

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】

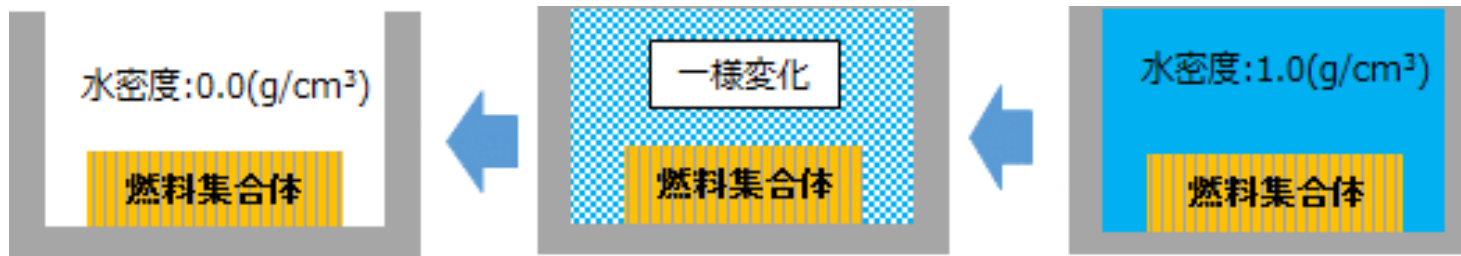
設置許可基準規則 第54条2項の未臨界性要求に係る
最適評価と不確かさを考慮した評価について

2020年 8月 7日

関西電力株式会社

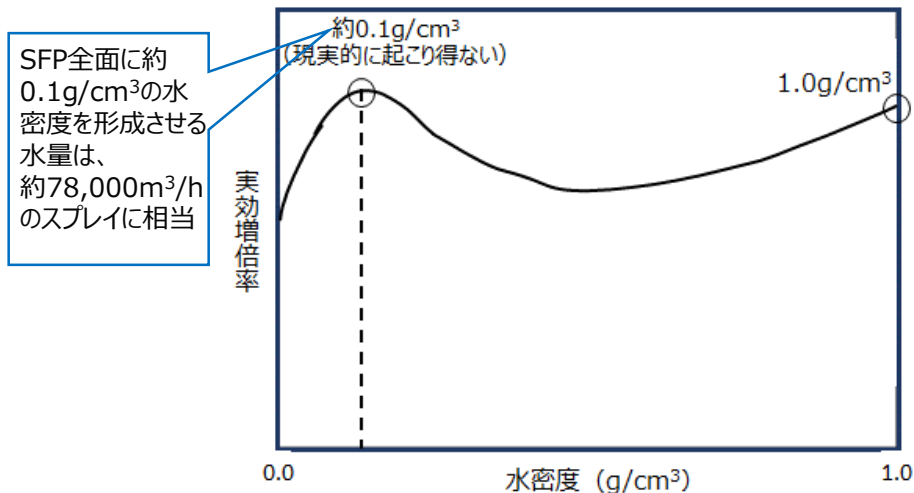
○既許可における未臨界性評価方針

・放水・注水設備の性能によらず、SFP全体の水密度を一様として、 $0.0 \sim 1.0 \text{g/cm}^3$ で評価



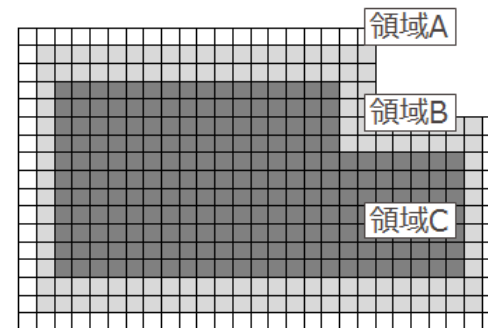
<特徴>

- ・高浜1,2号炉のラック構造はアングル型ステンレス鋼製であり、水位低下時の中性子の遮蔽効果が低く、現実的に起こり得ない水密度 (約 0.1g/cm^3) で実効増倍率のピークが発生する。
- ・既許認可では、燃焼度や中性子吸収体挿入の有無を制限した貯蔵領域を設定(3領域管理)することで、実効増倍率を抑制することとしたが、領域Cの多数の燃料で中性子吸収体を挿入しなければならず、燃料および内挿物の取り扱い頻度が多くなり管理が煩雑になる。



高浜1,2号炉SFP体系において水密度を一様に

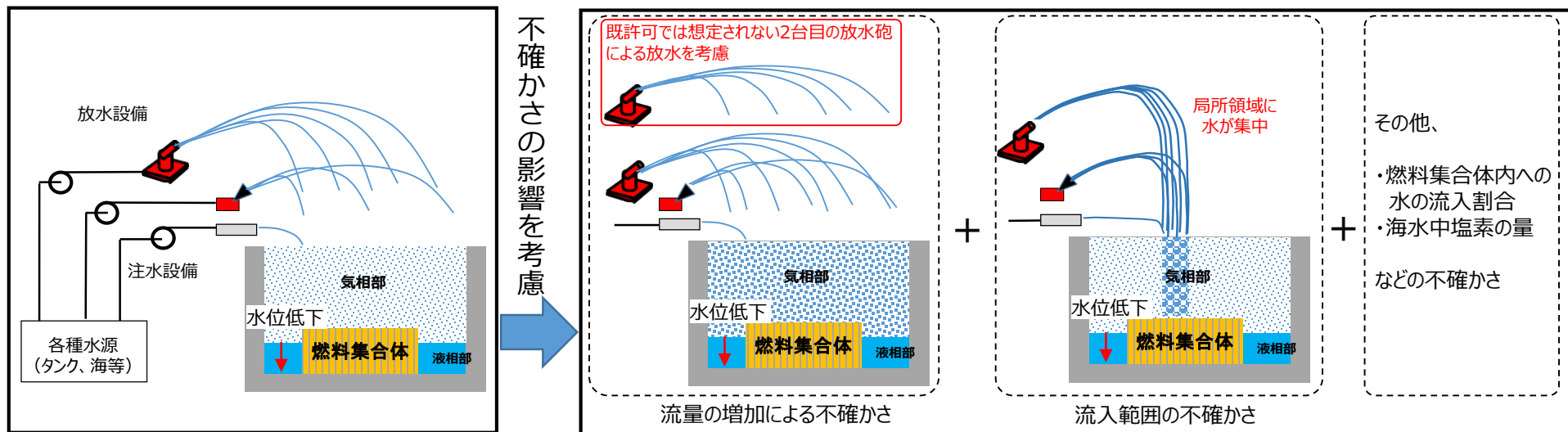
変化させた場合の実効増倍率挙動イメージ



	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

○今回の未臨界性評価方針

- ・SFP大規模漏えい時は液相部と気相部に分かれた状態で水位が低下する事象に合わせ、体系を液相部と気相部の2相に分け、水位が低下する条件で評価する。
- ・気相部の水分条件は、設置許可基準規則第54条に係る注水・放水に関する手順と設備台数等を踏まえたピット水大量漏えい時の基本的な状態を設定したうえで、流量や流入範囲等の不確かさによる影響を考慮した条件で評価。

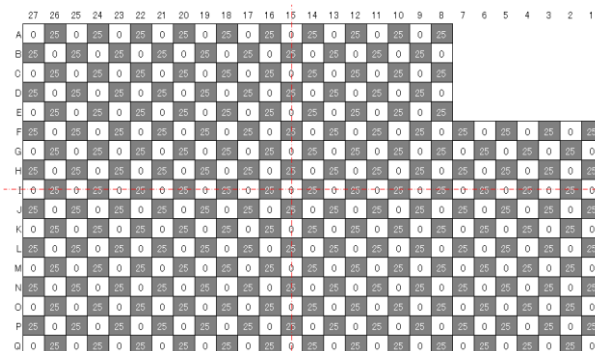


ピット水大量漏えい時の状態 (基本ケース)

各パラメータの不確かさによる影響

<特徴>

- ・評価条件を現実的な条件へ見直すことにより、中性子吸収体を考慮した燃料管理が不要となる。
- ・燃料および内挿物の取り扱い頻度を大幅に低減でき、安全性の向上が図られる。
- ・なおSFPへ流入した水が局所に集中した場合でも未臨界を維持するため、新燃料と燃焼燃料を分散させ配置する。

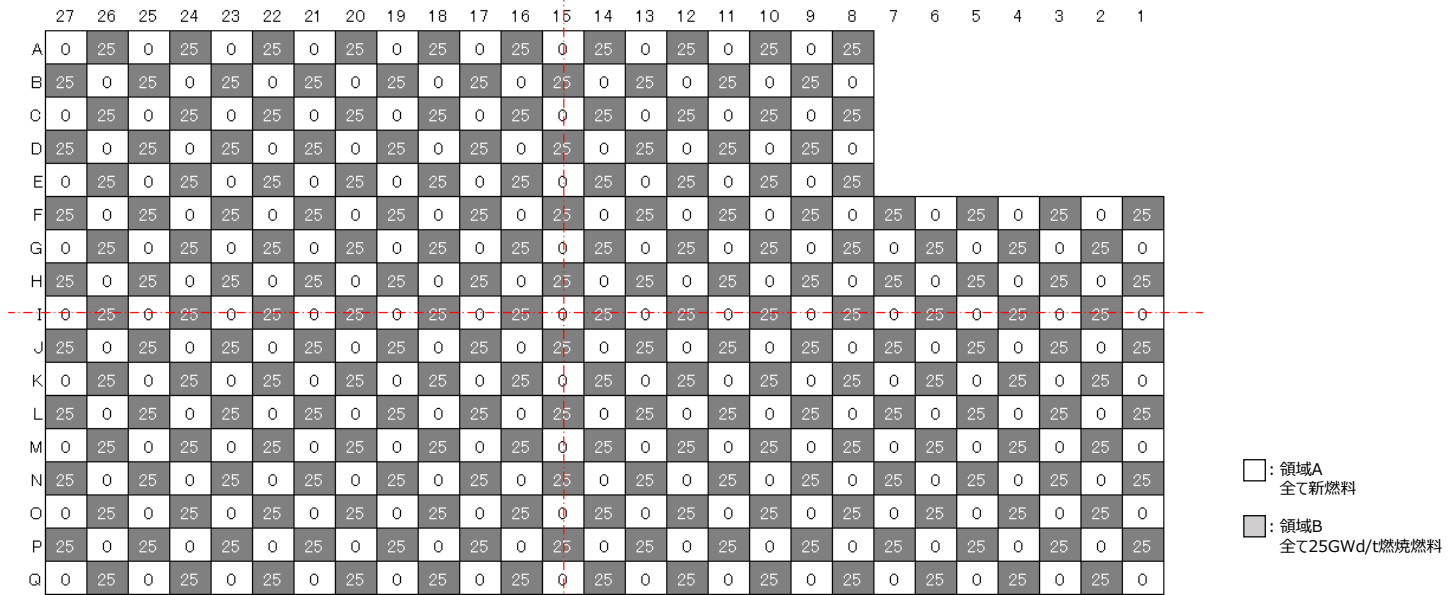


	貯蔵可能な燃焼度
□ 領域A	0GWd/t以上
■ 領域B	25GWd/t以上

「① 燃料配置条件（燃烧度、配置）」の設定

＜燃料配置条件（燃烧度、配置）＞（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25GWd/t燃焼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	20	25	30	40	計
実運用下 (SFラック満杯想定) ※	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

※ 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。

「① 燃料配置条件（Pu組成、AC・FP組成）」の設定

＜Pu組成、AC・FP条件＞（基本ケース条件）（不確かさを含む条件）

燃料の燃焼履歴や冷却期間、核種の種類は、実効増倍率を高めるように設定する。

【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 [] 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、²³⁸U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。
- 燃料の冷却期間は、 [] とする。
- 燃焼燃料中のAC核種およびFP核種は、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 [] 設定とし、中性子吸収効果を有するFPは [] する。

AC核種	ISG-8 Rev3	高浜1/2	
		新規制基準適合審査時	今回申請
235U	○	[]	[]
238U	○		
238Pu	○		
239Pu	○		
240Pu	○		
241Pu	○		
242Pu	○		
241Am	○		
[]	[]		
[]	[]		

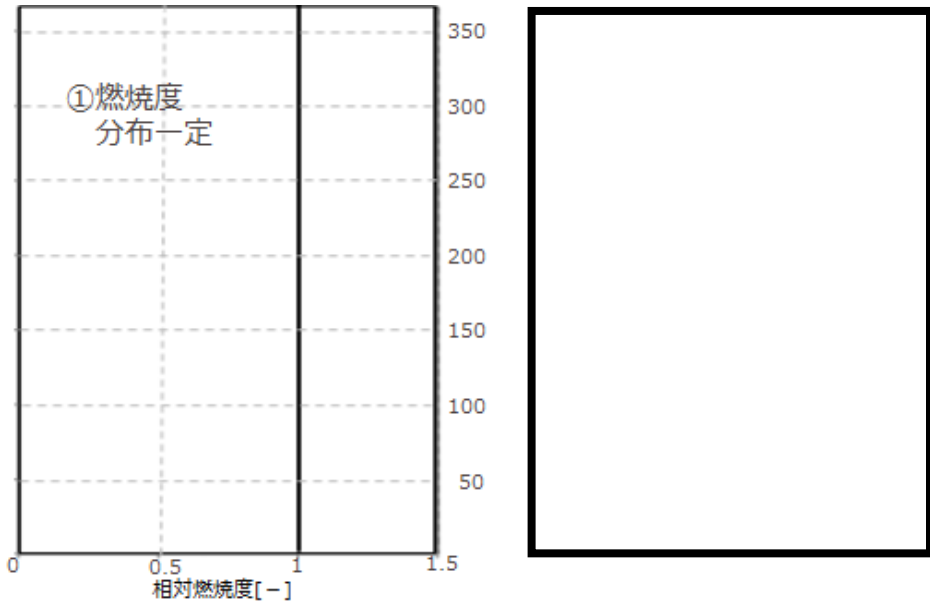
FP核種	ISG-8 Rev3	高浜1/2	
		新規制基準適合審査時	今回申請
95Mo	○	[]	[]
99Tc	○		
103Rh	○		
109Ag	○		
133Cs	○		
143Nd	○		
145Nd	○		
147Sm	○		
149Sm	○		
150Sm	○		
151Sm	○		
152Sm	○		
153Eu	○		
155Gd	○		

「① 燃料配置条件（軸方向燃烧度分布）」の設定

＜軸方向燃烧度分布＞（基本ケース条件）（不確かさを含む条件）

燃烧燃料は軸方向に燃烧度分布がつくが、低水位時の実効増倍率は燃烧度分布一定としたほうが大きいため、軸方向燃烧度分布は一定として取り扱う。

【軸方向燃烧度分布】



軸方向燃烧度分布の設定条件

※ 図は、を元に作成したもの

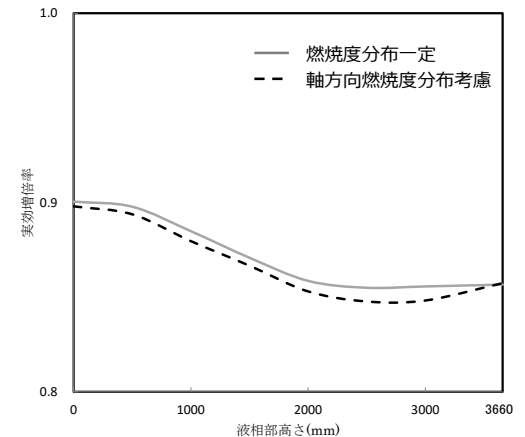
（参考）軸方向燃烧度分布の有無による感度解析

＜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	基本ケースに同じ

＜評価結果＞

ピット水大量漏えい時の未臨界性評価において確認する必要がある低水位時の実効増倍率は、軸方向燃烧度分布一定条件のほうが大きい。



「② 流量」の設定 (1 / 2)

＜流量＞（基本ケース条件）

注水設備による流量と放水設備による流量の合計値 m³/hを設定する。

【注水設備による流量設定の考え方】

各手順（参考7）による流量は既許可で想定している注水流量とし、全手順が同時に実施される可能性を想定し、181m³/hとする。

表 注水手順における流量

注水手順(ポンプ)	通常時流量
① 燃料取替用水タンク (燃料取替用水ポンプ)	30m ³ /h
②-1 2次系純水タンク (2次系純水ポンプ)	5m ³ /h
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
③ 1,2号淡水タンク (消火ポンプ-消火栓)	22m ³ /h
④ 2次系純水タンク (消防ポンプ)	39m ³ /h
⑤ 1次系純水タンク (1次系純水ポンプ)	40m ³ /h
⑥ 海水 (送水車)	15m ³ /h
合計	181m ³ /h

【放水設備による流量設定の考え方】

参考7のフロー図で示される3つの手順において使用するスプレーヘッド、放水砲による流量について、使用台数および通常使用時の流量を踏まえ、それぞれ m³/h、 m³/hとし、且つ両設備の同時使用を想定して、 m³/hとする。

表 放水手順における流量

放水手順	通常時流量	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	設定根拠記載値
③大容量ポンプによる放水	<input type="text"/> m ³ /h	
合計	<input type="text"/> m ³ /h	-

「② 流量」の設定 (2 / 2)

<流量> (不確かさを考慮した条件)

各手順の流量を設備仕様・構成上の最大値等とし、かつ手順上は想定されない対応として2台目の放水砲による放水も考慮した値として、m³/hとする。

【注水設備による流量】

各手順で使用するポンプの台数や仕様上限等を踏まえ713m³/hと設定する。

【放水設備による流量】

設備スペックの上限値を考慮し、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による放水も同時に考慮することとして、m³/hを設定する。

} 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	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※1×2※2	ポンプ揚程曲線
合計	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	-

※1：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。

※2：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。

<SFPへの流入範囲、流量分布>（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※に基づく分散分布から求まるピーク流量（ $4\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 以下）を上回る条件として、全流量がSFラック面積に一様に流入した場合の値($10\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$)相当を用いる。
- スprayについても同様に、全流量がSFラック面積に一様に流入した場合の値を用いる。

【放水砲の分散分布を考慮した場合のピーク近傍の水量】

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 $\pm 2\text{m}$ 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 $\pm 2\text{m}$ 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様にSFラック上に流入した場合の水量】

$$\square \text{m}^3/\text{h} \div (\square \text{m} \times \square \text{m} \times 424) = 9.7 \text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2) > \square \text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$$

【スprayの分散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prayによる全流量が一様に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pray水分布は、1分間連続スpray時の水量を開口部面積 0.038m^2 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)

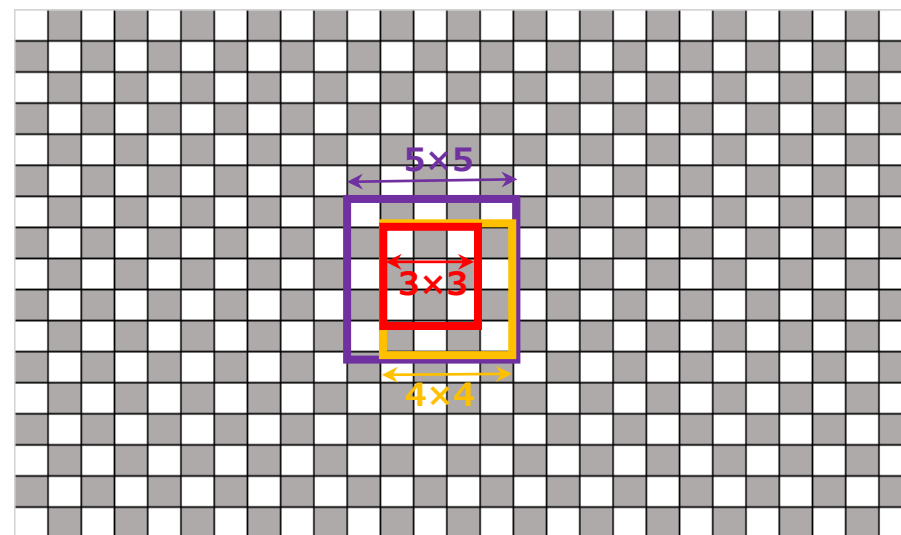
< SFPへの流入範囲、流量分布 >（不確かさを考慮した条件）

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に流入する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。
また、N×Nの設定位置の対称性を考慮できるよう、切り欠け部にも燃料が存在するものとして評価する。）



- : 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)

- ※ 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（不確かさ0.02含む）であり、判定基準（0.98以下）を満足する。

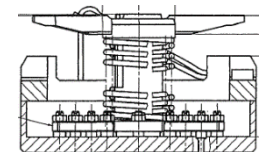
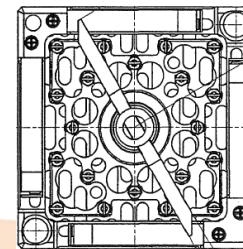
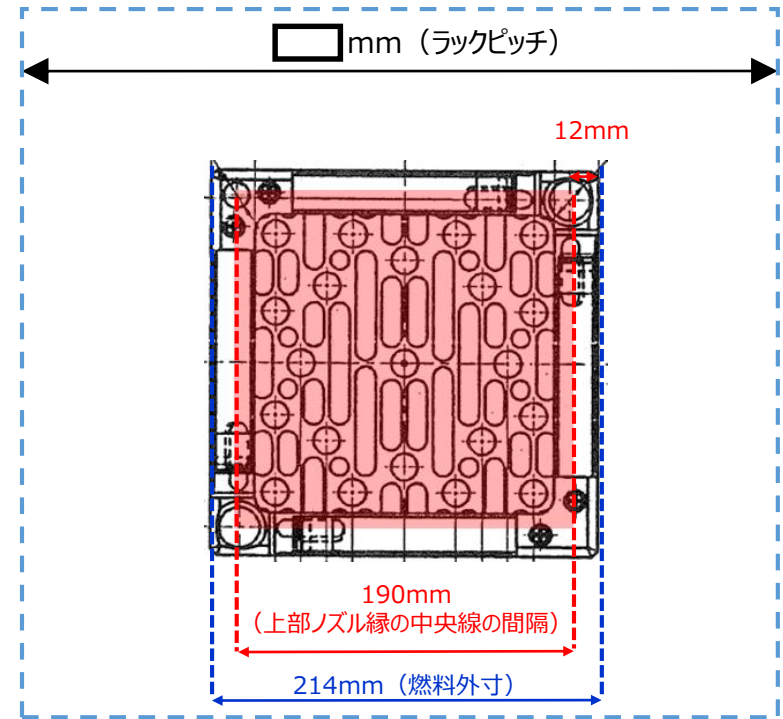
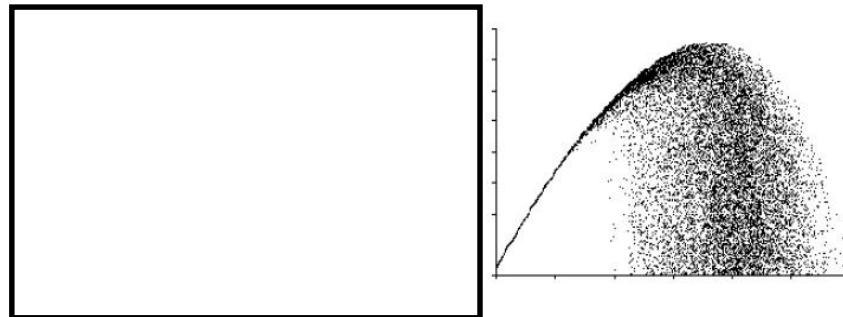
＜燃料集合体内に流入する割合＞（基本ケース条件）

燃料集合体の上部に垂直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。

【根拠】

- 無風時の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。
- 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。
- 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。

$$190 \times 190 \div (\square \times \square) \cong 23\%$$



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

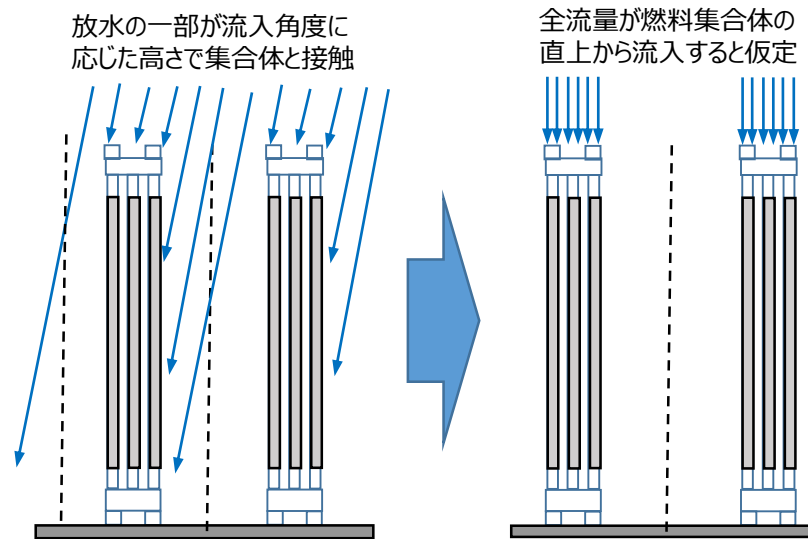
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

＜燃料集合体内に流入する割合＞（不確かさを考慮した条件）

横風の影響等により斜め方向から液滴が流入してくることを想定し、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。
- 燃料集合体の中間高さで接触する液滴についても、仮想的に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、一番厳しい状態となる、燃料集合体内への流入割合を100%と設定する。
- 上部ノズルにより弾かれる現象も保守的に考慮しない。

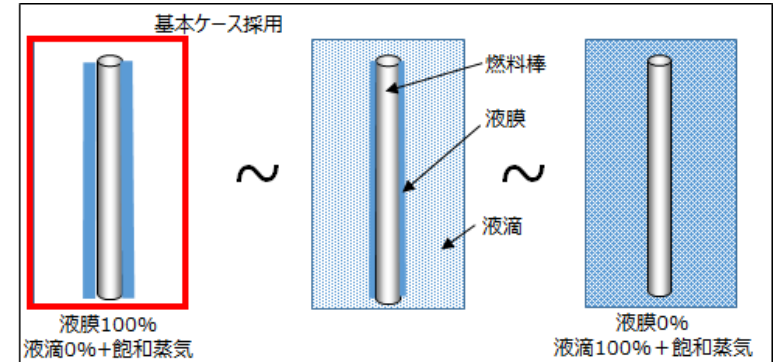


＜液膜割合＞（基本ケース条件）（不確かさを含む条件）

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。

【設定理由】

- 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。



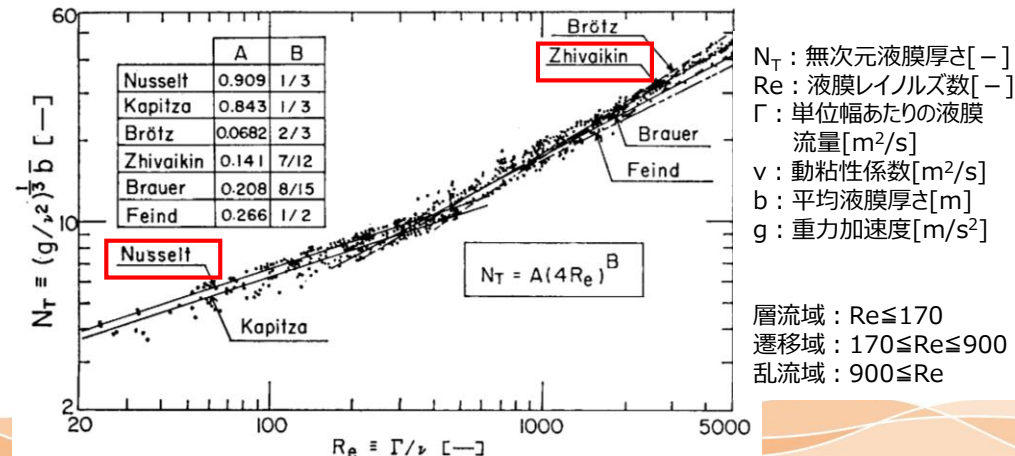
液膜と液滴の割合（イメージ図）

＜液膜評価式＞（基本ケース条件）

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。

【液膜厚さ評価式設定（基本ケース条件）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。



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

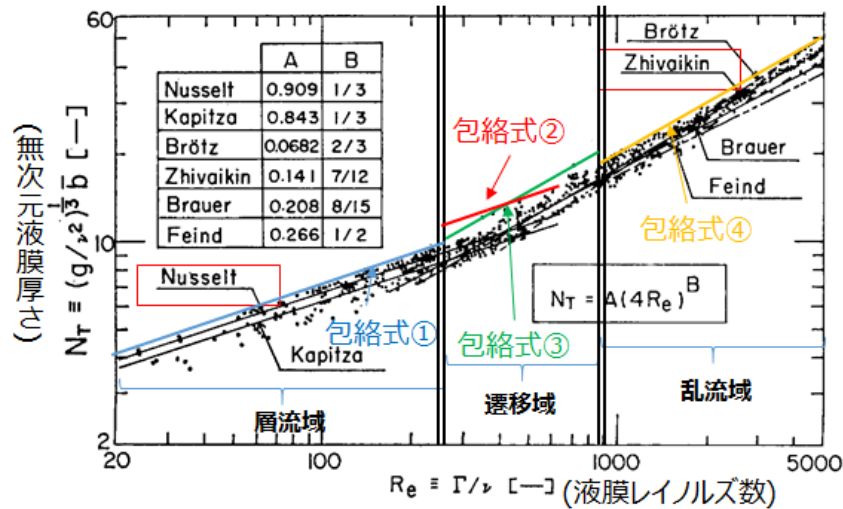
※ 新田勉他、垂直流下液膜における流動および波動特性、(1985)、化学工学論文集 The Kansai Electric Power Co., Inc.

＜液膜評価式＞（不確かさを考慮した条件）

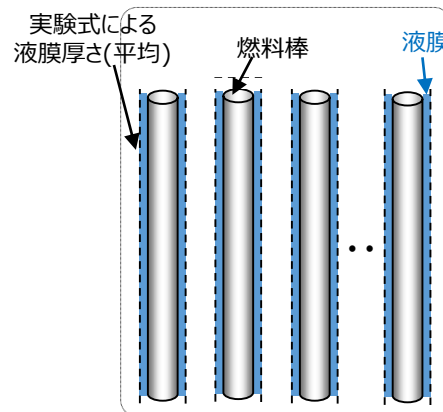
液膜厚さが厚いほうが実効増倍率が高くなるため、実験結果の不確か性を包含する評価式を設定する。

【実験の不確かさを包絡する算出式設定の考え方】

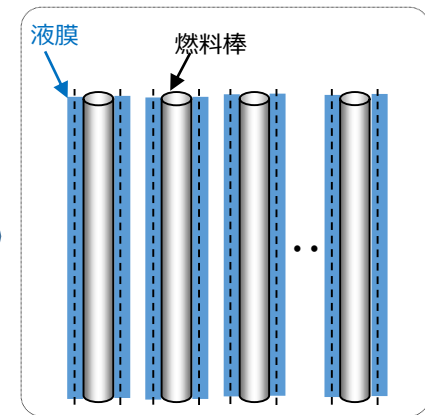
- 液膜が厚くなり燃料集合体内の水分量が多いほど実効増倍率が高くなるため、右図に示す実験データの全計測値を包含する評価式（包絡式）を設定する。
- 具体的には、代表的な実験式の傾き(右図のBの値)を保存し、各領域毎内の最も大きい計測値を通る線を包絡式とする。
- 各計測値にはばらつきがあるが、本包絡式はそれらをカバーするように設定されているため、実験データに着目した場合、液膜評価の上限として扱うことができる。
- 加えて、本包絡式を全燃料棒に適用することで、さらに大幅な保守性を考慮する。
(右の燃料棒模式図)



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)

「⑥ 気相部水密度（平均液滴径）」の設定

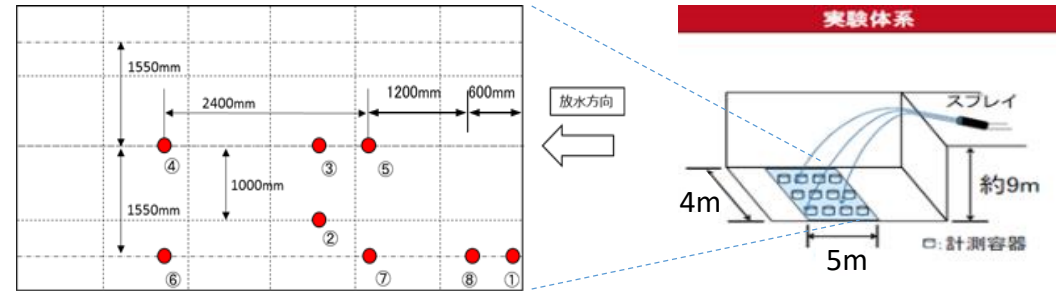
＜気相部水密度（平均液滴径）＞（基本ケース条件）

スプレイヘッドによる放水の平均液滴径を1.5mm、放水砲による放水の平均液滴径を2.9mmと設定する。

【設定根拠】

- スプレイ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は1.5mmであった。
- 放水砲による液滴の径は、文献※によると、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、大規模放水の平均的な液滴径を計算した値が約2.9mmであり、当該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とされている。

スプレイヘッドを用いた実放水試験の体系および試験結果



＜気相部水密度（平均液滴径）＞（不確かさを考慮した条件）

スプレイヘッドによる放水も放水砲による放水も、ともに1.0mmとする。

【不確かさを考慮した条件の設定根拠】

- 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イヘッドの平均液滴径を適用する。
- さらに、スプレイ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。

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

「⑦ 海水に含まれる塩素濃度」の設定

＜塩素濃度＞（基本ケース条件）

文献値※に記載の値の平均値として塩分濃度を3.5%とした場合の塩素濃度を設定する。

＜塩素濃度＞（不確かさを考慮した条件）

実効増倍率を高くするため、塩分濃度を3.0%に切り下げ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 %	—

不確かさを重畳させた未臨界性評価条件（1 / 3）

<未臨界性評価条件の取り扱い>

体系中の水分条件といった未臨界性評価結果に影響するパラメータについては、個別のパラメータを保守側に重畳させたワーストケースモデルを設定することにより水分条件の変化を考慮した最大の実効増倍率を評価する。なお今後、ワーストケースモデルをベースとして、ラックおよび燃料の製作公差による不確かさを評価する。

ここでは、水分条件を考慮したワーストケースモデルを設定することを目的として、個別パラメータのばらつきによる実効増倍率への影響についての感度評価をあわせて実施する。

上記の考え方を踏まえ、本申請においては、未臨界性評価において考慮する個別のパラメータの考え方を、以下の3種類に分類している。

【個別のパラメータ分類の考え方】

① ばらつきが特定の範囲に管理されるパラメータ

⇒未臨界性評価のベースとなるワーストケースモデルには組み込まず、不確か性として別途評価する。

（例：ラックや燃料の製作公差）

② ばらつきは生じ得るものの、特定の範囲に管理されていない、もしくは管理できないパラメータ

⇒未臨界性評価のベースとなるワーストケースモデルに組み込む。

（例：放水後の水分条件）

③ 評価の保守性を確保する観点から設定されるパラメータ

⇒未臨界性評価のベースとなるワーストケースモデルに組み込む。

（例：流量、燃料濃縮度）

不確かさを重畳させた未臨界性評価条件 (2 / 3)

<個別パラメータの分類>

不確かさの要因となる各パラメータについて、ワーストケースモデルに組み込む解析条件を選定する。

このワーストケースモデルが、後続の不確定性評価における基本のモデルとなる。



不確かさを重畳させた未臨界性評価条件（3 / 3）

各パラメータに対して、現実的な運転操作を考慮した条件、不確かさを考慮した条件、およびワーストケース条件への取り込み要否を下表に纏める。

パラメータ		現実的な運転操作を 考慮した条件	不確かさを考慮した条件	未臨界性評価 モデル設定方法
① 燃料配置条件		0GWd/t & 25GWd/t チェッカーボード配置	0GWd/t & 25GWd/t チェッカーボード配置	ワーストケースへ組み込む ③
水分条件	② 流量	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	ワーストケースへ組み込む ③
	③ SFPへの流入範囲、流量分布	SFP全面(一様)	局所(一様) (流入範囲は3×3範囲から拡大)	ワーストケースへ組み込む ②
	④ 集合体内に流入する割合	23%	30%*	ワーストケースへ組み込む ②*
	⑤ 液膜厚さ(算出式)	液膜レイノルズ数に 応じた実験式	実験値の包絡式	ワーストケースへ組み込む ②
	⑥ 気相部水密度(平均液滴径)	スプレーヘッド: 1.5mm 放水砲: 2.9mm (放水設備の性能に応じた液滴径)	スプレーヘッドの液滴径	ワーストケースへ組み込む ②
	⑦ 海水に含まれる塩素濃度	3.5%	3.0%	ワーストケースへ組み込む ③
	製作公差条件	ラック公差 (内のり、ラック内燃料偏心、中心間距離)	公称寸法	製作公差考慮
ラック公差 (ラック厚さ)		最小値(公差考慮)	最小値(公差考慮)	ワーストケースへ組み込む ③
燃料公差 (燃料材直径、燃料材密度、燃料材内 径、燃料材外径、燃料体外寸)		公称寸法	製作公差考慮	ワーストケースへ組み込まない ①
燃料公差 (濃縮度)		最大値(公差考慮)	最大値(公差考慮)	ワーストケースへ組み込む ③

*当該パラメータの感度を確認するに当たっては100%を設定するが、横風が吹いている状況で局所に全流量が集中するという状態は成立しないことから、ワーストケースでは集合体ノズル形状を踏まえた保守的な設定である30%を設定する。

- ① ばらつきが特定の範囲に管理される条件
- ② ばらつきは生じ得るものの、特定の範囲に管理されていない、もしくは管理できない条件
- ③ 評価の保守性を確保する観点から設定される条件

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。

【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、炉心全体の発熱量（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27サイクルの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】

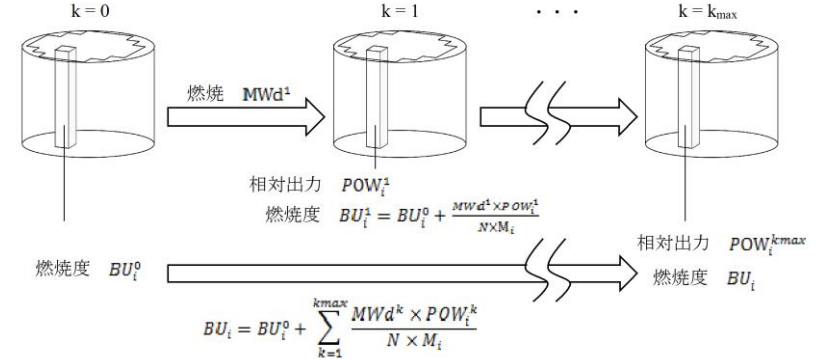
- 燃焼度は、原子炉熱出力と燃料集合体相対出力の誤差に影響を受け、それぞれの誤差の程度は以下の通り。

誤差を有する因子	誤差	出典
原子炉熱出力	2%	既許可で考慮されている熱出力誤差
燃料集合体の相対出力	4%	既許可で考慮されている、水平方向出力分布の歪みに相当する $F_{\Delta H}^N$ の不確かさ

- 上表の誤差因子はそれぞれ統計的に独立であることから、燃焼度自体の誤差は二乗和平方根をとることにより、約4.5%となる。

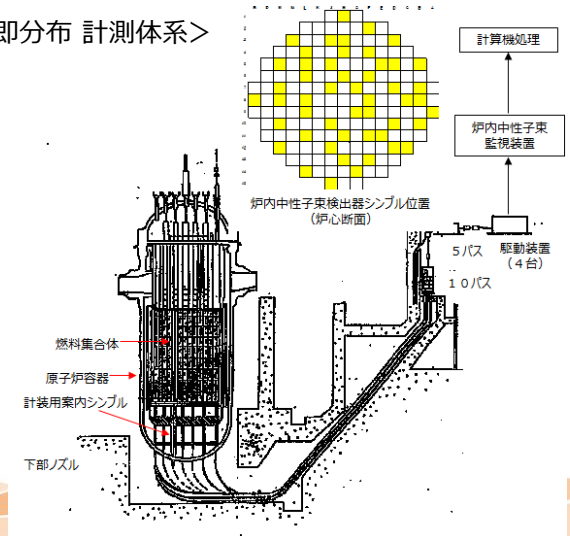
$$\sqrt{0.04^2 + 0.02^2} \approx 0.045$$

＜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＞



燃焼度の不確かさについては4.5%程度であり、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と考えられるが、仮に燃焼燃料の燃焼度を [] と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%

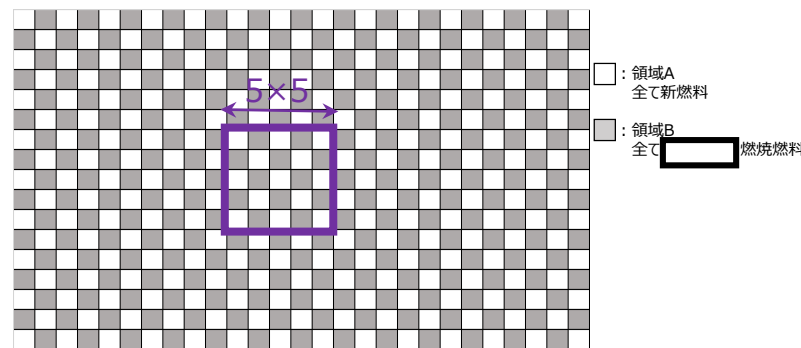


図 放水される水が集中する場合の燃料配置条件および集中する範囲

<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

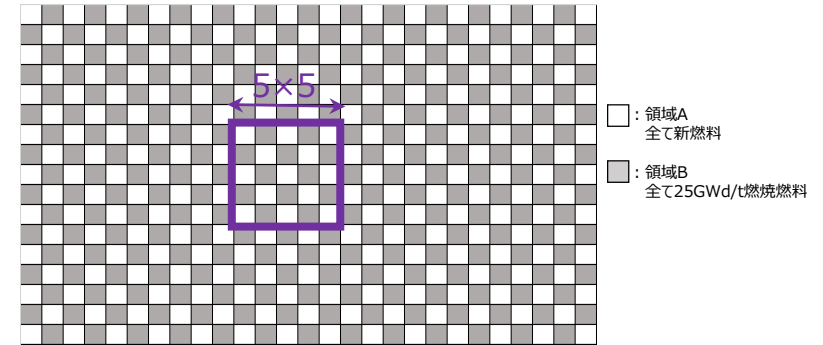
放水が局所に集中する状況において燃料の軸方向燃焼度分布を考慮した未臨界性評価を行い、基本ケース条件として燃焼度分布を一定としたことの妥当性を確認する。

<評価条件>

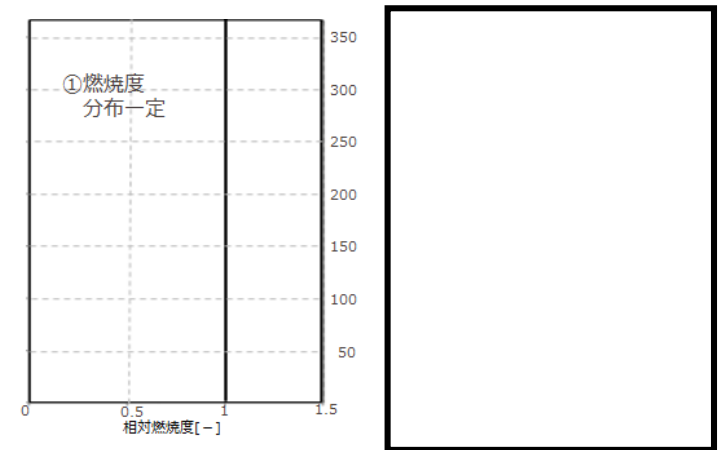
- ・貯蔵燃料：領域A ⇒ 新燃料、領域B ⇒ 25GWd/t燃焼燃料
- ・軸方向燃焼度分布：① 軸方向燃焼度分布
② 軸方向燃焼度分布考慮

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



燃料配置条件



軸方向燃焼度分布

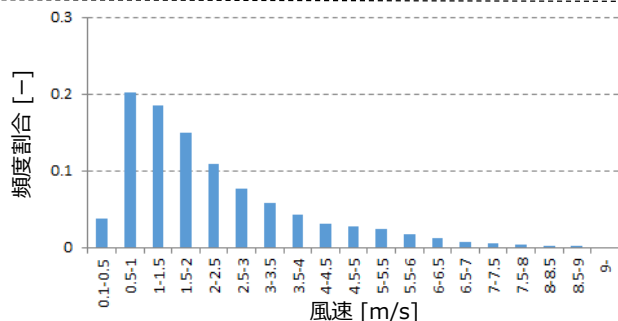
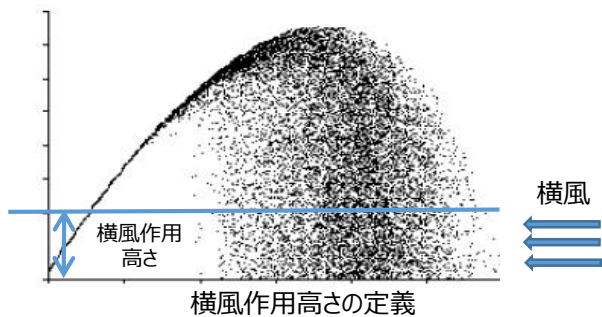
<評価結果>

LATER

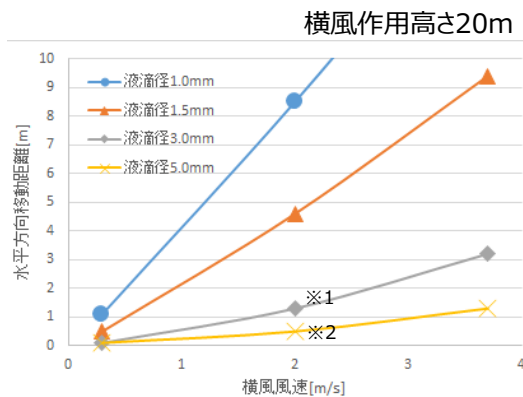
SFP内への流入流量は、基本ケースにおいても保守的に設備からの流量が全て流入するとしているが、横風が発生すると流入流量が低下すること、また斜めから流入する液滴は液膜形成を阻害する外乱となり液膜厚さを低下させる因子となることから、斜めからの流入による影響は考慮しない。

【理由】

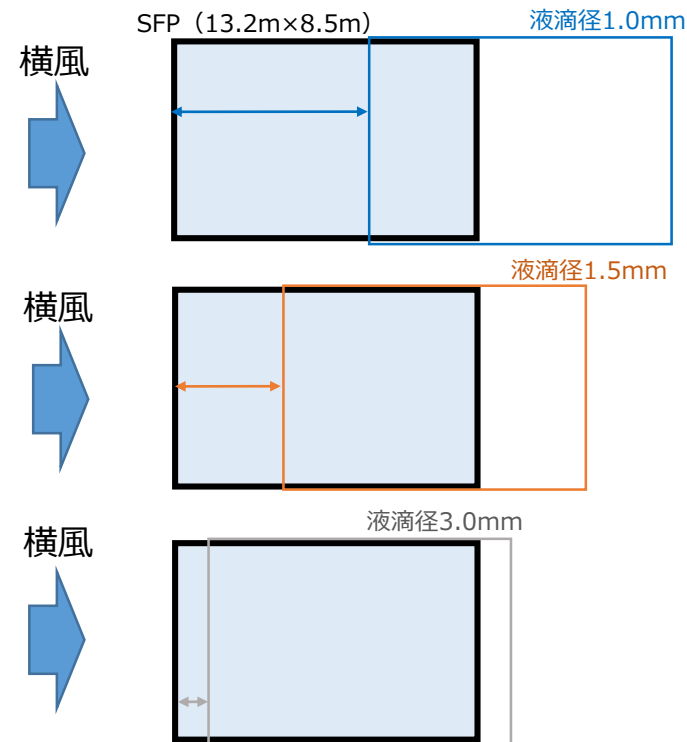
- 流量の大部分を占める放水砲の液滴は、数十メートルの高さまで到達したのちに落下するため、ほとんどの液滴は垂直に落下する。
(横風作用高さ20m、横風速度2 m/sとした場合における、液滴径3.0mmおよび5.0mmの地表面での流入角度はそれぞれ約6.5°、約2.5°)
- 横風が作用する場合、液滴は広範囲に離散するため流入流量が小さくなる。
- 且つ、斜めから流入し軸方向高さで燃料棒と接触する液滴は、液膜を弾き飛ばす外乱となり、液膜厚さを低下させる因子となる。



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



※1 流入角度は約6.5° ※2 流入角度は約2.5°



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)

【核種組成計算コードの精度および誤差の取り扱いについて】

- 核種組成計算に使用したコード（PHOENIX-P）は、既許認可における未臨界性評価でも用いたコードであり、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ことになるが、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。

【今回申請におけるFP核種選定が有する保守性】

- 未臨界性評価において考慮している核種は、その核種を含んだ体系に対しベンチマーク解析を実施することを基本としているが、今回申請ではISG-8 Rev3に記載のFP核種の中から、実効増倍率が厳しくなるよう [] ことにより十分保守的な条件設定としている。
- なおISG-8 rev3で考慮可能とされているFP核種を [] 場合に対し、今回申請での [] が有する保守性は、下記感度解析結果より実効増倍率で約2%以下と試算している。

<感度解析条件および解析結果>

貯蔵燃料 : 50GWd/t燃焼燃料
 解析体系 : 無限配列
 水密度 : 最適減速となる水密度 (約0.1g/cm³)
 ラック仕様および反射体設定 : 基本ケース条件に同じ
 FP条件 : 右表参照
 実効増倍率 : 右表参照

<ISG-8 rev3に対する保守性>

- ・50GWd/t燃焼燃料敷き詰め時の実効増倍率の差は約4%
- ・燃料の反応度は燃焼に応じ直線的に変化すると仮定すれば、今回申請で考慮している25GWd/t燃焼燃料の無限配列体系下での実効増倍率の差は $4 \times (25/50) = 2\%$ 程度

FP核種	ISG-8 Rev3	高浜1/2 採用手法
95Mo	○	[]
99Tc	○	
103Rh	○	
109Ag	○	
133Cs	○	
143Nd	○	
145Nd	○	
147Sm	○	
149Sm	○	
150Sm	○	
151Sm	○	
152Sm	○	
153Eu	○	
155Gd	○	
50GWd/t燃焼燃料敷き詰め※	0.9043	

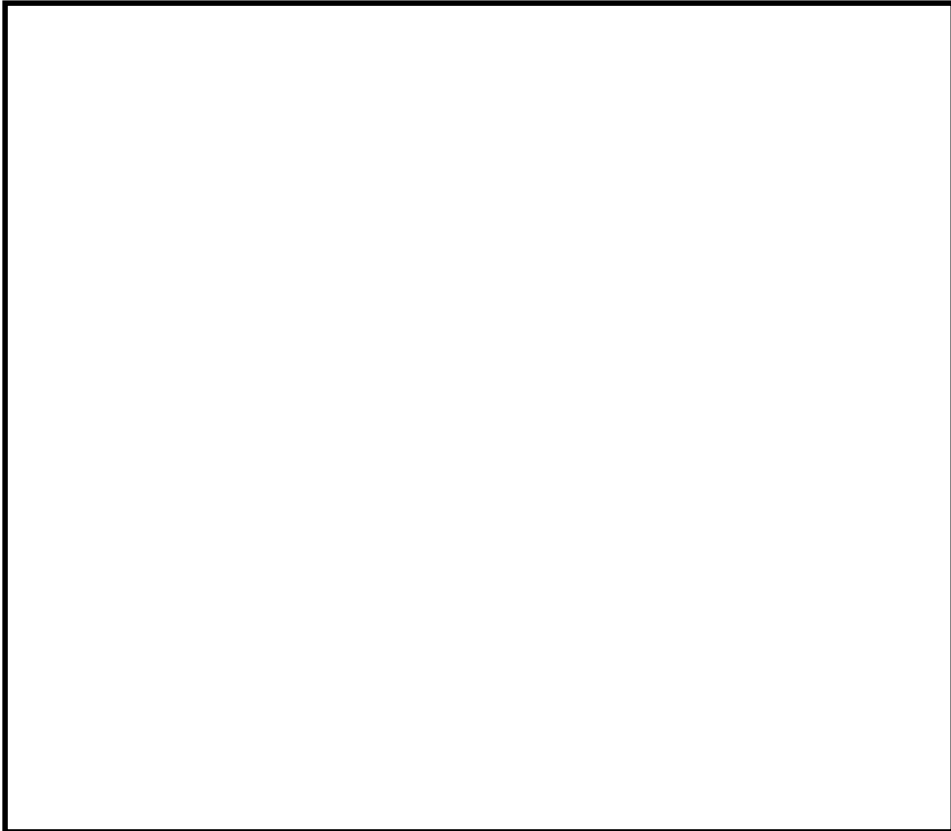
※ 製造公差等による不確定性を含まない値

【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※に載っている、FP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

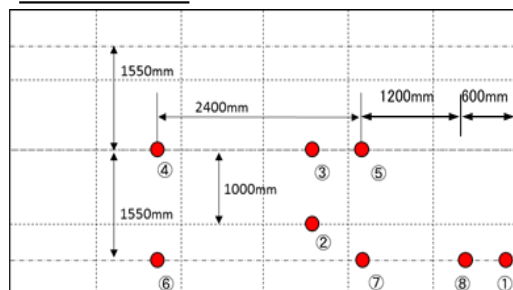
平均誤差および不確かさの計算結果

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※	□	□	□
	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

- 液滴の下降速度Vの算出に必要な、実際のスプレイ時における液滴の径を測定するため、実機スプレイヘッドを用いて、SFPを模擬した設備へのスプレイ放水を行い液滴径計測試験（液滴径分布測定）を実施した。

測定箇所



試験の様子

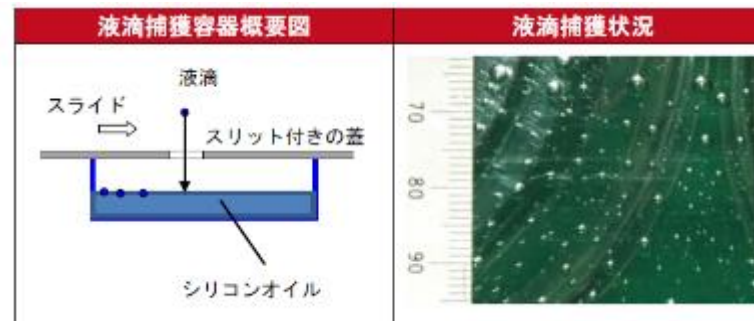


液滴径計測試験条件

項目	条件	説明
スプレイヘッド	実機	実機と同じもの
スプレイ流量	□ m ³ /h	実機使用時と同条件
首ふり条件	なし	より水密度が大きい状況でデータ採取
試験時温度	常温	下降速度が大きくなる常温で実施
落下高さ	約9m	燃料頂部相当高さ位置でのデータを取得
測定箇所	8箇所	高水密度の中央領域、低水密度の端部などで測定
計測回数	2回	2回の試験で得られたデータを踏まえ、スプレイ水密度算出時の液滴径を設定

液滴径分布測定方法

- ・ シリコンオイルを用いて落下液滴を捕獲
- ・ 画像処理により各測定点毎で液滴径および液滴数を計測（数百個以上／測定点、球形と想定し直径1軸を測定）
- ・ 液滴径0.1mm刻みで整理



液滴径計測試験結果

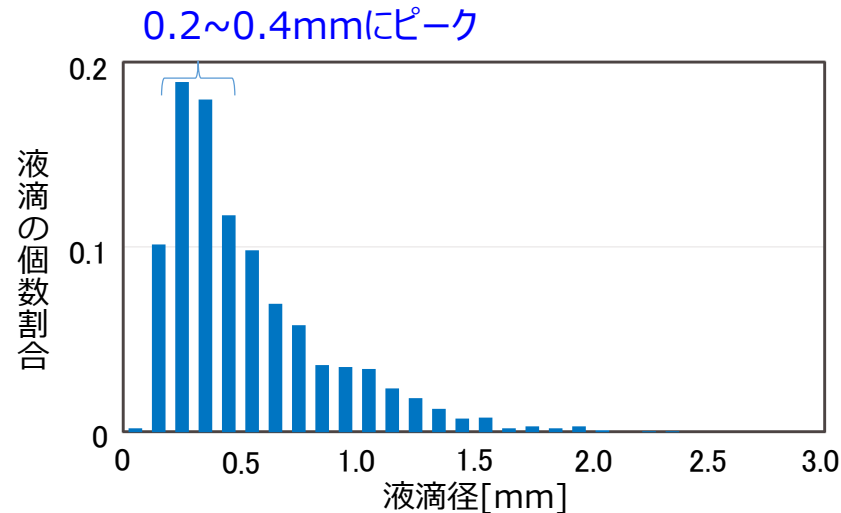


図1 液滴径毎の個数割合 (測定位置⑥の例)

- 試験の結果、液滴径の分布はどの測定位置でも概ね直径0.2~0.4mmに個数割合のピークがあった (図1)
 - 空間水密度 (単位体積内の水の重量) を求めるという観点からは、ある領域内にどれだけ重量の水が存在するかが重要
- ↓
- 水密度の観点から、液滴径毎の個数に液滴体積を乗じた体積分率で整理 (図2)
 - 各測定点での平均液滴径 (体積分率累計が50%となる液滴径) は、液滴径が小さくなる流量が少ない測定位置でも、1mm以上 (表)

体積分率で整理 (液滴径の3乗に比例) 表 測定位置毎の平均液滴径 [mm]

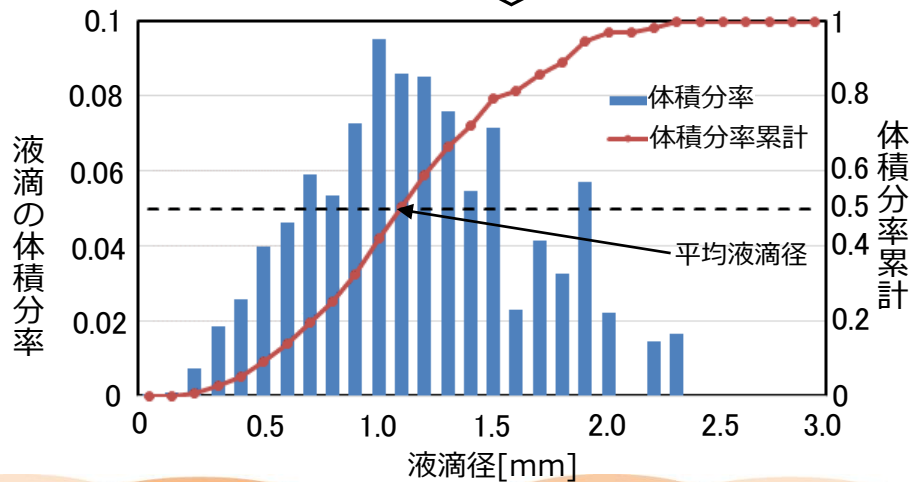


図2 液滴径毎の体積分率 (測定位置⑥の例)

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

- 液滴径計測試験の結果、流量の多い位置では液滴径が大きく、流量の少ない位置では液滴径が小さい傾向であり、どの測定位置においても平均液滴径は1mm以上であった（1mmはスプレイヘッド設置位置から最も遠い位置の値）。
- 液滴径が小さいほど、下降速度Vが小さくなり、スプレイ水密度Wが大きくなって実効増倍率が大きくなる。



スプレイ時の液滴径 = 1mm と設定

- 液滴の落下時には、重力と空気抵抗※がはたらき、これらがつりあう終端速度 V_i は次の式で求められる

※機械工学便覧（2007）、日本機械学会

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{重力-浮力} \qquad \qquad \qquad \text{空気抵抗} \\ (\rho_{water} - \rho_{air})gV_i = C_d \rho_{air} \frac{1}{2} v_i^2 A_i \\ \text{液滴の体積} \quad \text{液滴の断面積} \\ V_i = \frac{\pi}{6} d_i^3 \quad A_i = \frac{\pi}{4} d_i^2 \end{array} \right.$$

$$\therefore v_i = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{(\rho_{water} - \rho_{air})gd_i}{\rho_{air} C_d}}$$

液滴密度 ρ_{water}	:	998.2	[kg/m ³]
空気密度 ρ_{air}	:	1.166	[kg/m ³]
重力加速度 g	:	9.807	[m/s ²]
液滴直径 d_i	:	1.000×10^{-3}	[m]
抗力係数 C_d	:	0.7279	[-]

下降速度が小さくなる常温（20℃）の物性値を使用

- 液滴径1mmの場合、終端速度は約390cm/sとなる。なお、液滴径1mmの場合、落下高さ3～4m程度で終端速度に達するため、SFPラック頂部(スプレイヘッドから約8m下)では十分終端速度に達する。
- また、液滴径毎の下降速度に液滴の体積分率を乗じて求めた場合でも、平均下降速度は全測定点で430cm/s以上であり、平均すると530cm/sであった。



液滴の下降速度V = 390cm/s と設定
(液滴径1mmの終端速度)

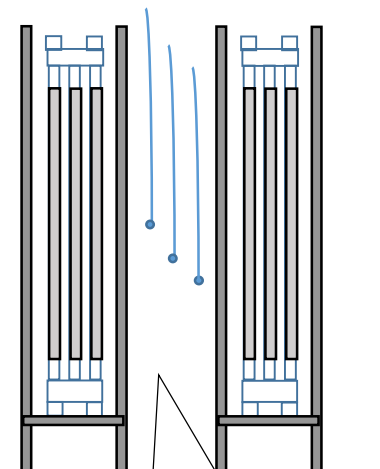
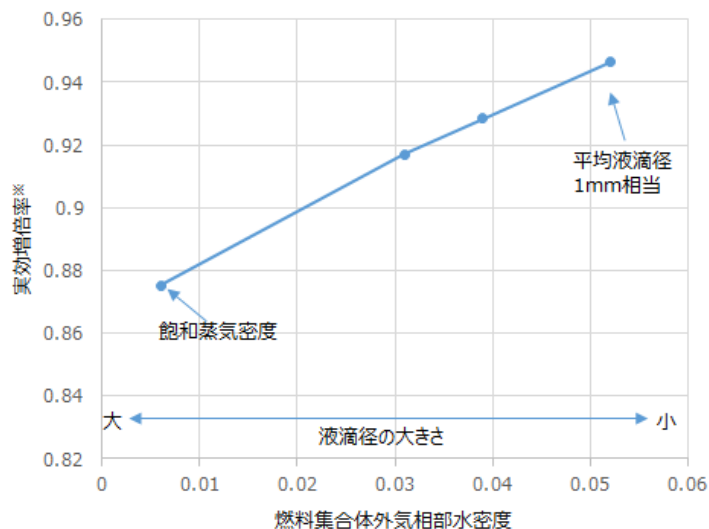
集合体内への水の流入流量が減速不足となる水量である場合は、集合体間の水密度は大きい方が実効増倍率が厳しいことを確認しており、本感度解析では、ラックにも燃料棒に形成される液膜と同じ厚さの液膜が形成されるとして評価している。

今回設定する各解析ケースには、集合体内への流入流量が本感度解析を上回るものではなく、集合体内は減速不足状態であることから、集合体間の水量が多くなるよう、気相部水密度を高くし且つラックに液膜を形成させた条件で評価する。

<感度解析条件>

- ・流入流量 : m³/h
- ・集合体内への流入割合 : 30%
- ・集中範囲 : 5×5
- ・水位 : 30cm
- ・ラックに形成される液膜厚さ : 燃料棒に形成される液膜と同じ厚さ
- ・燃料集合体外気相部水密度 : 飽和蒸気密度から平均液滴径1mm相当の水密度まで4点を評価

<感度解析結果>



燃料集合体の外の気相部水密度を変化させた

図 燃料集合体外水密度と実効増倍率の関係

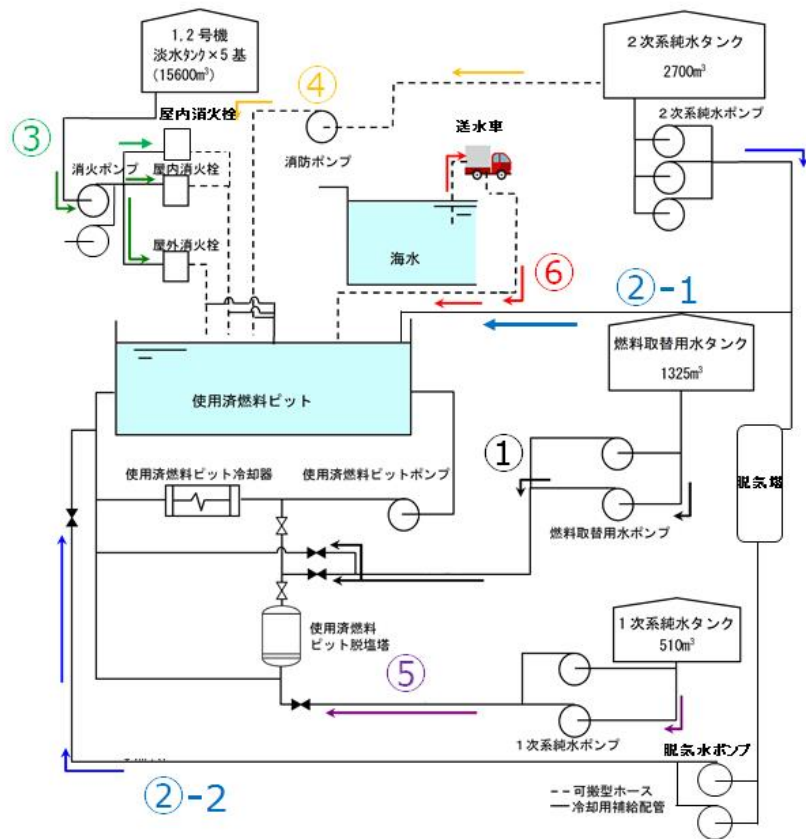


図 SFP注水設備の構成

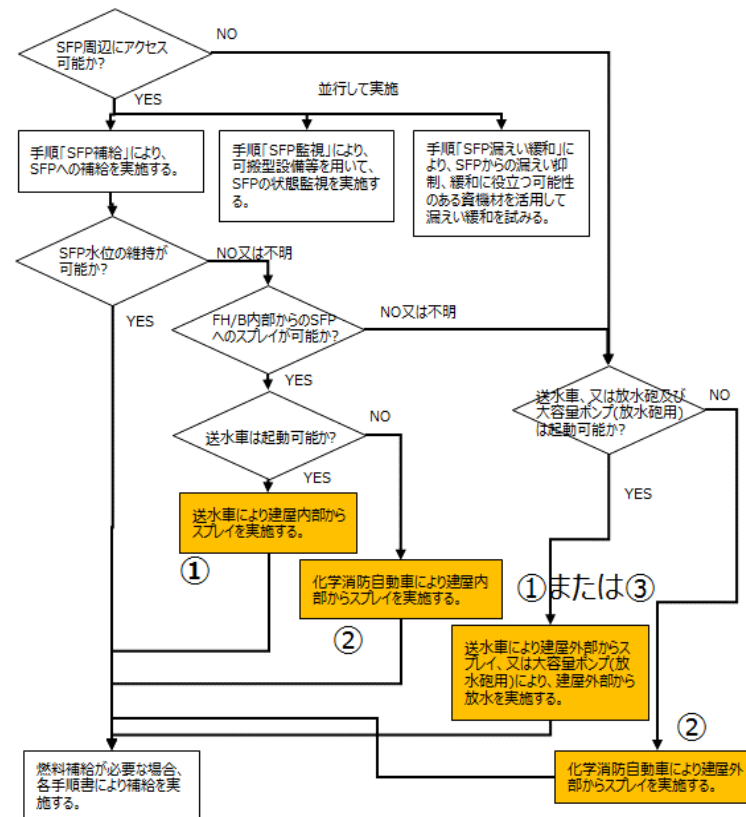


図 放水手順実施の判断フロー（大規模損壊まとめ添付資料を基に作成）

○ 放水設備による対応は、以下3つの手順の中から実施する。

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

○ 手順①と②は、スレイヘッダの保有台数は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。

放水砲による放水時の現実的な流量分布におけるピーク値の算出

- 文献より、射幅方向は正規分布を仮定し、フットプリント中心軸からの距離と水量の関係は以下の通り示される。

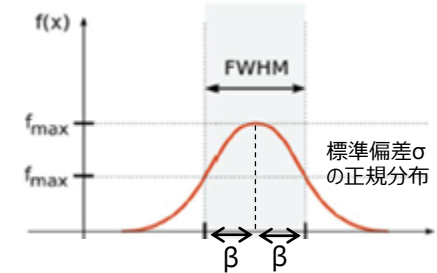
$$Q_p = Q_c \cdot \exp\left(-\frac{w}{\beta}\right)^2$$

ここで、 β および正規分布の標準偏差 σ は下式で表せる。

$$\beta = 0.11 \times H$$

$$\sigma = \beta \div \sqrt{2 \ln 2}$$

W[m] : 中心軸からの距離
 Qc[-] : 中心軸上の流量
 (軸上の最大値で規格化した流量)
 Qp[-] : 中心軸から距離wでの水量比
 β [m] : 半値半幅
 H[m] : 最大射高
 σ [m] : 標準偏差

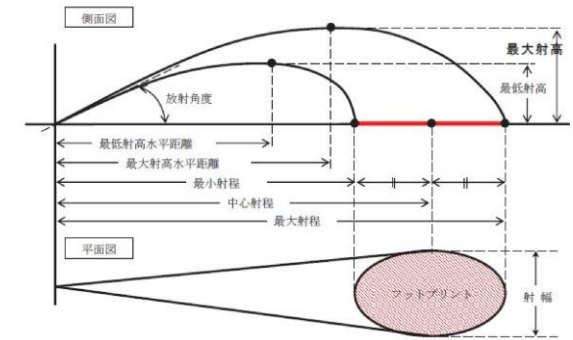


- 文献より、射程方向は、Rosin-Rammler分布を仮定し、射程距離で微分することで流量分布を得る。

$$R_m = \exp\left(-0.693 \left(\frac{L}{L_m}\right)^n\right), \quad n = \log(R/L_m) 6.645$$

$$Q_m = \frac{d(R_m)}{dL}$$

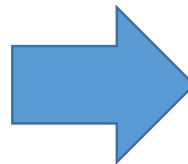
Rm [-] : 残留質量分率
 R [m] : 最大射程
 L [m] : 射程距離
 Lm[m] : 中心射程距離
 Qm [-] : 流量分率



- 放水砲メーカー提示の放水軌跡および着水範囲より、放水時における各パラメータおよび射程方向・射幅方向の流量割合は以下の通りであり、流量分布のピーク位置を含む4m×4m範囲に着目すると、流量分布は約 m³/(h・m²)となる。

計算諸元	
最小射程	
最大射程 (R)	
中心射程距離 (L _m)	
最大射高 (H)	
半値半幅 (β)	

Qp/Qc, Qmを算出



射幅方向全体の流量の約30%

射程方向全体の流量の約25%