



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】

2021年11月16日

関西電力株式会社

# 目 次 (1)

## <本申請の目的および変更概要>

設置変更許可申請の目的・変更内容 .....	1
既許可におけるSFP未臨界性評価の特徴および今回変更による効果 .....	2
大規模漏えい時の事象進展を踏まえた未臨界性評価条件の見直し .....	3
気相部の水分条件設定 .....	4、5

## <最適評価手法を用いた未臨界性評価>

最適評価手法による未臨界性評価 .....	6
パラメータの関係整理 .....	7、8
最適評価手法による未臨界性評価条件の設定方針 .....	9
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 .....	10
各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理について .....	11
各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果 .....	12~14
重畳させる不確かさの検討 .....	15

# 目 次 (2)

## <具体的な解析条件（基本ケース条件、不確かさを考慮した条件）に関する説明>

(1) 燃料条件	
「燃料配置」の設定	16
(2) 水分条件	
「流量」の設定	17 ~ 21
「SFPへの流入範囲、流量分布」の設定	22、23
「燃料集合体内への流入割合」の設定	24、25
「液膜となる流量の割合」の設定	26
「液膜厚さの評価式」の設定	27、28
「放水の液滴径」の設定	29、30
「海水中の塩素濃度」の設定	31
まとめ【解析条件一覧表】	32

## <前回会合コメントへの回答>

【コメントNo.1】流量設定の根拠となる手順の種別（通常操作またはSA手順）について明記すること	} 33 ~ 36
【コメントNo.2】基本ケース条件の流量はSA手順に基づき設定し、不確かさについては同じ手順内で想定されるものに限定すること	

# 目 次 (3)

## <参考>

審査における主な議論の経緯	参考1
新燃料敷き詰め条件下での未臨界性評価結果 暫定値	参考2
既許可と今回評価における実効増倍率の傾向	参考3
設定条件やモデルの妥当性を確認するパラメータスタディ	参考4
SFP内の内挿物	参考5
実運用において領域管理を取り除くことによる効果	参考6
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	参考7

---

## <本申請の目的および変更概要>

# 設置変更許可申請の目的・変更内容

## ○ 目的

使用済燃料ピット（SFP）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り運用管理面の安全性向上（作業員の被ばく量低減、燃料取扱時の誤操作低減等）を図る。

## ○ 変更内容

SFPからの大量の水の漏えい時における臨界防止に係る設計について、中性子吸収体を考慮せずとも臨界を防止する設計へ変更する。また本設計変更に合わせて、設計の妥当性を確認する評価手法および条件を変更する。

### <設計の変更>

	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 <b>ラック形状、燃料配置*</b> 及び使用済燃料ピット用 <b>中性子吸収体配置</b> において、スプレイや蒸気条件においても未臨界を維持できることにより臨界を防止し、(略)	(略)燃料損傷の進行を緩和し、臨界にならないよう配慮した <b>ラック形状及び燃料配置*</b> 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)

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

### <評価手法および条件の変更>

		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)	最適評価手法 (本件がSA事象であることに鑑み、最確状態を踏まえた基本ケースおよび不確かさ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)	
	評価条件	水分条件	気相、液相は区別せず、 水密度を0~1g/cm <sup>3</sup> 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。液膜の存在も考慮。
		燃料配置	燃烧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

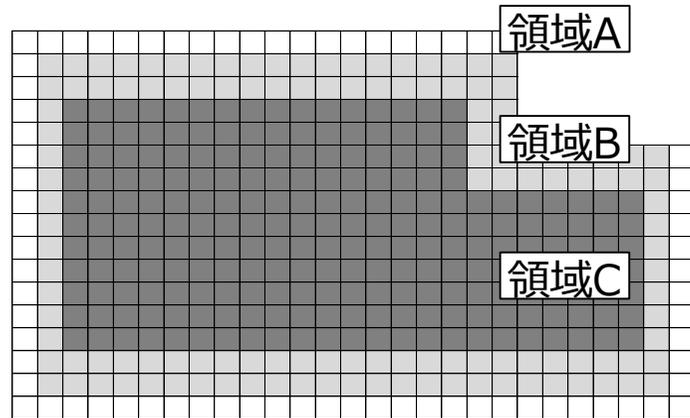
今回の設計および評価条件の変更により、既許可のような燃焼度および中性子吸収体の有無に応じた燃料の配置管理が不要とできることから、実運用においては今後未臨界上の配置制限を取り除く計画である。

配置制限を取り除くことで、照射燃料および内挿物の取り扱い頻度を大幅に削減でき、安全性向上に寄与する。

最適評価手法および見直した未臨界性評価条件を用いることにより、  
変更後の設計（中性子吸収体配置を考慮せず臨界を防止する設計）が規則要求を満足することを説明する。

## ○ 既許可の特徴

- 高浜 1、2 号炉のSFPラックはアングル型のステンレス鋼製で、大幅な水位低下時に中性子の遮へい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、燃料の燃焼度や中性子吸収体挿入の有無に応じた貯蔵領域を設定(3領域管理)することで実効増倍率を抑制し、臨界を防止する設計としている。
- 実運用上、領域B、Cの多くの燃料で中性子吸収体の挿入が必要となる。



	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

## ○ 今回の変更による効果

燃焼度や中性子吸収体挿入の有無によらない管理に変更することにより、**照射燃料の取扱いおよび内挿物入替の回数を大幅に低減でき、安全性向上が図られる。**

	3領域管理	配置制限なし	} 1 定検あたりの総取扱回数は、約460回 ⇒ 約190回に低減*
① 領域Aが満杯の状態の場合に、新燃料 1 体をSFPへ沈め込める作業	燃料移動 : 2回 内挿物入替 : 2回 ) 4回	燃料移動 : 1回 内挿物入替 : 0回 ) 1回	
② 制御棒とプラグングデバイスを入れ替える作業 (1組)	燃料移動 : 3回 内挿物入替 : 3回 ) 6回	燃料移動 : 0回 内挿物入替 : 3回 ) 3回	

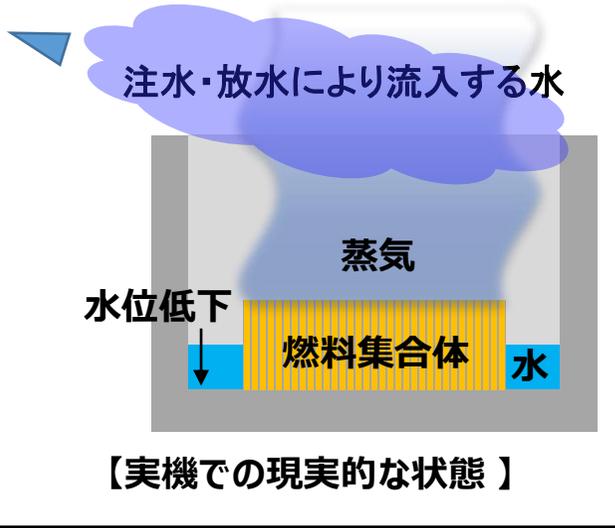
※ 1 定検あたりの標準的な作業量として、新燃料沈め込みを44体、制御棒とプラグングデバイスの入れ替えを48組と想定。

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

今回評価では、大規模漏えい時の事象進展を考慮し、液相部・気相部それぞれに、より実態に則した水密度を設定する。

## 大規模漏えい時の事象進展

- 大規模漏えい時には、整備している手順に基づき、SFPへ注水・放水が実施される。
- 注水・放水時のSFP雰囲気は、液相部（ピット水）と気相部（注水・放水により流入する水と蒸気）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する。



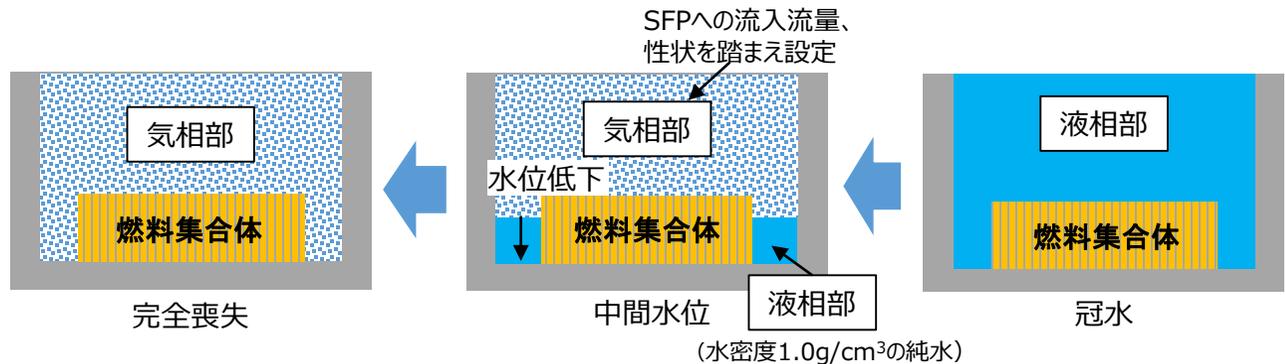
### ○既許可

理論上の全ての状態を包絡する条件として、液相、気相を区別せず、SFP全体の水密度を一律として、全ての水密度範囲（0.0～1.0g/cm<sup>3</sup>）の条件で評価する。



### ○今回評価

- 大規模漏えい時の実機での現実的な状態を考慮し、液相部と気相部の2相に分け、液相部の水位の変化を踏まえて評価する。
- 気相部の水分条件は、SFPに流入する水の流量や性状(液膜化)を踏まえ設定する。
- 液相部の水分条件は、実効増倍率を高める条件として、水密度1.0g/cm<sup>3</sup>の純水とする。

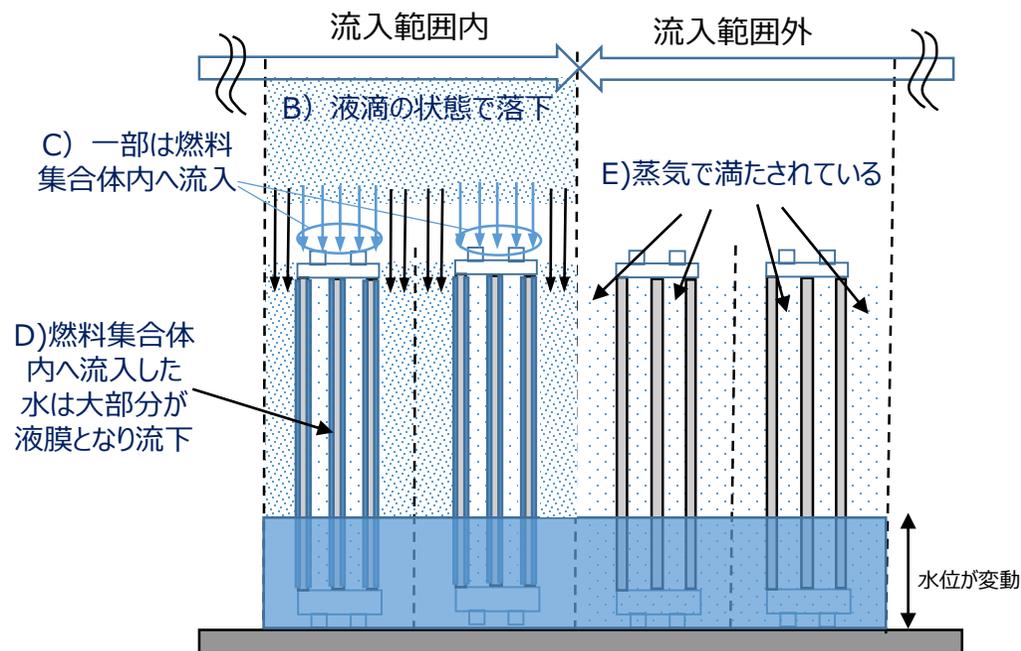
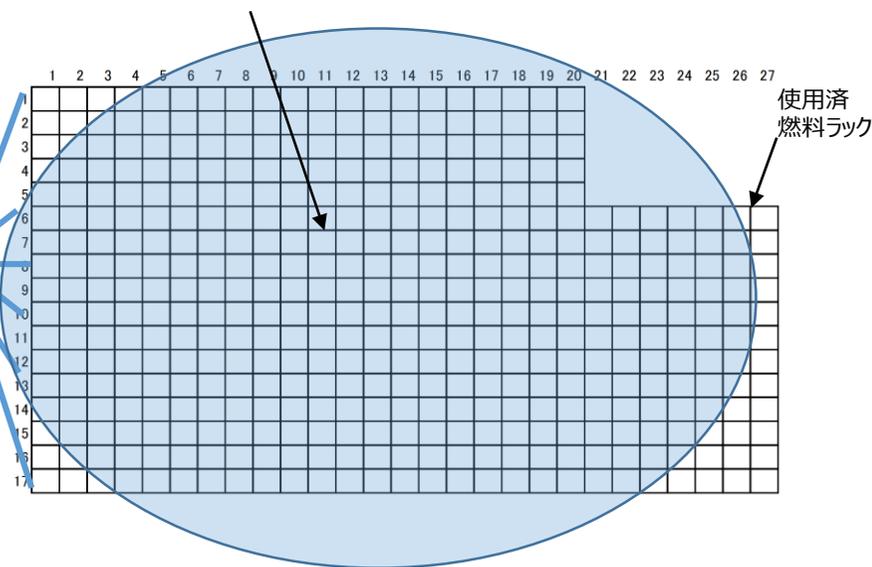


# 気相部の水分条件設定（1）

SFPへの流入量が多い、放水設備を用いたSFPへの放水を実施した場合の現実的な気相部の状態は以下のように考えられる。

- 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内へ流入する。
- 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。

A) 放水された水はSFPの広範囲へ落下



# 気相部の水分条件設定（2）

前頁に示すSFP内の状態を踏まえ、臨界計算コードへインプットする水分条件を以下のとおり設定する。

## I. 液膜厚さ

- 設備からの「流量」、水の「流入範囲・流量分布」から[ラックピッチあたりの流量]を求め、当該流量に「燃料集合体内への流入割合」を乗じることで燃料集合体内に流入する流量を求める。
- 燃料集合体内に流入する流量に「液膜となる流量の割合」を乗じ液膜となる流量を求め、「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

- 燃料集合体内へ流入する流量から、液膜となる流量を減じることで、燃料集合体内を液滴のまま落下する流量を求める。
- 落下する「液滴の径」より求まる液滴の下降速度、および液滴流量などを用い【燃料集合体内気相部水密度】を求める。

## III. 燃料集合体外気相部水密度

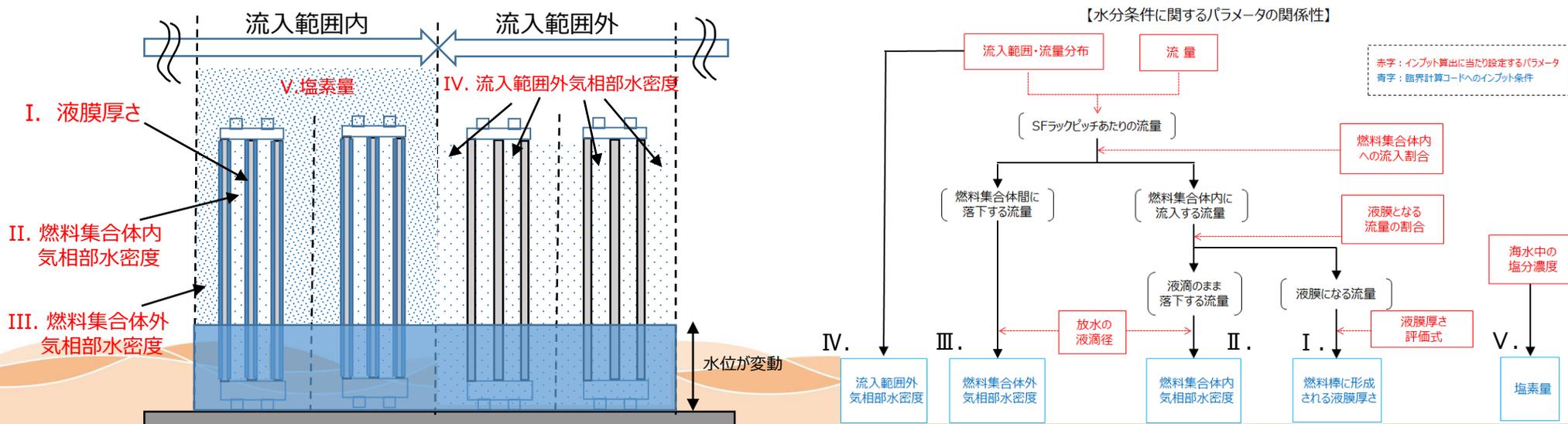
- ラックピッチあたりの流量から、燃料集合体内に流入する流量を減じることで、燃料集合体間を落下する流量を求める。
- 落下する「液滴の径」より求まる液滴の下降速度、および液滴流量などを用い【燃料集合体外気相部水密度】を求める。

## IV. 流入範囲外気相部水密度

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

## V. 塩素量

海水由来の「流量」について、「海水中の塩分濃度」により求まる塩素量を求める。



---

# <最適評価手法を用いた未臨界性評価>

# 最適評価手法による未臨界性評価

- 本件がSAに係る評価であることに鑑み、今回評価ではSA有効性評価で採用している最適評価手法（BEPU）を用いる。すなわち、最確状態を踏まえた基本ケースを設定したうえで、各パラメータに対し発生する不確かさ影響を考慮し設定する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。
- 設置許可基準規則54条2項への適合性を確認する未臨界性評価ケースについて、以下フローに沿って設定する。

## STEP1：検討対象パラメータの整理



臨界計算コードへの入力データの元となるパラメータを特定

… 7、8

## STEP2：基本ケース条件の設定方針検討



基本ケース条件の設定にあたり、最適評価手法の考え方に準じた各パラメータの設定方針を策定

… 9

## 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

… 10 ~ 14

## 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

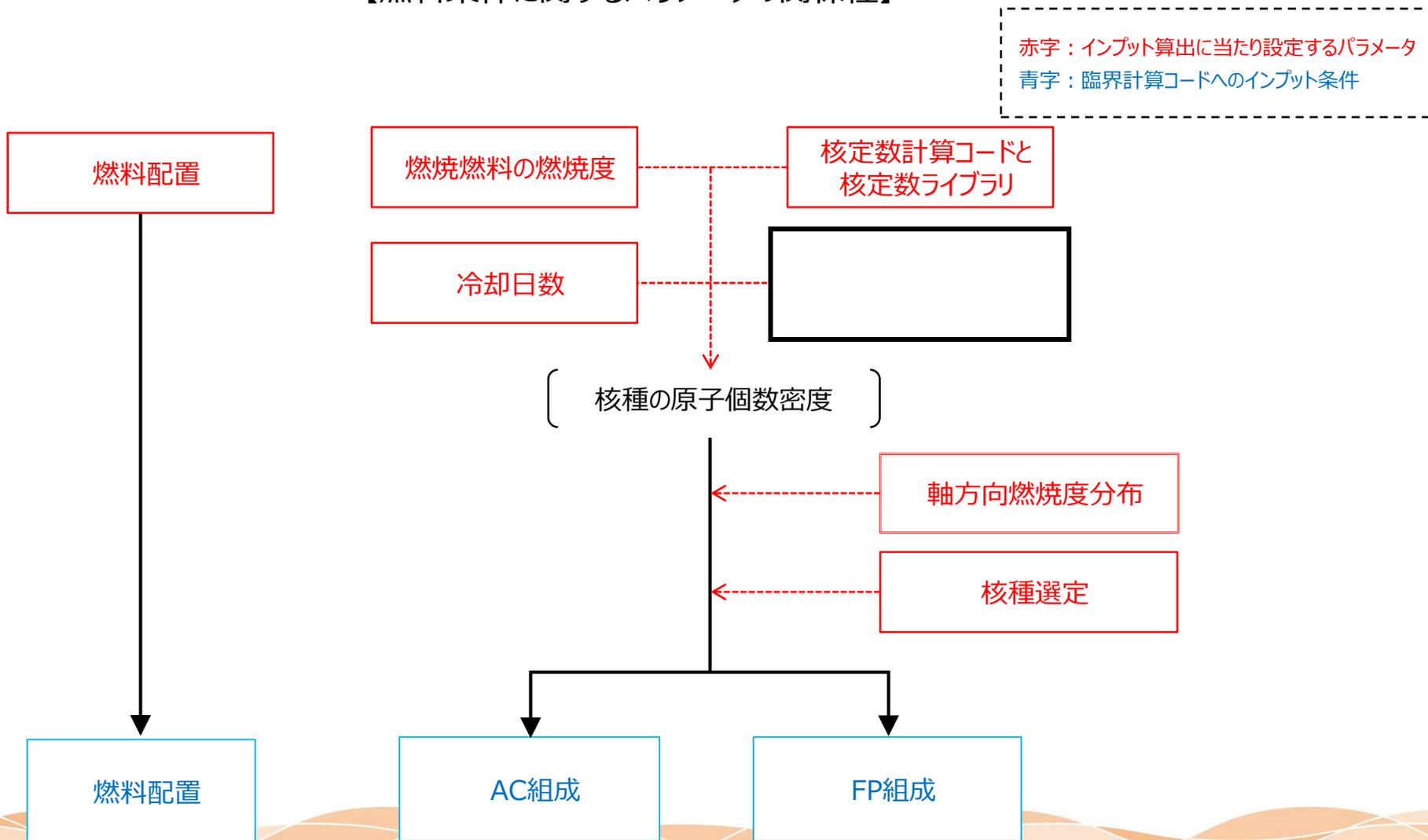
… 15

解析条件（基本ケースおよび感度確認ケース）の決定

# パラメータの関係整理（1）

臨界計算コードへの入力条件（青字）と、その元となるパラメータ（赤字）の関係性を以下に示す。

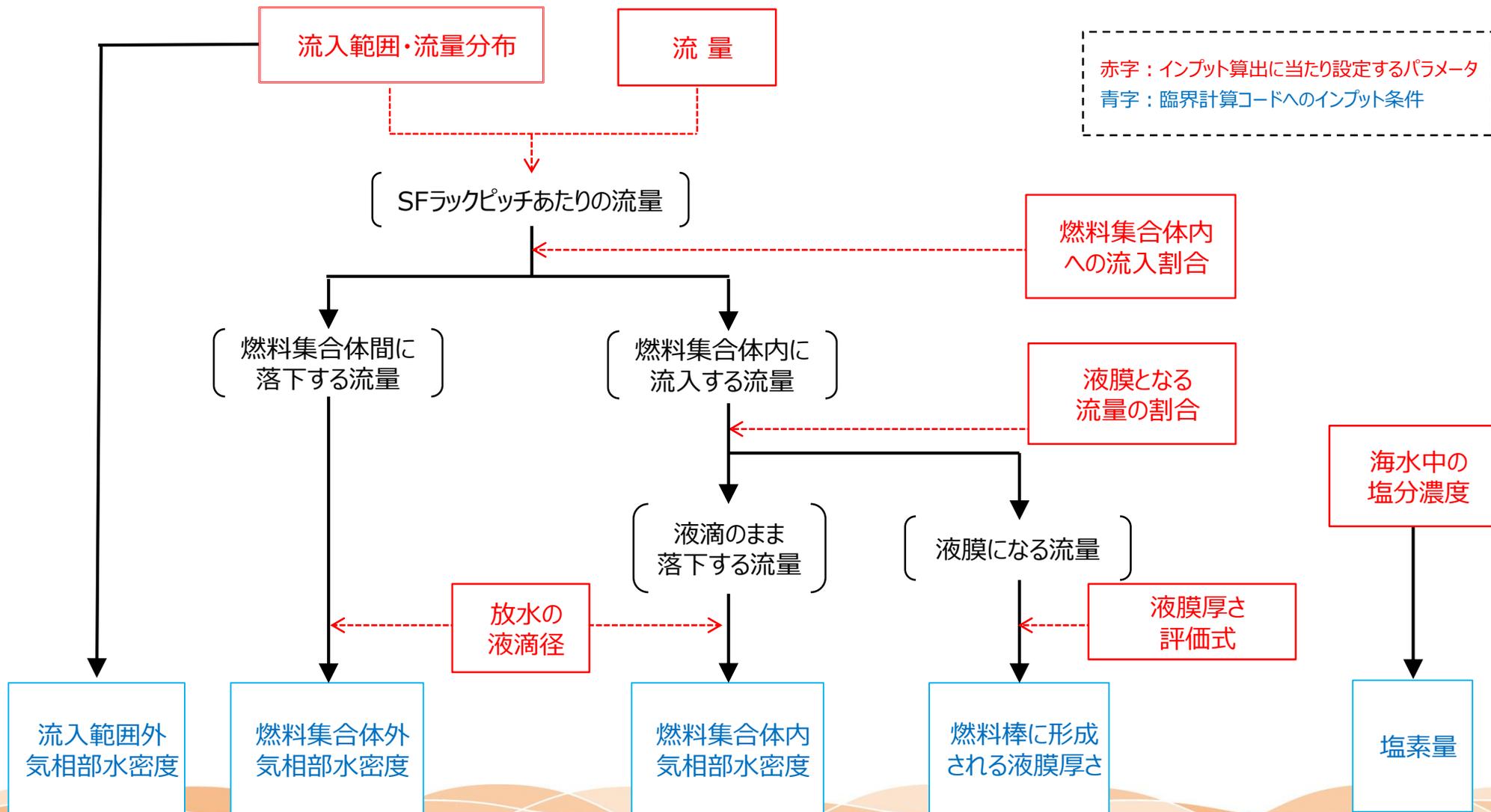
## 【燃料条件に関するパラメータの関係性】



# パラメータの関係整理 (2)

(続 き)

## 【水分条件に関するパラメータの関係性】



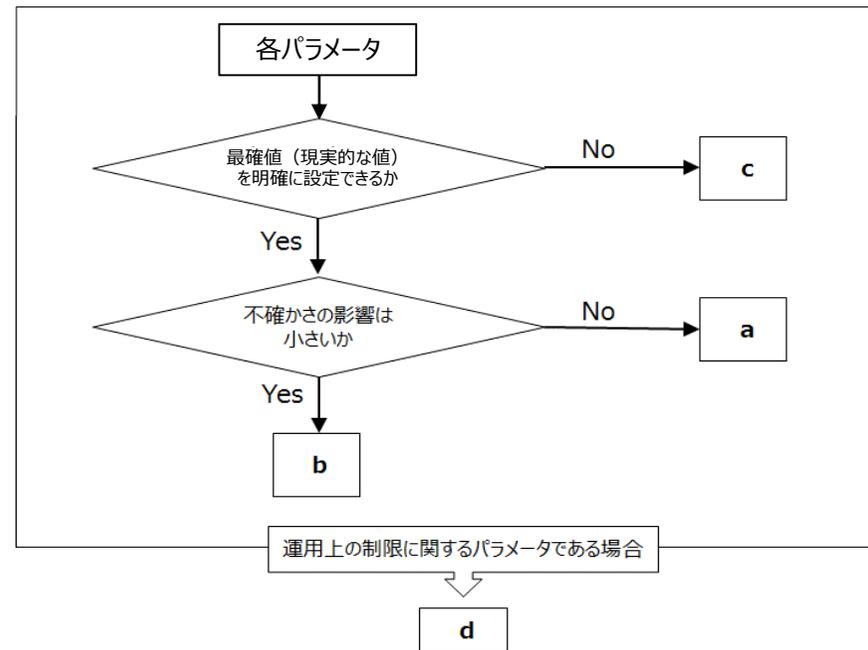
# 最適評価手法による未臨界性評価条件の設定方針

本件がSAに係る評価であることに鑑み、以下の方針のもと各パラメータに対する基本ケース条件を設定する。

## 【基本ケース条件の設定方針】

- a. 原則として最確値（現実的な値）を設定する。
- b. 不確かさが評価結果へ与える影響が小さいと判断できる場合には、最確値に対し不確かさを保守的に見込んだ値を設定する。
- c. 現実的な値に幅がある場合には、取り得る保守的な値を設定する。
- d. 運用上の制限に関連するパラメータについては、最確値に対し不確かさを保守的に見込んだ値を設定する。

各パラメータの基本ケース条件設定フロー



（参考） 実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド（抜粋）

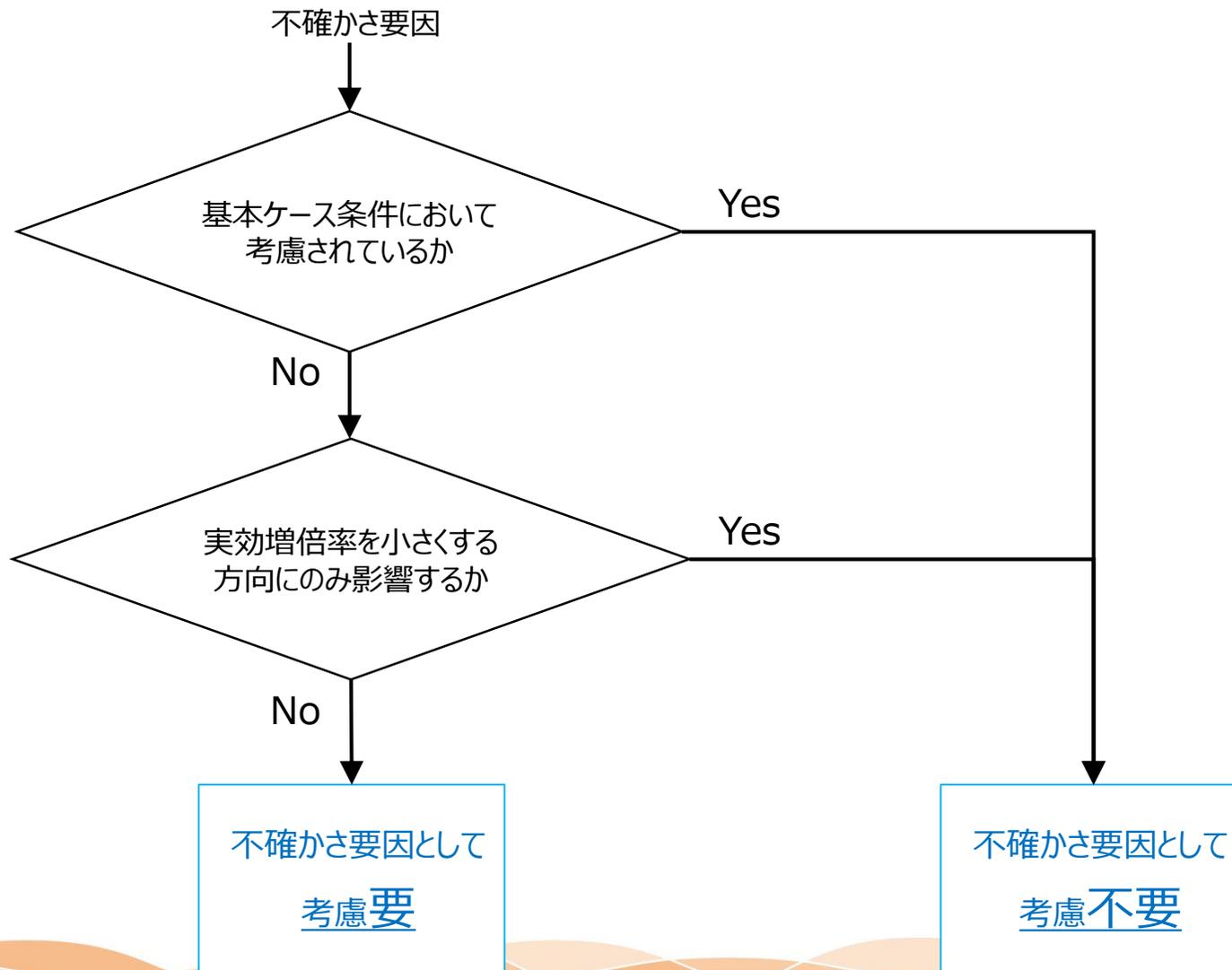
## 2.2 有効性評価に係る標準評価手法

### 2.2.1 有効性評価の手法及び範囲

- (1) 有効性評価にあたっては最適評価手法を適用し、「2.2.2 有効性評価の共通解析条件」及び「2.2.3事故シーケンスグループの主要解析条件等」の解析条件を適用する。ただし、保守的な仮定及び条件の適用を否定するものではない。
- (2) 実験等を基に検証され、適用範囲が適切なモデルを用いる。
- (3) 不確かさが大きいモデルを使用する場合又は検証されたモデルの適用範囲を超える場合には、感度解析結果等を基にその影響を適切に考慮する。

# 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

各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理にあたり、基本ケース条件に対する各不確かさ要因の考慮要否は、以下フローに基づき判定した。



# 各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理について

各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果を次ページ以降に示す。  
 なお表の見方は以下のとおりである。

基本ケース条件と不確かさの整理結果に係るまとめ方

パラメータ	基本ケース条件		基本ケース条件の 設定方針	基本ケース条件に対する不確かさ		実効増倍率が 厳しくなる方向	考慮 要否
	具体的条件	条件の説明		不確かさが生じる要因	不確かさが生じる方向		
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
【例】 海水中の 塩分濃度	3.3%	文献に記載された 最小値	c (塩分濃度は3.3~3.8%の 範囲であるが、高浜発電所 での現実的な値は定め難い)	海流の変化 【基本ケース条件で考慮済み】	塩素濃度増加	塩素濃度低下	不要

【説明】

- ① 臨界計算コードへのインプット算出に当たり設定するパラメータ名
- ② 基本ケースの具体的条件
- ③ 基本ケース条件 (②) の補足説明
- ④ 基本ケース条件の設定方針符号 (a.~d.) を記載。最確値を設定しなかったb、c、dについては設定理由を併記。
- ⑤ 基本ケース条件に対する不確かさ (どんな要因でパラメータが変わるのか) 。  
 その不確かさが既に基本ケース条件に包含されている場合は、その旨を【基本ケース条件で考慮済み】と併記。
- ⑥ 不確かさが発生した場合の、パラメータ (①) の状態・方向。
- ⑦ 未臨界性評価結果が厳しくなるパラメータ (①) の状態・方向。
- ⑧ 不確かさの考慮要否判定フローに基づく判定結果。  
 不確かさのうち、基本ケース条件で考慮されておらず、且つ実効増倍率を大きくする方向へ影響しうる不確かさは、考慮「要」となる。(例えば、⑤で【基本ケース条件で考慮済み】と記載されておらず、且つ⑥と⑦が一致している不確かさは、考慮「要」となる)

なお⑧で「要」と整理されたパラメータについて、不確かさを考慮した条件にて感度解析を実施する。

# 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）

パラメータ	基本ケース条件		基本ケース条件の設定方針	基本ケース条件に対する不確かさ		実効増倍率が厳しくなる方向	考慮要否
	具体的条件	条件の説明		不確かさが生じる要因	不確かさが生じる方向		
燃料配置	SFPは新燃料で満杯	燃焼条件および燃料貯蔵体数を、実効増倍率を高めるよう、また将来の実配置を包絡するよう条件を設定	c (燃料取替毎に貯蔵燃料体数および燃焼度は変化する)	貯蔵燃料燃焼度の違い 【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	・燃焼度が低い燃料を貯蔵 ・貯蔵体数が増加	不要
				燃料貯蔵体数 【基本ケース条件で考慮済み】	SFP満杯以下		不要
燃料条件	燃焼燃料の燃焼度	- (新燃料のみを貯蔵するとして燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)					
	軸方向燃焼度分布	- (新燃料のみを貯蔵するとして燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)					
	核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として燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)					
		- (新燃料のみを貯蔵するとして燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)					
	核種選定	- (新燃料のみを貯蔵するとして燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)					
	冷却日数	- (新燃料のみを貯蔵するとして燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)					
		- (新燃料のみを貯蔵するとして燃料配置とするため、本パラメータの条件は設定しない)					

# 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）

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

# 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）

パラメータ	基本ケース条件		基本ケース条件の設定方針	基本ケース条件に対する不確かさ		実効増倍率が厳しくなる方向	考慮要否	
	具体的条件	条件の説明		不確かさが生じる要因	不確かさが生じる方向			
(続 き)								
水分条件	液膜厚さ評価式	包絡式	<ul style="list-style-type: none"> <li>適用されるRe数範囲において、多種ある実験式を包絡する保守的な条件を設定</li> </ul>	c (集合体内の現実的な流動状況は定め難いため、保守的な条件を設定)	風の影響② (斜め方向の液滴落下による波立ち等の外乱)	液膜が薄くなる	液膜を厚くする	不要
					多種ある実験式の存在 【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	<ul style="list-style-type: none"> <li>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)</li> </ul>	c (放水砲由来の液滴径はスプレイヘッド由来の液滴径よりは大きい、現実的な条件を設定することは困難)	注水・放水手段の組合せ	液滴径を大きくする	液滴径を小さくする	不要
					1手順あたりのポンプ台数			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		不要
			スプレイ試験における測定箇所毎の結果の差異	液滴径を大きくする or 小さくする	<b>要</b>			
	海水中の塩分濃度	3.3%	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献に記載された最小値</li> </ul>	c (塩分濃度は3.3~3.8%の範囲であるが、高浜発電所での現実的な値は定め難い)	海流の変化 【基本ケース条件で考慮済み】	塩素濃度増加	塩素濃度低下	不要

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

## 重畳させる不確かさの検討

- 前頁までの表で考慮「要」と整理された不確かさ要因を下表に示す。これらの不確かさは、相互に因果関係はなく（いずれかの不確かさの発生に起因して、他の不確かさが発生することはない）、全て独立であることから、重畳は考慮しない。
- 設置許可基準規則第54条2項に係る未臨界性評価に関する要求事項への適合性は、基本ケースおよび下表に示す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。

表 各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	感度解析ケース (資料2)
流量	1手順あたりのポンプ台数	ケース①
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)	ケース②
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)	ケース③
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	ケース④

---

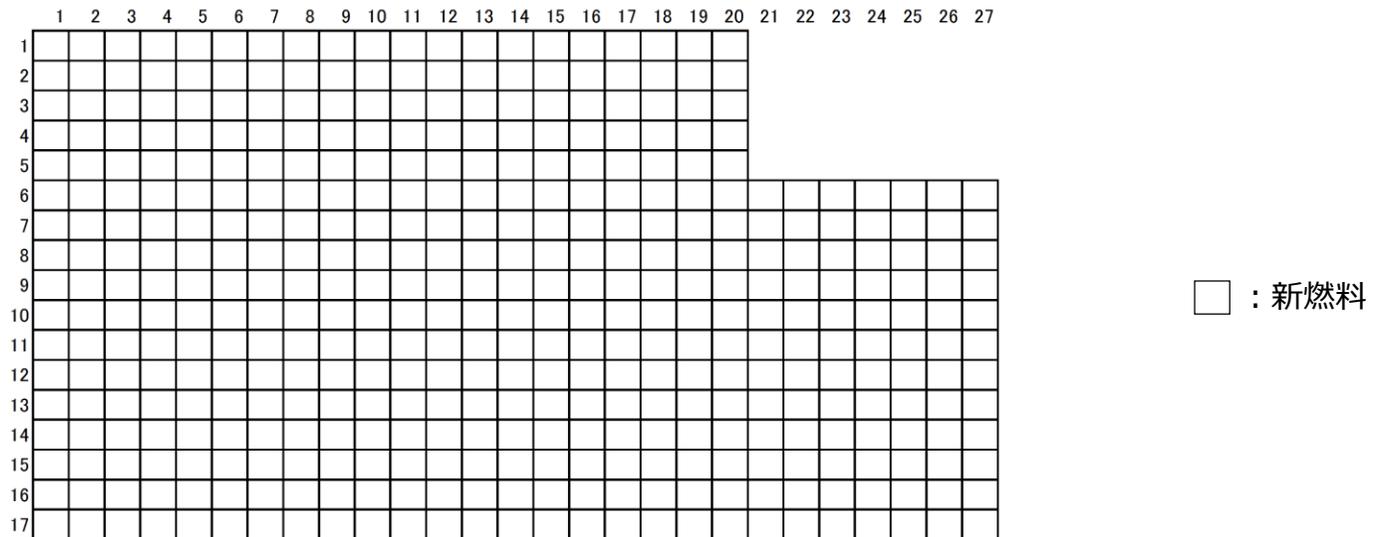
<具体的な解析条件（基本ケース条件、不確かさを考慮した条件）に関する説明>

**(基本ケース条件) (不確かさを含む条件)**

全てのラックに新燃料を貯蔵する設定とする。

**【説明】**

実運用においては、燃焼度 0～55GWd/tの燃料をランダムに貯蔵するが、評価上は全てのラックに新燃料を敷き詰めた保守的な条件とする。



参考 実運用下と基本ケースでの燃料貯蔵体数比較

燃焼度 (BU) 区分 (GWd/t)	BU<10	10≤BU<20	20≤BU<30	30≤BU<40	40≤BU	計
実運用下 (SFラック満杯想定) ※	44体	44体	28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	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。

(基本ケース条件)

設置許可基準規則54条にかかる対応として整備している手順全てが同時に実施されるとし、1手順につきポンプの起動台数を1台と想定する。(手順書上から1手順あたりに使用するポンプは1台と読めるため)

【説明】

- SFPへの注水・放水に係る手順の種別(通常操作向けの手順か事故時対応向けの手順か)について下表に示す。
- 今回の未臨界性評価においては、重大事故等時対応のため整備しているSFPへの注水・放水に係る手順のみをもとに流量を設定する。

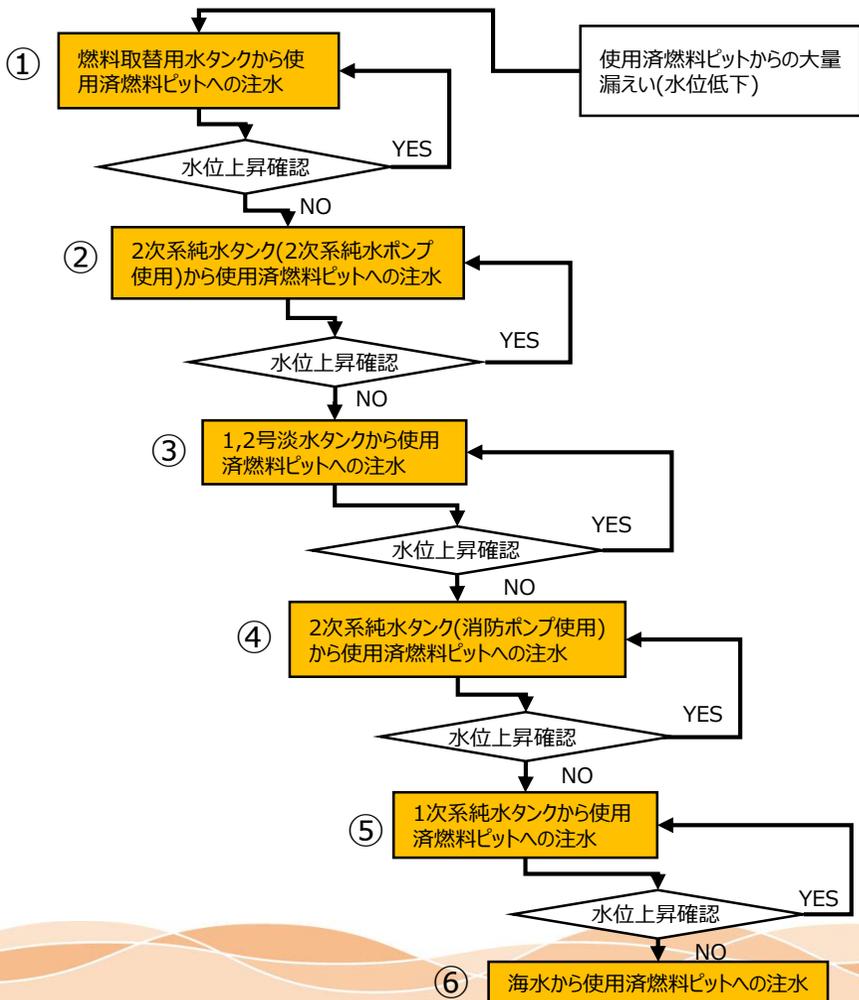
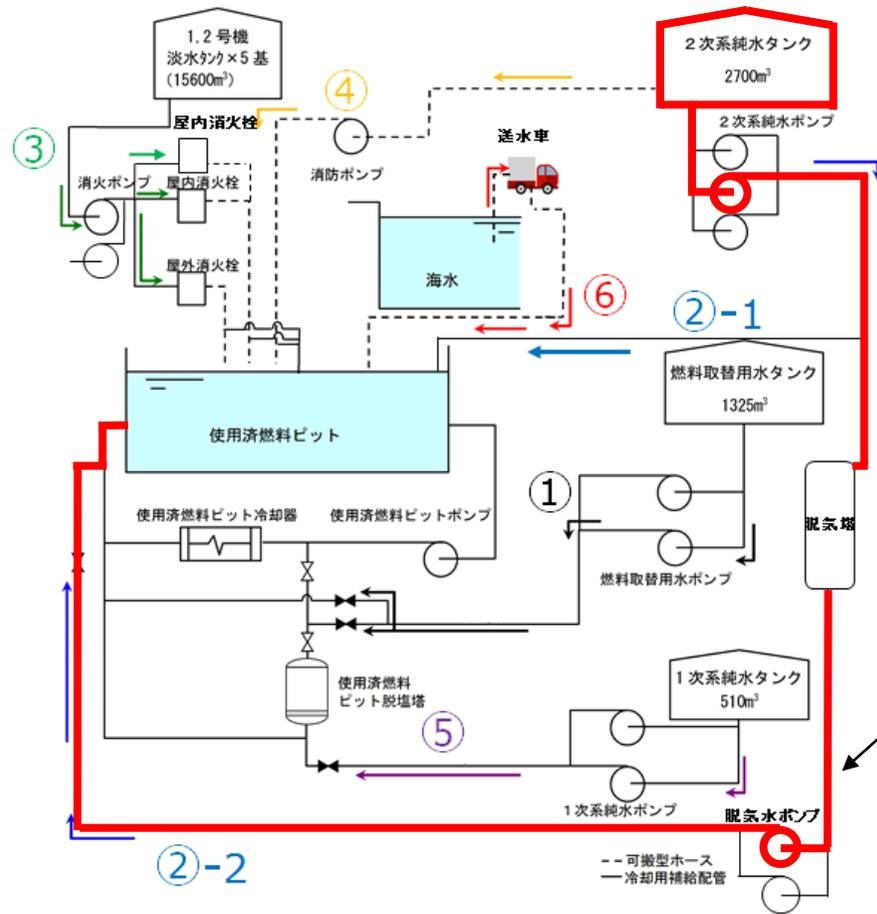


表 SFPへの注水・放水手順を整備している社内標準

	手順(ポンプ)	手順の種別	整備している社内標準	考慮要否
注水手順	① 燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)	重大事故等時対応向け	事故時操作所則	要
	②-1 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ) <sup>※1</sup>	通常時向け	通常操作所則	要
		重大事故等時対応向け	事故時操作所則	
	②-2 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ) (脱気塔を経由し、脱気水ポンプを使用)	通常時向け	通常操作所則	不要 <sup>※3</sup>
	③ 1,2号淡水タンク(消防ポンプ-消火栓)	重大事故等時対応向け	SA所達 <sup>※2</sup>	要
	④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	重大事故等時対応向け	SA所達	要
⑤ 1次系純水タンク(1次系純水ポンプ)	重大事故等時対応向け	SA所達	要	
放水手順 <sup>※4</sup>	⑥ 海水(送水車)	重大事故等時対応向け	SA所達	要
	送水車によるスプレー	重大事故等時対応向け	SA所達	要
	大容量ポンプ(放水砲用)による放水	重大事故等時対応向け	SA所達	要

※1 通常時向けの手順書、事故時向けの手順書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 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  
 ※3 手順②-2については、事故時向けに整備している手順書ではないこと、またプラント通常運転時のSFP水の自然蒸散分を定期的に補給する際は手順②-1にて実施しており、手順②-2にて実施した実績が無いことから、今回未臨界性評価条件の流量条件としては考慮しないこととする。  
 ※4 大規模損壊時にSFPへ放水する手順として、これ以外に化学消防自動車を用いたスプレー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、また当該手順を実施した場合における流量は「送水車によるスプレー」手順を考慮した流量と同じであるため包絡されることとなる。

図 SFPへの注水に係る手順の実施フロー



手順②-2は考慮しない。

- 事故時操作手順ではない。
- 通常操作手順としても使用した実績が無い。

# 「流量」の設定（3）

## <続き>

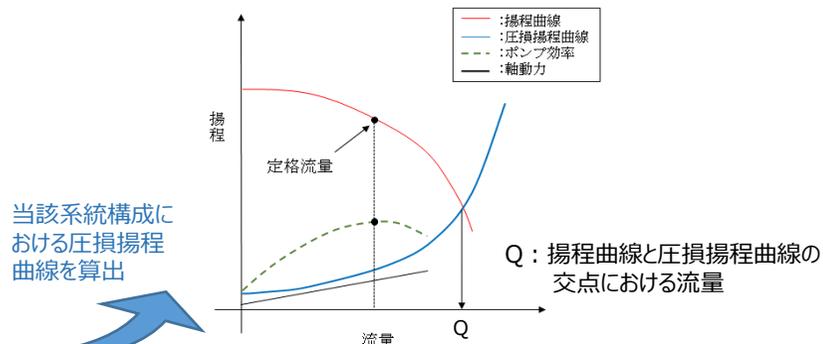
- 各手順の具体的な流量については、手順に示される設備・系統構成を前提とし、基本的にはポンプの揚程曲線と当該設備構成を踏まえた水頭差や配管圧損等により評価した圧損揚程曲線との交点における流量、もしくは設備の仕様制限から求まる流量を設定する。（送水実績がある手順は実測値を使用する。）

### 【燃料取替用水タンクからSFPへ注水時※1の例】

※1 他の注水手順についても、手順通りのラインナップを実施することにより系統構成が一意に決まるようになっている。



図 整備している手順に基づく系統構成（燃料取替用水タンクからの注水手順）



当該系統構成における圧損揚程曲線を算出

図 ポンプ揚程曲線を用いた流量の算出方法概略

### 【放水砲によるSFPへの放水時の例】

- 54条2項対応でSFPへ放水する手順の記載
  - ・大容量ポンプ（放水砲用）を2台直列に接続すること
  - ・放水砲は分岐器を用いて2台設置すること
  - ・SFPへ放水する際の放水砲使用台数は、SFPあたり1台とすること
- ⇒放水砲1台当たりの流量は、大容量ポンプ（放水砲用）の出口流量の半分となる。

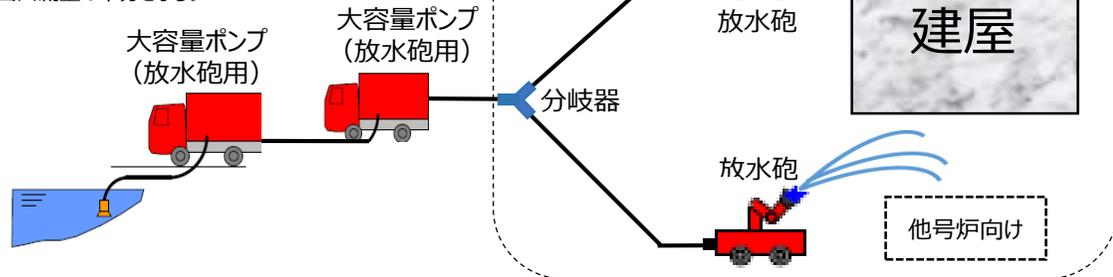


図 整備している手順に基づく系統構成（放水砲による放水手順）



図 大容量ポンプ（放水砲用）の揚程曲線（例）

## （不確かさを考慮した条件）

全手順が同時に実施され、かつ設置されるポンプの全数起動を想定する。

## 【説明】

系統内ポンプの起動台数は、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のポンプが全数起動することを考慮する。



図 ポンプ全数を起動する場合の系統構成（燃料取替用紙タンクからの注水手順）

# 「流量」の設定（5）

## （基本ケース条件）

注水および放水手順全てが同時に実施され、1手順につきポンプの起動台数を1台として評価した流量の合計  m<sup>3</sup>/hを設定する。

## （不確かさを考慮した条件）

注水および放水手順全てが同時に実施され、かつ設置されるポンプの全数起動を想定して評価した流量の合計  m<sup>3</sup>/hを設定する。

表 注水・放水設備による設定流量

手順(ポンプ)		基本ケース流量 (m <sup>3</sup> /h)	不確かさを考慮した流量 (m <sup>3</sup> /h)	根拠
注 水	① 燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)	21	21 (2台) ※1	ポンプ揚程曲線
	②-1 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ)	5	15 (3台)	実測値
	②-2 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ) (脱気塔を経由し、脱気水ポンプを使用)	— ※2	— ※2	— ※2
	③ 1,2号淡水タンク(消火ポンプ-消火栓)	22	132 (3か所※3×2台)	実測値
	④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	95	95	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	42 (2台) ※4	ポンプ揚程曲線
⑥ 海水(送水車)	260	260	ポンプ揚程曲線	
放 水	送水車によるスプレイ	<input type="text"/>	<input type="text"/>	スプレイヘッドの 仕様上限
	大容量ポンプ（放水砲用）による放水	<input type="text"/> ※5	<input type="text"/> ※5	大容量ポンプ (放水砲用) の仕様上限
合計		<input type="text"/>	<input type="text"/>	—

※1 系統上のオリフィスにより大きな圧損が生じるため、ポンプ起動台数を2台に増やしても流量への影響は軽微であった。

※2 通常操作の手順であるため考慮しない。

※3 系統数を単純倍した。

※4 系統途上で手順①と合流するため、合流点以降の圧損が大きく、ポンプ起動台数を2台に増やしても流量への影響は軽微であった。

※5 大容量ポンプ（放水砲用）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（ m<sup>3</sup>/h）が各号炉に2等分されるとした。

## （基本ケース条件）

- 流量の大部分を占める放水砲について、単位面積当たりの流量は、文献※1に基づく放水分布から求まるピーク流量よりも、全流量がSFラックに一様に流入した場合の方が大きくなるため、全流量をSFラック面積で割った値を用いる。
- スprayについても同様に、全流量をSFラック面積で割った値を用いる。

### 【説明】

#### ○放水砲

[放水分布に基づくピーク近傍の流量（単位面積当たり）]

文献を参考に、放水方向（射程方向）はRosin-Rammler分布を、放水の直交方向（射幅方向）は正規分布を用いて規格化した。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に基づいて設定した。

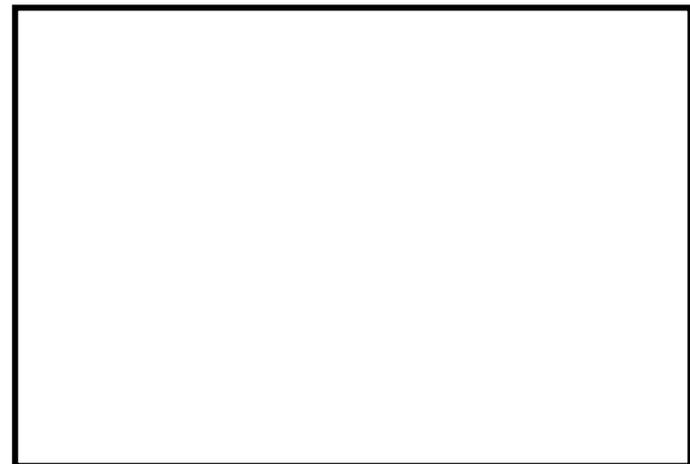
■ 射程方向・・・ ピーク位置±2mの範囲に射程方向総流量の約25%が集中

■ 射幅方向・・・ ピーク位置±2mの範囲に射幅方向総流量の約30%が集中

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

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

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



#### ○スプレイヘッド

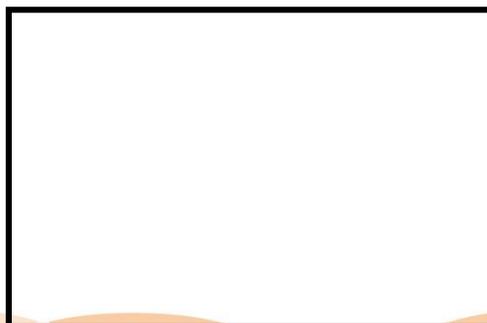
[放水分布に基づくピーク近傍の流量（単位面積当たり）]

メーカー試験結果を元に、「300cc以上」を「500cc」と大きく仮定する。

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

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

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



スプレイ水分布は、1分間連続スプレイ時の水量を開口部面積0.038m<sup>2</sup>の容器により取得



※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)

※2 流量には定格値を使用

## （不確かさを考慮した条件）

全流量がSFPの局所領域に集中することを仮定する。

### 【説明】

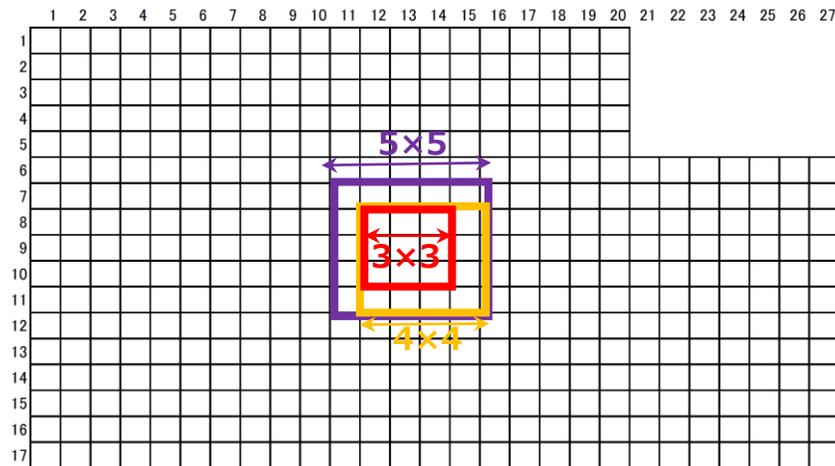
- ・ 実効増倍率を高くするため、局所領域はSFP中心部に設定する。

- ・ 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、水が集中する範囲（ $N \times N$ ）を順次広げていき解析を行う。

（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する。）

- ・ 局所集中範囲外の気相部水密度には飽和蒸気密度を設定する。

※ SFPに新燃料を敷き詰めた条件で、 $3 \times 3$ の範囲内の水密度を $0 \sim 1 \text{g/cm}^3$ まで変化させた場合の実効増倍率が0.971（不確か性0.02含む）であり、判定基準（0.98以下）を満足する。



□ : 新燃料を貯蔵

# 「燃料集合体内への流入割合」の設定（1）

## （基本ケース条件）

SFP内に流入する水のうち、燃料集合体に流入する流量の割合は、ラックピッチと燃料集合体外寸から求まる面積比等から、23%とする。

### 【説明】

- ・放水砲の放水軌跡（無風時）より、SFPへほぼ垂直に流入する状態を想定する。
- ・上部ノズル縁を真上から見た場合、燃料棒に通じる流路孔がほぼないことから、上部ノズル縁寸法の半分より外側の部分に落下した水は燃料集合体外へ弾かれると想定する。
- ・従って、燃料流入割合は、ラックピッチ面積に対する赤色部面積の比として、 $190 \times 190 \div (\square \times \square) \approx 23\%$  と設定する。  
（実機では、SFPに貯蔵されている燃料の多くには内挿物が挿入されており、燃料集合体外へ弾かれる流量が多くなるため、流入割合はさらに低下する。）

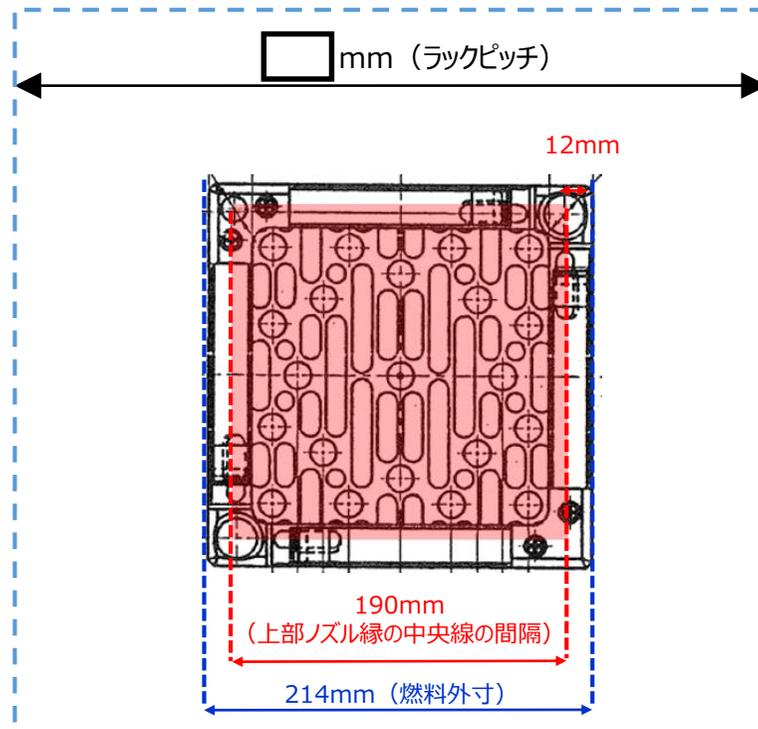
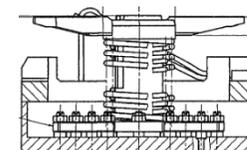
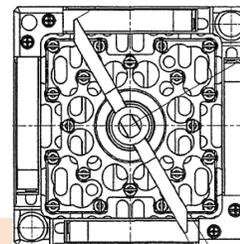


図 燃料集合体に流入する流量割合イメージ



参考図 放水砲の放水軌跡（無風時）



参考図 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

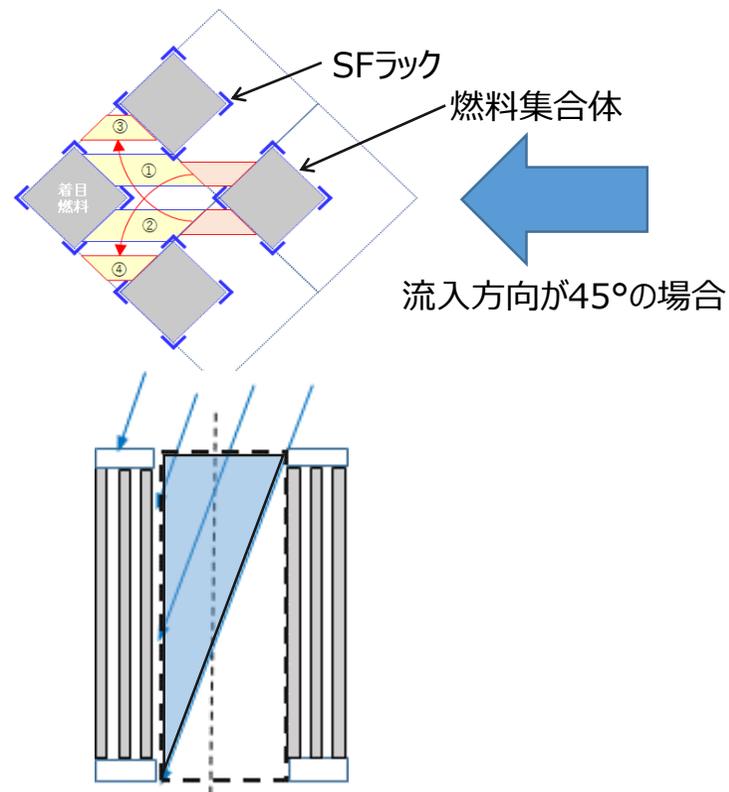
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

## （不確かさを考慮した条件）

風の影響により斜め方向から液滴が流入してくることを想定し、燃料集合体の幾何形状および放水の流入方向等より、46%とする。

## 【説明】

- 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、右図のとおり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45.2%となる。
- 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、面積に高さに乗じた体積の半分と見積もることができる。よって横風により斜めから液滴が流入してくる影響は、約23%となる。



流入方向が45°の場合

流入形態を踏まえた流入割合影響

### <影響計算>

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

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。

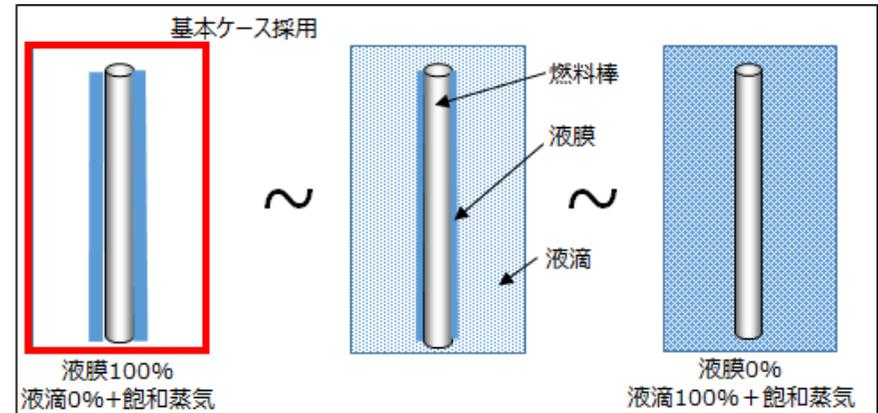
# 「液膜となる流量の割合」の設定

## (基本ケース条件) (不確かさを含む条件)

燃料集合体の上部構造を經由した流入となること、および実効増倍率を厳しくする観点を踏まえ、100%とする。

### 【説明】

- ・放水設備による液滴が集合体内へ流入する際は、上部ノズル等の存在により大部分が液膜化すると考えられる。
- ・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が、液膜として流下する場合は液滴として落下するよりも下降速度が小さく※、燃料棒周りの水分量が増えるため、実効増倍率は大きくなる。



液膜と液滴の割合 (イメージ図)

※ 基本ケースにおいて、燃料棒を流下する液膜の流下速度は、液滴の落下速度の約1/40倍である。

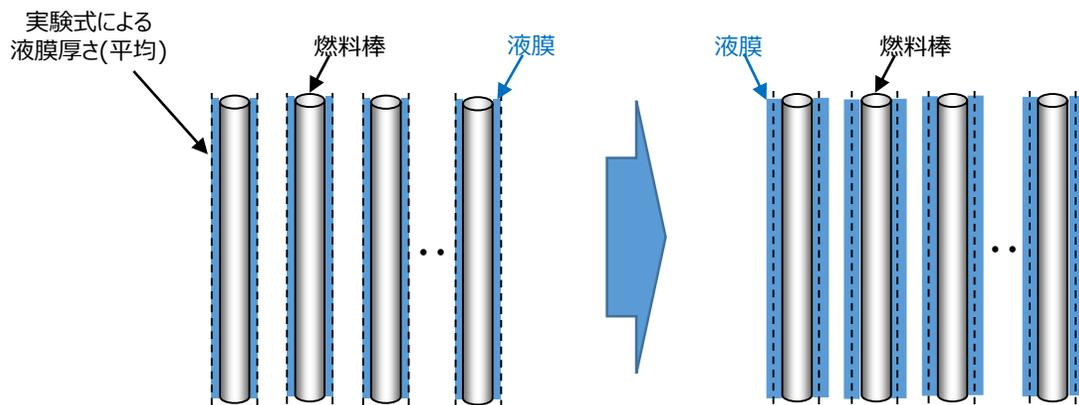
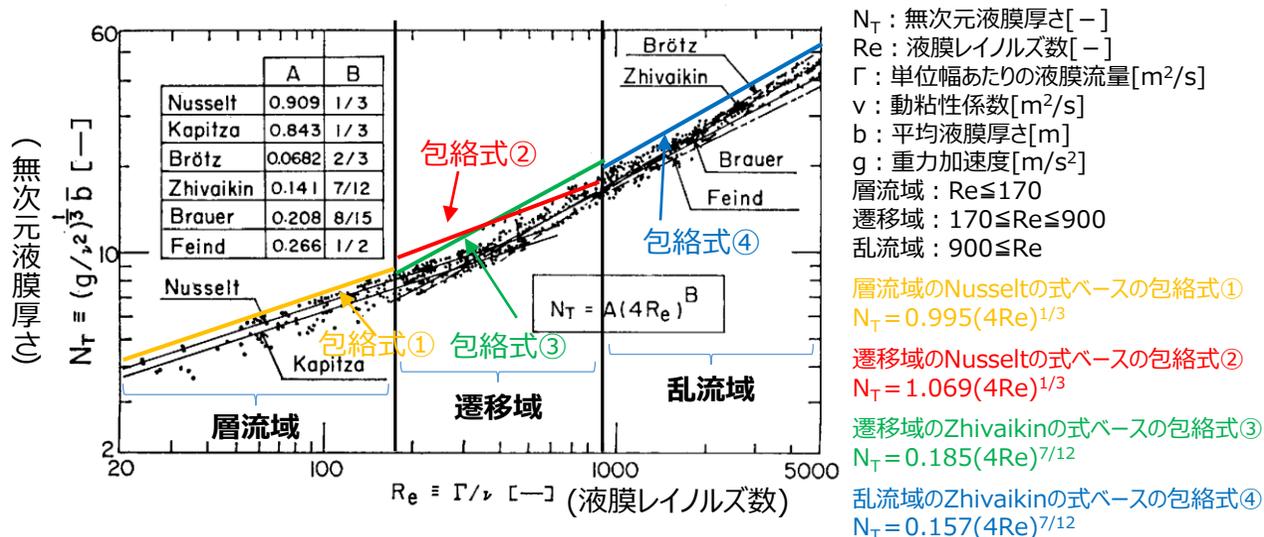
# 「液膜厚さの評価式」の設定（1）

## （基本ケース条件）（不確かさを含む条件）

液膜厚さが厚いほうが実効増倍率は高くなるため、実験結果を包含する評価式を設定する。

### 【説明】

- 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、右図※に示す実験データの全計測値を包含する評価式（包絡式）を設定する。
- 具体的には、代表的な実験式であるNusseltの式およびZhivaikinの式の傾き(右図のBの値)を保存し、各領域毎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に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できる。
- 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。  
(右の燃料棒模式図)



実態に則した条件  
(全燃料棒に実験式に基づく厚さの液膜が形成)

基本ケース条件  
(不確かさを含む条件)

※ 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

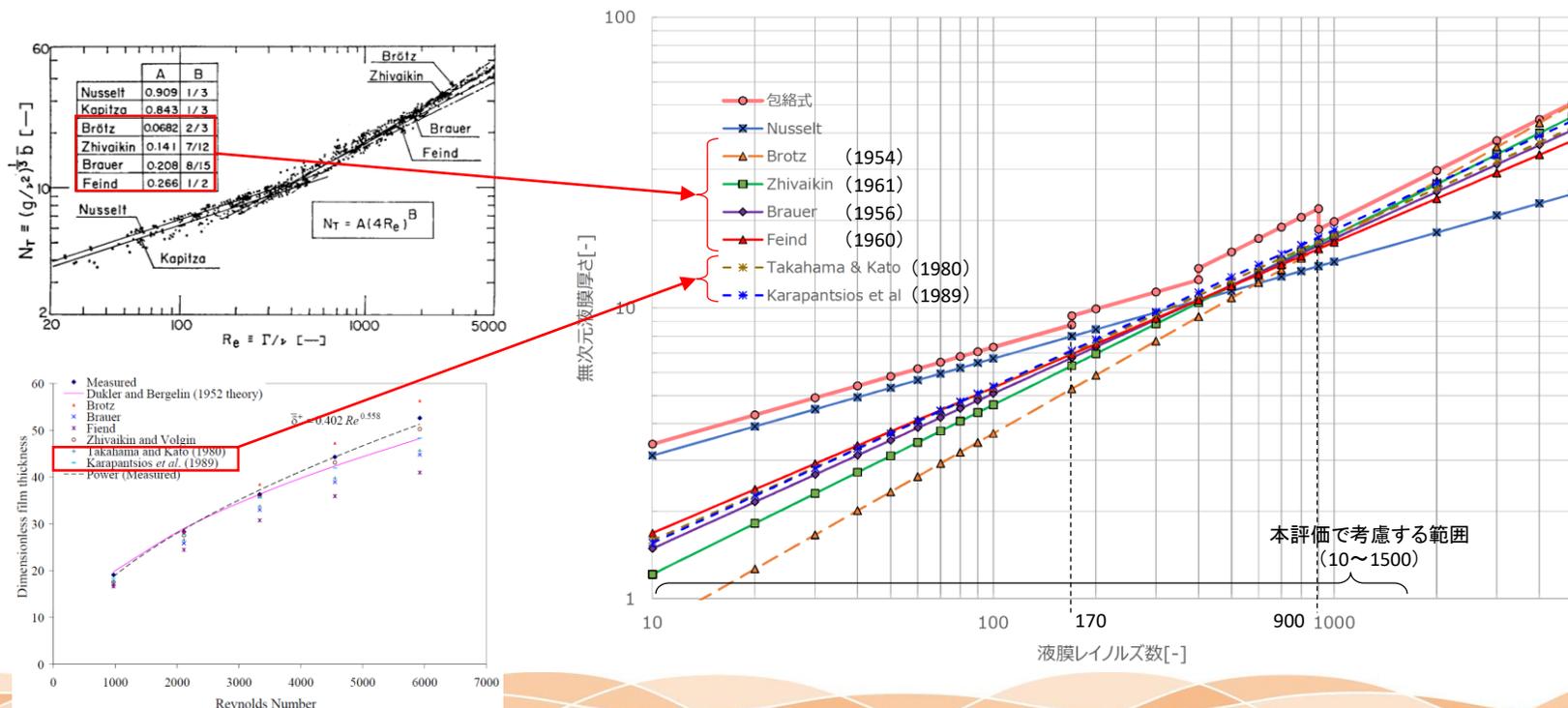
# 「液膜厚さの評価式」の設定（2）

(続 き)

・本評価において設定する不確かさを考慮した条件である包絡式は、各解析における液膜レイノルズ数の範囲（10～1500以下）において、比較的新しいTakahama and KatoおよびKarapantsiosらの液膜算出式を包絡している。

表 各解析ケースにおける液膜レイノルズ数

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



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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

# 「放水の液滴径」の設定（1）

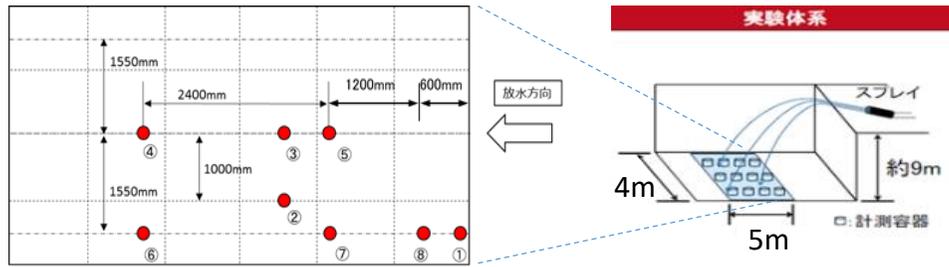
## （基本ケース条件）

スプレイヘッドを用いた液滴径データ取得試験で得られた平均液滴径（体積分率の50%出現値）を踏まえ、1.5mmを設定する。

## 【説明】

- 取得された液滴径の個数に対し、液滴径に応じた体積を乗じた体積分率で整理
- 全液滴径データより求まる体積分率の50%出現値は1.65～1.75mmであった。
- 液滴径が小さいほうが、液滴下降速度が小さくなり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。

## 試験概要

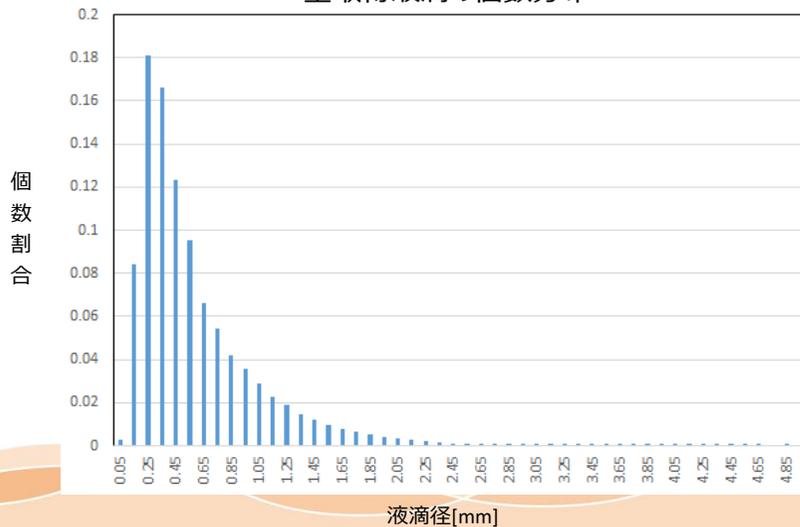


## 試験の様子

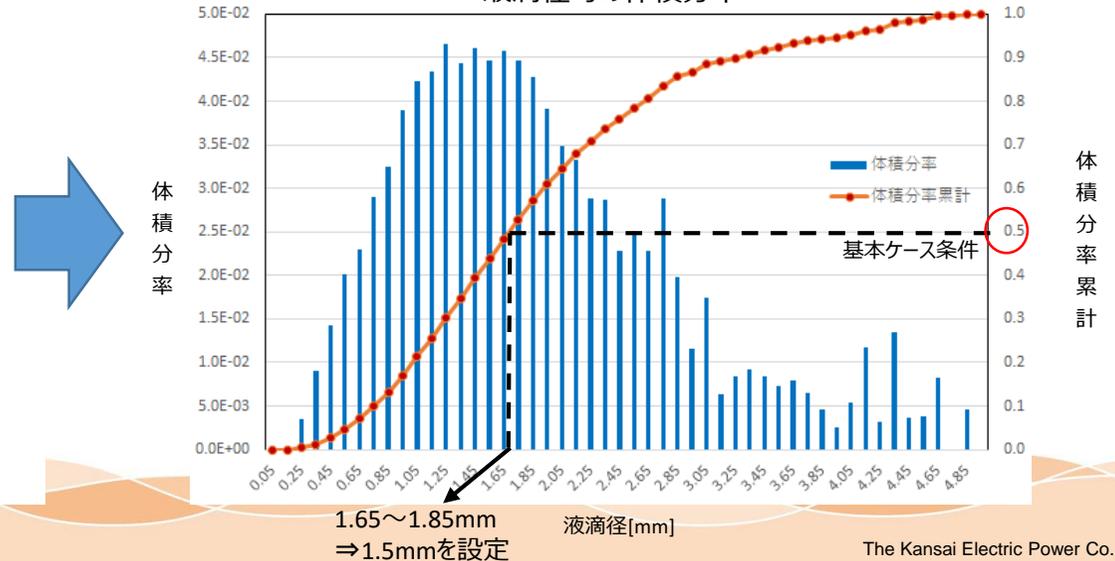


## 試験結果

### 全取得液滴の個数分布



### 液滴径毎の体積分率



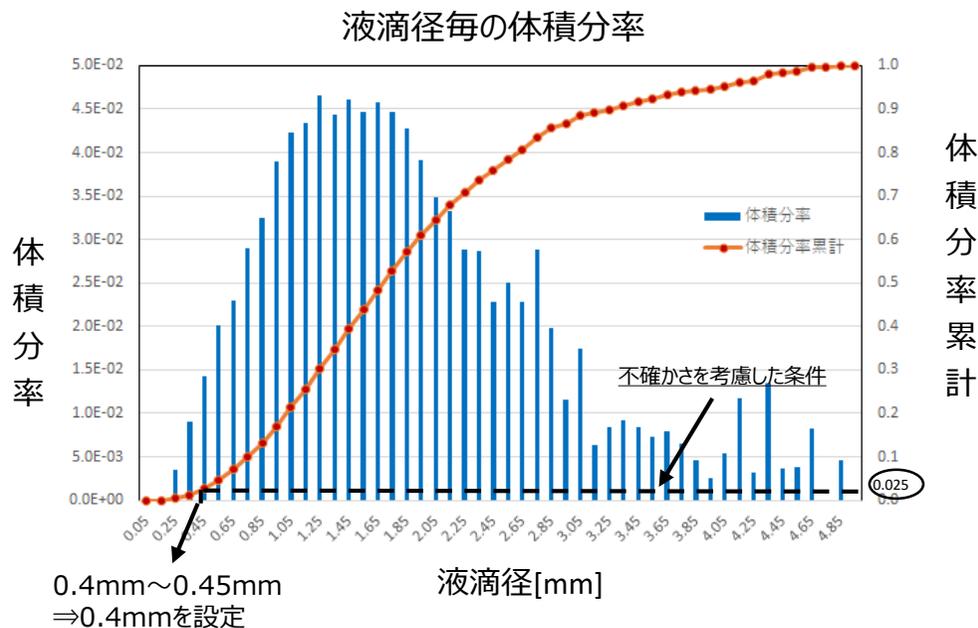
# 「放水の液滴径」の設定（2）

## （不確かさを考慮した条件）

放水の液滴径に対する不確かさの影響を確認するための条件として、体積分率における2.5%出現値を踏まえ、0.4mmとする。

### 【説明】

- ・ 放水の液滴径に対し考慮すべき不確かさは「スプレイ試験における測定箇所毎の結果の差異」であり、これらの影響を確認するための条件として、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）を踏まえ、0.4mmとする。
- ・ なお、流量の大部分を占める放水砲由来の液滴径にもスプレイヘッド由来の液滴を使用していることから、「放水砲 + スプレイヘッド」による放水の平均液滴径が0.4mmを下回ることは考え難い。



# 「海水中の塩素濃度」の設定

## (基本ケース条件) (不確かさを考慮した条件)

文献※の下限値3.3%を設定する。

### 【説明】

文献では3.3～3.8%とされているが、高浜発電所の塩分濃度最確値は定め難いことから、文献の下限値を設定する。

表 海水の塩分濃度および塩類組成

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

※ 岩波理化学辞典第5版 岩波書店、化学大辞典2 共立出版



## 前回会合コメントへの回答

### 前回会合における指摘事項

No.	指摘事項	会合日	備考
①	流量設定の根拠となる手順の種別（通常操作またはSA手順）について明記すること。	2021/4/15	-
②	基本ケース条件の流量はSA手順に基づき設定し、不確かさについては同じ手順内で想定されるものに限定すること。	2021/4/15	-
③	個別のFP核種が実効増倍率に与える影響度合いに応じて核種選定を検討すること。	2021/4/15	燃料配置を全て新燃料に変更したことにより、FP核種の考慮は不要となった。
④	燃焼計算コードPHOENIX-Pで求められた個々のFP核種の原子個数密度の妥当性を示すこと。	2021/4/15	

【コメントNo.1】 流量設定の根拠となる手順の種別（通常操作またはSA手順）について明記すること。

【コメントNo.2】 基本ケース条件の流量はSA手順に基づき設定し、不確かさについては同じ手順内で想定されるものに限定すること。

<回答>

- SFPへの注水・放水に係る手順の種別（通常時向け or 事故時対応向け）を下表に示す。
- 今回の未臨界性評価においては、SFPへの注水・放水に係る手順のうち**重大事故等対応のため整備している手順のみ**をもとに流量を設定する。

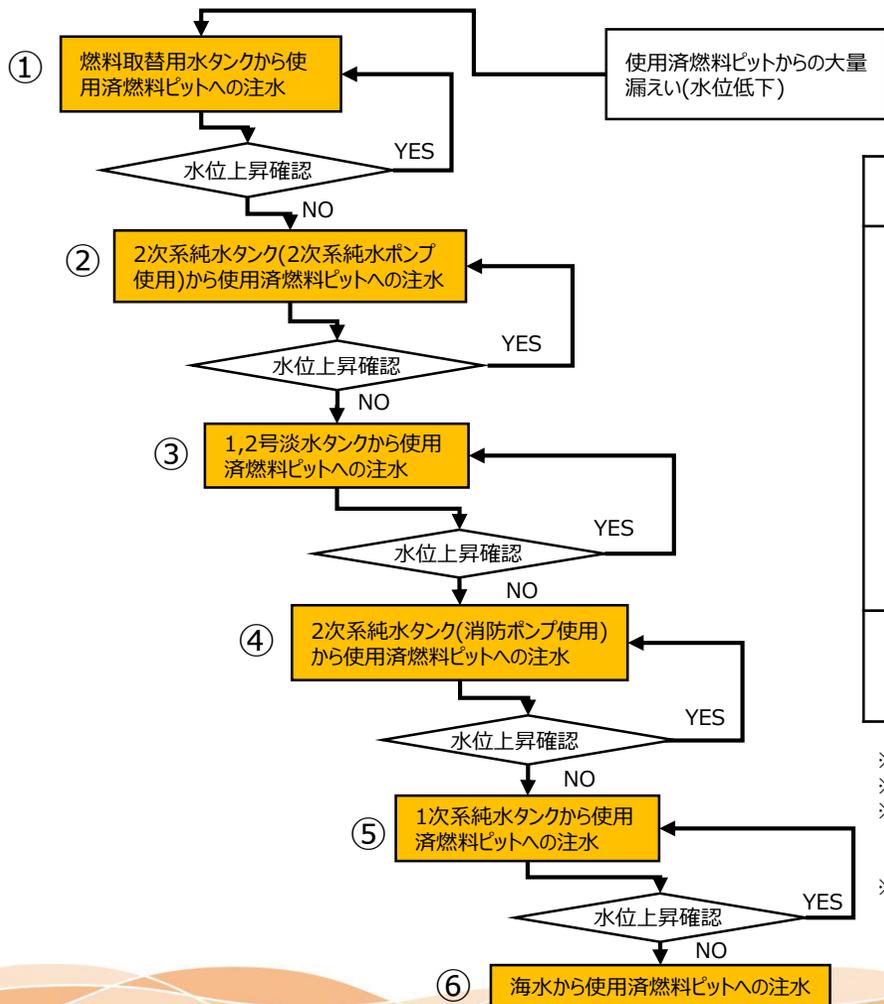


表 SFPへの注水・放水手順を整備している社内標準

	手順(ポンプ)	手順の種別	整備している社内標準	考慮要否
注水手順	① 燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)	重大事故等時対応向け	事故時操作所則	要
	②-1 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ) <sup>※1</sup>	通常時向け	通常操作所則	要
		重大事故等時対応向け	事故時操作所則	
	②-2 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ) (脱気塔を経由し、脱気水ポンプを使用)	通常時向け	通常操作所則	不要 <sup>※3</sup>
	③ 1,2号淡水タンク(消防ポンプ-消火栓)	重大事故等時対応向け	SA所達 <sup>※2</sup>	要
	④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	重大事故等時対応向け	SA所達	要
⑤ 1次系純水タンク(1次系純水ポンプ)	重大事故等時対応向け	SA所達	要	
放水 <sup>※4</sup> 手順	⑥ 海水(送水車)	重大事故等時対応向け	SA所達	要
	送水車によるスプレイ	重大事故等時対応向け	SA所達	要
	大容量ポンプ(放水砲用)による放水	重大事故等時対応向け	SA所達	要

※1 通常時向け及び事故時向け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 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

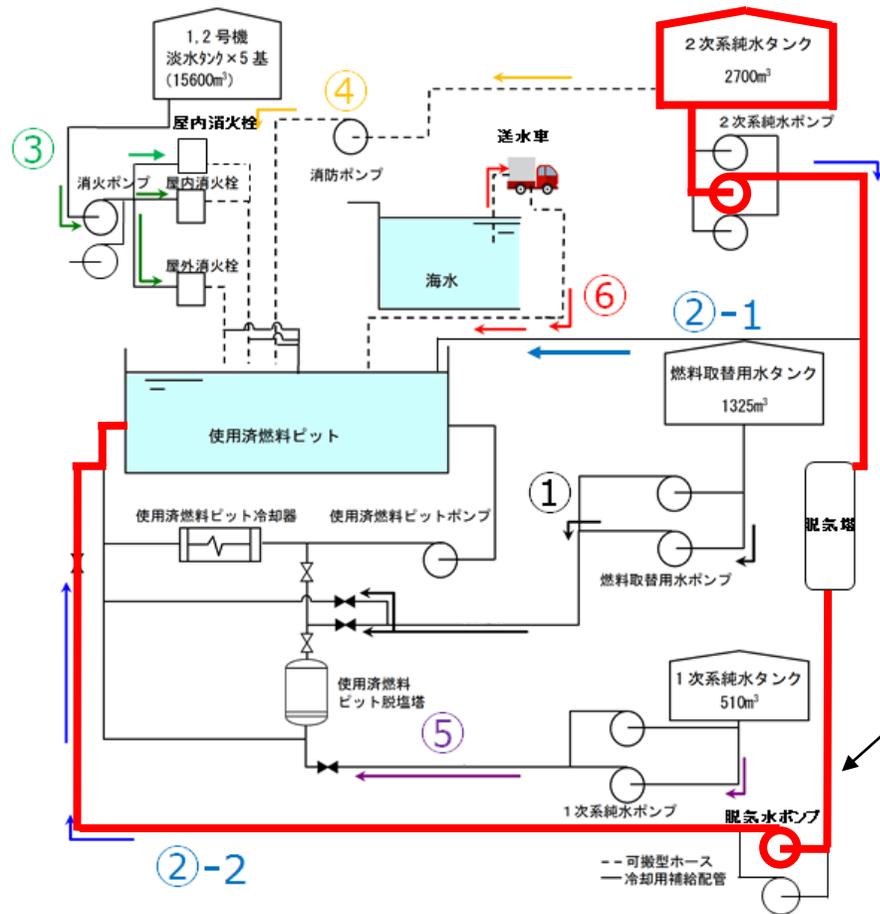
※3 手順②-2については、事故時向けに整備している手順書ではないこと、また通常運転時のSFP水の自然蒸散分を定期的に補給する際は手順②-1にて実施しており、手順②-2にて実施した実績が無いことから、今回未臨界性評価条件の流量条件としては考慮しない。

※4 大規模損壊時にSFPへ放水する手順として、これ以外に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、また当該手順を実施した場合における流量は「送水車によるスプレイ」手順を考慮した流量と同じであるため包絡されることとなる。

図 SFPへの注水に係る手順の実施フロー

【コメントNo.1】 流量設定の根拠となる手順の種別（通常操作またはSA手順）について明記すること。

【コメントNo.2】 基本ケース条件の流量はSA手順に基づき設定し、不確かさについては同じ手順内で想定されるものに限定すること。



手順②-2は考慮しない。

- 事故時操作手順ではない。
- 通常操作手順としても使用した実績が無い。

【コメントNo.1】 流量設定の根拠となる手順の種別（通常操作またはSA手順）について明記すること。

【コメントNo.2】 基本ケース条件の流量はSA手順に基づき設定し、不確かさについては同じ手順内で想定されるものに限定すること。

＜続き＞

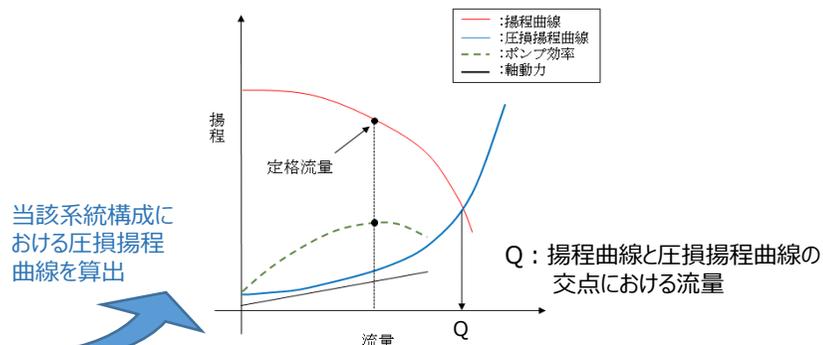
- 各手順の具体的な流量については、手順に示される設備・系統構成を前提とし、基本的にはポンプの揚程曲線と当該設備構成を踏まえた水頭差や配管圧損等により評価した圧損揚程曲線との交点における流量、もしくは設備の仕様制限から求まる流量を設定する。（送水実績がある手順は実測値を使用する。）

【燃料取替用水タンクからSFPへ注水時※1の例】

※1 他の注水手順についても、手順通りのラインナップを実施することにより系統構成が一意に決まるようになっている。



図 整備している手順に基づく系統構成（燃料取替用水タンクからの注水手順）



当該系統構成における圧損揚程曲線を算出

図 ポンプ揚程曲線を用いた流量の算出方法概略

【放水砲によるSFPへの放水時の例】

- 54条2項対応でSFPへ放水する手順の記載
  - 大容量ポンプ（放水砲用）を2台直列に接続すること
  - 放水砲は分岐器を用いて2台設置すること
  - SFPへ放水する際の放水砲使用台数は、SFPあたり1台とすること
- ⇒放水砲1台当たりの流量は、大容量ポンプ（放水砲用）の出口流量の半分となる。

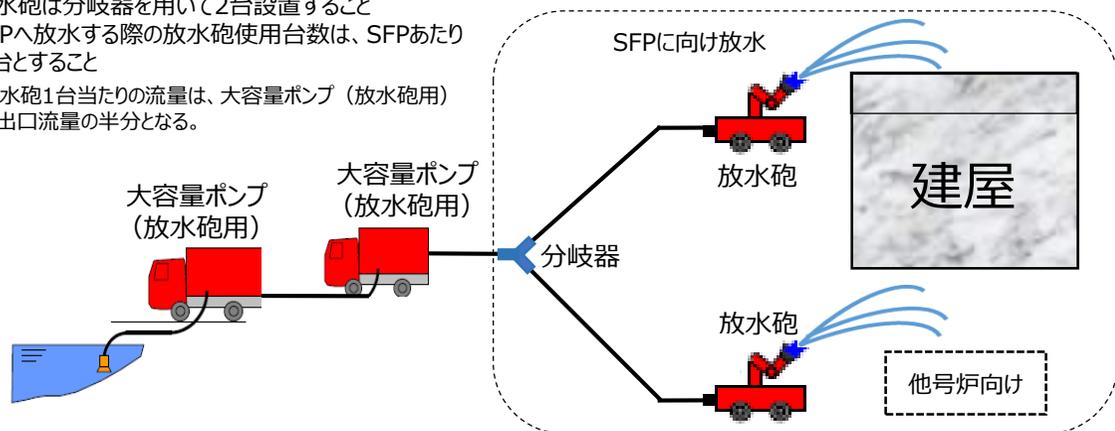


図 整備している手順に基づく系統構成（放水砲による放水手順）



図 大容量ポンプ（放水砲用）の揚程曲線（例）

【コメントNo.1】 流量設定の根拠となる手順の種別（通常操作またはSA手順）について明記すること。

【コメントNo.2】 基本ケース条件の流量はSA手順に基づき設定し、不確かさについては同じ手順内で想定されるものに限定すること。

＜続き＞

- 系統内ポンプの起動台数は、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のポンプが全数起動することを考慮する。**
- 流量設定の考え方を踏まえ、基本ケース条件には  m<sup>3</sup>/hを、不確かさを考慮した条件には  m<sup>3</sup>/hを設定する。

表 注水・放水設備による設定流量

手順(ポンプ)		基本ケース流量 (m <sup>3</sup> /h)	不確かさを考慮した流量 (m <sup>3</sup> /h)	根拠
注 水	① 燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)	21	21 (2台) ※1	ポンプ揚程曲線
	②-1 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ)	5	15 (3台)	実測値
	②-2 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ) (脱気塔を経由し、脱気水ポンプを使用)	— ※2	— ※2	— ※2
	③ 1,2号淡水タンク(消火ポンプ-消火栓)	22	132 (3か所※3×2台)	実測値
	④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	95	95	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	42 (2台) ※4	ポンプ揚程曲線
⑥ 海水(送水車)	260	260	ポンプ揚程曲線	
放 水	送水車によるスプレイ	<input type="text"/>	<input type="text"/>	スプレイヘッドの 仕様上限
	大容量ポンプ（放水砲用）による放水	<input type="text"/> ※5	<input type="text"/> ※5	大容量ポンプ (放水砲用) の仕様上限
合計		<input type="text"/>	<input type="text"/>	—

※1 系統上のオリフィスにより大きな圧損が生じるため、ポンプ起動台数を2台に増やしても流量への影響は軽微であった。

※2 通常操作の手順であるため考慮しない。

※3 系統数を単純倍した。

※4 系統途上で手順①と合流するため、合流点以降の圧損が大きく、ポンプ起動台数を2台に増やしても流量への影響は軽微であった。

※5 大容量ポンプ（放水砲用）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番目に容量の大きいポンプの直列を想定。律速となる低い方の流量（ m<sup>3</sup>/h）が各号炉に2等分されるとした。

---

<以下、参考>

# 審査における主な議論の経緯

## 参考 1

		既許可	2018.04 (初回申請) ~ 2019.11 (気相部に保守的な水密度を 一様に設定)	2019.12~2020.10 (SFPへ流入する最大流量 および流入水の液膜化の検討)	2020.11~2021.07 (最適評価手法 (BEPU) の導入)	今回 (燃料配置条件を新燃料敷き 詰めへ見直し)
主な変更内容		-	水密度条件および領域管理条件の変更	<ul style="list-style-type: none"> <li>SFPへ流入する最大流量を設定し、最大流量が局所に流入するとして条件で評価。</li> <li>燃料棒への液膜形成を考慮。</li> <li>燃料配置、燃焼度境界を変更。また海水中塩素の存在を考慮。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>流量等の各パラメータについて、BEPUに基づく基本ケース条件、不確かさを考慮した条件を設定。</li> <li>考慮するFP核種はSCALEコードによるベンチマーク実績のある核種に限定。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>不確かさを考慮した流量についても、手順書に基づく流量設定に変更</li> <li>新燃料敷き詰めに変更。</li> </ul>
燃料条件	領域管理	3領域(外周、中間、中心部)	2領域 (外周、中心部)	2領域 (チェッカーボード)	←	1領域 (新燃料敷き詰め)
	燃焼度区分	20,50GWd/t	20GWd/t	25GWd/t	24GWd/t	無 (新燃料で評価)
	FP核種	考慮あり から選定)	←	←	← (SCALEコードでのベンチマーク実績 がある核種のみ限定)	考慮不要 (新燃料組成で評価)
	中性子吸収体の考慮	考慮あり	考慮なし	←	←	←
水分条件	気相部のモデル	液相部・気相部に分けず、SFP全体が一様に0~1g/cm <sup>3</sup> に変化すると仮定し評価	液相部・気相部に分け、気相部については一様水密度0.04g/cm <sup>3</sup> で固定	燃料棒への液膜形成を考慮	←	←
	基本ケース水量			□ (最大流量)	□	□
	不確かさを考慮した流量	-	-	-	□	□
	参考ケース (大規模損壊時) の流量			-	□ (手順書にはない2台目の放水砲による放水を仮定)	-
	水質	純水	←	海水中塩素の存在を考慮	←	←
当社説明		-	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験等により得られた知見を踏まえ大きな保守性・裕度をもった水密度を気相部全体に一律で設定した。</li> <li>燃料棒周りに液膜が形成されることによる未臨界性への影響は、水密度の設定値が有する裕度に包含されるとした。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最大流量が局所領域に集中する等、非常に厳しい条件を設定した解析ケースでもって未臨界性を説明した。</li> <li>考慮するFP核種は、既許可と同様の保守的な考え方で選定する設定とした。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>BEPUに基づく評価条件設定方針を策定した。</li> <li>流量の不確かさを考慮した条件設定では、手順書に記載のない内容まで取り込んだ厳しい条件とした。</li> <li>燃焼計算コード (PHOENIX-P) による燃焼計算精度について、他コードを用いた精度比較や実炉心設計結果との比較等により示した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>手順書に基づく流量へ見直した結果、新燃料敷き詰めを仮定した条件で未臨界が維持できる見通しを得た。</li> <li>上述の変更により、燃焼に伴う諸条件の設定を不要とした。</li> </ul>
NRA殿の主なコメント		-	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料棒周りへの液膜形成については評価条件として設定すべきである。</li> <li>発電所にある設備を用いた場合にSFPへ流入しうる最大流量が、局所領域に流入した場合における未臨界性を確認する必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>本件がSA評価であることを踏まえ、最適評価手法(BEPU)に基づく評価へ見直すべきである。</li> <li>考量するFP核種は、SCALEコードによるベンチマーク実績があるものに限定すべきである。</li> <li>燃焼度区分について、燃焼度計算が有する誤差を解析側と運用側のどちらで担保するか整理する必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>設定方針自体は妥当であるが、その方針に則った条件設定がなされているかが重要である。</li> <li>手順書に記載のない内容まで取り込む必要はなく、他のSA有効性評価 (事故時手順に記載される事項を前提に不確かさを設定) との関連を踏まえ、不確かさを考慮した条件について再度検討が必要である。</li> <li>PHOENIX-Pコードでも、評価上考慮する個々の核種に対する計算精度を確認すべきで、PIE結果との比較等により適用性を確認する必要がある。</li> </ul>	

不確かさの影響を確認する感度解析ケースのうち、燃料領域に存在する減速材の量が最も多く、実効増倍率が最大になると考えられるケース②（流入範囲を局所としたケース）でも、新燃料敷き詰め条件において実効増倍率は判定基準を満足できる見通しを得ている。

<解析条件>

表 流入範囲を局所としたケース（ケース②）の解析条件

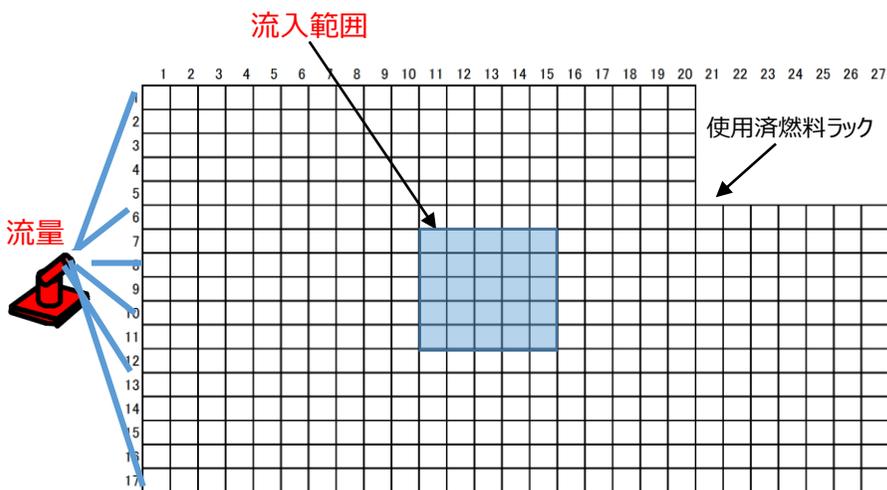
燃料条件	燃料配置		新燃料敷き詰め	
水分条件	流量 [m <sup>3</sup> /h]			
	SFPへの流入範囲、流量分布	流入範囲	局所 (3×3ラックから、実効増倍率の低下傾向が確認できる範囲まで)	
		流入分布	一様	
	燃料集合体内への流入割合 [%]		23	
	液膜厚さ	集合体内へ流入した流量のうち液膜となる流量割合 [%]	100	
		液膜厚さ評価式	包絡式	
	気相部水密度 (放水の液滴径等)	範囲内 流入	集合体内へ流入した流量のうち液滴のまま落下する流量割合 [%]	0
			燃料集合体内 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.0006(飽和蒸気密度)
			燃料集合体外 [g/cm <sup>3</sup> ]	液滴径を1.5mmとした水密度
		流入範囲外 [g/cm <sup>3</sup> ]		0.0006(飽和蒸気密度)

(続 き)

表 流入範囲を局所としたケース (ケース②) の解析条件 (臨界計算コードへのインプット)

燃料条件	燃料配置条件		新燃料敷き詰め (有限体系)		
	燃料種類		15×15型 通常ウラン燃料 ( $^{235}\text{U}$ 初期濃縮度: <input type="text"/> wt%, ペレット密度: 97%)		
	燃料有効長 [mm]		3,660		
	燃焼に伴う諸条件 (燃焼度、AC/FP核種組成)		-		
水分条件	流入範囲 (N×Nラック)		3×3	4×4	5×5
	液膜厚さ [mm]				
	水気相密度部	燃料集合体内 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.0006		
		燃料集合体外* [g/cm <sup>3</sup> ]			
	局所集中範囲外水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]		0.0006		

※ 淡水由来の流入水による水密度を「純水」、海水由来の流入水より求まる水密度を「海水」と記載



〔 赤字 : 今回設定を検討するパラメータ  
青字 : 臨界計算コードへのインプットとなるパラメータ 〕

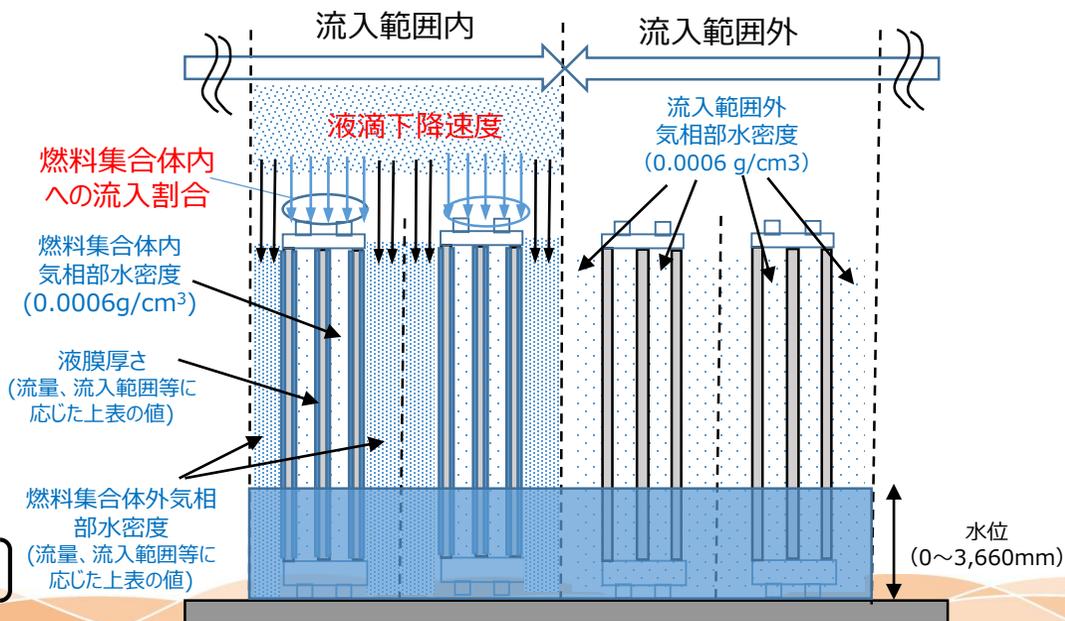


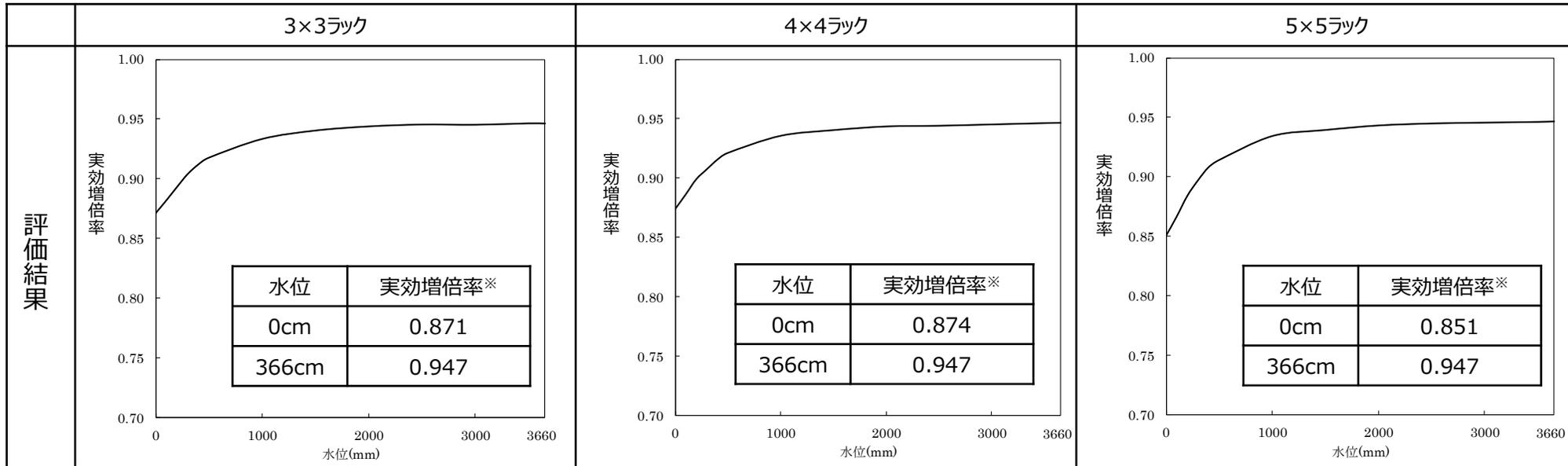
図 臨界計算コードへのインプットとなる水分条件 概要

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。

(続 き)

<評価結果>

実効増倍率は、製造公差等の不確定性として0.02を見込んだとしても、判定基準 (0.98以下) を満足する。



※ 製造公差等による不確定性を考慮しない値

図 評価結果

(続 き)

## <考 察>

- 水位0cmでの実効増倍率は4×4ラックで最大となった。
- 放水範囲が広がるにつれて、以下の相反する効果により、低水位時の実効増倍率はある局所範囲でピークを持つ。
  - ① 放水範囲に含まれる燃料集合体の数（ウラン量）が増える。 ⇒ 実効増倍率が増加
  - ② 燃料集合体1体あたりに流入する水量（減速材）が減る。 ⇒ 実効増倍率が低下
- ピークとなった局所範囲より大きな範囲に放水される場合、①の効果よりも②の効果の方がさらに大きくなるため、放水範囲が広がるにつれ実効増倍率は単調に減少する。

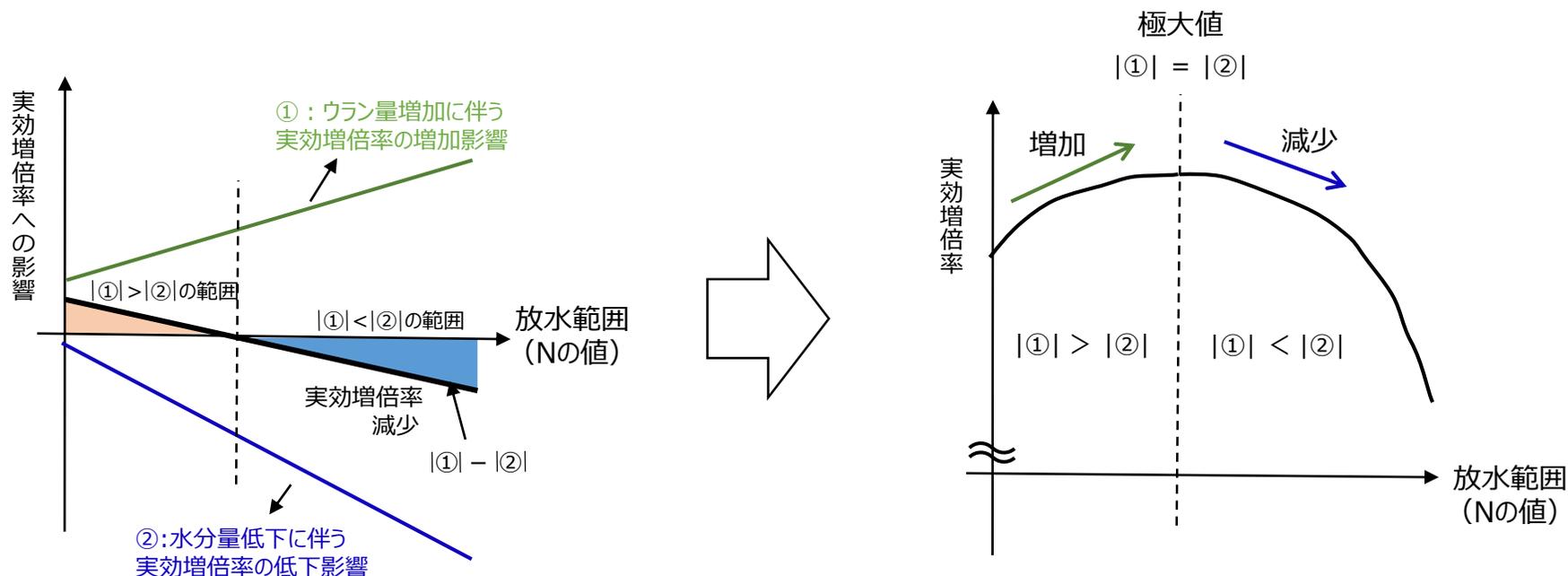
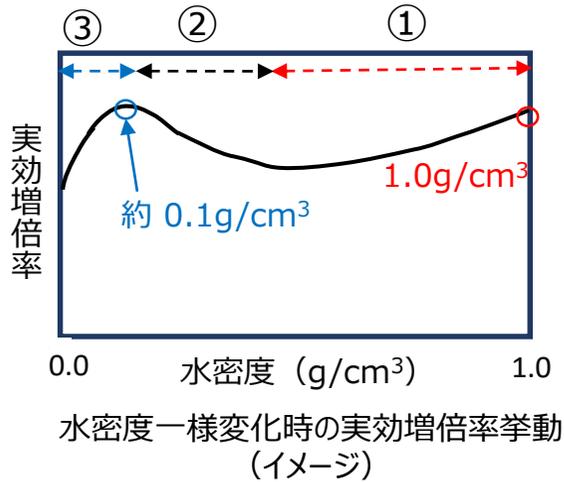


図 放水範囲 (Nの値) の変化に伴う実効増倍率挙動 概念図

既許可と今回評価において、それぞれ水密度および水位を変化させた場合の実効増倍率の傾向について以下に示す。

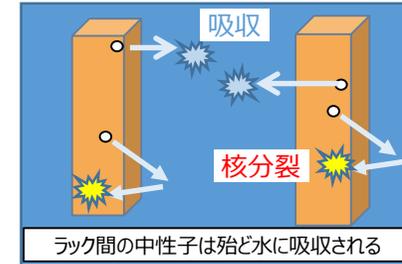
**（既許可）**

水密度一様変化における実効増倍率の傾向



**【①高水密度領域】**

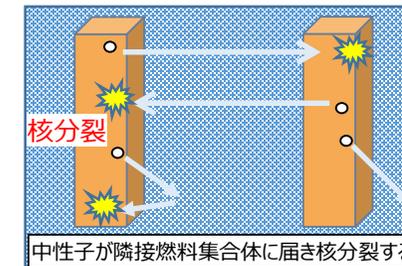
燃料集合体領域を飛び出した中性子はラック間の水に吸収されやすいため、単一集合体内の減速材の影響が支配的となり、水密度低下に伴い実効増倍率は減少する。



高水密度領域での中性子挙動  
（①）

**【②中水密度領域】**

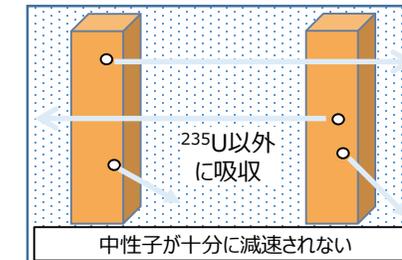
隣接する燃料へ中性子が到達し、隣接燃料で反応する中性子数が増えるため、水密度低下に伴い実効増倍率は増加する。



中水密度領域での中性子挙動  
（②）

**【③低水密度領域】**

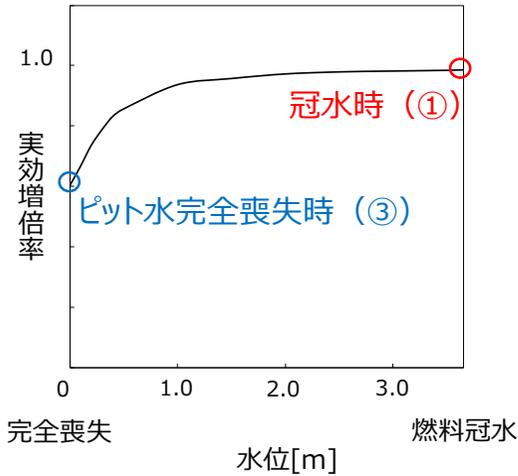
減速材密度が低すぎることから、核分裂数が減少する効果が大きくなるため、水密度低下に伴い実効増倍率は減少する。



低水密度領域での中性子挙動  
（③）

## （今回評価）

液膜モデルでの水位変化における実効増倍率の傾向

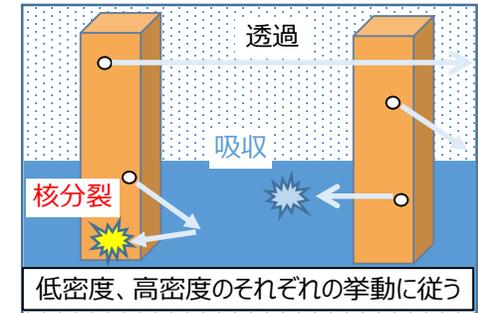


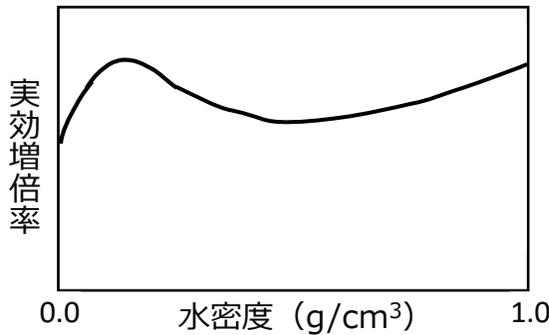
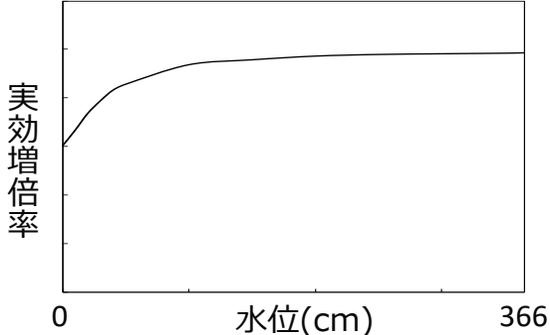
水位変化時の実効増倍率挙動（基本ケース）  
（イメージ）

### 【液膜モデルにおける気相部・液相部の状態】

- 気相部、液相部それぞれで、前ページの高水密度領域①、低水密度領域③の挙動を示すことから、中水密度領域②のような、体系全体として実効増倍率が高くなる状態にはならない。
- 水位が低下すると、高水密度領域①の体積が減少し、低水密度領域③の体積が増加する。
- 今回設定する基本ケースおよび不確かさケースにおける評価条件では、気相部よりも液相部となっているほうが実効増倍率が厳しくなるため、水位が低下し液相部領域が少なくなるに従い、体系の実効増倍率は低下する。

2相領域における各相での中性子挙動(①,③)



	既許可の評価	今回の評価
水密度条件	SFP全体を一様に変化 0.0~1.0g/cm <sup>3</sup>	気相部・液相部に分け、水位を変化 気相部：基本ケース、感度解析ケースに基づく条件 液相部：1.0 g/cm <sup>3</sup> （固定値）
体系のモデル	水密度一様モデル	液膜モデル
変化するパラメータ	水密度	水位
減速材の相数	1相	2相
中性子の挙動	水密度の変化に応じて、中性子挙動が変わる。	水位が変化しても各相の体積が変わるのみで、気相部・液相部における中性子挙動は変わらない。
実効増倍率	中性子の減速・吸収の効果に応じて変化し、約0.1g/cm <sup>3</sup> でピークを持つ。 	中性子挙動が変化する体系状態の変化が各相内で発生しないことから、既許可のようなピークを持たない。 



今回採用する液膜モデルの妥当性や、燃料条件が有する保守性等を確認するため、以下のパラメータスタディを行う。

番号	パラスタの対象	目的
①	燃料条件	燃焼燃料やGd入り燃料の存在を考慮しない等とする基本ケースでの燃料条件が有する保守性を確認する。
②	既許可と異なる条件	既許可評価からの燃料条件・水分条件それぞれの変更に伴う実効増倍率への影響を確認する。
③	流量	不連続な実効増倍率のピークが発生しないことでもって、液膜モデルの妥当性を確認する。
④-1	液膜厚さ	液膜モデルが適用可能となる範囲を確認する。
④-2	燃料集合体内気相部水密度	

## 設定条件やモデルの妥当性を確認するパラメータスタディ（2）

### ① 燃料条件に対するパラメータスタディ（目的：燃料条件が有する保守性確認）

- 基本ケースの燃料条件は、SFP内に実際に存在する内挿物を無視し、Gd入りウラン燃料をより反応度の高い通常ウラン燃料に置き換える等、保守的な条件を設定している。  
下表のとおりこれら燃料条件に対しパラスタシ、燃料条件が保守的であることを確認した。
- 今後、水位を変化させる、または燃焼度を変化させる等、より体系的に条件を変え解析し、これら条件が有する保守性を確認する。

□：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		
評価条件	内挿物	①考慮なし	②BP挿入を考慮	考慮なし		考慮なし		
	燃料種類	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	
	燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP無限体系)			新燃料敷き詰め (SFP無限体系)		①新燃料敷き詰め (SFP有限体系)	②新燃料と25GWd/t 燃焼燃料のチェッカーボード配置 (SFP有限体系)
	水分条件	冠水			冠水		冠水	
評価結果								

※1 BPについては使用状態により中性子吸収効果が異なるため、吸収材を無視し構造材のみを考慮した評価にて代表。

※2 構造材による中性子吸収効果および水排除効果により、反応度が低下。

設定条件やモデルの妥当性を確認するパラメータスタディ (3)

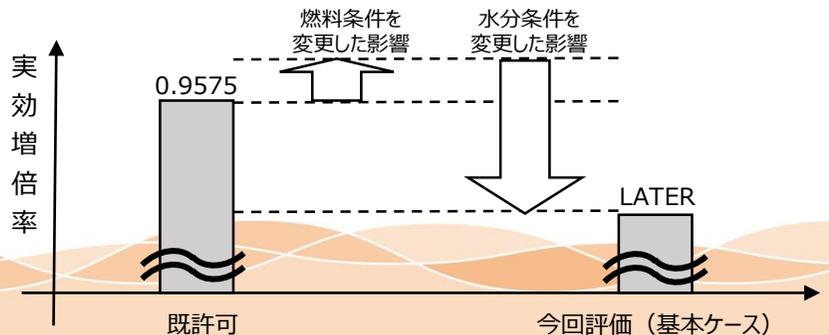
(2) 既許可と異なる条件に対するパラメータスタディ (目的: 評価モデルの違いによる実効増倍率への影響確認)

- ・ 今回評価 (基本ケース) の特徴
  - 燃料条件について、燃料運用上の制限を減らすため既許可よりも厳しい条件 (新燃料敷き詰め) とした。
  - 水分条件について、液膜形成の考慮など実効増倍率をより高める評価モデルとしたうえで、新たに取得した試験データ等の知見および最適評価手法を用い、流量の精緻化やマスバランスなどを考慮し条件を見直した。
- ・ 燃料条件と水分条件の変更に伴う実効増倍率への影響について、燃料・水分条件の片方を固定し、もう片方を変化させた場合の実効増倍率の差により確認する。

赤字: 実効増倍率の増加要因

		既許可	基本ケース条件
燃料条件	燃料タイプ	15×15型 通常ウラン燃料 (Gd入り燃料の存在は考慮しない。)	←
	<sup>235</sup> U濃縮度	□ wt%	←
	燃料有効長	3,660 mm	←
	燃料配置	燃料の燃焼度や中性子吸収体挿入の有無に応じた3領域管理	<b>新燃料敷き詰め (中性子吸収体は考慮しない。)</b>
	AC/FP核種の考慮		<b>考慮なし (新燃料敷き詰めのため)</b>
水分条件	評価モデル	<b>SFP全体の水密度を一律として全ての 水密度範囲(0~1g/cm<sup>3</sup>)で評価するモデル</b>	流入水の流量や性状 (液膜化) を踏まえた水密度を設定するモデル
		(流入水による燃料棒上の液膜形成を考慮しないモデル)	<b>(流入水が燃料棒上で液膜となることを考慮したモデル)</b>
	SFPへの流入流量 等	<b>概念なし</b>	流量: □ m <sup>3</sup> /h (その他、水分条件算出のための条件を設定)
	流入海水中の塩素	<b>考慮なし</b>	考慮あり
最適減速 or 低水位時の実効増倍率*		0.9575	LATER

※ 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。

③ 流量に対するパラメータスタディ（目的：液膜モデルの妥当性確認）

- 液膜モデルの採用に当たり解析結果の妥当性を確認するため、今後、流量に対するパラメータスタディを行い、実効増倍率に不連続なピークが発生しないことを確認する。

流量を変数とすることで、未臨界性評価で設定する水分条件のうち実効増倍率に大きく寄与する条件である、以下2点の条件が変化するため、モデル内の水分状態変化に伴う実効増倍率挙動を確認するための変数として適している。

- 【1】集合体内の水分量
- 【2】燃料集合体外気相部水密度

- なお流量以外の条件は、解析条件表に掲載のケースのうち実効増倍率が最も厳しくなると想定されるケース②の条件とする。

表 解析結果の妥当性を確認するためのパラメータスタディ

評価条件		(参考) ケース②	パラスタ条件		
燃料条件		SFPは燃料で満杯、貯蔵燃料は新燃料のみ	←		
水分条件	流量(m <sup>3</sup> /h)	□	X (パラスタ)		
	SFPへの 流入範囲、 流量分布	流入範囲	局所 (3×3から始め、低下傾向が確認できるまで)	ケース②で実効増倍率 が最大となる範囲	
		流量分布	一定	←	
	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 (g/cm <sup>3</sup> )	0.0006	←
		燃料集合体外(g/cm <sup>3</sup> )	液滴径1.5mmの液滴の 下降速度を使用した水密度	←	
		流入範囲外(g/cm <sup>3</sup> )	0.0006	←	
海水中の塩分濃度(%)		3.3	←		

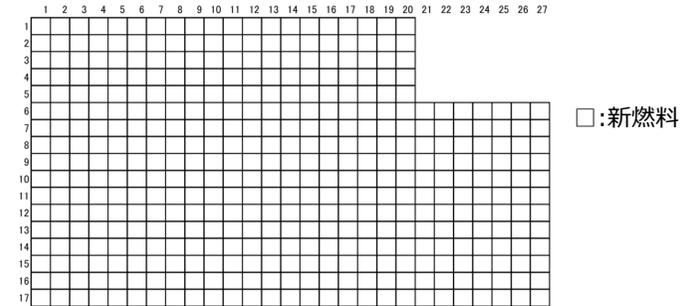


図 燃料配置条件



図 パラスタ結果

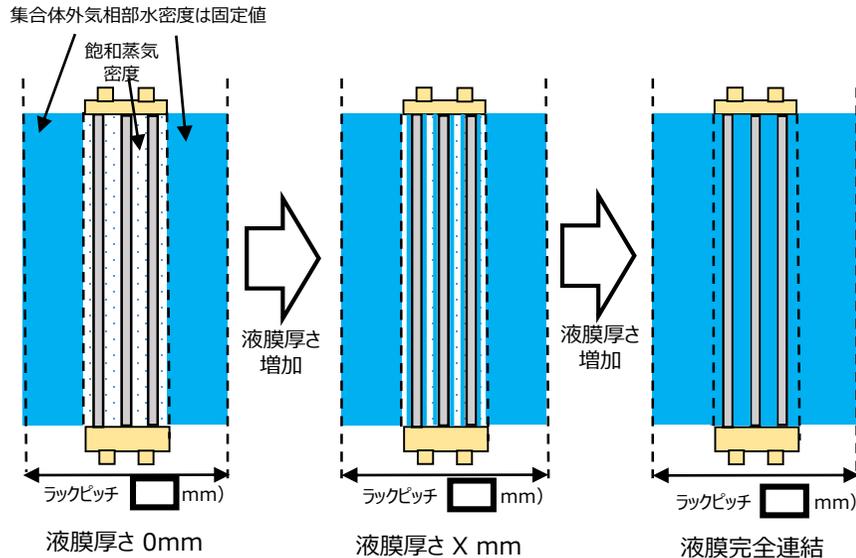
④ 液膜厚さ および 燃料集合体外気相部水密度に対するパラメータスタディ（目的：液膜モデルの適用範囲確認）

液膜モデルを採用するに当たり、SCALEコードがモデルとして考慮できない範囲がないかを確認するため、以下のパラメータスタディを行い不連続な実効増倍率が生じないことを確認する。

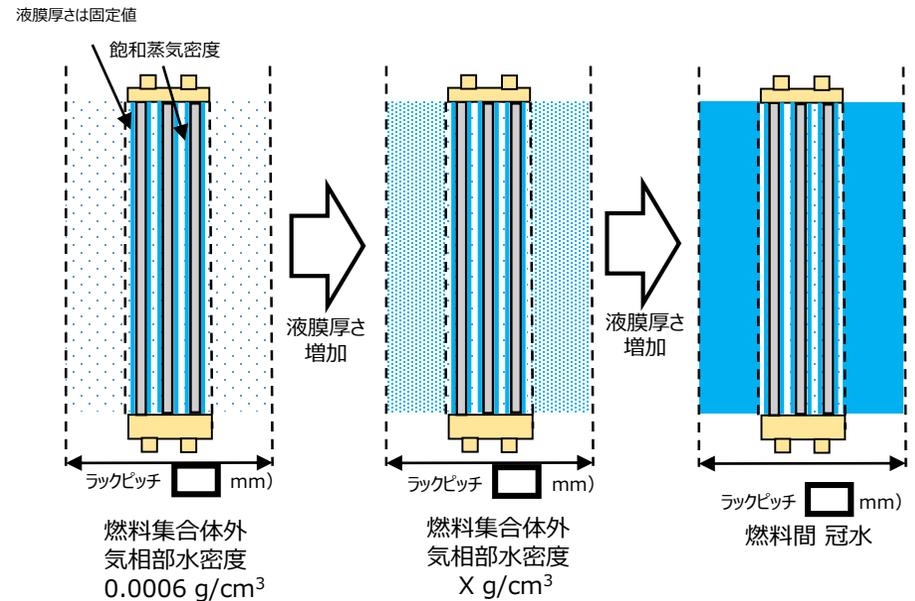
＜液膜モデルの妥当性確認解析＞

新燃料敷き詰め有限体系にて、「燃料集合体外気相部水密度を固定し、液膜厚さを变化させたパラメータスタディ」（パラスタ④-1）と、「液膜厚さを固定し、燃料集合体外気相部水密度を变化させたパラメータスタディ」（パラスタ④-2）を行う。

パラスタ④-1のイメージ



パラスタ④-2のイメージ



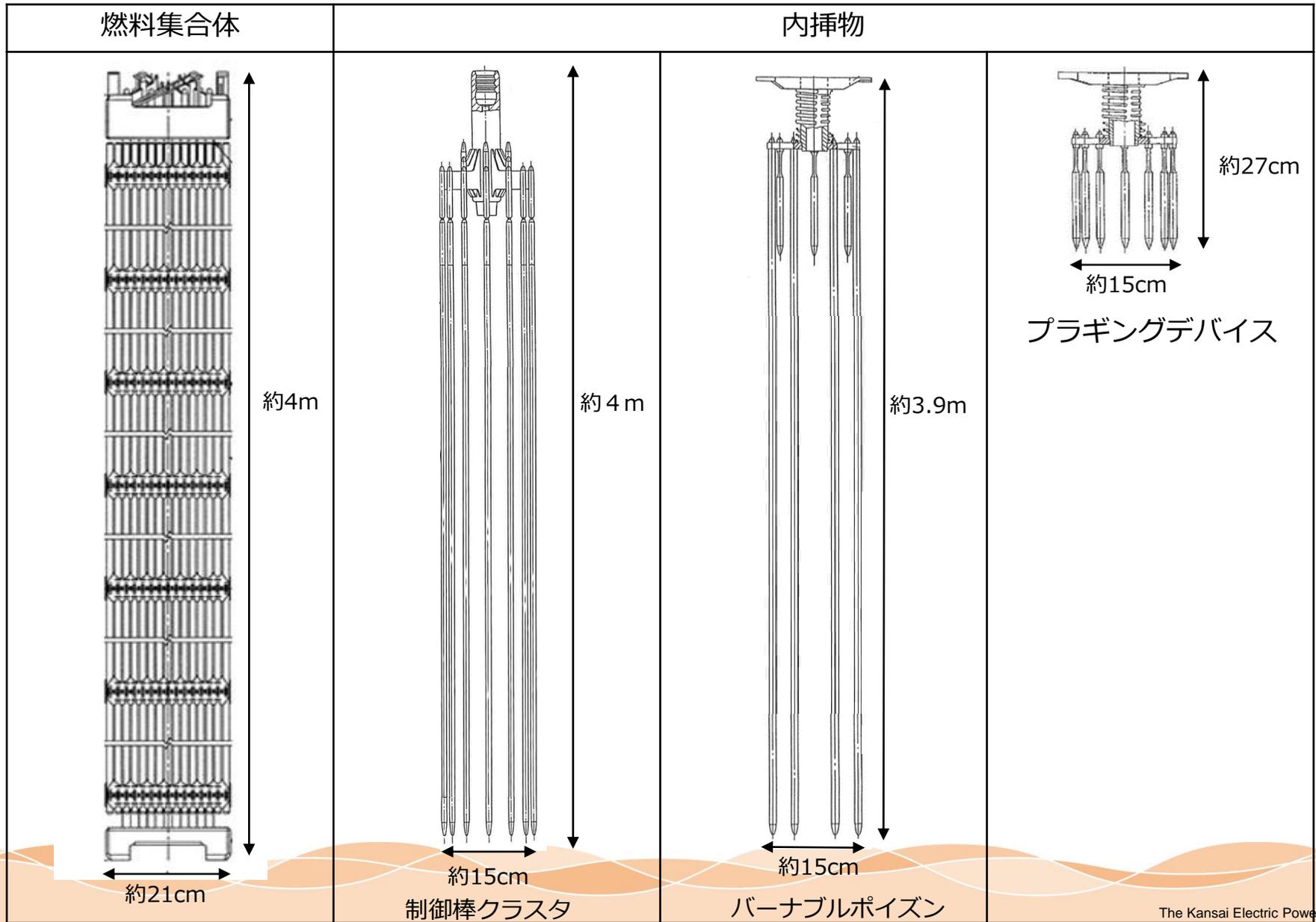
**（SFPラック内での内挿物保管状況について）**

SFPラック内に保管中の大部分の燃料には内挿物が挿入されている。  
内挿物の種別としては、プラグングデバイスと制御棒クラスタが大半を占めている。

SFPラック内の内挿物保管状況

項目	高浜 1 号炉	高浜 2 号炉										
配置図												
	<p>【燃焼度 (BU)凡例】 0 : BU&lt;10、 10 : 10≦BU&lt;20、 20 : 20≦BU&lt;30、 30 : 30≦BU&lt;40、 40 : 40≦BU (GWd/t)</p> <p>【内挿物凡例】 □ : プラギングデバイス、 ○ : 制御棒クラスタ、 △ : バーナブルポイズン</p>											
燃料集合体 (うちGd入り燃料集合体)	299体 (196体)	258体 (133体)										
燃焼度(GWd/t)別 内訳	<table border="1"> <tr> <td>BU&lt;10 56体</td> <td>10≦BU&lt;20 58体</td> <td>20≦BU&lt;30 26体</td> <td>30≦BU&lt;40 119体</td> <td>40&lt;BU 40体</td> </tr> </table>	BU<10 56体	10≦BU<20 58体	20≦BU<30 26体	30≦BU<40 119体	40<BU 40体	<table border="1"> <tr> <td>BU&lt;10 44体</td> <td>10≦BU&lt;20 45体</td> <td>20≦BU&lt;30 39体</td> <td>30≦BU&lt;40 87体</td> <td>40&lt;BU 43体</td> </tr> </table>	BU<10 44体	10≦BU<20 45体	20≦BU<30 39体	30≦BU<40 87体	40<BU 43体
BU<10 56体	10≦BU<20 58体	20≦BU<30 26体	30≦BU<40 119体	40<BU 40体								
BU<10 44体	10≦BU<20 45体	20≦BU<30 39体	30≦BU<40 87体	40<BU 43体								
プラグングデバイス	164体											
制御棒クラスタ	114体											
バーナブルポイズン	8体											
	120体											
	113体											
	16体											

（内挿物の概要）



# 実運用において領域管理を取り除くことによる効果（1）

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）をシミュレーションする。なお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】

中性子吸収体を考慮した3領域管理の場合 (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、事前の燃料等の移動が必要)

- 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]
- ②RCC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

所要ステップ数：燃料移動2回、内挿物移動2回

貯蔵容量  
 領域A：73体  
 領域B：126体  
 領域C：225体

配置制限なしの場合

- ①空ラックに新燃料を沈め込み

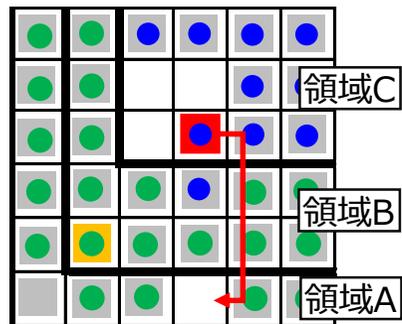
所要ステップ数：燃料移動1回、内挿物移動0回

凡例  
 燃料：■ ■ ■  
 PD：● ● ●  
 RCC：● ● ●

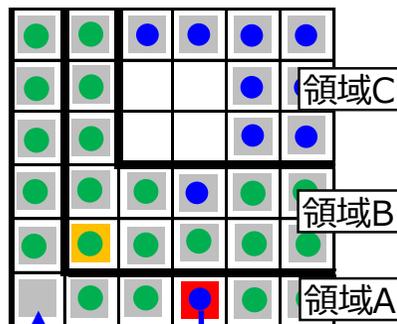
【内挿物の交換作業（PDとRCCの入れ替え1回）】

中性子吸収体を考慮した3領域管理の場合

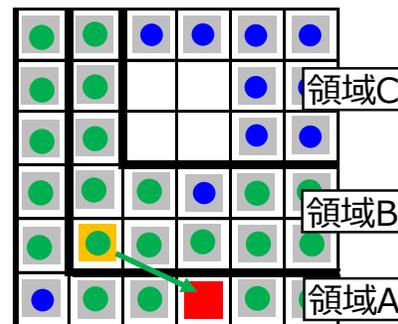
（ ■ 燃料に挿入されているRCCと ■ 燃料に挿入されているPDを交換）



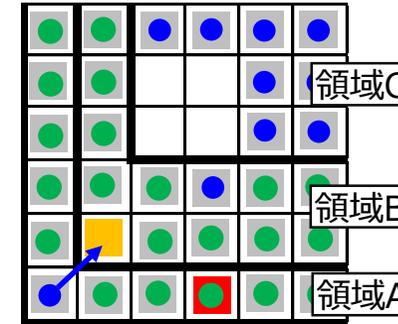
①領域Cの燃料を領域Aへ移動 [燃料移動]



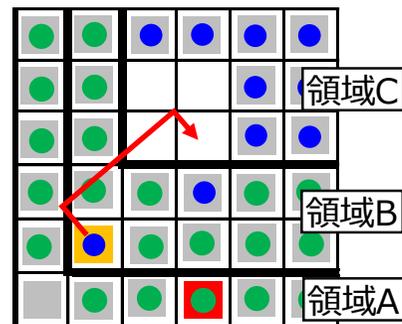
②領域A内燃料のRCCを引抜き内挿物のない燃料へ挿入 [内挿物移動]



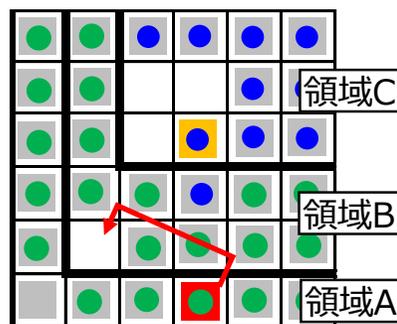
③PDを引抜き、移動させる燃料へ挿入 [内挿物移動]



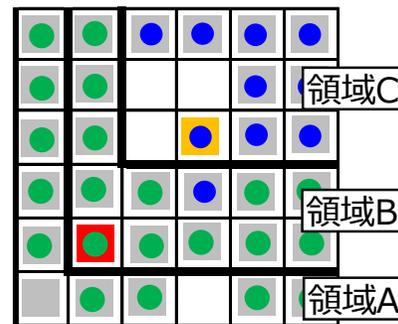
④RCCを引き抜き、移動させる燃料へ挿入 [内挿物移動]



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

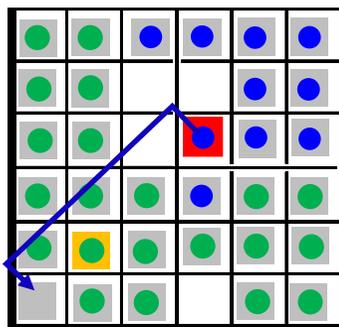
所要ステップ数：燃料移動3回、内挿物移動3回

【内挿物の交換を行う場合（続き）】

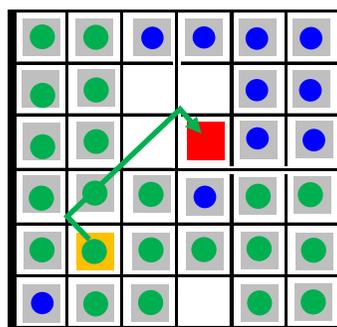
配置制限なしの場合

（ ■燃料に挿入されているRCCと ■燃料に挿入されているPDを交換）

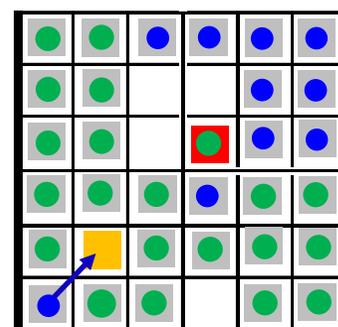
凡例	
燃料	■ ■ ■
PD	●
RCC	●



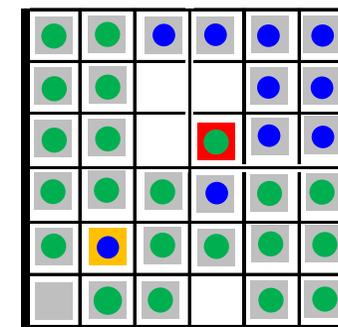
①PD挿入予定の燃料からRCCを移動 [内挿物移動]



②RCCを抜いた燃料にPDを挿入 [内挿物移動]



③PDを抜いた燃料にRCCを挿入 [内挿物移動]



④PD⇔RCC移動完了

所要ステップ数：燃料移動0回、内挿物移動3回

貯蔵容量  
領域A：201体  
領域B：223体

PD：プラグングデバイス、RCC：制御棒

PWRでの燃料取替に係る工程は下図のようになり、原子炉停止後に炉内の燃料全数をSFPへ一旦取り出し、所定の検査等を実施したのち、次サイクル運転に必要な新燃料をSFPへ沈めこむ。

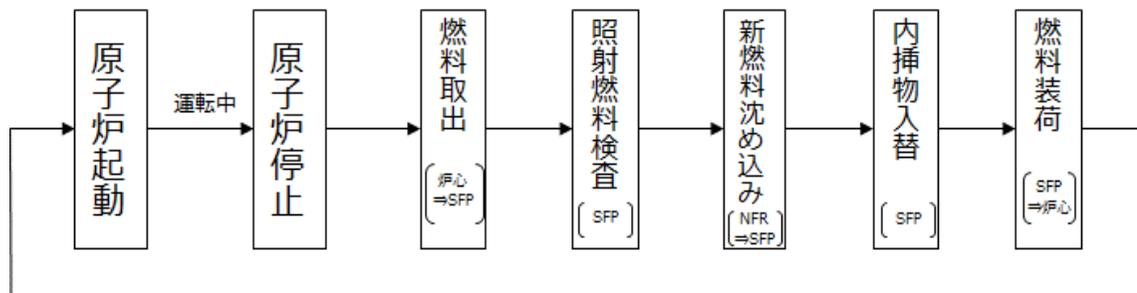


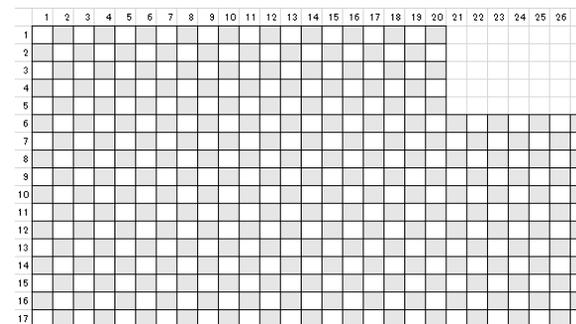
図 PWRでの燃料取替に係る工程

次項より、燃料取出し～新燃料沈め込みまでの工程で、配置制限（新燃料と25GWd/t燃焼燃料のチェッカー配置）がある場合と、配置制限がない場合それぞれについて、燃料取り扱い回数をシミュレーションする。

なおシミュレーションの前提は以下の通り。

- 取り出し燃料の燃焼度 : 下表のとおり（高浜1号炉 第26サイクル取り出し時点）
- 次サイクル向けに装荷する新燃料の体数 : 44体（最高燃焼度48GWd/t燃料平衡炉心での燃料装荷体数）
- 燃料取り出し前のSFP状況 : 使用済燃料223体がSFPの左端から順に貯蔵されているとする。  
（炉心からの取り出し燃料157体、次サイクル向け新燃料44体を沈め込んだ段階でSFPが満杯になる状況を想定）

燃焼度区分 (GWd/t)	BU<10	10≤BU<20	20≤BU<25	25≤BU<30	30≤BU<40	40≤BU	計
燃料体数	0体	56体	14体	14体	28体	45体	157体



□ : 燃焼度制限なし      ■ : 燃焼度25GWd/t以上のみ配置可能

図 想定する配置制限

前項の前提に基づきシミュレーションした結果、配置制限がある場合には使用済燃料14体の移動が必要となった。

## 配置制限（新燃料と25GWd/t燃焼燃料のチェッカーボード配置）がある場合

原子炉からの取り出し燃料を、なるべく■ラックを埋めるように配置したとしても、次サイクル向けに使用する新燃料44体を沈めこむための□ラックを確保するために、事前の燃料移動が必要。

- 数字は貯蔵燃料の燃焼度を示す。
- 青字数字：使用済燃料（223体） 赤字数字：取り出し燃料（157体） 黒字数字：沈め込む新燃料

- ：燃焼度制限なし
- ：燃焼度25GWd/t以上のみ配置可能

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
2	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
3	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
4	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
5	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
6	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
7	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
8	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
9	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
10	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
11	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
12	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
13	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
14	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
15	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
16	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							
17	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45							

燃料取り出し前

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	40	10	40						
2	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	25	10	40	10						
3	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	40	10	40					
4	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10					
5	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40					
6	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40		40
7	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40	40
8	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40		40
9	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40	40
10	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40		40
11	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40	40
12	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	30	20	40		40
13	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	40	10	40	20	40		40	
14	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	20	30	20	40		
15	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40		40	
16	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	20	30	20	40		
17	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40		40	

炉心から燃料取出し後

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	40	10	40					
2	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	25	10	40	10					
3	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	40	10	40				
4	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10				
5	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40					
6	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40		45
7	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40	45
8	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40	45
9	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	10	40	20	45
10	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40		45
11	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40	45
12	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	30	20	40		45
13	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	40	10	40	20	40		45	
14	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	20	30	20	40		45
15	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40		45	
16	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	20	30	20	40		45
17	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40		45	

□ラック確保のための燃料移動

14体の燃料を移動

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27				
1	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	0	45	10	30	10	40	10	40									
2	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	0	45	0	30	10	25	10	40	10								
3	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	0	30	10	30	10	40	10	40								
4	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	0	45	10	30	10	25	10	40	10							
5	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	0	30	10	30	10	25	10	40								
6	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	0	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40	0	40	0	45
7</																															

### 配置制限がない場合

どのラックにも新燃料を貯蔵することができるため、**新燃料沈め込み前の事前の燃料移動は不要**

- ・ 数字は貯蔵燃料の燃焼度を示す。
- ・ 青字数字：使用済燃料（223体） 赤字数字：取り出し燃料（157体） 黒字数字：沈め込む新燃料

□：燃焼度制限なし

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
2	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
3	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
4	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
5	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
6	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
7	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
8	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
9	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
10	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
11	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
12	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
13	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
14	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
15	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
16	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													
17	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45													

燃料取り出し前

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
1	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	40	10	40								
2	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	25	10	40	10								
3	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	40	10	40							
4	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10							
5	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40							
6	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40	0	40	0	0
7	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40	0	40	0	0	0
8	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40	0	40	0	0
9	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40	0	40	0	0	0
10	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40	0	40	0	0
11	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40	0	40	0	0	0
12	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	30	20	40	0	40	0	0
13	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	40	10	40	20	40	0	40	0	0	0
14	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	20	30	20	40	0	0	0	0
15	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40	0	40	0	0	0
16	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	20	30	20	40	0	0	0	0
17	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40	0	40	0	0	0

新燃料沈め込み

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	40	10	40							
2	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	25	10	40	10							
3	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	40	10	40						
4	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10						
5	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40						
6	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40			
7	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40				
8	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40			
9	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40				
10	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	40	20	40			
11	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40				
12	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	10	30	20	40			
13	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	40	10	40	20	40				
14	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	20	30	20	40			
15	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40				
16	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	10	30	10	25	10	40	20	30	20	40			
17	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	10	30	10	25	10	40	20	40				

炉心から燃料取出し後

配置制限がある場合に必要であった、新燃料沈め込み前の事前の燃料移動は不要

領域管理（配置制限）を取り除くことにより、例として、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、少なくとも燃料配置監視員の**約0.1人・mSvの被ばく量を低減できる。**

(燃料装荷時の被ばく量 概算値)

$$15\text{分/体} \times 157\text{体} \div 60\text{分} \times 0.003\text{mSv/h}^* \times 1\text{人} \approx 0.1\text{人} \cdot \text{mSv}$$

※作業時の環境サーベイ結果の平均値

燃料取扱作業における被ばく実績

(単位：人・mSv)

工事件名	高浜1号炉		高浜2号炉		平均
	第25回定検	第26回定検	第25回定検	第26回定検	
燃料取出装荷工事	1.69	1.71	3.61	2.84	2.46

<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。**

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	二. (3)(iii) b. 使用済燃料ピット水位の異常低下時における～～  (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)	二. (3)(iii) b. 使用済燃料ピット水位の異常低下時における～～  (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)	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>	新燃料敷き詰め	Aエリア <p>領域A：新燃料を貯蔵                      領域B：20GWd/t燃焼燃料を貯蔵</p>	Bエリア 新燃料敷き詰め	新燃料敷き詰め	Aエリア 新燃料敷き詰め	Bエリア 新燃料敷き詰め																											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3"></th> <th colspan="2">貯蔵可能な燃焼度※</th> </tr> <tr> <th colspan="2">55GWd/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> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>□領域A</td> <td>0GWd/t以上</td> <td>0GWd/t以上</td> </tr> <tr> <td>■領域B</td> <td>20GWd/t以上</td> <td>0GWd/t以上</td> </tr> <tr> <td>■領域C</td> <td>50GWd/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	中性子吸収体あり	□領域A	0GWd/t以上	0GWd/t以上	■領域B	20GWd/t以上	0GWd/t以上	■領域C	50GWd/t以上	15GWd/t以上	なし	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3"></th> <th colspan="2">貯蔵可能な燃焼度</th> </tr> <tr> <th>55GWd/t燃料</th> <th>48GWd/t燃料</th> </tr> <tr> <th colspan="2">中性子吸収体なし</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>□領域A</td> <td>0GWd/t以上</td> <td>0GWd/t以上</td> </tr> <tr> <td>■領域B</td> <td>20GWd/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	中性子吸収体なし		□領域A	0GWd/t以上	0GWd/t以上	■領域B	20GWd/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	中性子吸収体あり																																
□領域A	0GWd/t以上	0GWd/t以上																																
■領域B	20GWd/t以上	0GWd/t以上																																
■領域C	50GWd/t以上	15GWd/t以上																																
	貯蔵可能な燃焼度																																	
	55GWd/t燃料	48GWd/t燃料																																
	中性子吸収体なし																																	
□領域A	0GWd/t以上	0GWd/t以上																																
■領域B	20GWd/t以上	15GWd/t以上																																
配置制限																																		