

## 高浜発電所

### 1号炉及び2号炉

設置許可基準規則等への適合性について  
(使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更)

<補足説明資料>

2022年6月

関西電力株式会社

## 目 次

1. はじめに

2. 設置許可基準規則への適合性

3. 評価の基本方針

4. 実効増倍率の計算方法

5. 計算結果

別添1 使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更に伴う関係条文の整理表

別添2 大規模漏えい時の未臨界性評価手法について

別添3 解析結果の妥当性確認について

別添4 大規模漏えい時の未臨界性評価における不確定性評価の考え方

別紙1 計算機プログラム（解析コード）の概要

別紙2 SFPへの注水・放水流量の設定について

別紙3 実機スプレイ設備を用いた液滴径計測試験および液滴条件設定について

別紙4 液滴下降速度の算出について

別紙5 流量条件に対する使用済燃料ピットの未臨界性評価上の頑健性について

## 1. はじめに

### (1) 本設置変更許可申請の目的

本申請は使用済燃料ピットにおける燃料及び内挿物の取扱頻度を大幅に削減することによる運用管理面の安全性向上を図るため、SFPからの大量の水の漏えい時における臨界防止設計について、使用済燃料ピット用中性子吸収体（制御棒クラスタまたは使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体。）を考慮せずとも臨界を防止する設計へ変更する。また本設計変更に合わせて、設計の妥当性を確認する評価手法および条件を変更する。変更内容を第1-1表および第1-2表に示す。

### (2) 既許可における領域管理の特徴および変更による効果

高浜1，2号炉の使用済燃料ピットラックはアングル型のステンレス鋼製であり、大規模漏えい時は、水位の低下により燃料集合体間の中性子の遮蔽効果が低くなることから、未臨界性評価結果が厳しくなる。そのため、既許可では臨界を防止するために、燃料の燃焼度や中性子吸収体挿入の有無に応じた第1図に示す貯蔵領域を設定（3領域管理）することで臨界を防止する設計としているが、3領域管理においては、多くの燃料で中性子吸収体の挿入が必要となる。

最適評価手法を適用したうえで、新たに取得した試験データや、事故時に使用する設備の仕様、およびその運用を踏まえ評価条件を見直し、中性子吸収体の効果を考慮せず未臨界性評価を行うことで、未臨界性に係る燃料運用制限を取り除くことができる。これにより、核分裂生成物を内包する照射燃料の取扱いおよび照射燃料上での内挿物入替の回数を相当量低減でき、運用管理面の安全性向上が図られる。

## 2. 設置許可基準規則への適合性

本設置変更許可申請における関係条文を整理した結果を別添1に示す。規則への適合性を示すため、本設置変更許可申請に伴い設計方針を定め、発電用原子炉設置許可変更申請書を以下のとおり修正する。

### ○第四十三条 重大事故等対処設備

第四十三条 重大事故等対処設備は、次に掲げるものでなければならない。

- 一 想定される重大事故等が発生した場合における温度、放射線、荷重その他の使用条件において、重大事故等に対処するために必要な機能を有効に発揮するものであること。
- 二 想定される重大事故等が発生した場合において確実に操作できるものであること。
- 三 健全性及び能力を確認するため、発電用原子炉の運転中又は停止中に試験又は検査ができるものであること。
- 四 本来の用途以外の用途として重大事故等に対処するために使用する設備にあつては、通常時に使用する系統から速やかに切り替えられる機能を備えるものであること。
- 五 工場等内の他の設備に対して悪影響を及ぼさないものであること。
- 六 想定される重大事故等が発生した場合において重大事故等対処設備の操作及び復旧作業を行うことができるよう、放射線量が高くなるおそれが少ない設置場所の選定、設置場所への遮蔽物の設置その他の適切な措置を講じたものであること。

2 重大事故等対処設備のうち常設のもの（重大事故等対処設備のうち可搬型のもの（以下「可搬型重大事故等対処設備」という。）と接続するものにあつては、当該可搬型重大事故等対処設備と接続するために必要な発電用原子炉施設内の常設の配管、弁、ケーブルその他の機器を含む。以下「常設重大事故等対処設備」という。）は、前項に定めるもののほか、次に掲げるものでなければならない。（以下、略）

3 可搬型重大事故等対処設備に関しては、第一項に定めるもののほか、次に掲げるものでなければならない。（以下、略）

### 規則への適合性

本申請は、既許可において重大事故等対処設備として使用するとした使用済燃料ピット用中性子吸収体（制御棒クラスタまたは使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体）を、燃料の取扱設備及び貯蔵設備における重大事故等対処設備として用いない設計に変更するものであるため、使用済燃料ピット用中性子吸収体は本条文の適用対象外となる。またその他の重大事故等対処設備の変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、これら設備に対する既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。

○第五十四条 使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備

第五十四条 発電用原子炉施設には、使用済燃料貯蔵槽の冷却機能又は注水機能が喪失し、又は使用済燃料貯蔵槽からの水の漏えいその他の要因により当該使用済燃料貯蔵槽の水位が低下した場合において貯蔵槽内燃料体等を冷却し、放射線を遮蔽し、及び臨界を防止するために必要な設備を設けなければならない。

2 発電用原子炉施設には、使用済燃料貯蔵槽からの大量の水の漏えいその他の要因により当該使用済燃料貯蔵槽の水位が異常に低下した場合において貯蔵槽内燃料体等の著しい損傷の進行を緩和し、及び臨界を防止するために必要な設備を設けなければならない。

規則への適合性

使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備については、以下のとおり設計する。なお、第五十四条第1項に要求される貯蔵槽内燃料体等の冷却、放射線の遮蔽、及び臨界の防止、また第五十四条第2項に要求される燃料体等の著しい損傷の進行の緩和については、既存設備の変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。

(1) 使用済燃料ピット水位の異常低下時における使用済燃料ピット内燃料集合体の損傷の進行緩和、臨界防止及び放射性物質の放出低減

使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいが発生し、可搬型代替注水設備においても使用済燃料ピット水位が使用済燃料ピット出口配管下端未満かつ水位低下が継続する場合に、燃料損傷の進行を緩和し、臨界にならないよう配慮したラック形状及び燃料配置において、スプレイや蒸気条件においても未臨界を維持できることにより臨界を防止する。

### 3. 評価の基本方針

使用済燃料ピットで大規模漏えいが発生した場合、可搬型スプレー設備（使用済燃料ピットへのスプレー）により、使用済燃料ピット内の燃料体等の著しい損傷の進行を緩和し、できる限り環境への放射性物質の放出を低減するため、使用済燃料ピット全面にスプレーを実施し、ラック及び燃料体等を冷却する。また可搬型の放水設備（使用済燃料ピットへの放水）により、燃料損傷の進行を緩和し、燃料損傷時に原子炉補助建屋に大量の水を放水することによりできる限り環境への放射性物質の放出を低減し、また一部の水が使用済燃料ピットに注水されることで、ラック及び燃料体等を冷却する。

大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価は、臨界にならないよう配慮したラック形状及び燃料配置において、使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための手順等で想定される注水及びスプレーや蒸気条件においても臨界を防止できることを確認するため、第2図に示すように、評価には最適評価手法を採用し、体系を液相部（ピット水）と気相部（注水・放水により流入する水と蒸気）の2相に分け、使用済燃料ピットの水位を冠水状態から完全喪失状態まで変化させて評価を行う。最適評価手法を採用した条件設定の考え方については別添2「大規模漏えい時の未臨界性評価手法について」に示す。

また実効増倍率の計算には、3次元モンテカルロ計算コード**KENO-VI**を内蔵した**SCALE Ver. 6.0**を使用し、第3図に示す計算フローに従って計算を行う。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙1「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

#### 4. 実効増倍率の計算方法

##### (1) 計算体系

計算体系は、垂直方向、水平方向ともに有限の体系とする。垂直方向は、上下部の構造物による中性子反射効果を考慮し、燃料有効長上部は低水密度状態においても、十分な中性子の反射効果が得られる厚さ（中性子反射効果が飽和する厚さ）である**300mm**の水反射と仮定し、燃料有効長下部についても同様に、**1,000mm**のコンクリートとして評価する。水平方向では、ピット側面の構造物による中性子反射効果を考慮し、垂直方向上部と同様に**300mm**の水反射を仮定する。未臨界性評価の計算体系を第4図～第6図に示す。

##### (2) 臨界計算コードのインプットの元となるパラメータの設定

第7図に示すフローに基づき、臨界計算コードへのインプットデータの元となるパラメータを設定する。事故時にSFPへ注水・放水する場合の実態により則した条件（以下、「基本ケース条件」という。）、および各パラメータに対する不確かさ要因による影響を考慮した条件（以下、「不確かさを考慮した条件」という。）を設定のうえ、不確かさ同士の従属性・独立性を踏まえた解析ケースを設定する。各パラメータの具体的条件を第2表に、これら条件に基づき設定した臨界計算コードへのインプットを第3表に示す。また第2表に示す条件の導出プロセスについて別添2「大規模漏えい時の未臨界性評価手法について」に示す。

##### (3) その他計算条件

以下の条件については、貯蔵される燃料仕様の範囲内で未臨界性評価上厳しい結果を与えるように設定している。

- (a) 燃料は反応度の高い**55GWd/t**ウラン燃料とし、その初期濃縮度は、約**4.60wt%**に濃縮度公差を見込み  wt%とする。
- (b) 燃料有効長は、公称値**3,642mm**から延長し、**3,660mm**とする。
- (c) ラックの厚さは、中性子吸収効果を少なくするため仕様下限値  とする。
- (d) 液相部の水は純水とする。（残存するピット水に含まれるほう素、および事故時における注水・放水により液相部に流入する塩素は、液相部内の量を定め難いため考慮しない。）
- (e) 液相部の水密度は、高水密度範囲において水密度が **1.0 g/cm<sup>3</sup>** から低下するにつれて実効増倍率が低下することから、最も評価結果が厳しくなる水密度 **1.0 g/cm<sup>3</sup>** とする。

また、以下の計算条件には公称値を使用し、その不確かさについては、正負の製作公差を未臨界性評価上厳しくなる側に加算する（以下「製作公差に基づく不確かさとして考慮する計算条件」という。）。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

- (f) ラックの中心間距離
- (g) ラックの内のり
- (h) ラック内燃料偏心
- (i) 燃料材の直径及び密度
- (j) 燃料被覆材の内径及び外径
- (k) 燃料要素の中心間隔（燃料体外寸）

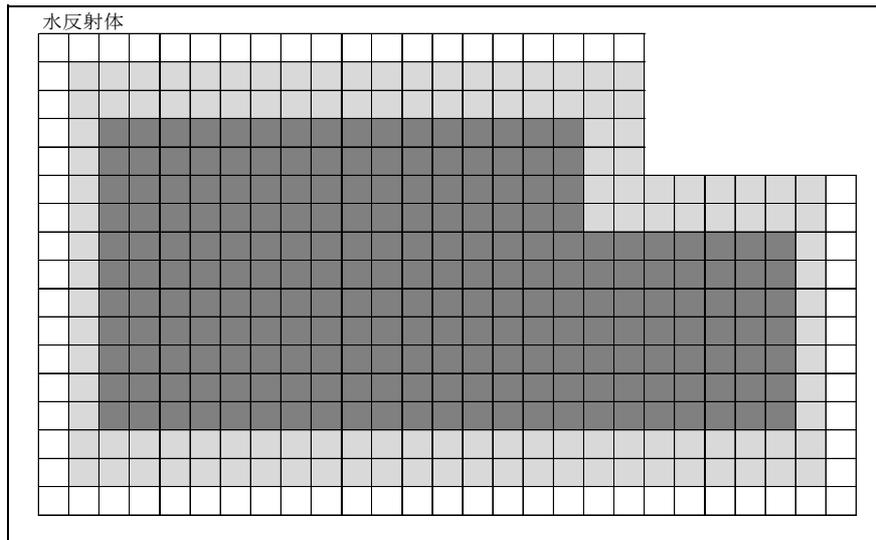
これらの計算条件を第4表にまとめる。また、製造公差等による不確定性評価の考え方について別添4「大規模漏えい時の未臨界性評価における不確定性評価の考え方」に示す。

## 5. 計算結果

未臨界性評価結果を第5表に示す。第8図のとおり、基本ケースおよび不確かさを考慮したケースの全ケースにおいて、純水冠水状態から液相部高さ（水位）の低下に伴い実効増倍率は減少し、純水冠水状態において最大**0.947**となった。

純水冠水時の実効増倍率に対し、製造公差や計算コード等の不確定性として余裕を見込んだ**0.02**を考慮しても実効増倍率は**0.967**であり、実効増倍率**0.98**以下を満足している。

以 上

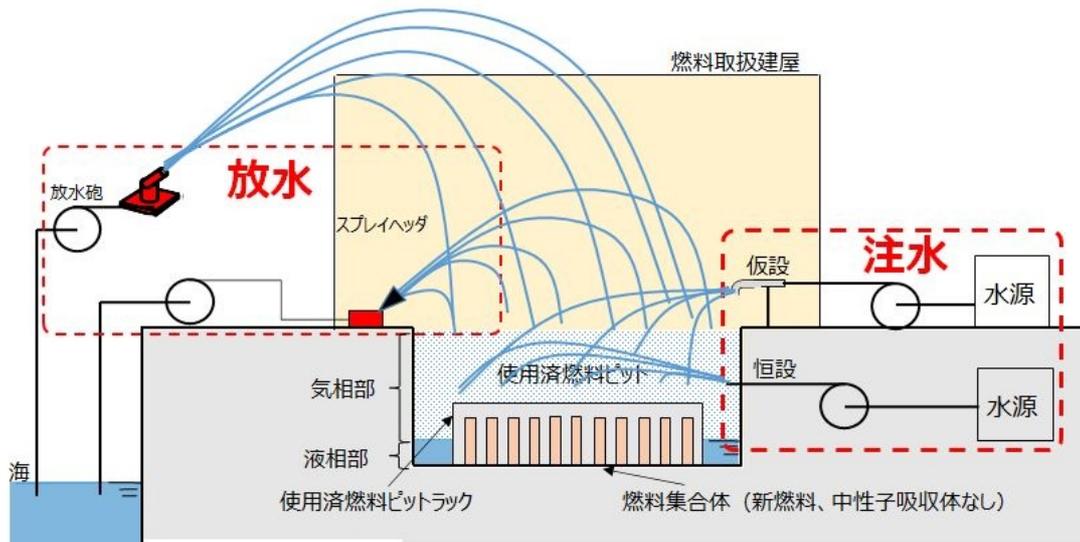


	55GWd/t 燃料 (初期濃縮度約 4.6wt%)		48GWd/t 燃料 (初期濃縮度約 4.0wt%)	
	使用済燃料ピット用 中性子吸収体なし	使用済燃料ピット用 中性子吸収体あり	使用済燃料ピット用 中性子吸収体なし	使用済燃料ピット用 中性子吸収体あり
□領域 A	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上
■領域 B	燃焼度 20GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 15GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上
■領域 C	燃焼度 50GWd/t 以上	燃焼度 15GWd/t 以上	燃焼度 45GWd/t 以上	燃焼度 10GWd/t 以上

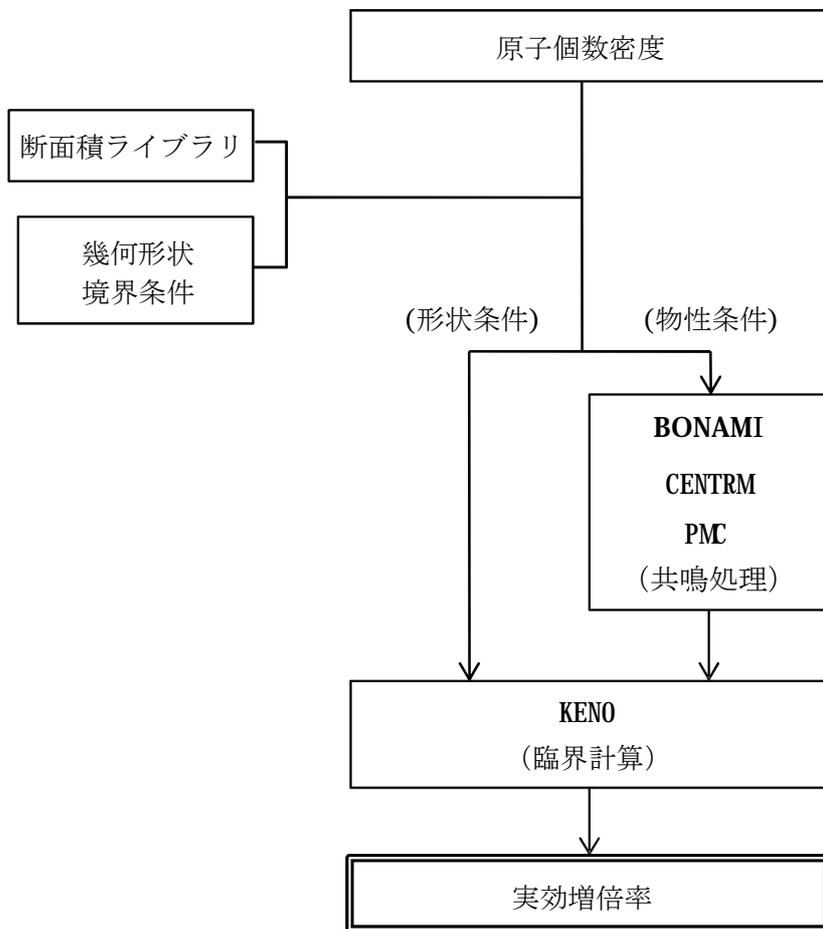
第1図 既許可における領域管理

<評価条件概要>

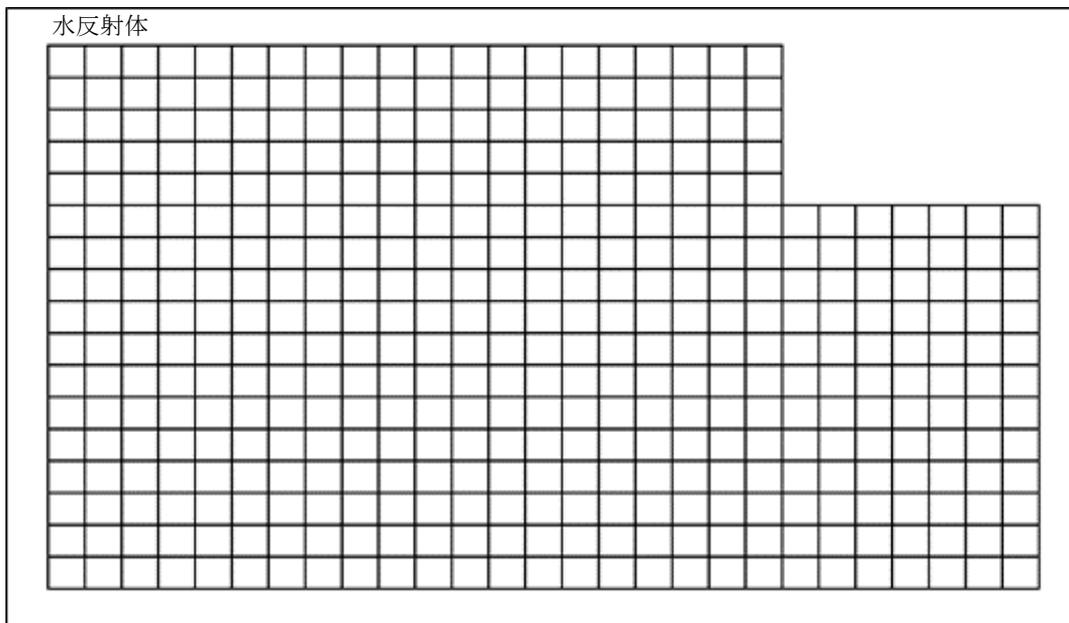
- 燃料配置については、最も反応度の高い新燃料が全てのラックに貯蔵された状態で評価する。
- 水の状態については、液相部と気相部の2相に分け、水位変化を踏まえて評価する。
- 評価には最適評価手法を採用し、重大事故等時における使用済燃料ピットへの注水・放水手順による流量等のパラメータに現実的な条件を設定した場合、および各パラメータに対し発生する不確かさの影響を考慮した場合でも未臨界が維持されることを確認することとし、海水を水源とする対策については、塩素による中性子吸収を考慮する。
- 燃料集合体内に液膜が形成されることを想定するとともに、気相部空間中の水密度は試験等で得られた知見を踏まえ設定する。



第2図 今回未臨界性評価の全体概要

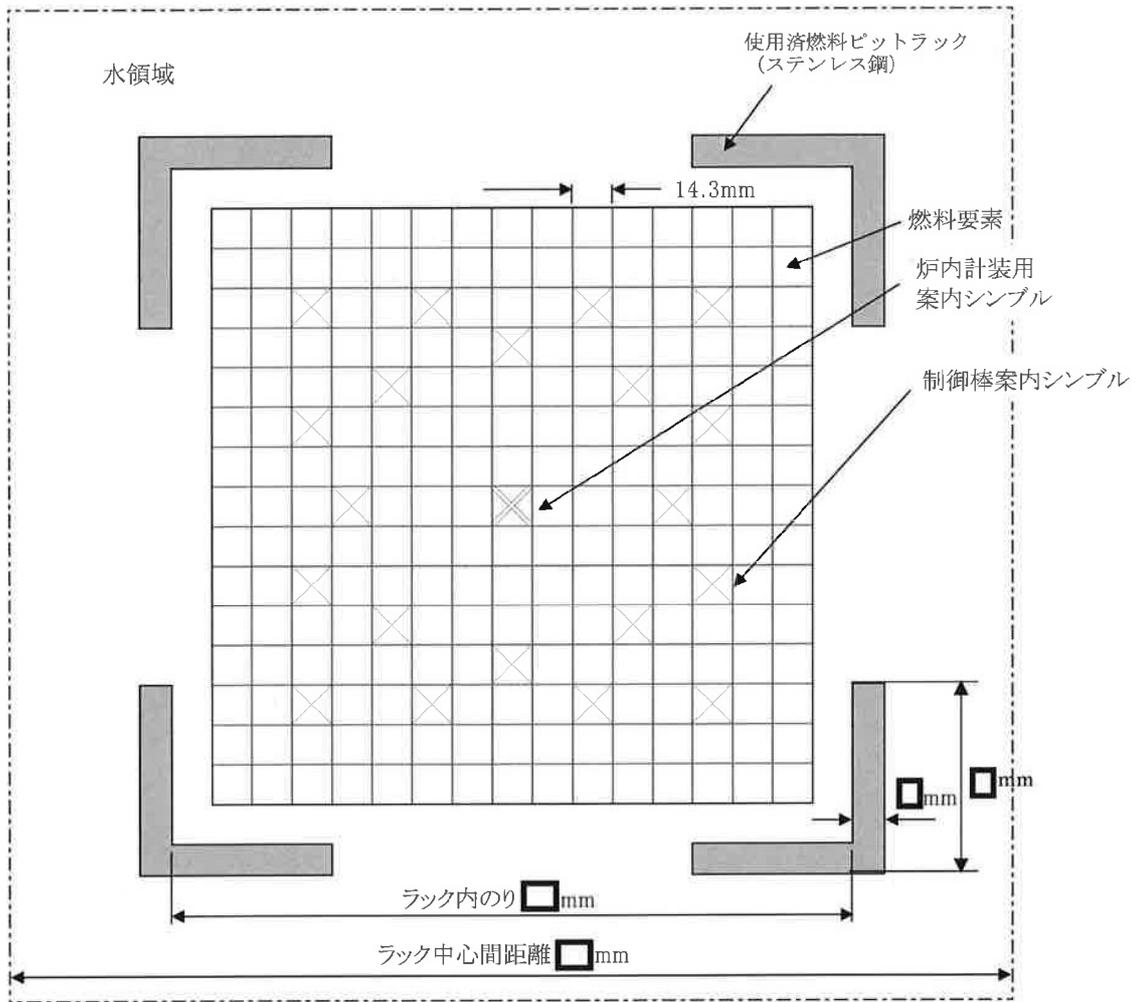


第3図 計算フロー



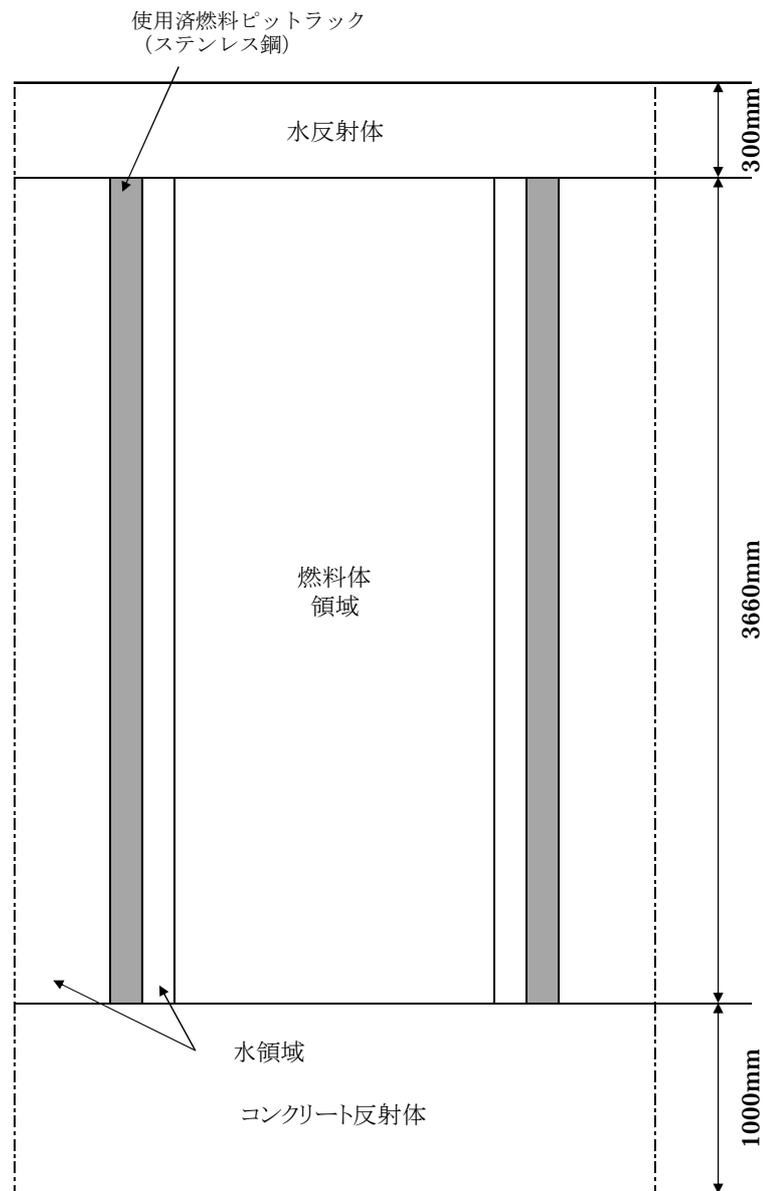
□ : ウラン新燃料 (燃焼度 0GWd/t) を貯蔵、貯蔵容量 : 424 体

第 4 図 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算体系 (水平方向)

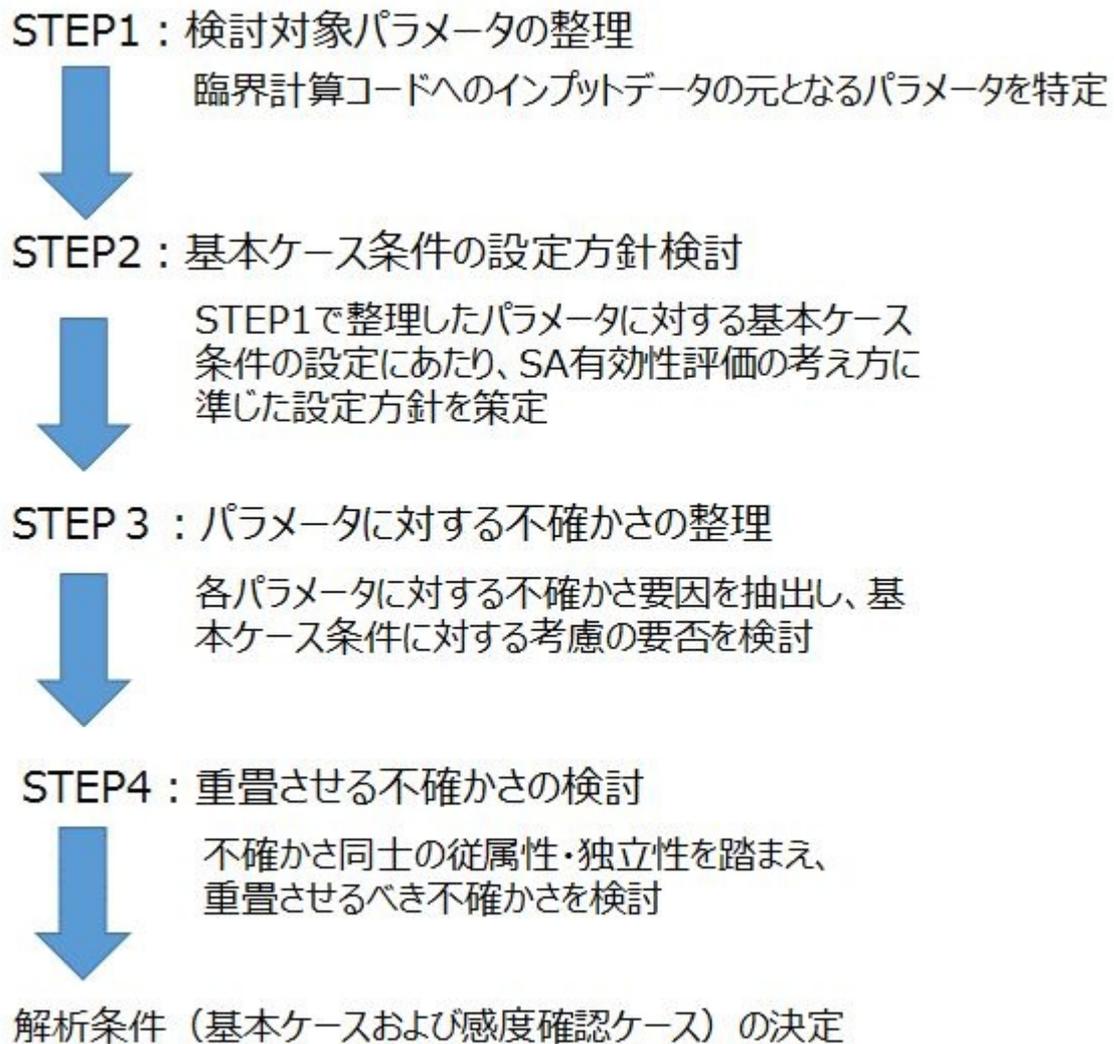


第5図 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算体系（水平方向）  
(燃料体部拡大図)

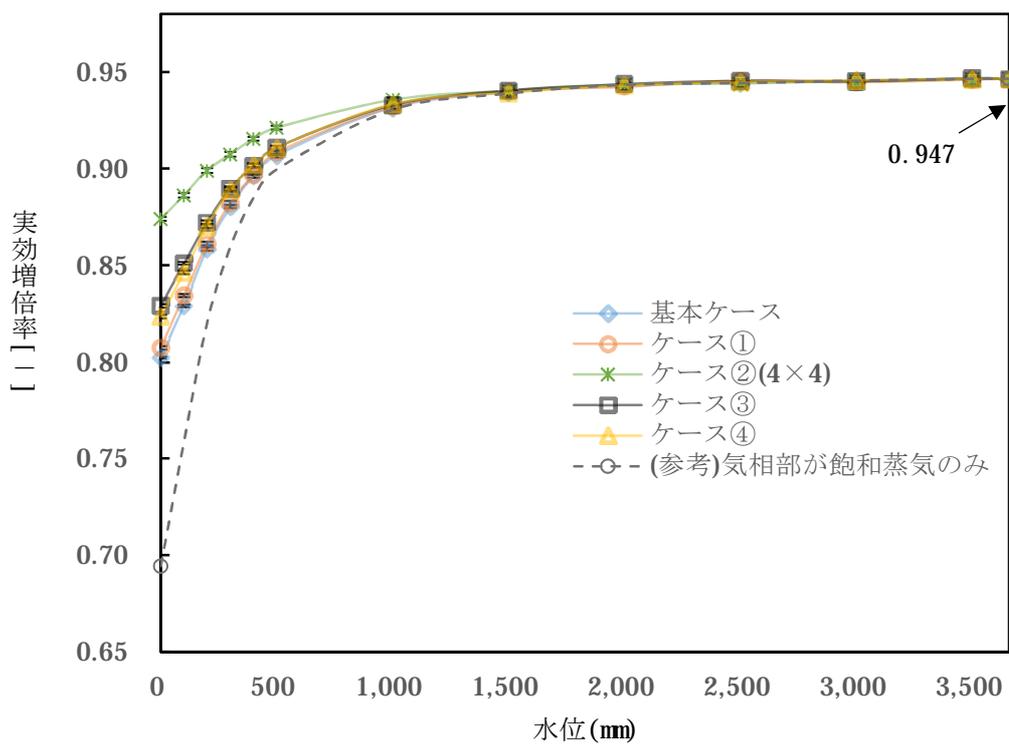
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



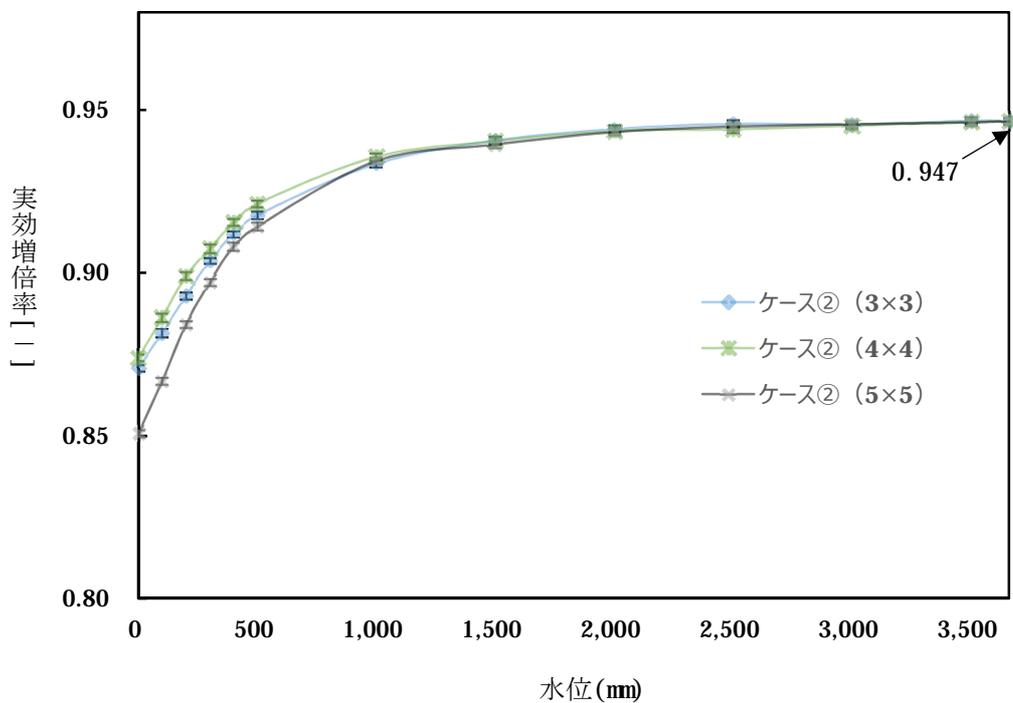
第 6 図 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算体系 (垂直方向)



第7図 臨界計算コードの入力データの元となるパラメータの設定フロー



基本ケース、感度解析ケース①、②(4×4)、③、④



感度解析ケース②(3×3~5×5)

第8図 各ケース実効増倍率評価結果※

※製造公差、計算コード等による不確定性を含まない値

第1-1表 本設置変更許可申請における設計変更内容

	変更前 (既許可)	変更後
本文 五号 二. (3) (iii) b.	(略) 燃料損傷の進行を緩和し、臨界にならないように配慮したラック形状、燃料配置 <sup>※</sup> 及び使用中中性子吸収体配置において、スプレイや蒸気条件においても未臨界を維持できることにより 臨界を防止し、(略)	(略) 燃料損傷の進行を緩和し、臨界にならないよう配慮したラック形状及び燃料配置 <sup>※</sup> において、 <u>使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための手順等で想定される注水及びスプレイや蒸気条件</u> においても未臨界を維持できることにより 臨界を防止し、(略)

※ 許可記載の「臨界にならないよう配慮した燃料配置」とは、未臨界性評価において未臨界であることを確認できる燃料配置のことを指す。

第1-2表 評価手法および条件の変更内容

	変更前 (既許可)	変更後
54条2項に係る臨界を防止できることを確認する評価	評価手法	最適評価手法 (本件がSA事象であることに鑑み、最確状態を踏まえた基本ケースおよび不確かさを考慮した感度解析ケースを設定し、各ケース全てが未臨界性上の判定基準を満足することを確認)
	水分条件	気相、液相に分け、水位を冠水から完全喪失まで変化させて評価。 液膜および海水 (塩素) の存在を考慮。
	燃料配置	新燃料敷き詰め
	中性子吸収体の存在	考慮しない

第2表 計算コードへのインプットの元となるパラメータの具体的な条件

評価条件	事故時の実態により則したケース (基本ケース)	1手順あたりのポンプ台 数による感度を確認する 解析 (ケース①)	風の影響① (流入範囲を 狭める風の影響) による感 度を確認する解析 (ケース②)	風の影響② (斜め方向に液滴を落 下させ燃料集合体内への流入割合 に影響を与える風の影響) による 感度を確認する解析 (ケース③)	スプレイ試験における測定 箇所毎の結果の差異によ る感度を確認する解析 (ケース④)
燃料条件	新燃料のみで満杯	←	←	←	←
燃料配置	新燃料のみで満杯	←	←	←	←
燃料種類	通常ウラン燃料 (Gd入り燃料の存在は考慮しない)	←	←	←	←
流量	<input type="text"/> (m <sup>3</sup> /h)	<input type="text"/> (m <sup>3</sup> /h)	<input type="text"/> (m <sup>3</sup> /h)	←	←
SFPへの流入範囲、流量分布	SFP全面	←	局所 (3×3から始め、低下傾 向が確認できるまで)	SFP全面	←
燃料集合体内への流入割合	一様	←	←	←	←
集合体内へ流入した流量のうち液膜となる流量割合	23 (%)	←	←	46 (%)	23 (%)
液膜厚さ	100 (%)	←	←	←	←
液膜厚さ評価式	包絡式	←	←	←	←
集合体内へ流入した流量のうち液滴のまま落下する流量割合	0 (%)	←	←	←	←
流入範囲内	飽和蒸気密度 0.0006 (g/cm <sup>3</sup> )	←	←	←	←
気相部	液滴径1.5mmを用いた水密度	←	←	←	液滴径0.4mmを用いた 水密度
水密度 (放水の液滴径等)	←	←	←	←	←
流入範囲外	←	←	←	←	←
海水中の塩分濃度	3.3 (%)	←	←	←	←
評価結果	冠水時：0.947 水位0cm時：0.803	冠水時：0.947 水位0cm時：0.808	冠水時：0.947 水位0cm時：0.874*	冠水時：0.947 水位0cm時：0.829	冠水時：0.947 水位0cm時：0.824

※流入範囲が4×4ラック時の値

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第3表 各ケースにおける臨界計算コードへのインプット

燃料	基本ケース	ケース①	ケース②	ケース③	ケース④
燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP 有限体系)				
燃料種類	15×15 型 通常ウラン燃料				
液膜厚さ [mm]					
燃料集合体内 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.0006 (飽和蒸気密度)				
燃料集合体外 <sup>*</sup> 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]					
流入範囲外 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	-	-	0.0006 (飽和蒸気密度)	-	-

水分条件

※ 淡水由来の流入水による水密度を「純水」、海水由来の流入水による水密度を「海水」と記載。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第4表 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算条件

	計算条件	備考
(燃料体)	15×15型ウラン燃料	—
燃料 <sup>235</sup> U 濃縮度	□ wt%	4.60wt%に濃縮度公差を見込んだ値
燃料材密度	理論密度の97%	(注1)
燃料材直径	9.29mm	(注1)
燃料被覆材		
内径	9.48mm	(注1)
外径	10.72mm	(注1)
燃料要素中心間隔	14.3mm	(注1)
燃料有効長	3,660mm	公称値3,642mmを延長
(ラック)	—	配置は第4図参照
ラックタイプ	アングル型	—
ラックの中心間距離	□mm×□mm	(注1)
材 料	ステンレス鋼	—
厚 さ	□mm	(注2)
内のり	□mm×□mm	(注1)
(使用済燃料ピット内の水分条件)	液相部の水は純水	残存しているほう素、および事故時における注水・放水により液相部に流入する塩素は考慮しない。
液相部水密度	1.0 g/cm <sup>3</sup>	(注3)
気相部水密度	第3表の通り設定	—

(注1) 製作公差に基づく不確定性として考慮する計算条件

(注2) 中性子吸収効果を少なくするため下限値を使用

(注3) 液相部の水密度は、高水密度範囲において最も評価結果が厳しくなる値である1.0 g/cm<sup>3</sup>とする。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第5表 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価結果

	評価結果 <sup>(注1)</sup>	判断基準
実効増倍率	0.967 (0.947)	≤0.98

(注1) 不確定性を含む。( )内は不確定性を含まない値。

別添1 使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更に伴う関係条文の整理表

関係条文	○
無関係	×

	条文	条文との関係性	備考
第1条	一条 適用範囲	×	適用する基準（法令）についての説明であり、要求事項ではないため、関係条文ではない。
第2条	二条 定義	×	言葉の定義であり、要求事項ではないため、関係条文ではない。
第3条	三条 D B地盤	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第3条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第4条	四条 耐震	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第4条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第5条	五条 津波防護	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第5条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第6条	六条 想定される自然現象	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第6条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第6条	六条 竜巻	×	同上
第6条	六条 外部火災	×	同上
第6条	六条 火山	×	同上
第7条	七条 不法な侵入	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第7条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第8条	八条 内部火災	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第8条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第9条	九条 内部溢水	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第9条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第10条	十条 誤操作防止	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第10条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第11条	十一条 安全避難通路	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第11条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第12条	十二条 安全施設	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第12条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第13条	十三条 運転時の異常な過渡変化	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第13条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第14条	十四条 全交流動力電源喪失対策設備	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第14条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第15条	十五条 炉心等	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第15条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第16条	十六条 燃料取扱・貯蔵設備	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第16条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第17条	十七条 R C P B	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第17条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第18条	十八条 蒸気タービン	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第18条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第19条	十九条 E C C S	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第19条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第20条	二十条 R C S 補給	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第20条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第21条	二十一条 残留熱除去	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第21条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第22条	二十二条 U H S	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第22条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第23条	二十三条 計装制御系統施設（S F P 監視計器）	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第23条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第24条	二十四条 安全保護回路	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第24条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第25条	二十五条 I & C	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第25条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第26条	二十六条 原子炉制御室等	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第26条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第27条	二十七条 廃棄物処理施設	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第27条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第28条	二十八条 廃棄物貯蔵施設	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第28条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第29条	二十九条 直接ガンマ線	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第29条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第30条	三十条 放射線防護	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第30条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第31条	三十一条 監視設備（周辺モニタリング）	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第31条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第32条	三十二条 C V	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第32条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第33条	三十三条 保安電源	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第33条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第34条	三十四条 緊急時対策所	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第34条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第35条	三十五条 通信連絡設備	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第35条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第36条	三十六条 補助ボイラ	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第36条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。

	条文	条文との関係性	備考
第37条	三十七条 SA拡大防止	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第37条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第38条	三十八条 SA地盤	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第38条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第39条	三十九条 地震 (SA荷重組合せ含む)	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第39条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第40条	四十条 津波	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第40条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第41条	四十一条 火災	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第41条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第42条	四十二条 特重	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第42条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
	1.0 共通	×	同上
	2. 大規模損壊	×	同上
第43条	四十三条 全般に係る事項	○	本申請は使用済燃料ピット用中性子吸収体を、燃料の取扱設備及び貯蔵設備における重大事故等対処設備として用いない設計に変更するものであるため、使用済燃料ピット用中性子吸収体は本条文の適用対象外となる。 なおその他の既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第43条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第44条	四十四条 緊急停止失敗時の未臨界/ 1.1 緊急停止失敗時の未臨界	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第44条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第45条	四十五条 RCPB高圧時冷却/1.2 RCPB高圧時冷却	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第45条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第46条	四十六条 RCPB減圧/1.3 RCPB減圧 (SGTR発生時の手順・I S L O C A)	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第46条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第47条	四十七条 RCPB低圧時冷却/1.4 RCPB低圧時冷却	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第47条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第48条	四十八条 最終ヒートシンク/1.5 最終ヒートシンク	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第48条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第49条	四十九条 CV内の冷却/1.6 CV 冷却	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第49条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第50条	五十条 CV過圧破損防止/1.7 C V過圧破損防止	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第50条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第51条	五十一条 CV下部冷却/1.8 CV 下部冷却	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第51条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第52条	五十二条 水素爆発CV破損防止/ 1.9 水素爆CV破損防止	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第52条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第53条	五十三条 水素爆発RB等損傷防止/ 1.10 水素爆発RB等損傷防止	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第53条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第54条	五十四条 SFP冷却/1.11 SFP 冷却	○	本申請における設計変更に伴い、第54条に係る本設置変更許可の基準適合性を確認する。
第55条	五十五条 放射性物質の拡散抑制/ 1.12 放射性物質の拡散を抑制	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第55条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第56条	五十六条 重大事故等の収束に必要な 水源 /1.13 重大事故等の収束に必要な 水源	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第56条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第57条	五十七条 電源設備/1.14 電源	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第57条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第58条	五十八条 計装設備/1.15 計装	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第58条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第59条	【二十六条 原子炉制御室等】 五十九条 原子炉制御室/ 1.16 原子炉制御室の居住性等に関する 手順等	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第59条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第60条	【三十一条 監視設備(周辺モニタリ ング)】 六十条 監視測定設備/1.17 監視測 定	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第60条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第61条	【三十四条 緊急時対策所】 六十一条 緊急時対策所/1.18 緊急 時対策所	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第61条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第62条	【三十五条 通信連絡設備】 六十二条 通信連絡/1.19 通信連絡 に関する手順等	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、第62条に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。

大規模漏えい時の未臨界性評価手法について

## 目 次

1. はじめに
2. 評価モデルの考え方
3. 最適評価手法を用いた未臨界性評価
4. SCALE6.0 へのインプット条件とパラメータの関係性
  - 4.1. 燃料条件
  - 4.2. 水分条件
5. 気相部水分条件の計算方法
  - 5.1. 気相部水密度の算出方法
  - 5.2. 液膜厚さの算出方法
6. 基本ケース条件の設定方針
7. 基本ケース条件に対する不確かさ要因の考慮要否判定
8. 各パラメータの基本ケース条件および不確かさを考慮した条件の設定
  - 8.1. 燃料条件の設定
    - 8.1.1. 「燃料配置」の設定
  - 8.2. 水分条件の設定
    - 8.2.1. 「流量」の設定
    - 8.2.2. 「流入範囲・流量分布」の設定
    - 8.2.3. 「燃料集合体内への流入割合」の設定
    - 8.2.4. 「液膜となる流量の割合」の設定
    - 8.2.5. 「液膜厚さ評価式」の設定
    - 8.2.6. 「放水の液滴径」の設定
    - 8.2.7. 「海水中の塩素濃度」の設定
9. 各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果
10. 重畳させる不確かさの検討
11. 基本ケースおよび感度解析ケース条件一覧

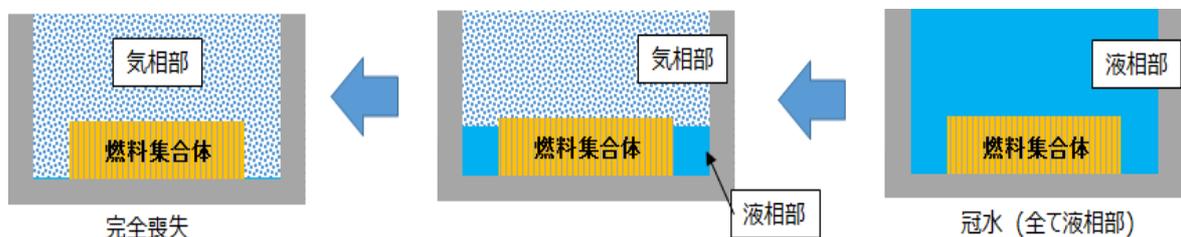
## 1. はじめに

高浜1, 2号炉の使用済燃料ピット(SFP)における大規模漏えい時には、SFPの水位が低下するとともに、事故時向けに整備される手順に基づく注水および放水対応がなされる。このため、注水・放水時のSFP雰囲気は、液相部(ピット水)と気相部(注水・放水された水と蒸気)の2相に分かれ、ピット水の漏えいが進むにつれ徐々に液相部水位が低下していく。既許可における大規模漏えい時の未臨界性評価では、SFP内における水密度状態を包絡する条件として、液相、気相を区別せず、SFP全体の水密度を一様として水密度範囲 $0.0\sim 1.0\text{g/cm}^3$ の条件で評価をしていた(第2-1図)。

本申請における大規模漏えい時の未臨界性評価では、実態により則して、SFP雰囲気が液相部と気相部に分かれた状態で水位が低下するという現象に合わせ、残存しているピット水より上部の気相部とピット水のある液相部の2相に分けた状態で、液相部水位を変化させて評価する(第2-2図)。さらに今回未臨界性評価では、SA有効性評価に準じ最適評価手法を用いた評価を実施する。本資料では、最適評価手法および設定条件について説明する。



第2-1図 既許可における未臨界性評価体系



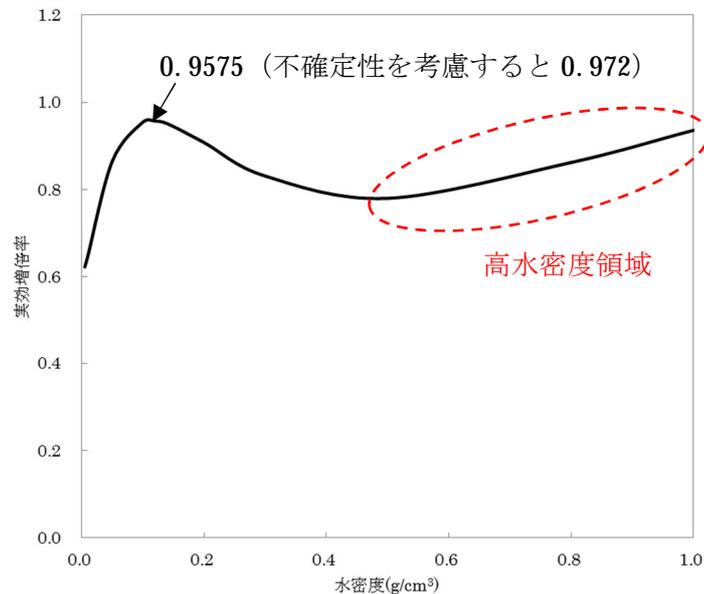
第2-2図 実態により則した未臨界性評価体系

## 2. 評価モデルの考え方

大規模漏えい時の実態により則した状態として、液相部(ピット水)と気相部(注水・放水された水と蒸気)の2相に分け、それぞれに適切な水分条件を設定したうえで、液相部水位を変化させた評価を行う。また、燃料体の上部および体系側面の反射体の設定にあたっては、中性子の漏れが少なくなるように、低水密度の状態であっても保守的に300mmの水反射体を設定し、下部には1000mmのコンクリート反射体を設定する。

なお液相部について、SFPは大気圧下であることから、実態としては崩壊熱によりピット水の沸騰が発生し、液相部の水密度が $1.0\text{g/cm}^3$ から低下すると考えられる。第2-3図に既許可の水密度を $0.0\sim 1.0\text{g/cm}^3$ に変化させた際の未臨界性評価結果を示すが、水密度が高い範囲(赤点線枠の

範囲) においては水密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  において実効増倍率が最大値となることから、液相部の水密度については  $1.0 \text{ g/cm}^3$  を設定する。



第 2-3 図 既許可における未臨界性評価結果

### 3. 最適評価手法を用いた未臨界性評価

54 条 2 項に係る大規模漏えい時の臨界防止要求への適合性を確認することを踏まえ、今回評価では最適評価手法を採用することとし、気相部には、重大事故等対応として実施される注水・放水手順において用いる設備の特徴や、放水された水の状態等を踏まえた、事故時の実態により則した状態（基本ケース）を設定する。基本ケースで設定する条件に対し実効増倍率を厳しくする不確かさがある場合には、当該不確かさが発生した場合の影響を考慮した感度解析ケース（不確かさを考慮したケース）を設定し、その未臨界性を評価する。

なお感度解析ケースの設定に当たっては、各不確かさの従属性・独立性を踏まえ、重畳させるべき不確かさを検討する。

### 4. SCALE6.0 へのインプット条件とパラメータの関係性

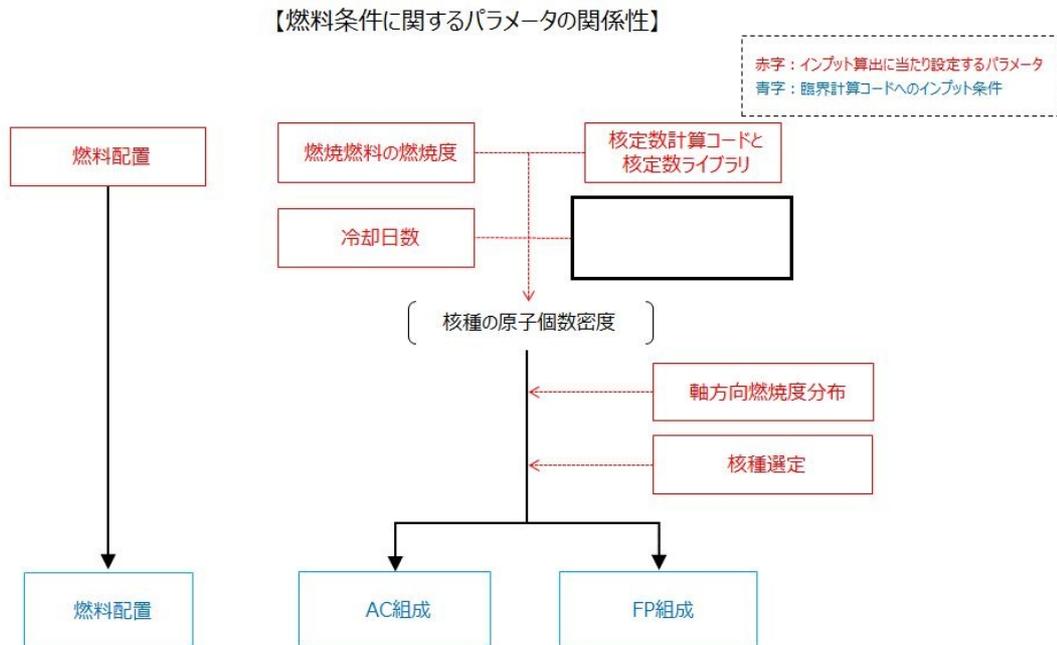
重大事故等対応として実施される注水・放水手順において用いる設備の特徴等を踏まえた各パラメータより臨界計算コード (SCALE6.0) へのインプット条件を算出する。燃料条件および水分条件 (気相部) に関する各パラメータの状態は以下の通り。

#### 4.1. 燃料条件

SFP 内には基本的に、燃料取替の都度、次サイクルに装荷する新燃料を沈めこむ運用としており、その他の燃料は照射燃料である。燃料集合体が照射されることにより、燃料集合体内の AC

組成、FP 組成等の条件が変化することから、SCALE6.0 への入力条件として燃焼燃料の存在を考慮する場合は、当該入力条件の算出に使用するパラメータによる影響の有無を確認することとなる。

燃料条件について、入力条件と入力条件算出に当たり設定するパラメータとの関係を第 2-4 図に示す。



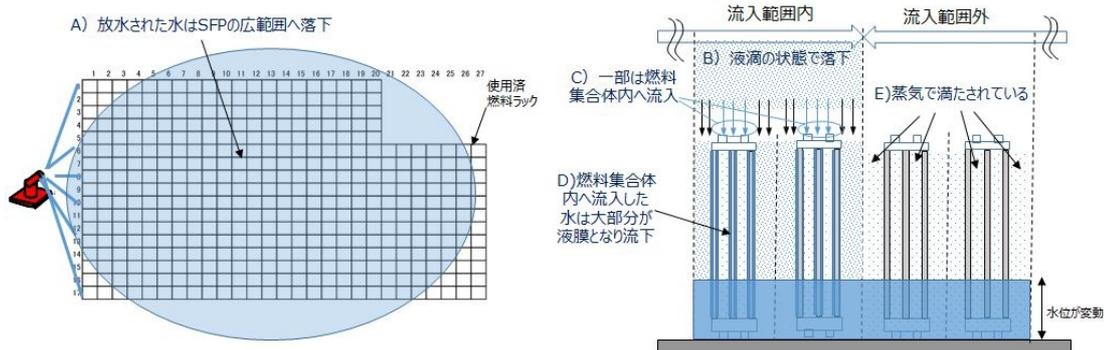
第 2-4 図 インput条件とinput条件算出に当たり設定するパラメータの関係（燃料条件）

#### 4.2. 水分条件

水分条件は主として、重大事故等対応として実施される注水・放水手順において用いる設備の、流量や放水形状等による性質による影響を受けるが、ここで SFP への流入流量が大きい、放水設備を用いた SFP への放水を実施した場合の現実的な気相部の状態は以下のように考えられる。放水設備を用いた場合の、重大事故等時の実態に則した状態の概略を第 2-5 図に示す。

- A) 放水された水は、SFP 上の広範囲に落下する。
- B) 放水された水は落下の過程で分裂し、液滴となって SFP 内へ流下する。
- C) SFP 内に流入した液滴は、一部は燃料集合体内に流入し、残りは燃料集合体間を液滴として落下する。
- D) 燃料集合体内に流入する水は上部構造物と接触することにより、大部分が液膜となって燃料棒を流下する。
- E) 放水された水の流入範囲外は、崩壊熱によるピット水の蒸散等に伴い発生する蒸気で満たされている。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 2-5 図 放水設備を用いた場合の重大事故等時の実態により則した状態 概略

よって **SCALE6.0** のインプットとしては、A) ～D) に示すような、重大事故等対応時における実態により則した状態にて解析するために、第 2-6 図に示す「液膜厚さ」、「燃料集合体内気相部水密度」、「燃料集合体外気相部水密度」、「流入範囲外気相部水密度」を設定する。

上記の水分条件に関するインプット条件は第 2-7 図にも示すように、以下の通り求める。なお「」はインプット条件を算出するに当たり設定するパラメータ、[ ] はそれらパラメータを用いた計算の途中過程において算出される値を示す。また海水由来の流量には、「海水中の塩分濃度」により求まる塩素の存在を考慮する。

### I. 液膜厚さ

- ・ 設備からの「流量」、水の「流入範囲・分布」から[ラックピッチあたりの流量]を求め、当該流量に「燃料集合体内への流入割合」を乗じることで[燃料集合体内に流入する流量]を求める。
- ・ 燃料集合体内に流入する流量に「液膜となる流量の割合」を乗じ、[液膜になる流量]を求め、「液膜厚さ評価式」により流量（液膜レイノルズ数）を液膜厚さへ換算する。

### II. 燃料集合体内気相部水密度

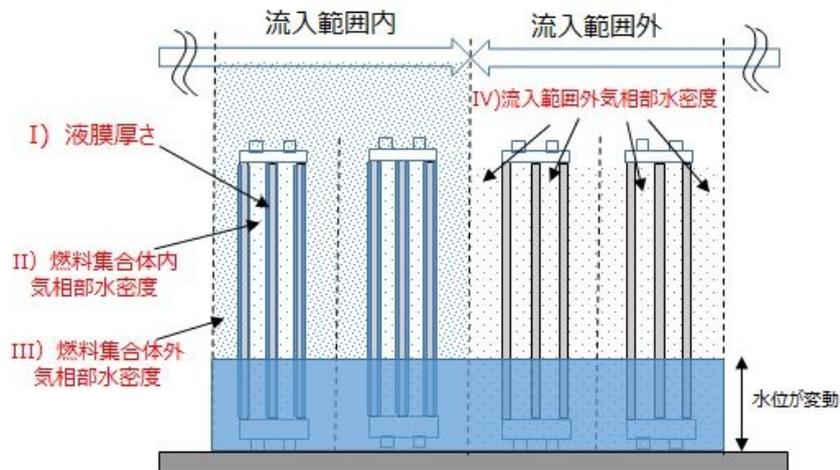
- ・ [燃料集合体内に流入する流量]から、[液膜になる流量]を減じることで、燃料集合体内を[液滴のまま落下する流量]を求める。
- ・ 落下する「液滴の径」より求まる液滴の下降速度、および液滴流量などを用い燃料集合体内気相部水密度を求める。

### III. 燃料集合体外気相部水密度

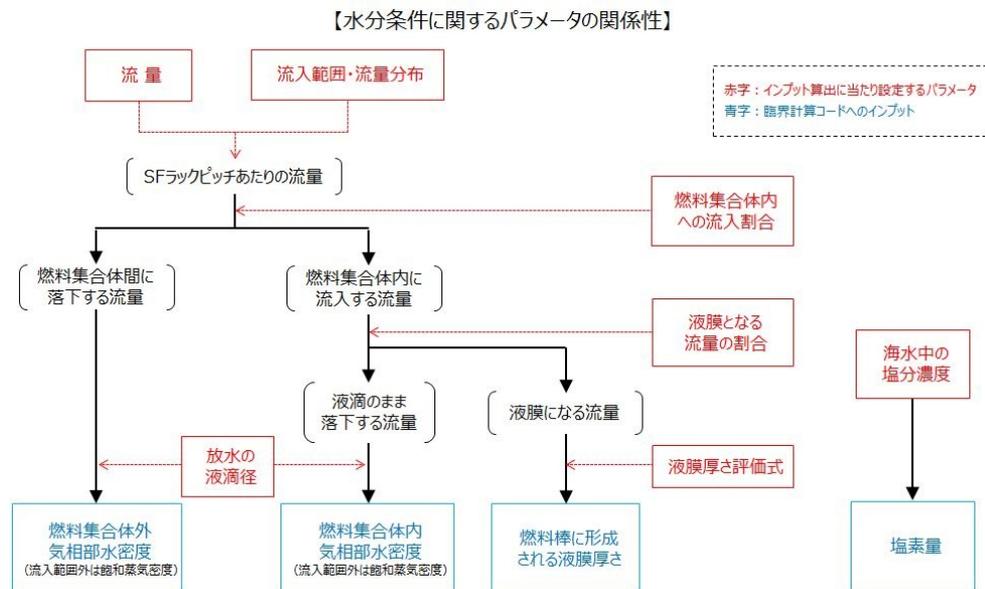
- ・ [ラックピッチあたりの流量]から、[燃料集合体内に流入する流量]を減じることで、燃料集合体間を落下する流量を求める。
- ・ 落下する「液滴の径」より求まる液滴の下降速度、および液滴流量などを用い燃料集合体外気相部水密度を求める。

#### IV. 流入範囲外気相部水密度

- ・ 流入範囲外には設備由来の水は流入しないことから、飽和蒸気（100℃、1atm の飽和蒸気密度 0.0006g/cm<sup>3</sup>）とする。



第 2-6 図 SCALE6.0 へインプットする気相部水分条件の概要



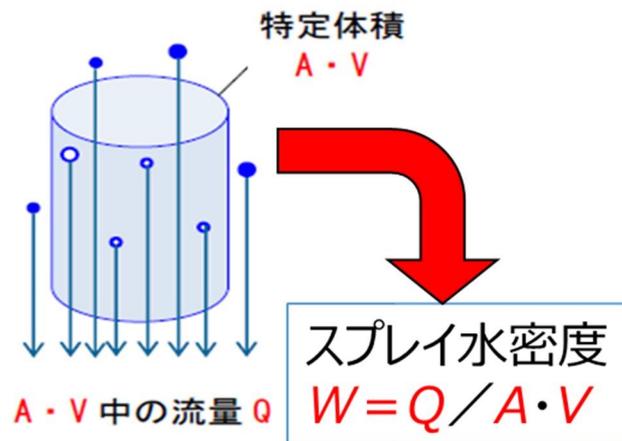
第 2-7 図 インプット条件とインプット条件算出に当たり設定するパラメータの関係（水分条件）

## 5. 気相部水分条件の計算方法

インプット条件のうち液膜厚さについては、燃料集合体内に流入する水の流量のうち、液膜となって流下する流量から算定し、また各箇所を設定する気相部水密度は、単位面積あたりに流入する液滴の流量および流入液滴の径より求まる液滴平均下降速度より算出する。ここでは、気相部水密度および液膜厚さの算出方法を示す。

### 5.1. 気相部水密度の算出方法

気相部水密度は、SFPへ流入する液滴が空間を占める割合として算出する。断面積 $A[\text{cm}^2]$ 当たりの流入流量を $Q[\text{cm}^3/\text{s}]$ とし、液滴の下降速度を $V[\text{cm}/\text{s}]$ とする場合、単位時間に断面積 $A[\text{cm}^2]$ を通過する液滴が占める空間体積は、 $A \cdot V[\text{cm}^3]$ となる。常温・常圧での水密度は $1[\text{g}/\text{cm}^3]$ であるため、同体積中に $Q[\text{cm}^3]=Q[\text{g}]$ の水が存在することとなり、水密度 $W$ は、 $Q/(A \cdot V)[\text{g}/\text{cm}^3]$ となる。空間体積 $A \cdot V[\text{cm}^3]$ 中あたりの流量 $Q[\text{cm}^3]$ の存在率を示す概要図を第2-8図に示す。液滴の下降速度を求めるためには、液滴径を定める必要があるため、事故時にSFPへ注水・放水を行うため使用する設備のうち、流入液滴の径が一番小さくなるスプレー設備を用いた試験により液滴データを取得した。試験の概要を別紙3に、液滴径を用いた液滴下降速度の算出方法を別紙4に示す。



第2-8図 空間体積 $A \cdot V[\text{cm}^3]$ 中あたりの流量 $Q$ の存在率を示す概要図

また、重大事故等時のSFPにおける実際の環境条件が気相部水密度へ与える影響を加味するため、SFP内の上昇流、蒸気の凝縮、飽和蒸気を考慮する。

## 5.2. 液膜厚さの算出方法

燃料集合体の上部より流入してくる液滴は、ほとんどが上部ノズル等でまとまり、燃料棒等の構造物を伝って流下する。液膜の厚さは、流下流量や、構造物表面の摩擦によるせん断力の影響を受けることとなり、これら諸元により液膜厚さを求める評価式として種々の実験式が提唱されている。提唱されている液膜厚さ評価式の例を第 2-1 表に示す。以下の実験式は主に液膜レイノルズ数によりその適用範囲が定められている。

第 2-1 表 液膜厚さ評価式の例 (実験式)

基本式	式の種類	A	B
$N_T = A(4Re)^B$	Nusselt	0.909	1/3
	Kapitza	0.843	1/3
	brotz	0.0682	2/3
	Zhivai kin	0.141	7/12
	Brouer	0.208	8/15
	Feind	0.266	1/2

$N_r$ ,  $Re$  はそれぞれ無次元液膜厚さ[-]、液膜レイノルズ数[-]であり、以下の式で表される。

$$N_T = (g/\nu^2)^{1/3} \bar{b} \quad , \quad Re = \Gamma/\nu$$

ここで、 $g$  は重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $\Gamma$  は単位幅当たり液膜流量[m<sup>2</sup>/s]、 $\nu$  は流体の動粘度[m<sup>2</sup>/s]である。

集合体内に流入する流量より液膜レイノルズ数を求めたうえで、適切な評価式を用い無次元厚さを求め、最終的に平均液膜厚さを求める。

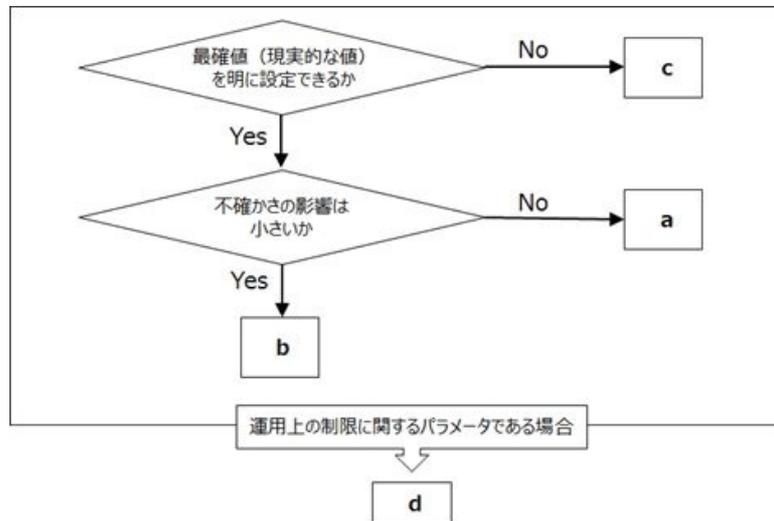
## 6. 基本ケース条件の設定方針

基本ケースの設定方針は、SA 有効性評価の審査ガイド(実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド)に準じ、以下の通りとする。各パラメータに対する基本ケース条件の設定方針を定めるフロー図を第 2-9 図に示す。

### 【基本ケースの設定方針】

- 原則として最確値（現実的な値）を設定する。
- 不確かさが評価結果へ与える影響が小さいと判断できる場合には、最確値に対し不確かさを保守的に見込んだ値を設定する。
- 現実的な値に幅がある場合には、取り得る保守的な値を設定する。

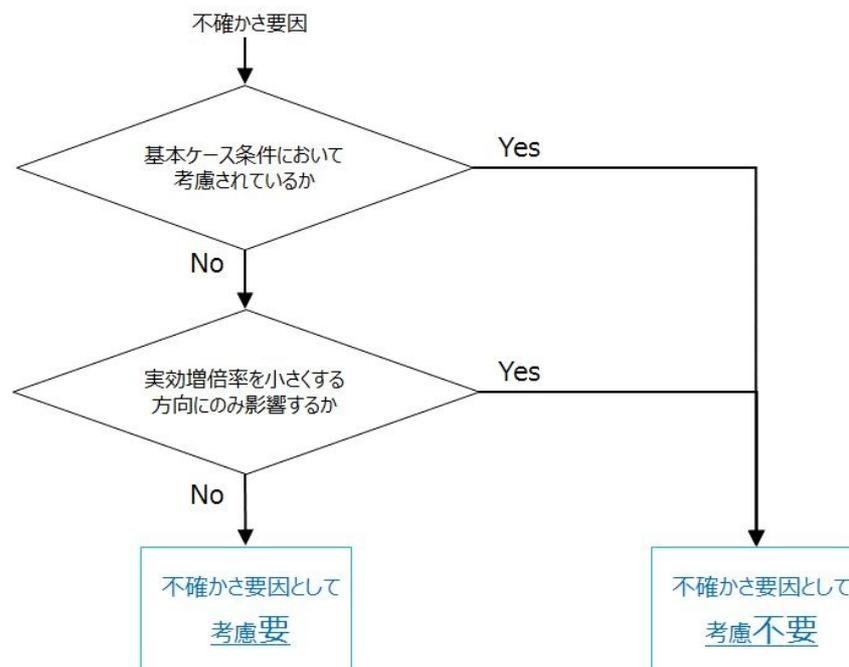
- d. 運用上の制限に関連するパラメータについては、最確値に対し不確かさを保守的に見込んだ値を設定する。



第 2-9 図 基本ケース条件設定フロー

### 7. 基本ケース条件に対する不確かさ要因の考慮要否判定

基本ケース条件は種々の不確かさ要因に影響を受け、その値が変化する。今回未臨界性評価においては、各パラメータの値を変動させる不確かさ要因を抽出したうえで、第 2-10 図に示すフロー図に基づき、評価における考慮要否を判定する。



第 2-10 図 基本ケース条件に対する不確かさ要因の考慮要否判定フロー

## 8. 各パラメータの基本ケース条件および不確かさを考慮した条件の設定

SCALE6.0へのインプット条件を算出するための各パラメータについて、基本ケース条件および不確かさを考慮した条件を設定する。なお条件設定に当たっては、まず第2-9図に示すように、各パラメータの特徴を踏まえた基本ケース条件の設定方針を定めたうえで、当該方針を踏まえ基本ケース条件を設定する。その後、各パラメータに発生する不確かさ要因を抽出したうえで、第2-10図に示す判定フローに基づき不確かさ要因の考慮要否を判定し、考慮要となった不確かさについて、その影響を考慮した条件を設定する。

### 8.1. 燃料条件の設定

#### 8.1.1. 「燃料配置」の設定

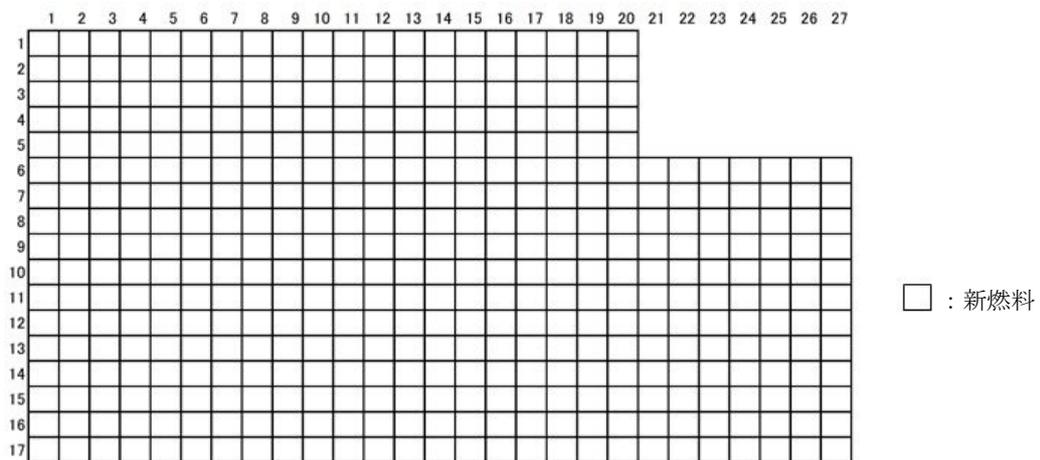
##### (a) 基本ケース条件の設定方針

SFP内には様々な燃焼度の燃料集合体が貯蔵され、また燃料取替を実施するたびに燃料配置は変化する。よって実運用では0~55GWd/tの燃焼燃料をランダムに貯蔵することとなり、事故時における最適状態を定め難い。

よって本パラメータの基本ケース条件の設定方針はc.とする。

##### (b) 基本ケース条件の設定

実運用を踏まえた保守的な条件として、すべてのラックに新燃料を貯蔵する設定とする。当該燃料配置条件を第2-11図に、実運用下と基本ケース条件での燃料貯蔵体数の比較を第2-2表に示す。



第2-11図 「燃料配置」基本ケース条件

第 2-2 表 燃料貯蔵体数比較 (3 ループ 55Gwd/t 平衡炉心での運用を仮定)

燃焼度 (BU) 区分 (Gwd/t)	BU<10	10 ≤ BU<20	20 ≤ BU<25	25 ≤ BU<30	30 ≤ BU<40	40 ≤ BU	計
実運用下 (SF ラック 満杯想定) ※	44 体	44 体	8 体	20 体	24 体	17+267 体	424 体
基本ケース 条件	424 体	0 体	0 体	0 体	0 体	0 体	424 体

※ 貯蔵される燃料は、1 炉心分の取り出し燃料 157 体 (燃焼度別体数は 55Gwd/t 燃料平衡炉心ベース) と使用済燃料 267 体とした。

(c) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「燃料配置」に対する不確かさ、および当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下の通り記載する。

(i) 貯蔵燃料燃焼度の多様性

基本ケースでは新燃料のみを貯蔵することを仮定しているが、実運用においては 0～55Gwd/t の種々の燃焼度である燃料が貯蔵される。燃焼の進んだ燃料は新燃料と比較し、核分裂性物質の減損等により反応度が低下する。よって当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

(ii) 燃料貯蔵体数

基本ケースでは全てのラックに燃料が貯蔵されることを仮定しているが、実運用における燃料貯蔵体数はラック容量以下となる。燃料貯蔵体数が減ると、体系内に存在する核分裂性物質の量が減ることとなる。よって当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

(d) 不確かさを考慮した条件について

(c) に示す不確かさは全て、基本ケース条件に対し実効増倍率を低下させる方向にのみ影響するものであるため、不確かさを考慮した条件の設定は不要となる。

8.2. 水分条件の設定

8.2.1. 「流量」の設定

(a) 基本ケース条件の設定方針

重大事故等対応用に整備している SFP への注水・放水に係る手順を実施した際の流量を考慮するが、手順によっては注水ラインを共有しており、単独実施時と比較して系統圧損の違いにより流量が変動し、また手順の組み合わせによっても大きく変動することから、事故時における最適状態を定め難い。

よって本パラメータの基本ケース条件の設定方針は c. とする。

#### (b) 基本ケース条件の設定

以下の条件に基づき算出した流量として、 m<sup>3</sup>/h を設定する。

- ・重大事故等対応用に整備している SFP への注水・放水に係る手順を全て同時に実施すると仮定する。
- ・系統内に複数のポンプが存在する場合、ポンプ起動台数は 1 手順につき 1 台とする。
- ・各手順の流量には、基本的にポンプ揚程曲線を用い系統圧損等を踏まえ評価した値（実測値があるものは実測値）を使用する。

なお流量設定の詳細は別紙 2 に示す。

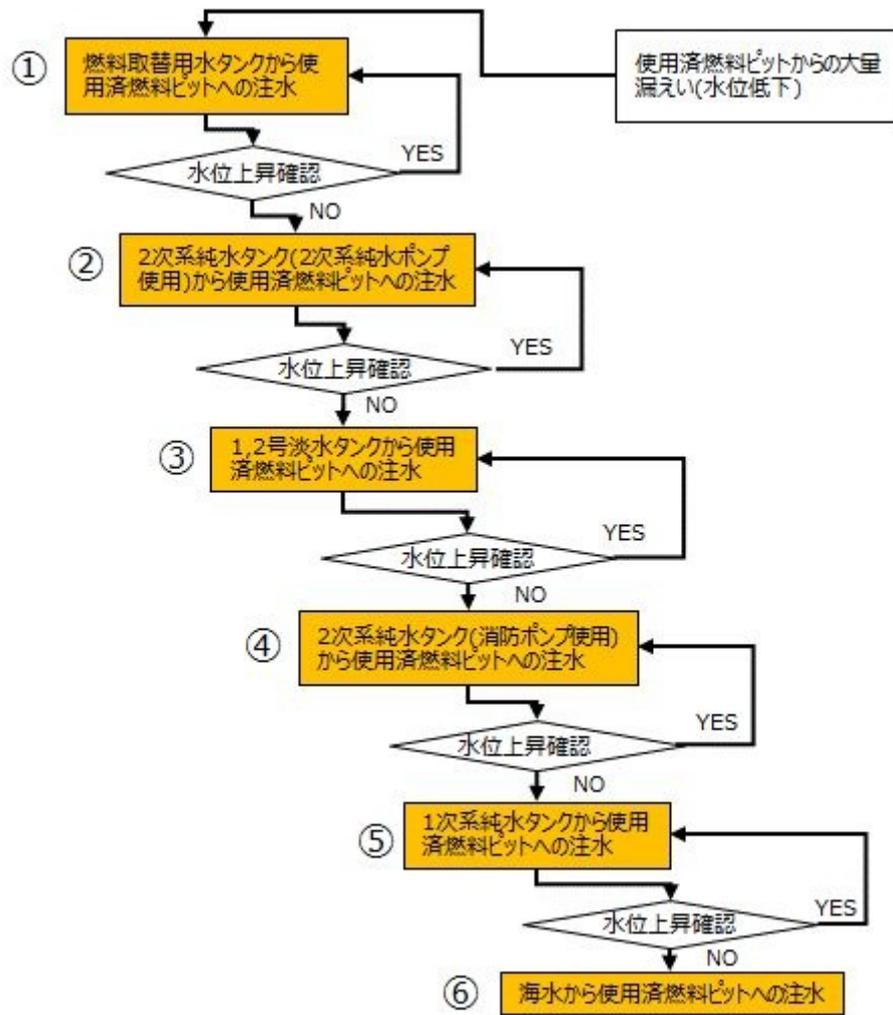
#### (c) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「流量」に対する不確かさ、および当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下の通り記載する。

#### (i) 注水・放水手段の組み合わせ

基本ケース条件では重大事故等対応用に整備している SFP への注水・放水に係る手順を全て同時に実施するとした値を設定しているが、実際の重大事故等時においては、第 2-12 図のフローの通り、SFP の事故状況に応じ必要な対応を実施することとなる。重大事故等時の状況によっては使用できない手順も発生しうり、またフロー上流の手順を実施しても水位の上昇が確認できない場合には、上流の手順による対応を停止することなく下流の手順を実施する可能性がある。これらの要因により注水・放水手段の組み合わせは変化するが、この場合 SFP への流入流量は、全ての手順を同時に実施するとした基本ケース条件よりも小さくなる。流量が小さくなると、体系内に流入する減速材として寄与する水の量が減ることとなる。よって当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 2-12 図 SFP への注水に係る手順の実施フロー

(ii)1 手順あたりのポンプ台数

基本ケース条件ではポンプ起動台数を1手順につき1台としている。手順の具体的記載通り対応を実施した場合、ポンプ起動台数は1台となるものの、運転ポンプを切り替える際には一時的に系統内に設置されるポンプ複数台分の流量が吐出される可能性がある。

ポンプの起動台数が増えると当該手順における流量が増加することになるため、当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を増加させる方向へ影響する。

(d) 不確かさを考慮した条件について

(c)に示す不確かさのうち、実効増倍率を増加させる方向へ影響する不確かさである「1手順あたりのポンプ台数」を考慮した条件として、m<sup>3</sup>/hを設定する。なお流量設定の詳細は別紙2に示す。

## 8.2.2. 「流入範囲・流量分布」の設定

(a) 基本ケース条件の設定方針

流量の大部分を占める放水砲については、設備の設置位置により流入範囲が変わり、またそれに伴いSFPに流入する流量の分布も影響を受けることから、最確状態を定め難い。よって本パラメータの基本ケース条件の設定方針はc.とする。

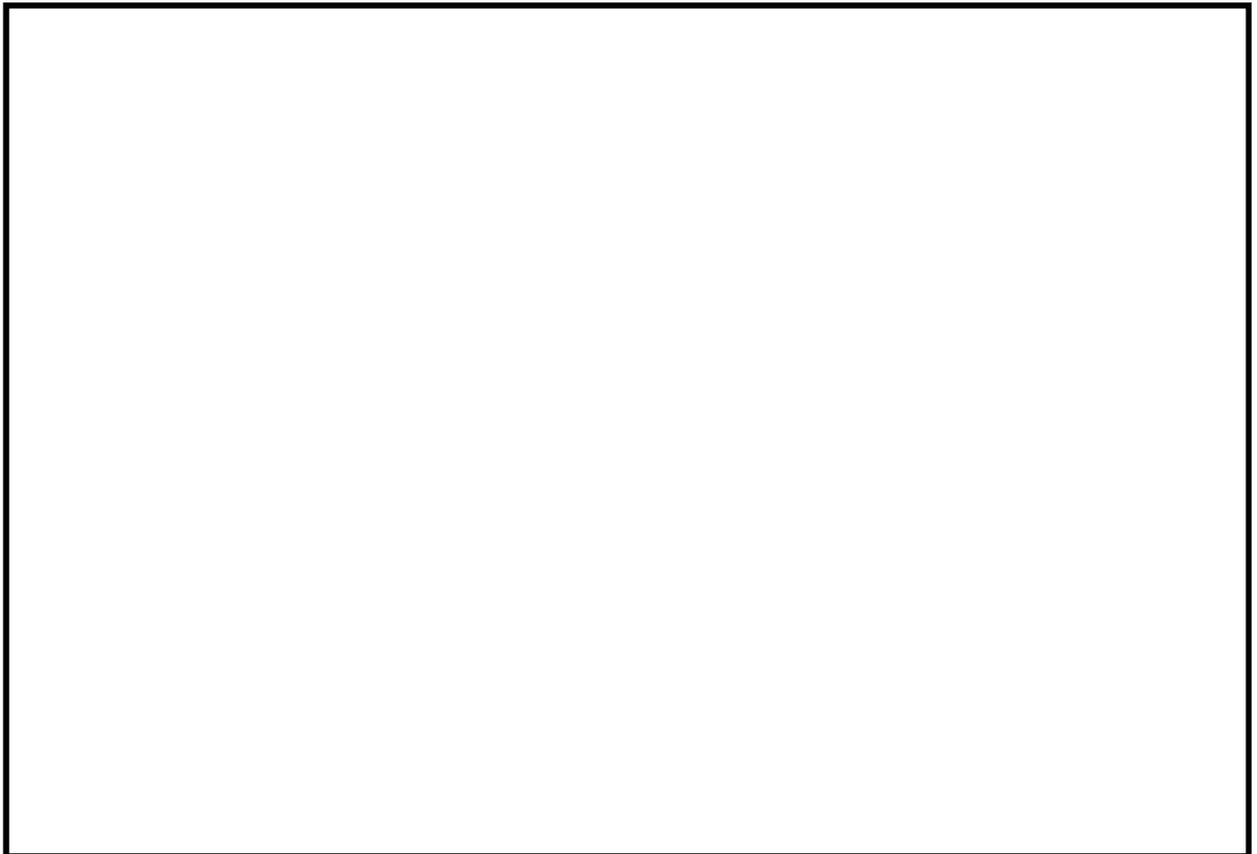
(b) 基本ケース条件の設定

放水砲による放水における「流入範囲・流量分布」については、放水時の現実的な放水範囲等を踏まえたうえで保守的に設定する。現実的な流量分布を求めるため、着水範囲に関する条件は放水砲メーカー作成の性能曲線を設定したうえで、着水範囲内の流量分布は文献(石油タンク火災消火時における大容量放水及び泡放射軌跡の予測モデルの構築、宮下達也(2014))を参考に、放水方向(射程方向)にはRosin-Rammler分布を、放水の直交方向(射幅方向)には正規分布を用いて規格化した。得られた流量分布を第2-13図に示す。現実的な流量分布におけるピーク流量(単位面積当たり)は以下の通り約m<sup>3</sup>/hであった。

<現実的な流量分布におけるピーク流量(単位面積当たり)>

$$\text{ m}^3/\text{h} \times 0.25 \times 0.30 \div 16 \text{ m}^2 = \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$$

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 2-13 図 放水砲による放水における現実的な流量分布

一方で、燃料貯蔵設備である SF ラックは放水砲による現実的な流入範囲よりも小さく、仮に全流量が SF ラック上へ一様に流入すると仮定した場合の流量（単位面積当たり）は、以下の通り約  $11\text{m}^3/\text{h}$  であり、現実的な流量分布を考慮した場合のピーク流量を上回る。

<全流量が SF ラック上へ一様に流入すると仮定した場合の流量（単位面積当たり）>

$$\square \text{ m}^3/\text{h} \div (\square \text{ m} \times \square \text{ m} \times 424) \approx 11 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$$

よって基本ケース条件としては、現実的な流入分布を踏まえた保守的な条件として、全流量を SF ラック面積で割った値を用いる。

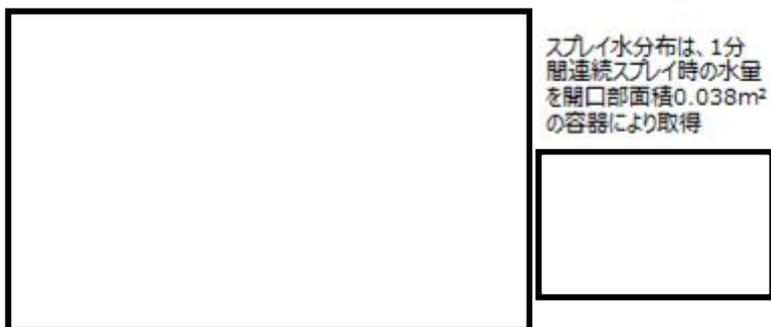
なおスプレーヘッドによるスプレー時の流入範囲・流量分布についても、以下の通り現実的な流量分布におけるピーク流量（単位面積当たり）より、全流量を SF ラック面積で割った値のほうが大きいため、放水砲と同様に全流量を SF ラック面積で割った値を用いる。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

<放水分布に基づくピーク近傍の流量（単位面積当たり）>

第 2-14 図に示すメーカー試験結果を元に、「300cc 以上」を「500cc」と大きく仮定すると、ピーク流量は以下の通り  $0.79\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$  と求まる。

$$500 \text{ cm}^3/\text{min} \times 60 \times 10^{-6} \div 0.038 \text{ m}^2 = 0.79\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$$



第 2-14 図 スプレイヘッドによる放水分布 メーカー試験結果

<全流量が SF ラック上へ一様に流入すると仮定した場合の流量（単位面積当たり）>

以下の通り  $0.88\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$  と求まる。

$$\square \text{ m}^3/\text{h} \div (\square \text{ m} \times \square \text{ m} \times 424) = 0.88\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$$

(c) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「流入範囲・流量分布」に対する不確かさ要因、および当該不確かさ要因が実効増倍率へ与える影響の方向について以下の通り記載する。

(i) 注水・放水手段の組み合わせ、および 1 手順あたりのポンプ台数

放水時の着水面積については、設備からの吐出流量による変動することになる。よってパラメータ「流量」の不確かさ要因である、注水・放水手段の組み合わせ、および 1 手順あたりのポンプ台数が、「流入範囲・流量分布」に対する不確かさ要因となる。

設備からの吐出流量が増加する場合、吐出された水の着水面積（流入範囲）は広がることとなり、すなわち SF ラック内に流入しない流量が増えることとなる。従って本不確かさ要因は、流入範囲を広範囲化し体系内の水分量が少なくなる方向、すなわち実効増倍率を低下させる方向にのみ発生する。

(ii) 放水分布のばらつき

実機放水砲による放水は、第 2-13 図に示すような流量分布を有するため、SF ラック毎に単位面積当たりの流量が異なることになるが、基本ケース条件としては現実的な流量分布に基づ

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

くピーク流量を包含するような条件として、放水砲による全流量が SF ラック上に一様に流入したとして、放水砲流量を SF ラック面積で割った値を使用している。

よって現実的な分布のばらつきを考慮する場合、全ラックにおいて単位面積当たりの流入流量が低下することになるため、本不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

### (iii) スプレイ分布のばらつき

実機スプレイヘッドによる放水は、第 2-14 図に示すような流量分布を有するため、SF ラック毎に単位面積当たりの流量が異なることになるが、基本ケース条件としては現実的な流量分布に基づくピーク流量を包含するような条件として、スプレイヘッドによる全流量が SF ラック上に一様に流入したとして、スプレイヘッド流量を SF ラック面積で割った値を使用している。

よって現実的な分布のばらつきを考慮する場合、全ラックにおいて単位面積当たりの流入流量が低下することになるため、本不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

### (iv) 風の影響①

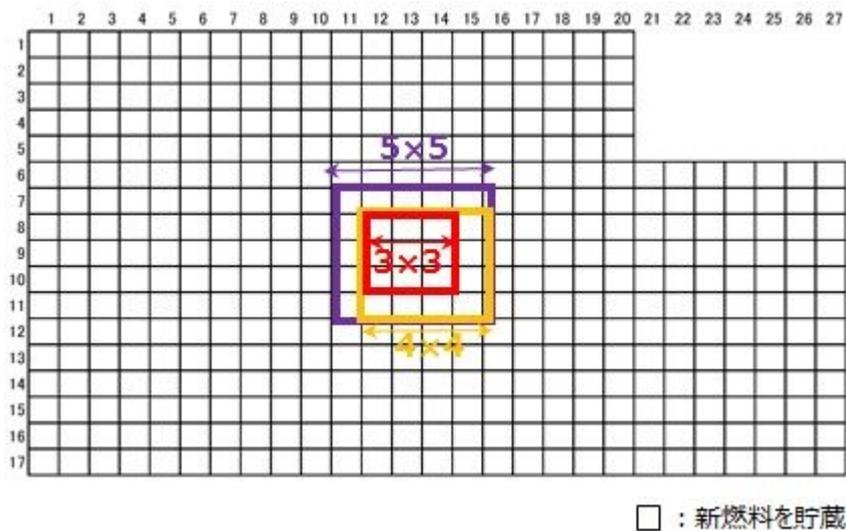
落下する液滴に対し風により力が加わり水平方向の移動が促進されることで、流入範囲・流量分布は影響を受けることとなり、風向きや放水方向によっては放水範囲は狭まりうる。風向きや放水方向等による組み合わせは無数にあることから、風の影響により流入範囲がどこまで狭まるかは定め難い。

流入範囲が狭まることにより、放水範囲内に含まれる燃料集合体の数（ウラン量）が減ることで実効増倍率が低下する効果と、燃料集合体 1 体当たりに流入する水量（減速材）が増え実効増倍率が増加する効果を持つ。よって当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を増加させる方向に影響しうる。

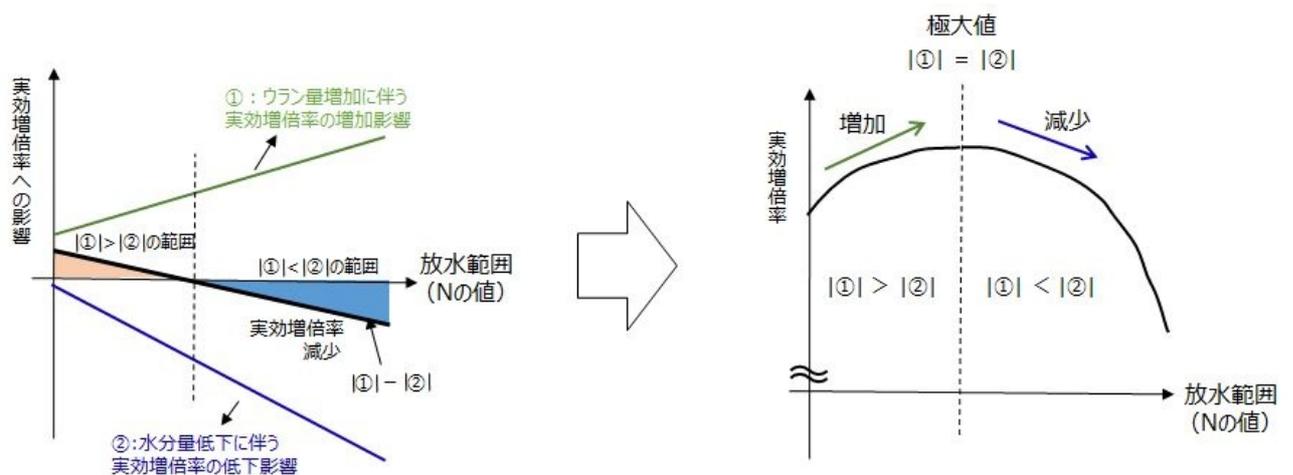
### (d) 不確かさを考慮した条件について

(c) に示す不確かさのうち、実効増倍率を増加させる方向へ影響しうる不確かさである「風の影響①」を考慮した条件として、全流量が SFP の局所領域に集中するとした条件を設定する。

実効増倍率を高くするため、局所領域は SFP 中心部に設定する。また(c)に示すように、流入範囲の変化は実効増倍率を増加あるいは低下させる、相反する効果を持つことから、局所領域がどの程度の広がりを持った場合に実効増倍率が最大になるかを確認するため、第 2-15 図に示す通り、水が集中する範囲 (N×N) を順次広げていき、局所範囲外の気相部水密は飽和蒸気密度として解析を行う。放水範囲の変化に伴う実効増倍率挙動の概念図を第 2-16 図に示す。



第 2-15 図 局所領域の設定



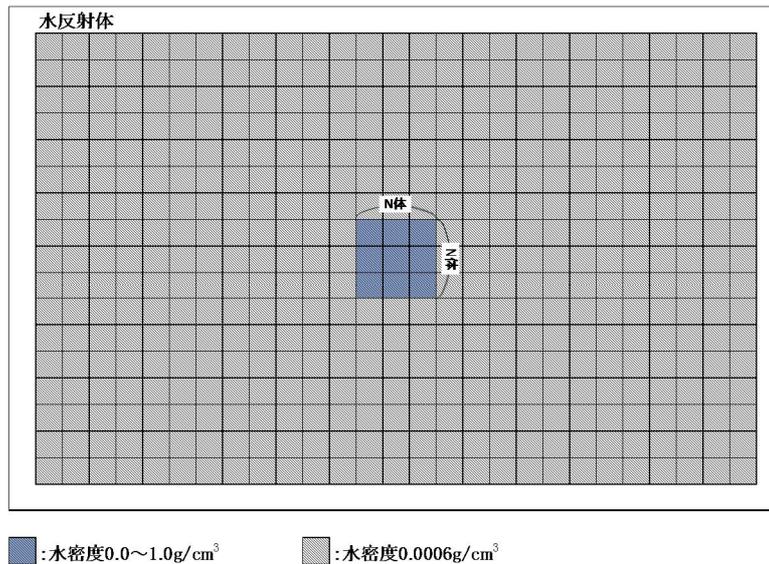
第 2-16 図 放水範囲 (N の値) の変化に伴う実効増倍率挙動 概念図

ここで、体系が臨界となるにはある一定量以上のウラン量が必要となることを踏まえ、N の値としては、いかなる一様な水密度でも臨界にならない\*ことを確認している N=3 から増やしていき、実効増倍率の低下傾向が把握できるまで解析を行う。

※高浜 1, 2 号炉のラック仕様で新燃料を敷き詰めた体系において、N×N ラック内の水密度を一様に 0~1g/cm<sup>3</sup> で変化させて実効増倍率を求め、製造公差や計算コード等の不確定性を考慮しても未臨界の判断基準を超えない範囲を確認した。解析体系を第 2-17 図に、評価条件を第 2-3 表に示す。

評価の結果、第 2-4 表に示す通り、3×3 ラックは判断基準の 0.98 を下回るが、4×4 ラック

では不確定性を考慮すると判断基準を超えることを確認した。なお、3×3 ラックでは、実効増倍率が水密度 1.0g/cm<sup>3</sup> で最大となっており、3×3 ラック外の水密度をより厳しい 1.0g/cm<sup>3</sup> に変更した場合においても、設計基準における純水冠水状態での評価結果 0.953(評価コードを PHOENIX-P/HIDRA、燃料の濃縮度条件を [ ]wt%とし、無限配列体系で評価した結果。不確定性を含まない値)から、実効増倍率は不確定性を考慮しても 0.98 を超えないため、3×3 ラックでは判断基準を下回るといふ評価結果に影響しない。



第 2-17 図 未臨界の判断基準を超えない範囲を確認する解析の評価体系

第 2-3 表 未臨界の判断基準を超えない範囲を確認する解析の条件

	計算条件
燃料仕様・配置	55GWd/t 燃料 (新燃料)
ラック仕様	ラック構造：アングル型 ラック材質：ステンレス鋼製 ラック配列：27×17 ラック
N×N ラック内水密度	0.0~1.0g/cm <sup>3</sup> で一様変化
N×N ラック外水密度	0.0006 g/cm <sup>3</sup>
垂直方向 計算体系	燃料領域：3660mm 燃料上部：水反射体 (300mm) 燃料下部：コンクリート反射体 (1000mm) [既許可に同じ]

第 2-4 表 ある狭い範囲を求めるための解析結果

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

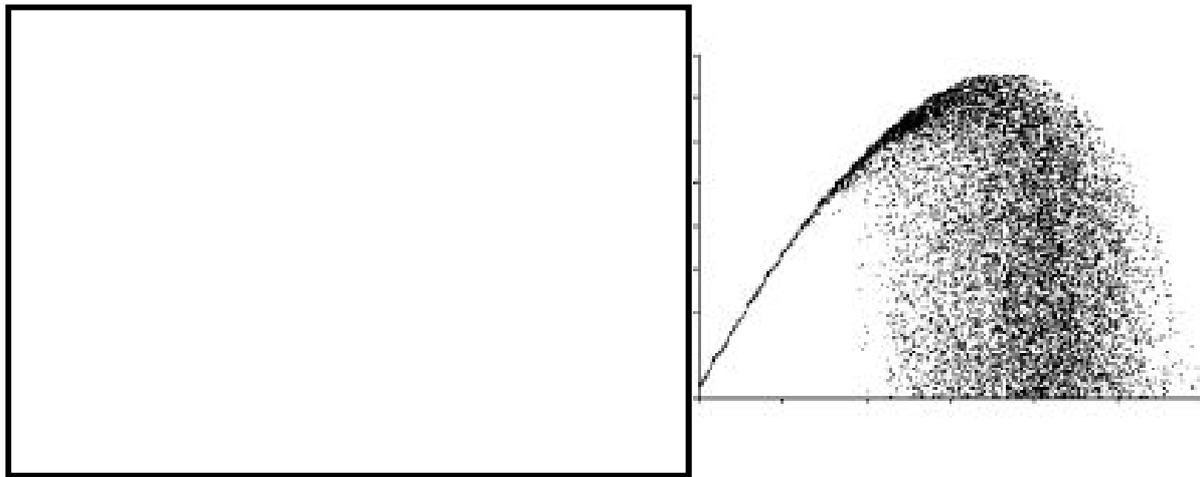
N×N ラック	実効増倍率（不確定性考慮なし）	備考
3×3 ラック	0.951	水密度 1.0g/cm <sup>3</sup> で最大
4×4 ラック	0.978	水密度 0.18g/cm <sup>3</sup> で最大

### 8.2.3. 「燃料集合体内への流入割合」の設定

#### (a) 基本ケース条件の設定方針

第 2-18 図に示す放水砲の放水軌跡（無風時）より、放水された水は SFP にほぼ垂直に流入すると想定できる。この場合、SFP 内に流入した水量のうち燃料集合体内に流入する水量の割合は、ラックピッチと燃料集合体の幾何形状により最確値を求めることができる。

よって本パラメータの基本ケース条件の設定方針は a. とする。



第 2-18 図 放水砲の放水軌跡（無風時）

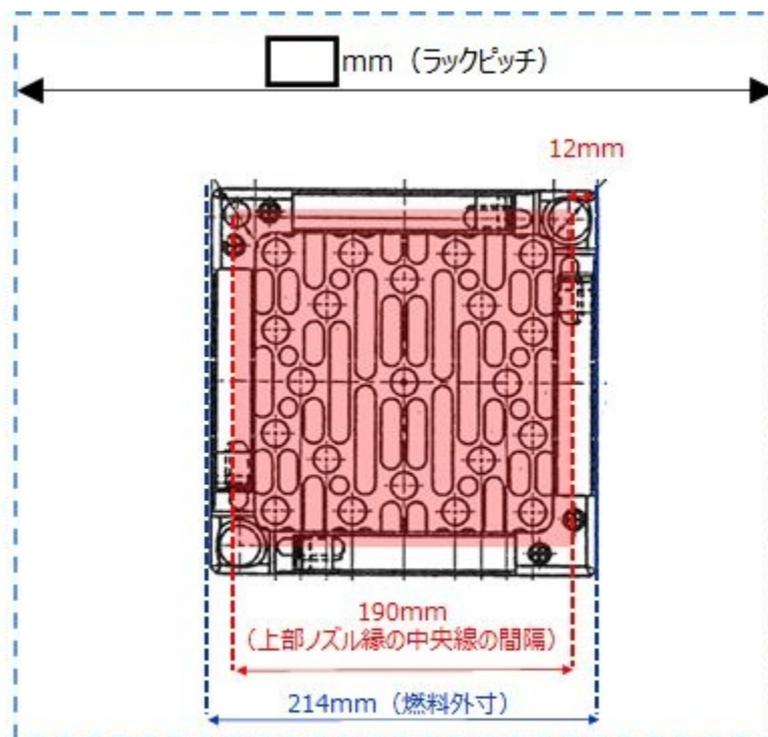
#### (b) 基本ケース条件の設定

第 2-19 図に示す通り、上部ノズル縁を真上から見た場合、燃料棒に通じる流路孔がほぼないことから、上部ノズル縁寸法の半分より外側の部分に落下した水は燃料集合体外へ弾かれると想定する。

よって、燃料流入割合は、ラックピッチ面積に対する赤色部面積の比として、

$$190 \times 190 \div (\square \times \square) \cong 23\% \text{ と設定する。}$$

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 2-19 図 燃料集合体に流入する流量割合 (イメージ)

(c) 不確かさ要因の抽出

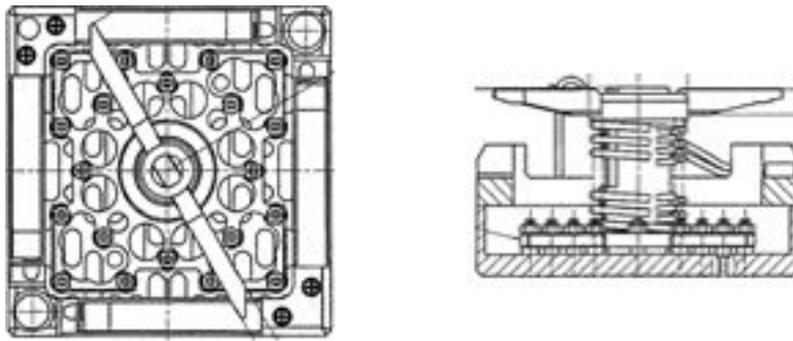
パラメータ「燃料集合体内への流入割合」に対する不確かさ、および当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下の通り記載する。

(i) 内挿物の存在

実機では、第 2-20 図に示すように SFP に貯蔵されている燃料の多くに内挿物が挿入されている。挿入された内挿物は燃料集合体の一部を覆うことから、内挿物が挿入されている場合、内挿物により燃料集合体外へ弾かれる流量が多くなる。燃料集合体外へ弾かれる流量が多くなるということは、燃料棒からのせん断力の作用を受けず落下する流量が増え、体系内に保持される水分が減ることとなるため、実効増倍率は低下する。

基本ケース条件は、内挿物の存在を考慮せず設定した条件であるため、当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 2-20 図 内挿物（プラグングデバイス）が挿入された燃料集合体の上面

(ii) 風の影響②

基本ケース条件としては無風時の放水軌跡を踏まえ液滴が垂直に落下する設定としたが、風の影響を受けることで水平方向の力が働き、燃料集合体に斜め方向から液滴が流入することが想定される。この場合、燃料集合体内に流入する水量が増える、すなわち燃料棒からのせん断力の作用を受ける水量が増え、体系中に保持される水分が増えることとなるため、当該不確かさは基本ケース条件に対し実効増倍率を増加させる方向に働く。

なおパラメータ「流量分布・流入範囲」の不確かさ要因としても風の影響があるが、流入範囲を局所化する風が吹く場合、流量が集中して落下することになるため、斜め方向で液滴が落下することは考え難い。また液滴を斜め方向から落下させるような風が吹く場合、放水範囲をより広げることになるため流量が局所化することは考え難い。よって「流入範囲を狭める風の影響」（風の影響①）と「流入範囲を広げる風の影響」（風の影響②）は、別々の不確かさ要因として取り扱う。

(d) 不確かさを考慮した条件について

(c) に示す不確かさのうち、実効増倍率を増加させる方向へ影響する不確かさである「風の影響②」を考慮した条件として、斜め方向から液滴が流入してくることを想定し、以下の通り燃料集合体の幾何形状および放水の流入方向等を踏まえ 46% とする。

- ・ ラックに対する流入方向を、流入割合への影響が最大となるように 45° とした場合、SF ラックの構造を踏まえた液滴流入面積は、第 2-21 図に示す黄色部面積で表され、ラックピッチ面積に対する液滴流入面積の比は下式の通り 45.2% となる。

$$\text{流入方向 } 45^\circ \text{ の場合の液滴流入面積} \Rightarrow (\text{ } \square \text{ mm}^2) \div (\text{ } \square \text{ mm} \times \text{ } \square \text{ mm}) \times 100 \doteq 45.2\%$$

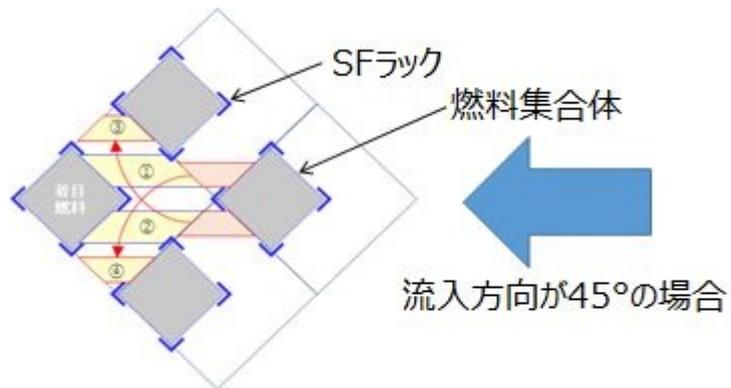
- ・ また斜めに落下してくるという液滴の流入形態を踏まえれば、流入割合への影響は第 2-22 図に示すように、面積に高さに乗じた体積の半分と見積もることができる。よって横風により斜

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

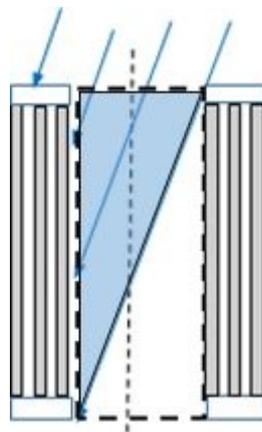
めから液滴が流入してくる影響は、下式のとおり約 **23%**となる。

横風による流入割合への影響  $\Rightarrow 45.2\% \div 2 = 22.6\% \Rightarrow 23\%$

- よって不確かさを考慮した「燃料集合体内への流入割合」として、基本ケース条件である **23%**に、横風の影響として **23%**を加算した値である **46%**を設定する。



第 2-21 図 流入方向 45° における液滴流入面積



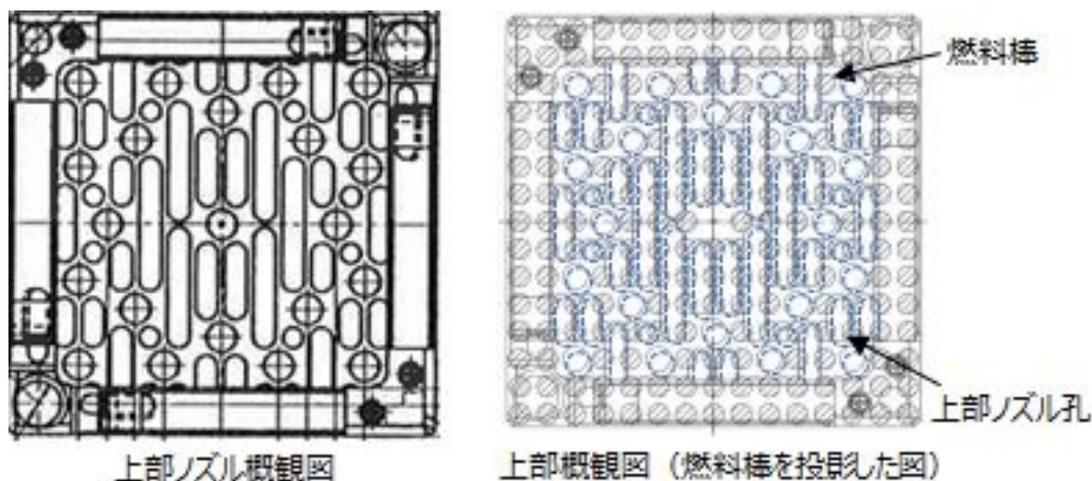
第 2-22 図 流入形態を踏まえた流入割合影響

#### 8.2.4. 「液膜となる流量の割合」の設定

##### (a) 基本ケース条件の設定方針

燃料集合体を真上から見たとき、第 2-23 図の通り燃料集合体下端までの経路はほとんど、上部ノズルや燃料棒等の構造物に遮られていることから、液滴のまま燃料集合体内の空間を落下する可能性は低く、大部分の液滴は構造物に付着してまとまり、構造物表面を流下することとなる。

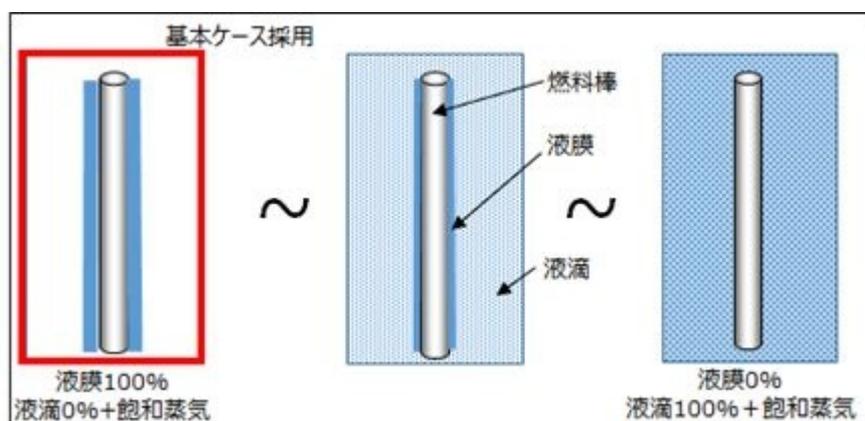
よって本パラメータの基本ケース条件の設定方針は a. とする。



第 2-23 図 燃料集合体上部の外形図

##### (b) 基本ケース条件の設定

最確値として 100% (燃料集合体内に流入する水は全て、液滴としてではなく、燃料棒等の構造物表面を流下する) とする。液滴と液膜の流量割合に関するイメージを第 2-24 図に示す。



第 2-24 図 液膜と液滴の割合 (イメージ図)

(c) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「液膜となる流量の割合」に対する不確かさ、および当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下の通り記載する。

(i) 一部の流量が液滴として落下

第 2-23 図に示す上部ノズル開口部のうちごく一部には、構造物に遮られず燃料集合体下端まで通ずる開口部があることから、燃料集合体内に流入する水の一部は液滴のまま落下すると考えられる。液滴のまま落下する流量が増えると、燃料棒からのせん断力の作用を受けず落下する流量が増え、体系内に保持される水分が減ることとなるため、実効増倍率は低下する。

基本ケース条件は、集合体内に流入した水がすべて液膜になるとする条件であるため、当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

(d) 不確かさを考慮した条件について

(c)に示す不確かさは、基本ケース条件に対し実効増倍率を低下させる方向にのみ影響するものであるため、不確かさを考慮した条件の設定は不要となる。

#### 8.2.5. 「液膜厚さ評価式」の設定

(a) 基本ケース条件の設定方針

燃料集合体を真上から見たとき、第 2-23 図の通り燃料集合体下端までの経路はほとんど、上部ノズルや燃料棒等の構造物に遮られていることから、液滴のまま燃料集合体内の空間を落下する可能性は低く、大部分の液滴は構造物に付着してまとまり、燃料棒を含む構造物表面を筋状に流下すると考えられる。しかし、筋状流下のような流動現象は非線形な挙動を示すため複雑であり、内部流動の最確状態は設定し難い。

よって内部流動に関する本パラメータの基本ケース条件の設定方針は c. とする。

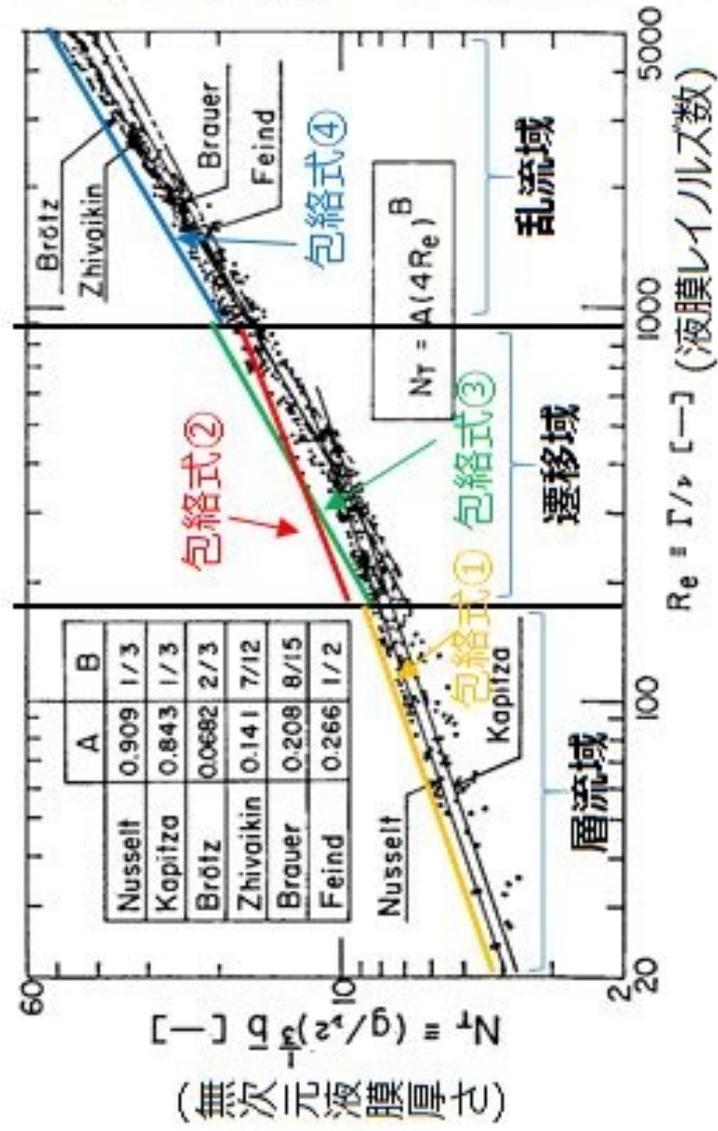
(b) 基本ケース条件の設定

流下形態としては、筋状流下時よりも燃料棒から作用するせん断力の合計値が大きくなる状態として液膜流下を想定する。液膜厚さの評価式としては第 2-1 表に示す通り種々の実験式が提示されているが、液膜が厚くなり燃料集合体内の水分量が多いほど実効増倍率が高くなるため、基本ケース条件の設定に当たっては第 2-25 図に示すように、文献<sup>\*</sup>に記載の実験データの全計測値を包含する評価式（包絡式）を設定する。具体的には、代表的な実験式である **Nusselt** の式および **Zhi vai kin** の式の傾き（第 2-25 図の **B** の値）を保存し、各領域内の最も大きい計測値を通る線を包絡式とする。

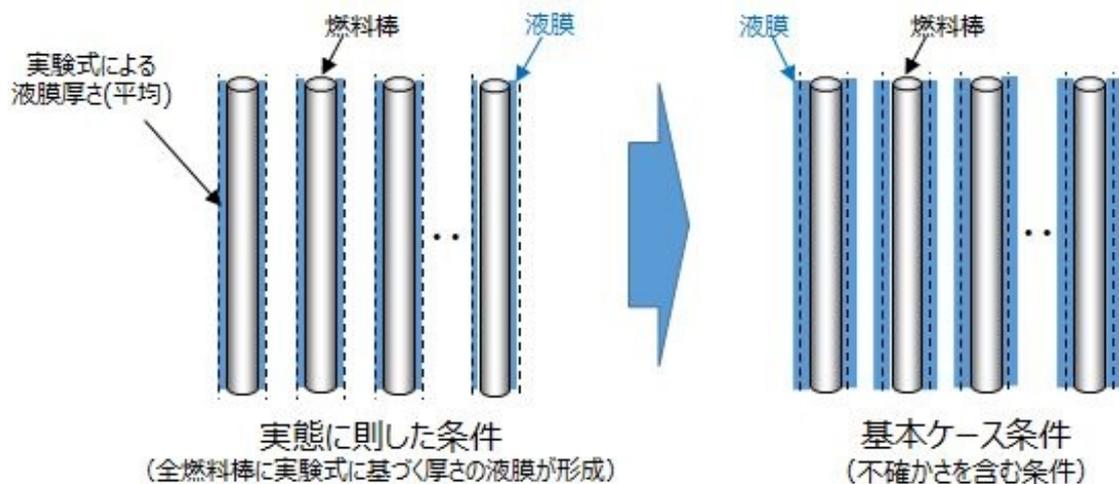
各計測値にはばらつきがあるが、本包絡式はそれらをカバーするよう設定されているため、

実験データに着目した場合、液膜評価の上限として扱うことが出来る。加えて、本包絡式を全燃料棒に適用することで、さらに大幅な保守性を考慮する。本条件設定のイメージを第 2-26 図に示す。

$N_T$ : 無次元液膜厚さ[-]  
 $Re$ : 液膜レイノルズ数[-]  
 $\Gamma$ : 単位幅あたりの液膜流量[m<sup>2</sup>/s]  
 $v$ : 動粘性係数[m<sup>2</sup>/s]  
 $b$ : 平均液膜厚さ[m]  
 $g$ : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>]  
 層流域:  $Re \leq 170$   
 遷移域:  $170 \leq Re \leq 900$   
 乱流域:  $900 \leq Re$   
 層流域のNusseltの式ベースの包絡式①  
 $N_T = 0.995(4Re)^{1/3}$   
 遷移域のNusseltの式ベースの包絡式②  
 $N_T = 1.069(4Re)^{1/3}$   
 遷移域のZhivaikinの式ベースの包絡式③  
 $N_T = 0.185(4Re)^{7/12}$   
 乱流域のZhivaikinの式ベースの包絡式④  
 $N_T = 0.157(4Re)^{7/12}$



第 2-25 図 包絡式の設定



第 2-26 図 液膜厚さ評価式の条件設定 (イメージ)

(c) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「液膜厚さの評価式」に対する不確かさ、および当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下の通り記載する。

(i) 風の影響②

包絡式のベースとなっている実験式は、静的な実験室環境下で取得された実験データより策定されたものであるが、実機の状態を踏まえた場合、風の影響により液滴に水平方向の力が作用することにより、斜めから液滴が流入してくる状況が想定される。この場合、燃料棒表面に存在する液膜界面に波立ちが発生する、あるいは液滴が液膜を弾き飛ばす等の外乱が発生することとなるが、これらは液膜を薄くする方向に作用する。液膜厚さの低下は減速材として大きく寄与する水量が減り実効増倍率が低下することとなるので、当該不確かさは基本ケース条件に対し実効増倍率を低下させる方向にのみ発生する。

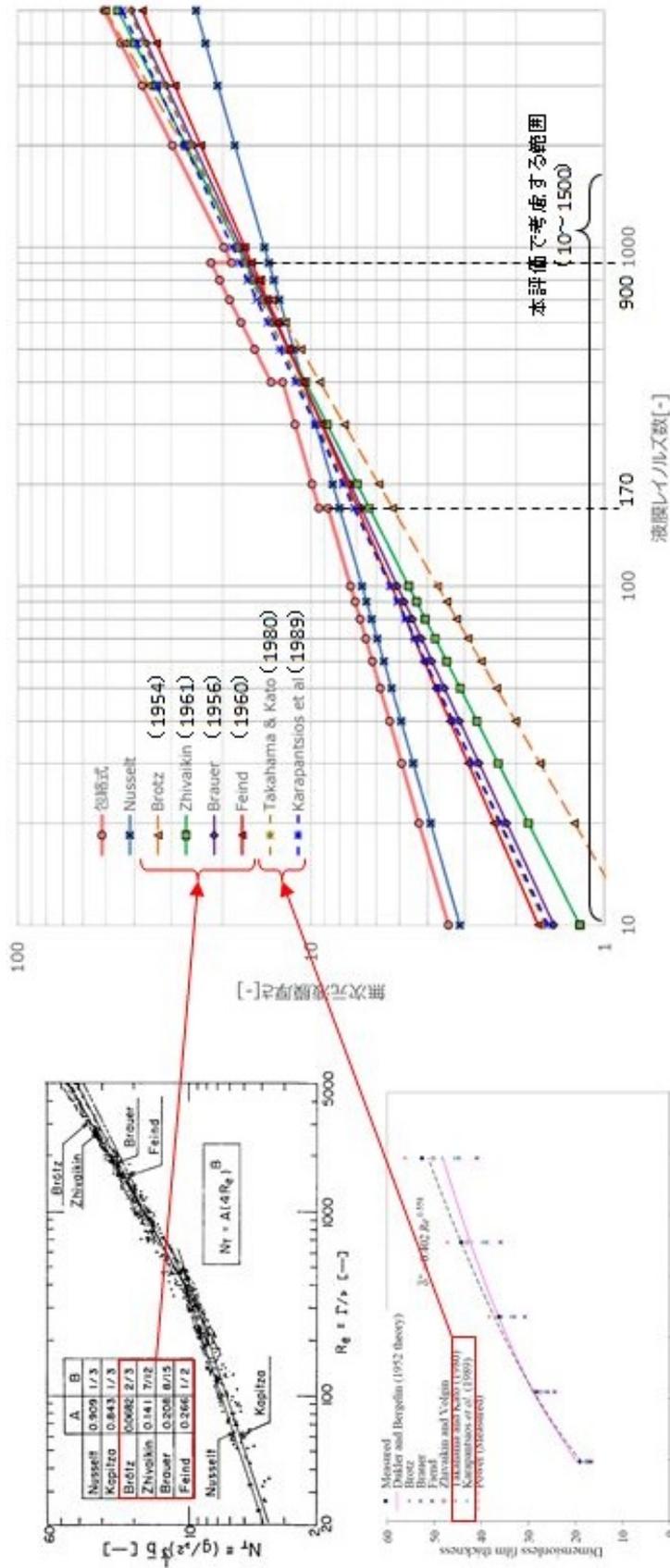
(ii) 多種ある実験式の存在

包絡式の設定にあっては、代表的な実験式である **Nusselt** の式および **Zhivai kin** の式をベースに設定したが、これら実験式が策定されて以降も種々の実験式が設定されている。実験式ごとの液膜厚さの大小は液膜レイノルズ数に応じ異なるが、第 2-5 表および第 2-27 図に示す通り、今回設定する包絡式は各解析における液膜レイノルズ数の範囲 (10~1500 以下) において、比較的新しい **Takahama and Kato** および **Karapantsios** らの液膜算出式を包絡していることを確認している。よって種々の実験式により液膜厚さを算出する場合、液膜厚さは包絡式を用いた場合よりも薄くなるため、本不確かさは基本ケースに対し実効増倍率を低下させる方向に働く。

第 2-5 表 各解析ケースにおける液膜レイノルズ数

	流入流量[m <sup>3</sup> /h]	流入範囲[-]	流入割合[%]	液膜レイノルズ数[-]
基本ケース条件	<input type="text"/>	SFP 全面 (424 ラック)	23	23
感度確認ケース①	<input type="text"/>	SFP 全面 (424 ラック)	23	25
感度確認ケース②	<input type="text"/>	局所 (3×3 ラック～)	23	～1074

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



Anand Padmanaban, Film Thickness Measurements in Falling Annular Films (2006年)、University of Saskatchewan

第 2-27 図 液膜レイノルズ数に応じた各種算定式による液膜厚さ

(d) 不確かさを考慮した条件について

(c) に示すとおり、実効増倍率を増加させる方向へ発生しうる不確かさはなく、包絡式を設定するとした基本ケース条件は、不確かさを含む条件となっている。

#### 8.2.6. 「放水の液滴径」の設定

(a) 基本ケース条件の設定方針

放水された水は液滴の状態となって落下するが、流量の大部分を占める放水砲由来の液滴径については、流量の小さいスプレイヘッド由来の液滴径よりは大きいと考えられるものの、その最確状態を実験的に得ることは困難である。

よって本パラメータの基本ケース条件の設定方針は c. とする。

(b) 基本ケース条件の設定

今回未臨界性評価ではスプレイヘッドと放水砲の同時放水を想定しているため、放水中には、スプレイヘッド由来の液滴と、放水砲由来の液滴が混在することとなる。放水砲由来の液滴径の最確値は定め難いものの、その値はスプレイヘッド由来の液滴の径よりも大きい。ここで、液滴径は小さい方が液滴の落下速度が低下し、体系内に留まる水量が増え実効増倍率が増加することから、保守性を有した条件として、全ての液滴をスプレイヘッド由来の液滴であるとし、実機スプレイヘッドを用いた液滴径データ取得試験の結果を踏まえ、**1.5mm**を設定する。なお液滴径データ取得試験の詳細、および試験結果を踏まえた液滴径設定の詳細について別紙3に示す。

(c) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「放水の液滴径」に対する不確かさ、および当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下の通り記載する。

(i) 注水・放水手段の組み合わせ、1手順当たりのポンプ台数

設備からの吐出流量が変化することに伴い液滴径の大きさも変化する。よってパラメータ「流量」の不確かさ要因である、注水・放水手段の組み合わせ、および1手順当たりのポンプ台数が、「放水砲の液滴径」に対する不確かさ要因となる。

流量が増加する場合には液滴径も大きくなるが、液滴径が大きくなると液滴の下降速度が大きくなり体系内に水分が保持されにくくなることで実効増倍率が低下する。よって流量を増加させる本不確かさは、基本ケースに対し実効増倍率を低下させる方向にのみ発生する。

(ii) 放水設備の違い

放水設備として使用するスプレイヘッドと放水砲はそれぞれ、使用時の条件や放水機構が

異なるため平均液滴径が異なる。基本ケース条件では全ての液滴についてスプレーヘッド由来の液滴径を用いることとしているため、本不確かさは基本ケースに対し液滴径を大きくする方向、すなわち実効増倍率を低下させる方向に働く。

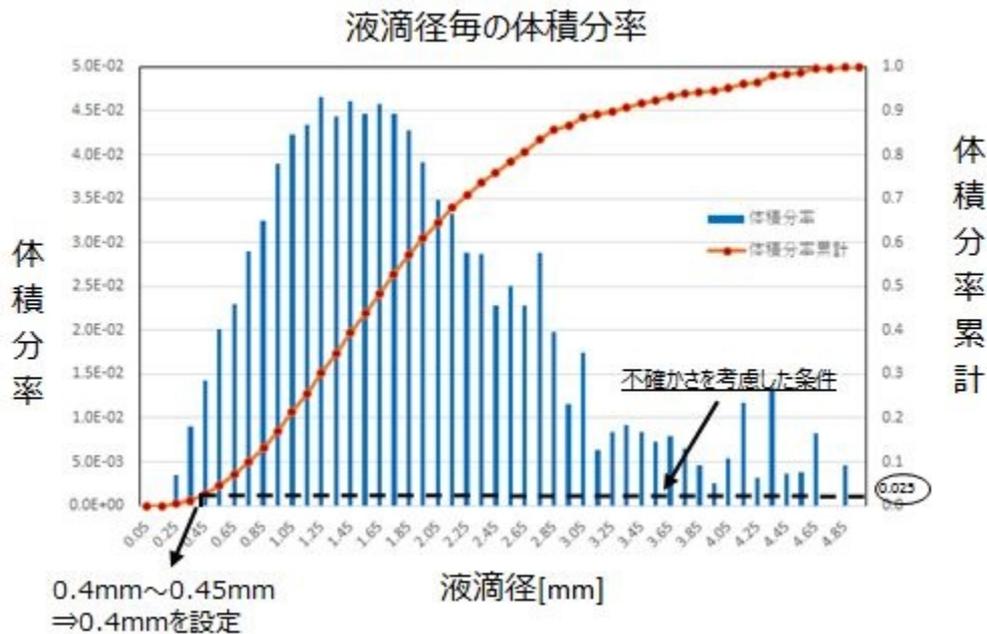
(iii) スプレー試験における測定箇所毎の結果の差異

液滴データ取得試験の結果、別紙3に示す通り測定位置によっては基本ケース条件よりも小さい平均液滴径が取得されている。液滴径が小さくなる場合、液滴の下降速度が小さくなり実効増倍率が大きくなることから、本不確かさは基本ケースに対し実効増倍率を増加させる方向に発生しうる。

(d) 不確かさを考慮した条件について

(c)に示す不確かさのうち、実効増倍率を増加させる方向へ発生しうる不確かさである「スプレー試験における測定箇所毎の結果の差異」を考慮した条件として、第2-28図に示す、各測定点で取得された全測定データを合算し得られる液滴分布において、有意水準5%とする場合の下限基準値となる、全取得液滴を用いた体積分率における2.5%出現値(0.4mm~0.45mm)を保守側に切り下げた0.4mmとする。

なお、流量の大部分を占める放水砲由来の液滴径にもスプレーヘッド由来の液滴を使用していることから、「放水砲+スプレーヘッド」による放水の平均液滴径が0.4mmを下回ることは考え難い。



第2-28図 全液滴径の統合データ

### 8.2.7. 「海水中の塩素濃度」の設定

#### (a) 基本ケース条件の設定方針

事故時に実施する放水・注水手順によっては海水を用いる手順があり、海水中には中性子吸収能力を有する塩素が含まれることから、今回未臨界性評価では海水由来の注水・放水内に含まれる塩素の中性子吸収効果を考慮する。

日本海域の塩素濃度は文献(岩波理化学辞典第5版 岩波書店、化学大辞典2 共立出版)より3.3～3.8%とされているが、この範囲における高浜発電所の塩分濃度最確値は定め難い。よって本パラメータの基本ケース条件の設定方針はc.とする。

#### (b) 基本ケース条件の設定

実効増倍率評価結果が厳しくなるよう、日本海域の塩分濃度範囲の下限值である3.3%を設定する。なお標準海水中塩分の塩類組成は第2-6表の示すとおりであり、これらの組成比を踏まえて塩素量を設定する。

第2-6表 海水の塩分濃度および塩類組成

		文献値	基本ケース条件
海水の塩分濃度		3.3%～3.8%	3.3%
海水（標準海水） の塩類組成	NaCl	77.758 %	77.0%
	MgCl <sub>2</sub>	10.878%	10.0%
	MgSO <sub>4</sub>	4.737 %	—
	CaSO <sub>4</sub>	3.600 %	—
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.465 %	—

### 9. 各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果

8. で設定した基本ケース条件と不確かさの整理結果について第2-7表に示す。

第2-7表 各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果（1/3）

パラメータ	基本ケース条件		基本ケース条件の 設定方針	基本ケース条件に対する不確かさ		実効増倍率が 高くなる方向	考慮 要否
	具体的条件	条件の説明		不確かさが生じる要因	不確かさが生じる方向		
燃料 配置	SFPは新燃料で満杯	燃焼条件および燃料貯蔵体数を、実効増倍率を高めるよう、また将来の実配置を包絡するよう条件を設定	c (燃料取替毎に貯蔵燃料体数および燃焼度は変化)	【基本ケース条件で考慮済み】 貯蔵燃料燃焼度の違い 【基本ケース条件で考慮済み】 燃料貯蔵体数 【基本ケース条件で考慮済み】	燃焼度が高い燃料が貯蔵される  SFP満杯以下	・燃焼度が低い燃料を貯蔵 ・貯蔵体数が増加	不要
燃焼燃料の 燃焼度				― (新燃料のみを貯蔵とした燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)			
軸方向 燃焼度分布				― (新燃料のみを貯蔵とした燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)			
核種数計算 コードと核種 数ライブラリ				― (新燃料のみを貯蔵とした燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)			
				― (新燃料のみを貯蔵とした燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)			
核種選定				― (新燃料のみを貯蔵とした燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)			
冷却日数				― (新燃料のみを貯蔵とした燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)			

燃料条件

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第2-7表 各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果（2 / 3）

パラメータ	基本ケース条件		基本ケース条件の 設定方針	基本ケース条件に対する不確かさ		考慮 要否
	具体的条件	条件の説明		不確かさが生じる要因	不確かさが生じる方向	
流量	□ m <sup>3</sup> /h	<ul style="list-style-type: none"> <li>重大事故等対応用に整備しているSFPへの注水・放水に係る手順を、全て同時に実施</li> <li>1 手順につきポンプ1台起動</li> <li>各手順の流量には、基本的にポンプ揚程曲線を用い系統圧損等を踏まえ評価した値（実測値があるものは実測値）を使用</li> </ul>	<p>c</p> <p>(手順によっては注水ラインを共有しており、また手順の組み合わせにより大きく変動するため最確値が定め難い)</p>	注水・放水手段の組合せ 【基本ケース条件で考慮済み】	流量低下	不要
				1 手順あたりのポンプ台数	流量増加	
水分条件 SFPへの流入範囲、流量分布	流入範囲：SFP全面 流量分布：一様	<ul style="list-style-type: none"> <li>放水設備からの全流量が、SFPラック全面に一様分布で流入する（単位面積当たりの流量は、放水設備による実際のものよりも大きい保守的な条件を設定）</li> </ul>	<p>c</p> <p>(設備の設置位置によりSFPに対する流入範囲、分布は変化する)</p>	注水・放水手段の組合せ	広範囲化	不要
				1 手順あたりのポンプ台数		
				放水分布のばらつき 【基本ケース条件で考慮済み】	単位面積当たりの流量低下	不要
				スプレイ分布のばらつき 【基本ケース条件で考慮済み】	単位面積当たりの流量低下	不要
燃料集合体内への流入割合	23%	<ul style="list-style-type: none"> <li>ラックピッチと燃料集合体の幾何形状より求まる面積比</li> <li>集合体上部へ流入する水の一部は上部ノズル構造等により弾かれる</li> <li>無風を仮定（斜めからの液滴の流入は考慮しない）</li> </ul>	<p>a</p>	風の影響①※1 (分布のゆらぎ、風の強さ)	局所化 or 広範囲化	要※1
				内挿物の存在 【基本ケース条件で考慮済み】	流入割合低下	不要
液膜となる流量の割合	100%	<ul style="list-style-type: none"> <li>液滴のまま落下するより、液膜となったほうが、体系内の水分量が多くなり実効増倍率が厳しくなる</li> </ul>	<p>a</p>	風の影響② (斜め方向の液滴落下による効果)	流入割合増加	要
				一部の流量が液滴のまま落下 【基本ケース条件で考慮済み】	液膜となる流量が減る	不要

共通するパラメータとして、流量に由来するものは赤ハッチング、風に由来するものは青ハッチングで示す。

※1： 流入範囲を局所化するような風が吹く場合、流量が集中して落下することになるため、斜め方向で液滴が落下することは考え難い。また液滴を斜め方向から落下させるような風が吹く場合、放水範囲をより広げることになるため流量が局所化することは考え難い。よって「流入範囲を狭める風の影響」（風の影響①）と「流入範囲を広げる風の影響」（風の影響②）は、別々の不確かさ要因として取り扱う。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第2-7表 各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果 (3 / 3)

パラメータ	基本ケース条件		基本ケース条件の設定方針	基本ケース条件に対する不確かさ		実効増倍率が厚くなる方向	考慮要否
	具体的条件	条件の説明		不確かさが生じる要因	不確かさが生じる方向		
(続き)							
液膜厚さ評価式	包絡式	<ul style="list-style-type: none"> <li>適用されるRe数範囲において、多種ある実験式を包絡する保守的な条件を設定</li> </ul>	<sup>C</sup> (集合体内の現実的な流動状況は定め難いため、保守的な条件を設定)	風の影響② (斜め方向の液滴落下による波立ち等の外乱)	液膜が薄くなる	液膜を厚くする	不要
				<ul style="list-style-type: none"> <li>多種ある実験式が存在【基本ケース条件で考慮済み】</li> </ul>	液膜が薄くなる		
水分条件 放水の液滴径	一律1.5mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>スプレーヘッドの実放水試験にて取得した平均液滴径(体積分率の50%出現値)</li> </ul>	<sup>C</sup> (放水砲由来の液滴径はスプレーヘッド由来の液滴径より大きい、現実的な条件を設定することは困難)	注水・放水手段の組合せ	液滴径を大きくする	液滴径を小さくする	不要
				1手順あたりのポンプ台数	液滴径を大きくする		
				放水設備の違い (放水砲orスレイヘッド)	液滴径を大きくする	液滴径を大きくする or 小さくする	要
				【基本ケース条件で考慮済み】	液滴径を大きくする		
海水中の塩分濃度	3.3%	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献に記載された最小値</li> </ul>	<sup>C</sup> (塩分濃度は3.3~3.8%の範囲であるが、高浜発電所での現実的な値は定め難い)	塩分濃度増加	塩分濃度低下	不要	

共通するパラメータとして、流量に由来するものは赤ハッチング、風に由来するものは青ハッチングで示す。

## 10. 重畳させる不確かさの検討

第 2-7 表で考慮「要」となった不確かさ要因を第 2-8 表に示す。これらの不確かさは、相互に因果関係はなく（いずれかの不確かさの発生に起因して、他の不確かさが発生することはない）、全て独立であることから、重畳は考慮しない。

設置許可基準規則第 54 条 2 項に係る未臨界性評価に関する要求事項への適合性は、基本ケースおよび下表に示す不確かさをそれぞれに考慮した感度解析ケースにおいて、未臨界を維持できることにより確認できる。

第 2-8 表 パラメータ毎に考慮「要」と抽出された不確かさ要因

パラメータ	不確かさ要因
流量	1 手順あたりのポンプ台数
SFP への流入範囲、 流量分布	流入範囲を狭める風の影響（風の影響①）
燃料集合体内への 流入割合	流入範囲を広げる風の影響（風の影響②）
放水の液滴径	スプレイ試験における測定箇所毎の 結果の差異

## 11. 基本ケースおよび感度解析ケース条件一覧

9. ままで算定したパラメータ、および 10. で整理した不確かさの取り扱いを踏まえ、基本ケースおよび不確かさを考慮した感度解析ケースを第 2-9 表の通り設定する。また、これらパラメータの条件を踏まえ算定される臨界計算コードへのインプット条件を第 2-10 表に示す。

第 2-9 表 基本ケースおよび感度解析ケースの解析条件

評価条件	事故時の実態により則したケース (基本ケース)	1 手順あつりのポンプ台 数による感度を確認する 解析 (ケース①)	風の影響① (流入範囲を 下さず燃料集合体内への感 度を確認する解析 (ケース②))	風の影響② (斜め方向に液滴を溶 下させ燃料集合体内への流入割合 に影響を与える風の影響) による 感度を確認する解析 (ケース③)	スプレッド試験における測定 箇所毎の結果の差異によ る感度を確認する解析 (ケース④)
燃料条件	新燃料のみで満杯	←	←	←	←
燃料配置	新燃料のみで満杯	←	←	←	←
燃料種類	通常ウラン燃料 (Gd入り燃料の存在は考慮しない)	←	←	←	←
流量	<input type="text" value=""/> (m <sup>3</sup> /h)	<input type="text" value=""/> (m <sup>3</sup> /h)	<input type="text" value=""/> (m <sup>3</sup> /h)	←	←
SFPへの流入範 囲、流量分布	SFP全面	←	局所 (3×3から始め、低下傾 向が確認できるまで)	SFP全面	←
液膜厚さ	一様	←	←	←	←
水分条件	23 (%)	←	←	46 (%)	23 (%)
液膜厚さ	100 (%)	←	←	←	←
気相部 水密度 (放水の 液滴径 等)	飽和蒸気密度 0.0006 (g/cm <sup>3</sup> ) 液滴径1.5mmを用いた水密度	←	←	←	←
液膜厚さ	0 (%)	←	←	←	←
液膜厚さ	包絡式	←	←	←	←
液膜厚さ	燃料集合体内	←	←	←	←
液膜厚さ	燃料集合体外	←	←	←	←
液膜厚さ	流入範囲内	←	←	←	←
液膜厚さ	流入範囲外	←	←	←	←
海水中の塩分濃度	3.3 (%)	←	0.0006 (g/cm <sup>3</sup> )	←	液滴径0.4mmを用いた 水密度

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 2-10 表 各ケースにおける臨界計算コードへのインプット

基本ケース	ケース① (1 手順あたりのポンプ台数による感度を確認する解析)	ケース② (「流入範囲を狭める風の影響」による感度を確認する解析)	ケース③ (「斜め方向に液滴を落下させ燃料集合体内への流入割合に影響を与える風の影響」による感度を確認する解析)	ケース④ (スプレイ試験における測定箇所毎の結果の差異による感度を確認する解析)
燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP 有限体系)			
燃料種類	15×15 型 通常ウラン燃料			
液膜厚さ [mm]				
燃料集合体内 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.0006 (飽和蒸気密度)			
燃料集合体外* 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]				
流入範囲外 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	—	0.0006 (飽和蒸気密度)	—	—

※ 淡水由来の流入水による水密度を「純水」、海水由来の流入水による水密度を「海水」と記載。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参考 1) 実運用において領域管理を取り除くことによる効果

1. はじめに

中性子吸収体を考慮した 3 領域管理がある場合と、配置制限がない場合それぞれについて、燃料等の取り扱い回数（所要ステップ数）がどの程度低減できるか等を確認する。

2. 所要ステップ数削減効果の確認

図 1 および図 2 に示すシミュレーションにより、領域管理を取り除くことで照射燃料の取り扱い及び内挿物入れ替えの回数を大幅に低減でき、表 1 のとおり 1 定検当たりの燃料等の総取扱回数が大幅に低減されることを確認した。なおシミュレーションにおいて既許可の初期状態としては、領域 A に空きラックが無い状況を想定した。

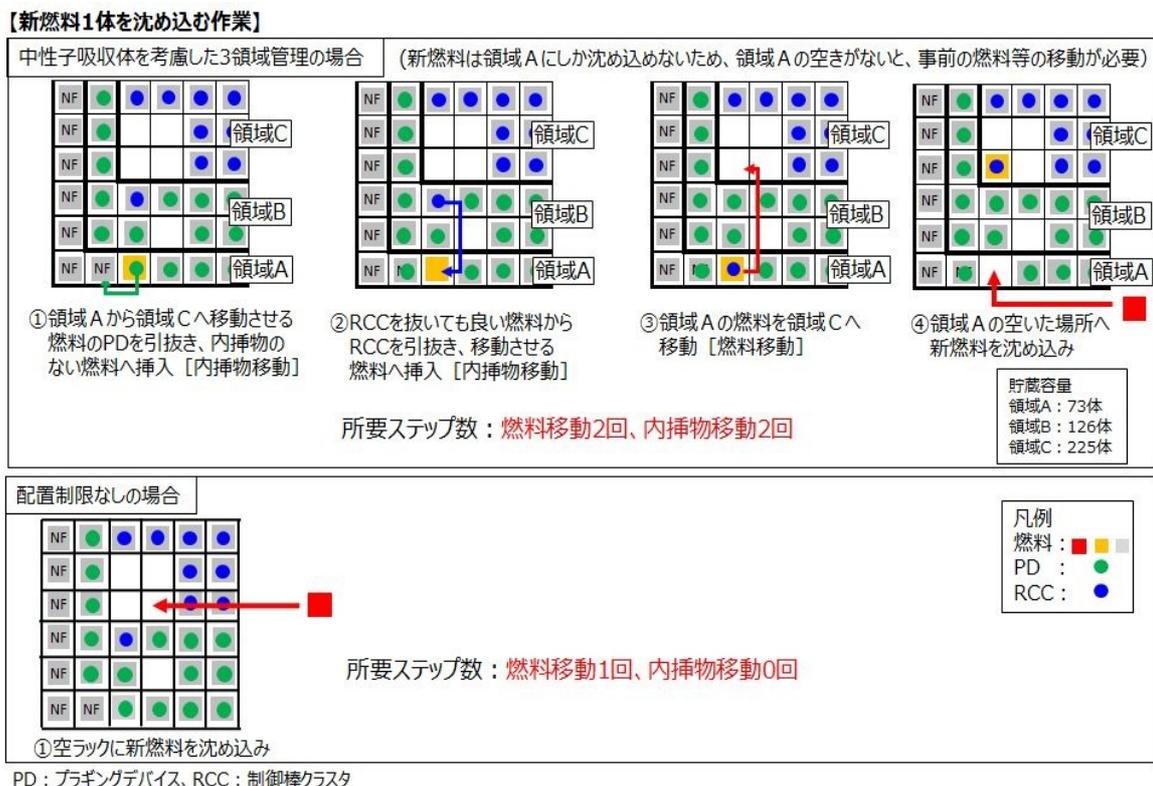
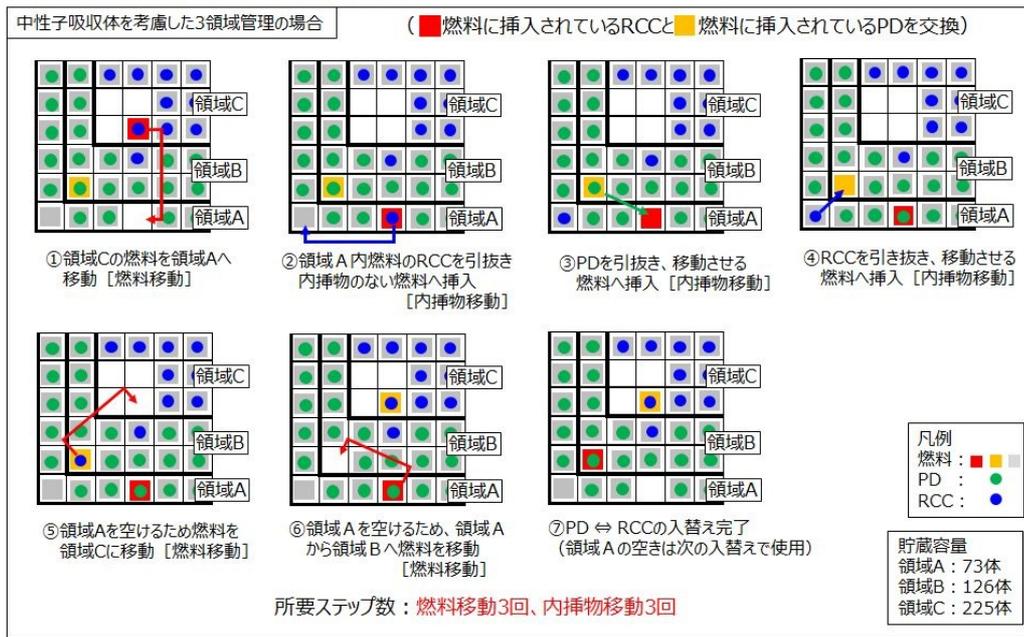


図 1 新燃料沈め込み作業における所要ステップ数比較

【内挿物の交換作業（PDとRCCの入れ替え1回）】



PD：プラグングデバイス、RCC：制御棒クラスタ

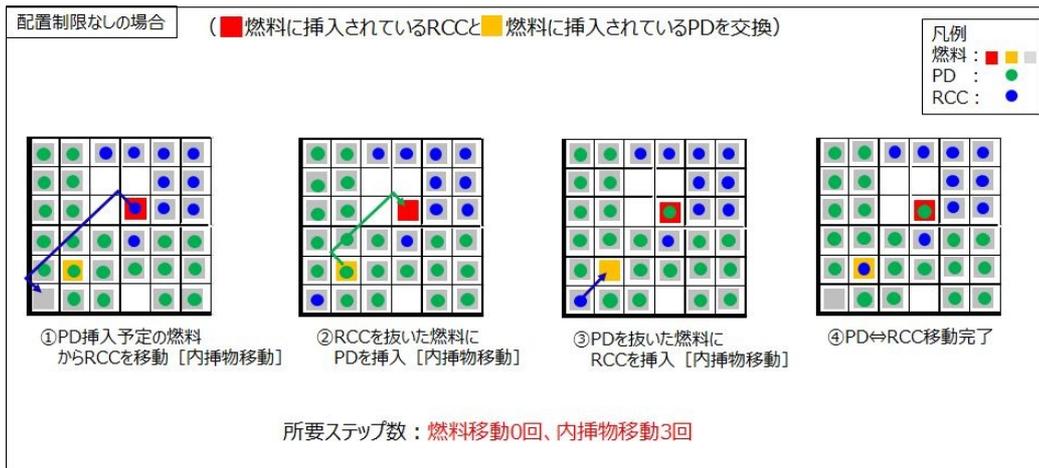


図2 内挿物交換作業における所要ステップ数比較

表1 配置制限の有無による1定検当たり総取扱回数の違い

	3領域管理	配置制限なし
①新燃料1体を沈め込む作業	燃料移動：2回 内挿物入替：2回	燃料移動：1回 内挿物入替：0回
②内挿物の交換作業 (PDとRCCの入れ替え1回)	燃料移動：3回 内挿物入替：3回	燃料移動：0回 内挿物入替：3回
	4回	1回
	6回	3回

1定検あたりの総取扱回数は、約460回 ⇒ 約190回に低減※

※ 1定検あたりの標準的な作業量として、新燃料沈め込みを44体、制御棒とプラグングデバイスの入れ替えを48組と想定。  
燃料等の総取扱回数は、3領域管理の場合：4回×44体+6回×48組 = 464回、配置制限がない場合：1回×44体+3回×48組 = 188回

### 3. 領域管理を取り除くことによるメリット

領域管理を取り除き、所要ステップ数を大幅に削減することで、以下の運用管理上のメリットが期待できる。

#### (1) 人的リソースの削減

当社はこれまで、許認可上の配置制限が課せられているプラントにおいては、燃料移動時の燃料配置誤りを防止するために専属の“燃料配置監視員”を配備してきた。配置制限がなくなれば、**その人的リソースを他の業務へ振り向けることができる。**

##### 【配置制限がある場合】

- ・作業責任者
- ・クレーン操作員
- ・燃料取扱工具操作員
- ・荷重監視員
- ・燃料配置監視員

##### 【配置制限がない場合】

- ・作業責任者
- ・クレーン操作員
- ・燃料取扱工具操作員
- ・荷重監視員

#### (2) 作業員の被ばく低減

配置制限がない場合、既許可での運用と比較し**約1.6人・mSvの被ばく量を低減できる。**

	既許可の3領域管理		制限なし	
	新燃料沈め込み	内挿物の交換	新燃料沈め込み	内挿物の交換
作業責任者、クレーン操作員、燃料取扱工具捜査員、荷重監視員	各4工数※1 (計16工数)	各2工数※1 (計8工数)	各1工数 (計4工数)	各1工数 (計4工数)
燃料配置監視員	1工数	1工数	0工数	0工数
1工数当たりの被ばく線量	0.1人・mSv※2	0.07人・mSv※3	0.1人・mSv※2	0.07人・mSv※3
線量合計	2.33人・mSv		0.68人・mSv	

<電離放射線障害防止規則第1条>

事業者は、労働者が電離放射線を受けることをできるだけ少なくするよう努めなければならない。

※1 シミュレーション結果を踏まえ設定

※2  $15 \text{分}^{(*)1} / \text{体} \times 157 \text{体} \div 60 \text{分}$

$\times 0.003 \text{mSv/h}^{(*)2} \times 1 \text{人} = 0.1 \text{人} \cdot \text{mSv}$

※3  $7 \text{分}^{(*)3} / \text{体} \times 157 \text{体} \div 60 \text{分}$

$\times 0.003 \text{mSv/h}^{(*)2} \times 1 \text{人} = 0.07 \text{人} \cdot \text{mSv}$

(\*1) 至近定検における燃料取扱作業時間(実績)の平均値

(\*2) 作業時の環境サーベイ結果の平均値

(\*3) 至近定検における内挿物取扱作業時間(実績)の平均値

#### (3) 不要な燃料移動の削減による誤配置、誤操作の防止

配置制限がない場合、燃料等の取り扱い回数(所要ステップ数)が削減でき、**燃料等の配置誤りや燃料取扱設備の操作ミス等の発生を低減できる。**

以上

(参考2) 燃料条件が有する保守性確認、および既許可からの評価条件変更による影響確認

1. はじめに

今回未臨界性評価において設定する燃料条件が有する保守性や、既許可からの条件変更に伴う実効増倍率への影響の程度を確認する。

2. 燃料条件に対するパラメータスタディ

基本ケースの燃料条件は、**SFP** 内に実際に存在する内挿物（中性子吸収物質として作用する）、**Gd** 入りウラン燃料（中性子吸収物質である **Gd** を含む）や燃焼燃料（燃焼に伴い反応度が低下）の存在を考慮せず、通常ウラン新燃料のみが貯蔵されていると仮定した条件を設定している。これら燃料条件が有する保守性を確認するため、図1に示すパラスタ(i)を行い、燃料条件が保守的であることを確認した。

□: 今回使用 □: 注目パラメータ

評価	内挿物が存在することの影響		Gd入りウラン燃料が存在することの影響		燃焼燃料が存在することの影響	
	①考慮なし	②BP挿入を考慮 ③RCC挿入を考慮	考慮なし	②Gd入りウラン燃料	考慮なし	通常ウラン燃料
内挿物	①考慮なし	②BP挿入を考慮 ③RCC挿入を考慮	考慮なし	②Gd入りウラン燃料	考慮なし	通常ウラン燃料
燃料種類	通常ウラン燃料	通常ウラン燃料	①通常ウラン燃料	②Gd入りウラン燃料	通常ウラン燃料	通常ウラン燃料
燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP有限体系)	新燃料敷き詰め (SFP有限体系)	新燃料敷き詰め (SFP有限体系)	新燃料敷き詰め (SFP有限体系)	①新燃料敷き詰め (SFP有限体系)	②新燃料と24GWd/1燃焼燃料の子エッカード配置 (SFP有限体系)
水分条件	基本ケースと同じ	基本ケースと同じ	基本ケースと同じ	基本ケースと同じ	基本ケース	基本ケース
評価結果						

図1 パラメータスタディ(i) 解析条件および結果

### 3. 既許可と異なる条件に対するパラメータスタディ

今回評価では既許可評価と比較して、燃料条件・水分条件の両方を変更している。燃料条件と水分条件の変更に伴う実効増倍率への影響を確認するため、表 1 に示すパラスタ(ii)を実施した。

(パラスタ(ii)と既許可との比較により燃料条件を変更した影響を、パラスタ(ii)と基本ケースとの比較により水分条件を変更した影響を確認した。)

表1 パラメータスタディ(ii) 解析条件

(赤字：実効増倍率の増加要因) (青字：既許可条件との差異 緑字：基本ケース条件との差異)

燃料条件	既許可	基本ケース条件	パラスタ② (既許可条件から燃料条件を 変更した影響の確認)
燃料配置	燃料の燃焼度や中性子吸収体 挿入の有無に応じた3領域管理	<b>新燃料敷き詰め (燃料の燃焼度や中性子 吸収体は考慮しない。)</b>	<b>新燃料敷き詰め (燃料の燃焼度や中性子吸収体は考慮しない。)</b>
AC/FP 核種の考慮	考慮あり※1	考慮なし <b>(新燃料敷き詰めのため)</b>	考慮なし <b>(新燃料敷き詰めのため)</b>
評価モデル	SFP 全体の <b>水密度を一樣として 全ての<b>水密度範囲(0~1g/cm<sup>3</sup>) で評価するモデル</b></b>	流入水の流量や性状(液膜化) を踏まえた水密度を設定する モデル	SFP 全体の <b>水密度を一樣として 全ての<b>水密度範囲(0~1g/cm<sup>3</sup>) で評価するモデル</b></b>
	(流入水による燃料棒上の 液膜形成を考慮しないモデル)	<b>(流入水が燃料棒上で液膜と なることを考慮したモデル)</b>	(流入水による燃料棒上の 液膜形成を考慮しないモデル)
SFP への 流入流量等	<b>概念なし</b>	流量： <input type="text"/> m <sup>3</sup> /h (その他、水分条件算出の ための条件を設定)	<b>概念なし</b>
流入海水 中の塩素	<b>考慮なし</b>	考慮あり	<b>考慮なし</b>
実効増倍率※2	0.958 (最適減速)	0.947 (冠水時) 0.803 (完全喪失時)	図2 参照

※1

※2 製造公差等の不確定性を含まない値

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

パラスタ(ii)の評価結果を、既許可の3領域における評価結果とともに図2に示す。

- パラスタ(ii)は既許可同様、水密度を一様に0~1g/cm<sup>3</sup>で変化させる評価としたため、水密度 約0.1g/cm<sup>3</sup>で最適減速状態となり、実効増倍率のピークが発生した。
- 既許可およびパラスタ(ii)の、最適減速(水密度 約0.1g/cm<sup>3</sup>)での実効増倍率は、パラスタ(ii)のほうが約0.20大きい。  
⇒燃料条件を新燃料敷き詰め条件へ変更した影響は、実効増倍率換算で+0.20程度である。
- パラスタ(ii)での最適減速における実効増倍率と、今回基本ケースの水位0cmでの実効増倍率は、基本ケースのほうが約0.35小さい。  
⇒水分条件を実態により則した条件へ変更した影響は、実効増倍率換算で-0.35程度である。

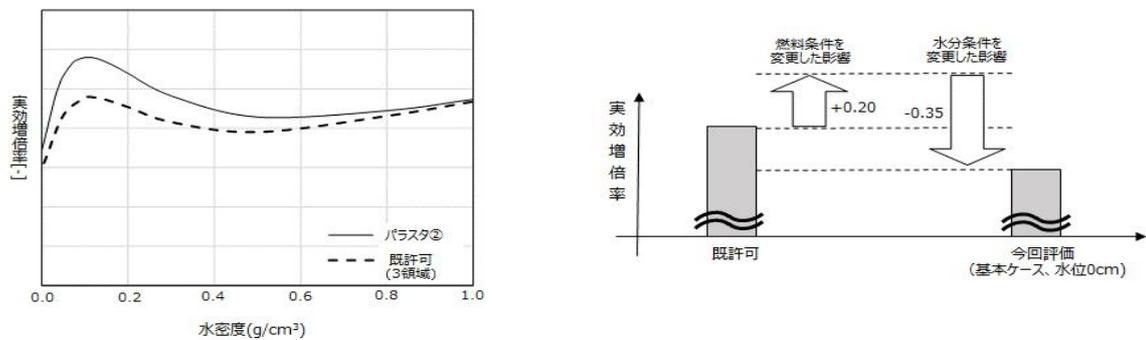


図2 パラメータスタディ(ii) 解析結果

以上

(参考3) 燃料集合体内の内部流動に係る条件設定について

1. はじめに

今回評価での基本ケース条件を定めるに先立ち、基本ケース条件の設定方針を策定し、最確値（現実的な値）を明に設定できないパラメータについては、取りうる保守的な条件を設定することとした。ここでは、策定した基本ケース設定方針に準じた、燃料集合体内における内部流動の設定（燃料棒全周への液膜形成）について説明する。

2. 大容量放水時の燃料集合体内の挙動

SFP ヘスプレイヘッドによるスプレイを実施した場合、燃料集合体内へ流入した水は液滴としてではなく、ほとんどが燃料棒と接しながら筋状流下するという知見を得ている<sup>※</sup>。放水砲を用いて大流量が燃料集合体内に流入する場合、スプレイヘッドでの放水を想定した小流量放水時の実験知見と比較して、燃料棒を流下する水は図1に示すように、以下の挙動を示すと考えられる。

- 流下する筋の本数が増える。
- 流下する筋の幅、厚さ（高さ）が広がる。

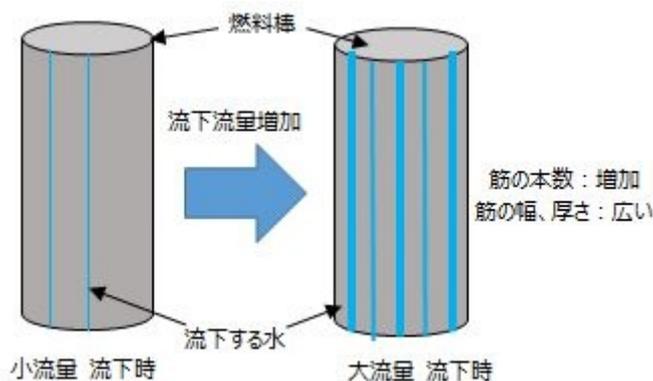


図1 燃料棒を流下する流量が増加した場合の内部流動変化（イメージ）

しかし、筋状に流下するような挙動は複雑であり、また放水砲のような大流量放水設備により放水した場合の内部流動は実験的にも確認し難いため、内部流動の最確状態は設定し難い。よって基本ケース設定方針に準じ、内部流動については未臨界性上保守的な条件を設定する。

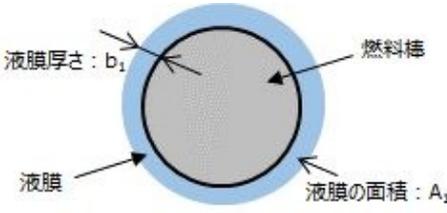
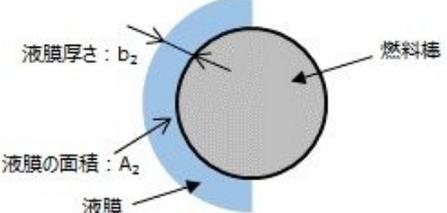
※「可搬型スプレイ放水時の燃料集合体内部流動に関する研究」、日本原子力学会 2017 年秋の大会、関西電力(株)、三菱重工業(株)

### 3. 保守性を有する内部流動条件の設定

厚い液膜となって燃料棒の一部を流下する場合より、薄い液膜が燃料棒表面に一様に付着する場合のほうが、表 1 に示す簡易評価のとおり、燃料棒から作用するせん断力の合計値が大きくなるため流下流速が相対的に小さくなり、体系中に保持される水分量は多くなる。

体系中に保持される水分量が多い方が、中性子の減速に主に寄与する水量が増え実効増倍率は厳しくなるため、今回未臨界性評価における内部流動の設定として、燃料棒の全周に液膜が形成される条件を採用する。

表 1 流下挙動の違いに対する体系中の水分量の違い

想定する状態	周方向全面に液膜となって流下する場合 	周方向の半分にのみ流下する場合 
液膜レイノルズ数 [-]	$Re_1=50$	$Re_2=100$ ( $\Gamma$ が 2 倍になるため)
無次元液膜厚さ [-] (ヌセルト式を仮定)	$NT_1=0.909 \times (4Re_1)^{1/3}$ =5.3	$NT_2=0.909 \times (4Re_2)^{1/3}$ =6.7
液膜厚さ [mm]	$b_1=NT_1 / (g / \nu^2)^{1/3}=0.25$	$b_2=NT_2 / (g / \nu^2)^{1/3}=0.31$
水が占める面積 [mm <sup>2</sup> ]	$A_1 = \{(10.72+2b_1)^2 - 10.72^2\} / 4$ =8.6	$A_2 = \{(10.72+2b_2)^2 - 10.72^2\} / 8$ =5.4

<計算の前提>

- ・ 全面に液膜が形成される場合の液膜  $Re$  数を 50 と想定 (基本ケースでの  $Re$  数は 50 以下)  
⇒ 周方向の半分にのみ流下する場合の液膜  $Re$  数は 100  
( $Re=\Gamma/\nu$ 、 $\Gamma$  : 周方向長さ当たりの流量)
- ・ 液膜厚さ評価式にはヌセルト式を使用  
( $NT=0.909 \times (4Re)^{1/3}$ )

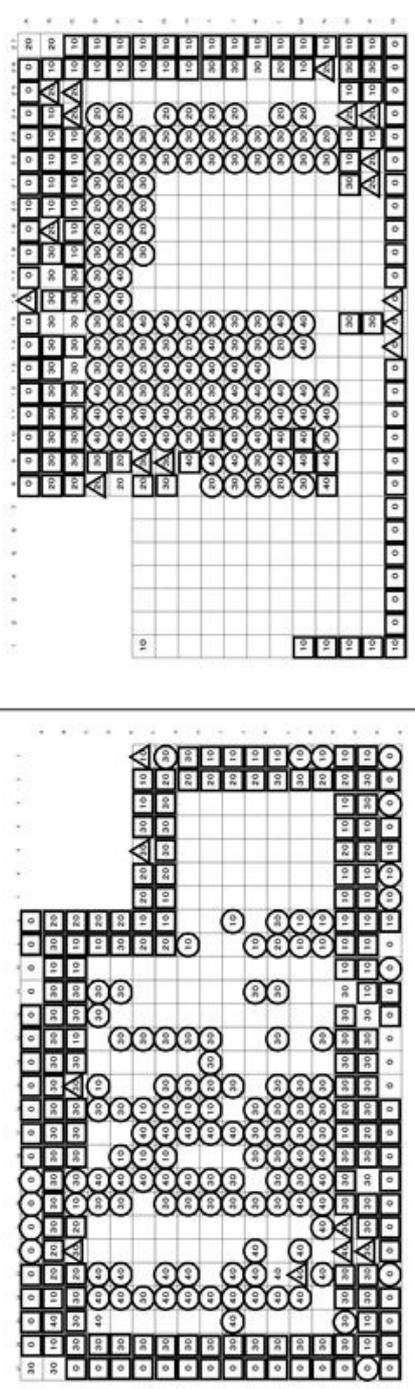
<計算諸元>

燃料棒外径 : 10.72 [mm]  
重力加速度 : 9.8 [m/s<sup>2</sup>]  
動粘度 :  $10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s]

以 上

(参考4) 内挿物の保管状況および概要

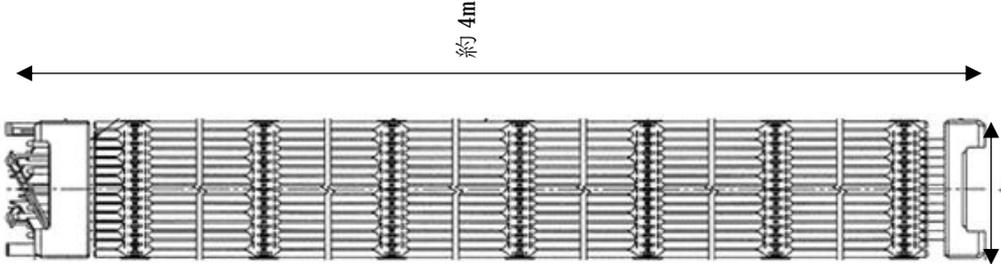
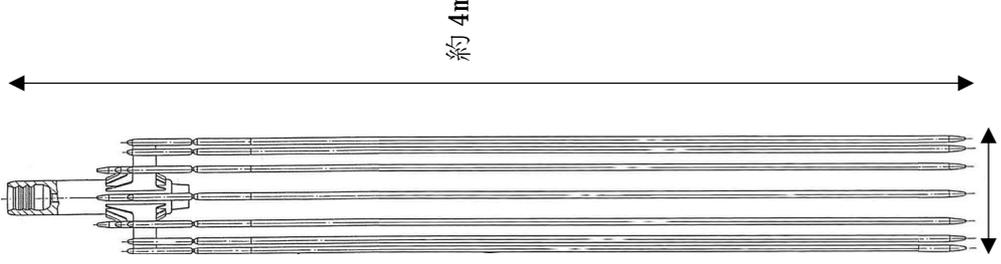
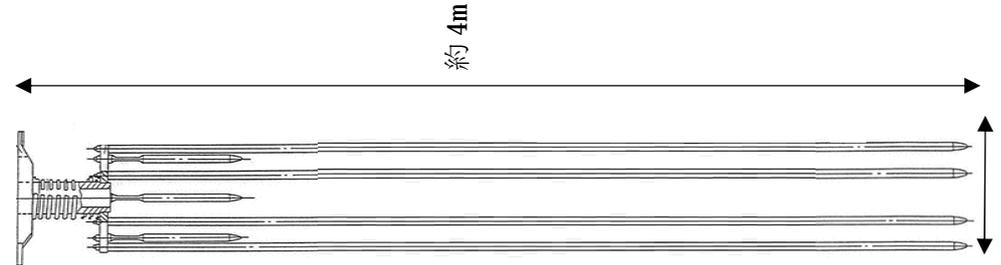
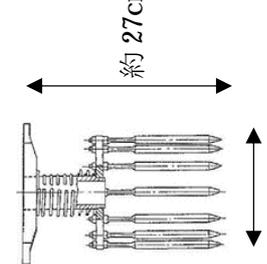
表1 高浜1,2号炉 SFP内における内挿物等の保管状況

項目	高浜1号炉	高浜2号炉
<p>配置図</p> 		
<p>燃料集合体 (うちGd入り燃料集合体)</p>	<p>299体 (196体)</p>	<p>258体 (133体)</p>
<p>燃焼度(GWd/t)別 内訳</p>	<p>BU &lt; 10 : 56体 10 ≤ BU &lt; 20 : 58体 20 ≤ BU &lt; 30 : 26体 30 ≤ BU &lt; 40 : 119体 40 &lt; BU : 40体</p>	<p>BU &lt; 10 : 44体 10 ≤ BU &lt; 20 : 45体 20 ≤ BU &lt; 30 : 39体 30 ≤ BU &lt; 40 : 87体 40 &lt; BU : 43体</p>
<p>プラグインデバイス</p>	<p>164体</p>	<p>120体</p>
<p>制御棒クラスタ</p>	<p>114体</p>	<p>113体</p>
<p>バーナブルポイズン</p>	<p>8体</p>	<p>16体</p>

【燃焼度 (BU)凡例】 0 : BU < 10、 10 : 10 ≤ BU < 20、 20 : 20 ≤ BU < 30、 30 : 30 ≤ BU < 40、 40 : 40 ≤ BU (GWd/t)

【内挿物凡例】 □ : プラグインデバイス、 ○ : 制御棒クラスタ、 △ : バーナブルポイズン

表 2 内挿物の概要

燃料集合体	内挿物		
 <p>約 4m</p> <p>約 21cm</p>	 <p>約 4m</p> <p>約 15cm</p> <p>制御棒クラスタ</p>	 <p>約 4m</p> <p>約 15cm</p> <p>バーナブルポイズン</p>	 <p>約 27cm</p> <p>約 15cm</p> <p>プラグインデバイス</p>

解析結果の妥当性確認について

## 目 次

1. はじめに
2. 解析に用いたコードの特徴
3. 解析結果の妥当性確認
  - 3.1. 類似解析結果との整合性
    - 3.1.1. 評価条件および結果
    - 3.1.2. 妥当性確認
      - 3.1.2.1 燃料冠水時の実効増倍率
      - 3.1.2.2 水位 **0mm**での実効増倍率
  - 3.2. 一般的な物理式により求まる実効増倍率との整合性
    - 3.2.1. 前提条件
    - 3.2.2. 妥当性確認
4. 解析に適用した品証プロセスの確認
5. まとめ

## 1. はじめに

今回の未臨界性評価では、最適評価手法を用い、最確状態を踏まえた基本ケースと不確かさ影響を確認する感度解析ケースについて解析を実施した。各ケースにおける臨界計算コード (SCALE コード) へのインプット条件を第 3-1 表に、実効増倍率評価結果を第 3-1-1 図および第 3-1-2 図に示す。

今回の評価条件は、既許認可での解析と異なり、以下のとおり空間中の水分状態を非均質に設定している点で特徴がある。

- ・ 体系を軸方向に気相部と液相部に大きく分割
- ・ 気相部においては、燃料集合体の中と外で異なる水分状態を設定するとともに、燃料棒周りに液膜が形成されることを考慮

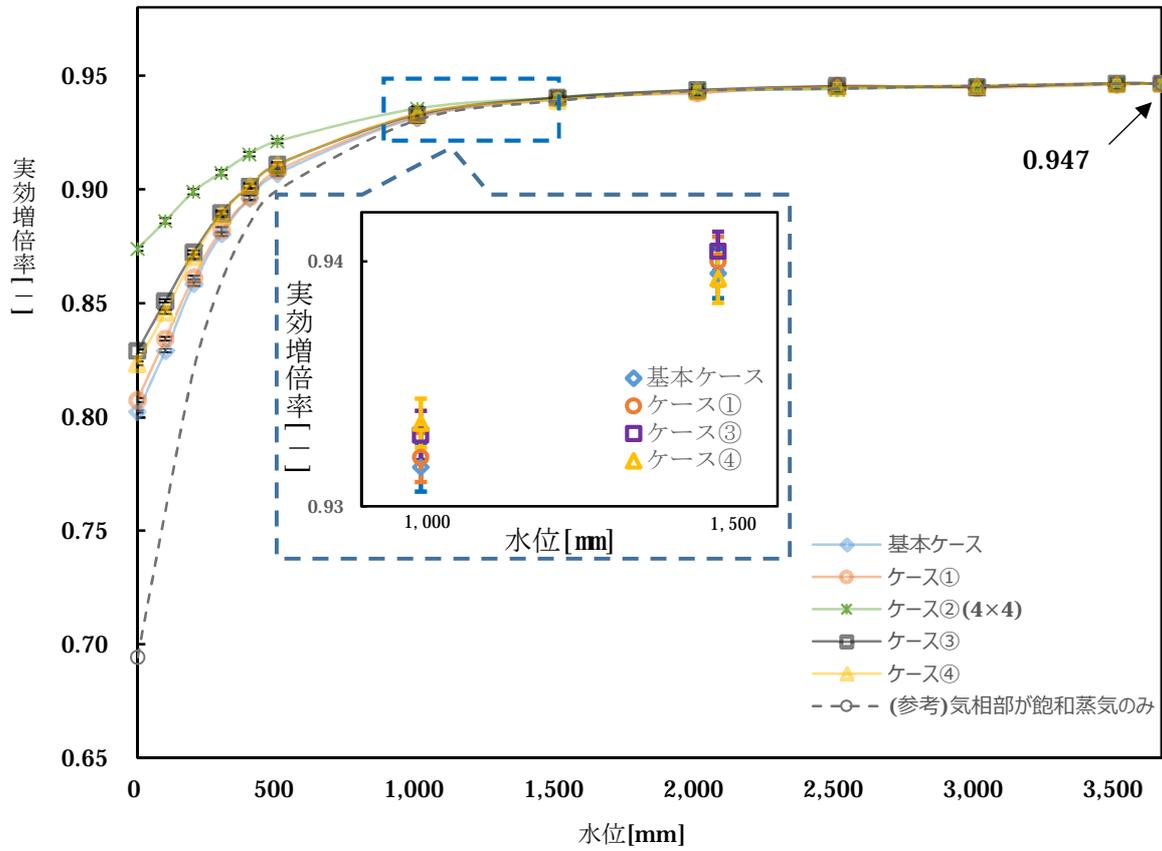
本資料では、上記のような特徴を有し、水位が低下するにつれ単調減少した基本ケースの実効増倍率解析結果の妥当性について確認するとともに、今回解析業務を実施するに当たり適用した品証プロセスの解析結果の適切性を説明する。

第3-1表 各ケースにおける臨界計算コードへのインプット

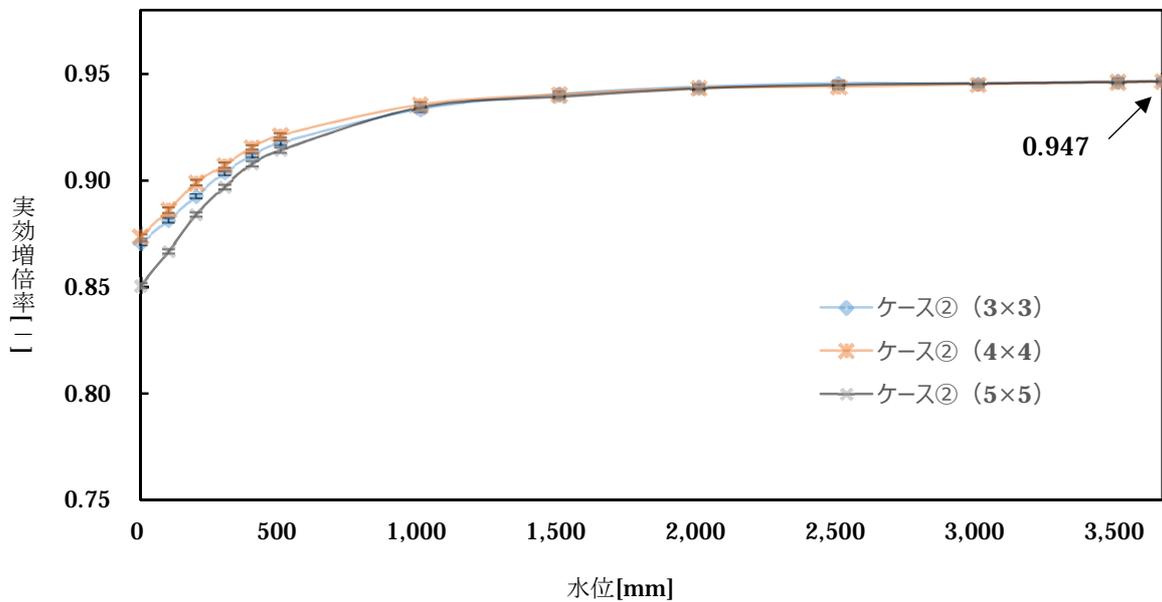
	基本ケース	ケース① (1手順あたりのポンプ台数による感度を確認する解析)	ケース② (「流入範囲を狭める風の影響」による感度を確認する解析)	ケース③ (「斜め方向に液滴を落下させ燃料集合体内への流入割合に影響を与える風の影響」による感度を確認する解析)	ケース④ (スプレイト試験における測定箇所毎の結果の差異による感度を確認する解析)
燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP 有限体系)				
燃料種類	15×15型 通常ウラン燃料				
液膜厚さ [mm]					
燃料集合体内 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.0006 (飽和蒸気密度)				
燃料集合体外※ 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]					
流入範囲外 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	—	—	0.0006 (飽和蒸気密度)	—	—

※ 淡水由来の流入水による水密度を「純水」、海水由来の流入水による水密度を「海水」と記載。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 3-1-1 図 実効増倍率評価結果<sup>※1,2</sup> (基本ケース、感度解析ケース)



第 3-1-2 図 実効増倍率評価結果<sup>※1,2</sup> (感度解析ケース②詳細)

※1 エラーバーはモンテカルロ計算における標準偏差 ( $\pm 2\sigma$ )

※2 製造公差、計算コード等による不確定性を含まない値

## 2. 解析に用いたコードの特徴

解析に用いた **SCALE** コードは別紙 1 に記載の通り、燃料及び構造材の材料組成と幾何形状を与える（形状情報を設定し、形状ごとに物質の原子個数密度を設定する。）ことにより解析を行う 3 次元輸送計算コードであり、今回液膜を考慮した解析で設定する形状（円管）、物質（軽水）を含んだ体系を精度よく評価できることをベンチマーク解析により妥当性確認している。既許認可解析においても、円管形状（燃料材や被覆管）および軽水を考慮した解析を実施している。また、ベンチマーク解析のため選定した臨界実験には中途水位により臨界を達成するものもあり、**SCALE** は各水位での実効増倍率も精度よく評価できている。

よって **SCALE** コードは、液膜の存在および水位条件を考慮した **SFP** 体系であっても、当該水分条件を適切に入力すれば、適切な解析結果を提示できるコードである。

## 3. 解析結果の妥当性確認

**SCAEL** コードを使用した基本ケース解析結果の妥当性について、大きく 2 つの観点で確認した。これらの詳細について以下で説明する。

- ①類似解析との比較
- ②一般的な物理式との整合

### 3.1 類似解析結果との整合性

基本ケース解析結果について、妥当性が確認された既許認可解析にて考慮していた燃料・水分条件を採用した類似解析の結果との比較を行い、条件の差異に対して実効増倍率の増減の方向が適切であることを確認する。

#### 3.1.1 評価条件および結果

基本ケースと、選定した類似解析条件における燃料・水分条件、および各条件での実効増倍率評価結果を第 3-2 表に示す。類似解析の条件としては、既許可において当該条件を用いた解析の妥当性が確認済みであるものを用いた。

なお、類似解析では体系全体に一律な水密度を設定する一方、基本ケースの気相部には燃料集合体の内側と外側それぞれに別の水密度を設定することから、解析結果の比較を行うため気相部の水分量に同じ指標を用いる必要がある。ここで、水密度が  $1.0\text{g/cm}^3$  ～ 約  $0.5\text{g/cm}^3$  の範囲では水密度低下に伴い実効増倍率が単調減少し、その後水密度約  $0.1\text{g/cm}^3$  に向けて実効増倍率が上昇するという既許認可解析結果の特徴、すなわち核分裂により発生した中性子が隣接燃料まで到達し隣接燃料で核分裂反応を起こすことにより実効増倍率が上昇することを踏まえれば、体系の水分量が少ない場合には、体系内中性子の平均自由行程が冠水時に比べて約 10 倍程度に長くなっている状態であり、このような状態においては、水分の存在形態（液滴や液膜）よりも、体系内に保持される水分量によって、実効増倍率は特徴づけられると考えられる。

よって、基本ケースと類似解析の結果を比較するため、それぞれの体系の水分量を空間平均水密度\*に換算して実効増倍率をプロットしたものを第 3-2 図に示す。

※空間平均水密度：気相部内の、「液膜+燃料集合体外気相部水密度」という非均質な水分状態について、体系に保持される水分量を保存した状態で一様水密度へ換算したものの。

<空間平均水密度  $\rho$  の算出方法>

$$\rho = \rho_x + \rho_y + \text{飽和蒸気密度}$$

$\rho_x$ ：燃料集合体外気相部水密度による空間平均水密度への寄与分

$\rho_y$ ：液膜による空間平均水密度への寄与分

$$\rho_x = (\text{燃料集合体外気相部水密度} - \text{飽和蒸気密度}) \times \frac{(\text{ラックピッチ面積} - \text{燃料集合体外寸面積})}{S}$$

$$\rho_y = \frac{S_m}{S} \times 1[\text{g/cm}^3]$$

( $S_m$ ：ラックピッチあたりの液膜占有面積、 $S$ ：ラックピッチあたりの間隙面積)

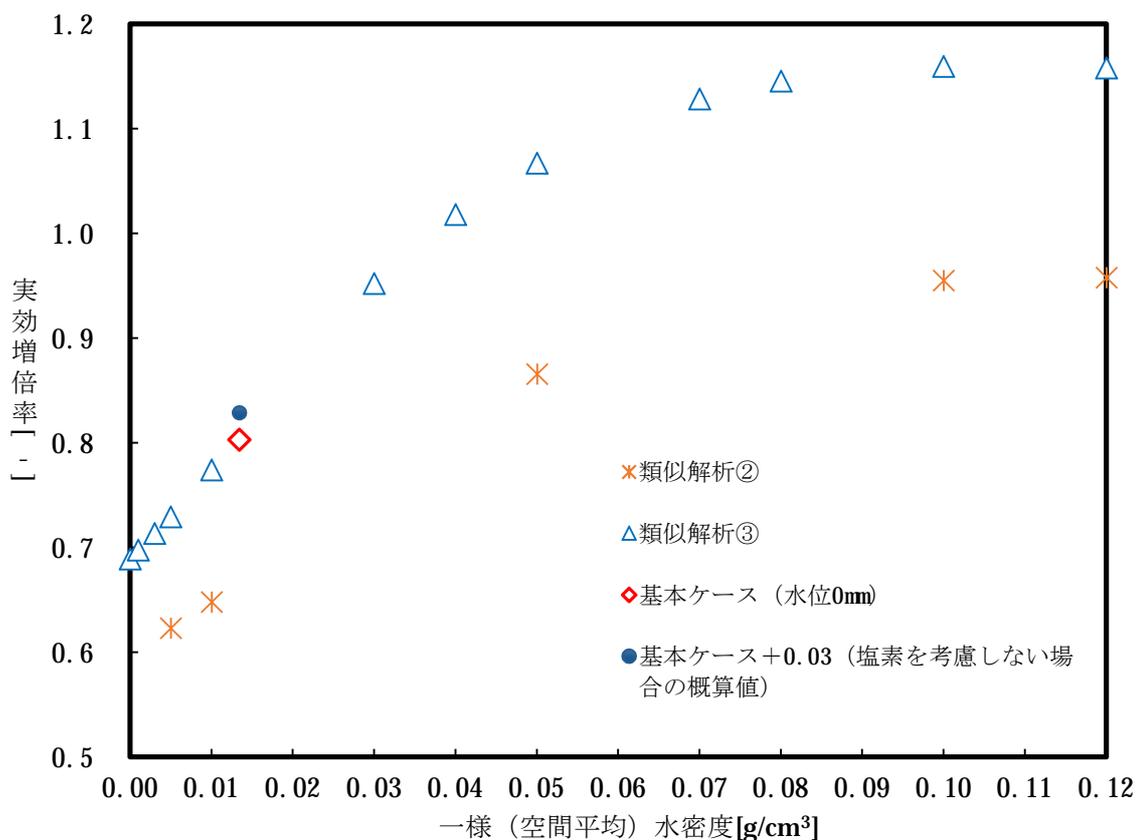
第 3-2 表 基本ケース、類似解析の解析条件および結果

	基本ケース条件	類似解析① (既許認可での 16 条 および 54 条 1 項に係 る評価)	類似解析② (既許認可での 54 条 2 項に係る評価)	類似解析③
燃料配置	ウラン新燃料 敷き詰め	ウラン新燃料 敷き詰め	3 領域管理 (0、20、50GWd/t)	ウラン新燃料 敷き詰め
ウラン濃縮度	<input type="text"/> wt%	<input type="text"/> wt%	<input type="text"/> wt%	<input type="text"/> wt%
液膜厚さ	<input type="text"/> mm	—	—	—
燃料集合体内 気相部水密度	0.0006 g/cm <sup>3</sup>	1.0 g/cm <sup>3</sup>	0~1.0 g/cm <sup>3</sup> で一様変化	0~1.0 g/cm <sup>3</sup> で一様変化
燃料集合体外 気相部水密度	<input type="text"/>			
液相部条件	純水 (水密度 1.0g/cm <sup>3</sup> )	—	—	—
変動 パラメータ	水位	なし	水密度	水密度
実効増倍率 <sup>※1,2</sup> 評価結果	冠水：0.947 水位 0 cm：0.803 (水位 0cmでの空間平均 水密度：0.0134g/cm <sup>3</sup> )	0.953	(水密度：実効増倍率) 1.0g/cm <sup>3</sup> ：0.937 約 0.1g/cm <sup>3</sup> 以下：第 3- 2 図参照	(水密度：実効増倍率) 1.0g/cm <sup>3</sup> ：0.947 約 0.1g/cm <sup>3</sup> 以下：第 3- 2 図参照

※1 不確定性を考慮しない値

※2 小数第 4 位を切り上げた値

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 3-2 図 基本ケースおよび類似解析の評価結果

### 3.1.2 妥当性確認

#### 3.1.2.1 燃料冠水時の実効増倍率

解析結果は、類似解析②<基本ケース<類似解析①となっている。

これは、この3つの水分状態が冠水状態で共通しており、実効増倍率の差異は燃料条件に依存すること、燃料条件（燃焼度、濃縮度）は、類似解析②<基本ケース<類似解析①の順に厳しくなることから妥当である。

#### 3.1.2.2 水位 0cmでの実効増倍率

類似解析③は、軸方向の燃料有効長全域にわたり一様な水密度を設定し解析している（すなわち気相・液相の分かれ目がない）ため、今回の未臨界評価手法における水位が 0 cmである状態（すべて気相部、ただし液膜が無い条件）に相当する状態と捉えることが出来る。第 3-2 図に示される通り実効増倍率は、類似解析③（水密度 0.01g/cm³）<基本ケース<類似解析③（水密度 0.03g/cm³）となっている。

これは、参考 3 に示すように、空間平均水密度が 0g/cm³ から約 0.1g/cm³ の範囲においては、空間平均水密度が大きくなるほど実効増倍率が高くなること、および基本ケース（水位 0cm）の空間平均水密度（0.0134g/cm³）が、0.01 g/cm³ と 0.03 g/cm³ の間にあることから妥当である。

また、基本ケースにおける気相部には塩素が含まれている。塩素による中性子吸収効果は実効増倍率換算で約 **0.03** であり、塩素の中性子吸収効果を考慮しない場合の想定値として基本ケース（水位 **0cm**）の実効増倍率に **0.03** の加算を仮定しても **0.833** となり、この値でも類似解析③（水密度 **0.01g/cm<sup>3</sup>**） < 基本ケース < 類似解析③（水密度 **0.03g/cm<sup>3</sup>**） の関係を満たす。

### 3.2 一般的な物理式により求まる実効増倍率との整合性

今回設定した基本ケースの水位 **0cm** での実効増倍率 (**0.803**) は、冠水時の実効増倍率 (**0.947**) と比較して小さいことから、基本ケースの水分条件は実効増倍率に対する気相部の寄与が小さい条件であるといえ、中途水位における実効増倍率解析結果は、水位低下に伴い単調に減少する挙動を示した。本挙動が、一般的な物理式から得られる水位低下時の実効増倍率挙動と整合しているかを確認した。

#### 3.2.1 前提条件

- ・液相部のほうが反応度は相当大きいという基本ケースの特徴を踏まえ、議論を単純化するため、第 3-3-1 図に示すような液相部と燃料からなる体系（軸方向寸法の低下により液相水位および燃料高さも同時に低下する）を考える。この場合、実効増倍率( $k_{eff}$ )は以下の式より求められる。

$$k_{eff} = \frac{k_{\infty}}{1+M^2B^2} \cdot \cdot \cdot \textcircled{1}$$

ここで、 $k_{\infty}$ は液相部の無限増倍率、 $M^2$ は移動面積、 $B^2$ は液相部のバックリングである。

- ・SFP 冠水時の実効増倍率は、体系が十分に大きいことから有限体系でも無限体系でも大きな差は無いため、液相部の無限増倍率（中性子の体系外への漏れがないとした増倍率）は、今回基本ケース冠水時の実効増倍率を保守側に切り上げ  $k_{\infty} = \mathbf{0.95}$  とする。
- ・バックリングの算出には、直方体の体系における一般的な導出式である下式を用いる。 $X$  と  $Y$  は SFP の水平方向寸法であり固定値とし、 $Z$  は液相部の高さとする。

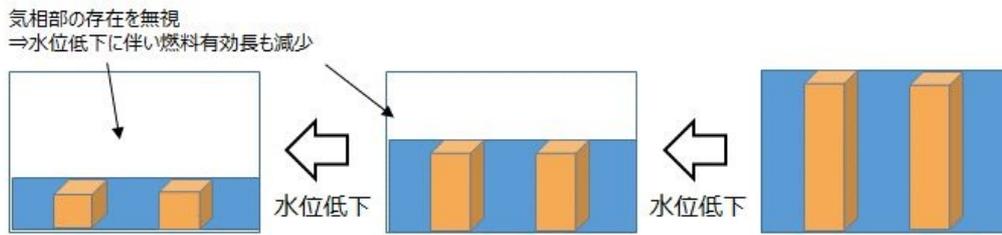
$$B^2 = \left(\frac{\pi}{X+2\delta_x}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{Y+2\delta_y}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{Z+2\delta_z}\right)^2 \quad \cdot \cdot \cdot \textcircled{2}$$

ここで、 $\delta$ は外挿距離である。

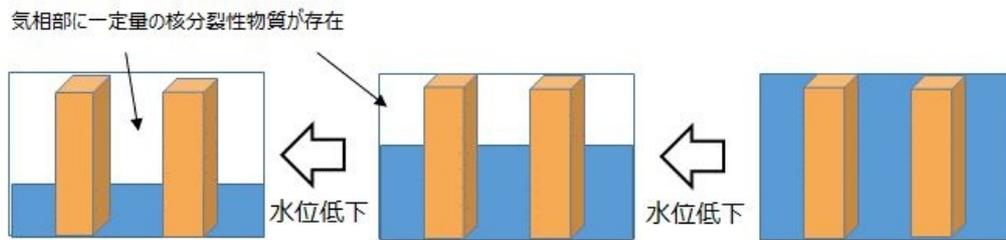
- ・実効増倍率の算出に必要な移動面積 $M^2$ および外挿距離 $\delta$ は、文献（軽水減速  $UO_2$  および  $PuO_2-UO_2$  燃料炉心の臨界量、JAERI 1254、鶴田晴通ら(1977)）に示される TCA 実験炉の試験データを元に、以下の通り設定する。これらの導出過程を参考 1 に示す。

$$M^2 = \mathbf{37.7}, \delta_x = \delta_y = \mathbf{8.5}, \delta_z = \mathbf{6.3}$$

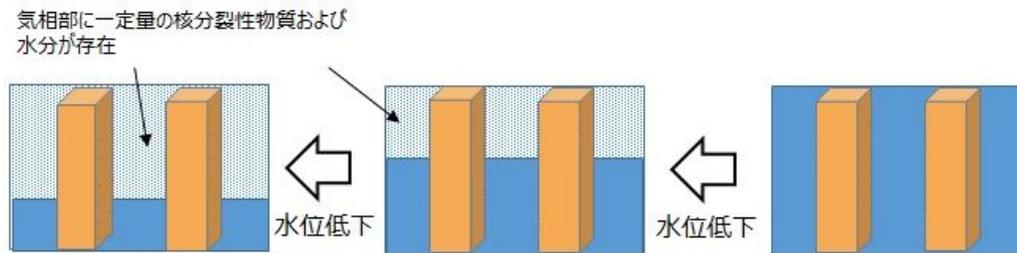
TCA 実験炉の体系概念図を、基本ケースの体系概念図と共に第 3-3-2 図に示す。



第 3-3-1 図 物理式に基づく評価で考慮する体系の概念図



TCA 実験炉の体系概念図



基本ケースの体系概念図

第 3-3-2 図 TCA 実験炉および基本ケースの体系概念図（燃料領域のみ）

ここで、 $M$  は拡散係数および中性子吸収・散乱断面積により求まる値であり、TCA 実験炉データと、物理式に基づく概略評価で考慮する体系や基本ケース体系は  $H/U$  が同等であるため、体系間での差は小さいと考えられる。また各体系で水平方向には軽水が存在するため、水平方向の外挿距離も各体系間での差は小さいと考えられる。

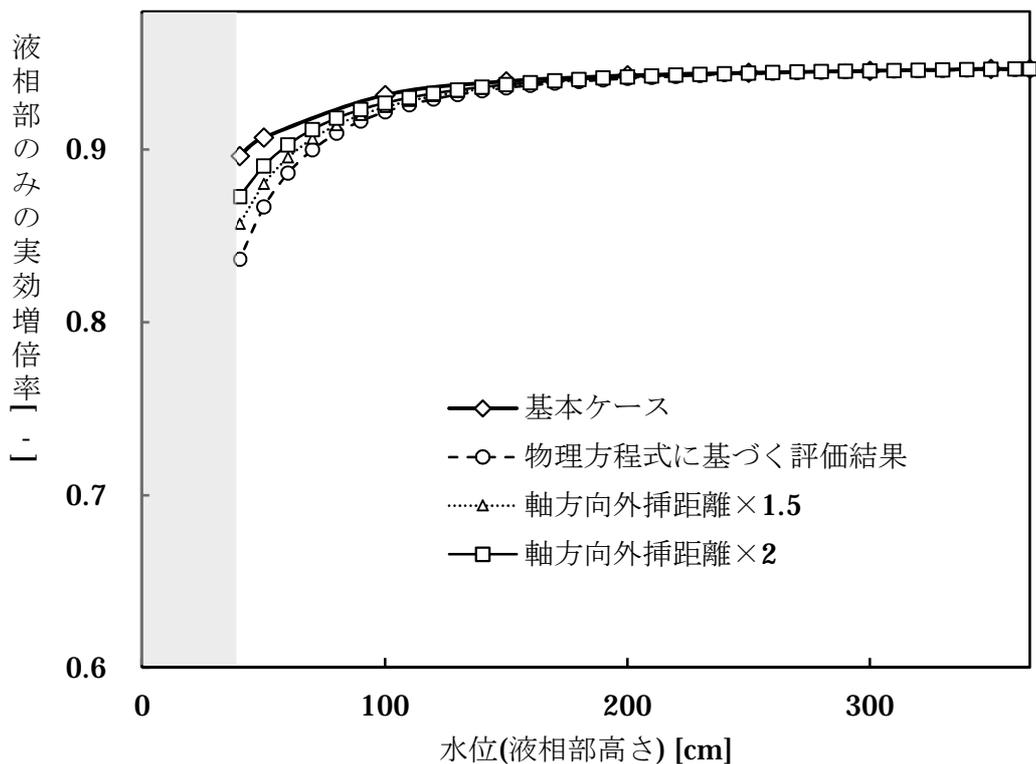
一方で、TCA 実験炉では液面上部には水分がほぼ存在しない一方、基本ケースでは一定量の水分が存在している。また基本ケースの解析においては下部反射体として厚さ 1000mm のコンクリートを設定していることを踏まえると、基本ケースの体系における軸方向外挿距離は、TCA 実験炉で取得された値より大きな値となることが考えられる。軸方向外挿距離が大きくなることによる実効増倍率への感度を確認するため、外挿距離  $\delta_z$  を 1.2 倍、1.5 倍、2 倍とした場合の物理式に基づく実効増倍率を合わせて確認する。

なお、体系が小さくなり中性子の漏れが極端に多くなる場合には、②式において体系寸法に対して定数である外挿距離の影響が大きくなり、①式による  $k_{eff}$  の値は実際の実効増倍率と差が生じてくるため、水位変化に対する実効増倍率変化挙動を①式にて確認するに当たっては、ある程度の水位以上で適用できることに注意が必要となる。本評価においては、文献でのTCA試験炉では臨界状態を達成するために炉心水位 40cm以上にて測定が実施されていることから、バックリングを踏まえた妥当性確認においては、水位 40cm以上を確認対象とする。

### 3.2.2 妥当性確認

液相高さを変化させた場合の実効増倍率を概算した結果を第3-4図に示す。一般的な物理式により算出した実効増倍率は、水位低下に伴い単調に減少しており、基本ケースの評価結果も同様に単調減少していることから、今回評価結果が物理的に妥当であることが確認できる。

また基本ケースと TCA 試験炉の体系の違いを踏まえ、文献の TCA 実験で得られた外挿距離よりも長い値を物理式に適用した場合の実効増倍率への感度を確認した。



第3-4図 物理式より求まる実効増倍率

#### 4. 解析に適用した品証プロセスの確認

今回の未臨界性評価に係る解析の実施に当たっては、「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」（以下、本ガイドラインという。）に則った品質管理を実施している。本ガイドラインでは、解析結果の検証を含め解析業務全般に対する審査を実施することが要求されており、今回解析業務の発注者である当社は、検証を含む審査を受注者が適切に行っていることを確認することで持って解析結果の適切性を確認している。

本ガイドライン規定項目のうち、解析コードの取り扱いや解析結果の確認に関する規定項目に係る当社の実施事項を第 3-5 表に示す。なお「解析結果の審査、検証」について、本ガイドラインに記載される〈解説、事例等〉に沿って記載している。

第 3-5 表 「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」の適用確認 (1/2)

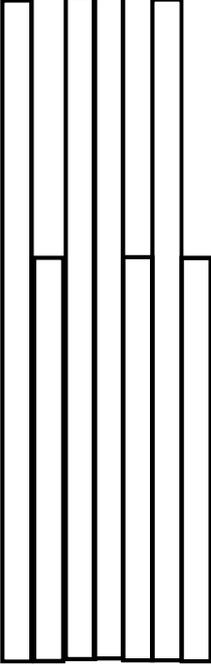
(原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン)		実施事項	確認結果 (○：実施 ×：未実施)
項目	項 目 規定内容		
(i)	<p>【発注者 (事業者)】】</p> <p>(1) 発注者は、受注者によって使用する計算機プログラムが適正であることが検証され、その検証方法及び登録方法を明確にして管理されていることを確認すること。</p> <p>【受注者 (解析者)】】</p> <p>(1) 受注者は使用する計算機プログラムが適正であることを検証するための検証方法や、適切に管理するための登録方法(登録リストによる管理方法等)を明確にすること。</p> <p>(2) 受注者は(1)の方法に基づき、計算機プログラムが適正なものであることを事前に検証し、受注者の組織が定めた登録リストにて管理すること。登録管理を行わない計算機プログラムを使用する場合には、その都度、検証を行うこと。</p> <p>(3) その登録リストには、検証された計算機プログラム名称及びバージョンを明記すること。また、計算機プログラム名称が同じであってもバージョンが相違する計算機プログラムを使用する場合は、改めて検証を行うこと。</p>	<p>【発注者】】</p> <p>SCALE コードが適正なものであることが以下の通り事前に検証されていることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・コードに付属のサンプル問題を実行し、解析解があらかじめ準備された参照解を再現した。(既許可時点で確認)</li> <li>・解析業務調達時における SCALE コードの運用環境について、開発機関 (ORNL) から提示された要件を満足している。(今回解析に当たっても確認)</li> </ul> <p>【受注者】】</p> <p>SCALE コードの検証方法および結果 (ベンチマーク解析等によりコードとしての V&amp;V を実施済みであることを確認する等) を図書に纏めている。また SCALE コードはソフトウェアリストに登録し管理することとしている。</p> <p>解析実施前に、SCALE コードの検証を行っている (動作環境が適切であること、SFP 未臨界性評価に用いるための妥当性確認済みのプログラムであること等)。</p> <p>登録リストにはプログラム名称及びバージョンを明記している。</p>	○
(ii)	<p>【発注者 (事業者)】】</p> <p>(1) 発注者は、受注者が解析ごとの入力根拠を明確にしていることを確認すること。</p> <p>【受注者 (解析者)】】</p> <p>(1) 受注者は、業務計画書等に基づき解析ごとの入力根拠を明確にした文書を作成すること。</p>	<p>【発注者】】</p> <p>今回解析に係る業務計画書に基づき受注者が作成する、入力条件を取り纏めた図書において、以下の通り入力根拠が明確になっていることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・液膜厚さ、気相部水密度等の水分条件が当社指定の条件通りであること。</li> <li>・燃料仕様やラック仕様の詳細 (燃料材の径、被覆管内外厚さ、ラック内のり等) について、設備図書に基づき設定されていること、または既許認可での設定条件と同じであること。</li> </ul> <p>【受注者】】</p> <p>入力条件の根拠を取り纏めた図書を作成した。</p>	○
(iii)	<p>【発注者 (事業者)】】</p> <p>(1) 発注者は、受注者が計算機プログラムへの入力 が正 確 に 実施されたことを確認していることを確認すること。</p> <p>【受注者 (解析者)】】</p> <p>(1) 受注者は、計算機プログラムへの入力 が正 確 に 実施されたこと の 確 認 を 行 う こ と 。</p>	<p>【発注者】】</p> <p>エコーバック<sup>※</sup>されたデータにより、図書で定めた通り適切に入力 が なされたことをチェックしていることを確認した。</p> <p>【受注者】】</p>	○

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 3-5 表 「原子力施設における許認可申請等に係る許認可申請等に関する解折業務の品質向上ガイドライン」の適用確認 (2/2)

項目 番号	項目 (原子力施設における許認可申請等に係る解折業務の品質向上ガイドライン)		実施事項	確認結果 ( ○：実施 ×：未実施
	規定内容			
(iv)	<p>解折結果の審査<sup>※3</sup>, 検証</p>	<p><b>【発注者（事業者）】</b></p> <p>(1) 発注者は、受注者が解折結果の検証項目と内容を明確にし、検証を含む審査状況を確認すること。</p> <p>&lt;解説、事例等&gt;</p> <p>発注者は、受注者が解折結果を、以下の観点で審査していることを、添付 1「解折業務の業務フローチャートの例」に示すように、受注者の作業工程の中で適宜確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・入力根拠を明確にしており、計算機プログラムへの入力を正確に実施しているか。</li> <li>・汎用表計算ソフトウェアを使用していることを明確にしており、必要な管理をしているか。</li> <li>・解折結果が適切であることを確認しているか。</li> </ul> <p><b>【受注者（解折者）】</b></p> <p>(1) 受注者は、あらかじめ策定した業務計画書に従って解折結果の検証を含む審査を行うこと。また、検証の結果を客観的な証拠によって示せるようにすること。</p> <p>(2) 受注者は、審査する者の活動内容を明確にして審査を行うこと。</p> <p>&lt;解説、事例等&gt;</p> <p>(1)-① 解折結果は、以下の観点で審査を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・入力根拠を明確にしており、計算機プログラムへの入力を正確に実施しているか。また、過去に実績のある入力データを流用している場合は、根拠を明確にしているか確認する。</li> <li>・汎用表計算ソフトウェアの使用を明確にしており、入力した計算式を事前に検証して登録しているか。また、登録していない場合には、その都度、検証しているか。</li> <li>・解折結果が受容できるものであることを次の例に示す方法で確認しているか。 <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 類似解折結果との比較（適切な比較対象を選定すること。）</li> <li>b. 物理的又は工学的整合性の確認（解折結果を理論値や経験値と比較）</li> </ul> </li> </ul>	<p><b>【発注者】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 原解折者以外の、適切な力量を有した検証者（兼、審査者）が、以下の通り解折結果を審査していることを確認した。</li> <li>・原解折者は、入力根拠を図書として整備し明確にしている。また原解折者により、エコーバックされた入力が入力がチェックされており、SCALE コードへの入力が正確に実施されている。</li> <li>・解折業務において汎用計算ソフトウェアは使用していない。</li> <li>・解折結果が適切である。</li> </ul> <p><b>【受注者】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 解折結果が受容できるものについて、  <div style="border: 1px solid black; height: 15px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 15px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 15px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 15px; width: 100%;"></div> </li></ul>	

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

		<p>(1)-② 許認可申請用の解析に変更又は新規性が認められる場合には、デザインレビュー等により適切か確認する。例として、以下のものがある。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・新設計の燃料、炉心、系統・設備等を採用した場合</li> <li>・新しい解析手順又は計算機プログラムを適用した場合</li> </ul> <p>(1)-③ 新たに解析を行わずに過去の検証済みの解析結果をそのまま使用する場合には、適用する設計インプットが同等であることを個々の使用ごとに検証する。また、過去の検証済みの解析結果に適用された検証方法・内容程度が(1)-①、②に記載する最新の手順と同等でない場合には、最新の手順に従って改めて検証を行うか、又は不足分に対する追加の検証を行う。</p>	 <p>液膜を考慮した解析は今回新たに実施している。</p>	
(v)	解析業務の変更管理	<p>【発注者（事業者）】</p> <p>(1) 発注者は、解析結果に影響がある変更が発生した場合、受注者に対して変更内容を確認に伝え、解析業務の変更管理を行わせること。</p> <p>(2) 発注者は、受注者が解析業務における変更を管理していることを確認すること。</p> <p>【受注者（解析者）】</p> <p>(1) 受注者は、解析業務に変更が生じた場合は変更内容を文書化し、解析業務の各段階においてその変更内容を反映すること。</p>	<p>【発注者】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 解析条件変更の都度、変更内容を受注者へ伝えている。</li> <li>➤ 受注者にて変更管理が行なわれていることを確認している。</li> </ul> <p>【受注者】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 発注者より変更連絡があった都度、変更内容を文書化し、解析業務の各段階においてその変更内容を反映している。</li> </ul>	○

※1 本ガイドラインにおいては、計算機プログラム並びに解析結果の適切性を確認する行為を指す。

※2 計算機が読み込んだ入力データを出力として書き出したもの。

※3 本ガイドラインにおいては、検証を含め解析業務全般を広い視点で確認する行為を指す。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

## 5. まとめ

今回解析結果について、以下に示す観点により、その妥当性を確認した。

- ・一般的な物理式により求まる水位変化時の実効増倍率挙動と、基本ケースにおける実効増倍率の挙動が一致している。
- ・既許認可において妥当性が確認されている類似解析結果と基本ケース解析結果を比較した結果、条件の差異に対して実効増倍率の増減の方向は適切であった。

また今回解析業務において適用した品証プロセスを確認し、解析結果の適切性を確認した。

以上

(参考1) JAERI-1254 掲載値からの核定数算出について

1. はじめに

基本ケースの解析結果については、一般的な物理式により求まる液相部の実効増倍率の傾向と整合していることを確認している。物理式による実効増倍率の算出に使用した核定数は、JAERI-1254（以下、文献という。）で示される実験データより算出した。

ここでは、文献の実験データを用いた核定数の算出過程を示す。

2. 算出過程

- ・ TABLE2 に掲載のある実験結果のうち、高浜 1,2 号炉の 15×15 型燃料集合体のピンセル領域の H/U (=4.8) に近い 1.50U 格子を今回の数値算出対象とした。

TABLE 2 Name of lattice

Lattice name	H/U or H/Pu	Lattice pitch (cm)
1.50U	4.33	1.849
1.83U	5.28	1.956
2.48U	7.16	2.150
3.00U	8.65	2.293
2.42P U	402	1.825
2.98P U	494	1.956
4.24P U	703	2.225
5.55P U	921	2.474

- ・ TABLE10 に、実験結果から内挿などの手順を踏んで算出した臨界バックリングの値が掲載されている。1.50U 格子の場合 0.00833cm<sup>2</sup>である。

TABLE 10 Critical bucklings, B<sub>c</sub><sup>2</sup>

Lattice name	B <sub>c</sub> <sup>2</sup> (×10 <sup>-2</sup> cm <sup>-2</sup> )	Note
1.50U	0.833±0.010	pattern=28
1.83U	0.943±0.013	=24
2.48U	0.983±0.008	=20
3.00U	0.952±0.014	=18
2.42P U	0.808±0.004	on 1972-4-1
2.98P U	0.828±0.004	
4.24P U	0.779±0.003	
5.55P U	0.651±0.002	

- ・ ここで、実効増倍率は以下の式が成り立ち、かつ、TABLE10 は臨界バックリングの値であるので k<sub>eff</sub> = 1 が成り立つ。

$$k_{eff} = \frac{k_{\infty}}{1 + M^2 B^2} = 1$$

したがって、下式が得られる。

$$k_{\infty} = 1 + M^2 B^2$$

- ・文献中 TABLE7 には  $M^2/k_\infty$  の値が掲載されている。

TABLE 7 Ratios between migration area,  $M^2$ , and infinite multiplication factor,  $k_\infty$

Lattice name	$M^2/k_\infty$ (cm <sup>2</sup> )
1.50U	28.7±0.4
1.83U	28.8±0.3
2.48U	28.7±0.4
3.00U	27.9±0.2
2.42PU	28.9±1.1
2.98PU	28.8±1.3
4.24PU	30.2±0.9
5.55PU	32.0±0.5

この  $M^2/k_\infty = A$  とおくと、 $k_\infty = M^2/A$  となるので上式に代入すると

$$\frac{M^2}{A} = 1 + M^2 B^2$$

となり、整理すると下式が得られる。

$$M^2 = \frac{A}{1 - A \times B^2}$$

したがって、 $A$  の値を TABLE7 から、 $B^2$  の値を TABLE10 から適用すると、1.50U 格子の移動面積  $M^2$  は以下のように求められる。

$$M^2 = \frac{28.7}{1 - 28.7 \times 0.00833} \approx 37.7$$

- ・一方、反射体節約の数値が TABLE6 により与えられており、これらの値は軸方向、水平方向における両側の値である、と説明されている。外挿距離が反射体節約の片側、すなわち TABLE6 記載値の半分に等しいとして、1.50U 格子の外挿距離は、軸方向で  $\delta_V = 12.6/2 = 6.3$ 、水平方向で  $\delta_H = 17.0/2 = 8.5$  となる。

TABLE 6 Reflector savings

Lattice name	Vertical (cm)	Horizontal (cm)
1.50U	12.6±0.3	17.0±0.8
1.83U	12.2±0.3	13.9±0.8
2.48U	11.3±0.2	13.7±0.5
3.00U	11.1±0.5	14.0±0.8
2.42PU	12.5±0.2	14.6±0.3
2.98PU	12.0±0.2	14.1±0.3
4.24PU	11.6±0.2	13.4±0.2
5.55PU	11.3±0.2	13.1±0.2

以上

## (参考2) 液相部・気相部それぞれの中性子スペクトルについて

### 1. はじめに

今回評価では、体系を液相部と気相部に分割し、それぞれに異なる水分状態を設定する。各相の中性子スペクトルを評価することで、各相における中性子挙動の特徴を確認する。

### 2. 中性子スペクトルとの関連性

今回評価では、SFP全体を液相と気相に分け、水位を変化させて評価している。一般的に、液相部では水による中性子減速効果によりスペクトルが柔らかく（熱中性子が相対的に多い）、気相部ではスペクトルが硬くなる。これらスペクトルの特徴を視覚的に確認するため、気相部および液相部の高さ方向における中性子スペクトル分析を行った。分析には、SCALEコードではスペクトル分析を実施し難いことからMVPコードを用い、図1に示す通常ウラン新燃料を貯蔵した無限配列体系を対象に、液相部及び気相部それぞれの上部、中央部、下部の3つの高さ位置において求めた。

評価結果を図2-1、図2-2に示すが、気相部では相対的に高速中性子の割合が多く、液相部では熱中性子の割合が多くなっている。また気相部の特徴として、高さ方向の違いによりスペクトルの形状に差がみられる。具体的には、境界面に近い気相部①、③に比べて、中央部の気相②の熱中性子の割合が小さくなっており、境界面に近い気相部においては、隣接する水（液相部や反射体）による減速効果が現れているものと考えられる。一方、液相部では、軸方向位置の違いによるスペクトル形状差は見られない。

これらの結果から、気相部・液相部それぞれでスペクトル特性が異なることを確認でき、またスペクトル特性は評価体系より想定できる定性的な特性と同様の傾向を示している。

なお基本ケースは気相よりも液相の方が反応度が十分大きく、また上述の通り気相部の方が中性子エネルギーが高く、 $^{235}\text{U}$ の核分裂断面積は図3の通りエネルギーが高いほど小さいことから、定性的には液相水位が低下し（気相部が拡大し）体系中にエネルギーが高い中性子が多くなるほど、体系全体としての核分裂数が減り実効増倍率が低下すると言える。今回の水位低下に伴う基本ケース解析結果も本定性的考察と同様の傾向を示している。

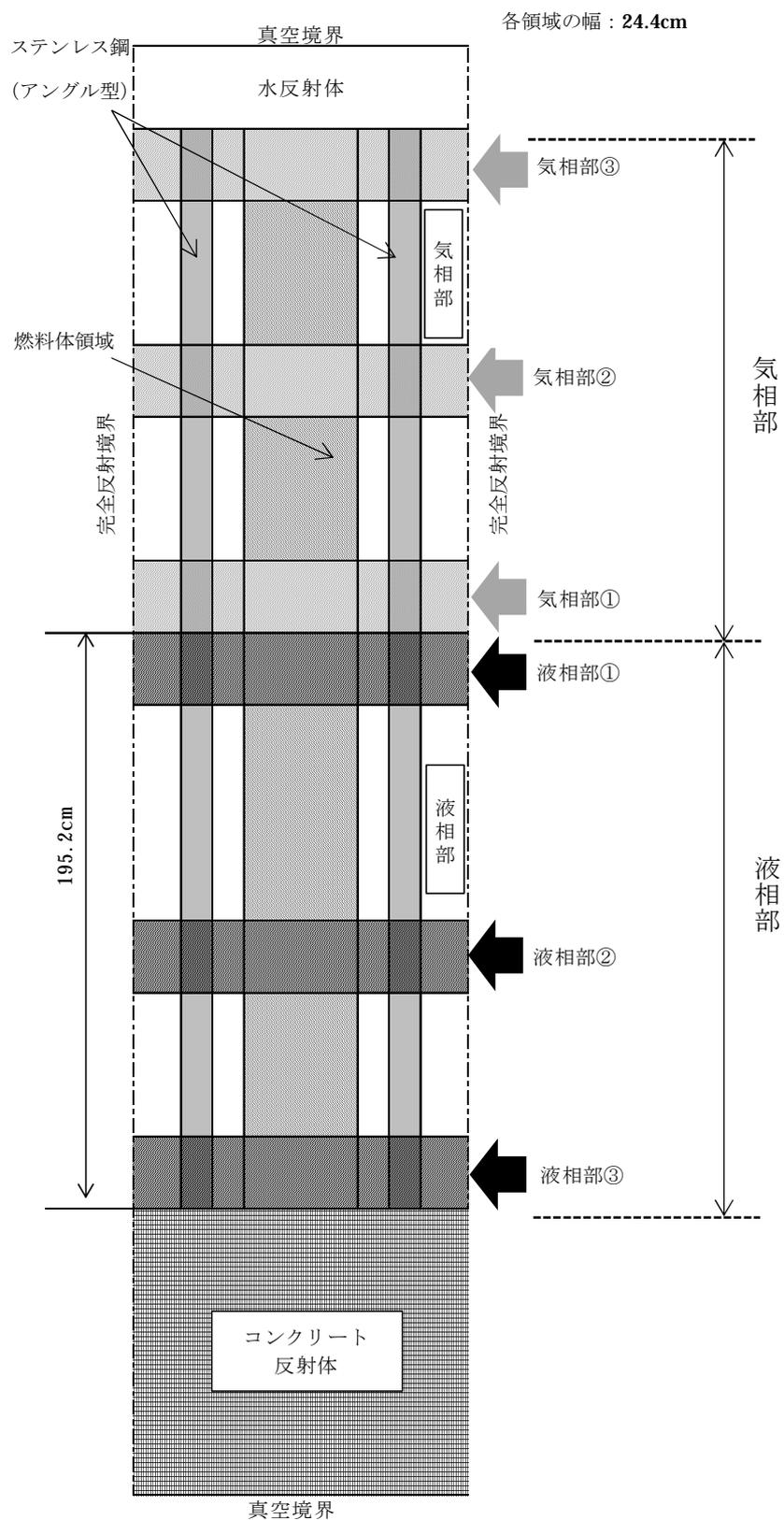


図1 境界における中性子スペクトルの評価体系 (軸方向)



図 2-1 気相部の中性子スペクトル評価結果

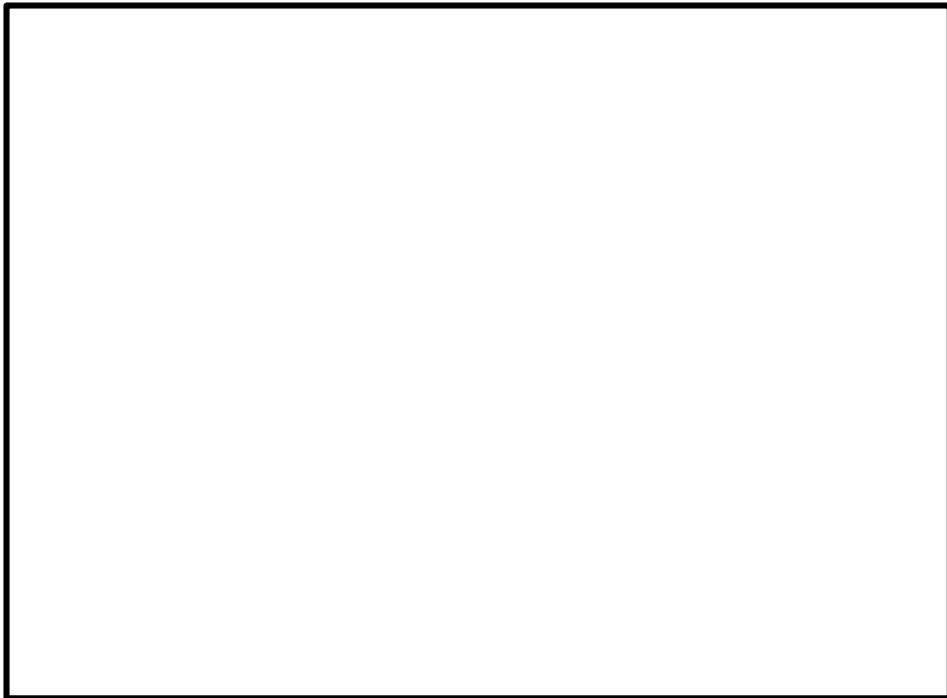


図 2-2 液相部における中性子スペクトル評価結果

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

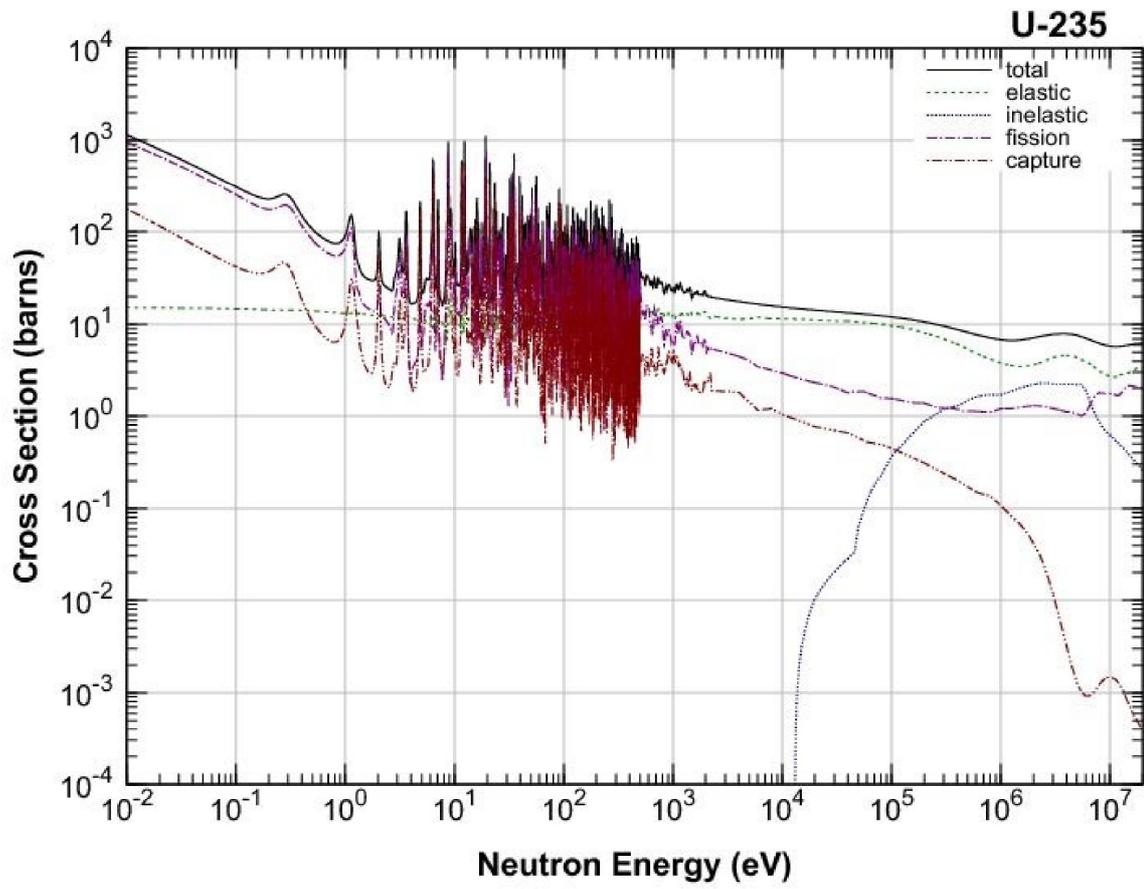


図3  $^{235}\text{U}$  断面積

(参考3) 水分条件変化時の実効増倍率への影響評価

1. はじめに

今回解析では、既許可の水分条件と異なり、集合体の内側と外側それぞれに異なる水分条件を設定する。これらの水分条件が変化した場合の実効増倍率影響に関する基礎データを得るために、燃料集合体の内側の水分状態のみ、もしくは外側の水分状態のみを変化させた場合の実効増倍率への影響を確認するパラメータスタディを実施した。

2. 燃料集合体の内側の水分状態のみを変化させた場合

燃料集合体の中の水分状態、すなわち液膜厚さのみを変化させた解析を行った。解析条件を図1に、解析結果を図2に示す。図2に示すとおり、液膜が厚くなるほど実効増倍率は高くなった。これは、核燃料の近くに減速材が多く存在するほうが実効増倍率は上がりやすいためである。

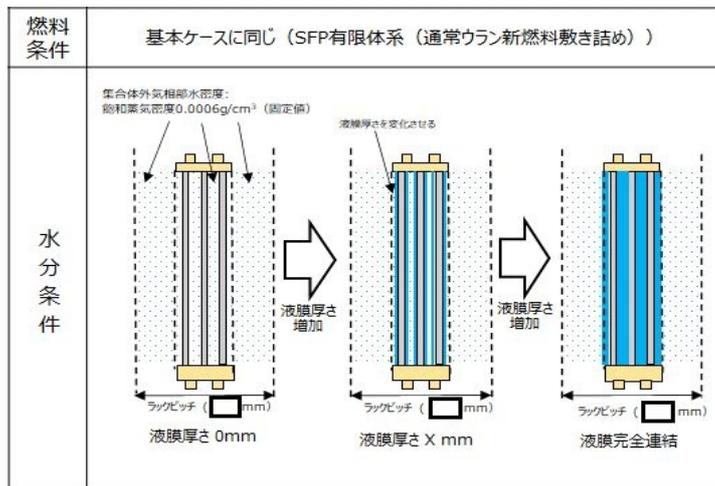
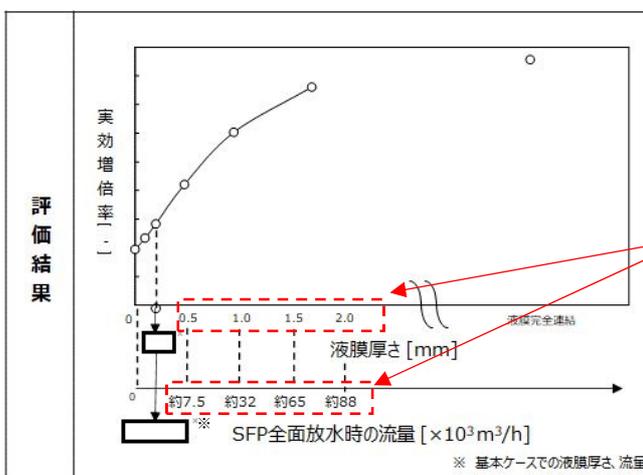


図1 燃料集合体の中の水分条件のみを変化させるパラメータスタディ 評価条件



これらの液膜厚さ条件における空間平均水密度 (3.1.1 項に記載の者に同じ。) を求め、それと等しい空間平均水密度を発生させる流量 (その流量により液膜と液滴も発生する) を第2X軸に記載した。なお、SFP 全面放水時の流量と液膜厚さの評価式 (包絡式) を用いて換算している。

流量  $7500\text{m}^3/\text{h}$  での液膜厚さ、集合体間気相部水密度 (それぞれ  $0.38\text{mm}$ 、 $0.0083\text{g/cm}^3$ ) での空間平均水密度は約  $0.0282\text{g/cm}^3$

図2 燃料集合体の中のみを変化させるパラメータスタディ 評価結果

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(2) 燃料集合体の外側の水密度のみを変化させた場合

燃料集合体の外側の水分状態、すなわち燃料集合体外気相部水密度のみを変化させた解析を実施した。解析条件を図3に、解析結果を図4に示す。図4に示すとおり、体系全体の集合体間の気相部水密度は、水密度  $0\text{g}/\text{cm}^3$  から約  $0.1\text{g}/\text{cm}^3$  に上昇するまでは実効増倍率が上昇し、その後減少に転じるが、水密度  $1\text{g}/\text{cm}^3$  に向けて再度上昇しない点が既許可とは異なっている。本パラメータスタディでは、集合体の外の水密度のみを変化させていることから、燃料集合体間の水密度が約  $0.1\text{g}/\text{cm}^3$  より大きくなる（中性子が隣接燃料へ到達するまでに集合体間の水分子に吸収されやすくなる）一方で、燃料集合体単体の反応度は増加することがないため、実効増倍率は単調に減少したものである。

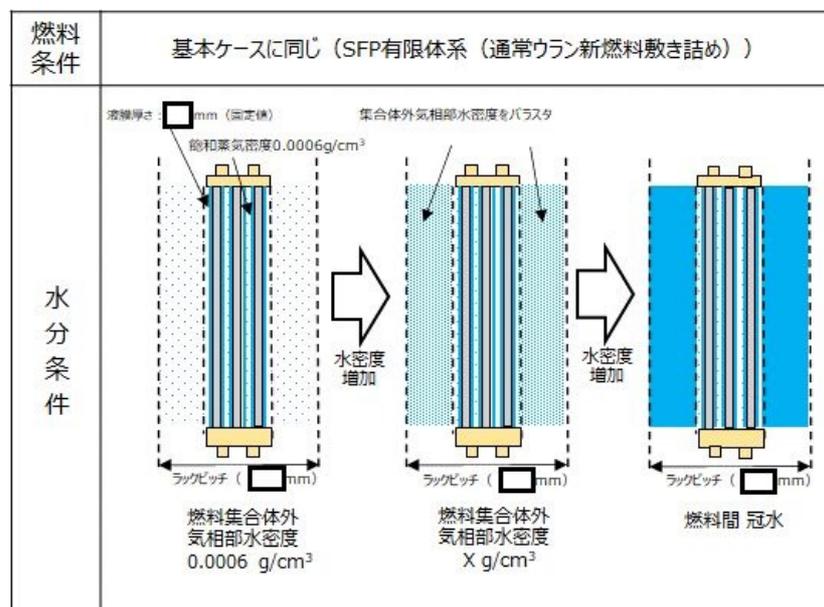


図3 燃料集合体の外の水密度のみを変化させるパラメータスタディ 評価条件

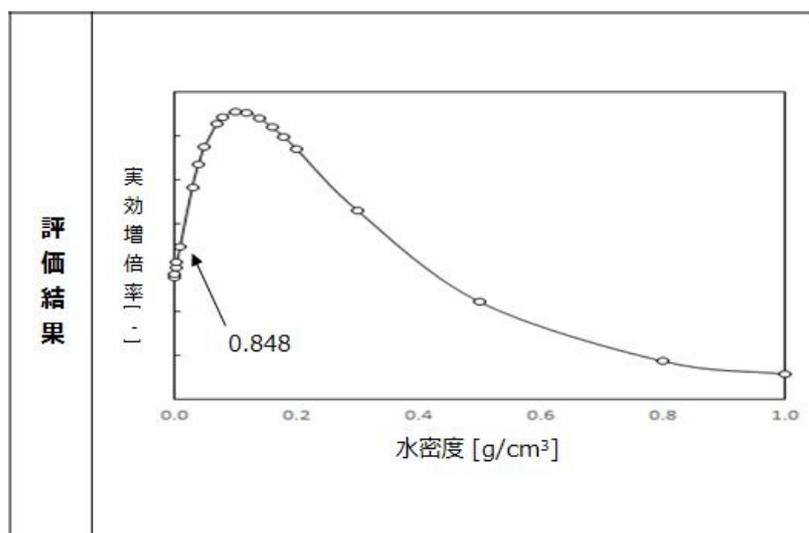


図4 燃料集合体の外のみを変化させるパラメータスタディ 評価結果

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

### 3. まとめ

図 2 および図 4 の結果より、今回の評価体系においては、液膜厚さや燃料集合体外気相部水密度が変化した場合、実効増倍率は以下挙動を示すことを確認した。

- ・液膜厚さが厚いほど、実効増倍率は大きくなる。
- ・燃料集合体外気相部水密度は、0～約  $0.1\text{g/cm}^3$  の範囲では、水密度が大きいほど実効増倍率は大きくなる。



大規模漏えい時の未臨界性評価における不確定性評価の考え方

## 目次

1. はじめに
2. 考慮すべき不確定性について

## 1. はじめに

今回の未臨界性評価においては、ラック仕様等の一部条件について公称値を使用しており、正負の製作公差を未臨界性上厳しくなる側に不確定性として考慮することとしている。本資料では、今回評価において考慮すべき不確定性の考え方について説明する。

## 2. 考慮すべき不確定性について

高浜 1, 2 号炉の使用済燃料ピットで、大規模漏えい時の未臨界性評価において考慮すべき不確定性として考えられるのは、以下のとおりである。

- ① 大規模漏えいを想定した解析モデルに係る不確定性
- ② 臨界計算上の不確定性（計算コードに係る不確定性）
- ③ 製作公差に基づく不確定性（ラック内での燃料体等が偏る効果を含む。）

上記のうち「①大規模漏えいを想定した解析モデルに係る不確定性」として考える項目は、使用済燃料ピット内の水分雰囲気、ほう素濃度条件及び使用済燃料ピットの構造物条件が挙げられる。

今回の未臨界性評価においては、使用済燃料ピット内の水分雰囲気については、事故時の実態に則した状態（基本ケース）に対し、発生しうる不確かさの影響を確認するための感度解析ケースにおいても未臨界が維持できることを確認する評価手法を採用する。また液相部に残存しているほう素は考慮しない。さらに、上下部の構造物による中性子反射効果を考慮し、燃料有効長上部は低水密度状態においても、十分な中性子反射効果が得られる厚さ（中性子反射効果が飽和する厚さ）である **300mm** の水反射と仮定し、燃料有効長下部についても同様に、**1,000mm** のコンクリートとして評価する。以上より①に係る不確定性については、全て使用済燃料ピットで大規模漏えいを想定した際に現実的に生じる状態を十分に包含できる評価手法および設定としている。

一方で、「②臨界計算上の不確定性（計算コードに係る不確定性）」については、別紙 1 「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示されるとおり、使用済燃料ピット仕様及び燃料仕様等を考慮して選定した臨界実験に対して、ベンチマーク解析を実施し、臨界計算に考慮すべき平均誤差及び標準偏差を適切に評価し、不確定性として考慮する。

また「③製作公差に基づく不確定性（ラック内での燃料体等が偏る効果を含む。）」については、燃料体等及びラックが健全であるという前提では、低水密度状態においても、平成 24 年 3 月 29 日付け平成 24・02・07 原第 10 号及び 11 号にて認可された工事計画の参考資料 6 「既存設備への影響に関する説明書」において考慮している項目を同様に考慮することで網羅的に評価される。

上記より、高浜 1, 2 号炉の使用済燃料ピットで、大規模漏えい時に考慮すべき不確定性は②、③に係る不確定性となる。今回設定した基本ケースおよび感度解析ケースで実効増倍率が最大となった燃料冠水状態において、②、③に係る不確定性を評価した結果、不確定性の合計は第 4-1 表に示すとおり **0.0115** となる。

第 4-1 表 高浜 1, 2 号炉 大規模漏えい時の未臨界性評価における不確定性評価結果  
(純水冠水時)

臨界計算上の不確定性評価項目				不確定性	
計算コード	平均誤差		$\delta k$	0.0007 <sup>(注1)</sup>	
の不確定性	95%信頼度×95%確率		$\epsilon_c$	0.0065 <sup>(注2)</sup>	
				不確定性	入力値 <sup>(注3)</sup>
製作公差に基づく不確定性	計算体系を第 4-1 図に示す。	ラックの内のり公差	$\epsilon_w$	0.0023	<input type="text"/>
		燃料製作公差	$\epsilon_r$	0.0061	—
		—燃料材直径	$\epsilon_d$	(0.0014)	<input type="text"/>
		—燃料材密度	$\epsilon_l$	(0.0038)	<input type="text"/>
		—被覆材内径	$\epsilon_{cr}$	(0.0014)	<input type="text"/>
		—被覆材外径	$\epsilon_{cd}$	(0.0032)	<input type="text"/>
		—燃料体外寸	$\epsilon_a$	(0.0029)	<input type="text"/>
	計算体系を第 4-2 図に示す。	ラック内燃料偏心	$\epsilon_f$	0.0042 <sup>(注4)</sup>	—
		ラックの中心間距離公差	$\epsilon_p$	0.0036 <sup>(注5)</sup>	<input type="text"/>
統計誤差			$\sigma$	0.0005	
不確定性合計 <sup>(注6)</sup>			$\epsilon$	0.0115	

(注 1) 国際的に臨界実験データを評価収集している OECD/NEA による INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS に登録されているウラン燃料に係る臨界実験を対象に SCALE6.0 システムのベンチマーク解析を実施して得られる加重平均実効増倍率の平均誤差。

(注 2) 上記の臨界実験を対象に SCALE6.0 システムのベンチマーク解析を実施して得られる加重平均実効増倍率の不確かさ (95%信頼度×95%確率での信頼係数を考慮)。

(注 3) 正負の製作公差のうち未臨界性評価上厳しくなる側の値を入力値とした。

(注 4)  のラック内での燃料体の偏心モデル (第 4-3、4-4、4-5 図)  での評価結果。なお、評価結果は下表のとおり。

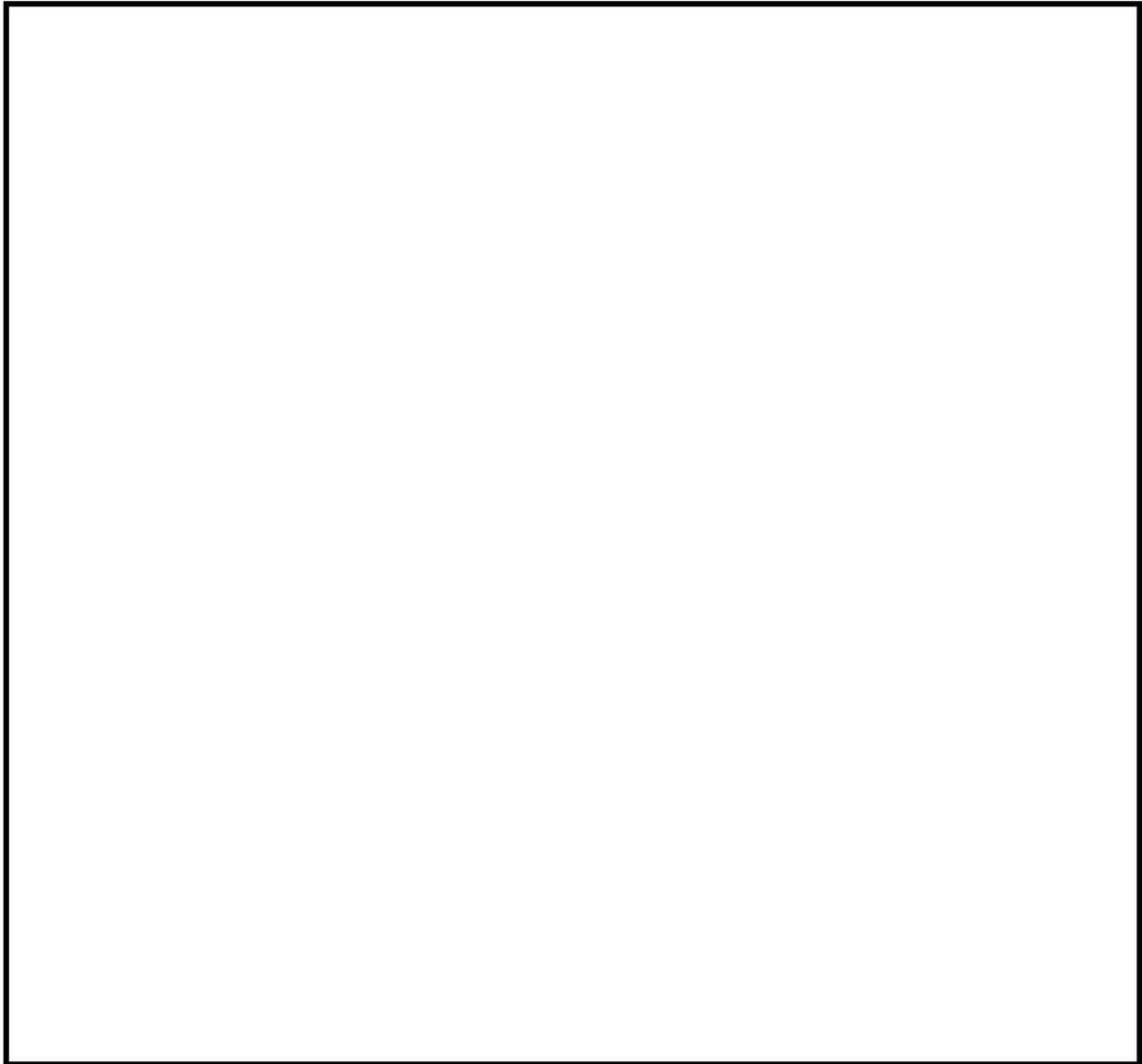
ラックの中心間距離公差による不確定性評価結果

解析モデル	不確定性評価結果
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>

(注5) 未臨界性評価にはラック間隔が [ ] を使用する。

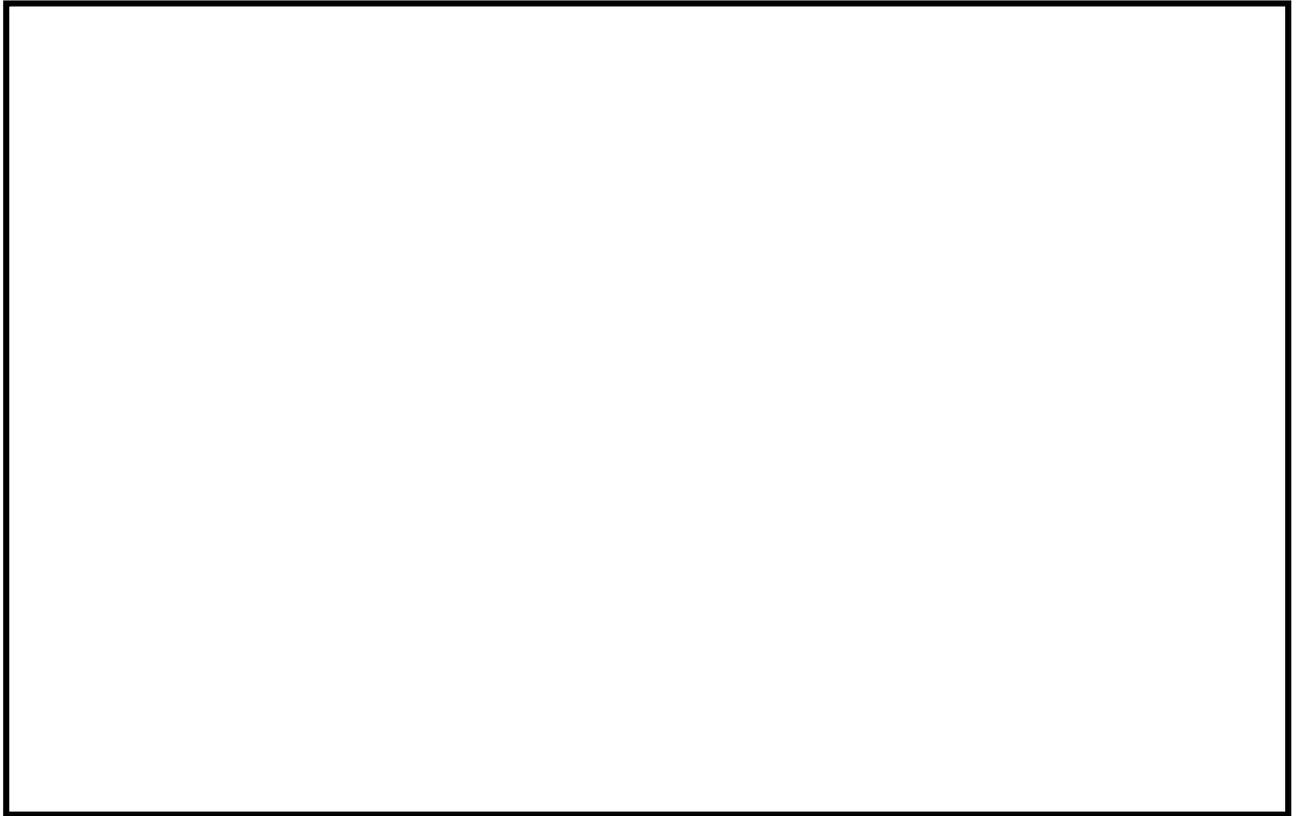
(注6) [ ]

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



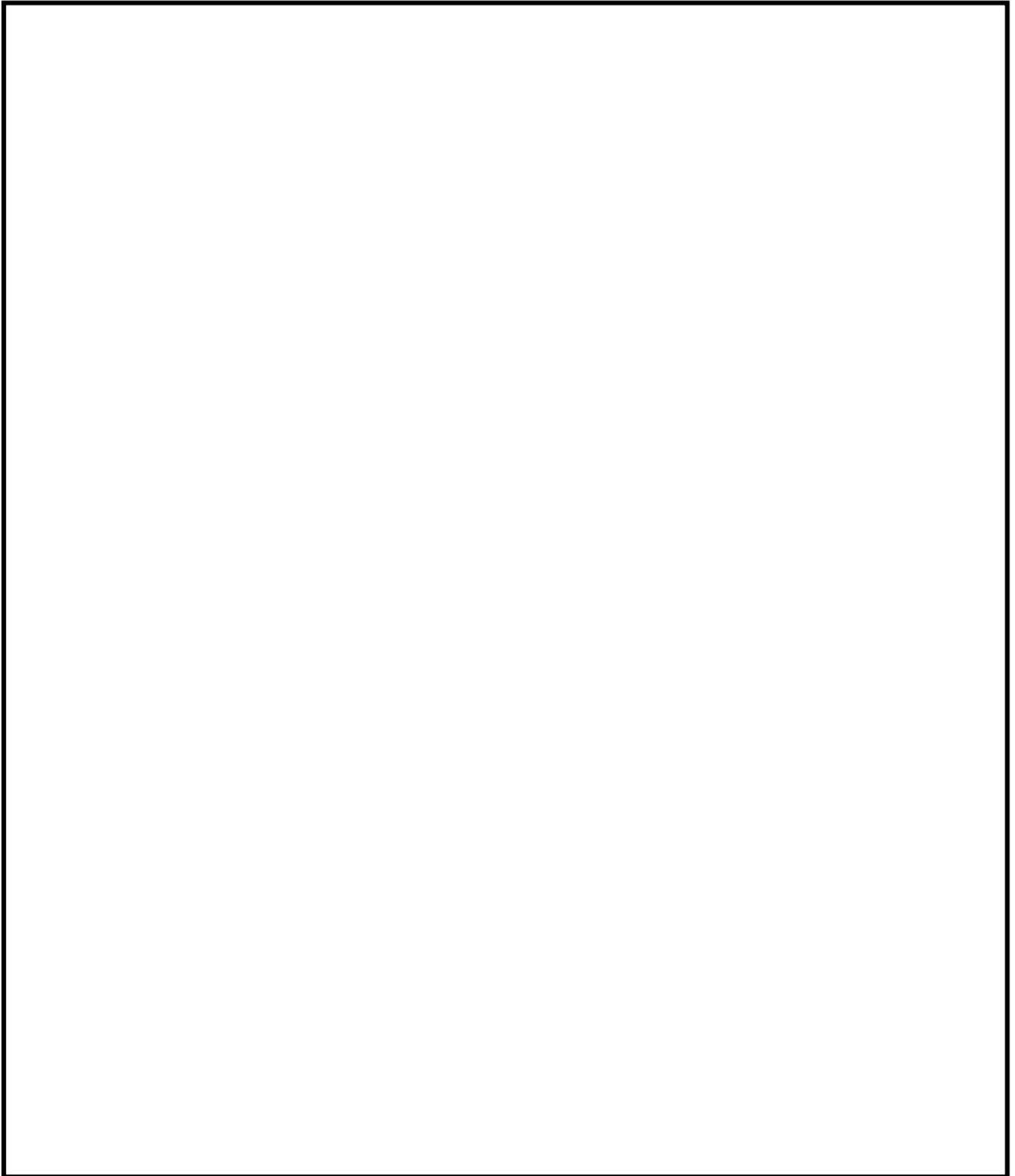
第 4-1 図 製作公差に基づく不確定性評価の計算体系

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 4-2 図 製作公差に基づく不確定性評価の計算体系

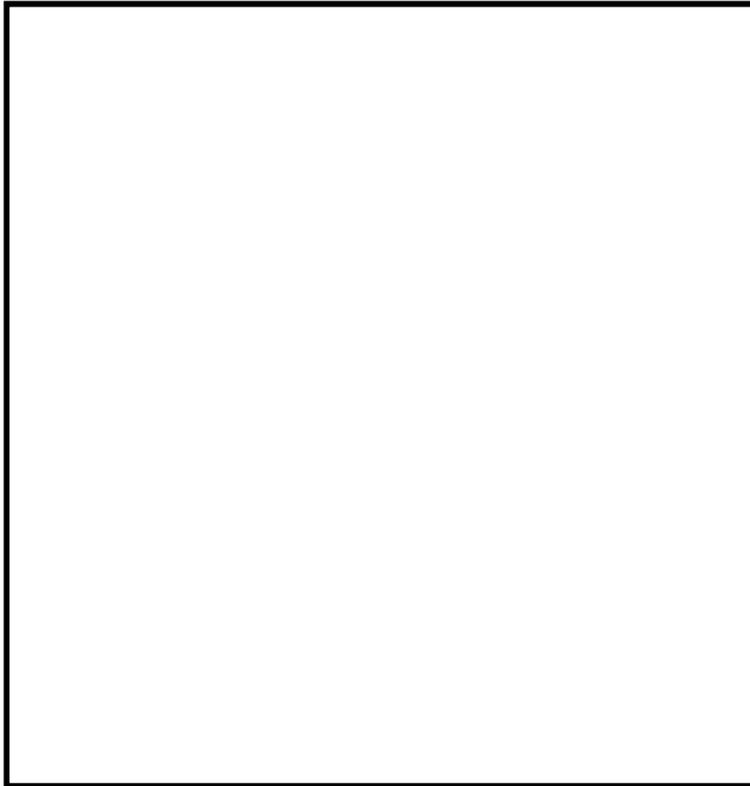
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 4-3 図 ラック内での燃料体偏心モデル



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 4-4 図 ラック内での燃料体偏心モデル



第 4-5 図 ラック内での燃料体偏心モデル



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



計算機プログラム（解析コード）の概要

## 目 次

1. はじめに
2. 解析コードの概要
  - 2.1. SCALE Ver. 6.0
    - 2.1.1. SCALE Ver. 6.0 の概要
    - 2.1.2. SCALE Ver. 6.0 の解析手法について

## 1. はじめに

本資料は、高浜 1, 2 号炉 設置変更許可申請（使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更）において使用した解析コードについて説明するものである。

## 2. 解析コードの概要

### 2.1 SCALE Ver. 6.0

#### 2.1.1 SCALE Ver. 6.0 の概要

対象：使用済燃料貯蔵設備

項目 \ コード名	SCALE
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	2009年
使用したバージョン	Ver. 6.0
使用目的	使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価
コード概要	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公開コードシステムであり、臨界計算コードが整備されている。本解析では臨界計算のCSAS6モジュールを用い、モンテカルロコードとしてKENO-VI、断面積ライブラリはENDF/B-VIIベースの238群ライブラリを使用している。
検証(Verification) 及び 妥当性確認(Validation)	<p>SCALE Ver. 6.0は、モンテカルロコードによる使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価に使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ コードに付属のサンプル問題を実行し、解析解があらかじめ準備された参照解を再現することを確認している。</li> <li>・ 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b></p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ OECD/NEA によりまとめられた臨界実験のベンチマーク集 (INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS September 2010 Edition (OECD/NEA)) に登</li> </ul>

	<p>録されている臨界実験から、国内PWRの燃料貯蔵設備仕様及び燃料仕様等を考慮して選定した179ケースのベンチマーク解析を実施している。ベンチマーク解析結果と臨界実験の実効増倍率の差は、ほぼ正規分布となることを確認している。また、ベンチマーク解析の実効増倍率が特定のピット仕様や燃料仕様に依存する傾向もない。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• ベンチマーク解析において、軽水減速体系の臨界実験データ及びボロン添加ステンレス板を含む体系の臨界実験データ、さらにMDX燃料を用いた臨界実験データを使用した解析結果から、臨界計算に考慮すべき平均誤差及びその不確かさを適切に評価している。</li><li>• 本設置許可において使用するバージョンは、既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。</li><li>• 本設置許可における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。</li></ul>
--	---

## 2.1.2 SCALE Ver. 6.0 の解析手法について

### (1) 一般事項

SCALE 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公開コードシステムであり、臨界計算コードが整備されている。本解析では臨界計算の CSAS6 モジュールを用い、モンテカルロ法に基づく 3 次元輸送計算コードとして KENO-VI、断面積ライブラリは、ENDF/B-VII ベースの 238 群ライブラリを使用している。

### (2) 解析コードの特徴

- ・米国 NRC により認証された標準解析コードであり、国内外の臨界解析の分野で幅広く使用されている。
- ・燃料及び構造材の材質組成と幾何形状を与えることにより、断面積作成から実効増倍率評価まで一連の解析を実行できる。
- ・3次元輸送計算コードであり、複雑な幾何形状における臨界計算が可能である。

### (3) 断面積ライブラリの特徴

- ・断面積ライブラリは SCALE Ver. 6.0 の内蔵ライブラリデータのうち、ENDF/B-VII ベースの 238 群ライブラリを使用している。
- ・ENDF/B-VII は、米国およびカナダの国立研究所、産業界、および大学が構成する CSEWG (Cross Section Evaluation Working Group、断面積評価ワーキンググループ) により作成された断面積ライブラリであり、ENDF/B-VI を基に IAEA と OECD/NEA によるワーキング委員会である WPEC (Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation) によって開発された H、Li6、B10、Au の断面積データを新たに登録する等の更新がなされている。断面積ライブラリについては、JAEA-Data/Code2017-006 (JENDL 開発のための軽水炉ベンチマークに関するデータ集の整備) の臨界実験データを用いて国内の最新断面積ライブラリである JENDL4 と ENDF-B/VII の比較を行っており、ライブラリ間の計算誤差の差が小さいことを確認している。

### (4) 解析手法

本解析で用いた臨界計算の CSAS6 モジュールについて、以下に示す。

#### a. BONAMI

BONAMI コードは、バックグラウンド断面積と領域の温度から自己遮蔽因子を内挿し、多群実効断面積を作成する。BONAMI コードは、非分離共鳴エネルギー

ギー領域に適用する。作成された多群実効断面積は、**CENTRM** コードにおける中性子スペクトル計算に使用される。

b. **CENTRM**

**CENTRM** コードは、セル形状をモデル化して、連続エネルギーの中性子スペクトルを求める。**CENTRM**コードは、分離共鳴エネルギー領域に適用する。

c. **PMC**

**PMC** コードは、**CENTRM** コードにより作成された連続エネルギーの中性子スペクトルを用いて、連続エネルギーの断面積を多群に縮約し、分離共鳴エネルギー領域の多群実効断面積を作成し、**BONAMI** で評価された非分離共鳴エネルギー領域の多群実効断面積と組み合わせる。

d. **KENO-VI**

**KENO-VI** は **ORNL** で開発された多群モンテカルロ臨界計算コードであり、複雑な体系の中性子増倍率の計算を行うことができる。

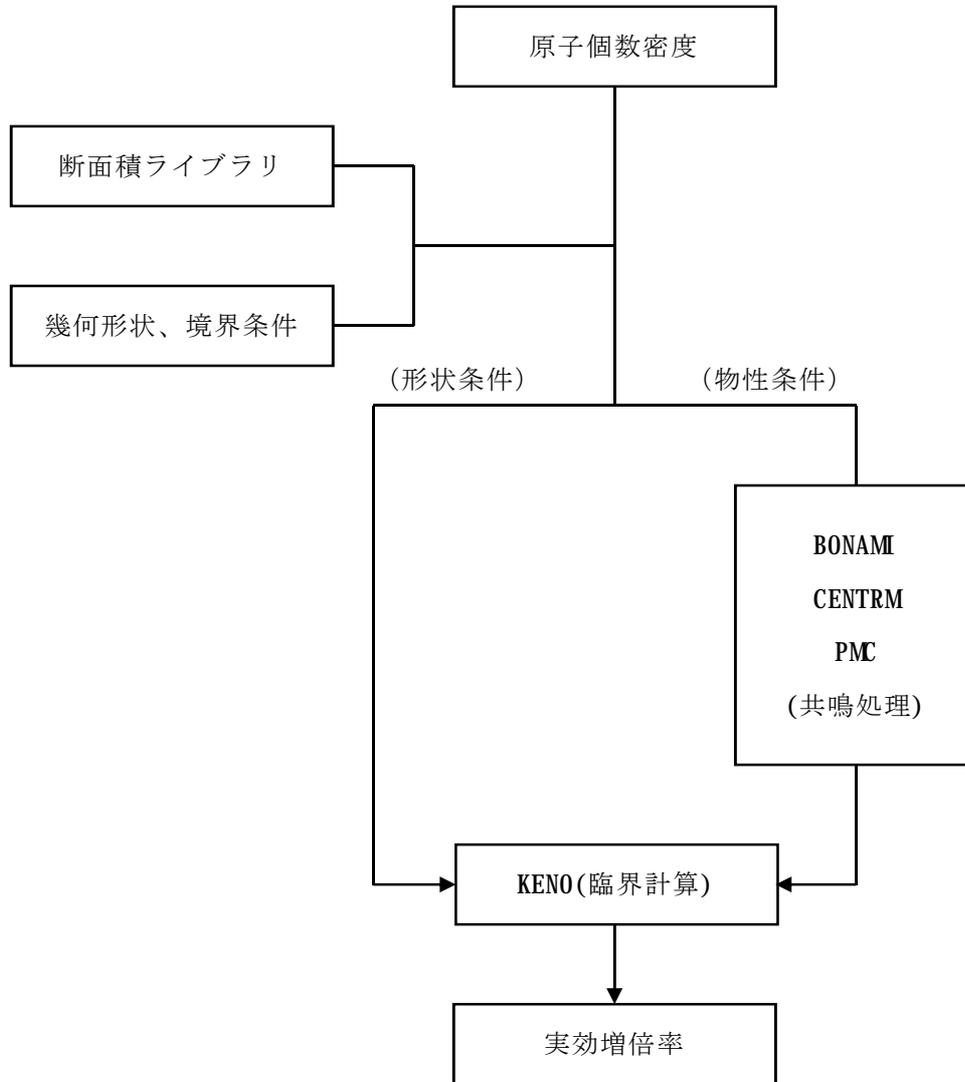
本コードでは、体系内の一つ一つの中性子の振舞いを追跡し、核分裂によって発生する中性子数 **F**、吸収されて消滅する中性子数 **A**、体系から漏えいする中性子数 **L** を評価し、次式により実効増倍率  $k_{\text{eff}}$  を算出する。

$$k_{\text{eff}} = \frac{F}{A + L}$$

(5) 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを第1図に示す。

なお、今回の解析で使用するSCALEの機能は、臨界計算であるため、第1図の解析フローチャートは、臨界計算のCSAS6モジュールについて記載している。



第1図 解析フローチャート

(6) 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

OECD/NEAによりまとめられた臨界実験ベンチマーク集とのベンチマーク解析により SCALE コードの適用検証及び妥当性確認を実施し、本解析コードを使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価へ適用することについて評価を行った。

a. 検証(Verification)

コードに付属のサンプル問題を実行し、解析解があらかじめ準備された参照解を再現することを確認した。また、本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認した。

b. 妥当性確認(Validation)

OECD/NEAによりまとめられた臨界実験ベンチマーク集(「INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS」 September 2010 Edition(OECD/NEA))に登録されている臨界実験から選定した179ケース(「MX燃料を使用(FPなし)した実験□ケース」+「ウラン燃料を使用(FPなし)した実験□ケース」+「FPを含む実験□ケース」+「塩素を含む実験□ケース」)のベンチマーク解析(以下「ベンチマーク解析」という)を実施した。ベンチマーク解析を行うにあたっては、国内PWRの燃料貯蔵設備及び燃料仕様のパラメータ範囲を包含する範囲を整理し、臨界実験を選定した。臨界実験の選定結果を第1-1表に、MX燃料(FPなし)を使用した臨界実験体系を第1-2表に、またFPを含んだ体系および塩素を含んだ体系の臨界実験として選定した結果をそれぞれ第1-3表、第1-4表に示す。

ベンチマーク解析により得られた実効増倍率及び標準偏差並びに各実験の実効増倍率測定値及び実験誤差を用いて、ラック体系の未臨界性評価に用いるSCALE Ver. 6.0システムの平均誤差( $1-k_c$ )及び不確かさ( $\Delta k_c$ )を導出した結果を第2表に示す。なお塩素を含む体系に対するベンチマーク解析は、「C. 使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価への適用性確認」に示す理由により第2表には記載していない。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 1-1 表 選定したパラメータ範囲（製作公差を含まない）

項目	単位	燃料貯蔵設備 及び燃料仕様の パラメータ範囲		選定した臨界実験の パラメータ範囲	
		MIN	MAX	MIN	MAX
燃料	ウラン燃料 <sup>235</sup> U 濃縮度	wt%	1.60	4.80	
	MDX 燃料 Pu 含有率	wt%	5.5	10.9	
	燃料材径	mm	8.19	9.29	
	燃料要素径	mm	9.5	10.72	
	被覆材 材質	—	ジルコニウム合金		
	燃料要素ピッチ	mm	12.6	14.3	
	燃料体内の減速材 体積/燃料体積	—	1.88	2.00	
	燃料要素 配列条件	—	正方配列		
	体系条件	—	燃料体配列体系		
減速材	減速材	—	無/軽水		
	減速材密度	g/cm <sup>3</sup>	0	約 1.0	
	減速材中の ほう素濃度	ppm	0	4400 以上	
ラック	ラック 材質	—	無/SUS/B-SUS		
	SUS 製ラックの ほう素添加量	wt%	0	1.05	
反射体	反射体 材質	—	軽水 /コンクリート		

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 1-2 表 MDX 燃料 (FP なし) を使用した臨界実験

項目	単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様のパラメータ範囲	
燃料	<sup>235</sup> U 濃縮度	MIN MAX	
	Pu 含有率	1.6 4.8	
	燃料材径	5.5 10.9	
	燃料体内の減速材体積 / 燃料体積	8.19 9.29	
	被覆管外径	1.88 2.00	
	被覆材材質	9.5 10.72	
	燃料要素ピッチ	ジルコニウム合金	
	燃料要素配列条件	12.6 14.3	
	体系条件	正方配列	
	減速材	燃料体配列体系	
	水位	無 / 軽水	
	反射体	反射体材質	完全喪失 / 冠水
		EALF	軽水 / コンクリート
実験ケース数		0.2 ~ 約 7eV*	
解析ケース数		—	
実験施設	—		

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

項目	<p style="text-align: center;">実験体系</p> <table border="1" data-bbox="1241 1480 1356 2027"> <tr> <td data-bbox="1241 1480 1305 1803">ベンチマーク 解析結果</td> <td data-bbox="1305 1480 1356 2027">SCALE6.0 による 実効増倍率の平均、<math>\sigma</math></td> </tr> </table>	ベンチマーク 解析結果	SCALE6.0 による 実効増倍率の平均、 $\sigma$
ベンチマーク 解析結果	SCALE6.0 による 実効増倍率の平均、 $\sigma$		

※ SFP に流入した水が局所に集中した体系での EALF

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 1-3 表 FP を含む体系の臨界実験

項目	単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲		
燃料	<sup>235</sup> U 濃縮度	WT%	MIN MAX	
	燃料材径	mm	1.6 4.8	
	燃料体内の減速材 体積／燃料体積	—	8.19 9.29	
	被覆管外径	mm	1.88 2.00	
	被覆材材質	—	9.5 10.72	
	燃料要素ピッチ	mm	ジルコニウム合金	
	燃料要素配列条件	—	12.6 14.3	
	体系条件	—	正方配列	
	減速材	—	燃料体配列体系	
	水位	mm	無／軽水	
反射体	反射体材質	—	完全喪失／冠水	
	EALF	eV	軽水／コンクリート	
		0.2～約 7eV**		

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲		MIN		MAX
		収率曲線に応じた核種		
項目	単位			
FP (中性子吸収体) 核種／元素	-			
中性子吸収体性状	-			
実験ケース数	-			
解析ケース数	-			
実験施設	-			
中性子吸収材	解析ケース	固体／液体／気体	-	-

※ SFP に流入した水が局所に集中した体系での EALF

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

項目	<p style="text-align: center;">実験体系</p>	<p style="text-align: center;">ベンチマーク 解析結果</p>	
		<p style="text-align: center;">SCALE6.0 による 実効増倍率の平均、<math>\sigma</math></p>	

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 1-4 表 塩素を含んだ臨界実験に対するベンチマーク結果

項目		単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲	
			MIN	MAX
燃料	<sup>235</sup> U 濃縮度	WT%	1.6	4.8
	燃料材径	mm	8.19	9.29
	燃料体内の減速材 体積／燃料体積	—	1.88	2.00
	被覆管外径	mm	9.5	10.72
	被覆材材質	—	ジルコニウム合金	
	燃料要素ピッチ	mm	12.6	14.3
	燃料要素配列条件	—	正方配列	
	体系条件	—	燃料体配列体系	
減速材	減速材	—	無／軽水	
	水位	mm	完全喪失／冠水	
反射体	反射体材質	—	軽水／コンクリート	
EALF		eV	0.2～約 7eV <sup>※</sup>	
中性子吸収	FP（中性子吸収体） 核種／元素	—	収率曲線に応じた核種	
	中性子吸収体性状	—	固体／液体／気体	
解析ケース	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

※ SFP に流入した水が局所に集中した体系での EALF

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

項目		
実験体系		
ベンチマーク 解析結果	SCALE6.0 による 実効増倍率の平均、 $\sigma$	

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 2 表 SCALE Ver. 6.0 システムの平均誤差及び不確かさ

条件	計算コード	SCALE6.0 システム (KENO-VI)			
	断面積ライブラリ	ENDF/B-VII 238 群			
	対象燃料	ウラン燃料 (FP なし)	MX 燃料 (FP なし)	ウラン燃料 (FP あり)	ウラン+MX 燃料 (FP あり)
	ベンチマークケース数				
評価 結果	平均誤差(1- $k_c$ )	0.0007	0.0013	0.0001	0.0001
	加重平均実効増倍率 ( $\overline{k_{eff}}$ )	0.9993	0.9987	0.9999	0.9999
	不確かさ ( $\Delta k_c = U \times S_p$ )	0.0065	0.0104	0.0067	0.0062
	信頼係数 ( $U$ ) <sup>*1</sup>				
	$\overline{k_{eff}}$ の不確かさ ( $S_p$ )				

\*1 ベンチマーク解析ケース数に対する 95%信頼度・95%確率での信頼係数。

c. 使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価への適用性確認

塩素を有する臨界実験以外では、ベンチマーク解析結果と臨界実験の実効増倍率は概ね一致しており、第 2 図のとおりその差は正規性を有することを確認している。選定した臨界実験には、冠水状態の実験及び第 3 表に示す低水密度状態の実験が含まれており、冠水状態及び低水密度状態の実効増倍率の計算値と測定値の差の傾向に大きな差異がないことが確認できる。また、選定した臨界実験には、部分水位で臨界となるケースも含まれており、気相と液相の境界についても適切に取り扱うことができると言える。

臨界実験ベンチマーク解析の対象となる臨界実験の選定において重要なパラメータは、体系に含まれる「物質（燃料、構造材（吸収材含む）、減速材等）」、その「形状」、及び「中性子エネルギー」であり、ベンチマーク解析では第 1-1 表に示すとおり燃料貯蔵設備仕様及び燃料仕様等を踏まえ臨界実験を選定している。これ

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

らのパラメータのうち、中性子スペクトルの特性を表す指標である EALF (Energy corresponding to the Average neutron Lethargy causing Fission: 核分裂に寄与する中性子平均エネルギー) について、高浜発電所 1, 2 号炉の使用済燃料ピットにおける大量の水の漏えい時の EALF は約 0.2~約 10eV (実効増倍率が判定基準に迫るような、厳しい気相部水密度条件の場合) となる。塩素を含む体系以外の選定済みの [ ] ケースの臨界実験、および上述した EALF 範囲の最大値近傍における計算精度の確認用に別途選定した [ ] ケースの臨界実験の C/E (C: 計算値と E: 測定値の比) に対する EALF を第 3 図に示す。これらケース全ての臨界実験について、C/E は EALF に対して特異な傾向を持たず、1 近傍で安定していることから、SCALE は EALF に対し良好な計算精度を有していると判断できる。

したがって、本解析コードを減速材密度条件が異なる 2 相モデルに対して使用する場合においても、第 2 表の臨界計算に考慮すべき平均誤差及びその不確かさを適用することは妥当である。また、ベンチマーク解析結果の実効増倍率が、特定のピット仕様や燃料仕様に依存する傾向もないため、本解析コードを使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価に使用することは妥当である。

なお第 3 図に示す通り、塩素を含む体系に対し実施した臨界実験ベンチマークの結果は、他の臨界実験ベンチマーク結果と比較して C/E が比較的高い傾向にあり全てのケースで C/E は 1.01 を超えており、塩素を含んだ体系は 1% (実効増倍率 0.01 に相当) 以上、安全側の評価結果を与えることを確認している。一方、塩素に起因する誤差については、ベンチマーク解析に関連する文献 (Sobes, VALIDATION STUDY FOR CREDITING CHLORINE IN CRITICALITY ANALYSES FOR SPENT NUCLEAR FUEL DISPOSITION (2015), ICNC) において、100pcm (実効増倍率 0.001 に相当) 程度と小さいことが報告されている。以上のことから、塩素が実効増倍率に与える影響は、安全側な実効増倍率となる評価結果が有する裕度に包含されることとなる。

また、第 4-1 表、第 4-2 表に示す通り、統計的検定により母分散および母平均が等しいかを有意水準 5%とした検定により確認した結果、これらが等しいとする仮説は棄却された。つまり平易に言えば、SCALE6.0 にとって塩素を含む臨界実験は、95%の確率で塩素を含まない体系の臨界実験とは母集団が異なると言える。よって塩素を含む体系に対し SCALE6.0 の不確かさを算出するに当たっては、塩素を含む体系での臨界実験ベンチマーク結果は考慮しない。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第3表 低水密度状態の臨界実験リスト

臨界実験	減速材密度	ケース数

第4-1表 塩素を含む臨界実験ベンチマーク結果とそれ以外の臨界実験ベンチマーク結果に対するF検定

帰無仮説  $H_0$  : 2群間の分散に差がない (等分散である)

対立仮説  $H_1$  : 2群間の分散に差がある (等分散ではない)

--

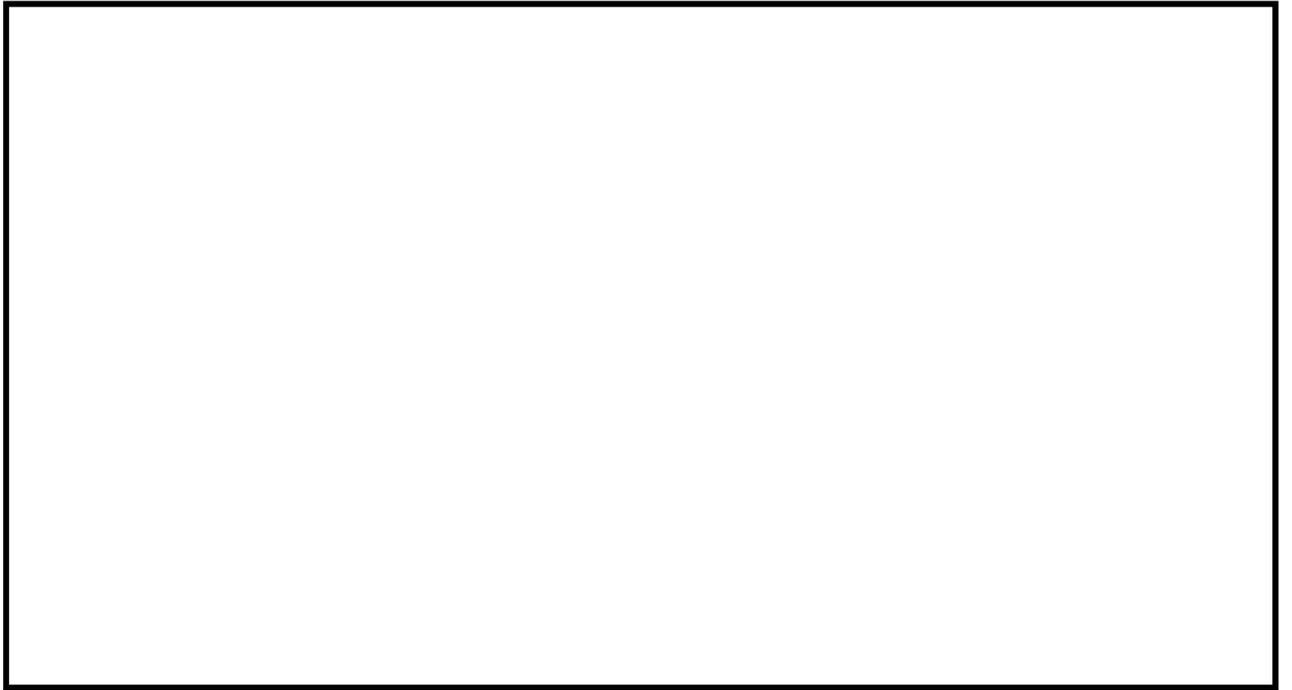
第4-2表 塩素を含む臨界実験ベンチマーク結果とそれ以外の臨界実験ベンチマーク結果に対するt検定

帰無仮説  $H_0$  : 2群間の平均に差が無い

対立仮説  $H_1$  : 2群間の平均に差がある

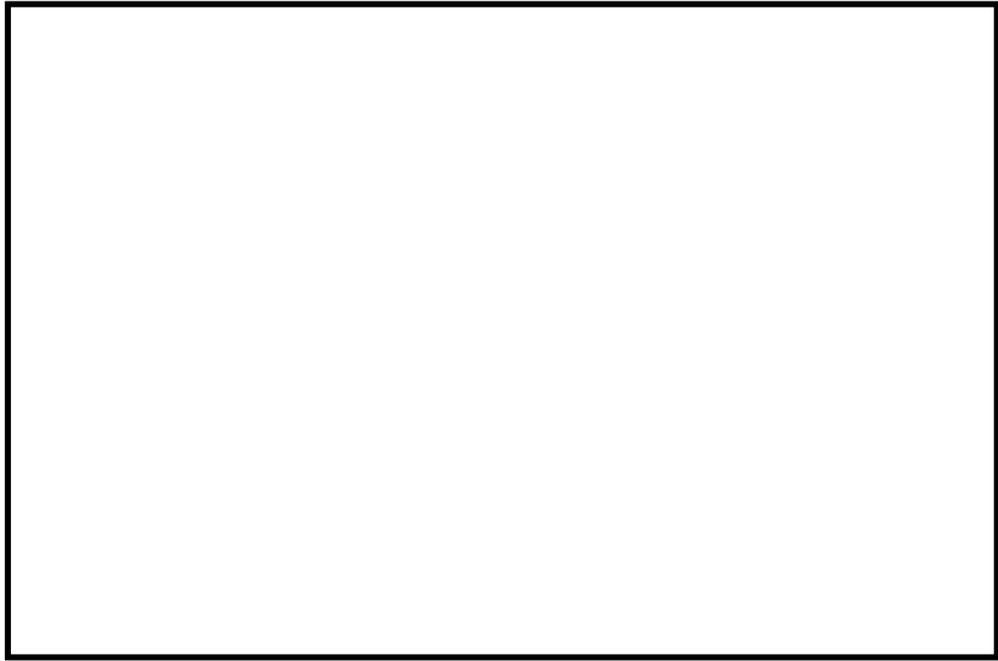
--

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第2図  $\Delta k$ に対するヒストグラム

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第3図 選定したベンチマーク実験の EALF と C/E の関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参考1) 第3表に示す臨界実験の概要



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参考2) FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析の結果

表1 FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析結果

--

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表1 FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析結果（続き）

--

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

また、表 1 に示す計算結果を FP 核種毎に整理したもの表 2 に、C/E 評価結果を核種毎でヒストグラムを整理したものを図 1 に示す。

表 2 FP 毎でのベンチマーク解析結果整理

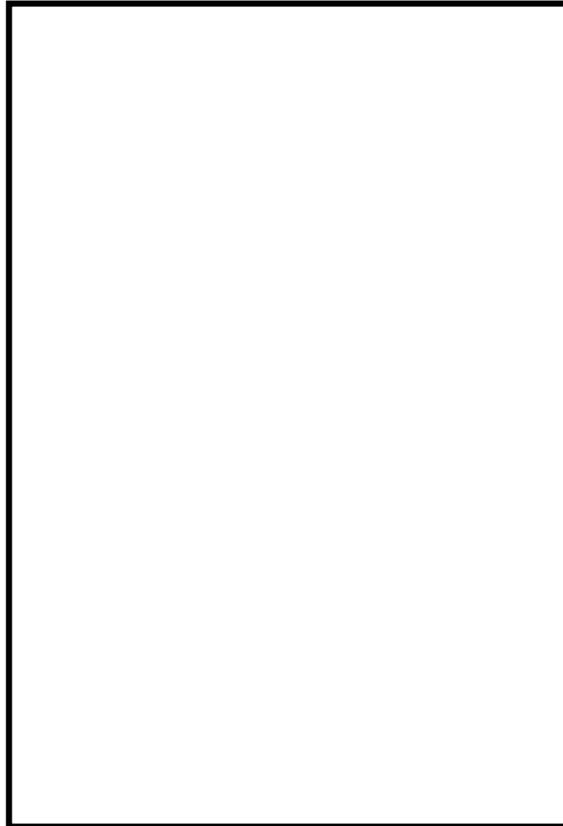
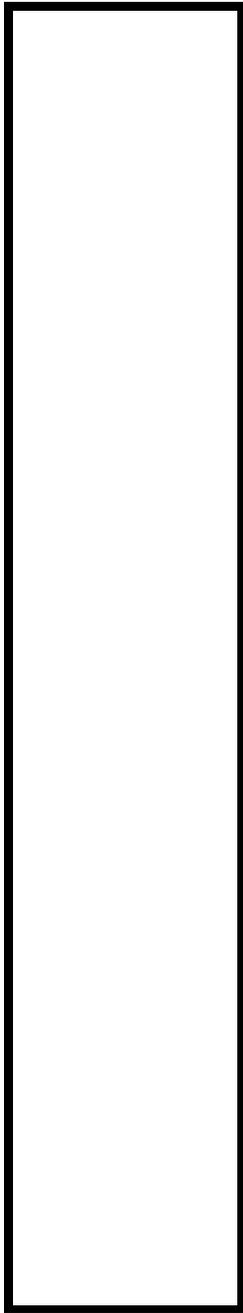


図 1-1 C/E の核種毎のヒストグラム

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

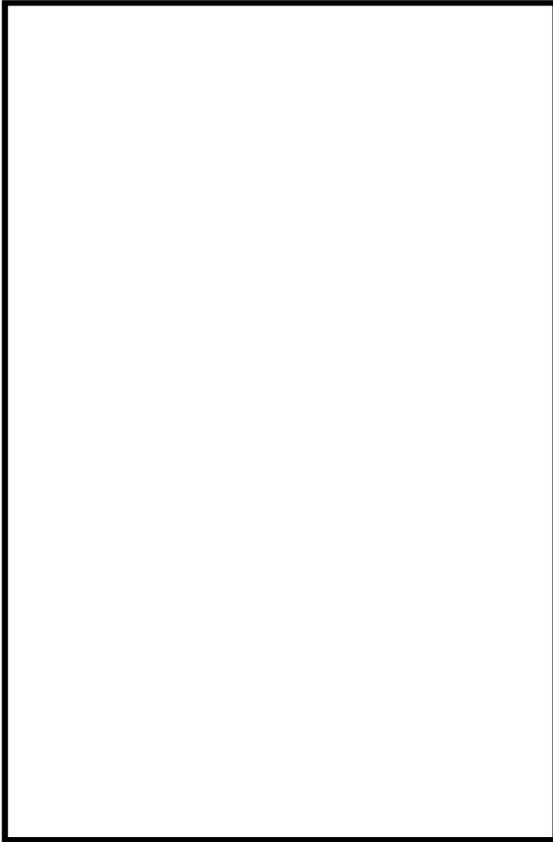
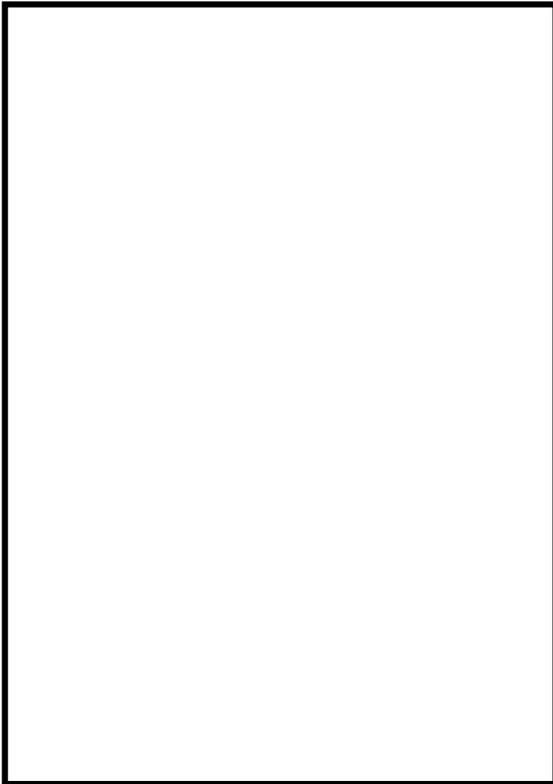


図 1-2 C/E の核種毎のヒストグラム



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参考3) 臨界実験の各 FP 核種を無視した場合の感度解析

【解析条件】

- ・解析対象の実験： [ ]
- ・対照実験ケース： [ ] ( [ ] が含まれる実験)
- ・FP 組成： 実験論文より参考表 1 のとおり。
- ・解析手法： 同位体の個数密度を 1 種類ずつ無視し、基準となる全核種考慮時の実効増倍率を比較する。

表 1 解析対象実験の FP 組成情報

--

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【解析結果】

断面積が大きい核種である  の実効増倍率変化が見られ、その他の核種については明確な感度は見られなかった。

表 2 解析結果

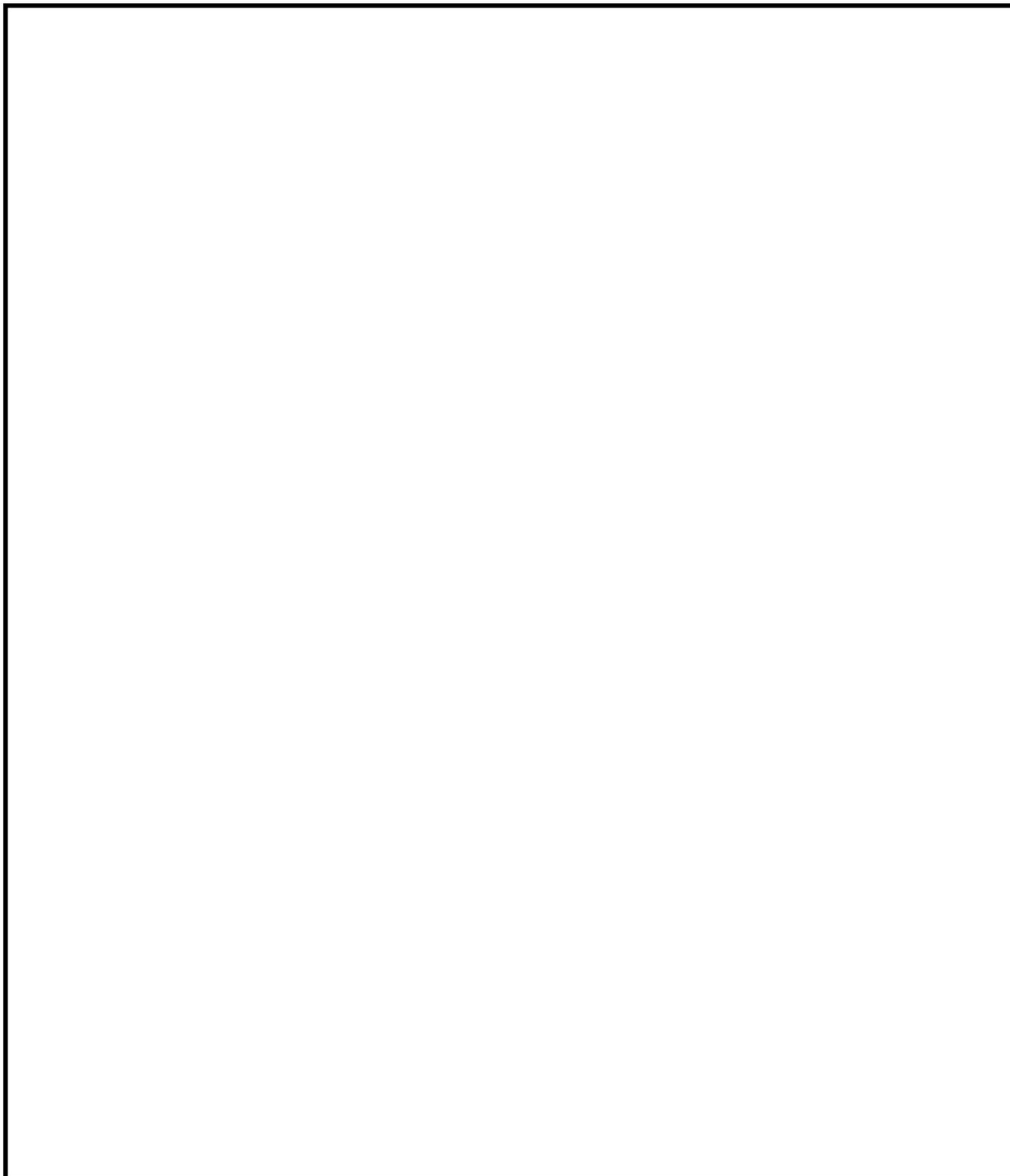
Case ID	keff	$\sigma$	$\Delta keff$	考慮しない核種	未臨界性評価で考慮する核種

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

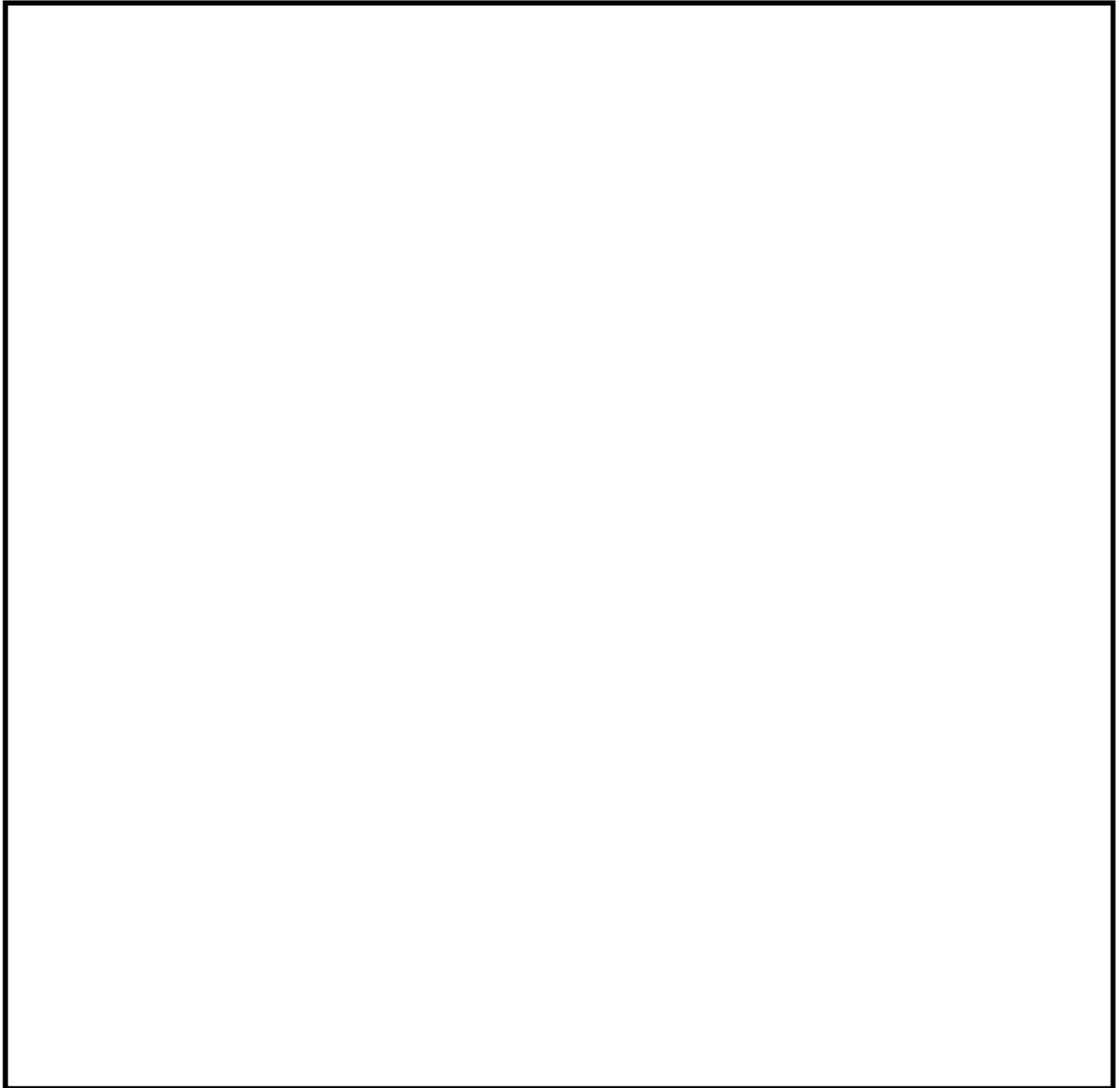
Case	keff	$\sigma$	$\Delta keff$	考慮しない核種	未臨界性評価で 考慮する核種

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

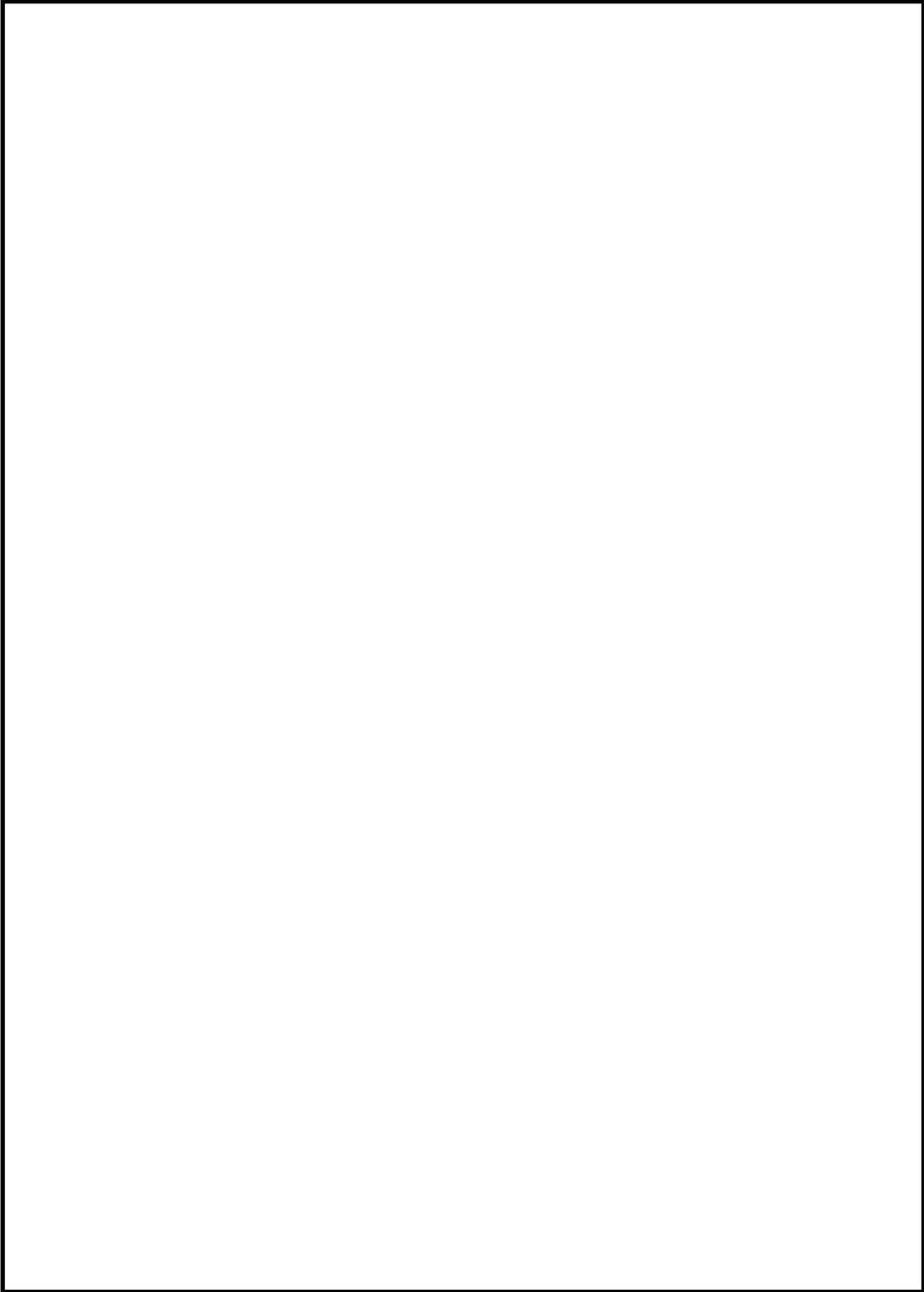
(参考4) 計算コードの不確かさの算出方法



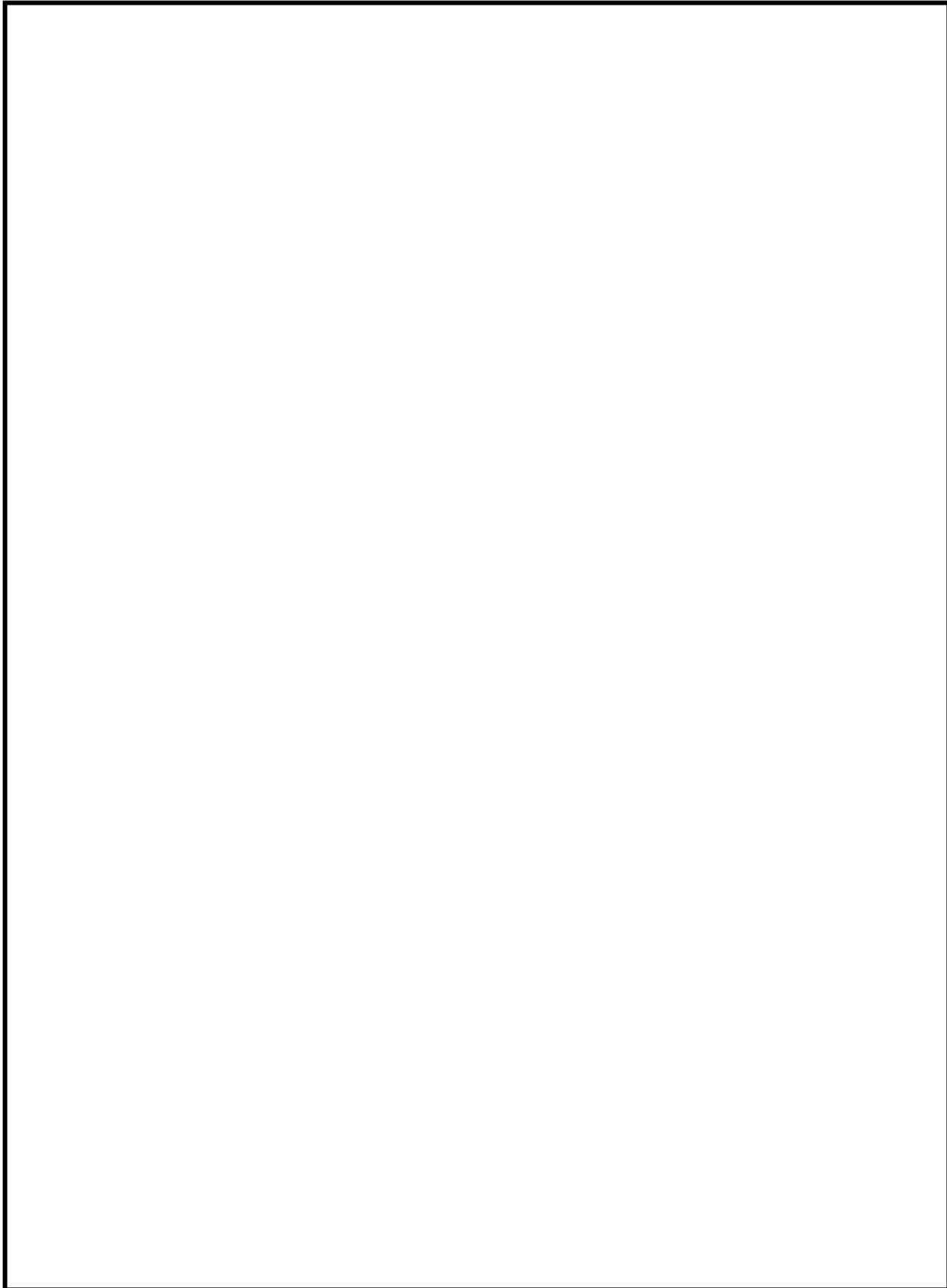
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



**SFP** への注水・放水流量の設定について

## 目 次

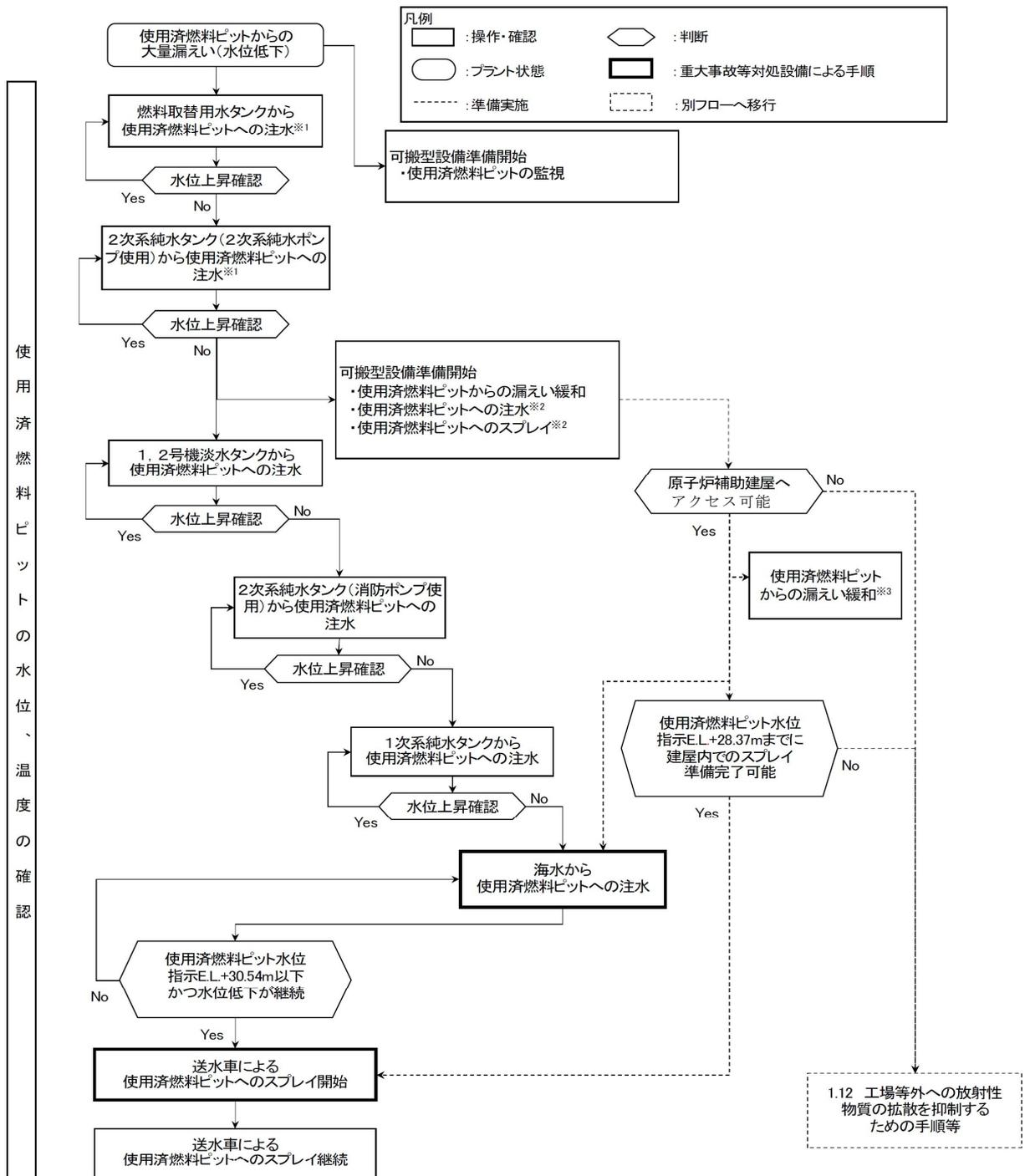
1. はじめに
2. SFP からの大量の水の漏えい時における注水・放水手順および設備保有台数
3. 各手順の流量条件設定
  - 3.1. 流量設定の考え方
    - 3.1.1. SFP 注水手順の流量
    - 3.1.2. SFP 放水手順の流量
  - 3.2. 配管圧損評価について
4. 基本ケース条件の設定について
5. 不確かさを考慮した条件の設定について
6. 系統に複数台設置されるポンプの起動台数の考え方について
7. 全手順同時実施の成立性確認
8. まとめ

## 1. はじめに

SFPからの大量の水の漏えい時には、重大事故等への対応に向け整備された手順に基づきSFPへ注水・放水を実施することとなっている。本資料では、未臨界性評価条件であるSFPへの流量について、各手順の設備構成、配備台数等を踏まえた、基本ケース条件および不確かさを考慮した条件における条件設定および設定根拠について説明する。なおSFPへ水を供給する行為のうち、直近まで施設された配管等を用いるもの（燃料取替用水ポンプ等）を注水、スプレーヘッドまたは放水砲によるものを放水と呼称する。

## 2. SFPからの大量の水の漏えい時における注水・放水手順および設備保有台数

SFPへの注水・放水に係る手順の実施判断フローを第1-1図に、SFP注水設備の構成を第1-2図に、放水砲による放水時の設備構成を第1-3図に、各注水・放水手順における水源、送水ポンプおよびポンプ台数を第1表に示す。



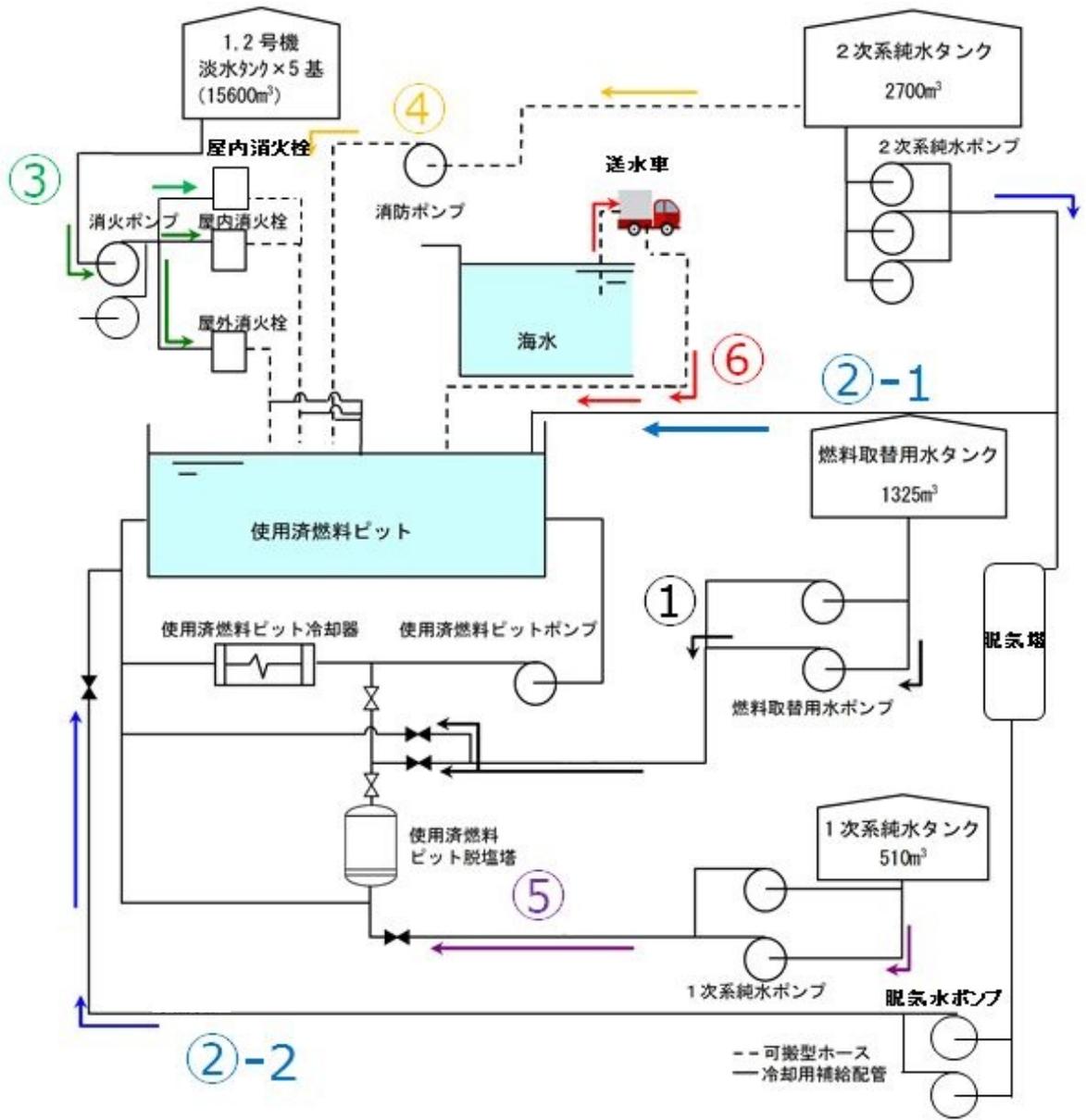
(注1)本フローに記載の注水手段については、複数の手段の準備又は注水を平行して実施することがある。  
また、水源の使用可否等に応じて手順を飛ばして対応することがある。

※1: 使用済燃料ピットの注水機能喪失の場合は使用不可

※2: 可搬型設備については、「送水車」による使用済燃料ピットへのスプレー」の準備を優先する。

※3: 使用済燃料ピット水位指示E.L.+30.54m以下、かつ水位低下が継続する場合。

第1-1図 SFPへの注水・放水に係る手順の実施判断フロー

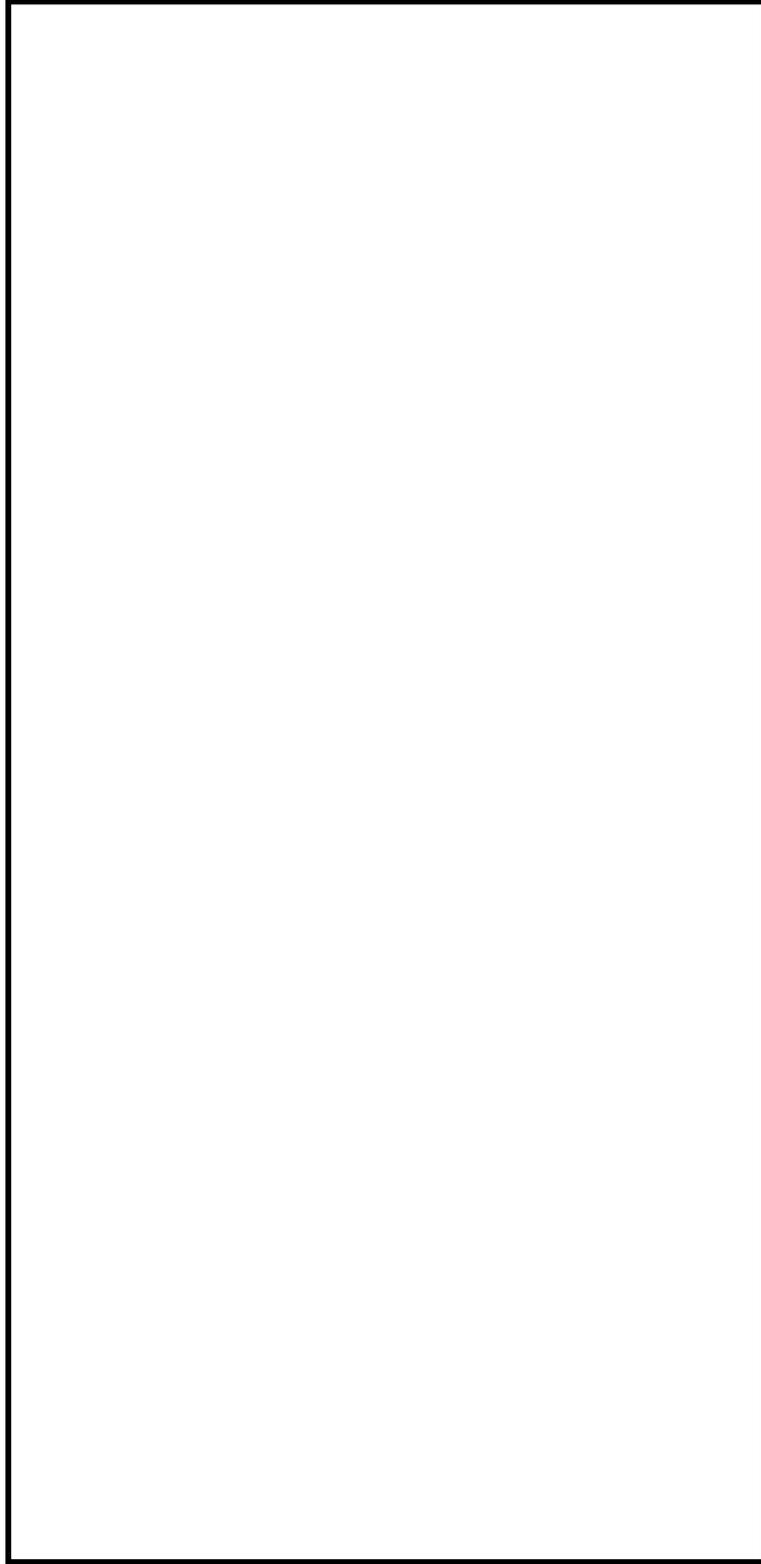


第1-2図 SFP注水設備の構成

今回の未臨界性評価においては、重大事故等対応のため整備しているSFPへの注水・放水に係る手順をもとに流量を設定する。

プラント通常運転時においてもSFP水は大気中へ自然蒸散するため、恒常的にSFP水位を監視し定期的にSFP水を補給しているが、当該補給時は手順②-1を用いて実施しており、手順②-2にて実施した実績は無い。

事故発生時は事故時向けに整備する手順書を用いて対応に当たること、手順②-2は恒常的に実施している手順でもないことから、今回未臨界性評価条件の流量条件を設定するに当たっては、手順②-2による流量は考慮しないこととする。



第1-3図 放水砲による放水時の設備構成

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第1表 SFPへの注水・放水手順における水源、送水ポンプおよびポンプ配備台数

手順番号	整備する社内標準	水源	送水ポンプ	ポンプ使用台数	ポンプ配備台数	放水設備			
						設備	使用台数	配備台数	
注水 手順	①	燃料取替用水タンク	燃料取替用水ポンプ	1台	2台				
	②—1	2次系純水タンク	2次系純水ポンプ	1台	3台				
			脱気水ポンプ <sup>※2</sup>	1台 <sup>※2</sup>	2台 <sup>※2</sup>				
	③	SA所達 <sup>※3</sup>	1,2号淡水タンク	ディーゼル消火ポンプ または電動消火ポンプ	1台	各1台			—
	④	SA所達 <sup>※3</sup>	2次系純水タンク	消防ポンプ	1台	1台			
	⑤	SA所達 <sup>※3</sup>	1次系純水タンク	1次系純水ポンプ	1台	2台			
⑥	SA所達 <sup>※3</sup>	海水	送水車	1台	5台 <sup>※4</sup>				
放水 手順	①	海水	送水車	1台/1SFP	3台 <sup>※5</sup>	スプレイ ヘッド	1台/1SFP	3台 <sup>※7</sup>	
	②	海水	大容量ポンプ (放水砲用)	2台/2SFP	3台 <sup>※6</sup>	放水砲	2台/2SFP	3台 <sup>※7</sup>	

※1 通常時操作、事故時操作どちらにも整備している手順であり、注水時の系統構成は同じ

※2 通常操作の手順であるため、流量設定条件として考慮しない

※3 高浜発電所 重大事故発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達

※4 高浜1号炉用に2台、高浜2号炉用に2台、共用予備1台の計5台を配備

※5 高浜1号炉用に1台、高浜2号炉用に1台、共用予備1台の計3台を配備（海水注水に使用する送水車の内数）

※6 高浜1, 2号炉共用で2台、共用予備1台の計3台を配備

※7 高浜1号炉用に1台、高浜2号炉用に1台、共用予備1台の計3台を配備

### 3. 各手順における流量条件設定

各手順でのポンプ使用台数および設備の配備状況を踏まえ、未臨界性評価で使用する流量条件を検討する。

#### 3.1. 流量設定の考え方

##### 3.1.1. SFP注水手順の流量

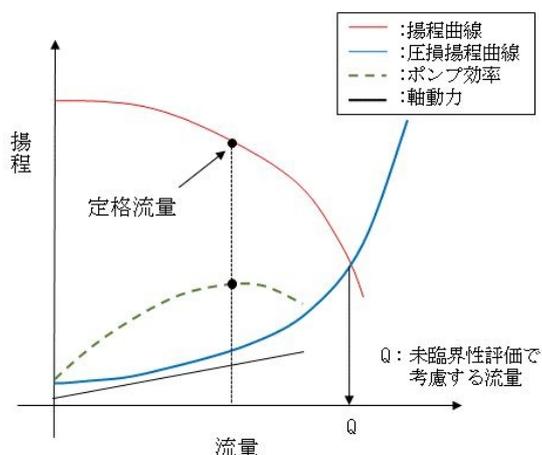
SFPへの注水に係る各手順によるSFPへの流入流量設定における各条件の具体的な考え方は以下の通りである。

#### (1) 恒設設備を使用する手順

a. 実際の施設ラインで通水した実測値があるもの  
実測値を使用する。（対象手順：注水手順②、③）

b. 実際のラインで通水した実測値が無いもの（対象手順：注水手順①、⑤）

第2図に示す通り、ポンプの揚程曲線と、高浜発電所でのSFP注水手順において整備している注水時の具体的な設備・系統構成を踏まえた水頭差や配管圧損等により評価した損失揚程曲線の交点における流量を使用する。



第2図 揚程曲線を用いた流量設定の概要

#### (2) 可搬型設備を使用する手順

ポンプの揚程曲線と、設備構成を踏まえた水頭差や配管圧損等により評価した損失揚程曲線の交点における流量を使用する。

（対象手順：注水手順④、⑥）

### 3.1.2. SFP放水手順の流量

SFPへの放水に係る各手順によるSFPへの流入流量設定の考え方は以下の通り。

#### (1) スプレイヘッドを用いて放水する手順

放水設備であるスプレイヘッドの仕様上限値を設定する。なお大規模損壊時における対応として、化学消防自動車を用いたスプレイ手順を別途整備しているが、当該手順は送水車が起動できない場合に実施する手順であり、且つスプレイヘッドの配備台数は各号炉に1台であることから、化学消防自動車と送水車によるスプレイを同時に実施することは想定しない。

(対象手順：放水手順①)

#### (2) 放水砲を用いて放水する手順

放水砲による放水時は第1-3図に示すように、放水砲入口の必要圧力を確保するため、大容量ポンプ（放水砲用）を2台直列に1ライン敷設し、2台目の大容量ポンプ（放水砲用）の出口から分岐管により各号炉向けへ2ラインに分岐させ放水砲を接続する系統構成としている。よって当該手順での流量設定においては、配備されている型式の異なる3種類の大容量ポンプ（放水砲用）のうち、最も容量が大きいポンプと2番目に容量が大きいポンプを直列することを想定し、各号炉へは大容量ポンプ（放水砲用）による流量が2等分された状態で放水されるとして設定する。

(対象手順：放水手順②)

### 3.2. 配管圧損評価について

圧損揚程曲線の策定に必要となる、取水源から移送先までの配管及び弁類圧損等は、以下に示すダルシーの式に基づき算出する。

$$H = \sum f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g} \quad \dots (1) \quad \text{ここで } H : \text{損失水頭(m)} \quad Re : \text{レイノルズ数(-)}$$
$$Re = \frac{Dv}{\nu} \quad \dots (2) \quad f : \text{摩擦係数(-)} \quad D : \text{配管内径(m)}$$
$$L/D : \text{等価直管長(-)} \quad v : \text{流速(m/s)}$$
$$g : \text{重力加速度(m/s}^2\text{)} \quad \nu : \text{動粘性係数(m}^2\text{/s)}$$
$$k : \text{抵抗係数(-)}$$

なお系統中にはエルボ、ベンド等が存在するが、それら配管形状抵抗や弁の抵抗については等価直管長（L/D）にて考慮する。また、レジューサ（拡大／縮小）部や配管出入口部の配管形状による抵抗は、抵抗計数kにて考慮する。各配管要素の等価直管長さの代表例を第2表に、抵抗計数の代表例を第3表に示す。

上式にて算出される配管等の圧損および取水源－移送先間の静水頭差より、圧損揚程曲線を策定する。

第2表 各配管要素の等価直管長※

配管要素	等価直管長 L/D	備考
90° エルボ	20	
45° エルボ	16	
ティー (ラン)	20	流れの方向が変わらない場合
ティー (ブランチ)	60	流れの方向が変わる場合
仕切弁	13	弁メーカーによる設計値を使用
逆止弁	135	弁メーカーによる設計値を使用

※「FLOW OF FLUIDS THROUGH VALVES, FITTINGS AND PIPE Technical Paper No. 410」(CRANE CO、1999)

第3表 各配管要素の抵抗計数※

配管要素	抵抗係数 k	備考
配管入口	0.5	形状が平面接続型の場合
配管出口	1.0	
レジューサ (拡大)	$\left(1 - \frac{D_{in}^2}{D_{out}^2}\right)^2$	D <sub>in</sub> : 入口配管内径 D <sub>out</sub> : 出口配管内径
レジューサ (縮小)	$0.5 \times \left(1 - \frac{D_{out}^2}{D_{in}^2}\right)$	D <sub>in</sub> : 入口配管内径 D <sub>out</sub> : 出口配管内径

※「FLOW OF FLUIDS THROUGH VALVES, FITTINGS AND PIPE Technical Paper No. 410」(CRANE CO、1999)

#### 4. 基本ケース条件の設定について

基本ケース条件には原則最確値を設定する観点から、重大事故等への対応に向け整備された手順に基づき設定するものとし、実施手順数および系統内ポンプの使用台数については以下の前提を置く。

##### a. 実施手順数

SFPからの大量の水の漏えい時において実施する注水・放水手順の組み合わせは多種あり、最確値を決めがたいことから、基本ケース条件においても未臨界性評価の観点から保守的に、SFPへの注水・放水に係る全手順の同時実施を想定する。なお各手順の設備構成、水源の容量および対応要員数の観点より、全手順を同時に実施することは可能である。

##### b. 各手順における系統内ポンプの使用台数

最確値を設定する観点から、1手順当たり1台とする。

上記の前提に基づき、各手順における基本ケース条件の流量を設定する。

(1)燃料取替用水タンクからの注水流量（注水手順①）

注水手順①については、3.1.1.(1)b.に示す通り、恒設設備を使用し、実測値が無い手順であるため、圧損揚程曲線を策定のうえ流量を評価する。なお、本手順は第1-2図に示す通り手順⑤と注水ラインを一部共有していることから、同時実施時におけるライン共有部の圧損増加を考慮し評価する。

・静水頭差等の条件

第4表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

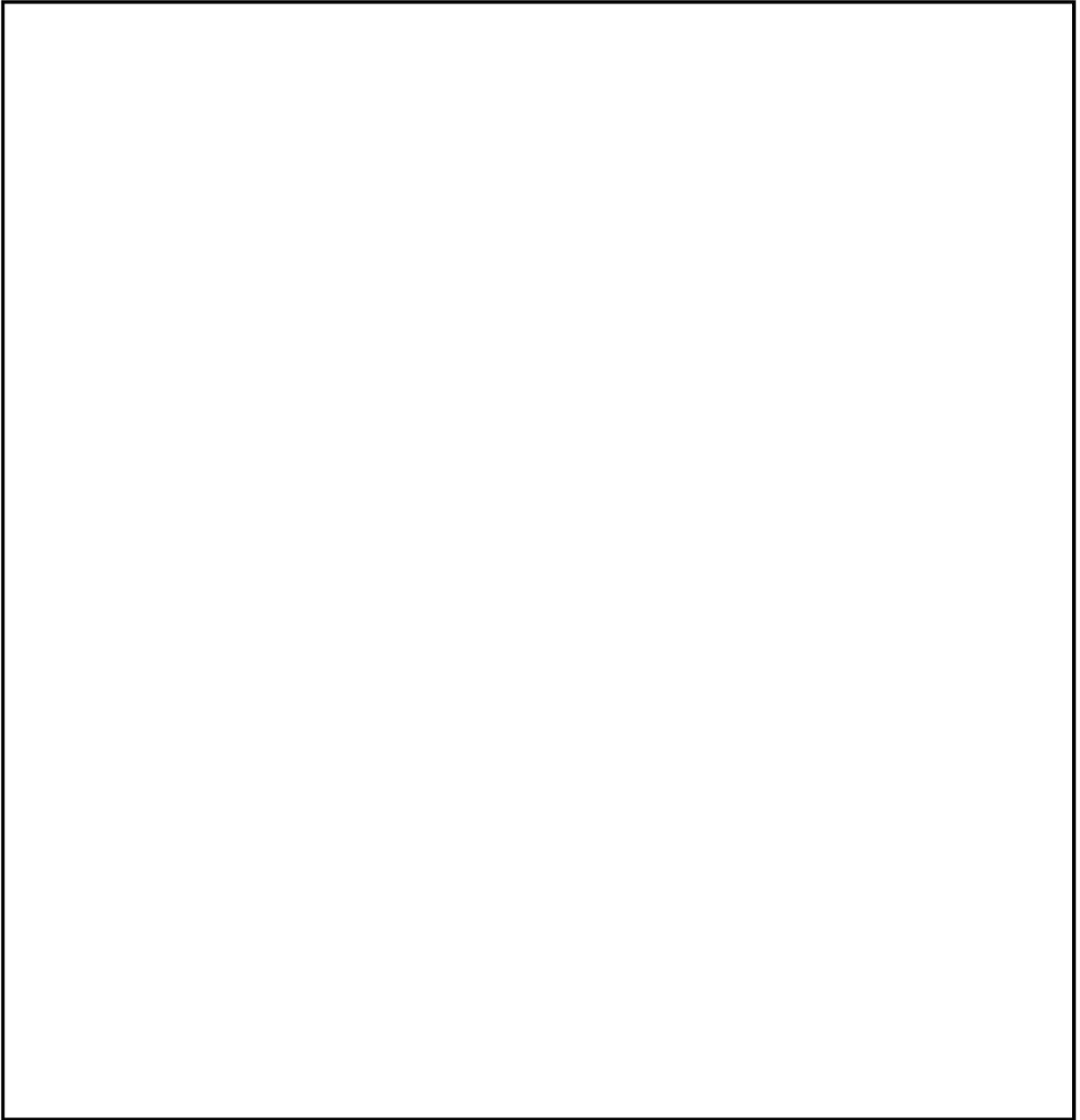
第4表 水源と移送先の静水頭差（手順①）

	手順①	備考
取水源 E. L		タンク100%水位E. L
移送先 E. L		SFP戻り配管放出端
静水頭差(移送先E. L. - 取水源E. L.)	-10.53 m	—

・注水時の系統構成

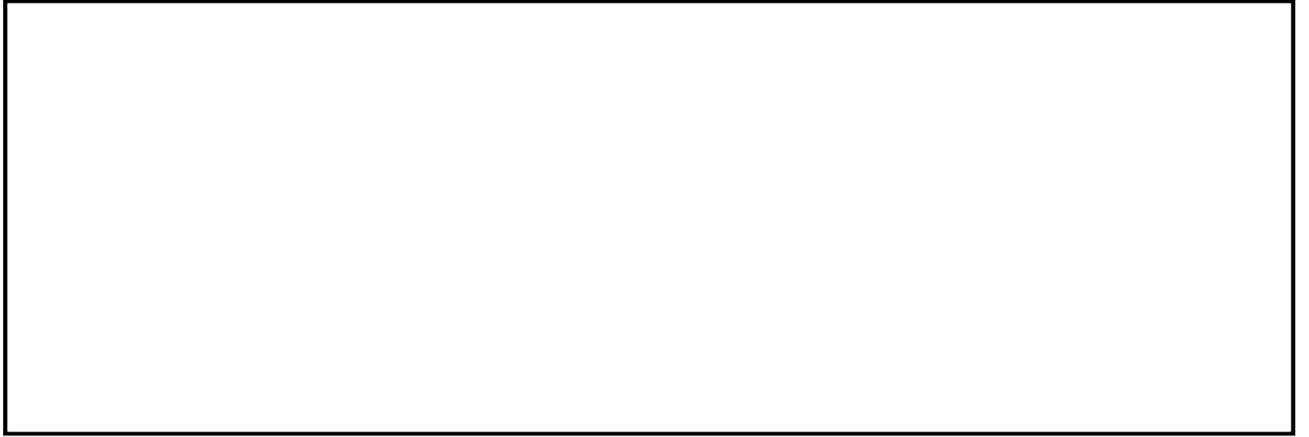
注水時の具体的手順を第3図に、手順に示される対応により構成される系統の概要を第4図に示す。手順では、赤で示す系統上のオリフィスを通して注水されることとなる。オリフィス通水時に発生する圧損は、オリフィス口径と配管内径より算出される断面積比に対し抵抗計数を算出し、ダルシーの式より求める。系統上オリフィスの概要を第5図に、圧損計算に使用した系統情報を第5表に示す。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

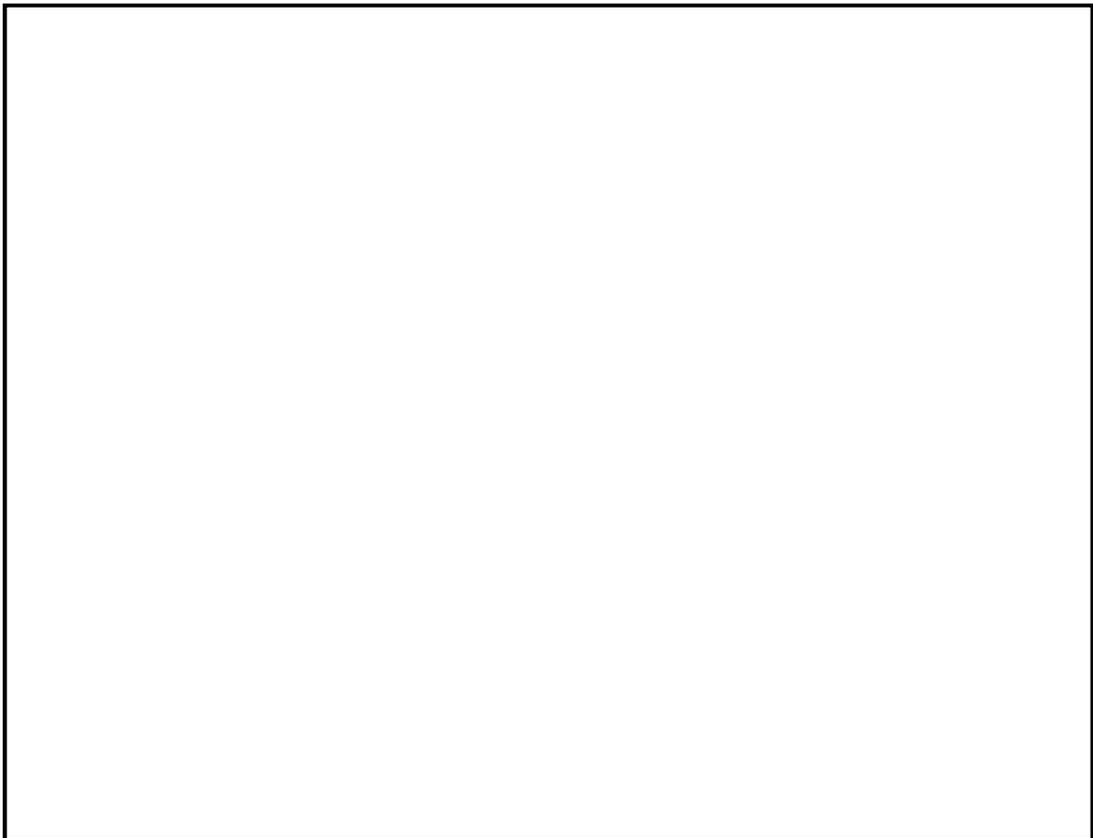


第3図 燃料取替用水ポンプを用いたSFPへの注水における具体的実施手順  
(高浜発電所1号機 事故時操作所則抜粋)

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第4図 燃料取替用水ポンプを用いてSFPへ注水する際の系統構成概要



第5図 系統上オリフィスの概要

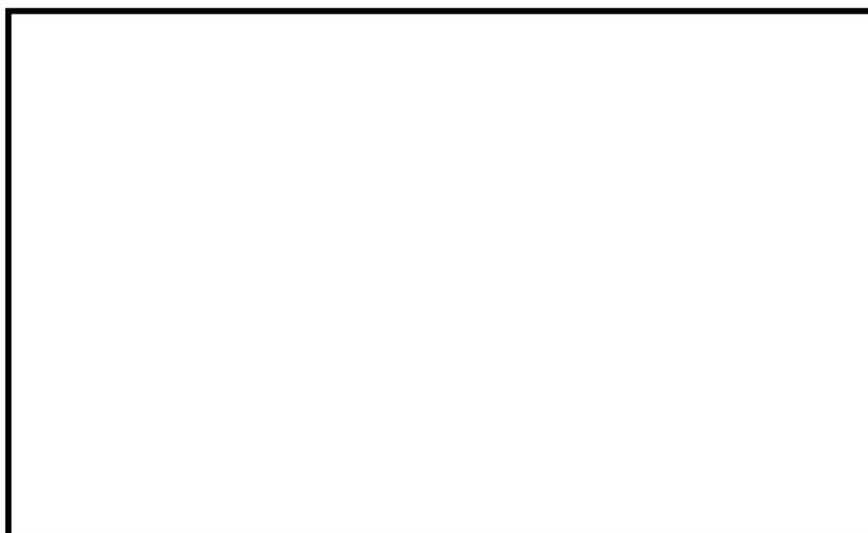
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第5表 系統内配管情報（燃料取替用水ポンプからの注水手順）

配管仕様 [インチ]	2	3	4	8
内径 [mm]				
総配管長さ [m]	1.1	86.0	0.8	14.6
90° エルボ数 [個]	2	29	—	3
45° エルボ数 [個]	—	6	1	—
ティー（ラン） [個]	—	—	—	—
ティー（ブランチ） [個]	—	5	1	—
仕切弁 [個]	—	7	—	1
逆止弁 [個]	—	1	—	—
レデューサ（2×3） [個]	2	—	—	—
レデューサ（3×2） [個]	1	—	—	—
配管入口 [個]	—	1	—	—
配管出口 [個]	—	—	1	—

・評価結果

評価結果を第6図に示す。ポンプ揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は、約21m<sup>3</sup>/hであり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。

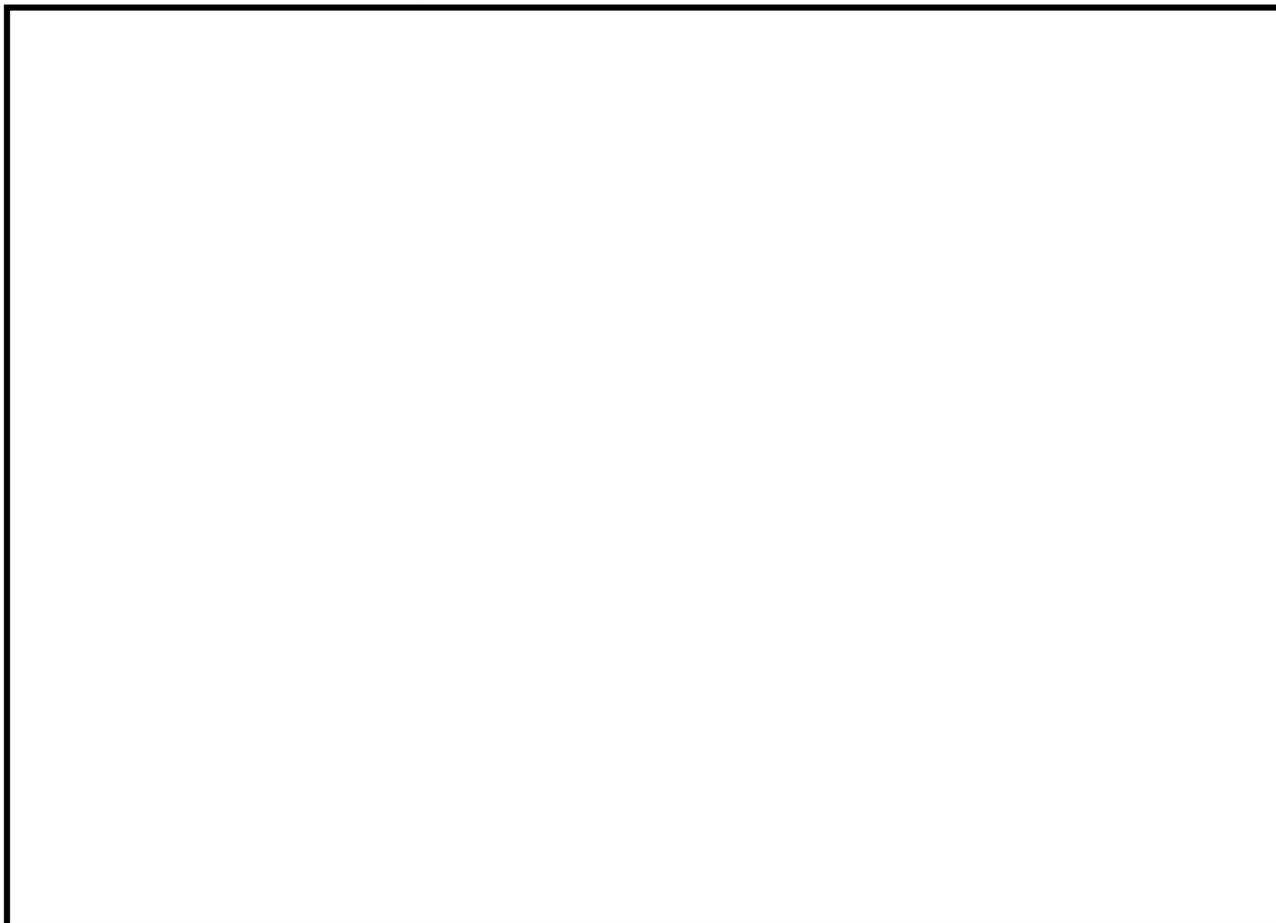


第6図 手順①におけるポンプ揚程および性能曲線との関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(2)2次系純水タンク（2次系純水ポンプ使用）からの注水流量（注水手順②）

注水手順②については、3.1.1.(1)a.に示す通り恒設設備を使用し、実測値がある手順であるため、実測値を使用する。実測値は第7図に示す通り、約5m<sup>3</sup>/hであり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。



第7図 2次系純水ポンプ 流量出典（水張ライン使用時の実測値）

(3)1,2号淡水タンクからの注水流量（注水手順③）

注水手順③については、3.1.1.(1)a.に示す通り恒設設備を使用し、実測値がある手順であるため、実測値を使用する。実測値は第8図に示す通り、約22m<sup>3</sup>/hであり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第8図 消火栓を用いた注水 流量出典

(4) 2次系純水タンク（消防ポンプ使用）からの注水流量（注水手順④）

注水手順④については、3.1.1.(2)に示す通り、可搬型設備を使用する手順であるため、ポンプ揚程曲線を用い系統圧損等を踏まえ評価する。

・評価条件

第6表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

第6表 水源と移送先の静水頭差（手順④）

	手順④	備考
取水源 E.L		タンク100%水位E.L
移送先 E.L		SFPフロアE.L
静水頭差(移送先E.L. - 取水源E.L.)	-14.27 m	—

また圧損計算に使用した系統情報を第7表に示す。なおホース敷設長さは、高浜1号および2号炉それぞれへの敷設ルートの最短ルート（1号炉東側シャッターからの敷設ルート）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

の長さとした。

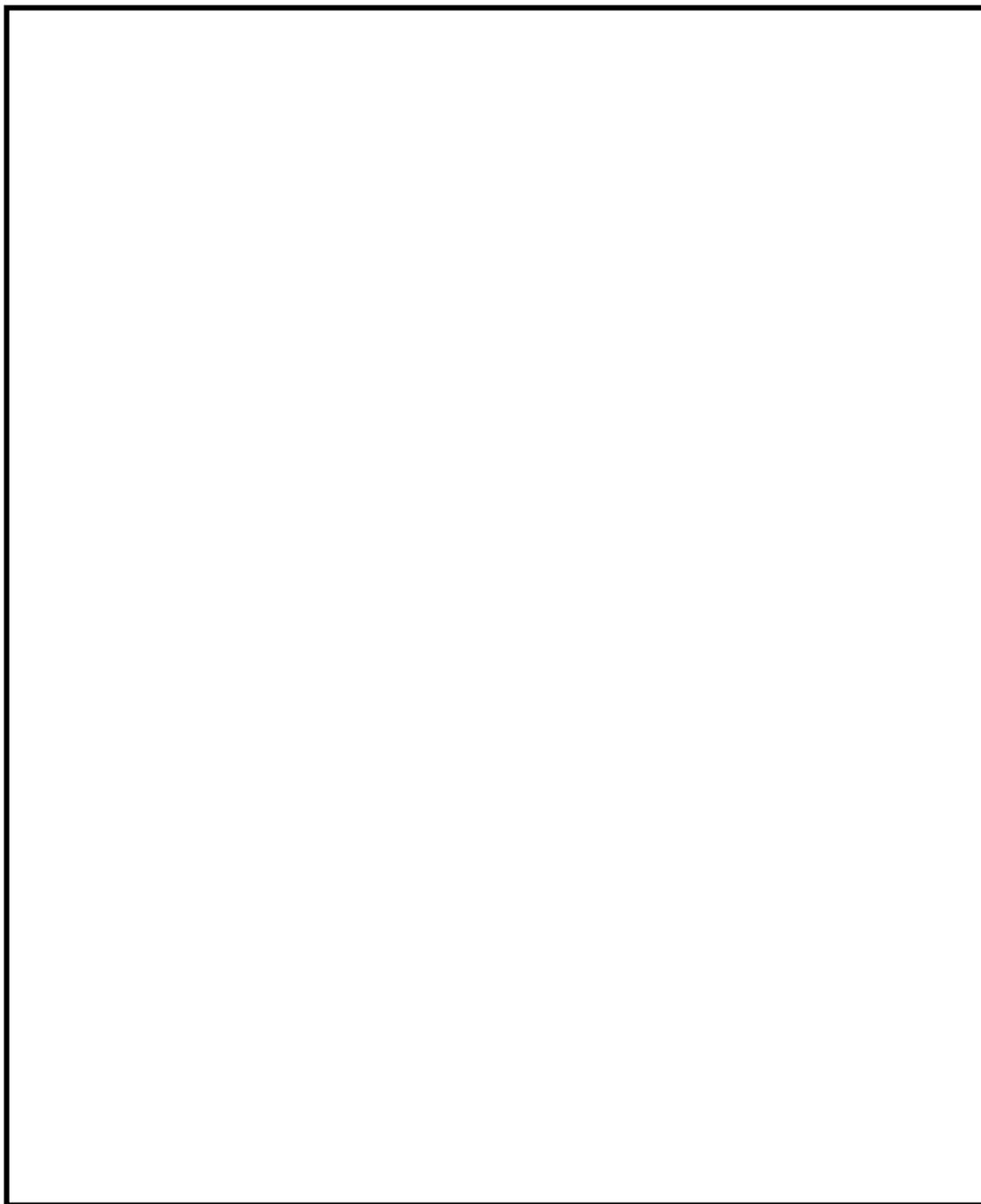
第7表 系統内配管情報

ホース情報		備考
敷設ホース仕様		—
内径 [mm]		当該ホース仕様における省令上の内径上限値
敷設長さ [m]		最短敷設ルートでの敷設長さ

・評価結果

評価結果を第9図に示す。ポンプ揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は約95m<sup>3</sup>/hであり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 9 図 消防ポンプ 流量出典

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(5) 1次系純水タンクからの注水流量（注水手順⑤）

注水手順⑤については、3.1.1.(1)b.に示す通り、恒設設備を使用し、実測値が無い手順であるため、圧損揚程曲線を策定のうえ流量を評価する。なお、本手順は第1-2図に示す通り手順①と注水ラインを一部共有していることから、同時実施時におけるライン共有部の圧損増加を考慮し評価する。

・静水頭差等の条件

第8表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

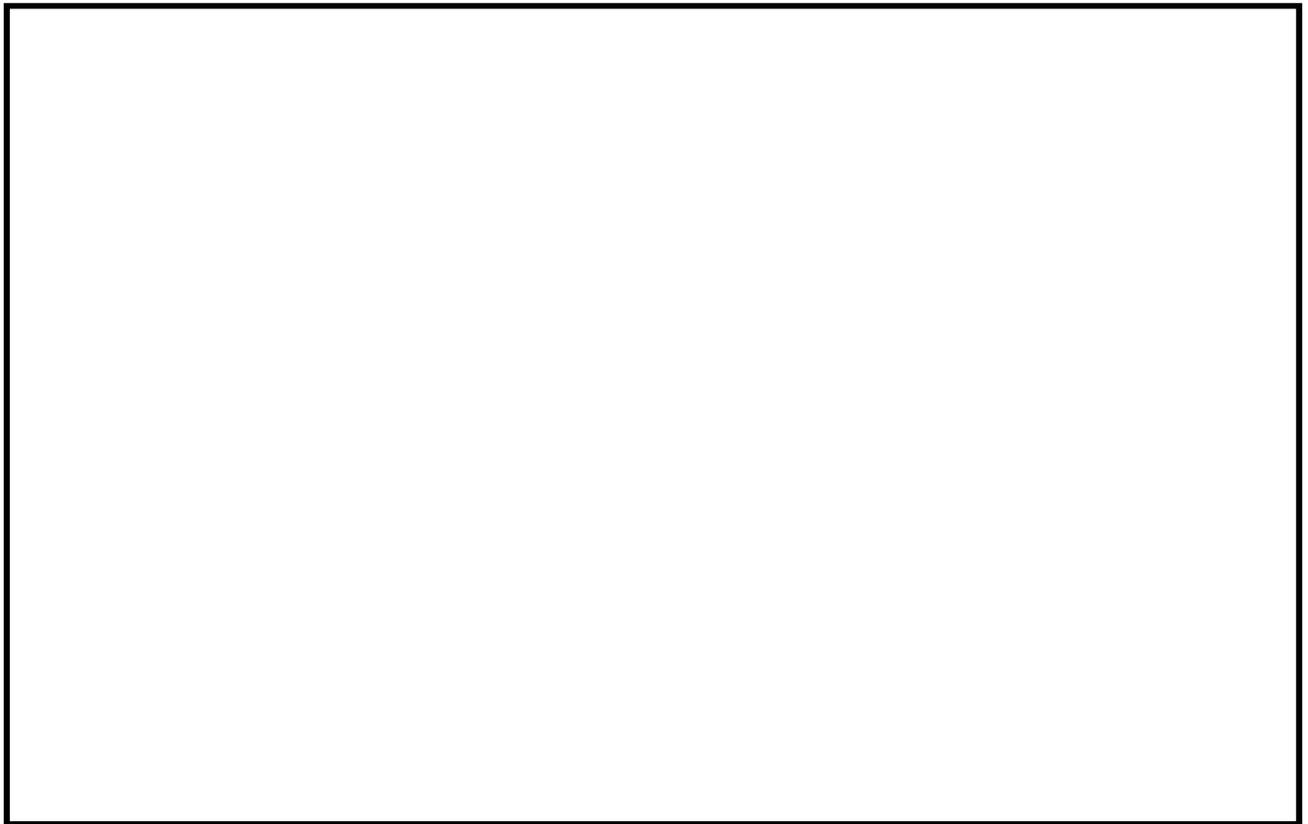
第8表 水源と移送先の静水頭差（手順⑤）

	手順⑤	備考
取水源 E. L		タンク100%水位E. L
移送先 E. L		SFP戻り配管放出端
静水頭差(移送先E. L. - 取水源E. L.)	-0.43 m	—

・注水時の系統構成

注水時の具体的実施手順を第10図に、手順に示される対応により構成される系統のラインナップを第11図に、圧損計算に使用した系統情報を第9表に示す。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第10図 1次系純水ポンプを用いたSFPへの注水における具体的実施手順



第11図 1次系純水ポンプを用いて SFP へ注水する際の系統構成概要

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第9表 系統内配管情報（手順⑤）

配管仕様 [インチ]	2	3	4	8
内径 [mm]				
総配管長さ [m]	33.0	58.7	50.3	14.6
90° エルボ数 [個]	8	19	12	3
45° エルボ数 [個]	—	2	3	—
ティー（ラン） [個]	—	—	—	—
ティー（ブランチ） [個]	3	3	4	—
仕切弁 [個]	1	5	3	1
逆止弁 [個]	1	—	2	—
レデューサ（2×3） [個]	2	—	—	—
レデューサ（2×4） [個]	1	—	—	—
レデューサ（3×2） [個]	2	—	—	—
レデューサ（4×3） [個]	—	2	—	—
配管入口 [個]	—	—	1	—
配管出口 [個]	—	—	1	—

・評価結果

評価結果を第12図に示す。ポンプ揚程曲線と圧損揚程曲線より求まる流量は、約39m<sup>3</sup>/hであり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。



第12図 手順⑤におけるポンプ揚程および性能曲線との関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(6) 海水（送水車使用）からの注水流量（注水手順⑥）

注水手順⑥については、3.1.1.(2)に示す通り、可搬型設備を使用する手順であるため、ポンプ揚程曲線を用い系統圧損等を踏まえ評価する。

・評価条件

第10表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

第10表 水源と移送先の静水頭差（注水手順⑥）

	手順⑥	備考
取水源 E. L		タンク100%水位E. L
移送先 E. L		SFPフロアE. L
静水頭差(移送先E. L. - 取水源E. L.)	28.8 m	—

計算に使用した系統情報を第11表に示す。なおホース敷設長さは、1号および2号炉それぞれへの敷設ルートの最短ルート（1号炉西側シャッターからの敷設ルート）の長さとした。

第11表 系統内配管情報（注水手順⑥）

ホース情報		備考
敷設ホース仕様		—
内径 [mm]		当該ホース仕様における省令上の内径上限値
敷設長さ [m]		最短敷設ルートでの敷設長さ

・評価結果

評価結果を第13図に示す。ポンプ揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は約260m<sup>3</sup>/hであり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

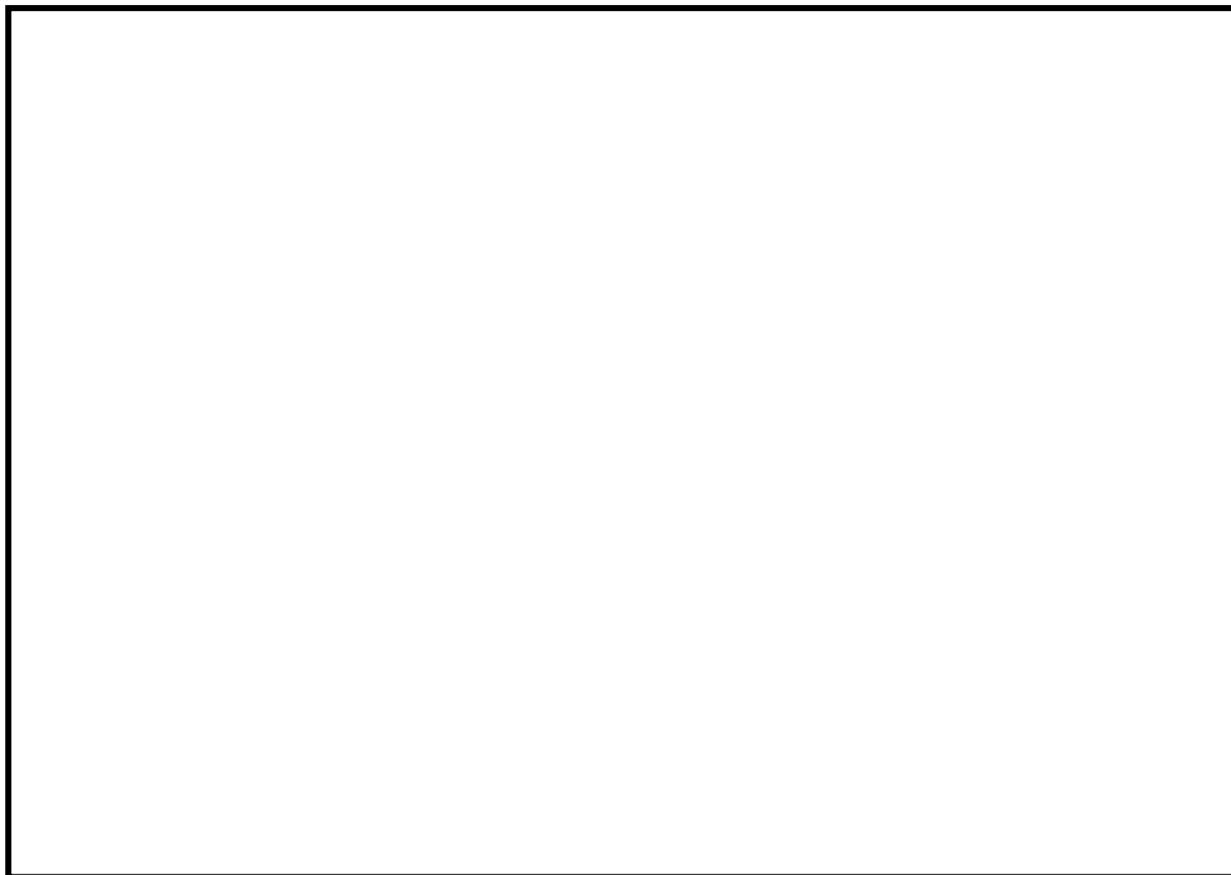


第 13 図 送水車 流量出典

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(7)送水車を使用したスプレイヘッドによる放水流量（放水手順①）

放水手順①については、3.1.2.(1)に示す通り、放水設備であるスプレイヘッドの仕様上限値として、第14図に示す通り  m<sup>3</sup>/hとする。



第14図 スプレイヘッドを用いた放水手順の流量

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(8) 大容量ポンプ（放水砲用）を使用した放水砲による放水流量（放水手順②）

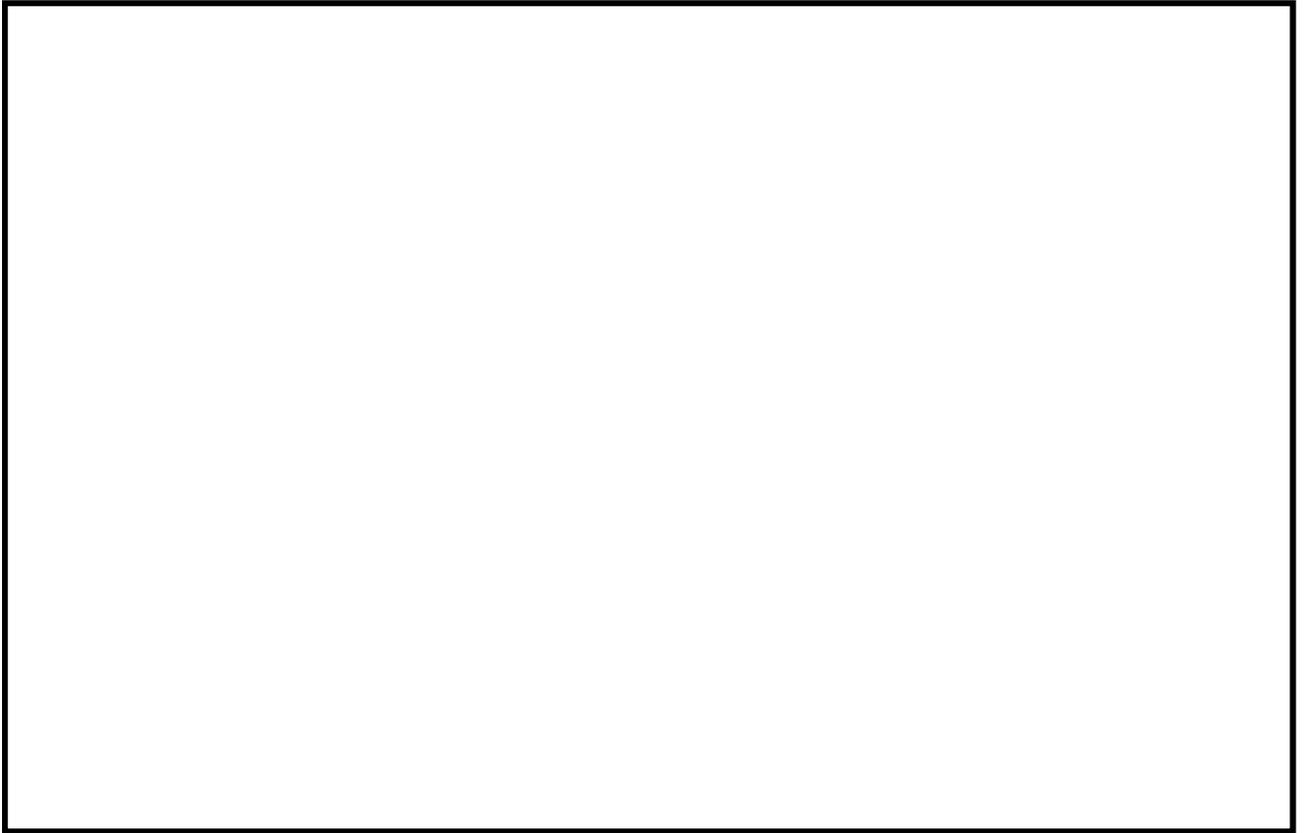
放水手順②については、3.1.2.(2)に示す通り、配備されている大容量ポンプ（放水砲用）の型式および設備構成を踏まえ設定する。なお大容量ポンプ（放水砲用）にはポンプ入口まで海水を送水する水中ポンプが備わっており、水中ポンプは油圧駆動でポンプインペラを回転させ水を吐出する構造となっている。流量増加の際はインペラへ油圧をかけることになるが、大容量ポンプ（放水砲用）の揚程曲線上の最大送水量において作動油圧上限値に達し、当該上限値以上の油圧が水中ポンプにかかることがない機構となっているため、大容量ポンプ（放水砲用）の流量が当該上限値以上となることはない。

具体的には、高浜発電所に配備されている大容量ポンプ（放水砲用）の型式はそれぞれ第12表に示す3種類があり、各型式の流量送水量は第15-1～3図に示す通りそれぞれ  $\square$   $\text{m}^3/\text{h}$ （型式：HS900）、 $\square$   $\text{m}^3/\text{h}$ （型式：HS900N）、 $\square$   $\text{m}^3/\text{h}$ （型式：HS1200）である。これらを直列に2台接続する場合の最大送水量は  $\square$   $\text{m}^3/\text{h}$ （HS900およびHS1200を用いる場合に送水量が最大となる。送水量は、ポンプを2台直列に接続する運用であることから容量の低い方のポンプと同値になる。）となることから、放水砲からの流量は  $\square$   $\text{m}^3/\text{h}$ を2等分した  $\square$   $\text{m}^3/\text{h}$ となる。

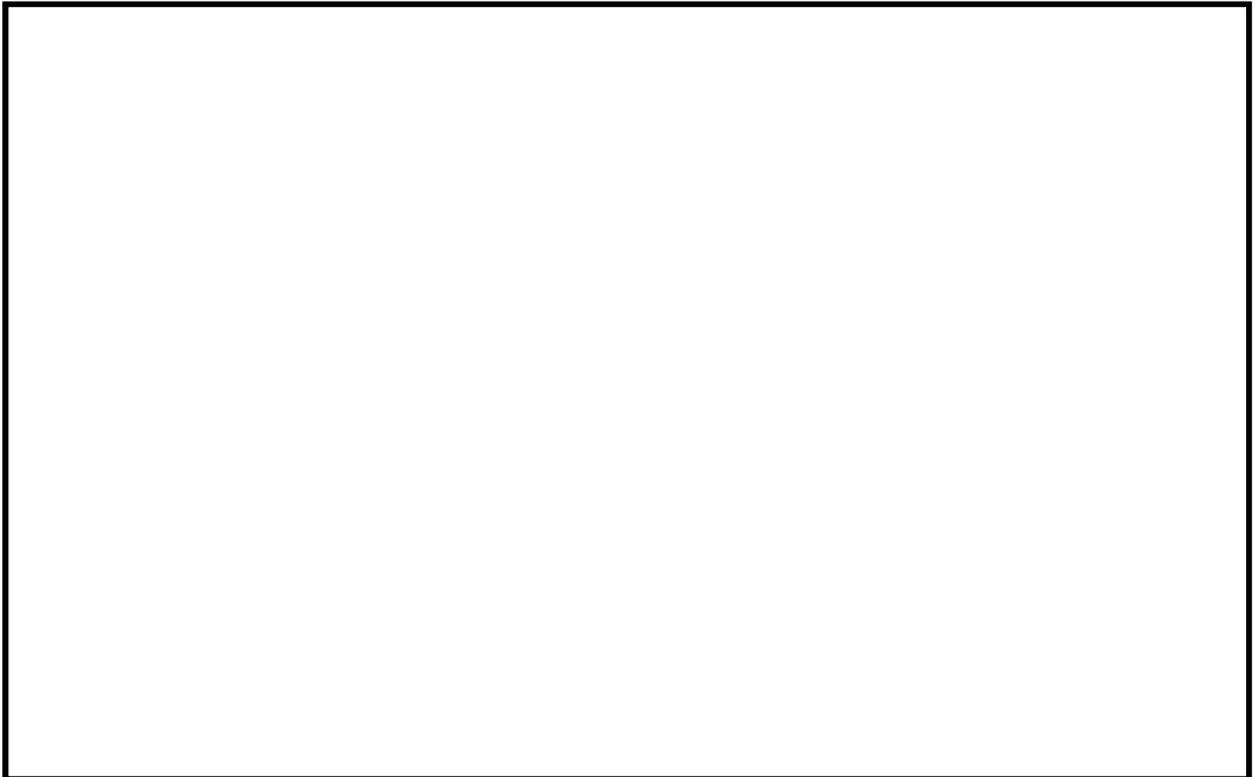
第12表 高浜1, 2号炉に配備している大容量ポンプ（放水砲用）の型式

型式	HS900 (1, 2号炉共用)	HS900N (1, 2号炉共用)	HS1200 (共用予備)
既工認記載値	$\square$ $\text{m}^3/\text{h}$ 以上		

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

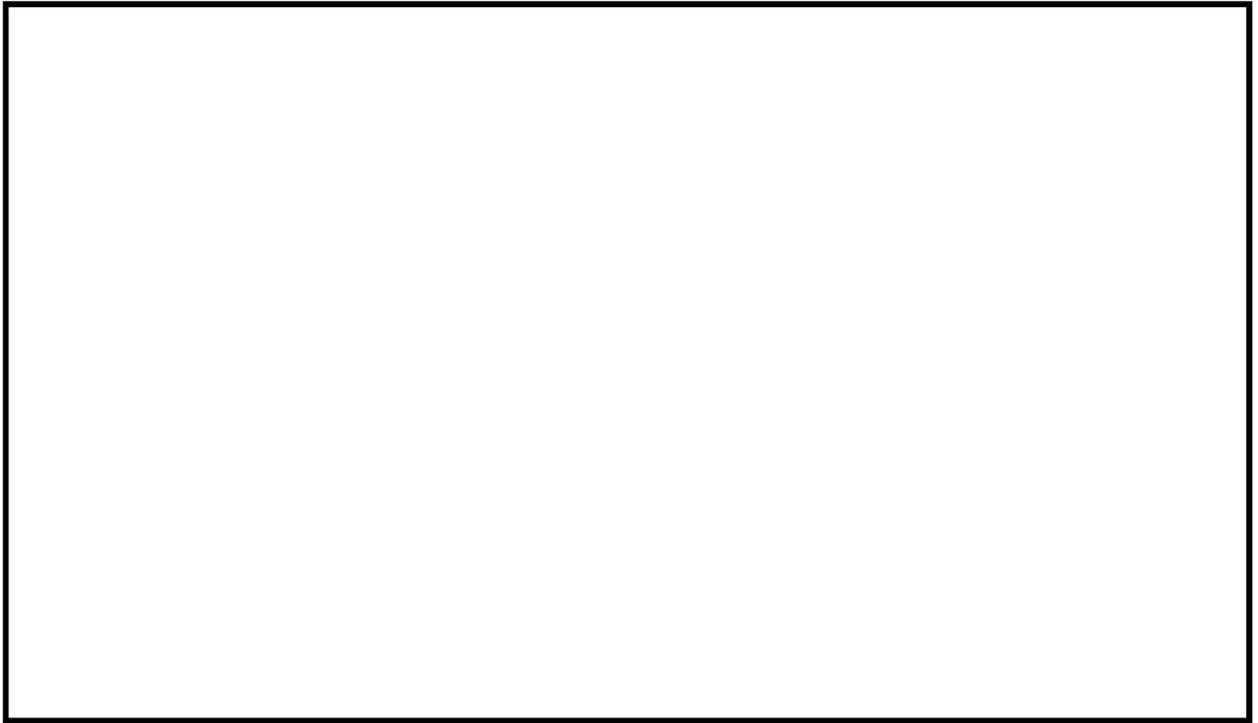


第 15-1 図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS900）



第 15-2 図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS900N）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 15-3 図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS1200）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

## 5. 不確かさを考慮した条件の設定について

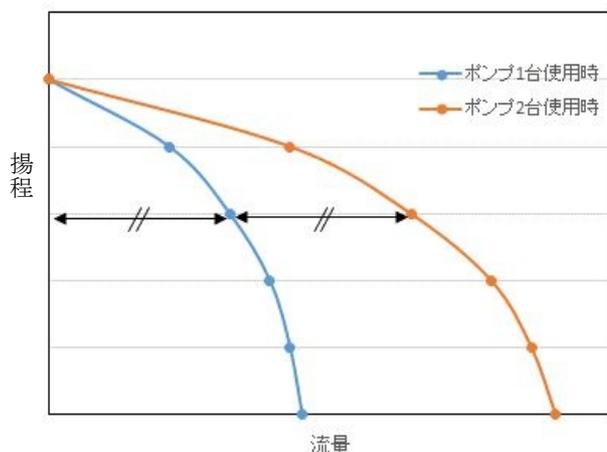
不確かさを考慮した条件の設定に際しては、重大事故等への対応に向け整備された手順に示される具体的記載事項を踏まえ、以下の考え方に基づき設定する。

### a. 実施手順数

基本ケース条件と同様にSFPへの注水・放水に係る全手順の同時実施を想定する。

### b. 各手順における系統内ポンプの使用台数

系統内ポンプの使用台数は、手順上からは1台と読み取れるが、運転ポンプを切り替える場合には一時的に複数台分の流量が吐出される可能性があることから、不確かさとして系統内に設置されるポンプが全数起動することを考慮する。なおポンプの複数台起動を想定するに当たり、ポンプの設計揚程曲線は第16図に示す通り、ポンプ1台時の設計揚程曲線の流量にポンプ台数を乗じて求められる曲線を使用する。またポンプ1台での通水時の実測値がある手順については、流量増加に伴う配管圧損増加の影響を無視する保守的な設定として、ポンプ1台での通水実績（基本ケース条件）にポンプの系統内設置台数を乗じることで算出する。



第16図 ポンプ複数台使用時の揚程曲線設定（2台起使用時の概要）

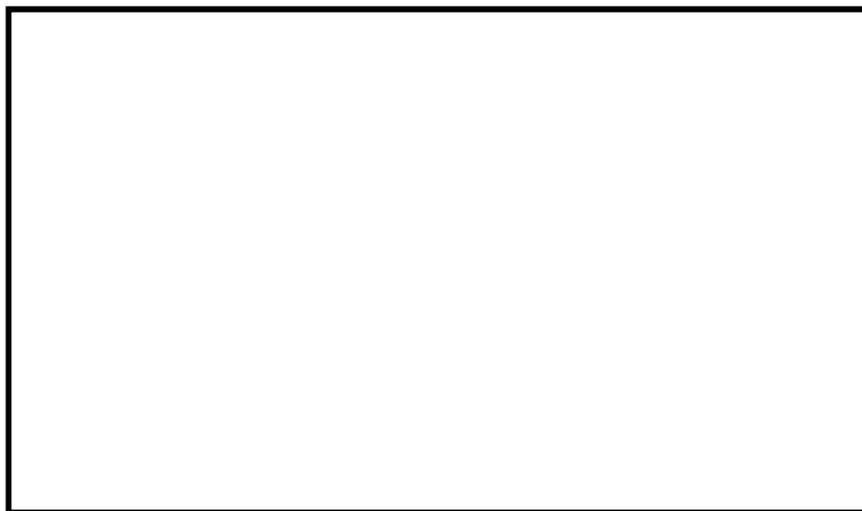
上記の前提および3.1.に示す具体的考え方にに基づき、各手順における流量の不確かさを考慮した条件を設定する。なお、基本ケース条件からの変更点は、使用するポンプ台数の増加であり、系統圧損の評価手法および水源-SFPの水頭差は変わらないことから、以降では①での系統構成および各手順での評価結果のみを示す。

(1) 燃料取替用水タンクおよび1次系純水タンクからの注水流量（注水手順①および手順⑤）

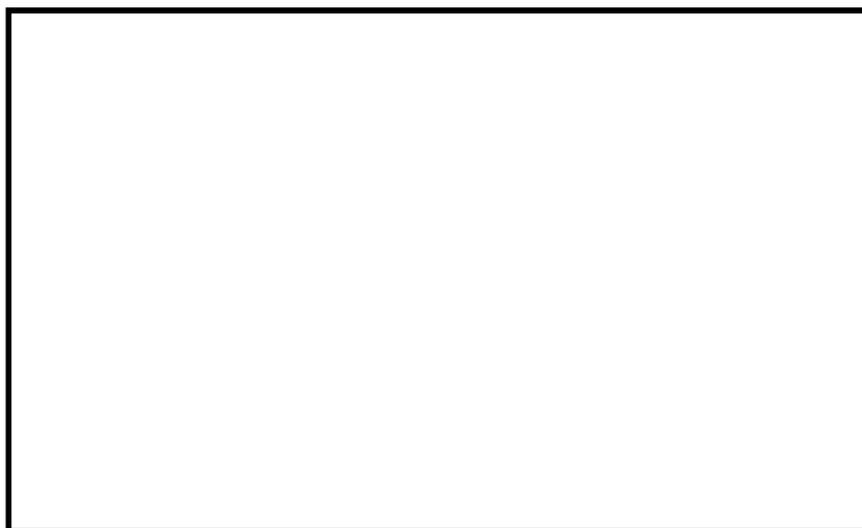
評価する手順①での系統概要を第17図に、ポンプの起動台数を全数とした評価結果を第18-1, 2図に示す。ポンプの揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は、手順①で約 $21\text{m}^3/\text{h}$ 、手順⑤で約 $42\text{m}^3/\text{h}$ であり、不確かさを考慮した条件の設定においては当該流量を使用する。



第17図 手順①における不確かさを考慮した流量を計算する際の系統構成概要



第18-1図 手順①におけるポンプ揚程および性能曲線との関係



第18-2図 手順⑤におけるポンプ揚程および性能曲線との関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(2) 2次系純水タンク（2次系純水ポンプ使用）からの注水流量（注水手順②）

3.1.1. (1)a. に示す通り恒設設備を使用し、実測値がある手順であるため、基本ケース条件にポンプ台数を乗じた値として $5\text{m}^3/\text{h} \times 3\text{台} = 15\text{m}^3/\text{h}$ を、不確かさを考慮した条件として使用する。

(3) 1,2号淡水タンクからの注水流量（注水手順③）

3.1.1. (1)a. に示す通り恒設設備を使用し、実測値がある手順であるため、基本ケース条件にポンプ台数を乗じることとし、さらに接続消火栓の数（3か所）も乗じた値として、 $22\text{m}^3/\text{h} \times 2\text{台} \times 3\text{か所} = 132\text{m}^3/\text{h}$ を、不確かさを考慮した条件として使用する。

(4) 2次系純水タンク（消防ポンプ使用）からの注水流量（注水手順④）

ポンプの系統内設置台数は基本ケース条件と同じであることから、不確かさを考慮した条件は基本ケース条件と同じ $95\text{m}^3/\text{h}$ を使用する。

(5) 海水（送水車使用）からの注水流量（注水手順⑥）

ポンプの系統内設置台数は基本ケース条件と同じであることから、不確かさを考慮した条件は基本ケース条件と同じ $260\text{m}^3/\text{h}$ を使用する。

(6) 送水車を使用したスプレイヘッドによる放水流量（放水手順①）

ポンプの系統内設置台数は基本ケース条件と同じであることから、不確かさを考慮した条件は基本ケース条件と同じ $\square \text{m}^3/\text{h}$ を使用する。

(7) 大容量ポンプ（放水砲用）を使用した放水砲による放水流量（放水手順②）

ポンプの系統内設置台数は基本ケース条件と同じであることから、不確かさを考慮した条件は基本ケース条件と同じ $\square \text{m}^3/\text{h}$ を使用する。

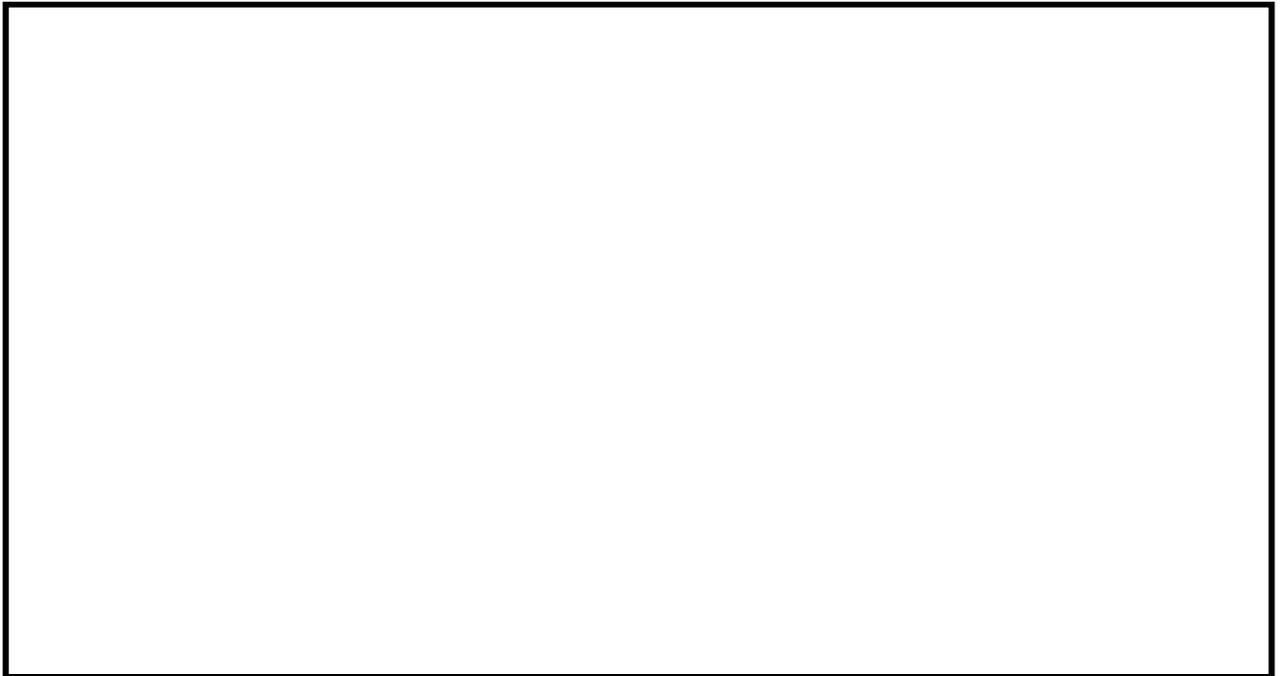
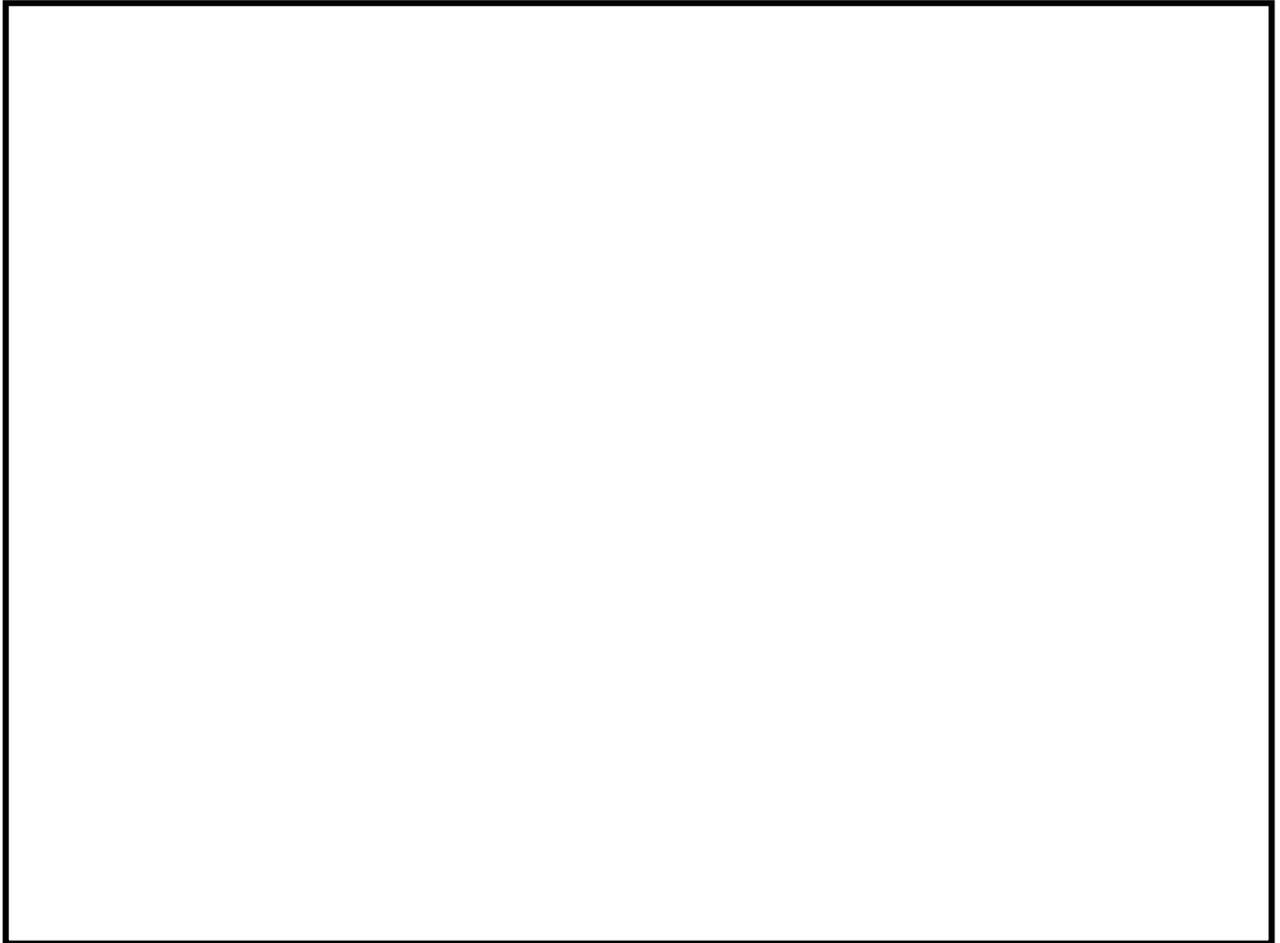
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

## 6. 系統に複数台設置されるポンプの起動台数の考え方について

流量の基本ケース条件の設定に当たっては原則最確値を設定する観点から、1 手順につき 1 台の起動を想定している。手順によっては系統内に複数台のポンプが設置されているものがあるが、それらは事故時の対応に多重性を持たせるため、あるいは点検や故障等のため使用できない場合におけるバックアップの位置づけである。また第 19 図に実際の事故時に使用する手順書の例を示すが、注水ラインの形成に当たっては片側ラインずつ形成する前提としていることも読み取れることから、1 手順につき 1 台の起動を想定することは妥当と判断している。

一方で、不確かさを考慮した条件の設定に当たっては、運転ポンプを切り替える場合に一時的に複数台分の流量が吐出される可能性を考慮し、ポンプを全数起動することを想定した値を設定する。

なお、仮に全数を起動させたとしても系統圧力等の観点から設備に悪影響を与えることはない。



第19図 事故時の対応（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

## 7. 全手順同時実施の成立性確認

流量条件の設定に当たっては、54条2項に係る対応として整備した全手順が同時に実施されることを想定しているが、各手順で使用する水源の容量や手順実施に必要な人員の数および手順毎の所要時間を踏まえ、全手順同時実施の成立性を確認した。なお本項では不確かさを考慮した流量での成立性を確認し、そうすることで基本ケース条件での同時実施成立性の確認を兼ねる。

海水以外を水源とする手順における水源の容量を第13表に示す。またSFPからの大量の水の漏えい発生時における対応フローおよび手順の有効性確認において使用されている各手順の所要時間を踏まえ、各手順を順に実施した場合の想定タイムチャートを第20図に示す。不確かさを考慮した流量で各水源を使用したとしても、放水砲による放水を実施するまで連続で水を補給することが可能である。また、より人員が必要となる放水砲による放水手順を、他手順を実施したのちに実施する想定としており、要員数の観点からも想定タイムチャートは成立しうるものである。

よって、不確かさを考慮した流量による全手順の同時実施は、要員や水源容量を踏まえても成立しうる。

第13表 使用済燃料ピットへの水補給において使用する水源の容量について

水源	容量 (補給可能水量)	不確かさを考慮した流量 での連続補給可能時間 <sup>※3</sup>	補給開始から放水砲による放水 までの時間 (第20図より)
燃料取替用水タンク	1325m <sup>3</sup> <sup>※1</sup>	約63時間	約9時間
2次系純水タンク	2700m <sup>3</sup> <sup>※2</sup>	約25時間 <sup>※4</sup>	約9時間
1, 2号機淡水タンク	15600m <sup>3</sup> (3120m <sup>3</sup> <sup>※2</sup> × 5基)	約118時間	約6時間
1次系純水タンク	510m <sup>3</sup> <sup>※2</sup>	約12時間	約3.5時間

※1: 保安規定値。 ※2: 有効水量として評価した値。 ※3: 容量をSFP内に全量補給可能な水量として計算した値。

※4: 2次系純水ポンプおよび消防ポンプ使用手順の流量合計を使用し計算した値。

			時間									
水源			SA設備準備開始					放水砲放水開始				
	実施要員 (人数)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DB	燃料取替用水タンク	運転員等 (1名)	約40分									
	2次系純水タンク	運転員等 (1名)	約20分									
多様性	1, 2号機淡水タンク	緊急時安全対策要員 (3名)										
	2次系純水タンク (消防ポンプ)	緊急時安全対策要員 (5名)										
	1次系純水タンク	緊急時安全対策要員 (2名)										
SA	海水注水 (送水車使用)	緊急時安全対策要員 (5名)										
	海水スプレー (送水車使用)	緊急時安全対策要員 (5名)										
	海水放水 (大容量ポンプ使用)	緊急時安全対策要員 (12名)										

第20図 全手順同時実施を想定したタイムチャート

## 8. まとめ

高浜1, 2号炉の未臨界性評価条件となるSFPへの流入流量について、各手順の系統構成および設備配備台数等を踏まえ、基本ケース条件および不確かさを考慮した条件を評価した。3. で示した流量設定の考え方に基づき、4. および5. で求めた各手順の流量評価結果を第14-1, 2表に纏める。

未臨界性評価における流量の基本ケース条件および不確かさを考慮した条件は、注水・放水手順の流量合計値として、それぞれ  m<sup>3</sup>/h、 m<sup>3</sup>/hとなる。

第14-1表 SFPへの注水手順の流量評価結果一覧

注水手順(ポンプ)	基本ケース 流量	不確かさを 考慮した流量	根拠
① 燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)	21 m <sup>3</sup> /h	21 m <sup>3</sup> /h	ポンプ揚程曲線
② 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ)	5 m <sup>3</sup> /h	15 m <sup>3</sup> /h	実測値
③ 1,2号淡水タンク(消火ポンプ-消火栓)	22 m <sup>3</sup> /h	132 m <sup>3</sup> /h	実測値
④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	95 m <sup>3</sup> /h	95 m <sup>3</sup> /h	ポンプ揚程曲線
⑤ 1次系純水タンク(1次系純水ポンプ)	39 m <sup>3</sup> /h	42 m <sup>3</sup> /h	ポンプ揚程曲線
⑥ 海水(送水車)	260 m <sup>3</sup> /h	260 m <sup>3</sup> /h	ポンプ揚程曲線
合計	442 m <sup>3</sup> /h	565 m <sup>3</sup> /h	—

第14-2表 SFPへの放水手順の流量評価結果一覧

放水手順	基本ケース流量	不確かさを考慮した流量	根拠
①送水車によるスプレー	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h	スプレーヘッドの仕様上限
②大容量ポンプ(放水砲用)による放水	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h	大容量ポンプ(放水砲用)の仕様上限
合計	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h	—

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参考1) 系統圧損を考慮した流量算出方法に関する補足説明

今回未臨界性評価の流量条件を設定するに当たり、基本ケースの流量については系統内ポンプ1台を起動した場合の流量とし、不確かさを考慮した流量については系統内ポンプの全数を起動した場合の流量としている。系統内に複数台のポンプが設置される場合の系統概要を図1に示すが、ポンプ入口分岐部からポンプ出口合流部までの各ポンプの配管長さ等が異なる場合、これらの違いを踏まえ流量が保守的に算出される手法で評価している。以下に、複数台ポンプ起動時の流量算出方法に関して補足する。

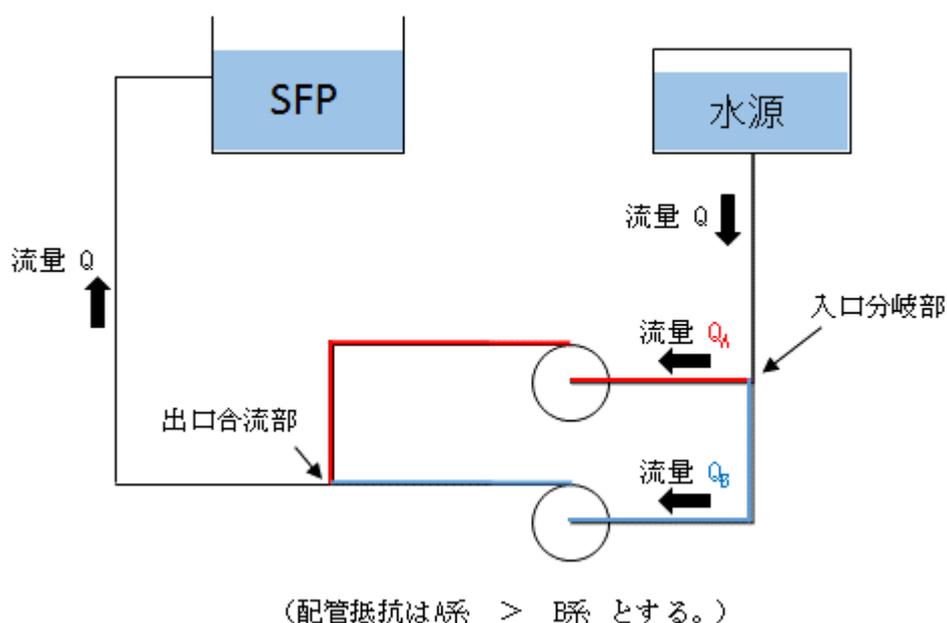


図1 ポンプが複数台設置される系統の概要

【ポンプ1台起動の場合の流量】

ポンプ起動台数を1台とする基本ケースの流量を求める際は、各ラインの等価直管長を算出したうえで、流量が大きくなるように、配管抵抗（等価配管長、配管径および流量により求まる）が小さいラインでの流量を算出している。例えば図1において配管抵抗がA系>B系の場合、ポンプ1台起動時の圧損揚程曲線は図2のようになり、より多くの流量が流れる $Q_B$ を用いることとしている。

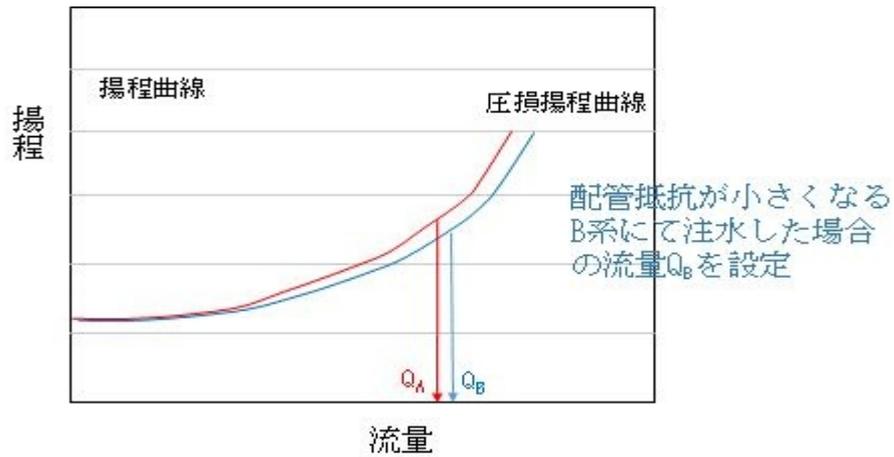


図2 基本ケースの流量（ポンプ起動台数は1台）の算出手法概要

【ポンプの複数台起動を想定した流量】

ポンプ起動台数を全数とする、不確かさを考慮した流量を求める際は、ポンプ入口分岐部からポンプ出口合流部までの長さを、配管抵抗が小さい方のラインにそろえる仮定としている。また上述の仮定を置くことに伴い、ポンプ揚程曲線として、ポンプ1台時の設計揚程曲線の流量にポンプ台数を乗じて求められる曲線を使用することとした（これにより、図1に示す系統において2台のポンプを同時に起動した場合の流量 $Q$ は、 $Q=2Q_A=2Q_B$ となる）。

不確かさを考慮した流量の評価概要を図3に示す。ポンプ1台時の揚程曲線の流量にポンプ台数を乗じて求めた揚程曲線と、系統圧損との交点 $Q'$ を用いることとした。なお実際の両ライン配管抵抗の合計値は、等価配管長等の差分の分だけ大きくなる場所、両ライン共に配管抵抗が小さい側であると仮定する本手法は、配管抵抗を小さく見積もる、すなわち流量を大きくする設定となっている。

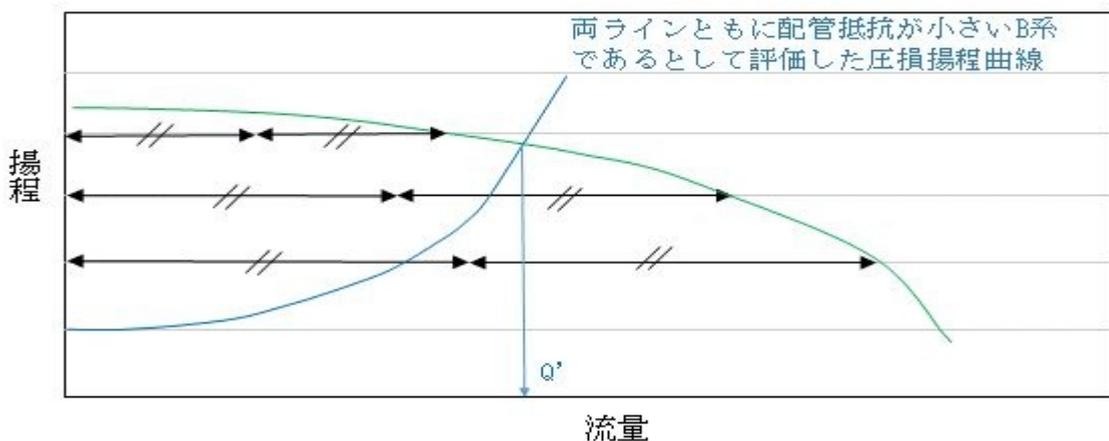


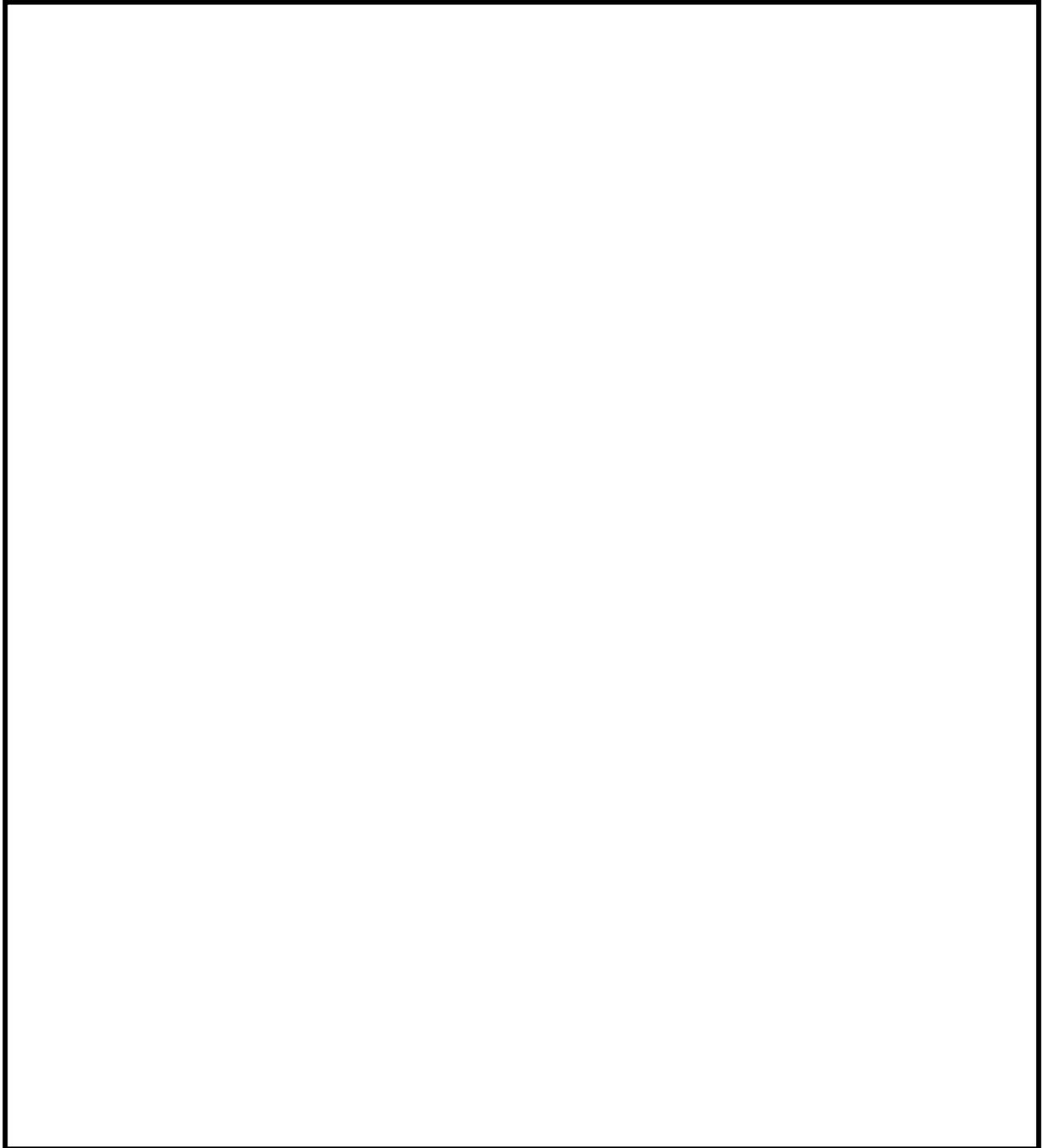
図3 不確かさを考慮した流量（ポンプ起動台数は全数）の算出手法概要

なお上述の通り、入口分岐部から各ポンプ入口まで、およびポンプ出口から出口合流部までの配管長さ等が異なる場合があることを踏まえた保守的な流量算出方法を採用しているが、実際には各ポンプは近接した箇所に配置されており、**A系**および**B系**の等価配管長にほとんど差はなく、それ起因する圧損差は、水源から**SFP**までの全揚程に対して小さい。

よって今回の手法を用い算出した結果は、各系列の配管長さ等を正確に考慮した場合の流量算出結果をよく近似できていると言える。

(参考2) 実測値があるSFPへの注水手順を整備した社内標準 (抜粋)

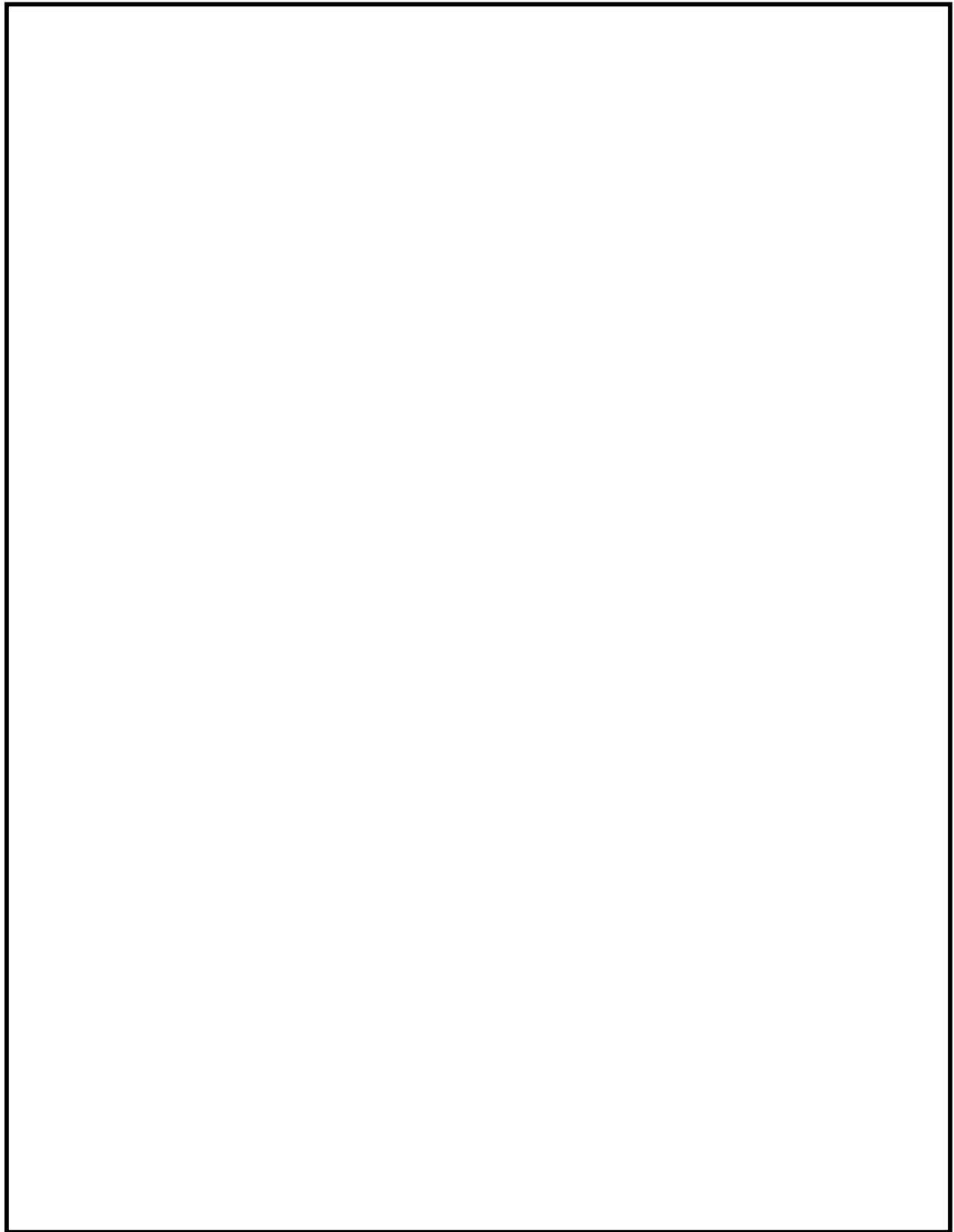
【2次系純水タンク (2次系純水ポンプ使用) からの注水 (注水手順②)】



高浜発電所1号機 事故時操作所則 (抜粋)

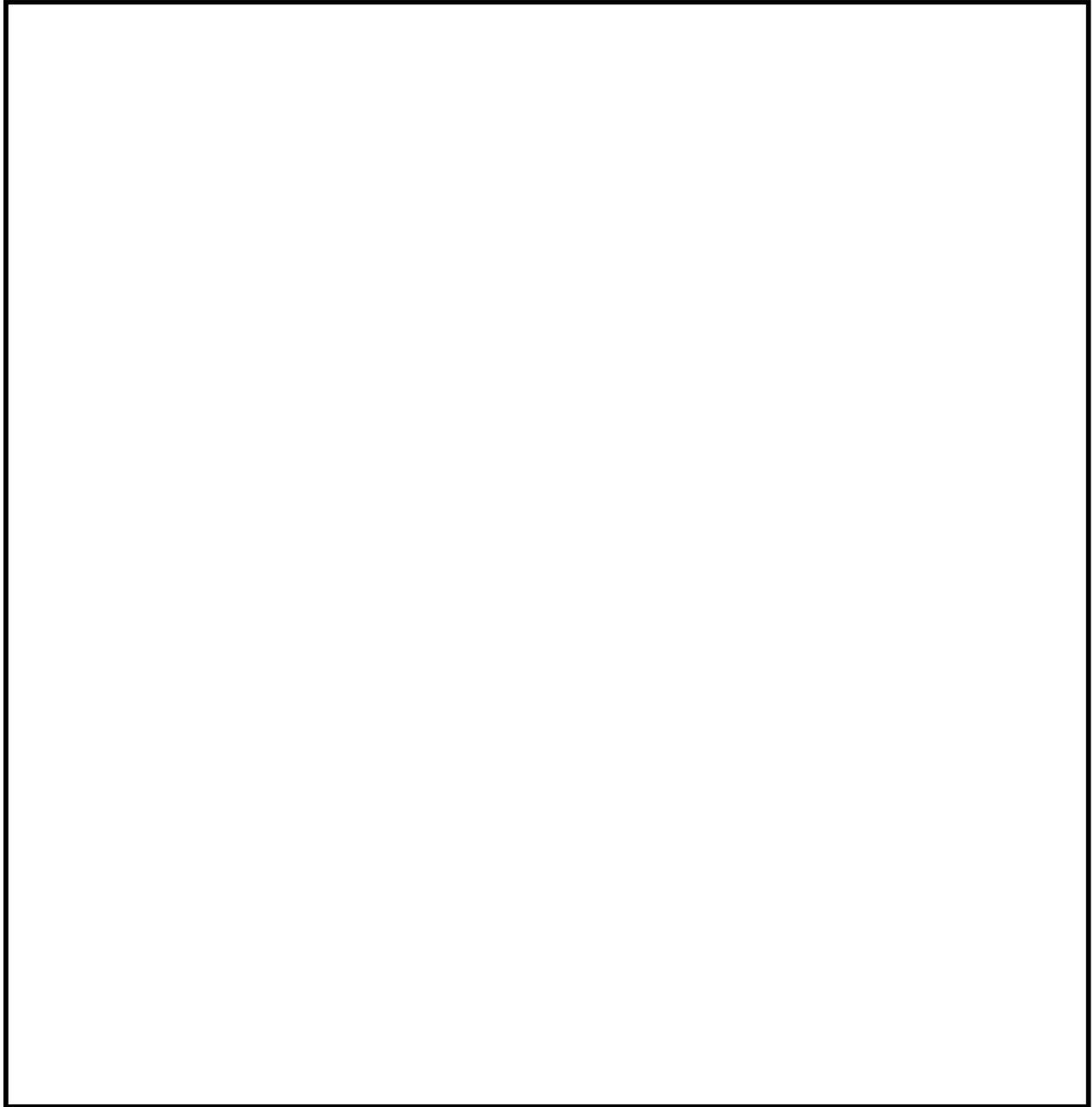
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【1,2号淡水タンクからの注水（注水手順③）】



高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

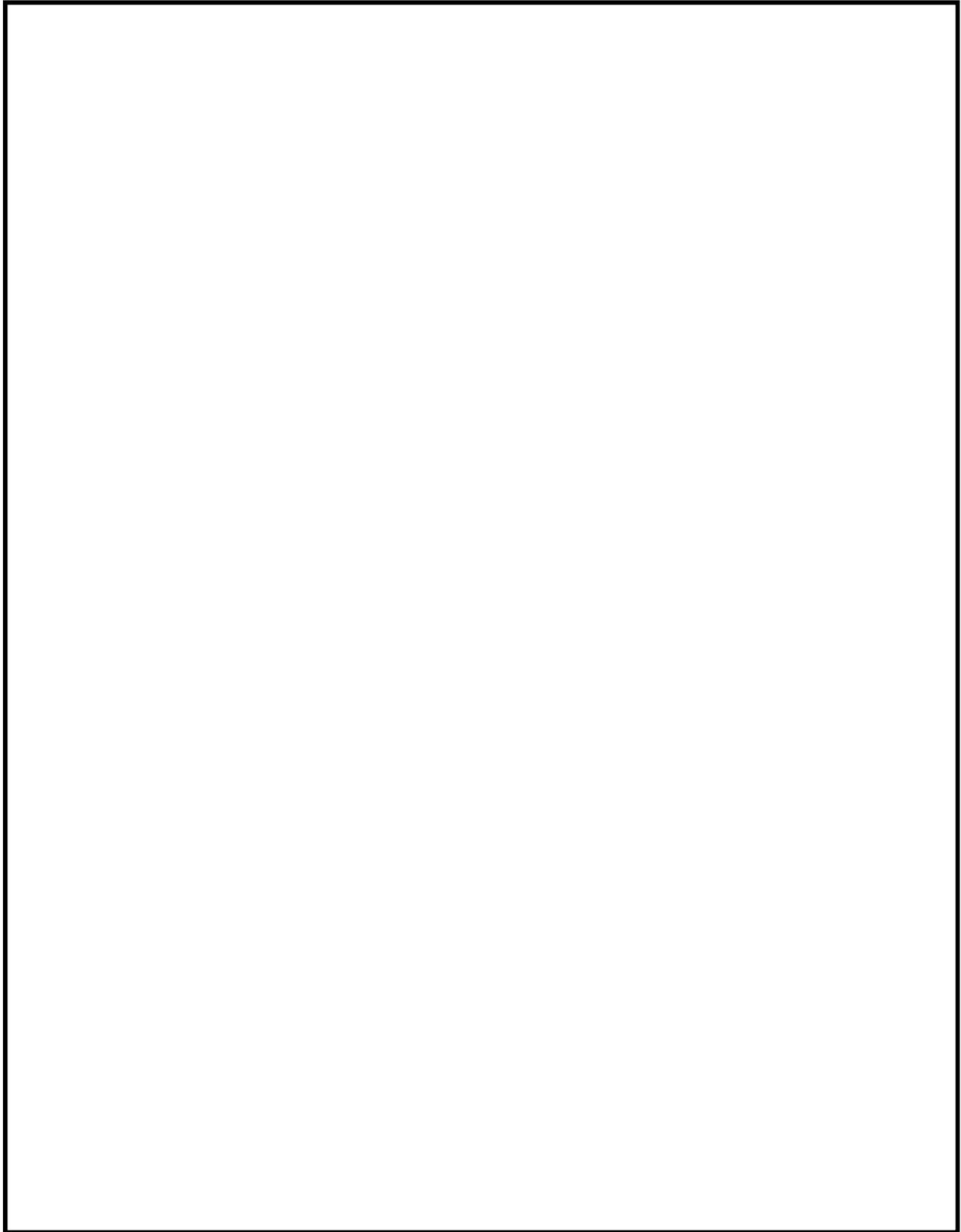
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

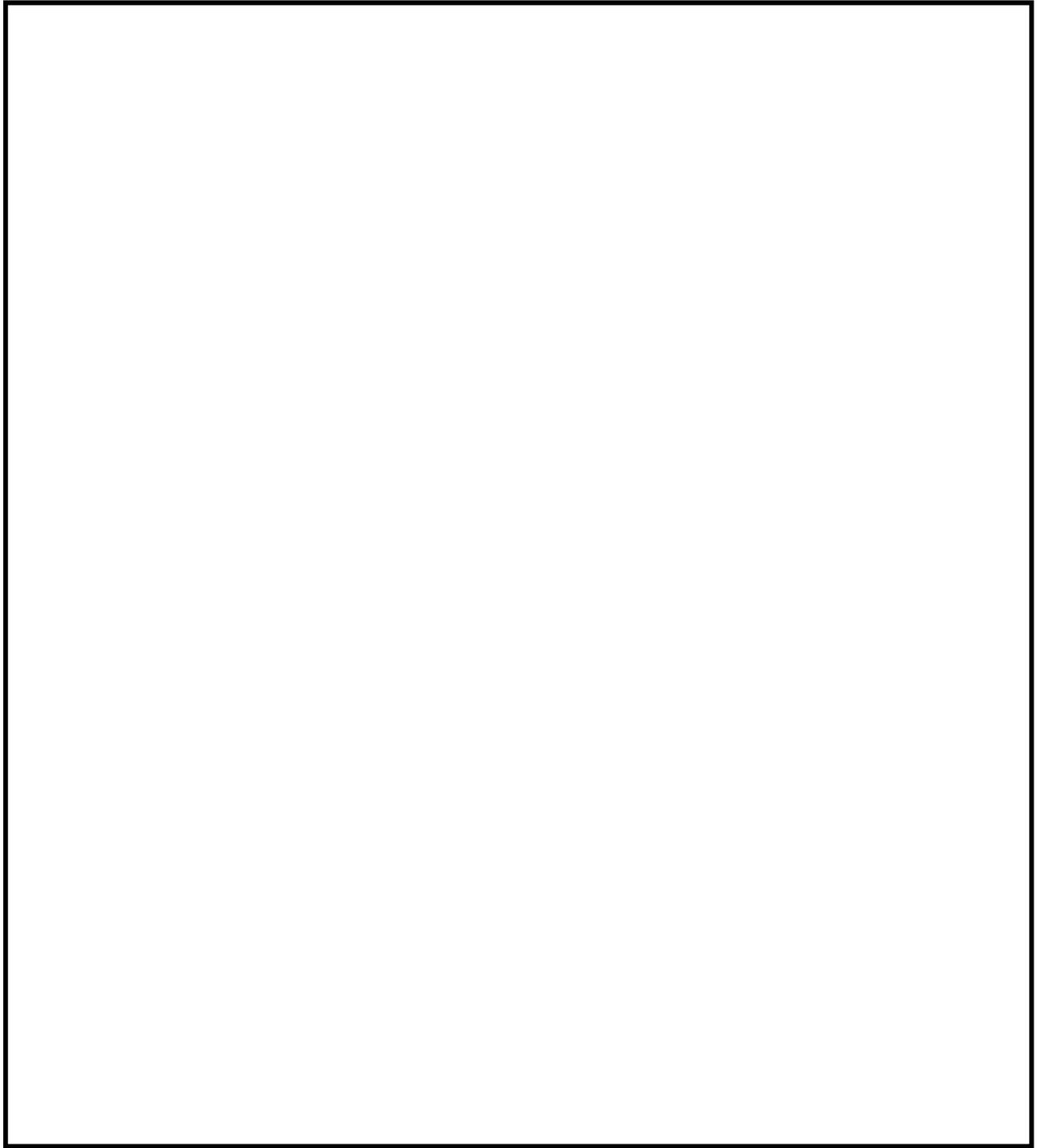
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【2次系純水タンク（消防ポンプ使用）からの注水（注水手順④）】



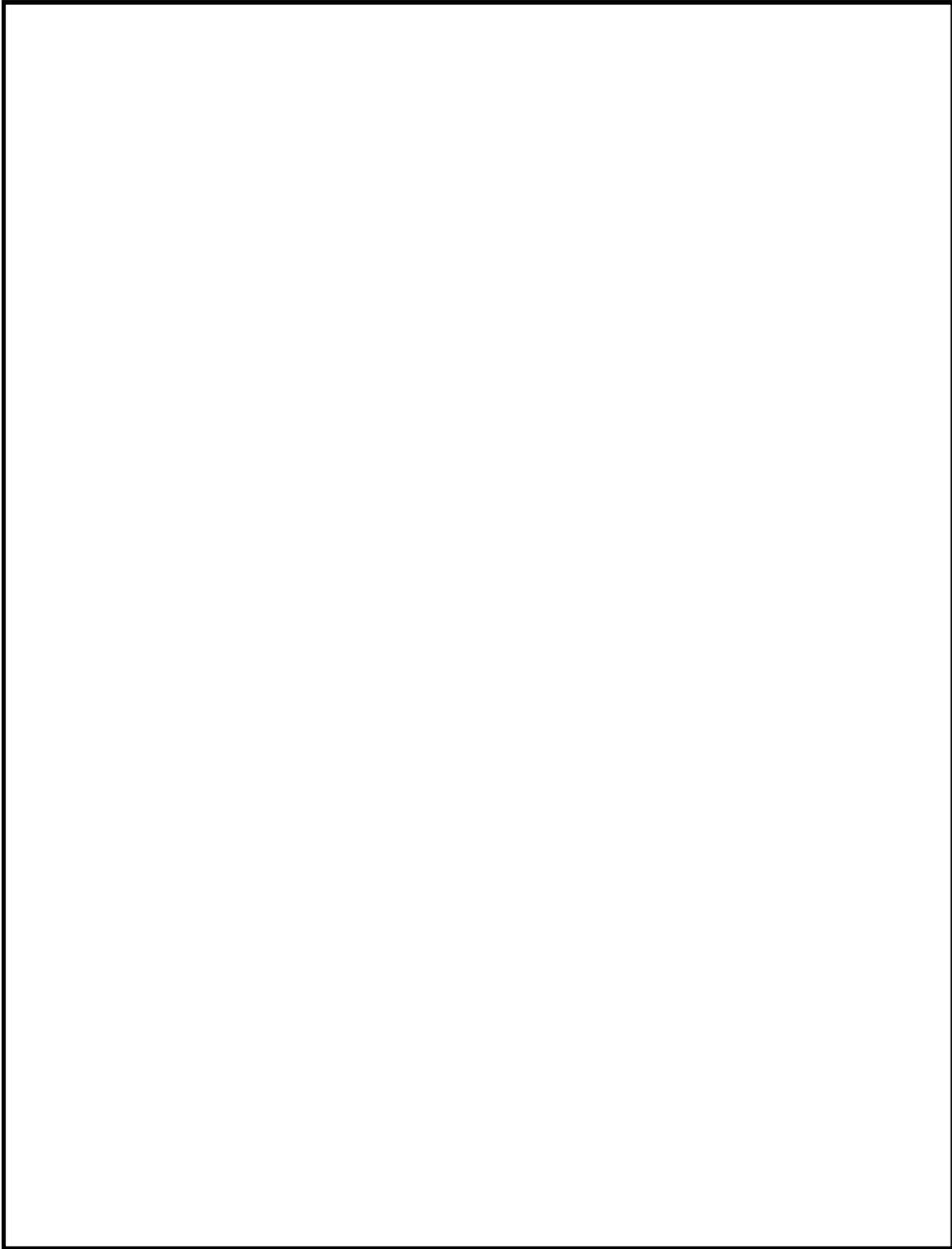
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

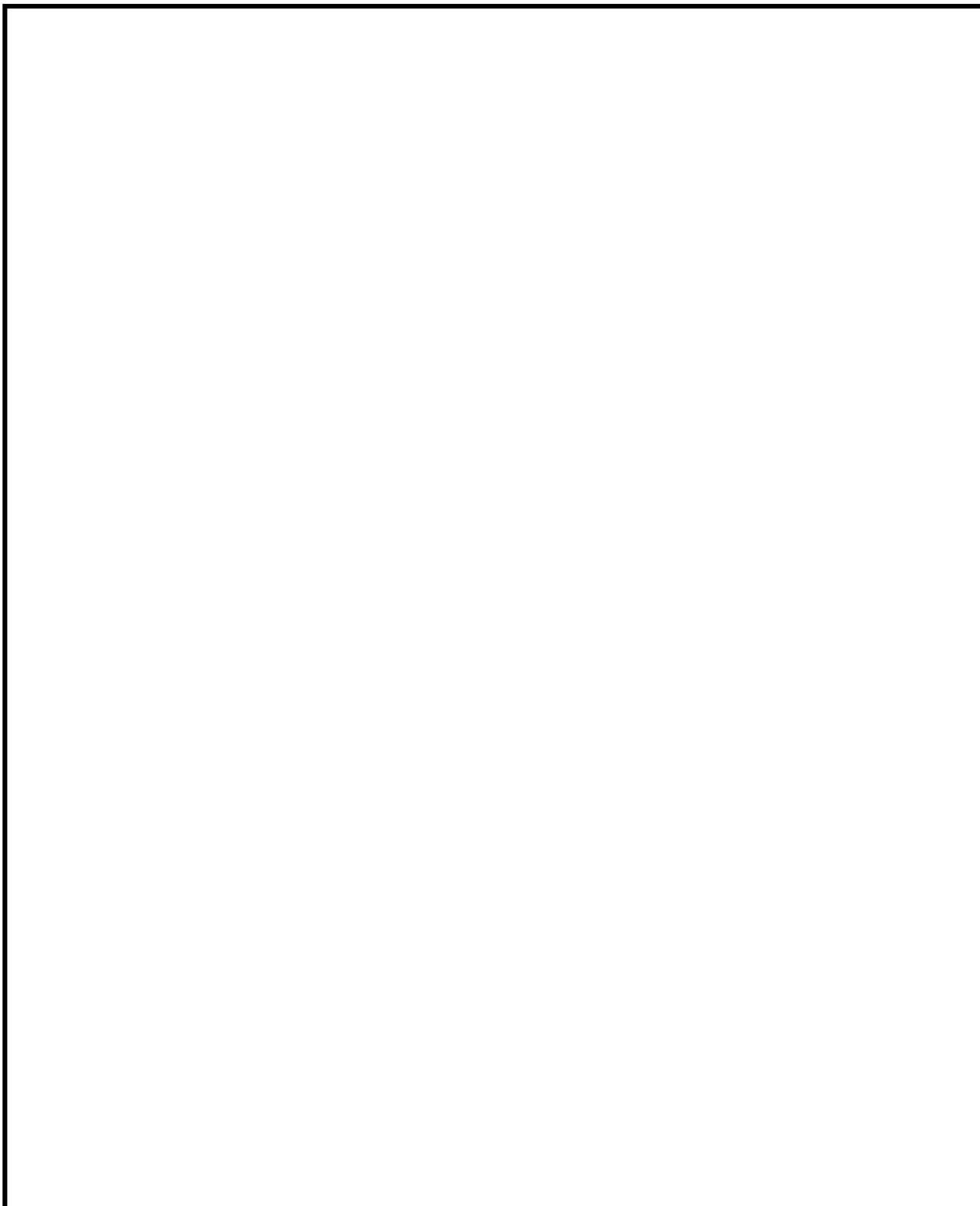


高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

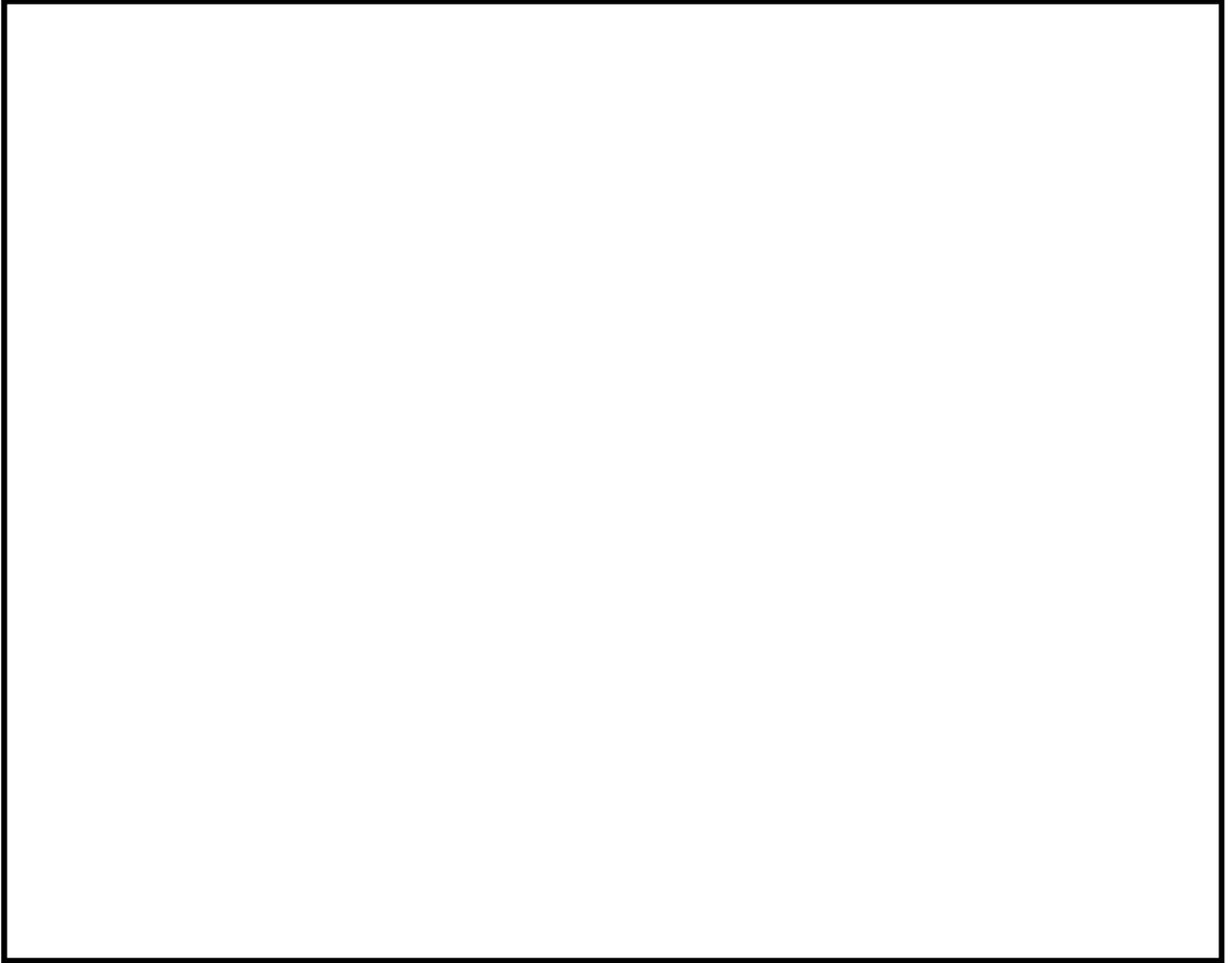
(参考3) 大容量ポンプ（放水砲用）による放水手順を整理した社内標準（抜粋）

【大容量ポンプ（放水砲用）による放水手順】



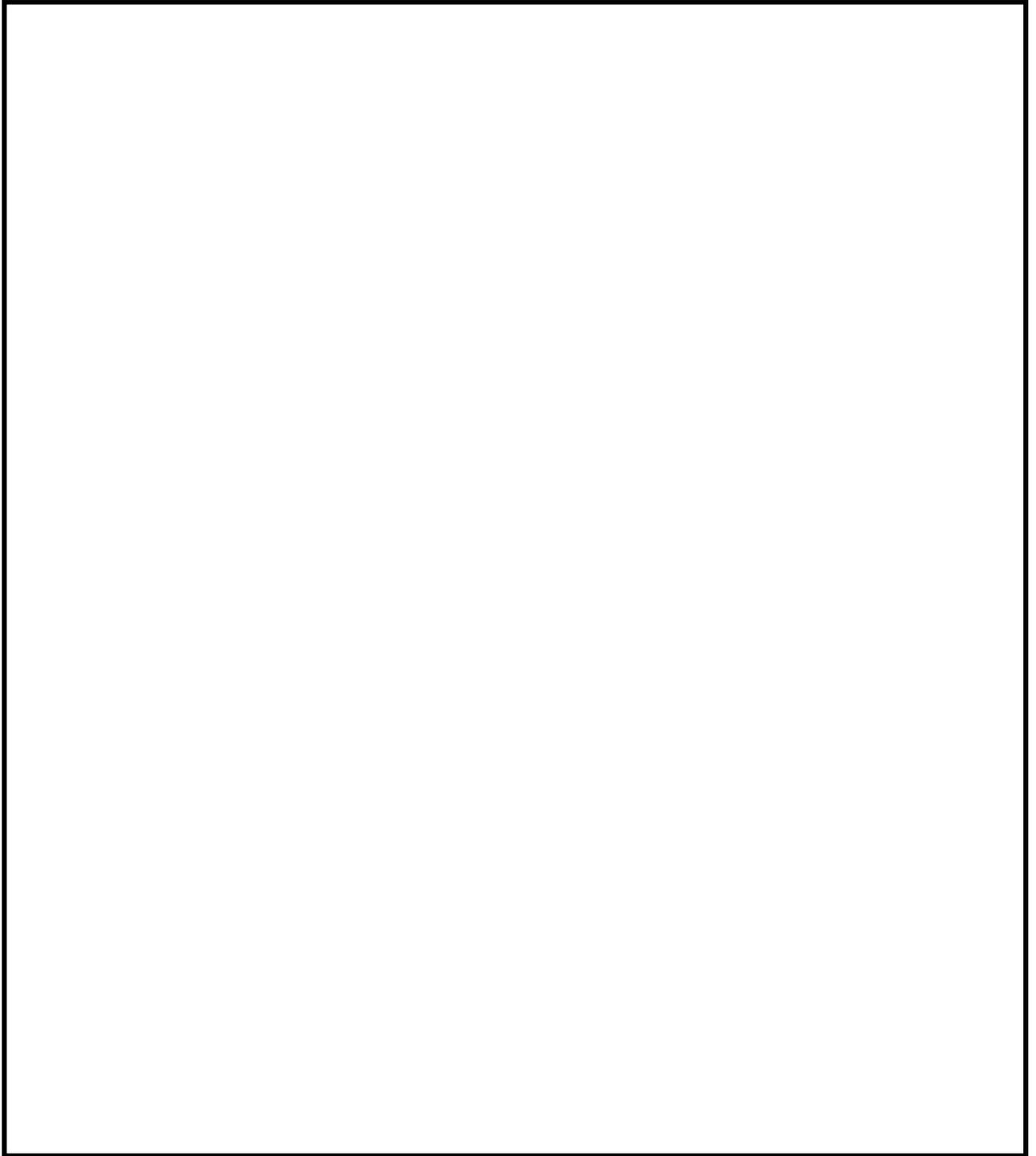
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



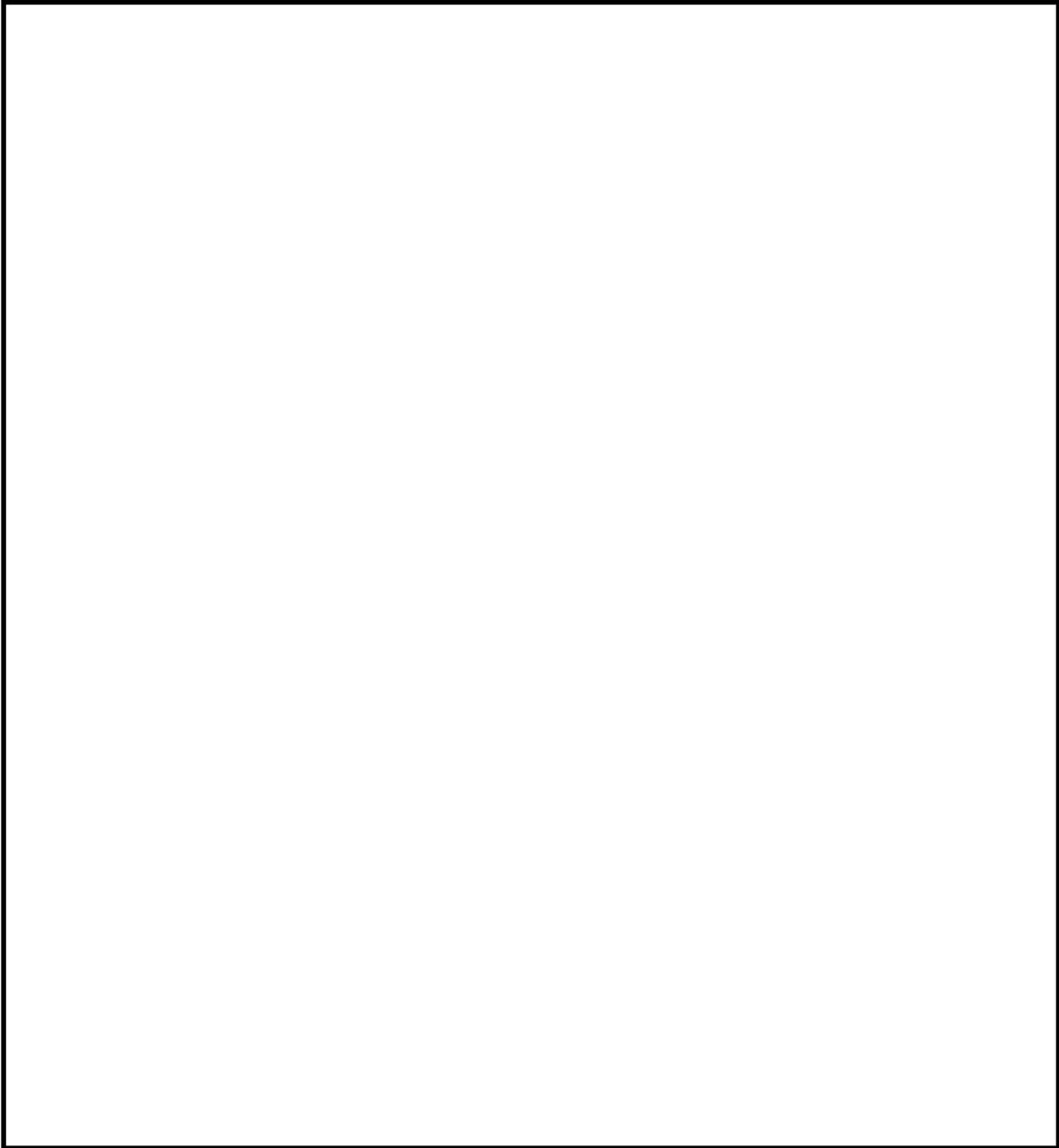
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

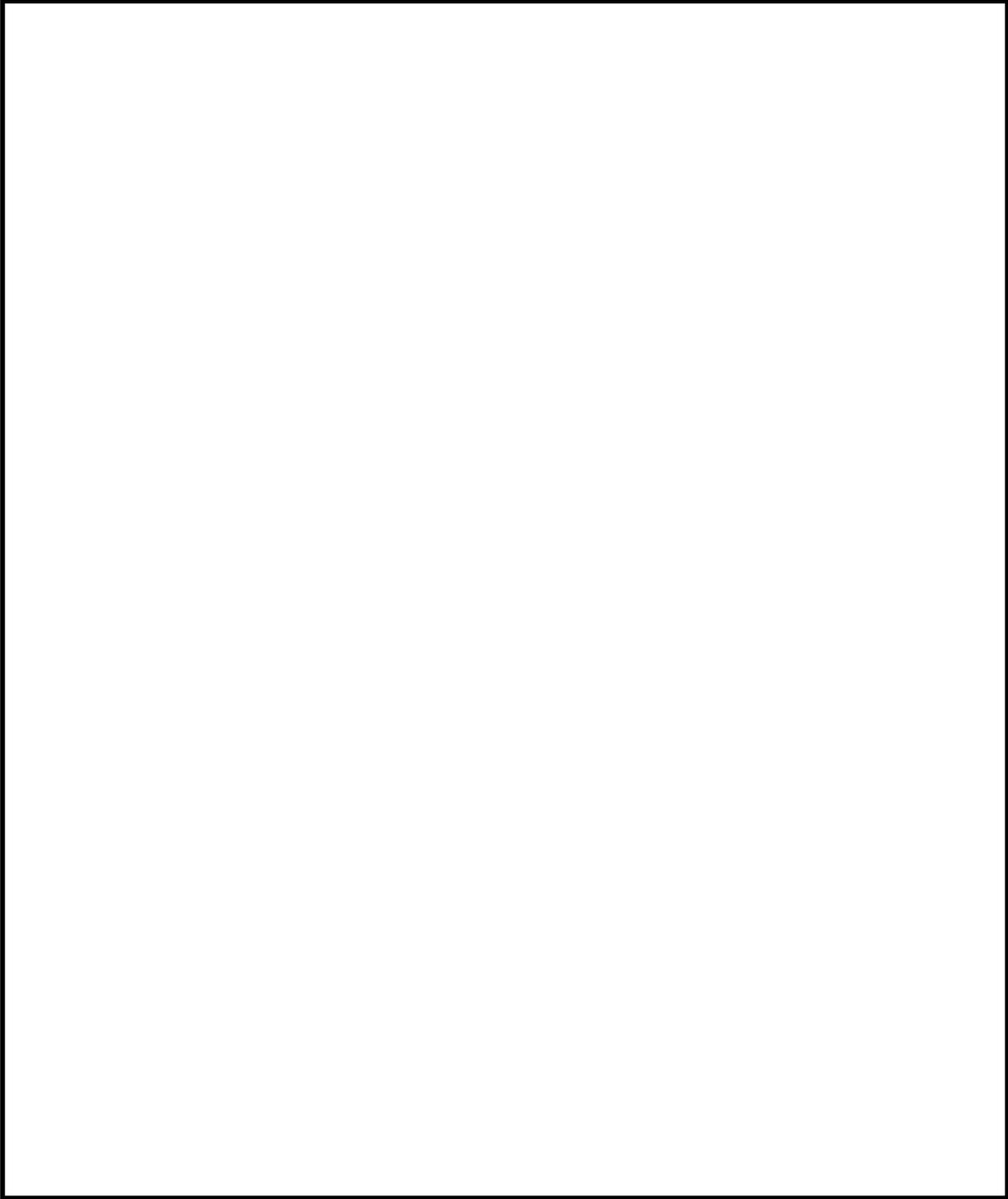


高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

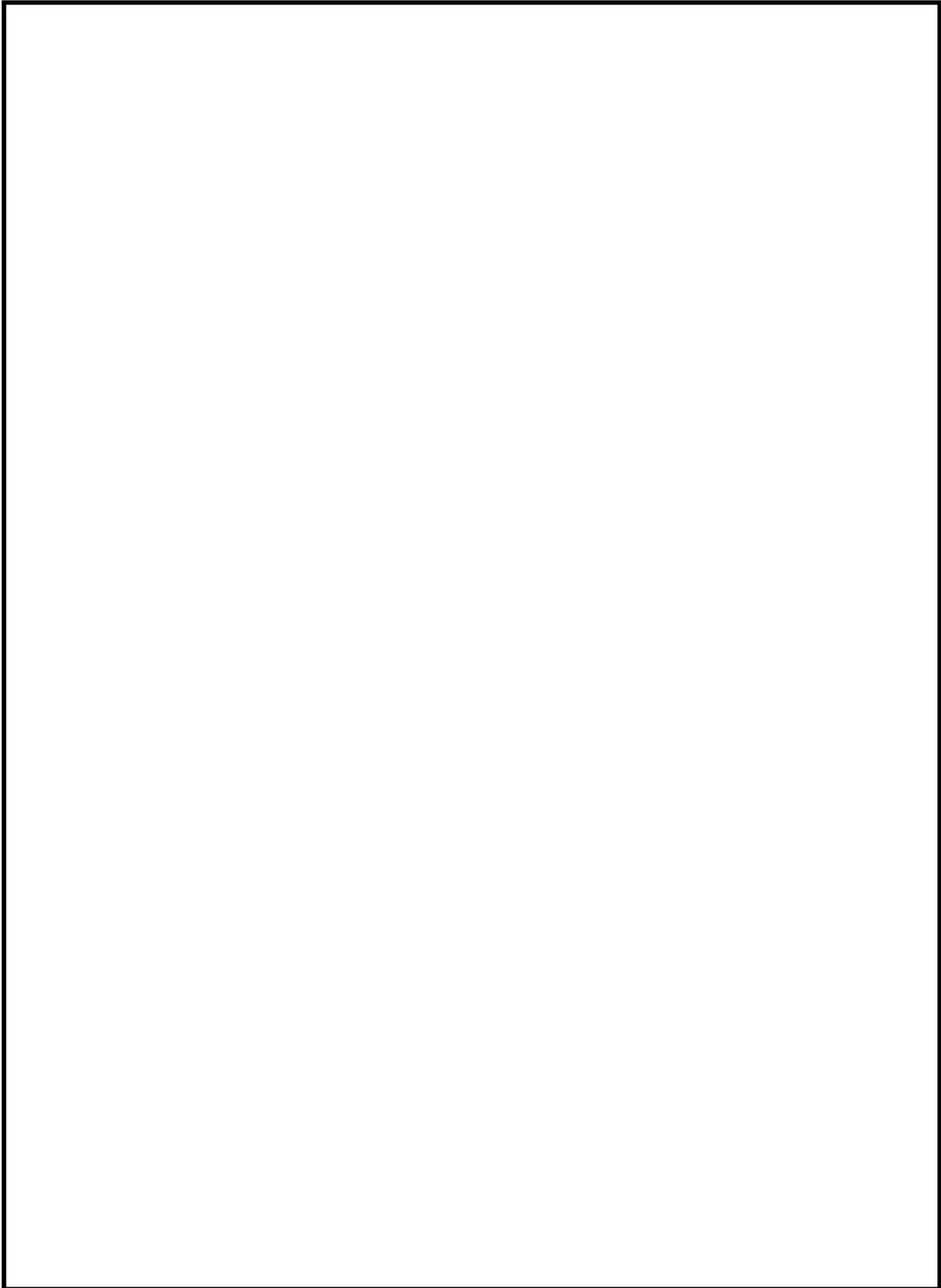


高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



実機スプレイ設備を用いた液滴径計測試験および液滴条件設定について

## 目 次

1. はじめに
2. スprayヘッド実機を用いた液滴径取得試験
  - 2.1. 試験目的
  - 2.2. 試験方法
3. 試験結果および考察
  - 3.1. 試験結果
  - 3.2. 試験結果の考察
4. 液滴径の基本ケース条件の設定
5. 液滴径の不確かさを考慮した条件の設定

## 1. はじめに

SFP未臨界性評価における水分条件である気相部水密度の算出に必要な放水中液滴の落下速度については、スプレーヘッドおよび放水砲による放水の液滴径より計算している。今回評価では、スプレーヘッド実機を使用した試験により取得した液滴データを踏まえた値を、放水砲由来の液滴にも設定することとしている。本資料では、スプレーヘッド実機を用い実施した液滴径計測試験について、および試験結果を踏まえた基本ケース条件および不確かさを考慮した条件の設定について説明する。

## 2. スプレーヘッド実機を用いた液滴径取得試験

### 2.1. 試験目的

気相部水密度の算出式( $Q/A \cdot V$ ) [ $g/cm^3$ ] ( $Q$ : 流量 [ $g/s$ ]  $A$ : 面積 [ $cm^2$ ]  $V$ : 液滴下降速度 [ $cm/s$ ])により評価するが、液滴の下降速度を算出するには放水中の液滴径が必要となることから、スプレーヘッド実機を用いた試験によりスプレー時の液滴径データを取得する。

### 2.2. 試験方法

第1図に示すように、SFP類似設備にてスプレーヘッドにより放水を行い、燃料ラック頂部高さ相当位置での液滴径を測定した。測定点の配置（平面図）を第2図に示す。

スプレー時の液滴を、シリコンオイルで満たされた容器に捕獲し、シリコンオイル表面に浮かんだ液滴を画像処理によりサンプリングし、液滴径分布を取得した。液滴捕獲装置の概要を第3図に示す。

流量等の諸条件は、スプレー設備の運用を踏まえ第1表に示す通り設定した。また本試験は計2回行った。

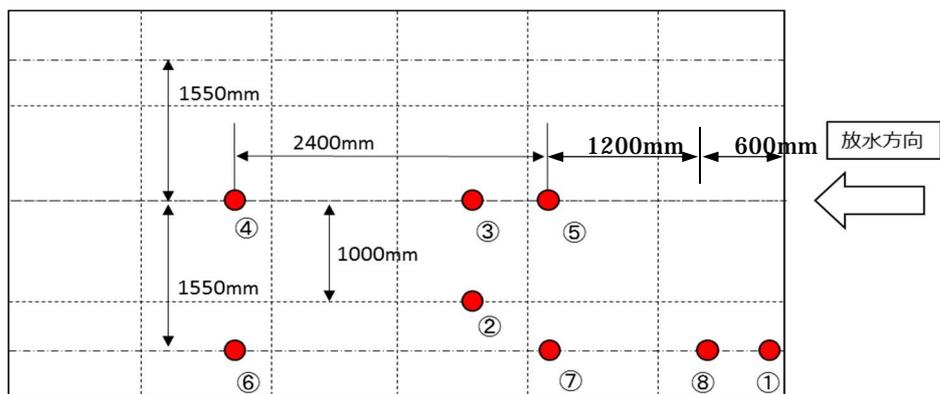
第1表 試験条件

使用設備	スプレーヘッド 可搬型消防ポンプ
流量等	
水	水道水（常温）

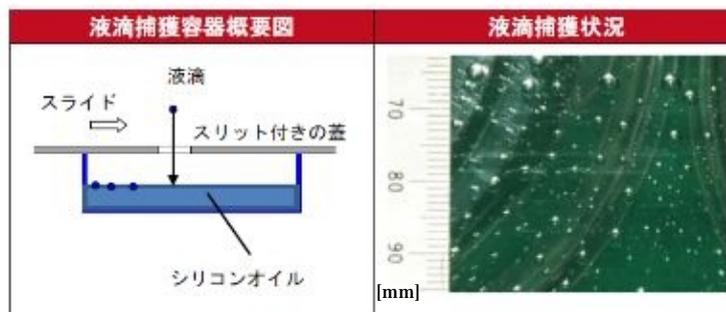
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第1図 液滴径測定試験 試験体系および試験の様子



第2図 液滴径分布測定位置（平面図）



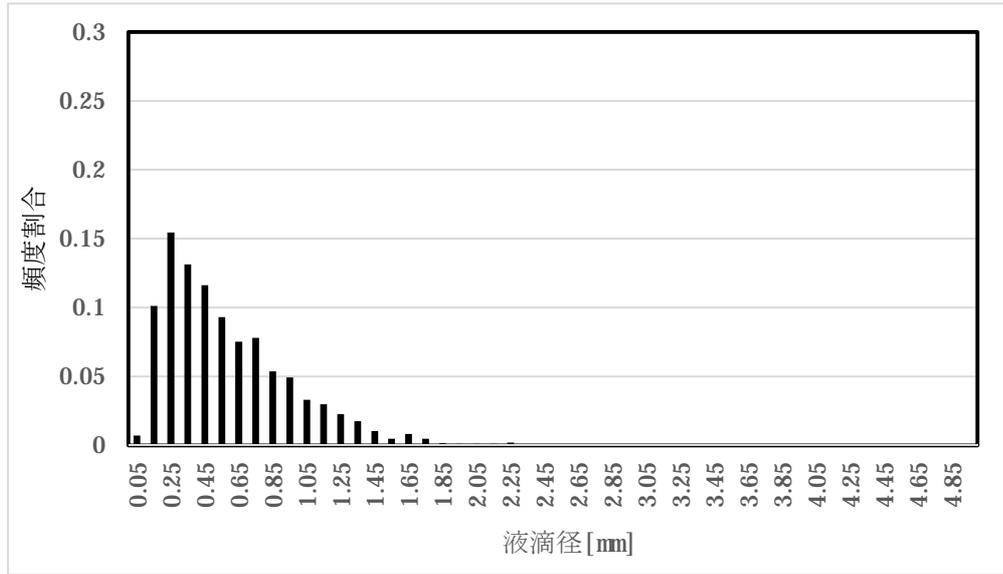
第3図 液滴捕獲装置の概要および取得液滴の様子

### 3. 試験結果および考察

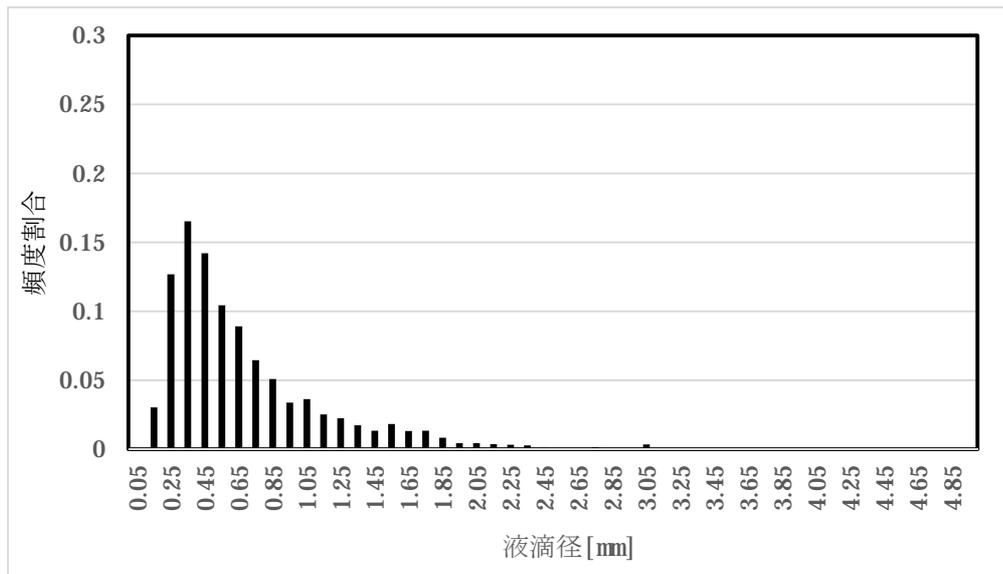
#### 3.1. 試験結果

2回の試験で得られた液滴径毎の個数割合をグラフにしたものを第4-1図および第4-2図に示す。使用済燃料ラック上部におけるスプレイ水は、液滴径0.2~0.4mmの液滴が個数としては支配的であり、液滴径が大きくなるにつれ、徐々に個数が減少していく傾向にある。

測定点①

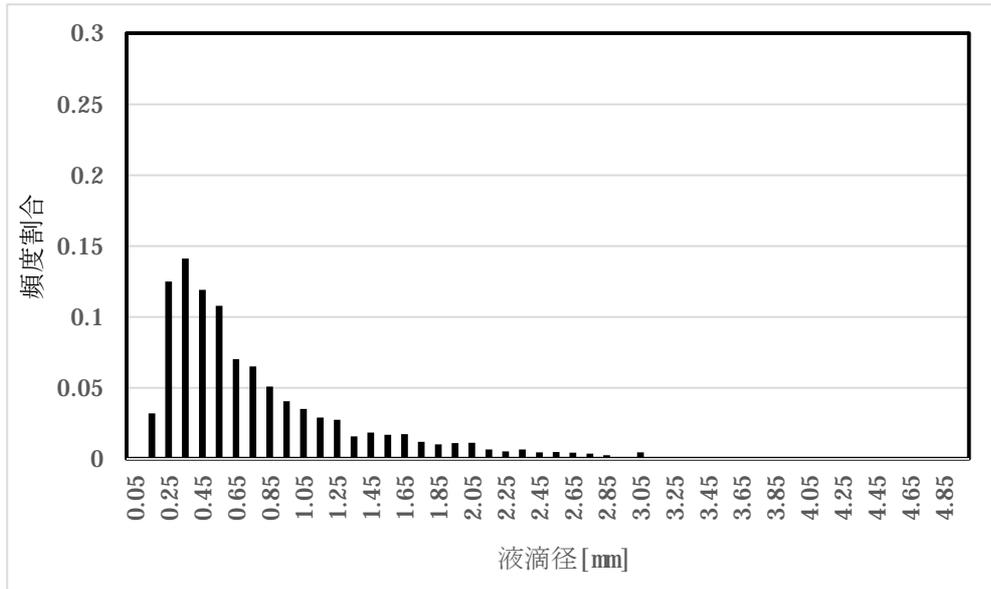


測定点②

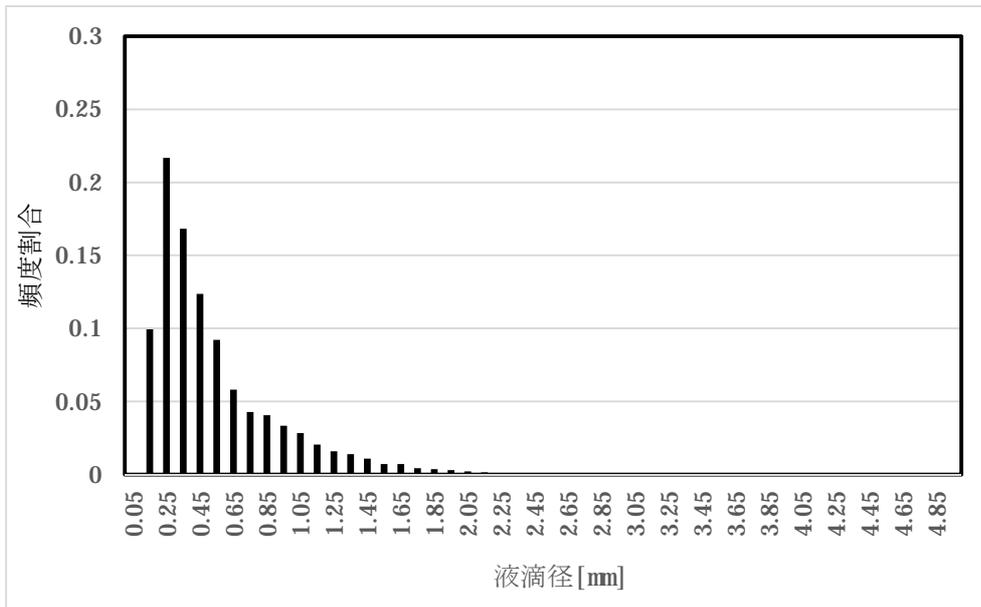


第4-1図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点③

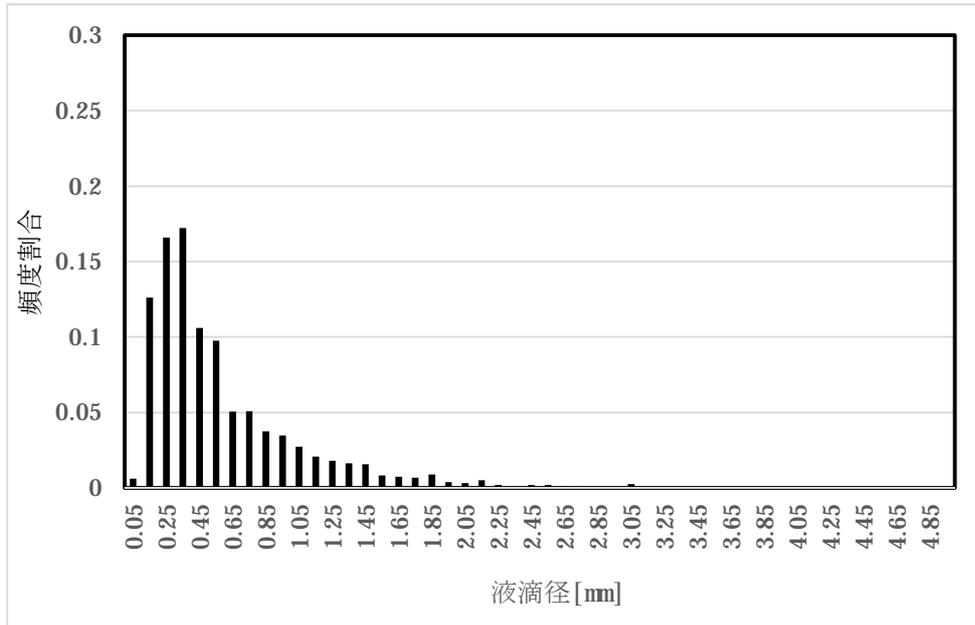


測定点④

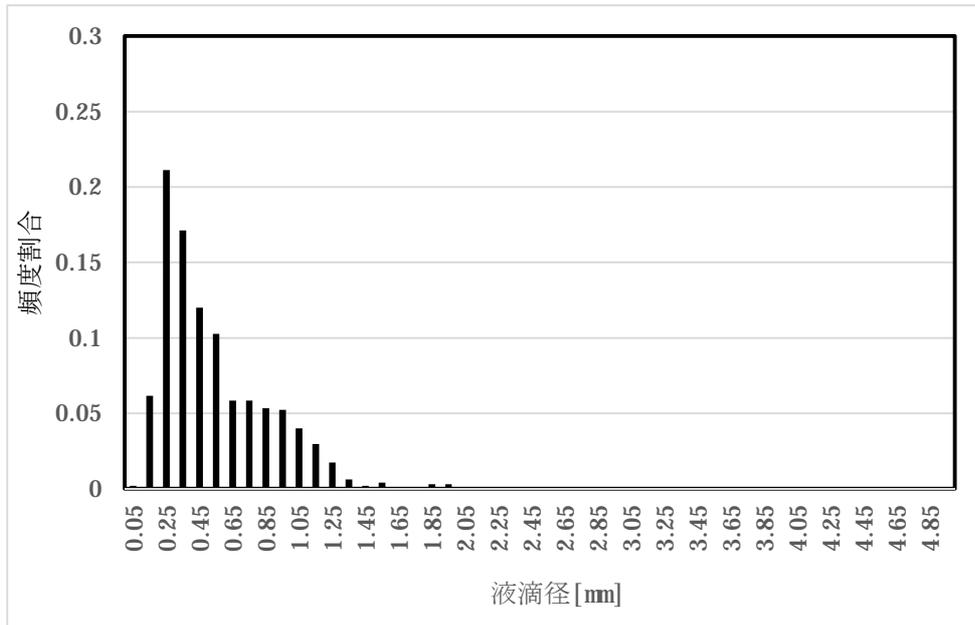


第4-1図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑤

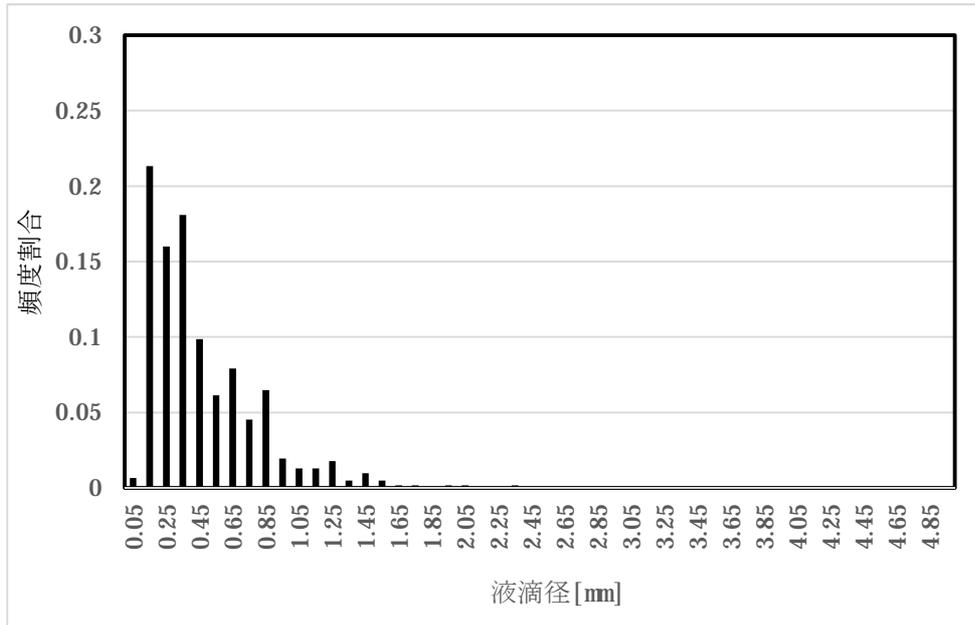


測定点⑥

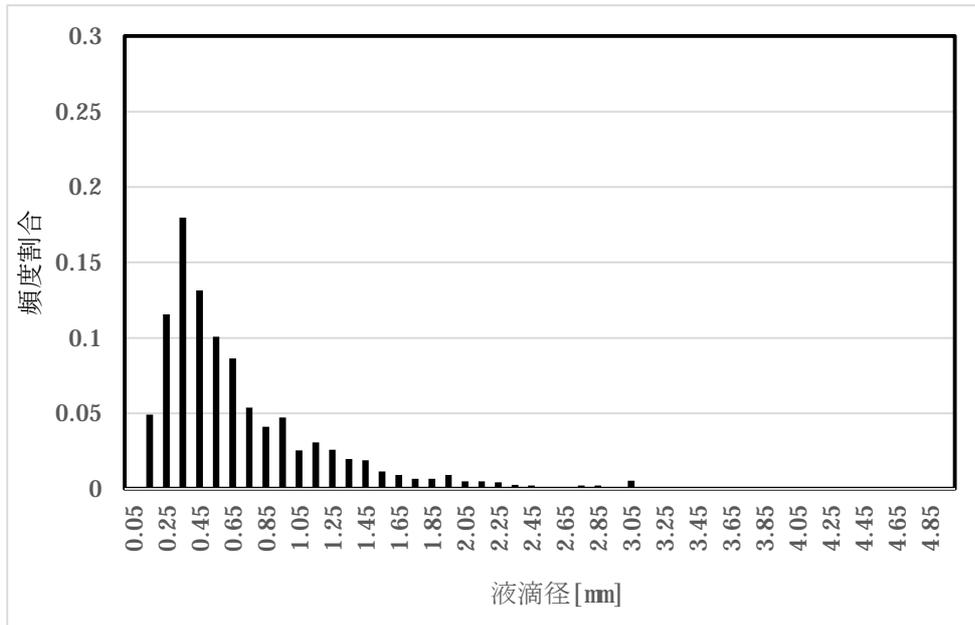


第4-1図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑦

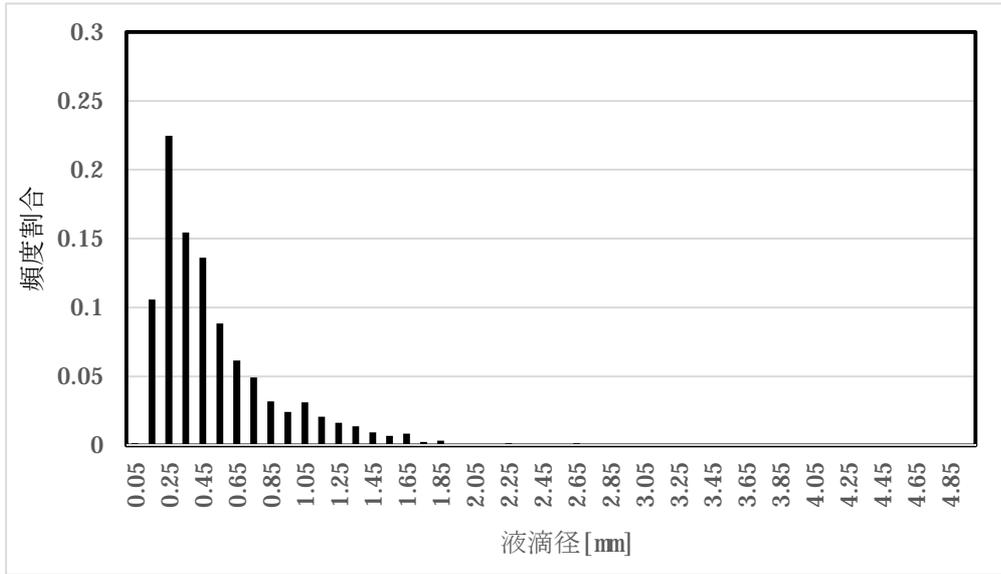


測定点⑧

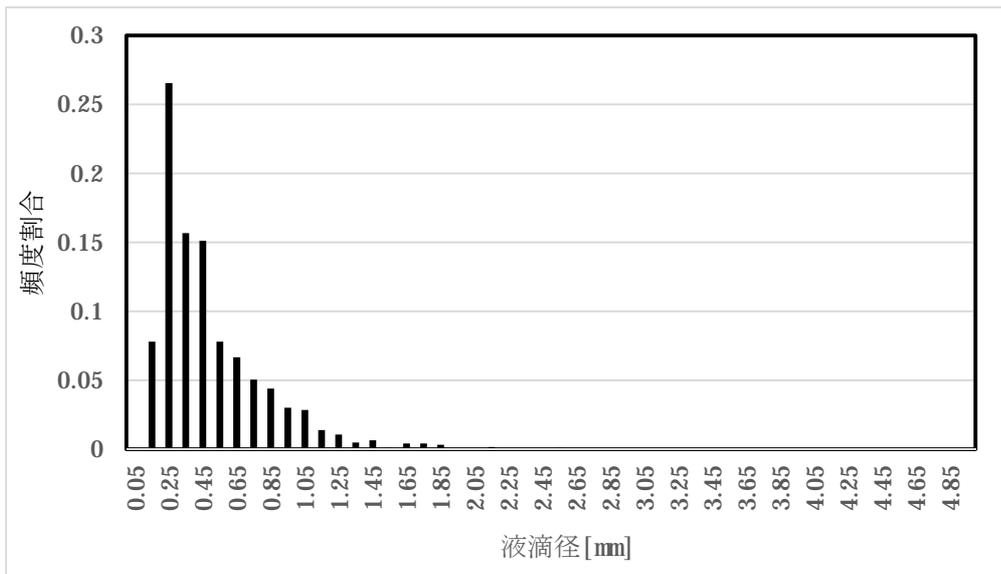


第4-1図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点①

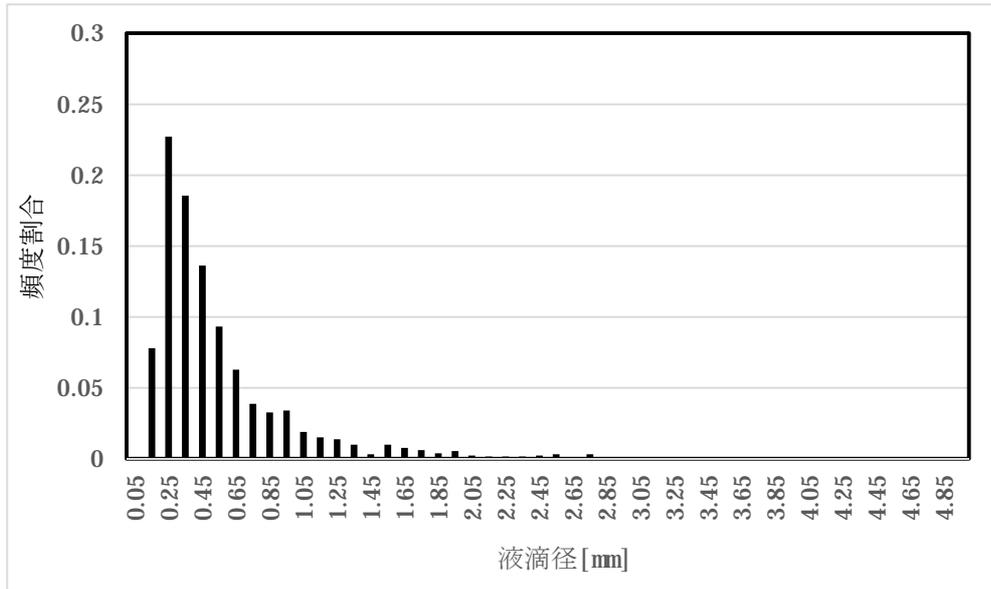


測定点②

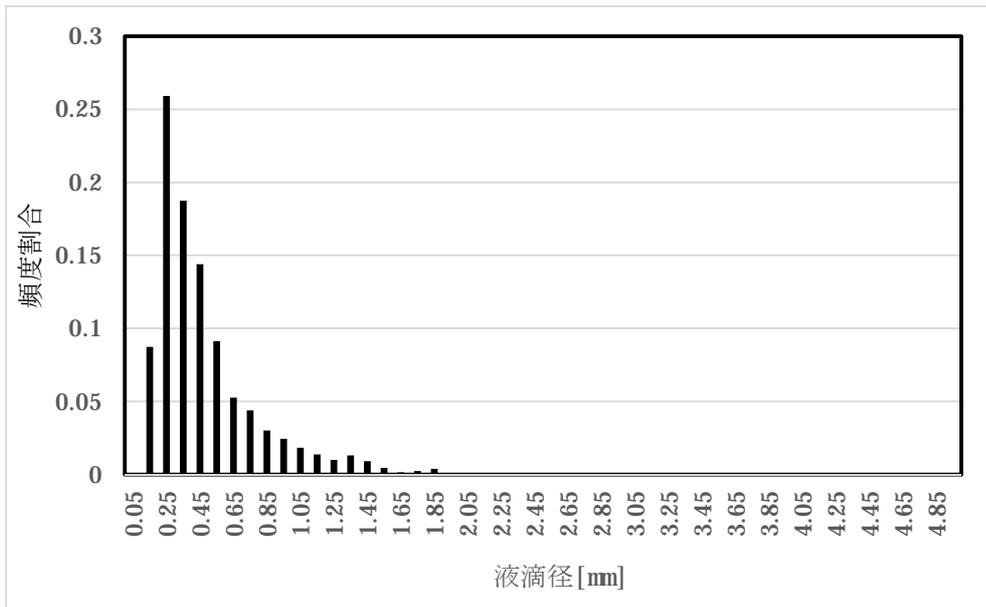


第4-2図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点③

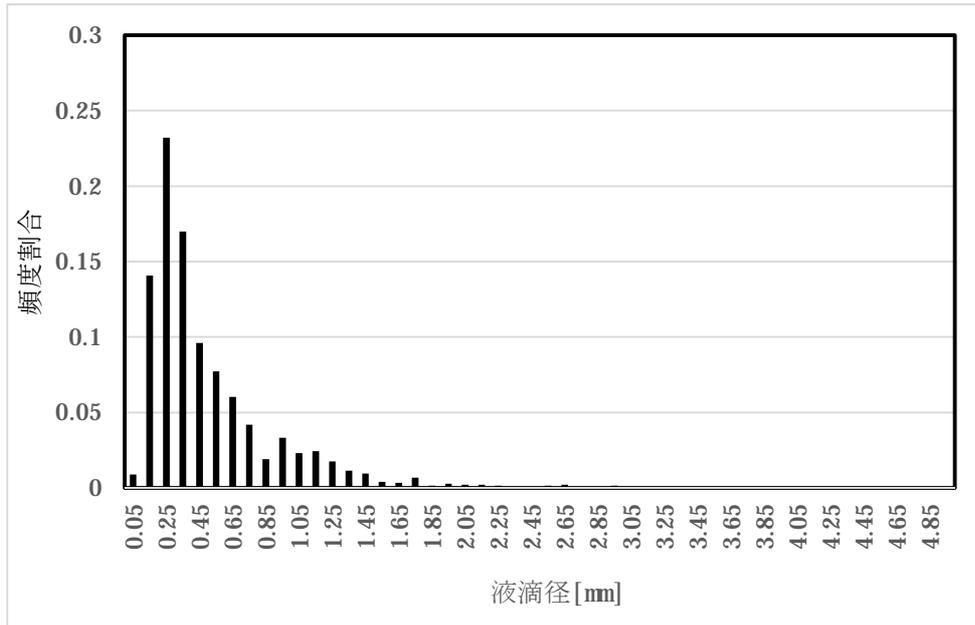


測定点④

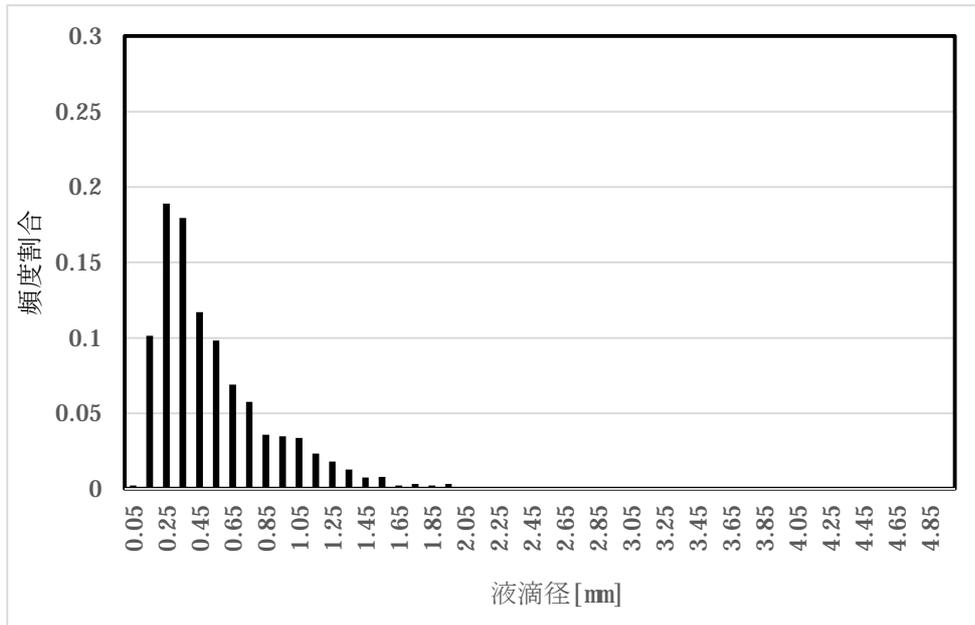


第4-2図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑤

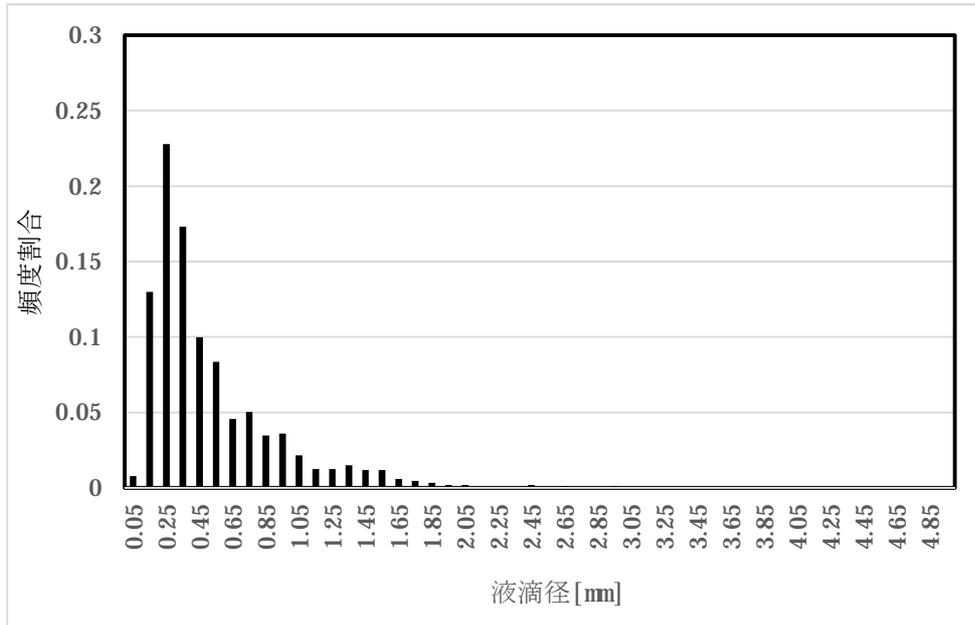


測定点⑥

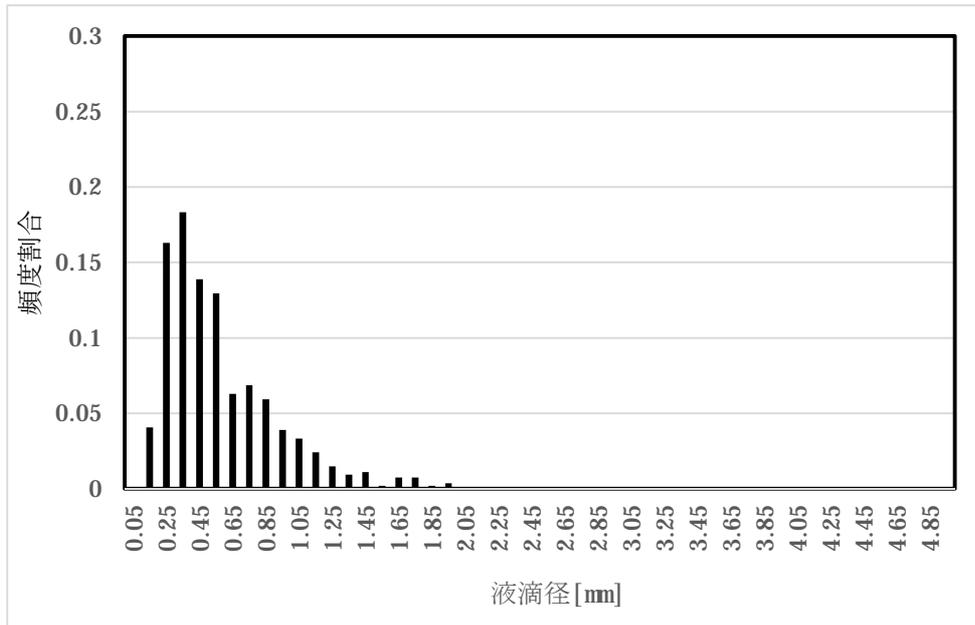


第4-2図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑦



測定点⑧



第4-2図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

### 3.2. 試験結果の考察

第4-1図及び第4-2図に示す試験データ（第1回目と第2回目）の試験結果より、試験毎に8点計測した全ての計測点において、数百個以上取得された液滴の個数割合分布が0.2～0.4mmで支配的となっていることから、試験回数を増やしたとしても液滴個数割合の分布形状は大きく変わることはなく、また測定点以外の箇所であっても同様の液滴径の分布をとることが推定される。

液滴や周囲の気体の流れは、流量等の試験条件が一定であっても変動を伴うことから、結果として生じる液滴径にはばらつきが生じる。加えて、実際のスプレーでは飛程のなかで衝突/分裂等も生じ、これらもばらつきの要因となる。

本試験では上記のばらつきの分布を把握できるように各計測点においてそれぞれ数百個以上の液滴を計測した。これら多数のデータについて正規確率プロット（詳細は以下参照）を用いて正規性の確認を行ったところ、各計測点とも対数正規分布に近い液滴径分布を得た。計測結果に正規性があるということは、一般に自然現象としてのばらつきを再現したサンプリングと捉えることができる。

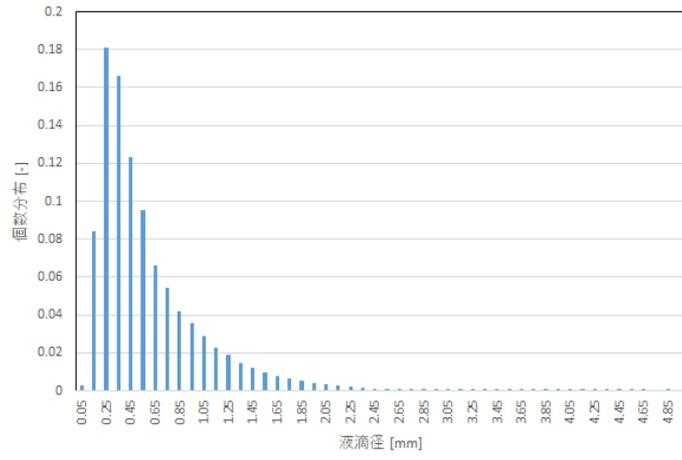
なお既往の研究にて、ノズルから噴出された水が液滴に微粒化するまでの過程を確率的にモデル化した場合の粒径分布が対数正規分布で近似され、実際に測定した粒径分布とも良好に一致すること<sup>1</sup>、種々のスプリンクラーノズルを用いた試験で取得した粒径分布が対数正規分布で近似されたことが知られて<sup>2</sup>おり、これらからも、各測定点での個数分布割合が対数正規性を有していた今回試験結果は妥当と考えられる。

また、試験データがスプレーヘッドの液滴の特徴を代表した液滴データを取得できているかを確認するため、全測定点のデータを合算したもの（第5図）と、放水方向の直線上に位置する点のうち放水分布図の中心付近に位置し計測点を代表していると考えられる⑤点（第1回試験及び第2回試験）について個数割合取得結果に対する検定を有意水準5%として実施した。検定に当たっては各測定点での個数分布割合には対数正規性があることを踏まえ、個数割合を対数変換し、F検定により等分散性を確認したうえで、「等分散を仮定したt検定」を実施した。

結果を第2表および第3表に示すが、2群間の分散および平均に差が無いとする仮説を棄却しない結果となった。つまり平易には、全測定点のデータを合算し得られる液滴個数分布は95%の確率でスプレーヘッド実機によるスプレー時の液滴個数分布に等しいと言える。よって、試験で取得した液滴個数割合は、スプレーヘッドの液滴の特徴を代表できていると言える。

<sup>1</sup> 松本史朗、高島洋一、スプレーの粒径分布：化学工学第33巻第4号（1969）

<sup>2</sup> Spray Characteristics of Fire Sprinklers(NIST GCR 02-838)：David Thomas Sheppard, Northwestern University(2002)



第 5 図 液滴径毎の個数分布(全測定点データ合算)

第 2 表 ⑤点と全測定点データ合算値に対する F 検定

帰無仮説  $H_0$  : 2 群間の分散に差がない (等分散である)

対立仮説  $H_1$  : 2 群間の分散に差がある (等分散ではない)

検定対象	第 1 回⑤	全測定データ
分散	0.001703	0.001531
自由度	41	48
F 値	1.1123	
P 値	0.3594	
棄却域の境界値	1.6395	
判定	P > 0.05 より、帰無仮説 $H_0$ は棄却されない	

検定対象	第 2 回⑤	全測定データ
分散	0.001867	0.001531
自由度	48	48
F 値	1.219	
P 値	0.2476	
棄却域の境界値	1.615	
判定	P 値 > 0.05 より、帰無仮説 $H_0$ は棄却されない	

< 第 2 表に関する説明 >

二つのサンプルにおいてカイ二乗変数に従う変数の比は「F 分布」に従う。F 値とは二つのサンプルの分散の比であり、F 検定では F 値を、F 分布において上側確率が有意水準 0.05 となる数値 (棄却域との境界値。以下、 $F_{0.05}$  値) と比較する。F 値 >  $F_{0.05}$  値である場合、F 値は棄却域に入るため有意水準 5% で有意であり、帰無仮説を棄却して対立仮説を採択する。反対に F 値 <  $F_{0.05}$  値であれば、帰無仮説は棄却されない。

P 値は、帰無仮説が正しいという仮定のもと、今回得られた値が偶然ではないとする確率のことであり、F 分布における  $F_{0.05}$  値に対する外側確率である。P 値が有意水準 0.05 よりも小さい場合、得られた値は偶然ではないという確率は小さいと判断し、帰無仮説を棄却し対立仮説を採択する。反対に P 値が 0.05 より大きい場合、帰無仮説は棄却されない。

今回検定の結果、F 値 <  $F_{0.05}$  値 (P 値 > 0.05) であったため、全測定点のデータを合算し得られる個数割合の分布 (第 5 図) と、計測点を代表していると考えられる⑤点での個数割合の分布

という 2 群のデータについて、F 値は棄却域に入らないことから、それぞれの分散に差があるとは言えない、という結果となった。

第 3 表 ⑤点と全測定点データ合算値に対する t 検定

帰無仮説  $H_0$  : 2 群間の平均に差が無い

対立仮説  $H_1$  : 2 群間の平均に差がある

検定対象	第 1 回⑤	全測定データ
自由度	89	
t 値	0.3846	
P 値 (両側)	0.7014	
棄却域の境界値 (両側)	1.9870	
判定	P > 0.05 より、帰無仮説 $H_0$ は棄却されない	

検定対象	第 2 回⑤	全測定データ
自由度	96	
t 値	-0.0215	
P 値 (両側)	0.9829	
棄却域の境界値 (両側)	1.9850	
判定	P > 0.05 より、帰無仮説 $H_0$ は棄却されない	

< 第 3 表に関する説明 >

t 値は平均値や自由度に基づく関数である。これは確率密度関数である「t 分布」に従うものであり、t 検定では t 値を、t 分布において外側確率が有意水準 0.05 となる t の値 (棄却域の境界値。以下、 $t_{0.05}$  値) と比較する。|t 値| >  $t_{0.05}$  である場合、t 値は棄却域に入るため有意水準 5% で有意であり、帰無仮説を棄却し対立仮説を採択する。反対に、|t 値| <  $t_{0.05}$  である場合、帰無仮説は棄却されない。

P 値は F 検定と同様に、t 分布における t 値に対する外側確率である。P 値が有意水準 0.05 よりも小さい場合、得られた値は偶然ではないという確率は小さいと判断し、帰無仮説を棄却し対立仮説を採択する。反対に P 値が 0.05 より大きい場合、帰無仮説は棄却されない。

今回検定の結果、 $|t \text{ 値}| < t_{0.05}$  ( $P \text{ 値} > 0.05$ ) であったため、全測定点のデータを合算し得られる個数割合の分布（第 5 図）と、計測点を代表していると考えられる⑤点での個数割合の分布という 2 群のデータについて、 $t$  値は棄却域に入らないことから、それぞれの平均に差があるとは言えない、という結果となった。

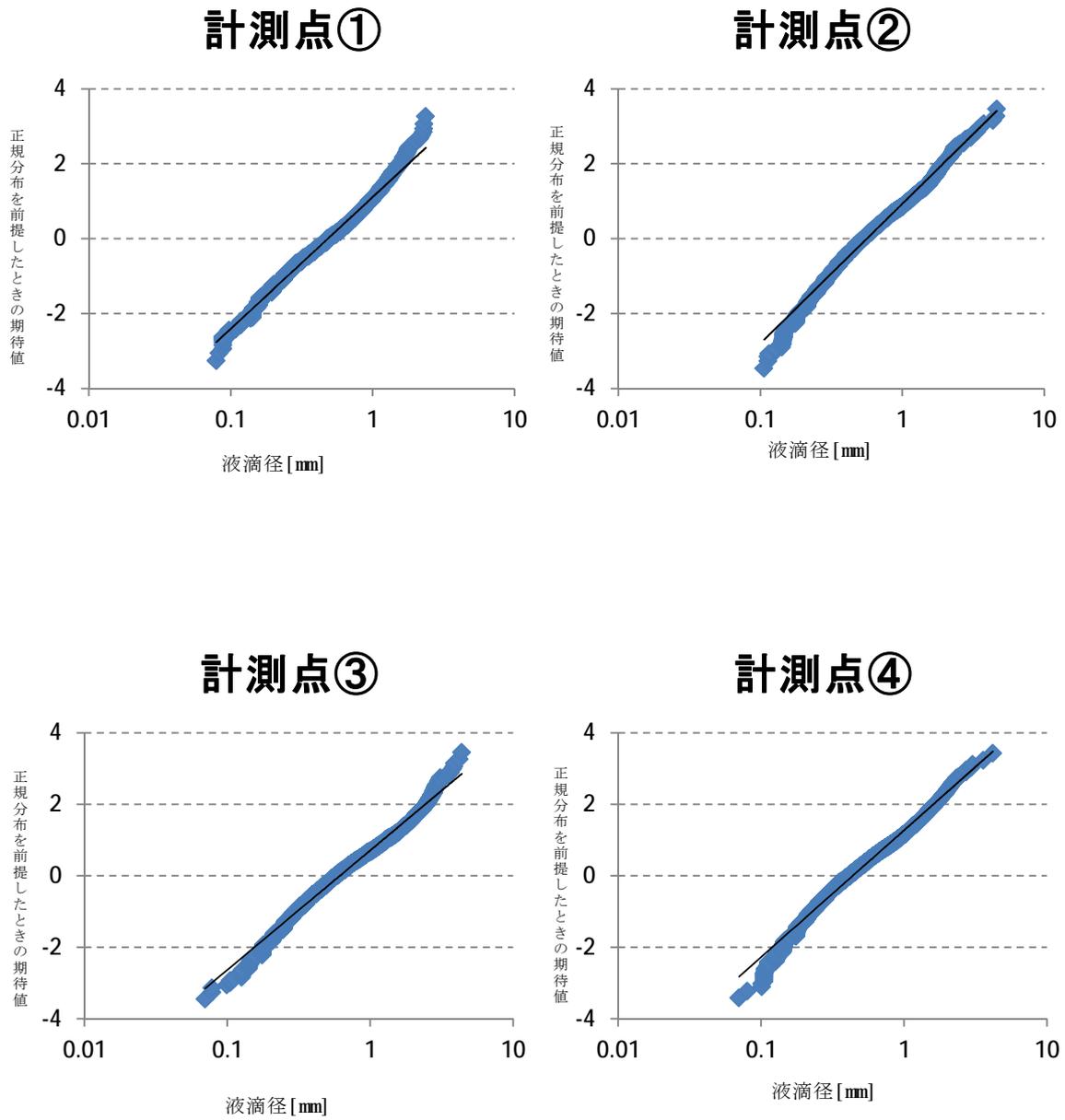
#### <正規確率プロットについて>

データが正規分布しているかどうかを目視判断するための手法であり、測定値を累積度数分率で整理し、そのプロットが直線状に並べば正規性有り判断できる。

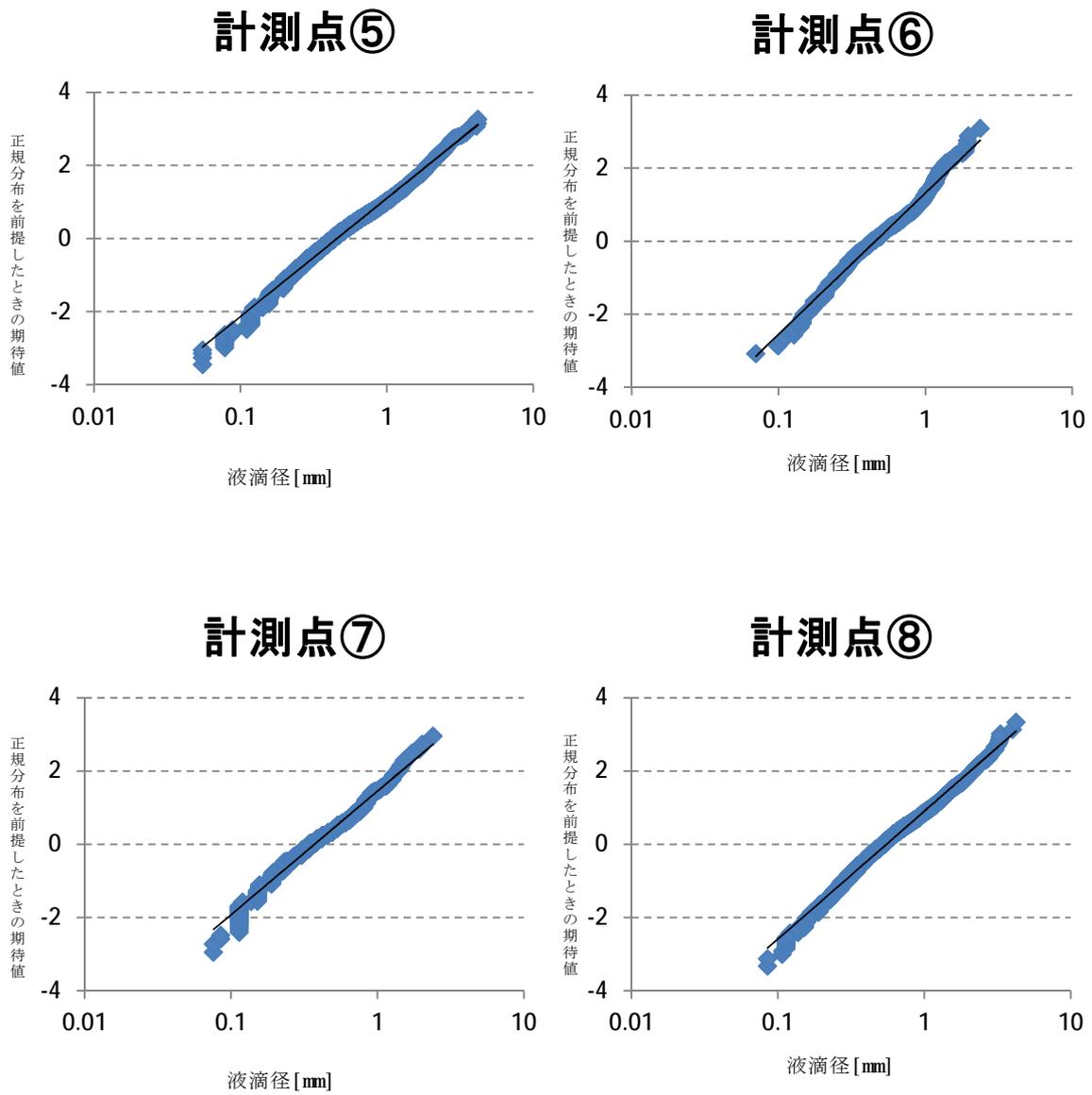
具体的には、取得されたデータについて累積比率（確率 $P_i$ ）を求め、 $P_i$ に対して正規分布の累積分布関数の逆関数を用いて求めた値をプロットし、正規分布なら直線、対数正規分布なら片対数グラフ上の直線に沿うかどうかを判断するものである。

この意味は、標準正規分布に従う $x$ に対応する累積比率（確率 $P_i$ ）を求める関数を逆算しているもので、測定値が正規分布に従うならば散布図を描くと直線状にプロットされることとなる。すなわち、正規性が無い＝正規分布に沿わない＝直線から外れるとして、目視にて正規性の有無を確認できる。

本試験結果の正規確率プロットを第6-1図および第6-2図に示す。横軸に対数をとるとプロット結果は全点で概ね直線状となることから、本計測結果は対数正規分布に従うと判断できる。



第 6-1 図 対数正規確率プロット (第 1 回試験 測定点①~④)



第 6-2 図 対数正規確率プロット (第 1 回試験 測定点⑤~⑧)

#### 4. 液滴径の基本ケース条件の設定

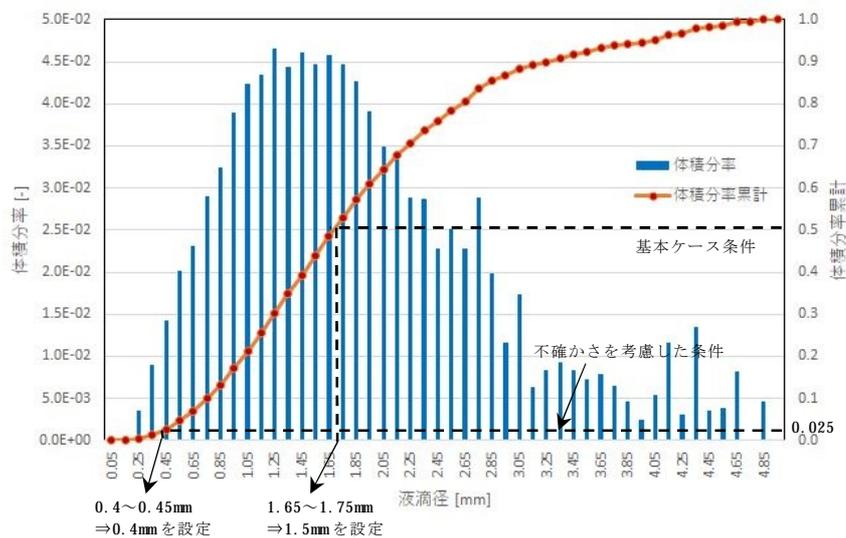
3.2.での検討より、各測定点のデータにおいて自然現象のばらつきを示す正規性を有する分布であることが得られたことから、基本ケース条件の設定に当たっては全測定データを合算することにより液滴径を評価する。全測定点の合算データについては、全計測点を代表していると考えられる放水方向の直線上に位置する点（点⑤）との比較検定において有意な差が見られないことから、スプレイヘッドの特徴を代表するデータであり、基本ケースの条件として妥当であると言える。

第5図にて得られた個数分布に対し液滴径毎の体積を乗じた体積分率で整理した結果、体積分率50%出現値は第7図の通り1.65~1.75mmとなった。液滴径が小さいほうが、液滴下降速度が小さく気中に液滴が滞在する時間は長くなり、気相部水密度は大きくなることから、基本ケース条件はより小さい液滴径1.5mmを設定する。

#### 5. 液滴径の不確かさを考慮した条件の設定

不確かさを考慮した条件としては、第7図に示す体積分率における両側5%を切り捨てた際の下限值、すなわち体積分率2.5%出現値（0.4mm~0.45mm）を踏まえ、0.4mmを設定する。

なお放水される流量の大部分は、スプレイヘッドではなく放水砲が占めることとなるが、放水砲由来の放水を特徴づける液滴径は2.9mm（文献※1）とされており、スプレイヘッドの液滴径を放水砲由来の液滴に適用することは大幅な保守性を有することになる。



第7図 液滴径毎の体積分率

※1：宮下達也、石油タンク火災消火時における大容量放水及び泡放射軌跡の予測モデルの構築（2014）

以上

液滴下降速度の算出について

## 目 次

1. はじめに
2. 液滴下降速度の算出方法
3. 液滴下降速度算出結果

## 1. はじめに

SFP未臨界性評価における水分条件である気相部水密度の算出に必要な放水中液滴の落下速度について、基本ケース条件としては液滴径を**1.5mm**とした場合の下降速度を、不確かさ影響を考慮した条件としては液滴径を**0.4mm**とした場合の下降速度を、それぞれ使用することとした。本資料では、液滴径を用いた下降速度算出方法の詳細について述べる。

## 2. 液滴下降速度の算出方法

スプレイ水の液滴下降速度  $v$  は、燃料ラック上面を通過する液滴について、SFPラック頂部高さ相当位置まで落下していることから個々の液滴が終端速度に達していると仮定し、液滴径により決まる終端速度を算出する。

自由落下する液滴の終端速度  $v_i$  は重力と空気抵抗が釣り合う速度として式(1)により求められる。

$$\begin{cases} (\rho_{water} - \rho_{air})gV_i = C_d \rho_{air} \frac{1}{2} v_i^2 A_i \\ V_i = \frac{\pi}{6} d_i^3 & A_i = \frac{\pi}{4} d_i^2 \end{cases} \quad (1)$$
$$\therefore v_i = \sqrt{\frac{4(\rho_{water} - \rho_{air})gd_i}{3\rho_{air}C_d}}$$

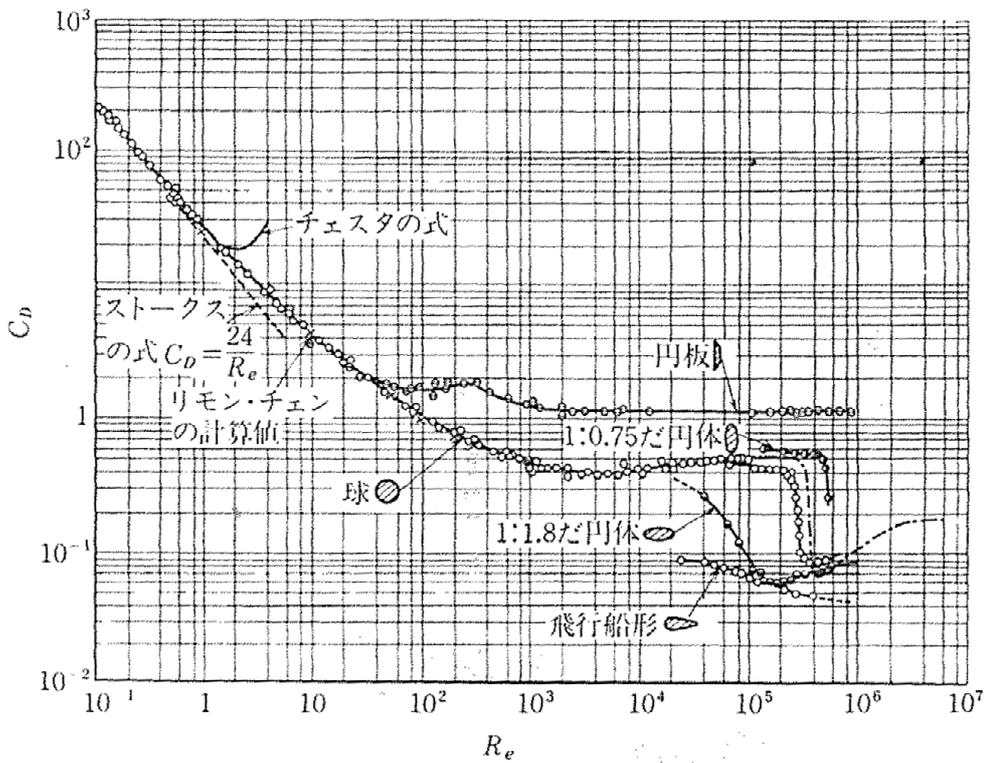
上記の式におけるパラメータの定義は以下の通りである。

$v_i$	:	液滴の終端速度 (m/s)
$\rho_{water}$	:	液滴の密度 (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{air}$	:	空気密度 (kg/m <sup>3</sup> )
$V_i$	:	液滴体積 (m <sup>3</sup> )
$A_i$	:	液滴断面積 (m <sup>2</sup> )
$g$	:	重力加速度 (m/s <sup>2</sup> )
$d_i$	:	液滴径 (m)
$C_d$	:	抗力係数 (—)

$C_d$ は、第1図に示す球体に対する実験結果から求められる経験式として式(2)で与えられる。

$$\begin{cases} C_d = \frac{24}{Re} & (Re < 1) \\ C_d = \left( 0.55 + \frac{4.8}{\sqrt{Re}} \right)^2 & (1 < Re < 500) \\ C_d = 0.44 & (500 < Re < 10^5) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、レイノルズ数は空気の動粘性係数  $\nu$  を用いて  $Re = v_i d_i / \nu$  で表される。抗力係数はレイノルズ数が小さい領域で、レイノルズ数すなわち終端速度に依存することから、式(1)の式において抗力係数の導出に用いる速度が計算結果の終端速度と一致するよう繰り返し計算を行う。



第1図 球体に対する抗力係数<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 機械工学便覧 A5 流体工学 (新版)

### 3. 液滴下降速度算出結果

液滴径が1.5mm、0.4mmである場合の液滴下降速度を、算出に使用した各物性値とともに第1表に示す。なお下降速度は、1の位を保守的に切り下げた値を使用する。

第1表 下降速度算出条件及び算出結果

$\rho_{water}$	998.2 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{air}$	1.166 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	$1.56 \times 10^{-5}$ [m <sup>2</sup> /s]
$g$	9.807 [m/s <sup>2</sup> ]
$d_i$	$1.0 \times 10^{-3}$ [m]
$C_d$	0.7279 [-]
液滴 (1.5mm) の 下降速度	530 [cm/s]
液滴 (0.4mm) の 下降速度	160 [cm/s]

なお、実際のスプレー時におけるSFP内環境は高温条件下であると考え、第1表中の物性値は常温 (20°C) の値を用いている。第1表の物性値のうち、温度の影響を受けるものは $\nu$ 、 $\rho_{water}$ および $\rho_{air}$ であるが、(1)式より下降速度への温度影響が大きい $\nu$ 、 $\rho_{air}$ については、温度が高いほど値は小さくなる傾向をもつ。 $\nu$ 、 $\rho_{air}$ のどちらも値が小さいほど液滴下降速度が大きくなる。また、スプレー時には高温であるSFP内に低温の液滴が落下することから、空気は高温状態、液滴は低温状態となるが、その状態を考慮し物性値を設定した場合、(1)式より物性値の変化は下降速度をより大きくする方向である。

以上より、水密度を大きく算出するという観点から常温 (20°C) の物性値を用いることは妥当である。

また、実際のスプレー時は海水を用いるが、下降速度算出の際は水の物性値を使用している。第1表の物性値のうち、液体の種類により変化する物性値は $\rho_{water}$ であるが、 $\rho_{water}$ は水のほう海水より小さいことから、より下降速度を小さくし水密度を高く算出する観点から水の物性値を使用している。

以 上



流量条件に対する使用済燃料ピットの未臨界性上の頑健性について

## 目 次

1. はじめに
2. 頑健性確認結果

## 1. はじめに

最適評価手法を適用した今回の評価結果が有する未臨界性上の頑健性を確認するため、基本ケース条件に対して流量条件を過大に設定した解析を行った。

## 2. 頑健性確認結果

解析条件を第1表に、結果を第1図に示す。

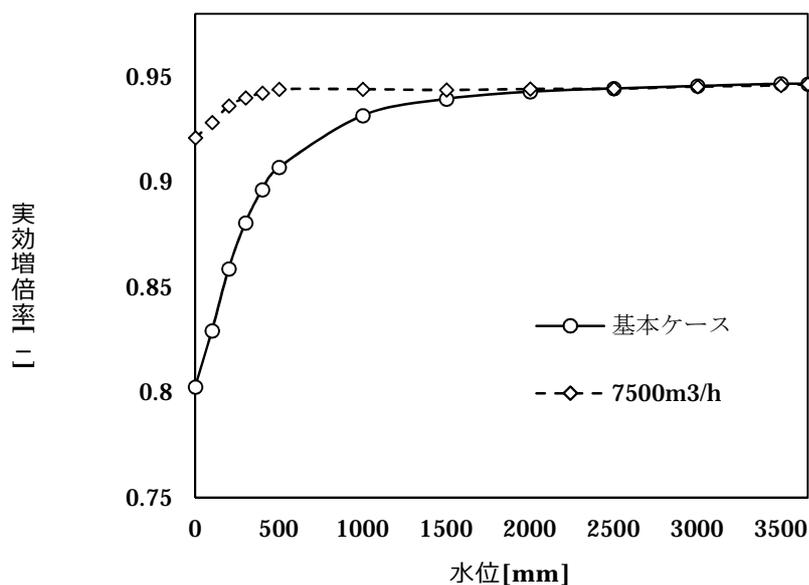
これによると、使用済燃料ピットの冷却と放射性物質の拡散抑制のための設備と手順から求めた基本ケースの流量条件（放水砲1台ベース）に対して、高浜発電所に配備している放水砲全台（予備を含め5台）を使用した場合の流量をさらに上回る  $7500\text{m}^3/\text{h}^*$ においても、実効増倍率は基本ケースと同じく水位低下に伴い単調に減少する挙動を示し、未臨界性を満足する結果が得られたことから、今回の流量条件は未臨界性上の十分な頑健性を有している。

※ 福島第一原子力発電所事故での対応において、SFPに向け放水・注水された流量は、最大でも  $500\text{m}^3/\text{h}$ 以下である。

（東京電力株式会社「福島原子力事故調査報告書」（平成24年6月）より）

第1表 評価条件（流量に対するパラメータスタディ）

		基本ケース	未臨界性上の頑健性確認解析	
燃料条件	燃料配置	新燃料のみで満杯	←	
	燃料種類	通常ウラン燃料 (Gd入り燃料の存在は考慮しない)	←	
水分条件	流量		7500 m <sup>3</sup> /h	
	SFPへの流入範囲、流量分布		流入範囲	SFP全面
			流量分布	一様
	燃料集合体内への流入割合		23 (%)	←
	液膜厚さ	集合体内へ流入した流量のうち液膜となる流量割合		100 (%)
		液膜厚さ評価式		包絡式
	気相部水密度 (放水の液滴径等)	流入範囲内	集合体内へ流入した流量のうち液滴のまま落下する流量割合	0 (%)
			燃料集合体内	飽和蒸気密度 0.0006 (g/cm <sup>3</sup> )
		燃料集合体外		液滴径1.5mmを用いた水密度
		流入範囲外		-
海水中の塩分濃度		3.3(%)	←	



第1図 流量パラメータスタディ結果

以上

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。