

高浜 1， 2 号炉 使用済燃料ピット 未臨界性評価に関する補足説明

＜構成＞

- (1) 中性子挙動等の特徴を踏まえた解析結果の妥当性確認について
⇒ 通しページ 1 ～ 2 0

＜中性子挙動等の特徴を踏まえた解析結果の妥当性確認について＞

1. はじめに

今回の未臨界性評価においては、最適評価手法を用い、最確状態を踏まえた基本ケースと不確かさ影響を確認する感度解析ケースについて解析を実施した。本資料では、各ケースの解析結果の妥当性について、水位変化時における各相の中性子挙動等と関連付けて説明する。

2. 各ケースの実効増倍率評価結果

各ケースにおける臨界計算コード（SCALE コード）へのインプット条件を第 1 表に、実効増倍率評価結果を第 1-1 図および第 1-2 図に示す。

全てのケースで、水位が低下し液相部領域が少なくなるにつれ実効増倍率は単調減少した。

また各ケースの中で水位 0mm における実効増倍率が最も大きかったのは、燃料棒周りに非常に厚い液膜が形成されるケース②であり、残りのケースでの水位 0mm における実効増倍率の大きさは以下の順位となった。この順位は、気相部の水分が多くなる順位、すなわち中性子の減速がより進みやすいケースの順位と整合している。

ケース③ > ケース④ > ケース① > 基本ケース

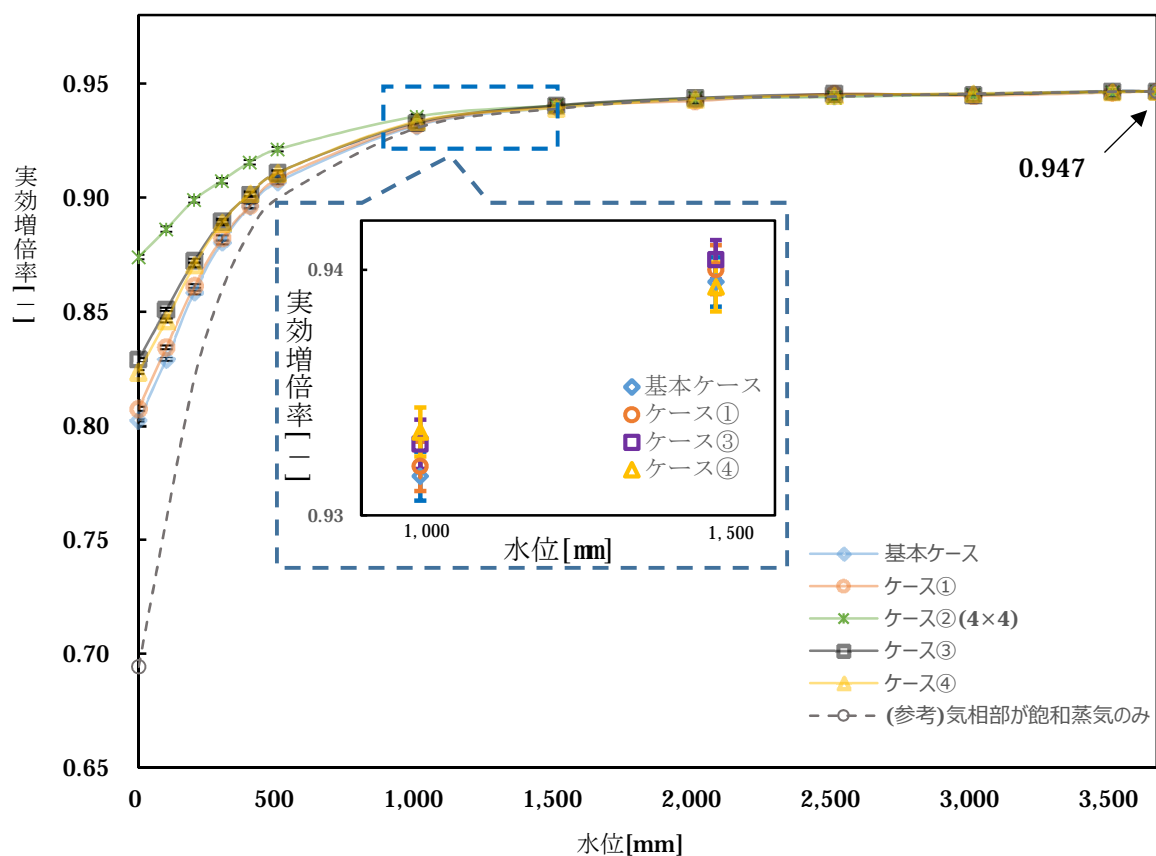
なお水位 1000mm 以上においては、一部上述の順位が変わる解析点が存在するが、全ケースでモンテカルロ計算上の標準偏差 $\pm 2\sigma$ のエラーバーが重なっていることから、当該順位に意味はない。

第1表 各ケースにおける臨界計算コードへのインプット

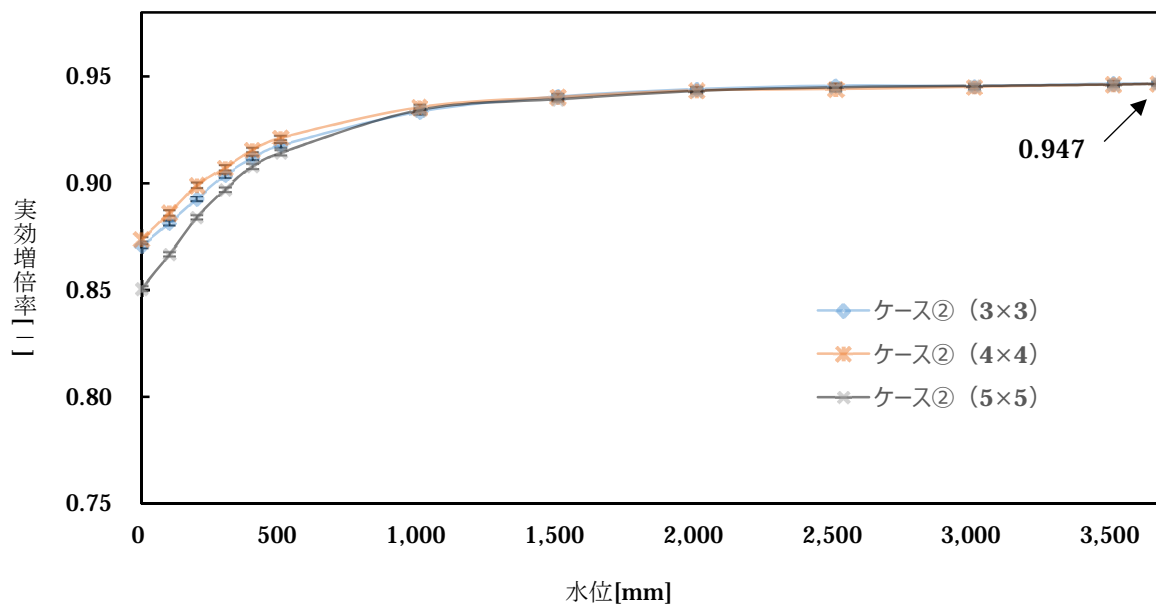
	基本ケース	ケース① (1手順あたりのボ ンブ台数による感 度を確認する解析)	ケース② (「流入範囲を狭める風の影響」 による感度を確認する解析)	ケース③ (「斜め方向に液滴を落下させ燃料集 合体内への流入割合に影響を与える風 の影響」による感度を確認する解析)	ケース④ (スプレイ試験における測 定箇所毎の結果の差異によ る感度を確認する解析)
燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP 有限体系)				
燃料種類	15×15 型 通常ウラン燃料				
液膜厚さ [mm]					
燃料集合体内 気相部水密度 [g/cm ³]	0.0006 (飽和蒸気密度)				
燃料集合体外※ 気相部水密度 [g/cm ³]					
流入範囲外 気相部水密度 [g/cm ³]	—	—	0.0006 (飽和蒸気密度)	—	—

※ 淡水由来の流入水による水密度を「純水」、海水由来の流入水による水密度を「海水」と記載。

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。



第 1-1 図 基本ケース、感度解析ケース①、③、④ 実効増倍率評価結果^{※1,2}



第 1-2 図 感度解析ケース② 実効増倍率評価結果^{※1,2}

※1 エラーバーはモンテカルロ計算における標準偏差 ($\pm 2\sigma$)

※2 製造公差、計算コード等による不確定性を含まない値

3. 解析結果の妥当性確認

解析結果の妥当性について、各相の中性子挙動やそのエネルギー特性を踏まえ考察を行った。

3.1 既許可と今回の実効増倍率結果の中性子挙動との関連

(1) 既許可

既許可の、水密度を一様に変化させた場合の実効増倍率は、第 2 図のとおり、水密度約 0.1g/cm^3 でピークを持つ。この挙動は、水密度の変化により体系内の中性子挙動が変化することが大きな要因であると考えられる。高浜 1, 2 号炉の SFP 体系（アングル型ステンレス鋼製ラック）において水密度を変化させた場合における各水密度状態での中性子挙動イメージを第 3 図に示す。

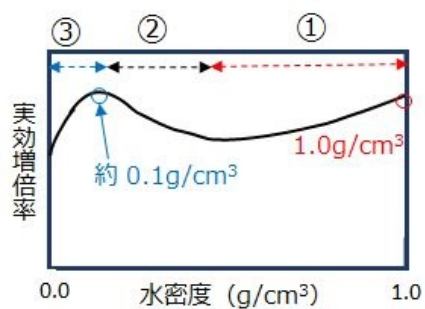
- ①高水密度領域においては、燃料集合体を飛び出した中性子はラック間の水に吸収されやすいため、単一集合体内の減速材の影響が支配的となることから、水密度低下にともない実効増倍率は減少する。
- ②中水密度領域においては、隣接燃料へ到達し反応する中性子数が増えるため、水密度低下に伴い実効増倍率は増加する。
- ③低水密度領域においては、減速材密度が低すぎることから、核分裂数が減少する効果が大きくなるため、水密度低下に伴い実効増倍率は減少する。

上記のように、水密度の変化に伴う中性子の減速や吸収効果の変化により、実効増倍率が変化し、約 0.1g/cm^3 でピークを持つ。

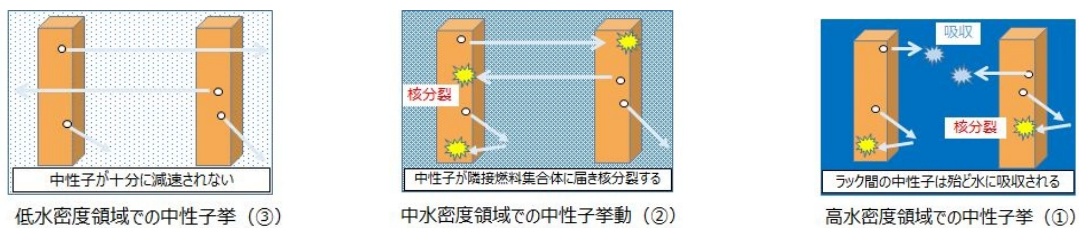
(2) 今回評価

今回の、体系を液相部・気相部に分け、水位を変化させた場合の実効増倍率は、第 4 図のとおり水位の低下に伴い単調減少している。

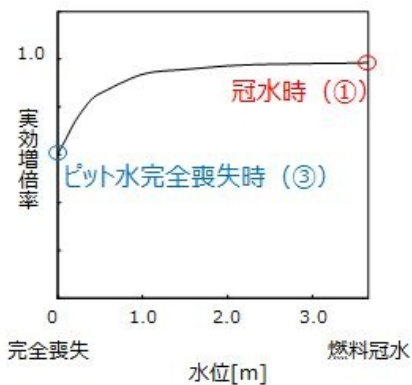
水位が変化した場合、第 5 図のように各相の領域の大きさは変わるものの、各相の水分条件は固定である。具体的には、液相部は第 3 図の①高水密度領域の状態に等しく、気相部は今回の解析条件の水分状態であれば③低水密度領域の状態に等しく、その状態を保ったまま（＝背景色の青色の濃さが変化せずに）、液相と気相の体積が変化していく。すなわち、②中水密度領域のような核反応が起これやすい状態が発現しないことから、第 4 図の実効増倍率はピークを持たず、水位の低下に伴い単調に減少したと考えられる。



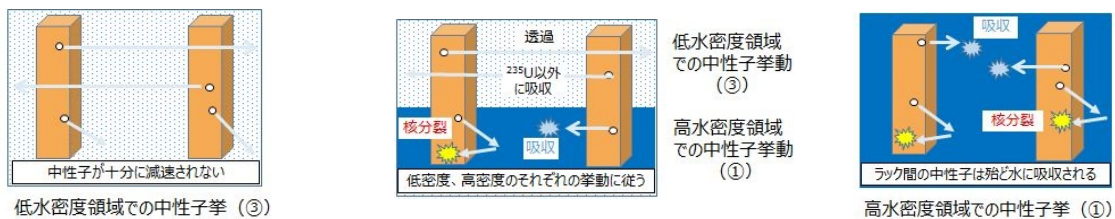
第 2 図 水密度一様変化時の実効増倍率挙動(イメージ)



第 3 図 水密度一様変化時の中性子挙動



第 4 図 水位変化時の実効増倍率挙動 (イメージ)



第 5 図 水位変化時の中性子挙動

3.2 各相の中性子エネルギー特性を踏まえた妥当性確認

今回評価における実効増倍率結果について、気相部と液相部の中性子スペクトルや **EALF** との関連性について述べる。

(1) 中性子スペクトルとの関連性

今回評価の特徴は、**SFP** 全体を液相と気相に分け、水位を変化させて評価していることである。一般的に、液相部では水による中性子減速効果によりスペクトルが柔らかく（熱中性子が相対的に多い）、気相部ではスペクトルが硬くなる。今回の解析結果の妥当性を裏付ける知見を得るために、気相部および液相部の高さ方向における中性子スペクトルを、**MP** コードを用いて、第 4 図に示す通常ウラン新燃料を貯蔵した無限配列体系を対象に、液相部及び気相部それぞれの上部、中央部、下部の 3 つの高さ位置において求めた。

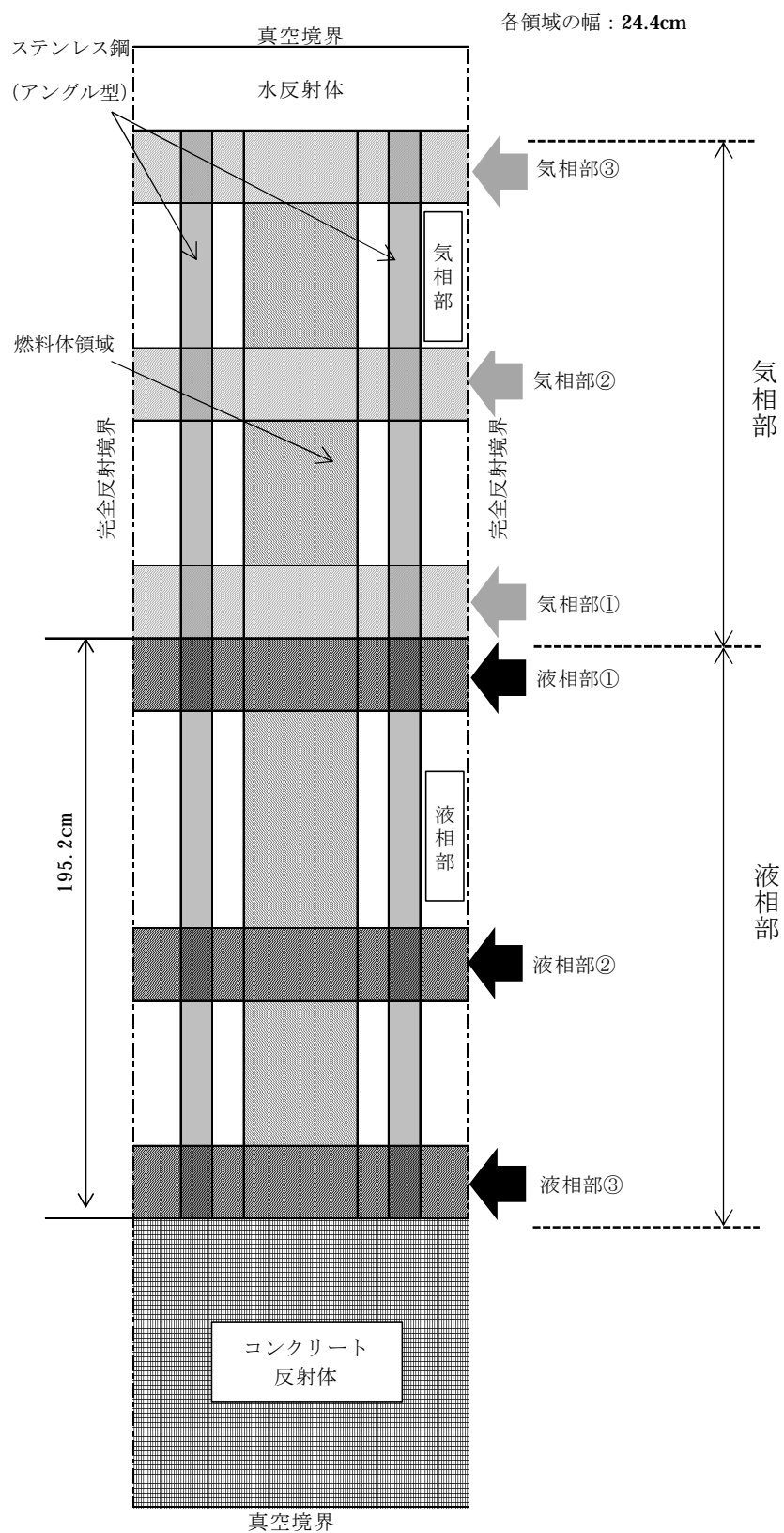
評価結果を第 5-1 図、第 5-2 図に示すが、気相部では相対的に高速中性子の割合が多く、液相部では中性子の割合が多くなっている。また気相部の特徴として、高さ方向の違いによりスペクトルの形状に差がみられる。具体的には、境界面に近い気相部①、③に比べて、中央部の気相②の熱中性子の割合が小さくなっている。これは、境界面に近い気相部においては、隣接する水（液相部や反射体）による減速効果が現れているものと考えられる。一方、液相部では、軸方向位置の違いによるスペクトル形状差は見られない。

これらの結果から、気相部・液相部それぞれでスペクトル特性が異なることを確認でき、またスペクトル特性は評価体系より予想される特性と同様の傾向を示しており、気相部、液相部それぞれが適切に評価されていると判断できる。

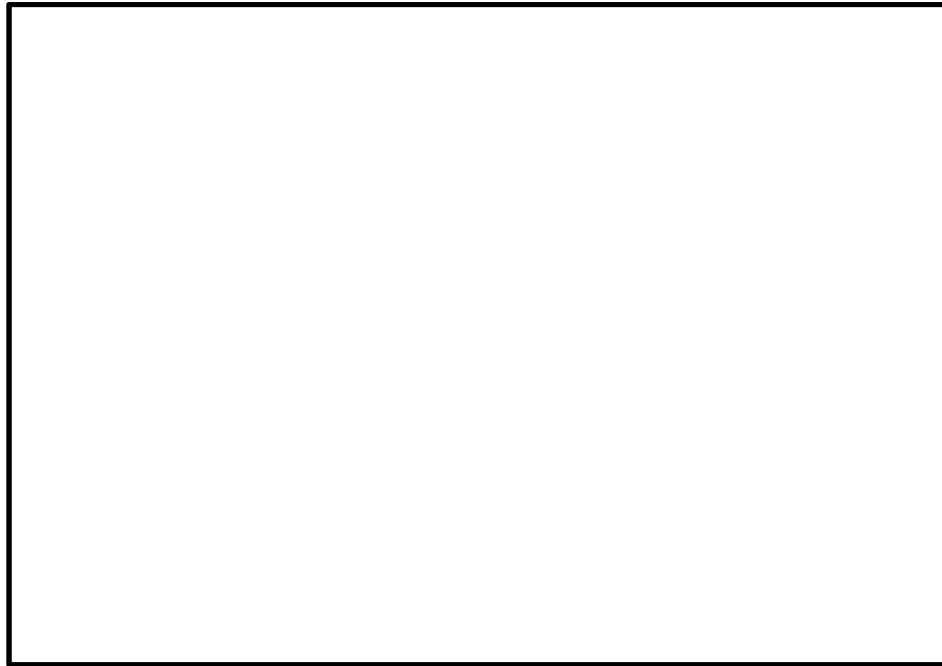
(2) EALF との関連性

第 6-1 図および第 6-2 図は、解析条件表の全ケースにおける各水位での **EALF**

(Energy corresponding to the Average neutron Lethargy causing Fission: 核分裂に寄与する中性子の平均エネルギー) を示したものであるが、全ケースで **EALF** は、満水から水位 **1000mm** まではほぼ一定で、水位 **1000mm** 以下になると急激に増加する傾向を示している。これは、気相部ではエネルギーの高い中性子が多く、気相部側が体系の実効増倍率を有意に決定づけるには、中性子が体系外へ漏れづらい状態となるよう大きな気相部体積が必要となるためである。



第4図 境界における中性子スペクトルの評価体系（軸方向）

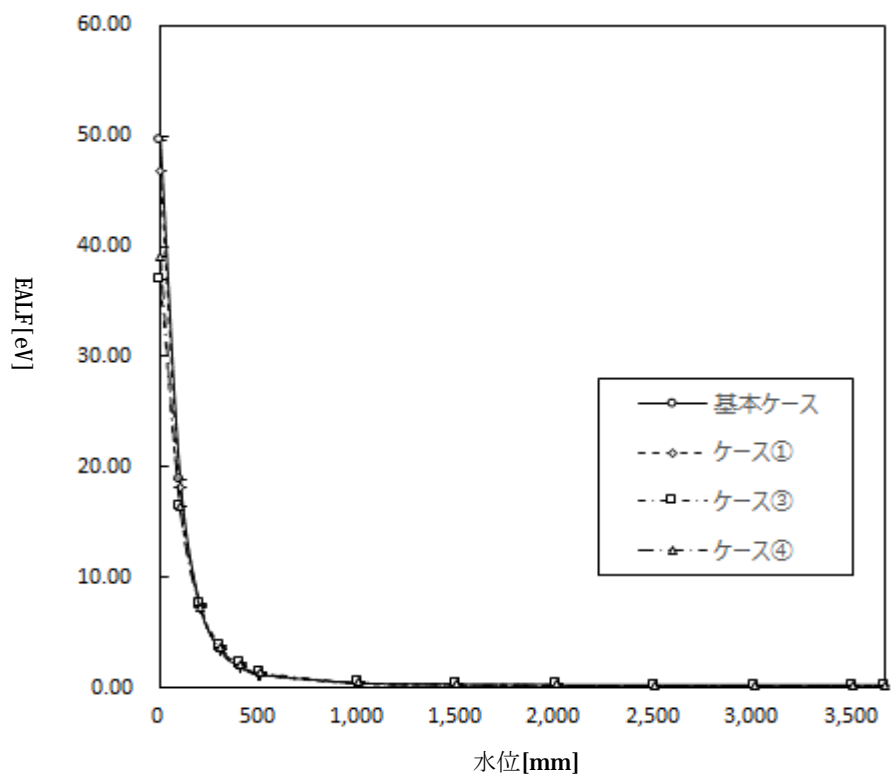


第 5-1 図 気相部中性子スペクトル評価結果

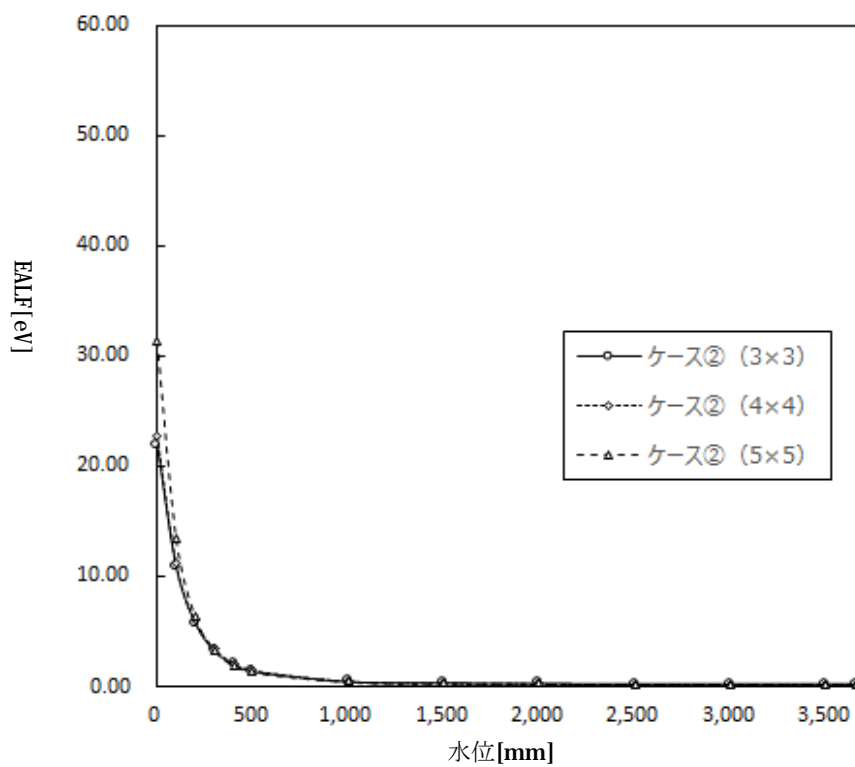


第 5-2 図 液相部における中性子スペクトル評価結果

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。



第 6-1 図 基本ケース、感度解析ケース①、③、④ 各水位での EALF



第 6-2 図 感度解析ケース② 各水位での EALF

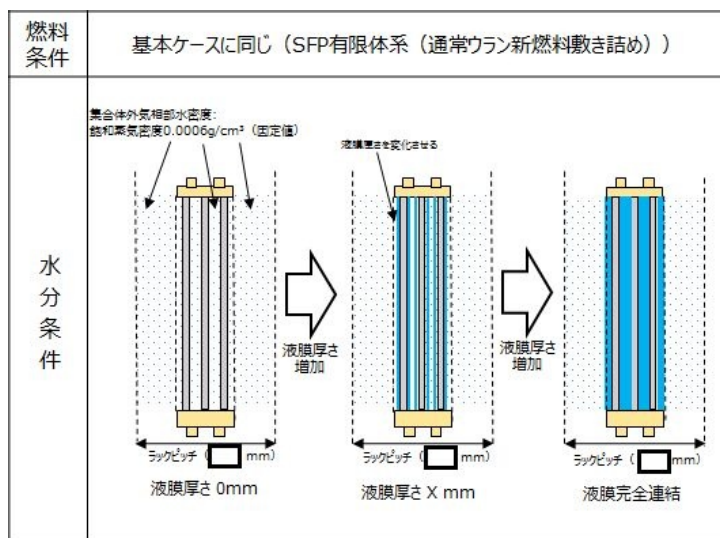
4. 水分条件の変化傾向を踏まえた妥当性確認

今回の未臨界性評価では、既許可と異なり、気相部領域において燃料集合体の中と外で異なる水分状態を設定している。ここでは、内側の水密度のみ、もしくは外側の水密度のみを変化させた場合の影響について確認し、今回の解析結果の妥当性を示す。

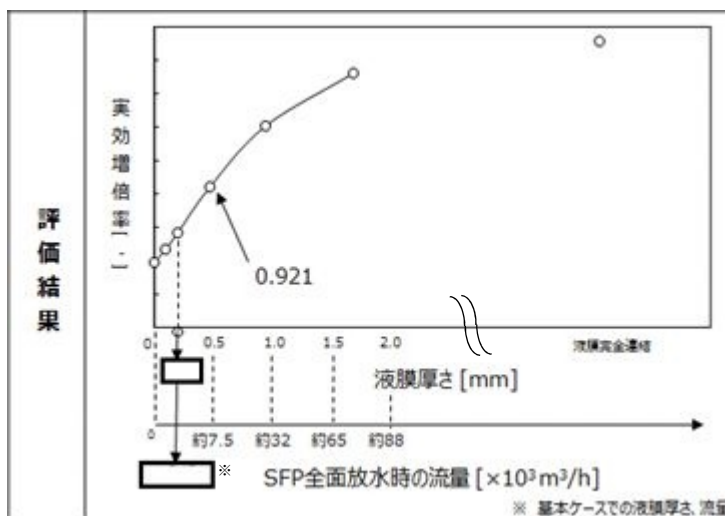
4-1. 燃料集合体の内外に設定する水密度条件による実効増倍率への影響確認

(1) 燃料集合体の内の水密度のみを変化させた場合

燃料集合体内の中の水密度、すなわち液膜厚さのみを変化させた解析を行った。解析条件を第7図に、解析結果を第8図に示す。第8図に示すとおり、液膜が厚くなるほど実効増倍率は高くなった。これは、核燃料の近くに減速材があるほうが実効増倍率は上がりやすいためであり、第8図の結果は妥当と言える。



第7図 燃料集合体の中の水密度のみを変化させるパラメータスタディ 評価条件



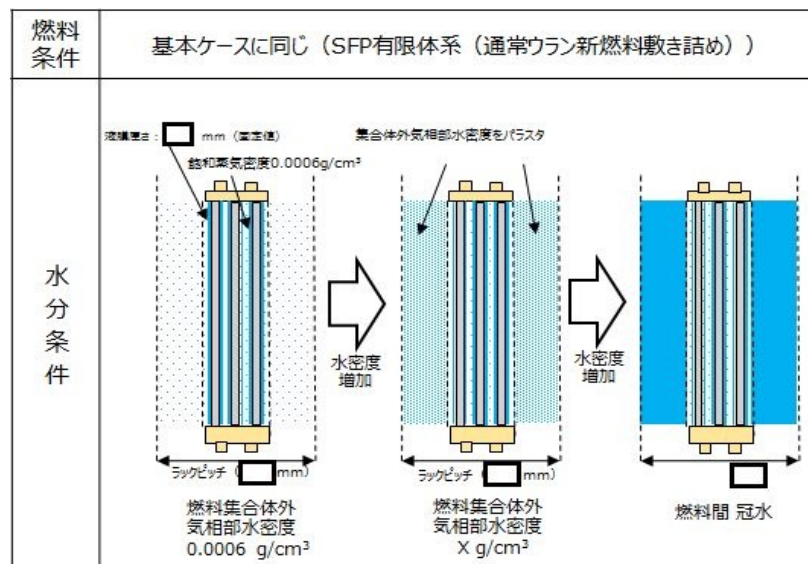
第8図 燃料集合体の中のみを変化させるパラメータスタディ 評価結果

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。

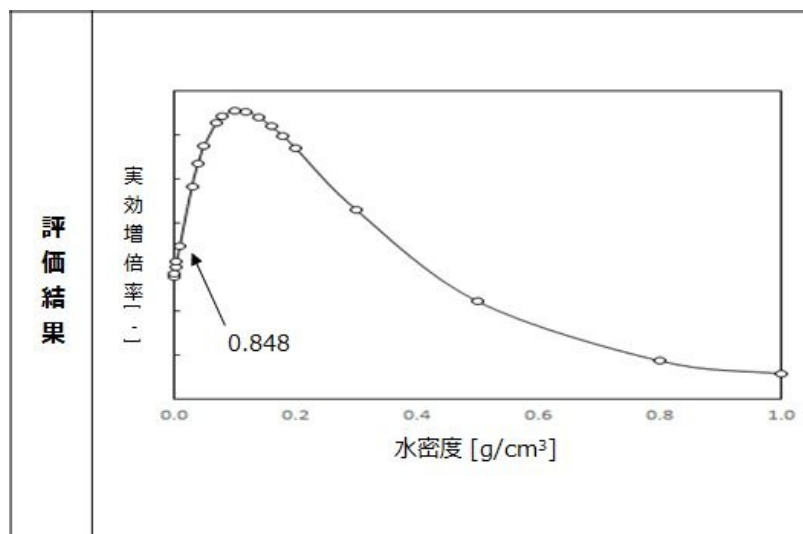
(2) 燃料集合体の外の水密度のみを変化させた場合

燃料集合体の外の水密度のみを変化させた解析を実施した。解析条件を第 9 図に、解析結果を第 10 図に示す。第 10 図に示すとおり、体系全体の集合体間の気相部水密度は、水密度 $0\text{g}/\text{cm}^3$ から約 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ に上昇するまでは実効増倍率が上昇し、その後減少に転じるが、水密度 $1\text{g}/\text{cm}^3$ に向けて再度上昇しない点が既許可とは異なっている。本パラスタでは、集合体の外の水密度のみを変化させていることから、燃料集合体間の水密度が約 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ より大きくなる（中性子が隣接燃料へ到達するまでに集合体間の水分子に吸収されやすくなる）一方で、燃料集合体単体の反応度は増加することがないため、実効増倍率は単調に減少する。

このように第 10 図に示す実効増倍率挙動は、既許可の実効増倍率挙動、および変化させる水分条件の違いを踏まえ説明が出来ることから第 10 図に示す結果は妥当である。



第 9 図 燃料集合体の外の水密度のみを変化させるパラメータスタディ 評価条件



第 10 図 燃料集合体の外のみを変化させるパラメータスタディ 評価結果

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。

4-2. 燃料集合体の内外の水分状態変化を踏まえた妥当性確認

第 8 図および第 10 図の結果より、今回の評価体系においては、液膜厚さや燃料集合体外気相部水密度が変化した場合、実効増倍率は以下挙動を示すと言える。

- A. 液膜厚さが厚いほど、実効増倍率は大きくなる
- B. 燃料集合体外気相部水密度は、0～約 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ の範囲では、水密度が大きいほど実効増倍率は大きくなる

ケース①、③、④の水分条件は、基本ケースに比べて液膜厚さや燃料集合体外気相部水密度が大きく、燃料集合体外気相部水密度が 0～約 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ の範囲にあることから、上記 A. B より、ケース①、③、④は基本ケースよりも実効増倍率が大きくなると予想でき、実際の解析結果もそれと整合している。

(なお集合体内の液膜厚さによっては、B. に示す集合体内気相部水密度が上昇傾向を示す範囲の上限 (約 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$) が変動する可能性はあるものの、第 9 図に示す液膜厚さとケース①、③、④の液膜厚さ条件は同等であり体系の水分状態に大きな差はないことから、当該上限は大きく低下することはない。一方で各ケースの燃料集合体外気相部水密度は約 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ と比較して約 $1/20$ 以下であるため、上昇傾向を示す範囲内である。)

ケース② (局所領域にのみ多量の水分が存在する条件) では、水の流入を想定する局所領域の大きさに応じて、領域内のウラン量とラックピッチ当たりの流入水量が変化するため、実効増倍率が最大となる局所領域の大きさをサーベイしているが、局所に流量が集中する場合であっても A. B. の傾向が当てはまることは、審査過程において提示したチェッカーボード配置条件下における感度解析において確認できる。

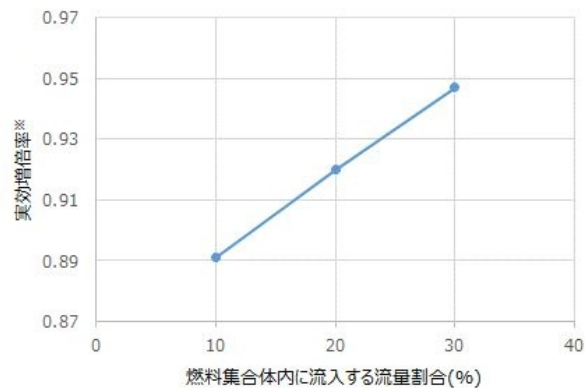
(チェッカーボード配置は水平方向の燃料反応度の偏りは平準化されるため、水分状態が変化した際における実効増倍率挙動は新燃料敷き詰め時と同様となる。)

感度解析条件を第 2 表に、感度解析結果を第 11 図～第 13 図に示す。第 11 図および第 12 図より、液膜をより厚くする条件とするほど実効増倍率は増加しており、また第 13 図より集合体間の気相部水密度を大きくするほど実効増倍率は上昇していることから、局所流入時においても前述の A. および B. の挙動が示されることが確認できる。

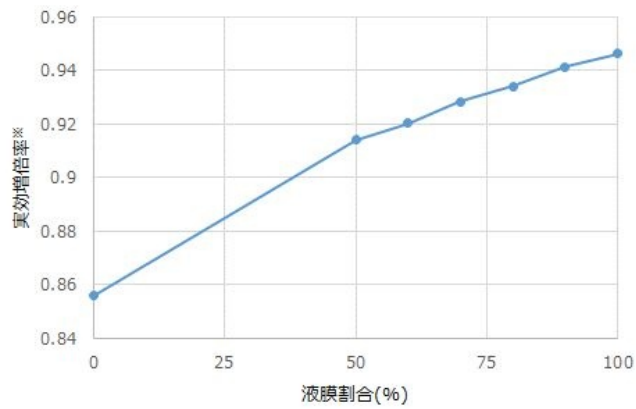
第2表 局所流入時において各位置の水分条件を変化させた感度解析 (チェッカーボード配置)

評価条件		国の影響① (流入範囲を決める国の影響) による感度を 確認する解析 (ケース②)	過去提示解析			
			ケースA	ケースAに対し “集合体内への流入割合” を変化させた感度解析	ケースAに対し “液膜となる流量の割合” を変化させた感度解析	ケースAに対し “集合体外気相部水密度” を変化させた感度解析
燃費条件	燃料配置	新燃料のみで満杯	新燃料と燃焼燃料(24GWd)の チェッカーボード配置	←	←	←
	燃料種類	15×15型 通常ウラン燃料	15×15型 通常ウラン燃料	←	←	←
水分条件	流量 (m³/h)			←	←	←
	SFPへの流入範囲、 流量分布	流入範囲	局所(5×5)	←	←	←
		流量分布	一様	←	←	←
	燃料集合体内への流入割合 (%)		30	10、20、30	30	←
	液膜厚さ	集合体内へ流入した流量 のうち液膜となる流量割合 (%)	100	←	100、50、40、30 20、10、0	100
		液膜厚さ評価式	包絡式	←	←	←
	気相部 水密度 (放水の 液滴径)	集合体内へ流入した流量のうち液 滴のまま落下する流量割合 (%)	0	←	0、50、60、70 80、90、100	0
		燃料集合体内 (g/cm³)	飽和蒸気密度 (0.0006)	←	←	←
		燃料集合体外	液滴径1.0mmを 用いた水密度	←	←	飽和蒸気密度から、液滴径1.0mm を用いた水密度までの4点を評価
	流入範囲外 (g/cm³)		飽和蒸気密度 (0.0006)	←	←	←
解析結果	海水中の塩分濃度 (%)		3.3	←	←	←
	解析結果		冠水時：0.947 水位0cm時：0.874	第10回参照	第11回参照	第12回参照

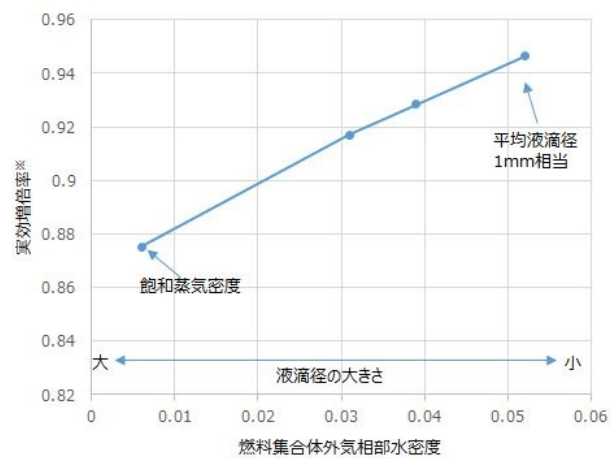
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 10 図 流量割合と実効増倍率の関係



第 11 図 液膜割合と実効増倍率の関係



第 12 図 燃料集合体外水密度と実効増倍率の関係

※実効増倍率の不確定性を考慮しない値

5. まとめ

解析条件表に掲載した各ケースの解析結果の妥当性について、各相の中性子の挙動やそのエネルギー特性、および燃料集合体の内外の水分条件を変化させた場合の実効増倍率挙動などの観点から確認を行った。

今回評価での実効増倍率挙動は、既許可の実効増倍率挙動および変化パラメータの違いから、各相の中性子挙動の違いが大きく影響していることを確認した。また **MP** コードを用いた各相の中性子スペクトル分析結果、および水位変化に伴う **EALF** の変化傾向についても、実効増倍率の挙動と一致していることを確認した。

また、今回評価での各ケースでの実効増倍率評価結果は基本ケースの評価結果より増加しており、燃料集合体の内外における水分条件の変化が実効増倍率に与える影響と整合していることを確認した。

以上のように、今回の実効増倍率評価結果は、既許可の実効増倍率挙動との違い、および各相の中性子エネルギーの違い、また燃料集合体内外の水分状態の変化という観点から見て、その挙動が整合していることから、評価結果は妥当であるといえる。

以上

(参考 1) 判定基準と比較する安全評価値の考え方

水位 0mm における基本ケースの実効増倍率は 0.803 であり、同水位におけるケース①～④の実効増倍率最大値は 0.874 であった。よって水分条件に発生しうる不確かさによる影響は、水位 0cm 実効増倍率換算で 0.071 ($=0.874-0.803$) となるが、この不確かさ影響を踏まえた場合でも冠水時の実効増倍率 0.947 を超えない。よって未臨界性評価としては、冠水時の実効増倍率に製造公差や計算コード等による不確定性として 0.02 を加算した 0.967 を、未臨界性の判定基準 0.98 と比較する。

(参考 2) 未臨界性評価の水変動と実効増倍率の考え方

1. はじめに

今回設定した基本ケースの水分条件は、実効増倍率に対する気相部の寄与が小さい条件であり、実効増倍率は水位低下に伴い単調に減少する結果となった。本挙動が、一般的な物理方程式から得られる水位低下時の実効増倍率挙動と整合しているかを確認した。

2. 前提条件

- ・議論を単純化するため液相部のみに注目（気相部の存在は無視）する。
- ・SFP 冠水時の実効増倍率は有限体系でも無限体系でも大きな差は無いため、液相部の無限増倍率を $k_{\infty} = 0.95$ とする。
- ・バックリングは以下に示す直方体の算出式を用いる。X と Y は SFP の水平方向寸法であり固定値とし、Z は液相部の高さとする。

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{X + 2\delta}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{Y + 2\delta}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{Z + 2\delta}\right)^2$$

- ・バックリング B^2 の算出に必要となる外挿距離 δ は以下の式により算出する。

$$\delta = 0.71 \times 3D$$

ここで、 $D = \frac{1}{3\Sigma_{tr}}$ の関係がある。

- ・実効増倍率評価に必要となる移動面積 M^2 は以下の式により算出する。

$$M^2 = \frac{D}{\Sigma_a}$$

- ・輸送断面積 Σ_{tr} および吸収断面積 Σ_a については文献※を参考に、 $\Sigma_{tr} = 3.62 \times 10^{-2} [\text{cm}^{-1}]$ 、 $\Sigma_a = 0.153 [\text{cm}^{-1}]$ とする。
- ・上記の無限増倍率、移動面積、バックリングから、実効増倍率 (k_{eff}) は下式により求める。

$$k_{eff} = \frac{k_{\infty}}{1 + M^2 B^2}$$

3. 結果

液相高さを変化させた場合の実効増倍率を概算した結果を図 1 に示す。一般的な物理方程式により算出した実効増倍率は、今回の基本ケースの評価結果と同様に、水位低下に伴い単調に減少していることから、今回評価結果が物理的に妥当であることが確認できた。

また水位 0cm を含む低水位時の実効増倍率は基本ケースのほうが大きくなっている。これは、基本ケースにおいては気相部に一定量の水分およびウランが存在しており、気相部の存在を無視した評価よりも体系全体として実効増倍率が大きくなったものであり、工学的な観点からも妥当である。（実機 SFP で気相部のみの実効増倍率は基本ケースにおいて 0.803 であり、気相部と液相部が混在する状態では、低水位の k_{eff} は約 0.8 以下にはならない。）

※ ジェームス J. ドゥデルスタット ルイス J. ハミルトン 著「原子炉の理論と解析（上）」成田正邦 藤田文行 共訳現代工学社

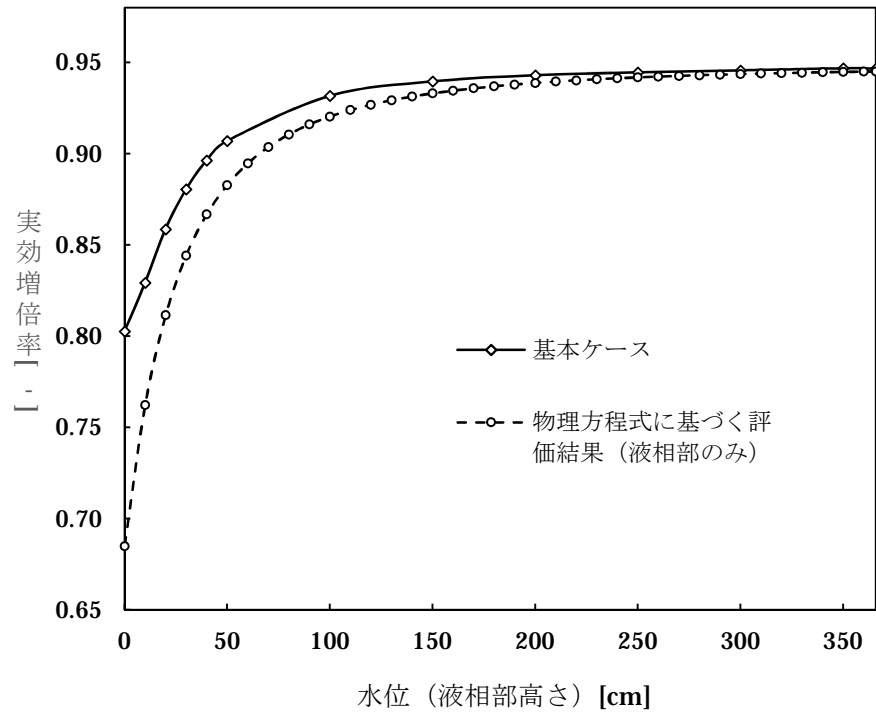


図1 物理方程式に基づく液相高さ変化時の実効増倍率

(参考 3) 流量条件に対する SFP の未臨界性上の頑健性について

1. はじめに

最適評価手法を適用した今回の評価結果が有する頑健性を確認するため、基本ケース条件に対して流量条件を過大に設定した解析を行った。

2. 結果

解析条件を表 1 に、結果を図 1 に示す。9000m³/h という過大な流量であっても未臨界性を満足する結果が得られた。流量が 7500m³/h であっても、高浜発電所に配備している放水砲全台（予備を含め 5 台）を使用した場合の流量より大きく、十分な頑健性※を有している。

3. 考察

図 1 に示す通り、9000m³/h もの過大な流量が SFP に流入するような、実効増倍率に対する気相部の寄与が大きい条件下では、低水位時において実効増倍率の極大値が発生している。気相・液相の境界面においては各相間の中性子の移動が発生しており、気相部の寄与が大きい条件下での水位の低下は、以下のように実効増倍率を増減させる相反する効果を持つ。

- ・核分裂反応が頻繁に起こる気相部が拡大する。
⇒ 実効増倍率の増加要因
- ・核分裂反応が頻繁に起こる気相部への、液相部からの中性子供給量が低下する。
⇒ 実効増倍率の低下要因

ここで、液相部の中性子スペクトルが柔らかく飛程が短いことを踏まえれば、液相部から気相部に移る中性子の量は、水位が高い状態ではほぼ一定であるが、低水位になると液相部内のウラン量の減少に伴い低下することとなる。また、低水位時では気相部領域が十分発達している状態でもあるため、そこから水位がさらに低下しても、実効増倍率の増加要因とはなりにくい。このように、気相部の拡大による実効増倍率への増加影響が失われた状態で、液相部からの中性子供給量が減り始めるような低水位において、実効増倍率は僅かながら水位 0mm での実効増倍率よりも大きい値を示したものと考えられる。

※ 福島第一原子力発電所事故での対応において、SFP に向け放水・注水された流量は、最大でも 500m³/h 以下である。（東京電力株式会社「福島原子力事故調査報告書」、平成 24 年 6 月）

表 1 評価条件（流量に対するパラメータスタディ）

			基本ケース	未臨界性上の 頑健性確認解析	
燃料条件	燃料配置		新燃料のみで満杯	←	
	燃料種類		通常ウラン燃料 (Gd入り燃料の存在は考慮しない)	←	
水分条件	流量		<div> </div> (m ³ /h)	9000 m ³ /h 7500 m ³ /h	
	SFPへの流入範囲、流量分布		流入範囲	SFP全面	←
			流量分布	一様	←
	燃料集合体内への流入割合		23 (%)	←	
	液膜 厚さ	集合体内へ流入した流量 のうち液膜となる流量割合		100 (%)	←
		液膜厚さ評価式		包絡式	←
	気相部 水密度 (放水の 液滴径等)	流入 範囲内	集合体内へ流入した流量のうち 液滴のまま落下する流量割合	0 (%)	←
			燃料集合体内	飽和蒸気密度 0.0006 (g/cm ³)	←
			燃料集合体外	液滴径1.5mmを用いた水密度	←
			流入範囲外		—
		海水中の塩分濃度		3.3(%)	←

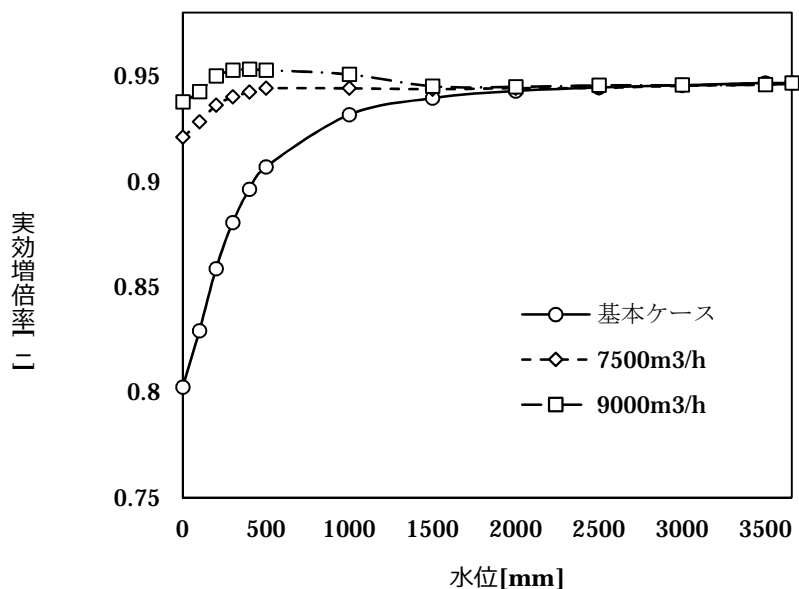


図 1 流量パラスタ結果

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。