

3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱

3.2.1 格納容器破損モードの特徴，格納容器破損防止対策

(1) 格納容器破損モード内のプラント損傷状態

格納容器破損モード「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」に至る可能性のあるプラント損傷状態は、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、TQUX，長期TB，TBU及びTBDである。

(2) 格納容器破損モードの特徴及び格納容器破損防止対策の基本的考え方

格納容器破損モード「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」では、発電用原子炉の運転中に運転時の異常な過渡変化又は全交流動力電源喪失が発生するとともに、非常用炉心冷却系等の安全機能の喪失が重畳する。このため、緩和措置がとられない場合には、原子炉圧力が高い状況で原子炉圧力容器が損傷し、溶融炉心、水蒸気、水素ガス等が急速に放出され、原子炉格納容器雰囲気が直接加熱されることにより、急速に格納容器圧力が上昇する等、原子炉格納容器に熱的・機械的な負荷が発生して原子炉格納容器の破損に至る。

したがって、本格納容器破損モードでは、溶融炉心、水蒸気及び水素ガスの急速な放出に伴い原子炉格納容器に熱的・機械的な負荷が加えられることを防止するため、原子炉圧力容器破損までに逃がし安全弁の手動開操作により原子炉減圧を実施することによって、原子炉格納容器の破損を防止する。

また、原子炉圧力容器の下部から溶融炉心が落下するまでに、格納容器代替スプレイ系（可搬型）によって原子炉格納容器下部に溶融炉心の冷却に必要な水位及び水量を確保するとともに格納容器冷却を実施する。溶融炉心の落下後は、コリウムシールド及びペデスタル代替注水系（可搬型）によって溶融炉心の冷却を実施する。その後、残留熱代替除去系又は格納容器フィルタベント系によって原子炉格納容器の圧力及び温度を低下させる。

さらに、原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度が可燃領域に至るまでに、原子炉格納容器内へ窒素を注入することによって、原子炉格納容器内における水素燃焼による原子炉格納容器の破損を防止する。

なお、本格納容器破損モードの有効性評価を実施する上では、重大事故等対処設備による原子炉注水機能についても使用できないものと仮定し、原子炉圧力容器破損に至るものとする。

(3) 格納容器破損防止対策

格納容器破損モード「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」で想定される事故シーケンスに対して、原子炉圧力が高い状況で原子炉圧力容器が損傷し、溶融炉心、水蒸気、水素ガス等が急速に放出され、原子炉格納容器に熱的・機械的な負荷が発生することに対して、原子炉減圧を可能とするため、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の手動開操作による原子炉減圧手段を整備する。

また、原子炉圧力容器破損前における格納容器温度の上昇を抑制し、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の環境条件を緩和する観点から格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器冷却手段を整備し、原子炉圧力容器破損後の格納容器圧力及び温度の上昇を抑制する観点から、残留熱代替除去系による原子炉格納容器除熱手段並びに格納容器フィルタベント系による原子炉格納容器除熱手段を整備する。

さらに、長期的な原子炉格納容器内酸素濃度の上昇を抑制する観点から、可

搬式窒素供給装置による原子炉格納容器内への窒素注入手段を整備する。

なお、これらの原子炉圧力容器破損以降の格納容器過圧・過温に対する手順及び重大事故等対策は「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」と同じである。

本格納容器破損モードの防止及びそれ以降の一連の対応を含めた重大事故等対策の概要を以下の a. から k. に示すとともに、a. から k. の重大事故等対策についての設備と手順の関係を第 3.2.1-1 表に示す。このうち、本格納容器破損モードに対する重大事故等対策は以下の a. から f. 及び h. である。

本格納容器破損モードの防止及びそれ以降の一連の対応も含めた重大事故等対策の概略系統図を第 3.2.1-1(1) 図から第 3.2.1-1(4) 図に、対応手順の概要を第 3.2.1-2 図に示す。このうち、本格納容器破損モードの重大事故等対策の概略系統図は、第 3.2.1-1(1) 図及び第 3.2.1-1(2) 図である。

本格納容器破損モードにおける評価事故シーケンスにおいて、重大事故等対策に必要な要員は、中央制御室の運転員及び緊急時対策要員で構成され、合計 31 名である。その内訳は次のとおりである。中央制御室の運転員は、当直長 1 名、当直副長 1 名、運転操作対応を行う運転員 5 名である。発電所構内に常駐している要員のうち、通報連絡等を行う緊急時対策本部要員は 5 名、緊急時対策要員（現場）は 19 名である。必要な要員と作業項目について第 3.2.1-3 図に示す。

なお、評価事故シーケンス以外の事故シーケンスについては、作業項目を評価事故シーケンスと比較し、必要な要員数を確認した結果、31 名で対処可能である。

a. 原子炉スクラム確認

運転時の異常な過渡変化又は全交流動力電源喪失が発生して原子炉がスクラムしたことを確認する。

原子炉のスクラムを確認するために必要な計装設備は、平均出力領域計装である。

b. 高圧・低圧注水機能喪失確認

原子炉スクラム後、原子炉水位は低下し続けるが、すべての非常用炉心冷却系等が機能喪失^{※1}していることを確認する。

非常用炉心冷却系等の機能喪失を確認するために必要な計装設備は、各ポンプの出口流量等である。

※1 非常用炉心冷却系等による注水が出来ない状態。高圧炉心スプレイ系、低圧炉心スプレイ系、残留熱除去系（低圧注水モード）及び原子炉隔離時冷却系の機能喪失が重畳する場合や高圧炉心スプレイ系、原子炉隔離時冷却系及び自動減圧系の機能喪失に伴い低圧炉心スプレイ系及び残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水ができない場合を想定。

c. 全交流動力電源喪失及び早期の電源回復不能判断並びに対応準備

外部電源が喪失するとともに、すべての非常用ディーゼル発電機等が機能喪失する。これにより非常用高圧母線（6.9kV）が使用不能となり、全交流動力電源喪失に至る。

中央制御室からの操作により外部電源受電及び非常用ディーゼル発電機等の起動ができず、非常用高圧母線（6.9kV）の電源回復ができない場合、早期の電源回復不能と判断する。これにより、常設代替交流電源設備及び原子炉補機代替冷却系の準備を開始する。準備完了後、常設代替交流電源設備を起動し、S A低圧母線に給電する。

d. 逃がし安全弁による原子炉急速減圧

原子炉水位の低下が継続し、燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点で、原子炉注水の手段が全くない場合でも、中央制御室からの遠隔操作によって逃がし安全弁（自動減圧機能付き）2個を手動で開放し、原子炉を急速減圧する。

原子炉急速減圧を確認するために必要な計装設備は、原子炉水位（燃料域）、原子炉水位（S A）、原子炉圧力及び原子炉圧力（S A）である。

原子炉急速減圧後は、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の開状態を保持し、原子炉圧力を低圧状態に維持する。

e. 炉心損傷確認

原子炉水位が更に低下し、炉心が露出し、炉心損傷したことを確認する。炉心損傷の判断は、ドライウエル又はサプレッション・チェンバ内のガンマ線線量率が設計基準事故相当のガンマ線線量率の10倍を超えた場合とする。

炉心損傷を確認するために必要な計装設備は、格納容器雰囲気放射線モニタ（ドライウエル）及び格納容器雰囲気放射線モニタ（サプレッション・チェンバ）である。

また、炉心損傷判断後は、原子炉格納容器内のpH制御のため薬品注入の準備を行う。サプレッション・チェンバのプール水のpHを7以上に制御することで、分子状無機よう素の生成が抑制され、その結果、有機よう素の生成についても抑制される。これにより、環境中への有機よう素の放出量を低減させることができる。なお、有効性評価においては、pH制御には期待しない。

f. 水素濃度及び酸素濃度監視設備の起動

炉心損傷が発生すれば、ジルコニウム-水反応等により水素ガスが発生し、水の放射線分解により水素ガス及び酸素ガスが発生することから、中央制御室からの遠隔操作により水素濃度及び酸素濃度監視設備を起動し、原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度を確認する。

原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度を確認するために必要な計装設備は、格納容器水素濃度（S A）及び格納容器酸素濃度（S A）である。

g. 原子炉格納容器下部への注水

原子炉への注水手段がないため、炉心が溶融して炉心下部プレナムへ溶融炉心が移行する。

炉心下部プレナムへの溶融炉心移行を確認するために必要な計装設備は、原子炉圧力容器温度（S A）である。

原子炉圧力容器下鏡温度300℃到達により炉心下部プレナムへの溶融炉心移行を確認した場合、原子炉圧力容器破損に備えて格納容器代替スプレイ系

(可搬型)による原子炉格納容器下部への注水^{※2}を実施する。この場合の注水は、原子炉格納容器下部への水張りが目的であるため、ペDESTAL水位が2.4m(注水量約225m³)に到達していることを確認した後、原子炉格納容器下部への注水を停止する。

原子炉格納容器下部への注水を確認するために必要な計装設備は、格納容器代替スプレイ流量及びペDESTAL水位である。

※2 原子炉格納容器下部注水を格納容器代替スプレイ系(可搬型)にて実施することにより、原子炉格納容器内の温度を低下させ、逃がし安全弁の環境条件を緩和する効果がある。

なお、本操作に期待しない場合であっても、評価上、原子炉圧力容器底部破損に至るまでの間、逃がし安全弁(自動減圧機能付き)は原子炉減圧機能を維持できる。

h. 原子炉圧力容器破損確認

原子炉圧力容器破損を直接確認する計装設備はないため、複数のパラメータの変化傾向により判断する。

原子炉圧力容器破損の徴候として、原子炉水位の低下、制御棒位置の指示値喪失数増加、原子炉圧力容器下鏡温度の指示値喪失数増加といったパラメータの変化を確認する。原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した場合には、原子炉圧力容器破損を速やかに判断するためにペDESTAL水温度等を継続監視する。

ペDESTAL水温度の急激な上昇又は指示値喪失、原子炉圧力の急激な低下、ドライウェル圧力の急激な上昇、原子炉格納容器下部の雰囲気温度の急激な上昇といったパラメータの変化によって原子炉圧力容器破損を判断する。

これらにより原子炉圧力容器破損を判断した後は、原子炉圧力とドライウェル圧力の差圧が0.25MPa[gage]以下であること及び原子炉格納容器下部の雰囲気温度が飽和温度以上であることで原子炉圧力容器破損を再確認する。

原子炉圧力容器の破損判断に必要な計装設備は、ペDESTAL水温度(SA)等である。

i. 溶融炉心への注水

溶融炉心の冷却を維持するため、原子炉圧力容器が破損し、溶融炉心が原子炉格納容器下部に落下した後は、ペDESTAL代替注水系(可搬型)による原子炉格納容器下部への注水を崩壊熱相当に余裕を見た流量にて継続して行う。

ペDESTAL代替注水系(可搬型)による原子炉格納容器下部注水を確認するために必要な計装設備は、ペDESTAL代替注水流量等である。

ペDESTAL代替注水系(可搬型)により溶融炉心の冷却が継続して行われていることは、ペDESTAL代替注水流量のほか、ペDESTAL水位によっても確認することができるが、原子炉圧力容器破損時の影響により、ペDESTAL水位による監視ができない場合であっても、以下の条件の一部又はすべてから総合的に溶融炉心の冷却が継続して行われていることを把握することができる。

- 原子炉格納容器下部の雰囲気温度が飽和温度程度で推移していること
- ドライウェルの雰囲気温度が飽和温度程度で推移していること

- ・原子炉格納容器内の水素濃度の上昇が停止すること
これらは、短時間ではなく数時間の推移を確認する。
- j. 残留熱代替除去系による溶融炉心冷却及び原子炉格納容器除熱
原子炉補機代替冷却系の準備及び残留熱代替除去系の運転の準備が完了した後、原子炉補機代替冷却系を用いた残留熱代替除去系による溶融炉心冷却及び原子炉格納容器除熱を開始する。残留熱代替除去系の循環流量は、残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量を用いて格納容器スプレイ弁を中央制御室から遠隔操作することで、格納容器スプレイによる原子炉格納容器下部注水を実施する。
残留熱代替除去系による溶融炉心冷却及び原子炉格納容器除熱を確認するために必要な計装設備は、残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量、ドライウエル圧力（SA）、サプレッション・プール水温度（SA）等である。
- k. 可搬式窒素供給装置を用いた原子炉格納容器内への窒素注入
残留熱代替除去系による原子炉格納容器除熱を実施した場合、可搬式窒素供給装置を用いて原子炉格納容器内へ窒素を注入することで、原子炉格納容器内酸素濃度の上昇を抑制する。
可搬式窒素供給装置を用いた原子炉格納容器内への窒素注入を確認するために必要な計装設備は、格納容器酸素濃度（SA）である。

3.2.2 格納容器破損防止対策の有効性評価

(1) 有効性評価の方法

本格納容器破損モードを評価する上で選定した評価事故シーケンスは、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、プラント損傷状態をTQUXとし、事象進展が早く炉心損傷までの時間余裕の観点で厳しい過渡事象を起因事象とし、逃がし安全弁再閉失敗を含まず高圧状態が維持される「過渡事象＋高圧炉心冷却失敗＋原子炉減圧失敗＋炉心損傷後の原子炉減圧失敗＋原子炉注水失敗＋DCH発生」である。

本評価事故シーケンスは「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の格納容器破損防止対策の有効性を評価するためのシーケンスであることから、炉心損傷までは事象を進展させる前提での評価となる。このため、前提とする事故条件として、設計基準事故対処設備による原子炉注水機能（非常用炉心冷却系等）のみならず、重大事故等対処設備による原子炉注水機能を含むすべての原子炉注水機能が使用できないものと仮定した。また、高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の発生防止を確認する観点から、原子炉圧力容器破損に至る前提とした。

仮に炉心損傷後の原子炉注水に期待できる場合には、原子炉圧力容器が破損するまでの時間の遅れや原子炉格納容器下部への落下量の抑制等、事象進展の緩和に期待できると考えられるが、本評価の前提とする事故条件は原子炉注水による事象進展の緩和の不確かさを包絡する保守的な条件である。

さらに、本評価事故シーケンスにおいては、電源の復旧、注水機能の確保等、必要となる事故対処設備が多く、原子炉格納容器への注水・除熱を実施するまでの対応時間を厳しく評価する観点から、全交流動力電源喪失の重畳を考慮する。

なお、格納容器過圧・過温破損の観点については、「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」にて示したとおり、LOCAをプラント損傷状態とする評価事故シーケンスで確認している。これは、過圧の観点ではLOCAによるドライウェルへの蒸気の放出及び原子炉注水による蒸気の発生が重畳する事故シーケンスへの対応が最も厳しいためであり、過温の観点では、事故初期に炉心が露出し過熱状態に至る事故シーケンスへの対応が最も厳しいためである。また、本格納容器破損モードを評価する上では、原子炉圧力容器が高圧の状態に破損に至る事故シーケンスを選定することから、LOCAをプラント損傷状態とする事故シーケンスは、本格納容器破損モードの評価事故シーケンスには適さない。

本格納容器破損モードの評価事故シーケンスに示される、炉心損傷前に原子炉減圧に失敗し、炉心損傷後に再度原子炉減圧を試みる状況としては、炉心損傷前の段階で非常用炉心冷却系である残留熱除去系（低圧注水モード）及び低圧炉心スプレイ系のみならず、重大事故等対処設備である低圧原子炉代替注水系（常設）等を含むすべての低圧注水機能が失われることで「2.2 高圧注水・減圧機能喪失」に示した代替自動減圧機能が作動せず、すべての低圧注水機能が失われている場合の手順に従って原子炉減圧しないまま炉心損傷に至る状況が考えられる。

手順上、すべての低圧注水機能が失われている状況では、原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達する時点までは原子炉を減圧しない。この原子炉減圧のタイミングは、原子炉水位が燃料棒有効長頂部以下となった場合、原子炉減圧を遅らせた方が、原子炉圧力容器内の原子炉冷却材の量を多く維持できるため、原子炉圧力容器破損に至る時間を遅らせることができる一方で、ジルコニウム-水反応等が著しくなる前に原子炉を減圧することで水素ガスの発生量を抑えられることを考慮して設定したものである。また、代替自動減圧機能は残留熱除去系（低圧注水モード）又は低圧炉心スプレイ系の起動が作動条件の1つであるため、残留熱除去系（低圧注水モード）及び低圧炉心スプレイ系が失われている状況では作動しない。

これを考慮し、本評価では評価事故シーケンスに加えてすべての低圧注水機能も失われている状況を想定した。

なお、この評価事故シーケンスへの対応及び事象進展は、「3.3 原子炉圧力容器外の熔融燃料-冷却材相互作用」及び「3.5 熔融炉心・コンクリート相互作用」の評価事故シーケンスへの対応及び事象進展と同じものとなる。

本格納容器破損モードではプラント損傷状態をTQUXとし、「3.3 原子炉圧力容器外の熔融燃料-冷却材相互作用」及び「3.5 熔融炉心・コンクリート相互作用」ではプラント損傷状態をTQUVとしており、異なるプラント状態を選定している。TQUXとTQUVでは喪失する設計基準事故対処設備が異なり、原子炉減圧について、TQUVでは設計基準事故対処設備である逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の機能に期待し、TQUXでは重大事故等対処設備としての逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の機能に期待する点が異なる。手順に従う場合、TQUVでは原子炉減圧機能は維持されているが低圧注水機能を喪失しているため、原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点で逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の手動開操作によって原子炉を減圧することとなる。また、TQUXは高圧熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱に進展し得るとして選定したプラント損傷状態であ

るが、重大事故等対処設備としての逃がし安全弁（自動減圧機能付き）に期待し、原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の 20%上の位置に到達した時点で逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の手動開操作によって原子炉を減圧することにより、高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱の発生防止を図る。

以上のとおり、どちらのプラント損傷状態であっても事象発生から原子炉減圧までの対応は同じとなり、運転員等操作時間やパラメータの変化も同じとなる。また、原子炉減圧以降も、溶融炉心の挙動に従って一連の流れで生じる各格納容器破損モードを、定められた一連の手順に従って防止することとなる。このことから、格納容器破損モード「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」、「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」及び「溶融炉心・コンクリート相互作用」については、1つの評価事故シーケンスへの一連の対応の中で各格納容器破損モードに対する格納容器破損防止対策の有効性を評価する。

本評価事故シーケンスでは、炉心における崩壊熱、燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形、沸騰・ボイド率変化、気液分離（水位変化）・対向流、原子炉圧力容器における冷却材放出（臨界流・差圧流）、炉心損傷後の原子炉圧力容器におけるリロケーション、原子炉圧力容器内 F C I（溶融炉心細粒化）、原子炉圧力容器内 F C I（デブリ粒子熱伝達）、構造材との熱伝達、下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達並びに原子炉圧力容器破損が重要現象となる。

よって、これらの現象を適切に評価することが可能であり、原子炉圧力容器内及び原子炉格納容器内の熱水力モデルを備え、かつ、炉心損傷後のシビアアクシデント特有の溶融炉心挙動に関するモデルを有するシビアアクシデント総合解析コード M A A P により原子炉圧力等の過渡応答を求める。

また、解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、本評価事故シーケンスにおける運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価する。

(2) 有効性評価の条件

本評価事故シーケンスに対する初期条件も含めた主要な解析条件を第 3. 2. 2-1 表に示す。また、主要な解析条件について、本評価事故シーケンス特有の解析条件を以下に示す。

a. 事故条件

(a) 起回事象

起回事象として、給水流量の全喪失が発生するものとする。

(b) 安全機能等の喪失に対する仮定

高圧注水機能として原子炉隔離時冷却系及び高圧炉心スプレイ系の機能喪失を、低圧注水機能として残留熱除去系（低圧注水モード）及び低圧炉心スプレイ系の機能喪失^{※3}を想定する。

また、非常用ディーゼル発電機等の機能喪失を想定し、全交流動力電源喪失の重畳を考慮するものとする。

さらに重大事故等対処設備による原子炉注水にも期待しない^{※4}ものとする。

※3 逃がし安全弁（逃がし弁機能）は健全だが、自動減圧機能作動条件

(低圧ECCSポンプ運転)を満たしていないため、逃がし安全弁(自動減圧機能付き)は作動しない。

- ※4 低圧原子炉代替注水弁(残留熱除去系注入弁)制御不能による低圧原子炉代替注水系機能喪失を想定。ペDESTAL代替注水系(可搬型)等、大量送水車を用いた原子炉注水以外の緩和機能には期待する。

(c) 外部電源

外部電源は使用できないものと仮定する。

電源復旧のための対応時間を厳しく見積もるため、全交流動力電源喪失を想定する。

(d) 高温ガスによる配管等のクリープ破損や漏えい等による影響

原子炉圧力を厳しく評価するため、高温ガスによる配管等のクリープ破損や漏えい等は、考慮しないものとする。

(e) 水素ガス及び酸素ガスの発生

水素ガスの発生については、ジルコニウム-水反応及び溶融炉心・コンクリート相互作用を考慮するものとする。なお、解析コードMAAPの評価結果では水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガスの発生を考慮していない。このため、水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガスの発生量は「3.4 水素燃焼」と同様に、解析コードMAAPで得られる崩壊熱をもとに評価するものとし「3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」にてその影響を確認する。

b. 重大事故等対策に関連する機器条件

(a) 原子炉スクラム信号

原子炉スクラムは、事象の発生と同時に発生するものとする。

(b) 主蒸気隔離弁

主蒸気隔離弁は、事象発生と同時に閉止するものとする。

(c) 再循環ポンプ

再循環ポンプは、事象発生と同時に停止するものとする。

(d) 逃がし安全弁

逃がし安全弁(逃がし弁機能)にて、原子炉冷却材圧力バウンダリの過度の圧力上昇を抑えるものとする。また、原子炉減圧には逃がし安全弁(自動減圧機能付き)2個を使用するものとし、容量として、1個当たり定格主蒸気流量の約8%を処理するものとする。

(e) 格納容器代替スプレイ系(可搬型)

原子炉圧力容器破損前に、格納容器代替スプレイ系(可搬型)により120m³/hで原子炉格納容器内にスプレイし、ペDESTAL水位が2.4mに到達するまで水張りを実施するものとする。

(f) ペDESTAL代替注水系(可搬型)

原子炉圧力容器が破損して溶融炉心が原子炉格納容器下部に落下した後は、ペDESTAL代替注水系(可搬型)により崩壊熱相当に余裕を見た流量の注水を行うものとする。

(g) 残留熱代替除去系

残留熱代替除去系により循環流量120m³/hにて原子炉格納容器内に連続スプレイを実施する。

(h) 原子炉補機代替冷却系

残留熱代替除去系から原子炉補機代替冷却系への伝熱容量は、残留熱代替除去系による格納容器スプレイ流量 $120\text{m}^3/\text{h}$ とした場合の熱交換器の設計性能に基づき約 6MW (サブプレッション・プール水温度 100°C , 海水温度 30°C において) とする。

(i) 可搬式窒素供給装置

可搬式窒素供給装置による格納容器内窒素注入は、ガス温度 35°C , 純度 $99.9\text{vol}\%$ にて $100\text{m}^3/\text{h}[\text{normal}]$ (窒素 $99.9\text{m}^3/\text{h}[\text{normal}]$ 及び酸素 $0.1\text{m}^3/\text{h}[\text{normal}]$) で原子炉格納容器内に注入する。

(j) コリウムシールド

材料は、熔融炉心のドライウェル機器ドレンサンプ及びドライウェル床ドレンサンプ (以下「ドライウェルサンプ」という。) への流入を防止する観点から、ジルコニア耐熱材を設定する。侵食開始温度は、ジルコニア耐熱材の侵食試験結果に基づき、 $2,100^\circ\text{C}$ を設定する。

c. 重大事故等対策に関連する操作条件

運転員等操作に関する条件として、「1.3.5 運転員等の操作時間に対する仮定」に示す分類に従って以下のとおり設定する。

(a) 原子炉急速減圧操作は、設計基準事故対処設備による原子炉注水機能 (非常用炉心冷却系等) のみならず、重大事故等対処設備による原子炉注水機能を含むすべての原子炉注水機能が喪失している場合の運転手順に従い、原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の 20% 上の位置に到達した時点で開始する。

(b) 格納容器代替スプレイ系 (可搬型) による原子炉格納容器下部への注水操作 (原子炉圧力容器破損前の初期水張り) は、原子炉圧力容器下鏡温度が 300°C に到達したことを確認して開始し、ペデスタル水位が 2.4m (注水量約 225m^3) に到達したことを確認した場合に停止する。

(c) ペデスタル代替注水系 (可搬型) による原子炉格納容器下部への注水操作 (原子炉圧力容器破損後の注水) は、原子炉圧力容器破損を確認した場合に開始する。

(d) 残留熱代替除去系による原子炉格納容器除熱操作は、原子炉補機代替冷却系の準備時間等を考慮し、事象発生から 10 時間後から開始するものとする。

(e) 可搬式窒素供給装置による原子炉格納容器内への窒素注入操作は、原子炉補機代替冷却系の準備完了後の可搬式窒素供給装置の準備時間等を考慮し、 12 時間後からドライウェル内へ窒素注入を開始する。

(3) 有効性評価 ($\text{Cs}-137$ の放出量の評価) の条件

a. 事象発生直前まで、定格出力の 100% で長時間にわたって運転されていたものとする。その運転時間は、燃料を約 $1/4$ ずつ取り替えていく場合の平衡炉心を考え、最高 $50,000$ 時間とする。

b. 残留熱代替除去系を用いた場合の環境中への総放出量の評価においては、原子炉内に内蔵されている核分裂生成物が事象進展に応じた割合で、原子炉格納容器内に放出^{*5}されるものとする。

※5 セシウムの原子炉格納容器内への放出割合については、本評価事故シーケンスにおいては解析コードMAAP の評価結果の方がNUREG-1465 より大きく算出する。

- c. 原子炉格納容器内に放出されたCs-137については、格納容器スプレイやサプレッション・チェンバのプール水でのスクラビング等による除去効果を考慮する。
- d. 原子炉建物から大気中への放射性物質の漏えいについて考慮する。漏えい量の評価条件は以下のとおりとする。
- (a) 原子炉格納容器からの漏えい量は、格納容器圧力に応じた設計漏えい率をもとに評価する。なお、エアロゾル粒子は原子炉格納容器外に放出される前に貫通部内で捕集されることが実験的に確認されていることから、原子炉格納容器の漏えい孔におけるエアロゾルの捕集の効果(D F = 10)を考慮する。
 - (b) 非常用ガス処理系による原子炉建物原子炉棟の設計負圧が維持されていることを想定し、設計換気率1回/日相当を考慮する。なお、非常用ガス処理系フィルタ装置による放射性物質の除去効果については、期待しないものとする。
 - (c) 原子炉建物内での放射能の時間減衰は考慮せず、また、原子炉建物内での粒子状物質の除去効果は保守的に考慮しない。

(添付資料3.2.3)

(4) 有効性評価の結果

本評価事故シーケンスにおける原子炉圧力、原子炉水位(シュラウド内外水位)、格納容器圧力、格納容器温度、サプレッション・プール水位及び注水流量の推移を第3.2.2-1(1)図から第3.2.2-1(6)図に示す。

a. 事象進展

事象発生後、すべての設計基準事故対処設備による原子炉注水機能(非常用炉心冷却系等)が機能喪失し、重大事故等対処設備による原子炉注水機能についても使用出来ないものと仮定することから、原子炉水位は急速に低下する。原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点(事象発生から約1.0時間後)で、中央制御室からの遠隔操作により逃がし安全弁(自動減圧機能付き)2個を手動で開放することで、原子炉急速減圧を実施する。水位低下により炉心が露出し、事象発生から約1.1時間後に炉心損傷に至る。原子炉減圧後の低圧原子炉代替注水系(常設)等による原子炉注水は実施しないものと仮定するため、事象発生から約5.4時間後に原子炉圧力容器破損に至る。

事象発生から約3.1時間後、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点で、格納容器代替スプレイ系(可搬型)による原子炉圧力容器破損前の原子炉格納容器下部への水張りを開始する。格納容器代替スプレイ系(可搬型)による注水流量を120m³/hとし、約1.9時間の注水を実施することでペDESTAL水位2.4m分の水量を確保し、事象発生から約5.0時間後に原子炉格納容器下部への水張りを停止する。

原子炉圧力容器が破損し、溶融炉心がペDESTAL水位 2.4m の水中に落下する際に、溶融炉心から原子炉冷却材への伝熱が起これ、水蒸気が発生することに伴う圧力上昇が生じる。

溶融炉心が原子炉格納容器下部に落下した後は、ペDESTAL代替注水系（可搬型）により原子炉格納容器下部に崩壊熱相当に余裕を見た流量の注水を継続的に行い、溶融炉心を冷却する。

崩壊熱が原子炉格納容器内に蒸気として放出されるため、格納容器圧力は急激に上昇するものの、格納容器スプレイの実施基準には到達しない。

事象発生から 10 時間が経過した時点で、原子炉補機代替冷却系による残留熱代替除去系の運転を開始する。残留熱代替除去系により、格納容器圧力及び温度の上昇は抑制され、その後、徐々に低下するとともに、原子炉格納容器下部の溶融炉心は安定的に冷却される。

また、残留熱代替除去系による原子炉格納容器除熱の開始後は、ドライウエル内で蒸気の凝縮が進むことに伴い、原子炉格納容器内の酸素濃度が相対的に上昇するが、事象発生から 12 時間後に、可搬式窒素供給装置を用いたドライウエルへの窒素供給を実施することで、原子炉格納容器内酸素濃度の上昇が抑制されるとともに、窒素供給を実施している期間においては格納容器圧力の低下が抑制される。

なお、事象発生から約 5.4 時間後の原子炉圧力容器の破損までは、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）によって原子炉圧力を 2.0MPa[gage]以下に維持することが必要となるが、炉心損傷後の原子炉圧力容器から逃がし安全弁（自動減圧機能付き）を通してサブプレッション・チェンバへ放出される高温流体や格納容器温度等の熱的影響を考慮しても、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）は確実に開状態を維持することが可能である。

(添付資料3.2.1)

b. 評価項目等

原子炉圧力容器破損直前の原子炉圧力は約 0.1MPa[gage]であり、2.0MPa[gage]以下に低減されている。

本評価では、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(4)の評価項目について、原子炉圧力をパラメータとして対策の有効性を確認した。なお、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(5)及び(8)の評価項目については「3.3 原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用」及び「3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」にて評価項目を満足することを確認している。また、原子炉格納容器下部に落下した溶融炉心及び原子炉格納容器の安定状態維持については「3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」にて確認している。

なお、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(1)から(3)の評価項目については「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」において、選定された評価事故シーケンスに対して対策の有効性を確認しているが、溶融炉心が原子炉格納容器下部に落下した場合については、本評価において、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(1)から(3)の評価項目について対策の有効性を確認できる。

ここで、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(3)の

評価項目については、原子炉格納容器が健全であるため、原子炉格納容器から原子炉建物への放射性物質の漏えい量は制限され、また、大気中へはほとんど放出されないものと考えられる。これは、原子炉建物内に漏えいした放射性物質は、原子炉建物内で時間減衰し、また、粒子状放射性物質は、原子炉建物内での重力沈降や水蒸気の凝縮に伴い、原子炉建物内に沈着すると考えられるためである。原子炉建物内での放射性物質の時間減衰及び粒子状放射性物質の除去効果等を保守的に考慮せず、原子炉建物から大気中への放射性物質の漏えいを想定した場合、漏えい量は約 0.56TBq（7日間）となり、100TBq を下回る。

事象発生からの7日間以降、Cs-137の漏えいが継続した場合の影響評価を行ったところ、約0.57TBq（30日間）及び約0.58TBq（100日間）であり、100TBqを下回る。

（添付資料3.5.1, 3.2.2, 3.2.3）

3.2.3 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価

解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価するものとする。

格納容器破損モード「高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」では、設計基準事故対処設備による原子炉注水機能（非常用炉心冷却系等）のみならず、重大事故等対処設備による原子炉注水機能を含むすべての原子炉注水機能が喪失して炉心損傷に至り、原子炉圧力容器が破損する前に手動操作により原子炉減圧を行うことが特徴である。

また、不確かさの影響を確認する運転員等操作は、事象進展に有意な影響を与えると考えられる操作として、原子炉急速減圧操作及び格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）とする。

本評価事故シーケンスの有効性評価における現象の不確かさとしては、熔融炉心落下流量、熔融ジェット径、熔融炉心粒子化割合、冷却材とデブリ粒子の伝熱、炉心ヒートアップ、炉心崩壊挙動、熔融炉心と上面水プールとの伝熱、熔融炉心と原子炉圧力容器間の熱伝達、原子炉圧力容器破損判定が挙げられる。

これらの不確かさに対して、燃料ペレットが崩壊する時間及び温度、熔融ジェット径、エントレインメント係数、デブリ粒子径、ジルコニウム-水反応速度、限界熱流束に係る係数、下部プレナムギャップ除熱量に係る係数、溶接部破損時の最大ひずみを変化させた場合の本格納容器破損モードに対する影響は小さいことを確認している。

また、原子炉水位を監視し、原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に達した時点で原子炉急速減圧を行うといった、徴候を捉えた対応を図ることによって、炉心下部プレナムへの熔融炉心移行が発生する前に速やかに2.0MPa[gage]を十分下回る圧力まで原子炉を減圧可能であることを確認している。

(1) 解析コードにおける重要現象の不確かさの影響評価

本格納容器破損モードにおいて不確かさの影響評価を行う重要現象とは、「1.7 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価方針」に示すとおりで

あり、それらの不確かさの影響評価は以下のとおりである。

a. 運転員等操作時間に与える影響

炉心における燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化及び燃料被覆管変形の不確かさとして、炉心ヒートアップに関するモデルは、TMI事故についての再現性及びCOR A実験についての再現性を確認している。炉心ヒートアップの感度解析（ジルコニウム-水反応速度の係数についての感度解析）では、炉心熔融時間及び炉心下部プレナムへの熔融炉心移行の開始時間に対する感度は数分程度であり、影響は小さいことを確認している。本評価事故シナリオでは、重大事故等対処設備を含むすべての原子炉への注水機能が喪失することを想定しており、最初に実施すべき操作は原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点の原子炉減圧操作であり、また、燃料被覆管温度等を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。また、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点で格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）を実施するが、炉心下部プレナムへの熔融炉心移行の開始時間の不確かさは小さく、炉心下部プレナムへ熔融炉心が移行した際の原子炉圧力容器下鏡温度の上昇は急峻であることから、原子炉圧力容器下鏡温度を操作開始の起点としている格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。

炉心における沸騰・ボイド率変化及び気液分離（水位変化）・対向流の不確かさとして、炉心モデル（炉心水位計算モデル）は、原子炉水位挙動について原子炉圧力容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERの評価結果との比較により水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であることを確認している。このため、原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達する時間が早まる可能性があるが、数分程度の差異であることから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉圧力容器におけるリロケーション及び構造材との熱伝達の不確かさとして、熔融炉心の挙動モデルはTMI事故についての再現性を確認している。また、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により原子炉圧力容器破損時間に与える影響は小さいことを確認している。リロケーションの影響を受ける可能性がある操作としては、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点での格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）があるが、炉心下部プレナムへの熔融炉心移行の開始時間の不確かさは小さく、炉心下部プレナムへ熔融炉心が移行した際の原子炉圧力容器下鏡温度の上昇は急峻であることから、原子炉圧力容器下鏡温度を操作開始の起点としている格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉圧力容器における原子炉圧力容器内FCI（熔融炉心細粒化）及び原子炉圧力容器内FCI（デブリ粒子熱伝達）の不確かさとし

て、下部プレナムでの熔融炉心の挙動に関する感度解析により、原子炉压力容器破損時の原子炉圧力に与える影響は小さいことを確認している。本評価事故シーケンスでは、原子炉压力容器内FCIを操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

炉心損傷後の原子炉压力容器における炉心下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達の不確かさとして、熔融炉心の挙動モデルはTMI事故についての再現性を確認している。また、炉心下部プレナムと熔融炉心の熱伝達に関する感度解析により原子炉压力容器破損時間に与える影響は小さいことを確認している。炉心下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達の不確かさの影響を受ける可能性がある操作としては、原子炉压力容器下鏡温度が300℃に到達した時点での格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉压力容器破損前の初期水張り）があるが、炉心下部プレナムへの熔融炉心移行の開始時間の不確かさは小さく、炉心下部プレナムへ熔融炉心が移行した際の原子炉压力容器下鏡温度の上昇は急峻であることから、原子炉压力容器下鏡温度を操作開始の起点としている格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉压力容器破損前の初期水張り）に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉压力容器における原子炉压力容器破損の不確かさとして、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ（しきい値）に関する感度解析により最大ひずみを低下させた場合に原子炉压力容器破損時間が早まることを確認している。本評価事故シーケンスでは、原子炉压力容器破損を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

（添付資料3.2.4）

b. 評価項目となるパラメータに与える影響

炉心における燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化及び燃料被覆管変形の不確かさとして、炉心ヒートアップに関するモデルは、TMI事故についての再現性及びCORAX実験についての再現性を確認している。炉心ヒートアップの感度解析（ジルコニウム-水反応速度の係数についての感度解析）では、炉心熔融時間及び炉心下部プレナムへの熔融炉心移行の開始時間への感度は数分程度であり、影響は小さいことを確認している。本評価事故シーケンスでは、原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点での運転員等操作による原子炉急速減圧によって原子炉圧力を2.0MPa[gage]以下に低減し、原子炉压力容器破損時の原子炉圧力を2.0MPa[gage]以下に維持しているため、運転員等操作時間に与える影響はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

炉心における沸騰・ボイド率変化及び気液分離（水位変化）・対向流の不確かさとして、炉心モデル（炉心水位計算モデル）は、原子炉水位挙動について原子炉压力容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERの評価結果との比較により水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であることを確認している。このため、原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達する時間が早まる可能性があるが、数分程度の差異であり、原子炉急速減圧操作後に原子炉圧力は速やかに低下することから、評価項目となるパラ

メータに与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉圧力容器におけるリロケーション及び構造材との熱伝達の不確かさとして、熔融炉心の挙動モデルはTMI事故についての再現性を確認している。また、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により炉心熔融時間に与える影響は小さいことを確認している。本評価事故シーケンスでは、原子炉圧力容器が破損する前に、十分な時間余裕をもって手動減圧により原子炉圧力を2.0MPa[gage]以下に維持していることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

炉心損傷後の原子炉圧力容器における原子炉圧力容器内FCI（熔融炉心細粒化）及び原子炉圧力容器内FCI（デブリ粒子熱伝達）の不確かさとして、下部プレナムでの熔融炉心の挙動に関する感度解析により、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力に与える影響は小さいことを確認している。本評価事故シーケンスでは、原子炉圧力容器が破損する前に、十分な時間余裕をもって手動減圧により原子炉圧力を2.0MPa[gage]以下に維持していることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

炉心損傷後の原子炉圧力容器における炉心下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達の不確かさとして、熔融炉心の挙動モデルはTMI事故についての再現性を確認している。また、炉心下部プレナムと熔融炉心の熱伝達に関する感度解析により原子炉圧力容器破損時間に与える影響は小さいことを確認していることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉圧力容器における原子炉圧力容器破損不確かさとして、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ（しきい値）に関する感度解析により最大ひずみを低下させた場合に原子炉圧力容器破損が早まることを確認しているが、原子炉圧力容器破損（事象発生から約5.4時間後）に対して早まる時間はわずかであることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

(添付資料3.2.4)

(2) 解析条件の不確かさの影響評価

a. 初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件

初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件は、第3.2.2-1表に示すとおりであり、それらの条件設定を設計値等、最確条件とした場合の影響を評価する。また、解析条件の設定に当たっては、評価項目となるパラメータに対する余裕が小さくなるような設定があることから、その中で事象進展に有意な影響を与えると考えられる項目に関する影響評価の結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

初期条件の原子炉停止後の崩壊熱は、解析条件の燃焼度33GWd/tに対応したものとしており、その最確条件は平均的燃焼度約30GWd/tであり、本解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、解析条件で設定している崩壊熱よりも小さくなるため、発生する蒸気量は少なくなり、原子炉水位の低下は緩和されるが、操作手順（原子炉水位に応じて急速減圧を実施すること）に変わりはないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。また、原子炉圧力容器破損に至るまでの事象進展は緩和されるが、操作手順（原子炉圧力容器下鏡温度に応じて原子炉格納容器下部への注水

操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）を実施すること）に変わりはないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉圧力、原子炉水位及び炉心流量は、解析条件の不確かさとして、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、事象進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。

（添付資料3.2.4）

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

初期条件の原子炉停止後の崩壊熱は、解析条件の燃焼度 33GWd/t に対応したものとしており、その最確条件は平均的燃焼度約 30GWd/t であり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、解析条件で設定している崩壊熱よりも小さくなるため、発生する蒸気量は少なくなり、原子炉水位の低下は緩和され、原子炉急速減圧操作の開始が遅くなるが、原子炉圧力容器破損も遅くなり、原子炉急速減圧操作開始後に原子炉圧力は速やかに低下することから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

初期条件の原子炉圧力、原子炉水位及び炉心流量は、解析条件の不確かさとして、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

（添付資料3.2.4）

b. 操作条件

操作条件の不確かさとして、操作の不確かさを「認知」、「要員配置」、「移動」、「操作所要時間」、「他の並列操作有無」及び「操作の確実さ」の6要因に分類し、これらの要因が運転員等操作時間に与える影響を評価する。また、運転員等操作時間に与える影響が評価項目となるパラメータに与える影響を評価し、評価結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

操作条件の原子炉急速減圧操作は、解析上の操作時間として原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達時（事象発生から約1.0時間後）を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達するまでに事象発生から約1.0時間の時間余裕があり、また、原子炉急速減圧操作は原子炉水位の低下傾向を監視しながらあらかじめ準備が可能であり、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であるため、操作開始時間に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響も小さい。当該操作は、解析コード及び解析条件（操作条件を除く。）の不確かさにより操作開始時間は遅れる可能性があるが、中央制御室で行う作業であり、他の操作との重複もないことから、他の操作に与える影響はない。

操作条件の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）は、解析上の操作開始時間として原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達時を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達するまでには事象発生から約3.1時間の時間余裕がある。また、格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作

は原子炉圧力容器下鏡温度を監視しながらあらかじめ準備が可能であり、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であるため、操作開始時間に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響も小さい。当該操作は、解析コード及び解析条件（操作条件を除く。）の不確かさにより操作開始時間は遅れる可能性があるが、当該操作に対応する運転員、対策要員に他の並列操作はなく、また、現場操作における評価上の所要時間には余裕を見込んで算定していることから、他の操作に与える影響はない。

(添付資料3.2.4)

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

操作条件の原子炉急速減圧操作は、運転員等操作時間に与える影響として、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

操作条件の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）は、運転員等操作時間に与える影響として、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

(添付資料3.2.4)

(3) 操作時間余裕の把握

操作開始時間の遅れによる影響度合いを把握する観点から、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内での操作時間余裕を確認し、その結果を以下に示す。

操作条件の原子炉急速減圧操作については、原子炉圧力容器破損までに完了する必要があるが、原子炉圧力容器破損までの時間は事象発生から約 5.4 時間あり、準備時間が確保できることから、時間余裕がある。

操作条件の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）については、原子炉圧力容器破損前の格納容器冷却を兼ねる操作であり、原子炉圧力容器下鏡温度が 300℃に到達後、速やかに実施することが望ましいが、原子炉圧力容器破損前は、本操作が実施できないと仮定しても、格納容器圧力及び温度が原子炉格納容器の限界圧力及び限界温度に到達することはなく、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）による原子炉減圧機能維持も可能であることから、時間余裕がある。

(添付資料3.2.4)

(4) まとめ

解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を確認した。その結果、解析コード及び解析条件の不確かさが運転員等操作時間に与える影響等を考慮した場合においても、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。このほか、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間には時間余裕がある。

3.2.4 必要な要員及び資源の評価

(1) 必要な要員の評価

格納容器破損モード「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」において、重大事故等対策時における必要な要員は「3.2.1(3)格納容器破損防止対策」に示すとおり 31 名である。「6.2 重大事故等対策時に必要な要員の評価結果」で説明している運転員、緊急時対策要員等の 45 名で対処可能である。

(2) 必要な資源の評価

格納容器破損モード「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」において、必要な水源、燃料及び電源は、「6.1(2) 資源の評価条件」の条件にて評価している。その結果を以下に示す。

a. 水源

格納容器代替スプレイ系（可搬型）及びペDESTAL代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水については、7 日間の対応を考慮すると、合計約 600m³の水が必要である。水源として、輪谷貯水槽（西 1／西 2）に約 7,000m³の水を保有している。これにより必要な水源は確保可能である。

残留熱代替除去系による原子炉格納容器除熱については、サブプレッション・チェンバのプール水を水源として注水することから、水源が枯渇することはないため、7 日間の注水継続実施が可能である。

（添付資料 3.2.5）

b. 燃料

常設代替交流電源設備による電源供給については、保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると、7 日間の運転継続に約 352m³の軽油が必要となる。ガスタービン発電機用軽油タンクにて約 450m³の軽油を保有しており、この使用が可能であることから常設代替交流電源設備による電源供給について、7 日間の運転継続が可能である。

格納容器代替スプレイ系（可搬型）及びペDESTAL代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水については、保守的に事象発生直後からの大量送水車の運転を想定すると、7 日間の運転継続に約 12m³の軽油が必要となる。原子炉補機代替冷却系の大型送水ポンプ車については、保守的に事象発生直後からの大型送水ポンプ車の運転を想定すると、約 53m³の軽油が必要となる。可搬式窒素供給装置による格納容器への窒素供給については、保守的に事象発生直後からの可搬式窒素供給装置の運転を想定すると、7 日間の運転継続に約 8 m³の軽油が必要となる。合計約 73m³の軽油が必要となる。非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等にて約 730m³の軽油を保有しており、この使用が可能であることから格納容器代替スプレイ系（可搬型）及びペDESTAL代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水、原子炉補機代替冷却系の運転、可搬式窒素供給装置による格納容器への窒素供給について、7 日間の運転継続が可能である。

緊急時対策所用発電機による電源供給については、保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると、7 日間の運転継続に約 8 m³の軽油が必要となる。緊急時対策所用燃料地下タンクにて約 45m³の軽油を保有しており、この使用が可能であることから、緊急時対策所用発電機による電源供給について、7 日間の継続が可能である。

(添付資料 3.2.6)

c. 電源

常設代替交流電源設備の電源負荷については、重大事故等対策に必要な負荷及びその他負荷として、約 1,941kW 必要となるが、常設代替交流電源設備は連続定格容量が約 4,800kW であり、必要負荷に対しての電源供給が可能である。

また、緊急時対策所用発電機についても、必要負荷に対しての電源供給が可能である。

(添付資料3.2.7)

3.2.5 結論

格納容器破損モード「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」では、運転時の異常な過渡変化又は全交流動力電源喪失が発生するとともに、非常用炉心冷却系等の安全機能の喪失が重畳する。このため、原子炉圧力容器が高い圧力の状態で損傷し、溶融炉心、水蒸気及び水素ガスが急速に放出され、原子炉格納容器に熱的・機械的な負荷が発生して原子炉格納容器の破損に至ることが特徴である。格納容器破損モード「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」に対する格納容器破損防止対策としては、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）による原子炉減圧手段を整備している。

格納容器破損モード「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の評価事故シーケンス「過渡事象＋高圧炉心冷却失敗＋原子炉減圧失敗＋炉心損傷後の原子炉減圧失敗＋原子炉注水失敗＋DCH発生」について、有効性評価を行った。

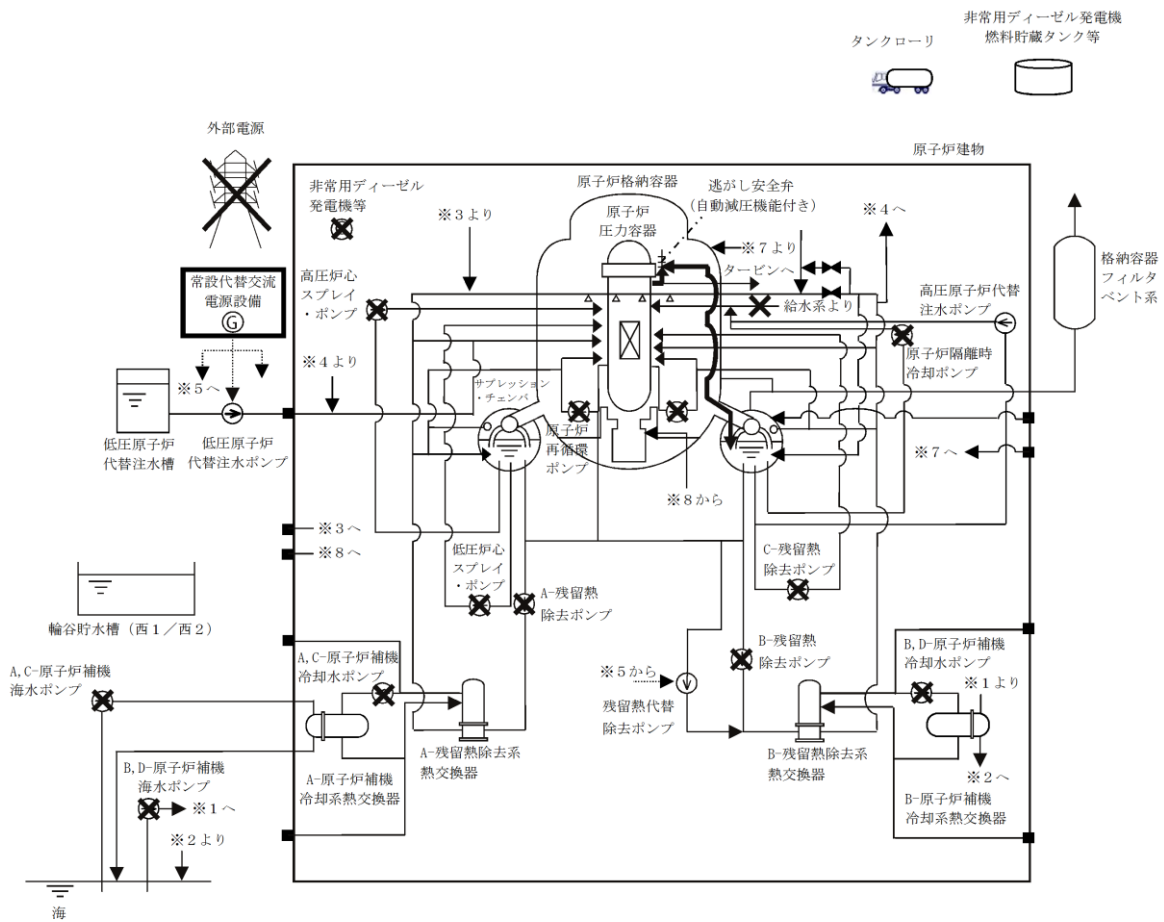
上記の場合においても、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の手動開操作による原子炉減圧により、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力を 2.0MPa [gage] 以下に低減することが可能である。また、安定状態を維持できる。

(添付資料3.5.1)

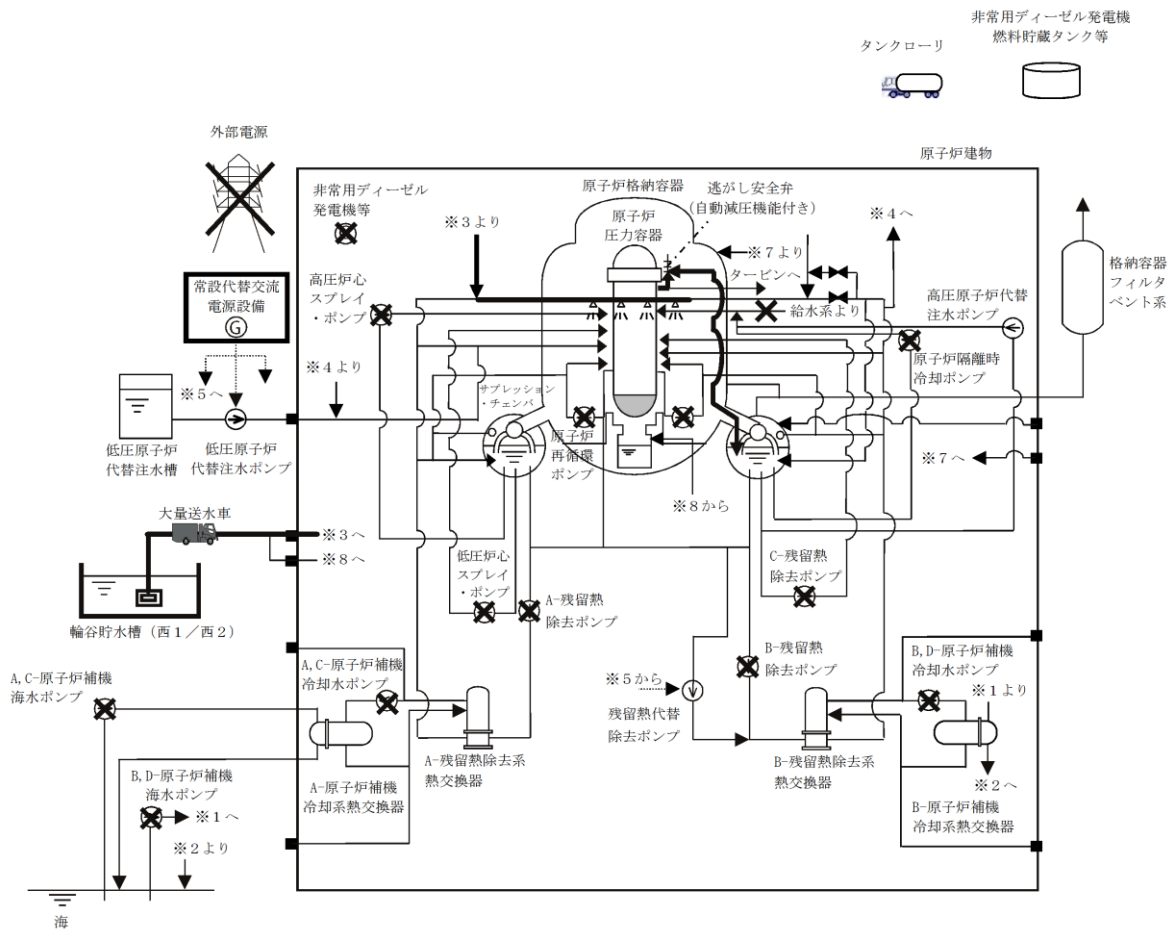
解析コード及び解析条件の不確かさについて確認した結果、運転員等操作時間に与える影響及び評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。また、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間余裕について確認した結果、操作が遅れた場合でも一定の余裕がある。

重大事故等対策時に必要な要員は、運転員及び緊急時対策要員にて対処可能である。また、必要な水源、燃料及び電源も供給可能である。

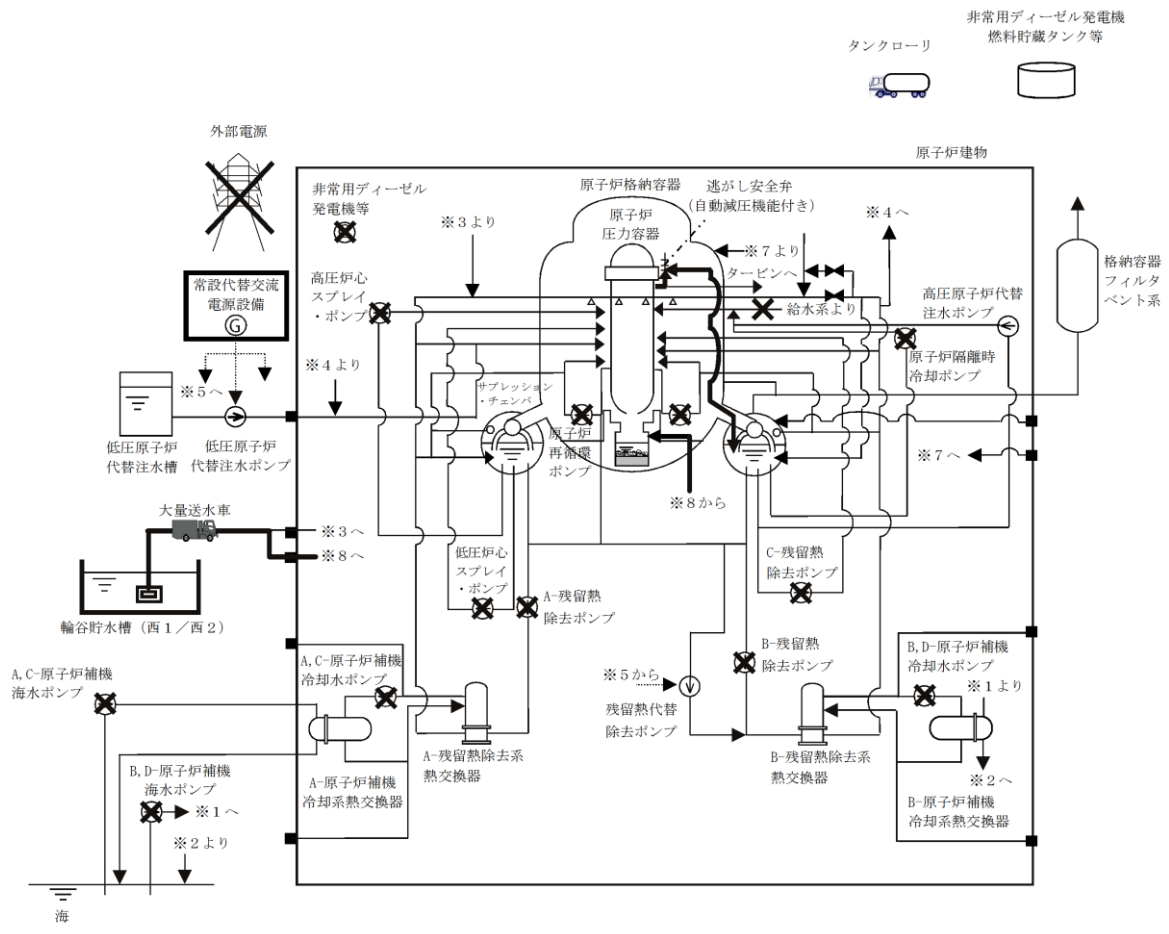
以上のことから、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の手動開操作による原子炉減圧の格納容器破損防止対策は、選定した評価事故シーケンスに対して有効であることが確認でき、格納容器破損モード「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」に対して有効である。



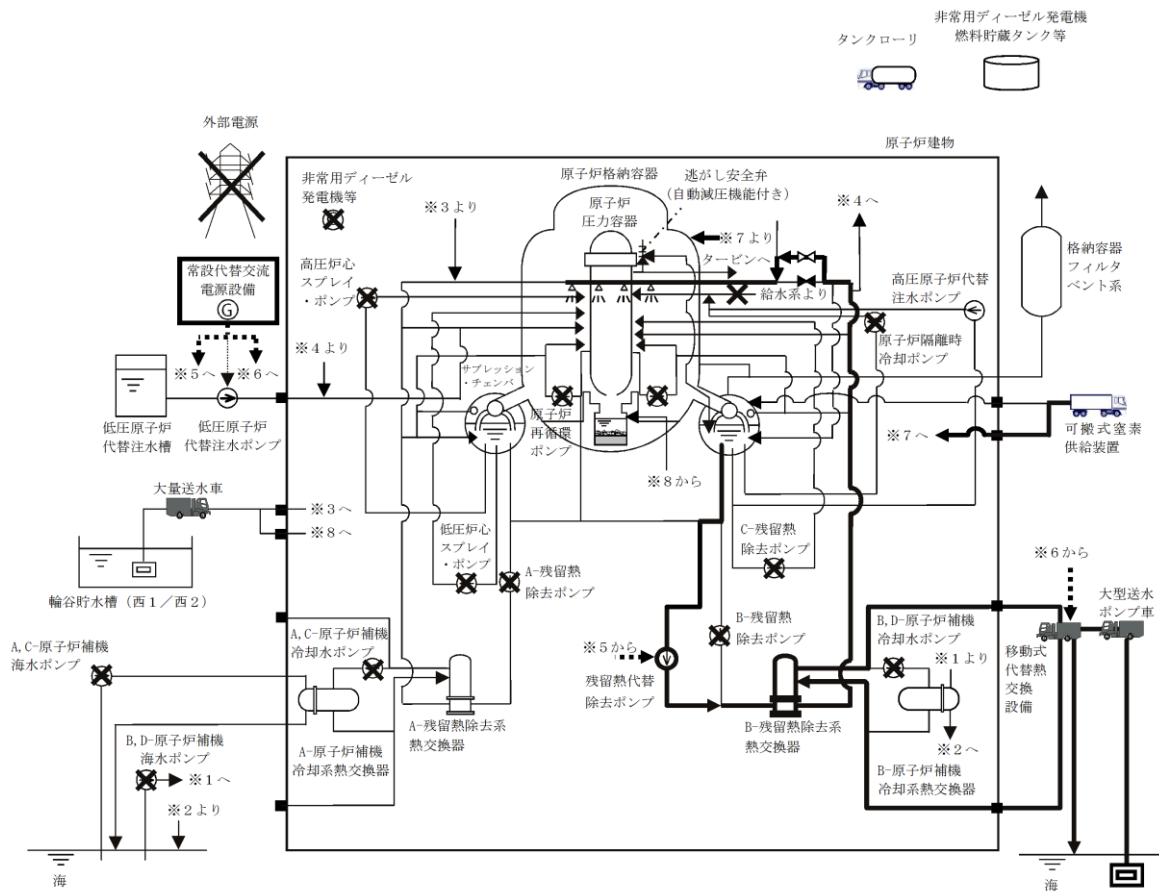
第3.2.1-1(1)図 「高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」の重大事故等対策の概略系統図 (原子炉減圧)



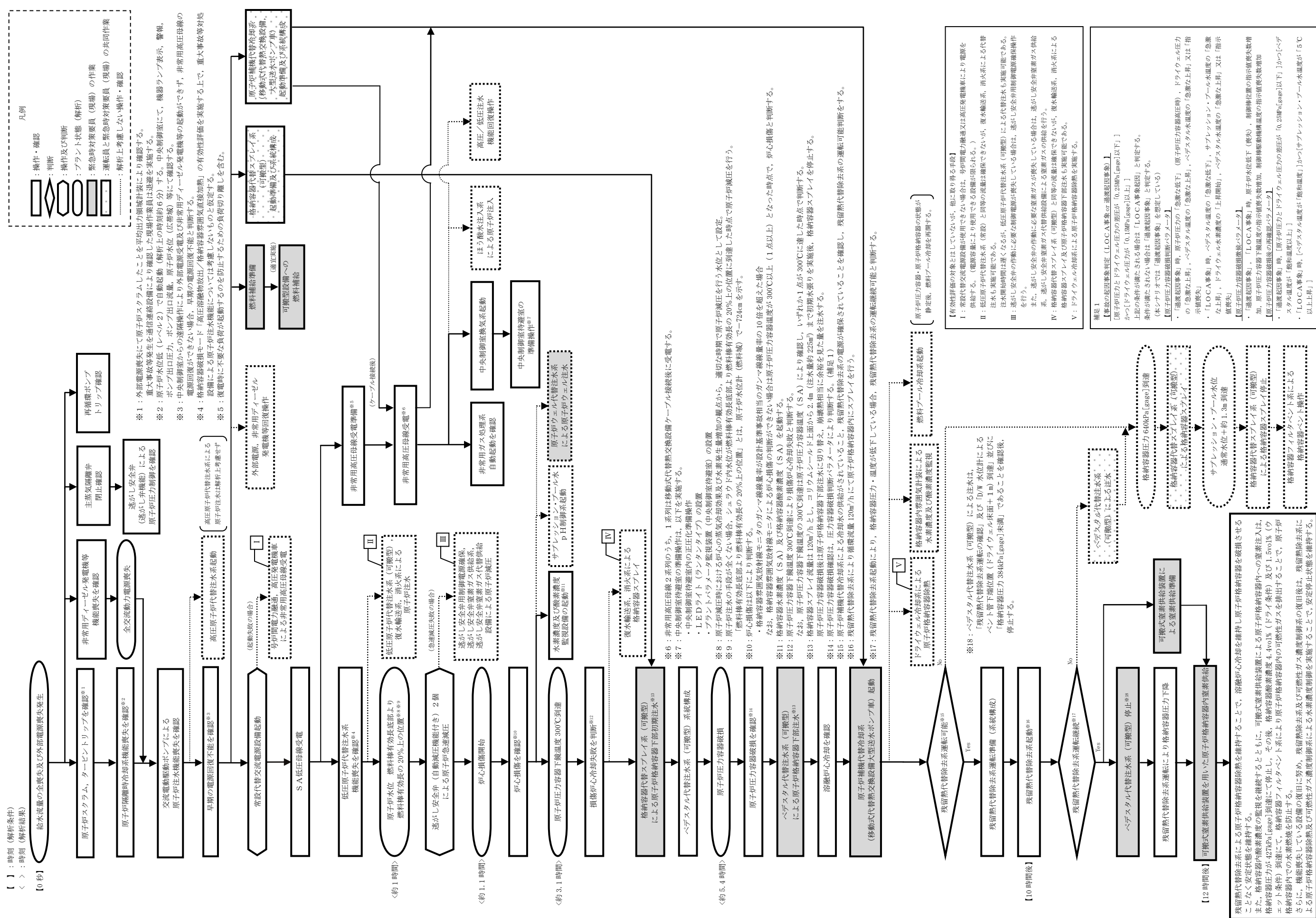
第 3. 2. 1-1 (2) 図 「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の重大事故等対策の概略系統図
 (原子炉圧力容器破損前の原子炉減圧, 原子炉格納容器下部注水)



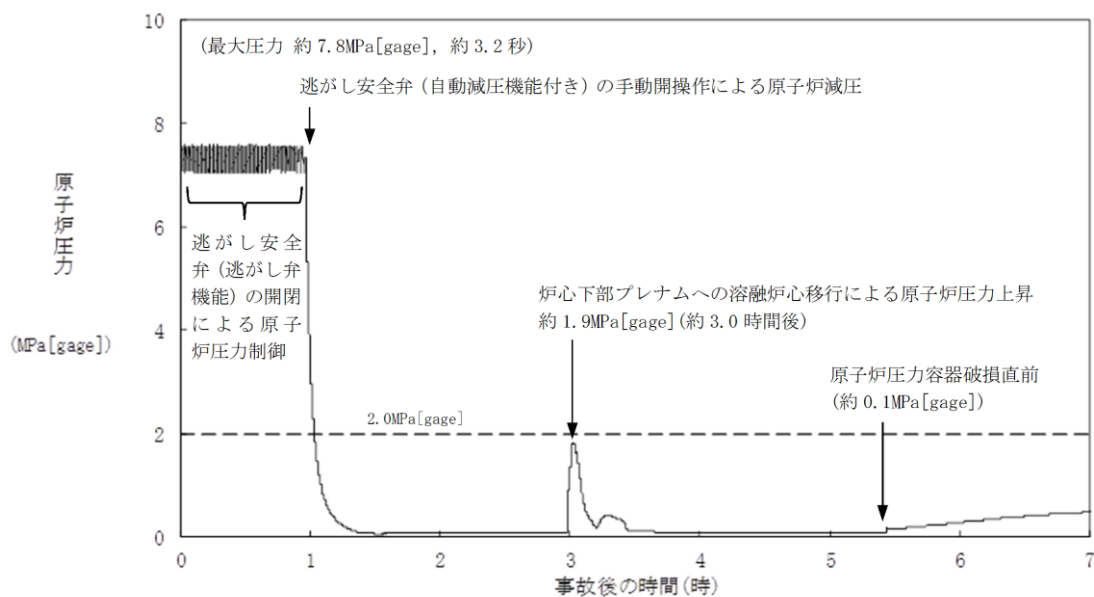
第 3. 2. 1-1 (3) 図 「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の重大事故等対策の概略系統図
 (原子炉压力容器破損後の原子炉格納容器下部注水)



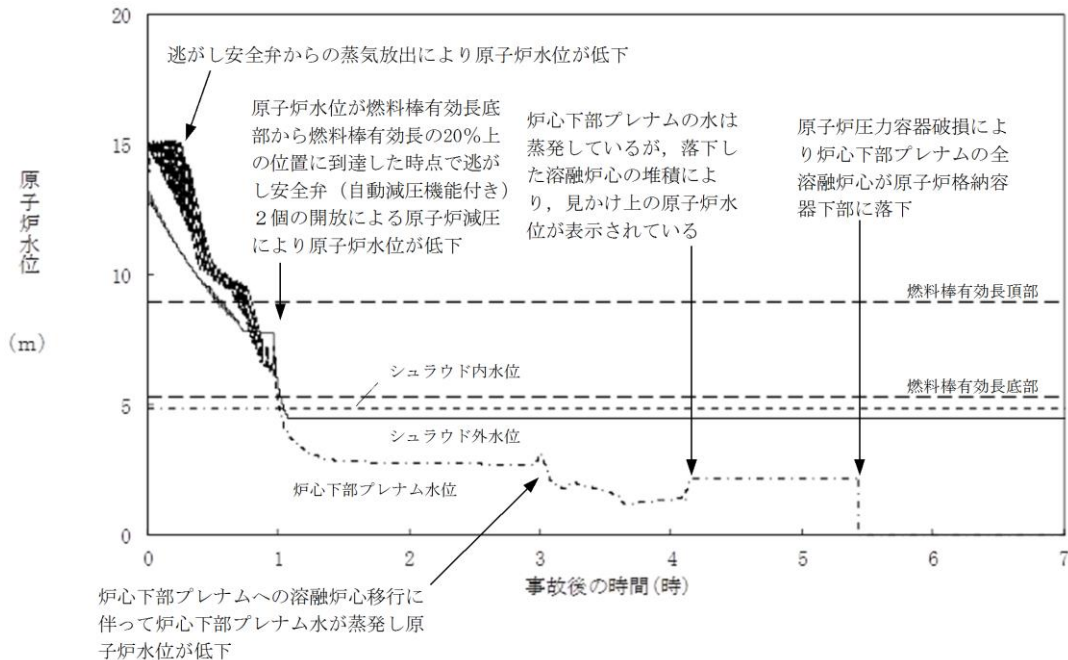
第 3. 2. 1-1(4) 図 「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の重大事故等対策の概略系統図
 (残留熱代替除去系による溶融炉心冷却，格納容器除熱及び可搬式窒素供給装置を用いた原子炉格納容器内窒素供給)



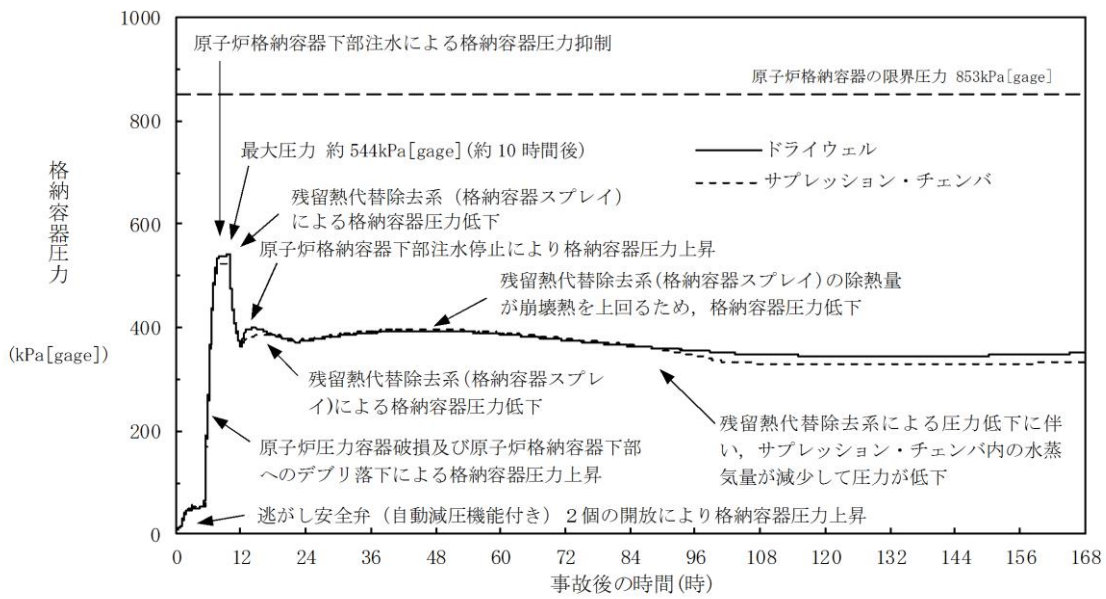
第3.2.1-2 図 「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の対応手順の概要



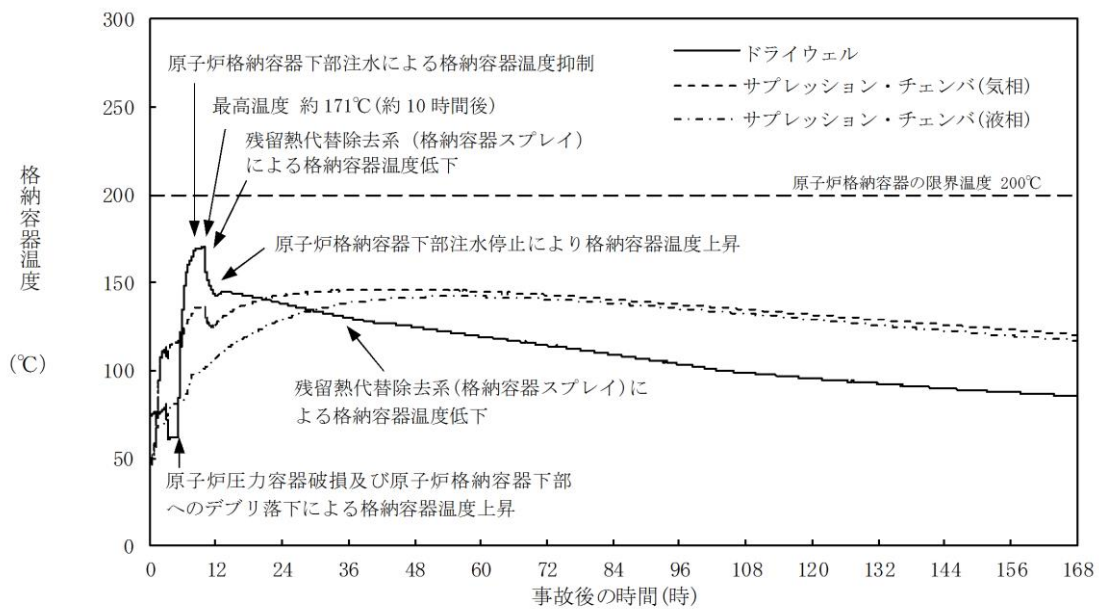
第 3.2.2-1(1) 図 原子炉圧力の推移



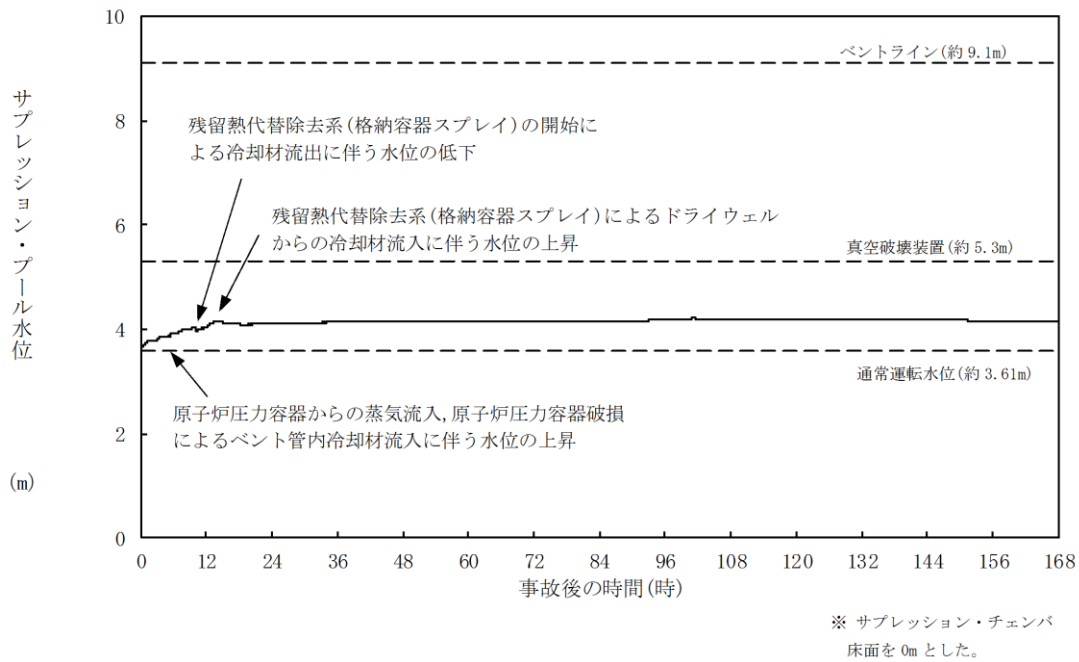
第 3.2.2-1(2) 図 原子炉水位 (シュラウド内外水位) の推移



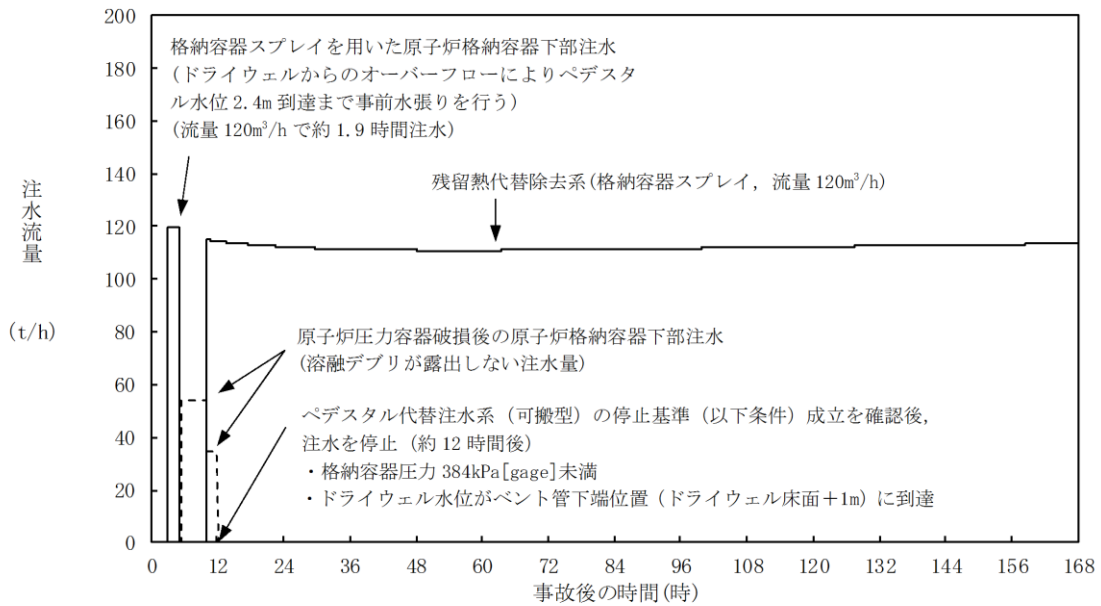
第 3. 2. 2-1(3) 図 格納容器圧力の推移



第 3. 2. 2-1(4) 図 格納容器温度の推移



第 3. 2. 2-1 (5) 図 サプレッション・プール水位の推移



第 3. 2. 2-1 (6) 図 注水流量の推移

第3.2.1-1表 「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の重大事故等対策について（1／4）

判断及び操作	手順	重大事故等対処設備	
		常設設備	可搬型設備 計装設備
原子炉スクラム確認	運転時の異常な過渡変化又は全交流動力電源喪失が発生し、原子炉がスクラムしたことを確認する。	B-115V系蓄電池※	平均出力領域計装※
高圧・低圧注水機能喪失確認※ ¹	原子炉スクラム後、原子炉水位は低下し続けるが、すべての非常用炉心冷却系等が機能喪失していることを確認する。	B-115V系蓄電池※ SA用115V系蓄電池	原子炉水位 (SA) 原子炉水位 (広帯域) ※ 原子炉水位 (燃料域) ※ 【原子炉隔離時冷却ポンプ出口流量】※ 【高圧炉心スプレイポンプ出口流量】※ 【残留熱除去ポンプ出口圧力】※ 【低圧炉心スプレイポンプ出口圧力】※
高圧原子炉代替注水系による原子炉注水	高圧注水機能喪失確認後、高圧原子炉代替注水系を起動し原子炉水位を回復する。	高圧原子炉代替注水系 サブレーション・チェンバ※ B-115V系蓄電池※ SA用115V系蓄電池	原子炉水位 (SA) 原子炉水位 (広帯域) ※ 原子炉水位 (燃料域) ※ 高圧原子炉代替注水流量

※：既許可の対象となっている設備を重大事故等対処設備に位置付けるもの
 【 】：重大事故等対処設備（設計基準拡張）
 □：有効性評価上考慮しない操作

※1 非常用炉心冷却系等による注水が出来ない状態。高圧炉心スプレイ系、残留熱除去系（低圧注水モード）及び原子炉隔離時冷却系の機能喪失が重畳する場合や高圧炉心スプレイ系、原子炉隔離時冷却系及び自動減圧系の機能喪失に伴い低圧炉心スプレイ系及び残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水ができない場合。

第 3.2.1-1 表 「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の重大事故等対策について（2／4）

判断及び操作	手順	重大事故等対処設備		
		常設設備	可搬型設備	計装設備
<p>外部電源が喪失するとともに、すべての非常用ダイオードが発電機等が機能喪失する。これにより非常用高圧母線（6.9kV）が使用不能となり、全交流動力電源喪失に至る。中央制御室にて外部電源受電及び非常用ダイオード発電機等の起動ができず、非常用高圧母線（6.9kV）の電源回復ができない場合、早期の電源回復不能と判断する。これにより、常設代替交流電源設備及び原子炉補機代替冷却系の準備を開始する。準備完了後、常設代替交流電源設備を起動し、SA低圧母線に給電する。</p>	<p>外部電源が喪失するとともに、すべての非常用ダイオードが発電機等が機能喪失する。これにより非常用高圧母線（6.9kV）が使用不能となり、全交流動力電源喪失に至る。中央制御室にて外部電源受電及び非常用ダイオード発電機等の起動ができず、非常用高圧母線（6.9kV）の電源回復ができない場合、早期の電源回復不能と判断する。これにより、常設代替交流電源設備及び原子炉補機代替冷却系の準備を開始する。準備完了後、常設代替交流電源設備を起動し、SA低圧母線に給電する。</p>	—	—	—
<p>逃がし安全弁による原子炉急速減圧</p>	<p>原子炉水位が燃料棒有効長底部より燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点で、原子炉注水の手段が全くない場合でも、中央制御室からの遠隔操作によって手動操作により逃がし安全弁（自動減圧機能付き）2個を開放し、原子炉を急速減圧する。</p>	<p>逃がし安全弁（自動減圧機能付き）※</p>	—	<p>原子炉水位（SA） 原子炉水位（燃料域）※ 原子炉圧力（SA） 原子炉圧力※</p>
<p>炉心損傷確認</p>	<p>高圧・低圧注水機能喪失により原子炉水位がさらに低下し、炉心が露出し、炉心損傷したことを確認する。</p>	—	—	<p>格納容器雰囲気放射線モニタ（ドライウエル）※ 格納容器雰囲気放射線モニタ（サブプレッション・チェンバ）※</p>

※：既許可の対象となっている設備を重大事故等対処設備に位置付けるもの
【 】：重大事故等対処設備（設計基準拡張）

第 3.2.1-1 表 「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の重大事故等対策について（3／4）

判断及び操作	手順	重大事故等対処設備		
		常設設備	可搬型設備	計装設備
<p>水素濃度及び酸素濃度監視設備の起動</p>	<p>炉心損傷が発生すれば、ジルコニウム-水反応等により水素ガスが発生し、水の放射線分解により水素ガス及び酸素ガスが発生することから、中央制御室からの遠隔操作により水素濃度及び酸素濃度監視設備を起動し、原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度を確認する。</p>	<p>常設代替交流電源設備</p>	<p>—</p>	<p>格納容器水素濃度 (S A) 格納容器酸素濃度 (S A)</p>
<p>原子炉格納容器下部への注水</p>	<p>原子炉压力容器下鏡温度 300℃到達により炉心下部プレナムへの溶融炉心移行を確認した場合、原子炉压力容器破損に備えて格納容器代替スプレイス系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水を実施する。この場合の注水は、原子炉格納容器下部への水張りが目的であるため、ペデスタル水位が 2.4m（注水量約 225m³）に到達した後、原子炉格納容器下部への注水を停止する。</p>	<p>非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等**</p>	<p>大量送水車 タンクローリ</p>	<p>原子炉圧力容器温度 (S A) 格納容器代替スプレイス流量 ペデスタル水位</p>
<p>原子炉压力容器破損確認</p>	<p>原子炉压力容器下鏡部温度が 300℃に到達した場合には、原子炉压力容器の破損を速やかに判断するためペデスタル水温等を継続監視する。ペデスタル水温の急激な上昇又は指示値喪失、原子炉圧力の急激な低下、ドライウエルの急激な上昇といったパラメータの変化によって原子炉压力容器破損を判断する。</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>原子炉压力容器温度 (S A) 原子炉圧力 (S A) 原子炉圧力* ドライウエル圧力 (S A) ペデスタル温度 (S A) ペデスタル水温 (S A)</p>

※：既許可の対象となつている設備を重大事故等対処設備に位置付けるもの
【 】：重大事故等対処設備（設計基準拡張）

第 3.2.1-1 表 「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の重大事故等対策について（4／4）

判断及び操作	手順	重大事故等対処設備		
		常設設備	可搬型設備	計装設備
溶融炉心への注水	原子炉圧力容器が破損し、溶融炉心が原子炉格納容器下部に落下した後は、ペデスタル代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水を崩壊熱に余裕を見た流量にて継続して行う。 ^{※2}	コリウムシールド 非常用ディーゼル発電機燃料 貯蔵タンク等※	大量送水車 タンクローリ	ペデスタル代替注水流量 ペデスタル代替注水流量（狭帯域用）
残留熱代替除去系による溶融炉心冷却及び原子炉格納容器除熱	原子炉補機代替冷却系の準備が完了した後、原子炉補機代替冷却系を用いた残留熱代替除去系による溶融炉心冷却及び原子炉格納容器除熱を開始する。格納容器スプレイ弁を中央制御室からの遠隔操作により開操作し、格納容器スプレイを実施する。	常設代替交流電源設備 非常用ディーゼル発電機燃料 貯蔵タンク等※ 残留熱代替除去系 サブレーション・チェンバ※	移動式代替熱交換設備 大型送水ポンプ車 タンクローリ	残留熱代替除去系格納容器スプレイ 流量 ドライウエル温度（SA） ドライウエル圧力（SA） サブレーション・チェンバ圧力（SA） サブレーション・プール水温度（SA）
可搬式窒素供給装置を用いた原子炉格納容器内への窒素注入	残留熱代替除去系による原子炉格納容器除熱を実施した場合、可搬式窒素供給装置を用いて原子炉格納容器内へ窒素を注入することで、格納容器内酸素濃度の上昇を抑制する。	常設代替交流電源設備 非常用ディーゼル発電機燃料 貯蔵タンク等※	可搬式窒素供給装置 タンクローリ	格納容器酸素濃度（SA）

※：既許可の対象となっている設備を重大事故等対処設備に位置付けるもの
【 】：重大事故等対処設備（設計基準拡張）

※2 原子炉圧力容器破損時の影響により、ペデスタル水位による監視ができな場合であっても、以下の条件の一部又はすべてから総合的に溶融炉心の冷却が継続して行われていることを把握することができる。
 ・原子炉格納容器下部の雰囲気温度が飽和温度程度で推移していること
 ・ドライウエルの雰囲気温度が飽和温度程度で推移していること
 ・原子炉格納容器内の水素濃度の上昇が停止すること

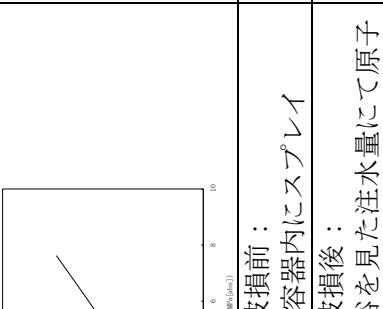
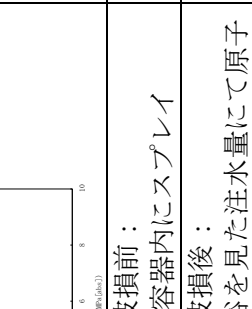
第3.2.2-1表 主要解析条件（高压熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱）（1／4）

項目	主要解析条件	条件設定の考え方
解析コード	MAAP	—
原子炉熱出力	2,436MW	定格原子炉熱出力として設定
原子炉圧力	6.93MPa[gage]	定格原子炉圧力として設定
原子炉水位	通常水位 (気水分離器下端から+83 cm)	通常運転時の原子炉水位として設定
炉心流量	35.6×10 ³ t/h	定格炉心流量として設定
燃料	9×9燃料 (A型)	9×9燃料 (A型), 9×9燃料 (B型) は熱水力的な特性は同等であり, その相違は燃料棒最大線出力密度の保守性に包絡されること, また, 9×9燃料の方がMOX燃料よりも崩壊熱が大きく, 燃料被覆管温度上昇の観点で厳しいため, MOX燃料の評価は9×9燃料 (A型) の評価に包絡されることを考慮し, 代表的に9×9燃料 (A型) を設定
原子炉停止後の崩壊熱	ANSI/ANS-5.1-1979 (燃焼度 33GWd/t)	サイクル末期の燃焼度のばらつきを考慮し, 10%の保守性を考慮して設定
格納容器容積 (ドライウエル)	7,900m ³	ドライウエル内体積の設計値 (内部機器及び構造物の体積を除いた値) を設定
格納容器容積 (サブプレッション・チェンバ)	空間部: 4,700m ³ 液相部: 2,800m ³	サブプレッション・チェンバ内体積の設計値 (内部機器及び構造物の体積を除いた値) を設定
真空破壊装置	3.43kPa (ドライウエル-サブプレッション・チェンバ間差圧)	真空破壊装置の設定値
サブプレッション・プール水位	3.61m (NWL)	通常運転時のサブプレッション・プール水位として設定
サブプレッション・プール水温度	35°C	通常運転時のサブプレッション・プール水温度の上限値として設定
格納容器圧力	5 kPa[gage]	通常運転時の格納容器圧力として設定
格納容器温度	57°C	通常運転時の格納容器温度として設定
外部水源の温度	35°C	屋外貯水槽の水源温度として実測値及び夏季の外気温度を踏まえて設定

第3.2.2-1表 主要解析条件（高压溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱）（2／4）

項目	主要解析条件	条件設定の考え方	
初期条件	溶融炉心からプール水への熱流束	800kW/m ² 相当（圧力依存あり）	過去の知見に基づき初期水張りの効果を考慮して設定
	コンクリートの種類	玄武岩系コンクリート	使用している骨材の種類から設定
	コンクリート以外の構造材の扱い	内側鋼板及びリブ鋼板は考慮しない	内側鋼板及びリブ鋼板については、コンクリートよりも融点が高いことから保守的に考慮しない
	原子炉圧力容器下部の構造物の扱い	原子炉格納容器下部に落下する溶融物とは扱わない	発熱密度を下げないよう保守的に設定
	原子炉格納容器下部床面積	原子炉格納容器下部床面積を設定	コリウムシールドを床面に設置するため、その設置面積を用いるものとする。
事故条件	起因事象	給水流量の全喪失 高压注水機能喪失 低压注水機能喪失 重大事故等対処設備による原子炉注水機能の喪失 全交流動力電源喪失	原子炉水位の低下の観点で厳しい事象を設定 高压注水機能として原子炉隔離時冷却系及び高压炉心スプレイスの機能喪失を、低压注水機能として残留熱除去系（低压注水モーター）及び低压炉心スプレイス系の機能喪失を設定するとともに、重大事故等対処設備による原子炉注水機能の喪失を設定すすべての非常用ディーゼル発電機等の機能喪失を設定
	外部電源	外部電源なし	全交流動力電源喪失を想定するため、外部電源なしを設定
	高温ガスによる配管等のクリープ破損や漏えい等	考慮しない	原子炉圧力を厳しく見積もるものとして設定

第3.2.2-1表 主要解析条件 (高压溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱) (3/4)

項目	主要解析条件	条件設定の考え方
原子炉スクラム信号	事象発生と同時に原子炉スクラム	事象発生と同時に原子炉スクラムするものとして設定
主蒸気隔離弁	事象発生と同時に閉止	主蒸気が原子炉格納容器内に保持される厳しい条件として設定
再循環ポンプ	事象発生と同時に停止	全交流動力電源喪失によるポンプ停止を踏まえて設定
逃がし弁機能	逃がし弁機能 7. 58MPa[gage] × 2 個, 367t/h/個 7. 65MPa[gage] × 3 個, 370t/h/個 7. 72MPa[gage] × 3 個, 373t/h/個 7. 79MPa[gage] × 4 個, 377t/h/個 逃がし安全弁 (自動減圧機能付き) の2 個を開することによる原子炉急速減圧 (原子炉圧力と逃がし安全弁1個あたりの蒸気量の 関係) 	逃がし安全弁の逃がし弁機能の設計値として設定
逃がし安全弁	逃がし安全弁 (自動減圧機能付き) の2 個を開することによる原子炉急速減圧 (原子炉圧力と逃がし安全弁1個あたりの蒸気量の 関係) 	逃がし安全弁の設計値に基づき蒸気流量及び原子炉圧力の関係から設定
格納容器代替スプレイ系 (可搬型)	原子炉圧力容器破損前: 120m ³ /hにて格納容器内にスプレイ	格納容器温度及び圧力抑制に必要なスプレイ流量を考慮して設定
ベダスタル代替注水系 (可搬型)	原子炉圧力容器破損後: 崩壊熱相当に余裕を見た注水量にて原子 炉格納容器下部に注水	溶融炉心冷却が継続可能な流量として設定
残留熱代替除去系	120m ³ /hにて格納容器内にスプレイ	残留熱代替除去系の設計値として設定
原子炉補機代替冷却系	残留熱代替除去系からの原子炉補機代替 冷却系への伝熱容量: 約6 MW (サブプレッション・プール水温度 100°C, 海水温度 30°Cにおいて)	原子炉補機代替冷却系の設計値 (残留熱代替除去系による格納容器スプレイ流量 120m ³ /hとした場合) として設定

重大事故等対策に関連する機器条件

第3.2.2-1表 主要解析条件（高压溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱）（4／4）

項目	主要解析条件	条件設定の考え方
<p>可搬式窒素供給装置</p>	<p>総注入流量：100m³/h[normal] ・窒素：99.9m³/h[normal] ・酸素：0.1m³/h[normal] ガス温度：35℃</p>	<p>総注入量は格納容器内の酸素濃度の上昇抑制に必要な流量として設定 酸素注入流量は純度99.9%を考慮して残りすべてを酸素として設定 ガス温度は気象条件を考慮して設定</p>
<p>コリウムシールド</p>	<p>材料：ジルコニア耐熱材 侵食開始温度：2, 100℃</p>	<p>材料は、溶融炉心のドライウェルサンプルへの流出を防止する観点から、ジルコニア耐熱材を設定 侵食開始温度は、ジルコニア耐熱材の侵食試験結果に基づき設定</p>
<p>原子炉急速減圧操作</p>	<p>原子炉水位が燃料棒有効長底部より燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点</p>	<p>炉心損傷後の酸化反応の影響緩和を考慮し設定</p>
<p>格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）</p>	<p>原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達したことを確認して開始し、ペダスタル水位が2.4mとなる注水量（約225m³）が注水されたことをもって停止する</p>	<p>格納容器温度の抑制効果及び炉心損傷後の原子炉圧力容器の破損による溶融炉心・コンクリート相互作用の影響緩和を考慮し設定</p>
<p>ペダスタル代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損後の注水）</p>	<p>原子炉圧力容器の破損を確認した場合</p>	<p>炉心損傷後の原子炉圧力容器の破損による溶融炉心・コンクリート相互作用の影響緩和を考慮し設定</p>
<p>残留熱代替除去系による溶融炉心冷却及び原子炉格納容器除熱操作</p>	<p>事象発生から10時間後</p>	<p>原子炉補機代替冷却系の準備時間を考慮して設定</p>
<p>可搬式窒素供給装置による格納容器内窒素供給操作</p>	<p>事象発生から12時間後</p>	<p>原子炉補機代替冷却系の準備完了後の可搬式窒素供給装置の準備時間を考慮して設定</p>

高温環境下での逃がし安全弁の開保持機能維持について

原子炉水位が燃料棒有効長頂部を下回り、炉心損傷に至るような状況では、原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）内の気相温度は飽和蒸気温度を大きく超える。高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱（以下「DCH」という。）を防止するためには、その様な環境下でも逃がし安全弁（以下「SRV」という。）を開保持し、RPV内の圧力を2MPa以下の低圧に維持する必要がある。

図1から図3に示すとおり、SRVは本体部と電磁弁、空気シリンダからなる補助作動装置から構成されている。「4. 本体部の温度上昇による影響」に示すとおり、本体部では温度上昇は問題にならないが、補助作動装置の温度が上昇すると、電磁弁又はピストンのシール部が熱によって損傷し、SRVの機能維持に影響を及ぼすおそれがある。

SRVについては以下の環境条件における機能維持を確認している。

- ・171℃において3時間継続の後160℃において3時間継続

ここでは、SRVの環境条件を厳しく評価する観点から、格納容器代替スプレイ系（可搬型）による格納容器スプレイに期待しない場合を仮定し、事象発生からRPV破損直前までの約5.4時間においてDCH防止のために原子炉の減圧を継続している環境下で想定されるSRVの温度を評価し、上記の条件と比較することで、SRVの健全性を評価する。

1. 評価方法

MAAP解析によって得られたDCH対応シナリオでのRPV内気相温度とドライウェル（以下「D/W」という。）内気相温度を環境温度条件として、三次元熱流動解析コード(STAR-CCM+)により、SRVの温度を評価した。

三次元熱流動解析では、RPV内気相温度とD/W内気相温度の温度条件が厳しくなる評価点を2点設けて定常解析を実施した。

2. 評価条件

(1) 温度条件

図4にRPV内気相温度及びD/W内気相温度のMAAP解析結果を示す。MAAP解析結果を踏まえ、以下に示すとおり評価条件を設定した。

- ① 事象発生からRPV破損直前までの範囲を代表する温度条件として、同範囲内でのRPV内気相温度が最も厳しい温度を適用し、定常解析によって評価する。
- ② 事象発生からRPV破損直前までの範囲を代表する温度条件として、同範囲

内でのD/W内気相温度が最も厳しい温度を適用し、定常解析によって評価する。

(2) 評価部位

SRVの開保持には、電磁弁コイルを励磁することで、補助作動装置のピストン部へ窒素を供給し、SRV本体スプリングの閉止力を上回る駆動力を発生させ、ピストンを押し上げた状態とする必要がある。SRVの開保持機能維持の観点では、高温影響を受けやすい以下の部位について評価する必要がある。

① 電磁弁（下部コイルハウジング）

電磁弁のコイルは熱容量が小さく、高温影響を受けやすい。電磁弁のコイルが熱によって損傷した場合、電磁弁のコイルが消磁することで、補助作動装置のピストンへの窒素供給が遮断されるとともに、流路が排気側へ切り替わることから、ピストンを押し上げていた窒素が排出され、SRV本体スプリングの閉止力によってSRVが閉止する。このため、電磁弁を評価の対象とするが、その中でも高温配管に近く、最も温度が高くなりやすい下部コイルハウジングの温度を評価する。

② ピストン（シール部）

ピストンのシール部にはフッ素ゴム製のOリングを用いており、高温影響を受けやすい。ピストンのシール部が熱によって損傷した場合、シール部よりピストンを押し上げていた窒素が排出され、SRV本体スプリングの閉止力によってSRVが閉止する。このため、ピストンの温度を評価する。

(3) 評価モデル

SRVの中で、電磁弁やピストンのシール部の温度条件が厳しい弁を評価する観点から、電磁弁の設置角度が排気管に最も近い弁を評価対象弁とした。また、図5及び図6のように開状態と閉状態を交互に並べた形でモデル化している。実機では離れた位置のSRV2個を操作することを基本とするが、解析では評価体系の側面を周期境界としており、保守的に1個おきに開動作するモデルとしている。

3. 評価結果

評価結果を表2及び図7及び図8に示す。事象発生からRPV破損直前までの範囲でRPV内気相温度が最も厳しい温度を適用した①の温度条件では、補助作動装置の電磁弁及びピストンのシール部の温度は160℃を約20℃下回った。また、①と同範囲でD/W内気相温度が最も厳しい温度を適用した②の温度条件では、補助作動装置の電磁弁及びピストンのシール部の温度は160℃を約20℃下回った。

なお、SRV環境試験では、160℃以上の温度条件において6時間の機能維持が確認されている。

SRVに対する機能確認試験では、初期の熱負荷として171℃を与えており、この試験実績を踏まえると、DCH防止のために原子炉減圧を継続している状況下

でもSRVの機能を継続可能である。①、②は厳しい温度を設定して実施した定常解析であり、実際にSRVが経験する温度は更に低い値になるものと考えられる。

以上のとおり、炉心損傷後、DCH防止のために原子炉の減圧を継続している状況を想定した環境下でも、SRVの機能を維持できると考える。

4. 本体部の温度上昇による影響

閉状態のSRVが強制開するためには、補助作動装置の駆動力がSRV本体の抵抗力を上回る必要がある。SRV本体の抵抗力に対する温度上昇の影響は表3のとおり、いずれも温度上昇によって抵抗力が低下するよう設計上配慮されており、温度上昇が強制開の妨げとなることはない。

以上

表1 三次元熱流動解析での温度条件

	温度条件①【定常解析】 (事象発生から熔融炉心落下直前までのRPV内気相平均温度が最高となる温度条件)	温度条件②【定常解析】 (事象発生から熔融炉心落下直前までのD/W内気相平均温度が最高となる温度条件)
RPV内気相温度	約 521℃	約 469℃
D/W内気相温度	約 85℃	約 90℃

表2 三次元熱流動解析での評価結果

	温度条件①【定常解析】 (事象発生から熔融炉心落下直前までのRPV内気相平均温度が最高となる温度条件)	温度条件②【定常解析】 (事象発生から熔融炉心落下直前までのD/W内気相平均温度が最高となる温度条件)
下部コイルハウジング最高温度*	約 141℃	約 136℃
ピストン部最高温度	約 136℃	約 132℃

※電磁弁設置位置

表3 SRV本体の抵抗力に対する温度上昇の影響

項目	温度上昇の影響
SRVスプリング閉止力	温度上昇に伴い、低下する方向にある。また、補助作動装置の駆動力はスプリング閉止力に対して十分な力量を有している。
弁棒・アジャスタリング摺動抵抗	主蒸気流路から離れた位置にあり、温度上昇幅は小さく、SRV強制開機能には影響を及ぼさない。
弁棒・ネッキブッシュ摺動抵抗	弁棒は []、ネッキブッシュは [] と、入熱時に隙間が拡大する材料の組み合わせとなっており、ネッキブッシュによる弁棒拘束は発生しない。
バランスピストン・ブッシュ摺動抵抗	バランスピストンは []、ブッシュは [] と、入熱時に隙間が拡大する材料の組み合わせとなっており、ブッシュによる弁棒拘束は発生しない。
弁体ソケット・弁体ガイド摺動抵抗	主蒸気温度上昇に伴い拡大するため、温度上昇に伴う弁体ガイドの弁体ソケット拘束は発生しない。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

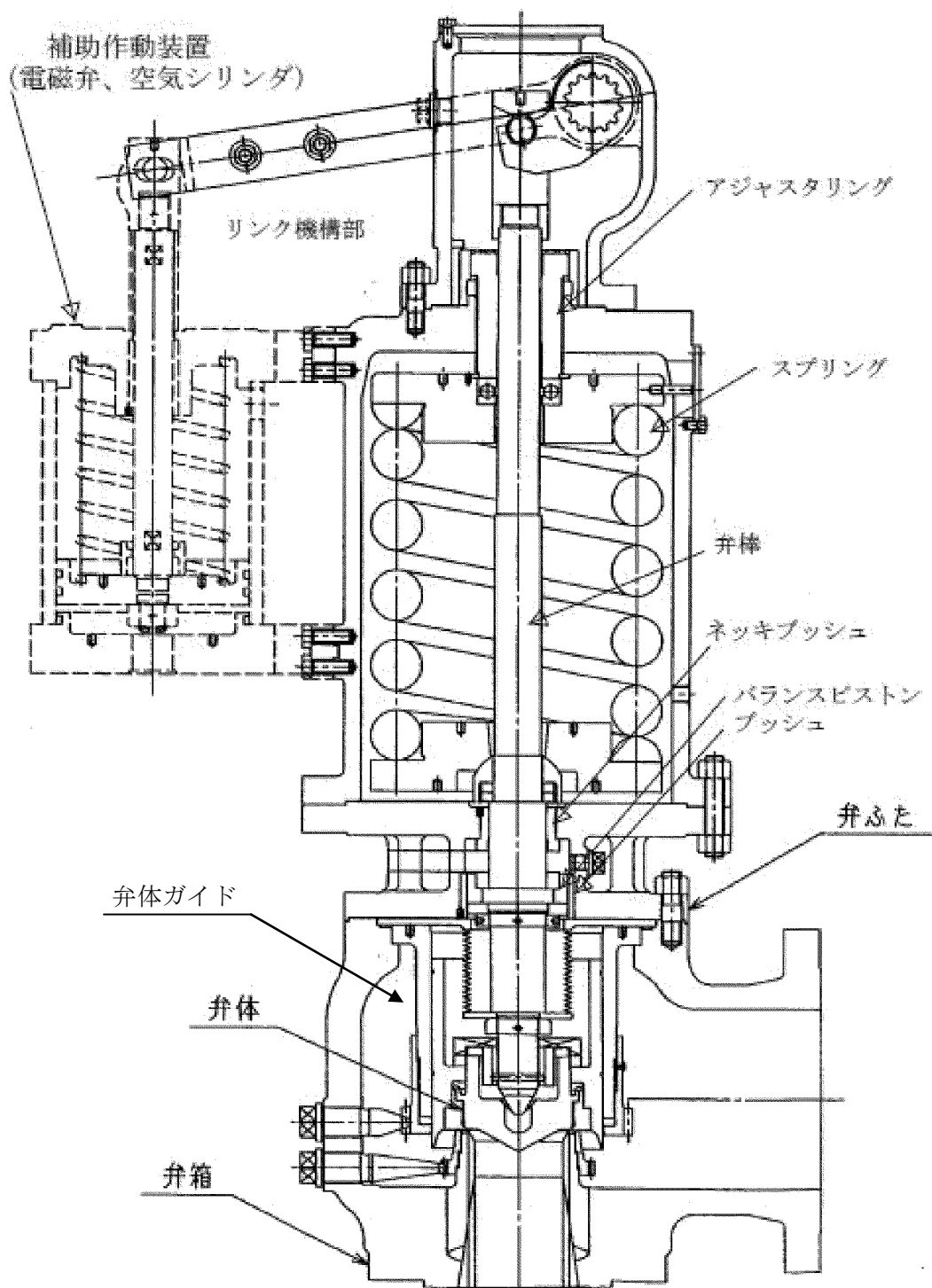


図1 SRV構造図

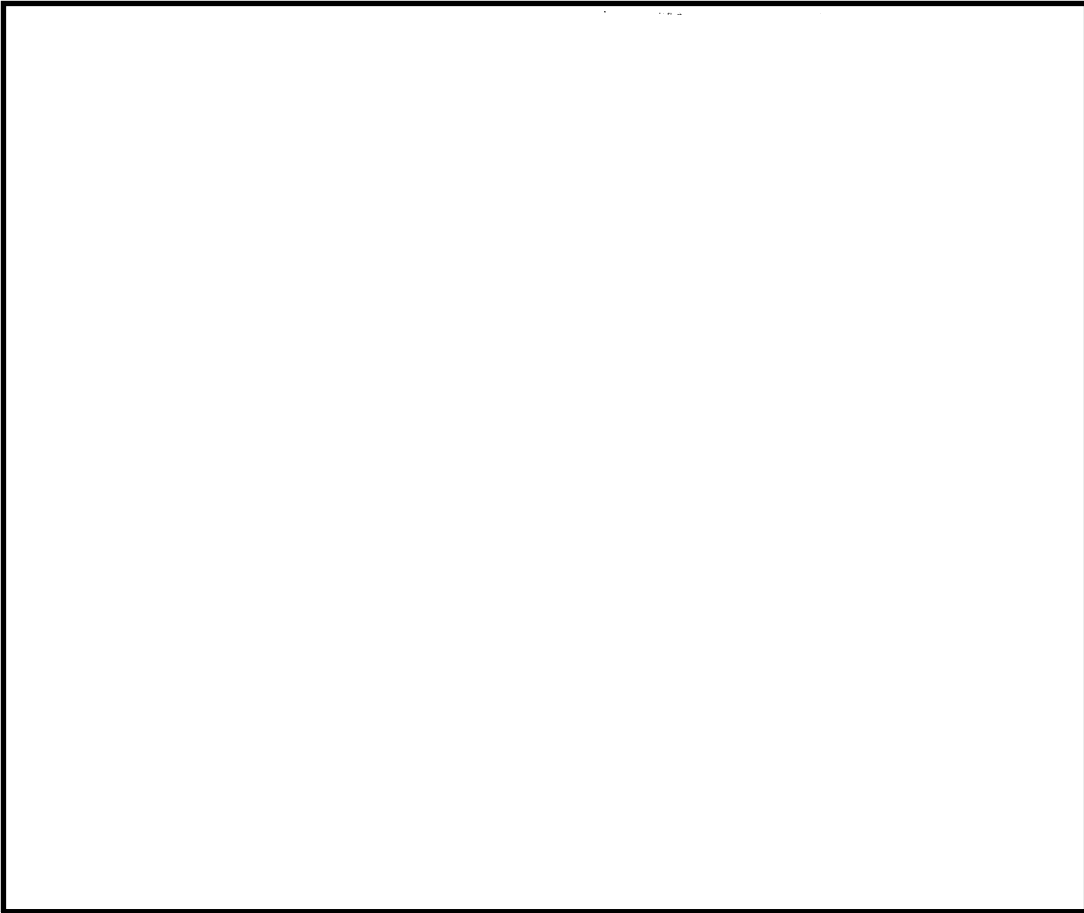


図2 SRV構造図（側面図詳細）

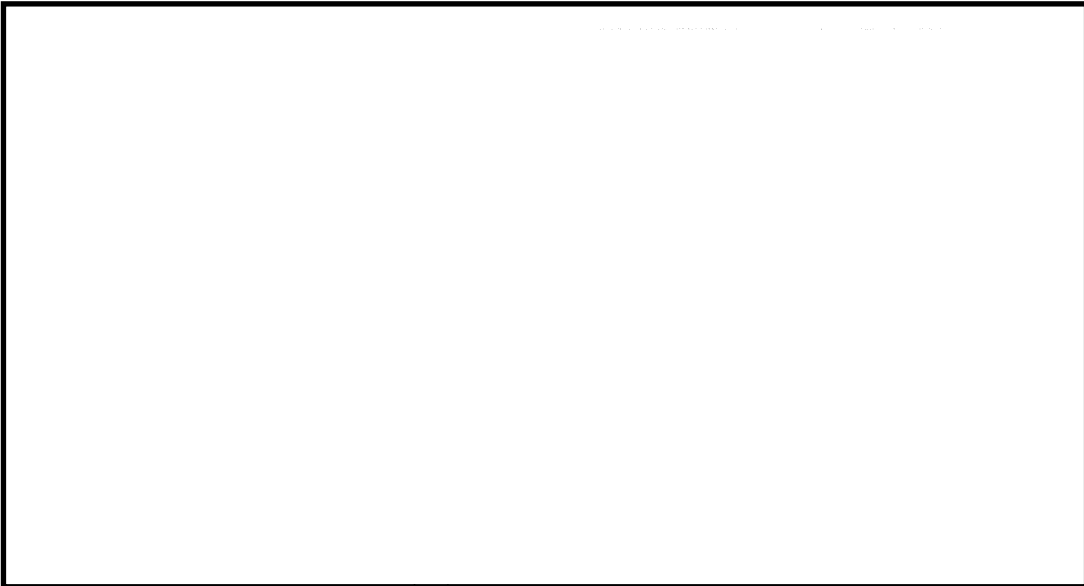


図3 SRV構造図（平面図詳細）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

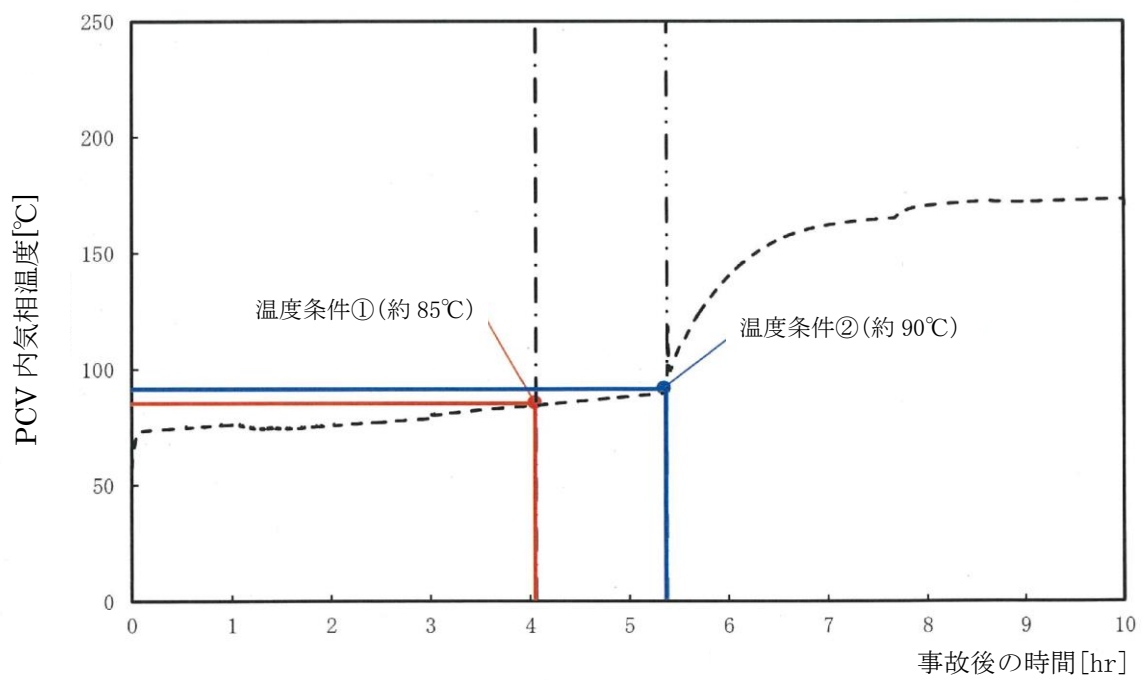
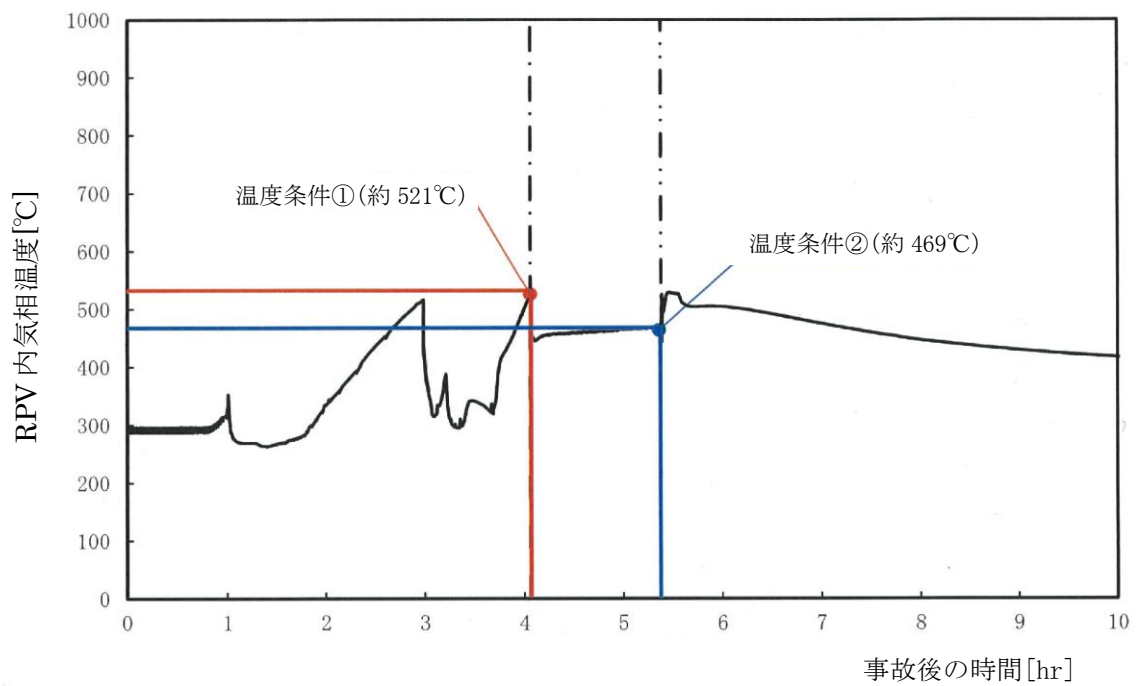


図4 R P V内気相平均温度及びD/W内気相平均温度の推移

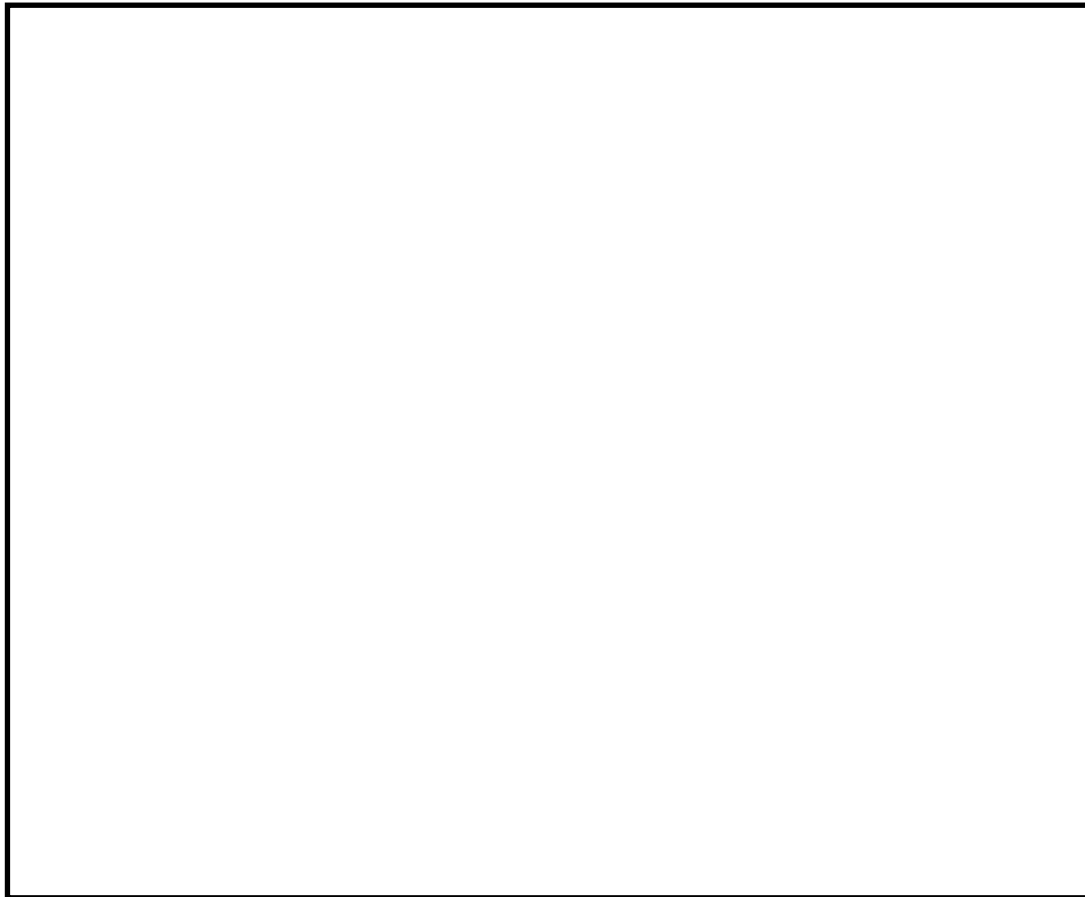


図5 モデル化範囲と境界条件



図6 モデル図と断面メッシュ図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

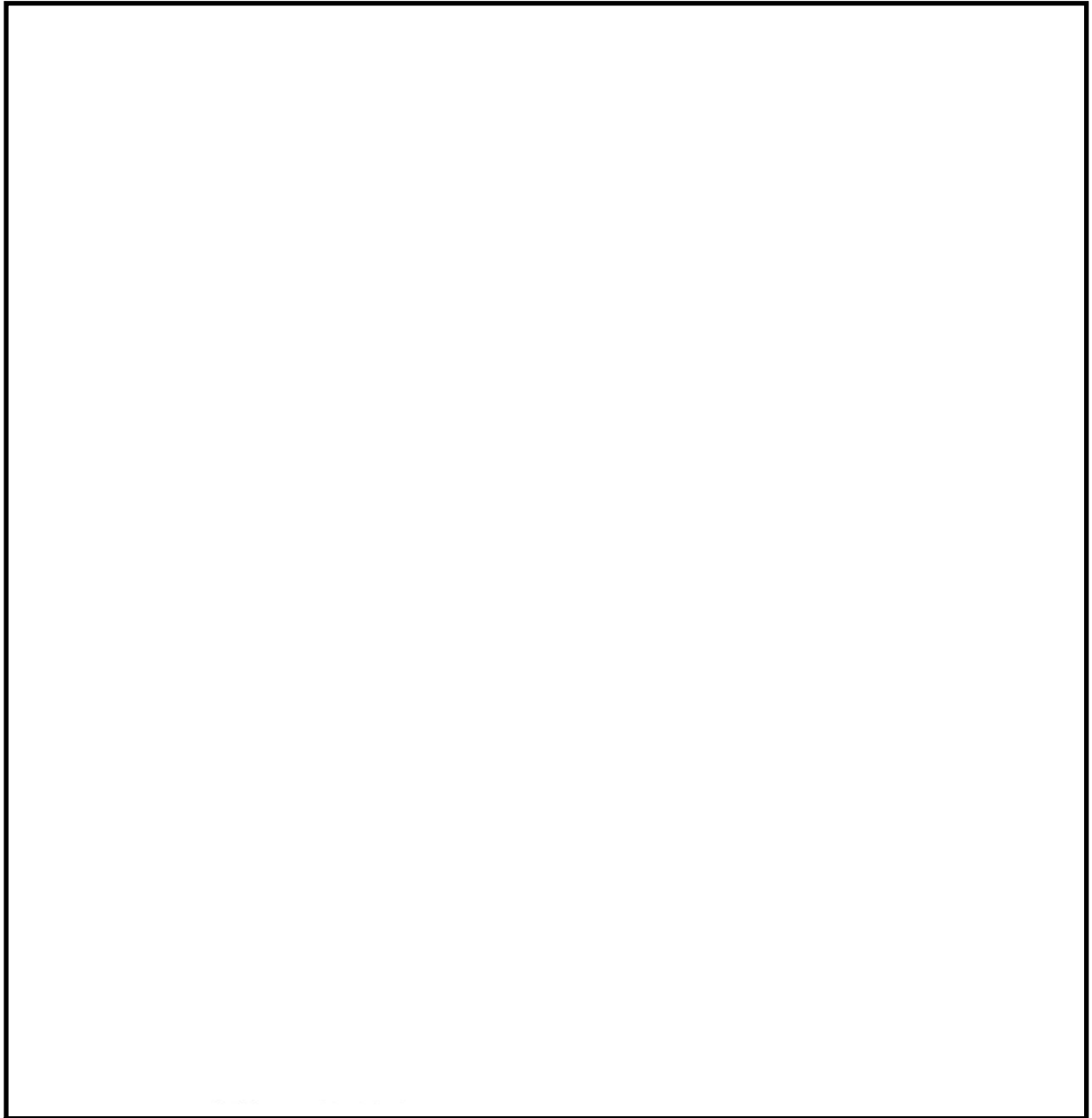


図7 解析結果(温度条件①: R P V内気相温度 521°C, P C V内気相温度 85°C)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

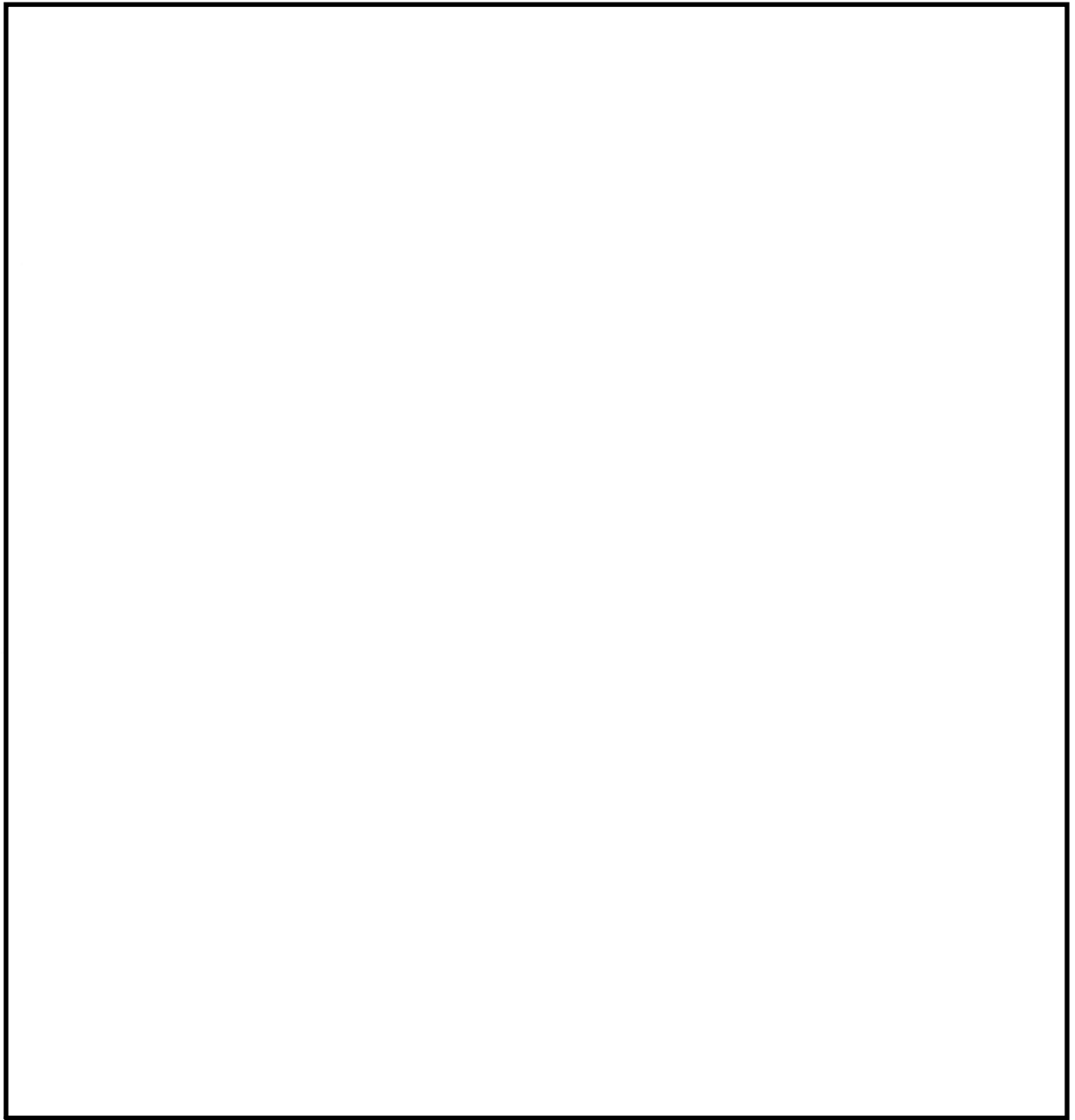


図 8 解析結果 (温度条件②): R P V内気相温度 469°C, P C V内気相温度 90°C)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

格納容器破損モード「DCH」、「FCI」及び「MCCI」の
評価事故シーケンスの位置づけ

格納容器破損モード「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱(DCH)」、「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用(FCI)」及び「溶融炉心・コンクリート相互作用(MCCI)」については、各プラント損傷状態(PDS)に対応する各重要事故シーケンス及び「雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)」の評価事故シーケンスへの重大事故等防止対策の有効性評価の結果等から、重大事故等対処設備に期待する場合、炉心損傷あるいは炉心下部プレナムへの溶融炉心移行までに事象の進展を停止し、これらの現象の発生を防止することができる。

しかしながら、格納容器破損モード「DCH」、「FCI」及び「MCCI」は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」(以下、「解釈」という。)第37条2-1(a)において、「必ず想定する格納容器破損モード」として定められている。このため、今回の評価では重大事故等対処設備の一部に期待しないものとして、各物理化学現象に伴う格納容器破損が懸念される状態に至る評価事故シーケンスを設定している。

一方、格納容器破損モード「雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)」については、事故シーケンス選定のプロセスにおいて、国内外の先進的な対策と同等な対策を講じても炉心損傷を防止できない事故シーケンスとして抽出された、「冷却材喪失(大破断LOCA)＋ECCS注水機能喪失＋全交流動力電源喪失」を評価事故シーケンスとして選定し、重大事故等対策の有効性を評価している。

以上のとおり、格納容器破損モード「雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)」は重大事故等対策に期待して評価し、解釈第37条2-3(a)～(c)の評価項目に対する重大事故等対策の有効性を評価しており、格納容器破損モード「DCH」、「FCI」及び「MCCI」は、評価を成立させるために、重大事故等対処設備の一部に期待しないものとして、解釈第37条2-3(d),(e),(i)の評価項目に対する重大事故等対策の有効性を評価している。

以 上

原子炉建物から大気中への放射性物質の漏えい量について
(高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱)

本格納容器破損モードの重大事故等対策の有効性評価では、厳しい事象を想定した場合でも、原子炉格納容器が破損することなく安定状態に至る結果が得られている。この評価結果に照らして原子炉建物から大気中への放射性物質の漏えい量を考える。

格納容器破損防止対策の有効性評価では、通常運転時に用いている原子炉建物原子炉棟内の換気系が全交流動力電源喪失により停止し、交流電源が回復した後非常用ガス処理系が起動する状況を想定している。ここで、原子炉建物原子炉棟内の換気系の停止から非常用ガス処理系が起動するまでの時間遅れを考慮し、非常用ガス処理系によって原子炉建物原子炉棟の設計負圧が達成されるまで事象発生から70分かかると想定している。

本格納容器破損モードの重大事故等対策の有効性評価では原子炉格納容器の閉じ込め機能は健全であると評価していることから、原子炉格納容器から漏えいした水蒸気は原子炉建物内で凝縮され、原子炉建物空間部が加圧されることはないと考えられる。また、原子炉棟内の換気系は停止しているため、原子炉建物内空間部と外気との圧力差が生じにくく、原子炉建物内外での空気のやりとりは殆どないものと考えられる。さらに、原子炉格納容器内から原子炉建物に漏えいした粒子状放射性物質は、原子炉建物内での重力沈降や水蒸気の凝縮に伴い、原子炉建物内に沈着するものと考えられる。

これらのことから、原子炉格納容器の健全性が維持されており、原子炉建物原子炉棟内の換気系が停止している場合は、原子炉格納容器から原子炉建物内に漏えいした放射性物質は、原子炉建物内で時間減衰し、また、原子炉建物内で除去されるため、大気中へは殆ど放出されないものと考えられる。

本評価では、上述の状況にかかわらず、非常用ガス処理系が起動し、原子炉建物原子炉棟の設計負圧が達成されるまでの間、原子炉格納容器から原子炉建物に漏えいした放射性物質は、保守的に全量原子炉建物から大気中へ漏えいすることを想定した場合の放出量を示す。

1. 評価条件

- (1) 本格納容器破損モードの評価事故シーケンスである「過渡事象＋高圧炉心冷却失敗＋原子炉減圧失敗＋炉心損傷後の原子炉減圧失敗＋原子炉注水失敗＋DCH発生」について評価する。
- (2) 原子炉格納容器からの漏えい量は、MAAP解析上で原子炉格納容器圧力に応じて漏えい率が変化するものとし、開口面積は以下のように設定する。(添付資料 3.1.2.5 参照)

- ・ 1Pd 以下 : 0.9Pd で 0.5%/日 相当
 - ・ 1 ~ 2Pd : 2.0Pd で 1.3%/日 相当
- (3) エアロゾル粒子は原子炉格納容器外に放出される前に貫通部内で捕集されることが実験的に確認されていることから原子炉格納容器の漏えい孔におけるエアロゾルの捕集の効果を考慮して評価する (DF=10)。
- (4) 原子炉建物から大気中への放射性物質の漏えいについては、非常用ガス処理系により負圧が達成される事象発生 70 分後までは原子炉建物原子炉棟内の放射性物質の保持機能に期待しないこととし (換気率無限)、非常用ガス処理系により設計負圧を達成した後は設計換気率 1 回/日相当を考慮する。
- (5) 非常用ガス処理系はフィルタを通して原子炉建物原子炉棟内の空気を外気に放出するためフィルタの放射性物質の除去性能に期待できるが、本評価では保守的に期待しないこととする (DF=1)。
- (6) 原子炉建物内での放射エネルギーの時間減衰は考慮せず、また、原子炉建物内での粒子状物質の除去効果は保守的に考慮しない。

2. 評価結果

原子炉建物から大気中へ漏えいする Cs-137 の評価結果を表 1 に示す。

原子炉建物から大気中への放射性物質 (Cs-137) の漏えい量は約 0.56TBq (7日間) であり、基準の 100TBq を下回っている。

なお、事象発生 7 日間以降の影響を確認するため、事象発生 30 日間、100 日間における環境への Cs-137 の放出量を確認している。

事象発生後 30 日間及び 100 日間での放出量においても 100TBq を下回る。

なお、事象発生 7 日以降の長期解析においては、事象発生約 81 日後^{*}に原子炉格納容器内水素燃焼防止の観点で格納容器フィルタベント系による原子炉格納容器除熱を実施し、事象発生 100 日まで格納容器フィルタベント系による原子炉格納容器除熱を継続しているが、原子炉格納容器の除熱機能、原子炉格納容器への窒素注入機能及び原子炉格納容器内の可燃性ガスの濃度制御系機能が確保できた場合には、格納容器ベントを停止する運用とする。

※ ベースケースでは、原子炉格納容器の圧力を高く評価するために原子炉格納容器からの漏えいを考慮していないが、約 96 日後に酸素濃度がドライ条件で 4.4vol% 及びウェット条件で 1.5vol% に到達するため格納容器ベントを実施する。

表1 原子炉建物から大気中への放射性物質(Cs-137)の漏えい量

(単位：TBq)

	漏えい量 (7日間)	漏えい量 (30日間)	漏えい量 (100日間)
高圧溶融物放出／ 格納容器雰囲気直 接加熱	約 0.56	約 0.57	約 0.58*

※ 格納容器フィルタベント系から大気中への放出量を含む (事象発生約 81 日後から 100 日まで格納容器ベント実施)

以上

表1 解析コードにおける重要現象の不確かさが運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータと与える影響（高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱）（1/2）

【MAAP】

分類	重要現象	解析モデル	不確かさ	運転員等操作時間と与える影響	評価項目となるパラメータと与える影響
炉心	崩壊熱 燃料棒内温度変化 燃料棒表面熱伝達 燃料棒覆管酸化	炉心モデル(原子炉出力及び崩壊熱) 炉心モデル(炉心熱水力モデル) 溶融炉心の挙動モデル(炉心ヒートアップ)	入力値に含まれる。	「解析条件を最悪条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータと与える影響」にて確認	「解析条件を最悪条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータと与える影響」にて確認
			TMI事故解析における炉心ヒートアップ時の水素発生、炉心領域での溶融進展状態について、TMI事故分析結果と良く一致することを確認した。	炉心ヒートアップに関するモデルは、TMI事故についてRA実験に関する再現性を確認している。	炉心ヒートアップの再現性及びCOR A実験についての再現性が確認されている。炉心ヒートアップの感度解析(ジルコニウム-水反応速度の係数)についての感度(シルコニウム-水反応速度の係数)についての感度あり、影響は小さいことが確認している。
			COR A実験解析における、燃料棒覆管、制御棒及びチャランネルボックスの温度変化について、測定データと良く一致することを確認した。	本評価事故シナリオでは、重大事故等対処設備を含むすべての原子炉への注水機能が喪失することを想定しており、最初に実施すべき操作は原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点の原子炉減圧操作であり、また、燃料棒覆管温度等を操作開始の起点としている。	本評価事故シナリオでは、重大事故等対処設備を含むすべての原子炉への注水機能が喪失することを想定しており、最初に実施すべき操作は原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点の原子炉減圧操作であり、また、燃料棒覆管温度等を操作開始の起点としている。
			炉心ヒートアップ速度の増加(燃料棒覆管酸化の促進)が早まることを想定し、仮想的な激しい振り幅ではあるが、ジルコニウム-水反応速度の係数を2倍とした感度解析により影響を確認した。	また、原子炉圧力容器下鏡温度が300Cに到達した時点で格納容器代替スプレイ系(可搬型)による原子炉格納容器下部への注水操作(原子炉圧力容器破損前の初期水張り)を実施することから、炉心下部プレナムへの溶融炉心移行の開始時間の不確かさは小さく、炉心下部プレナムへ溶融炉心が移行した際の原子炉圧力容器下鏡温度の上昇は急峻であることから、原子炉圧力容器下鏡温度を操作開始の起点としている格納容器代替スプレイ系(可搬型)による原子炉格納容器下部への注水操作(原子炉圧力容器破損前の初期水張り)に係る運転員等操作時間と与える影響は小さい。	また、原子炉圧力容器下鏡温度が300Cに到達した時点で格納容器代替スプレイ系(可搬型)による原子炉格納容器下部への注水操作(原子炉圧力容器破損前の初期水張り)を実施することから、炉心下部プレナムへの溶融炉心移行の開始時間の不確かさは小さく、炉心下部プレナムへ溶融炉心が移行した際の原子炉圧力容器下鏡温度の上昇は急峻であることから、原子炉圧力容器下鏡温度を操作開始の起点としている格納容器代替スプレイ系(可搬型)による原子炉格納容器下部への注水操作(原子炉圧力容器破損前の初期水張り)に係る運転員等操作時間と与える影響は小さい。
			・TQUV、大破断LOCAシナリオにも炉心溶融の開始時刻への影響は小さい。 ・下部プレナムへのリロケーション開始時刻は、ほぼ変化しない。	原子炉水位挙動について原子炉圧力容器内のモデルが精緻であるSAFERコードとの比較により、水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が保守的であることを確認している。このため、原子炉水位が燃料棒有効長の20%上の位置に到達する時間が早まる可能性があるが、数分程度の差異であることから運転員等操作時間と与える影響は小さい。	原子炉水位挙動について原子炉圧力容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERの評価結果との比較により水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であることを確認している。このため、原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達する時間が早まる可能性があるが、数分程度の差異であることから運転員等操作時間と与える影響は小さい。
沸騰・ボイド率変化	炉心モデル(炉心水位計算モデル)	TQXシナリオ及び中小破断LOCAシナリオに対して、MAAPコードとSAFERコードの比較を行い、以下の傾向を確認した。 ・MAAPコードではSAFERコードで考慮しているCCFLを取り扱っていないこと等から、水位変化に差異が生じたものの水位低下幅はMAAPコードの方が保守的であり、その後の注水操作による燃料棒有効長頂部までの水位回復時刻は両コードで同等である。	原子炉水位挙動について原子炉圧力容器内のモデルが精緻であるSAFERコードとの比較により、水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が保守的であることを確認している。このため、原子炉水位が燃料棒有効長の20%上の位置に到達する時間が早まる可能性があるが、数分程度の差異であることから運転員等操作時間と与える影響は小さい。	原子炉水位挙動について原子炉圧力容器内のモデルが精緻であるSAFERコードとの比較により、水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が保守的であることを確認している。このため、原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達する時間が早まる可能性があるが、数分程度の差異であることから運転員等操作時間と与える影響は小さい。	
気液分離(水位変化)・対向流	炉心モデル(炉心水位計算モデル)	逃がし安全弁からの流量は、設計に基づいて計算されていることから不確かさは小さい。このため、事故進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間と与える影響は小さい。	逃がし安全弁からの流量は、設計に基づいて計算されていることから不確かさは小さい。このため、事故進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間と与える影響は小さい。	逃がし安全弁からの流量は、設計に基づいて計算されていることから不確かさは小さい。このため、事故進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間と与える影響は小さい。	
原子炉压力容器	冷卻材放出(臨界流・差圧流)	原子炉压力容器モデル(破断流モデル)	逃がし安全弁からの流量は、設計に基づいて計算されていることから不確かさは小さい。このため、事故進展に与える影響は小さい。	逃がし安全弁からの流量は、設計に基づいて計算されていることから不確かさは小さい。このため、事故進展に与える影響は小さい。	逃がし安全弁からの流量は、設計に基づいて計算されていることから不確かさは小さい。このため、事故進展に与える影響は小さい。

表 1 解析コードにおける重要現象の不確かさが運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータと与える影響（高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱）（2／2）

【MAAP】

分類	重要現象	解析モデル	不確かさ	運転員等操作時間と与える影響	評価項目となるパラメータと与える影響
原子炉圧力容器(炉心損傷後)	リロケーション	溶融炉心の挙動モデル(リロケーション)	<ul style="list-style-type: none"> ・ TMI 事故解析における炉心領域での溶融進展状態について、TMI 事故分析結果と一致することを確認した。 ・ リロケーションの進展が早まることを想定し、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により影響を確認した。 ・ TQUV、大破断 LOCA シーンケケンスとともに、炉心溶融時刻、原子炉圧力容器破損時刻への影響が小さいことを確認した。 	<p>溶融炉心の挙動モデルは TMI 事故についての再現性を確認している。また、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により原子炉圧力容器破損時間と与える影響は小さいことを確認している。リロケーションの影響を受け可能性がある操作としては、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点で格納容器代替スプレイス(可搬型)による原子炉格納容器下部への注水操作(原子炉圧力容器破損前の初期水張り)があるが、炉心下部プレナムへの溶融炉心移行の開始時間の不確かさは小さく、炉心下部プレナム溶融炉心が移行した際の原子炉圧力容器下鏡温度の上昇は急峻であることから、原子炉圧力容器下鏡温度を操作開始の起点としている格納容器代替スプレイス系(可搬型)による原子炉格納容器下部への注水操作(原子炉圧力容器破損前の初期水張り)に係る運転員等操作時間と与える影響は小さい。</p>	<p>溶融炉心の挙動モデルは TMI 事故についての再現性を確認している。また、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により、炉心溶融時間と与える影響は小さいことを確認している。本評価項目となるパラメータと与える影響は小さい。</p>
	構造材と熱伝達		<p>原子炉圧力容器内 FCI (溶融炉心細粒化)</p>	<p>下部プレナムでの溶融炉心の挙動に関する感度解析により、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力と与える影響は小さいことを確認している。</p> <p>本評価項目となるパラメータと与える影響は小さい。</p>	<p>下部プレナムでの溶融炉心の挙動に関する感度解析により、原子炉圧力と与える影響は小さいことを確認している。本評価項目となるパラメータと与える影響は小さい。</p>
	原子炉圧力容器内 FCI (デブリ粒子熱伝達)	溶融炉心の挙動モデル(下部プレナムでの溶融炉心の挙動)	<p>原子炉圧力容器内 FCI (デブリ粒子熱伝達)</p>	<p>下部プレナムでの溶融炉心の挙動に関する感度解析により、原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力と与える影響は小さいことを確認している。</p> <p>本評価項目となるパラメータと与える影響は小さい。</p>	<p>下部プレナムでの溶融炉心の挙動に関する感度解析により、原子炉圧力と与える影響は小さいことを確認している。本評価項目となるパラメータと与える影響は小さい。</p>
	下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達		<p>溶融炉心の挙動モデルは TMI 事故についての再現性を確認している。また、炉心下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する感度解析により、原子炉圧力と与える影響は小さいことを確認している。また、炉心下部プレナムと溶融炉心の熱伝達に関する感度解析により、原子炉圧力と与える影響は小さいことを確認している。また、炉心下部プレナムと溶融炉心の熱伝達に関する感度解析により、原子炉圧力と与える影響は小さいことを確認している。</p>	<p>溶融炉心の挙動モデルは TMI 事故についての再現性を確認している。また、炉心下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達に関する感度解析により、原子炉圧力と与える影響は小さいことを確認している。また、炉心下部プレナムと溶融炉心の熱伝達に関する感度解析により、原子炉圧力と与える影響は小さいことを確認している。また、炉心下部プレナムと溶融炉心の熱伝達に関する感度解析により、原子炉圧力と与える影響は小さいことを確認している。</p>	
	原子炉圧力容器破損	溶融炉心の挙動モデル(原子炉圧力容器破損モデル)	<p>原子炉圧力容器破損に影響する項目として制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ(しきい値)をパラメータとした感度解析を行い、原子炉圧力容器破損時刻が約13分早まることを確認した。ただし、仮想的な厳しい条件に基づく解析結果であり、実機における解析への影響は十分小さいと判断される。</p>	<p>制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ(しきい値)をパラメータとした感度解析により、原子炉圧力容器破損時間と与える影響は小さいことを確認している。本評価項目となるパラメータと与える影響は小さい。</p>	<p>制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ(しきい値)をパラメータとした感度解析により、原子炉圧力容器破損時間と与える影響は小さいことを確認している。本評価項目となるパラメータと与える影響は小さい。</p>

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響 (高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱) (1 / 4)

項目	解析条件 (初期条件, 事故条件)		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	解析条件	最確条件			
原子炉熱出力	2, 436MW	2, 435MW以下 (実績値)	定格原子炉熱出力として設定	最確条件とした場合は、原子炉停止後の崩壊熱が緩和される。最確条件とした場合の運転員等操作時間への影響は、原子炉停止後の崩壊熱にて説明する。	最確条件とした場合には、原子炉停止後の崩壊熱が緩和される。最確条件とした場合の評価項目となるパラメータに与える影響は、原子炉停止後の崩壊熱にて説明する。
原子炉圧力	6. 93MPa[gage]	約6. 77～6. 79MPa[gage] (実績値)	定格原子炉圧力として設定	最確条件とした場合には、運転中の圧力変動により解析条件に対して変動を与え得るが、原子炉圧力は逃がし安全弁により制御されるため事象進展に及ぼす影響は小さく、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合には、運転中の圧力変動により解析条件に対して変動を与え得るが、原子炉圧力は逃がし安全弁により制御されるため事象進展に及ぼす影響は小さく、運転員等操作時間に与える影響はない。
原子炉水位	通常水位 (気水分離器下端から+83 cm)	通常水位 (気水分離器下端から約+83cm～約+85 cm)	通常運転時の原子炉水位として設定	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎの幅は事象発生後の水位低下量に対して非常に小さい。例えば、原子炉スクラム25分後までの崩壊熱による原子炉水位の低下量は、高圧が維持された状態でも通常運転水位から約4. 6mであるのに対してゆらぎによる水位変動幅は約2 cmであり非常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎの幅は事象発生後の水位低下量に対して非常に小さい。例えば、原子炉スクラム25分後までの崩壊熱による原子炉水位の低下量は、高圧が維持された状態でも通常運転水位から約4. 6mであるのに対してゆらぎによる水位変動幅は約2 cmであり非常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
炉心流量	35. 6×10 ³ t/h	定格流量の85～104% (実測値)	定格炉心流量として設定	炉心の反応度補償のため初期値は変化したが、事象発生後早期に原子炉はスクラムするため、初期炉心流量が事象進展に及ぼす影響は小さく、運転員等操作時間に与える影響は小さい。	炉心の反応度補償のため初期値は変化したが、事象発生後早期に原子炉はスクラムするため、初期炉心流量が事象進展に及ぼす影響は小さく、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
燃料	9×9燃料 (A型)	装荷炉心毎	9×9燃料 (A型)、9×9燃料 (B型) は熱水力的な特性は同等であり、その相違は燃料棒最大線出力密度の保守性に包絡されること、また、9×9燃料の方がMOX燃料よりも崩壊熱が大きく、MOX燃料の評価値は9×9燃料 (A型) の評価値に包絡されることを考慮し、代表的に9×9燃料 (A型) を設定	最確条件とした場合には、炉心に装荷される燃料は装荷炉心毎に異なることとなるが、装荷される燃料である9×9燃料 (A型)、9×9燃料 (B型)、MOX燃料について、9×9燃料 (A型)、9×9燃料 (B型) の燃料の組成は同等であり、また、MOX燃料の評価値は9×9燃料 (A型) の評価値に包絡され、事象進展に及ぼす影響は小さい。	最確条件とした場合には、炉心に装荷される燃料は装荷炉心毎に異なることとなるが、装荷される燃料である9×9燃料 (A型)、9×9燃料 (B型)、MOX燃料のうち、9×9燃料 (A型)、9×9燃料 (B型) の燃料の組成は同等であり、事象進展に及ぼす影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。MOX燃料の評価値は9×9燃料 (A型) の評価値に包絡され、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
原子炉停止後の崩壊熱	ANSI/ANS-5. 1-1979 (燃焼度33GWd/t)	ANSI/ANS-5. 1-1979 炉心平均燃焼度約30GWd/t (実績値)	サイクル末期の燃焼度のばらつきを考慮し、10%の保守性を考慮	最確条件とした場合は、解析条件で設定している崩壊熱よりも小さくなるため、発生する蒸気量は少なくなり、原子炉水位の低下は緩和されるが、操作手順 (原子炉水位に応じた急速減圧を実施すること) に変わりはなく、運転員等操作時間に与える影響はない。また、原子炉圧力容器破損に至るまでの事象進展は緩和されるが、操作手順 (原子炉圧力容器下鏡温度に応じて原子炉格納容器下部への注水操作 (原子炉圧力容器破損前の初期水張り) を実施すること) に変わりはなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は、解析条件で設定している崩壊熱よりも小さくなるため、発生する蒸気量は少なくなくなり、原子炉水位の低下は緩和され、原子炉急速減圧操作の開始が遅くなるが、原子炉圧力容器破損は遅くなくなり、原子炉急速減圧操作開始後に原子炉圧力は速やかに低下することから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータを与える影響（高压熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱）（2/4）

項目	解析条件（初期条件、事故条件）		条件設定の考え方	運転員等操作時間を与える影響	評価項目となるパラメータを与える影響
	解析条件	最確条件			
格納容器容積（ドライウエル）	7,900m ³	7,900m ³ （設計値）	ドライウエル内体種の設計値（内部機器及び構造物の体積を除いた値）を設定		
格納容器容積（サブレーション・チェンバ）	空間部：4,700m ³ 液相部：2,800m ³	空間部：4,700m ³ 液相部：2,800m ³ （設計値）	サブレーション・チェンバ内体種の設計値（内部機器及び構造物の体積を除いた値）を設定		
真空破壊装置	3.43kPa（ドライウエル・サブレーション・チェンバ間差圧）	3.43kPa（ドライウエル・サブレーション・チェンバ間差圧）（設計値）	真空破壊装置の設定値		
サブレーション・プール水位	3.61m（NWL）	約3.59m～約3.63m （実測値）	通常運転時のサブレーション・プール水位として設定	本シナリオは原子炉圧力容器内挙動を対象としているため、原子炉格納容器側の条件による直接的な影響はない。	本シナリオは原子炉圧力容器内挙動を対象としているため、原子炉格納容器側の条件による直接的な影響はない。
サブレーション・プール水温度	35℃	約19℃～約35℃ （実測値）	通常運転時のサブレーション・プール水温度の上限値として設定		
格納容器圧力	5 kPa [gage]	約5 kPa [gage]～約7 kPa [gage] （実測値）	通常運転時の格納容器圧力として設定		
格納容器温度	57℃	約45℃～約54℃程度 （実測値）	通常運転時の格納容器温度として設定		
外部水源の温度	35℃	31℃以下 （実測値）	屋外貯水槽の水温度として実測値及び夏季の外気温度を踏まえて設定	最確条件とした場合は、解析条件で設定している水温度よりも低くなる可能性があり、格納容器圧力及び温度上昇に対する格納容器スプレイによる抑制効果は大きくなるが、運転員等操作時間を与える影響は小さい。	最確条件とした場合は、解析条件で設定している水温度よりも低くなる可能性があり、格納容器圧力及び温度上昇に対する格納容器スプレイによる抑制効果は大きくなるが、運転員等操作時間を与える影響は小さい。
外部水源の容量	7,000m ³	7,000m ³ 以上 （合計貯水量）	輪谷貯水槽の水量を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合には、解析条件よりも水源容量の余裕が大きくなるため、水源が枯渇することはない。	—
燃料の容量	1,180m ³	1,180m ³ 以上 （合計貯水量）	発電所構内に貯蔵している合計容量を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合には、解析条件よりも燃料容量の余裕が大きくなるため、燃料が枯渇することはない。	—

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響 (高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱) (3 / 4)

項目	解析条件 (初期条件、事故条件) の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	解析条件	最確条件			
起回事象	給水流量の全喪失	-	原子炉水位の低下の観点で 厳しい事象を設定	起回事象として、原子炉水位の低下の観点で厳しい事象であるLOCA等の原子炉冷却材圧力パウンダリ喪失を仮定した場合は減圧操作が不要となる。	起回事象として、原子炉水位の低下の観点で厳しい事象であるLOCA等の原子炉冷却材圧力パウンダリ喪失を仮定した場合は減圧操作が不要となる。
安全機能の喪失に対する仮定	高圧注水機能喪失 低圧注水機能喪失 重大事故等対処設備による 原子炉注水機能の喪失 全交流動力電源喪失	-	高圧注水機能として原子炉 隔離時冷却系及び高圧炉心 スプレイ系の機能喪失を、低 圧注水機能として残留熱除 去系 (低圧注水モード) 及び 低圧炉心スプレイ系の機能 喪失を設定するとともに、重 大事故等対処設備による原 子炉注水機能の喪失を設定 また、すべての非常用デー ゼル機等の機能喪失を設定	-	-
外部電源	外部電源なし	-	全交流動力電源喪失を想定 するため、外部電源なしを設 定	-	-
高温ガスによる 配管等のクレー ブ破損や漏えい 等	考慮しない	発生する可能性は否定できない	原子炉圧力を厳しく見積も るものとして設定	東京電力福島第一原子炉発電所の事故に対する炉心・格納容器の推定の評価において、炉内核計装配管のドライチューブ、逃がし安全弁のフランジガスケット部等からの気相漏えいの可能性について言及されている。本仮定を本シナリオに対して考慮した場合、原子炉圧力を減圧させることとなるため、減圧の規模によっては原子炉減圧操作を回避する可能性もある。放出/格納容器雰囲気直接加熱を回避する可能性がある。	東京電力福島第一原子炉発電所の事故に対する炉心・格納容器の推定の評価において、炉内核計装配管のドライチューブ、逃がし安全弁のフランジガスケット部等からの気相漏えいの可能性について言及されている。本仮定を本シナリオに対して考慮した場合、原子炉圧力を減圧させることとなるため、減圧の規模によっては原子炉減圧操作を回避する可能性もある。放出/格納容器雰囲気直接加熱を回避する可能性がある。

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータとなるパラメータによる影響（高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱）（4 / 4）

項目	解析条件（初期条件、事故条件）の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間による影響	評価項目となるパラメータによる影響
	解析条件	最確条件			
原子炉スクラム信号	事象発生と同時に原子炉スクラム	事象発生と同時に原子炉スクラム	事象発生と同時に原子炉スクラムとするものとして設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。
主蒸気隔離弁	事象発生と同時に閉止	原子炉水位低（レベル2）	主蒸気が原子炉格納容器内に保持される厳しい条件として設定	最確条件とした場合には、逃がし安全弁を通じて原子炉格納容器内に放出される蒸気量が減少することから、格納容器圧力及び温度の上昇が遅くなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。	最確条件とした場合には、逃がし安全弁を通じて原子炉格納容器内に放出される蒸気量が減少することから、格納容器圧力及び温度の上昇が遅くなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
再循環ポンプ	事象発生と同時に停止	事象発生と同時に停止	全交流動力電源喪失によるポンプ停止を踏まえて設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。
逃がし安全弁	逃がし弁機能 7.58~7.79MPa [Gage] 367~377t/h/個	逃がし弁機能 7.58~7.79MPa [Gage] 367~377t/h/個	逃がし安全弁の逃がし弁機能の設計値として設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。
格納容器代替スプレイ系（可搬型）	逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の2個を開閉することによる原子炉急速減圧	逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の2個を開閉することによる原子炉急速減圧	逃がし安全弁の設計値に基づき蒸気流量及び原子炉圧力の関係から設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。
格納容器代替スプレイ系（可搬型）	原子炉圧力容器破損前：120m ³ /hにて格納容器内にスプレイ	原子炉圧力容器破損前：120m ³ /hにて格納容器内にスプレイ	格納容器温度及び圧力抑制に必要なスプレイ流量を考慮して設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。
残留熱代替冷却系	原子炉圧力容器破損後：崩壊熱相当に余裕を見た注水量にて原子炉格納容器下部に注水 120m ³ /hにて格納容器内にスプレイ	原子炉圧力容器破損後：崩壊熱相当に余裕を見た注水量にて原子炉格納容器下部に注水 120m ³ /hにて格納容器内にスプレイ	残留熱代替冷却系の設計値として設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。
原子炉補機代替冷却系	残留熱代替冷却系からの原子炉補機代替冷却系への伝熱容量：約6MW（サブレーション・ブール水温度：100℃、海水温度30℃において）	残留熱代替冷却系からの原子炉補機代替冷却系への伝熱容量：約6MW（サブレーション・ブール水温度：100℃、海水温度30℃において）	原子炉補機代替冷却系の設計値（残留熱代替冷却系による格納容器スプレイ流量 120m ³ /h とした場合）として設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。
可搬式窒素供給装置	総注入流量：100m ³ /h [normal] ・窒素：99.9m ³ /h [normal] ・酸素：0.1m ³ /h [normal] ガス温度：35℃	総注入流量：100m ³ /h [normal] ・窒素：99.9m ³ /h [normal] ・酸素：0.1m ³ /h [normal] ガス温度：35℃	総注入量は原子炉格納容器内の酸素濃度の上昇抑制に必要な流量として設定 酸素注入流量は純度99.9%を考慮して残りすべてを酸素として設定 ガス温度は気象条件を考慮して設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。
コリウムシールド	材料：ジルコニア耐熱材 侵食開始温度：2,100℃	材料：ジルコニア耐熱材 侵食開始温度：2,100℃	材料は、溶融炉心のドライウェルサンクへの流入を防止する観点から、ジルコニア耐熱材を設定 侵食開始温度は、ジルコニア耐熱材の侵食試験結果に基づき設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展による影響はない。

表3 運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕（高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱）（1/5）

項目	解析条件（操作条件）の不確かさ		操作の不確かさ要因	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	解析上の操作開始時間	解析上の操作開始時間の考え方					
原子炉急速減圧操作 操作条件	原子炉水位が燃料棒有効長燃料棒より燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点（事象発生から約1.0時間後）	炉心損傷後の酸化反応の影響緩和を考慮し設定	<p>【認知】 原子炉水位が燃料棒有効長底部より燃料棒有効長の20%上の位置に到達するまでは事象発生から約1.0時間の時間余裕があり、原子炉水位は事故時の重要監視パラメータとして継続監視しているため、認知に大幅な遅れが生じることは考えにくい。よって、認知遅れが操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【要員配置】 中央制御室での操作のみであり、運転員は中央制御室に常駐していることから、操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【移動】 中央制御室内での操作のみであり、操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【操作所要時間】 逃がし安全弁（自動減圧機能付き）による原子炉減圧操作は、中央制御室の制御盤での簡単な操作であるため、操作所要時間が減圧開始に与える影響はなし。</p> <p>【他の並列操作有無】 逃がし安全弁（自動減圧機能付き）手動開放操作時には、当該操作に対応する運転員に他の並列操作はななく、操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【操作の確実さ】 中央制御室内の制御盤での簡易な操作のため、誤操作は起こりにくく、そのため誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。</p>	原子炉水位が燃料棒有効長底部より燃料棒有効長の20%上の位置に到達するまでは事象発生から約1.0時間の時間余裕があり、また、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）による原子炉減圧操作は原子炉水位の低下傾向を監視しながらあらかじめ準備が可能であり、実態の操作開始時間は解析上の操作と同等であるため、操作開始時間に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響も小さい。 <p>当該操作は、解析コード及び解析条件（操作条件を除く）の不確かさにより操作開始時間が遅れる可能性があるが、中央制御室で行う操作であり、他の操作との重複もないことから、他の作業に与える影響はない。</p>	実態の操作開始時間と解析上の設定とほぼ同等であることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。	原子炉急速減圧操作については、原子炉圧力容器破損までに完了する必要があるが、原子炉圧力容器破損までの時間は事象発生から約5.4時間あり、準備時間が確保できることから、時間余裕がある。	訓練実績等により、原子炉水位が燃料棒有効長底部より燃料棒有効長の20%上の位置に到達後、速やかに逃がし安全弁（自動減圧機能付き）による減圧操作を開始、想定で意図している運転操作が実施可能なことを確認した。

表3 運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕（高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱）（2/5）

項目	解析条件（操作条件）の不確かさ		運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	解析上の操作開始時間	条件設定の考え方				
格納容器代替スプレイス系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作	原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達したことを確認して開始し、ペデスタル水位が2.4mとなる注水量（225m ³ ）が注水されたことを停止する	炉心損傷後の原子炉圧力容器破損による溶融炉心・コンクリート相互作用の影響緩和を考慮し設定	原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達するまでには事象発生から約3.1時間の時間余裕がある。また、格納容器代替スプレイス系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作は原子炉圧力容器下鏡温度を監視しながら溶融炉心の炉心下部ブレンナムへの移行を判断し、水張り操作を実施するため、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であり、操作開始時間に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響も小さい。当該操作は、解析コード及び解析条件（操作条件を除く）の不確かさにより操作開始時間が遅れる可能性があるが、当該操作に対応する運転員、緊急時対策要員（現場）に他の並列操作はなく、また、現場操作における評価上の所要時間には余裕を見込んで算定していることから、他の操作に与える影響はない。	原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達するまでには事象発生から約3.1時間の時間余裕がある。また、格納容器代替スプレイス系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作は原子炉圧力容器下鏡温度を監視しながら溶融炉心の炉心下部ブレンナムへの移行を判断し、水張り操作を実施するため、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であり、操作開始時間に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響も小さい。当該操作は、解析コード及び解析条件（操作条件を除く）の不確かさにより操作開始時間が遅れる可能性があるが、当該操作に対応する運転員、緊急時対策要員（現場）に他の並列操作はなく、また、現場操作における評価上の所要時間には余裕を見込んで算定していることから、他の操作に与える影響はない。	格納容器代替スプレイス系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）については、原子炉圧力容器破損前の格納容器冷却を兼ねる操作であり、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達後、速やかに実態の操作が望ましいが、原子炉圧力容器破損前は、本操作が実施できないと仮定しても、格納容器圧力及び温度が原子炉格納容器の限界圧力及び限界温度に到達することはなく、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）による原子炉減圧機能維持も可能である。	解析上は作業成立性を踏まえ事象発生から約3.1時間後としており、このうち、格納容器代替スプレイス系（可搬型）による原子炉圧力容器破損前の初期水張りの系統構成は、所要時間2時間10分想定のとおり、訓練実績では約1時間41分である。想定で意図している作業が実施可能なことを確認した。
操作条件			【認知】 中央制御室にて原子炉スクラムを確認した場合に緊急時対策要員（現場）を招集することとしており、高圧・低圧注水機能喪失を判断した場合には直ちに可搬型による注水準備操作に着手することとしている。この認知に係る時間として10分間を想定している。そのため、認知遅れ等による操作時間に与える影響はない。 原子炉格納容器下部への注水操作は、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達したことを確認して開始するが、損傷炉心への注水による冷却性を確認するため、原子炉圧力容器下鏡温度は継続監視しており、認知に大幅な遅れが生じることは考えにくい。よって、認知遅れにより操作開始時間に与える影響はない。 【要員配置】 格納容器代替スプレイス系（可搬型）による原子炉圧力容器破損前の初期水張り、中央制御室にて弁操作を行う運転員と、現場にて可搬型による注水のためのホース敷設等の注水準備操作を行う緊急時対策要員（現場）が各々配置されている。注水準備操作は現場にて緊急時対策要員（現場）が実施することとなるが、本操作を行う要員は、操作が終わるまで他の操作は行わない。このため、要員配置が操作開始時期に与える影響はなし。 【移動・操作所要時間】 現場での格納容器代替スプレイス系（可搬型）による注水準備操作は、移動時間を含め、事象発生から2時間10分で行うことを想定している。この後、原子炉圧力容器下鏡温度300℃到達を確認し、中央制御室で常設代替交流電源設備により確保した電源により弁操作を行うことにより注水を開始することとなる。以上より、移動・操作所要時間が操作開始時間に与える影響はなし。 【他の並列操作有無】 現場にて緊急時対策要員（現場）が格納容器代替スプレイス系（可搬型）による注水のためのホース敷設等の注水準備操作を行ったのち、中央制御室にて運転員が弁操作を行うことにより注水は開始される。当該操作に対応する運転員、緊急時対策要員（現場）に他の並列操作はなく、操作開始時間に与える影響はなし。 【操作の確実さ】 中央制御室内における操作は、操作盤での簡易な操作のため、誤操作は起こりにくく、そのため誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。また緊急時対策要員（現場）の信頼性向上や要員の安全のため2人1組で実施することとしており、誤操作は起こりにくく、誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。			

表3 運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕（高圧溶融物放出／格納容器雰囲気気直接加熱）（3/5）

項目	解析条件（操作条件）の不確かさ		操作の不確かさ要因	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	解析上の操作開始時間	条件設定の考え方					
ペデスタル代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉破損後の注水） 操作条件	解析上の操作開始時間 原子炉圧力容器の破損を確認した場合（事象発生から約5.4時間後）	原子炉破損後の原子炉圧力容器の破損による溶融炉心・コンクリート相互作用の影響を考慮し設定	操作の不確かさ要因 【認知】 溶融炉心が原子炉格納容器下部に落下した後、原子炉格納容器下部に崩壊熱に余裕を見た流量の注水を行うが、溶融炉心の落下はベデスタル温度、格納容器圧力等の監視により認知可能である。これらのパラメータは原子炉圧力容器破損判断のため継続監視しており、認知に大幅な遅れが生じることは考えにくい。よって、認知遅れにより操作開始時間に与える影響はなし。 【要員配置】 溶融炉心落下前の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への初期水張りに引き続いて行う操作であり、要員配置が操作開始時間に与える影響はなし。 【移動・操作所要時間】 溶融炉心落下前の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への初期水張りに引き続いて行う操作であり、移動・操作所要時間が操作開始時間に与える影響はなし。 【他の並列作業有無】 溶融炉心落下前の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への初期水張りに引き続いて行う操作であり、当該操作を行う運転員、緊急時対策要員（現場）に他の並列操作はなく、操作開始時間に与える影響はなし。 【操作の確実さ】 緊急時対策要員（現場）の現場操作は、操作の信頼性の向上や要員の安全のため2人1組で実施することとしており、誤操作は起こりにくく、誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。また、中央制御室内での操作は操作盤での簡易な操作であるため、誤操作は起こりにくく、そのため誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。	原子炉圧力容器破損までに事象発生から約5.4時間の時間余裕があり、また、溶融炉心落下後に原子炉格納容器下部注水が行われなかった場合でも、溶融炉心落下前に張られた水が蒸発し、溶融炉心が露出するまでには約1.4時間の時間余裕がある。また、溶融炉心落下後の原子炉格納容器下部への注水操作はベデスタル温度、格納容器圧力等の傾向を監視しながら原子炉圧力容器破損を判断して実施することとしており、実態の操作開始時間は解析上と同等であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。	原子炉圧力容器が破損するまでの時間は事象発生から約5.4時間あり、また、溶融炉心落下後に、原子炉格納容器下部注水が行われなかった場合でも、溶融炉心落下前に張られた水が溶融炉心の崩壊熱及びジルコニウム-水反応による発熱により蒸発し、溶融炉心が露出するまでには約1.4時間の時間余裕がある。	訓練実績等により、条件成立を前提として約6分間でベデスタル代替注水系（可搬型）による注水操作を開始可能である見込みを得た。想定で意図している運転操作が実施可能なことを確認した。	

表3 運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕（高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱）（4/5）

項目	解析条件(操作条件)の不確かさ		操作の不確かさ要因	運転員等操作時間に与える影響	評価項目とパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	解析上の操作開始時間	条件設定の考え方					
残留熱除去による溶融炉冷却及び原子炉格納容器熱操作 操作条件	解析上の操作開始時間 事象発生から10時間後	原子炉補機冷却系準備時間を考慮し設定	<p>【認知】</p> <p>中央制御室にて外部電源受電及び非常用ディーゼル発電機等の非常用高圧系統の電源回復ができない場合、早期の電源回復不可と判断し、これにより原子炉補機冷却系及び残留熱代替除去系の準備を開始する手順としているため、認知遅れにより操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【要員配置】</p> <p>残留熱代替除去系及び原子炉補機冷却系による格納容器除熱のために、中央制御室での操作及び現場にて弁操作を行う運転員と、大型送水ポンプ車による移動式代替熱交換設備への海水補給、移動式代替熱交換設備への冷却水供給のホース敷設、接続等を行う緊急時対策要員（現場）が配置されている。ホース敷設、接続等は現場にて緊急時対策要員（現場）が実施することとなるが、本操作を行う要員は、操作が終わるまで他の操作は行わない。このため、要員配置が操作開始時期に与える影響はなし。</p> <p>【移動・操作所要時間】</p> <p>残留熱代替除去系及び原子炉補機冷却系による格納容器除熱開始では、常設代替交流電源設備による電源確保、原子炉補機冷却系連動のための大型送水ポンプ車による移動式代替熱交換設備への海水補給、移動式代替熱交換設備による冷却水供給を行うことにより、電源及び冷却水を確保したうえで残留熱代替除去系の起動操作を行う。</p> <p>[常設代替交流電源設備による電源確保]</p> <p>中央制御室及び現場にて運転員が行う操作であり、常設代替交流電源設備の起動、受電操作に10分、非常用高圧母線への受電操作に1時間10分（準備1時間、操作10分）の合計1時間20分で実施すると設定した。</p> <p>[原子炉補機冷却系準備操作]</p> <p>原子炉補機冷却系を通じて崩壊熱の除去、補機冷却のための冷却水を供給するための操作である。移動式代替熱交換設備の冷却水として大型送水ポンプ車にて海水を供給するためのホース敷設、接続、崩壊熱の除去、補機冷却のための冷却水供給のためのホース敷設、接続等を現場にて緊急時対策要員（現場）が行うものであり、本操作は7時間20分（移動含む）で実施すると設定し、冷却ポンプのためのケーブル接続、受電に1時間40分（移動含む）を設定した。また、現場（原子炉建物内）にて運転員が弁操作を1時間40分（移動含む）にて行うことを設定した。緊急時対策要員（現場）によるホース敷設、ケーブル接続、運転員による系統構成は並列操作であるが、独立して行える操作であることから並列操作を行うことにより操作時間が長くなることはないと設定した。</p> <p>移動式代替熱交換設備による冷却水供給の準備を行うと設定した。</p> <p>常設代替交流電源設備による電源確保、原子炉補機冷却系準備操作は独立して行える操作であることから並列操作を行うことにより操作時間が長くなることはないと設定し、10時間後から中央制御室にて運転員が10分程度で残留熱代替除去系を起動し、10時間後から残留熱代替除去系により格納容器除熱を開始するものとして設定した。</p> <p>【他の並列操作】</p> <p>上述のとおり、残留熱代替除去系の起動操作までに行う操作は並列操作となるが、それを加味して操作所要時間を算定しているため、操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【操作の確かさ】</p> <p>緊急時対策要員（現場）、運転員の現場操作は、操作の信頼性の向上や要員の安全のため2人1組で実施することとし、誤操作は起こりにくく、誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。また、中央制御室内での操作は操作盤での簡易な操作であるため、誤操作は起こりにくく、そのため誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。</p>	<p>解析上の操作開始時間として事後発生から10時間後を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、実際の操作開始時間は解析上の想定と同等であり、操作開始時間に与える影響は小さい。また、本操作の操作開始時間は、原子炉補機冷却系準備期間を考慮して設定したものであり、原子炉補機冷却系（可搬型）の操作開始時間が早まれば、本操作の操作開始時間も早まる可能性があるが、残留熱代替除去系の運転開始時間も早まることから、運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。</p>	<p>原子炉補機冷却系準備期間が確保できなくなるため、時間余裕がある。なお、本操作は大幅に遅れるような事態になつた場合でも、格納容器の限界圧力に到達しないよう継続してペデスタル代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部注水、格納容器代替スプレイ系（可搬型）による格納容器スプレイを行うこととなる。</p>	<p>原子炉補機冷却系準備期間が確保できなくなるため、時間余裕がある。また、本操作は大幅に遅れるような事態になつた場合でも、格納容器の限界圧力に到達しないよう継続してペデスタル代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部注水、格納容器代替スプレイ系（可搬型）による格納容器スプレイを行うこととなる。</p>	<p>訓練実績等</p> <p>解析上は作業成立性を踏まえ事象発生から10時間後としており、このうち、原子炉補機冷却系準備操作（資機材配置及びホース施設、起動及び系統水張り）は、所要時間7時間20分想定であるところ、訓練実績では約5時間41分、また、残留熱代替除去系の準備操作（中央制御室系統構成）は、所要時間30分想定のところ、訓練実績では約9分である。想定で意図している作業が実施可能なことを確認した。</p>

表3 運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕（高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱）（5/5）

項目	解析条件（操作条件）の不確かさ		運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	解析上の操作開始時間	条件設定の考え方				
操作条件	可搬式窒素供給装置による格納容器内窒素供給操作	<p>【認知】 原子炉補機代替冷却系の準備が完了後準備を開始する手順としているため、認知遅れにより操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【要員配置】 可搬式窒素供給装置による格納容器内窒素供給のために、現場にて可搬式窒素供給装置の準備、起動を行う緊急時対策要員（現場）が配置されている。現場にて緊急時対策要員（現場）が実施することとなるが、本操作を行う要員は、操作が終わるまで他の操作は行わない。このため、要員配置が操作開始時期に与える影響はなし。</p> <p>【移動・操作所要時間】 現場での緊急時対策要員（現場）によるホース敷設等の格納容器内窒素供給準備操作は移動時間を含め2時間で行うことにより、事象発生から12時間まで窒素供給準備を完了することを想定している。以上より、移動・操作所要時間が操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【他の並列操作】 現場にて緊急時対策要員（現場）が可搬式窒素供給装置による格納容器内窒素供給のための準備操作を行ったのち、現場にて緊急時対策要員（現場）が弁操作を行うことにより窒素供給は開始される。当該操作を行う緊急時対策要員（現場）に窒素供給開始時に他の並列操作はなく、操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【操作の確実さ】 緊急時対策要員（現場）の現場操作は、操作の信頼性の向上や要員の安全のため2人1組で実施することとしており、誤操作は起こりにくく、誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。</p>	<p>解析上の操作開始時間から12時間後まで設定している。運転員等操作時間に与える影響と時間ほぼ同等であり、操作開始時間に与える影響は小さい。また、本操作の操作開始時間には、原子炉補機代替冷却系の準備期間を考慮して設定したものであり、原子炉補機代替冷却系の操作開始時間が早まれば、本操作の操作開始時間も早まる可能性があり、残留熱代替除去系の運転開始時間も早まることから、運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。</p>	<p>可搬式窒素供給装置による格納容器内窒素供給開始までの時間は、事象発生から12時間あり、準備時間が確保できることから、本操作には時間余裕がある。なお、本操作が大幅に遅れるような事態になった場合でも、酸素濃度が可燃限界に到達しないよう監視し、酸素ベント基準に到達した場合には格納容器ベントにより水素ガス及び酸素ガスの排出を行うこととなる。</p>	<p>解析上は作業成立性を踏まえ、事象発生から約3.1時間後以降としており、このうち、大量送水車への給油作業は、所要時間2時間30分想定のところ訓練実績等では約2時間12分である。想定で意図している作業が実施可能であることを確認した。</p>	
	送水車への燃料補給	<p>事象発生から約3.1時間後以降</p>	<p>格納容器代替スプレイス系（可搬型）及びベデスタル代替注水系（可搬型）の大量送水車の燃料枯渇までに実施すれば良い作業であり、格納容器代替スプレイス系（可搬型）による原子炉格納容器下部注水操作は、事象発生から約3.1時間後から実施するものであることから、十分な時間余裕がある。</p>	<p>送水車への燃料補給は、解析条件で想定している操作の成立や継続に必要な作業。作業成立性を踏まえ設定</p>	<p>—</p>	<p>—</p>

7日間における水源の対応について（高压溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱）

○水源

輪谷貯水槽（西1／西2）※：約7,000m³（約3,500m³×2）

※設置許可基準規則56条【解釈】1b)項を満足するための代替淡水源（措置）

○水使用パターン

①格納容器代替スプレイス系（可搬型）によるペデスタル注水

原子炉圧力容器下鏡部温度が300℃に到達した時点で開始し、ペデスタル水位2.4m（注水量225m³）到達後停止

②ペデスタル代替注水系（可搬型）によるペデスタル注水

原子炉圧力容器破損以降、崩壊熱相当に余裕を見た量で注水

○時間評価

事象発生12時間までは輪谷貯水槽（西1／西2）を水源としてペデスタル注水を実施するため、輪谷貯水槽（西1／西2）水位は減少する。事象発生後約10時間後から、サブレッション・チェンバのプール水を水源とした残留熱代替除去系の運転を実施する。

○水源評価結果

時間評価の結果から輪谷貯水槽（西1／西2）が枯渇することはない。また、7日間の対応を考慮すると、約600m³必要となり、十分に水量を確保しているため対応可能である。

$$225\text{m}^3 + (55\text{m}^3/\text{h} \times 4.6\text{h}) + (35\text{m}^3/\text{h} \times 2\text{h}) \div 600\text{m}^3$$

7日間における燃料の対応について
 (高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱)

保守的にすべての設備が、事象発生直後から7日間燃料を消費するものとして評価する。

時系列	合計	判定
大量送水車 1台起動 $0.0677\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 11.3736\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 73m^3	非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等の容量は約 730m^3 であり、7日間対応可能
大型送水ポンプ車 1台起動 $0.31\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 52.08\text{m}^3$		
可搬式窒素供給装置 1台起動 $0.0469\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 7.8792\text{m}^3$		
ガスタービン発電機 1台起動 (燃料消費率は保守的に最大負荷(定格出力運転)時を想定) $2.09\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 351.12\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 352m^3	ガスタービン発電機用軽油タンクの容量は約 450m^3 であり、7日間対応可能
緊急時対策所用発電機 1台 (燃料消費率は保守的に最大負荷(定格出力運転)時を想定) $0.0469\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 7.8792\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 8m^3	緊急時対策所用燃料地下タンクの容量は約 45m^3 であり、7日間対応可能

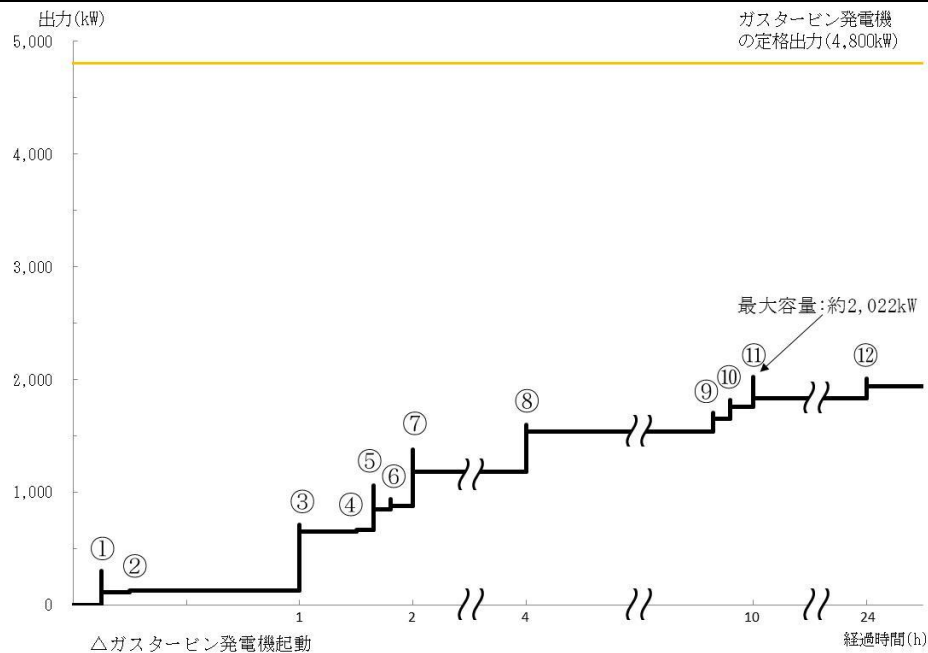
常設代替交流電源設備の負荷（高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱）

主要負荷リスト

電源設備：ガスタービン発電機

定格出力：4,800kW

起動順序	主要機器	負荷容量 (kW)	負荷起動時の最大負荷容量 (kW)	定常時の最大負荷容量 (kW)
①	ガスタービン発電機付帯設備	約 111	約 300	約 111
②	代替所内電気設備負荷（自動投入負荷）	約 18	約 129	約 129
③	充電器，非常用照明，非常用ガス処理系，モニタリング・ポスト他（D系高圧母線自動投入負荷）	約 518	約 713	約 647
④	格納容器水素濃度（S A），格納容器酸素濃度（S A）監視設備	約 20	約 667	約 667
⑤	B－中央制御室送風機	約 180	約 1,062	約 847
⑥	B－中央制御室非常用再循環送風機	約 30	約 939	約 877
⑦	B－中央制御室冷凍機	約 300	約 1,379	約 1,177
⑧	充電器，非常用照明，非常用ガス処理系他（C系高圧母線自動投入負荷）	約 359	約 1,598	約 1,536
⑨	A－淡水ポンプ（移動式代替熱交換設備）	約 110	約 1,706	約 1,646
⑩	B－淡水ポンプ（移動式代替熱交換設備）	約 110	約 1,816	約 1,756
⑪	残留熱代替除去ポンプ	約 75	約 2,022	約 1,831
⑫	B－燃料プール冷却水ポンプ	約 110	約 2,006	約 1,941



常設代替交流電源設備の負荷積算イメージ

3.3 原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用

3.3.1 格納容器破損モードの特徴、格納容器破損防止対策

(1) 格納容器破損モード内のプラント損傷状態

格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」に至る可能性のあるプラント損傷状態は、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、TQUV、TQUX及びLOCAである。

(2) 格納容器破損モードの特徴及び格納容器破損防止対策の基本的考え方

格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」では、発電用原子炉の運転中に運転時の異常な過渡変化、原子炉冷却材喪失事故（LOCA）が発生するとともに、非常用炉心冷却系等の安全機能の喪失が重畳する。このため、緩和措置がとられない場合には、溶融炉心と原子炉圧力容器外の水が接触して一時的な格納容器圧力の急上昇が生じ、このときに発生するエネルギーが大きい場合に構造物が破壊され原子炉格納容器の破損に至る。

原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用による水蒸気爆発事象については、これまでに実ウランを用いて種々の実験が行われている。水蒸気爆発は、溶融炉心が水中に落下し、細粒化して分散する際に蒸気膜を形成し、そこに何らかの外乱が加わることによって蒸気膜が崩壊した際に、瞬時の圧力伝播を生じ、大きなエネルギーを発生させる事象である。細粒化した溶融炉心を覆う蒸気膜には安定性があり、何らかの外乱がなければ蒸気膜の崩壊は起こりにくいという知見が実験等により得られている。原子炉格納容器下部に張られた水は準静的であり、外乱が加わる要素は考えにくい。このことから、実機において水蒸気爆発に至る可能性は極めて小さいと考えられる。

（添付資料3.3.1、3.3.2）

また、水蒸気爆発とは別に、溶融炉心から原子炉冷却材への伝熱によって水蒸気が発生することに伴う急激な格納容器圧力の上昇（以下「圧力スパイク」という。）が発生する。

上記のとおり、現実的には水蒸気爆発が発生する可能性は極めて小さいと考えられることから、本評価では、圧力スパイクについてその影響を評価する。

したがって、本格納容器破損モードでは、原子炉格納容器を冷却及び除熱し、溶融炉心から原子炉格納容器下部の水への伝熱による、水蒸気発生に伴う格納容器圧力の上昇を抑制することにより、原子炉格納容器の破損を防止する。

また、溶融炉心の落下後は、ペデスタル代替注水系（可搬型）によって溶融炉心の冷却を実施する。その後、残留熱代替除去系又は格納容器フィルタベント系によって原子炉格納容器の圧力及び温度を低下させる。

さらに、原子炉格納容器内における水素燃焼を防止するため、原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度が可燃領域に至るまでに、原子炉格納容器内へ窒素を注入することによって、原子炉格納容器の破損を防止する。

なお、本格納容器破損モードの有効性評価を実施する上では、重大事故等対処設備による原子炉注水機能についても使用できないものと仮定し、原子炉圧力容器破損に至るものとする。

(3) 格納容器破損防止対策

格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」で想定される事故シーケンスでは、原子炉格納容器下部への溶融炉心落下を想定す

る。この状況では、原子炉格納容器下部における「熔融炉心・コンクリート相互作用」を緩和する観点から、熔融炉心落下前に格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への水張りを行うことから、熔融炉心落下時には原子炉格納容器下部に水が張られた状態を想定する。なお、この水張り深さは、「原子炉圧力容器外の熔融燃料－冷却材相互作用」に伴う圧カスパイクの発生を仮定した場合の影響を小さく抑えつつ、「熔融炉心・コンクリート相互作用」の緩和効果に期待できる深さを考慮して2.4mとしている。

また、その後の格納容器圧力及び温度の上昇を抑制する観点から、残留熱代替除去系による原子炉格納容器除熱手段又は格納容器フィルタベント系による原子炉格納容器除熱手段を整備する。なお、これらの原子炉圧力容器破損以降の格納容器過圧・過温に対応する手順及び重大事故等対策は「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」と同じである。

本格納容器破損モードに至るまでの事象進展への対応、本格納容器破損モードによる原子炉格納容器の破損防止及び原子炉格納容器の破損を防止した以降の対応を含めた一連の重大事故等対策の概要は、「3.2 高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の3.2.1(3)のa.からk.に示している。このうち、本格納容器破損モードに対する重大事故等対策は、「3.2 高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の3.2.1(3)に示すg.及びh.である。なお、g.の原子炉格納容器下部への注水は、原子炉格納容器下部における「熔融炉心・コンクリート相互作用」を緩和する観点から実施するものであるが、原子炉格納容器下部に熔融炉心が落下した際の「原子炉圧力容器外の熔融燃料－冷却材相互作用」への影響も考慮して原子炉格納容器下部への注水量及びペDESTAL水位を定めていることから、本格納容器破損モードの対策として整理した。

(添付資料3.3.3)

本格納容器破損モードに至るまでの事象進展への対応、本格納容器破損モードによる原子炉格納容器の破損防止及び原子炉格納容器の破損を防止した以降の対応を含めた一連の重大事故等対策の概略系統図は「3.2 高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」に示す第3.2.1-1(1)図から第3.2.1-1(4)図である。このうち、本格納容器破損モードの重大事故等対策の概略系統図は「3.2 高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」に示す第3.2.1-1(2)図及び第3.2.1-1(3)図である。本格納容器破損モードに対応する手順及び必要な要員と作業項目は「3.2 高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」と同じである。

3.3.2 格納容器破損防止対策の有効性評価

(1) 有効性評価の方法

本格納容器破損モードを評価する上で選定した評価事故シーケンスは、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、プラント損傷状態をTQUVとし、事象進展が早く炉心損傷までの時間余裕の観点で厳しい過渡事象を起因事象とし、逃がし安全弁再閉失敗を含まない、「過渡事象＋高圧炉心冷却失敗＋低圧炉心冷却失敗＋炉心損傷後の原子炉注水（重大事故等対策を含む）失敗＋FCI発生」である。ここで、逃がし安全弁再閉失敗を含まない事故シーケンスとした理由は、プラント損傷状態がTQUVであるため、事故対応に及ぼす逃がし安全弁再閉の成否の影響は小さいと考え、発生頻度の観点で大きい事故シーケンスを選定したためである。

また、「1.2.2.1(3)c. 原子炉圧力容器外の熔融燃料－冷却材相互作用」に

示すとおり、プラント損傷状態の選定では、水蒸気爆発に対する条件設定の厳しさを考慮し、熔融炉心の内部エネルギーの観点でより厳しいと考えられるTQUVを選定した。一方、プラント損傷状態をLOCAとする場合、事象発生直後から原子炉冷却材が原子炉格納容器内に流出するため原子炉圧力容器破損までの時間が短くなる。この時の圧力スパイクへの影響については、解析条件のうち初期条件の不確かさとして評価する。

さらに、本評価事故シーケンスにおいては、電源の復旧、注水機能の確保等、必要となる事故対処設備が多く、原子炉格納容器への注水・除熱を実施するまでの対応時間を厳しく評価する観点から、全交流動力電源喪失の重畳を考慮する。

なお、本評価事故シーケンスは、「3.2 高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」及び「3.5 熔融炉心・コンクリート相互作用」において有効性を評価したシーケンスと同様のシーケンスである。本格納容器破損モード及び「3.5 熔融炉心・コンクリート相互作用」ではプラント損傷状態をTQUVとし、「3.2 高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」ではプラント損傷状態をTQUXとしており、異なるプラント状態を選定している。しかしながら、どちらのプラント損傷状態であっても原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点で逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の手動開操作によって原子炉を減圧する手順であり、原子炉減圧以降も、熔融炉心の挙動に従って一連の流れで生じる各格納容器破損モードを、定められた一連の手順に従って防止することとなる。このことから、これらの格納容器破損モードについては同様のシーケンスで評価する。

本評価事故シーケンスでは、炉心における崩壊熱、燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形、沸騰・ボイド率変化、気液分離（水位変化）・対向流、炉心損傷後の原子炉圧力容器におけるリロケーション、構造材との熱伝達、原子炉圧力容器破損、原子炉格納容器における格納容器各領域間の流動、炉心損傷後の原子炉格納容器における原子炉圧力容器外FCI（熔融炉心細粒化）並びに原子炉圧力容器外FCI（デブリ粒子熱伝達）が重要現象となる。

よって、これらの現象を適切に評価することが可能であり、原子炉圧力容器内及び原子炉格納容器内の熱水力モデルを備え、かつ、炉心損傷後のシビアアクシデント特有の熔融炉心挙動に関するモデルを有するシビアアクシデント総合解析コードMAAPにより格納容器圧力等の過渡応答を求める。

また、解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、本評価事故シーケンスにおける運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価する。

(2) 有効性評価の条件

本評価事故シーケンスの有効性評価の条件は、「3.2 高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の条件と同じである。

(3) 有効性評価の結果

本評価事故シーケンスにおける原子炉圧力及び原子炉水位（シュラウド内外水位）の推移を第3.3.2-1(1)図及び第3.3.2-1(2)図に、格納容器圧力、格納容器温度、ペDESTAL水位及び注水流量の推移を第3.3.2-1(3)図から第

3.3.2-1(6)図に示す。

a. 事象進展

事象進展は「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」と同じである。

b. 評価項目等

圧力スパイクによって原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力の最大値は、約193kPa[gage]に抑えられる。原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力は、原子炉格納容器の限界圧力853kPa[gage]を下回るため、原子炉格納容器バウンダリの機能は維持される。

圧力スパイクによって原子炉格納容器バウンダリにかかる温度の最大値は、約123℃に抑えられる。原子炉格納容器バウンダリにかかる温度は、原子炉格納容器の限界温度の200℃を下回るため、原子炉格納容器バウンダリの機能は維持される。

本評価では、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(5)の評価項目について、格納容器圧力をパラメータとして対策の有効性を確認した。なお、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(4)及び(8)の評価項目の評価結果については「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」及び「3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」にて評価項目を満足することを確認している。また、原子炉格納容器下部に落下した溶融炉心及び原子炉格納容器の安定状態維持については「3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」にて確認している。

(添付資料 3.5.1)

3.3.3 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価

解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価するものとする。

格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」では、重大事故等対処設備を含むすべての原子炉注水機能が喪失して炉心損傷及び原子炉圧力容器破損に至り、溶融炉心が原子炉格納容器下部の水中に落下して大きいエネルギーを発生することが特徴である。

また、不確かさの影響を確認する運転員等操作は、事象進展に有意な影響を与えると考えられる操作として、格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）とする。

本評価事故シーケンスの有効性評価における現象の不確かさとしては、溶融炉心落下速度、細粒化量、プール水とデブリ粒子の伝熱が挙げられる。溶融炉心落下速度及び細粒化量の不確かさに対して、エントレインメント係数を変化させた場合並びにプール水とデブリ粒子の伝熱の不確かさに対してデブリ粒子径を変化させた場合の本格納容器破損モードに対する影響は小さいことを確認している。

なお、これまでのFCI実験の知見からは、一部の二酸化ウラン混合物を用いて実機条件よりも高い溶融物温度の条件のもとで実施された実験においてトリガなしで水蒸気爆発が発生している例が報告されているが、実機で想定される程度の溶融物の温度において実施された実験においてトリガなしで水蒸気爆発が発生

している例は確認されていないことから、実機条件においては原子炉格納容器の損傷に至る大規模な原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用の発生の可能性は低いと推定される。

(1) 解析コードにおける重要現象の不確かさの影響評価

本評価事故シーケンスにおいて不確かさの影響評価を行う重要現象とは、「1.7 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価方針」に示すとおりであり、それらの不確かさの影響評価は以下のとおりである。

a. 運転員等操作時間に与える影響

炉心における燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化及び燃料被覆管変形の不確かさとして、炉心ヒートアップに関するモデルは、TMI事故についての再現性及びCORAX実験についての再現性を確認している。炉心ヒートアップの感度解析（ジルコニウム－水反応速度の係数についての感度解析）では、炉心溶融開始時間及び炉心下部プレナムへの溶融炉心移行の開始時間に対する感度は数分程度であり、影響は小さいことを確認している。

本評価事故シーケンスでは、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点で原子炉格納容器下部への初期水張り操作を実施するが、炉心下部プレナムへの溶融炉心移行の開始時間の不確かさは小さく、炉心下部プレナムへ溶融炉心が移行した際の原子炉圧力容器下鏡温度の上昇は急峻であることから、原子炉圧力容器下鏡温度を操作開始の起点としている原子炉格納容器下部への初期水張り操作に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。

炉心における沸騰・ボイド率変化及び気液分離（水位変化）・対向流の不確かさとして、炉心モデル（炉心水位計算モデル）は、原子炉水位挙動について原子炉圧力容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERの評価結果との比較により水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるものの、その差異は小さいことを確認していることから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。

原子炉格納容器における格納容器各領域間の流動の不確かさとして、格納容器モデル（原子炉格納容器の熱水力モデル）はHDR実験解析では区画によって格納容器温度を十数℃程度、格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向を確認しているが、BWRの格納容器内の区画とは異なる等、実験体系に起因するものと考えられ、実機体系においてはこの解析で確認された不確かさは小さくなるものと推定される。しかし、全体としては格納容器圧力及び温度の傾向を適切に再現できており、また、格納容器圧力及び温度を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

炉心損傷後の原子炉圧力容器におけるリロケーション及び構造材との熱伝達の不確かさとして、溶融炉心の挙動モデルはTMI事故についての再現性を確認している。また、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により原子炉圧力容器破損時間に与える影響は小さいことを確認している。リロケーションの影響を受ける可能性がある操作としては、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点での原子炉格納容器下部への初期水張り操作があるが、炉心下部プレナムへの溶融炉心移行の開始時間の不確かさ

は小さく、炉心下部プレナムへ熔融炉心が移行した際の原子炉圧力容器下鏡温度の上昇は急峻であることから、原子炉圧力容器下鏡温度を操作開始の起点としている原子炉格納容器下部への初期水張り操作に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉圧力容器における原子炉圧力容器破損の不確かさとして、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ（しきい値）に関する感度解析により最大ひずみを低下させた場合に原子炉圧力容器破損時間が早まることを確認している。本評価事故シーケンスでは、原子炉圧力容器破損を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

炉心損傷後の原子炉格納容器における熔融燃料－冷却材相互作用の不確かさとして、熔融炉心の細粒化モデルにおけるエントレインメント係数及びデブリ粒子径の感度解析により原子炉圧力容器外の熔融燃料－冷却材相互作用による圧力スパイクに与える影響は小さいことを確認している。本評価事故シーケンスでは、原子炉圧力容器外の熔融燃料－冷却材相互作用による圧力スパイクを起点とした運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

(添付資料3.3.4)

b. 評価項目となるパラメータに与える影響

炉心における燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化及び燃料被覆管変形の不確かさとして、炉心ヒートアップに関するモデルは、TMI事故についての再現性及びCORA実験についての再現性を確認している。炉心ヒートアップの感度解析（ジルコニウム－水反応速度の係数についての感度解析）では、格納容器圧力挙動への影響は小さいことを確認していることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

炉心における沸騰・ボイド率変化及び気液分離（水位変化）・対向流の不確かさとして、炉心モデル（炉心水位計算モデル）は、原子炉水位挙動について原子炉圧力容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERの評価結果との比較により水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるものの、その差異は小さいことを確認していることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

原子炉格納容器における格納容器各領域間の流動の不確かさとして、格納容器モデル（原子炉格納容器の熱水力モデル）はHDR実験解析では区画によって格納容器温度を十数℃程度、格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向を確認しているが、BWRの格納容器内の区画とは異なる等、実験体系に起因するものと考えられ、実機体系においてはこの解析で確認された不確かさは小さくなるものと推定される。しかし、全体としては格納容器圧力及び温度の傾向を適切に再現できていることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉圧力容器におけるリロケーション及び構造材との熱伝達の不確かさとして、熔融炉心の挙動モデルはTMI事故についての再現性を確認している。また、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により原子炉圧力容器破損時間に与える影響は小さいことを確認してお

り、原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用による格納容器圧力上昇に与える影響はほぼないことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉圧力容器における原子炉圧力容器破損の不確かさとして、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ（しきい値）に関する感度解析により最大ひずみを低下させた場合に原子炉圧力容器破損時間が早まることを確認しているが、原子炉圧力容器破損（事象発生から約5.4時間後）に対して早まる時間はわずかであることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉格納容器における溶融燃料－冷却材相互作用の不確かさとして、エントレインメント係数及びデブリ粒子径の感度解析により、原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用による圧力スパイクに与える影響は小さいことを確認していることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

(添付資料3.3.4, 3.3.5)

(2) 解析条件の不確かさの影響評価

a. 初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件

初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件は、第3.2.2-1表に示すとおりであり、それらの条件設定を設計値等、最確条件とした場合の影響を評価する。また、解析条件の設定に当たっては、評価項目となるパラメータに対する余裕が小さくなるような設定があることから、その中で事象進展に有意な影響を与えると考えられる項目に関する影響評価の結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

初期条件の原子炉停止後の崩壊熱は、解析条件の燃焼度 33GWd/t に対応したものであり、その最確条件は平均的燃焼度約 30GWd/t であり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、解析条件で設定している崩壊熱よりも小さくなるため、発生する蒸気量は少なくなり、原子炉圧力容器破損に至るまでの事象進展は緩和されるが、操作手順（原子炉圧力容器下鏡温度に応じて原子炉格納容器下部への初期水張り操作を実施すること）に変わりはないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の外部水源の温度は、解析条件の 35℃ に対して最確条件は 31℃ 以下であり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、原子炉格納容器下部への注水温度が低くなり、原子炉圧力容器破損時の原子炉格納容器下部のプール水温度が低くなるが、注水温度を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉圧力、原子炉水位、炉心流量、サプレッション・プール水位、格納容器圧力及び格納容器温度は、解析条件の不確かさとして、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、事象進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。

事故条件の起因事象は、解析条件の不確かさとして、大破断 L O C A を考慮した場合、原子炉冷却材の放出量が増加することにより原子炉圧力容器破損に至るまでの事象進展は早まるが、操作手順（原子炉圧力容器下鏡

温度に応じて原子炉格納容器下部への初期水張りを実施すること)に変わりはないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

(添付資料3.3.4, 3.3.5)

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

初期条件の原子炉停止後の崩壊熱は、解析条件の燃焼度 33Gwd/t に対応したものとしており、その最確条件は平均的燃焼度約 30Gwd/t であり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、解析条件で設定している崩壊熱よりも小さくなるため、熔融炉心の持つエネルギーが小さくなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

初期条件の外部水源の温度は、解析条件の 35℃ に対して最確条件は 31℃ 以下であり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、原子炉格納容器下部への注水温度が低くなり、原子炉压力容器破損時の原子炉格納容器下部のプール水温度が低くなるが、原子炉格納容器下部のプール水温度が低い場合は、顕熱によるエネルギーの吸収量が多くなり、潜熱で吸収するエネルギーが相対的に減少し、圧力スパイクに寄与する水蒸気発生量が低下することで格納容器圧力の上昇は緩和されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

初期条件の原子炉圧力、原子炉水位、炉心流量、サプレッション・プール水位、格納容器圧力及び格納容器温度は、解析条件の不確かさとして、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

事故条件の起因事象は、原子炉压力容器への給水はできないものとして給水流量の全喪失を設定している。事故条件について、原子炉压力容器外の熔融燃料-冷却材相互作用による圧力スパイクを評価するにあたり、熔融炉心落下時の崩壊熱の影響を確認する観点から感度解析を実施した。感度解析は、事故シーケンスを「大破断 L O C A + E C C S 注水機能喪失」とし、本評価事故シーケンスの解析条件と同様、電源の有無にかかわらず重大事故等対処設備による原子炉注水機能についても使用できないものと仮定した場合、原子炉压力容器破損のタイミングが早くなることを考慮したものである。その結果、第 3.3.3-1(1) 図に示すとおり、事象発生から約 3.3 時間後に原子炉压力容器破損に至り、圧力スパイクの最大値は約 301kPa[gage] であり、圧力スパイクの最大値は本評価の結果より高くなるものの、原子炉格納容器の限界圧力 853kPa[gage] 以下であることから、評価項目を満足する。

(添付資料3.3.4, 3.3.5)

b. 操作条件

操作条件の不確かさとして、操作の不確かさを「認知」、「要員配置」、「移動」、「操作所要時間」、「他の並列操作有無」及び「操作の確実さ」の 6 要因に分類し、これらの要因が運転員等操作時間に与える影響を評価する。また、運転員等操作時間に与える影響が評価項目となるパラメータに与える影響を評価し、評価結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

操作条件の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下

部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）は、解析上の操作時間として原子炉圧力容器下鏡温度が 300℃に到達した時点を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、原子炉圧力容器下鏡温度が 300℃に到達するまでに事象発生から約 3.1 時間の時間余裕があり、また、格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作は原子炉圧力容器下鏡温度を監視しながら熔融炉心の炉心下部プレナムへの移行を判断し、水張り操作を実施するため、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であり、操作開始時間に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響も小さい。当該操作は、解析コード及び解析条件（操作条件を除く。）の不確かさにより操作開始時間は遅れる可能性があるが、当該操作に対応する運転員、対策要員に他の並列操作はなく、また、現場操作における評価上の所要時間には余裕を見込んで算定していることから、他の操作に与える影響はない。

（添付資料3.3.4）

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

操作条件の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）は、運転員等操作時間に与える影響として、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

（添付資料3.3.4）

(3) 操作時間余裕の把握

操作開始時間の遅れによる影響度合いを把握する観点から、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内での操作時間余裕を確認し、その結果を以下に示す。

操作条件の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）については、原子炉圧力容器下鏡温度が 300℃に到達するまでに事象発生から約 3.1 時間の時間余裕があり、原子炉格納容器下部への注水準備として、すべての非常用炉心冷却系等の機能喪失や早期の電源回復不能確認を含む状況判断をした後に開始し、所要時間は約 2.5 時間で完了する。その後、ペDESTAL水位 2.4m までの注水は約 1.9 時間で完了することから、水張りを原子炉圧力容器下鏡温度 300℃到達時点である事象発生から約 3.1 時間後に開始すると、事象発生から約 5.0 時間後に水張りが完了する。事象発生から約 5.0 時間後の水張りの完了から、事象発生から約 5.4 時間後の原子炉圧力容器破損までの時間を考慮すると、原子炉格納容器下部への注水操作は操作遅れに対して 0.4 時間程度の時間余裕がある。

（添付資料3.3.4）

(4) まとめ

解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を確認した。その結果、解析コード及び解析条件の不確かさが運転員等操作時間に与える影響等を考慮した場合においても、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。このほか、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間には時間余裕がある。

3.3.4 必要な要員及び資源の評価

本評価事故シーケンスは、「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」と同じであることから、必要な要員及び資源の評価は「3.2.4 必要な要員及び資源の評価」と同じである。

3.3.5 結論

格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」では、運転時の異常な過渡変化又は原子炉冷却材喪失事故（LOCA）が発生するとともに、非常用炉心冷却系等の安全機能の喪失が重畳する。このため、溶融炉心と原子炉圧力容器外の水が接触して一時的な圧力の急上昇が生じ、このときに発生するエネルギーが大きい場合に構造物が破壊され原子炉格納容器の破損に至ることが特徴である。格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」に対する格納容器破損防止対策としては、格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部注水により原子炉圧力容器破損前に原子炉格納容器下部へ2.4mの水張りを実施する手段を整備している。

格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」の評価事故シーケンス「過渡事象＋高圧炉心冷却失敗＋低圧炉心冷却失敗＋炉心損傷後の原子炉注水（重大事故等対策を含む）失敗＋FCI発生」について、有効性評価を行った。

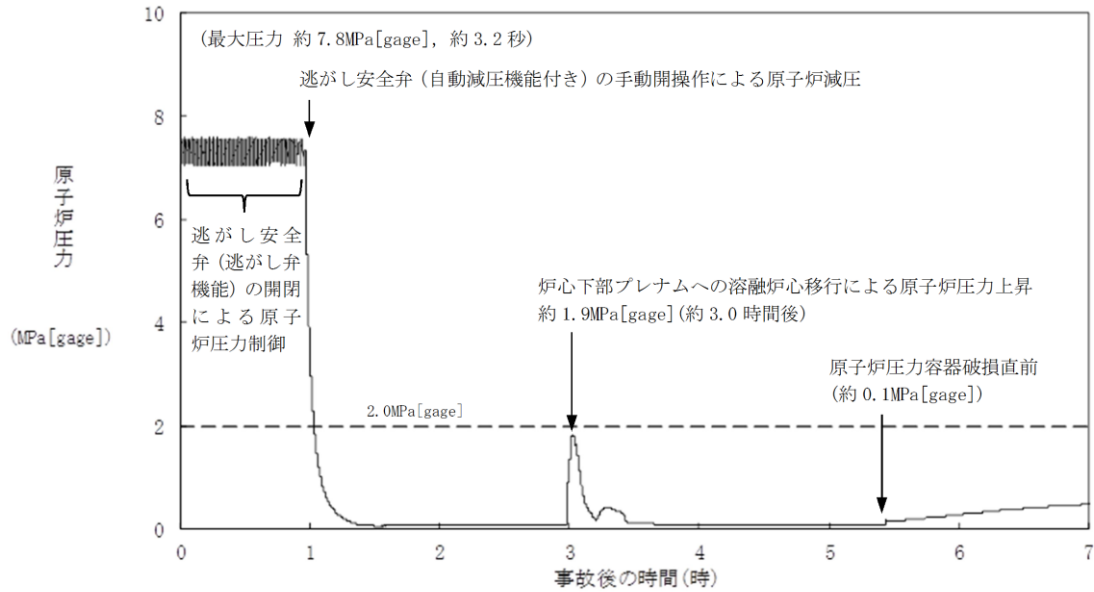
上記の場合には、水蒸気発生によって圧カスパイクが発生するが、原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力は、原子炉格納容器の限界圧力853kPa[gage]を下回るため、原子炉格納容器バウンダリの機能は維持できる。また、安定状態を維持できる。

（添付資料 3.5.1）

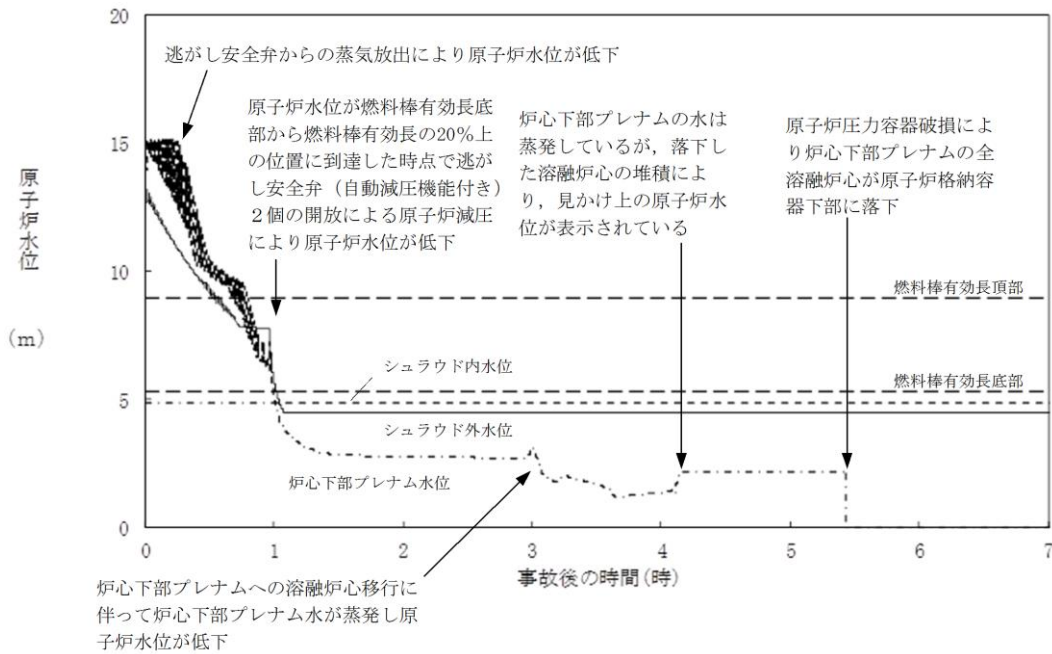
解析コード及び解析条件の不確かさについて確認した結果、運転員等操作時間に与える影響及び評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。また、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間余裕について確認した結果、操作が遅れた場合でも一定の余裕がある。

重大事故等対策時に必要な要員は、運転員及び緊急時対策要員にて確保可能である。また、必要な水源、燃料及び電源を供給可能である。

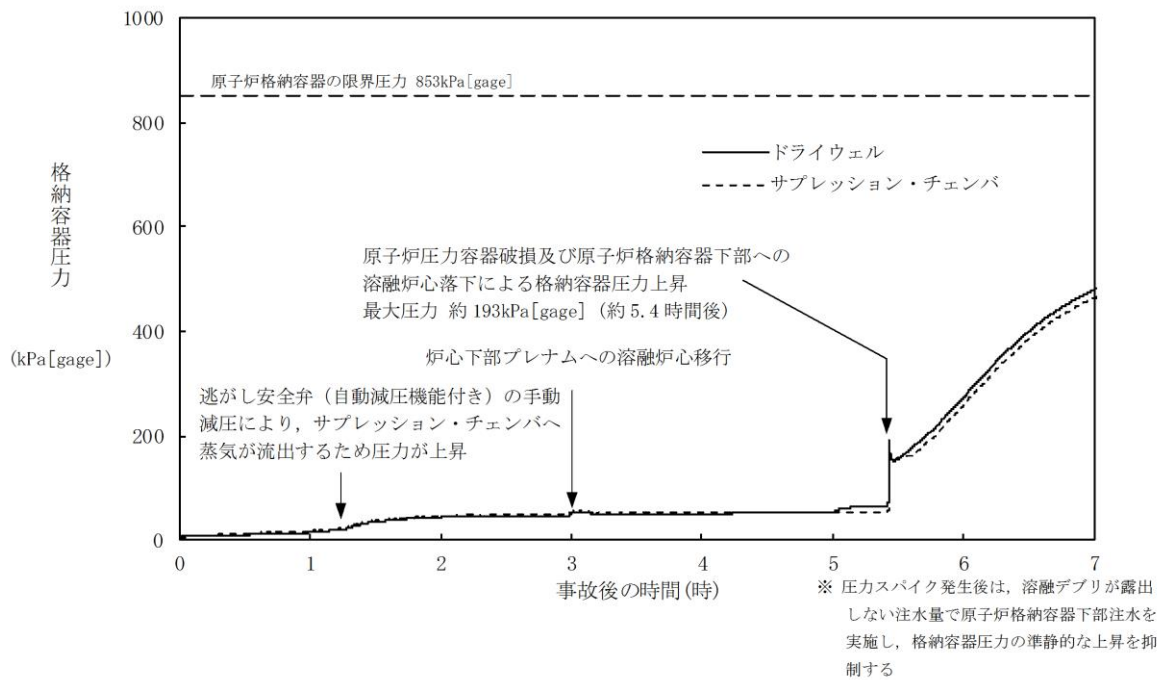
以上のことから、格納容器代替スプレイ系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水等の格納容器破損防止対策は、選定した評価事故シーケンスに対して有効であることが確認でき、格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」に対して有効である。



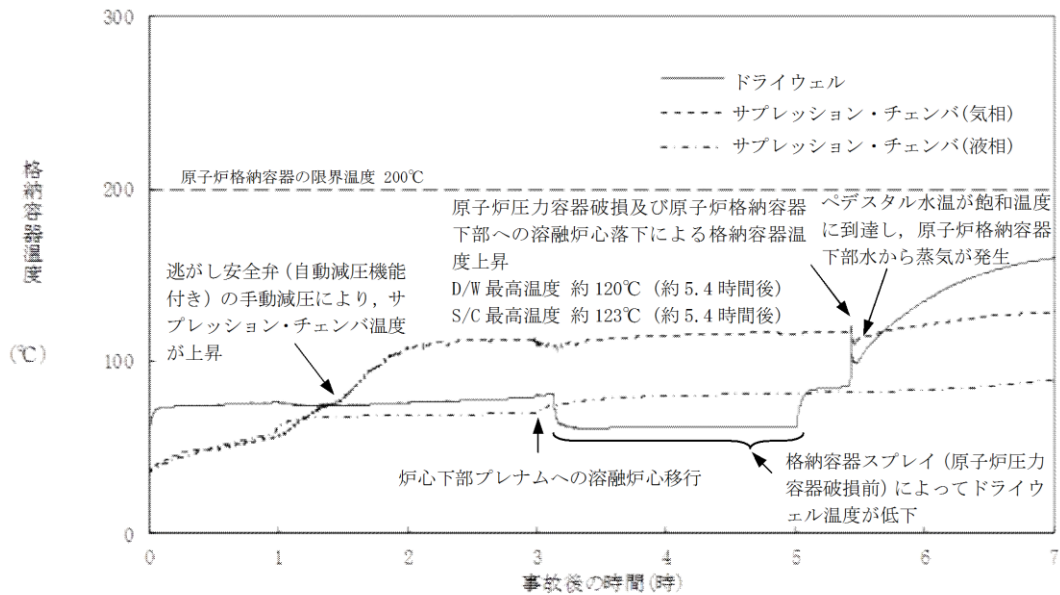
第 3.3.2-1(1) 図 原子炉圧力の推移



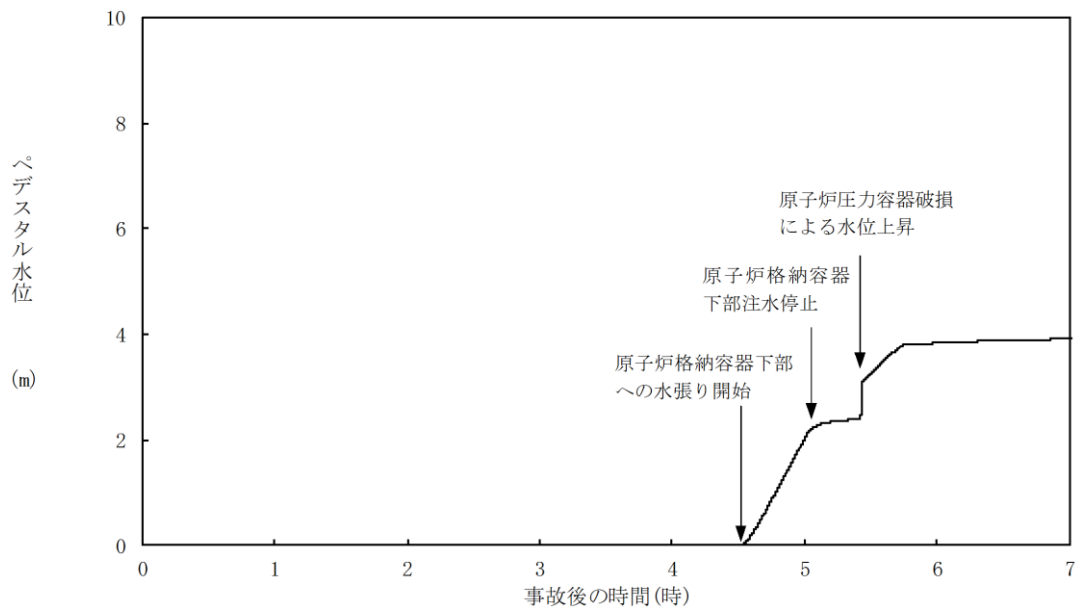
第 3.3.2-1(2) 図 原子炉水位 (シュラウド内外水位) の推移



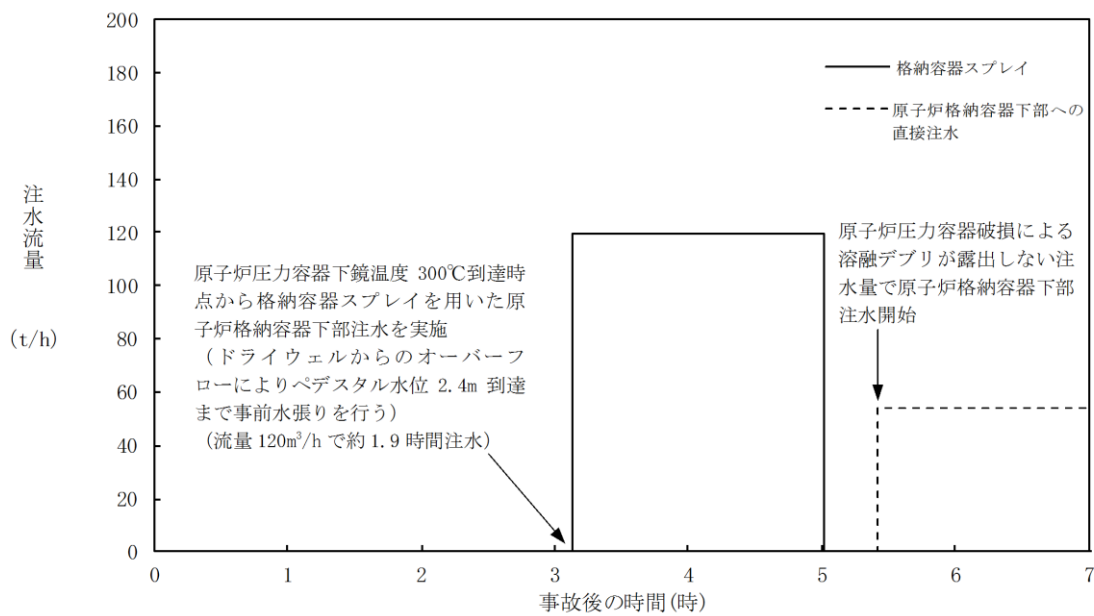
第 3.3.2-1 (3) 図 格納容器圧力の推移



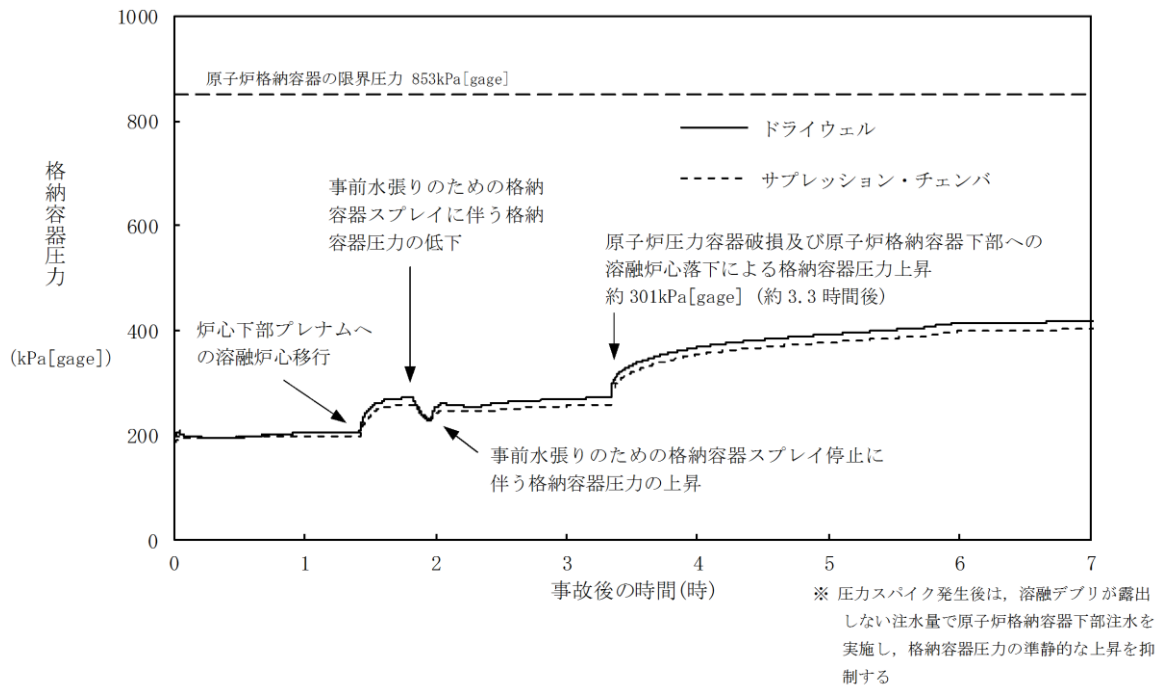
第 3.3.2-1 (4) 図 格納容器温度の推移



第 3. 3. 2-1 (5) 図 ペDESTアル水位の推移



第 3. 3. 2-1 (6) 図 注水流量の推移



第 3. 3. 3-1(1) 図 格納容器圧力の推移 (大破断 LOCA + ECCS 機能喪失)

原子炉压力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用に関する知見の整理

1. 原子炉压力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用の概要

炉心損傷後、溶融燃料と冷却材が接触すると、一時的な圧力の急上昇が生じる可能性がある。このときに発生するエネルギーが大きいと構造物が破壊され原子炉格納容器が破損する場合がある。溶融炉心と冷却材との接触及びそれに伴って引き起こされる現象のことを「溶融燃料—冷却材相互作用 (FCI)」と呼ぶ。また、FCIのうち、溶融炉心が水中に落下した際に溶融炉心の周囲に形成される蒸気膜が、何らかの外乱によって崩壊した際に瞬時の圧力伝播を生じ、大きなエネルギーを発生させる事象を「水蒸気爆発」と呼び、溶融炉心から原子炉冷却材への伝熱によって水蒸気が発生することに伴う急激な格納容器圧力の上昇を「圧カスパイク」と呼ぶ。

原子炉压力容器底部から溶融炉心が流出し、原子炉格納容器下部で冷却材と接触することで発生するFCIを「原子炉压力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用 (炉外FCI)」と呼ぶ。これまでの研究では、炉外FCIにおける水蒸気爆発現象を以下のような段階的な過程によって説明するモデルが提唱されている。

- ① 原子炉压力容器から落下する溶融炉心 (デブリジェット) が冷却材中に落下する。冷却材と接触した溶融炉心は、その界面の不安定性により細粒化して冷却材中に分散する (エントレイン)。細粒化した溶融炉心 (以下「デブリ粒子」と称す。) は、蒸気膜に覆われた状態で膜沸騰を伴う冷却材との混合状態となる (粗混合)。
- ② さらに、自発的もしくは外部からの圧力パルス等の外乱により、膜沸騰が不安定化し (トリガリング)、デブリ粒子と冷却材が直接接触する。
- ③ デブリ粒子と冷却材の直接接触により、急速な熱の移動が発生し、急速な蒸気発生・溶融炉心の微細化により、さらにデブリ粒子と冷却材の接触を促進し (伝播)、蒸気発生を促進する。この蒸気発生により圧力波が発生する。
- ④ 発生した圧力波が通過した後の高温高圧領域 (元々は粗混合領域) の膨張により運動エネルギーが発生し、構造材を破壊する要因となる。

水蒸気爆発が発生するためには、トリガリングが働く必要があり、さらにデブリ粒子と冷却材の接触が瞬時に粗混合領域全体に伝播する必要がある。水蒸気爆発に至らない場合でも、急速な蒸気発生による圧力上昇 (圧カスパイク) が発生する。

2. 水蒸気爆発が発生する可能性について

これまでの代表的なFCIの実験として、JRCイストラ研究所で実施され

たFARO実験, KROTOS実験, (旧)原子力発電技術機構で実施されたCOTELS実験, 韓国原子力研究所で実施されたTRO I 実験等がある。これらの実験では UO_2 混合物と模擬溶融物としてアルミナ等を用いている。

これまでの代表的なFC Iの実験から得られた知見については, 解析コード(MAAPコード)^[1]の「添付2 溶融炉心と冷却材の相互作用について」に示されている。これまでの UO_2 混合物を用いた実験では, KROTOS実験及びTRO I 実験の一部の実験ケースにおいて, 水蒸気爆発の発生が報告されている。

このうち, KROTOS実験は, 溶融炉心が水中に落下している時に容器の底から圧縮ガスを供給し, 膜沸騰を強制的に不安定化させて(外部トリガを与えて)いるため, 実機で起こるとは考えられない条件で実験した結果であるが, 機械的エネルギーへの変換効率は最大でも0.05%程度であり大規模な水蒸気爆発に至っていない。また, 外部トリガを与えた場合でも水蒸気爆発に至らなかったケースが複数確認されている。

TRO I 実験については, No. 10, 12, 13 及び 14 実験において, 外部トリガがない条件で水蒸気爆発が観測されている。しかしながら, TRO I 実験で用いた溶融物の過熱度が実機条件の過熱度(300K程度)に比べてかなり高いことが水蒸気爆発の発生に至った理由と考えられ, 実機条件に近い溶融物温度では水蒸気爆発の発生可能性は小さいと考えられる。また, 自発的に水蒸気爆発が発生したとされるNo. 13のエネルギー変換効率は0.4%であり, KROTOS実験の例よりは大きくなるが, 1%を下回る小さいものである。なお, 溶融物の温度を含め, 実機を模擬した溶融物を用いた実験の中で水蒸気爆発が観測された例は, いずれも外部トリガがある条件で実施されたものである。

上述のとおり, 溶融物の温度を含め, 実機を模擬した溶融物を用いたFC I 実験において水蒸気爆発が発生したケースでは, 水蒸気爆発のトリガを発生させるための装置を用いている。水蒸気爆発のトリガは粗混合粒子の周囲に形成される蒸気膜の崩壊に起因すると考えられており, 上述の実験で用いられたトリガ装置は蒸気膜を不安定化させる効果があると考えられるが, 一方, 実機条件ではこのようなトリガ装置で発生させているような圧力外乱となる要因は考えられない。

以上のことから, 実機において大規模な水蒸気爆発が発生する可能性は極めて小さいと考えられ, 原子炉格納容器健全性に与える影響はないと考える。

3. 参考文献

- [1] 「沸騰水型原子力発電所 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コード(MAAP)について」, 東芝エネルギーシステムズ株式会社, TLR-094, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社, HLR-123, 平成30年5月

以上

水蒸気爆発の発生を仮定した場合の原子炉格納容器の健全性への影響評価

1. 評価の目的

水蒸気爆発現象は、粗混合、トリガリング、拡大伝播といった段階的な過程によって説明するモデルが提唱されており、これらをすべて満たさなければ大規模な水蒸気爆発は発生しないと考えられている。

溶融炉心が原子炉圧力容器の破損口から落下した際に水蒸気爆発が発生する可能性は、これまでの知見からも極めて低いと考えられるが、水蒸気爆発が発生した場合についても考慮し、原子炉格納容器の健全性に対する影響を確認しておくことは、原子炉格納容器下部への水張り等の格納容器破損防止対策の適切性を確認する上でも有益な参考情報になると考える。このため、ここでは溶融炉心落下時の水蒸気爆発の発生を仮定し、水蒸気爆発が生じた際の原子炉格納容器の健全性を評価した。

2. 評価に用いた解析コード等

水蒸気爆発の影響を評価するにあたっては、溶融燃料-冷却材相互作用によって発生するエネルギー、発生エネルギーによる圧力伝播挙動及び構造応答が重要な現象となる。よって、これらの現象を適切に評価することが可能である水蒸気爆発解析コード J A S M I N E、構造応答解析コード A U T O D Y N - 2 D により圧力伝播挙動及び構造応答、格納容器圧力等の過渡応答を求める。

これらの解析コードに対して構築した評価モデル及び入力の詳細は添付資料 1.5.1 の (3) に示している。溶融炉心の物性値は J A S M I N E コードに付属している溶融コリウム模擬のライブラリから、デブリ物性値が実機条件に近いと考えられるライブラリを用いた。また、これらの解析コードへの入力条件の一部は、シビアアクシデント総合解析コード M A A P を用いて評価した、「3.3 原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用」の評価結果を用いた。

(添付資料 1.5.1)

3. 評価条件

主要解析条件を表 1 に示す。M A A P による解析の結果から溶融炉心は原子炉圧力容器底部の中央から落下するものとし、溶融炉心が原子炉圧力容器の破損口から落下する際には、溶融炉心・コンクリート相互作用の緩和策として、原子炉格納容器下部に水位 2.4m の水張りが実施されているものとした。

なお、応力評価の対象としている内側鋼板（厚さ 32mm）及び外側鋼板（厚さ 38mm）の降伏応力は約 490MPa である。

4. 評価結果

水蒸気爆発に伴うエネルギー, 原子炉格納容器下部内側及び外側鋼板の応力の推移を図1, 図2及び図3に示す。また, 参考として, 内側鋼板の周方向及び軸方向応力の推移を図4に示す。外側鋼板の周方向及び軸方向応力の推移を図5に示す。

水蒸気爆発の発生を想定した場合に原子炉格納容器下部の水に伝達される運動エネルギーの最大値は, 約14MJである。このエネルギーを入力とし, 原子炉格納容器下部内側及び外側鋼板にかかる応力を解析した結果, 原子炉格納容器下部の内側鋼板にかかる応力は約233MPa, 外側鋼板にかかる応力は約140MPaとなった。これは内側及び外側鋼板の降伏応力を大きく下回る値であり, かつ, 弾性範囲内にあることから, 原子炉压力容器の支持に支障が生じるものではない。なお, 構造上, 原子炉格納容器下部内側鋼板にかかる応力の方が外側鋼板にかかる応力よりも大きくなる傾向があるが, 原子炉压力容器の支持機能については原子炉格納容器下部の外側鋼板のみで維持可能である。

以上の結果から, 水蒸気爆発の発生を想定した場合であっても, 原子炉压力容器の支持機能は維持され格納容器の健全性に支障がないことから, 原子炉格納容器バウンダリの機能を維持できることを確認した。

以上

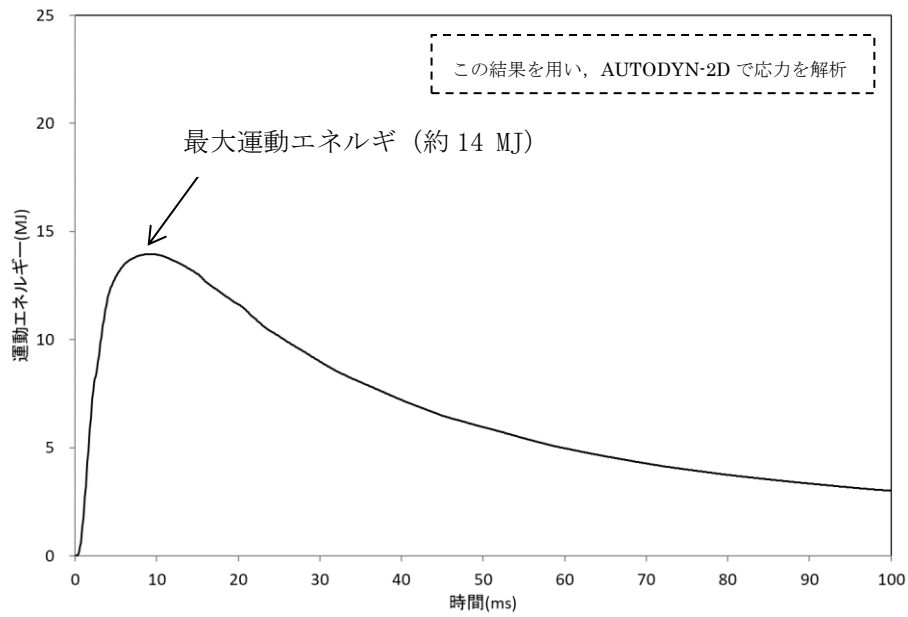


図1 水蒸気爆発によるエネルギーの推移^{※1}

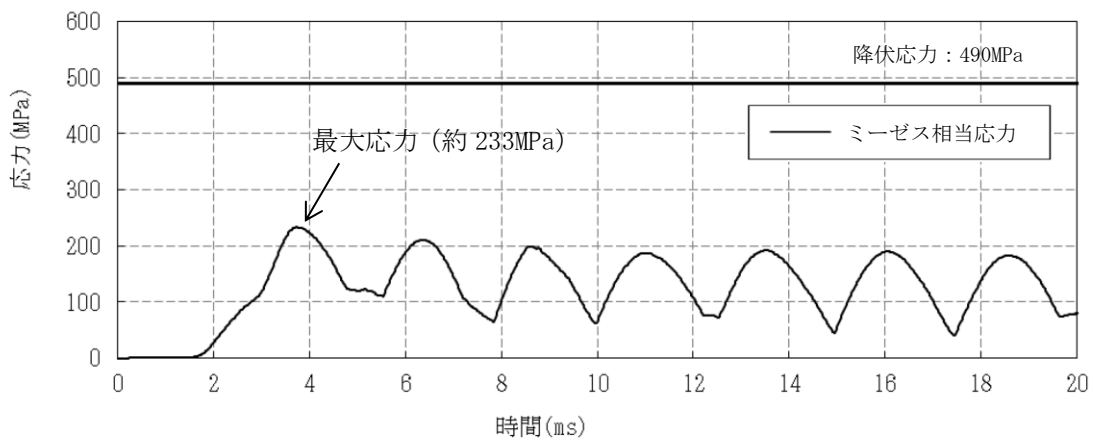


図2 原子炉格納容器下部内側鋼板の応力の推移^{※1}

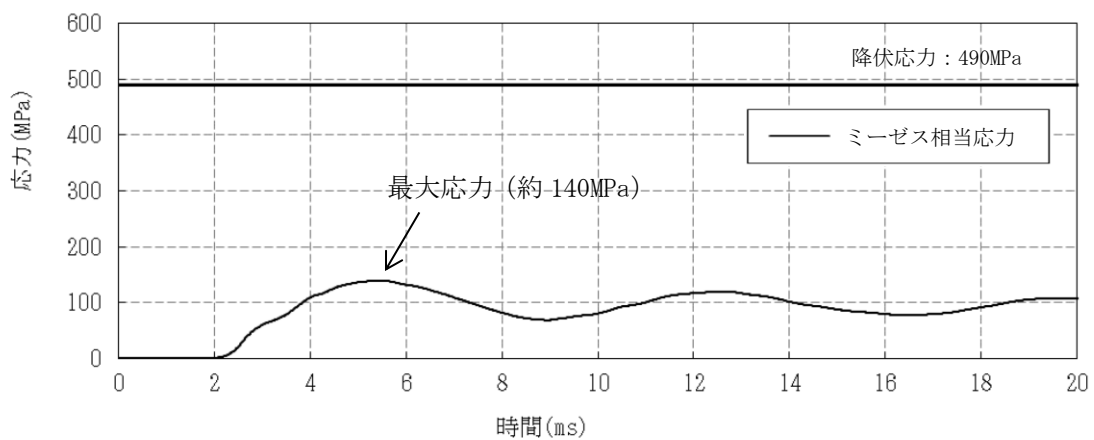


図3 原子炉格納容器下部外側鋼板の応力の推移^{※1}

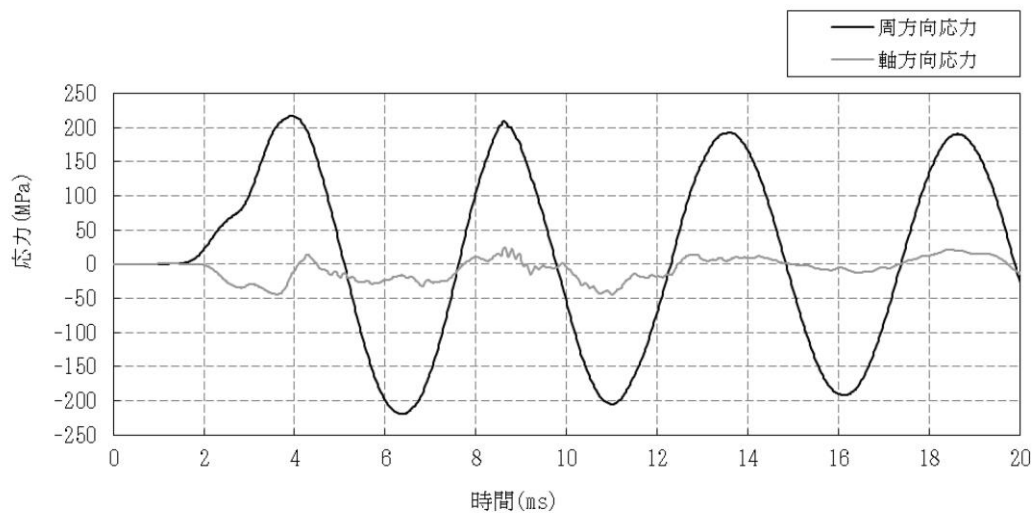


図4 内側鋼板の周方向及び軸方向応力の推移^{※1}

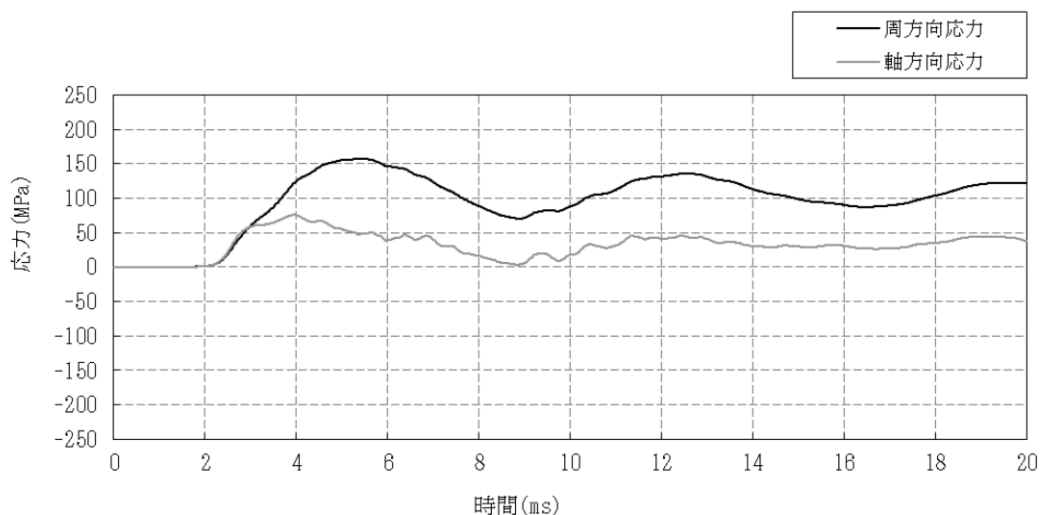


図5 外側鋼板の周方向及び軸方向応力の推移^{※1}

※1 JASMIN Eによって評価した水蒸気爆発による運動エネルギー（図1）の最大値をAUTODYNへの時刻0での入力とし、原子炉格納容器下部鋼板の応力の推移（図2～5）を評価している。このため、図1と図2～5の時刻歴は一致しない。

表 1 主要解析条件 (原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用 (水蒸気爆発の評価))

解析コード	項目	主要解析条件	条件設定の考え方
MAAP※	原子炉圧力容器の破損径	0.2m	制御棒駆動機構ハウジング 1 本の外径として設定
	ペダスタル水深	2.4m	溶融炉心—コネクタリート相互作用による格納容器破損防止対策として、落下した溶融炉心を微粒子化し、十分な除熱量を確保するため、予め水張りをを行うものとして手順上定めている値
	原子炉格納容器下部への水張りに用いる水の温度	35℃	外部水源の水温として設定
JASMINE	粗混合粒子径	4 mm	F A R O 試験結果におけるデブリ粒径分布をもとに設定
	爆発計算時の微粒子径	50 μ m	F A R O, K R O T O S 等の各種試験結果におけるデブリ粒径分布をもとに設定
AUTODYN — 2 D	溶融炉心—冷却材相互作用による発生エネルギー	J A S M I N E の解析結果をもとに設定	—

※「3.3 原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用」と重複する条件を除く。

原子炉格納容器下部への水張り実施の適切性

炉心の溶融が進展し、溶融炉心が原子炉圧力容器底部から流出するような場合には、原子炉格納容器内で発生する種々の現象の発生を防止あるいは影響を緩和することで、原子炉格納容器の破損を防止することが重要なマネジメントとなる。原子炉圧力容器の外において発生する現象のうち、溶融炉心・コンクリート相互作用（以下「MCCI」という。）に対してはその影響緩和の手段として、原子炉格納容器下部への溶融炉心落下前の水張り（以下「初期水張り」という。）が有効な対策となる。一方、初期水張りによって、原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用（以下「FCI」という。）による急激な水蒸気発生に伴う原子炉格納容器内圧力の急激な上昇（以下「圧力スパイク」という。）が生じるほか、実機条件における大規模な水蒸気爆発の発生の可能性は低いと推定されるものの、水蒸気爆発が発生する可能性も考慮に入れる必要がある。初期水張りの水深によって想定される影響の程度は変化すると考えられることから、初期水張りを実施する場合には、両者の影響を考慮して水位を決定する必要がある。以下に初期水張りにおける水位設定の考え方を示す。

1. 原子炉格納容器下部への水張りのFCIに対する影響

FCIとして生じる主な現象は、圧力スパイクである。

圧力スパイクは、水深が深い場合、顕熱によるエネルギーの吸収量が多くなり、潜熱で吸収するエネルギーが相対的に減少し、水蒸気発生量が低下することで、ピークが低くなる可能性がある一方、溶融炉心の粗混合量が多くなり、細粒化した粒子から水への伝熱量が多くなることで、ピークが高くなる可能性もある。

なお、FCIとして生じる現象としては水蒸気爆発も挙げられるが、水蒸気爆発については、 UO_2 主体の溶融物が水中に落下した場合に水蒸気爆発が発生した実験例はわずかであること及び、水蒸気爆発が発生した実験は、外部トリガを意図的に与えた場合、又は溶融物の温度が溶融炉心の温度を上回る程の極端に大きな過熱度で実験した場合に限られることを確認している。^[1-4]また、水深 1.3m 以上の条件下での水蒸気爆発の発生は報告されておらず、実機条件に近い多くの溶融物量を落下させた実験でも水蒸気爆発の発生は報告されていない。^[2,5,6]これらを考慮すると、実機で水蒸気爆発が生じる可能性は小さいと考える。しかしながら、仮に水蒸気爆発が発生した場合を想定すると、水深が深い方が粗混合が促進され、発生するエネルギーが大きくなることから、構造壁への衝撃荷重が大きくなると考えられる。

2. 原子炉格納容器下部への水張りのMCCIに対する影響

原子炉格納容器下部への初期水張りに失敗し、溶融炉心落下後に注水を開始した場合、これまでの知見^[7-16]からは、溶融炉心上部にクラストが形成され、溶融炉心の冷却が阻害される可能性が考えられる。

一方、初期水張りを実施することで、熔融物落下時に熔融炉心が粒子化されるため、クラストの形成によるデブリ内部への熱の閉じ込めを抑制することができ、デブリ上面からの除熱と落下時の熔融炉心の急速な冷却(デブリクエンチ)に期待できる。

[5, 6, 17]

3. 原子炉格納容器下部への水張りのDCHに対する影響

DCH に対する格納容器破損防止対策として原子炉の減圧を継続している状況で格納容器スプレイを実施した場合、格納容器の温度が低下し、逃がし安全弁の環境条件の緩和に期待できる。ただし、島根原子力発電所2号炉のようなMark-I改良型格納容器では、スプレイ水が原子炉格納容器下部に流入しペDESTAL水位が上昇することで、水蒸気爆発が発生した場合の影響が大きくなることから、そのリスクを踏まえた上で、原子炉格納容器下部への注水操作(原子炉圧力容器破損前の初期水張り)においてペDESTAL水位を適切に管理する必要がある。

4. 初期水張りの水位について

(1) 水位の設定

1. 及び2. に示したとおり、初期水張りの水位は、FCIの水蒸気爆発による原子炉格納容器への影響の観点では低い方が良く、MCCIによる原子炉格納容器への影響の観点では高い方が良い。なお、添付資料 3.3.1「原子炉圧力容器外の熔融燃料-冷却材相互作用に関する知見の整理」で確認したように、水蒸気爆発が発生する可能性は小さいものと考えられるのに対し、原子炉格納容器下部に熔融炉心が落下するとMCCIは発生するため、MCCIの影響緩和を考慮する必要があるが、島根原子力発電所2号炉の原子炉格納容器下部床面には、熔融炉心に対して耐侵食性を有するジルコニア耐熱材を材料とするコリウムシールドを設置しているため、MCCIによる原子炉格納容器下部のコンクリート侵食を抑制できるという特徴がある。

以上を踏まえ、島根原子力発電所2号炉においては、FCIの圧力スパイクを考慮しても原子炉格納容器バウンダリの機能が維持され、MCCI緩和のための熔融炉心の粒子化の効果に期待でき、さらにFCIの水蒸気爆発が発生した場合の影響を小さく抑えることができる水位として、初期水張り水位を2.4m(コリウムシールド上面からの水位)に設定している。初期水張り水位2.4mにおけるFCI、MCCIの影響や、水張りの実施可能性については、FCI、MCCI各事象の有効性評価で示したとおり、問題がないものとする。

(2) 水位の設定根拠

a. FCIの影響の観点

(i) 水蒸気爆発

1. に示したとおり、実機では水蒸気爆発が発生する可能性は小さい。しかしながら、仮にFCIによる水蒸気爆発の発生を前提とした場合、ペDESTAL水位について、水位が高い方が熔融炉心の細粒化割合が大きくなる傾向がある。この場合、細粒化した粒子から水への伝熱量が多くなるので、水蒸気爆発に伴い原子

炉格納容器下部に与えられる荷重は大きくなる。このことから、原子炉格納容器下部の水深が 2.4m より深い約 3.8m の場合の影響を評価し、問題がないことを確認している。（詳細は別添参照。）

水蒸気爆発が発生した際の気相部の挙動については、JASMIN Eコードを用い、添付資料 3.3.2 の評価条件（初期水張り水位 2.4m）における、原子炉格納容器下部の空間部での格納容器圧力を評価した。評価結果を図 1 に示す。水蒸気爆発時の粗混合粒子の細粒化と伝熱により、爆発源の膨張に伴う圧力波が伝播する。圧力波は減衰するため、原子炉圧力容器底部に到達する時点では 0.30MPa[abs]以下となる。0.30MPa 程度の圧力波によって原子炉圧力容器が損傷に至ることは想定し難いことから、圧力波による原子炉圧力容器への影響は無視できる程度と考える。原子炉格納容器への影響については、原子炉格納容器の構造上、原子炉格納容器下部において発生した圧力波が減衰されないまま原子炉格納容器上部に到達することは考えにくい。仮に 0.30MPa 程度の圧力波が原子炉格納容器上部の壁面に到達しても、原子炉格納容器の限界圧力（853kPa[gage]）未満であることから、原子炉格納容器が破損に至ることはない。

また、初期水張りの水位が上昇すると、水面から原子炉圧力容器の底部までの距離が短くなる。原子炉格納容器下部で水蒸気爆発が発生した場合には、発生した水蒸気によって水塊がピストン状に押し上げられ、水塊が原子炉圧力容器の底部に衝突する可能性が考えられるが、水面と原子炉圧力容器の底部の距離が短くなることにより、衝突の可能性が高くなることが懸念される。

水塊による水位上昇は、主に原子炉格納容器下部の径 D と初期水位 H_0 のアスペクト比（ H_0/D ）によって整理できる。^[19] 初期水張り水位 2.4m の場合、アスペクト比が約 0.42 となることから、水塊の上昇を含む最大水位は約 2.4m となる。また、初期水張り水位約 3.8m の場合、アスペクト比が約 0.66 となることから、水塊の上昇を含む最大水位は約 7.2m となる。水位約 3.8m の場合、水塊はコリウムシールド上面から約 7.2m まで上昇する可能性があるが、この高さはコリウムシールド上面から原子炉圧力容器の底部までの高さである約 9.5m よりも低いことから、水塊が原子炉圧力容器の底部に衝突することはなく、水塊による衝撃により、原子炉格納容器の支持機能の健全性に与える影響はない。

(ii) 圧力スパイク

初期水張り水位約 3.8m のときの格納容器圧力の評価結果を図 2 に示す。原子炉圧力容器が破損して、熔融炉心が原子炉格納容器下部の水中に落下する際に圧力スパイクが生じているが、圧力スパイクのピーク圧力は約 216kPa[gage]であり、水位 2.4m の場合の約 193kPa[gage]よりも高くなっているが、原子炉格納容器の限界圧力 853kPa[gage]を下回るため、原子炉格納容器バウンダリの機能は維持される。

なお、この理由としては、初期水張り水位の上昇によって原子炉格納容器下部の水量が多くなり、熔融炉心の粗混合量が増加し、水への伝熱量が増加したために、圧力スパイク評価は厳しくなったものと考えられる。

以上の結果から、ペDESTAL水位を現状の初期水張り水位である 2.4m 以上に上昇させた場合であっても、F C Iによって原子炉格納容器が破損に至るおそれはないと考える。

b. M C C I の影響の観点

原子炉压力容器の下部から溶融炉心が落下するまでに、原子炉格納容器下部に溶融炉心の冷却に十分な水位及び水量を確保することによって、溶融炉心が落下時に粒子化され、粒子ベッドとして堆積することにより、デブリ冷却性の向上が期待される。

島根原子力発電所 2 号炉では、「3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」に示すとおり、全炉心に相当する量が溶融炉心として原子炉格納容器下部に落下し、落下した溶融炉心は原子炉格納容器下部に一樣に広がるものとしており、この場合の堆積高さは約 1m となる。しかしながら、デブリ堆積高さの不確かさとしてデブリ粒子化等の影響が考えられることから、これらの不確かさを考慮したデブリ堆積高さの評価を実施し、初期水張りの水深の妥当性^{※1}を確認した。

※1 デブリが水面から露出する状態の悪影響として以下が考えられることから、溶融炉心の落下後において、デブリの冠水状態を維持することを確認する。

① F P 放出に関する悪影響

水面から露出した部分のデブリは冷却されにくく高温状態を維持するため、その下に堆積するデブリの除熱も悪くなり、デブリの平均温度が上昇する。この結果、高温のデブリからの F P 放出が継続する。また水面から露出しているデブリから放出された F P については、水中で除去される効果を期待できないことから、原子炉格納容器への F P 放出量が増加する。

② 格納容器過温に対する悪影響

水面から露出した部分のデブリは高温状態を維持するため、輻射や対流によりペDESTAL 雰囲気や格納容器バウンダリを直接加熱する要因となる。この結果、原子炉格納容器の健全性に影響を与える可能性がある。

③ M C C I に対する悪影響

水面から露出した部分のデブリは高温状態を維持するため、その下に堆積するデブリの除熱も悪くなり、デブリの平均温度が上昇する。この結果、原子炉格納容器下部床面のコリウムシールドやコンクリートの侵食量が増加し、原子炉格納容器の健全性に影響を与える可能性がある。

(a) デブリ冠水評価

デブリの堆積形状を図 3 に示す。ポロシティを考慮したデブリ堆積高さ H_{debr} は式 (1) で評価する。

$$H_{debr} = H_0 \times (1 - \phi_{ent}) + H_s + H_0 \times \phi_{ent} \div (1 - P) \quad \text{式 (1)}$$

ここで、

H_0 : 初期デブリ高さ [1.039m]

H_s : 原子炉格納容器下部の構造物分のデブリ堆積高さ [0.17m]

Φ_{ent} : R i c o u - S p a l d i n g 相関式^[18]に基づく粒子化割合 (0.38)

P : ポロシティ [0.5] P U L i M S 実験の知見 (0.29~0.37) 及び M A A P コード説明書のデブリ除熱量検討で想定している範囲 (0.26~0.48) から保守的に設定

また、粒子化したデブリの間隙に冷却水が浸入するため、デブリの冠水維持評価の観点から粒子化したデブリの範囲を除いた水プール水深 $H_{pool-ent}$ について式 (2) で評価する。

$$H_{pool-ent} = H_{pool} - (H_0 \times \phi_{ent} \div (1 - P) \times P) \quad \text{式 (2)}$$

ここで、

H_{pool} : 水プール初期水深 [2.4m]

H_0 : 初期デブリ高さ [1.039m]

Φ_{ent} : R i c o u - S p a l d i n g 相関式に基づく粒子化割合 (0.38)

P : ポロシティ [0.5]

式 (1) からデブリ堆積高さは約 1.6m となる。また、式 (2) から粒子化したデブリの範囲を除いた水プール水深 $H_{pool-ent}$ は約 2.005m となる。

M A A P コードを用いた有効性評価の結果 (デブリから水プールへの限界熱流束を 800kW/m^2 (圧力依存性あり) と設定) から、原子炉圧力容器破損後の原子炉格納容器下部注水が実施されず、熔融炉心落下前に張られた水が熔融炉心の崩壊熱及びジルコニウム-水反応による発熱により蒸発し、デブリが露出するまでの時間は、過渡起因事象の場合で原子炉圧力容器破損時点から約 1.4 時間後、L O C A 起因事象の場合で原子炉圧力容器破損時点から約 0.58 時間後であることから、粒子化したデブリの範囲を除いた水プール水深条件であって、原子炉格納容器下部注水の開始が遅れた場合でも一定時間冠水維持することが可能であることを確認した。

(b) デブリ堆積形状の不確かさ評価

水プール水位に対してデブリ落下量が多く粒子化割合が小さいことから、落下したデブリは均一に堆積すると考えられる。ここでは、デブリが均一に堆積しない場合の堆積高さについて評価する。

P U L i M S 実験において確認されたデブリ堆積高さと拵がり距離のアスペクト比を適用し、デブリ堆積形状を山状と想定すると、均一化した場合と比較して堆積高さが高くなる。

b. (a) の堆積高さに対して、アスペクト比を考慮した場合のデブリの堆積形状として、図 4 のように、連続層については、円柱状に堆積した形状とし、その上に粒子状デブリが円錐状に堆積する形状を仮定する。ここで、アスペクト比は、P U L i M S 試験で得られた 1 : 14 を想定する^{*2}。これを元に初期水

張り水位 2.4m における堆積高さを計算した結果、デブリ堆積高さは約 1.9m であり、粒子化したデブリの範囲を除いた水プール水深 $H_{pool-ent}$ は約 1.7m となることから、デブリは冠水される。計算方法は以下のとおりである。

- ・連続層の円錐部分については、堆積高さが最大となるのは床全面に広がった場合であることから、原子炉格納容器下部直径 5.745m にアスペクト比を考慮すると、頂点部分の堆積高さは約 0.42m となる。
- ・円柱部分については、連続層のうち、円錐部分の体積を除いたものとして求める。
- ・粒子状デブリについては、連続層の上に一様に堆積すると仮定して求める。
- ・デブリ堆積高さは上述の連続層と粒子状デブリの堆積高さの合計となる。

なお、デブリ堆積形状が山状の場合、均一化した場合と比較して熔融炉心上部水プールとの伝熱面積が増加して、水位低下が早くなる可能性があるが、伝熱面積の増加分は 1% 程度である。したがって、伝熱面積の増加によるペDESTAL 水位変化への影響は小さく、デブリ露出までの時間への影響は小さい。

※2 PULiMS 実験のうち、熔融物量が比較的大きい E4 実験において、平均堆積高さ 41mm に対して、拡がり距離は 740mm×560mm となっている(表 1, 図 5)。アスペクト比としては 1:18~1:14 となっており、デブリ堆積高さの評価としては、保守的に、1:14 を適用し評価を行う。PULiMS 実験は熔融物を水中に落下した実験であり、連続層と粒子状デブリを含めたデブリ全体としての体積高さに関する知見として適用できるものである。連続層と粒子状デブリを含めた全体を 1:14 とするため、本評価では円柱状に堆積した連続層の上に粒子状デブリが円錐状に堆積する形状を仮定する。

以上の結果から、デブリ堆積高さの不確かさを考慮しても、初期水張り水位 2.4m においてデブリ冠水が達成できることを確認した。

また、MCCI に対して保守的な評価条件を設定したうえで、初期水張りの有効性を感度解析によって確認している。初期水張りの水位を 2.4m とした場合について、熔融炉心は全量落下するものとし、デブリから水プールへの限界熱流束を格納容器圧力への依存性を考慮しない 800 kW/m^2 一定とした場合であっても、MCCI による侵食量は数 cm (デブリから水プールへの限界熱流束を 800 kW/m^2 (圧力依存あり) と設定した場合、床面 0 cm, 壁面約 4 cm であるのに対し、 800 kW/m^2 一定と設定した場合は、床面 0 cm, 壁面約 13 cm) に留まることを確認していることから、現状の初期水張り水位の設定に問題はないものとする。感度解析の結果を図 6 に示す。

c. まとめ

FCI については、これまでの試験結果から、実機において原子炉格納容器の破損に至るような大規模な原子炉圧力容器外での水蒸気爆発の発生の可能性は小さ

いと考える。なお、F C I の発生を前提とした評価においても、原子炉格納容器下部の構造損傷に伴う原子炉格納容器の破損には至らず、十分な余裕があることを確認しており、その水位が原子炉格納容器の健全性に影響を与えるものではないと判断している。また、熔融炉心の粒子化の効果等によるM C C I の影響緩和にも期待できる。

上記を踏まえ、原子炉格納容器下部に熔融炉心が落下する状況に対しては、原子炉格納容器下部に 2.4m の初期水張りまで注水を実施する運用としている。

5. 結論

島根原子力発電所 2 号炉においては、F C I が発生した場合の影響を低減しつつ、熔融炉心の粒子化の効果等によるM C C I の影響緩和を期待できる水位として、初期水張り水位を 2.4m に設定している。また、ペDESTAL水位が上昇した場合であっても原子炉格納容器が破損に至るおそれはない。

以 上

参考文献

- [1] V. Tyrpekl, Material effect in the nuclear fuel - coolant interaction : structural characterization of the steam explosion debris and solidification mechanism, 2012
- [2] J.H.Kim, et al, The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments, Proceedings of ICAPP' 04
- [3] J.H. Song, Fuel Coolant Interaction Experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture, Nucl. Eng. Design. 222, 1-15, 2003
- [4] J.H. Kim, Results of the Triggered Steam Explosions from the TROI Experiment, Nucl. Tech., Vol.158 378-395, 2007
- [5] D. Magallon, "Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments," Nucl. Eng. Design, 236 1998-2009, 2006
- [6] M. Kato, H. Nagasaka, "COTELS Fuel Coolant Interaction Tests under Ex-Vessel Conditions," JAERI-Conf 2000-015, 2000
- [7] (財) 原子力発電技術機構 (NUPEC), 「重要構造物安全評価 (原子炉格納容器信頼性実証事業) に関する総括報告書」 2003
- [8] B. R. Sehgal, et al., "ACE Project Phase C&D : ACE/MCCI and MACE Tests", NUREG/CR-0119, Vol.2, 1991
- [9] R. E. Blose, et al., "SWISS: Sustained Heated Metallic Melt/Concrete Interactions With Overlying Water Pools," NUREG/CR-4727, 1987
- [10] R. E. Blose, et al., "Core-Concrete Interactions with Overlying Water Pools - The WETCOR-1 Test," NUREG/CR-5907, 1993
- [11] M. T. Farmer, et al. "Status of Large Scale MACE Core Coolability Experiments", Proc. OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany, 1999
- [12] M. T. Farmer, et al., "Corium Coolability under Ex-Vessel Accident Conditions for LWRs," Nuc. Eng. and Technol., 41, 5, 2009
- [13] M. T. Farmer, et al., "OECD MCCI Project 2-D Core Concrete Interaction (CCI) Tests : Final Report," OECD/MCCI-2005-TR05, 2006
- [14] M. T. Farmer, et al., "OECD MCCI Project Final Report," OECD/MCCI-2005-TR06, 2006
- [15] M. T. Farmer, et al., "OECD MCCI-2 Project Final Report," OECD/MCCI-2010-TR07, 2010
- [16] H. Nagasaka, et al., "COTELS Project (3) : Ex-vessel Debris Cooling Tests," OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany, 1999
- [17] A. Karbojian, et al., "A scoping study of debris bed formation in the DEFOR test facility," Nucl. Eng. Design 239 1653- 1659, 2009
- [18] F. B. Ricou, D. B. Spalding, "Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets," Journal of Fluid Mechanics, Vol.11, pp.21-32, 1961
- [19] 稲坂 他「軽水炉のシビアアクシデント時における気泡急成長による水撃力の研究」, 海上技術安全研究報告書 第4巻 第3号, p.323-343, 2004.
- [20] A. Konovalenko et al., Experimental Results on Pouring and Underwater Liquid Melt Spreading and Energetic Melt-coolant Interaction, NUTHOS-9, Kaohsiung, Taiwan, September 9-13, 2012.

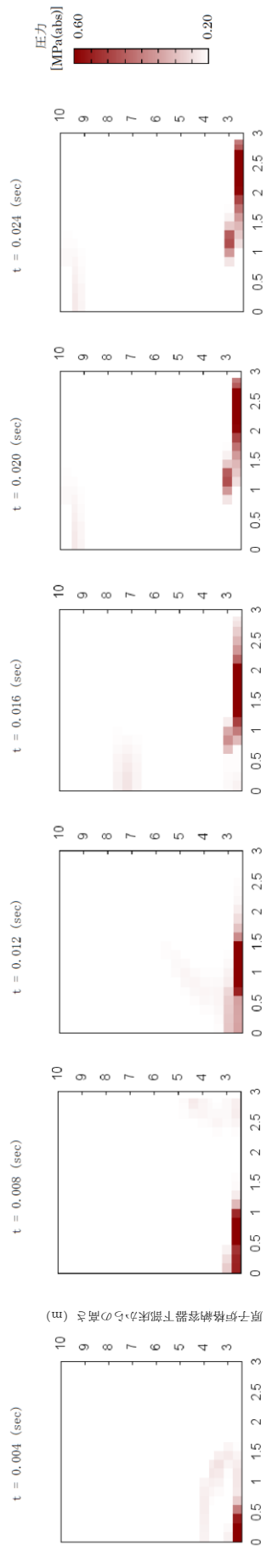


図 1 水蒸気爆発が発生した際の格納容器圧力

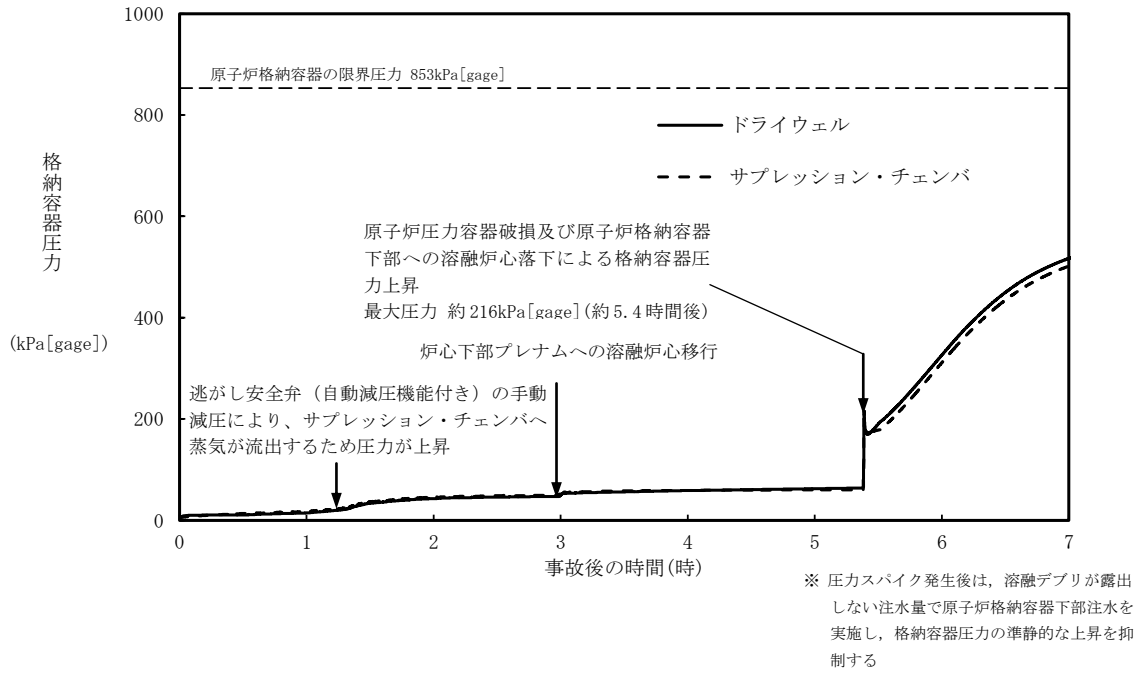


図2 格納容器圧力の推移 (初期水張り水位約 3.8m)

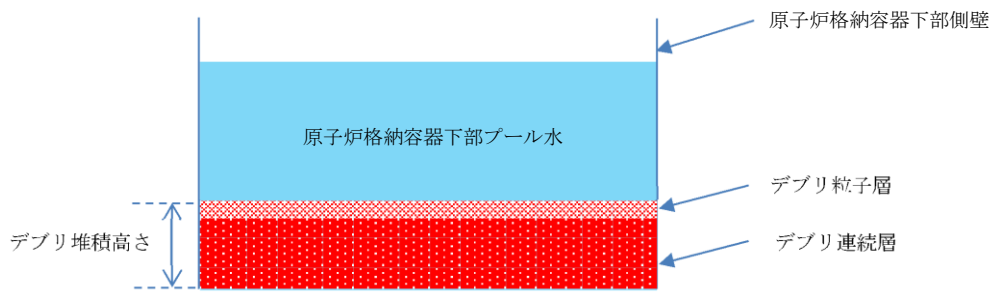


図3 デブリ堆積高さの概念図

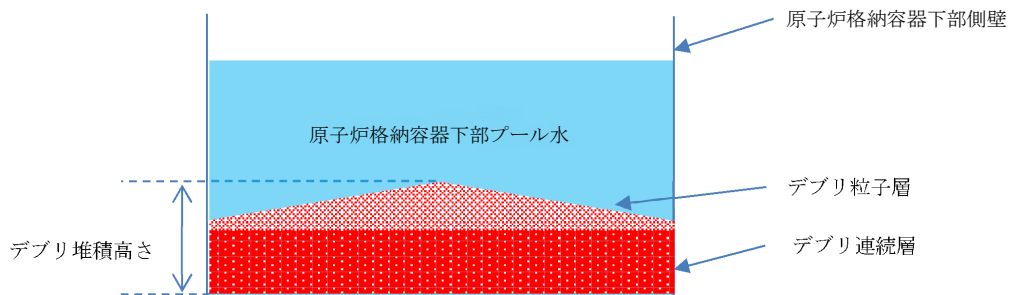


図4 デブリ堆積高さの概念図（不確かさ考慮）

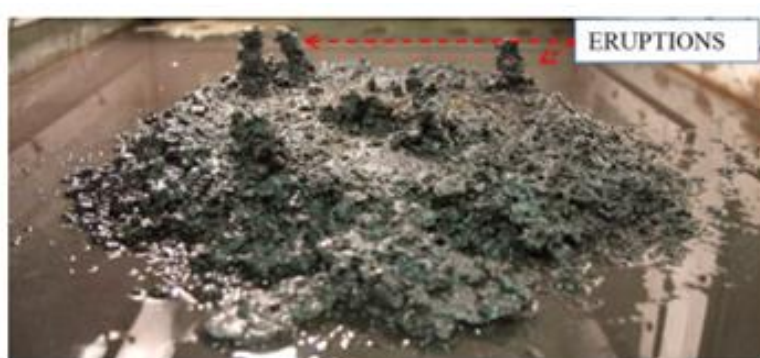


図5 PULiMS実験結果（E4）

表1 PULiMS実験条件と結果^[20]

Table 1. PULiMS-E test matrix with initial conditions.

Parameter	PULiMS tests				
	E1	E2	E3	E4	E5
Melt material	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	B ₂ O ₃ -CaO	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	ZrO ₂ -WO ₃
Melt mass composition, %	42.64-57.36 eutectic	30-70 non-eutectic	42.64-57.36 eutectic	42.64-57.36 eutectic	15.74-84.26 eutectic
Melt jet diameter, mm	20	20	20	20	20
Jet free fall height, mm	400	400	400	400	400
Initial melt volume, L	3	3	10	6	6
Initial melt mass, kg	23.4	7.5	78.1	46.9	41.2
T _{sol} , °C	870	1027	870	870	1231
T _{liq} , °C	870	1027	870	870	1231
Melt temperature in the funnel upon pouring, °C	1006	1350	1076	940	1531
Water pool depth, mm	200	200	200	200	200
Water temperature, °C	79	78	75	77	72

Table 2. Measured and estimated properties of the debris beds in PULiMS-E tests.

Parameter	Exploratory PULiMS tests			
	E1	E3	E4	E5
Melt release time, (sec)	10	15	12	~8.7
Total size $x \times y$, mm	460x440	~750x750	740x560	-
Cake size $x \times y$, mm	~430x320	~750x750	711x471	~400x420
Max debris height, mm	93	unknown	106	50
Area averaged debris bed height, mm	31	~30	30	22
Volume averaged debris bed height, mm	50	unknown	41	28
Debris height under injection point, mm	48	unknown	50	39
Total area occupied by cake, m ²	0.14	~0.44	0.30	0.14
Measured particulate debris mass, kg	~4	unknown	2.9	-
Measured particulate debris mass fraction, %	~20%	unknown	~6.8%	-
Solidified cake mass, kg	~20	unknown	39.5	13.6
Measured debris bed volume, L	~4.2	unknown	8.9	~3.1
Estimated total cake porosity	0.29	-	0.36	0.37
Symmetry of the spread	non-sym.	unknown	non-sym.	symmetric
Steam explosion	no	yes	no	yes
Cake formation	cake	no cake	cake	cake
Measured melt superheat, °C	136	206	70	300
Measured melt superheat in the pool, °C	121	77	48	90
Estimated loss of melt superheat due to jet interaction with coolant, °C	15	129	22	210

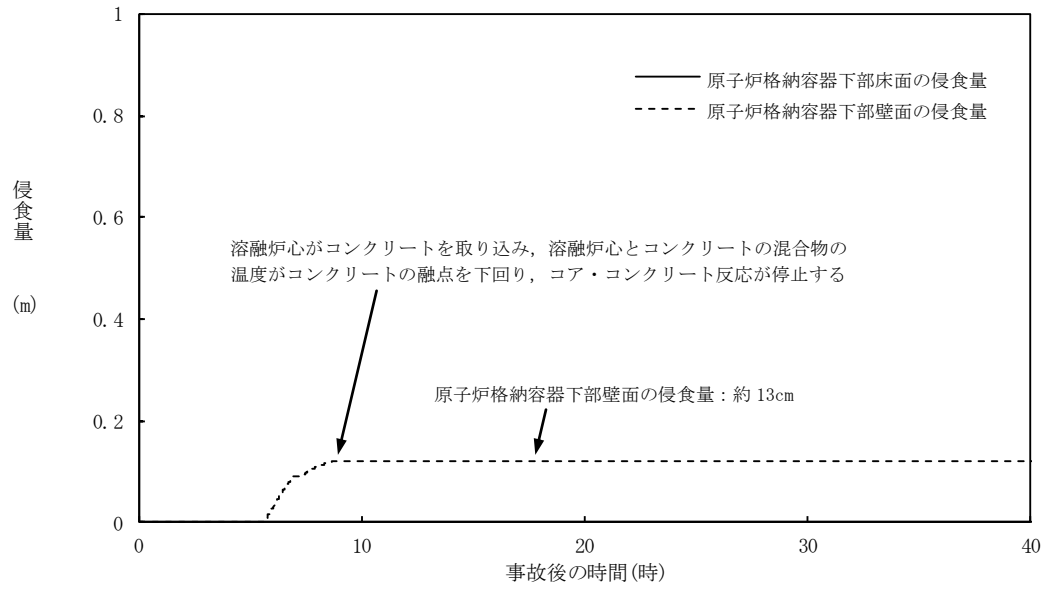


図6 原子炉格納容器下部壁面及び床面の侵食量の推移
 (初期水張り水位 2.4m, 上面熱流束:800kW/m²相当 (圧力依存なし))

水蒸気爆発の発生を仮定した場合の格納容器の健全性への影響評価
(原子炉格納容器下部への初期水張りの水位が上昇していた場合)

炉心損傷後の事故対応として、原子炉格納容器下部への初期水張りの運用手順を定め、また原子炉格納容器下部及びドライウェルには、重大事故等発生時における貯水状況を把握するための計装設備を設けていることから、水位を適切に管理可能であるが、ここでは、F C Iの有効性評価で設定した原子炉圧力容器破損に至るシナリオにおいて、仮に原子炉格納容器下部への初期水張りの水位が上昇していた場合に、水蒸気爆発が生じた際の原子炉格納容器の健全性を評価した。

1. 原子炉圧力容器破損前のペDESTAL水位上昇の可能性

格納容器スプレイによる原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）は、スプレイ水が制御棒駆動機構搬出入口より原子炉格納容器下部に流入することによって貯水し、ペDESTAL水位計にて水位 2.4mを確認した後、注水を停止する手順としている。この流路において、原子炉格納容器内の上階フロアの床はグレーチングとなっており、スプレイ水が滞留するような機器や堰はない。制御棒駆動機構搬出入口とドライウェル床面の間には堰があるものの、ドライウェル床面に溜まった水は一樣に上昇し、制御棒駆動機構搬出入口は比較的大きな開口部であることから、スプレイ水はこの開口部を通じて、遅滞なく原子炉格納容器下部に流れ込むと考えられるため、スプレイ水の原子炉格納容器内における滞留による影響は考えにくい。

この操作においてペDESTAL水位を上昇させる要因としては、停止操作判断による時間遅れ及び操作実施後のスプレイ弁全閉までの間、原子炉格納容器下部へのスプレイ水の流入が継続することによって水位が上昇する可能性がある。しかしながら、この要因によってペDESTAL水位が上昇を続けたとしても、制御棒駆動機構搬出入口下端位置（約 3.8m）以上の高さとなるには、ドライウェル床面全体を拡がりながら水位が形成される必要があるため、その水位上昇は緩やかであり、実態の事故対応において大幅な時間遅れが生じることは考えにくいことから、制御棒駆動機構搬出入口下端位置（約 3.8m）よりも高い水位となることはない。

また、その他ペDESTAL水位を上昇させる要因としては、注水の停止後にドライウェルサンプに貯まったスプレイ水が、ドライウェルサンプと原子炉格納容器下部床を接続するドレン配管及びコリウムシールドスリットを通じて、ドライウェルサンプから原子炉格納容器下部に流入する場合（以下「逆流」という。）が考えられる。ただし、この経路を通じて流入する流量は最大で約 $1.5\text{m}^3/\text{h}$ 、ペDESTAL水位上昇率は約 $0.06\text{m}/\text{h}$ であり、注水を停止した後の原子炉圧力容器破損までの逆流による水位上昇分は約 3 cm 程度であることから、F C Iに対して与える影響は小さいと考える。なお、逆流を続けたとしても水頭圧の関係から、制御棒駆動機構搬出入口下端位置（約 3.8m）よりも高い水位となることはない。

2. 評価条件

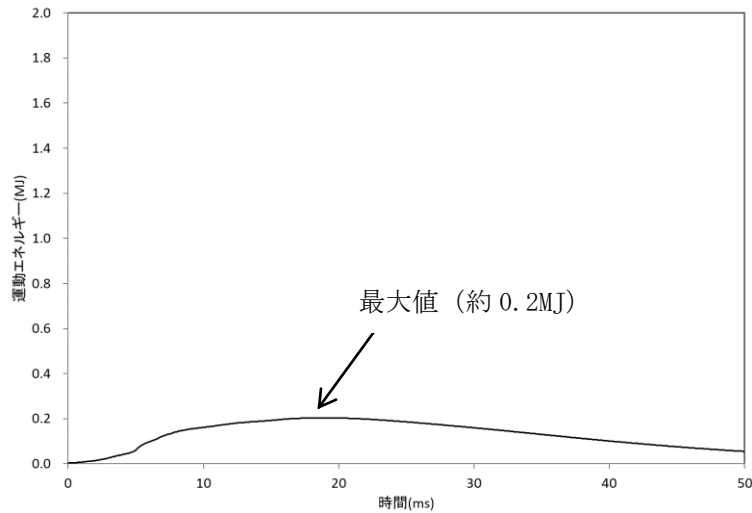
別表 1 に主要入力条件を示す。1. を踏まえ、熔融炉心が原子炉格納容器下部に落下する前に、原子炉格納容器下部に約 3.8m (制御棒駆動機構搬出入口下端位置) の水位が形成されているものとした。

また、ここでは一部現実的な熔融炉心の落下様態を想定した条件 (熔融炉心落下量, 粗混合粒径, トリガリングタイミング) を適用し, その他の条件は, 添付資料 3.3.2 において設定した評価条件と同様とした。

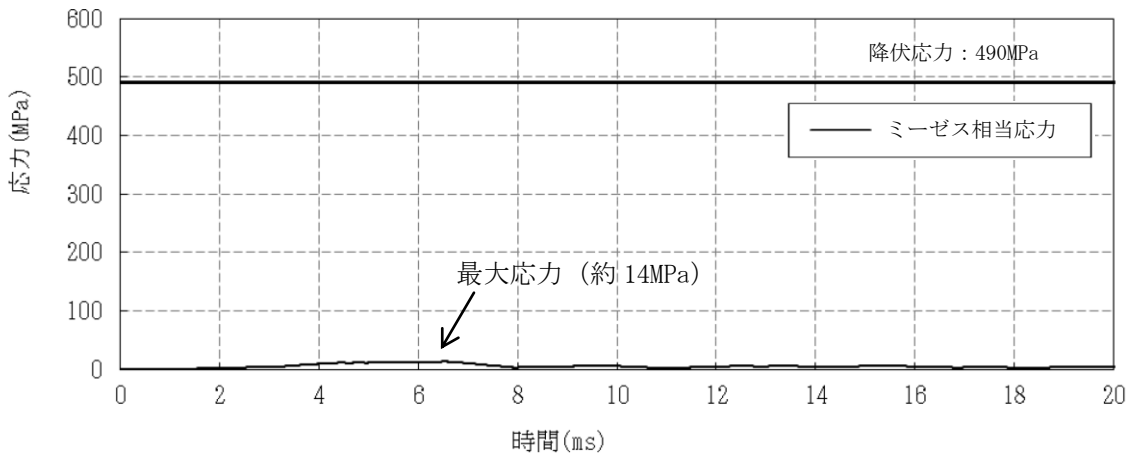
3. 評価結果

水蒸気爆発に伴うエネルギー, 原子炉格納容器下部内側及び外側鋼板の応力の推移を別図 1, 別図 2 及び別図 3 に示す。水蒸気爆発の発生を想定した場合に原子炉格納容器下部の水に伝達される運動エネルギーの最大値は約 0.2MJ である。このエネルギーを入力とし, 原子炉格納容器下部の内側及び外側鋼板にかかる応力を解析した結果, 原子炉格納容器下部の内側鋼板にかかる応力は約 14MPa, 外側鋼板にかかる応力は約 7MPa となった。これは原子炉格納容器下部内側及び外側鋼板の降伏応力 (490MPa) を十分に下回っており, 原子炉格納容器破損に至るおそれはないと考える。

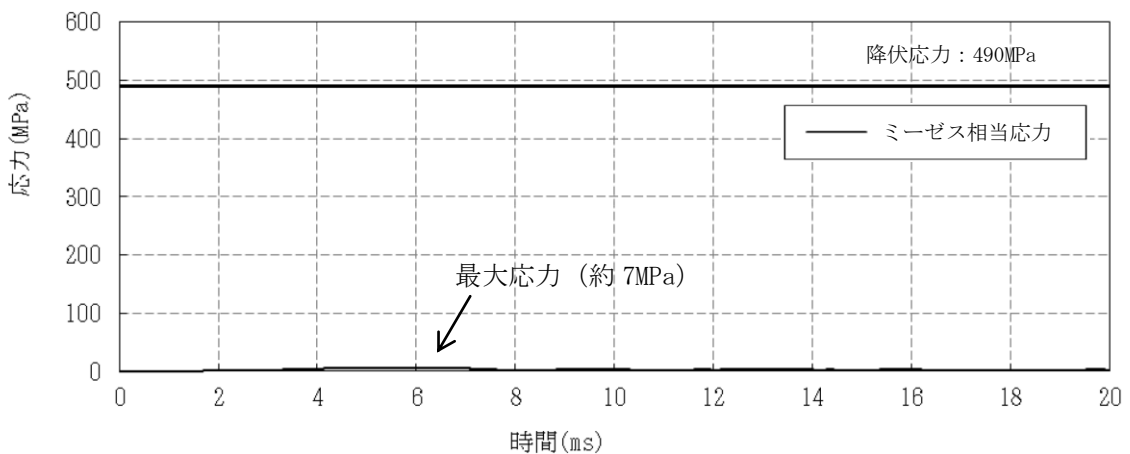
以 上



別図1 水蒸気爆発によるエネルギーの推移 (約 3.8m, 現実的な想定) ※¹



別図2 水蒸気爆発による原子炉格納容器下部内側鋼板の応力の変化
(約 3.8m, 現実的な想定) ※¹



別図3 水蒸気爆発による原子炉格納容器下部外側鋼板の応力の変化
(約 3.8m, 現実的な想定) ※¹

※¹ JASMININEによって評価した水蒸気爆発による運動エネルギー(別図1)の最大値をAUTODYNへの時刻0での入力とし、原子炉格納容器下部鋼板の応力の推移(別図2, 3)を評価している。このため、別図1と別図2, 3の時刻歴は一致しない。

別表1 主要解析条件 (原子炉圧力容器外の溶融炉心—冷却材相互作用のうち、水蒸気爆発の評価 (約3.8m水位及び現実的な想定による評価))

解析コード	項目	主要解析条件	条件設定の考え方
—	原子炉圧力容器の破損径	0.0357m (約10cm ²)	原子炉圧力容器と制御棒駆動機構ハウジングの隙間の面積3cm ² に余裕を見込んだ値
JASMINE	ペデスタル水深	3.794m	原子炉格納容器下部に制御棒駆動機構搬出入口下端位置までの高さ (約3.8m) の水位が形成されているものとして設定
	原子炉格納容器下部への水張りに用いる水の温度	35°C	外部水源の水温として設定
	溶融物の放出速度	8m/s	破損口にかかる溶融炉心の堆積圧等から MAAP4 で計算
	粗混合粒子径	3mm	既往の実験から得られている平均粒子径
	爆発計算時の微粒子径	50 μm	FARO, KROTOS 等の各種試験結果におけるデブリ粒径分布をもとに設定
	トリガリングタイミング	溶融物が床面に到達した時点	現実的条件には溶融物が原子炉格納容器下部床面に接触する際の衝撃によりトリガリングが発生する可能性が高いと考えられることから設定
AUTODYN-2D	溶融炉心—冷却材相互作用による発生エネルギー	約0.2MJ	JASMINE による解析結果をもとに設定

粒子化割合の算出

R P V破損時における流出する溶融炉心の粒子化割合を以下のR i c o u – S p a l d i n g 相関式によって評価している。本相関式は、M A A Pにおいても実装されている。

$$\Phi_{ent} = \frac{d_{dj,0}^2 - d_{dj}^2}{d_{dj,0}^2}$$

$$d_{dj} = d_{dj,0} - 2E_0 \left(\frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} \Delta H_{pool}$$

ここで、

Φ_{ent} : 粒子化割合 [-]

E_0 : エントレインメント係数 [-]

ΔH_{pool} : プール水深 [m]

d_{dj} : プール底部におけるデブリジェット径 [m]

$d_{dj,0}$: 気相部落下を考慮した水面におけるデブリジェット径^{*1} [m]

ρ_{dj} : デブリジェット密度 [kg/m³]

ρ_w : 水密度 [kg/m³]

※1 解析コードM A A Pによる破損口径の拡大（アブレーション）を考慮評価条件は以下のとおり。

- ・プール水深：2.4m（ペDESTAL水位）
- ・デブリジェット密度 kg/m³（M A A P計算結果^{*2}）
- ・初期デブリジェット径：0.20m（C R D案内管径）

※2 粒子化割合を大きく見積もる観点から、デブリ密度が小さい過渡事象シーケンスの値を使用

以上により評価した結果、粒子化割合は以下のとおり。

- ・エントレインメント係数 の場合：約 29%
（M A A P推奨範囲の最確値^{*3}）
- ・エントレインメント係数 の場合：約 38%
（M A A P推奨範囲の最大値^{*3}）

※3 M A A Pコードにおけるエントレインメント係数は、F A R O実験のベンチマーク解析の不確かさの範囲から、 から である。また、不確かさの範囲のうち、およそ中間となる を推奨範囲の最確値としており、A L P H A – M J B実験の検証解析において、最確値を用いることで実験結果とよく一致する結果が得られている。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表 1 解析コードにおける重要現象の不確かさの影響評価について（原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用）（1/2）

【MAAP】

分類	重要現象	解析モデル	不確かさ	運転員等操作時間を与える影響	評価項目となるパラメータを与える影響		
炉心	崩壊熱	炉心モデル(原子炉出力及び崩壊熱)	入力値に含まれる。	「解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータを与える影響」にて確認	「解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータを与える影響」にて確認		
						炉心ヒートアップにおける炉心ヒートアップ時の水素発生、炉心領域での溶融進展状態について、TMI事故分析結果と良く一致することを確認した。	
	燃料棒表面熱伝達	炉心モデル(炉心熱水力モデル)	TMI事故分析結果と良く一致することを確認した。	COR A実験解析における、燃料被覆管、制御棒及びチャネルボグスの温度変化について、測定データと良く一致することを確認した。	炉心ヒートアップに関するモデルは、TMI事故に関するRA実験についての再現性を確認している。	炉心ヒートアップに関するモデルは、TMI事故についての再現性及びCOR A実験についての再現性を確認している。炉心ヒートアップの感度解析(ジルコニウム-水反応速度の係数について)の感度解析では、格納容器圧力挙動への影響は小さいことを確認していることから、評価項目となるパラメータを与える影響は小さい。	
							炉心ヒートアップ速度の増加(燃料被覆管酸化の促進)を想定し、仮想的な厳しい振り幅ではあるが、ジルコニウム-水反応速度の係数を2倍とした感度解析により影響を確認した。
							・TQUV、大破断LOCAシーケンスともに炉心溶融の開始時刻への影響は小さい。 ・下部ブレナムへの溶融炉心移行の開始時刻は、ほぼ変化しない。
	燃料被覆管変形	炉心モデル(炉心熱水力モデル)	TQXシーケンス及び中小破断LOCAシーケンスに対して、MAAPコードとSAFERコードの比較を行い、以下の傾向を確認した。 ・MAAPコードではSAFERコードで考慮しているCCFLを取り取っていないことから水位変化に差異が生じたものの水位低下幅はMAAPコードの方が保守的であり、その後の注水操作による燃料棒有効長頂部までの水位回復時刻は両コードで同等である。	原子炉水位挙動について原子炉圧力容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERの評価結果との比較により水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるもの、その差異は小さいことを確認していることから、運転員等操作時間を与える影響は小さい。	原子炉水位挙動について原子炉圧力容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERの評価結果との比較により水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるもの、その差異は小さいことを確認していることから、評価項目となるパラメータを与える影響は小さい。		
						HDR実験解析では、格納容器圧力及び温度について、温度成層化含めて傾向を良く再現できるとを確認した。格納容器雰囲気温度を十数℃程度高め、格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向が確認されたが、実験体系に起因するものと考えられ、実験体系においてはこの種の不確かさは小さくなるものと考えられる。また、非凝縮性ガス濃度の挙動について、解析結果は測定データと良く一致することを確認した。	
沸騰・ボイド率変化	炉心モデル(炉心熱水力モデル)	HDR実験解析では、格納容器圧力及び温度について、温度成層化含めて傾向を良く再現できるとを確認した。格納容器雰囲気温度を十数℃程度高め、格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向が確認されたが、実験体系に起因するものと考えられ、実験体系においてはこの種の不確かさは小さくなるものと考えられる。また、非凝縮性ガス濃度の挙動について、解析結果は測定データと良く一致することを確認した。	原子炉水位挙動について原子炉圧力容器内のモデルが精緻である解析コードMAAPの評価結果との比較により水位低下幅は解析コードSAFERの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるもの、その差異は小さいことを確認していることから、評価項目となるパラメータを与える影響は小さい。	HDR実験解析では、格納容器圧力を1割程度高めに評価しているが、BWRの格納容器内の区画とは異なる等、実験体系に起因するものと考えられ、実験体系においてはこの種の不確かさは小さくなるものと考えられる。しかし、全体としては格納容器圧力及び温度の傾向を適切に再現できており、また、格納容器圧力及び温度を操作開始の起点としている運転員等操作時間を与える影響はない。さらに、運転員等操作時間を与える影響は小さい。			
気液分離(水位変化)・対向流					原子炉水位挙動について原子炉圧力容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERの評価結果との比較により水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるもの、その差異は小さいことを確認していることから、評価項目となるパラメータを与える影響は小さい。		
格納容器各領域間の流動	格納容器モデル(格納容器の熱水力モデル)	HDR実験解析では、格納容器圧力及び温度について、温度成層化含めて傾向を良く再現できるとを確認した。格納容器雰囲気温度を十数℃程度高め、格納容器圧力を1割程度高めに評価する傾向が確認されたが、実験体系に起因するものと考えられ、実験体系においてはこの種の不確かさは小さくなるものと考えられる。しかし、全体としては格納容器圧力及び温度の傾向を適切に再現できており、また、格納容器圧力及び温度を操作開始の起点としている運転員等操作時間を与える影響はない。さらに、運転員等操作時間を与える影響は小さい。					

表1 解析コードにおける重要現象の不確かさが運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響（原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用）（2/2）

【MAAP】

分類	重要現象	解析モデル	不確かさ	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
原子炉 圧力容 器(炉心 損傷後)	リロケー ション	溶融炉心の挙 動モデル (リロケーシ ョン)	<ul style="list-style-type: none"> ・TMI事故解析における炉心領域での溶融進展状態について、TMI事故分析結果と一致することを確認した。 ・リロケーションの進展が早まることを想定し、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により影響を確認した。 ・TQUV、大破断LOCAシナシスともに、炉心溶融時刻、原子炉圧力容器破損時刻への影響が小さいことを確認した。 	<p>溶融炉心の挙動モデルはTMI事故についての再現性を確認している。また、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により原子炉圧力容器破損時間に与える影響は小さいことを確認している。リロケーションの影響を受ける可能性のある操作としては、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点で原子炉格納容器下部への初期水張り操作があるが、炉心下部プレナムへの溶融炉心移行の開始時間の不確かさは小さく、炉心下部プレナムへ溶融炉心が移行した際の原子炉圧力容器下鏡温度の上昇は急峻であることから、原子炉圧力容器下鏡温度を操作開始の起点としている原子炉格納容器下部への初期水張り操作に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。</p>	<p>溶融炉心の挙動モデルはTMI事故についての再現性を確認している。また、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により原子炉圧力容器破損時間に与える影響は小さいことを確認している。リロケーションの影響を受ける可能性のある操作としては、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点で原子炉格納容器下部への初期水張り操作があるが、炉心下部プレナムへの溶融炉心移行の開始時間の不確かさは小さく、炉心下部プレナムへ溶融炉心が移行した際の原子炉圧力容器下鏡温度の上昇は急峻であることから、原子炉圧力容器下鏡温度を操作開始の起点としている原子炉格納容器下部への初期水張り操作に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。</p>
	構造材と の熱伝達				
原子炉 格納容 器(炉心 損傷後)	原子炉圧 力容器破 損	溶融炉心の挙 動モデル(原子 炉圧力容器破 損モデル)	<p>原子炉圧力容器外FCI現象に関する項目としてエントレインメント係数及びデブリ粒子径をパラメータとして感度解析を行い、原子炉圧力容器外FCIによって生じる圧力スパイクへの感度が小さいことを確認した。</p>	<p>本評価項目では、原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用による圧力スパイクを起点とした運転員等操作時間には影響はない。また、運転員等操作時間には影響はない。</p>	<p>溶融炉心の細粒化モデルにおけるエントレインメント係数及びデブリ粒子径の感度解析により、BW Rにおいては原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用による圧力スパイクに与える影響は小さいことを確認していることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。</p>

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータによる影響(原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用)(1/4)

項目	解析条件(初期条件(作)の不確かさ)		条件設定の考え方	運転員等操作時間による影響	評価項目となるパラメータによる影響
	解析条件	最確条件			
原子炉熱出力	2. 436MWt	2. 435MWt以下 (実績値)	定格原子炉熱出力として設定	最確条件とした場合は、原子炉停止後の崩壊熱が緩和される。最確条件とした場合は運転員等操作時間への影響は、原子炉停止後の崩壊熱にて説明する。	最確条件とした場合は、原子炉停止後の崩壊熱が緩和される。最確条件とした場合は評価項目となるパラメータによる影響は、原子炉停止後の崩壊熱にて説明する。
	6. 93MPa[gage]	約6. 77~ 6. 79MPa[gage] (実績値)	定格原子炉圧力として設定	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、原子炉圧力は逃がし安全弁により制御されるため事象進展に与える影響はないことから、運転員等操作時間による影響はない。	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、原子炉圧力は逃がし安全弁により制御されるため事象進展に与える影響はない。
原子炉水位	通常水位(気水分離器下端から+83cm)	通常水位(気水分離器下端から約+83cm~約+85cm)	通常運転時の原子炉水位として設定	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎの幅は事象発生後の水位低下量に対して非常に小さい。例えば、原子炉スクラム25分後までの崩壊熱による原子炉水位の低下量は、高圧が維持された状態でも通常運転水位から約4. 6mであり非常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間による影響は小さい。	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎの幅は事象発生後の水位低下量に対して非常に小さい。例えば、原子炉スクラム25分後までの崩壊熱による原子炉水位の低下量は、高圧が維持された状態でも通常運転水位から約4. 6mであり非常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータによる影響は小さい。
	35. 6×10 ³ t/h	定格流量の85~ 104% (実測値)	定格炉心流量として設定	炉心の反応度補償のため初期値は変化するが、事象発生後早期に原子炉はスクラムするため、初期炉心流量が事象進展に与える影響は小さい。	炉心の反応度補償のため初期値は変化するが、事象発生後早期に原子炉はスクラムするため、初期炉心流量が事象進展に与える影響は小さい。
燃料	9×9燃料(A型)	装荷炉心毎	9×9燃料(A型)、9×9燃料(B型)は熱力学的特性は同等であり、その相違は燃料棒最大線出力密度の保守性に包絡されること、また、9×9燃料の方がMOX燃料よりも崩壊熱が大きく、MOX燃料の評価は9×9燃料(A型)を考慮し、代表的に9×9燃料(A型)を設定	最確条件とした場合は、炉心に装荷される燃料は装荷炉心毎に異なることとなるが、装荷される燃料である9×9燃料(A型)、9×9燃料(B型)、MOX燃料のうち、9×9燃料(A型)、9×9燃料(B型)の燃料の組成は同等であり、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータによる影響は小さい。MOX燃料の評価は9×9燃料(A型)の評価に包絡され、運転員等操作時間による影響は小さい。	最確条件とした場合は、炉心に装荷される燃料は装荷炉心毎に異なることとなるが、装荷される燃料である9×9燃料(A型)、9×9燃料(B型)、MOX燃料のうち、9×9燃料(A型)、9×9燃料(B型)の燃料の組成は同等であり、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータによる影響は小さい。MOX燃料の評価は9×9燃料(A型)の評価に包絡され、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
原子炉停止後の崩壊熱	ANSI/ANS-5. 1-1979(燃焼度33GWd/t)	ANSI/ANS-5. 1-1979平均的燃焼度約30GWd/t(実績値)	サイクル末期の燃焼度のばらつきを考慮し、10%の保守性を考慮	最確条件とした場合は、発生する蒸気量は少なくなり、原子炉圧力容器破損に至るまでの事象進展は緩和されるが、操作手順(原子炉圧力容器下部への初期水張り操作を実施すること)に変わりはなく、運転員等操作時間による影響はない。	最確条件とした場合は、解析条件で設定している崩壊熱より小さくなるため、溶融炉心の持つエネルギーが小さくなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
格納容器容積(ドライウエル)	7, 900m ³	7, 900m ³ (設計値)	ドライウエル内体積の設計値(内部機器及び構造物の体積を除いた値)を設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、評価項目となるパラメータによる影響はない。
格納容器容積(サプレッション・チェンバ)	空間部: 4, 700m ³ 液相部: 2, 800m ³	空間部: 4, 700m ³ 液相部: 2, 800m ³ (設計値)	空間部: 4, 700m ³ 液相部: 2, 800m ³ (設計値)	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、評価項目となるパラメータによる影響はない。

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータによる影響(原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用)(2/4)

項目	解析条件(初期条件、事故条件及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間による影響	評価項目となるパラメータによる影響
	解析条件	最確条件			
真空破壊装置	3.43kPa(ドライウエル)・サブプレッジョン・チェンバ間差(圧)	3.43kPa(ドライウエル)・サブプレッジョン・チェンバ間差(圧)(設計値)	真空破壊装置の設定値	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、評価項目となるパラメータによる影響はない。
サブプレッジョン・プール水位	3.61m(NWL)	約3.59m~約3.63m(実測値)	通常運転時のサブプレッジョン・プール水位として設定	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎによるサブプレッジョン・プール水位低下分の熱容量は通常水位時に対して非常に小さい。例えば、通常水位下の熱容量は約2800m ³ 相当であるのに対して、ゆらぎによる水位低下分の熱容量は約20m ³ 相当であり、その低下割合は通常水位時の約0.7%程度と常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さい。	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎによるサブプレッジョン・プール水位低下分の熱容量は通常水位時に対して非常に小さい。例えば、通常水位下の熱容量は約2800m ³ 相当であるのに対して、ゆらぎによる水位低下分の熱容量は約20m ³ 相当であり、その低下割合は通常水位時の約0.7%程度と常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さい。
サブプレッジョン・プール水温度	35℃	約19℃~約35℃(実測値)	通常運転時のサブプレッジョン・プール水温度の上限値として設定	運転員等操作としては原子炉圧力容器下鏡温度の上昇を起点として原子炉格納容器下部への注水操作を行うこととなるが、本パラメータによる影響を受けることはなく、運転員等操作時間による影響はない。	最確条件とした場合は、解析条件で設定している水温より低くなるため、圧力スパスイクへの影響として、発生する蒸気量の低下が考えられるが、評価項目となるパラメータに対する影響は小さい。
格納容器圧力	5kPa[gage]	約5kPa[gage]~約7kPa[gage](実測値)	通常運転時の格納容器圧力として設定	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎによる格納容器圧力の上昇に与える影響は小さい。例えば、事象発生から原子炉圧力容器破損までの圧力上昇率(平均)は約5.4時間/約188kPa[gage]であるのに対して、ゆらぎによる圧力上昇率は約2kPaであり非常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さい。	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎによる格納容器圧力の上昇に与える影響は小さい。例えば、事象発生から原子炉圧力容器破損までの圧力上昇率(平均)は約5.4時間/約188kPa[gage]であるのに対して、ゆらぎによる圧力上昇率は約2kPaであり非常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さい。
格納容器温度	57℃	約45℃~約54℃程度(実測値)	通常運転時の格納容器温度として設定	運転員等操作としては原子炉圧力容器下鏡温度の上昇を起点として原子炉格納容器下部への注水操作を行うこととなることから本パラメータによる影響を受けることはなく、運転員等操作時間による影響はない。	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎによる格納容器温度の上昇に与える影響は小さい。例えば、事象発生から圧力容器破損までの温度上昇率は約5.5時間で約70℃であるのに対して、ゆらぎによる温度上昇率は非常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さく、評価項目となるパラメータによる影響は小さい。
外部水源の温度	35℃	31℃以下(実測値)	屋外貯水槽の水源温度として実測値及び夏季の外気温度を踏まえて設定	最確条件とした場合は、原子炉格納容器下部への注水温度が低くなり、原子炉圧力容器破損時の原子炉格納容器下部のプール水温度が低くなるが、注水温度を操作開始の起点としている運転員等操作は、運転員等操作時間による影響はない。	最確条件とした場合は、原子炉格納容器下部への注水温度が低くなり、原子炉格納容器下部のプール水温度が低い場合は、顕熱によるエネルギーの吸収量が少なく、顕熱が吸収するエネルギーが相対的に減少し、圧力スパスイクに寄与する水蒸気の発生量が低下することから、格納容器圧力の上昇は緩和されることから、評価項目となるパラメータに与える余裕は大きくなる。一方、トリガリングの発生を前提とした水蒸気爆発の観点では、低い水温は厳しめの評価を与えるが、水温の変化に対する水蒸気爆発のエネルギーの感度は小さいことから、評価項目となるパラメータに対する影響は小さい。
外部水源の容量	7,000m ³	7,000m ³ 以上(合計貯水量)	輪外貯水槽の水量を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合は、解析条件よりも水源容量の余裕が大きくなるため、水源が枯渇することはない。運転員等操作時間による影響はない。	-
燃料の容量	1,180m ³	1,180m ³ 以上(合計貯蔵量)	発電所構内に貯蔵している燃料容量を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合は、解析条件よりも燃料容量の余裕が大きくなるため、燃料が枯渇することはない。運転員等操作時間による影響はない。	-

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータを与える影響(原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用)(3/4)

項目	解析条件(初期条件、事故条件及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間を与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	解析条件	最確条件			
起因事象	給水流量の全喪失	—	原子炉水位の低下の観点で 厳しい事象を設定	大破断LOCAを考慮した場合、原子炉冷却材の流出量が増加することにより原子炉圧力容器破損に至るまでの事象進展は早まるが、操作手順(原子炉圧力容器下鏡温度に応じた原子炉格納容器下部への初期水張りを実施すること)に変わりはないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。 (添付資料3.3.5)	溶融炉心落下時の崩壊熱の影響を確認する観点から感度解析を実施した。感度解析は、事故シーケンスを「大破断LOCA+ECC S注水機能喪失」とし、本評価事故シーケンスの解析条件と同様、電源の有無にかかわらず重大事故等対処設備による原子炉注水機能について使用できないものと仮定した場合、原子炉圧力容器破損のタイミミングが早くなることを考慮したものである。その結果、事象発生から約3.3時間後に原子炉圧力容器破損に至り、圧力スバイクの最大値は約30kPa[gage]であり、圧力スバイクの最大値はベースケースの評価結果より高くなることから、評価項目を満足する。 (添付資料3.3.5)
事故条件	高圧注水機能喪失 低圧注水機能喪失 重大事故等対処設備による原子炉注水機能の喪失 全交流動力電源喪失	—	高圧注水機能として原子炉隔離時冷却系及び高圧炉心スプレイス系の機能喪失を、低圧注水機能として低圧炉心スプレイス系、低圧注水系の機能喪失を設定するとともに、重大事故等対処設備による原子炉注水機能の喪失を設定 また、すべての非常用ディーゼル機関等の機能喪失を設定 全交流動力電源喪失を想定するため、外部電源なしを設定	—	—
外部電源	外部電源なし	—	—	—	—

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響(原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用)(4/4)

項目	解析条件(初期条件、事故条件及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	解析条件	最確条件			
原子炉スクラム信号	事象発生と同時にスクラム	事象発生と同時にスクラム	事象発生と同時に原子炉スクラムするものとして設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
主蒸気隔離弁	事象発生と同時に閉止	原子炉水位低(レベル2)	主蒸気が原子炉格納容器内に保持される厳しい条件として設定	最確条件とした場合には、逃がし安全弁を通じて原子炉格納容器内に放出される蒸気量が減少することから、格納容器圧力及び温度の上昇が遅くなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。	最確条件とした場合には、逃がし安全弁を通じて原子炉格納容器内に放出される蒸気量が減少することから、格納容器圧力及び温度の上昇が遅くなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
再循環ポンプ	事象発生と同時に停止	事象発生と同時に停止	全交流動力電源喪失によるポンプ停止を踏まえて設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
逃がし安全弁	逃がし弁機能 7.58~7.79MPa[gage] 367~377t/h/個	逃がし弁機能 7.58~7.79MPa[gage] 367~377t/h/個	逃がし安全弁の逃がし弁機能の設計値として設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
	逃がし安全弁(自動減圧機能付き)の2個を開することによる原子炉減圧	逃がし安全弁(自動減圧機能付き)の2個を開することによる原子炉減圧	逃がし安全弁の設計値に基づく蒸気流量及び原子炉圧力の関係から設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
格納容器代替スプレイス(可搬型)	原子炉圧力容器破損前: 120m ³ /hにて格納容器内にスプレイス	原子炉圧力容器破損前: 120m ³ /hにて格納容器内にスプレイス	格納容器温度及び圧力抑制に必要なスプレイス流量を考慮して設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

機器条件

表3 運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕（原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用）

項目	解折条件（操作条件）の不確かさ		運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	解折上の操作開始時間	条件設定の考え方				
操作条件	原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点で開始、ペデスタル水位が2.4mとなる注水量(225m ³)が注水されたことを停止する（事象発生から約3.1時間後）	炉心損傷後の原子炉圧力容器破損による溶融炉心・コンクリート相互作用の影響緩和を考慮し設定	原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達するまでには事象発生から約3.1時間の時間余裕がある。また、格納容器代替スプレイス系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作は、原子炉圧力容器下鏡温度を監視しながら溶融炉心の炉心下部ブレナムへの移行を判断し、水張り操作を実施するため、実態の操作開始時間は解折上の設定とほぼ同等であり、操作開始時間に与える影響も小さい。当該操作は、解折コード及び解折条件（操作条件を除く）の不確かさにより操作開始時間が遅れる可能性があるが、当該操作に対応する運転員、緊急時対策要員（現場）に他の並列操作はなく、また、現場操作における評価上の所要時間には余裕を見込んで算定していることから、他の操作に与える影響はない。	実態の操作開始時間とほぼ同等であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。	格納容器代替スプレイス系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉圧力容器破損前の初期水張り）については、原子炉圧力容器破損前の原子炉格納容器冷却を兼ねる操作であり、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達後、速やかに実施することが望ましいが、原子炉圧力容器破損前に、格納容器の圧力及び温度が原子炉格納容器の限界圧力及び限界温度に到達する前に安全弁（自動減圧機能付き）により、時間余裕がある。	解折上は作業成立性を踏まえ、事象発生から約3.1時間後としており、このうち、格納容器代替スプレイス系（可搬型）による原子炉圧力容器破損前の初期水張りの系統構成は、所要時間2時間10分想定のとおり、訓練実績では約1時間41分である。想定を意図している作業が実施可能なことを確認した。
	【認知】 中央制御室にて原子炉スクラムを確認した場合に緊急時対策要員（現場）を招集することとしており、高圧・低圧注水機能喪失を判断した場合には直ちに可搬型による注水準備操作に着手することとしており、この認知に直る時間として10分間を想定している。そのため、認知遅れ等による操作時間に与える影響はなし。 原子炉格納容器下部への注水操作は、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達したことを確認して開始するが、損傷炉心への注水による冷却性を確認するため、原子炉圧力容器下鏡温度は継続監視しており、認知に大幅な遅れが生じることは考えにくい。よって、認知遅れにより操作開始時間に与える影響はなし。 【要員配置】 格納容器代替スプレイス系（可搬型）による原子炉圧力容器破損前の初期水張りは、中央制御室にて弁操作を行う運転員と、現場にて可搬型による注水のためのホース敷設等の注水準備操作を行う緊急時対策要員（現場）が各々配置されている。注水準備操作は現場にて緊急時対策要員（現場）が実施することとなるが、本操作を行う要員は、操作が終わるまで他の操作は行わない。このため、要員配置が操作開始時間に与える影響はなし。 【移動・操作所要時間】 現場での格納容器代替スプレイス系（可搬型）による注水準備操作は、移動時間を含め、事象発生から2時間10分で行うことを想定している。この後、原子炉圧力容器下鏡温度300℃到達を確認し、中央制御室で常設代替交流電源設備により確保した電源により弁操作を行うことにより注水を開始することとなる。以上より、移動・操作所要時間が操作開始時間と与える影響はなし。 【他の並列操作有無】 現場にて緊急時対策要員（現場）が格納容器代替スプレイス系（可搬型）による注水のためのホース敷設等の注水準備操作を行ったのち、中央制御室にて運転員が弁操作を行うことにより注水は開始される。当該操作に対応する運転員、緊急時対策要員（現場）に他の並列操作はなく、操作開始時間に与える影響はなし。 【操作の確実さ】 中央制御室内における操作は、操作盤での簡易な操作のため、誤操作は起こりにくく、そのため誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。また緊急時対策要員（現場）の現場操作は、操作の信頼性向上や要員の安全のため2人1組で実施することとしており、誤操作は起こりにくく、誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。					

プラント損傷状態をLOCAとした場合の圧カスパイクへの影響

1. 評価の目的

今回の申請において示した解析ケース（以下「ベースケース」という。）では、格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の熔融燃料－冷却材相互作用」の評価事故シーケンスのプラント損傷状態として、水蒸気爆発に対する条件設定の厳しさを考慮し、熔融炉心の内部エネルギーの観点でより厳しいと考えられるTQUVを選定しており、起因事象としては原子炉水位の低下の観点で最も厳しい給水流量の全喪失を設定している。

一方、起因事象として大破断LOCAを仮定した場合、原子炉冷却材圧力バウンダリからの原子炉冷却材の放出によって格納容器圧力が上昇することに加え、原子炉圧力容器破損のタイミングが早くなり、圧カスパイクの最大値がベースケースに比べて高い値となる可能性が考えられる。

このため、解析条件のうち初期条件の不確かさとして、起因事象が大破断LOCAの場合の圧カスパイクへの影響を確認する。

2. 評価条件

ベースケースの評価条件に対する変更点は以下のとおり。このほかの評価条件は、ベースケースの評価条件と同等である。

- ・起因事象を大破断LOCAとし、事故シーケンスを「大破断LOCA+ECCS注水機能喪失+全交流動力電源喪失」とした。
- ・リロケーションに伴い原子炉圧力容器下鏡温度が急激に上昇するため、これに備えた運転手順に従い、原子炉圧力容器下鏡温度300℃到達後にペDESTAL代替注水系（常設）による原子炉格納容器下部への注水を200m³/hにて開始し、ペDESTAL水位が2.4mに到達していることを確認した後、原子炉格納容器下部への注水を停止するものとした。
- ・原子炉圧力容器破損後には、ペDESTAL代替注水系（常設）による原子炉格納容器下部注水を実施するものとした。

3. 評価結果

格納容器圧力の評価結果を図1、格納容器温度の評価結果を図2に示す。

事象発生から約3.3時間後に原子炉圧力容器破損に至り、熔融炉心が原子炉格納容器下部に落下した後は格納容器スプレイ（原子炉圧力容器破損後の注水）を開始することによって、格納容器温度は低下する挙動を示している。圧カスパイクのピーク値は約301kPa[gage]であり、圧カスパイクのピーク値はベースケースの結果より高くなるものの、格納容器限界圧力の853kPa[gage]を下回るため、原

子炉格納容器バウンダリの機能は維持されることを確認した。

(補足) 過渡起因事象又はLOCA事象の原子炉圧力容器破損時の各判断パラメータ挙動は下表のとおり。

「過渡起因事象」時		「LOCA事象」時	
原子炉圧力	「急激な低下」 (原子炉圧力容器 高圧時)	ペDESTAL温度	「急激な低下」※1
ドライウエル圧力	「急激な上昇」	サプレッション・プー ル水温度	「急激な上昇」
ペDESTAL温度	「急激な上昇」	ドライウエル水素濃度	「上昇開始」
ペDESTAL水温度	「急激な上昇」又は 「指示値喪失」	ペDESTAL水温度	「急激な上昇」又は 「指示値喪失」

※1 LOCAを起因とした事象発生時において原子炉注水が出来ない状況下においては、原子炉圧力容器破損以前に原子炉圧力容器とドライウエルが破断口を通じて連通しているため、炉内の過熱蒸気がドライウエルに放出される。そのため、原子炉圧力容器破損時には一次系の高温ガスが原子炉格納容器下部に放出されない状況となり、原子炉圧力容器破損時に原子炉格納容器下部のプール水（LOCA破断水又は事前水張り水）とデブリが触れて水蒸気が発生することで、ペDESTAL温度（原子炉格納容器下部の空間部における雰囲気温度）は急低下する傾向となる。

以 上

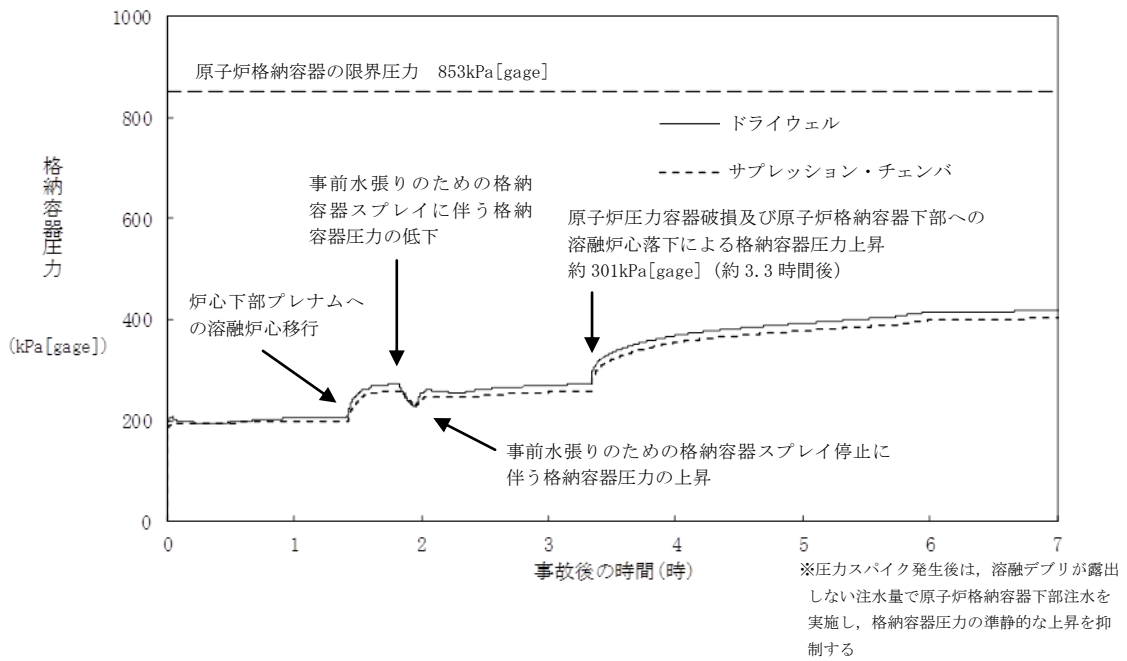


図1 格納容器圧力の推移

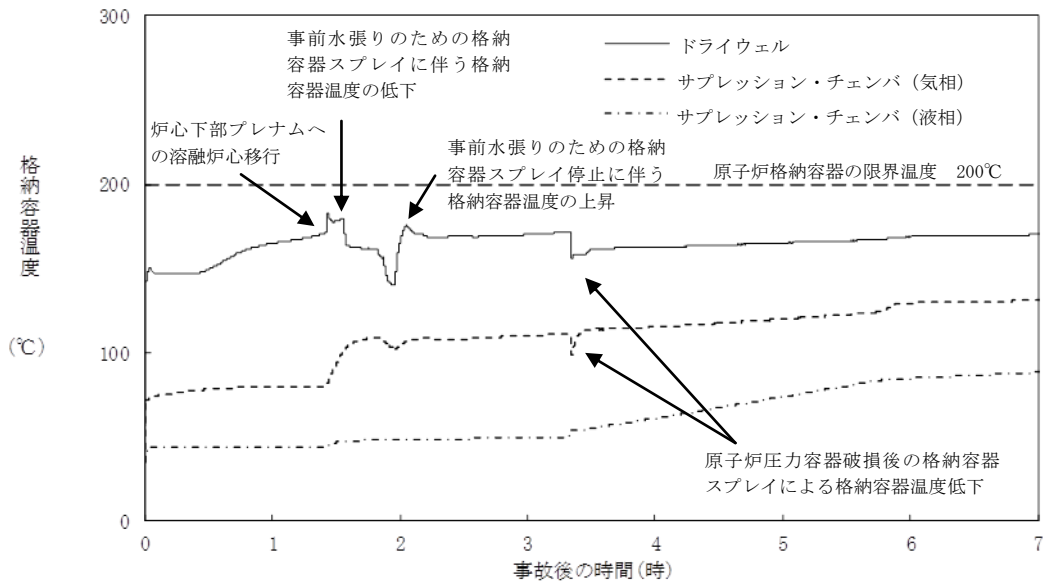


図2 格納容器温度の推移

3.4 水素燃焼

3.4.1 格納容器破損モードの特徴、格納容器破損防止対策

(1) 格納容器破損モード内のプラント損傷状態

格納容器破損モード「水素燃焼」に至る可能性のあるプラント損傷状態は、確率論的リスク評価の結果からは抽出されない。このため、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、「水素燃焼」の観点で評価することが適切と考えられる評価事故シーケンスを選定する。

(2) 格納容器破損モードの特徴及び格納容器破損防止対策の基本的考え方

格納容器破損モード「水素燃焼」では、ジルコニウム-水反応、水の放射線分解、金属腐食、熔融炉心・コンクリート相互作用等によって発生する水素ガスによって原子炉格納容器内の水素濃度が上昇し、水の放射線分解によって発生する酸素ガスによって原子炉格納容器内の酸素濃度が上昇する。このため、緩和措置がとられない場合には、ジルコニウム-水反応等によって発生する水素ガスと原子炉格納容器内の酸素ガスが反応することによって激しい燃焼が生じ、原子炉格納容器の破損に至る。

したがって、本格納容器破損モードは、窒素ガス置換による原子炉格納容器内雰囲気の不活性化に加え、可搬式窒素供給装置による原子炉格納容器内への窒素注入によって、原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度が可燃領域に至ることを防止することにより、原子炉格納容器の破損を防止する。また、熔融炉心・コンクリート相互作用による水素ガス発生に対しては「3.5 熔融炉心・コンクリート相互作用」のとおり、原子炉格納容器下部への注水によって水素ガス発生を抑制する。

なお、2号炉において重大事故が発生した場合、ジルコニウム-水反応によって水素濃度は13vol%^{※1}（ドライ条件）を大きく上回る。このため、本格納容器破損モードによる原子炉格納容器の破損を防止するうえでは、水素濃度及び酸素濃度が可燃領域に至ることを防止することが重要であるが、特に酸素濃度が可燃領域に至ることを防止することが重要である。また、水の放射線分解、金属腐食、熔融炉心・コンクリート相互作用等による水素ガス発生の影響は小さい。

※1 原子炉格納容器内の水素濃度がドライ条件に換算して13vol%以下又は酸素濃度が5vol%以下であれば爆轟を防止できると判断される。

(3) 格納容器破損防止対策

格納容器破損モード「水素燃焼」で想定される事故シーケンスに対して、窒素ガス置換による原子炉格納容器内雰囲気の不活性化に加え、可搬式窒素供給装置による原子炉格納容器内への窒素注入により、水素燃焼による原子炉格納容器の破損を防止する。

「3.4.2 格納容器破損防止対策の有効性評価」に示すとおり、格納容器破損モード「水素燃焼」において評価対象とした事故シーケンスは、「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」のうち、「3.1.2 残留熱代替除去系を使用する場合」と同じであることから、格納容器破損防止対策は「3.1.2.1 格納容器破損防止対策」と同じである。

3.4.2 格納容器破損防止対策の有効性評価

(1) 有効性評価の方法

本格納容器破損モードを評価するうえで選定した評価事故シーケンスは、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、酸素濃度が他のプラント損傷状態よりも相対的に高くなる可能性が考えられ、炉心損傷を防止できない事故シーケンスとして抽出されている「冷却材喪失(大破断LOCA)＋ECCS注水機能喪失＋全交流動力電源喪失」である。

この事故シーケンスは、「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)」の評価事故シーケンスと同じであることから、本格納容器破損モードの評価事故シーケンスは、「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)」のうち、「3.1.2 残留熱代替除去系を使用する場合」と同じ評価事故シーケンスとした。また、評価事故シーケンスを「3.1.3 残留熱代替除去系を使用しない場合」の評価事故シーケンスとしない理由は、「3.1.3 残留熱代替除去系を使用しない場合」では格納容器フィルタベント系に期待することで、原子炉格納容器内の気体が排出され、水素ガス及び酸素ガスの絶対量が減少し、水素ガス及び酸素ガスの分圧が低下するとともに、サプレッション・チェンバのプール水の減圧沸騰等によって発生する水蒸気とともに原子炉格納容器外に排出され続けることで、水素ガス及び酸素ガスの分圧並びに水素濃度及び酸素濃度が低く維持され、原子炉格納容器内での水素燃焼の可能性が無視できる状態となるためである。

(添付資料 3.4.1)

本評価事故シーケンスでは、炉心における崩壊熱、燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形、沸騰・ボイド率変化、気液分離(水位変化)・対向流、原子炉圧力容器におけるECCS注水(給水系・代替注水設備含む)、炉心損傷後の原子炉圧力容器におけるリロケーション、構造材との熱伝達、放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生、原子炉圧力容器内FP挙動、原子炉格納容器における格納容器各領域間の流動、サプレッション・プール冷却、スプレイ冷却、放射線水分解等による水素ガス・酸素ガス発生並びに炉心損傷後の原子炉格納容器における原子炉格納容器内FP挙動が重要現象となる。よって、これらの現象を適切に評価することが可能であり、原子炉圧力容器内及び原子炉格納容器内の熱水力モデルを備え、かつ、炉心損傷後のシビアアクシデント特有の熔融炉心挙動に関するモデルを有するシビアアクシデント総合解析コードMAAPにより格納容器圧力、格納容器温度、原子炉格納容器内の気相濃度等の過渡応答を求める。

また、解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、本評価事故シーケンスにおける運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価する。

(2) 有効性評価の条件

本評価事故シーケンスは、「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)」のうち、「3.1.2 残留熱代替除去系を使用する場合」と同じであることから、有効性評価の条件は「3.1.2.2(2) 有効性評価の条件」と同じである。このほかに、本評価事故シーケンスを評価する上で着目すべき主要な解析条件を第3.4.2-1表に示す。また、主要な解析条件について、本評価事故シーケンス特有の解析条件を以下に示す。

a. 初期条件

(a) 酸素濃度

原子炉格納容器の初期酸素濃度、水の放射線分解によって発生する水素ガス及び酸素ガス並びに可搬式窒素供給装置による原子炉格納容器内への窒素注入に伴い注入される酸素を考慮することとする。原子炉格納容器の初期酸素濃度は、運転上許容される上限の 2.5vol%（ドライ条件）とする。

b. 事故条件

(a) 炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量

炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量は、解析コードM A A P の評価結果から得られた値を用いた。これは、窒素ガス置換による原子炉格納容器内雰囲気の不活性化によって運転中の原子炉格納容器内の酸素濃度が低く管理されていること及び解析コードM A A P の評価結果で水素濃度が 13vol% を超えることを考慮すると、酸素濃度の上昇の観点から厳しいシーケンスとすることが適切と考えたためである。仮に全炉心内のジルコニウム量の 75% が水と反応し、水素ガスが発生した場合、原子炉格納容器内の水素濃度が増加するため、相対的に水の放射線分解で発生する酸素ガスの濃度は低下する。

(b) 水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガスの発生割合

水の放射線分解によって発生する水素ガス及び酸素ガスの発生量は、解析コードM A A P で得られる崩壊熱をもとに評価する。ここで、水素ガス及び酸素ガスの発生割合（G 値(100eV あたりの分子発生量)、以下「G 値」という。）は、それぞれ 0.06, 0.03 とする。また、原子炉冷却材による放射線エネルギーの吸収割合は、原子炉圧力容器内については、ベータ線、ガンマ線ともに 0.1, 原子炉圧力容器外の核分裂生成物については、ベータ線、ガンマ線ともに 1 とする。

(添付資料 3.4.2)

(c) 金属腐食等による水素ガス発生量

原子炉格納容器内の亜鉛等の反応や炉内構造物の金属腐食によって発生する水素ガスの発生量は、ジルコニウム-水反応による水素ガス発生量に比べて多いが、水素ガスの発生は、原子炉格納容器内の水素濃度を上昇させ、酸素濃度を低下させると考えられることから、金属腐食等による水素ガス発生量は考慮しない。

(添付資料 3.1.2.3)

(3) 有効性評価の結果

本評価事故シーケンスは、「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」のうち、「3.1.2 残留熱代替除去系を使用する場合」と同じであることから、有効性評価の結果は「3.1.2.2 (4) 有効性評価の結果」と同じである。このほかに、本評価事故シーケンスを評価する上で着目すべき評価結果として、格納容器圧力、格納容器温度、ドライウェル及びサブプレッション・チェンバ気相濃度（ウェット条件、ドライ条件）の推移を第 3.4.2-1(1) 図から第 3.4.2-1(6) 図に、事象発生から 7 日後（168 時間後）の酸素濃度を第 3.4.2-2 表に示す。

a. 事象進展

事象進展は「3.1.2.2(4)a. 事象進展」と同じである。

上記の事象進展に伴い、主に炉心の露出から炉心再冠水までの間に、全炉心内のジルコニウム量の約7.8%が水と反応して水素ガスが発生する。また、炉心再冠水に伴い、事象発生から約1.8時間後にジルコニウム-水反応は停止する。発生した水素ガスは原子炉圧力容器内で発生する蒸気とともに、破断口からドライウエルに流入する。また、原子炉圧力容器内及びサプレッション・チェンバ内における核分裂生成物による水の放射線分解により水素ガス及び酸素ガスが発生する。残留熱代替除去系による原子炉格納容器除熱の開始後は、ドライウエル内で蒸気の凝縮が進むことに伴い、原子炉格納容器内の酸素濃度が相対的に上昇するが、事象発生から12時間後に、可搬式窒素供給装置を用いた原子炉格納容器内への窒素注入操作を実施することで、原子炉格納容器内酸素濃度の上昇が抑制される。

b. 評価項目等

原子炉格納容器内の水素濃度は、ウェット条件においても事象発生直後から13vol%を上回るが、ウェット条件における酸素濃度は、事象発生から7日後までの間、可燃限界を上回ることなく、酸素ガスの蓄積が最も進む事象発生から7日後においても約1.9vol%であり、可燃限界を下回る。

ドライ条件では、事象発生約4時間後から約12時間後までの間、ドライウエルにおける酸素濃度が可燃限界である5vol%を上回る。この間、ウェット条件では、LOCA後のブローダウンによって、ドライウエルに存在する非凝縮性ガスが水蒸気と共にサプレッション・チェンバに送り込まれ、破断口から供給される水蒸気でドライウエル内が満たされるため、ドライウエル内のほぼ100%が水蒸気となっている。そのため、この間のドライ条件でのドライウエル内の気体組成は、ほぼ水の放射線分解によって生じる水素ガス及び酸素ガスの割合となり、そのウェット条件での酸素ガス濃度は1vol%未満(約0.1vol%)である。また、ドライウエル内の非凝縮性ガス(水素ガス、酸素ガス及び窒素ガス)の分圧の和は大気圧よりも低く、0.006MPa[abs]未満(水素及び酸素の分圧の和は0.002MPa[abs]未満)である。この間のサプレッション・チェンバ内のウェット条件での水蒸気の濃度は約3vol%であり、サプレッション・チェンバ内の全圧が0.43MPa[abs]以上であることから、非凝縮性ガス(水素ガス、酸素ガス及び窒素ガス)の分圧は少なくとも0.42MPa[abs]以上である。このため、仮にドライウエル内の水蒸気が凝縮してドライウエル内の圧力が低下し、相対的に水素濃度及び酸素濃度が上昇しても、ドライウエル内の水素濃度及び酸素濃度が可燃限界を上回る前に、サプレッション・チェンバから酸素濃度が5.0vol%未満の気体が流入する。このため、この間においてドライウエルの酸素濃度が現実に可燃限界である5vol%を上回ることはない。事象発生約12時間後以降は、ドライ条件を仮定しても酸素濃度は5.0vol%未満で推移し、事象発生から7日後の酸素濃度は、ドライウエルにおいて約1.2vol%、サプレッション・チェンバにおいて約2.8vol%である。したがって、格納容器スプレイの誤動作等により水蒸気量が低下しても、可燃限界である5vol%に達することはない。

その後も水素濃度及び酸素濃度を監視し、原子炉格納容器内の水素及び酸

素濃度が可燃領域に至る場合については、格納容器ベントによって、その水素濃度及び酸素濃度を低減することで、安定状態を維持できる。

また、原子炉格納容器内は、原子炉冷却材の蒸発によって発生する水蒸気で満たされるため、原子炉格納容器内がドライ条件となることは考えにくい。なお、事象発生後の168時間後における崩壊熱は約7.27MWであるが、これに相当する水蒸気発生量は約 $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}[\text{normal}]$ である。このため、水素燃焼の可能性の有無は、ウェット条件における気相濃度において判断することが妥当であると考えられる。

本評価では、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(6)の評価項目について、酸素濃度をパラメータとして対策の有効性を確認した。また、(7)の評価項目について、可燃性ガスの燃焼が生じないことを確認した。(7)の評価項目のうち、可燃性ガスの蓄積による(1)の評価項目への影響については、「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」のうち、「3.1.2 残留熱代替除去系を使用する場合」にて評価項目を満足することを確認している。

なお、本評価は選定された評価事故シーケンスに対する、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(6)の評価項目について対策の有効性を評価するものであり、原子炉格納容器下部に熔融炉心が落下しない場合の評価であるが、熔融炉心が原子炉格納容器下部に落下した場合の熔融炉心・コンクリート相互作用による水素ガス発生の影響については、「3.5 熔融炉心・コンクリート相互作用」において、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(6)及び(7)の評価項目について対策の有効性を確認できる。

(添付資料 3.4.3)

3.4.3 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価

本評価事故シーケンスは、「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」のうち、「3.1.2 残留熱代替除去系を使用する場合」と同じであることから、解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価は「3.1.2.3 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価」と同様である。よって以下では、格納容器破損モード「水素燃焼」を評価する上で着目すべき不確かさの影響評価結果を示す。

(1) 解析コードにおける重要現象の不確かさの影響評価

本評価事故シーケンスにおける、解析コードにおける重要現象の不確かさの影響評価は、「3.1.2.3(1) 解析コードにおける重要現象の不確かさの影響評価」と同様である。

(2) 解析条件の不確かさの影響評価

a. 初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件

初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件は、「3.1.2.3(2)a. 初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件」と同様であるが、本評価事故シーケンスを評価するうえで、事象進展に有意な影響を与えると考えられる項目に関する影響評価の結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

初期条件の酸素濃度は、解析条件の 2.5vol%（ドライ条件）に対して最確条件は約 2.5vol%（ドライ条件）以下であり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、初期酸素濃度が低くなるため、本評価事故シーケンスにおける原子炉格納容器内の酸素濃度推移が低く抑えられるが、本評価事故シーケンスにおいては原子炉格納容器内の酸素濃度を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

事故条件の炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量は、解析条件の全炉心内のジルコニウム量の約 7.8%が水と反応して発生する水素ガス量に対して最確条件は事象進展に依存するものであり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、水素ガス発生量が変動する可能性があるが、本評価事故シーケンスにおいては水素ガス発生量を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

事故条件の金属腐食等による水素ガス発生量は、最確条件とした場合は、水素ガス発生量が増加するため、本評価事故シーケンスにおける原子炉格納容器内の酸素濃度推移が低く抑えられるが、本評価事故シーケンスにおいては原子炉格納容器内の酸素濃度を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

事故条件の水の放射線分解による G 値は、解析条件の水素ガス：0.06、酸素ガス：0.03 に対して最確条件は同じであるが、G 値の不確かさにより水の放射線分解による酸素ガス発生量が大幅に増加する場合、原子炉格納容器内の酸素濃度が可燃領域又は爆轟領域となる可能性がある。その場合には、格納容器フィルタベント系を使用し、原子炉格納容器内の気体を排出する必要がある。なお、格納容器フィルタベント系に係る運転員等の操作については、「3.1.3 残留熱代替除去系を使用しない場合」において、成立性を確認している。

(添付資料3.4.4)

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

初期条件の酸素濃度は、解析条件の 2.5vol%（ドライ条件）に対して最確条件は約 2.5vol%（ドライ条件）以下であり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、初期酸素濃度が低くなるため、本評価事故シーケンスにおける原子炉格納容器内の酸素濃度推移が低く抑えられることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

事故条件の炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量は、解析条件の全炉心内のジルコニウム量の約 7.8%が水と反応して発生する水素ガス量に対して最確条件は事象進展に依存するものであり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、水素ガス発生量が変動する可能性がある。炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量は、運転員等操作である低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水の操作開始時間に依存して変動するが、低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水の操作開始時間については、「3.1.2.3(2)b. 操作条件」にて解析上の操作開始時間と実態の操作開始時間はほぼ同等と評価しており、炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量に与える影響は小さい。仮

に低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水の操作開始が早まった場合、第 3.4.3-1(1)図及び第 3.4.3-1(2)図に示すとおり、全炉心内のジルコニウム量の約 11.7%が水と反応し、炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量は 5 割程度増加するが、ウェット条件における酸素濃度は、酸素ガスの蓄積が最も進む事象発生から 7 日後においても約 1.9vol%であり、可燃限界を下回る。また、本評価における酸素濃度と同等の値であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。また、仮に低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水の操作開始が遅れた場合、第 3.4.3-1(3)図及び第 3.4.3-1(4)図に示すとおり、全炉心内のジルコニウム量の約 6.2%が水と反応し、炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量は 16%程度減少するが、ウェット条件における酸素濃度は、酸素ガスの蓄積が最も進む事象発生から 7 日後においても約 2.1vol%であり、可燃限界を下回る。また、本評価における酸素濃度と同等の値であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

事故条件の金属腐食等による水素ガス発生量は、最確条件とした場合は、水素ガス発生量が増加するため、本評価事故シナリオにおける原子炉格納容器内の酸素濃度推移が低く抑えられることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

事故条件の水の放射線分解による G 値は、解析条件の水素ガス：0.06、酸素ガス：0.03 に対して最確条件は同じであるが、G 値の不確かさにより水の放射線分解による酸素ガス発生量が大幅に増加する場合、原子炉格納容器内の酸素濃度が可燃領域又は爆轟領域となる可能性がある。その場合には、格納容器フィルタベント系を使用し、原子炉格納容器内の気体を排出することが可能であるため、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

G 値の不確かさにより水の放射線分解による酸素ガス発生量が大幅に増加する場合について、設計基準事故対処設備である可燃性ガス濃度制御系の性能評価に用いている G 値（沸騰状態の場合、水素：0.4、酸素：0.2、非沸騰状態の場合、水素：0.25、酸素：0.125）を使用した感度解析を実施した。第 3.4.3-1(5)図から第 3.4.3-1(9)図に示すとおり、原子炉格納容器内の酸素濃度は、ドライ条件において事象発生から約 85 時間で 4.4vol%に到達するが、格納容器フィルタベント系を用いた原子炉格納容器内の気体の排出操作には十分な時間余裕がある。4.4vol%到達時点で原子炉格納容器内の気体の排出操作を実施すると、水蒸気とともに非凝縮性ガスが原子炉格納容器外に押し出され、また、原子炉格納容器内は、減圧沸騰による原子炉冷却材の蒸発によって発生する水蒸気で満たされるため、原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度はほぼ 0 vol%まで低下することから、水素燃焼が発生することはない。

格納容器フィルタベント系による対応が生じる場合、その対応フローは「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」のうち、「3.1.3 残留熱代替除去系を使用しない場合」と同じであり、格納容器フィルタベント系の操作が必要となる時間は、「3.1.3 残留熱代替除去系を使用しない場合」よりも、本感度解析による評価結果の方が遅いことから、水素燃焼を防止する観点での事故対応は十分に可能となる。大気

中へのCs-137の総放出量の観点でも、本感度解析による評価結果の方が、事象発生から原子炉格納容器内の気体の排出操作までの時間が長いことから、「3.1.3 残留熱代替除去系を使用しない場合」の評価結果である約4.8TBqを超えることはなく、評価項目である100TBqを十分に下回る。
(添付資料3.4.1, 3.4.4, 3.4.5)

b. 操作条件

本評価事故シーケンスにおける操作条件は、「3.1.2.3(2)b. 操作条件」と同様である。

(3) 操作時間余裕の把握

本評価事故シーケンスにおける操作時間余裕の把握は、「3.1.2.3(3) 操作時間余裕の把握」と同様である。

(4) まとめ

解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を確認した。その結果、解析コード及び解析条件の不確かさが運転員等操作時間に与える影響等を考慮した場合においても、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。このほか、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間には時間余裕がある。

3.4.4 必要な要員及び資源の評価

本評価事故シーケンスは、「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」のうち、「3.1.2 残留熱代替除去系を使用する場合」と同じであることから、必要な要員及び資源の評価は「3.1.2.4 必要な要員及び資源の評価」と同じである。

3.4.5 結論

格納容器破損モード「水素燃焼」では、ジルコニウム-水反応等によって発生した水素ガスと、水の放射線分解によって発生した酸素ガスが原子炉格納容器内で反応することによって激しい燃焼が生じ、原子炉格納容器の破損に至ることが特徴である。格納容器破損モード「水素燃焼」に対する格納容器破損防止対策としては、窒素ガス置換による原子炉格納容器内雰囲気の不活性化に加え、可搬式窒素供給装置による原子炉格納容器内への窒素注入手段を整備している。

格納容器破損モード「水素燃焼」では、酸素濃度が他のプラント損傷状態よりも相対的に高くなる可能性が考えられ、炉心損傷を防止できない事故シーケンスとして抽出されている評価事故シーケンス「冷却材喪失（大破断LOCA）+ ECCS注水機能喪失+全交流動力電源喪失」について、有効性評価を行った。

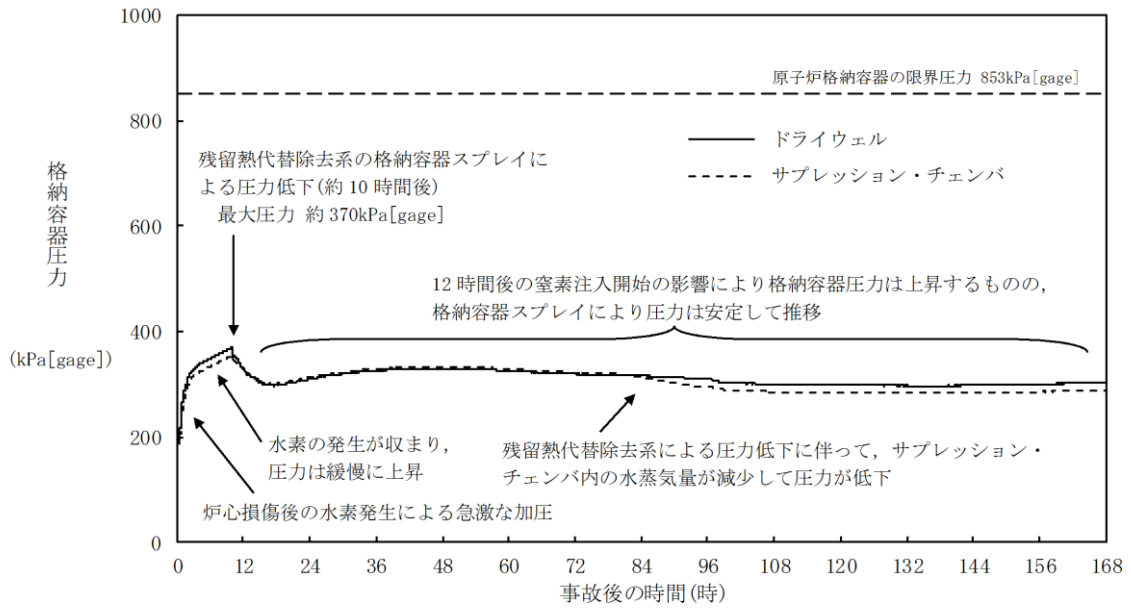
上記の場合においても、窒素ガス置換による原子炉格納容器内雰囲気の不活性化及び可搬式窒素供給装置を用いた原子炉格納容器内への窒素注入により、酸素濃度が可燃限界である5vol%（ドライ条件）以下となることから、水素燃焼に至ることはなく、評価項目を満足している。また、安定状態を維持できる。

解析コード及び解析条件の不確かさについて確認した結果、運転員等操作時間に与える影響及び評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。また、対策

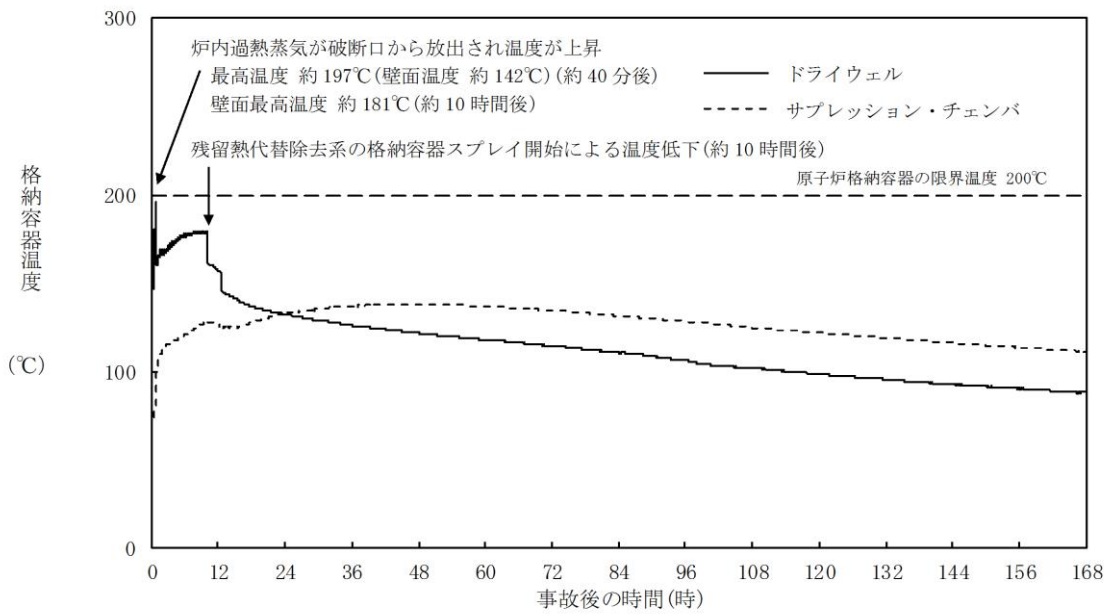
の有効性が確認できる範囲内において、操作時間余裕について確認した結果、操作が遅れた場合でも一定の余裕がある。

重大事故等対策時に必要な要員は、運転員及び緊急時対策要員にて確保可能である。また、必要な水源、燃料及び電源も供給可能である。

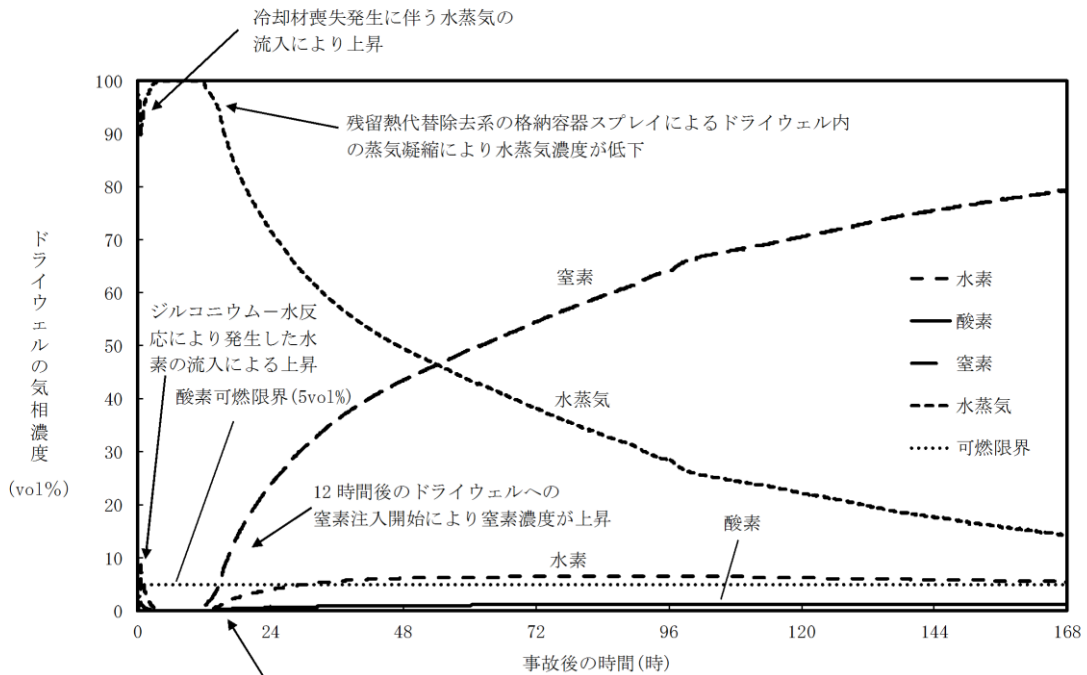
以上のことから、窒素ガス置換による原子炉格納容器内雰囲気の不活性化及び可搬式窒素供給装置を用いた原子炉格納容器内への窒素注入手段等の格納容器破損防止対策は、評価事故シーケンスに対して有効であることが確認でき、格納容器破損モード「水素燃焼」に対して有効である。



第 3.4.2-1(1) 図 格納容器圧力の推移

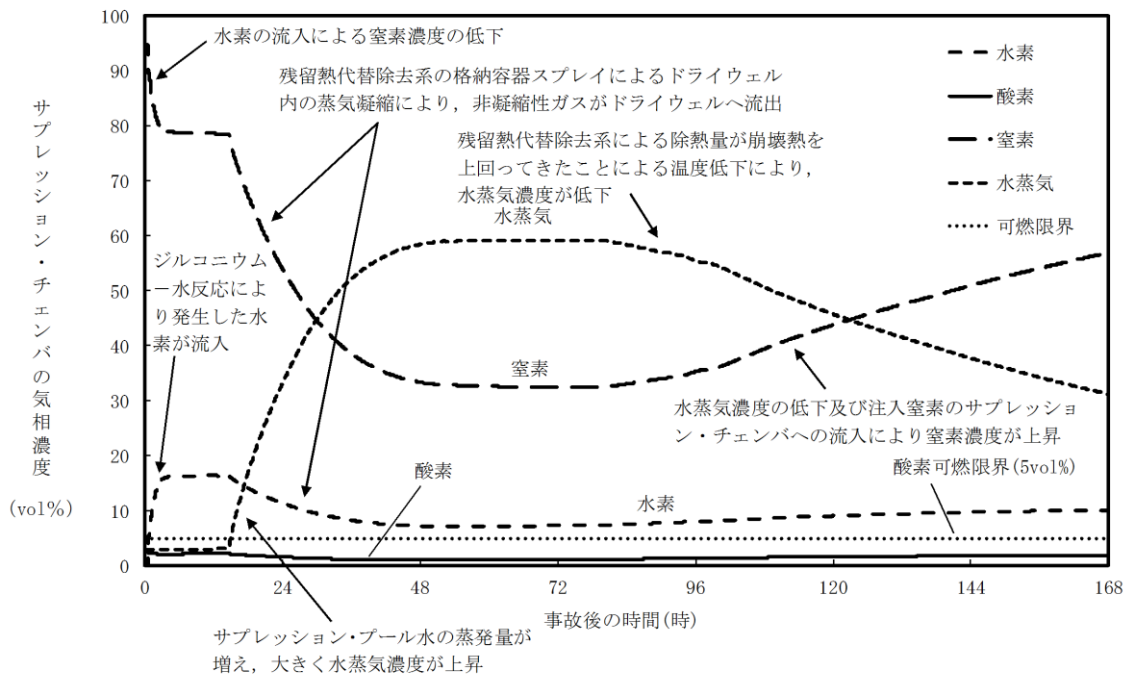


第 3.4.2-1(2) 図 格納容器温度の推移

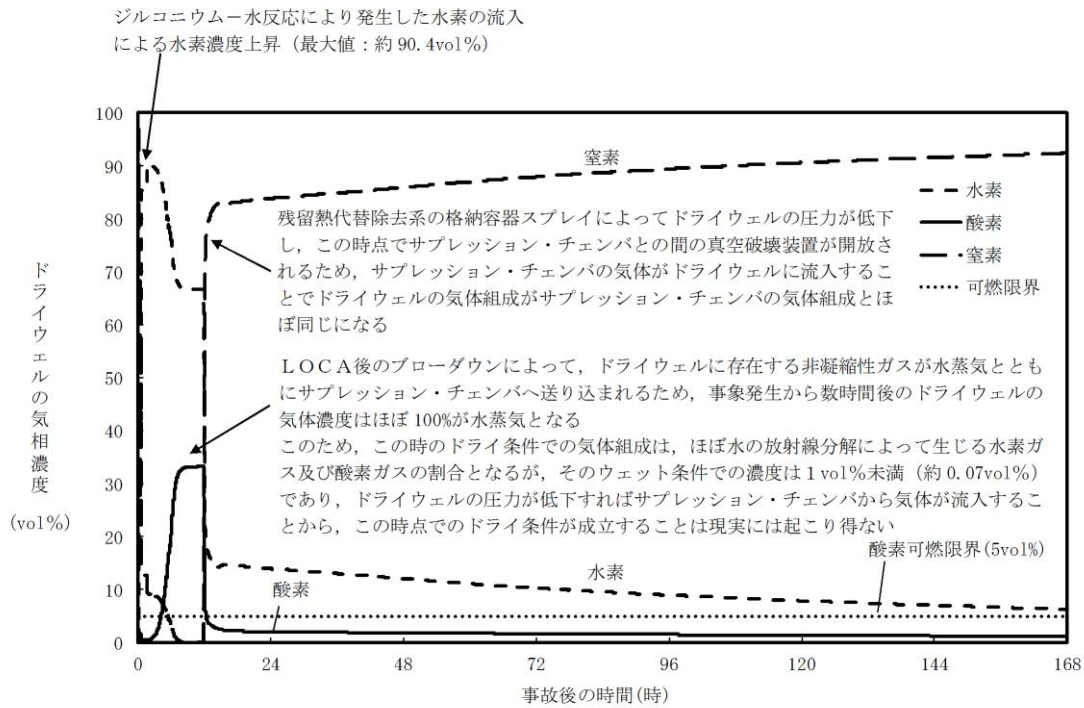


残留熱代替除去系の格納容器スプレイによるドライウェル内の蒸気凝縮により、サブプレッション・チェンバ内の非凝縮性ガスがドライウェルへ流入し、非凝縮性ガスの濃度が上昇

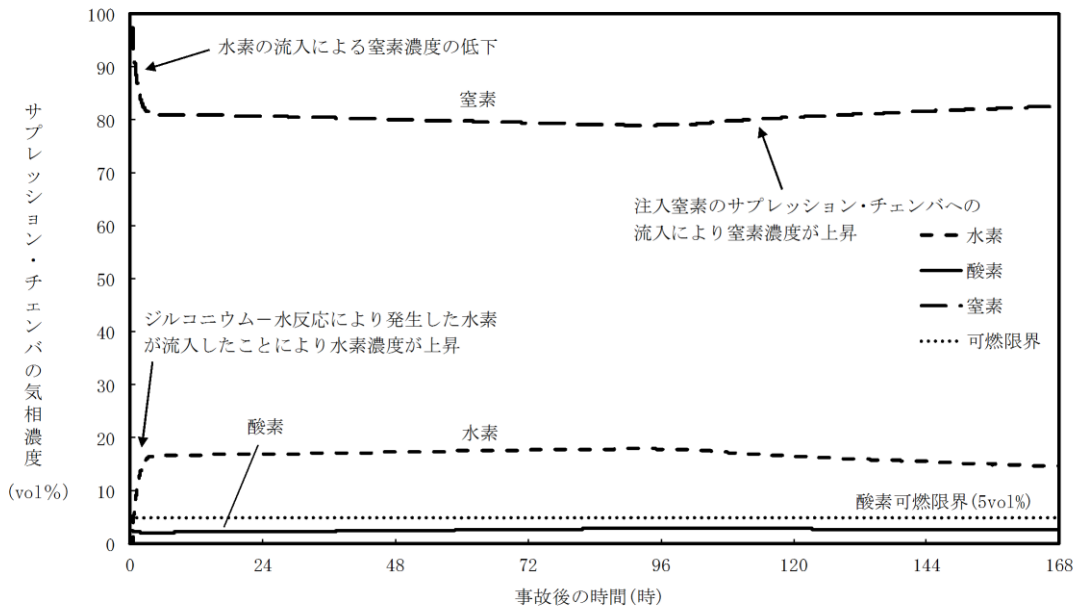
第 3. 4. 2-1 (3) 図 ドライウェル気相濃度の推移 (ウェット条件)



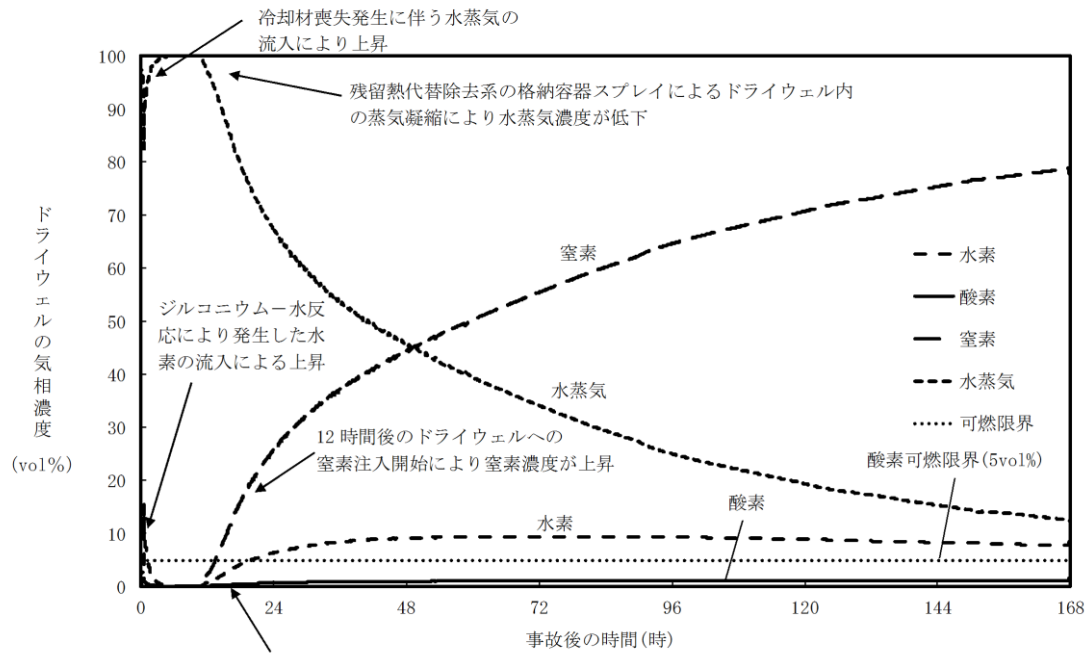
第 3. 4. 2-1 (4) 図 サプレッション・チェンバ気相濃度の推移 (ウェット条件)



第 3. 4. 2-1 (5) 図 ドライウエルの気相濃度の推移(ドライ条件)

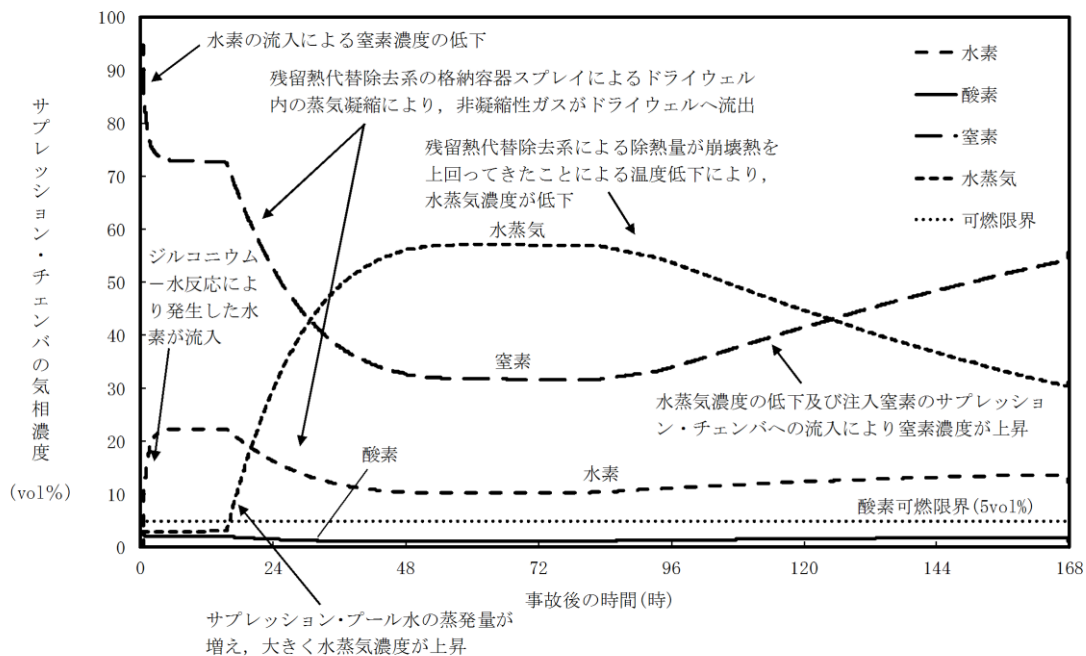


第 3. 4. 2-1 (6) 図 サプレッション・チェンバの気相濃度の推移(ドライ条件)

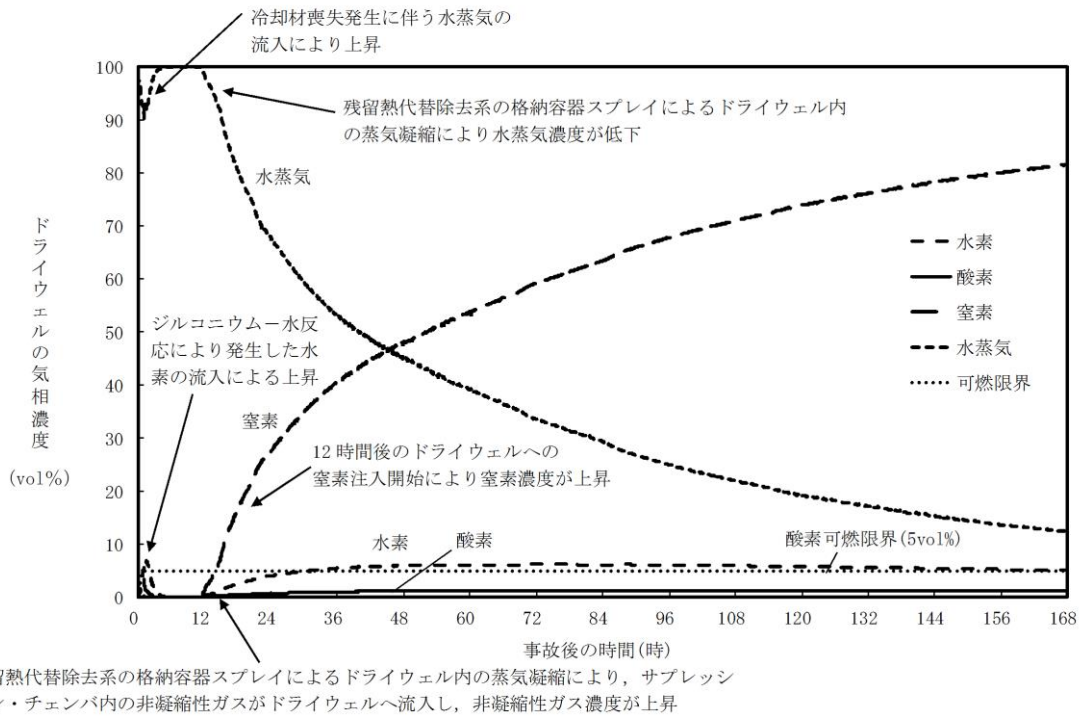


残留熱代替除去系の格納容器スプレイによるドライウエル内の蒸気凝縮により、サブプレッション・チェンバ内の非凝縮性ガスがドライウエルへ流入し、非凝縮性ガスの濃度が上昇

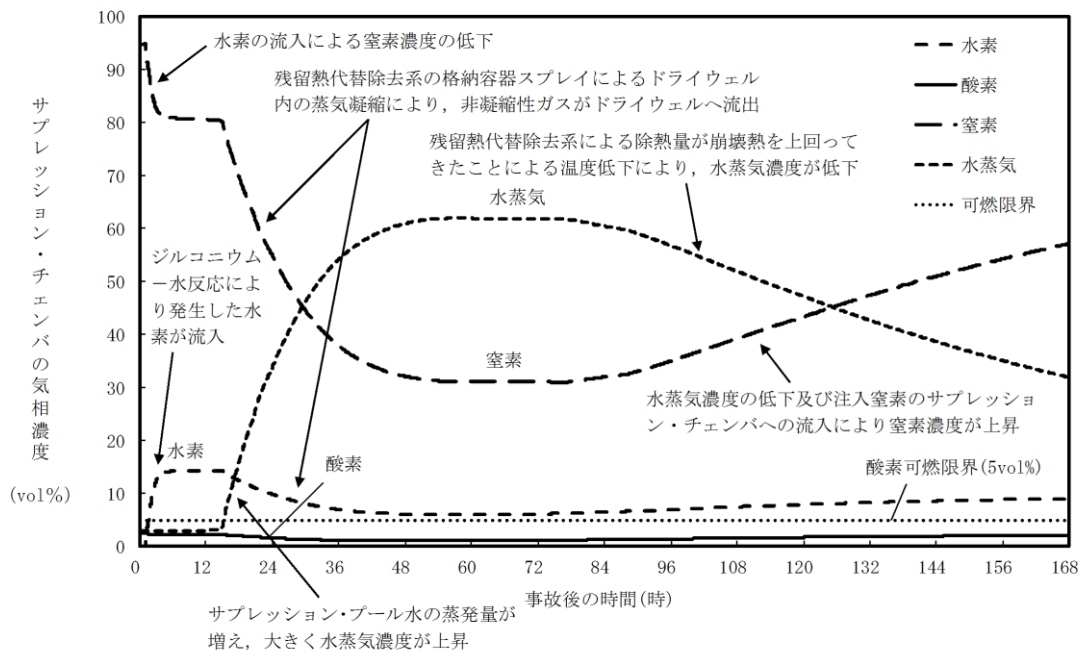
第 3. 4. 3-1(1) 図 事象発生から 25 分後に注水を開始した場合のドライウエルの気相濃度の推移(ウェット条件)



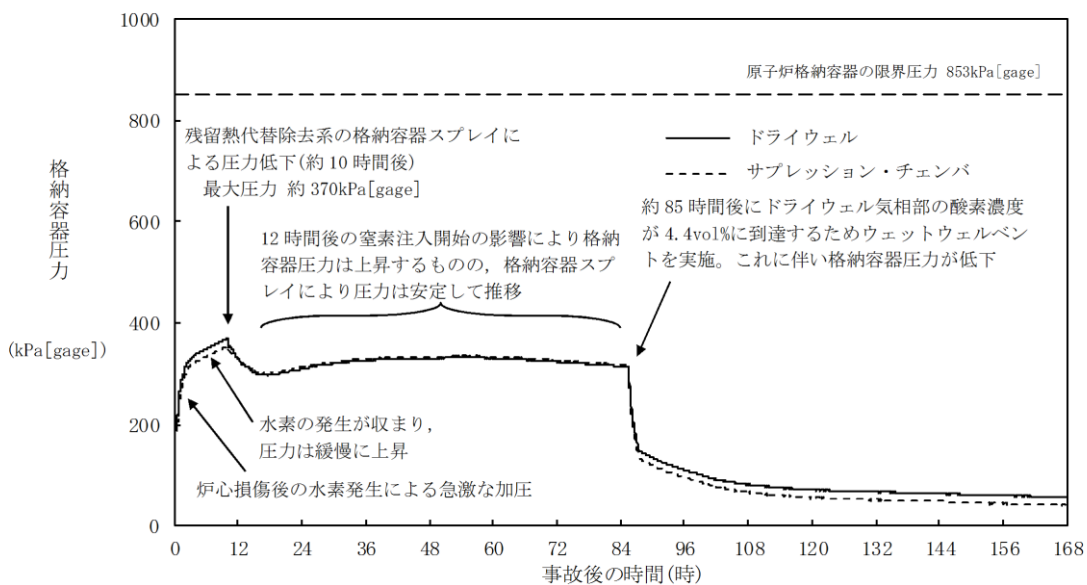
第 3. 4. 3-1(2) 図 事象発生から 25 分後に注水を開始した場合のサブプレッション・チェンバの気相濃度の推移(ウェット条件)



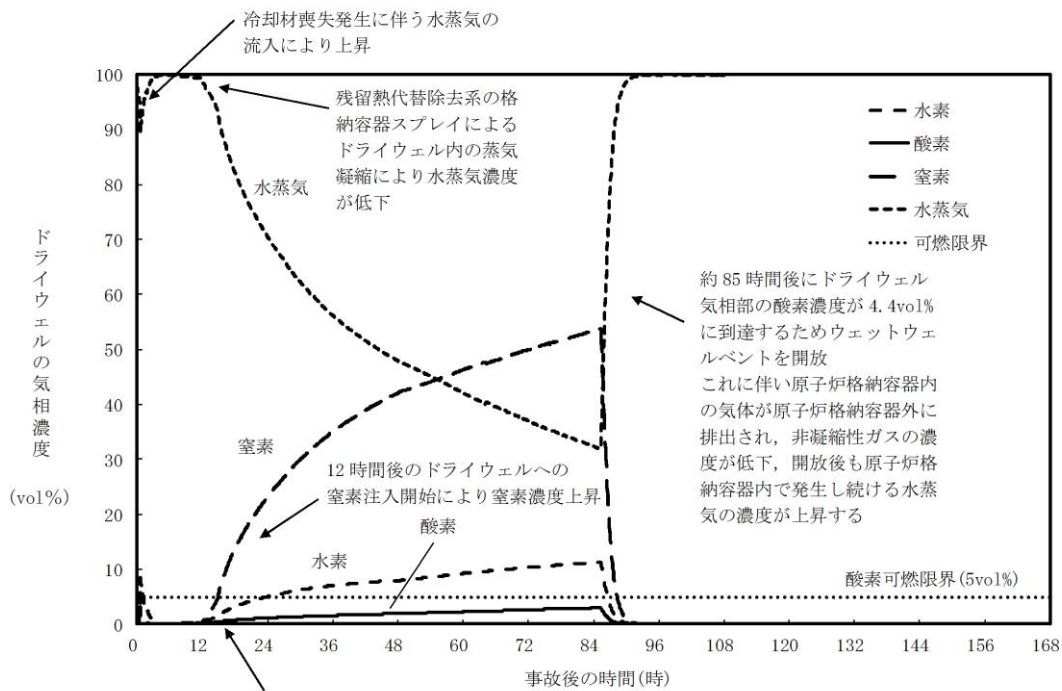
第3.4.3-1(3) 図 事象発生から60分後に注水を開始した場合のドライウエルの気相濃度の推移(ウェット条件)



第3.4.3-1(4) 図 事象発生から60分後に注水を開始した場合のサブプレッション・チェンバの気相濃度の推移(ウェット条件)

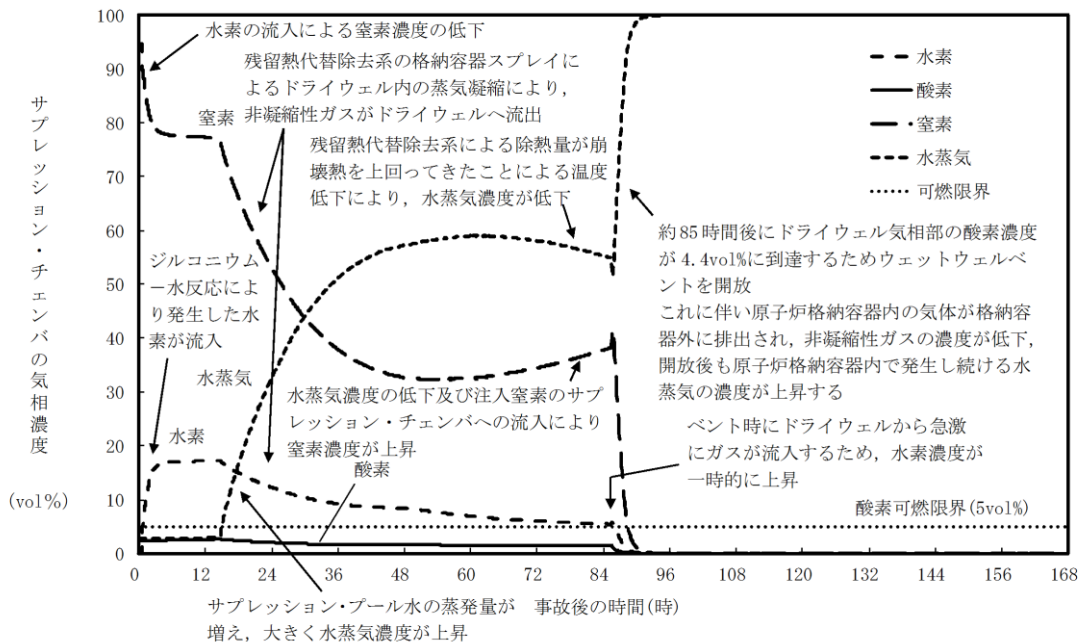


第3.4.3-1(5)図 G値を設計基準事故ベースとした場合の格納容器圧力の推移



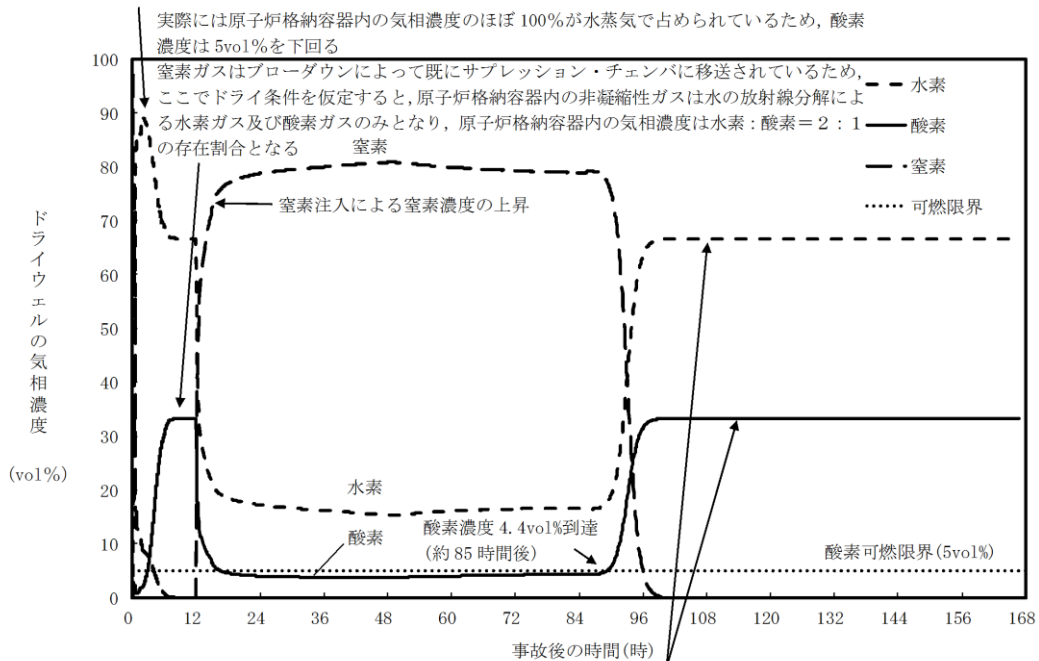
残留熱代替除去系の格納容器スプレイによるドライウェル内の蒸気凝縮により、サブプレッション・チェンバ内の非凝縮性ガスがドライウェルへ流入し、非凝縮性ガスの濃度が上昇

第 3. 4. 3-1 (6) 図 G 値を設計基準事故ベースとした場合のドライウェルの気相濃度の推移(ウェット条件)



第 3. 4. 3-1 (7) 図 G 値を設計基準事故ベースとした場合のサブプレッション・チェンバの気相濃度の推移(ウェット条件)

ジルコニウム-水反応により発生した水素の流入による水素濃度上昇



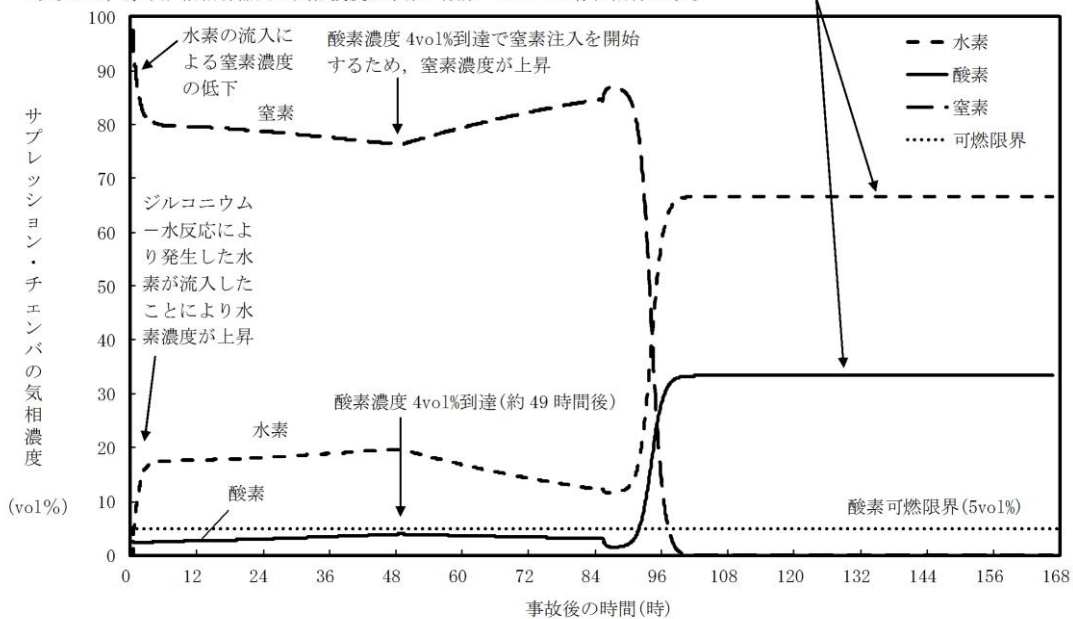
約 85 時間後にドライウェル気相部の酸素濃度が 4.4vol%に到達するため、ウェットウェルベントラインを開放
これに伴い原子炉格納容器内の気体が原子炉格納容器外に排出される

開放後、現実的には原子炉格納容器内で発生し続ける水蒸気が原子炉格納容器内の気相濃度のほぼ 100%を占め続けるが、ここでドライ条件を仮定すると、原子炉格納容器内の非凝縮性ガスは水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガスのみとなるため、原子炉格納容器内の気相濃度は水素：酸素=2：1の存在割合となる

第 3. 4. 3-1 (8) 図 G 値を設計基準事故ベースとした場合のドライウェルの気相濃度の推移(ドライ条件)

約 85 時間後にドライウェル気相部の酸素濃度が 4.4vol%に到達するため、ベントラインを開放
これに伴い原子炉格納容器内の気体が原子炉格納容器外に排出される

開放後、現実的には原子炉格納容器内で発生し続ける水蒸気が原子炉格納容器内の気相濃度のほぼ 100%を占め続けるが、ここでドライ条件を仮定すると、原子炉格納容器内の非凝縮性ガスは水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガスのみとなるため、原子炉格納容器内の気相濃度は水素：酸素=2：1の存在割合となる



第 3. 4. 3-1 (9) 図 G 値を設計基準事故ベースとした場合のサブプレッション・チェンバの気相濃度の推移(ドライ条件)

第3.4.2-1表 主要解析条件 (水素燃焼)

項目	主要解析条件	条件設定の考え方
初期条件	2.5vol%	酸素濃度 4.4vol% (ドライ条件) 到達を防止可能な初期酸素濃度として設定 (運転上許容されている値の上限)
事故条件	炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量	解析コードMARPによる評価結果
	金属腐食等による水素ガス発生量	酸素濃度を厳しく評価するものとして設定
	水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガスの発生割合	重大事故時における原子炉格納容器内の条件を考慮して設定

第3.4.2-2表 事象発生から7日後 (168時間後) の酸素濃度※

項目	ウェット条件 (vol%)	ドライ条件 (vol%)
ドライウエル	約 1.1	約 1.2
サブプレッション・チェンバ	約 1.9	約 2.8

※全炉心内のジルコニウム量の約7.8%が反応した場合

G 値を設計基準事故ベースとした場合の評価結果への影響

1. はじめに

今回の評価では、電力共同研究^[1,2]の結果を踏まえ、水の放射線分解における水素ガス及び酸素ガスのG値を $G(\text{H}_2)=0.06$, $G(\text{O}_2)=0.03$ としている。今回の評価で用いたG値は過去の複数回の実験によって測定した値であり、重大事故環境下での水の放射線分解の評価に適した値と考えるが、実験においてもG値にはばらつきが確認されたこと及び事故時の原子炉格納容器内の環境には不確かさがあることを考慮すると、G値については不確かさを考慮した取扱いが特に重要となる。

実際の事故対応において、何らかの要因によって酸素濃度が今回の評価よりも早く上昇する場合、事象発生から7日が経過する前に酸素濃度が5 vol%を上回る可能性が考えられる。ここでは何らかの要因によって酸素濃度が今回の評価よりも早く上昇する場合を想定し、酸素濃度の上昇速度の変化が評価結果及び事故対応に与える影響を確認した。

なお、基本的に、炉心損傷を伴う事故シーケンスでは、原子炉水位の低下や損傷炉心への注水により多量の水蒸気が発生するため、原子炉格納容器内がドライ条件となることは考えにくい。このため、水素燃焼の可能性の有無は、ウェット条件における気相濃度によって判断した。

2. 評価条件

今回の申請において示した解析ケース（以下、「ベースケース」という。）の評価条件に対する変更点は以下のとおり。このほかの評価条件は、ベースケースと同等である。

- 水の放射線分解における水素ガス及び酸素ガスのG値を、沸騰状態においては $G(\text{H}_2)=0.4$, $G(\text{O}_2)=0.2$, 非沸騰状態においては $G(\text{H}_2)=0.25$, $G(\text{O}_2)=0.125$ とした。この値は設計基準事故対処設備である可燃性ガス濃度制御系の性能を評価する際に用いている値であり、設計基準事故環境下に対しても一定の保守性を有する値である。設計基準事故環境下に比べ、重大事故環境下ではG値が低下する傾向にあることから、重大事故環境下におけるG値の不確かさとして考慮するには十分に保守的な値である。
- 事象発生から7日が経過する前に、水素濃度が可燃限界を上回り、酸素濃度がドライ条件で4.4 vol%及びウェット条件で1.5 vol%に到達する場合には、格納容器フィルタベント系によって原子炉格納容器内の気体を環境中に排出し、原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度を低減する。

- ・ サプレッション・チェンバ内の酸素濃度が 4.0vol%（ドライ条件）に到達する場合には、可搬式窒素供給装置を用いた窒素供給をドライウェル側からサプレッション・チェンバ側へ切り替える。

3. 評価結果

評価結果を図1から図6に示す。また、評価結果のまとめを表1及び表2に示す。

事象発生約12時間後からドライウェルへの窒素注入を開始し、その後、図6に示すとおり、事象発生約49時間後にサプレッション・チェンバの酸素濃度が4.0vol%（ドライ条件）に到達するため、窒素の注入をドライウェルからサプレッション・チェンバへ切り替える。

ドライ条件において、酸素濃度は事象発生から約85時間後に4.4vol%に到達した。このため、本評価では酸素濃度がドライ条件において4.4vol%に到達した約85時間時点でウェットウェルベントを実施した。その結果、原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度は大幅に低下し、水素濃度及び酸素濃度は可燃限界未満に抑制された。実際の手順では、窒素の注入をドライウェルからサプレッション・チェンバへ切り替えた後、ドライウェルの酸素濃度が4.0vol%に到達した場合に、再度窒素の注入をサプレッション・チェンバからドライウェルへ切り替えることから、格納容器ベントは約85時間よりも遅延される。

なお、ドライ条件では、図5及び図6に示すとおり、事象発生の約3時間後から約17時間後までの間、ドライウェルにおける酸素濃度が5vol%を上回る時間帯があるが、図3及び図4に示すとおり、その時間帯には原子炉格納容器内の大部分が水蒸気で占められているため、ドライ条件では放射線分解に伴って発生する水素ガス及び酸素ガスの体積割合が高くなり、酸素濃度が5vol%を超える結果となっているものであり、ウェット条件における酸素濃度は1.5vol%未満である。以上より、仮にG値が設計基準事故ベースであった場合においても、酸素発生量が増え、酸素濃度が5vol%を上回る時間帯がベースケース（約4時間後から約12時間後）よりも長時間となるが、ウェット条件における酸素濃度は1.5vol%未満であることからベースケースと同様に水素燃焼が発生することはない。

4. まとめ

何らかの要因によって酸素濃度が今回の評価よりも早く上昇する場合の評価結果への影響を確認した結果、評価項目となる酸素濃度は、事象発生から7日が経過する前に4.4vol%に到達するが、格納容器フィルタベント系による環境中への原子炉格納容器内の気体の排出によって水素濃度及び酸素濃度を可燃限界未満に抑制できることを確認した。

今回の感度解析に用いたG値は十分に保守的と考えられる値を用いたことから、仮に事故に至った場合でも、水の放射線分解に伴う酸素濃度の上昇速度は今回の感度解析の結果を十分下回るものと考えられるが、仮に酸素濃度の上昇速度が今

回の感度解析の結果のとおりであっても、格納容器フィルタベント系による環境中への原子炉格納容器内の気体の排出までに約 85 時間の時間余裕があることを確認した。

格納容器フィルタベント系による対応が生じる場合、その対応フローは大破断 L O C A 後に格納容器フィルタベント系を使用するケースと同じであり、前述のケースよりも格納容器フィルタベント系による環境中への原子炉格納容器内の気体の排出までの時間余裕が確保されることから、水素燃焼を防止する観点での事故対応は十分に可能と考える。環境中に放出される核分裂生成物 (C s -137) の観点でも、大破断 L O C A 後により短い時間 (事象発生から約 32 時間) で格納容器フィルタベント系による排出を実施する場合について評価し、評価項目である 100TBq を十分に下回ることを確認していることから、格納容器フィルタベント系による対応は可能と考える。

5. 参考文献

- [1] 「シビアアクシデントにおける可燃性ガスの挙動に関する研究」 (BWR 電力共同研究, 平成 12 年 3 月)
- [2] 「事故時放射線分解に関する研究」 (BWR 電力共同研究, 昭和 63 年 3 月)

表1 G値の変更に伴う評価項目への影響（ウェット条件）

項目	感度解析 (沸騰 : $G(H_2)=0.4$, $G(O_2)=0.2$ 非沸騰 : $G(H_2)=0.25$, $G(O_2)=0.125$)	ベースケース ($G(H_2)=0.06$, $G(O_2)=0.03$)	評価項目
酸素濃度 (ドライウエル)	事象発生から約 85 時間後に ドライウエルにおいてドライ 条件での酸素濃度が 4.4vol%に到達するが、約 85 時間時点でのウェットウ エルベントラインの開放に よって、ドライウエル及びサ プレッション・チェンバとも に 5 vol%未満に低減。	約 1.1vol% (事象発生から 168 時間後)	5 vol%以下
酸素濃度 (サプレッショ ン・チェンバ)		約 1.9vol% (事象発生から 168 時間後)	

表2 G値の変更に伴う評価項目への影響（ドライ条件）

項目	感度解析 (沸騰 : $G(H_2)=0.4$, $G(O_2)=0.2$ 非沸騰 : $G(H_2)=0.25$, $G(O_2)=0.125$)	ベースケース ($G(H_2)=0.06$, $G(O_2)=0.03$)	評価項目
酸素濃度 (ドライウエル)	事象発生から約 85 時間後に ドライウエルにおいてドライ 条件での酸素濃度が 4.4vol%に到達するが、約 85 時間時点でのウェットウ エルベントラインの開放によ って、ドライウエル及びサプ レッション・チェンバともに 5 vol%未満に低減。	約 1.2vol% (事象発生から 168 時間後)	5 vol%以下
酸素濃度 (サプレッショ ン・チェンバ)		約 2.8vol% (事象発生から 168 時間後)	

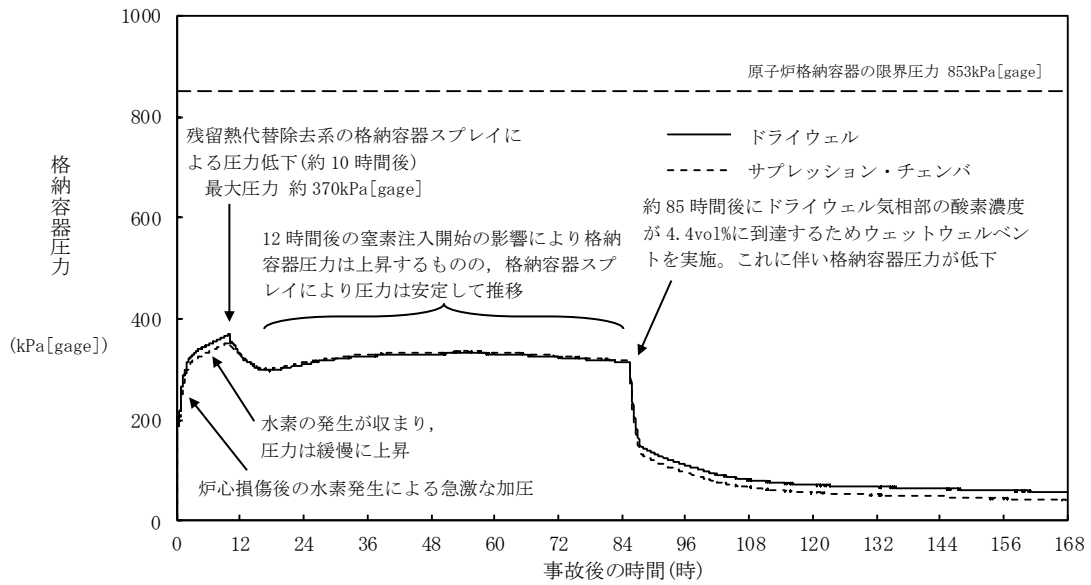


図1 格納容器圧力の推移

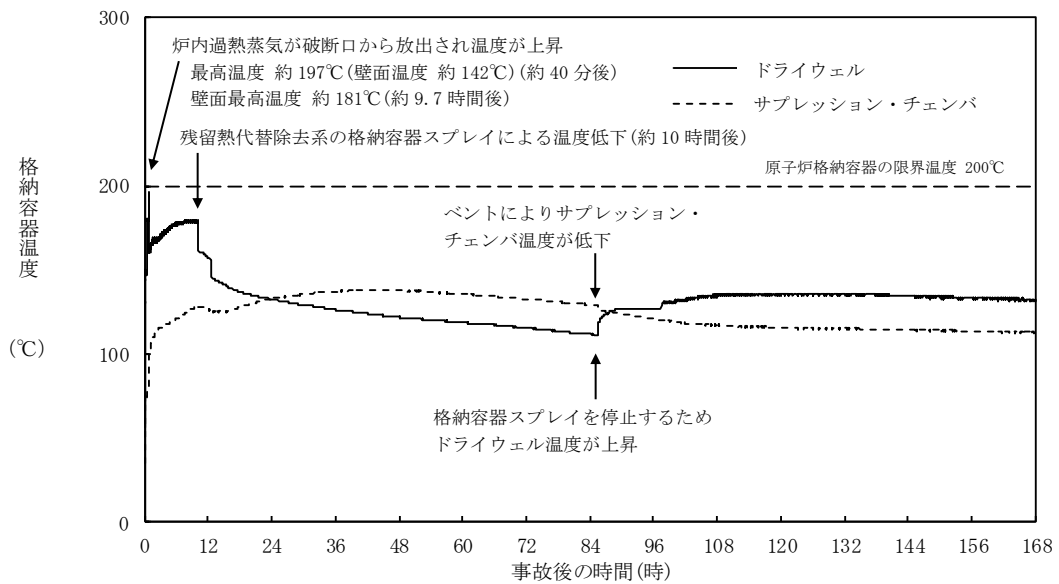
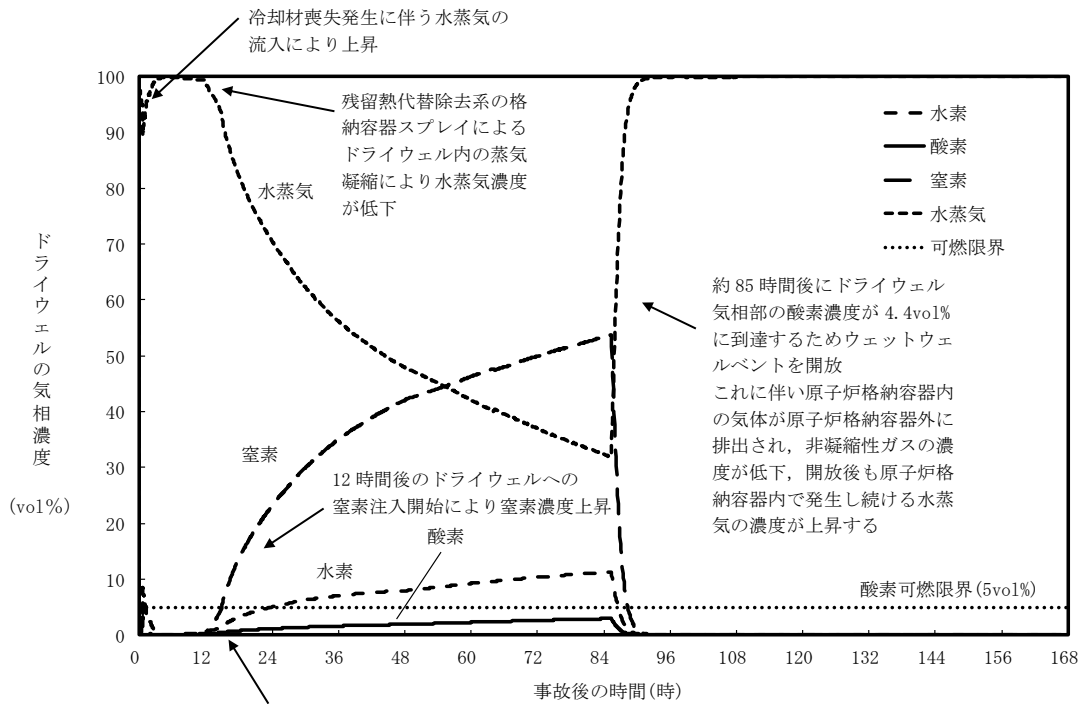


図2 格納容器温度の推移



残留熱代替除去系の格納容器スプレイによるドライウエル内の蒸気凝縮により、サブプレッション・チェンバ内の非凝縮性ガスがドライウエルへ流入し、非凝縮性ガスの濃度が上昇

図3 ドライウエルの気相濃度の推移(ウェット条件)

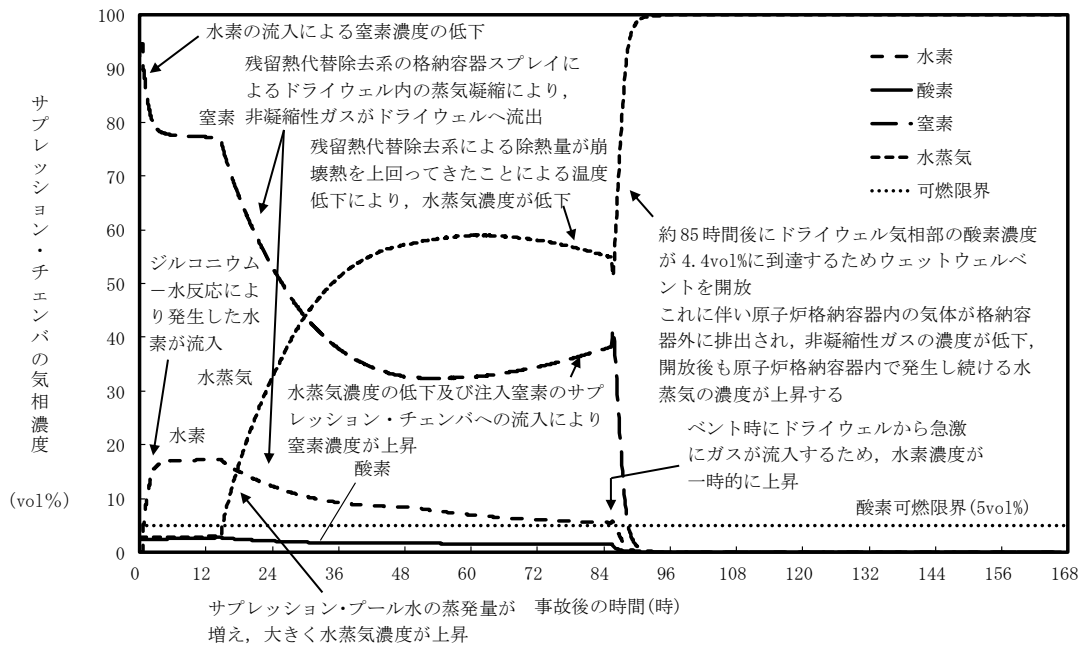
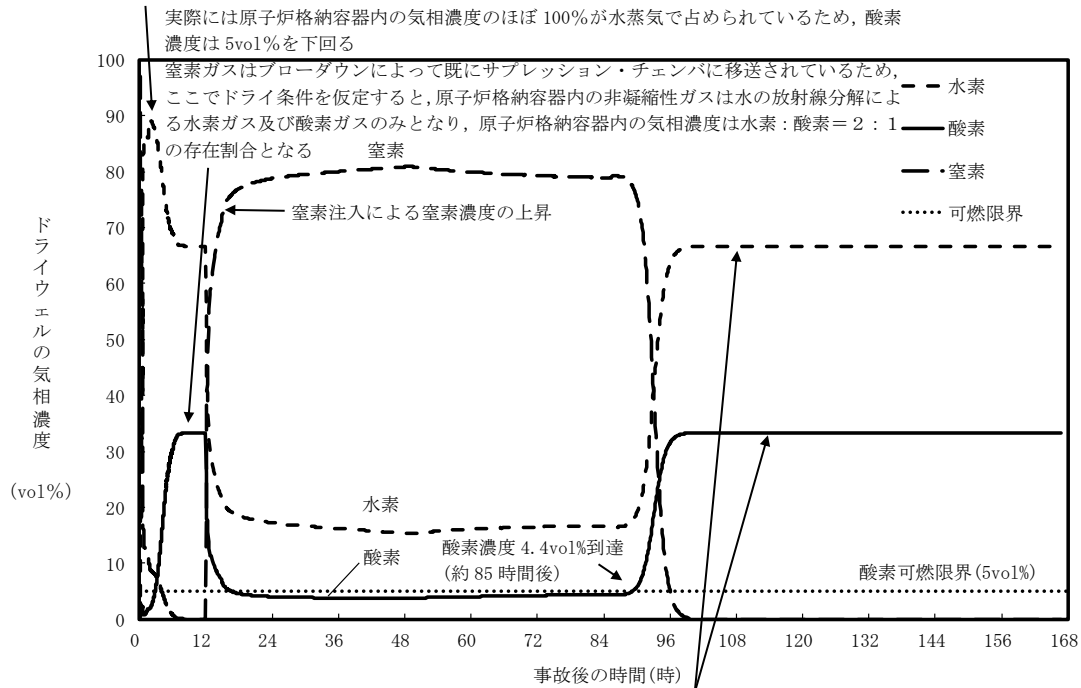


図4 サプレッション・チェンバの気相濃度の推移(ウェット条件)

ジルコニウム-水反応により発生した水素の流入による水素濃度上昇



約 85 時間後にドライウェル気相部の酸素濃度が 4.4vol%に到達するため、ウェットウェルベントラインを開放
これに伴い原子炉格納容器内の気体が原子炉格納容器外に排出される
開放後、現実的には原子炉格納容器内で発生し続ける水蒸気が原子炉格納容器内の気相濃度のほぼ 100%を占め続けるが、ここでドライ条件を仮定すると、原子炉格納容器内の非凝縮性ガスは水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガスのみとなるため、原子炉格納容器内の気相濃度は水素：酸素 = 2：1 の存在割合となる

図5 ドライウェルの気相濃度の推移(ドライ条件)

約 85 時間後にドライウェル気相部の酸素濃度が 4.4vol%に到達するため、ベントラインを開放
これに伴い原子炉格納容器内の気体が原子炉格納容器外に排出される
開放後、現実的には原子炉格納容器内で発生し続ける水蒸気が原子炉格納容器内の気相濃度のほぼ 100%を占め続けるが、ここでドライ条件を仮定すると、原子炉格納容器内の非凝縮性ガスは水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガスのみとなるため、原子炉格納容器内の気相濃度は水素：酸素 = 2：1 の存在割合となる

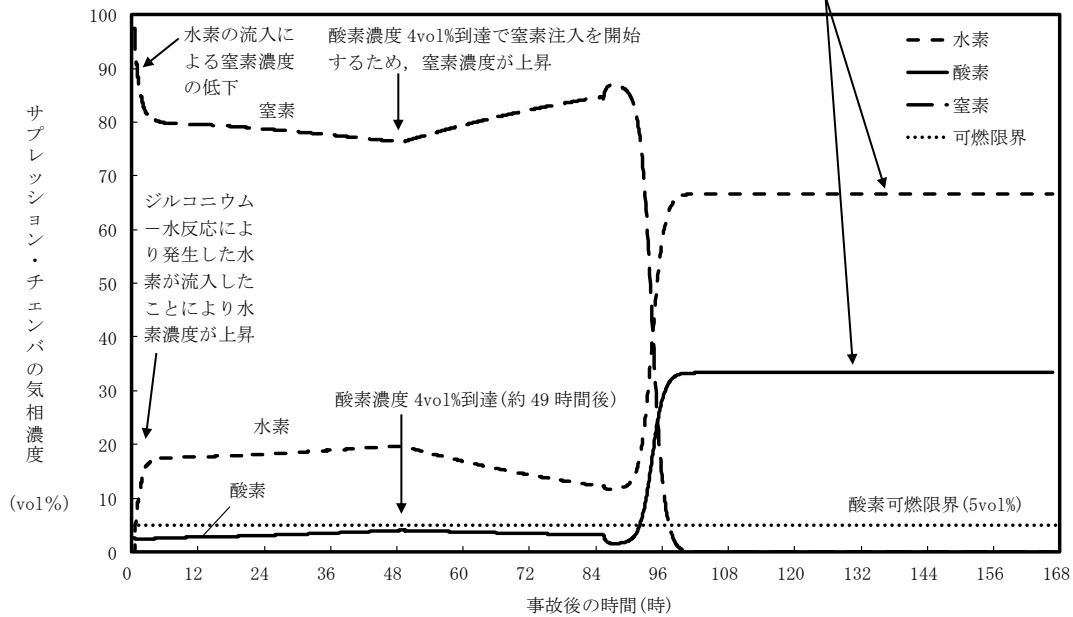
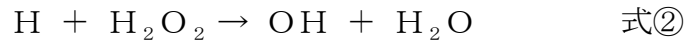
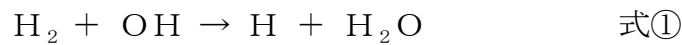


図6 サプレッション・チェンバの気相濃度の推移(ドライ条件)

水の放射線分解の評価について

1. 水の放射線分解の考慮

水が γ 線等の放射線エネルギーを吸収すると非常に短時間の間に水の放射線分解が起こり、H（水素原子）、OHラジカル、 e_{aq}^- （水和電子）、 HO_2 ラジカル、 H^+ （水素イオン）及び分子生成物の H_2 、 H_2O_2 （過酸化水素）を生じる。また、これら反応と並行して以下の化学反応が生じ、 H_2 がOHラジカルと反応して水に戻る等の再結合反応が起こる。なお、酸素ガスは過酸化水素の分解によって生成される。



格納容器破損モード「水素燃焼」における重大事故等対策の有効性評価では、水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガスの生成をモデル化している。

島根原子力発電所2号炉は、運転中、原子炉格納容器内が窒素ガスで置換されている。炉心損傷に至った場合及びその後の原子炉圧力容器破損後には、ジルコニウム-水反応やコア・コンクリート反応等、水素ガスについては多量に放出されるメカニズムが考えられるものの、酸素ガスに関しては水の放射線分解が支配的な生成プロセスである。水素ガスに関しては上記の反応によって比較的短時間で可燃限界の濃度を超えることから、原子炉格納容器内の気体の濃度を可燃限界以下に維持する観点では酸素濃度を低く維持することが重要となる。

以下では、この酸素ガスの支配的な生成プロセスである水の放射線分解について、本評価で用いた考え方を示す。

2. 水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガス量の計算

水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガスの生成量は以下の式(1)で算出している。

$$\Delta n = Q_{decay} \times \frac{E}{1.6 \times 10^{-19}} \times \frac{G}{100} \times \frac{1}{6.02 \times 10^{23}} \times \Delta t \quad (1)$$

式(1)のパラメータは以下のとおり。

Δn : 水の放射線分解による水素（酸素）ガス発生量[mol]

Q_{decay} : 崩壊熱[W]

E : 放射線吸収割合[-]

－炉内 : β 線, γ 線ともに0.1

－炉外のFP : β 線, γ 線ともに1

- G : 実効G値[分子/100eV]
-水素 : $G(H_2) = 0.06$
-酸素 : $G(O_2) = 0.03$
 Δt : タイムステップ[sec]

放射線吸収割合について、炉内については、炉心から放出される放射線が水に吸収される割合を解析によって評価した結果、約1%となったことから、これを保守的に考慮して10%とした。また、炉外のFPについては水中に分散していることを考慮し、保守的に放射線のエネルギーの100%が水の放射線分解に寄与するものとした。^[1]

今回は β 線及び γ 線を考慮の対象とし、 α 線については考慮の対象としていない。 α 線については飛程が短いため、大部分が熔融炉心等に吸収されるものと考え、 α 線による水の放射線分解への寄与は無視できるものとした。また、本評価では電力共同研究（以下、「電共研」という。）において求めたG値を用いているが、これは γ 線源による照射によって得られた実験結果である。 β 線は γ 線に比べて飛程が短いことから熔融炉心等に吸収され易く、 γ 線源による実験結果のG値を β 線に対して適用することは、放射線分解に伴う水素及び酸素濃度を多く見積もる点で保守的な取り扱いと考えられる。

放射線の吸収エネルギー100eVあたりに生成する原子・分子数をG値と呼ぶ。G値には水の放射線による分解作用のみを考慮した初期G値と、これに加えて放射線分解による生成物が再結合して水分子等に戻る化学反応の効果も考慮した実効G値がある。

照射が始まり、放射線分解による生成物が増加すると、その生成物の濃度に応じて生成物が再結合して水に戻る等の化学反応も増加するため、水素分子及び酸素分子の生成割合は照射初期から徐々に低下する。水素濃度や酸素濃度と水の吸収線量との関係の傾向は、一時的に水素濃度や酸素濃度の上昇ピークが現れるのではなく、水素濃度や酸素濃度の上昇が徐々に抑制されていく形の曲線となる。原子炉格納容器内の濃度上昇というマクロな現象を評価する観点では再結合等の化学反応の効果を含めた実効G値を用いることが適切と考えられるため、本評価では実効G値を用いる。また、実効G値には電共研の実験結果^[2]に基づく値を用いた。これについては次項に示す。

3. 実効G値の設定について

3. 1 実効G値の設定根拠とした電共研の実験結果^[2]

本評価における実効G値の設定根拠とした電共研「事故時放射線分解に関する研究」^[2]の実験結果を図1に示す。電共研の実験では、重大事故の際の原子炉格納容器内の環境を想定した。図1は、非沸騰条件において、よう素イオン濃度を炉心インベントリの50%に相当する濃度とし、ジルコニウム-水反応割合は5.5%とした場合の吸収線量と酸素濃度の相関を示している。

実効G値は吸収線量が $1 \times 10^4 \text{ Gy}$ での傾きから求めた。この吸収線量は事象発生から約 1.5 時間後までのサプレッション・プールでの吸収線量に相当する。実効G値は吸収線量の増加とともに傾きが小さくなる傾向にあることから、事象発生から約 1.5 時間後の実効G値を用いることは保守的であり妥当と考える。

3. 2 実効G値に影響を及ぼす因子

水の放射線分解によって生成した水素ガスや過酸化水素は、OHラジカルを介した再結合反応によって水に戻るが、このときOHラジカルと反応し易い物質の存在や、沸騰等による生成物の気相への移行があると、再結合反応が阻害され、水素分子及び酸素分子が生成される。このため、実効G値はこれらの因子によって変化する。

実効G値に影響を及ぼす因子としては、よう素等の不純物濃度、液相中の水素分子の濃度といった化学的因子の他に、ガスの気液移行速度（沸騰、非沸騰の違い）といった物理的因子がある。

本評価における実効G値の設定根拠とした電共研の実験結果に対して上記の因子の影響を考慮する際に参照した電共研の実験結果を次に示す。また、電共研の実験結果と本評価における各因子の相違と影響をまとめた結果を表1に示す。

(1) よう素の影響

体系中によう素等の不純物が存在すると、以下の化学反応が生じ、OHラジカルがOH⁻となるため、OHラジカルを介した式①の再結合反応を阻害し、水素分子の増加と同時に水素原子の生成が減少する。水素原子の減少により式②の反応が減少することで過酸化水素の加水分解が促進され、酸素ガスの生成量が増大するものと考えられる。



水中のよう素濃度を变化させた場合の酸素ガスの発生割合を図2に示す。液相単相条件下において、よう素イオン濃度は炉心インベントリの0～100%に相当する濃度とした。図2のとおり、水中のよう素イオン濃度が高いほど、吸収線量に対する酸素ガスの発生割合が高い。

よう素以外の不純物として、ほう素、鉄、銅を添加した場合の酸素ガスの発生割合を図3に示す。図3のとおり、不純物の添加による酸素ガスの発生割合への影響は見られない。

以上の結果から、よう素濃度に関して本評価における条件とほぼ同等の実験の結果から求めた実効G値を用いることは妥当と考える。

(2) 溶存水素濃度の影響

液相中の水素濃度が増加すると、OHラジカルを介した再結合反応が進み、その結果、水素ガスと酸素ガスの生成量が減少すると考えられる。

水中の水素濃度を变化させた場合の酸素ガスの発生割合を図4に示す。液相単

相条件下において、初期水素濃度はジルコニウム－水反応割合が0～50%で生成した場合の水素濃度に相当する気相中濃度の気液平衡濃度とした。図4のとおり、水中の水素濃度が高いほど、吸収線量に対する酸素ガスの発生割合が低い。

したがって、水の放射線分解が進行し、液相中の水素濃度が上昇すると実効G値は徐々に減少すると考えられる。また、ジルコニウム－水反応によって発生する水素ガスが液相中に溶解し、液相中の水素濃度が上昇する場合にも実効G値は減少すると考えられる。

よって、炉心損傷事故の状況としては比較的少ないと考えられるジルコニウム－水反応割合 5.5%に相当する溶存水素濃度の実験結果から求めた実効G値を用いることは妥当と考える。

(3) 初期酸素濃度の影響

初期酸素濃度を変化させた場合の酸素ガスの発生割合を図3に示す。図3からは、初期酸素濃度が酸素ガスの実効G値に与える影響は確認できない。このことから、初期酸素濃度は少なくとも数 vol%程度では、初期酸素濃度は酸素ガスの実効G値に影響を及ぼすものではないと考える。

(4) 沸騰、非沸騰状態の影響

非沸騰の場合には、水素ガス及び酸素ガスが比較的長期間液相に滞在できるため、再結合反応が起こりやすく、水素ガスと酸素ガスの生成量が減少すると考えられる。一方、液相が沸騰している場合には、生成された水素ガス及び酸素ガスがボイドに移行し短期間で気相に放出されるため、再結合反応が非沸騰状態に比べ起こりにくく、水素ガスと酸素ガスの生成量が増加すると考えられる。

沸騰状態における酸素濃度の変化を図5に示す。よう素イオン濃度を炉心インベントリの50%に相当する濃度とし、初期水素濃度はジルコニウム－水反応割合が5.0%で生成した場合の水素濃度に相当する気相中濃度の気液平衡濃度とした。図5のとおり、沸騰状態であっても、吸収線量に対する酸素ガスの発生割合は極めて低い。

上記の結果に加え、本評価条件では、大部分の領域・期間が非沸騰状態であると考えられることから、非沸騰状態の実効G値を採用することは妥当と考える。

(5) 温度の影響

温度を室温(25℃)から70℃まで変化させた場合の酸素濃度の変化を図6に示す。図6のとおり、温度が高くなるほど再結合反応が促進されるため、実効G値は小さくなる傾向となっている。また、オークリッジ国立研究所(ORNL)による照射試験^[3]でも、図7のとおり、温度依存性について同様の傾向が示されている。

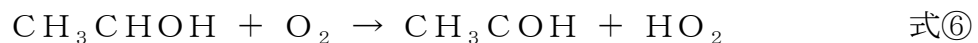
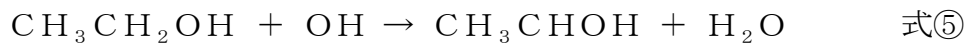
本評価条件では、温度は室温を上回るため、室温での電共研の実験結果に基づく実効G値を用いることは保守的であり妥当と考える。

(6) pHの影響

pHを4, 6.5, 10とした場合の酸素濃度の変化を図8に示す。図8からは、中性環境下で酸素ガスの実効G値はわずかに小さい傾向を示していることが分かる。^[2]しかしながら、その傾きの違いはわずかであることから、中性条件下の試験で求めた実効G値を用いることに問題はないと考える。

3. 3 実効G値への不純物の影響についての電共研の追加実験結果^[1]

電共研「シビアアクシデントにおける可燃性ガスの挙動に関する研究」^[1]では、電線被覆材等に起因する有機物の影響について追加実験を行っており、有機物をエタノールで模擬して液相中に添加し、酸素濃度の変化を測定している。実験結果は図9, 10のとおり、実効G値を低減する効果があることが確認されている。これは、エタノールは放射線場ではOHラジカルと反応してエタノールラジカルとなり、還元剤として働いて酸素ガスを消費する反応に寄与するためである。



その他の不純物と合わせて影響をまとめた結果を表2に示す。なお、通常の想定濃度範囲では、OHラジカルの反応速度の観点から、実効G値への影響はよう素イオンが支配的となることから、よう素イオンで不純物を代表させている。

4. 原子炉格納容器内の水素・酸素濃度の評価方法

放射線分解を考慮した原子炉格納容器内の水素・酸素濃度の評価方法は次のとおり。また、原子炉格納容器内の水素・酸素濃度の評価の流れを図11に示す。

- ・MAAP解析から得られるドライウエル及びサブプレッション・チェンバの窒素ガスモル数から、原子炉格納容器の初期酸素濃度を2.5vol%としたときの酸素ガスモル数と窒素ガスモル数を計算する。
- ・ドライウエル及びサブプレッション・チェンバにおける崩壊熱から、水の放射線分解による酸素ガス発生量と水素ガス発生量を計算する。
- ・水の放射線分解によって生成する水素ガス及び酸素ガスについては、MAAP結果に基づいてドライウエルとサブプレッション・チェンバ間の移行量を評価し、移行量に応じてドライウエルとサブプレッション・チェンバに分配する。
- ・上記を重ね合わせることにより、原子炉格納容器内の気相濃度を計算する。

5. 参考文献

- [1] 「シビアアクシデントにおける可燃性ガスの挙動に関する研究」 BWR 電力共同研究, 平成 12 年 3 月
- [2] 「事故時放射線分解に関する研究」 (BWR 電力共同研究, 昭和 63 年 3 月)
- [3] Zittel, H. E., “Boiling water reactor accident radiolysis studies”, ORNL-TM-2412 Part VIII (1970) .
- [4] Przewski, K. I., et. al., “Generation of hydrogen and oxygen by radiolytic decomposition of water in some BWR’ s”, U. S. NRC Joint ANS/ASME Conference, Aug (1984) .

以 上

表 1 各種パラメータが酸素ガスの実効G値に与える影響

パラメータ	電共研の 実験	有効性評価	酸素の実効G値への影響と保守性
吸収線量	~ 1×10^4 G y	サプレッション・プールでの吸収線量は事象発生から約 1.5 時間後に 1×10^4 G y を超える。	水素ガスの実効G値は吸収線量が多いほど小さくなる傾向があり ^[2, 3] , 酸素ガスの実効G値についても同様の傾向であることを確認している ^[2] 。酸素濃度の長期 (7日間) の推移を見る観点では, 事象進展を考えた上で事象発生から約 1.5 時間後の吸収線量に相当する (1×10^4 G y) で求めた実効G値を用いることは, 保守的であり妥当と考える。(図 1 参照)
よう素放出割合	50% (立地審査指針における仮想事故条件を設定)	約 79%	水素ガスの実効G値はよう素濃度が高いほど大きくなる傾向があり ^[2, 4] , 酸素ガスの実効G値についても同様の傾向であることを確認している ^[2] 。しかしながら, 図 2 を参照すると, 左記の程度の割合の相違であれば, G値 (測定データの傾き) に大きな違いは表れないと考えられることから, 有効性評価において, 電共研の実験結果に基づく実効G値を用いることは妥当と考える。
ジルコニウム-水反応割合 (溶存水素濃度)	5.5%	約 7.8%	水素ガスの実効G値は溶存水素濃度が高いほど小さくなる傾向があり ^[2, 4] , 酸素ガスの実効G値についても同様の傾向であることを確認している ^[2] 。このことから, ジルコニウム-水反応割合が小さい電共研の実験結果に基づく実効G値を用いることは妥当と考える。(図 4 参照)
初期酸素濃度	1.5vol%	2.5vol%	少なくとも初期酸素濃度数 vol%程度では, 初期酸素濃度は酸素ガスの実効G値に影響を及ぼすものではないと考える。(図 3 参照) ^[2]
沸騰・非沸騰	非沸騰状態	炉内: 沸騰状態 サプレッションプール: 非沸騰状態	沸騰状態では酸素ガスの実効G値はほぼ 0 となる傾向がある。このことから, 非沸騰状態での電共研の実験結果に基づく実効G値を用いることは妥当と考える。(図 5 参照) ^[2] 。
温度	室温	室温以上	温度が高いほど, 再結合反応が促進されるため実効G値は小さくなる傾向がある。事故時には温度は室温を上回るため, 室温での電共研の実験結果に基づく実効G値を用いることは保守的であり妥当と考える。(図 6, 7 参照) ^[2, 3]
pH	中性	事故対応の中で変動する可能性がある。	中性環境下では酸素の実効G値はわずかに小さい傾向を示すが, その差は小さい。このため, 中性条件下の試験で求めた電共研の実験結果に基づく実効G値を用いることに問題はないと考える。(図 8 参照) ^[2]

表2 よう素以外の不純物が酸素ガスの実効G値に与える影響

物質	発生原因	シビアアクシデント環境下における発生量	酸素ガスの実効G値への影響
金属イオン等 (Fe, Cu)	炉内構造物等	0～2 ppm (TMI-2事故時の冷却材中不純物濃度やBWRプラント通常運転時における金属濃度等の評価を参考に設定)	よう素存在条件下において、金属イオン等(Fe, Cu, B)が添加された場合の結果からは、実効G値へ影響は見られない。 ^[2] (図3参照)
ホウ酸	制御棒材の酸化、MCCI時の化学反応	約 1×10^{-3} mol/l (原子炉格納容器内での想定発生量とS/C液相体積から概算)	水のpHに影響するが、pHの違いによる実効G値への影響は小さい。 ^[2]
コンクリート	主成分のSiO ₂ , CaO, Al ₂ O ₃ , MgOなどがMCCI時に放出	安定な酸化物でエアロゾルとして挙動し、水にはほとんど溶けない	安定な酸化物でエアロゾルとして挙動し、水にはほとんど溶けないので、放射線分解への影響は小さい。また、MCCI時にCO ₂ が発生し水のpHに影響するが、pHの変化によるG値への影響は小さい。 ^[1, 2]
有機物	電線被覆材などの熱分解や放射線分解	約 1.1×10^{-6} mol/l (格納容器内での想定発生量とS/C液相体積から概算)	酸素ガスを消費する反応に寄与し、実効G値を低減する。 ^[1] (図9, 10参照)

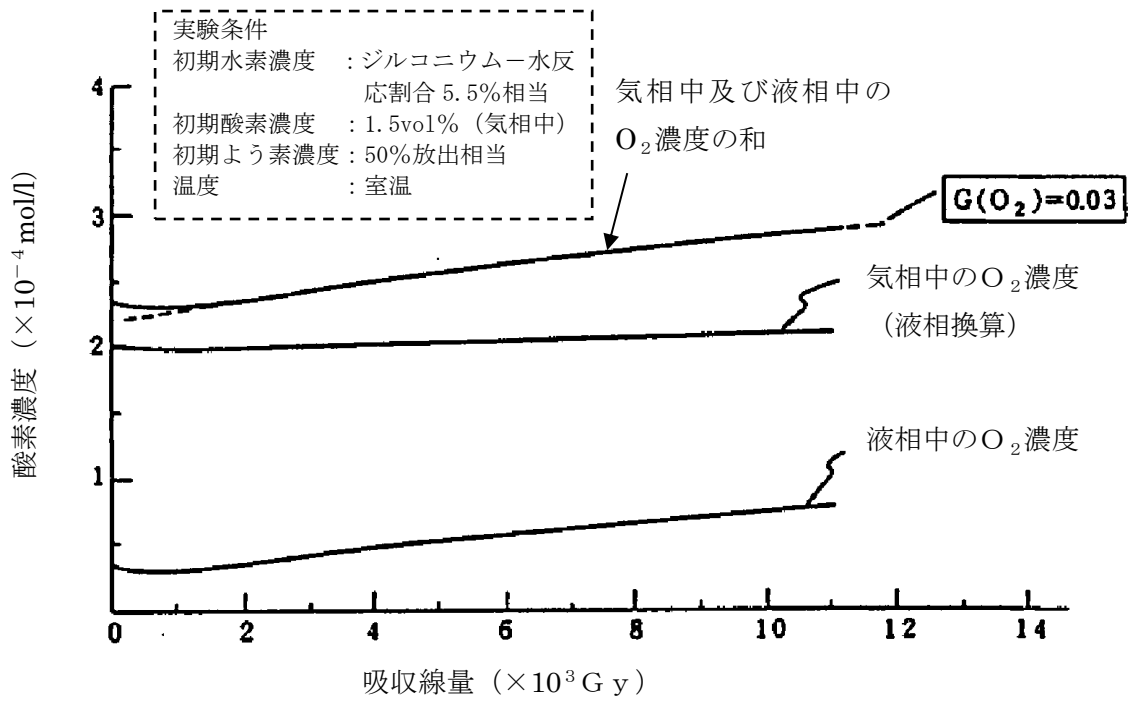


図1 本評価における実効G値の設定根拠とした電共研の実験結果

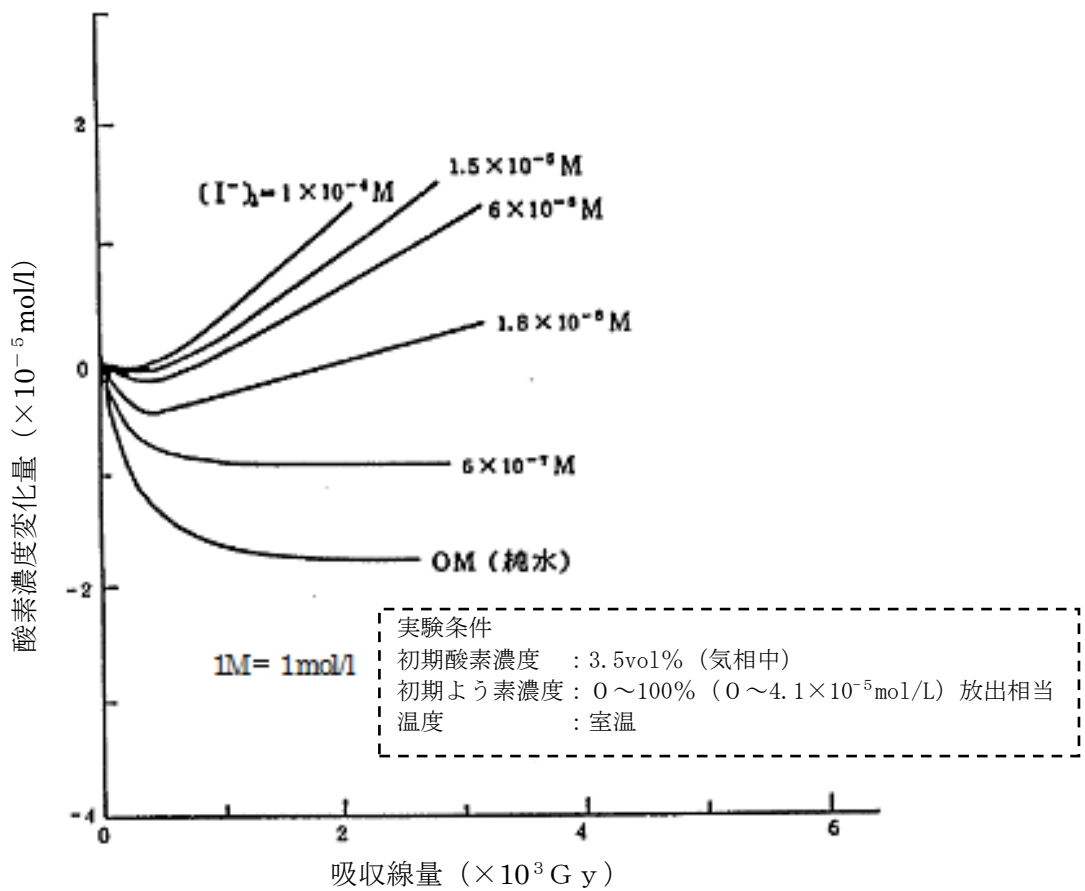


図2 溶存酸素濃度と吸収線量の関係 (よう素濃度を変化させた場合)

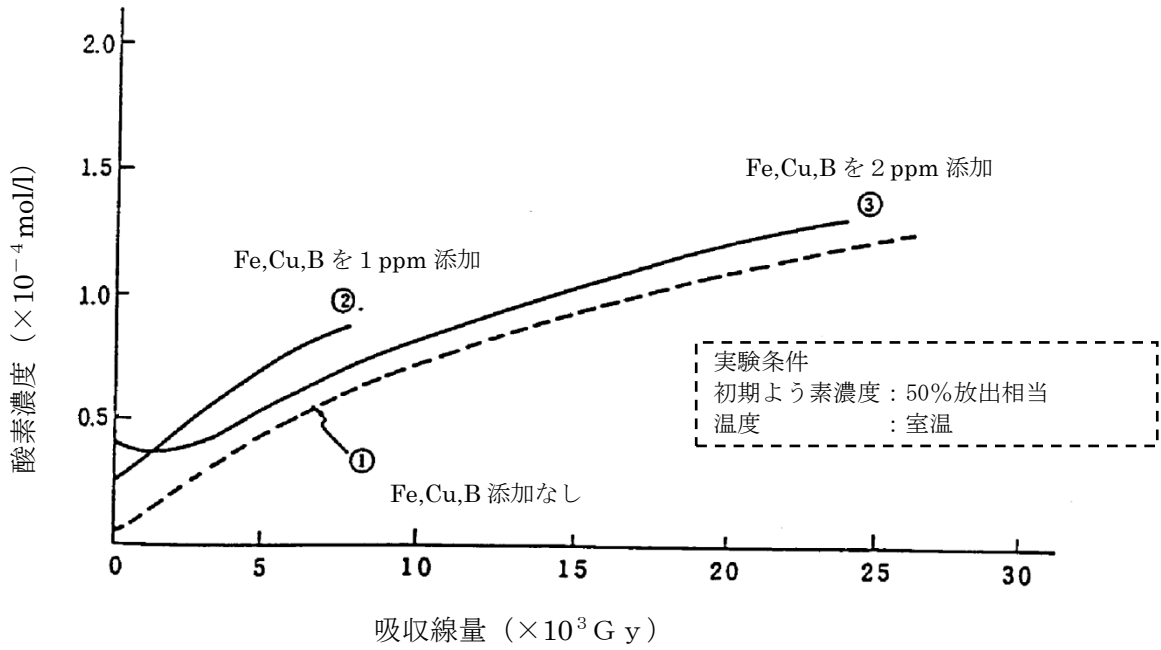


図3 溶存酸素濃度及び不純物(Fe, Cu, B)の有無と吸収線量の関係
(酸素濃度及び不純物(Fe, Cu, B)の添加量を変化させた場合)

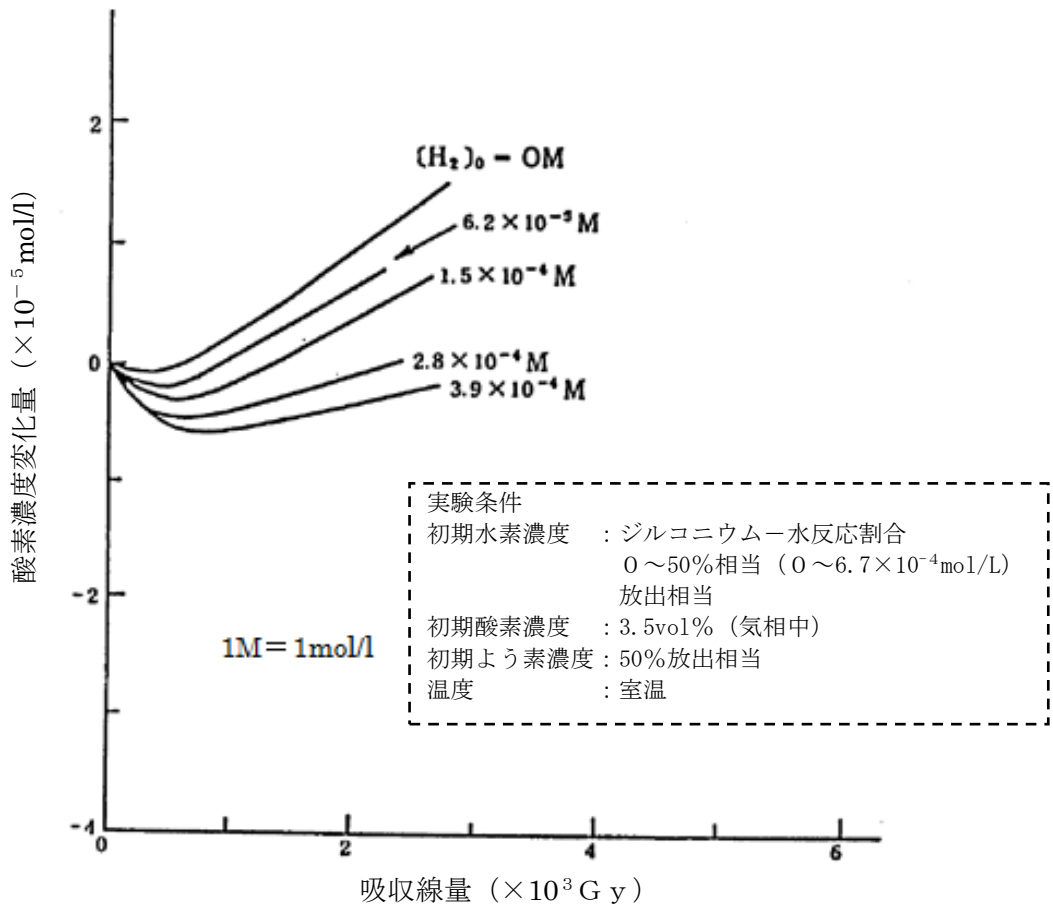


図4 溶存酸素濃度と吸収線量の関係 (溶存水素濃度を変化させた場合)

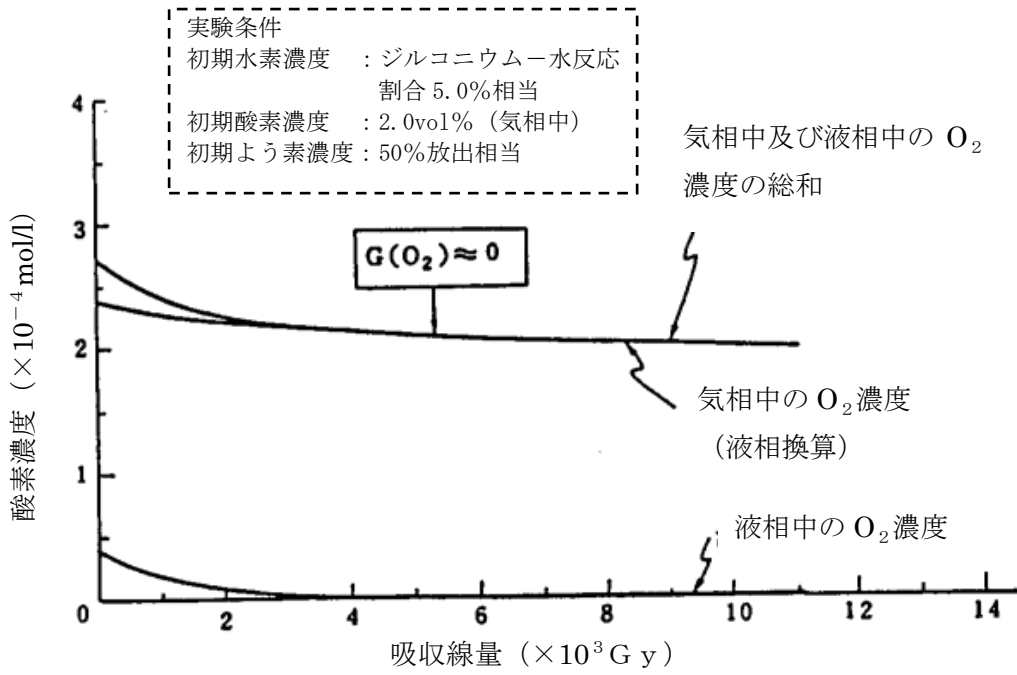


図5 溶存酸素濃度と吸収線量の関係 (沸騰状態)

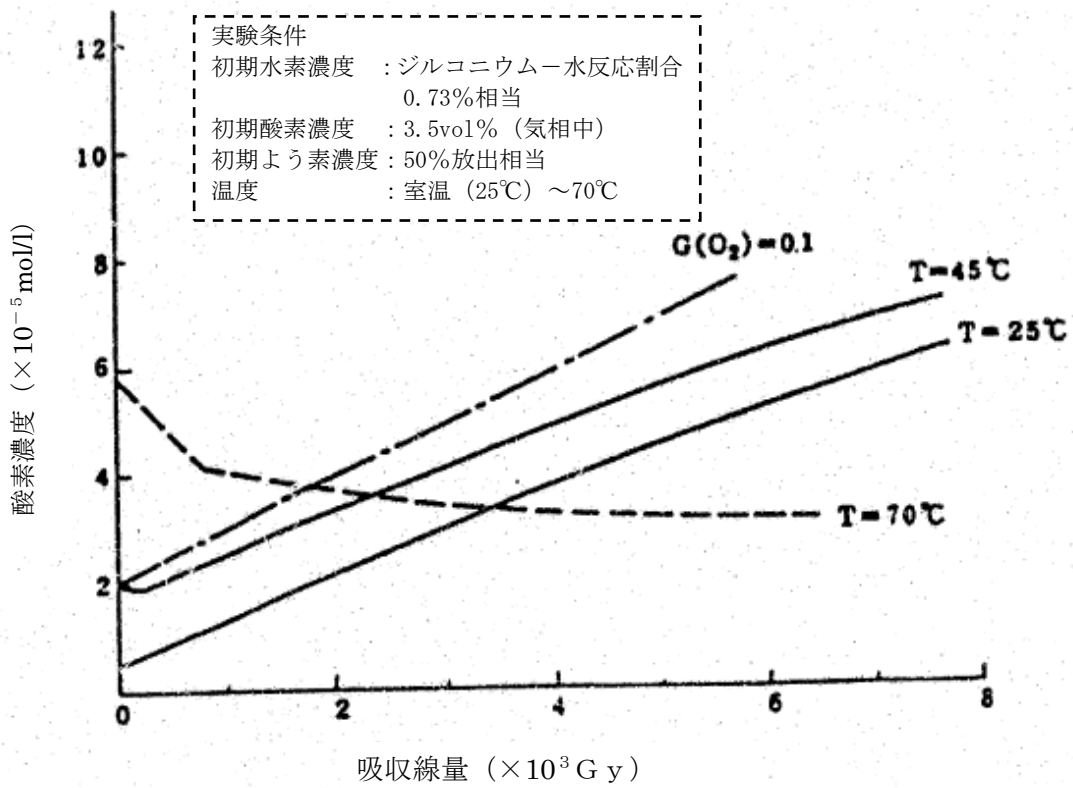


図6 溶存酸素濃度と吸収線量の関係 (温度を変化させた場合)

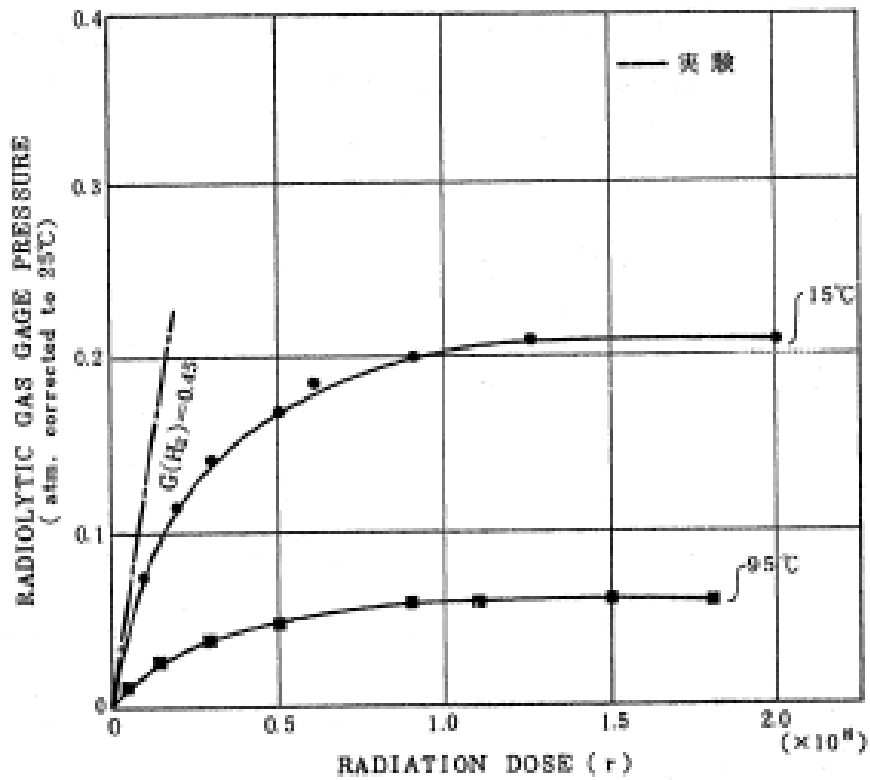


図7 水素ガス発生量と吸収線量の関係 (温度を変化させた場合) -ORNLによる試験

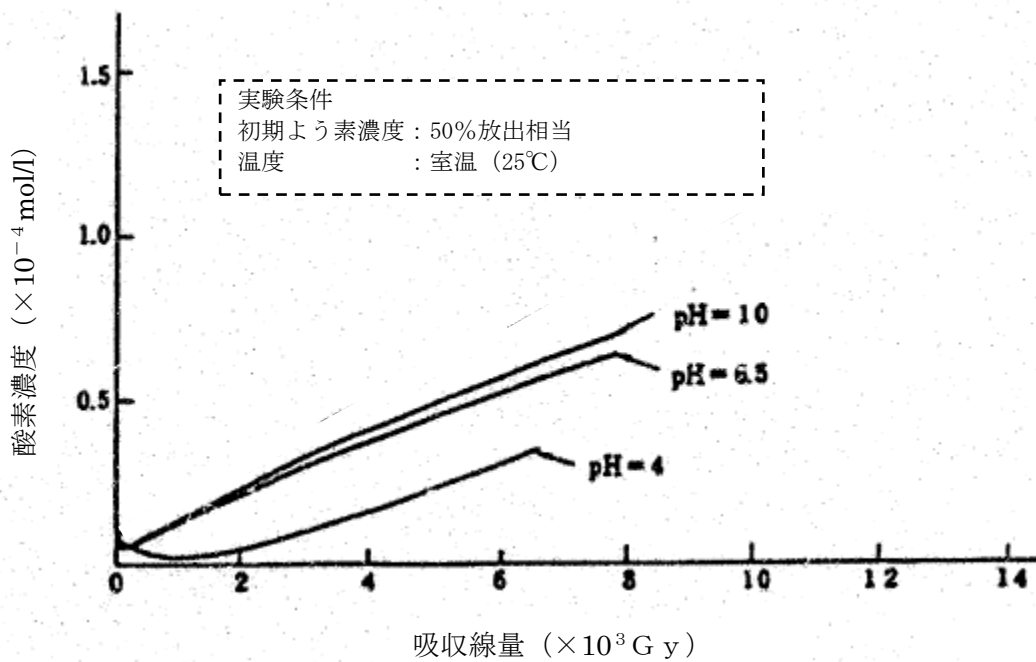


図8 溶存酸素濃度と吸収線量の関係 (pHを変化させた場合)

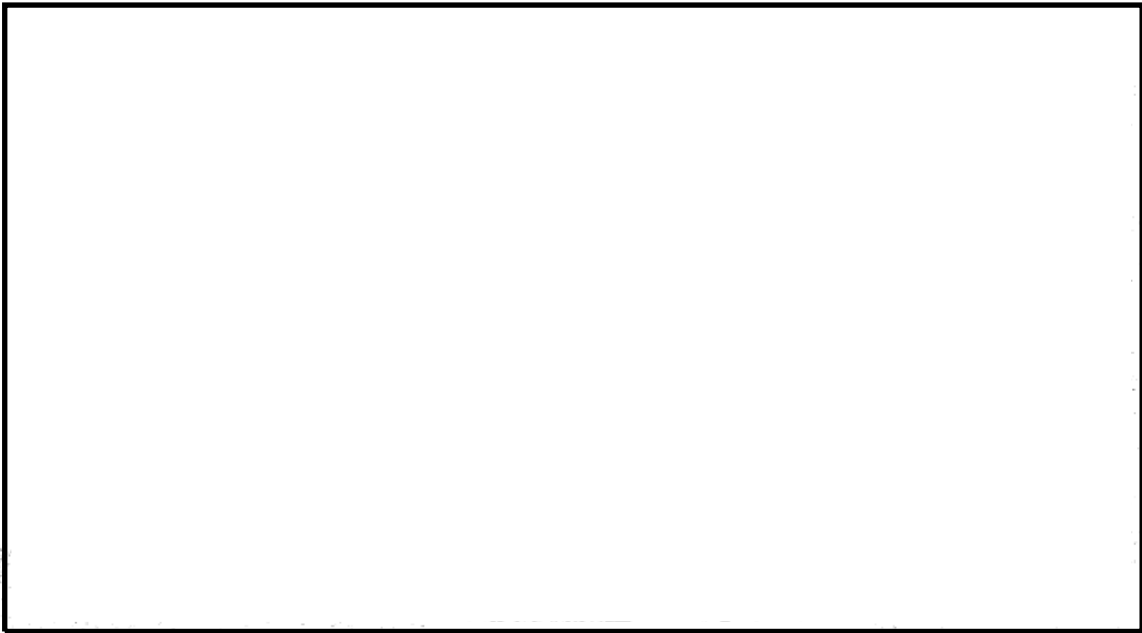


図 9 溶存酸素濃度と吸収線量の関係（エタノール添加なし）

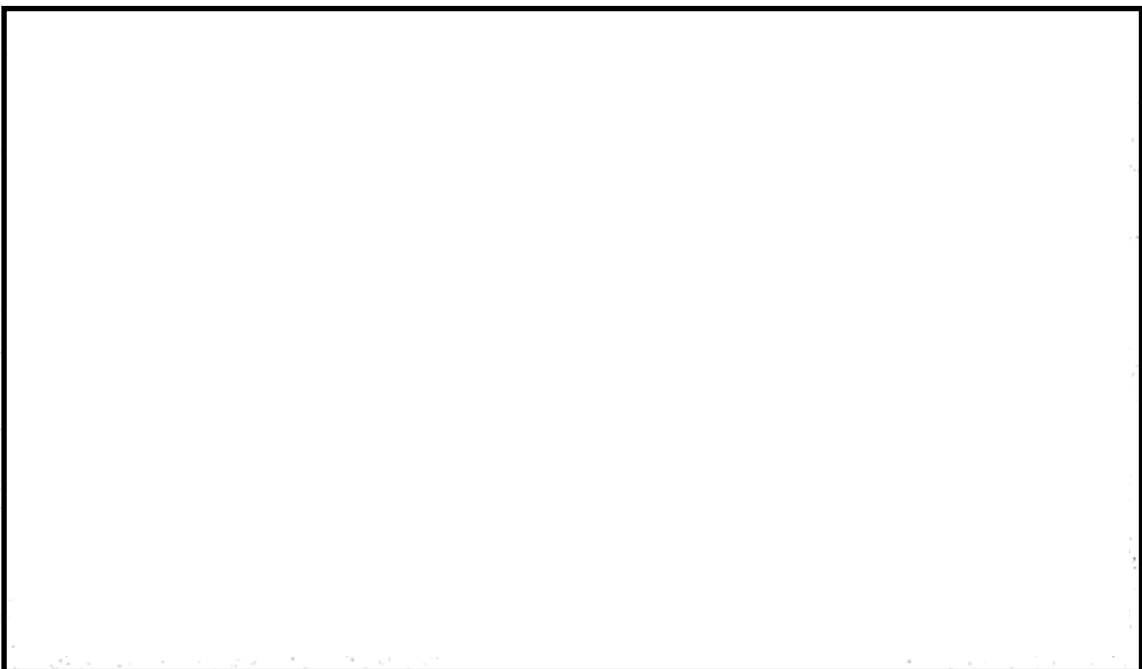


図 10 溶存酸素濃度と吸収線量の関係（エタノール添加あり）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

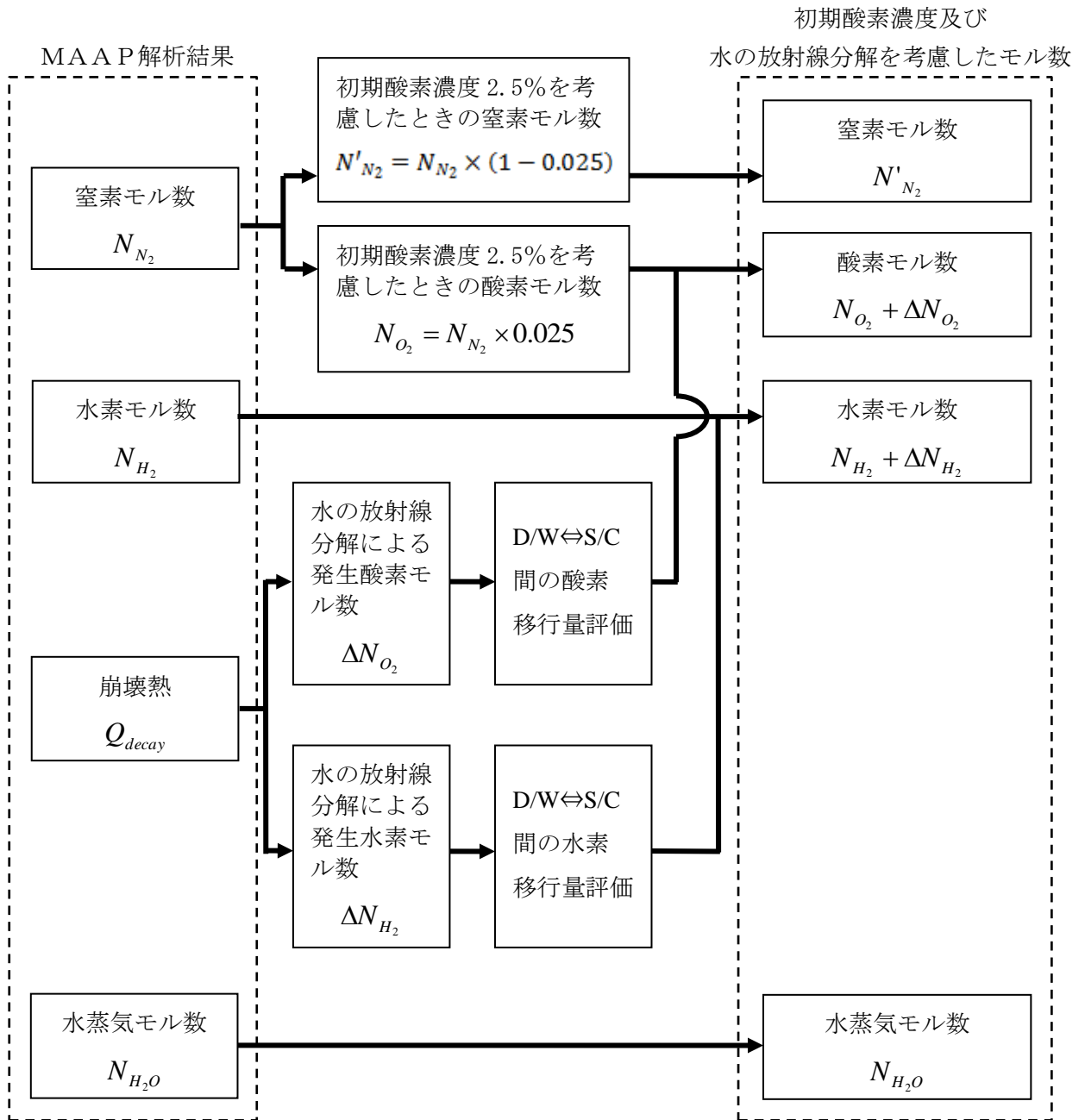


図 11 水素・酸素濃度の評価フロー図

安定状態について（水素燃焼）

水素燃焼の安定状態については以下のとおり。

原子炉格納容器安定状態：本評価では、事象発生から約 10 時間で原子炉補機代替冷却系を接続し、残留熱代替除去系による原子炉格納容器除熱を実施し、事象発生から約 12 時間後に可搬式窒素供給装置による原子炉格納容器内への窒素注入を実施する。これにより、7 日後まで格納容器ベントを実施しない状態で原子炉格納容器の機能を維持可能な事象進展となっている。

【安定状態の維持について】

本評価における格納容器ベントを実施しない状態を 7 日後以降も継続する場合、酸素濃度（ドライ条件）は事象発生から 100 日後時点における酸素濃度はドライ条件を仮定した場合であってもドライウェルで約 1.8vol%，サプレッション・チェンバで約 4.2vol%であり、可燃限界に到達するのは事象発生から 100 日以降である。

このため、事象発生から 7 日間が経過した以降も水素濃度及び酸素濃度を監視するとともに、状況に応じて酸素濃度の低減（可燃性ガス濃度制御系の運転等）を行い、原子炉格納容器内が可燃限界の濃度に到達することを防止する。また、重大事故等対処設備以外の設備の機能の復旧等も考慮し、格納容器圧力及び温度の低下操作や原子炉格納容器内の窒素ガス置換を試みる。これらの対応が困難であり、原子炉格納容器内の水素及び酸素濃度が可燃限界に到達する場合については、格納容器ベントにより、その水素及び酸素濃度を低減することにより安定状態を維持できる。

解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について（水素燃焼）
 表1 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響（水素燃焼）

項目	解析条件（初期条件、事故条件）の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	解析条件	最確条件			
初期条件 酸素濃度	2.5vol.%	2.5vol.%以下	酸素濃度 4.4vol.%（ドライ条件）到達を防止可能な初期酸素濃度として設定（運転上許容されている値の上限）	最確条件とした場合は、初期酸素濃度が低くなるため、本評価事故シナリオにおける原子炉格納容器内の酸素濃度推移が低く抑えられるが、本評価事故シナリオにおいて原子炉格納容器内の酸素濃度を操作開始の起点としている運転員等操作時間には影響はない。	最確条件とした場合は、初期酸素濃度が低くなるため、本評価事故シナリオにおける原子炉格納容器内の酸素濃度推移が低く抑えられることから、評価項目となるパラメータに対する余裕が大きくなる。
事故条件 炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量	全炉心内のジルコニウム約7.8%が水と反応して発生する水素量	事象進展による	解析コードMAMPによる評価結果	最確条件とした場合は、水素ガス発生量が変動する可能性があるが、本評価事故シナリオにおいては水素ガス発生量を操作開始の起点としている運転員等操作時間には影響はない。	最確条件とした場合は、水素ガス発生量が変動する可能性がある。炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量は、運転員等操作である低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水の操作開始時間に依存して変動するが、低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水の操作開始時間については、「3.1.2.3(2)b. 操作条件」にて解析上の操作開始時間と実際の操作開始時間はほぼ同等と評価しており、炉心内のジルコニウム-水反応による水素ガス発生量に与える影響は小さい。
	金属腐食等による水素ガス発生量	考慮しない	酸素濃度を厳しく評価するものとして設定	最確条件とした場合は、水素ガス発生量が増加するため、本評価事故シナリオにおける原子炉格納容器内の酸素濃度推移が低く抑えられるが、本評価事故シナリオにおいては原子炉格納容器内の酸素濃度を操作開始の起点としている運転員等操作時間には影響はない。	最確条件とした場合は、水素ガス発生量が増加するため、本評価事故シナリオにおける原子炉格納容器内の酸素濃度推移が低く抑えられることから、評価項目となるパラメータに対する余裕が大きくなる。
水の放射線分解による水素ガス及び酸素ガスの発生割合	水素： 0.06分子/100eV 酸素： 0.03分子/100eV	水素： 0.06分子/100eV 酸素： 0.03分子/100eV	重大事故時における原子炉格納容器内の条件を考慮して設定	G値の不確かさにより水の放射線分解による酸素発生量が大幅に増加する場合、原子炉格納容器内の酸素濃度が可燃領域又は爆轟領域となる可能性がある。その場合には、格納容器フィルタベント系を使用し、原子炉格納容器内の気体を排出することが可能であるため、評価項目となるパラメータに与える影響はない。	G値の不確かさにより水の放射線分解による酸素発生量が大幅に増加する場合、原子炉格納容器内の酸素濃度が可燃領域又は爆轟領域となる可能性がある。その場合には、格納容器フィルタベント系を使用し、原子炉格納容器内の気体を排出することが可能であるため、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

(添付資料3.4.1)

原子炉注水開始時間の評価結果への影響

1. はじめに

今回の評価では、運転操作手順書等を踏まえ、原子炉圧力容器への注水開始時刻を事象発生から 30 分後としている。実際の事故対応においては原子炉圧力容器への注水開始時刻が早まる又は遅れる可能性も想定される。水素燃焼のリスクの観点では、ジルコニウム-水反応による水素ガス発生量が抑制され、相対的に酸素濃度が高くなることで水素濃度及び酸素濃度がともに可燃領域に至る可能性が考えられる。一方で、注水時点の炉心の状態によっては、ジルコニウム-水反応が促進され、水素ガス発生量が増加する場合も考えられる。この場合には、増加した水素ガスによって相対的に酸素濃度が低下すると考えられる。

ここでは原子炉圧力容器への注水開始時刻が早まる又は遅れる場合を想定し、原子炉圧力容器への注水開始時刻が評価結果に与える影響を確認した。

2. 評価条件

今回の申請において示した解析ケース（以下「ベースケース」という。）の評価条件に対する変更点は以下のとおり。このほかの評価条件は、ベースケースと同等である。

(1) 感度解析 1（注水開始時刻が早まる場合）

- ・原子炉圧力容器への注水開始時刻を事象発生から 25 分後とした。25 分は今後の更なる事故対応能力の改善を見据えて設定した値である。

(2) 感度解析 2（注水開始時刻が遅れる場合）

- ・原子炉圧力容器への注水開始時刻をベースケースから 30 分遅延することとし、事象発生から 60 分後とした。30 分は、原子炉圧力容器への注水が遅れたとしても、熔融炉心が炉心プレナム下部に移行しない時間であることを確認し、設定した値である。

3. 評価結果

評価結果を図 1 から図 8 に示す。また、評価結果のまとめを表 1 に示す。各パラメータの推移はベースケースとほぼ同等となり、事象発生から 7 日後の酸素濃度も 5 vol% 未満となった。

4. まとめ

原子炉圧力容器への注水開始時刻が早まる又は遅れることによる評価結果への影響を確認した結果、評価項目となるパラメータである酸素濃度は、ベースケースと同等となった。このことから、実際の事故対応においては原子炉圧力容器への注水開始時刻が早まった又は遅れる場合においても水素燃焼のリスクの観点での事故対応への影響はない。

以上

表1 原子炉圧力容器への注水開始時刻の変更に伴う評価項目への影響

項目	原子炉圧力容器への注水開始時刻			評価項目
	感度解析1 (事象発生から 25分後)	感度解析2 (事象発生から 60分後)	ベースケース (事象発生から 30分後)	
全炉心内のジルコニウム量に対する酸化割合	約 11.7%	約 6.2%	約 7.8%	—
ジルコニウム-水反応による水素ガス発生量	約 293kg	約 167kg	約 198kg	
ドライウェル酸素濃度 (ウェット条件)	約 1.1vol%* (事象発生から 168時間後)	約 1.1vol% (事象発生から 168時間後)	約 1.1vol%* (事象発生から 168時間後)	5 vol% 以下
サプレッション・チェンバ 酸素濃度 (ウェット条件)	約 1.9vol%* (事象発生から 168時間後)	約 2.1vol% (事象発生から 168時間後)	約 1.9vol%* (事象発生から 168時間後)	

※ 注水開始時刻の違いにより、水-ジルコニウム反応による水素発生量 (①) や溶融炉心の形状に応じて水蒸気発生量 (②) が変化する。

感度解析1は、ベースケースよりも①が増加し、②が減少している。①の増加は格納容器内の酸素濃度を下げる効果となるが、②の減少は酸素濃度を上げる効果となるため、結果として168時間後の酸素濃度は同等の値となっている。

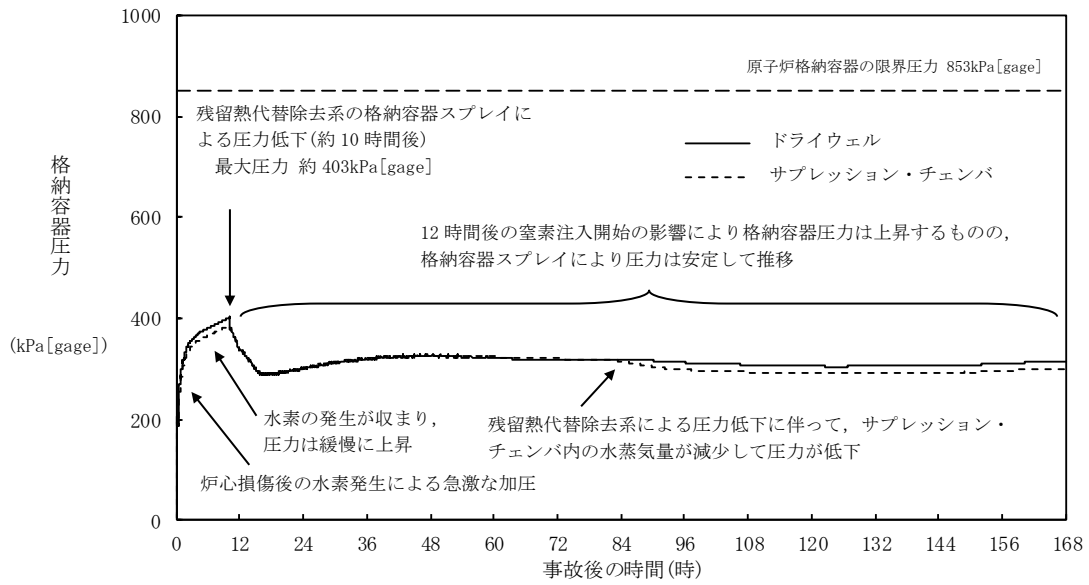


図1 格納容器圧力の推移 (感度解析1)

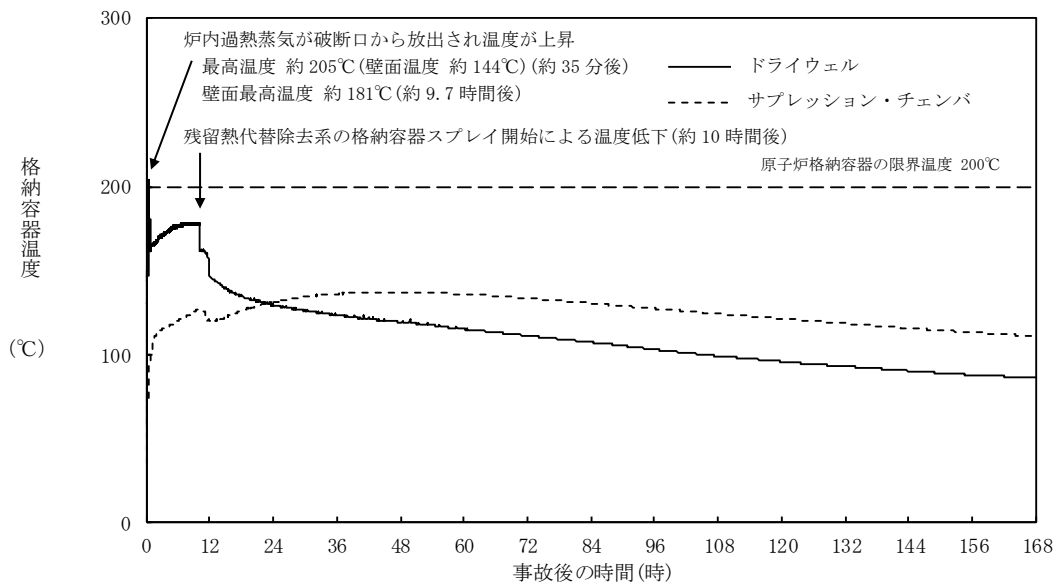
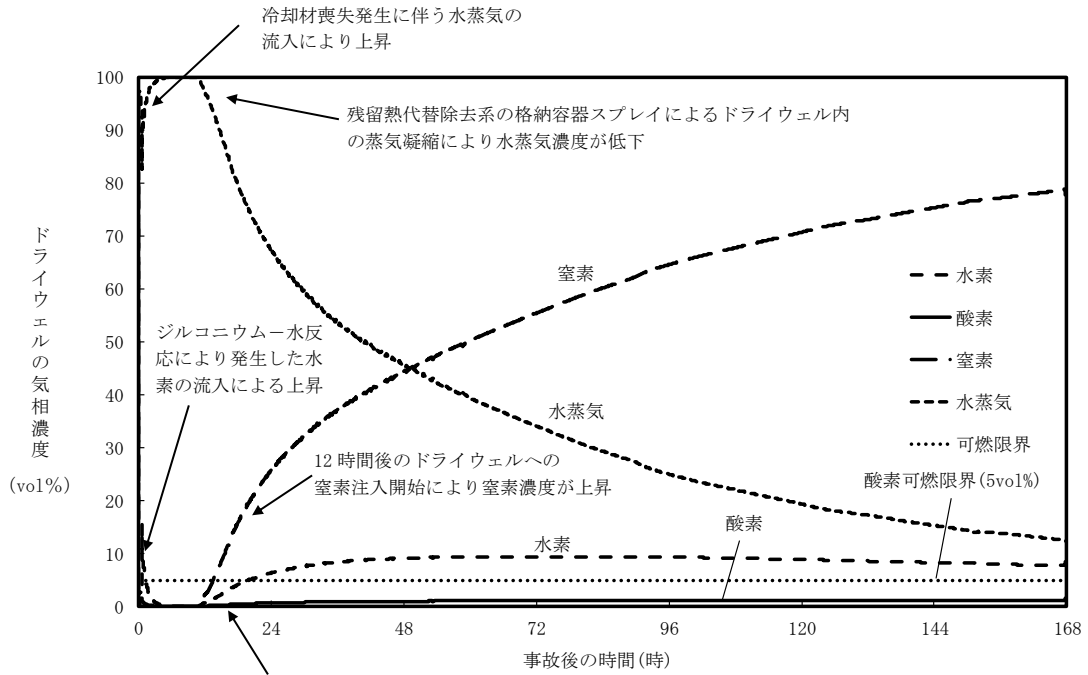


図2 格納容器温度の推移 (感度解析1)



残留熱代替除去系の格納容器スプレイによるドライウェル内の蒸気凝縮により、サブプレッション・チェンバ内の非凝縮性ガスがドライウェルへ流入し、非凝縮性ガスの濃度が上昇

図3 ドライウェルの気相濃度の推移(ウェット条件) (感度解析1)

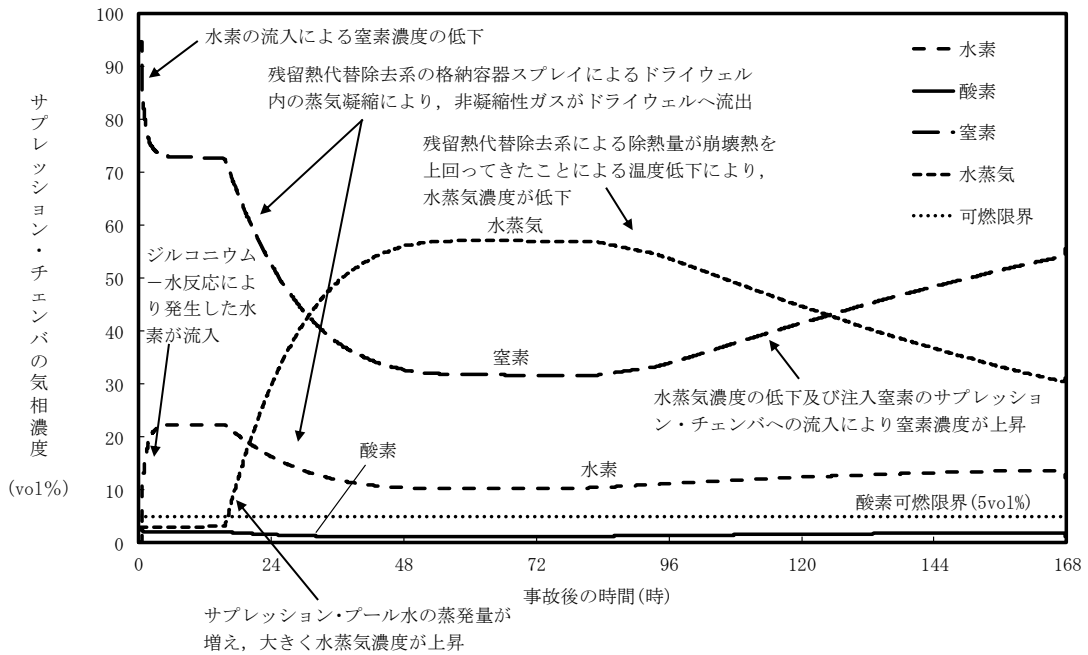


図4 サプレッション・チェンバの気相濃度の推移(ウェット条件) (感度解析1)

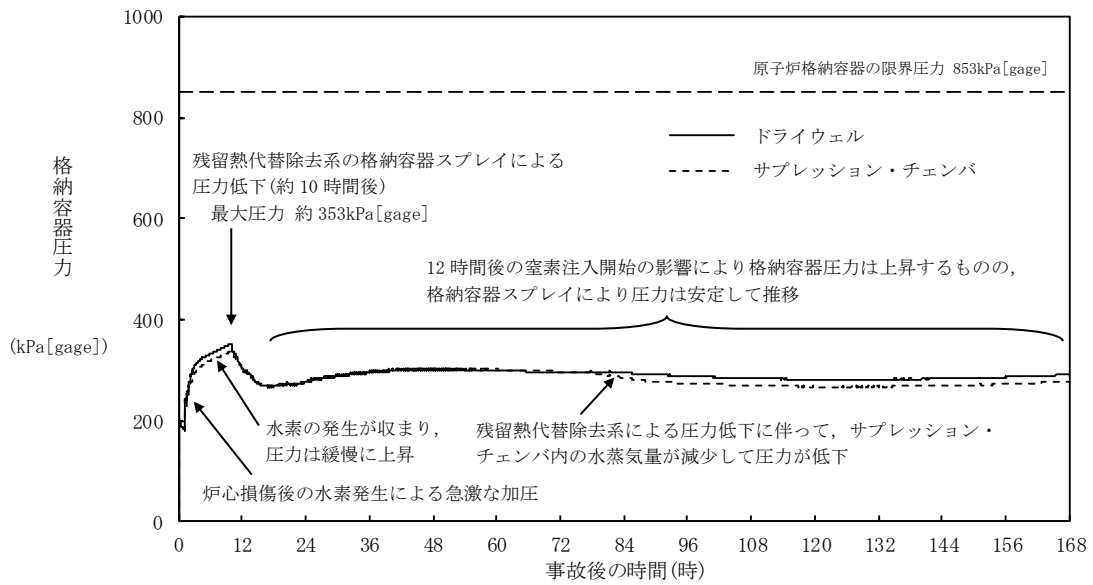


図 5 格納容器圧力の推移 (感度解析 2)

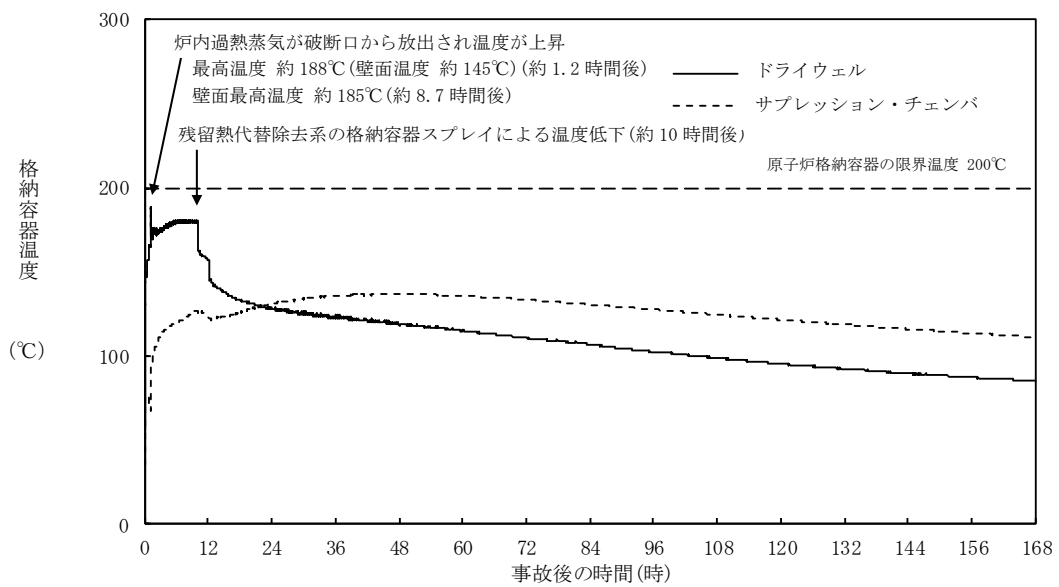


図 6 格納容器温度の推移 (感度解析 2)

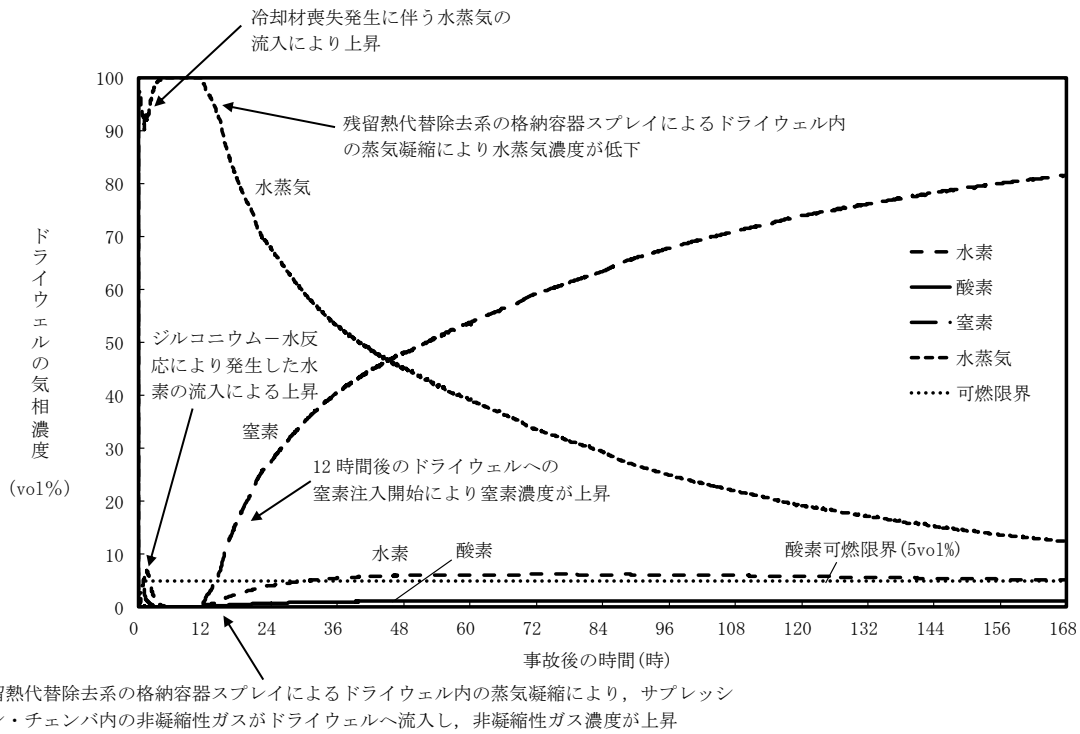


図7 ドライウエルの気相濃度の推移(ウェット条件) (感度解析2)

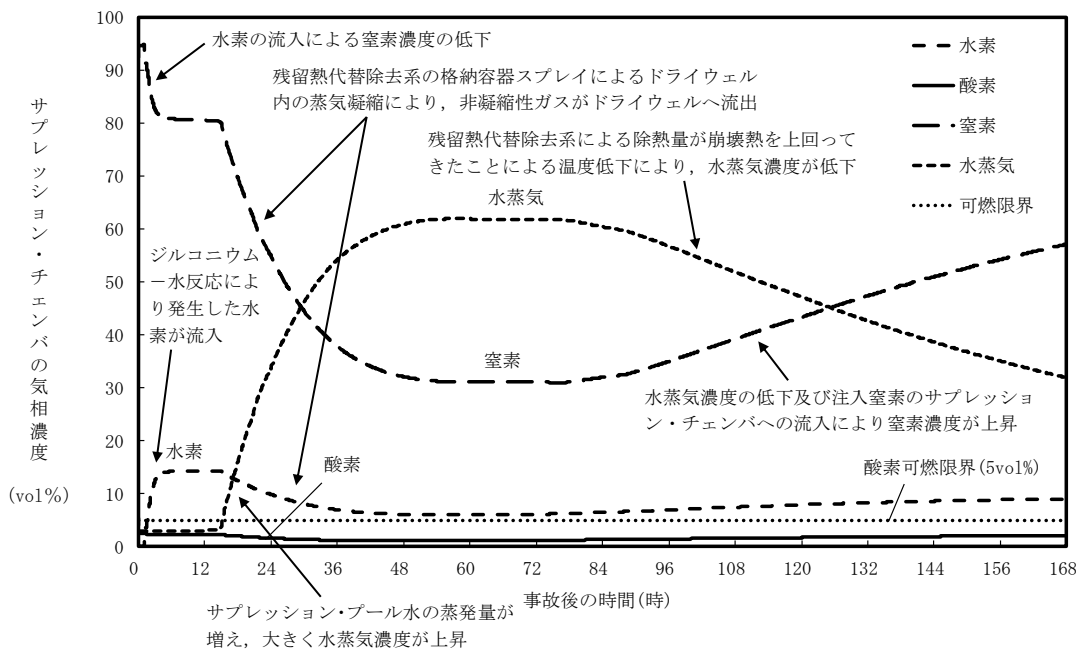


図8 サプレッション・チェンバの気相濃度の推移(ウェット条件) (感度解析2)

3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用

3.5.1 格納容器破損モードの特徴、格納容器破損防止対策

(1) 格納容器破損モード内のプラント損傷状態

格納容器破損モード「溶融炉心・コンクリート相互作用」に至る可能性のあるプラント損傷状態は、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、TQUV、TQUX及びLOCAである。

(2) 格納容器破損モードの特徴及び格納容器破損防止対策の基本的考え方

格納容器破損モード「溶融炉心・コンクリート相互作用」では、発電用原子炉の運転中に運転時の異常な過渡変化、原子炉冷却材喪失事故（LOCA）が発生するとともに、非常用炉心冷却系等の安全機能の喪失が重畳する。このため、緩和措置がとられない場合には、原子炉圧力容器内の溶融炉心が原子炉格納容器内へ流れ出し、溶融炉心からの崩壊熱や化学反応によって、原子炉格納容器下部のコンクリートが侵食され、原子炉格納容器の構造部材の支持機能を喪失し、原子炉格納容器の破損に至る。

したがって、本格納容器破損モードでは、原子炉圧力容器の下部から溶融炉心が落下する時点で、原子炉格納容器下部に溶融炉心の冷却に必要な水位及び水量を確保し、かつ、溶融炉心の落下後は、ペDESTAL代替注水系（可搬型）によって溶融炉心を冷却すること及び原子炉格納容器下部にコリウムシールドを設置することにより、原子炉格納容器の破損を防止するとともに、溶融炉心・コンクリート相互作用による水素ガス発生を抑制する。

また、溶融炉心の落下後は、ペDESTAL代替注水系（可搬型）によって溶融炉心の冷却を実施する。その後、残留熱代替除去系又は格納容器フィルタベント系によって原子炉格納容器の圧力及び温度を低下させる。

さらに、長期的な原子炉格納容器内酸素濃度の上昇を抑制する観点から、可搬式窒素供給装置を用いて原子炉格納容器内へ窒素供給することによって、原子炉格納容器の破損を防止する。

なお、本格納容器破損モードの有効性評価を実施する上では、重大事故等対処設備による原子炉注水機能についても使用できないものと仮定し、原子炉圧力容器破損に至るものとする。

(3) 格納容器破損防止対策

格納容器破損モード「溶融炉心・コンクリート相互作用」で想定される事故シーケンスに対して、原子炉格納容器下部のコンクリートの侵食による原子炉圧力容器の支持機能喪失を防止するため、格納容器代替スプレイ系（可搬型）及びペDESTAL代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部注水手段を整備する。また、ドライウェルサンプへの溶融炉心の流入を防止し、溶融炉心が原子炉格納容器バウンダリに接触することを防止するために、原子炉格納容器下部にコリウムシールドを設置する。

また、その後の格納容器圧力及び温度の上昇を抑制する観点から、残留熱代替除去系による原子炉格納容器除熱手段又は格納容器フィルタベント系による原子炉格納容器除熱手段を整備する。なお、これらの原子炉圧力容器破損以降の格納容器過圧・過温に対応する手順及び重大事故等対策は「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」と同じである。

本格納容器破損モードに至るまでの事象進展への対応、本格納容器破損モー

ドによる原子炉格納容器の破損防止及び原子炉格納容器の破損を防止した以降の対応を含めた一連の重大事故等対策の概要は、「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の3.2.1(3)のa.からk.に示している。このうち、本格納容器破損モードに対する重大事故等対策は、「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の3.2.1(3)に示すg.からj.である。

本格納容器破損モードに至るまでの事象進展への対応、本格納容器破損モードによる原子炉格納容器の破損防止及び原子炉格納容器の破損を防止した以降の対応を含めた一連の重大事故等対策の概略系統図は「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」に示す第3.2.1-1(1)図から第3.2.1-1(4)図である。このうち、本格納容器破損モードに対する重大事故等対策の概略系統図は「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」に示す第3.2.1-1(2)図から第3.2.1-1(4)図である。本格納容器破損モードに対応する手順及び必要な要員と作業項目は「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」と同じである。

3.5.2 格納容器破損防止対策の有効性評価

(1) 有効性評価の方法

本格納容器破損モードを評価する上で選定した評価事故シーケンスは、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、プラント損傷状態をTQUVとし、事象進展が早く炉心損傷までの時間余裕の観点で厳しい過渡事象を起因事象とし、逃がし安全弁再閉失敗を含まない「過渡事象＋高圧炉心冷却失敗＋低圧炉心冷却失敗＋炉心損傷後の原子炉注水（重大事故等対策を含む）失敗＋デブリ冷却失敗」である。ここで、逃がし安全弁再閉失敗を含まない事故シーケンスとした理由は、プラント損傷状態がTQUVであるため、事故対応に及ぼす逃がし安全弁再閉の成否の影響は小さいと考え、発生頻度の観点で大きい事故シーケンスを選定したためである。

また、「1.2.2.1(3)e. 溶融炉心・コンクリート相互作用」に示すとおり、プラント損傷状態の選定では、LOCAとTQUVを比較し、LOCAの場合は原子炉格納容器下部に原子炉冷却材が流入することで溶融炉心・コンクリート相互作用が緩和される可能性等を考慮し、より厳しいと考えられるTQUVを選定した。

また、本評価事故シーケンスにおいては、電源の復旧、注水機能の確保等、必要となる事故対処設備が多く、格納容器への注水・除熱を実施するまでの対応時間を厳しく評価する観点から、全交流動力電源喪失の重畳を考慮する。

なお、本評価事故シーケンスは、「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」及び「3.3 原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」において有効性を評価したシーケンスと同様のシーケンスである。本格納容器破損モード及び「3.3 原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」ではプラント損傷状態をTQUVとし、「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」ではプラント損傷状態をTQUXとしており、異なるプラント損傷状態を選定している。しかしながら、どちらのプラント損傷状態であっても原子炉水位が燃料棒有効長底部から燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点で逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の手動開操作によって原子炉減圧する手順であり、原子炉減圧以降も、溶融炉心の挙動に従って一連の流れで生じる各格納容器破損モードを、定められた一連の手順に従って防止することとなる。このことか

ら、これらの格納容器破損モードについては同様のシーケンスで評価する。

本評価事故シーケンスでは、炉心における崩壊熱、燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化、燃料被覆管変形、沸騰・ボイド率変化、気液分離（水位変化）・対向流、炉心損傷後の原子炉压力容器におけるリロケーション、構造材との熱伝達、下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達、原子炉压力容器破損、原子炉压力容器内F P挙動、炉心損傷後の原子炉格納容器における原子炉格納容器下部床面での熔融炉心の拡がり、原子炉压力容器外F C I（熔融炉心細粒化）、原子炉压力容器外F C I（デブリ粒子熱伝達）、熔融炉心と原子炉格納容器下部プール水との伝熱、熔融炉心とコンクリートの伝熱並びにコンクリート分解及び非凝縮性ガス発生が重要現象となる。

よって、これらの現象を適切に評価することが可能であり、原子炉压力容器内及び原子炉格納容器内の熱水力モデルを備え、かつ、炉心損傷後のシビアアクシデント特有の熔融炉心挙動に関するモデルを有するシビアアクシデント総合解析コードMAAPにより原子炉格納容器下部の床面及び壁面のコンクリートの侵食量等の過渡応答を求める。

また、解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、本評価事故シーケンスにおける運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価する。

(2) 有効性評価の条件

本評価事故シーケンスの有効性評価の条件は、「3.2 高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の条件と同じである。また、初期条件の初期酸素濃度並びに事故条件の水素ガス及び酸素ガスの発生については、「3.4 水素燃焼」と同じである。

(3) 有効性評価の結果

本評価事故シーケンスにおける原子炉圧力及び原子炉水位（シュラウド内外水位）の推移を第3.5.2-1(1)図及び第3.5.2-1(2)図に、格納容器圧力、格納容器温度、ドライウエル及びサプレッション・チェンバ気相濃度（ウェット条件、ドライ条件）、サプレッション・プール水位、ペDESTAL水位並びに熔融炉心・コンクリート相互作用による原子炉格納容器下部床面及び壁面のコンクリート侵食量の推移を第3.5.2-1(3)図から第3.5.2-1(11)図に示す。

a. 事象進展

事象進展は「3.2 高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」と同じである。

b. 評価項目等

原子炉格納容器下部にコリウムシールドを設置するとともに、熔融炉心落下前の原子炉格納容器下部への水張り及び熔融炉心落下後の原子炉格納容器下部への注水の継続によって、コンクリート侵食量は原子炉格納容器下部の床面で0 cm、壁面で約4 cmに抑えられ、原子炉格納容器下部の熔融炉心は適切に冷却される。また、MAAPコードによる評価において、コリウムシールドと熔融炉心の接触面温度は2,100℃未満であり、原子炉格納容器下部床面に設置したコリウムシールドの侵食は生じない。

原子炉格納容器下部壁面のコンクリート侵食に対しては、コンクリート侵食が約 1.6m 厚さの内側鋼板及びコンクリート部を貫通して外側鋼板まで到達しない限り、原子炉圧力容器の支持機能を維持できる。評価の結果、原子炉格納容器下部壁面のコンクリート侵食量は約 4 cm に抑えられ、原子炉圧力容器の支持機能を維持できる。

原子炉格納容器下部床面のコンクリート侵食に対しては、原子炉格納容器下部の床面以下のコンクリート厚さが約 4m であり、原子炉格納容器下部床面のコンクリート侵食量は 0 cm であるため、原子炉圧力容器の支持機能を維持できる。

また、熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガスの発生は、原子炉格納容器下部壁面についてはコンクリートの侵食量が約 4 cm であるため、約 11kg の可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスが発生するが、ジルコニウム-水反応によって約 423kg の水素ガスが発生することを考慮すると、熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスの発生が格納容器圧力に与える影響は小さい。このため、熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガスの発生が格納容器圧力に与える影響は小さい。

なお、原子炉格納容器下部への熔融炉心落下後の本評価における水素濃度は、ドライウェルよりも大きな値となるサプレッション・チェンバにおいて、ウェット条件で約 9.9vol% 以上、ドライ条件で約 24.7vol% 以上となり、ドライ条件においては 13vol% を上回る。一方、酸素濃度は水の放射線分解によって徐々に上昇するものの、事象発生から 7 日後（168 時間後）においても酸素濃度はウェット条件で約 1.6vol%、ドライ条件で約 2.5vol% であり、可燃限界である 5 vol% を下回る。熔融炉心・コンクリート相互作用によって、可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスが発生するが、ジルコニウム-水反応によって発生する水素ガスも考慮すると、原子炉格納容器内に存在する可燃性ガスとしては水素ガスが支配的であり、一酸化炭素の影響は無視できる。熔融炉心・コンクリート相互作用では酸素ガスは発生しないため、熔融炉心・コンクリート相互作用により発生する可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスを考慮することは原子炉格納容器内の酸素濃度を下げる要因となり、上記の酸素濃度（ウェット条件で 1.6vol%、ドライ条件で 2.5vol%）以下になるものと考えられる。このため、原子炉格納容器内での可燃性ガスの燃焼が発生するおそれはない。

その後は、原子炉格納容器下部に崩壊熱相当に余裕を見た流量での原子炉格納容器下部注水を行い、また、残留熱代替除去系による原子炉格納容器除熱を継続して行うことで、安定状態を維持できる。

(添付資料 3.5.1)

本評価では、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(8)の評価項目について、原子炉格納容器下部床面及び壁面のコンクリート侵食量^{*1}をパラメータとして対策の有効性を確認した。なお、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(4)及び(5)の評価項目の評価結果については「3.2 高圧熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」及び「3.3 原子炉圧力容器外の熔融燃料-冷却材相互作用」にて評価項目を満足することを確認している。

※1 熔融炉心が適切に冷却されることについても、原子炉格納容器の構造

部材の支持機能が維持される範囲で原子炉格納容器下部床面及び壁面のコンクリートの侵食が停止することで確認した。

なお、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(6)の評価項目については「3.4 水素燃焼」において、(7)の評価項目については「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」において、それぞれ選定された評価事故シーケンスに対して対策の有効性を確認しているが、溶融炉心が原子炉格納容器下部に落下した場合については、本評価において、「1.2.2.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(6)及び(7)の評価項目について対策の有効性を確認できる。

3.5.3 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価

解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価するものとする。

格納容器破損モード「溶融炉心・コンクリート相互作用」では、重大事故等対処設備を含むすべての原子炉注水機能が喪失して炉心損傷及び原子炉圧力容器の破損に至り、溶融炉心が原子炉格納容器下部へ落下してコンクリートを侵食することが特徴である。

また、不確かさの影響を確認する運転員等操作は、事象進展に有意な影響を与えると考えられる操作として、溶融炉心落下前の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による水張り操作及び溶融炉心落下後のペDESTAL代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作とする。

本評価事故シーケンスの有効性評価における現象の不確かさとしては、溶融炉心の粒子化、溶融炉心の拡がり、デブリから水への熱伝達、コンクリート種類が挙げられる。

本評価事故シーケンスの評価では、水による拡がり抑制に対して溶融炉心の拡がりを抑制した場合、及び、デブリ上面の性状に対して上面熱流束を変化させた場合の影響評価を実施する。なお、溶融炉心の粒子化の不確かさに対してエントレインメント係数を変化させた場合、コンクリート種類に対して壁方向と床方向の熱分配を変化させた場合の本格納容器破損モードに対する影響は小さいことを確認している。これらの影響評価に加え、溶融炉心落下時の崩壊熱の影響を確認する観点から原子炉圧力容器破損時の崩壊熱が大きくなるよう起因事象を大破断LOCAとした場合の影響評価を実施する。

これらの影響評価の結果、運転員等操作時間に与える影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響として、原子炉圧力容器の支持機能を維持できることを確認している。

また、原子炉圧力容器下鏡温度を監視し、300℃に到達した時点（事象発生から約3.1時間後）で原子炉格納容器下部への初期水張りを行い、原子炉格納容器下部への溶融炉心の落下に対しては、原子炉格納容器下部の雰囲気温度、格納容器圧力等を監視することによって、原子炉圧力容器破損を認知し、原子炉格納容器下部への注水を行うといった徴候を捉えた対応によって、溶融炉心を確実に冷却できることを確認している。

(1) 解析コードにおける重要現象の不確かさの影響評価

本評価事故シーケンスにおいて不確かさの影響評価を行う重要現象とは、「1.7 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価方針」に示すとおりであり、それらの不確かさの影響評価は以下のとおりである。

a. 運転員等操作時間に与える影響

炉心における燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化及び燃料被覆管変形の不確かさとして、炉心ヒートアップに関するモデルは、TMI事故についての再現性及びCOR A実験についての再現性を確認している。炉心ヒートアップの感度解析（ジルコニウム-水反応速度の係数についての感度解析）では、炉心熔融時間及び炉心下部プレナムへの熔融炉心移行の開始時間に対する感度は数分程度であり、影響は小さいことを確認している。本評価事故シーケンスでは、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点で原子炉格納容器下部への初期水張り操作、原子炉圧力容器破損時点で原子炉格納容器下部への注水操作を実施するが、炉心下部プレナムへの熔融炉心移行の開始時間の不確かさは小さく、炉心下部プレナムへ熔融炉心が移行した際の原子炉圧力容器下鏡温度の上昇及び原子炉圧力容器破損時の格納容器圧力上昇は急峻であることから、原子炉圧力容器下鏡温度及び原子炉圧力容器破損を操作開始の起点としている原子炉格納容器下部への初期水張り操作及び原子炉圧力容器破損時の原子炉格納容器下部への注水操作に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。

炉心における沸騰・ボイド率変化及び気液分離（水位変化）・対向流の不確かさとして、炉心モデル（炉心水位計算モデル）は、原子炉水位挙動について、原子炉圧力容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERの評価結果との比較により水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるものの、その差異は小さいことを確認していることから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉圧力容器におけるリロケーション及び構造材との熱伝達の不確かさとして、熔融炉心の挙動モデルはTMI事故についての再現性が確認している。また、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により原子炉圧力容器破損時間に与える影響は小さいことを確認している。リロケーションの影響を受ける可能性がある操作としては、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点での原子炉格納容器下部への初期水張り操作があるが、炉心下部プレナムへの熔融炉心移行の開始時間の不確かさは小さく、炉心下部プレナムへ熔融炉心が移行した際の原子炉圧力容器下鏡温度の上昇は急峻であることから、原子炉圧力容器下鏡温度を操作開始の起点としている原子炉格納容器下部への初期水張り操作に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。原子炉圧力容器の破損の影響を受ける可能性がある操作としては、熔融炉心落下後の原子炉格納容器下部への注水操作があるが、原子炉圧力容器破損時間の不確かさは小さいことから、原子炉圧力容器の破損を起点としている原子炉格納容器下部への注水操作に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉圧力容器における炉心下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達の不確かさとして、熔融炉心の挙動モデルはTMI事故についての再現性を確認している。また、炉心下部プレナムと熔融炉心の熱伝達に関する

感度解析により原子炉圧力容器破損時間に与える影響は小さいことを確認している。炉心下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達の不確かさの影響を受ける可能性がある操作としては、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点での原子炉格納容器下部への初期水張り操作があるが、炉心下部プレナムでの溶融炉心の熱伝達の不確かさは小さいことから、原子炉圧力容器下鏡温度を操作開始の起点としている原子炉格納容器下部への初期水張り操作に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。原子炉圧力容器破損の影響を受ける可能性がある操作としては、溶融炉心落下後の原子炉格納容器下部への注水操作があるが、原子炉圧力容器破損時間の不確かさは小さいことから、原子炉圧力容器の破損を起点としている原子炉格納容器下部への注水操作に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉圧力容器における原子炉圧力容器破損の不確かさとして、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ（しきい値）に関する感度解析により最大ひずみを低下させた場合に原子炉圧力容器破損時間が早まることを確認しているが、原子炉圧力容器破損（事象発生から約5.4時間後）に対して、十数分早まる程度であり、原子炉格納容器下部への注水は中央制御室から速やかに実施可能な操作であることから、原子炉圧力容器破損を操作開始の起点としている原子炉格納容器下部への注水操作に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉圧力容器における原子炉圧力容器内F P挙動の不確かさとして、核分裂生成物（F P）挙動モデルはPHEBUS-F P実験解析により原子炉圧力容器内へのF P放出の開始時間を適切に再現できることを確認している。PHEBUS-F P実験解析では、燃料被覆管破裂後のF P放出について実験結果より急激な放出を示す結果が確認されたが、小規模体系の模擬性が原因と推測され、実機の大規模な体系においてこの種の不確かさは小さくなると推定される。本評価事故シーケンスでは、炉心損傷後の原子炉圧力容器内F P放出を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作に与える影響はない。

炉心損傷後の原子炉格納容器における溶融燃料-冷却材相互作用の不確かさとして、溶融炉心の細粒化モデルにおけるエントレインメント係数、デブリ粒子径の感度解析により、原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用による圧力スパイクに与える影響は小さいことを確認している。本評価事故シーケンスでは、原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用による圧力スパイクを起点とした運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

炉心損傷後の原子炉格納容器における原子炉格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり及び溶融炉心と原子炉格納容器下部のプール水の伝熱の不確かさとして、エントレインメント係数、溶融炉心からのプール水への熱流束及び溶融プールクラスト間の熱伝達係数がコンクリート侵食量に影響を与えることを確認している。また、コリウムシールド侵食量に対しても影響を与える可能性があるが、本評価事故シーケンスでは、コリウムシールド及びコンクリート侵食を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

炉心損傷後の原子炉格納容器における溶融炉心とコンクリート伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生の不確かさとして、コリウムシールド及

びコンクリートの侵食量への影響が考えられる。本評価事故シーケンスでは、コリウムシールド及びコンクリート侵食を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。なお、炉心損傷後の原子炉格納容器における熔融炉心とコンクリート伝熱、コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生の不確かさがコンクリート侵食に与える影響に関しては、実験解析によりコンクリート侵食量を適切に評価できることを確認している。また、MAAPコードにおける熔融炉心から構造材への伝熱は材質に依存しないモデルであり、コリウムシールドにも適用可能である。
(添付資料 3.5.2)

b. 評価項目となるパラメータに与える影響

炉心における燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達、燃料被覆管酸化及び燃料被覆管変形の不確かさとして、炉心ヒートアップに関するモデルは、TMI事故についての再現性及びCORAX実験についての再現性を確認している。炉心ヒートアップの感度解析（ジルコニウム-水反応速度の係数についての感度解析）では、炉心熔融時間及び炉心下部プレナムへの熔融炉心移行の開始時間に対する感度は数分程度であり、影響は小さいことを確認している。本評価事故シーケンスでは、原子炉压力容器破損時点で原子炉格納容器下部に初期水張りが実施されていることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

炉心における沸騰・ボイド率変化及び気液分離（水位変化）・対向流の不確かさとして、炉心モデル（炉心水位計算モデル）は、原子炉水位挙動について原子炉压力容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERの評価結果との比較により、水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるものの、その差異は小さいことを確認している。また、原子炉压力容器破損時点で原子炉格納容器下部に初期水張りが実施されていることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉压力容器におけるリロケーション及び構造材との熱伝達の不確かさとして、熔融炉心の挙動モデルはTMI事故についての再現性を確認している。また、炉心ノード崩壊のパラメータを低下させた感度解析により、原子炉压力容器破損時間に与える影響は小さいことを確認している。本評価事故シーケンスでは、原子炉压力容器破損時点で原子炉格納容器下部に初期水張りが実施されていることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉压力容器における炉心下部プレナムでの熔融炉心の熱伝達の不確かさとして、熔融炉心の挙動モデルはTMI事故についての再現性を確認している。また、炉心下部プレナムと熔融炉心の熱伝達に関する感度解析により原子炉压力容器破損時間に与える影響は小さいことを確認している。本評価事故シーケンスでは、原子炉压力容器破損時点で原子炉格納容器下部に初期水張りが実施されていることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉压力容器における原子炉压力容器破損の不確かさとして、制御棒駆動機構ハウジング溶接部の破損判定に用いる最大ひずみ（しきい値）に関する感度解析により最大ひずみを低下させた場合に原子炉压力容器破損時間が早まることを確認しているが、原子炉压力容器破損（事象発

生から約 5.4 時間後) に対して、早まる時間はわずかであり、破損時間がわずかに早まった場合においても、原子炉格納容器下部に初期水張りが実施されていることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉压力容器における原子炉压力容器内 F P 挙動の不確かさとして、原子炉压力容器内 F P 挙動と熔融炉心・コンクリート相互作用による侵食量に関連はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

炉心損傷後の原子炉格納容器における熔融燃料-冷却材相互作用の不確かさとして、エントレインメント係数の感度解析により熔融炉心の細粒化割合がコンクリート侵食に与える感度は小さいことを確認しており、また、熔融炉心の温度に対する感度は小さく、コリウムシールド侵食に与える感度についても同様に小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

炉心損傷後の原子炉格納容器における原子炉格納容器下部床面での熔融炉心の拡がりについて、熔融炉心の拡がりを抑制した場合を想定した感度解析を実施した。評価の体系として、水中に落下した熔融炉心が初期水張り水深と同じ高さの円柱を形成し、円柱の上面から水によって除熱されるものとした。ただし、円柱の側面部分も水に接していることを想定し、上面からの除熱量は円柱上面の面積に側面の面積を加えた値とした。感度解析の結果、第 3.5.3-1(1) 図に示すとおり、コリウムシールド及びコンクリートの侵食は生じず、原子炉压力容器の支持機能を維持できる。また、熔融炉心と原子炉格納容器下部のプール水の伝熱の不確かさとして、エントレインメント係数、熔融炉心からのプール水への熱流束及び熔融プール-クラスト間の熱伝達係数の感度解析を踏まえ、コンクリートの侵食量について支配的な熔融炉心からのプール水への熱流束についての感度解析を実施した。感度解析の結果、第 3.5.3-1(2) 図に示すとおり、コンクリート侵食量は原子炉格納容器下部の床面で 0 cm、壁面で約 13cm に抑えられ、原子炉压力容器の支持機能を維持できる。なお、本感度解析では、原子炉格納容器下部での熔融炉心・コンクリート相互作用によって約 41kg の可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスが発生するが、本評価においてもジルコニウム-水反応によって約 422kg の水素ガスが発生することを考慮すると、熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスの発生が格納容器圧力に与える影響は小さい。熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガスの発生が、可燃性ガスの燃焼の可能性に及ぼす影響について、本評価における原子炉格納容器下部への熔融炉心落下後の原子炉格納容器内の水素濃度は、ドライウェルよりも大きな値となるサプレッション・チェンバにおいて、ウェット条件で約 6.1vol% 以上、ドライ条件で約 30.9vol% 以上となり、ドライ条件においては 13vol% を上回る。このことから、本感度解析において評価した、熔融炉心・コンクリート相互作用に伴って発生する可燃性ガスの発生量を本評価の結果に加えて原子炉格納容器内の気相濃度を評価しても、原子炉格納容器内での可燃性ガスの燃焼の可能性には影響しない。

なお、熔融炉心・コンクリート相互作用によって生じる約 41kg の気体の内訳は、可燃性ガスである水素ガスが約 35kg、一酸化炭素が約 6 kg、その他の非凝縮性ガスである二酸化炭素が 1 kg 未満である。ジルコニウム-水反応によって発生する水素ガスも考慮すると、原子炉格納容器内に存在する可燃

性ガスとしては水素ガスが支配的であり、一酸化炭素の影響は無視できる。

一方、原子炉格納容器内の酸素濃度については、水の放射線分解によって徐々に上昇するものの、事象発生から7日後（168時間後）でもサプレッション・チェンバにおいて、ウェット条件で約1.5vol%，ドライ条件で約4.1vol%であり、可燃限界である5vol%を下回る。溶融炉心・コンクリート相互作用では酸素ガスは発生しないため、溶融炉心・コンクリート相互作用により発生する可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスを考慮することは原子炉格納容器内の酸素濃度を下げる要因となる。このため、本感度解析ケースの溶融炉心・コンクリート相互作用に伴って発生する可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスの発生量を本評価の結果に加えて気相濃度を評価する場合、上記の酸素濃度（ウェット条件で1.5vol%，ドライ条件で4.1vol%）以下になるものと考えられる。このため、原子炉格納容器内での可燃性ガスの燃焼が発生するおそれはない。

（添付資料 3.5.2, 3.5.3）

(2) 解析条件の不確かさの影響評価

a. 初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件

初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件は、第3.2.2-1表に示すとおりであり、それらの条件設定を設計値等、最確条件とした場合の影響を評価する。また、解析条件の設定に当たっては、評価項目となるパラメータに対する余裕が小さくなるような設定があることから、その中で事象進展に有意な影響を与えると考えられる項目に関する影響評価の結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

初期条件の原子炉停止後の崩壊熱は、解析条件の燃焼度33GWd/tに対応したものとしており、その最確条件は平均的燃焼度約30GWd/tであり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、解析条件で設定している崩壊熱よりも小さくなるため、発生する蒸気量は少なくなり、原子炉圧力容器の破損に至るまでの事象進展は緩和されるが、操作手順（原子炉圧力容器下鏡温度に応じて原子炉格納容器下部への初期水張り操作を実施すること及び溶融炉心落下後に原子炉格納容器下部への注水操作を開始すること）に変わりはないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の溶融炉心からプールへの熱流束は、解析条件の800kW/m²相当（圧力依存あり）に対して最確条件は800kW/m²相当（圧力依存あり）であり、最確条件とした場合は、解析条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件のコンクリート以外の構造材の扱いは、解析条件の内側鋼板及びリブ鋼板は考慮しないことに対して、最確条件はコンクリート以外の構造材を考慮することであり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合には、コンクリートより融点が高い内側鋼板、リブ鋼板の耐熱の効果により、溶融炉心・コンクリート相互作用によるコンクリート侵食が抑制されるが、コンクリート侵食量を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。また、コリウムシールドについては、機器条件にて考慮している。

初期条件の原子炉圧力容器下部の構造物の扱いは、解析条件の原子炉格納容器下部に落下する溶融物とは扱わないことに対して、最確条件は部分的な溶融が生じ、原子炉格納容器下部に落下する可能性があり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、溶融物の発熱密度が下がるため、溶融炉心・コンクリート相互作用によるコリウムシールド及びコンクリートの侵食は抑制されるが、コリウムシールド及びコンクリートの侵食を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉格納容器下部床面積は、解析条件の原子炉格納容器下部の床面積に対して最確条件は原子炉格納容器下部の床面積であり、最確条件とした場合は、解析条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉圧力、原子炉水位、炉心流量、サプレッション・プール水位、格納容器圧力及び格納容器温度は、解析条件の不確かさとして、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、事象進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。

事故条件の起因事象は、原子炉圧力容器への給水はできないものとして給水流量の全喪失を設定しているが、起因事象の違いによって操作手順（原子炉圧力容器下鏡温度に応じて原子炉格納容器下部への初期水張り操作を実施すること及び原子炉圧力容器破損後に原子炉格納容器下部への注水操作を開始すること）に変わりはないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

機器条件のコリウムシールドの侵食開始温度は、解析条件の $2,100^{\circ}\text{C}$ に対して最確条件は $2,100^{\circ}\text{C}$ であり、最確条件とした場合は、解析条件と同様であるため、事象進展に影響はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

(添付資料 3.5.2)

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

初期条件の原子炉停止後の崩壊熱は、解析条件の燃焼度 33GWd/t に対応したものとしており、その最確条件は平均的燃焼度約 30GWd/t であり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、解析条件で設定している崩壊熱よりも小さくなるため、溶融炉心の持つエネルギーが小さくなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

初期条件の溶融炉心からプールへの熱流束は、解析条件の 800kW/m^2 相当（圧力依存あり）に対して最確条件は 800kW/m^2 相当（圧力依存あり）であり、最確条件とした場合は、解析条件と同様であるため、事象進展に影響はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。コンクリートの侵食量に対しては、実験で確認されている侵食面における侵食の不均一性等の影響を確認する観点から、コンクリート侵食量への影響が最も大きい溶融炉心からプール水への熱流束について、感度解析を実施した。感度解析の結果、第 3.5.3-1(2)図に示すとおり、コンクリート侵食量は原子炉格納容器下部の床面で 0 cm 、壁面で約 13 cm に抑えられることから、原子炉圧力容器の支持機能を維持できることを確認した。なお、本感度解析では、原子炉格納容器下部での溶融炉心・コンクリート相互作用によって約 41 kg の可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスが発生するが、本評価

においてもジルコニウム-水反応によって約 422kg の水素ガスが発生することを考慮すると、熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスの発生が格納容器圧力に与える影響は小さい。

熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガスの発生が、可燃性ガスの燃焼の可能性に及ぼす影響について、本感度解析における原子炉格納容器下部への熔融炉心落下後の原子炉格納容器内の水素濃度は、ドライウェルよりも大きな値となるサプレッション・チェンバにおいて、ウェット条件で約 6.1vol%以上、ドライ条件で約 30.9vol%以上となり、ドライ条件においては 13vol%を上回る。このことから、本感度解析において評価した、熔融炉心・コンクリート相互作用によって発生する可燃性ガスの発生量を本評価の結果に加えて原子炉格納容器内の気相濃度を評価しても、原子炉格納容器内での可燃性ガスの燃焼の可能性には影響しない。なお、熔融炉心・コンクリート相互作用によって生じる約 41kg の気体の内訳は、可燃性ガスである水素が約 35kg、一酸化炭素が約 6 kg、その他の非凝縮性ガスである二酸化炭素が 1 kg 未満である。ジルコニウム-水反応によって発生する水素ガスも考慮すると、原子炉格納容器内に存在する可燃性ガスとしては水素ガスが支配的であり、一酸化炭素の影響は無視できる。

一方、原子炉格納容器内の酸素濃度については、水の放射線分解によって徐々に上昇するものの、事象発生から 7 日後（168 時間後）でもサプレッション・チェンバにおいて、ウェット条件で約 1.5vol%，ドライ条件で約 4.1vol%であり、可燃限界である 5 vol%を下回る。熔融炉心・コンクリート相互作用では酸素ガスは発生しないため、熔融炉心・コンクリート相互作用により発生する可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスを考慮することは原子炉格納容器内の酸素濃度を下げる要因となる。このため、本感度解析ケースの熔融炉心・コンクリート相互作用によって発生する可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスの発生量を本評価の結果に加えて気相濃度を評価する場合、上記の酸素濃度（ウェット条件で 1.5vol%，ドライ条件で 4.1vol%）以下になるものと考えられる。このため、原子炉格納容器内での可燃性ガスの燃焼が発生するおそれはない。

初期条件のコンクリート以外の構造材の扱いは、解析条件の内側鋼板及びリブ鋼板は考慮しないことに対して最確条件はコンクリート以外の構造材を考慮することであり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、コンクリートより融点が高い内側鋼板、リブ鋼板の耐熱の効果により、熔融炉心・コンクリート相互作用によるコンクリート侵食が抑制されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。また、コリウムシールドについては、機器条件にて考慮している。

初期条件の原子炉圧力容器下部の構造物の扱いは、解析条件の原子炉格納容器下部に落下する熔融物とは扱わないことに対して最確条件は部分的な熔融が生じ、原子炉格納容器下部に落下する可能性があり、解析条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、熔融物の発熱密度が下がるため、熔融炉心・コンクリート相互作用によるコリウムシールド及びコンクリートの侵食は抑制されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

初期条件の原子炉格納容器下部床面積は、解析条件の原子炉格納容器下部の床面積に対して最確条件は原子炉格納容器下部の床面積であり、最確

条件とした場合は、解析条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

初期条件の原子炉圧力、原子炉水位、炉心流量、サプレッション・プール水位、格納容器圧力及び格納容器温度は、解析条件の不確かさとして、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

事故条件について、熔融炉心・コンクリート相互作用によるコンクリート侵食量を評価するにあたり、熔融炉心落下時の崩壊熱の影響を確認する観点から感度解析を実施した。感度解析は、原子炉水位の低下の観点でより厳しい事象である LOCA 等の原子炉冷却材圧力バウンダリ喪失を仮定し、事故シーケンスを「大破断 LOCA + ECCS 注水機能喪失」とし、本評価事故シーケンスの解析条件と同様、電源の有無にかかわらず重大事故等対処設備による原子炉注水機能についても使用出来ないものと仮定した。この場合、事象発生直後から原子炉冷却材が原子炉格納容器内に流出するため、原子炉水位の低下が早く、原子炉圧力容器破損までの時間は約 3.3 時間となる。

その結果、第 3.5.3-1(3)図に示すとおり、コンクリート侵食量は原子炉格納容器下部の床面で 0 cm、壁面では約 4 cm に抑えられ、原子炉圧力容器の支持機能を維持できることを確認した。また、コンクリートの侵食量がわずかであることから、本評価における熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガスの発生量は原子炉格納容器内の気相濃度に及ぼす影響を与えない。このため、熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガスの蓄積及び燃焼による格納容器圧力への影響はなく、原子炉格納容器内の気体組成の推移は「3.5.2(3)b 評価項目等」と同じとなる。なお、本評価における原子炉格納容器下部への熔融炉心落下後の水素濃度は、サプレッション・チェンバよりも大きな値となるドライウエルにおいて、ウェット条件で約 0.1vol%以上、ドライ条件で約 24.8vol%以上となり、ドライ条件においては 13vol%を上回る。一方、酸素濃度は水の放射線分解によって徐々に上昇するものの、事象発生から 7 日後（168 時間後）においてもウェット条件で約 2.4vol%、ドライ条件で約 2.9vol%であり、可燃限界である 5 vol%を下回ることから、原子炉格納容器内での可燃性ガスの燃焼が発生するおそれはない。

機器条件のコリウムシールドの侵食開始温度は、解析条件の 2,100°C に対して最確条件は 2,100°C であり、最確条件とした場合は、解析条件と同様であるため、事象進展に影響はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

(添付資料 3.5.2, 3.5.3)

b. 操作条件

操作条件の不確かさとして、操作の不確かさを「認知」、「要員配置」、「移動」、「操作所要時間」、「他の並列操作有無」及び「操作の確実さ」の 6 要因に分類し、これらの要因が、運転員等操作時間に与える影響を評価する。また、運転員等操作時間に与える影響が評価項目となるパラメータに与える影響を評価し、評価結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

操作条件の熔融炉心落下前の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による水張り操作は、解析上の操作時間として原子炉压力容器下鏡温度が 300℃に到達した時点を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、原子炉压力容器下鏡温度が 300℃に到達するまでに事象発生から約 3.1 時間の時間余裕があり、また、原子炉格納容器下部の水張り操作は原子炉压力容器下鏡温度を監視しながら熔融炉心の炉心下部プレナムへの移行を判断し、水張り操作を実施するため、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であり、操作開始時間に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響も小さい。当該操作は、解析コード及び解析条件（操作条件を除く。）の不確かさにより操作開始時間は遅れる可能性があるが、当該操作に対応する運転員、対策要員に他の並列操作はなく、また、現場操作における評価上の所要時間には余裕を見込んで算定していることから、他の操作に与える影響はない。

操作条件のペDESTAL代替注水系（可搬型）による熔融炉心落下後の原子炉格納容器下部への注水操作は、解析上の操作開始時間として原子炉压力容器破損後（事象発生から約 5.4 時間後）を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、原子炉压力容器破損までに事象発生から約 5.4 時間の時間余裕があり、また、熔融炉心落下後に原子炉格納容器下部注水が行われなかった場合でも、熔融炉心落下前に張られた水が蒸発し、熔融炉心が露出するまでには約 1.4 時間の時間余裕がある。熔融炉心落下後の原子炉格納容器下部への注水操作はペDESTAL温度、格納容器圧力等の傾向を監視しながら原子炉压力容器破損を判断して実施することとしており、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であるため、操作開始時間に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響も小さい。

(添付資料 3.5.2)

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

操作条件の熔融炉心落下前の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による水張り操作は、運転員等操作時間に与える影響として、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

操作条件の熔融炉心落下後の原子炉格納容器下部へのペDESTAL代替注水系（可搬型）による注水操作は、運転員等操作時間に与える影響として、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

(添付資料 3.5.2)

(3) 操作時間余裕の把握

操作開始時間の遅れによる影響度合いを把握する観点から、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内での操作時間余裕を確認し、その結果を以下に示す。

操作条件の熔融炉心落下前の格納容器代替スプレイ系（可搬型）による水張り操作については、原子炉压力容器下鏡温度が 300℃に到達するまでに事象発生から約 3.1 時間の時間余裕があり、原子炉格納容器下部への注水準備として、

すべての非常用炉心冷却系等の機能喪失や早期の電源回復不能確認を含む状況判断をした後に開始し、所要時間は約 2.5 時間で完了する。その後、ペDESTAL 水位 2.4m までの注水は約 1.9 時間で完了することから、水張りを事象発生から約 3.1 時間後に開始すると、事象発生から約 5.0 時間後に水張りが完了する。事象発生から約 5.0 時間後の水張りの完了から、事象発生から約 5.4 時間後の原子炉圧力容器破損までの時間を考慮すると、原子炉格納容器下部への注水操作は操作遅れに対して 0.4 時間程度の時間余裕がある。

操作条件の溶融炉心落下後の原子炉格納容器下部へのペDESTAL 代替注水系（可搬型）による注水操作については、原子炉圧力容器破損までの時間は事象発生から約 5.4 時間あり、また、溶融炉心落下後に原子炉格納容器下部注水が行われなかった場合でも、溶融炉心落下前に張られた水が溶融炉心の崩壊熱及びジルコニウム-水反応による発熱により蒸発し、溶融炉心が露出するまでには約 1.4 時間の時間余裕がある。

(添付資料 3.5.2)

(4) まとめ

解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を確認した。その結果、解析コード及び解析条件の不確かさが運転員等操作時間に与える影響等を考慮した場合においても、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。このほか、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間には時間余裕がある。

3.5.4 必要な要員及び資源の評価

本評価事故シーケンスは、「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」と同じであることから、必要な要員及び資源の評価は「3.2.4 必要な要員及び資源の評価」と同じである。

3.5.5 結論

格納容器破損モード「溶融炉心・コンクリート相互作用」では、運転時の異常な過渡変化又は原子炉冷却材喪失事故（LOCA）が発生するとともに、非常用炉心冷却系等の安全機能の喪失が重畳する。このため、原子炉圧力容器内の溶融炉心が原子炉格納容器内へ流れ出し、溶融炉心からの崩壊熱や化学反応によって、原子炉格納容器下部のコンクリートが侵食され、原子炉格納容器の構造部材の支持機能を喪失し、原子炉格納容器の破損に至ることが特徴である。格納容器破損モード「溶融炉心・コンクリート相互作用」に対する格納容器破損防止対策としては、格納容器代替スプレイ系（可搬型）及びペDESTAL 代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部注水手段を整備している。また、原子炉格納容器下部にコリウムシールドを設置している。

格納容器破損モード「溶融炉心・コンクリート相互作用」の評価事故シーケンス「過渡事象＋高圧炉心冷却失敗＋低圧炉心冷却失敗＋炉心損傷後の原子炉注水（重大事故等対策を含む）失敗＋デブリ冷却失敗」について、有効性評価を行った。

上記の場合においても、格納容器代替スプレイ系（可搬型）及びペDESTAL 代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部注水を実施することにより、溶融

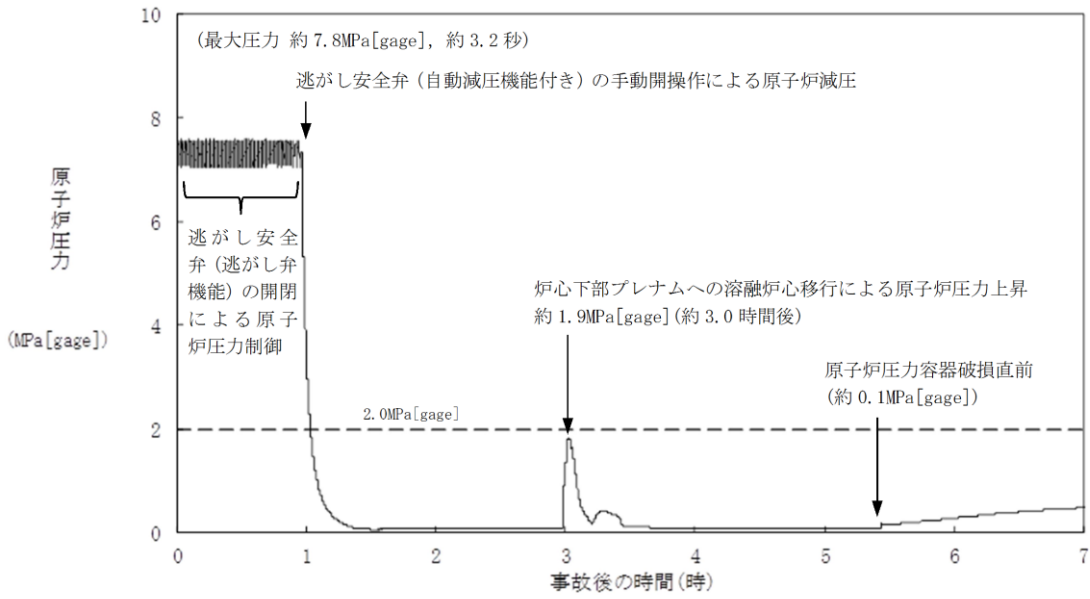
炉心の冷却が可能である。その結果、溶融炉心・コンクリート相互作用によってコンクリート侵食量は原子炉格納容器下部床面で0 cm, 壁面で約4 cmに抑えられ、原子炉圧力容器の支持機能を維持できる。また、安定状態を維持できる。

(添付資料 3.5.3)

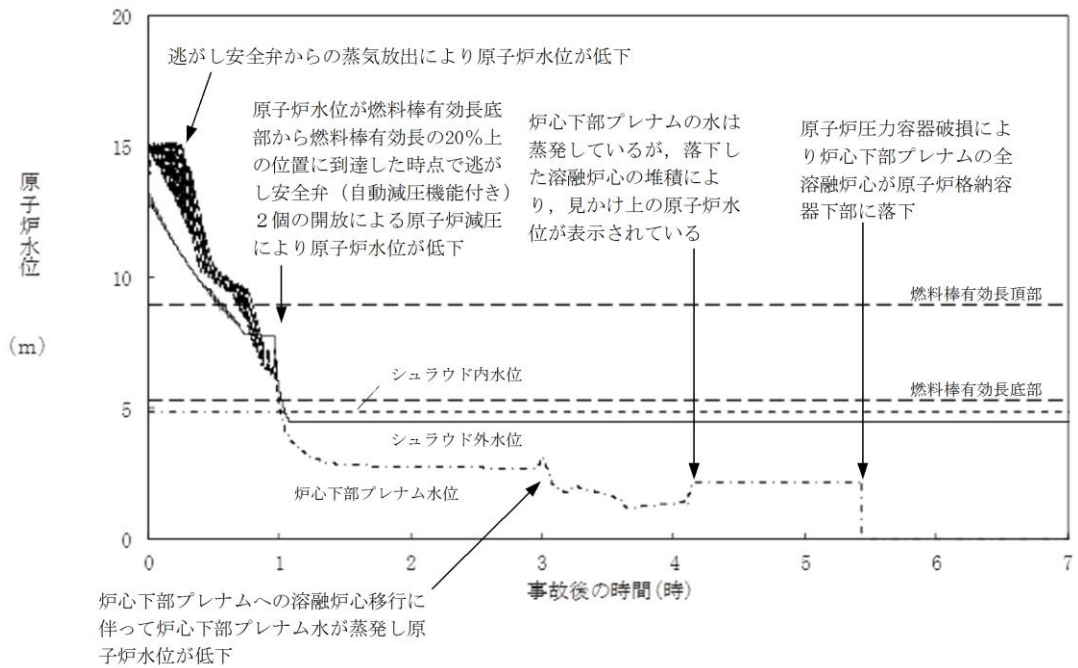
解析コード及び解析条件の不確かさについて確認した結果、運転員等操作時間に与える影響及び評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。また、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間余裕について確認した結果、操作が遅れた場合でも一定の余裕がある。

重大事故等対策時に必要な要員は、運転員及び緊急時対策要員にて確保可能である。また、必要な水源、燃料及び電源を供給可能である。

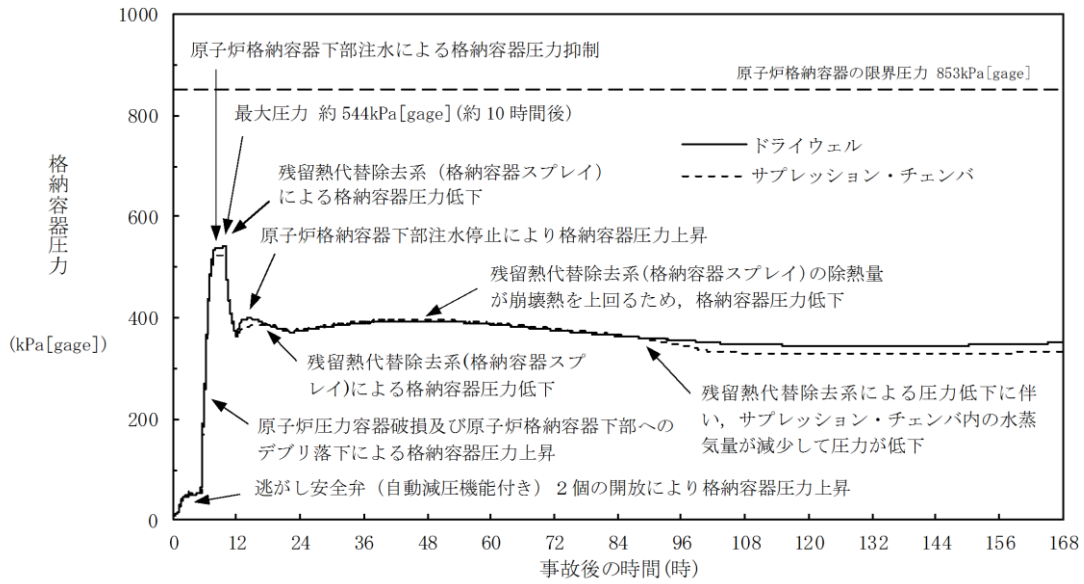
以上のことから、格納容器代替スプレイ系（可搬型）及びペDESTAL代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水等の格納容器破損防止対策は、選定した評価事故シーケンスに対して有効であることが確認でき、格納容器破損モード「溶融炉心・コンクリート相互作用」に対して有効である。



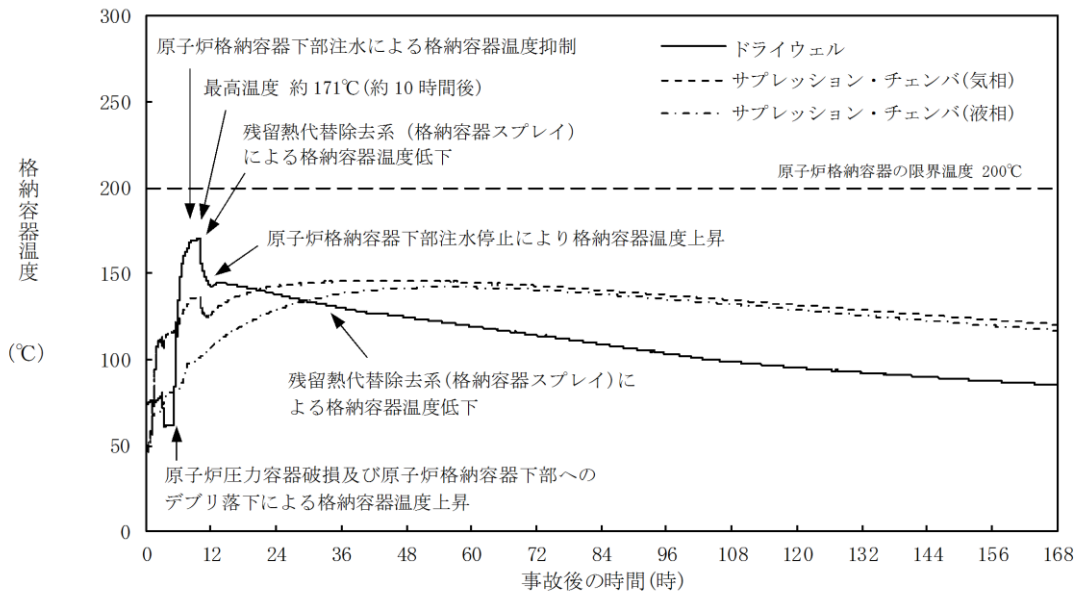
第 3.5.2-1(1) 図 原子炉圧力の推移



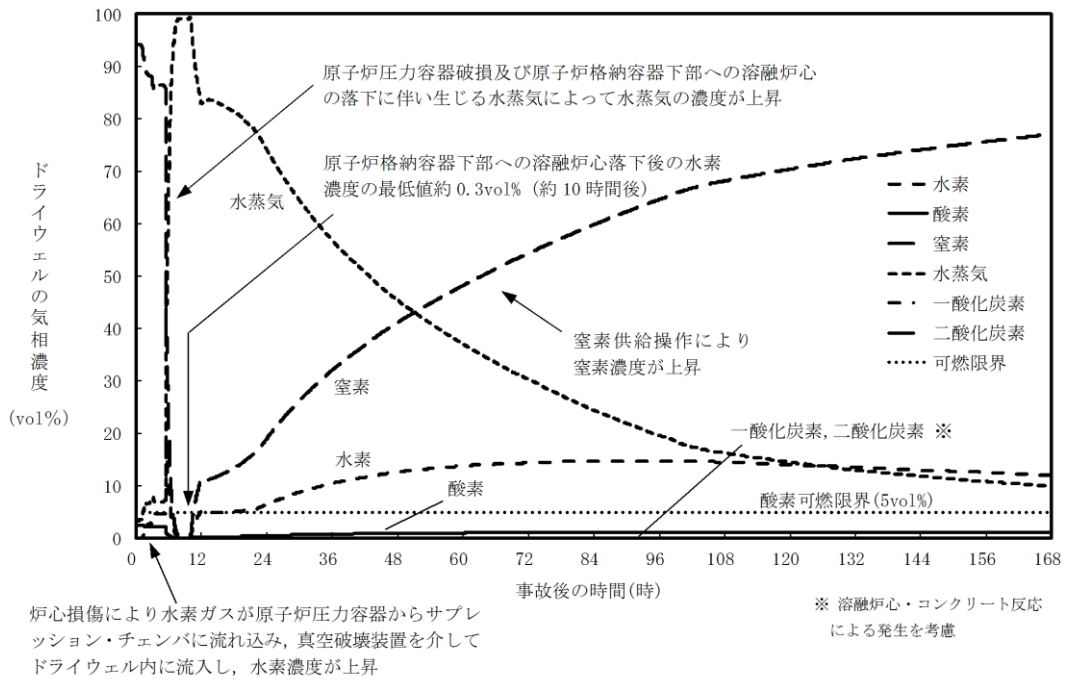
第 3.5.2-1(2) 図 原子炉水位(シュラウド内外水位) の推移



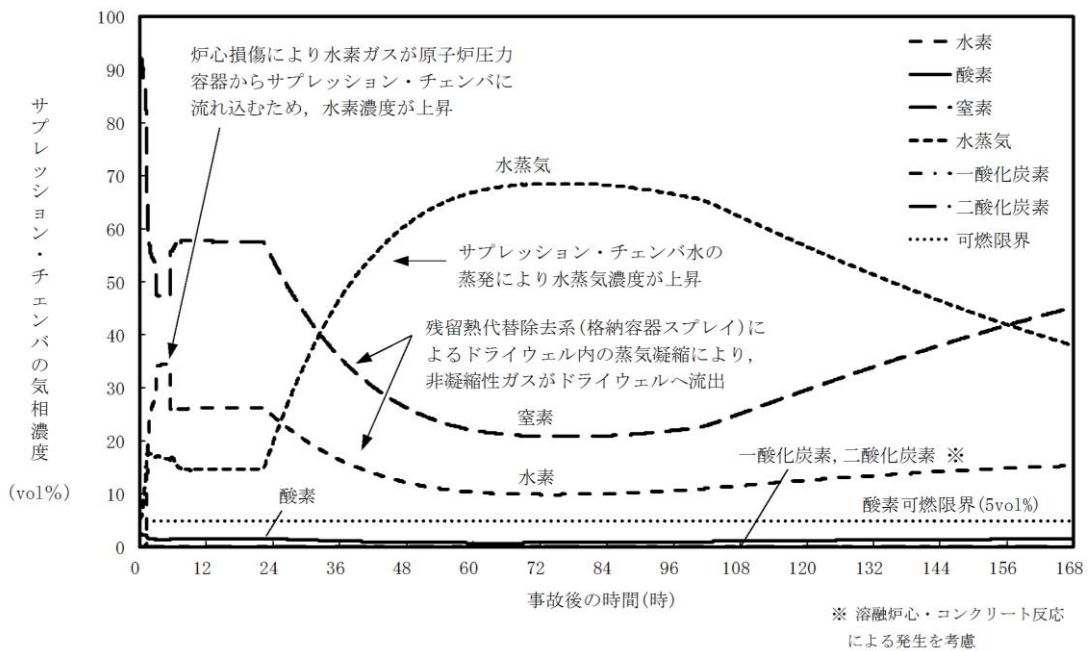
第 3.5.2-1(3) 図 格納容器圧力の推移



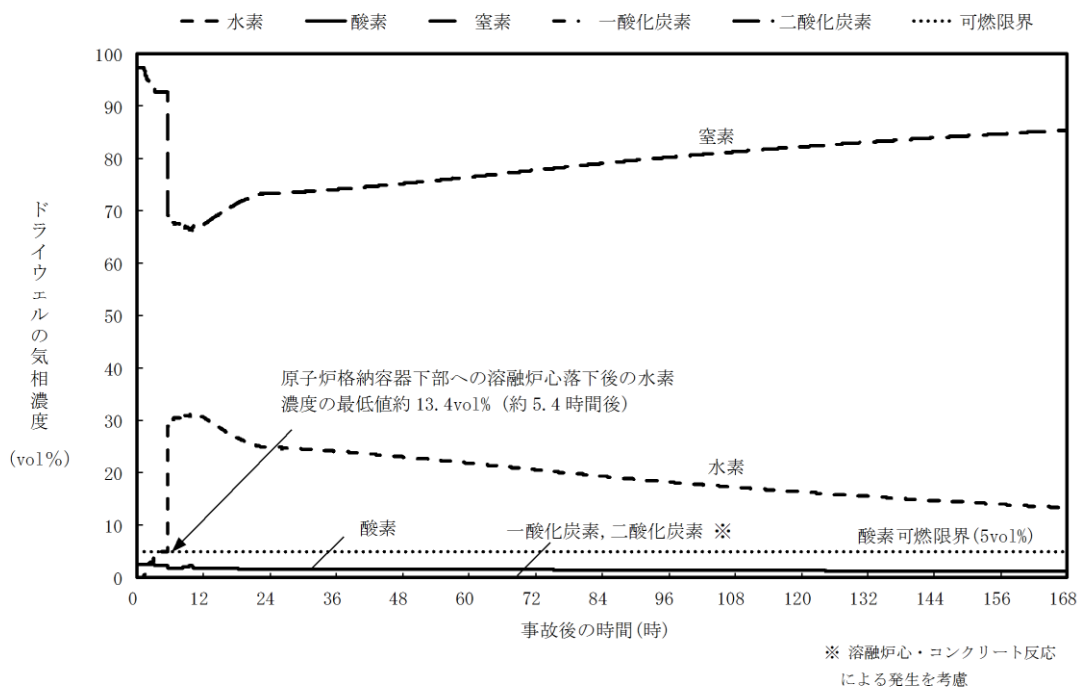
第 3.5.2-1(4) 図 格納容器温度の推移



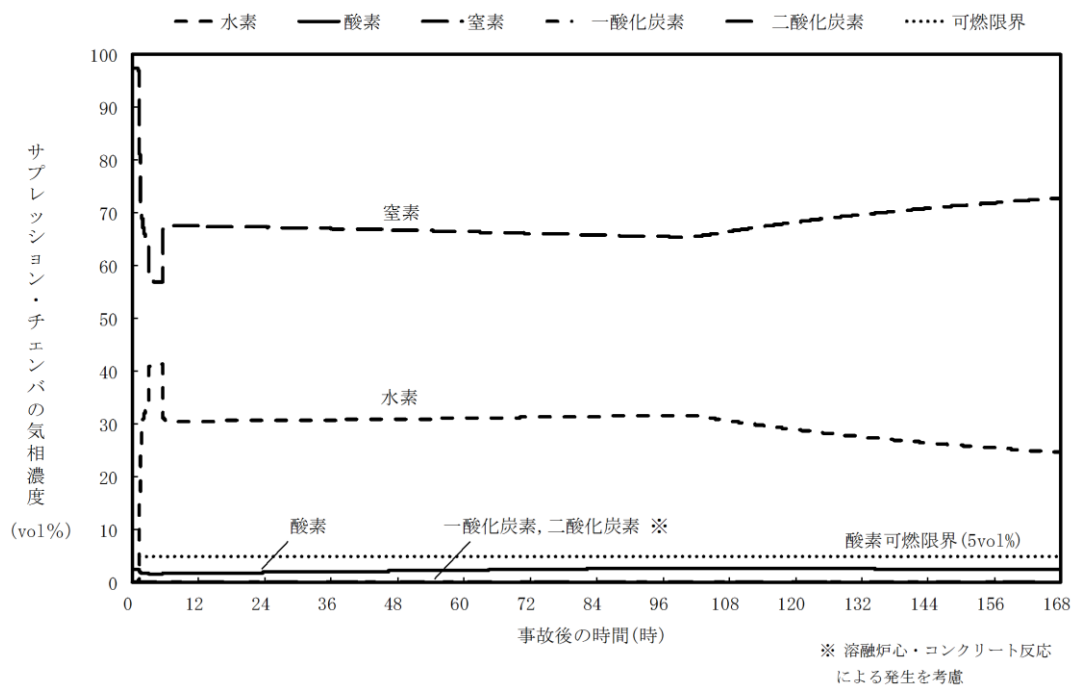
第 3.5.2-1(5) 図 ドライウェルの気相濃度の推移 (ウェット条件)



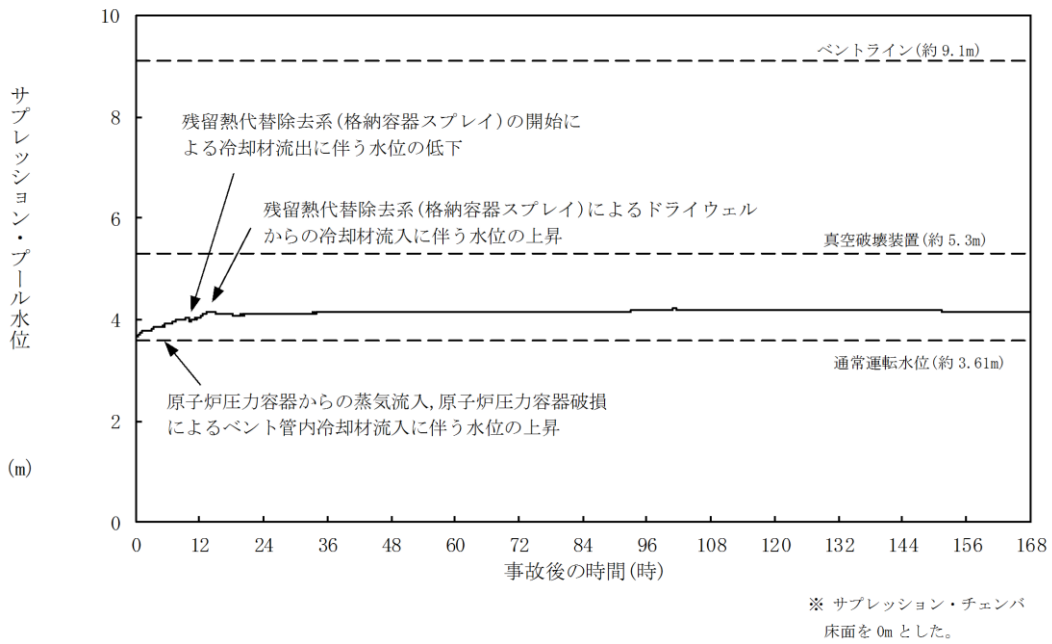
第 3.5.2-1(6) 図 サプレッション・チェンバの気相濃度の推移(ウェット条件)



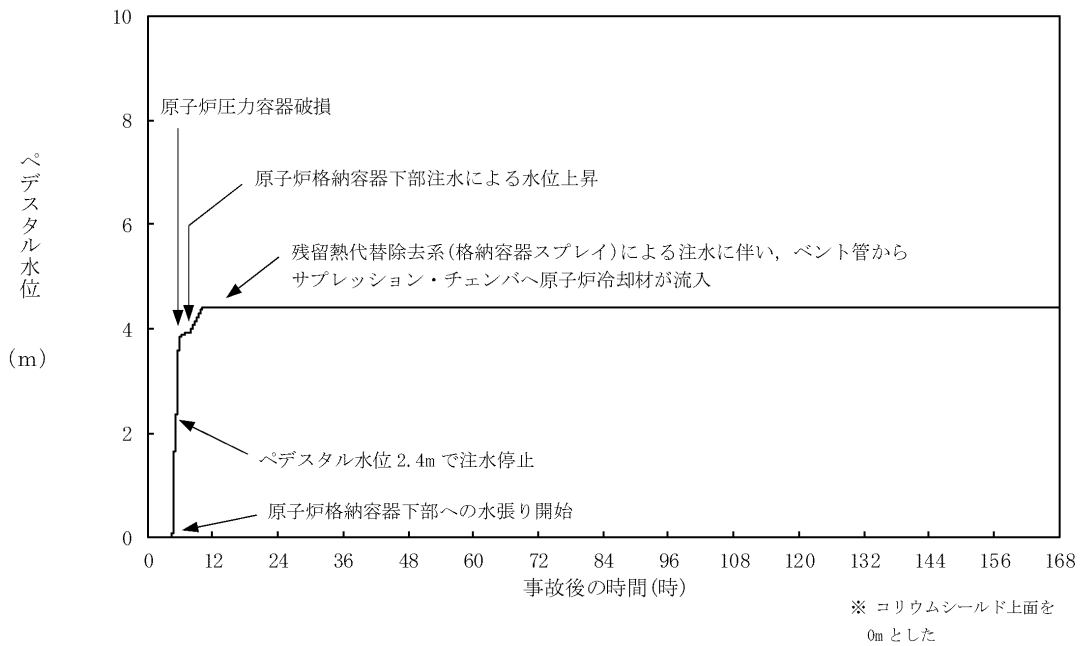
第 3. 5. 2-1(7) 図 ドライウエルの気相濃度の推移 (ドライ条件)



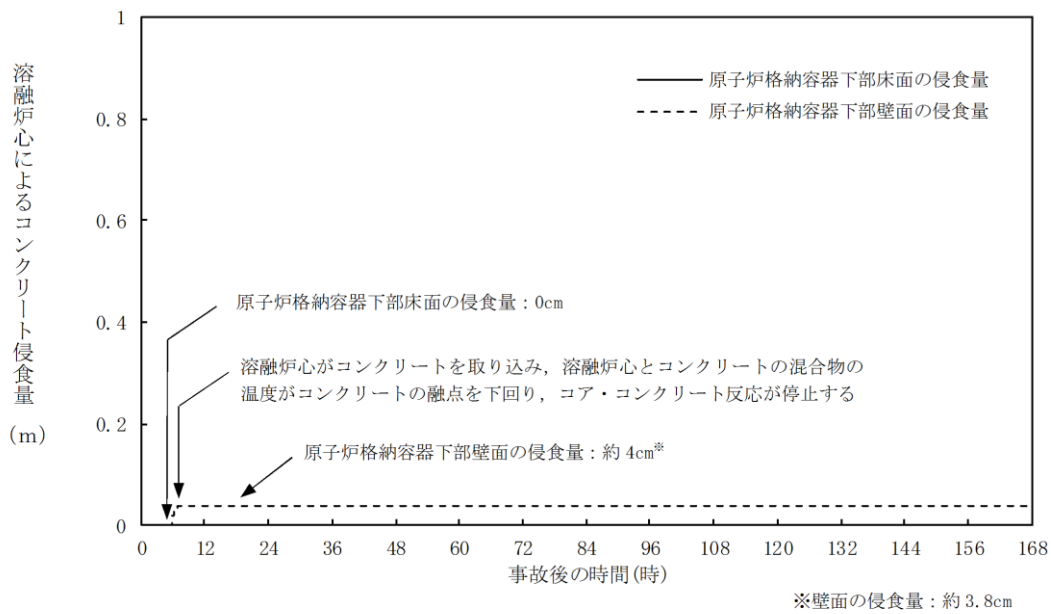
第 3. 5. 2-1(8) 図 サプレッション・チェンバの気相濃度の推移 (ドライ条件)



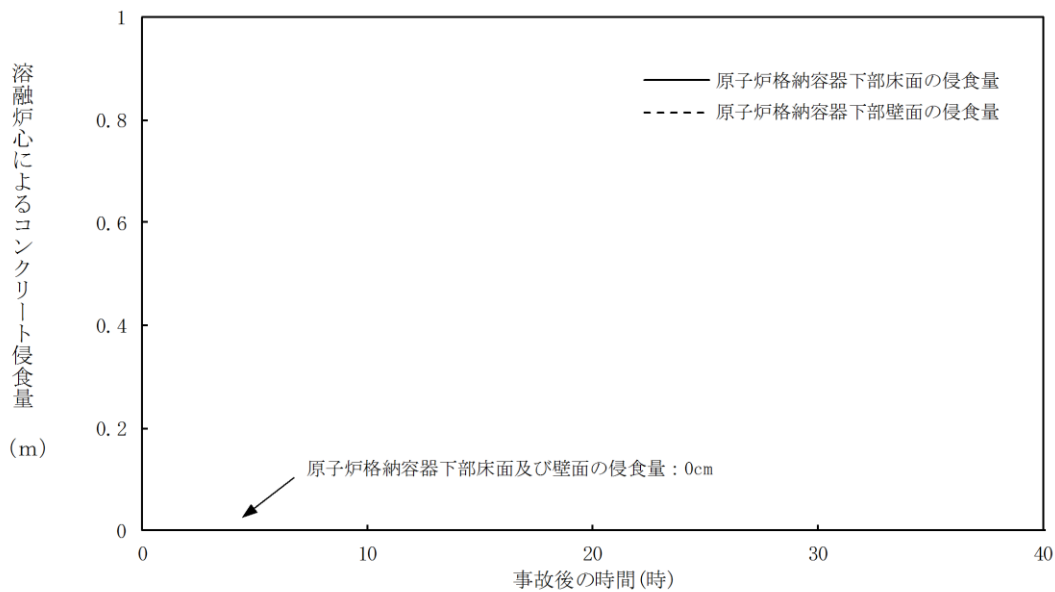
第 3.5.2-1(9) 図 サプレッション・プール水位の推移



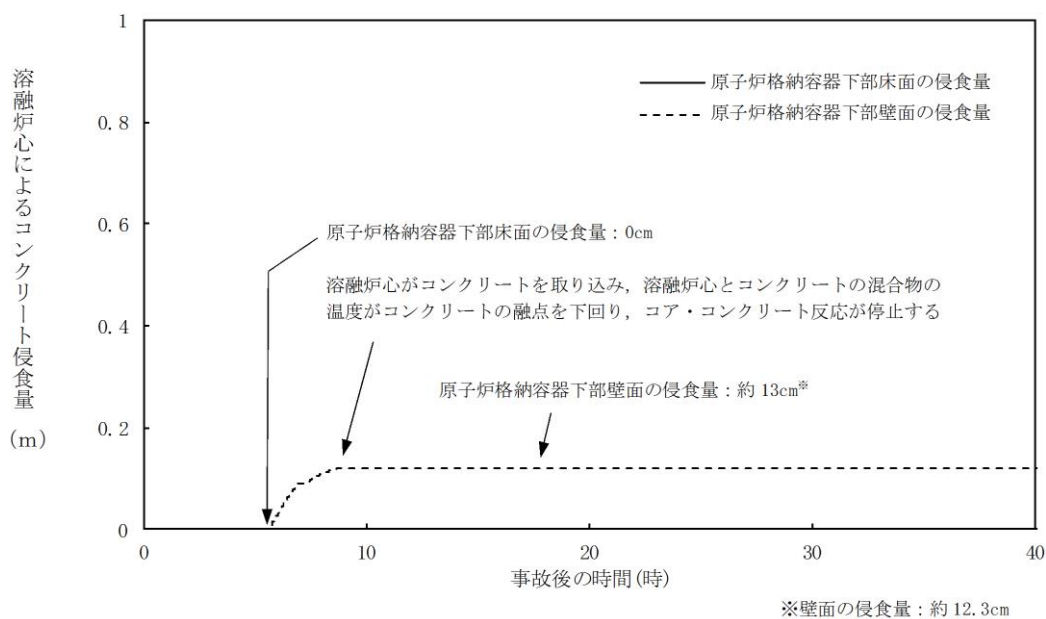
第 3.5.2-1(10) 図 ペデスタル水位の推移



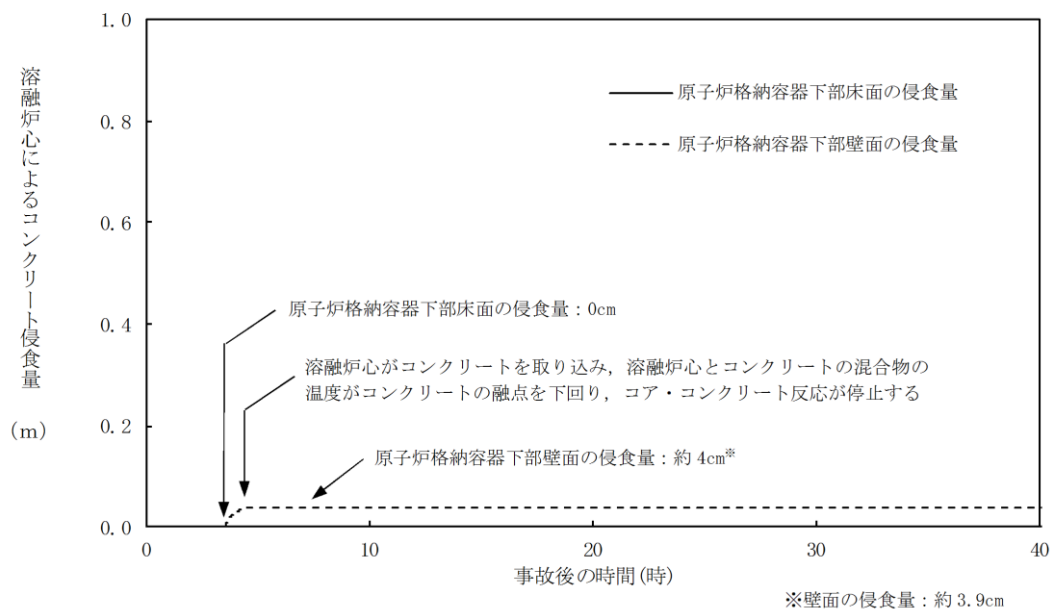
第 3.5.2-1(11) 図 原子炉格納容器下部床面及び壁面のコンクリート侵食量の推移



第 3.5.3-1(1) 図 原子炉格納容器下部床面及び壁面のコンクリート侵食量の推移 (溶融炉心の拡がりを抑制した場合)



第 3.5.3-1(2) 図 原子炉格納容器下部床面及び壁面のコンクリート侵食量の推移
 (溶融炉心からプール水への熱流束を保守的に考慮する場合)



第 3.5.3-1(3) 図 原子炉格納容器下部床面及び壁面のコンクリート侵食量の推移
 (溶融炉心の崩壊熱を保守的に考慮する場合)

安定状態について（溶融炉心・コンクリート相互作用）

溶融炉心・コンクリート相互作用時の安定状態については以下のとおり。

原子炉格納容器安定状態：溶融炉心・コンクリート相互作用による原子炉格納容器下部床面及び壁面の侵食が停止し、侵食の停止を継続するための設備がその後も機能維持できると判断され、かつ、必要な要員の不足や資源の枯渇等のあらかじめ想定される事象悪化のおそれがない場合、安定状態が確立されたものとする。

【安定状態の確立について】

原子炉格納容器安定状態の確立について

ペDESTAL代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部への崩壊熱相当量の注水を継続することにより、溶融炉心・コンクリート相互作用による原子炉格納容器下部床面及び壁面の侵食の停止を維持でき、原子炉格納容器安定状態が確立される。

また、重大事故等対策時に必要な要員は確保可能であり、また、必要な水源、燃料及び電源を供給可能である。

【安定状態の維持について】

残留熱代替除去系を用いて又は残留熱除去系機能を復旧して除熱を行うことにより、安定状態後の更なる除熱が可能となる。

安定状態後の措置に関する具体的な要件は以下のとおり。

- ① 原子炉格納容器除熱機能として残留熱代替除去系の使用又は残留熱除去系の復旧による冷却への移行
- ② 原子炉格納容器内の水素・酸素濃度の制御を目的とした可燃性ガス濃度制御系の復旧及び原子炉格納容器内への窒素ガス封入（パージ）
- ③ 上記の安全機能の維持に必要な電源（外部電源）、冷却水系等の復旧
- ④ 長期的に維持される原子炉格納容器の状態（温度・圧力）に対し、適切な地震力に対する原子炉格納容器の頑健性の確保

（添付資料 2.1.1 別紙 1）

表1 解析コードにおける重要現象の不確かさが運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響 (溶融炉心・コンクリート相互作用) (1/3)

【MAAP】

分類	重要現象	解析モデル	不確かさ	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
炉心	崩壊熱	炉心モデル (原子炉出力及び崩壊熱)	入力値に含まれる。	「解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響」にて確認	「解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響」にて確認
	燃料棒内温度変化	炉心モデル (炉心熱水力モデル)	TMI事故解析における炉心ヒートアップ時の水素発生、炉心領域での溶融進展状態について、TMI事故分析結果と良く一致することを確認した。	炉心ヒートアップに関するモデルは、TMI事故についての再現性を確認している。	炉心ヒートアップに関するモデルは、TMI事故についての再現性及びCOR A実験についての再現性を確認している。炉心ヒートアップの感度解析 (ジルコニウム-水反応速度の係数についての感度解析) では、炉心溶融時間及び炉心下部プレナムへの溶融炉心移行の開始時間について、測定データと良く一致することを確認した。
	燃料棒表面熱伝達	溶融炉心の挙動モデル (炉心ヒートアップ)	CORA実験解析における、燃料被覆管、制御棒及びチャランネルボックスの温度変化について、測定データと良く一致することを確認した。	炉心ヒートアップの感度解析 (ジルコニウム-水反応速度の係数) については、影響は小さいことを確認している。	(ジルコニウム-水反応速度の係数) については、感度は数分程度であり、影響は小さいことを確認している。
	燃料被覆管酸化	溶融炉心の挙動モデル (炉心ヒートアップ)	炉心ヒートアップ速度の増加 (燃料被覆管酸化の促進) を想定し、仮想的な厳しい振り幅ではあるが、ジルコニウム-水反応速度の係数を2倍とした感度解析により影響を確認した。	本評価シナリオでは、原子炉圧力容器破損時点を原炉格納容器下部への初期水張り操作、原炉圧力容器破損時点を原炉格納容器下部への注水操作を実施するが、炉心下部プレナムへの溶融炉心移行の開始時間の不確かさは小さく、炉心下部プレナムへ溶融炉心が移行した際の原炉圧力容器下鏡温度及び原炉圧力容器破損時の格納容器圧力上昇は急峻であることから、原炉圧力容器下鏡温度及び原炉圧力容器破損を操作開始の起点としている原炉格納容器下部への初期水張り操作及び原炉圧力容器破損時の原炉格納容器下部への注水操作に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。	本評価シナリオでは、原炉圧力容器破損時点で原炉格納容器下部に初期水張りを実施されていることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
	燃料被覆管変形	溶融炉心の挙動モデル (炉心ヒートアップ)	・TQUV、大破断LOCAシナリオともに炉心溶融の開始時刻への影響は小さい。 ・下部プレナムへの溶融炉心移行の開始時刻は、ほぼ変化しない。	原炉格納容器下部への注水操作に係る運転員等操作時間に与える影響は小さい。	原炉格納容器下部に初期水張りを実施されていることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
	沸騰・ボイド率変化	炉心モデル (炉心水位計算モデル)	TQXシナリオ及び中小破断LOCAシナリオに対して、MAAPコードとSAFERコードの比較を行い、以下の傾向を確認した。 ・MAAPコードではSAFERコードで考慮しているCCFLを取り扱っていないこと等から水位変化に差異が生じたものの水位低下幅はMAAPコードの方が保守的であり、その後の注水操作による燃料棒有効長頂部までの水位回復時刻は両コードで同等である。	原子炉水位差動について原炉格納容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERとの比較により水位低下幅が精緻である解析コードSAFERの評価結果との比較により保守的であるものの、評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるもの、その差異は小さいことを確認していることから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。	原子炉水位差動について原炉格納容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERとの比較により、水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるもの、その差異は小さいことを確認していることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。また、原炉圧力容器破損時点で原炉格納容器下部に初期水張りを実施されていることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
気液分離 (水位変化)・対向流	炉心モデル (炉心水位計算モデル)	炉心モデル (炉心水位計算モデル)	炉心水位差動について原炉格納容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERとの比較により水位低下幅が精緻である解析コードSAFERの評価結果との比較により保守的であるものの、評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるもの、その差異は小さいことを確認していることから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。	原子炉水位差動について原炉格納容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERとの比較により、水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるもの、その差異は小さいことを確認していることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。	原子炉水位差動について原炉格納容器内のモデルが精緻である解析コードSAFERとの比較により、水位低下幅は解析コードMAAPの評価結果の方が大きく、解析コードSAFERに対して保守的であるもの、その差異は小さいことを確認していることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

表1 解析コードにおける重要現象の不確かさが運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響（溶融炉心・コンクリート相互作用）（3/3）

【MAAP】

分類	重要現象	解析モデル	不確かさ	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
原子炉格納容器 (炉心損傷後)	原子炉圧力容器外FCI (溶融炉心細粒化)		原子炉圧力容器外FCI現象に関する項目としてエントレインメント係数及びデブリ粒子径をパラメータとして感度解析を行い、原子炉圧力容器外FCIによって生じる圧力スパイクへの感度が小さいことを確認した。	本評価事故シナリオでは、原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用による圧力スパイクを起点とした運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。	エントレインメント係数の感度解析より溶融炉心の細粒化割合がコンクリート侵食に与える感度は小さいことを確認しており、また、溶融炉心の温度に対する感度は小さく、コリウムシールド侵食に与える感度についても同様に小さいと考えられることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
	原子炉圧力容器外FCI (デブリ粒子熱伝達)		溶融炉心の拡がり実験や評価に関する知見に基づき、落下した溶融炉心は床上全体に均一に拡がると想定される。ただし、堆積形状の不確かさが想定されるため、個別プランクのベドスタル形状や事前水張りの深さを踏まえて、拡がりを抑制した感度解析等の取扱いを行うことが適切と考えられる。		溶融炉心の拡がりを抑制した場合を想定した感度解析を実施した。感度解析の結果、コリウムシールド及びコンクリート侵食は生じず、原子炉圧力容器の支持機能を維持できる。 (添付資料3.5.3参照)
	格納容器下部床面での溶融炉心の拡がり		溶融炉心・コンクリート相互作用への影響の観点で、エントレインメント係数、上面熱流束及び溶融プールからクラスタへの熱伝達係数をパラメータとした感度解析を行った。評価の結果、コンクリート侵食量に対して上面熱流束の感度が支配的であることを確認した。また、上面熱流束を下限値とした場合でも、コンクリート侵食量が22.5cm程度に収まることを確認した。	本評価事故シナリオでは、コリウムシールド及びコンクリート侵食を操作開始の起点としている運転員等操作はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。	
	溶融炉心と格納容器下部プールの伝熱	溶融炉心の挙動モデル (格納容器下部での溶融炉心の挙動)	上記の感度解析は、想定される範囲で厳しい条件を与えて感度を確認したものであり、不確かさを考慮しても実機でのコンクリート侵食量は感度解析よりも厳しくなることはないと考えられる。		エントレインメント係数、溶融炉心からプール水への熱流束及び溶融プールクラスタ間の熱伝達係数の感度解析を踏まえ、コンクリートの侵食量について支配的な溶融炉心からプール水への熱流束についての感度解析を実施した。コンクリート侵食量は原子炉格納容器下部の床面で0cm、壁面で約13cmに抑えられ、原子炉圧力容器の支持機能を維持できる。なお、本感度解析では、原子炉格納容器下部での溶融炉心・コンクリート相互作用によって約41kgの可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスが発生するが、本評価においてもシルコニウム—水反応による可燃性ガスが約422kgの酸素ガスが発生することを考慮すると、溶融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスの発生が格納容器圧力に与える影響は小さい。 (添付資料3.5.3参照)
	溶融炉心とコンクリートの伝熱		ACE実験解析及びSURC-4実験解析より、溶融炉心堆積状態が既知である場合の溶融炉心とコンクリートの伝熱及びそれに伴うコンクリート侵食挙動について妥当に評価できることを確認した。		
	コンクリート分解及び非凝縮性ガス発生		実験で確認されている侵食の不均一性については、実験における侵食のばらつきがMAAPコードの予測侵食量の20%の範囲内に収まっていることから、上面熱流束の感度に比べて影響が小さいことを確認した。		

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに関する影響 (溶融炉心・コンクリート相互作用) (1/4)

項目	解析条件(初期条件、事故条件及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	解析条件	最確条件			
原子炉熱出力	2.436MWt	2.435MWt以下 (実績値)	定格原子炉熱出力として設定	最確条件とした場合は、原子炉停止後の崩壊熱が緩和される。最確条件とした場合の運転員等操作時間への影響は、原子炉停止後の崩壊熱にて説明する。	最確条件とした場合は、原子炉停止後の崩壊熱が緩和される。最確条件とした場合の評価項目となるパラメータに与える影響は、原子炉停止後の崩壊熱にて説明する。
原子炉圧力	6.93MPa [gage]	約6.77~ 6.79MPa [gage] (実績値)	定格原子炉圧力として設定	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、原子炉圧力は逃がし安全弁により制御されるため事象進展に及ぼす影響は小さく、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、原子炉圧力は逃がし安全弁により制御されるため事象進展に及ぼす影響は小さく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
原子炉水位	通常水位(気水分離器下端から+83cm)	通常水位(気水分離器下端から約+83cm~+85cm)	通常運転時の原子炉水位として設定	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎの幅は事象発生後の水位低下量に対して非常に小さい。例えば、原子炉スクラム25分後までの崩壊熱による原子炉水位の低下量は、高圧が維持された状態でも通常運転水位から約4.6mであり非常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎの幅は事象発生後の水位低下量に対して非常に小さい。例えば、原子炉スクラム25分後までの崩壊熱による原子炉水位の低下量は、高圧が維持された状態でも通常運転水位から約4.6mであるのに対してゆらぎによる水位変動幅は約2cmであり非常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
炉心流量	35.6×10 ³ t/h	定格流量の85~104% (実測値)	定格炉心流量として設定	炉心の反応度補償のため初期値は変化するが、事象発生後早期に原子炉はスクラムするため、初期炉心流量が事象進展に及ぼす影響は小さく、運転員等操作時間に与える影響は小さい。	炉心の反応度補償のため初期値は変化するが、事象発生後早期に原子炉はスクラムするため、初期炉心流量が事象進展に及ぼす影響は小さく、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
燃料	9×9燃料(A型)	装荷炉心毎	9×9燃料(A型)、9×9燃料(B型)は熱水力的な特性は同等であり、その相違は燃料棒最大線出力密度の保守性に包絡されること、また、9×9燃料の方がMOX燃料よりも崩壊熱が大きく、MOX燃料の評価は9×9燃料(A型)の評価に包絡されることを考慮し、代表的に9×9燃料(A型)を設定	最確条件とした場合は、炉心に装荷される燃料は装荷炉心毎に異なることとなるが、装荷される燃料である9×9燃料(A型)、9×9燃料(B型)、MOX燃料のうち、9×9燃料(A型)、9×9燃料(B型)の燃料の組成は同等であり、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。MOX燃料の評価は9×9燃料(A型)の評価に包絡され、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。	最確条件とした場合は、炉心に装荷される燃料は装荷炉心毎に異なることとなるが、装荷される燃料である9×9燃料(A型)、9×9燃料(B型)、MOX燃料のうち、9×9燃料(A型)、9×9燃料(B型)の燃料の組成は同等であり、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。MOX燃料の評価は9×9燃料(A型)の評価に包絡され、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
原子炉停止後の崩壊熱	ANSI/ANS-5.1-1979(燃焼度336wd/t)	ANSI/ANS-5.1-1979炉心平均燃焼度約306wd/t (実績値)	サイクル末期の燃焼度のばらつきを考慮し、10%の保守性を考慮	最確条件とした場合は、発生する蒸気量は少なくなり、原子炉圧力容器破損に至るまでの事象進展は緩和されるが、操作手順(原子炉圧力容器下鏡温度に応じた原子炉格納容器下部への初期水張り操作を実施すること及び溶融炉心落下後に原子炉格納容器下部への注水操作を開始すること)に変わりはないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は、解析条件で設定している崩壊熱よりも小さくなるため、発生する蒸気量は少なくなり、原子炉圧力容器破損に至るまでの事象進展は緩和されるが、操作手順(原子炉圧力容器下鏡温度に応じた原子炉格納容器下部への初期水張り操作を実施すること及び溶融炉心落下後に原子炉格納容器下部への注水操作を開始すること)に変わりはないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。
格納容器容積(ドライウエル)	7,900m ³	7,900m ³ (設計値)	ドライウエル内体積の設計値(内部機器及び構造物の体積を除いた値)を設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。
格納容器容積(サブレーション・チェンバ)	空間部：4,700m ³ 液相部：2,800m ³	空間部：4,700m ³ 液相部：2,800m ³ (設計値)	サブレーション・チェンバ内体積の設計値(内部機器及び構造物の体積を除いた値)を設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータとなるパラメータ相互作用) (2/4)

項目	解析条件(初期条件、事故条件及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	解析条件	最確条件			
真空破壊装置	3.43kPa(ドライウエール・サブプレッジョン・チェンバール差圧)	3.43kPa(ドライウエール・サブプレッジョン・チェンバール差圧) (設計値)	真空破壊装置の設定値	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
サブプレッジョン・プール水位	3.61m(NWL)	約3.59m~約3.63m(実測値)	通常運転時のサブプレッジョン・プール水位として設定	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎによるサブプレッジョン・プール水位低下分の熱容量は通常水位時に対して非常に小さい。例えば、通常水位は約2800m ³ 相当であるのに対して、ゆらぎによる水位低下分の熱容量は約20m ³ 相当であり、その低下割合は通常水位時の約0.7%程度と常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。	最確条件とした場合は、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎによるサブプレッジョン・プール水位低下分の熱容量は通常水位時に対して非常に小さい。例えば、通常水位は約2800m ³ 相当であるのに対して、ゆらぎによる水位低下分の熱容量は約20m ³ 相当であり、その低下割合は通常水位時の約0.7%程度と常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
サブプレッジョン・プール水温度	35℃	約19℃~約35℃(実測値)	通常運転時のサブプレッジョン・プール水温度の上限値として設定	運転員等操作としては原子炉圧力容器下鏡温度の上昇を起点として原子炉格納容器下部への注水を行うこととなることから、本パラメータにより影響を受けることはなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	溶融炉心・コンクリート相互作用による侵食量という観点では、直接的な影響はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
格納容器圧力	5 kPa[gage]	約5 kPa [gage]~約7 kPa [gage] (実測値)	通常運転時の格納容器圧力として設定	最確条件とした場合には、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎによる格納容器圧力の上昇に与える影響は小さい。例えば、事象発生から原子炉圧力容器破損までの圧力上昇率は約5.4時間(平均)は約188kPa [gage]であり、非正常にに対して、ゆらぎによる圧力上昇量は約2kPaであり非常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さい。	最確条件とした場合には、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎによる格納容器圧力の上昇に与える影響は小さい。例えば、事象発生から原子炉圧力容器破損までの圧力上昇率は(平均)は約5.4時間(平均)は約188kPa [gage]であるのに対して、ゆらぎによる圧力上昇量は約2kPaであり非常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さい。従って、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
格納容器温度	57℃	約45℃~約54℃程(実測値)	通常運転時の格納容器温度として設定	運転員等操作としては原子炉圧力容器下鏡温度の上昇を起点として原子炉格納容器下部への注水を行うこととなることから、本パラメータにより影響を受けることはなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合には、ゆらぎにより解析条件に対して変動を与え得るが、ゆらぎによる格納容器温度の上昇に与える影響は小さい。例えば、事象発生から圧力容器破損までの温度上昇率は(平均)は約5.4時間で約66℃であるのに対して、ゆらぎによる温度上昇率は非常に小さい。従って、事象進展に与える影響は小さく、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
外部水源の温度	35℃	31℃以下(実測値)	屋外貯水槽の水源温度として実測値及び夏季の外気温を踏まえて設定	運転員等操作としては原子炉圧力容器下鏡温度の上昇を起点として原子炉格納容器下部への注水操作の開始となることから、本パラメータにより影響を受けることはなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	外部水源の温度が低い場合、溶融炉心・コンクリート相互作用の侵食量という観点では溶融炉心からの除熱が促進されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
外部水源の容量	7,000m ³	7,000m ³ 以上(合計貯水量)	輪谷貯水槽の水量を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合には、解析条件よりも水源容量の余裕が大きくなるため、水源が枯渇することはない。	-
燃料の容量	1,180m ³	1,180m ³ 以上(合計貯水量)	発電所構内に貯蔵している合計容量を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合には、解析条件よりも燃料容量の余裕が大きくなるため、燃料が枯渇することはない。	-

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータとなる影響 (溶融炉心・コンクリート相互作用) (3/4)

項目	解析条件(初期条件、事故条件及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	解析条件	最確条件			
初期条件	溶融炉心からプール水への熱流束	800kW/m ² 相当 (圧力依存あり)	過去の知見に基づき事前水張りの効果を考慮して設定	最確条件とした場合、解析条件と同様であるため、現象進展に与える影響はないこと、評価項目となるパラメータに与える影響はない。コンクリート侵食量に対しては、実験で確認されている侵食面における侵食の不均一性等の影響を確認する観点から、コンクリート侵食量への影響が最も大きい溶融炉心からプール水への熱流束について、感度解析を実施した。感度解析の結果、コンクリートの侵食量は原子炉圧力容器下部の床面で0cm、壁面で約13cmに抑えられることから、原子炉圧力容器の支持機能を維持できる。(添付資料3.5.3)	最確条件とした場合は、解析条件と同様であるため、現象進展に与える影響はないこと、評価項目となるパラメータに与える影響はない。コンクリート侵食量に対しては、実験で確認されている侵食面における侵食の不均一性等の影響を確認する観点から、コンクリート侵食量への影響が最も大きい溶融炉心からプール水への熱流束について、感度解析を実施した。感度解析の結果、コンクリートの侵食量は原子炉圧力容器下部の床面で0cm、壁面で約13cmに抑えられることから、原子炉圧力容器の支持機能を維持できる。(添付資料3.5.3)
	コンクリートの種類	玄武岩系 コンクリート	使用している骨材の種類から設定	最確条件とした場合、解析条件と同様であるため、現象進展に与える影響はないこと、評価項目となるパラメータに与える影響はない。	最確条件とした場合は、解析条件と同様であるため、現象進展に与える影響はない。コンクリート侵食量に対しては、実験で確認されている侵食面における侵食の不均一性等の影響を確認する観点から、コンクリート侵食量への影響が最も大きい溶融炉心からプール水への熱流束について、感度解析を実施した。感度解析の結果、コンクリートの侵食量は原子炉圧力容器下部の床面で0cm、壁面で約13cmに抑えられることから、原子炉圧力容器の支持機能を維持できる。(添付資料3.5.3)
	コンクリート以外の構造材の扱い	内側鋼板及びびりブ鋼板は考慮しない	内側鋼板及びびりブ鋼板についてはコンクリートよりも融点が高いことから保守的に考慮しない	最確条件とした場合は、解析条件と同様であるため、現象進展に与える影響はない。	最確条件とした場合は、解析条件と同様であるため、現象進展に与える影響はない。コンクリート侵食量に対しては、実験で確認されている侵食面における侵食の不均一性等の影響を確認する観点から、コンクリート侵食量への影響が最も大きい溶融炉心からプール水への熱流束について、感度解析を実施した。感度解析の結果、コンクリートの侵食量は原子炉圧力容器下部の床面で0cm、壁面で約13cmに抑えられることから、原子炉圧力容器の支持機能を維持できる。(添付資料3.5.3)
	原子炉圧力容器下部の構造物の扱い	原子炉圧力容器下部に落下する溶融物は扱わない	発熱密度を下げないよう保守的に設定	最確条件とした場合は、解析条件と同様であるため、現象進展に与える影響はない。	最確条件とした場合は、解析条件と同様であるため、現象進展に与える影響はない。コンクリート侵食量に対しては、実験で確認されている侵食面における侵食の不均一性等の影響を確認する観点から、コンクリート侵食量への影響が最も大きい溶融炉心からプール水への熱流束について、感度解析を実施した。感度解析の結果、コンクリートの侵食量は原子炉圧力容器下部の床面で0cm、壁面で約13cmに抑えられることから、原子炉圧力容器の支持機能を維持できる。(添付資料3.5.3)
	原子炉圧力容器下部床面積	原子炉圧力容器下部床面積を設定	原子炉圧力容器下部床面積を設定	コリウムシールドを床面に設置するため、その設置面積を用いるものとする	解析条件と最確条件とは同様であることから、現象進展に与える影響はない。
事故条件	起回事象	給水流量の全喪失	原子炉水位の低下の観点で厳しい事象を設定	起回事象の違いによって操作手順(原子炉圧力容器下部鏡温度に応じて原子炉圧力容器下部への初期水張り操作を実施すること及び原子炉圧力容器破損後に原子炉圧力容器下部への注水操作を開始すること)に変わりはないこと、評価項目となるパラメータに与える影響はない。	解析条件と最確条件とは同様であることから、現象進展に与える影響はない。コリウムシールドの侵食が抑制されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
	安全機能等の喪失に対する仮定	高圧注水機能喪失 低圧注水機能喪失 重大事故等対処設備による原子炉注水機能の喪失 全交流動力電源喪失	高圧注水機能として原子炉隔離時冷却系及び高圧炉心スプレイス系の機能喪失を、低圧注水機能として低圧炉心スプレイス系の機能喪失を設定するとともに、重大事故等対処設備による原子炉注水機能の喪失を設定。また、すべての非常用ディーゼル機関等の機能喪失を設定	起回事象の違いによって操作手順(原子炉圧力容器下部鏡温度に応じて原子炉圧力容器下部への初期水張り操作を実施すること及び原子炉圧力容器破損後に原子炉圧力容器下部への注水操作を開始すること)に変わりはないこと、評価項目となるパラメータに与える影響はない。	解析条件と最確条件とは同様であることから、現象進展に与える影響はない。コリウムシールドの侵食が抑制されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
外部電源	外部電源なし	外部電源なし	全交流動力電源喪失を想定するため、外部電源なしを設定	解析条件と最確条件とは同様であることから、現象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件とは同様であることから、現象進展に与える影響はない。コリウムシールドの侵食が抑制されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータと与える影響 (溶融炉心・コンクリート相互作用) (4/4)

項目	解析条件 (初期条件, 事故条件及び機器条件) の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータと与える影響
	解析条件	最確条件			
原子炉スクラム信号	事象発生と同時に原子炉スクラム	事象発生と同時に原子炉スクラム	事象発生と同時に原子炉スクラムするものとして設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はなく、評価項目となるパラメータと与える影響はない。
主蒸気隔離弁	事象発生と同時に閉止	原子炉水位低 (レベル2)	主蒸気が原子炉格納容器内に保持される厳しい条件として設定	最確条件とした場合には、逃がし安全弁を通じて原子炉格納容器内に放出される蒸気量が減少することから、格納容器圧力及び温度の上昇が遅くなることから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。	最確条件とした場合には、逃がし安全弁を通じて原子炉格納容器内に放出される蒸気量が減少することから、格納容器圧力及び温度の上昇が遅くなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
再循環ポンプ	事象発生と同時に閉止	事象発生と同時に閉止	全交流動力電源喪失によるポンプ停止を踏まえて設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。
逃がし安全弁	逃がし弁機能 7.58~ 7.79MPa [gage] 367~377t/h/個	逃がし弁機能 7.58~ 7.79MPa [gage] 367~377t/h/個	逃がし安全弁の逃がし弁機能の設計値として設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。
	逃がし安全弁 (自動減圧機能付き) の2個を開することによる原子炉減圧	逃がし安全弁 (自動減圧機能付き) の2個を開することによる原子炉減圧	逃がし安全弁の設計値に基づく蒸気流量及び原子炉圧力の関係から設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。
格納容器代替スプレイ系 (可搬型)	原子炉圧力容器破損前: 120m ³ /hにて格納容器内にスプレイ	原子炉圧力容器破損前: 120m ³ /hにて格納容器内にスプレイ	格納容器温度及び圧力抑制に必要なスプレイ流量を考慮して設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。
ペダスタル代替注水系 (可搬型)	原子炉圧力容器破損後: 崩壊熱相当に余裕を見たと注水量にて原子炉格納容器下部に注水	原子炉圧力容器破損後: 崩壊熱相当に余裕を見たと注水量にて原子炉格納容器下部に注水	溶融炉心冷却が継続可能な流量として設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。
コリウムシールド	材料: ジルコニア耐熱材 侵食開始温度: 2,100°C	材料: ジルコニア耐熱材 侵食開始温度: 2,100°C	材料は、溶融炉心のドライウエルサンプへの流入を防止する観点から、ジルコニア耐熱材を設定。侵食開始温度は、ジルコニア耐熱材の侵食試験結果に基づき設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に与える影響はない。

表3 運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕 (溶融炉心・コンクリート相互作用) (1/2)

項目	解析条件(操作条件)の不確かさ		運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	解析上の操作開始時間	条件設定の考え方の考え方				
操作条件	原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点で開始、ベデスタル水位が2.4mとなる注水量(225m ³) 注水量が注水されたことをもって停止する(事象発生から約3.1時間後)	炉心損傷後の原子炉圧力容器破損による溶融炉心・コンクリート相互作用の影響緩和を考慮し設定	<p>【認知】 中央制御室にて原子炉スクラムを確認した場合に緊急時対策要員(現場)を招集することとしており、高圧・低圧注水機能喪失を判断した場合には直ちに可搬型による注水準備操作に着手することとしている。この認知に係る時間として10分間を想定している。そのため、認知遅れ等による操作時間に与える影響はなし。</p> <p>原子炉格納容器下部への注水操作は、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達したことを確認して開始するが、損傷炉心への注水による冷却性を確認するため、原子炉圧力容器下鏡温度は継続監視しており、認知に大幅な遅れが生じることは考えにくい。よって、認知遅れにより操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【要員配置】 格納容器代替スプレイス系(可搬型)による原子炉圧力容器破損前の初期水張りには、中央制御室にて弁操作を行う運転員と、現場にて可搬型による注水のためのホース敷設等の注水準備操作を行う緊急時対策要員(現場)が各々配置されている。注水準備操作は現場にて緊急時対策要員(現場)が実施することとなるが、本操作を行う要員は、操作が終わるまで他の操作は行わない。このため、要員配置が操作開始時期に与える影響はなし。</p> <p>【移動・操作所要時間】 現場での格納容器代替スプレイス系(可搬型)による注水準備操作は、移動時間を含め、事象発生から2時間10分で行うことを想定している。この後、原子炉圧力容器下鏡温度300℃到達を確認し、中央制御室で常設代替交流電源設備により確保した電源により弁操作を行うことにより注水を開始することとなる。以上より、移動・操作所要時間が操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【他の並列操作有無】 現場にて緊急時対策要員(現場)が格納容器代替スプレイス系(可搬型)による注水のためのホース敷設等の注水準備操作を行ったのち、中央制御室にて運転員が弁操作を行うことにより注水は開始される。当該操作に対応する運転員、緊急時対策要員(現場)に他の並列操作はなく、操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【操作の確実さ】 中央制御室内における操作は、操作盤での簡易な操作のため、誤操作は起こりにくく、そのため誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。また緊急時対策要員(現場)の信頼性向上や要員の安全のため2人1組で実施することとしており、誤操作は起こりにくく、誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。</p>	<p>原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達するまでは事象発生から約3.1時間の時間余裕がある。また、格納容器代替スプレイス系(可搬型)による原子炉格納容器下部への注水操作は原子炉圧力容器下鏡温度を監視しながら溶融炉心の炉心下部プレナムへの移行を判断し、水張り操作を実施するため、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であり、操作開始時間に与える影響は小さい。</p> <p>当該操作は、解析コード及び解析条件(操作条件を除く)の不確かさにより操作開始時間が遅れる可能性があるが、当該操作に対応する運転員、緊急時対策要員(現場)に他の並列操作はなく、主要な操作は、約5.0時間後の水張り完了から、約5.4時間後の原子炉圧力容器破損までの時間を考慮すると、原子炉格納容器下部への注水操作は操作遅れに対して0.4時間程度の時間余裕がある。</p>	<p>格納容器代替スプレイス系(可搬型)による原子炉格納容器破損前の初期水張り(原子炉圧力容器破損前の初期水張り)については、原子炉圧力容器破損前の原子炉格納容器冷却を兼ねる操作であり、原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達後、速やかに実施することが望ましいが、原子炉圧力容器破損前には、本操作が実施できないと仮定しても、格納容器圧力及び温度が原子炉格納容器の限界圧力及び限界温度に到達することはなく、逃がし安全弁(自動減圧機能付き)による原子炉減圧機能減時も可能であることから、時間余裕がある。</p> <p>原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達するまでに事象発生から約3.1時間間の時間余裕があり、原子炉格納容器下部への注水準備として、全ての非常用炉心冷却系等の機能喪失や早期の電源回復不能確認を含む状況判断をした後に開始し、所要時間は約2.5時間で完了する。その後、ベデスタル水位2.4mまでの注水は約1.9時間で完了することから、水張りを原子炉圧力容器下鏡温度300℃到達時点である事象発生から約3.1時間後に開始すると、事象発生から約5.0時間後に水張り完了する。事象発生から約5.0時間後の水張り完了から、約5.4時間後の原子炉格納容器破損までの時間を考慮すると、原子炉格納容器下部への注水操作は操作遅れに対して0.4時間程度の時間余裕がある。</p>	<p>解析上は作業成立性を踏まえ、事象発生から約3.1時間後としており、このうち、格納容器代替スプレイス系(可搬型)による原子炉格納容器破損前の初期水張り等の系統構成は、所要時間2時間10分想定のところ、訓練実績では約1時間41分である。想定で作業が実施可能なことを確認した。</p>

表3 運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕（溶融炉心・コンクリート相互作用）（2/2）

項目	解析条件（操作条件）の不確かさ		運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	解析上の操作開始時間	条件設定の考え方の不確かさ				
ペデスタル代替注水系（可搬型）による原子炉格納容器下部への注水操作（原子炉格納容器破損後の注水）	原子炉圧力容器の破損を確認した場合は（事象発生から約5.4時間後）	炉心損傷後の原子炉格納容器の破損による溶融炉心・コンクリート相互作用の影響を考慮し設定	<p>原子炉圧力容器破損までに事象発生から約5.4時間の時間余裕があり、また、溶融炉心落下後に原子炉格納容器下部注水が行われなかった場合でも、溶融炉心落下前に張られた水が蒸発し、溶融炉心が露出するまでには約1.4時間の時間余裕がある。</p> <p>また、溶融炉心落下後の原子炉格納容器下部への注水操作はベデスタル温度、格納容器圧力等の傾向を監視しながら原子炉圧力容器破損を判断して実施することとしており、実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であるため、操作開始時間に与える影響は小さいこととから、運転員等操作時間に与える影響も小さい。</p>	<p>実態の操作開始時間は解析上の設定とほぼ同等であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。</p>	<p>原子炉圧力容器が破損するまでの時間は事象発生から約5.4時間あり、また、溶融炉心落下後に、原子炉格納容器下部注水が行われなかった場合でも、溶融炉心が溶融炉心の崩壊熱水が溶融炉心の崩壊熱及びジルコニウム-水反応による発熱により蒸発し、溶融炉心が露出するまでには約1.4時間の時間余裕がある。</p>	<p>訓練実績等により、条件成立を前提として約6分間でベデスタル代替注水系（可搬型）による注水操作を開始可能である見込みを得た。想定で意図している運転操作が実施可能なことを確認した。</p>

溶融炉心の崩壊熱及び溶融炉心からプール水への熱流束を保守的に考慮する場合、
原子炉格納容器下部床面での溶融炉心の拡がりを抑制した場合の
コンクリート侵食量及び溶融炉心・コンクリート相互作用によって発生する
非凝縮性ガスの影響評価

1. 評価の目的

今回の申請において示した解析ケース（以下「ベースケース」という。）では、プラント損傷状態をTQUVとしており、溶融炉心から原子炉格納容器下部のプール水への熱流束は、その格納容器圧力への依存性を考慮している。これは、より厳しいプラント損傷状態を設定したうえで、より現実的に溶融炉心からの除熱量を評価する観点で設定したものである。

ベースケースの条件設定に対し、崩壊熱又は溶融炉心からプール水への熱流束（以下「上面熱流束」という。）についてコンクリート侵食量に対する感度を確認した。崩壊熱についての感度を確認した理由は、プラント損傷状態をLOCAとする場合、TQUVの場合よりも早く原子炉圧力容器が破損に至ることを確認したためである。上面熱流束についての感度を確認した理由は、解析コード（MAAPコード）^[1]の「添付3 溶融炉心・コンクリート相互作用について」において、解析モデルの不確かさを整理し、感度解析対象として抽出し、その感度を確認したエントレインメント係数、上面熱流束及び溶融プール・クラスト間の熱伝達係数のうち、上面熱流束がコンクリート侵食量に対して影響の大きいパラメータであることを確認したためである。

また、原子炉格納容器下部に落下した溶融炉心について、ベースケースでは床面に一様に拡がる評価モデルとして扱っているが、その挙動には不確かさがあると考えられる。この溶融炉心が均一に拡がらない場合の影響を確認するため、溶融炉心の拡がりが抑制された場合の評価モデルを作成し、コンクリート侵食量を評価した。

2. 評価条件

ベースケースの評価条件に対する変更点は以下のとおり。このほかの評価条件は、ベースケースと同等である。

(1) 原子炉格納容器下部の評価において溶融炉心の崩壊熱を保守的に考慮する場合

- ・起因事象の不確かさを保守的に考慮するため、事故シーケンスを「大破断LOCA+ECCS注水機能喪失」とし、本評価事故シーケンスの評価条件と同様、電源の有無にかかわらず重大事故等対処設備による原子炉注水機能についても使用できないものと仮定した。この場合、事象発生直後から原子炉冷却材が流出するため、原子炉圧力容器破損までの時間が早まり、崩壊熱は

大きくなる。

(2) 原子炉格納容器下部の評価において上面熱流束を保守的に考慮する場合

- ・原子炉格納容器下部に落下した後の上面熱流束をベースケースから変更し、 800kW/m^2 一定とした。これは、Kutateladze 型の水平平板限界熱流束相関式において大気圧状態を想定した場合、上面熱流束が 800 kW/m^2 程度であることを考慮し、保守的に設定した値である。なお、ベースケースでは上面熱流束を 800 kW/m^2 (圧力依存有り) としている。ベースケースにおける原子炉圧力容器破損後の格納容器圧力は、約 $0.2\text{MPa}[\text{gage}]$ 以上で制御されていることから、ベースケースにおける上面熱流束は、約 $1,300\text{kW/m}^2$ (格納容器圧力約 $0.2\text{MPa}[\text{gage}]$ において) 以上となる。

(3) 原子炉格納容器下部の評価において溶融炉心の拡がりを抑制する場合

- ・溶融炉心が拡がらないことを想定した最も極端なケースとして、水中に落下した溶融炉心は水中で拡がらず、初期水張り水深と同じ高さの円柱になるものとした。
- ・評価体系 (円柱) の高さは 2.4m (初期水張り高さ) , 底面積は約 11m^2 (原子炉格納容器下部床面積の約 $2/5$) とし、評価体系 (円柱) の上面から水によって除熱されるものとした。ただし、円柱の側面部分も水に接していることを想定し、上面からの除熱量は円柱上面の面積に側面の面積を加えた値とした。

3. 評価結果

(1) 原子炉格納容器下部の評価において溶融炉心の崩壊熱を保守的に考慮する場合

評価結果を図 1 に示す。評価の結果、コンクリート侵食量は床面で 0 cm 、壁面で約 4 cm に抑えられることから、原子炉圧力容器の支持機能を維持できることを確認した。コンクリートの侵食量がわずかであることから、本評価における溶融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガスの発生量は原子炉格納容器内の気相濃度に影響を与えない。このため、溶融炉心・コンクリート相互作用に伴う可燃性ガスの発生による格納容器圧力への影響は無く、原子炉格納容器内の気体組成の推移はベースケース (3.5.2(3) b. 参照) と同じとなる。ただし、原子炉冷却材圧力バウンダリからの原子炉冷却材の放出、原子炉圧力容器破損及び原子炉格納容器下部への溶融炉心落下による格納容器圧力の上昇によって、事象発生 12 時間後における格納容器圧力は $427\text{kPa}[\text{gage}]$ (1 Pd) 以上となることから、過圧破損防止の観点で窒素注入は実施しないため、そのマネジメントの差異が原子炉格納容器内の気相濃度に影響を与える。

本評価における原子炉格納容器下部への溶融炉心落下後の水素濃度は、サプレッション・チェンバよりも大きな値となるドライウエルにおいて、ウェット条件で約 $0.1\text{vol}\%$ 以上、ドライ条件で約 $24.8\text{vol}\%$ 以上となり、ドライ条

件において 13vol%を上回る。一方、酸素濃度は水の放射線分解によって徐々に上昇するものの、事象発生から 7 日後（168 時間後）においてもウェット条件で約 2.4vol%，ドライ条件で約 2.9vol%であり、5 vol%を下回ることから、原子炉格納容器内の可燃性ガスの燃焼が発生するおそれはない。なお、上述のとおり、本感度解析ケースにおいては窒素注入を実施していないことから、長期的な格納容器圧力はベースケースに比べて低く、原子炉格納容器内の酸素濃度はベースケースに比べて大きい結果となっている。

(2) 原子炉格納容器下部の評価において上面熱流束を保守的に考慮する場合

評価結果を図 2 に示す。評価の結果、コンクリート侵食量は床面で 0 cm、壁面で約 13cm に抑えられ、原子炉圧力容器の支持機能を維持できることを確認した。本感度解析ケースでは、熔融炉心・コンクリート相互作用によって約 41kg の可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスが発生するが、本評価においても、ベースケース同様にジルコニウム-水反応によって約 422kg の水素ガスが発生することを考慮すると、熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスの発生が格納容器圧力に与える影響は小さい。なお、ベースケースよりもコンクリート侵食量が増加することにより、可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスの発生量が増加するため、事象発生 12 時間後における格納容器圧力は 427kPa[gage]（1 Pd）以上となることから、過圧破損防止の観点で窒素注入は実施していない。

熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガスの発生が、可燃性ガスの燃焼の可能性に及ぼす影響について、本評価における原子炉格納容器下部への熔融炉心落下後の原子炉格納容器内の水素濃度は、ドライウェルよりも大きな値となるサプレッション・チェンバにおいて、ウェット条件で約 6.1vol%以上、ドライ条件で約 30.9vol%以上となり、ドライ条件において 13 vol%を上回る。このことから、本感度解析において評価した、熔融炉心・コンクリート相互作用に伴って発生する可燃性ガスを、本評価の結果に加えたとしても、原子炉格納容器内の可燃性ガスの燃焼の可能性には影響しない。なお、熔融炉心・コンクリート相互作用によって生じる約 41kg の気体の内訳は、可燃性ガスである水素ガスが約 35kg、一酸化炭素が約 6 kg、その他の非凝縮性ガスである二酸化炭素が 1 kg 未満である。ジルコニウム-水反応によって発生する水素ガスも考慮すると、原子炉格納容器内に存在する可燃性ガスとしては水素ガスが支配的であり、一酸化炭素の影響は無視できる。

一方、原子炉格納容器内の酸素濃度については、水の放射線分解によって徐々に上昇するものの、事象発生から 7 日後（168 時間後）でもサプレッション・チェンバにおいて、ウェット条件で約 1.5vol%，ドライ条件で約 4.1vol%であり、可燃限界である 5 vol%を下回る。熔融炉心・コンクリート相互作用では酸素ガスは発生しないため、熔融炉心・コンクリート相互作用により発生する可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスを考慮することは原子炉格納容器内の酸素濃度を下げる要因となる。このため、本感度解析ケースの熔融炉

心・コンクリート相互作用に伴って発生する可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスの発生量を本評価の結果に加えて気相濃度を評価する場合、上記の酸素濃度（ウェット条件で 1.5vol%，ドライ条件で 4.1vol%）以下になるものと考えられる。このため、原子炉格納容器内での可燃性ガスの燃焼が発生するおそれはない。なお、上述のとおり、本感度解析ケースにおいては窒素注入を実施していないことから、長期的な格納容器圧力はベースケースに比べて低く、原子炉格納容器内の酸素濃度はベースケースに比べて大きい結果となっている。

(3) 原子炉格納容器下部の評価において熔融炉心の拡がりを抑制する場合

評価結果を図 3 に示す。評価の結果、コリウムシールド及びコンクリートの侵食は生じず、原子炉圧力容器の支持機能を維持できることを確認した。熔融炉心・コンクリート相互作用によってコンクリート侵食は生じないことから可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガスは発生せず、格納容器圧力や原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度への影響はない。なお、本評価における原子炉格納容器下部への熔融炉心落下後の水素濃度は、ドライウェルよりも大きな値となるサプレッション・チェンバにおいて、ウェット条件で約 10.2vol%以上、ドライ条件で約 24.4vol%以上となり、ドライ条件において 13 vol%を上回る。一方、酸素濃度は水の放射線分解によって徐々に上昇するものの、事象発生から 7 日後（168 時間後）においても酸素濃度はウェット条件で約 1.6vol%，ドライ条件で約 2.6vol%であり、5 vol%を下回ることから、原子炉格納容器内での可燃性ガスの燃焼が発生するおそれはない。

4. まとめ

熔融炉心の落下時刻の不確かさや解析モデルの不確かさの影響によって原子炉格納容器下部のコンクリート侵食量が増大する場合の保守的な条件設定が評価結果に与える影響を確認した結果、評価項目となるコンクリート侵食量は、最もコンクリート侵食量が多い結果となった上面熱流束を保守的に考慮した場合であっても床面で 0 cm、壁面で約 13cm であり、原子炉圧力容器の支持機能を維持できることを確認した。

また、熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガスの発生を考慮しても格納容器圧力に与える影響は小さく、可燃性ガスの燃焼の観点でも燃料のリスクを高めるものではないことを確認した。

5. 参考文献

- [1] 「沸騰水型原子力発電所 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コード(MAAP)について」、東芝エネルギーシステムズ株式会社、TLR-094、日立GEニュークリア・エナジー株式会社、HLR-123、平成 30 年 5 月

以上

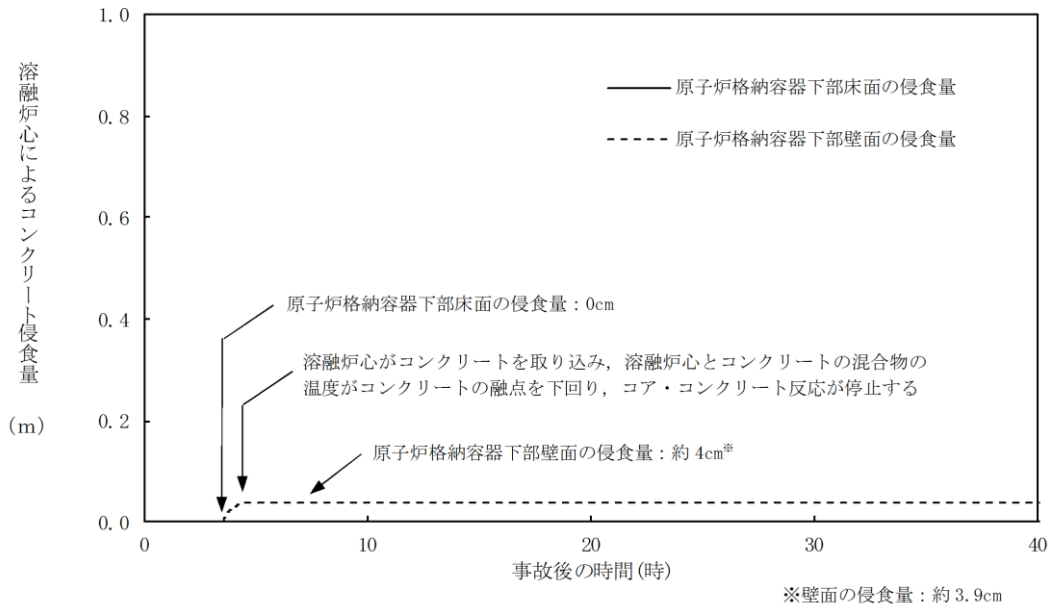


図1 原子炉格納容器下部床面及び壁面のコンクリート侵食量の推移 (溶融炉心の崩壊熱を保守的に考慮する場合)

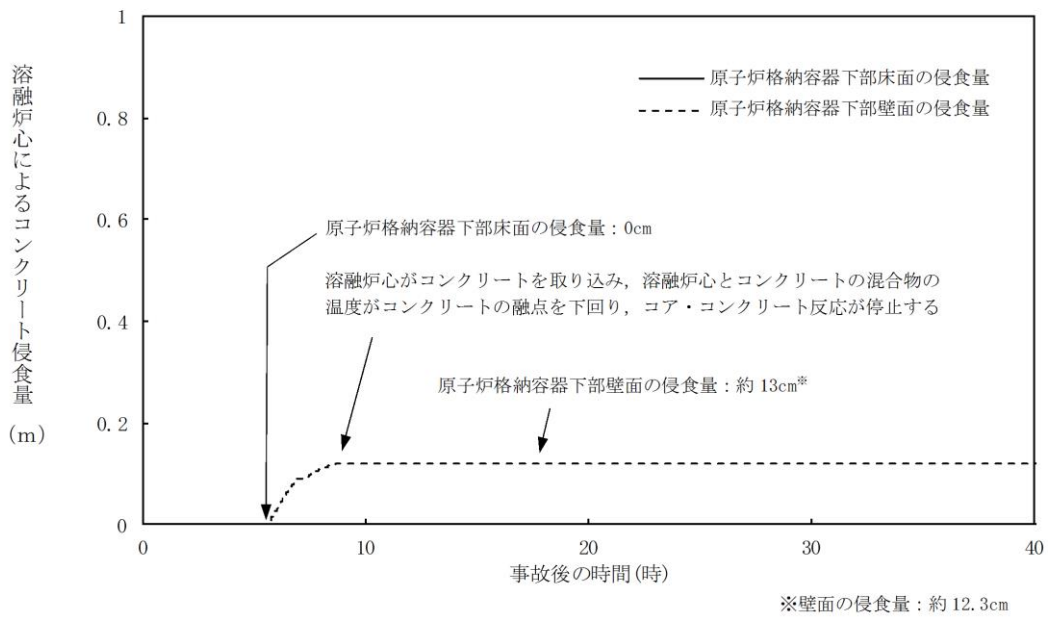


図2 原子炉格納容器下部床面及び壁面のコンクリート侵食量の推移 (上面熱流束を保守的に考慮する場合)

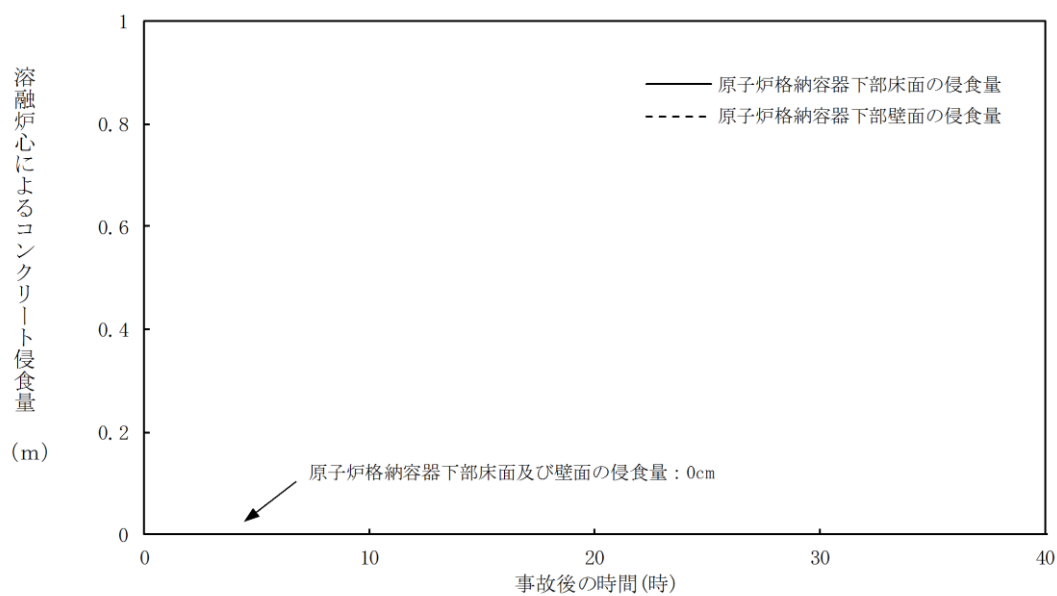


図3 原子炉格納容器下部床面及び壁面のコンクリート侵食量の推移
(溶融炉心の拡がりを抑制した場合)

4. 燃料プールにおける重大事故に至るおそれがある事故

4.1 想定事故 1

4.1.1 想定事故 1 の特徴, 燃料損傷防止対策

(1) 想定する事故

「燃料プールにおける重大事故に至るおそれがある事故」において、燃料プールにおける燃料損傷防止対策の有効性を確認するために想定する事故の一つには、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、想定事故 1 として「燃料プールの冷却機能又は注水機能が喪失することにより、燃料プール内の水の温度が上昇し、蒸発により水位が低下する事故」がある。

(2) 想定事故 1 の特徴及び燃料損傷防止対策の基本的考え方

想定事故 1 では、燃料プールの冷却機能及び注水機能が喪失することを想定する。このため、燃料プール水温が徐々に上昇し、やがて沸騰して蒸発することによって燃料プール水位が緩慢に低下することから、緩和措置がとられない場合には、燃料プール水位の低下により燃料が露出し、燃料損傷に至る。

本想定事故は、燃料プールの冷却機能及び注水機能を喪失したことによって燃料損傷に至る事故を想定するものである。このため、重大事故等対策の有効性評価には、燃料プールの注水機能に対する重大事故等対処設備に期待することが考えられる。

したがって、想定事故 1 では、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）により燃料プールへ注水することによって、燃料損傷の防止を図る。また、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）により燃料プール水位を維持する。

(3) 燃料損傷防止対策

想定事故 1 における機能喪失に対して、燃料プール内の燃料が著しい損傷に至ることなく、かつ、十分な冷却を可能とするため、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）^{※1}による燃料プールへの注水手段を整備する。これらの対策の概略系統図を第 4.1.1-1 図に、手順の概要を第 4.1.1-2 図に示すとともに、重大事故等対策の概要を以下に示す。また、重大事故等対策における設備と操作手順の関係を第 4.1.1-1 表に示す。

想定事故 1 において、重大事故等対策に必要な要員は、中央制御室の運転員及び緊急時対策要員で構成され、合計 24 名である。その内訳は次のとおりである。中央制御室の運転員は、当直長 1 名、当直副長 1 名、運転操作対応を行う運転員 1 名である。発電所構内に常駐している要員のうち、通報連絡等を行う緊急時対策本部要員は 5 名、緊急時対策要員（現場）は 16 名である。必要な要員と作業項目について第 4.1.1-3 図に示す。

※1 燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）以外に、燃料プールスプレイ系（常設スプレイヘッド）による対応が可能である。

a. 燃料プールの冷却機能喪失確認

燃料プールを冷却している系統が機能喪失することにより、燃料プール水の温度が上昇する。中央制御室からの遠隔操作による燃料プールの冷却系の再起動操作が困難な場合、燃料プールの冷却機能喪失であることを確認する。

燃料プールの冷却機能喪失を確認するために必要な計装設備は、燃料プール水位・温度（S A）等である。

b. 燃料プールの注水機能喪失確認

燃料プールの冷却機能喪失の確認後、燃料プール水の温度上昇による蒸発により燃料プール水位が低下することが想定されるため、復水輸送系等による燃料プールへの注水準備を行う。中央制御室からの遠隔操作により燃料プールへの注水準備が困難な場合、燃料プールの注水機能喪失であることを確認する。

燃料プールの注水機能喪失を確認するために必要な計装設備は、燃料プール水位・温度（S A）等である。

c. 燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水

燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）の準備は冷却機能喪失による異常の認知を起点として開始する。準備が完了したところで、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水を開始し、燃料プール水位を維持する。その後、燃料プールの冷却機能を復旧するとともに、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）の間欠運転又は流量調整により蒸発量に応じた注水を行うことで、必要な遮蔽^{※2}を確保できる燃料プール水位より高く維持する。

燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水を確認するために必要な計装設備は、燃料プール水位・温度（S A）等である。

※2 必要な遮蔽の目安とした線量率は10mSv/hとする。想定事故1における原子炉建物原子炉棟4階での緊急時対策要員による作業時間並びに現場作業員の退避は2時間以内であり、作業員の被ばく量は最大でも20mSvとなるため、緊急作業時における被ばく限度の100mSvに対して余裕がある。

原子炉建物原子炉棟4階での作業は、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）を使用する場合の可搬型スプレイノズル及びホースの設置が想定される。

必要な遮蔽の目安とした線量率10mSv/hは、定期検査作業時での原子炉建物原子炉棟4階における線量率を考慮した値である。

この線量率となる燃料プール水位は通常水位から約2.6m下の位置である。

（添付資料4.1.1, 4.1.2）

4.1.2 燃料損傷防止対策の有効性評価

(1) 有効性評価の方法

想定事故1で想定する事故は、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、「燃料プールの冷却機能又は注水機能が喪失することにより、燃料プール内の水の温度が上昇し、蒸発により水位が低下する事故」である。

想定事故1では、燃料プールの冷却機能喪失及び注水機能喪失に伴い燃料プ

ール水温が徐々に上昇し、やがて沸騰して蒸発することによって燃料プール水位が緩慢に低下するが、燃料プールへの注水により、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される水位を確保できることを評価する。なお、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される水位を確保できることで、燃料棒有効長頂部は冠水が維持される。

未臨界については、燃料がボロン添加ステンレス鋼製ラックセルに貯蔵されており、必要な燃料間距離をとる等の設計により水密度の状態によらず臨界未満となるため、維持される。

また、評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、想定事故1における運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価する。

(添付資料 4.1.1, 4.1.2)

(2) 有効性評価の条件

想定事故1に対する初期条件も含めた主要な評価条件を第4.1.2-1表に示す。また、主要な評価条件について、想定事故1特有の評価条件を以下に示す。

なお、本評価では崩壊熱及び運転員の人数の観点から厳しい条件である、原子炉運転停止中の燃料プールを前提とする。原子炉運転中の燃料プールは、崩壊熱が原子炉運転停止中の燃料プールに比べて小さく事象進展が緩やかになること、また、より多くの運転員による対応が可能であることから本評価に包絡される。

(添付資料 4.1.1)

a. 初期条件

(a) 燃料プールの初期水位及び初期水温

燃料プールの初期水位は通常水位とし、保有水量を厳しく見積もるため、燃料プールと隣接する原子炉ウェルの間に設置されているプールゲートは閉状態を仮定する。また、燃料プールの初期水温は、運転上許容される上限の65℃とする。

(b) 崩壊熱

燃料プールには貯蔵燃料の他に、原子炉停止後に最短時間（原子炉停止後10日）で取り出された全炉心分の燃料が一時保管されていることを想定して、燃料プールの崩壊熱は約7.8MWを用いるものとする。

なお、崩壊熱に相当する保有水の蒸発量は約13m³/hである。

b. 事故条件

(a) 安全機能の喪失に対する仮定

燃料プールの冷却機能及び注水機能として燃料プール冷却系、残留熱除去系、復水輸送系等の機能を喪失するものとする。

(b) 外部電源

外部電源は使用できないものと仮定する。

外部電源が使用できない場合においても、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水は可能であり、外部電源がある場合と事象進展は同等となるが、資源の評価の観点から厳しい評価条件となる外部電源が使用できない場合を想定する。

c. 重大事故等対策に関連する機器条件

(a) 燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）

燃料プールへの注水は、大量送水車1台を使用するものとし、崩壊熱による燃料プール水の蒸発量を上回る $48\text{m}^3/\text{h}^{*3}$ にて注水する。

※3 燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）、燃料プールスプレイ系（常設スプレイヘッド）の注水容量はともに $48\text{m}^3/\text{h}$ 以上である。

d. 重大事故等対策に関連する操作条件

運転員等操作に関する条件として、「1.3.5 運転員等の操作時間に対する仮定」に示す分類に従って以下のとおり設定する。

(a) 燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水準備は、緊急時対策要員の移動及び注水準備に必要な時間等を考慮して、事象発生3時間10分後までに完了するが、燃料プールへの注水は燃料プールの水温が 100°C に到達することにより燃料プール水位が低下し始める事象発生約7.9時間後から開始する。

(3) 有効性評価の結果

想定事故1における燃料プール水位の推移を第4.1.2-1図に、燃料プール水位と線量率の関係を第4.1.2-2図に示す。

a. 事象進展

燃料プールの冷却機能が喪失した後、燃料プール水温は約 $4.4^\circ\text{C}/\text{h}$ で上昇し、事象発生から約7.9時間後に 100°C に到達する。その後、蒸発により燃料プール水位は低下し始めるが、事象発生から3時間10分後までに燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水準備が完了し、事象発生から約7.9時間経過した時点で燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水を開始することから、燃料プール水位は低下しない。

その後は、燃料プールの冷却機能を復旧するとともに、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）により、蒸発量に応じた量を燃料プールに注水することで、燃料プール水位を維持する。

b. 評価項目等

燃料プール水位は、第4.1.2-1図に示すとおり、水位低下することなく通常水位のままであるため、燃料棒有効長頂部は冠水維持される。燃料プール水は事象発生約7.9時間で沸騰し、その後 100°C 付近で維持される。

また、第4.1.2-2図に示すとおり、燃料プール水位は通常水位のままであるため、燃料プール周りの線量率は、約 $1.0 \times 10^{-3} \text{mSv}/\text{h}$ 以下であり、必要な遮蔽の目安とした $10\text{mSv}/\text{h}$ と比べて低いことから、この水位において放射線の遮蔽は維持されている。なお、線量率の評価点は原子炉建物原子炉棟4階の燃料取替機台車床としている。

燃料プールでは燃料がボロン添加ステンレス鋼製ラックセルに貯蔵されており、必要な燃料間距離をとる等の設計により水密度の状態によらず臨界未満となるため、本事象においても未臨界は維持される。

事象発生3時間10分後までに燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水準備が完了するため、燃料プールの水位が低下し始める事象発生約7.9時間後から蒸発量に応じた燃料プールへの注水を継続することで安定状態を維持できる。

本評価では、「1.2.3.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(1)から(3)の評価項目について、対策の有効性を確認した。

(添付資料4.1.3, 4.1.4)

4.1.3 評価条件の不確かさの影響評価

評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価するものとする。

想定事故1では、燃料プールの冷却機能及び注水機能が喪失することが特徴である。また、不確かさの影響を確認する運転員等操作は、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作とする。

(1) 評価条件の不確かさの影響評価

a. 初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件

初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件は、第4.1.2-1表に示すとおりであり、それらの条件設定を設計値等、最確条件とした場合の影響を評価する。また、評価条件の設定に当たっては、評価項目となるパラメータに対する余裕が小さくなるような設定があることから、その中で事象進展に有意な影響を与えると考えられる項目に関する影響評価の結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間へ与える影響

初期条件の燃料の崩壊熱は、評価条件の約7.8MWに対して最確条件は約7.8MW以下であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料の崩壊熱より小さくなるため、燃料プール水温の上昇及び燃料プール水位の低下は緩和されるが、注水操作は燃料の崩壊熱に応じた対応をとるものではなく、冷却機能喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の燃料プール水温は、評価条件の65℃に対して最確条件は約17℃～約40℃であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料プールの初期水温より低くなり、沸騰開始時間は遅くなるため、時間余裕が長くなるが、注水操作は燃料プール水の初期水温に応じた対応をとるものではなく、冷却機能喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の燃料プール水位は、評価条件の通常水位に対して最確条件は通常水位付近であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件での初期水位は通常水位を設定しているため、通常水位より低い水位の変動を考慮した場合、燃料プール水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間及び燃料プール水位の低下による異常の認知の時間は短くなる。条件によっては想定する冷却機能喪失による異常認知より早くなり、それにより操作開始が早くなるが、注水操作は冷却機能喪失による異常の認知を起点として操作を開始するため、その起点より操作開始が遅くなることはないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期に地震起因のスロッシングが発生した場合、燃料プール水位が最大で約1.1m低下するものの、放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約1.1日後（10mSv/hの場合）であり、事象発生から3時間10分後までに燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による注水が可能となることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件のプールゲートの状態は、評価条件のプールゲート閉に対して最確条件はプールゲート開であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、保有水量がプールゲート閉時と比べ2倍程度となり、燃料プール水温の上昇及び蒸発による燃料プール水位の低下は緩和されるが、注水操作はプールゲートの状態に応じた対応をとるものではなく、冷却機能喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

初期条件の燃料の崩壊熱は、評価条件の約7.8MWに対して最確条件は約7.8MW以下であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料の崩壊熱より小さくなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

初期条件の燃料プール水温は、評価条件の65℃に対して最確条件は約17℃～約40℃であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料プール水温より低くなるため、沸騰開始時間は遅くなり、燃料プール水位の低下は緩和されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

また、自然蒸発、燃料プール水温及び温度の上昇の非一様性により、評価で想定している沸騰による燃料プール水位低下開始時間より早く燃料プール水位の低下が始まることも考えられる。しかし、自然蒸発による影響は沸騰による水位の低下と比べてわずかであり、気化熱により燃料プール水は冷却される。さらに、燃料プール水温の非一様性も沸騰開始後の気泡上昇を駆動力とした対流により影響が小さくなることが考えられる。仮に、事象発生直後から沸騰による燃料プール水位の低下が開始すると想定した場合であっても、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約1.4日（10mSv/hの場合）、燃料プール水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は事象発生から約3.6日あり、事象発生から3時間10分後までに燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による注水が可能となることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

初期条件の燃料プール水位は、評価条件の通常水位に対して最確条件は通常水位付近であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件での初期水位は通常水位を設定しているため、その変動を考慮した場合、燃料プールが通常水位から燃料棒有効長頂部まで低下する時間は短くなるが、仮に初期水位を水位低警報レベル（通常水位から約0.27m下^{※4}）とした場合であっても、放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約1.5日（10mSv/hの場合）、燃料プール水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は事象発生から約3.8日あり、事象発生から3時間10分後までに燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による注水が可能であることから、評価項目となるパラメータに与

える影響は小さい。

初期に地震起因のスロッシングが発生した場合、最大で約1.1mの水位の低下が発生するが、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約1.1日（10mSv/hの場合）、燃料棒有効長頂部まで低下する時間は事象発生から約3.3日あり、事象発生から3時間10分後までに燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による注水が可能であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

初期条件のプールゲートの状態は、評価条件のプールゲート閉に対して最確条件はプールゲート開であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、保有水量がプールゲート閉時と比べ2倍程度となり、燃料プール水温の上昇及び蒸発による燃料プール水位の低下は緩和されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

※4 燃料プール水位低の警報設定値：通常水位－272mm

（添付資料4.1.5）

b. 操作条件

操作条件の不確かさとして、操作の不確かさを「認知」、「要員配置」、「移動」、「操作所要時間」、「他の並列操作有無」及び「操作の確実さ」の6要因に分類し、これらの要因が運転員等操作時間に与える影響を評価する。また、運転員等操作時間に与える影響が評価項目となるパラメータに与える影響を評価し、評価結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

操作条件の燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作は、評価上の操作開始時間として事象発生から約7.9時間後を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、当該操作は他の操作との重複はなく、燃料プールの冷却機能喪失による異常を認知した時点で注水準備に着手可能であり、その準備操作にかかる時間は3時間を想定していることから、実態の操作開始時間は想定している事象発生から約7.9時間後より早まる可能性があり、運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

操作条件の燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作は、運転員等操作時間に与える影響として、実態の操作開始時間が早まり、燃料プール水位の回復を早める可能性があることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

（添付資料4.1.5）

(2) 操作時間余裕の把握

操作開始時間の遅れによる影響度合いを把握する観点から、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内での操作時間余裕を確認し、その結果を以下に示す。

操作条件の燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作については、放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するま

での時間が事象発生から約1.7日（10mSv/hの場合）、燃料プール水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間が事象発生から約3.9日であり、事故を検知して注水を開始するまでの時間は事象発生から約7.9時間後と設定しているため、準備時間が確保できることから、時間余裕がある。

（添付資料4.1.5）

(3) まとめ

評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を確認した。その結果、評価条件の不確かさが運転員等操作時間に与える影響等を考慮した場合においても、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。このほか、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間には時間余裕がある。

4.1.4 必要な要員及び資源の評価

(1) 必要な要員の評価

想定事故1において、重大事故等対策時における必要な要員は、「4.1.1(3)燃料損傷防止対策」に示すとおり24名である。「6.2 重大事故等対策時に必要な要員の評価結果」で説明している運転員、緊急時対策要員等の43名で対処可能である。

なお、今回評価した原子炉の運転停止中ではなく、原子炉運転中を想定した場合、事象によっては、原子炉における重大事故又は重大事故に至るおそれのある事故の対応と、想定事故1の対応が重畳することも考えられる。しかし、原子炉運転中を想定した場合、燃料プールに貯蔵されている燃料の崩壊熱が低いいため、操作時間余裕が十分長くあり（原子炉運転開始直後を考慮しても燃料プール水が100℃に到達するまで最低でも1日以上）、原子炉における重大事故又は重大事故に至るおそれのある事故の対応が収束に向かっていている状態での対応となるため、緊急時対策要員により対応可能である。

(2) 必要な資源の評価

想定事故1において、必要な水源、燃料及び電源は、「6.1(2) 資源の評価条件」の条件にて評価している。その結果を以下に示す。

a. 水源

燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水については、7日間の対応を考慮すると、約2,100m³の水が必要となる。水源として、輪谷貯水槽（西1／西2）に約7,000m³の水を保有しており、水源を枯渇させることなく7日間の注水継続実施が可能である。

（添付資料4.1.6）

b. 燃料

非常用ディーゼル発電機等による電源供給については、保守的に事象発生後7日間最大負荷で運転した場合、運転継続に約700m³の軽油が必要となる。燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水については、保守的に事象発生直後からの大量送水車の運転を想定すると、7日間の運転継続に約12m³の軽油が必要となる。合計約712m³の軽油が必要と

なる。非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等にて約730m³の軽油を保有しており、この使用が可能であることから非常用ディーゼル発電機等による電源供給、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水について、7日間の運転継続が可能である。

緊急時対策所用発電機による電源供給については、保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると、7日間の運転継続に約8m³の軽油が必要となる。緊急時対策所用燃料地下タンクにて約45m³の軽油を保有しており、この使用が可能であることから、緊急時対策所用発電機による電源供給について、7日間の継続が可能である。

(添付資料4.1.7)

c. 電源

外部電源は使用できないものと仮定し、非常用ディーゼル発電機等によって給電を行うものとする。重大事故等対策時に必要な負荷は、非常用ディーゼル発電機等の負荷に含まれることから、非常用ディーゼル発電機等による電源供給が可能である。

また、緊急時対策所用発電機についても、必要負荷に対しての電源供給が可能である。

4.1.5 結論

想定事故1では、燃料プールの冷却系が機能喪失し、燃料プール水温が上昇し、やがて沸騰して蒸発することによって燃料プール水位が緩慢に低下することから、緩和措置がとられない場合には、燃料プール水位の低下により燃料が露出し、燃料損傷に至ることが特徴である。想定事故1に対する燃料損傷防止対策としては、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水手段を整備している。

想定事故1について有効性評価を実施した。

上記の場合においても、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水により、燃料プール水位を維持することができることから、放射線の遮蔽が維持され、かつ、燃料損傷することはない。

また、燃料プールでは燃料がボロン添加ステンレス鋼製ラックセルに貯蔵されており、必要な燃料間距離をとる等の設計により水密度の状態によらず臨界未達となるため、未臨界は維持される。

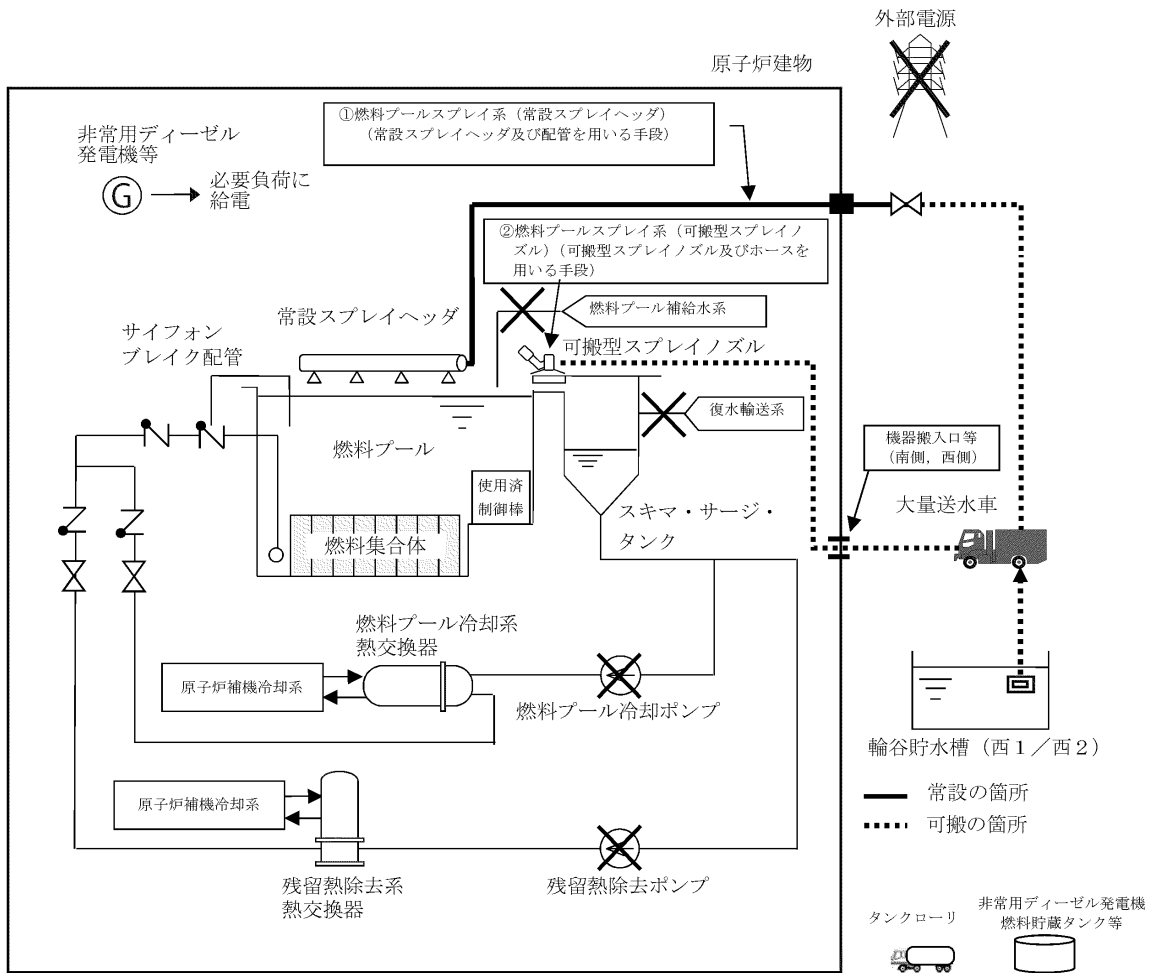
その結果、燃料棒有効長頂部の冠水、放射線の遮蔽が維持される水位の確保及び未臨界を維持できることから、評価項目を満足している。また、安定状態を維持できる。

評価条件の不確かさについて確認した結果、運転員等操作時間に与える影響及び評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

また、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間余裕について確認した結果、操作が遅れた場合でも一定の余裕がある。

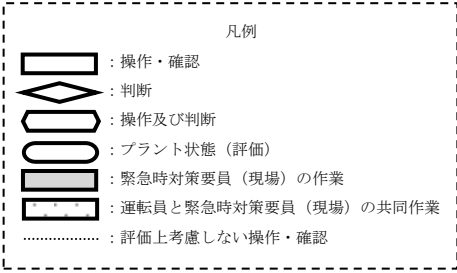
重大事故等対策時に必要な要員は、運転員及び緊急時対策要員にて確保可能である。また、必要な水源、燃料及び電源を供給可能である。

以上のことから、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水等の燃料損傷防止対策は、想定事故1に対して有効である。

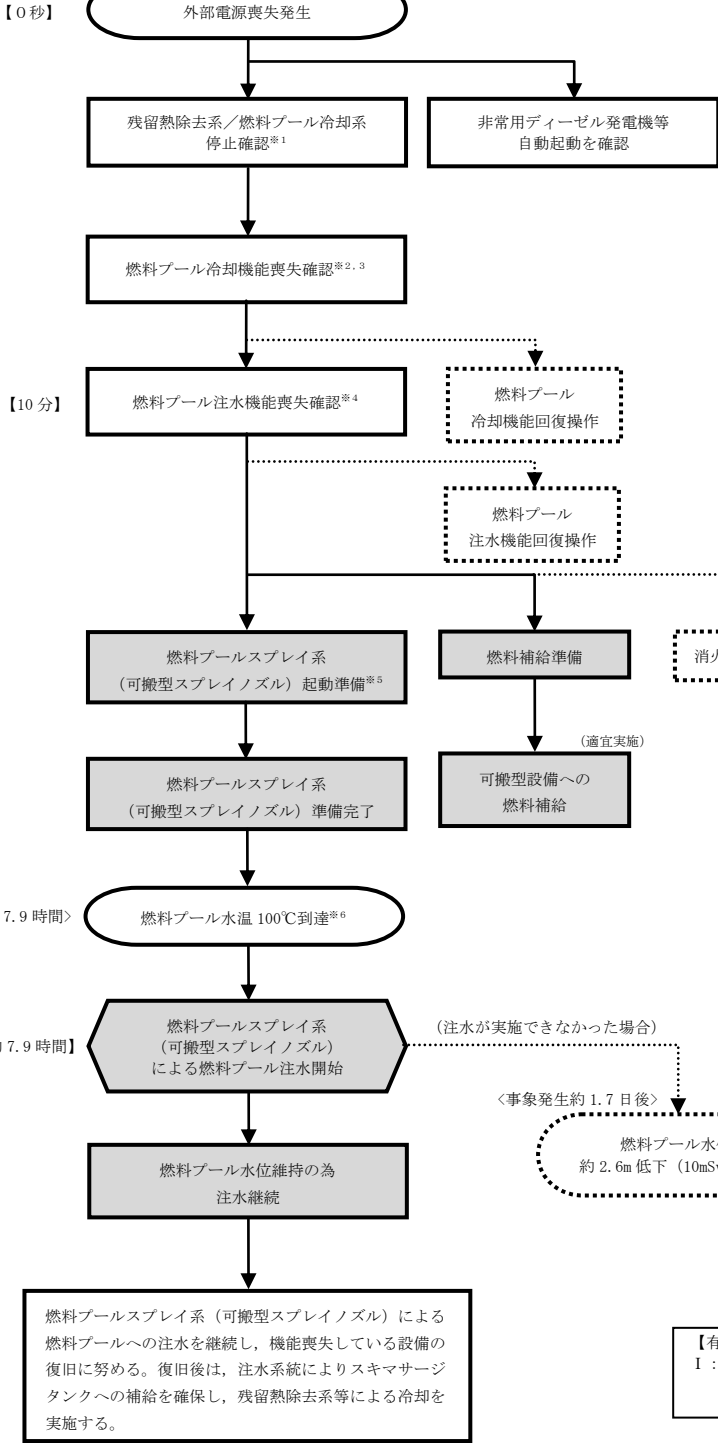


第 4.1.1-1 図 「想定事故 1」の重大事故等対策の概略系統図
(燃料プールへの注水)

プラント前提条件
 ・プラント停止後 10 日目
 ・全燃料取出し及びプールゲート「閉」



【 】 : 時刻 (評価条件)
 < > : 時刻 (評価結果)



- ※1 : 中央制御室にて各機器の停止を、燃料プール水位・温度 (SA)、状態表示ランプ、警報、ポンプ出口流量等により確認する。
- ※2 : 残留熱除去系及び燃料プール冷却系の再起動が困難な場合、燃料プールの冷却機能が喪失したことを確認する。燃料プールの冷却機能は、燃料プール水位・温度 (SA)、状態表示ランプ、警報、ポンプ出口流量等により確認する。
- ※3 : 重大事故等発生を通信連絡設備により確認した現場作業員は退避を実施する。なお、すべての作業員が退避するまでの時間は、1時間30分程度である。
- ※4 : 残留熱除去系、燃料プール補給水系及び復水輸送系の再起動が困難な場合、燃料プールの注水機能が喪失であることを確認する。燃料プールの注水機能は、燃料プール水位・温度 (SA)、状態表示ランプ、警報、ポンプ出口流量等により確認する。
- ※5 : 燃料プールへの注水は燃料プールスプレイ系 (常設スプレイヘッド) により実施する。常設スプレイヘッドによる注水ができない場合、燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレイノズル) による注水を実施する。評価上、燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレイノズル) による燃料プールへの注水を実施する。
- ※6 : 燃料プール水位・温度 (SA) にて確認する。
- ※7 : 燃料プール水位 (SA) にて確認する。

第 4.1.1-2 図 「想定事故 1」 の対応手順の概要

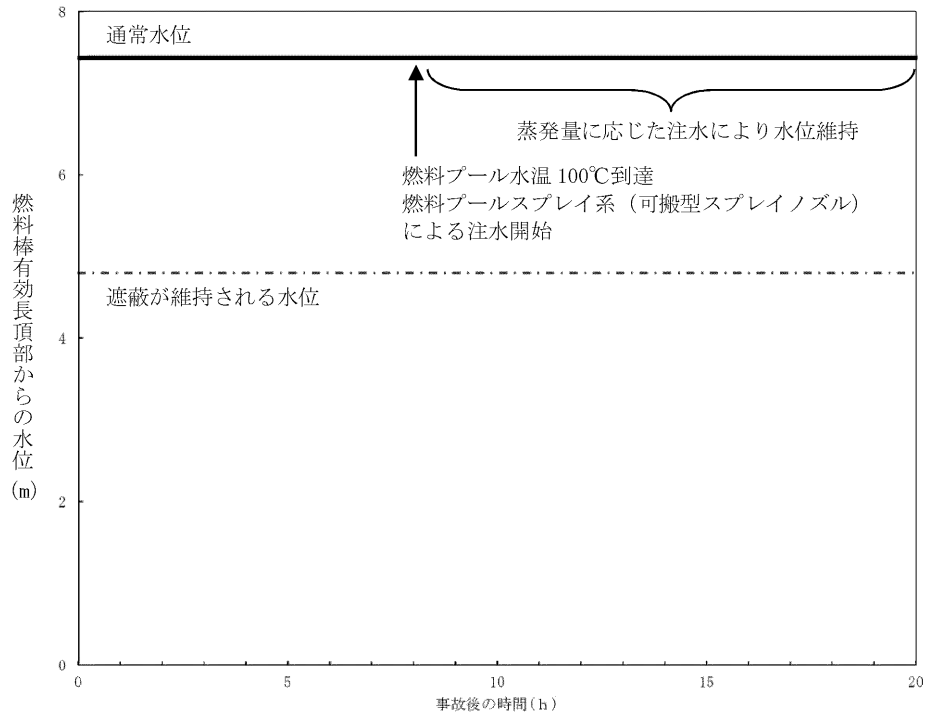
想定事故 1

操作項目	実施箇所・必要人員数				操作内容	経過時間(分)						経過時間(時間)											経過時間(日)			備考	
	責任者	当直長	1人	中央制御室監視 緊急時対策本部連絡		10	20	30	40	50	60	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	5	6	7		
状況判断	1人 A	—	—	—	・ 外部電源喪失確認 ・ 非常用ディーゼル発電機等自動起動確認 ・ 残留熱除去系停止/燃料プール冷却系停止確認 ・ 燃料プール冷却機能喪失確認 ・ 燃料プール注水機能喪失確認 ・ 燃料プール水位・温度監視	10分																					
燃料プール冷却機能回復操作	—	—	—	—	・ 残留熱除去系, 燃料プール冷却系 機能回復																						評価上考慮せず 対応可能な要員により対応する
燃料プール注水機能回復操作	—	—	—	—	・ 残留熱除去系, 燃料プール補給水系, 復水輸送系 機能回復																						評価上考慮せず 対応可能な要員により対応する
燃料プールのスプレイ系(可搬型スプレイノズル)による燃料プール注水	—	—	—	14人 a~n	・ 放射線防護具準備 ・ 大量送水車による燃料プールへの注水準備(大量送水車配置, ホース展張, 接続) ・ 原子炉建物内ホース敷設, 可搬型スプレイノズル準備	10分					2時間50分																
	—	—	—	(2人) a, b	・ 大量送水車による燃料プールへの注水																						適宜実施
燃料プールのスプレイ系(常設スプレイヘッド)による燃料プール注水	—	—	—	—	・ 大量送水車による燃料プールへの注水																						評価上考慮せず 注水不可の場合は可搬型スプレイノズルにより対応する
燃料補給準備	—	—	—	2人 o~p	・ 放射線防護具準備	10分																					
	—	—	—		・ 非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等からタンクローリへの補給							2時間30分															
燃料補給作業	—	—	—	—	・ 大量送水車への補給																						適宜実施
必要人員数 合計	1人 A	—	—	16人 a~p																							

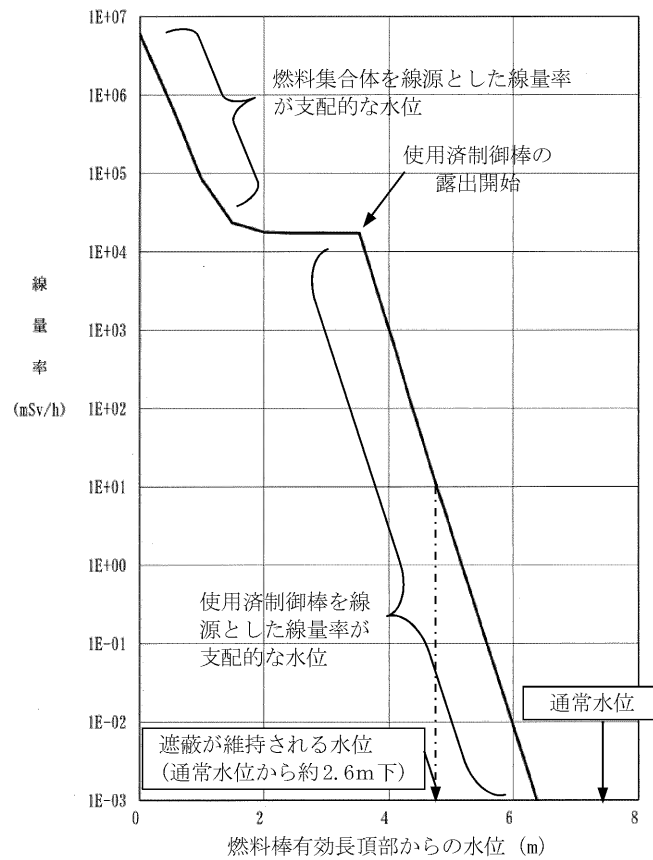
() 内の数字は他の作業終了後, 移動して対応する人員数。

原子炉運転中における燃料プールでの事故を想定した場合, 事象によっては, 原子炉における重大事故の対応と燃料プールにおける重大事故に至るおそれのある事故の対応が重畳することも考えられる。しかし, 燃料プールに貯蔵されている燃料の崩壊熱が低いことから時間余裕が十分長く(運転開始直後を考慮しても燃料プールの保有水が100℃に到達するまで1日以上), 原子炉側の事故対応が収束に向かっている状態での対応となるため, 緊急時対策要員により対応可能である。

第 4.1.1-3 図 「想定事故 1」の作業と所要時間



第 4.1.2-1 図 燃料プール水位の推移 (想定事故 1)



第 4.1.2-2 図 燃料プール水位と線量率 (想定事故 1)

第 4.1.1-1 表 「想定事故 1」の重大事故等対策について

判断及び操作	手順	重大事故等対処設備		
		常設設備	可搬型設備	計装設備
燃料プールの冷却機能喪失確認	燃料プールを冷却している系統が機能喪失することにより、燃料プール水の温度が上昇する。中央制御室からの遠隔操作により燃料プールの冷却系の再起動操作が困難な場合、燃料プールの冷却系機能喪失であることを確認する。	【非常用ディーゼル発電機】* 【非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク】*	-	【残留熱除去ポンプ出口圧力】* 【残留熱除去ポンプ出口流量】* 燃料プール水位・温度 (SA) 燃料プール水位 (SA) 燃料プール監視カメラ (SA) (燃料プール監視カメラ用冷却設備を含む。)
燃料プールの注水機能喪失確認	燃料プールの冷却系機能喪失の確認後、燃料プール水の温度上昇による蒸発により燃料プール水位が低下することが想定されるため、復水輸送系等による燃料プールへの注水準備を行う。中央制御室からの遠隔操作により燃料プールへの注水準備が困難な場合、燃料プールの注水機能喪失であることを確認する。	-	-	【残留熱除去ポンプ出口圧力】* 【残留熱除去ポンプ出口流量】* 燃料プール水位・温度 (SA) 燃料プール水位 (SA) 燃料プールエリア放射線モニタ (高レンジ・低レンジ) (SA) 燃料プール監視カメラ (SA) (燃料プール監視カメラ用冷却設備を含む。)
燃料プールスプレイス系 (常設スプレイヘッド) による燃料プールへの注水	燃料プールスプレイス系 (常設スプレイヘッド) の準備が完了したところで、燃料プールスプレイス系 (常設スプレイヘッド) による燃料プール注水により、燃料プール水位を維持する。その後は、燃料プールの冷却系を復旧しつつ、蒸発量に応じた水量を注水することで、燃料プール水位を維持する。	常設スプレイヘッド 非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等**	大量送水車 タンクローリー	燃料プール水位・温度 (SA) 燃料プール水位 (SA) 燃料プールエリア放射線モニタ (高レンジ・低レンジ) (SA) 燃料プール監視カメラ (SA) (燃料プール監視カメラ用冷却設備を含む。)
燃料プールスプレイス系 (可搬型スプレイノズル) による燃料プールへの注水	燃料プールスプレイス系 (可搬型スプレイノズル) の準備が完了したところで、燃料プールスプレイス系 (可搬型スプレイノズル) による燃料プール注水により、燃料プール水位を維持する。その後は、燃料プールの冷却系を復旧しつつ、蒸発量に応じた水量を注水することで、燃料プール水位を維持する。	非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等**	可搬型スプレイノズル 大量送水車 タンクローリー	燃料プール水位・温度 (SA) 燃料プール水位 (SA) 燃料プールエリア放射線モニタ (高レンジ・低レンジ) (SA) 燃料プール監視カメラ (SA) (燃料プール監視カメラ用冷却設備を含む。)

※：既許可の対象となっている設備を重大事故等対処設備に位置付けるもの
 【 】：重大事故等対処設備 (設計基準拡張)
 ■：有効性評価上考慮しない操作

第 4.1.2-1 表 主要評価条件 (想定事故 1)

項目	主要評価条件	条件設定の考え方
初期条件	燃料プール保有水量	保有水量を厳しく見積もるためにプールゲート閉の状況を想定
	燃料プール水位	通常水位を設定
	燃料プール水温	運転上許容される上限値として設定
	燃料の崩壊熱	原子炉停止後に最短時間 (原子炉停止後 10 日 ^{*1}) で取り出された全炉心分の燃料が、過去に取り出された貯蔵燃料と合わせて、使用済燃料貯蔵ラックに最大体数貯蔵されていることを想定し、ORI GEN 2 を用いて算出 また、原子炉停止 10 日後においては、MOX 燃料の方が 9 × 9 燃料よりも崩壊熱が大きく、燃料プール水位低下の観点で厳しいため、燃料プールにおける使用済燃料の崩壊熱は MOX 燃料を考慮
事故条件	安全機能の喪失に対する仮定	燃料プールの冷却機能及び注水機能として、燃料プール冷却系、残留熱除去系、復水輸送系等の機能喪失を設定
	外部電源	外部電源の有無は事象進展に影響しないことから、資源の観点で厳しい外部電源なしを設定
重大機器関連する条件	燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレイノズル)	燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレイノズル) による注水を想定設備の設計を踏まえて設定
	燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレイノズル) による燃料プールへの注水	燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレイノズル) による燃料プールへの注水準備は、緊急時対策要員の移動及び注水準備に必要な時間等を考慮して、事象発生 3 時間 10 分後までに完了するが、燃料プールへの注水は燃料プールの水温が 100℃ に到達することにより燃料プール水位が低下し始める事象発生約 7.9 時間後を設定

※1 島根 2 号炉の定期検査における実績を確認し、解列後の全制御棒全挿入から原子炉開放までの最短時間である約 5 日及び全燃料取り出しの最短時間約 5 日を考慮して原子炉停止後 10 日を設定。原子炉停止後 10 日とは全制御棒全挿入からの時間を示している。通常停止操作において原子炉の出力は全制御棒全挿入完了及び発電機解列以前から徐々に低下させるが、崩壊熱評価はスクラムのような瞬間に出力を低下させる保守的な計算条件となっている。

※2 燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレイノズル) 及び燃料プールスプレイ系 (常設スプレイヘッド) の注水容量はともに 48m³/h 以上である。

燃料プールの水位低下と遮蔽水位に関する評価について

1. 燃料プールの概要

図1に燃料プール等の平面図を示す。

定期事業者検査時において、多くの場合はプールゲートが開放され、燃料プールは原子炉ウェル、蒸気乾燥器・気水分離器ピット（以下「DSP」という。）、キャスク仮置ピットと繋がっているが、有効性評価においては、プールゲートを閉鎖している場合を想定し、原子炉ウェル、DSP及びキャスク仮置ピットの保有水量は考慮しない。

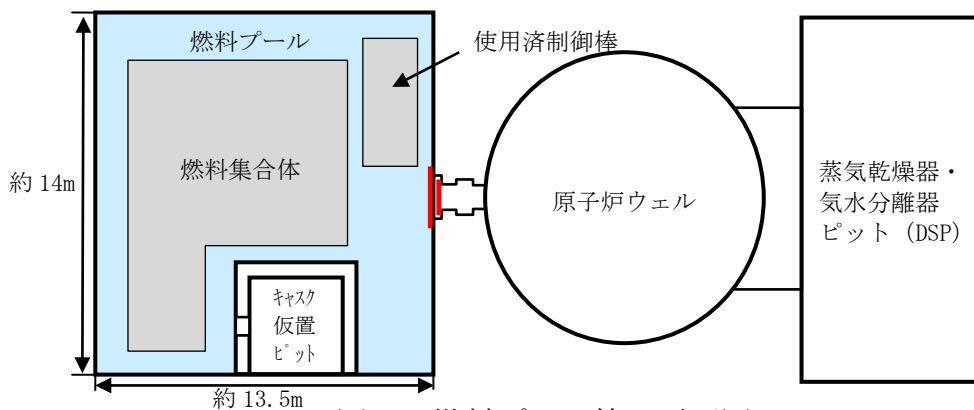


図1 燃料プール等の平面図

2. 放射線の遮蔽の維持に必要な燃料プールの遮蔽水位について

図2に放射線の遮蔽の維持に必要な燃料プールの遮蔽水位について示す。

放射線の遮蔽の維持に必要な燃料プールの遮蔽水位は、その状況（必要となる現場及び操作する時間）によって異なる。重大事故等であることを考慮し、例えば10mSv/hの場合は、通常水位から約2.6m^{*}下の位置より高い遮蔽水位が必要である。

※ 放射線の遮蔽の維持に必要な燃料プール水位の算出方法については添付資料4.1.2に示す。

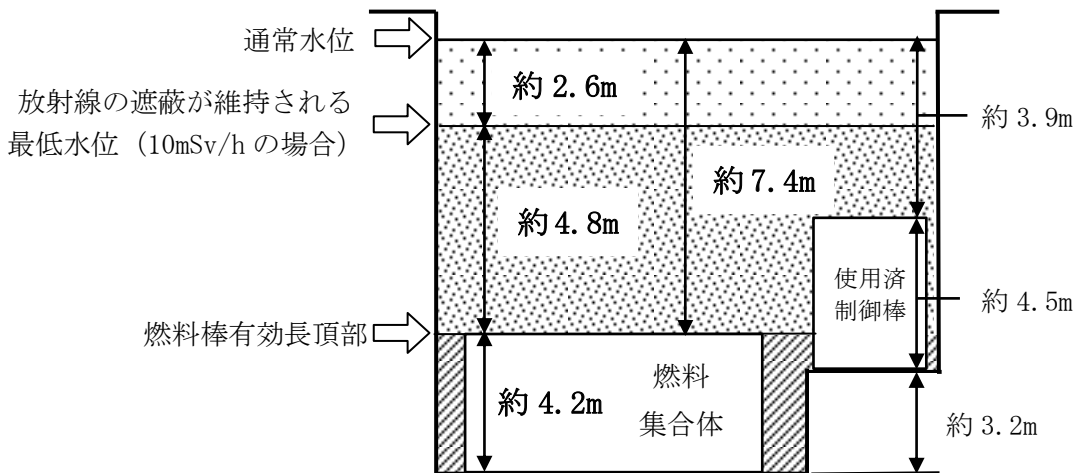


図2 放射線の遮蔽の維持に必要な燃料プールの遮蔽水位

3. 燃料プールの構造高さ、断面積及び保有水の容積について

図3に燃料プールの構造高さを、表1に燃料プールの断面積及び保有水の容積を示す。

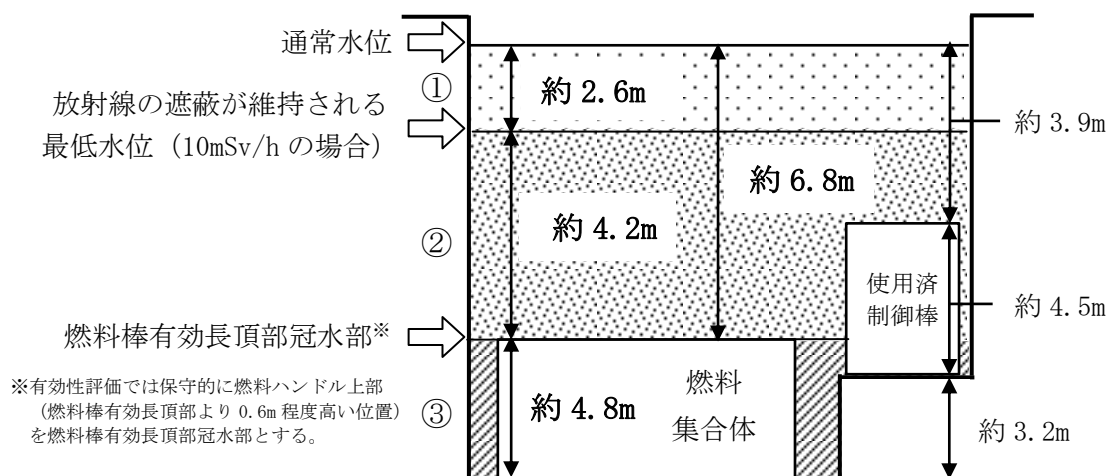


図3 島根2号炉の燃料プールの構造高さ

表1 燃料プールの断面積及び保有水の容積

領域	断面積 (m ²)	保有水の容積 (m ³)
①	約 167	約 439
②	約 167	約 704
③	約 95	約 456
合計		約 1,599

図3に示す各領域①～③の保有水の容積は、燃料プール容積から燃料プール内の機器の容積を差し引くことで算出し、各領域の断面積については、①の領域では燃料プールの寸法より求めた断面積を使用し、②、③の領域では求めた各領域の容積から高さで除して求めた。なお、燃料プールの断面積については各領域での平均的な値を示しているが、燃料プール内に設置されている機器は領域②又は領域③のプール下部であるため、保有水量に対する水位の低下という観点で保守的な評価となっている。

4. 想定事故1における時間余裕

燃料プールの冷却機能及び注水機能の喪失時における崩壊熱による燃料プール水位の沸騰までの時間、沸騰開始後の水位低下時間及び沸騰による水位低下平均速度について、以下の式を用いて評価を行った。事象を保守的に評価するため、燃料プールの初期水温は、運転上許容される上限値である65℃とする。また、発生する崩壊熱はすべて燃料プールの水温上昇及び蒸発に寄与するものとし、燃料プールの水面、壁面等からの放熱は考慮しない。

○評価方法及び評価条件

①冷却機能喪失から沸騰（燃料プール水100℃到達）までの時間

沸騰までの時間(h)=

$$\frac{(100[^\circ\text{C}]-65[^\circ\text{C}]) \times \text{燃料プール保有水の比熱}[\text{kJ/kg/}^\circ\text{C}]^{*1} \times \text{燃料プール水量}[\text{m}^3] \times \text{燃料プール水密度}[\text{kg/m}^3]^{*2}}{\text{燃料崩壊熱}[\text{MW}] \times 10^3 \times 3600}$$

②沸騰による蒸発量と沸騰開始から燃料棒有効長頂部冠水部まで水位が低下するまでの時間

$$1 \text{ 時間当たりの沸騰による蒸発量}[\text{m}^3/\text{h}] = \frac{\text{燃料崩壊熱}[\text{MW}] \times 10^3 \times 3600}{\text{燃料プール水密度}[\text{kg/m}^3]^{*2} \times \text{蒸発潜熱}[\text{kJ/kg}]^{*3}}$$

水位低下時間[h]=

$$\frac{\text{通常水位から燃料棒有効長頂部冠水部までの燃料プール水量}[\text{m}^3] \times \text{燃料プール水密度}[\text{kg/m}^3]^{*2} \times \text{蒸発潜熱}[\text{kJ/kg}]^{*3}}{\text{燃料崩壊熱}[\text{MW}] \times 10^3 \times 3600}$$

③沸騰による燃料プール水位の低下平均速度

$$\text{水位低下速度}[\text{m/h}] = \frac{\text{通常水位から燃料棒有効長頂部冠水部までの高低差}[\text{m}]}{\text{通常水位から燃料棒有効長頂部冠水部までの水位低下にかかる時間}[\text{h}]}$$

燃料プールの下部は機器等が設置されており、保有水が少ないため、燃料プールの下部では水位低下速度は早く、燃料プール上部では水位低下速度は遅い。燃料棒有効長頂部に水位が到達するまでの時間評価では、保守的に一律の水位低下速度を想定する。

表2 評価に使用する値

プール保有水の比熱 ^{※1} (kJ/kg/°C)	プール水量 (m ³)	プール水密度 ^{※2} (kg/m ³)	燃料の崩壊熱 (MW)
4.185	約 1,599	958	約 7.8

蒸発潜熱 ^{※3} (kJ/Kg)	通常水位から燃料棒有効長頂部冠水部までのプール水量 ^{※4} (m ³)	通常水位から燃料棒有効長頂部冠水部までの高低差 (m)	通常水位から 2.6m 下までのプール水量 (m ³)
2,256.47	約 1,143	約 6.8	約 439

※1：65°Cから100°Cまでの飽和水の比熱のうち、最小となる65°Cの値を採用。

(1999年蒸気表より)

※2：65°Cから100°Cまでの飽和水の密度のうち、最小となる100°Cの値を採用。

(1999年蒸気表より)

※3：100°Cの飽和水のエンタルピと100°Cの飽和蒸気のエンタルピの差より算出。

(1999年蒸気表より)

※4：保有水量の算出では燃料棒有効長頂部冠水部として燃料ハンドル上部（燃料棒有効長頂部より0.6m程度高い位置）を設定

なお、①～③の式による算出については以下の保守的な仮定及び非保守的な仮定に基づく評価である。

<保守的な仮定>

- ・燃料プール水温の温度変化に対する比熱及び密度の評価にて、時間を短く評価する最も厳しくなる値を想定している。
- ・燃料プールの水面、壁面等からの放熱を考慮せず、崩壊熱がすべて燃料プール水温上昇及び蒸発に寄与するものとしている。

<非保守的な仮定>

- ・簡易的な評価とするために燃料プール水温をすべて均一の温度とし、プール全体が100°Cに到達した時間を沸騰開始としており、燃料プール水温の非一様性を考慮していない。なお、発熱源は燃料プール下方に位置する燃料集合体であり、自然対流の効果により非一様性は緩和される。

非保守的な仮定を設定することを踏まえ、事象発生直後から沸騰による燃料プール水位の低下が開始すると想定した場合の評価についても実施する。

なお、注水等の操作時間余裕は十分に大きいことからこれらの評価の仮定による影響は無視できる程度であると考えられる。

表3 評価結果

項目	算定結果
燃料プール水温が 100℃に到達するまでの時間 (h)	約 7.9
燃料の崩壊熱による燃料プール保有水の蒸発量 (m ³ /h)	約 13
燃料プール水位が通常水位から約 2.6m 低下するまでの時間 (day)	約 1.7
燃料棒有効長頂部冠水部まで燃料プール水位が低下するまでの時間 (day)	約 3.9
燃料プール水位の低下速度 (m/h)	約 0.08

燃料プールの冷却機能が喪失した場合、燃料の崩壊熱により燃料プール水温が上昇し、事象発生から約 7.9 時間後に沸騰が開始され、蒸発により燃料プールの水位低下が始まる。この時の蒸発量は、約 13m³/h である。

よって、燃料プール水位が放射線の遮蔽に必要な通常水位から約 2.6m(10mSv/h の場合)下の位置まで低下するまでの時間は、事象発生から約 1.7 日後であり、重大事故等対策として期待する燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による注水操作の時間余裕は十分にある。

<参考>

有効性評価では崩壊熱が厳しい定期事業者検査中に全炉心燃料が燃料プールに取り出される想定であり、通常運転中の想定は以下のとおりとなる。

燃料プールの冷却機能が喪失した場合、燃料の崩壊熱により燃料プール水温が上昇し、事象発生から約 1.1 日後に沸騰が開始され、その後燃料プール水位が放射線の遮蔽に必要な通常水位から約 2.6m(10mSv/h の場合)下の位置まで低下するまでの時間は、事象発生から約 6.1 日後となる。このように原子炉運転中の燃料プールは、原子炉停止中の燃料プールに比べてさらに長い時間余裕がある。

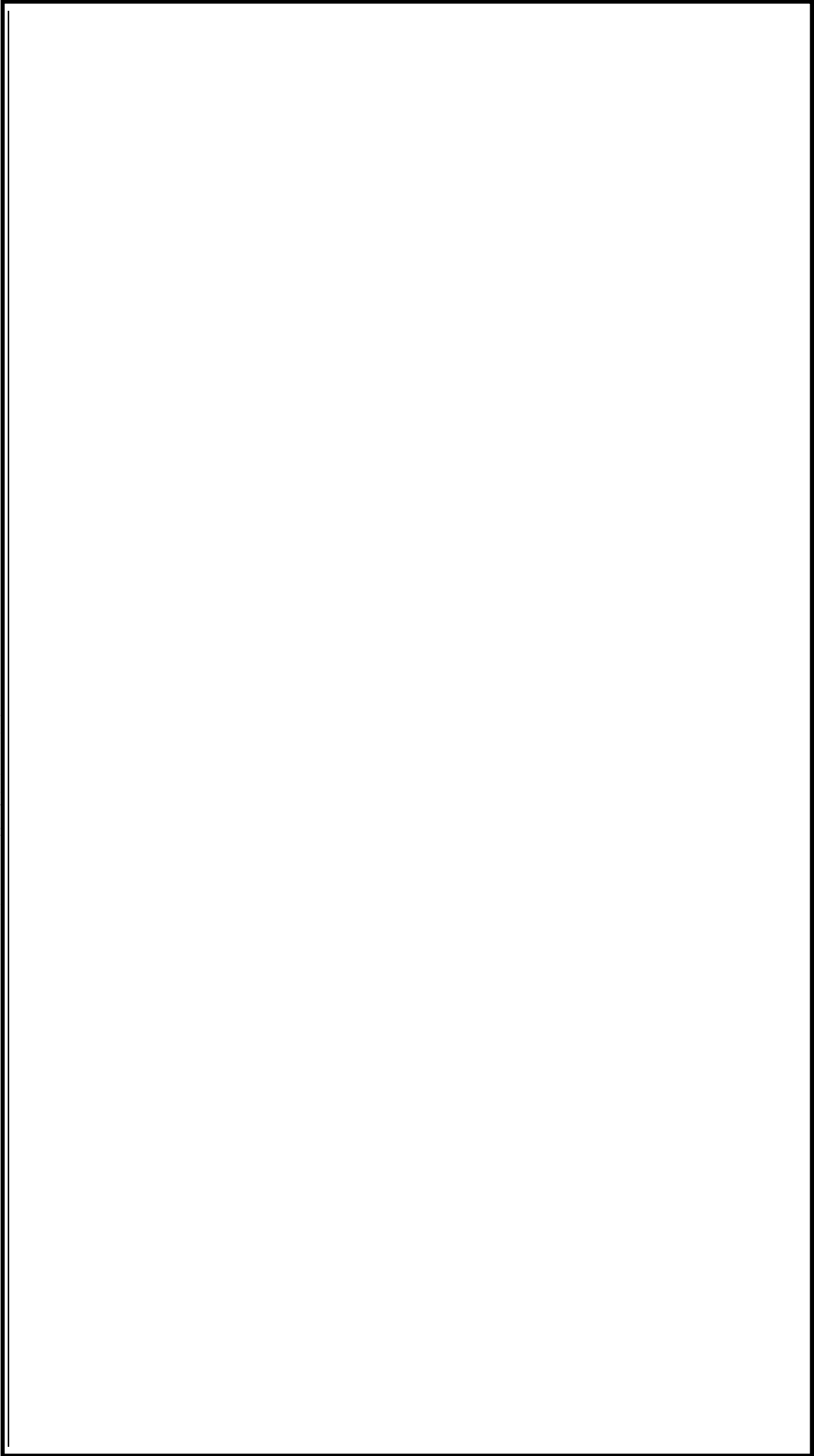
表4 通常運転中の想定**

項目	算定結果
燃料の崩壊熱 (MW)	約 2.2
燃料プール水温が 100℃に到達するまでの時間 (day)	約 1.1
崩壊熱による燃料プール保有水の蒸発量 (m ³ /h)	約 3.7
燃料プール水位が通常水位から約 2.6m 低下するまでの時間 (day)	約 6.1
燃料棒有効長頂部冠水部まで燃料プール水位が低下するまでの時間 (day)	約 14
燃料プール水位の低下速度 (m/h)	約 0.03

※燃料プールの初期水温は保守的に有効性評価での想定と同様の 65℃とした。

5. 燃料取り出しスキーム

表5 燃料取り出しスキーム



本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

「水遮蔽厚に対する貯蔵中の燃料等からの線量率」の評価について

1. 燃料集合体の評価条件

燃料プール内の使用済燃料貯蔵ラックに燃料がすべて満たされた状態を仮定し、その時の燃料集合体を線源とする。

評価条件を以下に示す。

- 線源形状：燃料プール内の使用済燃料貯蔵ラックに燃料がすべて満たされた状態
- 線源材質：燃料集合体及び水を考慮（密度： g/cm³）
- ガンマ線エネルギー：評価に使用するガンマ線は、エネルギー4群とする。
- 線源強度：文献^{※1}に記載のエネルギーあたりの線源強度を基に、9×9燃料（A型）の体積あたりの線源強度を式①で算出した。

$$\text{線源強度 (cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}\text{)} = \frac{\text{文献に記載の線源強度 (MeV} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \times \text{燃料集合体あたりの熱出力 (W/体)} \dots \text{①}}{\text{各群のエネルギー (MeV)} \times \text{燃料集合体体積 (cm}^3\text{/体)}$$

このときの線源条件は以下とする。なお、本評価で使用している線源強度（文献値）に対する燃料照射期間は10⁶時間（約114年）であり、島根2号炉の燃料照射期間を十分に包絡している。

- ・燃料照射期間：10⁶時間（無限照射）
- ・停止後の期間^{※2}：10日（実績を考慮した値を設定）
- ・燃料集合体あたりの熱出力：4.35MW/体（9×9燃料（A型））
- ・燃料集合体体積：約7.1×10⁴ cm³（9×9燃料（A型））

※1 Blizard E. P. and Abbott L. S., ed., “REACTOR HANDBOOK. 2nd ed. Vol. III Part B, SHIELDING”, INTERSCIENCE PUBLISHERS, New York, London, 1962”

※2 原子炉停止後10日とは全制御棒全挿入からの時間を示している。通常停止操作において原子炉の出力は全制御棒全挿入完了及び発電機解列以前から徐々に低下させるが、線源強度評価は崩壊熱評価と同様にスクラムのような瞬時に出力を低下させる保守的な評価条件となっている。

○評価モデル：直方体線源

線量率評価は、QAD-CGGP2Rコードを用いており、その評価モデルを図1に示す。また、評価により求めた線源強度を表1に示す。

なお、評価モデルにおいては、燃料棒有効長以外の構造体は評価対象に含めていないが、実際の燃料集合体では、燃料棒有効長以外の構造体（上部タイプ

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

レート等)においても、放射化等により線源を有している。しかしながら、燃料棒有効長以外の構造体の線源強度は、燃料棒有効長に比べて十分小さいと考えられる。本線量評価は、燃料プールにおいて放射線の遮蔽が維持される水位を評価するものであり、放射線の遮蔽が維持される水位（通常水位から約 2.6m 下）においては、燃料集合体由来の線量率は小さく（図 7 参照）、線量率全体の 0.1%未満の寄与であるため、評価結果に対する燃料棒有効長以外の構造体からの影響は十分に無視できる。

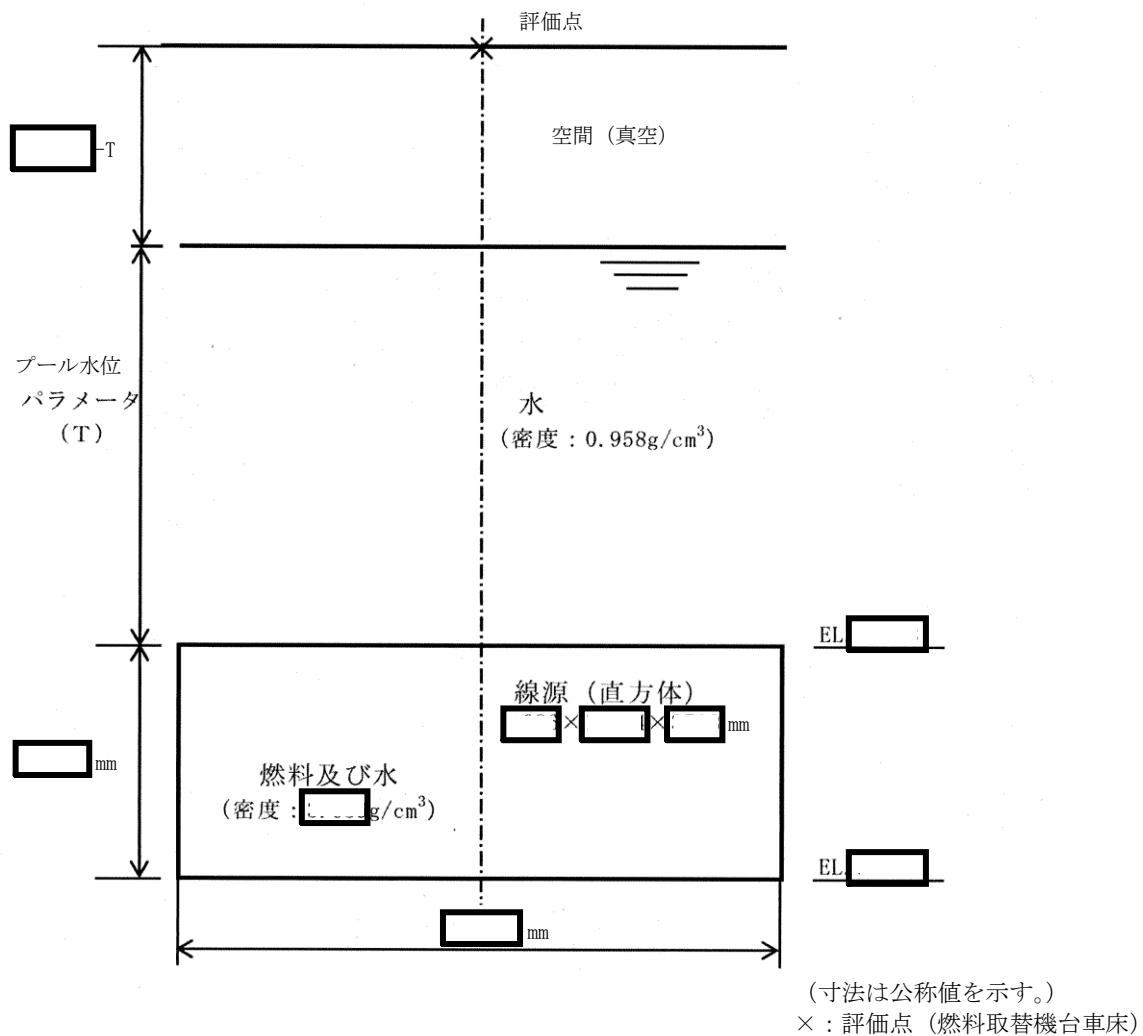


図1 燃料集合体の線量率評価モデル

表1 燃料集合体の線源強度

群	ガンマ線 エネルギー (MeV)	線源強度 ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1.0	4.3×10^{11}
2	2.0	7.3×10^{10}
3	3.0	1.2×10^9
4	4.0	2.6×10^7

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

2. 使用済制御棒の評価条件

燃料プール内の使用済制御棒を線源とする評価条件を以下に示す。

○線源形状 : 燃料プール内の制御棒貯蔵ハンガのすべてに使用済制御棒が満たされた状態

○線源材料 : 水 (密度 : $0.958\text{g}/\text{cm}^3$ ※)

※ 65°C から 100°C までの飽和水の密度のうち, 最小となる 100°C の値を採用

○ガンマ線エネルギー : 評価に使用するガンマ線はエネルギー 18 群 (ORIGEN 群構造) とする。

○線源強度 : 使用済制御棒を高さ方向に 3 領域に分割し, 使用済制御棒上部は上部ローラを, 使用済制御棒中間部は中性子吸収材を, 使用済制御棒下部は下部ローラを代表としてモデル化している。使用済制御棒中間部は制御棒を挿入時のみ, 使用済制御棒上部は挿入時と引き抜き時の間, 中性子が照射されるものとする。

照射期間については, 制御棒挿入時に照射される制御棒はすべて H f 型制御棒とし, 制御棒照射量制限値 (H f 型 :) を炉中央の平均熱中性子フラックスで除した値とした。制御棒引き抜き時に照射される制御棒はすべて B_4C 型制御棒とし, 制御棒照射量制限値 (B_4C 型 :) を炉底部熱中性子フラックスで除した値とした。また, 使用済制御棒下部は使用済制御棒上部と同じ線源強度とする。

また, 燃料プールには, タイプ別でかつ, 冷却期間の異なる使用済制御棒が混在して貯蔵されていることを想定し, 貯蔵使用済制御棒全体の放射能を保存して平均した線源強度を式②により算出した。

$$\text{平均線源強度} = \frac{\sum \{ (\text{制御棒タイプ} \cdot \text{冷却期間別の線源強度}) \times (\text{制御棒タイプ} \cdot \text{冷却期間別の保管本数}) \}}{\text{全貯蔵本数}} \quad \dots \text{②}$$

制御棒タイプは H f 型, B_4C 型の 2 タイプ, 冷却期間は 0 ~ 10 サイクルの 11 種類, 全貯蔵本数は 144 本とした。

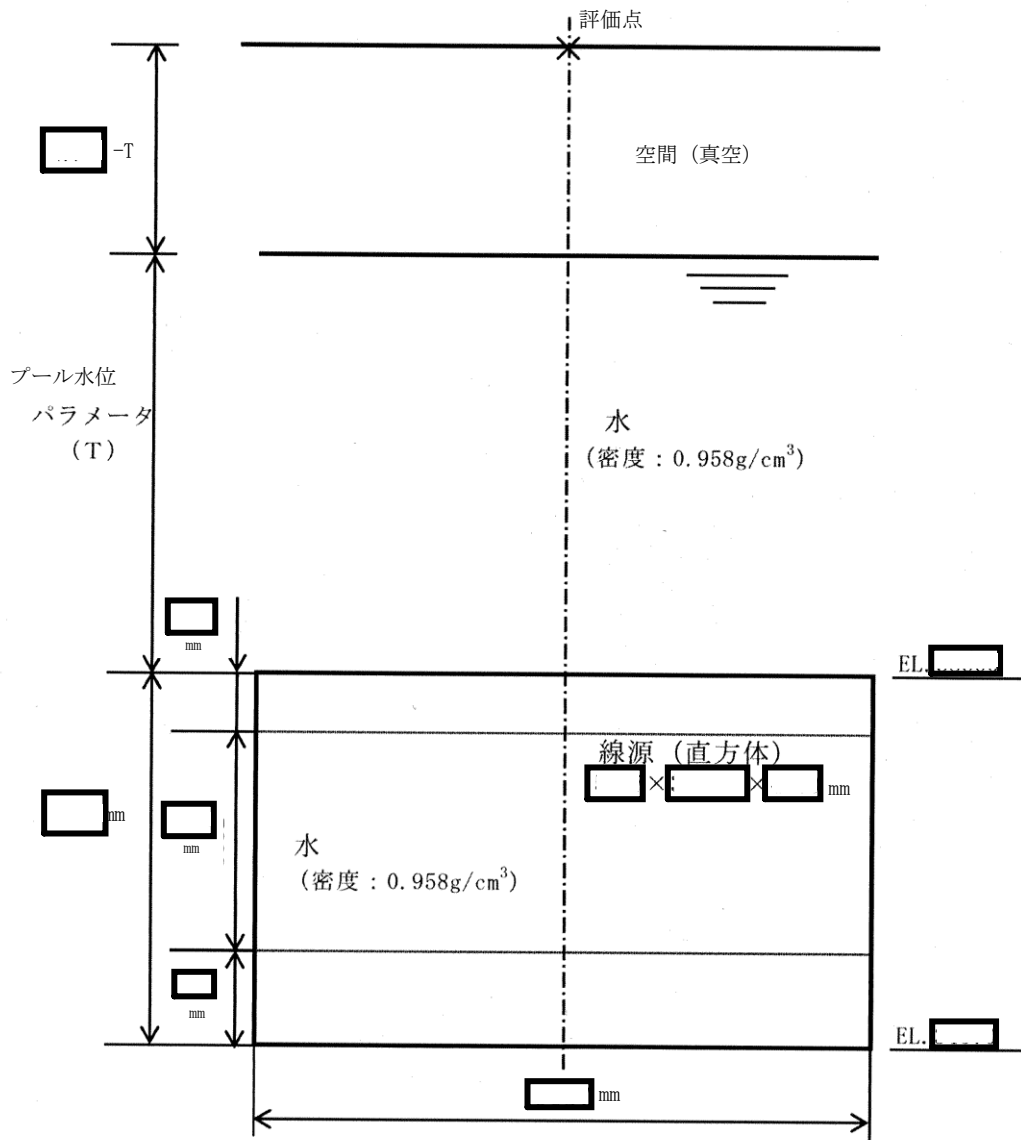
使用済制御棒の内訳は表 2 に示すとおり, 定期検査ごとに取り出された照射済制御棒の本数の実績を参考に, 貯蔵数が最大となるように毎サイクル H f 型と B_4C 型制御棒がそれぞれ取り出されることを想定した。

○評価モデル : 直方体線源

線量率評価は, QAD-CGGP 2 R コードを用いておりその評価モデルを図 2 に示す。また, 評価により求めた線源強度を表 3 に示す。

表2 制御棒のタイプ別，冷却期間別の貯蔵本数

タイプ	冷却期間 (サイクル)	冷却期間 (day)	本数 (本)
H f 型 制御棒	0	10	9
	1	506	4
	2	1002	4
	3	1498	4
	4	1994	4
	5	2490	4
	6	2986	4
	7	3482	4
	8	3978	4
	9	4474	4
	10	4970	5
B ₄ C型 制御棒	0	10	12
	1	506	8
	2	1002	8
	3	1498	8
	4	1994	8
	5	2490	8
	6	2986	8
	7	3482	8
	8	3978	8
	9	4474	8
	10	4970	10



(寸法は公称値を示す。)
 ×：評価点 (燃料取替機台車床)

図2 使用済制御棒の線量率評価モデル

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表3 使用済制御棒の線源強度

群	ガンマ線 エネルギー (MeV)	制御棒上部 線源強度 ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)	制御棒中間部 線源強度 ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)	制御棒下部 線源強度 ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1.00×10^{-2}	1.08×10^6	1.03×10^9	1.08×10^6
2	2.50×10^{-2}	8.86×10^3	7.92×10^6	8.86×10^3
3	3.75×10^{-2}	5.94×10^3	9.99×10^6	5.94×10^3
4	5.75×10^{-2}	6.88×10^3	2.84×10^9	6.88×10^3
5	8.50×10^{-2}	3.64×10^3	5.66×10^7	3.64×10^3
6	1.25×10^{-1}	5.18×10^3	3.74×10^9	5.18×10^3
7	2.25×10^{-1}	5.31×10^3	1.73×10^8	5.31×10^3
8	3.75×10^{-1}	2.70×10^5	8.58×10^8	2.70×10^5
9	5.75×10^{-1}	1.06×10^6	4.83×10^9	1.06×10^6
10	8.50×10^{-1}	3.81×10^6	1.27×10^7	3.81×10^6
11	1.25×10^0	1.14×10^7	6.23×10^8	1.14×10^7
12	1.75×10^0	1.97×10^4	2.53×10^3	1.97×10^4
13	2.25×10^0	6.05×10^1	2.23×10^2	6.05×10^1
14	2.75×10^0	4.30×10^{-1}	8.88×10^1	4.30×10^{-1}
15	3.50×10^0	1.66×10^{-4}	7.86×10^{-1}	1.66×10^{-4}
16	5.00×10^0	1.73×10^{-6}	8.30×10^{-6}	1.73×10^{-6}
17	7.00×10^0	0.00×10^0	9.33×10^{-7}	0.00×10^0
18	9.50×10^0	0.00×10^0	1.07×10^{-7}	0.00×10^0
合計		1.77×10^7	1.42×10^{10}	1.77×10^7

○使用済制御棒の冠水時及び露出時の線量率評価モデルについて

使用済制御棒は次に示すようにステンレスの制御棒貯蔵ハンガにハンドル部を通して格納されている。評価ではこの構造材を含めた使用済制御棒設置箇所を直方体の線源としてモデル化している（図3）。本来線源が存在しない使用済制御棒間にも線源が存在する想定をすることで、線源の体積としては約1.9倍となることから、実際よりも保守的なモデルとしている（図4）。

遮蔽評価をする際、線源材料にも密度を設定することで自己遮蔽等の評価を行う。本評価ではこちらの設定を使用済制御棒が冠水時(①)、一部露出時(②)、露出時(③)のいずれにおいても遮蔽性能の低い水として評価している。

実機体系では、露出時(③)において使用済制御棒間等は気中であるが、使用済制御棒はステンレスや炭化ホウ素（またはハフニウム）等で構成されるため、それらの自己遮蔽効果を期待できる。評価モデル上はこれらを一様に水として評価しているが、ステンレスや炭化ホウ素等の自己遮蔽効果が高いことに加え、線源以外にも制御棒貯蔵ハンガのような構造材があり、それらの遮蔽効果により保守性を確保している。

冠水時(①)、一部露出時(②)の状態においては使用済制御棒等の遮蔽効果に加えて、制御棒間の隙間等の気中であった箇所に水が入る為、遮蔽効果はさらに高まるが、評価においては露出時(③)と同様、水と設定して評価をすることでさらに保守的なモデルとなっている。

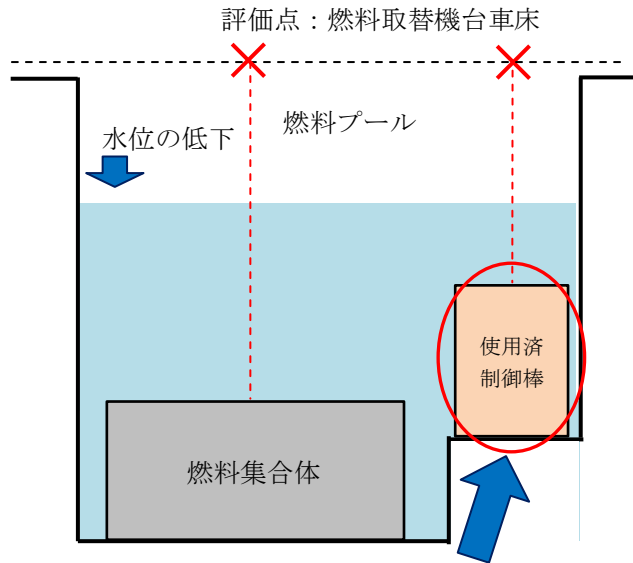
評価結果において、水位低下により使用済制御棒の露出が開始した際の現場の線量率と、完全に露出した後の現場の線量率にあまり差異がないことは、評価で上記に示すとおり冠水時(①)と露出時(③)を等しく、線源を水として評価しているためである（図5）。

<参考>

一例としてCo-60を線源とした時のガンマ線の実効線量透過率の1/10価層は水であると約70cmであるのに対して、鉄（密度：7.86g/cm³）であると約9cmとなり、これらの遮蔽性能が水と比べて大きいことが分かる。

参考文献：アイソトープ手帳11版 公益社団法人日本アイソトープ協会

各線源の真上に燃料取替機台車床があると仮定した場合の距離を設定し，各評価点での線量率を合計



水位低下時での制御棒の線源モデル方法について以降に詳細を示す

図3 燃料プール概要図

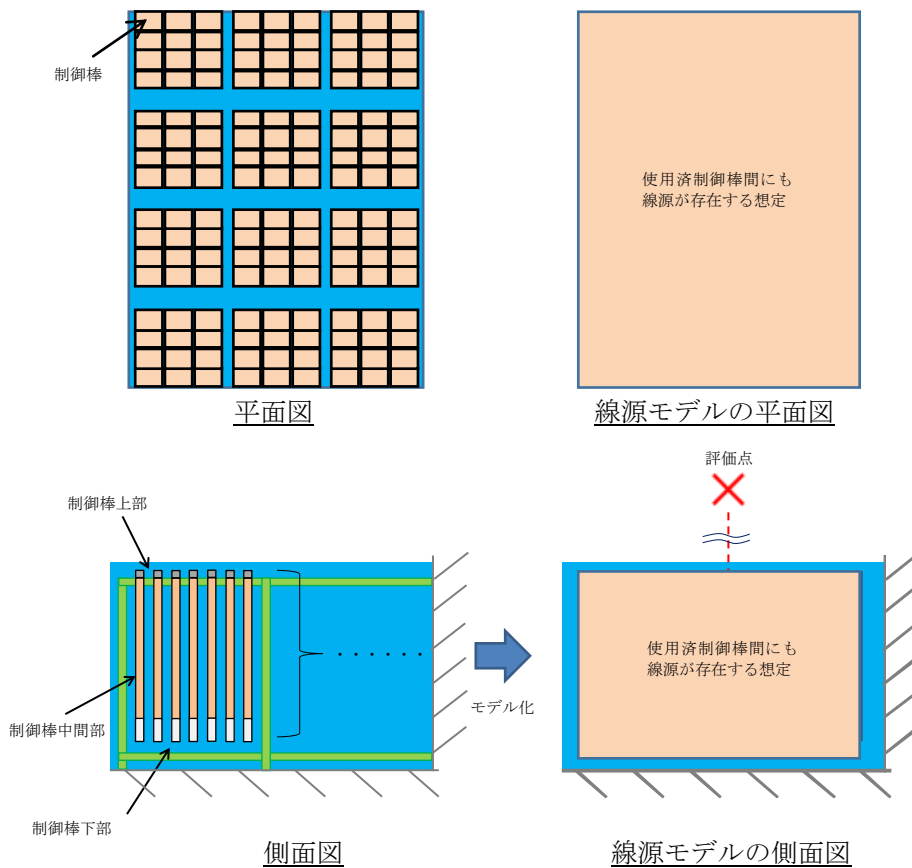
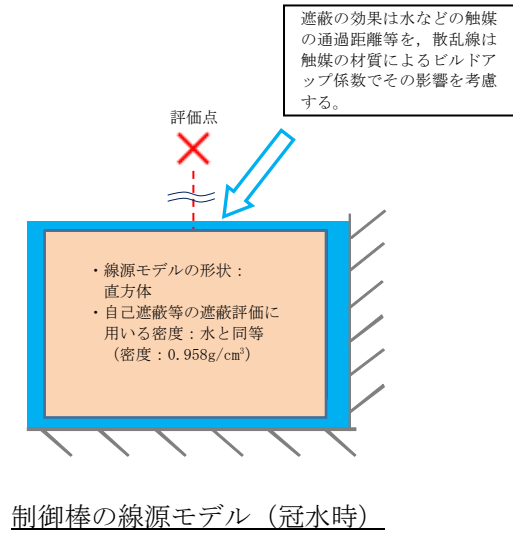
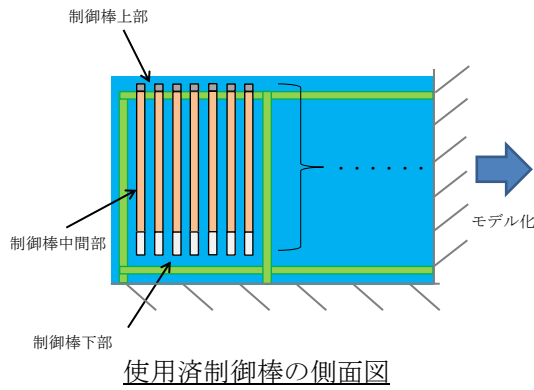
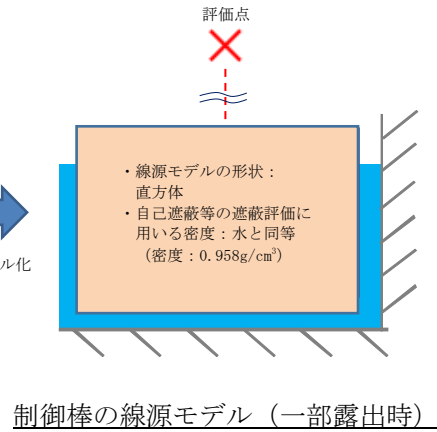
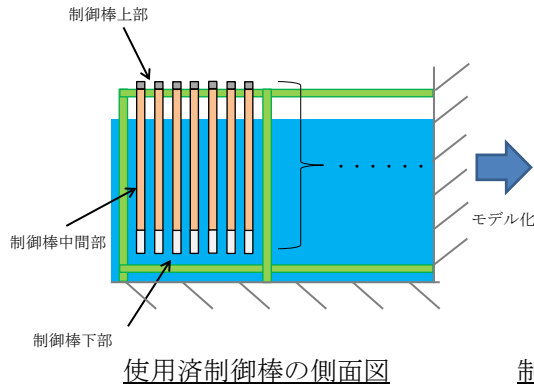


図4 使用済制御棒の線量率評価モデル

①冠水時



②一部露出時



③露出時

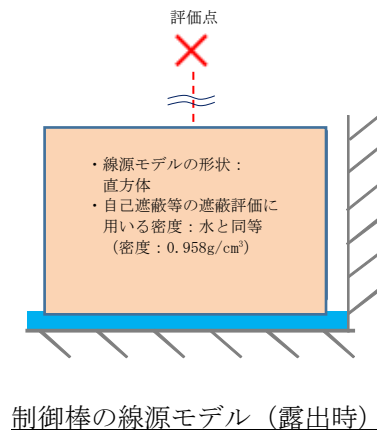
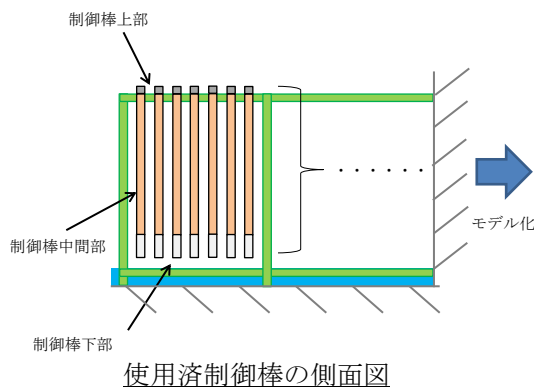


図5 使用済制御棒の冠水時及び露出時の線量率評価モデル

3. 線量率の評価

線量率は、QAD-CGGP2Rコードを用いて評価している。

一般的に点減衰核積分法では、線源領域を細分化し点線源で近似を行い、各点線源から評価点までの媒質の通過距離から非散乱ガンマ線束を求める。これにビルドアップ係数を掛け、線源領域全空間で積分した後、線量率換算係数を掛けることで評価点での線量率を求める。

QAD-CGGP2Rコードでは、式③を用い、線量率を評価している。図6にQAD-CGGP2Rコードの評価体系を示す。

$$D_j = \sum_i F_j \cdot \frac{S_{ij}}{4 \cdot \pi \cdot R_i^2} \cdot e^{\left(-\sum_k \mu_k \cdot t_k\right)} \cdot B_{ij} \dots \textcircled{3}$$

j : エネルギー群番号

i : 線源点番号

k : 領域番号 (遮蔽領域)

F_j : 線量率換算係数

S_{ij} : i 番目の線源点で代表される領域の体積で重みづけされたエネルギー j 群の点線源強度

R_i : i 番目の線源点と計算点の距離

B_{ij} : ビルドアップ係数

μ_{jk} : 領域 k におけるエネルギー j 群の γ 線に対する線吸収係数

t_k : 領域 k を γ 線が透過する距離

これにより求められたエネルギー第 j 群の線量率 D_j から、すべての線源エネルギー群について加えることによって全線量率を評価している。

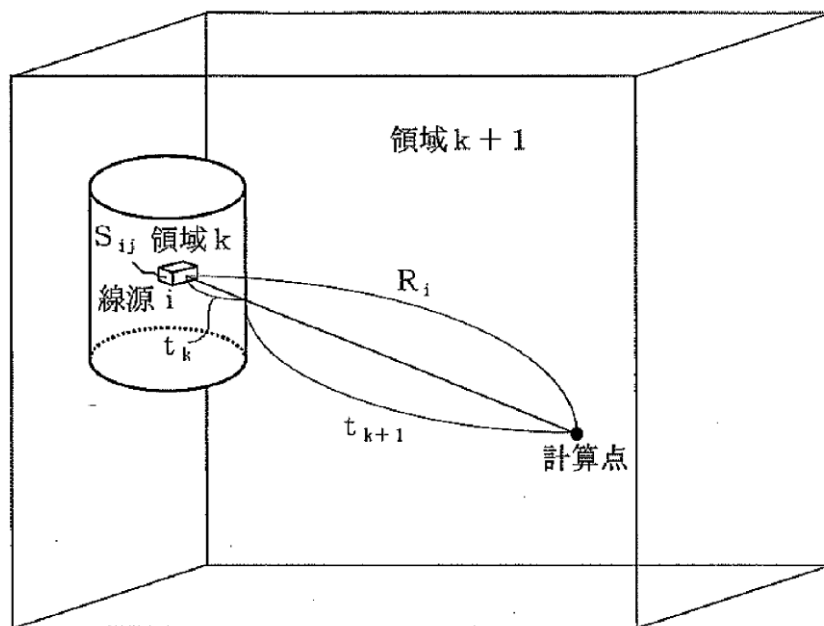


図6 QAD-CGGP2Rコードの評価体系

4. 線量率を求める際の評価点と放射線遮蔽が維持される水位について

(1) 線量率を求める際の評価点

線源からの線量率を求める際に設定する評価点は、燃料プールの上部にあ
る燃料取替機台車床とした。なお、評価では図1及び図2の線量率評価モデル
に示すようにプール躯体による遮蔽は考慮せず、線源から評価点までの距離を
入力として評価している。

(2) 放射線の遮蔽が維持される水位

想定事故1, 2及び運転停止中の各有効性評価において、原子炉建物原子炉
棟4階での緊急時対策要員による作業時間並びに現場作業員の退避は2時間
以内であり、必要な放射線の遮蔽の目安を10mSv/hとすると作業員の被ばく量
は最大でも20mSvとなるため、緊急作業時における被ばく限度の100mSvに対
して余裕のある値である。目安とした線量率は後述する定期検査作業時での原
子炉建物原子炉棟4階における現場線量率の実績値についても考慮した値で
ある。(詳細については「<補足>必要な遮蔽の目安とした10mSv/hの設定に
ついて」を参照)。

想定事故1, 2での必要な遮蔽水位は図7より約4.8mとなり、開始水位から
約2.6m低下した水位である。なお、通常時であっても作業によって現場線量
率が上昇することが考えられる。原子炉建物原子炉棟4階における作業の例と
して、蒸気乾燥器の取り外し作業の実績は、約1mSv/h(設置する遮蔽体の遮
蔽効果に期待した場合の値を示す、設置する遮蔽体の遮蔽効果に期待しない場
合は約2.6mSv/hとなる)であった。

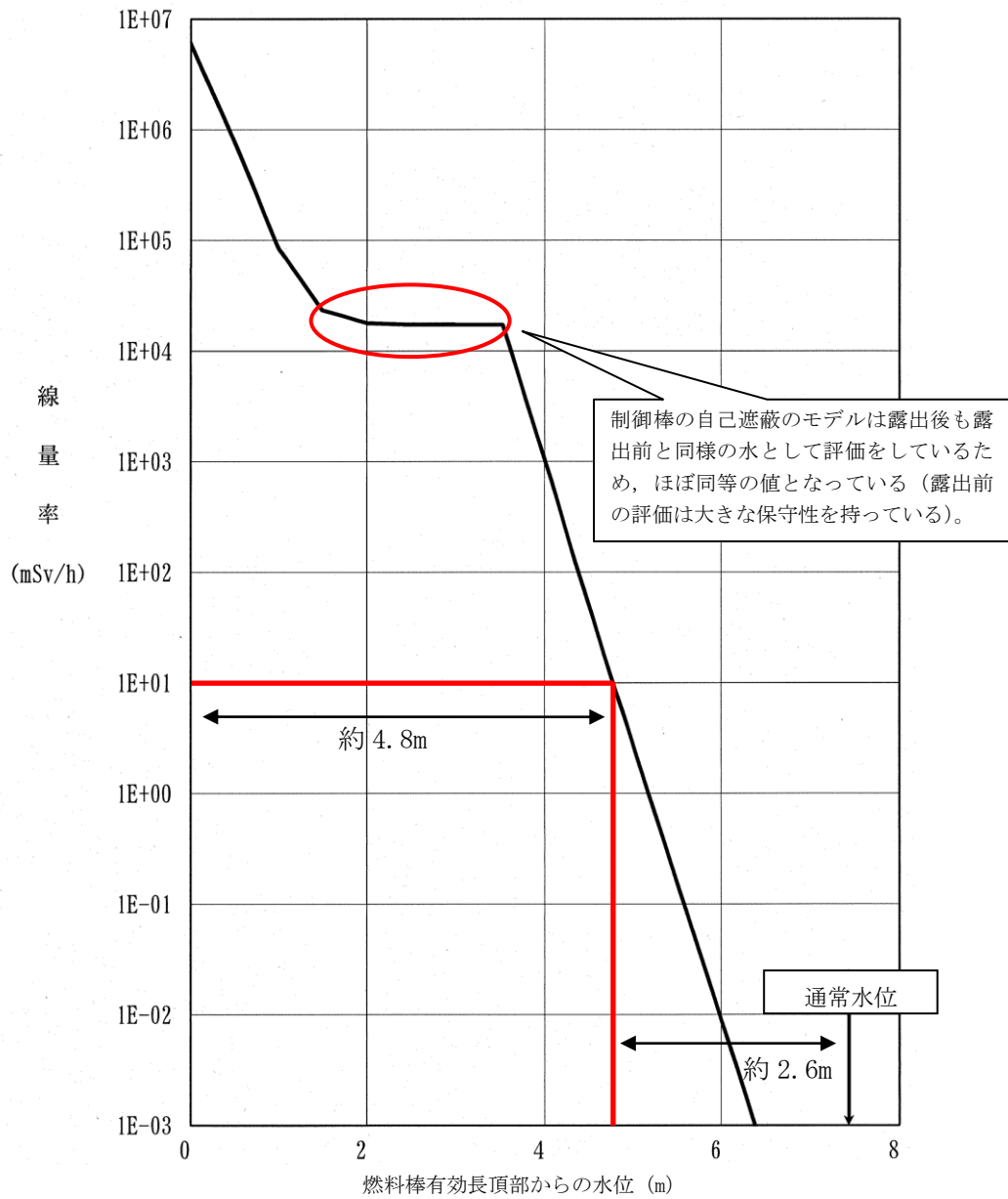


図7 放射線の遮蔽が維持される水位

<補足>必要な遮蔽の目安とした 10mSv/h の設定について

- ① 緊急作業時における被ばく限度 (100mSv) と現場での作業時間を踏まえた遮蔽水位の目安について

<原子炉建物原子炉棟 4 階での作業時間>

- ・想定事故 1, 2 において燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレイノズル) を使用する場合の可搬型スプレイノズル及びホースの設置作業は, 現場へのアクセス及び現場操作を含めて 2 時間以内で実施可能である。また, 原子炉運転停止中における燃料損傷防止対策の有効性評価においては, 原子炉建物原子炉棟 4 階でのアクセス又は現場操作に期待していない。
- ・事象発生時に原子炉建物原子炉棟 4 階にいる現場作業員の退避については 2 時間以内で実施可能である。

以上より, 原子炉建物原子炉棟 4 階での緊急時対策要員による作業時間並びに現場作業員の退避は 2 時間以内であり, 必要な放射線の遮蔽の目安を 10mSv/h とすると作業員の被ばく量は最大でも 20mSv となるため, 緊急作業時における被ばく限度の 100mSv に対して余裕のある値である。

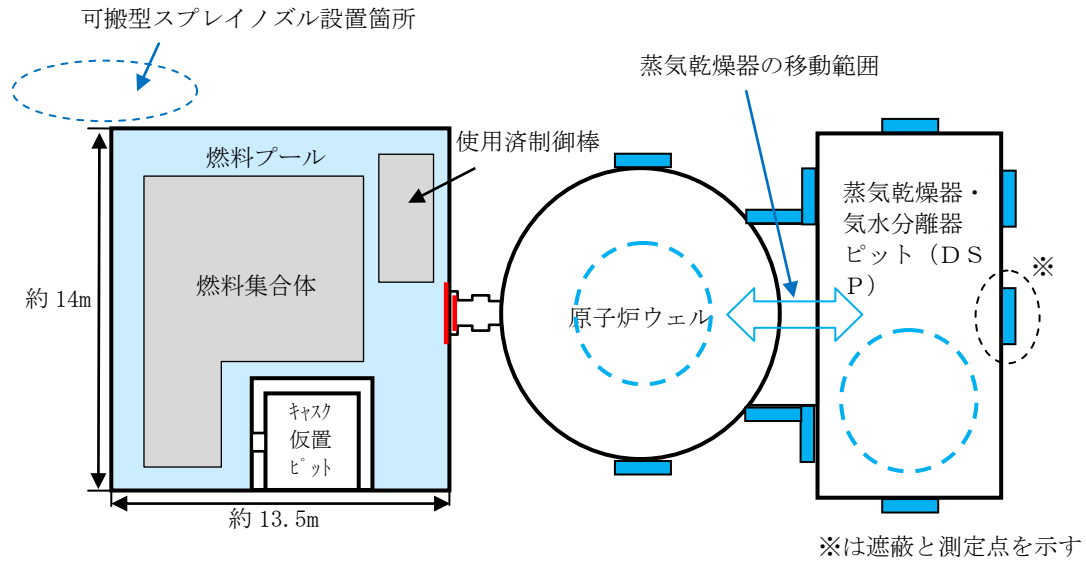
- ② 定期検査作業時での原子炉建物原子炉棟 4 階における現場線量率の実績値

通常時であっても作業によって現場線量率が上昇することが考えられる。原子炉建物原子炉棟 4 階における作業の例として, 蒸気乾燥器の取り外し作業の実績は約 2.6mSv/h (設置する遮蔽体の遮蔽効果に期待しない場合の測定点) 及び約 1 mSv/h (設置する遮蔽体の遮蔽効果に期待する場合の測定点) であった。なお, 蒸気乾燥器の移動範囲及び作業場所による線量率の測定点は図 8 に示す。

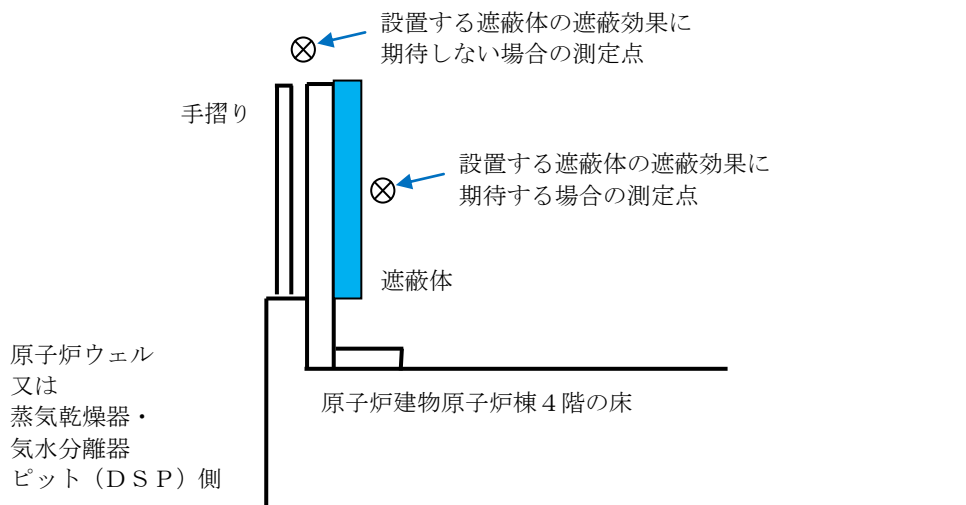
- ③ 蒸気乾燥器移動時に重大事故等が発生した場合の蒸気乾燥器からの影響について

蒸気乾燥器移動時の事故発生を想定した際, 原子炉ウェル又は D S P 廻りの空間線量率は, ②の遮蔽に期待できない測定点で示すように遮蔽の目安 (10 mSv/h) を超えることはないが, 仮に②の遮蔽に期待できない測定点での空間線量率が遮蔽の目安 (10mSv/h) を超える場合であっても, 有効性評価での重大事故等対策において, 移動中の蒸気乾燥器近傍での作業はなく, 重大事故等対策を実施する現場操作場所での空間線量率が必要な遮蔽の目安 (10mSv/h) を超えることはない。

なお, 作業員の退避についても同様である。



(a) 蒸気乾燥器の移動範囲



(b) 遮蔽と測定点の位置 ((a) の図の中で※で示す箇所の断面)

図8 蒸気乾燥器の移動範囲及び作業場所による線量率の測定点

安定状態について（想定事故 1）

想定事故 1（燃料プールの冷却機能喪失及び注水機能喪失）の安定状態については以下のとおり。

燃料プール安定状態：事象発生後，設計基準事故対処設備及び重大事故等対処設備を用いた燃料プールへの注水により，燃料プール水位を回復・維持することで，燃料の冠水，放射線遮蔽及び未臨界が維持され，燃料プールの保有水の水温が安定し，かつ，必要な要員の不足や資源の枯渇等のあらかじめ想定される事象悪化のおそれがない場合，安定状態が確立されたものとする。

【安定状態の確立について】燃料プールの安定状態の確立について

燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）を用いた燃料プールへの注水を実施することで，燃料プール水位が維持され，燃料プールの安定状態が確立される。

また，重大事故等対策時に必要な要員が確保可能であり，また，必要な水源，燃料及び電源を供給可能である。

【安定状態の維持について】

上記の燃料損傷防止対策により安定状態を維持できる。
また，燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水を継続し，残留熱除去系又は燃料プール冷却系を復旧し，復旧後は復水輸送系等によりスキマサージタンクへの補給を実施する。燃料プールの保有水を残留熱除去系等により冷却することによって，安定状態後の状態維持のための冷却が可能となる。

（添付資料 2. 1. 1 別紙 1 参照）

燃料プール水沸騰・喪失時の未臨界性評価

島根原子力発電所 2 号炉の燃料プールでは、ボロン添加ステンレス鋼製ラックセルに燃料が貯蔵されている。燃料プールには、通常は限られた体数の新燃料と使用済燃料が貯蔵されるが、臨界設計については新燃料及びいかなる燃焼度の燃料を貯蔵しても十分安全側の評価を得るように、炉心装荷時の無限増倍率として 1.30（ウラン燃料の場合）、1.23（MOX 燃料の場合）を仮定している。また、プール水温、ラック製造公差、ボロン添加率及びラックセル内燃料配置それぞれについて最も結果が厳しくなる状態で評価している。未臨界性評価の基本計算条件を表 1 に、ラック形状が確保された状態を前提とした計算体系を図 1 に示す。

仮に燃料プール水が沸騰や喪失した状態を想定し、燃料プールの水密度が減少した場合を考えると、ラックセル内で中性子を減速する効果が減少し、実効増倍率を低下させる効果がある。一方、ラックセル間では水及びラックセルによる中性子を吸収する効果が減少するため、隣接ラックへの中性子の流れ込みが強くなり、実効増倍率を増加させる効果が生じる。

低水密度状態を想定した場合の燃料プールの実効増倍率は上記の 2 つの効果のバランスにより決定されるため、ラックの材質・ピッチの組み合わせによっては通常の冠水状態と比較して臨界評価結果が厳しくなる可能性がある。

そこで、島根原子力発電所 2 号炉の燃料プールにおいて水密度を $1.0 \sim 0.0 \text{ g/cm}^3$ と変化させて実効増倍率を評価したところ、中性子の強吸収体であるラックセル中のボロンの効果により、実効増倍率を増加させる効果である隣接ラックへの中性子の流れ込みが抑制されることから、水密度の減少に伴い実効増倍率は単調に減少する結果が得られた。このため、水密度が減少する事象が生じた場合でも未臨界は維持されることを確認した。解析結果を図 2 及び図 3 に示す。

なお、解析には米国オークリッジ国立研究所（ORNL）により米国原子力規制委員会（NRC）の原子力関連許認可評価用に作成された 3 次元多群輸送評価コードであり、米国内及び日本国内の臨界安全評価に広く使用されている SCALE システムを用いた。

表 1 未臨界性評価の基本計算条件

	項目	仕様	
		ウラン燃料	MOX燃料
燃料仕様	燃料種類	9×9燃料 (A型)	MOX燃料
	濃縮度	²³⁵ U濃縮度 □ wt% ^{※1}	核分裂性Pu富化度 □ wt% ^{※2} ²³⁵ U濃縮度 □ wt%
	ペレット密度	理論密度の97%	理論密度の95%
	ペレット直径	0.96cm	1.04cm
	被覆管外径	1.12cm	1.23cm
	被覆管厚さ	0.71mm	0.86mm
使用済燃料 貯蔵ラック	ラックタイプ	たて置ラック式	
	ラックピッチ	□ mm	
	材料	ボロン添加ステンレス鋼	
	ボロン濃度	□ wt% ^{※3}	
	板厚	□ mm	
	内のり	□ mm	

※1 未臨界性評価用燃料集合体 ($k_{\infty}=1.30$ 未燃焼組成, Gdなし)

※2 未臨界性評価用燃料集合体 ($k_{\infty}=1.23$ 未燃焼組成, Gdなし)

※3 ボロン濃度の解析使用値は、製造公差下限値とする。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

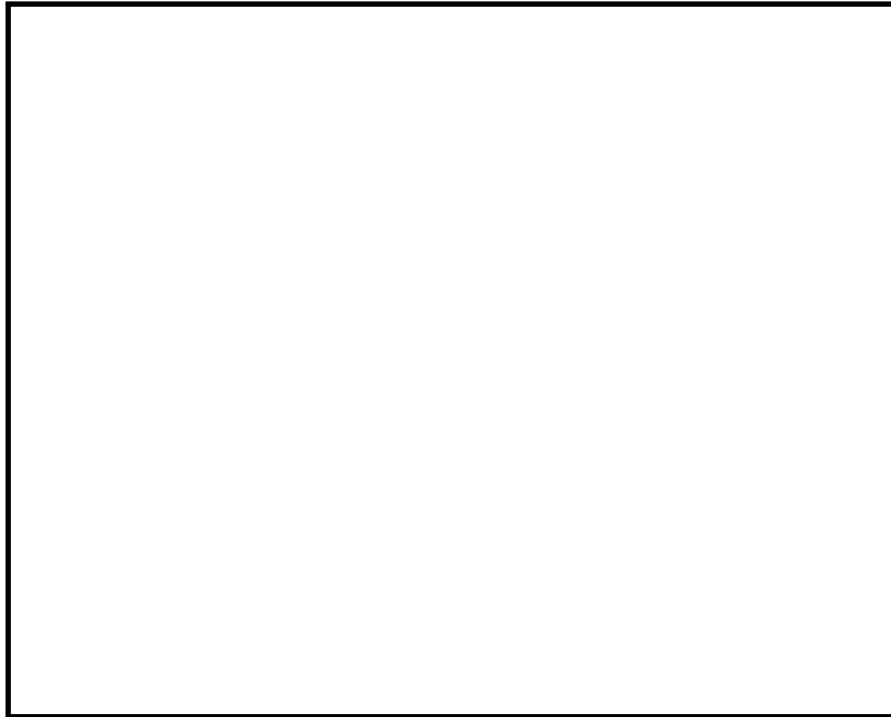


図1 燃料貯蔵ラックの計算体系

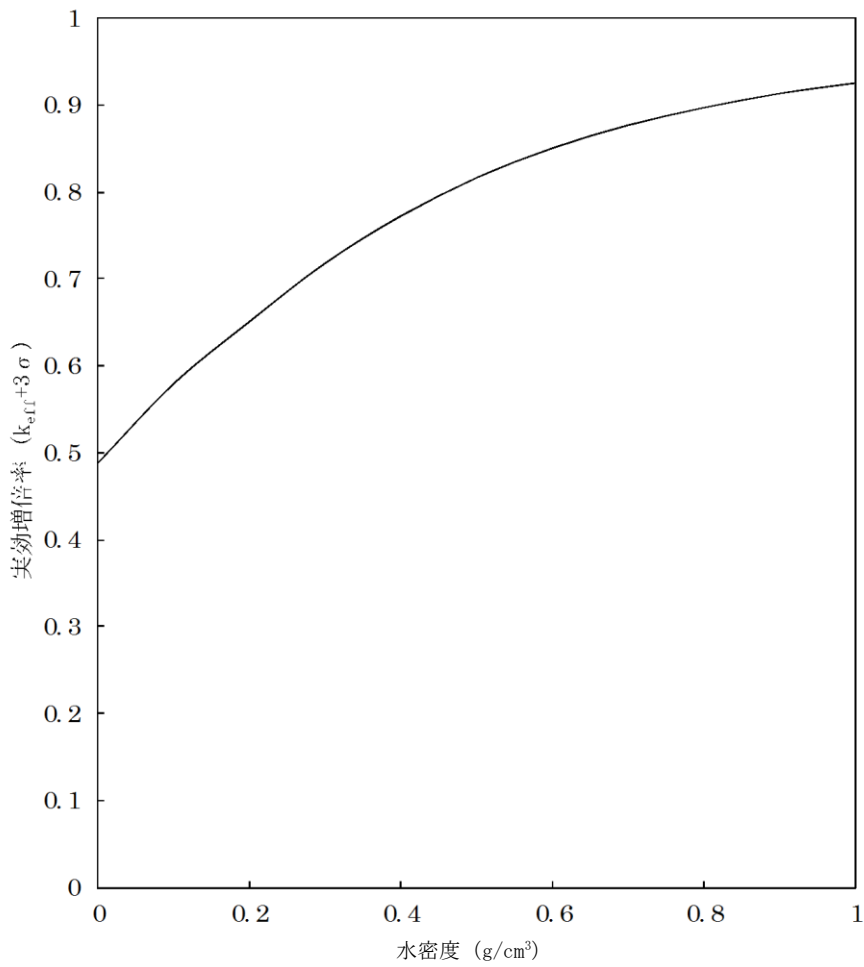


図2 実効増倍率の水密度依存性 (ウラン燃料)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

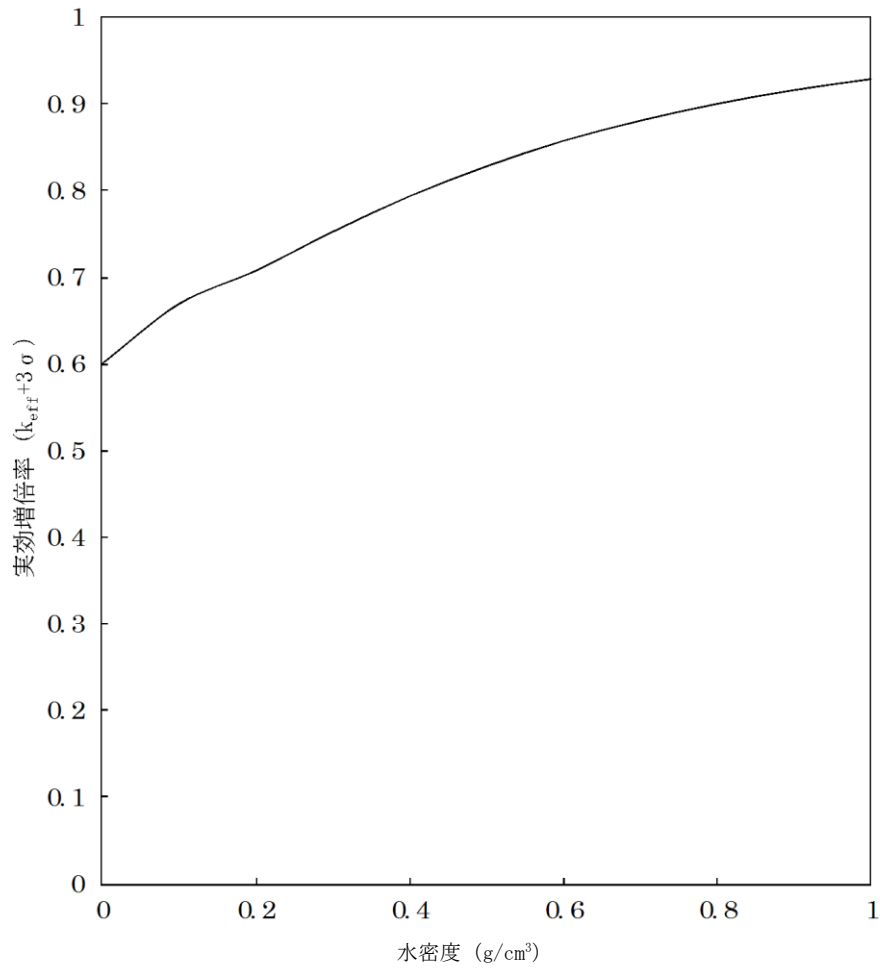


図3 実効増倍率の水密度依存性 (MOX燃料)

表 1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間となるパラメータに与える影響 (想定事故 1) (1 / 3)

項目	評価条件 (初期、事故及び機器条件) の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
燃料プールの保有水量	約 1,599m ³	約 1,599m ³	保有水量を厳しく見積もるためにプールゲート閉の状況を想定	燃料プール水位及びプールゲートの状態の不確かさに含まれる。	燃料プール水位及びプールゲートの状態の不確かさに含まれる。
	通常水位	通常水位付近			
燃料プールの初期水位	通常水位	通常水位付近	通常水位を設定	最確条件とした場合は、評価条件での初期水位は通常水位を設定しているため、その変動を考慮した場合は、燃料プールが通常水位から燃料棒有効長頂部まで低下する時間は短くなるが、仮に初期水位を水位低レベル (通常水位から約 0.27m 下) とした場合であっても、放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約 1.5 日 (10mSv/h の場合)、燃料プール水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は事象発生から約 3.8 日あり、事象発生から 3 時間 10 分後までに燃料プールのスプレイス系 (可搬型スプレインゾル) による注水が可能となることから、評価条件となるパラメータに与える影響は小さい。	
初期条件				初期に地震起因のスロッシングが発生した場合、燃料プール水位が最大で約 1.1m (スロッシング量: 180m ³) の水位の低下が発生するが、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約 1.1 日 (10mSv/h の場合)、燃料棒有効長頂部まで水位が低下するまでの時間は事象発生から約 3.3 日あり、事象発生から 3 時間 10 分後までに燃料プールのスプレイス系 (可搬型スプレインゾル) による注水が可能であることから、評価条件となるパラメータに与える影響は小さい。	最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料プール水位より低くなるため、沸騰開始時間は速くなり、燃料プールの低下は緩やかになることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくない。
燃料プールの初期水温	65℃	約 17℃~約 40℃ (実績値)	運転上許容される上限値として設定	最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料プールの初期水温より低くなり、沸騰開始時間は速くなるため、時間余裕が長くなるが、燃料プールのスプレイス系 (可搬型スプレインゾル) による燃料プールへの注水操作は、燃料プールの初期水温に応じた対応をとるものではなく、冷却機能喪失による異常の認知を起点とするものであるため、運転員等操作時間に与える影響はない。	また、自然蒸発、燃料プール水温及び温度上昇の非一様性により、評価で想定している燃料プールの水位低下開始時間より早く水位の低下が始まることも考えられる。しかし、自然蒸発による影響は沸騰による水位低下と比べて僅かであり、気化熱により燃料プールの水位は冷却され、燃料プールの水温の非一様性も沸騰開始後の気泡上昇を駆動力とした対流により影響は小さくなることが考えられる。仮に、事象発生直後から沸騰による燃料プールの水位の低下が開始すると想定した場合であっても、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約 1.4 日 (10mSv/h の場合)、燃料プール水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は事象発生から約 3.6 日あり、事象発生から 3 時間 10 分後までに燃料プールのスプレイス系 (可搬型スプレインゾル) による注水が可能となることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

※1 本評価値は、燃料プールへの戻り水の影響を考慮していない保守的なものであり、これらを考慮するとスロッシング量が小さくなる。

表1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間となるパラメータに与える影響（想定事故1）（2/3）

項目	評価条件(初期、事故及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
燃料の崩壊熱	約7.8MW 【使用済燃料】 取出時平均燃焼 度： ・9×9燃料 456Wd/t ・MOX燃料 336Wd/t	約7.8MW以下 (実績値)	原子炉停止後に最短時間(原子炉停止後10日)で取り出された全炉心分の燃料が、過去に取り出された貯蔵燃料と合わせて、使用済燃料貯蔵ラックに最大体数貯蔵されていることを想定し、ORIGEN2を用いて算出	最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料の上昇及び燃料の崩壊熱より小さくなるため、燃料プール水温の上昇及び燃料の崩壊熱に低下は緩和されるが、注水操作は、燃料の崩壊熱に応じた対応をとるものではなく、冷却機能喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間には与える影響はない。	最確条件とした場合は、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
	初期条件 プールゲートの状態	プールゲート閉 (原子炉ウエル及びDSPの保有水量を考慮しない)	プールゲート開 (原子炉ウエル及びDSPの保有水量を考慮)	全炉心燃料取出直後においてプールゲートは開放されていることが想定されるが、燃料プールの保有水量を厳しく見積もるためにプールゲート閉を想定	最確条件とした場合は、保有水量がプールゲート閉と比べ2倍程度となり、燃料プールの水温の上昇及び蒸発による燃料プール水位の低下は緩和されるが、燃料プールスプレイ系(可搬型スプレイン/ズル)による燃料プールへの注水操作は、プールゲートの状態に応じた対応をとるものではなく、冷却機能喪失による異常の認知を起点とするものであるため、運転員等操作時間に与える影響はない。
外部水源の容量	約7,000m ³	約7,000m ³ 以上 (合計貯水量)	通常時の水量を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合には、評価条件よりも水源容量の余裕が大きくなるため、運転員等操作時間に与える影響はない。	—
燃料の容量	1,180m ³	1,180m ³ 以上 (合計貯蔵量)	通常時の運用値を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合には、評価条件よりも燃料容量の余裕が大きくなるため、運転員等操作時間に与える影響はない。	—

表 1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間となるパラメータに与える影響 (想定事故 1) (3 / 3)

項目	評価条件 (初期、事故及び機器条件) の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
事故条件	安全機能の喪失に対する仮定	燃料プールの冷却機能及び注水機能の喪失	燃料プールの冷却機能及び注水機能として燃料プール冷却系、残留熱除去系、復水輸送系等の機能喪失を設定	—	—
	外部電源	外部電源なし	外部電源の有無は事象進展に影響しないことから、資源の観点で厳しい外部電源なしを設定	外部電源がない場合と外部電源がある場合では、事象進展は同じであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	外部電源がない場合と外部電源がある場合では、事象進展は同じであることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
機器条件	燃料プールスプレイスプレインノズルによる燃料プールへの注水流量	48m ³ /h	燃料プールスプレイスプレインノズル (可搬型スプレイスプレインノズル) による注水を想定設備の設計を踏まえて設定	燃料プールスプレイスプレインノズル (可搬型スプレイスプレインノズル) による注水流量を起点に開始する操作ではないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。	評価条件で設定している燃料プールスプレイスプレインノズル (可搬型スプレイスプレインノズル) による注水流量は、燃料の崩壊熱に相当する保有水の蒸発量 (最大 19m ³ /h) より大きく、注水操作開始以降の流量であることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

表2 運転員等操作時間に与える影響，評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕（想定事故1）

項目	評価条件（操作条件）の不確かさ		操作の不確かさ要因	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	評価上の操作開始時間	評価上の操作開始時間					
燃料ブールスブレイ系（可搬型スプレインノズル）による燃料ブールへの注水 操作条件	燃料ブールスブレイ系（可搬型スプレインノズル）の系統構成に必要な準備時間は3時間であるが、燃料ブール水位の低下し始める時間が事象発生から約7.9時間後であることと踏まえて設定	燃料ブールスブレイ系（可搬型スプレインノズル）の系統構成に必要な準備時間は3時間であるが、燃料ブール水位の低下し始める時間が事象発生から約7.9時間後であることと踏まえて設定	<p>【認知】 中央制御室にて機器ランプ表示，機器故障警報，系統流量指示計等にて異常を確認する。燃料ブールスブレイ系（可搬型スプレインノズル）による燃料ブールへの注水操作の開始は事象発生から約7.9時間後であり，それまでに燃料ブール冷却系等の故障による燃料ブールの冷却機能及び注水機能の喪失を認知できる時間がある。</p> <p>【要員配置】 当該操作は緊急時対策要員（現場）が配置されており，操作開始時間に与える影響はない。</p> <p>【移動】 燃料ブールスブレイ系（可搬型スプレインノズル）に用いる大量送水車及び原子炉建物内でホース敷設を行う緊急時対策要員（現場）は，事象発生後に作業現場へ移動することを想定している。仮に地震等の外乱事象が起因事象の場合に，アクセスルートの被害があっても，ホイールローダ等にて必要なアクセスルートを仮復旧できる体制としており，操作開始時間に与える影響はない。</p> <p>【操作所要時間】 燃料ブールスブレイ系（可搬型スプレインノズル）による燃料ブールへの注水準備は，大量送水車の配置，屋外及び原子炉建物内のホース敷設，可搬型スプレインノズルの設置，ホース接続及びポンプ起動操作である。</p> <p>移動時間も含め，これら準備操作に3時間を想定しており，他の操作はないため，燃料ブール冷却機能及び注水機能の喪失を認知した時点で注水準備が可能である。</p> <p>【他の並列操作有無】 燃料ブールスブレイ系（可搬型スプレインノズル）による燃料ブールへの注水操作時に，他の並列操作はなく，操作時間に与える影響はない。</p> <p>【操作の確実さ】 現場操作は，操作の信頼性向上や要員の安全のため2人1組で実施することとしており，誤操作は起こりにくく，誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。</p>	<p>当該操作は他の操作との重複はなく，燃料ブール冷却機能喪失による異常を認知した時点で注水準備に着手可能であり，その準備操作にかかる時間は3時間を想定していることから，実態の操作開始時間は想定している事象発生から約7.9時間後より早まる可能性があり，運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。</p>	<p>実際の操作開始時間が早まり，燃料ブール水位の回復が早める可能性があることから，評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。</p>	<p>放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間が事象発生から約1.7日（10msv/h），燃料ブール水位が燃料棒有効長頂部まで水位が低下するまでの時間が事象発生から約3.9日であり，事故を検知して注水を開始するまでの時間は約7.9時間と設定していることから，時間余裕がある。</p>	<p>評価上は作業成立性を踏まえ事象発生から約7.9時間後以降としており，このうち，大量送水車への給油作業は，所要時間2時間30分想定のところ，訓練実績では約2時間12分である。想定で意図している操作が実施可能なことを確認した。</p>
	大量送水車への燃料補給	大量送水車等への燃料補給は解析条件で想定していない操作の成立や継続に必要な作業・作業成立性を踏まえ設定	大量送水車への燃料補給は解析条件で想定していない操作の成立や継続に必要な作業・作業成立性を踏まえ設定	<p>大量送水車の燃料枯渇までに実施すればよい作業であり，大量送水車による注水操作は，事象発生約7.9時間後以降に実施するものであり，十分な時間余裕がある。</p>	—	—	—

7日間における水源の対応について（想定事故1）

○水源

輪谷貯水槽（西1／西2）※：約7,000 m³

※設置許可基準規則56条【解釈】1b)項を満足するための代替淡水源（措置）

○水使用パターン

①燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水

事象発生約7.9時間後から水位を維持できるよう崩壊熱相当の流量（13 m³/h）で注水を実施する。

○時間評価

燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プール注水が実施されているため輪谷貯水槽（西1／西2）水量は減少する。

○水源評価結果

事象発生約7.9時間後から崩壊熱相当の流量（13 m³/h）で注水を実施するため7日間では合計約2,100 m³の水量が必要となり、十分に水量を確保しているため対応可能である。

$13 \text{ m}^3/\text{h} \times (168\text{h}-7.9\text{h}) \doteq 2,100 \text{ m}^3$

7日間における燃料の対応について（想定事故1）

保守的にすべての設備が、事象発生直後から7日間燃料を消費するものとして評価する。

時系列	合計	判定
非常用ディーゼル発電機 2台起動 ^{※1} (燃料消費率は保守的に最大負荷(定格出力運転)時を想定) $1.618\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 2\text{台} = 543.648\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 712m^3	非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等の容量は約 730m^3 であり、7日間対応可能
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 1台起動 (燃料消費率は保守的に最大負荷(定格出力運転)時を想定) $0.927\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 155.736\text{m}^3$		
大量送水車 1台起動 $0.0677\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 11.3736\text{m}^3$		
緊急時対策所用発電機 1台 (燃料消費率は保守的に最大負荷(定格出力運転)時を想定) $0.0469\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 7.8792\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 8m^3	緊急時対策所用燃料地下タンクの容量は約 45m^3 であり、7日間対応可能

※1 事故収束に必要な非常用ディーゼル発電機は1台であるが、保守的に非常用ディーゼル発電機2台を起動させて評価した。

4.2 想定事故 2

4.2.1 想定事故 2 の特徴，燃料損傷防止対策

(1) 想定する事故

「燃料プールにおける重大事故に至るおそれがある事故」において，燃料プールにおける燃料損傷防止対策の有効性を確認するために想定する事故の一つには，「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり，想定事故 2 として「サイフォン現象等により燃料プール内の水の小規模な喪失が発生し，燃料プールの水位が低下する事故」がある。

(2) 想定事故 2 の特徴及び燃料損傷防止対策の基本的考え方

想定事故 2 では，燃料プールの冷却系の配管破断によるサイフォン現象等により燃料プール内の水の小規模な漏えいが発生するとともに，燃料プール注水機能が喪失することを想定する。このため，燃料プール水位が低下することから，緩和措置がとられない場合には，燃料は露出し，燃料損傷に至る。

本想定事故は，燃料プール水の漏えいによって燃料損傷に至る事故を想定するものである。このため，重大事故等対策の有効性評価には，燃料プール水の漏えいの停止手段及び燃料プールの注水機能に対する重大事故等対処設備に期待することが考えられる。

したがって，想定事故 2 では，サイフォンブレイク配管による燃料プール水の漏えいの停止及び燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水によって，燃料損傷の防止を図る。また，燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）により燃料プール水位を維持する。

(3) 燃料損傷防止対策

想定事故 2 における機能喪失に対して，燃料プール内の燃料が著しい損傷に至ることなく，かつ，十分な冷却を可能とするため，サイフォンブレイク配管による漏えい停止機能及び燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）^{※1}による燃料プールへの注水手段を整備する。これらの対策の概略系統図を第 4.2.1-1 図に，手順の概要を第 4.2.1-2 図に示すとともに，重大事故等対策の概要を以下に示す。また，重大事故等対策における設備と操作手順の関係を第 4.2.1-1 表に示す。

想定事故 2 において，重大事故等対策に必要な要員は，中央制御室の運転員及び緊急時対策要員で構成され，合計 26 名である。その内訳は次のとおりである。中央制御室の運転員は，当直長 1 名，当直副長 1 名，運転操作対応を行う運転員 3 名である。発電所構内に常駐している要員のうち，通報連絡等を行う緊急時対策本部要員は 5 名，緊急時対策要員（現場）は 16 名である。必要な要員と作業項目について第 4.2.1-3 図に示す。

※1 燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）以外に，燃料プールスプレイ系（常設スプレイヘッド）による対応が可能である。

a. 燃料プール水位低下確認

燃料プールを冷却している系統が停止すると同時に，燃料プールの冷却系の配管破断によるサイフォン現象等により燃料プール内の水の小規模な漏えいが発生し，燃料プール水位が低下することを確認する。

燃料プールの水位低下を確認するために必要な計装設備は、燃料プール水位・温度（SA）等である。

b. 燃料プールの注水機能喪失確認

燃料プールの喪失した保有水を注水するため、復水輸送系等による燃料プールへの注水準備を行う。中央制御室からの遠隔操作により燃料プールへの注水準備が困難な場合、燃料プールへの注水機能喪失であることを確認する。

燃料プールの注水機能喪失を確認するために必要な計装設備は、燃料プール水位・温度（SA）等である。

c. サイフォンブレイク配管による燃料プール漏えい停止確認

燃料プールの水位低下に伴い発生する警報等により、燃料プールからの漏えいを認知し、初期水位から燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近まで水位が低下するが、サイフォンブレイク配管により漏えいが停止することを確認する。

d. 燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水

燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）の準備は水位低下に伴う異常の認知を起点として冷却機能喪失又は注水機能喪失を確認し、開始する。準備が完了したところで、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水を開始し、燃料プール水位を維持する。その後は、燃料プールの冷却系を復旧するとともに、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）の間欠運転又は流量調整により蒸発量に応じた注水を行うことで、必要な遮蔽^{※2}を確保できる燃料プール水位より高く維持する。

燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水を確認するために必要な設備は、燃料プール水位・温度（SA）等である。

※2 必要な遮蔽の目安とした線量率は10mSv/hとする。想定事故2における原子炉建物原子炉棟4階での緊急時対策要員による作業時間並びに現場作業員の退避は2時間以内であり、作業員の被ばく量は最大でも20mSvとなるため、緊急作業時における被ばく限度の100mSvに対して余裕がある。

原子炉建物原子炉棟4階での作業は、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）を使用する場合における可搬型スプレイノズル及びホースの設置が想定される。

必要な遮蔽の目安とした線量率10mSv/hは、定期検査作業時での原子炉建物原子炉棟4階における線量率を考慮した値である。

この線量率となる燃料プール水位は通常水位から約2.6m下の位置である。

（添付資料4.1.2）

4.2.2 燃料損傷防止対策の有効性評価

(1) 有効性評価の方法

想定事故2で想定する事故は、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」

に示すとおり、「サイフォン現象等により燃料プール内の水の小規模な喪失が発生し、燃料プールの水位が低下する事故」である。

なお、燃料プールの保有水の漏えいを防止するため、燃料プールには排水口を設けない設計としており、また、燃料プール冷却系はスキマせきを越えてスキマサージタンクに流出する水を循環させる設計とするとともに、燃料プールに入る配管には逆止弁を設け、配管からの漏えいがあってもサイフォン現象による燃料プール水の流出を防止する設計としている。燃料プールに入る配管の逆止弁は動力を必要としない設計であり、信頼性は十分高いと考えられるが、本想定事故では開固着を想定する。

想定事故2では、残留熱除去系配管の破断発生後、サイフォン現象による燃料プール水の漏えい及び崩壊熱による燃料プール水温の上昇、沸騰及び蒸発によって燃料プール水位は低下する。サイフォンブレイク配管による漏えい停止及び燃料プールへの注水により、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される水位を確保できることを評価する。なお、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される水位を確保できることで、燃料棒有効長頂部は冠水が維持される。

未臨界については、燃料がボロン添加ステンレス鋼製ラックセルに貯蔵されており、必要な燃料間距離をとる等の設計により水密度の状態によらず臨界未満となるため、維持される。

また、評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、想定事故2における運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価する。

(添付資料 4.1.4, 4.2.1)

(2) 有効性評価の条件

想定事故2に対する初期条件も含めた主要な評価条件を第4.2.2-1表に示す。また、主要な評価条件について、想定事故2特有の評価条件を以下に示す。

なお、本評価では崩壊熱及び運転員の人数の観点から厳しい条件である、原子炉運転停止中の燃料プールを前提とする。原子炉運転中の燃料プールは、崩壊熱が原子炉運転停止中の燃料プールに比べて小さく事象進展が緩やかになること、また、より多くの運転員による対応が可能であることから本評価に包絡される。

(添付資料 4.1.1)

a. 初期条件

(a) 燃料プールの初期水位及び初期水温

燃料プールの初期水位は通常水位とし、保有水量を厳しく見積もるため、燃料プールと隣接する原子炉ウェルの間に設置されているプールゲートは閉状態を仮定する。また、燃料プールの初期水温は、運転上許容される上限の65℃とする。

(b) 崩壊熱

燃料プールには貯蔵燃料の他に、原子炉停止後に最短時間（原子炉停止後10日）で取り出された全炉心分の燃料が一時保管されていることを想定して、燃料プールの崩壊熱は約7.8MWを用いるものとする。

なお、崩壊熱に相当する保有水の蒸発量は約13m³/hである。

b. 事故条件

(a) 安全機能の喪失に対する仮定

燃料プールの冷却機能及び注水機能として燃料プール冷却系、残留熱除去系、復水輸送系等の機能を喪失するものとする。

(b) 配管破断の想定

燃料プール水位が最も低下する可能性のあるサイフォン現象による漏えいとして、残留熱除去系配管^{※3}の全周破断を想定する。

※3 燃料プールに入る配管でサイフォン現象による漏えい発生の可能性のあるものは、燃料プール冷却系の戻り配管以外になく、よって当該配管に接続される系統のうち、配管内径及び破断時の高さ等の漏えい発生時の影響を考慮して設定。

(c) サイフォン現象による燃料プール水位の低下

燃料プール冷却系配管及び残留熱除去系配管に設置されている逆止弁については、燃料プール冷却系の配管で想定される異物の弁への噛み込みにより開固着し、逆止弁の機能が十分に働かない状態を仮定する。このとき、サイフォン現象により燃料プール水位は低下するが、サイフォンブレイク配管の効果により、燃料プール冷却系戻り配管水平部下端（通常水位より約0.28m下）に余裕をみた、通常水位から約0.35m下まで低下するものとする。

なお、評価においては燃料プールの水位は、燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近まで瞬時に低下するものとする。

(添付資料 4.2.1)

(d) 外部電源

外部電源は使用できないものと仮定する。

外部電源が使用できない場合においても、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水は可能であり、外部電源がある場合と事象進展は同等となるが、資源の評価の観点から厳しい評価条件となる外部電源が使用できない場合を想定する。

c. 重大事故等対策に関連する機器条件

(a) 燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）

燃料プールへの注水は、大量送水車1台を使用するものとし、崩壊熱による燃料プール水の蒸発量を上回る $48\text{m}^3/\text{h}^{\ast 4}$ にて注水する。

※4 燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）、燃料プールのスプレイ系（常設スプレイヘッダ）の注水容量はともに $48\text{m}^3/\text{h}$ 以上である。

d. 重大事故等対策に関連する操作条件

運転員等操作に関する条件として、「1.3.5 運転員等の操作時間に対する仮定」に示す分類に従って以下のとおり設定する。

(a) 燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水準備は、緊急時対策要員の移動及び注水準備に必要な時間等を考慮して、事象発生3時間10分後までに完了するが、燃料プールへの注水は燃料プールの水温が 100°C に到達することにより燃料プール水位が低下し始める事象発生約7.6時間後から開始する。

(3) 有効性評価の結果

想定事故2における燃料プール水位の推移を第4.2.2-1図に、燃料プール水位と線量率の関係を第4.2.2-2図に示す。

a. 事象進展

残留熱除去系配管の破断発生後、サイフォン現象によって、燃料プール水は漏えいし、燃料プール水位は燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近まで低下する。スキマせきを越える水がなくなるためスキマサージタンクの水位低下又は燃料プールの水位低下に伴い発生する警報により異常を認知する。燃料プール水位・温度(SA)等により、燃料プールからの漏えいが発生したこと及びサイフンブレイク配管によりサイフォン現象による漏えいが停止したことを確認する。また、燃料プールの喪失した保有水を注水するため、復水輸送系等による水の注水準備を行うが復水輸送系等が使用不可能な場合、燃料プールのスプレイ系(可搬型スプレイノズル)による燃料プールへの注水準備を行う。

燃料プールの冷却機能が喪失した後、燃料プール水温は約4.6°C/hで上昇し、事象発生から約7.6時間後に100°Cに達する。その後、蒸発により燃料プール水位は低下し始めるが、事象発生から3時間10分後までに燃料プールのスプレイ系(可搬型スプレイノズル)による燃料プールへの注水準備が完了し、事象発生から約7.6時間経過した時点で燃料プールのスプレイ系(可搬型スプレイノズル)による燃料プールへの注水を開始することから、燃料プール水位は維持される。

その後は、燃料プールの冷却機能を復旧するとともに、燃料プールのスプレイ系(可搬型スプレイノズル)により、蒸発量に応じた量を燃料プールに注水することで、燃料プール水位を維持する。

b. 評価項目等

燃料プール水位は第4.2.2-1図に示すとおり、通常水位から約0.35m下まで低下するに留まり、燃料棒有効長頂部は冠水維持される。燃料プール水は事象発生約7.6時間で沸騰し、その後100°C付近で維持される。

また、第4.2.2-2図に示すとおり、燃料プール水位が通常水位から約0.35m下の水位となった場合の線量率は約 1.0×10^{-3} mSv/h以下であり、必要な遮蔽の目安とした10mSv/hと比べて低いことから、この水位において放射線の遮蔽は維持される。なお、線量率の評価点は原子炉建物原子炉棟4階の燃料取替機台車床としている。

燃料プールでは燃料がボロン添加ステンレス鋼製ラックセルに貯蔵されており、必要な燃料間距離をとる等の設計により水密度の状態によらず臨界未満となるため、本事象においても未臨界は維持される。

事象発生約7.6時間後から燃料プールのスプレイ系(可搬型スプレイノズル)による燃料プールへの注水を行うことで蒸発量に応じた燃料プールへの注水を継続することで安定状態を維持できる。

本評価では、「1.2.3.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(1)から(3)の評価項目について、対策の有効性を確認した。

(添付資料4.1.2, 4.2.3)

4.2.3 評価条件の不確かさの影響評価

評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価するものとする。

想定事故2では、サイフォン現象等により燃料プール内の水の小規模な喪失が発生し、燃料プールの水位が低下することが特徴である。また、不確かさの影響を確認する運転員等操作は、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作とする。

(1) 評価条件の不確かさの影響評価

a. 初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件

初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件は、第4.2.2-1表に示すとおりであり、それらの条件設定を設計値等、最確条件とした場合の影響を評価する。また、評価条件の設定に当たっては、評価項目となるパラメータに対する余裕が小さくなるような設定があることから、その中で事象進展に有意な影響を与えると考えられる項目に関する影響評価の結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

初期条件の燃料の崩壊熱は、評価条件の約7.8MWに対して最確条件は約7.8MW以下であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料の崩壊熱より小さくなるため、燃料プール水温の上昇及び水位の低下は緩和されるが、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作は燃料の崩壊熱に応じた対応をとるものではなく、燃料プール水位の低下に伴う異常の認知を起点とした冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の燃料プール水温は、評価条件の65℃に対して最確条件は約17℃～約40℃であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料プールの初期水温より低くなり、沸騰開始時間は遅くなるため、時間余裕が長くなるが、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作は燃料プール水の初期水温に応じた対応をとるものではなく、燃料プール水位の低下に伴う異常の認知を起点とした冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の燃料プール水位は、評価条件の通常水位に対して最確条件は通常水位付近であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件での初期水位は通常水位を設定しているため、通常水位より低い水位の変動を考慮した場合、燃料プール水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間及び燃料プール水位の低下による異常の認知の時間は短くなるが、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作は初期水位に応じた対応をとるものではなく、燃料プール水位の低下に伴う異常の認知を起点とした冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期に地震起因のスロッシングが発生した場合、燃料プール水位が最大

で約1.1m低下するものの、放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約1.1日後（10mSv/hの場合）であり、事象発生から3時間10分後までに燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による注水が可能となることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件のプールゲートの状態は、評価条件のプールゲート閉に対して最確条件はプールゲート開であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、保有水量がプールゲート閉時と比べ2倍程度となり、燃料プールの水温の上昇及び蒸発による燃料プール水位の低下は緩和されるが、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作はプールゲートの状態に応じた対応をとるものではなく、燃料プール水位の低下に伴う異常の認知を起点とした冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

配管破断の想定及びサイフォン現象による燃料プール水位の低下は、破断面積及び弁の開口面積に応じて水位低下速度が変動するが、本評価では、サイフォンブレイク配管による漏えい停止を考慮しており、燃料プール水位が燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近（通常水位から約0.35m下）まで瞬時に低下するものとしていることから、事象進展に影響はなく、また、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作は水位低下速度に応じた対応をとるものではなく、水位低下に伴う異常の認知を起点とした冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであるため、運転員等操作時間に与える影響はない。

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

初期条件の燃料の崩壊熱は、評価条件の約7.8MWに対して最確条件は約7.8MW以下であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料の崩壊熱より小さくなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

初期条件の燃料プール水温は、評価条件の65℃に対して最確条件は約17℃～約40℃であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料プール水温より低くなるため、沸騰開始時間は遅くなり、燃料プール水位の低下は緩和されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

また、自然蒸発、燃料プールの水温及び温度上昇の非一様性により、評価で想定している沸騰による燃料プール水位の低下開始時間より早く燃料プール水位の低下が始まることも考えられる。しかし、自然蒸発による影響は沸騰による水位の低下と比べてわずかであり、気化熱により燃料プール水は冷却される。さらに、燃料プール水温の非一様性も沸騰開始後の気泡上昇を駆動力とした対流により影響が小さくなることが考えられる。仮に、事象発生直後から沸騰による燃料プール水位の低下が開始すると想定した場合であっても、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約1.2日（10mSv/hの場合）、燃料プール水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は事象発生から約3.4日あり、事象発生から3時間10分後までに燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による注水が可能であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

初期条件の燃料プール水位は、評価条件の通常水位に対して最確条件は通常水位付近であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件での初期水位は通常水位を設定しているため、その変動を考慮した場合、燃料プール水位が初期水位から燃料棒有効長頂部まで低下する時間は短くなるが、仮に初期水位を水位低警報レベル（通常水位から約0.27m下^{※5}）とした場合であっても、漏えいにより瞬時に水位が低下しサイフォンブレイク配管により燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近（通常水位から約0.35m下）で停止するとしていることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

初期に地震起因のスロッシングが発生した場合、最大で約1.1mの水位の低下が発生するが、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約1.1日（10mSv/hの場合）、燃料プール水位が通常水位から燃料棒有効長頂部まで低下する時間は事象発生から約3.3日あり、事象発生から3時間10分後までに燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による注水が可能であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

初期条件のプールゲートの状態は、評価条件のプールゲート閉に対して最確条件はプールゲート開であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、保有水量がプールゲート閉時と比べ2倍程度となり、燃料プール水温の上昇及び蒸発による燃料プール水位の低下は緩和されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

配管破断の想定及びサイフォン現象による燃料プール水位の低下は、破断面積及び弁の開口面積に応じて水位低下速度が変動するが、本評価では、サイフォンブレイク配管による漏えい停止を考慮しており、燃料プール水位が燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近（通常水位から約0.35m下）まで瞬時に低下するものとしていることから、事象進展に影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

※5 燃料プール水位低の警報設定値：通常水位-272mm

(添付資料4.2.4)

b. 操作条件

操作条件の不確かさとして、操作の不確かさを「認知」、「要員配置」、「移動」、「操作所要時間」、「他の並列操作有無」及び「操作の確実さ」の6要因に分類し、これらの要因が運転員等操作時間に与える影響を評価する。また、運転員等操作時間に与える影響が評価項目となるパラメータに与える影響を評価し、評価結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

操作条件の燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作は、評価上の操作開始時間として、事象発生から約7.6時間後を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、当該操作は他の操作との重複はなく、燃料プールの冷却機能喪失又は水位低下による異常を認知した時点で注水準備に着手可能であり、その準備操作にかかる時間は3時間を想定していることから、実態の操作開始時間は想定している事象発生から約7.6時間後より早まる可能性があり、運転員等操作時

間に対する余裕は大きくなる。

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

操作条件の燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作は、運転員等操作時間に与える影響として、評価上の操作完了時間に対して、実態に見込まれる操作完了時間が早くなる可能性がある。この場合、放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間余裕は、注水操作に対して約1.5日（10mSv/hの場合）と操作に対して十分な時間余裕があることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

（添付資料4.2.4）

(2) 操作時間余裕の把握

操作開始時間の遅れによる影響度合いを把握する観点から、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内での操作時間余裕を確認し、その結果を以下に示す。

操作条件の燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作は、放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間が約1.5日（10mSv/hの場合）、燃料プール水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間が約3.7日であり、事故を検知して注水を開始するまでの時間は事象発生から約7.6時間後と設定していることから、時間余裕がある。

（添付資料4.2.4）

(3) まとめ

評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を確認した。その結果、評価条件の不確かさが運転員等操作時間に与える影響等を考慮した場合においても、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。このほか、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間には時間余裕がある。

4.2.4 必要な要員及び資源の評価

(1) 必要な要員の評価

想定事故2において、重大事故等対策時における必要な要員は、「4.2.1(3)燃料損傷防止対策」に示すとおり26名である。「6.2 重大事故等対策時に必要な要員の評価結果」で説明している運転員、緊急時対策要員等の43名で対処可能である。

なお、今回評価した原子炉運転停止中ではなく、原子炉運転中を想定した場合、事象によっては、原子炉における重大事故又は重大事故に至るおそれのある事故の対応と、想定事故2の対応が重畳することも考えられる。しかし、原子炉運転中を想定した場合、燃料プールに貯蔵されている燃料の崩壊熱が低いいため、操作時間余裕が十分長くあり（原子炉運転開始直後を考慮しても燃料プール水が100℃に到達するまで最低でも1日以上）、原子炉における重大事故又は重大事故に至るおそれのある事故の対応が収束に向かっている状態での対応となるため、緊急時対策要員により対応可能である。

(2) 必要な資源の評価

想定事故2において、必要な水源、燃料及び電源は、「6.1(2)資源の評価条件」の条件にて評価している。その結果を以下に示す。

a. 水源

燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プール注水については、7日間の対応を考慮すると、約2,100m³の水が必要である。水源として、輪谷貯水槽（西1/西2）に約7,000m³の水量を保有しており、水源を枯渇させることなく7日間の注水継続実施が可能である。

（添付資料4.2.5）

b. 燃料

非常用ディーゼル発電機等による電源供給については、保守的に事象発生後7日間最大負荷で運転した場合、運転継続に約700m³の軽油が必要となる。燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水については、保守的に事象発生直後からの大量送水車の運転を想定すると、7日間の運転継続に約12m³の軽油が必要となる。合計約712m³の軽油が必要となる。非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等にて約730m³の軽油を保有しており、この使用が可能であることから非常用ディーゼル発電機等による電源供給、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水について、7日間の運転継続が可能である。

緊急時対策所用発電機による電源供給については、保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると、7日間の運転継続に約8m³の軽油が必要となる。緊急時対策所用燃料地下タンクにて約45m³の軽油を保有しており、この使用が可能であることから、緊急時対策所用発電機による電源供給について、7日間の継続が可能である。

（添付資料4.2.6）

c. 電源

外部電源は使用できないものと仮定し、非常用ディーゼル発電機等によって給電を行うものとする。重大事故等対策時に必要な負荷は、非常用ディーゼル発電機等の負荷に含まれることから、非常用ディーゼル発電機等による電源供給が可能である。

また、緊急時対策所用発電機についても、必要負荷に対しての電源供給が可能である。

4.2.5 結論

想定事故2では、燃料プールに入る配管からの漏えいが発生した際に逆止弁の機能が十分に働かず、サイフォン現象等による燃料プール水の小規模な喪失が発生し、かつ、燃料プールへの水の注水にも失敗して燃料プール水位が低下することで、やがて燃料が露出し燃料損傷に至ることが特徴である。想定事故2に対する燃料損傷防止対策としては燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水手段を整備している。

想定事故2について有効性評価を実施した。

上記の場合においても、燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）によ

る燃料プールへの注水により、燃料プール水位を維持することができることから、放射線の遮蔽が維持され、かつ、燃料損傷することはない。

また、燃料プールでは燃料がボロン添加ステンレス鋼製ラックセルに貯蔵されており、必要な燃料間距離をとる等の設計により水密度の状態によらず臨界未満となるため、未臨界は維持される。

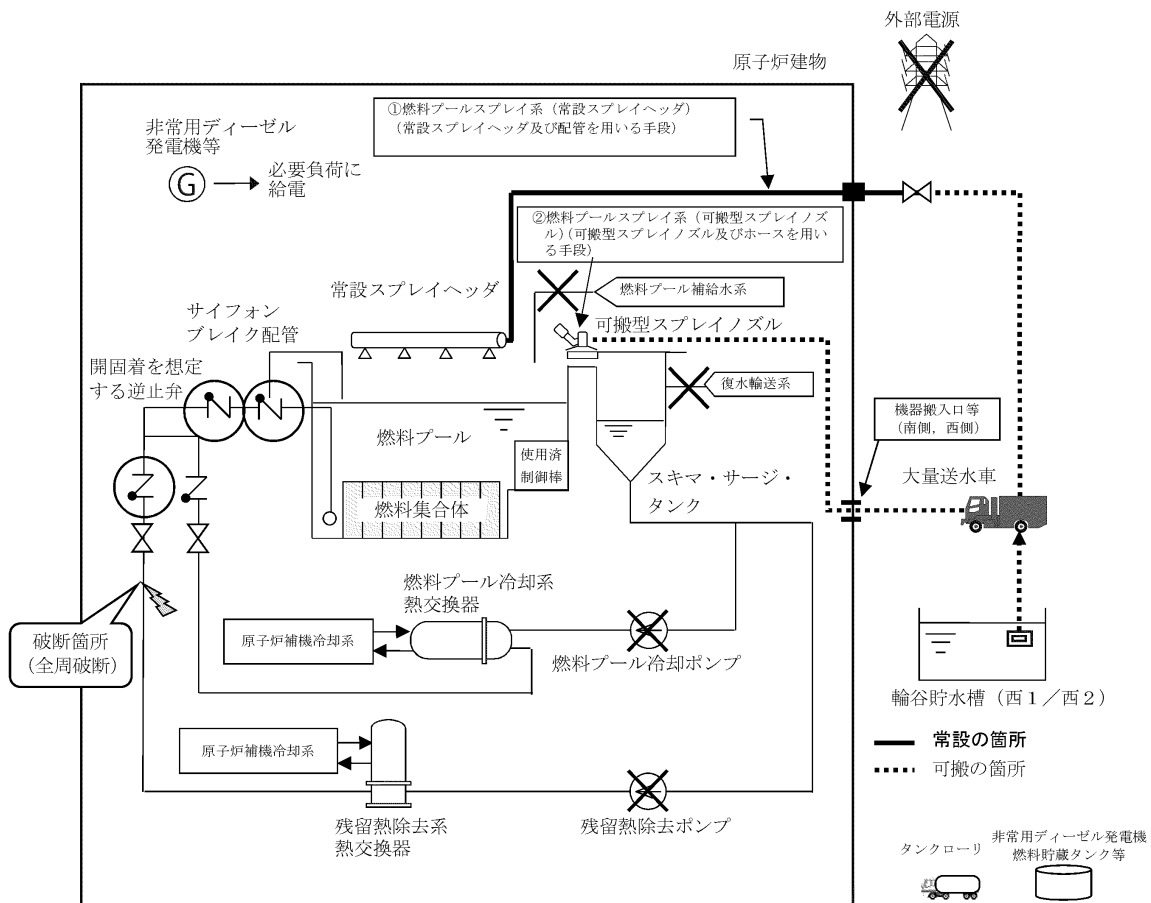
その結果、燃料棒有効長頂部の冠水、放射線の遮蔽が維持される水位の確保及び未臨界を維持できることから、評価項目を満足している。また、安定状態を維持できる。

評価条件の不確かさについて確認した結果、運転員等操作時間に与える影響及び評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

また、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間余裕について確認した結果、操作が遅れた場合でも一定の余裕がある。

重大事故等対策時に必要な要員は、運転員及び緊急時対策要員にて確保可能である。また、必要な水源、燃料及び電源を供給可能である。

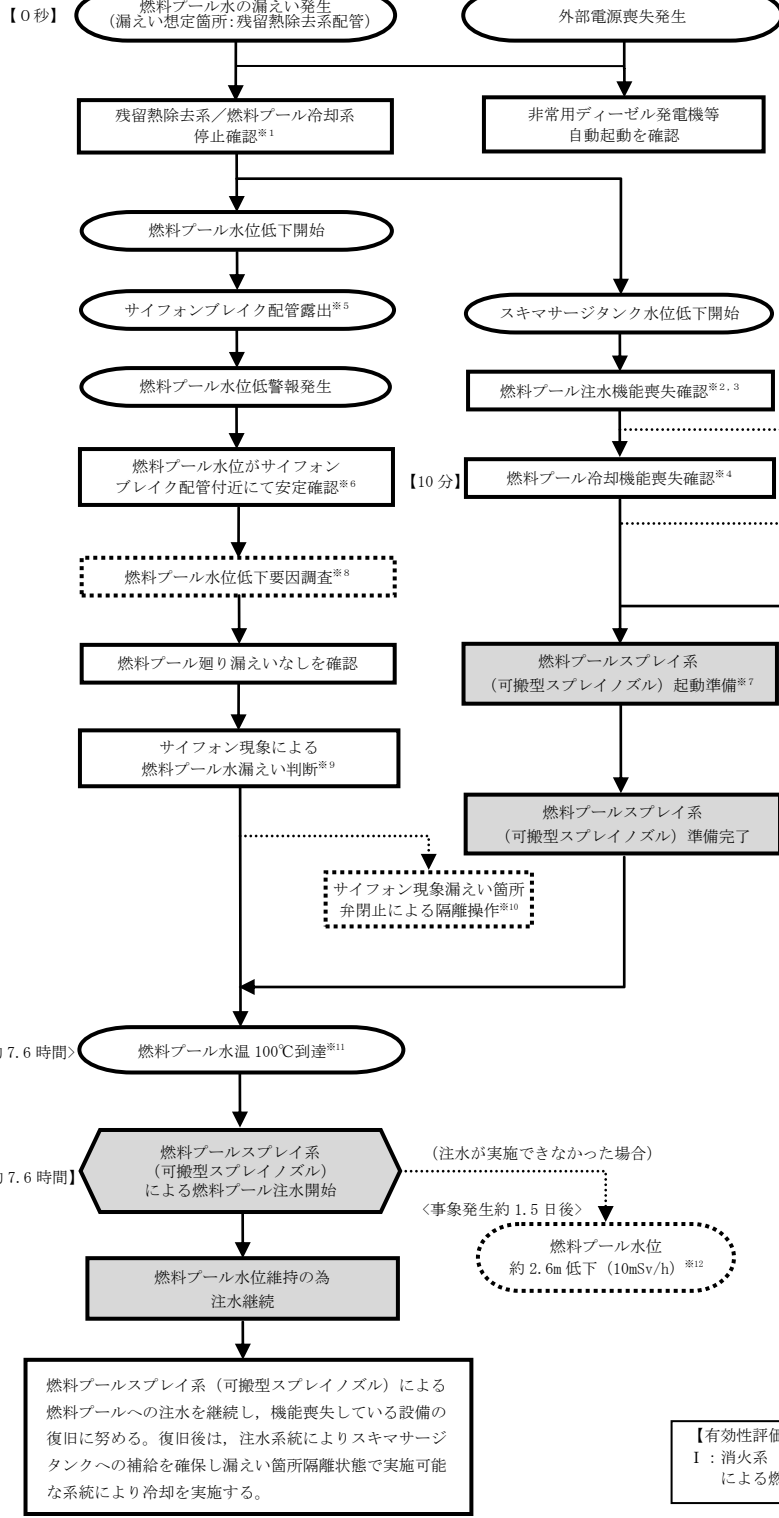
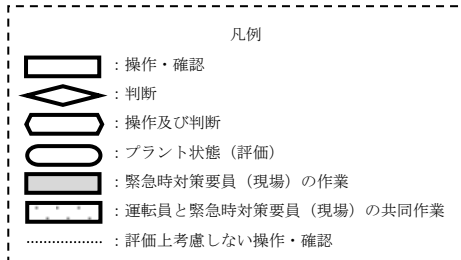
以上のことから、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水等の燃料損傷防止対策は、想定事故2に対して有効である。



第 4.2.1-1 図 「想定事故 2」の重大事故等対策の概略系統図
(燃料プールへの注水)

プラント前提条件
 ・プラント停止後 10 日目
 ・全燃料取出し及びプールゲート「閉」

【 】：時刻（評価条件）
 < >：時刻（評価結果）



- ※1：中央制御室にて各機器の停止を、燃料プール水位・温度（SA）、状態表示ランプ、警報、ポンプ出口流量等により確認する。
- ※2：残留熱除去系、燃料プール補給水系及び復水輸送系の再起動が困難な場合、燃料プールの注水機能が喪失であることを確認する。燃料プールの注水機能は、燃料プール水位・温度（SA）、状態表示ランプ、警報、ポンプ出口流量等により確認する。
- ※3：重大事故等発生を通信連絡設備により確認した現場作業員は退避を実施する。なお、すべての作業員が退避するまでの時間は、1時間30分程度である。
- ※4：注水機能喪失により冷却機能を起動してもスキマサージタンク水位低によりトリップするため機能喪失を判断する。
- ※5：サイフォンブレイク配管位置は通常水位から 0.15m 下に位置している。
- ※6：サイフォンブレイク配管の効果によりサイフォン現象による漏えいは停止し、燃料プール水位がサイフォンブレイク配管位置付近（通常水位から約 0.35m 下）で安定する。
- ※7：燃料プールへの注水は燃料プールのスプレー系（常設スプレーヘッド）により実施する。常設スプレーヘッドによる注水ができない場合、燃料プールのスプレー系（可搬型スプレーノズル）による注水を実施する。評価上、燃料プールのスプレー系（可搬型スプレーノズル）による燃料プールへの注水を実施する。
- ※8：下記により要因調査を実施する。
 - ・「燃料プール漏洩」警報発生有無
 - ・「燃料プールゲート/压力容器・格納容器間漏洩」警報発生有無
 - ・燃料プール冷却系廻りの漏えい有無
 - ・残留熱除去系廻りの漏えい有無
- ※9：燃料プールからの漏えいの形跡が無いこと、サイフォンブレイク配管の露出水位付近で燃料プール水位が安定していることから、サイフォン現象により燃料プール水が漏えいしていたと判断する。
- ※10：サイフォンブレイク配管により燃料プールからの漏えいは停止しているが、破断箇所を系統から隔離するため弁により隔離操作を実施する。
- ※11：燃料プール水位・温度（SA）にて確認する。
- ※12：燃料プール水位（SA）にて確認する。

【有効性評価の対象とはしていないが、他に取れる手段】
 I：消火系（消火栓を使用した場合、復水輸送ラインを使用した場合）による燃料プールへの注水も実施可能である。

第 4.2.1-2 図 「想定事故 2」の対応手順の概要

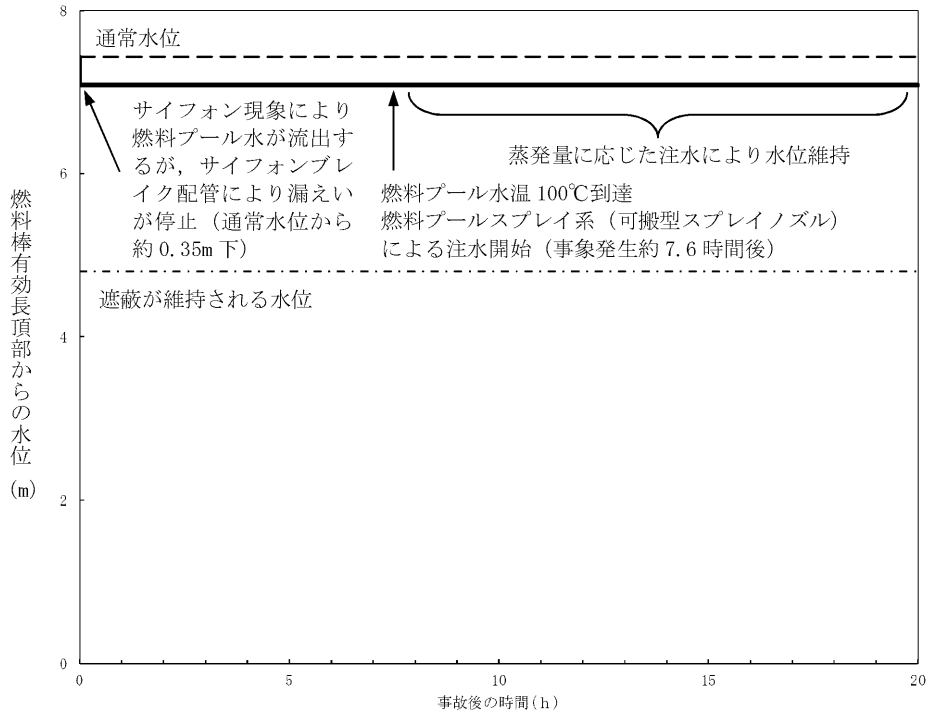
想定事故 2

操作項目	実施箇所・必要人員数				操作内容	経過時間 (分)						経過時間 (時間)							経過時間 (日)			備考					
	責任者	当直長	1人	中央制御室監視 緊急時対策本部連絡		10	20	30	40	50	60	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	5	6	7	
状況判断	1人 A	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 燃料プール水漏えい発生確認 外部電源喪失確認 非常用ディーゼル発電機等自動起動確認 残留熱除去系停止/燃料プール冷却系停止確認 燃料プール水位がサイフォンブレイク配管付近にて安定確認 燃料プール注水機能喪失確認 燃料プール冷却機能喪失確認 燃料プール水位・温度監視 	10分																					
燃料プール冷却機能回復操作	—	—	—	—	残留熱除去系, 燃料プール冷却系 機能回復																					評価上考慮せず 対応可能な要員により対応する	
燃料プール注水機能回復操作	—	—	—	—	残留熱除去系, 燃料プール補給水系, 復水輸送系 機能回復																					評価上考慮せず 対応可能な要員により対応する	
燃料プール水位低下要因調査	(1人) A	—	—	—	警報確認による要因調査	10分																				評価上考慮せず	
	—	2人 B, C	—	—	現場確認		1時間																			評価上考慮せず	
	—	—	—	—	隔離操作																					評価上考慮せず 対応可能な要員により対応する	
燃料プールのスプレイ系 (可搬型スプレイノズル) による燃料プール注水	—	—	—	14人 a~n	放射線防護具準備	10分																					
	—	—	—	(2人) a, b	大量送水車による燃料プールへの注水準備 (大量送水車配置, ホース展張, 接続), 原子炉建物内ホース敷設, 可搬型スプレイノズル準備		2時間50分																				
燃料プールのスプレイ系 (常設スプレイヘッド) による燃料プール注水	—	—	—	—	大量送水車による燃料プールへの注水																					評価上考慮せず 注水不可の場合は可搬型スプレイノズルにより対応する	
燃料補給準備	—	—	—	2人 o~p	放射線防護具準備	10分																					
	—	—	—		非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等からタンクローリへの補給		2時間30分																				タンクローリ残量に応じて適宜非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等から補給
燃料補給作業	—	—	—	—	大量送水車への補給																					適宜実施	
必要人員数 合計	1人 A	2人 B, C	—	16人 a~p																							

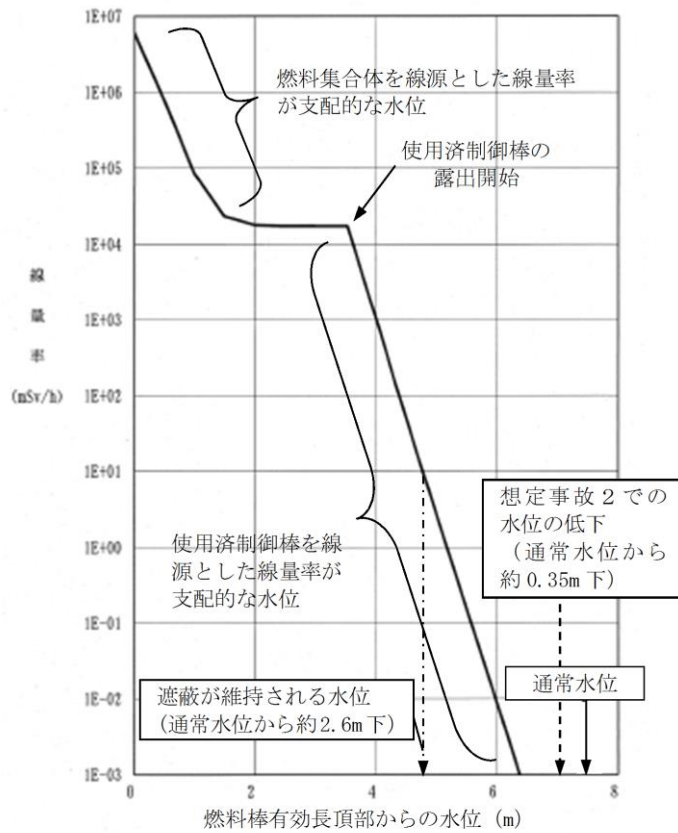
() 内の数字は他の作業終了後、移動して対応する人員数。

原子炉運転中における燃料プールでの事故を想定した場合、事象によっては、原子炉における重大事故の対応と燃料プールにおける重大事故に至るおそれのある事故の対応が重畳することも考えられる。しかし、燃料プールに貯蔵されている燃料の崩壊熱が低いことから時間余裕が十分長く (運転開始直後を考慮しても燃料プールの保有水が100℃に到達するまで1日以上)、原子炉側の事故対応が収束に向かっている状態での対応となるため、緊急時対策要員により対応可能である。

第 4.2.1-3 図 「想定事故 2」 の作業と所要時間



第 4.2.2-1 図 燃料プール水位の推移 (想定事故 2)



第 4.2.2-2 図 燃料プール水位と線量率 (想定事故 2)

第 4.2.1-1 表 「想定事故 2」の重大事故等対策について (1 / 2)

判断及び操作	手順	重大事故等対処設備		
		常設設備	可搬型設備	計装設備
燃料プールの水位低下確認	燃料プールを冷却している系統が機能喪失すると同時に、燃料プールの冷却系の配管破断によるサイフォン現象等により燃料プール内の水の小規模な漏えいが発生し、燃料プール水位が低下することを確認する。	【非常用ディーゼル発電機】※ 【非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク】※	—	燃料プール水位・温度 (SA) 燃料プール水位 (SA) 燃料プール監視カメラ (SA) (燃料プール監視カメラ用冷却設備を含む。)
燃料プールの注水機能喪失確認	燃料プールの水位低下分を注水するため、復水輸送系等による燃料プールへの注水準備を行う。中央制御室からの遠隔操作による燃料プールへの注水準備が困難な場合、燃料プールへの注水機能喪失であることを確認する。	—	—	【残留熱除去ポンプ出口圧力】※ 【残留熱除去ポンプ出口流量】※ 燃料プール水位・温度 (SA) 燃料プール水位 (SA) 燃料プールエリア放射線モニタ (高レンジ・低レンジ) (SA) 燃料プール監視カメラ (SA) (燃料プール監視カメラ用冷却設備を含む。)
サイフォンブレイク配管による燃料プール漏えい停止確認	燃料プールの水位低下に伴い発生する警報等により、燃料プールからの漏えいを認知し、初期水位から燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近まで水位が低下するが、サイフォンブレイク配管により漏えいが停止することを確認する。	—	—	燃料プール水位・温度 (SA) 燃料プール水位 (SA) 燃料プールエリア放射線モニタ (高レンジ・低レンジ) (SA) 燃料プール監視カメラ (SA) (燃料プール監視カメラ用冷却設備を含む。)

※：既許可の対象となっている設備を重大事故等対処設備に位置付けるもの
【 】：重大事故等対処設備 (設計基準拡張)

第 4.2.1-1 表 「想定事故 2」の重大事故等対策について (2/2)

判断及び操作	手順	重大事故等対処設備		
		常設設備	可搬型設備	計装設備
燃料プールスプレイ系 (常設スプレイヘッド) による燃料プールへの注水	燃料プールスプレイ系 (常設スプレイヘッド) の準備が完了したところで, 燃料プールスプレイ系 (常設スプレイヘッド) による燃料プールへの注水により燃料プールの水位を維持する。その後は, 燃料プールの冷却系を復旧しつつ, 蒸発量に応じた水量を注水することで, 燃料プールの水位を維持する。	常設スプレイヘッド 非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等※	大量送水車 タンクローリ	燃料プールの水位・温度 (SA) 燃料プールの水位 (SA) 燃料プールのエリア放射線モニタ (高レンジ・低レンジ) (SA) 燃料プールの監視カメラ (SA) (燃料プールの監視カメラ用冷却設備を含む。)
燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレイノズル) による燃料プールへの注水	燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレイノズル) の準備が完了したところで, 燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレイノズル) による燃料プールの注水により, 燃料プールの水位を維持する。その後は, 燃料プールの冷却系を復旧しつつ, 蒸発量に応じた水量を注水することで, 燃料プールの水位を維持する。	非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等※	可搬型スプレイノズル 大量送水車 タンクローリ	燃料プールの水位・温度 (SA) 燃料プールの水位 (SA) 燃料プールのエリア放射線モニタ (高レンジ・低レンジ) (SA) 燃料プールの監視カメラ (SA) (燃料プールの監視カメラ用冷却設備を含む。)

※: 既許可の対象となっている設備を重大事故等対処設備に位置付けるもの

【 】: 重大事故等対処設備 (設計基準拡張)

■: 有効性評価上考慮しない操作

第4.2.2-1表 主要評価条件 (想定事故2) (1/2)

項目		主要評価条件	条件設定の考え方
初期条件	燃料プール保有水量	約 1,599m ³	保有水量を厳しく見積もるためにプールゲート閉の状況を想定
	燃料プール水位	通常水位	通常水位を設定
	燃料プール水温	65℃	運転上許容される上限値として設定
	燃料の崩壊熱	約 7.8MW 【使用済燃料】 取出時平均燃焼度： ・ 9 × 9 燃料 45GWd/t ・ MOX燃料 33GWd/t	原子炉停止後に最短時間（原子炉停止後 10 日※ ¹ ）で取り出された全炉心分の燃料が、過去に取り出された貯蔵燃料と合わせて、使用済燃料貯蔵ラックに最大体数貯蔵されていることを想定し、ORIGEN 2 を用いて算出 また、原子炉停止 10 日後においては、MOX燃料の方が 9 × 9 燃料よりも崩壊熱が大きく、燃料プール水位低下の観点で厳しいため、燃料プールにおける使用済燃料の崩壊熱はMOX燃料を考慮
事故条件	安全機能の喪失に対する仮定	燃料プールの冷却機能及び注水機能喪失	燃料プールの冷却機能及び注水機能として、燃料プール冷却系、残留熱除去系、復水輸送系等の機能喪失を設定
	配管破断の想定	残留熱除去系配管の全周破断	燃料プール水位が最も低下する可能性のあるサイフォン現象による漏えいとして、残留熱除去系配管の全周破断を想定
	漏えいによる燃料プール水位の低下	事象発生と同時に通常水位から約 0.35m 下まで低下	燃料プール冷却系配管及び残留熱除去系配管に設置されている逆止弁については、燃料プール冷却系の配管で想定される異物の弁への噛み込みにより開固着し、逆止弁の機能が十分に働かない状態を仮定このとき、サイフォン現象により燃料プール水位は低下するが、サイフォンブレイク配管の効果により、燃料プール冷却系戻り配管水平部下端（通常水位より約 0.28m 下）に余裕をみた、通常水位から約 0.35m 下まで低下を設定。なお、この水位まで瞬時に低下するものとする
	外部電源	外部電源なし	外部電源の有無は事象進展に影響しないことから、資源の観点で厳しい外部電源なしを設定

※1 島根2号炉の定期検査における実績を確認し、解列後の全制御棒全挿入から原子炉開放までの最短時間である約5日及び全燃料取り出しの最短時間約5日を考慮して原子炉停止後10日を設定。原子炉停止後10日とは全制御棒全挿入からの時間を示している。通常停止操作において原子炉の出力は全制御棒全挿入完了及び発電機解列以前から徐々に低下させるが、崩壊熱評価はスクラムのような瞬時に出力を低下させる保守的な計算条件となっている。

第4.2.2-1表 主要評価条件 (想定事故2) (2/2)

項目		主要評価条件	条件設定の考え方
重大 関連する 機器条件	燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレインノズル)	48m ³ /h※2で注水	燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレインノズル) による注水を想定設備の設計を踏まえて設定
重大 関連する 操作 条件	燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレインノズル) による燃料プールへの注水	事象発生から約7.6時間後	燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレインノズル) による燃料プールへの注水準備は, 緊急時対策要員の移動及び注水準備に必要な時間等を考慮して, 事象発生3時間10分後までに完了するが, 燃料プールへの注水は燃料プールの水温が100℃に到達することにより燃料プール水位が低下し始める事象発生約7.6時間後を設定

※2 燃料プールスプレイ系 (可搬型スプレインノズル) 及び燃料プールスプレイ系 (常設スプレイヘッド) の注水容量はともに48m³/h以上である。

燃料プールの水位低下と遮蔽水位に関する評価について

1. 燃料プールの概要

添付資料 4. 1. 1 と同様である。

2. 放射線の遮蔽の維持に必要な燃料プールの遮蔽水位について

添付資料 4. 1. 1 と同様である。

3. 想定事故 2 における時間余裕

図 1 に示すように想定事故 2 では燃料プール冷却系配管及び残留熱除去系配管に設置されている逆止弁については開固着を仮定する。サイフォンブレイク配管により、サイフォン現象による流出を防止するため、燃料プール水位は燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近（通常水位から約 0.35m 下）までの低下にとどまり、保守的にこの水位まで瞬時に低下するものとする。

配管破断により保有水が漏えいし、燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近（通常水位から約 0.35m 下）まで水位が低下した場合、崩壊熱除去機能喪失に伴い、事象発生から約 7.6 時間後に沸騰の開始により水位が低下する。

燃料プール水位が通常水位から放射線の遮蔽が維持される最低水位（通常水位から約 2.6m 下）まで低下する時間は、事象発生から約 1.5 日であり、重大事故等対策として期待している燃料プールのスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水操作の時間余裕は十分ある（評価結果は表 1 のとおり）。

表 1 崩壊熱除去機能喪失及びサイフォン現象発生時の評価結果

項目	算定結果
燃料プール水温が 100°C に到達するまでの時間 (h)	約 7.6
燃料の崩壊熱による燃料プール保有水の蒸発量 (m ³ /h)	約 13
燃料プール水位が通常水位から約 2.6m 低下するまでの時間 (day)	約 1.5
燃料棒有効長頂部冠水部まで燃料プール水位が低下するまでの時間 (day)	約 3.7
燃料プール水位の低下速度 (m/h)	約 0.08

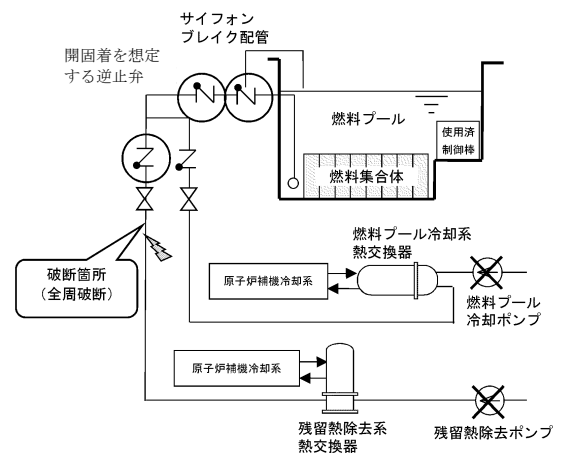


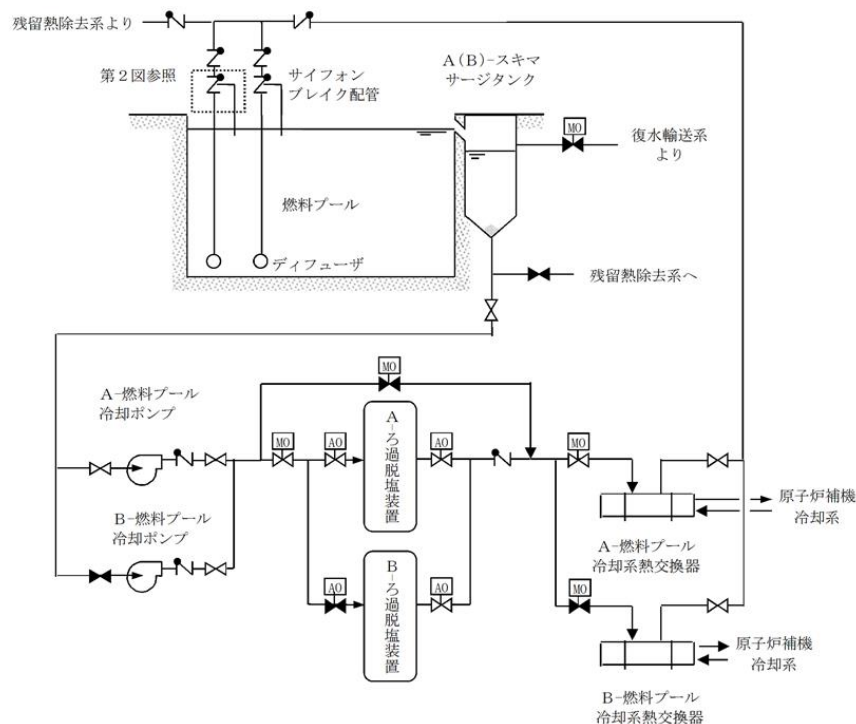
図 1 想定事故 2 の想定

燃料プールのサイフォンブレイク配管について

1. サイフォンブレイク配管の概要

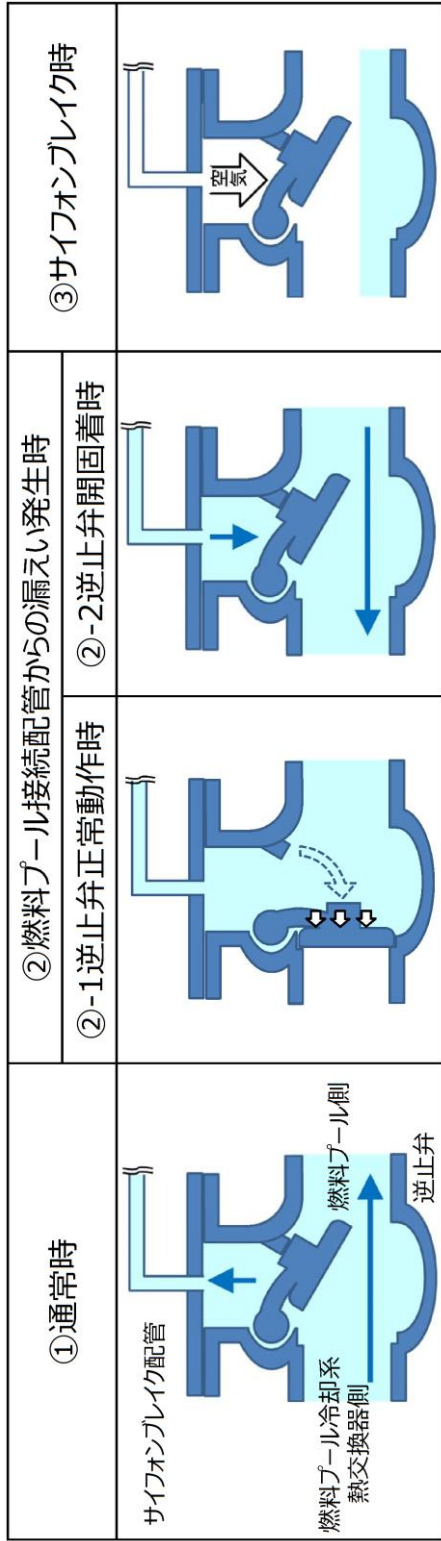
燃料プールは、第1図のように燃料プール冷却系により冷却及び水質管理されている。燃料プールの保有水がサイフォン現象により漏えいする場合は、燃料プール冷却系戻り配管に設置された逆止弁（2重化）により燃料プールの保有水の漏えいを防止する設計としている。仮に、逆止弁が開固着により機能喪失した状態でサイフォン現象が発生した場合は、サイフォンブレイク配管の開放端のレベルまで水位が低下した時点でサイフォンブレイク配管の開放端から空気が吸い込まれ、吸い込まれた空気が第2図③のように弁箱と開固着した弁体との間に形成されている隙間（第3図②，③参照）を通過し、燃料プール冷却系戻り配管へ流入することで、サイフォン現象による漏えいを停止することが可能な設計としている。

なお、サイフォンブレイク配管は、現場での施工性を考慮し、逆止弁の弁蓋に接続しているが、弁体等との干渉はなく、逆止弁の動作に影響はしないことから、サイフォン現象発生時の逆止弁機能に影響はない。また、弁箱と開固着した弁体との間に形成される隙間部の面積（ 1780mm^2 以上）は、サイフォンブレイク配管内面積（配管内面積： mm^2 ）より大きく、逆止弁開固着時にサイフォン現象が発生した場合であっても、逆止弁内部でサイフォンブレイク配管からの空気の流路が確保されることで、サイフォン現象を停止することが可能である。（第3図③参照）

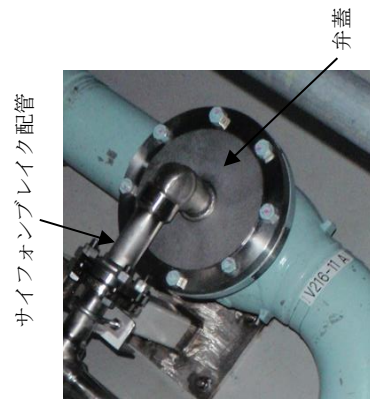


第1図 燃料プール冷却系系統概要図

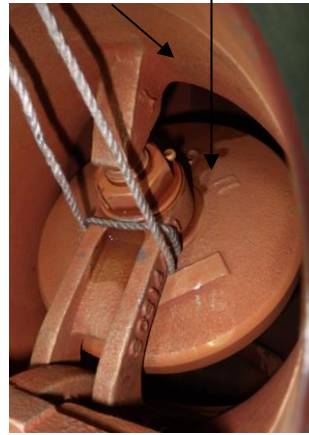
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



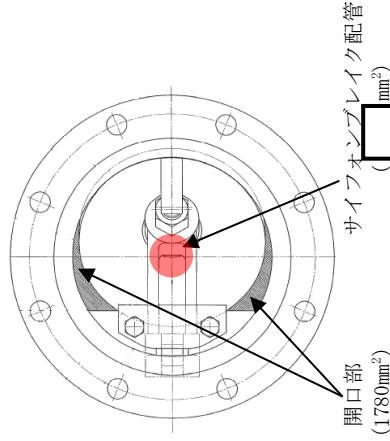
第2図 各状態における逆止弁内部概要図



① 逆止弁外観



② 逆止弁内部
(弁全開状態)



③ 逆止弁構造図
(弁全開状態)

第3図 逆止弁内部構造図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

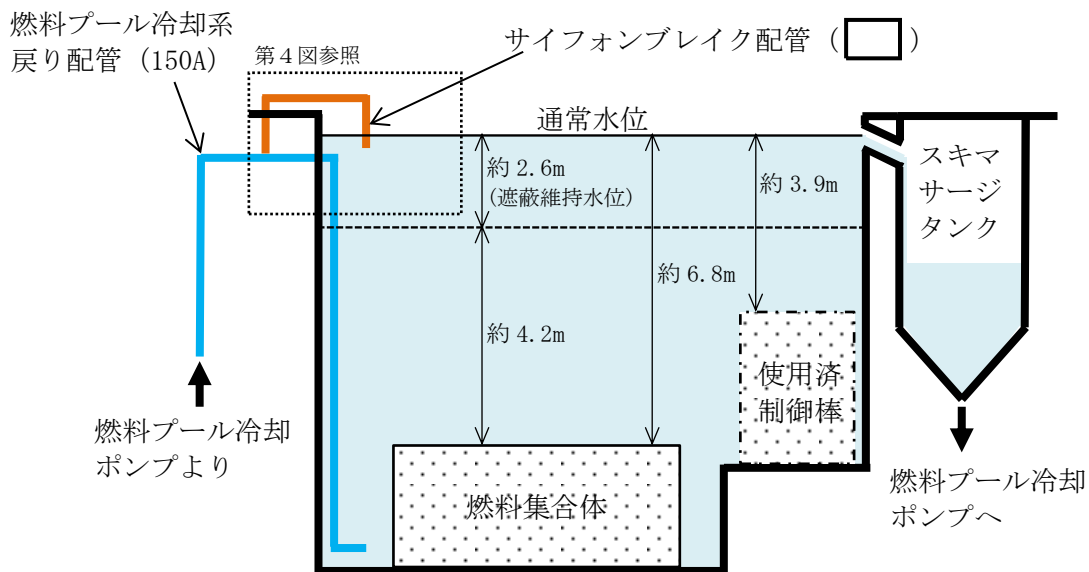
2. サイフォンブレイク配管の機器仕様

(1) サイフォンブレイク配管の寸法

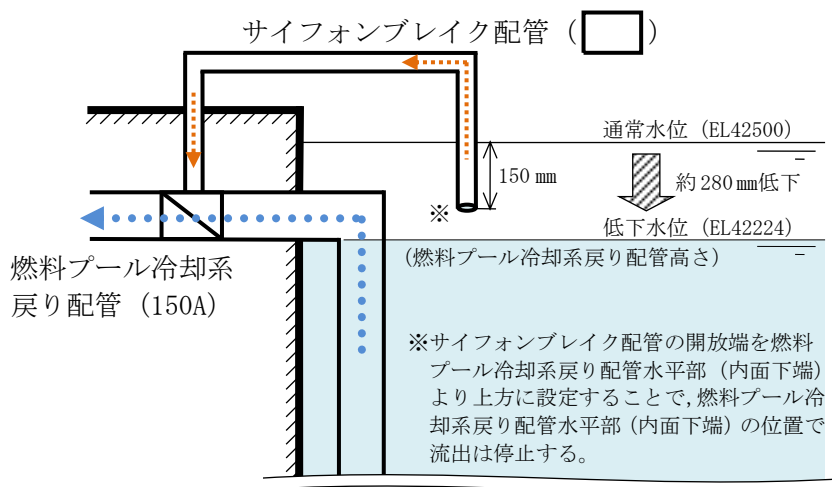
サイフォンブレイク配管は、2本の燃料プール冷却系戻り配管（150A）にそれぞれ設置する、弁等の機器がない口径 \square の配管である。

(2) サイフォンブレイク配管の設置レベル

サイフォンブレイク配管の設置位置及び燃料プール内のレベルを第4図に示す。サイフォンブレイク配管の開放端は通常水位より下方（150mm）に設置されており、燃料プールの保有水がサイフォン現象で流出した場合においても、水位低下を燃料プール冷却系戻り配管水平部（内面下端、通常水位より下方（約280mm））のレベルまでで留めることが可能である。



第4図 燃料プール内のレベル相関図



第5図 サイフォンブレイク配管設置レベル図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

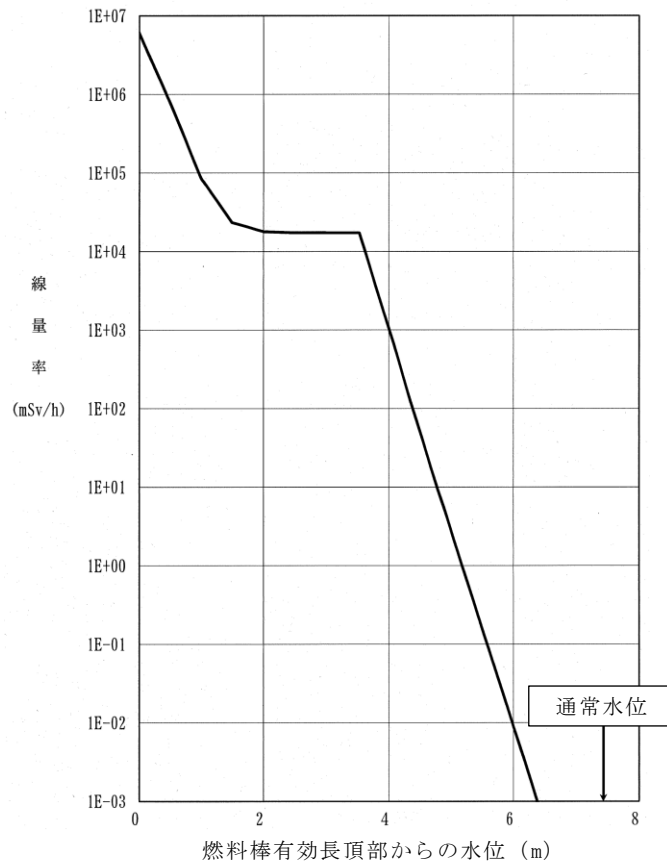
(3) サイフォン現象発生時の想定漏えい量

サイフォン現象が発生し、サイフォンブレイク配管の開放端まで水位が低下すると、当該開放端から空気を吸込み、燃料プール冷却系戻り配管水平部に空気が溜まり両側の配管内の水に力が伝わらなくなりサイフォン現象を止めることができる（第5図参照）。

この場合における漏えい量は約 46.8m^3 （通常水位より下方約280mm）となるが、想定事象2の解析で用いる漏えい量については、これに保守性を持たせて約 58.5m^3 （通常水位より下方約0.35m）で評価している。

(4) 想定被ばく線量率

燃料プールの保有水が流出した場合の、原子炉建物原子炉棟4階の被ばく線量評価結果を第6図に示す。第6図より、燃料プールの水位が通常水位から約0.35m下まで低下した場合においても原子炉建物原子炉棟4階の雰囲気線量率は $1.0 \times 10^{-3}\text{mSv/h}$ 以下であることから、燃料プールはサイフォン現象が発生した場合においても十分な遮蔽水位を確保することが可能である。



第6図 原子炉建物原子炉棟4階での被ばく線量率

3. サイフンブレイク配管の健全性について

(1) 配管強度への影響について

サイフンブレイク配管及びサイフンブレイク配管が取り付けられている燃料プール冷却系戻り配管は基準地震動 S_s に対し十分な耐震性を有している。

(2) 人的要因による機能阻害について

サイフンブレイク配管は、操作や作動機構を有さない構造であることから、誤操作や故障により機能喪失することはない。そのため、燃料プール保有水のサイフン現象による漏えいが発生した場合においても、操作や作業を実施することはなく、サイフンブレイク配管の開放端まで水位低下することで自動的にサイフン現象を止めることが可能である。

(3) 異物による閉塞について

燃料プールは、燃料プール冷却系の「スキマサージタンク」及び「ろ過脱塩器」により、下記の不純物を除去し水質基準を満足する設計となっており、不純物によるサイフンブレイク配管（口径 ）の閉塞を防止することが可能である。

- ・燃料プール水面上の空気中からの混入物
 - ・燃料プールに貯蔵される燃料及び機器表面に付着した不純物
 - ・燃料交換時に炉心から出る腐食生成物と核分裂生成物
 - ・燃料交換作業、その他の作業の際の混入物
 - ・燃料プール洗浄後の残留化学洗浄液又はフラッシング水
- a. スキマサージタンクによる異物除去について
スキマサージタンクには、約800mm×1170mmの異物混入防止用金網が設置されており、燃料プール水面に浮かぶ塵等の比較的大きな不純物を除去することが可能である。
- b. ろ過脱塩器による異物除去について
ろ過脱塩器は、イオン交換樹脂により燃料プール水を浄化する設備である。
このろ過脱塩器のエレメントは目開き約25 μ m程度であり、サイフンブレイク配管（口径 ）を閉塞させるような不純物の除去が可能である。
- c. 燃料プールの巡視について
燃料プールは、運転員により、1回/1日の巡視を実施することとなっており、サイフンブレイク配管を閉塞させる可能性がある浮遊物等がないことを確認することができる。このような巡視で浮遊物等を発見することにより、異物による閉塞を防止することが可能である。
- d. 地震等発生時における異物による閉塞の防止について
燃料プールの近傍は異物混入防止エリアとして設定して、原則シート養生を実施しない運用としている（プール脇の手すり等についても同様）。ただし、定期検査時の汚染拡大防止及び作業エリア内での作業

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

を避けることができず、プール内への異物混入防止のために養生が必要となる場合などの理由があるときには、必要箇所の養生を行うため、これらの養生シートがスロッシング等によりプール内に流れ込む懸念はある。

地震発生時に原子炉建物基礎マット上で10gal以上の揺れが確認された場合に運転員がパトロールを実施することとしており、燃料プール内に養生シート（黄色及び緑色）が落下している場合、発見することができる。また、地震発生時を含め中央制御室において燃料プール水位に関する警報が発せられた場合、原子炉建物原子炉棟4階に設置しているカメラを使用することで、中央制御室から燃料プール及びサイフォンブレイク配管開放端付近の状況を確認することができる（第7図参照）。

燃料プール内に落下した養生シートは、速やかに除去が行えるよう原子炉建物原子炉棟4階に除去用の治具を配備する。

（配備する治具）

①タモ、ケーブルフィッシャー

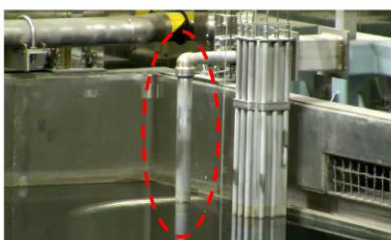
燃料プール上の養生シート片の除去

②ボートフック

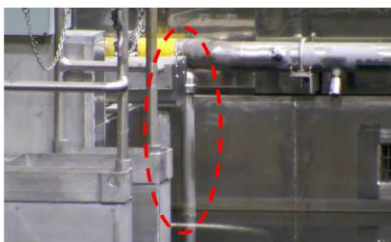
サイフォンブレイク配管開放端に張り付いた養生シート片の除去

仮にサイフォン現象による漏えいが発生している状況で原子炉建物原子炉棟4階の線量率が上昇してプール内に流れ込んだ浮遊物等を除去できず、かつ浮遊物等によるサイフォンブレイク配管の閉塞が発生した場合は漏えいが継続することとなる。

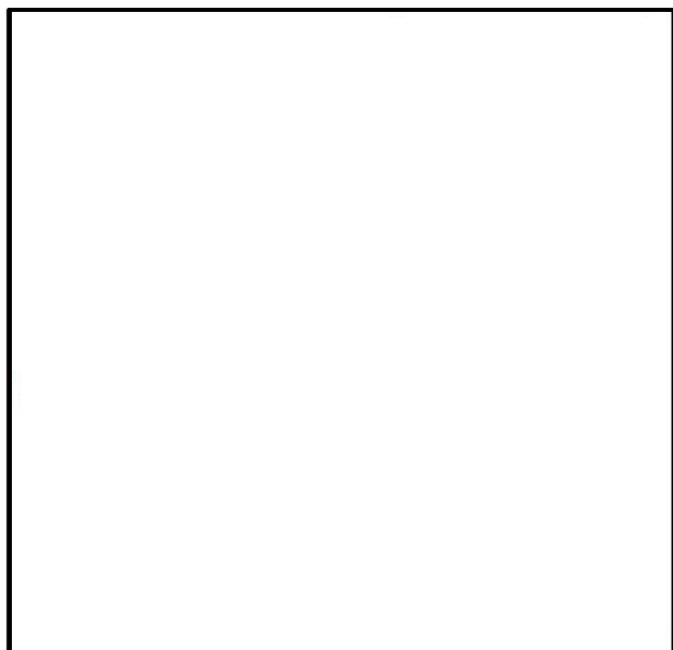
ただし、スロッシングによりサイフォンブレイク配管の開放端が露出している場合においては浮遊物等によるサイフォンブレイク配管の閉塞は発生しないと考えられる。



①燃料プール北側カメラ設置予定位置からの映像
（サイフォンブレイク配管（南側））



②燃料プール南側カメラ設置予定位置からの映像
（サイフォンブレイク配管（北側））



第7図 サイフォンブレイク配管設置位置図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

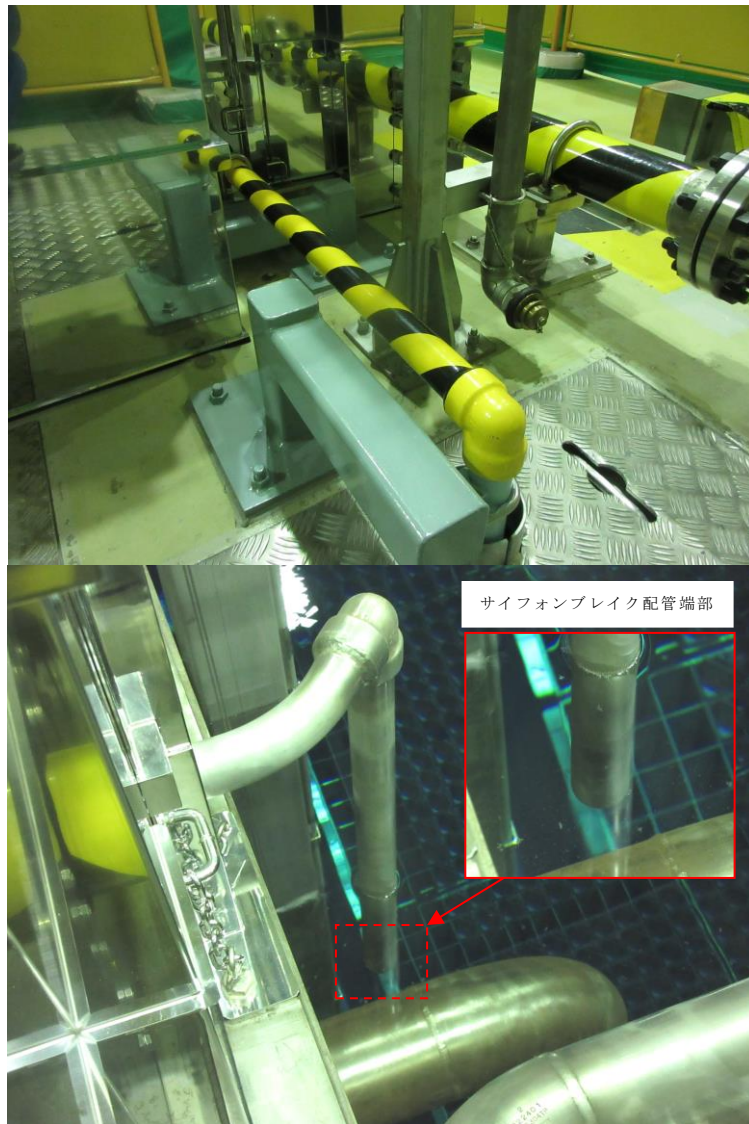
(4) 落下物干渉による影響

サイフォンブレイク配管は開放端を鉛直下向きになるよう設置しているため、仮に燃料プール内に異物混入があっても異物が端部に付着し留まることはない。

また、床面上に敷設しているサイフォンブレイク配管については囲い等を実施することにより、落下物による閉塞の影響を考慮した設計とする。

(5) サイフォンブレイク配管の健全性確認方法について

燃料プールの通常水位においてサイフォンブレイク配管の端部付近の水のゆらぎを目視により確認するが、目視確認が困難な場合は聴診棒による聴音により通水状況の確認を実施する。



第8図 サイフォンブレイク配管の設置状況

安定状態について（想定事故2）

想定事故2（サイフォン現象等による燃料プール内の水の小規模な喪失）の安定状態については以下のとおり。

燃料プール安定状態：設計基準事故対処設備及び重大事故等対処設備を用いた燃料プールへの注水により燃料プール水位を維持することで、燃料の冠水、放射線遮蔽及び未臨界が維持され、燃料プールの保有水の温度が安定し、かつ、必要な要員の不足、資源の枯渇等のあらかじめ想定される事象悪化のおそれがない場合、安定状態が確立されたものとする。

【安定状態の確立について】

燃料プールの安定状態の確立について

燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）を用いた燃料プールへの注水を実施することで、燃料プール水位が維持され、燃料プールの安定状態が確立される。

重大事故等対策時に必要な要員は確保可能であり、また、必要な水源、燃料及び電源を供給可能である。

【安定状態の維持について】

上記の燃料損傷防止対策により安定状態を維持できる。

また、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水を継続し、残留熱除去系又は燃料プール冷却系を復旧し、復旧後は復水輸送系等によりスキマサージタンクへの補給を実施する。燃料プールの保有水を残留熱除去系等により冷却することによって、安定状態後の状態維持のための冷却が可能となる。

（添付資料 2.1.1 別紙 1 参照）

表 1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響 (想定事故 2) (1 / 3)

項目	評価条件 (初期、事故及び機器条件) の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
燃料プールの保有水量	約 1,599m ³	約 1,599m ³	保有水量を厳しく見積もるためにプールゲート閉の状況を想定	燃料プール水位及びブールゲートの状態の不確かさに含まれる。	燃料プール水位及びブールゲートの状態の不確かさに含まれる。
燃料プールの初期水位	通常水位	通常水位付近	通常水位を設定	<p>最確条件とした場合は、評価条件での初期水位は通常水位を想定しているため、通常水位より低い水位の変動を考慮した場合、燃料プール水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間及び燃料プール水位の低下による異常の認知の時間は短くなるが、燃料プールの注水操作は初期水位に合った対応をとるのではなく、燃料プールの初期水位の低下に伴う冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。</p> <p>初期に地震起因のスロッシングが発生した場合、最大で約 1.1m (スロッシング量: 180m³) の水位の低下が発生するが、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約 1.1 日 (10mSv/h の場合)、燃料プール水位が通常水位から、燃料棒有効長頂部まで低下する時間は事象発生から約 3.3 日あり、事象発生から 3 時間 10 分後までに燃料プールの注水が可能となるパラメータに与える影響は小さい。</p>	<p>最確条件とした場合は、評価条件での初期水位は通常水位を想定しているため、その変動を考慮した場合、燃料プール水位が初期水位から燃料棒有効長頂部まで低下する時間は短くなるが、仮に初期水位を水位低警報レベル (通常水位から約 0.27m 下) とした場合であっても、漏えいにより瞬時に水位が低下しサイフォンブレイク配管により燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近 (通常水位から約 0.35m 下) で停止することから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。</p> <p>初期に地震起因のスロッシングが発生した場合、最大で約 1.1m (スロッシング量: 180m³) の水位の低下が発生するが、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約 1.1 日 (10mSv/h の場合)、燃料プール水位が通常水位から、燃料棒有効長頂部まで低下する時間は事象発生から約 3.3 日あり、事象発生から 3 時間 10 分後までに燃料プールの注水が可能となるパラメータに与える影響は小さい。</p>
初期条件					
燃料プールの初期水温	65°C	約 17°C~約 40°C (実績値)	<p>運転上許容される上限値として設定</p>	<p>最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料プールの初期水温より低くなるが、沸騰開始時間は遅くなるため、時間余裕が長くなるが、燃料プールの注水操作は、燃料プールの初期水温に合った対応をとるものではなく、燃料プールの初期水位の低下に伴う異常の認知を起点とした冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。</p>	<p>最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料プール水温より低くなるため、沸騰開始時間は遅くなり、燃料プール水位の低下は緩和されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。</p> <p>また、自然蒸発、燃料プールの水温及び温度上昇の非一様性により、評価で想定している沸騰による燃料プール水位低下開始時間より早く燃料プール水位の低下が始まることも考えられる。しかし、自然蒸発による影響は沸騰による水位低下と比べて僅かであり、気化熱により燃料プールの水温が冷却される。さらに、燃料プールの水温の非一様性も沸騰開始後の気泡上昇を駆動力とした対流により影響が小さくなることが考えられる。仮に、事象発生直後から沸騰による燃料プールの水位低下が開始すると想定した場合であっても、燃料プール水位が放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約 1.2 日 (10mSv/h の場合)、燃料棒有効長まで水位が低下するまでの時間は事象発生から約 3.4 日あり、事象発生から 3 時間 10 分後までに燃料プールの注水が可能であることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。</p>

※1 本評価値は、燃料プールへの戻り水の影響を考慮していない保守的なものであり、これらを考慮するとスロッシング量は小さくなる。

表 1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間となるパラメータに与える影響 (想定事故 2) (2 / 3)

項目	評価条件 (初期、事故及び機器条件) の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
燃料の崩壊熱	約 7.8MW 【使用済燃料】 取出時平均燃焼度： ・ 9 × 9 燃料 45GW/t ・ MOX 燃料 33GW/t	約 7.8MW 以下 (実績値)	原子炉停止後に最短時間 (原子炉停止後 10 日) で取り出された全炉心分の燃料が、過去に取り出された貯蔵燃料と合わせて、使用済燃料貯蔵トラックに最大体数貯蔵されていることを想定し、ORIGEN2 を用いて算出	最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料の崩壊熱より小さくなるため、燃料プール水位の低下は緩和されるが、燃料プールのレイ系 (可搬型スプレイノズル) による燃料プールへの注水操作は、燃料の崩壊熱に応じた対応をとるものではなく、燃料プール水位の低下に伴う異常の認知を起点とした冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
	ブールゲートの状態	ブールゲート閉 (原子炉ウエル及びDSPの保有水量を考慮しない)	ブールゲート開 (原子炉ウエル及びDSPの保有水量を考慮)	全炉心燃料取出直後であるため、ブールゲートは開放されていることが想定されるが、燃料プールの保有水量を厳しく見積もるためにブールゲート閉を想定	最確条件とした場合は、保有水量がブールゲート閉と比べ2倍程度となり、燃料プールの水温の上昇及び蒸発による燃料プール水位の低下は緩和されるが、燃料プールのスプレイ系 (可搬型スプレイノズル) による燃料プールへの注水操作は、ブールゲートの状態に応じた対応をとるものではなく、燃料プール水位の低下に伴う異常の認知を起点とした冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。
外部水源の容量	約 7,000m ³	約 7,000m ³ 以上 (合計貯水量)	通常時の水量を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合には、解析条件よりも水源容量の余裕が大きくなるため、運転員等操作時間に与える影響はない。	—
燃料の容量	1,180m ³	1,180m ³ 以上 (合計貯蔵量)	通常時の運用値を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合には、解析条件よりも燃料容量の余裕が大きくなるため、運転員等操作時間に与える影響はない。	—

表1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間となるパラメータに与える影響(想定事故2)(3/3)

項目	評価条件(初期,事故及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
安全機能の喪失に対する仮定	燃料プールの冷却機能喪失及び注水機能	-	燃料プールの冷却機能及び注水機能として燃料プール冷却系,残留熱除去系,復水輸送系等の機能喪失を設定	-	-
事故条件	配管破断の想定	残留熱除去系配管の全周破断	燃料プール水位が最も低下する可能性があるサイフォン現象による漏えいとして,残留熱除去系配管の全周破断を想定	配管破断の想定及びサイフォン現象による燃料プール水位の低下は,破断面種及び弁の開口面積に応じて水位低下速度が変動するが,本評価では,サイフォンブレイク配管による漏えい停止を考慮しており,燃料プール水位が燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近(通常水位から約0.35m下)まで瞬時に低下することから,サイフォンブレイク配管により,燃料プール水位が燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近(通常水位から約0.35m下)まで瞬時に低下することから,燃焼型スプレイ系(可搬型スプレイノズル)による燃料プールへの注水操作は水位低下速度に合わせた対応をとるものではなく,水位低下に伴う異常の認知を起点とした冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであるため,運転員等操作時間に与える影響はない。	配管破断の想定及びサイフォン現象による燃料プール水位の低下は,破断面種及び弁の開口面積に応じて水位低下速度が変動するが,本評価では,サイフォンブレイク配管による漏えい停止を考慮しており,燃料プール水位が燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近(通常水位から約0.35m下)まで瞬時に低下することから,サイフォンブレイク配管により,燃料プール水位が燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近(通常水位から約0.35m下)まで瞬時に低下することから,燃焼型スプレイ系(可搬型スプレイノズル)による燃料プールへの注水操作は水位低下速度に合わせた対応をとるものではなく,水位低下に伴う異常の認知を起点とした冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであるため,運転員等操作時間に与える影響はない。
	サイフォン現象による燃料プール水位の低下	サイフォン現象により,サイフォン現象による流出が停止するため,燃料プール水位は燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近(通常水位より0.35m下)までの低下にとどまり,保守的にこの水位まで瞬時に低下することを想定	サイフォンブレイク配管により,サイフォン現象による流出が停止するため,燃料プール水位は燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近(通常水位より0.35m下)までの低下にとどまり,保守的にこの水位まで瞬時に低下することを想定	サイフォンブレイク配管により,燃料プール水位が燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近(通常水位から約0.35m下)まで瞬時に低下することから,燃焼型スプレイ系(可搬型スプレイノズル)による燃料プールへの注水操作は水位低下速度に合わせた対応をとるものではなく,水位低下に伴う異常の認知を起点とした冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであるため,運転員等操作時間に与える影響はない。	サイフォン現象による燃料プール水位の低下は,破断面種及び弁の開口面積に応じて水位低下速度が変動するが,本評価では,サイフォンブレイク配管による漏えい停止を考慮しており,燃料プール水位が燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近(通常水位から約0.35m下)まで瞬時に低下することから,サイフォンブレイク配管により,燃料プール水位が燃料プール冷却系戻り配管水平部高さ付近(通常水位から約0.35m下)まで瞬時に低下することから,燃焼型スプレイ系(可搬型スプレイノズル)による燃料プールへの注水操作は水位低下速度に合わせた対応をとるものではなく,水位低下に伴う異常の認知を起点とした冷却機能喪失又は注水機能喪失の確認を起点とするものであるため,運転員等操作時間に与える影響はない。
	外部電源	外部電源なし	外部電源に変化	外部電源の有無は事象進展に影響しないことから,資源の観点で厳しい外部電源なしを設定	外部電源がない場合と外部電源がある場合では,事象進展は同じであることから,運転員等操作時間に与える影響はない。
機器条件	燃料プール系(可搬型スプレイノズル)による燃料プールへの注水流量	48m ³ /h	燃料プール系(可搬型スプレイノズル)による注水を想定設備の設計を踏まえて設定	燃料プール系(可搬型スプレイノズル)による注水流量を起点に開始する操作ではないことから,運転員等操作時間に与える影響はない。	評価条件で設定している燃料プール系(可搬型スプレイノズル)による注水流量は崩壊熱による保有水の蒸発量(最大13m ³ /h)より大きく,注水操作開始以降の流量であることから,評価項目となるパラメータに与える影響はない。

7日間における水源の対応について（想定事故2）

○水源

輪谷貯水槽（西1／西2）※：約7,000 m³（約3,500m³×2）

※設置許可基準規則56条【解釈】1b)項を満足するための代替淡水源（措置）

○水使用パターン

①燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プールへの注水

事象発生約7.6時間後から水位を維持できるよう崩壊熱相当の流量（13 m³/h）で注水を実施する。

○時間評価

燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）による燃料プール注水が実施されているため輪谷貯水槽（西1／西2）水量は減少する。

○水源評価結果

事象発生約7.6時間後から崩壊熱相当の流量（13 m³/h）で注水を実施するため7日間では合計約2,100 m³の水量が必要となり、十分に水量を確保しているため対応可能である。

13 m³/h × (168h-7.6h) ≒ 2,100 m³

7日間における燃料の対応について（想定事故2）

保守的にすべての設備が、事象発生直後から7日間燃料を消費するものとして評価する。

時系列	合計	判定
非常用ディーゼル発電機 2台起動 ^{※1} (燃料消費率は保守的に最大負荷(定格出力運転)時を想定) $1.618\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 2\text{台} = 543.648\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 712m^3	非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等の容量は約 730m^3 であり、7日間対応可能
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 1台起動 (燃料消費率は保守的に最大負荷(定格出力運転)時を想定) $0.927\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 155.736\text{m}^3$		
大量送水車 1台起動 $0.0677\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 11.3736\text{m}^3$		
緊急時対策所用発電機 1台 (燃料消費率は保守的に最大負荷(定格出力運転)時を想定) $0.0469\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 7.8792\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 8m^3	緊急時対策所用燃料地下タンクの容量は約 45m^3 であり、7日間対応可能

※1 事故収束に必要な非常用ディーゼル発電機は1台であるが、保守的に非常用ディーゼル発電機2台を起動させて評価した。

5. 運転停止中の原子炉における重大事故に至るおそれがある事故

5.1 崩壊熱除去機能喪失

5.1.1 事故シーケンスグループの特徴，燃料損傷防止対策

(1) 事故シーケンスグループ内の事故シーケンス

事故シーケンスグループ「崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系の故障による停止時冷却機能喪失）」に含まれる事故シーケンスは、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、「崩壊熱除去機能喪失＋崩壊熱除去・炉心冷却失敗」及び「外部電源喪失＋崩壊熱除去・炉心冷却失敗」である。

(2) 事故シーケンスグループの特徴及び燃料損傷防止対策の基本的考え方

事故シーケンスグループ「崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系の故障による停止時冷却機能喪失）」では、原子炉の運転停止中に残留熱除去系の故障により、崩壊熱除去機能が喪失することを想定する。このため、燃料の崩壊熱により原子炉冷却材が蒸発することから、緩和措置がとられない場合には、原子炉水位の低下により燃料が露出し燃料損傷に至る。

本事故シーケンスグループは、崩壊熱除去機能を喪失したことによって燃料損傷に至る事故シーケンスグループである。このため、運転停止中の原子炉における燃料損傷防止対策の有効性評価には、崩壊熱除去機能に対する重大事故等対処設備に期待することが考えられる。

したがって、本事故シーケンスグループでは、運転員が異常を認知して、待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水を行うことによって燃料損傷の防止を図る。また、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転による最終的な熱の逃がし場へ熱の輸送を行うことにより、原子炉を除熱する。

(3) 燃料損傷防止対策

事故シーケンスグループ「崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系の故障による停止時冷却機能喪失）」における機能喪失に対して、燃料が著しい損傷に至ることなく、かつ、十分な冷却を可能とするため、待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水手段及び残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱手段を整備する。また、原子炉補機冷却機能喪失により残留熱除去機能が喪失した場合については「5.2 全交流動力電源喪失」にて燃料損傷防止対策の有効性を確認する。これらの対策の概略系統図を第5.1.1-1(1)図及び第5.1.1-1(2)図に、手順の概要を第5.1.1-2図に示すとともに、重大事故等対策の概要を以下に示す。また、重大事故等対策における設備と操作手順の関係を第5.1.1-1表に示す。

本事故シーケンスグループにおける重要事故シーケンスにおいて、重大事故等対策に必要な要員は、中央制御室の運転員及び緊急時対策要員で構成され、合計10名である。その内訳は次のとおりである。中央制御室の運転員は、当直長1名、当直副長1名、運転操作対応を行う運転員3名である。発電所構内に常駐している要員のうち、通報連絡等を行う緊急時対策本部要員は5名である。必要な要員と作業項目について第5.1.1-3図に示す。

なお、重要事故シーケンス以外の事故シーケンスについては、作業項目を重要事故シーケンスと比較し、必要な要員数を確認した結果、10名で対処可能である。

- a. 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の故障に伴う崩壊熱除去機能喪失確認

原子炉の運転停止中に残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の故障により、崩壊熱除去機能が喪失する。これにより、原子炉水温が上昇し100℃に到達する。運転員は原子炉水温の上昇等を確認し、崩壊熱除去機能喪失を確認する。

残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の故障に伴う崩壊熱除去機能喪失を確認するために必要な計装設備は、残留熱除去系熱交換器出口温度等である。

- b. 逃がし安全弁による原子炉の低圧状態維持

崩壊熱除去機能喪失により原子炉水温が100℃に到達し、原子炉圧力が上昇することから、原子炉を低圧状態に維持するため、中央制御室からの遠隔操作により逃がし安全弁（自動減圧機能付き）1個を開操作する。

逃がし安全弁（自動減圧機能付き）による原子炉の低圧状態維持を確認するために必要な計装設備は、原子炉圧力（SA）、原子炉圧力等である。

- c. 残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水

崩壊熱除去機能喪失により原子炉冷却材が蒸発し、原子炉水位が低下するため、中央制御室からの遠隔操作により待機していた残留熱除去系（低圧注水モード）運転による原子炉注水を開始し、原子炉水位を回復する。

残留熱除去系（低圧注水モード）運転による原子炉注水を確認するために必要な計装設備は、残留熱除去ポンプ出口流量等である。

- d. 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転による崩壊熱除去機能回復

残留熱除去系（低圧注水モード）運転による原子炉水位回復後、中央制御室及び現場にて残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）へ切替えを行い、崩壊熱除去機能を回復する。

残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転による崩壊熱除去機能回復を確認するために必要な計装設備は、残留熱除去系熱交換器入口温度等である。

崩壊熱除去機能回復後、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）を全閉とし、原子炉低圧状態の維持を停止する。

5.1.2 燃料損傷防止対策の有効性評価

(1) 有効性評価の方法

本事故シーケンスグループを評価するうえで選定した重要事故シーケンスは、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、「崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系機能喪失[フロントライン]）+崩壊熱除去・炉心冷却失敗」である。

本重要事故シーケンスにおいて想定するプラント状態は、崩壊熱、原子炉冷却材の保有水量及び注水手段の多様性の観点から、「POS-A 格納容器及び原子炉圧力容器の開放並びに原子炉ウェル満水への移行状態」が燃料棒有効長頂部の冠水、放射線の遮蔽が維持される水位の確保及び未臨界の確保に対して、最も厳しい想定である。したがって、当該プラント状態を基本とし、他の

プラント状態も考慮した想定において評価項目を満足することを確認することにより、運転停止中の他のプラント状態においても、評価項目を満足できる。

また、評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、本重要事故シーケンスにおける運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価する。

(添付資料5.1.1, 5.1.2)

(2) 有効性評価の条件

本重要事故シーケンスに対する初期条件も含めた主要な評価条件を第5.1.2-1表に示す。また、主要な評価条件について、本重要事故シーケンス特有の評価条件を以下に示す。

a. 初期条件

(a) 原子炉圧力容器の状態

原子炉圧力容器の未開放時について評価する。原子炉圧力容器の開放時については、燃料の崩壊熱及び保有水量の観点から、未開放時の評価に包絡される。

(b) 崩壊熱

原子炉停止後の崩壊熱は、ANSI/ANS-5.1-1979の式に基づくものとし、また、崩壊熱を厳しく見積もるために、原子炉停止1日後の崩壊熱を用いる。このときの崩壊熱は約14.0MWである。

なお、崩壊熱に相当する原子炉冷却材の蒸発量は約23m³/hである。

(添付資料5.1.3)

(c) 原子炉水位及び原子炉水温

事象発生前の原子炉水位は通常運転水位とし、また、原子炉水温は52℃とする。

(d) 原子炉圧力

原子炉の初期圧力は大気圧が維持されているものとする。また、事象発生後において、水位低下量を厳しく見積もるために、原子炉圧力は大気圧に維持されているものとする^{*1}。

※1 実操作では残留熱除去系（低圧注水モード）の注水準備が完了した後で原子炉減圧を実施することとなり、残留熱除去系（低圧注水モード）の注水特性に応じて大気圧より高い圧力で注水が開始されることとなる。大気圧より高い圧力下での原子炉冷却材の蒸発量は大気圧下と比べ小さくなるため、原子炉圧力が大気圧に維持されているとした評価は保守的な条件となる。

b. 事故条件

(a) 起因事象

起因事象として、運転中の残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の故障によって、崩壊熱除去機能を喪失するものとする。

(b) 安全機能喪失に対する仮定

起因事象の想定により、運転中の残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の機能が喪失するものとする。

(c) 外部電源

外部電源は使用できないものと仮定する。

外部電源が使用できない場合においても、非常用ディーゼル発電機にて残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水が可能であり、外部電源がある場合と事象進展は同等となるが、資源の評価の観点で厳しい評価条件となる外部電源が使用できない場合を想定する。

c. 重大事故等対策に関連する機器条件

(a) 残留熱除去系（低圧注水モード）

残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水流量は $1,136\text{m}^3/\text{h}$ とする。

(b) 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）

伝熱容量は、熱交換器 1 基あたり約 9 MW（原子炉冷却材温度 52°C 、海水温度 30°C において）とする。

d. 重大事故等対策に関連する操作条件

運転員等操作に関する条件として、「1.3.5 運転員等の操作時間に対する仮定」に示す分類に従って以下のとおり設定する。

- (a) 残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水は、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）故障に伴う崩壊熱除去機能喪失確認を考慮し、事象発生から 2 時間後に実施するものとする。

(3) 有効性評価の結果

本重要事故シーケンスにおける原子炉水位の推移を第 5.1.2-1 図に、原子炉水位と線量率の関係を第 5.1.2-2 図に示す。

a. 事象進展

事象発生後、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の故障に伴い崩壊熱除去機能が喪失することにより原子炉水温が上昇し、事象発生から約 0.9 時間後に沸騰、蒸発することにより原子炉水位は低下し始める。残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の機能喪失に伴う原子炉水温の上昇により異常を認知し、事象発生から 2 時間後に待機中の残留熱除去ポンプを起動し、残留熱除去系（低圧注水モード）による注水を行う。

原子炉水位回復から約 30 分後、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）へ切り替え、除熱を開始することによって、原子炉水温は低下する^{※2}。

- ※2 原子炉冷却材の温度が 100°C の場合における残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）1 系統での除熱能力は、燃料の崩壊熱を上回るため、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）への切替えを実施することで原子炉水温は低下する。

実操作では残留熱除去系（低圧注水モード）の準備が完了した後で原子炉減圧を実施することとなり、残留熱除去系（低圧注水モード）の注水特性に応じて大気圧より高い圧力で注水が開始されることとなる。そのため、原子炉圧力が大気圧で維持されているとした評価は保守的な条件となる。

b. 評価項目等

原子炉水位は、第5.1.2-1図に示すとおり、燃料棒有効長頂部の約4.0m上まで低下するに留まり、燃料は冠水維持される。

原子炉圧力容器は未開放であり、第5.1.2-2図に示すとおり、必要な遮蔽^{※3}が維持される水位である燃料棒有効長頂部の約1.8m上を下回ることがないため、放射線の遮蔽は維持される。なお、線量率の評価点は原子炉建物原子炉棟4階の燃料取替機台車床としている。また、全制御棒全挿入状態が維持されているため、未臨界は確保されている。

原子炉水位回復後、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による除熱を継続することで、長期的に安定状態を維持できる。

本評価では、「1.2.4.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(1)から(3)の評価項目について、対策の有効性を確認した。

※3 必要な遮蔽の目安とした線量率は10mSv/hとする。崩壊熱除去機能喪失における原子炉建物原子炉棟4階からの現場作業員の退避は2時間以内であり、作業員の被ばく量は最大でも20mSvとなるため、緊急作業時における被ばく限度の100mSvに対して余裕がある。

本事故に応じた燃料損傷防止対策において原子炉建物原子炉棟4階での操作を必要な作業としていないが、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）を使用した燃料プールへの注水について仮に考慮し、可搬型スプレイノズル及びホースの設置にかかる作業時間を想定した。

必要な遮蔽の目安とした線量率10mSv/hは、定期検査作業時での原子炉建物原子炉棟4階における線量率を考慮した値である。

この線量率となる水位は燃料棒有効長頂部の約1.8m上（通常水位から約3.3m下）の位置である。

（添付資料4.1.2, 5.1.4, 5.1.5, 5.1.6）

5.1.3 評価条件の不確かさの影響評価

評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価するものとする。

本重要事故シーケンスは、原子炉の運転停止中に残留熱除去系の故障により、崩壊熱除去機能を喪失することが特徴である。また、不確かさの影響を確認する運転員等操作は、待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水操作とする。

(1) 評価条件の不確かさの影響評価

a. 初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件

初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件は、第5.1.2-1表に示すとおりであり、それらの条件設定を設計値等、最確条件とした場合の影響を評価する。また、評価条件の設定に当たっては、評価項目となるパラメータに対する余裕が小さくなるような設定があることから、その中で事象進展に有意な影響を与えると考えられる項目に関する影響評価の結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

初期条件の燃料の崩壊熱は、評価条件の約14.0MWに対して最確条件は約14.0MW以下であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場

合は、評価条件で設定している燃料の崩壊熱より小さくなるため、原子炉水温の上昇及び原子炉水位の低下は緩和されるが、注水操作は崩壊熱に応じた対応をとるものではなく、崩壊熱除去機能喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉水温は、評価条件の 52℃に対して最確条件は約 29℃～約 46℃であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、事象発生ごとに異なる。原子炉水温が 100℃かつ原子炉停止から 12 時間後の燃料の崩壊熱を用いて原子炉注水までの時間余裕を評価すると、必要な遮蔽が維持される水位（必要な遮蔽の目安とした 10mSv/h が維持される水位）である燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上の高さに到達するまでの時間は事象発生から約 2.7 時間となることから、評価条件である原子炉水温が 52℃、原子炉停止から 1 日後の燃料の崩壊熱の場合の評価より時間余裕は短くなるが、注水操作は原子炉水温に応じた対応をとるものではなく、崩壊熱除去機能喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉水位は、評価条件の通常運転水位に対して最確条件は通常運転水位以上であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している原子炉水位より高くなるため、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は長くなるが、注水操作は原子炉水位に応じた対応をとるものではなく、崩壊熱除去機能喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉圧力は、評価条件の大気圧に対して最確条件も大気圧であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。仮に、原子炉圧力が大気圧より高い場合は、沸騰開始時間は遅くなり、原子炉水位の低下は緩和されるが、注水操作は原子炉圧力に応じた対応をとるものではなく、崩壊熱除去機能喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉圧力容器の状態は、評価条件の原子炉圧力容器の未開放に対して最確条件は事象発生ごとに異なるものであり、本評価条件の不確かさとして、原子炉圧力容器の未開放時は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。原子炉圧力容器の開放時は、原子炉減圧操作が不要となるが、事象進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

初期条件の燃料の崩壊熱は、評価条件の約 14.0MW に対して最確条件は約 14.0MW 以下であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料の崩壊熱より小さくなるため、原子炉水温の上昇及び原子炉水位の低下は緩和されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。仮に、原子炉停止後の時間が短く、燃料の崩壊熱が大きい場合は、注水までの時間余裕が短くなることから、評価項目に対する余裕は小さくなる。原子炉停止から 12 時間後の燃料の

崩壊熱を用いて原子炉注水までの時間余裕を評価すると、必要な遮蔽が維持される水位（必要な遮蔽の目安とした 10mSv/h が維持される水位）である燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上の高さに到達するまでの時間は事象発生から約 2.7 時間、燃料棒有効長頂部到達まで事象発生から約 4.2 時間となることから、評価条件である原子炉停止 1 日後の評価より時間余裕は短くなる。ただし、必要な放射線の遮蔽は維持され、原子炉注水までの時間余裕も十分な時間が確保されていることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

初期条件の原子炉水温は、評価条件の 52°C に対して最確条件は約 29°C ～約 46°C であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、事象発生ごとに異なる。原子炉水温が 100°C かつ原子炉停止から 12 時間後の燃料の崩壊熱を用いて原子炉注水までの時間余裕を評価すると、必要な遮蔽が維持される水位（必要な遮蔽の目安とした 10mSv/h が維持される水位）である燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上の高さに到達するまでの時間は事象発生から約 2.7 時間となることから、評価条件である原子炉水温が 52°C かつ原子炉停止から 1 日後の燃料の崩壊熱の場合の評価より時間余裕は短くなる。ただし、必要な放射線の遮蔽は維持され、原子炉注水までの時間余裕も十分な時間が確保されていることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

初期条件の原子炉水位は、評価条件の通常運転水位に対して最確条件は通常運転水位以上であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している原子炉水位より高くなるため、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで水位が低下する時間は長くなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

初期条件の原子炉圧力は、評価条件の大気圧に対して最確条件も大気圧であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。仮に、原子炉圧力が大気圧より高い場合は、沸騰開始時間が遅くなり、原子炉水位の低下は緩和されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる^{*4}。

初期条件の原子炉圧力容器の状態は、評価条件の原子炉圧力容器の未開放に対して最確条件は事象発生ごとに異なるものであり、本評価条件の不確かさとして、原子炉圧力容器の未開放時は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。原子炉圧力容器の開放時は、原子炉減圧操作が不要となるが、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

※4 原子炉圧力上昇による原子炉冷却材蒸発の抑制効果を考慮した評価。

b. 操作条件

操作条件の不確かさとして、操作の不確かさを「認知」、「要員配置」、「移動」、「操作所要時間」、「他の並列操作有無」及び「操作の確実さ」の 6 要因に分類し、これらの要因が運転員等操作時間に与える影響を評価する。また、運転員等操作時間に与える影響が評価項目となるパラメータに与える影響を評価し、評価結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

操作条件の待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）の注水操作は、評価上の操作開始時間として、事象発生から2時間後を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、崩壊熱除去機能喪失による異常の認知により原子炉注水の必要性を確認し操作を実施することは容易であり、評価では事象発生から2時間後の注水操作開始を設定しているが、実態の注水操作開始時間は早くなる可能性があることから、運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

操作条件の待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）の注水操作は、運転員等操作時間に与える影響として、実態の操作開始時間が早まり、原子炉水位の低下を緩和する可能性があることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

(添付資料 5.1.1, 5.1.6, 5.1.7)

(2) 操作時間余裕の把握

操作開始時間の遅れによる影響度合いを把握する観点から、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内での操作時間余裕を確認し、その結果を以下に示す。

操作条件の待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）による注水操作について、通常運転水位から放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約4.3時間、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間が事象発生から約6.1時間であり、事故を認知して注水を開始するまでの時間は事象発生から2時間後であるため、準備時間が確保できることから、時間余裕がある。

(添付資料 5.1.1, 5.1.6, 5.1.7)

(3) まとめ

評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を確認した。その結果、評価条件の不確かさが運転員等操作時間に与える影響等を考慮した場合においても、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

このほか、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間には時間余裕がある。

5.1.4 必要な要員及び資源の評価

(1) 必要な要員の評価

事故シーケンスグループ「崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系の故障による停止時冷却機能喪失）」において、重大事故等対策時における必要な要員は、「5.1.1(3) 燃料損傷防止対策」に示すとおり10名である。「6.2 重大事故等対策時に必要な要員の評価結果」で説明している運転員、緊急時対策要員等の43名で対処可能である。

(2) 必要な資源の評価

事故シーケンスグループ「崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系の故障による

停止時冷却機能喪失)」において、水源、燃料及び電源の資源は、「6.1(2) 資源の評価条件」の条件にて評価している。その結果を以下に示す。

a. 水源

残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水については、必要な注水量が少なく、また、サプレッション・チェンバのプール水を水源とし、循環することから、水源が枯渇することはないため、7日間の継続実施が可能である。

b. 燃料

非常用ディーゼル発電機等による電源供給については、保守的に事象発生後7日間最大負荷で運転した場合、運転継続に約700m³の軽油が必要となる。非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等にて約730m³の軽油を保有しており、この使用が可能であることから非常用ディーゼル発電機等による電源供給について、7日間の継続が可能である。

緊急時対策所用発電機による電源供給については、保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると、7日間の運転継続に約8m³の軽油が必要となる。緊急時対策所用燃料地下タンクにて約45m³の軽油を保有しており、この使用が可能であることから、緊急時対策所用発電機による電源供給について、7日間の継続が可能である。

(添付資料 5.1.8)

c. 電源

外部電源は使用できないものと仮定し、非常用ディーゼル発電機等によって給電を行うものとする。重大事故等対策時に必要な負荷は、非常用ディーゼル発電機等の負荷に含まれることから、非常用ディーゼル発電機等による電源供給が可能である。

また、緊急時対策所用発電機についても、必要負荷に対しての電源供給が可能である。

5.1.5 結論

事故シーケンスグループ「崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系の故障による停止時冷却機能喪失）」では、原子炉の運転停止中に残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の故障により、崩壊熱除去機能を喪失することが特徴である。事故シーケンスグループ「崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系の故障による停止時冷却機能喪失）」に対する燃料損傷防止対策としては、残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水手段及び残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱手段を整備している。

事故シーケンスグループ「崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系の故障による停止時冷却機能喪失）」の重要事故シーケンス「崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系機能喪失[フロントライン]）+崩壊熱除去・炉心冷却失敗」について有効性評価を行った。

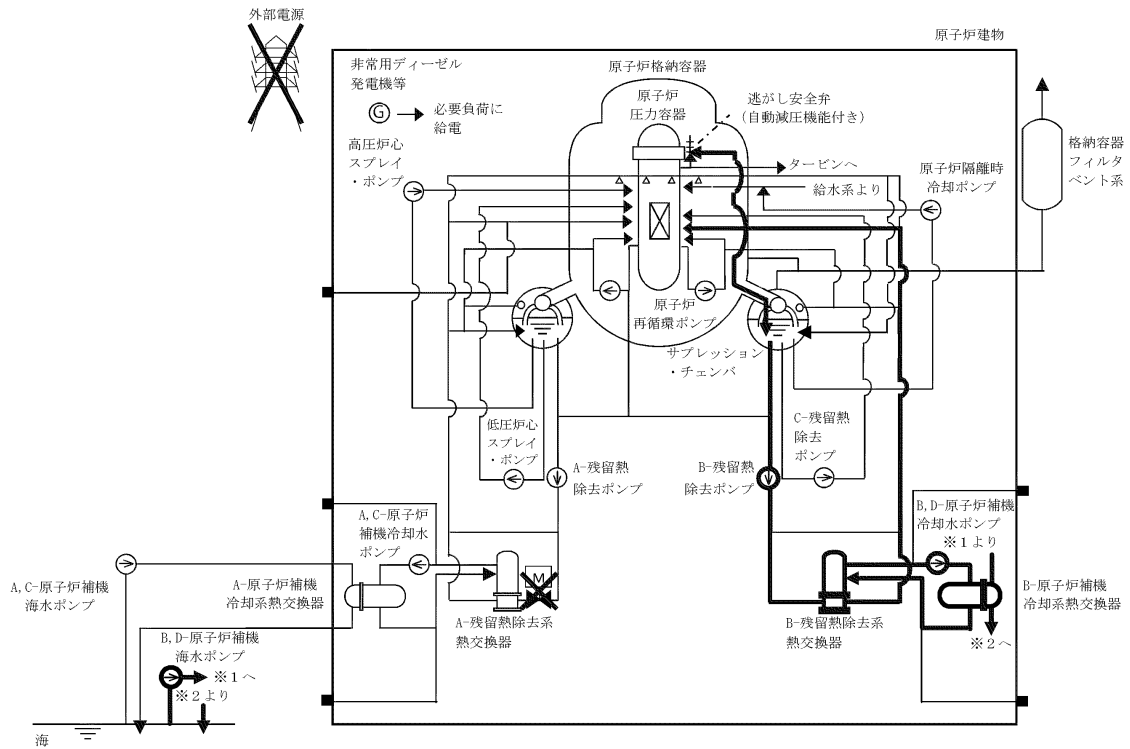
上記の場合においても、残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水及び残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱を実施することにより、燃料損傷することはない。

その結果、燃料棒有効長頂部の冠水、放射線遮蔽の維持及び未臨界の確保ができることから、評価項目を満足している。また、安定状態を維持できる。

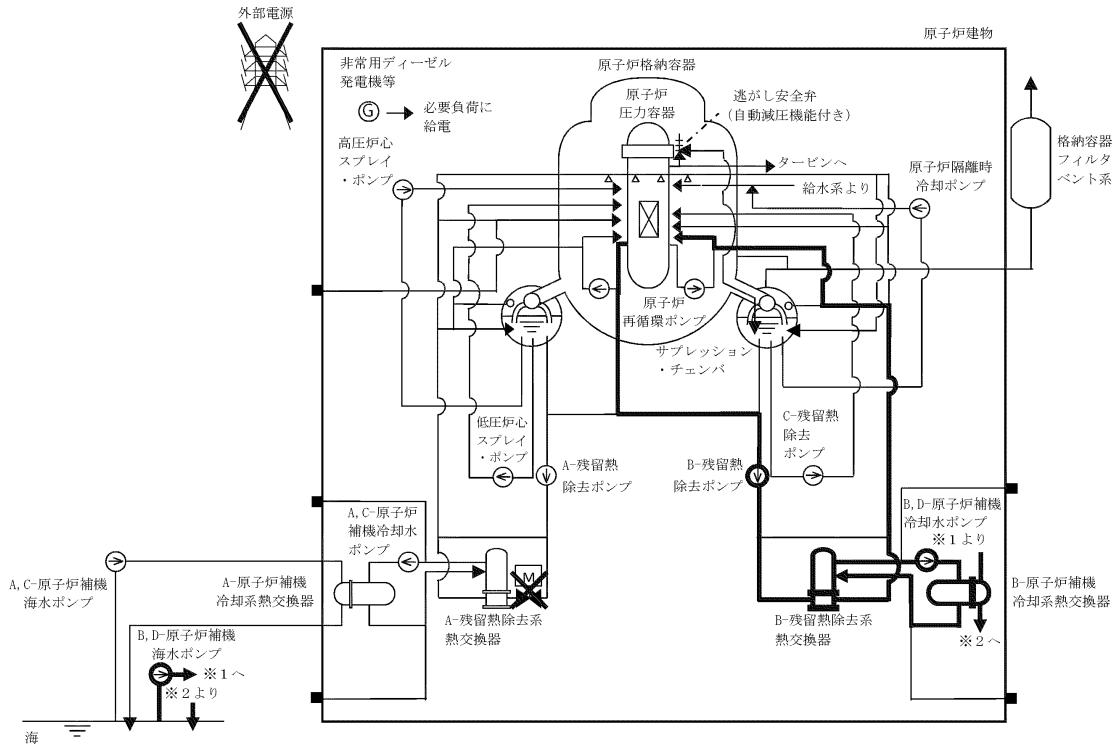
評価条件の不確かさについて確認した結果、運転員等操作時間に与える影響及び評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。また、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間余裕について確認した結果、操作が遅れた場合でも一定の余裕がある。

重大事故等対策時に必要な要員は、運転員及び緊急時対策要員にて確保可能である。また、必要な水源、燃料及び電源を供給可能である。

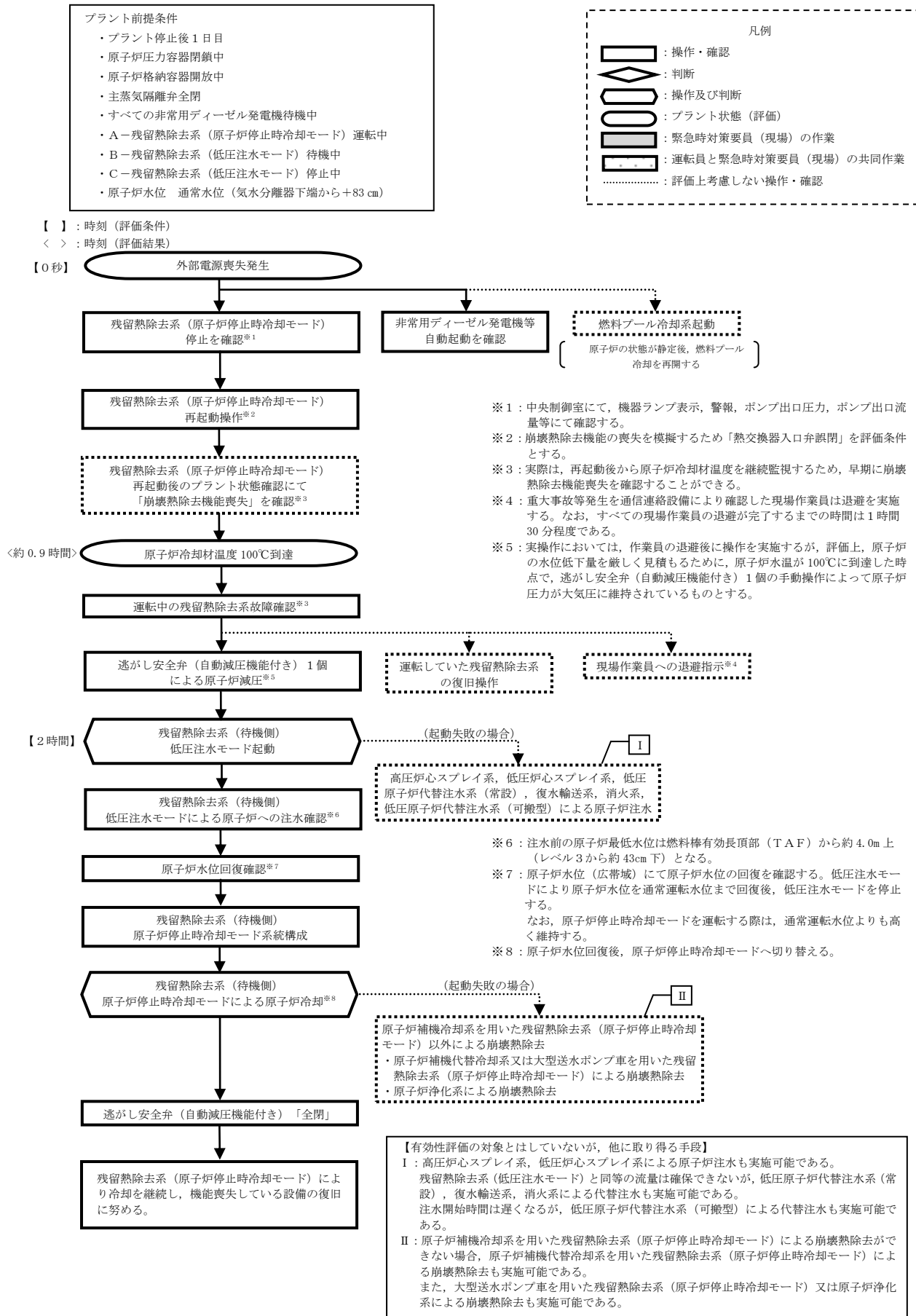
以上のことから、残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水及び残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱等の燃料損傷防止対策は、選定した重要事故シーケンスに対して有効であることが確認でき、事故シーケンスグループ「崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系の故障による停止時冷却機能喪失）」に対して有効である。



第5.1.1-1(1)図 「崩壊熱除去機能喪失」の重大事故等対策の概略系統図
(原子炉停止時冷却失敗, 原子炉減圧及び原子炉注水)



第5. 1. 1-1(2) 図 「崩壊熱除去機能喪失」の重大事故等対策の概略系統図 (原子炉停止時冷却)



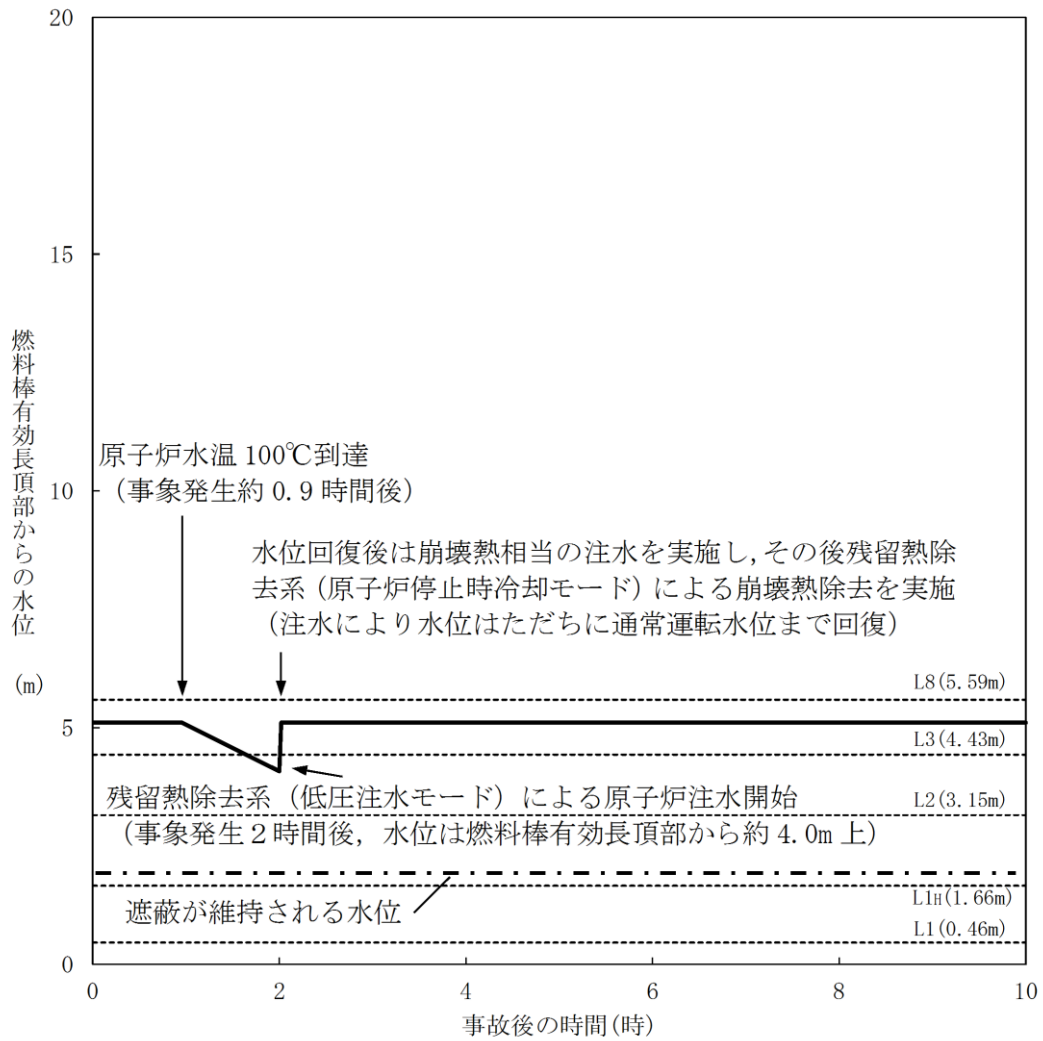
第 5.1.1-2 図 「崩壊熱除去機能喪失」の対応手順の概要

停止中の崩壊熱除去機能喪失

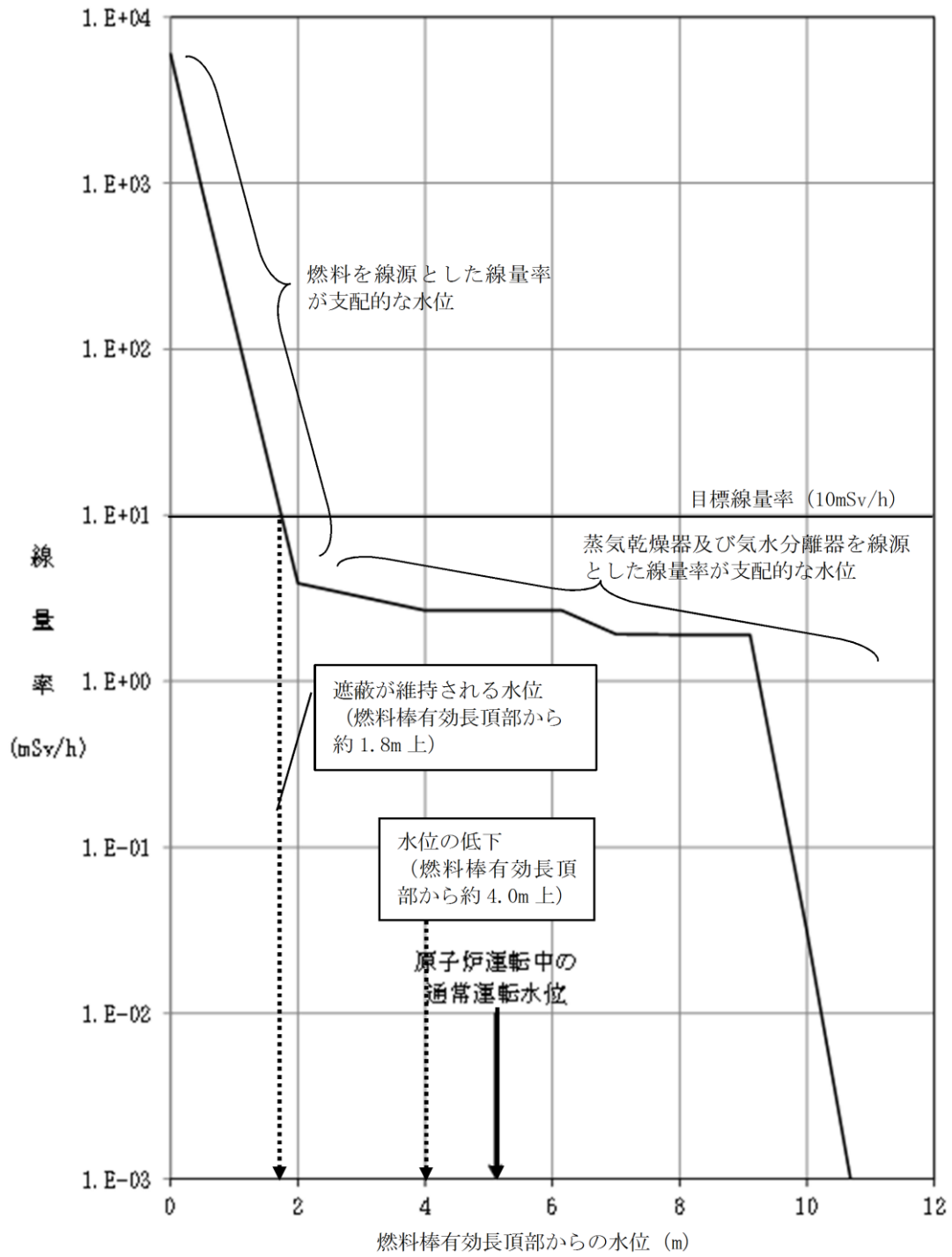
操作項目	実施箇所・必要人員数			操作内容	経過時間 (分)																		経過時間 (日)			備考
	責任者	当直長	1人		中央制御室監視 緊急時対策本部連絡	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	5	6	
状況判断	1人 A	—	—	・ 外部電源喪失確認 ・ 非常用ディーゼル発電機等自動起動確認 ・ 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）停止確認 ・ 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）再起動																						
残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）機能喪失調査，機器復旧操作	—	—	—	・ 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）機能回復																						評価上考慮せず 対応可能な要員により対応する
現場作業員への退避指示	—	—	—	・ 当直長による現場作業員への退避指示	1時間30分以内に退避完了																					評価上考慮せず 中央制御室で当直長が指示する
原子炉減圧操作	(1人) A	—	—	・ 逃がし安全弁（自動減圧機能付き）1個 手動開放操作	10分																					
原子炉水位回復操作	(1人) A	—	—	・ 残留熱除去系（低圧注水モード）（待機側）起動/停止操作	10分																		原子炉水位回復後，残留熱除去系（低圧注水モード）停止			B-残留熱除去ポンプ
残留熱除去系（低圧注水モード）から 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード） への切替え	(1人) A	—	—	・ 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）（待機側）系統構成（中央制御室）	20分																					B-残留熱除去ポンプ
	—	2人 B, C	—	・ 放射線防護具準備	10分																					
残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転	—	—	—	・ 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）（待機側）系統構成（現場）	20分																					B-残留熱除去ポンプ
	(1人) A	—	—	・ 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）（待機側）起動	10分																					B-残留熱除去ポンプ
燃料プール冷却 再開	(1人) A	—	—	・ 原子炉冷却材温度調整	適宜実施																		残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転継続			B-残留熱除去ポンプ
	(1人) A	—	—	・ 燃料プール冷却系再起動	適宜実施																					評価上考慮せず 燃料プール水温66℃以下維持
必要人員数 合計	1人 A	2人 B, C	—																							

() 内の数字は他の作業終了後，移動して対応する人員数。

第 5.1.1-3 図 「崩壊熱除去機能喪失」の作業と所要時間



第 5.1.2-1 図 原子炉水位の推移



第 5.1.2-2 図 原子炉水位と線量率

第 5.1.1-1 表 「崩壊熱除去機能喪失」の重大事故等対策について

判断及び操作	手順	重大事故等対処設備		
		常設設備	可搬型設備	計装設備
残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)の故障に伴う崩壊熱除去機能喪失確認	原子炉の運転停止中に残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)の故障により、崩壊熱除去機能が喪失する。これにより、原子炉水温が上昇し100℃に到達する。	【非常用ディーゼル発電機】 ※ 【非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク】 ※	—	【残留熱除去系熱交換器入口温度】 ※ 【残留熱除去系熱交換器出口温度】 ※
逃がし安全弁による原子炉の低圧状態維持	崩壊熱除去機能喪失により原子炉水温が100℃に到達し原子炉圧力が上昇することから、原子炉圧力を低圧状態に維持するため、中央制御室からの遠隔操作により逃がし安全弁(自動減圧機能付き)1個を開操作する。	逃がし安全弁(自動減圧機能付き) ※	—	原子炉圧力(SA) 原子炉圧力 ※ 【残留熱除去系熱交換器入口温度】 ※ 【残留熱除去系熱交換器出口温度】 ※
残留熱除去系(低圧注水モード)運転による原子炉注水	崩壊熱除去機能喪失により、原子炉冷却材が蒸発し原子炉水位が低下するため、中央制御室からの遠隔操作により待機していた残留熱除去系(低圧注水モード)運転による原子炉注水を開始し、原子炉水位を回復する。	【残留熱除去系(低圧注水モード)】 ※ サブレーション・チェンバ ※	—	原子炉水位(SA) 原子炉水位(広帯域) ※ 【残留熱除去系熱交換器出口流量】 ※
残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)運転による崩壊熱除去機能回復	残留熱除去系(低圧注水モード)運転による原子炉水位回復後、中央制御室及び現場にて残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)へ切替えを行い、崩壊熱除去機能を回復する。 崩壊熱除去機能回復後、逃がし安全弁(自動減圧機能付き)を全閉とし、原子炉低圧状態の維持を停止する。	【残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)】 ※	—	原子炉水位(SA) 原子炉水位(広帯域) ※ 【残留熱除去系熱交換器出口流量】 ※ 【残留熱除去系熱交換器入口温度】 ※

※：既許可の対象となっている設備を重大事故等対処設備に位置付けるもの
 【 】：重大事故等対処設備(設計基準拡張)

第5.1.2-1表 主要評価条件（崩壊熱除去機能喪失）（1/2）

項目	主要評価条件	条件設定の考え方
原子炉圧力容器の状態	原子炉圧力容器の未開放	燃料の崩壊熱及び保有水量の観点から設定
燃料の崩壊熱	約14.0MW (9×9燃料(A型), 原子炉停止1日後※1)	平衡炉心燃料の平均燃焼度 33GWd/t ^{※2} を基に, ANS I / ANS - 5.1-1979にて算出した原子炉停止1日後の崩壊熱として設定 また, 原子炉停止1日後においては, 9×9燃料の方がMOX燃料よりも崩壊熱が大きく, 原子炉水位低下の観点で厳しいため, MOX燃料の評価は9×9燃料(A型)の評価に包絡されることを考慮し, 代表的に9×9燃料(A型)を設定
原子炉水位	通常水位 (気水分離器下端から+83 cm)	原子炉停止1日後の水位
原子炉水温	52°C	原子炉停止1日後の実績を踏まえ, 原子炉は残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)にて冷却されているため, その設計温度である52°Cを設定
原子炉圧力	大気圧	原子炉停止1日後の実績を考慮して設定
起因事象, 安全機能の喪失に対する仮定	残留熱除去系機能喪失	運転中の残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)の故障を仮定
外部電源	外部電源なし	外部電源の有無は, 崩壊熱除去機能の喪失に伴う原子炉水位の低下に影響しないことから, 資源の観点で厳しい外部電源なしを設定

※1 原子炉停止1日後とは全制御棒全挿入からの時間を示している。通常停止操作において原子炉の出力は全制御棒全挿入完了及び発電機解列以前から徐々に低下させるが, 崩壊熱評価はスクラムのような瞬時に出力を低下させる保守的な計算条件となっている。

※2 サイクル末期の燃焼度のばらつきを考慮し, 10%の保守性を考慮

第5.1.2-1表 主要評価条件（崩壊熱除去機能喪失）（2/2）

項目	主要評価条件	条件設定の考え方
重大事故等対策に 関連する機器条件	<p>残留熱除去系（低圧注水モード）</p> <p>1, 136 m³/h で注水</p>	<p>残留熱除去系（低圧注水モード）の設計値として設定</p>
重大事故等対策に 関連する機器条件	<p>残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）</p> <p>熱交換器1基あたり約9MW（原子炉冷却材温度52℃、海水温度30℃において）</p>	<p>残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の設計値として設定 （原子炉水位回復後は崩壊熱相当の注水を実施することで水位を維持するが、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）を実施することとで原子炉内の崩壊熱を除去できるため、注水が不要となる）</p>
重大事故等対策に 関連する操作条件	<p>残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水操作</p> <p>事象発生から2時間後</p>	<p>残留熱除去系の機能喪失に伴う異常の認知及び現場操作の実績等を基に、さらに余裕を考慮して設定</p>

運転停止中の崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失における
燃料棒有効長頂部又は放射線の遮蔽が維持される目安の水位到達までの時間余裕と
必要な注水量の計算方法について

運転停止中の崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失により、燃料棒有効長頂部又は放射線の遮蔽が維持される目安の水位到達までの時間余裕と必要な注水量について、以下の式を用いて計算を行った。なお、事象を厳しく評価するため、発生する崩壊熱はすべて原子炉水温の上昇及び蒸発に寄与するものとし、原子炉圧力容器や水面からの放熱は考慮しない。

なお、5. 1. 2及び5. 2. 2の「燃料損傷防止対策の有効性評価」において、「1. 原子炉圧力上昇による原子炉冷却材蒸発の抑制効果を考慮しない計算」を用いて評価を行っており、添付資料5. 1. 7及び添付資料5. 2. 2の「評価条件の不確かさの影響評価について」の一部においては、未開放状態の被ばく影響をより現実に近い想定として評価するため、「2. 原子炉圧力上昇による原子炉冷却材蒸発の抑制効果を考慮した計算」を用いた。

1. 原子炉圧力上昇による原子炉冷却材蒸発の抑制効果を考慮しない計算

原子炉未開放状態において、原子炉圧力上昇に伴う原子炉冷却材の比エンタルピの上昇により、大気圧下と比べて原子炉冷却材の蒸発量は抑制されるが、ここでは原子炉圧力容器の状態によらず、保守的かつ簡易的な評価として大気圧下の原子炉冷却材の蒸発量を求めた。

(1) 100℃に至るまでの時間

100℃に至るまでの時間は、運転停止中の崩壊熱除去機能喪失時、全交流動力電源喪失時ともに約 0.95 時間である。計算は次の式で行った。

$$t_1 = (h_{100} - h_{52}) \times V_c \times \rho_{52} / (Q \times 3600)$$

- t_1 : 100℃に至るまでの時間[h]
 h_{100} : 100℃の飽和水の比エンタルピ[kJ/kg] = 419.10
 h_{52} : 52℃の飽和水の比エンタルピ[kJ/kg] = 217.70
 V_c : 保有水の体積[m³] =
 ρ_{52} : 52℃の水密度[kg/m³] = 987
 Q : 崩壊熱[kW] = 1.40×10^4

(2) 燃料棒有効長頂部又は放射線の遮蔽が維持される水位に至るまでの時間

燃料棒有効長頂部又は放射線の遮蔽が維持される水位に至るまでの時間は、運転停止中の崩壊熱除去機能喪失時、全交流動力電源喪失時で、それぞれ約 6.1 時間と約 4.3 時間である。計算は次の式で行った。

$$t = t_1 + t_2$$

$$t_2 = (h_s - h_{100}) \times V_u \times \rho_{52} / (Q \times 3600)$$

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

- t : 燃料棒有効長頂部又は放射線の遮蔽が維持される水位に至るまでの時間[h]
 t_2 : 100°C到達から燃料棒有効長頂部又は放射線の遮蔽が維持される水位に至るまでの時間[h]
 h_{100} : 100°Cの飽和水の比エンタルピ[kJ/kg] = 419.10
 h_s : 飽和蒸気の比エンタルピ[kJ/kg] = 2675.57
 V_u : 保有水の体積[m³]
 (燃料棒有効長頂部までの保有水の体積) =
 (放射線の遮蔽が維持される水位までの保有水の体積) =
 ρ_{52} : 52°Cの水密度[kg/m³] = 987
 Q : 崩壊熱[kW] = 1.40×10^4

また、注水前の蒸発量は、運転停止中の崩壊熱除去機能喪失時、全交流動力電源喪失時ともに約 23[m³/h]である。計算は次の式で行った。

$$\rho_{100} \text{ (注水前の蒸発量)} = (Q \times 3600) / ((h_s - h_{100}) \times \rho_{100})$$

ρ_{100} : 100°Cの水密度[kg/m³] = 958

(3) 必要な注水量

崩壊熱によって喪失する原子炉冷却材を補うために必要な注水量は、運転停止中の崩壊熱除去機能喪失時、全交流動力電源喪失時ともに約 21[m³/h]である。計算は次の式で行った。

$$f = (Q \times 3600) / ((h_s - h_f) \times \rho_f)$$

- f : 必要な注水量[m³/h]
 ρ_f : 注水(飽和水, 水温 35°C)の密度[kg/m³] = 994
 h_s : 飽和蒸気の比エンタルピ[kJ/kg] = 2675.57
 h_f : 注水(飽和水, 水温 35°C)の比エンタルピ[kJ/kg] = 146.64
 Q : 崩壊熱[kW] = 1.40×10^4

(4) 注水中の蒸発量

注水中の蒸発量は、運転停止中の崩壊熱除去機能喪失時、運転停止中の全交流動力電源喪失時ともに 0[m³/h]である。注入された水を 100°Cに上昇させる熱を崩壊熱から差し引いた熱が蒸発に使われることから、計算は次の式で行った。

$$Q \times 3600 = F \times \rho_f \times (h_{100} - h_f) + S \times \rho_f \times (h_s - h_{100})$$

$$S = (Q \times 3600 - F \times \rho_f \times (h_{100} - h_f)) / (\rho_f \times (h_s - h_{100}))$$

- F : 注水量[m³/h]
 (崩壊熱除去機能喪失時) = 1,136 (残留熱除去系定格流量)
 (全交流動力電源喪失時) = 200 (低圧原子炉代替注水系(常設)の設計値として設定)
 S : 注水中の蒸発量[m³/h] (ただし, $S \geq 0$)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

- ρ_f : 注水 (飽和水, 水温 35°C) の密度 [kg/m³] = 994
 h_s : 飽和蒸気の比エンタルピ [kJ/kg] = 2675.57
 h_{100} : 100°Cの飽和水の比エンタルピ [kJ/kg] = 419.10
 h_f : 注水 (飽和水, 水温 35°C) の比エンタルピ [kJ/kg] = 146.64
 Q : 崩壊熱 [kW] = 1.40 × 10⁴

2. 原子炉圧力上昇による原子炉冷却材蒸発の抑制効果を考慮した計算 (原子炉圧力容器が閉鎖状態での評価)

(1) 逃がし安全弁 (SRV) の逃がし弁機能が作動する最低圧力に到達する時間等

5.1.2 及び 5.2.2 の「燃料損傷防止対策の有効性評価」においては原子炉圧力容器未開放状態であるが, 原子炉の大気圧状態が維持される想定にて計算を実施している。ただし, 実操作において崩壊熱除去機能が喪失した際の逃がし安全弁 (SRV) による減圧操作は原子炉の注水機能が確保された後となるため, 原子炉圧力上昇による原子炉冷却材蒸発の抑制効果に期待でき, 原子炉冷却材の蒸発量は小さくなる。

閉鎖状態における原子炉の圧力上昇と水位の関係は下の式で計算できる。ここで逃がし安全弁 (SRV) の逃がし弁機能が作動する最低圧力 (7.58MPa [gage]) に到達する時間等を求めた。

$$M_s / \rho_s + M_l / \rho_l = V_{all}$$

$$M_s + M_l = M_{all}$$

$$\Delta (h_s \times V_s \times \rho_s + h_l \times V_l \times \rho_l) = Q \Delta t$$

※初期状態の各変数は[0], SRV作動圧力到達時の各変数は[1]で表す

M_s , M_l : 気相部の蒸発量, 液相部の水量 [kg]

初期 (大気圧, 原子炉水温 52°C) :

$$M_{s0} = \text{約 } \boxed{} \text{ kg (飽和蒸気圧)}, \quad M_{l0} = \text{約 } \boxed{} \text{ kg}$$

M_{all} : 原子炉圧力容器内の蒸気及び原子炉冷却材の総量 [kg] = 約 $\boxed{}$ kg

ρ_s , ρ_l : 飽和蒸気の密度, 水の密度 [kg/m³]

初期 (大気圧, 原子炉水温 52°C) :

$$\rho_{s0} = 0.0912 \text{ kg/m}^3, \quad \rho_{l0} = 987 \text{ kg/m}^3$$

SRV作動圧力到達時 (7.58MPa [gage], 原子炉水温 292°C) :

$$\rho_{s1} = 40.4 \text{ kg/m}^3, \quad \rho_{l1} = 728 \text{ kg/m}^3$$

V_s , V_l : 気相部の体積, 液相部の体積 [m³]

初期 (大気圧, 原子炉水温 52°C) :

$$V_{s0} = \text{約 } \boxed{} \text{ m}^3, \quad V_{l0} = \text{約 } \boxed{} \text{ m}^3$$

V_{all} : 原子炉圧力容器内の体積 [m³] = 約 $\boxed{}$ m³

h_s , h_l : 飽和蒸気, 水のエンタルピ [kJ/kg]

初期 (大気圧, 原子炉水温 52°C) :

$$h_{s0} = 2594.84 \text{ kJ/kg}, \quad h_{l0} = 217.70 \text{ kJ/kg}$$

SRV作動圧力到達時 (7.58MPa [gage], 原子炉水温 292°C) :

$$h_{s1} = 2763.55 \text{ kJ/kg}, \quad h_{l1} = 1300.63 \text{ kJ/kg}$$

本資料のうち, 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

Q : 崩壊熱量[kJ/s] = 1.40×10^4 kJ/s (原子炉停止 1 日後)
Δt : 事象発生後の時間[s]

上記式より

S R V 作動圧力到達時 (7.58MPa[gage], 原子炉水温 292°C) の液相部の水量[kg]

$$M_{11} = \text{約 } 2.364 \times 10^5 \text{ kg}$$

S R V 作動圧力到達時 (7.58MPa[gage], 原子炉水温 292°C) の液相部の体積[m³]

$$V_{11} = \text{約 } \boxed{} \text{ m}^3$$

事象発生後の時間[s]

$$\Delta t = \text{約 } 1.9 \times 10^4 [\text{s}] \rightarrow 5 \text{ 時間以上}$$

となり、事象発生約 5 時間後までに約 2.5t の原子炉冷却材が蒸発する。ただし、熱膨張により原子炉冷却材の体積は約 82.8m³ 増加し、原子炉水位は燃料棒有効長頂部より約 8.69m 上 (通常運転水位より約 3.59m 高い位置) となる。S R V 作動圧力到達時 (7.58MPa[gage]) においては遮蔽評価に用いている 100°C の時の水の密度と比べて水の密度が約 0.76 倍と減少しているため、同等の遮蔽厚さに換算した場合、燃料棒有効長頂部より約 6.61m 上 (通常運転水位より約 1.51m 高い位置) となり、事象発生前と同様原子炉冷却材による放射線の遮蔽は維持される。

以上より、原子炉圧力容器が閉鎖状態において崩壊熱除去機能が喪失した場合も、逃がし安全弁の作動等により原子炉内の保有水量が減少するまでの間 (5 時間以上)、原子炉冷却材による放射線の遮蔽は維持される。

なお、原子炉停止 12 時間後を想定した際、上記の原子炉停止 1 日後と同様の評価式を用いて算出すると、S R V 作動圧力到達時 (7.58MPa[gage]) までの時間は 4 時間以上となる。

重要事故シーケンスの選定結果を踏まえた有効性評価の条件設定

1. 「崩壊熱除去機能喪失」の重要事故シーケンスの選定

運転停止中原子炉における燃料損傷防止対策の有効性評価「崩壊熱除去機能喪失」の重要事故シーケンスの選定にあたっては、他の殆どの重要事故シーケンス等の選定と同様に、PRAの結果から抽出された事故シーケンスグループから「実用発電用原子炉に係る運転停止中原子炉における燃料損傷防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」（以下「ガイド」という。）に示された着眼点を考慮し、重要事故シーケンスを選定している。

崩壊熱除去機能喪失の重要事故シーケンスとしては、ガイドに示された着眼点に加えて事故シーケンスグループ「全交流動力電源喪失」における評価内容との差別化を図ることを考慮し、次の事故シーケンスを選定した。

- ・崩壊熱除去機能喪失(残留熱除去系機能喪失[フロントライン]) + 崩壊熱除去・炉心冷却失敗

2. 重要事故シーケンスに対する燃料損傷防止対策の選定

有効性評価では、設計基準相当の設備の機能喪失を受けて燃料損傷に至る重要事故シーケンスに対し、重大事故等対処設備を用いて燃料損傷を防止できることを確認している。この観点では、すべての崩壊熱除去機能及び注水機能の喪失を受け、重大事故等対処設備を用いて燃料損傷を防止するという評価も考えられるが、この場合、事故シーケンスグループ「全交流動力電源喪失」で選定される重要事故シーケンスと同じ評価を実施することとなる。このため、「崩壊熱除去機能喪失」の重要事故シーケンスの有効性評価では、ガイドの対策例を参照し、待機中の残留熱除去系によって崩壊熱除去機能を確保し、燃料損傷を防止可能であることを確認している。

3. プラント状態（POS）の選定

重要事故シーケンスの選定プロセスでは、POSについては選定していないため、有効性評価の評価条件を設定する際に選定している。崩壊熱除去機能の喪失事象が発生した場合、代替の崩壊熱除去機能や炉心への注水機能を用いて燃料損傷を防止することとなる。このため、POSを選定するうえでは崩壊熱が高く、原子炉压力容器内の保有水量が少ないため、事象発生から燃料損傷までの時間余裕が厳しいPOSを選定することが適切と考える。停止時レベル1 PRAにおけるPOSの分類及び定期事業者検査工程を図1に、POSの選定方法及び原子炉压力容器の開閉状態を表1に示す。崩壊熱の観点で最も厳しいPOSは「S 原子炉冷温停止への移行状態」であり、次に「A 原子炉格納容器及び原子炉压力容器の開放並びに原子炉ウェル満水への移行状態」、その次が「B 原子炉ウェル満水状態」という順となる。保有水の観点では原子炉水位が通常運転水位付近の可能性のあるPOS「S」、「A」、「C 原子炉格納容器及び原子炉压力容器の閉鎖及び起動準備への移行状態」、「D 起動準備状態」が厳しい。

次に崩壊熱除去・注水機能を持つ設備の事故時の使用可否について考えると、POS「S」及び「D」の原子炉停止直後・起動準備状態において、給水系を除

く緩和設備が原子炉運転中と同様に待機状態又は早期復旧により使用可能な状態である^{*}。そのため、緩和設備についてはPOS「S」及び「D」以外のPOS「A」～「C」が厳しい条件となる。

なお、原子炉压力容器閉鎖時は原子炉圧力の上昇が考えられるが、トップベントから原子炉の減圧ができること、急激に原子炉圧力が上昇するようなものではないこと、原子炉圧力が上昇しても逃がし安全弁で減圧できることから残留熱除去系（低圧注水モード）が使用できるとしている。また、原子炉格納容器閉鎖時においても同様の考え方である。

このため、本評価においては、POS「S」の次に崩壊熱が高く、原子炉压力容器内の保有水量が少ないことに加え、使用可能な緩和設備が原子炉運転中より少なくなるPOS「A」を選定している。なお本評価では、原子炉压力容器内の保有水量が少なく、放射線の遮蔽が維持される水位に到達するまでの時間余裕の観点から厳しい、原子炉压力容器閉鎖状態を評価条件とした。

※ 一例として後述する「添付資料 5.1.6 6. 原子炉隔離時冷却系による注水について」で示すとおり、POS「S」及び「D」において原子炉压力容器が閉鎖状態であるため、原子炉圧力が上昇した後に原子炉隔離時冷却系の注水も使用可能となる。一方、POS「A」～「C」のうち原子炉压力容器が開放状態である場合には、原子炉圧力が上昇しないため原子炉隔離時冷却系が使用できなくなる。

4. 他の燃料損傷防止対策を想定した場合の影響

本評価では、待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水の有効性を確認しているが、別の燃料損傷防止対策として、低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水が考えられるが、これについては「全交流動力電源喪失」で選定される重要事故シーケンスにおいて、本評価と同じPOS「A」でその有効性を確認している。

表 1 各プラント状態における評価項目に対する影響（崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失）

プラント状態 (POS)	包絡事象	重大事故等対処設備等	原子炉圧力容器蓋の開閉状態	運転停止中の評価項目	
				燃料有効長頂部の冠水	放射線の遮蔽が維持できる水位の確保
S 原子炉冷温停止への移行状態	POS-A を想定した有効性評価条件に包絡。(崩壊熱や保有水量を POS-S と同等のものを使用しているため)	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉隔離時冷却系※1 非常用炉心冷却系 (LPCI, LPCS, HP(CS)) ※2 低圧原子炉代替注水系 (常設) 低圧原子炉代替注水系 (可搬型) ガスタービン発電機 	閉鎖	原子炉が未開放であり、原子炉圧力容器蓋、蒸気乾燥器及び気水分離器の遮蔽にも期待できることから、必要な遮蔽は確保される。(添付資料 5.1.6)	未臨界の確保 フロント状態 POS-A に同じ。
A 原子炉格納容器及び原子炉圧力容器の開放並びに原子炉ウエル満水への移行状態	—	<ul style="list-style-type: none"> 非常用炉心冷却系 (LPCI, LPCS, HP(CS)) ※2 低圧原子炉代替注水系 (常設) 低圧原子炉代替注水系 (可搬型) ガスタービン発電機 	閉鎖→開放	有効性評価にて評価項目を満足することを確認している。 (原子炉を開放中であり、原子炉圧力容器蓋、蒸気乾燥器及び気水分離器の遮蔽にも期待できる、又は十分な遮蔽水位が確保されていることから、必要な遮蔽は確保される。(添付資料 5.1.6))	有効性評価にて評価項目を満足することを確認している。 制御棒引き抜きに係わる試験は「反応度誤投入」に包絡。
B1					
B2	「全交流動力電源喪失 (POS-A)」及び「燃料プール想定事故 1」に包絡。	<ul style="list-style-type: none"> 非常用炉心冷却系 (LPCI) ※2 低圧原子炉代替注水系 (可搬型) ガスタービン発電機 燃料プールスプレイ系 	開放	水位下の速い、シナリオである「原子炉冷却材の流出」にて評価し、評価項目を満足することを確認している。 ※燃料プールにおける放射線の遮蔽確保は「燃料プール想定事故 1」に包絡される。	フロント状態 POS-A に同じ。 燃料の取出・装荷に係わる作業は「反応度誤投入」に包絡。
B3					
B4					
C 原子炉格納容器及び原子炉圧力容器の閉鎖及び起動準備への移行状態	POS-A に包絡される。	<ul style="list-style-type: none"> 非常用炉心冷却系 (LPCI, LPCS, HP(CS)) ※2 低圧原子炉代替注水系 (常設) 低圧原子炉代替注水系 (可搬型) ガスタービン発電機 	開放→閉鎖	原子炉を閉鎖中であり、原子炉圧力容器蓋、蒸気乾燥器及び気水分離器の遮蔽にも期待できる、又は十分な遮蔽水位が確保されていることから、必要な遮蔽は確保される。(添付資料 5.1.6)	フロント状態 POS-A に同じ。
D 起動準備状態			閉鎖	原子炉が未開放であり、原子炉圧力容器蓋、蒸気乾燥器及び気水分離器の遮蔽にも期待できることから、必要な遮蔽は確保される。(添付資料 5.1.6)	

※1 原子炉圧力が上昇した後使用可能となる ※2 停止時レベル 1 PRA では、保守的に期待していない設備

崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失評価における崩壊熱設定の考え方

1. 本評価における崩壊熱の設定

運転停止中の原子炉における燃料損傷防止対策の有効性評価「崩壊熱除去機能喪失」及び「全交流動力電源喪失」の重要事故シーケンスの有効性評価では、原子炉スクラムによる原子炉停止から1日後[※]の崩壊熱を用いて原子炉水温の上昇及び蒸発による原子炉水位の低下を評価している。

一般に定期事業者検査期間が数十日であることを考慮すると、原子炉停止から1日（24時間）後の崩壊熱を用いることは定期事業者検査期間から見ると保守的な設定であると考えるが、仮に原子炉停止からの時間がより短い時点での崩壊熱を用いれば、より厳しい評価条件となる。

※ 原子炉停止から1日（24時間）後とは全制御棒全挿入からの時間を示している。通常停止操作において原子炉の出力は全制御棒全挿入完了及び発電機解列以前から徐々に低下させるが、崩壊熱評価はスクラムのような瞬時に出力を低下させる保守的な計算条件となっている。具体的には制御棒の挿入開始及び発電機解列の実績は、全制御棒全挿入完了を基準とするとそれぞれ8時間程度前、5時間程度前となっており、実際の崩壊熱は評価値より小さくなる。

2. より厳しい崩壊熱を設定した場合の時間余裕への影響

プラント停止時を復水器真空破壊からと考えると、通常、復水器真空破壊のタイミングは通常のプラント停止操作における全制御棒挿入完了から12時間以上後である。仮に、原子炉水温が100℃かつ原子炉停止から12時間後の崩壊熱によって原子炉注水までの時間余裕を評価すると、燃料棒有効長頂部到達まで約4.2時間となる。原子炉停止から1日（24時間）後の原子炉注水までの時間余裕が約6.1時間であることから、時間余裕の観点では約2時間短くなるが、本重要事故シーケンスにおける「崩壊熱除去機能喪失」及び「全交流動力電源喪失」の事象発生から原子炉注水開始までの対応は2時間であることから十分対応可能な範囲である。

また、必要な遮蔽の確保の観点においても、現場作業員の退避までの時間余裕が原子炉停止から1日（24時間）後の場合では約4.3時間に対して、12時間後の場合では約2.7時間と短くなるものの、十分退避可能な範囲である（添付資料 5.1.6）。

この様に、崩壊熱の設定によっては原子炉注水及び現場作業員の退避の時間余裕に変動が生じるが、原子炉スクラムによる原子炉停止とし、13ヶ月運転に対して燃焼度を10%増加させた場合の崩壊熱を用いていること及び原子炉注水までの時間余裕の評価では崩壊熱の減衰を考慮していないこと等、様々な保守性を含めた評価としていることから、本重要事故シーケンスにおいて、原子炉注水が間に合わず燃料損傷に至る状況、現場作業員が過度な被ばくを受ける状況は想定し難いものとする。

以上

安定状態について（運転停止中（崩壊熱除去機能喪失））

運転停止中の崩壊熱除去機能喪失時の安定状態については以下のとおり。

原子炉安定停止状態：事象発生後，設計基準事故対処設備及び重大事故等対処設備を用いた炉心冷却により，炉心冠水が維持でき，また，冷却のための設備がその後も機能維持できると判断され，かつ，必要な要員の不足や資源の枯渇等のあらかじめ想定される事象悪化のおそれがない場合，原子炉安定停止状態が確立されたものとする。

【安定状態の確立について】

原子炉安定停止状態の確立について

崩壊熱除去機能喪失により原子炉水温が上昇し，沸騰開始による原子炉水位の低下が始まるが，待機していた残留熱除去系（低圧注水モード）による注水継続により原子炉水位は回復し，炉心の冷却が維持される。

その後，残留熱除去系（低圧注水モード）を残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）に切り替え，原子炉除熱を開始することで冷温停止状態に移行し，原子炉安定停止状態が確立される。

重大事故等対策時に必要な要員は確保可能であり，また，必要な水源，燃料及び電源を供給可能である。

【安定状態の維持について】

上記の燃料損傷防止対策により原子炉安定停止状態を維持できる。

また，残留熱除去系機能を維持し，除熱を行うことにより，安定停止状態後の安定停止状態の維持が可能となる。（添付資料 2. 1. 1 別紙 1 参照）

原子炉停止中における崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失時の 原子炉格納容器の影響について

運転停止中の有効性評価は、審査ガイドの評価項目^{*}に基づき原子炉への注水を行うことで燃料の冠水が維持されていることをもって、燃料の冷却が維持され燃料損傷が防止できていることを確認している。

※<審査ガイドの評価項目>

- (a) 燃料有効長頂部が冠水していること。
- (b) 放射線の遮蔽が維持される水位を確保すること。
- (c) 未臨界を確保すること（ただし、通常の運転操作における臨界、又は燃料の健全性に影響を与えない一時的かつわずかな出力上昇を伴う臨界は除く。）

この際、格納容器内圧力及び温度の挙動は評価対象とはしていないが、原子炉補機代替冷却系又は格納容器ベントによる原子炉格納容器除熱により対応することとなる。

1. プラント停止中における崩壊熱除去機能喪失時の原子炉格納容器の影響

プラント停止中の有効性評価において、崩壊熱除去機能を喪失している期間は「崩壊熱除去機能喪失」の事象発生約2時間後まで、「全交流動力電源喪失」の事象発生から原子炉補機代替冷却系等による崩壊熱除去機能復旧の事象発生約10時間後までである。

ここでは、代表として「全交流動力電源喪失」を前提に考察する。

崩壊熱除去機能が喪失すると原子炉水温は上昇し、冷却機能喪失後0.9時間程度で沸騰を開始した後、水位が低下する。原子炉注水により燃料の冷却は維持されるが、原子炉内の圧力が徐々に上昇するため、原子炉の減圧が必要となる。減圧により原子炉内の熱量がサプレッション・チェンバへと移行し、格納容器内の温度上昇や圧力上昇に至る。格納容器内の圧力上昇が384kPa[gage]に到達する時間は約47時間であり、原子炉補機代替冷却系による崩壊熱除去機能復旧の時間余裕は十分確保される。

また、仮に原子炉補機代替冷却系による崩壊熱除去機能の復旧ができない場合は格納容器ベントによる除熱を実施することとなるが、追加放出においては、既に原子炉停止後の減圧操作により原子炉内へ放出されて気体廃棄物処理系で処理されるため、格納容器内の放射性物質の量は、運転中の事故時と比べて非常に小さく、考慮不要である。

なお、原子炉圧力容器が閉鎖状態かつ原子炉格納容器開放状態で、全交流動力電源喪失が発生する頻度は大きなものではないが、これらについても考察する。

所員用エアロック等の開放により原子炉格納容器が開放されている場合、所員用エアロック等を速やかに閉止することで、上記と同様の対応となる。

原子炉格納容器の上部蓋を取り外している場合は、状況により速やかに原子炉格納容器を閉鎖することが困難となり原子炉内から蒸気とともに熱量が原子炉格納容器を經由して原子炉建物内に放出されることも考えられる。ただし、原子炉建物壁面への吸熱及びブローアウトパネル開放等による環境への放熱により、原子炉建物内の環境条件は必要な設備が機能喪失するほど悪化することはなく、原子炉補機代替冷却系等を用いた原子炉又は格納容器冷却の開始により徐々に改善

される。また、現場作業員の退避時及び公衆への放射線影響について、原子炉冷却材中に含まれる放射性物質は微少であり、かつ、時間減衰による低減効果もあるため、有意なものとはならない。

原子炉压力容器を開放している場合は、原子炉内から放出された熱量は蒸気に伴い原子炉建物内に放出され、原子炉建物壁面への吸熱、または環境へ放熱されるが、この場合は崩壊熱量がさらに低下していること、原子炉ウェルが水張りされているなど原子炉冷却材の量が増加していることから事象進展はより緩慢となる。

<参考>

運転停止中における全交流動力電源喪失が発生した際の原子炉格納容器の圧力をMAAPコードにより求めた。解析条件は表1、解析結果は表2及び表3となる。格納容器代替スプレイに期待するケース及び期待しないケースの2ケースの評価を実施し、その結果、格納容器代替スプレイに期待しない場合であってもベントまでの時間は事象開始から約47時間となった。

表 1 解析条件（停止時ベントタイミングの確認）

分類	項目	解析条件
事故発生時のプラント状態	崩壊熱	原子炉停止 1 日後
	原子炉圧力容器の想定	未開放
	原子炉初期水温	約51℃（残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の設計温度52℃とほぼ同値）※
	原子炉の初期圧力	大気圧相当
	原子炉格納容器の想定	未開放
	原子炉格納容器内の初期温度	サプレッション・プール水温：約35℃ 気相部：約64℃（通常運転時の温度57℃を包絡する値）※
	原子炉格納容器の初期圧力	大気圧相当
	低圧原子炉代替注水槽の水温	35℃
事象進展	事象開始	<ul style="list-style-type: none"> ・全交流動力電源喪失発生 ・水位低下に伴う非常用炉心冷却系の起動は期待しない
	事象発生 2 時間後	<ul style="list-style-type: none"> ・常設代替交流電源設備による電源供給開始 ・逃がし安全弁（自動減圧機能付き）による減圧 ・低圧原子炉代替注水系（常設）による注水開始
	低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水	200m ³ /h
	格納容器代替スプレイ	実施に期待しない，又は格納容器代替スプレイ系（可搬型）によるD/Wスプレイ実施（120m ³ /h）
	ベントタイミング	格納容器圧力384kPa[gage]到達，又はサプレッション・プール水位通常水位＋約1.3m到達

※：有効性評価で想定する原子炉停止 1 日後の状態をMAAPにて評価するため，詳細な設定が困難なパラメータは有効性評価で想定する設定値等と同等な値となるようにした。

表2 解析結果（停止時ベントタイミングの確認）

分類	ベントタイミング	備考
格納容器代替スプレイに期待するケース	事象発生後 約60時間	サプレッション・プール水位 通常水位+約1.3m到達
格納容器代替スプレイに期待しないケース	事象発生後 約47時間	格納容器圧力384kPa[gage] 到達

表3 解析結果（格納容器圧力及び温度*）

分類	事象発生10時間後		ベントタイミング時	
	格納容器圧力 (kPa[gage])	格納容器温度 (°C)	格納容器圧力 (kPa[gage])	格納容器温度 (°C)
格納容器代替スプレイに期待するケース	S/C : 約22	D/W : 約74	S/C : 約351 (事象発生後 約60時間)	S/C : 約149 (事象発生後 約60時間)
格納容器代替スプレイに期待しないケース	S/C : 約22	D/W : 約74	S/C : 約384 (事象発生後 約47時間)	S/C : 約150 (事象発生後 約47時間)

※：格納容器圧力及び温度はドライウェルとサプレッション・チェンバのうち、より値が大きい側の結果を記載

以上

運転停止中 崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失時における 放射線の遮蔽維持について

運転停止中の「崩壊熱除去機能喪失」及び「全交流動力電源喪失」における放射線の遮蔽維持について評価を行い、放射線の遮蔽維持に必要な水位（目安と考える 10mSv/h[※]）が維持されることを確認したため、その結果を以下に示す。

また、放射線の遮蔽を検討する際、原子炉圧力容器開放作業の流れ、原子炉圧力容器等構造物及び原子炉水位が重要となるため、それらを考慮した評価とした。

※ 必要な遮蔽の目安とする線量率は、「崩壊熱除去機能喪失」及び「全交流動力電源喪失」における原子炉建物原子炉棟 4 階からの現場作業員の退避は 2 時間以内であり、作業員の被ばく量は最大でも 20mSv となるため、緊急作業時の被ばく限度の 100mSv に対して余裕がある 10mSv/h とした。

本事故に応じた燃料損傷防止対策において原子炉建物原子炉棟 4 階での操作を必要な作業としていないが、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル使用）を使用した燃料プールへの注水について仮に考慮し、可搬型スプレイノズル及びホースの設置にかかる作業時間を想定した。

必要な遮蔽の目安とした線量率 10mSv/h は、定期事業者検査作業時での原子炉建物原子炉棟 4 階における線量率を考慮した値である。

この線量率となる水位は燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上（通常水位から約 3.3m 下）の位置である。

1. 原子炉圧力容器開放作業の流れ

①原子炉圧力容器開放作業の開始前、コンクリートハッチ取り外し、原子炉格納容器蓋取り外し（図 1 中の 1, 2, 3）

原子炉を停止後、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）で除熱可能な圧力に減圧されるまでは、原子炉は主蒸気系を介して、復水器によって除熱される。残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による除熱を開始した後、復水器真空破壊を経て、復水器による除熱を停止する。

これらの原子炉の冷温停止状態に向けた操作と並行して、コンクリートハッチ及び原子炉格納容器蓋の取り外し作業を実施する。

②原子炉圧力容器蓋取り外し（図 1 中の 4）

原子炉が冷温停止状態になった後、原子炉の水位を徐々に上昇させ、原子炉圧力容器保温材及び原子炉圧力容器蓋を開放する（原子炉圧力容器開放時の水位はフランジ下 0.5m 程度）。

③蒸気乾燥器取り外し（図 1 中の 5）

水位を徐々に上昇させながら、蒸気乾燥器を蒸気乾燥器・気水分離器ピット（以下「D S P」という。）へと移動する（蒸気乾燥器は気中移動）。

④気水分離器取り外し（図1中の6）

気水分離器をD S Pへと移動する（気水分離器は水中移動）。

なお、原子炉起動に向けて実施する原子炉圧力容器閉鎖作業においては開放作業の逆の流れで実施される。この状況においては原子炉圧力容器開放作業時に比べ、原子炉停止後の冷却時間が長く燃料の崩壊熱及び線源強度が小さくなる。そのため、放射線の遮蔽維持における影響は原子炉圧力容器開放作業時に包絡される。

（添付資料 5. 1. 2）

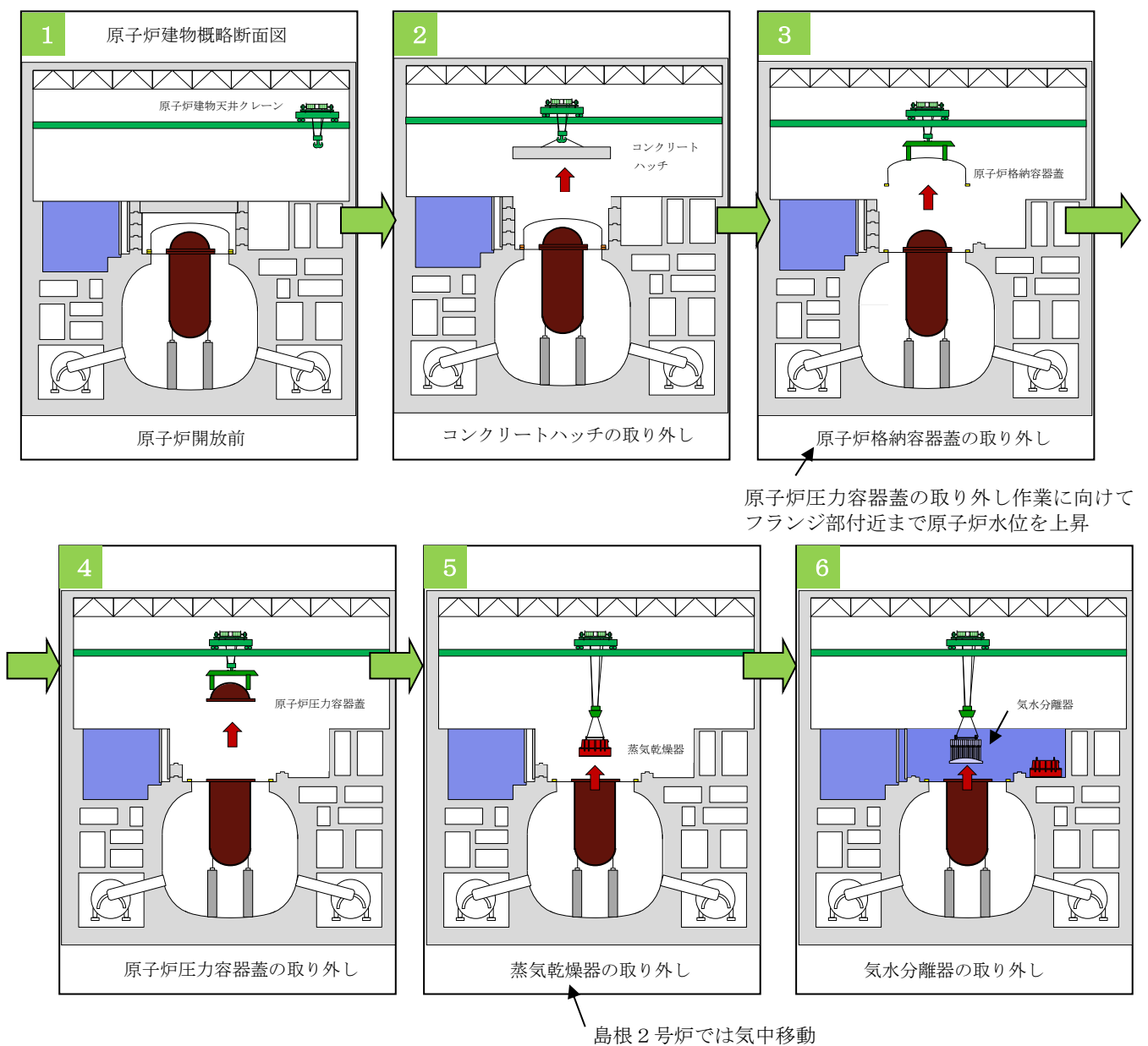


図1 原子炉圧力容器開放作業の流れ

2. 原子炉圧力容器等構造物

評価点 (燃料取替機台車床 (後述するコンクリートハッチ取り外し,
原子炉格納容器蓋取り外し状態の作業現場を想定))

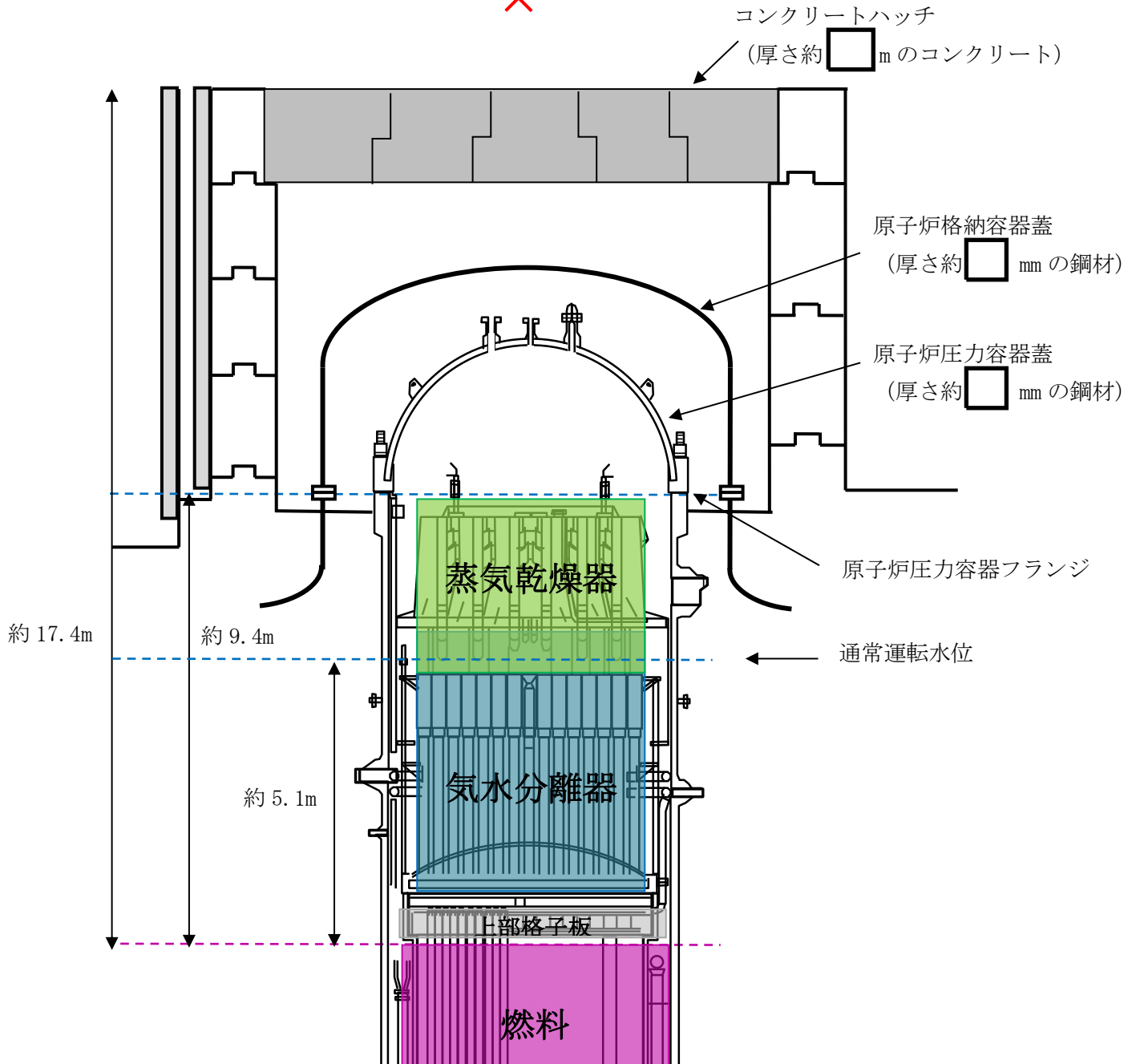


図2 原子炉圧力容器等構造物の概要

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

3. 各状態における遮蔽維持について

原子炉圧力容器開放作業時の各状態における現場の放射線遮蔽について以下に示す。

①-1 原子炉圧力容器開放作業の開始前（図1中の1）

原子炉運転中，原子炉停止直後等はコンクリートハッチ，原子炉格納容器蓋及び原子炉圧力容器蓋が閉鎖されており，また，蒸気乾燥器，気水分離器等も炉内に存在するため，炉心燃料等の線源からの放射線の多くはこれらに遮られ，原子炉建物原子炉棟4階での線量率は十分小さくなる。そのため，原子炉圧力容器開放作業の開始前において，原子炉水位低下に伴う放射線の遮蔽の評価は不要である。

※ 一例としてC o -60 を線源とした時の 10cm の鉄の実効線量透過率は約 8.2×10^{-2} ，155cm のコンクリートの実効線量透過率は約 4.1×10^{-7} と非常に小さくなる。

（参考：放射線施設の遮蔽計算実務（放射線）データ集 2012 公益財団法人 原子力安全技術センター）

①-2 コンクリートハッチ取り外し，原子炉格納容器蓋取り外し（図1中の2，3）

コンクリートハッチ及び原子炉格納容器蓋の取り外し後は，これらの遮蔽効果には期待できなくなるが，原子炉圧力容器蓋，蒸気乾燥器及び気水分離器の遮蔽効果に期待できる。さらに原子炉圧力容器蓋の取り外し作業に向けて原子炉の水位の上昇操作を実施するため，定期事業者検査ごとに高さは異なるが原子炉の水位は徐々に上昇することになる。この状態で原子炉建物原子炉棟4階にて原子炉圧力容器開放に向けた作業を実施していることも考えるため，コンクリートハッチ及び原子炉格納容器蓋の遮蔽に期待しない場合の現場線量率の評価が必要である。

② 原子炉圧力容器蓋取り外し（図1中の4）

原子炉圧力容器蓋開放時はフランジ下 0.5m 程度まで原子炉の水位を上昇させた後，開放作業を実施する。この際，原子炉の水位上昇により炉心燃料及び上部格子板からの放射線の影響は非常に小さくなる。また，原子炉の保有水量が多くなるため，100℃に至るまでの時間はさらに長くなる（約 1.2 時間程度）。

仮に原子炉圧力容器蓋を取り外し中に全交流動力電源喪失事象等が発生した際を考えた場合，原子炉圧力容器蓋を完全に移動させていなければ，その遮蔽に期待できる。

また，原子炉圧力容器蓋を取り外した後の状態にて後述する全交流動力電源喪失事象の水位低下（フランジ付近から約 1.1m 低下）を仮定した場合も，原子炉水位がフランジよりさらに高い水位である可能性があること，炉心燃料及び上部格子板からの放射線影響は後述する原子炉冷却材の流出の原子炉水位と線量率の関係（5.3 原子炉冷却材の流出 第5.3.2-2 図）に包絡できることから，必要な遮蔽の目安とした 10mSv/h を超えることはない。

なお，蒸気乾燥器及び気水分離器からの放射線影響においても線源強度が大きくないこと，約 1.1m の水位低下により露出する蒸気乾燥器は通常作業でも気中移動させる設備であることから，これらを考慮しても必要な遮蔽は維持される。

以上より，原子炉水位低下に伴う放射線の遮蔽の評価は不要である。（上記の①-2 での

評価に包絡)。

③ 蒸気乾燥器取り出し (図 1 中の 5) 及び④ 気水分離器取り外し (図 1 中の 6)

蒸気乾燥器の取り外しに併せ、水位を上昇させていく状態であり、崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失事象が発生した場合においても、沸騰開始及び水位低下までに十分に時間余裕があるため、原子炉水位低下に伴う放射線の遮蔽の評価は不要である。

4. 放射線の遮蔽維持に必要な水位

放射線の遮蔽維持に必要な水位 (目安と考える 10mSv/h) は、3. の検討を踏まえ、「①-2 コンクリートハッチ取り外し、原子炉格納容器蓋取り外し (図 1 中の 2, 3)」の状態を想定して評価を行った。

線量率の算出は、「添付資料 4.1.2 「水遮蔽厚に対する貯蔵中の燃料等からの線量率」の評価について」と同様に QAD-CGGP2R コードを用いて計算し、評価条件は以下に示すものを用いた。

なお、評価点は燃料取替機台車床*とした。

※ 原子炉停止中の崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失時の作業員の退避を想定して評価点を設定した。コンクリートハッチ取り外し及び原子炉格納容器蓋取り外し作業時において作業員は天井クレーン操作室等にいることが考えられるため、より線源に近い燃料取替機台車床を代表としている。なお、停止作業中においては作業員が原子炉格納容器内 (D/W含む) に入って作業することも考えられるが、炉心燃料からの放射線は遮蔽物 (原子炉圧力容器、シュラウド、生体遮蔽 (原子炉遮蔽壁) 等) により減衰されること、原子炉建物原子炉棟 4 階と同様に事故時に作業員が退避することから、作業員の退避に関する被ばく影響は本評価に包絡される。

(1) 炉心燃料・炉内構造物の評価モデルと線源強度

放射線源として燃料、上部格子板、気水分離器及び蒸気乾燥器をモデル化した。

a. 炉心燃料

評価条件を以下に示す。

- 線源形状：円柱線源 (炉心のすべてに燃料がある状態)
- 燃料棒有効長 (mm)：
- ガンマ線エネルギー：評価に使用するガンマ線は、エネルギー 5 群
- 線源材質：燃料及び水 (密度： g/cm³)
- 線源強度：文献値*¹に記載のエネルギーあたりの線源強度を基に、9×9 燃料 (A型) の体積あたりの線源強度を式①で算出

$$\text{線源強度 (cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) = \frac{\text{文献に記載の線源強度 (MeV} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) \times \text{燃料集合体あたりの熱出力 (W/体)}}{\text{各群のエネルギー (MeV)} \times \text{燃料集合体体積 (cm}^3 \text{/体)}} \dots \text{①}$$

このときの線源条件は以下となる。なお、本評価で使用している文献値は、燃料照射期間 10⁶時間 (約 114 年) と、島根 2 号炉の実績を包絡した条件で評価されており、

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

島根 2 号炉に関する本評価においても適用可能である。

- ・燃料照射期間： 10^6 時間（無限照射）
- ・原子炉停止後の期間^{※2}：停止後 12 時間（原子炉未開放状態での実績を考慮して設定した値）
- ・燃料集合体あたりの熱出力：4.35MW/体（9×9 燃料（A型））
- ・燃料集合体体積：約 $7.1 \times 10^4 \text{ cm}^3$ （9×9 燃料（A型））

※1 Blizard E. P. and Abbott L. S., ed., “REACTOR HANDBOOK. 2nd ed. Vol. III Part B, SHIELDING”, INTERSCIENCE PUBLISHERS, New York, London, 1962”

※2 原子炉停止後の期間は全制御棒全挿入からの時間を示している。通常停止操作において原子炉の出力は全制御棒全挿入完了及び発電機解列以前から徐々に低下させるが、線源強度評価は崩壊熱評価と同様にスクラムのような瞬時に出力を低下させる保守的な評価条件となっている。

○ 評価モデル：円柱線源

線量率評価モデルを図3に示す。また、式①で算出した体積あたりの線源強度を表1に示す。

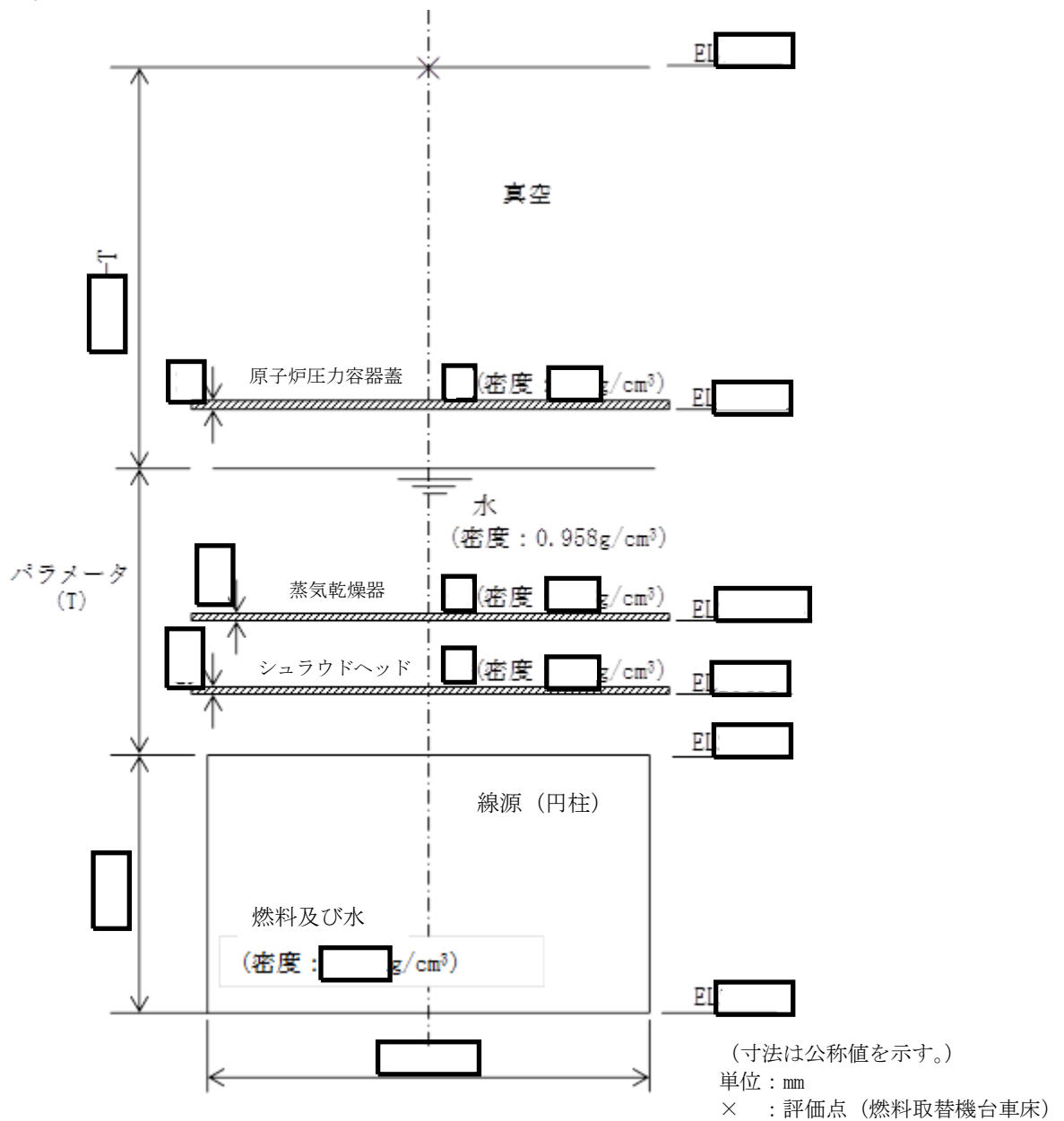


図3 燃料の線量率評価モデル

表1 燃料の線源強度

ガンマ線 エネルギー (MeV)	線源強度 ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
1.0	9.8×10^{11}
2.0	1.6×10^{11}
3.0	4.7×10^9
4.0	7.3×10^7
5.0	2.0×10^7

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

b. 上部格子板

評価条件を以下に示す。

- 線源形状：円柱線源としてモデル化
- 線源の高さ (mm)：
- ガンマ線エネルギー：評価に使用するガンマ線は、主要核種 ^{60}Co を想定して 1.5MeV
- 線源材質：水と同等 (密度： $0.958\text{g}/\text{cm}^3$ *)
- ※ 52°C から 100°C までの飽和水の密度のうち、最小となる 100°C の値を採用
- 線源強度は、機器表面の実測値 (Sv/h) より $8.7 \times 10^9 \text{ Bq}/\text{cm}^3$ と算出線量率評価モデルを図 4 に示す。

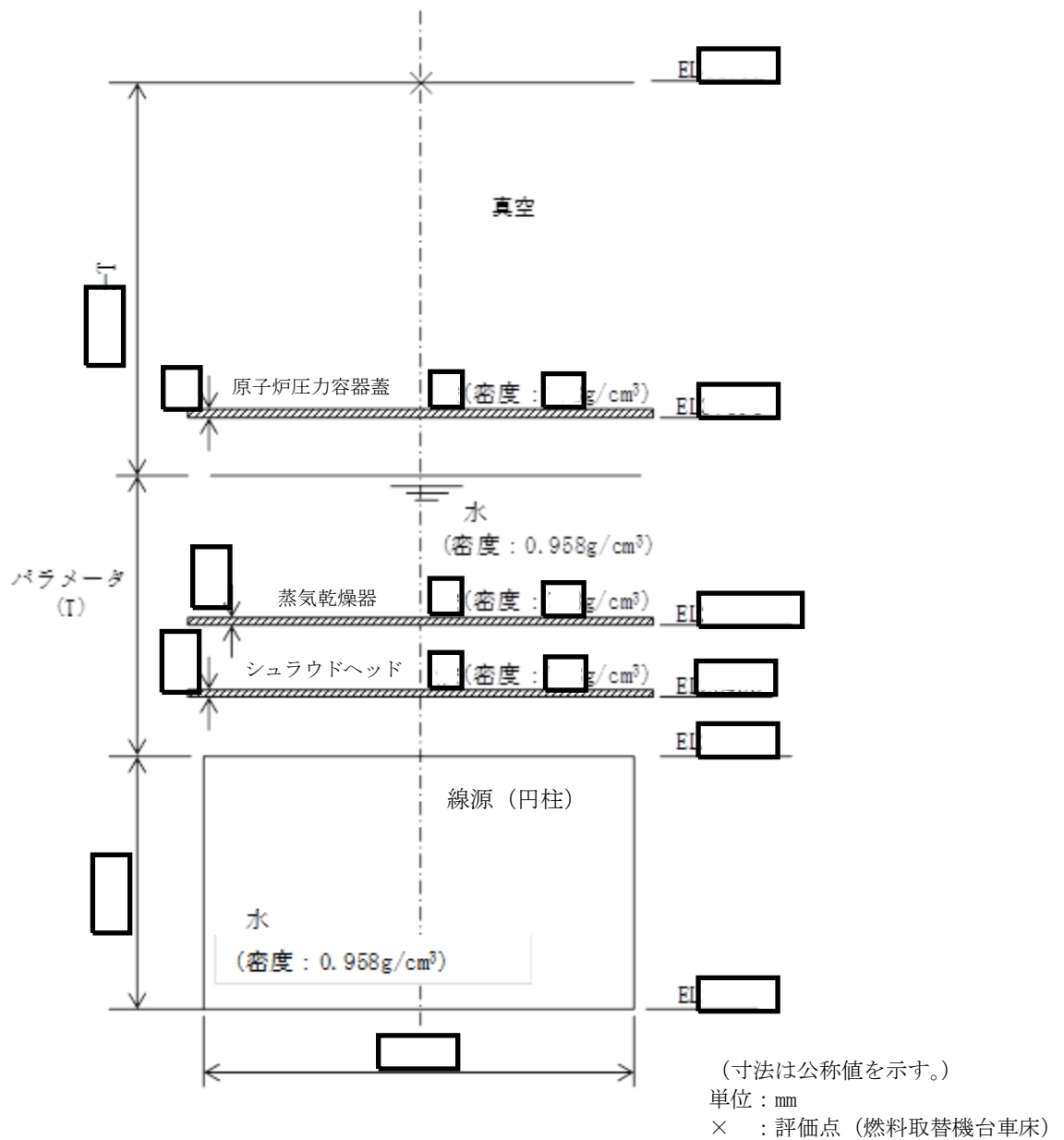


図 4 上部格子板の線量率評価モデル

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

c. 気水分離器

評価条件を以下に示す。

- 線源形状：円柱線源としてモデル化
- 線源の高さ (mm)：
- ガンマ線エネルギー：評価に使用するガンマ線は、主要核種 ^{60}Co を想定して 1.5MeV
- 線源材質：水と同等 (密度： $0.958\text{g}/\text{cm}^3$ *)
- ※ 52°Cから 100°Cまでの飽和水の密度のうち、最小となる 100°Cの値を採用
- 線源強度は、機器表面の実測値 (mSv/h) より $1.3 \times 10^6 \text{ Bq}/\text{cm}^3$ と算出線量率評価モデルを図5に示す。

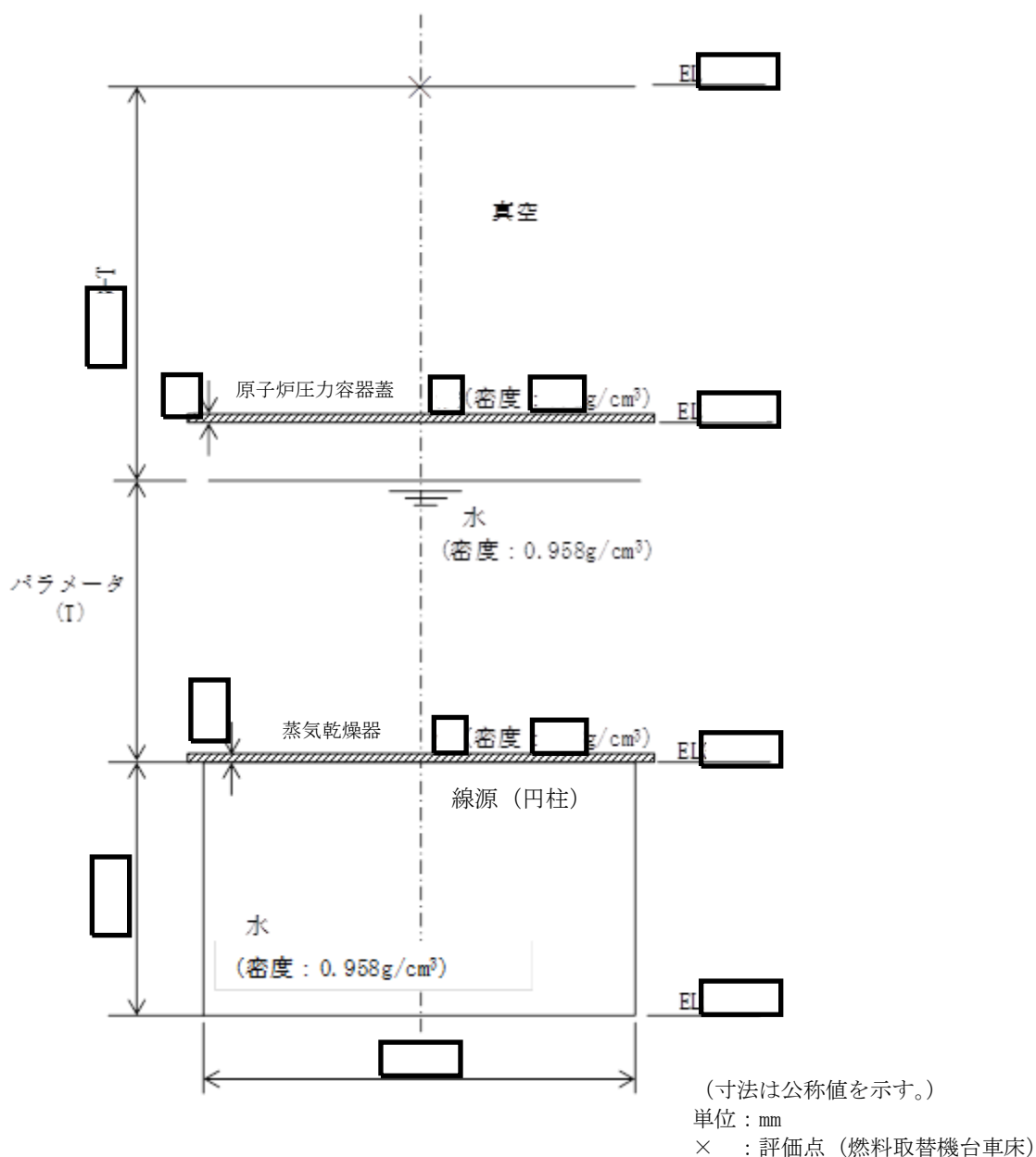


図5 気水分離器の線量率評価モデル

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

d. 蒸気乾燥器

評価条件を以下に示す。

- 線源形状：円柱線源としてモデル化
- 線源の高さ (mm)：
- ガンマ線エネルギー：評価に使用するガンマ線は，主要核種 ^{60}Co を想定して 1.5MeV
- 線源材質：水と同等 (密度： $0.958\text{g}/\text{cm}^3$)
- ※ 52°C から 100°C までの飽和水の密度のうち，最小となる 100°C の値を採用
- 線源強度は，機器表面の実測値 (mSv/h) より 1.3×10^6 Bq/cm 2 と算出線量率評価モデルを図 6 に示す。

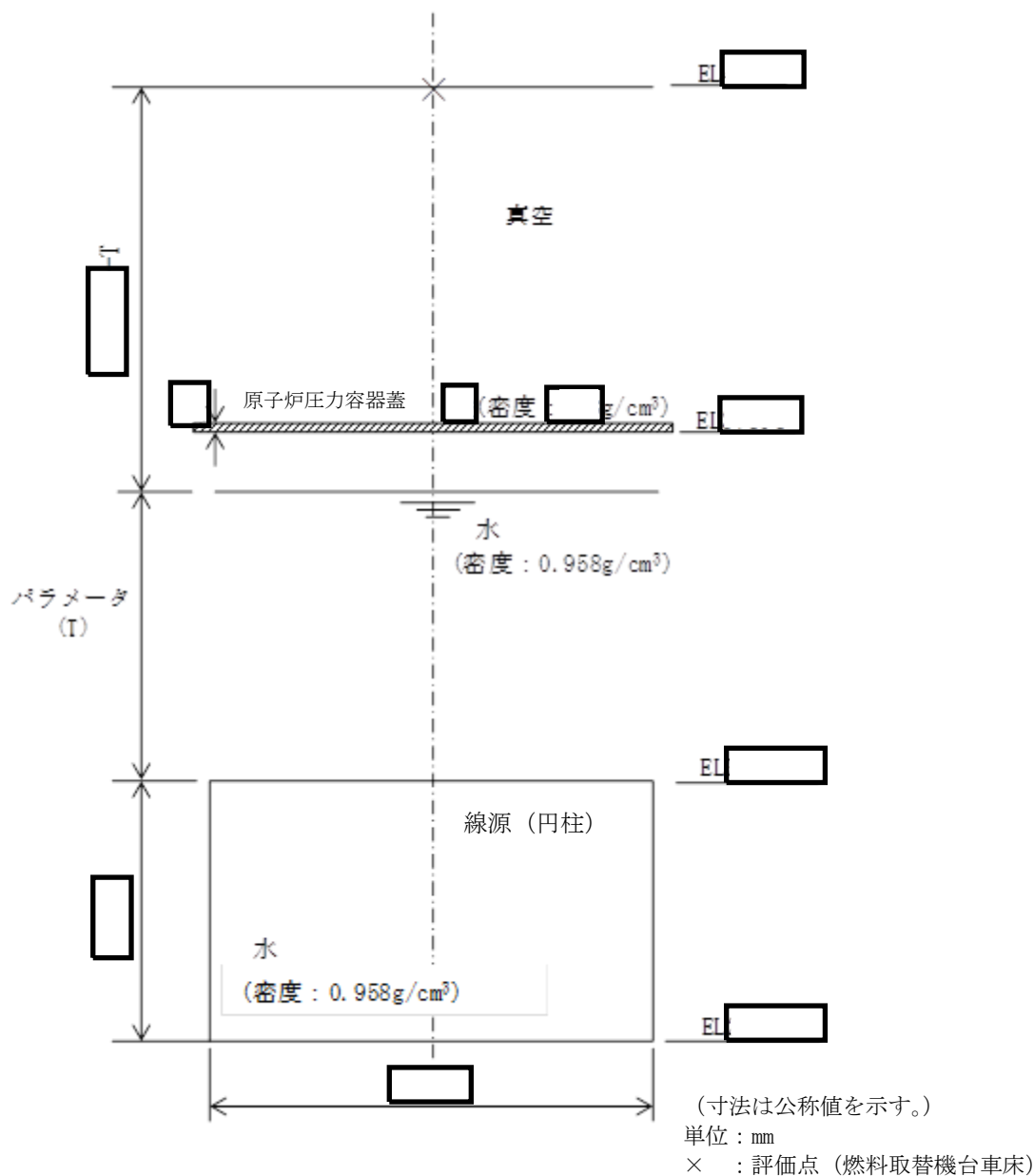


図 6 蒸気乾燥器の線量率評価モデル

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(2) 遮蔽物の評価モデル

原子炉圧力容器内の原子炉冷却材以外に放射線を遮蔽する構造物として、原子炉圧力容器蓋、蒸気乾燥器、気水分離器をモデル化した。なお、蒸気乾燥器及び気水分離器は構造が複雑であり、放射線の遮蔽物を平均化したモデルとするとストリーミング(放射線漏れ)の影響により非保守的な評価となるため、線源を覆うような構造物のみ遮蔽物として考慮した。

a. 原子炉圧力容器蓋

評価条件を以下に示す。

- 遮蔽物形状：円柱遮蔽物としてモデル化
- 遮蔽物の高さ (mm)： (圧力容器蓋の最薄部厚さ)
- 遮蔽物材質： 平板 (密度： g/cm³) ※
- ※ 原子炉圧力容器鋼板 () の密度は、同等である で代表した線量率評価モデル (遮蔽) を図 3～7 に示す。



図 7 原子炉圧力容器蓋の線量率評価モデル (遮蔽)

b. 蒸気乾燥器

評価条件を以下に示す。

- 遮蔽物形状：円柱遮蔽物としてモデル化
- 遮蔽物の高さ (mm)： (フード部の最薄部厚さ)
- 遮蔽物材質： 平板 (密度： g/cm³) ※
- ※ 蒸気乾燥器の材質 () の密度は、同等である で代表した線量率評価モデル (遮蔽) を図 3～5 及び 8 に示す。



図 8 蒸気乾燥器の線量率評価モデル (遮蔽)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

c. 気水分離器

評価条件を以下に示す。

○ 遮蔽物形状：円柱遮蔽物としてモデル化

○ 遮蔽物の高さ (mm)： (シュラウドヘッドの厚さ (気水分離器スワラーによる遮蔽も考慮))

○ 遮蔽物材質： 平板 (密度 g/cm³) ※

※ 気水分離器の材質 () の密度は、同等である で代表した線量率評価モデル (遮蔽) を図 3, 4 及び 9 に示す。



図 9 気水分離器の線量率評価モデル (遮蔽)

(3) 現場の線量率の評価結果

(1), (2)の条件を用いて評価した原子炉水位と現場の線量率の関係を図10に示す。

グラフより必要な遮蔽を確保できる水位(目安と考える10mSv/h)は以下の仮定のもとで「燃料棒有効長頂部の約1.8m上」と求めた。

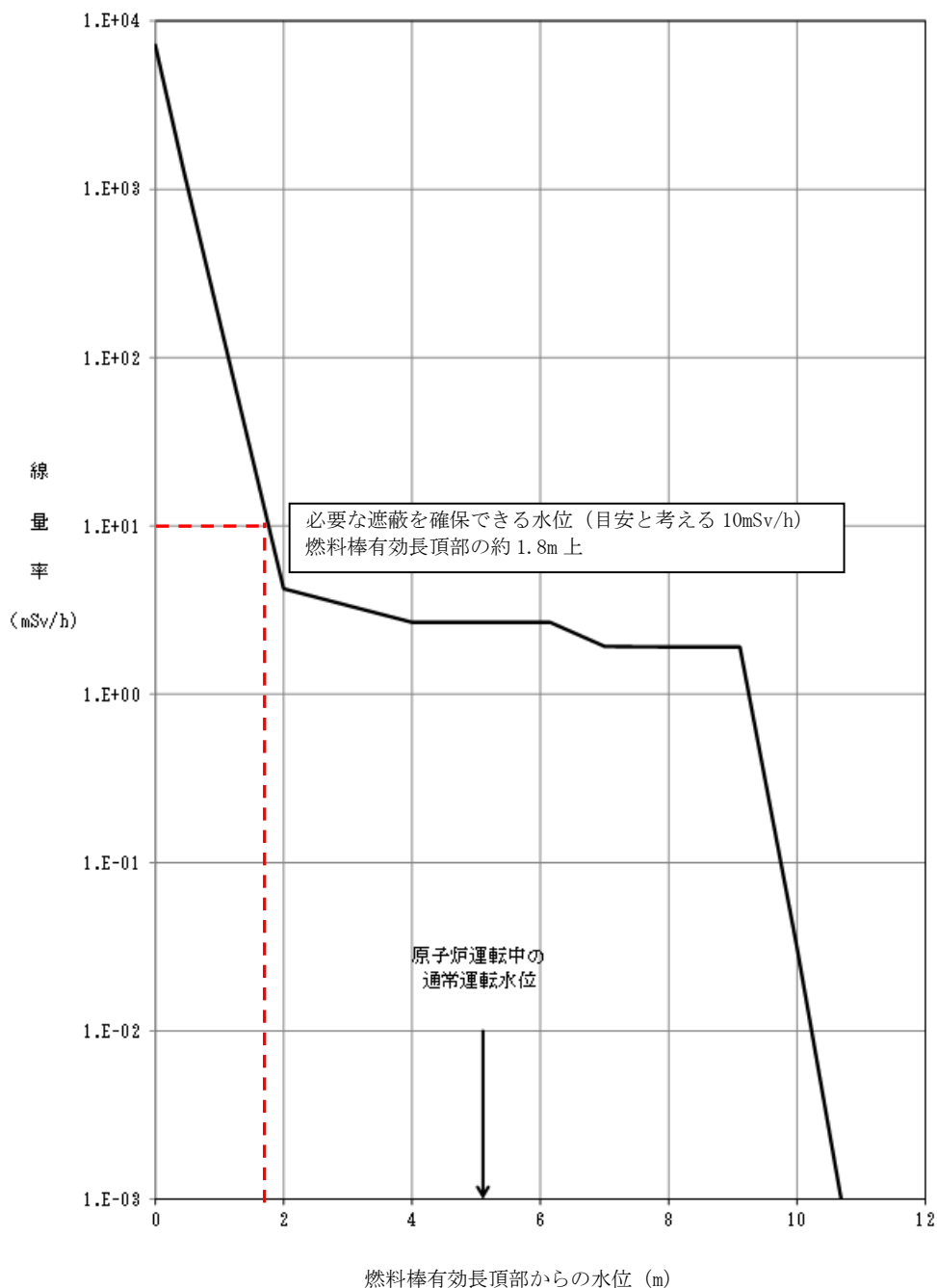


図10 原子炉水位と炉心燃料及び上部格子板等からの線量率

(4) 必要な遮蔽を確保できる最低水位到達までの時間余裕

崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失時の事故発生時から放射線の遮蔽維持に必要な水位到達までの時間を、「添付資料 5.1.1 1. 原子炉圧力上昇による原子炉冷却材蒸発の抑制効果を考慮しない計算」を用いて求めた。

計算は後述する「添付資料 5.1.7」の評価条件の不確かさを踏まえ、原子炉停止後 12 時間後と 1 日後の 2 ケースを実施した。

評価条件及び評価結果を表 2 に示す。

評価結果より、原子炉停止 12 時間後及び原子炉停止 1 日後においては崩壊熱除去機能喪失時の注水までの想定時間である事象発生から 2 時間後、全交流動力電源喪失時の注水までの想定時間である事象発生から 2 時間後に対して十分であることが確認された。

表 2 必要な遮蔽を確保できる最低水位到達までの時間余裕の評価条件と結果

原子炉停止後の時間	原子炉初期水温 (°C)	崩壊熱 (kW)	必要な遮蔽を確保できる水位到達までの時間余裕 ^{※1}	燃料棒有効長頂部到達までの時間余裕	残留熱除去機能喪失時の注水までの想定時間	全交流動力電源喪失時の注水までの想定時間
12 時間 (不確かさで確認するケース)	100	1.67×10^4	約 2.7 時間	約 4.2 時間	2 時間	2 時間
24 時間 (有効性評価で確認するケース)	52	1.40×10^4	約 4.3 時間	約 6.1 時間	2 時間	2 時間

※1 「添付資料 5.1.1 2. 原子炉圧力上昇による原子炉冷却材蒸発の抑制効果を考慮した計算」に示すように、原子炉の減圧操作実施までは、発生した崩壊熱の多くが飽和水の顕熱として吸収されるため、必要な遮蔽を確保できる水位到達までの時間余裕はさらに長くなる（原子炉停止 12 時間後でも 4 時間以上の時間余裕がある）。

5. 事故時の退避について

事故発生時の原子炉建物原子炉棟 4 階又は原子炉格納容器内にいる現場作業員の退避について確認した。

事象発生時、当直長のページングによる退避指示、又は現場の状況変化により、現場作業員は異常状態を認知し、2 時間以内に原子炉建物原子炉棟 4 階又は原子炉格納容器内より退避する。また、運転員は現場作業員の退避が完了したことを確認し、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）の開操作を開始する。全交流動力電源喪失により現場の照明設備が消灯することも考えられるが、現場作業員はヘッドライト等のバッテリー式の照明を保有しており、線量が上昇する前（4. より事象発生から最短約 2.7 時間）の退避が十分可能である。

なお、作業者の避難が必要な場合は、避難指示及び立ち入り制限が実施されるため、作業者は緊急作業を除き現場の安全性が確認される前に再入域することはない。

復旧に際しては放射線汚染等を確認し、現場の安全性が確認された後実施する。

6. 原子炉隔離時冷却系による注水について

原子炉隔離時冷却系の設計として、作動には0.74MPa[gage]以上の原子炉圧力を必要としており、原子炉停止時の初期圧力は大気圧程度まで低下しているため、評価において原子炉隔離時冷却系による注水に期待していない。ただし、有効性評価で想定しているような原子炉未開放状態において事象進展とともに原子炉の圧力が上昇し、原子炉隔離時冷却系による注水が可能となることが考えられる。なお、原子炉隔離時冷却系の点検の準備として弁の電源等に隔離操作（アイソレーション）を実施していることも考えられるが、これらの事故時に原子炉隔離時冷却系での注水を必要とした際は運転員がただちに復旧を実施することが可能であるため、原子炉隔離時冷却系の使用の問題とならない。

7. まとめ

崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失時で想定する原子炉停止1日後において、必要な遮蔽を確保できる水位を下回ることはない。

また、評価条件の不確かさを考慮して原子炉停止12時間後、原子炉初期水温100℃の状態を想定した場合でも、4. で評価した必要な遮蔽を確保できる水位到達までの時間余裕である約2.7時間に比べ十分時間がある。さらに、これらの時間余裕は「添付資料5.1.1 2. 原子炉圧力上昇による原子炉冷却材蒸発の抑制効果を考慮した計算」のとおり、原子炉圧力上昇による原子炉冷却材蒸発の抑制効果を考慮することでさらに長くなる。

以上より、運転員及び作業員が現場にいる間、放射線の遮蔽は維持される。

表 1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響(運転停止中(崩壊熱除去機能喪失)) (1/3)

項目	評価条件(初期、事故及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
初期条件	約 14.0MW (9×9燃料(A型), 原子炉停止1日後)	約 14MW 以下 (実績値)	平衡炉心燃料の平均燃焼度 33GWd/t (サイクル末期の燃焼度のばらつきを考慮し, 10%の保守性を考慮) を基に ANSI/ANS-5.1-1979 にて算出した値 また, 原子炉停止1日後においては, 9×9燃料の方が MOX 燃料よりも崩壊熱が大きくなり, 原子炉水位低下の観点で厳しいため, MOX 燃料 (A 型) の評価は 9×9 燃料 (A 型) の評価に包絡されることを考慮し, 代表的に 9×9 燃料 (A 型) を設定 停止後の時間については, 停止後の時間を短くとり, 崩壊熱が蔽しなくなるように1日後の状態を想定	最確条件とした場合は, 評価条件で設定している燃料の崩壊熱より小さくなるため, 原子炉水温の上昇及び原子炉水位の低下は緩和されるが, 注水操作は崩壊熱に応じた対応をとるものではなく, 崩壊熱除去機能喪失による異常の認知を起点とするものであることから, 運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は, 評価条件で設定している燃料の崩壊熱より小さくなるため, 原子炉水温の上昇及び原子炉水位の低下は緩和されることから, 評価項目となるパラメータに対する余裕が大きくなる。仮に, 原子炉停止後の時間が短く, 燃料の崩壊熱が大きい場合は, 注水までの時間が短くなることから, 評価項目に対する余裕は小さくなる。原子炉停止から12時間後の燃料の崩壊熱を用いて原子炉注水までの時間余裕を評価すると, 必要な遮蔽が維持される水位 (必要な遮蔽の目安とした 10mSv/h が維持される水位) である燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上の高さに到達するまでの時間は事象発生から約 2.7 時間, 燃料棒有効長頂部到達まで事象発生から約 4.2 時間となることから評価条件である原子炉停止1日後の評価より時間余裕は短くなる。ただし, 必要な放射線の遮蔽は維持され, 原子炉注水までの時間余裕も十分な時間が確保されていることから, 評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
原子炉水温	52℃	約 29℃~約 46℃*1 (実績値)	停止後1日の実績を踏まえ, 原子炉は残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード) にて冷却されているため, その設計温度である 52℃を設定	最確条件とした場合は, 事故事象ごとに異なる。原子炉水温が 100℃かつ原子炉注水までの時間余裕を評価すると, 必要な遮蔽が維持される水位 (必要な遮蔽の目安とした 10mSv/h が維持される水位) である燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上の高さに到達するまでの時間は事象発生から約 2.7 時間となることから, 評価条件である原子炉水温が 52℃かつ原子炉停止から1日後の燃料の崩壊熱の場合の評価より時間余裕は短くなるが, 注水操作は原子炉水温に応じた対応をとるものではなく, 崩壊熱除去機能喪失による異常の認知を起点とするものであることから, 運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は, 事故事象毎に異なる。原子炉水温が 100℃かつ原子炉注水までの時間余裕を評価すると, 必要な遮蔽が維持される水位 (必要な遮蔽の目安とした 10mSv/h が維持される水位) である燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上の高さに到達するまでの時間は事象発生から約 2.7 時間となることから, 評価条件である原子炉水温が 52℃かつ原子炉停止から1日後の燃料の崩壊熱の場合の評価より時間余裕は短くなる。ただし, 必要な放射線の遮蔽は維持される水位 (必要な遮蔽の目安とした 10mSv/h が維持される水位) である燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上の高さに到達するまでの時間は事象発生から約 2.7 時間となることから, 評価条件である原子炉水温が 52℃かつ原子炉停止から1日後の燃料の崩壊熱の場合の評価より時間余裕は短くなる。ただし, 必要な放射線の遮蔽は維持され, 原子炉注水までの時間余裕も十分な時間が確保されていることから, 評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

*1 過去のプラント停止操作実施時の全制御棒全挿入から約 24 時間経過後の原子炉水温の実績データ

表1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響(運転停止中(崩壊熱除去機能喪失))(2/3)

項目	評価条件(初期, 事故及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
原子炉水位	通常運転水位 (気水分離器 下端から+83 cm)	通常運転水位 以上	原子炉停止1日後の水 位	最確条件とした場合は、評価条件で設定している原子炉水位より高くなるため、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は長くなるが、注水操作は原子炉水位に応じた対応をとるものではなく、崩壊熱除去機能喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は、評価条件で設定している原子炉水位より高くなるため、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は長くなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
原子炉圧力	大気圧	大気圧※2	原子炉停止1日後の実 績を考慮して設定	最確条件とした場合は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。仮に、原子炉圧力が大気圧より高い場合は、沸騰開始時間は遅くなり、原子炉水位の低下は緩和されるが、注水操作は原子炉圧力に応じた対応をとるものではなく、崩壊熱除去機能喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。仮に、原子炉圧力が大気圧より高い場合は、沸騰開始時間が遅くなり、原子炉水位の低下は緩和されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
原子炉圧力容器 の状態	原子炉圧力 容器未開放	事故毎に 変化	燃料の崩壊熱及び保有 水量の観点から設定	原子炉圧力容器の未開放時は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。 原子炉圧力容器の開放時は、原子炉減圧操作が不要となるが、事象進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。	原子炉圧力容器の未開放時は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。 原子炉圧力容器の開放時は、原子炉減圧操作が不要となるが、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
燃料の容量	1,180m ³	1,180m ³ 以上 (合計貯蔵量)	発電所構内に貯蔵して いる合計容量を参考 に、最確条件を包絡で きる条件を設定	最確条件とした場合は、解析条件よりも燃料容量の余裕が大きくなる。また、事象発生直後から最大負荷運転を想定しても燃料は枯渇しないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。	—

※2 原子炉停止直後、原子炉圧力容器耐圧試験などの特殊な場合を除く。

表 1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響(運転停止中(崩壊熱除去機能喪失))(3/3)

項目	評価条件(初期、事故及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
事故条件	起因事象、安全機能の喪失に対する仮定	残留熱除去系の機能喪失	—	運転中の残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)の故障を想定	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
	外部電源	外部電源なし	事故毎に変化	外部電源の有無は、崩壊熱除去機能の喪失に伴う原子炉水位の低下に影響しないことから、資源の観点で厳しい外部電源なしを設定	外部電源がない場合と外部電源がある場合では、事象進展は同じであることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
機器条件	残留熱除去系(低圧注水モード)	1,136 m ³ /hで注水	1,136 m ³ /hで注水	残留熱除去系(低圧注水モード)の設計値として設定	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
	残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)	熱交換器1基あたり約9MW(原子炉冷却材温度52℃、海水温度30℃において)	熱交換器1基あたり約9MW(原子炉冷却材温度52℃、海水温度30℃において)	残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)の設計値として設定	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

表2 運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕(運転停止中(崩壊熱除去機能喪失)) (1/2)

項目	評価条件(操作条件)の不確かさ		操作の不確かさ要因	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	評価上の操作開始時間	条件設定の考え方					
操作条件 待機中の残留熱除去系(低圧注水モード)による注水操作	事象発生から2時間後	残留熱除去系の機能喪失に伴う異常の認知及び現場操作の実績等を基に、さらに余裕を考慮して設定	<p>【認知】 評価では残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)の故障発生から残留熱除去系(低圧注水モード)による原子炉注水操作の開始まで、逃がし安全弁の手動減圧操作等を含めて事象発生から2時間後を設定しているが、原子炉注水の必要性を認知することは容易である。よって、評価上の注水操作開始時間に対し、実際の注水操作開始時間が早くなる場合が考えられる。</p> <p>【要員配置】 中央制御室内での操作のみであり、運転員は中央制御室に常駐していることから、操作開始時間に与える影響なし。</p> <p>【移動】 中央制御室内での操作のみであり、操作開始時間に与える影響なし。</p> <p>【操作所要時間】 残留熱除去系のポンプ起動操作及び注入弁の操作は、制御盤の操作スイッチによる操作のため、簡易な操作である。また、原子炉水位の低下に対して操作に要する時間は短い。</p> <p>【他の並列操作有無】 当該操作を実施する運転員は、残留熱除去系(低圧注水モード)の原子炉注水操作時に他の並列操作はなく、操作開始時間に与える影響はなし。</p> <p>【操作の確実さ】 中央制御室における操作は、制御盤の操作スイッチによる簡易な操作のため、誤操作は起こりにくく、そのため誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。</p>	崩壊熱除去機能喪失による原子炉注水の必要性を確保すること、評価では事象発生から2時間後の注水操作開始を設定しているが、実際の注水操作開始時間が早くなる可能性があること、評価項目となるパラメータに与える影響は大きくなる。	<p>実態の操作開始時間が早まり、原子炉水位の低下を緩和する可能性があること、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。</p> <p>通常運転水位から放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約4.3時間、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間があり、事象発生から約6.1時間であり、事故を認知して注水を開始するまでの時間は事象発生から2時間後であるため、準備時間が確保できることから、時間余裕がある。</p>	<p>評価上は作業成立性を踏まえ事象発生から2時間後としており、このうち、残留熱除去系(低圧注水モード)による原子炉注水の起動操作は、所要時間10分想定のところ、訓練実績では約2分である。想定で意図している運転操作が実施可能なことを確認した。</p>	

表2 運転員等操作時間に与える影響，評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕(運転停止中(崩壊熱除去機能喪失)) (2/2)

項目	評価条件(操作条件)の不確かさ		操作の不確かさ要因	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	評価上の操作開始時間	条件設定の考え方					
<p>待機中の残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)による崩壊熱除去機能復旧</p> <p>操作条件</p>	<p>事象発生から2時間30分後</p>	<p>運転手順書等を踏まえて設定</p>	<p>残留熱除去系の低圧注水モードにより原子炉への注水を実施していることから、原子炉停止時冷却モードによる崩壊熱除去機能復旧には時間余裕がある。</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>評価上は作業成立性を踏まえ、原子炉水位回復から30分後としており、このうち、系統構成及びボンプの起動は、所要時間30分想定のところ、訓練実績等では約16分である。想定で意図している運転操作が実施可能なことを確認した。</p>

7日間における燃料の対応について（運転停止中（崩壊熱除去機能喪失））

保守的にすべての設備が、事象発生直後から7日間燃料を消費するものとして評価する。

時系列	合計	判定
非常用ディーゼル発電機 2台起動 ^{※1} （燃料消費率は保守的に最大負荷（定格出力運転）時を想定） $1.618\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 2\text{台} = 543.648\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 700m^3	非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等の容量は約 730m^3 であり、7日間対応可能
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 1台起動 （燃料消費率は保守的に最大負荷（定格出力運転）時を想定） $0.927\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 155.736\text{m}^3$		
緊急時対策所用発電機 1台 （燃料消費率は保守的に最大負荷（定格出力運転）時を想定） $0.0469\text{ m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 7.8792\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 8m^3	緊急時対策所用燃料地下タンクの容量は約 45m^3 であり、7日間対応可能

※1 事故収束に必要な非常用ディーゼル発電機は1台であるが、保守的に非常用ディーゼル発電機2台を起動させて評価した。

5.2 全交流動力電源喪失

5.2.1 事故シーケンスグループの特徴、燃料損傷防止対策

(1) 事故シーケンスグループ内の事故シーケンス

事故シーケンスグループ「全交流動力電源喪失」に含まれる事故シーケンスは、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、「外部電源喪失＋交流電源喪失」及び「外部電源喪失＋直流電源喪失」である。

(2) 事故シーケンスグループの特徴及び燃料損傷防止対策の基本的考え方

事故シーケンスグループ「全交流動力電源喪失」では、原子炉の運転停止中に全交流動力電源が喪失することにより、原子炉の注水機能及び除熱機能が喪失することを想定する。このため、燃料の崩壊熱により原子炉冷却材が蒸発することから、緩和措置がとられない場合には、原子炉水位の低下により燃料が露出し、燃料損傷に至る。

本事故シーケンスグループは、全交流動力電源が喪失したことによって燃料損傷に至る事故シーケンスグループである。このため、運転停止中の原子炉における燃料損傷防止対策の有効性評価には、全交流動力電源に対する重大事故等対処設備に期待することが考えられる。

したがって、本事故シーケンスグループでは、運転員が異常を認知して、常設代替交流電源設備による電源供給、低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水を行うことによって、燃料損傷の防止を図る。また、原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による最終的な熱の逃がし場へ熱の輸送を行うことにより、原子炉を除熱する。

(3) 燃料損傷防止対策

事故シーケンスグループ「全交流動力電源喪失」における機能喪失に対して、燃料が著しい損傷に至ることなく、かつ、十分な冷却を可能とするため、初期の対策として常設代替交流電源設備による給電手段、低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水手段を整備する。また、安定状態に向けた対策として原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱手段を整備する。これらの対策の概略系統図を第 5.2.1-1(1) 図及び第 5.2.1-1(2) 図に、手順の概要を第 5.2.1-2 図に示すとともに、重大事故等対策の概要を以下に示す。また、重大事故等対策における設備と操作手順の関係を第 5.2.1-1 表に示す。

本事故シーケンスグループにおける重要事故シーケンスにおいて、重大事故等対策に必要な要員は、中央制御室の運転員及び緊急時対策要員で構成され、合計 29 名である。その内訳は次のとおりである。中央制御室の運転員は、当直長 1 名、当直副長 1 名、運転操作対応を行う運転員 3 名である。発電所構内に常駐している要員のうち、通報連絡等を行う緊急時対策本部要員は 5 名、緊急時対策要員（現場）は 19 名である。必要な要員と作業項目について第 5.2.1-3 図に示す。

なお、重要事故シーケンス以外の事故シーケンスについては、作業項目を重要事故シーケンスと比較し、必要な要員数を確認した結果、29 名で対処可能である。

- a. 全交流動力電源喪失による残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）停止確認
原子炉の運転停止中に全交流動力電源が喪失し、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転停止による崩壊熱除去機能が喪失する。
残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転停止による崩壊熱除去機能喪失を確認するために必要な計装設備は、残留熱除去ポンプ出口流量である。
- b. 早期の電源回復不能判断及び対応準備
中央制御室からの操作により外部電源受電及び非常用ディーゼル発電機等の起動ができず、非常用高圧母線（6.9kV）の電源回復ができない場合、早期の電源回復不能と判断する。これにより、常設代替交流電源設備、原子炉補機代替冷却系、低圧原子炉代替注水系（常設）の準備を開始する。
- c. 逃がし安全弁による原子炉の低圧状態維持
残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転停止により原子炉水温が100℃に到達し、原子炉圧力が上昇することから、原子炉圧力を低圧状態に維持するため、中央制御室からの遠隔操作により逃がし安全弁（自動減圧機能付き）1個を開操作する。
残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転停止による原子炉水温の上昇を確認するために必要な計装設備は、原子炉圧力容器温度（SA）である。
逃がし安全弁（自動減圧機能付き）による原子炉の低圧状態維持を確認するために必要な計装設備は、原子炉圧力（SA）、原子炉圧力等である。
- d. 低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水
常設代替交流電源設備による交流電源供給を確認後、中央制御室からの遠隔操作により低圧原子炉代替注水ポンプを手動起動し、低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水を開始する。これにより、原子炉水位が回復する。
低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水を確認するために必要な計装設備は、原子炉水位（広帯域）、代替注水流量（常設）等である。
- e. 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転による崩壊熱除去機能回復
原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系の準備が完了後、中央制御室からの遠隔操作により残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転を再開する。
残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転の再開を確認するために必要な計装設備は、残留熱除去系熱交換器入口温度等である。
崩壊熱除去機能回復後、逃がし安全弁（自動減圧機能付き）を全閉とし、原子炉低圧状態の維持を停止する。

5.2.2 燃料損傷防止対策の有効性評価

(1) 有効性評価の方法

本事故シーケンスグループを評価するうえで選定した重要事故シーケンスは、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、「外部電源喪失＋交流電源喪失」である。

なお、「5.1 崩壊熱除去機能喪失」で考慮している原子炉補機冷却機能喪失により残留熱除去機能が喪失した場合については、事象進展が同様なので併せて本重要事故シーケンスにおいて燃料損傷防止対策の有効性を確認する。

本評価で想定するプラント状態においては、崩壊熱、原子炉冷却材及び注水手段の多様性の観点から、「POS-A 格納容器及び原子炉圧力容器の開放並びに原子炉ウェル満水への移行状態」が燃料棒有効長頂部の冠水、放射線の遮蔽が維持される水位の確保及び未臨界の確保に対して、最も厳しい想定である。したがって、当該プラント状態を基本とし、他のプラント状態も考慮した想定において評価項目を満足することを確認することにより、運転停止中の他のプラント状態においても、評価項目を満足できる。

また、評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、本重要事故シーケンスにおける運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価する。

(添付資料 5.1.1, 5.1.2)

(2) 有効性評価の条件

本重要事故シーケンスに対する初期条件も含めた主要な評価条件を第 5.2.2-1 表に示す。また、主要な評価条件について、本重要事故シーケンス特有の評価条件を以下に示す。

a. 初期条件

(a) 原子炉圧力容器の状態

原子炉圧力容器の未開放時について評価する。原子炉圧力容器の開放時については、燃料の崩壊熱及び保有水量の観点から、未開放時の評価に包絡される。

(b) 崩壊熱

原子炉停止後の崩壊熱は、ANSI/ANS-5.1-1979 の式に基づくものとし、また、崩壊熱を厳しく見積もるために、原子炉停止 1 日後の崩壊熱を用いる。このときの崩壊熱は約 14.0MW である。

なお、崩壊熱に相当する原子炉冷却材の蒸発量は約 23m³/h である。

(添付資料 5.1.3)

(c) 原子炉水位及び原子炉水温

事象発生前の原子炉水位は通常運転水位とし、また、原子炉水温は 52℃とする。

(d) 原子炉圧力

原子炉の初期圧力は大気圧が維持されているものとする。また、事象発生後において、水位低下量を厳しく見積もるために、原子炉圧力は大気圧に維持されているものとする*1。

※1 実操作では低圧原子炉代替注水系（常設）の注水準備が完了した後で原子炉減圧を実施することとなり、低圧原子炉代替注水系（常設）の注水特性に応じて大気圧より高い圧力で注水が開始されることとなる。大気圧より高い圧力下での原子炉冷却材の蒸発量は大気圧下と比べ小さくなるため、原子炉圧力が大気圧に維持されているとした評価は保守的な条件となる。

b. 事故条件

(a) 起因事象

起因事象として、送電系統又は所内主発電設備の故障等によって、外部電源を喪失するものとする。

(b) 安全機能の喪失に対する仮定

すべての非常用ディーゼル発電機等の機能喪失を想定し、全交流動力電源を喪失するものとする。また、原子炉補機冷却系の機能喪失を重畳させるものとする。

(c) 外部電源

外部電源は使用できないものと仮定する。起因事象として、外部電源を喪失するものとしている。

c. 重大事故等対策に関連する機器条件

(a) 低圧原子炉代替注水系（常設）

低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水流量は 200m³/h とする。

(b) 原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）

伝熱容量は、熱交換器 1 基あたり約 15.7MW（原子炉冷却材温度 100℃、海水温度 30℃において）とする。

d. 重大事故等対策に関連する操作条件

運転員等操作に関する条件として、「1.3.5 運転員等の操作時間に対する仮定」に示す分類に従って以下のとおり設定する。

(a) 事象発生 2 時間までに常設代替交流電源設備によって交流電源の供給を開始する。

(b) 低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水操作は、事象発生 2 時間後から開始する。

(c) 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）は、軸受等の冷却が必要となるため、原子炉補機代替冷却系の準備が完了する事象発生 10 時間後から開始する。

(3) 有効性評価の結果

本重要事故シーケンスにおける原子炉水位の推移を第 5.2.2-1 図に、原子炉水位と線量率の関係を第 5.2.2-2 図に示す。

a. 事象進展

事象発生後、全交流動力電源喪失に伴い崩壊熱除去機能が喪失することにより原子炉水温が上昇し、事象発生から約 0.9 時間後に沸騰、蒸発することにより原子炉水位は低下し始める。常設代替交流電源設備による交流電源の供給を開始し、事象発生から 2 時間経過した時点で、低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水を行うことによって、原子炉水位は燃料棒有効長頂部の約 4.0m 上まで低下するにとどまる。原子炉水位回復後は、蒸発量に応じた注水を実施することによって、原子炉水位を適切に維持することができる。

事象発生から 10 時間経過した時点で、原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱を開始することに

よって、原子炉水温は低下する。

b. 評価項目等

原子炉水位は、第 5.2.2-1 図に示すとおり、燃料棒有効長頂部の約 4.0m 上まで低下するに留まり、燃料は冠水を維持する。

原子炉圧力容器は未開放であり、第 5.2.2-2 図に示すとおり、必要な遮蔽^{※2}が維持される水位である燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上を下回ることがないため、放射線の遮蔽は維持される。なお、線量率の評価点は原子炉建物原子炉棟 4 階の燃料取替機台車床としている。また、全制御棒全挿入状態が維持されているため、未臨界は確保されている。

なお、事象発生前に現場にいた作業員の退避における放射線影響については現場環境が悪化する前に退避が可能であるため、影響はない。

事象発生 2 時間後から、常設代替交流電源設備により電源を供給された低圧原子炉代替注水系（常設）で原子炉注水を行い、事象発生 10 時間後から、原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による除熱を開始することで、長期的に安定状態を維持できる。

本評価では、「1.2.4.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(1)から(3)の評価項目について、対策の有効性を確認した。

※2 必要な遮蔽の目安とした線量率は 10mSv/h とする。全交流動力電源喪失における原子炉建物原子炉棟 4 階からの現場作業員の退避は 2 時間以内であり、作業員の被ばく量は最大でも 20mSv となるため、緊急作業時における被ばく限度の 100mSv に対して、余裕がある。

本事故に応じた燃料損傷防止対策において原子炉建物原子炉棟 4 階での操作を必要な作業としていないが、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）を使用した燃料プールへの注水について仮に考慮し、可搬型スプレイノズル及びホースの設置にかかる作業時間を想定した。

必要な遮蔽の目安とした線量率 10mSv/h は、定期事業者検査作業時での原子炉建物原子炉棟 4 階における線量率を考慮した値である。

この線量率となる水位は燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上（通常水位から約 3.3m 下）の位置である。

（添付資料4.1.2, 5.1.5, 5.1.6, 5.2.1）

5.2.3 評価条件の不確かさの影響評価

評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価するものとする。

本重要事故シーケンスは、原子炉の運転停止中に全交流動力電源が喪失し、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）等による崩壊熱除去機能を喪失することが特徴である。また、不確かさの影響を確認する運転員等操作は、常設代替交流電源設備による受電及び低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水操作並びに原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱操作とする。

(1) 評価条件の不確かさの影響評価

a. 初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件

初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件は、第 5.2.2

－1表に示すとおりであり、それらの条件設定を設計値等、最確条件とした場合の影響を評価する。また、評価条件の設定に当たっては、評価項目となるパラメータに対する余裕が小さくなるような設定があることから、その中で事象進展に有意な影響を与えると考えられる項目に関する影響評価の結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

初期条件の燃料の崩壊熱は、評価条件の約 14.0MW に対して最確条件は約 14.0MW 以下であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料の崩壊熱より小さくなるため、原子炉水温の上昇及び原子炉水位の低下は緩和されるが、注水操作や給電操作は崩壊熱に応じた対応をとるものではなく、全交流動力電源の喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉水温は、評価条件の 52℃に対して最確条件は約 29℃～約 46℃であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、事象発生ごとに異なる。原子炉水温が 100℃かつ原子炉停止から 12 時間後の燃料の崩壊熱を用いて原子炉注水までの時間余裕を評価すると、必要な遮蔽が維持される水位（必要な遮蔽の目安とした 10mSv/h が維持される水位）である燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上の高さに到達するまでの時間は事象発生から約 2.7 時間となることから、評価条件である原子炉水温が 52℃、原子炉停止から 1 日後の燃料の崩壊熱の場合の評価より時間余裕は短くなるが、注水操作や給電操作は原子炉水温に応じた対応をとるものではなく、全交流動力電源の喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉水位は、評価条件の通常運転水位に対して最確条件は通常運転水位以上であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している原子炉水位より高くなるため、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は長くなるが、注水操作や給電操作は原子炉水位に応じた対応をとるものではなく、全交流動力電源の喪失による異常の認知を起点とする操作であることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉圧力は、評価条件の大気圧に対して最確条件も大気圧であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。仮に、原子炉圧力が大気圧より高い場合は、沸騰開始時間は遅くなり、原子炉水位の低下は緩和されるが、注水操作や給電操作は原子炉圧力に応じた対応をとるものではなく、全交流動力電源の喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉圧力容器の状態は、評価条件の原子炉圧力容器の未開放に対して最確条件は事象発生ごとに異なるものであり、評価条件の不確かさとして、原子炉圧力容器の未開放時は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。原子炉圧力容器の開放時は、原子炉減圧操作が不要となるが、事象進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響は小

さい。

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

初期条件の燃料の崩壊熱は、評価条件の約 14.0MW に対して最確条件は約 14.0MW 以下であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している燃料の崩壊熱より小さくなるため、原子炉水温の上昇及び原子炉水位の低下は緩和されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。仮に、原子炉停止後の時間が短く、燃料の崩壊熱が大きい場合は、注水までの時間余裕が短くなることから、評価項目に対する余裕は小さくなる。原子炉停止から 12 時間後の燃料の崩壊熱を用いて原子炉注水までの時間余裕を評価すると、必要な遮蔽が維持される水位（必要な遮蔽の目安とした 10mSv/h が維持される水位）である燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上の高さに到達するまでの時間は事象発生から約 2.7 時間、燃料棒有効長頂部到達まで事象発生から約 4.2 時間となることから、評価条件である原子炉停止 1 日後の評価より時間余裕は短くなる。ただし、本時間に対して作業員が現場から退避するまでの時間及び原子炉注水までの時間は確保されているため放射線の遮蔽は維持され、原子炉水位が燃料棒有効長頂部を下回ることはないことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

初期条件の原子炉水温は、評価条件の 52°C に対して最確条件は約 29°C ～約 46°C であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、事象ごとにより異なる。原子炉水温が 100°C かつ原子炉停止から 12 時間後の燃料の崩壊熱を用いて原子炉注水までの時間余裕を評価すると、必要な遮蔽が維持される水位（必要な遮蔽の目安とした 10mSv/h が維持される水位）である燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上の高さに到達するまでの時間は事象発生から約 2.7 時間となることから、評価条件である原子炉水温が 52°C かつ原子炉停止から 1 日後の燃料の崩壊熱の場合の評価より時間余裕は短くなる。

ただし、必要な放射線の遮蔽は維持され、原子炉注水までの時間余裕も十分な時間が確保されていることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

初期条件の原子炉水位は、評価条件の通常運転水位に対して最確条件は通常運転水位以上であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している原子炉水位より高くなるため、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は長くなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

初期条件の原子炉圧力は、評価条件の大気圧に対して最確条件も大気圧であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。仮に、原子炉圧力が大気圧より高い場合は、沸騰開始時間は遅くなり、原子炉水位の低下は緩和されることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる^{※3}。

初期条件の原子炉圧力容器の状態は、評価条件の原子炉圧力容器の未開放に対して最確条件は事象ごとにより異なるものであり、本評価条件の不確かさとして、原子炉圧力容器の未開放時は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、評価項目となるパラメータに与え

る影響はない。原子炉圧力容器の開放時は、原子炉減圧操作が不要となるが、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

※3 原子炉圧力上昇による原子炉冷却材蒸発の抑制効果を考慮した評価。

b. 操作条件

操作条件の不確かさとして、操作の不確かさを「認知」、「要員配置」、「移動」、「操作所要時間」、「他の並列操作有無」及び「操作の確実さ」の6要因に分類し、これらの要因が運転員等操作時間に与える影響を評価する。また、運転員等操作時間に与える影響が評価項目となるパラメータに与える影響を評価し、評価結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

操作条件の常設代替交流電源設備からの受電及び低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水操作は、評価上の操作開始時間として、事象発生から2時間後を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、常設代替交流電源設備からの受電操作についてはS A低圧母線及び2系列の非常用高圧母線の電源回復を想定しているが、低圧原子炉代替注水系（常設）はS A低圧母線の電源回復後に運転可能であり、原子炉注水操作開始の時間が早まり、原子炉水位の回復が早まる可能性があることから、運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。

低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水操作は、低圧原子炉代替注水ポンプの起動操作が常設代替交流電源設備からの受電操作の影響を受けるが、低圧原子炉代替注水系（常設）はS A低圧母線の電源回復後に運転可能であり、原子炉注水操作開始の時間が早まり、原子炉水位の回復が早まる可能性があることから、運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。

操作条件の原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱操作は、評価上の操作開始時間として、事象発生から10時間後を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、準備操作が想定より短い時間で完了することで操作開始時間が早まる可能性があることから、運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

操作条件の常設代替交流電源設備からの受電及び低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水操作は、運転員等操作時間に与える影響として、実態の操作開始時間が早まり、原子炉水位の低下を緩和する可能性があることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

操作条件の原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱操作は、運転員等操作時間に与える影響として、操作開始時間は評価上の想定より早まる可能性があるが、原子炉への注水をすでに実施していることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

(添付資料 5.1.1, 5.1.6, 5.2.2)

(2) 操作時間余裕の把握

操作開始時間の遅れによる影響度合いを把握する観点から、評価項目となる

パラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内での操作時間余裕を確認し、その結果を以下に示す。

操作条件の常設代替交流電源設備からの受電及び低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水操作は、通常運転水位から放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約 4.3 時間、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は事象発生から約 6.1 時間であり、事故を認知して注水を開始するまでの時間が事象発生から 2 時間後であるため、準備時間が確保できることから、時間余裕がある。

操作条件の原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱操作は、事象発生から 10 時間後の操作であるため、準備時間が確保できることから、時間余裕がある。仮に、操作が遅れる場合は、低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉への注水を継続する。

（添付資料 5.1.1, 5.1.6, 5.2.2）

(3) まとめ

評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を確認した。その結果、評価条件の不確かさが運転員等操作時間に与える影響等を考慮した場合においても、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

このほか、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間には時間余裕がある。

5.2.4 必要な要員及び資源の評価

(1) 必要な要員の評価

事故シーケンスグループ「全交流動力電源喪失」において、重大事故等対策時に必要な要員は、「5.2.1(3) 燃料損傷防止対策」に示すとおり 29 名である。

「6.2 重大事故等対策時に必要な要員の評価結果」で説明している運転員、緊急時対策要員等の 43 名で対処可能である。

(2) 必要な資源の評価

事故シーケンスグループ「全交流動力電源喪失」において、水源、燃料及び電源は、「6.1(2) 資源の評価条件」の条件にて評価している。その結果を以下に示す。

a. 水源

低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水については、7 日間の対応を考慮すると、約 300m³の水が必要となる。水源として、低圧原子炉代替注水槽に約 740m³及び輪谷貯水槽（西 1 / 西 2）に約 7,000m³の水を保有している。これにより、必要な水源は確保可能である。また、事象発生 2 時間 30 分後以降に輪谷貯水槽（西 1 / 西 2）の水を大量送水車により低圧原子炉代替注水槽へ給水することで、低圧原子炉代替注水槽を枯渇させることなく低圧原子炉代替注水槽を水源とした 7 日間の継続実施が可能である。

（添付資料 5.2.3）

b. 燃料

常設代替交流電源設備による電源供給については、保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると、7日間の運転継続に約352m³の軽油が必要となる。ガスタービン発電機用軽油タンクにて約450m³の軽油を保有しており、これらの使用が可能であることから、常設代替交流電源設備による電源供給について、7日間の継続が可能である。

大量送水車による低圧原子炉代替注水槽への給水については、保守的に事象発生直後からの大量送水車の運転を想定すると、7日間の運転継続に約12m³の軽油が必要となる。原子炉補機代替冷却系の大型送水ポンプ車については、事象発生直後からの大型送水ポンプ車の運転を想定すると、7日間の運転継続に約53m³の軽油が必要となる。合計約65m³の軽油が必要となる。非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等にて約730m³の軽油を保有しており、これらの使用が可能であることから、大量送水車による低圧原子炉代替注水槽への給水及び原子炉補機代替冷却系の運転について、7日間の継続が可能である。

緊急時対策所用発電機による電源供給については、保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると、7日間の運転継続に約8m³の軽油が必要となる。緊急時対策所用燃料地下タンクにて約45m³の軽油を保有しており、この使用が可能であることから、緊急時対策所用発電機による電源供給について、7日間の継続が可能である。

(添付資料 5.2.4)

c. 電源

常設代替交流電源設備の電源負荷については、重大事故対策等に必要な負荷として、約2,406kW必要となるが、常設代替交流電源設備は連続定格容量が約4,800kWであり、必要負荷に対しての電源供給が可能である。

また、緊急時対策所用発電機についても、必要負荷に対しての電源供給が可能である。

蓄電池の容量については、交流電源が復旧しない場合を想定しても、不要な直流負荷の切り離し等を行うことにより、24時間の直流電源供給が可能である。

(添付資料 5.2.5)

5.2.5 結論

事故シーケンスグループ「全交流動力電源喪失」では、原子炉の運転停止中に全交流動力電源が喪失し、残留熱除去系等による崩壊熱除去機能を喪失することが特徴である。事故シーケンスグループ「全交流動力電源喪失」に対する燃料損傷防止対策としては、初期の対策として、常設代替交流電源設備による交流電源供給手段、低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水手段、安定状態に向けた対策として、原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱手段を整備している。

事故シーケンスグループ「全交流動力電源喪失」の重要事故シーケンス「外部電源喪失+交流電源喪失」について有効性評価を行った。

上記の場合においても、常設代替交流電源設備による交流電源供給、低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水及び原子炉補機代替冷却系を介した残留

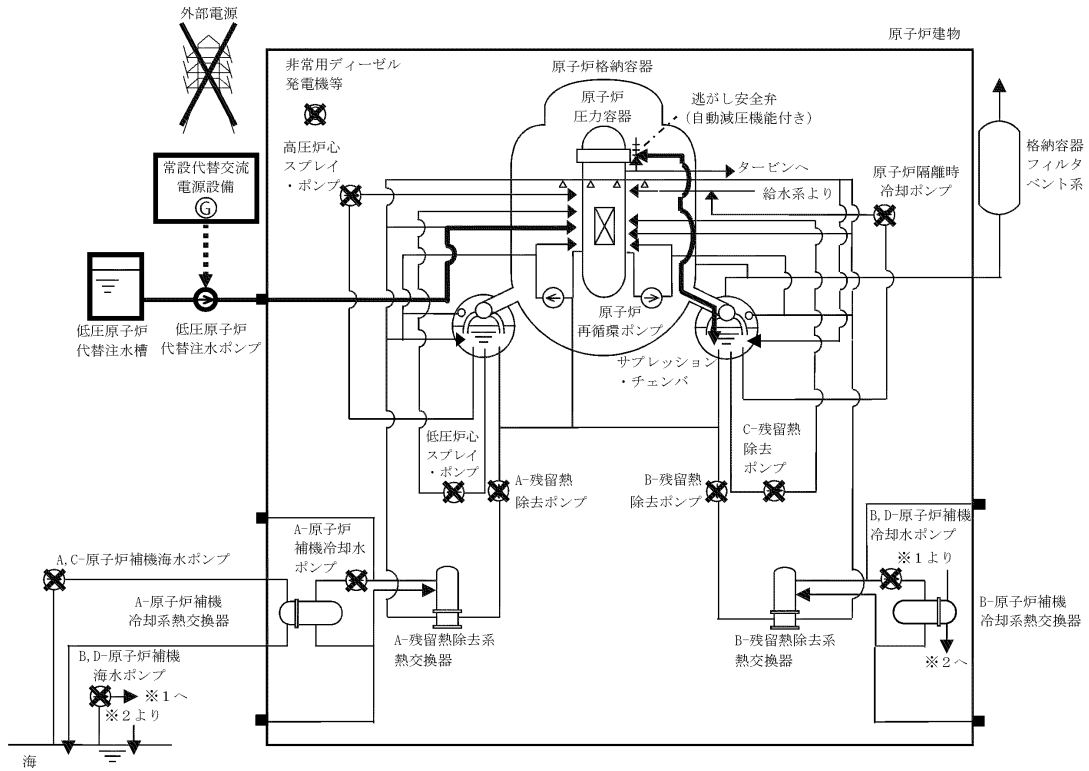
熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱を実施することにより、燃料損傷することはない。

その結果、燃料棒有効長頂部の冠水、放射線遮蔽の維持及び未臨界の確保ができることから、評価項目を満足している。また、安定状態を維持できる。

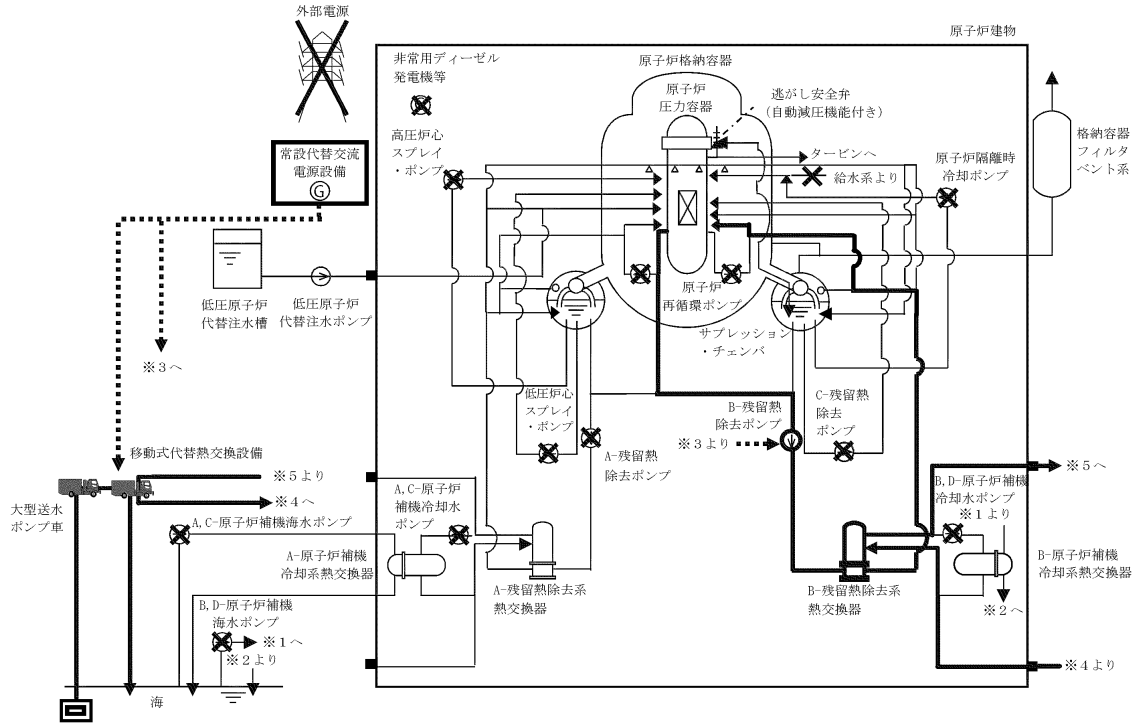
評価条件の不確かさについて確認した結果、運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。また、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間余裕について確認した結果、操作が遅れた場合でも一定の余裕がある。

重大事故等対策時に必要な要員は、運転員及び緊急時対策要員にて確保可能である。また、必要な水源、燃料及び電源を供給可能である。

以上のことから、低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水及び原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）による原子炉除熱等の燃料損傷防止対策は、選定した重要事故シーケンスに対して有効であることが確認でき、事故シーケンスグループ「全交流動力電源喪失」に対して有効である。



第5.2.1-1(1)図 「全交流動力電源喪失」の重大事故等対策の概略系統図
(原子炉減圧及び原子炉注水)

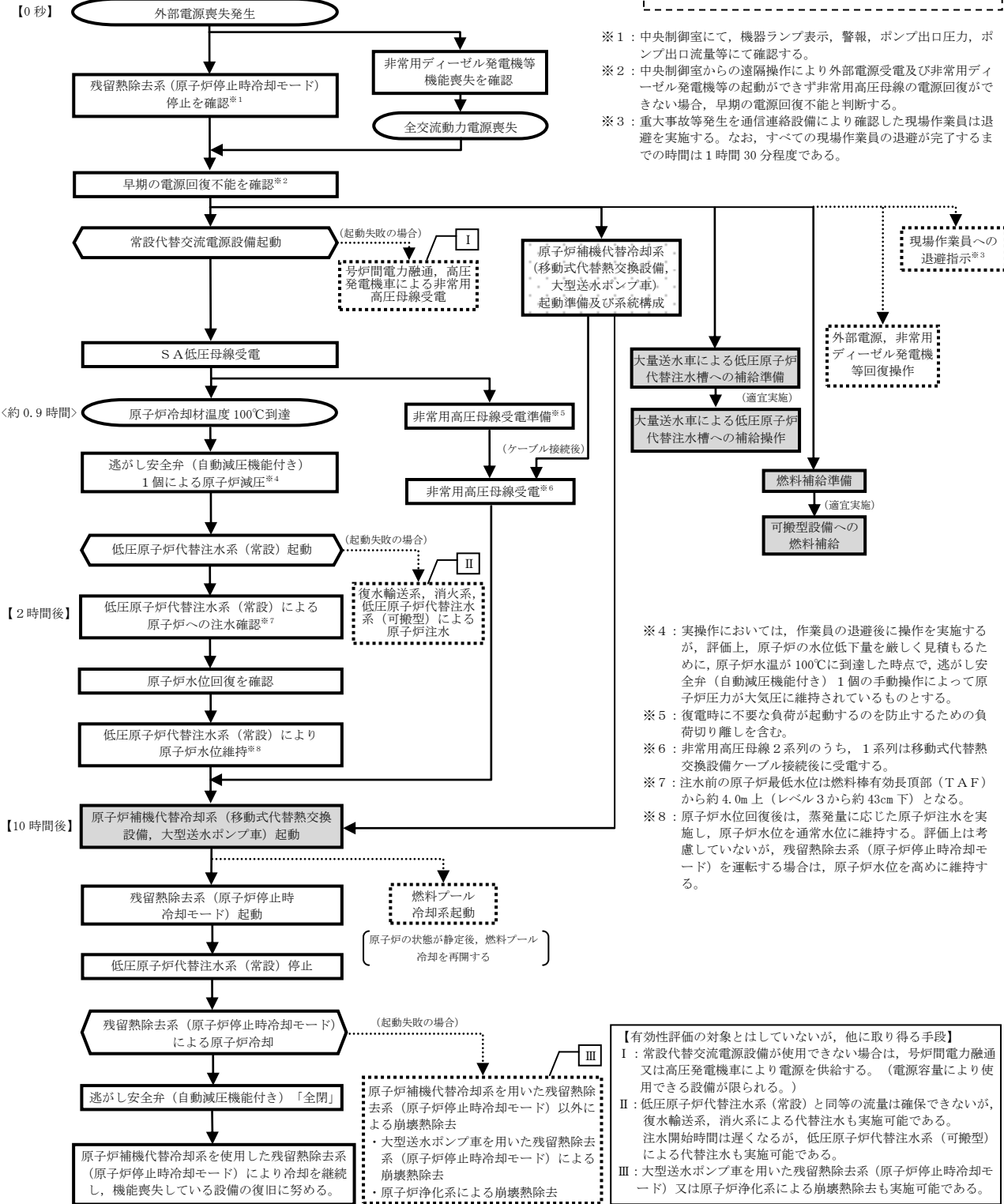
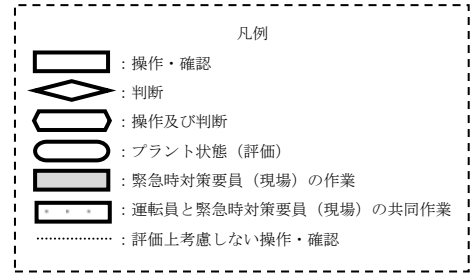


第5.2.1-1(2) 図 「全交流動力電源喪失」の重大事故等対策の概略系統図 (原子炉停止時冷却)

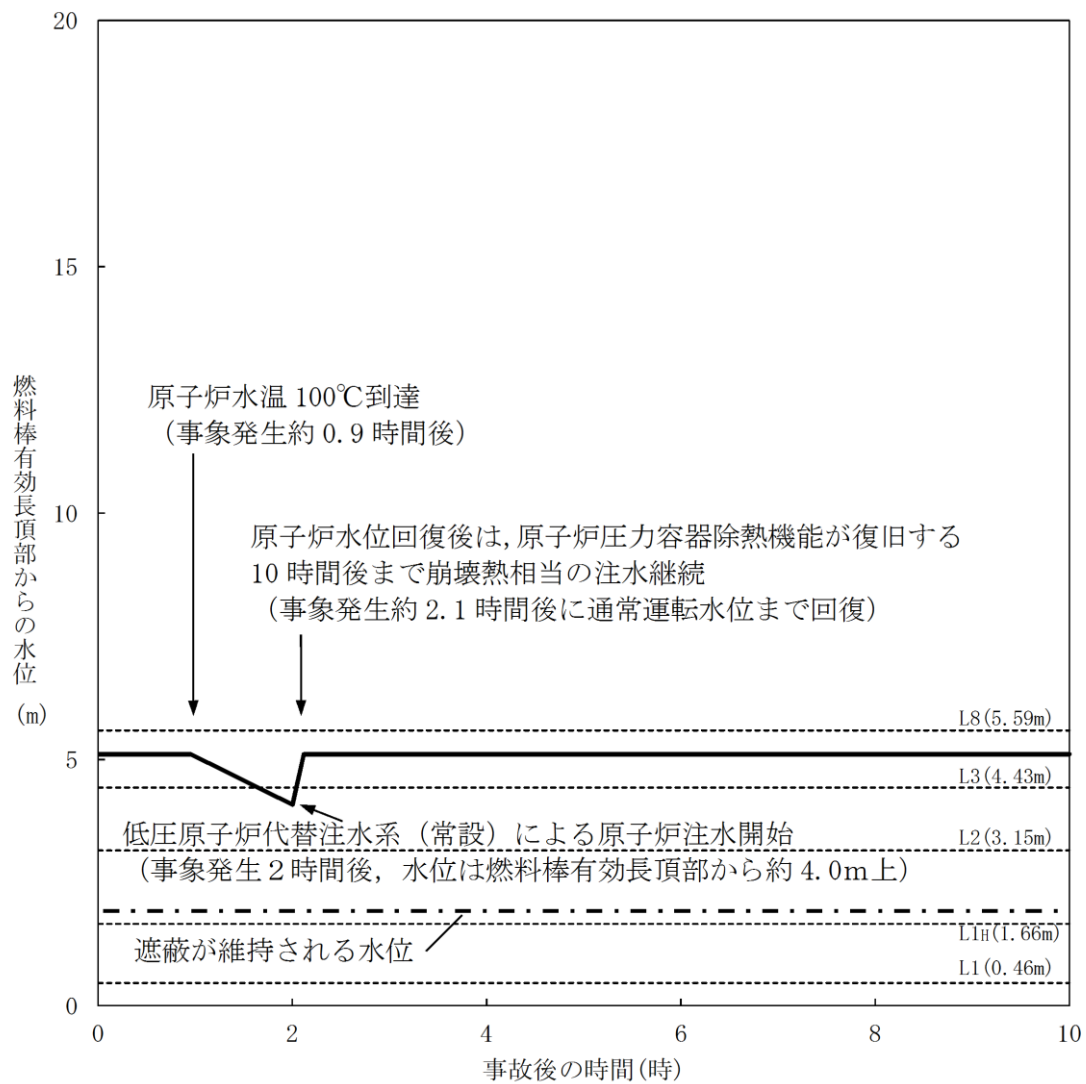
プラント前提条件

- ・プラント停止後1日目
- ・原子炉圧力容器閉鎖中
- ・原子炉格納容器開放中
- ・主蒸気隔離弁全閉
- ・A-残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転中
- ・B-残留熱除去系（低圧注水モード）待機中
- ・C-残留熱除去系（低圧注水モード）停止中
- ・原子炉水位 通常水位（気水分離器下端から+83cm）

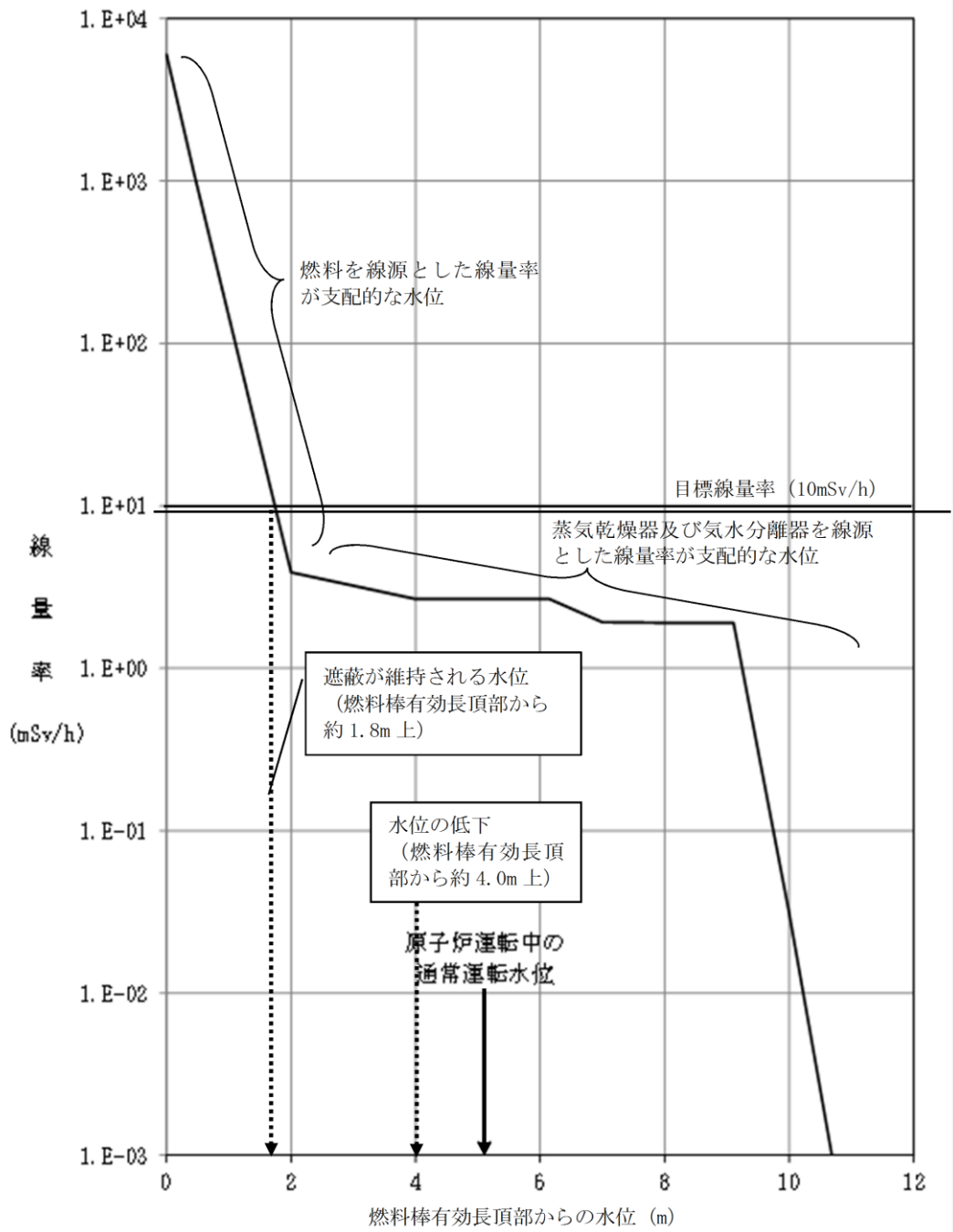
【 】：時刻（評価条件）
 < >：時刻（評価結果）



5.2.1-2 図 「全交流動力電源喪失」の対応手順の概要



第 5.2.2-1 図 原子炉水位の推移



第 5.2.2-2 図 原子炉水位と線量率

第 5.2.1-1 表 「全交流動力電源喪失」の重大事故等対策について

判断及び操作	手順	重大事故等対処設備	
		常設設備	可搬型設備 計装設備
全交流動力電源喪失による 残留熱除去系（原子炉停止 時冷却モード）停止確認	原子炉の運転停止中に全交流動力電源が喪失 し、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード） 運転停止による崩壊熱除去機能が喪失する。	B-115V 系蓄電池*	【残留熱除去ポンプ出口流量】*
逃がし安全弁による原子炉 の低圧状態維持	残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運 転停止により原子炉水温が 100℃に到達する ことから、原子炉圧力を低圧状態に維持する ため逃がし安全弁（自動減圧機能付き）1 個 を開操作する。	B-115V 系蓄電池* S A 用 115V 系蓄電池 逃がし安全弁（自動減圧機能付き）*	原子炉圧力（S A） 原子炉圧力* 原子炉圧力容器温度（S A）
低圧原子炉代替注水系（常 設）による原子炉注水	常設代替交流電源設備による交流電源供給を 確認後、中央制御室からの遠隔操作により低 圧原子炉代替注水ポンプを手動起動し、低圧 原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水 を開始する。	常設代替交流電源設備 非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タ ンク等* 低圧原子炉代替注水ポンプ 低圧原子炉代替注水槽	原子炉水位（S A） 原子炉水位（広帯域）* 代替注水流量（常設） 低圧原子炉代替注水槽水位
残留熱除去系（原子炉停止 時冷却モード）運転による 崩壊熱除去機能回復	原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系 の準備が完了後、中央制御室からの遠隔操作 により残留熱除去系（原子炉停止時冷却モー ド）運転を再開する。 崩壊熱除去機能回復後、逃がし安全弁（自動 減圧機能付き）を全閉とし、原子炉低圧状態 の維持を停止する。	常設代替交流電源設備 非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タ ンク等* 【残留熱除去系 （原子炉停止時冷却モード）】*	移動式代替熱交換設 備 大型送水ポンプ車 タンクローリ

※：既許可の対象となっている設備を重大事故等対処設備に位置付けるもの
【 】：重大事故等対処設備（設計基準拡張）

第 5.2.2-1 表 主要評価条件 (全交流動力電源喪失) (1 / 2)

項目	主要評価条件	条件設定の考え方
初期条件	原子炉圧力容器の状態	燃料の崩壊熱及び保有水量の観点から設定
	燃料の崩壊熱	平衡炉心燃料の平均燃焼度 33GWd/t ^{※2} を基に、ANSI/ANS-5.1-1979にて算出した原子炉停止 1 日後の崩壊熱として設定 また、原子炉停止 1 日後においては、9 × 9 燃料の方が MOX 燃料よりも崩壊熱が大きく、原子炉水位低下の観点で厳しいため、MOX 燃料の評価は 9 × 9 燃料 (A 型) の評価に包絡されることを考慮し、代表的に 9 × 9 燃料 (A 型) を設定
	原子炉水位	原子炉停止 1 日後の水位
	原子炉水温	原子炉停止 1 日後の実績を踏まえ、原子炉は残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード) にて冷却されているため、その設計温度である 52°C を設定
	原子炉圧力	原子炉停止 1 日後の実績を考慮して設定
	起因事象	送電系統又は所内主発電設備の故障等によって、外部電源が喪失するものとして設定
事故条件	安全機能の喪失に対する仮定	すべての非常用ディーゼル発電機等の機能喪失を想定
	外部電源	原子炉補機冷却系の機能喪失により崩壊熱除去機能が喪失した場合を包含する条件として設定 起因事象として、外部電源が喪失するものとして設定

※1 原子炉停止 1 日後とは全制御棒全挿入からの時間を示している。通常停止操作において原子炉の出力は全制御棒全挿入完了及び発電機解列以前から徐々に低下させるが、崩壊熱評価はスクラムのような瞬時に出力を低下させる保守的な計算条件となっている。

※2 サイクル末期の燃焼度のばらつきを考慮し、10%の保守性を考慮

第 5.2.2-1 表 主要評価条件 (全交流動力電源喪失) (2 / 2)

項目	主要評価条件	条件設定の考え方
重大事故等対策に関連する機器条件	低圧原子炉代替注水系 (常設)	低圧原子炉代替注水系 (常設) の設計値として設定
重大事故等対策に関連する機器条件	原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード)	原子炉補機代替冷却系の設計値を考慮して設定
重大事故等対策に関連する操作条件	常設代替交流電源設備からの受電及び低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水操作	全交流動力電源喪失時の訓練実績を踏まえた操作の時間及び系統構成の時間に余裕を考慮して設定
重大事故等対策に関連する操作条件	原子炉補機代替冷却系運転操作	原子炉補機代替冷却系の準備期間を考慮して設定
重大事故等対策に関連する操作条件	原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード) による原子炉除熱操作	原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード) による原子炉除熱機能回復を踏まえて設定

安定状態について（運転停止中（全交流動力電源喪失））

運転停止中の全交流動力電源喪失の安定状態については以下のとおり。

原子炉安定停止状態：事象発生後，設計基準事故対処設備及び重大事故等対処設備を用いた炉心冷却により，炉心冠水が維持でき，また，冷却のための設備がその後も機能維持できると判断され，かつ，必要な要員の不足や資源の枯渇等のあらかじめ想定される事象悪化のおそれがない場合，原子炉安定停止状態が確立されたものとする。

【安定状態の確立について】

原子炉安定停止状態の確立について

崩壊熱除去機能喪失により原子炉水温が上昇し，沸騰開始による原子炉水位の低下が始まるが，常設代替交流電源設備による交流電源の供給を開始した後，低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水により原子炉水位は回復し，炉心の冷却が維持される。

その後，原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）により原子炉除熱を開始することで冷温停止状態に移行することができ，原子炉安定停止状態が確立される。

重大事故等対策時に必要な要員は確保可能であり，また，必要な水源，燃料及び電源を供給可能である。

【安定状態の維持について】

上記の燃料破損防止対策により原子炉安定停止状態を維持できる。

また，残留熱除去系機能を維持し，除熱を行うことにより，安定停止状態後の安定停止状態の維持が可能となる。

（添付資料 2.1.1 別紙 1 参照）

表 1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響(運転停止中(全交流動力電源喪失)) (1/3)

項目	評価条件(初期、事故及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
初期条件	約 14.0MW (9×9燃料(A型), 原子炉停止1日後)	約 14MW 以下 (実績値)	平衡炉心燃料の平均燃焼度 33GWd/t ^{*2} を基に, ANSI/ANS-5.1-1979にて算出した原子炉停止1日後の崩壊熱として設定 また, 原子炉停止1日後においては, 9×9燃料の方がMOX燃料よりも崩壊熱が大きく, 原子炉水位低下の観点で厳しかったため, MOX燃料(A型)の評価は9×9燃料(A型)のことに包絡されることを考慮し, 代表的に9×9燃料(A型)を設定 停止後の時間については, 停止後の時間を短くとり, 崩壊熱が厳しくなるように1日後の状態を想定	最確条件とした場合は, 評価条件で設定している燃料の崩壊熱より小さくなるため, 原子炉水温の上昇及び原子炉水位の低下は緩和されることから, 評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。仮に, 原子炉停止後の時間が短く, 燃料の崩壊熱が大きい場合は, 注水までの時間が短くなることから, 評価項目に対する余裕は小さくなる。原子炉停止から12時間後の燃料の崩壊熱を用いて原子炉注水までの時間余裕を評価すると, 必要な遮蔽が維持される水位(必要な遮蔽の目安とした10msv/hが維持される水位)である燃料棒有効長頂部の約1.8m上の高さに到達するまでの時間は約2.7時間, 燃料棒有効長頂部到達まで約4.2時間となることから, 評価条件である原子炉停止1日後の評価より時間余裕は短くなる。ただし, 本時間に対して作業員が現場から退避するため放射線の遮蔽は維持され, 原子炉水位が燃料棒有効長頂部を下回ることはないことから, 評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。	最確条件とした場合は, 事故事象ごとに異なる。原子炉水温が100℃かつ原子炉停止から12時間後の燃料の崩壊熱を用いて原子炉注水までの時間余裕を評価すると, 必要な遮蔽が維持される水位(必要な遮蔽の目安とした10msv/hが維持される水位)である燃料棒有効長頂部の約1.8m上の高さに到達するまでの時間は約2.7時間となることから, 評価条件である原子炉水温が52℃かつ原子炉停止から1日後の燃料の崩壊熱の場合の評価より時間余裕は短くなる。ただし, 必要な放射線の遮蔽は維持され, 原子炉注水までの時間余裕も十分な時間が確保されていることから, 評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
原子炉水温	52℃	約 29℃~約 46℃ ^{*1} (実績値)	原子炉停止後1日の実績を踏まえ, 原子炉は残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)にて冷却されているため, その設計温度である52℃を設定	最確条件とした場合は, 事故事象ごとに異なる。原子炉水温が100℃かつ原子炉停止から12時間後の燃料の崩壊熱を用いて原子炉注水までの時間余裕を評価すると, 必要な遮蔽が維持される水位(必要な遮蔽の目安とした10msv/hがある燃料棒有効長頂部の約1.8m上の高さに到達するまでの時間は約2.7時間となることから, 評価条件である原子炉水温が52℃かつ原子炉停止から1日後の燃料の崩壊熱の場合の評価より時間余裕は短くなるが, 注水操作や給電操作は原子炉水温に応じた対応をとるものではなく, 全交流動力電源の喪失による異常の認知を起点とするものであることから, 運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は, 事故事象ごとに異なる。原子炉水温が100℃かつ原子炉停止から12時間後の燃料の崩壊熱を用いて原子炉注水までの時間余裕を評価すると, 必要な遮蔽が維持される水位(必要な遮蔽の目安とした10msv/hがある燃料棒有効長頂部の約1.8m上の高さに到達するまでの時間は約2.7時間となることから, 評価条件である原子炉水温が52℃かつ原子炉停止から1日後の燃料の崩壊熱の場合の評価より時間余裕は短くなる。ただし, 必要な放射線の遮蔽は維持され, 原子炉注水までの時間余裕も十分な時間が確保されていることから, 評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

*1 過去のプラント停止操作実施時の全制御棒全挿入から約24時間経過後の原子炉水温の実績データ

表1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響(運転停止中(全交流動力電源喪失))(2/3)

項目	評価条件(初期, 事故及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
原子炉水位	通常運転水位(気水分離器下端から+83cm)	通常運転水位以上	原子炉停止1日後の水位	最確条件とした場合は、評価条件で設定している原子炉水位より高くなるため、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は長くなるが、注水操作や給電操作は原子炉水位に応じた対応をとるものではなく、全交流動力電源の喪失による異常の認知を起点とする操作であることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は、評価条件で設定している原子炉水位より高くなるため、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は長くなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
原子炉圧力	大気圧	大気圧 ^{※2}	原子炉停止1日後の実績を考慮して設定	最確条件とした場合は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。仮に、原子炉圧力が大気圧より高い場合は、沸騰開始時間は遅くなり、原子炉水位の低下は緩和されるが、注水操作や給電操作は原子炉圧力に応じた対応をとるものではなく、全交流動力電源の喪失による異常の認知を起点とするものであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響は大きくなる。
原子炉圧力容器的状態	原子炉圧力容器未開放	事故毎に変化	炉心の萌燃熟及び保有水量の観点から設定	原子炉圧力容器的未開放時は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はない。運転員等操作時間に与える影響はない。原子炉圧力容器的開放時は、原子炉減圧操作が必要となるが、事象進展に与える影響は小さいことから、運転員等操作時間に与える影響は小さい。	原子炉圧力容器的未開放時は、評価条件と同様であるため、事象進展に与える影響はないことから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。原子炉圧力容器的開放時は、原子炉減圧操作が必要となるが、事象進展に与える影響は小さいことから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
低圧原子炉代替注水系(常設)水源温度	35℃	31℃以下(実績値)	屋外貯水槽の水源温度として実績値及び夏季の外気温度を踏まえて設定	最確条件とした場合は、評価条件で設定している水温よりも低くなる可能性があり、原子炉注水後の注水操作や給電操作の開始は注水源の温度に応じた対応をとるものではなく、全交流動力電源の喪失による異常の認知を起点とする操作であることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は、評価条件で設定している水温よりも低くなる可能性があり、原子炉注水後の原子炉水位の回復が早くなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
外部水源の容量	7,740m ³	7,740m ³ 以上(合計貯水量)	低圧原子炉代替注水槽及び輪谷貯水槽(西1/西2)の水量を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合は、解析条件よりも水源容量の余裕が大きくなるため、水源が枯渇することはない。運転員等操作時間に与える影響はない。	-
燃料の容量	1,180m ³	1,180m ³ 以上(合計貯蔵量)	発電所構内に貯蔵している合計容量を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合は、解析条件より燃料容量の余裕が大きくなるため、燃料が枯渇することはない。運転員等操作時間に与える影響はない。	-

※2 原子炉停止直後、原子炉圧力容器耐圧試験などの特殊な場合を除く。

表 1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響(運転停止中(全交流動力電源喪失))(3/3)

項目	評価条件(初期,事故及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
事故条件	起因事象	外部電源喪失	送電系統又は所内主発電設備の故障等によって、外部電源が喪失するものとして設定	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
	安全機能の喪失に対する仮定	全交流動力電源喪失	すべての非常用ディーゼル発電機等の機能喪失を想定		
		原子炉補機冷却系機能喪失	原子炉補機冷却系の機能喪失により残留熱除去機能が喪失した場合を包含する条件として設定		
外部電源	外部電源なし	事故毎に変化	起因事象として、外部電源が喪失するものとして設定	外部電源がない場合と外部電源がある場合では、事象進展は同じであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	外部電源がない場合と外部電源がある場合では、事象進展は同じであることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
機器条件	低圧原子炉代替注水系(常設)	200m ³ /hで原子炉注水	低圧原子炉代替注水系(常設)の設計値として設定	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
	原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)	熱交換器1基あたり約15.7MW(原子炉冷却材温度100℃,海水温度30℃)において	熱交換器1基あたり約15.7MW(原子炉冷却材温度100℃,海水温度30℃)において	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

表2 運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕(運転停止中(全交流動力電源喪失))(1/5)

項目	評価条件(操作条件)の不確かさ		操作の不確かさ要因	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	評価上の操作開始時間	条件設定の考え方					
常設代替交流電源設備からの受電及び低圧原子炉代替注水水系(常設)による原子炉注水	事象発生から2時間後	全交流動力電源喪失時の訓練実績を踏まえた操作の時間余裕を考慮して設定	<p>【認知】</p> 中央制御室にて外部電源受電及び非常用ディーゼル発電機等による非常用高圧母線の電源回復ができない場合、早期の電源回復不可と判断し、これにより常設代替交流電源設備及び低圧原子炉代替注水水系(常設)の準備を開始する手順としている。この認知に係る時間として10分間を想定しているため、認知遅れ等により操作時間に与える影響はない。 <p>【要員配置】</p> 常設代替交流電源設備からの受電操作のために、中央制御室にて常設代替交流電源設備の起動操作および受電操作を行う運転員と、現場にて常設代替交流電源設備からの受電準備および受電操作を行う運転員(現場)が配置されている。常設代替交流電源設備の起動操作および受電準備を行う運転員は、常設代替交流電源設備からの受電準備のための負荷切り離し操作を行ってからの期間、他の操作を担っていない。このため、要員配置が操作開始時間に与える影響はなし。また、低圧原子炉代替注水水系(常設)による原子炉注水操作については、中央制御室内での操作のみであり、運転員は中央制御室に常駐していることから、操作開始時間に与える影響はない。 <p>【移動】</p> 常設代替交流電源設備からの受電操作を行う運転員(現場)は、中央制御室から操作現場まで10分間程度で移動可能であるため、移動が操作開始時間に与える影響はない。また、低圧原子炉代替注水水系(常設)による原子炉注水操作については、中央制御室内での操作のみであり、操作開始時間に与える影響はない。 <p>【操作所要時間】</p> 常設代替交流電源設備の起動操作等を行う運転員、常設代替交流電源設備からの受電準備を行う運転員及び運転員(現場)、非常用高圧母線の受電操作を行う運転員(現場)の操作内容及び操作所要時間は以下のとおり。これらの作業は並行して行うため、操作所要時間は最長で1時間10分間となる。 [非常用高圧母線D系の受電準備を行う運転員(中央制御室)：操作所要時間；合計25分間]	常設代替交流電源設備からの受電操作についてはS A低圧母線及び2系列の非常用高圧母線の電源回復を想定しているが、低圧原子炉代替注水水系(常設)はS A低圧母線の電源回復後に運転可能であり、原子炉注水操作開始の時間が早まり、原子炉水位の回復が早まることから、運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。	実態の操作開始時間が早まり、原子炉水位の低下を緩和する可能性があることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。	通常運転水位から放射線の遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は、事象発生から約4.3時間後、原子炉水位が燃料棒有効長頂部までの水位が低下するまでの時間は、事象発生から約6.1時間後であり、事故を認知して注水を開始するまでの時間が2時間後であるため、準備時間が確保できることから、時間余裕がある。	評価上の操作開始時間として、事象発生から2時間後としており、このうち、常設代替交流電源設備からの受電操作は、運転員による常設代替交流電源設備の起動操作、並びに現場及び中央制御室の運転員による受電前準備及び受電操作を並行して実施し、所要時間1時間20分程度では約54分である。低圧原子炉代替注水水系(常設)による原子炉注水における低圧原子炉代替注水ポンプを起動、低圧原子炉代替注水系(常設)の弁操作による系統構成は、所要時間10分程度であるところ、訓練実績では約8分で可能である見込みを得た。想定で意図している運転操作が実施可能なことを確認した。

表2 運転員等操作時間に与える影響, 評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕(運転停止中(全交流動力電源喪失))(2/5)

項目	評価条件(操作条件)の不確かさ		操作の不確かさ要因	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	評価上の操作開始時間	条件設定の考え方					
常設代替交流電源設備からの受電及び低圧原子炉代替注水水系(常設)による原子炉注水 操作条件	事象発生から2時間後	全交流動力電源喪失時の訓練実績を踏まえた操作の間及び系統構成の時間に余裕を考慮して設定	操作の不確かさ要因 ・常設代替交流電源設備からの受電前準備として、負荷抑制のための切り離し及び操作スイッチの切保保持等の所要時間に25分間を想定 [起動操作等を行う運転員：操作所要時間；合計10分間] ・常設代替交流電源設備の起動及び受電操作の所要時間に10分間を想定 [非常用高圧母線D系の受電準備を行う運転員(現場)：操作所要時間；合計35分間] ・常設代替交流電源設備からの受電前準備として、負荷抑制のための切り離し操作を行う。操作の所要時間は35分間を想定 [非常用高圧母線D系の受電操作を行う運転員(中央制御室及び現場)：操作所要時間；合計5分間] ・緊急用交流高圧母線の遮断器の投入後の非常用高圧母線の受電操作の所要時間に5分間を想定 [非常用高圧母線C系の受電準備を行う運転員(中央制御室)：操作所要時間；合計25分間] ・常設代替交流電源設備からの受電前準備として、負荷抑制のための切り離し及び操作スイッチの切保保持等の所要時間に25分間を想定 [非常用高圧母線C系の受電準備を行う運転員(現場)：操作所要時間；合計25分間] ・常設代替交流電源設備からの受電前準備として、負荷抑制のための切り離し操作を行う。操作の所要時間は25分間を想定 [非常用高圧母線C系の受電準備を行う運転員(中央制御室及び現場)：操作所要時間；合計5分間] ・緊急用交流高圧母線の遮断器の投入後の非常用高圧母線の受電操作の所要時間に5分間を想定 低圧原子炉代替注水水系(常設)による原子炉注水準備の操作は、低圧原子炉代替注水系(常設)の弁操作による系統構成、低圧原子炉代替注水系(常設)の起動であり、いずれも中央制御室における制御盤の操作スイッチによる操作であり、時間余裕を含めて操作時間10分を想定する。	—	—	—	—

表2 運転員等操作時間に与える影響, 評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕(運転停止中(全交流動力電源喪失)) (3/5)

項目	評価条件(操作条件)の不確かさ		操作の不確かさ要因	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	評価上の操作開始時間	条件設定の考え方					
常設代替交流電源設備からの受電及び低圧原子炉代替注水水系(常設)による原子炉注水 操作条件	事象発生から2時間後	全交流動力電源喪失時の訓練実績を踏まえた操作の時間及び系統構成の時間に余裕を考慮して設定	<p>【他の並列操作有無】 常設代替交流電源設備の起動操作等を行う運転員(現場)と受電準備を行う運転員(現場)の並列操作はあるが、それを加味して操作の所要時間を算定しているため、操作開始時間に与える影響はない。また、低圧原子炉代替注水水系(常設)による原子炉注水操作は、常設代替交流電源設備からの受電操作における非常用高圧母線への受電操作後に実施する。</p> <p>【操作の確実さ】 現場操作は、操作の信頼性の向上や要員の安全のため2人1組で実施することとしており、誤操作は起こりにくく、誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。また、中央制御室内の制御盤操作は、操作スイッチによる簡易な操作のため、誤操作は起こりにくく、そのため誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。</p>	-	-	-	-

表2 運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕(運転停止中(全交流動力電源喪失)) (4/5)

項目	評価条件 (操作条件) の不確かさ	操作の不確かさ要因	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	評価上の操作開始時間					
原子炉補機代替冷却系運転操作 操作条件	原子炉補機代替冷却系の準備期間を考慮して設定	<p>操作の不確かさ要因</p> <p>【認知】 中央制御室にて外部電源受電及び非常用ディーゼル発電機等による非常用高圧母線の電源回復ができない場合、早期の電源回復不可と判断し、これにより原子炉補機代替冷却系の準備を開始する手順としているため、認知遅れ等により操作時間に与える影響はない。</p> <p>【要員配置】 原子炉補機代替冷却系の準備操作は、中央制御室での操作を行う運転員、現場にて弁操作を行う運転員、現場にて大型送水ポンプ車による移動式熱交換設備への海水補給、移動式代替熱交換設備による冷却水供給のホース敷設、接続等を行う専任の緊急時対策要員(現場)が配置されている。ホース敷設、接続等は現場にて緊急時対策要員(現場)が実施することとなるが、本操作を行う要員は、操作が終わるまでの期間、他の操作を担っていない。よって、操作開始時間に与える影響はない。</p> <p>【移動】 原子炉補機代替冷却系に用いる大型送水ポンプ車、移動式代替熱交換設備は車両であり、自走にて作業現場へ移動することを想定している。仮に地震等の外部事象が起因事象の場合に、アクセスルートの被害があっても、ホイールローダ等にて必要なアクセスルートを仮復旧できる体制としており、操作開始時間に与える影響はない。</p> <p>【操作所要時間】 緊急時対策要員(現場)の準備操作は、各機器の設置作業及び弁・スイッチ類の操作に移動時間を含めて7時間20分の作業時間を想定しているが、訓練実績を踏まえると、より早期に準備操作が完了する見込みである。また、運転員(現場)の行う現場系統構成は、操作場所は原子炉建物及び廃棄物処理建物であり、移動を含めて2時間10分の操作時間を想定している。よって、操作開始時間に与える影響はない。</p>	準備操作が想定より短い時間で完了することから、運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。	操作開始時間は評価上の想定より早まる可能性があるが、原子炉への注水をすすでに実施していることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。	事象発生約10時間後の操作であるため、準備時間が確保できるところから、時間余裕がある。仮に、操作が遅れる場合は、低圧原子炉代替注水系(常設)による原子炉への注水は継続する。	評価上は作業成立性を踏まえ事象発生から10時間後としており、このうち、各機器の設置作業及び弁・スイッチ類の操作は、所要時間7時間、20分想定のとおり、訓練実績では、約5時間41分である。また、運転員による常設代替交流電源設備による電源確保、緊急時対策要員(現場)による大型送水ポンプ車による移動式代替熱交換設備への海水補給、緊急時対策要員(現場)による移動式代替熱交換設備による冷却水供給を並行して実施することで、想定で意図している運転操作が実施可能なことを確認した。

表2 運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕(運転停止中(全交流動力電源喪失)) (5/5)

項目	評価条件(操作条件)の不確かさ		操作の不確かさ要因	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	評価上の操作開始時間	条件設定の考え方					
原子炉補機代替冷却系運転操作	事象発生 10 時間後	原子炉補機代替冷却系の準備期間を考慮して設定	<p>操作の不確かさ要因</p> <p>【他の並列操作有無】 緊急時対策要員(現場)による準備操作は、低圧原子炉代替注水槽への補給に係る系統構成作業後に行う操作であり、他の並列操作は無いことから、操作開始時間に与える影響はない。</p> <p>【操作の確実さ】 緊急時対策要員(現場)、運転員の現場操作は、操作の信頼性の向上や要員の安全のため2人1組で実施することとしており、誤操作は起こりにくく、誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。</p>	-	-	-	-
原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)による原子炉除熱操作	事象発生 10 時間後	原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)による原子炉除熱機能回復を踏まえて設定	<p>原子炉補機代替冷却系を介した残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)による原子炉除熱操作は、原子炉補機代替冷却系運転操作に引き続き実施する操作であり、運転操作までの時間は、事象発生から約10時間あり時間余裕がある。</p>	運転員等操作時間に与える影響として、準備操作が想定より短い時間で完了することにより、操作開始時間が早まる可能性があることから、運転員等に対する操作時間に対する余裕は大きくなる。	操作開始時間は評価上の想定より早まる可能性があるが、原子炉への注水をすすでに実施していることと、評価項目となるパラメータに与える影響はない。	事象発生から10時間後の操作で、準備時間があるため、準備時間から、時間余裕がある。仮に、操作が遅れる場合は、低圧原子炉代替注水系(常設)による原子炉への注水は継続する。	評価上は作業成立性を踏まえ、事象発生から10時間後としており、このうち、系統構成及びポンプの起動は、所要時間35分以内、訓練等から、約19分以内で操作可能である見込みを得た。想定で意図している運転操作が実施可能なことを確認した。
低圧原子炉代替注水槽への水補給	事象発生 2 時間 30 分後以降	低圧原子炉代替注水槽への水補給は、解析条件ではないが、解析で想定している操作の成立や継続に必要な作業。踏まえて設定	<p>評価上は作業成立性を踏まえ、事象発生から2時間30分後以降、適宜開始としているが、低圧原子炉代替注水槽の水源枯渇までに実施すれば良い作業であり、低圧原子炉代替注水槽の保有水のみで事象発生から約32時間まで注水可能であることから十分な時間余裕がある。</p>	-	-	-	評価上は作業成立性を踏まえ、事象発生から2時間30分後以降としており、このうち、輪谷貯水槽から低圧原子炉代替注水槽への補給の系統構成は、所要時間2時間10分想定である。訓練実績では、約1時間41分である。想定で意図している運転操作が実施可能なことを確認した。

7 日間における水源の対応について（運転停止中（全交流動力電源喪失））

○水源

低圧原子炉代替注水槽：約 740m³

輪谷貯水槽（西 1 / 西 2）※：約 7, 000m³（約 3, 500m³ × 2）

※設置許可基準規則 56 条【解釈】 1b) 項を満足するための代替淡水源（措置）

○水使用パターン

①低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水

事象発生 2 時間後から、原子炉水位回復まで最大流量（200m³/h）で注水する。原子炉水位回復後は、崩壊熱に応じた注水量で注水する。

②輪谷貯水槽（西 1 / 西 2）から低圧原子炉代替注水槽への移送

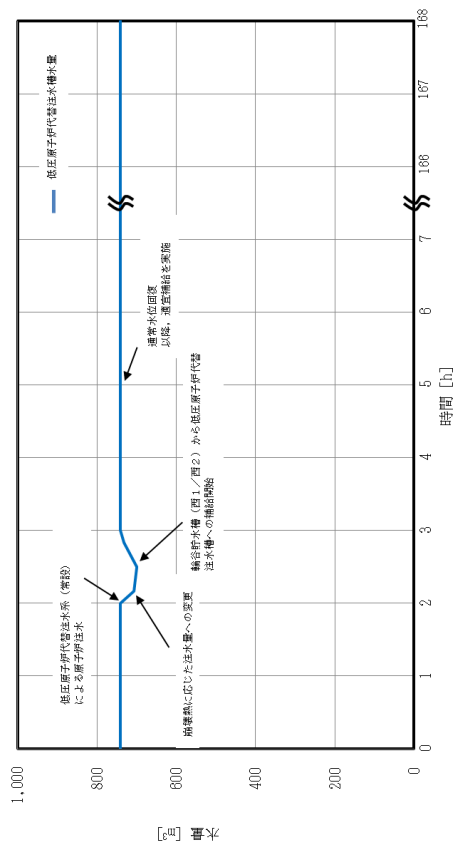
事象発生 2 時間 30 分後から大量送水車を用いて 120m³/h で低圧原子炉代替注水槽へ移送する。

○時間評価（右上図）

事象発生後から 2 時間後から低圧原子炉代替注水槽を水源として原子炉注水を実施するため、低圧原子炉代替注水槽水量は減少する。事象発生 2 時間 30 分後から低圧原子炉代替注水槽への補給を開始するため低圧原子炉代替注水槽水量は回復する。事象発生後約 10 時間後から、残留熱除去系の運転を開始し、以降は安定して冷却することができる。

○水源評価結果

時間評価の結果から低圧原子炉代替注水槽が枯渇することはない。また、7 日間の対応を考慮すると、約 300m³ 必要となる。低圧原子炉代替注水槽に約 740m³ 及び輪谷貯水槽（西 1 / 西 2）に約 7, 000m³ の水を保有することから、必要水量は確保可能であり、安定して冷却を継続することが可能である。



7日間における燃料の対応について（運転停止中（全交流動力電源喪失））

保守的にすべての設備が、事象発生直後から7日間燃料を消費するものとして評価する。

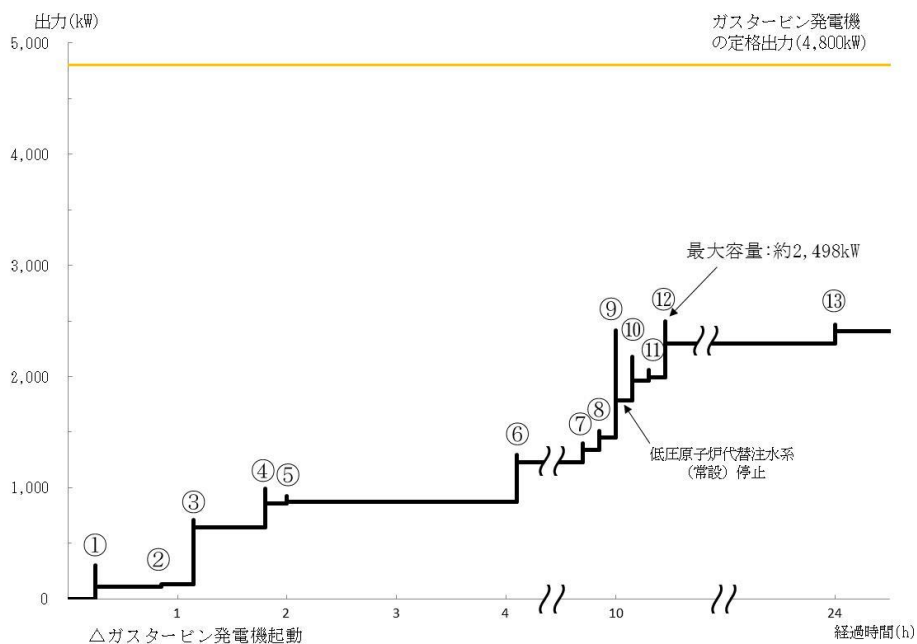
時系列	合計	判定
大量送水車 1台起動 $0.0677\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 11.3736\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 65m^3	非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等の容量は約 730m^3 であり、7日間対応可能
大型送水ポンプ車 1台起動 $0.31\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 52.08\text{m}^3$		
ガスタービン発電機 1台起動 （燃料消費率は保守的に最大負荷（定格出力運転）時を想定） $2.09\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 351.12\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 352m^3	ガスタービン発電機用軽油タンクの容量は約 450m^3 であり、7日間対応可能
緊急時対策所用発電機 1台 （燃料消費率は保守的に最大負荷（定格出力運転）時を想定） $0.0469\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 7.8792\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 8m^3	緊急時対策所用燃料地下タンクの容量は約 45m^3 であり、7日間対応可能

常設代替交流電源設備の負荷（運転停止中（全交流動力電源喪失））

主要負荷リスト

電源設備：ガスタービン発電機 定格出力：4,800kW

起動順序	主要機器	負荷容量 (kW)	負荷起動時の最大負荷容量 (kW)	定常時の最大負荷容量 (kW)
①	ガスタービン発電機付帯設備	約 111	約 300	約 111
②	代替所内電気設備負荷（自動投入負荷）	約 18	約 129	約 129
③	充電器，非常用照明，非常用ガス処理系，モニタリング・ポスト他（D系高圧母線自動投入負荷）	約 518	約 713	約 647
④	低圧原子炉代替注水ポンプ	約 210	約 989	約 857
⑤	低圧原子炉代替注水設備非常用送風機	約 15	約 927	約 872
⑥	充電器，非常用照明，非常用ガス処理系他（C系高圧母線自動投入負荷）	約 359	約 1,293	約 1,231
⑦	A-淡水ポンプ（移動式代替熱交換設備）	約 110	約 1,401	約 1,341
⑧	B-淡水ポンプ（移動式代替熱交換設備）	約 110	約 1,511	約 1,451
⑨	B-残留熱除去ポンプ	約 560	約 2,415	約 1,786
⑩	B-中央制御室送風機	約 180	約 2,181	約 1,966
⑪	B-中央制御室非常用再循環送風機	約 30	約 2,058	約 1,996
⑫	B-中央制御室冷凍機	約 300	約 2,498	約 2,296
⑬	B-燃料プール冷却水ポンプ	約 110	約 2,471	約 2,406



常設代替交流電源設備の負荷積算イメージ

5.3 原子炉冷却材の流出

5.3.1 事故シーケンスグループの特徴、燃料損傷防止対策

(1) 事故シーケンスグループ内の事故シーケンス

事故シーケンスグループ「原子炉冷却材の流出」に含まれる事故シーケンスは、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、「原子炉冷却材の流出（残留熱除去系切替時の冷却材流出）＋流出隔離・炉心冷却失敗」、「原子炉冷却材の流出（原子炉浄化系ブロー時の冷却材流出）＋流出隔離・炉心冷却失敗」、「原子炉冷却材の流出（制御棒駆動機構点検時の冷却材流出）＋流出隔離・炉心冷却失敗」及び「原子炉冷却材の流出（局部出力領域モニタ交換時の冷却材流出）＋流出隔離・炉心冷却失敗」である。

(2) 事故シーケンスグループの特徴及び燃料損傷防止対策の基本的考え方

事故シーケンスグループ「原子炉冷却材の流出」では、原子炉の運転停止中に、原子炉冷却材圧力バウンダリに接続された系統から、運転員の誤操作等により系外への原子炉冷却材の流出が発生することを想定する。このため、原子炉冷却材の流出に伴い原子炉冷却材が減少することから、緩和措置がとられない場合には、原子炉水位の低下により燃料が露出し、燃料損傷に至る。

本事故シーケンスグループは、原子炉冷却材の流出によって燃料損傷に至る事故シーケンスグループである。このため、運転停止中の原子炉における燃料損傷防止対策の有効性評価には、注水機能に対する重大事故等対処設備に期待することが考えられる。

したがって、本事故シーケンスグループでは、原子炉圧力容器からの原子炉冷却材流出の停止や、残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水を行うことで必要量の原子炉冷却材を確保することによって、燃料損傷の防止を図る。また、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転による最終的な熱の逃がし場へ熱の輸送を行うことにより、原子炉を除熱する。

(3) 燃料損傷防止対策

事故シーケンスグループ「原子炉冷却材の流出」における機能喪失に対して、燃料が著しい損傷に至ることなく、かつ、十分な冷却を可能とするため、運転員による原子炉冷却材流出の停止及び残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水手段を整備する。これらの対策の概略系統図を第5.3.1-1(1)図及び第5.3.1-1(2)図に、手順の概要を第5.3.1-2図に示すとともに、重大事故等対策の概要を以下に示す。また、重大事故等対策における設備と操作手順の関係を第5.3.1-1表に示す。

本事故シーケンスグループにおける重要事故シーケンスにおいて、重大事故等対策に必要な要員は、中央制御室の運転員及び緊急時対策要員で構成され、合計10名である。その内訳は次のとおりである。中央制御室の運転員は、当直長1名、当直副長1名、運転操作対応を行う運転員3名である。発電所構内に常駐している要員のうち、通報連絡等を行う緊急時対策本部要員は5名である。必要な要員と作業項目について第5.3.1-3図に示す。

なお、重要事故シーケンス以外の事故シーケンスについては、作業項目を重要事故シーケンスと比較し、必要な要員数を確認した結果、10名で対処可能である。

a. 原子炉冷却材圧力バウンダリ外への原子炉冷却材流出確認

原子炉の運転停止中に原子炉冷却材圧力バウンダリに接続された系統から、運転員の誤操作等により系外への原子炉冷却材の流出が発生する。なお、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の吸い込み配管の高さは燃料棒有効長頂部以下にあるため、本事故シーケンスの水位低下量においては崩壊熱除去機能は維持される。

原子炉冷却材圧力バウンダリ外への原子炉冷却材流出を確認するために必要な計装設備は、サプレッション・プール水位（SA）等である。

b. 原子炉冷却材圧力バウンダリ外への原子炉冷却材流出停止確認

原子炉冷却材圧力バウンダリに接続された系統から漏えいしている箇所の隔離を行うことで、原子炉冷却材流出が停止することを確認する。

隔離操作完了により、正常な原子炉停止時冷却モードの運転となる。

原子炉冷却材圧力バウンダリ外への原子炉冷却材流出停止を確認するために必要な計装設備は、サプレッション・プール水位（SA）等である。

c. 残留熱除去系（低圧注水モード）運転による原子炉注水

原子炉冷却材流出により低下した原子炉水位を回復するため、中央制御室からの遠隔操作により残留熱除去系（低圧注水モード）運転による原子炉注水を開始し、原子炉水位を回復する。

残留熱除去系（低圧注水モード）運転による原子炉注水を確認するために必要な計装設備は、残留熱除去ポンプ出口流量等である。

5.3.2 燃料損傷防止対策の有効性評価

(1) 有効性評価の方法

本事故シーケンスグループを評価するうえで選定した重要事故シーケンスは、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、事象認知までに要する時間（点検作業に伴う原子炉冷却材の流出事象は検知が容易）及び原子炉冷却材の流出量の観点から「原子炉冷却材の流出（残留熱除去系切替時の冷却材流出）＋流出隔離・炉心冷却失敗」である^{*1}。

残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）は通常、2系統あるうち1系統を用いて、崩壊熱除去を実施しており、作業や点検等に伴い系統切替えを実施する場合がある。系統切替えに当たって、原子炉冷却材が系外に流出しないように系統構成を十分に確認して行うが、操作の誤り等によって原子炉冷却材が系外に流出する事象を想定している。

「残留熱除去系切替時の冷却材流出」は原子炉冷却材流出事象発生時の検知が他の作業等よりも困難な事象であり、原子炉圧力容器の上蓋が開放されている「POS-B 原子炉ウェル満水状態」が検知性及び放射線遮蔽の考慮の観点で最も厳しい想定である。なお、燃料棒有効長頂部まで原子炉水位が低下するまでの時間余裕という観点では原子炉未開放状態が厳しくなるが、その場合であっても約1.3時間の時間余裕^{*2}があり、かつ、原子炉水位計による警報発生、緩和設備の起動等に期待できるため、原子炉開放時と比べて速やかな検知と注水が可能であり、評価項目を満足できる。したがって、当該プラント状態を基本とし、他のプラント状態も考慮した想定において評価項目を満足することを確認することにより、運転停止中の他のプラント状態においても、評価項

目を満足できる。

本重要事故シーケンスでは、操作の誤り等による原子炉冷却材の系外流出により原子炉水位が低下するが、燃料棒有効長頂部の冠水及び未臨界を維持できることを評価する。さらに、原子炉水位が放射線の遮蔽が維持される水位を確保できることを評価する。

また、評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、本重要事故シーケンスにおける運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価する。

※1 残留熱除去系切替え時の冷却材流出による流出量は他の原子炉冷却材流出事象と比べて流出量が多い（付録1 別添 島根原子力発電所2号炉 確率論的リスク評価(PRA)について 補足説明資料1.1.2.c-3 冷却材流出事象の流出量及び余裕時間の算出方法について）

※2 原子炉冷却材の流出により原子炉水位が通常運転水位から燃料棒有効長頂部まで低下するまでの時間

(添付資料5.3.1, 5.3.2)

(2) 有効性評価の条件

本重要事故シーケンスに対する初期条件も含めた主要な評価条件を第5.3.2-1表に示す。また、主要な評価条件について、本重要事故シーケンス特有の評価条件を以下に示す。

a. 初期条件

(a) 原子炉圧力容器の状態

原子炉圧力容器の開放時について評価する。原子炉未開放時においては原子炉水位計による警報発生、緩和設備の起動等に期待できる。

(b) 原子炉水位及び原子炉水温

事象発生前の原子炉の初期水位は、原子炉ウェル満水の水位とし、保有水量を厳しく見積もるため、燃料プールと原子炉ウェルの間に設置されているプールゲートは閉を仮定する。また、原子炉水温は52℃とする。

b. 事故条件

(a) 起回事象

起回事象として、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の系統切替え時に原子炉冷却材が流出するものとする。具体的には、ミニマムフロー弁の閉操作忘れの人的過誤による原子炉冷却材のサプレッション・チェンバへの流出を想定し、流出量は約94m³/hとする。

(b) 崩壊熱による原子炉水温の上昇及び蒸発

本想定事象では崩壊熱除去機能喪失を仮定した場合も、事象発生から安定状態に至る時間に対して、原子炉水温が100℃に到達するまでの時間が事象発生から5時間以上と長いため、崩壊熱による原子炉水温の上昇及び蒸発については、考慮しない。

(c) 外部電源

外部電源は使用できないものと仮定する。

外部電源が使用できない場合においても、非常用ディーゼル発電機にて残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水が可能であり、外部電

源がある場合と事象進展は同等となるが、資源の評価の観点で厳しい評価条件となる外部電源が使用できない場合を想定する。

c. 重大事故等対策に関連する機器条件

(a) 残留熱除去系（低圧注水モード）

残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水流量は $1,136\text{m}^3/\text{h}$ とする。

d. 重大事故等対策に関連する操作条件

運転員等操作に関する条件として、「1.3.5 運転員等の操作時間に対する仮定」に示す分類に従って以下のとおり設定する。

(a) 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転中の残留熱除去ポンプミニマムフロー弁閉止及び待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水は、原子炉水位低下確認後、原因調査を開始し、事象発生から2時間後に実施するものとする。

なお、本評価事象においては漏えい箇所の隔離が容易であるため、残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水操作は残留熱除去ポンプミニマムフロー弁閉止操作完了後に実施するものとしている。ただし、両操作とも水位低下を認知して実施する操作であり、事象によっては原子炉注水操作を残留熱除去ポンプミニマムフロー弁閉止操作完了前に実施することもある。

(添付資料 5.3.2)

(3) 有効性評価の結果

本重要事故シーケンスにおける原子炉水位の推移を第5.3.2-1図に、原子炉水位と線量率の関係を第5.3.2-2図に示す。

a. 事象進展

事象発生後、原子炉冷却材が流出することにより、原子炉水位は低下し始めるが、原子炉水位の低下により異常事象を認知し、事象発生から2時間経過した時点で、残留熱除去ポンプミニマムフロー弁閉止操作完了後、待機中の残留熱除去ポンプを起動し、残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水を行う。

その後は、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転により崩壊熱除去機能を回復する。

線量率の評価点は原子炉建物原子炉棟4階の燃料取替機台車床としており、燃料棒有効長頂部の約15m上の水位での線量率は $1.0 \times 10^{-3}\text{mSv/h}$ 以下であり、この水位において放射線の遮蔽は維持されている。

b. 評価項目等

原子炉水位は第5.3.2-1図に示すとおり、燃料棒有効長頂部の約15m上まで低下するに留まり、燃料は冠水維持される。

第5.3.2-2図に示すとおり、必要な遮蔽^{*3}が維持できる水位である燃料棒有効長頂部の約2.5m上を下回ることがないため、放射線の遮蔽は維持される。なお、線量率の評価点は原子炉建物原子炉棟4階の燃料取替機台車床としている。

また、全制御棒全挿入状態が維持されているため、未臨界は確保されている。

原子炉水位回復後、残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水を停止し、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）運転による原子炉压力容器除熱を行うことで、安定状態を維持できる。

本評価では、「1.2.4.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(1)から(3)の評価項目について、対策の有効性を確認した。

※3 必要な遮蔽の目安とした線量率は10mSv/hとする。原子炉冷却材流出における原子炉建物原子炉棟4階からの現場作業員の退避は2時間以内であり、作業員の被ばく量は最大でも20mSvとなるため、緊急作業時における被ばく限度の100mSvに対して余裕がある。

本事故に応じた燃料損傷防止対策において原子炉建物原子炉棟4階での操作を必要な作業としていないが、燃料プールスプレイ系（可搬型スプレイノズル）を使用した燃料プールへの注水について仮に考慮し、可搬型スプレイノズル及びホースの設置にかかる作業時間を想定した。

必要な遮蔽の目安とした線量率10mSv/hは、定期事業者検査作業時での原子炉建物原子炉棟4階における線量率を考慮した値である。

この線量率となる水位は燃料棒有効長頂部の約2.5m上（原子炉ウェル満水から約14m下）の位置である。

（添付資料 4.1.2, 5.1.6, 5.3.3）

5.3.3 評価条件の不確かさの影響評価

評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価するものとする。

本重要事故シーケンスは、事象進展が緩やかであり、運転員等操作である待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）により、水位を回復させることが特徴である。また、不確かさの影響を確認する運転員等操作は、原子炉冷却材流出の停止操作及び待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水操作とする。

(1) 評価条件の不確かさの影響評価

a. 初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件

初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件は、第5.3.2-1表に示すとおりであり、それらの条件設定を設計値等、最確条件とした場合の影響を確認する。また、評価条件の設定に当たっては、評価項目に対する余裕が小さくなるような設定があることから、その中で事象進展に有意な影響を与えると考えられる項目に関する影響評価の結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

初期条件の原子炉水位は、評価条件の原子炉ウェル満水に対して最確条件とした場合は、事故事象ごとに異なり、原子炉ウェル水張り実施中においては、評価条件よりも原子炉初期水位は低くなるが、既に原子炉注水を実施しており、また原子炉冷却材流出の停止のための隔離操作は、原子炉冷却材流出の認知を起点とする操作であることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件のプールゲートの状態は評価条件のプールゲート閉に対して最確条件はプールゲート開であり、評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している保有水量より多くなるため、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は長くなるが、原子炉冷却材流出の停止及び注水操作は原子炉冷却材流出の認知を起点とする操作であることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

初期条件の原子炉压力容器の状態は、評価条件の原子炉压力容器の開放に対して最確条件は事故事象ごとに異なる。原子炉压力容器の未開放時は、原子炉水位計による警報発生、緩和設備の起動等により原子炉冷却材流出の認知が早まるため、運転員等操作時間が早くなり、原子炉压力容器の開放時は、評価条件と同様となるが、原子炉冷却材流出の停止及び注水操作は原子炉冷却材流出の認知を起点とする操作であることから、運転員等操作時間に与える影響はない。

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

初期条件の原子炉水位及び原子炉压力容器の状態について、評価条件の原子炉压力容器の開放及び原子炉ウェル満水に対して最確条件は事故事象ごとに異なる。原子炉压力容器の開放時は、原子炉ウェルの水張りを実施しているため初期水位が原子炉ウェル満水と高い位置となるが、原子炉压力容器等の遮蔽に期待できず、また原子炉水位計の警報による運転員の認知に期待できないため、速やかな認知が困難である。一方、原子炉压力容器の未開放時は、原子炉压力容器の開放時と比べて、初期水位が低い位置であるが、原子炉压力容器等の遮蔽に期待でき、かつ、原子炉水位計による警報発生、緩和設備の起動等により原子炉冷却材流出の認知が早まるため、放射線の遮蔽を維持できる燃料棒有効長頂部の約 1.8m 上に到達するまでの時間（事象発生から約 50 分）までの認知が可能である。

このため、現場作業員の退避時の被ばくを考慮した際も必要な放射線の遮蔽は維持されることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。また、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は約 1.3 時間の時間余裕があり、認知後すぐに隔離による原子炉冷却材流出の停止操作及び原子炉注水操作を行えるため、操作時間が十分あることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

初期条件のプールゲートの状態において評価条件のプールゲート閉に対して、最確条件はプールゲート開であり、本評価条件の不確かさとして、最確条件とした場合は、評価条件で設定している保有水量より多くなるため、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は長くなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

b. 操作条件

操作条件の不確かさとして、操作の不確かさを「認知」、「要員配置」、「移動」、「操作所要時間」、「他の並列操作有無」及び「操作の確実さ」の 6 要因に分類し、これらの要因が運転員等操作時間に与える影響を評価する。また、運転員等操作時間に与える影響が評価項目となるパラメータに与える影響を評価し、評価結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

操作条件の原子炉冷却材流出の停止操作は、評価上の操作開始時間とし

て、事象発生から2時間後を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、実態の運転操作においては、運転員の残留熱除去系系統切替え時のプラント状態確認による早期の認知に期待できるため、評価の想定と比べ、早く事象を認知できる可能性があり、評価上の操作開始時間に対し、実態の原子炉冷却材流出の停止操作が早くなることから、運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。

操作条件の待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）の注水操作は、評価上の操作開始時間として、原子炉水位の低下に伴う異常の認知及び現場操作の時間を考慮し、事象発生から2時間後を設定している。運転員等操作時間に与える影響として、原子炉水位低下時に原子炉注水の必要性を認知することは容易であり、評価では事象発生から2時間後の原子炉注水操作開始を設定しているが、実態は運転員の残留熱除去系系統切替え時のプラント状態確認による早期の認知に期待でき、速やかに原子炉注水操作を実施するため、その開始時間は早くなることから、運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

操作条件の原子炉冷却材流出の停止操作は、運転員等操作時間に与える影響として、実態の操作開始時間が早まり、原子炉水位の低下を緩和する可能性があることから、評価項目となるパラメータに与える余裕は大きくなる。

操作条件の待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）の注水操作は、運転員等操作時間に与える影響として、実態の操作開始時間が早まり、原子炉水位の低下を緩和する可能性があることから、評価項目となるパラメータに与える余裕は大きくなる。

(添付資料 5.3.4)

(2) 操作時間余裕の把握

操作開始時間の遅れによる影響度合いを把握する観点から、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内での操作時間余裕を確認し、その結果を以下に示す。

操作条件の原子炉冷却材流出の停止操作について、必要な遮蔽が確保される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約10時間後であり、事故を認知して漏えい箇所の隔離が完了し、原子炉注水を開始するまでの時間は事象発生から2時間後であることから、時間余裕がある。

操作条件の待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）の注水操作について、必要な遮蔽が確保される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約10時間後であり、事故を認知して原子炉注水を開始するまでの時間は事象発生から2時間後であることから、時間余裕がある。

(添付資料5.3.4)

(3) まとめ

評価条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を確認した。その結果、評価条件の不確かさが運転員等操作時間に与える影響等を考慮した場合においても、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

このほか、評価項目となるパラメータに対して、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間には時間余裕がある。

5.3.4 必要な要員及び資源の評価

(1) 必要な要員の評価

事故シーケンスグループ「原子炉冷却材の流出」において、重大事故等対策時における必要な要員は、「5.3.1(3) 燃料損傷防止対策」に示すとおり10名である。「6.2 重大事故等対策時に必要な要員の評価結果」で説明している運転員、緊急時対策要員等の43名で対処可能である。

(2) 必要な資源の評価

事故シーケンスグループ「原子炉冷却材の流出」において、必要な水源、燃料及び電源は、「6.1(2) 資源の評価条件」の条件にて評価している。その結果を以下に示す。

a. 水源

残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水については、必要な注水量が少なく、また、サプレッション・チェンバのプール水を水源とし、循環することから、枯渇することはないため、7日間の継続実施が可能である。

b. 燃料

非常用ディーゼル発電機等による電源供給については、保守的に事象発生後7日間最大負荷で運転した場合、運転継続に約700m³の軽油が必要となる。非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等にて約730m³の軽油を保有しており、これらの使用が可能であることから、非常用ディーゼル発電機等による電源供給について、7日間の継続が可能である。

緊急時対策所用発電機による電源供給については、保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると、7日間の運転継続に約8m³の軽油が必要となる。緊急時対策所用燃料地下タンクにて約45m³の軽油を保有しており、この使用が可能であることから、緊急時対策所用発電機による電源供給について、7日間の継続が可能である。

(添付資料5.3.5)

c. 電源

外部電源は使用できないものと仮定し、非常用ディーゼル発電機等によって給電を行うものとする。重大事故等対策時に必要な負荷は、非常用ディーゼル発電機等は負荷に含まれることから、非常用ディーゼル発電機等による電源供給が可能である。

また、緊急時対策所用発電機についても、必要負荷に対しての電源供給が可能である。

5.3.5 結論

事故シーケンスグループ「原子炉冷却材の流出」では、系統切替え操作の誤り等によって原子炉冷却材が系外に流出することで原子炉圧力容器内の保有水量が減少し、燃料損傷に至ることが特徴である。事故シーケンスグループ「原子炉冷却材の流出」に対する燃料損傷防止対策としては、原子炉冷却材流出の

停止及び残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水手段を整備している。

事故シーケンスグループ「原子炉冷却材の流出」の重要事故シーケンス「原子炉冷却材の流出（残留熱除去系切替時の冷却材流出）＋流出隔離・炉心冷却失敗」について有効性評価を実施した。

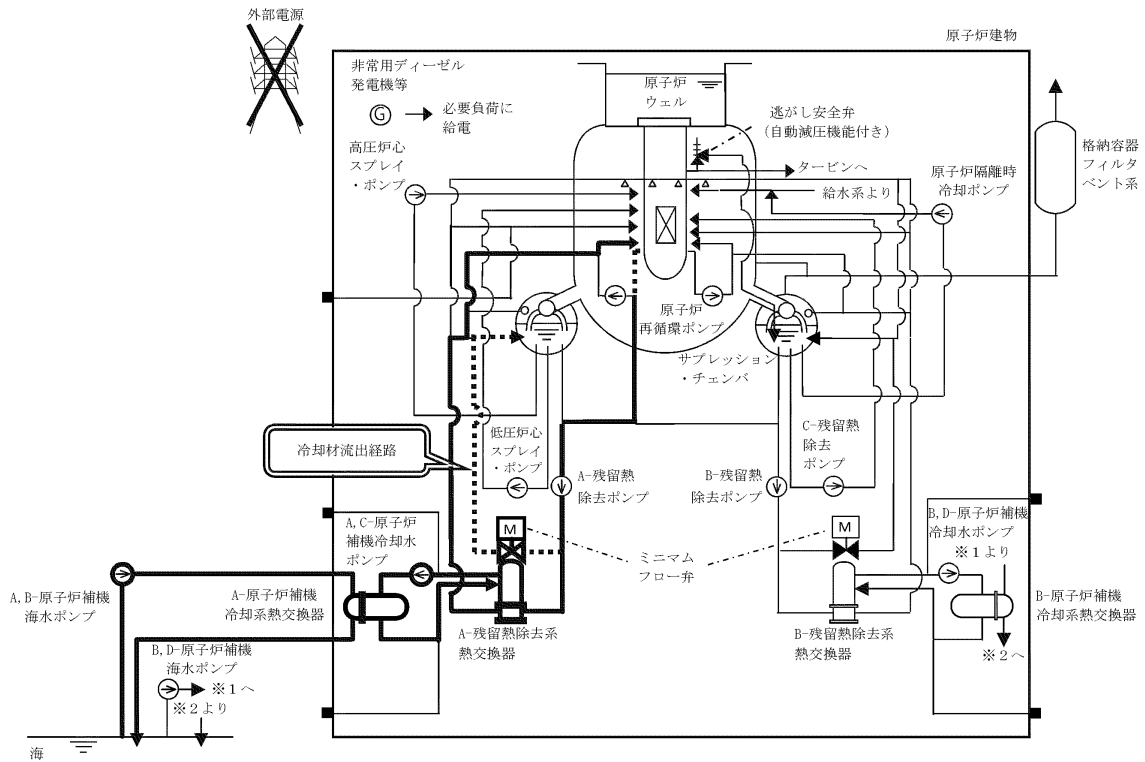
上記の場合においても、残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水を行うことにより、燃料は露出することなく燃料棒有効長頂部は冠水しているため、燃料損傷することはない。

その結果、燃料棒有効長頂部の冠水、放射線の遮蔽の維持及び制御棒の全挿入状態が維持されており未臨界の確保ができることから、評価項目を満足している。また、安定状態を維持できる。

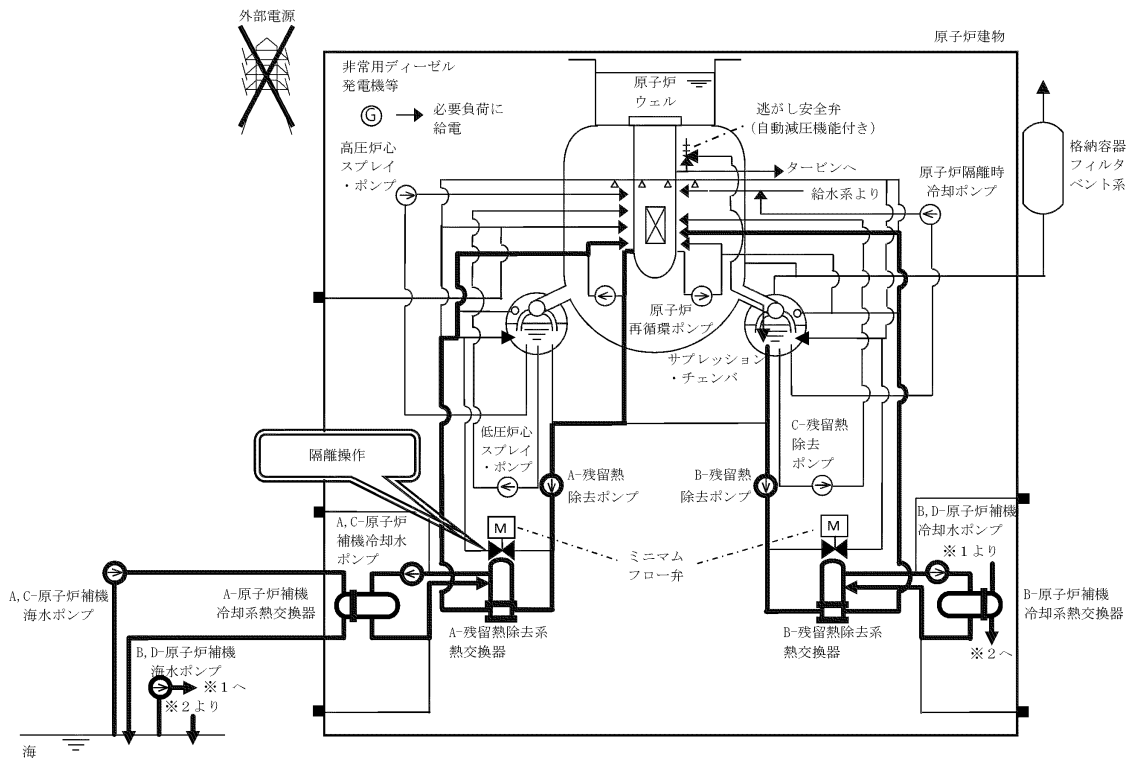
評価条件の不確かさについて確認した結果、運転員等操作時間に与える影響及び評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。また、対策の有効性が確認できる範囲内において、操作時間余裕について確認した結果、操作が遅れた場合でも一定の余裕がある。

重大事故等対策時に必要な要員は、運転員及び緊急時対策要員にて確保可能である。また、必要な水源、燃料及び電源を供給可能である。

以上のことから、残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水等の燃料損傷防止対策は、選定した重要事故シーケンスに対して有効であることが確認でき、事故シーケンスグループ「原子炉冷却材の流出」に対して有効である。

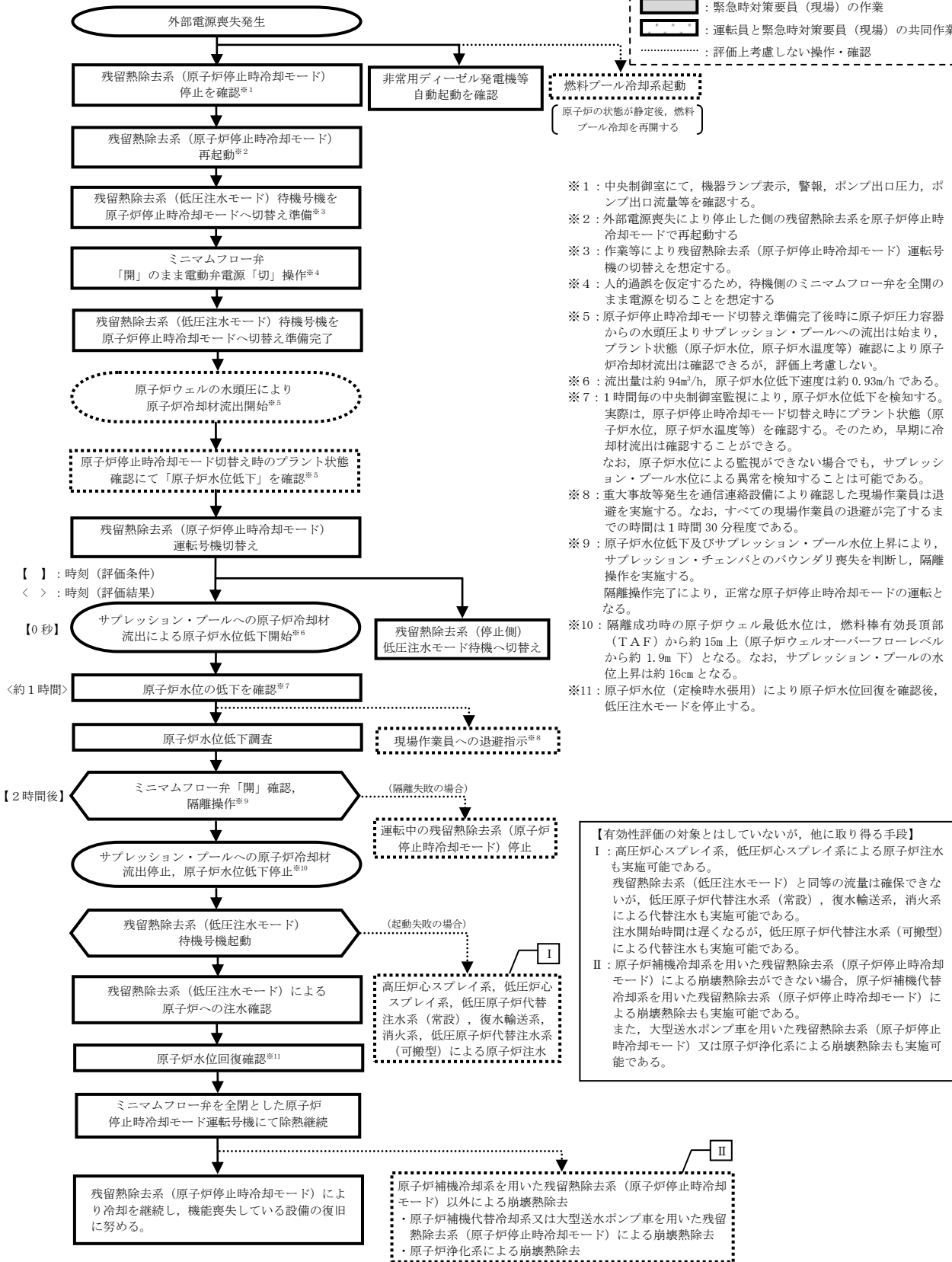
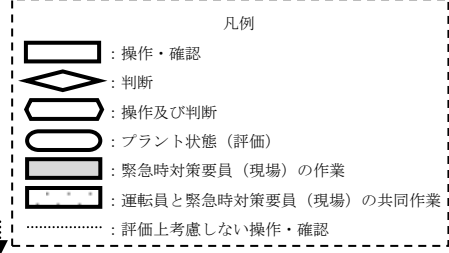


第5.3.1-1(1)図 「原子炉冷却材の流出」の重大事故等対策の概略系統図
(原子炉停止時冷却系統構成失敗)



第 5.3.1-1(2) 図 「原子炉冷却材の流出」の重大事故等対策の概略系統図
(漏えい箇所の隔離操作，原子炉注水及び原子炉停止時冷却)

プラント前提条件
 ・原子炉ウエル満水
 ・全燃料装荷&プールゲート「閉」
 ・A-残留熱除去系（低圧注水モード） 待機中
 ・B-残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード） 運転中
 ・C-残留熱除去系 点検に伴い待機除外中



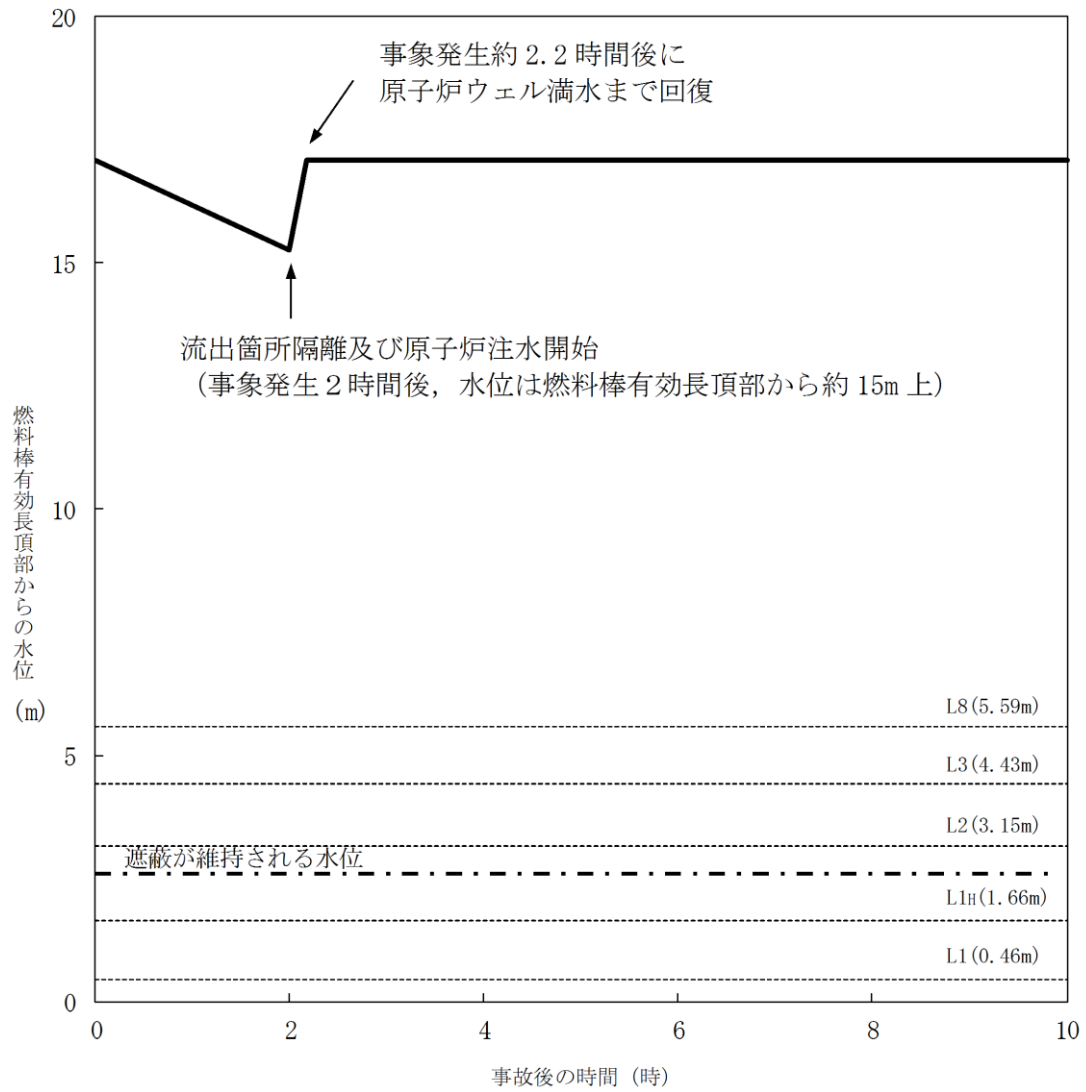
第 5.3.1-2 図 「原子炉冷却材の流出」の対応手順の概要

原子炉冷却材の流出

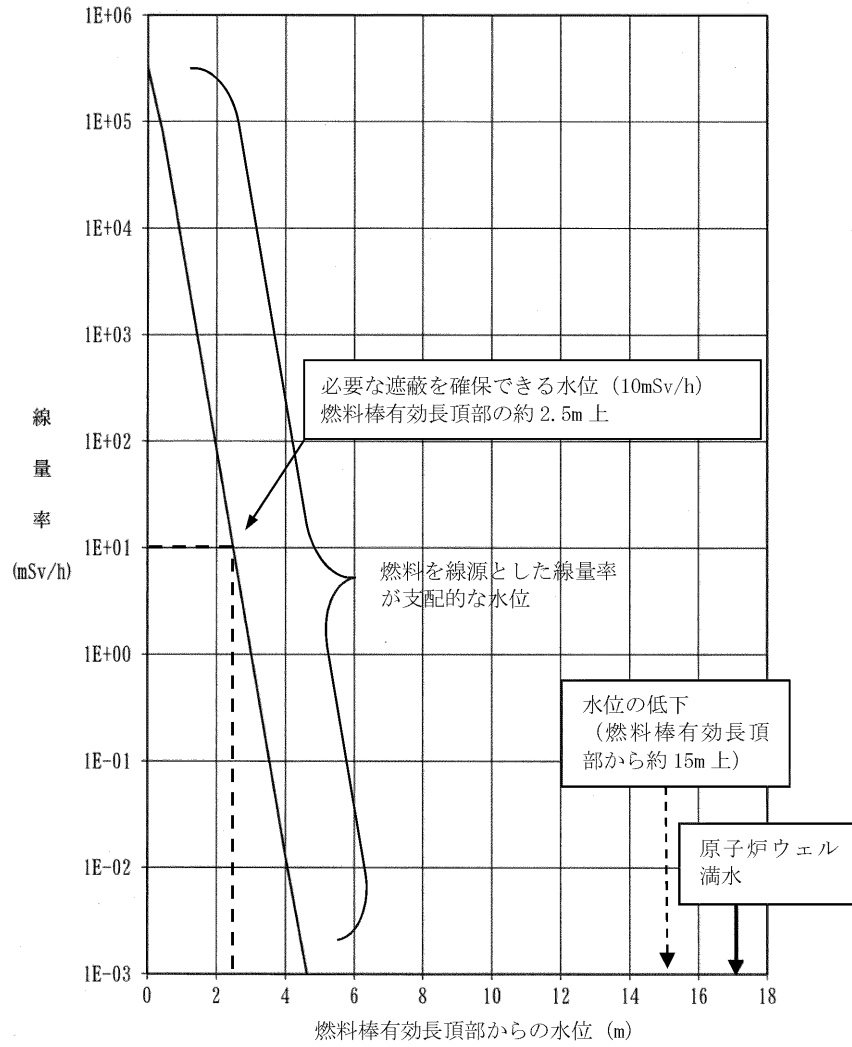
必要な要員と作業項目				経過時間 (分)														経過時間 (日)			備考				
				0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160		170	5	6	7
手順の項目	実施箇所・必要人員数			操作内容	<p>0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170</p> <p>5 6 7</p> <p>事象発生</p> <p>約1時間後 原子炉水位低下検知</p> <p>2時間後 サプレッション・プールへの原子炉冷却材流出停止 残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水</p>																				
	責任者	当直長	1人																					中央制御室監視 緊急時対策本部連絡	
	指揮者	当直副長	1人																					運転操作指揮	
	通報連絡者	緊急時対策本部要員	5人																					初動での指揮 中央制御室連絡 発電所外部連絡	
	運転員 (中央制御室)	運転員 (現場)	緊急時対策要員 (現場)																						
状況判断	1人 A	—	—	・ 外部電源喪失確認 ・ 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）（運転側）停止確認 ・ 非常用ディーゼル発電機等自動起動確認	10分																			B-残留熱除去ポンプ	
残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード) 再起動	(1人) A	—	—	・ 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）（運転側）起動	10分																			B-残留熱除去ポンプ	
残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード) 切替え操作	(1人) A	—	—	・ 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）（待機側）系統構成（中央制御室）	20分																			A-残留熱除去ポンプ	
	—	2人 B, C	—	・ 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）（待機側）系統構成（現場）	20分																			A-残留熱除去ポンプ	
	(1人) A	—	—	・ 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）（運転側）から 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）（待機側）へ切替え操作	20分																			B-残留熱除去ポンプから A-残留熱除去ポンプ	
現場作業員への退避指示	—	—	—	・ 当直長による現場作業員への退避指示																	1時間30分以内に退避完了				評価上考慮せず 中央制御室で当直長が指示する
原子炉水位回復操作	(1人) A	—	—	・ 原子炉水位、温度監視																	適宜監視				
	(1人) A	—	—	・ 残留熱除去系（低圧注水モード）（停止側）系統構成（中央制御室）	20分																				B-残留熱除去ポンプ
	—	2人 B, C	—	・ 残留熱除去系（低圧注水モード）（停止側）系統構成（現場）	20分																				B-残留熱除去ポンプ
	(1人) A	—	—	・ 原子炉水位低下調査/隔離操作																	60分				原子炉冷却材流出停止により 正常な原子炉停止時冷却モード 運転が開始される
	—	2人 B, C	—	・ 放射線防護具準備	10分																				
	—	—	—	・ 原子炉水位低下調査/隔離準備操作																	50分				
	(1人) A	—	—	・ 残留熱除去系（低圧注水モード）起動操作																	10分				原子炉水位回復後、残留熱除去系（低圧注水モード）停止
燃料プール冷却 再開	(1人) A	—	—	・ 燃料プール冷却系再起動																				・ 燃料プール冷却水ポンプを再起動し燃料プールの冷却を再開する。 ・ 必要に応じてスキマサージタンクへの補給を実施する。 適宜実施	評価上考慮せず 燃料プール水温66℃以下維持
必要人員数 合計	1人 A	2人 B, C	—																						

() 内の数字は他の作業終了後、移動して対応する人員数。

第 5.3.1-3 図 「原子炉冷却材の流出」の作業と所要時間



第 5.3.2-1 図 原子炉水位の推移



第 5.3.2-2 図 原子炉水位と線量率

第 5.3.1-1 表 「原子炉冷却材の流出」の重大事故等対策について

判断及び操作	手順	重大事故等対処設備	
		常設設備	可搬型設備 計装設備
原子炉冷却材圧力バウンダリ外への原子炉冷却材流出確認	運転停止中に原子炉冷却材圧力バウンダリに接続された系統から、運転員の誤操作等により系外への原子炉冷却材の流出が発生する。	【非常用ディーゼル発電機】※ 【非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク】※	サブプレッション・プールの水位 (S A) 原子炉水位 (S A) 原子炉水位 (広帯域) ※
原子炉冷却材圧力バウンダリ外への原子炉冷却材流出停止確認	原子炉冷却材圧力バウンダリに接続された系統から漏えいしている箇所の隔離を行うことで、原子炉冷却材流出が停止することを確認する。	—	サブプレッション・プールの水位 (S A) 原子炉水位 (S A) 原子炉水位 (広帯域) ※
残留熱除去系 (低圧注水モード) 運転による原子炉注水	原子炉冷却材流出により低下した原子炉水位を回復するため、待機していた残留熱除去系 (低圧注水モード) 運転で原子炉注水を実施する。	【残留熱除去系 (低圧注水モード)】※ サブプレッション・チェンバ※	【残留熱除去ポンプ出口流量】 原子炉水位 (S A) 原子炉水位 (広帯域) ※

※：既許可の対象となっている設備を重大事故等対処設備に位置付けるもの
【 】：重大事故等対処設備 (設計基準拡張)

第 5.3.2-1 表 主要評価条件 (原子炉冷却材の流出)

項目		主要評価条件	条件設定の考え方
初期条件	原子炉压力容器の状態	原子炉压力容器の開放	線量率の影響を確認するため、原子炉压力容器の開放状態を想定
	原子炉水位	原子炉ウェル満水	原子炉压力容器が開放状態での水位を想定
	原子炉水温	52℃	残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の設計値を設定
	原子炉圧力	大気圧	原子炉压力容器の開放を想定
	プールの状態	閉	保有水が少ないプールゲート閉を想定
	事故条件	起因事象	原子炉冷却材の流出
原子炉冷却材のサブプレッション・チェンバへの流出量		約 94m ³ /h	ミニマムフローラインに残留熱除去ポンプ出口圧力が掛かった場合の最大流出量
崩壊熱による原子炉水温の上昇及び蒸発		考慮しない	原子炉水温が 100℃に到達するまでの時間が長く、事象進展に影響しないことから設定
外部電源		外部電源なし	外部電源の有無は、原子炉冷却材の流出に伴う原子炉水位の低下に影響しないことから、資源の観点で厳しい外部電源なしを設定
残留熱除去系（低圧注水モード）		1,136 m ³ /h で注水	残留熱除去系（低圧注水モード）の設計値として設定
重大事故等対策に関連する機器条件	原子炉冷却材流出の停止	事象発生から 2 時間後	原子炉水位の低下に伴う異常の認知及び現場操作の実績等を基に、さらに時間余裕を考慮して設定
	残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水操作	事象発生から 2 時間後	

原子炉冷却材の流出における運転停止中の線量率評価について

運転停止中の原子炉における燃料損傷防止対策の有効性評価では「放射線遮蔽が維持される水位を確保すること」との基準が定められている。

以下に原子炉冷却材の流出における現場線量率の評価を示す。

なお、線量率の評価において、原子炉圧力容器は原子炉未開放の場合、原子炉圧力容器等の遮蔽に期待でき、認知も容易であるため、原子炉開放を想定した。また、原子炉圧力容器の開放作業中において、基本的に原子炉冷却材の流出のおそれのある作業を実施しないこと、原子炉ウェル等に注水を実施している状態であることより、評価において気水分離器及び蒸気乾燥器のDSPへの取り出しが完了し、原子炉ウェルが満水の状態を想定した。

1. 炉心燃料・炉内構造物の線源強度

放射線源として燃料及び上部格子板をモデル化した。

(1) 炉心燃料

評価条件を以下に示す。

- 線源形状：円柱線源（炉心のすべてに燃料がある状態）
- 燃料棒有効長（mm）：
- ガンマ線エネルギー：計算に使用するガンマ線は、エネルギー4群
- 線源材質：燃料及び水（密度 g/cm³）
- 線源強度：文献値^{*1}に記載のエネルギーあたりの線源強度を基に、9×9燃料（A型）の体積あたりの線源強度を式①で算出

$$\text{線源強度 (cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) = \frac{\text{文献に記載の線源強度 (MeV} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) \times \text{燃料集合体あたりの熱出力 (W/体)}}{\text{各群のエネルギー (MeV)} \times \text{燃料集合体体積 (cm}^3 \text{/体)}} \quad \dots \text{①}$$

このときの線源条件は以下となる。なお、本評価で使用している文献値は、燃料照射期間10⁶時間（約114年）と、島根2号炉の実績を包絡した条件で評価されており、島根2号炉に関する本評価においても適用可能である。

- ・燃料照射期間：10⁶時間（無限照射）
- ・原子炉停止後の期間^{*2}：停止後3日（実績を考慮した値を設定）
- ・燃料集合体あたりの熱出力：4.35MW/体（9×9燃料（A型））
- ・燃料集合体体積：約7.1×10⁴ cm³（9×9燃料（A型））

※1 Blizard E. P. and Abbott L. S., ed., “REACTOR HANDBOOK. 2nd ed. Vol. III Part B, SHIELDING”, INTERSCIENCE PUBLISHERS, New York, London, 1962

※2 原子炉停止後の期間は全制御棒全挿入からの時間を示している。通常停止操作において原子炉の出力は全制御棒全挿入完了及び発電機解列以前から徐々に低下させるが、線源強度評価は崩壊熱評価と同様にスクラムのような瞬時に出力を低下させる保守的な計算条件となっている。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

○ 評価モデル：円柱線源

線量率評価モデルを図1に示す。また、式①で算出した体積あたりの線源強度を表1に示す。

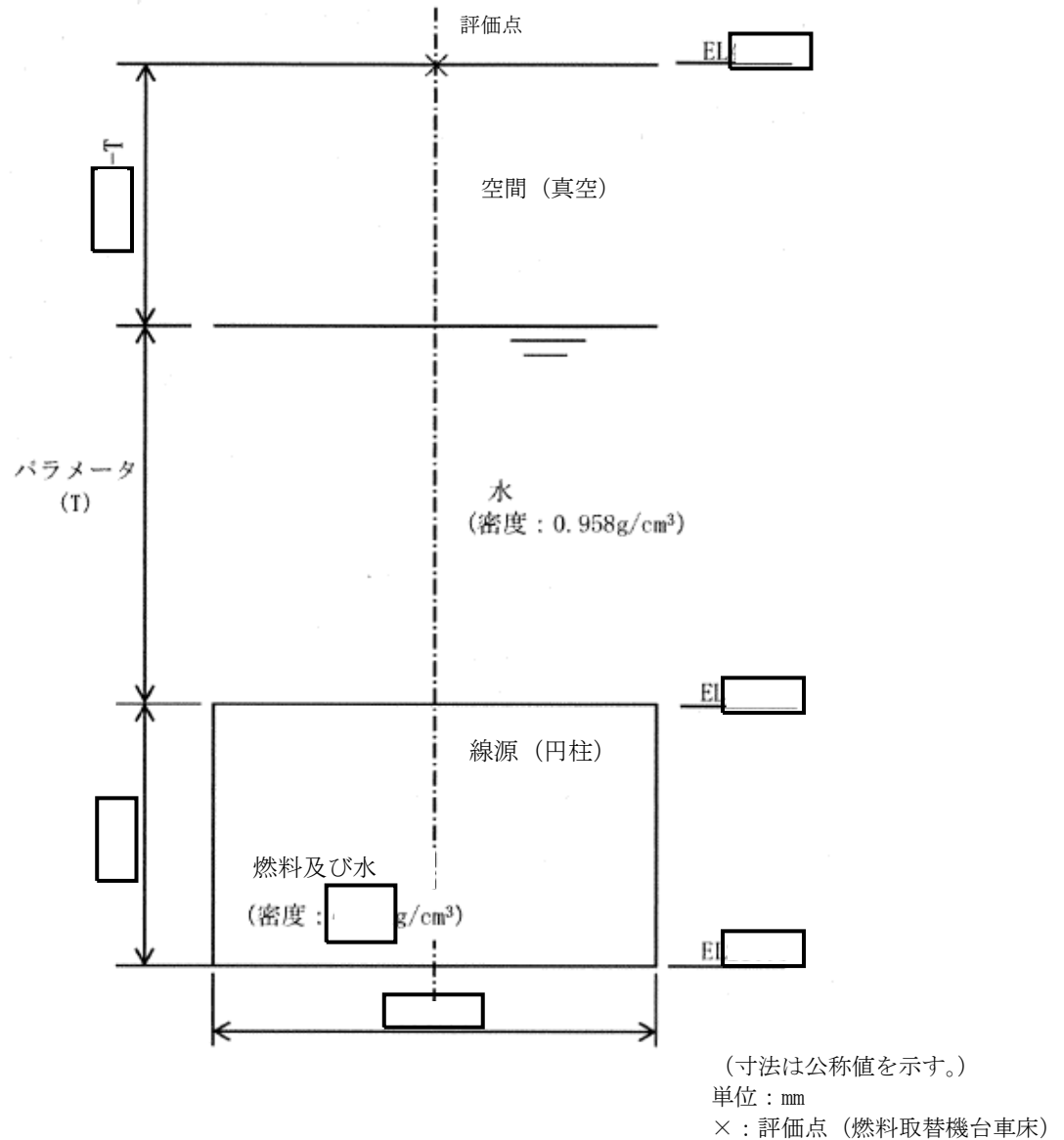


図1 燃料の線量率計算モデル

表1 燃料の線源強度

ガンマ線 エネルギー (MeV)	線源強度 ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
1.0	6.1×10^{11}
2.0	1.1×10^{11}
3.0	2.0×10^9
4.0	3.1×10^7

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(2) 上部格子板

評価条件を以下に示す。

○ 線源形状：円柱線源としてモデル化

○ 線源の高さ (mm)：□

○ ガンマ線エネルギー：評価に使用するガンマ線は、主要核種 ^{60}Co を想定して 1.5MeV

○ 線源材質：水と同等(密度 $0.958\text{g}/\text{cm}^3$ ※)

※ 52℃から 100℃までの飽和水の密度のうち、最小となる 100℃の値を採用

○ 線源強度は、機器表面の実測値 (□ Sv/h) より 8.7×10^9 (Bq/cm³) と算出

線量率評価モデルを図 2 に示す。

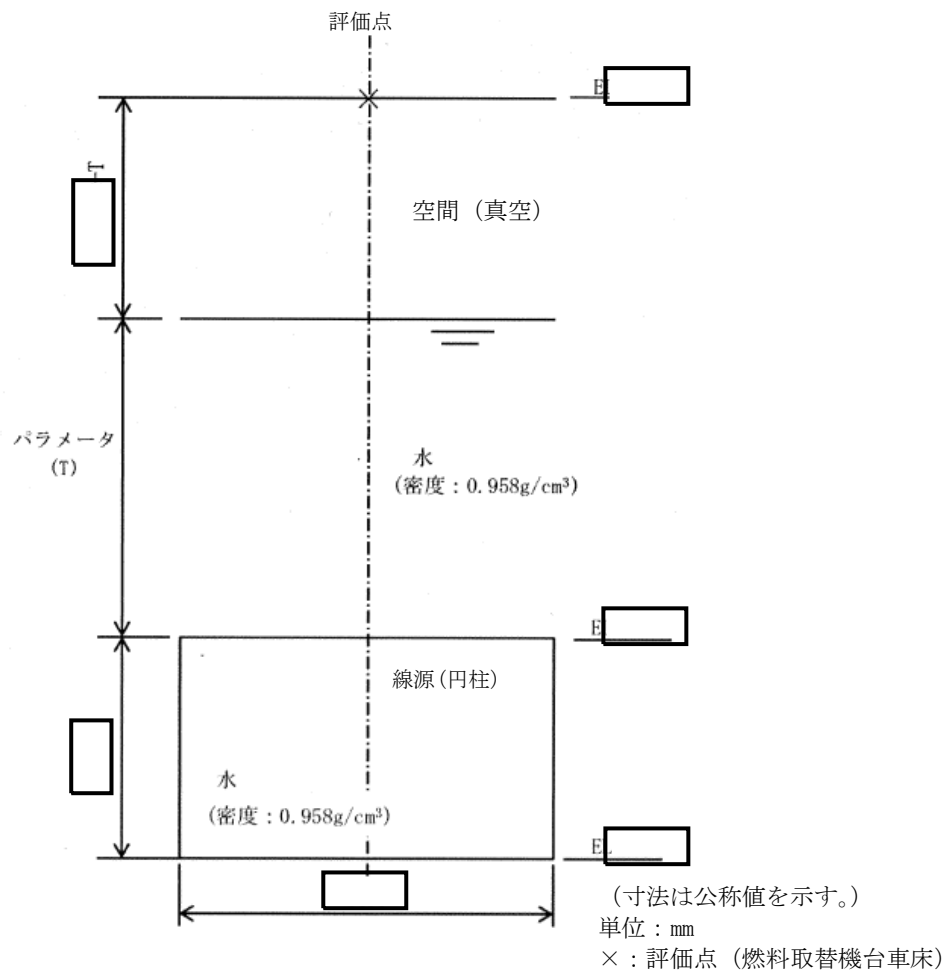


図 2 上部格子板の線量率評価モデル

2. 線量率の評価

線量率は、「添付資料 4. 1. 2「水遮蔽厚に対する貯蔵中の燃料等からの線量率」の評価について」と同様に QAD-CGGP 2 R コードを用いて計算している。

評価点については保守的に燃料取替機台車床とした。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

3. 現場の線量率の評価結果

1, 2の条件を用いて評価した原子炉水位と現場の線量率の関係を図3に示す。

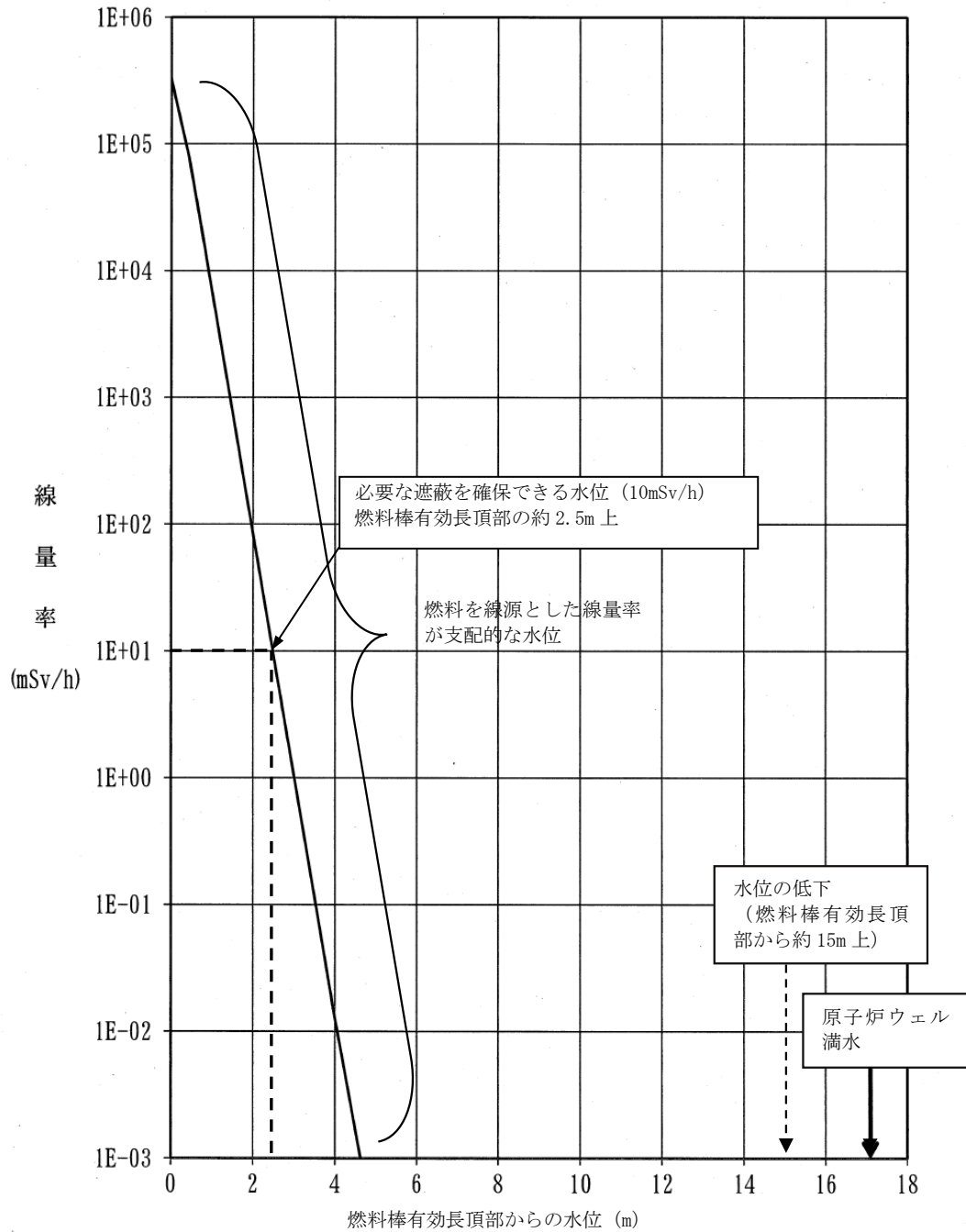


図3 原子炉水位と線量率

原子炉冷却材流出評価におけるPOS選定の考え方

1. 本評価におけるPOSの決定

運転停止中の原子炉における燃料損傷防止対策の有効性評価、「原子炉冷却材の流出」（以下「原子炉冷却材流出」という。）の重要事故シーケンスの評価では、次節に示すとおり、定期事業者検査中に実施する作業等を確認し、原子炉冷却材流出が生じ得る作業を抽出した後、各々の作業を比較して重要事故シーケンスとする作業を選定した。定期事業者検査中に各作業等が実施される時期はおおむね決まっているため、POSについては、選び得るPOSを比較して決定した。

2. 原子炉冷却材流出評価の対象とした作業等

重要事故シーケンスの選定にあたり、定期事業者検査中に原子炉冷却材流出が想定され得るとして抽出した作業等は次の4つである。この4つの作業等から、本評価では「残留熱除去系切替時の冷却材流出」を選定した。選定の理由は、発生時に想定される原子炉冷却材流出速度が大きいこと※、原子炉浄化系ブローは原子炉水位の変化に特に注目する作業であること、他の2事象は点検・交換であり、発生時の検知の可能性が本事象よりも高いと考えられることによるものである。

- (1) 制御棒駆動機構点検時の冷却材流出
- (2) 局部出力領域モニタ交換時の冷却材流出
- (3) 原子炉浄化系ブロー時の冷却材流出
- (4) 残留熱除去系切替時の冷却材流出

※ 残留熱除去系切替時の冷却材流出による流出量は他の原子炉冷却材流出事象と比べて流出量が多い（付録1 別添 島根原子力発電所2号炉 確率的リスク評価(PRA)について 補足説明資料1.1.2.c-3 冷却材流出事象の流出量及び余裕時間の算出方法について）

<残留熱除去系切替時の冷却材流出発生時の流出量の算出>

流出量は、
より算出した。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

: 約 94m³/h

3. POSを選定するうえで考慮した点

定期事業者検査中に残留熱除去系切替を実施する時期としては、残留熱除去系の運転や待機の系統を変化させる場合があり、この作業は定期事業者検査中のほぼ全域で生じ得る。このため、POSについてはいずれの場合も選び得る。

そのうえで、本評価ではPOSの選定において以下の点を考慮した。

(1) 崩壊熱による原子炉水温の上昇及び蒸発

崩壊熱による原子炉冷却材の減少を厳しく評価する観点では、原子炉停止後の時間が短いPOSの方が適切である。ただし、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の吸い込み配管の高さは燃料棒有効長頂部以下にあり、本事故シナシケンスの水位低下量においては崩壊熱除去機能は維持されるため、崩壊熱の違いによる時間余裕への影響はない。

(2) 原子炉圧力容器内の保有水量

原子炉圧力容器内の保有水量の観点では、原子炉ウェル満水の状態が最も余裕があり、原子炉圧力容器が通常水位(NWL)に近いほど厳しい条件となる。ただし、原子炉水位が通常運転水位の場合においても、燃料棒有効長頂部まで低下する時間は約1.3時間の時間余裕があり、原子炉注水までの時間余裕を確保できる。

(3) 発生時の検知性

発生時の検知性の観点では、原子炉圧力容器の上蓋が閉止されている場合、原子炉水位低下の警報発生や緩和設備の起動などに期待できるが、原子炉圧力容器の上蓋が開放されている場合、これらの機能には期待できない。

(4) 原子炉水位低下時の作業環境

原子炉水位低下時の作業環境への影響の観点では、原子炉圧力容器の上蓋が閉止されている場合、原子炉水位が低下しても十分に遮蔽されるため作業環境には影響が生じないが、原子炉圧力容器の上蓋が開放されている場合、原子炉水位が大きく低下すると十分な遮蔽効果が期待できなくなり、作業環境への影響が表れる。

4. POSの選定結果と考察

「残留熱除去系切替時の冷却材流出」は原子炉冷却材流出事象発生時の検知が他の作業等よりも困難な事象である。このため、3. (1)から(4)のうち、(3)の検知性の観点で厳しいPOSを選定することが適切と考える。この観点では、原子炉圧力容器の上蓋が開放されている、POS-B、Cが選定される。POS-

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

Cは原子炉浄化系ブローによる原子炉ウェルの水位低下から始まり,途中で原子炉圧力容器の上蓋が閉鎖されるPOSであり,原子炉圧力容器の上蓋が開放されている状態での原子炉水位について,特に注意が払われるPOSであることから,本重要事故シーケンスでは,POS-Bを代表として選定することが適切と考える。

なお,燃料棒有効長頂部まで水位が低下するまでの時間余裕という観点では原子炉未開放であるPOS-S, A, C, Dの「残留熱除去系切替時の冷却材流出」が厳しくなるが,その場合であっても約1.3時間の時間余裕※があり,かつ原子炉水位計による警報発生や緩和設備の起動などに期待できるため,原子炉開放時と比べて速やかな検知と注水が可能である。

※ 原子炉冷却材流出により原子炉水位が通常運転水位から燃料棒有効長頂部まで水位が低下するまでの時間

以上

表1 各プラント状態における評価項目に対する影響（原子炉冷却材流出）

プラント状態 (POS)	包絡事象	重大事故等対処設備等	原子炉圧力容器蓋の開閉状態	運転停止中の評価項目		未臨界の確保
				燃料棒有効長頂部の冠水	放射線の遮蔽が維持できる水位の確保	
S 原子炉冷温停止への移行状態	基本的に、冷却材流出事象の要因となる作業や操作を実施しない例外的な作業として「残留熱除去系の切り替え操作」の実施があるが「添付資料 5.3.4 評価条件の不確かさの影響評価について(運転停止中(原子炉冷却材の流出))」に包絡される	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉隔離時冷却系※1 非常用炉心冷却系 (LPCI, LPCS, HPCS) ※2 低圧原子炉代替注水系 (常設) 低圧原子炉代替注水系 (可搬型) ガスタービン発電機 	閉鎖	有効性評価では原子炉水位計による警報発生及び緩和設備の起動等により原子炉冷却材流出の認知が早まり、運転員等操作時間が早くなるため、「添付資料 5.3.4 評価条件の不確かさの影響評価について(運転停止中(原子炉冷却材の流出))」に包絡される	有効性評価では原子炉水位計による警報発生及び緩和設備の起動等により原子炉冷却材流出の認知が早まり、運転員等操作時間が早くなるため、「添付資料 5.3.4 評価条件の不確かさの影響評価について(運転停止中(原子炉冷却材の流出))」に包絡される	プラント状態 POS-B と同じ 制御棒引き抜きに係わる試験は「反応度誤投入」に包絡
A 格納容器及び原子炉圧力容器の開閉並びに原子炉ウエル満水への移行状態	基本的に、冷却材流出事象の要因となる作業や操作を実施しない例外的な作業として「残留熱除去系の切り替え操作」の実施があるが「添付資料 5.3.4 評価条件の不確かさの影響評価について(運転停止中(原子炉冷却材の流出))」に包絡される	<ul style="list-style-type: none"> 非常用炉心冷却系 (LPCI, LPCS, HPCS) ※2 低圧原子炉代替注水系 (常設) 低圧原子炉代替注水系 (可搬型) ガスタービン発電機 	閉鎖→開放	有効性評価では原子炉水位計による警報発生及び緩和設備の起動等により原子炉冷却材流出の認知が早まり、運転員等操作時間が早くなるため、「添付資料 5.3.4 評価条件の不確かさの影響評価について(運転停止中(原子炉冷却材の流出))」に包絡される	有効性評価では原子炉水位計による警報発生及び緩和設備の起動等により原子炉冷却材流出の認知が早まり、運転員等操作時間が早くなるため、「添付資料 5.3.4 評価条件の不確かさの影響評価について(運転停止中(原子炉冷却材の流出))」に包絡される	プラント状態 POS-B と同じ 制御棒引き抜きに係わる試験は「反応度誤投入」に包絡
B1						
B2	原子炉ウエル満水状態 (原子炉ウエル水抜き開始まで)	<ul style="list-style-type: none"> 非常用炉心冷却系 (LPCI) ※2 低圧原子炉代替注水系 (可搬型) ガスタービン発電機 燃料プールのブレイ系 	開放	有効性評価にて評価項目を満足することを確認している (有効性評価で確認している「残留熱除去系切替時の冷却材流出」に他の冷却材流出事象 (制御棒駆動系点検時の冷却材流出、制御棒駆動系点検時の冷却材流出、局部出力モニタ交換時の冷却材流出) は包絡される)	有効性評価にて評価項目を満足することを確認している (有効性評価で確認している「残留熱除去系切替時の冷却材流出」に他の冷却材流出事象 (制御棒駆動系点検時の冷却材流出、局部出力モニタ交換時の冷却材流出) は包絡される)	有効性評価にて評価項目を満足している 燃料の取出・装束に係わる作業は「反応度誤投入」に包絡
B3						
B4						
C 格納容器及び原子炉圧力容器の開閉並びに起動準備への移行状態	冷却材流出事象の要因となる作業として「残留熱除去系の切り替え操作」及び「原子炉浄化系プロロープ操作」が考えられるが、原子炉未開放状態では原子炉水位計による警報発生及び緩和設備の起動等により原子炉冷却材流出の認知が早まり、運転員等操作時間が早くなるため、「添付資料 5.3.4 評価条件の不確かさの影響評価について(運転停止中(原子炉冷却材の流出))」に包絡される	<ul style="list-style-type: none"> 非常用炉心冷却系 (LPCI, LPCS, HPCS) ※2 低圧原子炉代替注水系 (常設) 低圧原子炉代替注水系 (可搬型) ガスタービン発電機 	開放→閉鎖	有効性評価では原子炉水位計による警報発生及び緩和設備の起動等により原子炉冷却材流出の認知が早まり、運転員等操作時間が早くなるため、「添付資料 5.3.4 評価条件の不確かさの影響評価について(運転停止中(原子炉冷却材の流出))」に包絡される	有効性評価では原子炉水位計による警報発生及び緩和設備の起動等により原子炉冷却材流出の認知が早まり、運転員等操作時間が早くなるため、「添付資料 5.3.4 評価条件の不確かさの影響評価について(運転停止中(原子炉冷却材の流出))」に包絡される	プラント状態 POS-B と同じ 制御棒引き抜きに係わる試験は「反応度誤投入」に包絡
D 起動準備状態			閉鎖			

※1 原子炉圧力が上昇した後に使用可能となる ※2 停止レベル1 PRA では、保守的に期待していない設備

安定状態について(運転停止中(原子炉冷却材の流出))

運転停止中の原子炉冷却材の流出の安定状態については以下のとおり。

原子炉安定停止状態：事象発生後，原子炉冷却材の流出が停止し，設計基準事故対処設備及び重大事故等対処設備を用いた炉心冷却により，炉心冠水が維持でき，また，冷却のための設備がその後も機能維持できると判断され，かつ，必要な要員の不足や資源の枯渇等のあらかじめ想定される事象悪化のおそれがない場合，原子炉安定停止状態が確立されたものとする。

【安定状態の確立について】原子炉安定停止状態の確立について

事象発生直後から原子炉冷却材の流出により原子炉水位が低下するが，事象発生から2時間後に原子炉冷却材の流出を停止させ，残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水を行うことで原子炉水位が回復する。その後，残留熱除去系（低圧注水モード）による原子炉注水を停止し，残留熱除去系（停止時冷却モード）にて冷却することで，冷温停止状態を維持することができ，原子炉安定停止状態が確立される。

重大事故等対策時に必要な要員は確保可能であり，また，必要な水源，燃料及び電源を供給可能である。

【安定状態の維持について】

上記の燃料損傷防止対策により原子炉安定停止状態を維持できる。

また，残留熱除去系機能を維持し，除熱を行うことにより，安定停止状態後の安定停止状態の維持が可能となる。

(添付資料 2.1.1 別紙 1 参照)

評価条件の不確かさの影響評価について(運転停止中(原子炉冷却材の流出))
 表 1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響 (1 / 2)

項目	評価条件(初期、事故及び機器条件)の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
原子炉水位	原子炉ウエル水	事故毎に変化	原子炉圧力容器が開放状態での水位を想定	最確条件とした場合は、事故事象ごとくに異なり、原子炉ウエル水張り実施中においては、評価条件によりも原子炉初期水位に原子炉注水を実施しており、また原子炉冷却材流出の停止のための隔離操作は、原子炉冷却材流出の認知を起点とする操作であることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は、事故事象毎に異なり、原子炉ウエル水張り実施中においては、評価条件によりも原子炉初期水位は低くなるが、原子炉注水が実施されているため、原子炉水位の低下は起こらず、また、通常これらの期間には残留熱除去系の系統切替操作は実施しないことから事象進展に与える影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。原子炉圧力容器が未開放の場合、原子炉初期水位が通常運転水位付近にある場合も想定されるが、燃料棒有効長頂部まで原子炉水位が低下するまでの時間は約1.3時間の時間余裕があり、原子炉注水操作を行える。
原子炉圧力	大気圧	大気圧	原子炉圧力容器の開放を想定	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はない。	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
原子炉圧力容器の状態	原子炉圧力容器の開放	事故毎に変化	線量率の影響の観点を確認するため、原子炉圧力容器が開放状態を想定	最確条件は事故事象ごとくに異なる。原子炉圧力容器の未開放時は、原子炉水位計により原子炉冷却材生及び緩和設備の起動等により原子炉冷却材流出の認知が早まるため、運転員等操作時間が早くなり、原子炉圧力容器の開放時は、評価条件と同様となるが、原子炉冷却材流出の停止及び注水操作は原子炉冷却材流出の認知を起点とする操作であることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	原子炉圧力容器の開放時は、原子炉ウエル水張りを実施しているため初期水位が原子炉ウエル満水と高い位置となるが、原子炉圧力容器等の遮蔽に期待できず、また原子炉水位計の警報による運転員の認知に期待できないため、速やかな認知が困難である。一方、原子炉圧力容器の未開放時は、原子炉圧力容器の開放時と比べて、初期水位が低い位置であるが、原子炉圧力容器等の遮蔽に期待でき、かつ、原子炉水位計による警報発生、緩和設備の起動等により原子炉冷却材流出の認知が早まるため、放射線の遮蔽を維持できる燃料棒有効長頂部の約1.8m上に到達するまでの時間(約50分)まで認知が可能である。このため、現場作業員の退避時の被ばくを考慮した際も必要な放射線の遮蔽は維持されることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。また、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は約1.3時間の時間余裕があり、認知後すぐに隔離による原子炉冷却材流出の停止操作及び原子炉注水操作を行えるため、操作時間が十分あることから、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
初期条件					

表 1 評価条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響 (2/2)

項目	評価条件 (初期、事故及び機器条件) の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	評価条件	最確条件			
初期条件	ブールゲートの状態	閉	保有水が少ないブールゲートを想定	最確条件とした場合は、評価条件で設定している保有水量より多くなるため、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は長くなることか炉冷却材流出の停止及び注水操作は原子炉冷却材流出の認知を起点とする操作であることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	最確条件とした場合は、評価条件で設定している保有水量より多くなるため、原子炉水位が燃料棒有効長頂部まで低下する時間は長くなることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなくなる。
	燃料の容量	1, 180m ³	発電所構内に貯蔵している合計容量を参考に、最確条件を包絡できる条件を設定	最確条件とした場合は、解析条件よりも燃料容量の余裕が大きくなるため、燃料が枯渇することはない。運転員等操作時間に与える影響はない。	—
事故条件	起因事象	原子炉冷却材の流出	残留熱除去系切替時の原子炉冷却材流出を想定	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
	原子炉冷却材のサブプレッション・チェンバへの流出量	約 94m ³ /h	ミニマムフローラインに残留熱除去系ポンプ出口圧力がなかった場合の最大流出量	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
	崩壊熱による原子炉水温の上昇及び蒸発	考慮しない	原子炉水温が 100℃に到達するまでの時間が長く、事象進展に影響しないことから、考慮しない。	外部電源がない場合と外部電源がある場合では、事象進展は同じであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	外部電源がない場合と外部電源がある場合では、事象進展は同じであることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
外部電源	外部電源なし	事故毎に変化	外部電源の有無は、原子炉冷却材の流出に伴う原子炉水位の低下に影響しないことから、資源の評価の観点で厳しくなる外部電源なしを想定	外部電源がない場合と外部電源がある場合では、事象進展は同じであることから、運転員等操作時間に与える影響はない。	外部電源がない場合と外部電源がある場合では、事象進展は同じであることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
機器条件	残留熱除去系 (低圧注水モーター)	1, 136m ³ /h で注水	残留熱除去系 (低圧注水モーター) の設計値として設定	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、運転員等操作時間に与える影響はない。	評価条件と最確条件が同様であることから、事象進展に影響はなく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

表2 運転員等操作時間に与える影響，評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕（1/2）

項目	評価条件（操作条件）の不確かさ		運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	評価上の操作開始時間	条件設定の考え方				
原子炉冷却材流出の停止 操作条件	事象発生から2時間後	原子炉水位の低下に伴う異常の認知及び現場操作の実績等を基に、さらに時間余裕を考慮して設定	<p>【認知】 評価では、1 時間毎の中央制御室監視により、原子炉ウエル水位低下を検知することを想定している。実際は、残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）切替時にプラント状態（原子炉ウエル水位、原子炉水温等）確認により、早期に原子炉冷却材流出を認知できる可能性がある。</p> <p>【要員配置】 運転員による操作のみであり、運転員は中央制御室に常駐していることから、操作開始時間に与える影響はない。</p> <p>【移動】 漏えい隔離のためのミニマムフロア弁の閉操作には、原子炉建物の現場において当該弁の電源を復旧する必要がある。中央制御室から原子炉建物の現場までのアクセスルート上にアクセスを阻害する設備はなく、操作開始時間に与える影響はない。</p> <p>【操作所要時間】 原子炉ウエル水位低下調査における、漏えい箇所の特定及び隔離に1時間を想定している。漏えい箇所の隔離は、現場におけるミニマムフロア弁の電源復旧と中央制御室における当該弁の遠隔閉操作である。1 弁のみの操作であり、操作開始時間に与える影響はない。</p> <p>【他の並列操作有無】 原子炉ウエル水位低下調査における漏えい箇所の特定及び隔離操作に対応する運転員に他の並列操作はなく、操作時間に与える影響はない。</p> <p>【操作の確実さ】 漏えい隔離操作等の現場操作は、操作の信頼性向上や要員の安全のため2 人1 組で実施することとしており、誤操作は起こりにくく、誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。</p>	<p>実態の操作開始時間が早まり、原子炉水位の低下を緩和する可能性があることから、評価項目となるパラメータに与える余裕は大きくなる。</p>	<p>必要な遮蔽が維持される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約10時間後であり、事故を認知して原子炉注水を開始するまでの時間は事象発生から2時間後であることから、時間余裕がある。</p>	<p>評価上は作業成立性を踏まえ事象発生から2時間後とされており、このミニマムフロア弁の電源復旧と中央制御室における当該弁の遠隔閉操作は、訓練実績では約7分である。想定で意図している運転操作が実施可能なことを確認した。</p>

表2 運転員等操作時間に与える影響，評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕（2/2）

項目	評価条件（操作条件）の不確かさ		操作の不確かさ要因	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響	操作時間余裕	訓練実績等
	評価上の操作開始時間	条件設定の考え方					
<p>待機中の残留熱除去系（低圧注水モード）の注水操作</p> <p>操作条件</p>	<p>事象発生から2時間後</p>	<p>原子炉水位の低下に伴う異常の認知及び現場操作の実績等を基に、さらに時間余裕を考慮して設定</p>	<p>【認知】 原子炉冷却材流出時に原子炉注水の必要性を認知することは容易であり、よって、評価上の原子炉注水操作開始時間に対し、実際の原子炉注水操作開始時間は早くなる可能性がある。</p> <p>【要員配置】 中央制御室内での操作のみであり、運転員は中央制御室に常駐していることから、操作開始時間に与える影響はない。</p> <p>【移動】 中央制御室内での操作のみであり、操作開始時間に与える影響はない。</p> <p>【操作所要時間】 残留熱除去系のポンプ起動操作及び注入弁の開操作は、制御盤の操作スイッチによる操作のため、簡易な操作である。操作時間は特に設定していないが、原子炉水位の低下に対して操作に要する時間は短い。</p> <p>【他の並列操作有無】 当該操作を実施する運転員は、残留熱除去系（低圧注水モード）の原子炉注水操作時に他の並列操作はなく、操作開始時間に与える影響はない。</p> <p>【操作の確実さ】 中央制御室における操作は、制御盤の操作スイッチによる簡易な操作のため、誤操作は起こりにくく、そのため誤操作等により操作時間が長くなる可能性は低い。</p>	<p>原子炉水位低下時に原子炉注水の必要性を認知することは容易であり、よって、評価上の原子炉注水操作開始時間は早くなる可能性がある。</p> <p>原子炉注水操作開始時間から2時間後の原子炉注水操作開始時間を設定しているが、実態は運転員の残留熱除去系系統切替時のプラント状態確認による早期の認知に期待でき、速やかに原子炉注水操作を実施するため、その開始時間は早くなることから、運転員等操作時間に対する余裕は大きくなる。</p>	<p>実態の操作開始時間が早まり、原子炉水位の低下を緩和する可能性があることから、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。</p>	<p>必要な遮蔽が確保される最低水位に到達するまでの時間は事象発生から約10時間後であり、事故を認知して原子炉注水を開始するまでの時間は事象発生から2時間後であり、時間余裕がある。</p>	<p>評価上は作業成立性を踏まえ事象発生から2時間後とし、このうち、残留熱除去系のポンプ起動操作及び注入弁の開操作は、所要時間10分想定のところ、訓練実績では約2分である。想定で意図している運転操作が実施可能なことを確認した。</p>

7日間における燃料の対応について(運転停止中(原子炉冷却材の流出))

保守的にすべての設備が、事象発生直後から7日間燃料を消費するものとして評価する。

時系列	合計	判定
非常用ディーゼル発電機 2台起動 ^{※1} (燃料消費率は保守的に最大負荷(定格出力運転)時を想定) $1.618\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 2\text{台} = 543.648\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 700m^3	非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等の容量は約 730m^3 であり、7日間対応可能
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 1台起動 (燃料消費率は保守的に最大負荷(定格出力運転)時を想定) $0.927\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 155.736\text{m}^3$		
緊急時対策所用発電機 1台 (燃料消費率は保守的に最大負荷(定格出力運転)時を想定) $0.0469\text{ m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 7\text{日} \times 1\text{台} = 7.8792\text{m}^3$	7日間の 軽油消費量 約 8m^3	緊急時対策所用燃料地下タンクの容量は約 45m^3 であり、7日間対応可能

※1 事故収束に必要な非常用ディーゼル発電機は1台であるが、保守的に非常用ディーゼル発電機2台を起動させて評価した。

5.4 反応度の誤投入

5.4.1 事故シーケンスグループの特徴、燃料損傷防止対策

(1) 事故シーケンスグループ内の事故シーケンス

事故シーケンスグループ「反応度の誤投入」に含まれる事故シーケンスは、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、「反応度の誤投入」である。

(2) 事故シーケンスグループの特徴及び燃料損傷防止対策の基本的考え方

事故シーケンスグループ「反応度の誤投入」では、原子炉の運転停止中に制御棒の誤引き抜き等によって、燃料に反応度が投入されることを想定する。このため、緩和措置がとられない場合には、原子炉は臨界に達し、急激な反応度投入に伴う出力上昇により燃料損傷に至る。

本事故シーケンスグループは、臨界又は臨界近傍の炉心において反応度の誤投入により、原子炉出力が上昇することによって、燃料損傷に至る事故シーケンスグループである。このため、運転停止中の原子炉における燃料損傷防止対策の有効性評価には、原子炉保護機能及び原子炉停止機能に対する設備に期待することが考えられる。

したがって、本事故シーケンスグループでは、異常な反応度の投入に対してスクラムによる負の反応度の投入により、未臨界を確保し、燃料損傷の防止を図る。

(添付資料 5.4.1)

(3) 燃料損傷防止対策

事故シーケンスグループ「反応度の誤投入」に対して、燃料が著しい損傷に至ることなく、かつ、十分な冷却を可能とするため、原子炉停止機能により原子炉をスクラムし、未臨界とする。手順の概要を第 5.4.1-1 図に示すとともに、重大事故等対策の概要を以下に示す。また、重大事故等対策における設備と操作手順の関係を第 5.4.1-1 表に示す。

本事故シーケンスにおいては、重大事故等対策はすべて自動で作動するため、対応に必要な要員は不要である。

なお、スクラム動作後の原子炉の状態確認において、中央制御室の運転員 1 名で実施可能である。

a. 誤操作による反応度誤投入

運転停止中に制御棒の誤引き抜き等によって、燃料に反応度が投入される。

制御棒の誤引き抜き等による反応度の誤投入を確認するために必要な計装設備は、中性子源領域計装等である。

b. 反応度誤投入後のスクラム

制御棒の誤操作による反応度の投入により、中間領域計装の中性子束高信号（各レンジフルスケールの 95%）が発信し、原子炉はスクラムする。制御棒が全挿入し、原子炉は未臨界状態となる。

原子炉のスクラムを確認するために必要な計装設備は、中性子源領域計装等である。

5.4.2 燃料損傷防止対策の有効性評価

(1) 有効性評価の方法

本事故シーケンスグループを評価するうえで選定した重要事故シーケンスは、「1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定」に示すとおり、「停止中に実施される検査等により、最大反応度価値を有する制御棒1本が全引き抜きされている状態から、他の1本の制御棒が操作量の制限を超える誤った操作によって引き抜かれ、異常な反応度の投入を認知できずに燃料の損傷に至る事故」である。運転停止中の原子炉においては、不用意な臨界の発生を防止するため、停止余裕(最大反応度価値を有する1本の制御棒が引き抜かれても炉心を未臨界に維持できること)を確保できるように燃料を配置するとともに、通常は原子炉モードスイッチを燃料交換位置として、1本を超える制御棒の引き抜きを防止するインターロックを維持した状態で必要な制御棒の操作が実施される。

しかしながら、運転停止中の原子炉においても、検査等の実施に伴い原子炉モードスイッチを起動位置として複数の制御棒の引き抜きを実施する場合がある。このような場合、制御棒の引き抜きは原則としてノッチ操作とし、中性子束の監視を行いながら実施している。

本重要事故シーケンスでは、誤操作によって制御棒の引き抜きが行われることにより異常な反応度が投入されるため、炉心における核分裂出力、出力分布変化、反応度フィードバック効果、制御棒反応度効果、燃料棒内温度変化、燃料棒表面熱伝達及び沸騰遷移が重要現象となる。

よって、この現象を適切に評価することが可能である反応度投入事象解析コードAPEX及び単チャンネル熱水解析コードSCAT(RIA用)により炉心平均中性子束及び燃料エンタルピの過渡応答を求める。

また、解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、本重要事故シーケンスにおける評価項目となるパラメータに与える影響を評価する。

さらに、解析コード及び解析条件の不確かさのうち、評価項目となるパラメータに与える影響があるものについては、「5.4.3(3) 感度解析」において、それらの不確かさを考慮した影響評価を実施する。

(2) 有効性評価の条件

本重要事故シーケンスに対する初期条件も含めた主要な解析条件を第5.4.2-1表に示す。また、主要な解析条件について、本重要事故シーケンス特有の解析条件を以下に示す。

a. 初期条件

(a) 炉心状態

燃料交換後における余剰反応度の大きな炉心での事象発生を想定して、評価する炉心状態は、平衡炉心のサイクル初期とする。

(b) 実効増倍率

事象発生前の炉心の実効増倍率は1.0とする。

(c) 原子炉出力、原子炉圧力、燃料被覆管表面温度及び原子炉冷却材温度

事象発生前の原子炉出力は定格値の 10^{-8} 、原子炉圧力は0.0MPa[gage]、燃料被覆管表面温度及び原子炉冷却材温度は20℃とする。また、燃料エンタルピの初期値は8kJ/kgとする。

b. 事故条件

(a) 起因事象

起因事象として、運転停止中の原子炉において、制御棒1本が全引き抜きされている状態から、他の1本の制御棒が操作量の制限を超える誤った操作によって連続的に引き抜かれる事象を想定する。

(b) 誤引き抜きされる制御棒

誤引き抜きされる制御棒は、投入される反応度を厳しく評価するため、最大反応度価値を有する制御棒の斜め隣接^{※1}の制御棒とする。誤引き抜きされる制御棒1本の反応度価値は約1.75% Δk ^{※2}である。引抜制御棒反応度曲線^{※2}を第5.4.2-1図に示す。

※1 制御棒密度の偏りが少なくなるよう市松模様の引抜パターンを作成し、高い制御棒価値を生じる引抜パターンとならないようにしている。

※2 三次元沸騰水型原子炉模擬計算コード（LOGOS）による解析結果

なお、通常、制御棒1本が全引き抜きされている状態の未臨界度は深く、また、仮に他の1本の制御棒が操作量の制限を超えた場合でも、臨界近接で引き抜かれる制御棒の反応度価値が核的制限値を超えないように管理^{※3}している。これらを踏まえ、本評価においては、誤引き抜きされる制御棒の反応度価値が、管理値を超える事象を想定した。

※3 原子炉起動時及び停止時冷温臨界試験は、臨界近接時における制御棒の最大反応度価値が1.0% Δk 以下となるように管理。また、制御棒価値ミニマイザ又は複数の運転員による制御棒の引抜手順の監視を実施。なお、原子炉停止余裕検査においても同様の監視を実施。

(c) 外部電源

制御棒の引抜操作には外部電源が必要となる。外部電源が失われた状態では反応度誤投入事象が想定できないことも踏まえ、外部電源は使用できるものとする。

c. 重大事故等対策に関連する機器条件

(a) 制御棒の引抜速度

制御棒は、引抜速度の上限値9.1 cm/sにて連続で引き抜かれるものとする^{※4}。引抜制御棒反応度曲線を第5.4.2-1図に示す。

※4 複数の制御棒を引き抜く試験において、対象制御棒の連続引き抜きの実施が可能な手順としている場合を除き、引抜操作はノッチ操作としている。そのため、ここでは人的過誤等によって連続引き抜きされることを想定する。

(b) 原子炉スクラム信号

中間領域計装の中性子束高（各レンジフルスケールの95%）信号で原子炉はスクラムするものとする。スクラム反応度曲線を第5.4.2-2図に示す。なお、原子炉スクラム信号の発信を想定する際の中間領域計装のバイパス状態は、A、Bチャンネルとも引抜制御棒に最も近い検出器が1個ずつバイパス状態にあるとする。

- d. 重大事故等対策に関連する操作条件
運転員等操作に関する条件はない。

(3) 有効性評価の結果

本重要事故シーケンスにおける燃料エンタルピ及び炉心平均中性子束の推移を第5.4.2-3図に示す。

a. 事象進展

制御棒の引抜開始から約10秒後に中間領域計装の中性子束高スクラム信号（各レンジフルスケールの95%）が発信し、原子炉はスクラムする。

このとき、投入される反応度は約1.14ドル（投入反応度最大値：約0.69% Δk ）であるが、原子炉出力は第5.4.2-3図に示すとおり、定格出力の約12.2%まで上昇するにとどまる。

また、燃料エンタルピは最大で約50kJ/kgであり、「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針」に示されている燃料棒の内圧と原子炉冷却材圧力の差に応じた許容設計限界のうち最も厳しいしきい値である272kJ/kg（65cal/g）を超えることはない。燃料エンタルピの増分の最大値は約42kJ/kgであり、「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象における燃焼の進んだ燃料の取扱いについて」に示された燃料ペレット燃焼度65,000MWd/t以上の燃料に対するペレット-被覆管機械的相互作用を原因とする破損を生じるしきい値の目安である、ピーク出力部燃料エンタルピの増分で167kJ/kg（40cal/g）を用いた場合においても、これを超えることはなく燃料の健全性は維持される。

b. 評価項目等

制御棒の引き抜きによる反応度の投入に伴い一時的に臨界に至るものの、原子炉スクラムにより未臨界は確保される。なお、原子炉水位に有意な変動はないため、燃料棒有効長頂部は冠水を維持しており、放射線の遮蔽は維持される。

本評価では、「1.2.4.2 有効性を確認するための評価項目の設定」に示す(1)から(3)の評価項目について、対策の有効性を確認した。

(添付資料5.4.2)

5.4.3 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価

解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を評価するものとする。

本重要事故シーケンスは、自動作動する原子炉保護系により、原子炉をスクラムすることで、プラントを安定状態に導くことが特徴である。このため、運転員等操作はなく、操作時間が与える影響等は不要である。

(1) 解析コードにおける重要現象の不確かさの影響評価

本重要事故シーケンスにおいて不確かさの影響評価を行う重要現象とは、「1.7 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価方針」に示すとおりであり、それらの不確かさの影響評価は以下のとおりである。

a. 運転員等操作時間に与える影響

本重要事故シーケンスは、「5.4.2(2) 有効性評価の条件」に示すとおり、運転員等操作には期待しないことから、運転員等操作時間に与える影響はない。

b. 評価項目となるパラメータに与える影響

ドップラ反応度フィードバックの不確かさとして、実験により解析コードは7～9%と評価されていることから、これを踏まえ解析を行う必要がある。また、臨界試験との比較により、実効遅発中性子割合の不確かさは約4%と評価されていることから、これを踏まえて解析を行う必要がある。この不確かさを考慮した感度解析を「(3) 感度解析」にて実施する。

制御棒反応度の不確かさは約9%と評価されていることから、これを踏まえ解析を行う必要がある。また、臨界試験との比較により、実効遅発中性子割合の不確かさは約4%と評価されていることから、これを踏まえて解析を行う必要がある。この不確かさを考慮した感度解析を「(3) 感度解析」にて実施する。

(添付資料5.4.3)

(2) 解析条件の不確かさの影響評価

a. 初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件

初期条件、事故条件及び重大事故等対策に関連する機器条件は、第5.4.2-1表に示すとおりであり、それらの条件設定を設計値等、最確条件とした場合の影響を確認する。また、解析条件の設定に当たっては、評価項目に対する余裕が小さくなるような設定があることから、その中で事象進展に有意な影響を与えると考えられる項目に関する影響の結果を以下に示す。

(a) 運転員等操作時間に与える影響

本重要事故シーケンスは、「5.4.2(2) 有効性評価の条件」に示すとおり、運転員等操作には期待しないため、運転員等操作時間に与える影響はない。

(b) 評価項目となるパラメータに与える影響

炉心状態においては装荷炉心ごとに制御棒反応度価値やスクラム反応度等の特性が変化するため、投入反応度が大きくなるおそれがある。そのため、評価項目に対する余裕は小さくなるが、「(5) 解析条件の不確かさが評価項目となるパラメータに与える影響評価」にて、投入される反応度について確認している。

実効増倍率が0.99の場合は、制御棒引抜開始直後は反応度が投入されず、臨界到達までにかかる時間が追加で必要となり、炉心平均中性子束及び燃料エンタルピが上昇するタイミングが遅くなる。また投入される反応度も約1.00ドル(燃料エンタルピ最大値:約14kJ/kg, 燃料エンタルピの増分の最大値:約6kJ/kg)と小さく1ドル位置近傍における反応度印加率も緩やかとなることから、燃料エンタルピの上昇率も小さく評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。

初期出力は炉心状態ごとに異なり、評価項目となるパラメータに影響を与えるため、その不確かさが与える影響を評価した。初期出力の不確かさにより評価項目に対する余裕が変化するが、「(5) 解析条件の不確かさが

評価項目となるパラメータに与える影響評価」において、初期出力の不確かさの影響を確認している。

初期燃料温度は炉心状態ごとに異なり、評価項目となるパラメータに影響を与えるため、その不確かさが与える影響を評価した。初期燃料温度の不確かさにより評価項目に対する余裕が変化するが、「(5) 解析条件の不確かさが評価項目となるパラメータに与える影響評価」において、初期燃料温度の不確かさの影響を確認している。

制御棒引抜阻止は、本評価において期待していないが、これに期待した場合、中間領域計装の中性子束高信号（各レンジフルスケールの90%）が発信すると制御棒引き抜きが阻止される。ただし、本評価では制御棒の誤引き抜きにより反応度が急激に投入されるため、中間領域計装の中性子束高信号（各レンジフルスケールの90%）による制御棒引抜阻止信号と中性子束高信号（各レンジフルスケールの95%）による原子炉スクラム信号がほぼ同時に発信することから、制御棒引抜阻止に期待した場合でも評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

b. 操作条件

本重要事故シーケンスは、「5.4.2(2) 有効性評価の条件」に示すとおり、運転員等操作には期待しないため、運転員等操作に関する条件はない。

(添付資料5.4.3)

(3) 感度解析

解析コードの不確かさによりドップラ反応度フィードバック効果と制御棒反応度効果は評価項目となるパラメータに影響を与えることから本重要事故シーケンスにおいて感度解析を行う。

ドップラ反応度を+10%とした場合に投入される反応度は約 1.14 ドル（燃料エンタルピの最大値は約 48kJ/kg, 増分の最大値は約 40kJ/kg）, -10%とした場合に投入される反応度は約 1.14 ドル（燃料エンタルピの最大値は約 52kJ/kg, 増分の最大値は約 44kJ/kg）である。

スクラム反応度を+10%とした場合に投入される反応度は約 1.14 ドル（燃料エンタルピの最大値は約 48kJ/kg, 増分の最大値は約 40kJ/kg）, -10%とした場合に投入される反応度は約 1.14 ドル（燃料エンタルピの最大値は約 53kJ/kg, 増分の最大値は約 45kJ/kg）である。

引抜制御棒反応度を+10%とした場合に投入される反応度は約 1.16 ドル（燃料エンタルピの最大値は約 63kJ/kg, 増分の最大値は約 55kJ/kg）, -10%とした場合に投入される反応度は約 1.12 ドル（燃料エンタルピの最大値は約 39kJ/kg, 増分の最大値は約 31kJ/kg）である。

実効遅発中性子割合を+10%とした場合に投入される反応度は約 1.11 ドル（燃料エンタルピの最大値は約 45kJ/kg, 増分の最大値は約 37kJ/kg）, -10%と投入される反応度は約 1.17 ドル（燃料エンタルピの最大値は約 56kJ/kg, 増分の最大値は約 48kJ/kg）である。

以上より、これらの不確かさを考慮しても燃料エンタルピ増加に伴う燃料の破損は生じないことから、評価項目を満足する。

(添付資料5.4.3)

(4) 操作時間余裕の把握

本重要事故シーケンスは、「5.4.2(2) 有効性評価の条件」に示すとおり、運転員等操作には期待しないことから、操作時間余裕に関する影響はない。

(5) 解析条件の不確かさが評価項目となるパラメータに与える影響評価

解析条件の不確かさにより投入される反応度が大きくなることも考えられ、評価項目となるパラメータに影響を与えることから、炉心状態の変動による評価項目となるパラメータに与える影響について確認した。

以下の保守的な想定をした評価においても、投入される反応度は約 1.21 ドル（燃料エンタルピーの最大値は約 68kJ/kg, 増分の最大値は約 60kJ/kg）にとどまることから、不確かさが評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

・サイクル初期及びサイクル末期の炉心状態において、9×9燃料（B型）平衡炉心、9×9燃料（A型）及びMOX燃料 228体を装荷した平衡炉心、9×9燃料（B型）及びMOX燃料 228体を装荷した平衡炉心の反応度印加率を包絡する引抜制御棒反応度曲線を用いた場合

初期出力は炉心状態ごとに異なり、評価項目となるパラメータに影響を与えるため、その不確かさが与える影響を評価した。定格の 10^{-8} の10倍及び1/10倍とした場合の感度解析を行い、有効性評価での結果（投入される反応度は約 1.14 ドル、燃料エンタルピーの最大値は約 50kJ/kg, 増分の最大値は約 42kJ/kg）と大きく差異がなく、投入される反応度は約 1.11 ドル、燃料エンタルピーの最大値は約 33kJ/kg, 増分の最大値は約 25kJ/kg（10倍）及び投入される反応度は約 1.16 ドル、燃料エンタルピーの最大値は約 69kJ/kg, 増分の最大値は約 61kJ/kg（1/10倍）であることから、初期出力の不確かさが与える影響は小さい。

初期燃料温度は炉心状態ごとに異なり、評価項目となるパラメータに影響を与えるため、その不確かさが与える影響を評価した。初期燃料温度を 60°Cとした場合の感度解析を実施し、有効性評価での結果（投入される反応度は約 1.14 ドル、燃料エンタルピーの最大値は約 50kJ/kg, 増分の最大値は約 42kJ/kg）と大きく差異がなく、投入される反応度は約 1.15 ドル、燃料エンタルピーの最大値は約 64kJ/kg, 増分の最大値は約 49kJ/kgであることから、初期燃料温度の不確かさが与える影響は小さい。

（添付資料5.4.3, 5.4.4）

(6) まとめ

解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価の範囲として、運転員等操作時間に与える影響、評価項目となるパラメータに与える影響及び操作時間余裕を確認した。その結果、解析条件の不確かさが評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

5.4.4 必要な要員及び資源の評価

(1) 必要な要員の評価

事故シーケンスグループ「反応度の誤投入」において、重大事故等対策は自動で作動するため、対応に必要な要員はいない。

(2) 必要な資源の評価

事故シーケンスグループ「反応度の誤投入」において、必要な水源、燃料及び電源の評価結果は以下のとおりである。

a. 水源

本重要事故シーケンスの評価では、原子炉注水は想定していない。

b. 燃料

本重要事故シーケンスの評価では、燃料の使用は想定していない。

c. 電源

本重要事故シーケンスの評価では、外部電源喪失は想定していない。

5.4.5 結論

事故シーケンスグループ「反応度の誤投入」では、誤操作により過剰な制御棒の引き抜きが行われ、臨界に至る反応度が投入されることで、原子炉が臨界に達し燃料損傷に至ることが特徴である。事故シーケンスグループ「反応度の誤投入」に対する燃料損傷防止対策としては、原子炉停止機能を整備している。

事故シーケンスグループ「反応度の誤投入」の重要事故シーケンス「停止中に実施される検査等により、最大反応度値を有する制御棒1本が全引き抜きされている状態から、他の1本の制御棒が操作量の制限を超える誤った操作によって引き抜かれ、異常な反応度の投入を認知できずに燃料の損傷に至る事故」について有効性評価を行った。

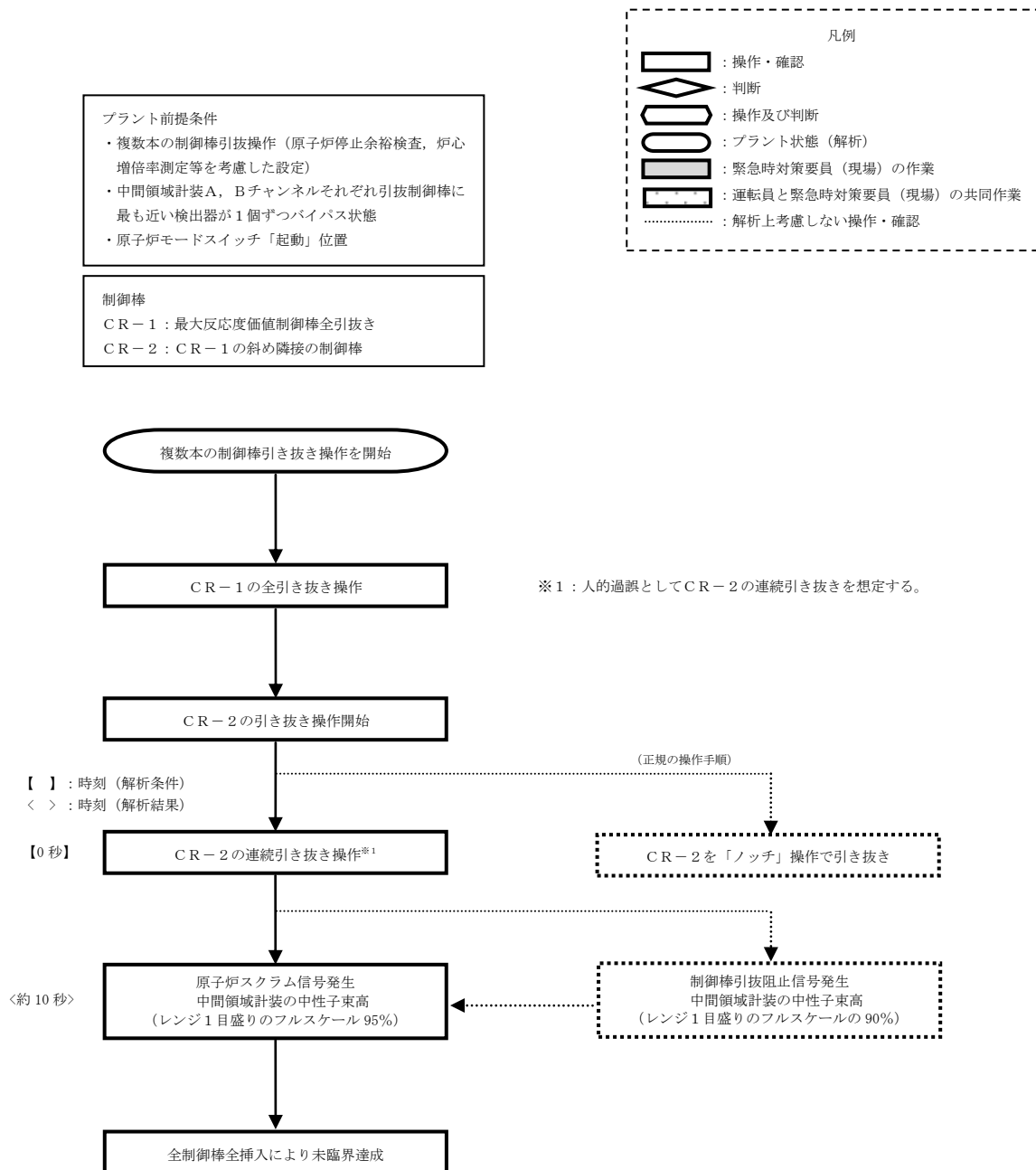
上記の場合においても、原子炉停止機能により、燃料が損傷することはなく、未臨界を維持することが可能である。

その結果、燃料棒有効長頂部の冠水、放射線遮蔽の維持及び未臨界の確保ができることから、評価項目を満足している。また、安定状態を維持できる。

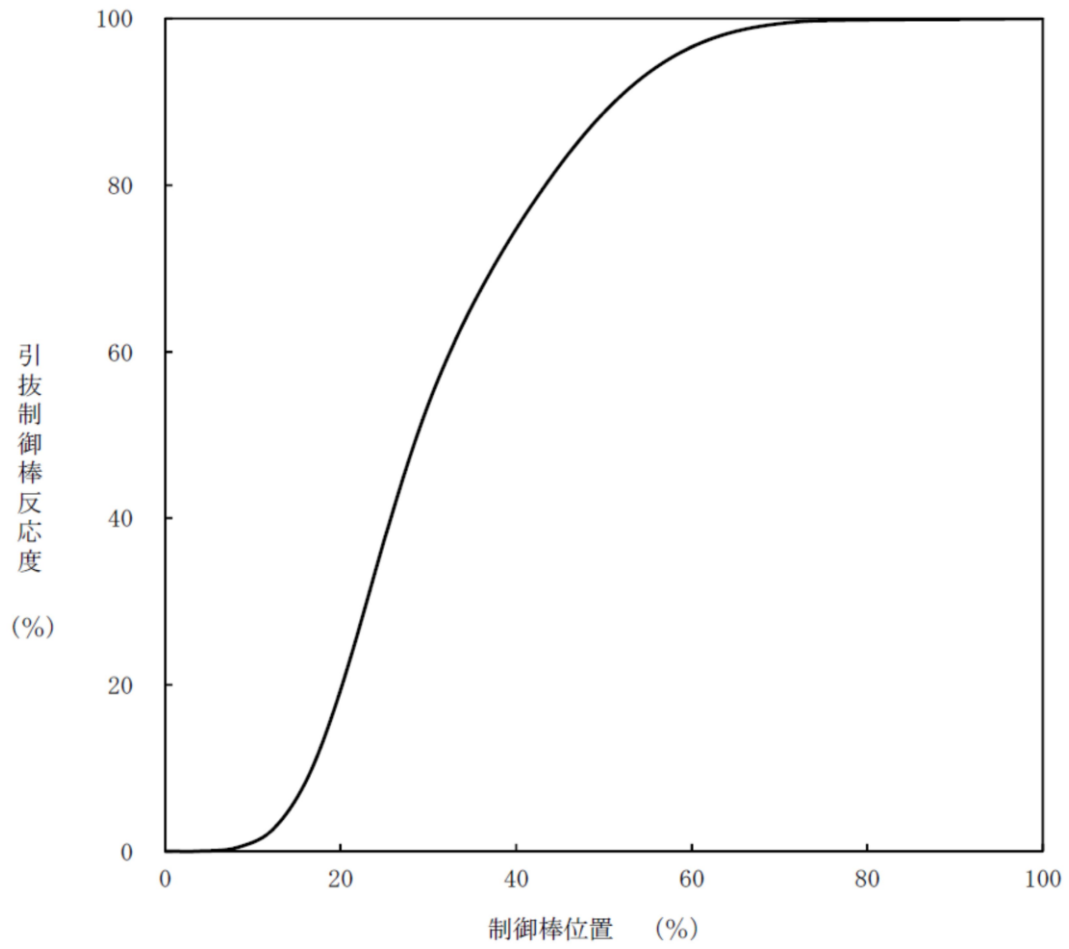
解析条件の不確かさについて確認した結果、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

本事故シーケンスグループにおける島根原子力発電所2号炉の重大事故等対策は自動で作動するため、対応に必要な要員はいない。スクラム動作後の原子炉の状態確認において、中央制御室の運転員1名で実施可能である。

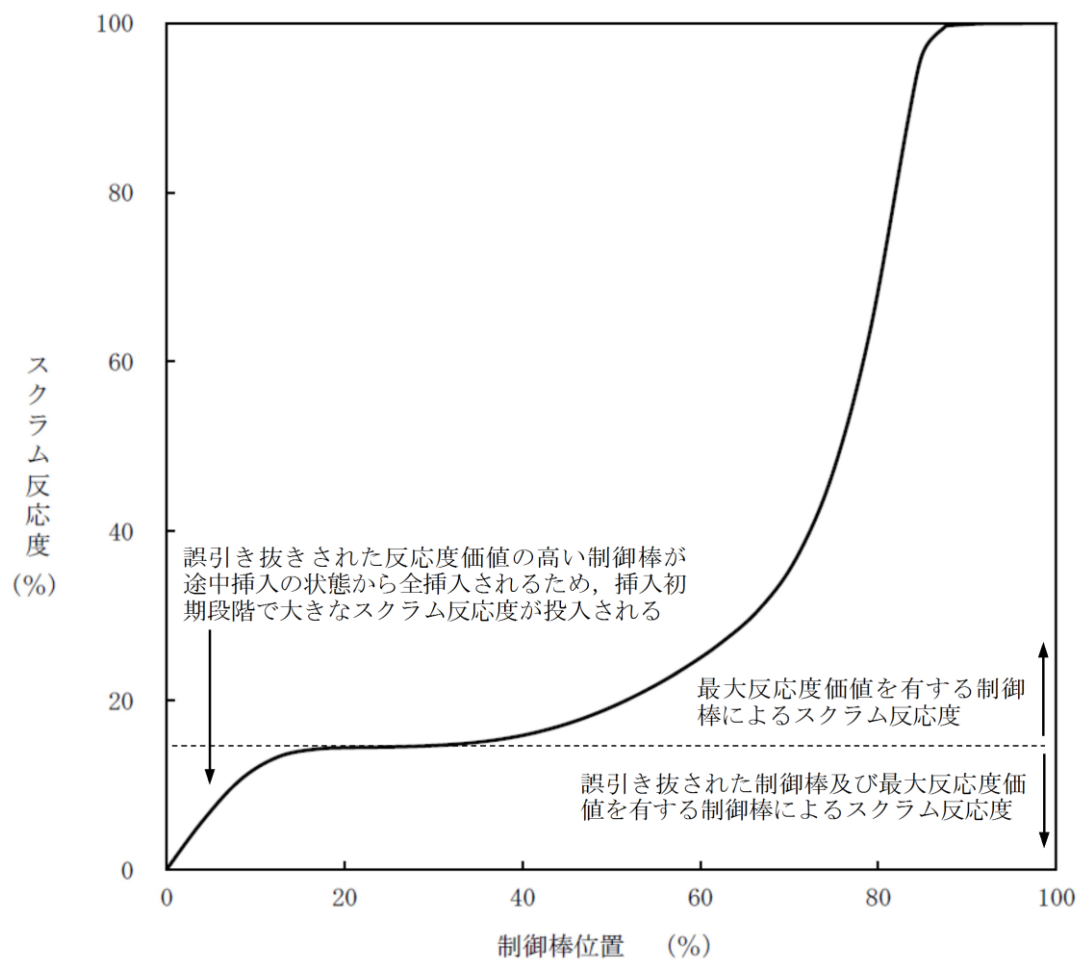
以上のことから、原子炉停止機能の燃料損傷防止対策は、選定した重要事故シーケンスに対して有効であることが確認でき、事故シーケンスグループ「反応度の誤投入」に対して有効である。



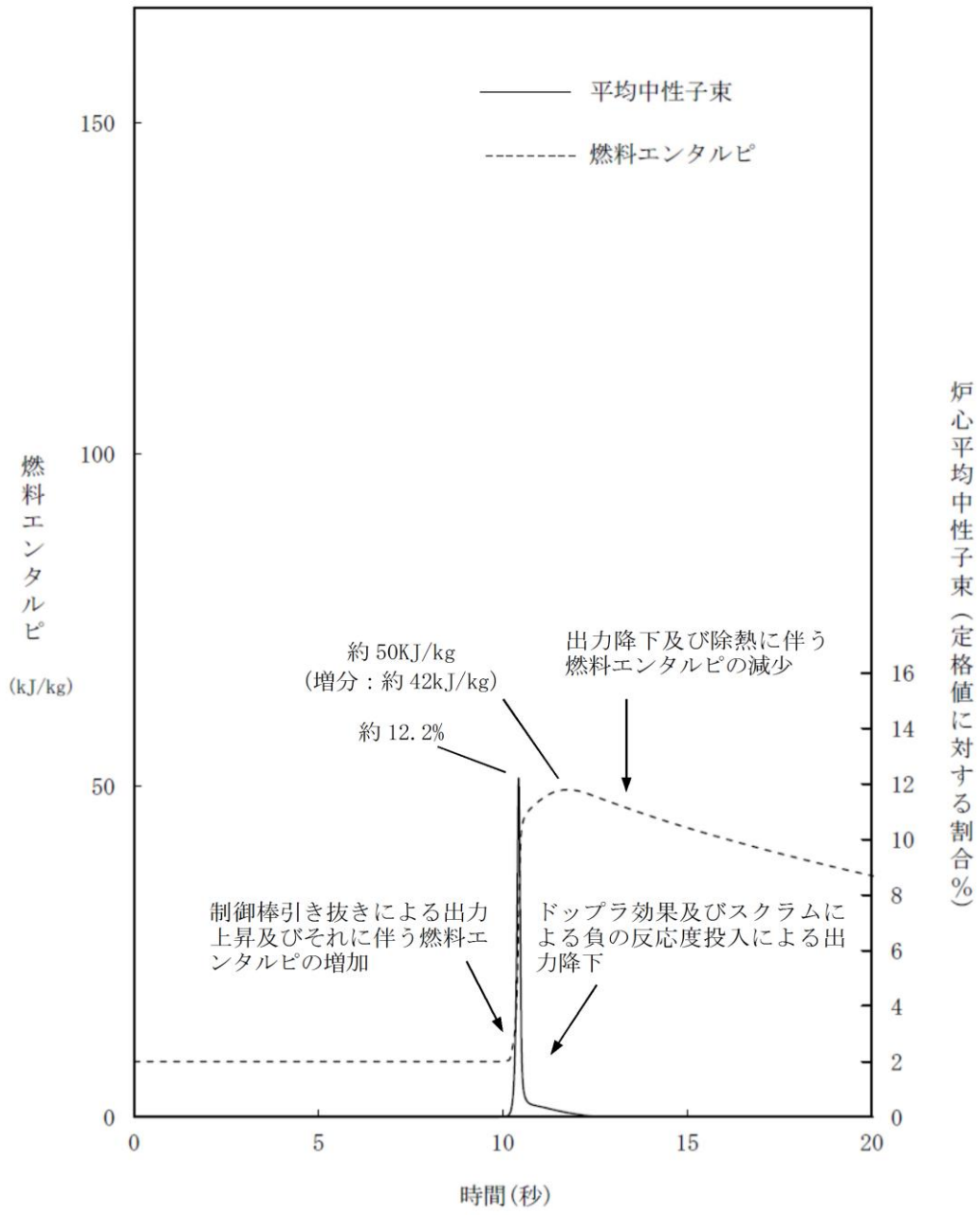
第 5.4.1-1 図 「反応度の誤投入」の対応手順の概要



第 5. 4. 2-1 図 反応度の誤投入における引抜制御棒反応度曲線



第 5.4.2-2 図 反応度の誤投入におけるスクラム反応度曲線



第 5.4.2-3 図 反応度の誤投入における推移

第5.4.1-1表 「反応度の誤投入」の重大事故等対策について

判断及び操作	手順	重大事故等対処設備	
		常設設備	可搬型設備
誤操作による反応度誤投入	運転停止中に制御棒の誤引き抜き等によって、燃料に反応度が投入されることにより、臨界に達する。	—	—
反応度誤投入後のスクラム確認	制御棒の誤操作による反応度の投入により、中間領域計装の中性子束高信号が発生し、原子炉はスクラムする。制御棒が全挿入し、原子炉は未臨界状態となる。	—	—

※：既許可の対象となっている設備を重大事故等対処設備に位置付けるもの
 【 】：重大事故等対処設備（設計基準拡張）

第5.4.2-1表 主要解析条件 (運転停止中の反応度の誤投入) (1/2)

項目	主要解析条件	条件設定の考え方
解析コード	APEX/ SCAT(RIA用)	—
炉心状態	9×9燃料(A型)(単一炉心) 平衡炉心のサイクル初期	9×9燃料(A型)平衡炉心, 9×9燃料(B型)平衡炉心, 9×9燃料(A型)及びMOX燃料228体を装荷した平衡炉心, 9×9燃料(B型)及びMOX燃料228体を装荷した平衡炉心は, 特性はほぼ同等であることから, 9×9燃料(A型)を代表的な炉心として設定 燃料交換後の余剰反応度の大きな炉心を想定
実効増倍率	1.0	原子炉は臨界状態にあるものとして設定
原子炉出力	定格出力の 10^{-8}	原子炉が低温状態であることを想定して設定
原子炉圧力	0.0MPa[gage]	原子炉停止時の圧力を想定
燃料被覆管表面温度及び 原子炉冷却材温度	20℃	原子炉冷却材温度の下限値として運用している値であり, 反応度の観点からは保守的な値として設定
燃料エンタルピ	8kJ/kg	原子炉冷却材温度20℃における燃料エンタルピを想定
起因事象	制御棒の誤引き抜き	運転停止中の原子炉において, 制御棒1本が全引き抜きされている状態から, 他の1本の制御棒が操作量の制限を超える誤った操作によって連続的に引き抜かれる事象を想定する
誤引き抜きされる制御棒	最大反応度価値を有する制御棒の斜め隣接の制御棒	運転停止中に実施する複数の制御棒引き抜きを伴う検査等を考慮し, 全引き抜きされている制御棒の斜め隣接 ^{※1} の制御棒とする。誤引き抜きされる制御棒1本の反応度価値は約 $1.75\% \Delta k^{*2}$ とする なお, 通常, 制御棒1本が全引き抜きされている状態の未臨界度は深く, また, 仮に他の1本の制御棒が操作量の制限を超えないよう管理 ^{※3} している。これらを踏まえ, 制御棒の反応度価値が核的制限値を超えるような管理 ^{※3} している。これらを踏まえ, 本評価においては, 誤引き抜きされる制御棒の反応度価値が, 管理値を超える事象を想定
外部電源	外部電源あり	制御棒引抜操作には外部電源が必要となるため, 外部電源ありを設定

※1 制御棒密度の偏りが少なくなるよう市松模様の引抜パターンを作成し, 高い制御棒価値を生じる引抜パターンとならないようにしている。

※2 二次元沸騰水型原子炉模擬計算コード(LOGOS)による解析結果

※3 臨界近接時における制御棒の最大反応度価値は $1.0\% \Delta k$ 以下であること

第5.4.2-1表 主要解析条件 (運転停止中の反応度の誤投入) (2/2)

項目	主要解析条件	条件設定の考え方
制御棒引抜速度	9.1 cm/s	制御棒引抜速度の上限値を設定
中間領域計装バイパス状態	A, Bチャンネルそれぞれ1個	A, Bチャンネルともに引抜制御棒に最も近い検出器が1個ずつバイパス状態にあるとする
制御棒引抜阻止信号	期待しない	制御棒の引き抜きが制限されないことにより, 制御棒の誤操作の量が増加するものとして設定
原子炉スクラム信号	中性子束高 (中間領域計装)	中間領域計装の原子炉スクラム機能により設定※

重大事故等対策に関連する機器条件

※ 複数の制御棒引き抜きを伴う検査を実施する際において, 当直長らが最初の制御棒引抜開始前に原子炉保護系計装が動作不能でないこと (指示値の異常有無確認, 定期事業者検査安全保護系設定値確認試験 (核計装) 等), 制御棒のスクラムアキムレータの圧力等を確認することで, 必要な安全保護系が正常に動作することを確認する運用となっている。そのため, 本現象においてもスクラム信号の機能に期待できる。

反応度の誤投入事象の代表性について

有効性評価では反応度の誤投入事象として、「停止中に実施される検査等により、最大反応度価値を有する制御棒 1 本が全引き抜きされている状態から、他の 1 本の制御棒が操作量の制限を超える誤った操作によって引き抜かれ、異常な反応度の投入を認知できずに燃料の損傷に至る事故」を想定している。これは、運転停止中に実施する停止時冷温臨界試験や原子炉停止余裕検査を考慮した想定であり、その試験の制御棒誤引抜き事象の代表性について以下に示す。

1. 運転停止中において、制御棒を複数引き抜く試験

運転停止中の通常の原子炉においては、停止余裕（最大反応度価値を有する 1 本の制御棒が引き抜かれても炉心を未臨界に維持できること）を確保した燃料配置に加え、原子炉モードスイッチを「燃料交換」位置にすることで複数の制御棒の引き抜きを阻止するインターロックを維持し、不用意な臨界の発生を防止している。しかし、「原子炉停止余裕検査」と「停止時冷温臨界試験」の実施時においては、原子炉モードスイッチを「起動」位置として複数の制御棒の引き抜きを実施する。そのため、これらの試験中に人的過誤が発生すると、想定を超える反応度が投入される可能性がある。

それぞれの試験の概要や対象となる制御棒等は以下のとおり。

a. 停止時冷温臨界試験

試験の目的：臨界予測精度の維持・向上のためのデータベースの蓄積

試験内容：原子炉の起動前及び停止後に冷温状態で実施する（いずれも原子炉圧力容器は未開放）。あらかじめ定めた制御棒操作手順に則り、順番に対象となる制御棒引き抜きを実施し、臨界状態確認後に、制御棒パターン、原子炉冷却材温度、ペリオド等のデータを採取する。なお、臨界近傍での制御棒の引き抜きに際しては、1 ノッチ引き抜きごとに試験担当者で未臨界を確認している。

対象制御棒：評価ケースにより異なる。臨界状態が確認されるまで、複数本の制御棒の引き抜きを実施。臨界近傍で引き抜く制御棒の価値は小さいものを取り扱う。

事故防止対策：制御棒価値ミニマイザによる監視（又は制御棒を操作する運転員以外の運転員による監視）

b. 原子炉停止余裕検査

試験の目的：停止余裕（最大反応度値を有する1本の制御棒が引き抜かれても炉心を未臨界に維持できること）の確認

試験内容：燃料取替及び燃料集合体炉内配置検査の完了後、以下の手順で実施する。

①最大値を有する制御棒（CR-1）の全引き抜き

②最大値を有する制御棒（CR-1）を補正位置 N^{*1} まで挿入

※1 最大反応度値を有する制御棒（CR-1）の対角隣接の制御棒（CR-2）について停止余裕の確認に必要な引抜き位置

③最大値を有する制御棒（CR-1）の斜め隣接の制御棒（CR-2）を補正位置 N まで引き抜き

④最大値を有する制御棒（CR-1）を再度全引き抜き

この状態の炉心が未臨界であることを確認する。なお、制御棒の引き抜きに際しては、1ノッチ引き抜きごとに検査担当者で未臨界を確認している。

対象制御棒：最大値を有する制御棒の斜め隣接の制御棒1本

最大値を有する制御棒の斜め隣接の制御棒のうち反応度の補正に必要な値を有して印加反応度が大きすぎないように選択

事故防止対策：制御棒を操作する運転員以外の運転員による監視

2. 想定する人的過誤

想定を超えた反応度が投入されるおそれのある人的過誤として下記の「燃料の誤装荷」、「制御棒の選択誤り」及び「制御棒の連続引き抜き」について検討した。

2-1. 単一の人的過誤

a. 燃料の誤装荷

燃料の誤装荷は、誤配置や燃料・制御棒の装荷順序の誤りにより、想定以上の反応度が投入されることが考えられる。これらは燃料交換が燃料取替機により自動で装荷位置まで移動され、かつ作業員による配置の確認が実施されている。このため、本事象が発生しても適切に認知がされるため、反応度の連続投入及び急激な反応度の投入は考えられない。

b. 制御棒の選択誤り

操作する制御棒の選択を誤るとその反応度値は変化する。停止時冷温臨界試験や原子炉停止余裕検査では事前に対象となる制御棒の値が臨界近傍で大きくならないよう評価により対象を選定しており、その制御棒パターンは制御棒値ミニマイザ又は運転員及び運転操作助勢者により監視されているため、これらのパターンを外れた制御棒が選択されることは考

えづらい。また、選択誤りが発生した場合においても臨界付近での制御棒引抜操作は1ノッチずつであるため、反応度の急激な投入は考えられない。

c. 制御棒の連続引き抜き

運転員及び検査員による制御棒及び中性子源領域計装の確認を実施しており、人的過誤発生時も認知が容易である。しかし、これらの認知は運転員及び運転操作助勢者並びに検査員に期待しているため、有効性評価ではこれらの認知に期待せず、制御棒が連続引き抜きされることを想定する。

2-2. 人的過誤の重畳

人的過誤として抽出した「a. 燃料の誤装荷」、「b. 制御棒の選択誤り」及び「c. 制御棒の連続引き抜き」の重畳事象の発生について検討した。反応度の投入速度等の理由^{※2}から、検討すべき人的過誤の重畳は「b. 制御棒の選択誤り」＋「c. 制御棒の連続引き抜き」のみであると考えられる。したがって、以下に「b. 制御棒の選択誤り」＋「c. 制御棒の連続引き抜き」の評価を示す。

評価の結果、人的過誤の重畳は発生の可能性が低く、また発生した場合であっても必ず臨界に至るとは限らず、即発臨界に至るような事象はさらに起こりにくいと考えられることから、有効性評価では単一の人的過誤である「c. 制御棒の連続引き抜き」について検討する。

※2 「c. 制御棒の連続引き抜き」を含まない人的過誤が重畳した場合は、制御棒が反応度の投入速度が遅く、即発臨界に至らない。また、「a. 燃料の誤装荷」については燃料取替機により機械的に自動で選択されるため、運転員等の作業時の誤りにより間違った配置になることはなく、またデータの入力についても複数の担当者による確認を多重に実施していること、及び燃料集合体炉内配置検査を実施していることから、誤装荷単一の過誤の発生確率でも十分低いと考えられ、他の過誤との重畳事象は考慮不要であると考えられる。

・「b. 制御棒の選択誤り」＋「c. 制御棒の連続引き抜き」の重畳

人的過誤の重畳を考慮すべき試験は「1. 運転停止中において、制御棒を複数引き抜く試験」に示すとおり、原子炉停止余裕検査及び停止時冷温臨界試験である。通常、停止時冷温臨界試験では機械的に制御棒の選択の誤りを防止している^{※3}。したがって、この機能を使用している場合は、人的過誤による制御棒の選択の誤りは発生しないため、人的過誤の重畳の考慮は不要である。しかし、これらの機能に期待しない場合であっても、操作する運転員以外の運転員が1名以上監視にあたることで試験の実施が許容されている(試験の手順書)ため、制御棒価値ミニマイザ等の機械的な誤操作の防止機能に期待しない状況で発生する人的過誤の確率について検討した。

図1に「c. 制御棒の連続引き抜き」、図2に「b. 制御棒の選択誤り」＋「c. 制御棒の連続引き抜き」の重畳(人的過誤に従属性を考えた場合)におけるH

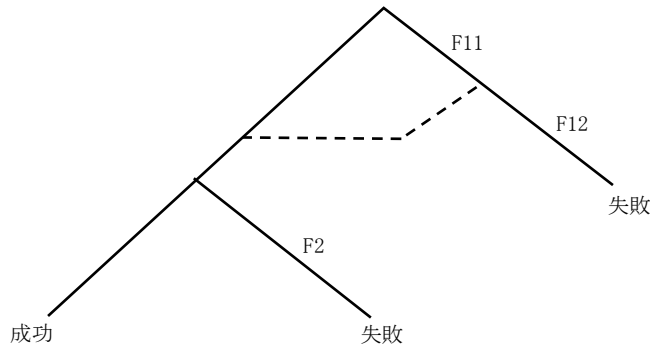
RAツリー及び人的過誤の確率を示す。

その結果、「c. 制御棒の連続引き抜き」の単一の人的過誤に比べて「b. 制御棒の選択誤り」+「c. 制御棒の連続引き抜き」の重畳を考慮した場合、発生確率が小さくなっていることが分かる。なお、ここでの評価は同じ操作者・指示者による「b. 制御棒の選択誤り」と「c. 制御棒の連続引き抜き」の人的過誤の従属性については、NUREG/CR-6883のSPAR-H手法における従属性レベルの選定フロー（表1）に基づき、高従属と設定した。

同じ操作者・指示者による「b. 制御棒の選択誤り」及び「c. 制御棒の連続引き抜き」の過誤の従属性は、作業内容の差異やステップごとに実施していることから独立事象として考えることもでき、その場合についても併せて評価した（図3）。

以上のように人的過誤が発生する確率は低く、また、これらの人的過誤が重畳しても必ず臨界に至るとは限らず（対象の制御棒価値が大きくない等）、即発臨界に至るような事象はさらに起こりにくいと考えられる。

※3 制御棒価値ミニマイザによる予め定められた制御棒以外の引抜防止

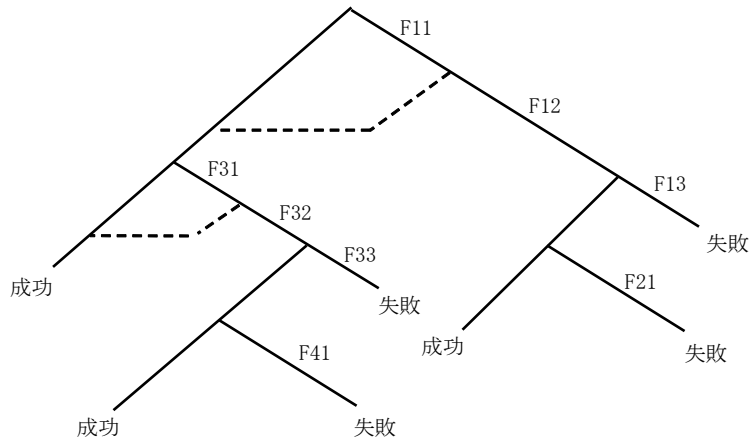


人的過誤の内容		過誤確率値 (中央値)	E F	備考
F11	検査担当者の指示誤りによる制御棒の連続引き抜き	3.0E-03	3	NUREG/CR-1278 手順書を用いる時のオMISSIONエラー [チェック表が正しく用いられている場合の長い操作(10項目以上)] 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F12	運転操作担当者や運転操作助勢者による過誤回復失敗	5.3E-02	3	NUREG/CR-6883 (SPAR-H) の[低従属] F11 の操作に対して、時間的な間隔、作業者の相違があるため、低従属とする 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F2	運転操作担当者による制御棒の連続引き抜き	3.0E-03	3	NUREG/CR-1278 手順書を用いる時のオMISSIONエラー [チェック表が正しく用いられている場合の長い操作(10項目以上)] 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定

※ 運転操作担当者による制御棒の連続引き抜きにおける過誤回復については十分期待できるものであるが投入される反応度の不確かさがあるため、期待しない。

人的過誤 (平均値)	E F
4.0E-03	2.8

図1 「c. 制御棒の連続引き抜き」のHRAツリー及び人的過誤確率

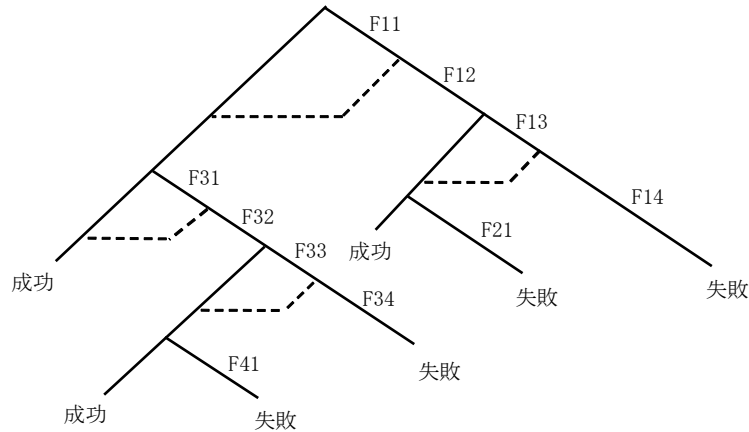


人的過誤の内容		過誤確率値 (中央値)	E F	備考
F11	検査担当者の指示誤りによる制御棒の選択誤り	3.0E-03	3	NUREG/CR-1278 手順書を用いる時のオMISSIONエラー [チェックが正しく用いられている場合の長い操作(10項目以上)] 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F12	運転操作担当者や運転操作助勢者による過誤回復失敗	5.3E-02	3	NUREG/CR-6883 (SPAR-H)の[低従属] F11の操作に対して、時間的な間隔、作業者の相違があるため、低従属とする 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F13	検査担当者の指示誤りによる制御棒の連続引き抜き	5.0E-01	2	NUREG/CR-6883 (SPAR-H)の[高従属] F11の操作と作業内容が異なるが、作業者、操作場所は同一であるため、高従属とする 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定 (過誤回復には期待しない)
F21	運転操作担当者による制御棒の連続引き抜き	5.3E-02	3	NUREG/CR-6883 (SPAR-H)の[低従属] F11の操作と作業内容が異なり、操作と時間的な間隔、作業者の相違があるため、低従属とする 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F31	運転操作担当者による制御棒の選択誤り	3.0E-03	3	NUREG/CR-1278 手順書を用いる時のオMISSIONエラー [チェック表が正しく用いられている場合の長い操作(10項目以上)] 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F32	検査担当者や運転操作助勢者による制御棒の選択誤りに対する過誤回復失敗	5.3E-02	3	NUREG/CR-6883 (SPAR-H)の[低従属] F31の操作に対して、時間的な間隔、作業者の相違があるため、低従属とする 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F33	検査担当者の指示誤りによる制御棒の連続引き抜き	5.3E-02	3	NUREG/CR-6883 (SPAR-H)の[低従属] F31の操作と作業内容が異なり、操作と時間的な間隔、作業者の相違があるため、低従属とする 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F41	運転操作担当者による制御棒の連続引き抜き	5.0E-01	2	NUREG/CR-6883 (SPAR-H)の[高従属] F31の操作と作業内容が異なるが、作業者、操作場所は同一であるため、高従属とする 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定 (過誤回復には期待しない)

※ 運転操作担当者による制御棒の連続引き抜きにおける過誤回復については十分期待できるものであるが投入される反応度の不確かさがあるため、期待しない。
 ※ HRAツリー及び人的過誤の確率は複数の制御棒を引き抜く停止時冷温臨界試験を想定して評価する。

人的過誤 (平均値)	E F
3.1E-04	3.5

図2 「b. 制御棒の選択誤り」 + 「c. 制御棒の連続引き抜き」
 (人的過誤に従属性を考えた場合) のHRAツリー及び人的過誤確率



人的過誤の内容		過誤確率値 (中央値)	E F	備考
F11	検査担当者の指示誤りによる制御棒の選択誤り	3.0E-0.3	3	NUREG/CR-1278 手順書を用いるときのオMISSIONエラー [チェック表が正しく用いられている場合の長い操作(10項目以上)] 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F12	運転操作担当者や運転操作助勢者による過誤回復失敗	5.3E-0.2	3	NUREG/CR-6883 (SPAR-H) の[低従属] F11の操作に対して、時間的な間隔、作業者の相違があるため、低従属とする 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F13	検査担当者の指示誤りによる制御棒の連続引き抜き	3.0E-0.3	3	NUREG/CR-1278 手順書を用いる時のオMISSIONエラー [チェック表が正しく用いられている場合の長い操作(10項目以上)] 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定 ※制御棒の選択誤りとの従属性は作業内容が異なり、操作は試験要領に従ってステップごとを実施していることから完全独立とする
F14	運転操作担当者や運転操作助勢者による過誤回復失敗	5.3E-0.2	3	NUREG/CR-6883 (SPAR-H) の[低従属] F13の操作に対して、時間的な間隔、作業者の相違があるため、低従属とする 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F21	運転操作担当者による制御棒の連続引き抜き	3.0E-03	3	NUREG/CR-1278 手順書を用いる時のオMISSIONエラー [チェック表が正しく用いられている場合の長い操作(10項目以上)] 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定 ※制御棒の選択誤りとの従属性は作業内容が異なり、操作は試験要領に従ってステップごとを実施していることから完全独立とする
F31	運転操作担当者による制御棒の選択誤り	3.0E-03	3	NUREG/CR-1278 手順書を用いるときのオMISSIONエラー [チェック表が正しく用いられている場合の長い操作(10項目以上)] 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F32	検査担当者や運転操作助勢者による制御棒の選択誤りに対する過誤回復失敗	5.3E-0.2	3	NUREG/CR-6883 (SPAR-H) の[低従属] F31の操作に対して、時間的な間隔、作業者の相違があるため、低従属とする 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F33	検査担当者の指示誤りによる制御棒の連続引き抜き	3.0E-0.3	3	NUREG/CR-1278 手順書を用いる時のオMISSIONエラー [チェック表が正しく用いられている場合の長い操作(10項目以上)] 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定 ※制御棒の選択誤りとの従属性は作業内容が異なり、操作は試験要領に従ってステップごとを実施していることから完全独立とする
F34	運転操作担当者や運転操作助勢者による過誤回復失敗	5.3E-0.2	3	NUREG/CR-6883 (SPAR-H) の[低従属] F33の操作に対して、時間的な間隔、作業者の相違があるため、低従属とする 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定
F41	運転操作担当者による制御棒の連続引き抜き	3.0E-0.3	3	NUREG/CR-1278 手順書を用いる時のオMISSIONエラー [チェック表が正しく用いられている場合の長い操作(10項目以上)] 特に高いストレスとはならないため、ストレスファクタは1を設定 ※制御棒の選択誤りとの従属性は作業内容が異なり、操作は試験要領に従ってステップごとを実施していることから完全独立とする

※ 運転操作担当者による制御棒の連続引き抜きにおける過誤回復については十分期待できるものであるが投入される反応度の不確かさがあるため、期待しない。
 ※ 制御棒の選択誤りと連続引き抜きの従属性については、時間的な間隔(ステップごとに操作を確認)しているのに加え、作業内容が異なることから完全独立(従属性なし)とする。

※ HRAツリー及び人的過誤の確率は複数の制御棒の引き抜きを実施する停止時冷温臨界試験を想定して評価する。

人的過誤 (平均値)	E F
2.0E-06	4.2

図3 「b. 制御棒の選択誤り」 + 「c. 制御棒の連続引き抜き」
(それぞれの人的過誤を独立事象とした場合)のHRAツリー及び人的過誤確率

表 1 SPAR-H 手法における従属性レベルの選定フロー
(NUREG/CR-6883 から抜粋)

Dependency Condition Table						Number of Human Action Failures Rule <input type="checkbox"/> - Not Applicable. Why? _____
Condition Number	Crew (same or different)	Time (close in time or not close in time)	Location (same or different)	Cues (additional or no additional)	Dependency	
1	s	c	s	na	complete	When considering recovery in a series e.g., 2 nd , 3 rd , or 4 th checker If this error is the 3 rd error in the sequence, then the dependency is at least moderate. If this error is the 4 th error in the sequence, then the dependency is at least high.
2				a	complete	
3			d	na	high	
4				a	high	
5		nc	s	na	high	
6				a	moderate	
7			d	na	moderate	
8				a	low	
9	d	c	s	na	moderate	
10				a	moderate	
11			d	na	moderate	
12				a	moderate	
13		nc	s	na	low	
14				a	low	
15			d	na	low	
16				a	low	
17					zero	

3. 過去に発生した反応度投入事例

過去に発生した反応度投入事象例としては、平成 11 年志賀原子力発電所 1 号炉原子炉緊急停止事故があるが、島根原子力発電所 2 号炉では運用上の対策及び設備対策が実施されていることから、事象発生の確率が低いと考えられるため、有効性評価で想定する反応度誤投入事象として選定不要と考える。

- ・平成 11 年志賀原子力発電所 1 号炉 原子炉緊急停止事故（北陸）

原子炉停止機能強化工事の機能確認試験時にアイソレ誤り及び弁のシートパスにより制御棒が引き抜かれ、アキュームレータに圧力が充填されていなかったことで、直ちに制御棒が挿入されず、臨界に至った。

上記の事象を踏まえ、島根原子力発電所 2 号炉では、次の対策を講じている。

- ・ HCU 隔離時の CRD リターンライン運転手順の整備
- ・ 原子炉 - CRD 冷却水ヘッド間差圧上昇時の CRD ポンプ自動トリップインターロックの設置

また、仮に同様の事象が起きた場合についての炉心挙動解析が実施されており、即発臨界に至る可能性はあるものの、炉心損傷はしないことが確認されている（参考文献 日本原子力学会誌 Vol. 49, No. 10 (2007) 671-675 北陸電力(株) 志賀原子力発電所 1 号機で発生した臨界時の炉心挙動解析）

- ・島根原子力発電所 2 号炉における制御棒部分挿入事象

島根原子力発電所 2 号炉においては、制御棒の誤引き抜け事象等により反応度が誤投入された事象の発生実績はないが、平成 24 年 4 月、第 17 回定期検査開始に伴い全炉心燃料（560 体）を燃料プールへ取り出した後の原子炉内において全引抜状態としていた制御棒 137 体中、1 体（H-13）が部分挿入されている

ことを確認した。

この事象は、当該隔離弁（ユニット H-13 の駆動水挿入管隔離弁）において、前回点検実施以降の開閉操作時にシステムのネジ部にかじりが生じ、干渉していたため全閉ができず、当該隔離弁操作時に弁棒のストロークまで確認していなかったため中間開状態であることに気付かなかったことが原因である。

ただし、本事象は全燃料取り出し状態であったこと、および制御棒が挿入側に動作した事象であることから、反応度が投入された事象ではない。

なお、当事象への対策として、以下の対策を行った。

- a. 当該HCU隔離弁の弁体・ステム・ガイドの交換を実施。
- b. HCUエアレント作業実施前の駆動水挿入管隔離弁・引抜隔離弁の状態確認について、操作員の手での開閉確認に加えて、開閉状態を表すマーキングにより確認を行うように要領書の改正を実施。

4. 重要事故シーケンスの選定

有効性評価では1～3章を踏まえ、停止時冷温臨界試験及び原子炉停止余裕検査の検査時に人的過誤により制御棒が連続的に引き抜かれる事象を想定した。

この時、誤引き抜きされる制御棒は、以下の点を考慮して「最大反応度価値を有する制御棒の斜め隣接の制御棒」を反応度誤投入の代表性のあるものとして選定した。

- ・引き抜かれる制御棒の反応度価値が管理値^{*4}を超えるもの
- ・停止時冷温臨界試験や原子炉停止余裕検査での試験対象や事故防止の対策
- ・一般的に臨界近傍まで複数の制御棒を引き抜いていくと、1本あたりの制御棒価値は相対的に低下していく傾向にあること
- ・設計により挿入可能な制御棒のうち最大反応度価値制御棒1本が引き抜かれた状態であっても未臨界が維持されていること

以上より、反応度の誤投入事象として、「停止中に実施される検査等により、最大反応度価値を有する制御棒1本が全引き抜きされている状態から、他の1本の制御棒が操作量の制限を超える誤った操作によって引き抜かれ、異常な反応度の投入を認知できずに燃料の損傷に至る事故」を代表性のあるシナリオとしている。

※4 核的制限値を超えないように設定している管理値：臨界近接時における制御棒の最大反応度価値は1.0%Δk以下（「9×9燃料が装荷され、MOX燃料が装荷されるまでのサイクル」において核的制限値を超えないように管理している値であり、「MOX燃料を装荷したサイクル以降」における核的制限値）

安定状態について
(運転停止中 (反応度の誤投入))

運転停止中の反応度の誤投入の安定状態については以下のとおり。

原子炉安定停止状態：事象発生後，設計基準事故対処設備及び重大事故等対処設備を用いた炉心冷却により，炉心冠水が維持でき，また，冷却のための設備がその後も機能維持できると判断され，かつ，必要な要員の不足や資源の枯渇等のあらかじめ想定される事象悪化のおそれがない場合，原子炉安定停止状態が確立されたものとする。

【安定状態の確立について】

原子炉安定停止状態の確立について

運転停止中に制御棒の誤引き抜き等によって，燃料に反応度が投入されるが，中間領域計装の中性子束高スクラム信号により原子炉はスクラムし，制御棒全挿入となり，原子炉は未臨界状態となり，原子炉安定停止状態が確立される。

重大事故等対策は自動で作動するため，対応に必要な要員はいない。

【安定状態の維持について】

上記の燃料損傷防止対策により原子炉安定停止状態を維持できる。

また，残留熱除去系機能を維持し，除熱を行うことにより，安定停止状態後の安定停止状態の維持が可能となる。

解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について (運転停止中 (反応度の誤投入))

表 1 解析コードにおける重要現象の不確かさが運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響 (反応度の誤投入)

分類	重要現象	解析モデル	不確かさ	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
炉心 (核)	核分裂出力	<ul style="list-style-type: none"> 一点近似動特性モデル (炉出力) 出力分布は二次元拡散モデル 核定数は三次元体系の炉心を空間効果を考慮し二次元体系に縮約 	考慮しない		ドップラ反応度フィードバック及び制御棒反応度効果の不確かさに含まれる。
	出力分布変化	<ul style="list-style-type: none"> RZ 二次元拡散モデル エンタルピステップの進行に伴う相対出力分布変化を考慮 	考慮しない		三次元沸騰水型原子炉機械計算コード (LOGOS) にて評価した核定数を APEX コードの二次元領域へ縮約する過程で、軸方向及び径方向に不確かさが生じるが、引抜制御棒値を制御棒値ミニママイザ管理値である 1.0% Δk よりも厳しい 1.75% Δk に設定し、さらに局所ピーキング係数が燃焼寿命を通じた最大値 (燃焼度 0 MWd/t における値) となるように設定することで、最高出力燃料集合体の最高出力燃料棒の燃焼エンタルピを評価していることから、出力分布の不確かさは考慮しない。
	反応度フィードバック効果	<ul style="list-style-type: none"> ドップラ反応度フィードバック効果は出力分布依存で考慮 熱的現象は断熱、ボイド反応度フィードバック効果は考慮しない* 	<ul style="list-style-type: none"> ドップラ反応度フィードバック効果: 7 ~ 9% 実効遅発中性子割合: 4% 	<p>停止時の制御棒の誤引き抜きは、中性子領域計算の中性子束高の信号の発生により、原子炉はスクラムし、事象は未臨界となり収束することから、運転員は操作を介しない。</p> <p>したがって、解析コードの不確かさが運転員等操作時間に与える影響はない。</p>	実験結果と解析コードの比較から、ドップラ反応度フィードバックの不確かさは 7 ~ 9% と評価されていることから、これを踏まえて解析を行う必要がある。また、実効値初中性子割合の不確かさは、臨界試験の結果と解析コードの比較により、約 4% と評価されていることから、これを踏まえて解析を行う必要がある。
	制御棒反応度効果	<ul style="list-style-type: none"> 三次元拡散モデル 動特性計算では外部入力 	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒反応度: 9% 実効遅発中性子割合: 4% 	<p>実験結果と解析コードの比較から、制御棒反応度の不確かさは約 9% 程度あることから、これを踏まえて解析を行う必要がある。</p> <p>また、実効値初中性子割合の不確かさは、臨界試験の結果と解析コードの比較により、約 4% と評価されていることから、これを踏まえて解析を行う必要がある。</p> <p>「反応度投入事象評価指針」において燃料棒内メッシュの「制御棒落下」解析結果への影響は 0% と報告されていることから、類似の事象である本事故シナリオについても、評価項目となるパラメータに対する影響は小さい。</p>	実験結果と解析コードの比較から、制御棒反応度の不確かさは約 9% 程度あることから、これを踏まえて解析を行う必要がある。また、実効値初中性子割合の不確かさは、臨界試験の結果と解析コードの比較により、約 4% と評価されていることから、これを踏まえて解析を行う必要がある。
炉心 (燃料)	燃料棒内温度変化	<ul style="list-style-type: none"> 熱伝導モデル 燃料ペレレット-被覆管ギャップ熱伝達モデル 単相強制対流: Dittus-Boelter の式 核沸騰状態: Jens-Lottes の式 膜沸騰状態 (低温時): NSR R の実測データに基づいて導出された熱伝達相関式 	考慮しない		本事象では即発臨界となり、急激な出力上昇が生じるが、スクラム反応度印加により出力は速やかに降下し、燃料エンタルピはその数秒後に最大値となる。このような短時間の事象であることから、燃料棒表面熱伝達の不確かさが燃料エンタルピの最大値に及ぼす影響はほとんどない。そのため、評価項目となるパラメータに対する影響は小さい。
	燃料棒表面熱伝達		考慮しない		
	沸騰遷移	<ul style="list-style-type: none"> 低温時: Rohsenow-Griffith の式及び Kutateladze の式 	考慮しない		事象を通じての表面熱流束は限界熱流束に対して十分小さくなくなっていることから、沸騰遷移の判定式の不確かさが燃料エンタルピの最大値に与える影響はほとんどなく、評価項目となるパラメータに対する影響は小さい。

※ APEX は断熱モデルに基づくドップラ反応度フィードバックモデルを採用し、減速材温度フィードバック及び減速材ボイドフィードバックは考慮しない。

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータを与える影響（反応度の誤投入）（1 / 2）

項目	解析条件（初期条件、事故条件）の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間を与える影響	評価項目となるパラメータを与える影響
	解析条件	最確条件			
炉心状態	9×9燃料（A型）平衡炉心（単一炉心） 平衡炉心サイクル初期	装荷炉心毎 燃焼度毎	9×9燃料（A型）平衡炉心、9×9燃料（B型）平衡炉心、9×9燃料（A型）及びMOX燃料228体を装荷した平衡炉心、9×9燃料（B型）及びMOX燃料228体を装荷した平衡炉心、特性はほぼ同等であることから、9×9燃料（A型）を代表的な炉心として設定 引抜制御棒の値が大きくなくなるサイクル初期炉心を設定	運転員等操作時間を与える影響	実炉心においては、装荷炉心毎、燃焼度毎に制御棒反応度値やスクラム反応度等の特性が変化する。 これらの影響については以下の保守的な想定をした評価においても投入される反応度は約1.21ドル（燃料エンタルピー最大値：約68kJ/kg、燃料エンタルピーの増分の最大値：約60kJ/kg）にとどまることから、不確かさが評価項目となるパラメータを与える影響は小さい。 ・サイクル初期及びサイクル末期の炉心状態において、9×9燃料（B型）平衡炉心、9×9燃料（A型）及びMOX燃料228体を装荷した平衡炉心、9×9燃料（B型）及びMOX燃料228体を装荷した平衡炉心の反応度印加率を包含する引抜制御棒反応度曲線を用いた場合炉心の反応度印加率が0.99の場合は、制御棒引抜開始直後は反応度が投入される実効増倍率が1.00となることから、燃料エンタルピーの上昇率も小さくなる。また投入される反応度印加率も緩やかとなることから、燃料エンタルピーの増分の最大値（約14kJ/kg）と小さく1ドル位置近傍における反応度の増分も小さく1ドル位置近傍における反応度の増分も緩やかとなることから、燃料エンタルピーの上昇率も小さくなる。評価項目となるパラメータに対する余裕が大きくなる。
実効増倍率	1.0	0.99（設計目標値）以下	原子炉は臨界状態にあるものとして設定	停止時の制御棒の誤引き抜きは、中性子領域計装の中性子束高の信号の発生により、原子炉はスクラムし、事象は未臨界となり収束することから、運転員の操作を介しない。 したがって、解析コードの不確かさが運転員等操作時間を与える影響はない。	実効増倍率が0.99の場合は、制御棒引抜開始直後は反応度が投入される。臨界到達までにかかる時間が追加で必要となり、炉心平均中性子束及び燃料エンタルピーが上昇するタイミングが遅くなる。また投入される反応度の増分も約1.00ドル（燃料エンタルピー最大値：約14kJ/kg、燃料エンタルピーの増分の最大値：約6kJ/kg）と小さく1ドル位置近傍における反応度の増分も緩やかとなることから、燃料エンタルピーの上昇率も小さくなる。評価項目となるパラメータに対する余裕が大きくなる。
原子炉出力	定格出力の10 ⁻⁸	定格出力の10 ⁻⁸ 程度	原子炉は低温状態にあるものとして設定		炉心状態毎に初期出力は異なるが、長期停止の影響を含め初期出力の不確かさが与える影響を確認できるように感度解析の幅を設定してある。 定格出力の10 ⁻⁸ の10倍及び1/10倍とした場合の感度解析結果を行い、結果は以下の通りとなった。 ・定格出力の10 ⁻⁷ :約1.11ドル（燃料エンタルピーの最大値：約33kJ/kg、燃料エンタルピーの増分の最大値：約25kJ/kg） ・定格出力の10 ⁻⁸ :約1.16ドル（燃料エンタルピーの最大値：約69kJ/kg、燃料エンタルピーの増分の最大値：約16kJ/kg） 有効性評価での結果（約1.14ドル、燃料エンタルピーの最大値：約50kJ/kg、燃料エンタルピーの増分の最大値：約42kJ/kg）と大きく差異のないことから、初期出力の不確かさが評価項目となるパラメータを与える影響は小さい。
原子炉圧力	0.0MPa〔gage〕	0.0MPa〔gage〕程度	原子炉停止時の圧力を設定		解析条件と同様であることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
燃料被覆管表面温度及び原子炉冷却材温度	20℃	事故事象毎 20℃以上	原子炉冷却材温度の下限值として運用している値であり、反応度の観点からは保守的な値として設定		初期燃料被覆管表面温度は炉心状態毎に異なり、評価項目となるパラメータに影響を与えるため、その不確かさが与える影響を評価した。 初期燃料温度を60℃とした場合の感度解析を実施し、結果は以下の通りとなった。 ・初期燃料温度60℃:約1.15ドル（燃料エンタルピーの最大値は約64kJ/kg、燃料エンタルピーの増分の最大値：約49kJ/kg） 有効性評価での結果（約1.14ドル、燃料エンタルピーの最大値：約50kJ/kg、燃料エンタルピーの増分の最大値：約42kJ/kg）と大きく差異のないことから、初期出力の不確かさが評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。
燃料エンタルピー	8kJ/kg	8kJ/kg以上	原子炉冷却材温度20℃における燃料エンタルピーを設定		

※ 本評価で評価対象とした9×9燃料では、初期の燃料被覆管表面温度及び冷却材温度を高く設定した場合に、G dの燃料やP uの蓄積により、結果が厳しくなる場合がある。

表2 解析条件を最確条件とした場合の運転員等操作時間及び評価項目となるパラメータに与える影響（反応度の誤投入）（2/2）

項目	解析条件（初期条件、事故条件）の不確かさ		条件設定の考え方	運転員等操作時間に与える影響	評価項目となるパラメータに与える影響
	解析条件	最確条件			
起因事象	制御棒の誤引き抜き	—	運転停止中の原子炉において、制御棒1本が全引き抜きされている状態から、他の1本の制御棒が操作量の制限を超える誤った操作によって連続的に引き抜かれる事象を想定する。	運転員等操作時間に与える影響	解析条件と同様であることから、評価項目となるパラメータに与える影響はない。
	誤引き抜きされる制御棒	—	運転停止中に実施する複数の制御棒引き抜きを伴う検査等を考慮し、全引き抜きされている制御棒の斜め隣接 ^{※1} の制御棒とする。誤引き抜きされる制御棒1本の反応度価値は約1.75%Δk ^{※2} とする。	運転員等操作時間に与える影響	—
	最大反応度価値を有する制御棒の斜め隣接の制御棒	—	なお、通常、制御棒1本が全引き抜きされている状態の未臨界度は深く、また、仮に他の1本の制御棒が操作量の制限を超えた場合でも、臨界近接で引き抜かれる制御棒の反応度価値が核の制限値を超えないよう管理 ^{※3} している。これらを踏まえ、本評価においては、誤引き抜きされる制御棒の反応度価値が、管理値を超える事象を想定	運転員等操作時間に与える影響	—
	外部電源	外部電源あり	制御棒引抜操作には外部電源が必要となるため、外部電源ありを設定	停止時の制御棒の誤引き抜きは、中性子領域計装の中性子束高の信号の発生により、原子炉はスクラムし、事象は未臨界となり収束することから、運転員はスクラムし、事象は未臨界との操作を介しない。	—
機器条件	制御棒引抜速度	9.1 cm/s	9.1 cm/s以下	制御棒引抜速度の上限値として設定	—
	中間領域計装バイパス状態	A, B チャンネルそれぞれ1個	バイパスなし	A, B チャンネルとも引抜制御棒に最も近い検出器がそれぞれ1個バイパスにあるものとして設定	中間領域計装バイパス状態がない場合はスクラム信号の応答が早くなり、投入反応度が小さくなるため、評価項目となるパラメータに対する余裕は大きくなる。
	制御棒引抜阻止信号	期待しない (中間領域計装の中性子束高 (各レンジフルスケールの90%))	期待する (中間領域計装の中性子束高 (各レンジフルスケールの90%))	制御棒の引き抜きが制限されないことにより、制御棒の誤操作の量が増加するものとして設定	制御棒引抜阻止に期待した場合、中間領域計装の中性子束高 (各レンジフルスケールの90%) が発信すると制御棒引き抜きが停止する。ただし、本評価では制御棒の誤引き抜きにより反応度が急激に投入されると中性子束高 (各レンジフルスケールの95%) によるスクラム信号がほぼ同時に発信するため、制御棒引き抜きに期待した場合でも評価項目に与える影響はほとんどない。
	原子炉スクラム信号	中間領域計装の中性子束高 (各レンジフルスケールの95%)	中間領域計装の中性子束高 (各レンジフルスケールの95%)	中間領域計装の原子炉スクラム機能により設定	解析条件と最確条件は同様であることから、事象進展に影響はななく、評価項目となるパラメータに与える影響はない。

※1 制御棒密度の偏りが少なくなるよう市松模様の引抜パターンを作成し、高い制御棒価値を生じる引抜パターンとしないようにしている。

※2 三次元沸騰水型原子炉模擬計算コード (LOGOS) による解析結果

※3 原子炉起動時及び冷温臨界試験時は、臨界近接時における制御棒の最大反応度価値が 1.0%Δk 以下となるように管理。また、制御棒ミニマイザ又は複数
の運転員による制御棒の引抜手順の監視を実施。なお、原子炉停止余裕検査においても同様の監視を実施。

反応度誤投入における炉心の状態等の不確かさについて

反応度誤投入事象の評価において炉心状態を「平衡炉心のサイクル初期」とし、「最大反応度価値制御棒及びその斜め隣接の制御棒」が引き抜かれる想定をして評価している。実炉心においてはこれらの想定と異なり、 9×9 燃料（B型）平衡炉心、 9×9 燃料（A型）及びMOX燃料 228 体を装荷した平衡炉心、 9×9 燃料（B型）及びMOX燃料 228 体を装荷した平衡炉心の場合、事象発生時期がサイクル末期である場合に加え、引抜制御棒価値、引抜制御棒反応度曲線、スクラム反応度曲線、実効遅発中性子割合等のパラメータに不確かさがあるため、有効性評価での想定とこれらの不確かさの影響について以下にまとめた。

1. 感度解析の条件

炉心状態の不確かさの影響を考慮するパラメータとして「解析コードのAPEX」の重要現象の特定を参考に「引抜制御棒価値」、「引抜制御棒反応度曲線」、「スクラム反応度曲線」及び「実効遅発中性子割合」の4つについて表1に示す感度解析を実施した。

なお、原子炉初期出力及び初期燃料温度については解析条件の不確かさの影響評価にて感度解析を実施していることから今回対象としていない。また、出力分布変化については、三次元沸騰水型原子炉模擬計算コード（LOGOS）にて評価した核定数をAPEXコードの二次元領域へ縮約する過程で、軸方向及び径方向に不確かさが生じるが、引抜制御棒価値を制御棒価値ミニマイザ管理値である $1.0\% \Delta k$ よりも厳しい $1.75\% \Delta k$ に設定し、さらに局所ピーキング係数が燃焼寿命を通じた最大値（燃焼度 0MWd/t における値）となるように設定することで、最高出力燃料集合体の最高出力燃料棒の燃料エンタルピを評価していることから、今回対象としていない。また、二次元領域への縮約操作に伴う不確かさが燃料エンタルピへ与える影響は小さいことを、米国での設計認証申請において適用実績があり、縮約を介さずに炉心三次元体系で動特性解析を行うことができる三次元動特性解析コードTRACGによる影響評価等によって確認している。

・引抜制御棒価値

「 9×9 燃料が装荷され、MOX燃料が装荷されるまでのサイクル」において核的制限値を超えないように管理している値、「MOX燃料を装荷したサイクル以降」における核的制限値（臨界近接時においては最大反応度価値を $1.0\% \Delta k$ 以下とすること）を考慮し、引抜制御棒価値 $1.0\% \Delta k$ をノミナル条件として設定した。本制御棒価値は、炉心状態によらずそれ以下に管理する管理値であることから、感度解析でも同一の条件とした。

・引抜制御棒反応度曲線

有効性評価において表1に示す 9×9 燃料（A型）平衡炉心サイクル初期

を想定している。

ノミナル条件としてサイクル初期及びサイクル末期での引抜制御棒反応度曲線を $1.0\% \Delta k$ に規格したものを考慮した。

不確かさ評価としてサイクル初期及びサイクル末期の炉心状態において、1ドル位置における引抜制御棒反応度印加率が 9×9 燃料 (B型) 平衡炉心、 9×9 燃料 (A型) 及びMOX燃料 228 体を装荷した平衡炉心、 9×9 燃料 (B型) 及びMOX燃料 228 体を装荷した平衡炉心での印加率の変動を包絡するように設定した。

感度解析に用いたサイクル初期及びサイクル末期の引抜制御棒反応度曲線を図1, 図2 に示す。

- ・スクラム反応度曲線

有効性評価において表1に示すサイクル初期を想定して評価を実施しており、感度解析においてはサイクル末期の炉心状態のスクラム反応度曲線の影響についても確認した。

- ・実効遅発中性子割合

有効性評価において表1に示すサイクル初期を想定して評価を実施しており、感度解析においてはサイクル末期の炉心状態の実効遅発中性子割合の影響及びMOX燃料 228 体を装荷した平衡炉心における実効遅発中性子割合の影響についても確認した。

2. 感度解析の結果

解析結果を表2にまとめた。サイクル初期及びサイクル末期並びに 9×9 燃料 (B型) 平衡炉心、 9×9 燃料 (A型) 及びMOX燃料 228 体を装荷した平衡炉心、 9×9 燃料 (B型) 及びMOX燃料 228 体を装荷した平衡炉心の炉心状態の不確かさを考慮したケースにおいても、最大の投入反応度は感度解析 (サイクル末期、 9×9 燃料 (B型) 平衡炉心、 9×9 燃料 (A型) 及びMOX燃料 228 体を装荷した平衡炉心、 9×9 燃料 (B型) 及びMOX燃料 228 体を装荷した平衡炉心での印加率の変動を包含) の約 1.21 ドルで、燃料エンタルピの最大値は約 68kJ/kg であり、「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針」に示された燃料の許容設計限界値以下である。また、燃料エンタルピの増分の最大値は約 60 kJ/kg であり、ペレット燃焼度 65,000MWd/t 以上の燃料に対する P C M I 破損しきい値の目安としてピーク出力部燃料エンタルピの増分で 167 kJ/kg (40cal/g) を用いた場合においても、これを超えることはなく燃料の健全性は維持される。

そのため、これらの不確かさを考慮しても、燃料エンタルピの増加に伴う燃料の破損は発生せず、事象は収束して安定状態に導かれることが分かった。

表1 反応度の誤投入における炉心の状態等の不確かさ感度解析項目

項目	有効性評価解析	ノミナルケース (サイクル初期)	不確かさ評価 (サイクル初期)	ノミナルケース (サイクル末期)	不確かさ評価 (サイクル末期)
引抜制御棒価値	1.75% Δk	1.0% Δk	1.0% Δk	1.0% Δk	1.0% Δk
引抜制御棒反応度曲線	サイクル初期炉心のLOGOS解析結果	有効性評価解析の反応度曲線を制御棒価値1.0% Δkに規格化	1ドル位置における引抜制御棒反応度印加率がノミナルケース(サイクル初期)の1.75倍 ^{※1} になるように補正する。ただし、引抜制御棒反応度が1.0% Δkを超える部分については、1.0% Δkで一定とする。	サイクル末期炉心のLOGOS解析結果(制御棒価値1.0% Δkに規格化)	1ドル位置における引抜制御棒反応度曲線の反応度印加率がノミナルケース(サイクル末期)の1.5倍 ^{※2} になるように補正する。ただし、引抜制御棒反応度が1.0% Δkを超える部分については、1.0% Δkで一定とする。
スクラム反応度曲線	サイクル初期炉心のLOGOS解析結果	変更なし	変更なし	サイクル末期炉心のLOGOS解析結果	サイクル末期炉心のLOGOS解析結果
実効遅発中性子割合	サイクル初期炉心に対応した値	変更なし	MOX燃料装荷による変動を考慮した値として0.88倍(0.0053/0.0060)※3	サイクル末期相当の値として0.88倍(0.0053/0.0060)※4	サイクル末期かつMOX燃料装荷による変動を考慮した値として0.81倍(0.0049/0.0060)※5

- ※1 制御棒落下事故解析における落下制御棒反応度曲線(サイクル初期低温時)より9×9燃料(B型)平衡炉心、9×9燃料(A型)及びMOX燃料228体を装荷した平衡炉心の反応度印加率の変動を包含するようにより幅を設定。
- ※2 制御棒落下事故解析における落下制御棒反応度曲線(サイクル末期低温時)より9×9燃料(B型)平衡炉心、9×9燃料(A型)及びMOX燃料228体を装荷した平衡炉心、9×9燃料(B型)及びMOX燃料228体を装荷した平衡炉心の反応度印加率の変動を包含するようにより幅を設定。
- ※3 実効遅発中性子割合の設置変更許可申請書記載値(ウラン炉心平衡サイクル初期：0.0060, MOX炉心平衡サイクル初期：0.0053)より算出。
- ※4 実効遅発中性子割合の設置変更許可申請書記載値(ウラン炉心平衡サイクル初期：0.0060, ウラン炉心平衡サイクル末期：0.0053)より算出。
- ※5 実効遅発中性子割合の設置変更許可申請書記載値(ウラン炉心平衡サイクル初期：0.0060, MOX炉心平衡サイクル末期：0.0049)より算出。

表 2 反応度誤投入における炉心の状態等の不確かさの感度解析結果

項 目	単位	申請解析	ノミナルケース (サイクル初期)	不確かさ評価ケース (サイクル初期)	ノミナルケース (サイクル末期)	不確かさ評価ケース (サイクル末期)
引抜制御棒価値	% Δk	1.75	1.0	1.0	1.0	1.0
引抜制御棒反応度曲線の 1 ドル位置 における反応度印加率	$\Delta k / \Delta \rho^{*1}$	0.0013	0.0005	0.0009	0.0010	0.0015
実効選発中性子割合 ^{※2}	-	0.0061	0.0061	0.0054	0.0054	0.0049
最大投入反応度	% Δk	0.69	0.63	0.60	0.60	0.60
	ドル	1.14	1.03	1.11	1.12	1.21
燃料エンタルピの最大値	kJ/kg	約50	約17	約28	約33	約68
燃料エンタルピの増分の最大値	kJ/kg	約42	約 9	約20	約25	約60

※1：制御棒を1ノッチ引き抜いた時の印加反応度

※2：APEXにより計算される実効選発中性子割合

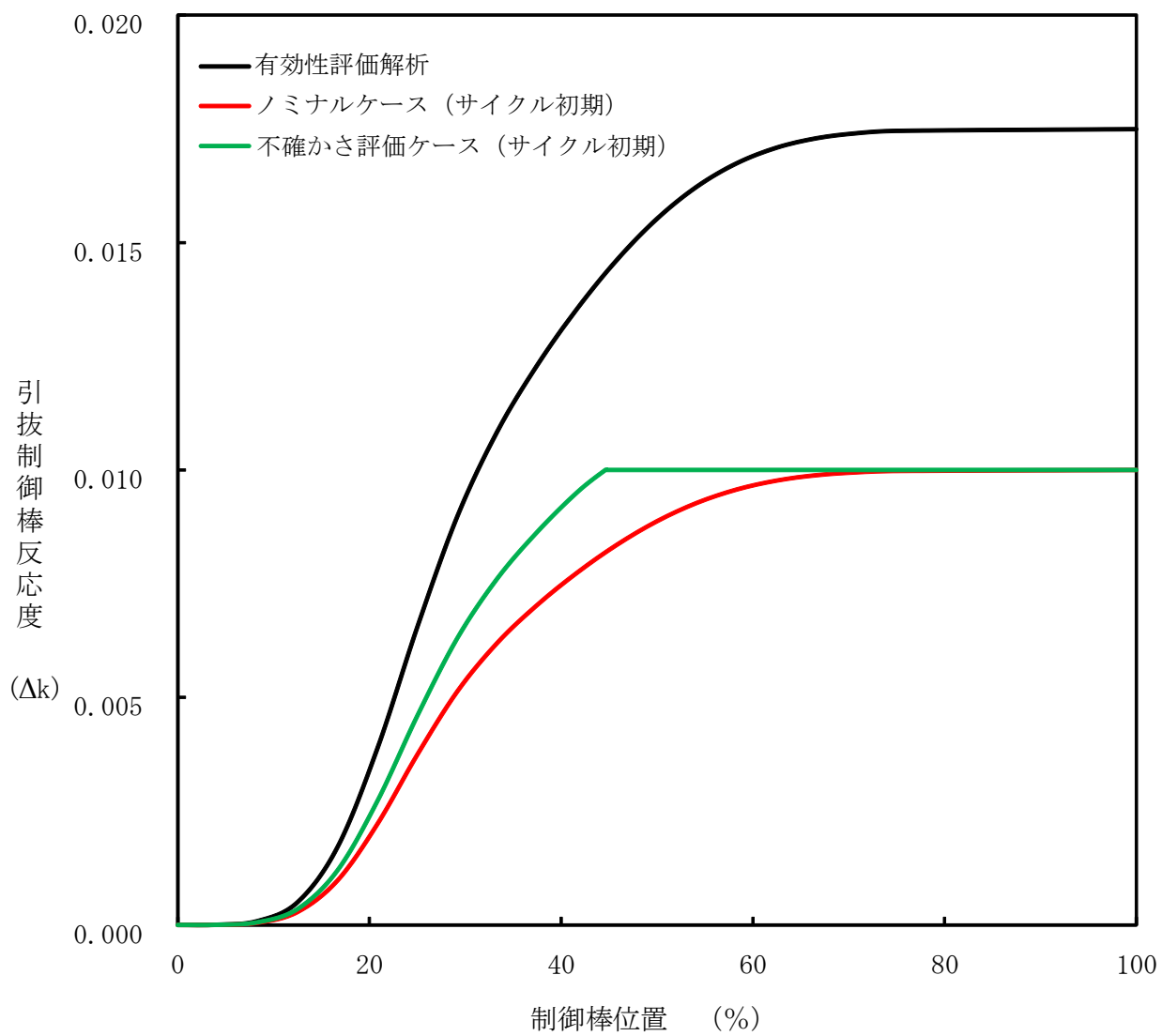


図1 引抜制御棒反応度曲線 (サイクル初期)

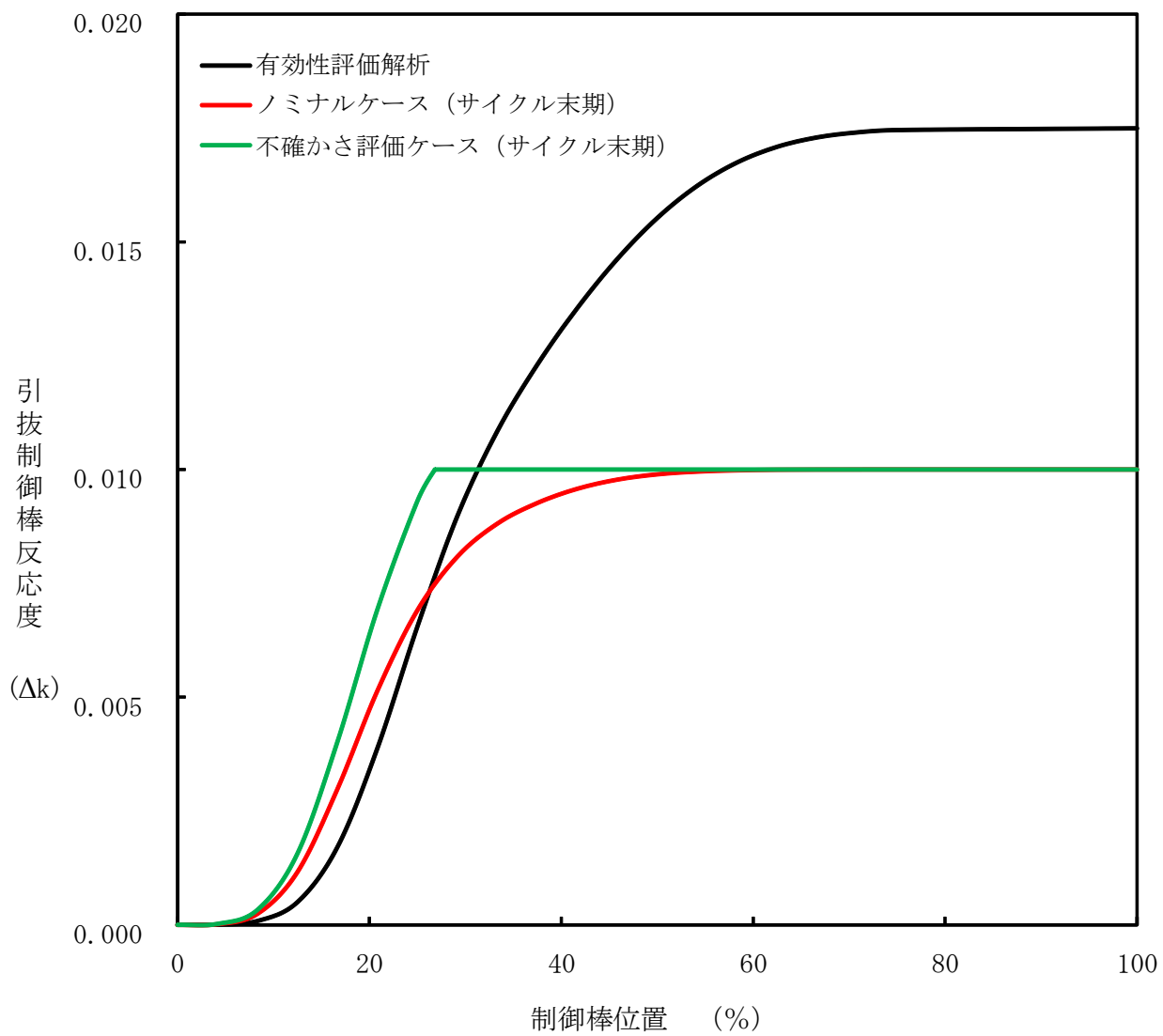


図2 引抜制御棒反応度曲線 (サイクル末期)

6. 必要な要員及び資源の評価

6.1 必要な要員及び資源の評価条件

(1) 要員の評価条件

- a. 各事故シーケンスにおける要員については、2号炉の重大事故等対策時において対応可能であるか評価を行う。ただし、運転補助要員2名については、故意による大型航空機の衝突その他のテロリズムの発生の場合に活動を期待する要員であることから、要員の評価には含めないものとする。
- b. 各事故シーケンスにおいては、中央制御室の当直長、当直副長、運転員及び発電所構内に常駐している緊急時対策要員により、必要な作業対応が可能であることを評価する。

なお、発電所構外からの参集要員については、実際の運用では、参集次第作業対応は可能であるが、評価上は見込まないものとする。
- c. 可搬型設備操作においては、緊急時対策要員が発電所構内に常駐していることを考慮し、事象発生直後から活動を開始することとして要員を評価する。

(2) 資源の評価条件

a. 全般

- (a) 重大事故等対策の有効性評価において、通常系統からの給水及び給電が不可能となる事象についての水源、燃料及び電源に関する評価を実施する。また、前提として、有効性評価の条件（各重要事故シーケンス等特有の解析条件又は評価条件）を考慮する。
- (b) 水源、燃料及び電源については、2号炉において重大事故等が発生した場合を想定して消費量を評価する。

b. 水源

- (a) 原子炉への注水において、水源となる低圧原子炉代替注水槽の保有水量（約740m³：有効水量）が、輪谷貯水槽（西1／西2）から大量送水車を用いた水の移送を開始するまでに枯渇しないことを評価する。
- (b) 低圧原子炉代替注水槽については、輪谷貯水槽（西1／西2）からの水の移送について、大量送水車を用いて必要注水量以上が補給可能であることを評価する。
- (c) 原子炉、原子炉格納容器及び燃料プールへの注水において、水源となる輪谷貯水槽（西1／西2）の保有水量（約7,000m³）が枯渇しないことを評価する。
- (d) 水源の評価については、必要注水量が多い重要事故シーケンス等が水源（必要水量）として厳しい評価となることから、重要事故シーケンス等を

評価し成立性を確認することで、他の事故シーケンスグループ等も包絡されることを確認する。

c. 燃料

(a) 常設代替交流電源設備、大型送水ポンプ車、大量送水車、可搬式窒素供給装置、非常用ディーゼル発電機等及び緊急時対策所用発電機のうち、事故シーケンスグループ等における事故収束に必要な設備を考慮して消費する燃料（軽油）が備蓄している軽油量にて7日間の運転継続が可能であることを評価する。

(b) 全交流動力電源喪失の発生又は重畳を想定しない事故シーケンスについては、非常用ディーゼル発電機等からの給電による燃料消費量の評価を行う。また、外部電源喪失を想定しない場合においても、仮に外部電源が喪失し非常用ディーゼル発電機等から給電することを想定し、燃料消費量の確認を行う。常設代替交流電源設備からの給電を想定する事故シーケンスグループ等においては、常設代替交流電源設備からの給電による燃料消費量の評価を行う。

この場合、燃料（軽油）の備蓄量として、非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等（約730m³）及びガスタービン発電機用軽油タンク（約450 m³）の合計容量（約1,180m³）を考慮する。

(c) 全交流動力電源喪失の発生又は重畳を想定する事故シーケンスについては、常設代替交流電源設備からの給電による燃料消費量の評価を行う。この場合、燃料（軽油）の備蓄量として、ガスタービン発電機用軽油タンク（約450m³）の容量を考慮する。

(d) 緊急時対策所用発電機の使用を想定する事故シーケンスグループ等については、緊急時対策所用発電機の燃料消費量の評価を行う。

この場合、燃料（軽油）の備蓄量として、緊急時対策所用燃料地下タンク（約45m³）の容量を考慮する。

(e) 燃料消費量の計算においては、電源設備等が保守的に事象発生直後から燃料を消費することを想定し算出する。

d. 電源

(a) 全交流動力電源喪失の発生又は重畳を想定する事故シーケンスにおいては、常設代替交流電源設備により、有効性評価において考慮する設備に電源供給を行い、その最大負荷が常設代替交流電源設備の連続定格容量（約4,800kW）未満となることを評価する。

(b) 全交流動力電源喪失の発生又は重畳を想定しない事故シーケンスにおいては、非常用ディーゼル発電機等からの給電を考慮し、また、外部電源喪失を想定しない事故シーケンスにおいても、保守的に外部電源が喪失するものとして、非常用ディーゼル発電機等から給電するものとして評価す

る。

外部電源が喪失するものとした場合、常設代替交流電源設備により、有効性評価で考慮する設備に電源供給を行う事故シーケンスグループ等については、その最大負荷が、常設代替交流電源設備の連続定格容量（約4,800kW）未満となることを評価する。

- (c) 各事故シーケンスにおける対策に必要な設備は、重要事故シーケンス等の対策設備に包絡されるため、重要事故シーケンス等の評価し成立性を確認することで、他の事故シーケンスグループ等も包絡されることを確認する。

6.2 重大事故等対策時に必要な要員の評価結果

(1) 必要な要員の評価結果

各事故シーケンスグループにおいて、重大事故等対策時に必要な操作項目、必要な要員数及び移動時間を含めた各操作の所要時間について確認した。

島根2号炉において、原子炉運転中を想定する。原子炉運転中に必要な要員数が最も多い事故シーケンスグループ等は、「2.3.1 全交流動力電源喪失（長期TB）」、「2.3.2 全交流動力電源喪失（TBU）」、「2.3.3 全交流動力電源喪失（TBD）」、「2.3.4 全交流動力電源喪失（TBP）」、「2.4.1 崩壊熱除去機能喪失（取水機能が喪失した場合）」、「3.1.2 残留熱代替除去系を使用する場合」、「3.1.3 残留熱代替除去系を使用しない場合」、「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」、「3.3 原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」、「3.4 水素燃焼」、「3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」であり、必要な要員は31名である。必要な作業対応は、中央制御室の運転員9名、発電所構内に常駐している緊急時対策要員29名及び自衛消防隊7名の初動体制の要員45名で対処可能である。これらの要員数を夜間及び休日（平日の勤務時間帯以外）においても確保可能である。

また、島根2号炉において、原子炉運転停止中を想定する。原子炉運転停止中に必要な要員数が最も多い事故シーケンスグループ等は、「5.2 全交流動力電源喪失」の事象であり、必要な要員は29名である。必要な作業対応は、中央制御室の運転員7名、発電所構内に常駐している緊急時対策要員29名及び自衛消防隊7名の初動体制の要員43名で対処可能である。これらの要員数を夜間及び休日（平日の勤務時間帯以外）においても確保可能である。

また、燃料プールに燃料が取り出されている期間において、必要な要員が最も多い事故シーケンスグループ等は、「4.2 想定事故2」であり、必要な要員は26名である。必要な作業対応は、中央制御室の運転員7名、発電所構内に常駐している緊急時対策要員29名及び自衛消防隊7名の初動体制の要員43名で対処可能である。これらの要員数を夜間及び休日（平日の勤務時間帯以外）においても確保可能である。

（添付資料 6.1.1, 6.2.1, 6.2.2）

6.3 重大事故等対策時に必要な水源，燃料及び電源の評価結果

事象発生後7日間は，外部からの支援がない場合においても，必要量以上の水源，燃料及び電源の供給が可能である。

(1) 水源の評価結果

a. 原子炉及び原子炉格納容器への注水

原子炉及び原子炉格納容器への注水における水源評価において，最も厳しくなる事故シーケンスグループ等は「2.1 高圧・低圧注水機能喪失」及び「2.4.2 崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系が故障した場合）」である。

低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水及び格納容器代替スプレイ系（可搬型）による格納容器スプレイについては，合計約3,600m³の水が必要となる。

水源として，低圧原子炉代替注水槽に約740m³及び輪谷貯水槽（西1／西2）に約7,000m³の水を保有しており，高圧・低圧注水機能喪失の場合は事象発生2時間30分後以降，崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系が故障した場合）の場合は事象発生8時間後以降に輪谷貯水槽（西1／西2）から低圧原子炉代替注水槽へ水の移送を行うことで，低圧原子炉代替注水槽を枯渇させることなく，低圧原子炉代替注水槽を水源とした7日間の注水継続が可能である。また，輪谷貯水槽（西1／西2）を枯渇させることなく，輪谷貯水槽（西1／西2）を水源とした格納容器スプレイが可能である。

b. 燃料プールへの注水

燃料プールへの注水における水源評価において，最も厳しくなる事故シーケンスグループ等は，「4.1 想定事故1」及び「4.2 想定事故2」である。

大量送水車による燃料プール注水において，約2,100m³の水が必要となる。

水源として，輪谷貯水槽（西1／西2）に約7,000m³の水を保有しており，水源を枯渇させることなく7日間の注水継続が可能である。

（添付資料6.3.1）

(2) 燃料の評価結果

a. 全交流動力電源喪失の発生又は重畳を考慮しない場合

全交流動力電源喪失の発生又は重畳を考慮しない場合の燃料評価において，最も燃料の消費量が厳しくなる事故シーケンスグループ等は，「2.1 高圧・低圧注水機能喪失」，「2.4.2 崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系が故障した場合）」，「2.6 L O C A時注水機能喪失」である。

非常用ディーゼル発電機等による電源供給については，保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると7日間の運転継続に約700m³の軽油が必要となる。常設代替交流電源設備による電源供給については，保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると，7日の運転継続に約

352m³の軽油が必要となる。大量送水車による低圧原子炉代替注水槽への給水については、保守的に事象発生直後からの大量送水車の運転を想定すると、7日間の運転継続に約12m³の軽油が必要となる。

7日間の運転継続に必要な軽油は、これらを合計して約1,064m³の軽油が必要となる。

さらに、緊急時対策所用発電機による電源供給については、保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると、7日間の運転継続に約8m³の軽油が必要となる。

よって、事故対応に必要な軽油は、非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等にて約730m³、ガスタービン発電機用軽油タンクにて約450m³、緊急時対策所用燃料地下タンクにて約45m³を備蓄しているため、必要量の軽油を供給可能である。

b. 全交流動力電源喪失の発生又は重畳を考慮した場合

全交流動力電源喪失の発生又は重畳を考慮した場合の燃料評価において、最も燃料の消費量が厳しくなる事故シーケンスグループ等は、「3.1.2 残留熱代替除去系を使用する場合」、「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」、「3.3 原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」、「3.4 水素燃焼」、「3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」である。

常設代替交流電源設備による電源供給については、保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると、7日間の運転継続に約352m³の軽油が必要となる。大量送水車による低圧原子炉代替注水槽への補給又はペDESTAL代替注水系（可搬型）によるペDESTAL注水については、保守的に事象発生直後からの運転を想定すると、7日間の運転継続に約12m³の軽油が必要となる。原子炉補機代替冷却系の大型送水ポンプ車については、保守的に事象発生直後からの大型送水ポンプ車の運転を想定すると、7日間の運転継続に約53m³の軽油が必要となる。可搬式窒素供給装置による格納容器への窒素供給については、保守的に事象発生直後からの可搬式窒素供給装置の運転を想定すると、7日間の運転継続に約8m³の軽油が必要となる。

7日間の運転継続に必要な軽油は、これらを合計して約425m³の軽油が必要となる。

さらに、緊急時対策所用発電機による電源供給については、保守的に事象発生直後から最大負荷での運転を想定すると、7日間の運転継続に約8m³の軽油が必要となる。

よって、事故対応に必要な軽油は、非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等にて約730m³、ガスタービン発電機用軽油タンクにて約450m³、緊急時対策所用燃料地下タンクにて約45m³を備蓄しているため、必要量の軽油を供給可能である。

(添付資料6.3.1)

(3) 電源の評価結果

全交流動力電源喪失の発生又は重畳を考慮する場合に評価上、最も負荷が厳しくなる事故シーケンスグループ等は、「2.3.1 全交流動力電源喪失（長期TB）」、「2.3.2 全交流動力電源喪失（TBU）」、「2.3.3 全交流動力電源喪失（TBD）」、「2.3.4 全交流動力電源喪失（TBP）」である。常設代替交流電源設備の電源負荷については、重大事故等対策時に必要な負荷として、約4,286kWが必要となるが、常設代替交流電源設備の連続定格容量である4,800kW未満であることから、必要負荷に対しての電源供給が可能である。

なお、全交流動力電源喪失の発生又は重畳を考慮しない場合は、非常用ディーゼル発電機等による電源供給を想定しているが、重大事故等対策に必要な負荷は、非常用ディーゼル発電機等の負荷に含まれることから、非常用ディーゼル発電機等による電源供給が可能である。

また、直流電源については外部電源喪失時においても、非常用ディーゼル発電機等又は常設代替交流電源設備により交流電源を充電器盤に供給することで継続的な直流電源の供給が可能である。なお、事故シーケンスグループ「2.3 全交流動力電源喪失」においては、交流電源が事象発生後24時間復旧しない場合を想定しており、この場合でも直流電源負荷の切り離し及び所内常設蓄電式直流電源設備への切替えの実施により、事象発生後24時間の連続した直流電源の供給が可能である。

(添付資料 6.3.1)

他号炉との同時被災時における必要な要員及び資源について

島根原子力発電所2号炉（以下「2号炉」という。）運転中に重大事故等が発生した場合、他号炉及び2号炉の燃料プールについても重大事故等が発生すると想定し、それらの対応を含めた同時被災時に必要な要員及び資源について整理する。

なお、島根原子力発電所1号炉（以下「1号炉」という。）は、廃止措置中であり、保有する燃料からの崩壊熱の継続的な除去が必要となる。

また、島根原子力発電所3号炉（以下「3号炉」という。）については、初装荷燃料装荷前のため、燃料からの崩壊熱除去が不要である。

そのため、他号炉を含めた同時被災が発生すると、他号炉への対応が必要となり、2号炉への対応に必要な要員及び資源の十分性に影響を与えるおそれがある。また、必要な要員及び資源が十分であっても、同時被災による他号炉の状態により、2号炉への対応が阻害されるおそれもある。

以上を踏まえ、他号炉を含めた同時被災時に必要な要員及び資源の十分性を確認するとともに、他号炉における高線量場の発生を前提として2号炉重大事故等対応の成立性を確認する。

また、2号炉の燃料プールを含めた事故対応においても当該号炉の要員及び資源が十分であることを併せて確認する。

1. 同時被災時に必要な要員及び資源の十分性

(1) 想定する重大事故等

東京電力福島第一原子力発電所の事故及び共通要因による複数炉の重大事故等の発生の可能性を考慮し、1、2号炉について、全交流動力電源喪失及び燃料プールでのスロッシングの発生を想定する。なお、1号炉の燃料プールにおいて、全保有水喪失を想定した場合は自然対流による空気冷却での使用済燃料の冷却維持が可能と考えられるため^{*1}、必要な要員及び資源を検討する本事象では、燃料プールへの注水実施が必要となるスロッシングの発生を想定した。

また、不測の事態を想定し、1号炉において事象発生直後に内部火災が発生していることを想定する。なお、水源評価に際しては1号炉における消火活動による水の消費を考慮する。

2号炉について、有効性評価の各シナリオのうち、必要な要員及び資源（水源、燃料及び電源）ごとに最も厳しいシナリオを想定する。

第1表に想定する各号炉の状態を示す。上記に対して、7日間の対応に必要な要員、必要な資源、2号炉の対応への影響を確認する。

※1 技術的能力 添付資料1.0.16 「重大事故等時における停止号炉の影響について」参照

(2) 必要となる対応操作，必要な要員及び資源の整理

「(1) 想定する重大事故等」にて必要となる対応操作，必要な要員及び7日間の対応に必要なとなる資源について，第2表及び第1図のとおり整理する。

(3) 評価結果

1号炉にて「(1) 想定する重大事故等」が発生した場合の必要な要員及び必要な資源についての評価結果を以下に示す。

a. 必要な要員の評価

重大事故等発生時に必要な1号炉の対応操作及び2号炉の燃料プールの対応操作については，運転員，自衛消防隊，緊急時対策要員及び8時間以降を目安に発電所外から参集する要員にて対応可能である。

b. 必要な資源の評価

(a) 水源

2号炉においては，水源の使用量が最も多い「2.1 高圧・低圧注水機能喪失」及び「2.4.2 崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系が故障した場合）」を想定すると，原子炉注水及び格納容器スプレイの実施のため，7日間で約3,600m³の水が必要となる。また，第3表に示すとおり，2号炉における燃料プールへの注水量（通常水位までの回復，水位維持）は，7日間の対応を考慮すると，約574m³の水が必要となる（合計約4,174m³）。

2号炉における水源として，低圧原子炉代替注水槽に約740m³及び輪谷貯水槽（西1／西2）に約7,000m³の水を保有しているため，原子炉及び燃料プールの対応に必要な水源は確保可能である（合計約7,740m³）。

1号炉において，スロッシングによる水位低下を想定しても，遮蔽に必要な水位を維持しており，燃料プール水温が100℃に到達するのは約11日後であり，7日間で燃料プールへの注水は必要ない。なお，スロッシングによる水位低下を回復させるために必要な水量を考慮すると，約180m³となる。

1号炉における水源として，第3表に示す必要な水量を純水タンク，ろ過水タンク等にて確保する運用であることから，2号炉における水源を用いなくても1号炉の7日間の対応が可能である^{※2}。

内部火災に対する消火活動に必要な水源は約32m³であり，ろ過水タンクに必要な水量が確保されるため，2号炉における水源を用いなくても7日間の対応が可能である。

なお，1号炉においても，燃料プール水がサイフォン現象により流出

する場合に備え、2号炉と同様のサイフォンブレイク配管を設け、サイフォン現象による燃料プール水の流出を停止することが可能な設計としている。

また、スロッシングによる水位低下に伴う原子炉建物5階（燃料取替階）の線量率の上昇はないが、線量率上昇により、原子炉建物5階（燃料取替階）での燃料プールへの注水操作が困難になる場合に備え、高圧発電機車により給電した消火系、復水輸送系、補給水系による当該現場作業を必要としない注水手段を確保している。

1号炉の注水及び給電に用いる設備の台数と共用の関係は第4表に示すとおりである。高圧発電機車は1号炉用として、1台確保している。また、高圧発電機車を用いることで復水輸送系、補給水系、消火系等への給電も実施可能である。

※2 燃料プールの通常水位までの回復を想定した場合、1号炉においては、内部火災に対する消火活動に必要な水源と合わせ、合計約212m³の水が必要となる。（1、2号炉で合計約786m³）

したがって、燃料プールの通常水位までの回復及び運転中の原子炉での事故対応を想定すると、1、2号炉にて合計4,386m³の水が必要である。

2号炉の低圧原子炉代替注水槽及び輪谷貯水槽（西1／西2）における保有水は約7,740m³であり、ろ過水タンク、純水タンク等の確保される保有水量は約2,800m³以上である（合計約10,540m³以上）。

これらの合計量は、2号炉の重大事故等対応及び1号炉の内部火災への対応を実施したうえで、1号炉の燃料プールの水位を通常水位まで回復させ、その後7日間の水位維持を可能となる水量である。7日以降については十分時間余裕があるため、外部からの水源供給や支援等にも期待できることから、1号炉の燃料プールの水位維持は可能である。

(b) 燃料（軽油）

2号炉において、軽油の使用量が最も多い「2.1 高圧・低圧注水機能喪失」、「2.4.2 崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系が故障した場合）」、「2.6 L O C A時注水機能喪失」を想定すると、非常用ディーゼル発電機（2台）の7日間の運転継続に約544m³*3、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機の7日間の運転継続に約156m³*3、ガスタービン発電機の7日間の運転継続に約352m³*3、低圧原子炉代替注水槽への補給及び燃料プールスプレイ系に使用する大量送水車の7日間の運転継続に約12m³*3の軽油が必要となる。（合計約1,064m³）

非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等及びガスタービン発電機用軽油タンクにて合計約1,180m³の軽油を保有しており、これらの使用が可能であることから、2号炉の原子炉及び燃料プールの事故対応について、7日間の対応は可能である。

1号炉の燃料プールの注水設備への電源供給に使用する軽油の使用量として、保守的に最大負荷で高圧発電機車を起動した場合を想定しており、事象発生から7日間使用した場合に必要な燃料消費量は、約19m³である。

1号炉の燃料プールの注水設備に使用する軽油の使用量として、大量送水車を想定しており、7日間で必要な燃料消費量は、約12m³となる。

なお、1号炉における内部火災が発生した場合の消火活動に対しても、化学消防自動車及び小型動力ポンプ付水槽車の7日間の運転継続を仮定すると約10m³*³必要となる。(合計約40m³)

1号炉のディーゼル発電機燃料地下タンクにて約78m³の軽油を保有しており、これらの使用が可能であることから、1号炉の燃料プールの事故対応及び内部火災の消火活動について、7日間の対応は可能である。

緊急時対策所用燃料地下タンクはすべての事故シーケンスグループ等で使用を想定するが、同時被災の有無にかかわらず緊急時対策所用発電機の7日間の運転継続に約8m³*³の軽油が必要となる。緊急時対策所用燃料地下タンクに約45m³の軽油を保有していることから、原子炉及び燃料プールの7日間の対応は可能である。

※3 保守的に事象発生直後から運転を想定し、燃料消費率は最大負荷時を想定する。

(c) 電源

高圧発電機車による電源供給により、重大事故等の対応に必要な負荷(計器類)に電源供給が可能である。なお、高圧発電機車による給電ができない場合に備え、可搬型計測器接続の手順を用意している。

(4) 2号炉の重大事故等時の対応への影響について

「(3)評価結果」に示すとおり、重大事故等時に必要となる対応操作は、運転員、自衛消防隊、緊急時対策要員及び8時間以降を目安に発電所外から参集する要員にて対応可能であることから、2号炉の重大事故等に対処する要員に影響を与えない。

2号炉の各資源にて原子炉及び燃料プールにおける7日間の対応が可能であり、また、1号炉の各資源にて1号炉の燃料プール及び内部火災における7日間の対応が可能である。

以上のことから、1号炉に重大事故等が発生した場合にも、2号炉の重大事故等時対応への影響はない。

2. 1号炉における高線量場発生による2号炉対応への影響

「1. 同時被災時に必要な要員及び資源の十分性」で想定する事故時の1号炉の燃料プールにおいて、スロッシング等の水位低下による現場線量率上昇は、以下の資料で示すとおり、2号炉の重大事故時対応に影響するものではない。

技術的能力 「添付資料 1.0.16 重大事故等発生時における停止号炉の影響について」

「添付資料 1.0.2 補足資料6 1～3号炉同時発災時におけるアクセスルートへの影響」

3. まとめ

「1. 同時被災時に必要な要員及び資源の十分性」及び「2. 他号炉における高線量場発生による2号炉対応への影響」に示すとおり、高線量場の発生を含め、1号炉に重大事故等が発生した場合にも、2号炉の重大事故等の対応は可能である。

第1表 想定する各号炉の状態

項目	2号炉	1号炉
要員	<ul style="list-style-type: none"> 全交流動力電源喪失 燃料プールでのスロッシング発生 「3.1.3 残留熱代替除去系を使用しない場合」 「4.2 想定事故2」※¹ 	
水源	<ul style="list-style-type: none"> 全交流動力電源喪失 燃料プールでのスロッシング発生 「2.1 高圧・低圧注水機能喪失」, 「2.4.2 崩壊熱除去機能喪失 (残留熱除去系が故障した場合)」 「4.2 想定事故2」※¹ 	<ul style="list-style-type: none"> 全交流動力電源喪失※² 燃料プールでのスロッシング発生 内部火災※³
燃料	<ul style="list-style-type: none"> 外部電源喪失 燃料プールでのスロッシング発生 「2.1 高圧・低圧注水機能喪失」, 「2.4.2 崩壊熱除去機能喪失 (残留熱除去系が故障した場合)」, 「2.6 LOCA時注水機能喪失」 「4.2 想定事故2」※¹ 	
電源	<ul style="list-style-type: none"> 全交流動力電源喪失 燃料プールでのスロッシング発生 「2.3.1 全交流動力電源喪失 (長期TB)」 「4.2 想定事故2」※¹ 	

※¹ サイフォン現象による漏えいは、サイフォンブレイク配管により停止される。

したがって、この漏えいによる影響はスロッシングによる溢水に包絡されるため、燃料プールからの漏えいを想定する。

※² 燃料については高圧発電機車の運転継続を想定する。

※³ 2号炉は火災防護措置が強化されることから、1号炉での内部火災を想定する。

第2表 同時被災時の1, 2号炉の燃料プールの対応操作, 必要な要員及び資源

必要となる対応操作	対応操作概要	対応要員	必要な資源
<p>内部火災に対する消火活動</p>	<p>建物内の火災を想定し, 当該火災に対する現場確認・消火活動を実施する。</p>	<p>自衛消防隊</p>	<p>○水源 32m³ ○燃料 化学消防自動車: 約5m³ (0.0275 m³/h × 24h × 7日 × 1台) 小型動力ポンプ付水槽車: 約5m³ (0.025 m³/h × 24h × 7日 × 1台)</p>
<p>各注水系による燃料プールへの注水 (復水輸送系, 燃料プール補給水系, 消火系, 大量送水車による燃料プールへの給水, 2号炉は有効性評価のシナリオを想定)</p>	<p>各注水系による燃料プール及び格納容器への給水を行い, 燃料プールからの崩壊熱の継続的な除去を行う。</p>	<p>運転員, 緊急時対策要員, 8時間以降を目安に発電所外から参集する要員</p>	<p>○水源 (詳細は第3表参照) ・ 1号炉: 180m³ ・ 2号炉: 4,174m³** ※2号炉については有効性評価「2.1 高圧・低圧注水機能喪失」, 「2.4.2 崩壊熱除去機能喪失 (残留熱除去系が故障した場合)」で想定している水源(3,600m³)も含む ○燃料 ・ 1号炉 大量送水車: 約12m³ (0.0677m³/h × 24h × 7日 × 1台) ・ 2号炉 大量送水車: 約12m³ (0.0677m³/h × 24h × 7日 × 1台)</p>
<p>高圧発電機車による給電, 受電</p>	<p>高圧発電機車による給電, 受電操作を実施する。</p>	<p>運転員, 緊急時対策要員, 8時間以降を目安に発電所外から参集する要員</p>	<p>○燃料 高圧発電機車: 約19m³ (0.11m³/h × 24h × 7日 × 1台)</p>
<p>燃料給油作業</p>	<p>大量送水車及び高圧発電機車に給油を行う</p>	<p>緊急時対策要員</p>	<p>—</p>

第3表 1, 2号炉の必要な水量

	1号炉		2号炉	
	廃止措置中 ^{※1}		運転中 ^{※1}	
	炉	燃料プール	炉	燃料プール
炉心燃料	全燃料取り出し		装荷済	
原子炉開放状態	開放（プールゲート閉）		未開放（プールゲート閉）	
水位	—	NWL	重要事故シナ ケンス（2.1 高圧・低圧注 水機能喪失, 2.4.2 崩壊 熱除去機能喪 失（残留熱除 去系が故障し た場合）によ る	NWL
想定するプラントの 状態		スロッシング による漏えい +全交流動力 電源喪失		スロッシングに よる漏えい +全交流動力電 源喪失
スロッシング 溢水量 ^{※2} (m ³)		180		180
65℃到達までの時間 (hr)		111		17.94
100℃到達までの 時間 (hr)		266.4		43.07
必要な注水量① ^{※3} (m ³)		—		394
事象発生からTAF到 達までの時間 (hr)		1,579		306.03
通常水位（オーバー フロー水位）から必 要な遮蔽水位 ^{※4} まで の水位差 (m)		5.6		2.6
必要な注水量② ^{※3} (m ³)		180		574

※1 廃止措置中の1号炉は平成27年4月時点での崩壊熱により算出。2号炉はプラント停止50日後の崩壊熱により算出。

※2 1号炉の溢水量は、2号炉の評価結果に基づきスロッシングによる溢水量を設定（1号炉の燃料プールは2号炉に比べて保有水量や表面積が小さいため溢水量は少なくなると考えられる）。

※3 「必要な注水量①」：蒸発による水位低下防止に必要な注水量。「必要な注水量②」：通常水位までの回復及びその後7日間通常水位を維持するために必要な注水量。

※4 2号炉原子炉建物原子炉棟4階（燃料取替階）での現場の線量率が10mSv/h以下となる水位（遮蔽水位の計算に用いた1号炉の線源の強度は保守的に設定（実際の保管体数798体に対して1539体保管している前提で評価））

第4表 1号炉の注水及び給電に用いる設備の台数

記載は設置台数であり，（）内はその系統のみで注水するのに必要な台数

		1号炉	備考
注水設備	復水輸送系	3(1)	全交流動力電源喪失時は高圧発電機車による給電を実施することで使用可能
	補給水系	3(1)	全交流動力電源喪失時は高圧発電機車による給電を実施することで使用可能
	消火系	2(1)	全交流動力電源喪失時は高圧発電機車による給電を実施することで使用可能
給電設備	大量送水車	1(1)	十分時間余裕があるため，1台を用いて，必要な箇所へ順次注水を実施していくことが可能
	高圧発電機車	1(1)	十分時間余裕があるため，1台を用いて，必要な箇所へ順次給電を実施していくことが可能

炉号	実施箇所・必要人員数				操作項目	経過時間(時間)														備考
	運転員 (中央制御室) ※	運転員 (現場)	緊急時対策要員 (現場)	自衛消防隊		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1号炉 「全発電動力電源喪失及び燃料プールのスロッシング並びに火災発生」を想定	1人	—	—	—	プラント状況判断															▽ 事業発生 ▽ 参加要員による作業開始 10分 10分 10分 消火活動継続実施 2号炉の作業を優先に運営実施 2号炉の作業を優先に運営実施 2号炉の作業を優先に運営実施 運営実施
	(1人) A	—	—	—	プラント監視 (発電不可能な場合は、可搬型計測器接続による計器監視)															
	(1人) A	—	—	—	火災状況確認															
	—	1人	—	自衛消防隊にて対応	火災現場確認・消火活動															
	—	—	—	—	非常用ディーゼル発電機 機能回復 (機材上考慮せず)															
共通	(1人) A	—	参加要員にて対応	—	復水輸送系、補給水系、消火系による燃料プール注水															
	(1人) A	—	参加要員にて対応	—	大電送水車による燃料プール注水 (復水輸送系等による注水が不可能な場合)															
	—	—	参加要員にて対応	—	高圧発電機車による給電・受電															
	—	—	参加要員にて対応	—	燃料補給作業															

() 内の数字は他の作業終了後、移動して対応する人員数
※：当直長含む人数

なお、2号炉において原子炉運転中を想定した場合、原子炉側と燃料プール側との重大事故等対応の重畳も考えられるが、運転中に燃料プールに貯蔵されている燃料の崩壊熱が低いことから(第3表参照)、原子炉側の事故対応が収束に向かっている状態での対応となり、緊急時対策要員や参加要員により対応可能である。またプラント状態の監視においても、原子炉側で期待している運転員が併せて燃料プール側を監視できるため、現在の要員での対応が可能である。

第1図 1号炉における各作業と所要時間

重大事故等対策の要員の確保及び所要時間について

重大事故等の発生時においては、緊急時警戒体制を発令し、緊急時対策要員を招集することで事故の対応にあたる。夜間及び休日（平日の勤務時間帯以外）において、初動体制として、中央制御室の運転員 9 名（運転停止中においては 7 名）、発電所構内に常駐している緊急時対策要員 29 名及び自衛消防隊 7 名の合計 45 名（運転停止中においては 43 名）により、迅速な対応を図ることとしている。

表 1 及び表 2 に各事故シーケンスにおける作業に必要な要員数を示す。

運転中に最も多く要員を必要とするのは、「2.3.1 全交流動力電源喪失（長期TB）」、「2.3.2 全交流動力電源喪失（TBU）」、「2.3.3 全交流動力電源喪失（TBD）」、「2.3.4 全交流動力電源喪失（TBP）」、「2.4.1 崩壊熱除去機能喪失（取水機能が喪失した場合）」、「3.1.2 残留熱代替除去系を使用する場合」、「3.1.3 残留熱代替除去系を使用しない場合」、「3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」、「3.3 原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用」、「3.4 水素燃焼」、「3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」である。事象発生後に必要な要員は、当直長 1 名、当直副長 1 名、2 号運転員 5 名、緊急時対策本部要員（通報連絡等を行う要員） 5 名及び緊急時対策要員（現場） 19 名の合計 31 名であることから、初動体制の要員（45 名）で事故対応が可能である。

また、運転停止中最も多く要員を必要とするのは、「5.2 全交流動力電源喪失」である。事象発生後に必要な要員は、当直長 1 名、当直副長 1 名、2 号運転員 3 名、緊急時対策本部要員（通報連絡等を行う要員） 5 名及び緊急時対策要員（現場） 19 名の合計 29 名であることから、初動体制の要員（43 名）で事故対応が可能である。

燃料プールに燃料を取り出している期間中に最も要員を必要とするのは、「4.2 想定事故 2」の事象である。必要な要員は、当直長 1 名、当直副長 1 名、2 号運転員 3 名、緊急時対策本部要員（通報連絡等を行う要員） 5 名及び緊急時対策要員（現場） 16 名の合計 26 名であることから、初動体制の要員（43 名）で対応が可能である。

各事故シーケンス等において必要な作業については、初動体制の要員により実施可能である。

以上より、重大事故等対策の成立性に問題がないことを確認した。

表1 運転中の各事故シナリオにおける初動要員 (1 / 2)

事故シナリオ	運転員					緊急時対策要員			自衛 消防隊	必要 要員数
	当直長	当直副長	2号 運転員	1号 運転員	合計	緊急時対策 本部要員 (通報連絡等)	緊急時対策 要員 (現場)	合計		
発電所に常駐している要員	1	1	5	2	9	5	24	29	7	45
2.1 高圧・低圧注水機能喪失	1	1	3	—	5	5	18	23	—	28
2.2 高圧注水・減圧機能喪失	1	1	3	—	5	5	—	5	—	10
2.3.1 全交流動力電源喪失 (長期T B)	1	1	5	—	7	5	19	24	—	31
2.3.2 全交流動力電源喪失 (T B U)	1	1	5	—	7	5	19	24	—	31
2.3.3 全交流動力電源喪失 (T B D)	1	1	5	—	7	5	19	24	—	31
2.3.4 全交流動力電源喪失 (T B P)	1	1	5	—	7	5	19	24	—	31
2.4.1 崩壊熱除去機能喪失 (取水機能が喪失した場合)	1	1	5	—	7	5	19	24	—	31
2.4.2 崩壊熱除去機能喪失 (残留熱除去系が故障した場合)	1	1	3	—	5	5	18	23	—	28
2.5 原子炉停止機能喪失	1	1	4	—	6	5	—	5	—	11
2.6 LOCA 時注水機能喪失	1	1	3	—	5	5	18	23	—	28
2.7 格納容器バイパス (インターフェイスシステムLOCA)	1	1	3	—	5	5	—	5	—	10

■ : 必要な要員数が最大となる事故シナリオを示す。

表1 運転中の各事故シナリオにおける初動要員 (2 / 2)

事故シナリオ	運転員					緊急時対策要員			自衛 消防隊	必要 要員数
	当直長	当直副長	2号 運転員	1号 運転員	合計	緊急時対策 本部署員 (通報連絡等)	緊急時対策 要員 (現場)	合計		
発電所に常駐している要員	1	1	5	2	9	5	24	29	7	45
3.1.2 雰囲気圧力・温度による静的負荷 (格納容器過圧・過温破損) 残留熱代替除去系を使用する場合	1	1	5	—	7	5	19	24	—	31
3.1.3 雰囲気圧力・温度による静的負荷 (格納容器過圧・過温破損) 残留熱代替除去系を使用しない場合	1	1	5	—	7	5	19	24	—	31
3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱	1	1	5	—	7	5	19	24	—	31
3.3 原子炉圧力容器外の溶融燃料—冷却材相互作用	1	1	5	—	7	5	19	24	—	31
3.4 水素燃焼	1	1	5	—	7	5	19	24	—	31
3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用	1	1	5	—	7	5	19	24	—	31

□ : 必要な要員数が最大となる事故シナリオを示す。

表2 燃料プールにおける重大事故に至るおそれのある事故及び運転停止中の原子炉における重大事故に至るおそれがある
事故の各事故シナリオにおける初動要員

事故シナリオ	運転員					緊急時対策要員			自衛 消防隊	必要 要員数
	当直長	当直副長	2号 運転員	1号 運転員	合計	緊急時対策 本部要員 (通報連絡等)	緊急時対策 要員 (現場)	合計		
発電所に常駐している要員	1	1	3	2	7	5	24	29	7	43
4.1 想定事故 1	1	1	1	—	3	5	16	21	—	24
4.2 想定事故 2	1	1	3	—	5	5	16	21	—	26
5.1 崩壊熱除去機能喪失	1	1	3	—	5	5	—	5	—	10
5.2 全交流動力電源喪失	1	1	3	—	5	5	19	24	—	29
5.3 原子炉冷却材の流出	1	1	3	—	5	5	—	5	—	10
5.4 反応度の誤投入※1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

※1：本事故シナリオにおいて、重大事故等対策はすべて自動で作動するため、「—」とする。なお、スクラム動作後の原子炉の状態確認において、中央制御室の運転員1名で実施可能である。

■：燃料プールにおける重大事故に至るおそれのある事故及び運転停止中の原子炉における重大事故に至るおそれがある事故のそれぞれにおいて、必要な要員数が最大となる事故シナリオを示す。

重要事故シーケンス等以外の事故シーケンスの 要員の評価について

1. はじめに

各事故シーケンスグループの有効性評価で、重要事故シーケンス等の事故対応に必要な要員について評価している。各事故シーケンスグループ等のその他の事故シーケンスについては本資料にて、重要事故シーケンス等の作業項目を基に必要な要員数を確認する。

2. 重要事故シーケンス等以外の事故シーケンスにおける要員の評価結果

重要事故シーケンス等以外の事故シーケンスにおいて、重大事故等対策の実施に必要な作業項目を抽出し、各事故シーケンスグループ等の重要事故シーケンスと比較し、必要な要員数を確認した。その結果は、表1から表3及び別紙のとおりである。

なお、評価の結果、最も要員が必要となる事故シーケンスにおいても最大31名（原子炉運転停止中では29名）であり、重大事故等に対処する要員の45名（原子炉運転停止中は43名）以内で重大事故等の対応が可能である。

3. 必要な要員の評価方法

- (1) 重要事故シーケンス等以外の事故シーケンスの要員については、対応する重要事故シーケンスと比較し、対応可能であるか評価を行う。
- (2) 各事故シーケンスの評価においても、対応する重要事故シーケンスと同様又は保守的な条件で評価する。
- (3) 事故発生初期の状況判断時に対応する確認行為については、これまでの重要事故シーケンスと同様に、中央制御室のすべての運転員で対応するため、要員数としての評価は不要とする。
- (4) 運転員の操作及び移動についても重要事故シーケンスと同様の考え方にて評価を行う。
- (5) 「運転中の原子炉における重大事故」の評価は、別紙「必要な要員数の観点での評価事故シーケンスの代表性の整理」に示すとおり、要員の観点で厳しいPDS及び炉心損傷後の事故シーケンスを考慮しても、現在の要員数で重大事故への対応は可能であり、必要な要員数を考慮しても評価事故シーケンスは代表性を有していることを確認する。

表 1 運転中の原子炉における重大事故に至るおそれがある事故の評価結果 (1 / 6)

事故シナリオ	重要事故シナリオ	その他の事故シナリオ	事象進展及び人数の増減理由	必要要員数	重要事故シナリオに必要な要員数
高圧・低圧注水機能喪失	過渡事象 + 高圧炉心冷却失敗 + 低圧炉心冷却失敗	2.1-① 過渡事象 + 圧力バウンダリ健全性 (SRV再閉) 失敗 + 高圧炉心冷却 (HPCS) 失敗 + 低圧炉心冷却失敗	事象進展及び人数の増減理由 ・「給水流量の全喪失」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする (起因事象は原子炉水位低下の観点で厳しい「給水流量の全喪失」を想定) ・主蒸気隔離弁の閉鎖により原子炉圧力は上昇し、逃がし安全弁 (逃がし弁機能) の再閉に失敗し、原子炉圧力は低下を始めるが、その後原子炉の減圧を実施し、低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始すること ・原子炉水位は回復する。 ・重要事故シナリオとの差異は原子炉の減圧のみ (逃がし安全弁 (逃がし弁機能) の再開失敗による減圧の有無) であるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 ・原子炉手動停止後、「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 ・原子炉は高圧状態にあるため原子炉の減圧操作後、低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 ・重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生することであり、事象進展は緩やかとなるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。	28	28
	過渡事象 + 高圧炉心冷却失敗 + 低圧炉心冷却失敗	2.1-② 手動停止 + 高圧炉心冷却失敗 + 低圧炉心冷却失敗	・原子炉手動停止後、「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 ・主蒸気隔離弁の閉鎖により原子炉圧力は上昇し、逃がし安全弁 (逃がし弁機能) が開放される。この時、逃がし安全弁 (逃がし弁機能) の再閉に失敗し、原子炉圧力は低下を始めるが、その後原子炉の減圧を実施し、低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始すること ・重要事故シナリオとの差異は原子炉の減圧の起点及び原子炉停止後に事故が発生することであり、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。	28	28
	過渡事象 + 高圧炉心冷却失敗 + 低圧炉心冷却失敗	2.1-③ 手動停止 + 圧力バウンダリ健全性 (SRV再閉) 失敗 + 高圧炉心冷却 (HPCS) 失敗 + 低圧炉心冷却失敗	・サポート系1区分の喪失の場合、一般的に他の区分が健全であるため対応手段が著しく制限される状態ではないが、事象を厳しくするため起因事象として緩和設備への影響が大きいため「交流電源故障 (1区分)」を設定し、原子炉停止操作後に「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 ・原子炉の減圧操作後、低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 ・重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生すること及び交流電源故障が区分1の場合、残留熱除去系 (A) の注入弁への電源供給が必要になるが、要員に増減なし。	28	28
	過渡事象 + 高圧炉心冷却失敗 + 低圧炉心冷却失敗	2.1-④ サポート系喪失 + 高圧炉心冷却失敗 + 低圧炉心冷却失敗	・サポート系1区分の喪失の場合、一般的に他の区分が健全であるため対応手段が著しく制限される状態ではないが、事象を厳しくするため起因事象として緩和設備への影響が大きいため「交流電源故障 (1区分)」を設定し、原子炉停止操作後に「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 ・主蒸気隔離弁の閉鎖により原子炉圧力は上昇し、逃がし安全弁 (逃がし弁機能) が開放される。この時、逃がし安全弁 (逃がし弁機能) の再閉に失敗し、原子炉圧力は低下を始めるが、その後原子炉の減圧を実施し、低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始すること ・重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生すること及び交流電源故障が区分1の場合、残留熱除去系 (A) の注入弁への電源供給が必要になるが、要員に増減なし。	28	28
	過渡事象 + 高圧炉心冷却失敗 + 低圧炉心冷却失敗	2.1-⑤ サポート系喪失 + 圧力バウンダリ健全性 (SRV再閉) 失敗 + 高圧炉心冷却 (HPCS) 失敗 + 低圧炉心冷却失敗	・原子炉手動停止後、「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 ・原子炉は高圧状態にあるため原子炉の減圧操作後、低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 ・重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生することであり、事象進展は緩やかとなるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。	10	10
高圧注水・減圧機能喪失	過渡事象 + 高圧炉心冷却失敗 + 原子炉減圧失敗	2.2-① 手動停止 + 高圧炉心冷却失敗 + 原子炉減圧失敗 2.2-② サポート系喪失 + 高圧炉心冷却失敗 + 原子炉減圧失敗	・原子炉手動停止後、「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 ・代替自動減圧作動回路を用いた逃がし安全弁 (自動減圧機能付き) の動作により原子炉が減圧し、低圧非常用炉心冷却系による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 ・重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生することであり、事象進展は緩やかとなるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 ・サポート系1区分の喪失の場合、一般的に他の区分が健全であるため対応手段が著しく制限される状態ではないが、事象を厳しくするため起因事象として緩和設備への影響が大きいため「交流電源故障 (1区分)」を設定し、原子炉停止操作後に「給水流量の全喪失」の発生、手動減圧代替自動減圧作動回路を用いた逃がし安全弁 (自動減圧機能付き) の動作により原子炉が減圧し、低圧非常用炉心冷却系による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 ・重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生すること及び使用できる低圧非常用炉心冷却系の系統数のみであり、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。	10	10

表 1 運転中の原子炉における重大事故に至るおそれがある事故の評価結果（2 / 6）

事故シケケンスグループ	重要事故シケケンス	その他の事故シケケンス	事象進展及び人数の増減理由	必要要員数	重要事故シケケンスに必要な要員数
全交流動力電源喪失（長期T B）	外部電源喪失+交流電源（D G - A, B）失敗+高圧炉心冷却（H P C S）喪失	重要事故シケケンス以外のシケケンスなし			31
全交流動力電源喪失（T B U）	外部電源喪失+交流電源（D G - A, B）失敗+高圧炉心冷却失敗	重要事故シケケンス以外のシケケンスなし			31
全交流動力電源喪失（T B D）	外部電源喪失+直流電源（区分1, 2）失敗+高圧炉心冷却（H P C S）失敗	重要事故シケケンス以外のシケケンスなし			31
全交流動力電源喪失（T B P）	外部電源喪失+交流電源（D G - A, B）失敗+圧力バウンダリ健全性（S R V再開）失敗+高圧炉心冷却（H P C S）失敗	重要事故シケケンス以外のシケケンスなし			31

表 1 運転中の原子炉における重大事故に至るおそれがある事故の評価結果 (3 / 6)

事故シナリオ	重要事故シナリオ	その他の事故シナリオ	事象進展及び人数の増減理由	必要員数	重要事故シナリオに必要な員数
崩壊熱除去機能喪失		2.4-① 過渡事象+高圧炉心冷却失敗 +崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「給水流量の全喪失」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする (起因事象は原子炉水位低下の観点で厳しい「給水流量の全喪失」を想定)。 原子炉の減圧後に低圧非常用炉心冷却系又は低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始すること、原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉水位を回復する系統が異なることであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 	28	
		2.4-② 過渡事象+圧力バウンダリ健全性 (SRV再閉) 失敗+崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「給水流量の全喪失」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする (起因事象は原子炉水位低下の観点で厳しい「給水流量の喪失」を想定)。 主蒸気隔離弁の閉鎖により原子炉圧力は上昇し、逃がし安全弁 (逃がし弁機能) が開放される。この時、逃がし安全弁 (逃がし弁機能) の再開に失敗し、原子炉圧力は低下を始め、原子炉隔離時冷却系が停止するが、非常用炉心冷却系又は低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始すること、原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉の減圧 (逃がし安全弁の再開失敗による減圧) 及び原子炉の減圧に伴い原子炉隔離時冷却系が停止し、他の注水手段により原子炉水位を回復することであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 	28	
		2.4-③ 過渡事象+圧力バウンダリ健全性 (SRV再閉) 失敗+高圧炉心冷却 (HPCS) 失敗+崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「給水流量の全喪失」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする (起因事象は原子炉水位低下の観点で厳しい「給水流量の全喪失」を想定)。 主蒸気隔離弁の閉鎖により原子炉圧力は上昇し、逃がし安全弁 (逃がし弁機能) が開放される。この時、逃がし安全弁 (逃がし弁機能) の再開に失敗し、原子炉圧力は低下を始め、原子炉隔離時冷却系が停止するが、原子炉の減圧を要し、低圧非常用炉心冷却系又は低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始すること、原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉の減圧 (逃がし安全弁の再開失敗による減圧) 及び原子炉の再開失敗による減圧) 及び原子炉の再開失敗による減圧) であるため、必要な操作は異なることであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 	28	
	過渡事象+崩壊熱除去失敗	2.4-④ 手動停止+崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉手動停止後、「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 原子炉隔離時冷却系及び原子炉減圧後の低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始すること、原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生することであり、事象進展は緩やかとなるが、必要な操作は同様であるため、人数に増減なし。 	28	[崩壊熱除去機能喪失] 28
		2.4-⑤ 手動停止+高圧炉心冷却失敗+崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉手動停止後、「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 原子炉の減圧後に低圧非常用炉心冷却系又は低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始すること、原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生すること及び原子炉水位を回復する系統が異なることであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 	28	[取水機能喪失] 31
		2.4-⑥ 手動停止+圧力バウンダリ健全性 (SRV再閉) 失敗+崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉手動停止後、「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 主蒸気隔離弁の閉鎖により原子炉圧力は上昇し、逃がし安全弁 (逃がし安全弁 (逃がし弁機能) が開放される。この時、逃がし安全弁 (逃がし弁機能) の再開に失敗し、原子炉圧力は低下を始め、原子炉隔離時冷却系が停止するが、非常用炉心冷却系又は低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始すること、原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉の減圧 (逃がし安全弁の再開失敗による減圧) 及び原子炉の減圧に伴い原子炉隔離時冷却系が停止し、他の注水手段により原子炉水位を回復することであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 	28	
		2.4-⑦ 手動停止+圧力バウンダリ健全性 (SRV再閉) 失敗+高圧炉心冷却 (HPCS) 失敗+崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉手動停止後、「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 主蒸気隔離弁の閉鎖により原子炉圧力は上昇し、逃がし安全弁 (逃がし安全弁 (逃がし弁機能) が開放される。この時、逃がし安全弁 (逃がし弁機能) の再開に失敗し、原子炉圧力は低下を始め、原子炉隔離時冷却系が停止するが、原子炉の減圧を要し、低圧非常用炉心冷却系又は低圧原子炉代替注水系 (常設) による原子炉注水を開始すること、原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生すること、原子炉の減圧 (逃がし安全弁の再開失敗による減圧) 及び原子炉の再開失敗による減圧) 及び原子炉の再開失敗による減圧) であるため、必要な操作は異なることであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 	28	

表 1 運転中の原子炉における重大事故に至るおそれがある事故の評価結果（4 / 6）

事故シナリオ グループ	重要事故 シナリオ	その他の事故 シナリオ	事象進展及び人数の増減理由	必要 要員数	重要事故 シナリオに 必要な要員数
崩壊熱除去機能 喪失	重要事故 シナリオ	2.4-⑥ サブポート系喪失+崩壊 熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> サブポート系1区分の喪失の場合、一般的に他の区分が健全であるため対応手段が著しく制限される状態ではないが、事象を厳しくするため起因事象として緩和設備への影響が大きき「交流電源故障（1区分）」を設定し、原子炉停止後に「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 原子炉隔離時冷却系等又は原子炉の減圧後に低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生すること及び原子炉水位を回復する系統が異なることであるが、必要な操作は同様であるため、残留熱除去系（A）の注入弁への重大事故等対策による電源供給が必要になるが、要員に増減なし。 	28	[崩壊熱除去 機能喪失] 28 [取水機能 喪失] 31
			<ul style="list-style-type: none"> サブポート系1区分の喪失の場合、一般的に他の区分が健全であるため対応手段が著しく制限される状態ではないが、事象を厳しくするため起因事象として緩和設備への影響が大きき「交流電源故障（1区分）」を設定し、原子炉停止後に「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 原子炉の減圧後に低圧非常用炉心冷却系又は低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生すること及び原子炉水位を回復する系統が異なることであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 	28	
			<ul style="list-style-type: none"> サブポート系1区分の喪失の場合、一般的に他の区分が健全であるため対応手段が著しく制限される状態ではないが、事象を厳しくするため起因事象として緩和設備への影響が大きき「交流電源故障（1区分）」を設定し、原子炉停止後に「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 主蒸気隔離弁の閉鎖により原子炉圧力は上昇し、逃がし安全弁（逃がし弁機能）が開放される。この時、逃がし安全弁（逃がし弁機能）の再閉に失敗し、原子炉圧力は低下を始め、原子炉隔離時冷却系が停止するが、非常用炉心冷却系又は原子炉の減圧後に低圧原子炉代替注水系（常設）による注水を開始することで原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生すること、原子炉の減圧（逃がし安全弁の再閉失敗による減圧）、原子炉の減圧に伴い原子炉隔離時冷却系が停止し、他の注水手段により原子炉水位を回復することであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 	28	
			<ul style="list-style-type: none"> サブポート系1区分の喪失の場合、一般的に他の区分が健全であるため対応手段が著しく制限される状態ではないが、事象を厳しくするため起因事象として緩和設備への影響が大きき「交流電源故障（1区分）」を設定し、原子炉停止後に「給水流量の全喪失」の発生を想定する。 主蒸気隔離弁の閉鎖により原子炉圧力は上昇し、逃がし安全弁（逃がし弁機能）が開放される。この時、逃がし安全弁（逃がし弁機能）の再閉に失敗し、原子炉圧力は低下を始め、原子炉隔離時冷却系が停止するが、原子炉の減圧後に低圧非常用炉心冷却系又は低圧原子炉代替注水系（常設）による注水を開始することで原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉停止後に事故が発生すること、原子炉の減圧（逃がし安全弁の再閉失敗による減圧）、原子炉水位を回復する系統が異なることであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 	28	

表 1 運転中の原子炉における重大事故に至るおそれがある事故の評価結果（5 / 6）

事故シークエンス グループ	重要事故 シークエンス	その他の事故 シークエンス	事象進展及び人数の増減理由	必要 要員数	重要事故 シークエンスに 必要な要員数	
崩壊熱除去機能 喪失	重要事故 シークエンス	2.4-② 冷却材喪失（小破断 LOC A）＋崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「外部電源喪失＋小破断 LOC A」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする。 重要事故シークエンスとの差異は、原子炉冷却材が原子炉格納容器に漏えいすることで、格納容器圧力の上昇が早くなることであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 	28	[崩壊熱除去 機能喪失] 28 [取水機能 喪失] 31	
		2.4-③ 冷却材喪失（中破断 LOC A）＋崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「外部電源喪失＋中破断 LOC A」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする。 中破断 LOC Aにより原子炉隔離時冷却系の原子炉注水の継続に期待できないが高圧炉心スプレイ系による原子炉注水を開始することで原子炉水位は維持される。 重要事故シークエンスとの差異は、原子炉の減圧に伴い原子炉隔離時冷却系の機能に期待出来ないこと及び原子炉冷却材が原子炉格納容器に漏えいすること、格納容器圧力の上昇が早くなることであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 	28		
		2.4-④ 冷却材喪失（大破断 LOC A）＋崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「外部電源喪失＋大破断 LOC A」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする。 大破断 LOC Aにより原子炉隔離時冷却系の機能に期待できないが高圧炉心スプレイ系による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 重大事故シークエンスとの差異は、原子炉の減圧に伴い原子炉隔離時冷却系の機能に期待出来ないこと及び原子炉冷却材が原子炉格納容器に漏えいすること、格納容器圧力の上昇が早くなることであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 	28		
	重要事故 シークエンス	過渡事象＋崩壊熱 除去失敗	2.4-⑤ 冷却材喪失（小破断 LOC A）＋高圧炉心冷却失敗＋ 崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「外部電源喪失＋小破断 LOC A」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする。 原子炉の減圧後に低圧非常用炉心冷却系による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 重要事故シークエンスとの差異は、原子炉冷却材が原子炉格納容器に漏えいすることで、格納容器圧力の上昇が早くなること及び原子炉水位を回復する系統が異なることであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 		28
			2.4-⑥ 冷却材喪失（中破断 LOC A）＋高圧炉心冷却失敗＋ 崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「外部電源喪失＋中破断 LOC A」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする。 原子炉の減圧後に低圧非常用炉心冷却系による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 重要事故シークエンスとの差異は、原子炉冷却材が原子炉格納容器に漏えいすることで、格納容器圧力の上昇が早くなること及び原子炉水位を回復する系統が異なることであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 		28
			2.4-⑦ 冷却材喪失（大破断 LOC A）＋高圧炉心冷却失敗＋ 崩壊熱除去失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「外部電源喪失＋大破断 LOC A」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする。 低圧非常用炉心冷却系による原子炉注水を開始することで原子炉水位は破断口位置まで回復する。 重大事故シークエンスとの差異は、原子炉冷却材が原子炉格納容器に漏えいすることで、格納容器圧力の上昇が早くなること及び原子炉水位を回復する系統が異なることであるが、必要な操作は同様であるため、要員に増減なし。 		28

表 1 運転中の原子炉における重大事故に至るおそれがある事故の評価結果 (6 / 6)

事故シナリオグループ	重要事故シナリオ	その他の事故シナリオ	事象進展及び人数の増減理由	必要要員数	重要事故シナリオに必要要員数
崩壊熱除去機能喪失	過渡事象＋崩壊熱除去失敗	2.4-① 外部電源喪失＋交流電源(DG-A, B)失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「外部電源喪失」発生後、原子炉スクラムする。 主蒸気隔離弁の開鎖により原子炉圧力が上昇し、逃がし弁機能が開放される。原子炉隔離時冷却系等又は原子炉の減圧後に低圧原子炉代替注水系(常設)による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉水位を回復する系統が異なることであるが、必要な操作は同様であるため、要員は増減なし。 	28	[崩壊熱除去機能喪失] 28 [取水機能喪失] 31
		2.4-② 外部電源喪失＋交流電源(DG-A, B)失敗＋圧力バウンダリ健全性(SRV再閉)失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「外部電源喪失」発生後、原子炉スクラムする。 主蒸気隔離弁閉鎖により原子炉圧力が上昇し、逃がし弁機能が開放される。この時、逃がし弁機能(の再開)の再開に失敗し、原子炉圧力は低下を始め、原子炉隔離時冷却系が停止するが、原子炉の減圧後に低圧原子炉代替注水系(常設)による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は原子炉の減圧(逃がし弁機能)の再開失敗による減圧に伴い原子炉隔離時冷却系が停止し、他の注水手段により原子炉水位を回復することであるが、必要な操作は同様であるため、要員は増減なし。 「外部電源喪失」発生後、原子炉スクラムする。 主蒸気隔離弁閉鎖により原子炉圧力が上昇し、逃がし弁機能が開放される。「直流電源喪失」によって電源設備の閉鎖電源は喪失しているため、高圧原子炉代替注水系、または「所内発電設備(直流電源設備)への切替え操作」による直流電源の給電により逃がし弁機能(自動減圧機能付き)による急速減圧を実施し、原子炉の減圧後に低圧原子炉代替注水系(常設)による原子炉注水を開始することで原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は交流電源が喪失していることであるが、必要な操作は同様であるため、要員は増減なし。 	28	
原子炉停止機能喪失	過渡事象＋原子炉停止失敗	2.5-① 冷却材喪失(小破断LOC A)＋原子炉停止失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「小破断LOC A」発生後、格納容器漏えい判断により出力低下後、原子炉手動スクラムを実施するが、原子炉スクラムに失敗する。 代替制御弁挿入機能及び代替原子炉再循環ポンプトリップ機能がにより原子炉出力は低下し、未臨界に至る。 給水系、原子炉隔離時冷却系及び高圧炉心スプレイス系により注水を行い、炉心冠水維持される。 重要事故シナリオとの差異は、LOCA対応が必要なことであるが、中央制御室の運転員によって実施されるため要員数は変化しない。 	11	11
		2.5-② 冷却材喪失(中破断LOC A)＋原子炉停止失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「中破断LOC A」発生後、格納容器圧力上昇により、原子炉スクラム信号が発生するが、原子炉スクラムに失敗する。 代替制御弁挿入機能及び代替原子炉再循環ポンプトリップ機能がにより原子炉出力は低下し、未臨界に至る。 給水系、原子炉隔離時冷却系(初期)及び高圧炉心スプレイス系により注水を行い、炉心冠水維持される。 重要事故シナリオとの差異はLOCA対応が必要なことであるが、中央制御室の運転員によって実施されるため要員数は変化しない。 	11	
LOCA時注水機能喪失	冷却材喪失(中破断LOC A)＋高圧炉心冷却失敗＋低圧炉心冷却失敗	2.6-① 冷却材喪失(小破断LOC A)＋高圧炉心冷却失敗＋低圧炉心冷却失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「小破断LOC A」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする。 代替制御弁挿入機能により原子炉出力は低下し、未臨界に至る。 非常用炉心冷却系による注水を行い、炉心冠水維持される。 重要事故シナリオとの差異はLOCA対応が必要なことであるが、中央制御室の運転員によって実施されるため要員数は変化しない。 	11	28
		2.6-② 冷却材喪失(中破断LOC A)＋高圧炉心冷却失敗＋低圧炉心冷却失敗	<ul style="list-style-type: none"> 「中破断LOC A」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする。 原子炉水位が低下するため、低圧非常用炉心冷却系を準備後、原子炉の減圧を試みるが失敗する。 代替自動減圧(自動減圧機能付き)の動作により原子炉が減圧し、低圧非常用炉心冷却系により原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は、低圧非常用炉心冷却系が使用できることであり、要員数は減少する。 「中破断LOC A」発生後、原子炉水位が低下し、原子炉スクラムする。 原子炉隔離時冷却系により原子炉水位を維持するが、LOCA事象により原子炉圧力が低下するため機能喪失する。また、高圧炉心スプレイス系の水および原子炉の減圧を試みるが失敗する。 代替自動減圧(自動減圧機能付き)の動作により原子炉が減圧し、低圧非常用炉心冷却系により原子炉水位は回復する。 重要事故シナリオとの差異は、低圧非常用炉心冷却系が使用できることであり、要員数は減少する。 	10	
格納容器バイパス(インターフェイスシステムLOCA)	格納容器バイパス(インターフェイスシステムLOCA)	重要事故シナリオ以外のシナリオなし		10	10

表 2 燃料プールにおける重大事故に至るおそれがある事故の評価結果

想定する事故	その他の事故シナケンス	事象進展及び人数の増減理由	必要 要員数	重要事故 シナケンスに 必要な要員数
想定事故 1 (冷却機能又は注水機能喪失)	想定事故以外の事故シナケンスなし			24
想定事故 2 (燃料プール内の水の小規模な喪失)	想定事故以外の事故シナケンスなし			26

表 3 運転停止中の原子炉における重大事故に至るおそれのある事故の評価結果

事故シナリオグループ	重要事故シナリオ	その他の事故シナリオ	事象進展及び人数の増減理由	必要員数	重要事故シナリオに必要な員数
崩壊熱除去機能喪失	崩壊熱除去機能喪失＋崩壊熱除去・炉心冷却失敗	5.1-① 外部電源喪失＋崩壊熱除去・炉心冷却失敗	<ul style="list-style-type: none"> 外部電源喪失後、非常用ディーゼル発電機により非常用電源は確保するものの、残留熱除去系及び炉心補機冷却系の再起動に失敗することにより、炉心冷却材の温度が上昇する。本事象に対して、重要事故シナリオ中の残留熱除去系による炉心注水を実施する。 重要事故シナリオに対する評価では外部電源喪失を仮定しており、必要な員数は同様であるため、人数が増減なし。 	10	10
全交流動力電源喪失	外部電源喪失＋交流電源喪失	5.2-① 外部電源喪失＋直流通電源喪失	<ul style="list-style-type: none"> 起因事象として「外部電源喪失」及び「直流通電源喪失」を想定し、崩壊熱除去系及び注水系喪失により炉心冷却材の温度が上昇し、蒸発により水位が低下する。 重要事故シナリオと異なり、「直流通電源喪失」によって電源設備の制御電源は喪失しているため、必要な操作である「低圧注水モード」運転による炉心注水」及び「炉心停止時冷却モードによる炉心の除熱」操作の替わりに、「常設代替交流電源設備」による交流電源供給及び低圧炉心代替注水系（常設）による炉心注水」が必要となる。ただし、操作に対する必要な員数は同様であるため、人数が増減なし。 	29	29
原子炉冷却材の流出	原子炉冷却材の流出（残留熱除去系切替時の冷却材流出）＋流出隔離・炉心冷却失敗	5.3-① 原子炉冷却材の流出（制御棒駆動機構点検時の冷却材流出）＋流出隔離・炉心冷却失敗	<ul style="list-style-type: none"> 起因事象が「原子炉冷却材の流出（制御棒駆動機構点検時の冷却材流出）」となり、事象の認知が早くなる。 重要事故シナリオとの差異は起因事象のみであり、事象進展は緩やかとなるが、必要な操作は同様であるため、人数が増減なし。 	10	10
		5.3-② 原子炉冷却材の流出（局部出力領域モニタ交換時の冷却材流出）＋流出隔離・炉心冷却失敗	<ul style="list-style-type: none"> 起因事象が「原子炉冷却材の流出（局部出力領域モニタ交換時の冷却材流出）」となり、事象の認知が早くなる。 重要事故シナリオとの差異は起因事象のみであり、事象進展は緩やかとなるが、必要な操作は同様であるため、人数が増減なし。 	10	
		5.3-③ 原子炉冷却材の流出（原子炉浄化系プロロープ時の冷却材流出）＋流出隔離・炉心冷却失敗	<ul style="list-style-type: none"> 起因事象が「原子炉冷却材の流出（原子炉浄化系プロロープ時の冷却材流出）」となる。 重要事故シナリオとの差異は起因事象のみであり、事象進展は緩やかとなるが、必要な操作は同様であるため、人数が増減なし。 	10	
反応度の懸投入	反応度の懸投入	重要事故シナリオ以外のシナリオなし			-

必要な要員数の観点での評価事故シーケンスの代表性の整理

設置許可基準規則第 37 条第 2 項に規定されている「重大事故が発生した場合」の評価では、各格納容器破損モードに至るおそれのある PDS の中から、当該破損モードに至る場合にその破損モードが最も厳しく表れると考えられる PDS を選定し、その PDS に属する事故シーケンスの中から最も厳しい事故シーケンスを評価事故シーケンスとして選定している。ここでは、各 PDS 及び炉心損傷後の対応に必要な要員数の観点から、評価事故シーケンスの代表性を整理する。

今回の PRA により抽出した PDS を表 1 に示す。また、設置許可基準規則第 37 条第 1 項の「重大事故に至るおそれがある事故が発生した場合」の評価結果をもとに、各 PDS による炉心損傷を防止するために必要な要員数を合わせて示す。

なお、表 1 のうち、TW（崩壊熱除去機能喪失）、TC（原子炉停止機能喪失）は格納容器先行破損事象であり、ISLOCA（インターフェイスシステム LOCA）は格納容器バイパス事象である。いずれも炉心損傷の前に原子炉格納容器が機能喪失する PDS であるため、評価事故シーケンスの選定の起点となる PDS の選定対象からは除外している。

本来、重大事故等対処設備に期待しない PRA から抽出された各 PDS は、表 1 の炉心損傷防止に必要な数の要員が適切な対応をとることによって炉心損傷を防止できるものであるが、何らかの対応の失敗によって炉心損傷に至るものと仮定する。

この仮定のうえでも、評価事故シーケンスの起点（事象発生時）において必要な要員数は、表 1 の炉心損傷防止に必要な人数であり、この観点で最も厳しい PDS は、全交流動力電源喪失（SBO）を伴う PDS（長期 TB、TBU、TBP 及び TBD）の 31 名である。

次に、重大事故等対処設備に期待しない場合、各格納容器破損モードに進展し得る PDS、その中で要員数の観点で厳しい PDS 及び評価シーケンスの起点として選定した PDS を表 2 に示す。

格納容器破損モード格納容器過圧破損、格納容器過温破損及び水素燃焼では、LOCA を PDS に選定したうえで PDS に SBO を加えているため、SBO にも対応可能な要員数が必要となる。このことから、選定した PDS は要員の観点で最も厳しい PDS を包絡している。そのうえで、LOCA 及び SBO に並行して対応し、格納容器破損防止が可能であることを示している。ただし、交流動力電源の 24 時間以内の復旧に期待していることから、TBP への炉心損傷防止対応で想定している低圧原子炉代替注水系（可搬型）を用いた原子炉注水は考慮していない。

なお、炉心損傷後は重大事故等対処設備を用いた原子炉注水や原子炉格納容器熱除去等を実施する必要があるが、これらの対応に必要な要員数は PDS に

よらず同じであり、これに加えて電源復旧が必要となる場合が、必要な要員数の観点で厳しいと考えられる。このことから、今回選定した評価事故シーケンスは必要な要員数の観点においても他の事故シーケンスを包絡していると考ええる。

高圧熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱（DCH）、原子炉圧力容器外の熔融燃料－冷却材相互作用（FCI）及び熔融炉心・コンクリート相互作用（MCCI）については、炉心損傷後の対応として、原子炉水位が燃料棒有効長下端から燃料棒有効長の20%上の位置に到達した時点での原子炉減圧及び原子炉圧力容器下鏡温度が300℃に到達した時点でのペDESTALへの注水等が必要となるが、これらの対応に必要な要員数はPDSによらず同じであり、いずれの場合も大破断LOCA+SBO後の対応に必要な要員数を上回ることは無い。

以上より、要員の観点で厳しいPDS及び炉心損傷後の事故シーケンスを考慮しても、現在の要員数で重大事故への対応は可能であり、必要な要員数を考慮しても評価事故シーケンスは代表性を有していることを確認した。

以上

表1 PRAにより抽出したPDSと炉心損傷防止に際して必要な要員数

PDS	格納容器破損 時期	R P V圧力	炉心損傷 時期	炉心損傷防止に 必要な人数 ^{※1}
T Q U V	炉心損傷後	低圧	早期	28
T Q U X	炉心損傷後	高圧	早期	10
長期T B	炉心損傷後	高圧	後期	31
T B U	炉心損傷後	高圧	早期	31
T B P	炉心損傷後	低圧	早期	31
T B D	炉心損傷後	高圧	早期	31
L O C A	炉心損傷後	低圧	早期	28 ^{※2}
T W ^{※3}	炉心損傷前	—	後期	31
T C ^{※3}	炉心損傷前	—	早期	11
I S L O C A ^{※3}	炉心損傷前	—	早期	10

※1 : 「重大事故に至るおそれがある事故が発生した場合」の評価結果から抽出

※2 : L O C A時注水機能喪失（冷却材喪失（中破断L O C A）+高圧炉心冷却失敗+低圧炉心冷却失敗）における炉心損傷防止の評価結果から抽出

※3 : 炉心損傷の前に格納容器が機能喪失するため、評価事故シーケンスの選定の起点となるPDSの選定対象からは除外したPDS

表2 要員及び事象の厳しさの観点からの各格納容器破損モードのPDSの整理

格納容器破損モード	該当するPDS	要員の観点で 厳しいPDS	選定したPDS
雰囲気圧力・温度による静的負荷 (格納容器過圧破損)	TQUV	長期TB TBU TBP TBD	LOCA+SBO ^{*1}
	TQUX		
	LOCA		
雰囲気圧力温度による静的負荷 (格納容器過温破損)	TQUV		
	TQUX		
	長期TB		
	TBU		
	TBP		
高压熔融物放出／格納容器雰囲気 直接加熱 (DCH)	TBD		
	LOCA		
	TQUX	長期TB TBU TBD	TQUX+SBO ^{*1}
	長期TB		
TBU			
TBD			
原子炉圧力容器外の熔融燃料－ 冷却材相互作用 (FCI)	TQUV	TQUV LOCA	TQUV+SBO ^{*1}
	TQUX		
	LOCA		
水素燃焼	－	－	LOCA+SBO ^{*1}
熔融炉心・コンクリート相互作 用 (MCCI)	TQUV	TQUV LOCA	TQUV+SBO ^{*1}
	TQUX		
	LOCA		

※1：PRAから直接抽出されるPDSではないが、電源復旧、注水機能確保のための設備が多く、格納容器破損防止対策のための対応時間が厳しいシナリオを想定するため、SBOの重畳した評価事故シーケンスを選定している。

水源，燃料，電源負荷評価結果について

1. はじめに

重大事故等対策の有効性評価において，重大事故等対策を外部支援に期待することなく7日間継続するために必要な水源及び燃料について評価を実施するとともに，電源負荷の積み上げが給電容量内にあることを確認する。

2. 事故シーケンス別の必要量について

重大事故等対策の有効性評価において，通常系統からの給水及び給電が不可能となる事象についての水源及び燃料に関する評価結果を第1表に整理した。

また，同様に常設代替交流電源設備からの電源供給が必要な事象について，必要負荷が常設代替交流電源設備を連続運転させた場合の定格容量内であることを第1表に整理した。

3. まとめ

重大事故等対策の有効性評価において，水源，燃料及び電源負荷のそれぞれに対して最も厳しい事故シーケンスを想定した場合についても，発電所構内に備蓄している水源及び燃料により，必要な対策を7日間継続することが十分に可能であることを確認した。また，常設代替交流電源設備から給電する場合の電源負荷についても，常設代替交流電源設備を連続運転させた場合の定格容量内であることを確認した。

第1表 水源、燃料及び電源負荷の必要量 (1/4)

事故シナクセス	水源		燃料(軽油) 7日間必要量/備蓄量	電源負荷 最大負荷/給電容量
	原子炉注水及び格納容器スプレイ (必要水量/水源総量)	燃料プール注水 (必要水量/水源総量)		
2.1 高圧・低圧注水機能喪失	約 3,600m ³ /約 7,740m ³ ・低圧原子炉代替注水系(常設) ・格納容器代替スプレイ系(可搬型)	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約 712m ³ /約 730m ³ ・非常用ディーゼル発電機×2 (約 543.648m ³) ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機(約 155.736m ³) ・大量送水車(約 11.3736m ³) ○ガスタービン発電機用軽油タンク 約 352m ³ /約 450m ³ ・ガスタービン発電機(約 351.12m ³) ○緊急時対策用燃料地下タンク 約 8m ³ /約 45m ³ ・緊急時対策用発電機(約 7.8792m ³)	約 354kW/約 4,800kW
2.2 高圧注水・減圧機能喪失	—	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約 700m ³ /約 730m ³ ・非常用ディーゼル発電機×2 (約 543.648m ³) ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機(約 155.736m ³) ○緊急時対策用燃料地下タンク 約 8m ³ /約 45m ³ ・緊急時対策用発電機(約 7.8792m ³)	—
2.3.1 全交流動力電源喪失(長期T B)	約 1,100m ³ /約 7,000m ³ ・低圧原子炉代替注水系(可搬型) ・格納容器代替スプレイ系(可搬型)	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約 12m ³ /約 730m ³ ・大量送水車(約 11.3736m ³) ○ガスタービン発電機用軽油タンク 約 352m ³ /約 450m ³ ・ガスタービン発電機(約 351.12m ³) ○緊急時対策用燃料地下タンク 約 8m ³ /約 45m ³ ・緊急時対策用発電機(約 7.8792m ³)	約 4,286kW/約 4,800kW ※2
2.3.2 全交流動力電源喪失(T B U)	—	—	—	—
2.3.3 全交流動力電源喪失(T B D)	—	—	—	—
2.3.4 全交流動力電源喪失(T B P)	約 1,000m ³ /約 7,000m ³ ・低圧原子炉代替注水系(可搬型) ・格納容器代替スプレイ系(可搬型)	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約 12m ³ /約 730m ³ ・大量送水車(約 11.3736m ³) ○ガスタービン発電機用軽油タンク 約 352m ³ /約 450m ³ ・ガスタービン発電機(約 351.12m ³) ○緊急時対策用燃料地下タンク 約 8m ³ /約 45m ³ ・緊急時対策用発電機(約 7.8792m ³)	約 4,286kW/約 4,800kW ※2

※1：有効性評価において、外部電源喪失は想定していないが、仮に外部電源が喪失し、非常用ディーゼル発電機が起動したことを考慮する。

※2：直流電源については、電源負荷の制限や電源の切替えにより、24時間電源供給可能である。以降は、他の事故シナクセスグループ等も含めて交流電源により供給可能である。

□ は、各資源の必要量(負荷)が最大のものを示す。ただし、燃料評価においては、□ は、全交流動力電源喪失の発生または重量を考慮し、ガスタービン発電機による電源供給に期待する場合の最大値を、

□ は、全交流動力電源喪失の発生または重量を考慮せず、非常用ディーゼル発電機で電源を供給する場合の最大値を示す。

第1表 水源、燃料及び電源負荷の必要量(2/4)

事故シナクセス	水源		燃料(軽油) 7日間必要量/備蓄量	電源負荷 最大負荷/給電容量
	原子炉注水及び格納容器スプレイ (必要水量/水源総量)	燃料プール注水 (必要水量/水源総量)		
2.4.1 崩壊熱除去機能喪失 (取水機能が喪失した場合)	—	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約55m ³ /約730m ³ ・大型送水ポンプ車(約52.08m ³) ○ガスタービン発電機用軽油タンク 約352m ³ /約450m ³ ・ガスタービン発電機(約351.12m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機(約7.8792m ³) ・緊急時対策所用発電機(約7.8792m ³)	約2,966kW/約4,800kW
2.4.2 崩壊熱除去機能喪失 (残留熱除去機能が故障した場合)	約3,600m ³ /約7,740m ³ ・低圧原子炉代替注水系(常設) ・格納容器代替スプレイ系(可搬型)	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約712m ³ /約730m ³ ・非常用ディーゼル発電機×2(約543.648m ³) ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機(約155.736m ³) ・大量送水車(約11.3736m ³) ○ガスタービン発電機用軽油タンク 約352m ³ /約450m ³ ・ガスタービン発電機(約351.12m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機(約7.8792m ³) ・緊急時対策所用発電機(約7.8792m ³)	約354kW/約4,800kW
2.5 原子炉停止機能喪失*1	—	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約700m ³ /約730m ³ ・非常用ディーゼル発電機×2(約543.648m ³) ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機(約155.736m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機(約7.8792m ³) ・緊急時対策所用発電機(約7.8792m ³)	—
2.6 LOCA時注水機能喪失	約3,400m ³ /約7,740m ³ ・低圧原子炉代替注水系(常設) ・格納容器代替スプレイ系(可搬型)	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約712m ³ /約730m ³ ・非常用ディーゼル発電機×2(約543.648m ³) ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機(約155.736m ³) ・大量送水車(約11.3736m ³) ○ガスタービン発電機用軽油タンク 約352m ³ /約450m ³ ・ガスタービン発電機(約351.12m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機(約7.8792m ³) ・緊急時対策所用発電機(約7.8792m ³)	約354kW/約4,800kW

※1：有効性評価において、外部電源喪失は想定していないが、仮に外部電源が喪失し、非常用ディーゼル発電機が起動したことを考慮する。

※2：直流電源については、電源負荷の制限や電源の切替えにより、24時間電源供給可能である。以降は、他の事故シナクセスグループ等も含めて交流電源により供給可能である。

☐は、各資源の必要量(負荷)が最大のものを示す。ただし、燃料評価においては、☐は、全交流動力電源喪失の発生または重量を考慮し、ガスタービン発電機による電源供給に期待する場合の最大値を示す。
☐は、全交流動力電源喪失の発生または重量を考慮せず、非常用ディーゼル発電機で電源を供給する場合の最大値を示す。

第1表 水源、燃料及び電源負荷の必要量 (3/4)

事故シナケンス	水源		燃料 (軽油) 7日間必要量/備蓄量	電源負荷 最大負荷/給電容量
	原子炉注水及び格納容器スプレイ (必要水量/水源総量)	燃料プール注水 (必要水量/水源総量)		
2.7 ISLUCA	—	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約700m ³ /約730m ³ ・非常用ディーゼル発電機×2 (約543.648m ³) ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 (約155.736m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機 (約7.8792m ³)	—
3.1.2 雰囲気圧力・温度による静的負荷 (格納容器過圧・過温破損) 残留熱代替除去系を使用する場合	約500m ³ /約7,740m ³ ・低圧原子炉代替注水系 (常設)	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約73m ³ /約730m ³ ・大量送水車 (約11.3736m ³) ・大型送水ポンプ車 (約52.08m ³) ・可搬式窒素供給装置 (約7.8792m ³) ○ガスタービン発電機用軽油タンク 約352m ³ /約450m ³ ・ガスタービン発電機 (約351.12m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機 (約7.8792m ³)	約1,941kW/約4,800kW
3.1.3 雰囲気圧力・温度による静的負荷 (格納容器過圧・過温破損) 残留熱代替除去系を使用しない場合	約3,200m ³ /約7,740m ³ ・低圧原子炉代替注水系 (常設) ・格納容器代替スプレイ系 (可搬型)	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約65m ³ /約730m ³ ・大量送水車 (約11.3736m ³) ・大型送水ポンプ車 (約52.08m ³) ○ガスタービン発電機用軽油タンク 約352m ³ /約450m ³ ・ガスタービン発電機 (約351.12m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機 (約7.8792m ³)	約2,091kW/約4,800kW
3.2 高圧溶融放出/格納容器雰囲気直接加熱	約600m ³ /約7,000m ³	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約73m ³ /約730m ³ ・大量送水車 (約11.3736m ³) ・大型送水ポンプ車 (約52.08m ³) ・可搬式窒素供給装置 (約7.8792m ³) ○ガスタービン発電機用軽油タンク 約352m ³ /約450m ³ ・ガスタービン発電機 (約351.12m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機 (約7.8792m ³)	約1,941kW/約4,800kW
3.3 原子炉圧力容器外の溶融燃料-冷却材相互作用	—	—	—	—
3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用	—	—	—	—

※1：有効性評価において、外部電源喪失は想定していないが、仮に外部電源が喪失し、非常用ディーゼル発電機が起動したことを考慮する。

※2：直流電源については、電源負荷の制限や電源の切替えにより、24時間電源供給可能である。以降は、他の事故シナケンスグループ等も含めて交流電源により供給可能である。

☐は、各資源の必要量 (負荷) が最大のものを示す。ただし、燃料評価においては、☐は、全交流動力電源喪失の発生または重量を考慮し、ガスタービン発電機による電源供給に期待する場合の最大値を示す。
☐は、全交流動力電源喪失の発生または重量を考慮せず、非常用ディーゼル発電機で電源を供給する場合の最大値を示す。

第1表 水源、燃料及び電源負荷の必要量（4/4）

事故シナリオ	水源		燃料（軽油） 7日間必要量/備蓄量	電源負荷 最大負荷/給電容量
	原子炉注水及び格納容器スプレイ (必要水量/水源総量)	燃料プール注水 (必要水量/水源総量)		
4.1 想定事故1	—	約2,100m ³ /約7,000m ³ ・燃料プールのスプレイ系	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約712m ³ /約730m ³ ・非常用ディーゼル発電機×2 (約543.648m ³) ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 (約155.736m ³) ・大量送水車 (約11.3736m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機 (約7.8792m ³)	—
4.2 想定事故2	—	約2,100m ³ /約7,000m ³ ・燃料プールのスプレイ系	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約712m ³ /約730m ³ ・非常用ディーゼル発電機×2 (約543.648m ³) ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 (約155.736m ³) ・大量送水車 (約11.3736m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機 (約7.8792m ³)	—
5.1 崩壊熱除去機能喪失	—	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約700m ³ /約730m ³ ・非常用ディーゼル発電機×2 (約543.648m ³) ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 (約155.736m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機 (約7.8792m ³)	—
5.2 全交流動力電源喪失	約300m ³ /約7,740m ³ ・低圧原子炉代替注水系 (常設)	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約65m ³ /約730m ³ ・大量送水車 (約11.3736m ³) ・大型送水ポンプ車 (約52.08m ³) ○ガスタービン発電機用軽油タンク 約352m ³ /約450m ³ ・ガスタービン発電機 (約351.12m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機 (約7.8792m ³)	約2,406kW/約4,800kW
5.3 原子炉冷却材流出	—	—	○非常用ディーゼル発電機燃料貯蔵タンク等 約700m ³ /約730m ³ ・非常用ディーゼル発電機×2 (約543.648m ³) ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 (約155.736m ³) ○緊急時対策所用燃料地下タンク 約8m ³ /約45m ³ ・緊急時対策所用発電機 (約7.8792m ³)	—
5.4 反応度の誤投入 ^{*1}	—	—	—	—

※1：有効性評価において、外部電源喪失は想定していないが、仮に外部電源が喪失し、非常用ディーゼル発電機が起動したことを考慮する。

※2：直流電源については、電源負荷の制限や電源の切替えにより、24時間電源供給可能である。以降は、他の事故シナリオグループ等も含めて交流電源により供給可能である。

□ は、各資源の必要量（負荷）が最大のものを示す。ただし、燃料評価においては、□ は、全交流動力電源喪失の発生または重量を考慮し、ガスタービン発電機による電源供給に期待する場合の最大値を

□ は、全交流動力電源喪失の発生または重量を考慮せず、非常用ディーゼル発電機で電源を供給する場合の最大値を示す。