

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への回答

2020年 9月 29日

関西電力株式会社

2020年6月2日審査会合における指摘事項

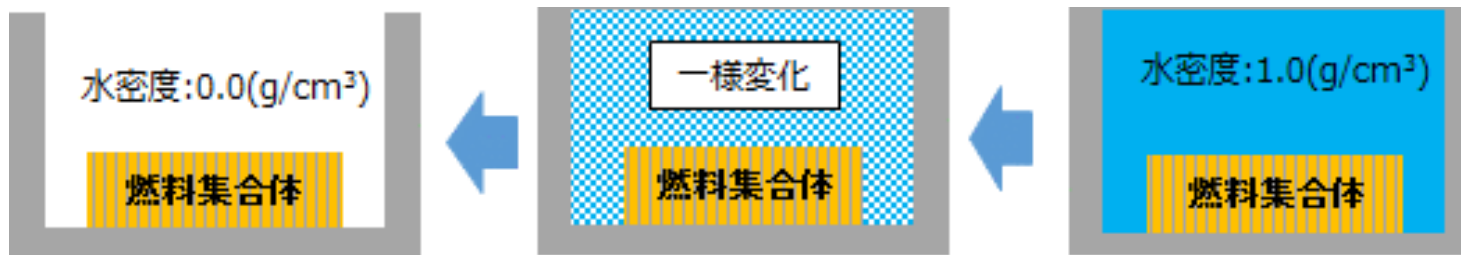
| No. | 指摘事項 | 会合日 |
|-----|---|----------|
| ① | 大規模損壊時の使用済燃料ピットの未臨界評価について、手順で見込んでいる条件で評価した上で、放水砲 2 台分の水量でも評価すること。なお、評価にあたっては、質量バランスを維持し、過度な保守性は見込まないこと。 | 2020/6/2 |
| ② | スプレイヘッドの液滴径を放水砲の液滴径として用いることの妥当性を説明すること。 | 2020/6/2 |
| ③ | 使用済燃料集合体に斜めから水が入ることを想定し、使用済燃料集合体の幾何形状を考慮した水の流入割合を説明すること。 | 2020/6/2 |
| ④ | 軸方向燃焼度分布の妥当性評価及び燃焼度の不確かさについて、説明すること。 | 2020/6/2 |
| ⑤ | 燃料集合体の燃焼度算定の精度について評価方法を含めて詳細に説明すること。また、燃焼を考慮した臨界計算において中性子吸収効果を期待しているFPの選定の考え方と臨界計算の不確かさを説明すること。 | 2020/6/2 |
| ⑥ | 使用済燃料の発熱量の違いを考慮しても、温度勾配が平坦となることを説明すること。 | 2020/6/2 |
| ⑦ | 感度解析については、臨界計算に影響を与えるその他のパラメータ等について厳しい条件であることを明確にして計算結果を示し、制限値と比較すること。 | 2020/6/2 |

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 | ~ | 2 |
| 「① 燃料配置条件」の設定 | 3 | ~ | 5 |
| 今回の未臨界性評価における水分条件設定について | 6 | ~ | 7 |
| 「② 流量」の設定 | 8 | ~ | 9 |
| 「③ SFPへの流入範囲、流量分布」の設定 | 10 | ~ | 11 |
| 「④ 燃料集合体内に流入する割合」の設定 | 12 | ~ | 13 |
| 「⑤ 液膜厚さ（液膜割合、評価式）」の設定 | 14 | ~ | 16 |
| 「⑥ 気相部水密度（平均液滴径）」の設定 | 17 | | |
| 「⑦ 海水に含まれる塩素濃度」の設定 | 18 | | |
| 不確かさを重畳させた未臨界性評価条件 | 19 | ~ | 22 |
| 燃焼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焼度分布の影響 | 参考2 | | |
| 核種組成に関する不確かさについて | 参考3 | | |
| スプレイヘッドによる実放水試験結果に基づく平均液滴径の算出 | 参考4 | | |
| 燃料集合体間の水分条件設定について | 参考5 | | |
| 注水手順の系統構成および放水手順の実施判断フロー | 参考6 | | |
| 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 | 参考7 | | |
| 液膜厚さの具体的計算方法について | 参考8 | | |
| 斜めから液滴が落下する際に適用する液膜厚さ評価式について | 参考9 | | |

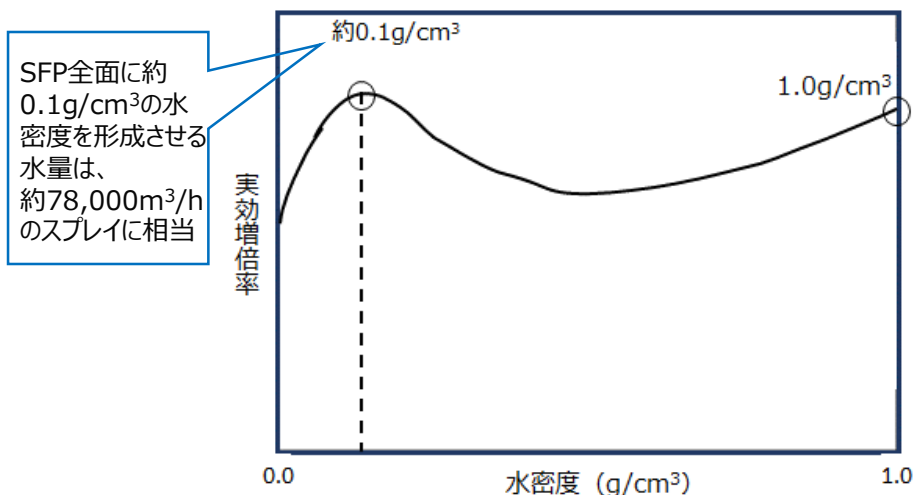
○既許可における未臨界性評価方針

- ・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



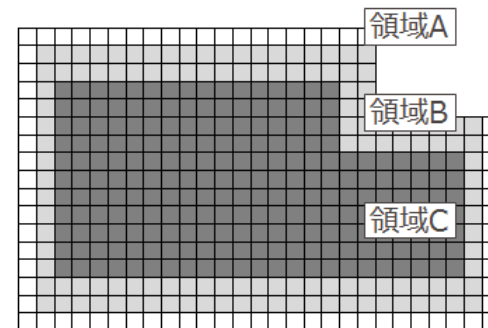
<特徴>

- ・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。
- ・燃烧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)して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

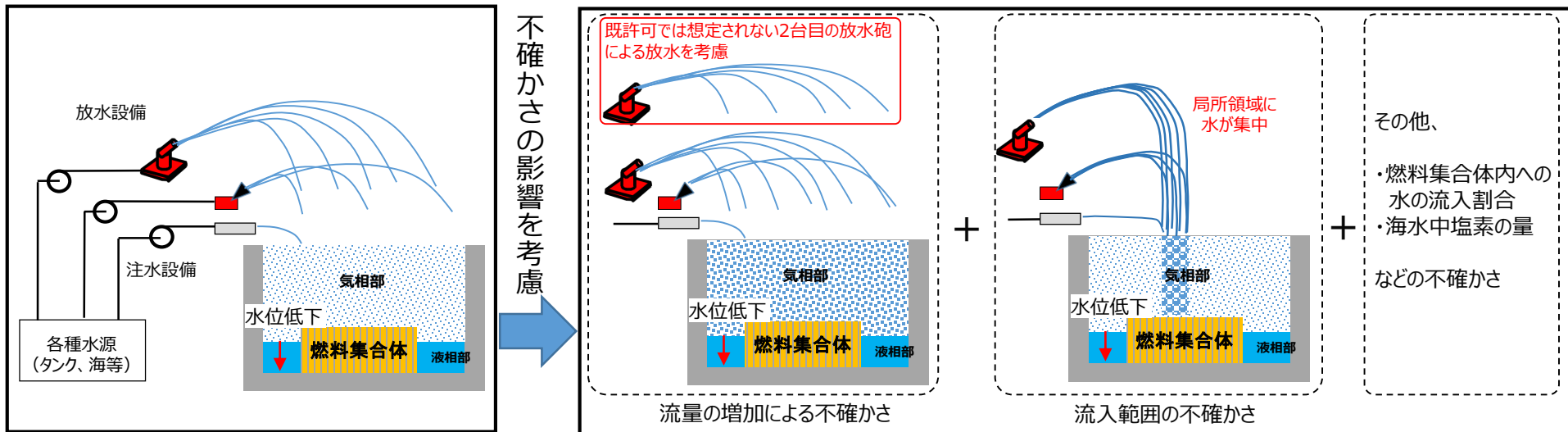
変化させた場合の実効増倍率挙動イメージ



| | 貯蔵可能な燃烧度 | | | |
|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 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および各不確かさの重畳を踏まえた条件で評価。

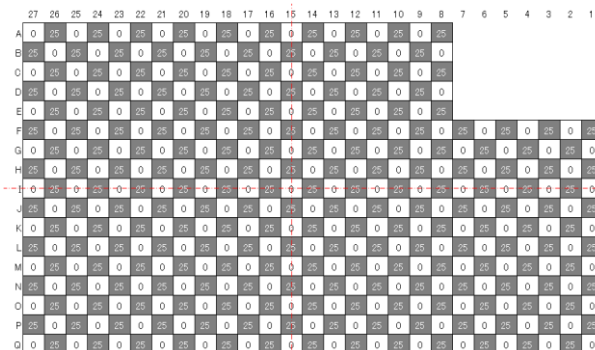


ピット水大量漏えい時の状態 (基本ケース)

各パラメータの不確かさによる影響

<特徴>

- ・評価条件をより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。

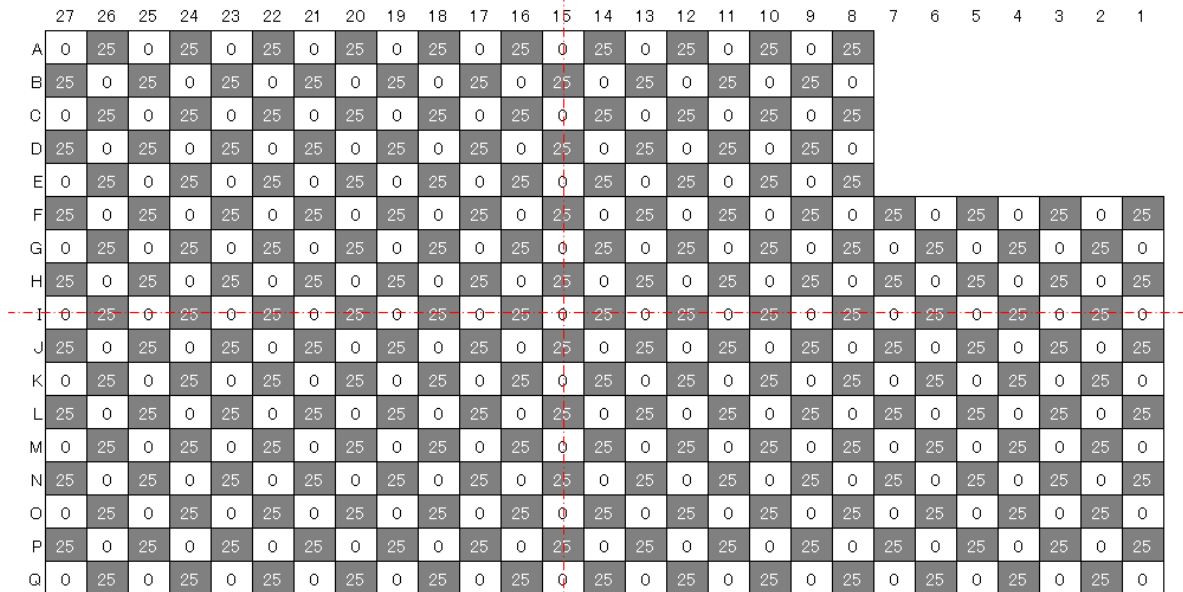


| | 貯蔵可能な燃焼度 |
|-------|-----------|
| □ 領域A | 0GWd/t以上 |
| ■ 領域B | 25GWd/t以上 |

「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燃烧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

| 燃烧度区分 (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。

- 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。
- AC核種およびFP核種は、燃焼燃料に実態として存在する核種のうち、燃焼期間、プールでの保管中、長時間にわたって燃料ペレット内にあり、燃料核種と均一組成をなしているとみなすことができる核種より、実効増倍率が大きくなるように設定する。
- 冷却期間設定は以下の考えに基づき [] とする。

【AC核種】

・表1にAC核種の半減期を示しているが、Puの生成量が大きくなるような燃焼条件とあわせて、 []

[] が保守的である。

【FP核種】

・中性子吸収効果を有するFP核種については、多種存在する核種のうち、 [] している。

また、FP核種は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、 [] 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

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 |
|-------------------|----------------|------|-------------------------|
| | 新規制基準 適合審査時 | 今回申請 | |
| ²³⁵ U | [] | [] | 約 7.0×10 ⁸ 年 |
| ²³⁸ U | | | 約 4.5×10 ⁹ 年 |
| ²³⁸ Pu | | | 約 87年 |
| ²³⁹ Pu | | | 約 2.4×10 ⁴ 年 |
| ²⁴⁰ Pu | | | 約 6.5×10 ³ 年 |
| ²⁴¹ Pu | | | 約 14年 |
| ²⁴² Pu | | | 約 3.7×10 ⁵ 年 |
| ²⁴¹ Am | | | 約 432年 |
| ²³⁹ Np | | | 約 2.3日 |

[]

表2 解析時に考慮するFP核種

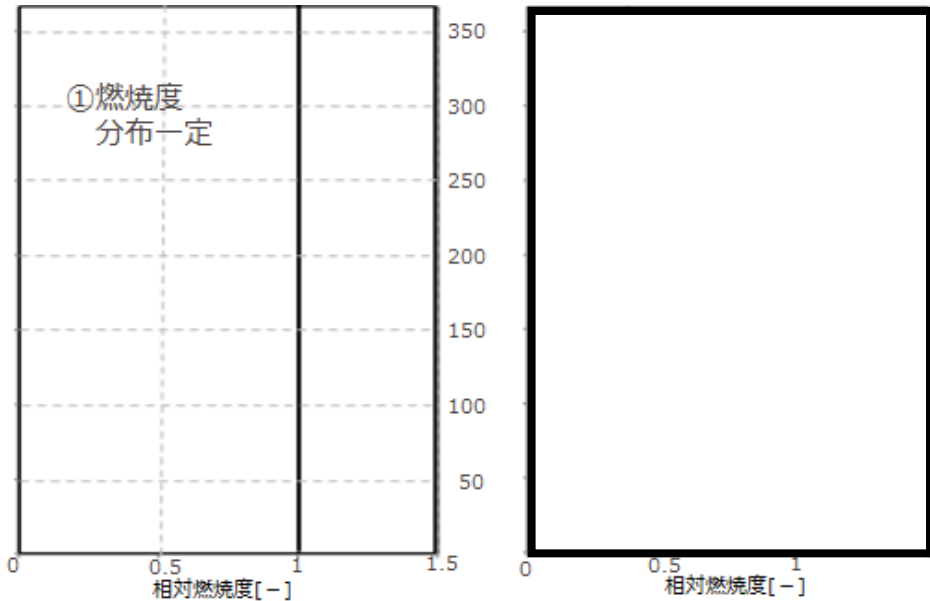
| FP 核種 | 高浜 1/2 号炉 | | 半減期 |
|--------------------|--------------------------|------|--------------------------|
| | 新規制基準 適合審査時 | 今回申請 | |
| ⁸³ Kr | [] | [] | — (安定) |
| ⁹³ Zr | | | 約 1.5×10 ⁶ 年 |
| ⁹⁵ Mo | | | — (安定) |
| ⁹⁹ Tc | | | 約 2.1×10 ⁵ 年 |
| ¹⁰¹ Ru | | | — (安定) |
| ¹⁰³ Rh | | | — (安定) |
| ¹⁰⁵ Rh | | | 約 35時間 |
| ¹⁰⁶ 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 |
| ¹³¹ Xe | | | — (安定) |
| ¹³⁵ Xe | | | 約 9.1時間 |
| ¹³⁹ La | | | — (安定) |
| ¹⁴¹ Pr | | | — (安定) |
| ¹⁴² 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) | | |

「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と

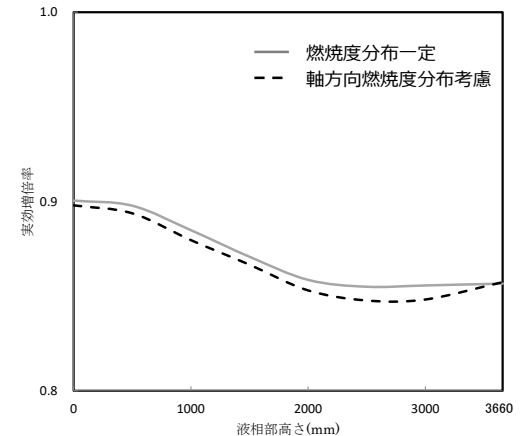
（参考）軸方向燃烧度分布の有無による感度解析

＜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 | 基本ケースと同じ |

＜評価結果＞

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。

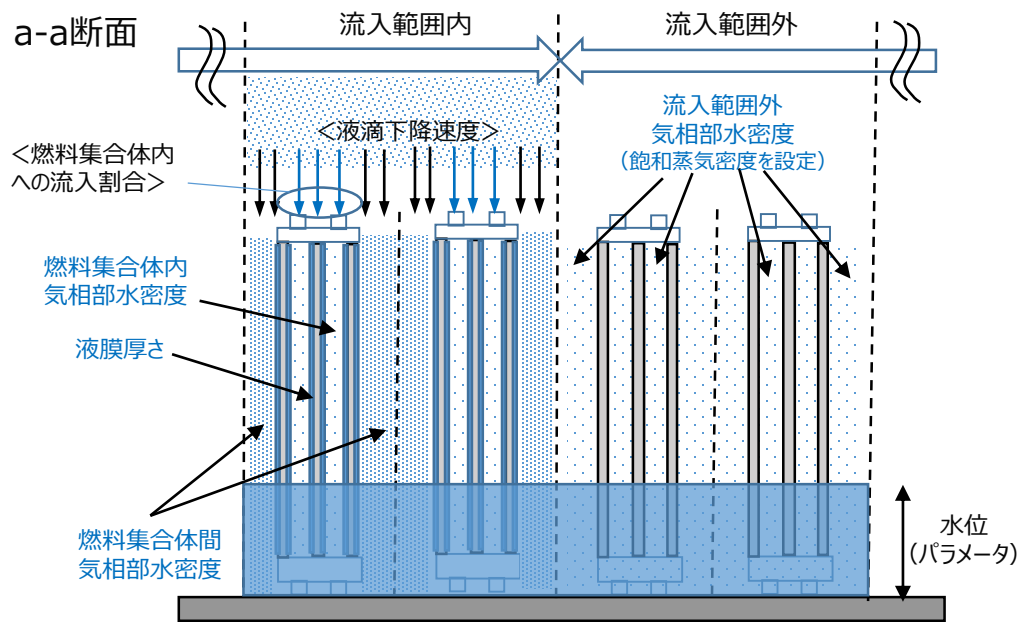
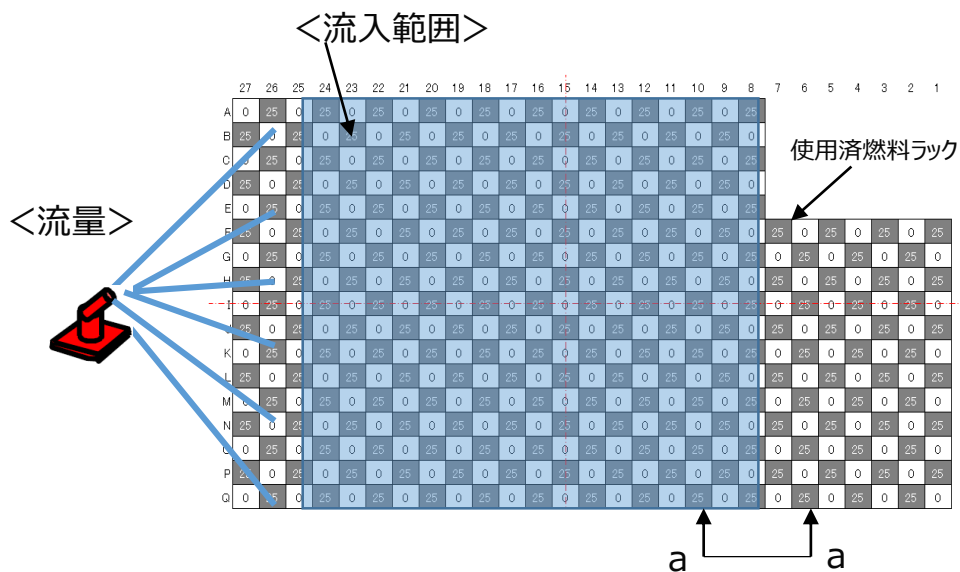


今回の未臨界性評価における水分条件設定について (1 / 2)

○ 水分条件の相関性

- 今回未臨界性評価において臨界計算コードへのインプットとなる水分条件は「液膜厚さ」、「燃料集合体内気相部水密度」、「燃料集合体間気相部水密度」、「流入範囲外気相部水密度」である。
- これら4つのインプットは設備特性、施設損壊状況を踏まえ設定される〈流量〉等の条件により算出する。

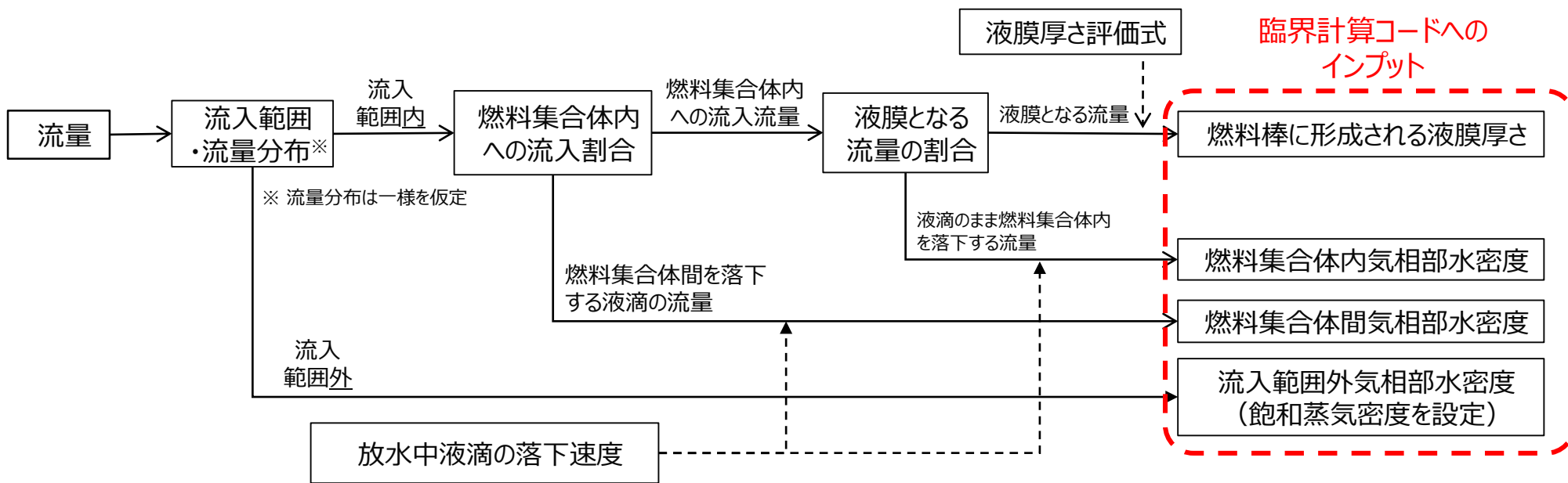
〔 青字 : 臨界計算コードへのインプットとなるパラメータ
 < > : 今回設定を検討するパラメータ 〕



（続 き）

- 各インプットはそれぞれに相関性（上流条件の設定と連動し変化する）があり、設置許可基準規則第54条2項要求に係る未臨界性評価での各パラメータの不確かさを考慮した条件設定に当たっては、未臨界性評価結果を厳しくするよう設定する。

次ページより、水分条件に係る各パラメータの具体的な条件設定方針を示す。



「② 流量」の設定 (1 / 2)

<流量> (基本ケース条件)

・注水設備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】

- ・参考 6 - 1に示す通常時の注水流量とする。
- ・全注水設備の同時使用を想定する。

【放水設備による流量設定】

- ・参考 6 - 2に示す3つの手順を踏まえた通常時の放水流量とする。
- ・スプレーヘッドおよび放水砲の同時使用を想定する。

表 注水設備による通常時流量

| 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 |

表 放水設備による通常時流量

| 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)

・設備仕様・構成上の最大値等により、m³/hを設定する。

【注水設備による最大流量設定】

・基本ケース条件を基に、設備スペックの上限値、および各手順で使用可能な設備台数を踏まえ設定する注水流量とする。

表 注水設備による設定流量

| 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 | - |

※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。

【放水設備による最大流量設定】

・基本ケース条件を基に、設備スペックの上限値、および各手順で使用可能な設備使用台数を踏まえ設定する放水流量とする。

表 放水設備による設定流量

| 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※ | 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。

<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ラックに一様に流入した場合の方が大きくなるため、全流量がSFラック面積に一様に流入した場合の値を用いる。
- スプレイについても同様に、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】

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

【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)

< SFPへの流入範囲、流量分布 >（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。

【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。

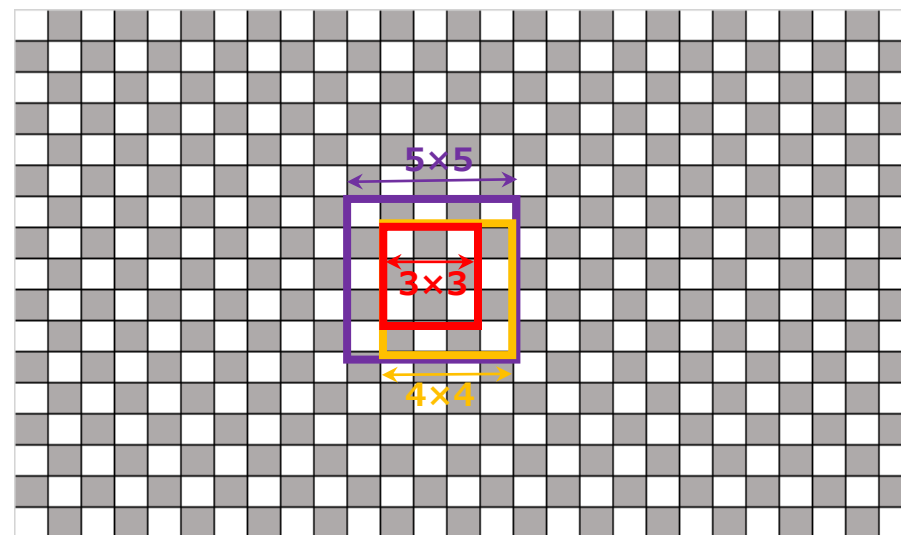
○ 局所領域がどの程度の広がりを持った場合に実効増倍率が最大になるかを確認するため、水が集中する範囲（ $N \times N$ ）を順次広げていき解析を行う。

（ 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。

また、 $N \times N$ 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条件を設定する。）

○ 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 （不確かさ 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
(25GWd/t 以上燃焼燃料を貯蔵)

「④ 燃料集合体内に流入する割合」の設定（1 / 2）

＜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。

【流入割合設定の検討】

- 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。）

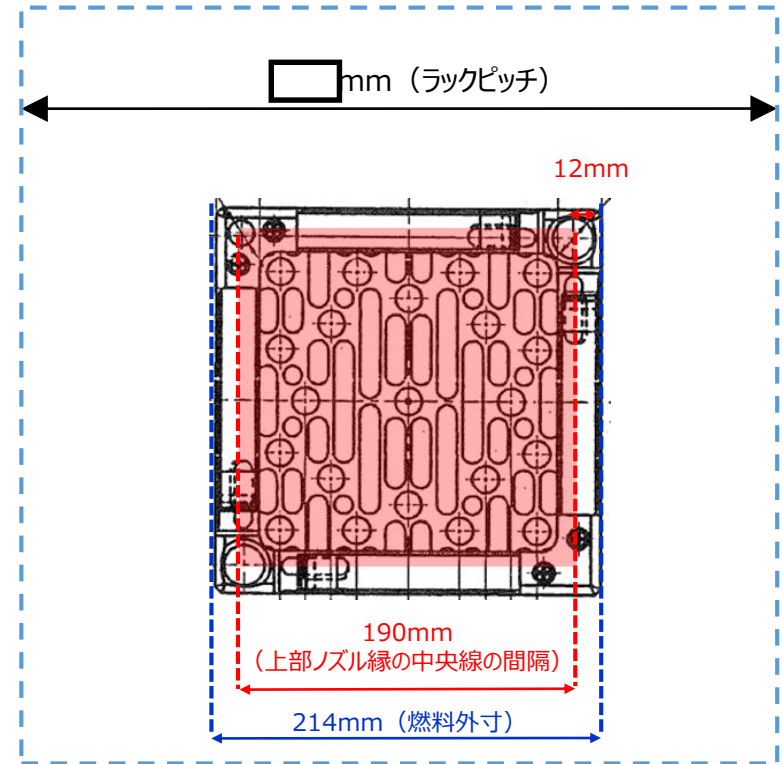
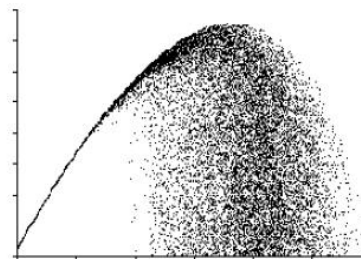
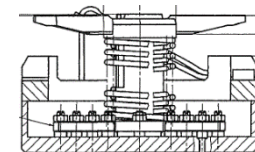
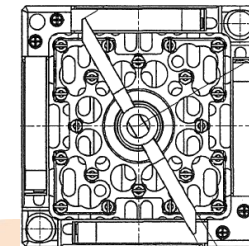


図 燃料集合体に流入する流量割合イメージ



参考図 放水砲の放水軌跡（無風時）



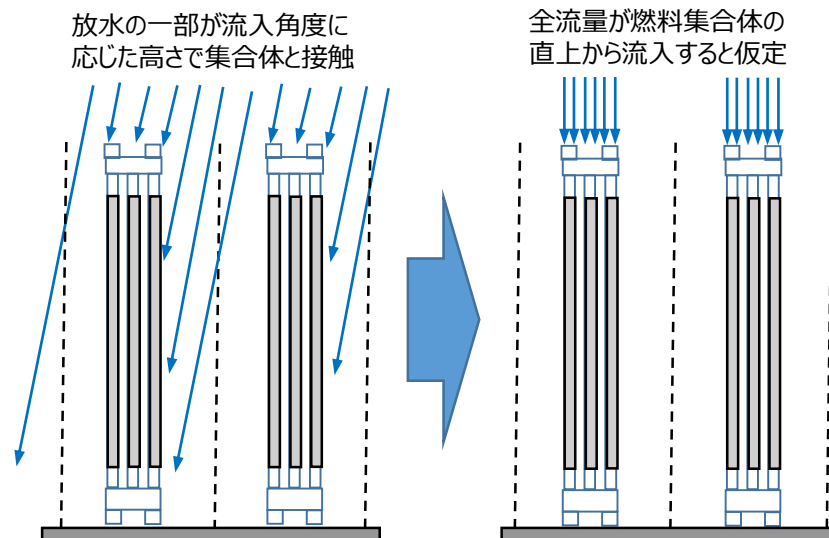
参考図 内挿物（プラグングデバイス）が挿入された燃料集合体の上面

＜燃料集合体内に流入する割合＞（不確かさを考慮した条件）

- ・横風等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、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】

- ・横風により、一部横方向からSFPへ流入する状態を想定する。
- ・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、実効増倍率の評価上、一番厳しい条件であ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。

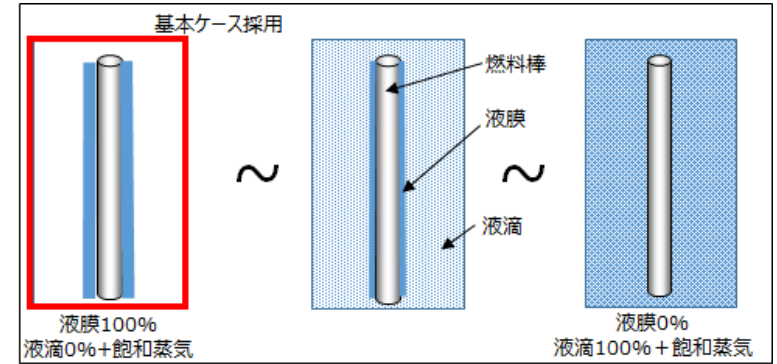


＜液膜割合＞（基本ケース条件）（不確かさを含む条件）

- ・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。



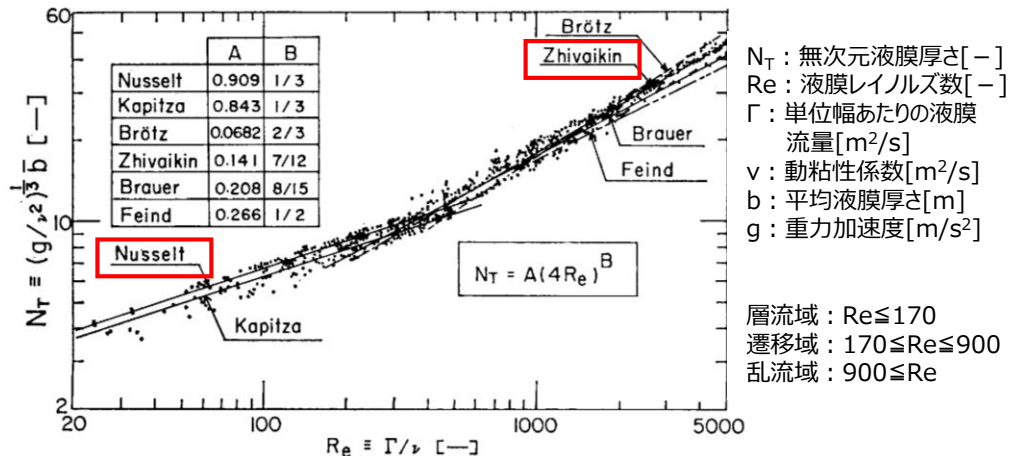
液膜と液滴の割合（イメージ図）

＜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。



※ 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

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

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]

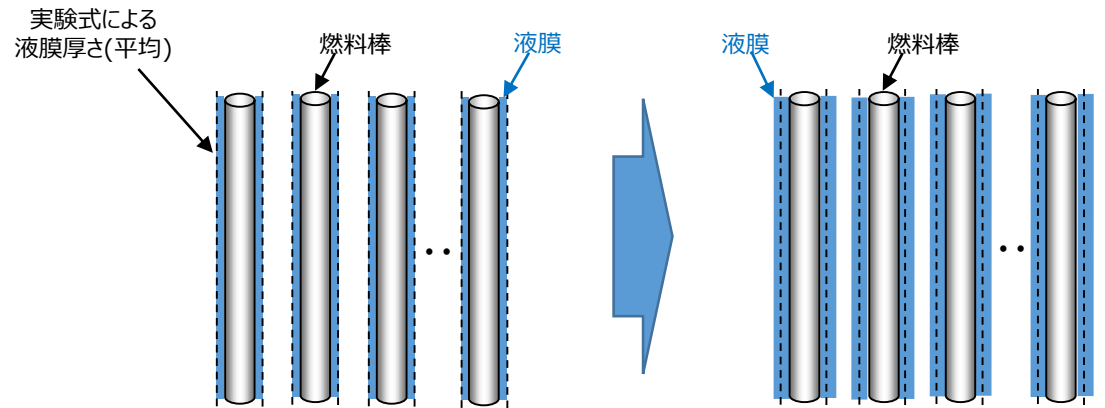
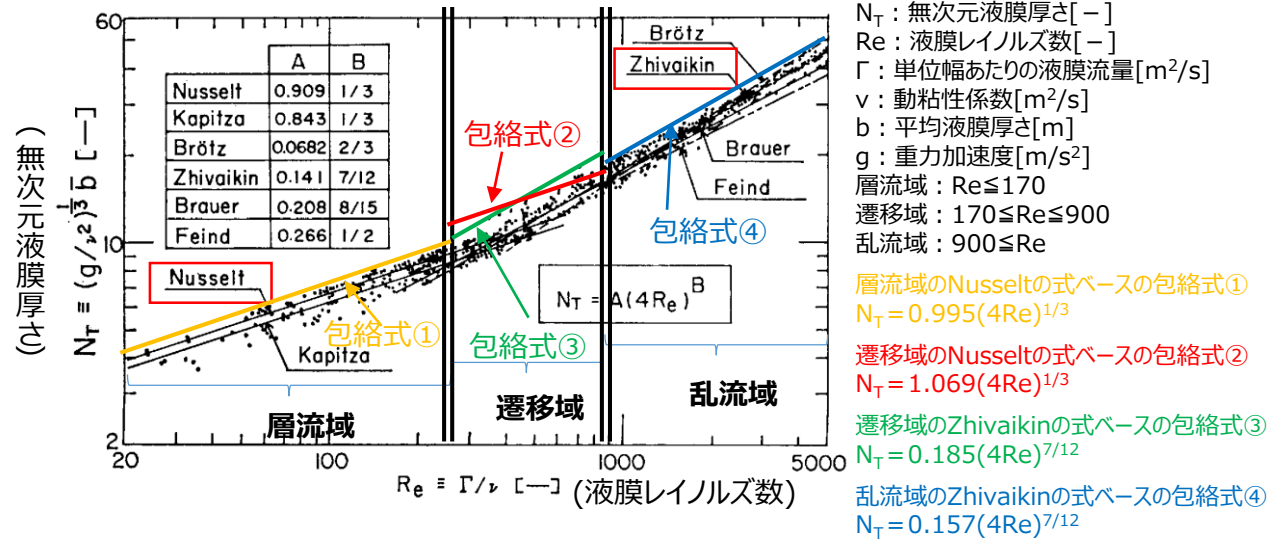
層流域: $Re \leq 170$
 遷移域: $170 \leq Re \leq 900$
 乱流域: $900 \leq Re$

＜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、実験結果を包含する評価式を設定する。

【実験結果を包含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)



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)

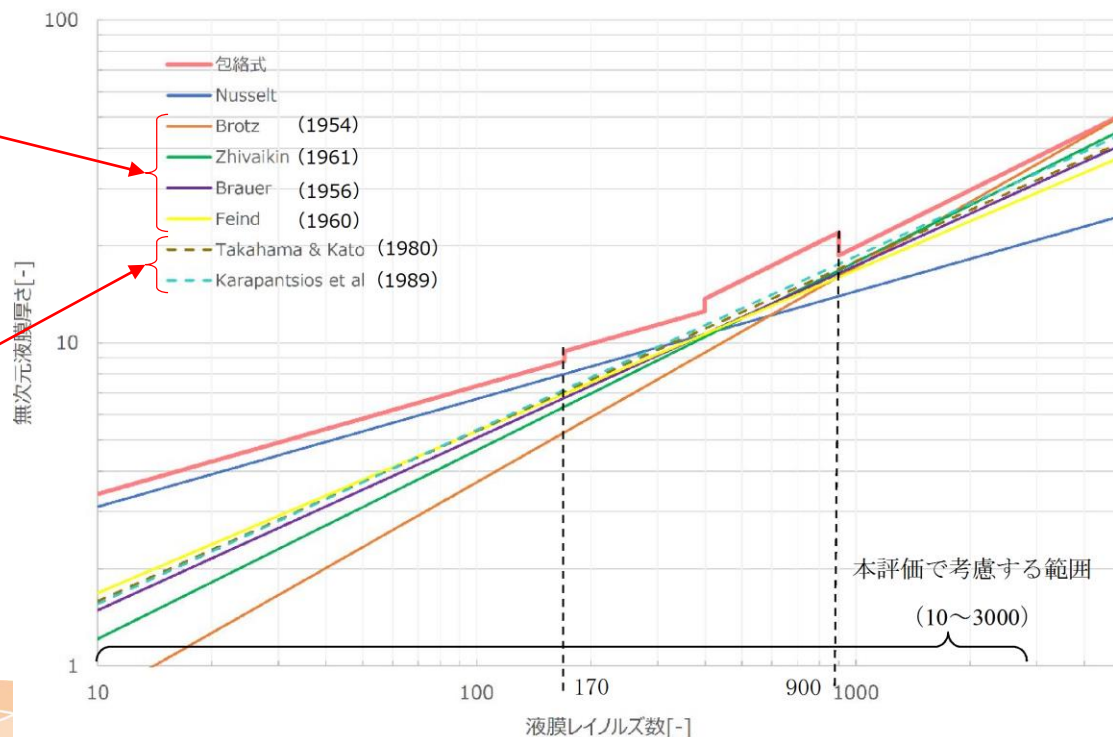
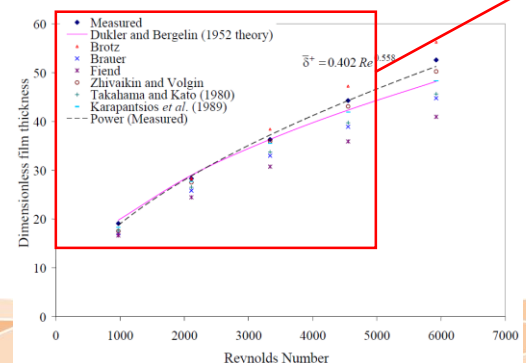
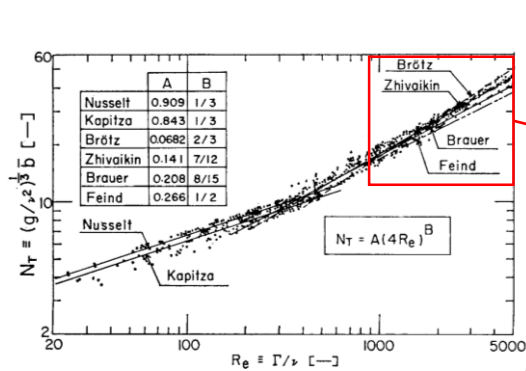
「⑤ 液膜厚さ（液膜割合、評価式）」の設定（3 / 3）

（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（10～3000程度）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 |  | SFP全面 (424ラック) | 23 | 16 |
| 不確かさ考慮条件 (重畳ケース1) |  | 局所 (3×3ラック) | 30 | 1691 |
| 不確かさ考慮条件 (重畳ケース2) |  | 局所 (3×3ラック) | 30 | 2492 |



「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

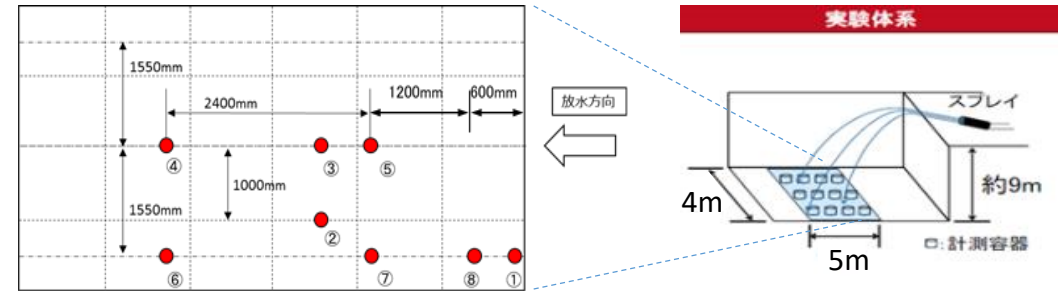


表 測定位置毎の平均液滴径[mm]

| 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

＜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。

＜塩素濃度＞（基本ケース条件）

・文献※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 % | — |

※ 岩波理化学辞典第5版 岩波書店、化学大辞典2 共立出版

不確かさを重畳させた未臨界性評価条件（1 / 4）

<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。

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、不確定性として別途評価する。

（例：ラックや燃料の製作公差）

② ばらつきが特定の範囲に管理されていないパラメータ

⇒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）

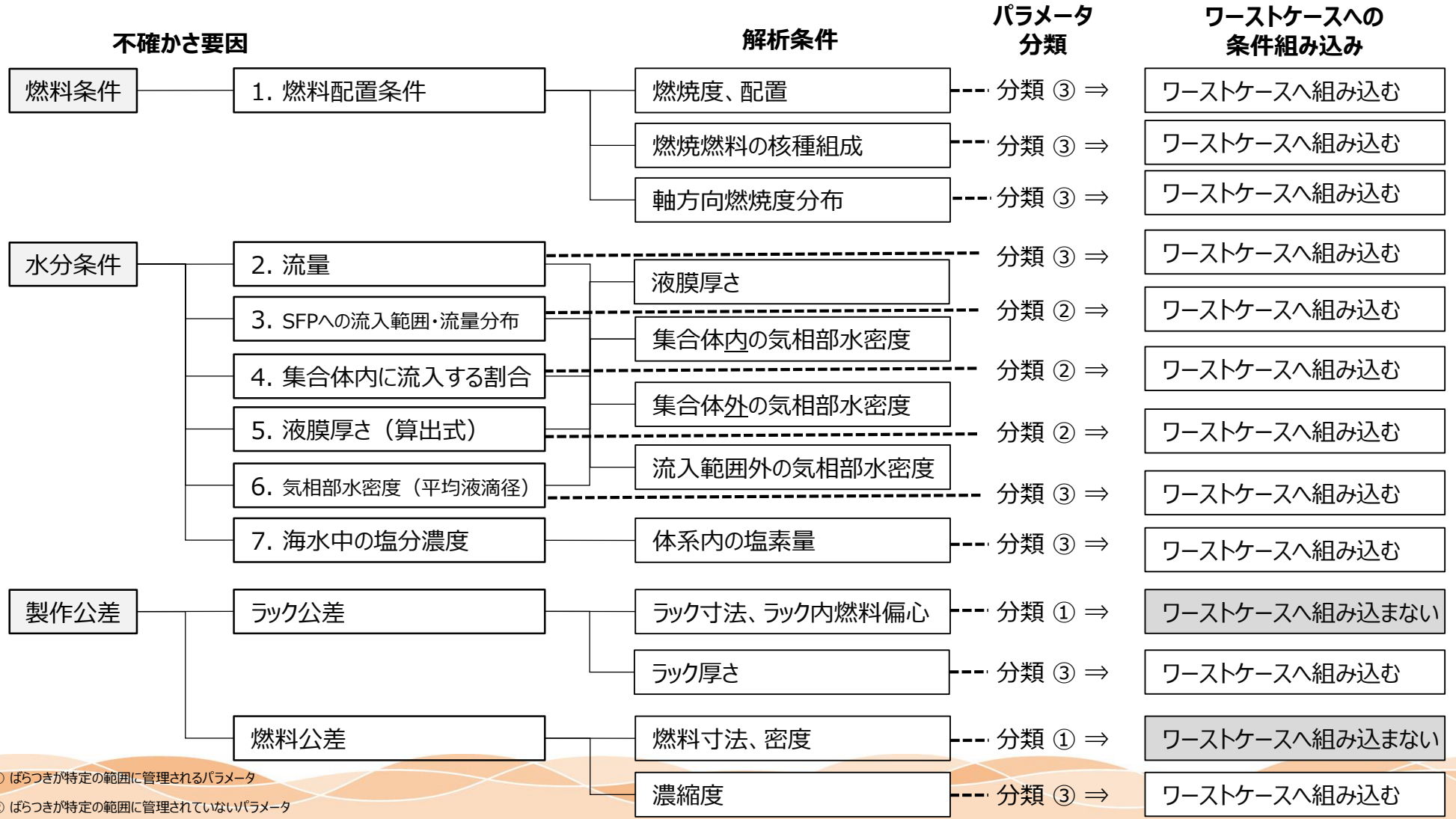
③ 固定値を用いるパラメータ

⇒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）

＜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、後続の製作公差に基づく不確定性評価における基本のモデルとなる。



分類① ばらつきが特定の範囲に管理されるパラメータ
 分類② ばらつきが特定の範囲に管理されていないパラメータ
 分類③ 固定値を用いるパラメータ

不確かさを重畳させた未臨界性評価条件 (3 / 4)

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 | (参考) 大規模損壊を考慮した条件 | 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 | 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 | <input type="text"/> m ³ /h ^{*1} | 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) | 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% ^{*2} | 30% ^{*2} | ワーストケースへ組み込む ② ^{*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 | 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) | スプレイヘッド: 1.5mm 放水砲: 2.9mm (放水設備の性能に応じた液滴径) | スプレイヘッドの液滴径 1.0mm | スプレイヘッドの液滴径 1.0mm | ワーストケースへ組み込む ② |
| | 7. 海水中の塩素濃度 | 3.5% | 3.0% | 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 | 製作公差考慮 | ワーストケースへ組み込まない ① |
| | ラック公差 (ラック厚さ) | 最小値(公差考慮) | 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 | 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) | 最大値(公差考慮) | ワーストケースへ組み込む ③ |

※1 大規模損壊時には発電所内の設備を用いて柔軟な対応を取る可能性があることを踏まえ、被災していない号炉向けの2台目の放水砲による流量も考慮する。

※2 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パラメータ
- ② ばらつきが特定の範囲に管理されていないパラメータ
- ③ 固定値を用いるパラメータ

不確かさを重畳させた未臨界性評価条件 (4 / 4)

<事象シナリオを踏まえた不確かさ重畳モデル>

横風の影響について、流入範囲の不確かさ条件が発生するシナリオを踏まえたうえで不確かさ重畳モデルを設定し、未臨界性を確認する。

【流入範囲が広範囲となる場合】(下表①)

流入範囲としては、横風等によりSFP外へ外れる量は無視し、全量がSFラックに流入すると想定する。

また、燃料集合体への流入割合については、横風により斜めから流入する不確かさとして実効増倍率評価上一番厳しい100%とする。

【流入範囲が局所となる場合】(下表②)

建屋天井の一部のみが損壊し、建屋天井に放水された水が損壊部から流入するシナリオとなるが、横風が発生すると、流量が局所に全量は集中しないため、流入割合には燃料の幾何形状を元にした値である23%に余裕をみて30%を設定する。

なお、横風により、流量の分散は考慮せず流入割合への影響のみを考慮した下表③についても未臨界性を確認する。

| | | ① 流入範囲が広範囲となるケース | ② 流入範囲が局所となるケース | ③ (参考) ②の妥当性確認 |
|---------------|------------|---------------------|-----------------|----------------|
| 想定シナリオ | | | | |
| 不確かさを考慮した評価条件 | 流入流量 | □ m ³ /h | | |
| | 流入範囲 | SFP全面 | 局所 | 局所 |
| | 集合体内への流入割合 | 100% | 30% | 46%※1 |
| | 液膜評価式 | 包絡式 | 包絡式 | 実験式※2 |

※1 液滴が斜めから燃料集合体へ流入することを考慮した場合において、SFラックの幾何形状のみを考慮して計算した流入割合

※2 液滴が斜めから流入する場合には液膜が波立つが、波立ちにより液膜の厚さは低下するという影響を考慮し、液膜評価式には実験式そのまま適用する。

【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】

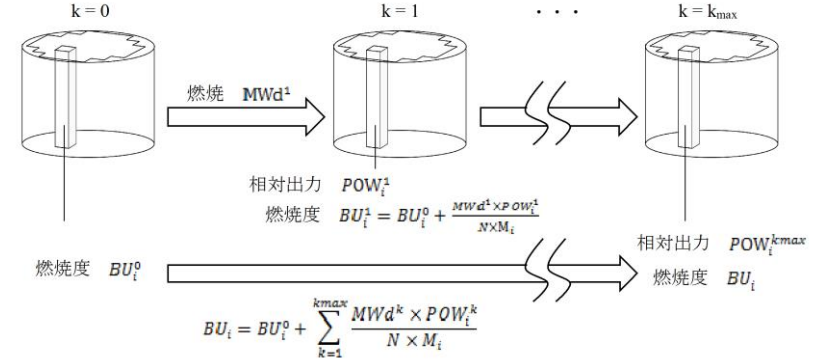
- 燃焼度は、原子炉熱出力と燃料集合体相対出力の誤差に影響を受け、それぞれの誤差の程度は以下の通り。

| 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 | □% | 取替炉心に対する測定値と設計値の誤差を評価、統計処理 |

- 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2.4%となる。

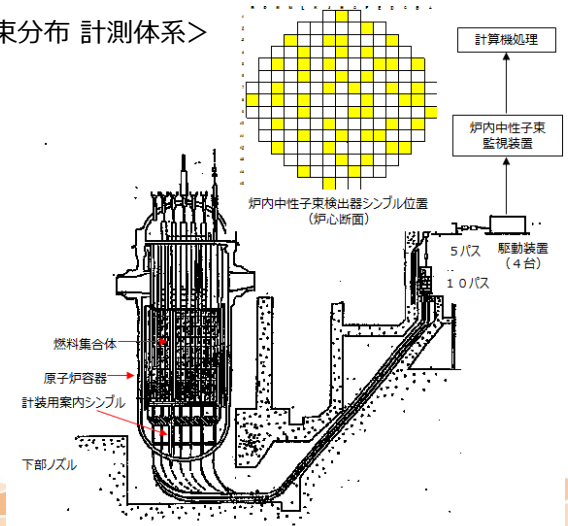
$$\sqrt{0.02^2 + \square^2} \approx 0.024$$

＜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% |
| 余裕 | | ±0.45% |
| 誤差合計 | | ±2.0% |

【熱出力への誤差計算手法】

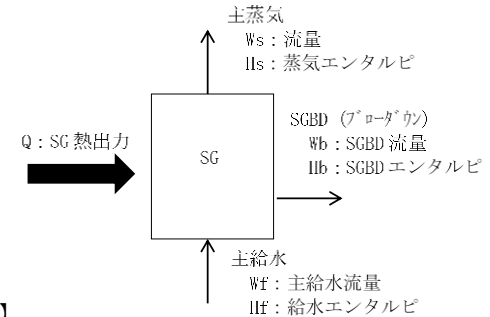
- 蒸気発生器の熱出力計算は下式の通り。

$$Q = (Ws \times Hs) + (Wb \times Hb) - (Wf \times Hf)$$

$$= (Wf - Wb) \times (Hs - Hf) + Wb \times (Hb - Hf)$$
- 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誤差を評価し、統計処理することで求める。

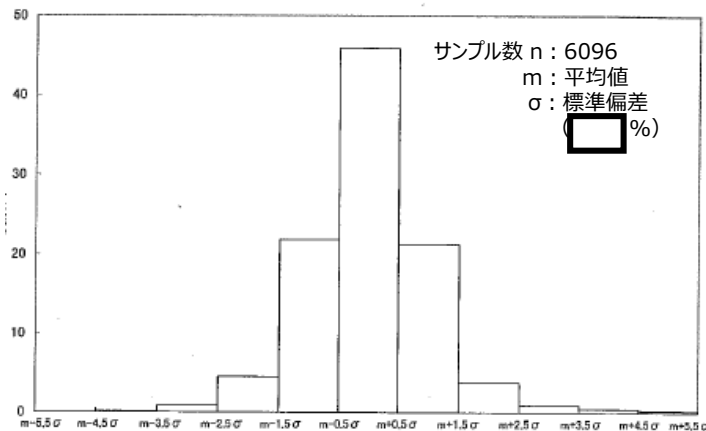


図 燃料集合体出力分布の測定値と計算値の誤差度数分布※

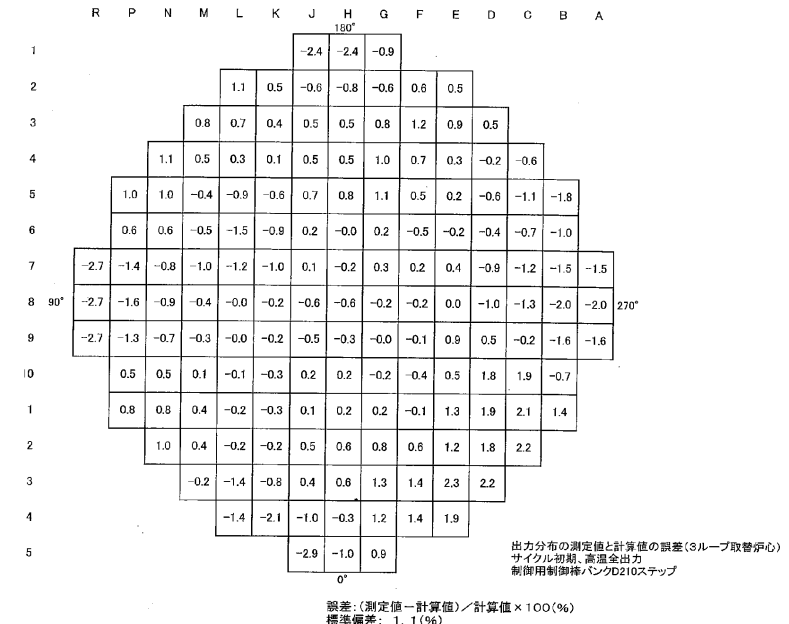


図 取替炉心における各燃料集合体の出力分布測定値と計算値の誤差※ (3ループ、サイクル初期、高温全出力の例)

燃焼度の不確かさについては約2.4%と見積もられ、米国ガイドには約5%以内との記載があるが、仮に全ての燃焼燃料が6%の燃焼度誤差を持つとした場合の感度解析を行う。

<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性

… 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。 …

<評価条件>

- ・貯蔵燃料：右図の通り
- ・ 水位：低水位
- ・ 流量： m³/h
- ・集中範囲：5×5
- ・流入割合：30%
- ・液膜割合：100%
- ・集中範囲外の気相部水密度：飽和蒸気密度

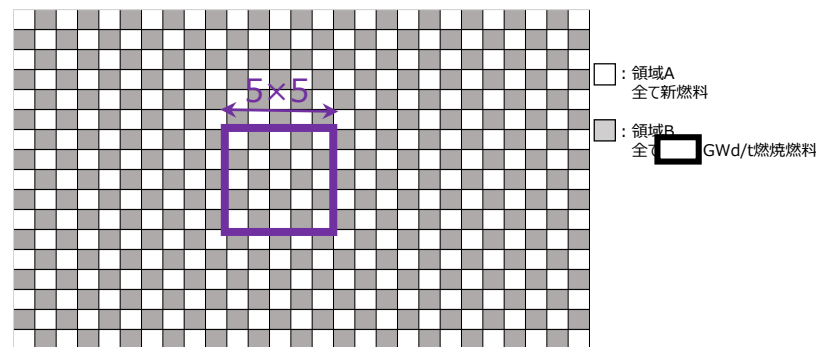


図 放水される水が集中する場合の燃料配置条件および集中する範囲

<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

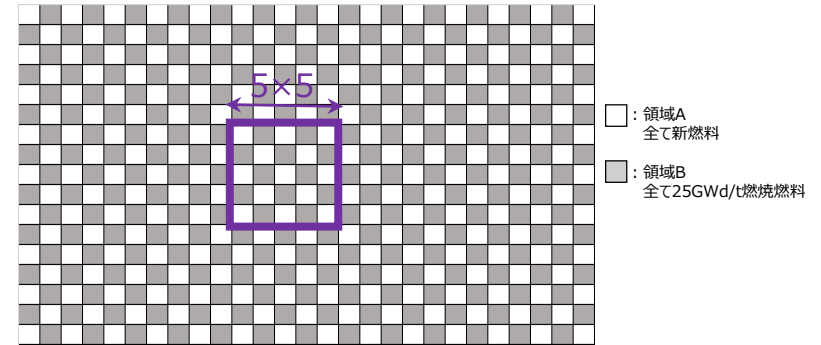
放水が局所に集中する状況において燃料の軸方向燃焼度分布を考慮した未臨界性評価を行い、基本ケース条件として燃焼度分布を一定としたことの妥当性を確認する。

<評価条件>

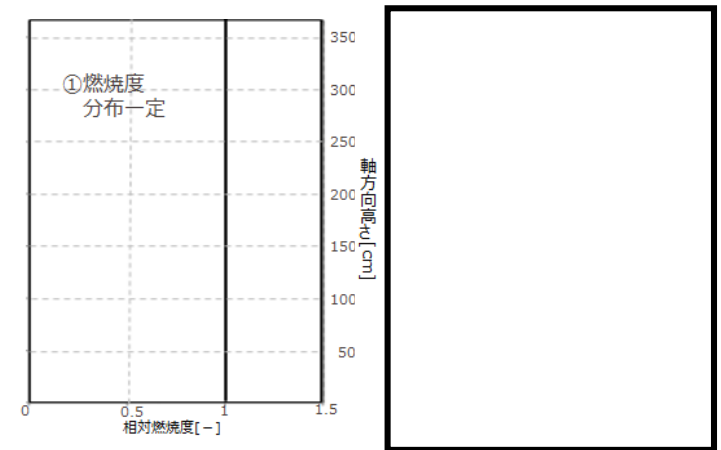
- ・貯蔵燃料：領域A ⇒ 新燃料、領域B ⇒ 25GWd/t燃焼燃料
- ・軸方向燃焼度分布：① 軸方向燃焼度分布
② 軸方向燃焼度分布考慮

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

【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ことを感度解析にて確認している。

・ 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）

PHOENIX-Pコードの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。誤差の影響が顕著に表れる50GWd/t燃焼燃料を考慮し、実効増倍率が最大となるよう原子個数密度を設定した場合の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²⁴⁰の生成量を多くし実効増倍率を厳しくするため、 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。
 今回申請より燃焼度が低く実効増倍率への影響が小さくなる条件である20GWd/t燃焼燃料を考慮した場合、 による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 | | | | ΔK_2^* |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| ① | | ② | | |
| 実効増倍率 K_G | 統計誤差 σ_G | 実効増倍率 K_B | 統計誤差 σ_B | |
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | 0.0047 |

※

<結果>

実効増倍率への感度 : 0.0047

- 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。

【 が有する保守性およびFPを考慮することによる実効増倍率への寄与】

- 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、今回の申請では 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。
- 実態として存在する核種を現実的に考慮する場合※に対し、 が有する保守性、およびFPを考慮することによる実効増倍率への寄与を下記感度解析のとおり確認する。

※ 米国審査ガイド (ISG8 Rev.3) を参考に する。

＜感度解析条件＞

水分条件 : 基本ケース条件に同じ
 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

＜解析結果＞

実効増倍率 : 右表参照 (LATER)

③-①よりFPを考慮することによる実効増倍率への寄与を、
 ②-①より今回評価でのFP各種設定が有する保守性を確認する。

| FP核種 | ＜感度解析①＞ | ＜感度解析②＞ 高浜1/2採用手法 | ＜感度解析③＞ FPの寄与確認 |
|--------|---------|----------------------|--------------------|
| 95Mo | | | 考慮なし |
| 99Tc | | | |
| 103Rh | | | |
| 109Ag | | | |
| 133Cs | | | |
| 143Nd | | | |
| 145Nd | | | |
| 147Sm | | | |
| 149Sm | | | |
| 150Sm | | | |
| 151Sm | | | |
| 152Sm | | | |
| 153Eu | | | |
| 155Gd | | | |
| 実効増倍率※ | LATER | LATER | LATER |

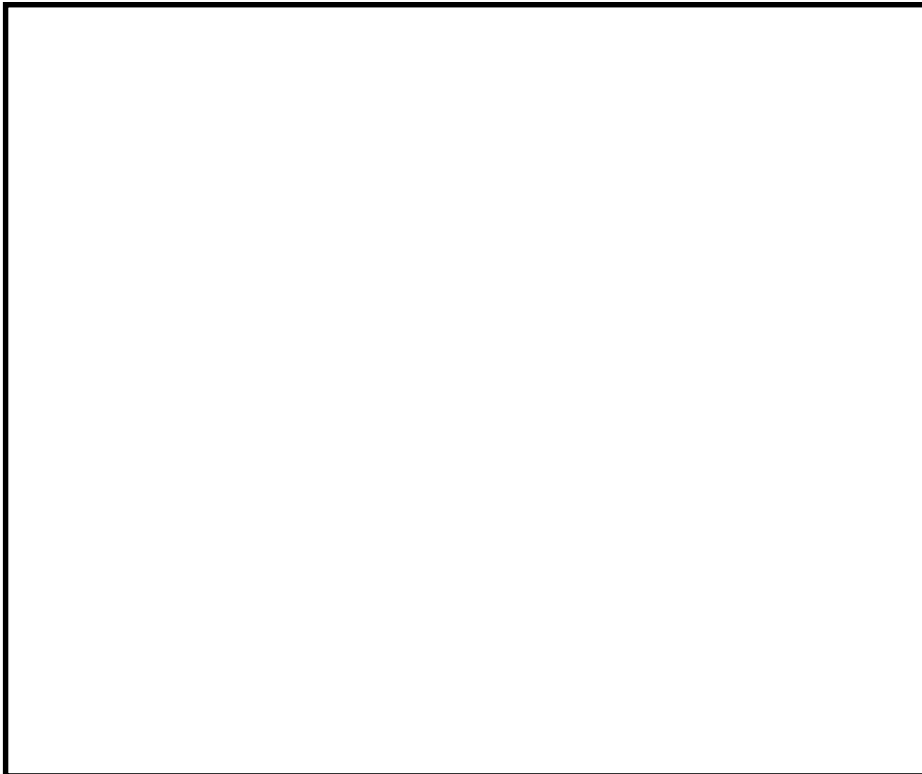
※ 製造公差等による不確定性を含まない値

【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

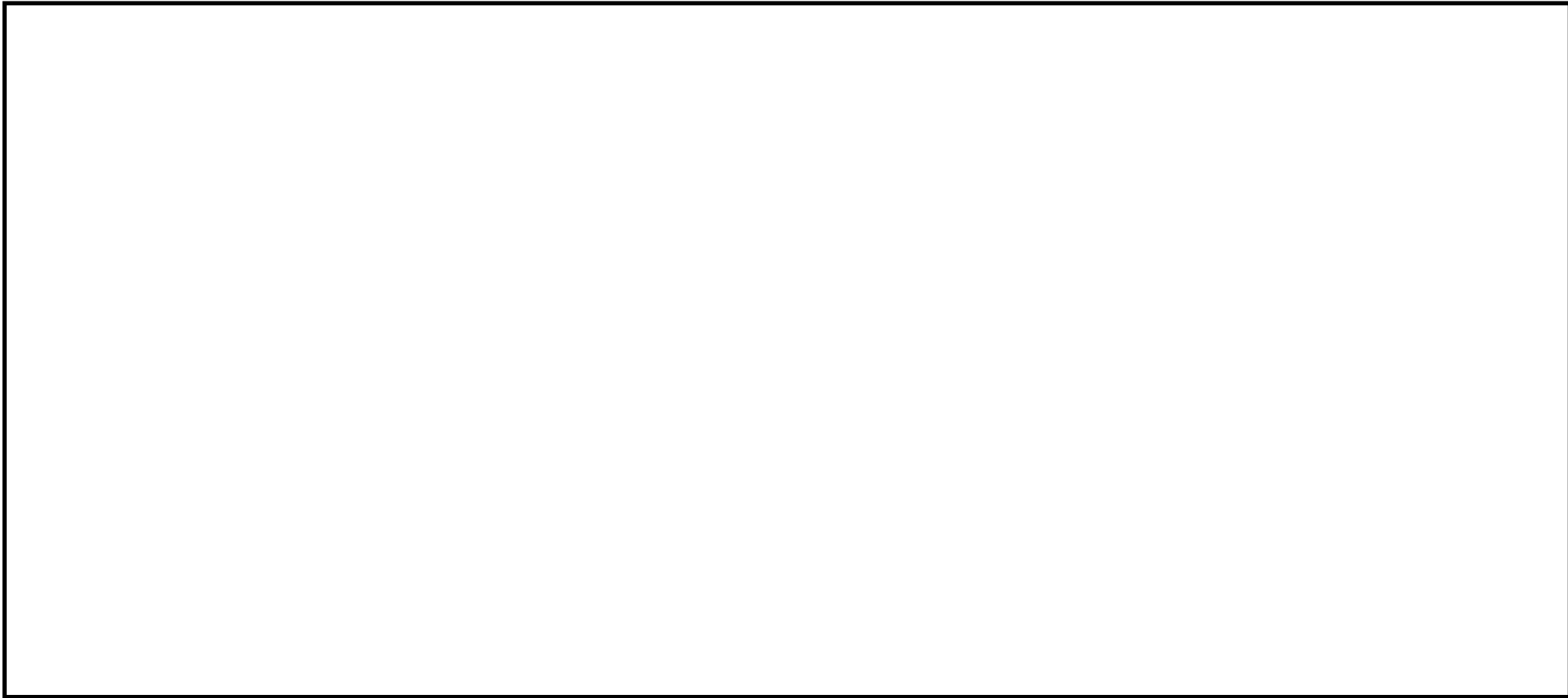
| 実験ID | CASE ID | 中性子 吸収剤材質 | ケース数合計 |
|------|---------|--------------|--------|
| | | | |

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) | □ | □ | □ |

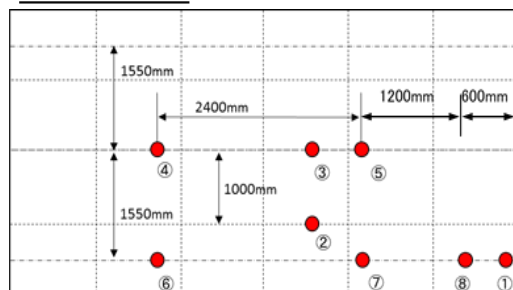
選定した臨界実験のEALFに対するC/Eの傾向

追加ベンチマークを実施した臨界実験のうちFPを含む臨界実験体系は以下の3例である。



- 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

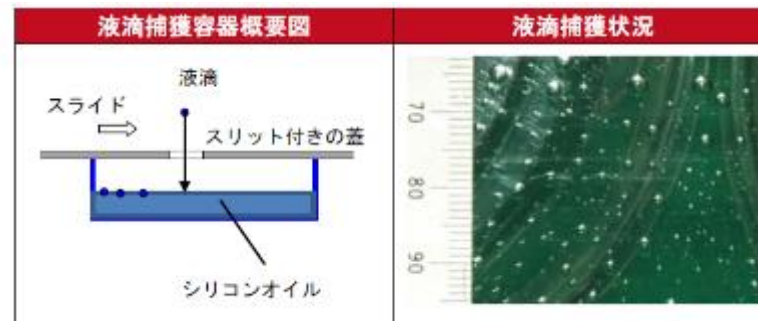


液滴径計測試験条件

| 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

0.2~0.4mmにピーク

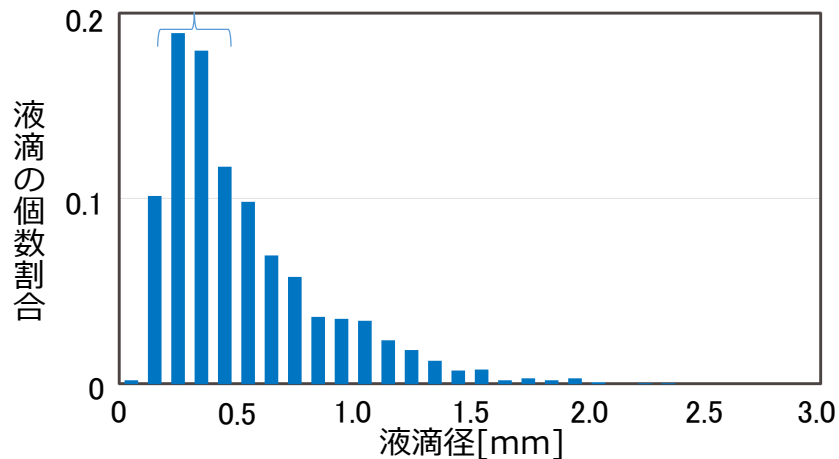


図1 液滴径毎の個数割合 (測定位置⑥の例)

体積分率で整理(液滴径の3乗に比例)

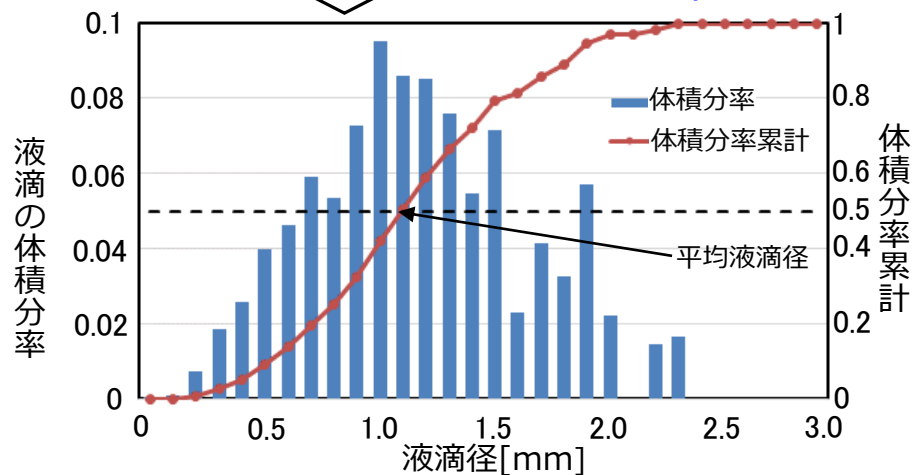


図2 液滴径毎の体積分率 (測定位置⑥の例)

- 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の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)

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 |

- 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、これらが釣りあう終端速度 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

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

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

| | | | |
|---------------------|---|------------------------|----------------------|
| 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くなる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>

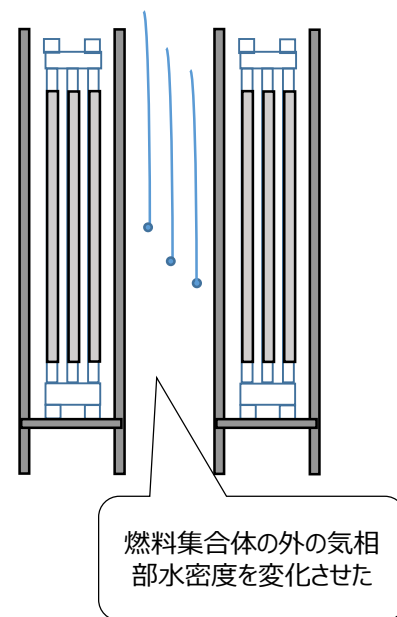
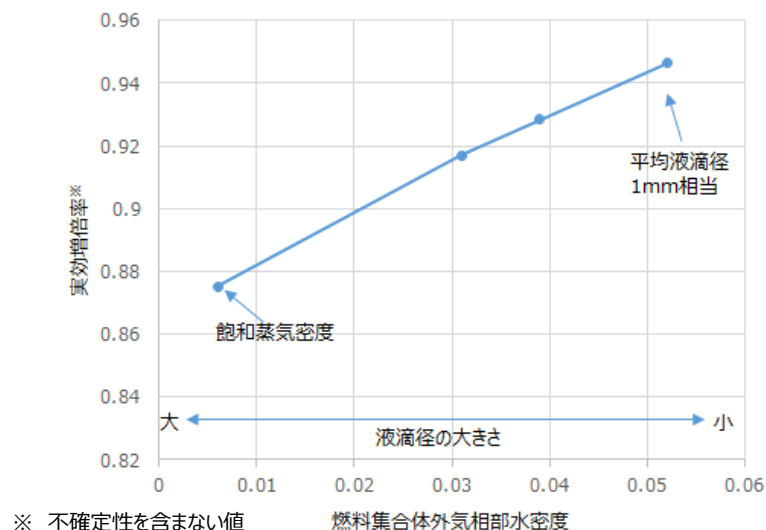


図 燃料集合体外水密度と実効増倍率の関係

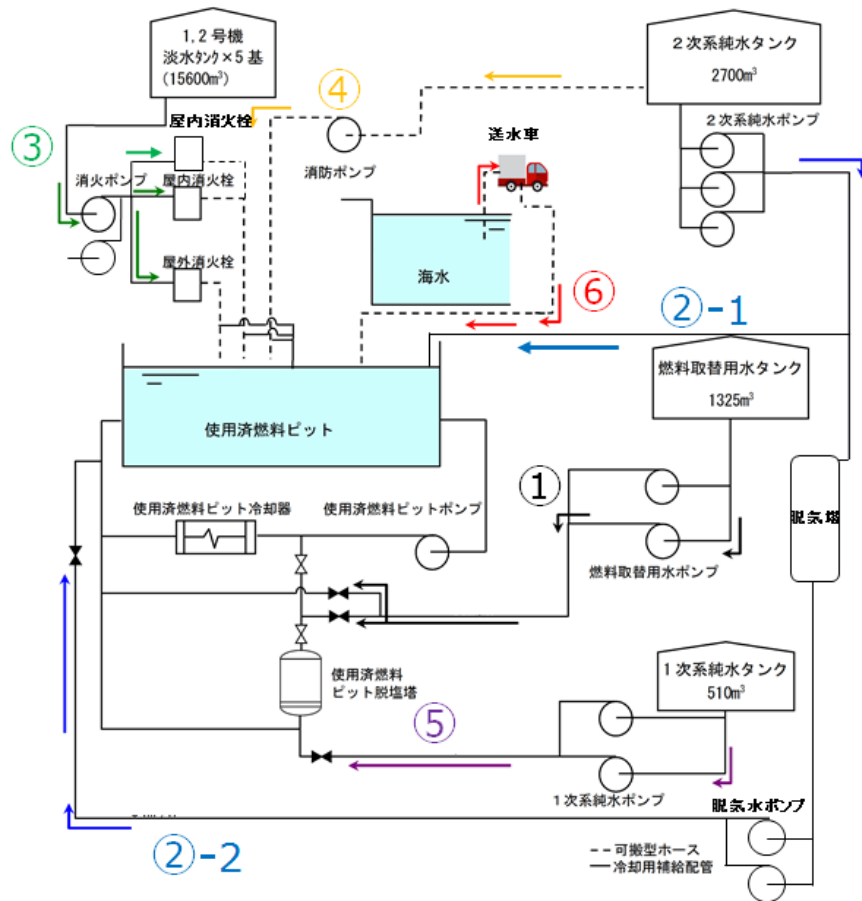


図 SFP注水設備の構成

表 SFP注水通常実施時の流量（追補1.11 まとめ添付資料 1.11.12より抜粋）

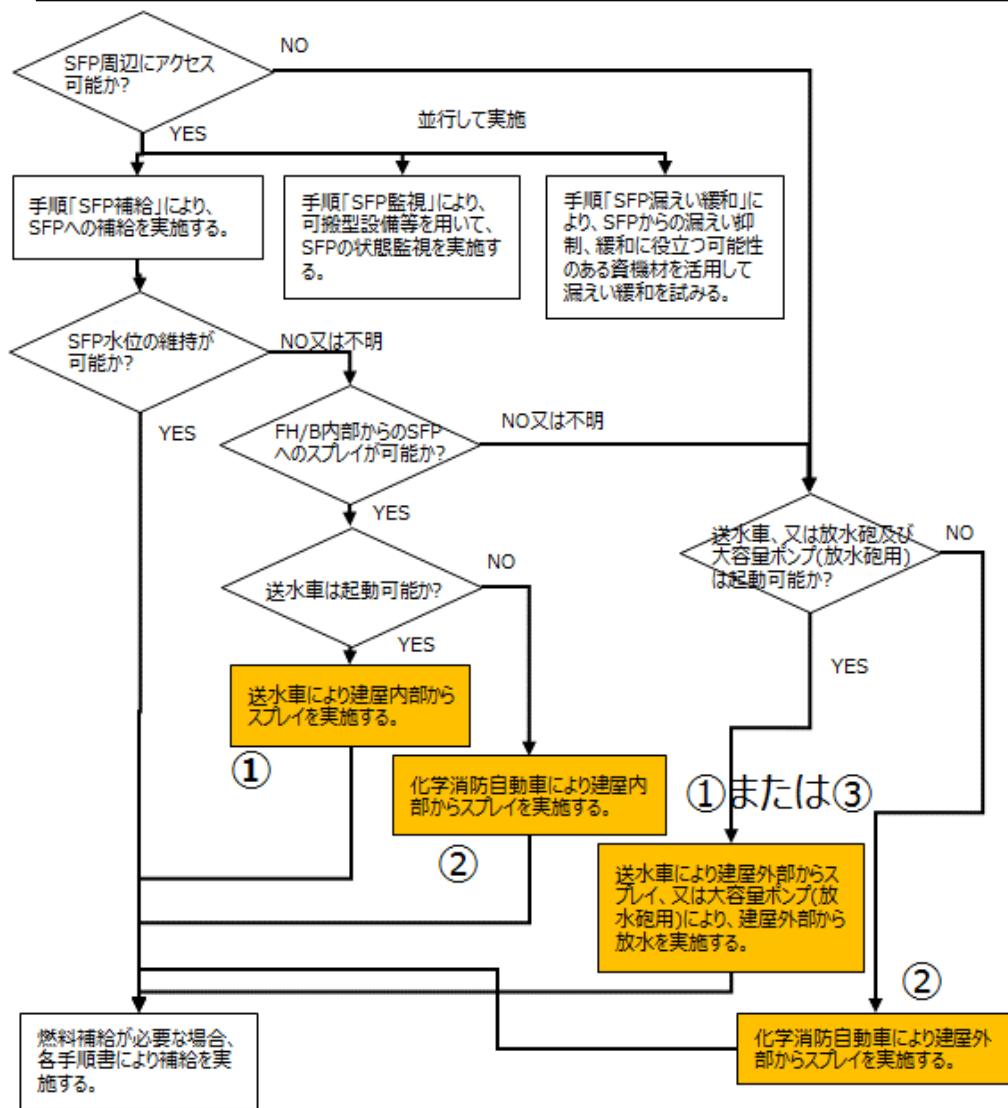
| | 水 源 | 補給可能水量 | 流れ | 補給流量 | 連続補給可能時間 |
|---|------------|--|----|-----------------------|----------------|
| ① | 燃料取替水タンク | 1325m ³ *2 | → | 30m ³ /h*3 | 約 44h |
| | 2次系純水タンク | 2700 m ³ *1 | → | 34m ³ /h | 約 79h |
| | | | → | 39m ³ /h*4 | 約 69h |
| ② | 1,2号機淡水タンク | 15600m ³ (3120 m ³ *1 × 5基) | → | 22m ³ /h*4 | 約 709h |
| ③ | 1次系純水タンク | 510 m ³ *1 | → | 40m ³ /h*3 | 約 12h |
| ④ | 海水 | 長期的に連続補給可能 | → | 15m ³ /h | 長期的に 連続補給可能 |

※1:有効水量として評価した値

※2:保安規定値（燃料取替水タンク水量をSFP内に全量補給可能な水量として想定する）

※3:ポンプ定格流量

※4:訓練時の値



○ 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と②は、スプレーヘッドの保有台数が1台/炉であるため同時実施は出来ない。
 手順③について、放水砲は各号炉に1台ずつ設置することを想定している。

表 放水設備による設定流量

| 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 | □ m ³ /h | □ 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 | □ m ³ /h | □ m ³ /h* | ポンプ揚程曲線 |
| 合計 | □ m ³ /h | □ 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。

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。

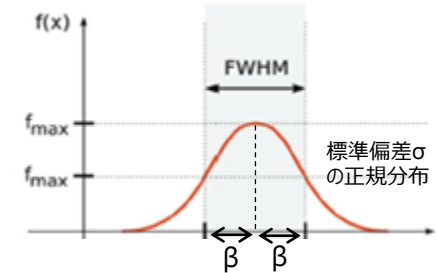
$$Q_p = Q_c \cdot \exp\left(-\frac{w}{\beta}\right)^2$$

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

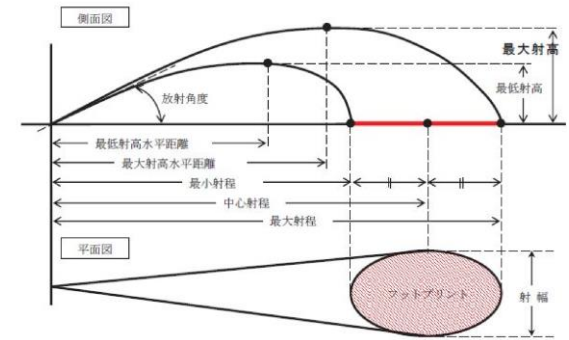


- 文献より、射程方向は、Rosin-Rammler分布を仮定し、射程距離で微分することで流量分布を得る。

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

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

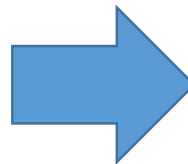
Rm [-] : 残留質量分率
 R [m] : 最大射程
 L [m] : 射程距離
 Lm[m] : 中心射程距離
 Qm [-] : 流量分率



- 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



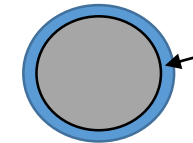
射幅方向全体の流量の約30%

⇔ 射程方向全体の流量の約25%

< \square m³/hが5×5に流入し、全て液膜となった場合の計算例>

- ① 流量と流入範囲から、燃料1体あたりの流量を算出、更に燃料棒等の表面積を考慮した単位幅あたりの液膜流量 Γ を算出。
⇒燃料1体あたりの流量： \square m³/h ， 単位幅あたりの液膜流量 Γ ：3.24m²/h (0.0009m²/s)
- ② 流量から液膜レイノルズ数を算出。⇒897
- ③ 液膜レイノルズ数から適用する式を選定。⇒ 170 \leq Re \leq 900であるため、包絡式②or③を適用
- ④ 液膜レイノルズ数と適用する式から無次元液膜厚さを算出。⇒ 包絡式②なら16.4、③なら21.9、③の方が厚いため、③の値を採用
- ⑤ 無次元液膜厚さから平均液膜厚さを算出。⇒液膜厚さは1.03mm

(燃料棒1本当たりの流量はおよそ \square m³/h \div 225本=0.124 m³/h/本であるため、液膜の流下速度は、厚さ1.03mmの液膜が占める面積で流量を割ることで、約190 cm/sとなる。)



液膜が占める面積

$$\frac{(10.72+1.03)^2-10.72^2}{4} \times \pi = 18.1[\text{mm}^2]$$

なお、③の液膜算出式は、理想的な実験環境で成立する評価式をベースとして採用し、さらにRe数で区分される領域毎に実験の最大値を包絡する評価式を、流量が集中する範囲の全ての燃料棒に適用したため、極めて保守的な設定となっている。

| 記号 | 値 |
|--|------------------------|
| N_T ：無次元液膜厚さ[-] | $(g/v^2)^{1/3}b$ |
| Re：液膜レイノルズ数[-] | Γ/v |
| Γ ：単位幅あたりの液膜流量[m ² /s] | - |
| v ：動粘性係数[m ² /s] | 1.003×10^{-6} |
| b ：平均液膜厚さ[m] | - |
| g ：重力加速度[m/s ²] | 9.807 |

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
 $N_T = 0.995(4Re)^{1/3}$

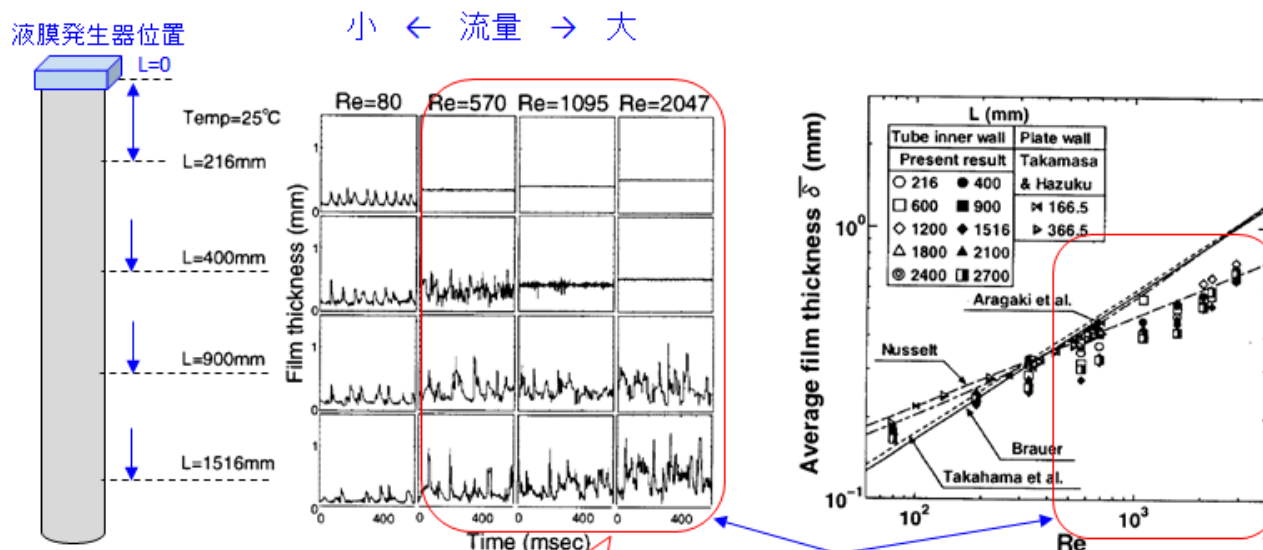
遷移域のNusseltの式ベースの包絡式②
 $N_T = 1.069(4Re)^{1/3}$

遷移域のZhivaikinの式ベースの包絡式③
 $N_T = 10.185(4Re)^{7/12}$

乱流域のZhivaikinの式ベースの包絡式④
 $N_T = 0.157(4Re)^{7/12}$

Nusseltの式
 $N_T = 0.909(4Re)^{1/3}$

- 斜めから液滴が流入してくる状況を想定した場合、燃料棒表面に存在する液膜界面に波立ちが発生することとなり、この波が液膜厚さに及ぼす。
- 公開文献※によれば、レーザーフォーカス変位計を用いた非接触手法により液膜厚さを計測した結果、液膜は管を流下する過程で波が発達し流速が増加することで、液膜厚さが実験式よりも薄くなると示されている。
- これは、波によってせん断力と重力の均衡が崩れ、波高が高い部分に作用するせん断力が低下し、結果として鉛直下向きの速度が増加したところで重力とせん断力が釣り合うためと考える。
- この作用に着目すると、斜めからの液滴の衝突は、波立ちをより大きく、また液膜の流下速度を加速させる因子になることから、実験式をさらに薄くする方向に働く。
- よって斜めからの液滴流入を考慮する場合においては、実験式をそのまま適用することは保守的な設定となる。



L: 測定位置
= 液膜発生器からの助走距離

助走距離の増加に伴い、大きく波立ち、発達する。

波の発達により、液膜厚さの低下傾向が確認できる。