

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8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

別添5 申請書記載内容に関する補足説明

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及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及び条件を変更する。変更内容を第1-1表及び第1-2表に示す。

(2) 既許可における領域管理の特徴及び変更による効果

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、及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及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、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、スプレイ及び蒸気条件においても臨界を防止できる設計とする。

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、スプレー及び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。）、及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し、残存するピット水に含まれるほう素は考慮しない。
- (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/cm³** 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/cm³** とする。

また、以下の計算条件には公称値を使用し、その不確実性については、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実性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）

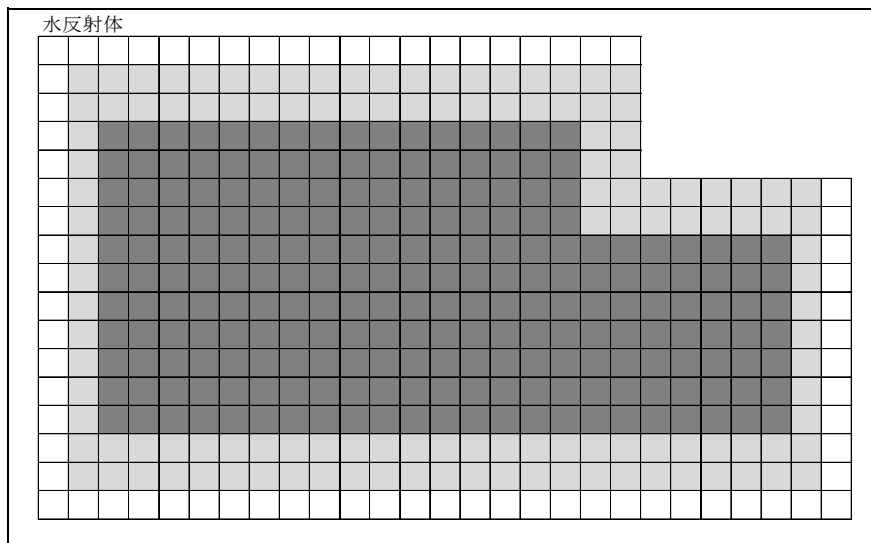
これらの計算条件を第4表にまとめる。また、製造公差等による不確定性評価の考え方について別添4「大規模漏えい時の未臨界性評価における不確定性評価の考え方」に示す。

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、基本ケース及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

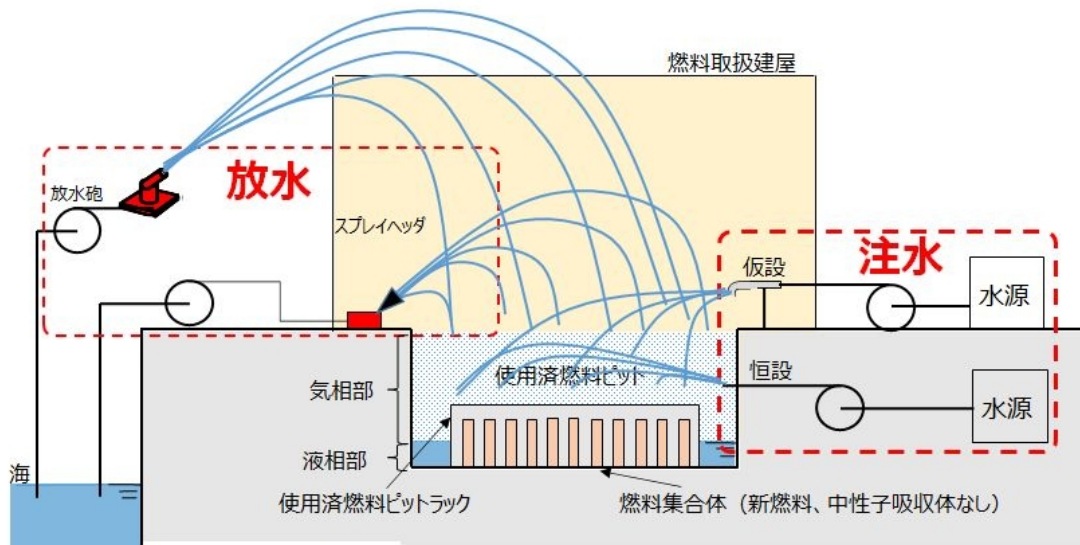


	55GWd/t 燃料 (初期濃縮度約 4.6wt%)		48GWd/t 燃料 (初期濃縮度約 4.0wt%)	
	使用済燃料ピット用 中性子吸収体なし	使用済燃料ピット用 中性子吸収体あり	使用済燃料ピット用 中性子吸収体なし	使用済燃料ピット用 中性子吸収体あり
□領域 A	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上
■領域 B	燃焼度 20GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 15GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上
■領域 C	燃焼度 50GWd/t 以上	燃焼度 15GWd/t 以上	燃焼度 45GWd/t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

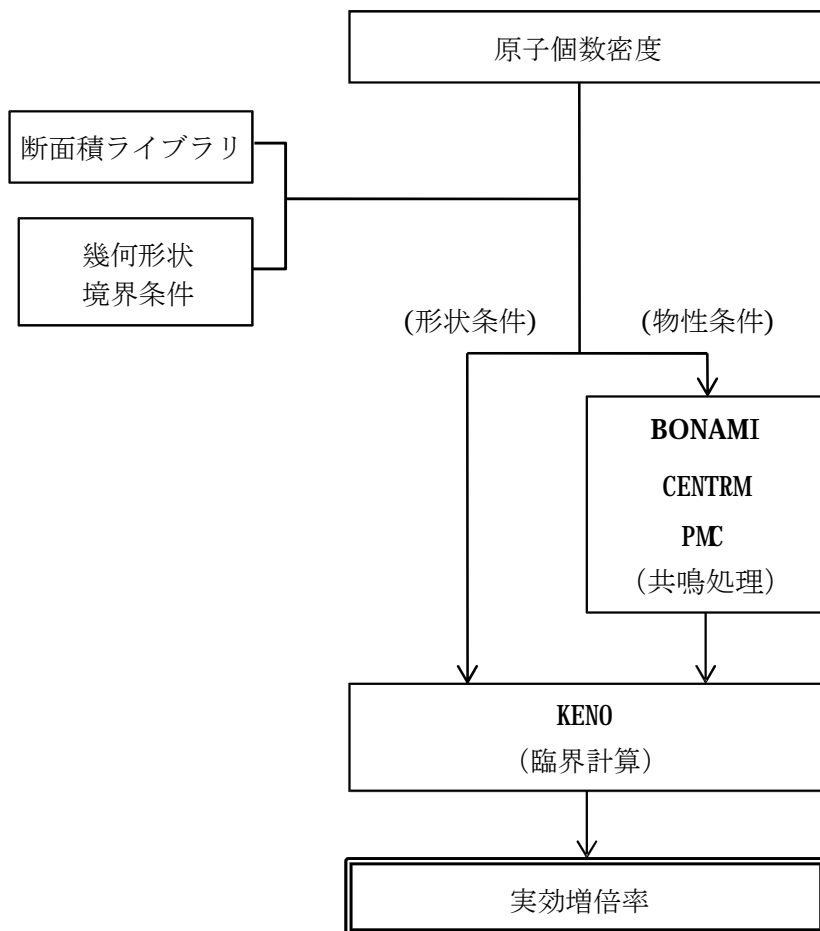
第1図 既許可における領域管理

<評価条件概要>

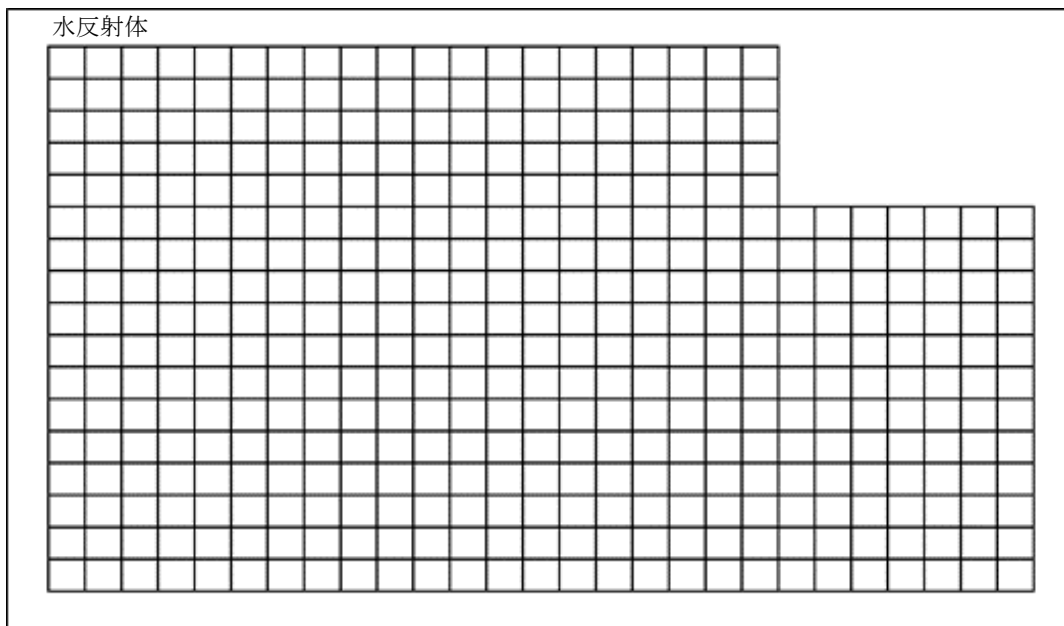
- 燃料配置については、最も反応度の高い新燃料が全てのラックに貯蔵された状態で評価する。
- 水の状態については、液相部と気相部の2相に分け、水位変化を踏まえて評価する。
- 評価には最適評価手法を採用し、重大事故等時における使用済燃料ピットへの注水・放水手順による流量等のパラメータに現実的な条件を設定した場合、および各パラメータに対し発生する不確かさの影響を考慮した場合でも未臨界が維持されることを確認することとし、海水を水源とする対策については、塩素による中性子吸収を考慮する。
- 燃料集合体内に液膜が形成されることを想定するとともに、気相部空間中の水密度は試験等で得られた知見を踏まえ設定す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



第2図 今回未臨界性評価の全体概要

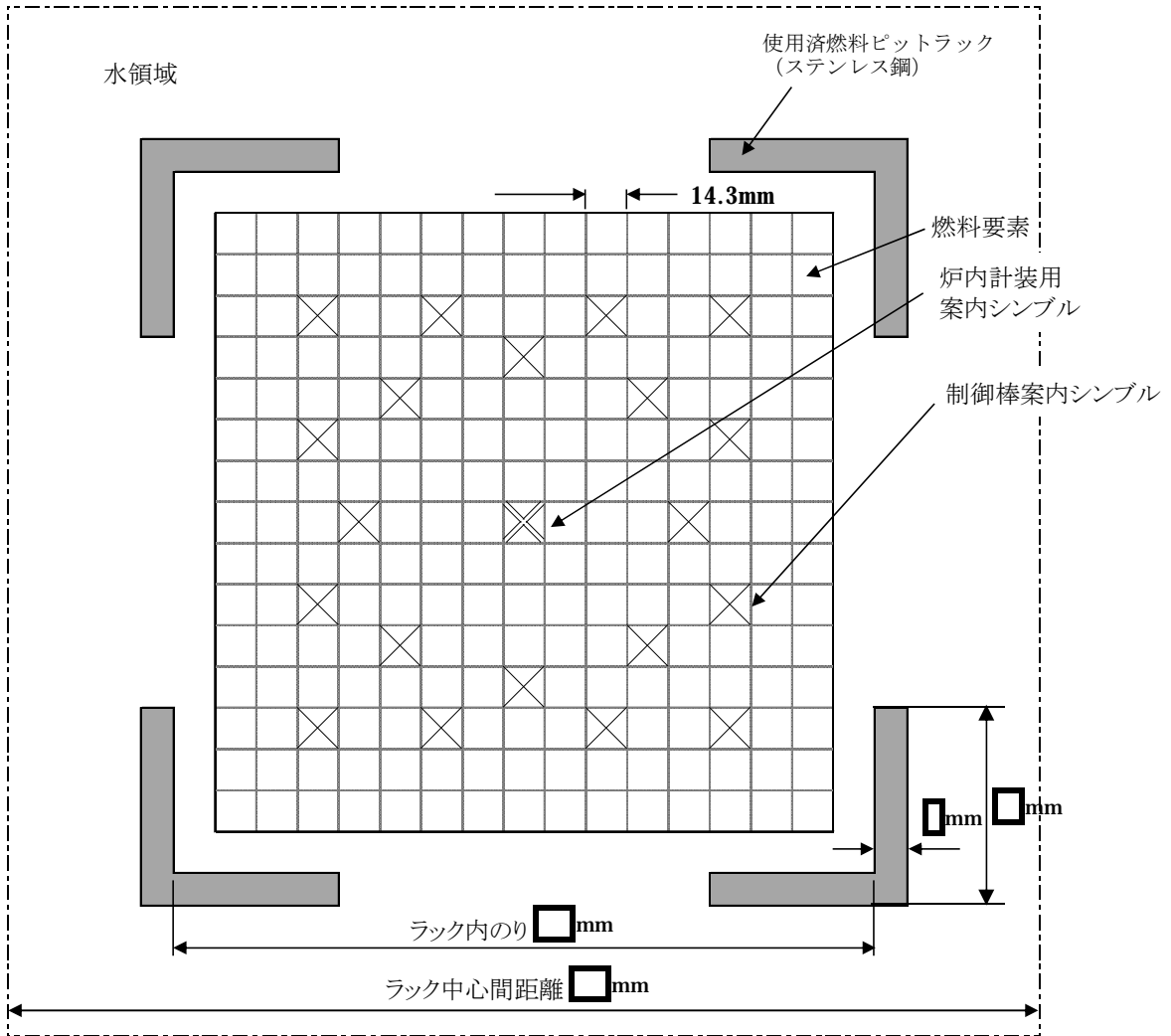


第3図 計算フロー



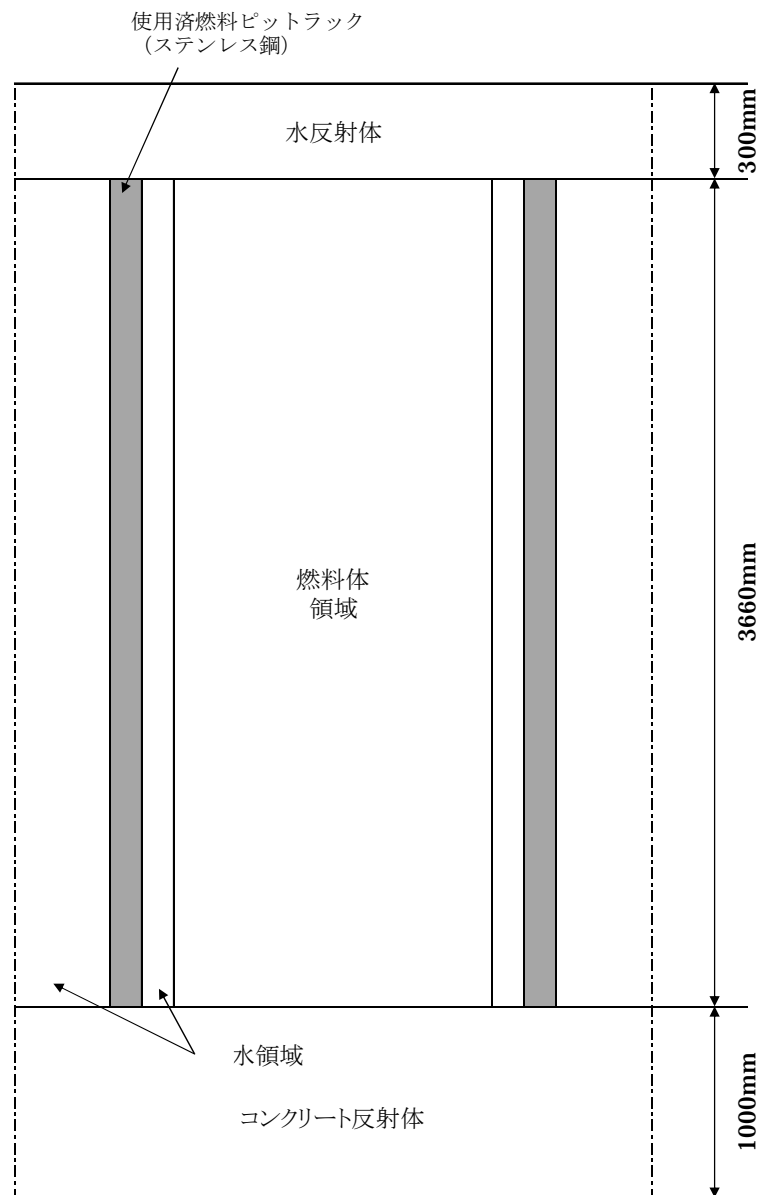
□ : ウラン新燃料 (燃焼度 0GWh/t) を貯蔵、貯蔵容量 : 424 体

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)

STEP1 : 検討対象パラメータの整理



STEP2 : 基本ケース条件の設定



設備の特徴や水の状態等を踏まえ、事故時の実態により則した基本ケース条件を設定する

STEP3 : パラメータに対する不確かさの整理



各パラメータに対する不確かさ要因を抽出し、基本ケース条件に対する考慮の要否を検討

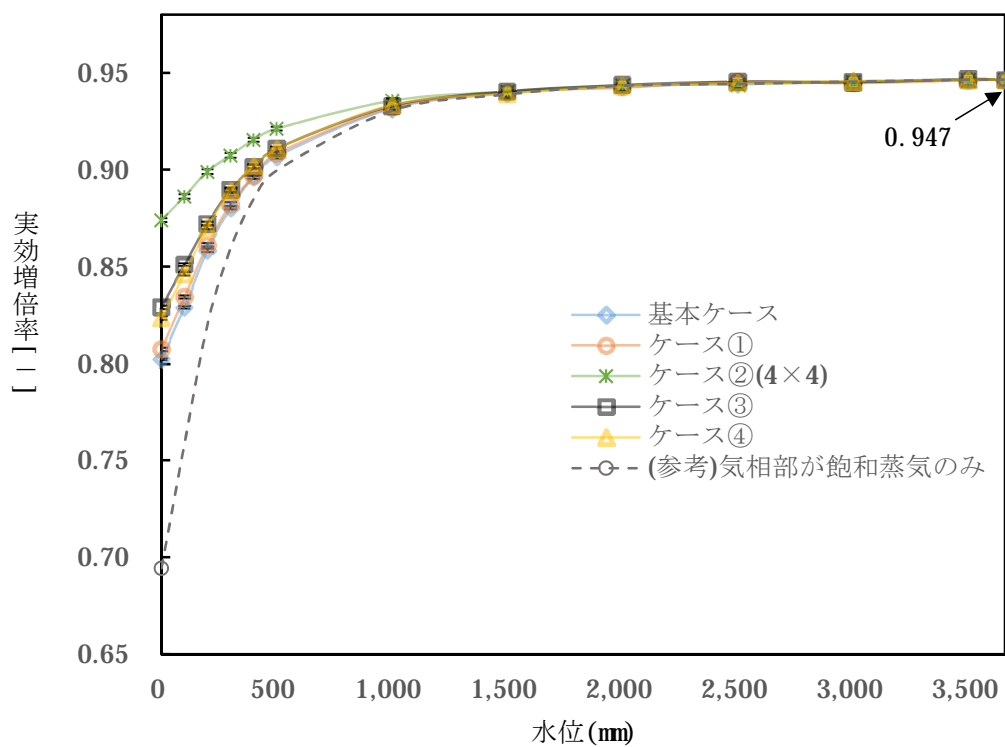
STEP4 : 重畳させる不確かさの検討



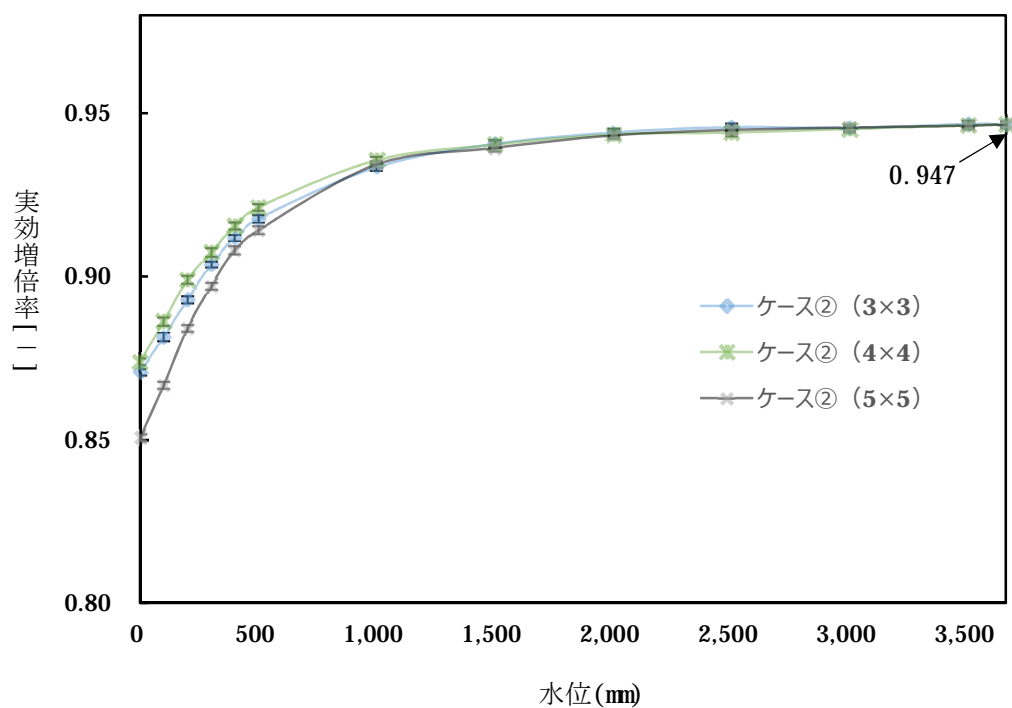
不確かさ同士の従属性・独立性を踏まえ、重畳させるべき不確かさを検討

解析条件（基本ケースおよび感度確認ケース）の決定

第7図 臨界計算コードのインプット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配慮した <u>ボックス形状、燃料配置及び使用済燃料ピット用中性子吸収体配置</u> において、スプレイヤや蒸気条件においても未臨界を維持できるところ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 <u>ボックス形状及び燃料配置</u> 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</u> 、スプレイヤ及び蒸気条件においても未臨界を維持できるところにより臨界を防止し、(略)

第1-2表 評価手法及び条件の変更内容

	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	保守的手法 (大きな保守性を有する評価ケースを一つ設定し、当該評価ケースが未臨界性上の判定基準を満足することを確認) 気相、液相は区別せず、 水密度を $0 \sim 1\text{g/cm}^3$ で変化させて評価	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及び不確かさ影響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、液相は区別せず、 水密度を $0 \sim 1\text{g/cm}^3$ で変化させて評価	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。 液膜及び海水 (塩素) の存在を考慮。
	燃料配置	燃焼度及び中性子吸収体の有無に応じた3領域	新燃料敷き詰め
	中性子吸収体の存在	考慮する	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手頃あたりのポンプ台 数による感度を検証する 解析 (ケース①)	風の影響① (流入範囲を 下させ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 (斜め方向に液滴を落 下させ燃料集合体内への感 度を確認する解析 (ケース③))	スレイ試験における液滴径 測定箇所毎の結果の差異に よる感度を検証する解析 (ケース④)
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)	←	←	←	←
	流量 [] m ³ /h	[] m ³ /h	[] m ³ /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	←
	流量分布 一様	←	←	←	←
燃料集合体内への流入割合	23 (%)	←	←	46 (%)	23 (%)
集合体内へ流入した流量 のうち液膜と蒸気流量割合	100 (%)	←	←	←	←
液膜厚さ	包絡式	←	←	←	←
気相部 水密度 (放水の 液滴径 等)	飽和蒸気密度 0.0006 (g/cm ³) 液滴径1.5mmを用いた水密度	←	←	←	←
流入範囲外	—	—	0.0006 (g/cm ³)	—	—
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 ³]	0.0006 (飽和蒸気密度)				
燃料集合体外※ 気相部水密度 [g/cm ³]					
流入範囲外 気相部水密度 [g/cm ³]	—	—	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 ^{235}U 濃縮度	<input type="text"/> 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	<input type="text"/> mm × <input type="text"/> mm	(注1)
材 料	ステンレス鋼	—
厚 さ	<input type="text"/> mm	(注2)
内のり	<input type="text"/> mm × <input type="text"/> 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は考慮しない
液相部水密度	1.0 g/cm ³	(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/cm³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 ^(注1)	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及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. 基本ケース及び感度解析ケース条件一覧

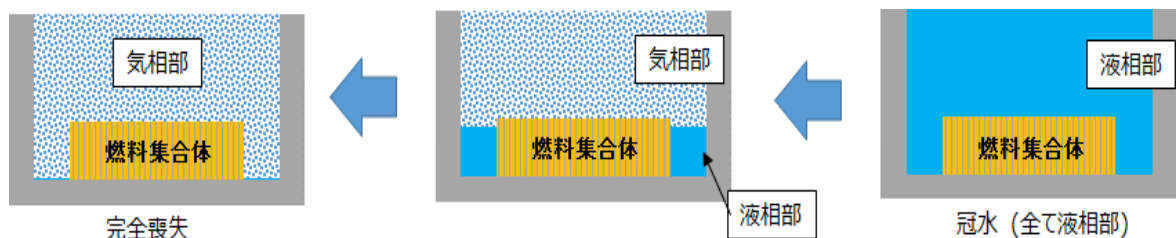
1. はじめに

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及び放水を実施する。このため、注水・放水中の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、最適評価手法及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



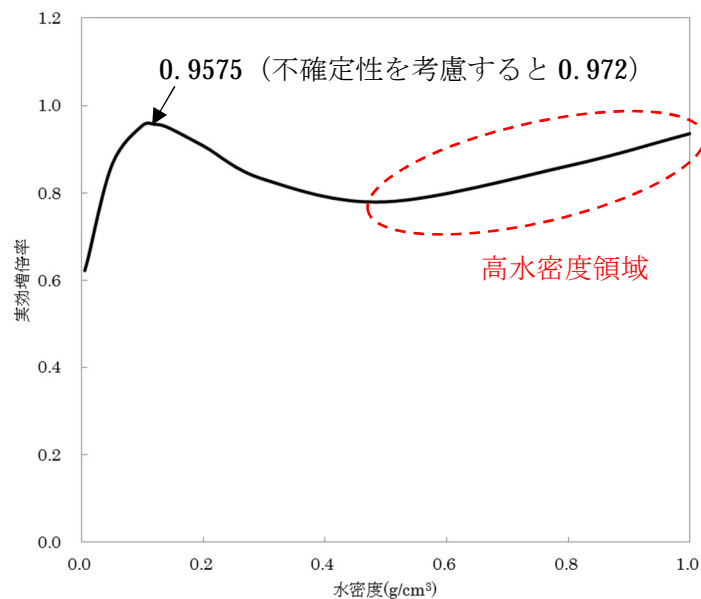
第2-2図 実態により則した未臨界性評価体系

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、燃料体の上部及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 1.0g/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 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 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

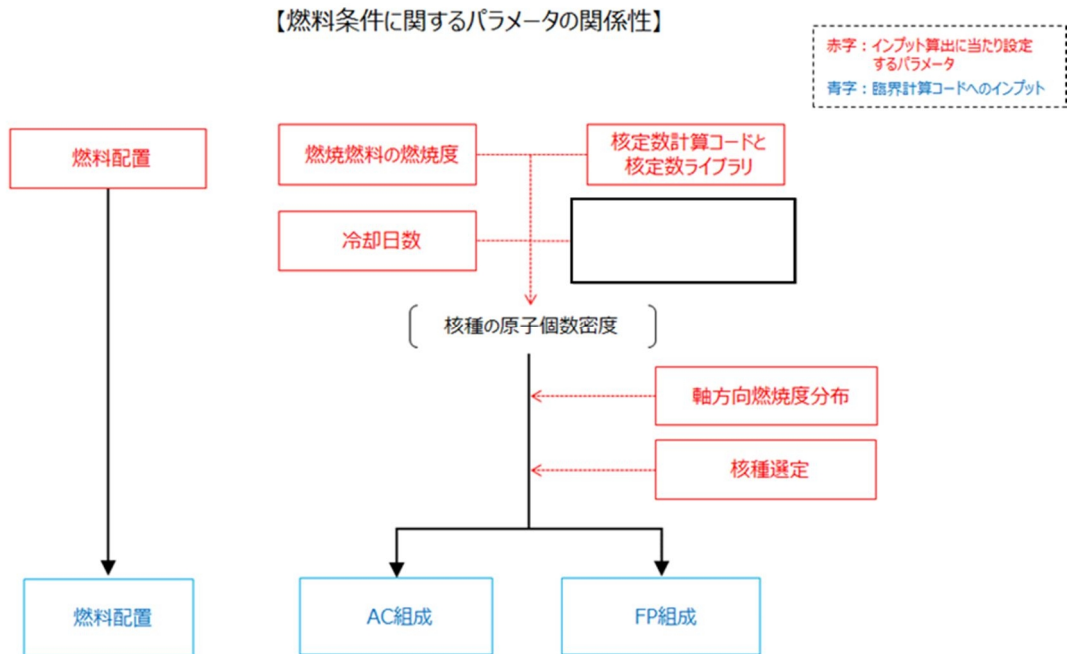
重大事故等対応として実施される注水・放水手順において用いる設備の特徴等を踏まえた各パラメータより臨界計算コード (SCALE6.0) へのインプット条件を算出する。燃料条件及び水分条件 (気相部) に関する各パラメータの状態は以下の通り。

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 へのインプット条件として燃焼燃料の存在を考慮する場合は、当該インプット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、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との関係を第 2-4 図に示す。



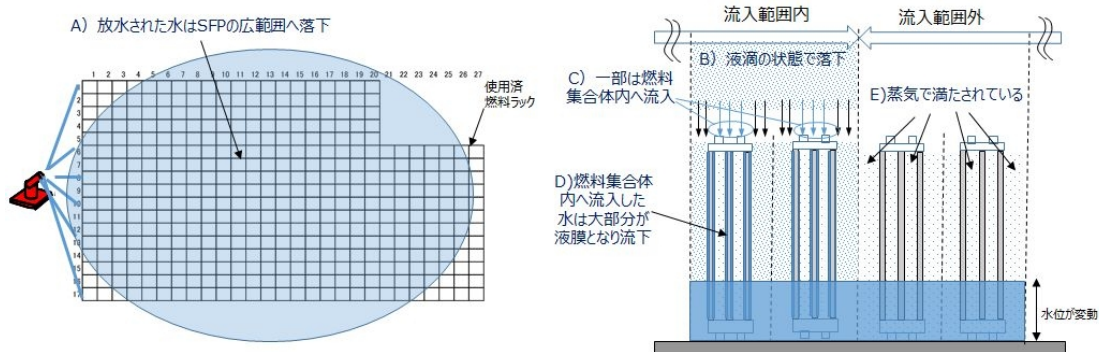
第 2-4 図 インプット条件とインプット条件算出に当たり設定するパラメータの関係（燃料条件）

4.2. 水分条件

水分条件は、主に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の影響を受けるが、SFP への流入流量が大きい放水設備を用いた場合の現実的な気相部の状態は以下 A)～E)のようになると考えられる。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) ~E) 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」により求め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[ラックピッチ当たりの流量]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

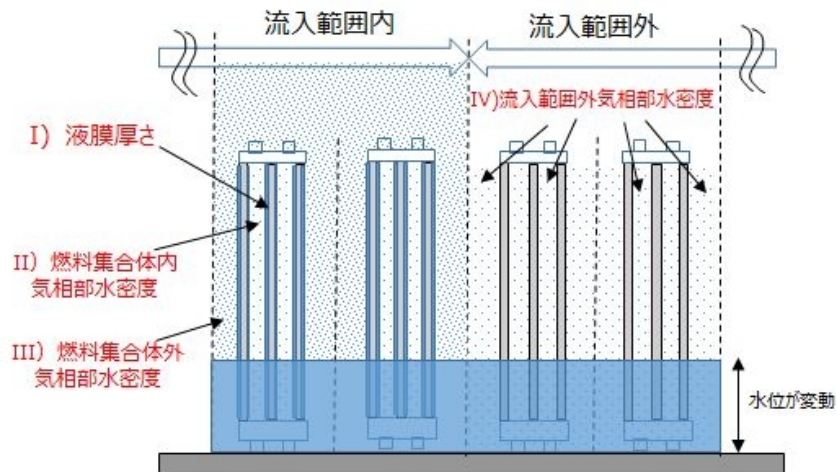
- ・ [燃料集合体内に流入する流量]から、[液膜になる流量]を減じることで、燃料集合体内を[液滴のまま落下する流量]を求める。
- ・ 落下する「液滴の径」より求まる液滴の下降速度、及び液滴流量などを用い燃料集合体内気相部水密度を求める。

III. 燃料集合体外気相部水密度

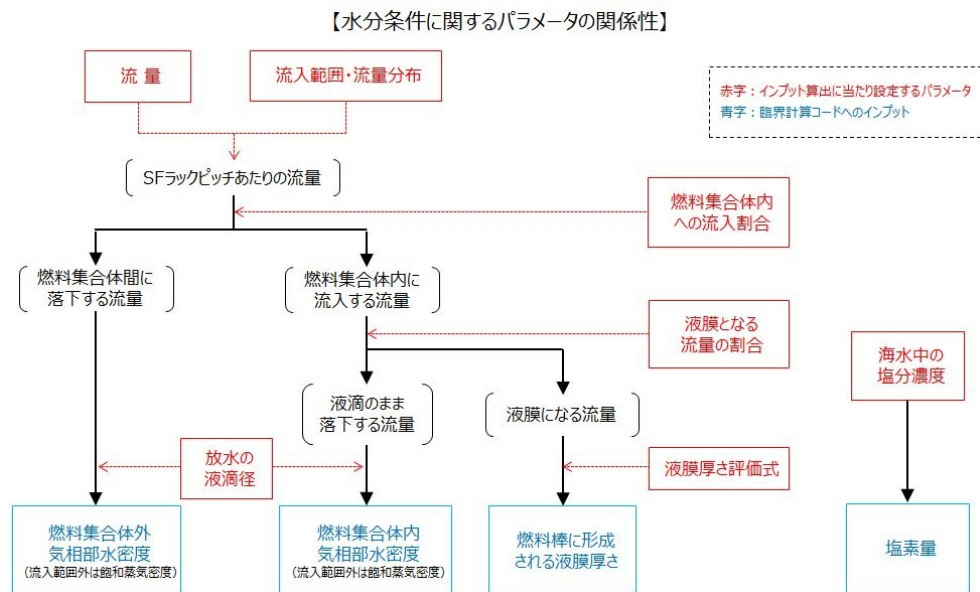
- ・ [ラックピッチ当たりの流量]から、[燃料集合体内に流入する流量]を減じることで、燃料集合体間を落下する流量を求める。
- ・ 落下する「液滴の径」より求まる液滴の下降速度、及び液滴流量などを用い燃料集合体外気相部水密度を求める。

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/cm³）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



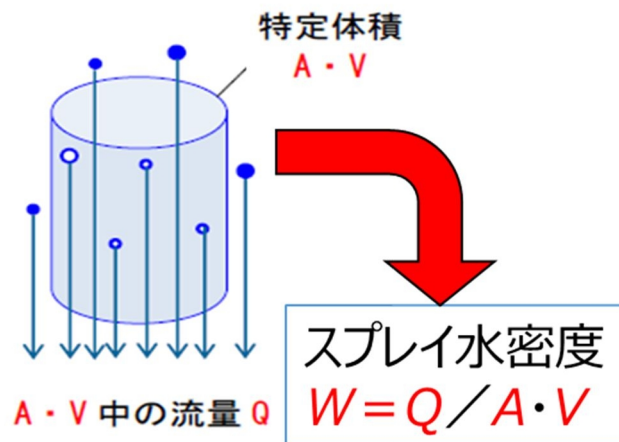
第 2-7 図 インプット条件とインプット条件算出に当たり設定するパラメータの関係 (水分条件)

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、単位面積当たりに流入する液滴の流量及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、気相部水密度及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 $A \cdot V[\text{cm}^3]$ 中当たりの流量 $Q[\text{cm}^3]$ 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 $A \cdot V[\text{cm}^3]$ 中当たりの流量 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と接触し、燃料棒等の構造物を伝って流下する。流入水が燃料棒に対して均一な液膜を形成するとした場合、そ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。

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/s²]、 Γ は単位幅当たり液膜流量[m²/s]、 ν は流体の動粘度[m²/s]である。

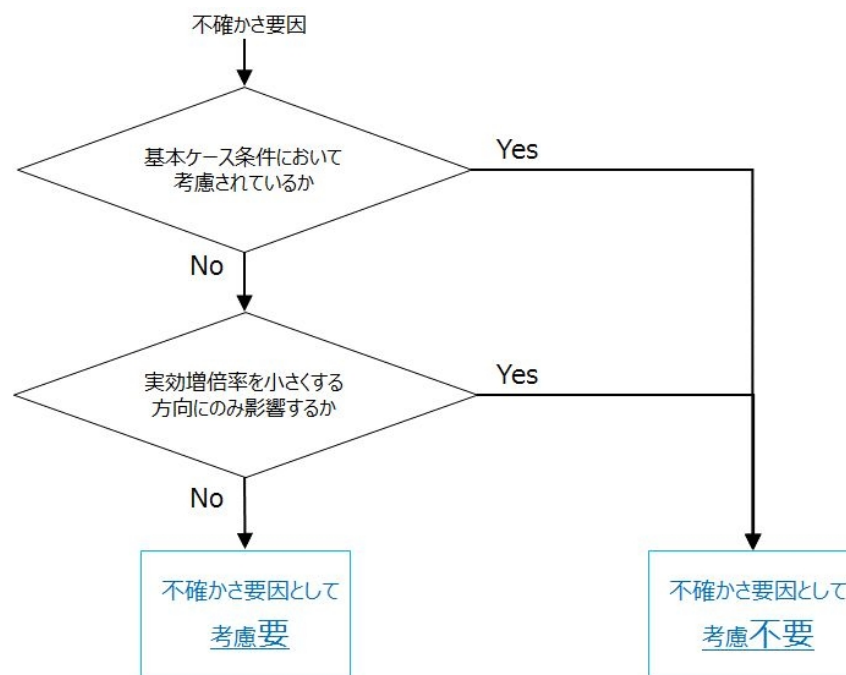
集合体内に流入する流量より液膜レイノルズ数を求めたうえで、適切な評価式を用い無次元厚さを求め、最終的に平均液膜厚さを求める。

6. 基本ケース条件の設定方針

基本ケース条件を設定するに当たっては、設計値等の現実的な条件を基本としつつ、原則、実効増倍率に対して余裕が小さくなるような設定とする。

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。今回の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2-9図に示すフロー図に基づき、不確かさ要因の考慮要否を判定する。



第 2-9 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及び不確かさを考慮した条件の設定

解析の条件設定については、設計値等の現実的な条件を基本としつつ、原則、実効増倍率に対して余裕が小さくなるような設定とする。また、解析条件の不確かさ影響を考慮する必要がある場合には、影響評価において感度解析を行う。

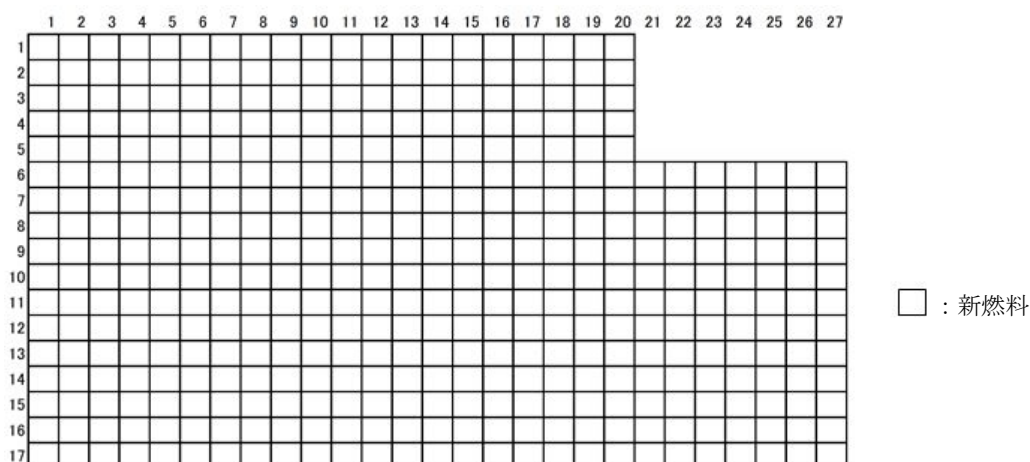
8.1. 燃料条件の設定

8.1.1. 「燃料配置」の設定

(a) 基本ケース条件の設定

実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう、濃縮度が最も高い取替燃料が新燃料として全てのラックに貯蔵された状態を設定する。

当該燃料配置条件を第 2-10 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 表に示すが、実運用に対して基本ケース条件が十分に保守的であることが分かる。



第 2-10 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。

(b) 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、及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。

(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因は全て、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である。

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

放水設備による放水は、注水設備によって SFP の水位が維持できない場合に実施する想定としていることから、整備している注水手順を全て同時に実施している状況は現実的な条件と捉えることができ、各手順で使用する設備及びそれらの仕様を用いることにより手順毎の流量を求めることが出来る。よって「流量」については以下の条件に基づき算出した現実的な条件となるよう、 m³/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想定する。
- ・ 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。

(b) 不確かさ要因の抽出

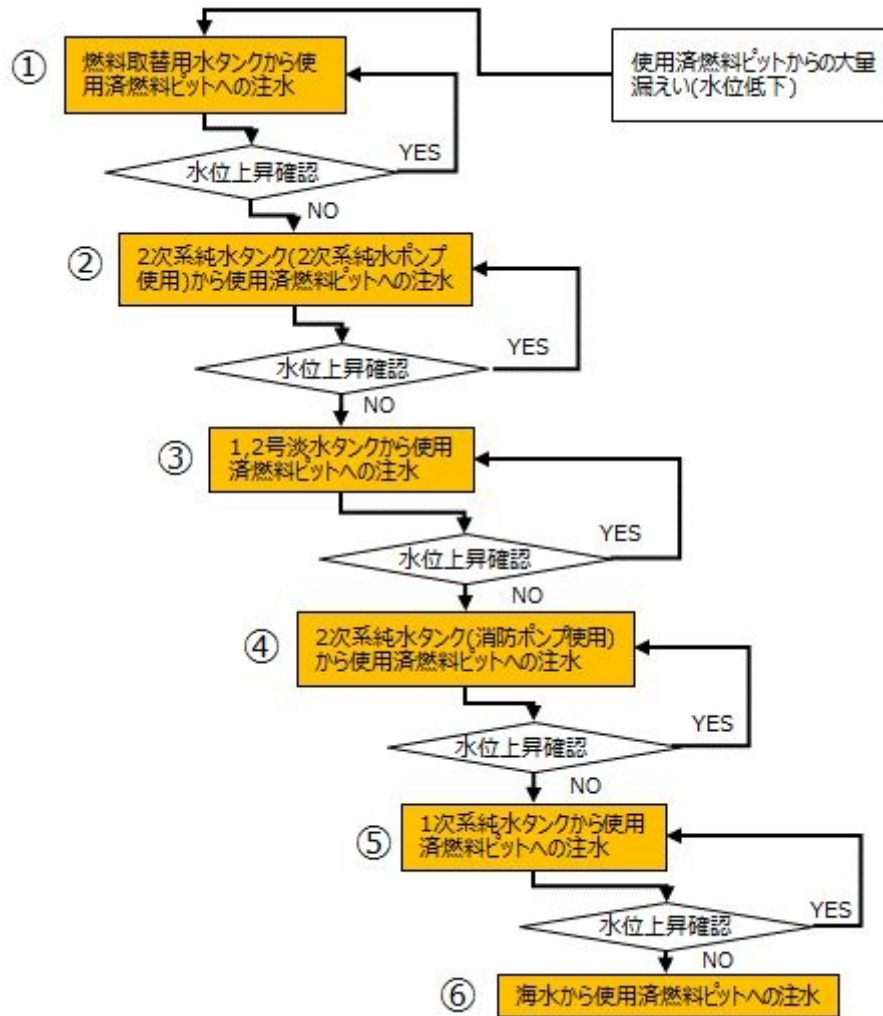
パラメータ「流量」に対する不確かさ、及び当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下の通り記載する。

(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て値を設定している。実際の重大事故等時においては、第 2-11 図のフローに基づき各手順の対応を実施することとなり、重大事故等時の状況によっては使用でき

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。

ない手順も発生しうるため注水・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。



第 2-11 図 SFP への注水に係る手順の実施フロー

(ii) 1 手順当たりのポンプ台数

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。手順通りに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。

(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因のうち、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 手順当たりのポンプ台数」を考慮した条件として、 $\square \text{ m}^3/\text{h}$ 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

注水設備由来の流入水については手順毎で SFP への流入位置が異なるため流入範囲、流量分布を求め難いが、流量の大部分を占める放水設備由来の流入水については、使用時の流量や設備仕様より流入範囲・流量分布を類推することが可能である。よって「流入範囲・流量分布」の基本ケース条件については、現実的な条件となるよう、放水設備由来の流入形態をベースに、全流量がラック面積に対し一様に流入する（流入範囲は SFP 全面、流入分布は全流量を SF ラック面積で割った値を用いる）として設定する。本条件は以下の通り、単独の放水設備による放水時の流入範囲・流量分布を上回る条件設定となっている。

<放水砲>

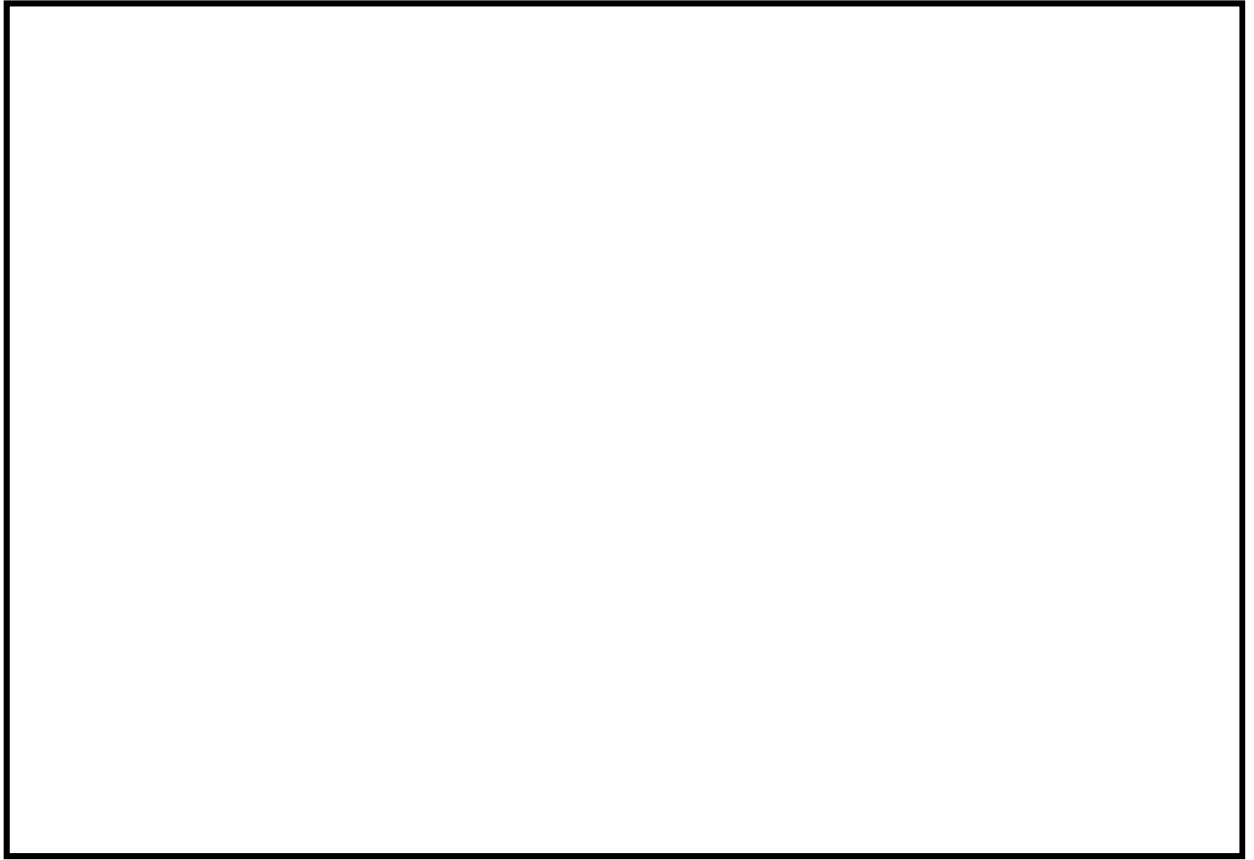
着水範囲に関する条件は放水砲メーカー作成の性能曲線を設定したうえで、着水範囲内の流量分布は文献（石油タンク火災消火時における大容量放水及び泡放射軌跡の予測モデルの構築、宮下達也（2014））を参考に、放水方向（射程方向）には Rosin-Rammler 分布を、放水の直交方向（射幅方向）には正規分布を用いて規格化した。得られた流量分布を第 2-12 図に示すが、ピーク流量（単位面積当たり）は以下の通り約 $\square \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ であった。

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

一方で、燃料貯蔵設備である SF ラックは放水砲による流入範囲よりも小さく、全流量が SF ラック上へ一様に流入すると想定した場合の流量（単位面積当たり）は、以下の通り約 $11 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ であり、放水時の流量分布におけるピーク流量を上回る。

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

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。

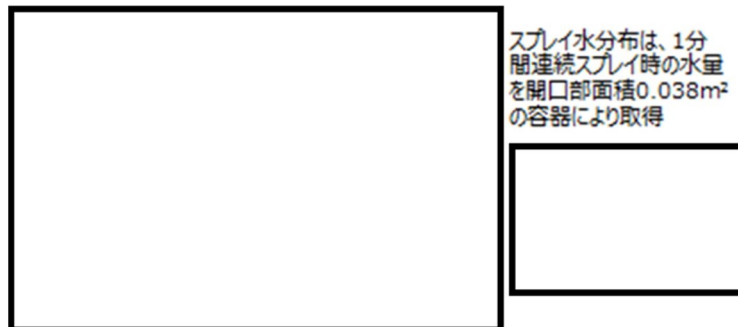


第 2-12 図 放水砲による流量分布

<スプレーヘッダ>

第 2-13 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 2-13 図 スプレーヘッダによる放水分布 メーカー試験結果

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。

一方で、全流量が SF ラック上へ一様に流入すると想定した場合の流量（単位面積当たり）は以下の通り $0.88\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ と求まり、放水時の流量分布におけるピーク流量を上回る。

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

※ 流量には定格値を使用

(b) 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、及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、及び 1 手順当たりのポンプ台数

放水時の着水面積については、設備からの吐出流量により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、及び 1 手順当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実態に則した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、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実態に則した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

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。

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

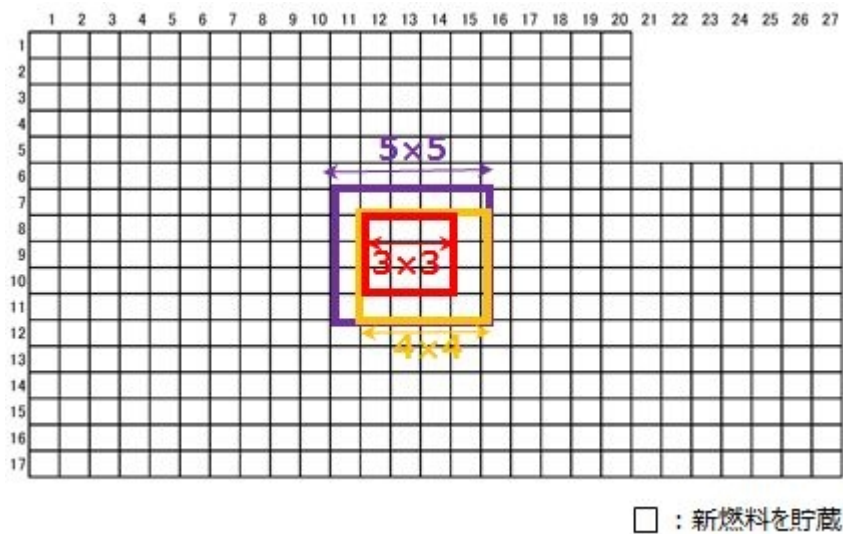
落下する液滴に対し風により力が加わり水平方向の移動が促進されることで、流入範囲・流量分布は影響を受けることとなり、風向きや放水方向によっては放水範囲は狭まりうる。風向きや放水方向等による組み合わせは無数にあることから、風の影響により流入範囲がどこまで狭まるかは定め難い。

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。

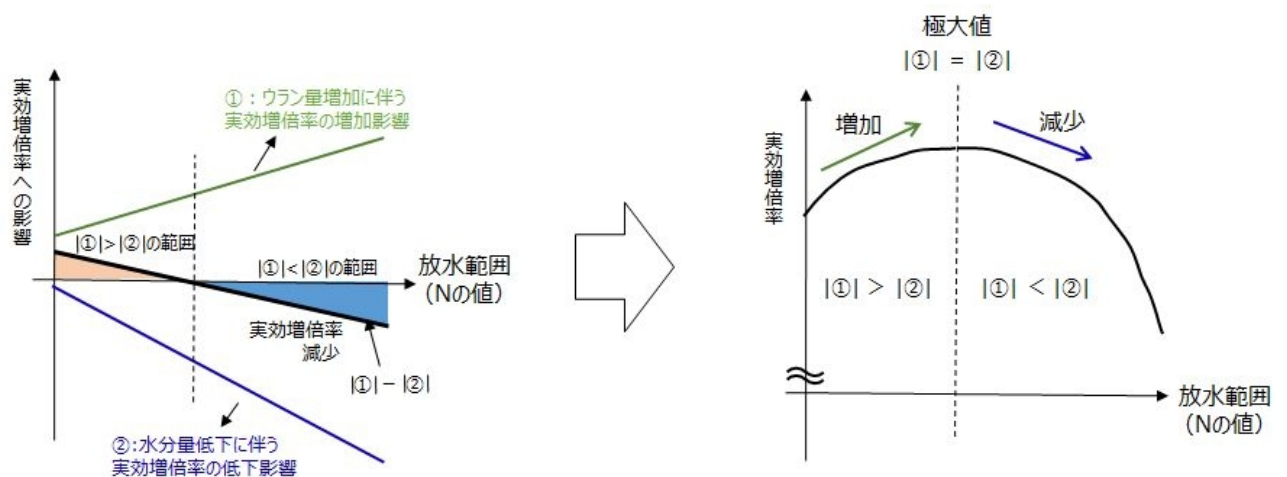
(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因のうち、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、(b) 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 2-14 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度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 2-15 図に示す。



第 2-14 図 局所領域の設定



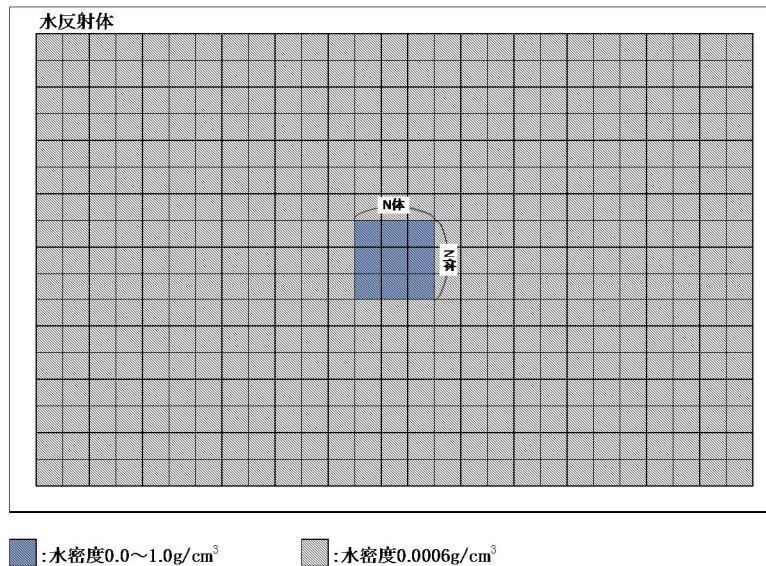
第 2-15 図 放水範囲 (N の値) の変化に伴う実効増倍率挙動 概念図

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/cm³ 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 2-16 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/cm³ 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/cm³ 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である。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う評価結果に影響しない。



第 2-16 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 ³ で一様変化
N×N ラック外水密度	0.0006 g/cm ³
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]

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。

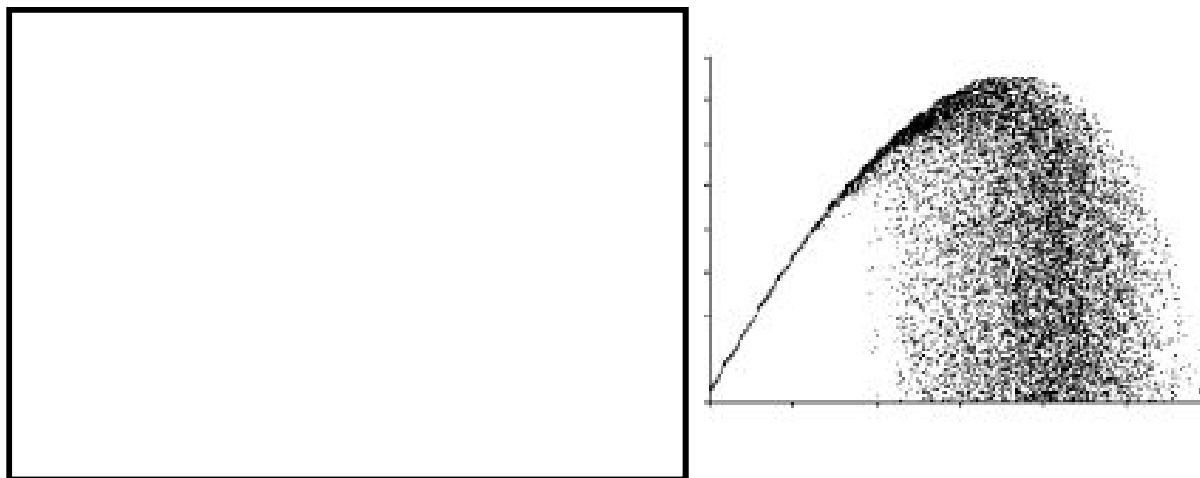
第 2-4 表 ある狭い範囲を求めるための解析結果

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 ³ で最大
4×4 ラック	0.978	水密度 0.18g/cm ³ で最大

8.2.3. 「燃料集合体内への流入割合」の設定

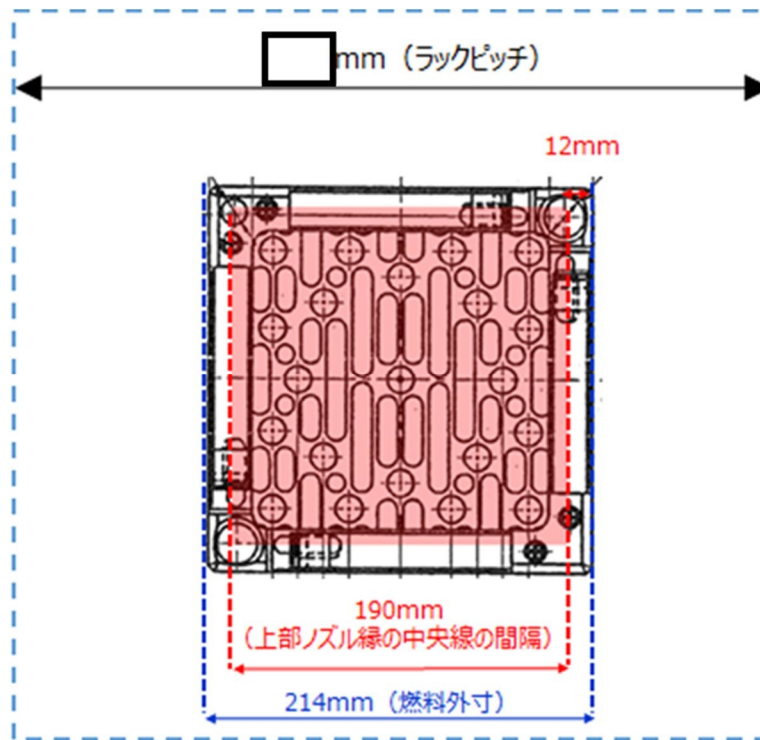
(a) 基本ケース条件の設定

第 2-17 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現実的な値を求めることができる。なお、第 2-18 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される。よって本パラメータの基本ケース条件は、現実的な条件となるよう、ラックピッチ面積に対する赤色部面積の比として、 $190 \times 190 \div (\square \times \square) \approx 23\%$ と設定する。



第 2-17 図 放水砲の放水軌跡（無風時）

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 2-18 図 燃料集合体に流入する流量割合 (イメージ)

(b) 不確かさ要因の抽出

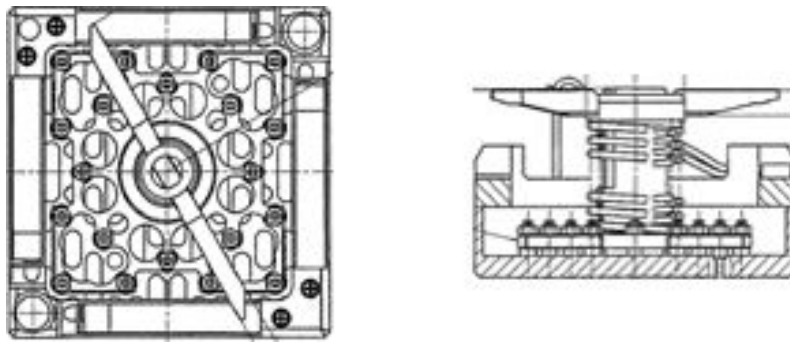
パラメータ「燃料集合体内への流入割合」に対する不確かさ、及び当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下の通り記載する。

(i) 内挿物の存在

実機では、第 2-19 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 2-19 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。

(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因のうち、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及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 2-20 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。

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

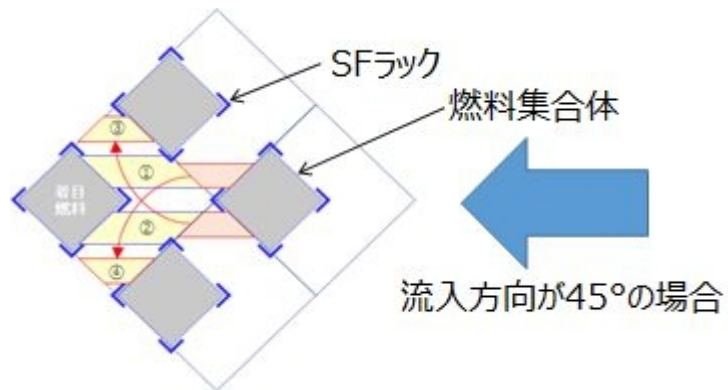
- ・ また、斜めに落下してくるという液滴の流入形態を踏まえれば、流入割合への影響は第 2-21 図に示すように、面積に高さを乗じた体積の半分と見積もることができる。よって横風により

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。

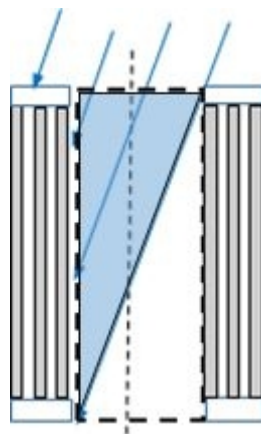
斜めから液滴が流入してくる影響は、下式のとおり約 **23%**となる。

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 2-20 図 流入方向 45° における液滴流入面積



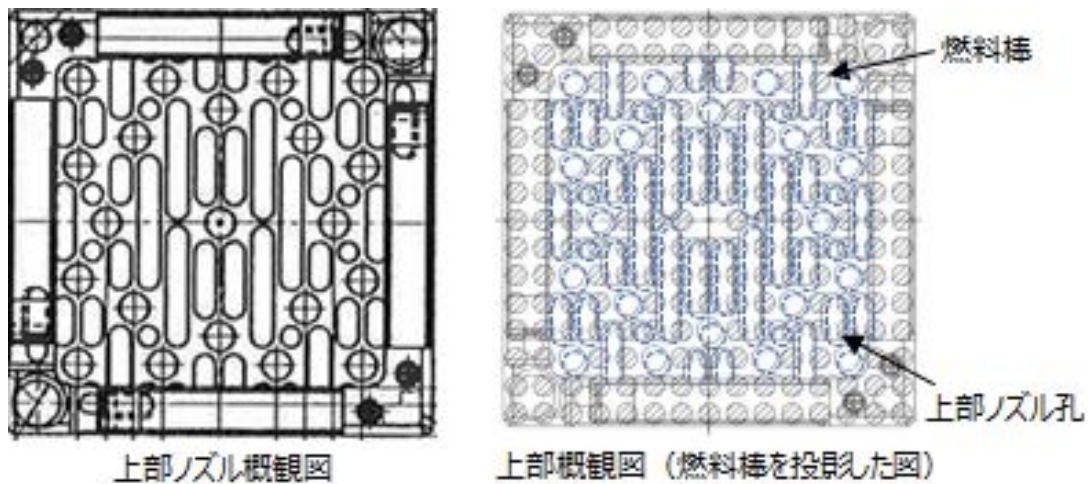
第 2-21 図 流入形態を踏まえた流入割合影響

8.2.4. 「液膜となる流量の割合」の設定

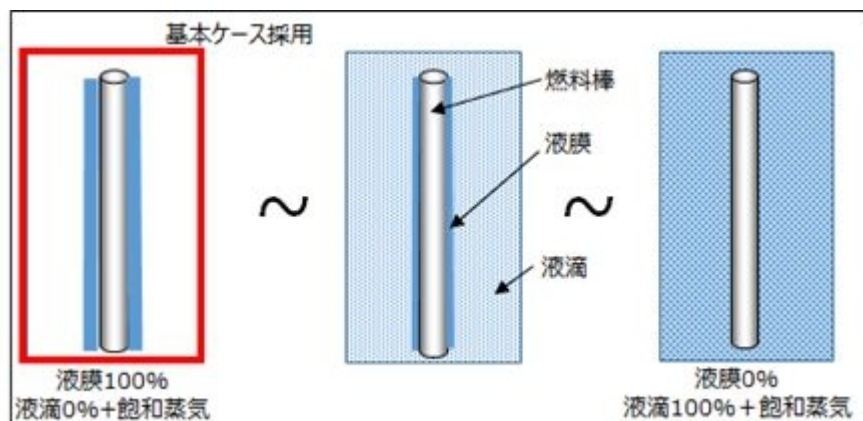
(a) 基本ケース条件の設定

第 2-22 図に示す通り燃料集合体内への主要な流路となる上部ノズルの構造は複雑であり、大部分の液滴は構造物に接触し、構造物表面を流下すると考えられるものの、燃料集合体内への流入水の内部流動を現実的に設定することは困難である。一方で参考 3 に示すように、集合体に流入する全ての水が液膜となり、燃料棒全周に液膜を形成すると想定したほうが、燃料棒から作用するせん断力の合計値が大きくなって体系中に保持される水分量が多くなり、実効増倍率が厳しくなる。

よって内部挙動に関する本パラメータの基本ケース条件は、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう、100%（燃料集合体内に流入する水は全て液膜となる）とする。液滴と液膜の流量割合に関するイメージを第 2-23 図に示す。



第 2-22 図 燃料集合体上部の概観図



第 2-23 図 液膜と液滴の割合 (イメージ図)

(b) 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、及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 2-22 図に示す上部ノズル開口部の一部には、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。

(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因は、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である。

8.2.5. 「液膜厚さ評価式」の設定

(a) 基本ケース条件の設定

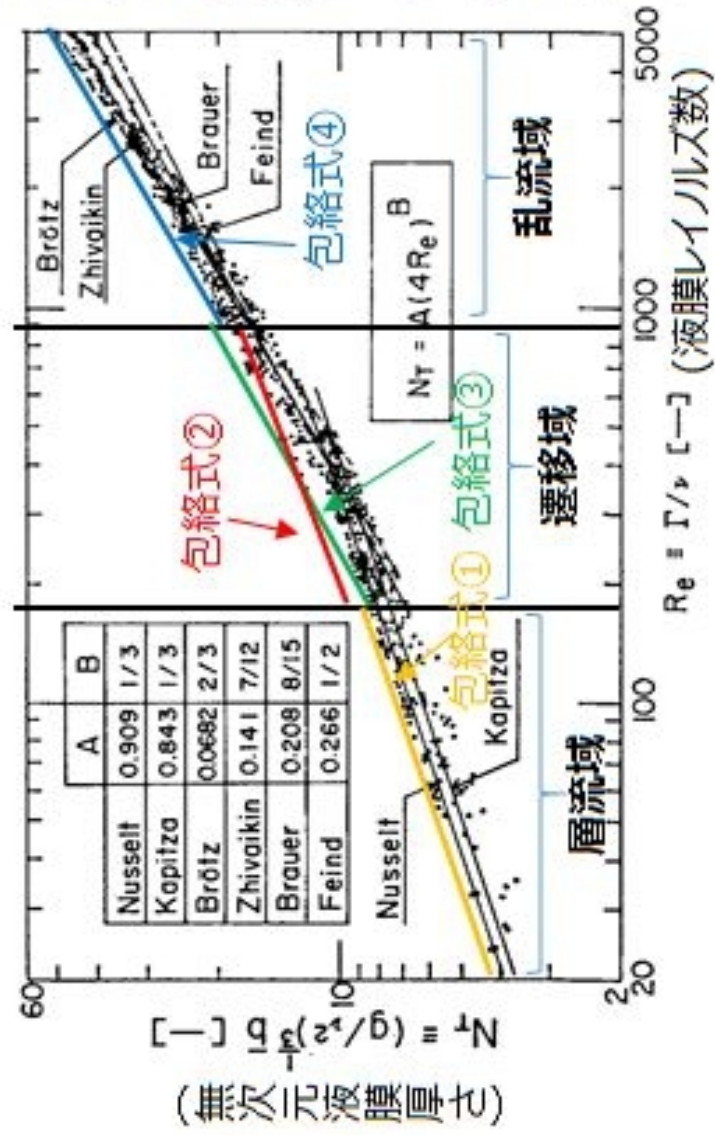
燃料集合体を真上から見たとき、第 2-22 図の通り燃料集合体下端までの経路はほとんど、上部ノズルや燃料棒等の構造物に遮られていることから、大部分の液滴は構造物に付着してまとまり、燃料棒を含む構造物表面を筋状に流下すると考えられる。しかし、筋状流下のような流動現象は非線形な挙動を示すため複雑であり、内部流動を現実的に設定することは困難である。よって内部流動に関する本パラメータの基本ケース条件は、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう設定する。流下形態としては、筋状流下時よりも燃料棒から作用するせん断力の合計値が大きくなる状態として液膜流下を想定し、液膜厚さの評価式としては第 2-1 表に示す通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 2-24 図に示すように、文献※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 $Nusselt$ の式及び $Zhivai kin$ の式の傾き（第 2-24 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 2-25 図に示す。

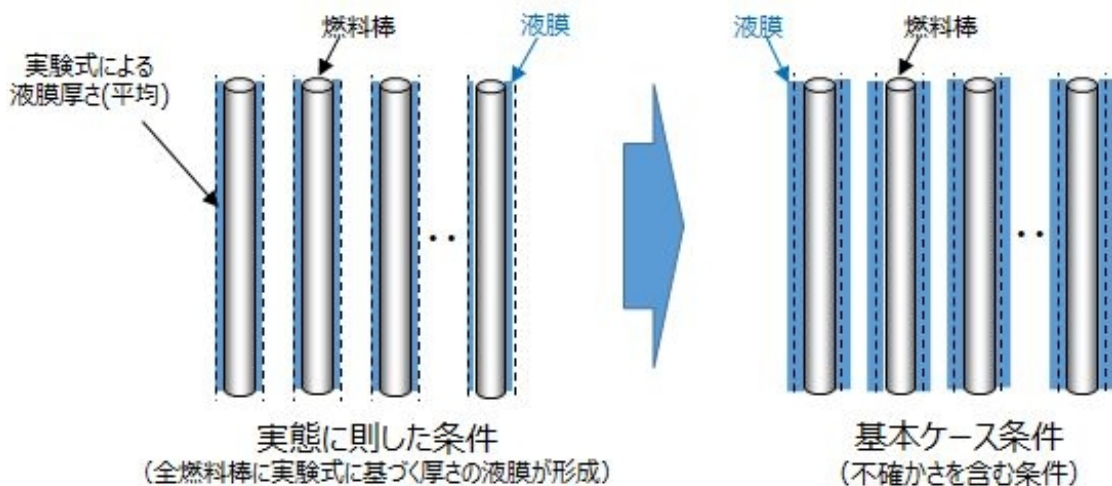
※ 新垣勉他、垂直流下液膜における流動および波動特性、(1985)、化学工学論文集

N_T : 無次元液膜厚さ[-]
 Re : 液膜レイノルズ数[-]
 Γ : 単位幅あたりの液膜流量[m²/s]
 v : 動粘性係数[m²/s]
 b : 平均液膜厚さ[m]
 g : 重力加速度[m/s²]
 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 2-24 図 包絡式の設定



第 2-25 図 液膜厚さ評価式の条件設定 (イメージ)

(b) 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、及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影響する。

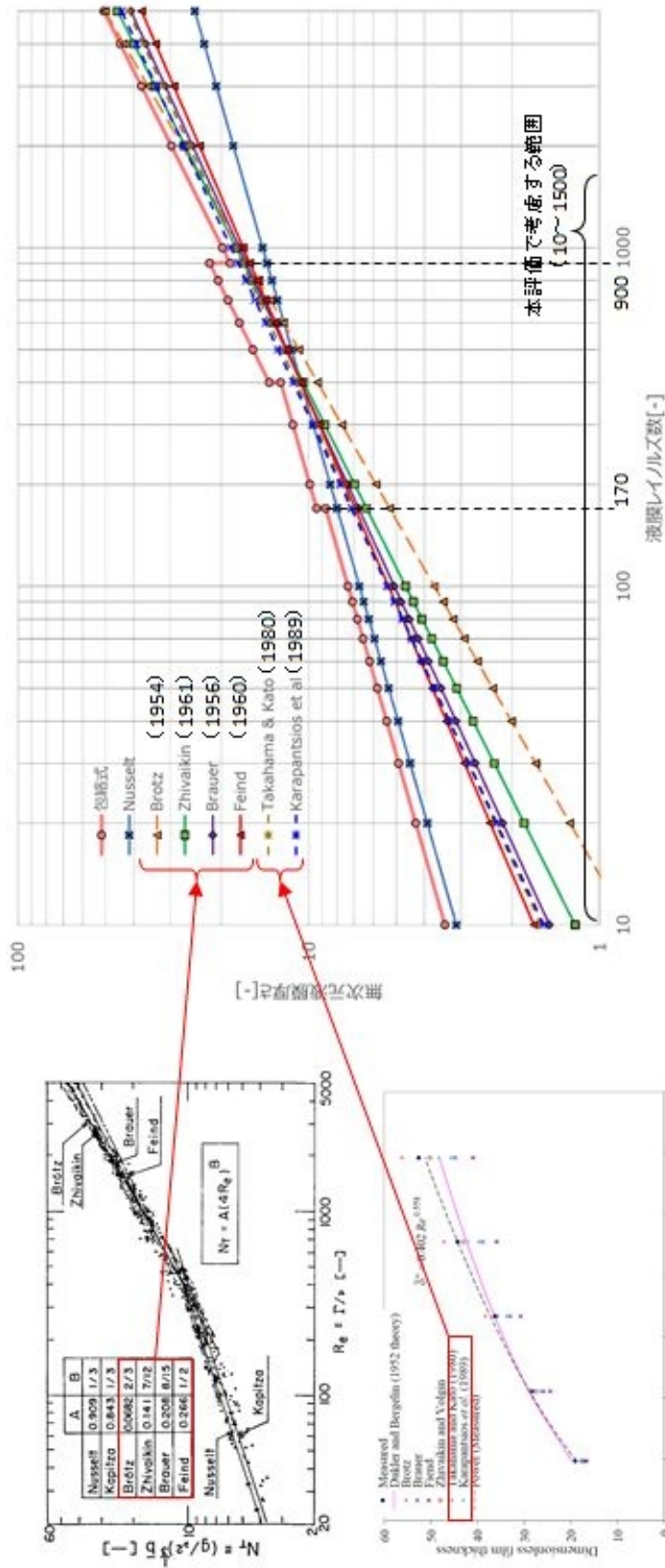
(ii) 多種ある実験式の存在

包絡式の設定にあたっては、代表的な実験式である **Nusselt** の式及び **Zhivaikin** 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 表及び第 2-26 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** 及び **Karapantsios** らの液膜算出式を包絡している。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のみ影響する。

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 ³ /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
感度解析ケース①	<input type="text"/>	SFP 全面 (424 ラック)	23	25
感度解析ケース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 2-26 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

(c)不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因は、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である。

8.2.6. 「放水の液滴径」の設定

(a)基本ケース条件の設定

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ーヘッド由来の液滴径よりは大きいと考えられるものの、その現実的な値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は、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう設定する。

今回の未臨界性評価では事故時対応向けに整備している全手順の同時実施を想定しているため、放水中には、スプレーヘッドに由来する液滴と、放水砲等に由来する液滴が混在することとなる。放水砲等に由来する液滴径の最確値は定め難いものの、その値はスプレー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ーヘッド由来の液滴であるとし、実機スプレー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、及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。

(b)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、及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、及び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影響する。

(ii)放水設備の違い

放水設備として使用するスプレーヘッドと放水砲は、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

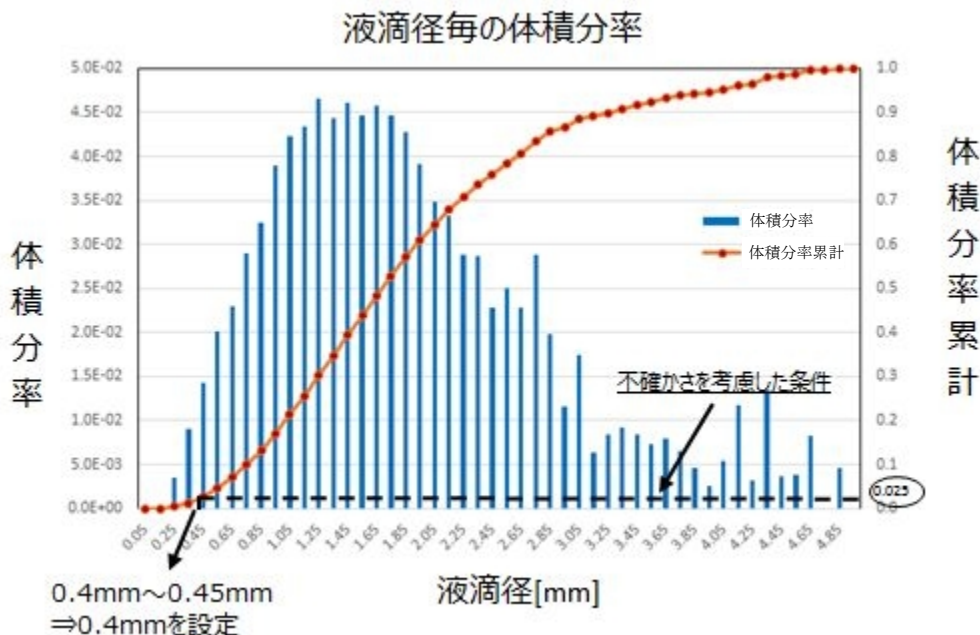
る方向、すなわち実効増倍率を低下させる方向に働く。

(iii) スプレイ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のみ影響する。

(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因のうち、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「スプレイ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2-27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。



第2-27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

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は、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう、日本海域の塩分濃度範囲の下限値である 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 表に示すとおりであり、これらの組成比を踏まえて塩素量を設定する。

第 2-6 表 海水の塩分濃度及び塩類組成

		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 ₂	10.878%	10.0%
	MgSO ₄	4.737 %	—
	CaSO ₄	3.600 %	—
	K ₂ SO ₄	2.465 %	—

(b) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「海水中の塩素濃度」に対する不確かさ要因、及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) 海流の変化

日本海において 300m より浅い部分の塩分濃度は、海流の影響により 3.38%～3.43%（気象庁 HP より）程度の範囲でばらつきが生じるとされている。

一方で、基本ケース条件は本ばらつきの下限値を下回る 3.3%を設定することから、本不確かさ要因は、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因は、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である。

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		基本ケース条件に対する不確かさ		実効増倍率が 低くなる方向	考慮 要否	(参考) 申請書 添付書類入 記載
	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	SFPIは新燃料で満杯	燃焼条件および燃料貯蔵体数、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	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 SFPI満杯以下	・燃焼度が低い燃料を貯蔵 ・貯蔵体数が増加	不要 不要	燃料配置については、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう、濃縮度が最も高い取替燃料が新燃料として全てのラックに貯蔵された状態を設定する。
燃焼燃料の 燃焼度		(新燃料のみを貯蔵するため、本パラメータの条件は設定しない)				- (記載なし)	
軸方向 燃焼度分布		(新燃料のみを貯蔵するため、本パラメータの条件は設定しない)				- (記載なし)	
核定数計算 コードと核定 数ライブラリ		(新燃料のみを貯蔵するため、本パラメータの条件は設定しない)				- (記載なし)	
		(新燃料のみを貯蔵するため、本パラメータの条件は設定しない)				- (記載なし)	
核種濃度		(新燃料のみを貯蔵するため、本パラメータの条件は設定しない)				- (記載なし)	
冷却日数		(新燃料のみを貯蔵するため、本パラメータの条件は設定しない)				- (記載なし)	

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		基本ケース条件に対する不確かさ		実効増倍率が 厳しくなる方向	考慮 要否	(参考) 申請書 添付書類 記載
	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 ³ /h	<ul style="list-style-type: none"> 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 1手順につきポンプ1台起動 各手順の流量には、基本的にポンプ操縦曲線を用い、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 	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	流量増加	不要	現実的な条件となるよう、重大事故等時対応のため整備している注水及び放水に係る手順全てが同時に実施されたとして設定するとともに、不確かさとして設定されるポンプの全数起動を考慮する。
			1手順あたりのポンプ台数	流量増加	要		
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"> 放水設備からの全流量が、SFPラック全面に均等に流入する(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大きい保守的な条件を設定) 	注水・放水手段の組合せ	広範囲化	流入範囲: 局所化	不要	現実的な条件となるよう、全流量がラック面積に対し一様に流入するものとして設定するとともに、不確かさとして全流量が局所領域に集中することを考慮する。
			1手順あたりのポンプ台数	単位面積当たりの流量低下	流量分布: 単位面積当たりの流量増加	不要	
			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		
			スレイ分布のばらつき 【基本ケース条件で考慮済み】	不要			
燃料集合体内への流入割合	23%	<ul style="list-style-type: none"> 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 集合体上部へ流入する水の一部分は上部ノズル構造等により弾かれる 無風を仮定(斜めからの液滴の流入は考慮しない) 	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	燃料集合体内へ流入する水量の割合については、現実的な条件となるよう、ラックの中心間距離と燃料集合体外寸から求まる面積比等から設定するとともに、不確かさとして斜め方向から液滴が流入することを考慮する。	
			内挿物の存在 【基本ケース条件で考慮済み】	流入割合低下	流入割合増加		不要
液膜となる流量の割合	100%	<ul style="list-style-type: none"> 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 	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	燃料集合体内に流入した水は、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう、全てが液膜となるように設定する。	
一部が液膜となる流量の割合	液膜となる流量が増える	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		基本ケース条件に対する不確かさ		実効増倍率が 感じなる方向	考慮 要否	(参考) 申請書 添付書類 記載
	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			
液膜厚さ評価 式	包絡式	・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	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	液膜については、実効増倍率 に対して余裕が小さくなるよう、 燃料棒全周に対し一様に形 成されるとした上で、厚くなるよ うに設定する。
			多種ある実験式が存在 【基本ケース条件で考慮済み】	液膜が薄くなる		不要	
放水の液滴径	一律1.5mm	・スプレイ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)	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	放水の液滴径については、実 効増倍率に対して余裕が小さ くなるよう、スプレイ試験等 で得られた知見を踏まえ設定す るとともに、不確かさとして有意 であると考えられる値の下限を 考慮する。
			1 手順あたりのポンプ台数	液滴径を大きくする		不要	
			放水設備の違い (放水砲orスプレイヘッド) 【基本ケース条件で考慮済み】	液滴径を大きくする		要	
海水中の 塩分濃度	3.3%	・文献に記載された最小値	スプレイ試験における測定箇所毎の 結果の差異 海流の変化 【基本ケース条件で考慮済み】	液滴径を大きくする or 小さくする	塩素濃度低下	不要	海水中の塩素による中性子 吸収を考慮することとし、塩素 濃度については、実効増倍率 に対して余裕が小さくなるよう、 海水の塩分濃度の下限値を 踏まえ設定する。

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、基本ケース及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. 基本ケース及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、及び 10. で整理した不確かさの取り扱いを踏まえ、基本ケース及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 基本ケース及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手順あたりのポンプ台 数による感度を検証する 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 度を検証する解析 (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 感度を検証する解析 (ケース③)	スプレイ試験における液滴径 測定箇所毎の結果の差異に よる感度を検証する解析 (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	□ (m ³ /h)	□ (m ³ /h)	□ (m ³ /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 (%)	←	←	←	←
液膜厚さ	包絡式	←	←	←	←
気相部 水密度 (放水の 液滴径 等)	0 (%)	←	←	←	←
流入範囲内	飽和蒸気密度 0.0006 (g/cm ³)	←	←	←	←
流入範囲外	液滴径 1.5mmを用いた水密度	←	←	←	液滴径 0.4mmを用いた水 密度
海水中の塩分濃度	3.3 (%)	←	0.0006 (g/cm 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 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 手順あたりのボ ンブ台数による感 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液滴 径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 条件	新燃料敷き詰め (SFP 有限体系)			
	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 ³]	0.0006 (飽和蒸気密度)			
燃料集合体外※ 気相部水密度 [g/cm ³]				
流入範囲外 気相部水密度 [g/cm ³]	—	—	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

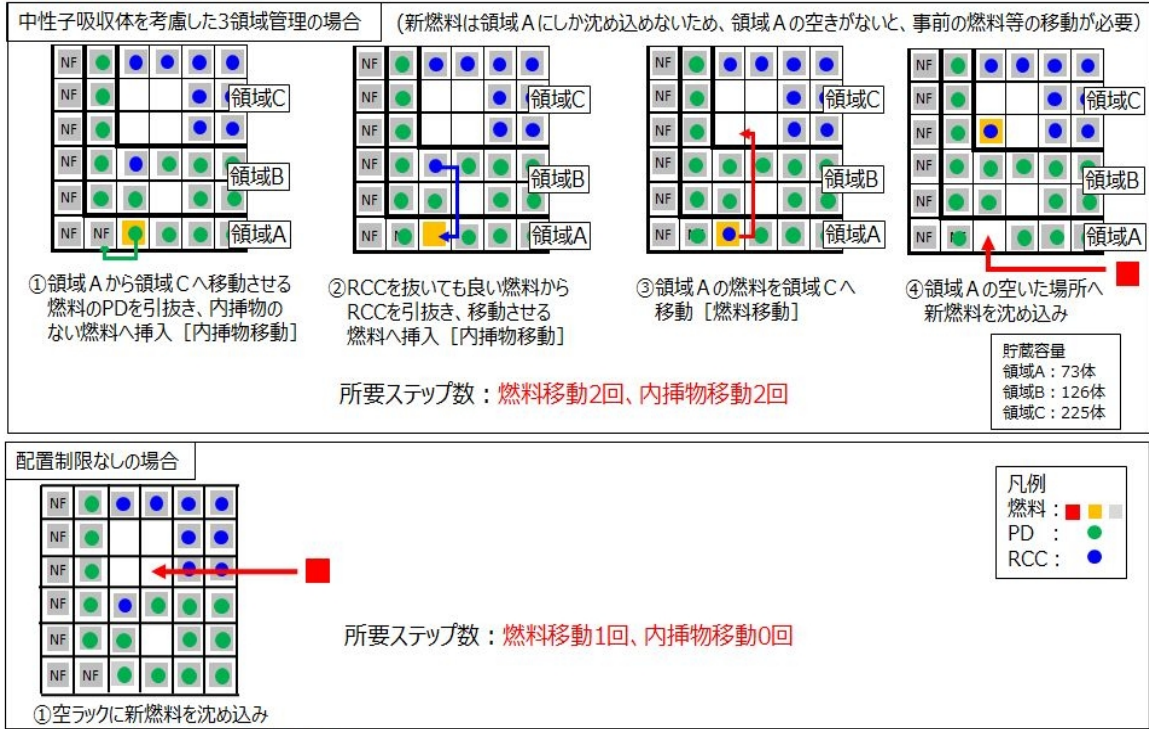
1. はじめに

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 及び図 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。

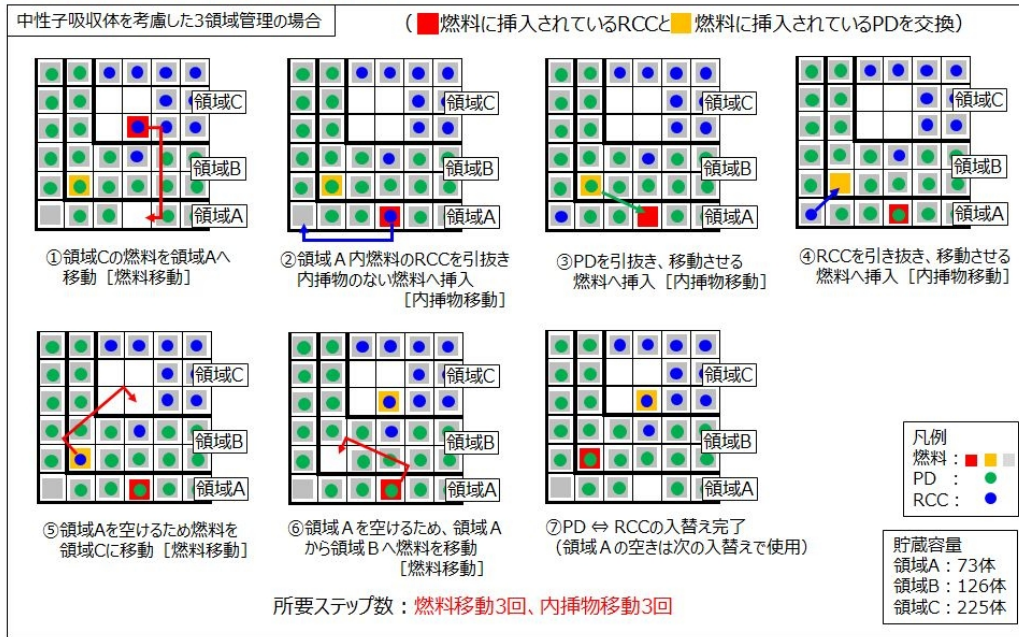
【新燃料 1 体を沈め込む作業】



PD：プラグングデバイス、RCC：制御棒クラス

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

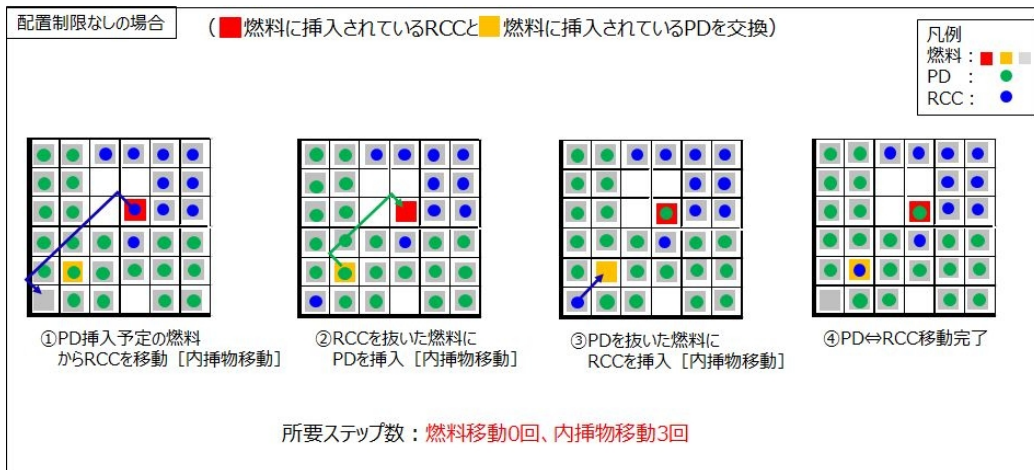


図2 内挿物交換作業における所要ステップ数比較

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、燃料取扱工具操作員、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	

※1 シミュレーション結果を踏まえ設定

※2 15分^{(*)1}/体×157体÷60分

×0.003mSv/h^{(*)2}×1人≒0.1人・mSv

※3 7分^{(*)3}/体×157体÷60分

×0.003mSv/h^{(*)2}×1人≒0.07人・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

<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。

(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、及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	①通常ウラン燃料	②Gd入りウラン燃料	考慮なし	考慮なし
内挿物	①考慮なし	②BP挿入を考慮 ③RCC挿入を考慮	①通常ウラン燃料	②Gd入りウラン燃料	考慮なし	考慮なし
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)	①通常ウラン燃料	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) 解析条件及び結果

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	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。)	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。)
AC/FP 核種の考慮	考慮あり※1	考慮なし (新燃料敷き詰めのため)	考慮なし (新燃料敷き詰めのため)
評価モデル	SFP 全体の水密度を一樣として 全ての水密度範囲(0~1g/cm³) で評価するモデル	流入水の流れや性状(液膜化)を踏まえた水密度を設定するモデル	SFP 全体の水密度を一樣として 全ての水密度範囲(0~1g/cm³)で評価するモデル
	(流入水による燃料棒上の液膜形成を考慮しないモデル)	(流入水が燃料棒上で液膜となることを考慮したモデル)	(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	概念なし	流量： <input type="text"/> m ³ /h (その他、水分条件算出のための条件を設定)	概念なし
流入海水 中の塩素	考慮なし	考慮あり	考慮なし
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/cm³で変化させる評価としたため、水密度 約0.1g/cm³で最適減速状態となり、実効増倍率のピークが発生した。
- 既許可及びパラスタ(ii)の、最適減速(水密度 約0.1g/cm³)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。

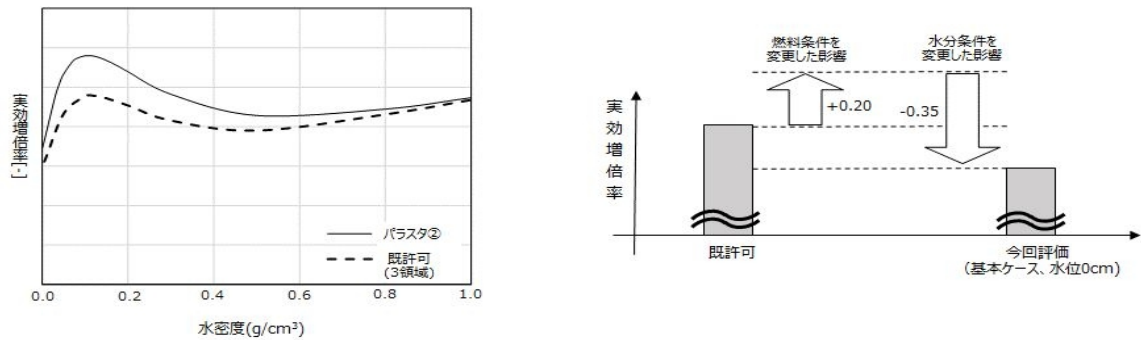


図2 パラメータスタディ(ii) 解析結果

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

燃料集合体内における内部流動に係る条件（燃料棒全周への液膜形成）が、保守的な設定となっていることについて説明する。

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※。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。

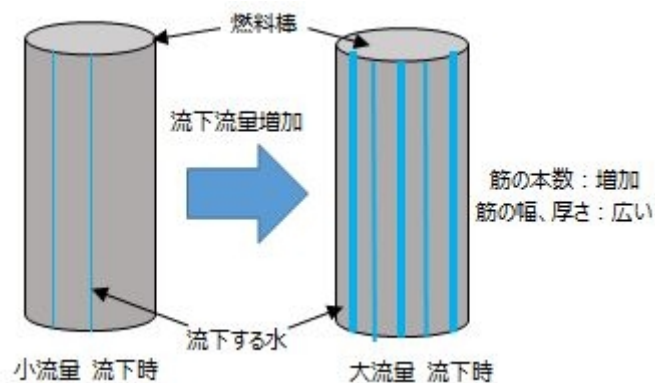


図 1 燃料棒を流下する流量が増加した場合の内部流動変化（イメージ）

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。よって内部流動に係る条件については未臨界性上保守的な条件を設定する。

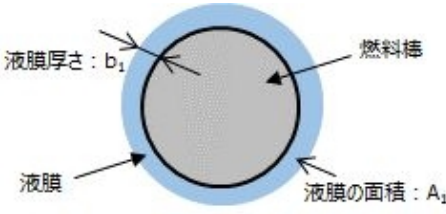
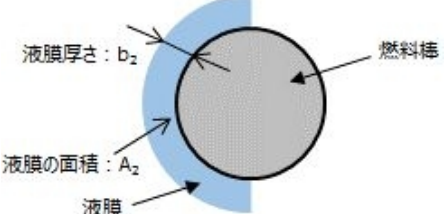
※「可搬型スプレイ放水時の燃料集合体内部流動に関する研究」、日本原子力学会 2017 年秋の大会、関西電力(株)、三菱重工業(株)

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[-]	$Re_1=50$	$Re_2=100$ (Γが2倍になるため)
無次元液膜厚さ[-] (Nusselt の式を仮定)	$NT_1=0.909 \times (4Re_1)^{1/3}$ =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 ²]	$A_1 = \{(10.72+2b_1)^2 - 10.72^2\} / 4$ =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
($Re=\Gamma/\nu$ 、 Γ : 周方向長さ当たりの流量)
- ・ 液膜厚さ評価式には Nusselt の式を使用
($NT=0.909 \times (4Re)^{1/3}$)

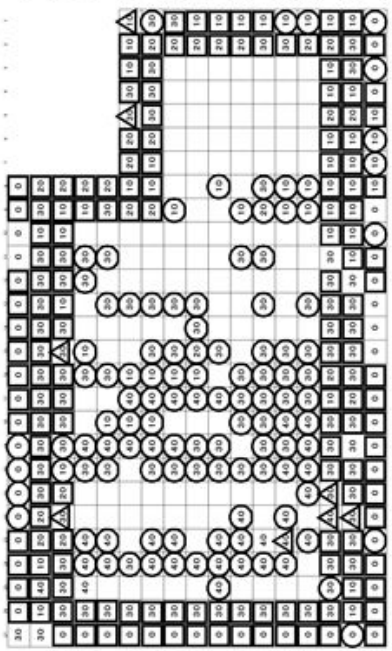
<計算諸元>

燃料棒外径: 10.72[mm]
重力加速度: 9.8 [m/s²]
動粘度: 10^{-6} [m²/s]

以 上

(参考 4) 内挿物の保管状況及び概要

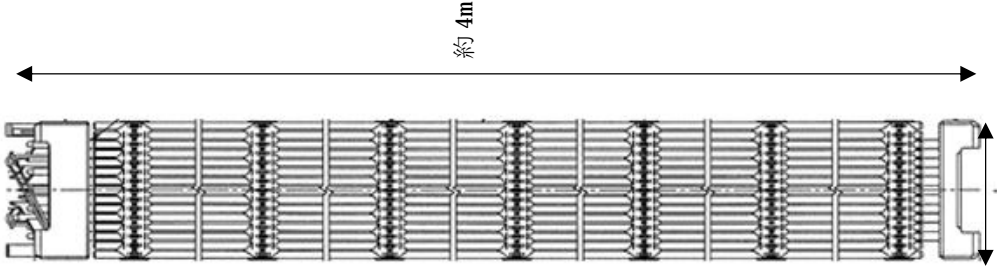
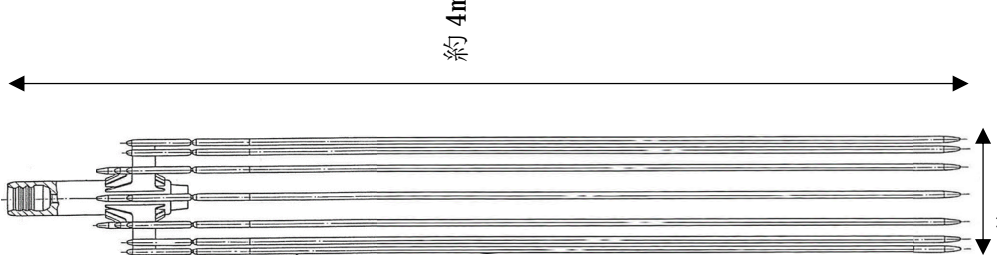
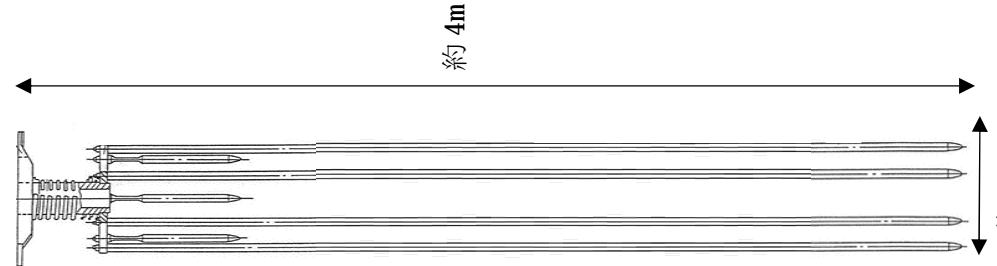
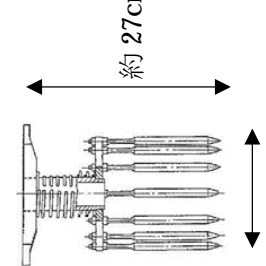
表 1 高浜 1, 2 号炉 SFP 内における内挿物等の保管状況

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 < 10 56体 10 ≤ BU < 20 58体 20 ≤ BU < 30 26体 30 ≤ BU < 40 119体 40 < BU 40体</p>	<p>BU < 10 44体 10 ≤ BU < 20 45体 20 ≤ BU < 30 39体 30 ≤ BU < 40 87体 40 < BU 43体</p>
<p>プラインゲデバイス</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】 □ : プラインゲデバイス、 ○ : 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>プラグングデバイス</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 類似解析との比較
 - 3.1.1 評価条件及び結果
 - 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 **0cm** での実効増倍率
 - 3.2 修正 1 群拡散理論に基づく近似式により求まる実効増倍率挙動との相似性
 - 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、設計値等の現実的な条件を基本としつつ、原則、実効増倍率に対して余裕が小さくなるような条件を各パラメータに設定した基本ケースと、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 図及び第 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

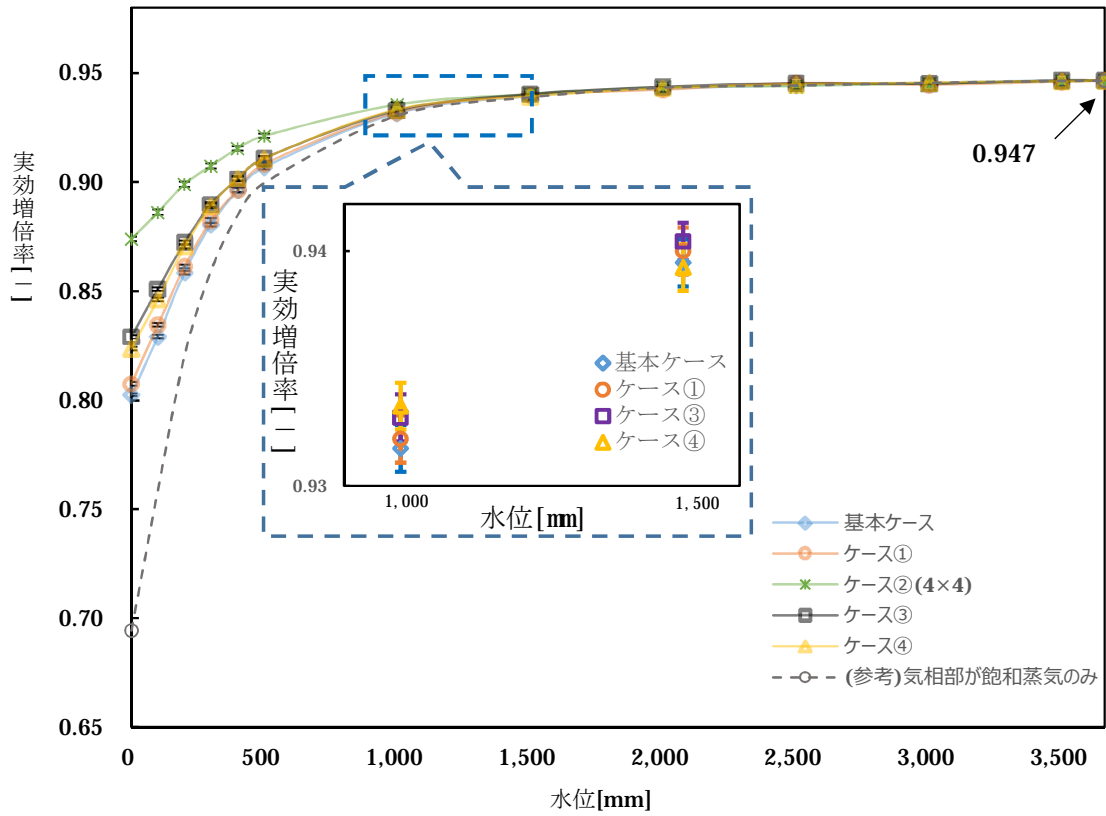
本資料では、上記のような特徴を有し、水位が低下するにつれ単調減少した実効増倍率解析結果の妥当性について確認するとともに、今回解析業務を実施するに当たり適用した品証プロセスを踏まえて解析結果の適切性を説明する。

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

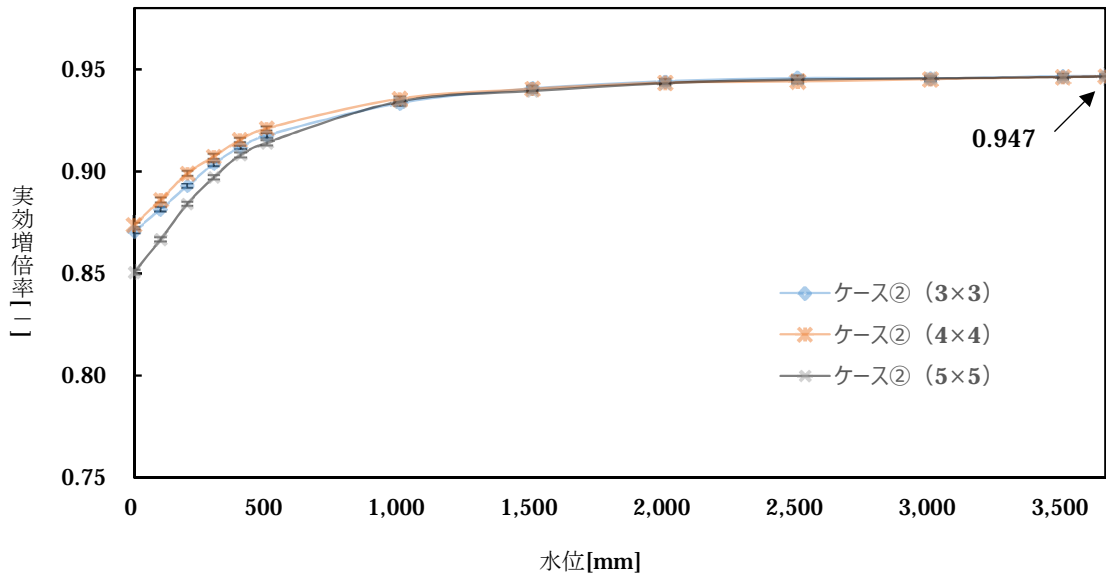
		感度解析ケース			
基本ケース		ケース① (1手順あたりのボ ンブ台数による感 度を確認する解析)	ケース② (「流入範囲を狭める風の影響」 による感度を確認する解析)	ケース③ (「斜め方向に液滴を落下させ燃料集 合体内への流入割合に影響を与える風 の影響」による感度を確認する解析)	ケース④ (スプレイ試験における液滴 径測定箇所毎の結果の差異に よる感度を確認する解析)
燃料 条件	燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP 有限体系)			
	燃料種類	15×15 型 通常ウラン燃料			
	液膜厚さ [mm]				
	燃料集合体内 気相部水密度 [g/cm ³]	0.0006 (飽和蒸気密度)			
	燃料集合体外* 気相部水密度 [g/cm ³]				
	流入範囲外 気相部水密度 [g/cm ³]	—	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^{※1,2} (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^{※1,2} (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る。今回解析において **SCALE** コードへ入力する液膜の幾何形状は円環、物質は軽水であるが、ベンチマーク解析においては核燃料物質と減速材が存在する非均質な管群体系での臨界実験及び軽水を減速材とする臨界実験に対し、ベンチマーク解析結果と臨界実験の実効増倍率が精度よく一致することをもって妥当性確認している。既許認可解析においては同じコードを用い、円柱形状の燃料材等が存在する管群体系下において軽水が存在する状態に対し解析を実施している。またベンチマーク解析用に選定した臨界実験には、気相部に水分がほとんど存在しない状態で中途水位により臨界を達成しているものもあり、当該臨界実験に対しても **SCALE** は精度よく評価できることを確認している。

このことより **SCALE** コードは、「核燃料物質と減速材が存在する非均質な管群体系」、「軽水が存在する体系」及び「水分がほとんどない気相部を伴った部分水位の体系」を評価できるコードであると言える。

3. 解析結果の妥当性確認

実効増倍率が冠水時で最大となり水位低下に伴い単調減少した各ケースでの解析結果の妥当性について、以下の 2 つの観点で確認した。

①類似解析との比較

②修正 1 群拡散理論に基づく近似式により求まる実効増倍率挙動との相似性

3.1 類似解析との比較

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 評価条件及び結果

基本ケース及び類似解析の燃料・水分条件と実効増倍率評価結果を第 3-2 表に示す。類似解析には、既許認可解析で採用した実績がある燃料条件（新燃料敷き詰め、または 3 領域管理）と水分条件（冠水または水密度 $0\sim 1\text{g}/\text{cm}^3$ で一様変化）を持つものを選定した。

ここで、類似解析では体系全体に一律な水密度を設定するのに対し、基本ケースでは、ラックピッチあたりの水分状態を全 424 ラックに等しく設定する点では類似解析と同じであるものの、気相部において燃料集合体の内側と外側で異なる水密度を設定していることから、両者の解析結果の比較を行うにあたり、気相部の水分量を評価する共通の指標を用いることとする。低水密度においては中性子が隣接燃料に遠まで到達し核分裂反応を起こしている（基本ケースにおける中性子の平均自由行程は、冠水時で 0.57cm 、水位 0cm 時で 5.3cm ）と考えられ、移動する間の減速は体系内に保持される水の総量に主に依存すると考えられることから、気相部の水分量を評価する共通の指標として、空間平均水密度^{*}を用い解析結果を

整理する。

基本ケースと類似解析の実効増倍率を空間平均水密度を横軸に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、体系中の水分量を保存した状態で一様水密度へ換算したもの。

<空間平均水密度 ρ の算出方法>

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

ρ_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

ρ_y ：液膜による空間平均水密度への寄与分

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

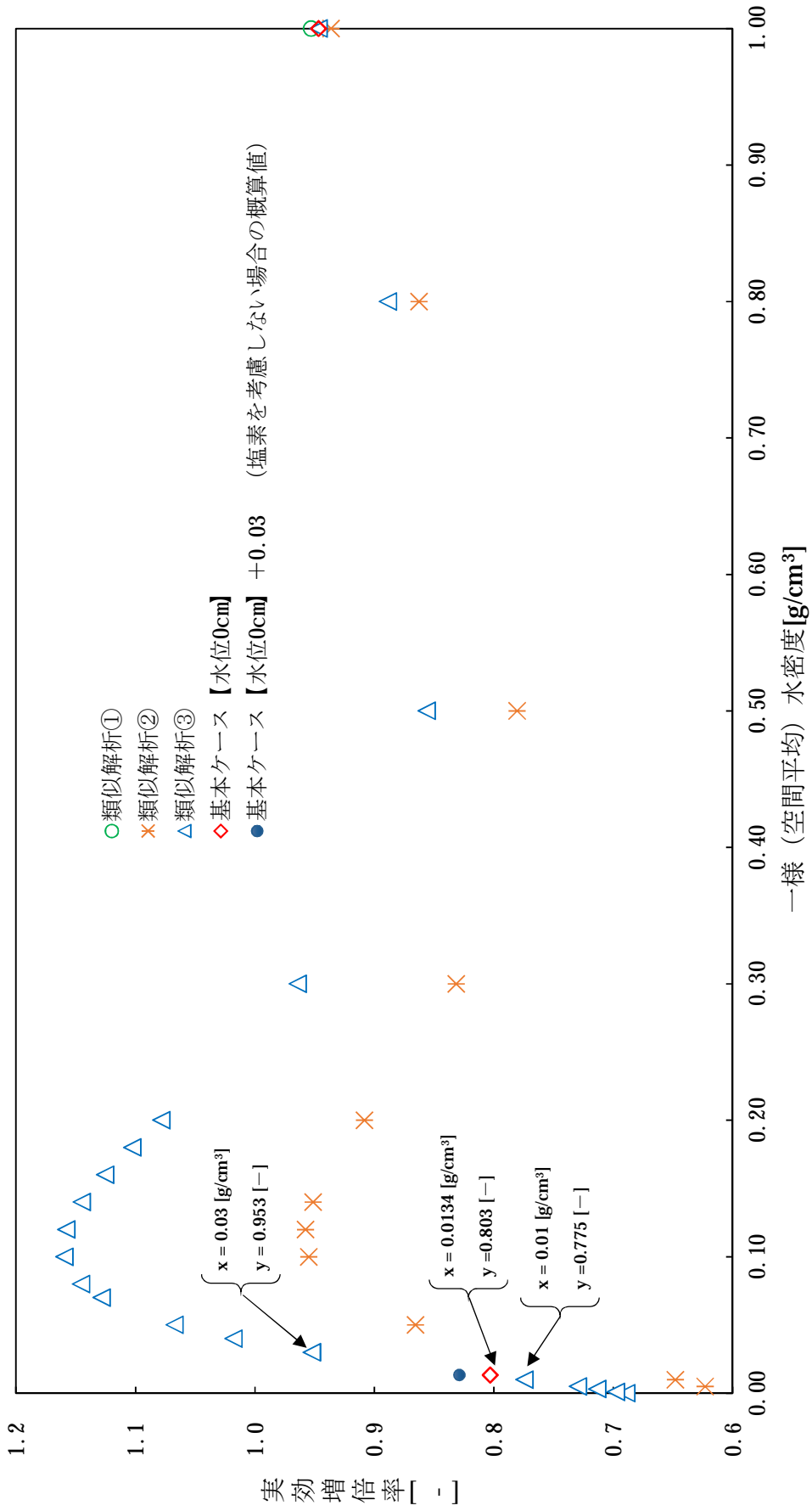
$$\rho_y = \frac{S_m}{S} \times 1[\text{g/cm}^3]$$

(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及び結果

	基本ケース条件	類似解析① (既許認可での 16 条及び 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 ³	1.0 g/cm ³	0~1.0 g/cm ³ で一様変化	0~1.0 g/cm ³ 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 ³)	—	—	—
変動 パラメータ	水位	なし	水密度	水密度
実効増倍率 評価結果	第 3-2 図参照			

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 基本ケース及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【0.937】＜基本ケース【0.947】＜類似解析①【0.953】の順となっている。なお【】内は実効増倍率である。

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は基本ケースと燃料条件が等しく、また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0cm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）【0.775】＜基本ケース（水位0cm）【0.803】＜類似解析③（水密度0.03g/cm³）【0.953】となっている。なお【】内は実効増倍率である。

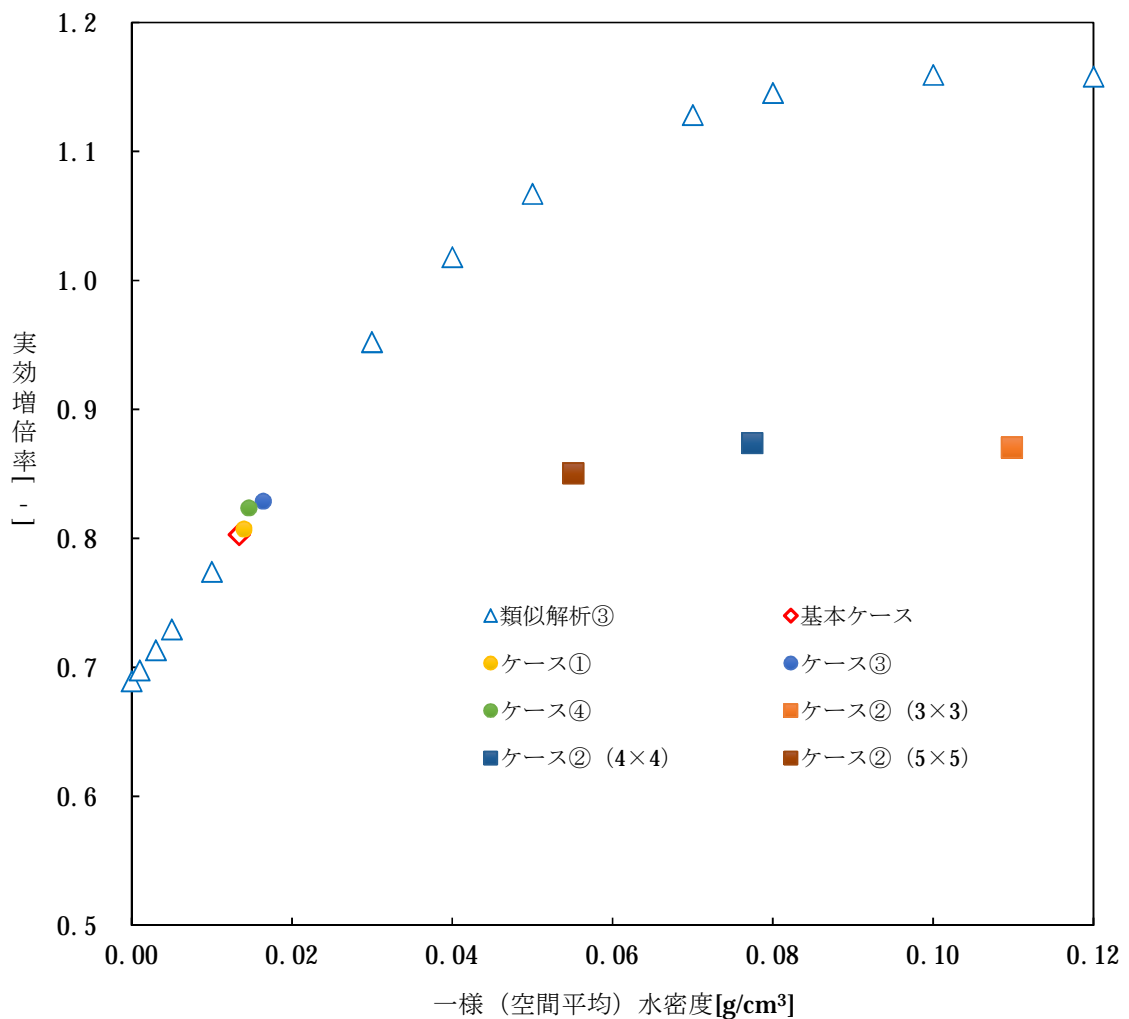
これは、参考2に示すように、空間平均水密度が0g/cm³から約0.1g/cm³の範囲においては、空間平均水密度が大きくなるほど実効増倍率が高くなること、及び基本ケース（水位0cm）の空間平均水密度（0.0134g/cm³）が、0.01g/cm³と0.03g/cm³の間にあることから妥当である。

なお、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の加算を仮定した値は0.833となり、この値でも類似解析③（水密度0.01g/cm³）＜基本ケース＜類似解析③（水密度0.03g/cm³）の関係を満たす。

ここで、感度解析ケース①～④における水位0cmでの実効増倍率についても、気相部の水量を空間平均水密度に換算し、基本ケース及び類似解析③の結果と併せ第3-3図に示す。

感度解析ケース①、③、④の実効増倍率は概ね、類似解析③のプロットを結んだ線上に位置している。感度解析ケース①、③、④はラックピッチ当たりの水分量が全424ラックで同じであり、また液膜厚さも基本ケースと同等であることから、これらは基本ケースと類似の水分状態にあると言え、類似解析③に対する実効増倍率の傾向も基本ケースと同様（類似解析③プロットの線上に概ね乗る）になったものである。

一方で感度解析ケース②の解析結果は他ケースと傾向が異なり、同等の空間平均水密度における類似解析③の結果より小さくなっている。これは、感度解析ケース②は局所に水分が集中することを想定しており、局所領域内は最適減速に近い水分状態となるものの領域内のウラン量（燃料集合体の数）が少なく、領域内から水平方向へ漏れる中性子量が多くなり、核分裂に寄与しない中性子が増えるためである。



第 3-3 図 基本ケース、感度解析ケース（水位 0cm）及び類似解析③の実効増倍率（ケース②での空間平均水密度は、局所範囲内において一様水密度に換算した値）

3.2 修正 1 群拡散理論に基づく近似式により求まる実効増倍率挙動との相似性

SCALE での解析結果は、水位低下に伴い単調減少する傾向を示した。本傾向の妥当性を確認するため、気相部を飽和蒸気として SCALE で計算した水位低下による実効増倍率の単調減少傾向と、修正 1 群拡散理論に基づく近似式により求まる水位低下時の実効増倍率傾向が相似であるかを確認する。

3.2.1 前提条件

- ・修正 1 群拡散理論から導かれる近似式を①式に示す。

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

ここで、 k_{∞} 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 $k_{\infty} = 0.95$ 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。

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

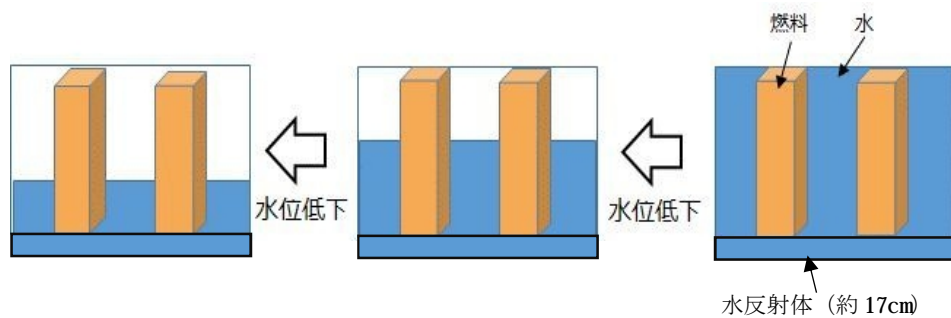
ここで、 δ は外挿距離である。

- 実効増倍率の算出に必要な移動面積 M^2 及び外挿距離 δ 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（軽水減速のタンク型臨界集合体）で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。

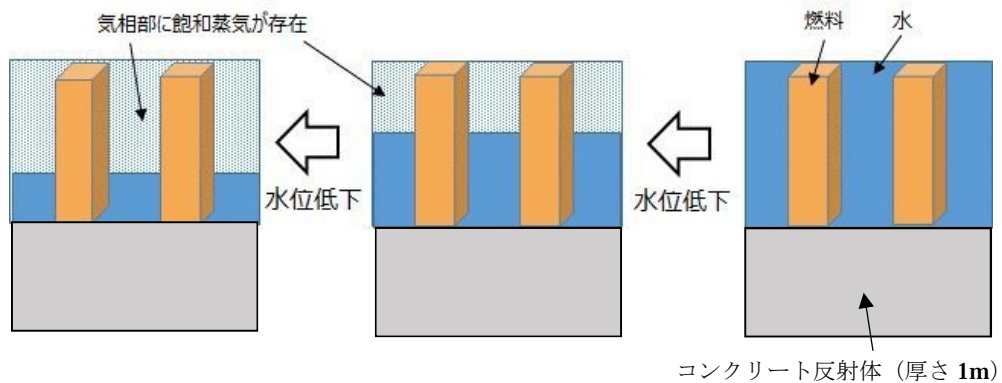
$$M^2 = 37.7、\delta_x = \delta_y = 8.5、\delta_z = 6.3$$

水位（液相高さ Z ）の低下に伴い、②式のバックリングが単調増加し、結果として①式の実効増倍率が単調減少する。

TCA（軽水減速のタンク型臨界集合体）の体系概念図を第 3-4-1 図に、気相部を飽和蒸気とした **SFP** 体系（**SCALE** で計算した体系）の概念図を第 3-4-2 図に示す。



第 3-4-1 図 TCA（軽水減速のタンク型臨界集合体）の体系概念図
（燃料領域＋下部反射体）



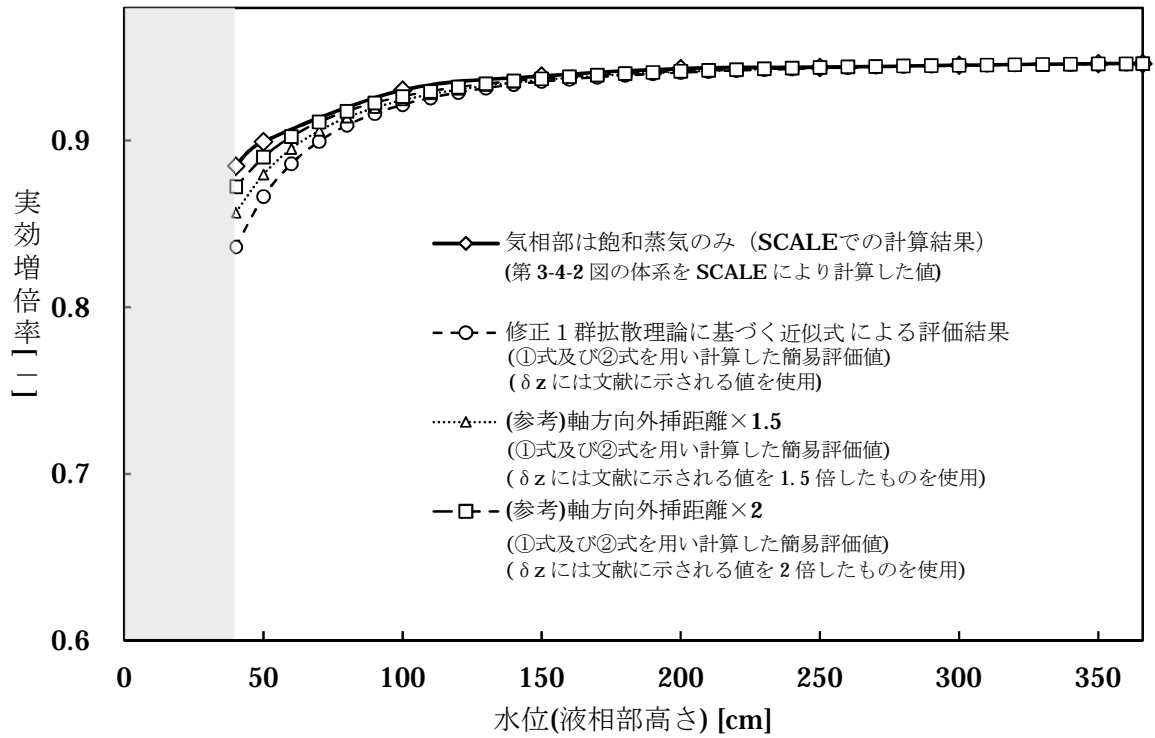
第 3-4-2 図 気相部を飽和蒸気とした SFP 体系の概念図
（燃料領域＋下部反射体）

ここで、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。文献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今回の妥当性確認においては、水位 40cm 以上を確認対象とする。

また SFP 体系では下部反射体として厚さ 1m のコンクリートを設定する等、TCA と比較して軸方向外挿距離が大きくなる要因が存在することから、軸方向外挿距離が変化した際の実効増倍率への影響度合いを傾向として把握するため、参考として文献に示される軸方向外挿距離を 1.5 倍または 2 倍とし、①及び②式を用い評価した実効増倍率も合わせて確認する。

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第 3-5 図に示す。SCALE コードで計算した実効増倍率と、①式及び②式により評価した実効増倍率はどちらも水位低下に伴い単調減少しており相似であることから、SCALE コードを使用した部分水位変化による実効増倍率の単調減少傾向は妥当である。



第 3-5 図 修正 1 群拡散理論に基づく近似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も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を抜粋のうえ、各項目に対する具体的実施事項を第 3-3 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 3-3 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 (1/3)

項目		実施事項	確認結果 ○：実施 ×：未実施	
4.2.2	計算機プログラムの検証 ※1	<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。(①既許可時点、②既許可時点と今回) ①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。</p> <p>②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。</p> <p>【受注者】</p> <p>SCALE コードの検証方法及び検証結果 (ベンチマーク解析等によりコードとしてのV&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している。</p> <p>解析実施前に、SCALE コードの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を確認している。</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>	○
4.2.3	入力根拠の明確化	<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"> 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。 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。 <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>	○
4.2.4	入力結果の確認	<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>エコーバックされたデータにより、図書で定めた通り適切に入力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> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>	○

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 3-3 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 (2/3)

番号	(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	規定内容		
4.3	解析結果の審査※3、 検証	<p>【発注者（事業者）】</p> <p>(1) 発注者は、受注者が解析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><解説、事例等></p> <p>発注者は、受注者が解析結果を、以下の観点で審査していることを、添付 1「解析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"> ・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。 ・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。 ・解析結果が適切であることを確認しているか。 <p>【受注者（解析者）】</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析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><解説、事例等></p> <p>(1)-① 解析結果は、以下の観点で審査を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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を確認する。 ・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。 ・解析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"> a. 類似解析結果との比較（適切な比較対象を選定すること。） b. 物理的又は工学的整合性の確認（解析結果を理論値や経験値と比較） 	<p>【発注者】</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 原解析者以外の、適切な力量を有した検証者（兼、審査者）が、以下の通り解析結果を審査していることを確認した。 <ul style="list-style-type: none"> ・原解析者は、入力根拠を図書として整備し明確にしている。また原解析者により、エコーバックされた入力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。 ・解析業務において汎用計算ソフトウェアは使用していない。 ・解析結果が適切である。 <p>【受注者】</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 解析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> <p>を 確 認 し た。</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3-3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 (3/3)

項目		実施事項	確認結果 ○：実施 ×：未実施
番号	規定内容		
4.3	<p>解析結果の審査^{※3}、 検証</p>	<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を確認する。例として、以下のものがある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新設計の燃料、炉心、系統・設備等を採用した場合 ・新しい解析手順又は計算機プログラムを適用した場合 <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>○</p>
4.5	<p>解析業務の変更管理</p>	<p>➤ 液膜を考慮した解析は今回新たに実施している。</p> <p>【発注者】</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 解析条件変更の都度、変更内容を受注者へ伝えている。 ➤ 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。 <p>【受注者】</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 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。 	<p>○</p>

※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。

- ・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。
- ・SCALE コードを使用した実効増倍率は水位低下に伴い単調減少しており、修正1群拡散理論に基づく近似式により求まる水位変化時の実効増倍率挙動と相似であった。

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、修正1群拡散理論に基づく近似式により求まる実効増倍率の傾向と整合していることを確認している。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
2.42PU	402	1.825
2.98PU	494	1.956
4.24PU	703	2.225
5.55PU	921	2.474

- TABLE10 に、実験結果を内挿などして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0.00833cm²である。

TABLE 10 Critical bucklings, B_c²

Lattice name	B _c ² (×10 ⁻² cm ⁻²)	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
2.42PU	0.808±0.004	on 1972-4-1
2.98PU	0.828±0.004	
4.24PU	0.779±0.003	
5.55PU	0.651±0.002	

- ここで、実効増倍率は以下の式が成り立ち、TABLE10は臨界バックリングの値であるのでk_{eff} = 1が成り立つことから、下式が得られる。

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

$$k_{\infty} = 1 + M^2 B_c^2 \quad \dots \textcircled{1}$$

- TABLE7 には M^2/k_∞ の値が掲載されている。

TABLE 7 Ratios between migration area, M^2 , and infinite multiplication factor, k_∞

Lattice name	M^2/k_∞ (cm ²)
1.50U	28.7±0.4
1.83U	28.8±0.3
2.48U	28.7±0.4
3.00U	27.9±0.2
2.42P U	28.9±1.1
2.98P U	28.8±1.3
4.24P U	30.2±0.9
5.55P U	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①式に代入すると

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

となり、整理すると下式が得られる。

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

したがって、 A の値を TABLE7 から、 B_c^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。

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

- 軸方向、水平方向の反射体節約（両側の値）数値が TABLE6 により与えられている。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
2.42P U	12.5±0.2	14.6±0.3
2.98P U	12.0±0.2	14.1±0.3
4.24P U	11.6±0.2	13.4±0.2
5.55P U	11.3±0.2	13.1±0.2

以上

(参考2) 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している。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、もしくは外側のどちらか一方の水分状態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

燃料集合体の内側の水分状態、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。

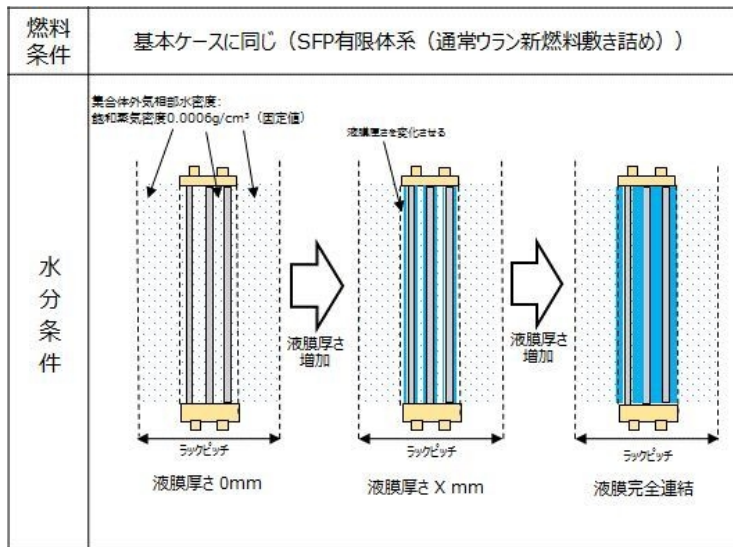


図1 燃料集合体の中の水密度のみを変化させるパラメータスタディ 評価条件

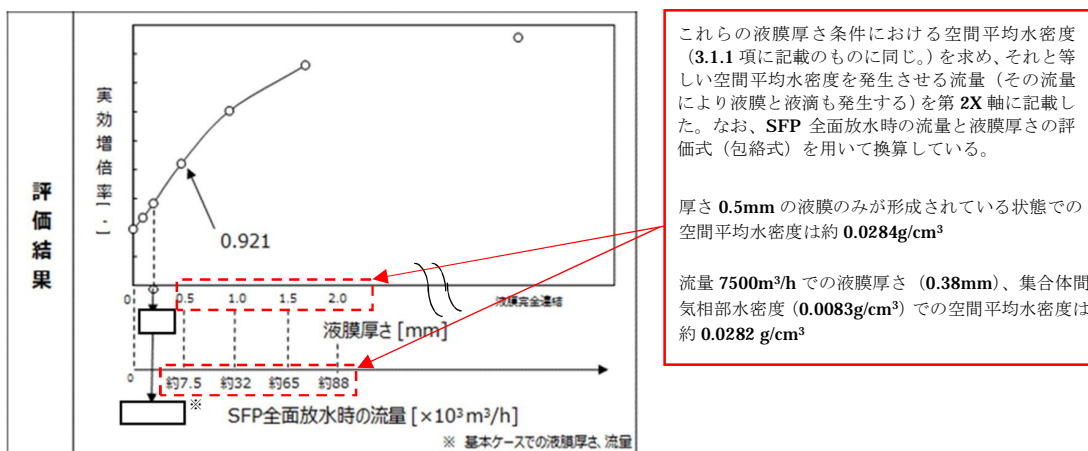


図2 燃料集合体の中のみを変化させるパラメータスタディ 評価結果

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 に示すとおり実効増倍率は、集合体間の気相部水密度が 0g/cm^3 から約 0.1g/cm^3 に上昇するにつれて増加し、その後減少に転じるが、水密度 1g/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、集合体間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 0.1g/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。

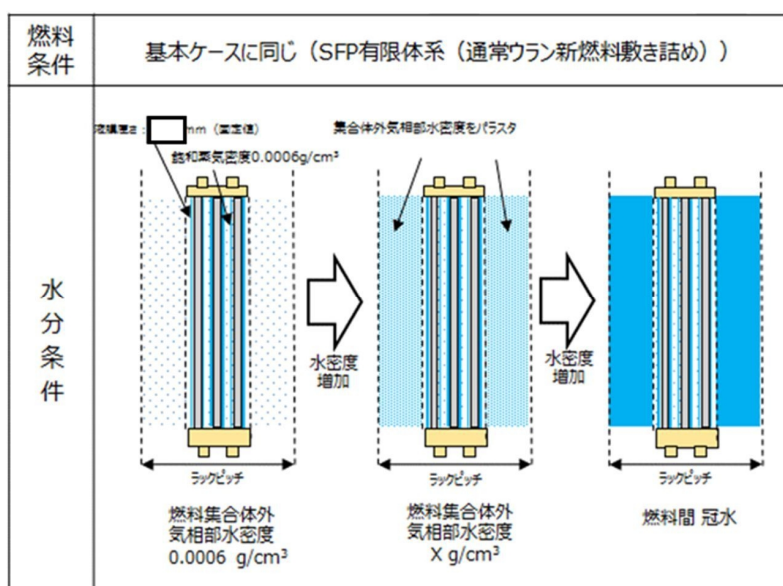


図 3 燃料集合体の外の水密度のみを変化させるパラメータスタディ 評価条件

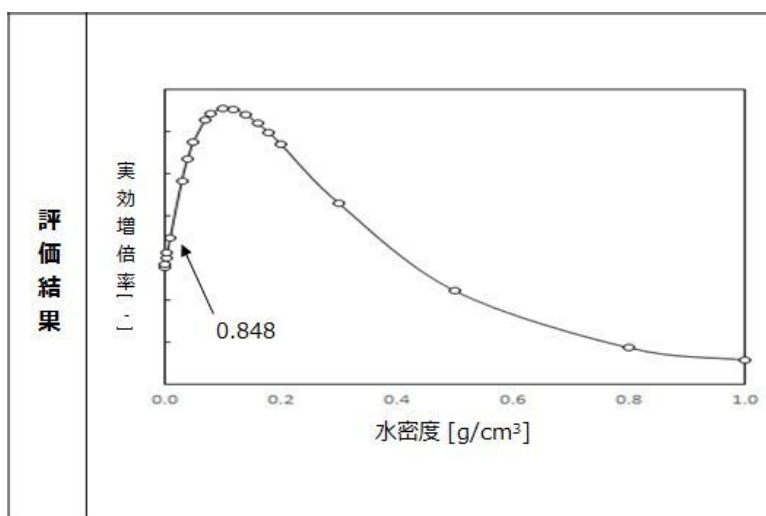


図 4 燃料集合体の外のみを変化させるパラメータスタディ 評価結果

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 及び図 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、実効増倍率は以下の挙動を示すことを確認した。

- ・液膜厚さが厚くなるほど、実効増倍率は大きくなる。
- ・集合体間の気相部水密度が 0～約 0.1g/cm³ の範囲では、水密度が大きいほど実効増倍率は増加する。

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うる状態を十分に包含できる評価手法及び設定としている。

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及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		δk	0.0007 ^(注1)	
の不確定性	95%信頼度×95%確率		ϵ_c	0.0065 ^(注2)	
				不確定性	入力値 ^(注3)
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	ϵ_w	0.0023	<input type="text"/>
		燃料製作公差	ϵ_r	0.0061	—
		—燃料材直径	ϵ_d	(0.0014)	<input type="text"/>
		—燃料材密度	ϵ_l	(0.0038)	<input type="text"/>
		—被覆材内径	ϵ_{cr}	(0.0014)	<input type="text"/>
		—被覆材外径	ϵ_{cd}	(0.0032)	<input type="text"/>
		—燃料体外寸	ϵ_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	ϵ_f	0.0042 ^(注4)	—
		ラックの中心間距離公差	ϵ_p	0.0036 ^(注5)	<input type="text"/>
統計誤差			σ	0.0005	
不確定性合計 ^(注6)			ϵ	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。

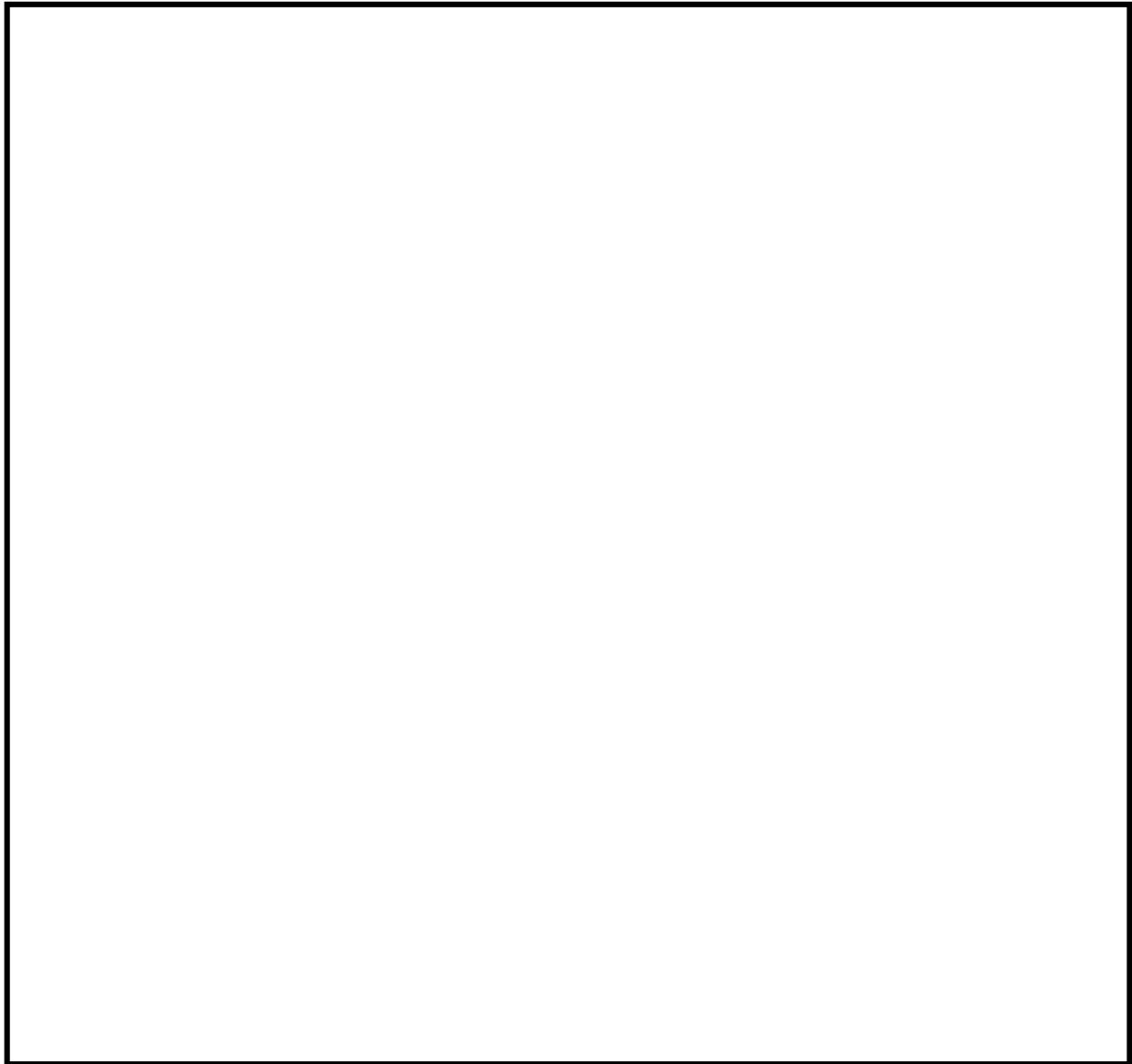
ラックの中心間距離公差による不確定性評価結果

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。

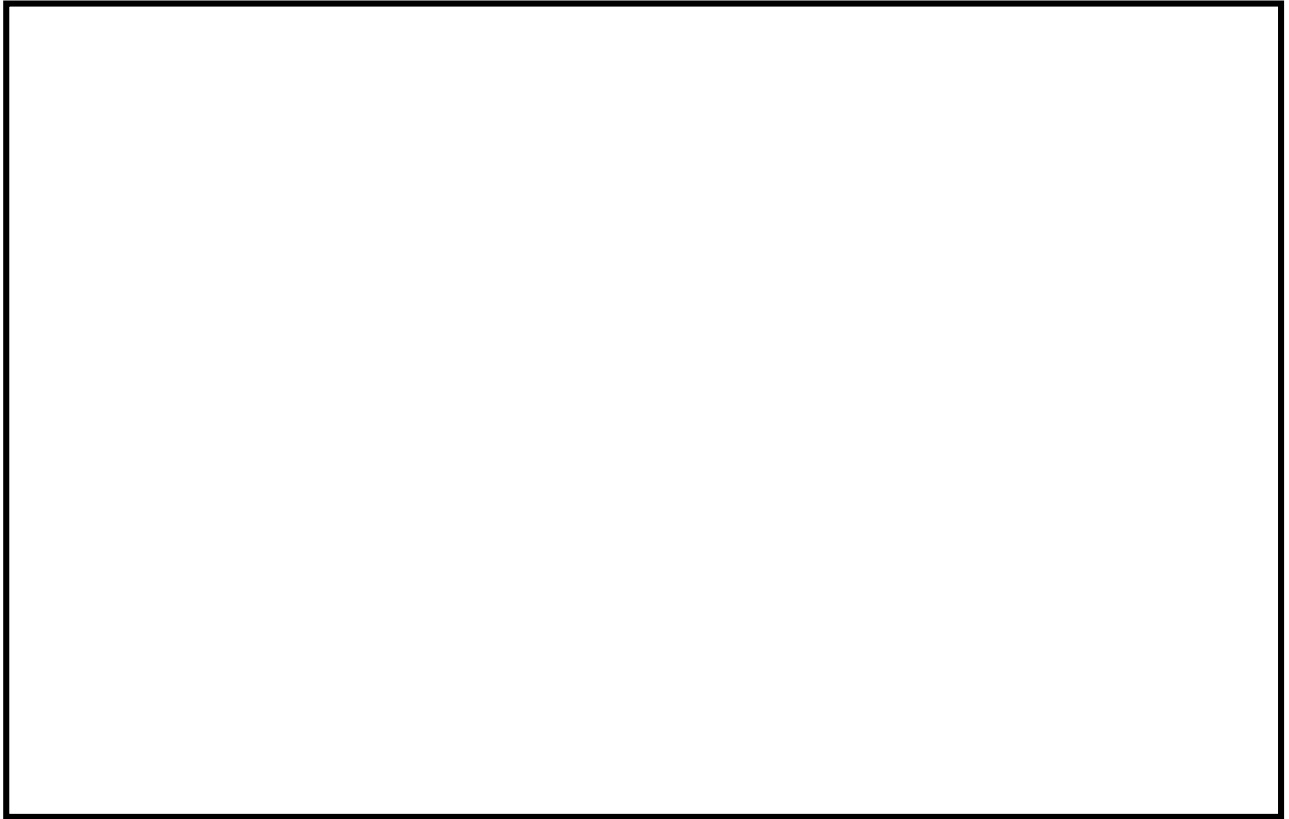
(注6) []

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。



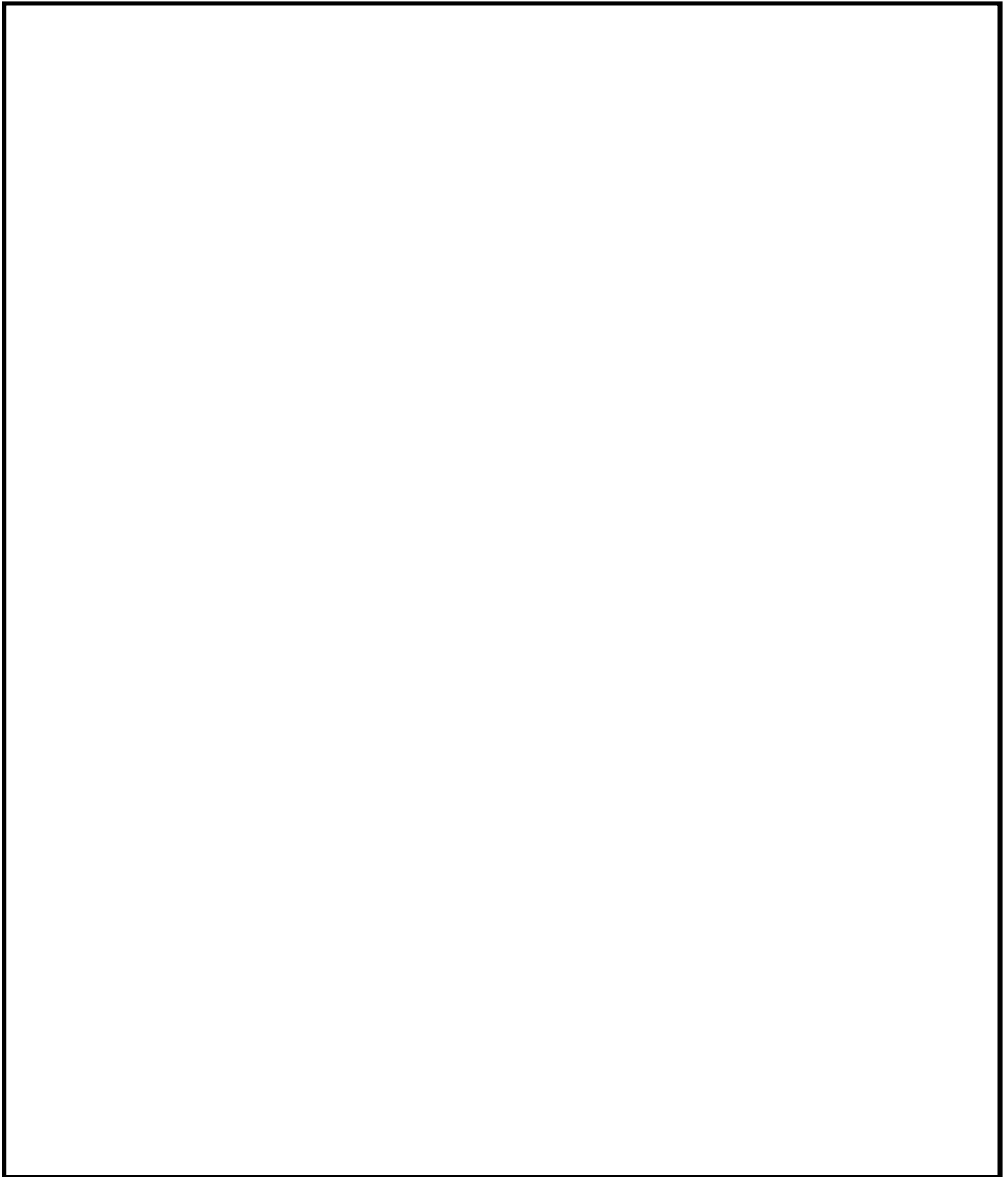
第 4-1 図 製作公差に基づく不確定性評価の計算体系

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

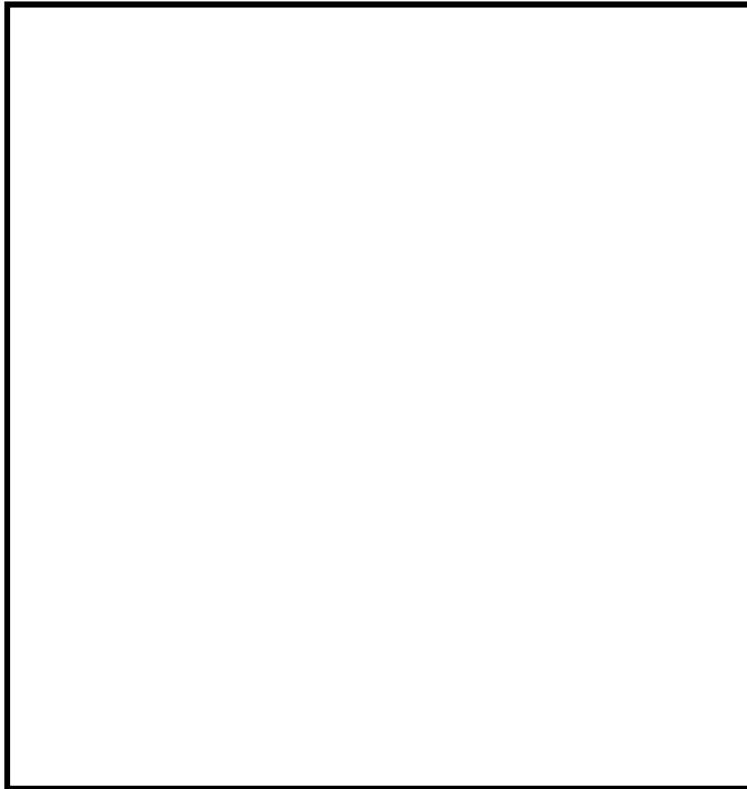
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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。

申請書記載内容に関する補足説明

目 次

1. はじめに
2. 申請書記載内容に関する補足

1. はじめに

2019年6月14日 設置変更許可申請（2022年5月13日補正申請）における申請書記載内容について以下の通り補足する。

2. 申請書記載内容に関する補足

(1) ラック形状に関する記載について

本文五号「二. (2) (ii) a. 構造」において、臨界防止要求に係る設計に関し、「臨界にならないよう配慮したラック形状」と記載している。これは、後段規制^{※1}において、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として、ラック形状が必要であることを明確にするためである。従って、未臨界の維持に必要なラック形状の元となる使用済燃料ピットラックは臨界防止に係る SA 設備であり、設工認^{※2}においても使用済燃料ピットラックは SA 設備と整理している。

本文五号「二. (2) (ii) a. 構造」(2022. 5. 13 補正申請) 抜粋

また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより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、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設計とする。

※1 高浜1号機 既工認添付資料19 燃料取扱設備、新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書 (2016年6月10日認可版抜粋)

第2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 ²³⁵ U濃縮度		□	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
貯蔵領域	領域A	燃焼度0MWD/tの燃料を貯蔵	—
	領域B	燃焼度20,000MWD/tの燃料を貯蔵	
	領域C	燃焼度50,000MWD/tの燃料を貯蔵	
(ラック)		—	配置は第5図参照
ラックタイプ		アングル型	—
ラックの中心間距離		□	(注1)
材 料		ステンレス鋼	—
厚 さ		□	(注2)
内のり		□	(注1)
(使用済燃料ピット内の水分条件)		純水	発生しているほう素は考慮しない
密度		0.0~1.0g/cm ³	—

(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

ラック形状に係る条件

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。

※2 高浜1号機 既工認資料 「核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設 6 (1) 基本設計方針」

表1 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の主要設備リスト (2016年6月10日認可版抜粋)

表1 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の主要設備リスト (2/13)

設備区分	機器区分	名称	変更前			変更後		
			設計基準対象施設 ^(注1)		重大事故等対処設備 ^(注2)	設計基準対象施設 ^(注1)		重大事故等対処設備 ^(注2)
			耐震重要度 分類	機器クラス	設備分類	耐震重要度 分類	機器クラス	設備分類
使用済燃料貯蔵設備	使用済燃料貯蔵槽	使用済燃料ピット	S	クラス3	—	変更なし	常設耐震/ 防止 常設/緩和	SAクラス2
		使用済燃料ピット Aエリア、Bエリア (3号機設備、1・2・3・4号機共用)	S	クラス3	—	変更なし	常設耐震/ 防止 常設/緩和	SAクラス2
		使用済燃料ピット Aエリア、Bエリア (4号機設備、1・2・3・4号機共用)	S	クラス3	—	変更なし	常設耐震/ 防止 常設/緩和	SAクラス2
	使用済燃料ピットラック	S	—	—	変更なし	常設耐震/ 防止 常設/緩和	—	
	使用済燃料貯蔵ラック	使用済燃料ラック Aエリア、Bエリア (3号機設備、1・2・3・4号機共用)	S	—	—	変更なし	常設耐震/ 防止 常設/緩和	—
使用済燃料ラック Aエリア、Bエリア (4号機設備、1・2・3・4号機共用)		S	—	—	変更なし	常設耐震/ 防止 常設/緩和	—	

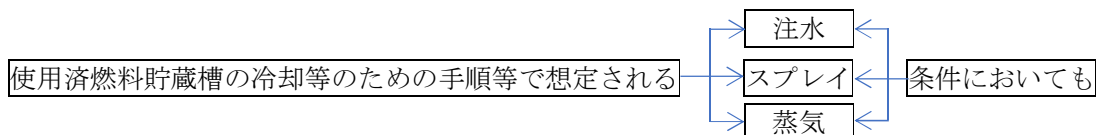
使用済燃料ピットラックはSA設備として整理している

なお、「二. (2) (ii) a. 構造」に記載している臨界防止に係る記載と、設置許可基準規則との関連性を参考1に示す。

(2) 手順等で想定される対象の記載について

a. 補正申請時の考え方

本文五号及び添付書類八に「～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においても臨界を防止できる～」と記載していた。各語句の関係は以下の通りであり、「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」が修飾しているのは「注水及びスプレイや蒸気条件」であり、また、「条件」は、「注水」、「スプレイ」、「蒸気」を、それぞれ後ろから修飾している。



b. 記載の適正化に向けての考え方

「使用済燃料貯蔵槽の冷却のための手順等で想定される」の記載が「注水 (条件)」、「スプレイ (条件)」及び「蒸気条件」を3つとも修飾していることが正確に読み取れるよう、

「～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、スプレー及び蒸気条件においても臨界を防止できる～」と変更することを検討する。

(3) 燃料配置に係る記載について

a. 補正申請時の考え方

既許可（2016.4.20 許可）及び補正申請（2022.5.13 申請）における臨界防止のための「燃料配置」に係る記載について、本文五号での記載を第 1-1 表に、添付書類八での記載を第 1-2 表に示す。

- ・ 本文五号の「燃料配置」は、燃料の種類や燃焼度等を踏まえた配置も意図した広義の意味で記載しており、参考 2 に示すように、燃焼度等による配置制限を設けていないプラントにおいても同様の記載としている。また、燃料配置は設備には該当せず、その具体的運用については保安規定^{※3}にて定めている。
- ・ 添付書類八では、「燃料配置」についてより具体的に、どのような燃料配置に対して未臨界を維持できる設計とするかを記載している。既許可では「燃料の初期濃縮度、燃焼度及び使用済燃料ピット用中性子吸収体の有無の条件による貯蔵領域を設定し、その領域で最も反応度の高い燃料体等が当該領域の全てのラックに貯蔵された状態」と記載しており、今回の補正申請では「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」と記載していた。

なお、最も反応度の高い新燃料とは、「本文五号 ハ. (2)」及び「添付書類八 3.2.3(2)」に記載されている濃縮度約 4.6wt%のウランを使用した燃料棒のみで構成した燃料集合体のことであり、ガドリニア入り燃料集合体の場合は、一部の燃料棒が濃縮度約 3.0wt%であるため、これよりも反応度は低くなる。設置許可及び設工認の記載比較を参考 3 に示す。

また、既許可では、48 GWh/t ウラン燃料（初期濃縮度 約 4.0wt%）と 55GWh/t ウラン燃料（初期濃縮度 約 4.6wt%）とで貯蔵可能な条件を区別するため、燃料貯蔵領域の条件の一つとして「燃料の初期濃縮度」と添付書類八に記載していた。

第 1-1 表 本文五号における「燃料配置」に係る記載

既許可(2016.4.20許可)	補正申請(2022.5.13申請)
<p>ニ. 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造及び設備</p> <p>(2) 核燃料物質貯蔵設備の構造及び貯蔵能力</p> <p>(ii) 使用済燃料貯蔵設備</p> <p>a. 構造</p> <p>(～略～)</p> <p>また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより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、臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置及び制御棒クラストと同等の反応度抑制効果を有する中性子吸収体（以下「使用済燃料ピット用中性子吸収体」という。）配置においてスプレイヤ蒸気条件においても臨界を防止できる設計とする。</p>	<p>ニ. 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造及び設備</p> <p>(2) 核燃料物質貯蔵設備の構造及び貯蔵能力</p> <p>(ii) 使用済燃料貯蔵設備</p> <p>a. 構造</p> <p>(～略～)</p> <p>また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより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、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イヤ蒸気条件においても臨界を防止できる設計とする。</p>

第1-2表 添付書類八における「燃料配置」に係る記載

既許可(2016.4.20許可)	補正申請 (2022.5.13申請)
<p>4. 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設 4.1 燃料の取扱設備及び貯蔵設備 4.1.2 重大事故等時 4.1.2.1 概要 (～略～)</p> <p>また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより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滿かつ水位低下が継続する場合に、臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置及び使用済燃料ピット用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臨界を防止する設計とする。</p> <p style="text-align: right;">→ 具体的に記載</p> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>燃料配置及び使用済燃料ピット用中性子吸収体配置については、燃料の初期濃縮度、燃焼度及び使用済燃料ピット用中性子吸収体の有無の条件による貯蔵領域を設定し、その領域で最も反応度の高い燃料体等が当該領域の全てのラックに貯蔵された状態で未臨界を維持できる設計とする。</p> </div> <p style="text-align: right;">(～略～)</p>	<p>4. 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設 4.1 燃料の取扱設備及び貯蔵設備 4.1.2 重大事故等時 4.1.2.1 概要 (～略～)</p> <p>また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより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滿かつ水位低下が継続する場合に、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イや蒸気条件においても臨界を防止する設計とする。</p> <p style="text-align: right;">→ 具体的に記載</p> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>具体的には、以下の条件で評価し、制御棒クラスタ等の中性子吸収効果を考慮せずに未臨界を維持できる設計とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 </div> <p style="text-align: right;">(～略～)</p>

※3 高浜発電所保安規定 第 95 条

(新燃料の貯蔵)

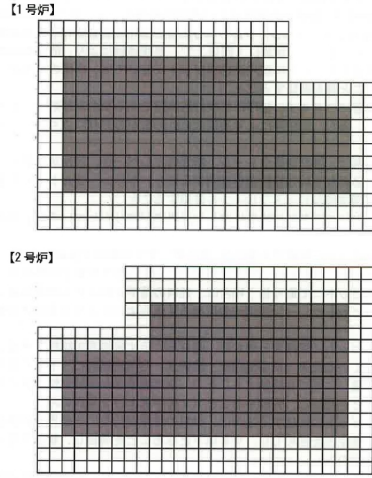
- 第 95 条 原子燃料課長は、新燃料を貯蔵する場合は、次の事項を遵守する。
- (1) ウラン新燃料は、新燃料貯蔵庫または使用済燃料ピット（以下、「貯蔵施設」という。）に貯蔵すること。ウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料は、使用済燃料ピットに貯蔵すること。また、1ヶ月に1回以上^{※1}、巡視点検により、貯蔵状況等に異常のないことを確認するとともに使用済燃料ピットにおいては、水面の清浄度および異物の混入がないこと等を確認すること。
 - (2) 貯蔵施設の目につきやすい箇所に燃料貯蔵施設である旨および貯蔵上の注意事項を掲示すること。また、施設等により取扱者以外の者がみだりに立ち入りできない措置を講じること。
 - (3) ウラン新燃料は、補助建屋クレーン、新燃料エレベータ、使用済燃料ピットクレーンのうちから必要な燃料取扱設備を使用すること。ウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料は、使用済燃料ピットクレーンを使用すること。
 - (4) 貯蔵施設において新燃料が臨界に達しない措置が講じられていることを確認すること。
 - (5) 使用済燃料ピットに貯蔵する場合は、原子炉に全ての燃料が裝荷されている状態で、使用済燃料ピットに1炉心以上の使用済燃料ラックの空き容量を確保すること。
 - (6) 使用済燃料ピットにて取り扱う場合は、燃料の落下を防止する措置を講じること。
 - (7) 使用済燃料ピットクレーン使用時の吊荷の重量および吊上げ上限高さを管理すること。
 - (8) 使用済燃料ピットに貯蔵する場合は、図95に示す未臨界が維持できることをあらかじめ確認している条件（初期濃縮度、燃焼度、使用済燃料ピット用中性子吸収体の有無および配置）に基づき移動することで、実効増倍率が不確実性を含めて0.98以下となることを確認し、管理すること（1号炉および2号炉のみ）。
 - (9) 使用済燃料ピットに貯蔵する場合は、燃料の移動開始前に承認評価を行い、実効増倍率が不確実性を含めて0.98以下となることを確認し、管理すること（3号炉および4号炉のみ）。
 - (10) 使用済燃料ピット内の新燃料の移動にあたっては、誤配置を防止する措置を講じること。
2. 原子燃料課長は、第1項(8)、(9)における燃料移動の実施計画を作成し、原子炉主任技術者の確認を得て、所長の承認を得る。

※1：毎月1日を始期とする1ヶ月間に1回実施（以下、本章において同じ）。

具体的な燃料貯蔵領域は保安規定にて定めている

高浜発電所 第95条-1/2

図 9 5 燃料貯蔵領域図



	55GW/t 燃料 (初期濃縮度約 4.6wt%)		48GW/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

高浜発電所 第95条-2/2

本文五号「ハ.(2)」抜粋 (既許可：2016.4.20 許可)

(2) 燃料体

(i) 燃料材の種類

二酸化ウラン焼結ペレット (一部ガドリニアを含む)

ウラン235濃縮度

ウラン 235 濃縮度の最大は約 4.6wt%である

(略)

取替燃料 約4.6wt%以下

ガドリニア入り燃料については、濃縮度約 3.0wt%以下、ガドリニア濃度約 10wt%以下

添付書類八「3.2.3(2)」抜粋 (既許可：2016.4.20 許可)

(2) 燃料集合体

燃料集合体には、二酸化ウラン燃料集合体とガドリニア入り二酸化ウラン燃料集合体がある。

燃料集合体は、第 3.2.2 図及び第 3.2.3(1) 図に示すように、15×15 の正方配列を形成する燃料棒 204 本、制御棒案内シンプル 20 本、炉内計装用案内シンプル 1 本、支持格子 7 個、上部ノズル及び下部ノズル各 1 個等で構成する。

二酸化ウラン燃料集合体は、すべての燃料棒が二酸化ウラン燃料棒であり、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料集合体は、燃料棒のうち 20 本又は 16 本がガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒である。

通常、燃料集合体は同じ濃縮度の燃料棒で構成されるが、ガドリニア入り燃料集合体には濃縮度の異なる燃料棒が混在する

b. 記載の適正化に向けての考え方

「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」との記載については、許可本文及び添付書類八の燃料集合体に係る記載と関連付けて分かるように、「濃縮度が最も高い取替燃料が新燃料として全てのラックに貯蔵された状態を設定する」と変更することを検討する。

(4) 最適評価手法に係る記載見直しについて

a. 補正申請時の考え方

補正申請（2022.5.13申請）における添付書類八 4.1.2.1項に係る記載については、以下の通りとしていた。

赤線部は評価の概要・考え方を記載したものであり、重大事故等対応のため整備している手順や設備等に基づき設定する基本ケース、および各パラメータに対し発生する不確かさ影響を考慮した感度解析ケースでも未臨界が維持できることを確認する旨を記載していた。

青線部は今回未臨界性評価で設定する具体的条件を記載したものであり、既許認可解析における設定から変更したものを抜粋して記載し、後段規制においてこれら設定を考慮した解析が行われることを確実にするために記載していた。

補正申請書（2022.5.13申請）添付書類八 4.1.2.1項における記載

～略～

具体的には、以下の条件で評価し、制御棒クラスタ等の中性子吸収効果を考慮せずに未臨界を維持できる設計とする。

- ・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、⁽¹⁾及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⁽²⁾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。

(1) 基本ケースを指す。

(2) 感度解析ケースを指す。

b. 記載の適正化に向けての考え方

添付書類十 6.5.1項「解析条件設定の考え方」を基に見直すこととし、評価の考え方と評価条件に係る記載を明確に区別して読み取れるよう、以下のように変更することを検討する。

【前段：評価の考え方の部分】

解析の条件設定については、設計値等の現実的な条件を基本としつつ、原則、実効増倍率に対して余裕が小さくなるような設定とする。また、解析条件の不確かさ影響を考慮する必要がある場合には、影響評価において感度解析を行う。

【後段：評価条件の部分】

- ・燃料配置については、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう、濃縮度が最も高い取替燃料が新燃料として全てのラックに貯蔵された状態を設定する。
- ・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。液相部は純水とし、気相部においては、飽和蒸気の状態を考慮する。
- ・流量については、現実的な条件となるよう、重大事故等時対応のため整備している注水及び放水に係る手順全てが同時に実施されたとして設定するとともに、不確かさとして設置されるポンプの全数起動を考慮する。
- ・流入範囲及び流量分布については、現実的な条件となるよう、全流量がラック面積に対し一様に流入するものとして設定するとともに、不確かさとして全流量が局所領域に集中することを考慮する。
- ・燃料集合体内へ流入する水量の割合については、現実的な条件となるよう、ラックの中心間距離と燃料集合体外寸から求まる面積比等から設定するとともに、不確かさとして斜め方向から液滴が流入することを考慮する。
- ・燃料集合体内に流入した水は、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう、全てが液膜となるように設定する。
- ・液膜については、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう、燃料棒全周に対し一様に形成されるとした上で、厚くなるように設定する。
- ・放水の液滴径については、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう、スプレー試験等で得られた知見を踏まえ設定するとともに、不確かさとして有意であると考えられる値の下限を考慮する。
- ・海水中の塩素による中性子吸収を考慮することとし、塩素濃度については、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう、海水の塩分濃度の下限値を踏まえ設定する。

(5) 制御棒クラスタ等の中性子吸収効果に係る記載について

添付書類八 4.1.2.1 項での評価条件に係る記載における「制御棒クラスタ等の中性子吸収効果を考慮せずに」の“等”については、制御棒クラスタ以外の内挿物等を意図して記載していた。

重大事故等時において、実機使用済燃料ピットに存在しうるものに対する中性子吸収効果の考慮有無について第 2 表に示す。

第 2 表 54 条 2 項に係る未臨界性評価における中性子吸収効果の考慮有無

中性子吸収物質	既許可 (2016. 4. 20 許可)	補正申請 (2022. 5. 13 申請)
制御棒クラスタ	○	×
使用済燃料ピット用 中性子吸収棒集合体	○	×
ピット水に残存するほう素	×	×
バーナブルポイズン	×	×
プラギングデバイス	×	×
海水由来の塩素（気相部）	×	○

【凡例】○：考慮する、×：考慮しない

(6) 今回申請の理由について

a. 補正申請時の考え方

第3-1表及び第3-2表に示すとおり、今回の未臨界性評価において削除する使用済燃料ピット用中性子吸収体は、既許可においては、使用済燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備の双方に本文の記載があるため、該当箇所の記事を一部変更するという意図で変更の理由を記載していた。

(申請書記載)

四、変更の理由
1号炉及び2号炉の使用済燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備を一部変更する。

「本文五号 二. (2) (ii) 使用済燃料貯蔵設備」

「本文五号二. (3) (iii) 使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備」

b. 記載の適正化に向けての考え方

今回の申請理由、設備・運用の変更内容及び本文の変更を加える箇所が明確となるよう、以下のように変更することを検討する。

(記載の適正化に向けた検討)

四、変更の理由
燃料取扱時における運用面の安全性向上を図るため、使用済燃料ピット用中性子吸収体の廃止並びに未臨界維持に係る燃料の初期濃縮度、燃焼度及び使用済燃料ピット用中性子吸収体の有無の条件による貯蔵領域の設定の廃止を行うことから、1号炉及び2号炉の使用済燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備を一部変更する。

申請理由

設備・運用の変更内容

本文の変更を加える箇所

なお、運用面の安全性向上とは、使用済燃料ピットにおける燃料および内挿物の取り扱い頻度を大幅に削減することにより、作業員の被ばく量低減や、誤配置および誤操作（燃料集合体の使用済燃料ピットラックへの乗上げ、構造物との接触等）の低減を図ることである。

第3-1表 使用済燃料貯蔵設備に係る記載

既許可(2016.4.20許可) 本文五号	既許可(2016.4.20許可)添付書類八
<p>ニ. 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造及び設備</p> <p>(2) 核燃料物質貯蔵設備の構造及び貯蔵能力</p> <p>(ii) 使用済燃料貯蔵設備</p> <p>a. 構造 (～略～)</p> <p>また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより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滿かつ水位低下が継続する場合に、臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置及び制御棒クラスタと同等の反応度抑制効果を有する中性子吸収体（以下「使用済燃料ピット用中性子吸収体」という。）配置においてスプレーイや蒸気条件においても臨界を防止できる設計とする。</p>	<p>4. 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設</p> <p>4.1 燃料の取扱施設及び貯蔵設備</p> <p>4.1.2 重大事故等時</p> <p>4.1.2.3 主要設備及び仕様</p> <p>燃料の取扱施設及び貯蔵設備（重大事故等時）の主要設備及び仕様を第4.1.2表に示す。</p> <p>第4.1.2.1表 燃料の取扱施設及び貯蔵設備（重大事故等時の設備仕様）</p> <p>使用済燃料ピット用中性子吸収体</p> <p>a. 制御棒クラスタ</p> <p>b. 使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体 (～略～)</p>

第3-2表 使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備に係る記載

既許可(2016.4.20許可) 本文五号	既許可(2016.4.20許可) 添付書類八
<p>ニ. 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造及び設備</p> <p>(3) 核燃料物質貯蔵用冷却設備の構造及び冷却能力</p> <p>(iii) 使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備</p> <p>b. 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</p> <p>(～略～)</p> <p>～臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置及び使用済燃料ピット用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、～</p>	<p>4. 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設</p> <p>4.3 使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備</p> <p>4.3.2 設計方針</p> <p>(2) 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</p> <p>(～略～)</p> <p>使用済燃料ピットについては、「4.1 燃料の取扱設備及び貯蔵設備 4.1.2 重大事故等時」にて記載する。</p>
<p>4. 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設</p> <p>4.1 燃料の取扱設備及び貯蔵設備</p> <p>4.1.2 重大事故等時</p> <p>4.1.2.3 主要設備及び仕様</p> <p>燃料の取扱設備及び貯蔵設備（重大事故等時）の主要設備及び仕様を第4.1.2表に示す。</p> <p>第4.1.2.1表 燃料の取扱設備及び貯蔵設備（重大事故等時の設備仕様）</p> <p>使用済燃料ピット用中性子吸収体</p> <p>a. 制御棒クラスタ</p> <p>b. 使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体</p> <p>(～略～)</p>	<p>4.1 燃料の取扱設備及び貯蔵設備</p> <p>4.1.2 重大事故等時</p> <p>4.1.2.3 主要設備及び仕様</p> <p>燃料の取扱設備及び貯蔵設備（重大事故等時）の主要設備及び仕様を第4.1.2表に示す。</p> <p>第4.1.2.1表 燃料の取扱設備及び貯蔵設備（重大事故等時の設備仕様）</p> <p>使用済燃料ピット用中性子吸収体</p> <p>a. 制御棒クラスタ</p> <p>b. 使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体</p> <p>(～略～)</p>

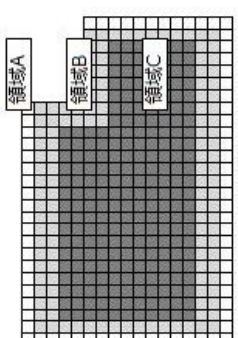
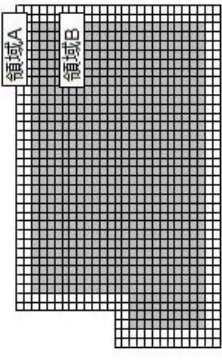
(参考1)「本文五号ニ、(2)(ii) a. 構造」での臨界防止に係る記載と設置許可基準規則との関連性

- ・既許可及び補正申請での本文五号ニ、(2)(ii) a. 構造に係る記載については、設置許可基準規則の第16条2項、第54条1項、第54条2項と対応するよう3つのパートで構成されている。
- ・「臨界にならないよう配慮したラック形状及び燃料配置」の記載中、ラックは第54条2項に該当する設備である。
- ・既許可及び補正申請での記載内容および設置許可基準規則との関連について下表に示す。

	既許可 (2016. 4. 20 許可)	補正申請 (2022. 5. 13 申請)	設置許可基準規則
16 条	<p>ニ、核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造及び設備</p> <p>(2) 核燃料物質貯蔵設備の構造及び貯蔵能力</p> <p>(ii) 使用済燃料貯蔵設備</p> <p>a. 構造</p> <p>使用済燃料貯蔵設備は、使用済燃料及び新燃料をほう酸水中の使用済燃料ラックに挿入して貯蔵する鉄筋コンクリート造、ステンレス鋼内張りの水槽（使用済燃料ピット）であり、</p> <p>(～略～)</p> <p>使用済燃料貯蔵設備は、想定されるいかなる状態においても燃料が臨界に達することのない設計とする。</p> <p>(～略～)</p>	<p>ニ、核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造及び設備</p> <p>(2) 核燃料物質貯蔵設備の構造及び貯蔵能力</p> <p>(ii) 使用済燃料貯蔵設備</p> <p>a. 構造</p> <p>同左</p> <p>同左</p> <p>(～略～)</p>	<p>【第十六条 2項】</p> <p>発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより、燃料体等の貯蔵施設（安全施設に属するものに限る。以下この項において同じ。）を設けなければならない。</p> <p>一 燃料体等の貯蔵施設は、次に掲げるものであること。</p> <p>(～略～)</p> <p>ハ 燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。</p> <p>二 (～略～)</p>
54 条 1 項	<p>燃料貯蔵設備の使用済燃料ピットは、使用済燃料ピットの冷却機能喪失、使用済燃料ピットの注水機能喪失、使用済燃料ピット水の小規模な漏えいが発生した場合において、燃料の貯蔵機能を確保できる設計とする。</p> <p>5 4 条 1 項で考慮する想定事故 1 または想定事故 2 においては、可搬型代替注水設備により燃料の崩壊熱に伴う蒸散量を上回る水量を注水することで燃料の冠水状態が維持されるため、使用済燃料ピット（使用済燃料ピットラック含む）の燃料貯蔵機能が確保でき、臨界を防止できる。</p>	<p>同左</p> <p>(～略～)</p>	<p>【第五十四条】</p> <p>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。</p> <p>< 解釈 (抜粋) ></p> <p>第 1 項に規定する「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」とは、本規程第 3 7 条 3 - 1 (a) 及び (b) で定義する想定事故 1 及び想定事故 2 において想定する使用済燃料貯蔵槽の水位の低下をいう。</p> <p>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。</p> <p>< 解釈 (抜粋) ></p> <p>第 2 項に規定する「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」とは、以下に掲げる措置又はこれらと同等の効果を有する措置を行うための設備をいう。</p> <p>a) スプレイ設備として、可搬型スプレイ設備（スプレイヘッド、スプレイライン及びポンプ車等）を配備すること。</p> <p>b) スプレイ設備は、代替注水設備によって使用済燃料貯蔵槽の水位が維持できない場合でも、燃料損傷を緩和できるものであること。</p> <p>c) 燃料損傷時に、できる限り環境への放射性物質の放出を低減するための設備を整備すること。</p>
54 条 2 項	<p>また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより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滿かつ水位低下が継続する場合には、臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置及び制御棒クラスタと同等の反応度抑制効果を有する中性子吸収体（以下「使用済燃料ピット用中性子吸収体」という。）配置においてスプレイや蒸気条件においても臨界を防止できる設計とする。</p>	<p>また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより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滿かつ水位低下が継続する場合には、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イや蒸気条件においても臨界を防止できる設計とする。</p>	

(参考2) 各プラントにおける SFP 未臨界性維持に係る設計方針の記載比較

「臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置・・・」は、全プラント共通の記載である。

	高浜 1、2号炉 (既許可)	高浜 1、2号炉 (今回申請)	大飯 3、4号炉 (既許可)	美浜 3号炉 (既許可)	高浜 3、4号炉 (既許可)																						
本文五号	<p>二.(3)(iii) b. 使用済燃料ピット水位の異常低下における〜</p> <p>(略)臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置及び使用済燃料ピット用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)</p>	<p>二.(3)(iii) b. 使用済燃料ピット水位の異常低下における〜</p> <p>(略)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し、(略)</p>	同左	同左	同左																						
未臨界性評価での燃料配置条件	 <p>領域A：新燃料を貯蔵 領域B：20GWd/t燃焼燃料を貯蔵 領域C：50GWd/t燃焼燃料を貯蔵</p>	<p>新燃料敷き詰め</p>	<p>領域A 領域B</p>  <p>領域A：新燃料を貯蔵 領域B：20GWd/t燃焼燃料を貯蔵</p>	<p>新燃料敷き詰め</p>	<p>新燃料敷き詰め</p>																						
配置制限	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">貯蔵可能な燃焼度*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>55GWd/t燃料</td> <td>中性子吸収体なし</td> </tr> <tr> <td>0GWd/t以上</td> <td>中性子吸収体あり</td> </tr> <tr> <td>20GWd/t以上</td> <td>0GWd/t以上</td> </tr> <tr> <td>50GWd/t以上</td> <td>0GWd/t以上</td> </tr> <tr> <td>15GWd/t以上</td> <td>15GWd/t以上</td> </tr> </tbody> </table> <p>※ 55GWd/t燃料の条件のみ記載</p>	貯蔵可能な燃焼度*		55GWd/t燃料	中性子吸収体なし	0GWd/t以上	中性子吸収体あり	20GWd/t以上	0GWd/t以上	50GWd/t以上	0GWd/t以上	15GWd/t以上	15GWd/t以上	なし	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">貯蔵可能な燃焼度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>55GWd/t燃料</td> <td>48GWd/t燃料</td> </tr> <tr> <td>0GWd/t以上</td> <td>中性子吸収体なし</td> </tr> <tr> <td>20GWd/t以上</td> <td>0GWd/t以上</td> </tr> <tr> <td>15GWd/t以上</td> <td>15GWd/t以上</td> </tr> </tbody> </table>	貯蔵可能な燃焼度		55GWd/t燃料	48GWd/t燃料	0GWd/t以上	中性子吸収体なし	20GWd/t以上	0GWd/t以上	15GWd/t以上	15GWd/t以上	なし	なし
貯蔵可能な燃焼度*																											
55GWd/t燃料	中性子吸収体なし																										
0GWd/t以上	中性子吸収体あり																										
20GWd/t以上	0GWd/t以上																										
50GWd/t以上	0GWd/t以上																										
15GWd/t以上	15GWd/t以上																										
貯蔵可能な燃焼度																											
55GWd/t燃料	48GWd/t燃料																										
0GWd/t以上	中性子吸収体なし																										
20GWd/t以上	0GWd/t以上																										
15GWd/t以上	15GWd/t以上																										

既許可 (2016.4.20 許可) 本文五号	既許可 (2016.4.20 許可) 添付書類A	設工認(2022.5.30 認可)	備考																																				
<p>ただし、第4～第6領域 約3.3wt% 第7～第10領域 約2.8wt% 第11～第15領域 約3.4wt% 第14～第15領域燃料のうちガドリニア入り燃料については、濃縮度約1.9wt%、ガドリニア濃縮度約6wt% 第16～第31領域 約4.0wt%～約3.4wt% ガドリニア入り燃料については、濃縮度約2.5wt%～約1.9wt%、ガドリニア濃縮度約6wt% 理論密度の約97% ガドリニア入り燃料について、理論密度の約96% ペレットの初期密度</p> <p>第1～第31領域 理論密度の約95%</p>	<p>ただし、第4～第6領域 約3.3wt% 第7～第10領域 約2.8wt% 第11～第15領域 約3.4wt% 第14～第15領域燃料のうちガドリニア入り燃料については、濃縮度約1.9wt%、ガドリニア濃縮度約6wt% 第16～第31領域 約4.0wt%～約3.4wt% ガドリニア入り燃料については、濃縮度約2.5wt%～約1.9wt%、ガドリニア濃縮度約6wt% 理論密度の約97% ガドリニア入り燃料について、理論密度の約96% 初期密度 ガドリニア入り燃料について、理論密度の約98% は、理論密度の約95%</p> <p>ただし、第1～第31領域 (略)</p> <p>(2) 被覆管 (略)</p> <p>(3) 燃料集合体 (略)</p> <p>燃料集合体 集合体数 157 燃料棒配列 15×15 集合体当たり燃料棒本数 204 全燃料棒本数 32,028 燃料棒全長 (端柱とも) 約3.9m 燃料棒ピッチ 約14.3mm 集合体全長 約4.1m 集合体断面寸法 約214mm×約214mm 支持格子材料 ニッケル・クロム・鉄合金 集合体当たり支持格子数 7 制御棒案内シンプル材料 ジルカロイ-4 集合体当たり制御棒案内シンプル本数 20 制御棒案内シンプル (略) 集合体当たり炉内計装用案内シンプル本数 1 炉内計装用案内シンプル</p>	<p>ただし、第4～第6領域 約3.3wt% 第7～第10領域 約2.8wt% 第11～第15領域 約3.4wt% 第14～第15領域燃料のうちガドリニア入り燃料については、濃縮度約1.9wt%、ガドリニア濃縮度約6wt% 第16～第31領域 約4.0wt%～約3.4wt% ガドリニア入り燃料については、濃縮度約2.5wt%～約1.9wt%、ガドリニア濃縮度約6wt% 理論密度の約97% ガドリニア入り燃料について、理論密度の約96% 初期密度 ガドリニア入り燃料について、理論密度の約98% は、理論密度の約95%</p> <p>ただし、第1～第31領域 (略)</p> <p>(2) 被覆管 (略)</p> <p>(3) 燃料集合体 (略)</p> <p>燃料集合体 集合体数 157 燃料棒配列 15×15 集合体当たり燃料棒本数 204 全燃料棒本数 32,028 燃料棒全長 (端柱とも) 約3.9m 燃料棒ピッチ 約14.3mm 集合体全長 約4.1m 集合体断面寸法 約214mm×約214mm 支持格子材料 ニッケル・クロム・鉄合金 集合体当たり支持格子数 7 制御棒案内シンプル材料 ジルカロイ-4 集合体当たり制御棒案内シンプル本数 20 制御棒案内シンプル (略) 集合体当たり炉内計装用案内シンプル本数 1 炉内計装用案内シンプル</p>	<p>(3/5)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>変更前</th> <th>変更後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ウラン235濃縮度 (wt%)</td> <td>4.60 (04.10) 変更なし</td> </tr> <tr> <td>密度(理論密度比) (%)</td> <td>97 (02.8) 97.0 (04.0)</td> </tr> <tr> <td>ウラン含有率 (wt%)</td> <td>— 以上 (04)</td> </tr> <tr> <td>酸素対ウラン比 (wt%)</td> <td>— 2.000 (04.0)</td> </tr> <tr> <td>組成 (wt%)</td> <td>— 以下 (04)</td> </tr> <tr> <td>水素 (wt%)</td> <td>— 以下 (04)</td> </tr> <tr> <td>窒素 (wt%)</td> <td>— 以下 (04)</td> </tr> <tr> <td>ウラン235濃縮度 (wt%)</td> <td>3.00 (02.10) 変更なし</td> </tr> <tr> <td>密度(理論密度比) (%)</td> <td>96 (02.10) 96.0 (04.0)</td> </tr> <tr> <td>ウラン含有率 (wt%)</td> <td>— 以上 (04)</td> </tr> <tr> <td>酸素対ウラン比 (wt%)</td> <td>— 2.083 (04.0)</td> </tr> <tr> <td>ガドリニア濃度 (wt%)</td> <td>10 (02.10) 10.00 (04)</td> </tr> <tr> <td>組成 (wt%)</td> <td>— 8.68 (04)</td> </tr> <tr> <td>以下 (04)</td> <td>— 以下 (04)</td> </tr> <tr> <td>以下 (04)</td> <td>— 以下 (04)</td> </tr> <tr> <td>以下 (04)</td> <td>— 以下 (04)</td> </tr> <tr> <td>以下 (04)</td> <td>— 以下 (04)</td> </tr> </tbody> </table> <p>燃料被覆材 Si-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金又はSi-Fe-Nb系ジルコニウム基合金 変更なし</p>	変更前	変更後	ウラン235濃縮度 (wt%)	4.60 (04.10) 変更なし	密度(理論密度比) (%)	97 (02.8) 97.0 (04.0)	ウラン含有率 (wt%)	— 以上 (04)	酸素対ウラン比 (wt%)	— 2.000 (04.0)	組成 (wt%)	— 以下 (04)	水素 (wt%)	— 以下 (04)	窒素 (wt%)	— 以下 (04)	ウラン235濃縮度 (wt%)	3.00 (02.10) 変更なし	密度(理論密度比) (%)	96 (02.10) 96.0 (04.0)	ウラン含有率 (wt%)	— 以上 (04)	酸素対ウラン比 (wt%)	— 2.083 (04.0)	ガドリニア濃度 (wt%)	10 (02.10) 10.00 (04)	組成 (wt%)	— 8.68 (04)	以下 (04)	— 以下 (04)	以下 (04)	— 以下 (04)	以下 (04)	— 以下 (04)	以下 (04)	— 以下 (04)
変更前	変更後																																						
ウラン235濃縮度 (wt%)	4.60 (04.10) 変更なし																																						
密度(理論密度比) (%)	97 (02.8) 97.0 (04.0)																																						
ウラン含有率 (wt%)	— 以上 (04)																																						
酸素対ウラン比 (wt%)	— 2.000 (04.0)																																						
組成 (wt%)	— 以下 (04)																																						
水素 (wt%)	— 以下 (04)																																						
窒素 (wt%)	— 以下 (04)																																						
ウラン235濃縮度 (wt%)	3.00 (02.10) 変更なし																																						
密度(理論密度比) (%)	96 (02.10) 96.0 (04.0)																																						
ウラン含有率 (wt%)	— 以上 (04)																																						
酸素対ウラン比 (wt%)	— 2.083 (04.0)																																						
ガドリニア濃度 (wt%)	10 (02.10) 10.00 (04)																																						
組成 (wt%)	— 8.68 (04)																																						
以下 (04)	— 以下 (04)																																						
以下 (04)	— 以下 (04)																																						
以下 (04)	— 以下 (04)																																						
以下 (04)	— 以下 (04)																																						
<p>ただし、第4～第6領域 約3.3wt% 第7～第10領域 約2.8wt% 第11～第15領域 約3.4wt% 第14～第15領域燃料のうちガドリニア入り燃料については、濃縮度約1.9wt%、ガドリニア濃縮度約6wt% 第16～第31領域 約4.0wt%～約3.4wt% ガドリニア入り燃料については、濃縮度約2.5wt%～約1.9wt%、ガドリニア濃縮度約6wt% 理論密度の約97% ガドリニア入り燃料について、理論密度の約96% 初期密度 ガドリニア入り燃料について、理論密度の約98% は、理論密度の約95%</p> <p>ただし、第1～第31領域 (略)</p> <p>(2) 被覆管 (略)</p> <p>(3) 燃料集合体 (略)</p> <p>燃料集合体 集合体数 157 燃料棒配列 15×15 集合体当たり燃料棒本数 204 全燃料棒本数 32,028 燃料棒全長 (端柱とも) 約3.9m 燃料棒ピッチ 約14.3mm 集合体全長 約4.1m 集合体断面寸法 約214mm×約214mm 支持格子材料 ニッケル・クロム・鉄合金 集合体当たり支持格子数 7 制御棒案内シンプル材料 ジルカロイ-4 集合体当たり制御棒案内シンプル本数 20 制御棒案内シンプル (略) 集合体当たり炉内計装用案内シンプル本数 1 炉内計装用案内シンプル</p>	<p>(4/5)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>変更前</th> <th>変更後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>燃料被覆材種別</td> <td>— Si-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金 (ASTM B 351 Grade R66804 (JIS H 4751 ZrTi3040H04))</td> </tr> <tr> <td>支持格子</td> <td>— 射出硬化型ニッケル基合金 (ASTM B 670 UNS N07718)</td> </tr> <tr> <td>フレキシブル</td> <td>— 射出硬化型ニッケル基合金 (ASTM B 670 UNS N07718)</td> </tr> <tr> <td>上部支持板 (上部ノズル)</td> <td>— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)</td> </tr> <tr> <td>上部ノズル押え板</td> <td>— 射出硬化型ニッケル基合金 (ASTM B 670 UNS N07718)</td> </tr> <tr> <td>スプリングスクリュー (下部ノズル)</td> <td>— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)</td> </tr> <tr> <td>下部支持板 (下部ノズル)</td> <td>— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)</td> </tr> <tr> <td>制御棒案内シンプル</td> <td>— Si-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金 (ASTM B 351 Grade R66804)</td> </tr> <tr> <td>スリット</td> <td>— オーステナイト系ステンレス鋼 (JIS G 4014)</td> </tr> <tr> <td>コイル押え板 (ベレット押え板)</td> <td>— オーステナイト系ばね鋼 (ASTM A 307)</td> </tr> <tr> <td>インサート管</td> <td>— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)</td> </tr> <tr> <td>インサート種別</td> <td>— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)</td> </tr> </tbody> </table>	変更前	変更後	燃料被覆材種別	— Si-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金 (ASTM B 351 Grade R66804 (JIS H 4751 ZrTi3040H04))	支持格子	— 射出硬化型ニッケル基合金 (ASTM B 670 UNS N07718)	フレキシブル	— 射出硬化型ニッケル基合金 (ASTM B 670 UNS N07718)	上部支持板 (上部ノズル)	— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)	上部ノズル押え板	— 射出硬化型ニッケル基合金 (ASTM B 670 UNS N07718)	スプリングスクリュー (下部ノズル)	— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)	下部支持板 (下部ノズル)	— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)	制御棒案内シンプル	— Si-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金 (ASTM B 351 Grade R66804)	スリット	— オーステナイト系ステンレス鋼 (JIS G 4014)	コイル押え板 (ベレット押え板)	— オーステナイト系ばね鋼 (ASTM A 307)	インサート管	— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)	インサート種別	— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)	<p>(iv) 燃料集合体の構造</p> <p>a. 構造 燃料集合体は、燃料棒、制御棒案内シンプル及び炉内計装用案内シンプルを支持格子により15行15列の一定ピッチの正方形に配列し、制御棒案内シンプルの上端に上部ノズル、下端に下部ノズルを取り付け、下部ノズルでその荷重を支持する構造とする。 燃料集合体は、原子炉の使用期間中に生じ得る種々の因子を考慮しても、その健全性を失うことがない設計とする。また、燃料集合体は輸送及び取扱い中に過度の変形を生じない設計とする。</p>	<p>枠囲みの範囲は確認に係る事項ですので公開することはありません。</p>										
変更前	変更後																																						
燃料被覆材種別	— Si-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金 (ASTM B 351 Grade R66804 (JIS H 4751 ZrTi3040H04))																																						
支持格子	— 射出硬化型ニッケル基合金 (ASTM B 670 UNS N07718)																																						
フレキシブル	— 射出硬化型ニッケル基合金 (ASTM B 670 UNS N07718)																																						
上部支持板 (上部ノズル)	— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)																																						
上部ノズル押え板	— 射出硬化型ニッケル基合金 (ASTM B 670 UNS N07718)																																						
スプリングスクリュー (下部ノズル)	— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)																																						
下部支持板 (下部ノズル)	— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)																																						
制御棒案内シンプル	— Si-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金 (ASTM B 351 Grade R66804)																																						
スリット	— オーステナイト系ステンレス鋼 (JIS G 4014)																																						
コイル押え板 (ベレット押え板)	— オーステナイト系ばね鋼 (ASTM A 307)																																						
インサート管	— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)																																						
インサート種別	— オーステナイト系ステンレス鋼 (ASTM A 307)																																						

既許可 (2016.4.20 許可) 本文五号	既許可 (2016.4.20 許可) 添付書類八	設工認(2022.5.30 認可)	備考												
b. 主要仕様 燃料集合体における燃料棒配列 15×15 燃料棒ピッチ 約 14mm 燃料集合体当たりの燃料棒本数 204 燃料集合体当たりの制御棒案内シンプル本数 20 燃料集合体当たりの炉内計装用案内シンプル本数 1	外径 約 13.9mm 厚さ 約 0.43mm 燃焼度 取替燃料集合体平均 約 49,000MWd/t (3.6 で述べる平衡炉心) 燃料集合体最高燃焼度 55,000MWd/t ただし、第 1～第 15 領域 39,000MWd/t 第 16～第 31 領域 48,000MWd/t	約 49,000MWd/t (3.6 で述べる平衡炉心) 燃料集合体最高燃焼度 55,000MWd/t ただし、第 1～第 15 領域 39,000MWd/t 第 16～第 31 領域 48,000MWd/t	設工認(2022.5.30 認可)												
(v) 最高燃焼度 燃料集合体最高燃焼度 55,000MWd/t ただし、第 1～第 15 領域 39,000MWd/t 第 16～第 31 領域 48,000MWd/t	燃焼度 取替燃料集合体平均 約 49,000MWd/t (3.6 で述べる平衡炉心) 燃料集合体最高燃焼度 55,000MWd/t ただし、第 1～第 15 領域 39,000MWd/t 第 16～第 31 領域 48,000MWd/t	(5/9) <table border="1" data-bbox="319 436 470 918"> <thead> <tr> <th></th> <th>変更前</th> <th>変更後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>炉内計装用案内シンプル</td> <td>-</td> <td>Sn-Fe-Cu系ジルコニウム合金 (ASTM B 353 Grade R60804)</td> </tr> <tr> <td>制御棒案内シンプル</td> <td>-</td> <td>Sn-Fe-Cu系ジルコニウム合金 (ASTM B 351 Grade R60804)</td> </tr> <tr> <td>シンプルスクリュー</td> <td>-</td> <td>ホーバロニウム系ステンレス鋼 (ASTM A 182)</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注1) 公称値</p> <p>(注2) 記載内容は燃料棒設計認可申請書 (M013燃焼2号, 平成24年7月3日認可) による。なお、燃料棒設計認可申請書では全長を「4,034」、断面寸法を「214×214」としている。</p> <p>(注3) 既工事計画書に記載がないため記載の適正化を行う。記載内容は、平成24年5月29日付け平成24-05-07(原第10号)にて認可された工事計画の添付資料1「熱出力計算書」による。</p> <p>(注4) 記載内容は燃料棒設計認可申請書 (M015燃焼2号, 平成24年7月3日認可) による。</p> <p>(注5) 記載内容は燃料棒設計認可申請書 (M015燃焼2号, 平成24年7月3日認可) による。なお、燃料棒設計認可申請書では全長を「3,866」、燃料棒案内シンプル長を「10,721」、燃料棒案内シンプル外径を「19,481」、燃料棒案内シンプル内径を「10,621」、上置プレナム長を「<input type="checkbox"/>」、コイルばね外径を「<input type="checkbox"/>」としている。</p> <p>(注6) 燃料棒 当たり 1個</p> <p>(注7) 記載内容は燃料棒設計認可申請書 (M013燃焼2号, 平成24年7月3日認可) による。なお、燃料棒設計認可申請書では支持格子外径寸法を「214×214」としている。</p> <p>(注8) 燃料棒 当たり 1個</p> <p>(注9) 記載内容は燃料棒設計認可申請書 (M013燃焼2号, 平成24年7月3日認可) による。なお、燃料棒設計認可申請書では上置支持格子外径寸法を「213×213」、下置支持格子外径寸法を「214×214」としている。</p> <p>(注10) 燃料棒 当たり 20本</p> <p>(注11) 燃料棒 当たり 1本</p> <p>(注12) 既工事計画書に記載がないため記載の適正化を行う。記載内容は、平成24年5月29日付け平成24-05-07(原第10号)にて認可された工事計画の添付資料1「熱出力計算書」による。なお、既工事計画書では炉内計装用案内シンプル本数を「約104本」と記載している。</p> <p>(注13) 燃料棒ごとに、いずれか一方の材料を使用する。</p> <p>(注14) 燃料棒 当たり 200個</p>		変更前	変更後	炉内計装用案内シンプル	-	Sn-Fe-Cu系ジルコニウム合金 (ASTM B 353 Grade R60804)	制御棒案内シンプル	-	Sn-Fe-Cu系ジルコニウム合金 (ASTM B 351 Grade R60804)	シンプルスクリュー	-	ホーバロニウム系ステンレス鋼 (ASTM A 182)	
	変更前	変更後													
炉内計装用案内シンプル	-	Sn-Fe-Cu系ジルコニウム合金 (ASTM B 353 Grade R60804)													
制御棒案内シンプル	-	Sn-Fe-Cu系ジルコニウム合金 (ASTM B 351 Grade R60804)													
シンプルスクリュー	-	ホーバロニウム系ステンレス鋼 (ASTM A 182)													

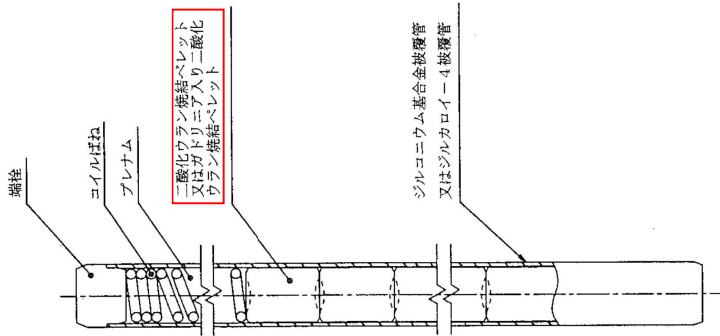
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

既許可 (2016.4.20 許可) 本文五号

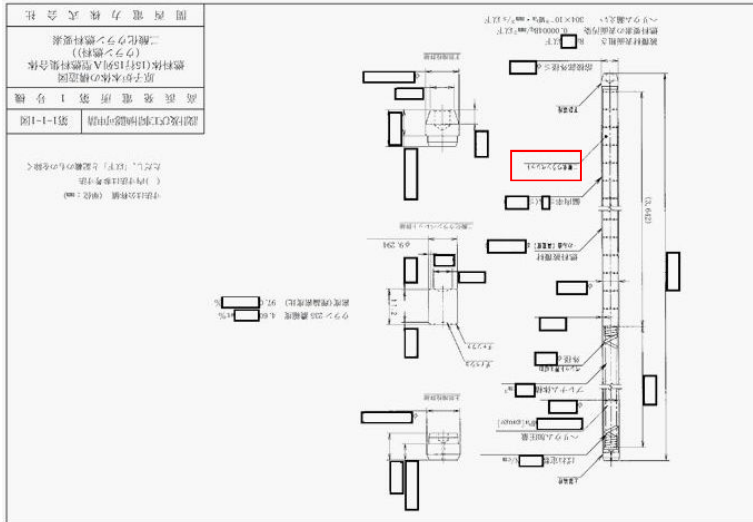
既許可 (2016.4.20 許可) 添付書類八

設工認(2022.5.30 認可)

備考



第3.2.1図 燃料棒断面図



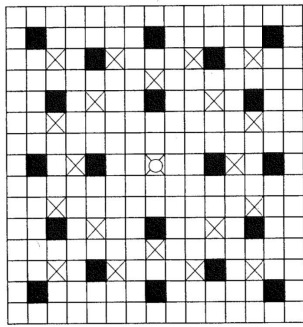
設工認(2022.5.30 認可)	第1-1図
高浜発電所第1号機	原子炉本体の構造図
燃料棒束(15列入熱伝導体集合体)	二酸化ウラン燃料要素
関西電力株式会社	

既許可 (2016.4.20 許可) 本文五号

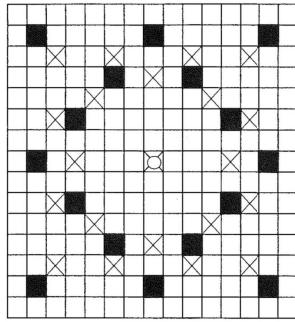
既許可 (2016.4.20 許可) 添付書類八

設工認(2022.5.30 認可)

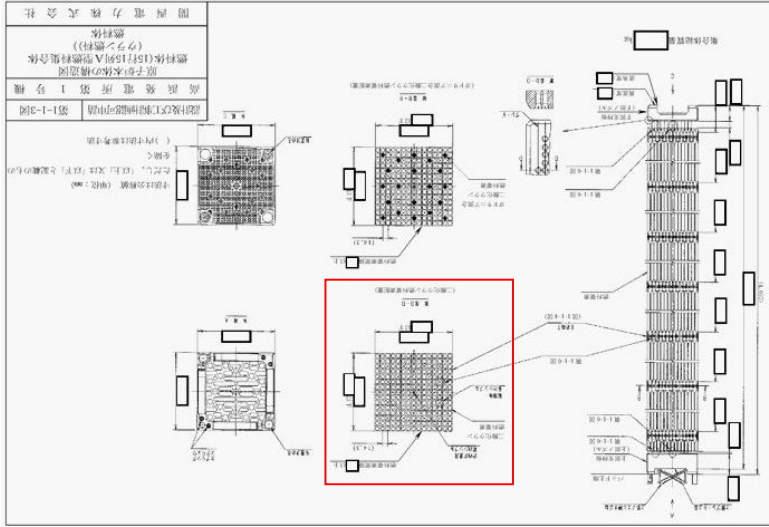
備考



第 3.2-3(2)図 集合体内ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒配置図 (ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒本数: 20 本)



第 3.2-3(3)図 集合体内ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒配置図 (ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒本数: 16 本)



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>【検証(Verification)】</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"> ・ 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。 ・ 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。 <p>【妥当性確認(Validation)】</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"> ・ 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

	<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">• 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。• 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。• 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。
--	---

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、米国及びカナダの国立研究所、産業界、及び大学が構成する 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。

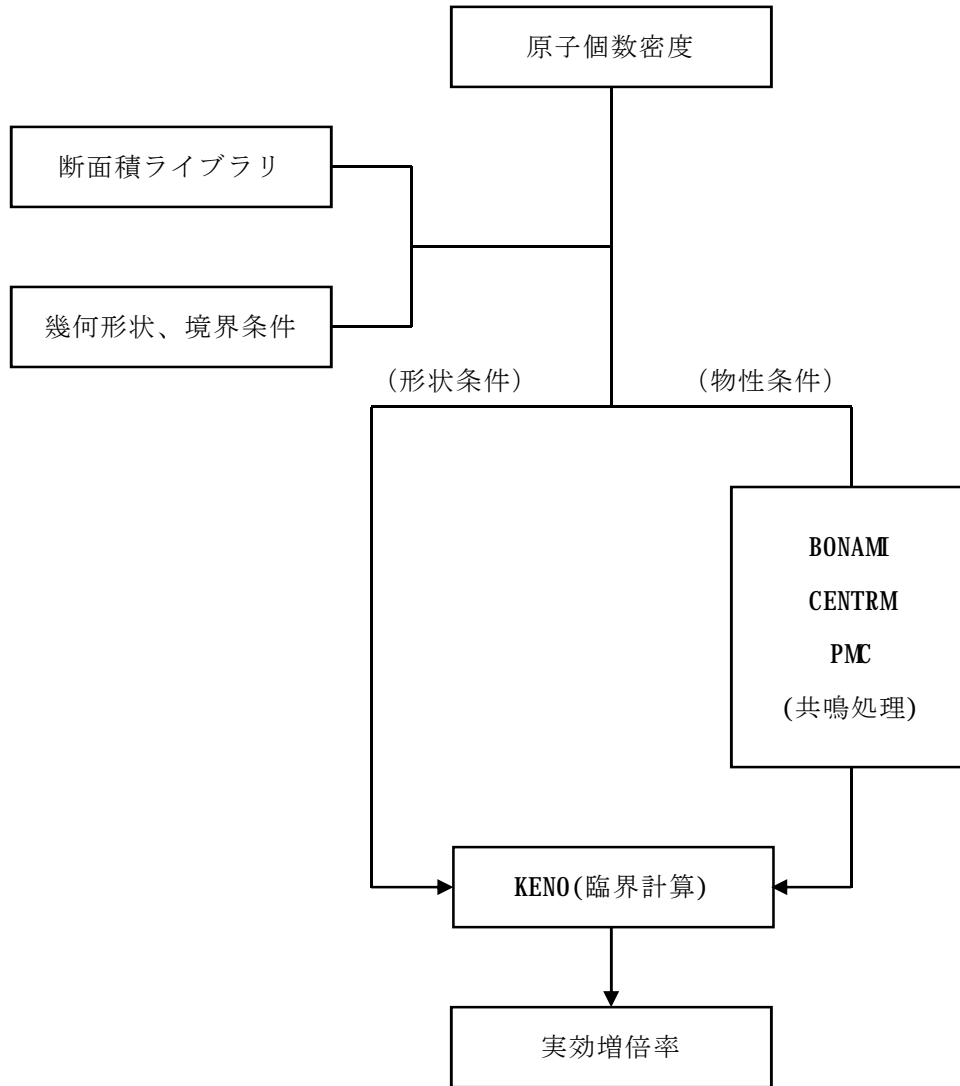
本コードでは、体系内の一つ一つの中性子の振舞いを追跡し、核分裂によって発生する中性子数 **F**、吸収されて消滅する中性子数 **A**、体系から漏えいする中性子数 **L** を評価し、次式により実効増倍率 k_{eff} を算出する。

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

(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を含んだ体系及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(Δk_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 ²³⁵ 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 ³	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 MOX 燃料 (FP なし) を使用した臨界実験 (1/2)

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	²³⁵ 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。

第 1-2 表 **MX** 燃料 (**FP** なし) を使用した臨界実験 (2/2)

項目	<div style="border: 2px solid black; height: 500px; width: 100%;"></div>	
<p style="text-align: center;">実験体系</p>		

※ 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 (1/3)

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	²³⁵ 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。

第 1-3 表 FP を含む体系の臨界実験 (2/3)

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
FP (中性子吸収体) 核種／元素	-	収率曲線に応じた核種	
中性子吸収材	-	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。

第 1-3 表 FP を含む体系の臨界実験 (3/3)

<p>項目</p>	<p>実験体系</p>	<p>ベンチマーク 解析結果</p>	<p>SCALE6.0 による 実効増倍率の平均、σ</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(1/2)

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	²³⁵ 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 [※]	
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。

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(2/2)

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、 σ	

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)	MDX 燃料 (FP なし)	ウラン燃料 (FP あり)	ウラン+MDX 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) *1				
	$\overline{k_{eff}}$ 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、及び上述した 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及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)

--

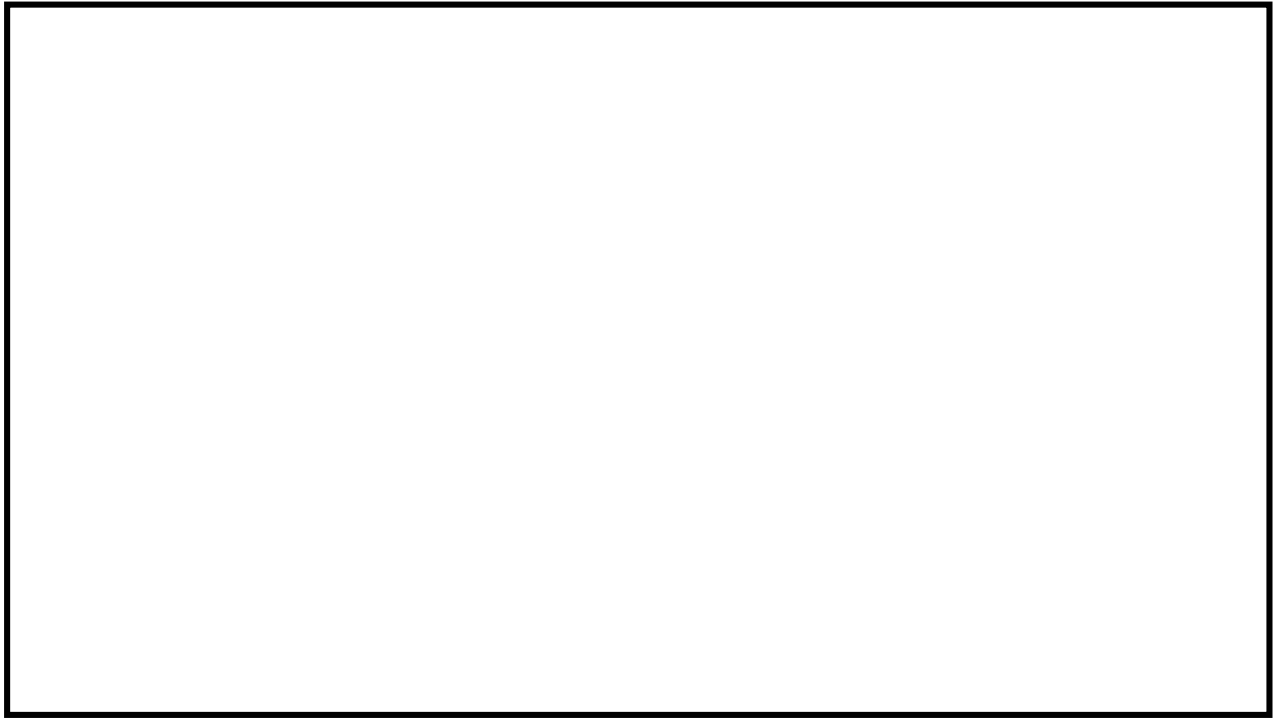
第4-2表 塩素を含む臨界実験ベンチマーク結果とそれ以外の臨界実験ベンチマーク結果に対するt検定

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

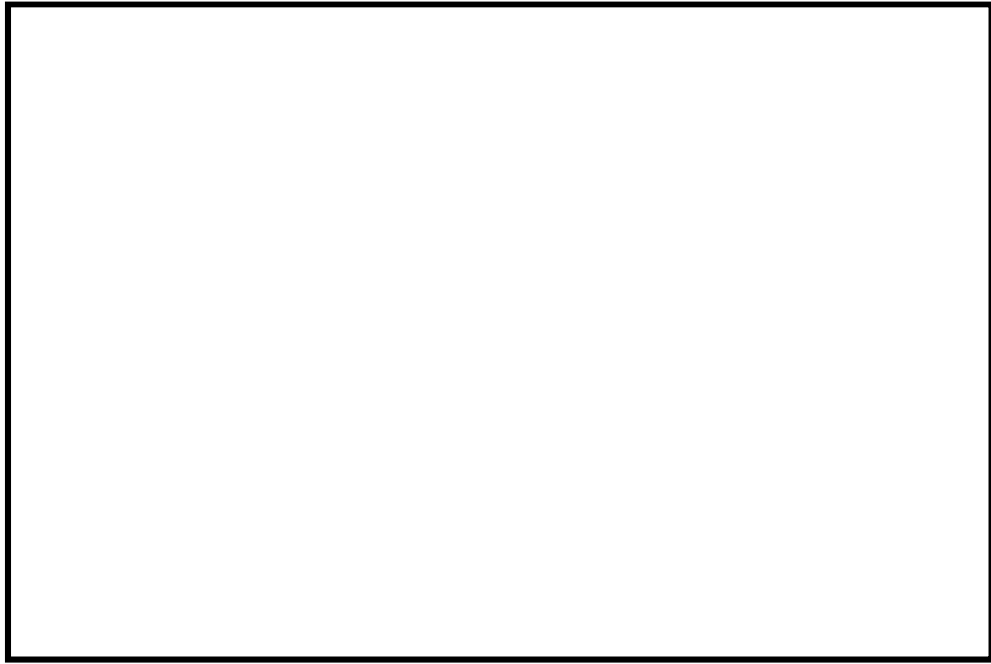
--

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 Δk 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。

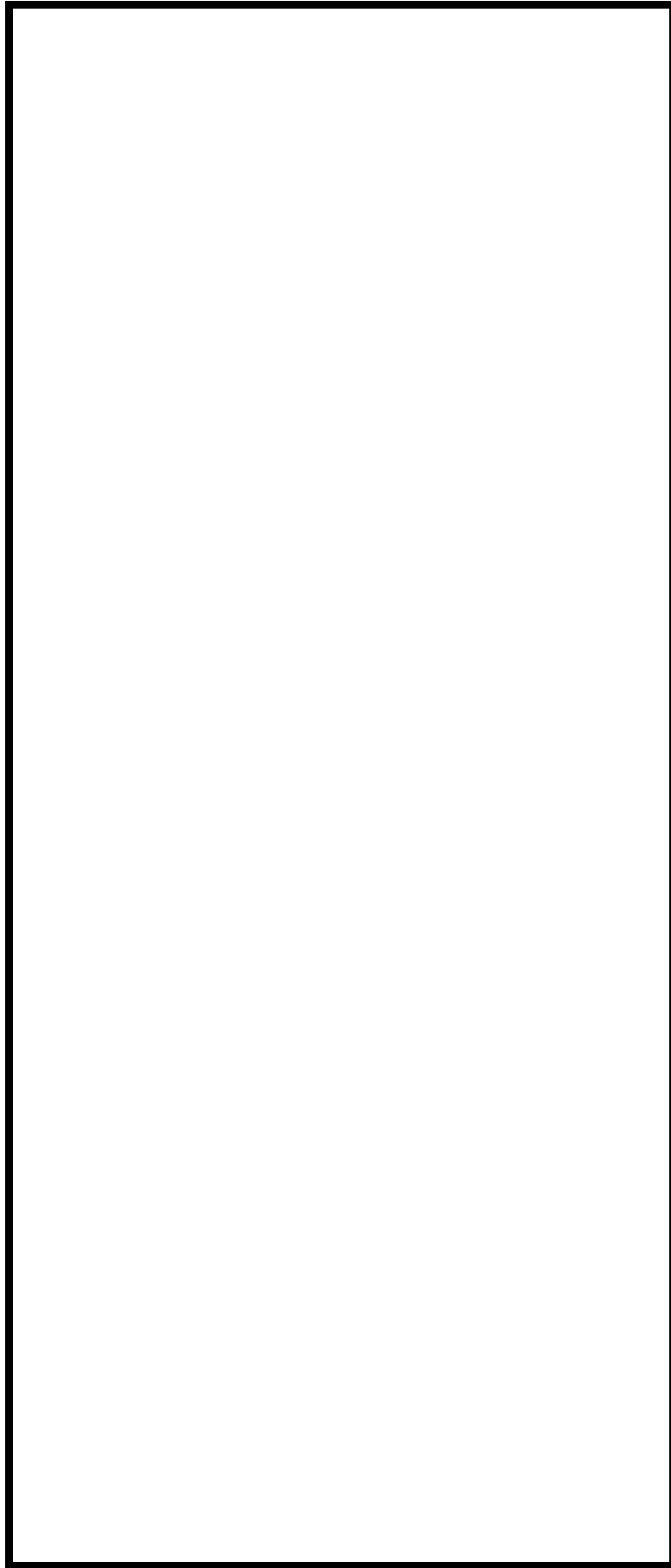
(参考2) FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析の結果

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(1/2)

--

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。

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(2/2)



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。

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

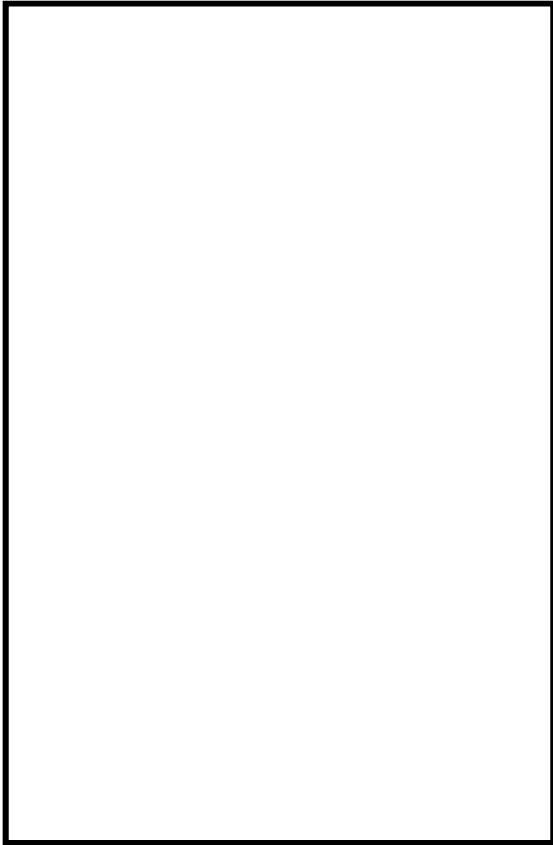
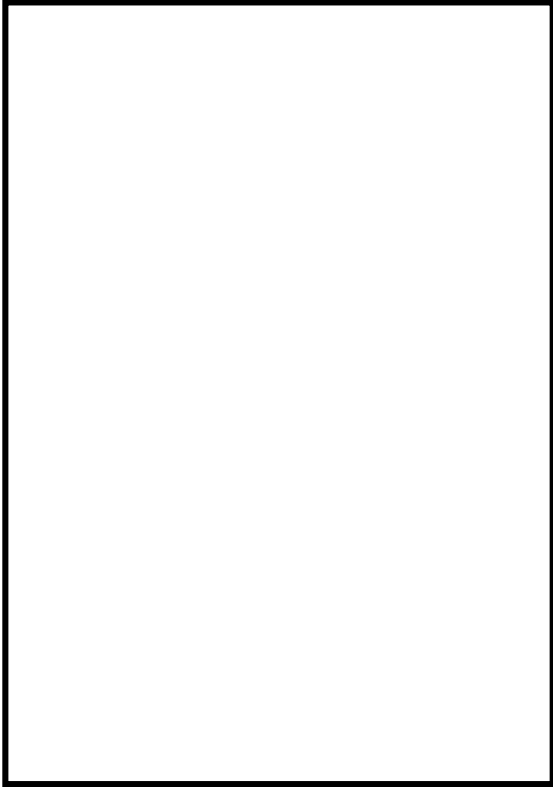


図 1 - 2 C/E の核種毎のヒストグラム



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(1/2)

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

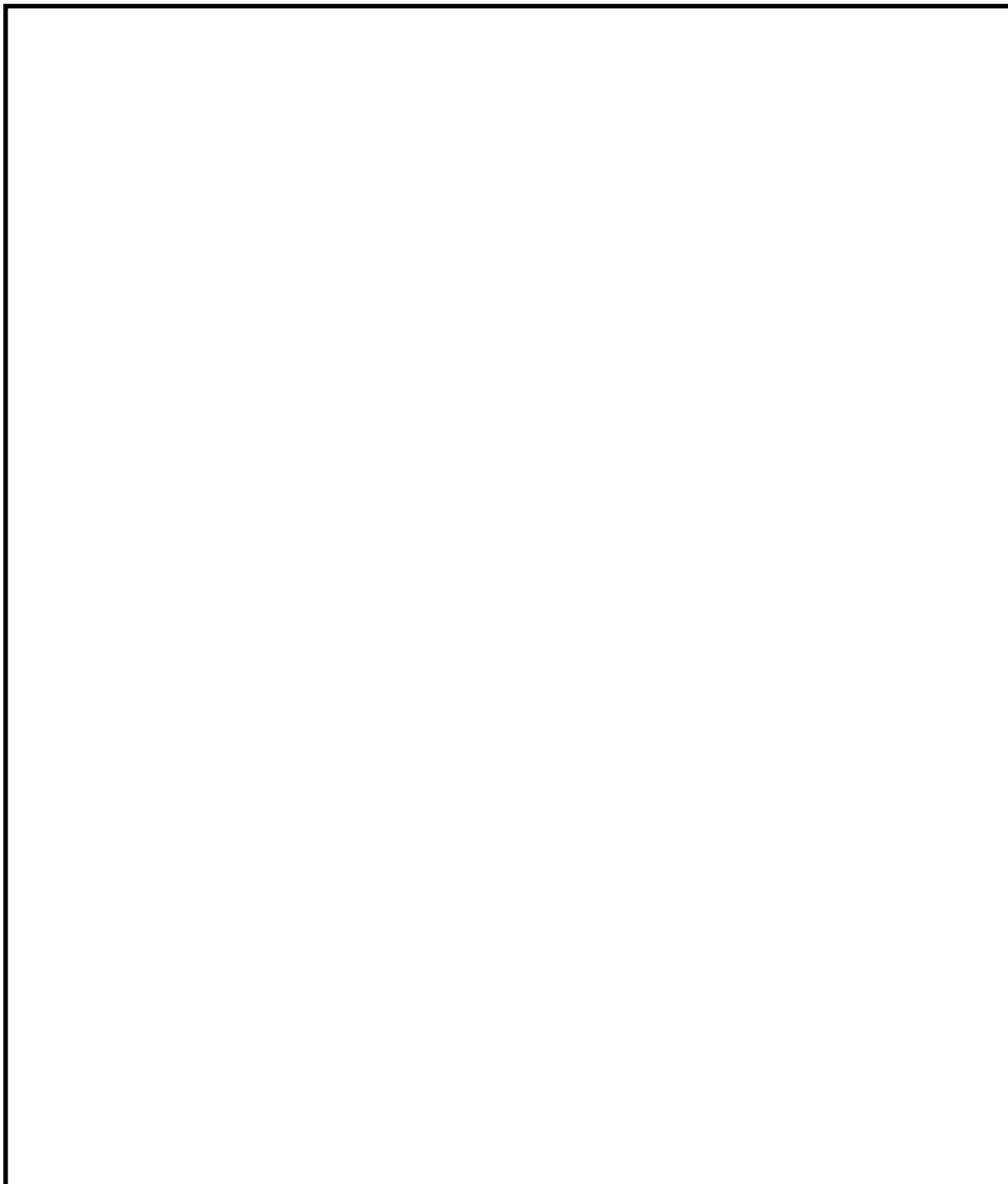
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表2 解析結果(2/2)

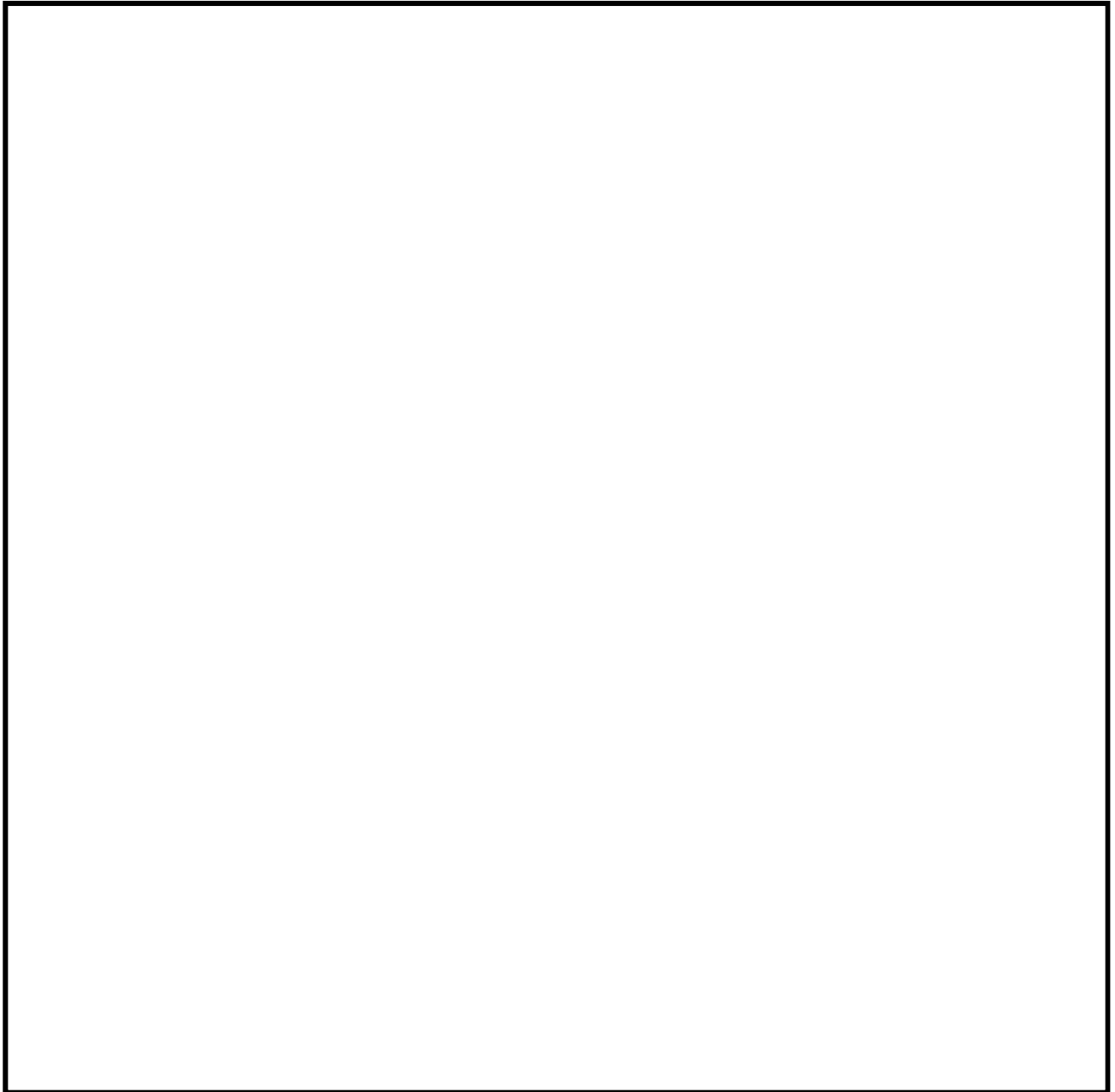
Case	keff	σ	$\Delta keff$	考慮しない核種	未臨界性評価で 考慮する核種

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。

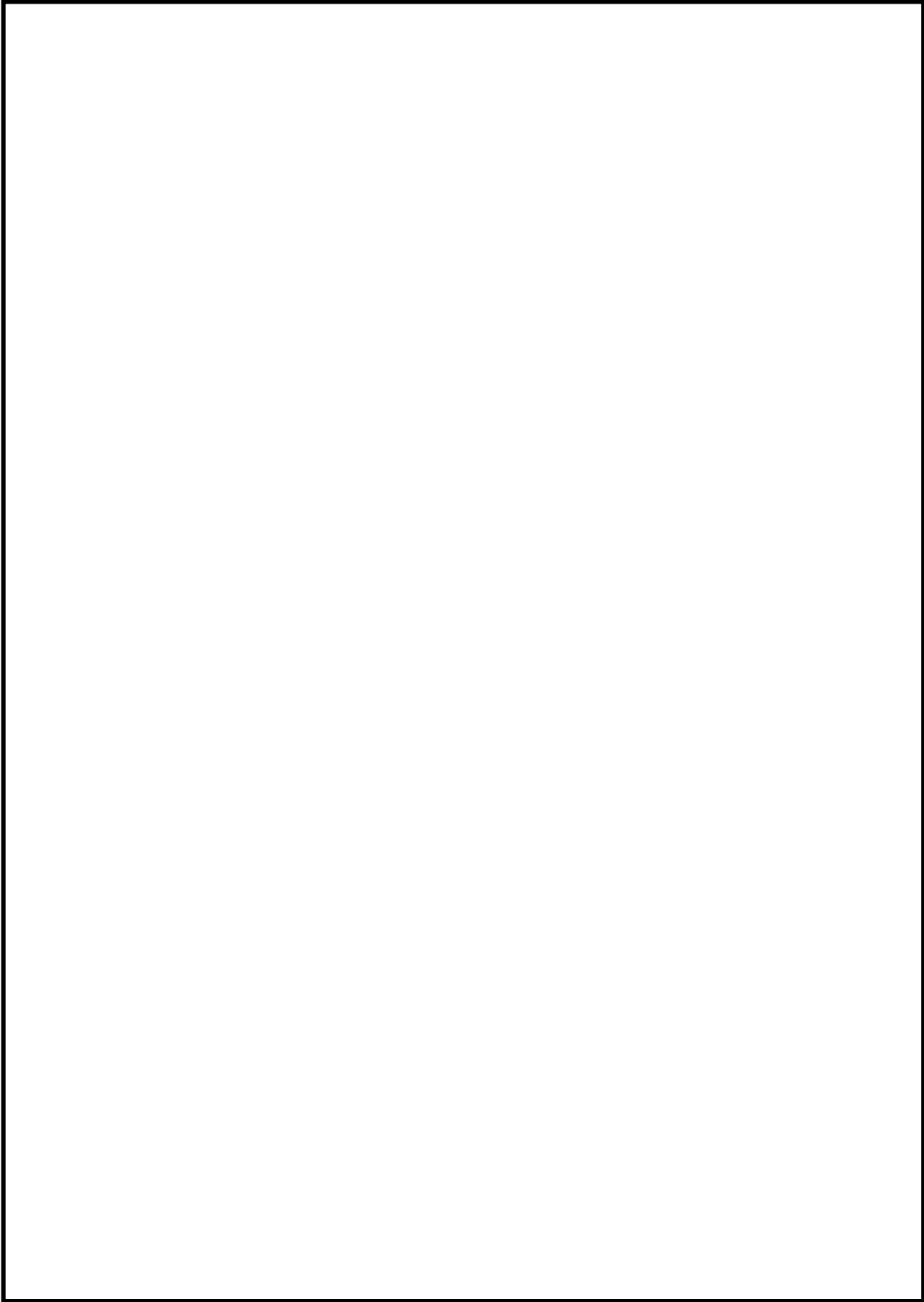
(参考4) 計算コードの不確かさの算出方法



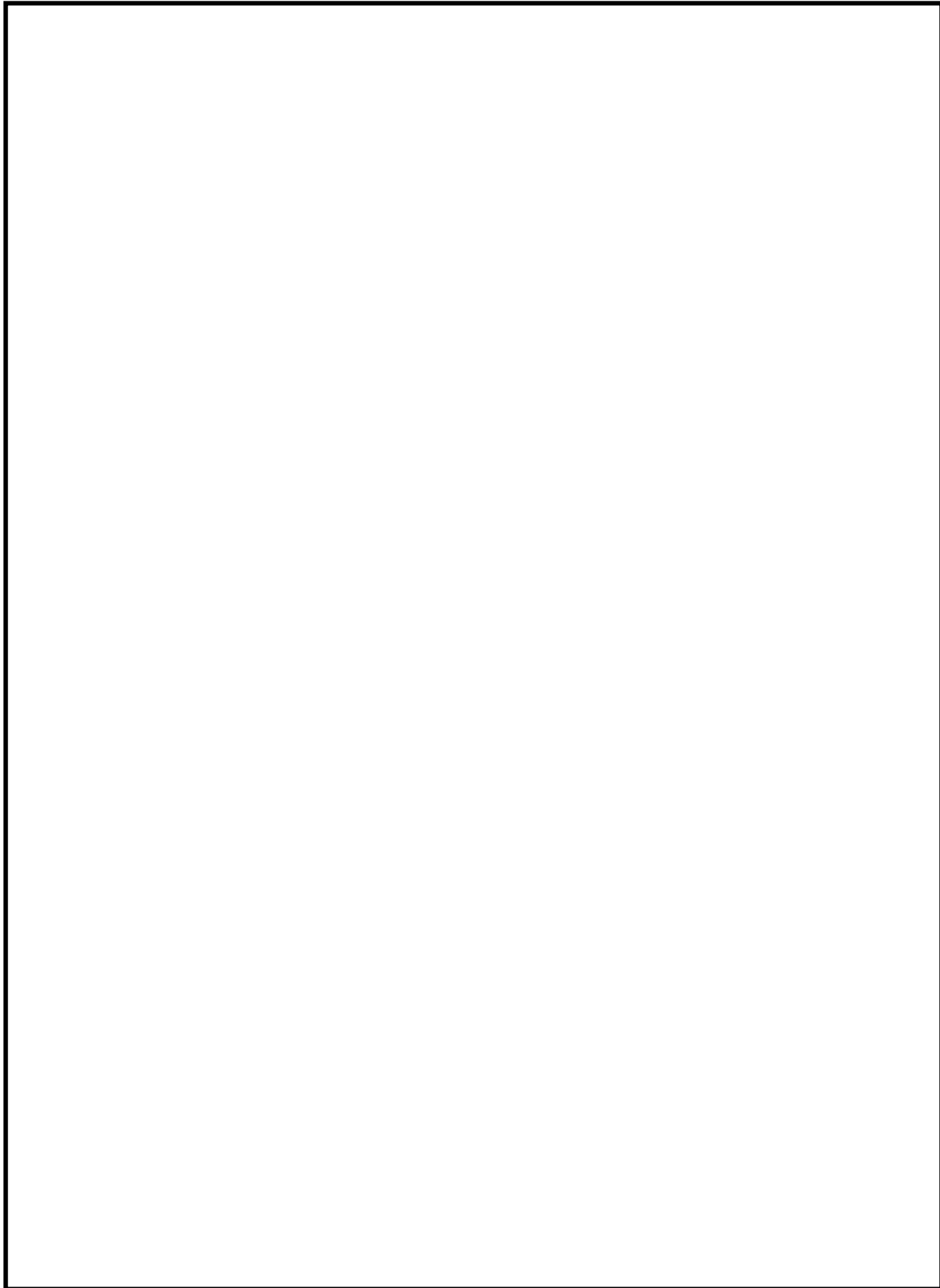
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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

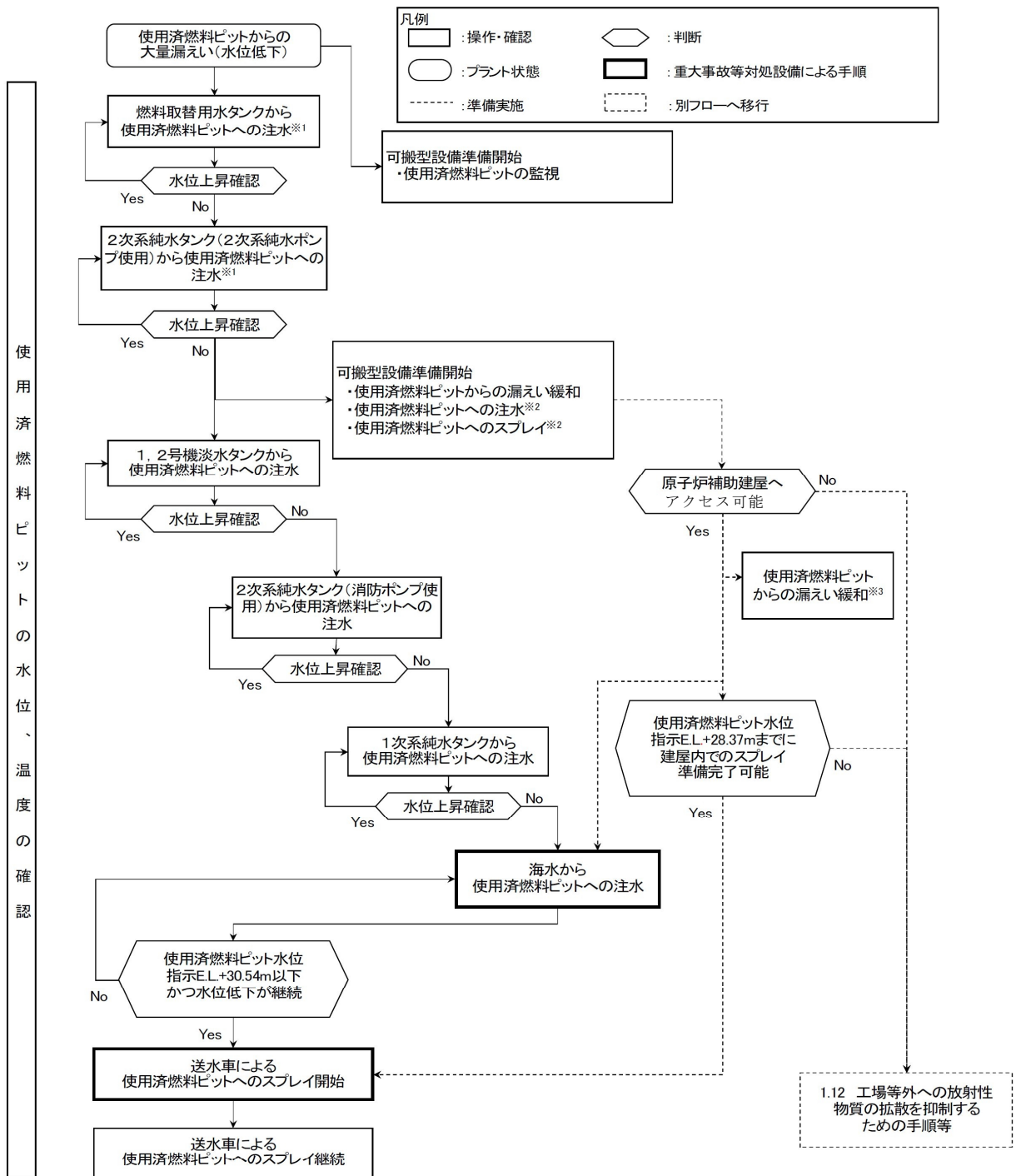
1. はじめに
2. SFP からの大量の水の漏えい時における注水・放水手順および設備保有台数
3. 各手順の流量条件設定
 - 3.1. 流量設定の考え方
 - 3.1.1. SFP 注水手順の流量
 - 3.1.2. SFP 放水手順の流量
 - 3.2. 配管圧損評価について
4. 基本ケース条件の設定について
5. 不確かさを考慮した条件の設定について
6. 系統に複数台設置されるポンプの起動台数の考え方について
7. 全手順同時実施の成立性確認
8. まとめ

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。



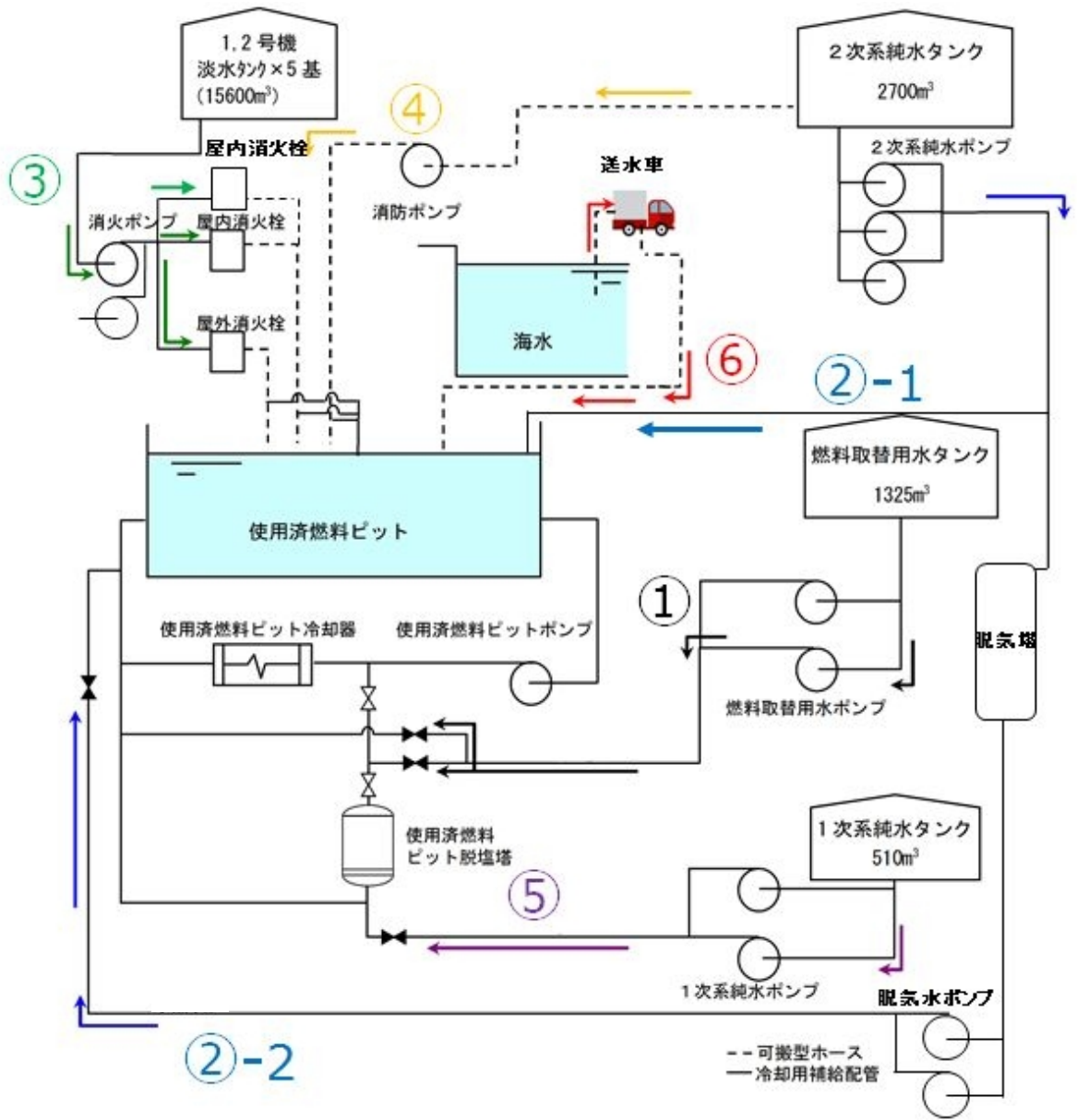
(注1)本フローに記載の注水手段については、複数の手段の準備又は注水を平行して実施することがある。
また、水源の使用可否等に応じて手順を飛ばして対応することがある。

※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

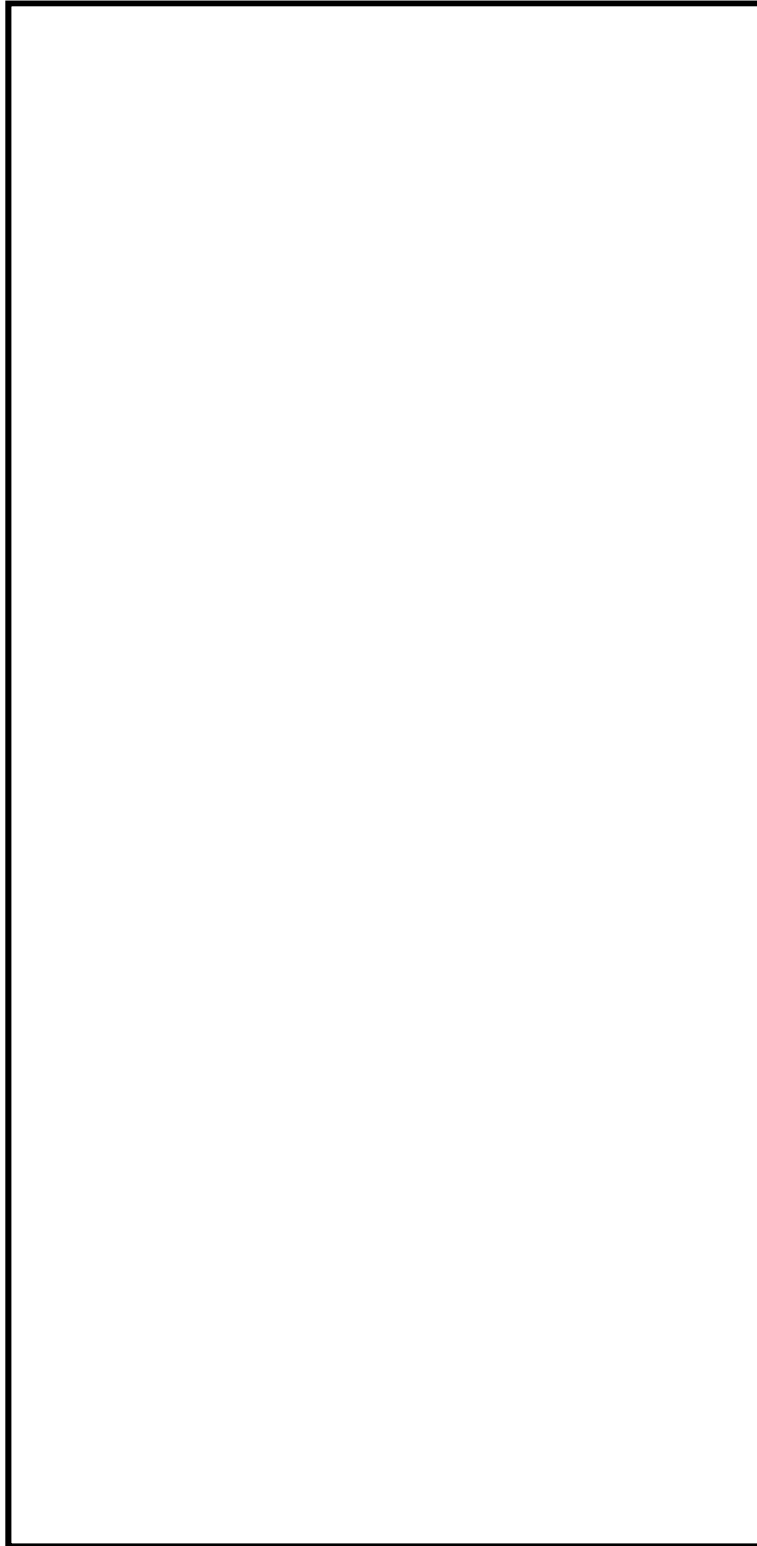


第1-2図 SFP注水設備の構成

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 ^{※2}	1台 ^{※2}	2台 ^{※2}			
	③	SA所達 ^{※3}	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 ^{※3}	2次系純水タンク	消防ポンプ	1台	1台		
	⑤	SA所達 ^{※3}	1次系純水タンク	1次系純水ポンプ	1台	2台		
⑥	SA所達 ^{※3}	海水	送水車	1台	5台 ^{※4}			
放水 手順	①	海水	送水車	1台/1SFP	3台 ^{※5}	スプレイ ヘッド	1台/1SFP	3台 ^{※7}
	②	海水	大容量ポンプ (放水砲用)	2台/2SFP	3台 ^{※6}	放水砲	2台/2SFP	3台 ^{※7}

※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

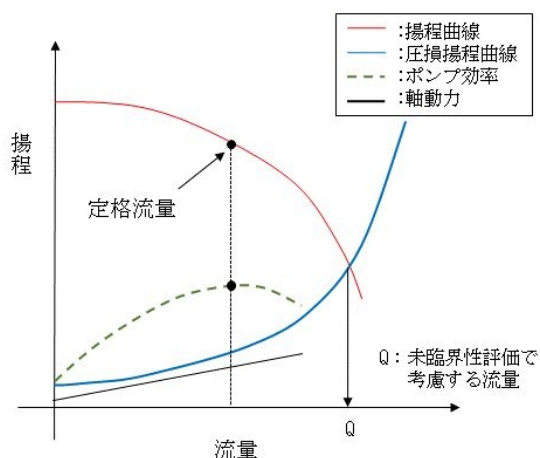
SFPへの注水に係る各手順によるSFPへの流入流量設定における各条件の具体的な考え方は以下の通りである。

(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な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。

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

なお、系統中にはエルボ、バ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、抵抗係数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、抵抗係数の代表例を第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 各配管要素の抵抗係数※

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 _{in} : 入口配管内径 D _{out} : 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 _{in} : 入口配管内径 D _{out} : 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、実態により則した条件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

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。

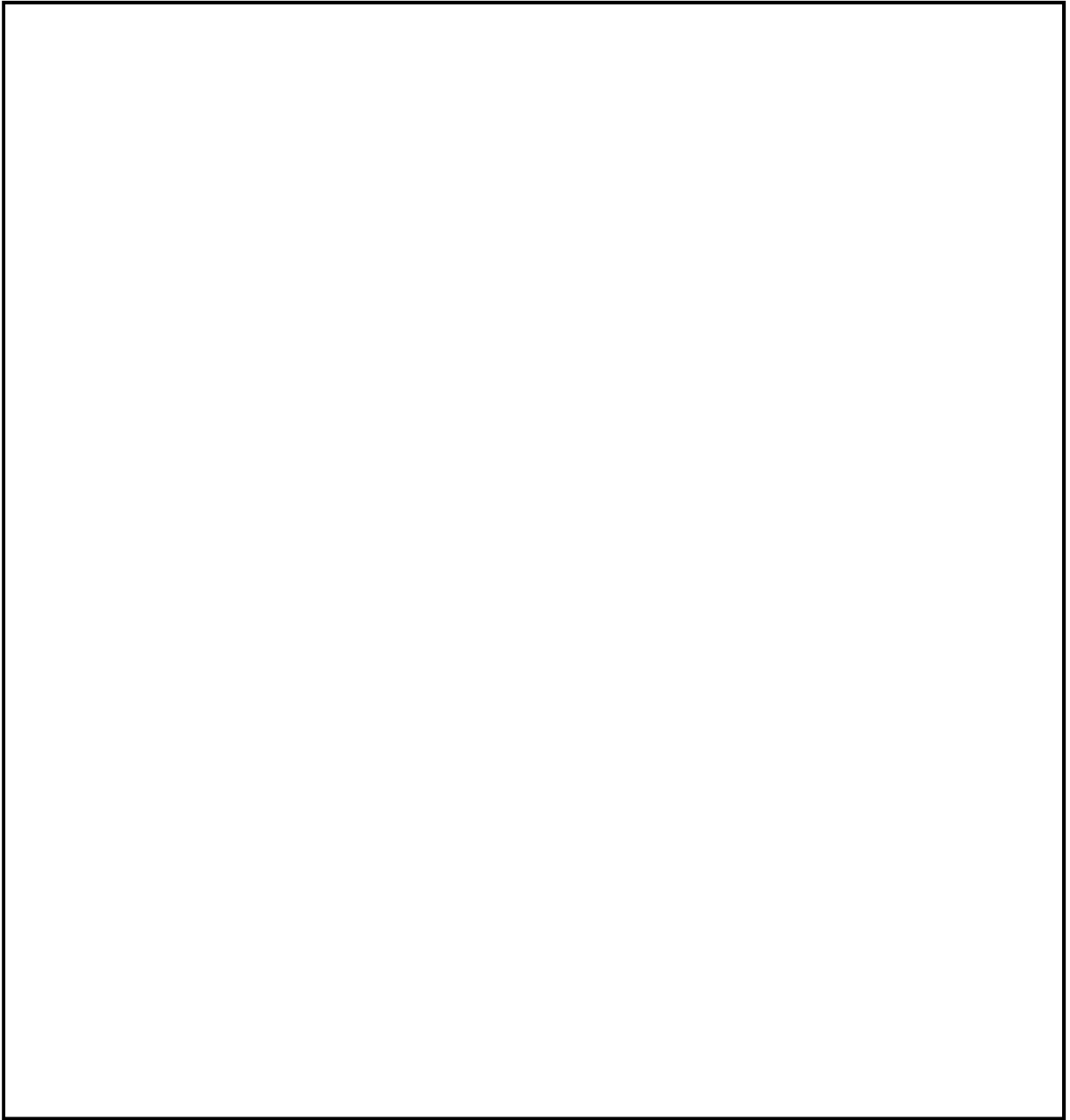
第4表 水源と移送先の静水頭差（手順①）

	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

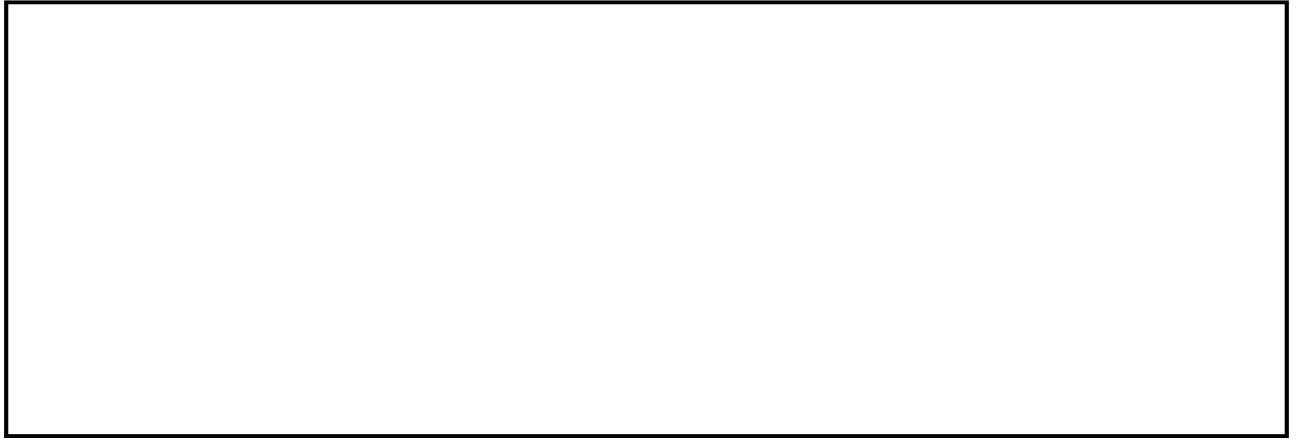
注水時の具体的手順を第3図に、手順に示される対応により構成される系統の概要を第4図に示す。手順では、赤で示す系統上のオリフィスを通して注水されることとなる。オリフィス通水時に発生する圧損は、オリフィス口径と配管内径より算出される断面積比に対し抵抗係数を算出し、ダルシーの式より求める。系統上オリフィスの概要を第5図に、圧損計算に使用した系統情報を第5表に示す。

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。

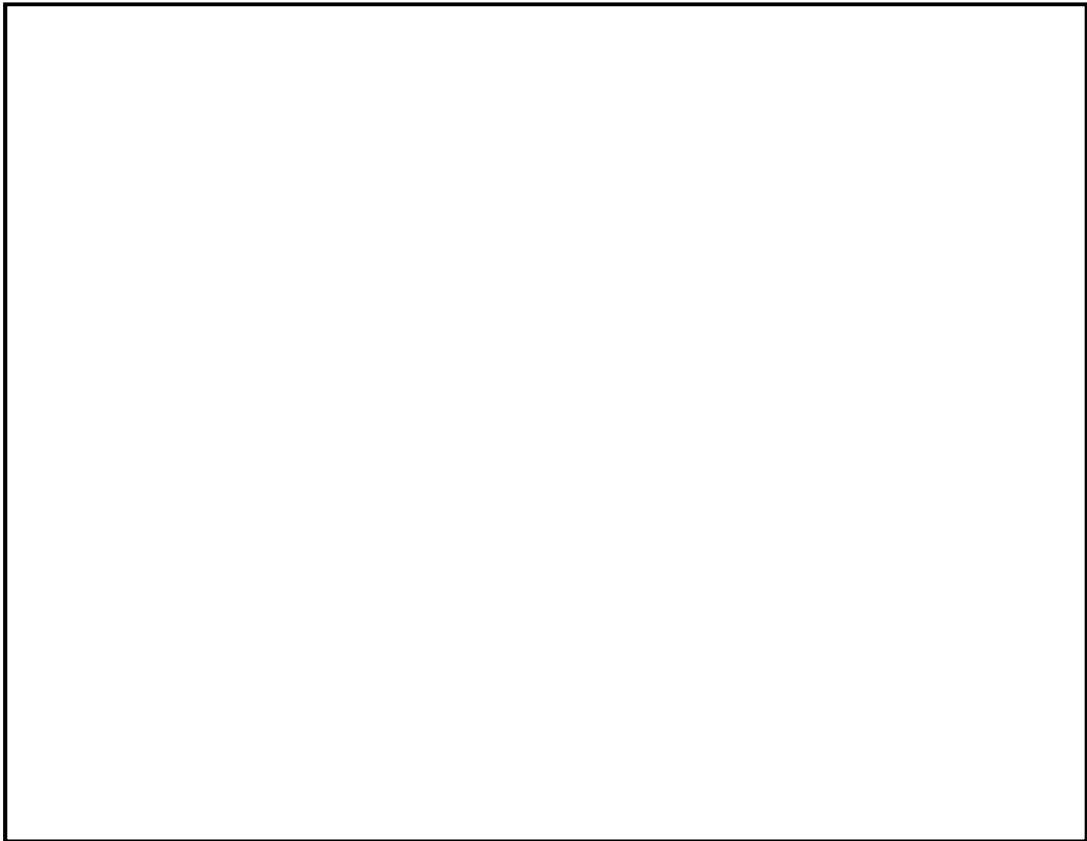


第3図 燃料取替用水ポンプを用いたSFPへの注水における具体的実施手順
(高浜発電所1号機 事故時操作所則抜粋)

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21m³/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。

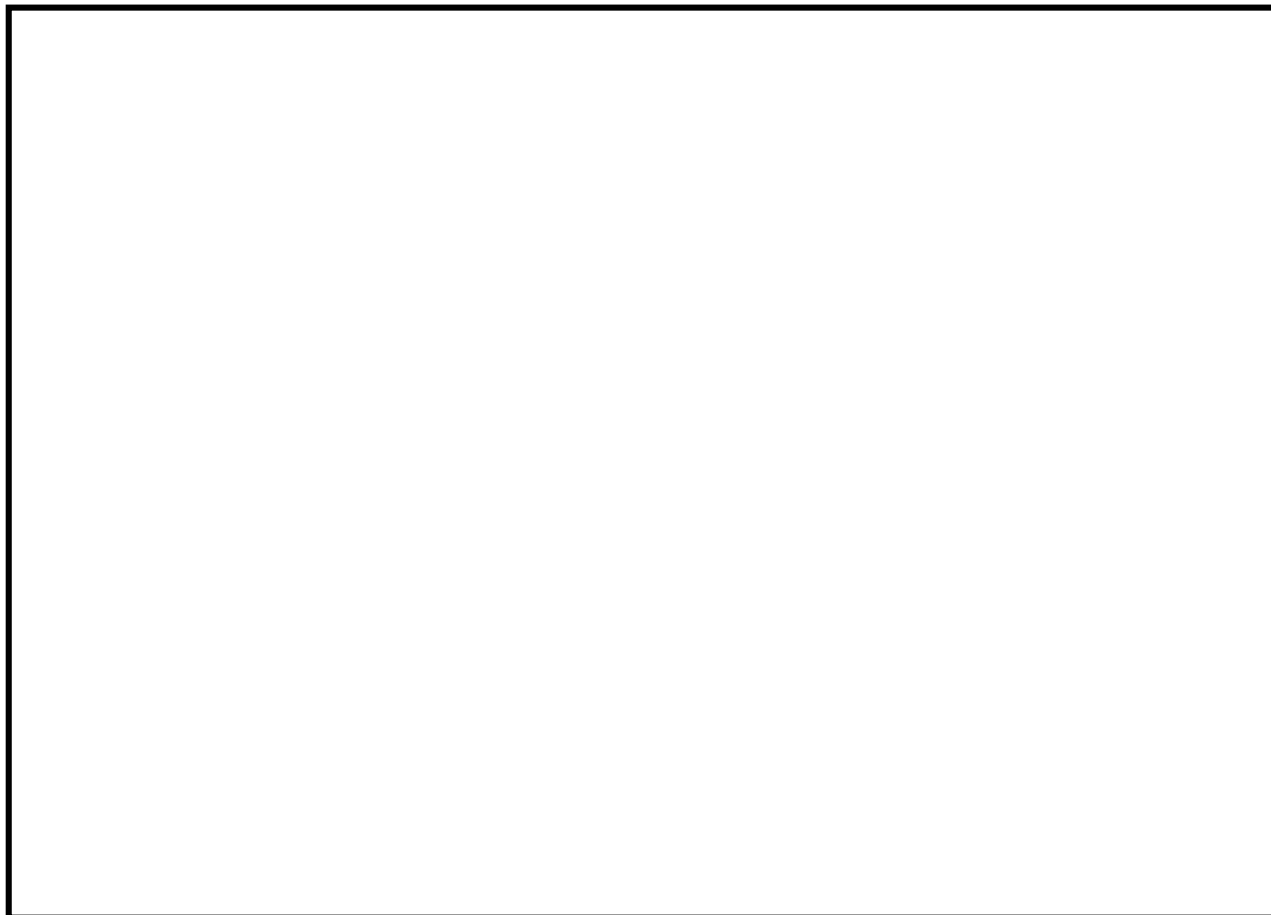


第6図 手順①におけるポンプ揚程および性能曲線との関係

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5m³/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22m³/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

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。

ト) の長さとした。

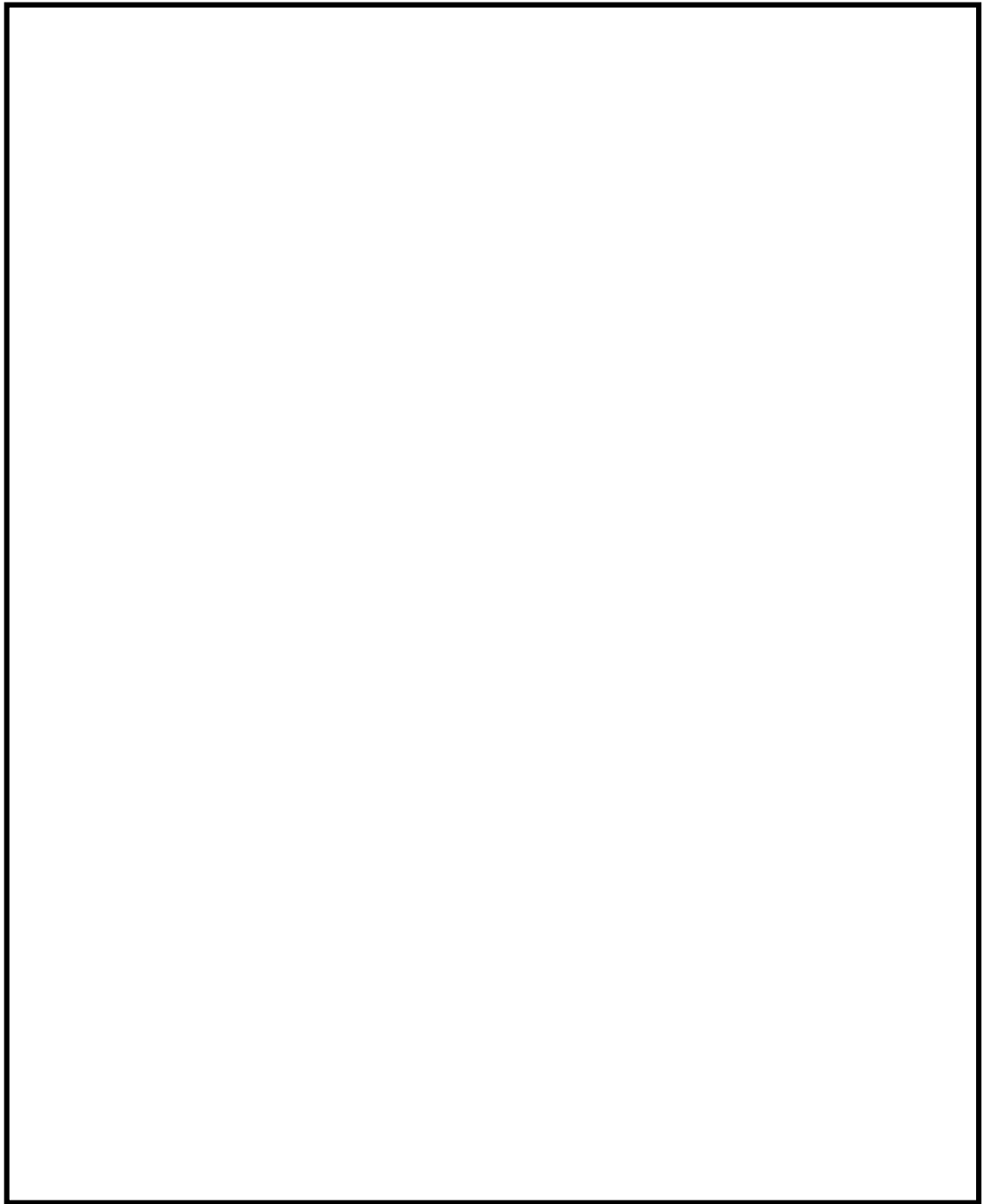
第7表 系統内配管情報

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95m³/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。

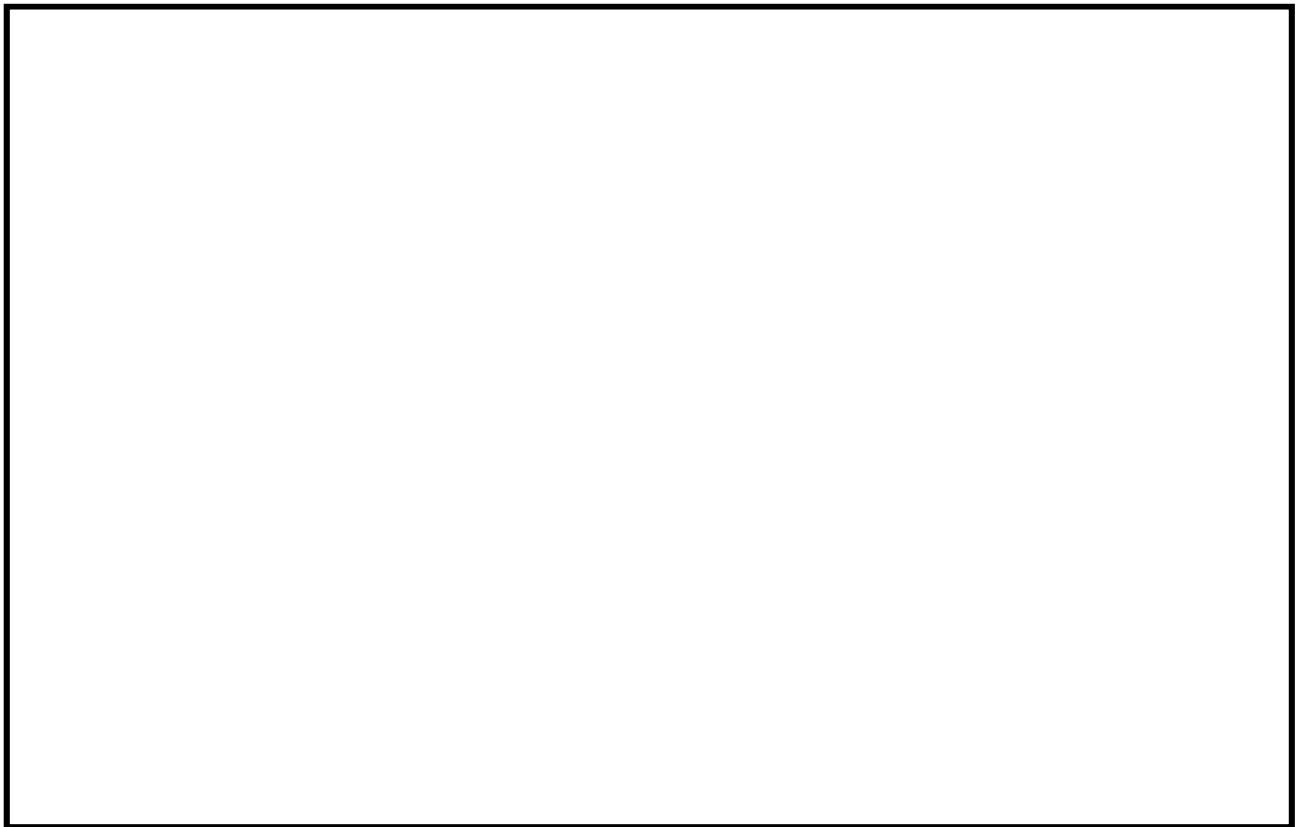
第8表 水源と移送先の静水頭差（手順⑤）

	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

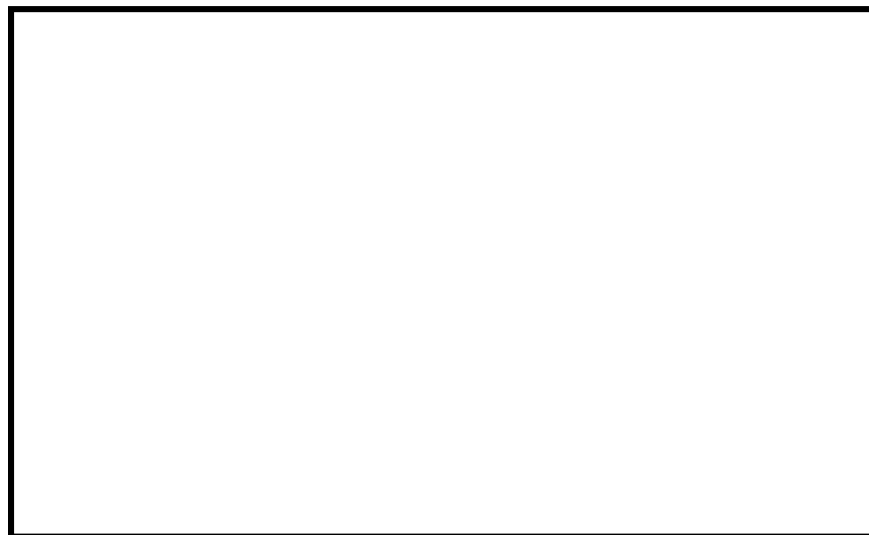
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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39m³/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 shortest route（1号炉西側シャッターからの敷設ルート）の長さとした。

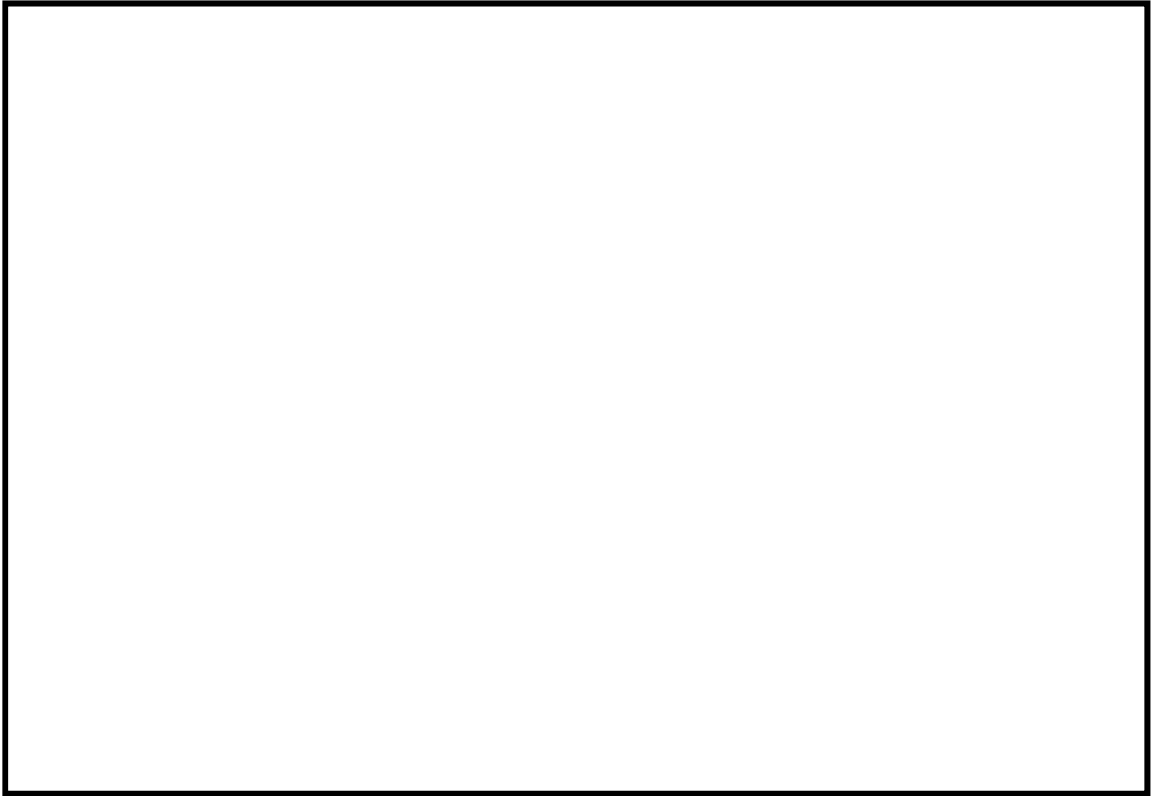
第11表 系統内配管情報（注水手順⑥）

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 260m³/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。

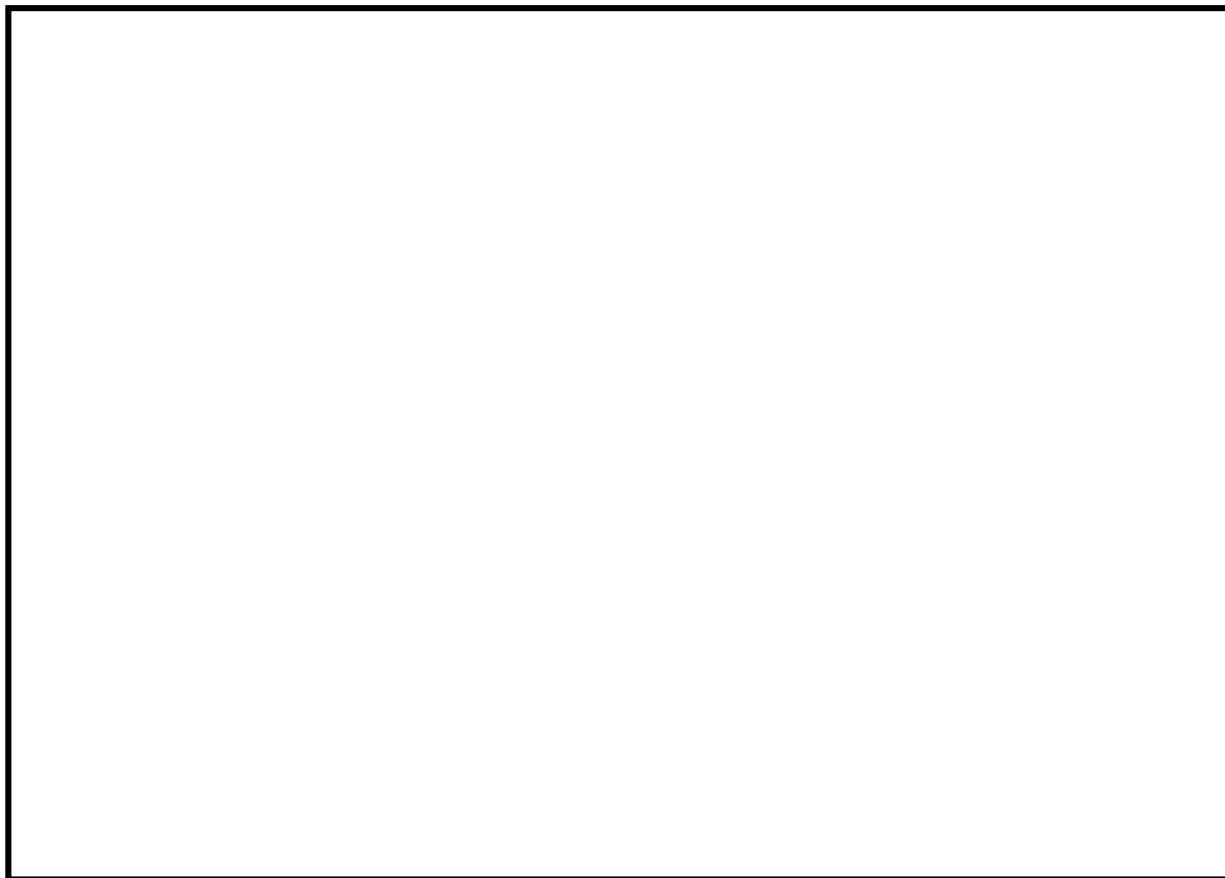


第 13 図 送水車 流量出典

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図に示す通り約□ m^3/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）

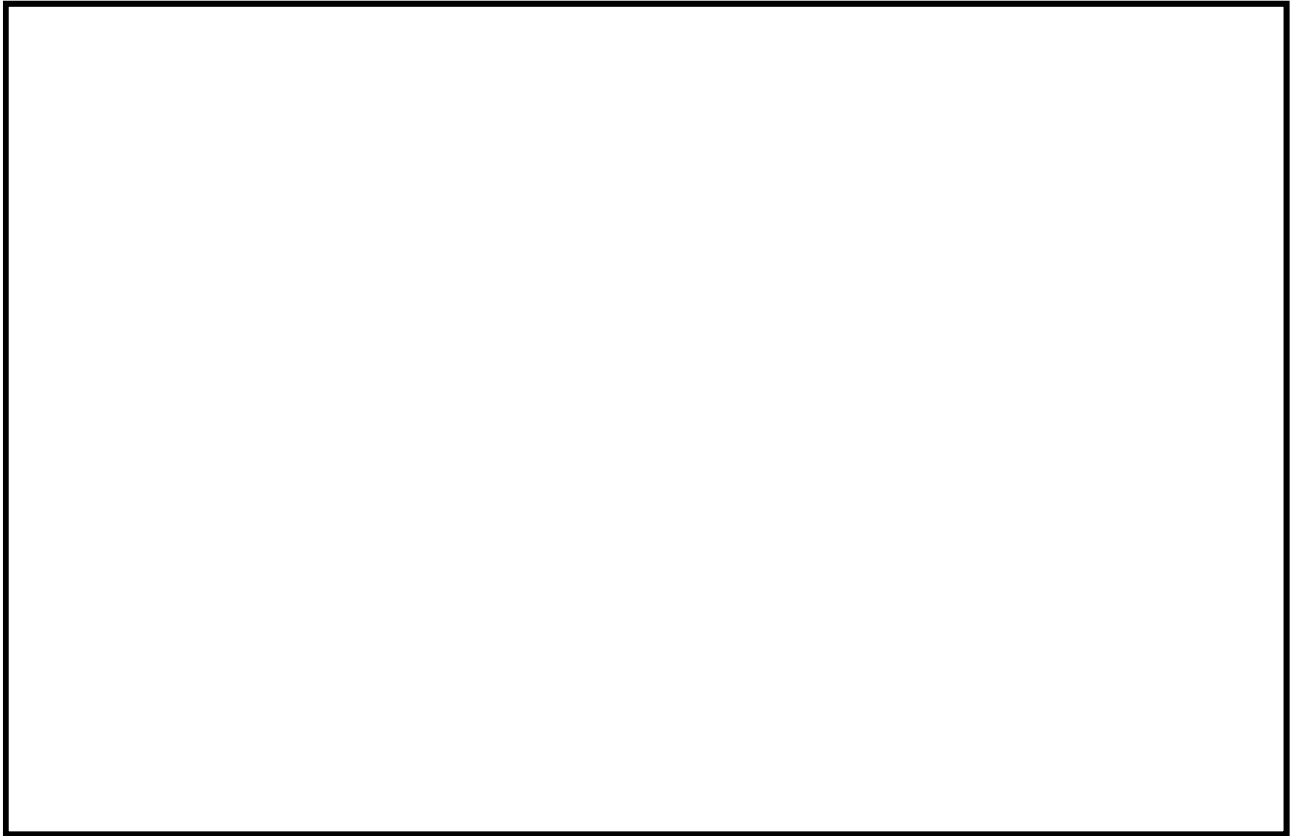
放水手順②については、3.1.2.(2)に示す通り、配備されている大容量ポンプ（放水砲用）の型式および設備構成を踏まえ設定する。なお、大容量ポンプ（放水砲用）にはポンプ入口まで海水を送水する水中ポンプが備わっており、水中ポンプは油圧駆動でポンプインペラを回転させ水を吐出する構造となっている。流量増加の際はインペラへ油圧をかけることになるが、大容量ポンプ（放水砲用）の揚程曲線上の最大送水量において作動油圧上限値に達し、当該上限値以上の油圧が水中ポンプにかかることがない機構となっているため、大容量ポンプ（放水砲用）の流量が当該上限値以上となることはない。

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 m³/h（型式：HS900）、 \square m³/h（型式：HS900N）、 \square m³/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 m³/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 m³/hを2等分した \square m³/hとなる。

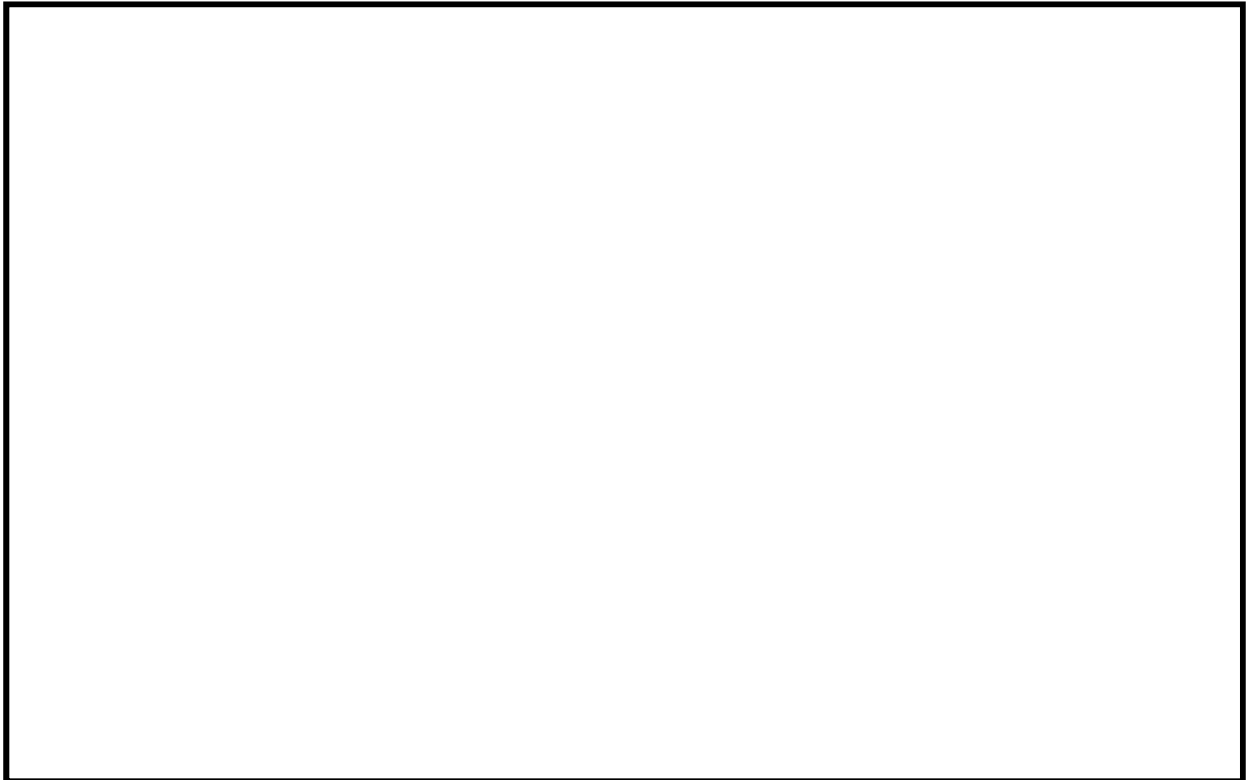
第12表 高浜1, 2号炉に配備している大容量ポンプ（放水砲用）の型式

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 m ³ /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。

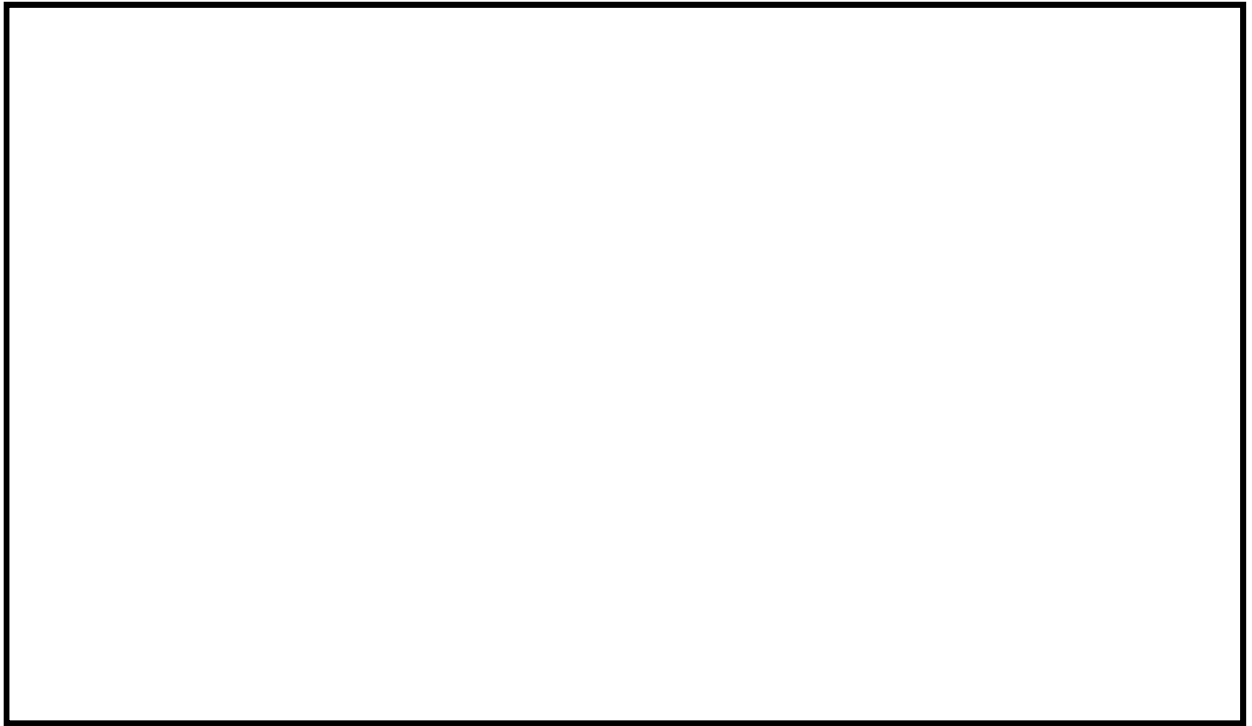


第 15-1 図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS900）



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

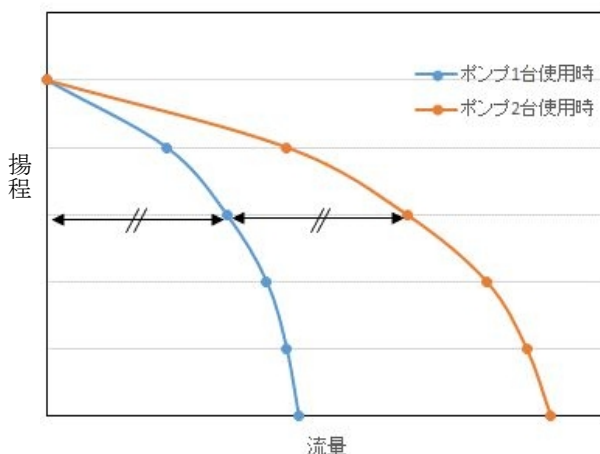
不確かさを考慮した条件の設定に際しては、重大事故等への対応に向け整備された手順に示される具体的記載事項を踏まえ、以下の考え方にに基づき設定する。

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。

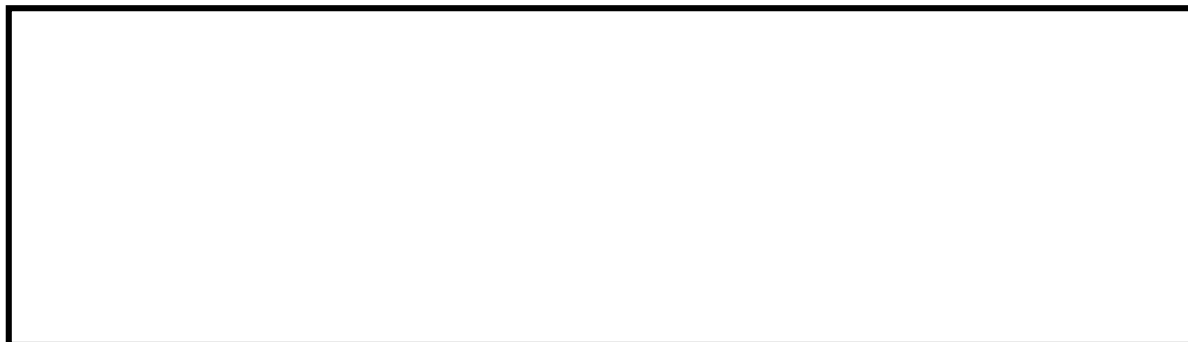


第16図 ポンプ複数台使用時の揚程曲線設定(2台使用時の概要)

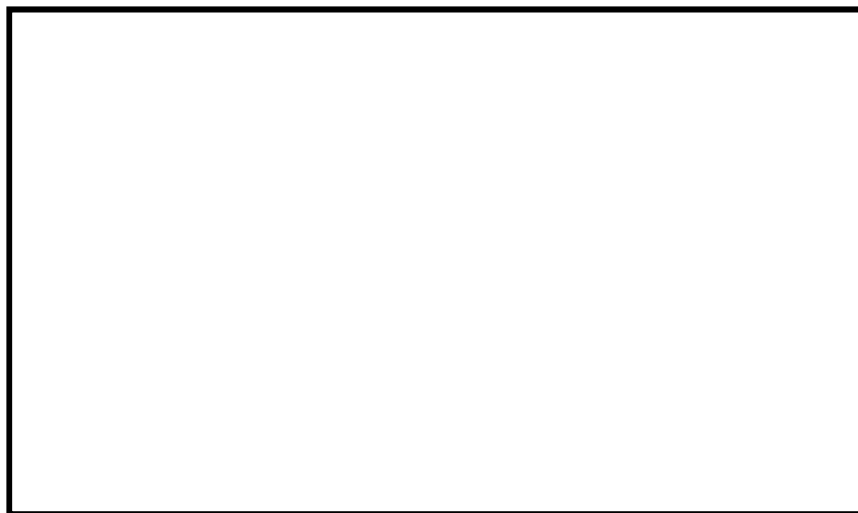
上記の前提および3.1.に示す具体的考え方にに基づき、各手順における流量の不確かさを考慮した条件を設定する。なお、基本ケース条件からの変更点は、使用するポンプ台数の増加であり、系統圧損の評価手法および水源-SFPの水頭差は変わらないことから、以降では①での系統構成および各手順での評価結果のみを示す。

(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21m³/h、手順⑤で約42m³/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。

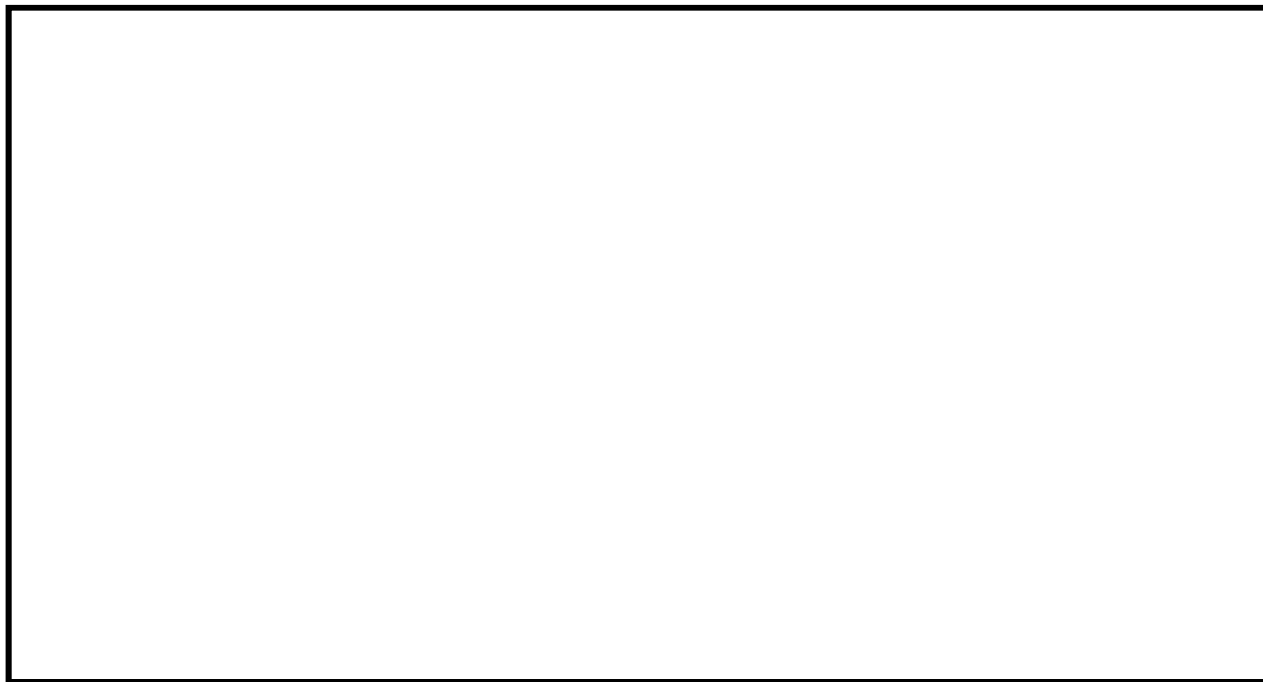
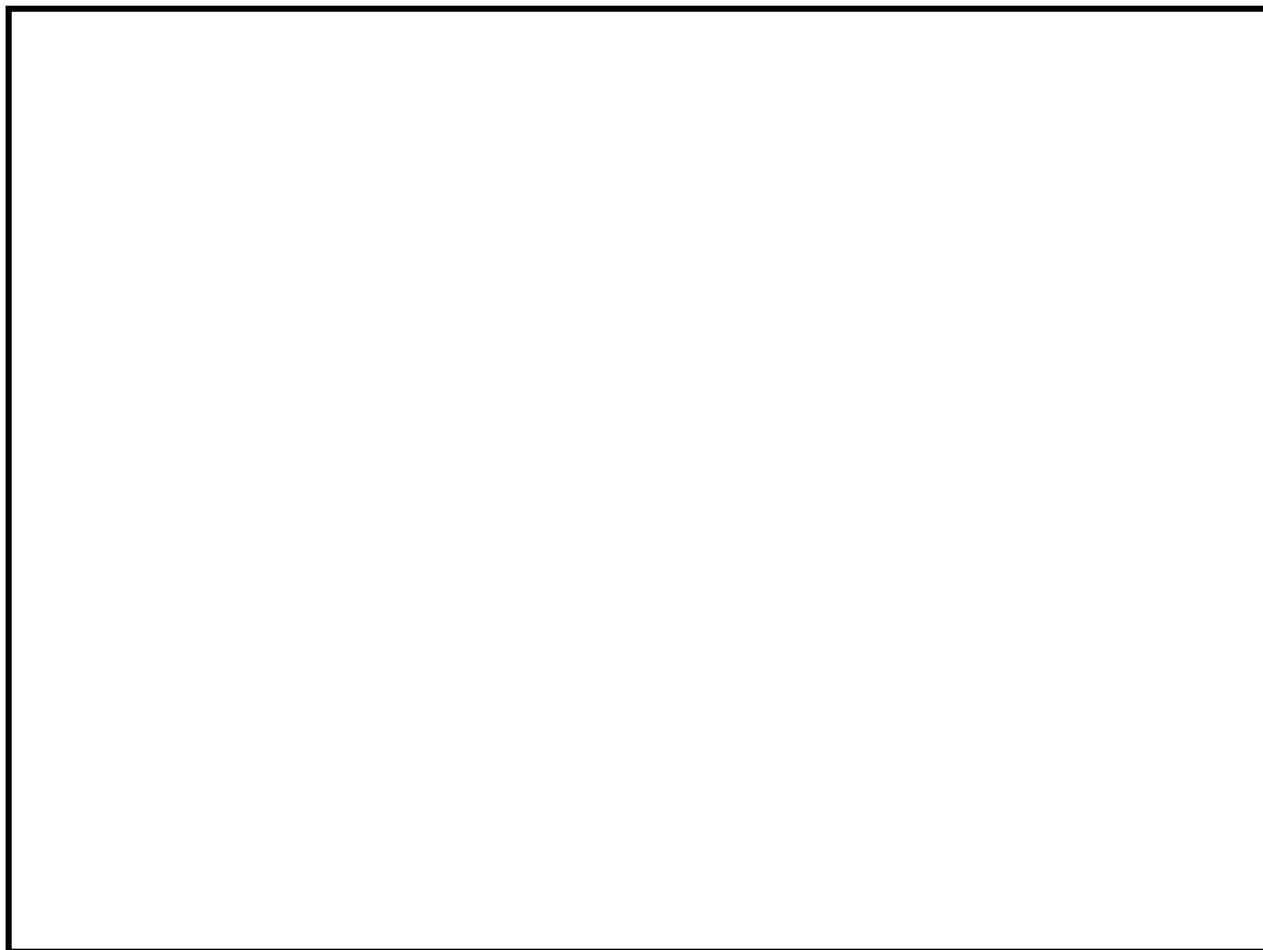
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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、重大事故等への対応に向け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 ^{※3}	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 ³ ^{※1}	約63時間	約9時間
2次系純水タンク	2700m ³ ^{※2}	約25時間 ^{※4}	約9時間
1, 2号機淡水タンク	15600m ³ (3120m ³ ^{※2} × 5基)	約118時間	約6時間
1次系純水タンク	510m ³ ^{※2}	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。

水源		実施要員 (人数)	時間												
			SA設備準備開始					放水砲放水開始							
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)	約3時間												
	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 m³/h、 m³/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 ³ /h	21 m ³ /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 ³ /h	15 m ³ /h	実測値
③ 1,2号淡水タンク(消火ポンプ-消火栓)	22 m ³ /h	132 m ³ /h	実測値
④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	95 m ³ /h	95 m ³ /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 ³ /h	42 m ³ /h	ポンプ揚程曲線
⑥ 海水(送水車)	260 m ³ /h	260 m ³ /h	ポンプ揚程曲線
合計	442 m ³ /h	565 m ³ /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 ³ /h	<input type="text"/> m ³ /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 ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	大容量ポンプ(放水砲用)の仕様上限
合計	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /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。

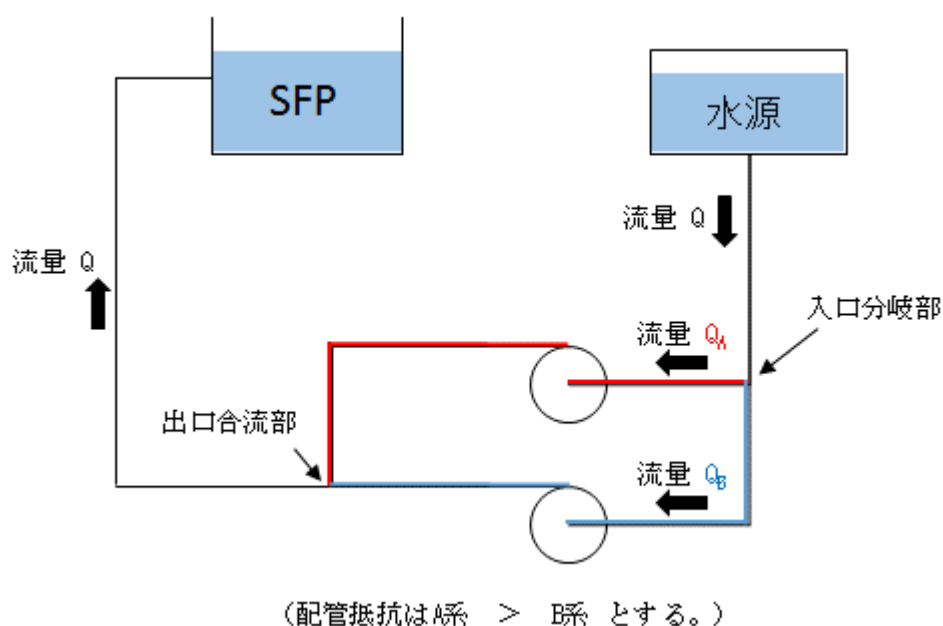


図1 ポンプが複数台設置される系統の概要

【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。

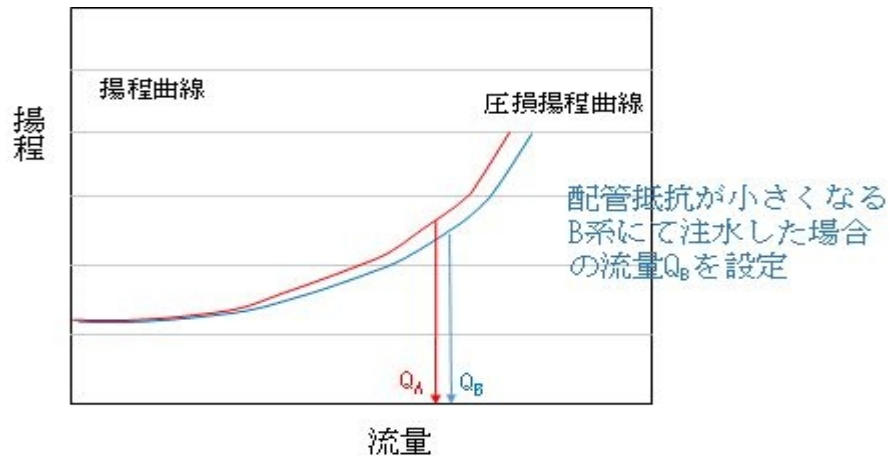


図2 基本ケースの流量（ポンプ起動台数は1台）の算出手法概要

【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。

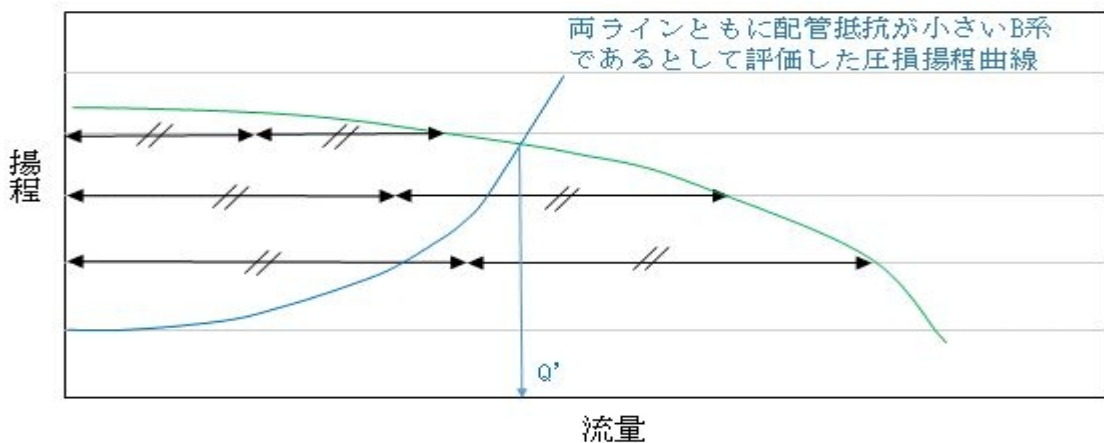


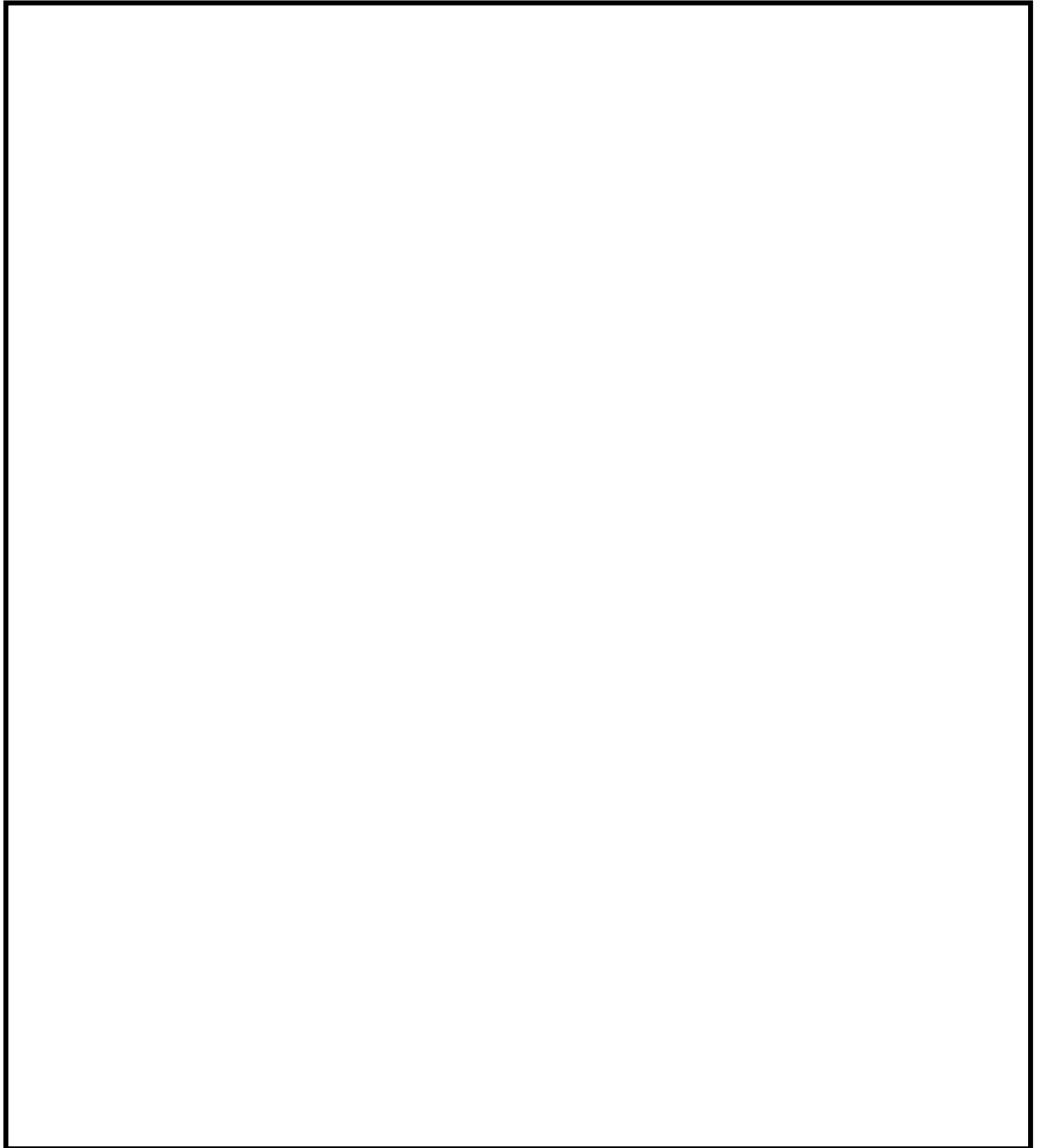
図3 不確かさを考慮した流量（ポンプ起動台数は全数）の算出手法概要

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、それに起因する圧損差は、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)

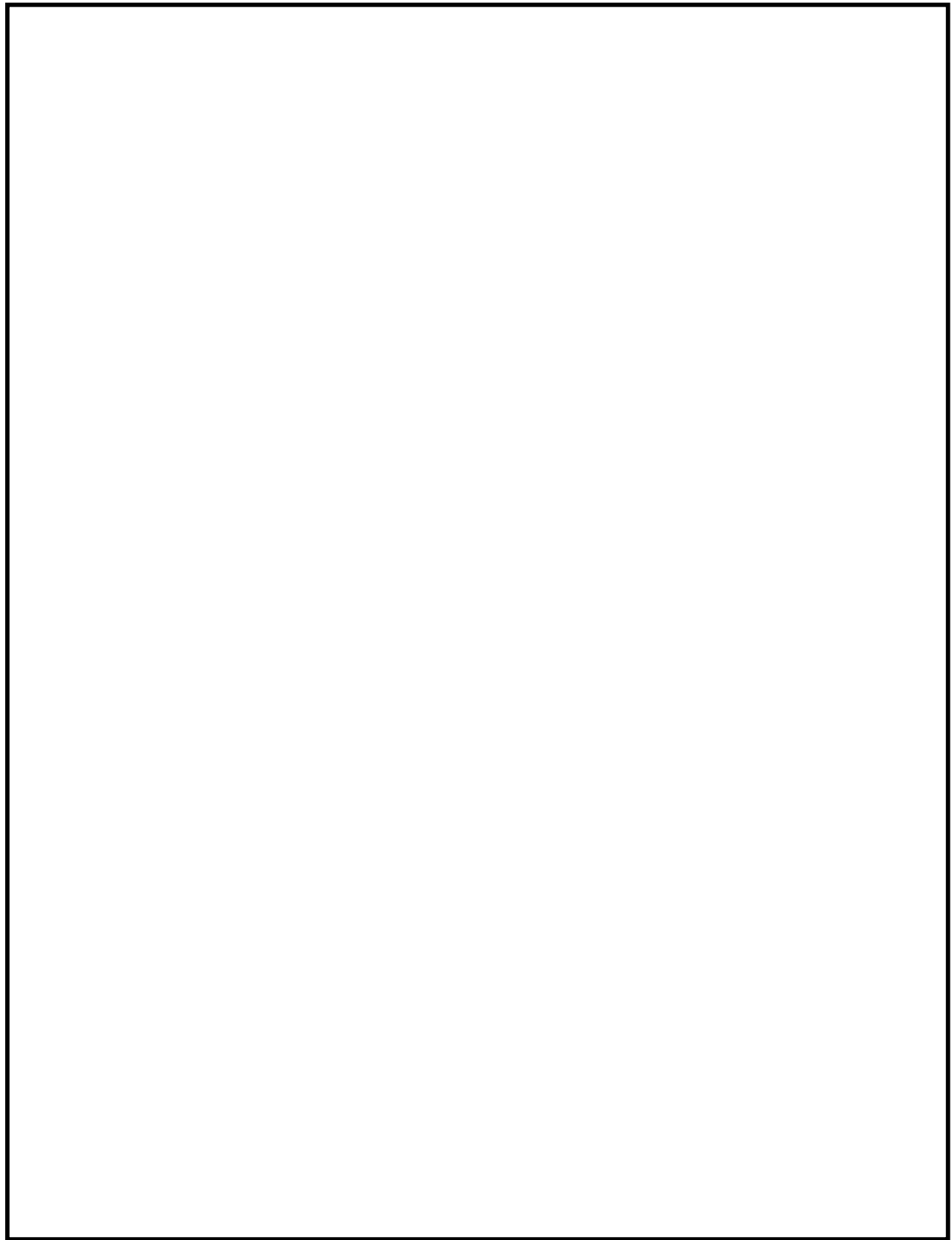
【2次系純水タンク (2次系純水ポンプ使用) からの注水 (注水手順②)】



高浜発電所1号機 事故時操作所則 (抜粋)

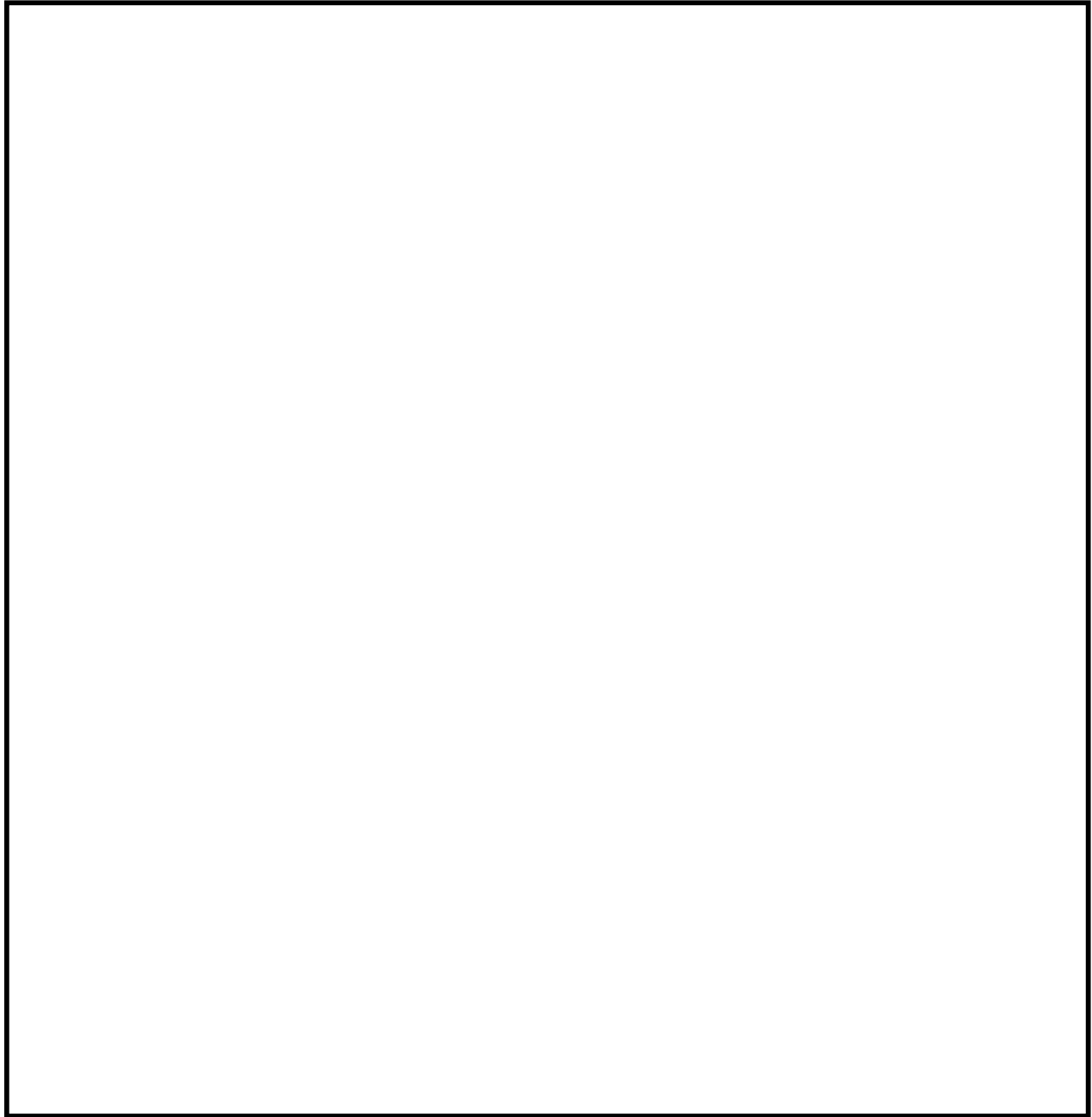
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【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。

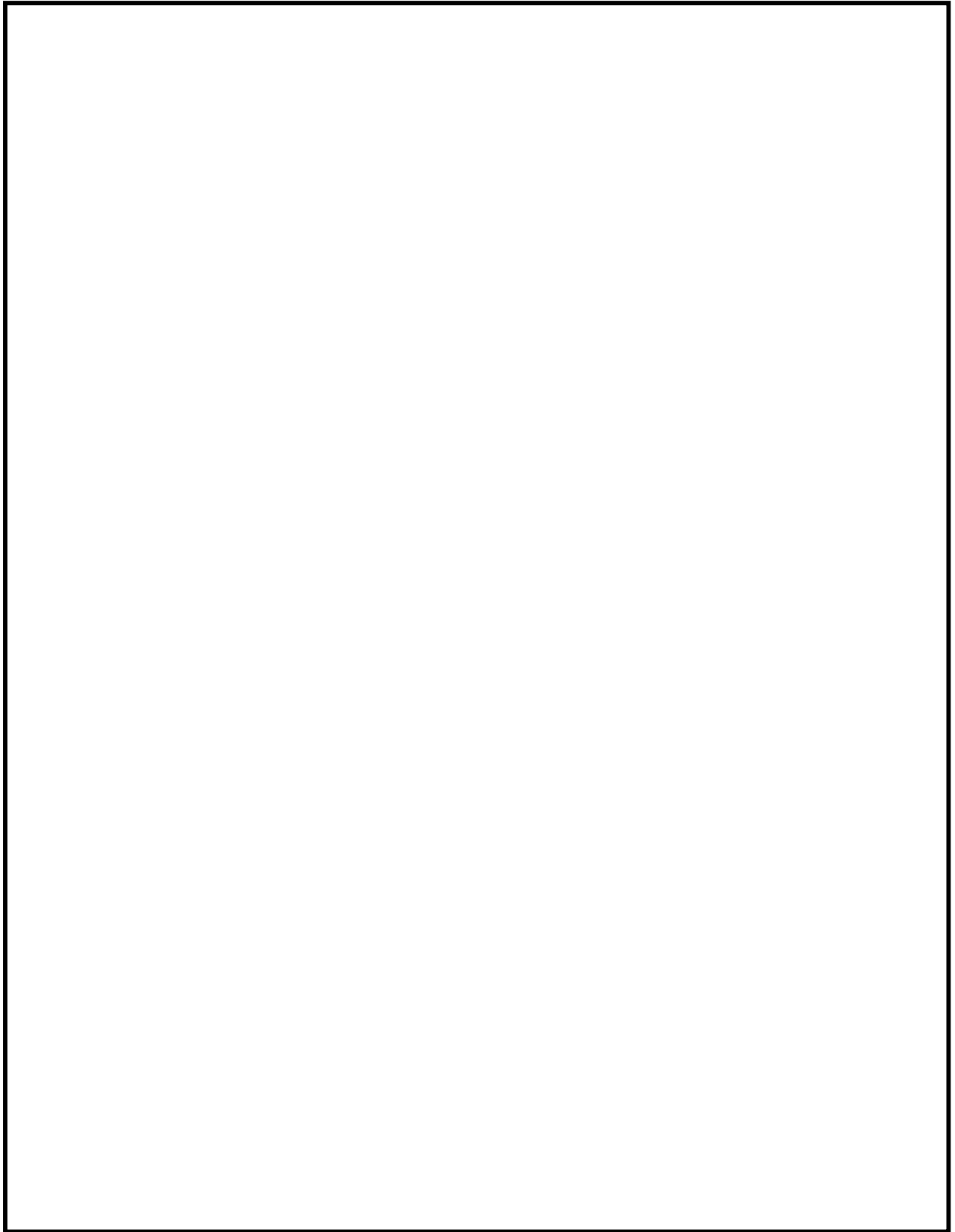
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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）

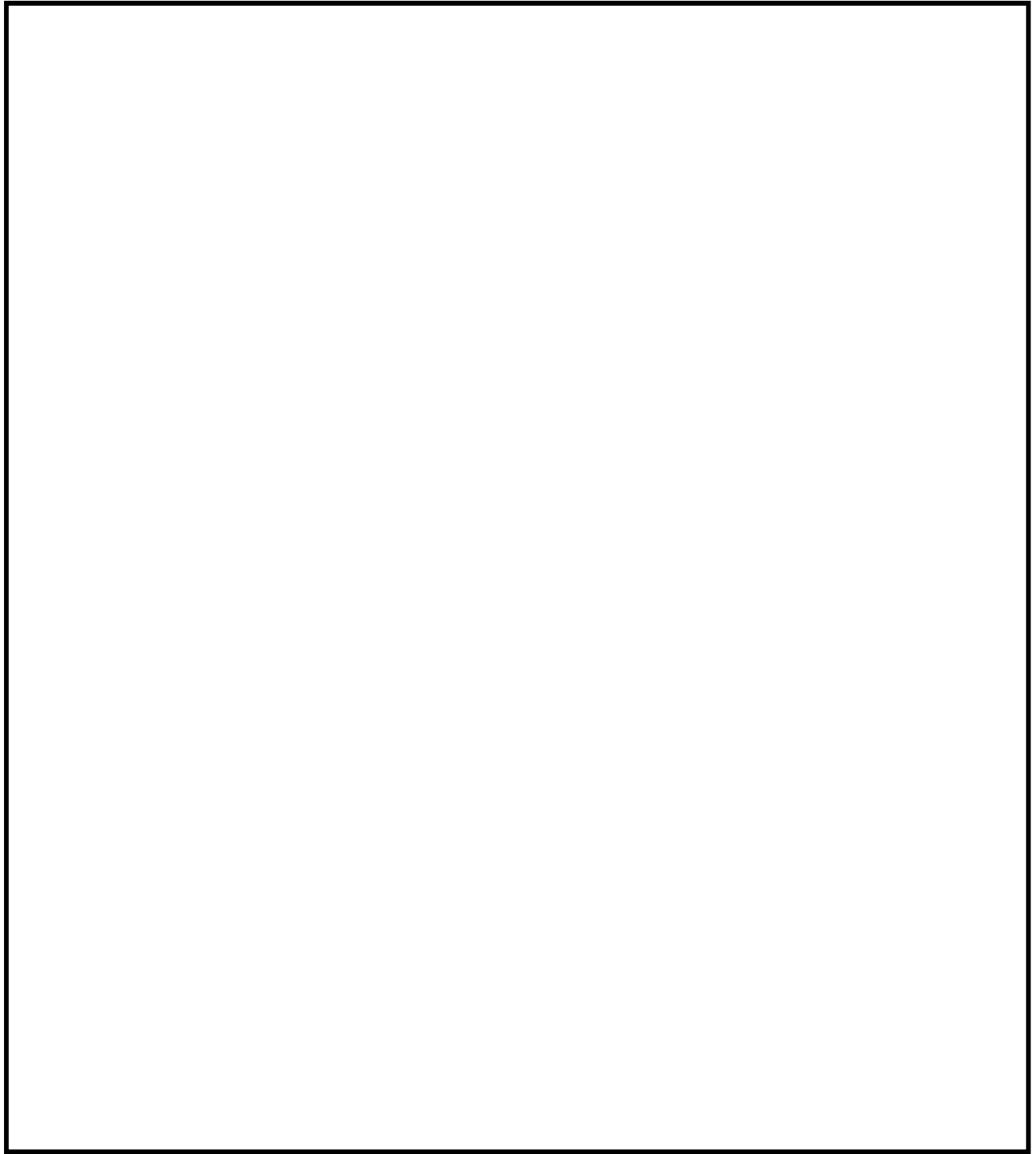
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【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）】



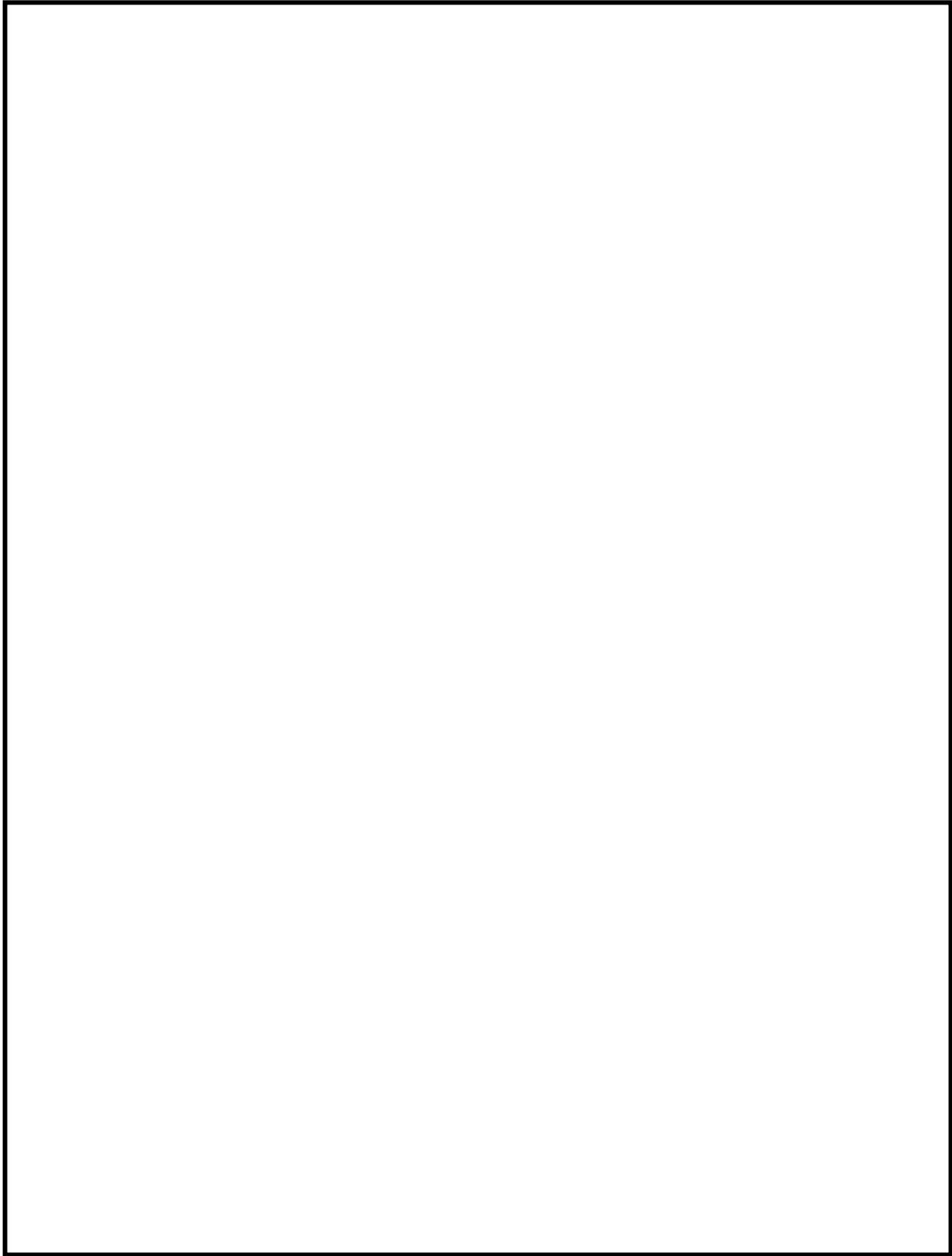
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。

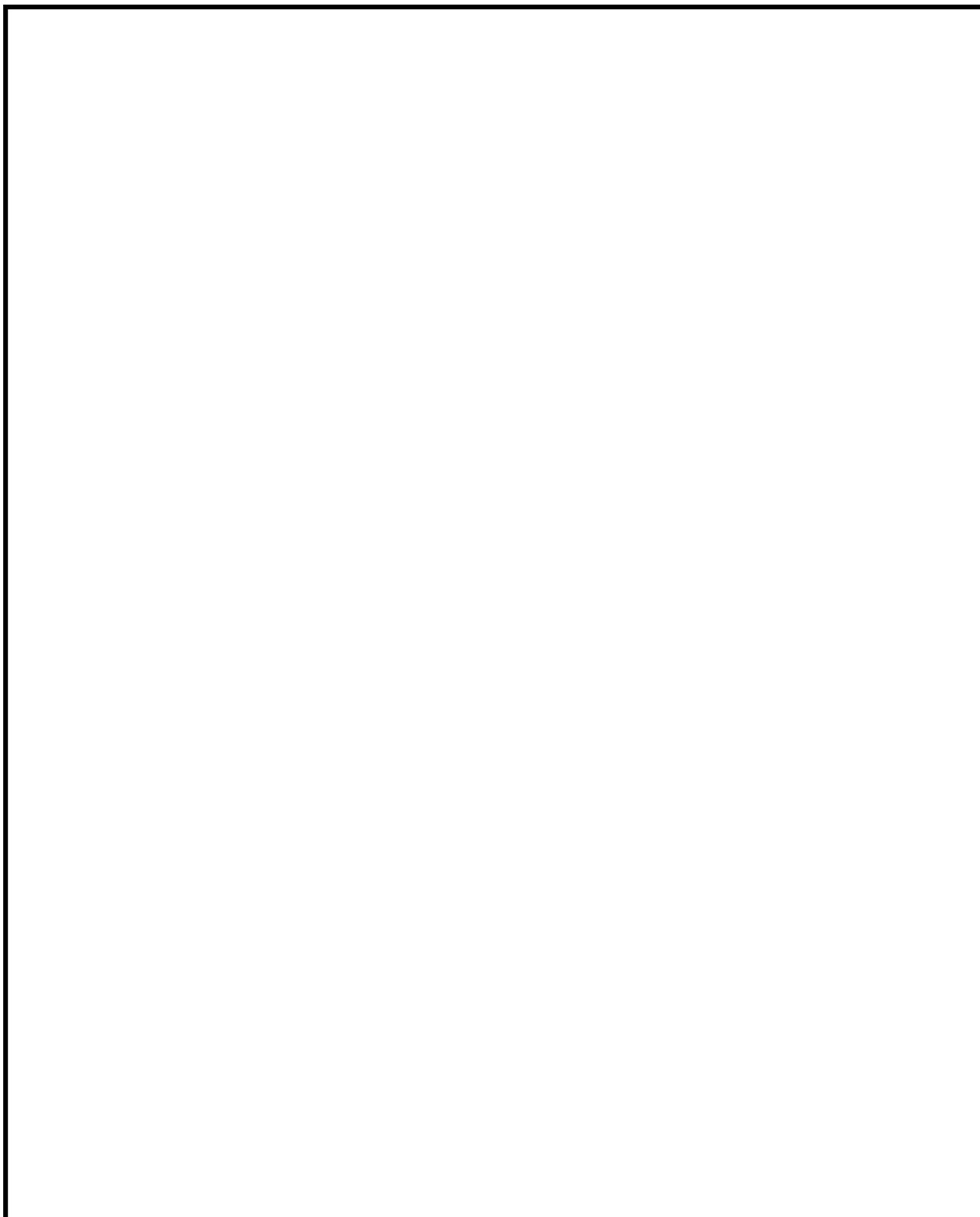


高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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】



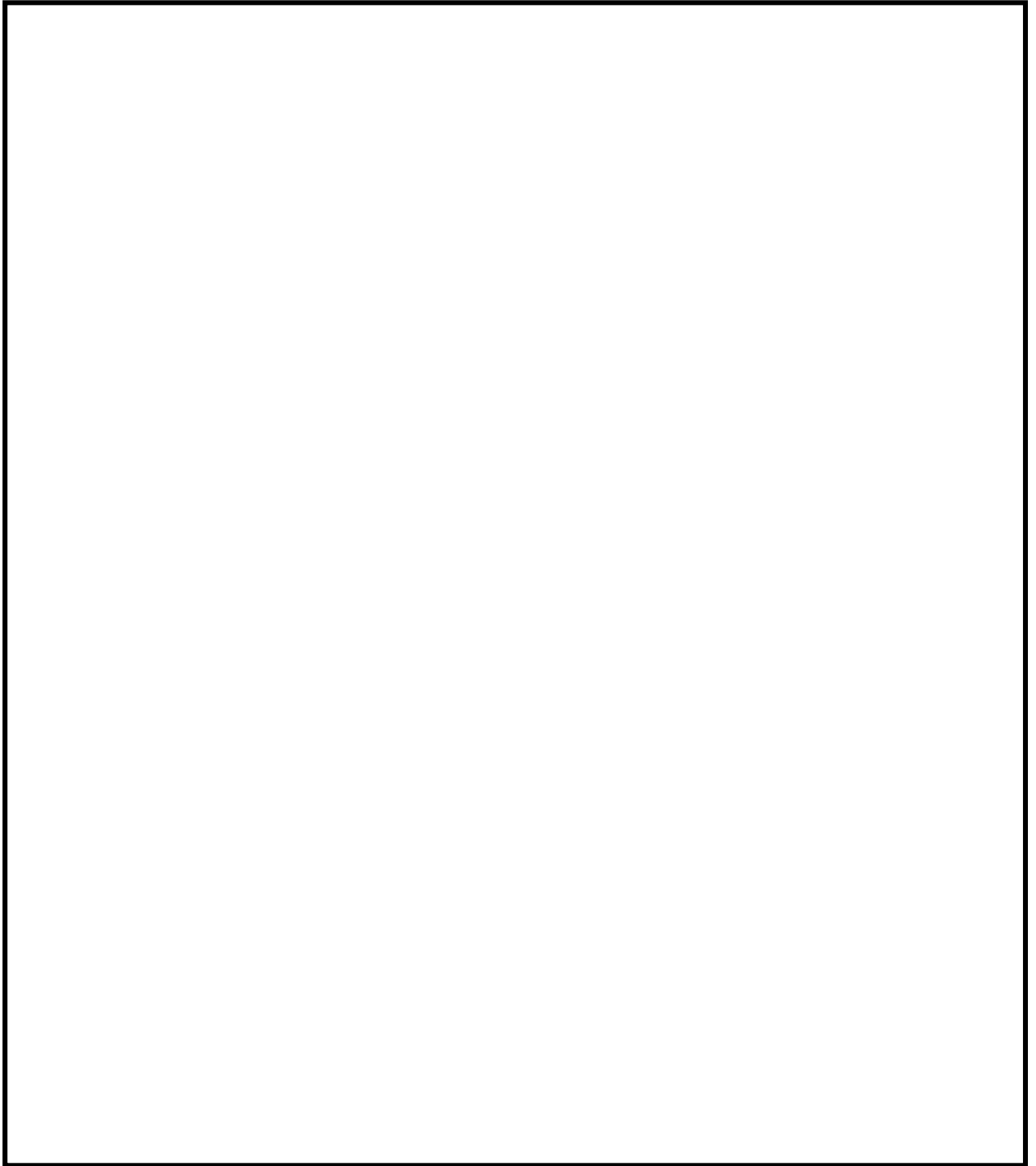
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



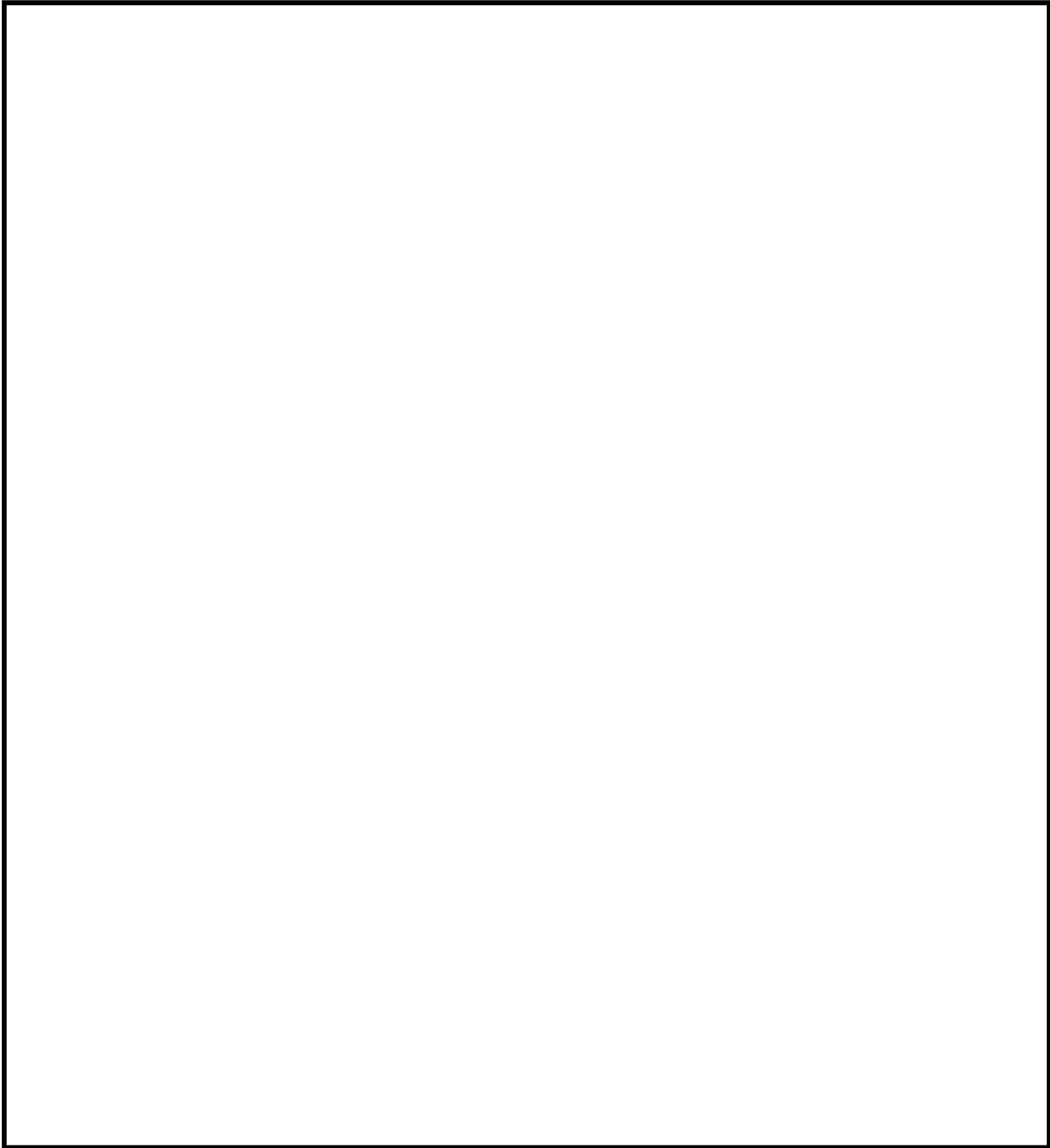
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



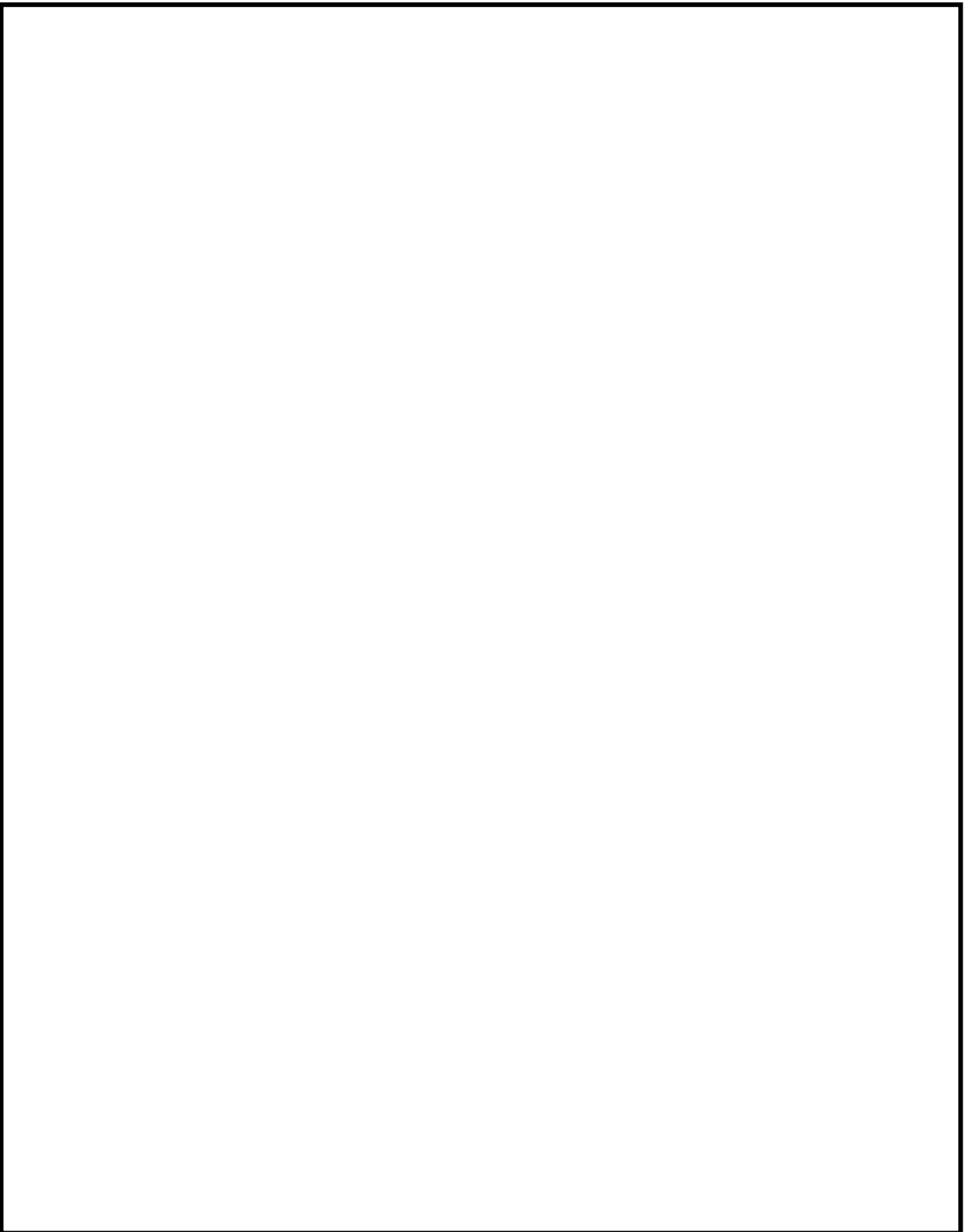
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



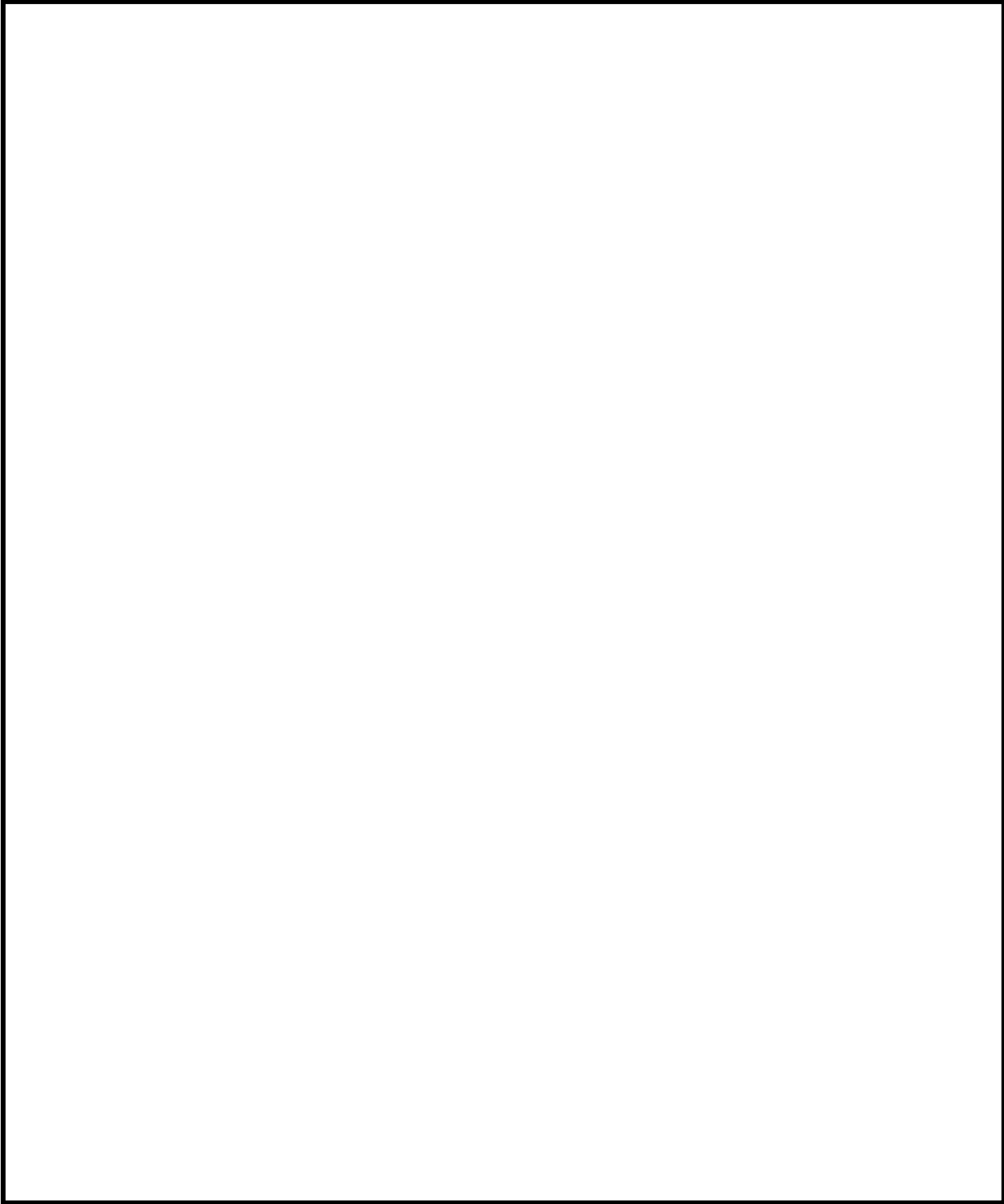
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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及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. 試験結果及び考察
 - 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、スプレーヘッド及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、及び試験結果を踏まえた基本ケース条件及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。

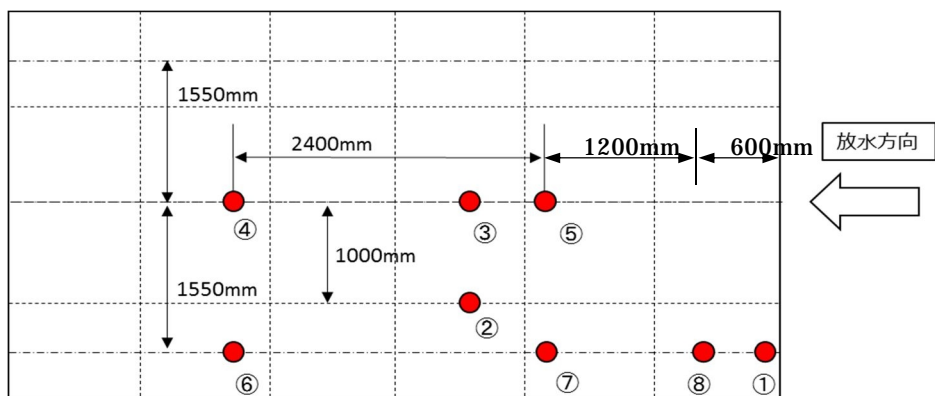
第1表 試験条件

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）

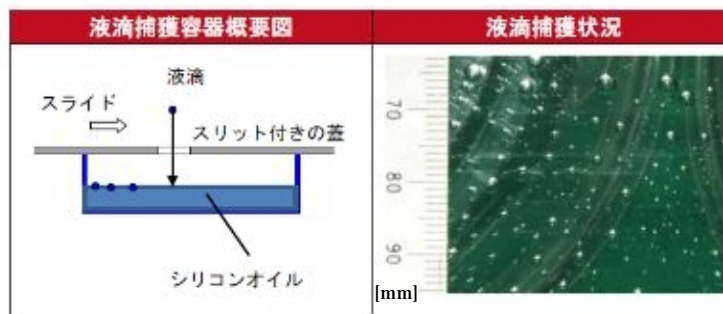
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第1図 液滴径測定試験 試験体系及び試験の様子



第2図 液滴径分布測定位置（平面図）



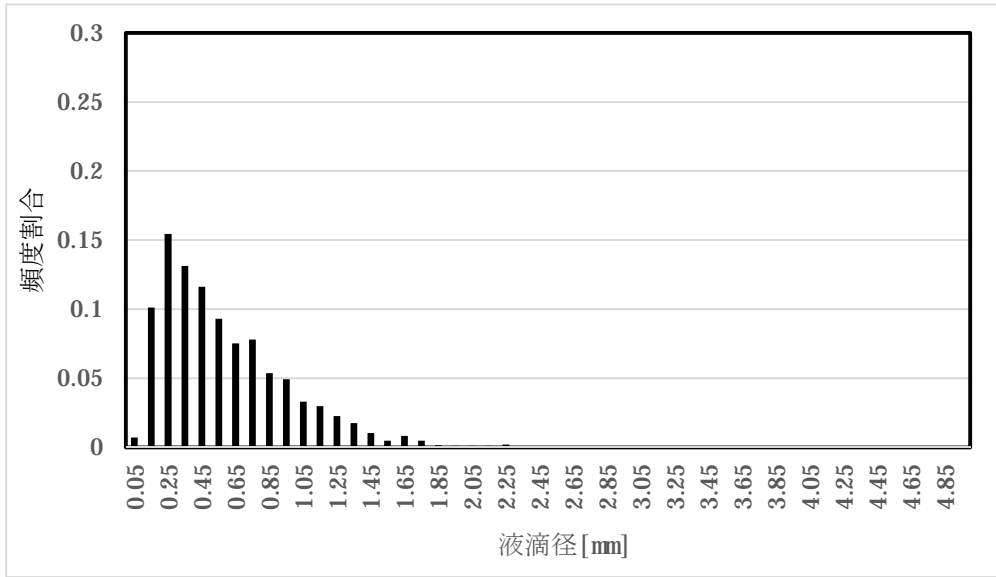
第3図 液滴捕獲装置の概要及び取得液滴の様子

3. 試験結果及び考察

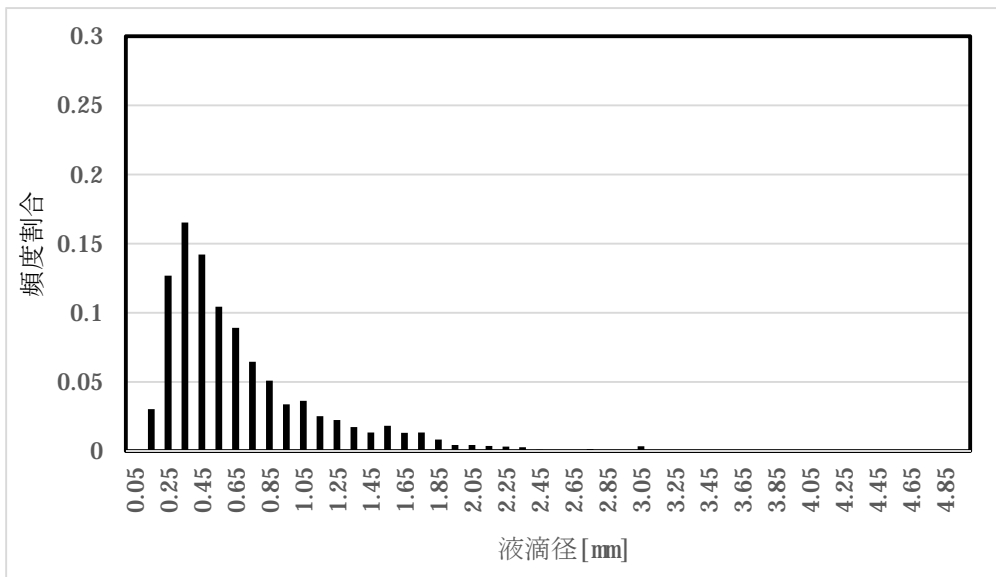
3.1. 試験結果

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図及び第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

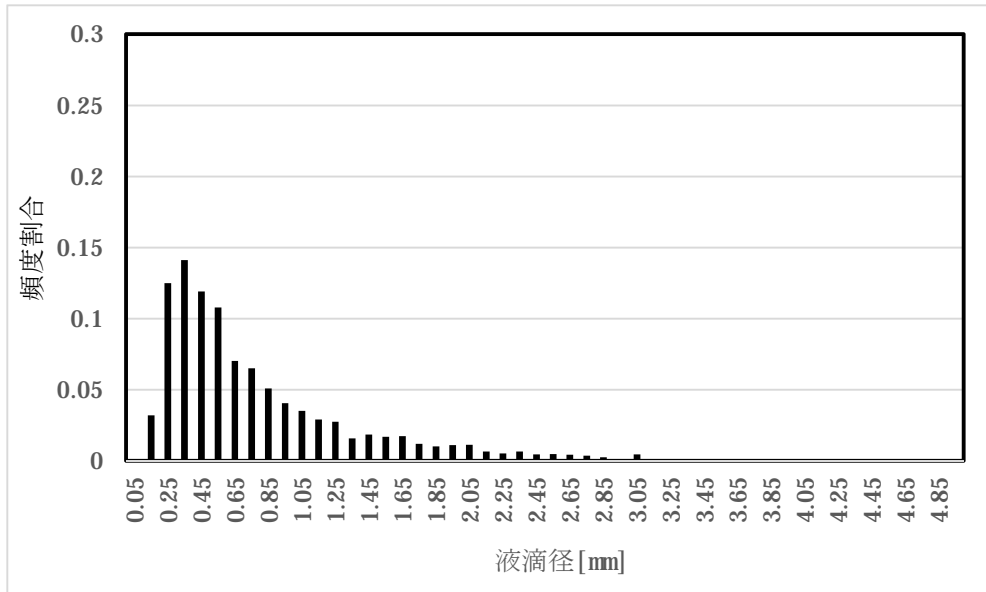


測定点②

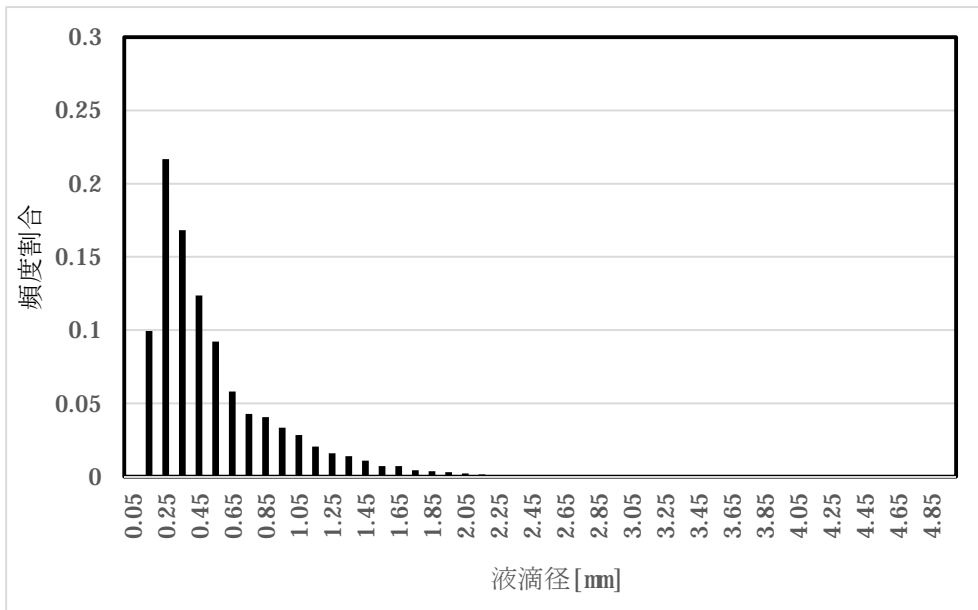


第4-1図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点③

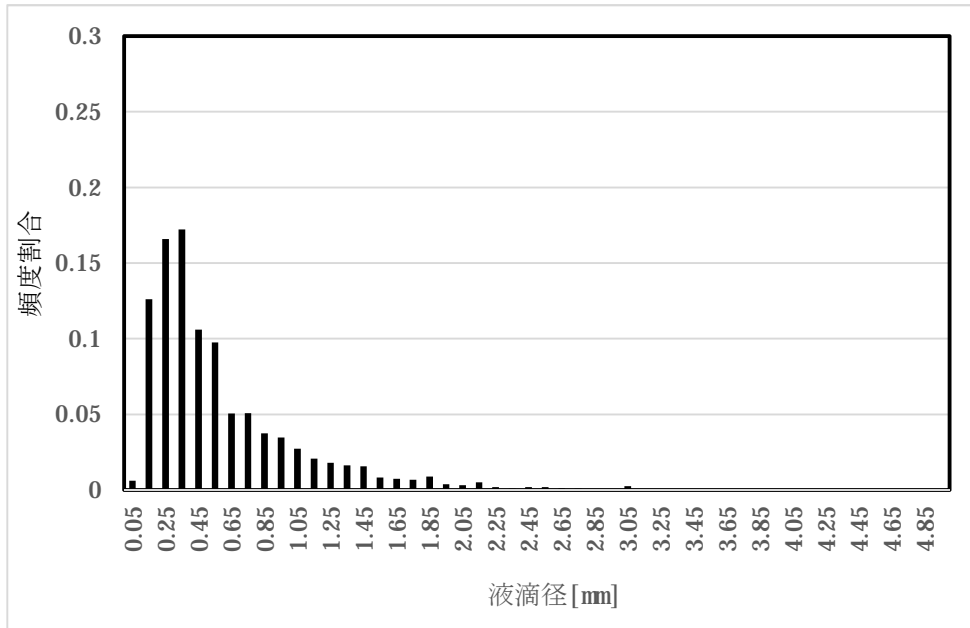


測定点④

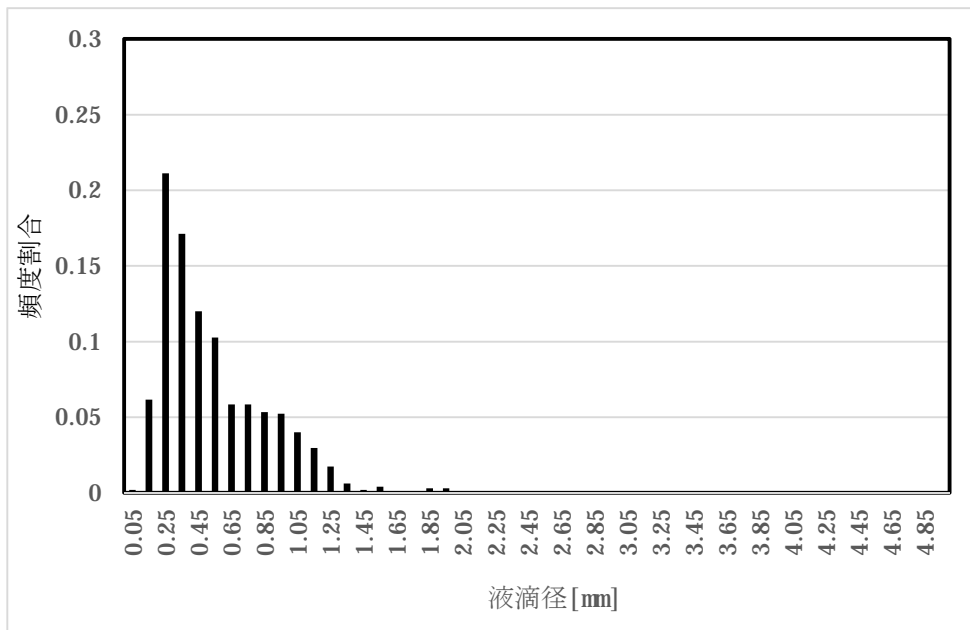


第4-1図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑤

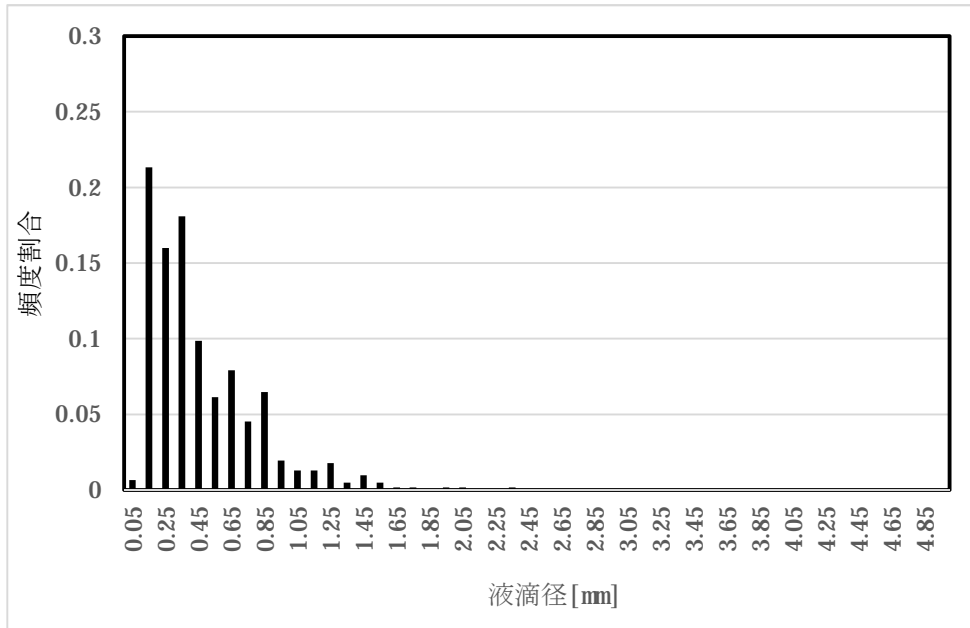


測定点⑥

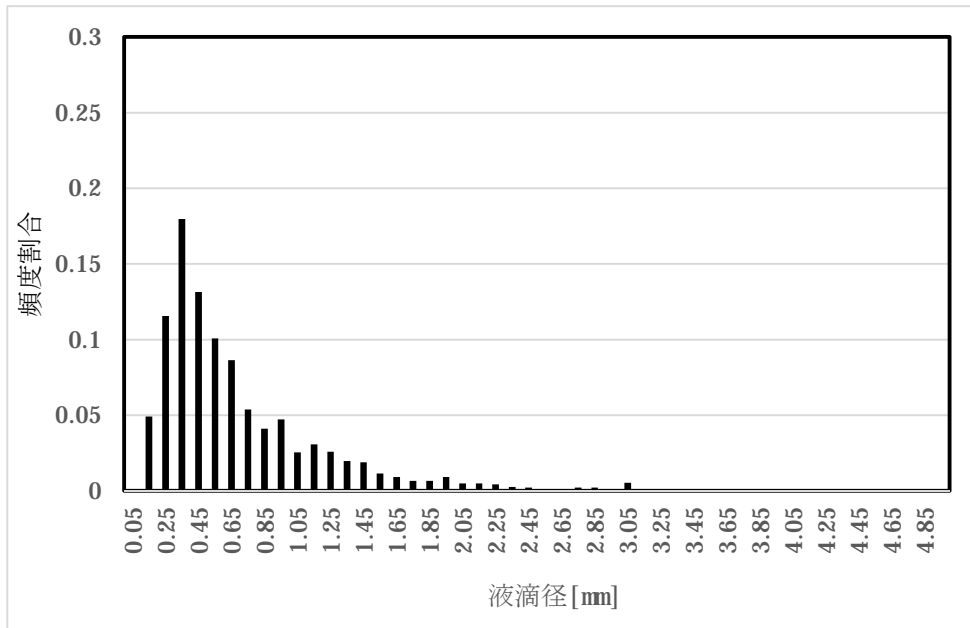


第4-1図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑦

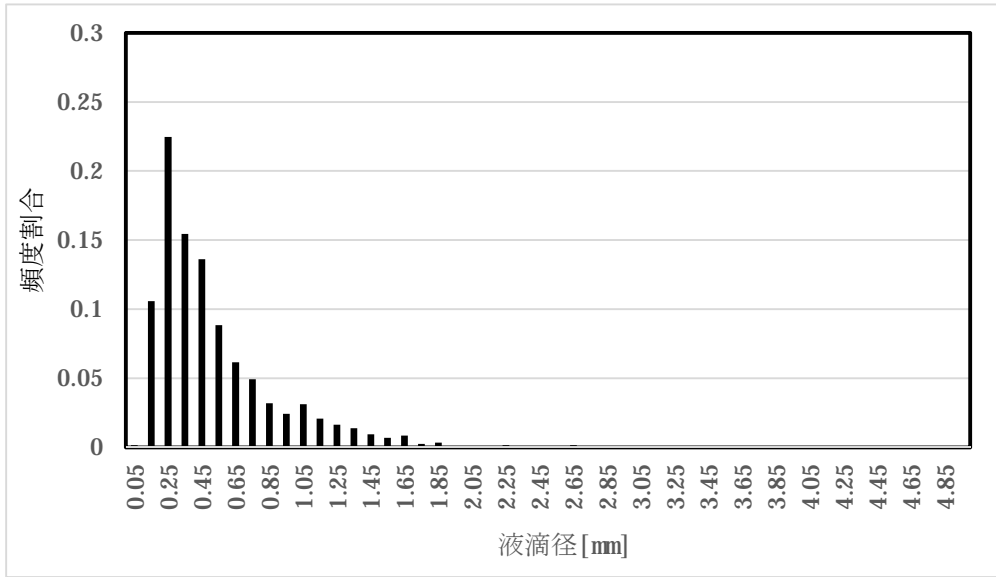


測定点⑧

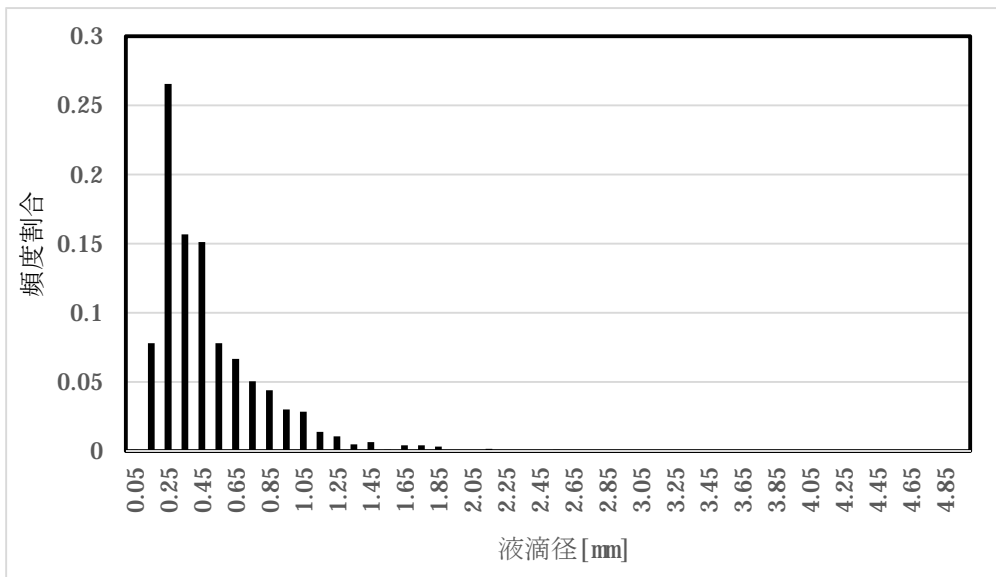


第4-1図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点①

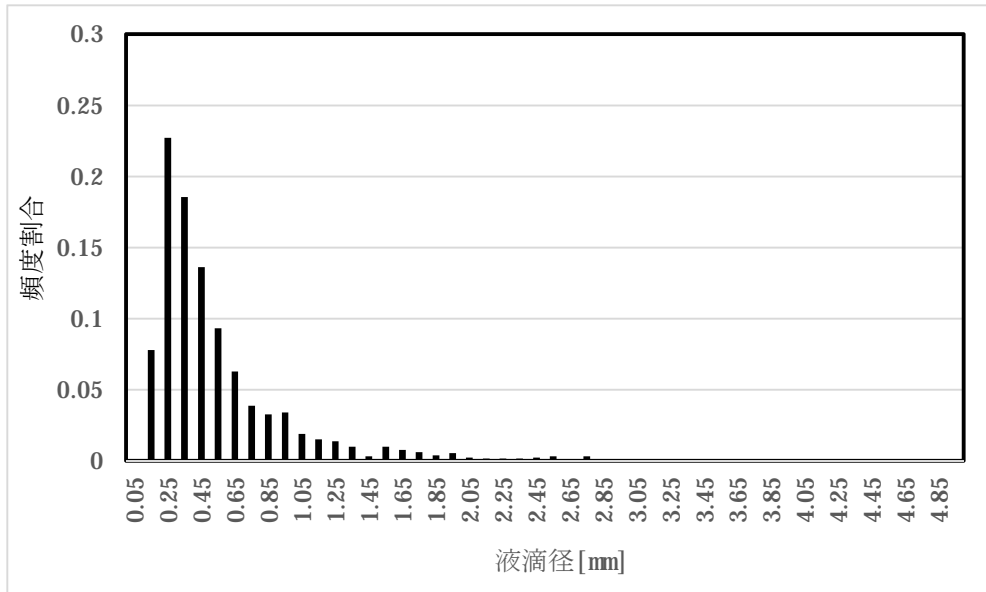


測定点②

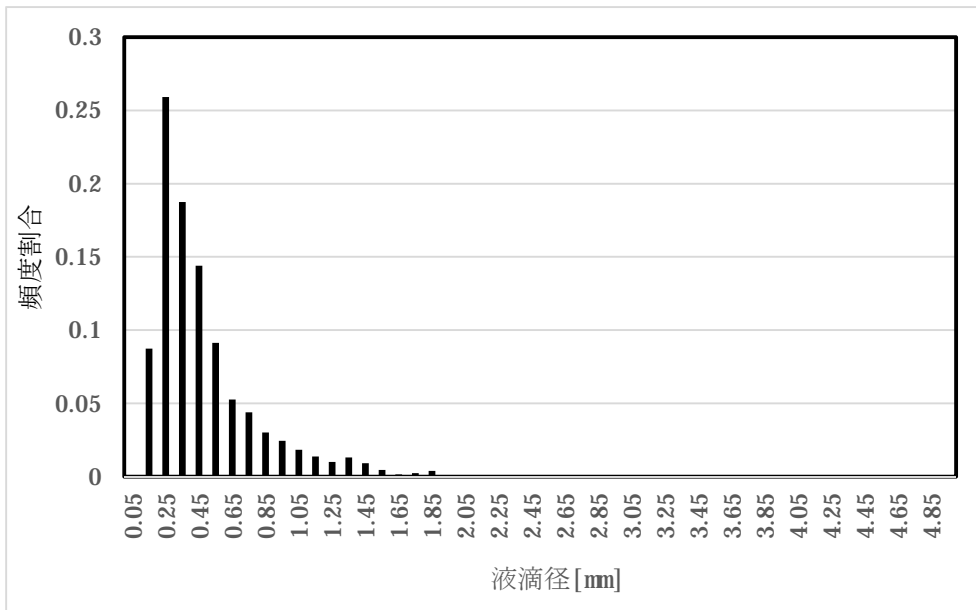


第4-2図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点③

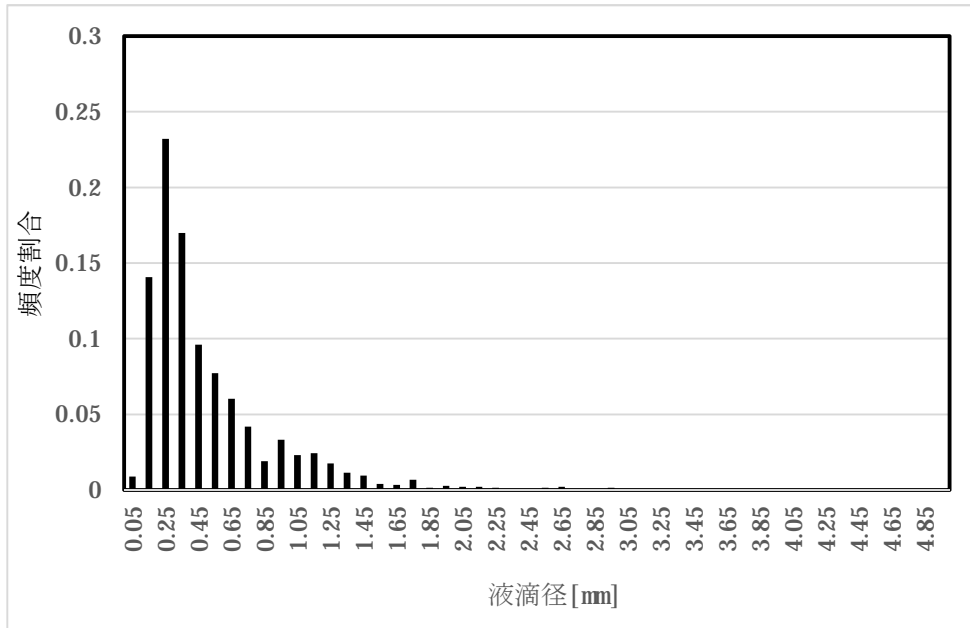


測定点④

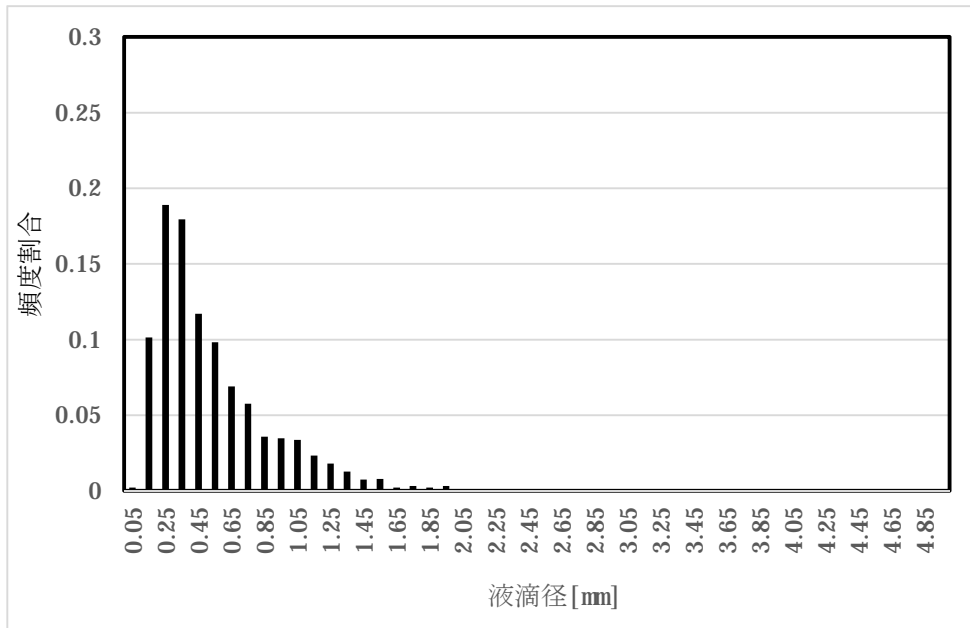


第4-2図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑤

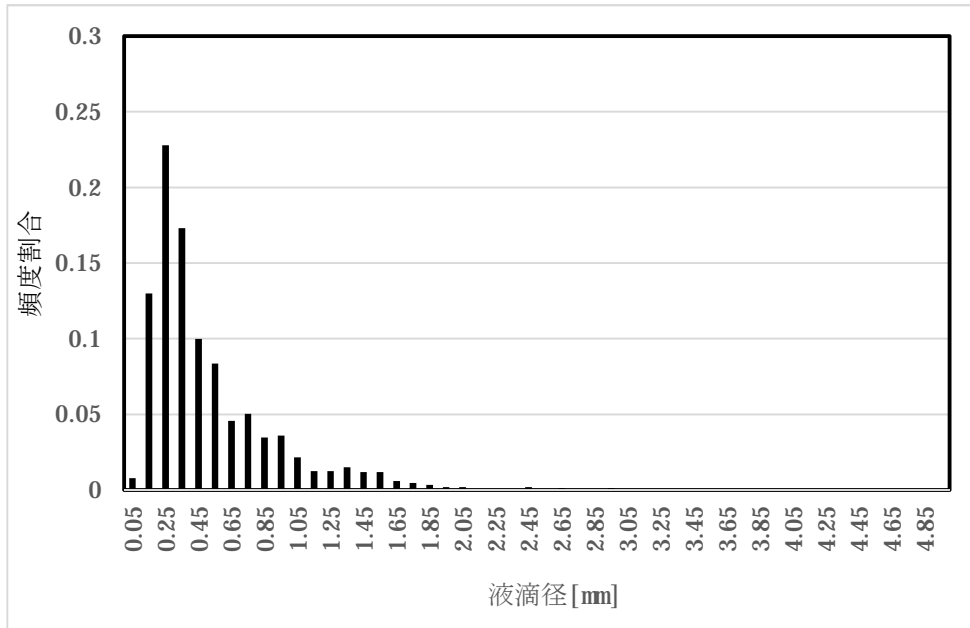


測定点⑥

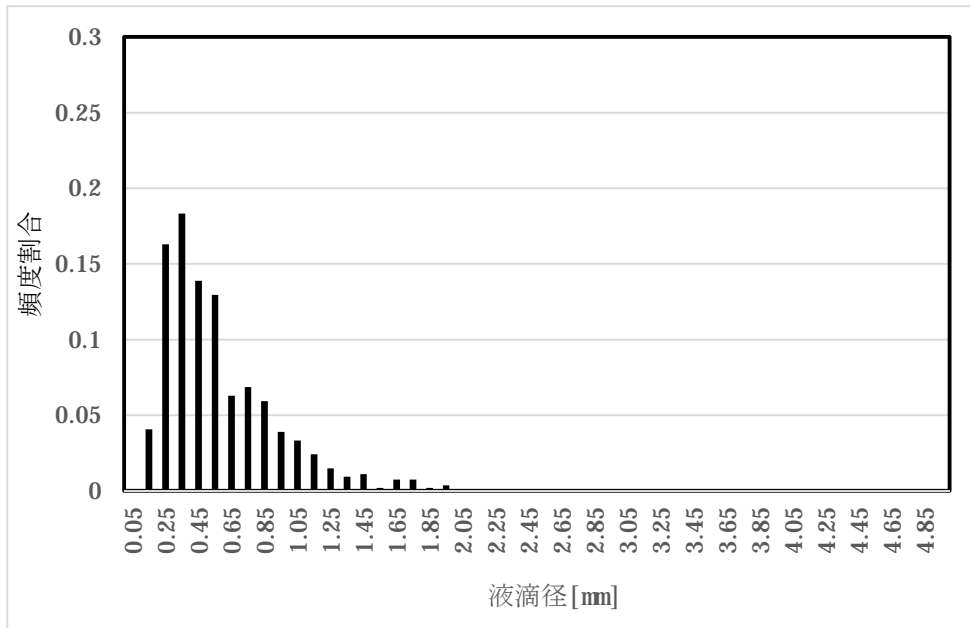


第4-2図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

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。

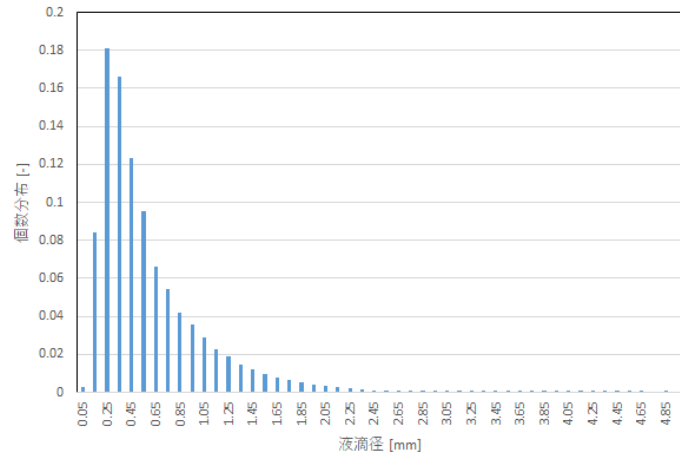
なお、既往の研究にて、ノズルから噴出された水が液滴に微粒化するまでの過程を確率的にモデル化した場合の粒径分布が対数正規分布で近似され、実際に測定した粒径分布とも良好に一致すること¹、種々のスプリンクラーノズルを用いた試験で取得した粒径分布が対数正規分布で近似されたことが知られて²おり、これらからも、各測定点での個数分布割合が対数正規性を有していた今回試験結果は妥当と考えられる。

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表及び第3表に示すが、2群間の分散及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。

¹ 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）

² 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。

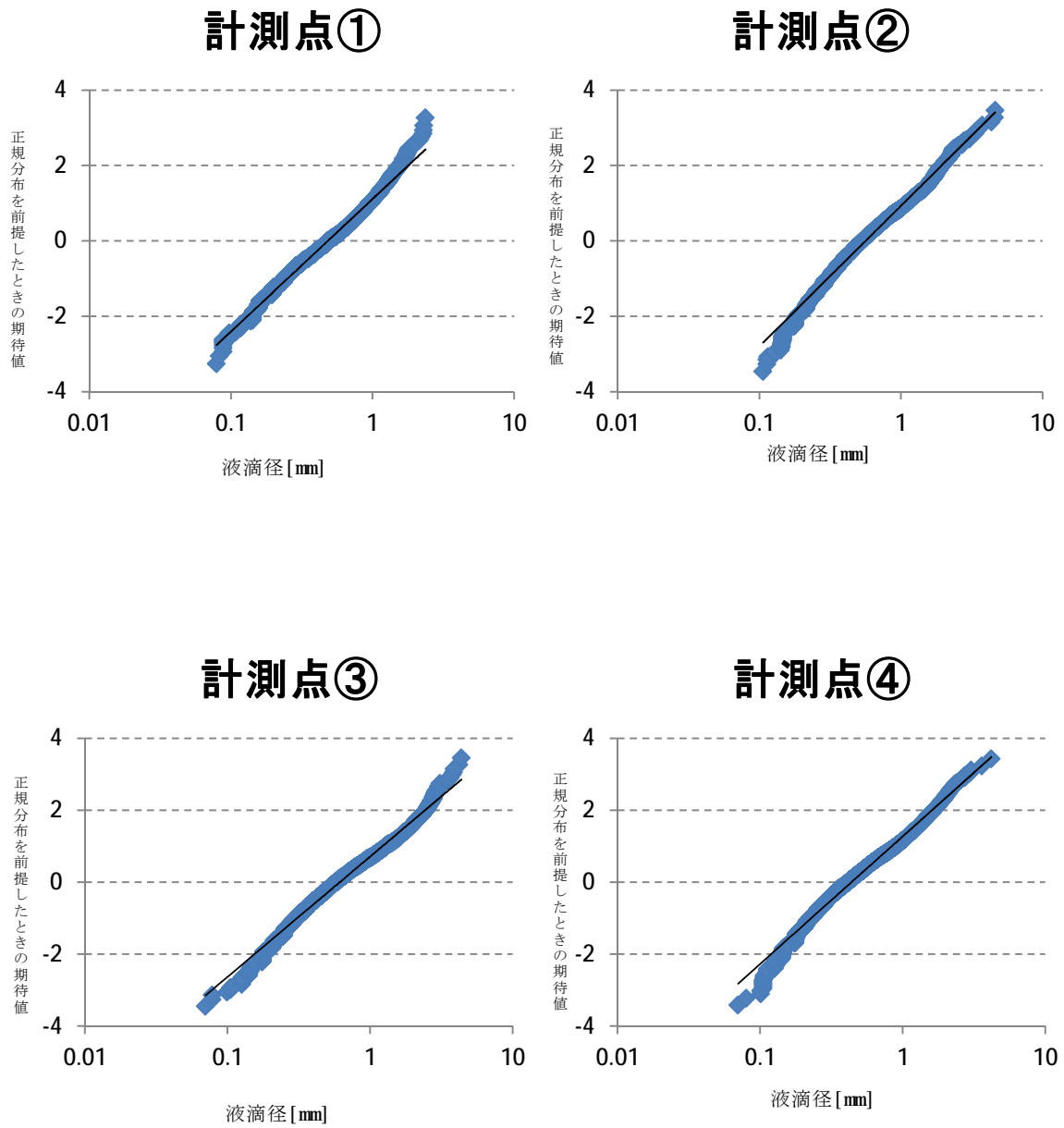
<正規確率プロットについて>

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とは判断できる。

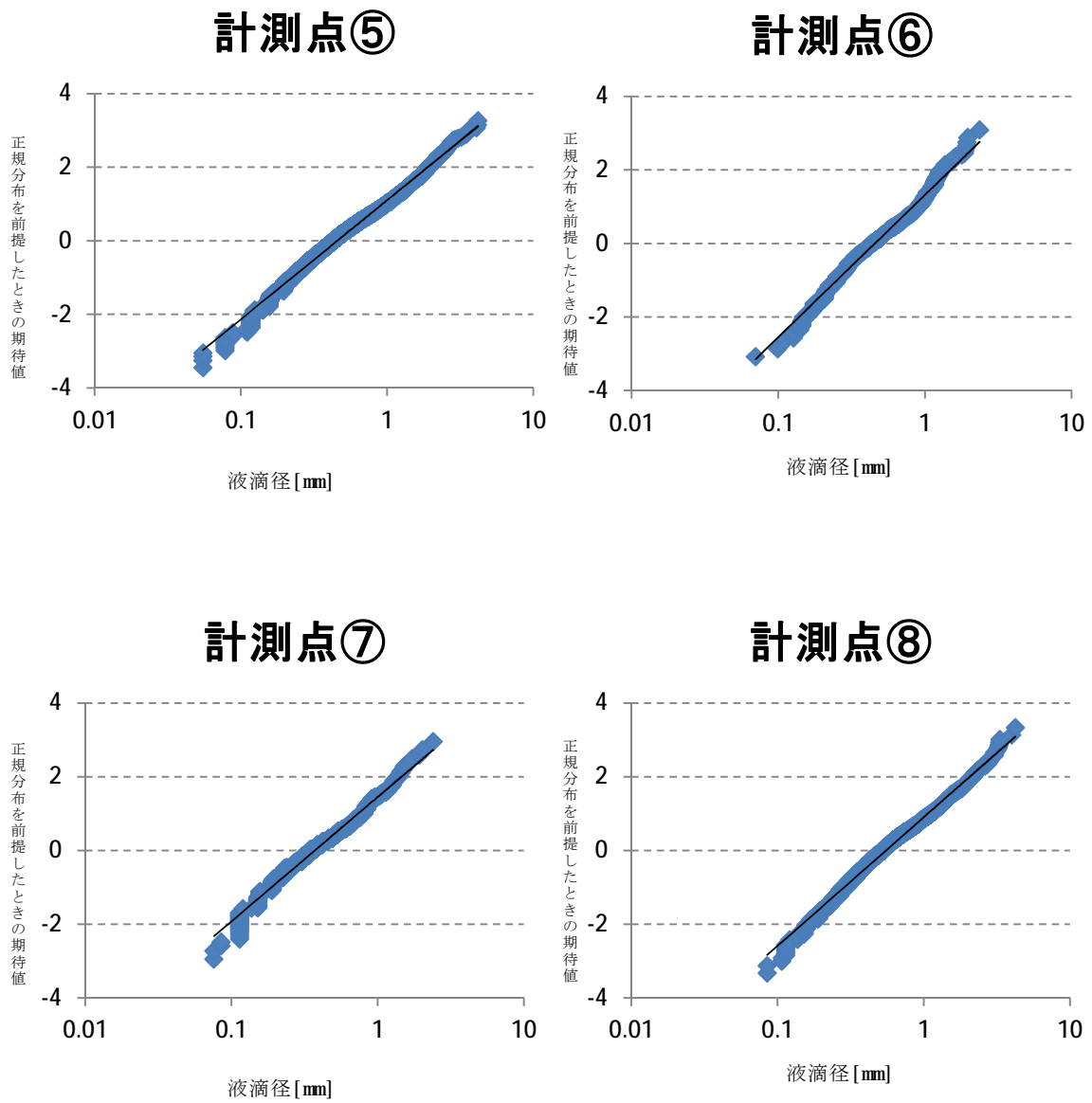
具体的には、取得されたデータについて累積比率（確率 P_i ）を求め、 P_i に対して正規分布の累積分布関数の逆関数を用いて求めた値をプロットし、正規分布なら直線、対数正規分布なら片対数グラフ上の直線に沿うかどうかを判断するものである。

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図及び第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

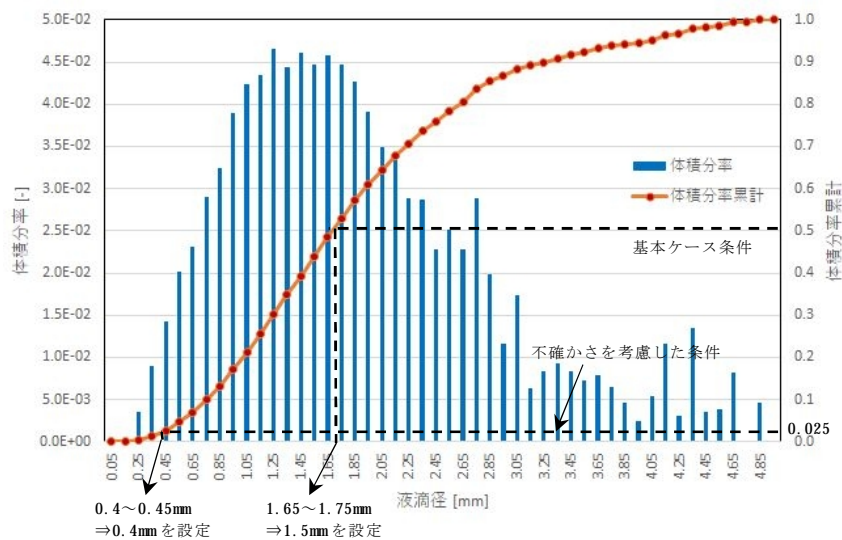
3.2.での検討より、各測定点のデータにおいて自然現象のばらつきを示す正規性を有する分布であることが得られたことから、基本ケース条件の設定に当たっては全測定データを合算することにより液滴径を評価する。全測定点の合算データについては、全計測点を代表していると考えられる放水方向の直線上に位置する点（点⑤）との比較検定において有意な差が見られないことから、スプレイヘッドの特徴を代表するデータであり、基本ケースの条件として妥当であると言える。

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

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。

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

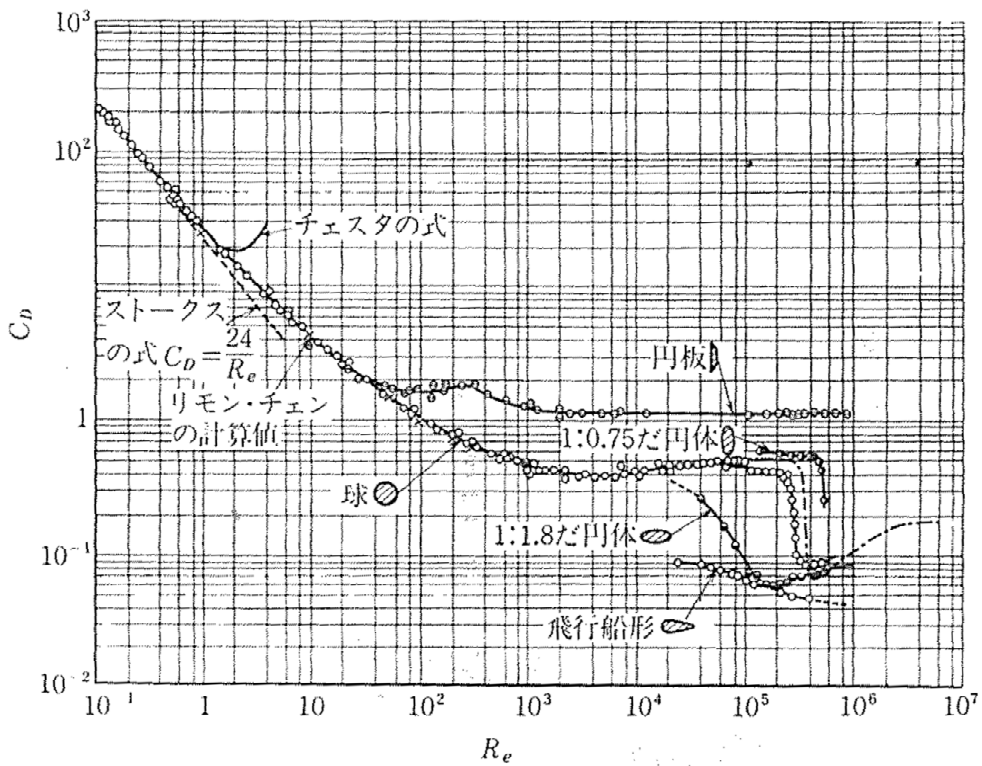
上記の式におけるパラメータの定義は以下の通りである。

v_i	:	液滴の終端速度 (m/s)
ρ_{water}	:	液滴の密度 (kg/m ³)
ρ_{air}	:	空気密度 (kg/m ³)
V_i	:	液滴体積 (m ³)
A_i	:	液滴断面積 (m ²)
g	:	重力加速度 (m/s ²)
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 ν 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¹

¹ 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

ρ_{water}	998.2 [kg/m ³]
ρ_{air}	1.166 [kg/m ³]
ν	1.56×10^{-5} [m ² /s]
g	9.807 [m/s ²]
d_i	1.0×10^{-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 ν 、 ρ_{water} 及び ρ_{air} であるが、(1)式より下降速度への温度影響が大きい ν 、 ρ_{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。 ν 、 ρ_{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純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 ρ_{water} であるが、 ρ_{water} は純水のほうが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純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。

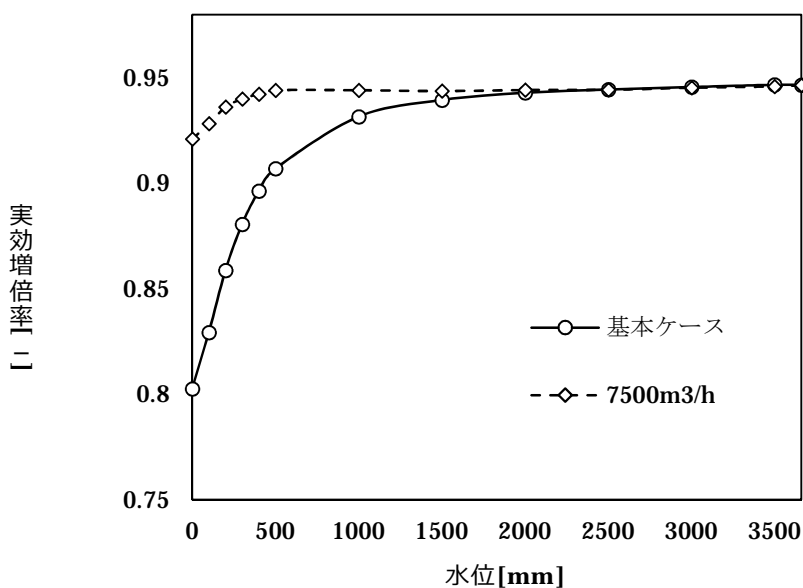
これによると、使用済燃料ピットの冷却と放射性物質の拡散抑制のための設備と手順から求めた基本ケースの流量条件（放水砲1台ベース）に対して、高浜発電所に配備している放水砲全台（予備を含め5台）を使用した場合の流量をさらに上回る $7500\text{m}^3/\text{h}^*$ においても、実効増倍率は基本ケースと同じく水位低下に伴い単調に減少する挙動を示し、未臨界性を満足する結果が得られたことから、今回の流量条件は未臨界性上の十分な頑健性を有している。

※ 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		<input type="text" value=""/> (m ³ /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 ³)
		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。