



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

2021年9月6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 .....	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…………… }  
【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… } 33 ~ 36

# 目 次 (3)

## <参考>

審査における主な議論の経緯	参考1-1	
SFP内の内挿物について	参考2-1	～ 参考2-3
実効増倍率の評価結果 (例)	参考3-1	～ 参考3-3
既許可と今回評価における実効増倍率の挙動について	参考4-1	～ 参考4-3
気相部の寄与が大きい条件下における実効増倍率の挙動	参考5-1	
解析結果の妥当性確認	参考6-1	
評価モデルの違いによる実効増倍率への影響	参考7-1	
燃料条件が有する保守性について	参考8-1	
液膜モデルの妥当性確認	参考9-1	
SFP燃料配置に係る実運用について	参考10-1	

---

## <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

## ○ 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安全性向上を図る。

## ○ 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	変更後
本文 五号 二. (3) (iii) b.	(略) 燃料損傷の進行を緩和し、臨界にならないように配慮した <b>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</b> において、スプレー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、スプレー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)

### <評価手法および条件の変更>

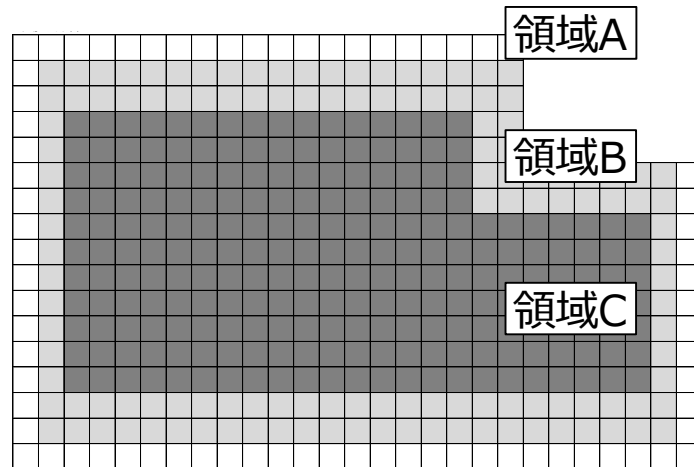
		変更前	変更後	
54条2項に係る臨界を防止できることを確認する評価	評価手法	保守的手法 (大きな保守性を有する評価ケースを一つ設定し、当該評価ケースが未臨界性上の判定基準を満足することを確認)	最適評価手法 (SA事象に鑑み、最確状態を踏まえた基本ケースおよび不確かさ影響を考慮した感度解析ケースを設定し、各ケース全てが未臨界性上の判定基準を満足することを確認)	
	評価条件	水の存在、状態	気相、液相は区別せず、 水密度を0~1g/cm <sup>3</sup> で変化させて評価	気相、液相に分け、 水位を冠水から完全喪失まで変化させて評価。液膜の存在も考慮。
		燃料配置	燃焼度及び中性子吸収体の有無に応じた3領域	新燃料敷き詰め
		中性子吸収体	有り	無し

これら変更により、既許可で求められていた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なり、燃料および内挿物の取り扱い頻度を大幅に削減でき、原子力安全向上に寄与する。

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。

○ 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あり、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
- 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

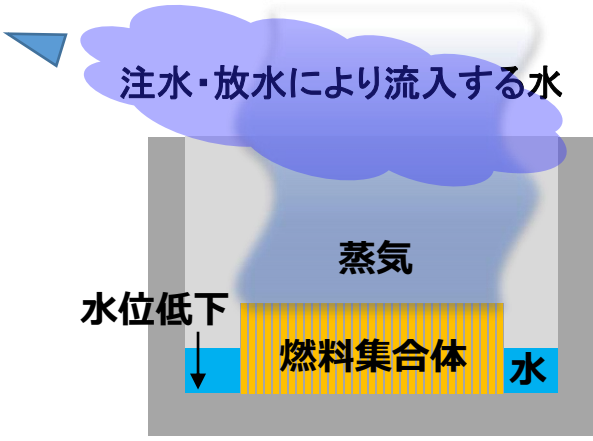
○ 今回の変更による特徴

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。**

今回申請では、大規模漏えい時の事象進展を考慮し、水位の変化を踏まえた評価を実施する。

## 大規模漏えい時の事象進展

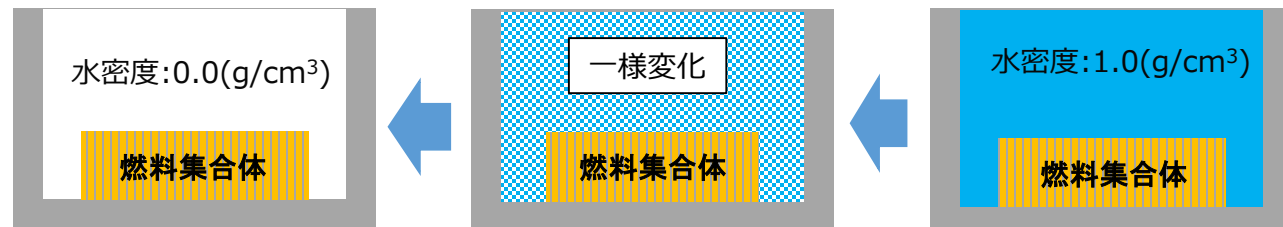
- 大規模漏えいが発生した場合には、事故時向けに整備している手順に基づき、SFPへ注水・放水を行う。
- 注水・放水時のSFP雰囲気は、液相部（ピット水）と気相部（注水・放水により流入する水と蒸気）の2相に分かれ、ピット水の漏えいが進むにつれ徐々に液相部水位が低下する。



【実機での現実的な状態】

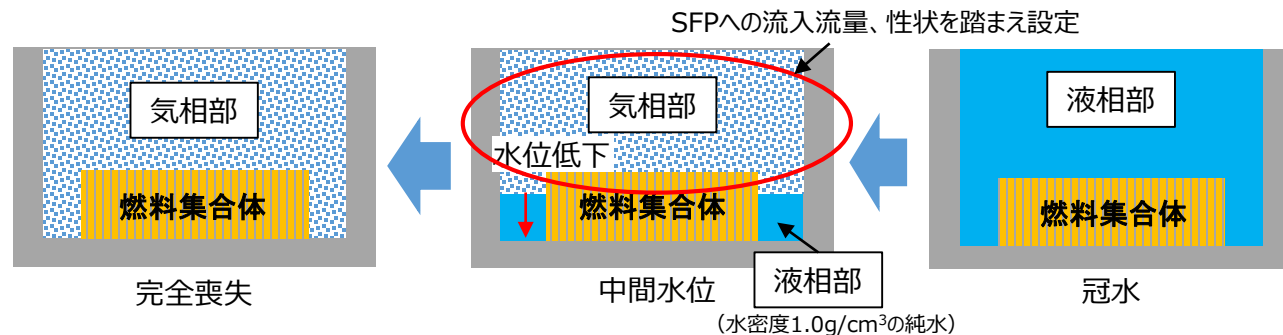
## ○既許可

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全体の水密度を一様として、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

- 大量のSFP水が漏えいした時に液相部と気相部に分かれた状態で、水位が低下するという事象に合わせ、液相部(ピット水)と気相部(注水・放水により流入する水と蒸気)の2相に分け、液相部水位の変化を踏まえて評価する。
- 気相部の水分条件には、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。)

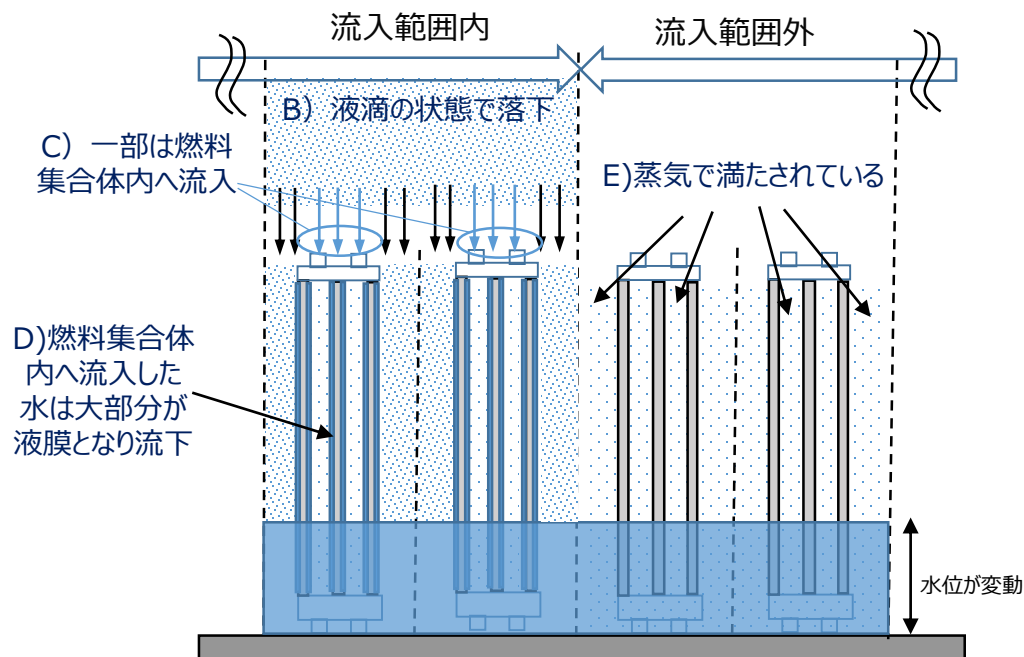
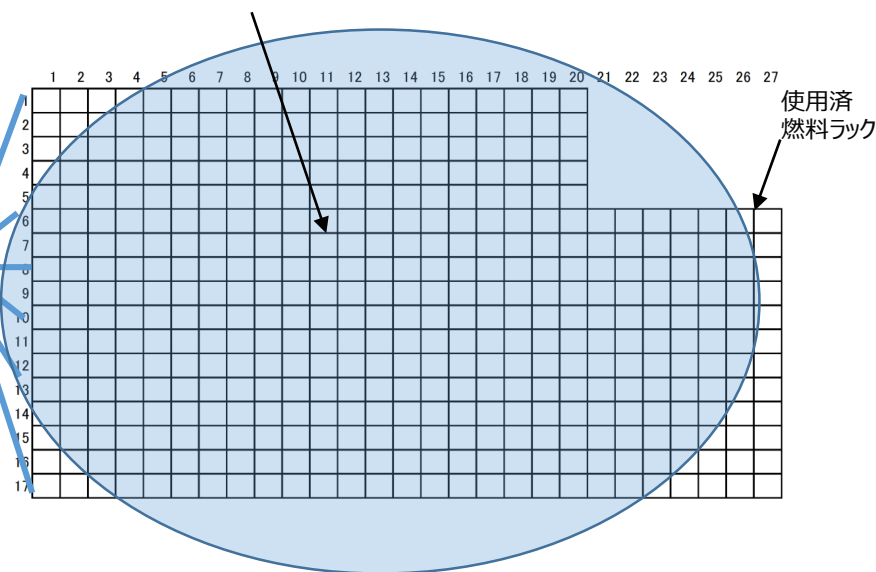




## 気相部の水分条件設定（1 / 2）

- 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なると考えられる。
  - 放水された水は、SFP上の広範囲に落下する。
  - 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。
  - 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。
  - 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。
  - 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 / 2）

- 前頁に示すSFP内の状態を踏まえて設定する、臨界計算コードへ入力する水分条件について、算出方法の概要とともに示す。

### 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。

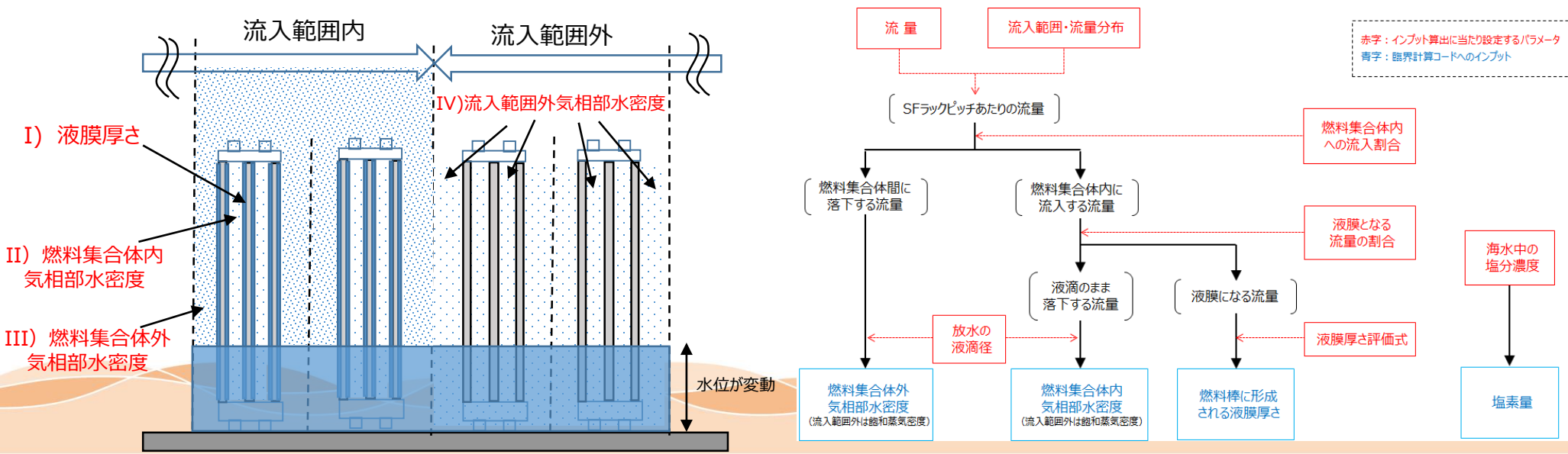
### III. 燃料集合体外気相部水密度

- 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。

- なお海水由来の流量には、「海水中の塩分濃度」により求まる塩素の存在を考慮する。



---

# <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、今回未臨界性評価では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

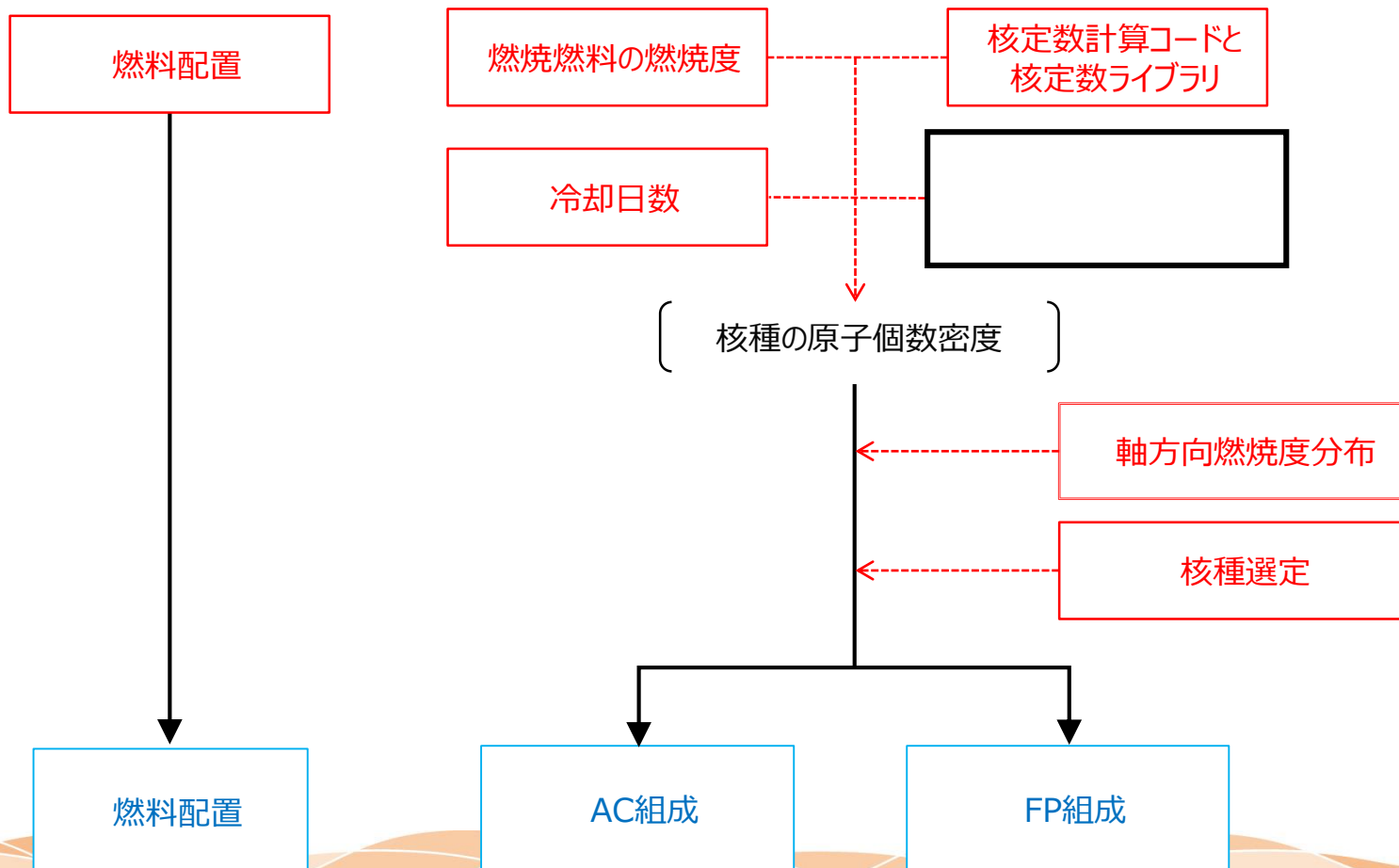
解析条件（基本ケースおよび感度確認ケース）の決定

# パラメータの関係整理 ( 1 / 2 )

臨界計算コードへのインプットの元となるパラメータ（赤字）について、基本ケース条件の設定および不確かさの整理を行う。

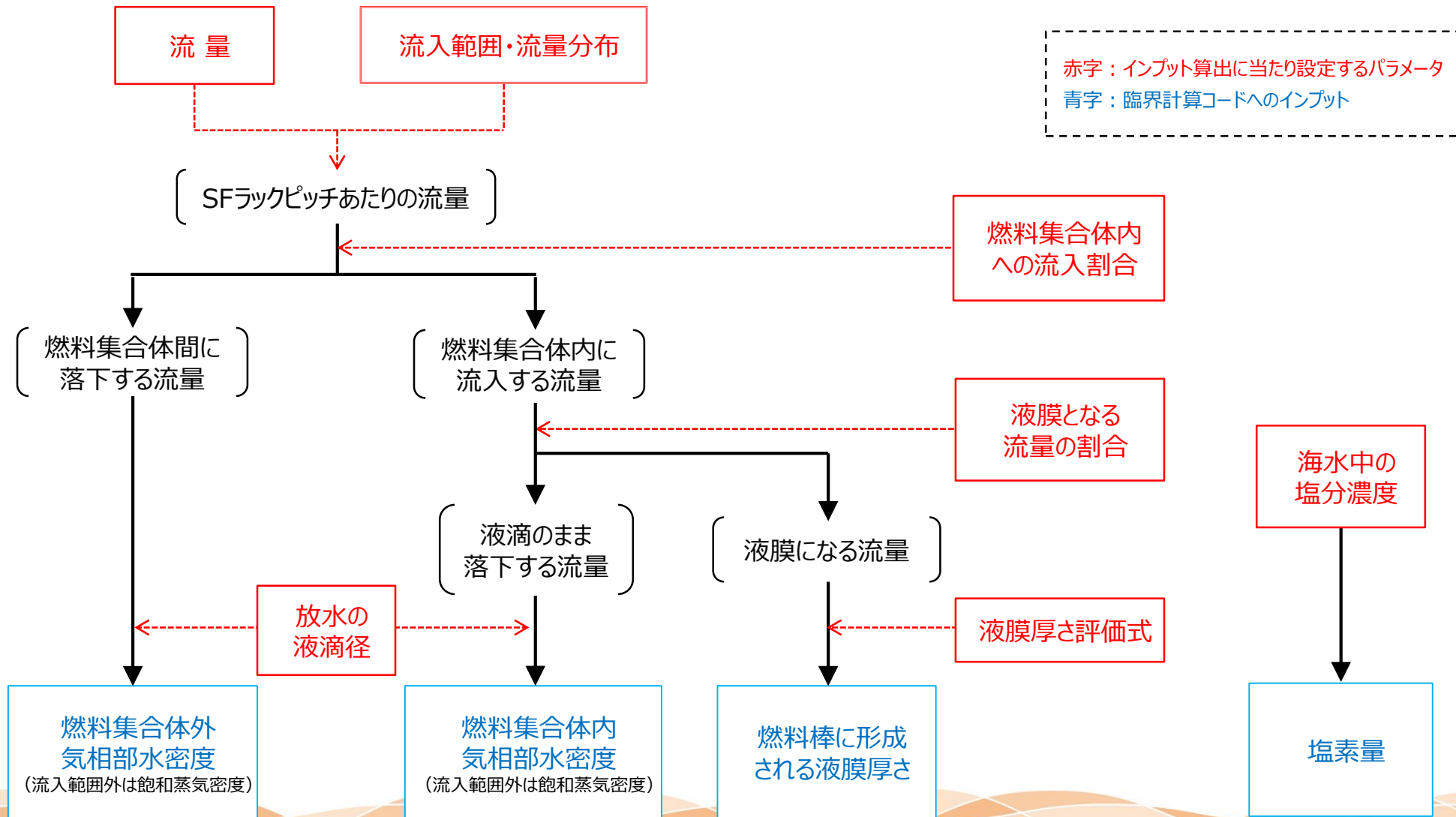
## 【燃料条件に関するパラメータの関係性】

赤字：インプット算出に当たり設定するパラメータ  
 青字：臨界計算コードへのインプット



(続 き)

## 【水分条件に関するパラメータの関係性】



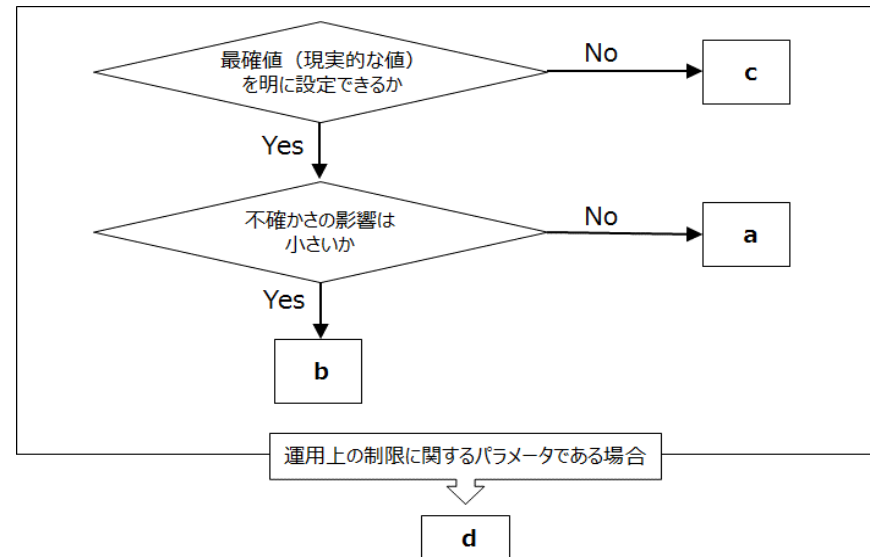
# 最適評価手法による未臨界性評価条件の設定方針

- 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】

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

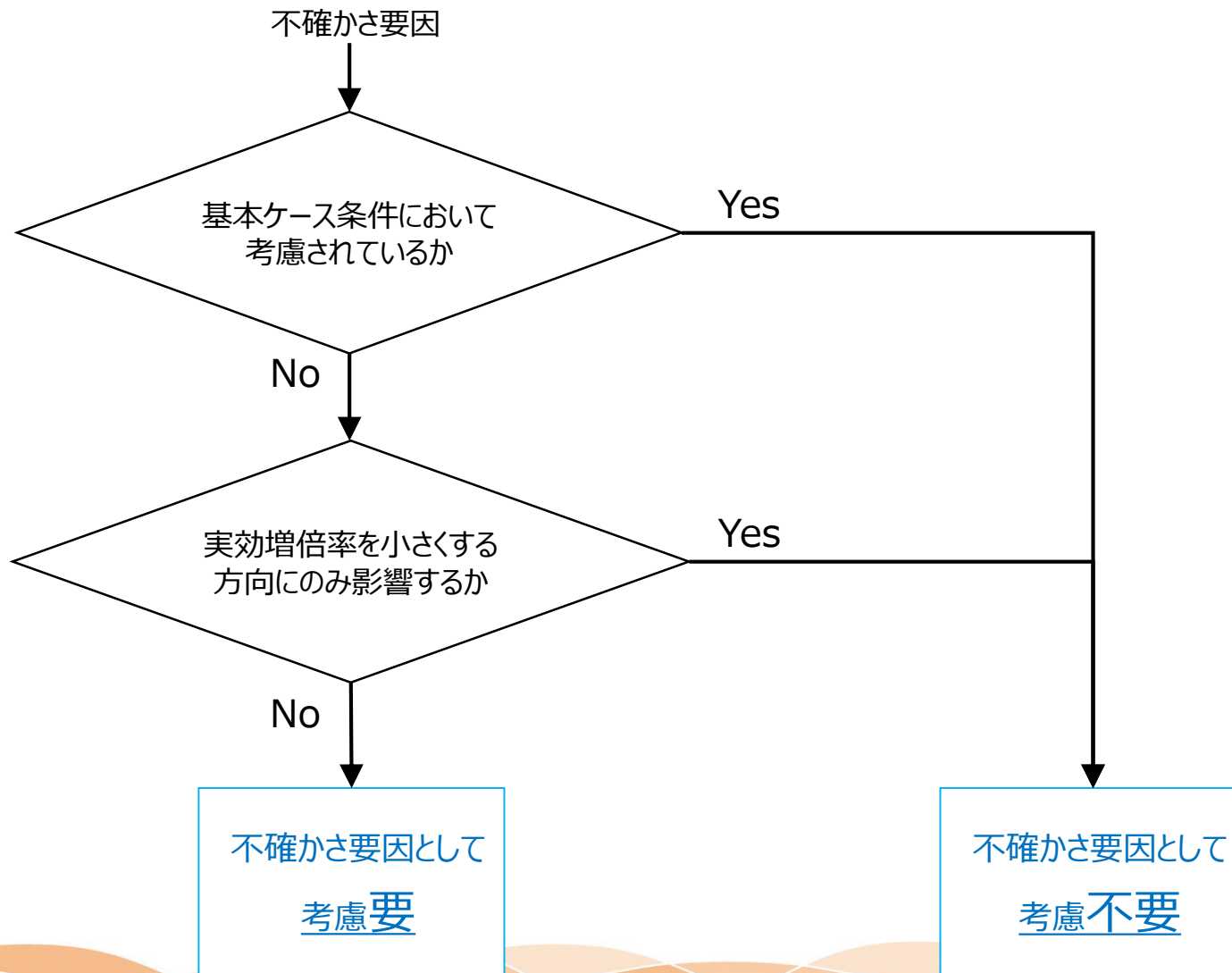
## 2.2 有効性評価に係る標準評価手法

### 2.2.1 有効性評価の手法及び範囲

- 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。
- 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。
- 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】	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) 。  
 その不確かさが保守的に設定した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】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、基本ケース条件に考慮されておらず、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】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 / 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		
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が高まるよう設定するとともに実運用を見越した燃料配置を設定	c (燃料取替毎に貯蔵燃料体数および燃焼度は変化する)	貯蔵燃料燃焼度の多様性【基本ケース条件で考慮】	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】	SFP満杯以下		不要
燃料条件	燃焼燃料の燃焼度	-					
	軸方向燃焼度分布	-					
	核定数計算コードと核定数ライブラリ	-					
		-					
	核種選定	-					
	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)

(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)

(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 / 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		
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】	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
水分条件 SFPへの流入範囲、流量分布	流入範囲：SFP全面 流量分布：一様	<ul style="list-style-type: none"> <li>・放水設備からの全流量が、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			不要
				放水分布のばらつき【基本ケース条件で考慮】	単位面積当たりの流量低下		不要
				スプレイ分布のばらつき【基本ケース条件で考慮】	単位面積当たりの流量低下		不要
				風の影響①※1 (分布のゆらぎ、風の強さ)	局所化 or 広範囲化		要※1
燃料集合体内への流入割合	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】	流入割合低下	流入割合増加	不要
				風の影響②※1 (斜め方向の液滴落下による効果)	流入割合増加		要※1
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】	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: SFP全体以上となる放水流入範囲を局所化するような風が吹く場合、当該範囲内の単位面積当たりの流量は非常に大きく、且つ斜めから流入する液滴の存在も考慮し難いため、「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(斜めからの液滴の流入を促進する)風の影響」(風の影響②)は分けて考慮する。

# 各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果（3 / 3）

パラメータ	基本ケース条件		基本ケース条件の設定方針	基本ケース条件に対する不確かさ		実効増倍率が厳しくなる方向	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】	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】	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】	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

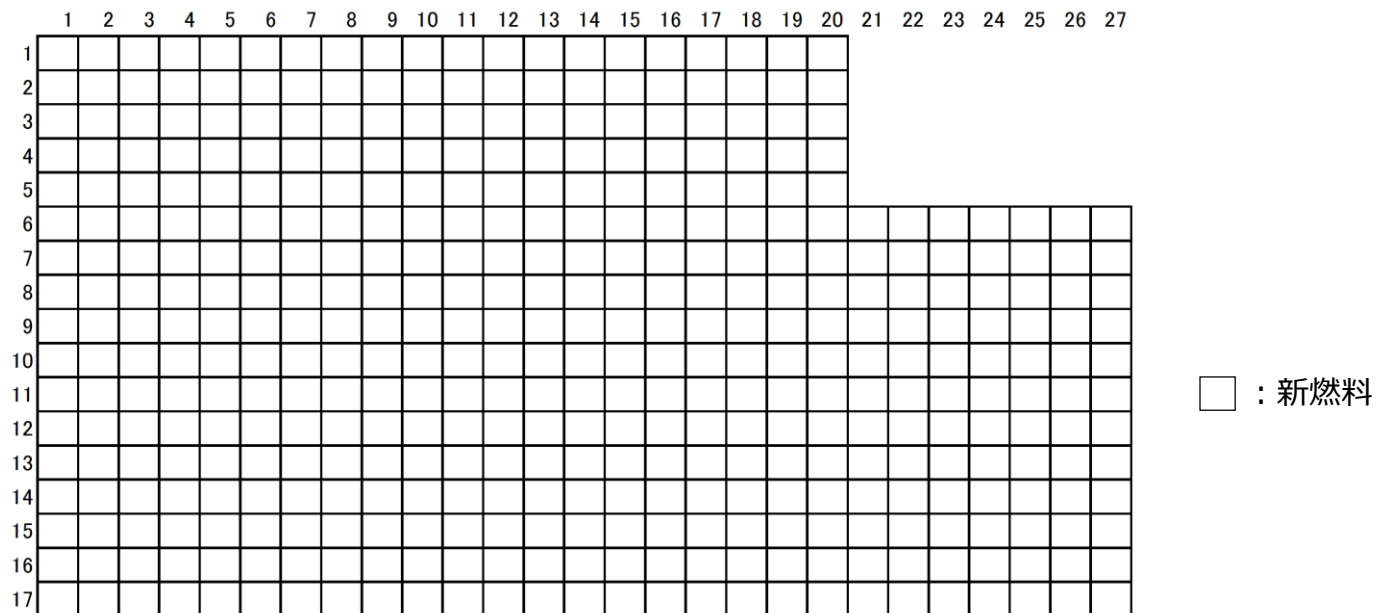
パラメータ	不確かさ要因	感度解析ケース (資料2)
流量	1手順あたりのポンプ台数	ケース①
SFPへの流入範囲、 流量分布	流入範囲を狭める風の影響 (風の影響①)	ケース②
燃料集合体内への 流入割合	流入範囲を広げる風の影響 (風の影響②)	ケース③
放水の液滴径	スプレイ試験における測定箇所毎の 結果の差異	ケース④

---

<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。  
(実運用においては、0～55GWd/tの燃焼燃料をランダムに貯蔵する。)



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55GWd/t燃料平衡炉心の装荷燃料 (157体) と使用済燃料 (40GWd/t : 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。

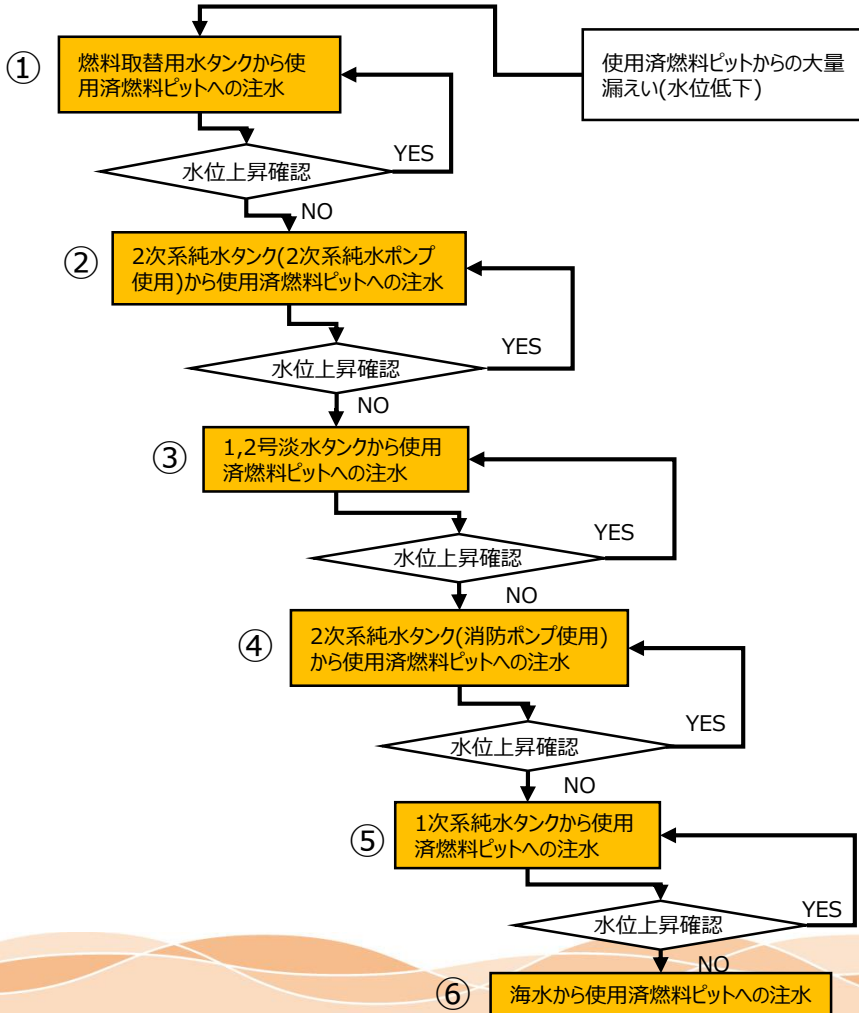


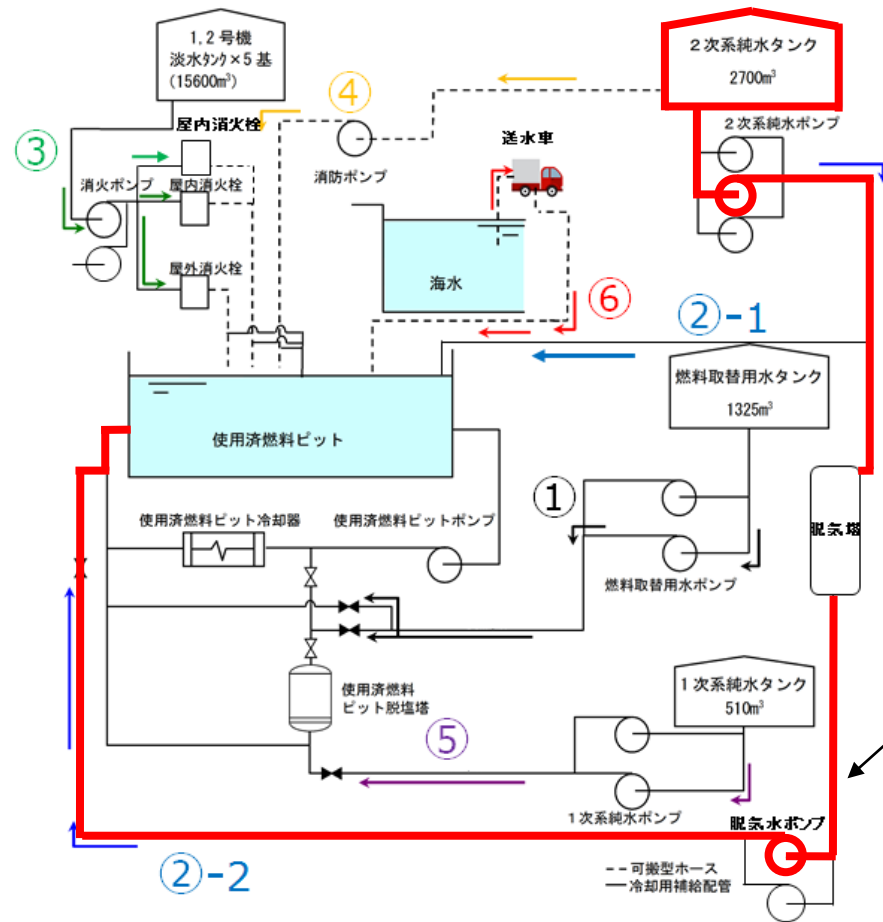
表 SFPへの注水・放水手順を整備している社内標準

	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	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。

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 / 5)

<続き>

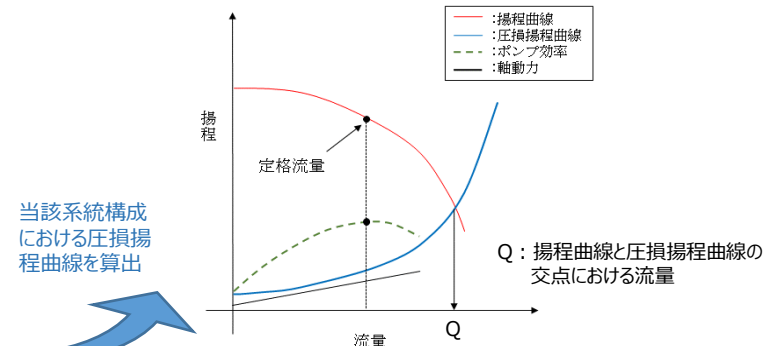
- 各手順の具体的な流量については、手順に示される設備・系統構成を前提とし、基本的にはポンプの揚程曲線と当該設備構成を踏まえた水頭差や配管圧損等により評価した圧損揚程曲線との交点における流量、もしくは設備の仕様制限から求まる流量を設定する。(送水実績がある手順は実測値を使用する。)

## 【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 (燃料の著しい損傷の進行緩和を緩和し、放射性物質の放出を低減する) のため、SFPへ放水する場合には、以下の手順を定めている。

- 大容量ポンプ (放水砲用) を2台直列に接続すること
- 放水砲用は分岐器を用いて2台設置すること
- SFPへ放水する際の放水砲使用台数は、1台 / 1SFP とすること

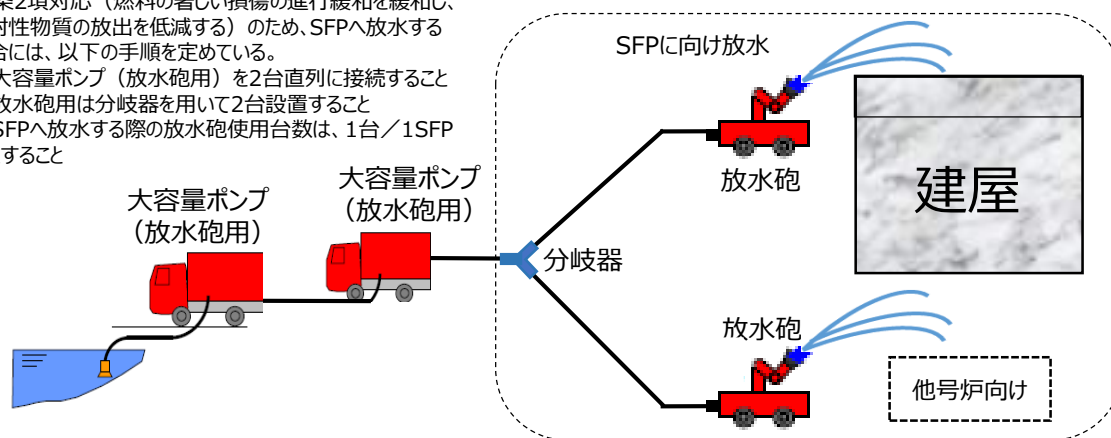


図 整備している手順に基づく系統構成 (放水砲による放水手順)



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。

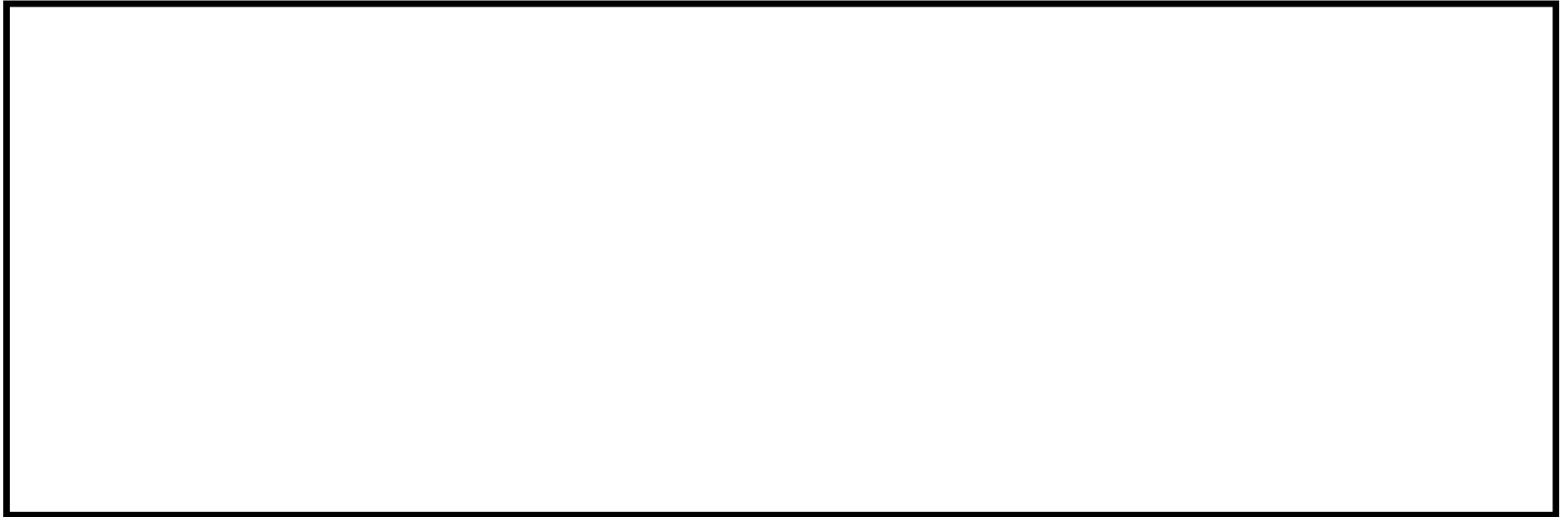


図 ポンプ全数を起動する場合の系統概要

# 「流量」の設定 (5 / 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台として評価した値である  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値である  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	ポンプ揚程曲線
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。

**(基本ケース条件)**

- 流量の大部分を占める放水砲については、文献※<sup>1</sup>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ラックに一樣に流入した場合の方が大きくなるため、全流量がSFラック面積に一樣に流入した場合の値を用いる。
- スprayについても同様に、全流量がSFラック面積に一樣に流入した場合の値を用いる。

**【説明】****[放水砲の放水分布に基づくピーク近傍の水量]**

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

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

**[放水砲による全流量が一樣にSFラック上に流入した場合の水量]**

$$\square \text{ m}^3/\text{h}^{*2} \div (\square \text{ m} \times \square \text{ m} \times 424) \doteq 11 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2) > 4 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$$

**[スプレイの放水分布を考慮した場合のピーク近傍の水量]**

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

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

**[スプレイによる全流量が一樣にSFラック上に流入した場合の水量]**

$$\square \text{ m}^3/\text{h}^{*2} \div (\square \text{ m} \times \square \text{ m} \times 424) = 0.88 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2) > 0.79 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$$

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 放水砲およびスプレイヘッドの流量には定格値を使用

**（不確かさを考慮した条件）**

・放水される全量がSFPの局所領域に集中することを仮定する。

**【説 明】**

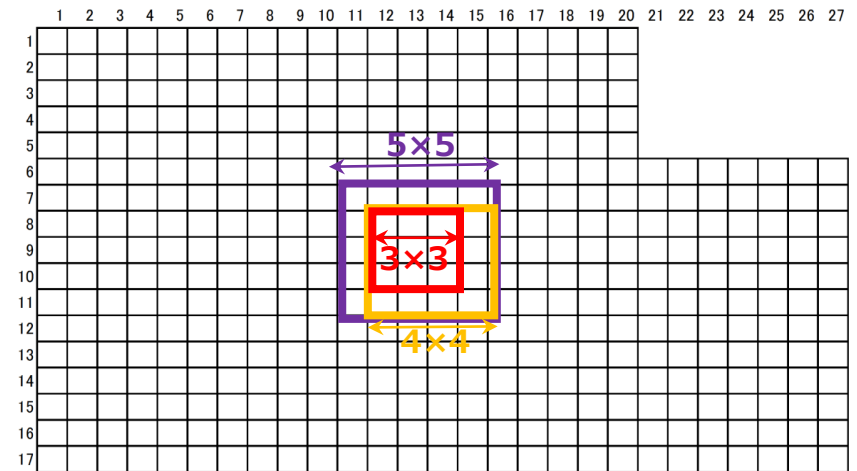
○ 実効増倍率を高くするため、局所領域はSFP中心部に設定する。

○ 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



# 「燃料集合体内への流入割合」の設定（1 / 2）

## （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、上部ノズルの構造を踏まえ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、流路孔面積はさらに小さくなる。）

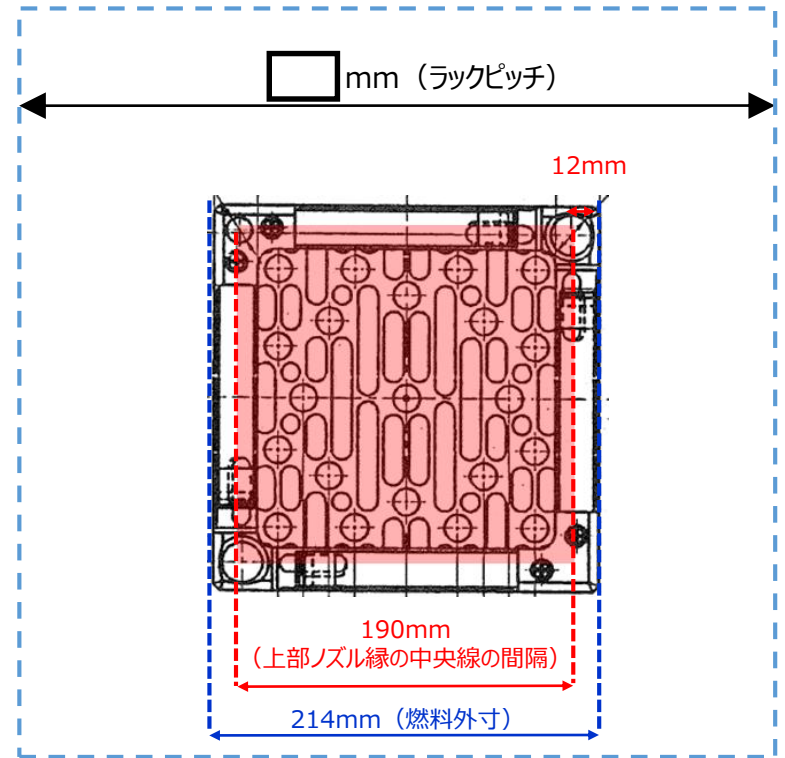
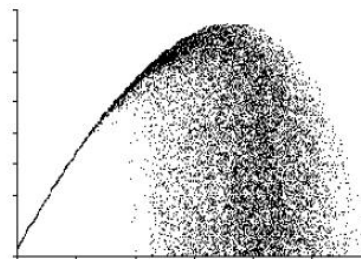
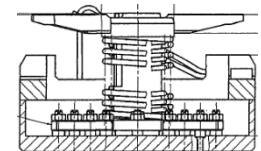
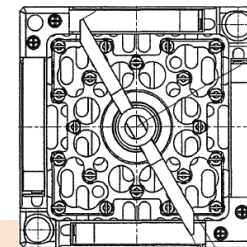


図 燃料集合体に流入する流量割合イメージ



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を踏まえた値として46%と設定する。

### 【説明】

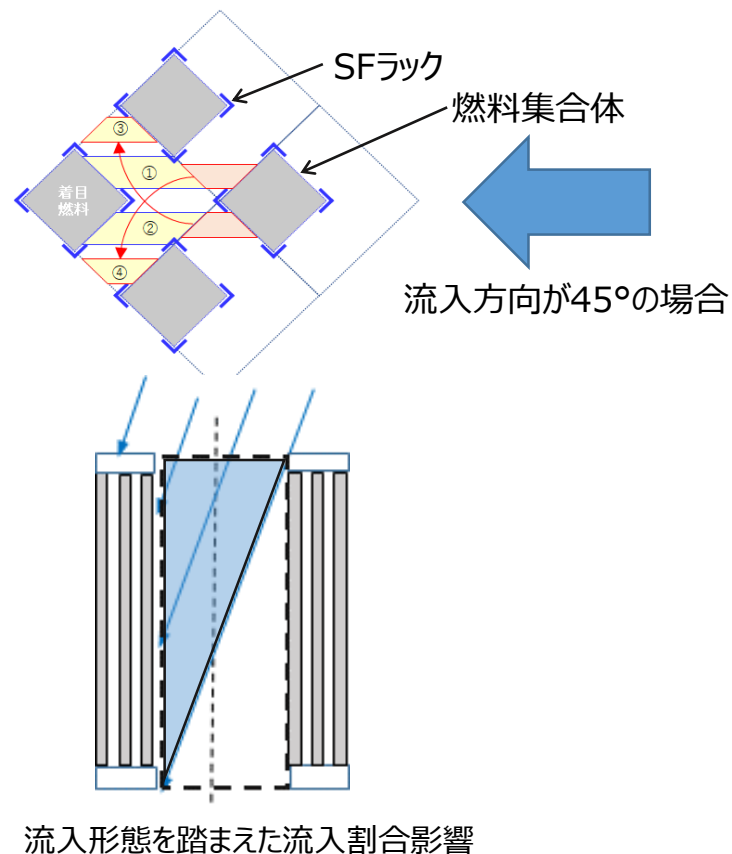
- ラックに対する流入方向を流入割合への影響が最大となるように45°とした場合、SFラックの構造を踏まえた液滴流入面積は、右図のとおり黄色部面積で表され、ラックピッチ面積に対する液滴流入面積の比は45.2%となる。
- また斜めに落下してくるという液滴の流入形態を踏まえれば、流入割合への影響は、面積に高さを乗じた体積の半分と見積もることができる。よって横風により斜めから液滴が流入してくる影響は、約23%となる。

#### <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「燃料集合体内に流入する割合」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。





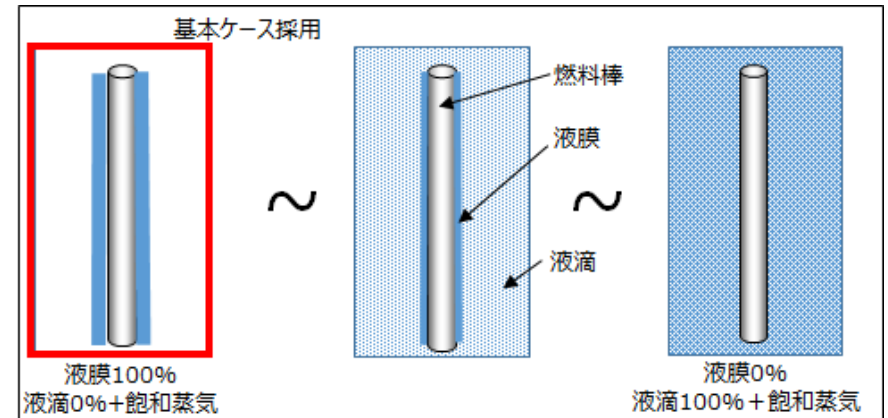
# 「液膜となる流量の割合」の設定

## (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ほとんど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のほうが液滴として落下するよりも下降速度が小さい、すなわち燃料領域内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)

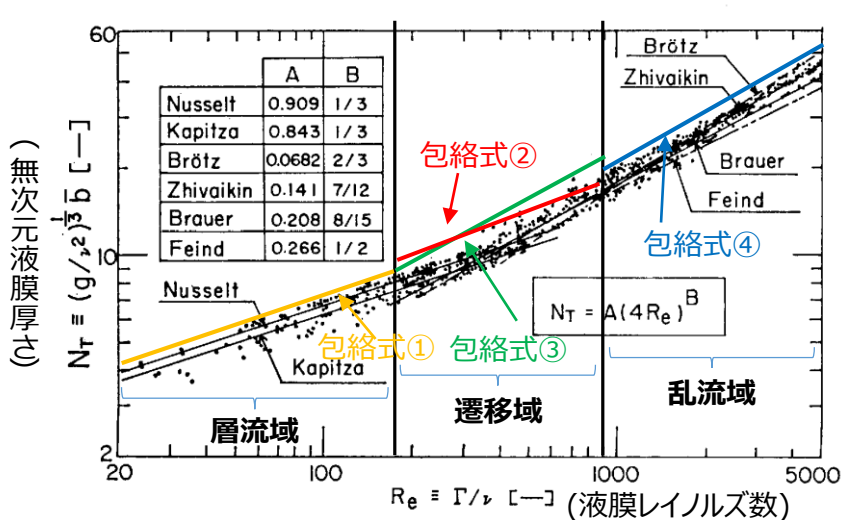
# 「液膜厚さの評価式」の設定 (1 / 2)

## (基本ケース条件) (不確かさを含む条件)

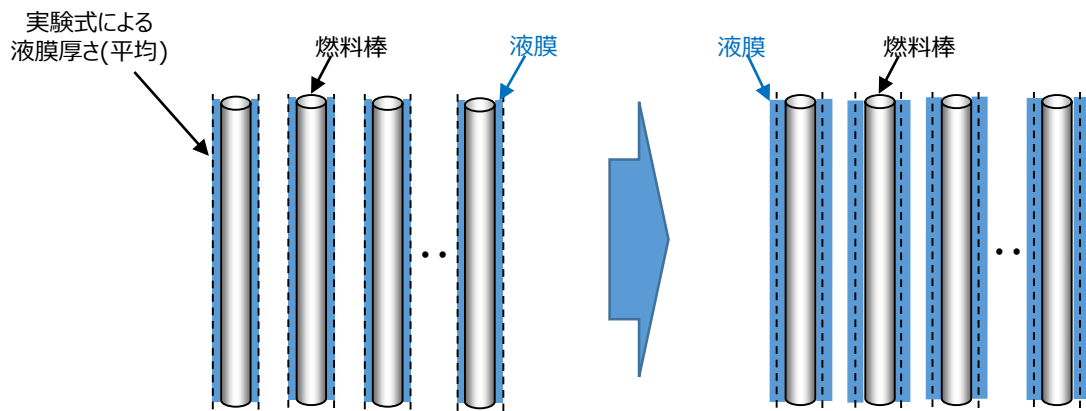
・液膜厚さが厚いほうが実効増倍率が高くなるため、実験結果を包含する評価式を設定する。

### 【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)



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



基本ケース条件

不確かさを考慮した設定  
(全燃料棒に実験の不確かさを包絡する液膜厚さを設定)

※ 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

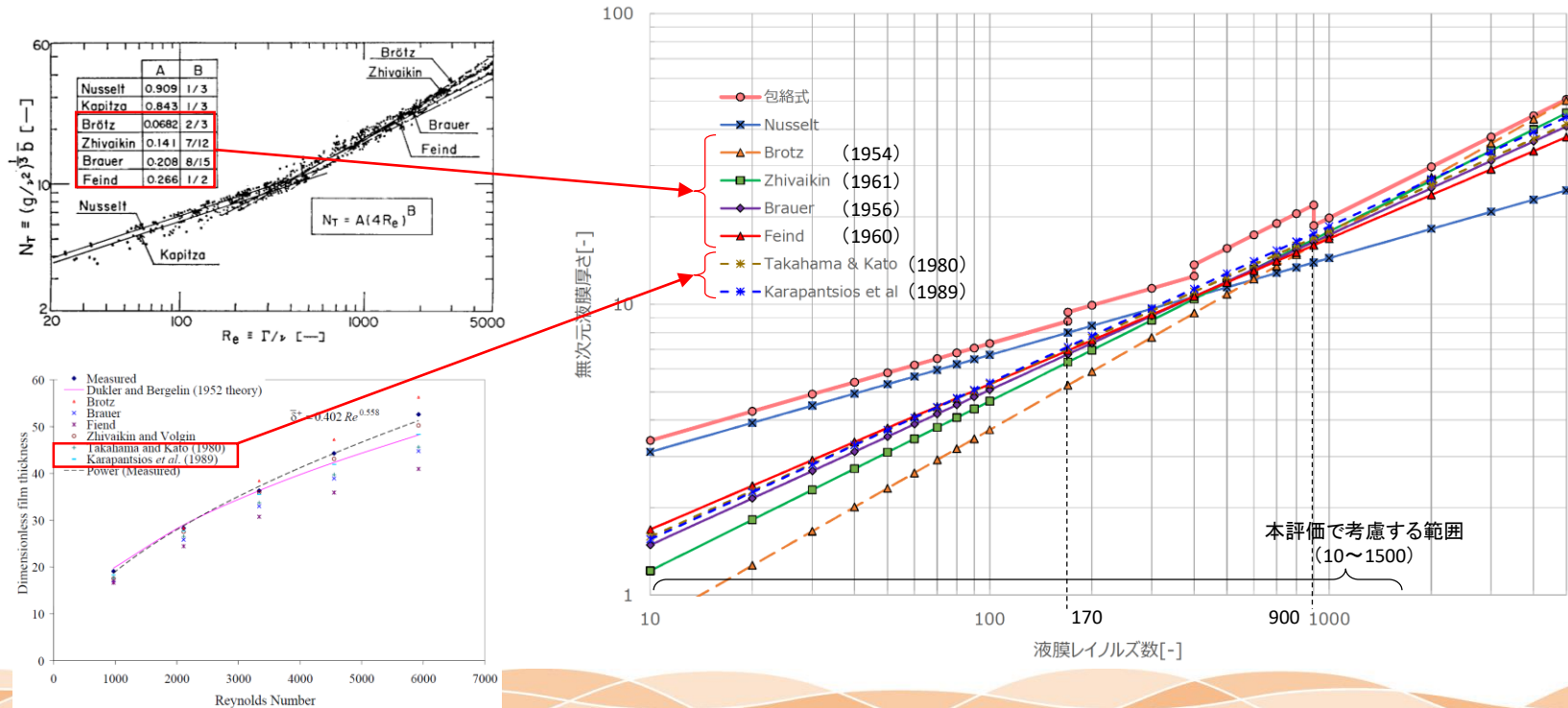
# 「液膜厚さの評価式」の設定 (2 / 2)

(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

# 「放水の液滴径」の設定（1 / 2）

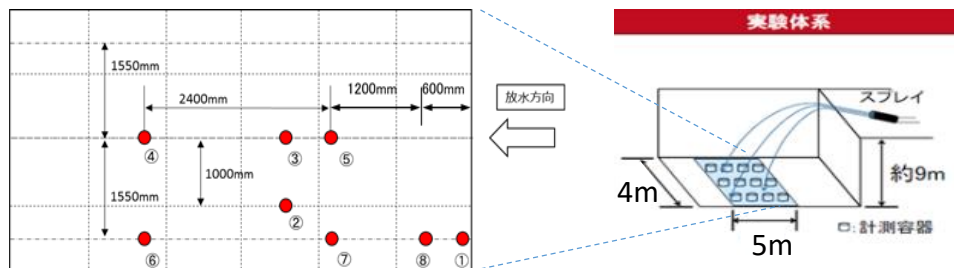
## （基本ケース条件）

・スプレー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

## 試験概要

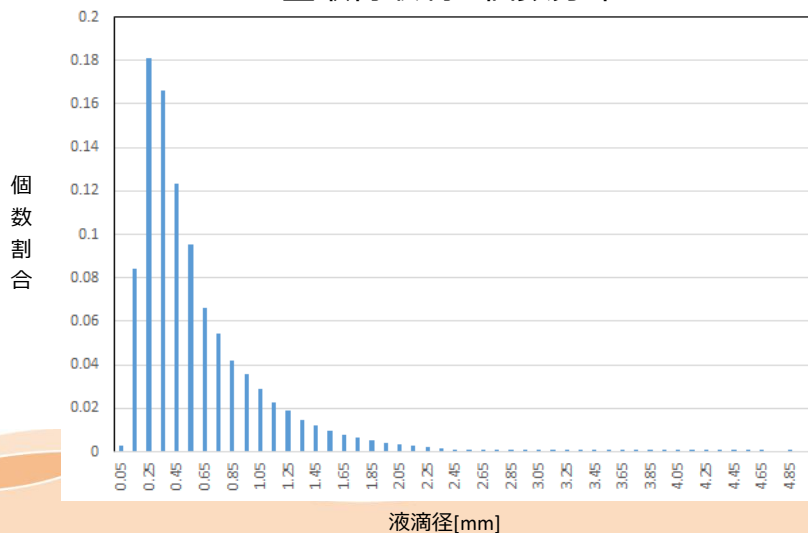


## 試験の様子

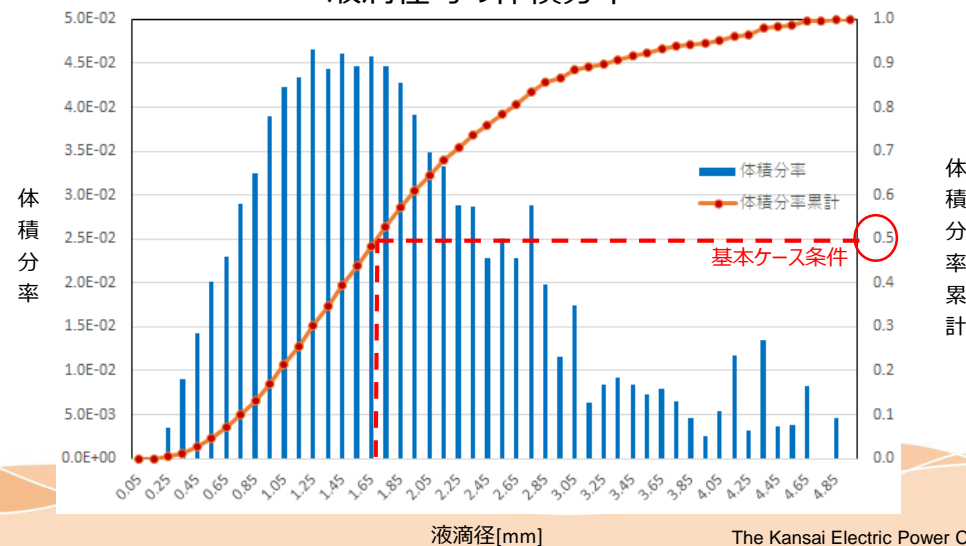


## 試験結果

### 全取得液滴の個数分布



### 液滴径毎の体積分率

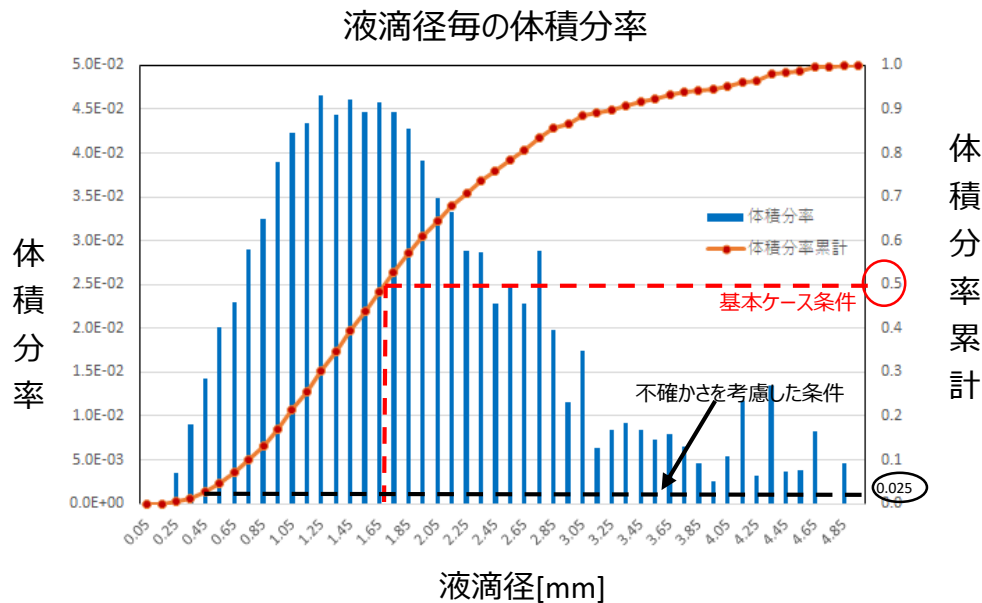


## （不確かさを考慮した条件）

・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20%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。

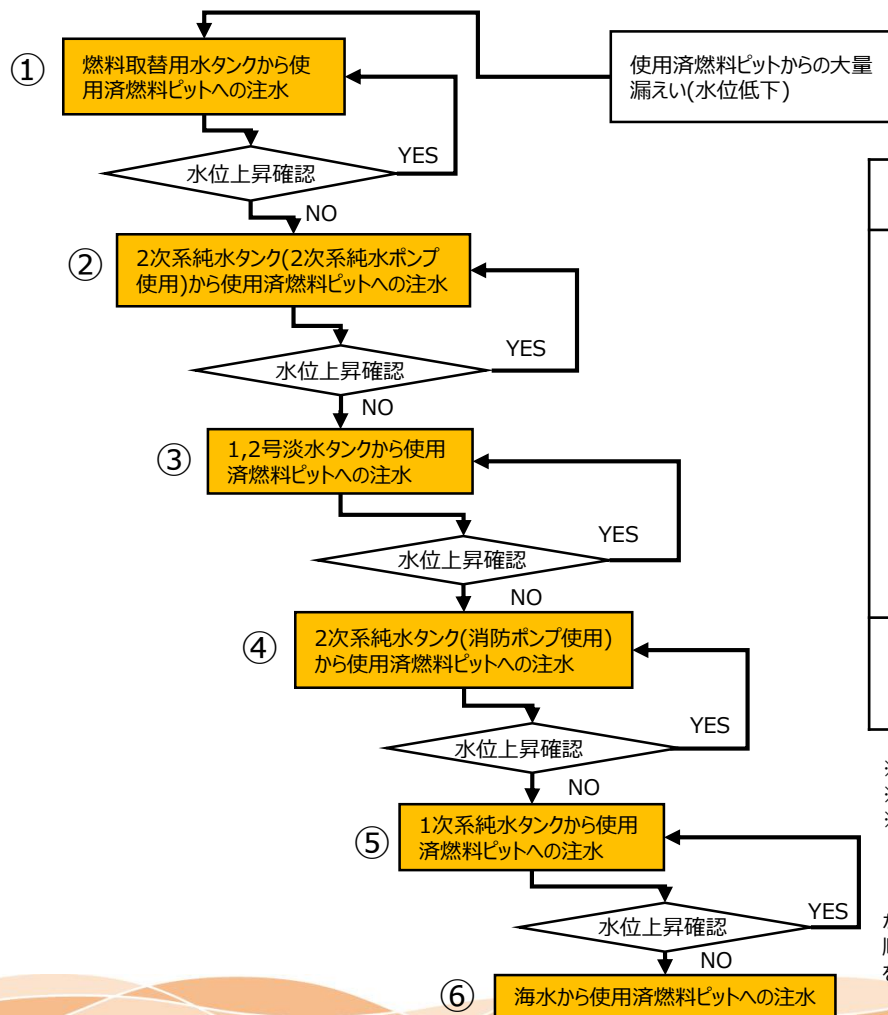


表 SFPへの注水・放水手順を整備している社内標準

	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
⑥ 海水(送水車)	重大事故等時対応向け	SA所達	要	
放水 手順	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

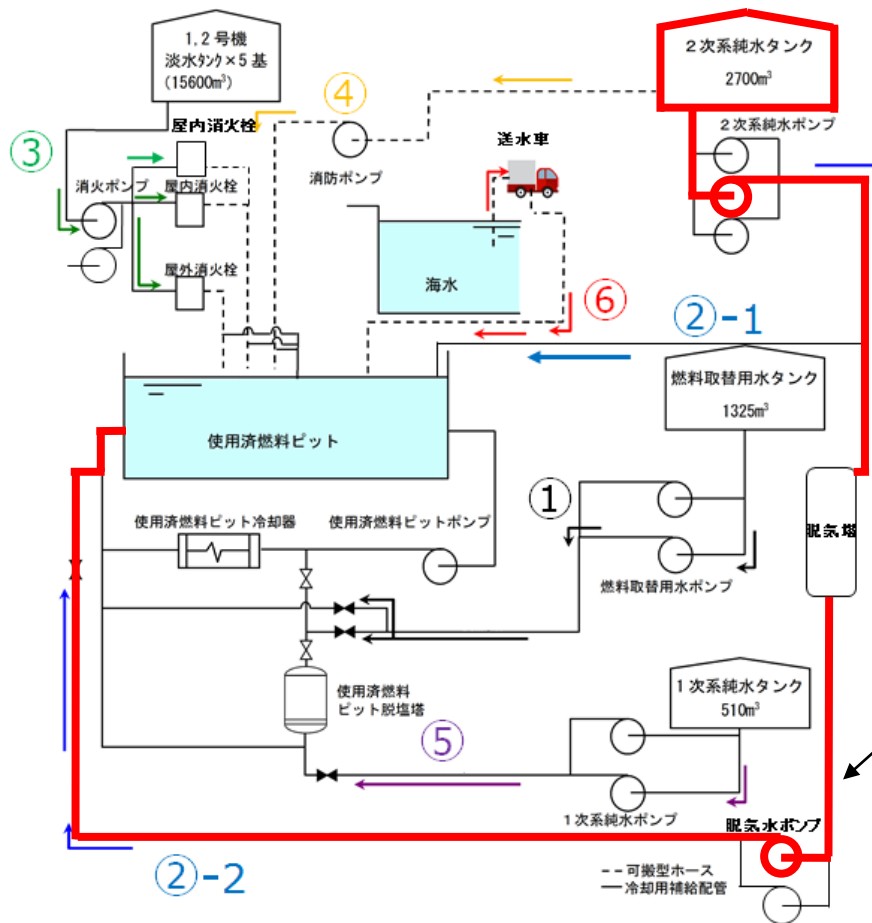
※3 手順②-2については、事故時向けに整備している手順書ではないこと、また通常運転時のSFP水の自然蒸散分を定期的に補給する際は手順②-1にて実施しており、手順②-2にて実施した実績が無いことから、今回未臨界性評価条件の流量条件としては考慮しない。

なお大規模損壊時に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。  
・ 事故時対応手順ではない。  
・ 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＞

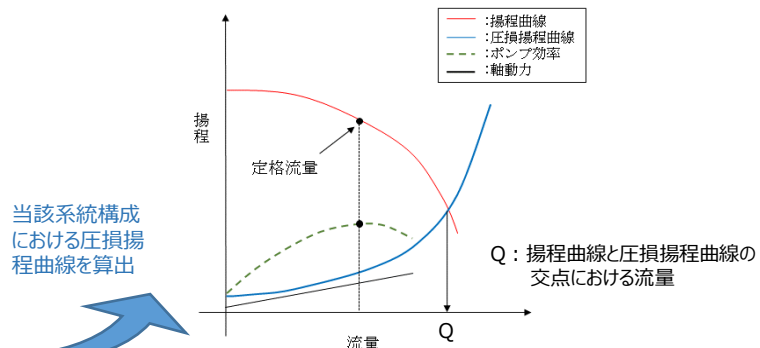
- 各手順の具体的な流量については、手順に示される設備・系統構成を前提とし、基本的にはポンプの揚程曲線と当該設備構成を踏まえた水頭差や配管圧損等により評価した圧損揚程曲線との交点における流量、もしくは設備の仕様制限から求まる流量を設定する。（送水実績がある手順は実測値を使用する。）

【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（燃料の著しい損傷の進行緩和を緩和し、放射性物質の放出を低減する）のため、SFPへ放水する場合には、以下の手順を定めている。

- 大容量ポンプ（放水砲用）を2台直列に接続する。
- 放水砲は分岐器を用いて2台設置する。
- SFPへ放水する際の放水砲使用台数は、1台／1SFPとする。

⇒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。

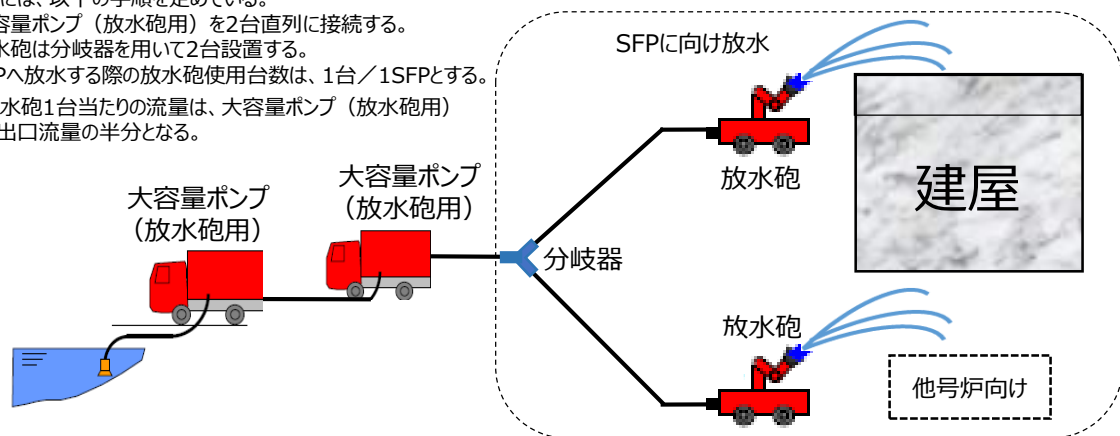


図 整備している手順に基づく系統構成（放水砲による放水手順）



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	ポンプ揚程曲線
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。

---

<以下、参考>





# SFP内の内挿物について

[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。

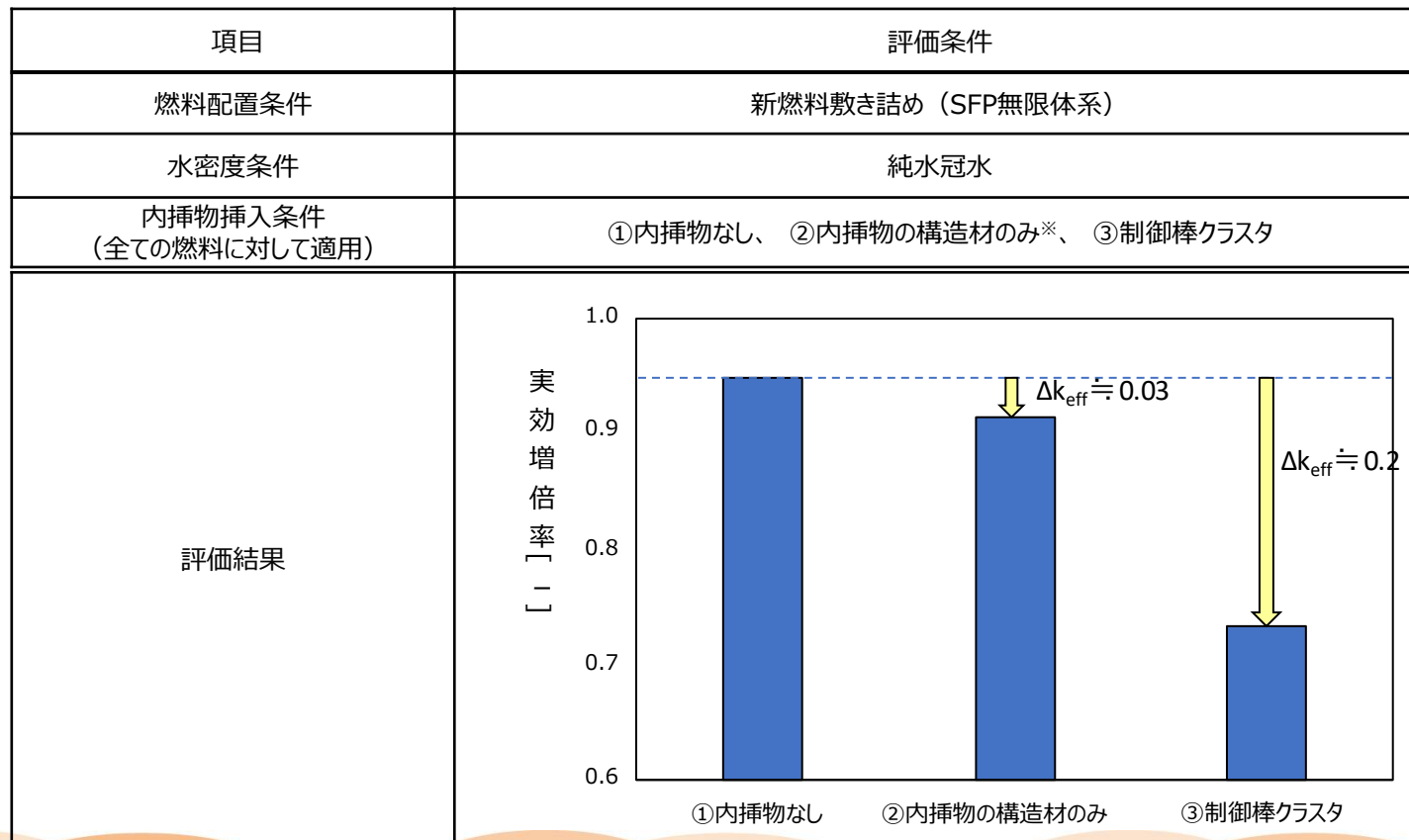
SFPラック内の内挿物保管状況

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】 □ : プラグングデバイス、 ○ : 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)
プラグングデバイス	164体	120体
制御棒クラスタ	114体	113体
バーナブルポイズン	8体	16体

# SFP内の内挿物について

[SFPラック内の内挿物が実効増倍率に与える影響について]

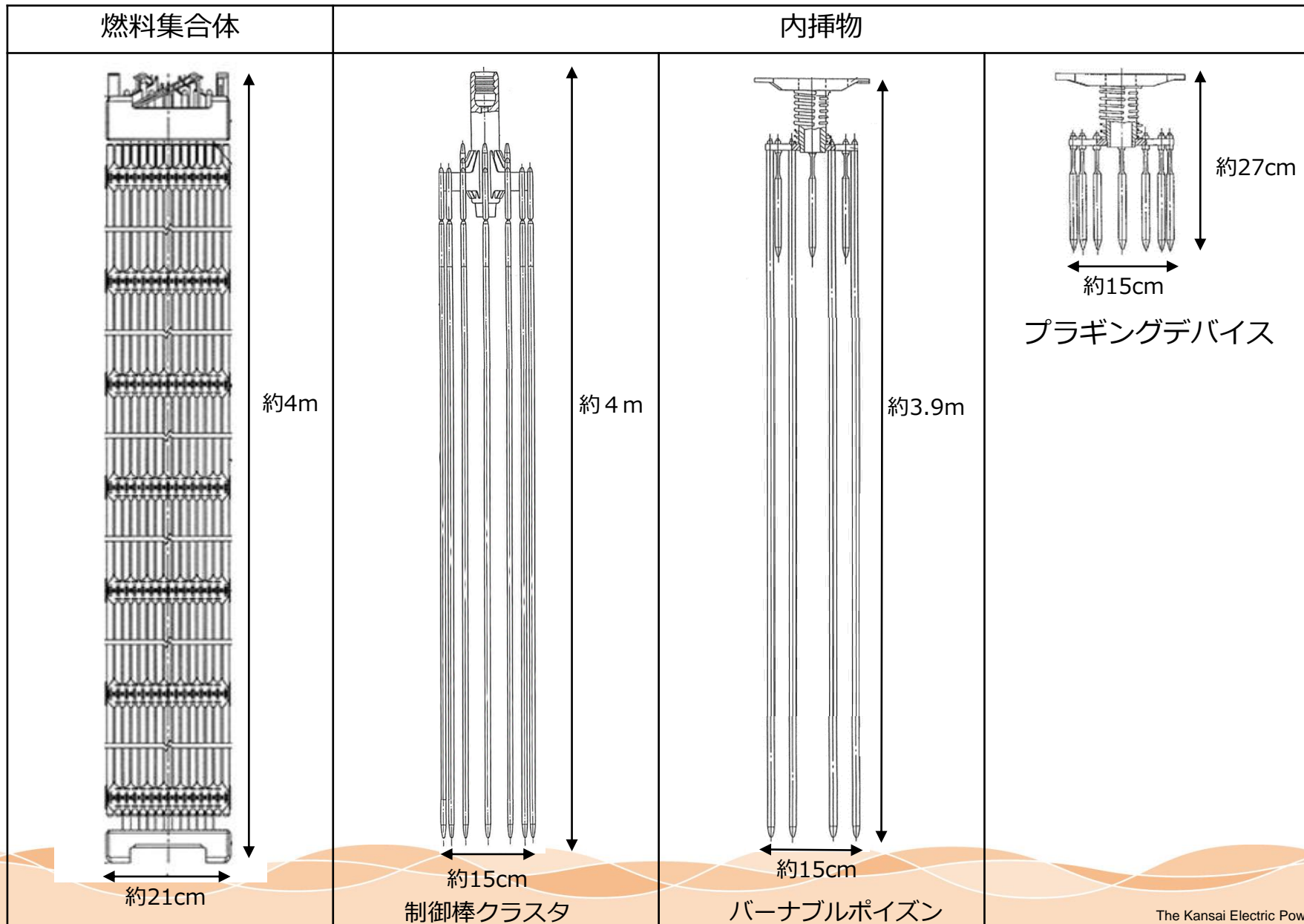
- ・今回未臨界性評価では、SFP内で燃料集合体と共に保管されている内挿物を無視し評価を行う。
- ・SFP保管中の内挿物が実効増倍率に与える影響を確認するため、①内挿物を考慮しない場合、②内挿物の構造材のみを考慮した場合、③制御棒クラスタが挿入された状態について評価した。  
(バーナブルポイズンについては使用状態により中性子吸収効果が異なるため、吸収材を無視し構造材のみを考慮した条件②の評価にて代表した。)
- ・評価の結果、内挿物がない状態の実効増倍率が最も高くなり、解析の前提条件としている「SFP内には内挿物なし」とすることが保守的であることを確認した。これは、内挿物の持つ中性子吸収効果および構造材による水排除効果により、反応度が低下することによるものである。



※ 制御棒クラスタから中性子吸収材「銀-インジウム-カドミウム」を除いたもの (吸収材部を真空に置換)



[内挿物の概要]



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。

<流入範囲を局所としたケース（ケース②） 解析条件>

表 流入範囲を局所としたケースの解析条件（解析条件一覧表に掲載の「ケース②」）

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)

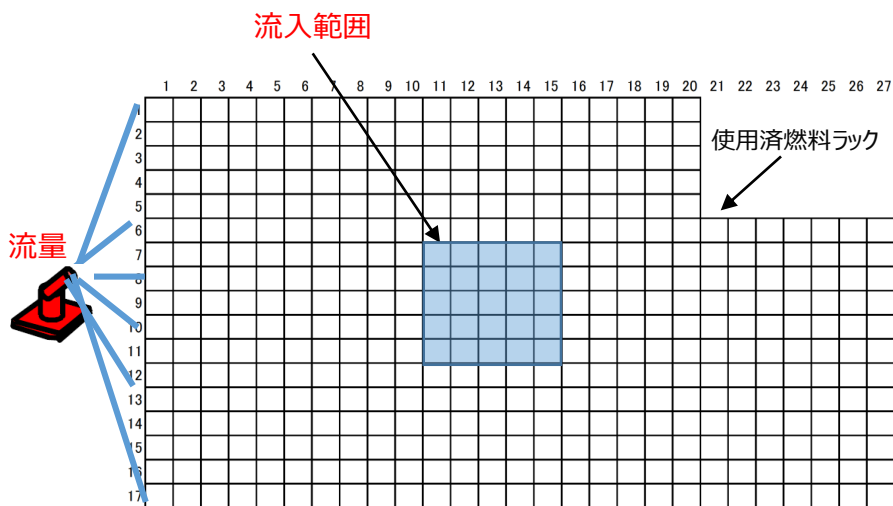
# 実効増倍率の評価結果 (例)

(続 き)

表 局所に流量が集中する場合の解析条件 (ケース②の各条件により求めた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 ( <sup>235</sup> 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	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 】

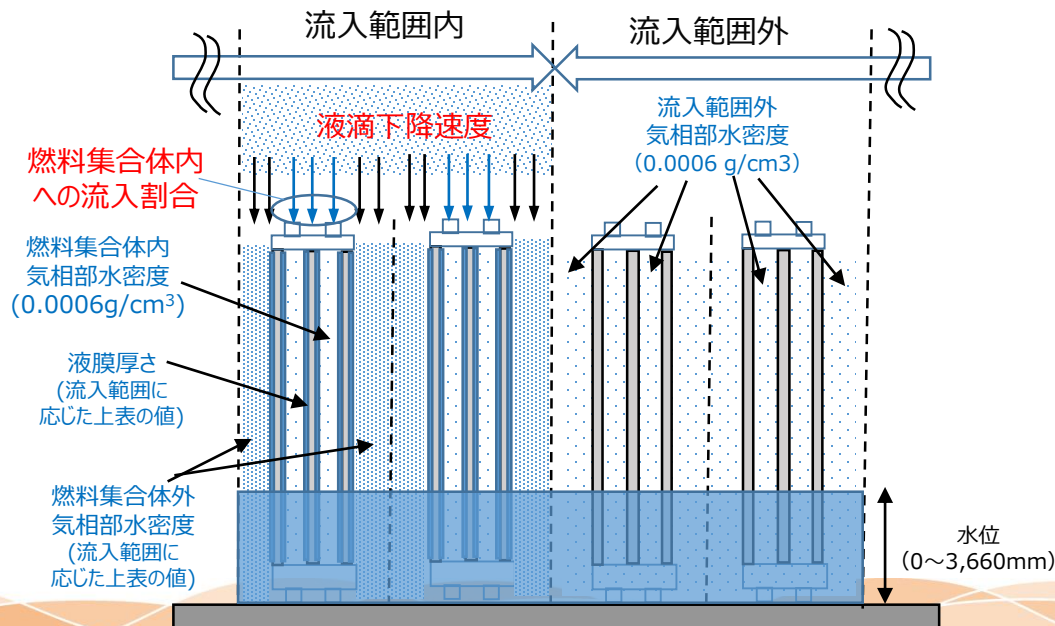


図 臨界計算コードへのインプットとなる水分条件 概要

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。

# 実効増倍率の評価結果（例）

（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。

## 【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。
- 放水範囲が広がる場合、以下の相反する効果を併せ持つことから、低水位時の実効増倍率はある局所範囲でピークを持つこととなる。
  - ① 範囲内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傾向となる。

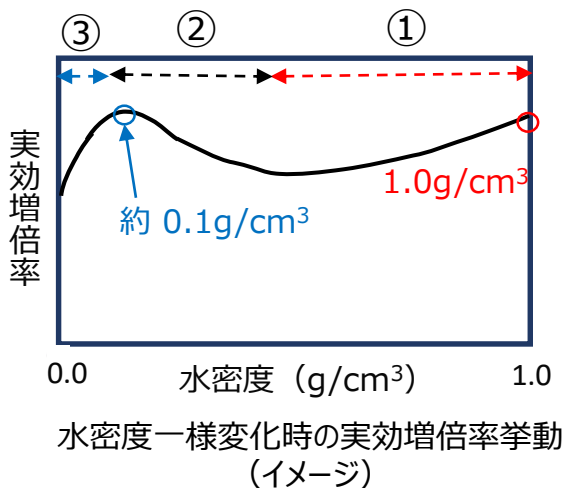
	3×3ラック	4×4ラック	5×5ラック
評価結果			

※ 製造公差等による不確定性を考慮しない値

図 評価結果

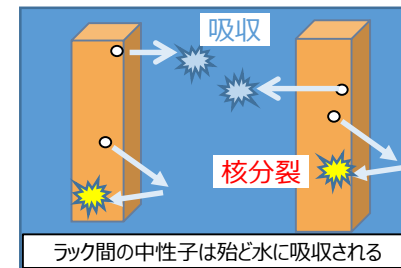
既許可と今回評価において、それぞれ水密度および水位を変化させた場合の実効増倍率の挙動の傾向について以下に示す。

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】

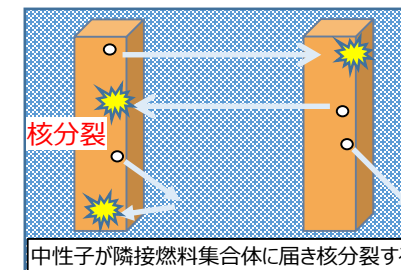
燃料集合体領域を飛び出した中性子はラック間の水に吸収されるため、単一集合体内の減速材の影響が支配的となり、水密度低下に伴い実効増倍率は減少する。



高水密度領域での中性子挙動 (①)

【②中水密度領域】

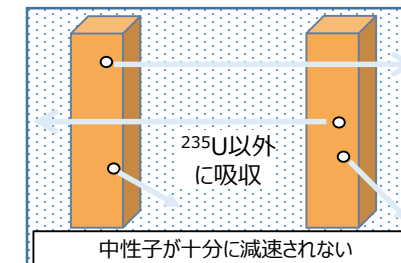
隣接する燃料へ到達し、隣接燃料で反応する中性子数が増えるため、水密度低下に伴い実効増倍率は増加する。



中水密度領域での中性子挙動 (②)

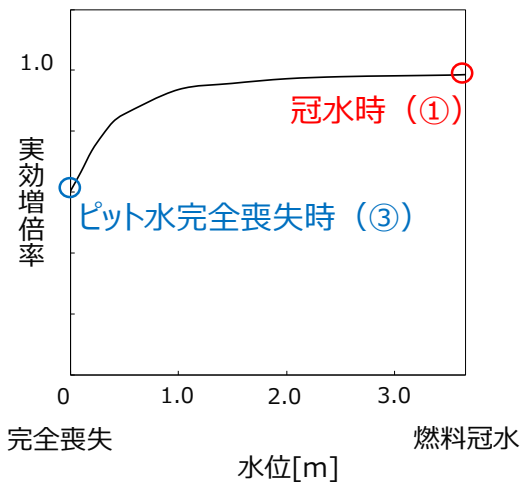
【③低水密度領域】

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)

本申請 (気相部、液相部の 2 相での水位変化における実効増倍率の傾向)

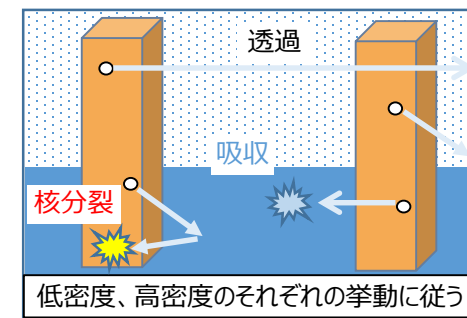


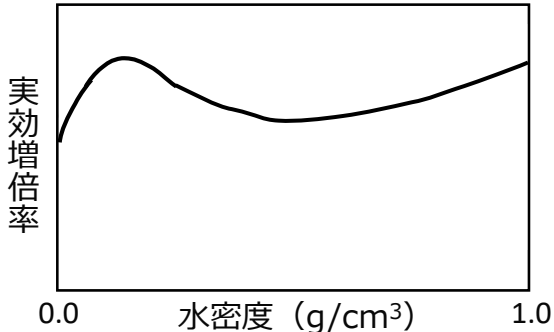
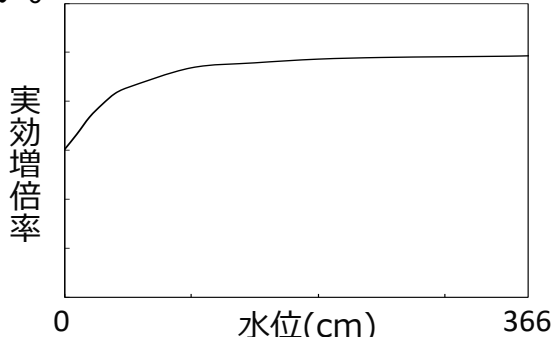
水位変化時の実効増倍率挙動

【2相の状態】

- 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が減少し、低水密度領域③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傾向となる。

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。	気相部・液相部の水密度は固定であり、水位が変化しても各相の大きさが変わるのみで、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。 





# 解析結果の妥当性確認

- 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、流量を変数とした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

- パラメータスタディに当たっては、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において実施する。

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 (mm)	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	←		

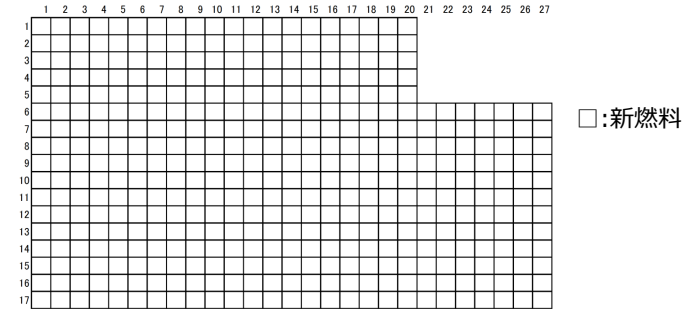


図 燃料配置条件



図 パラスタ結果

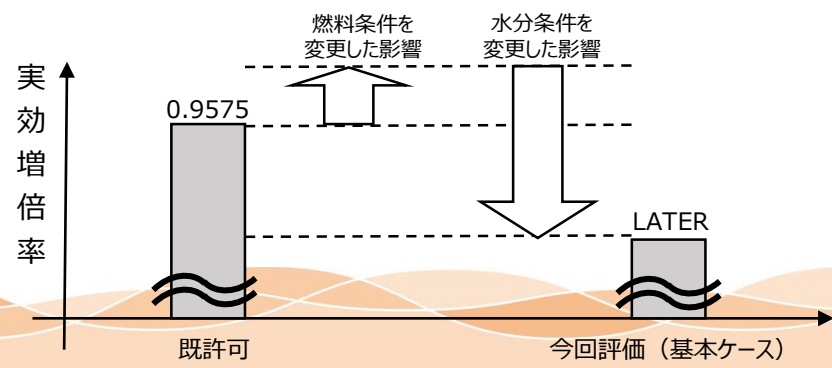
## 評価モデルの違いによる実効増倍率への影響

- 今回評価（基本ケース）は、
  - ・ 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は、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できる。

赤字：実効増倍率の増加要因

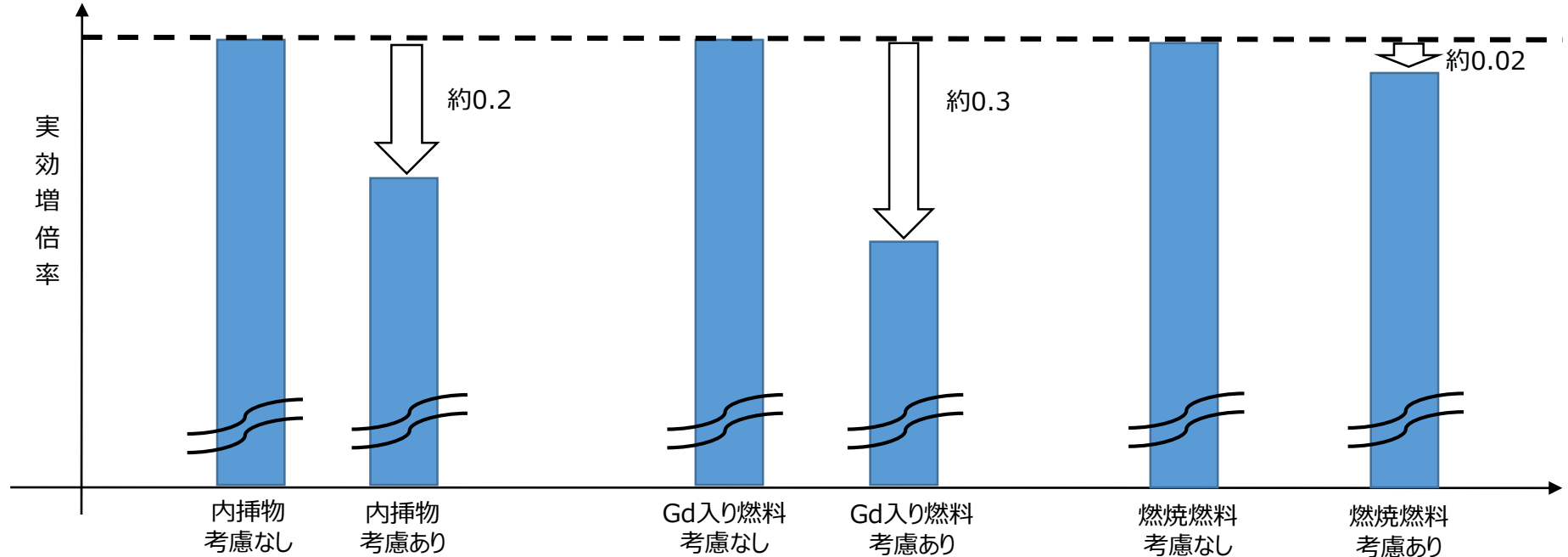
		既許可	基本ケース条件
燃料条件	燃料タイプ	15×15型 通常ウラン燃料（Gd入り燃料の存在は考慮しない。）	←
	<sup>235</sup> U濃縮度	□ wt%	←
	燃料有効長	3,660 mm	←
	燃料配置	燃料の燃焼度や中性子吸収体挿入の有無に応じた3領域管理	燃焼度0GWd/tの燃料のみを貯蔵 (中性子吸収体は考慮しない。)
	AC/FP核種の考慮		考慮なし (新燃料敷き詰めのため)
水分条件	評価モデル	SFP全体の水密度を一様として全ての 水密度範囲(0~1g/cm <sup>3</sup> )で評価するモデル (流入水による燃料棒上の液膜形成を考慮しないモデル)	流入水の流量や性状（液膜化）を 踏まえた水密度を設定するモデル <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	概念なし	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	考慮なし	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



# 燃料条件が有する保守性について

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、保守的な条件としている。



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

燃烧燃料が存在することの影響

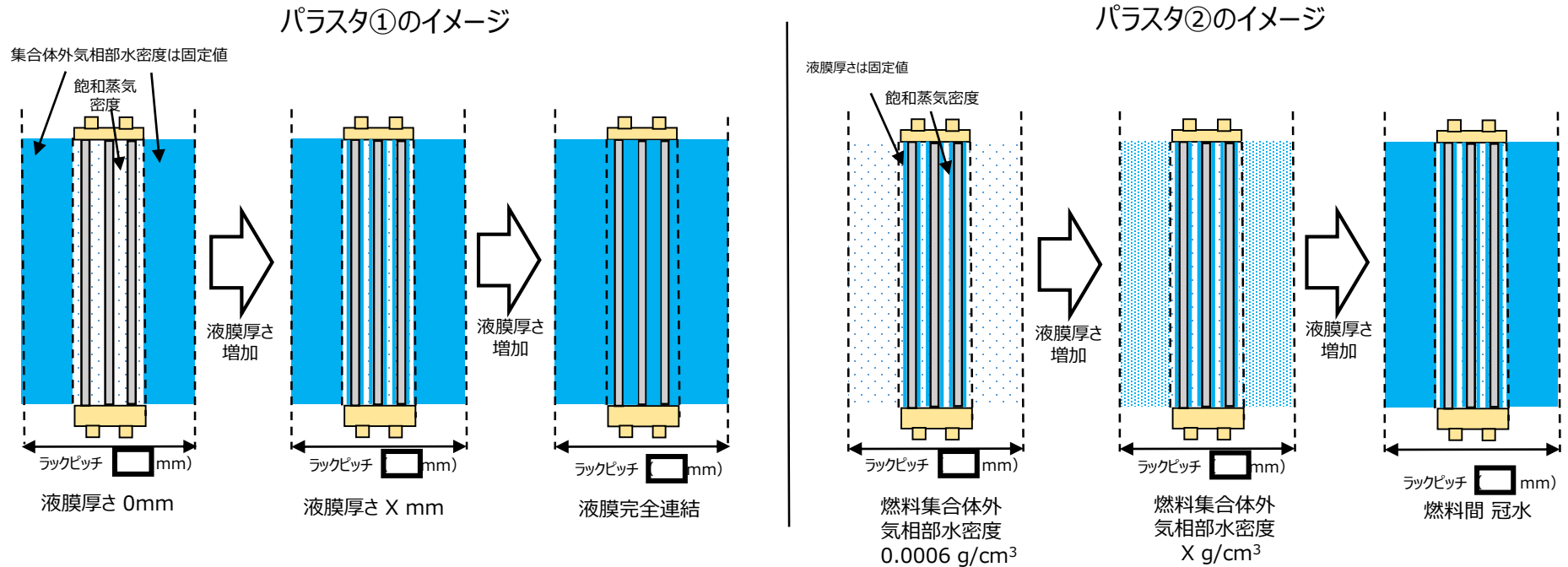
内挿物	①内挿物考慮なし	②RCC挿入を考慮	内挿物考慮なし		内挿物考慮なし
燃料種類	通常ウラン燃料		①通常ウラン燃料	②Gd入りウラン燃料	通常ウラン燃料
燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP無限体系)		新燃料敷き詰め (SFP無限体系)		①新燃料敷き詰め (SFP有限体系) ②新燃料と25GWd/t燃烧燃料のチェッカーボード配置 (SFP有限体系)
(水分条件)	冠水		冠水		冠水

# 液膜モデルの妥当性確認

○ 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>

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



- 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、燃料配置を新燃料敷き詰めとした基本ケースおよび感度解析ケースにおいて未臨界を維持できること（実効増倍率の評価結果が0.98以下であること）により確認できる。
- 未臨界が設計で担保されているのであれば、運用上の制限をなくすことができ、現場作業でのヒューマンエラー防止につながると考えている。よって実運用では燃料配置に係る制限は設けない。
- なお実運用では、燃料取替毎に炉心に装荷する新燃料（約60体）を貯蔵しているため、今回基本ケースのように新燃料のみでSFラックが満杯になることはない。
- SFPが満杯になる状況では、燃烧の進んだ多量の使用済燃料が貯蔵されることとなり、その場合SFP内の実効増倍率は新燃料敷き詰め時と比べ小さくなる。

燃烧度 (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) <sup>※</sup>	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55GWd/t燃料平衡炉心の装荷燃料（157体）と使用済燃料（40GWd/t：267体）とした。