

解析結果の妥当性確認および考察について

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、今回解析結果の妥当性について説明する。

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、水位が低下するにつれ実効増倍率は単調減少した。また各ケースの水位0mmにおける実効増倍率の大きさは以下の順位となった。

基本ケース < ケース① < ケース④ < ケース③ < ケース②

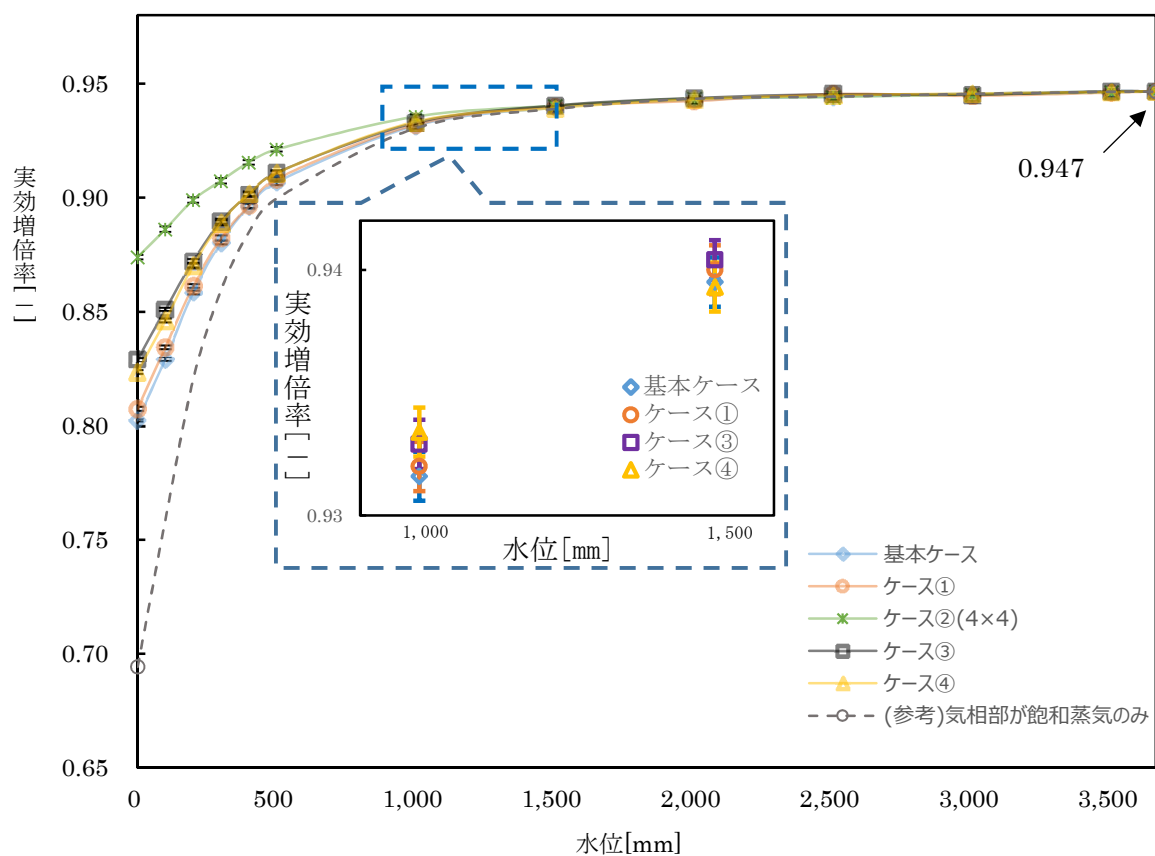
なお水位1000mm以上においては、上述の順位が入れ替わる解析点があるが、全ケースでモンテカルロ計算上の標準偏差 $\pm 2\sigma$ のエラーバーが重なっていることから、当該順位に意味はない。

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

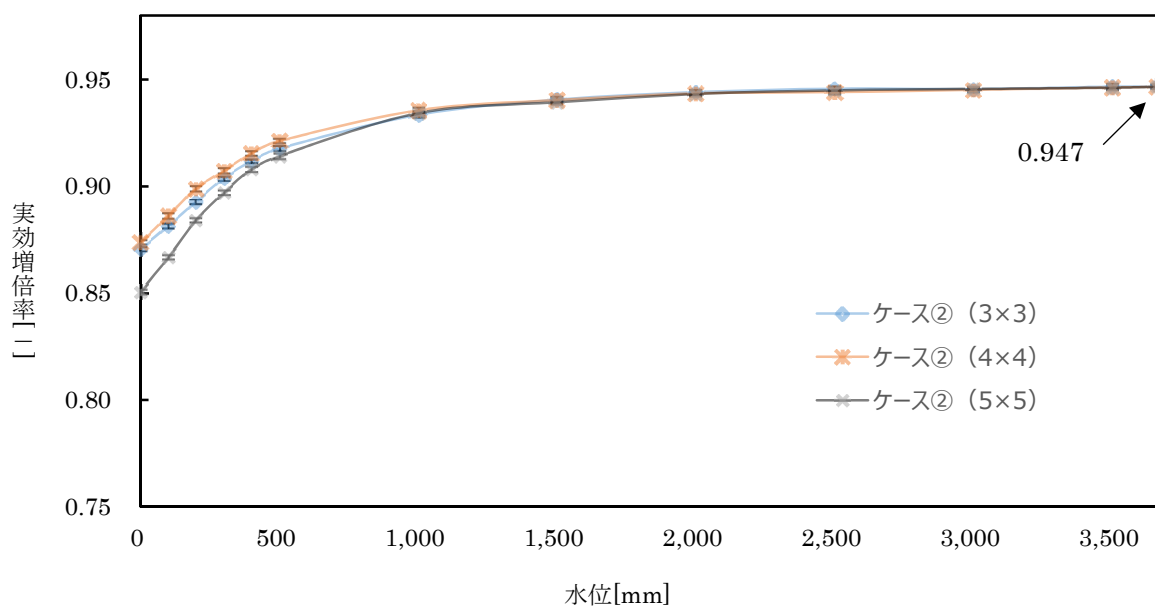
	基本ケース	ケース① (1手順あたりのポンプ台数による感度を確認する解析)	ケース② (「流入範囲を狭める風の影響」による感度を確認する解析)	ケース③ (「斜め方向に液滴を落下させ燃料集合体内への流入割合に影響を与える風の影響」による感度を確認する解析)	ケース④ (スプレイト試験における測定箇所毎の結果の差異による感度を確認する解析)
燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP 有限体系)				
燃料種類	15×15型 通常ウラン燃料				
液膜厚さ [mm]					
燃料集合体内 気相部水密度 [g/cm ³]	0.0006 (飽和蒸気密度)				
燃料集合体外* 気相部水密度 [g/cm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



第 1-2 図 実効増倍率評価結果^{※1,2} (感度解析ケース②詳細)

※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、一般的な物理式により求められる実効増倍率との整合性、ならびに類似解析結果との比較により確認を行った。

3.1 一般的な物理式により求まる実効増倍率との整合性

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。

3.1.1 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。この場合、実効増倍率(k_{eff})は以下の式より求められる。

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

ここで、 k_{∞} は液相部の無限増倍率、 M^2 は移動面積、 B^2 は液相部のバックリングである。

- ・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。

- ・バックリングの算出には、直方体の体系における一般的な導出式である下式を用いる。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。

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

ここで、 δ は外挿距離である。

- ・実効増倍率の算出に必要となる移動面積 M^2 および外挿距離 δ は、文献（軽水減速UO₂およびPuO₂-UO₂燃料炉心の臨界量、JAERI 1254、鶴田晴通ら(1977)）に示される実験炉の試験データを元に、以下の通り設定する。なおこれらの導出過程を参考1に示す。

$$M^2 = 37.7、\delta_x = \delta_y = 8.5、\delta_z = 6.3$$

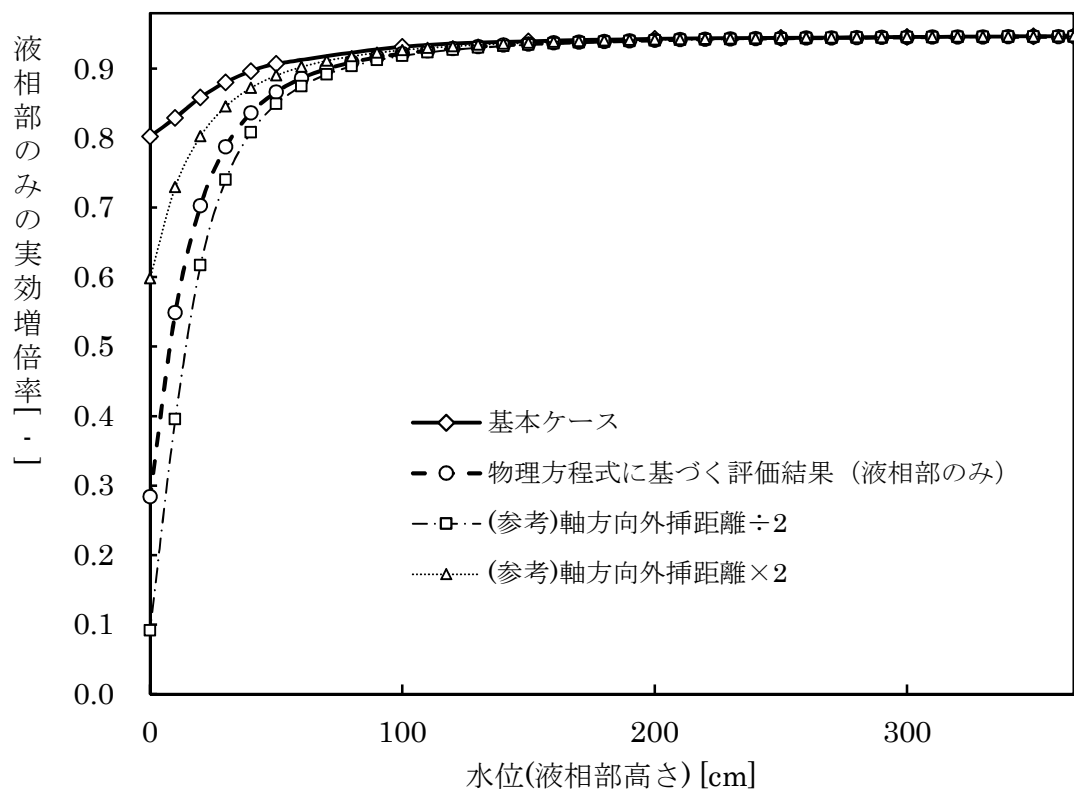
3.1.2 妥当性確認

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第2-1図に示す。一般的な物理式により算出した実効増倍率は、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る。

また水位0mm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。）

なお文献では反射体として軽水を用いた場合の外挿距離が示されているが、今回未臨界性評価では軸方向の下部反射体として厚さ 1000mm のコンクリートを設定する。反射体の種類により外挿距離は異なるが、その場合でも実効増倍率挙動（冠水から水位 100cm まではほぼ一定で、それ以上に水位が低下すると実効増倍率が大きく低下する。）は変わらない。



第2-1図 物理式より求まる実効増倍率

3.2 類似解析結果との整合性

解析結果の工学的妥当性を確認するため、類似解析における実効増倍率評価結果との比較を行い、条件の差異に対して実効増倍率の増減の方向が適切であることを確認する。

3.2.1 評価条件および結果

基本ケースと、選定した類似解析条件における燃料・水分条件、および各条件での実効増倍率評価結果を表2に示す。類似解析の条件としては、既許可において当該条件を用いた解析の妥当性が確認済みであるものを用いた。

第2表の解析結果を元に各ケースの水分条件を空間平均水密度[※]に換算して、実効増倍率をプロットしたものを第2-2図に示す。

※空間平均水密度：「液膜+燃料集合体外気相部水密度」という非均質な水分状態について、体系に保持される水分量を保存した状態で一様水密度へ換算したもの。

第2表 基本ケース、類似解析の解析条件および結果

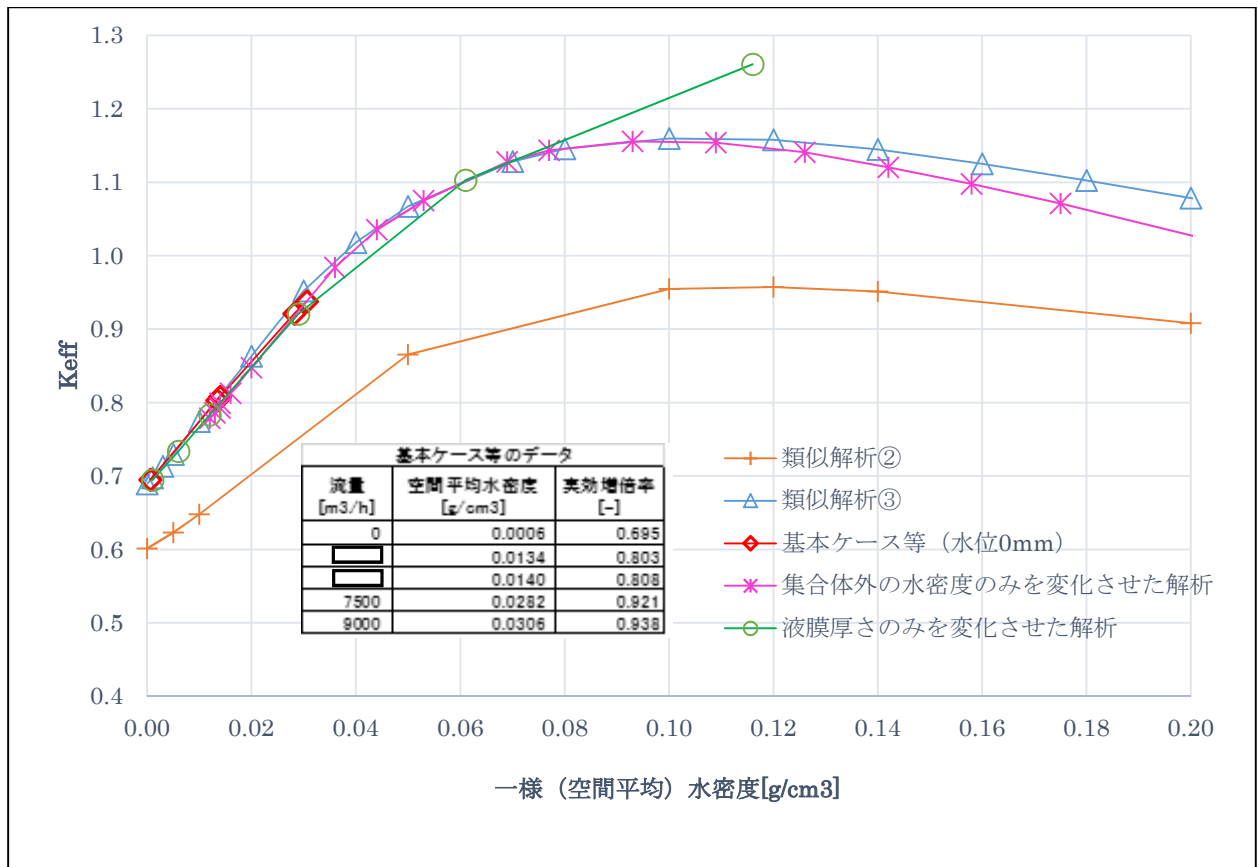
	基本ケース条件	類似解析① (既許認可での16条 および54条1項に係 る評価)	類似解析② (既許認可での54条2 項に係る評価) ※1	類似解析③※1
燃料配置	ウラン新燃料 敷き詰め	ウラン新燃料 敷き詰め	3領域管理 (0、20、50GWd/t)	ウラン新燃料 敷き詰め
ウラン濃縮度	□ wt%	□ wt%	□ wt%	□ wt%
液膜厚さ	□ mm	—	—	—
燃料集合体内 気相部水密度	0.0006 g/cm ³	1.0 g/cm ³	0~1.0 g/cm ³ で一様変化	0~1.0 g/cm ³ で一様変化
燃料集合体外 気相部水密度	□			
液相部条件	純水 (水密度 1.0g/cm ³)	—	—	—
変動 パラメータ	水位	なし	水密度	水密度
実効増倍率※2,3 評価結果	冠水 : 0.947 水位 0mm : 0.803 (水位 0mm での空間平均水 密度 : 0.0134g/cm ³)	0.953	(水密度 : 実効増倍率) 1.0g/cm ³ : 0.937 約 0.1g/cm ³ : 0.958 0.005g/cm ³ : 0.623 0.002g/cm ³ : 0.610 0g/cm ³ : 0.601	(水密度 : 実効増倍率) 1.0g/cm ³ : 0.947 約 0.1g/cm ³ : 1.160 0.03 g/cm ³ : 0.953 0.02 g/cm ³ : 0.864 0.01 g/cm ³ : 0.775 0.005g/cm ³ : 0.730 0.002g/cm ³ : 0.706 0g/cm ³ : 0.690

※1 一部の水密度における実効増倍率は内外挿により求める。

※2 不確定性を考慮しない値

※3 小数第4位を切り上げた値

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 2-2 図 基本ケース等および類似解析の評価結果（空間平均水密度ベース）

3. 2. 2 妥当性確認

3. 2. 2. 1 燃料冠水時の実効増倍率

解析結果は、類似解析②<基本ケース<類似解析①となっている。

これは、この 3つの水分状態が冠水状態で共通しており、実効増倍率の差異は燃料条件に依存すること、燃料条件（燃焼度、濃縮度）は、類似解析②<基本ケース<類似解析①の順に厳しくなることから妥当である。

3. 2. 2. 2 水位 0mm での実効増倍率

解析結果は、類似解析③（水密度 0.01g/cm³）<基本ケース<類似解析③（水密度 0.02g/cm³）となっている。

これは、空間平均水密度が 0g/cm³から約 0.1g/cm³の範囲においては、空間平均水密度が大きくなるほど実効増倍率が高くなること、および基本ケース（水位 0mm）の空間平均水密度（0.0134g/cm³）が、0.01 g/cm³と 0.02 g/cm³の間にあることから妥当である。

燃料条件が同じ場合、実効増倍率は基本的に空間水密度に支配されることから、第 2-2 図に示すように、燃料条件が等しい基本ケース等と類似解析③の解析結果が空間水密度に対してほぼ同等の傾向を示していることは妥当である。なお、基本ケース等と類似解析③

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。

の解析結果が完全に一致しない理由は、同じ空間水密度であっても水の存在形態に違いがあること（全体一様 or 液膜考慮）や、基本ケース等では海水由来の流量中に含まれる塩素の中性子吸収効果を考慮していることによるものと考えられる。

4. 解析結果に対する考察

4.1 中性子挙動との関連性

既許可と今回の実効増倍率挙動の違いについて、中性子挙動と関連付けて説明する。

(1) 既許可の実効増倍率挙動

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3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。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4図に示す。

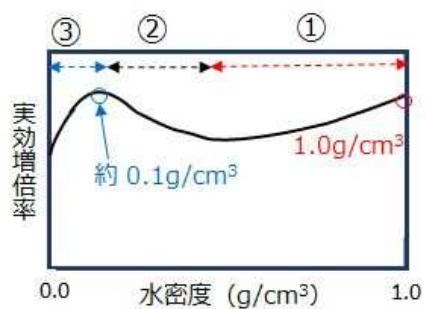
- ①高水密度領域においては、燃料集合体を飛び出した中性子はラック間の水に吸収されやすいため、単一集合体内の減速材の影響が支配的となることから、水密度低下にともない実効増倍率は減少する。
- ②中水密度領域においては、隣接燃料へ到達し反応する中性子数が増えるため、水密度低下に伴い実効増倍率は増加する。
- ③低水密度領域においては、減速材密度が低すぎることから、核分裂数が減少する効果が大きくなるため、水密度低下に伴い実効増倍率は減少する。

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。

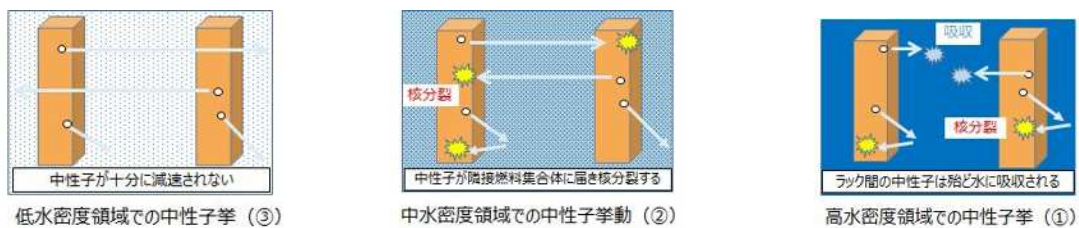
(2) 今回評価の実効増倍率挙動

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5図のとおり水位の低下に伴い単調減少している。

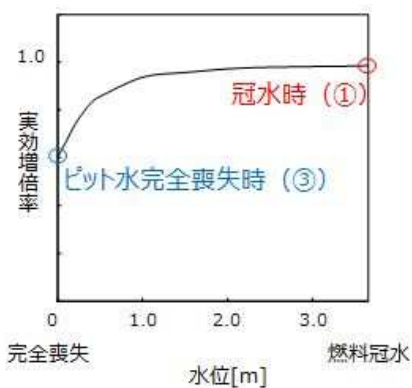
水位が変化した場合、第6図のように各相の領域の大きさは変わるものの、各相の水分条件は固定である。具体的には、液相部は第3図の①高水密度領域の状態に等しく、気相部は今回の解析条件の水分状態であれば③低水密度領域の状態に等しく、その状態を保ったまま（＝背景色の青色の濃さが変化せずに）、液相と気相の体積が変化していく。すなわち、②中水密度領域のような核反応が起りやすい状態が発現しないことから、第4図の実効増倍率はピークを持たず、水位の低下に伴い単調に減少している。



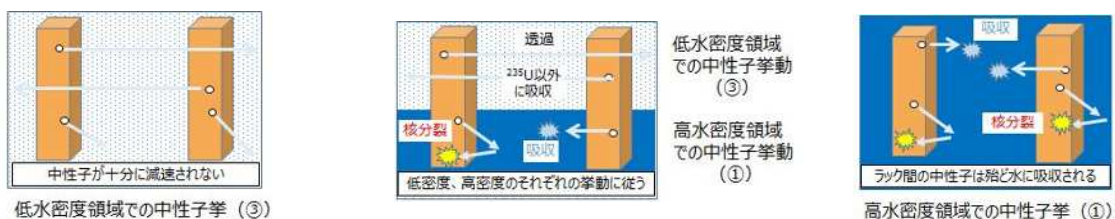
第3図 水密度一様変化時の実効増倍率挙動(イメージ)



第4図 水密度一様変化時の中性子挙動



第5図 水位変化時の実効増倍率挙動 (イメージ)



第6図 水位変化時の中性子挙動

4.2 中性子スペクトルや EALF との関連性

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、MVP コードを用いて、第 7 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 8-1 図、第 8-2 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では、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。

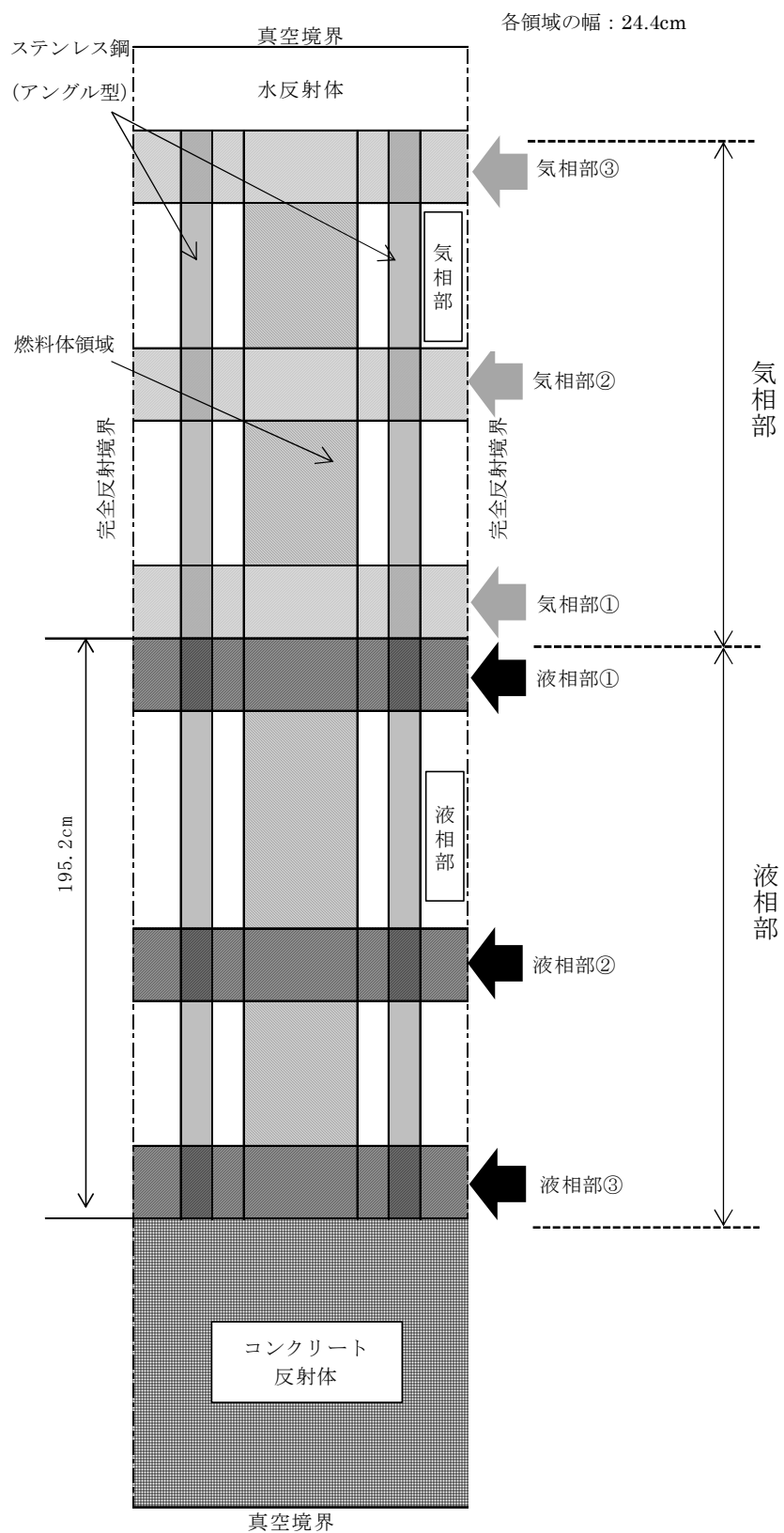
これらの結果から、気相部・液相部それぞれでスペクトル特性が異なることを確認でき、またスペクトル特性は評価体系より想定できる定性的な特性と同様の傾向を示しており、気相部、液相部それぞれが適切に評価されていると判断できる。

(2) EALF との関連性

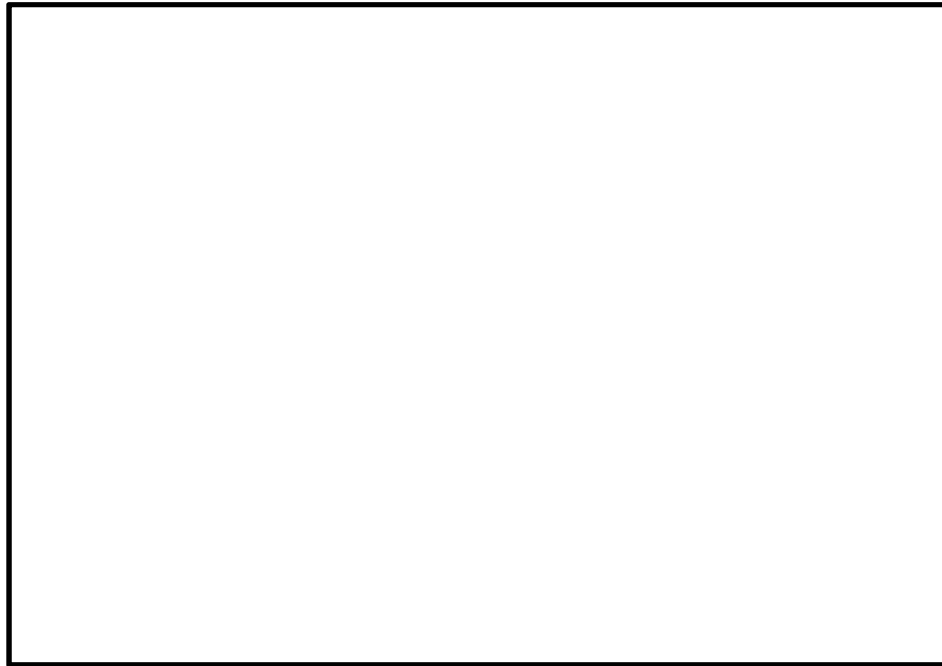
第 9-1 図および第 9-2 図は、解析条件表の全ケースにおける各水位での EALF

(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う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。

また各ケース解析結果において実効増倍率が低下する水位と、EALF が低下しだす水位が約 1000mm で整合しており、当該水位付近で体系を支配する相が液相から気相に遷移することが分かる。



第7図 境界における中性子スペクトルの評価体系 (軸方向)

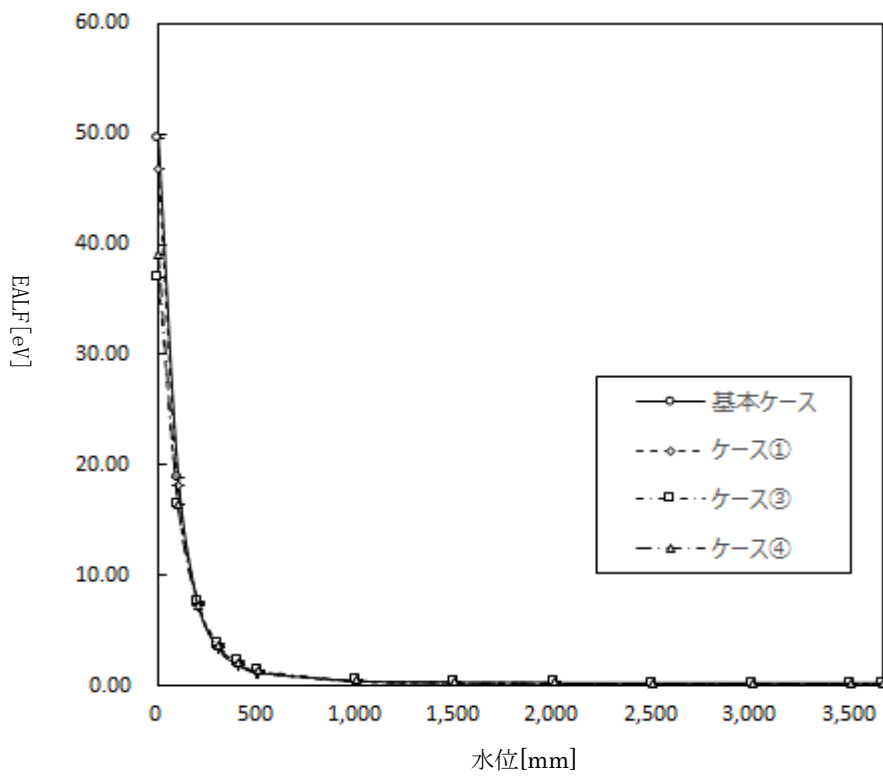


第 8-1 図 気相部の中性子スペクトル評価結果

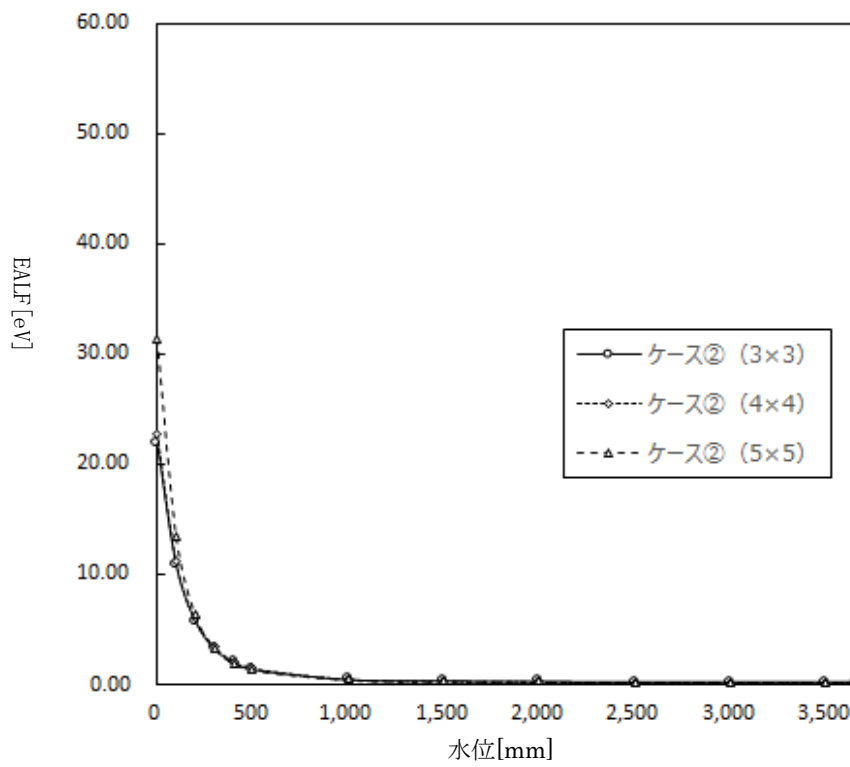


第 8-2 図 液相部における中性子スペクトル評価結果

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 9-1 図 基本ケース、感度解析ケース①、③、④ 各水位での EALF



第 9-2 図 感度解析ケース② 各水位での EALF

4.3 感度解析ケース評価結果に対する考察

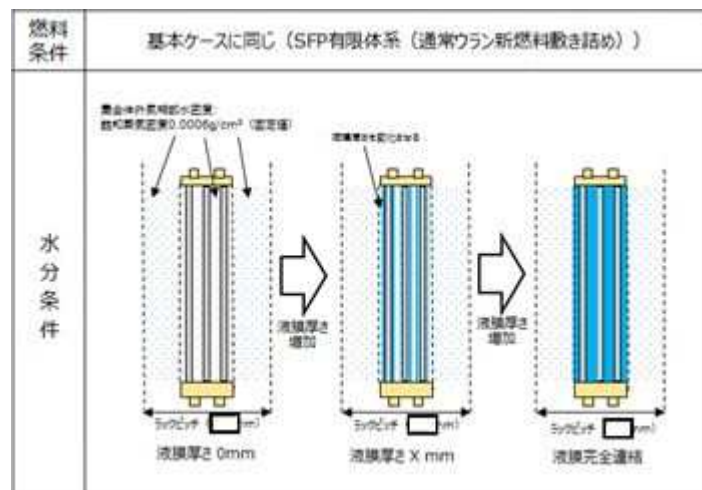
基本ケースの実効増倍率よりも大きい結果となった、感度解析ケース①～④の実効増倍率評価結果の妥当性について、燃料集合体の内側の水密度のみ、もしくは外側の水密度のみを変化させた場合の実効増倍率への影響を踏まえ説明する。

4.3.1 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

感度解析ケース評価結果の妥当性確認に当たり、以下に示す燃料集合体の内側の水密度のみ、もしくは外側の水密度のみを変化させた場合の実効増倍率への影響を確認するパラメータスタディを実施した。

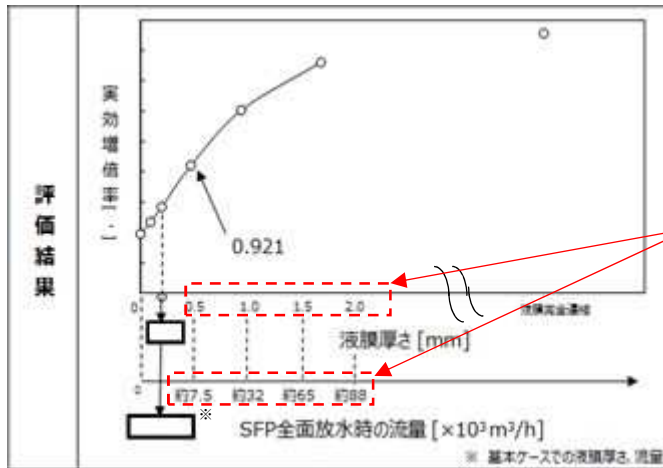
(1) 燃料集合体の内側の水密度のみを変化させた場合

燃料集合体内の中の水状態、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 10 図に、解析結果を第 11 図に示す。第 11 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る。



第 10 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

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。



これらの液膜厚さ条件における空間平均水密度を求め、それと等しい空間平均水密度を発生させる流量（その流量により液膜と液滴も発生する）を第 2X 軸に記載した。なお、SFP 全面放水時の流量と液膜厚さの評価式（包絡式）を用いて換算している。

<例：厚さ 0.5mm 液膜のみ形成時の空間平均水密度>
空間平均水密度 ρ は以下計算により、求められる。

$$\rho = S m / S \times 1 [g/cm^3]$$

$S m$: ラックピッチあたりの液膜占有面積

S : ラックピッチあたりの間隙面積

$\rho = 0.0284 [g/cm^3]$ \approx 参考 3 に示す流量 $7500 m^3/h$ での空間平均水密度 ($0.0282 g/cm^3$)

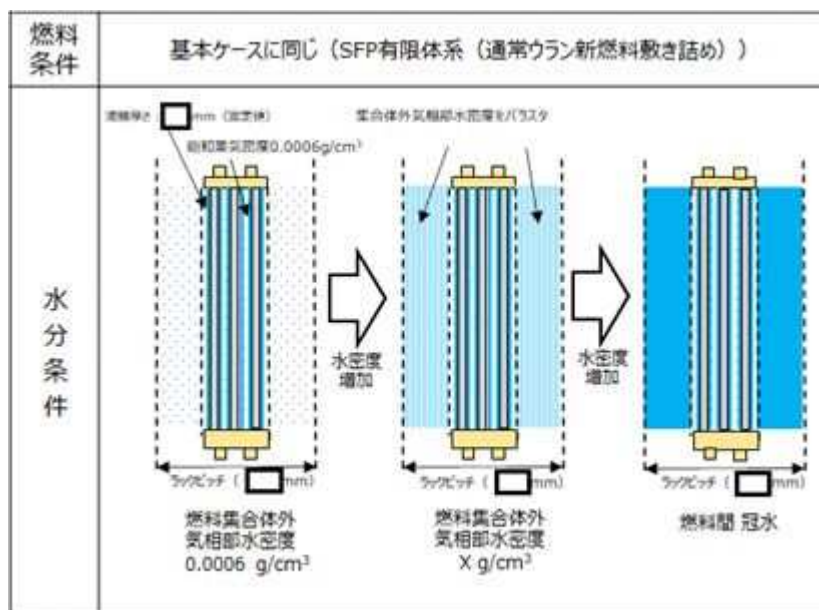
(説明) 本ページの感度解析が集合体間水密度を無視しているのに対し、参考 3 の評価は、流量の一部が集合体間水密度の増加に消費されるので、同じ流量 ($7500 m^3/h$) であっても、参考 3 のほうが液膜厚さは薄くなっている。

第 11 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

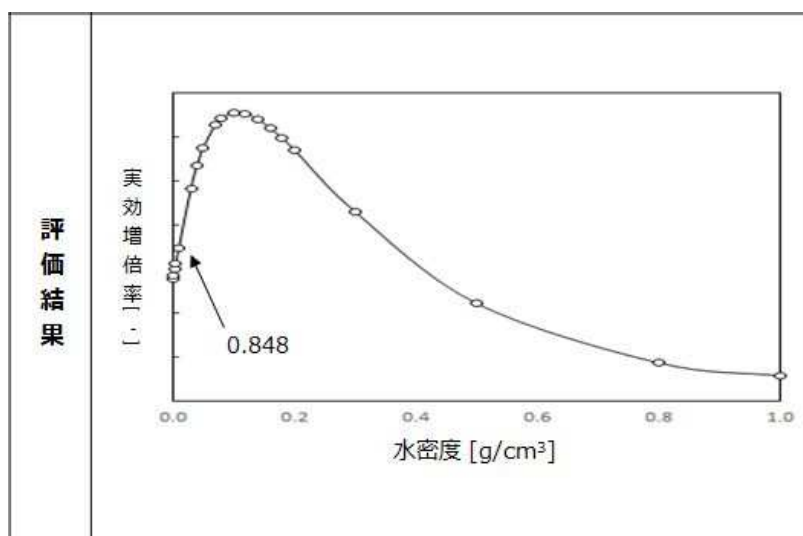
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(2) 燃料集合体の外側の水密度のみを変化させた場合

燃料集合体の外側の水分状態、すなわち燃料集合体外気相部水密度のみを変化させた解析を実施した。解析条件を第12図に、解析結果を第13図に示す。第13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 0g/cm^3 から約 0.1g/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 1g/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。本パラメータスタディでは、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 0.1g/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したものである。



第12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13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。

4.3.2 燃料集合体の内外の水分状態変化を踏まえた考察

第 11 図および第 13 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 0.1g/cm³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 0.1g/cm³の範囲にあるため、ケース①、③、④の条件は基本ケースより実効増倍率が大きくなる条件となっている。実際のケース①、③、④の実効増倍率評価結果は基本ケースよりも大きくなっていることから、解析結果は妥当であると判断できる。なおケース①、③、④の実効増倍率の順位は、ケース③ > ケース④ > ケース①となっており、この順位は第 1 表に示すように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順位であることと整合している。

(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 0.1g/cm³) が変動する可能性はあるものの、第 12 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 0.1g/cm³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) は、燃料棒周りに非常に厚い液膜が形成されるケースで、低水位時の実効増倍率が全ケース中で一番大きくなった。当該ケースは、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 3 表に、感度解析結果を第 14 図～第 16 図に示す。第 14 図および第 15 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 16 図より燃料集合体の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。

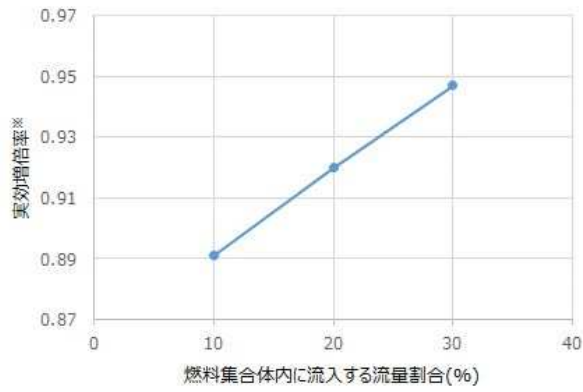
よってケース②の水分条件は、基本ケースに比べて液膜厚さや燃料集合体外気

相部水密度が大きく、燃料集合体外気相部水密度が0～約0.1g/cm³の範囲にあるため、ケース②の条件は基本ケースより大きくなる条件となっていると言える。実際のケース②の評価結果での実効増倍率評価結果は基本ケースよりも大きくなっていることから、ケース②の解析結果は妥当であると判断できる。

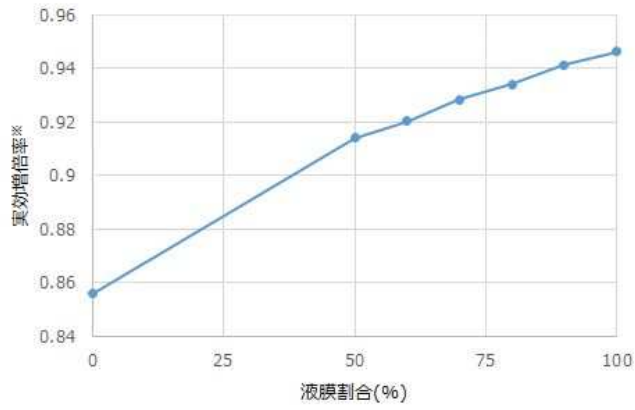
第3表 局所流入時において各位置の水分条件を変化させた感度解析 (チェッカーボード配置)

評価条件		解析条件表 ケース②	参照解析				
			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 "集合体外気相水密度" を変化させた感度解析	
燃料条件	燃料配置	新燃料のみで満杯	新燃料と24GWd/燃料の 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 (m ³ /h)	□	□	←	←	←	
	SFPへの流入範囲、 流量分布	流入範囲	局所 (4×4)	局所(5×5)	←	←	←
		流量分布	一様	一様	←	←	←
	燃料集合体内への流入割合 (%)	23	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	←	100, 50, 40, 30, 20, 10, 0	100
		液膜厚さ評価式	包絡式	包絡式	←	←	←
	気相水密度 (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	←	0, 50, 60, 70, 80, 90, 100	0
		燃料集合体内 (g/cm ³)	飽和蒸気密度 (0.0006)	飽和蒸気密度 (0.0006)	←	←	←
		燃料集合体外	液滴径1.5mmを 用いた水密度	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
	海水中の塩分濃度(%)	流入範囲外 (g/cm ³)	飽和蒸気密度 (0.0006)	飽和蒸気密度 (0.0006)	←	←	←
海水中の塩分濃度(%)		3.3	3.0	←	←	←	
解析結果		冠水時：0.947 水位0cm時：0.874	水位0cm時：0.945 冠水時：0.930	第14図参照	第15図参照	第16図参照	

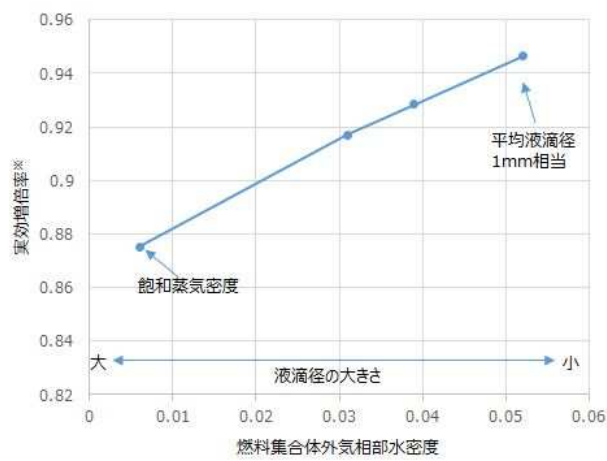
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 14 図 流量割合と実効増倍率の関係



第 15 図 液膜割合と実効増倍率の関係



第 16 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

4.4 解析に適用した品証プロセスの確認

今回の未臨界性評価に係る解析の実施に当たっては、「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」に則った品質管理を実施している。本ガイドライン規定項目のうち、解析コードの取り扱いや解析結果の確認に関する規定項目に係る当社の実施事項を第4表に示す。本ガイドラインでは、解析結果の検証を含め解析業務全般に対する審査を実施することが要求されており、本品証プロセスを経て得られた今回の解析結果は適切なものである。

第4表 「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」の適用確認 (1/2)

(原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン)		項 目 規定内容	当社の実施事項	確認結果 (○：実施 ×：未実施)
番号	項目			
(i)	計算機プログラムの検証 ^{*1}	<p>【発注者（事業者）】 (1) 発注者は、受注者によって使用する計算機プログラムが適正であることが検証され、その検証方法及び登録方法を明確にして管理されていることを確認すること。</p> <p>【受注者（解析者）】 (1) 受注者は使用する計算機プログラムが適正であることを検証するための検証方法や、適切に管理するための登録方法（登録リストによる管理方法等）を明確にすること。 (2) 受注者は(1)の方法に基づき、計算機プログラムが適正なものであることを事前に検証し、受注者の組織が定めた登録リストにて管理すること。登録管理を行わない計算機プログラムを使用する場合には、その都度、検証を行うこと。 (3) その登録リストには、検証された計算機プログラム名称及びバージョンを明記すること。また、計算機プログラム名称が同じであってもバージョンが相違する計算機プログラムを使用する場合は、改めて検証を行うこと。</p>	<p>SCALE6.0 が適正なものであることが以下の通り事前に検証されていることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コードに付属のサンプル問題を実行し、解析解があらかじめ準備された参照解を再現する。 ・SCALE6.0の運用環境について、開発機関（ORNL）から提示された要件を満足している。 	○
(ii)	入力根拠の明確化	<p>【発注者（事業者）】 (1) 発注者は、受注者が解析ごとの入力根拠を明確にしていることを確認すること。</p> <p>【受注者（解析者）】 (1) 受注者は、業務計画書等に基づき解析ごとの入力根拠を明確にした文書を作成すること。</p>	<p>今回解析に係る業務計画書に基づき作成する、入力条件を取り纏めた図書（入力根拠書）において、以下の通り入力根拠が明確になっていることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・液膜厚さ、気相部水密度等の水分条件が当社指定の条件通りであること。 ・燃料仕様やラック仕様の詳細（燃料材の径、被覆管内外厚さ、ラック内のり等）について、設備図書に基づき設定されていること、または既許認可での設定条件と同じであること。 	○
(iii)	入力結果の確認	<p>【発注者（事業者）】 (1) 発注者は、受注者が計算機プログラムへの入力が正確に実施されたことを確認していることを確認すること。</p> <p>【受注者（解析者）】 (1) 受注者は、計算機プログラムへの入力が正確に実施されたことの確認を行うこと。</p>	<p>エコーバック^{*2}されたデータにより、入力根拠書で定めた通り適切に入力がなされたことをチェックしていることを確認した。</p>	○

第4表 「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」の適用確認 (2/2)

項目		項目	規定内容	当社の実施事項	確認結果 (○：実施 ×：未実施)
(vi)	解析結果の審査 ^{※1} 、検証	【発注者（事業者）】 (1) 発注者は、受注者が解析結果の検証項目と内容を明確にし、検証を含む審査状況を確認すること。 【受注者（解析者）】 (1) 受注者は、あらかじめ策定した業務計画書に従って解析結果の検証を含む審査を行うこと。また、検証の結果を客観的な証拠によって示せるようにすること。 (2) 受注者は、審査する者の活動内容を明確にして審査を行うこと。	<p>解析結果に問題が無いことを、原解析者以外の者が検証することと しており、使用するコードが解析対象に対し適正なものであった か、また以下の例に示す方法で解析結果が受容できるものである か、等の検証項目が明確にされていることを確認した。 a. 類似解析結果との比較（ヒストリー数：□万） b. 物理的又は工学的整合性の確認</p> <p>今回の未臨界性評価に係る解析において検証者は、 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> なお <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> 等を確認している。</p> <p>これら検証を含む審査が適切に行われていることを確認している。</p>	○	
(v)	解析業務の変更管理	【発注者（事業者）】 (1) 発注者は、解析結果に影響がある変更が発生した場合、受注者に対して変更内容を確認し伝え、解析業務の変更管理を行わせること。 (2) 発注者は、受注者が解析業務における変更を管理していることを確認すること。 【受注者（解析者）】 (1) 受注者は、解析業務に変更が生じた場合は変更内容を文書化し、解析業務の各段階においてその変更内容を反映すること。	<p>解析条件の変更の都度、変更内容を受注者へ伝えていく。 受注者にて変更管理が行なわれていることを確認している。</p>	○	

※1 本ガイドラインにおいては、計算機プログラム並びに解析結果の適切性を確認する行為を指す。

※2 計算機が読み込んだ入力データを出力として書き出したもの。

※3 本ガイドラインにおいては、検証を含め解析業務全般を広い視点で確認する行為を指す。

5. まとめ

今回解析結果について、以下に示す観点により、その妥当性を確認した。

- ・一般的な物理式により求まる水位変化時の実効増倍率挙動と、基本ケースにおける実効増倍率の挙動が一致している。
- ・既許認可において妥当性が確認されている類似解析結果と基本ケース解析結果を比較した結果、条件の差異に対して実効増倍率の増減の方向は適切であった。

また解析結果について以下の通り考察し、実効増倍率挙動と中性子挙動との関連性等を確認した。

- ・既許認可と今回の実効増倍率評価結果は、変動パラメータ変化に伴う中性子挙動に基づく実効増倍率挙動と整合している。
- ・各相における中性子スペクトル分析により、各相で中性子挙動が異なることを確認した。また各水位における EALF の傾向から、基本ケースで実効増倍率が低下し始める水位と、EALF が上昇しだす水位が一致しており、当該水位付近で体系を支配する相が液相から気相に遷移することを確認した。
- ・感度解析ケース①～④の水分状態は、基本ケース条件に対して実効増倍率が大きくなるような水分状態が設定されており、各感度解析における実際の実効増倍率解析結果も、基本ケースよりも大きくなった。
- ・今回の未臨界性評価に係る解析の実施に当たっては、「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」に則った品質管理を実施している。本ガイドラインでは、解析結果の検証を含め解析業務全般に対する審査を実施することが要求されており、本品証プロセスを経て得られた今回の解析結果は妥当なものである。

以上

(参考 1) JAERI-1254 掲載値からの核定数算出について

1. はじめに

基本ケースの解析結果については、一般的な物理式により求まる液相部の実効増倍率の傾向と整合していることを確認している。物理式による実効増倍率の算出に使用した核定数は、JAERI-1254 (以下、文献という。) で示される実験データより算出した。

ここでは、文献の実験データを用いた核定数の算出過程を示す。

2. 算出過程

- ・ TABLE2 に掲載のある実験結果のうち、高浜 1,2 号炉の 15×15 型燃料集合体のピンセル領域の H/U (=4.8) に近い 1.50U 格子を今回の数値算出対象とした。

TABLE 2 Name of lattice

Lattice name	H/U or H/Pu	Lattice pitch (cm)
1. 50U	4.33	1.849
1. 83U	5.28	1.956
2. 48U	7.16	2.150
3. 00U	8.65	2.293
2. 42P U	402	1.825
2. 98P U	494	1.956
4. 24P U	703	2.225
5. 55P U	921	2.474

- ・ TABLE10 に、実験結果から内挿などの手順を踏んで算出した臨界バックリングの値が掲載されている。1.50U 格子の場合 0.00833cm⁻²である。

TABLE 10 Critical bucklings, B_c²

Lattice name	B _c ² (×10 ⁻² cm ⁻²)	Note
1. 50U	0.833±0.010	pattern=28
1. 83U	0.943±0.013	=24
2. 48U	0.983±0.008	=20
3. 00U	0.952±0.014	=18
2. 42P U	0.808±0.004	on 1972-4-1
2. 98P U	0.828±0.004	
4. 24P U	0.779±0.003	
5. 55P U	0.651±0.002	

- ・ ここで、実効増倍率は以下の式が成り立ち、かつ、TABLE10 は臨界バックリングの値であるので k_{eff} = 1 が成り立つ。

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

したがって、下式が得られる。

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

- ・文献中 TABLE7 には M^2/k_∞ の値が掲載されている。

TABLE 7 Ratios between migration area, M^2 , and infinite multiplication factor, k_∞

Lattice name	M^2/k_∞ (cm ²)
1.50U	28.7±0.4
1.83U	28.8±0.3
2.48U	28.7±0.4
3.00U	27.9±0.2
2.42P U	28.9±1.1
2.98P U	28.8±1.3
4.24P U	30.2±0.9
5.55P U	32.0±0.5

この $M^2/k_\infty = A$ とおくと、 $k_\infty = M^2/A$ となるので上式に代入すると

$$\frac{M^2}{A} = 1 + M^2 B^2$$

となり、整理すると下式が得られる。

$$M^2 = \frac{A}{1 - A \times B^2}$$

したがって、 A の値を TABLE7 から、 B^2 の値を TABLE10 から適用すると、1.50U 格子の移動面積 M^2 は以下のように求められる。

$$M^2 = \frac{28.7}{1 - 28.7 \times 0.00833} \approx 37.7$$

- ・一方、反射体節約の数値が TABLE6 により与えられており、これらの値は軸方向、水平方向における両側の値である、と説明されている。外挿距離が反射体節約の片側、すなわち TABLE6 記載値の半分に等しいとして、1.50U 格子の外挿距離は、軸方向で $\delta_V = 12.6/2 = 6.3$ 、水平方向で $\delta_H = 17.0/2 = 8.5$ となる。

TABLE 6 Reflector savings

Lattice name	Vertical (cm)	Horizontal (cm)
1.50U	12.6±0.3	17.0±0.8
1.83U	12.2±0.3	13.9±0.8
2.48U	11.3±0.2	13.7±0.5
3.00U	11.1±0.5	14.0±0.8
2.42P U	12.5±0.2	14.6±0.3
2.98P U	12.0±0.2	14.1±0.3
4.24P U	11.6±0.2	13.4±0.2
5.55P U	11.3±0.2	13.1±0.2

以上

(参考 2) 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 0mm 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実性として余裕を見込んで 0.02 を仮定して加算した 0.967 を、未臨界性の判定基準 0.98 と比較する。

以 上

(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、当該条件をもとに算出した計算コードへのインプット条件を表2に、結果を図1に示す。7500m³/hという過大な流量であっても、今回の基本ケースおよび感度解析ケース①～④と同じく、実効増倍率は水位低下に伴い単調に減少する挙動を示しており、未臨界性を満足する結果が得られた。なお本流量は、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。

※ 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		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	包格式	←	
	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(%)	←		

表2 計算コードへのインプット条件

		基本ケース	未臨界性上の 頑健性確認解析
水分条件	液膜厚さ [mm] ^{※1}		0.38
	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]	0.0020	0.0083
	(空間平均水密度) ^{※2}	(約 0.0134g/cm ³)	(約 0.0282g/cm ³)

※1 液膜厚さの算出方法

「流量と流入範囲・流量分布」*燃料集合体内への流入割合*液膜となる流量割合*液膜評価式
により算出する。(2022年2月7日審査会合資料2-1右肩P8参照)

※2 空間平均水密度 ρ の算出方法

$$\rho = \rho_x + \rho_y + \text{飽和蒸気密度}$$

ρ_x : 燃料集合体外気相部水密度による空間平均水密度への寄与分

ρ_y : 液膜による空間平均水密度への寄与分

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。

<未臨界性上の頑健性確認解析（流量 7500m³/h）での空間平均水密度の計算例>

$$\rho_x \equiv (\text{燃料集合体外気相部水密度} - \text{飽和蒸気密度}) \times \frac{(\text{ラックピッチ面積} - \text{燃料集合体外寸面積})}{S} = 0.00630[\text{g/cm}^3]$$

$$\rho_y = S_m / S \times 1[\text{g/cm}^3] = 0.0213[\text{g/cm}^3]$$

(S_m : ラックピッチあたりの液膜占有面積、 S : ラックピッチあたりの間隙面積)

$$\rho = 0.00630 + 0.0213 + 0.0006 = 0.0282[\text{g/cm}^3]$$

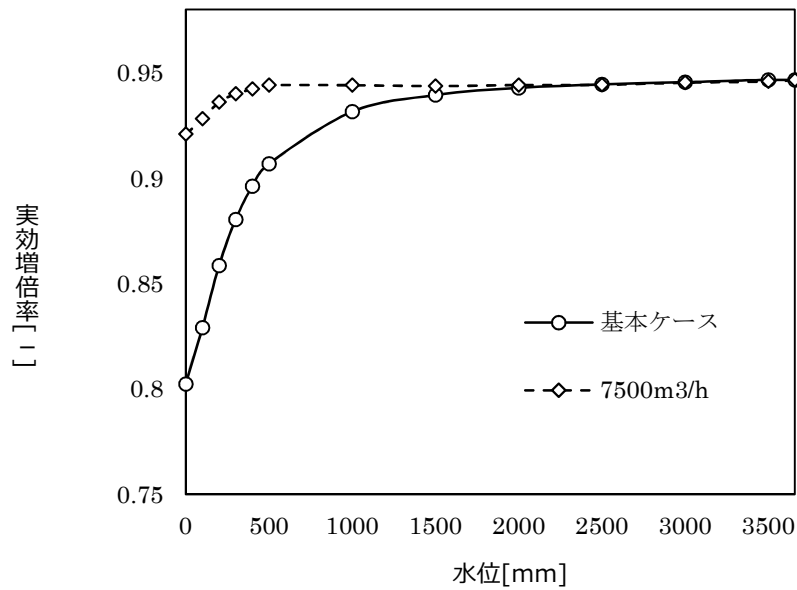


図1 流量パラメータスタディ結果