



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11月26日

関西電力株式会社

2020年10月5日審査会合における指摘事項

No.	指摘事項	会合日
①	54条の重大事故等対処施設の評価は、最適評価手法を用いることとし、最初に、評価条件一覧において、基本ケースを定めた上で、各パラメータの不確かさから範囲及び重ね合わせを示すこと。	2020/10/5
②	燃料集合体へ集中する場合の流入割合を最大100%としているが、幾何形状を考慮した46%を用いること。	2020/10/5
③	大規模損壊の前提となっている放水砲2台目を考慮する点について、2台集中は現実的にあり得ないことから、適切な条件設定に見直すこと。	2020/10/5
④	液膜評価式に包絡式でなく実験式を使用する場合には、燃焼集合体内の水の流れも含めた現象論とその妥当性を説明すること。	2020/10/5
⑤	燃料集合体燃焼度の不確かさを原子炉熱出力の測定誤差と燃料集合体の相対誤差から計算する方法について整理し、説明すること。	2020/10/5
⑥	25～55GWd/tの燃料を貯蔵するとしている領域Bについて、解析上の燃焼度及び実際の運用上の管理燃焼度を整理し、申請の記載も含めて、説明すること。	2020/10/5
⑦	実効増倍率への寄与について、着目しているFP核種ごとにその影響を定量的に示せるか検討すること。	2020/10/5
⑧	FP核種について、ベンチマークができていない核種のみを限定することを検討すること。実験データの有効性について、着目している核種がどの程度の寄与（反応度効果）があるのか示すこと。	2020/10/5
⑨	前回の審査会合コメント（塩素の影響を統計的に扱うこと等）の回答内容を適切に資料に反映すること。	2020/10/5
⑩	不確かさについて、パラメータの誤差要因がどこからきているのか、誤差の性質により評価する必要があるため、発生要因がなにかということ踏まえて、重畳させる等の条件を検討すること。	2020/10/5
⑪	上記の個別の内容については、解析表の基本ケース条件や不確かさの重ね合わせの議論の後に行うこと。	2020/10/5

: 本日まで説明する事項 (No.①、⑩)

# 目 次

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 .....	1	
パラメータの関係整理 .....	2	、 3
SA有効性評価を踏まえた未臨界性評価条件の設定方針 .....	4	
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 .....	5	
各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果 .....	6	~ 8
重畳させる不確かさの検討 .....	9	
解析において考慮するAC核種およびFP核種 .....	参考1	
燃焼度の不確かさについて .....	参考2	
燃料集合体やラックの寸法および燃料材条件等の設定 .....	参考3	

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検討し設定する。

## STEP1：検討対象パラメータの整理



臨界計算コードへのインプットデータの元となるパラメータを特定

… 2、3

## STEP2：基本ケース条件の設定方針検討



STEP1で整理したパラメータに対する基本ケース条件の設定にあたり、SA有効性評価の考え方に準じた設定方針を策定

… 4

## 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

… 5～8

## 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

… 9

**解析条件（基本ケースおよび感度確認ケース）の決定**

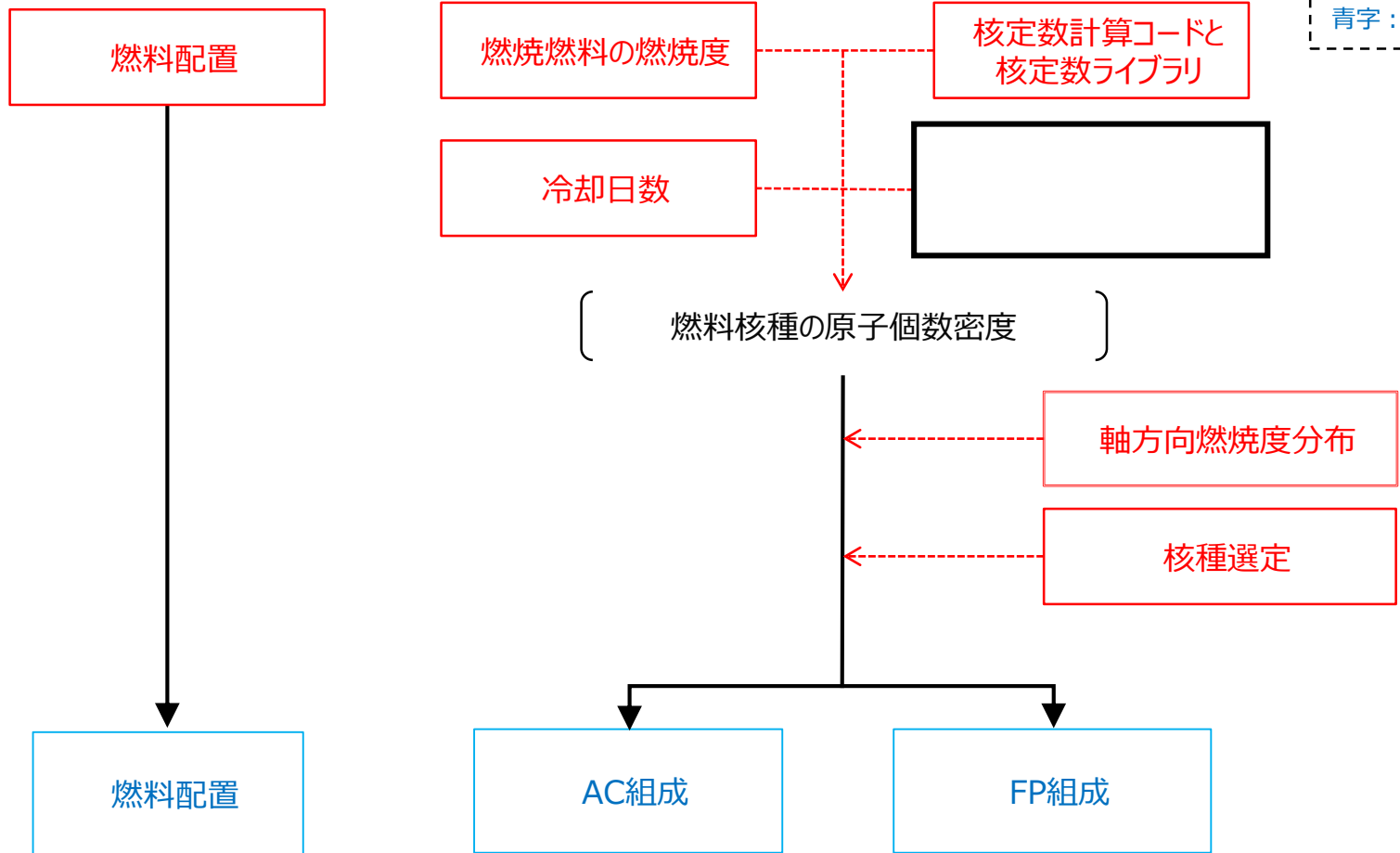
… 資料1 - 2

# 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】

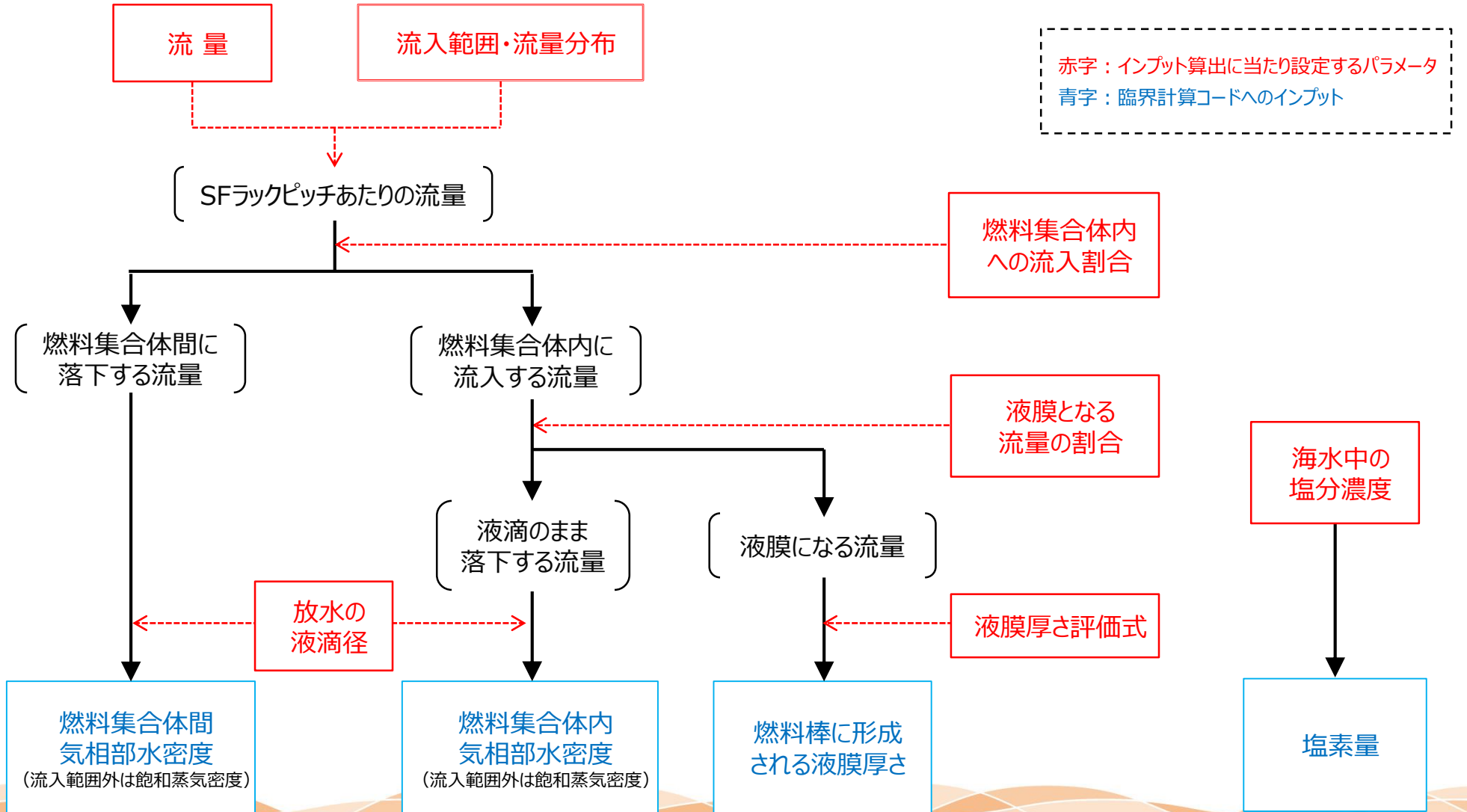
赤字：インプット算出に当たり設定するパラメータ  
青字：臨界計算コードへのインプット



# パラメータの関係整理 (2 / 2)

(続 き)

## 【水分条件に関するパラメータの関係性】



# S A 有効性評価を踏まえた未臨界性評価条件の設定方針

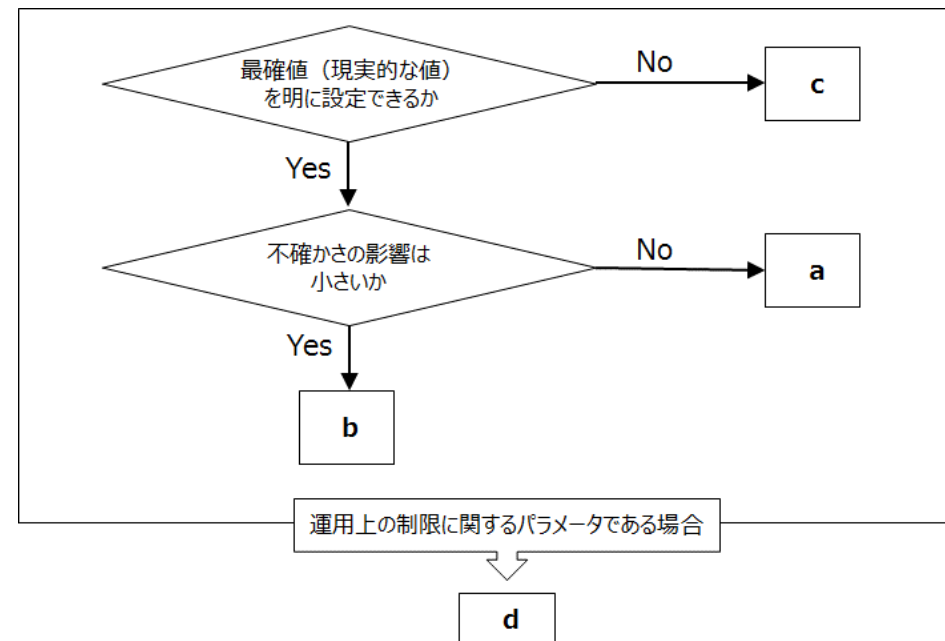
## <未臨界性評価方針>

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

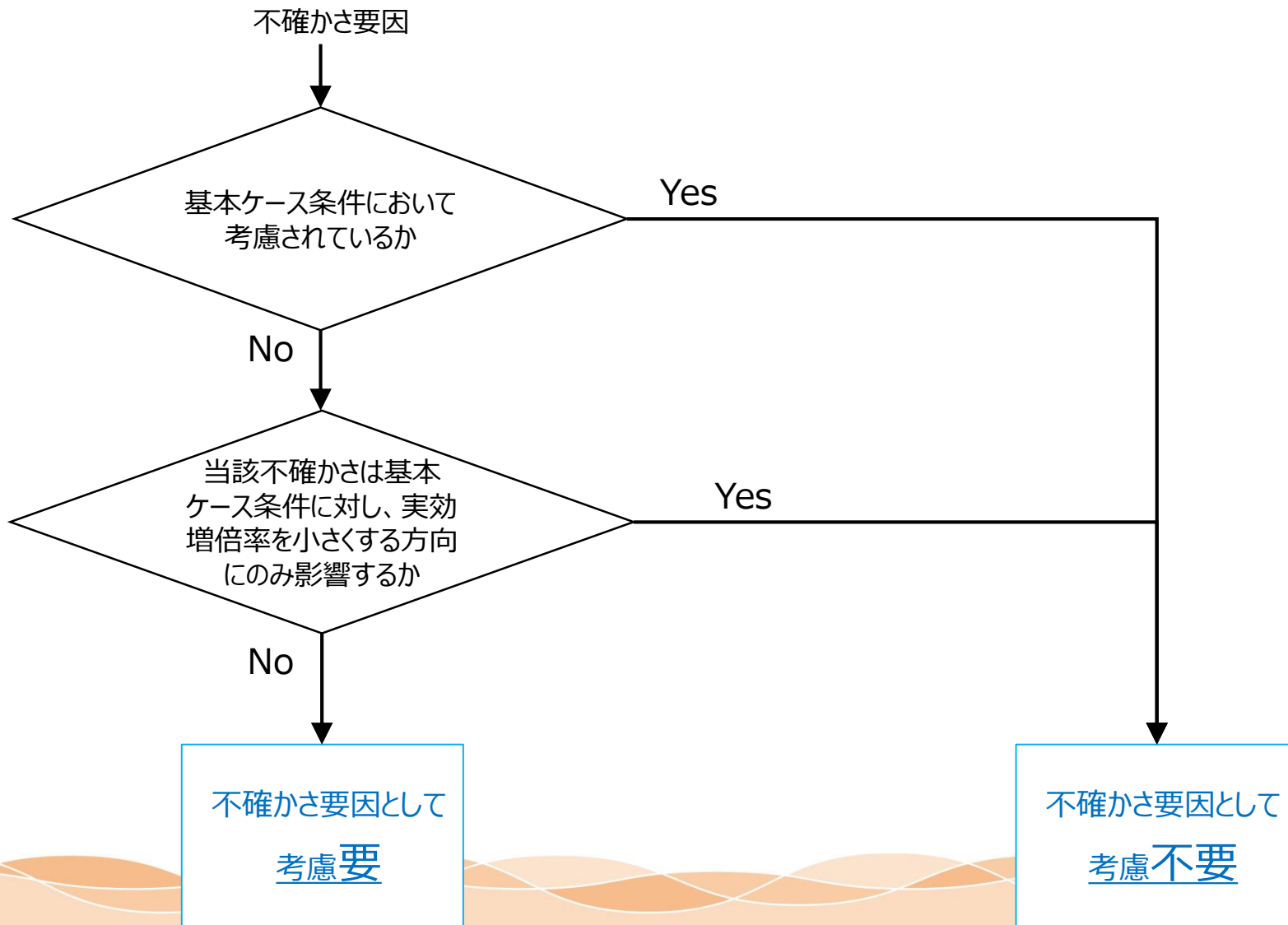
### 2.2.1 有効性評価の手法及び範囲

- (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			
燃料条件	燃料配置	・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	・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】  燃料貯蔵体数【基本ケース条件で考慮】	燃焼度が高い燃料が貯蔵される  SFP満杯以下	燃焼度が低い燃料が多く貯蔵、且つSFP満杯	不要 不要
	燃焼燃料の燃焼度	24GWd/t	・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	・核定数計算コードにはPHOENIX-P(ライブラリ: ENDF-B/V)を使用	・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	・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	・AC核種は、Puの原子個数密度を多くする設定 ・FP核種は、	・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】 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等)	中性子吸収効果が増加 核分裂性核種が増加 中性子吸収効果が増加 or 減少(ベンチマーク実績がない核種あり)	中性子吸収効果が低下 核分裂性核種が増加	不要 不要 要
	冷却日数		・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 基本ケース条件および不確かさを考慮した条件での考慮核種は参考 1 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	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 15px; vertical-align: middle;"></div> m <sup>3</sup> /h	・54条に係る対応として整備する手順を全て同時に実施 ・各手順の流量には、基本的にポンプ揚程曲線に基づく設備性能設計上の上限値（実測値があるものは実測値）を使用。	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	・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。）	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 流量分布：単位面積当たりの流量増加	不要
					定格を上回る使用 （ポンプ揚程、ポンプ台数など）			
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pray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 （分布のゆらぎ、風の強さ）	局所化 or 広範囲化	要		
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 （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%	・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。

# 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	・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 (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	・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		要
					風の影響 (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
核種選定	臨界計算コードでの核種取り扱いの違い
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
燃料集合体内への 流入割合	
放水の液滴径	スプレー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」や「臨界計算コードでの核種取り扱いの違い」等の不確かさ要因が発生することはない）ため、これら不確かさは全て独立である。

# 解析において考慮するAC核種およびFP核種

基本ケース解析および核種選定に対する感度解析において考慮する具体的なAC核種およびFP核種を示す。  
感度解析ケースで考慮する核種はベンチマーク実績がある核種に限定している。

表 1 解析時に考慮するAC核種

AC核種	高浜1/2号炉		半減期
	基本ケース	感度解析 ケース	
235U			約 $7.0 \times 10^8$ 年
238U			約 $4.5 \times 10^9$ 年
238Pu			約87年
239Pu			約 $2.4 \times 10^4$ 年
240Pu			約 $6.5 \times 10^3$ 年
241Pu			約14年
242Pu			約 $3.7 \times 10^5$ 年
241Am			約432年
239Np			約2.3日



表 2 解析時に考慮するFP核種

FP核種	高浜1/2号炉		半減期
	基本ケース	感度解析 ケース	
83Kr			- (安定)
93Zr			約 $1.5 \times 10^6$ 年
95Mo			- (安定)
99Tc			約 $2.1 \times 10^5$ 年
101Ru			- (安定)
103Rh			- (安定)
105Rh			約35時間
105Pd			- (安定)
108Pd			- (安定)
109Ag			- (安定)
133Cs			- (安定)
134Cs			約2.1年
135Cs			約 $2.3 \times 10^6$ 年
131Xe			- (安定)
135Xe			約9.1時間
139La			- (安定)
141Pr			- (安定)
143Nd			- (安定)
145Nd			- (安定)
147Sm			約 $1.1 \times 10^{11}$ 年
149Sm			約 $2.0 \times 10^{15}$ 年
150Sm			- (安定)
151Sm			約90年
152Sm			- (安定)
147Pm			約2.6年
148mPm			約41日
149Pm			約53時間
153Eu			- (安定)
154Eu			約8.6年
155Eu			約4.8年
155Gd	- (安定)		

## 【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中性子束分布をもとに各集合体の相対出力分布を求め、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】

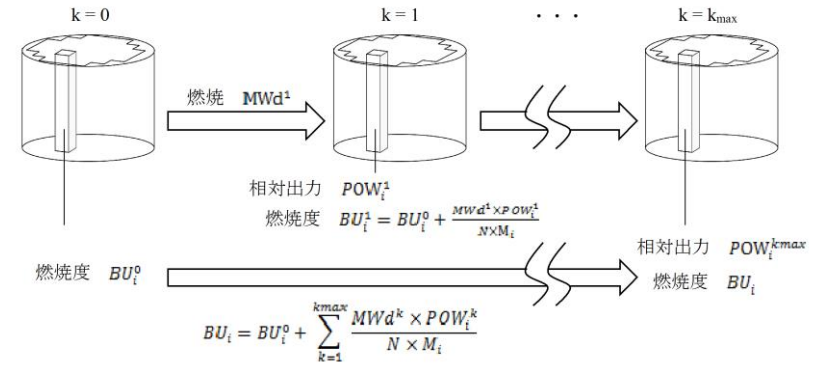
- 燃焼度は、原子炉熱出力と燃料集合体相対出力の誤差に影響を受け、それぞれの誤差の程度は以下の通り。

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

- 上表の誤差因子は独立であるものの、誤差の算出方法が異なることを踏まえ、単純和とした値を切り上げた4%を燃焼度の不確かさとして見積もる。

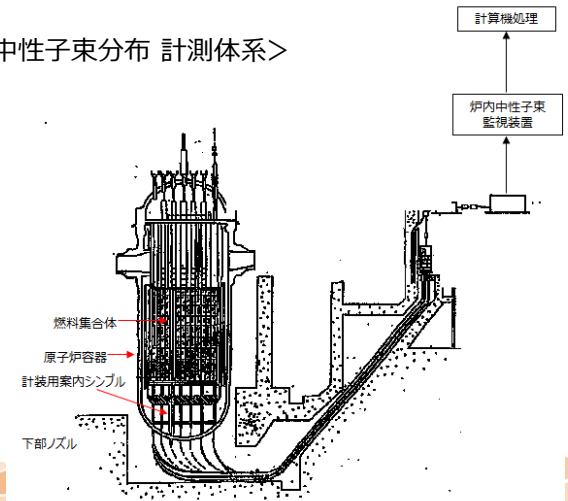
$$1.55 + \text{} \cong 4\%$$

## ＜燃料集合体内の燃焼度計算手法＞



- $BU_i$  最新の積算後の燃料集合体 i の燃焼度 (MWd/t)
- $BU_i^0$  サイクル初期の燃料集合体 i の積算燃焼度 (MWd/t)
- $POW_i^k$  k 番目の出力分布結果中の燃料集合体 i の相対出力
- $MWd^k$  k-1~k 番目の間に出力分布結果で加わった炉心全体の熱出力量 (MWd)
- $M_i$  燃料集合体 i の初期金属燃料の重量 (t)
- $N$  炉心内に装荷されている燃料集合体数
- $k_{max}$  今回の燃焼度を積算する出力分布結果の数

## ＜炉内中性子束分布 計測体系＞





## <原子炉熱出力誤差の内訳>

原子炉熱出力は、蒸気発生器の給水流量等を基にエンタルピ計算により算出している。エンタルピ計算に用いる各パラメータの測定精度(計器誤差)および原子炉熱出力への誤差は下表のとおり。

パラメータ	測定精度	熱出力計算に及ぼす影響
給水温度	±2%	±0.3%
給水圧力	±5%	
蒸気圧力	±2%	
給水流量	±1.25%	±1.25%
誤差合計		±1.55%

### 【熱出力への誤差計算手法】

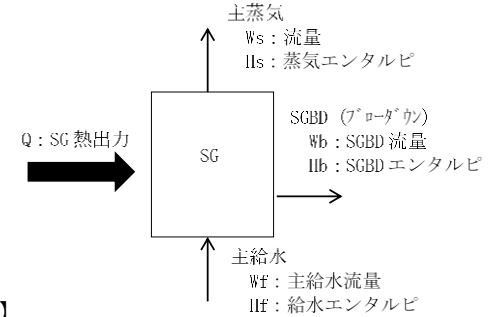
- 蒸気発生器の熱出力計算は下式の通り。  

$$Q = (W_s \times H_s) + (W_b \times H_b) - (W_f \times H_f)$$

$$= (W_f - W_b) \times (H_s - H_f) + W_b \times (H_b - H_f)$$
- 各パラメータには左表のとおり計器誤差が含まれる。圧力・温度による誤差については、圧力/温度の誤差幅から蒸気表を用いてエンタルピ誤差を算出する。

(3ループプラントの例)

給水エンタルピ誤差: 1.22 kcal/kg  
 蒸気エンタルピ誤差: 0.31 kcal/kg  
 蒸気エンタルピと給水エンタルピの差: 438.2 kcal/kg



### 【エンタルピ計算】

$$\sqrt{(1.22^2 + 0.31^2)} \div 438.2 = 0.29\% \Rightarrow 0.3\%$$

## <燃料集合体出力の誤差の内訳>

2~4ループの取替炉心に対して、サイクル初期・中期・末期それぞれにおける高温全出力時での燃料集合体出力測定値と計算値の差を評価し、統計処理※1することで求める。

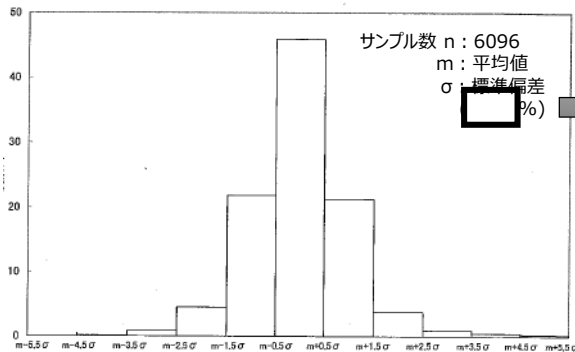


図 燃料集合体出力分布の測定値と計算値の差の度数分布※2

表 サンプルとした炉心出力分布測定(マップ)数

プラント	マップ数

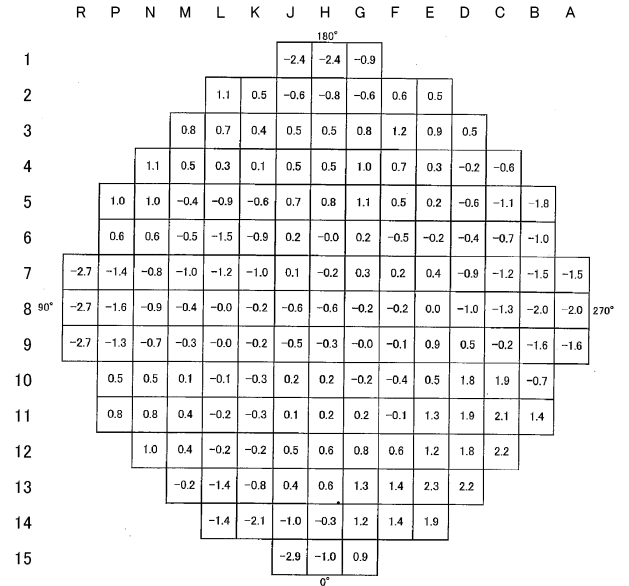


図 取替炉心における各燃料集合体の出力分布測定値と計算値の差※2  
 (測定値-計算値) / 計算値 × 100 (%)  
 (3ループ、サイクル初期、高温全出力の例)

- 米国ガイドによると燃焼度の誤差は「約5%以内」と記載されている。

<米国ガイドNEI 12-16抜粋>

## 5.1.5 Reactor Record Burnup Uncertainty

… The EPRI and ORNL reports agree that burnup estimations based on the flux measurements followed by time integration are within 5% of the true assembly burnup, and as such using 5% as the BMU is conservative. …

## 5.1.5 原子炉レコードの燃焼度の不確かさ

… EPRIおよびORNLレポートは、フラックス測定とそれに続く時間積分に基づく燃焼推定が、実際のアセンブリ燃焼度の5%以内であり、BMU (Burnup Measurement Uncertainty) が保守的であるため、5%を使用することに同意しています。…



# 燃料集合体やラックの寸法および燃料材条件等の設定

- ・燃料集合体やラックの寸法条件および燃料材条件等の設定については、既許可から変更せず以下の通り設定する。
- ・なお、基本ケース条件に公称値を用いるパラメータについては、製作公差の影響を不確定性として別途考慮する。

表 燃料集合体・ラック寸法および燃料材条件等の設定

パラメータ	基本ケース条件	基本ケース条件設定の考え方	不確かさが生じる要因	考慮要否	
燃料集合体・ラック寸法および燃料材条件	初期濃縮度	□ wt%	公称値に、製作公差を実効増倍率を厳しくする方向へ見込んだ値	製作公差 【基本ケース条件で考慮】	不要
	燃料有効長	□ mm	公称値から実効増倍率を大きくする方向へ延長した値	製作公差 【基本ケース条件で考慮】	不要
	ラック厚さ	□ mm	公称値に、製作公差を実効増倍率を厳しくする方向へ見込んだ値	製作公差 【基本ケース条件で考慮】	不要
	ラックの中心間距離	公称値 (ノミナル値)	最確値として設定。	製作公差	<b>要</b>
	ラックの内り				
	ラック内燃料偏心				
	燃料材の直径及び密度				
	燃料被覆材の内径及び外径				
燃料集合体外寸					
使用済燃料ピット内ほう素濃度	0 ppm	使用済燃料ピット内の水は純水とし、残存しているほう素濃度は考慮しない。	純水または海水の注水によるほう素濃度低下 【基本ケース条件で考慮】	不要	
反射体条件	燃料有効長上部 : 水反射体 (30cm)  燃料有効長下部 : コンクリート(1m)	大量の水の漏えい時の燃料有効長上下部の状態を踏まえ、十分な反射効果が得られる(中性子反射効果が飽和する) 厚さとして設定。	放水・注水による反射効果の変化 【基本ケース条件で考慮】	不要	

正負の製作公差を未臨界性評価上厳しくなる側に不確定性として別途考慮する。