



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】

設置許可基準規則 第54条2項の未臨界性要求に係る
最適評価と不確かさを考慮した評価について

2020年 7月15日

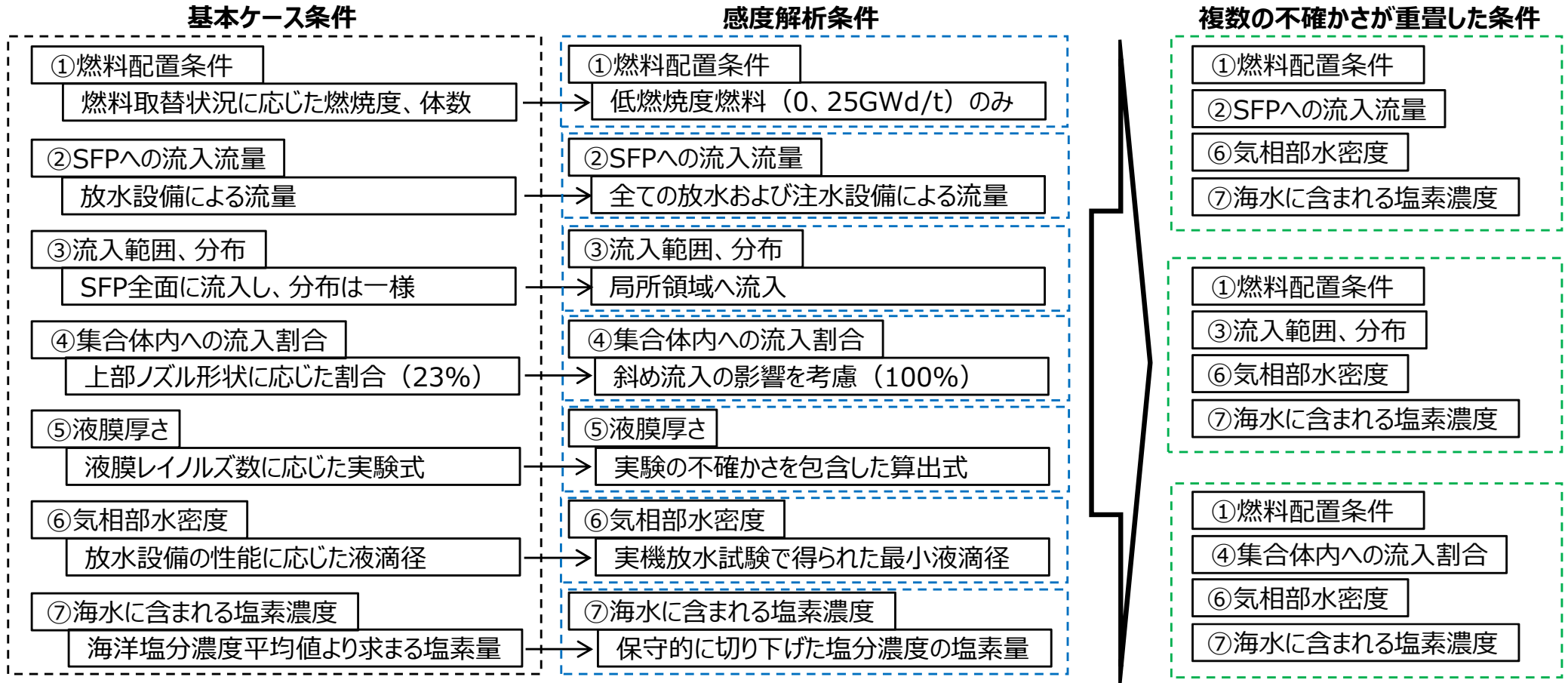
関西電力株式会社

目 次

設置許可基準規則 第54条 2 項に係る未臨界性評価方針	1
「① 燃料配置条件（燃烧度、配置）」基本ケース条件	2
「① 燃料配置条件（燃烧度、配置）」不確かさを考慮した条件	3
「① 燃料配置条件（Pu組成、AC・FP組成）」基本ケース条件	4
「① 燃料配置条件（軸方向燃烧度分布）」基本ケース条件	5
「② 流量」基本ケース条件	6
「② 流量」不確かさを考慮した条件	7
「③ 水がSFPへ流入する範囲（範囲、分布）」基本ケース条件	8
「③ 水がSFPへ流入する範囲（範囲、分布）」不確かさを考慮した条件	9
「④ 燃料集合体内に流入する割合」基本ケース条件	10
「④ 燃料集合体内に流入する割合」不確かさを考慮した条件	11
「⑤ 液膜厚さ（液膜割合、評価式）」基本ケース条件	12
「⑤ 液膜厚さ（評価式）」不確かさを考慮した条件	13
「⑥ 気相部水密度（液滴径）」基本ケース、不確かさを考慮した条件	14
「⑦ 海水に含まれる塩素濃度」基本ケース、不確かさを考慮した条件	15
重畳させる不確かさ	16
燃烧度の不確かさについて	参考1
放水が局所に集中する状況での軸方向燃烧度分布の影響	参考2
斜め流量を考慮する必要性について	参考3

SFPからの大量の水の漏えいが発生した状況を踏まえた条件（以下、基本ケースという。）を設定したうえで、各パラメータの不確かさによる実効増倍率への影響を確認するため、不確かさを考慮した感度解析を行う。

また、複数の不確かさが重畳した場合の解析も実施する。



で囲んだ条件での解析を行い、全て未臨界となることを確認する。

「① 燃料配置条件（燃烧度、配置）」 基本ケース条件

基本ケースにおける燃料配置条件として、炉心に装荷する予定の燃料と使用済燃料によりSFPが満杯となっている状態を想定する。

【貯蔵燃料の構成】

○ 55GWd/t燃料平衡炉心の装荷燃料と使用済燃料とした。

- 炉心装荷用燃料 : 157体
- 使用済燃料（40GWd/tとする） : 267体

表 貯蔵燃料の燃烧度毎体数内訳

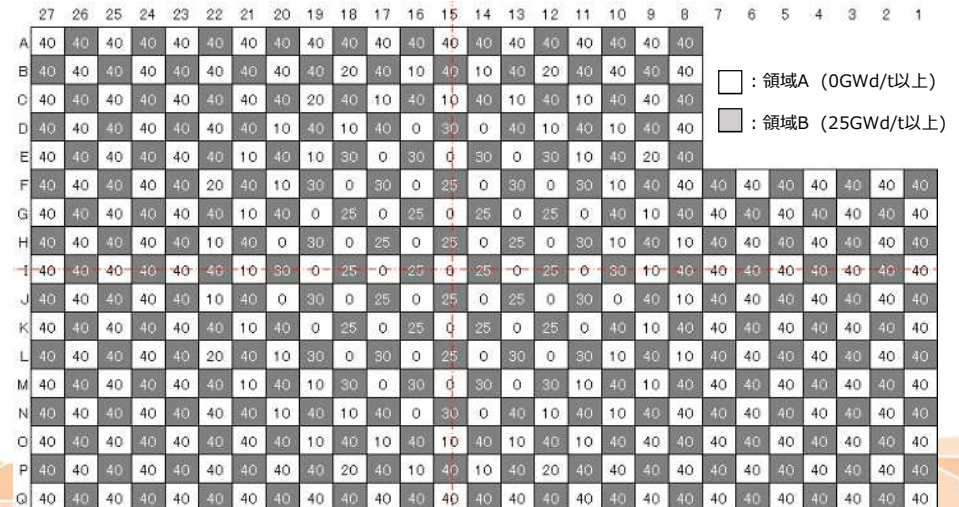
燃烧度区分(GWd/t)	0	10	20	25	30	40	計
炉心装荷用燃料	44体	44体	8体	20体	24体	17体	157体
使用済燃料	0体	0体	0体	0体	0体	267体	267体
合計	44体	44体	8体	20体	24体	284体	424体

【燃料配置】

○ 通常は空きラックへランダムに貯蔵するが、実効増倍率が厳しくなるように、以下コンセプトのもと配置。

- ① 中心座標はI-15とする。
- ② 領域A(白ラック)には、中心から同心円状に内側から順に新燃料、10GW/t燃烧燃料、20GWd/燃烧燃料を配置
- ③ 領域B(黒ラック)には、中心から同心円状に内側から順に25GWd/t燃烧燃料、30GWd/t燃烧燃料を配置
- ④ 残りのラックに40GWd/t燃烧燃料を配置

図 基本ケースにおける燃料配置条件



「① 燃料配置条件（燃烧度、配置）」 不確かさを考慮した条件

基本ケースにおいては使用済燃料（40G以上）が多く貯蔵される状況を想定したが、不確かさを考慮した条件として実効増倍率が高くなるように領域Aには全て新燃料を、領域Bには全て25GWd/t燃焼燃料を貯蔵する設定とする。

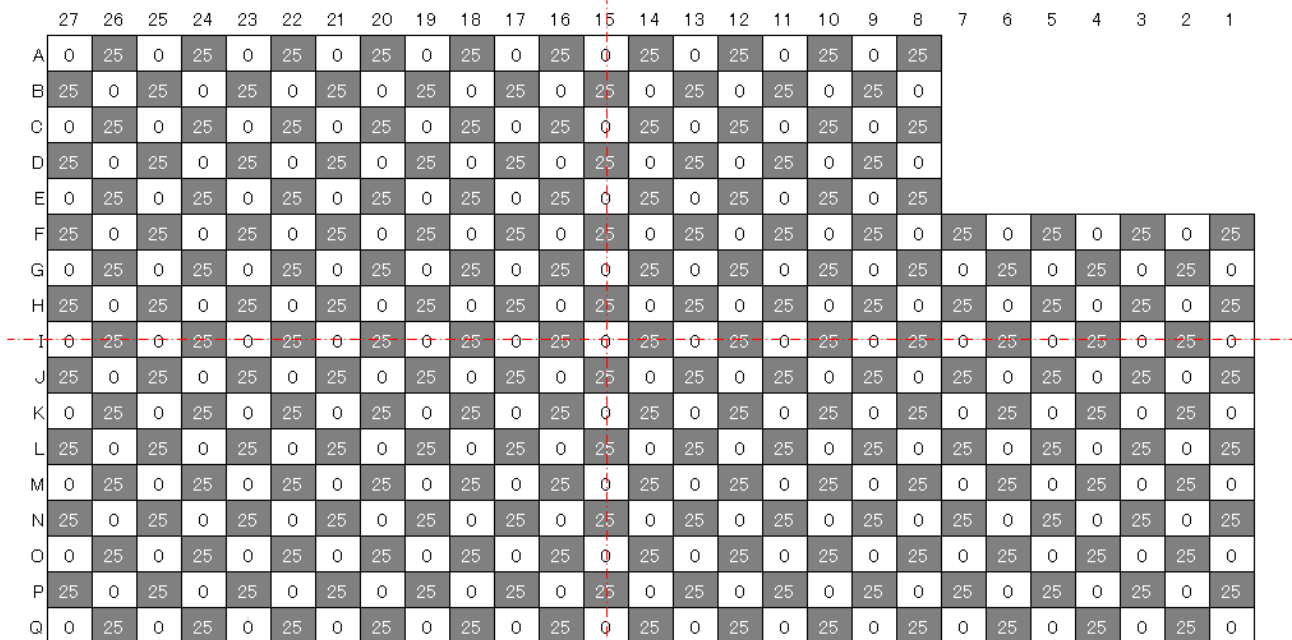


表 基本ケース条件および不確かさを考慮した条件の燃焼度毎の燃料体数内訳比較

燃焼度区分 (GWd/t)	0	10	20	25	30	40	計
基本ケースにおける燃料体数	44体	44体	8体	20体	24体	284体 (72+212 体)	424体
不確かさを考慮した燃料体数	212体	0体	0体	212体	0体	0体	424体

「① 燃料配置条件（Pu組成、AC・FP組成）」 基本ケース条件

AC・FPの組成および量は、燃料の燃焼履歴や冷却期間により変化するが、基本ケースにおいては燃料の反応度が高くなる条件を設定する。なお基本ケースにて保守的な条件を設定するため、不確かさを考慮した条件は設定しない。

【燃焼燃料の燃焼履歴】

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 [] 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、プルトニウムの生成量を大きく取り扱うことができる。

なお、以下の考え方で不確かさを考慮した条件を含む。

【ACおよびFP組成】

燃焼燃料中のアクチノイド核種および核分裂生成物は、臨界の観点から保守的となるように、米国審査ガイド（ISG8 Rev.3）と比較して []

さらに、実効増倍率を厳しくするため燃焼後の冷却期間は、 [] とする。

AC核種	ISG-8Rev3	高浜1/2
235U	○	[]
238U	○	
238Pu	○	
239Pu	○	
240Pu	○	
241Pu	○	
242Pu	○	
241Am	○	
[]	[]	
[]	[]	

(○の数が多い ⇒ 反応度が大きい)

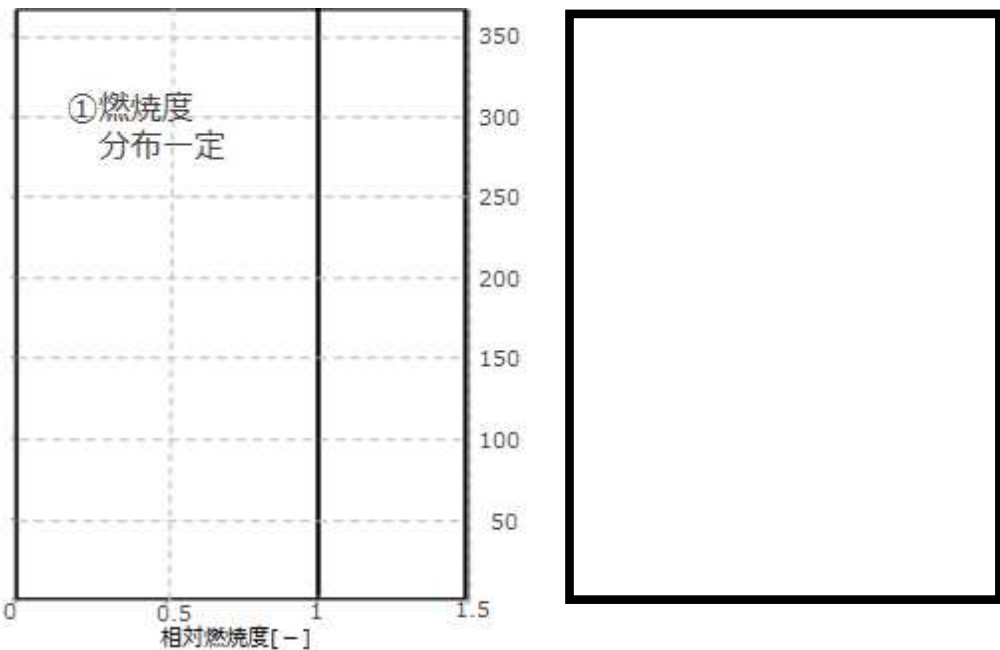
FP核種	ISG-8Rev3	高浜1/2
95Mo	○	[]
99Tc	○	
103Rh	○	
109Ag	○	
133Cs	○	
143Nd	○	
145Nd	○	
147Sm	○	
149Sm	○	
150Sm	○	
151Sm	○	
152Sm	○	
153Eu	○	
155Gd	○	

(○の数が少ない ⇒ 反応度が大きい)

燃烧燃料は軸方向に燃烧度分布がつくが、水位低下時の実効増倍率は燃烧度分布一定としたほうが大きいので、基本ケースにおいては軸方向燃烧度分布は一定として扱う。

なお基本ケースにて保守的な条件を設定するため、不確かさを考慮した条件は設定しない。

【軸方向燃烧度分布】



軸方向燃烧度分布なし
(基本ケースで設定)

軸方向燃烧度分布あり※

軸方向燃烧度分布の設定条件

※ 記載の図は、を元に作成したもの

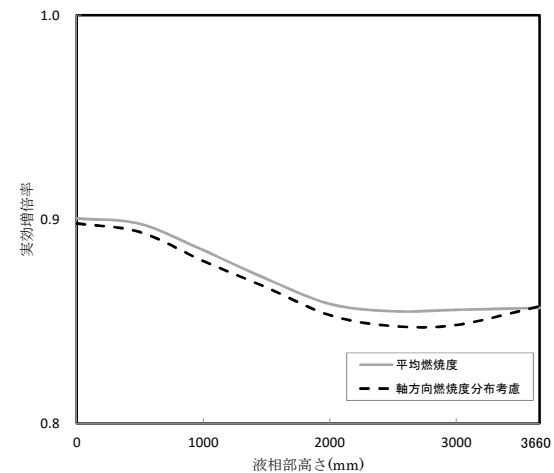
(参考)

軸方向燃烧度分布を有する燃料(20GWd/t燃烧燃料)をSFP全面に敷き詰めた場合、水位低下時の実効増倍率はわずかに軸方向燃烧度分布一定条件のほうが大きい。

<評価条件>

項目	備考
燃料配置条件	20GWd/t燃烧燃料を敷き詰め
軸方向燃烧度分布	①燃烧度分布一定、②軸方向燃烧度分布考慮
水密度条件	気相部0.04g/cm ³ 、液相部1.0g/cm ³
その他変動パラメータ、ラック仕様、反射体条件等	基本ケースと同じ

<評価結果>



「② 流量」 基本ケース条件

ピット水の大量漏えい時は、整備されている注水・放水手順に基づく対応を実施する。基本ケースにおける流量条件は、通常使用する放水設備の使用台数および設定流量を踏まえた流量とする。

SFPへの注水手順のうちピット水の大量漏えいが発生する状況下にも系統構成が可能な手順は実施される可能性があるが、必要な個所に必要な資源を投入する観点から、所定の注水手順を実施しても水位低下が継続する場合は放水設備による対応へ移行することとなり、注水と放水が同時に実施される可能性は低いことから、基本ケースにおいては注水設備からの流量は考慮しない。

【放水設備による流量】

○ SFPへの放水は右図判断フローに基づき、以下3つの手順の中から実施する。

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

○ 手順①または②についてスプレーヘッドの保有台数は1台/炉であるため同時実施は出来ない。手順③について、放水砲は手順上、各号炉に1台ずつ設置する。

○ スプレーヘッド、放水砲は通常、それぞれ \square m³/h、 \square m³/hで、どちらか一方を使用する設計としているが、不確かさを考慮して同時使用とする。

以上から想定する流量は \square m³/hとなる。

設備	設備	配備台数*		備考
		T1用	T2用	
手順① または 手順②	スプレーヘッド	1台	1台	
	送水車	2台	2台	
	化学消防自動車	1台		
手順③	大容量ポンプ (放水砲用)	2台		放水砲放水に必要な基底圧力を得るため2台直列に接続する。
	放水砲	1台	1台	共用設備

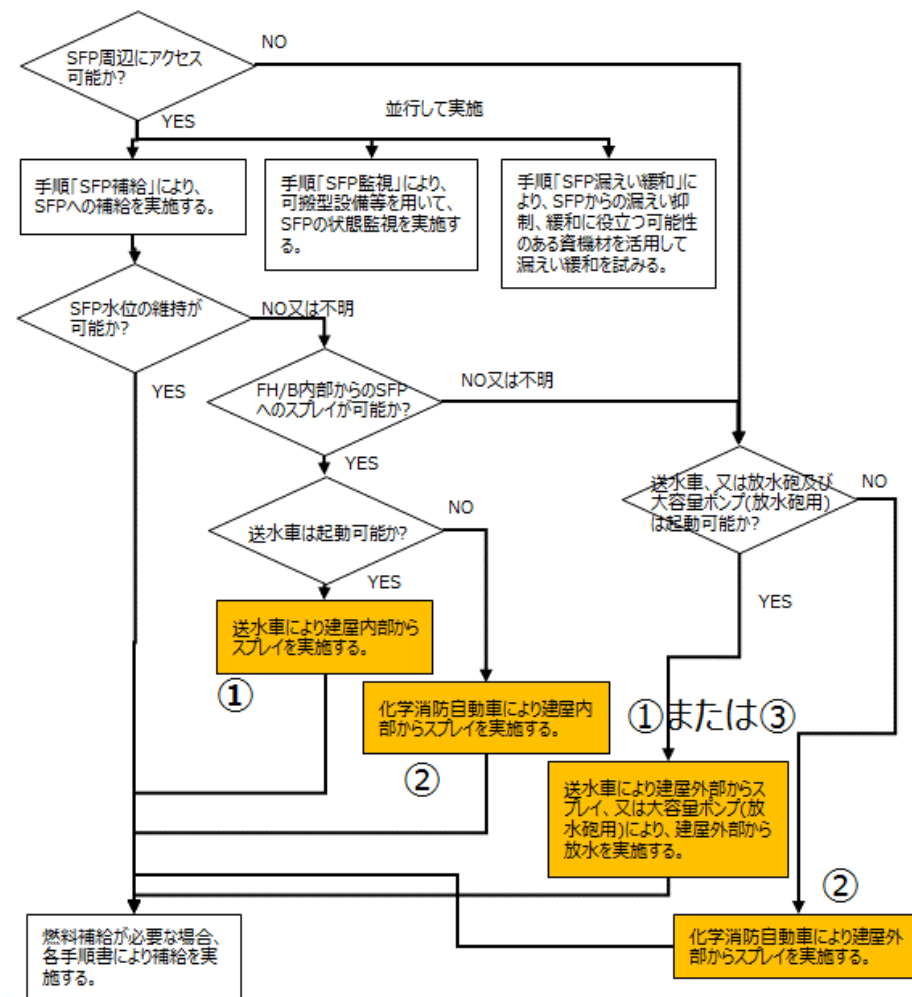


図 放水手順実施の判断フロー（大規模損壊まとも添付資料を基に作成）

基本ケースにおいては放水設備による流量を設定したが、不確かさを考慮した流量条件には、各設備からの流量を設備上限等とした場合の値とし、かつ同時実施が物理的に可能なすべての手順による注水・放水が重畳するとした場合の流量を設定する。

【注水設備による流量】

○ 各手順の設定流量は系統内ポンプ台数やポンプ揚程曲線を踏まえ設定し、さらに全注水手順が同時に実施されることを仮定することとし、713 m³/hを設定する。

【放水設備による流量】

○ 各手順の設定流量は設備の仕様上限を踏まえ設定し、さらに片号炉のみ発災した場合に他号炉向けに設置する放水砲の流量も同時に考慮することとし、 m³/hを設定する。

不確かさを考慮した流量としてこれらを合計した m³/h を設定

表 注水手順における流量の設定方針

注水手順(ポンプ)	通常時流量	設定流量	根拠
① 燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)	30m ³ /h	30m ³ /h×2※1	定格流量
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※1	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)	30m ³ /h	30m ³ /h※2×2※1	定格流量
③ 1,2号淡水タンク(消火ポンプ-消火栓)	22m ³ /h	22m ³ /h×3※3×2※1	実測値
④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	39m ³ /h	96m 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)	40m ³ /h	40m ³ /h×2	定格流量
⑥ 海水(送水車)	15m ³ /h	270m ³ /h	ポンプ揚程曲線
合計	181m ³ /h	713m³/h	-

表 放水手順における流量および出典

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

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

※1 ポンプ台数。なお手順②-2については脱気水ポンプの台数。
 ※2 脱気水ポンプの定格流量。
 ※3 消火栓の数（屋内消火栓2か所、屋外消火栓1か所）。
 ※4 ポンプ揚程曲線の最大値を想定した。

放水設備により放水される水の大部分は、SFP面積より広範囲に、流量分布を有しているが、SFPのサイズ内では流量分布は一様とみなせるため、基本ケースにおいては流量分布は一様と設定する。

【放水時の実際の状態を踏まえた条件設定理由】

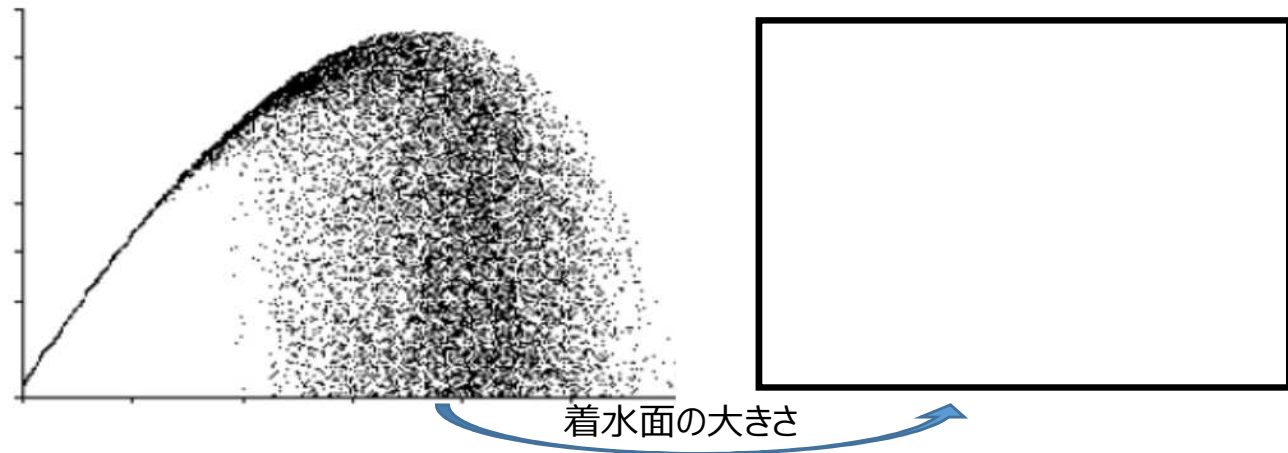
放水設備による放水時の現実的な状態は以下の通り。

- 放水設備により放水された水は広範囲に広がり、一部はSFP外へ落下する。
特に、流量の大きい放水砲については、フットプリント（流量が主に着水する範囲）がSFP面積より大きい。
- 文献※によれば、放水砲からの放水のうちフットプリントへ到達する流量は約50%程度とされている。
- 放水設備により放水された水は流量分布を有している。

スプレイヘッドによる放水時の流入範囲及び流量分布



放水砲による放水時の流入範囲及びSFPの大きさ比較（仰角 70° の場合）



※ 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)

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。

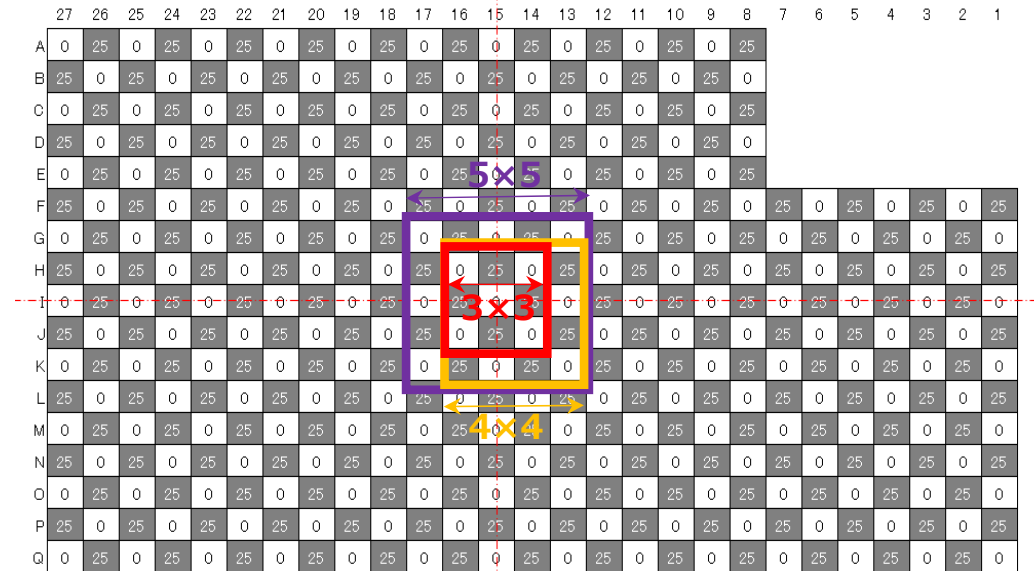
基本ケースにおいてはSFP全面に一様に流入する場合を想定したが、不確かさを考慮した流入範囲には放水の一部が局所領域に集中する可能性があることを踏まえ、SFPに放水された水の全量が局所領域に集中することを仮定する。

【流入範囲設定の検討】

- 実効増倍率を高くするため、局所領域は基本ケースにおいて燃焼度の低い燃料が配置されるSFP中心部に設定し、当該の領域に放水設備による全流量が集中することを仮定する。
- 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×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。）

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

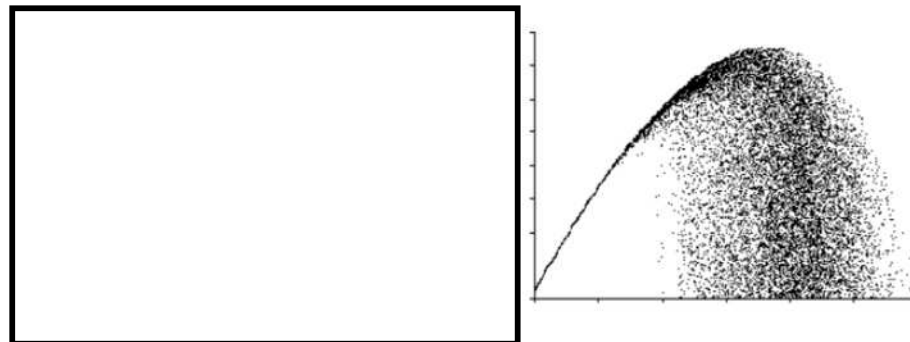


放水砲の放水軌跡はSFPへほぼ垂直に流入する状態となっていること、およびSFP内に放水流量すべてが流入する仮定とするため横風の影響は考慮しないことから、放水された液滴はSFPに垂直に落下する。燃料集合体の上部に落下する水の一部は、上部ノズルに当たって燃料集合体外に弾かれると考えられたため、基本ケースにおいては、上部ノズルの構造を踏まえ流入割合を23%と設定する。

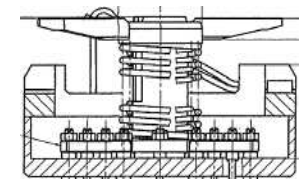
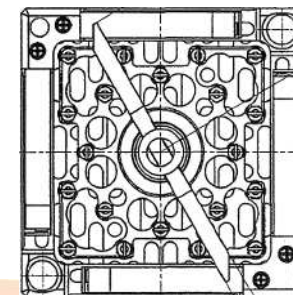
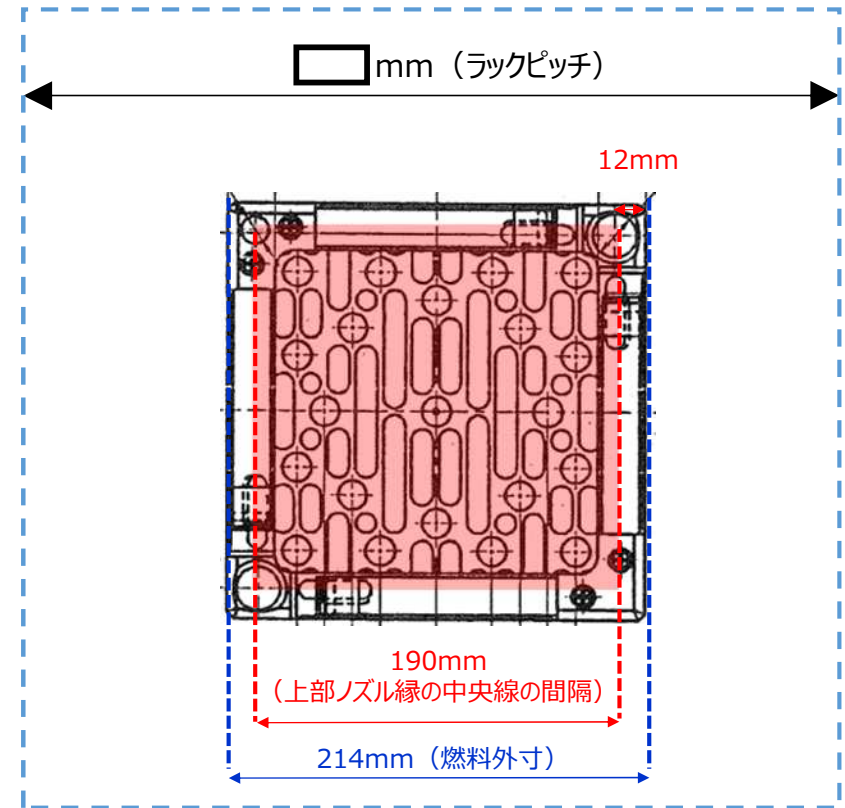
【上部ノズル構造を踏まえた検討】

- 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ため、縁に当たった水の一部は燃料集合体内へ流入せず集合体外へ弾かれる。
- 具体的には、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考えられる。
- 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、以下計算により23%となる。

$$190 \times 190 \div (\square \times \square) = \square \Rightarrow 23\% \text{ (切り上げ)}$$



なお高浜1, 2号炉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いるため、流路孔面積はさらに小さくなる。



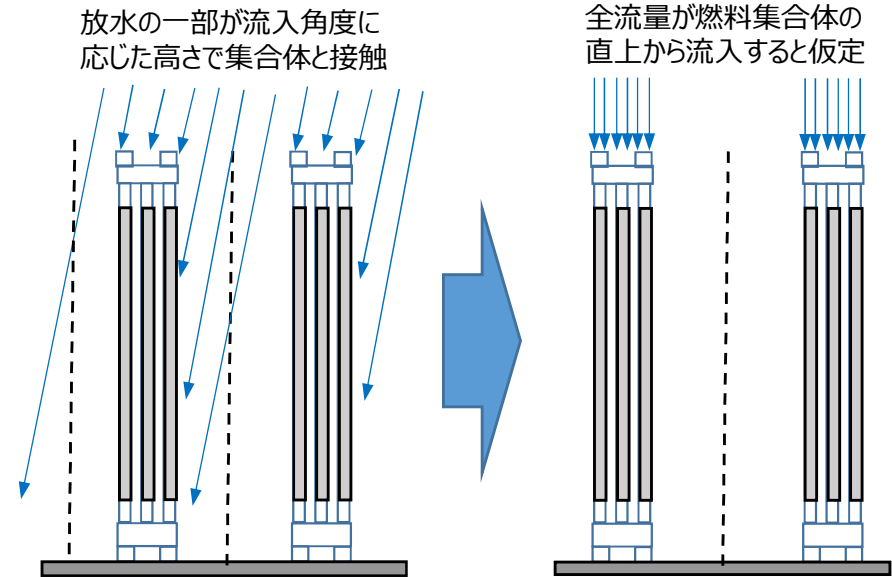
参考図 内挿物（プラグングデバイス）が挿入された燃料集合体の上面

基本ケースにおいては集合体内への流入割合を23%としたが、不確かさを考慮した流入割合には斜め方向からの流入を仮定し、100%と設定する。

【斜め流入を仮定した場合の流入割合の検討】

- 放水された水の一部が斜めから流入する場合、放水の一部は流入角度に応じた軸方向高さで燃料集合体と接触する。
- 不確かさを考慮するに当たっては、ある軸方向高さで接触する液滴は、仮想的に最初から燃料集合体の真上から流入するものとし、また燃料集合体内への流入量を多くし実効増倍率を厳しくするため、燃料集合体内への流入割合を100%とする。

(上部ノズルにより弾かれる現象も保守的に考慮しない。)



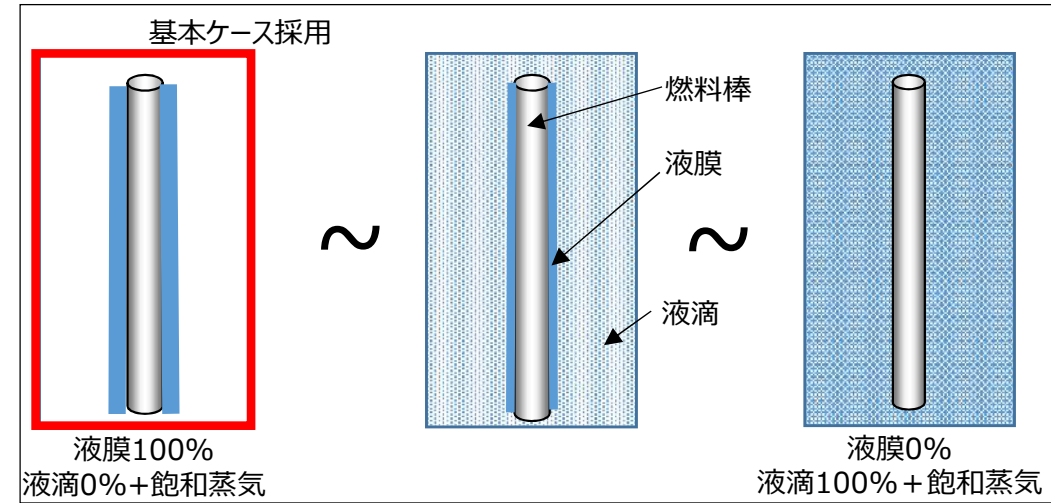
液膜割合については、放水された水が集合体内に流入する際は上部ノズル等の影響によりほとんどが液膜となること、かつ集合体内の水分量を大きくし実効増倍率を保守的に（厳しく）する観点から、液膜割合は100%とする。

また液膜厚さについては、静的な環境で取得されたデータをもとに液膜Re数に応じて設定される実験式を使用し算出する。

【液膜割合の検討】

- 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。

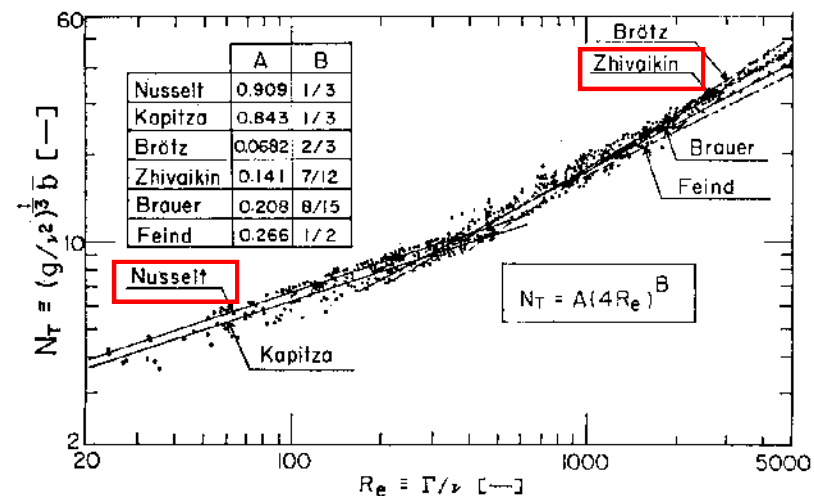
よって基本ケースにおいては実現象及び実効増倍率への影響を踏まえ、液膜割合は100%と設定する。



液膜と液滴の割合（イメージ図）

【液膜厚さ評価式の検討】

- 液膜厚さは燃料棒にかかる流量等（液膜Re数）に依存する。
- 液膜厚さ算出に当たっては、静的な実験環境で取得されたデータをもとに液膜Re数に応じて設定される実験式（右図*）を用いて算出する。



N_T : 無次元液膜厚さ[-]
 Re : 液膜レイノルズ数[-]
 Γ : 単位幅あたりの液膜流量[m^2/s]
 ν : 動粘性係数[m^2/s]
 b : 平均液膜厚さ[m]
 g : 重力加速度[m/s^2]

層流域 : $Re \leq 170$
 遷移域 : $170 \leq Re \leq 900$
 乱流域 : $900 \leq Re$

層流域 ($Re < 170$) : Nusseltの式
 $N_T = 0.909(4Re)^{1/3}$

乱流域 ($900 \leq Re$) : Zhivaikinの式
 $N_T = 0.141(4Re)^{7/12}$

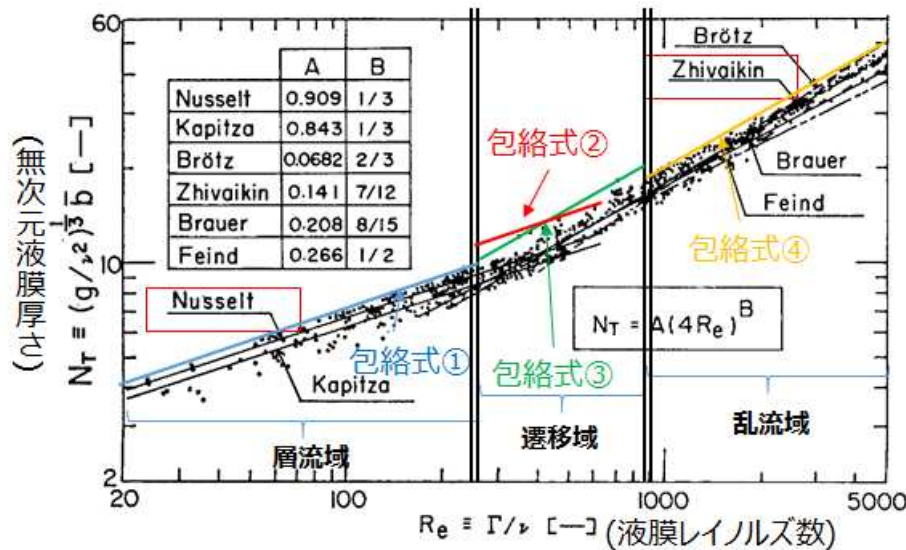
遷移域 ($170 \leq Re < 900$) : Nusseltの式とZhivaikinの式のうち液膜厚さが大きくなる式

* 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

基本ケースにおいては液膜厚さ算出に実験環境で取得されたデータをもとに設定された実験式を用いたが、不確かさを考慮した場合は液膜厚さが厚くなる状態のほうが実効増倍率が高くなることから、実験結果の不確か性を包含する評価式を設定し、当該評価式にて算出される液膜厚さを放水範囲内のすべての燃料棒に適用する。

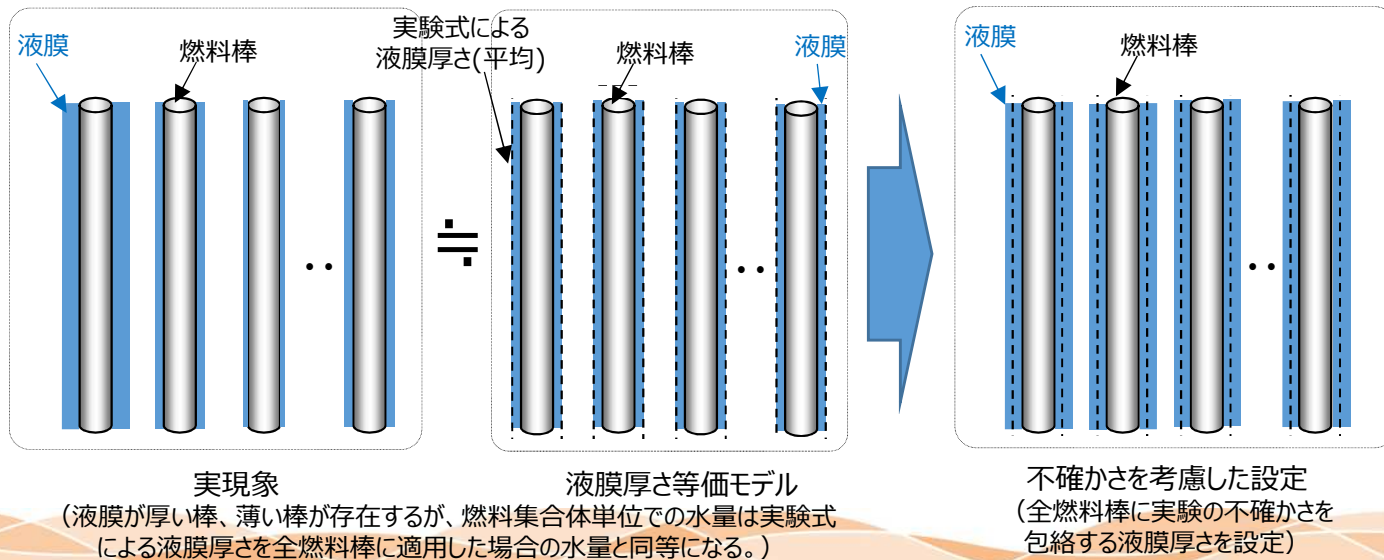
【実験の不確かさを包絡する算出式の設定】

- 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、実験値を包含するような包絡式を設定し、液膜厚さを算出する。
- 具体的には、液膜Re数領域毎に実験値を包絡するように、式の傾き(右図のBの値)を保存し、最も外側の実験値を通る包絡式を設定する。



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
 $N_T = 0.157(4Re)^{7/12}$

- なお実現象としては、実験の誤差は燃料棒一本一本に対しプラス(厚くなる)側・マイナス(薄くなる)側のどちらかが発生することとなるが、実効増倍率を高くするため、放水範囲内のすべての燃料棒の液膜厚さ評価に包絡式を使用する。



放水設備としてスプレィヘッドおよび放水砲の使用を想定していることから、液滴径は放水設備それぞれの性能を踏まえ、基本ケースにおいてはスプレィヘッドによる放水の平均液滴径は1.5mm、放水砲による放水の平均液滴径を2.9mmとする。

なお不確かさを考慮した条件としては、液滴径が小さいほど水密度は大きくなることから、平均液滴径がより小さいスプレィヘッドの実放水試験により取得した平均液滴径の最小値1.0mmとする。

【現実的な液滴径（基本ケース条件）】

○ スプレィヘッドによる液滴の径は、実機を用いた実放水試験により取得した平均液滴径の測定点毎の平均値である1.5mmを使用する。

○ 放水砲による液滴の径は、文献※を参考に2.9mmを使用する。

(実験室体系での小規模放水試験により得られたデータを元に、大規模放水の平均液滴径を計算した値が約2.9mmであり、当該平均液滴径を用いた放水シミュレーションの結果が実放水軌跡と精度良く一致することが記載されている。)

【不確かさを考慮した液滴径】

○ 液滴径が小さいほど液滴下降速度は遅くなって水密度は大きくなり、実効増倍率が厳しくなることから、流量の大きい放水砲に対してもスプレィヘッドの平均液滴径を適用する。

○ さらにスプレィヘッドの平均液滴径として、実機を用いた実放水試験により取得した平均液滴径の最小値を使用する。

スプレィヘッドを用いた実放水試験の体系および試験結果

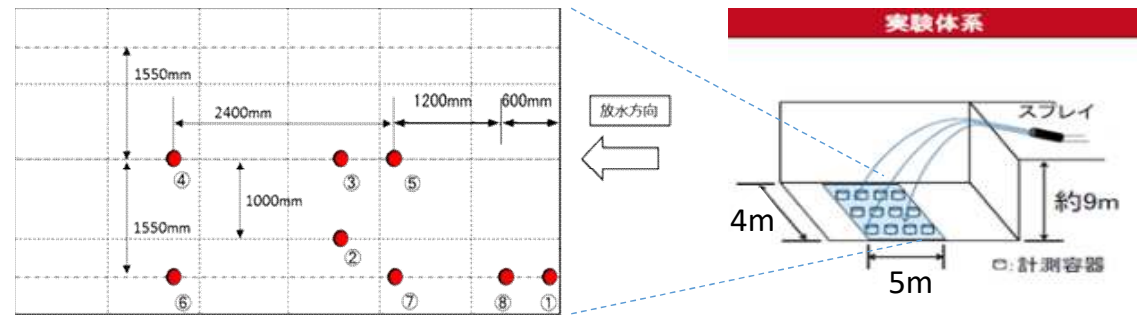


表 測定位置毎の平均液滴径[mm]

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

平均値：1.5mm

最小値：1.0mm

※ 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)

放水設備の水源である海水中の塩素（Cl）による中性子吸収効果を考慮することとし、基本ケースにおいては文献値※に記載の値の平均値として塩分濃度を3.5%を使用した場合の塩素濃度を設定する。

なお不確かさを考慮した条件としては、実効増倍率を高くするため、塩分濃度を保守的に切り下げた値3.0%とした場合の塩素濃度を設定する。

表 海水の塩分濃度および塩類組成

		基本ケース条件（文献値※）	不確かさを考慮した条件
海水の塩分濃度		3.3%～3.8%（平均値：3.5%）	3.0%
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 %	—

※ 岩波理化学辞典第5版 岩波書店、化学大辞典2 共立出版

重畳させる不確かさ

重畳させる不確かさについては、以下のとおり検討した。

- ① 互いに独立なパラメータについては、基本的に重畳を考慮しないが、ピット水の大量漏えいに関係なく存在する不確かさについては、重畳を考慮する。

具体的には、「燃料配置条件（燃烧度、配置）」、「燃料集合体外の気相部水密度（平均液滴径の大きさ）」および「海水に含まれる塩素濃度」の不確かさは重畳させる。

- ② ピット水の大量漏えい発生時におけるSFP環境を考えた際、不確かさが未臨界性評価結果を緩くする方向へ振れると考えられる不確かさは、重畳を考慮しない。

具体的には、「液膜厚さの評価式」は、液膜の形成が適切になされる静的な実験室環境下において取得されたデータを元に設定された式であり、実験結果のばらつきはあるものの、そのばらつきは燃料棒一本一本に対しプラス側・マイナス側に発生するものであり、燃料集合体という単位で見れば、平均値（実験式を用いた算出値）になると考えられる。

さらに、ピット水大量漏えい時のSFP環境は、液膜形成を阻害する外乱（空気の対流や液膜への水塊の衝突）が発生しており、実際に形成される液膜の厚さは当該評価式による算出値より小さくなると考えられるため、「液膜厚さの評価式」の不確かさは重畳させない。

- ③ 残った条件のうち、基本ケースに対し実効増倍率を厳しくする方向の不確かさを有するパラメータは「流量」、「SFPへ流入する範囲」および「燃料集合体内に流入する割合」であり、これらそれぞれを①の不確かさと重畳させる。

	重畳ケース1	重畳ケース2	重畳ケース3	備考
燃料配置条件（燃烧度、配置）	○	○	○	検討①より全ケースで重畳させる。
流量	○	—	—	
SFPへ流入する範囲	—	○	—	
燃料集合体内に流入する割合	—	—	○	
液膜厚さ（評価式）	—	—	—	②より重畳させない。
気相部水密度（液滴径）	○	○	○	検討①より全ケースで重畳させる。
海水に含まれる塩分濃度	○	○	○	検討①より全ケースで重畳させる。

燃焼度の不確かさについて

高浜1/2号炉の過去3サイクル分、計6炉心を対象に燃焼度誤差を整理した結果、サイクル終了時点での最大誤差は であった。

高浜1号炉 至近3サイクルの燃焼度誤差

サイクル番号		25	26	27
サイクル長さ (MWd/t)		13084	14664	14228
集合体燃焼度の差異(MWd/t) (絶対値)	最大			
	最小			
	標準偏差			
集合体燃焼度の差異 (%) (サイクル長さに対する相対値)	最大			
	最小			
	標準偏差			

高浜2号炉 至近3サイクルの燃焼度誤差

サイクル番号		25	26	27
サイクル長さ (MWd/t)		8922	13432	14324
集合体燃焼度の差異(MWd/t) (絶対値)	最大			
	最小			
	標準偏差			
集合体燃焼度の差異 (%) (サイクル長さに対する相対誤差※)	最大			
	最小			
	標準偏差			



157体×6炉心 = 942体分の誤差分布

$$\text{※ 相対誤差} = \frac{[\text{実績}\Delta\text{Bu}] - [\text{設計}\Delta\text{Bu}]}{\text{サイクル長}} \times 100(\%)$$

ΔBu : サイクル初期とサイクル末期の燃焼度差

燃焼度の不確かさについては [] であり、燃焼の進んだ多数の燃料を新燃料または25GWd/t燃焼燃料として設定した燃料配置条件が有する保守性に包含されるが、仮に燃焼燃料の燃焼度を [] した場合でも未臨界であることを確認する。

<評価条件>

- ・貯蔵燃料：領域A ⇒ 新燃料、領域B ⇒ [] GWd/t燃焼燃料
- ・水位：低水位
- ・流量： [] m³/h

その他、以下条件等は6/2審査会合提示の条件に同じ。

- ・集中範囲：5×5
- ・流入割合：30%
- ・液膜割合：100%

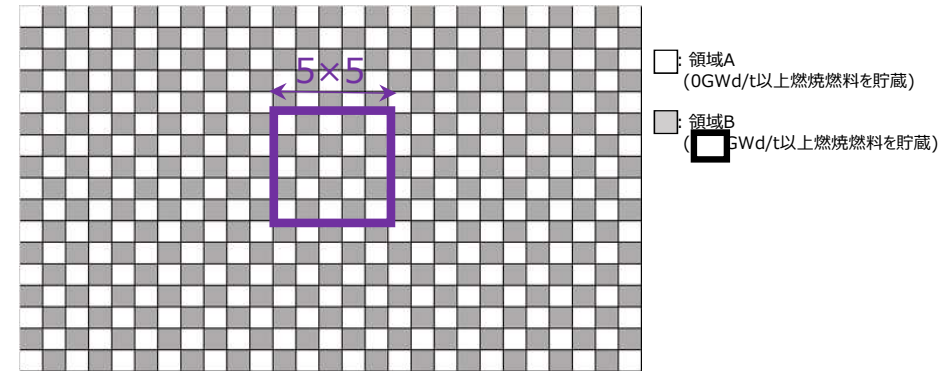


図 放水される水が集中する場合の燃料配置条件および集中する範囲

<評価結果>

LATER

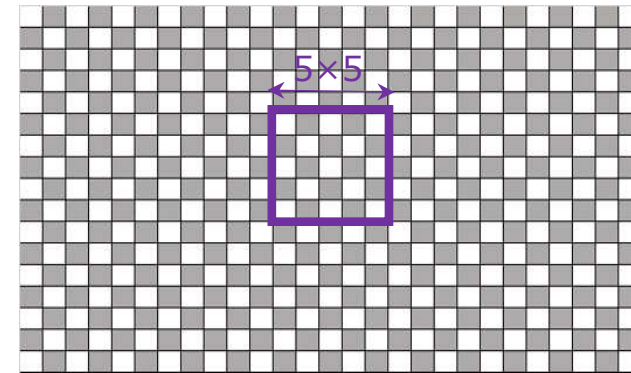
放水が局所に集中する状況での軸方向燃焼度分布の影響

参考2

放水が局所に集中する状況において燃料の軸方向燃焼度分布を考慮した未臨界性評価を行い、基本ケース条件として燃焼度分布を一様としたことの妥当性を確認する。

<評価条件>

- ・貯蔵燃料：領域A ⇒ 新燃料、領域B ⇒ 25GWd/t燃焼燃料
- ・軸方向燃焼度分布：① 軸方向燃焼度分布
② 軸方向燃焼度分布考慮

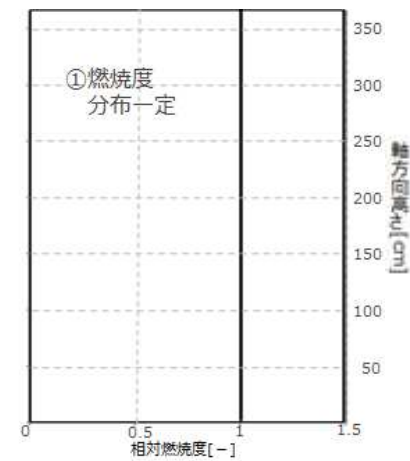


- ：領域A
(0GWd/t以上燃焼燃料を貯蔵)
- ：領域B
(25GWd/t以上燃焼燃料を貯蔵)

その他の以下条件等は6/2審査会合提示の条件に同じ。

- ・流入流量： m³/h
- ・流入割合：30%
- ・液膜割合：100%
- ・集中範囲：5×5
- ・水位：低水位

<評価結果>
LATER

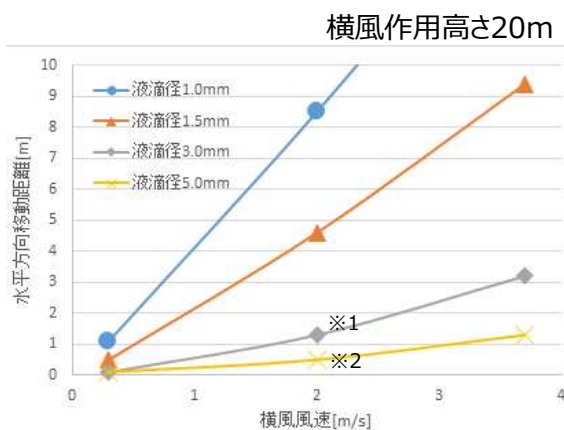
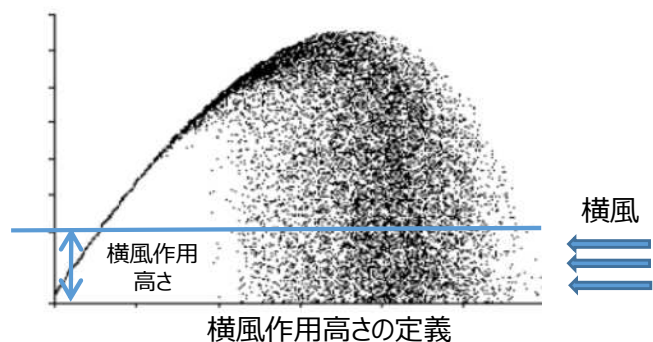


軸方向燃焼度分布

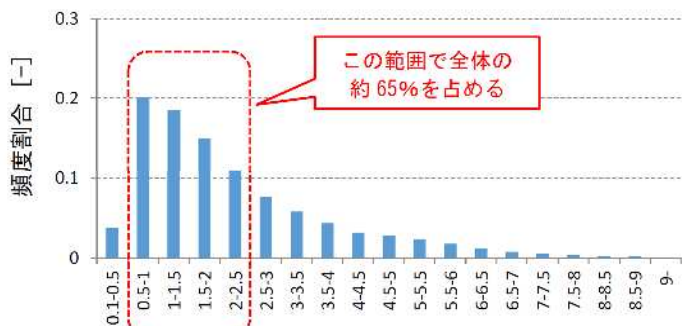
SFP内への流入流量は、基本ケースにおいても保守的に設備からの流量が全て流入するとしているが、横風が発生すると流入流量が低下すること、また斜めから流入する液滴は液膜形成を阻害する外乱となり液膜厚さを低下させる因子となることから、斜めからの流入による影響は考慮しない。

【理由】

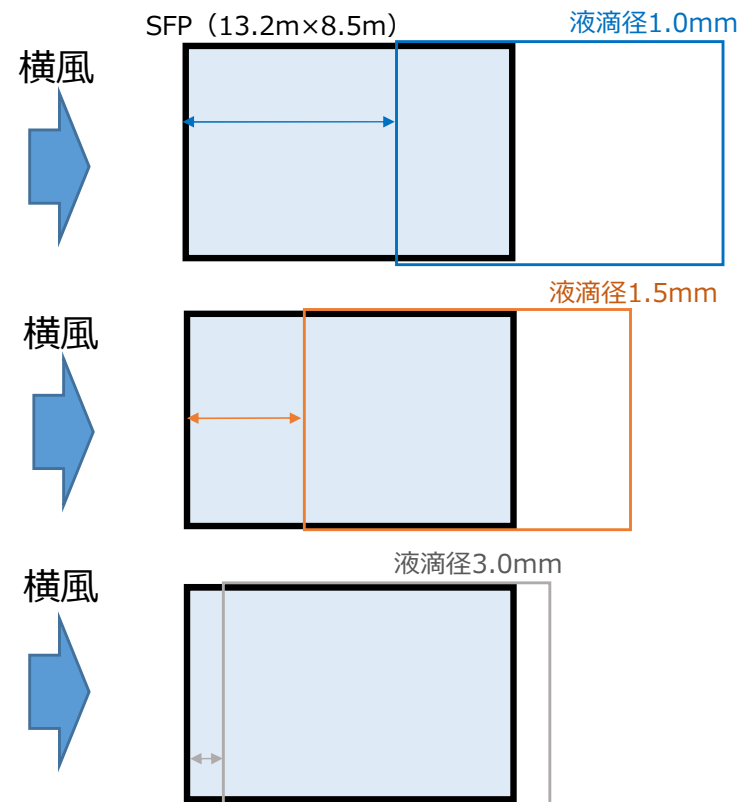
- 流量の大部分を占める放水砲の液滴は、数十メートルの高さまで到達したのちに落下するため、ほとんどの液滴は垂直に落下する。
(横風作用高さ20m、横風速度2 m/sとした場合における、液滴径3.0mmおよび5.0mmの地表面での流入角度はそれぞれ約6.5°、約2.5°)
- 横風が作用する場合、液滴は広範囲に離散するため流入流量が小さくなる。
- 且つ、斜めから流入し軸方向高さで燃料棒と接触する液滴は、液膜を弾き飛ばす外乱となり、液膜厚さを低下させる因子となる。



※1 流入角度は約6.5° ※2 流入角度は約2.5°



高浜発電所での風速頻度分布
(2019年度データの一時当たり平均値 (約8700点))
(平均 約2.0m/s、標準偏差 約1.7m/s)



横風が作用した場合の液滴落下範囲の移動 (イメージ)
(横風作用高さ: 20m、横風風速: 2m/sの場合)