

MHI-NES-1076

改0 2023年1月27日

PWRにおけるLOCA時に発生するデブリの
長期炉心冷却性への影響について

2023年1月

関西電力株式会社

北海道電力株式会社

日本原子力発電株式会社

四国電力株式会社

九州電力株式会社

三菱重工業株式会社

目 次

1. はじめに	1
2. 背景	2
2.1. LOCA 時の長期炉心冷却及び発生デブリ	2
2.1.1. LOCA 時の長期炉心冷却.....	2
2.1.2. LOCA 時の発生デブリ	2
2.1.3. デブリによる炉心冷却流路への影響	3
2.2. 過去の検討経緯.....	4
2.2.1. 米国の検討経緯	4
2.2.2. 国内の検討経緯	5
3. 再循環運転時における流動状況及びスクリーン下流側炉内影響の評価シナリオ	7
3.1. 再循環運転時における 1 次冷却系及び原子炉容器内の流動状況	7
3.1.1. LOCA 事象条件（破断位置）に対する流動状況.....	7
3.1.2. 炉心へのデブリ到達量及びデブリの炉心蓄積による炉内流動状況.....	10
3.2. スクリーン下流側炉内影響の評価シナリオ.....	16
4. 流動試験	18
4.1. 非化学デブリ試験	18
4.1.1. 基礎試験	18
4.1.2. 燃料集合体を用いた流動試験	40
4.2. 化学デブリ試験.....	50
4.2.1. バッフルバレル流動試験	50
4.2.2. 化学デブリ析出に関する基礎試験	61
5. デブリによる流路閉塞時の炉内流動解析	64
5.1. 解析条件	64
5.1.1. 非化学デブリによる炉心圧力損失の増加	64
5.1.2. 化学デブリによる炉心圧力損失の増加.....	66
5.1.3. 化学デブリ析出開始時間	66
5.2. 解析ケース	67
5.2.1. 標準解析	67
5.2.2. 感度解析	69
5.3. 評価項目及び判断基準.....	70
5.3.1. 評価項目	70
5.3.2. 長期炉心冷却性の判断基準	70

5.4. 解析結果	71
5.4.1. 標準解析結果	71
5.4.2. 感度解析結果	74
6. 長期炉心冷却性に対する評価	81
6.1. スクリーン下流側炉内影響の評価に含まれる保守性	81
6.1.1. 解析条件に含まれる保守性	83
6.1.2. 試験条件に含まれる保守性	85
6.1.3. 試験及び解析の結果に含まれる保守性	87
6.1.4. 評価シナリオに含まれる保守性	87
6.2. 長期炉心冷却性への影響	89
7. 運用管理への影響	90
7.1. 通常運転時の運用管理	90
7.2. 事故時の運転手順の設定	90
8. まとめ	91
9. 参考文献	92

添付資料

- 添付資料 1 再循環サンプルスクリーンバイパス試験の概要
- 添付資料 2 被覆管表面へのデブリ付着による影響に関する検討
- 添付資料 3 LOCA デブリによるほう酸析出への影響
- 添付資料 4 流動試験における A 型 17×17 Zry グリッド燃料の代表性
- 添付資料 5 化学デブリ析出に関する基礎試験

1. はじめに

設計基準事故の原子炉冷却材喪失事象（LOCA 事象：Loss of Coolant Accident、以降、LOCA 事象と称す）における長期炉心冷却性評価の一つとして、LOCA 事象で発生したデブリ（保温材、塗装片等）の一部が再循環運転時において、再循環サンプからスクリーンを通過し原子炉容器内へ流入することで、炉心入口部を中心に冷却材流路を閉塞させることによる、炉心崩壊熱の除去への影響について、米国では過去 20 年にわたって検討が続けられてきた。

国内の PWR 産業界においては、本件を原子炉の安全性に関する重点取り組み事項の一つとして認識を持ち、PWR 電力委託研究及びメーカーの自社研究等によって、現象のより詳細な理解と安全性への影響を評価すべく、各種の試験と解析評価を行ってきた。

また、学協会活動においても、2015 年 10 月に初版発刊された、日本原子力学会 標準委員会 技術レポート「発電用軽水型原子炉の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書 第 1 分冊：炉心及び燃料の安全設計」に関する報告書の中で、国内外での安全トピックス等の収集と分析を通じて、国内において具体的な検討課題と位置づけ、現象の理解と安全性への定量的な影響評価を追求すべき優先項目として抽出した。

さらに、2018 年 12 月に見直した「軽水炉燃料等の安全高度化ロードマップ」において、短期的に最優先で知見を拡充し、定量的に安全性を示すべき安全上の重要な事項として位置づけて、ステークホルダーに広く公知化している。

原子力規制委員会との間では、再稼働審査において、本件は中長期的課題として検討が必要との見解が示されている。

以上の経緯も踏まえ、PWR 電力と三菱重工業では、検討開始から進捗状況を、原子力学会の年会・大会において報告を重ねてきた。また、原子力規制委員会では、技術情報検討会¹⁾で、国内の産業界での取り組みに対して継続的なフォローが必要な案件として認識されたことを受け、PWR 産業界との公開会合と、PWR 電力委託研究で実施された流動試験への見学を通じて、PWR 産業界での取り組み状況に対して確認が行われた。

PWR 産業界での検討は 2022 年内に終了し、各種の試験と解析に基づく定量的かつ保守的な評価により、LOCA 後発生するデブリが長期炉心冷却性に影響を及ぼさないことを明確にしている。

本資料は、これらの内容についてまとめたものである。

2. 背景

2.1. LOCA 時の長期炉心冷却及び発生デブリ

2.1.1. LOCA 時の長期炉心冷却

PWR における LOCA 事象は、原子炉の出力運転中に原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する配管等が破断した場合に、破断口から 1 次冷却材が系外に流出し炉心の冷却能力が低下する事象を想定している。LOCA が発生した場合、非常用炉心冷却設備が作動し、燃料取替用水タンク内の冷却材が低温側配管から注入されることにより炉心が冷却される。また、LOCA 時においては原子炉格納容器内の内圧増加の抑制及び放射性よう素の除去を目的とし、原子炉格納容器スプレイ設備により原子炉格納容器内に pH 調整剤を含む冷却材がスプレイされる。スプレイ水や破断口から流出した冷却材は格納容器内の再循環サンプに溜まっており、燃料取替用タンク内の水位が低下してきた場合、再循環サンプ内の冷却材が原子炉容器及び格納容器に注入及びスプレイされる。この再循環サンプから原子炉容器及び格納容器スプレイ系へ冷却材を供給する運転（以降、再循環運転と称す）を継続することにより LOCA 後の長期炉心冷却が可能となる。

再循環運転において冷却材は低温側配管から注入されることから、低温側配管破断時においては、ダウンカマ（原子炉容器と炉心槽の間のアニュラス形状の部分）での水頭を駆動力として蒸散量を補うだけの冷却材が炉心へ供給され、蒸散量を超える殆どの注入水は破断口から流出する。また、高温側配管破断時においては低温側配管から注入した冷却材は全て炉心を通過し、上部プレナムを経て高温側配管の破断口から流出する。

2.1.2. LOCA 時の発生デブリ

LOCA 発生直後に 1 次冷却系の破断口から噴出した高温高圧の蒸気により周囲の保温材及び塗装膜が破砕する。破砕した保温材、塗装片はスプレイ水や破断口から流出した冷却材とともに原子炉格納容器内に蓄積する。再循環運転の開始に伴い、冷却材とともに保温材及び塗装片等が原子炉容器及び格納容器スプレイ系に流れ込むこととなるが、再循環サンプにはスクリーンが設置されており、破砕した保温材等の繊維デブリの多くはスクリーンで除去される。

スクリーンを通過したデブリを含む冷却材は原子炉容器及び格納容器に注入及びスプレイされ、その後、再循環サンプへと戻り循環する。ここで、2 巡目以降の循環においてはスクリーンに捕捉された繊維デブリがフィルターとなり、スクリーンを通過するデブリ量が極端に減少することが分かっている（添付資料 1 を参照）。

ここで、LOCA 時に発生するデブリは下記が想定されている。

- 繊維デブリ：破断口からの蒸気により破砕した繊維質の保温材であり、国内プラントで使用されている主な繊維質の保温材はロックウール
- 粒子デブリ：破断口からの蒸気により破砕した塗装及びケイ酸カルシウム保温材、また原子炉格納容器のフローアーに堆積した塵等の潜在粒子
- 化学デブリ：LOCA 時の破断流やスプレイ水により原子炉格納容器の構造材（アルミニウム、亜鉛メッキ等）から流出した金属イオンが原子炉格納容器のスプレイ水に含まれる pH 調整材（水酸化ナトリウム、ヒドラジン）と化学反応を起こし、コロイド状に析出した化学物質

化学デブリは析出するまでに時間を要し、LOCA 発生から 24 時間は析出しないと考えられている（4.2.2 項参照）。一方、化学デブリに対して、繊維デブリ及び粒子デブリを併せて非化学デブリと称し、非化学デブリは再循環開始直後から原子炉容器内へ流入すると想定されている（以降、非化学デブリと称す）。

2.1.3. デブリによる炉心冷却流路への影響

(1) 非化学デブリの影響

再循環サンプのスクリーンを通過した繊維デブリは原子炉容器内に流入し、燃料集合体で捕捉され、流路を閉塞する。これにより、炉心入口部の圧力損失が増加する。また、燃料集合体に蓄積した繊維デブリ層の空隙を粒子デブリが埋めることでさらに圧力損失が増加する。この圧力損失の増加により炉心への冷却材供給量が低下することが懸念されている。

繊維デブリにより閉塞しやすいのは炉心入口部（燃料集合体の下部）であり、特に下部ノズルの流路孔（直下流に設置されている異物フィルターを含む）において流路が閉塞しやすい。これは、下部ノズルの流路孔の流路面積及び等価直径が燃料集合体の他の部位と比べて小さいことが主な要因である。しかしながら、炉心入口部に少しでも非閉塞流路が存在する場合、その流路を粒子デブリが通過するため限定的な圧力損失の増加に留まる。

また、下部ノズルを通過したデブリは下流に設置されたグリッドや上部ノズルでは、下部ノズル部と比べると流路が広いことから捕捉されにくく、圧力損失の増加量は限定的となる。なお、グリッド部において捕捉されたデブリによる燃料被覆管の伝熱への影響については添付資料 2 に示す。

(2) 化学デブリの影響

再循環サンプ等で化学デブリが時間遅れで析出し、再循環サンプのスクリーンを通過して原子炉容器内に流入した後、非化学デブリが蓄積した個所に化学デブリが捕捉される。この化学デブリの捕捉により、粒子デブリと同様に、圧力損失が

大幅に増加する。しかしながら、炉心入口部に少しでも非閉塞流路が存在する場合、化学デブリも粒子デブリと同様にその流路を通過するため、圧力損失の増加は限定的となる。なお、燃料被覆管への化学デブリ付着による伝熱への影響については添付資料 2 に示す。

(3) 注水切替後におけるデブリの影響

LOCA 発生から 24 時間後（一部のプラントでは 12 時間）、ほう素濃度が最大となる原子炉容器内の水面近傍において、ほう酸の析出（添付資料 3）を防止することを目的とし、冷却材の注入は低温側配管から低温側配管／高温側配管同時注入へ切り替えられる。これにより冷却材が炉心上部から供給されるが、燃料集合体の上部ノズルは流路孔が大きく、デブリによる閉塞の懸念はない。したがって、その後はデブリによる長期炉心冷却に対する懸念は払拭される。

上記の通り、再循環運転の開始後に非化学デブリ及び化学デブリにより炉心入口部の冷却流路が閉塞され、冷却材が十分に供給されずに炉心冷却が阻害されることが懸念されている。この懸念事項は LOCA 後の長期炉心冷却性事象（以降、スクリーン下流側炉内影響と称す）として、スクリーン閉塞事象と併せて米国において先行して調査研究が進められ、その後国内でも検討が開始されることとなった。

2.2. 過去の検討経緯^{2), 3), 4), 5), 6), 7), 8)}

2.2.1. 米国の検討経緯

再循環サンプスクリーンの閉塞事象及び下流側炉内影響については米国において先行して検討が進められており、その検討経緯について以下に示す。

(1) 再循環サンプスクリーン閉塞に対する検討

1979 年に NRC から再循環サンプの信頼性についての問題が提起され、R.G. 1.82 Rev.1 として LOCA デブリによる再循環サンプスクリーン閉塞を防止するための一般的な設計仕様が PWR 及び BWR に対して規定された。

しかしながら、1992 年にスウェーデンのバーセベック発電所 (BWR) において、安全弁の誤開放による蒸気の放出に伴い配管保温材が飛散し、圧力制御室に流入した保温材によりストレーナが閉塞する事故が発生した。この事故により設計で想定されていたよりも早期に再循環サンプスクリーンが閉塞することが示唆された。また、米国においてペリー発電所 (BWR) 及びリメリック発電所 (BWR) における事例からも再循環サンプスクリーン閉塞に対する懸念が再燃した。これらの事例を起点として 1996 年に R.G. 1.82 Rev.2 が発行され、BWR に対してスクリーンの大型化等の対策が講じられた。

一方、PWR プラントにおいては具体的なスクリーン閉塞事象は発生していないが、同様の懸念が想定されることから、1997年に Generic Safety Issue (GSI) - 191 としてサンプスクリーン閉塞事象に対する検討が開始された。2003年には R.G. 1.82 Rev.3 が発行され、PWR における再循環サンプスクリーン閉塞に対する詳細な評価が要求された。また、2004年に NRC は GL2004-02 を発行し、R.G. 1.82 Rev.3 に適合する評価及び改良工事を実施するように指示した。

(2) スクリーン下流側炉内影響に関する検討

再循環サンプスクリーン閉塞事象について検討する中、スクリーンを通過したデブリが下流にある炉心冷却流路を閉塞することが懸念されるようになり、スクリーン下流側炉内影響として検討が開始された。

2011年に事業者から WCAP-16793 Rev.2 としてスクリーン下流側炉内影響に対する評価手法が報告された。また、2012年に R.G. 1.82 Rev.4 が発行され、WCAP-16793 Rev.2 を参照することでスクリーン下流側炉内影響の評価が要求された。

しかしながら、WCAP-16793 Rev.2 に記載された手法は保守的であったことから、NRC は SECY-12-0093 において以下の評価オプションを提示することで GSI-191 の解決を図ることとした。

- オプション 1 : WCAP-16793 Rev.2 に記載された手法を適用したアプローチ
- オプション 2a : プラント固有情報を用いることで WCAP-16793 Rev.2 から緩和した繊維デブリ制限量を評価するアプローチ (PWROG はオプション 2a を適用した評価手法を WCAP-17788 として NRC へ提出)
- オプション 2b : 確率論的アプローチにより炉心入口閉塞によるリスクの増加を評価
- オプション 3 : 再循環サンプスクリーン閉塞と炉内下流側影響を分離して取り扱い、再循環サンプスクリーン閉塞に対してはオプション 1、炉内下流側影響に対してはオプション 2b を適用

上記のオプションを適用することで GL2004-02 への対応は終結し、GSI-191 も 2019年に終結が宣言された。

2.2.2. 国内の検討経緯

国内では米国における GL2004-02 発行に加え、BWR における圧力制御室への異物混入事象を踏まえ、旧原子力安全・保安院から 2004年に保温材等の実態調査の指示があり、事業者は旧原子力安全・保安院へ実態調査結果及び暫定処置内容を報告した。ま

た、安全評価 WG を立ち上げ、米国状況を踏まえた検討結果を基に、2008 年に内規が制定され、事業者へ再循環サンプスクリーンの性能評価が要求された。

事業者は国内プラント条件に基づく知見の拡充とこれに基づく再循環サンプスクリーンの性能評価、改造工事計画認可及び改良工事を進め、2011 年に改良工事を完了させた。

なお、再循環サンプスクリーン大型化工事の工事計画認可申請において、以下の事項が中長期課題として位置づけられ、事業者による課題解決に向けた継続的な知見拡充を行うこととなった。

- a. スクリーン下流側炉内影響
- b. 再循環サンプスクリーン性能評価における異物圧力損失評価試験手法の妥当性
- c. 化学影響生成異物の評価手法の妥当性 (国内 PWR へ WCAP-16530 を適用することの妥当性)

これらのうち、c.項に対しては旧 JNES、事業者及びメーカーによる検証により早期解決し、b.項においても事業者及びメーカーによる追加検証試験を報告済の状況にある。

また、2013 年の新規規制基準への移行後も設計基準事故における炉心冷却機能として NRA 規則で従来の要求が継承されることとなり、国内 PWR プラントの新規制基準適合性審査においてスクリーン下流側炉内影響は継続して中長期課題として位置づけられ、米国での検討状況を踏まえて対応することとなった⁹⁾。

上記の経緯を踏まえ、本書においては a. 項のスクリーン下流側炉内影響について流動試験及び炉内流動解析に基づき検討した結果をまとめた。

3. 再循環運転時における流動状況及びスクリーン下流側炉内影響の評価シナリオ

3.1. 再循環運転時における 1 次冷却系及び原子炉容器内の流動状況

3.1.1. LOCA 事象条件（破断位置）に対する流動状況

非常用炉心冷却系により低温側配管から注入された冷却材は、原子炉容器と炉心槽との間のアニュラス部であるダウンカムを下降し、原子炉容器底部から炉心入口部を通過して炉心に流入し、炉心の崩壊熱を除去する。

炉心への冷却材の注水は、ダウンカム側と炉心側との間の水頭差が駆動力となる。炉心冷却に供給される冷却材の流量は、この駆動力と、炉心入口部から炉心を冷却したのち破断口に至り原子炉格納容器へ流出するまでに生じる圧力損失とのバランスで決まる。

ダウンカム側の水位は、破断口がダウンカム上端相当の高さにある低温側配管破断の場合と比べ、ダウンカム側には破断口のない高温側配管破断の場合の方がより高い水位が可能となり、水頭差もその分大きいため、炉心の冷却流量も多くなっている。

非常用炉心冷却系から供給される炉心流量は、低温側配管破断、高温側配管破断のそれぞれの場合に対して以下の通りである。

(1) 低温側配管破断事象の流動状況

図 3-1 に示すように、低温側配管破断では破断口高さがダウンカマ上端相当であるため、ダウンカマ内の水位は、ダウンカマ上端を超えることはなく、炉心流量を超える注入水は破断口から原子炉格納容器に流出する。すなわち、健全側の低温側配管へ注入された冷却材の多くは、流路抵抗が小さいダウンカマを経由し破断側の低温側配管破断口に至る経路により破断口から原子炉格納容器へ流出し、残りが炉心冷却に供給される。

炉心流量は、炉心の内外での以下の水頭及び圧力損失がバランスする分だけが供給され、準定常状態では炉心での蒸散流量相当の流量となる。

- ・ダウンカマ側：ダウンカマ内の水位
- ・炉心側：炉心水位（コラプスト水位）及び
炉心上部から破断口に至る蒸気流量による圧力損失

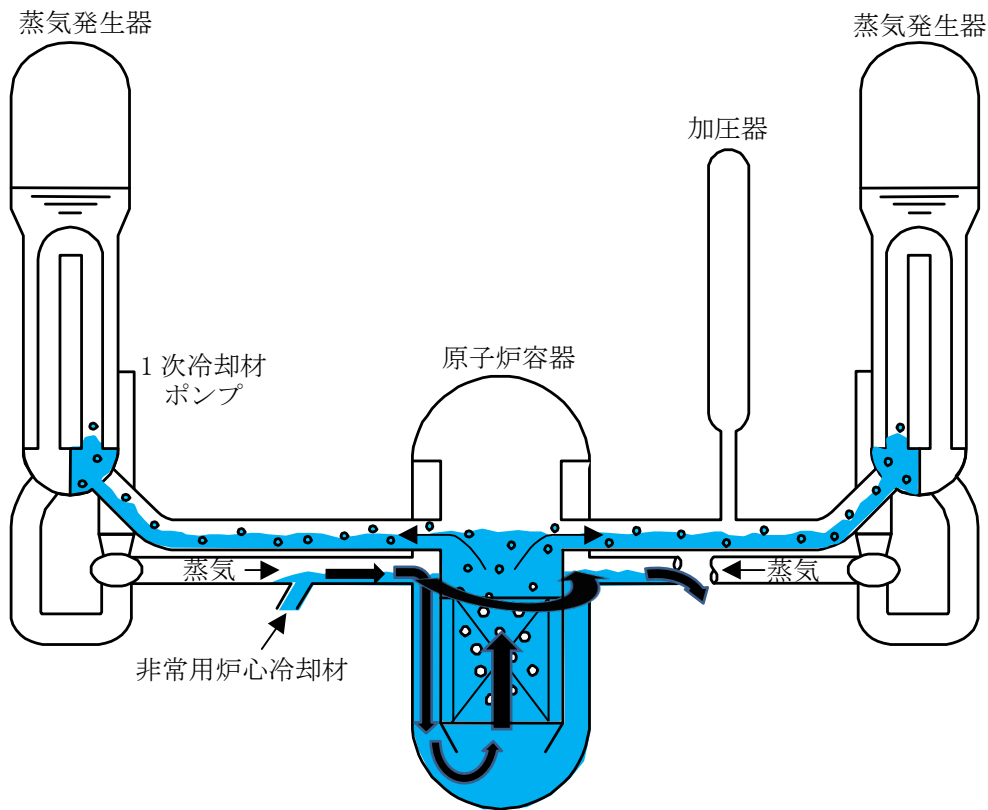


図 3-1 低温側配管破断時における 1 次冷却系及び原子炉容器内の流動状況

(2) 高温側配管破断事象の流動状況

図 3-2 に示すように、高温側配管破断においては、低温側配管へ注水された冷却材が炉心をバイパスして破断口へ直接向かう経路は蒸気発生器、1次冷却材ポンプ等の機器を経由することとなり、その水頭や流路抵抗が大きいため、1次冷却系に注水された冷却材はそのままダウンカマを下降し、原子炉容器底部を經由して炉心入口部から炉心に流入する。このため、1次冷却系に注入されたすべての冷却材が炉心の冷却に有効に活用される。炉心を経た冷却材は、炉心上部を通り破断側の高温側配管破断口から原子炉格納容器へ流出する。

炉心流量は、炉心の内外での以下の水頭及び圧力損失がバランスする分だけが供給されるが、実際は炉心から高温側配管破断口に至る圧力損失は比較的小さいため、ダウンカマ側の水位はそれほど高くなりずにバランスする。

- ・ダウンカマ側：ダウンカマ及び低温側配管、蒸気発生器出口配管、蒸気発生器伝熱管低温側部の水位
- ・炉心側：蒸気を含む炉心水位（コラプスト水位）及び
炉心入口部から炉心を経由して高温側配管破断口に至る圧力損失

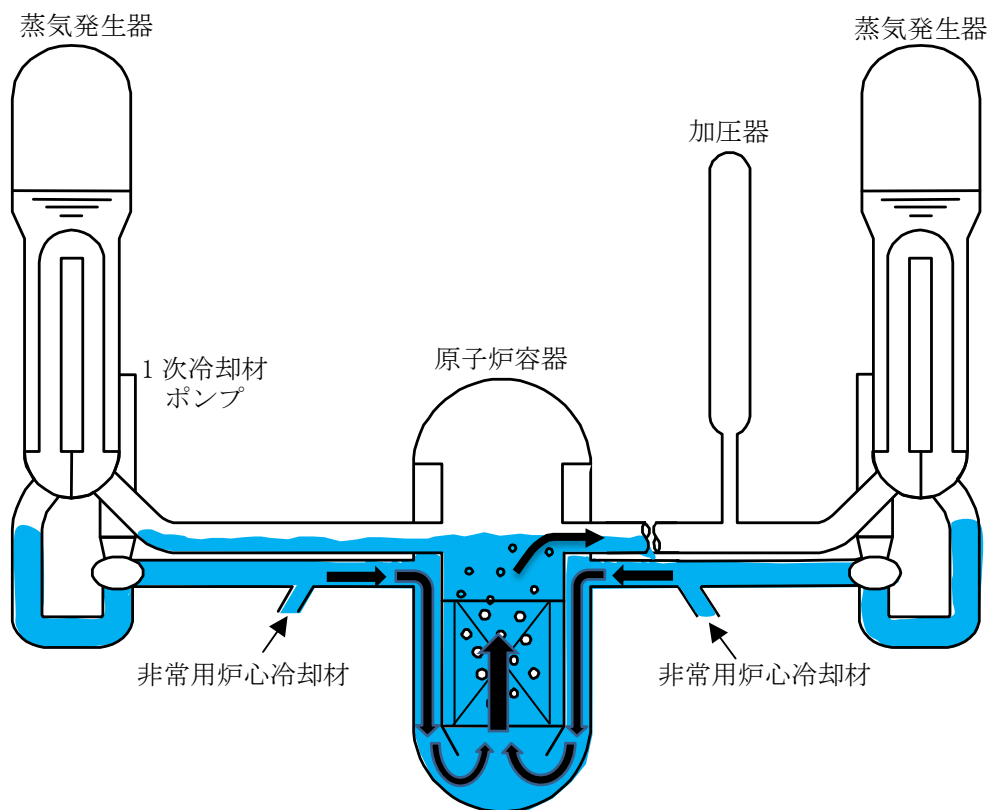


図 3-2 高温側配管破断時における1次冷却系及び原子炉容器内の流動状況

3.1.2. 炉心へのデブリ到達量及びデブリの炉心蓄積による炉内流動状況

(1) 炉心へのデブリ到達量

低温側配管破断事象では、前項で述べたように炉心流量は蒸散量相当であるため、非常用炉心冷却系による注水の大半は炉心をバイパスして破断口に抜けていく。このことから、炉心流量に伴い原子炉容器に流入するデブリ量も少なく、炉心に到達するデブリ量は高温側配管破断事象の場合よりも少量となる。

一方、高温側配管破断事象では、非常用炉心冷却系により注入された冷却材が全て炉心に供給されるため、これに伴い炉心に到達するデブリ量も多くなる。

(2) デブリの蓄積に伴う炉内流動状況

再循環開始後、炉心入口部を中心とする炉心部へのデブリの蓄積が進むと、炉心冷却流路の流動抵抗が増加し炉心流量は減少傾向となる。一方で、炉心流量の駆動源となるダウンカマ側と炉心側との間の水頭差もデブリの蓄積に応じて増加するため、デブリの蓄積が進行してもしばらくの間は、必要な炉心流量は維持されることとなる。

デブリの蓄積に伴うこの水頭差の増加は、低温側配管破断事象の場合と高温側配管破断事象の場合とでは異なる機構となる。

(a) 低温側配管破断時

炉心部へのデブリの蓄積開始時において、炉心からの蒸散量、ダウンカマ側と炉心側との水頭差、及び炉心から破断口までの圧力損失に応じて炉心に供給される平衡的な状態が保たれている。図 3-3 に低温側配管破断時の模式図を示す。

デブリの炉心入口部蓄積による圧力損失の増加に伴い、炉心流量が減少傾向となると、炉内での熱除去バランスが崩れ、炉内の水位が低下する（図 3-3 の②）が、これによりダウンカマ側と炉心側との水頭差（図 3-3 の①-②）が増加する方向となるため、冷却流量は圧力損失の増加ほどには減少しない。このように炉心部でのデブリの蓄積が進んでもしばらくの間は、このフィードバックの機構により炉心流量は大きく低下することなく炉心冷却に必要な流量は維持される。

デブリ蓄積増加に伴う圧力損失の増加が一定レベルを超過し、炉心水位がさらに低下して炉心流量が炉心崩壊熱による蒸散流量を賄えない状態になると、炉心フロス水位は炉心発熱有効長上端を下回って炉心露出し、燃料被覆管温度は増加する。

(b) 高温側配管破断時

図 3-4 に高温側配管破断時の模式図を示す。

デブリ蓄積により炉心入口部の圧力損失が増加すると注入点である低温側配管

部の水位が上昇し、非常用炉心冷却系による注水の一部は炉心とは逆方向の1次冷却材ポンプ、蒸気発生器出口配管部及び蒸気発生器へ向かい、同部に蓄水され始めるが、ダウンカマ側水位は維持されるため炉心へ向かう流量は一時減少するも炉心冷却に必要な流量は維持される(図 3-4 の①)。蒸気発生器出口配管部まで蓄水され、さらに炉心入口部での圧力損失が増加するとダウンカマ側の水位は蒸気発生器低温側伝熱管部まで達し、以降はダウンカマ側水位がさらに増加していく。このため、炉心入口部の圧力損失の増加に相応して蒸気発生器低温側伝熱管部水位が上昇してダウンカマ側と炉心側との水頭差が増加するため、1次冷却系への注入水はそのまま炉心に流入する(図 3-4 の②)。さらに炉心部のデブリ蓄積による圧力損失の増加が進み、蒸気発生器伝熱管のU字形状頂部までダウンカマ側水位が到達すると、それ以降は水頭差の増加はなくなり(図 3-4 の③)、それ以上に圧力損失が増加すると炉心流量の減少が開始する。

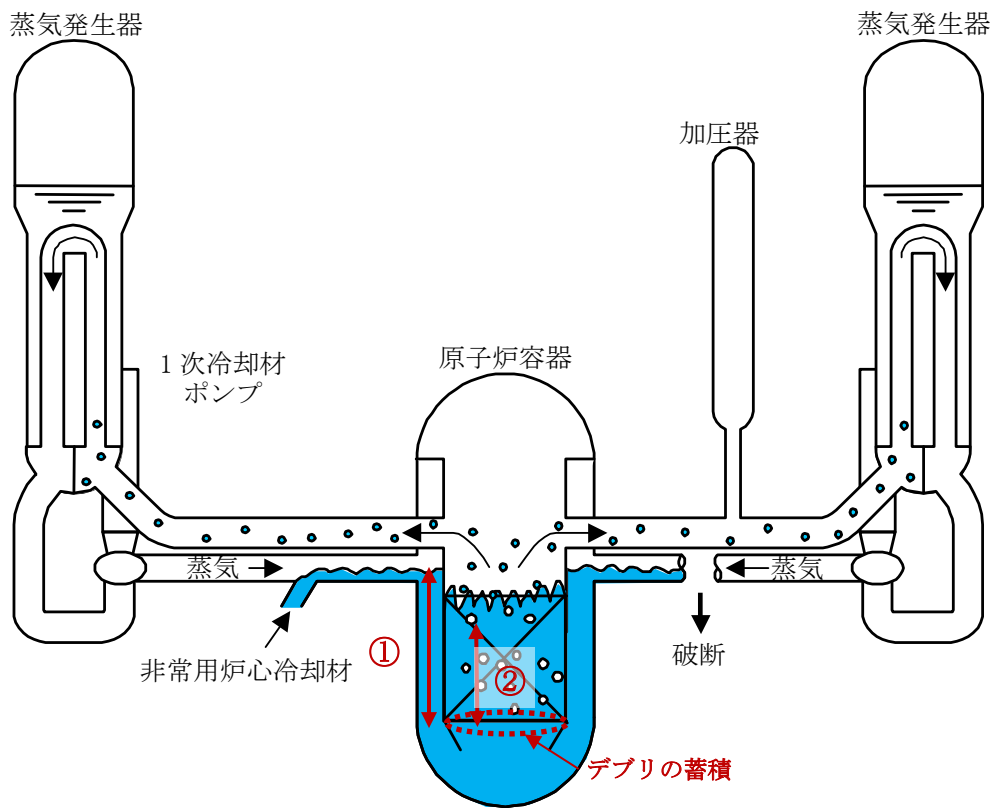


図 3-3 低温側配管破断時の炉心部デブリ蓄積による炉内流動への影響

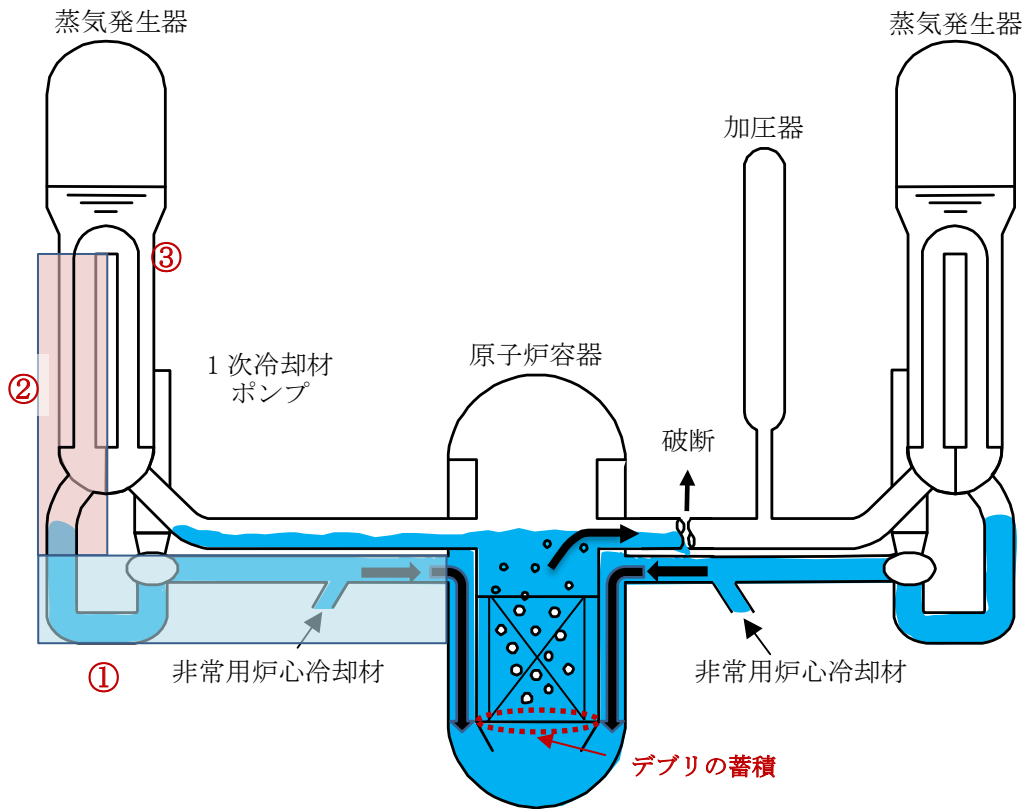


図 3-4 高温側配管破断時の炉心部デブリ蓄積による炉内流動への影響

(3) 炉心冠水を維持できる限界流量

炉心入口部を中心とするデブリの蓄積が進み、炉心部の圧力損失の増加が続くと、炉心流量は低下する。最終的には炉心の崩壊熱による冷却材の蒸散量に相当する冷却材の補給量を下回り、炉心のフロス水位は炉心発熱有効長上端以下まで低下して炉心が露出し、燃料被覆管温度は上昇し始める。したがって、崩壊熱による蒸散量と釣り合う炉心流量が長期冷却性維持の目安となる限界流量と考えることができ、この時に炉心側水位はフロス水位で炉心発熱有効長上端となる。再循環開始直後、崩壊熱が最大となることから、その時点の崩壊熱を考慮した蒸散量に釣り合う炉心流量は、炉心の燃料バンドル部断面での流速に換算すると、約 10mm/s 程度となる。

前項のとおり炉心流量の駆動力はダウンカマ側と炉心側の水頭差であり、限界流量となるときの炉心側水位はフロス水位で発熱有効長上端相当である。このため、ダウンカマ側水位の多寡により限界流量に相応するデブリ蓄積による圧力損失が定まる。

図 3-5 にデブリの蓄積に伴う水頭差による駆動力・圧力損失と炉心流量の変化を示す。低温側配管破断事象、及び高温側配管破断事象において、デブリ蓄積がない状態からデブリの蓄積が進み、限界流量に至るまでの変化を模式的に示している。図に示すように駆動力と圧力損失はバランスして推移する。

低温側配管破断事象の場合には、ダウンカマ側水位は最大でもダウンカマ上端であり炉心流量の駆動力は高温側配管破断の場合に比べて小さく、また炉心部から破断口までの流路が長く一定の圧力損失もある。このため、図 3-5 に示すように、低温側配管破断の場合、デブリのない状態でも比較的限界流量に近く、デブリ蓄積による圧力損失の増加により、限界流量相当の圧力損失に達するまでの余裕は小さい。

一方、高温側配管破断の場合は、ダウンカマ側水位は前項のとおり最大で蒸気発生器低温側伝熱管部頂部まで可能であり、炉心流量の駆動力は低温側配管破断の場合に比べてかなり大きく、炉心部から破断口までの流路が短く圧力損失は比較的小さい。このことから、図 3-5 に示すように、高温側配管破断の場合、デブリがある程度蓄積しても、比較的大きな駆動力が得られるため、限界流量時に相当する圧力損失に達するまでの余裕は大きい。

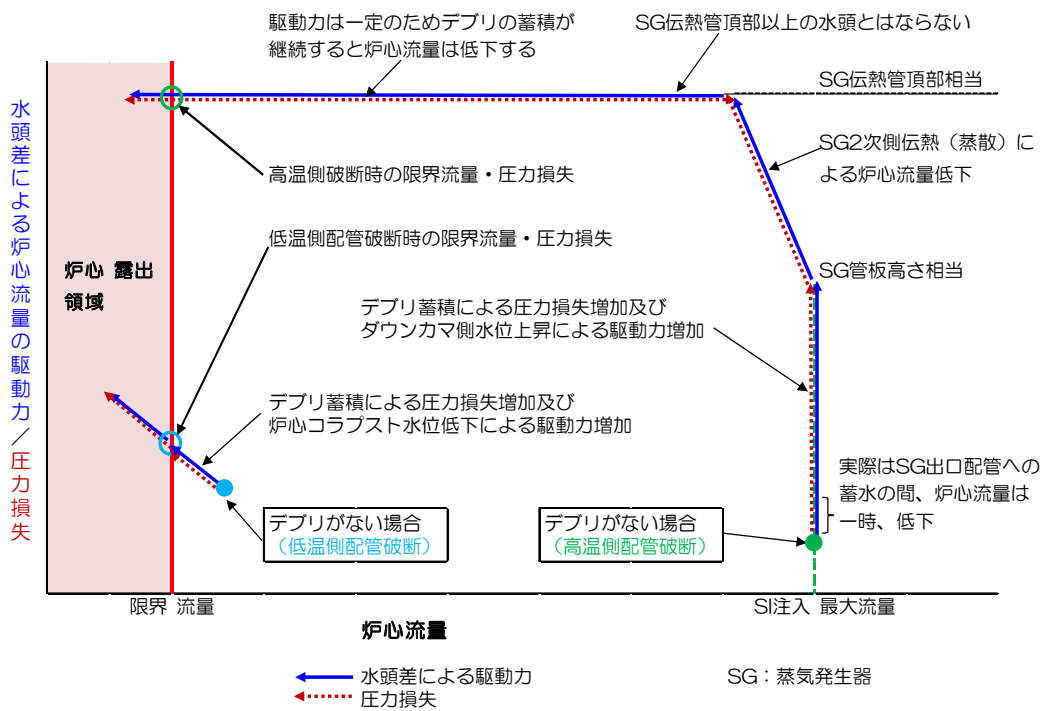


図 3-5 デブリの蓄積に伴う駆動力・圧力損失と炉心流量の変化

3.2. スクリーン下流側炉内影響の評価シナリオ

2.2.1 項の通り、米国 PWROG ではスクリーン下流側炉内影響の評価シナリオとして複数のオプションが考慮されている。このうち、決定論的な炉内流動解析で被覆管温度を求め、判断基準値を超えないことで冷却性の維持を評価しているのは、以下の 2 種類のオプションであり、国内のスクリーン下流側炉内影響の評価においても参考としている。

・オプション 1： 1 ステップの圧力損失増加

再循環開始と同時に炉心入口部が非化学デブリと化学デブリにより閉塞されると仮定して炉内流動解析を行う。

非化学デブリと化学デブリによる閉塞により炉心入口部の圧力損失は大きく増加し、炉心全面がデブリにより閉塞することを仮定して、圧力損失の増加を定量的に求めて解析入力とするか、または、化学デブリによる閉塞部は圧力損失の増加が極めて大きくなること（当該断面は通水しない）を仮定して、炉心断面のうちのデブリの未閉塞部分の割合を解析入力とするか、いずれかの仮定に基づき炉内流動解析が実施されている。

このオプションに基づく評価手法は、WCAP-16793 に記載されている。

・オプション 2a： 2 ステップの圧力損失増加と代替炉心冷却流路の考慮

再循環開始直後は非化学デブリのみによる炉心部の閉塞・圧力損失の増加を仮定し、その後、時間の経過とともに炉内の水温低下や pH 変化の影響を考慮して化学デブリが析出開始する時間以降は、炉心部の圧力損失は極端に大きくなると仮定する。化学デブリの析出後は炉心入口部からの通水は期待せず、炉心外周のバッフルバレル間の流路を代替流路として炉心への冷却材の供給に活用できるとする考え方である。

崩壊熱の大きい初期の段階では炉心の圧力損失の増加がオプション 1 より小さいことから被覆管温度等の評価は緩和されるが、オプション 1 にはない、化学デブリ析出が開始する時間の算出と代替流路による化学デブリを含む冷却材の炉心注入特性の確認が求められる。

このオプションに基づく評価手法は、WCAP- 17788 に記載されている。

上記の決定論的評価手法の各オプションの考え方の模式図を図 3-6 に示す。

国内 PWR では基本的に、オプション 2a に基づいて炉内流動解析を行う。解析入力に必要な情報は各種の試験結果を基に保守性を考慮して設定されている。

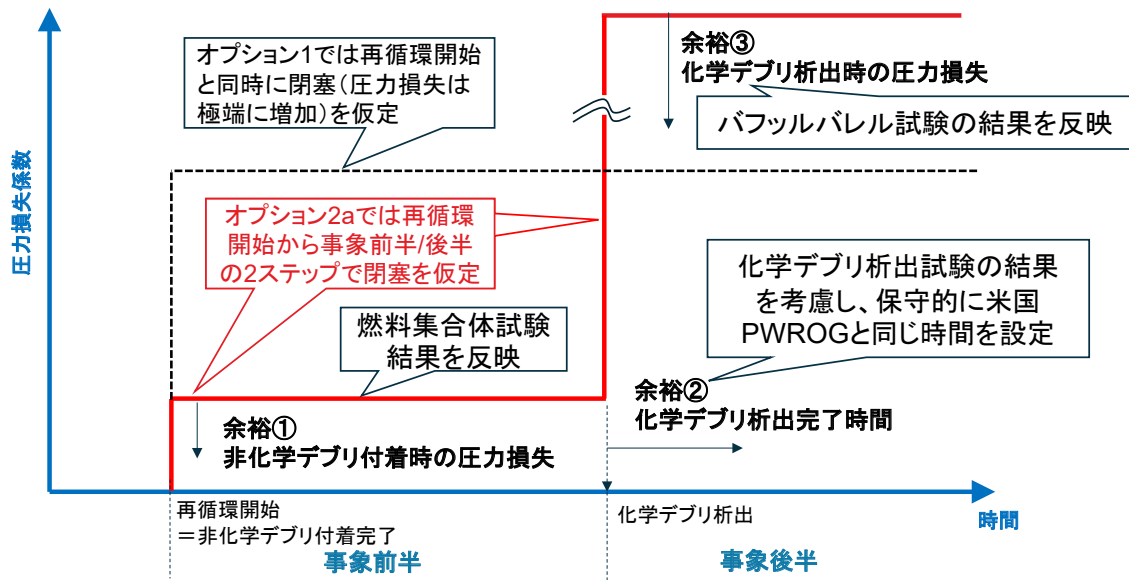


図 3-6 長期炉心冷却性の評価シナリオ (オプション 1 と 2a の比較)

4. 流動試験

オプション 2a のシナリオに基づく炉内流動解析の評価条件（デブリによる冷却流路の閉塞条件）について妥当性を確認するため、炉心入口部及び代替流路（バッフルバレル流路）を模擬した流動試験を実施し、非化学デブリ及び化学デブリが流入した際の冷却流路への通水性影響を確認した。

4.1. 非化学デブリ試験

4.1.1. 基礎試験

非化学デブリによる基礎的な知見を得ることを目的に、炉心入口部の流路を部分的に模擬した流動試験を実施した。基礎試験は炉心入口部の流路として、実機プラントの下部炉心板、燃料集合体の下部ノズル、最下段グリッド、燃料棒を部分的に模擬した供試体を用いることで、実機プラントの境界条件が与える通水性への影響をパラメトリックに確認する。ここで、供試体として使用した下部ノズル及びグリッドは 17×17 A 型 ステップ 2 ジルカロイ (Zry) グリッド燃料 (添付資料 4) である。

(1) 試験装置

試験装置の概要を図 4-1、図 4-2 に示す。また、テストセクションの概要を図 4-3、図 4-4、図 4-5、図 4-6 に示す。

試験装置はタンク、ポンプ、流量計、テストセクションで構成され、タンクから流出したデブリを含む試験水はポンプ、流量計を通過した後、テストセクションへ流入し再度タンクへ戻る循環ループである。タンクでは攪拌機を設置し、試験水を攪拌することで、試験水内のデブリを均一に分散させている。また、テストセクションは、燃料集合体の下部ノズル 2 体、若しくは下部ノズル 1/4 体を設置した体系とし、この試験体系に応じた流量条件とするため試験ループを変更している。

下部ノズル 2 体体系は、試験条件に応じ、下部ノズルのみを設置した体系と、下部ノズルに加え最下段グリッド及び模擬燃料棒を設置した体系を用いている。また、炉心入口部の流れを模擬するため、下部ノズルの上流に下部炉心板を模擬した構造物（流路孔を模擬）を設置し、さらに下部ノズルを並列に 2 体設置することで実機プラントと同じ下部ノズルの周辺ギャップを模擬している。

下部ノズル 1/4 体体系は、海外知見（米国知見）の模擬を目的として、公開情報に基づき、下部ノズルのプレート中央部（1/4 領域）を供試体としたものである。この体系は、試験体系の違い（国内体系：下部ノズル 2 体体系と米国体系：下部ノズル 1/4 体体系の違い）による通水性への影響を確認するために用いる。

試験では供試体間差圧変動を時系列データとして計測することで、デブリによる通水性への影響を確認する。また、試験中の状態を確認するため、ループ流量、試験水温度、系圧力も時系列データとして計測する。

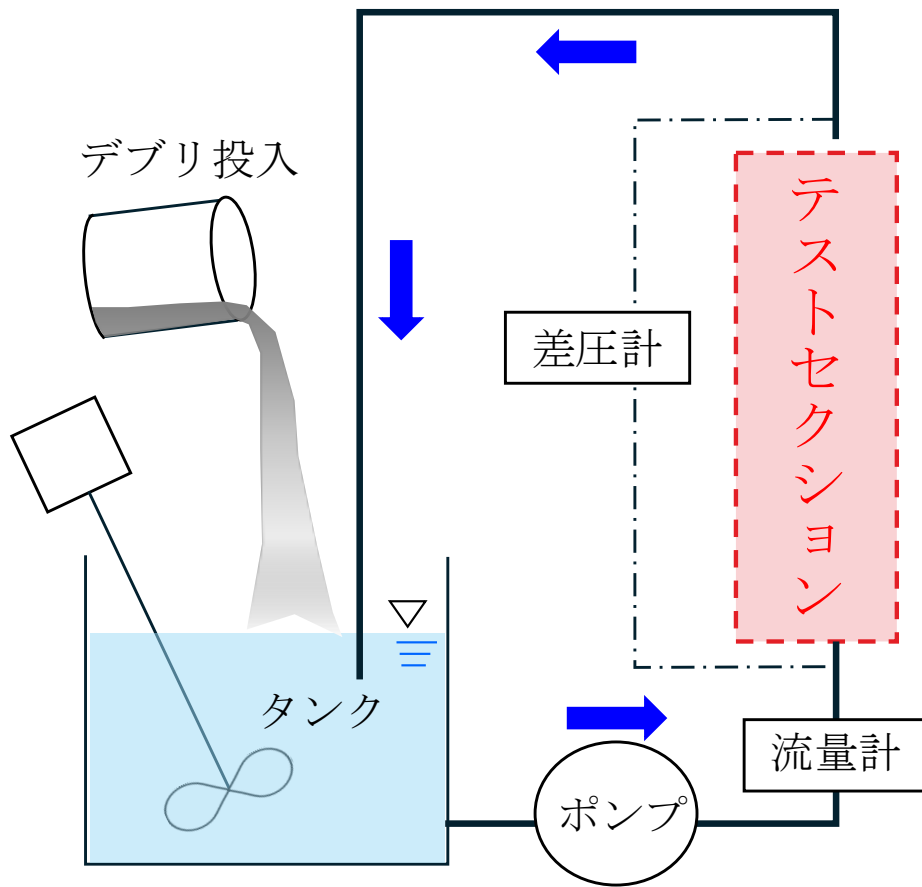
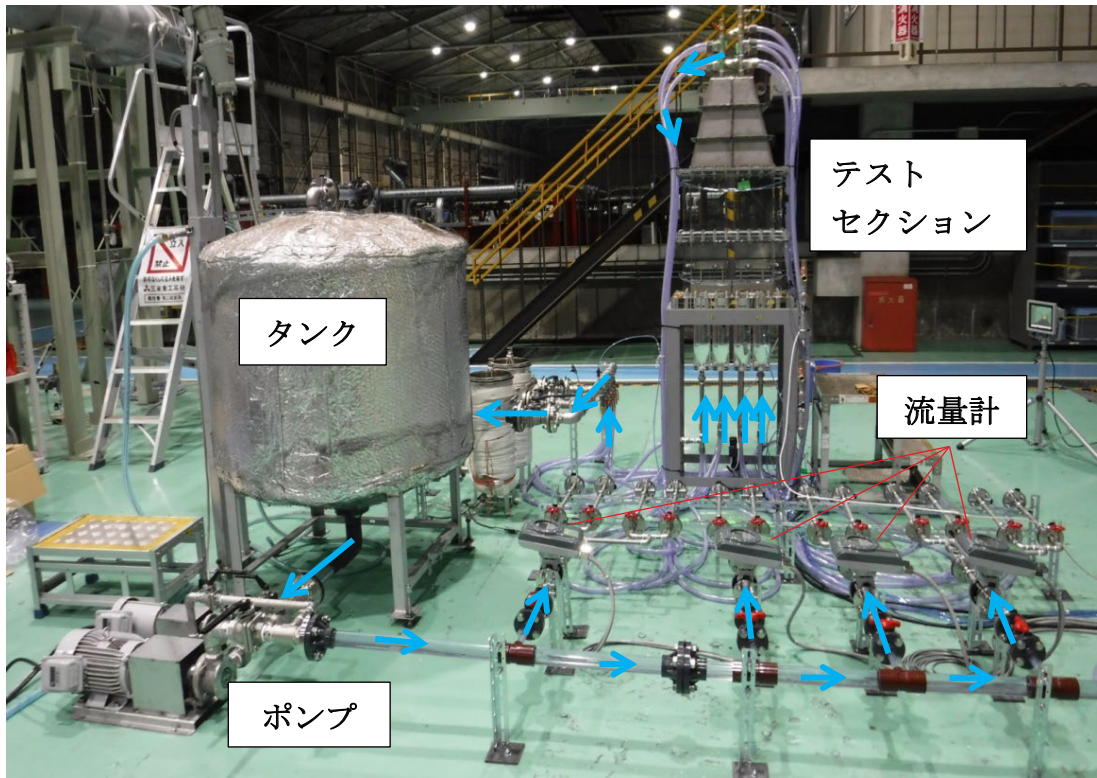
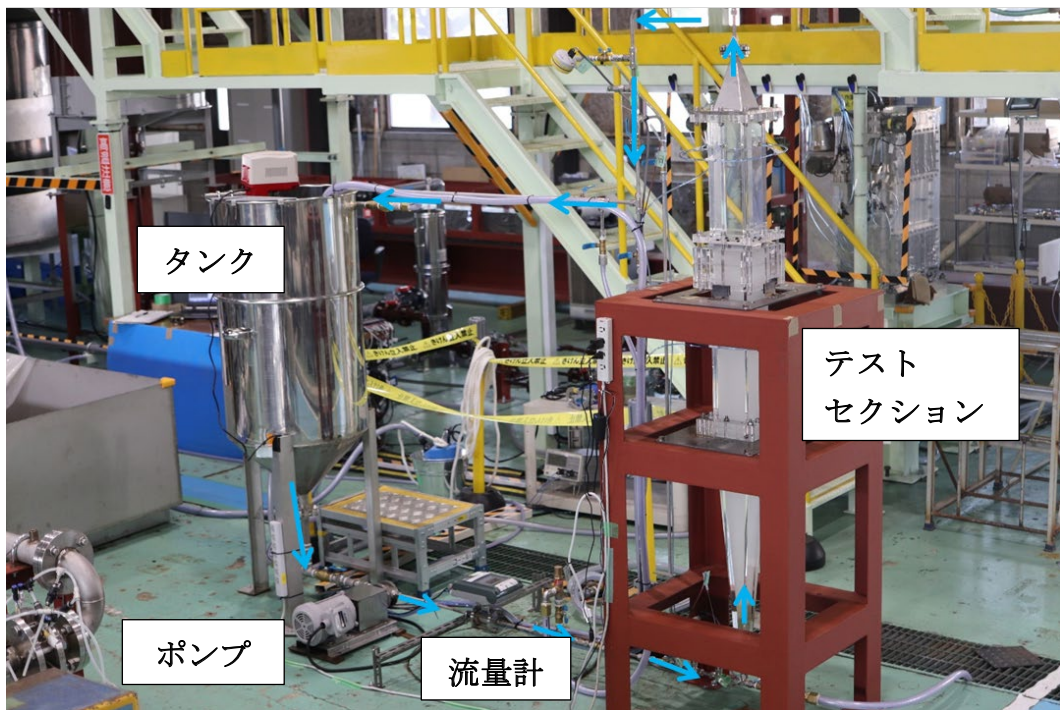


図 4-1 基礎試験 試験装置 (概念図)



(a) 燃料集合体の下部ノズル 2 体体系



(b) 燃料集合体の下部ノズル 1/4 体体系

図 4-2 基礎試験 試験装置

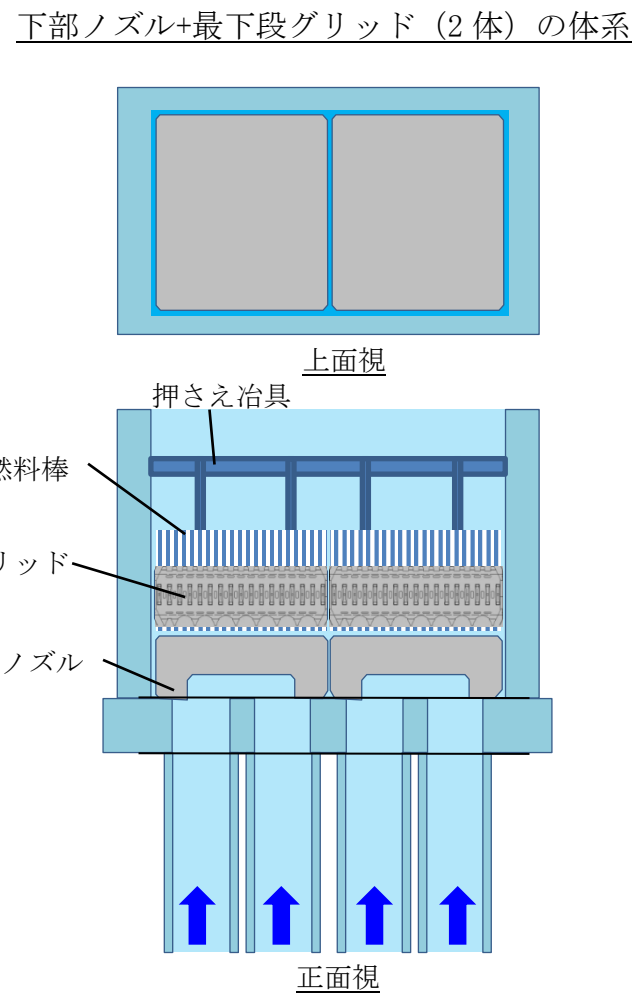
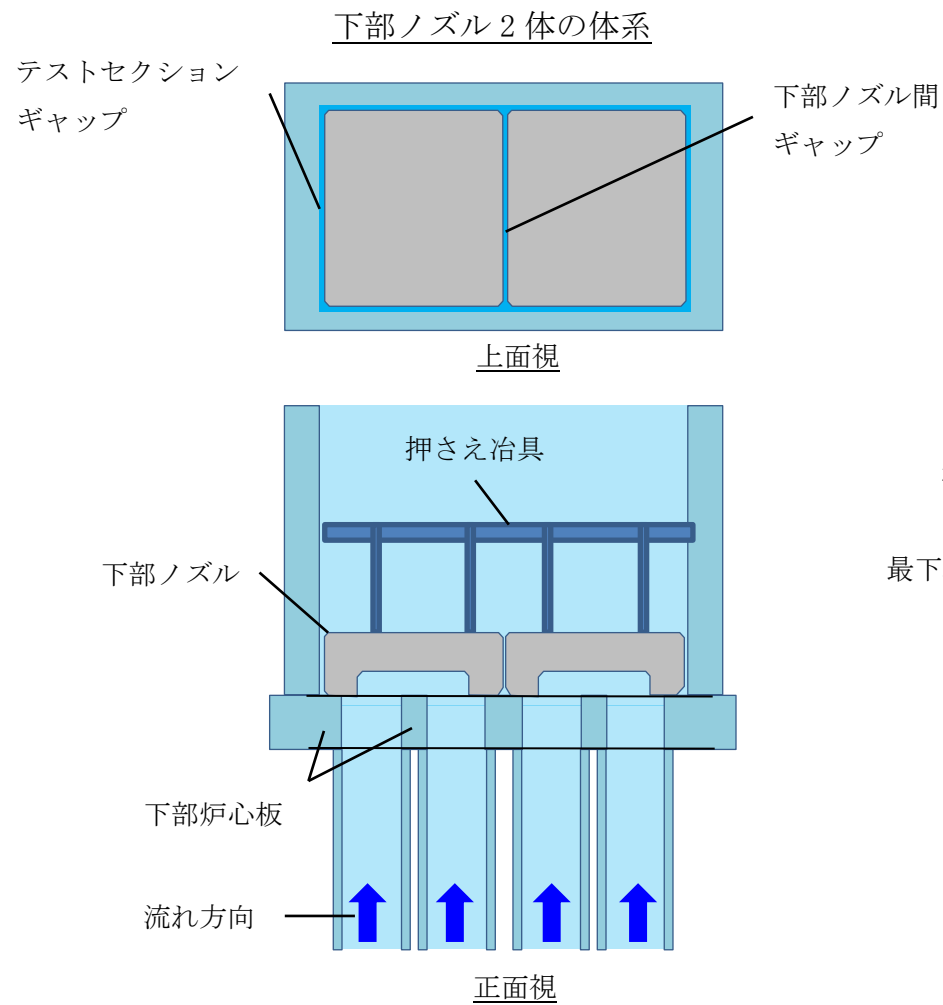
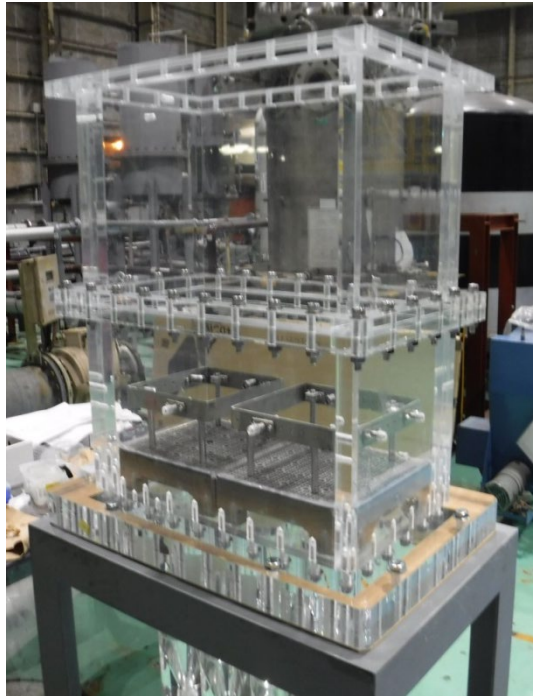


図 4-3 基礎試験 テストセクション (概念図) : 下部ノズル 2 体体系



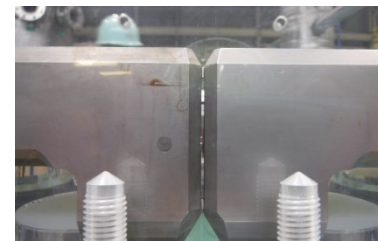
テストセクションの外観



下部ノズル 2 体の体系



下部ノズル+最下段グリッド (2 体)
の体系



下部ノズル間ギャップ

図 4-4 基礎試験 テストセクション： 下部ノズル 2 体体系

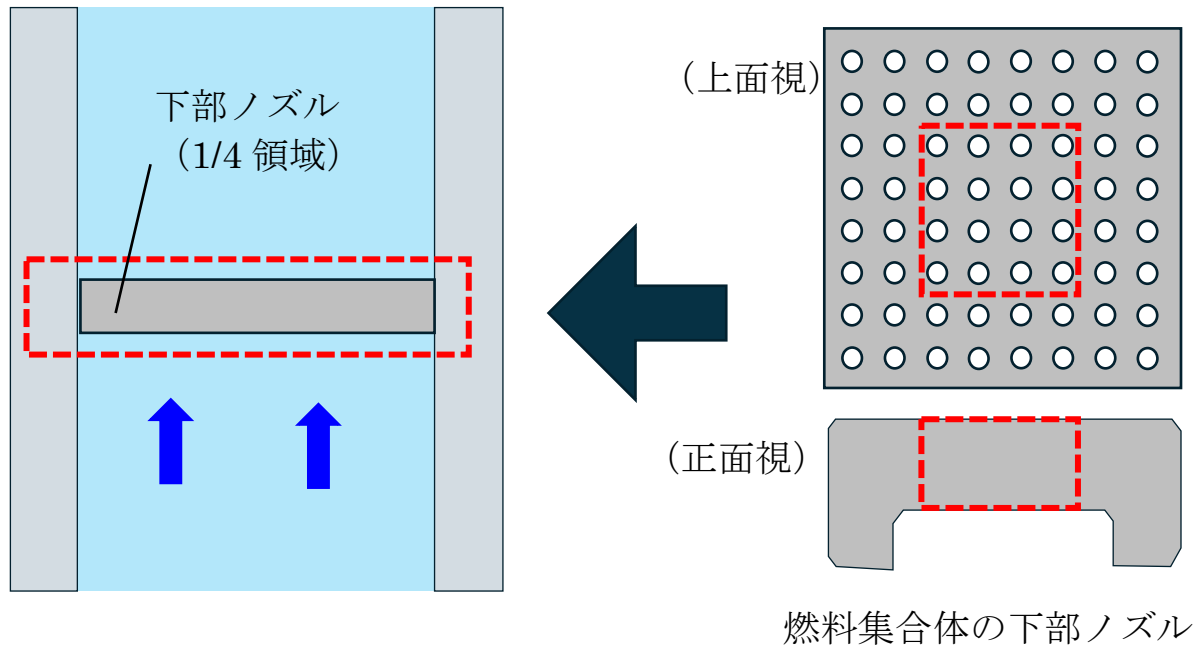
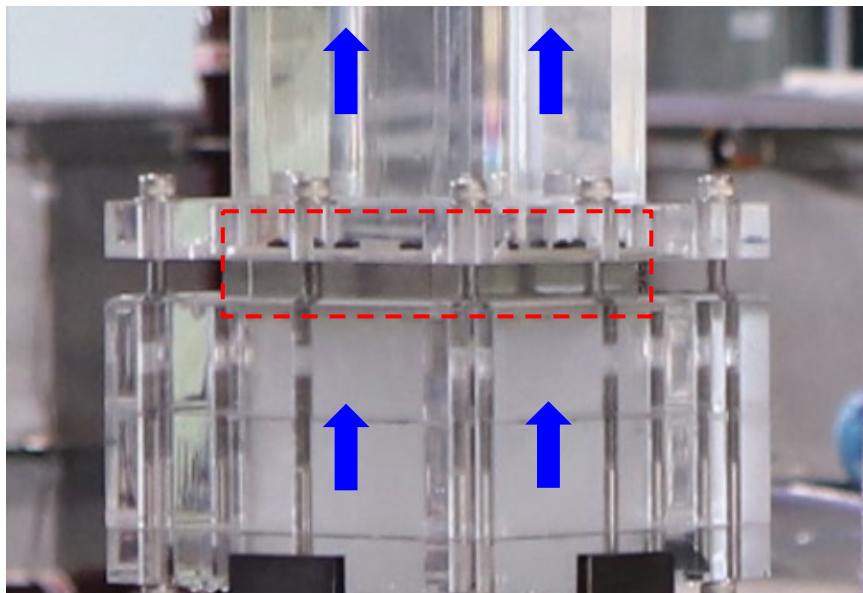
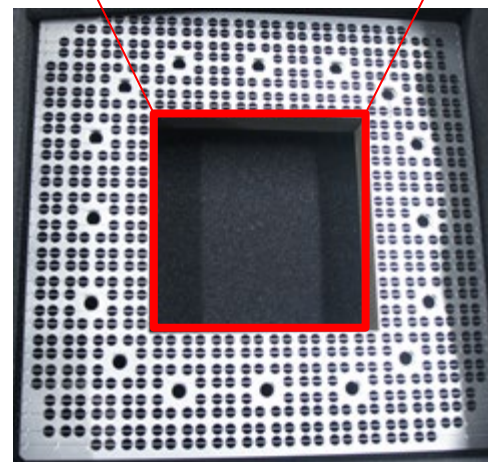
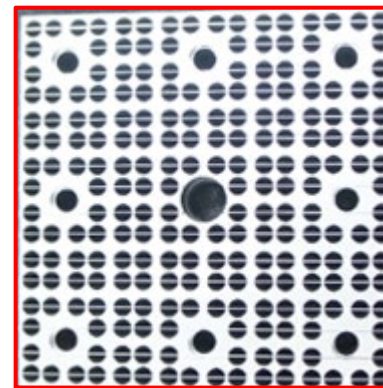


図 4-5 基礎試験 テストセクション (概念図) : 下部ノズル 1/4 体体系

下部ノズル 1/4 領域



テストセクションの外観



燃料集合体の下部ノズル

図 4-6 基礎試験 テストセクション：下部ノズル 1/4 体体系

(2) 試験条件

試験条件を表 4-1～表 4-6 に示す。炉心入口部の境界条件が与える通水性への影響を確認するため、下記の項目に対して供試体間差圧への感度を計測した。

(a) 試験体系

(国内体系：下部ノズル 2 体系、米国体系：下部ノズル 1/4 体系)

(b) 試験水温度 (常温、約 55℃)

(c) 炉心流速 (約 10mm/s、約 30mm/s、約 50mm/s)

(d) 粒子デブリ径 (平均粒子径約 20 μ m、約 30 μ m、約 380 μ m)

(e) P/F 比 (0、約 1、約 3、約 10、∞) *

*粒子デブリと繊維デブリの重量比 (Particle/fiber の比)

(f) デブリ投入方法 (粒子デブリ先行投入、繊維デブリ先行投入、同時投入)

基礎試験において、実機相当の非化学デブリ量を投入することは試験装置の制約から難しい。したがって、実機のデブリ濃度を包絡的に模擬し、デブリ投入後の供試体間差圧の変動が十分小さくなるまで試験水を循環させ、実機相当のデブリ量を包絡する量が供試体を通過するまで試験を実施した。これにより、小規模な試験装置であっても供試体を通過するデブリ量を包絡的に取り扱え、試験条件に対する感度をパラメトリックに評価することが可能である。

また、国内 PWR プラントを包絡する P/F 比を広範囲に模擬し、投入した繊維デブリ量と P/F 比に相当する粒子デブリ量を投入した。これにより、P/F 比が供試体間差圧に与える影響を広範囲に確認することが可能である。

国内 PWR プラントのデブリ濃度、及び各試験条件におけるデブリ濃度を図 4-7 に示す。図中の国内 PWR プラントの繊維デブリ濃度は、サンプルスクリーンのバイパス試験 (繊維デブリのバイパス率) : 添付資料 1 の結果を用いて評価した値である。また、試験条件としては国内 PWR プラント条件を十分に包絡した繊維デブリバイパス率 30%、60%に基づき繊維デブリ濃度を設定した。また、基礎試験のデブリ濃度に国内 PWR プラントのサンプルピット水 (燃料集合体当たり最小量) を考慮し算出した等価デブリ量を図 4-8 に示す。

図 4-7、図 4-8 より国内 PWR プラントの P/F 及びデブリ濃度を十分に包絡した試験条件となっていることが分かる。

表 4-1 試験条件 (試験体系)

項目		米国体系	国内体系
供 試 体	下部ノズル	1/4 体	2 体
	最下段グリッド	無	
	燃料棒	無	
	テストセクション及び 下部ノズル間ギャップ	無	有(約 1mm)
	下部炉心板	無	有
流 体 条 件	圧力	常圧	
	温度	常温	
	炉心流速	約 20mm/s	
デ ブ リ 条 件	デブリ種類	繊維デブリ: 保温材 (ロックウール) 粒子デブリ: 塗料 (アクリルパウダー) ケイ酸カルシウム保温材 潜在粒子 (珪砂)	
	デブリ濃度 (図 4-7)	(A)	(B)
	等価デブリ量	繊維デブリ: 約 440g 粒子デブリ: 約 4400g	繊維デブリ: 約 1600g 粒子デブリ: 約 16000g
	P/F (粒子デブリと 繊維デブリの比)	約 10	

表 4-2 試験条件一覧（試験水温度）

項目		常温	高温
供試体	下部ノズル	2 体	
	最下段グリッド	有	
	燃料棒	有	
流体条件	圧力	常圧	
	温度	約 25℃	約 55℃
	炉心流速	約 30mm/s	
デブリ条件	デブリ種類	繊維デブリ：保温材（ロックウール） 粒子デブリ：塗料（アクリルパウダー） ケイ酸カルシウム保温材 潜在粒子（珪砂）	
	デブリ濃度（図 4-7）	(D)	
	等価デブリ量	繊維デブリ：約 4500g 粒子デブリ：約 14000g	
	P/F（粒子デブリと繊維デブリの比）	約 3	

表 4-3 試験条件一覧 (炉心流速)

項目		低流速	中流速	高流速
供試体	下部ノズル	2 体		
	最下段グリッド	有		
	燃料棒	有		
流体条件	圧力	常圧		
	温度	常温		
	炉心流速	約 10mm/s	約 30mm/s	約 50mm/s
デブリ条件	デブリ種類	繊維デブリ: 保温材 (ロックウール) 粒子デブリ: 塗料 (アクリルパウダー) ケイ酸カルシウム保温材 潜在粒子 (珪砂)		
	デブリ濃度 (図 4-7)	(C)		
	等価デブリ量	繊維デブリ: 約 1400g 粒子デブリ: 約 14000g		
	P/F (粒子デブリと 繊維デブリの比)	約 10		

表 4-4 試験条件一覧 (粒子デブリ径)

項目		平均粒子径：約 20 μ m	平均粒子径：約 30 μ m	平均粒子径：約 380 μ m
供試体	下部ノズル	2 体		
	最下段グリッド	有		
	燃料棒	有		
流体条件	圧力	常圧		
	温度	常温		
	炉心流速	約 30mm/s		
デブリ条件	デブリ種類	繊維デブリ：保温材（ロックウール） 粒子デブリ：塗料（アクリルパウダー） ケイ酸カルシウム保温材 潜在粒子（珪砂）		
	デブリ濃度 (図 4-7)	(C)		
	等価デブリ量	繊維デブリ：約 1400g 粒子デブリ：約 14000g		
	P/F (粒子デブリと 繊維デブリの比)	約 10		

表 4-5 試験条件一覧 (P/F 比)

項目		P/F=0	P/F=1	P/F=3	P/F=10	P/F=∞
供試体	下部ノズル	2 体				
	最下段グリッド	有				
	燃料棒	有				
流体条件	圧力	常圧				
	温度	常温				
	炉心流速	約 30mm/s				
デブリ条件	デブリ種類	繊維デブリ: 保温材 (ロックウール) 粒子デブリ: 塗料 (アクリルパウダー) ケイ酸カルシウム保温材 潜在粒子 (珪砂)				
	デブリ濃度 (図 4-7)	(E-2)	(E-3)	(D)	(C)	(E-1)
	等価デブリ量	繊維デブリ: 約 5200g 粒子デブリ: 約 0g	繊維デブリ: 約 5200g 粒子デブリ: 約 5200g	繊維デブリ: 約 4500g 粒子デブリ: 約 14000g	繊維デブリ: 約 1400g 粒子デブリ: 約 14000g	繊維デブリ: 約 0g 粒子デブリ: 約 5200g
	P/F (粒子デブリと 繊維デブリの比)	0 (繊維デブリのみ)	約 1	約 3	約 10	∞ (粒子デブリのみ)

表 4-6 試験条件一覧 (デブリ投入方法)

項目		粒子先行投入	繊維先行投入	同時投入
供試体	下部ノズル	2 体		
	最下段グリッド	有		
	燃料棒	有		
流体条件	圧力	常圧		
	温度	常温		
	炉心流速	約 30mm/s		
デブリ条件	デブリ種類	繊維デブリ: 保温材 (ロックウール) 粒子デブリ: 塗料 (アクリルパウダー) ケイ酸カルシウム保温材 潜在粒子 (珪砂)		
	デブリ濃度 (図 4-7)	(E-1) → (E-3)	(E-2) → (E-3)	(E-3)
	等価デブリ量	繊維デブリ: 約 5200g 粒子デブリ: 約 5200g		
	P/F (粒子デブリと 繊維デブリの比)	$P/F = \infty \rightarrow 1$	$P/F = 0 \rightarrow 1$	約 1

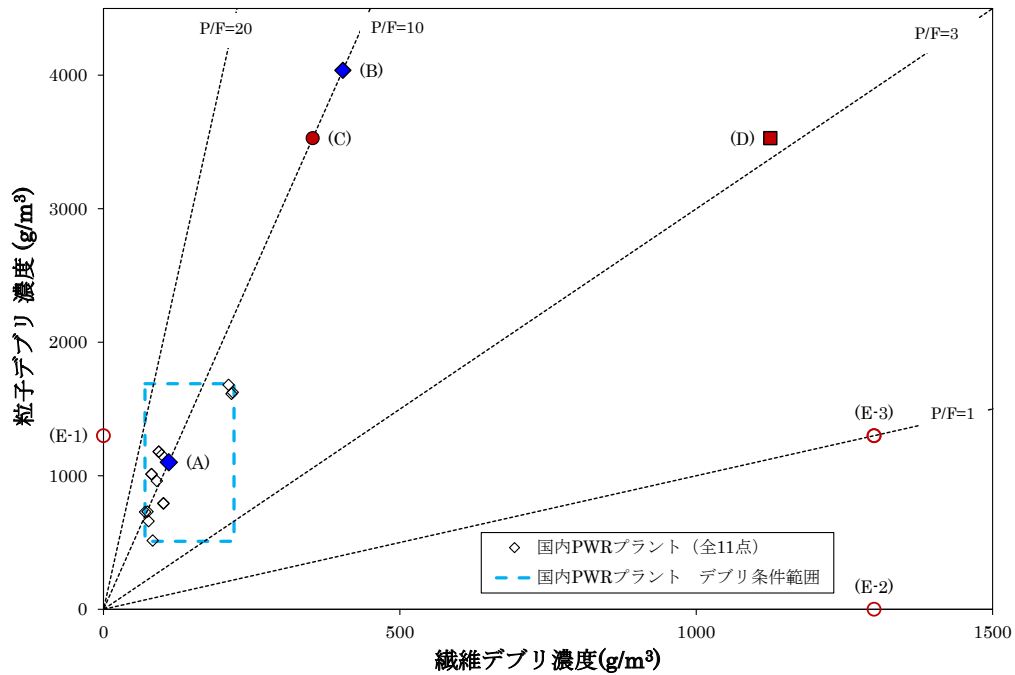


図 4-7 各試験ケースに対する最大到達デブリ濃度

*条件(A)は海外知見（米国知見）を模擬した基礎試験。デブリ濃度は公開情報^{10),11),12)}より設定

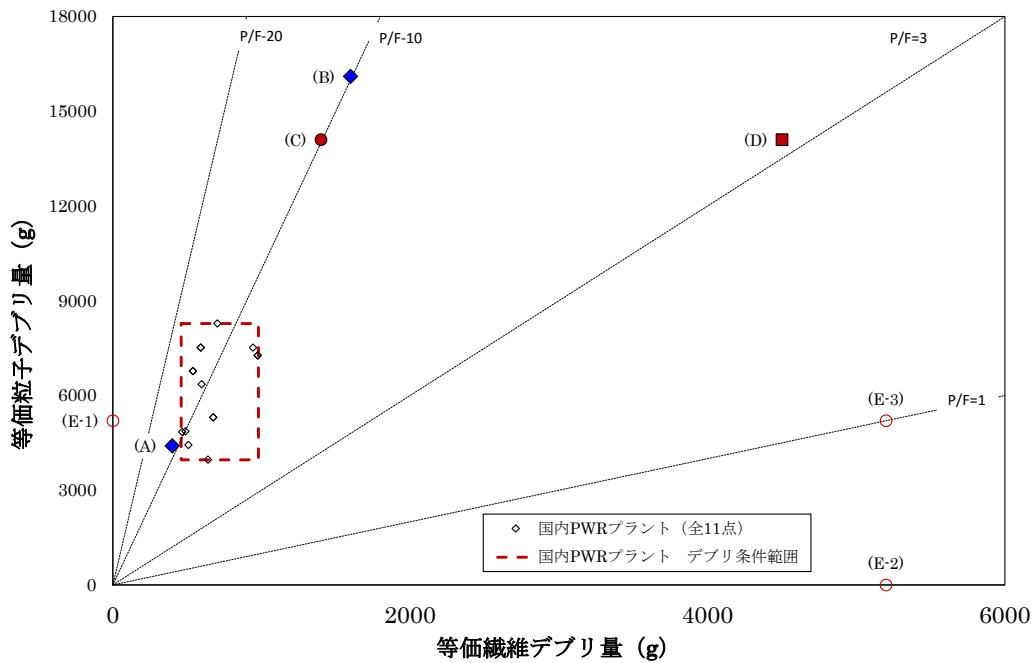


図 4-8 各試験ケースに対する等価デブリ量

*図 4-7 のデブリ濃度に国内 PWR プラントのサンプルット水（燃料集合体当たりの最小量）を考慮した等価デブリ量

(3) 試験結果

(a) 試験体系（米国体系、国内体系）

試験結果を図 4-9 に示す。下部ノズル 1/4 体体系では供試体間差圧が経過時間とともに急速に増加し、試験開始から 4800 秒程度で 200kPa に達する。一方、下部ノズル 2 体体系では供試体間差圧は 1kPa 未満である。

下部ノズル 1/4 体体系のデブリ堆積状況を図 4-10 に示す。下部ノズル 1/4 体体系は下部ノズル間ギャップ及びテストセクション間ギャップが存在せず、また供試体の模擬範囲が狭く下部炉心板も存在しない。このため、テストセクション内では一様な流れとなり、その流れに応じて試験水中のデブリが下部ノズル下面で均一に捕捉されることで、下部ノズル下面に均一なデブリ層が形成される。このデブリ層は、主に繊維デブリで構成され、繊維デブリ層の空隙を埋めるように粒子デブリが捕捉されているため、時間経過とともに下部ノズル下面に繊維デブリ、粒子デブリが堆積していき、供試体間差圧が大きく増加していると考えられる。

下部ノズル 2 体体系におけるデブリ堆積状況を図 4-11 に示す。下部ノズル 2 体体系は、下部ノズルの上流に下部炉心板(燃料集合体当たり 4 孔)を模擬しており、また下部ノズルを並列して 2 体設置することで、実機プラントと同じ下部ノズルの周辺ギャップを模擬している。このため、供試体へ流入する流れは非均一となり、それに伴って試験水中のデブリも非均一で供試体に付着・堆積することから、供試体各部で部分的に流路が確保される。この結果、試験ループを循環するデブリは供試体で捕捉されず、それら流路を通過することから、供試体間差圧は 1kPa 以下で概ね一定となる。

上記より、米国体系（下部ノズル 1/4 体体系）は実機プラントに対し過度な保守性を有している。一方、国内体系（下部ノズル 2 体体系）は下部ノズルの周辺ギャップ及び下部炉心板を模擬することで、実機プラントと同等の流動現象を模擬していると判断できる。

(b) 試験水温度（常温、約 55°C）

試験結果を図 4-12 に示す。水温を変えた試験の結果、供試体間差圧は常温とした試験の結果と同等であった。これは、試験水温度を高くしても、常温の試験と同様に、下部ノズルに非閉塞流路が存在するためであると考えられる。また、試験で計測された供試体間差圧は非閉塞流路を通過する際の形状損失が支配的であり、試験水温度による影響は小さいと考えられる。

ここで、常温の試験水を使用した方が僅かに供試体間差圧が大きいのが、これは試験水の温度が低いことにより粘性が高くなり、デブリが下部ノズルに捕捉されやすくなったことが主要因であると考えられる。

上記の通り、温度の違いによるデブリ付着のメカニズム、及び供試体間差圧への

影響は軽微であるが、試験水の温度が低いほうがやや保守的である。したがって、実機プラントの再循環運転時に想定される温度条件に対し、常温で実施した試験結果を適用することは保守的な取り扱いである。

(c) 炉心流速（約 10mm/s、約 30mm/s、約 50mm/s）

試験結果を図 4-12 に示す。供試体間差圧は 1kPa 未満であり、炉心流速の違いで顕著な差は生じない。炉心流速が速い場合、動圧が大きくなり、供試体間差圧も大きくなる可能性があるが、流速が速いことで供試体各部でのデブリの捕捉が阻害され、結果として流動抵抗が低下し、供試体間差圧がそれほど大きくなる。一方、炉心流速が遅い場合、供試体各部でデブリが捕捉され易く、流動抵抗が大きくなる傾向となる。ただし、実機プラントの再循環運転時に想定される炉心流速条件での供試体間差圧への影響は 0.3kPa 程度と非常に小さく、炉心入口部の流路に対する通水性には影響がないと判断できる。

(d) 粒子デブリ径（平均粒子径約 20 μ m、約 30 μ m、約 380 μ m）

試験結果を図 4-12 に示す。供試体間差圧は 1kPa 未満であり、粒子デブリ径の違いで顕著な差は生じない。ただし、平均粒子径 380 μ m の場合、僅かに供試体間差圧が増加する傾向がある。粒径の大きな粒子デブリの場合、比較的繊維デブリへ捕捉/付着しやすく、また沈降速度が大きいため、テストセクション内に浮遊していた粒子デブリが沈降し、供試体の上部から流路を閉塞している。その結果、供試体間差圧が僅かに増加したものと考えられる。

上記より、粒子デブリの粒子径が大きくなることで、テストセクション内に浮遊するデブリの沈降が促進され、供試体間差圧が増加する傾向が確認できた。ただし、その影響は小さく炉心入口部の流路に対する通水性には影響がないと判断できる。

(e) P/F 比（0、約 1、約 3、約 10、 ∞ ）

試験結果を図 4-12 に示す。P/F 比を 0 とした場合（繊維デブリのみを投入した場合）、他条件より供試体間差圧が僅かに増加する傾向となる。これは、粒子デブリが存在しないことで、繊維デブリが阻害されずに、供試体へ捕捉されるためである。このことから、粒子デブリが存在しない場合、保守的な条件になると考えられるが、実機プラントにおいて粒子デブリが存在しない状況は想定されておらず、仮想的な条件である。

また、P/F 比を約 1、約 3、約 10 とした場合、供試体間差圧はほぼ同等であり、実機プラントで想定される P/F 比の範囲 約 1~10 では、P/F 比の感度が十分小さいと判断できる。

なお、P/F 比を ∞ とした場合（粒子デブリのみを投入した場合）、供試体間差圧

は他条件より供試体間差圧が小さくなる。供試体にデブリが付着するメカニズムは、繊維デブリが捕捉され、捕捉された繊維デブリに粒子デブリが捕捉されることである。このため、粒子デブリしか存在しない場合、供試体にデブリが殆ど捕捉されず、通過してしまう。

上記より、粒子デブリが存在しない条件で供試体間差圧が僅かに増加するが、実機プラントでは想定されない仮想的な条件であり、また、その影響は小さいことから炉心入口部の流路に対する通水性には影響がないと判断できる。

(f) デブリ投入方法（粒子デブリ先行投入、繊維デブリ先行投入、同時投入）

投入方法を以下に示す。

粒子デブリ先行投入：粒子デブリ	→	繊維デブリ
繊維デブリ先行投入：繊維デブリ	→	粒子デブリ
同時投入		：繊維/粒子デブリ

試験結果を図 4-12 に示す。繊維デブリを先行投入した場合、他条件より供試体間差圧が増加する傾向となる。これは、前述の P/F=0 条件と同様に、繊維デブリが阻害されずに、供試体へ捕捉され、その後投入された粒子デブリが供試体に付着した繊維デブリに捕捉されるためである。

また、粒子デブリを先行投入した場合は、試験水中に粒子デブリが十分に浮遊した状態で繊維デブリが投入されるため、繊維デブリが供試体に捕捉されることを阻害し、供試体間差圧が小さくなる。

上記より、先行して繊維デブリが流入し、炉心入口部の流路をある程度閉塞した後、粒子デブリが炉内へ到達する程度厳しい条件となる。ただし、実機プラントにおいて繊維デブリのみ先行して炉内へ流入されることは想定されない仮想的な条件であり、繊維デブリと粒子デブリはほぼ同時期に炉内へ流入するものと考えられる。また、デブリの投入方法により供試体間差圧に影響を及ぼすものの、その影響は小さく炉心入口部の流路に対する通水性には影響がないと判断できる。

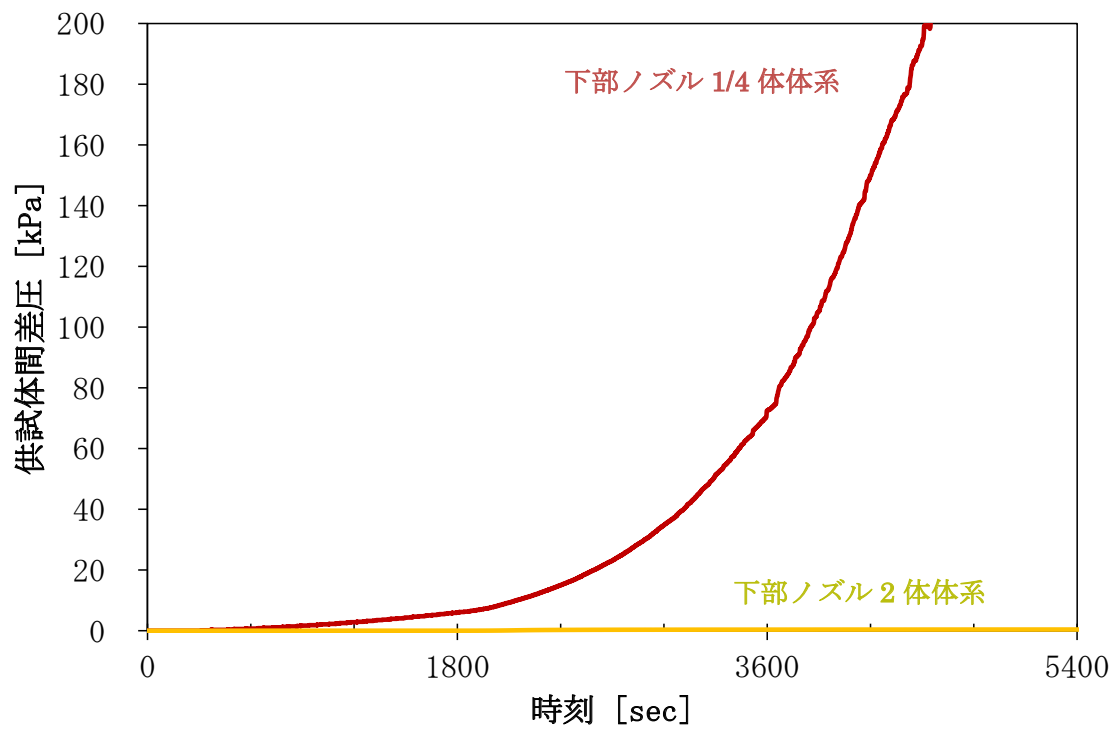
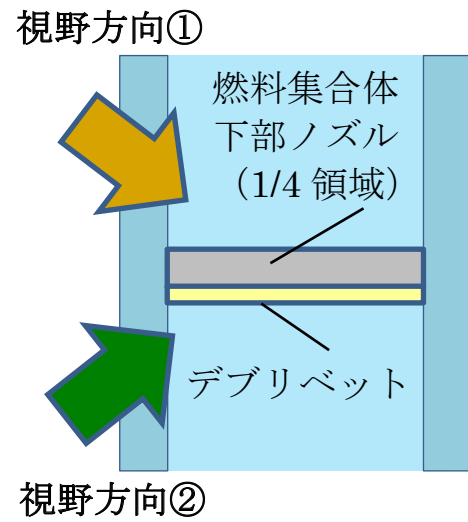
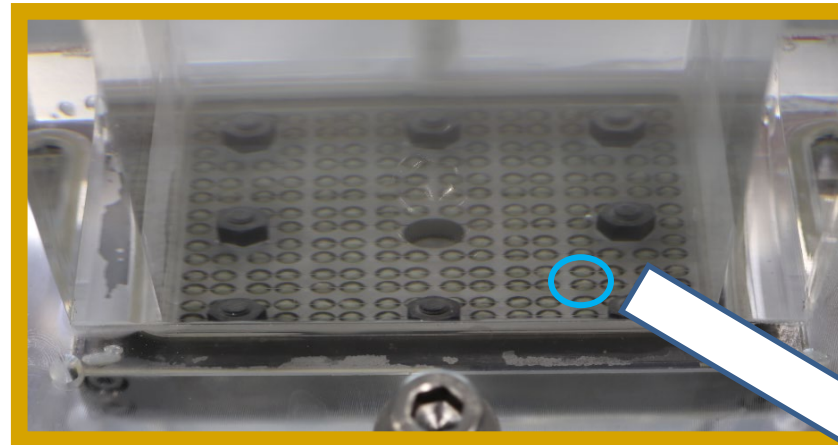


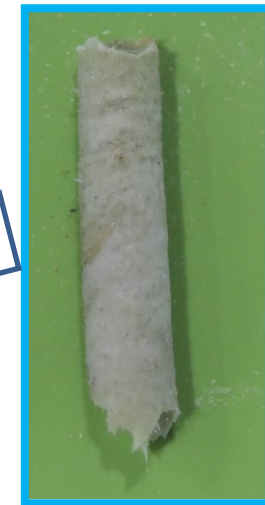
図 4-9 供試体間差圧（下部ノズル 1/4 体体系と下部ノズル 2 体体系の比較）



上面 (視野方向①)



下部ノズル流路孔内の
デブリベット



下面 (視野方向②)

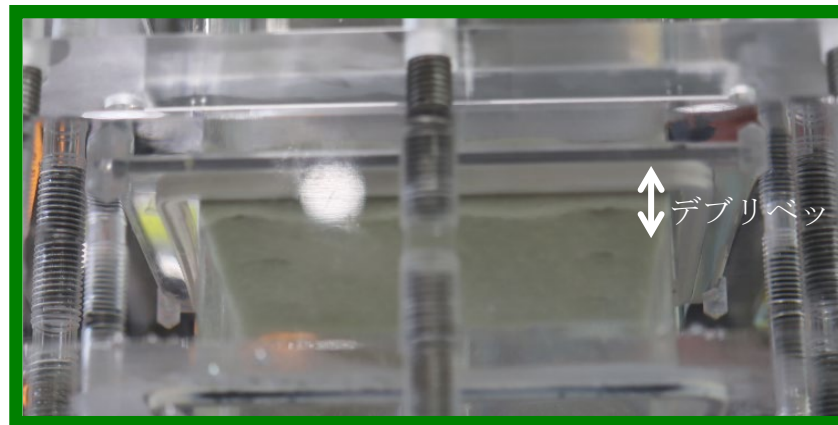
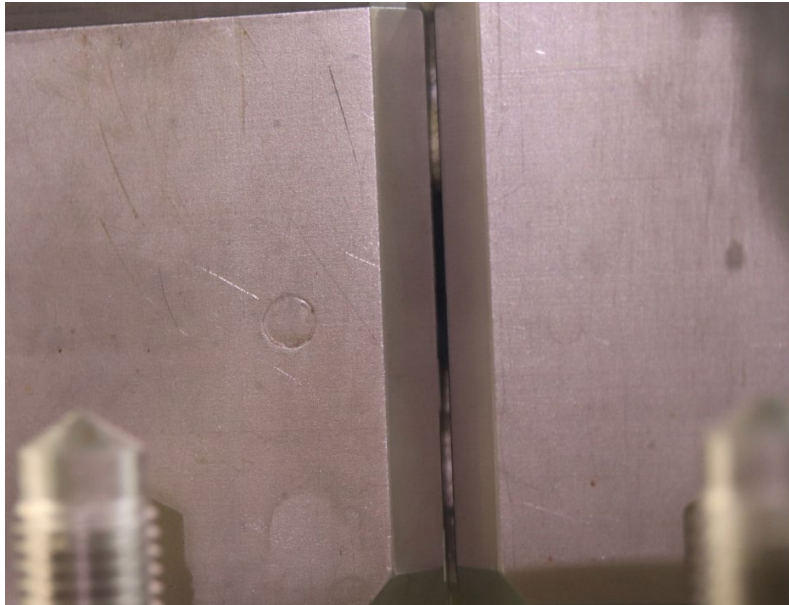
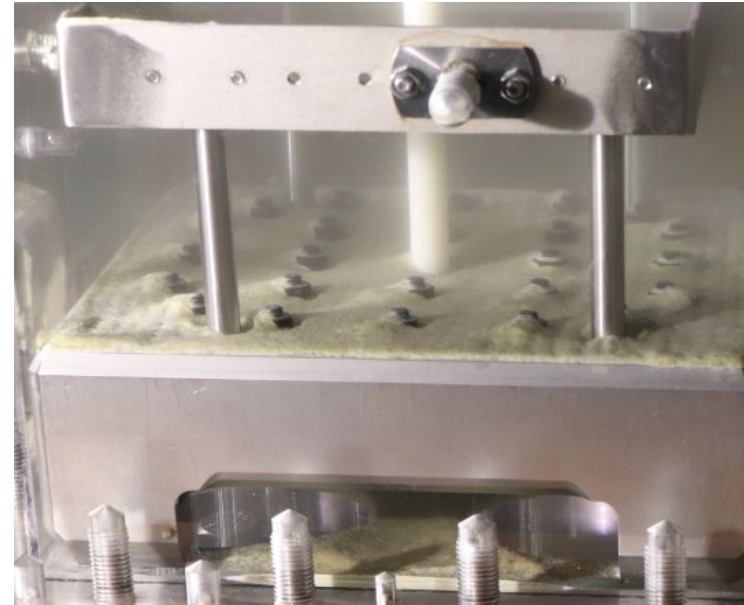


図 4-10 デブリ堆積状況 (試験後) : 下部ノズル 1/4 体体系

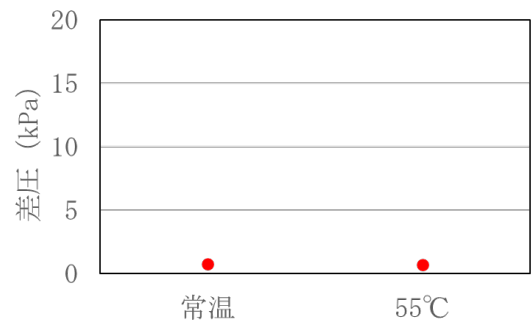


下部ノズル間ギャップ (試験後)

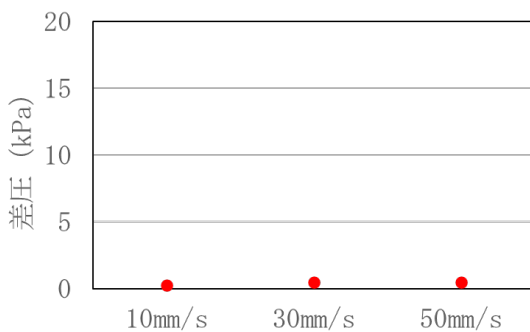


下部ノズル-テストセクション間ギャップ (試験後)

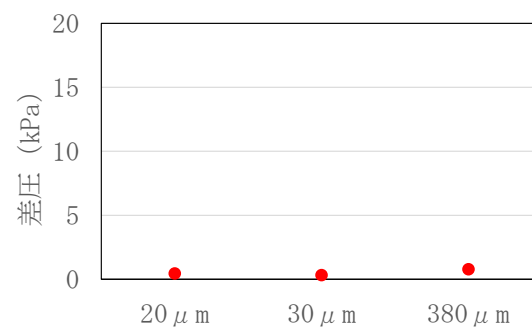
図 4-11 デブリ堆積状況 (試験後) : 下部ノズル 2 体体系



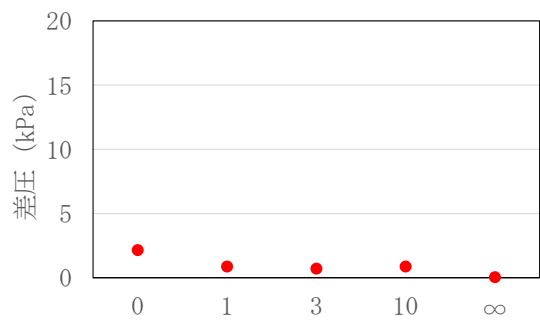
(b)試験水温度



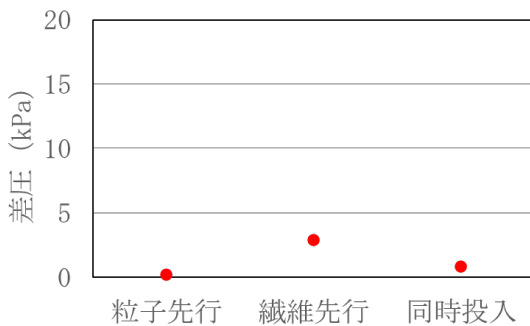
(c)炉心流速



(d)粒子デブリ径



(e)P/F 比



(f)デブリ投入方法

図 4-12 基礎試験における供試体間差圧 (最大値)

4.1.2. 燃料集合体を用いた流動試験

実寸大の燃料集合体（17×17A型 ステップ2 Zry グリッド燃料）を2体並列に設置し、非化学デブリが炉内へ流入した場合でも、炉心の長期冷却に必要な通水性を有することを確認した。

(1) 試験装置

試験装置及びテストセクションの概要を図 4-13、図 4-14、図 4-15 に示す。

基礎試験と同様に試験装置は、タンク、ポンプ、流量計、テストセクションで構成され、タンクから流出したデブリを含む試験水はポンプ、流量計を通過した後、テストセクションへ流入し再度タンクへ戻る循環ループである。タンクでは攪拌機を設置し、タンク内の試験水を攪拌することで、試験水内のデブリを均一に分散させている。

テストセクションは境界条件を実機プラントと同等とするため、燃料集合体の上流に下部炉心板を模擬した構造物（流路孔を模擬）、下流に上部炉心板を模擬した構造物（流路孔、及び燃料集合体－上部炉心板間距離を模擬）を設置した。また、試験中のデブリの捕捉状況、及び試験水の流況を目視するため、下部ノズル+最下段グリッド部、第2グリッド部、燃料集合体上部（最上段グリッド、上部ノズル、模擬上部炉心板）の計3ヶ所に、観察窓を設置している。

試験では、燃料集合体間差圧変動を時系列データとして計測することで、デブリによる通水性への影響を確認する。差圧の計測位置は、デブリの捕捉状況を計測できるよう、各グリッドの中間部に計測点を設置している。また、試験中の状態を確認するため、ループ流量、試験水温度、系圧力も時系列データとして併せて計測する。

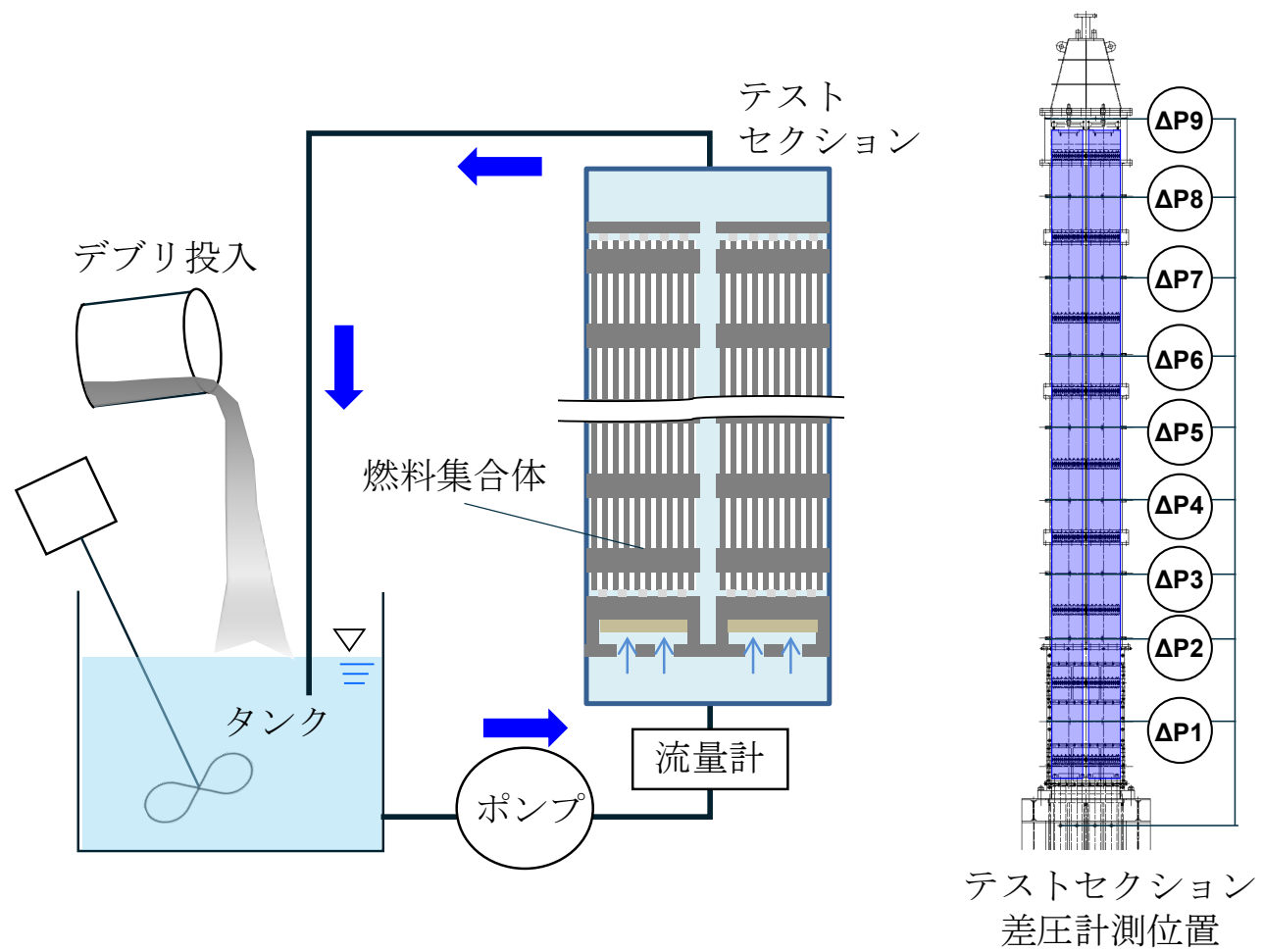


図 4-13 燃料集合体を用いた流動試験 試験装置 (概念図)

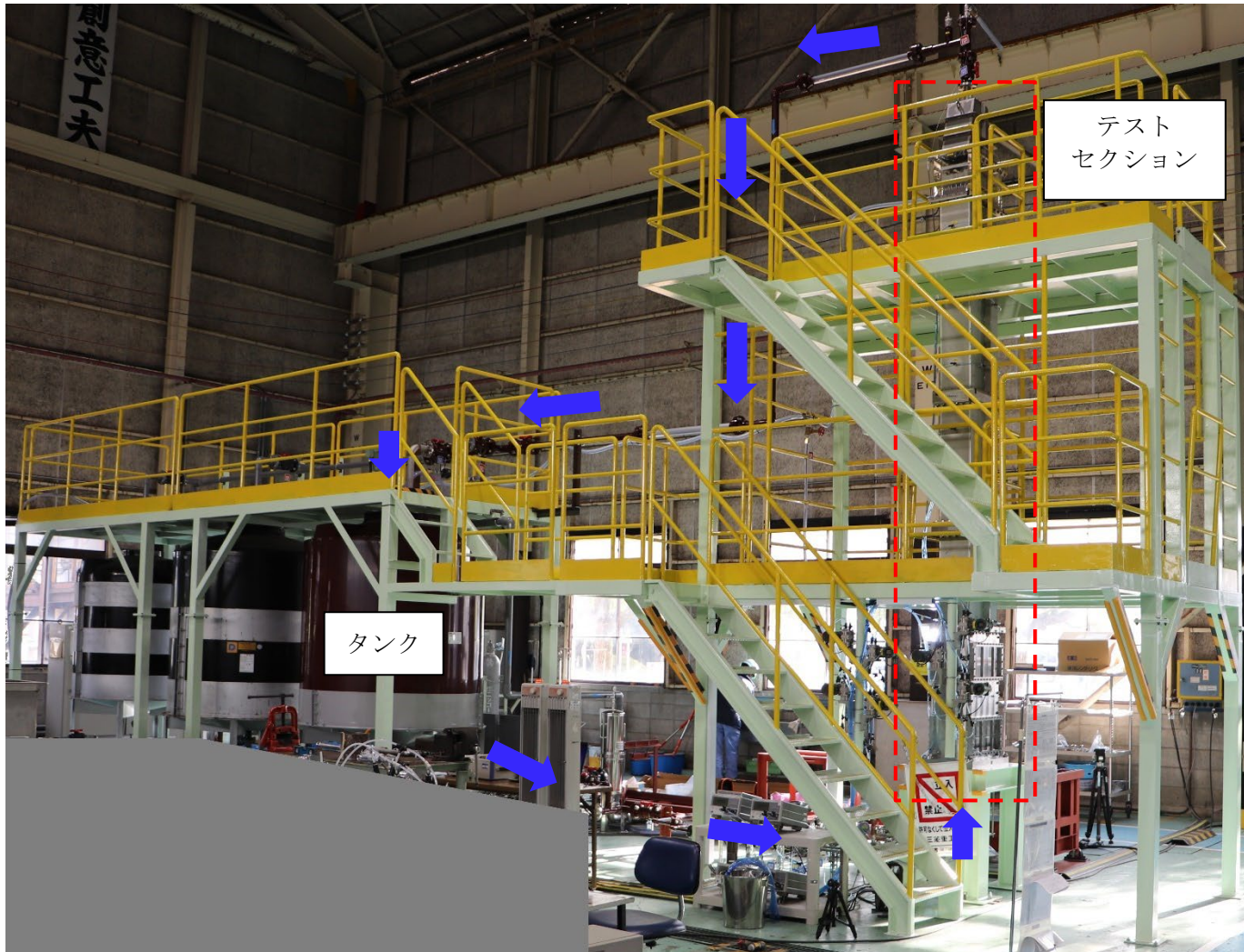
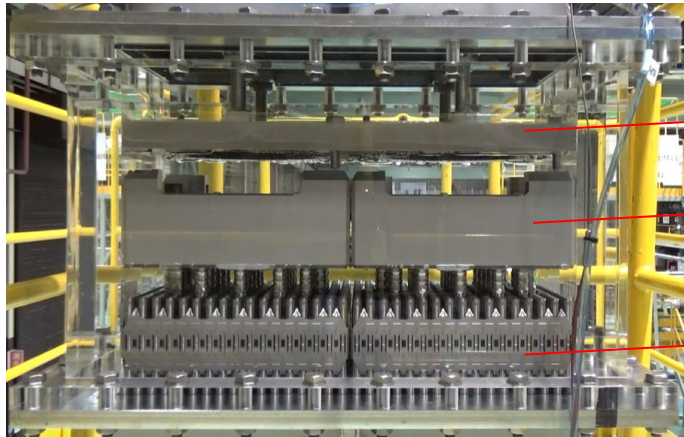


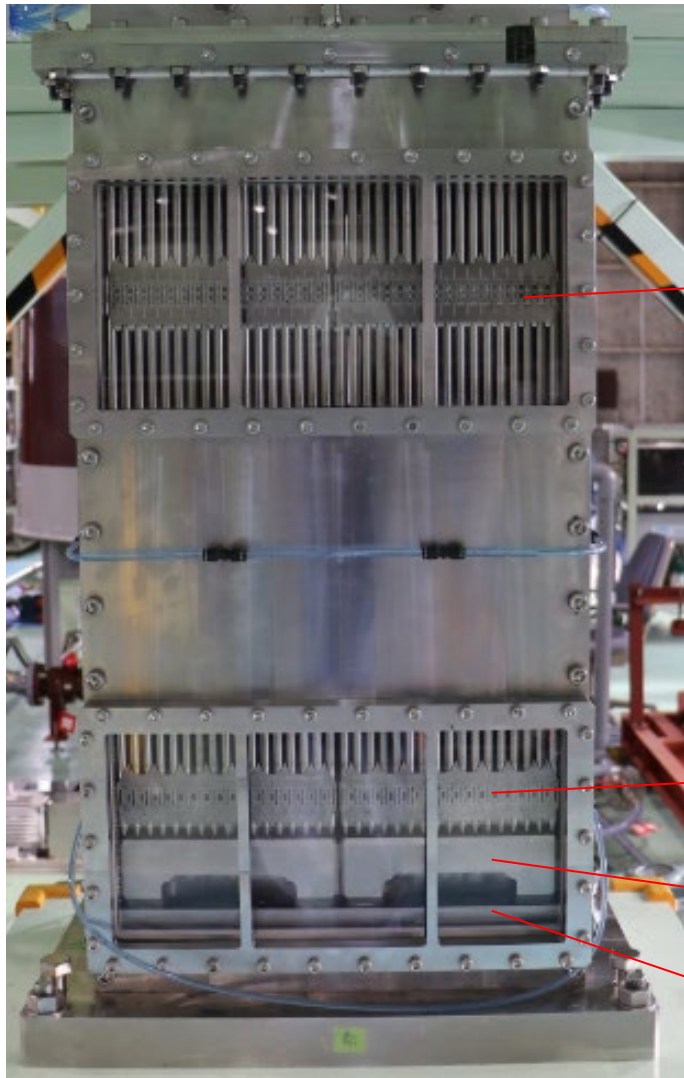
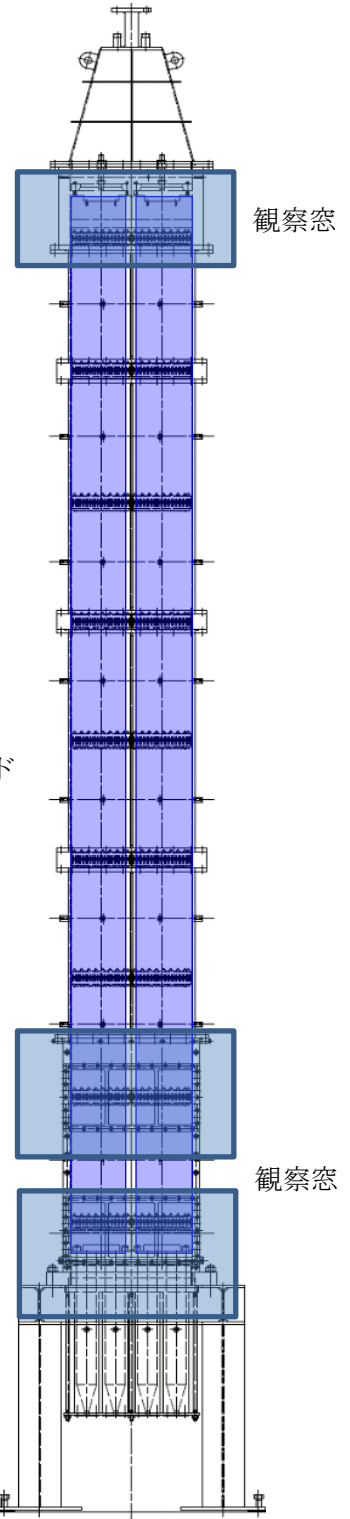
図 4-14 燃料集合体を用いた流動試験 試験装置



上部炉心板

上部ノズル

最上段
グリッド



第2グリッド

最下段
グリッド

下部ノズル

下部炉心板

図 4-15 燃料集合体を用いた流動試験 テストセクション

(2) 試験条件

試験条件を表 4-7 に示す。試験は、ケース 1：国内 PWR 代表プラント条件、ケース 2：繊維デブリ先行投入条件、ケース 3：国内 PWR プラント包絡条件（デブリ量包絡条件）で実施した。ケース 2：繊維デブリ先行投入条件は、基礎試験で試験結果が厳しめの傾向であったデブリ投入方法、及び粒子デブリ径に対する燃料集合体体系での感度を確認するため実施している。

また、基礎試験の結果から、下部ノズル 2 体を用いた実機に近い体系においては繊維デブリが捕捉されない開口部が生じ、P/F の感度が無視できることを確認している。したがって、本試験における P/F 比は代表プラントの P/F と同等とした。

低温側配管破断時における、LOCA 後長期冷却時の炉心への冷却材の流量は、ダウンカマと炉心側の水頭差によって決まる。崩壊熱が比較的大きい再循環開始直後の時点では、炉内の冷却材流速は約 30mm/s 程度になるが、デブリの捕捉による炉心入口部の圧力損失の増加とともに、炉心崩壊熱による蒸散流量(ボイルオフ流量)相当(約 10mm/s 程度)を確保するのに必要な駆動力(ダウンカマと炉心側の水頭差)も大きくなる。つまり、炉内の流動としては、ボイルオフ流量(約 10mm/s)相当まで流量が低下すると、流量は一定のまま炉内の圧力損失が増加していくことになる。また、基礎試験の結果から、炉心流速が低い方がデブリの捕捉が発生しやすいことが確認できているため、試験流量としては代表条件としてボイルオフ流量(約 10mm/s)を選定している。

国内 PWR プラントの再循環サンプに到達するデブリ量とスクリーンを通過するデブリ量を図 4-16 に示す。サンプスクリーンに到達した繊維デブリの多くはスクリーンで捕捉され、スクリーンを通過する繊維デブリの量は約 10～25%程度(サンプスクリーンのバイパス試験：添付資料 1 に基づく値)である。

また、国内 PWR プラントのサンプスクリーンのデブリ通過量(サンプスクリーンのバイパス試験：添付資料 1 に基づく値)、及び各試験条件におけるデブリ投入量を図 4-17 に示す。繊維デブリに対するサンプスクリーンのバイパス率は、バイパス試験の結果から 10～25%程度であるが、国内 PWR プラント包絡条件では保守的にサンプスクリーンのバイパス率を 30%としてデブリ投入量を設定している。また、基礎試験と同様に試験中の燃料集合体間差圧の変動が十分小さくなるまで試験水を循環させることで、実機プラントで燃料集合体を通過しうるデブリ量を大幅に超えた保守的な条件としている。なお、粒子デブリの投入量は、基礎試験と同様にバイパス率 100%として取り扱う。

表 4-7 試験条件 燃料集合体を用いた流動試験

項目		ケース 1 国内代表プラント条件	ケース 2 繊維デブリ先行投入条件	ケース 3 国内 PWR プラント包絡条件
流体条件	圧力	常圧		
	温度	常温		
	炉心流速	炉心流速：約 10mm/s		
デブリ条件	デブリ種類	繊維デブリ：保温材（ロックウール） 粒子デブリ：塗料（アクリルパウダー） ケイ酸カルシウム保温材 潜在粒子（珪砂）		
	繊維デブリ量※	約 1.6 kg/FA	約 2.6kg/FA	約 2.6kg/FA
	粒子デブリ量※	約 4.9 kg/FA	約 7.9kg/FA	約 8.3kg/FA
	P/F（粒子デブリと繊維デブリの比）	約 3		
	平均粒子径	約 20 μ m	約 380 μ m	
	デブリ投入方法	同時投入	繊維デブリ先行投入	同時投入

※ 燃料集合体 1 体あたりのデブリ重量（kg/FA）を記載

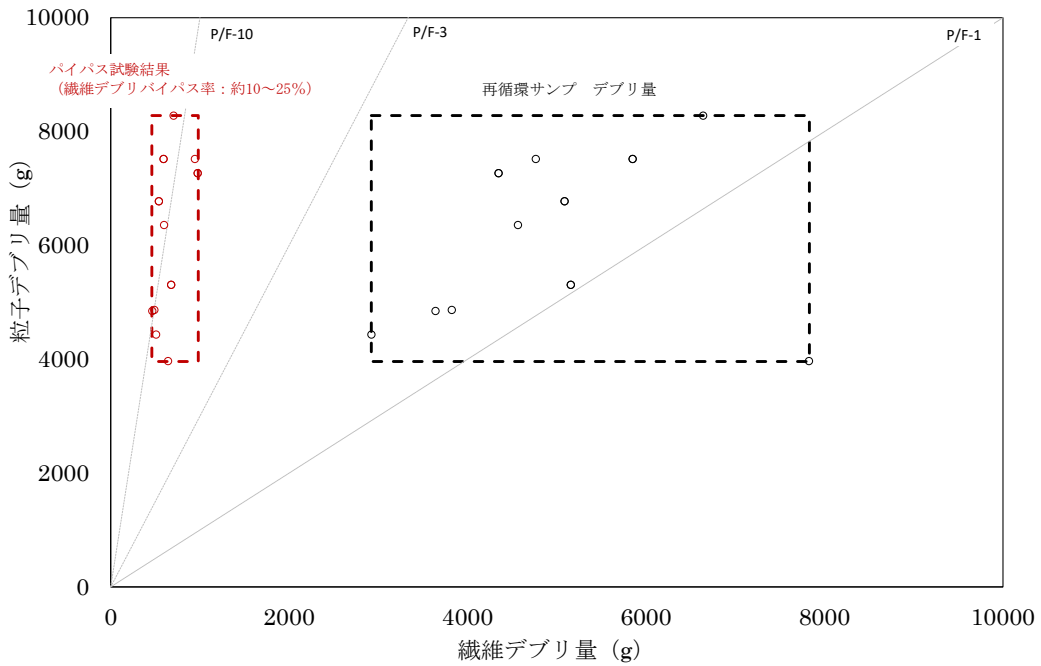


図 4-16 LOCA 時の再循環サンプルデブリ量及びスクリーン通過量 (バイパス試験結果)
*燃料集合体あたりのデブリ量

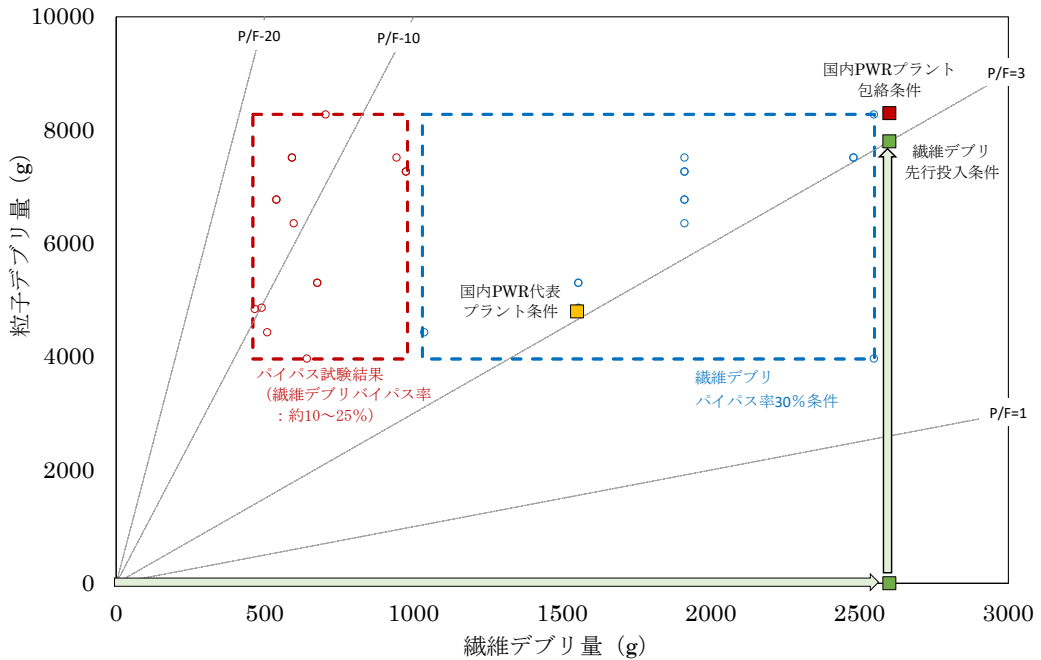


図 4-17 各試験条件に対する燃料集合体あたりのデブリ量

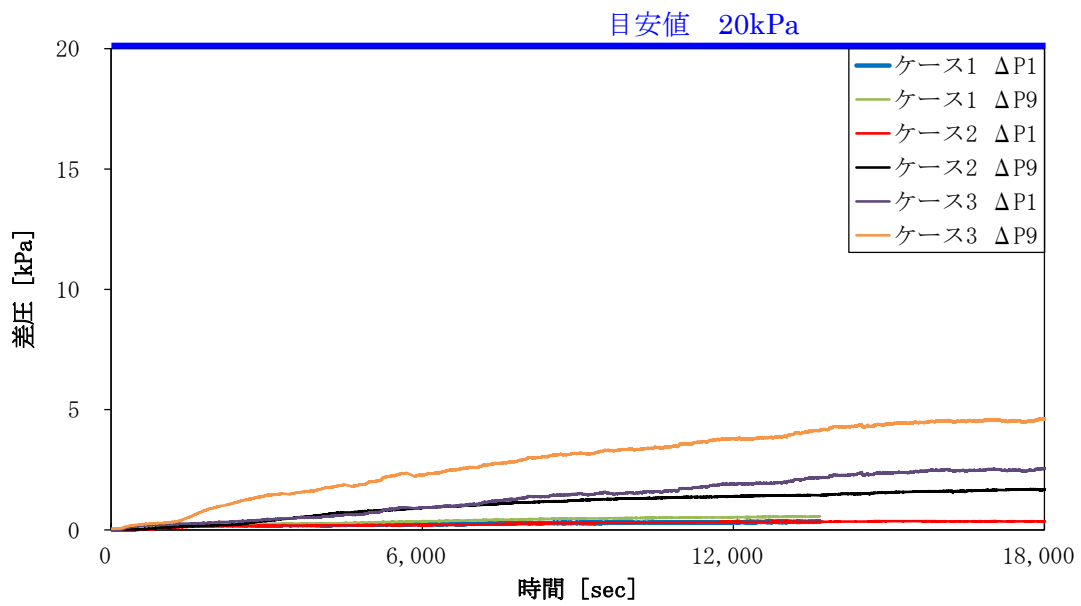
(3) 試験結果

試験結果を図 4-18、図 4-19 に示す。デブリによる燃料集合体間差圧の増加量は、ケース 3 で最も高くなるが、その値は炉心における冷却材の蒸散量を補うのに許容される圧力損失の目安値 20kPa に対して約 4.6kPa (比率: 約 23%) と十分小さく、炉心の冷却性に対して十分な余裕を有している。これは、繊維デブリによって燃料集合体内の流路が完全に閉塞されることはなく、非化学デブリが開口部から捕捉されることなく流れたことによるものと考えられる。

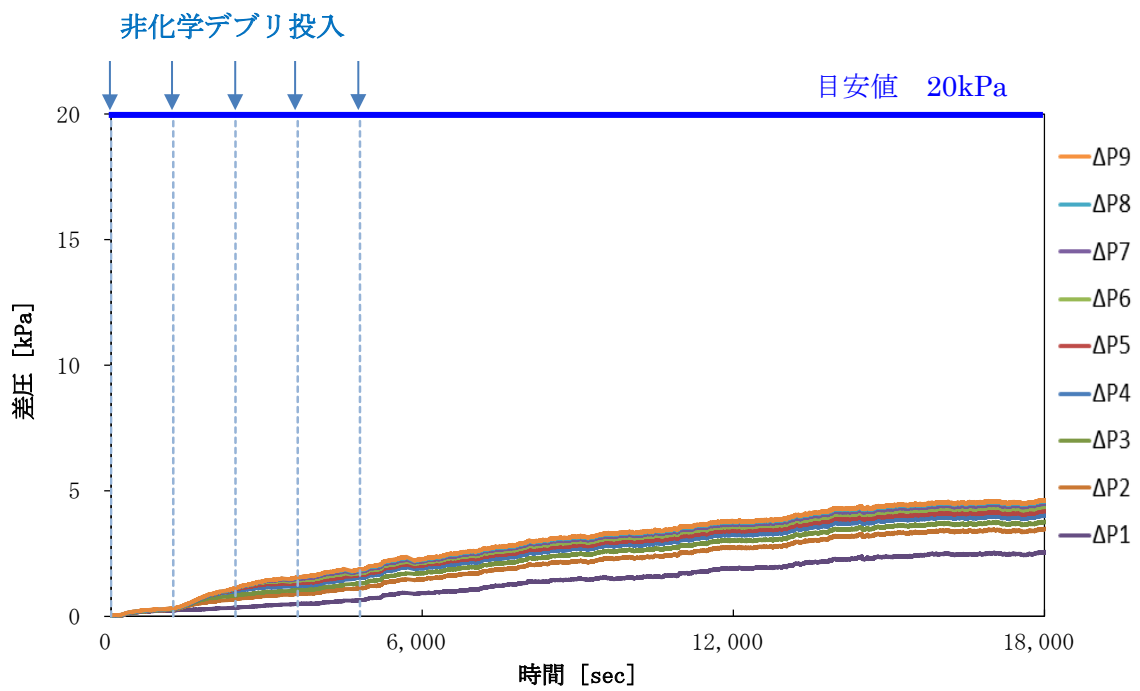
また、 ΔP_9 (燃料集合体全体の圧力損失) に占める ΔP_1 (下部ノズル+最下段グリット) の割合が大きく、炉心入口部においてデブリによる閉塞が生じやすく、下流にあるグリッド及び上部ノズルでは閉塞が生じにくいことが分かる。

ΔP_1 (下部ノズル+最下段グリット) の差圧は、ケース 1 とケース 2 は同程度であるのに対し、ケース 3 は約 6 倍近く高い値であり、炉心入口部でのデブリの捕捉/付着が顕著であったことが分かる。この要因として、繊維デブリと粒径の大きな粒子デブリを同時投入したことが挙げられる。粒径が大きな粒子デブリは比較的繊維デブリへ捕捉/付着しやすく、また自重により沈降しやすい。この傾向から、デブリを同時投入した際、他ケースと比較して粒子デブリが燃料集合体に捕捉された繊維デブリに付着しやすく、燃料集合体の下部ノズル部や各グリッド部において部分的に流速が低下した流路で粒子デブリが沈降しやすい環境であったと推測される。また、この粒子デブリの沈降に伴い、繊維デブリが炉心入口部で多く捕捉されるようになったことも、差圧増加に寄与したと考えられる。

なお、ケース 2 も粒径の大きな粒子デブリを用いているが、ケース 2 では先行して繊維デブリを投入し、燃料集合体間差圧が安定した後、粒子デブリを投入している。このため、燃料集合体各部の流路で部分的な閉塞が生じた状態 (閉塞していない流路の流速が相対的に大きい状態) となり、粒子デブリの堆積が燃料集合体全体に分散され、かつ、既に繊維デブリにより閉塞された流路に対して上部から粒子デブリが堆積する状況 (流路閉塞に寄与しない状況) であったことから、ケース 3 のような差圧増加が生じなかったものと推測される。



(a) 各試験ケース ($\Delta P1$ 、 $\Delta P9$)



(b) ケース 3 燃料集合体各部の差圧データ

図 4-18 燃料集合体を用いた流動試験 試験結果

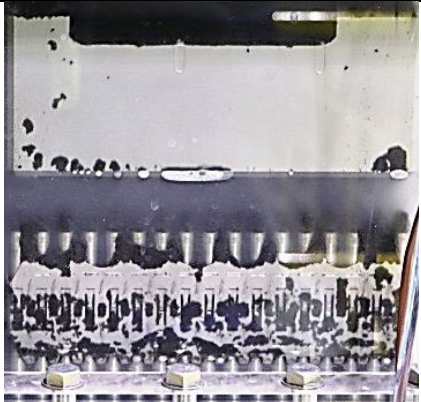
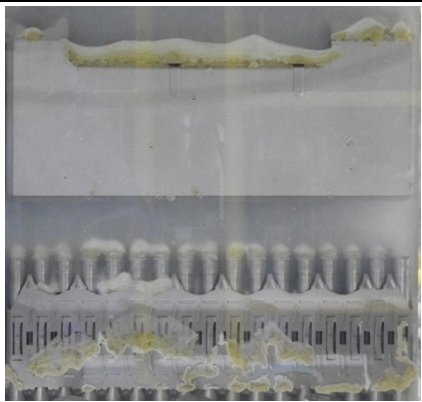
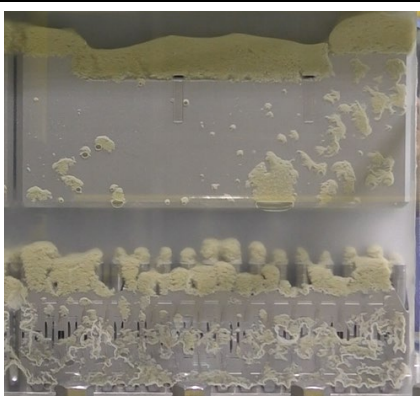
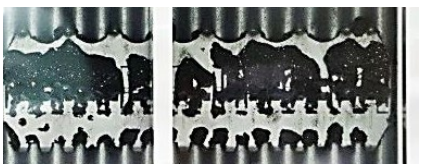
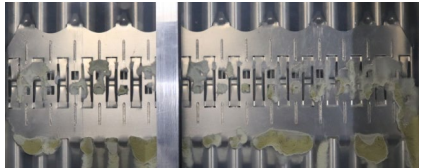
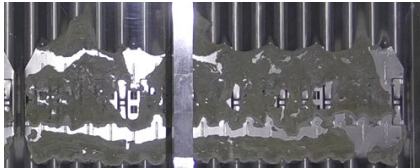
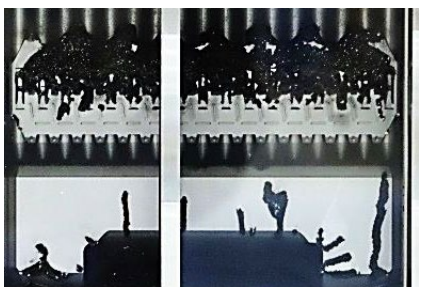
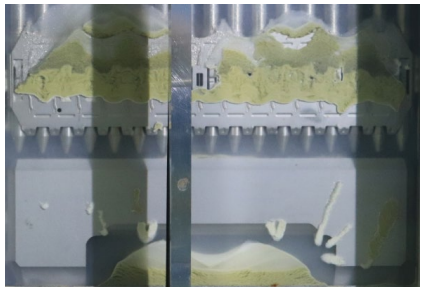
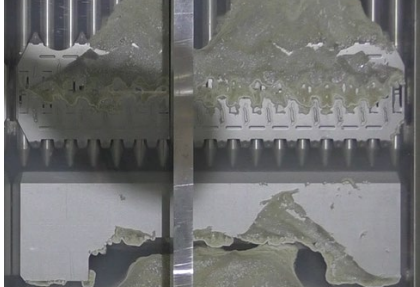
	ケース 1	ケース 2	ケース 3
最上段グリット+ 上部ノズル			
第 2 グリッド			
下部ノズル+ 最下段グリッド			

図 4-19 デブリ堆積状況（試験後）：燃料集合体を用いた流動試験

4.2. 化学デブリ試験

4.2.1. バッフルバレル流動試験

実寸大の燃料集合体（17×17 A 型 ステップ 2 Zry グリッド燃料）1 体と模擬バッフルバレル流路を設置し、非化学デブリに加え、化学デブリが炉内へ流入した場合でも、代替流路（模擬バッフルバレル流路）で炉心の長期冷却に必要な通水性を有することを確認した。

(1) 試験装置

試験装置及びテストセクションの概要を図 4-20、図 4-21、図 4-22、図 4-23 に示す。

試験装置は、タンク、ポンプ、流量計、テストセクションで構成され、タンクから流出したデブリを含む試験水は、ポンプ及び流量計を通過した後、テストセクションへ流入し再度タンクへ戻る循環ループである。化学デブリは併設した化学デブリ生成装置からタンク内へ挿入され、タンク内の攪拌機で試験水を攪拌することで、試験水内のデブリを均一に分散させている。

実機プラントにおける炉心外周部は炉心を囲むバッフル板、及び炉心槽とバッフル板を接続するフォーマ板から構成される。下部炉心板から流入した 1 次冷却材は、下部ノズルを通りバッフル板と下部炉心板の間隙へ流入し、フォーマ板の流路孔を通過後、バッフル板と上部炉心板の間隙を通過して炉心側へ流出する。この一連の流動を模擬するため、テストセクションは実寸大の燃料集合体 1 体と模擬バッフルバレル流路に加え、燃料集合体の上流に下部炉心板、下流に上部炉心板を設置している。また、試験中のデブリの捕捉状況、及び試験水の流況を目視するため、下部ノズル+最下段グリッド部、第 2 グリッド部、燃料集合体上部（最上段グリッド、上部ノズル、模擬上部炉心板）の高さ位置（計 3 ヶ所）に、観察窓を設置している。

ここで、模擬バッフルバレルは、燃料集合体 1 体と概ね同等の流路面積で模擬し、国内 PWR 代表プラントの流量比率（炉心：バッフルバレル領域の流量比率）となるよう供試体の流路抵抗を設定した。流路抵抗の調整はフォーマ板の流路孔形状で行い、全 9 段中の 5 段はタイプ A、残りの 4 段はタイプ B と 2 種類のフォーマ板を設置している。この流路孔は、国内 PWR プラントにおいて多数を占め、またデブリの捕捉の観点で流路面積が小さい形状を選定している。

試験では、燃料集合体間差圧変動を時系列データとして計測することで、デブリによる通水性への影響を確認する。差圧の計測位置は、デブリの捕捉状況を計測できるように模擬バッフルバレル流路のフォーマ板、及び燃料集合体の各グリッドの中間部に計測点を設置している。また、試験中の状態を確認するため、ループ流量、試験水温度、系圧力も時系列データとして併せて計測する。

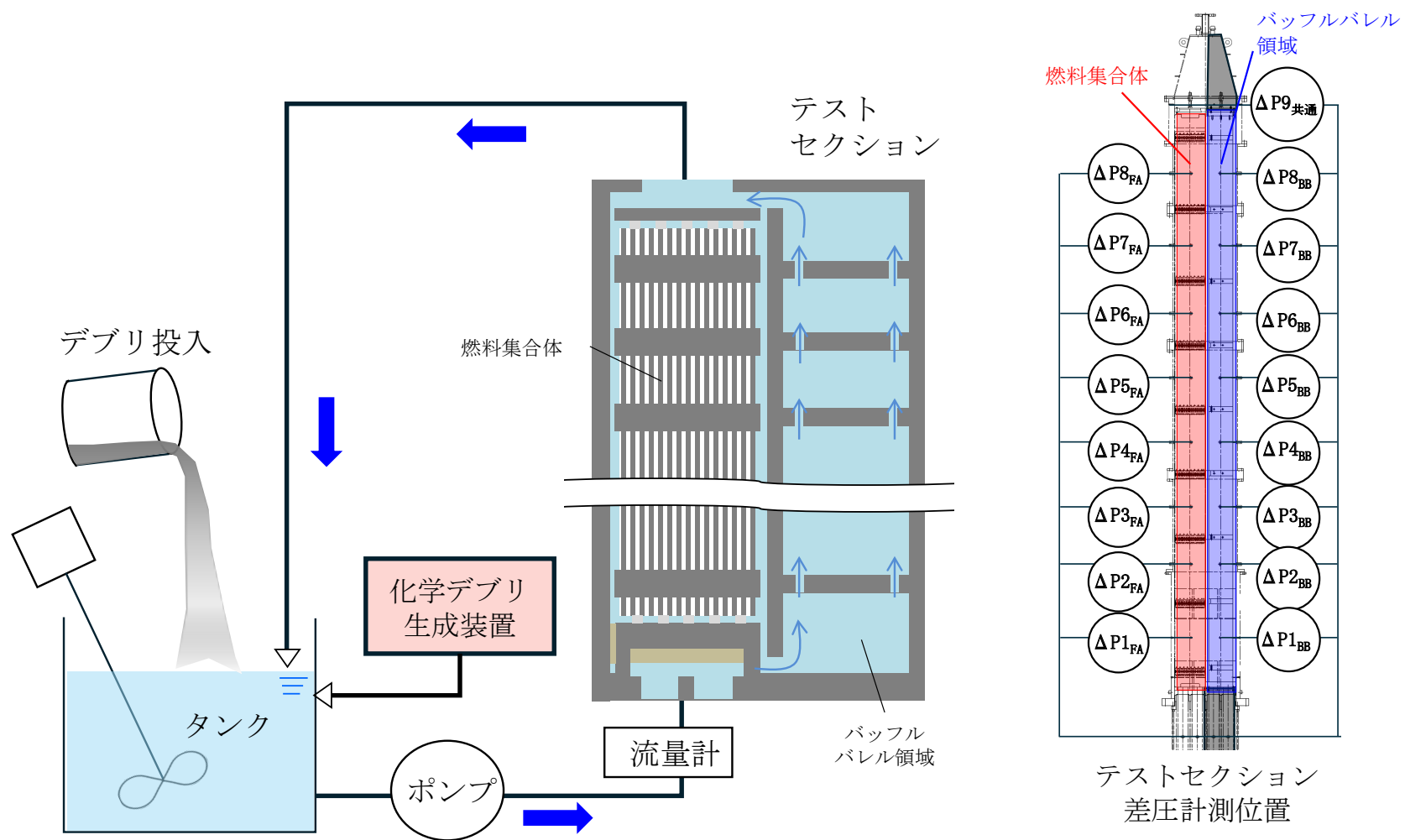


図 4-20 バブルバレル流動試験 試験装置 (概念図)

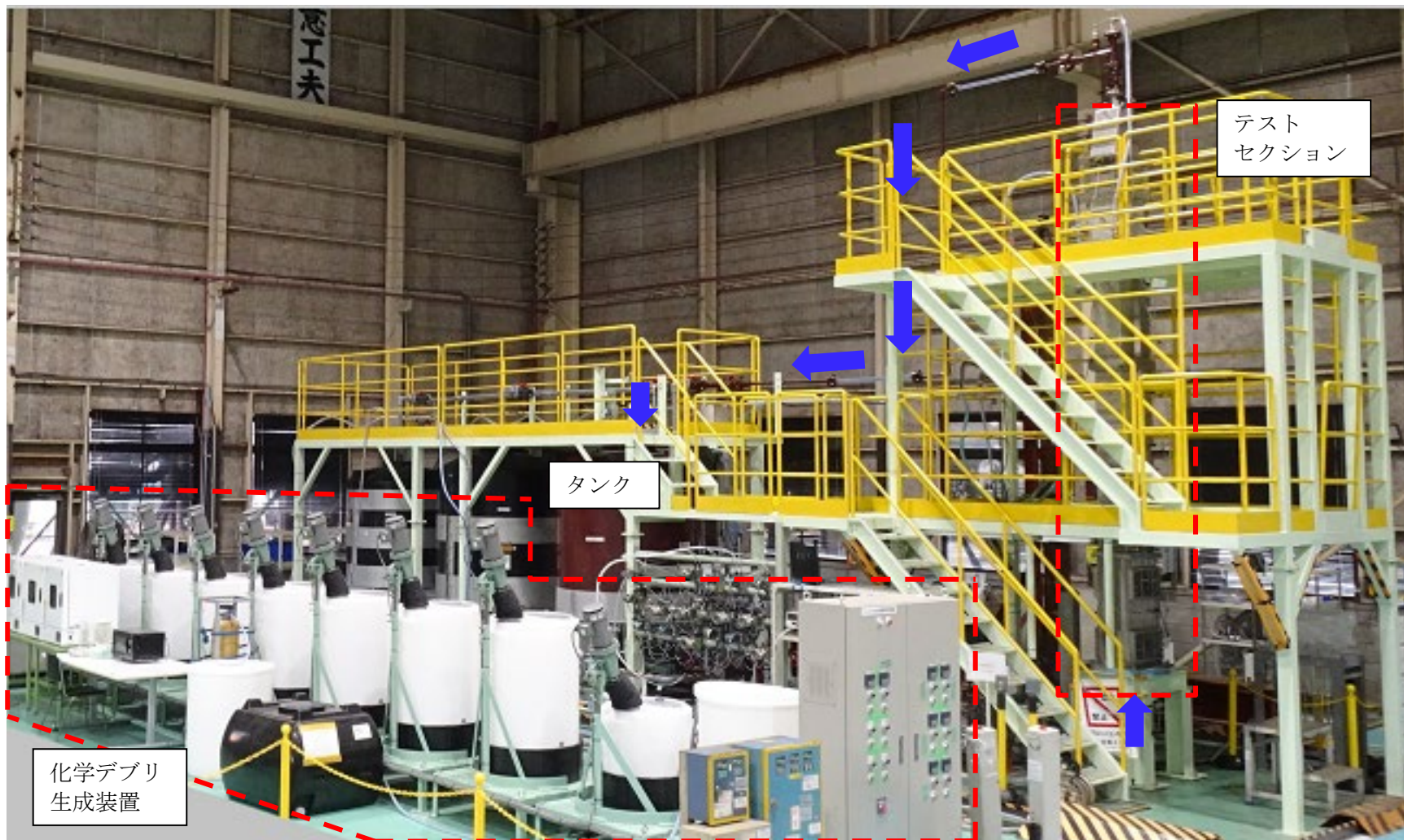


図 4-21 バッフルバレル流動試験 試験装置

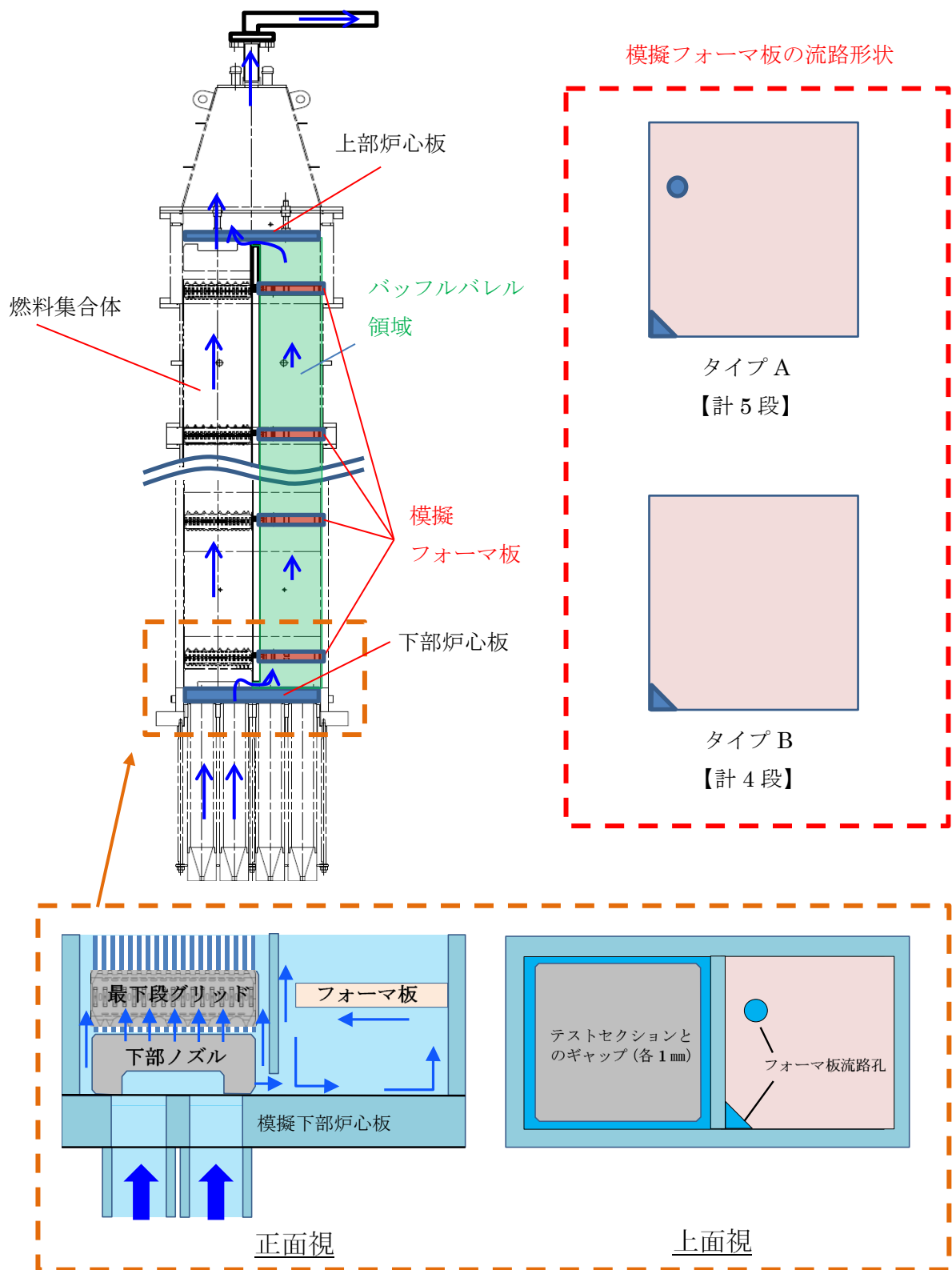


図 4-22 バブルバレル流動試験 テストセクション (概念図)

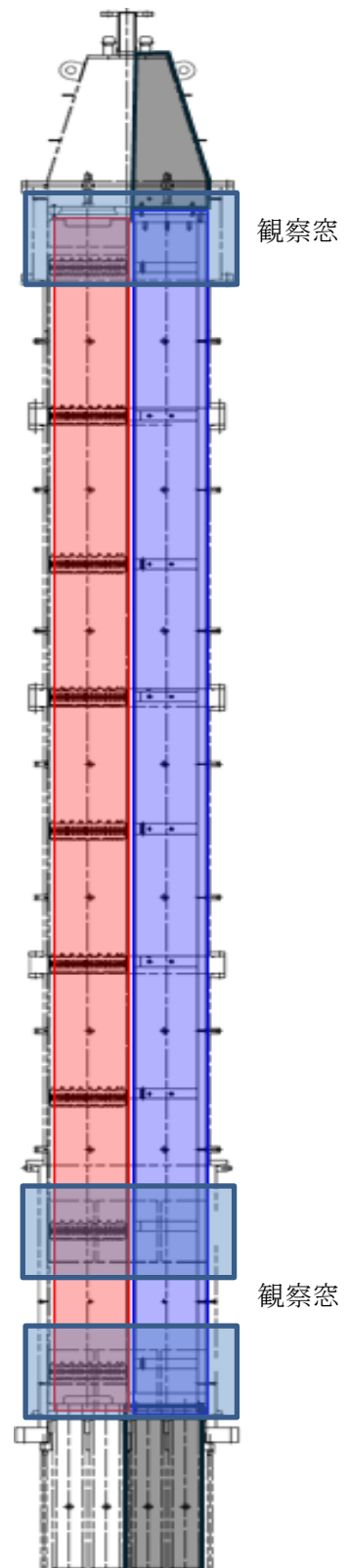
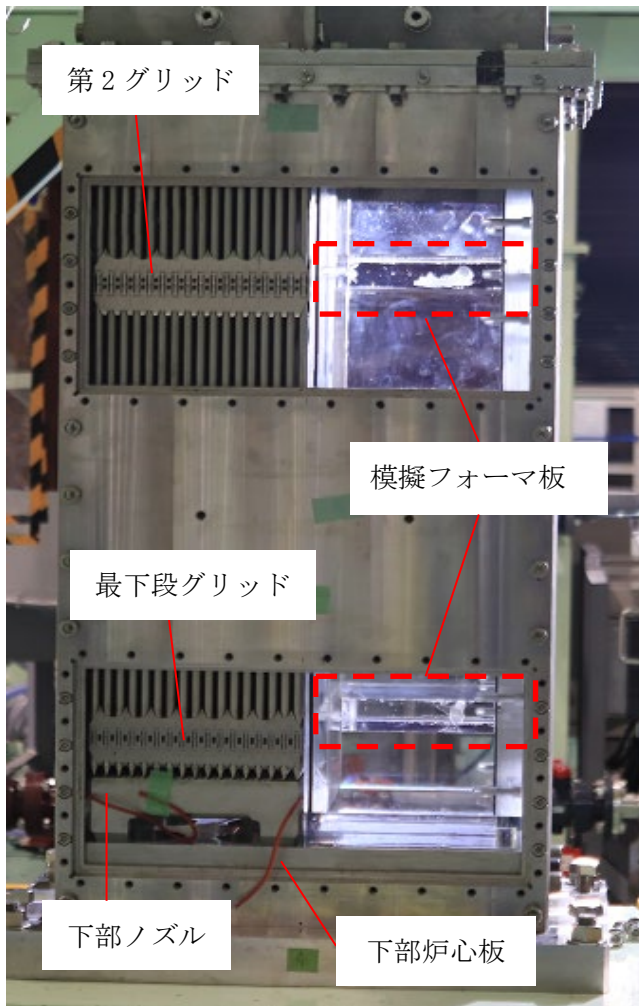
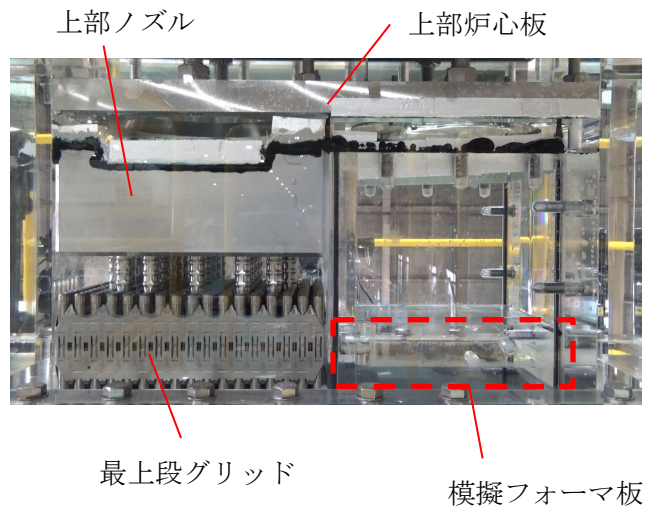


図 4-23 バッフルバレル流動試験 テストセクション

(2) 試験条件

試験条件を表 4-8 に示す。試験は、ケース 1：バッフルバレル流路の確認試験、ケース 2：燃料集合体及びバッフルバレル流路の確認試験を実施した。

ケース 1：バッフルバレル流路の確認試験は、LOCA 解析結果に基づき、低温側配管破断事象及び高温側配管破断事象のバッフルバレル流量にて、バッフルバレル流路が閉塞しないことを確認する。試験では燃料集合体への試験水の流れを遮断し、投入した全デブリが下部炉心板を通過した後、バッフルバレル流路へ流入する保守的な条件とした。試験では、デブリ投入前後での流量と差圧の関係から、バッフルバレル流路における閉塞の有無を判断している。

ケース 2：燃料集合体及びバッフルバレル流路の確認試験は、燃料集合体及びバッフルバレル流路に試験水を通水し、非化学デブリが燃料集合体へ捕捉された後、化学デブリを投入した際の、燃料集合体及びバッフルバレル流路での閉塞状況を確認する。試験では各流路の流量割合の変動から閉塞状況を判断している。

シナリオとして、バッフルバレル流路から冷却材が供給されるのは、化学デブリ析出後を想定しており、冷却材の温度が十分に低下した条件となる。したがって、試験水温度は常温を用い、系の圧力も実機プラントと同様の条件として常圧を用いる。

繊維デブリ及び粒子デブリの投入量は非化学デブリ投入試験と同様に、国内 PWR プラントのデブリ量を包絡した条件（図 4-17）として、繊維デブリ及び粒子デブリのサンプルスクリーンのバイパス率を各々、30%、100%として設定している。また、化学デブリについても国内 PWR プラントを包絡する条件として投入量を設定し、サンプルスクリーンのバイパス率を 100%として取り扱う。

表 4-8 試験条件 バッフルバレル流動試験

項目		ケース 1 バッフルバレル流路の確認試験	ケース 2 燃料集合体及びバッフルバレル流路の確認試験
流体条件	燃料集合体への通水	× (燃料集合体側を閉止)	○ (燃料集合体側を通水)
	圧力	常圧	
	温度	常温	
	流量	0.00012 ~ 0.00049 m ³ /s	燃料集合体部：炉心流速 約 10mm/s
デブリ条件	投入量	繊維デブリ：保温材（ロックウール） 粒子デブリ：塗料（アクリルパウダー） ケイ酸カルシウム保温材 潜在粒子（珪砂） 化学デブリ：AlOOH	
	繊維デブリ量※	約 2.6kg/FA	
	粒子デブリ量※	約 8.3kg/FA	
	化学デブリ量※	約 4.3kg/FA	
	P/F（粒子デブリと繊維デブリの比）	約 3	
	平均粒子径	約 30 μm	

※ 燃料集合体 1 体あたりのデブリ重量 (kg/FA) を記載

(3) 試験結果

(a) バッフルバレル流路の閉塞確認試験（ケース 1）

試験結果を図 4-24、図 4-25 に示す。バッフルバレル流路に非化学デブリ及び化学デブリを投入し、低温側配管破断事象から高温側配管破断事象までの流量範囲で試験水を循環させた場合においても、流量に伴う供試体間差圧の変化は、デブリ投入前とデブリ投入後(非化学デブリ及び化学デブリ)で同程度の値であり、また机上検討の予測差圧ともよく一致している。また、目視による観察結果からもフォーマ板流路孔に閉塞となるデブリ付着が生じていない。

この結果から、化学デブリ析出前後の条件においても、バッフルバレル流路はデブリによる閉塞は生じず、代替流路で炉心の長期冷却が可能であると判断できる。

(b) 燃料集合体及びバッフルバレル流路の閉塞確認試験（ケース 2）

試験結果を図 4-26、図 4-27 に示す。ケース 1 の試験で取得した流量と差圧の関係から、バッフルバレル流路を通過した流量を評価し、燃料集合体流路に流入した流量の割合を確認した。供試体間差圧の増加に伴い、燃料集合体流路へ流入する流量は低下するが、デブリを全量投入した場合においても燃料集合体流路には 85%程度の流量が流入し、一方でバッフルバレル流路には 15%程度の流量が流入する。

燃料集合体間差圧の変動より、非化学デブリ投入区間ではデブリの投入に伴い差圧が増加し、燃料集合体間の差圧が約 1.5kPa（15,000 秒時点）で概ね一定となるが、化学デブリ投入区間では、燃料集合体間差圧の変動は殆ど確認できない。このことから、非化学デブリが燃料集合体に捕捉・付着することで、形成された燃料集合体各部の流路（流速が比較的速い流路）は、化学デブリに対しても有効であり、実機プラントにおいて化学デブリが析出した状態においても燃料集合体部の流路は完全閉塞には至らないと判断できる。

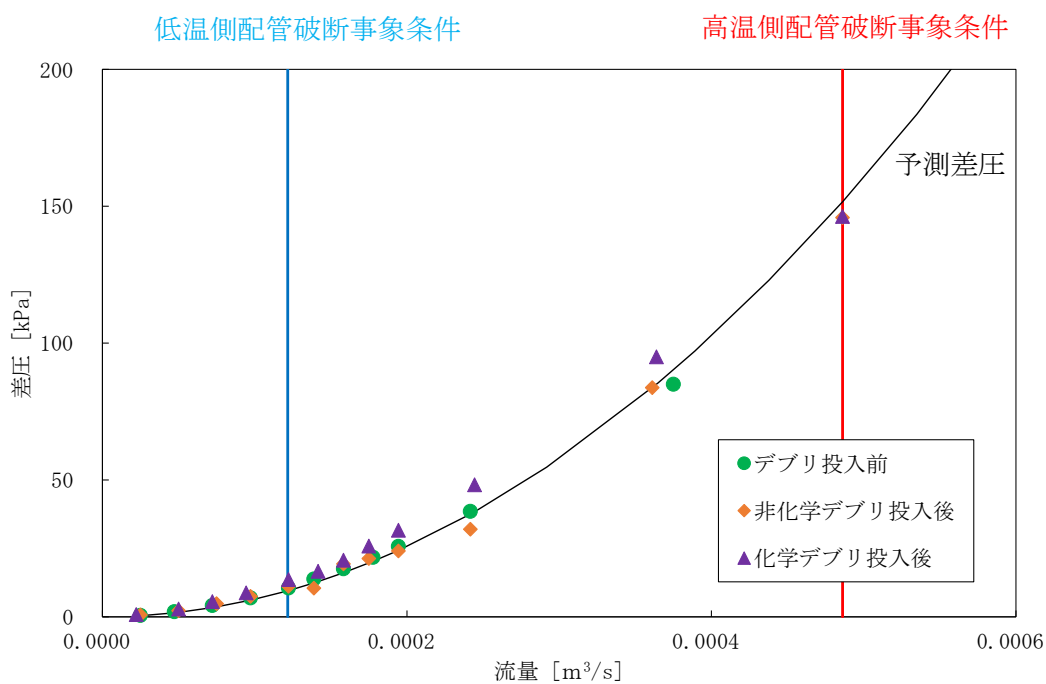


図 4-24 バッフルバレル流動試験 (ケース 1) 試験結果

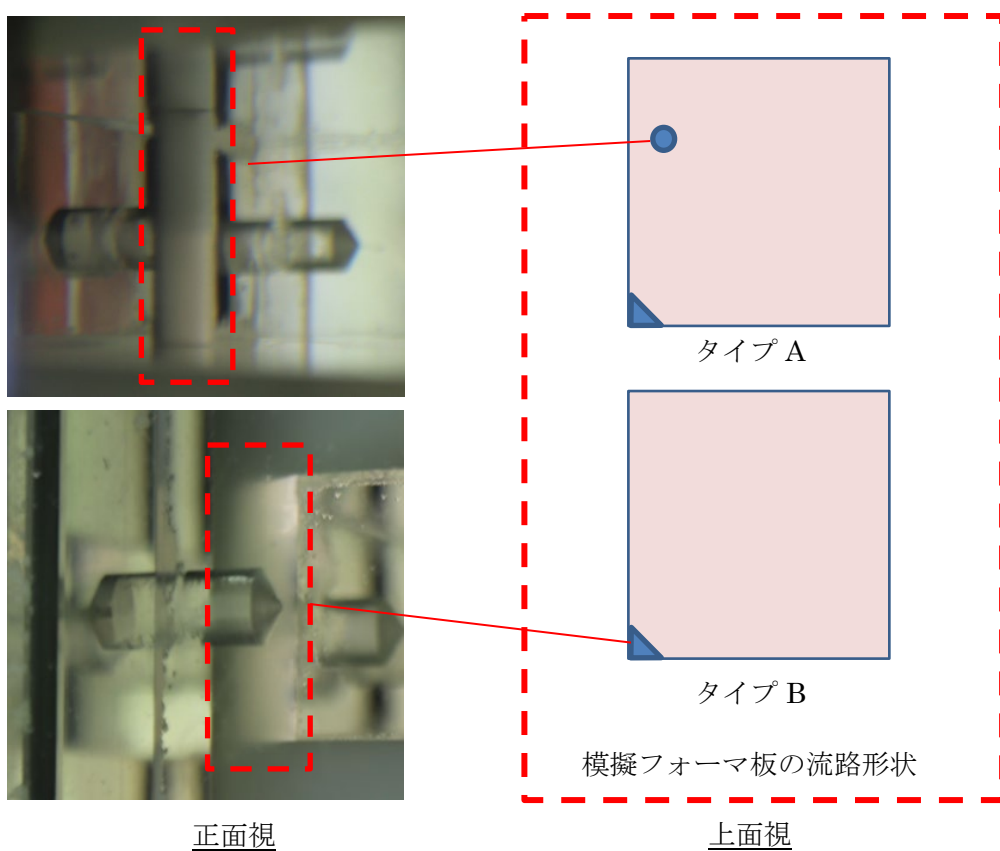
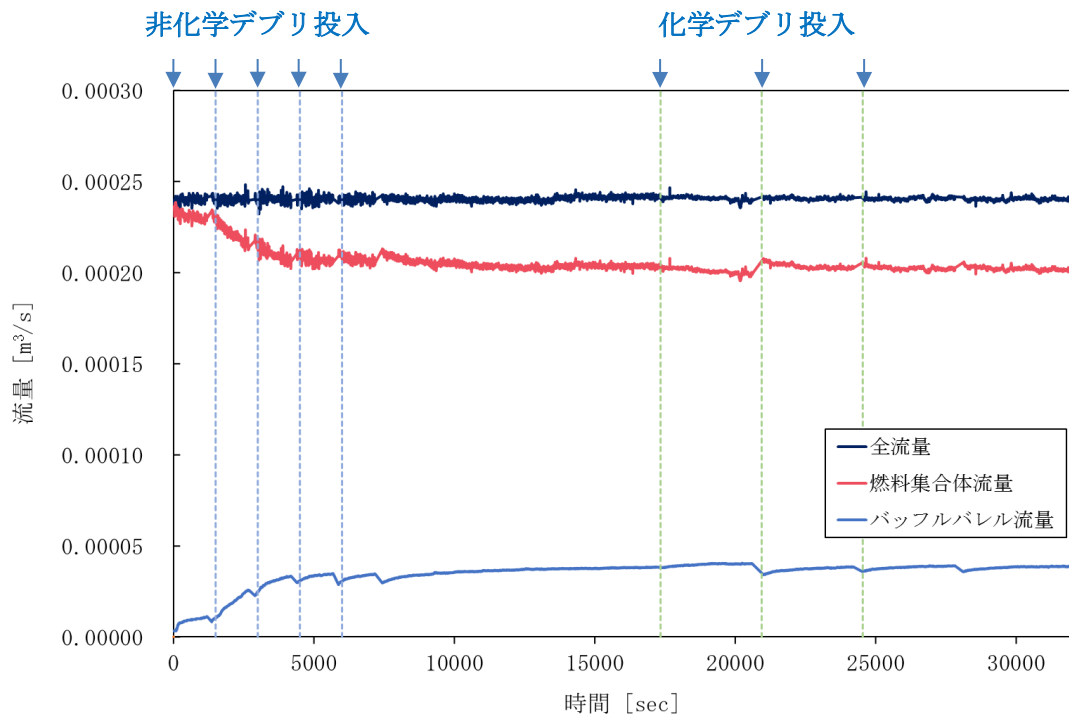
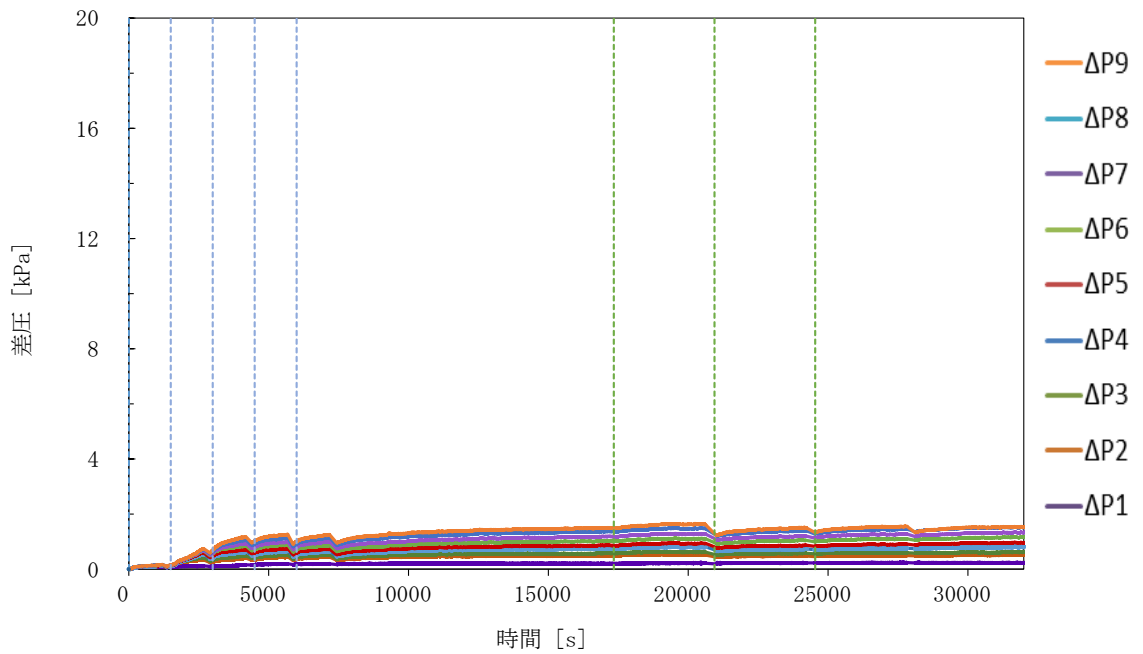


図 4-25 フォーマ板の流路孔状況：バッフルバレル流動試験 (ケース 1)



(a) 燃料集合体-バブルバレル領域の流量変化



(b) 燃料集合体間差圧

図 4-26 バブルバレル流動試験 (ケース 2) 試験結果

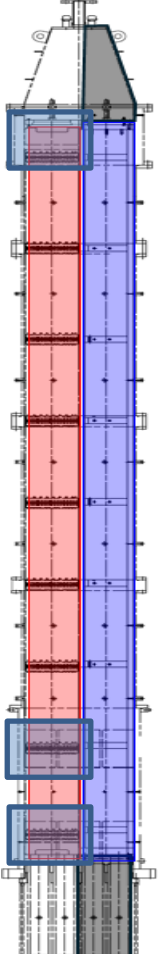
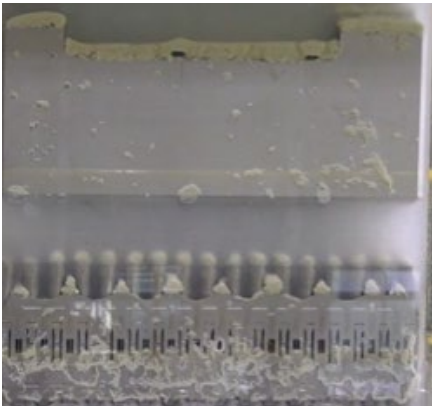

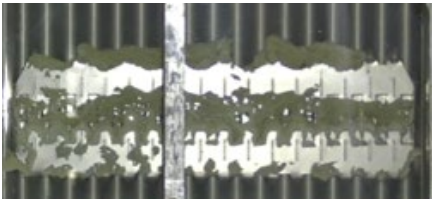



位置	非化学デブリ投入後	化学デブリ投入後	
最上段グリット+ 上部ノズル			
第2グリッド			
下部ノズル+ 最下段グリッド			

図 4-27 バッフルバレル流動試験 (ケース 2) デブリ堆積状況 (試験後)

4.2.2. 化学デブリ析出に関する基礎試験

(1) 概要

再循環運転時に高温の冷却材と接触した保温材及び構造材は腐食し、保温材及び構造材に含まれる金属イオンが徐々に冷却材へと溶解する。この金属イオンは格納容器スプレイ系に含まれる pH 調整材と化学反応を起こし、水温低下による溶解度の低下に伴いコロイド状の化学デブリとして析出する。なお、化学デブリとして析出するのは主にアルミニウム水酸化物、アルミノ珪酸ナトリウム、珪酸亜鉛である。¹³⁾

ここで、保温材や構造材の腐食により金属イオンが冷却材に溶け出すには時間を要す。また、金属イオンの濃度が溶解度に達するには冷却材の水温が低下する必要があり、水温の低下にも時間が必要である。したがって、化学デブリは LOCA 発生から数時間の遅れを伴い析出すると考えられている。

化学デブリが析出するまでに要する時間を炉内流動解析に考慮した場合、再循環開始直後は非化学デブリのみが炉内に流入することとなり、再循環開始直後の炉心入口の圧力損失の増加幅を大幅に緩和することができる。

上記のことから、化学デブリ析出時間を試験等により明らかにしておくことは重要である。

(2) 米国の取り組み¹³⁾

米国ではこの化学デブリが析出するまでの時間遅れを考慮し、炉内流動解析を実施している。また、オートクレーブを用いて化学デブリ析出時間に関する試験が実施されている。この試験では、実機の格納容器内の冷却材温度履歴及び pH 履歴を模擬した水溶液に格納容器の構造材及び保温材を投入し、定期的に抽出したサンプル水の濾過時間を基に化学デブリ析出の有無が評価されている。米国では多数のプラントタイプが存在し、保温材、構造材の量及び pH 調整材の種類を基に類似プラントをグルーピングすることで網羅的な試験を実施している。

上記の試験の結果、大半のプラントにおいて LOCA 後 24 時間は化学デブリが析出しないことが分かっている。

(3) 試験方法及び試験条件

国内 PWR プラントでも米国と同様の保温材、構造材が使用されていることから、化学デブリの析出時間も 24 時間以降であると推測されるが、国内プラント条件による基礎的な試験を実施し、化学デブリの析出時間を確認しておく必要がある。

国内 PWR プラント条件として、保温材（ロックウール、ケイ酸カルシウム）及び構造材（アルミニウム、亜鉛メッキ、炭素鋼）を用いて化学デブリの析出時間に

関する試験を実施した。

試験では実機における原子炉格納容器内の冷却材温度履歴及び pH 履歴を模擬した水溶液に構造材及び保温材を投入し、約 24 時間後の化学デブリ析出の有無を目視により確認した。代表的な試験条件を以下に示す(詳細は添付資料 5 に示す)。

保温材 (濃度)

ロックウール	0.6 kg/m ³
ケイ酸カルシウム	0.16 kg/m ³

構造材 (単位溶液当たりの表面積)

アルニウム	56 mm ² /l
亜鉛メッキ	14750 mm ² /l
炭素鋼	440 mm ² /l

水溶液

水温	90°C
pH	8.5*

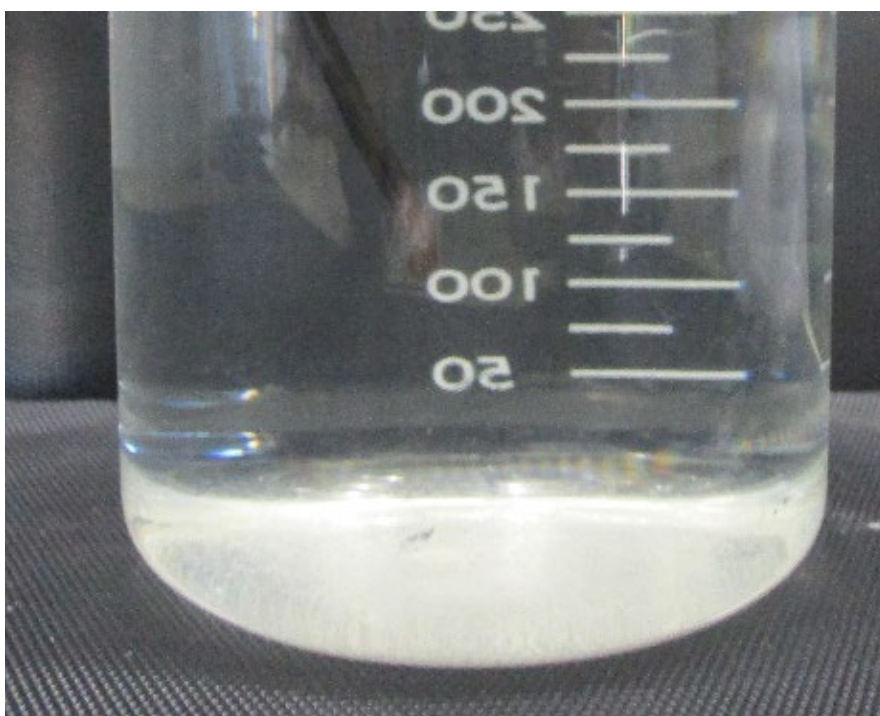
※ 試験開始時は pH4.3 とし、試験開始から 1 時間程度で pH 調整材 (水酸化ナトリウム) により pH8.5 とした

(4) 試験結果

化学デブリ析出時間に関する試験の結果を図 4-28 に示す。24 時間後の水溶液は水温約 90°C であり、目視で化学デブリが析出していないことを確認した。その後、自然放冷により水温約 30°C となり、水溶液の溶解度が低下した時にも化学デブリが析出していないことを確認した。したがって、米国試験と同様に国内 PWR プラントにおいても LOCA 後 24 時間以内では化学デブリが析出しないことが分かった。試験結果の詳細については添付資料 5 に示す。



試験 24 時間後 (水温 90°C)



試験 24 時間後 (水温 30°C)

図 4-28 化学デブリ析出時間の確認試験の結果 (24 時間後のビーカ写真)

5. デブリによる流路閉塞時の炉内流動解析

5.1. 解析条件

米国 PWROG のオプション 2a の解析条件を参考に、非化学デブリによる圧力損失の増加、炉内水温低下に伴う化学デブリ析出による圧力損失のさらなる増加の 2 段階の圧力損失の増加を条件として炉内の流動解析を実施している。なお、流動解析コードは原子炉容器内の熱流動を詳細に評価できる最適評価コードの MCOBRA/RELAP5-GOTHIC を使用している。

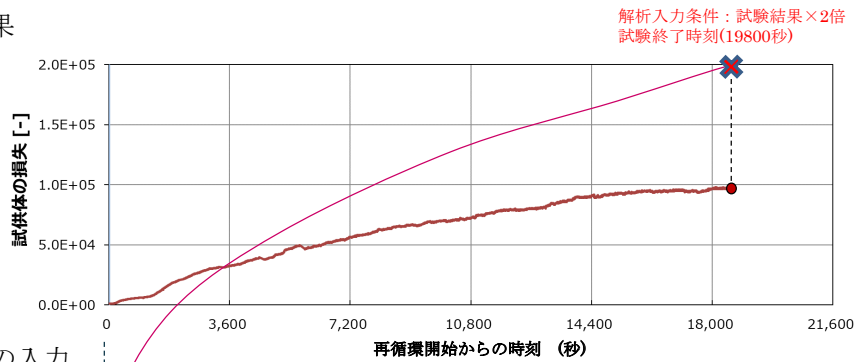
5.1.1. 非化学デブリによる炉心圧力損失の増加

再循環開始直後、炉心入口部を中心に非化学デブリの蓄積によるステップ状の圧力損失の増加が生じると仮定している。

図 5-1 に示すように、燃料集合体を用いた流動試験（4.1.2 項参照）に基づき評価した圧力損失の 2 倍を保守的に解析に用いている。

炉内流動解析は基本的に低温側配管破断事象を対象としているが、非化学デブリによる炉心部での圧力損失の増加は、炉心へのデブリ到達量が多くなる高温側配管破断事象を包含する条件で実施した試験結果に基づき設定している。

■ 試験結果



■ 解析時の入力

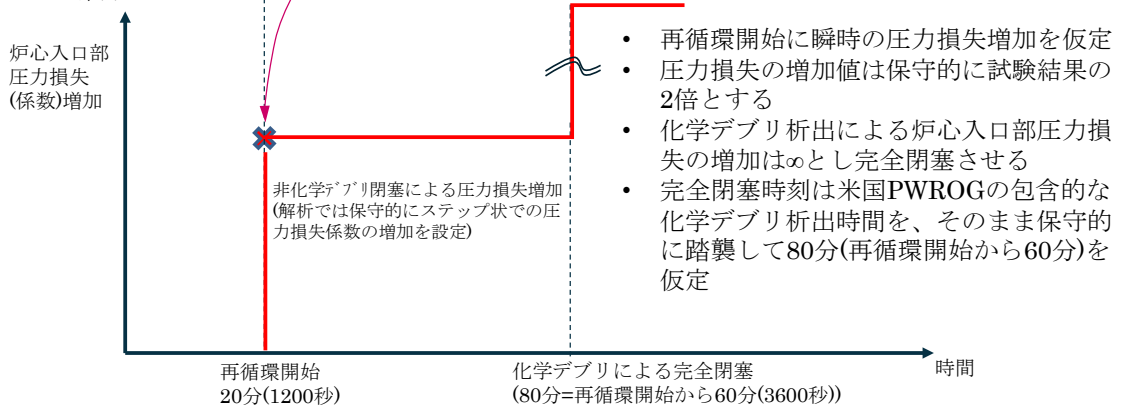


図 5-1 試験結果に基づいたデブリによる圧力損失増加の設定

5.1.2. 化学デブリによる炉心圧力損失の増加

化学デブリ析出開始を仮定した時間で瞬時に炉心入口部が完全閉塞となり、炉心入口部からの冷却材の通水が絶たれるものと仮定している。この完全閉塞の仮定が保守的であることは、バッフルバレル流動試験（4.2.1 項参照）において、化学デブリを投入した場合においても、炉心入口部からの冷却流量が一定レベル確保された結果から確認している。

一方で、代替流路としてのバッフルバレル間では、流路となるバッフルフォーマ板での流路孔が化学デブリ析出により閉塞されることはなく、圧力損失も増加することがないことを前提としている。この前提の妥当性についても、バッフルバレル流動試験（4.2.1 項参照）で確認している。

5.1.3. 化学デブリ析出開始時間

米国 PWROG のオプション 2a での解析条件に基づき、再循環開始後 1 時間（LOCA 発生後 80 分）後に、非化学デブリが蓄積した炉心入口部の冷却流路に、化学デブリが重畳することで、ステップ状に炉心入口部の圧力損失が無限大（完全閉塞）に増加すると仮定している。

なお、米国 PWROG の化学影響試験¹³⁾では、米国の大半のプラントで化学デブリの析出開始は再循環開始後 24 時間以降であり、最も析出が早いグループでも 4 時間程度との報告がなされている。一方、国内条件ではすべてのプラントで 24 時間以降の化学デブリ析出となることを化学デブリ析出試験（4.2.2 項参照）で確認している。このため、米国 PWROG の解析における 1 時間での析出開始条件は、崩壊熱が高いうちに炉心入口部の完全閉塞を仮定することから、十分に保守的である。

5.2. 解析ケース

5.2.1. 標準解析

標準解析は、標準4ループプラントを対象とし、以下の条件を設定している。

(1) 米国 PWROG オプション 2a 相当の主要な解析条件

米国 PWROG のオプション 2a での解析条件に基づき、再循環開始から1時間（LOCA 発生後 80 分）後、炉心入口部に蓄積していた非化学デブリに化学デブリが重畳し、炉心入口部の圧力損失がステップ状に無限大となり、完全閉塞すると仮定している。

なお、5.1.3 項に記載した通り再循環開始から1時間（LOCA 発生後 80 分）後に、化学デブリによって完全閉塞するとした仮定は十分に保守的である。

(2) 破断位置

上述の通り、炉心冷却の観点で、保守的となる低温側配管破断事象とする。なお、炉心へのデブリの到達量の観点では高温側配管破断事象の方が保守的であるが、流路閉塞による圧力損失の増加は高温側配管破断事象の条件を包含するものとして入力において考慮する。

(3) プラントタイプ

表 5-1 の通り、プラントタイプ間の分析で、デブリの閉塞のし易さ、閉塞時の圧力損失の増加の観点から、長期冷却性が比較的厳しいと考えられるのは、標準4ループプラントと 17×17 型燃料標準3ループプラントである。標準解析としては標準4ループプラントを対象に実施し、17×17 型燃料標準3ループプラントは後述の感度解析として標準4ループプラントと大差ないことを確認する。

なお、解析の各種の入力に大きな余裕を有しているので、現実的にはどのタイプでも同様にデブリ閉塞前から変化が生じない結果となるものと考えられる。

(4) 炉心燃料

国内 PWR プラントで現状最も標準的な高燃焼度（55GWd/t）二酸化ウラン燃料炉心を対象として、崩壊熱を考慮した入力とする。

表 5-1 プラントタイプ間の比較

	4 ループ (17×17 型燃料)	3 ループ (17×17 型燃料)	3 ループ (15×15 型燃料)	2 ループ (14×14 型燃料)
再循環開始時の冷却性： 冷却材体積に対する炉心発熱 (崩壊熱)との比	大	小	小	小
炉心への冷却材注水駆動力： 低温側配管取付け部下端と炉 心下端部との高低差	大	小	中	中
デブリによる流動抵抗： 炉心入口部でのデブリ閉塞、 圧力損失増加の程度	大	大	小	小

(太字：炉心長期冷却評価の観点で厳しくなる条件)

5.2.2. 感度解析

標準解析の条件から以下を変更させた場合の影響を感度解析として実施する。

(1) 化学デブリ析出開始時間の変更

標準解析では、再循環開始後 1 時間で化学デブリが析出すると仮定しているが、感度解析では、米国 PWROG にて実施された化学影響試験において、米国 PWR プラントの中で最短の化学デブリ析出開始時間と評価されている 4 時間として実施する。標準解析の解析条件である再循環開始後 1 時間での析出を仮定した場合よりも、完全閉塞後の被覆管温度上昇の緩和が見込まれ、その程度を確認する。

(2) 破断位置の変更

標準解析では、炉心冷却の観点で保守的となる低温側配管破断事象を設定しているが、感度解析では高温側配管破断事象の解析を実施し、低温側配管破断事象が炉心冷却の観点で保守的であることを確認する。

(3) プラントタイプの変更

表 5-1 でのプラントタイプ間の分析で、長期冷却性が比較的厳しいと考えられるのは、標準 4 ループプラントと標準 3 ループプラント (17×17 型燃料) である。ここでは、標準 4 ループプラントと同一条件で標準 3 ループプラントを対象に解析を実施し、炉心の長期冷却性が確保されることを確認する。

(4) 崩壊熱の変更 (MOX 燃料装荷を考慮)

標準解析では二酸化ウラン燃料のみの炉心条件としているが、MOX 燃料を 1/4 炉心規模まで装荷させたときの崩壊熱の増加に着目した感度解析を実施する。国内 PWR で利用される MOX 燃料はこれまでの装荷実績と今後の予定から、17×17 型燃料に限定されるため、同型燃料が装荷されている標準 4 ループプラントを対象に崩壊熱のみを増加させた感度解析によって、影響を確認する。

5.3. 評価項目及び判断基準

5.3.1. 評価項目

被覆管温度の一時的な増加の有無を含む変化、炉心の崩壊熱発生と冷却材による熱除去とのバランスによるヒートアップ(炉心水位低下に伴い燃料被覆管温度が一時的に上昇する)発生の有無、炉心の水位変化に着目して、長期冷却性の維持の判断を行う。

5.3.2. 長期炉心冷却性の判断基準

被覆管温度の判断基準値を設定して行う。

(1) 被覆管温度の一時的な増加

PWR 電力委託研究の成果として、再冠水時に加えて、再循環時に再び 1200°C に達したのちでも、その後の急冷による熱衝撃荷重、あるいは Sd 地震発生時の曲げ荷重に対しても、被覆管が分断することなく構造が維持されることが確認されている。このため、1200°C を被覆管の瞬時または一時的な温度上昇による高温酸化脆化を考慮した制限とする。

(2) 被覆管温度の長期にわたる増加

被覆管温度が漸増し長期間初期温度より高い状態が維持されるような状況下では、Zr 基合金の被覆管の酸化とそれに伴う水素吸収による水素脆化を考慮する必要がある。この観点からは米国 PWROG で採用されている、被覆管の酸化反応が加速する可能性のある 800F (約 427°C) を制限として設定した。

後述の通り、本解析では、再循環時のデブリの閉塞に伴う被覆管の温度上昇は、一時的な温度上昇となるか、一切温度上昇が認められない結果であった。しかしながら、保守的により厳しい 800F を被覆管温度上昇の制限値として設定した。

5.4. 解析結果

5.4.1. 標準解析結果

標準解析では、標準 4 ループプラントを対象に、化学デブリ析出が再循環開始後 1 時間で起こることを仮定している。

図 5-2、図 5-3 及び図 5-4 に標準解析の結果を示す。図 5-3 に示されているように、再循環が開始される 1200 秒(20 分)での非化学デブリによる炉心入口部の圧力損失の増加及び 4800 秒(再循環後 1 時間)での化学デブリ析出による圧力損失の増加が起こっても、炉心の平均的挙動として、炉心へ供給される冷却流量は、蒸散量(ボイルオフ流量)を下回ることなく、図 5-4 に示すように著しい炉心水位の低下は生じていないことが確認された。また、炉心部の圧力損失の増加に伴う被覆管温度のヒートアップは生じないことが確認された。

なお、事象の後半において被覆管温度は一時的に局所で上昇しているが、上昇の度合いは判断基準値に比べて僅かであり、その後直ちに初期温度に戻ることから、流路閉塞による長期的な炉心冷却に問題となることはない。

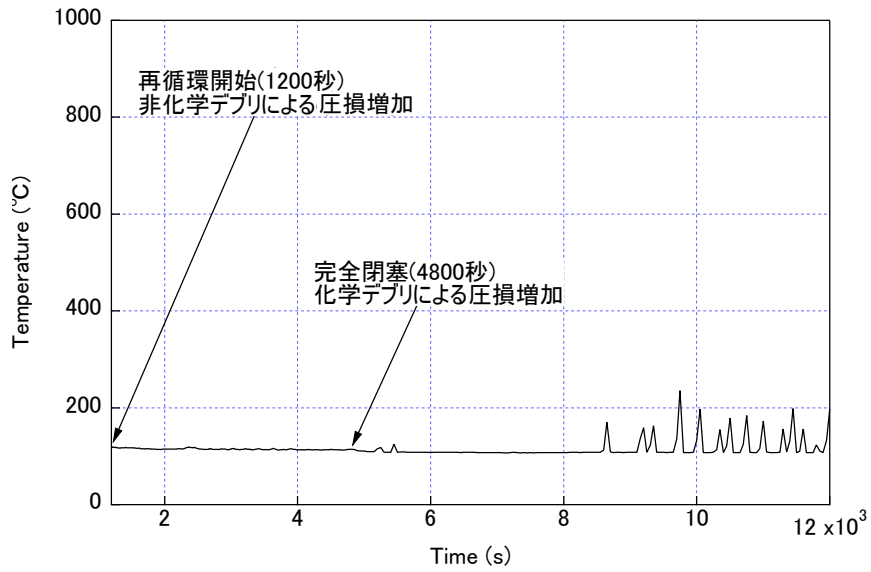


図 5-2 最高被覆管温度(標準 4 ループプラント標準解析)

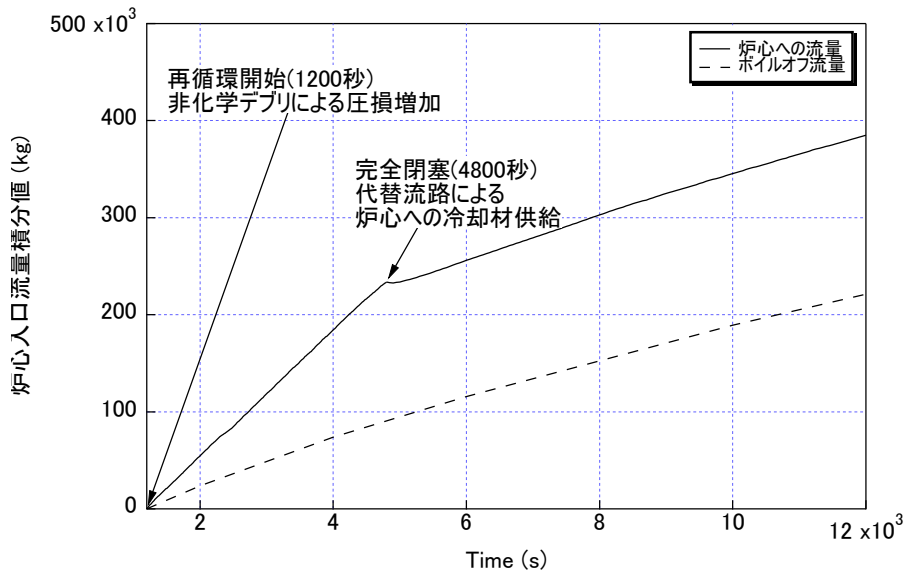


図 5-3 炉心への冷却材流量の積分値 (標準 4 ループプラント標準解析)

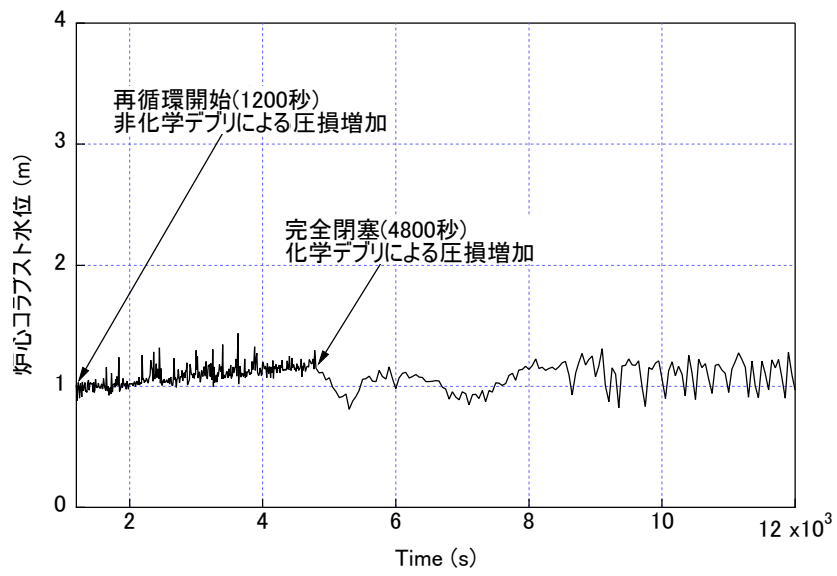


図 5-4 高温流路炉心のコラプスト水位 (標準 4 ループプラント標準解析)

5.4.2. 感度解析結果

いずれのケースも、標準解析結果と同様に、デブリ蓄積による圧力損失の増加によって長期炉心冷却に問題が生じないことが確認された。

(1) 化学デブリ析出開始時間の変更

図 5-5 及び図 5-6 に化学デブリ析出時間の感度解析結果を示す。化学デブリ析出時間を 4 時間としているが、標準解析での 1 時間の場合(図 5-2)と比べて、化学デブリ析出後の被覆管温度の一時的な上昇はさらに抑制される結果となっている。また、標準解析結果と同様に、化学デブリ析出後においても炉心へ供給される冷却流量は、蒸散量(ボイルオフ流量)を十分上回ることが確認された。

なお、化学デブリ析出試験の結果では、化学デブリ析出は再循環開始後 24 時間以上となっている。その時間では、国内 PWR プラントでは LOCA 発生から 24 時間後、またはそれ以前に、炉内のほう酸濃度を低減することを目的とし、冷却材の注入が低温側配管から、低温側配管／高温側配管同時注入へ切り替える運用としていることから、炉心上部からの冷却が進むことになり、以降、デブリの影響は化学デブリ析出が進んでも、解消される。

(2) 破断位置の変更

図 5-7 及び図 5-8 に破断口の位置変更の感度解析結果を示す。感度解析では破断箇所を高温側配管としているが、化学デブリ析出開始時間を 1 時間とした場合でも、化学デブリ析出前後において、被覆管温度の一時的な上昇も無視できるほど僅かな結果となっている。また、化学デブリ析出後においても炉心へ供給される冷却流量は、蒸散量(ボイルオフ流量)を十分上回ることが確認された。

(3) プラントタイプの変更

感度解析では標準 3 ループプラントを対象に、化学デブリ析出時間については再循環開始後 1 時間及び 4 時間を仮定して実施している。図 5-9 及び図 5-10 に化学デブリ析出 1 時間の場合、図 5-11 及び図 5-12 に化学デブリ析出 4 時間の場合の解析結果を示す。標準 4 ループプラントと同様に、化学デブリ析出開始前までは被覆管温度の上昇は生じない結果となっている。化学デブリ析出 4 時間後の条件では標準 4 ループプラント(図 5-5)と同様に、被覆管温度の一時的な上昇は無視できる結果となっている。また、化学デブリ析出時間が再循環開始後 1 時間及び 4 時間のいずれにおいても、化学デブリ析出後に炉心へ供給される冷却流量は、蒸散量(ボイルオフ流量)を十分上回ることが確認された。

(4) 崩壊熱の変更 (MOX 燃料装荷を考慮)

図 5-13 及び図 5-14 に MOX 燃料装荷を考慮した崩壊熱変更の感度解析結果を

示す。図 5-14 に示すように MOX 燃料装荷を考慮した崩壊熱は相対的に二酸化ウラン燃料炉心用崩壊熱よりも出力が高くなることから、図 5-13 のように化学デブリ析出後に被覆管温度は局所的に一時的な上昇が現れるものの、被覆管の温度上昇の程度は標準解析の二酸化ウラン燃料炉心と同程度に収まり、長期的な炉心冷却が維持される結果となっている。

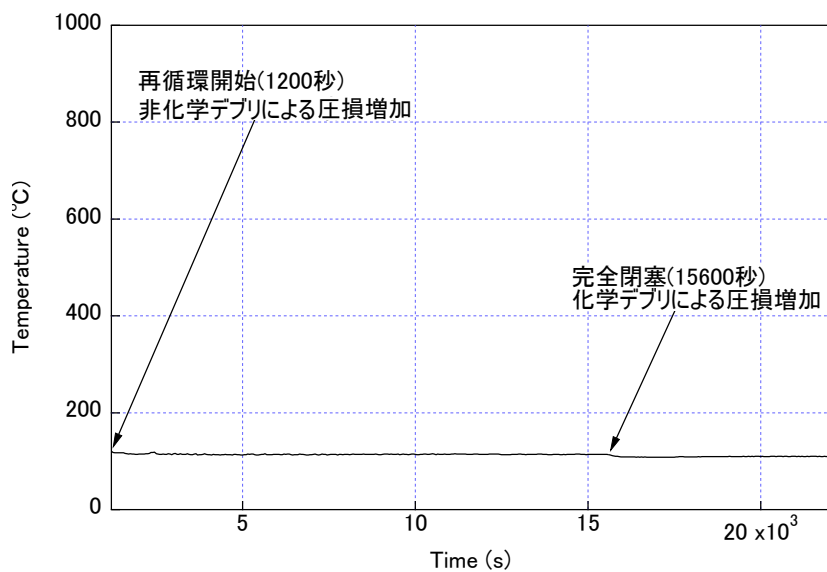


図 5-5 化学デブリ析出時間の感度解析結果 - 最高被覆管温度
(感度解析ケース(化学デブリ析出 4 時間))

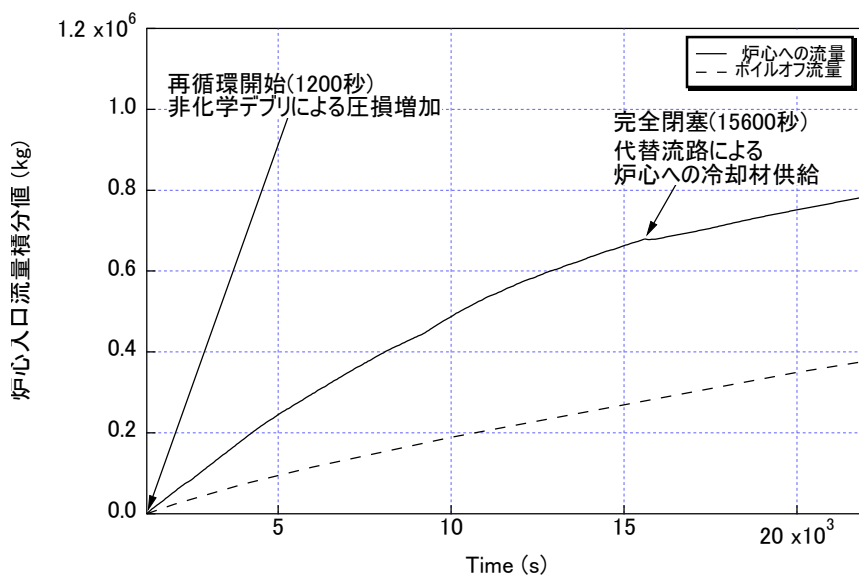


図 5-6 化学デブリ析出時間の感度解析結果 - 炉心への冷却材流量の積分値
(感度解析ケース(化学デブリ析出 4 時間))

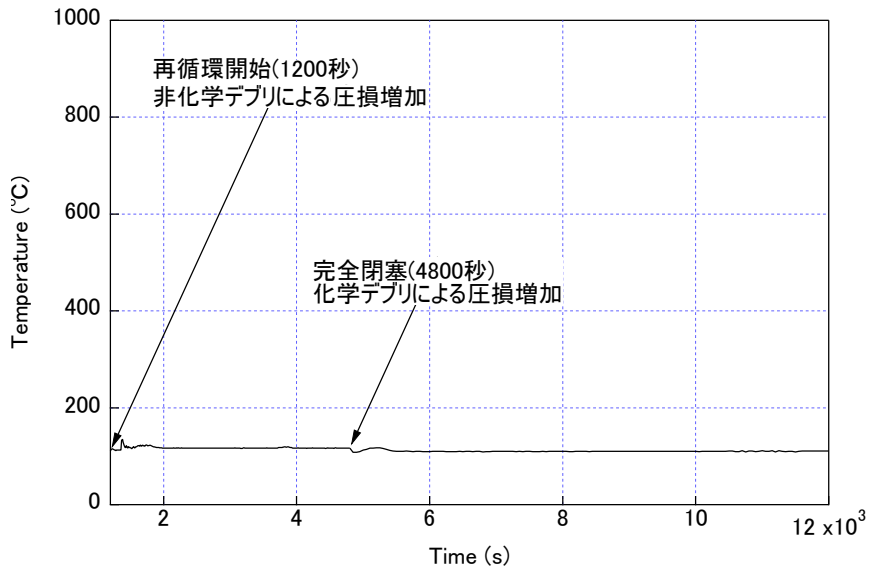


図 5-7 破断口の位置変更の感度解析結果 - 最高被覆管温度
(感度解析ケース(高温側配管破断))

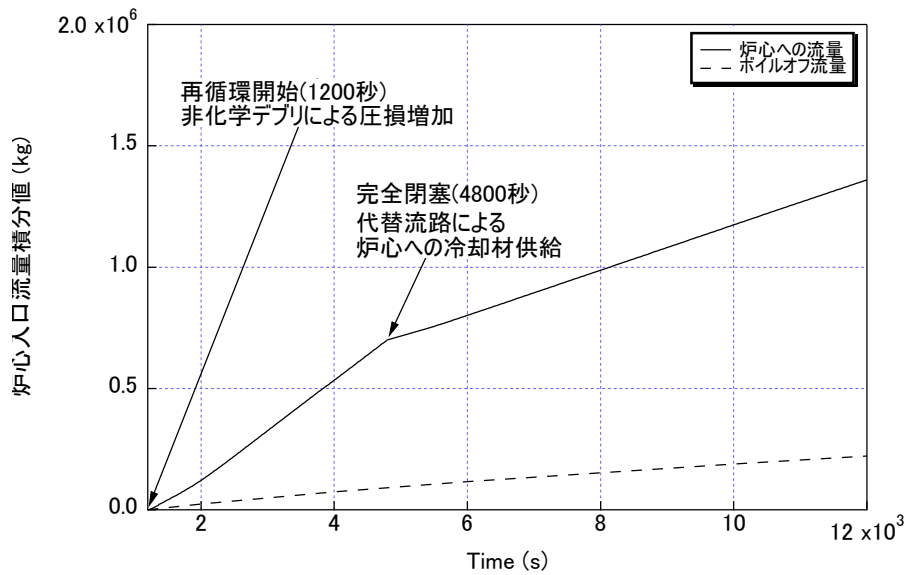


図 5-8 破断口の位置変更の感度解析結果 - 炉心への冷却材流量の積分値
(感度解析ケース(高温側配管破断))

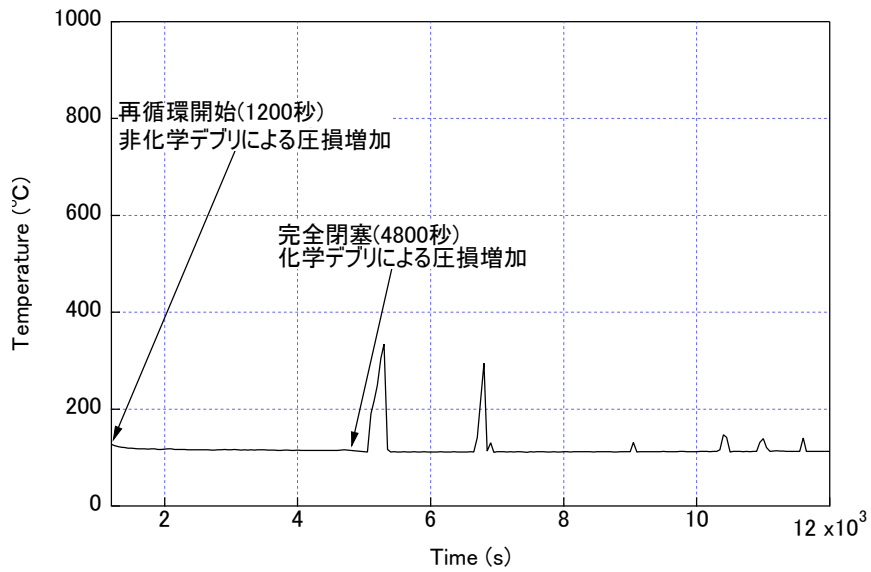


図 5-9 プラントタイプ変更の感度解析結果 - 最高被覆管温度
(感度解析ケース (標準 3 ループプラント、化学デブリ析出 1 時間))

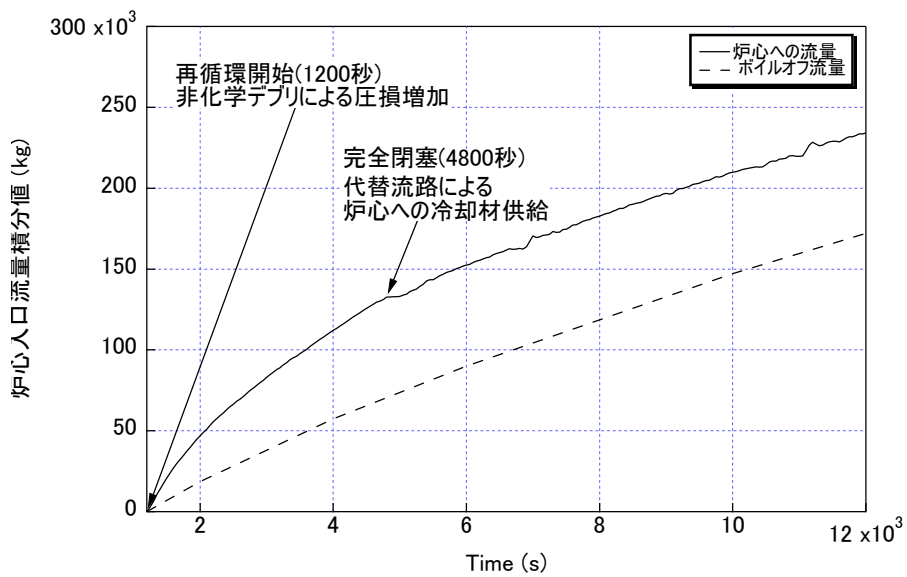


図 5-10 プラントタイプ変更の感度解析結果 - 炉心への冷却材流量の積分値
(感度解析ケース (標準 3 ループプラント、化学デブリ析出 1 時間))

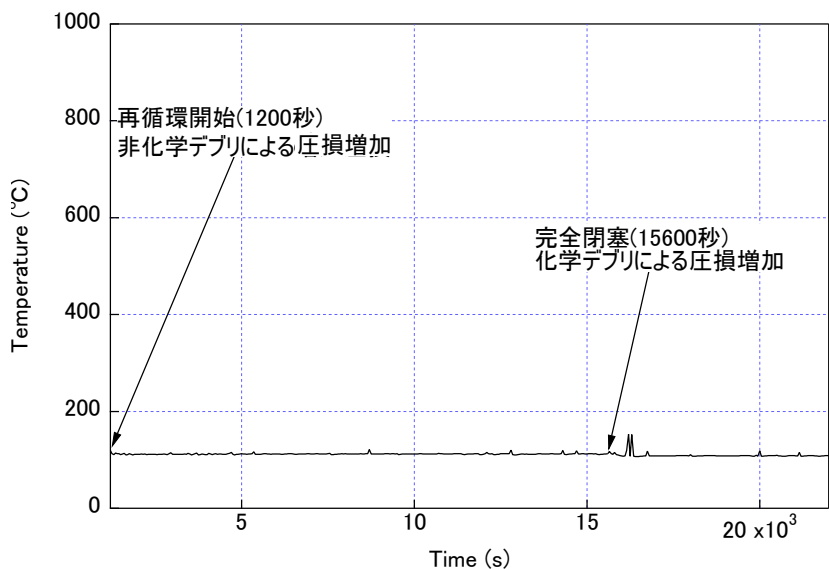


図 5-11 プラントタイプ変更の感度解析結果 - 最高被覆管温度
(感度解析ケース (標準 3 ループプラント、化学デブリ析出 4 時間))

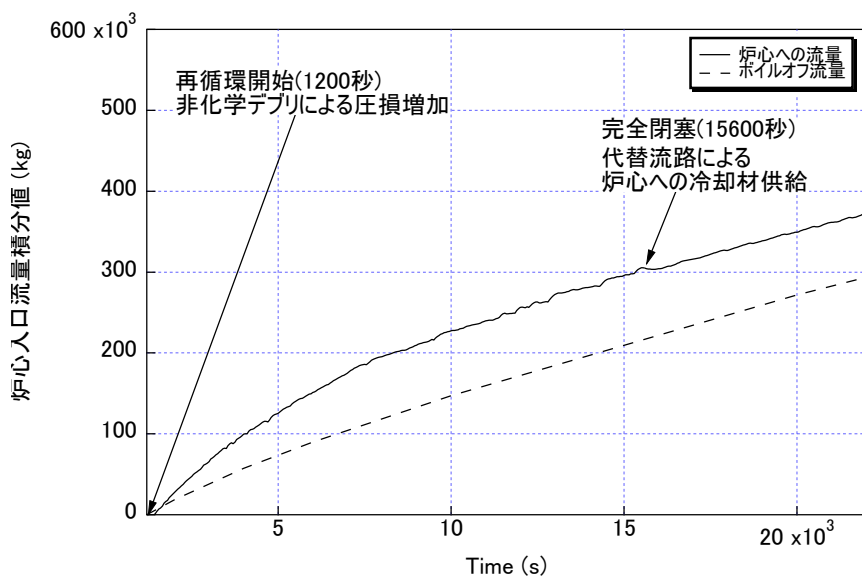


図 5-12 プラントタイプ変更の感度解析結果 - 炉心への冷却材流量の積分値
(感度解析ケース (標準 3 ループプラント、化学デブリ析出 4 時間))

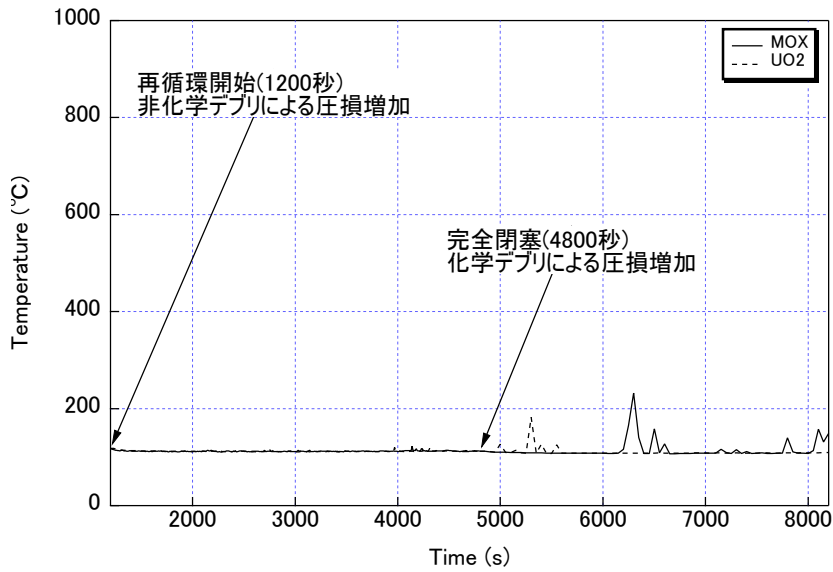


図 5-13 MOX 燃料装荷を考慮した崩壊熱変更の感度解析結果 - 最高被覆管温度

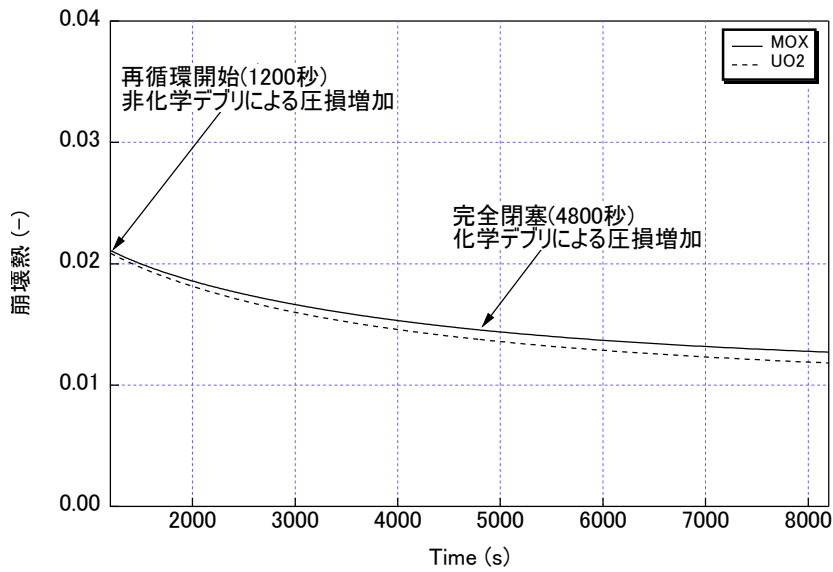


図 5-14 MOX 燃料装荷を考慮した崩壊熱変更の感度解析結果 - 崩壊熱

6. 長期炉心冷却性に対する評価

6.1. スクリーン下流側炉内影響の評価に含まれる保守性

スクリーン下流側炉内影響の評価においては表 6-1 に示す通り、解析及び試験において、入力や前提等の条件及び結果に大きな保守性と余裕が含まれている。また、これらの入力や前提等の条件において非保守的な設定は行われていない。

表 6-1 スクリーン下流側炉内影響の評価における保守性と余裕

	入力、条件の設定に含まれる保守性	結果の保守性・余裕
試験における保守性	<ul style="list-style-type: none"> ○非化学デブリ投入量 <ul style="list-style-type: none"> ・ HLB、CLB で想定される炉心へ到達するデブリ量を大幅に上回る量を投入し、圧力損失の増加を評価 (HLB : 2.6 倍、CLB : 115 倍) ・スクリーンのバイパス率を試験結果を包絡する 30%と仮定し、炉心へ到達する繊維デブリの量を包絡的な条件とした ○燃料集合体 2 体の体系 <ul style="list-style-type: none"> ・燃料集合体 4 体ではコーナ部に大きな流路が形成されデブリが通過しやすく、燃料集合体 2 体の体系は保守的 	<ul style="list-style-type: none"> ・非化学デブリによる炉心の圧力損失係数の増加量は限定的 ・化学デブリ投入試験において燃料の圧力損失の増加は限定的
解析における保守性	<ul style="list-style-type: none"> ○試験結果に基づく解析入力の設定 <ul style="list-style-type: none"> ・非化学デブリによる燃料集合体の圧力損失の増加： 試験結果に 2 倍程度の余裕を見込んで解析入力を設定 再循環開始と同時にステップ状の圧力損失の増加 ・化学デブリによる燃料集合体の圧力損失の増加： 試験では限定的な増加であるが解析入力は無限大（完全閉塞） 析出開始時と同時にステップ状の完全閉塞を仮定 ・化学デブリ析出時間： 実機では 24 時間以上であるが解析では 1 時間と仮定 ○被覆管温度制限値：800F の余裕 	<p>被覆管温度がデブリによる流路閉塞前後で有意に増加せず、800F に対して大きな余裕</p>

CLB : 低温側配管破断事象、HLB : 高温側配管破断事象

6.1.1. 解析条件に含まれる保守性

炉内流動解析で仮定している炉心入口の圧力損失係数の時間変化を図 6-1 に示す。流動解析において仮定した炉心入口の圧力損失係数には下記の 3 つの保守性が含まれている。

1 つ目の保守性は、非化学デブリによる圧力損失係数の増加をステップ状に仮定し、試験結果の 2 倍としている点である。試験では炉心入口部の圧力損失係数は非化学デブリにより時間とともに徐々に増加するが、炉内流動解析ではステップ状に増加すると保守的に仮定している。また、圧力損失係数が高くなる常温の試験水を用いた結果を保守的に適用し、圧力損失係数の増加量として試験結果の 2 倍を解析に入力している。

2 つ目の保守性は、化学デブリが実際よりも早期に析出すると仮定している点である。化学デブリの析出時間に関する基礎試験の結果、化学デブリは LOCA が発生してから 24 時間以内は析出しないことがわかっている。しかしながら、炉内流動解析においては保守的に LOCA 後 80 分で化学デブリが析出すると仮定している。

3 つ目の保守性は、化学デブリが析出後に炉心入口が完全に閉塞し、圧力損失係数が大幅に増加すると仮定している点である。炉心入口部に非化学デブリが均一に層を形成した状態で化学デブリが流入する場合、炉心入口部の圧力損失係数が大幅に増加することが知られている。炉内流動解析では上記を仮定したものとなっている。しかしながら、実際には非化学デブリが不均一に堆積し、一定程度の流路が確保されており、化学デブリが析出後も圧力損失は大きく増加しないことが、バップルバレル流動試験（4.2.1 項参照）において示されている。したがって、実際には炉心入口部が化学デブリにより完全に閉塞することはなく、炉心入口部から冷却材が供給される。

上記の通り、炉内流動解析においてはデブリによる炉心入口の圧力損失の増加量を保守的に仮定しており、十分な安全裕度を持つ評価となっている。

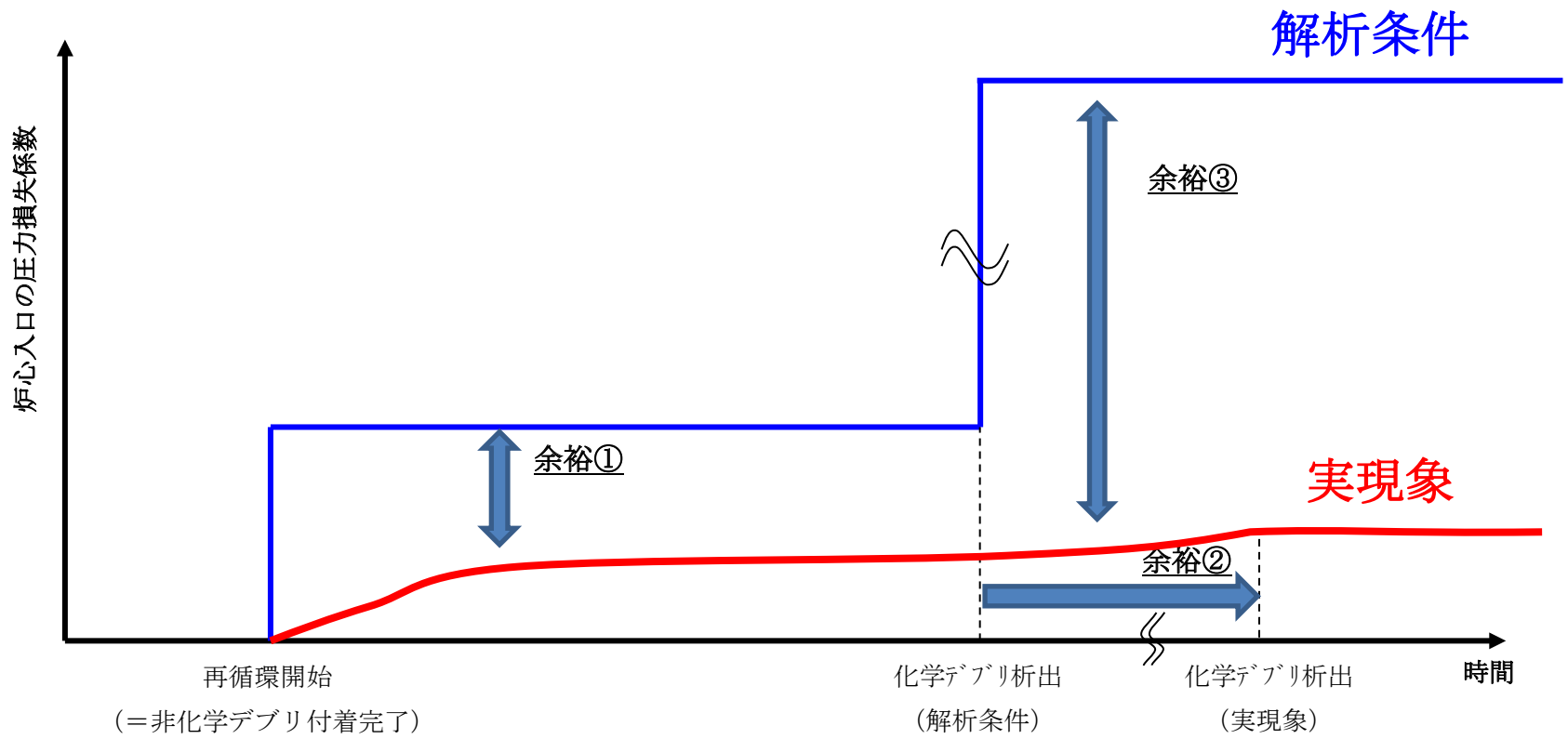


図 6-1 炉内流動解析で仮定している炉心入口部の圧力損失係数の時間変化

6.1.2. 試験条件に含まれる保守性

デブリによる流路閉塞は繊維デブリによる閉塞から始まり、繊維デブリの空隙を粒子デブリ及び化学デブリが閉塞することで圧力損失が大きく増加する。したがって、繊維デブリ量が多いほうが閉塞する可能性が高くなり、厳しい試験条件となる。

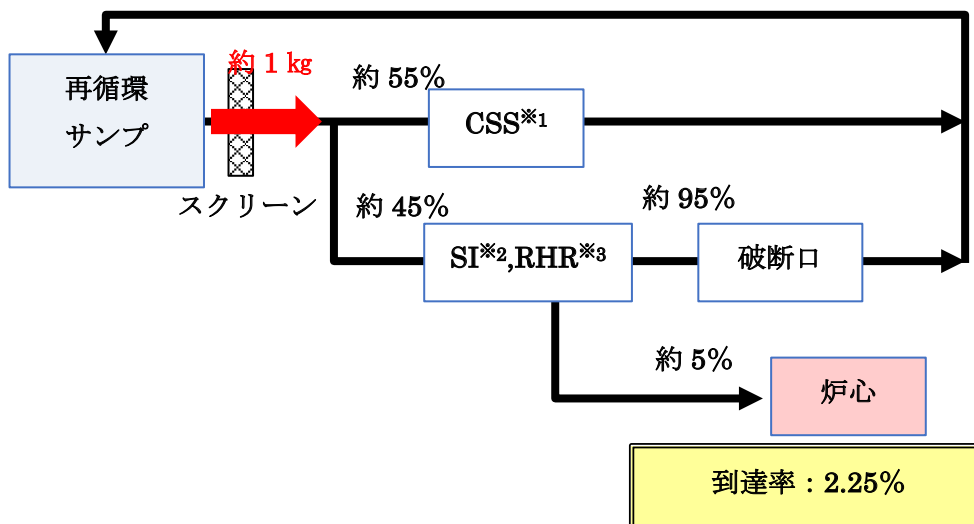
燃料集合体を用いた流動試験（4.1.2 項参照）及びバップルバレル流動試験（4.2.1 項参照）において投入した繊維デブリ量は約 2.6kg/FA であり、実際にスクリーンを通過する繊維デブリの最大量である約 1 kg/FA の 2.6 倍の量に相当する。

したがって、非常用炉心冷却系から注入された全ての冷却材が炉心を通過する高温側配管破断事象に対しては、実機で想定される最大の繊維デブリ量（スクリーンを通過する最大量）の 2.6 倍を投入した試験条件となっている。

また、低温側配管破断事象における炉心への繊維デブリの到達割合に関する図を図 6-2 に示す。サンプルスクリーンを通過したデブリは格納容器スプレイ系と原子炉容器へと分岐し、サンプルスクリーン通過したデブリの約 45%が原子炉容器へ流入する。しかしながら、原子炉容器へ流入したデブリの大半はダウンカマを經由し、低温側配管の破断口から流出してしまうことから、炉心へ到達する繊維デブリはサンプルスクリーンを通過した繊維デブリの約 2.25%となる。しかしながら、試験では投入した全ての繊維デブリが炉心へ到達したと仮定しており、繊維デブリ投入量に大きな保守性を持っている。

さらに、実機においてサンプルスクリーンにある程度の繊維デブリが捕捉されると繊維デブリの層がフィルター役割を果たし、スクリーンを通過するデブリ量が極端に減少する（以降、自己フィルター化と称す）。これにより、再循環運転が開始された数時間は繊維デブリが原子炉容器内に流入してくるが、その後は繊維デブリが殆ど流入しなくなる。一方、流動試験においてはスクリーンの自己フィルター化の効果を無視した安全側の条件としており、供試体を通過した繊維デブリを再流入させている。この条件で 5 時間以上の試験を実施しており、十分に保守的な試験条件となっている。

【実機における低温側配管破断事象】



※1 CSS : Containment Spray System (原子炉格納容器スプレイ系)

※2 SI : Safety Injection system (安全注入系)

※3 RHR : Residual Heat Removal system (余熱除去系)

【流動試験】

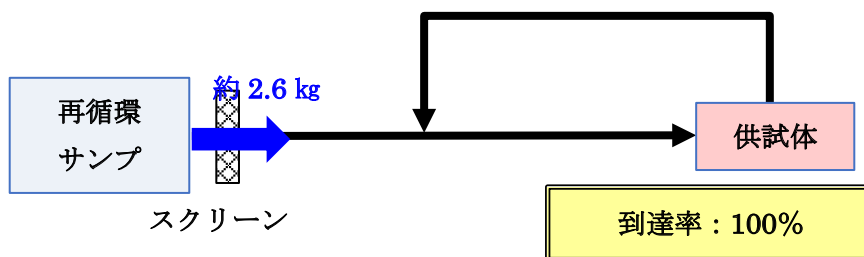


図 6-2 低温側配管破断事象における繊維デブリの炉心到達割合

6.1.3. 試験及び解析の結果に含まれる保守性

燃料集合体を用いた流動試験の結果、非化学デブリによる炉心の圧力損失係数の増加量は限定的であることが確認できた。また、炉心の圧力損失係数は時間とともに徐々に増加することが分かった。

解析への入力においては、試験結果を保守的に取り扱い、再循環開始と同時にステップ状に圧力損失係数が増加するとし、試験結果の2倍の圧力損失係数とした。

また、バップルバレル流動試験の結果から、化学デブリ析出後の炉心入口における圧力損失の増加量は限定的であり、完全閉塞には至らないことが確認できた。解析への入力においては、試験結果を保守的に取り扱い、化学デブリの析出直後に炉心入口部が完全閉塞するとしている。

上記の保守的な解析入力による炉内流動解析の結果、被覆管温度は保守的に設定した800Fの基準値に対して大きな余裕を有していることが確認された。

6.1.4. 評価シナリオに含まれる保守性

図6-3に評価シナリオに含まれる保守性を示す。評価シナリオにおいては化学デブリの析出後は炉心入口部が完全閉塞することを前提としている。しかしながら、燃料集合体およびバップルバレル流路の閉塞確認試験(4.2.1項参照)では、化学デブリによる圧力損失の増加は限定的であり、化学デブリが析出した後も燃料集合体の下部からの通水による炉心冷却が可能であることが確認された。

上記のことは、評価シナリオ自体にも保守性を持つことを示している。米国PWROGによるオプション2aのシナリオにおいては、化学デブリの析出が非化学デブリによる流路閉塞に遅れて発生することの考慮、及び化学デブリ析出後の代替流路による炉心冷却の確保が必要となる。しかしながら、実際には化学デブリによる圧力損失の増加量は限定的であり、化学デブリの析出前後で炉心の圧力損失は大きく変化しない。また、冷却材の注入が低温側配管から低温側配管/高温側配管への同時注入に切り替わることによって、冷却材が炉心上部から供給されるが、燃料集合体の上部ノズルは流路孔が大きく、デブリによる流路閉塞の懸念は払拭される。したがって、現実的な評価シナリオとしては、非化学デブリによる閉塞を考慮することのみでよいと考えられる。

このように、オプション2aとして設定した評価シナリオ自体にも、保守性が含まれると考えられる。

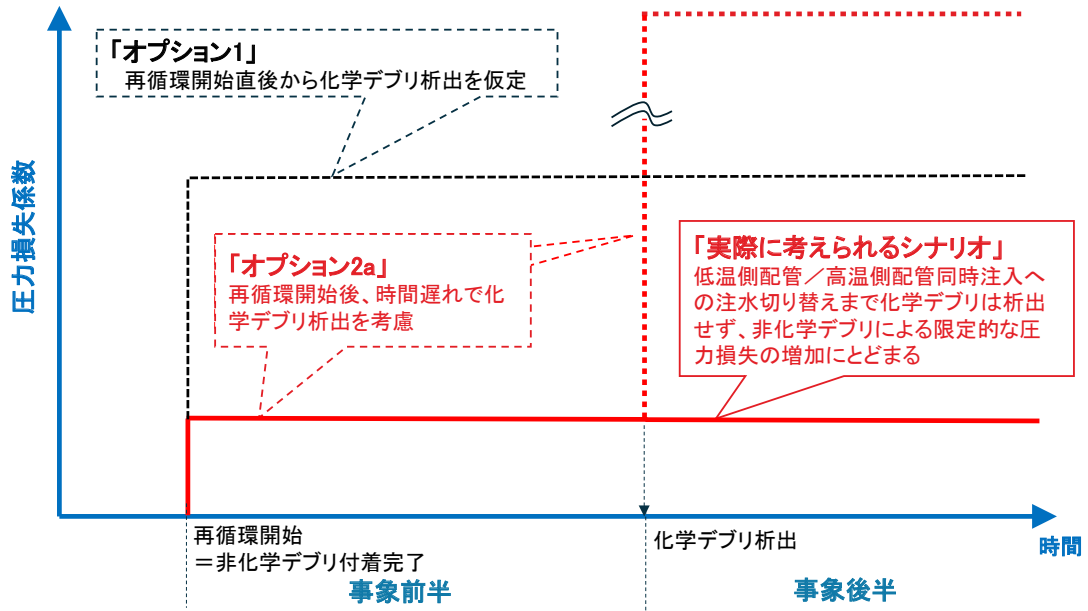


図 6-3 評価シナリオに含まれる保守性

6.2. 長期炉心冷却性への影響

米国 PWROG のシナリオに沿って、試験結果に基づいた保守的な入力、かつ国内 PWR プラントを包括する条件として、炉内の流路閉塞を考慮した流動解析を実施した。その結果、炉心全体として冷却流量が炉心からの蒸散量を常時上回ること、局所的には被覆管温度は、一時的かつ限定的な上昇が認められるものの、流路閉塞前の再循環開始直前の被覆管温度から増加することはないことを確認した。

この結果により、旧原子力安全委員会において制定された「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」の解説における、長期の炉心冷却性が維持されることの解釈に関する記載である「炉心が冠水しているか、又は少なくとも炉心の出力密度の高い部分が冠水し、それ以外の部分の冷却も十分であるような状態が維持できることを示せば満足されたと見なす。」に対して、デブリによる流路閉塞の問題が生じる前と同様に、デブリによる流路閉塞を保守的に考慮しても適合していることを確認した。

以上より、LOCA 時に発生するデブリの炉心到達及び炉心入口部を中心とする冷却流路閉塞による長期炉心冷却性への影響は問題とならないと結論する。

7. 運用管理への影響

運転中の運用管理については、通常運転時の管理と事故時の運転手順の設定に分けられる。デブリによる長期炉心冷却性への影響が問題とはならないことを示した評価において、運用管理に関して留意すべき事項がないか確認した。

7.1. 通常運転時の運用管理

通常運転時には、評価の前提事項や条件が遵守されていることの確認が求められる。ここで、今後の工事等で変わりうる条件として、評価に用いた炉心又は燃料へのデブリ投入量が考えられる。

LOCA デブリによるスクリーン下流側炉内影響に関する評価は、試験及び解析ともに入力条件及び結果において、大きな保守性を有している。そのうち、試験条件である繊維デブリ投入量に限定しても、保守的に見積もって実機条件の約 2.6 倍の裕度を持っている。

このため、現状及び将来の運用変更に対して、繊維デブリの発生源である配管保温材に代表される繊維材が現状の 2.6 倍以上に増加しない限り、試験及び解析の結果は適用できるものと判断する。

すでに、原子炉格納容器内での機器配管修繕等の工事では以下の運用が実施されている。

- ・ サンプスクリーンの設計条件（デブリ量）を超過しない設計を実施
- ・ カプセル保温の採用、繊維系保温材の低密度化等、デブリ低減対策についても考慮

上記の機器配管修繕等の工事は、上流のサンプスクリーンの評価条件の遵守の観点から、国内プラントで設定している繊維デブリ量が変わらない範囲で実施されている。したがって、機器配管修繕等の工事毎に行われている現状の管理によって、スクリーン下流側炉内影響評価の条件も同時に遵守されることとなるため、新たな評価を実施する必要はない。

7.2. 事故時の運転手順の設定

LOCA 後の長期炉心冷却において考慮されている運転手順は、LOCA 発生から 24 時間後（一部のプラントでは 12 時間後）に非常用炉心冷却系からの注水の一部を低温側配管から高温側配管へ切り替えることである。この手順は LOCA 後のほう酸析出防止のために設定されているものであり、スクリーン下流側炉内影響の評価においては考慮しておらず、従来の手順からの変更は不要である。

上記の通り、事故時の運転手順において追加、変更等は不要である。

8. まとめ

PWR 産業界での LOCA 後のデブリによる長期炉心冷却性評価に係る検討は、長年検討が進められてきた米国 PWROG における評価の調査からはじめ、決定論的手法として最新のオプション 2a の評価シナリオと手法を踏襲して、試験と解析が進められた。その中で、国内 PWR プラントの特徴を踏まえ、条件等において丁寧な配慮を行いながら進めてきた。

特に非化学デブリの燃料への投入試験においては、米国より大規模な試験体系となる、燃料集合体 2 体を有する体系下で、基礎試験と実寸試験を繰り返し、繊維状のデブリが燃料の断面の全面にわたって付着・閉塞することはなく、流路の一部は繊維デブリにより閉塞することなく安定した冷却流路が確保・維持されることを確認した。

燃料の断面において、繊維デブリが全面に閉塞することなく、未閉塞の部分が残されると、未閉塞部分では、繊維デブリの隙間に捕捉される粒子状のデブリ、及び繊維と粒子からなる非化学デブリの層の上に冷却材の水溫低下等に伴い生じる化学析出によるデブリの層の緻密化が生じにくくなると考えられることから、燃料断面又は炉心断面での平均的な流動抵抗の増加も限定的となることが、基礎試験及び化学デブリの投入試験において確認された。

このようなデブリの流路への蓄積と閉塞に関する挙動の詳細な把握を行ったうえで、米国 PWROG のシナリオに沿って、試験結果に基づいた保守的な入力、かつ国内の全 PWR プラントを包括する入力として解析の条件を設定した。そのうえで、炉内のデブリ閉塞を考慮した流動解析を実施して、炉心全体として冷却流量が炉心からの蒸散量を常時上回ること、局所的に被覆管温度は一時的かつ限定的な上昇が認められるものの、デブリ閉塞前の再循環開始直前の被覆管温度から増加することはないことを確認した。

この結果は、旧原子力安全委員会において制定された「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」の解説の中の、長期の炉心冷却性が維持されることの解釈に関する記載である「炉心が冠水しているか、又は少なくとも炉心の出力密度の高い部分が冠水し、それ以外の部分の冷却も十分であるような状態が維持できることを示せば満足されたと見なす。」に対して、デブリ閉塞の問題が生じる前と同様に、デブリの閉塞を保守的に考慮しても適合していることを確認した。

以上の評価に至るまでに、米国で先行して豊富なデブリ問題に対する取り組み経験を持ち、終結までを主導したウェスティングハウス社には、国内の PWR 産業界から関連する問い合わせや国内で実施した試験を中心とする結果への意見聴取に対して、適切な回答と助言等を頂いた。

また国内の規制当局である原子力規制庁の関係者とは、技術情報検討会での本課題の解決に向けて、公開会合及び産業界での試験の見学等を通じて、幅広い視点からの安全性確認に向けたアドバイスを頂いた。ここに感謝を申し上げさせて頂く。

9. 参考文献

- 1) 第 42 回技術情報検討会 資料 42-1-2, 原子力規制委員会 システム安全研究部門 "サンプスクリーンを通過したデブリが炉心に与える影響に関する米国の対応状況及びこれを踏まえた国内の対応について", 令和 2 年 8 月 19 日
- 2) Water Sources for Long-Term Recirculation Following a Loss-of-Coolant-Accident, Regulatory Guide 1.82 Revision 4, March 2012.
- 3) 10 CFR Part 50 §50.46, "Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling Systems for Light Water Nuclear Reactors," 72 Federal Register 49494, August 2007.
- 4) NRC SECY-12-0093(ADAMS Accession No. ML121310648), "Closure Options for Generic Safety Issue – 191, Assessment of Debris Accumulation on Pressurized-Water Reactor Sump Performance," July 2012
- 5) GL 2004-02(ADAMS Accession Number ML042360586), "Potential Impact of Debris Blockage on Emergency Recirculation During Design Basis Accidents at Pressurized-Water Reactors," September 2004.
- 6) WCAP-16793-NP-A, Rev. 2, "Evaluation of Long-Term Cooling Considering Particulate, Fibrous and Chemical Debris in the Recirculating Fluid," October 2011.
- 7) WCAP-17788-NP, Volume1, Rev. 1, " Comprehensive Analysis and test Program for GSI-191 Closure(PA-SEE-1090)," December 2019.
- 8) WCAP-16530-NP-A, Rev. 0, "Evaluation of Post-Accident Chemical Effects in Containment Sump Fluids to Support GSI-191," March 2008.
- 9) 高浜 3 号炉及び 4 号炉設置許可基準等への適合状況について（重大事故等対処設備） 補足説明資料 47-10, "格納容器再循環サンプスクリーンの今後の検討課題について",

- 10) ML14153A013, " GSI-191 Comprehensive Analysis and Test Program Update: Subscale Testing," April 2014.
- 11) ML15076A134, " GSI-191 Test Program Summary Scaled Head Loss Testing," February 2015.
- 12) WCAP-17788-NP, Volume6, Rev1, " Comprehensive Analysis and test Program for GSI-191 Closure(PA-SEE-1090)-Subscale Head Loss Test Program Report," December 2019.
- 13) WCAP-17788-NP, Volume5, Rev1, " Comprehensive Analysis and test Program for GSI-191 Closure(PA-SEE-1090)-Autoclave Chemical Effects Testing for GSI-191 Long-Term Cooling," December 2019