

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

審査会合における指摘事項の回答

2020年12月7日

関西電力株式会社

目 次 (1)

<前回会合コメントへの回答>

【コメントNo.1】燃焼度の不確かさとして集合体相対出力誤差を見込むべきか説明すること	1
【コメントNo.2】軸方向燃焼度分布を一定としたほうが厳しくなることを解析で説明すること	2
【コメントNo.3】核種選定におけるFPの基本ケース、不確かさケースの具体的選定の考え方を説明すること	3
【コメントNo.4】液滴径について、体積分率での50%出現値を使用することを検討すること	4、5
【コメントNo.5】流量におけるポンプ台数の考え方について説明すること	6

<未臨界性評価の設定に関する基本的考え方>

設置許可基準規則第54条 2 項の要求に係る未臨界性評価ケースの検討方針	7
パラメータの関係整理	8、9
SA有効性評価を踏まえた未臨界性評価条件の設定方針	10
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	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
「燃焼燃料の燃焼度」の設定	17
「軸方向燃焼度分布」の設定	18
「核定数計算コードと核定数ライブラリ」の設定	19、20
「燃焼時の内挿物の種類」の設定	21
「核種選定」の設定	22
「冷却日数」の設定	23

(2) 水分条件

「流量」の設定	24
「SFPへの流入範囲、流量分布」の設定	25、26
「燃料集合体内への流入割合」の設定	27、28
「液膜となる流量の割合」の設定	29
「液膜厚さの評価式」の設定	30、31
「放水の液滴径」の設定	32、33
「海水中の塩素濃度」の設定	34

【コメントNo.1】燃焼度の不確かさとして集合体相対出力誤差を見込むべきか説明すること

＜回答＞

燃焼度は領域管理の運用に係わるパラメータであることから、基本ケース条件設定方針(d)に基づき、基本ケース条件に不確かさを見込んだ値を設定する。よって燃焼度に影響する原子炉熱出力及び燃料集合体相対出力の不確かさは、どちらも基本ケース条件に織り込むこととする。

【燃焼度の測定手法】

- 各集合体の燃焼度は、定期的に可動式小型中性子束検出器（以下、「M/D」という。：Movable Detector）を用いて測定した炉内の中性子束分布から求めた各集合体の相対出力分布に炉心全体の熱出力量（MWd）を掛けることで求められる。

【燃焼度の信頼性】

- 上記手法により計算された燃焼度は燃料取替毎の炉心設計における入力値として使用され、その妥当性は炉物理検査（臨界ボロン濃度、原子炉停止余裕、出力分布等）において、設計値との差異が判定基準内に収まることをもって確認される。高浜1,2号炉ではそれぞれ過去全ての炉物理検査により妥当性を確認している。

【燃焼度の不確かさ】

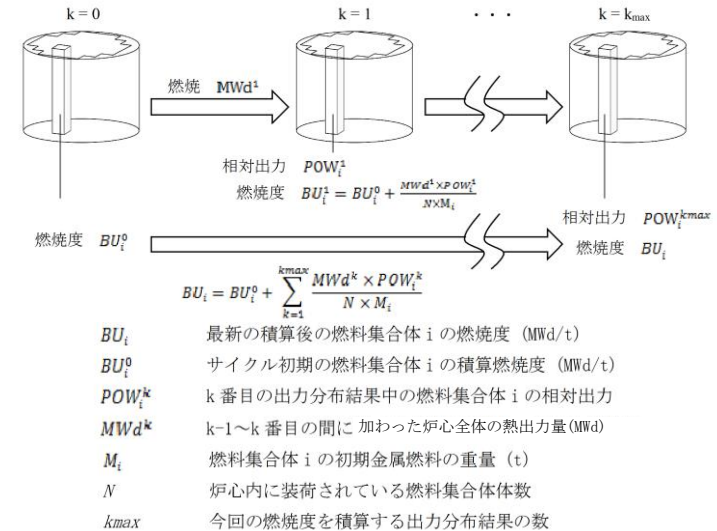
- 燃焼度は、原子炉熱出力と燃料集合体相対出力の誤差に影響を受け、それぞれの誤差の程度は以下の通り。

誤差を有する因子	誤差	出典
原子炉熱出力	1.55 %	熱出力計算に適用するパラメータ測定時の計器誤差
燃料集合体の相対出力	<input type="text"/> %	取替炉心に対する測定値と設計値の差を評価、統計処理

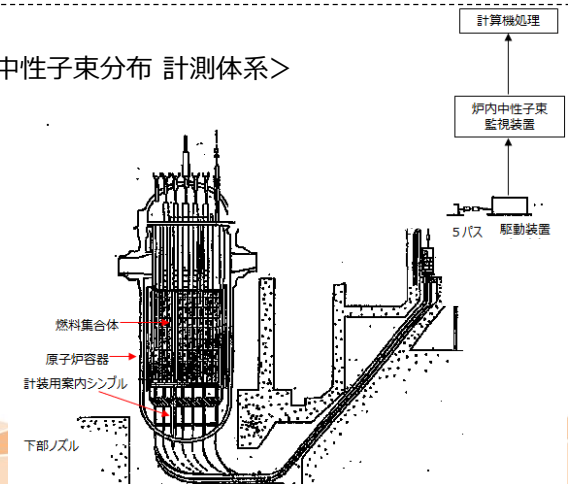
- 上表の誤差因子を保守的に単純和した値を切り上げた4%を不確かさとして織り込んだ値を基本ケース条件とし、実運用では不確かさを考慮しない最確条件で管理する。

$$1.55 + \boxed{} = 4\%$$

＜燃料集合体内の燃焼度計算手法＞



＜炉内中性子束分布 計測体系＞



＜回答＞

- ・燃焼燃料の軸方向燃焼度分布を一定とした場合と分布ありとした場合では、分布一定としたほうが実効増倍率は僅かに大きくなった。（類推ケース）
- ・今後、さらに基本ケースと条件を揃えたケースについても、同様の確認を実施する。

項目	評価条件	
	類推ケース	基本ケースと条件を揃えたケース
燃料配置条件	燃焼燃料敷き詰め（ラック有限体系）	基本ケース条件と同じ
燃焼燃料の燃焼度	20GWd/t	24GWd/t
燃焼燃料の軸方向燃焼度分布	①燃焼度分布一定 ②燃焼度分布考慮	←
水密度条件	気相部の水密度は一律に0.04g/cm ³	基本ケース条件と同じ
核種の選定	既許可と同じ。	基本ケース条件と同じ
ラック仕様、反射体条件等	既許可と同じ。	←
評価結果	<p>実効増倍率</p> <p>水位[cm]</p> <p>— 燃焼度分布一定 - - 燃焼度分布考慮</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center; width: fit-content; margin: auto;">LATER</div>

<回答>

- FP核種の基本ケース条件は、、ベンチマーク実績を有する核種から選定することとする。
- 核種選定の基本ケース条件に対し考慮すべき不確かさは無いことから、不確かさを考慮した条件は設定しない。
- なおSCALEコード自体の不確かさについては、FPに対し実施したベンチマーク解析結果を元に算出し、実効増倍率の不確かさとして別途考慮する。

表 解析時に考慮するFP核種

FP核種	基本ケース	ベンチマーク実績	半減期
⁸³ Kr			- (安定)
⁹³ Zr			約 1.5×10^6 年
⁹⁵ Mo			- (安定)
⁹⁹ Tc			約 2.1×10^5 年
¹⁰¹ Ru			- (安定)
¹⁰³ Rh			- (安定)
¹⁰⁵ Rh			約35時間
¹⁰⁵ Pd			- (安定)
¹⁰⁸ Pd			- (安定)
¹⁰⁹ Ag			- (安定)
¹³³ Cs			- (安定)
¹³⁴ Cs			約2.1年
¹³⁵ Cs			約 2.3×10^6 年
¹³⁹ La			- (安定)
¹⁴¹ Pr			- (安定)
¹⁴³ Nd			- (安定)
¹⁴⁵ Nd			- (安定)
¹⁴⁷ Sm			約 1.1×10^{11} 年
¹⁴⁹ Sm			約 2.0×10^{15} 年
¹⁵⁰ Sm			- (安定)
¹⁵¹ Sm			約90年
¹⁵² Sm			- (安定)
¹⁴⁷ Pm			約2.6年
^{148m} Pm			約41日
¹⁴⁹ Pm			約53時間
¹⁵³ Eu			- (安定)
¹⁵⁴ Eu			約8.6年
¹⁵⁵ Eu			約4.8年
¹⁵⁵ Gd			- (安定)

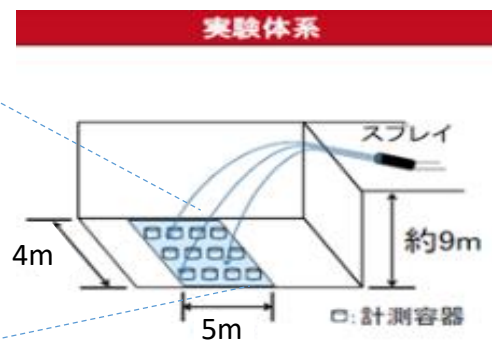
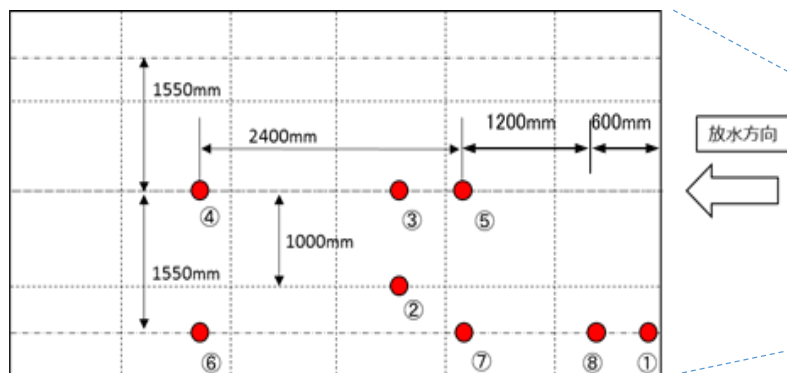
＜回答＞

以下の理由により、液滴径の基本ケース条件は、全測定箇所を取得された液滴径の体積分率の50%出現値を踏まえ1.5mmとし、不確かさを考慮した条件は、それよりも更に小さい20%出現値を踏まえ1.0mmを設定する。

- ・ スprayヘッド実機を用いた試験結果より、液滴の個数は全測定点で0.2～0.4mmでピークとなり、その後緩やかに減少しており、また流量を変えた場合でも個数分布の特徴は変わらないことから、本試験で得られた各測定箇所での結果はSprayヘッドの液滴特性を代表している。
- ・ 流量の大部分を占める放水砲由来の液滴径は、Sprayヘッドの液滴よりも大きくなるが、保守的にSprayヘッドと同じ液滴径を設定している。

【実機を用いた液滴径取得試験の概要】

測定箇所



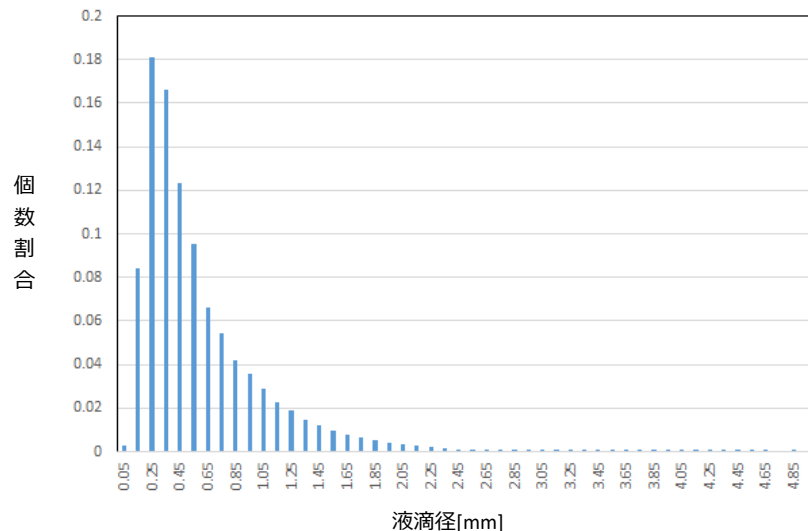
試験の様子



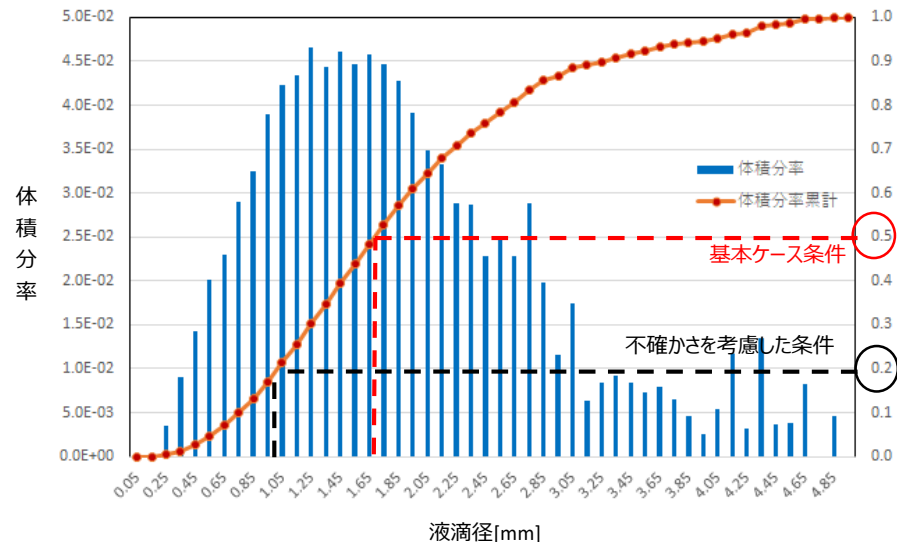
(続 き)

試験結果

液滴径毎の個数分布



液滴径毎の体積分率



【基本ケース条件の設定】

○ 液滴径の全取得結果に対する平均液滴径（体積分率の50%出現値）を踏まえ、1.5mmを設定する。

- ・ 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

【不確かさを考慮した条件の設定】

○ 放水の液滴径に対し考慮すべき不確かさは、「風の影響」および「スプレー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、全取得液滴を用いた体積分率における20%出現値（1.0mm～1.05mm）を踏まえ、1.0mmとする。

○ なお、流量の大部分を占める放水砲由来の液滴径にもスプレーヘッド由来の液滴を使用していることから、「放水砲＋スプレーヘッド」による放水の平均液滴径が1.0mmを下回ることは考え難い。

【コメントNo.5】流量におけるポンプ台数の考え方について説明すること

<回答>

- 基本ケースでは全手順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。
(ポンプを複数台設置している理由は、故障や点検等により使用できない場合に備えるためであり、複数台の同時起動は系統やポンプ自体への負荷増加の観点から推奨されない。手順書上では特に明文化していない。)
なおポンプ1台当たりの流量については、ポンプ揚程曲線上の上限値を基本的に設定する。
- 不確かさを考慮した条件としては、設置されるポンプの全数起動を想定する。
- 上記の考え方を踏まえ、基本ケース条件には m³/h を、不確かさを考慮した条件には m³/h を設定する。

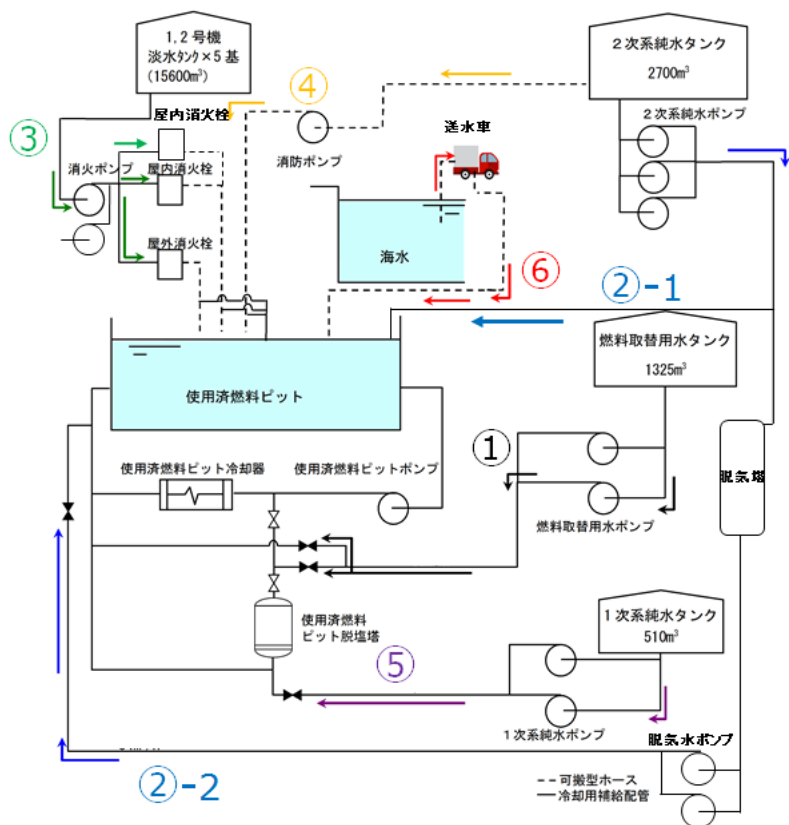


図 SFP注水設備の構成

表 注水設備による設定流量

注水手順(ポンプ)	基本ケース流量	不確かさを考慮した流量	根拠
① 燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h×2台	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)	5m ³ /h	5m ³ /h×3台	実測値
②-2 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ) (脱気塔経由)	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h※1×2台※2	ポンプ揚程曲線
③ 1,2号淡水タンク(消火ポンプ-消火栓)	22m ³ /h	22m ³ /h×3か所※3×2台	実測値
④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	ポンプ揚程曲線
⑤ 1次系純水タンク(1次系純水ポンプ)	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h×2台	ポンプ揚程曲線
⑥ 海水(送水車)	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	ポンプ揚程曲線
合計	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	-

※1 脱気水ポンプの流量。 ※2 脱気水ポンプの台数。

※3 消火栓の数(屋内消火栓2か所、屋外消火栓1か所)。

(基本ケース条件)

合計 m³/h

表 放水設備による設定流量

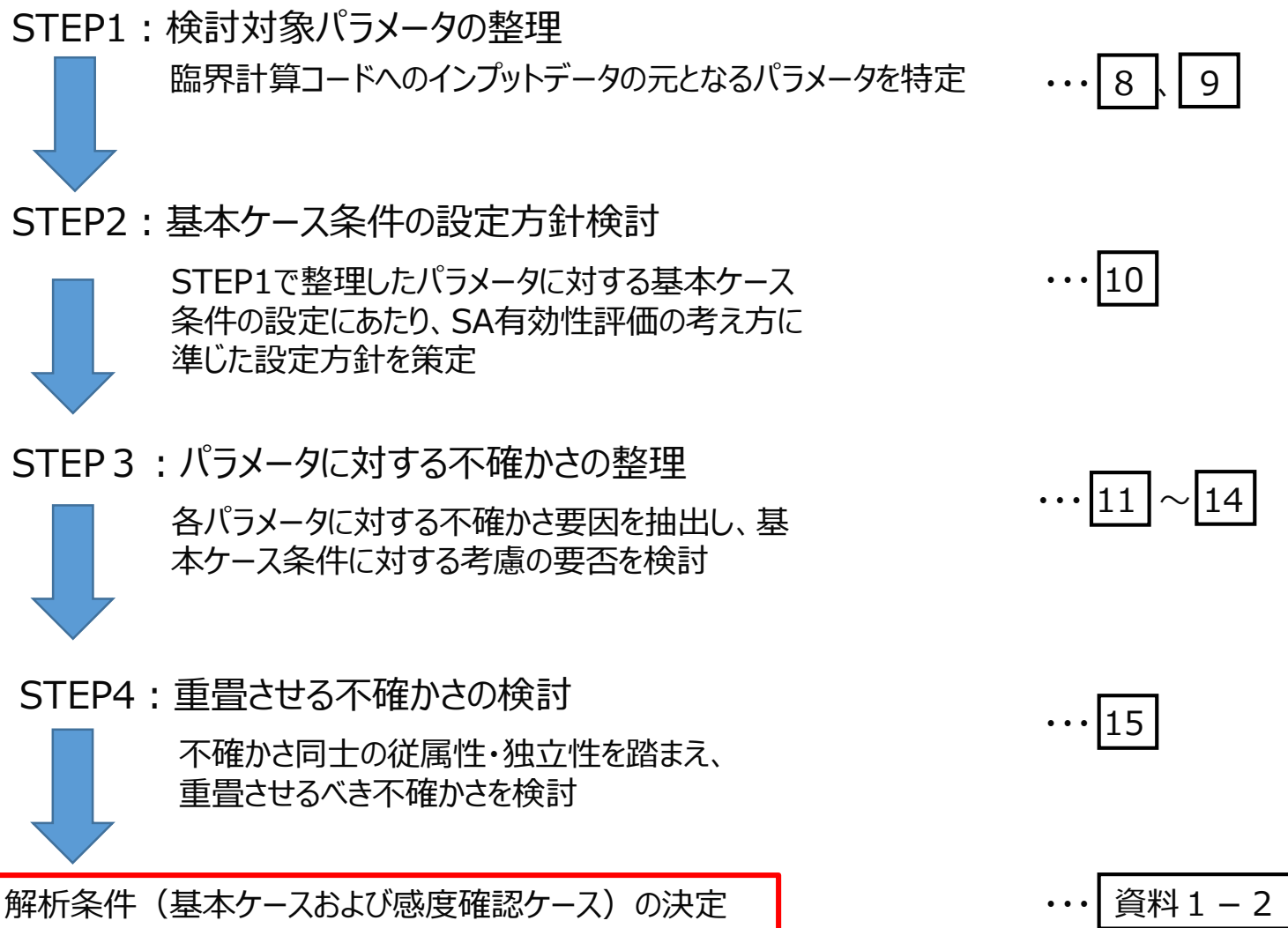
放水手順	基本ケース流量	不確かさを考慮した流量	根拠
送水車によるスプレイ	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	スプレイヘッドの仕様上限
大容量ポンプによる放水	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	ポンプ揚程曲線
合計	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	-

※ 大容量ポンプは、3種類が配備されており、最も容量の大きいポンプと2番目に容量が大きいポンプの直列を想定。律速となる低い方の流量 (m³/h) が各号炉に2等分されるとした。

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。

<未臨界性評価の設定に関する基本的考え方>

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。

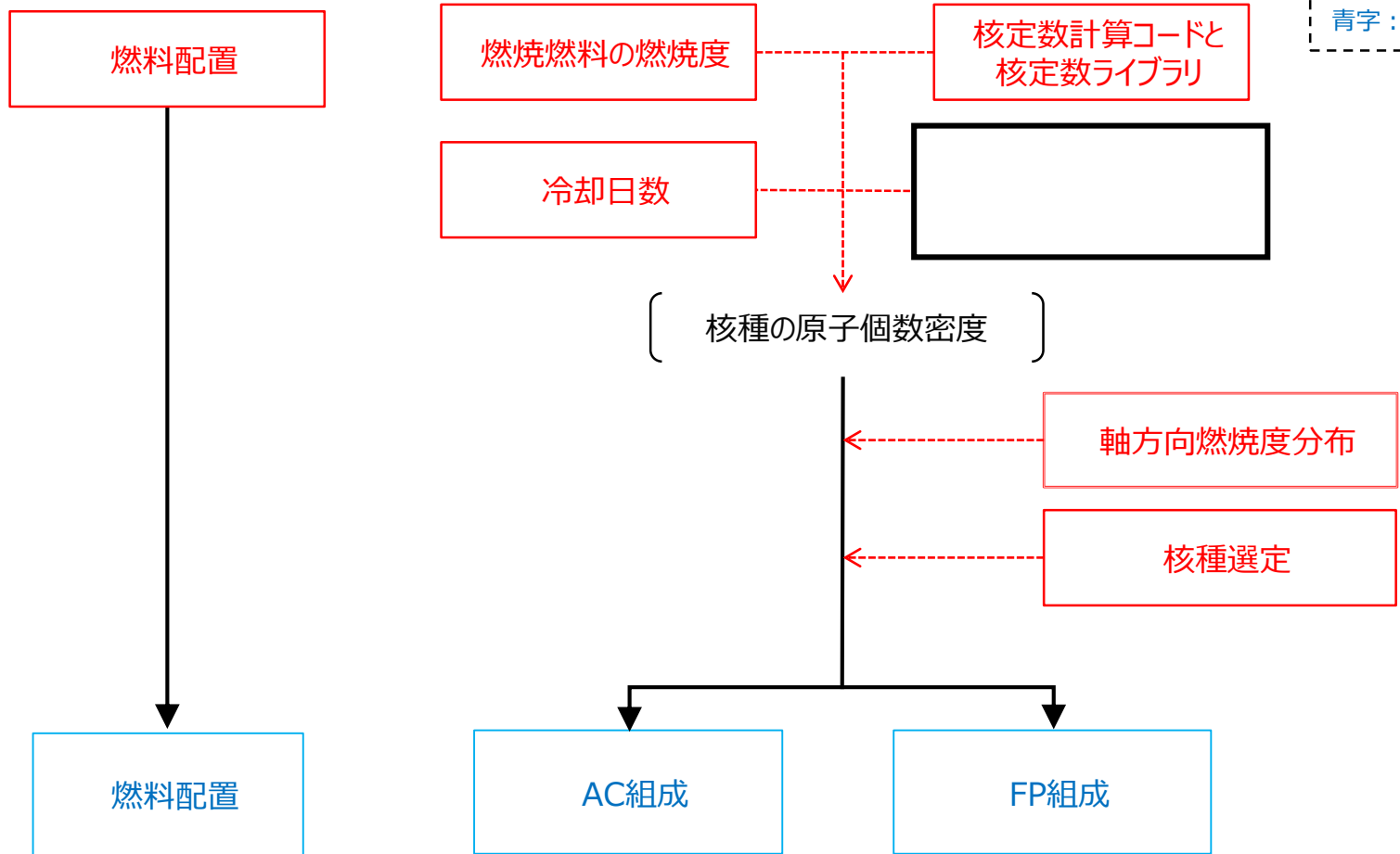


パラメータの関係整理 (1 / 2)

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。

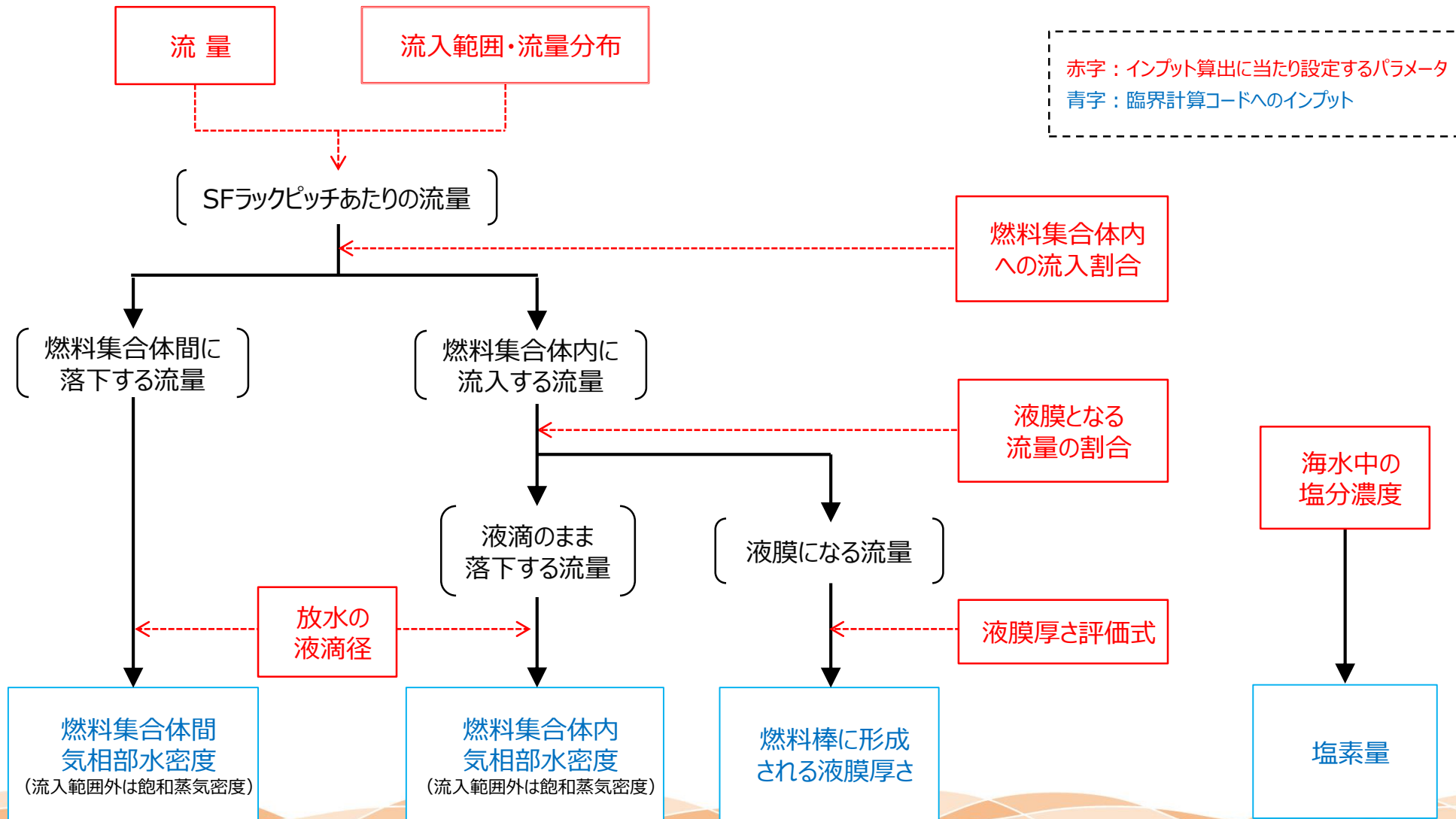
【燃料条件に関するパラメータの関係性】

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】



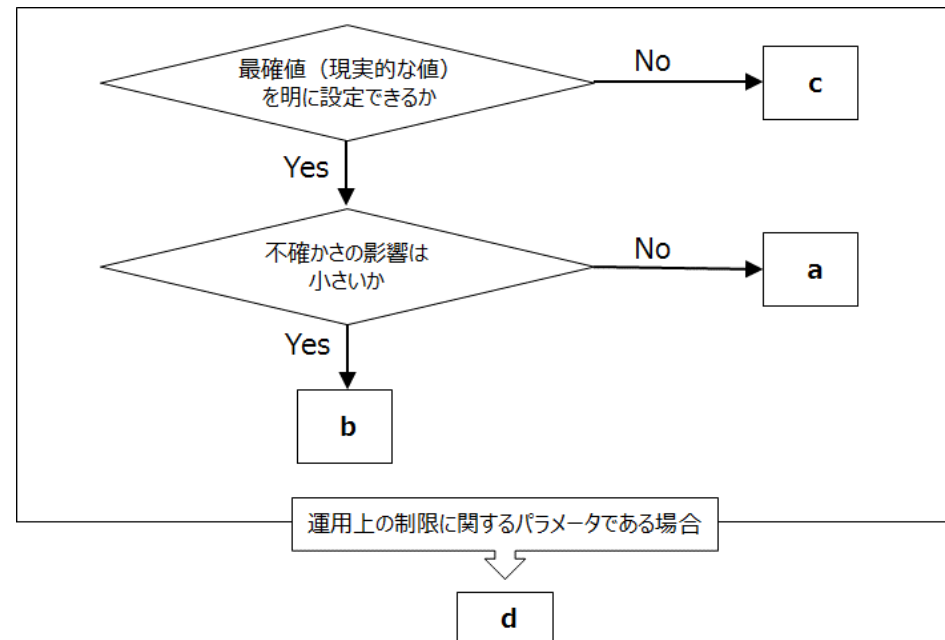
<未臨界性評価方針>

設置許可基準規則 第54条2項の評価を実施することに鑑み、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

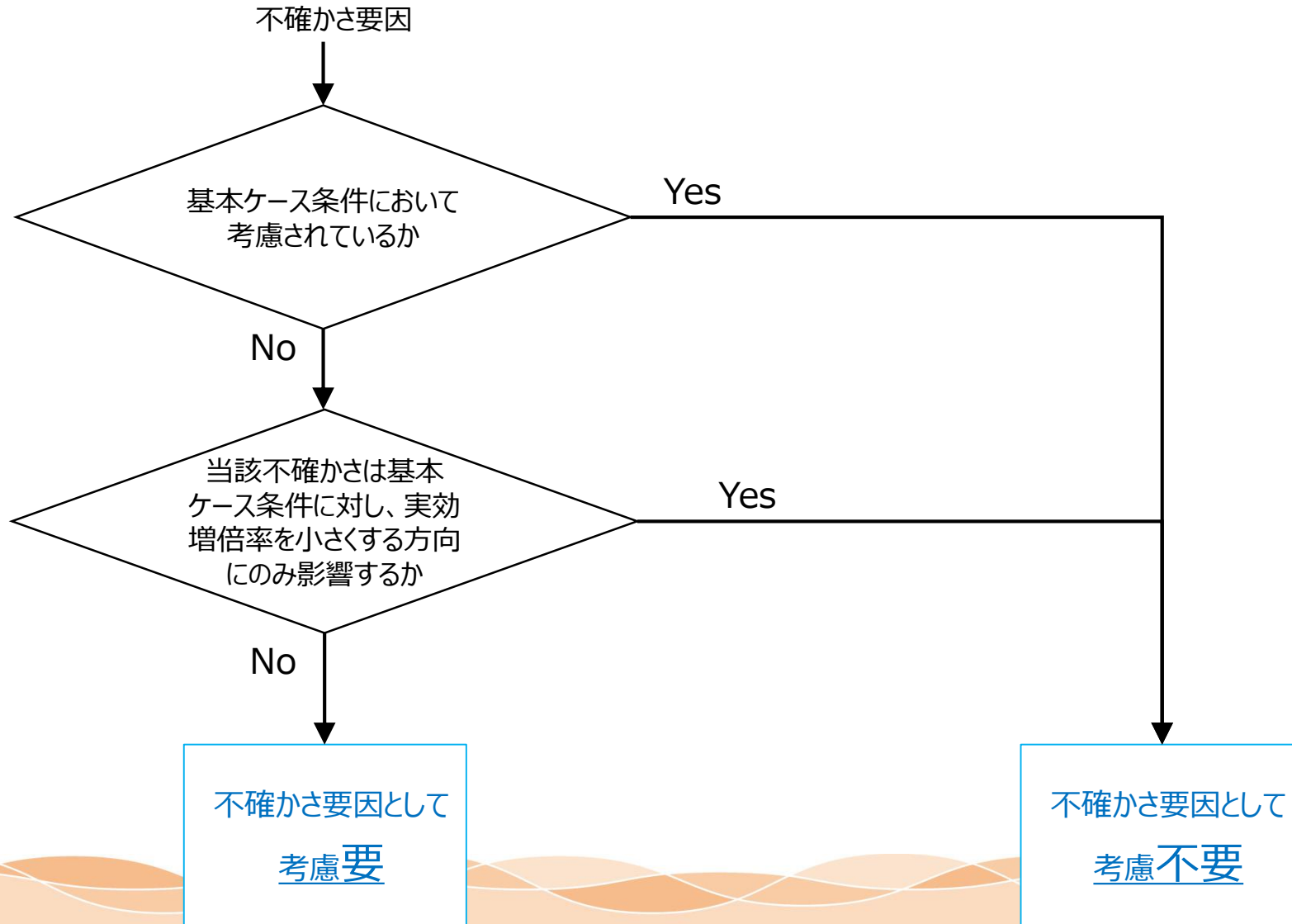
2.2.1 有効性評価の手法及び範囲

- (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。

～以下 略～

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結果を次ページ以降に示す。
- なお、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	<ul style="list-style-type: none"> SFPは燃料で満杯 貯蔵燃料は新燃料と24GWd/t燃焼燃料のチェッカーボード配置 	<ul style="list-style-type: none"> 燃焼度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	燃焼度が低い燃料が多く貯蔵、且つSFP満杯	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
燃焼燃料の燃焼度	24GWd/t	<ul style="list-style-type: none"> 実運用における管理燃焼度25GWd/tの設定に対し、不確かさ影響を考慮して設定。 	d (運用上の制限に関連するパラメータ)	原子炉熱出力の誤差【基本ケース条件で考慮】 燃料集合体の相対出力誤差【基本ケース条件で考慮】	燃焼度を大きくする	燃焼度を小さくする	不要
軸方向燃焼度分布	一定	実効増倍率が厳しくなる条件として設定。	b (燃焼燃料には軸方向に燃焼度分布があるが、実効増倍率へ及ぼす影響は軽微)	軸方向に燃焼度分布がある【基本ケース条件で考慮】	軸方向燃焼度分布あり	一定	不要
核定数計算コードと核定数ライブラリ	<ul style="list-style-type: none"> 核定数計算コードにはPHOENIX-P(ライブラリ: ENDF-B/V)を使用 	<ul style="list-style-type: none"> 炉心設計で妥当性が確認されているコード(ライブラリ含む)を使用。 	a	核定数計算コードの計算精度(断面積ライブラリの違いおよび縮約の影響)	Pu生成量増加 or 減少	Puの生成量が大きくなる	不要※1
	燃焼計算	<ul style="list-style-type: none"> 実効増倍率を高める保守的な条件を設定 	c (は複数種類ある)	を使用し燃焼【基本ケース条件で考慮】	Pu生成量減少	Puの生成量が大きくなる	不要
核種選定	<ul style="list-style-type: none"> AC核種は、Puの原子個数密度を多くする設定 FP核種は、核種であり、ベンチマーク実績がある核種から選定 	<ul style="list-style-type: none"> 実効増倍率を高める保守的な条件を設定※2 	c (核種によっては、その特性によりSFP保管中の存在位置、量を定める難しい。)	他のFP核種の存在【基本ケース条件で考慮】	中性子吸収効果が増加	中性子吸収効果が低下 核分裂性核種が増加	不要
				他のAC核種の存在【基本ケース条件で考慮】 臨界計算コードでの核種取り扱いの違い(ベンチマーク実績の有無)【基本ケース条件で考慮】	核分裂性核種が増加 中性子吸収効果が増加 or 減少		不要
冷却日数		<ul style="list-style-type: none"> 実効増倍率を高める保守的な条件を設定 	c (冷却日数は燃料毎に異なる)	燃料毎の冷却日数の差異【基本ケース条件で考慮】※3		冷却日数	不要

※1 燃焼計算コードによる組成計算結果誤差の実効増倍率への影響は、組成を決定するうえでの燃焼計算手法が有する保守性に包絡されることを確認している。

※2 具体的な核種名は22ページ参照。

※3 を選定しているため、実効増倍率への影響は極小であり無視できる。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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		
水分条件	流量	□ m ³ /h	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
				定格を上回る使用(ポンプ揚程、ポンプ台数など)	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	c (設備の設置位置によりSFPI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	不要
				定格を上回る使用(ポンプ揚程、ポンプ台数など)			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】	単位面積当たりの流量低下	流量分布：単位面積当たりの流量増加	不要	
			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%	・ラックピッチと燃料集合体の幾何形状より求まる面積比 ・集合体上部へ流入する水の一部は上部ノズル構造等により弾かれる。 ・無風を仮定(斜めからの液滴落下は考慮しない。)	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%	・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。	a	流入形態(一部の流量は液滴のまま落下)【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「流入範囲を広げるが液滴の落下挙動に影響を与える風の影響」(風の影響②)は分けて考慮する。

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	・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	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
					多種ある実験式が存在【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	・スプレイヘッドの実放水試験にて取得した平均液滴径	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
					定格を上回る使用 (ポンプ揚程、ポンプ台数など)			
					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		
					風の影響② (液滴径の大きさに対する効果)	液滴径を小さくする		
					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	要	
	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

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

各パラメータ毎に考慮「要」と抽出された不確かさ要因は、それぞれ相互に因果関係を持たず全て独立であることから、重畳は考慮しない。

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
流量	定格を上回る使用 (ポンプ揚程、ポンプ台数等)
SFPへの流入範囲、 流量分布	風の影響①
燃料集合体内への 流入割合	風の影響②
放水の液滴径	スプレイ試験における測定箇所毎の 結果の差異

各不確かさ要因に相互の因果関係はない（例えば、「定格を上回る使用」が発生したことに起因して、「風の影響」等の不確かさ要因が発生することはない）ため、これらの不確かさは全て独立である。

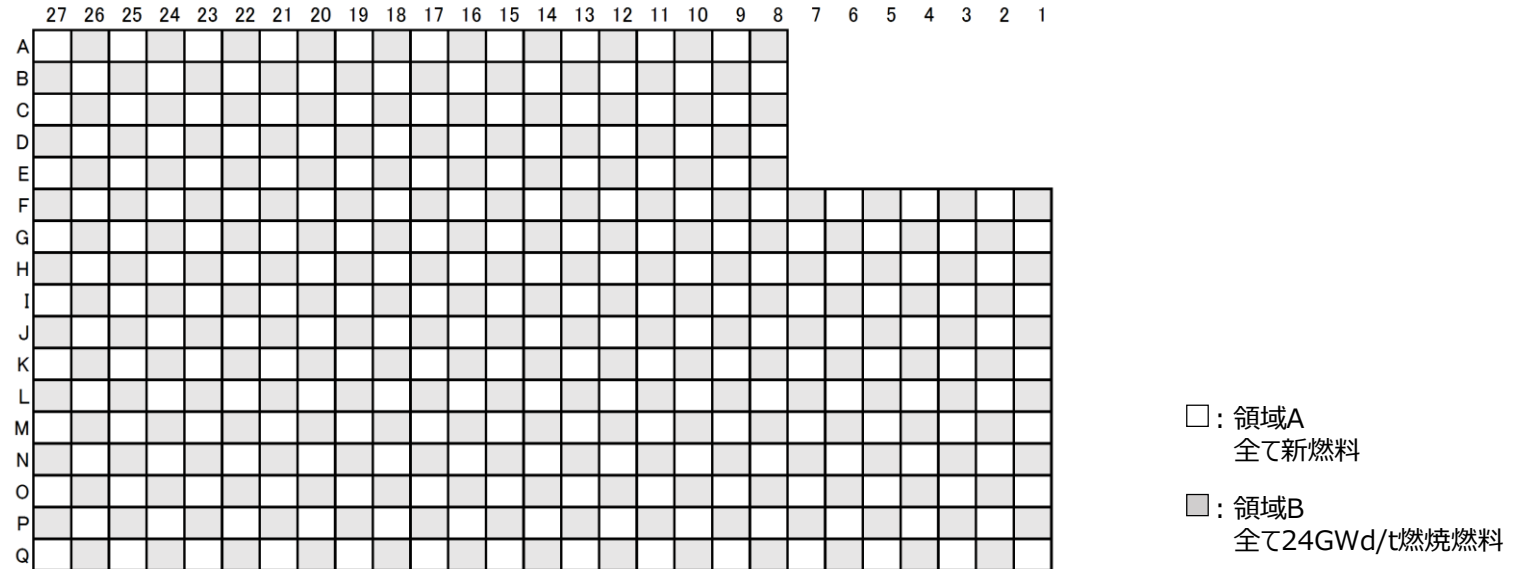
<具体的な解析条件（基本ケース条件、不確かさを考慮した条件）に関する説明>

(1) 燃料条件

「燃料配置」の設定

(基本ケース条件) (不確かさを含む条件)

- ・領域Aには全て新燃料を、領域Bには全て24GWd/t^{※1}の照射燃料を貯蔵する設定とする。
(実運用においては、領域Aには0~55GWd/tの燃料を、領域Bには25~55GWd/tの燃料を貯蔵する。)



参考 実運用下と基本ケースでの燃料貯蔵体数比較

燃焼度区分 (GWd/t)	0~10	10~20	20~25	25~30	30~40	40~	計
実運用下 (SFラック満杯想定) ^{※2}	44体	44体	8体	20体	24体	17+267体	424体
基本ケース条件	212体	0体	0体	212体	0体	0体	424体

※1 「燃焼度」に対する不確かさを考慮した値。

※2 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。

「 燃焼燃料の燃焼度 」 の設定

(基本ケース条件) (不確かさを含む条件)

- ・領域管理運用上の管理燃焼度25GWd/tに対し不確かさを見込んだ値として24GWd/t (= 25×0.96) を設定する。

【燃焼度の測定手法】

- 各集合体の燃焼度は、定期的に可動式小型中性子束検出器 (以下、「M/D」という。: Movable Detector) を用いて測定した炉内の中性子束分布から求めた各集合体の相対出力分布に、炉心全体の熱出力量 (MWd) を掛けることで求められる。

【燃焼度の信頼性】

- 上記手法により計算された燃焼度は燃料取替毎の炉心設計における入力値として使用され、その妥当性は炉物理検査 (臨界ボロン濃度、原子炉停止余裕、出力分布等) において、設計値との差異が判定基準内に収まることをもって確認される。高浜1,2号炉ではそれぞれ過去全ての炉物理検査により妥当性を確認している。

【燃焼度の不確かさ】

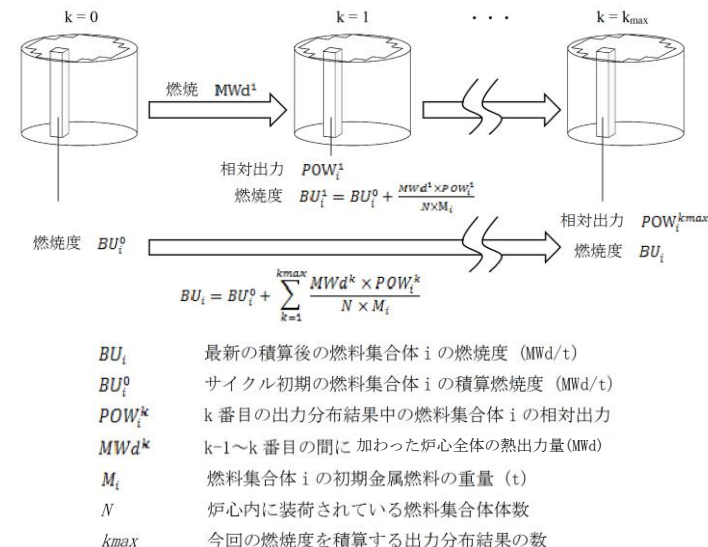
- 燃焼度は、原子炉熱出力と燃料集合体相対出力の誤差に影響を受け、それぞれの誤差の程度は以下の通り。

誤差を有する因子	誤差	出典
原子炉熱出力	1.55 %	熱出力計算に適用するパラメータ測定時の計器誤差
燃料集合体の相対出力	<input type="text"/> %	取替炉心に対する測定値と設計値の差を評価、統計処理

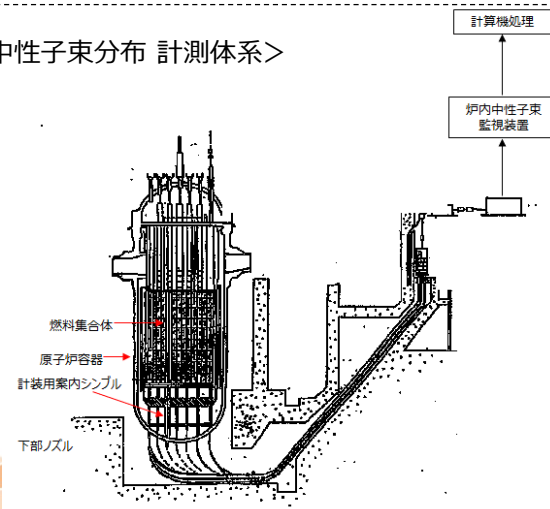
- 上表の誤差因子を保守的に単純和した値を切り上げた4%を不確かさとして織り込んだ値を基本ケース条件とし、実運用では不確かさを考慮しない最確条件で管理する。

$$1.55 + \boxed{} \cong 4\%$$

＜燃料集合体内の燃焼度計算手法＞



＜炉内中性子束分布 計測体系＞



「軸方向燃焼度分布」の設定

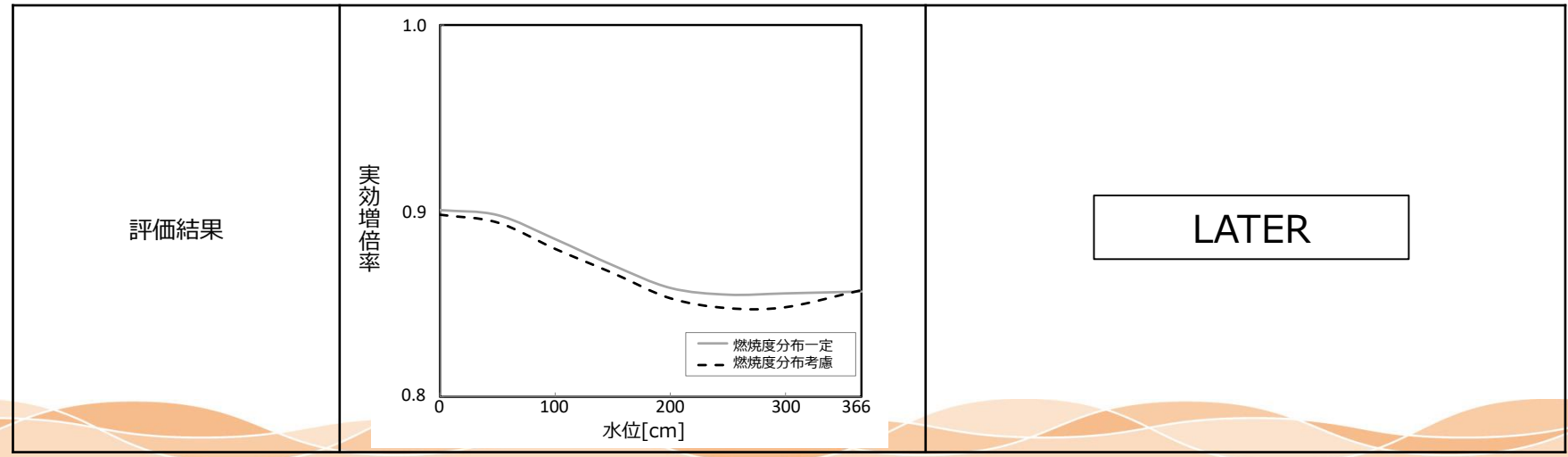
(基本ケース条件) (不確かさを含む条件)

- 軸方向燃焼度分布は、低水位時の実効増倍率が大きくなる条件として、一定と設定する。

【説明】

- 燃焼燃料の軸方向燃焼度分布を一定とした場合と分布ありとした場合では、分布一定としたほうが実効増倍率は僅かに大きくなった。(類推ケース)
- 今後、さらに基本ケースと条件を揃えたケースについても、同様の確認を実施する。

項目	評価条件	
	類推ケース	基本ケースと条件を揃えたケース
燃料配置条件	燃焼燃料敷き詰め(ラック有限体系)	基本ケース条件と同じ
燃焼燃料の燃焼度	20GWd/t	24GWd/t
燃焼燃料の軸方向燃焼度分布	①燃焼度分布一定 ②燃焼度分布考慮	←
水密度条件	気相部の水密度は一律に0.04g/cm ³	基本ケース条件と同じ
核種の選定	既許可と同じ。	基本ケース条件と同じ
ラック仕様、反射体条件等	既許可に同じ。	←



(基本ケース条件) (不確かさを含む条件)

既許認可における未臨界性評価でも用いたPHOENIX-P (ライブラリ: ENDF/B-V)を使用する。

[説明]

- ・本コードは、他コードとのクロスチェックや、取替炉心設計における実測値との比較において良好な一致が示されており、燃焼に伴う核種組成の変化を適切に評価できることを確認している。
- ・本コードによる燃焼計算結果としての核種組成には誤差が含まれるが、その影響は反応度が高くなる条件で燃焼計算を行うことによる保守性に包含されることを感度解析にて確認している。

[感度解析に関する説明]

○ 感度解析① (目的: 核種生成量の誤差が実効増倍率へ与える影響の確認)

- ・核種組成の計算誤差は、エネルギー群の縮約および断面積ライブラリの差異に起因するが、感度解析の結果、実効増倍率への影響は約0.4%であった。

<解析条件>

(核種生成量の精度確認)

- 解析体系 : ピンセル体系
- 燃料燃焼度 : 50GWd/t
- 考慮核種 : 表1参照
- 使用コード : PHOENIX-P, MVP-BURN
- MVP-BURNのライブラリ : JENDL4.0, ENDF/B-VII, JEFF3.1

MVP-BURNとPHOENIX-Pとの原子個数密度比: 表1参照

(実効増倍率への影響確認)

- 使用コード : SCALE6.0
- 解析体系 : 50GWd/t燃焼燃料敷き詰め (無限体系)
- 水密度条件 : 最適減速水密度 (約0.1g/cm³)
- 燃料内核種の原子個数密度 : ①PHOENIX-Pでの計算結果そのまま
②MVP-BURNでの計算結果から核分裂性物質は最大、中性子捕獲核種は最小の値を選択

<結果>

実効増倍率への影響 : 0.0041

表1 PHOENIX-PとMVP-BURNの核種生成量比較

核種	PHOENIX-PとMVP-BURNの 原子個数密度比			特徴	keffが最大 となる原子 個数密度比
	MVP-BURNのライブラリ				
	JENDL4.0	ENDF/B-VII	JEFF3.1		

表2 核種組成の誤差が実効増倍率へ与える影響

原子個数密度条件				ΔK_1^*
①		②		
実効増倍率 K_{PHNX}	統計誤差 σ_{PHNX}	実効増倍率 K_{MAX}	統計誤差 σ_{MAX}	
[]	[]	[]	[]	0.0041

※

(続 き)

○ 感度解析② (目的：燃焼計算手法が有する保守性の確認)

- ・ プルトニウム生成量を多くし実効増倍率を厳しくなるような手法で燃焼計算した燃料組成を、すべての燃焼燃料に対して適用して臨界計算を実施している (なお通常炉心設計においては [] を使用することはほとんどないことから、全ての燃焼燃料に対して [] 燃焼計算することには大きな保守性がある。) 。
- ・ 感度解析の結果、実効増倍率への影響は約0.5%であった。

<解析条件>

(核種生成量の精度確認)

- 解析体系 : 無限体系
- 燃料燃焼度 : 20GWd/t
- 水分条件 : 純水冠水
- PHOENIX-Pでの燃焼計算手法 : ① [] で計算した値
② [] で計算した値

表 燃焼計算手法が有する保守性

燃焼計算手法				$\Delta K_2^{※2}$
①	②			
実効増倍率 K_α	統計誤差 σ_α	実効増倍率 K_β	統計誤差 σ_β	
[]	[]	[]	[]	0.0047

<結 果>

実効増倍率への感度 : 0.0047

※2 []

○ 感度解析①、②の結果を踏まえた考察

- ・ $\Delta K_1 < \Delta K_2$ であり、今回の燃料配置条件にて設定する燃焼燃料の燃焼度は25GWd/tであるため、 ΔK_1 はより小さく、 ΔK_2 はより大きくなることから、核種組成計算結果の誤差による実効増倍率への影響は燃焼計算手法が有する保守性に包含される。

(基本ケース条件) (不確かさを含む条件)

実効増倍率を高める設定とするため、を挿入した状態で燃焼計算を行う。

【説明】

- ・ 燃焼燃料の燃焼履歴については、反応度が高くなるよう、核分裂性物質が増える条件とする。
- ・ 具体的には、すべての燃焼燃料に対して、燃焼中にが挿入された状態を考慮する。これにより、
によって中性子スペクトルが硬くなり、 ^{238}U の中性子吸収が増加することによりプルトニウムの生成量を大きく取り扱うことができる。

「核種選定」の設定

(基本ケース条件) (不確かさを含む条件)

- AC核種はPuの原子個数密度を高める設定とする。
- FP核種は [] の核種で、ベンチマーク実績のある核種より選定する。

表 解析時に考慮するAC核種

AC核種	基本ケース	半減期
235U	[]	約 7.0×10^8 年
238U		約 4.5×10^9 年
238Pu		約87年
239Pu		約 2.4×10^4 年
240Pu		約 6.5×10^3 年
241Pu		約14年
242Pu		約 3.7×10^5 年
241Am		約432年
239Np		約2.3日

[]

表 解析時に考慮するFP核種

FP核種	基本ケース	半減期	FP核種	基本ケース	半減期
83Kr	[]	- (安定)	143Nd	[]	- (安定)
93Zr		約 1.5×10^6 年	145Nd		- (安定)
95Mo		- (安定)	147Sm		約 1.1×10^{11} 年
99Tc		約 2.1×10^5 年	149Sm		約 2.0×10^{15} 年
101Ru		- (安定)	150Sm		- (安定)
103Rh		- (安定)	151Sm		約90年
105Rh		約35時間	152Sm		- (安定)
105Pd		- (安定)	147Pm		約2.6年
108Pd		- (安定)	148mPm		約41日
109Ag		- (安定)	149Pm		約53時間
133Cs		- (安定)	153Eu		- (安定)
134Cs		約2.1年	154Eu		約8.6年
135Cs		約 2.3×10^6 年	155Eu		約4.8年
139La		- (安定)	155Gd		- (安定)
141Pr		- (安定)			

表 FP核種を含むベンチマーク実験

実験ID	CASE ID	中性子 吸収剤材質	ケース数合計
[]			

(基本ケース条件) (不確かさを考慮した条件)

- ・実効増倍率を高める条件として、と設定する。

【説明】

AC核種 ⇒ Puの生成量が大きくなるような燃焼条件とあわせて、比較的短半減期の核分裂性核種である ^{241}Pu の崩壊等による反応度低下を考慮しないよう、冷却期間は短めに設定する方が保守的である。

FP核種 ⇒ 冷却期間を考慮することで以下①と②の影響を受けるが、①の効果を考慮しないよう、冷却期間は短めに設定する方が保守的である。

- ① 親核種の崩壊により生成され、中性子吸収能力が大きくなる効果
- ② 核種自体の崩壊により、中性子吸収効果が小さくなる効果

(2) 水分条件

「流量」の設定

(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、また各手順の流量には基本的にポンプ揚程曲線の上限值を用いた場合の値である m³/h を用いる。なおポンプの起動台数は1台とする。

(不確かさを考慮した条件)

- 各手順の流量は基本的にポンプ揚程曲線の上限值としつつ、複数台設置されるポンプの同時起動を想定し、 m³/h を設定する。

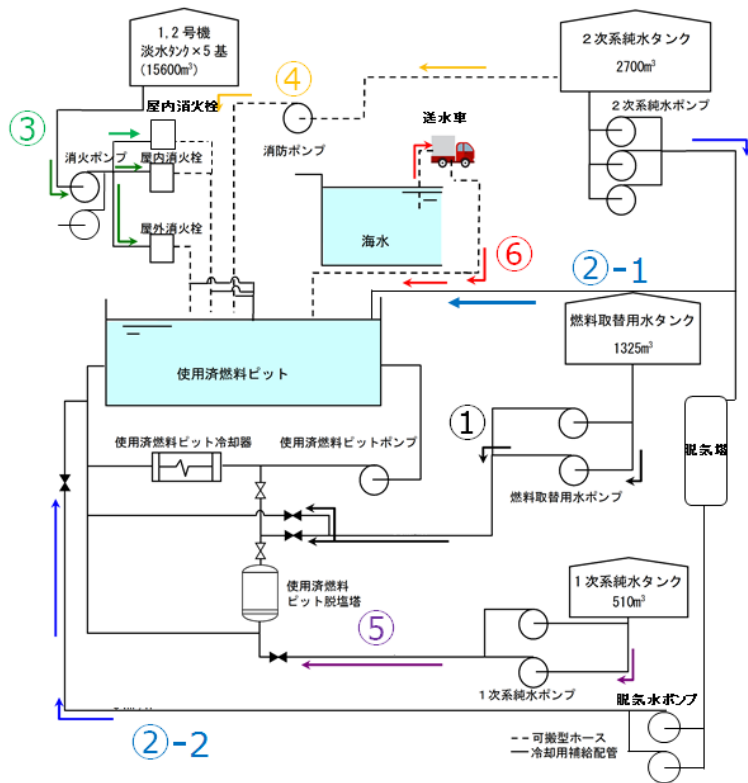


図 SFP注水設備の構成

表 注水設備による設定流量

注水手順(ポンプ)	基本ケース流量	不確かさを考慮した流量	根拠
① 燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h×2台	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)	5m ³ /h	5m ³ /h×3台	実測値
②-2 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ) (脱気塔経由)	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h※1×2台※2	ポンプ揚程曲線
③ 1,2号淡水タンク(消防ポンプ-消火栓)	22m ³ /h	22m ³ /h×3か所※3×2台	実測値
④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	ポンプ揚程曲線
⑤ 1次系純水タンク(1次系純水ポンプ)	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h×2台	ポンプ揚程曲線
⑥ 海水(送水車)	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	ポンプ揚程曲線
合計	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	-

※1 脱気水ポンプの流量。 ※2 脱気水ポンプの台数。
 ※3 消火栓の数 (屋内消火栓2か所、屋外消火栓1か所)。

(基本ケース条件)

表 放水設備による設定流量

放水手順	基本ケース流量	不確かさを考慮した流量	根拠
送水車によるスプレイ	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	スプレイヘッドの仕様上限
大容量ポンプによる放水	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	ポンプ揚程曲線
合計	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	-

※ 大容量ポンプは、3種類が配備されており、最も容量の大きいポンプと2番目に容量の大きいポンプの直列を想定。律速となる低い方の流量 m³/h が各号炉に2等分されるとした。

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

[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]

$$\square \text{ m}^3/\text{h} \div (\square \text{ m} \times \square \text{ m} \times 424) \div 10 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2) > 4 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$$

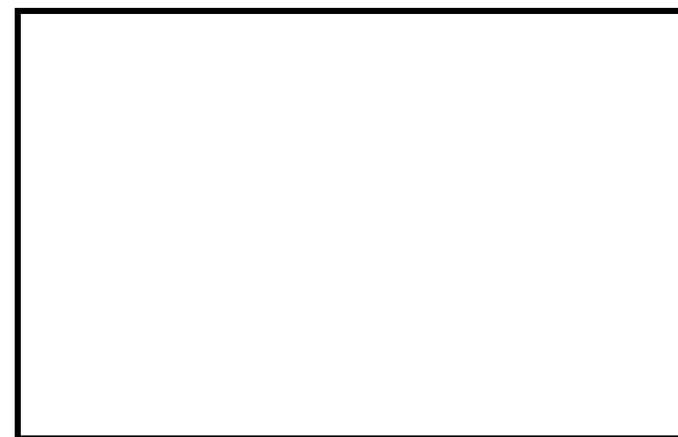
[スプレイの放水分布を考慮した場合のピーク近傍の水量]

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]

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



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0.038m²の容器により取得



※ 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)

（不確かさを考慮した条件）

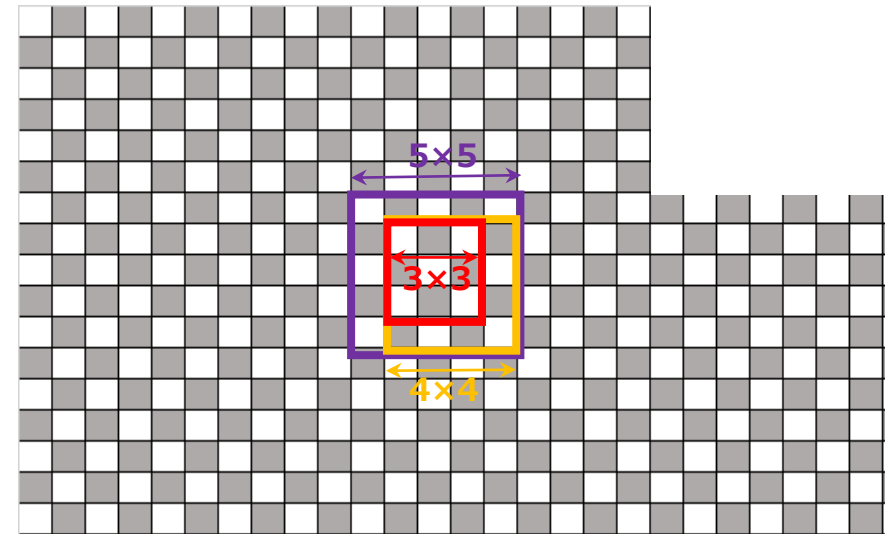
- ・放水される全量がSFPの局所領域に集中することを仮定する。

【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、 3×3 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。



- : 領域A
(0GWd/t 以上燃焼燃料を貯蔵)
- : 領域B
(24GWd/t 以上燃焼燃料を貯蔵)

（基本ケース条件）

- 燃料集合体の上部に落下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。（全流量がSFPへ流入する保守的な条件との重畳を避けるため、横風の影響までは考慮しない。）
- 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。）

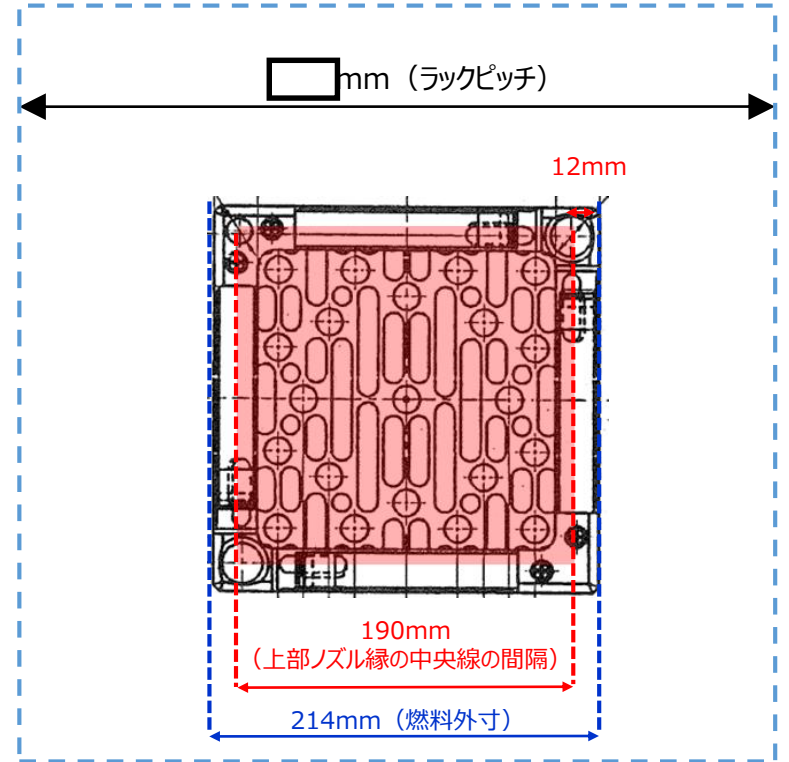
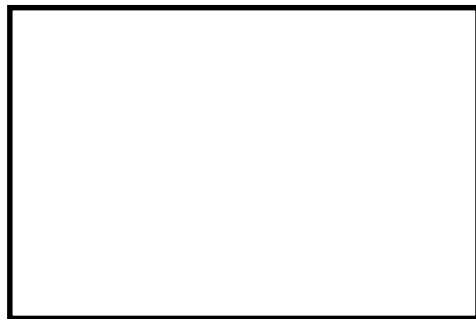
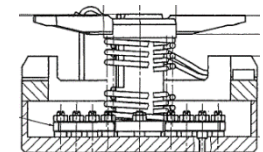
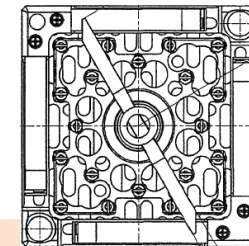


図 燃料集合体に流入する流量割合イメージ



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

（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】

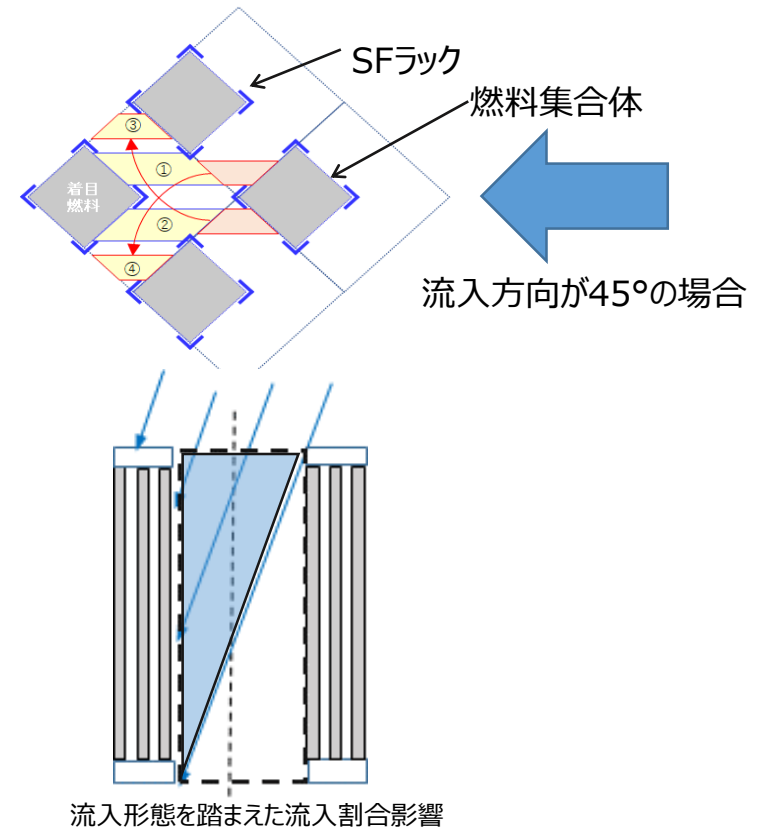
- ラックに対する流入方向を流入割合への影響が最大となるように45°とした場合、SFラックの構造を踏まえた液滴流入面積は、右図のとおり黄色部面積で表され、ラックピッチ面積に対する液滴流入面積の比は45.2%となる。
- また斜めに落下してくるという液滴の流入形態を踏まえれば、流入割合への影響は、面積に高さに乗じた体積の半分と見積もることができる。よって横風により斜めから液滴が流入してくる影響は、約23%となる。

<影響計算>

流入方向45°の場合の液滴流入面積
 ⇒ (mm²) ÷ (mm × mm) × 100 = 45.2%

横風による流入割合への影響
 ⇒ 45.2% ÷ 2 = 22.6% ⇒ 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。



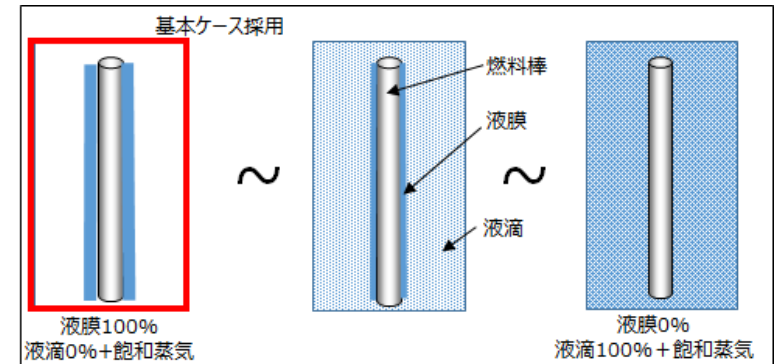
「液膜となる流量の割合」の設定

(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は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)

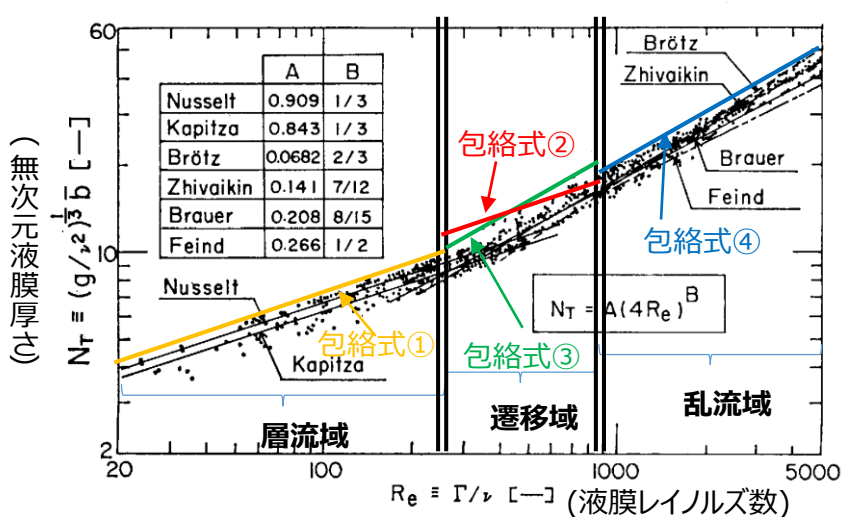
「液膜厚さの評価式」の設定 (1 / 2)

(基本ケース条件) (不確かさを含む条件)

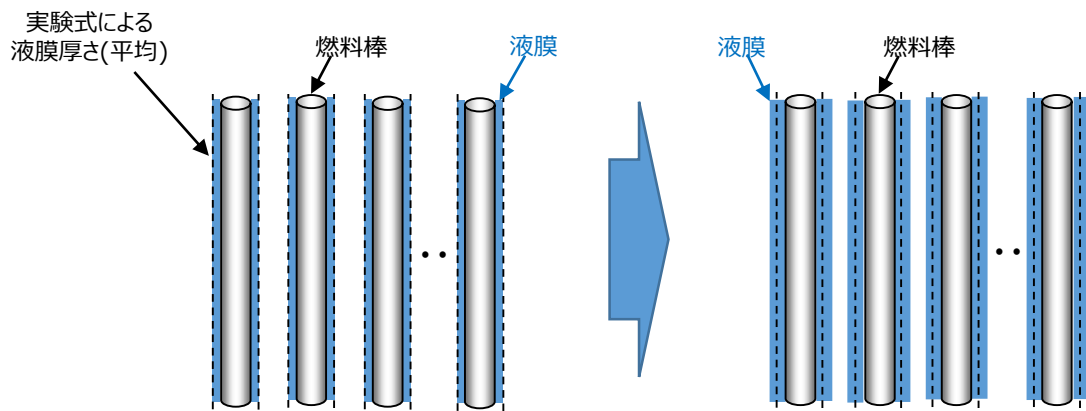
・液膜厚さが厚いほうが実効増倍率が高くなるため、実験結果を包含する評価式を設定する。

【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[-]
 Γ : 単位幅あたりの液膜流量[m²/s]
 ν : 動粘性係数[m²/s]
 b : 平均液膜厚さ[m]
 g : 重力加速度[m/s²]
 層流域: $Re \leq 170$
 遷移域: $170 \leq Re \leq 900$
 乱流域: $900 \leq Re$
 層流域のNusseltの式ベースの包絡式①
 $N_T = 0.995(4Re)^{1/3}$
 遷移域のNusseltの式ベースの包絡式②
 $N_T = 1.069(4Re)^{1/3}$
 遷移域のZhivaikinの式ベースの包絡式③
 $N_T = 0.185(4Re)^{7/12}$
 乱流域のZhivaikinの式ベースの包絡式④
 $N_T = 0.157(4Re)^{7/12}$



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

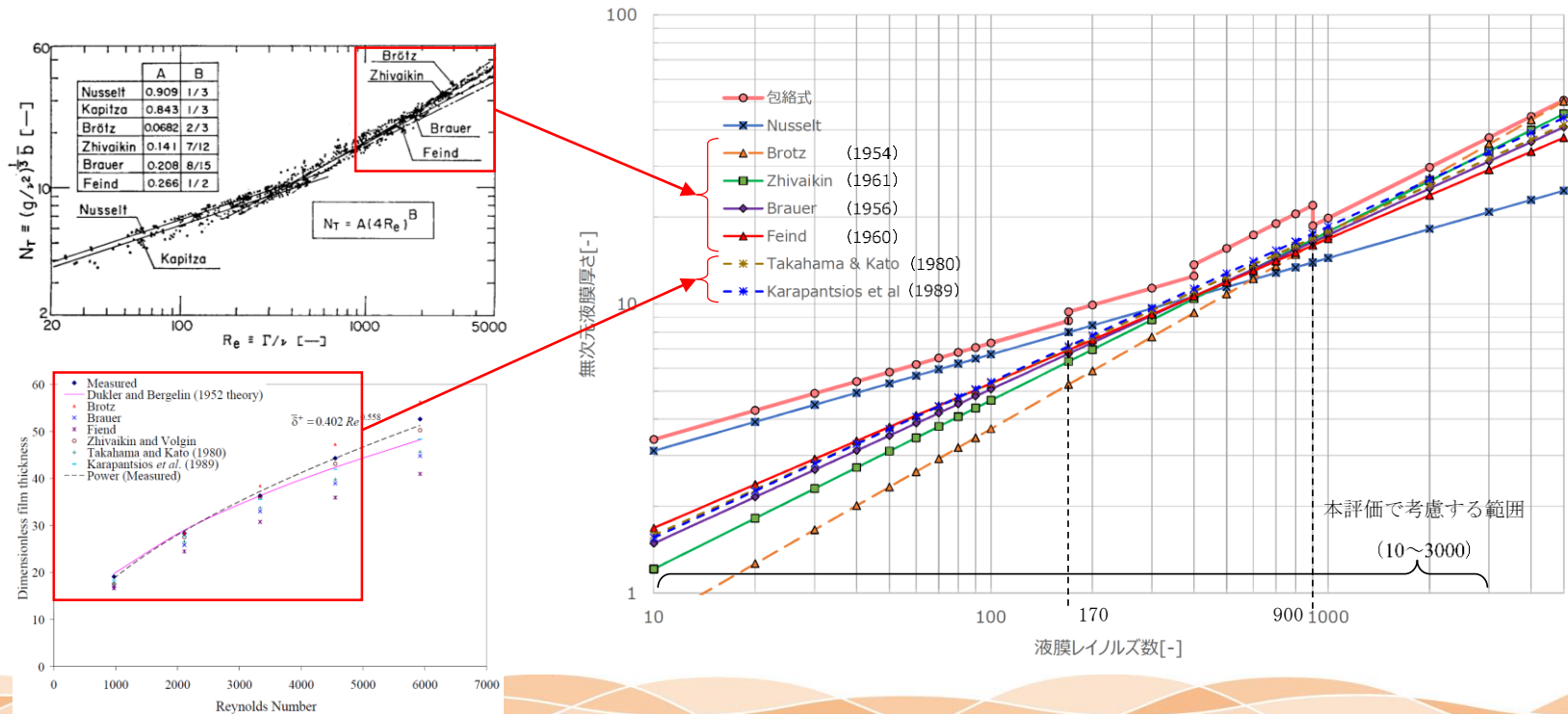
「液膜厚さの評価式」の設定 (2 / 2)

(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 ³ /h]	流入範囲[-]	流入割合[%]	液膜レイノルズ数[-]
基本ケース条件	<input type="text"/>	SFP全面 (424ラック)	23	25
感度確認ケース①	<input type="text"/>	SFP全面 (424ラック)	23	29
感度確認ケース②	<input type="text"/>	局所 (3×3ラック~)	23	~1375



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）

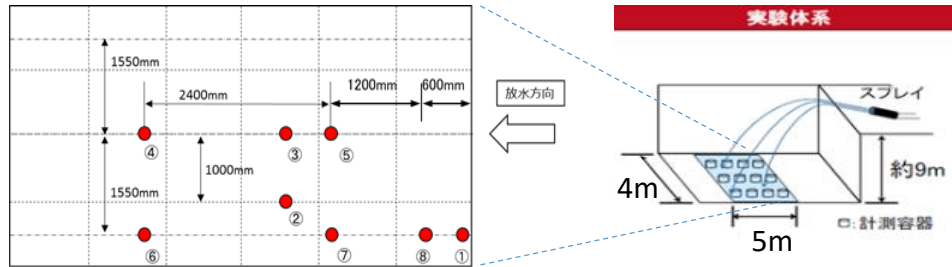
（基本ケース条件）

・スプレイヘッドを用いた液滴径取得試験結果に対する平均液滴径（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

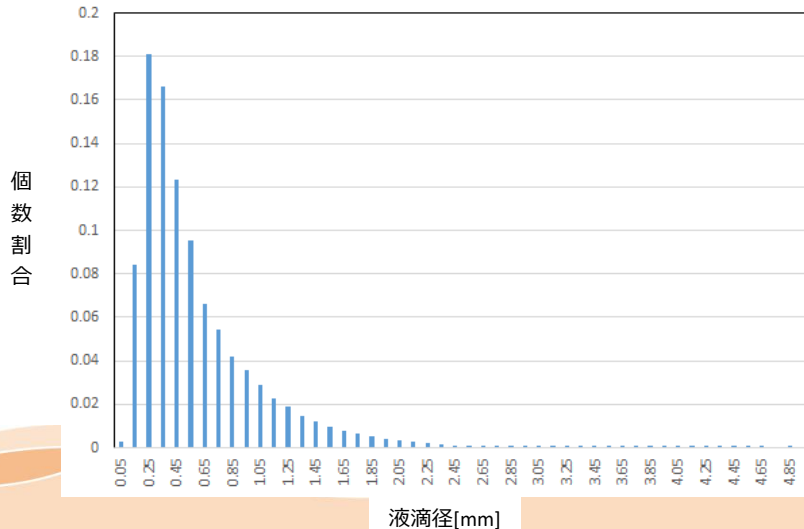


試験の様子

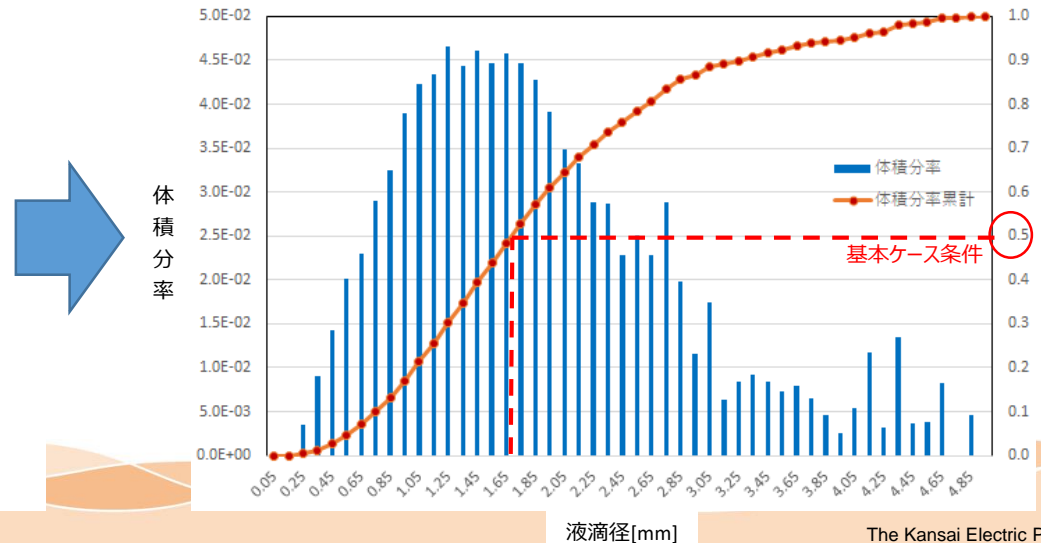


試験結果

全取得液滴の個数分布



体積分率

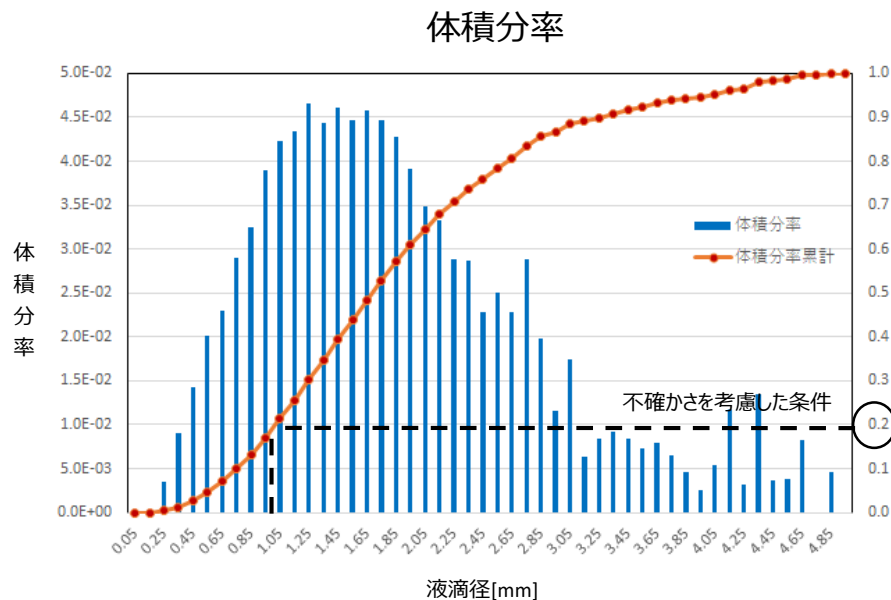


（不確かさを考慮した条件）

・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、1.0mmとする。

【説明】

- 放水の液滴径に対し考慮すべき不確かさは、「風の影響」および「スプレー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、全取得液滴を用いた体積分率における20%出現値（1.0mm～1.05mm）を踏まえ、1.0mmとする。
- なお、流量の大部分を占める放水砲由来の液滴径にもスプレーヘッド由来の液滴を使用していることから、「放水砲 + スプレーヘッド」による放水の平均液滴径が1.0mmを下回することは考え難い。



「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※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、文献の下限值3.3%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 ₂	10.878%	10.0%
	MgSO ₄	4.737 %	—
	CaSO ₄	3.600 %	—
	K ₂ SO ₄	2.465 %	—

FPを含んだ体系に対するベンチマーク解析

参考

【FPを含んだ体系に対するベンチマーク解析結果】

○ OECD/NEAによるICSBEP※に記載している、FPを含んだ□ケースの臨界実験に対しSCALE 6.0によるベンチマーク解析を実施した結果、すべてのケースにおいてC/Eは1.0付近で良好な一致を示した。

※INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS

○ □ケースのベンチマーク結果を加え統計処理することで算出されるSCALE 6.0の平均誤差及び計算の不確かさは、現在適用しているMOX燃料のみ□ケースに対するベンチマーク解析結果を統計処理した値よりも小さい。

FPを含むベンチマーク実験

実験ID	CASE ID	中性子 吸収剤材質	ケース数合計

平均誤差および不確かさの計算結果

条件	計算コード	SCALE6.0システム (KENO-VI)		
	燃料材質およびFP有無	MOX燃料 (FPなし)	ウラン燃料 (FPなし)	ウラン+MOX燃料 (FPあり)
	ベンチマークケース数	□	□	□
評価結果	平均誤差(1-k _c)	0.0013	0.0007	0.0001
	不確かさ(Δk _c = U × S _p)	0.0104	0.0065	0.0062
	信頼係数U	□	□	□
	$\overline{k_{eff}}$ の不確かさ (S _p)	□	□	□

選定した臨界実験のEALFに対するC/Eの傾向

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。