



高浜発電所 発電用原子炉設置変更許可申請
（1号及び2号原子炉施設の変更）
【使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更】

審査会合における指摘事項の回答

2020年 5月 21日

関西電力株式会社

2019年7月9日、12月17日の審査会合における指摘事項

No.	指摘事項	会合日
①	大容量ポンプの基数等から現実的に想定しうるSFPへの最大流量（注水および放水）の考え方を整理し、説明すること。	2019/7/9
②	燃料集合体への放水について、放水が狭い領域に集中するケースも想定し評価すること。	2019/7/9
③	評価にあたっては、燃料棒外表面に形成される液膜厚さ（液膜厚さの評価式を含む）、液滴の落下速度、液膜と液滴の割合等の不確かさを考慮すること。	2019/7/9
④	2相モデル（気相と液相）で気相部水密度を変化させた場合の実効増倍率の影響を評価すること。	2019/7/9
⑤	評価体系や反射体による保守性を説明すること。	2019/7/9
⑥	スプレイ水の液膜または液滴への分配による影響を示すこと。	2019/7/9
⑦	新燃料を外側に配置する領域管理について、臨界や運用上の考え方を整理し、説明すること。	2019/7/9
⑧	被災していないユニット側の放水砲からの流量について評価を行うこと。	2019/12/17
⑨	未臨界性評価に影響を与える解析パラメータを抽出し、最大流量に依存しない形でサーバイできないか検討すること。	2019/12/17

本日のご説明内容

説明内容	該当頁	コメント番号対応
1. 設置変更許可申請の目的・変更概要	1~2	-
2. 大規模漏えい時のSFP環境の想定	3~7	-
3. 燃料配置条件の設定	8~11	コメント⑦
4. SFPに流入する水が全面に広がる場合の検討	12	
(1) 評価条件（気相部水密度）	13~15	コメント④
(2) 評価結果	16	-
5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討	17	
(1) 評価条件（流量、水の存在形態等）	18~35	コメント① コメント③ コメント⑧ コメント⑨
(2) 評価結果	36~37	コメント②
(3) 評価条件への影響評価	38~49	コメント⑥
6. SCALEコードの適用性について	50~52	-
7. 軸方向燃焼度分布の影響について	53~54	-
8. 反射体の設定について	55~57	コメント⑤
9. まとめ	58~59	-

1. 設置変更許可申請の目的・変更概要

1. 設置変更許可申請の目的・変更概要

○ 目的

使用済燃料ピット（SFP）における大規模漏えい時の未臨界性評価条件を、燃料および内挿物の取り扱いの観点から運用性を向上できるように見直すことにより、燃料および内挿物の取扱頻度を大幅に削減し安全性の向上を図る。

○ 変更概要

SFP未臨界性評価の前提となる水密度について、新たな試験データ等の知見を踏まえて精緻化することにより、SFP水位が異常に低下した場合の未臨界性評価条件を一部見直し、SFPにおける燃料配置及び中性子吸収体配置の管理を以下のとおり変更する。

		変更前	変更後
主な評価条件	水の存在、状態	気相、液相は区別せず、水密度を0~1g/cm ³ で変化させて評価	気相、液相に分け、水密度は気相、液相でそれぞれ固定し、水位を冠水から完全喪失まで変化させて評価。液膜の存在も考慮。
	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	燃焼度に応じた2領域
	中性子吸収体考慮	有り	無し



変更後の未臨界性評価条件（今後管理していく燃料配置条件を含む）の妥当性を確認することで、規則要求（水位が異常に低下した場合において臨界を防止すること）を満足することを説明する。

（燃料体等の著しい損傷の進行の緩和について、評価条件や評価結果、配備した可搬型スプレイ設備やその運用に変更はない。）

○ 設置許可基準規則（第54条第2項）

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。

2. 大規模漏えい時のSFP環境の想定

2. 大規模漏えい時のSFP環境の想定（1 / 4）

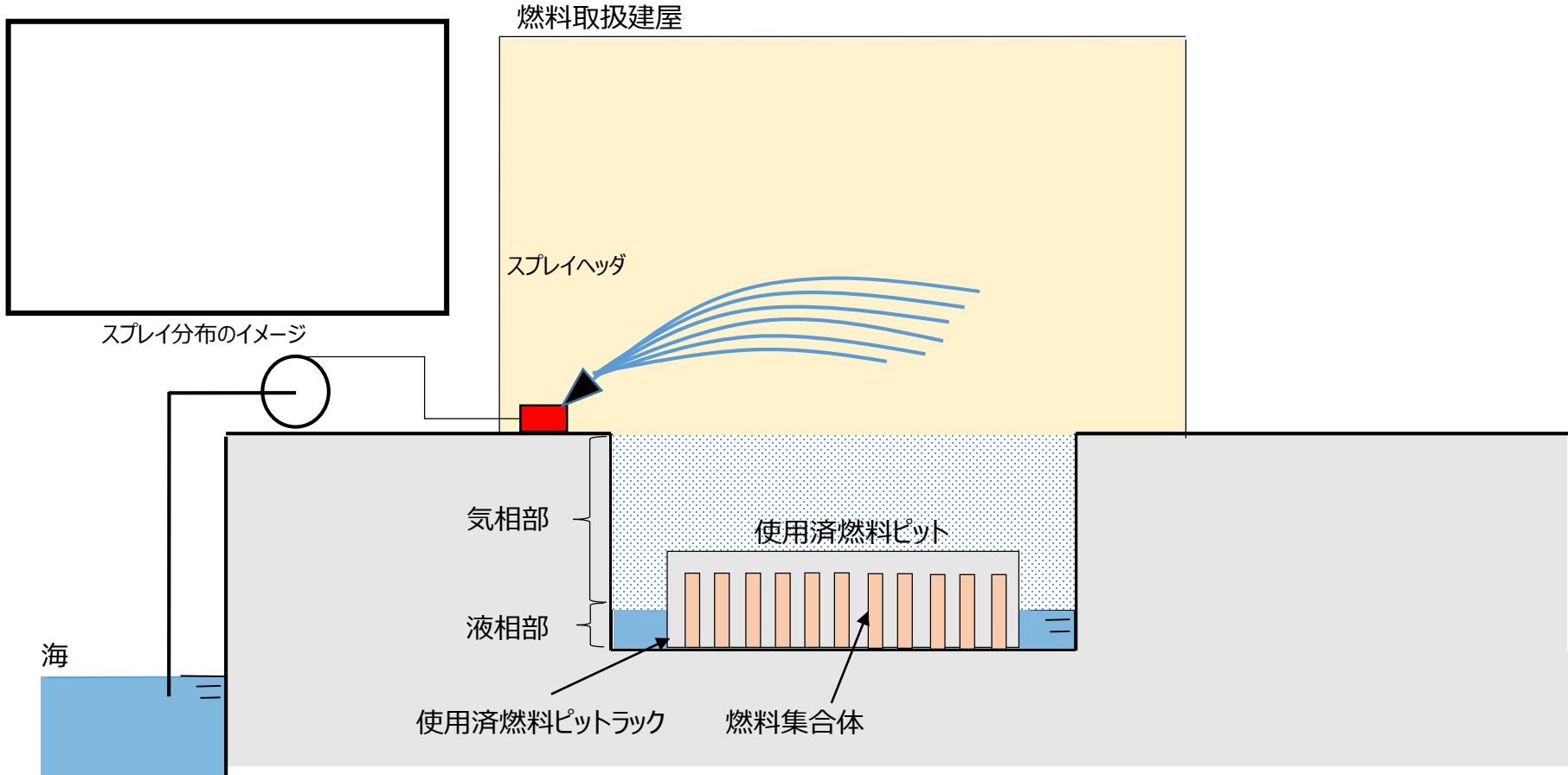
大規模漏えい時のSFP環境について、今回の申請では実際の状態を包含するよう両極端なケースを想定した条件により評価を行った。

表 実際の状態と評価上の想定と比較

	実際の状態	評価上の想定 (既許可)	評価上の想定（今回申請）	
			水が全面に広がる場合	水が局所に集中する場合
水量	スプレイヘッド1台の定格流量	—	全ての注水、放水設備の最大合計流量を超える流量	全ての注水、放水設備の最大合計流量
注水、放水 状態 (イメージ図)	スプレイヘッドの水は扇型に放水され、一部は SFPの外にかかる。水密度は扇型の中央部で高く、外側に行くにつれて低くなる。 (p5参照)	—	上記の水量全量がSFP全面に均一に広がることを想定 (p6参照)	上記の水量全量が局所に集中することを想定 (p7参照)
水の状態	SFP内には、気相部と液相部が存在し、液滴や液膜、蒸気が混在した状態	水密度を体系全体に一律に設定し、 $0\sim 1\text{g/cm}^3$ の範囲を評価	SFP内を気相部、液相部の二相に分け、気相部は液滴、蒸気の状態を考慮。 気相部水密度は試験により得られた知見を基に保守的な値を設定	SFP内を気相部、液相部の二相に分け、気相部は液滴、蒸気の状態を考慮し、燃料棒周りの液膜の存在を考慮。
塩分	海水を水源とする注水、放水には、塩素が含まれる	考慮しない	考慮しない	海水を水源とするものは塩素を考慮
水位	SFP満水～完全喪失	—	燃料集合体冠水～完全喪失	燃料集合体冠水～完全喪失

2. 大規模漏えい時のSFP環境の想定（2 / 4）

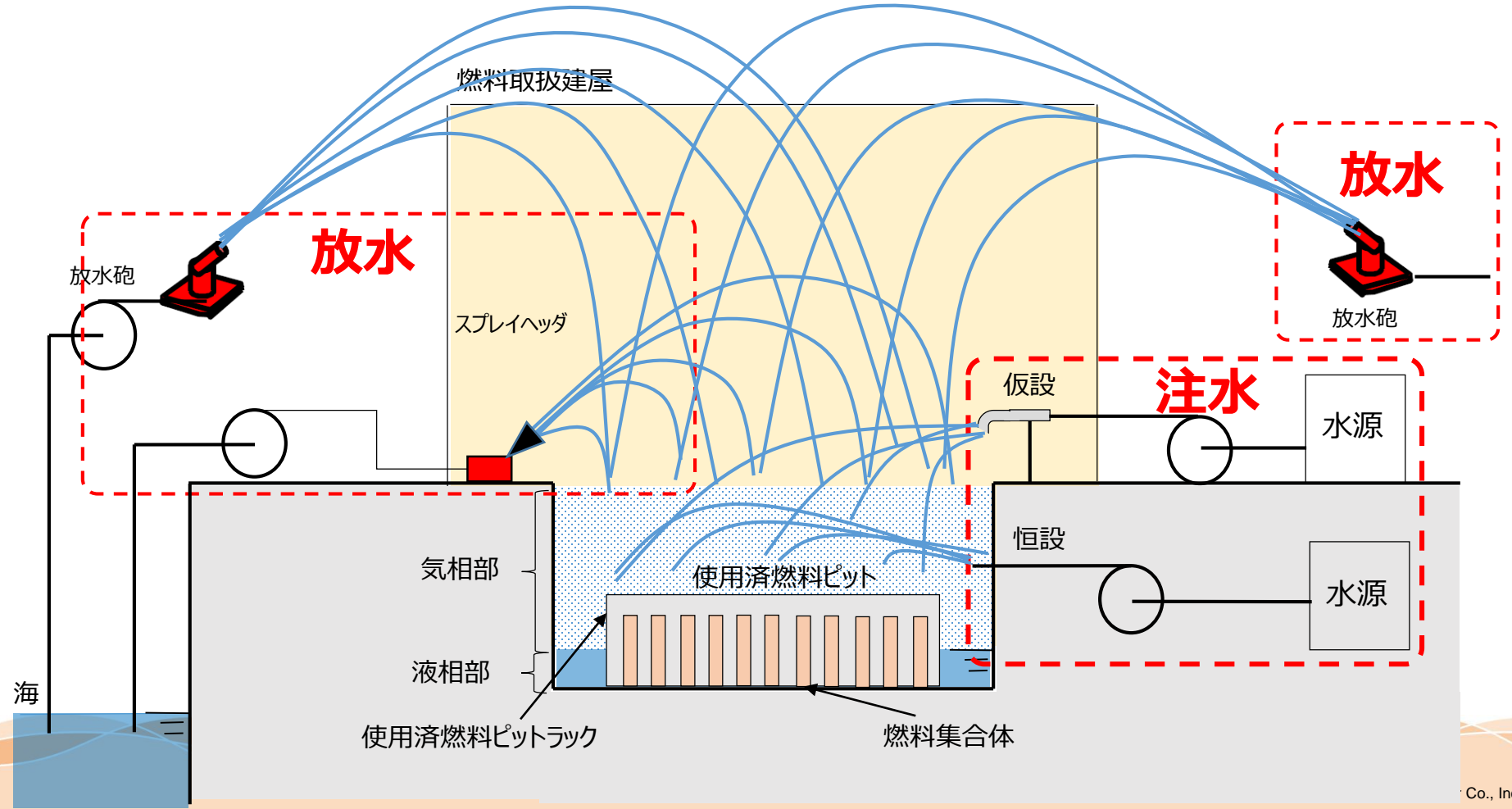
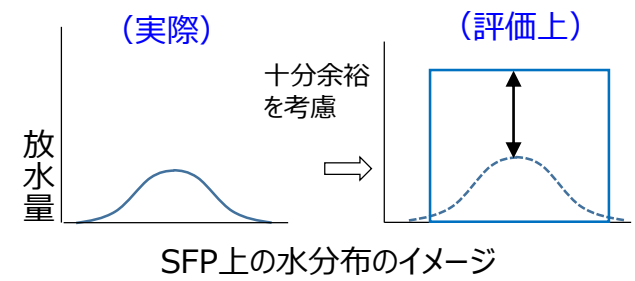
- 実際の状態におけるSFP環境
 - ・スプレイヘッド1台をSFP全面にかけることでSFPの冷却は可能。スプレイヘッドの水は扇型に放水され、一部は SFPの外にかかる。水密度は扇型の中央部が高く、外側に行くにつれて低くなる。
 - ・SFP内には、気相部と液相部が存在し、水は液滴や液膜、蒸気の状態。



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. 大規模漏えい時のSFP環境の想定 (3 / 4)

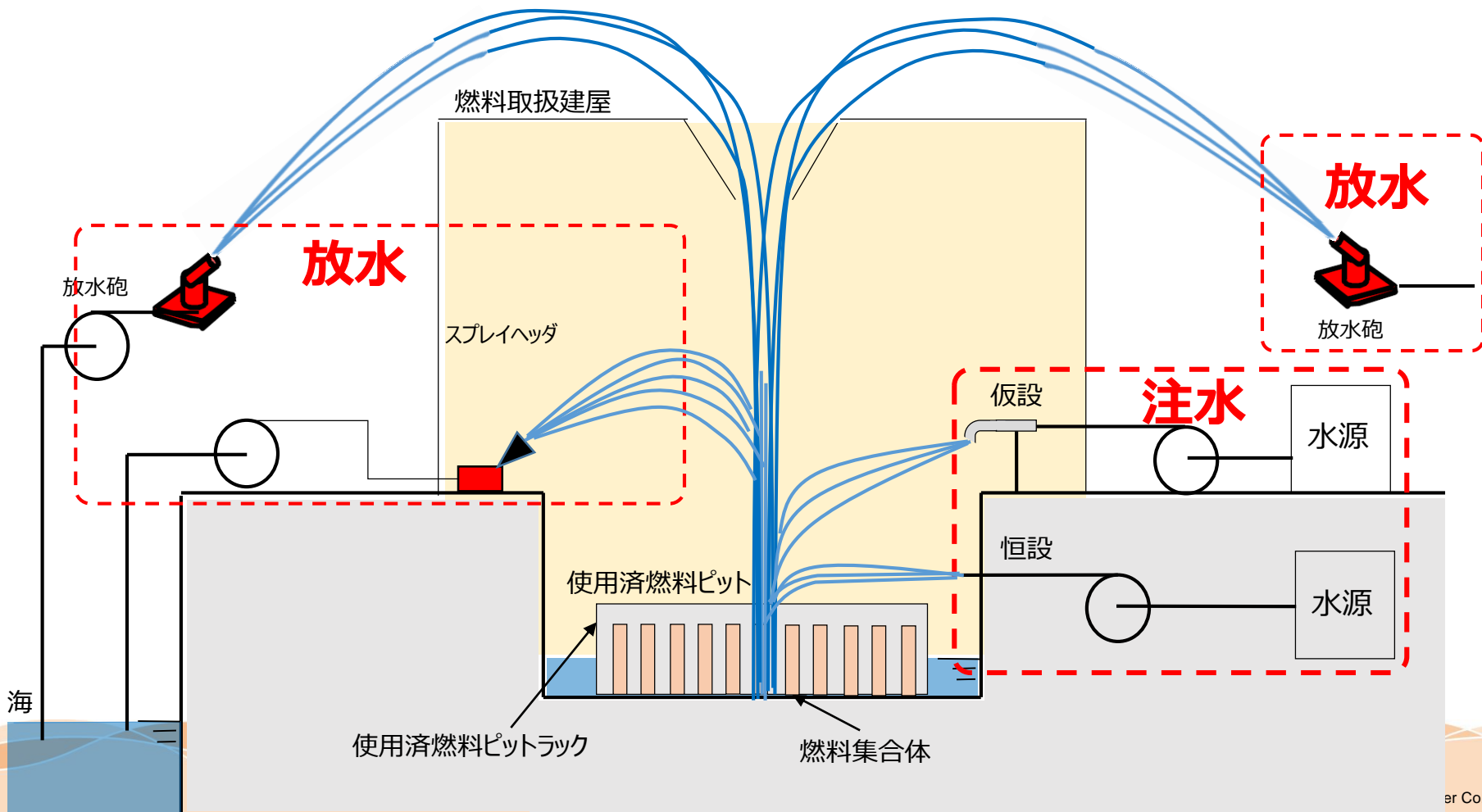
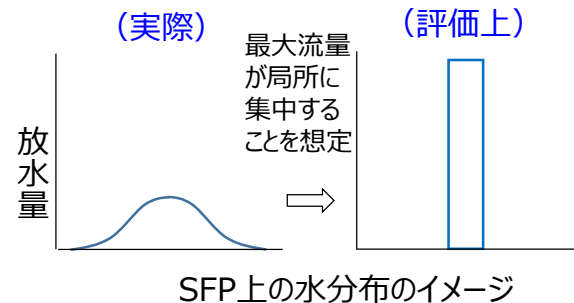
- SFPに流入する水が全面に広がるとした場合の評価条件
 - ・注水や放水による流量がSFP全面に広がることを想定する。
 - ・SFP内を気相部、液相部の二相に分け、水位は燃料集合体冠水から完全喪失までを想定する。
 - ・水は、液滴および蒸気の存在のみを考慮し、気相部水密度は試験により得られた知見を基に保守的な値を設定し、現実的な分布を十分包含するように、保守的な水密度分布を一様に設定する。



2. 大規模漏えい時のSFP環境の想定 (4 / 4)

○ SFPに流入する水が局所に集中する場合の評価条件

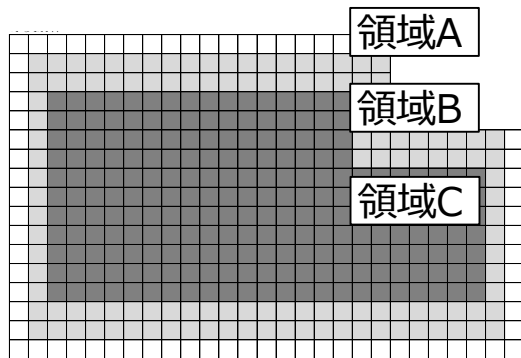
- ・建屋、SFPにかかる注水および放水は、全流量が局所に集中することを想定する。
- ・流入する水の量は、設備容量等から最大流量を設定する。なお、海水を水源とする水には、塩素の存在を考慮する。
- ・SFP内を気相部、液相部の二相に分け、水位は燃料集合体冠水から完全喪失までを想定し、液膜、液滴、蒸気の存在を考慮する。



3. 燃料配置条件の設定

【既許可の領域管理の特徴】

- T1,2SFPラックはアングル型ステンレス鋼製であり、水位低下時の中性子の遮へい効果が低い。
- 既許可では、中性子吸収体を考慮した3領域管理としており、燃料取替に伴うSFP内の燃料移動や内挿物の取り扱い頻度が高くなる。



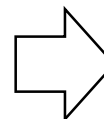
	貯蔵可能な燃焼度			
	55GWd/t燃料		48GWd/t燃料	
	中性子 吸収体なし	中性子 吸収体あり	中性子 吸収体なし	中性子 吸収体あり
□領域A	0GWd/t以上	0GWd/t以上	0GWd/t以上	0GWd/t以上
■領域B	20GWd/t以上	0GWd/t以上	15GWd/t以上	0GWd/t以上
■領域C	50GWd/t以上	15GWd/t以上	45GWd/t以上	10GWd/t以上

図 既許可における領域管理

【変更による効果】

- 中性子吸収体を考慮しない2領域管理に変更することにより、運用上支障があった核分裂生成物を内包する**照射燃料や内挿物の取り扱い回数を大幅に低減でき、安全性向上が図られる (参考 1)**

	3領域管理 (中性子吸収体の考慮有り)	2領域管理 (中性子吸収体の考慮無し)
① 新燃料 1 体のSFPへの沈め込み作業 (領域Aが満杯の状態)	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 燃料に挿入するプラグングデバイスと 制御棒の入替え作業 (1体)	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



3. 燃料配置条件の設定 (2 / 3)

【審査会合コメント⑦：領域管理について、臨界上、運用上の考え方を整理し、説明すること。】

<コメント⑦への回答>

局所に水が集中した場合でも未臨界を維持できるように、新燃料を分散させるとともに、全体的な未臨界性を向上させるために領域Bの燃焼度制限を20GWd/t以上から25GWd/t以上に見直した。また、燃料及び内挿物の取り扱い回数を低減させ、安全性の向上を図るため、中性子吸収体を考慮しない領域管理とした。

	既許可	見直し前 (2018年2月申請時)	見直し後																																			
配置図																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="2">55GWd/t燃料</th> <th colspan="2">48GWd/t燃料</th> </tr> <tr> <th>中性子 吸収体なし</th> <th>中性子 吸収体あり</th> <th>中性子 吸収体なし</th> <th>中性子 吸収体あり</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>□領域A</td> <td>0GWd/t</td> <td>0GWd/t</td> <td>0GWd/t</td> <td>0GWd/t</td> </tr> <tr> <td>■領域B</td> <td>20GWd/t</td> <td>0GWd/t</td> <td>15GWd/t</td> <td>0GWd/t</td> </tr> <tr> <td>■領域C</td> <td>50GWd/t</td> <td>15GWd/t</td> <td>45GWd/t</td> <td>10GWd/t</td> </tr> </tbody> </table>		55GWd/t燃料		48GWd/t燃料		中性子 吸収体なし	中性子 吸収体あり	中性子 吸収体なし	中性子 吸収体あり	□領域A	0GWd/t	0GWd/t	0GWd/t	0GWd/t	■領域B	20GWd/t	0GWd/t	15GWd/t	0GWd/t	■領域C	50GWd/t	15GWd/t	45GWd/t	10GWd/t	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>燃焼度 (GWd/t)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>□領域A</td> <td>0 (55GWd/t燃料)</td> </tr> <tr> <td>■領域B</td> <td>20 (55GWd/t燃料)</td> </tr> </tbody> </table>		燃焼度 (GWd/t)	□領域A	0 (55GWd/t燃料)	■領域B	20 (55GWd/t燃料)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>燃焼度 (GWd/t)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>□領域A</td> <td>0 (55GWd/t燃料)</td> </tr> <tr> <td>■領域B</td> <td>25 (55GWd/t燃料)</td> </tr> </tbody> </table>		燃焼度 (GWd/t)	□領域A	0 (55GWd/t燃料)	■領域B
	55GWd/t燃料		48GWd/t燃料																																			
	中性子 吸収体なし	中性子 吸収体あり	中性子 吸収体なし	中性子 吸収体あり																																		
□領域A	0GWd/t	0GWd/t	0GWd/t	0GWd/t																																		
■領域B	20GWd/t	0GWd/t	15GWd/t	0GWd/t																																		
■領域C	50GWd/t	15GWd/t	45GWd/t	10GWd/t																																		
	燃焼度 (GWd/t)																																					
□領域A	0 (55GWd/t燃料)																																					
■領域B	20 (55GWd/t燃料)																																					
	燃焼度 (GWd/t)																																					
□領域A	0 (55GWd/t燃料)																																					
■領域B	25 (55GWd/t燃料)																																					
中性子吸収体考慮	あり	なし	なし																																			
貯蔵体数	領域A：73体 領域B：126体 領域C：225体	領域A：201体 領域B：223体	領域A：212体 領域B：212体																																			

3. 燃料配置条件の設定（3 / 3）

<領域Bの燃焼度の設定>

- 領域Bの燃焼度は、運用上の観点（燃料配置の自由度を高めるため燃焼度制限は低い方が良い）と、臨界上の観点（実効増倍率を低減させるため燃焼度制限は高い方が良い）を両立させて25GWd/tとしている。
- 臨界上の観点からは、領域Bの燃焼度制限を25GWd/tとして設定し判定基準を満足することを確認しているが、仮に領域Bの燃料の燃焼度がすべて5GWd/t若くなったとしても判定基準を満足することを確認している（p47参照）。
- 炉心から取り出す燃料の燃焼度毎の内訳は下表のとおりで、20GWd/t以下の燃料は44体、25GWd/t以下の燃料は52体であり差が8体しかなく、領域Bの燃焼度制限を20GWd/tから25GWd/tへ見直すことの影響は軽微である。また、25GWd/t以下の燃料は、次サイクル装荷する新燃料44体を追加しても96体であり、領域Aに貯蔵可能な212体と比較して十分余裕があることから運用上の観点からも妥当である。
- また、SFP内での燃料移動及び炉心装荷・取出時においては、燃料別に付与される燃料番号を用いて、複数人により作業手順を確認し、燃料の移動履歴を追うことができる運用としており、燃料配置の管理を確実に実施することができる。

表 平衡炉心に基づいた燃料運用及び領域設定による貯蔵可能燃料体数

燃焼度(GWd/t)	0～20	20～30	30～40	40～50	50～	計
55GWd/t燃料平衡炉心 燃料取出時	44体	28体 (25G以下は8 体)	24体	36体	25体	157体
領域Aに貯蔵可能な体数	212体					

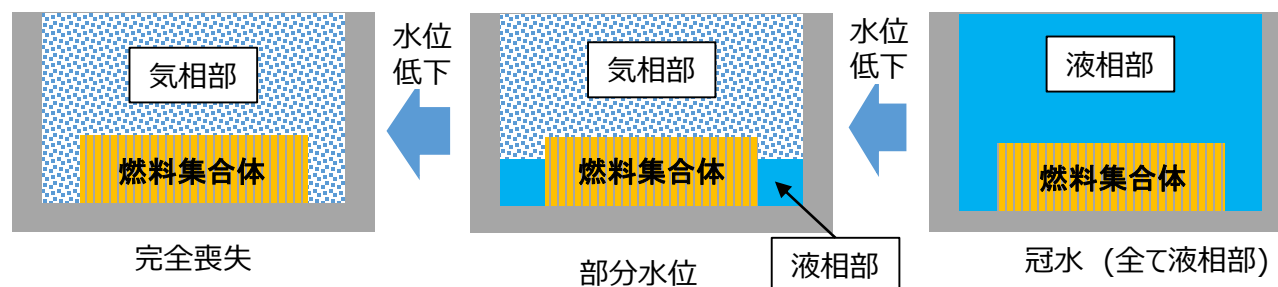
4. SFPに流入する水が全面に広がる場合の検討

4. SFPに流入する水が全面に広がる場合の検討

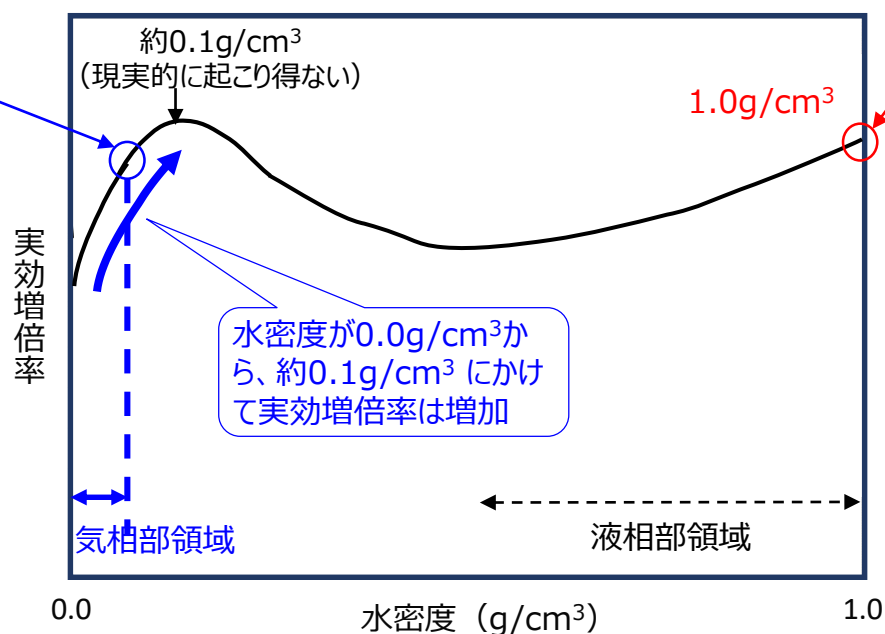
(1) 評価条件 (1 / 3)

<評価方針>

SFP全面に水が広がる場合は、実際の事象に合わせて液相部(ピット水)と気相部(スプレイ水と蒸気)の2相に分けて、それぞれ保守的な一様な値に水密度を固定した条件で、水位の変化を踏まえた評価とする。



気相部領域で、現実的に起こりうる水密度領域を踏まえ保守的に 0.04g/cm^3 を設定 (固定値)



液相部領域で実効増倍率が最大となる 1.0g/cm^3 を液相部水密度に設定

高浜1,2号炉SFP体系において水密度を一様に変化させた場合の実効増倍率挙動イメージ

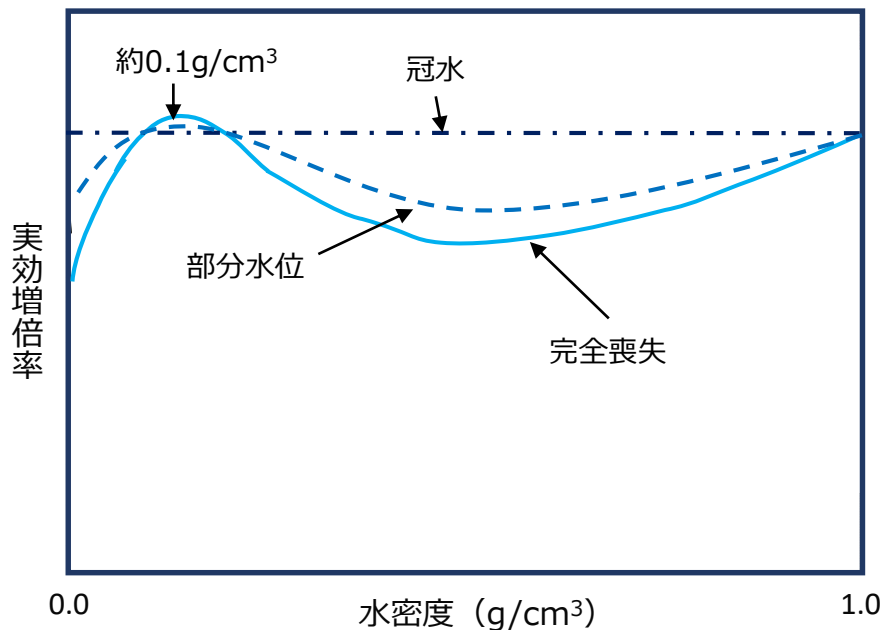
4. SFPに流入する水が全面に広がる場合の検討

(1) 評価条件 (2 / 3)

【審査会合コメント④：気相部水密度を変化させた場合の実効増倍率の影響を評価すること。】

<コメント④への回答>

- 完全喪失した場合と部分水位の場合において、気相部水密度を0～1g/cm³まで変化させた場合の実効増倍率の挙動イメージは下図のとおり。
- 実効増倍率は、気相部水密度が0g/cm³から大きくなるにつれて増加し、約0.1g/cm³で極大値をとり、一旦減少したのち、1g/cm³にかけて再び増加するカーブを描く。
- 部分水位の場合、水位が低い場合は完全喪失状態と同様の变化傾向を示し、水位が上昇すると冠水状態の値に近づく傾向となる。



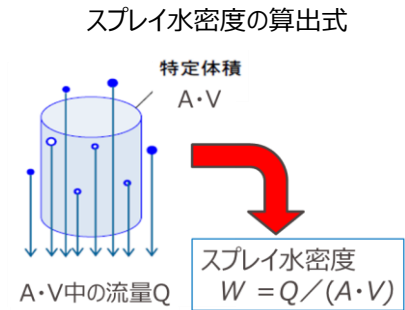
高浜1,2号炉SFP体系において、二相とした場合に気相部の水密度を変化させた場合の実効増倍率挙動イメージ

4. SFPに流入する水が全面に広がる場合の検討

(1) 評価条件 (3 / 3)

<気相部水密度の設定>

- a. 気相部水密度 ($W = Q/A \cdot V$) が大きいほど実効増倍率が大きくなることから、気相部水密度の算出に当たって、以下の保守性を見込む(参考2および参考3参照)。
 - ・流量Qはスプレー定格流量をベースとし、約47倍の保守性を持たせる。
 - ・下降速度Vは、試験結果の平均値を下回る平均液滴径1mmを基にした値とする。
- b. a. で求まる気相部水密度に対してさらに、気相部水密度が高くなる効果として、以下の3つの環境条件を考慮する(参考2参照)。
 - ①蒸発に伴い発生する上昇流により液滴の下降速度が減じられる効果
 - ②飽和蒸気がスプレー水と接触し凝縮して液滴に変化する効果
 - ③崩壊熱により発生する蒸気が常に飽和蒸気として存在する効果



想定条件	説明	水密度W
現実的なスプレー水密度	定格流量で、ラック全面にスプレーした場合の水密度	0.000063 g/cm ³

×約47倍

保守的に設定したスプレー水密度	流量を定格の約47倍として求めたスプレー水密度W	0.0030 g/cm ³
-----------------	--------------------------	--------------------------

上昇流の影響として
下降速度-10cm/s

①上昇流により液滴の下降速度Vを10cm/s 減速	SFPの貯蔵燃料の崩壊熱が最大になる条件でのSFP全体の熱負荷から求められる上昇流(約8.8cm/s)を保守的に切り上げて10cm/sと仮定	0.0031 g/cm ³
---------------------------	--	--------------------------

×1.2倍

②蒸気の凝縮によりスプレー流量Qを1.2倍	スプレー水1m ³ との熱交換により蒸気が凝縮して最大0.19m ³ の水になることから流量Qを1.2倍する。	0.0037 g/cm ³
-----------------------	---	--------------------------

+0.0006g/cm³

③飽和蒸気分として、0.0006g/cm ³ を加算	大気圧、100℃における飽和蒸気の密度を考慮	0.0043 g/cm ³
---------------------------------------	------------------------	--------------------------

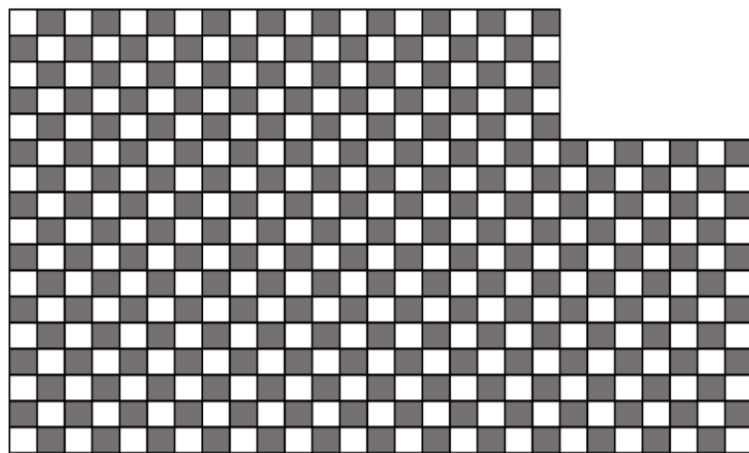
×約9倍

気相部水密度には、更に余裕を持った**0.04g/cm³**を設定(参考4参照)

4. SFPに流入する水が全面に広がる場合の検討 (2) 評価結果

<評価条件>

- ・燃料配置条件 : 下図のとおり。
- ・水位 : 0~366cm
(解析点は、0~50cmまで10cm刻み、
50~300cmまで50cm刻み)
- ・水密度条件 : 気相部 : 0.04g/cm³
液相部 : 1.0g/cm³
- ・液膜厚さ : 0mm



	燃焼度 (GWd/t)
□ 領域A	0 (55GWd/t燃料)
■ 領域B	25 (55GWd/t燃料)

図 SFPに水が全面に広がる場合の燃料配置条件

<評価結果>

いずれの水位においても判定基準 (0.98以下) を満足することを確認した。

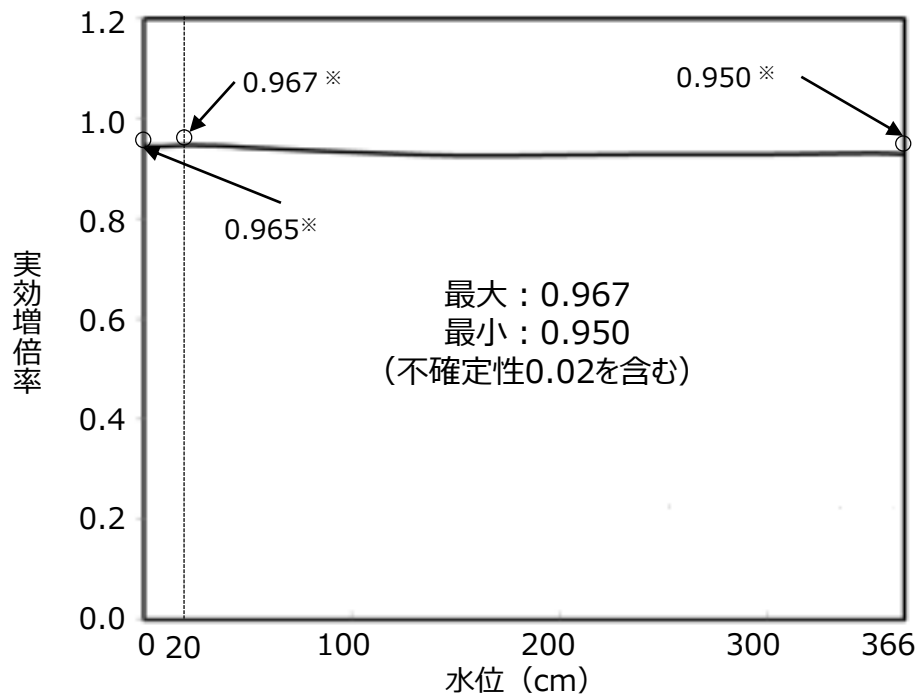


図 SFPに流入する水が全面に広がる場合の評価結果

※ 不確定性0.02を含んだ値

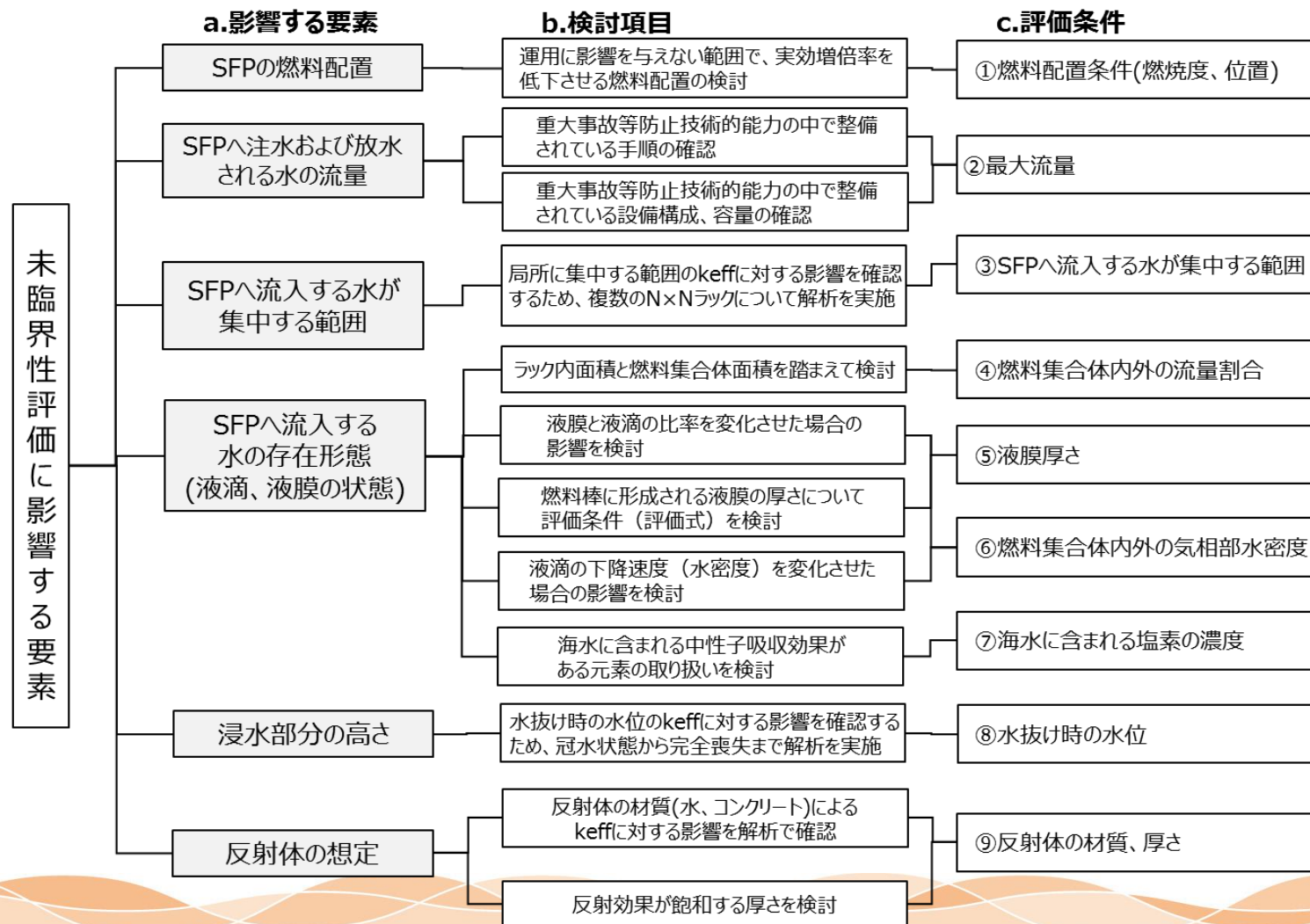
5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(1) 評価条件 (1 / 18)

<評価方針>

SFPに流入する水が局所に集中する場合は、実際の事象に合わせ液相部(ピット水)と気相部(スプレイ水と蒸気)の2相に分けた評価とし、さらに、評価に影響する要素毎に項目を検討し、9つの評価条件を設定した。各評価条件の内容についてはp19~p35に示す。



5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

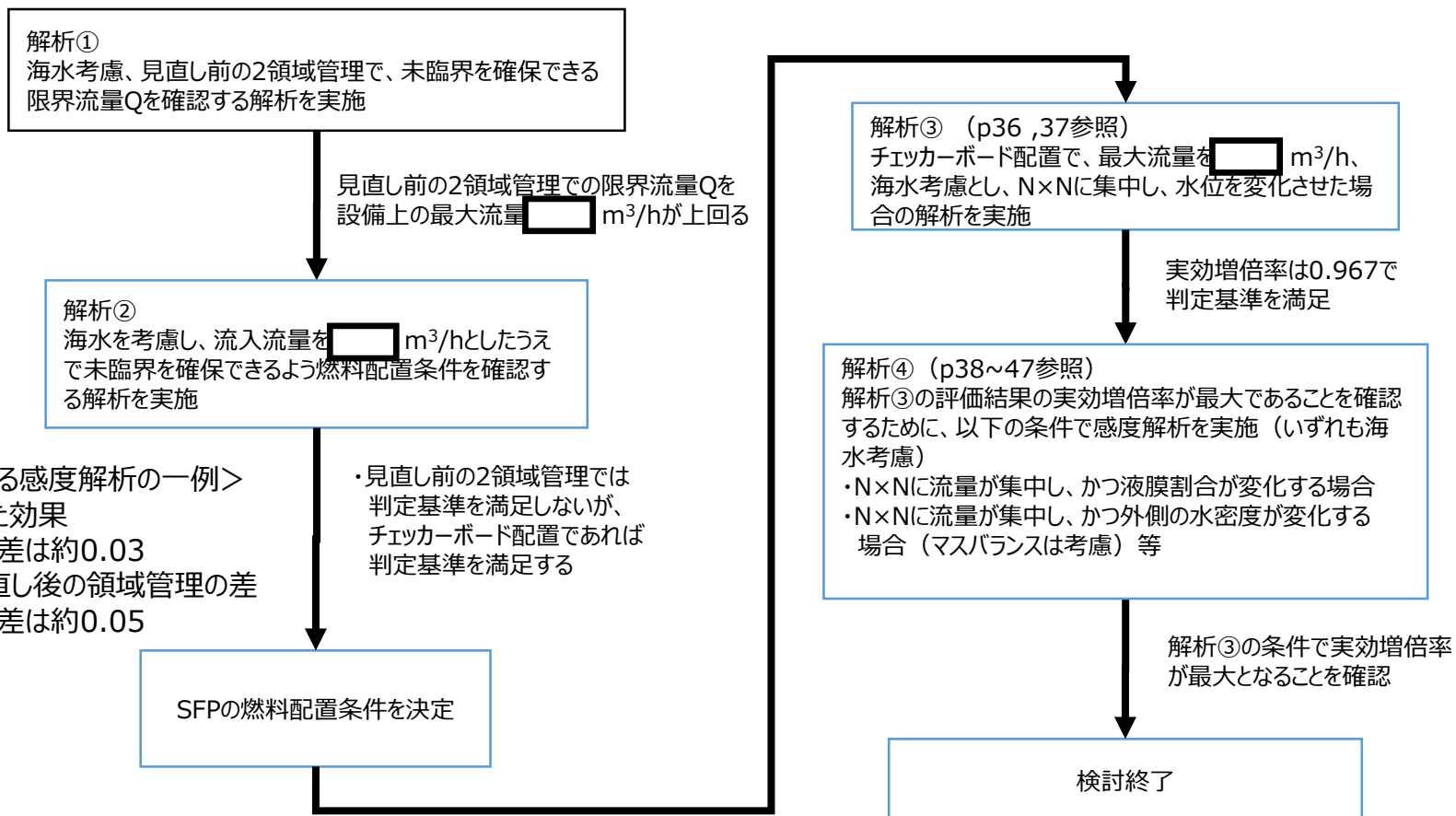
(1) 評価条件 (2 / 18)

【審査会合コメント⑨：未臨界性評価に影響を与える解析パラメータを抽出し、最大流量に依存しない形でサーベイできないか検討すること。】

<コメント⑨への回答>

検討フローとおり、最大流量を設定した上で評価条件の検討を行い、実効増倍率を評価した結果、判定基準を満足することを確認できた。

<SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討フロー>



<条件の違いによる感度解析の一例>
○ 海水を考慮した効果
実効増倍率の差は約0.03
○ 見直し前と見直し後の領域管理の差
実効増倍率の差は約0.05

・見直し前の2領域管理では
判定基準を満足しないが、
チェッカーボード配置であれば
判定基準を満足する

チェッカーボード配置を採用。(さらに全体の実効増倍率を
下げるため、領域Bの燃焼度制限を20GWd/tから
25GWd/tに変更)

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. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(1) 評価条件 (3 / 18)

<注水流量の検討 (1 / 3) >

- SFPへの注水は、右図の判断フローのとおり、水位上昇が確認できなければ、順次後段の手順へ移行することとしている。
- 注水流量の想定においては、合計流量が大きめになるよう、各水源の枯渇や注水準備に要する時間は考慮せず、これら6つの手順がすべて同時に実施されるとした。

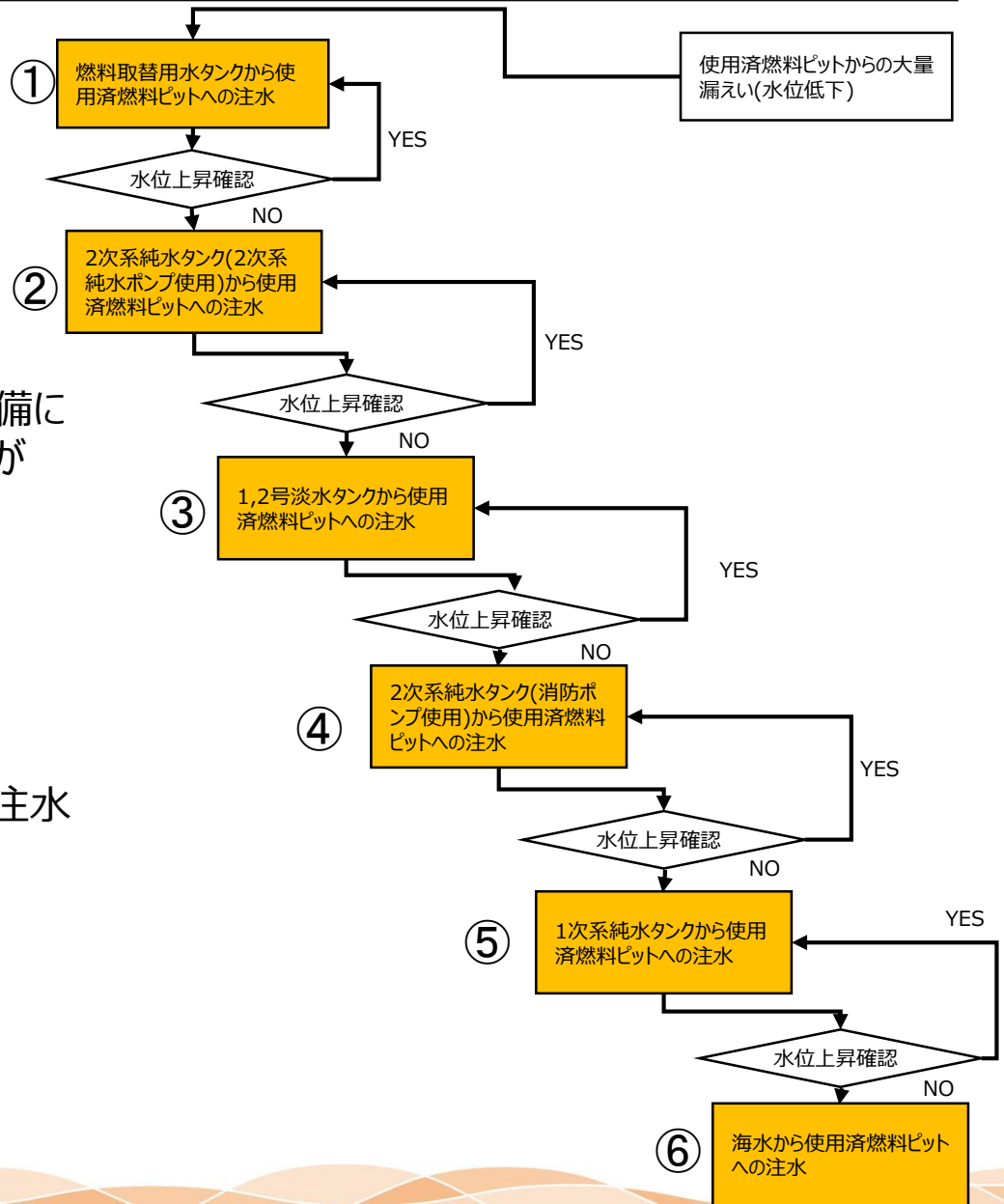


図 使用済燃料ピット漏えい発生時の対応手順 (技術的能力1.11より抜粋)

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(1) 評価条件 (4 / 18)

<注水流量の検討 (2 / 3)>

前頁で示した6つの手順の設備構成は下図のとおり。

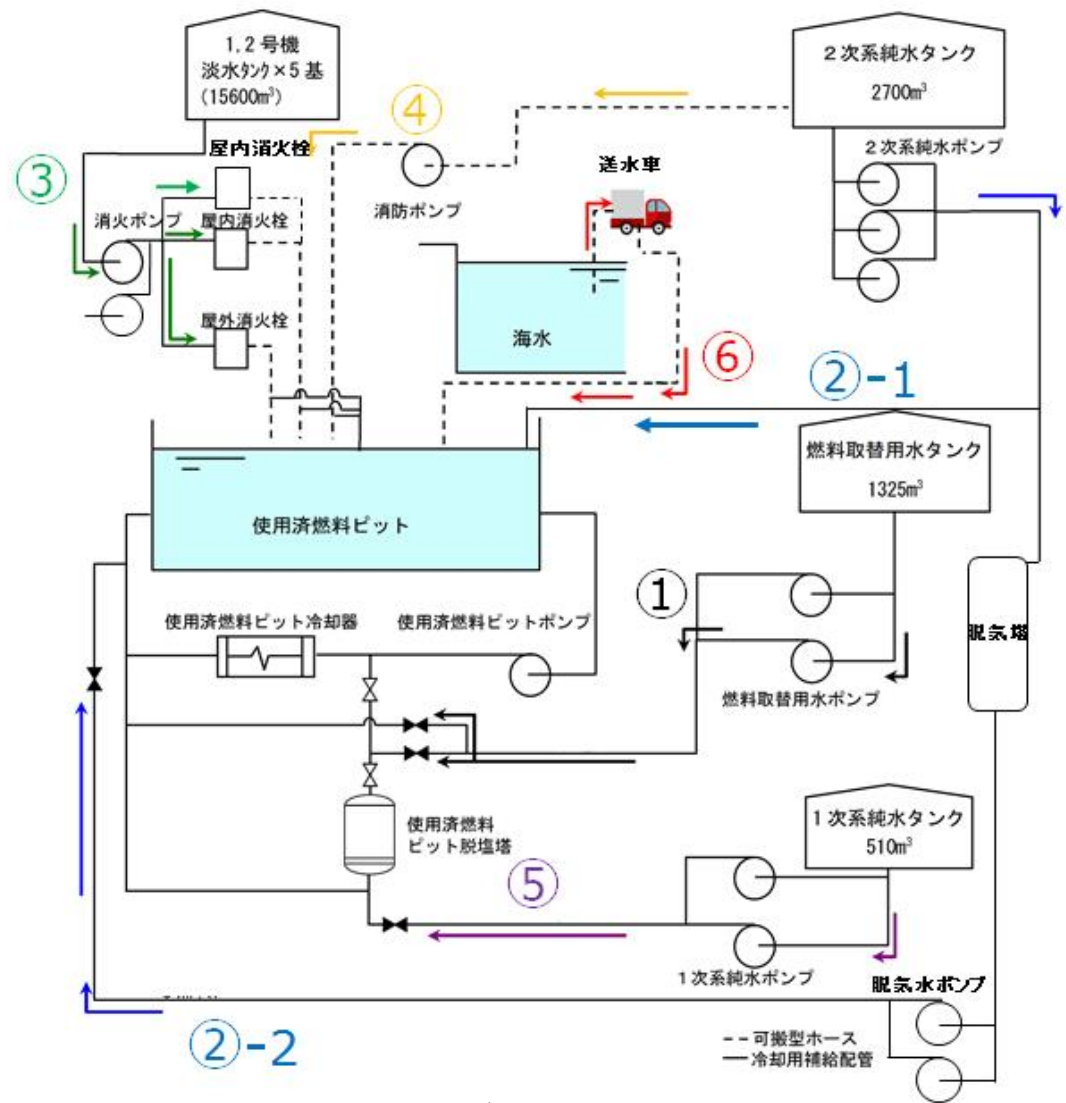


図 SFP注水設備の構成

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(1) 評価条件 (5 / 18)

<注水流量の検討 (3 / 3) >

注水流量の合計値は、各手順を大規模損壊時まとめ資料に記載されている通常の操作で行った場合は、 $181\text{m}^3/\text{h}$ となるが、大きめになるよう $713\text{m}^3/\text{h}$ とした。

(1) 恒設設備を使用する手順

a. 当該ポンプを用いて実際の敷設ラインで通水した実測値があるものについては、実測値にポンプ台数を乗じた値とした。
また、手順③ 1,2号淡水タンク(消火ポンプ-消火栓)については、接続可能な消火栓の数を更に乗じた値とした。
対象手順：②-1 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ)
③ 1,2号淡水タンク(消火ポンプ-消火栓)

b. 実測値がないものについては、当該系統の流量の律速になるポンプの定格流量に台数を乗じた値とした。
(流量が保守的になるよう、配管圧損の増加による流量低下は考慮しない。)

対象手順：① 燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)
②-2 2次系純水タンク(脱気塔経由)
⑤ 1次系純水タンク(1次系純水ポンプ)

(2) 可搬型設備を使用する手順

訓練で当該ポンプを用いて通水した実測値があるものの、保守的に流量を大きくするため、ポンプの揚程曲線から得られる最大値(ホースの圧損は考慮しない)とした。

対象手順：④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)
⑥ 海水(送水車)

表 各手順における流量の設定方針

注水手順(ポンプ)	通常時流量	設定流量	根拠	設定方針
① 燃料取替用水タンク (燃料取替用水ポンプ)	$30\text{m}^3/\text{h}$	$30\text{m}^3/\text{h} \times 2^{*1}$	定格流量	(1)-b
②-1 2次系純水タンク (2次系純水ポンプ)	$5\text{m}^3/\text{h}$	$5\text{m}^3/\text{h} \times 3^{*1}$	実測値	(1)-a
②-2 2次系純水タンク (2次系純水ポンプ) (脱気塔経由)	$30\text{m}^3/\text{h}$	$30\text{m}^3/\text{h}^{*2} \times 2^{*1}$	定格流量	(1)-c
③ 1,2号淡水タンク (消火ポンプ-消火栓)	$22\text{m}^3/\text{h}$	$22\text{m}^3/\text{h} \times 3^{*3} \times 2^{*1}$	実測値	(1)-a
④ 2次系純水タンク (消防ポンプ)	$39\text{m}^3/\text{h}$	$96\text{m}^3/\text{h}$	ポンプ 揚程曲線	(2)
⑤ 1次系純水タンク (1次系純水ポンプ)	$40\text{m}^3/\text{h}$	$40\text{m}^3/\text{h} \times 2$	定格流量	(1)-b
⑥ 海水 (送水車)	$15\text{m}^3/\text{h}$	$270\text{m}^3/\text{h}$	ポンプ 揚程曲線	(2)
合計	$181\text{m}^3/\text{h}$	$713\text{m}^3/\text{h}$	-	

※1 ポンプ台数。なお手順②-2については脱気水ポンプの台数。

※2 脱気水ポンプの定格流量。

※3 消火栓の数 (屋内消火栓2か所、屋外消火栓1か所)。

※4 ポンプ揚程曲線の最大値を想定した。

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(1) 評価条件 (6 / 18)

<放水流量の検討 (1 / 4) >

○ SFPへの放水は、右図の判断フローに基づき、以下の3つの手順の中から実施される。

- ① 送水車によるスプレイ
- ② 化学消防自動車によるスプレイ
- ③ 大容量ポンプ(放水砲用)による放水

○ 放水流量の想定においては、合計流量が大きめになるよう、設備の構成上、同時に実施することが可能な手順については、判断フローによらず同時に実施されるとした。

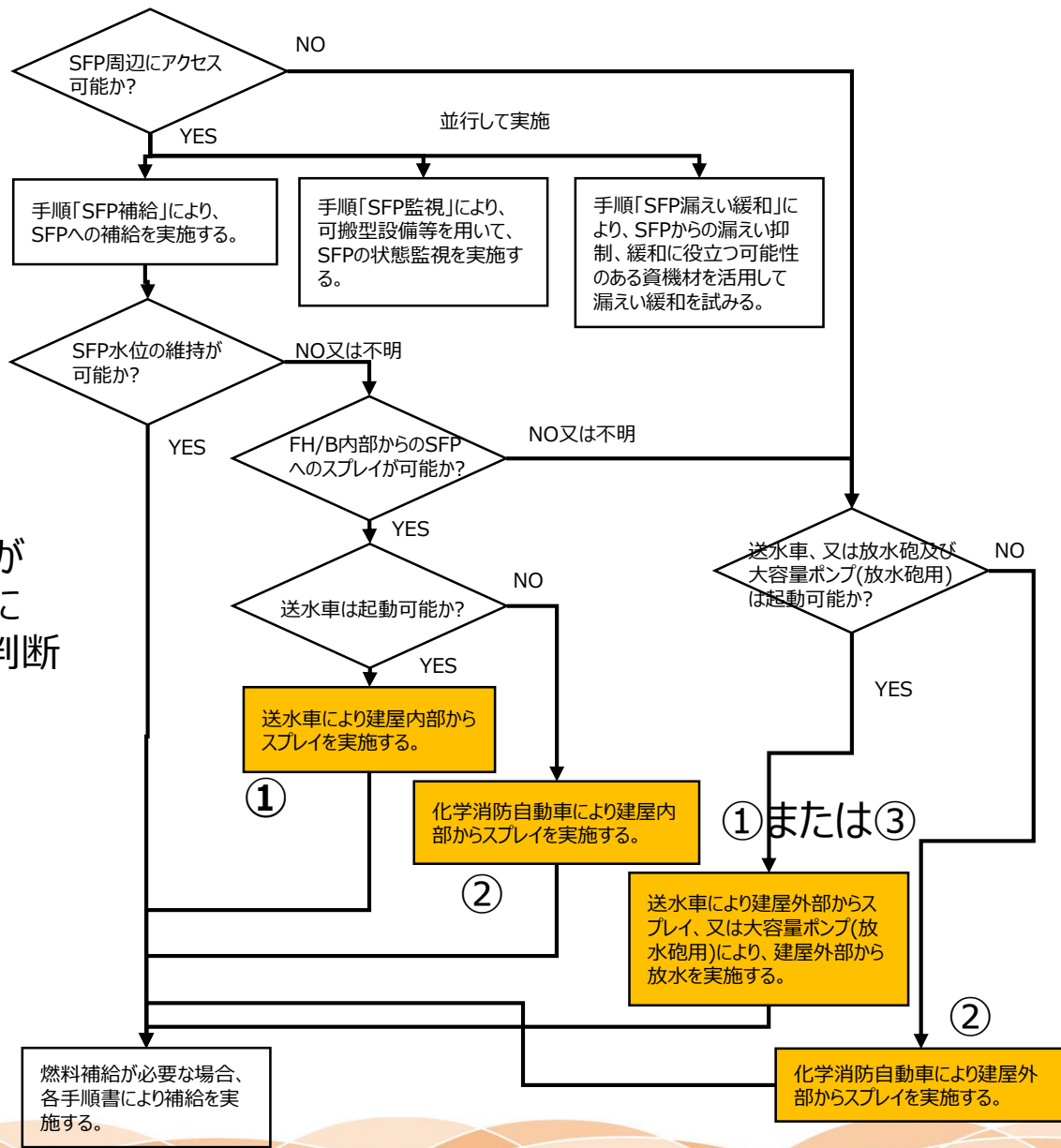


図 放水手順実施の判断フロー (大規模損壊まとめ添付資料を基に作成)

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(1) 評価条件 (7/18)

<放水流量の検討 (2/4) >

- 手順①または②について、スプレイヘッドの保有台数が1台/炉であることから、スプレイヘッドを使用するラインは1ラインのみとなる。
- 手順③について、大容量ポンプは、必要な性能を発揮させるために2台を直列でつなぐ必要がある（参考5参照）ので、放水砲を使用するラインは、1ラインのみとなり、下流で2つに分岐させてそれぞれのSFPへ放水する構成となる。

表 高浜1,2号炉における大規模損壊時にSFPへスプレイ・放水する設備の保有台数

設備		台数				備考
		T1用	T2用	予備	T1,2計	
手順① または 手順②	スプレイヘッド	1台	1台	1台 (T1,2共用)	3台	
	送水車	2台	2台	1台 (T1,2共用)	5台	SFP注水でも使用するため必要数nの2倍の台数を保有
	化学消防自動車	1台		なし	1台	
手順③	大容量ポンプ (放水砲用)	2台		1台 (T1,2共用)	3台	
	放水砲	1台	1台	1台 (T1,2共用)	3台	

- なお、大規模損壊時は、原則号炉間の設備融通は行わないこととしている。
各ユニット向けの設備の確保が困難な場合にのみ、速やかに担当ユニットの作業に戻ることができる車両型のSA設備（送水車等）は融通可能としているが、敷設後の移動が困難なホース等の融通は行わない。すなわち、他号炉向けに配備される設備を用いて追加で敷設することは想定しない。

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

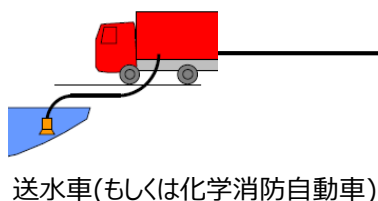
(1) 評価条件 (8 / 18)

<放水流量の検討 (3 / 4) >

○SFPへの流入量が最大となる状態 (設備構成) は下図のとおり。

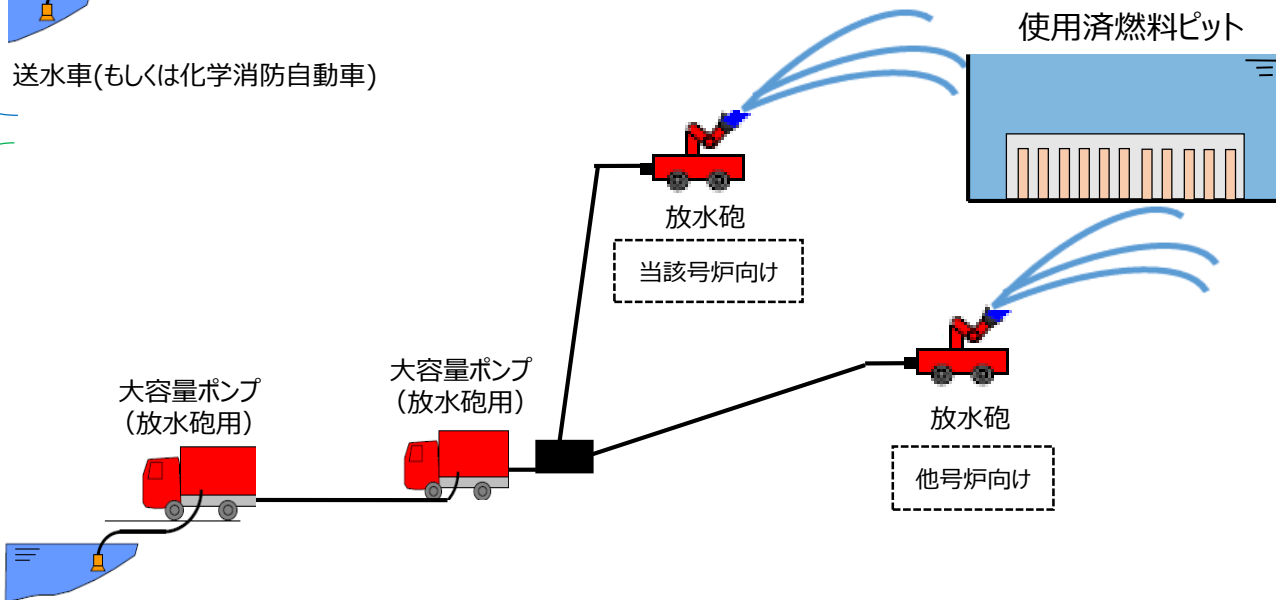
「送水車によるスプレー」(手順①)
or
「化学消防自動車によるスプレー」
(手順②)

スプレーヘッドの設置台数は1台/炉であることから、化学消防自動車と送水車によるスプレーを同時に実施することは想定しない。



「手順①or手順②」と手順③は、設備の構成上、同時に実施することが可能であるため同時に実施することを想定する。

「大容量ポンプ (放水砲用)
による放水」(手順③)



【審査会合コメント⑧：被災していないユニット側の放水砲からの流量について評価を行うこと。】

<コメント⑧への回答>

○片号炉のみ被災した場合には2台の放水砲を1ユニットに向けて放水する可能性があることから、**同じSFPに2台放水砲を使用することを想定する。**

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(1) 評価条件 (9 / 18)

<放水流量の検討 (4 / 4) >

放水流量の合計値は、各手順を大規模損壊時まとめ資料に記載されている通常の操作で行った場合は、 m³/hであるが、大きめになるよう m³/hとした。

(1) スプレイヘッドを用いて放水する手順

- ・スプレイヘッドで放水する際は、通常約 m³/hで実施するが、流量設定においてはスプレイヘッドの仕様上限である m³/hとした。
- 対象手順：①送水車によるスプレイ or
②化学消防自動車によるスプレイ

表 各手順における流量および出典

放水手順	通常時流量	設定流量	根拠
①送水車によるスプレイor②化学消防自動車によるスプレイ	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h ^{※1}	スプレイヘッドの仕様上限
③大容量ポンプによる放水	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h ^{※2×2※3}	ポンプ揚程曲線
合計	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	-

(2) 放水砲を用いて放水する手順

- ・大容量ポンプ(放水砲用)による放水は、各号炉向けに放水砲1台を設置し(参考1参照)、通常約 m³/hで放水するが、流量設定においては、ポンプの仕様上限である m³/hとした。

m³/hの根拠としては、保有する3種類の大容量ポンプ(放水砲用)のうち、最も容量の大きいポンプと2番目に容量が大きいポンプの直列を想定し、各号炉向けの流量は、律速となる流量が各号炉に2等分されるとした。

- ・さらに、片号炉のみ被災した場合には2台の放水砲を1ユニットに向けて放水する可能性があることから2台分の流量とした。

対象手順：③放水砲(大容量ポンプ)による放水

- ※1：通常の運用は m³/h
- ※2：大容量ポンプは、3種類が配備されており、最も容量の大きいポンプと2番目に容量が大きいポンプの直列を想定。律速となる低い方の流量(m³/h)が各号炉に2等分されるとした。
- ※3：片側発災の場合に他号炉向けの放水砲による流量も考慮した。

表 大容量ポンプの容量の比較

型式	HS900 (1、2号炉共用)	HS900N (1、2号炉共用)	HS1200 (予備)
工認記載値	<input type="text"/> m ³ /h以上		
公称値	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h
揚程曲線上の最大値	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の評価条件（流量、水の存在形態等）の検討 （1）評価条件（10/18）

27

<最大流量の設定>

- 大規模漏えい時にSFPへ流入する最大流量としては、注水流量713 m³/hと放水流量の放水 m³/hの合計流量 m³/hとする。

【審査会合コメント①：SFPへの最大流量（注水および放水）の考え方を整理し、説明すること。】

<コメント①への回答>

- 大規模損壊時の対応として整備されている注水および放水の各手順から、各手順の流量は実測や設備仕様を踏まえた最大の流量とし、合計流量は同時に実施可能な手順を全て合計した。

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. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討 (1) 評価条件 (11/18)

<SFPへ流入する海水中の塩素の中性子吸収効果考慮>

- SFPへ注水、放水する手順には、海水を水源とする手順が含まれていることから、海水中の塩素(Cl)による中性子吸収効果を考慮することとした。
- 塩素を考慮する海水流量は、注水手順の⑥とすべての放水手順の合計を足した流量 m³/hとした。
- また、塩分濃度については、文献値(下限3.3%、平均3.5%) ※を保守的に切り下げて3%とした。また、塩分中の塩化合物については、NaClとMgCl₂を考慮することとし、組成も文献値※を保守的に切り下げて、NaCl77%、MgCl₂10%とした。

表 注水手順の流量および水源

注水手順(ポンプ)	流量	水源
① 燃料取替用水タンク (燃料取替用水ポンプ)	30m ³ /h×2	淡水
②-1 2次系純水タンク (2次系純水ポンプ)	5m ³ /h×3	淡水
②-2 2次系純水タンク (2次系純水ポンプ) (脱気塔経由)	30m ³ /h×2	淡水
③ 1,2号淡水タンク (消火ポンプ-消火栓)	22m ³ /h×3×2	淡水
④ 2次系純水タンク (消防ポンプ)	96m ³ /h	淡水
⑤ 1次系純水タンク (1次系純水ポンプ)	40m ³ /h×2	淡水
⑥ 海水 (送水車)	270m ³ /h	海水
合計	713m ³ /h	-

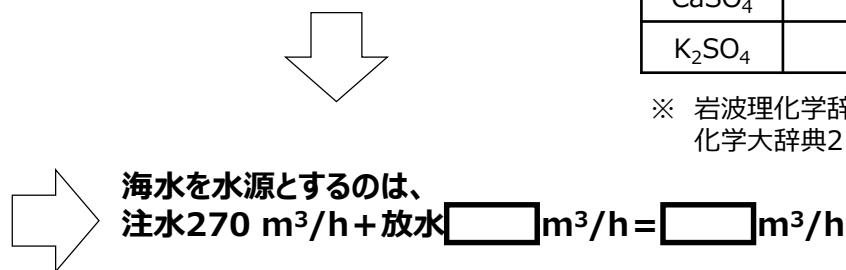
表 放水手順の流量および水源

放水手順	流量	水源
①送水車によるスプレーor②化学消防自動車によるスプレー	<input type="text"/> m ³ /h	海水
③大容量ポンプによる放水	<input type="text"/> m ³ /h×2	海水
合計	<input type="text"/> m ³ /h	-

表 海水の塩分濃度および塩類組成※

文献値		想定した値
海水の塩分濃度		
塩分	3.3%~3.8%	3.0%
海水(標準海水)の塩類組成		
NaCl	77.758 %	77.0%
MgCl ₂	10.878%	10%
MgSO ₄	4.737 %	-
CaSO ₄	3.600 %	-
K ₂ SO ₄	2.465 %	-

※ 岩波理化学辞典第5版 岩波書店、化学大辞典2 共立出版



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. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(1) 評価条件 (12/18)

＜燃料集合体内外の流量割合＞

- 燃料集合体の上部に落下する水の一部は、上部ノズルに当たって燃料集合体外に弾かれ燃料集合体内には流入しないが、燃料集合体内の水分量が多いほど中性子が減速されやすく、燃料近くで熱中性子が増えて、実効増倍率が高くなるので、**解析においては燃料集合体の上部に垂直に落下する水が上部ノズルで弾かれずに全て燃料集合体内に流入するものとする。**

- 局所集中範囲内の流量分布を一様と想定し、SFPに流入する全流量のうち燃料集合体に流入する割合は、水平投影面積に比例するとした。

$$\text{燃料集合体に流入する割合} = \frac{\text{燃料集合体面積}}{\text{ラックピッチ内面積}} = \frac{214 \times 214}{\square \times \square} = \frac{45796}{\square} = \square \% \approx 30\%$$

以上より、燃料集合体に流入する流量は全流量の30%とする。

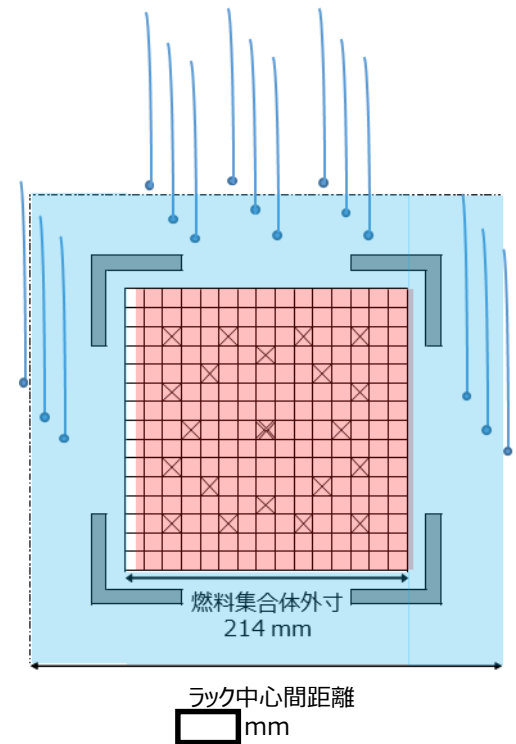
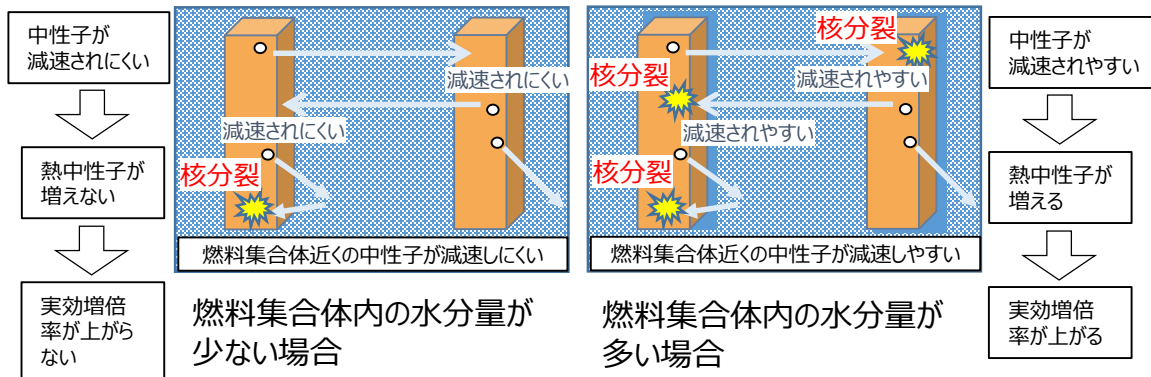


図 燃料集合体とラックピッチの寸法

赤：燃料集合体内
青：燃料集合体外

※ 本検討は局所に集中する場合の検討であるため、屋上に溜まった水が垂直に落下することを想定している。また、オペレーションフロアから、SFPのラック頂部までは約8mあり、オペレーションフロアからラック頂部までの間は横風の影響を受けないことから、SFPに流入する水が、垂直に流入すると想定する。

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

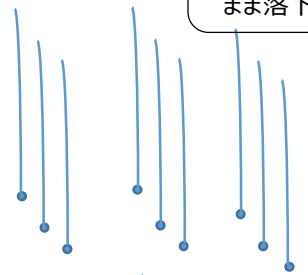
(1) 評価条件 (13/18)

【審査会合コメント③：液膜と液滴の割合を考慮すること。】

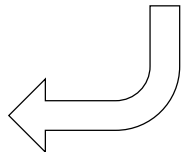
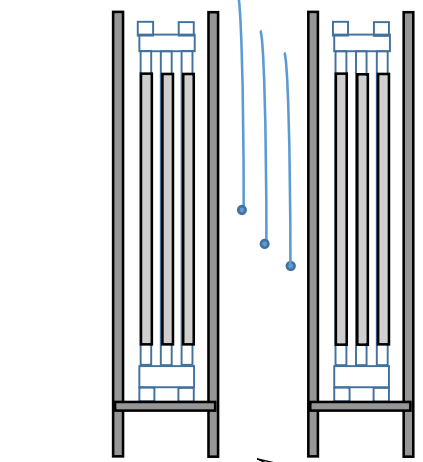
＜液滴と液膜の割合の検討：コメント③への回答＞

- 燃料集合体内に流入した水は、液滴のまま落下する場合と、燃料棒等の表面を液膜となって流下する場合に分かれ、液膜と液滴は様々な割合を取り得る。
- 燃料集合体内の液滴と液膜の割合については、燃料棒周りの水分量が多いほど中性子が減速されやすくなり、実効増倍率が高くなることから、燃料棒周りに最も水分量が多くなる（落下速度は液膜の方が液滴よりも遅いため水分量が多くなる）ように、**全て液膜とした。**
- さらに、燃料集合体内の気相部水密度は、液滴として存在する水がない状態で取り得る最大値である飽和蒸気密度とした。

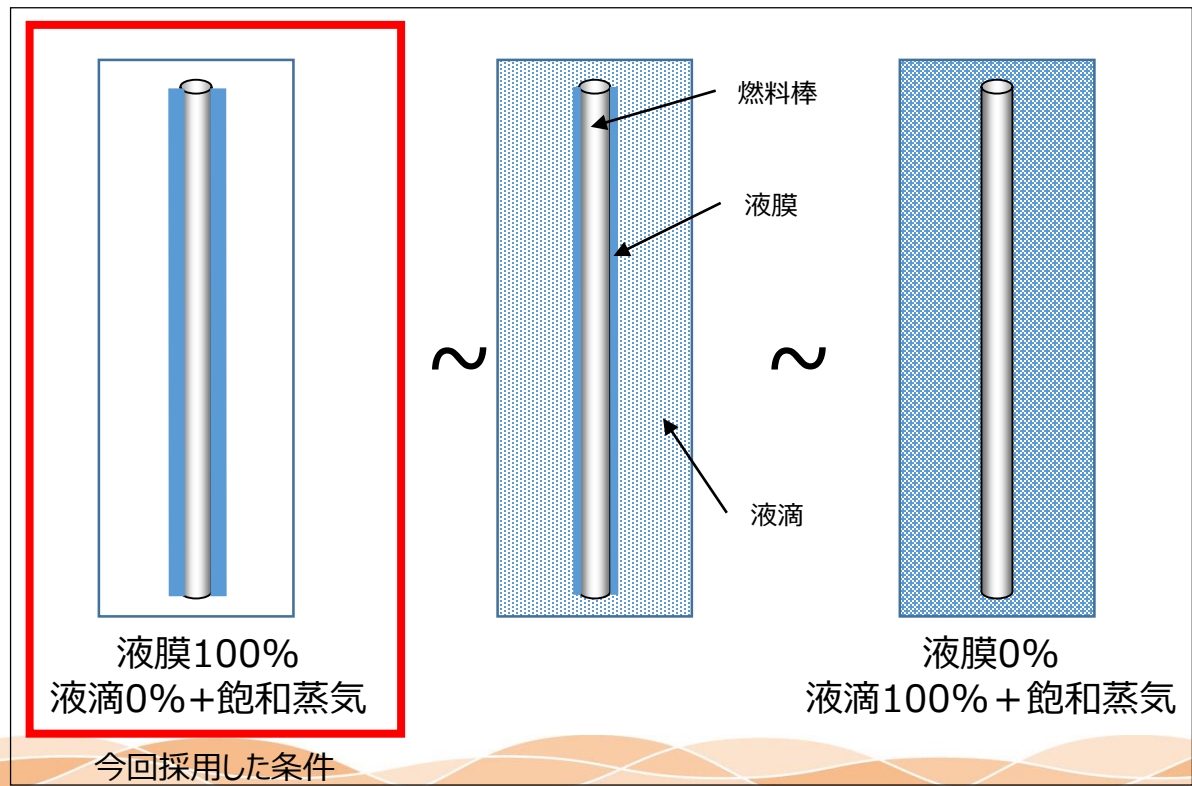
燃料集合体の中に入る液滴は、液膜になる場合と液滴のまま落下する場合がある。



燃料集合体の外に落ちる液滴はそのまま落下する



拡大



液膜と液滴の割合 (イメージ図)

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(1) 評価条件 (14/18)

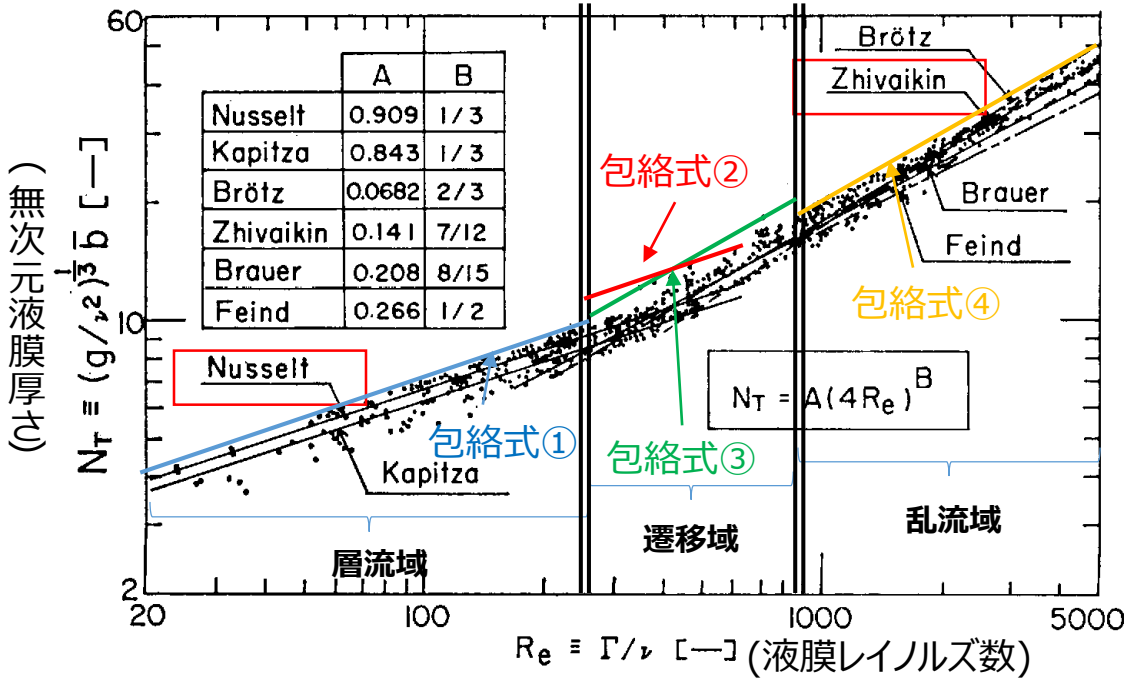
【審査会合コメント③：燃料棒外表面に形成される液膜厚さ（液膜厚さの評価式を含む）の不確かさを考慮すること。】

<液膜厚さ評価：コメント③への回答>

- 燃料集合体内の水分量が多いほど中性子が減速されやすくなり、実効増倍率が高くなるため、液膜厚さは厚くなる条件とする。
- 液膜の厚さは燃料棒にかかる流量に依存し、流量が大きくなり(Re数が大きくなり)、臨界Re数を超えると、液膜の流れは層流から乱流となる。

このため、液膜厚さのベースとなる評価式は、層流域については層流流下液膜に対するNusselt*1の式、乱流域については、乱流流下液膜に対するZhivaikin*2の式とする。

- さらに評価式の不確かさを考慮するため、領域毎に文献に記載されている実験値を包絡するように、式の傾き（下図のBの値）を保存し、最も外側の実験値を通る包絡式を設定し、流量が集中する範囲の全ての燃料棒に適用した（遷移域は両方で評価し、高い値を採用。参考6参照）。



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[m^2/s]
 ν : 動粘性係数[m^2/s]
 b : 平均液膜厚さ[m]
 g : 重力加速度[m/s^2]
 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
 $N_T = 0.157(4Re)^{7/12}$

図 従来の式と実験的な平均膜厚さとの比較*2

*1 : 上田辰洋、気液二相流 - 流れと熱伝達 -, (1981)、養賢堂
 *2 : 新田勉他、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

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(1) 評価条件 (15/18)

<液膜厚さに対する温度の影響（発熱体からの上昇流の影響）>

- 今回見直した燃料配置条件は、燃焼の進んだ燃料（発熱体）と、新燃料（非発熱体）を交互に配置するものである。
- ミクロな視点で見れば、発熱体の上部には上昇流が発生する(右上図)ものの、マクロな視点で見れば、非発熱体は発熱体に囲まれており、SFP全体で温度分布は平坦化されることから、SFP配置燃料の発熱量の違いが液膜厚さ評価に及ぼす影響は小さい。
- さらに、本評価における液膜厚さは、実験値を包絡する評価式により算出した液膜厚さが流量が集中する範囲の全ての燃料棒に適用される設定であるため、十分な保守性を有している。
- また、燃焼の進んだ燃料（発熱体）の燃料棒に形成される液膜は、熱の影響で蒸発するが、液膜厚さの設定においては保守的となるよう蒸発は考慮していない*。
- したがって、発熱体と非発熱体の配置の影響を考慮しても液膜厚さの設定は妥当である。

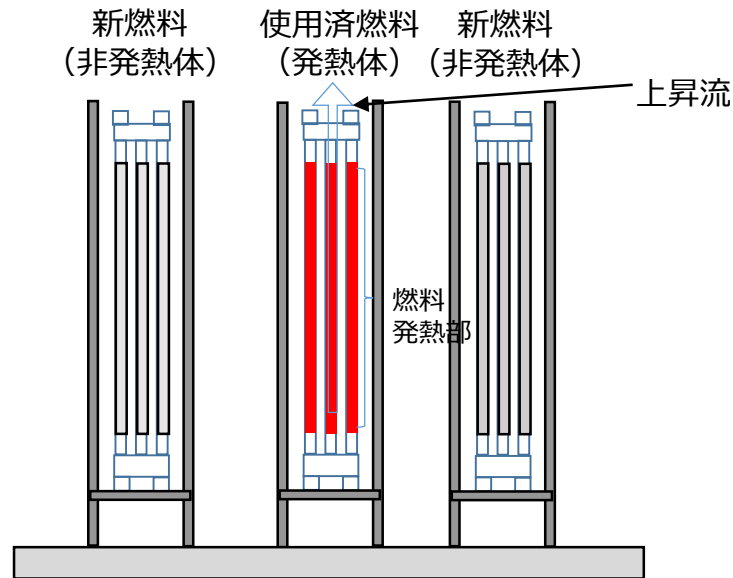


図 発熱燃料と非発熱燃料が並んだ場合のイメージ

* SFP環境下の温度としては、常温（20℃）から100℃までを想定している。液膜厚さの算出は、100℃では蒸発しやすくなり液膜厚さが薄くなるので、液膜厚さが厚くなる常温（20℃）で評価している。
 同様に、気相部水密度の算出についても、100℃では蒸発しやすくなり、液滴径が小さくなり、水密度が下がるので、水密度が上がる常温（20℃）で評価している。

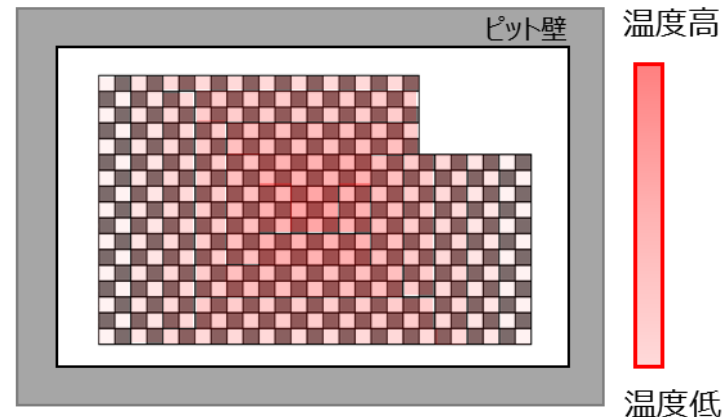


図 SFP全体で見た場合の温度分布のイメージ

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(1) 評価条件 (16/18)

【審査会合コメント③：液滴の落下速度の不確かさを考慮すること。】

<気相部水密度（液滴の下降速度）：コメント③への回答>

- 液滴の下降速度は、液滴径に依存する。SFP内には放水砲による液滴やスプレーによる液滴が存在するため、実際はこれらの平均液滴径から決まる下降速度となる。
- 実際の平均液滴径は特定できないため、燃料集合体外の水密度の取り得る範囲としては、“0g/cm³”から“平均液滴径1mmベース（参考2参照）”の水密度の範囲として、中性子が十分減速される条件となるように**燃料集合体外の水密度を最も高くなる※値（平均液滴径1mmベースの水密度）**とした。

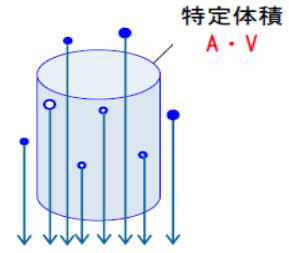
※ 放水砲の放水範囲が局所に集中する場合は、放水が天井や壁に当たった後、局所に集中すると考えられ、天井や壁に当たった後SFPに落下する水の液滴は、噴霧状に放水されるスプレーによる液滴よりも液滴径が大きい。すなわち、放水砲による平均液滴径はスプレーによる平均液滴径1mmよりも大きくなる。

<取り得る水密度の範囲>

	最小値	最大値	備考
気相部水密度	0	平均液滴径 1mmベースの値※	平均液滴径により決定
平均下降速度	390cm/sec以上	390cm/sec	平均液滴径により決定
平均液滴径	1mm以上	1mm	スプレー試験により決定

下降速度が速い ⇔ 下降速度が遅い

平均液滴径が大きい ⇔ 平均液滴径が小さい



↓

水密度
 $W = Q / (A \cdot V)$

- 下降速度 V … 液滴の下降速度
- 放水範囲 A … 流路面積
- 放水流量 Q … 放水流量

※ 水密度は、環境条件を考慮した右式を用いて算出。 $W = [Q \div \{A \times (V - 10)\}] \times 1.2 + 0.0006$

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討 (1) 評価条件 (17/18)

＜SFPに流入する水が集中する範囲＞

- SFPに流入した水(m³/h)が、どの程度の広がりをもった場合に実効増倍率が最大となるかを確認するため、水が集中する範囲 (N×N) を順次広げて解析を行った (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※¹から増やしていき、実効増倍率の増減傾向が把握できるまで解析を行った)。

- ※ 1 SFPに新燃料を敷き詰めた条件で、3×3の範囲内の水密度を0~1g/cm³まで変化させた場合の実効増倍率が0.971 (不確定性0.02含む) であり、判定基準 (0.98以下) を満足することを確認している。

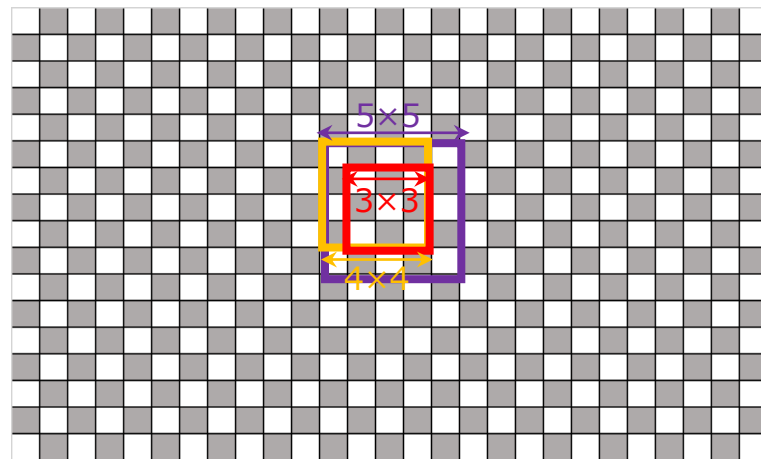


図 放水される水が集中する想定範囲※²

	燃焼度 (GWd/t)
□ 領域A	0 (55GWd/t燃料)
■ 領域B	25 (55GWd/t燃料)

- ※ 2 保守的に評価できるようにSFPラックの切り欠けをなくし、燃料が存在するものとして評価した。

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. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討 (1) 評価条件 (18/18)

<設定条件の設定根拠>

局所に集中する場合の実効増倍率の最大値を確認する評価条件を下表のとおり整理した。

表 最大流量が局所に集中した場合の未臨界性評価条件

評価条件		設定根拠
①燃料配置条件(燃焼度、位置)		p34のチェッカーボード配置
②最大流量		<input type="text"/> m ³ /h
③SFPへ流入する水が集中する範囲	SFPへ流入する水が集中する範囲	3×3,4×4,5×5…の範囲について解析を実施し、最も実効増倍率が高くなる範囲を確認
	局所集中範囲外の水密度	飽和蒸気密度を設定
④燃料集合体内外の流量割合		燃料集合体内に全流量の30%が流入
⑤液膜厚さ		液膜を形成する流量に対して、層流および乱流の違いを考慮して液膜厚さを算出(流入する水が全て液膜になると想定し、層流および乱流の違いを考慮して液膜厚さを算出)
⑥燃料集合体内外の気相部水密度	燃料集合体内	飽和蒸気密度 (液滴のまま流入する水がないとした場合に取うる最大値として、飽和蒸気密度を設定)
	燃料集合体外	流量は全流量の70%とし、液滴径1mmとして気相部水密度を算出
⑦海水に含まれる塩素の濃度		海水量 <input type="text"/> m ³ /h、塩分濃度3%、塩類組成NaCl77%、MgCl ₂ 10%として濃度を算出
⑧水抜け時の水位		完全喪失～冠水状態まで変化
⑨反射体の材質、厚さ		SFPラック周りに厚さ300mmの水反射体を設定

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. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(2) 評価結果 (1 / 2)

【審査会合コメント②：放水が狭い領域に集中するケースも想定し評価すること。】

<コメント②への回答>

評価条件と評価結果を以下に示す。全て判定基準を満足している。水位と実効増倍率の関係のグラフは次頁に示す。

表 局所に集中した場合の未臨界性評価条件および評価結果

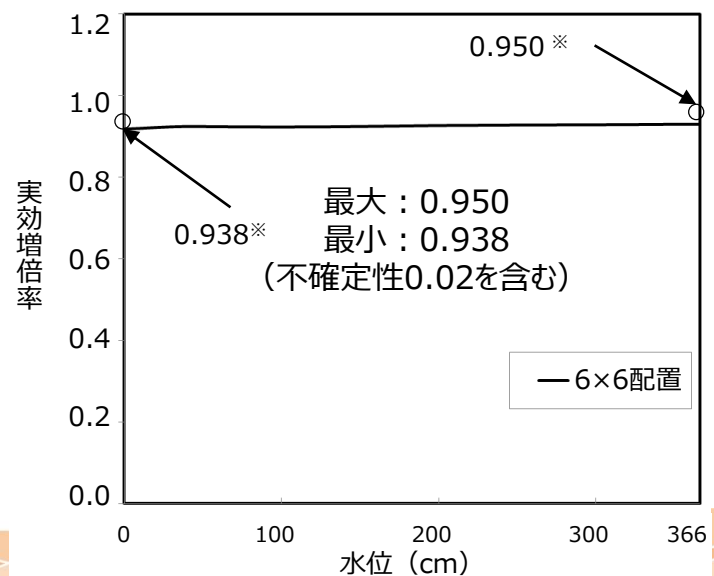
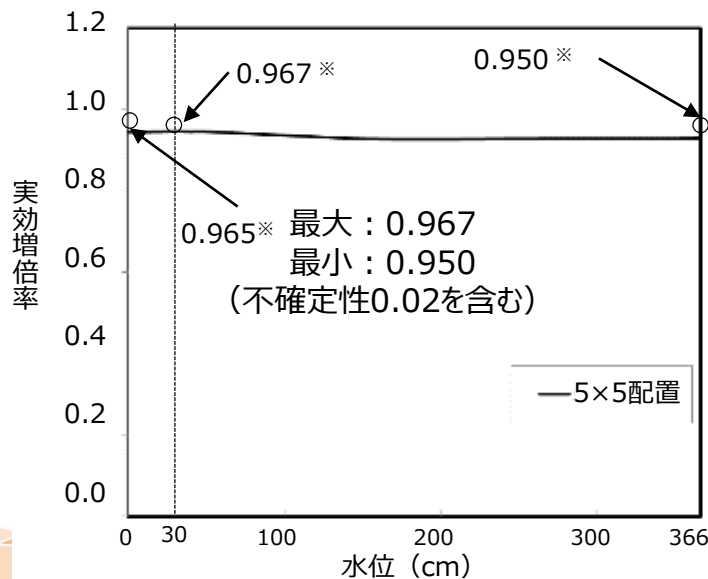
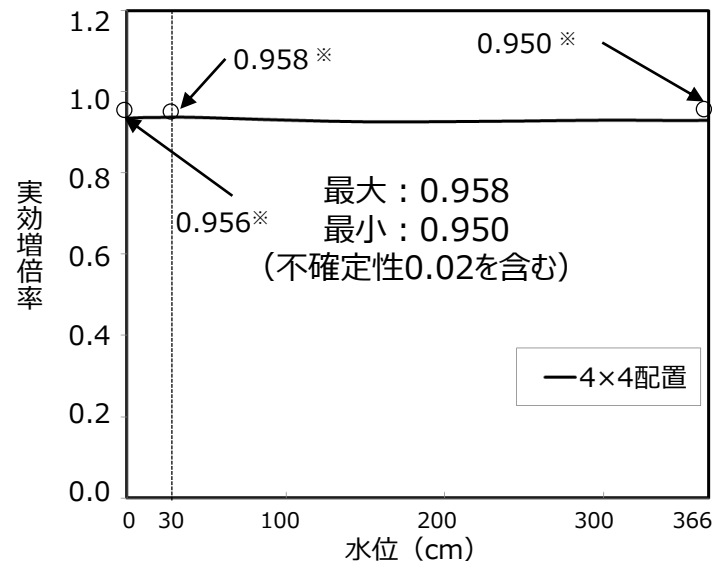
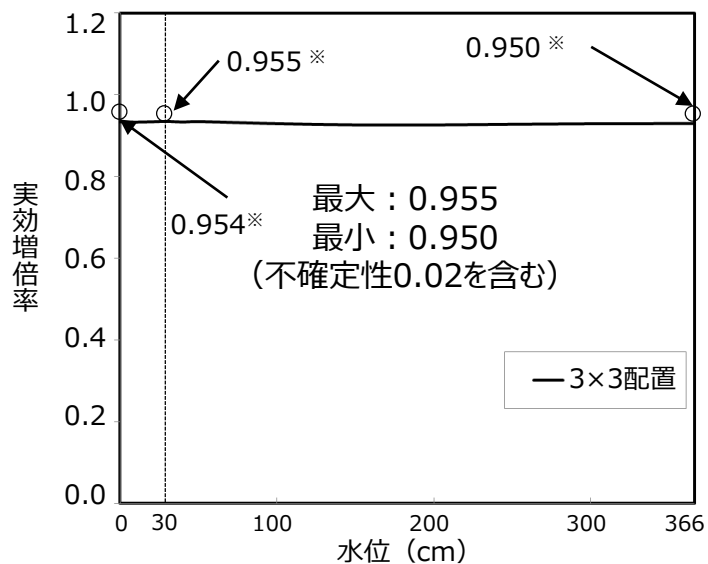
		集中範囲 (N×Nラック)	3×3	4×4	5×5	6×6
		評価 条件	最大流量	□ m ³ /h (純水：443 m ³ /h、海水：□ m ³ /h)		
液膜厚さ	1.58mm		1.13mm	1.03mm	0.83mm	
気相部 水密度	燃料 集合体内		飽和蒸気密度 (0.0006g/cm ³)			
	燃料 集合体外		純水：0.028g/cm ³ 海水：0.115g/cm ³	純水：0.017g/cm ³ 海水：0.064g/cm ³	純水：0.011g/cm ³ 海水：0.041g/cm ³	純水：0.008g/cm ³ 海水：0.028g/cm ³
局所集中 範囲外水密度	飽和蒸気密度 (0.0006g/cm ³)					
評価 結果	実効 増倍率※	水位 0cm	0.954	0.956	0.965	0.938
		水位30cm	0.955	0.958	<u>0.967</u>	— (実効増倍率は単調に増加)
		水位366cm	0.950			

※ 実効増倍率は一律不確定性を0.02とした。

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. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討 (2) 評価結果 (2 / 2)

各集中範囲における水位と実効増倍率の関係を以下に示す。



※ 不確定性0.02を含んだ値

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(3) 評価条件への影響評価 (1 / 12)

<評価条件への影響評価>

これまでに評価した条件が妥当であることを確認するために、a～iの項目について影響評価を行った。以降、各項目の影響評価について説明する。なお、解析条件は、p36の5×5の条件を基本ケースとし、影響評価を行う項目の条件を変えて評価した。

表 基本ケースの条件と影響評価を確認する解析の関係

評価条件		基本ケースの条件	基本ケース条件の各項目の影響評価を確認する解析
最大流量		□ m ³ /h	a.SFPへ流入する流量および塩分の影響
海水に含まれる塩素の濃度		海水量 □ m ³ /h 3%	a.SFPへ流入する流量および塩分の影響
燃料集合体内外の流量割合		30%	b.燃料集合体へ流入する流量の影響
液膜厚さ		液膜割合100%	c.液滴と液膜の割合の影響
燃料集合体内外の気相部水密度	燃料集合体内	飽和蒸気密度 (液滴0%)	c.液滴と液膜の割合の影響
	燃料集合体外	燃料集合体外割合:70%	b.燃料集合体へ流入する流量の影響
		水密度:液滴径1mmとして気相部水密度を算出	e.燃料集合体外の気相部水密度 (液滴の下降速度) の影響
スプレイ水温度		20℃	d.液膜厚さに対する温度の影響
SFPへ流入する水が集中する範囲	SFPへ流入する水が集中する範囲	SFP中央の5×5範囲内	f.SFPに流入する水が集中する場所の影響 g.SFPに流入する水が集中する範囲の外に弾かれた場合の影響
	局所集中範囲外	飽和蒸気密度を設定	h.集中範囲の外に液膜が形成された場合の影響評価
燃料配置条件(燃焼度、位置)		チェッカーボード配置 領域A:0GWd/t,領域B:25GWd/t	i.領域Bの燃焼度設定のもつ余裕の確認

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討 (3) 評価条件への影響評価 (2 / 12)

a. SFPへ流入する流量および塩分の影響

<評価目的>

流量の変化およびそれに伴う塩分の変化が実効増倍率へ与える影響を確認する。

<評価条件>

- ・集中範囲：5×5
- ・流量：443m³/h（純水で最大の値）～ m³/h（最大流量）までほぼ均等になるように4点を評価
- ・水位：完全喪失

<評価結果>

流量増加に伴い実効増倍率は単調に増加することを確認した。これは塩素の増加に伴う実効増倍率の低減効果よりも、流量増加（減速材増加）に伴う実効増倍率の増加効果の方が大きいためと考えられる。

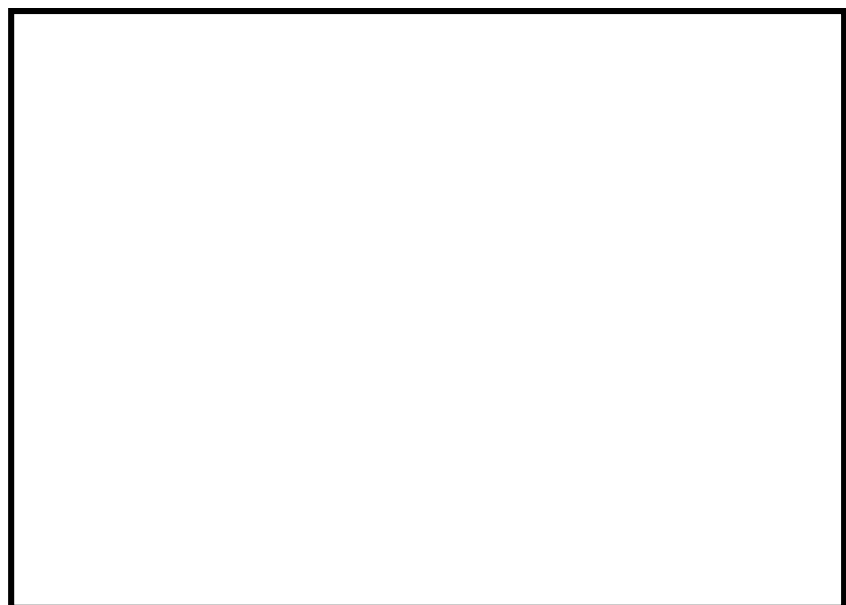


図 局所に集中する流量と実効増倍率の関係

表 影響を確認した流量および内訳

--

※ 不確定性を含まない値

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討 (3) 評価条件への影響評価 (3 / 12)

b. 燃料集合体へ流入する流量の影響

<評価目的>

燃料集合体へ流入する流量割合の変化が実効増倍率へ与える影響（燃料集合体間の水密度の変化が実効増倍率へ与える影響）を確認する。

<評価条件>

- ・集中範囲：5×5
- ・燃料集合体内へ流入する流量割合：10,20,30%（燃料集合体間の水密度を増加させる30%以下で変化）
- ・水位：30cm

<評価結果>

流量割合の低減（燃料集合体間の水密度の増加）に伴い実効増倍率は単調に低下することを確認した。これは、この範囲では燃料集合体内の水量が多いほど、中性子が減速しやすい条件になった結果と考えられる。

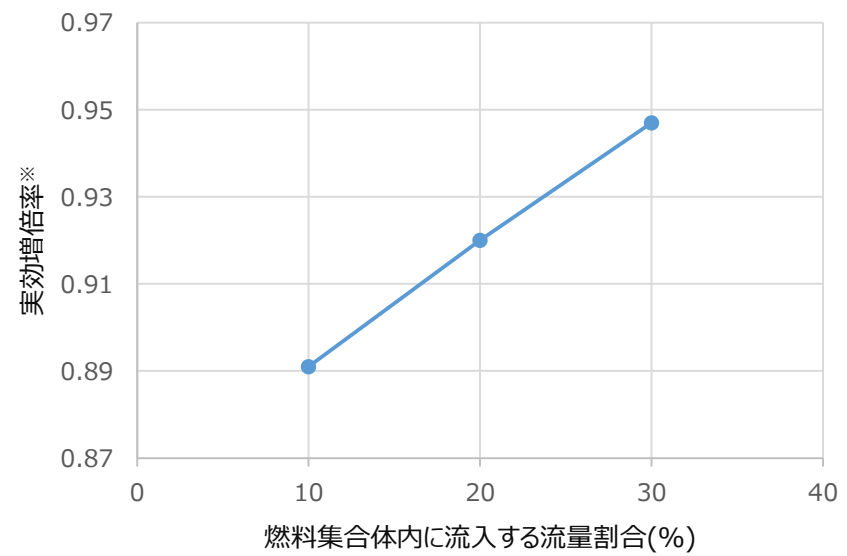


図 燃料集合体内に流入する流量割合と実効増倍率の関係

※ 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。

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(3) 評価条件への影響評価 (4 / 12)

【審査会合コメント⑥：スプレイ水の液膜または液滴への分配による影響を示すこと。】

c. 液滴と液膜の割合の影響

＜評価目的＞

液膜割合の変化が実効増倍率へ与える影響について確認する。

＜評価条件＞

- ・集中範囲：5×5
- ・液膜割合：0,50,60,70,80,90,100%
- ・水位：完全喪失

＜評価結果：コメント⑥への回答＞

液膜割合の増加に伴い、実効増倍率が単調に増加することを確認した。これは燃料集合体内に液膜として存在する方が、液滴として存在するよりも下降速度が遅く、その結果燃料集合体内の水量が多くなり、中性子が減速しやすい条件になった結果と考えられる。

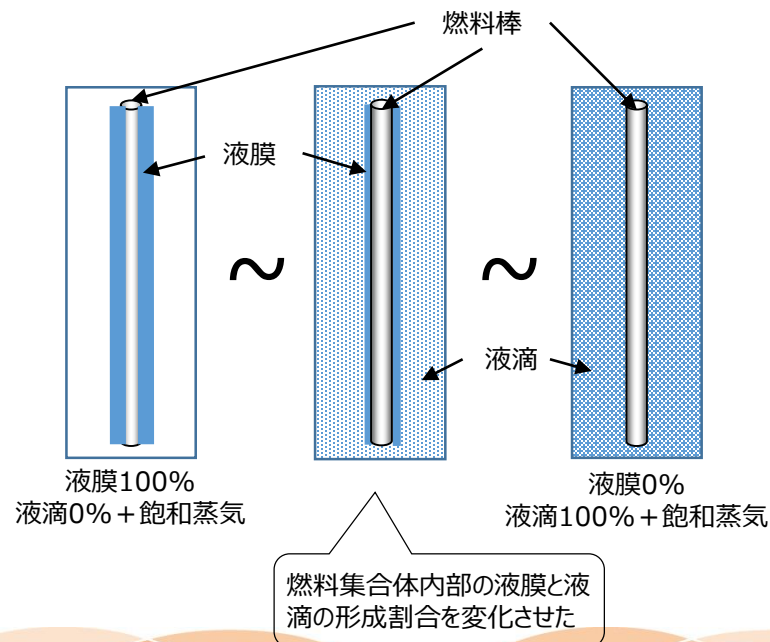
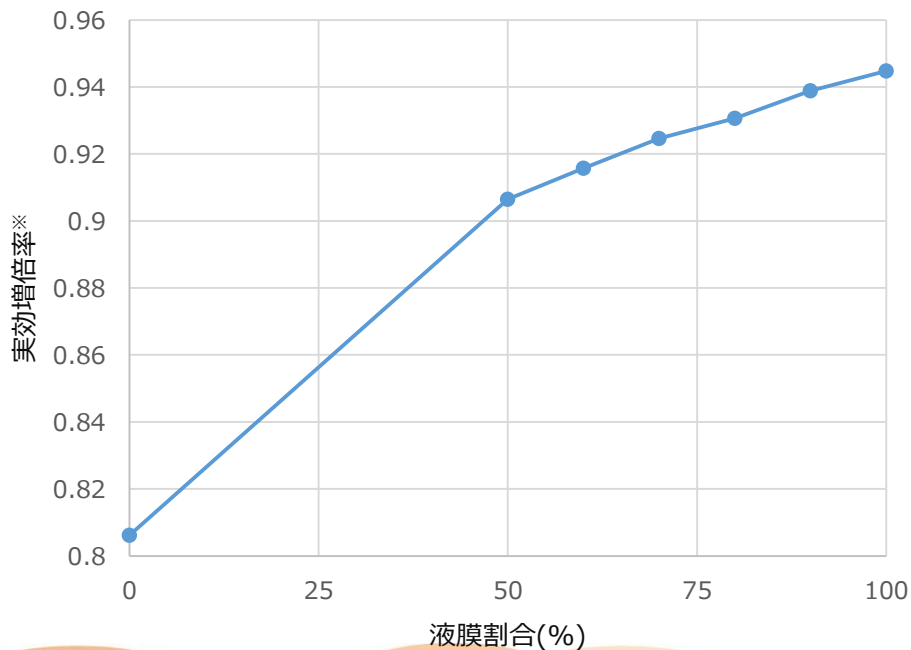


図 液膜割合と実効増倍率の関係

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(3) 評価条件への影響評価 (5 / 12)

d. 液膜厚さに対する温度の影響

<評価目的>

水温の違いによる動粘性係数の変化が実効増倍率に与える影響を確認する。

<評価条件>

- ・集中範囲：5×5
- ・水温：5℃（常温よりもさらに温度が低下した場合）、20℃（常温）、100℃
- ・水位：30cm

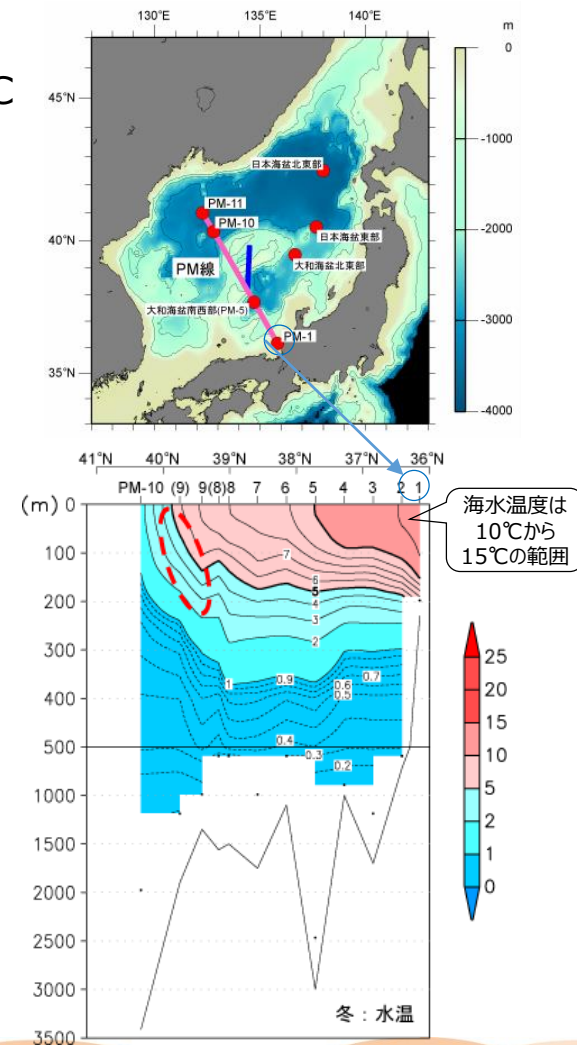
<評価結果>

水温が低下するほど動粘性係数が増加し、液膜厚さも増えるため、実効増倍率は高くなるが、水温5℃であっても**判定基準（0.98以下）を満足することを確認した。**

表 評価結果

水温	動粘性係数 (m ² /s)	液膜厚さ (mm)	実効増倍率 (不確定性は一律0.02とした)
5℃	1.519×10 ⁻⁶	1.06	0.971
20℃	1.003×10 ⁻⁶	1.03	0.967
100℃	0.295×10 ⁻⁶	0.93	—

冬期平均海水温度 (気象庁より)



5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(3) 評価条件への影響評価 (6 / 12)

e. 燃料集合体外の気相部水密度 (液滴の下降速度) の影響

<評価目的>

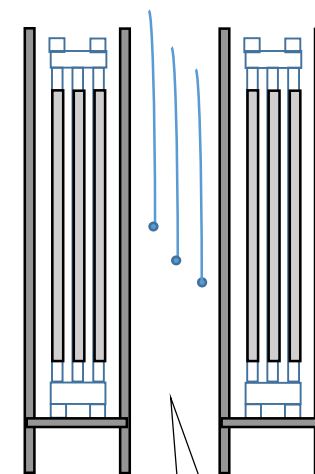
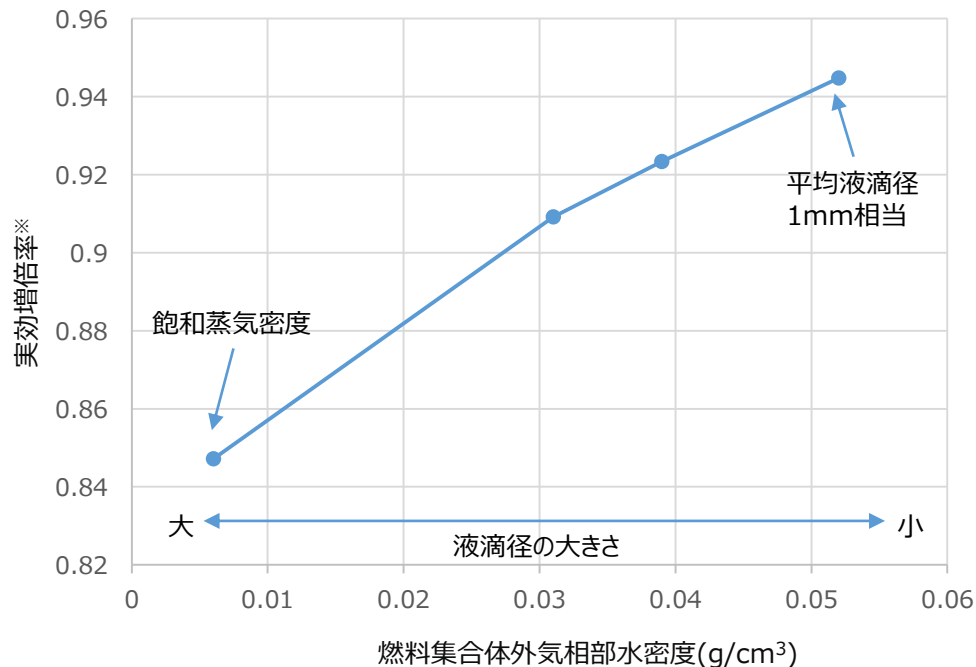
燃料集合体外の気相部水密度の変化が実効増倍率へ与える影響について確認する。

<評価条件>

- ・集中範囲：5×5
- ・燃料集合体外気相部水密度：飽和蒸気密度から平均液滴径1mm相当の水密度まで4点を評価
- ・水位：完全喪失

<評価結果>

燃料集合体外の水密度の増加に伴い、実効増倍率が単調に増加することを確認した。これは今回設定した流量でも放水範囲内の水量が中性子を減速するために十分ではないため、燃料集合体外の水密度が高い方が減速に寄与する水が増えて、実効増倍率が高くなったものと考えられる。



燃料集合体の外の気相部水密度を変化させた

図 燃料集合体外水密度と実効増倍率の関係

※ 不確定性を含まない値

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討 (3) 評価条件への影響評価 (7/12)

f. SFPに流入する水が集中する場所の影響

<評価目的>

SFPに流入した水が集中する場所の違いによる実効増倍率への影響（反射体の影響）について確認する。

<評価条件>

- ・集中範囲：5×5
- ・集中する場所：SFPの中央、SFPの端
- ・水位：30cm

<評価結果>

集中する場所がSFPの端の方が、実効増倍率が下がることを確認した。これはSFPの端の方が中性子が漏れる効果が、中央よりも端の方が高く、実効増倍率が低下したものと考えられる。

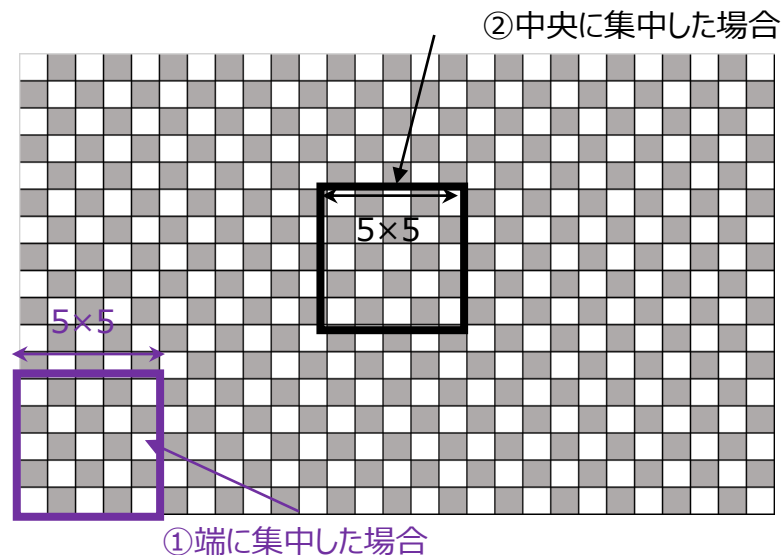


表 評価結果

評価ケース	実効増倍率 (不確定性は一律0.02とした)
①SFPの端に集中した場合の評価	0.958
②SFPの中央に集中した場合の評価	0.967

	燃焼度 (GWd/t)
□領域A	0 (55GWd/t燃料)
■領域B	25 (55GWd/t燃料)

図 放水される水が集中する場合の燃料配置条件および集中する範囲

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(3) 評価条件への影響評価 (8 / 12)

g. SFPに流入する水が集中する範囲の外に弾かれた場合の影響

<評価目的>

N×N (集中範囲) の外に水が弾かれた場合の実効増倍率への影響を確認する。

<評価条件>

流量集中範囲の最外周のラック (範囲B) から一部の水が弾かれ、隣接ラック (範囲C) に流入することを想定する。

・集中範囲 : 5×5

・流量

範囲A(中央3×3) : 最大流量の9/25(範囲Aと範囲Bは弾かれた水をやり取りするだけなので、範囲Aの流量は固定)

範囲B : 最大流量の16/25から外側に弾かれる量を引いた分

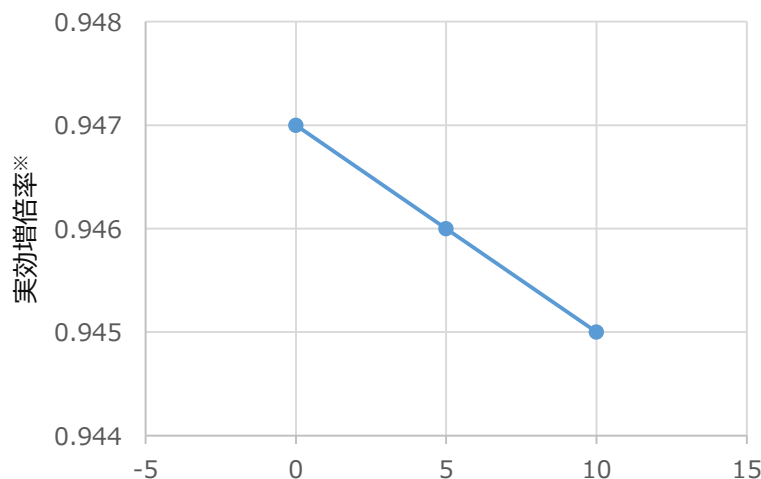
範囲C : 範囲Bから弾かれる量

・範囲Cへ弾かれる水の割合 : 範囲Aに流入する水の0,5,10%

・水位 : 30cm

<評価結果>

水が集中範囲から弾かれる割合の増加に伴い、実効増倍率が単調に低下することを確認した。これは、集中する範囲の水が減るほど減速に寄与する水が減り、実効増倍率が低下したものと考えられる。



最外周の範囲からN×Nの外に出る割合(%)

図 最外周の範囲からN×Nの外に出る割合と実効増倍率の関係

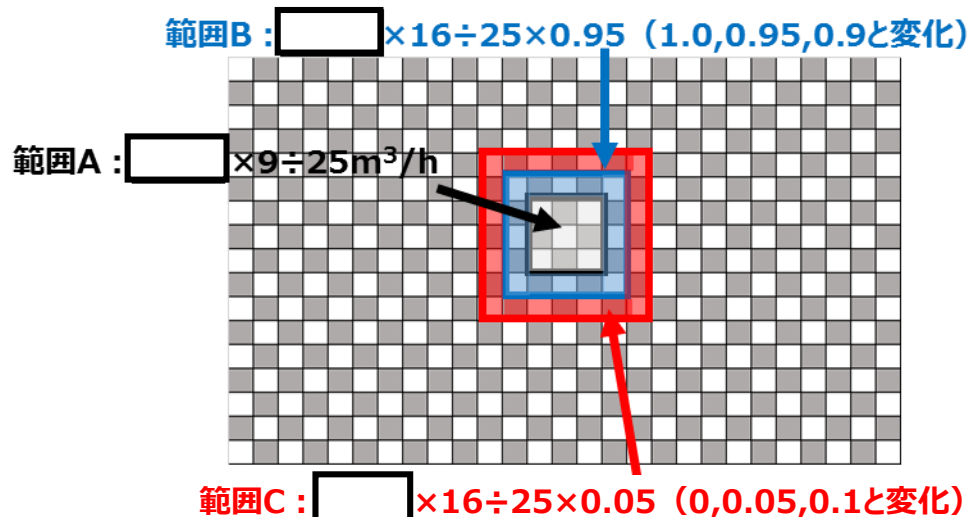


図 範囲AおよびBの流量設定

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。

※ 不確定性を含まない値

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(3) 評価条件への影響評価 (9 / 12)

h. 集中範囲の外に液膜が形成された場合の影響評価

<評価目的>

集中範囲の外に液膜が残っていた場合の実効増倍率への影響を確認する。

<評価条件>

- ・集中範囲：5×5
- ・液膜厚さ：5×5内；0.96mm※1、5×5外；0.3mm※2
- ・水位：30cm

<評価結果>

N×Nに最大流量が集中した上で、さらにN×Nの外に最大流量による液膜が形成されても、実効増倍率は0.967（不確定性0.02を含む）であり、**判定基準（0.98以下）を満足することを確認した。**

- ※ 1 最大流量の2倍以上となるマスバランスを無視した極めて厳しい条件としているため、5×5内の液膜厚さの評価は、実験値の最大値を包絡する式ではなく、最大値とRe数が近い領域で無次元液膜厚さが二番目に大きい値を包絡する式とした（下図参照）。なお、5×5内の流量は、 m³/hとした。
- ※ 2 m³/hが424ラック全面に広がった場合の液膜厚さ0.28mmを上回る厚さを設定

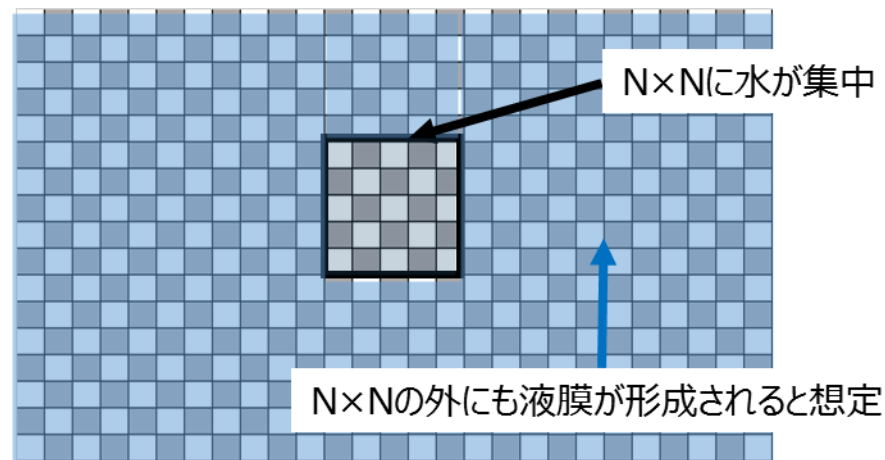
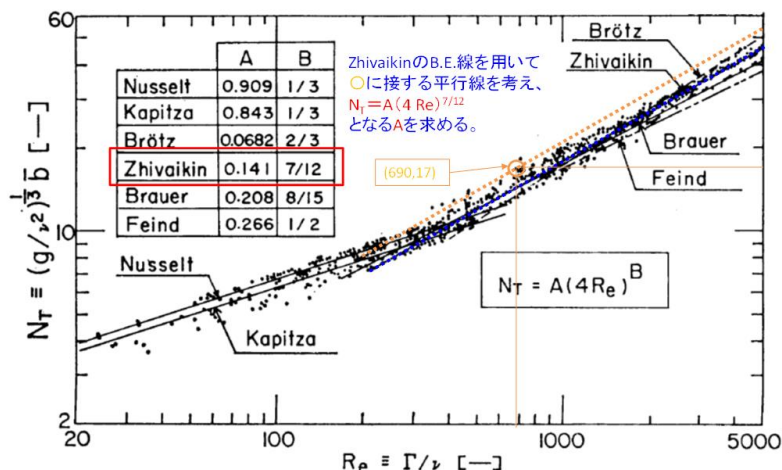


Fig. 4 Comparison of conventional equations with experimental average film thickness

図 液膜厚さの設定

図 N×N内の液膜厚さの包絡式

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. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討 (3) 評価条件への影響評価 (10/12)

i. 領域Bの燃焼度設定のもつ余裕の確認

<評価目的>

領域Bに貯蔵する燃料の燃焼度を大きく切り下げても、
実効増倍率が判定基準を満足することを確認する。

<評価条件>

- ・集中範囲：5×5
- ・流量：m³/h
- ・水位：完全喪失
- ・領域Bの燃焼度：20GWd/t

<評価結果>

領域Bの燃料を25GWd/tから20GWd/tに置き換えても、
判定基準 (0.98以下) を満足することを確認した。

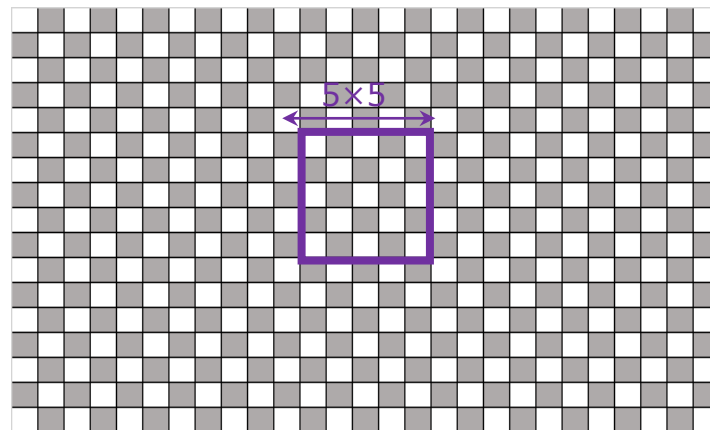


図 放水される水が集中する場合の燃料配置条件
および集中する範囲

表 領域設定におけるより厳しい条件の検討結果

	基本ケース※	感度解析
領域A	燃焼度 0GWd/t	燃焼度 0GWd/t
領域B	燃焼度 25GWd/t	燃焼度 20GWd/t
実効増倍率 (不確定性を一律0.02とした)	0.965	0.979

※ 基本ケースの流量はm³/h

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(3) 評価条件への影響評価 (11/12)

○未臨界性評価条件の設定根拠、保守性および温度の影響について下表のとおり整理した。

パラメータ条件	取り得る範囲	解析を実施した条件	設定根拠	通常値 (現実的な事象)	不確かさor余裕	温度の影響
①燃料配置条件 (燃焼度、配置)	新燃料敷き詰め ～ 55G燃焼燃料敷き詰め	チェッカーボード 配置 0G : 212体 25G : 212体	SFPへ流入する水が集中した場合でも未臨界を維持できるように新燃料を分散させた。	55G平衡炉心を想定すると、炉心から取り出した燃料157体の内訳は、 1回燃焼 (25G以下) が44体、 2回燃焼 (25G以上) が36体、 2回燃焼 (25G以下) が8体、 3回燃焼 (25G以上) が44体、 4回燃焼 (25G以上) が25体。 また、定検中はさらに44体程度の新燃料が貯蔵される。SFP内の炉心からの取出燃料以外の25G以下の燃料は、現時点で、 1号炉2体、 2号炉6体である (今後も同程度で推移)。	燃焼度区分が二つしかないため、各領域に実際に配置される燃料の燃焼度は、各領域の評価上の値よりも高く、十分余裕あり (25G以下の燃料は、燃料装荷前でも100体程度)	なし
②流量(m ³ /h)	0～ <input type="text"/>	<input type="text"/>	手順、設備構成を踏まえて範囲を設定した。また、今回設定した流量は、減速不足状態であることから、最大値を評価条件とした。	<input type="text"/> (大規模損壊時のまとめ資料記載値の合計)	注水手順をすべて合計。放水に放水砲2台分を全量考慮	なし
③SFPへ流入する水が集中する範囲	1ラック～424ラック	3×3～6×6	取り得る範囲をサーベイし最も厳しい条件を確認	・注水は配管の下方に落下 ・スプレーはSFP全体にかかるように放水 ・放水砲は建屋全体にかかるように放水	最も実効増倍率が厳しい値を確認できるような範囲を設定また、全量が局所に集中することを想定	なし
④燃料集合体内に流入する割合(%)	0～30	30	一部の流量は、上部ノズルに弾かれて入らないが、全量入る前提とした。	<input type="text"/> 以下	水平投影面積比を保守的に切り上げ、さらに上部ノズルに弾かれる水を弾かれなると想定	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。

5. SFPに流入する水が局所に集中する場合の検討

(3) 評価条件への影響評価 (12/12)

○未臨界性評価条件の設定根拠、保守性および温度の影響について下表のとおり整理した。

パラメータ条件	取り得る範囲	解析を実施した条件	設定根拠	通常値 (現実的な事象)	不確かさor余裕	温度の影響
⑤液膜厚さ (mm)	0～液膜100%の厚さ	液膜100%の厚さ	取り得る範囲をサーベイし最も厳しい条件を確認	Re数に対応するNusseltの式やZhivaikinの式による厚さ以下	理想的な実験環境で成立する評価式をベースとし、さらに実験値を包絡する評価式により算出した液膜厚さを流量が集中する範囲の全ての燃料棒に適用	高温より厚くなる(実効増倍率が厳しくなる) 常温で評価。さらに液膜厚さがより厳しくなる5℃の動粘性係数の影響も確認
⑥-1気相部水密度 (燃料集合体内) (g/cm ³)	0.0006 ～ 液滴径1mm時の水密度	0.0006	取り得る範囲をサーベイし最も厳しい条件を確認	スプレイの平均液滴径は1mm以上、注水、放水砲の平均液滴径はスプレイの平均液滴径以上	気相部の液滴には放水砲によるものも含まれるが、保守的に全てスプレイによる平均液滴径は1mmと設定	高温より大きくなる(実効増倍率が厳しくなる) 常温で評価
⑥-2気相部水密度 (燃料集合体外) (g/cm ³)	0.0006 ～ 液滴径1mm時の水密度	液滴径1mm時の水密度	取り得る範囲をサーベイし最も厳しい条件を確認	同上	同上	同上
⑦海水に含まれる塩素濃度(%)	3.3～3.8	3%	ばらつきの下限を切り下げた値	平均3.5	塩分濃度はばらつきの下限をさらに切り下げて設定	なし
⑧水抜け時の水位(cm)	0～366	全ての範囲を評価	取り得る範囲をサーベイし最も厳しい条件を確認	事故時の水の漏えい程度に依存するため想定不可	全ての水位を評価	なし
⑨反射体の材質、厚さ(cm)	SFP内の構造物による材質、厚さ	30cm	反射体効果が飽和する厚さ	実際のSFP内の構造物の材質、厚さ	実効増倍率への影響が飽和する厚さを確認 水抜け時の評価でも上部および水平方向に水反射体を設定	なし

6. SCALEコードの適用性について

6. SCALEコードの適用性について

(1)ベンチマーク解析

○ 以下のことから、SCALEコードを今回評価した二相の体系や、塩素を含む体系に使用することは適切である。

<二相の体系への適用性>

- ・147ケースのベンチマーク解析の結果から、① 液相部の状態 を取り扱える、② 気相部の状態を取り扱えること、さらに、水位変化は液相部と気相部の境界位置が変わるだけで中性子の挙動に大きく影響を与えるものでないので、2相の状態を取り扱える（参考7）。
- ・従来のベンチマーク範囲のEALF(核分裂に寄与する中性子平均エネルギー)間にある、申請評価での低水位状態に相当するEALFに対する傾向を確認するために別途選定した3ケースについても、計算結果と実験結果は良く一致している（参考7）。

<塩素を含む体系への適用性>

- ・塩素を含む体系を評価するため、塩素が用いられている3ケースのベンチマーク解析を追加で実施した。塩素を含む3ケースのC/Eは1.0を超えているものの、これらの結果は計算値が実験値よりも実効増倍率を厳しく評価する方向（安全側の評価）であることから評価上問題はない。
- ・また、塩素が用いられている臨界実験も含めた150ケースのベンチマーク解析結果から計算コードの不確定性を評価すると、平均誤差は0.0006、95%信頼度×95%確率は0.0072となる。これは次頁に記載している計算コードの不確定性（平均誤差0.0013、95%信頼度×95%確率0.0104）よりも小さく、本評価で使用している不確定性の値0.02は十分に余裕を見込んだ値である。



6. SCALEコードの適用性について

(2)不確定性

<不確定性の妥当性について>

- 今回申請の見直し後の評価では、これまでの実績を踏まえて実効増倍率の不確定性として0.02を採用している。
- 既許可および今回申請の見直し前の評価では、下表の項目について評価し合計したものを採用している。計算コードの不確定性は、前頁に示した147ケースのベンチマーク解析を基に評価した平均誤差及び標準偏差であり、評価ケースには依存しない値である。
- 製作公差に基づく不確定性は、評価ケース毎に異なる値となるが、過去の実績を踏まえると、今回申請の見直し後の体系に製造公差も含めた不確定性は、採用した0.02を十分下回る。
- 統計誤差も評価ケース毎に異なる値となるが、p16の評価で0.0004、p36の評価（5×5）で0.0006であり過去の実績と同程度である。
- 既許可および今回申請の見直し前評価における不確定性は、0.0142および0.0152であることから、今回採用している不確定性0.02は十分保守的な値である。

表 不確定性評価の内訳

臨界計算上の不確定性評価項目			既許可	今回申請 (見直し前)	今回申請 (見直し後)
計算コードの不確定性	平均誤差	δk	0.0013 ^{※2}		
	95%信頼度×95%確率	ϵ_c	0.0104 ^{※3}		
製作公差に基づく不確定性	ラックの内のり公差	ϵ_w	0.0025	0.0023	—
	燃料製作公差	ϵ_r	0.0045	0.0061	—
	ラックの中心間距離公差	ϵ_p	0.0036	0.0036	—
	ラック内燃料偏心	ϵ_f	0.0040	0.0052	—
統計誤差		σ	0.0004	0.0005	0.0004~0.0006
不確定性 ^{※1}		ϵ	0.0142	0.0152	0.02

※ 1 既許可、今回申請（見直し前）の値は、合計した不確定性

※ 2 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MOX燃料（燃烧燃料を含む体系の評価においては、ウラン燃料または燃烧燃料と同様にプルトニウムを含むMOX燃料に対する不確定性のうち、評価結果が厳しくなるMOX燃料に対する不確定性を使用する。）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。

※ 3 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）。

7. 軸方向燃焼度分布の影響について

7. 軸方向燃焼度分布の影響について

<評価目的>

燃焼燃料の軸方向燃焼度分布が実効増倍率に与える影響を確認する。

<評価条件>

項目	評価条件	備考
燃料配置条件	図1	燃焼燃料 ^{※1} の敷き詰め
燃焼燃料 ^{※1} の軸方向燃焼度分布	図2	①燃焼度分布一定 (申請評価条件) ②軸方向燃焼度分布 ^{※2} 考慮
変動パラメータ、水密度条件、ラック仕様、反射体条件等		気相部0.04g/cm ³ 、液相部1.0g/cm ³ 。ラック仕様、反射体条件等は申請評価条件に同じ

図1.燃料配置条件

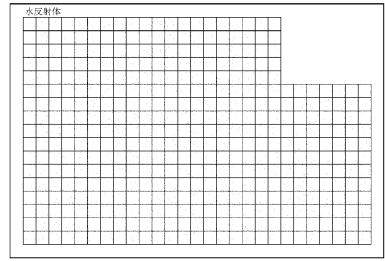
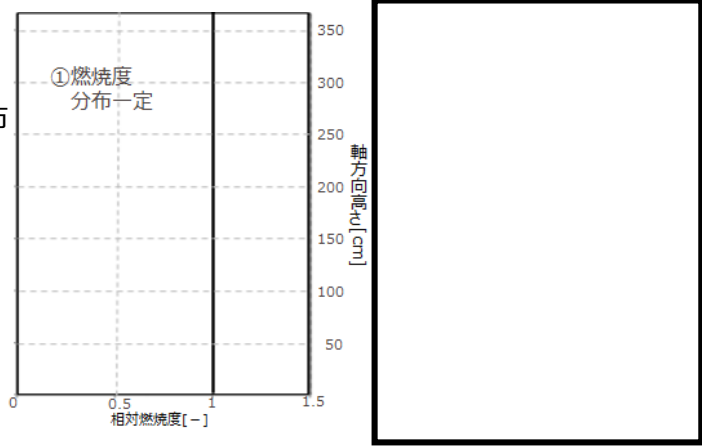
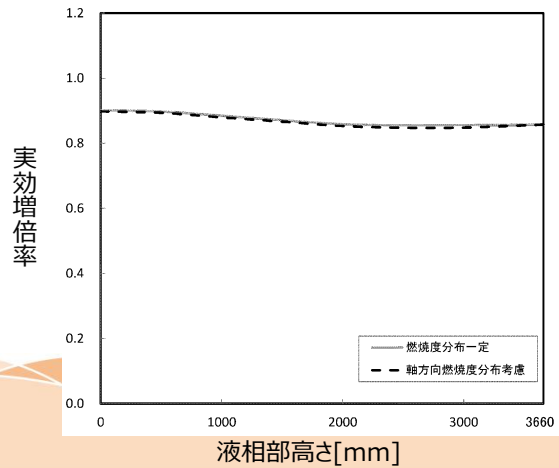


図2. 軸方向燃焼度分布



- ※1 感度解析は20GWd/tで実施。チッカーボード配置ではなく敷き詰めた条件で評価しており、感度を十分確認可能。
- ※2 軸方向燃焼度分布の影響がより大きくなるよう、運転中、履歴がある燃料を設定

<評価結果>



左図のとおり、軸方向燃焼度を一定とした場合と分布を考慮した場合で、実効増倍率は同等であり、申請評価において、燃焼度分布一定とすることは妥当。

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。

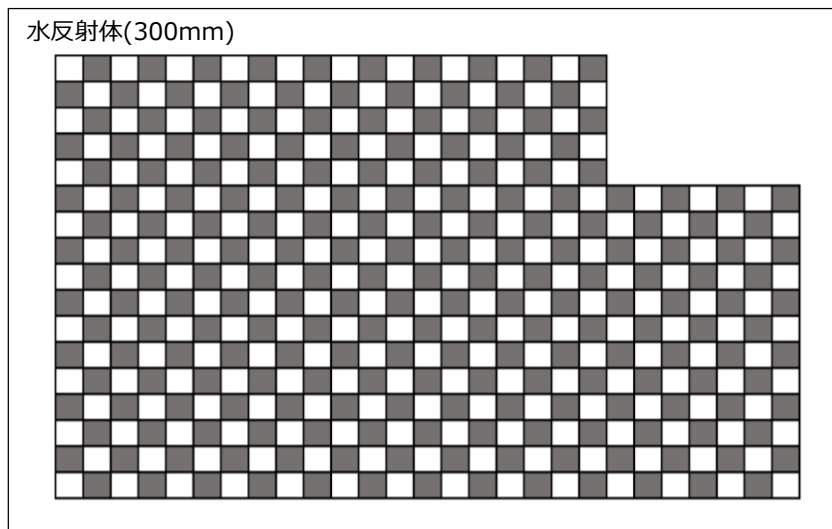
8. 反射体の設定について

8. 反射体の設定について (1 / 2)

<反射体条件>

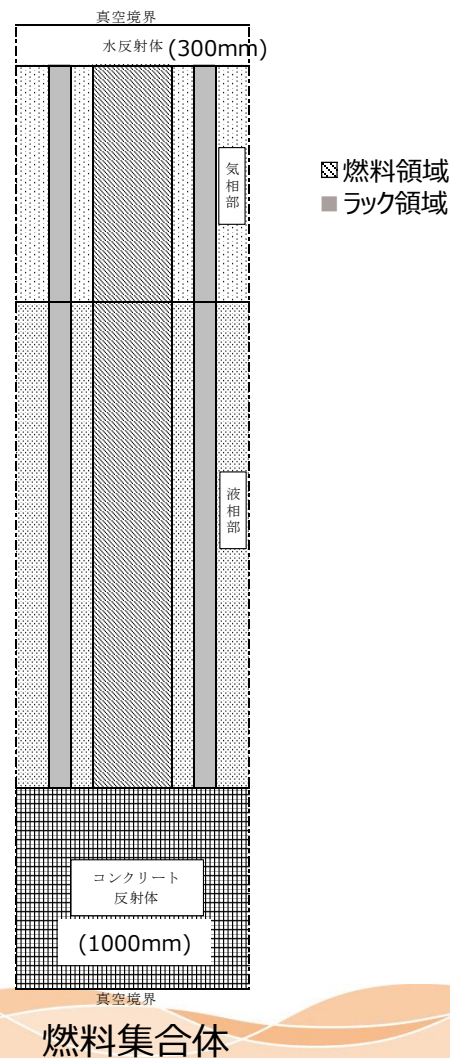
未臨界性評価における反射体条件を下図に示す。次頁に水平方向の反射体設定の妥当性を示す。

図 水平方向幾何形状および反射体条件



	燃焼度 (GWd/t)
□ 領域A	0 (55GWd/t燃料)
■ 領域B	25 (55GWd/t燃料)

図 鉛直方向幾何形状および反射体条件



【審査会合コメント⑤：評価体系や反射体による保守性を説明すること。】

＜評価目的＞

申請評価における水平方向反射体は、ラック外周の側面に水反射体を設定しており、反射体厚さは臨界安全ハンドブックを参考に、十分な中性子の反射効果が得られる厚さ（反射効果が飽和する厚さ）として300mmを設定しているが、コンクリート反射体での評価と比較することで、その設定の妥当性を確認する。

＜評価条件＞

- ・水平方向反射体 : コンクリート
- ・水平方向反射体厚さ : 1000 mm (コンクリート反射体において中性子反射効果が飽和する厚さ)
- ・気相部水密度 : 0.04 g/cm³ (ラック内に形成される水密度をラックピット壁間にも適用)
- ・水位 : 20 cm (p16の実効増倍率が最大となる水位を適用)

その他の燃料貯蔵条件、鉛直方向反射体条件等は変更なし

＜評価結果＞

ラック外周の側面の反射体をコンクリートに変更しても、申請評価の実効増倍率を下回ることを確認した。

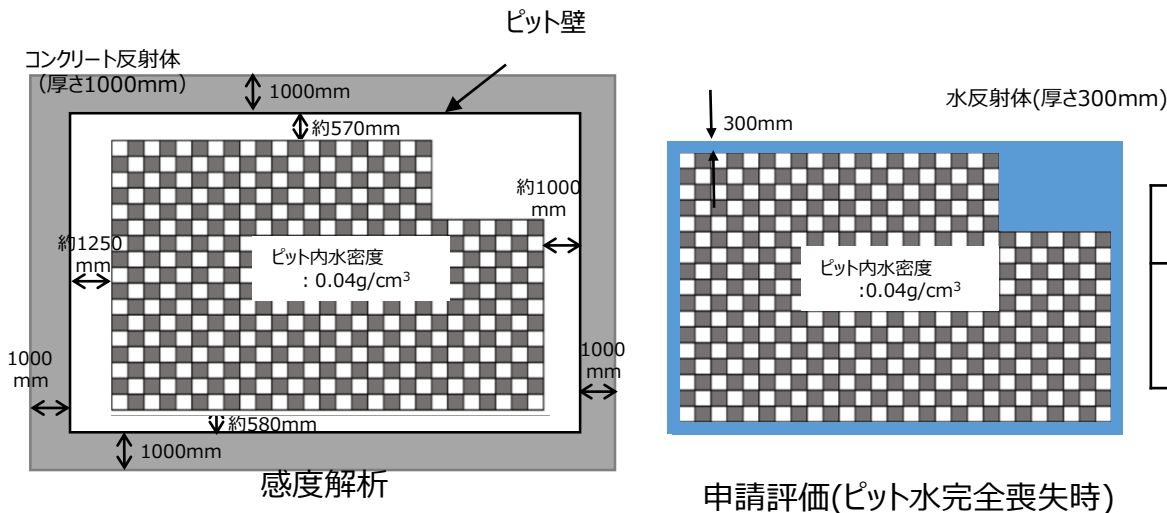


表 感度解析評価結果

	感度解析	申請評価
実効増倍率 (不確定性を一律 0.02とした)	0.966	0.967

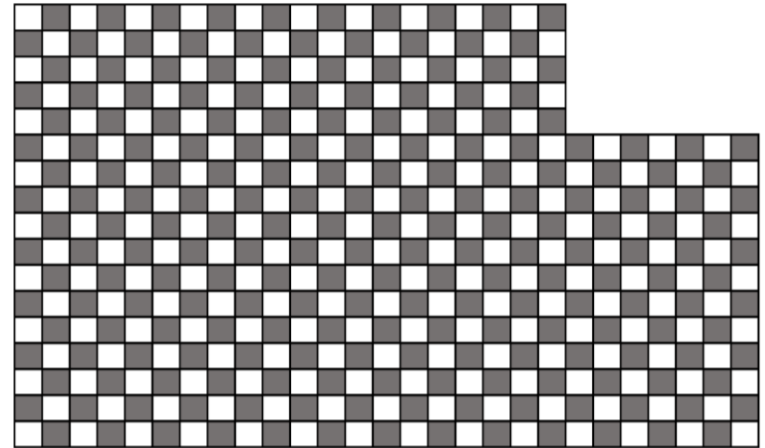
図 感度解析および申請評価における水平方向反射体設定

9. まとめ

9. まとめ

大規模損漏えい時にSFPへ流入する水が全面に広がった場合および局所に集中した場合について、実効増倍率が最も厳しくなるよう設定した最大流量や水の存在形態などの条件において臨界を防止できることを確認した。

見直した領域管理図

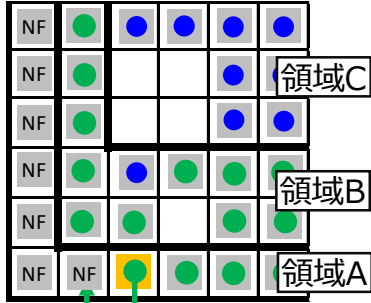


	燃焼度 (GWd/t)
□ 領域A	0 (55GWd/t燃料)
■ 領域B	25 (55GWd/t燃料)

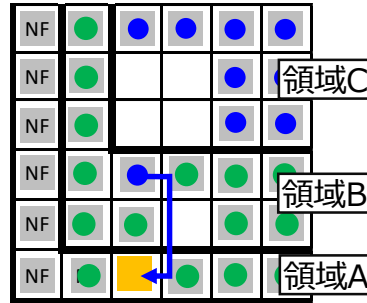
中性子吸収体は全ての領域で不要

<参考 1> 領域管理方法の見直しによる効果（新燃料沈め込み）

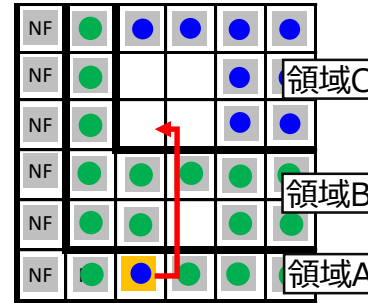
中性子吸収体を考慮した3領域管理の場合



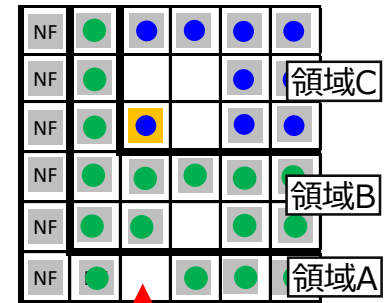
① 領域 A から領域 C へ移動させる燃料のPDを引抜き、内挿物のない燃料へ挿入 [内挿物移動]



② RCCを抜いても良い燃料からRCCを引抜き、移動させる燃料へ挿入 [内挿物移動]



③ 領域 A の燃料を領域 C へ移動 [燃料移動]

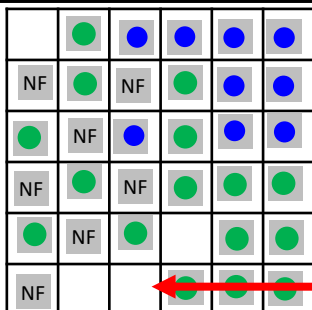


④ 領域 A の空いた場所へ新燃料を沈め込み

新燃料は領域 A にしか沈め込めないため、領域 A の空きがないと、**燃料 1 体を沈め込む前に、燃料移動1回、内挿物移動2回が必要。**

貯蔵容量
領域A：73体
領域B：126体
領域C：225体

2領域管理（チェッカーボード）の場合



① 領域 A の空いている場所へ新燃料を沈め込み

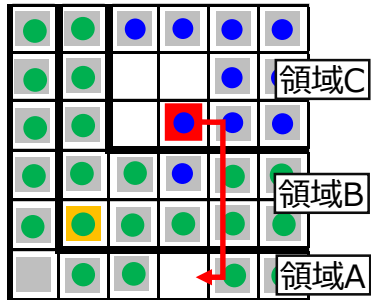
領域Aの貯蔵容量が212体と多く、また領域 B にも燃烧度が比較的低くても中性子吸収体なしに配置できることから、領域 A の空きが多くなる。

燃料1体を沈め込む前に、燃料移動、内挿物移動は不要。

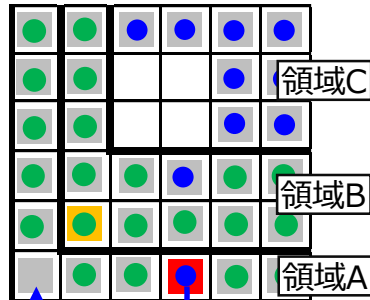
凡例
燃料：■ ■ ■
PD：●
RCC：●

貯蔵容量
領域A：212体
領域B：212体

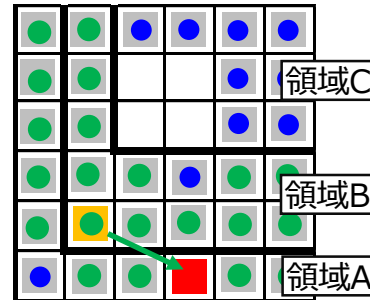
中性子吸収体を考慮した3領域管理の場合



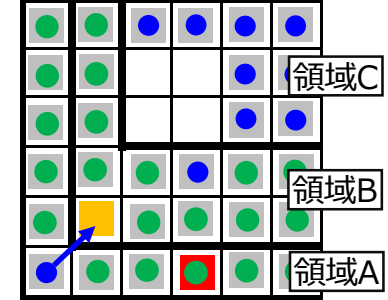
①領域Cの燃料を領域Aへ移動 [燃料移動]



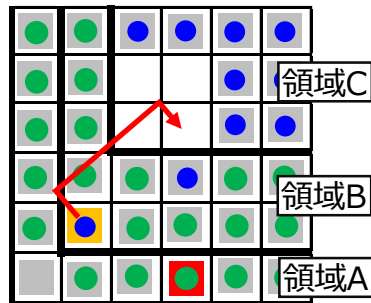
②領域 A 内燃料のRCCを引抜き内挿物のない燃料へ挿入 [内挿物移動]



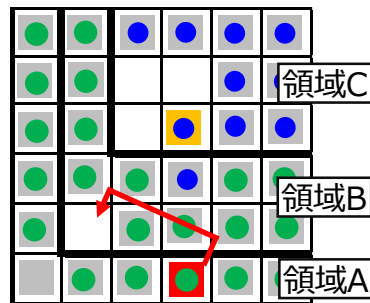
③PDを引抜き、移動させる燃料へ挿入 [内挿物移動]



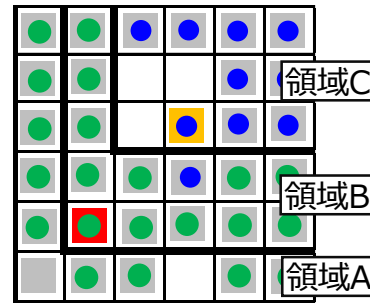
④RCCを引き抜き、移動させる燃料へ挿入 [内挿物移動]



⑤領域Aを空けるため燃料を領域Cに移動 [燃料移動]



⑥領域 A を空けるため、領域 A から領域 B へ燃料を移動 [燃料移動]



⑦PD ⇔ RCCの入替え完了 (領域 A の空きは次の入替えで使用)

凡例
燃料 : ■ ■ ■
PD : ●
RCC : ●

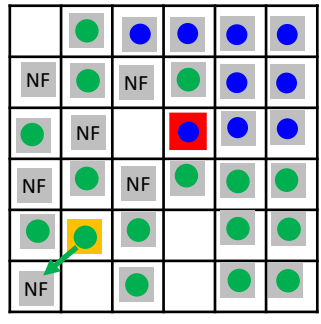
貯蔵容量
領域A : 73体
領域B : 126体
領域C : 225体

PD ⇔ RCCの入替え1回に、燃料移動3回、内挿物移動3回が必要。

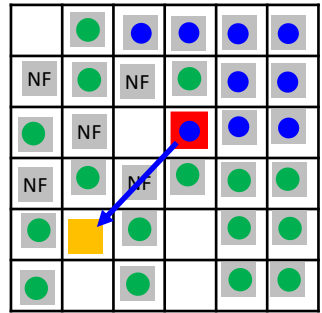
PD : プラギングデバイス、RCC : 制御棒

2領域管理(チェッカーボード配置)の場合

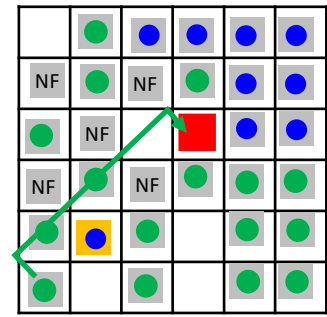
凡例
 燃料 : ■ ■ ■
 PD : ● ●
 RCC : ● ●



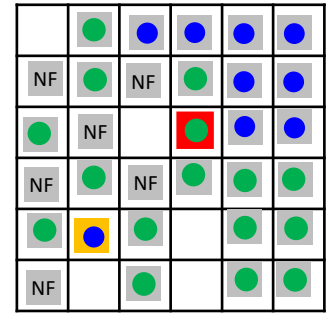
①RCC挿入予定の燃料からPDを移動



②PDを抜いた燃料にRCCを挿入



③RCCを抜いた燃料にPDを挿入



④PD⇔RCC移動完了

PD ⇔ RCCの入替え1回に、内挿物移動3回のみが必要で、燃料移動は不要。

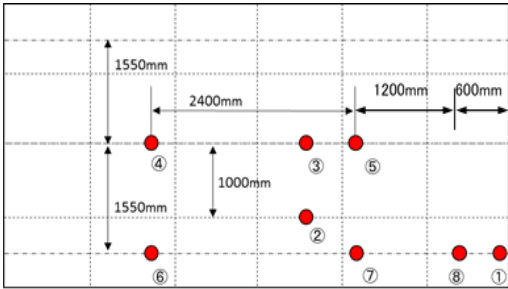
貯蔵容量
 領域A : 212体
 領域B : 212体

PD : プラギングデバイス、RCC : 制御棒

（1）実機スプレイヘッドを用いた液滴径計測試験（1／2）

- 下降速度Vの算出に必要な、実際のスプレイ時における液滴の径を測定するため、実機スプレイヘッドを用いて、SFPを模擬した設備へのスプレイ放水を行い液滴径計測試験（液滴径分布測定）を実施した。

測定箇所



試験の様子

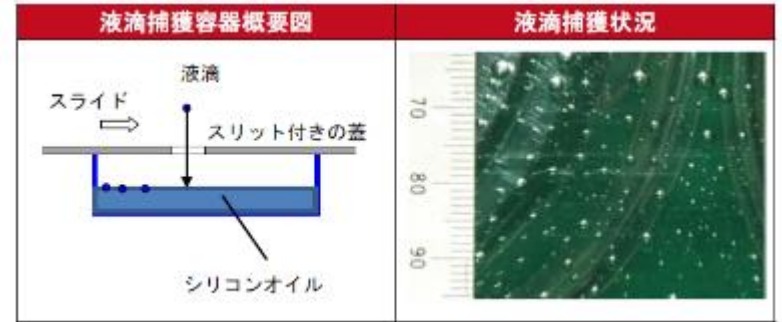


液滴径計測試験条件

項目	条件	説明
スプレイヘッド	実機	実機と同じもの
スプレイ流量	□ m ³ /h	実機使用時と同条件
首ふり条件	なし	より水密度が大きい状況でデータ採取
試験時温度	常温	下降速度が大きくなる常温で実施
落下高さ	約9m	燃料頂部相当高さ位置でのデータを取得
測定箇所	8箇所	高水密度の中央領域、低水密度の端部などで測定
計測回数	2回	2回の試験で得られたデータを踏まえ、スプレイ水密度算出時の液滴径を設定

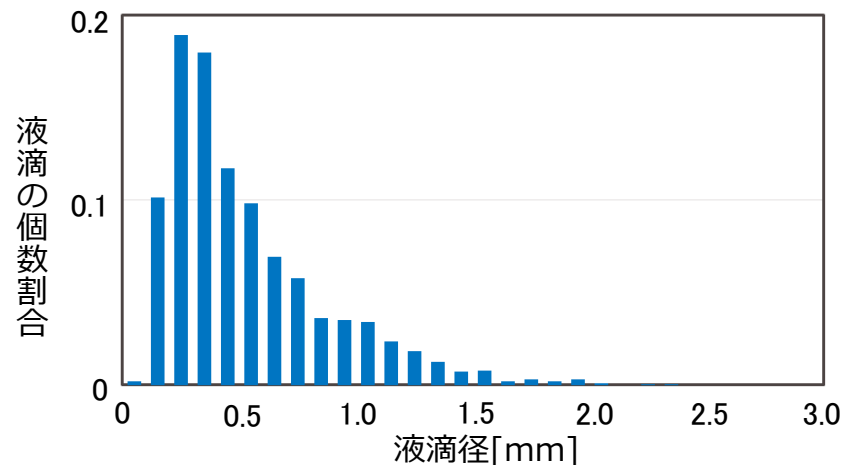
液滴径分布測定方法

- シリコンオイルを用いて落下液滴を捕獲
- 画像処理により各測定点毎で液滴径および液滴数を計測（数百個以上／測定点、球形と想定し直径1軸を測定）
- 液滴径0.1mm刻みで整理



(1) 実機スプレイヘッドを用いた液滴径計測試験 (2/2)

液滴径計測試験結果

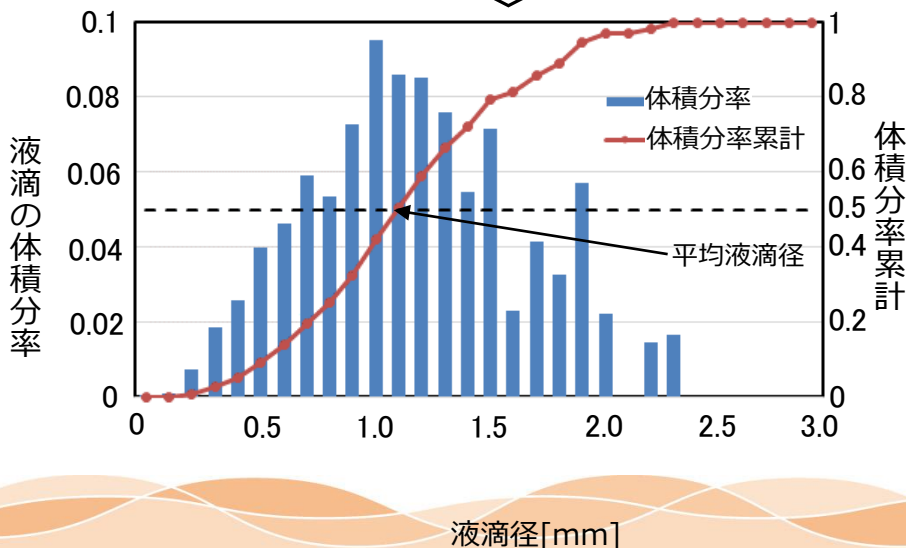


- 試験の結果、液滴径の分布はどの測定位置でも概ね直径0.2～0.4mmに個数割合のピークがあった (図1)
 - 空間水密度 (単位体積内の水の重量) を求めるという観点からは、ある領域内にどれだけの重量の水が存在するかが重要
- ↓
- 水密度の観点から、液滴径毎の個数に液滴体積を乗じた体積分率で整理 (図2)
 - 各測定点での平均液滴径 (体積分率累計が50%となる液滴径) は、いずれも1mm以上 (表)

図1 液滴径毎の個数割合 (測定位置⑥の例)

体積で整理 (液滴径の3乗に比例)

表 測定位置毎の平均液滴径 [mm]



測定位置	平均液滴径 (1回目)	平均液滴径 (2回目)
①	1.15 ~ 1.25	1.35 ~ 1.45
②	1.65 ~ 1.75	1.05 ~ 1.15
③	1.95 ~ 2.05	1.85 ~ 1.95
④	1.35 ~ 1.45	1.15 ~ 1.25
⑤	1.75 ~ 1.85	2.45 ~ 2.55
⑥	1.00 ~ 1.05	1.05 ~ 1.15
⑦	1.05 ~ 1.15	1.55 ~ 1.65
⑧	1.85 ~ 1.95	1.05 ~ 1.15

図2 液滴径毎の体積分率 (測定位置⑥の例)

(2) 下降速度Vの検討

液滴径計測試験の結果、どの測定位置についてもスプレーによる平均液滴径は1mm以上であることを確認



液滴径が小さいほど、下降速度Vが小さくなり、スプレー水密度Wが大きくなって実効増倍率が大きくなるため

スプレー時の液滴径 = 1mm と設定

- 液滴の落下時には、重力と空気抵抗*がはたらかき、これらがつりあう終端速度は次の式で求められる

*機械工学便覧（2007）、日本機械学会

$$\begin{cases} \text{重力-浮力} & \text{空気抵抗} \\ (\rho_{water} - \rho_{air})gV_i = C_d \rho_{air} \frac{1}{2} v_i^2 A_i \\ \text{液滴の体積} & \text{液滴の断面積} \\ V_i = \frac{\pi}{6} d_i^3 & A_i = \frac{\pi}{4} d_i^2 \end{cases}$$

$$\therefore v_i = \sqrt{\frac{4(\rho_{water} - \rho_{air})gd_i}{3\rho_{air}C_d}}$$

液滴密度 ρ_{water}	:	998.2	[kg/m ³]
空気密度 ρ_{air}	:	1.166	[kg/m ³]
重力加速度 g	:	9.807	[m/s ²]
液滴径 d_i	:	1.000×10^{-3}	[m]
抗力係数 C_d	:	0.7279	[-]

下降速度が小さくなる常温（20℃）の物性値を使用

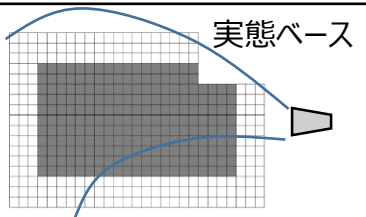
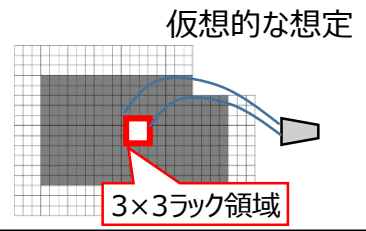
- 液滴径1mmの場合、終端速度は約390cm/sとなる。なお、液滴径1mmの場合、落下高さ3～4m程度で終端速度に達するため、SFPラック頂部(スプレーヘッドから約8m下)では十分終端速度に達する。
- また、液滴径毎の下降速度に液滴の体積分率を乗じて求めた場合でも、平均下降速度は全測定点で430cm/s以上であった



液滴の下降速度V = 390cm/s と設定

(3) スprayによる水密度の検討

- 大規模漏えい時のSFP未臨界性評価を実施する観点から、スプレイ時の水密度 $[W=Q/(A \cdot V)]$ を保守的に設定するため、スプレイ流量Qに大きな保守性を持たせる。

	下降速度V	スプレイ流量Q	スプレイ範囲A		水密度W
 <p>実態ベース</p>	390cm/s	実機スプレイ流量（定格） $\square \text{ m}^3/\text{h}$ $\Rightarrow \square \text{ g/s}$	SFP全域（ラック面積） $\square \text{ cm} \times \square \text{ cm} \times 424 \text{ ラック}$ $= \square \text{ cm}^2$	⇒	0.000063 g/cm ³
Q/Aを大きく設定するために、通常ラック全面(424ラック)に放水されるスプレイ水が、ある狭い範囲に全量流入すると仮定					
 <p>仮想的な想定</p> <p>3×3ラック領域</p>	390cm/s	実機スプレイ流量（定格） $\square \text{ m}^3/\text{h}$ $\Rightarrow \square \text{ g/s}$	狭い範囲として、3×3ラック $\square \text{ cm} \times \square \text{ cm} \times 9 \text{ ラック}$ $= \square \text{ cm}^2$	⇒	0.0030 g/cm ³
この値をスプレイによる水密度としてSFP全域で使用					
SFP全域へ展開	390cm/s	保守的なスプレイ流量 $\square \text{ m}^3/\text{h} \times 424/9$ $\Rightarrow \square \text{ g/s}$	SFP全域（ラック面積） $\square \text{ cm} \times \square \text{ cm} \times 424 \text{ ラック}$ $= \square \text{ cm}^2$	⇐	0.0030 g/cm ³

スプレイ流量は定格の約47倍(=424/9倍)に相当
[保守性]

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。

注) スプレイ流量の大気圧下での重量換算における水の密度は1.0g/cm³を使用

(4) 気相部水密度の設定

○ 気相部水密度は $0.0\text{g}/\text{cm}^3$ から約 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ に近づくほど、実効増倍率が大きくなることから、スプレー水密度 $W=0.0030\text{g}/\text{cm}^3$ に対して、スプレー時のSFP内環境条件のうち、気相部水密度が高くなるように以下の条件を考慮する。

- ① 蒸発に伴い発生する上昇流
- ② 蒸気がスプレー水との接触し凝縮することによる液化
- ③ 崩壊熱により発生する蒸気（飽和蒸気）

	計算条件	説明	水密度
保守的に設定したスプレー水密度W	下降速度Vは 390cm/s	流量を 定格の約47倍 として求めたスプレー水密度W	0.0030 g/cm^3
① 上昇流	下降速度Vを 10cm/s 減速	SFPの貯蔵燃料の崩壊熱が最大になる条件でのSFP全体の熱負荷から求められる上昇流は約8.8cm/s ⇒ 保守的に下降速度Vから10cm/s減速	0.0031 g/cm^3
② 蒸気の凝縮	水密度を1.2倍	スプレー水 1m^3 が凝縮し得る蒸気が最大 0.19m^3 ⇒ 流量Qへの影響は1.2倍	0.0037 g/cm^3
③ 飽和蒸気	$0.0006\text{g}/\text{cm}^3$ 加算	大気圧、 100°C における飽和蒸気の密度を考慮	0.0043 g/cm^3

未臨界性評価で用いる気相部水密度には、更に余裕を持った **$0.04\text{g}/\text{cm}^3$** を設定

【スプレー流量は保守的に約47倍×更に約9倍の余裕（液滴径変動の影響等を包含）】

(1) 試験結果（個数割合分布形状）の考察

【審査会合コメント③：液滴径計測試験回数の妥当性について説明すること】

- 気相部水密度の設定に際して、十分な保守性を考慮することを前提に、定格流量での液滴径計測試験で得られた0.2～0.4mmに個数割合のピークをもつ液滴データより、体積分率で整理し得られる平均液滴径を踏まえ、スプレー時の液滴径を1mmと設定し、スプレー時の水密度を設定
- なお、以下のとおり、試験で得られた液滴の個数割合の分布は、大きく変化するものでないと考えている

◆実施時期の異なる2回の試験について、全計測点で数百個以上の液滴データを取得し、個数割合の分布を確認

各試験においてばらつきを把握できるだけのデータを得ており、第1回、第2回の液滴の個数割合分布の形状を比較しても、良い再現性を示す（図1）



試験回数を増やしても液滴径分布形状は概ね同じになる

◆スプレー設備には設備内圧を一定に保つオートマチック機能が搭載されており、流量が変動した場合でも、液滴径分布形状への影響は小さいと推定



定格の半分の流量で実施した予備試験での液滴データと比較しても、液滴径分布形状はよく一致している（図2）

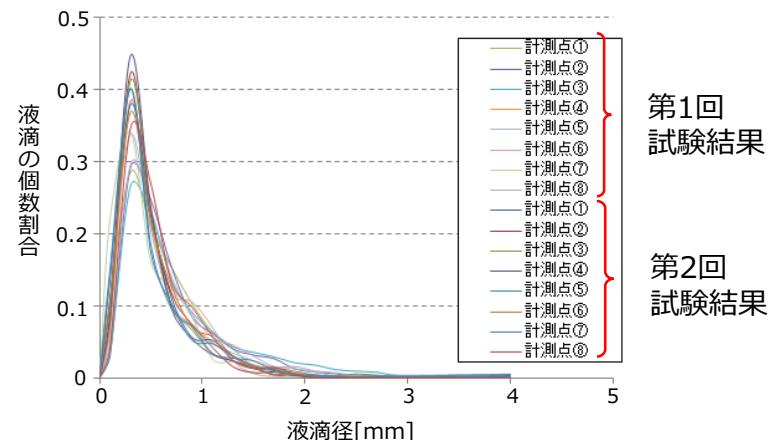


図1 液滴個数割合の試験結果（第1回および第2回試験）

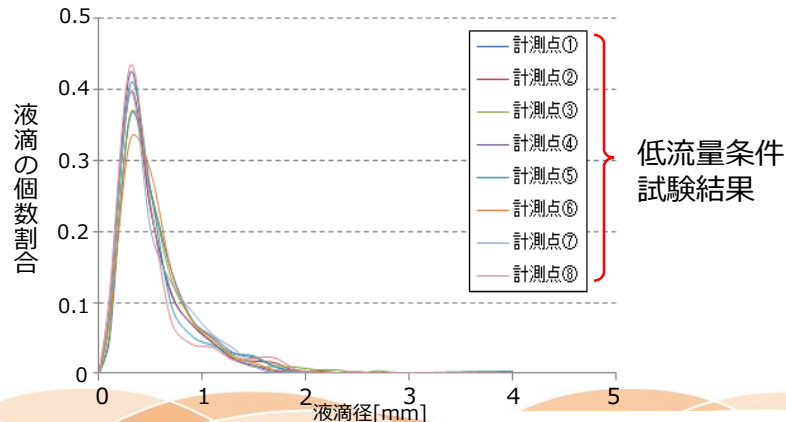


図2 低流量条件での液滴径分布

<参考3> SFPに流入する水が全面に広がる場合の水密度変動要因に対する影響評価

(2) 液滴径、下降速度変動の影響確認

参考3-2

- 気相部水密度の設定では液滴径を1mmとして評価し、下降速度Vを390cm/sと設定した
- 液滴径、下降速度の変動による影響を確認するため、現実的には起こりえないものの、スプレイの液滴全てが、個数分率のピークである0.2~0.4mmより更に小さい液滴径0.15mmであると仮定して水密度を評価

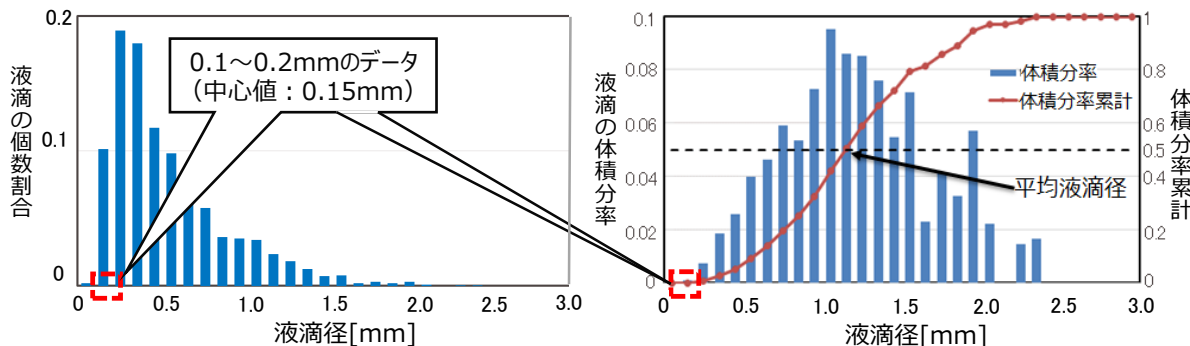


図 液滴径毎の個数分布（測定位置⑥の例）

(参考)

- ・ 液滴径が小さい→下降速度が小さい→水密度が大きい
- ・ 液滴径0.15mmの体積は、液滴径1mmの体積の0.34%であり、水密度への寄与は非常に小さい

	下降速度 V	流量Q	放水範囲A	スプレイによる 水密度	①上昇流 ②蒸気の凝縮 ③飽和蒸気 考慮
液滴径 0.15mm	45.5 cm/s	実機スプレイ流量(定格) □ m ³ /h ⇒ □ g/s	SFP全域（ラック面積） □ cm × □ cm × 424ラック = □ cm ²	0.00054 g/cm ³	0.0014 g/cm ³

注) スプレイ流量の大気圧下での重量換算における水の密度は1.0g/cm³を使用

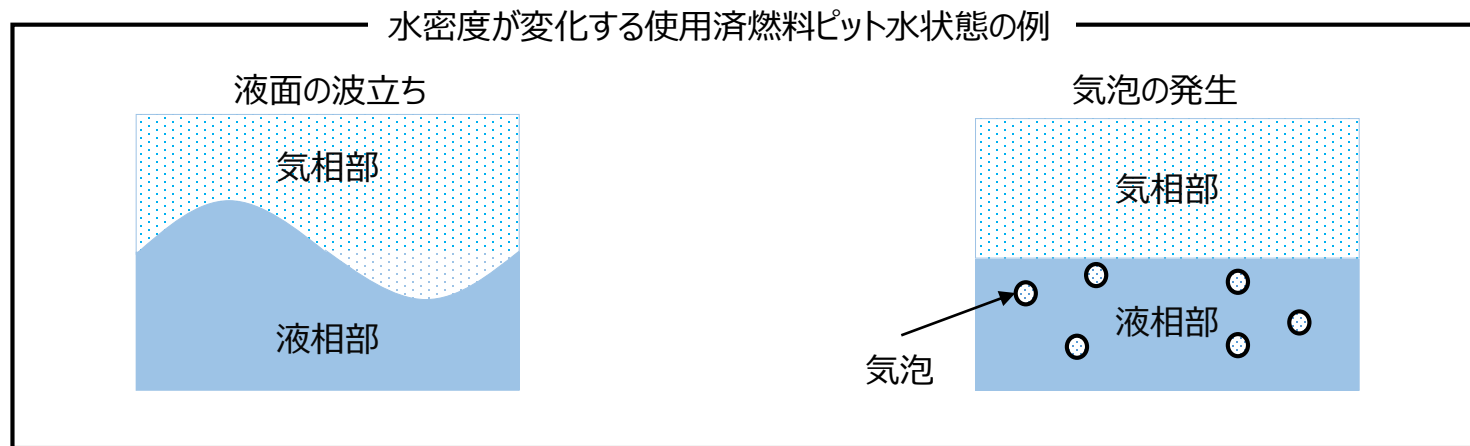
- 液滴径を0.15mmとした場合、下降速度Vは45.5cm/sとなり、気相部水密度は0.0014g/cm³となることから、未臨界性評価に用いた**気相部水密度0.04g/cm³に十分包含される**

【参考】
液滴径を0.15mmとして、気相部水密度0.04g/cm³設定時の流量Q（= 定格の約47倍）とした場合の水密度は0.0397g/cm³

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。

【審査会合コメント④：外乱等による水密度の変動が未臨界性評価に与える影響について説明すること】

- 未臨界性評価では、使用済燃料ピットにおける大規模漏えい時の状況を考慮し、体系内の水密度を気相部と液相部の2相に分け、液相部の水位が低下するとしているが、使用済燃料ピットにおいて大規模漏えいが発生する際には、使用済燃料ピット水には大きな外乱が与えられることが想定される
- 使用済燃料ピット水に外乱が与えられた場合、以下の例に示すように水密度が変化することが考えられる



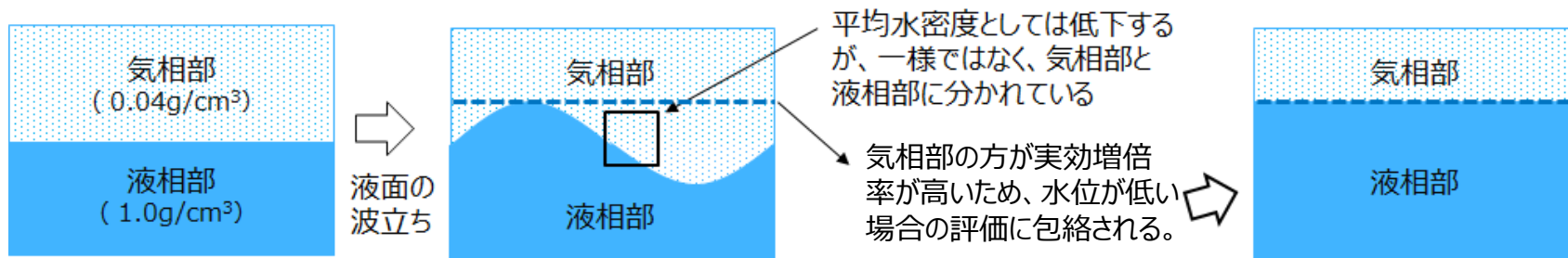
- 気相部と液相部それぞれに対し、大規模漏えい時における使用済燃料ピット水の状態を考慮した場合、臨界性に影響する空間で一様に水密度が約 0.1g/cm^3 に近づく可能性について検討した

<参考3> SFPに流入する水が全面に広がる場合の水密度変動要因に対する影響評価

(3) 大規模漏えい時における水密度変動の可能性について (2/3)

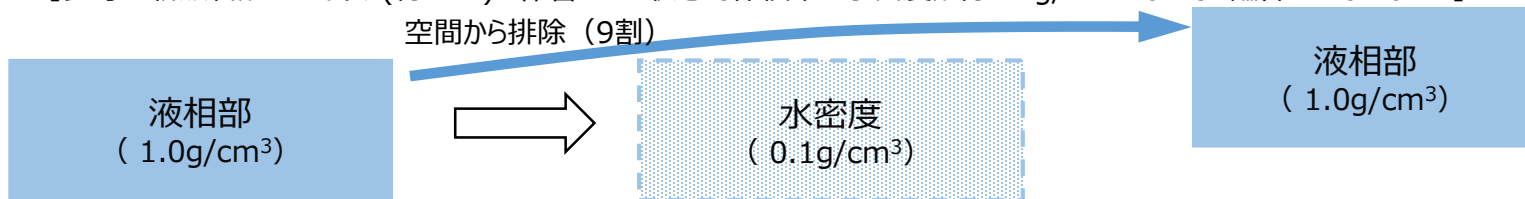
参考3-4

- 気相部： $0.04\text{g/cm}^3 \Rightarrow$ 約 0.1g/cm^3 への可能性
 - ・ 気相部水密度として 0.04g/cm^3 は、スプレイ環境下において保守的に設定しており、これより高まることはない
- 液相部： $1.0\text{g/cm}^3 \Rightarrow$ 約 0.1g/cm^3 への可能性
 - ・ 外乱による液面の波立ちにより、非常に限られた空間を考えた場合に、液相部の水密度が一時的に 1.0g/cm^3 から低下すると考えられるが、その水密度は一樣ではなく、気相部と液相部に分かれており、気相部である方が実効増倍率が大きくなることから、水位上昇時の評価に包含される



- ・ また、外乱や沸騰により、気泡が発生することによっても水密度が低下する。しかし、水密度 1.0g/cm^3 の液相が約 0.1g/cm^3 の一樣な水密度に変化するためには、約9割の水が排除され、約1割の水が一樣に分散する必要があるが、水密度約 0.1g/cm^3 において臨界に必要なウラン量が含まれる空間内の多量の水が、外乱による気泡等の発生により、瞬時に排除されることは現実的に考えられない

[参考：新燃料が3×3ラック(約 5m^3)に保管された状態で体積中の水密度が約 0.1g/cm^3 となっても臨界にはならない。]



- 大規模漏えい時の使用済燃料ピット状態を考慮しても、臨界となるウラン量を有する空間全体で一樣に水密度が約 0.1g/cm^3 が形成されることはない

- 前ページで述べたとおり、外乱や気泡の発生が想定される大規模漏えい時においても、臨界となるウラン量を有する体積全体で一様に水密度が約 0.1g/cm^3 になることはないが、念のため、仮想的な条件として、SFPの液相部の十分に大きな層の水密度が、瞬時に約 0.1g/cm^3 、一様に変化したと仮定して、実効増倍率を確認した

【評価条件】

- ・貯蔵燃料 : 全て新燃料 (2領域管理よりも実効増倍率を高める条件)
- ・水密度 (下図) : 燃料体領域の 0～3000mm … 1.0g/cm^3
 燃料体領域の3000～3660mm … 約 0.1g/cm^3
- ・その他の燃料仕様、計算コード等は変更なし

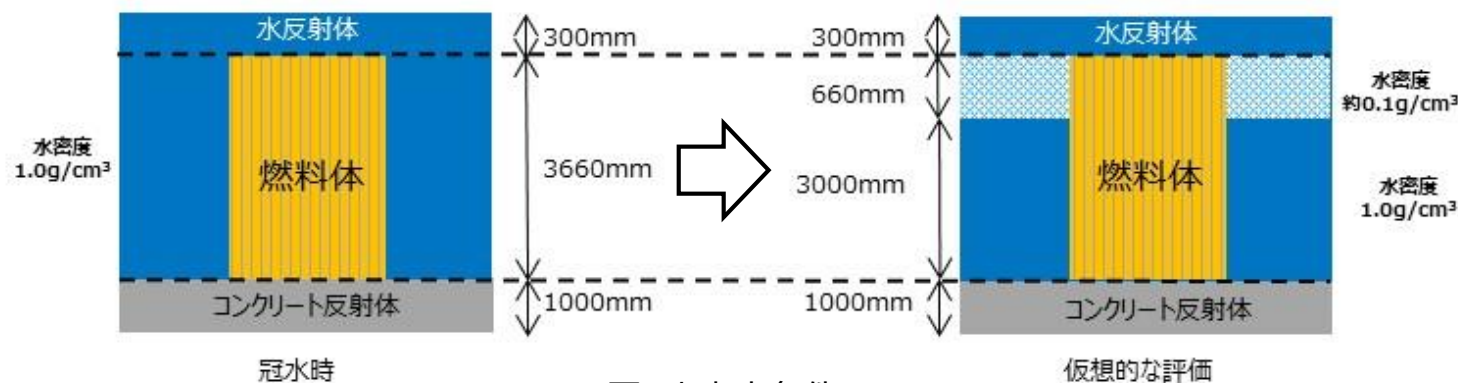


図 水密度条件

【評価結果】 実効増倍率 : 0.952 (不確定性考慮なし)

- 評価の結果、実効増倍率は十分に低い値であり、不確定性を考慮しても判定基準である実効増倍率0.98を下回することは確実であり、臨界には至らない
- 前ページの定性的な検討および上記の仮想的な条件における未臨界性評価結果から、大規模漏えい時における外乱等による水密度の変動を考慮しても、臨界を防止できることを確認した

(4) ラック内構造物の影響確認

- 燃料集合体上部まで落下したスプレイの液滴は、ラック内構造物の影響により、上部ノズル等においてまとまり、ほとんどが液滴ではなく燃料棒等の表面を筋状に流下し、燃料集合体内の水密度は低下すると考えられる
- 気相部水密度 $0.04\text{g}/\text{cm}^3$ の設定においては、液滴が筋状に流下し、水密度が低下する効果を考慮していないが、未臨界性評価への影響を確認する

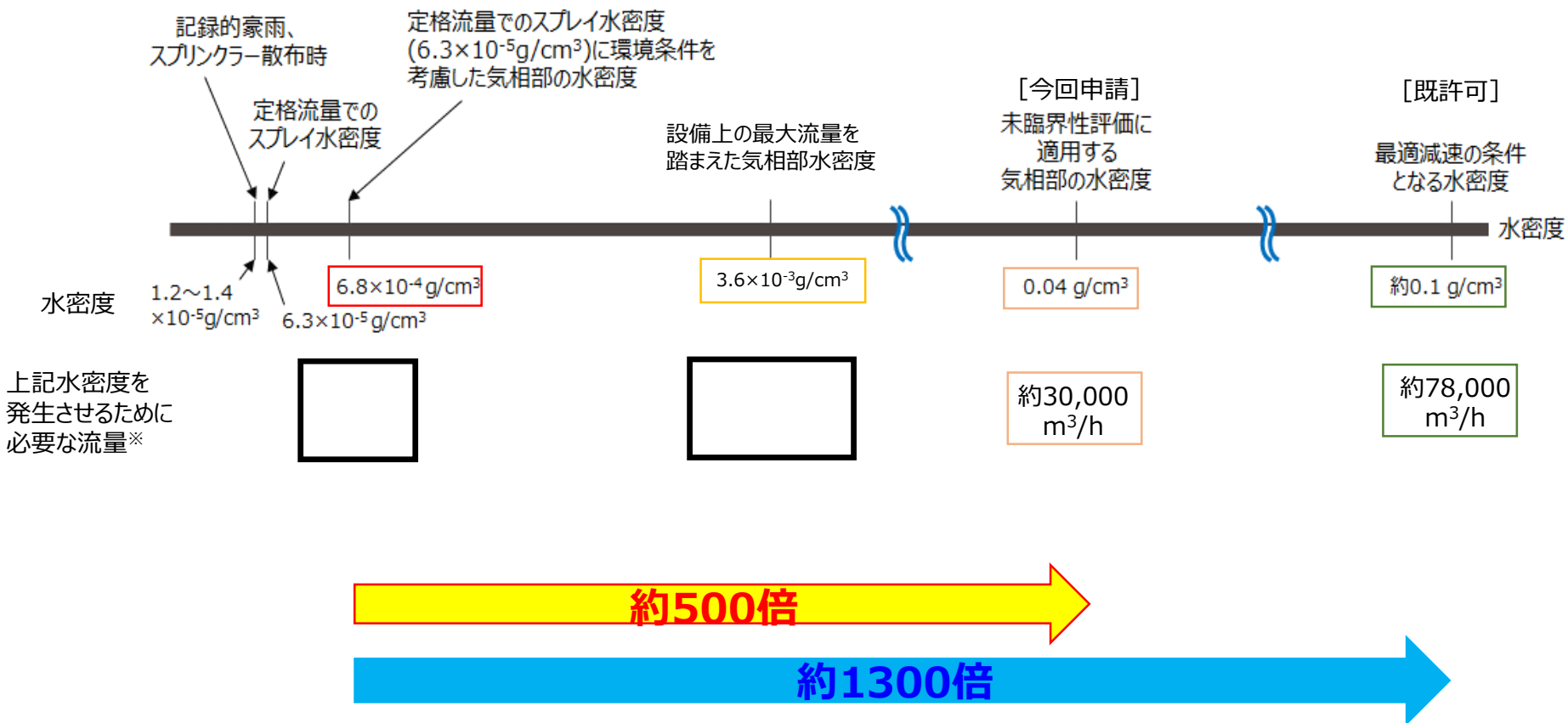
[考察]

- ◆ SFPに流入する水が局所に集中する場合の評価条件の検討の中で、 $N \times N$ に集中する範囲の評価に液膜が形成する条件で検討を行っている。
- ◆ N の値は3から値を増やしていき実効増倍率の低下傾向が確認できるまで実施しているが、その結果 N が5から6になった時点で実効増倍率が低下傾向となることを確認している。
- ◆ 従って N がラック全面（=424）となった場合は、最も厳しい $N=5$ の値よりも低くなるため、液膜がSFP全面に形成された場合の実効増倍率は、SFP全面に広がった場合（気相部水密度 0.04 、液膜形成なし）よりも十分低くなると考えられる。



評価の結果、液滴が燃料棒等の表面を筋状に流下することによる影響は、気相部水密度 $0.04\text{g}/\text{cm}^3$ での未臨界性評価に十分包含される

定格流量でのスプレイ水密度に環境条件を考慮した水密度を発生させるために必要な流量の比較



※：水密度 = [流量(g/s)/{範囲(cm²) × (下降速度(cm/s) - 上昇流(cm/s))}] × 凝縮 + 飽和蒸気(g/cm³) の関係を用いて算出した流量

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。

- 敷設ルートについては、2つのアクセスルートから事故時の状況に応じ、どちらか一方を選定する。
- ホースの圧損、水頭圧および放水砲の必要入口圧力(□MPa)を確保するため、大容量ポンプ（放水砲用）は2台直列に設置する。
- 2台目の大容量ポンプ（放水砲用） 出口から分岐管を用いて2ラインに分岐させ、各号炉に1台の放水砲を用いて放水することで、高浜1,2両号炉が発災した場合でも対応可能である。

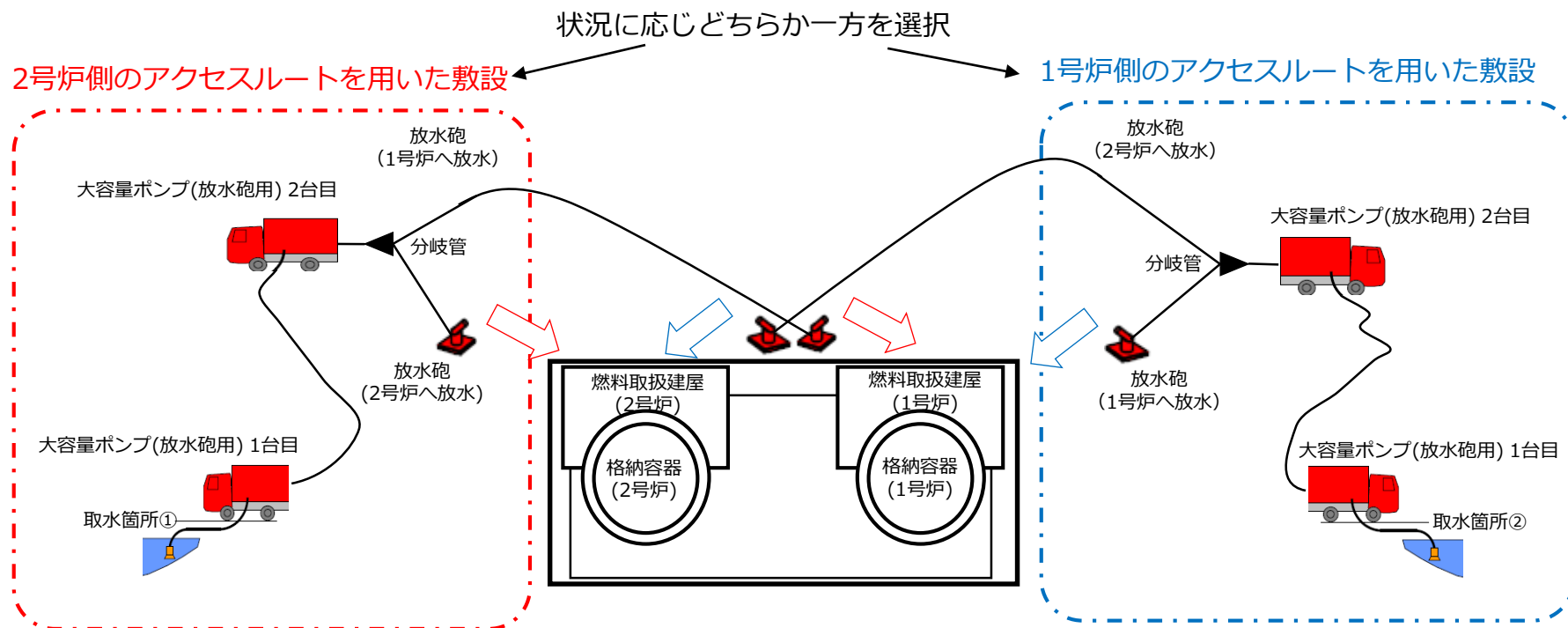


図 大容量ポンプ（放水砲用） – 放水砲 ライン敷設（概略図）

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。

- 大容量ポンプ（放水砲用）は、E.L.約□mの取水場所に1台目を、E.L.約□mの建屋背面道路付近に2台目を設置する。
- 放水砲の設置位置は、風向き等の天候状態に応じて最も効果的な方角を選定し、各号炉の建屋へ1台の放水砲により放水する。

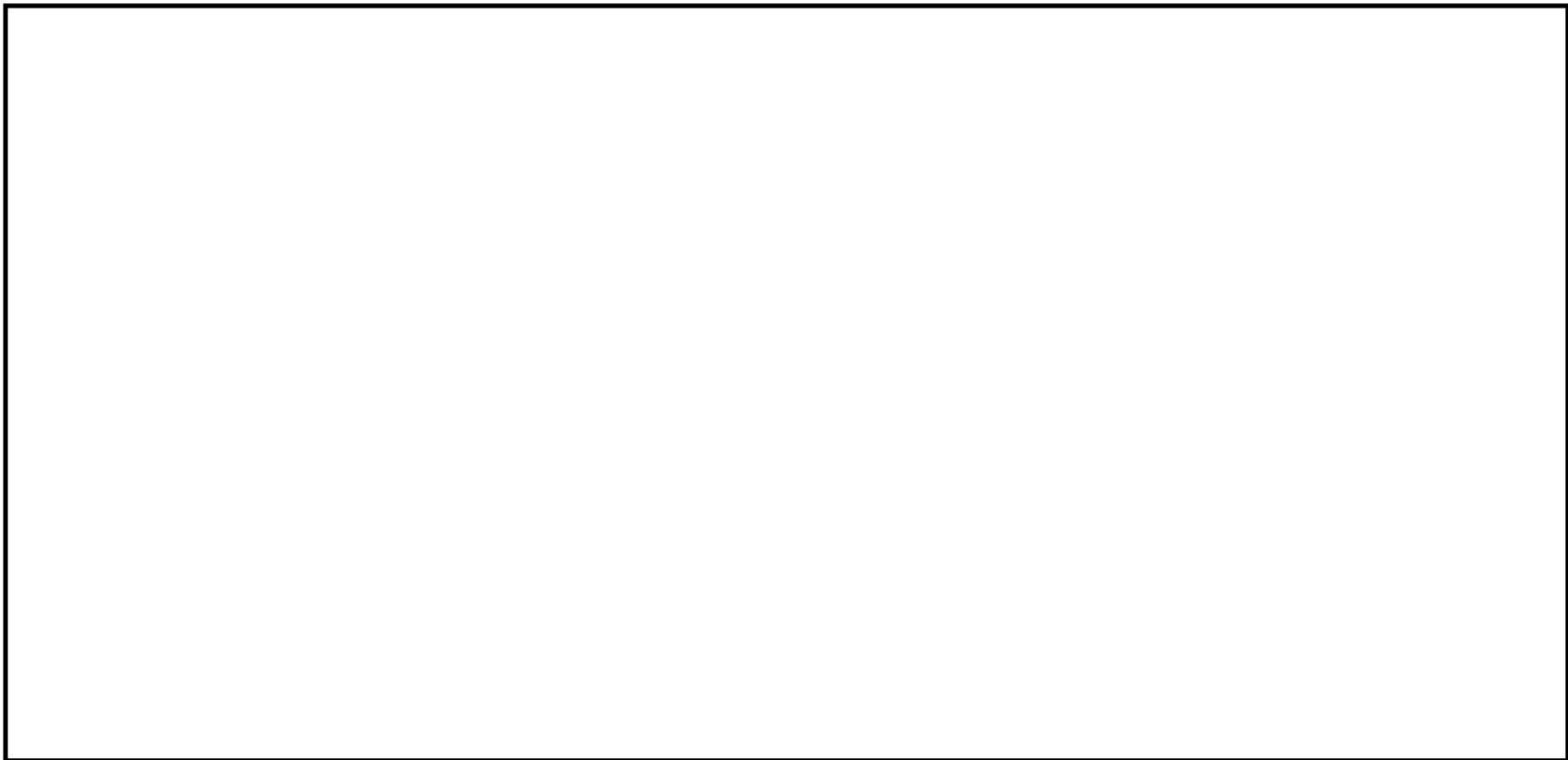


図 大容量ポンプ（放水砲用）－放水砲 ライン敷設時の設備設置場所

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6> 液膜厚さの計算方法について

○ 液膜厚さの計算方法について詳細に説明する。

< m³/hが5×5に流入し、全て液膜となった場合の計算例 >

- ① 流量と流入範囲から、燃料1体あたりの流量を算出、更に燃料棒等の表面積を考慮した単位幅あたりの流量Γを算出。
⇒燃料1体あたりの流量： m³/h ， 単位幅あたりの流量Γ：3.24m²/h (0.0009m²/s)
- ② 流量から液膜レイノルズ数を算出。⇒897
- ③ 液膜レイノルズ数から適用する式を選定。⇒ 170≤Re≤900であるため、包絡式②or③を適用
- ④ 液膜レイノルズ数と適用する式から無次元液膜厚さを算出。⇒ ②なら16.4、③なら21.9、③の方が厚いため、③の値を採用
- ⑤ 無次元液膜厚さから平均液膜厚さを算出。⇒液膜厚さは1.03mm

なお、③の液膜算出式は、理想的な実験環境で成立する評価式をベースとして採用し、さらにRe数で区分される領域毎に実験の最大値を包絡する評価式を、流量が集中する範囲の全ての燃料棒に適用したため極めて保守的な設定となっている。

仮に同じ条件でNusseltの式で算出すると、液膜厚さは0.66mmであり、Nusseltの式で液膜厚さが1.03mmとなる流量を逆算すると約9000m³/hとなる。

記号	値
N_T ：無次元液膜厚さ[-]	$(g/v^2)^{1/3}b$
Re：液膜レイノルズ数[-]	Γ/v
Γ ：単位幅あたりの液膜流量[m ² /s]	-
v ：動粘性係数[m ² /s]	1.003×10^{-6}
b ：平均液膜厚さ[m]	-
g ：重力加速度[m/s ²]	9.807

層流域：Re≤170
遷移域：170≤Re≤900
乱流域：900≤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
 $N_T = 0.157(4Re)^{7/12}$

Nusseltの式
 $N_T = 0.909(4Re)^{1/3}$

<参考7> SCALEコードの適用性について

(1) ベンチマーク解析による確認 (1 / 2)

- SFPの未臨界性評価では、SFP体系を低水密度の気相部と液相部の2相に分けた評価を実施するため、中性子の挙動に影響を与える以下3点の状態を精度よく取り扱えることが必要

- ① 液相部の状態
- ② 気相部の状態
- ③ 2相の状態

表 低水密度状態のベンチマーク実験



- 計算コードの不確定性を求めるために、燃料貯蔵施設仕様及び燃料仕様等を踏まえ147ケースの臨界実験を選定し、ベンチマーク解析を実施している

- 臨界実験については、水密度1.0g/cm³の状態に加え、表に示す低水密度状態の実験も含まれており、図に示すとおり低密度状態の実験に対する平均誤差および標準偏差は、水密度1.0g/cm³の実験と比較して大きな差はない

また、ベンチマーク解析の結果より、水密度の違いにより解析結果が特別な傾向を持っていることも無い

⇒ ① 液相部の状態 および ② 気相部の状態 を取り扱える。

- ベンチマーク実験における燃料、減速材、コンクリート、構造材などの各境界を、SCALEコードの評価では適切に取り扱っており、臨界実験結果と比較して良好な精度を示している

- 水位の変化は液相部と気相部の境界の位置が変わるだけで中性子の挙動に大きく影響を与えるものではなく、境界を適切に取り扱えることから水位変化した場合についても適切に取り扱うことができる

⇒ ③ 2相の状態 を取り扱える。

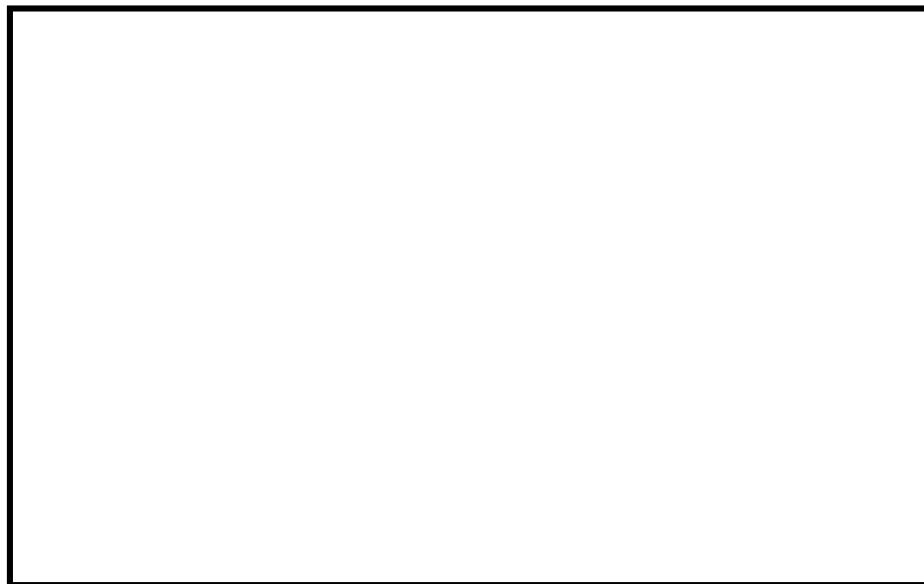


図 ベンチマーク解析による誤差分布

- したがって、SCALEコードは①～③を精度よく取り扱えることから、**今回評価にSCALEを使用することは適切である**

(1) ベンチマーク解析による確認 (2 / 2)

- 更に、中性子スペクトルの特性を表す指標であるEALF(核分裂に寄与する中性子平均エネルギー)に着目し、申請評価におけるEALFおよび選定した147ケースの臨界実験に対するEALFを整理
- 全ての臨界実験について、計算結果と実験結果の比(C/E)は1近傍であり、EALFの値に関わらず計算精度は良好

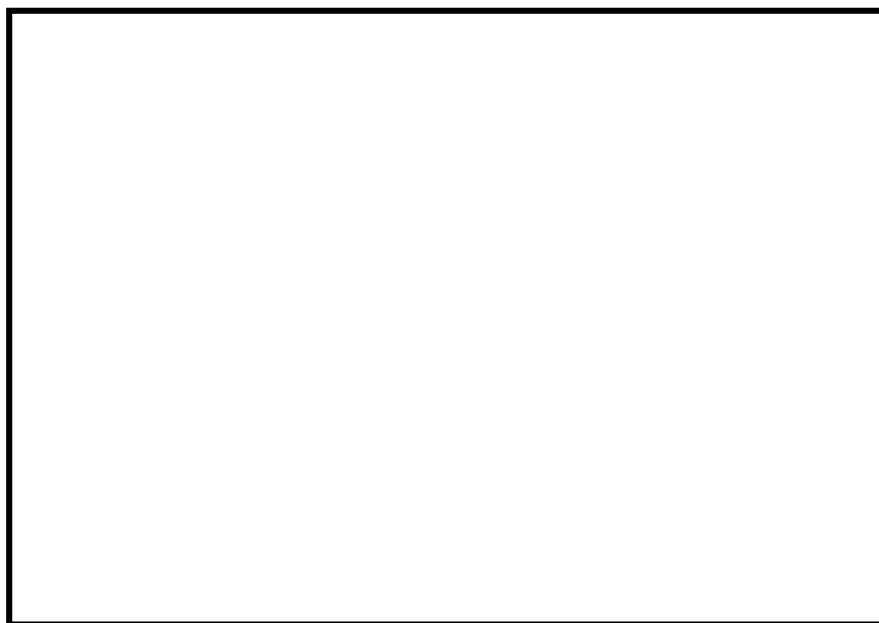
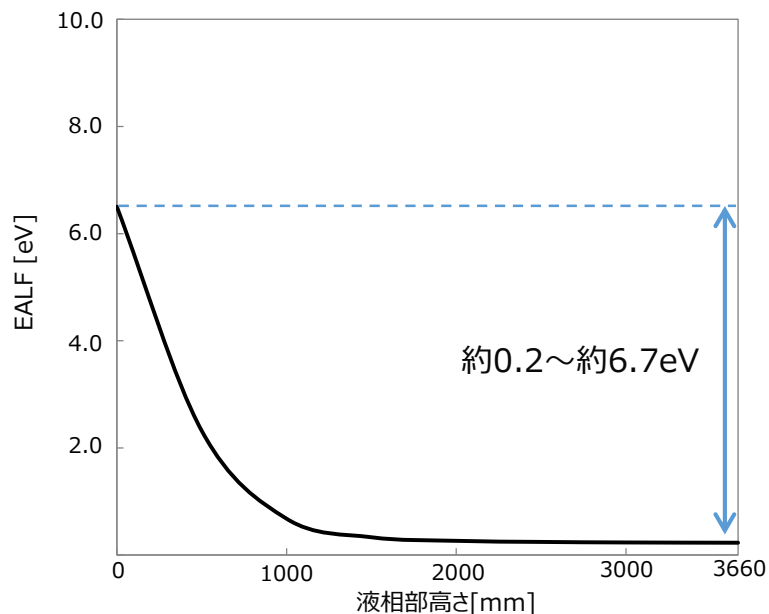


図 申請評価におけるEALF

- なお、申請評価でのEALF最大値近傍に対する傾向を確認するために別途選定した3ケースについてもC/Eを確認した結果、147ケースのベンチマーク解析と同様に計算精度は良好