

＜実効増倍率挙動や中性子エネルギー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

今回未臨界性評価においては最適評価手法による評価、すなわち最確状態を踏まえた基本ケースおよび不確かさ影響を確認する感度解析ケースを評価する。本資料では、各ケースの実効増倍率の挙動や中性子エネルギー特性の観点から、解析結果の妥当性を説明する。

2. 各ケースの実効増倍率評価結果

解析条件表に記載の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、各ケースの実効増倍率評価結果を第1-1図および第1-2図に示す。

今回実施した全てのケースで、気相部よりも液相部となっているほうが実効増倍率は厳しくなる条件であり、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。

水位 0mm における実効増倍率が最大となったのは、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。

感度解析ケース③ > 感度解析ケース④ > 感度解析ケース① > 基本ケース

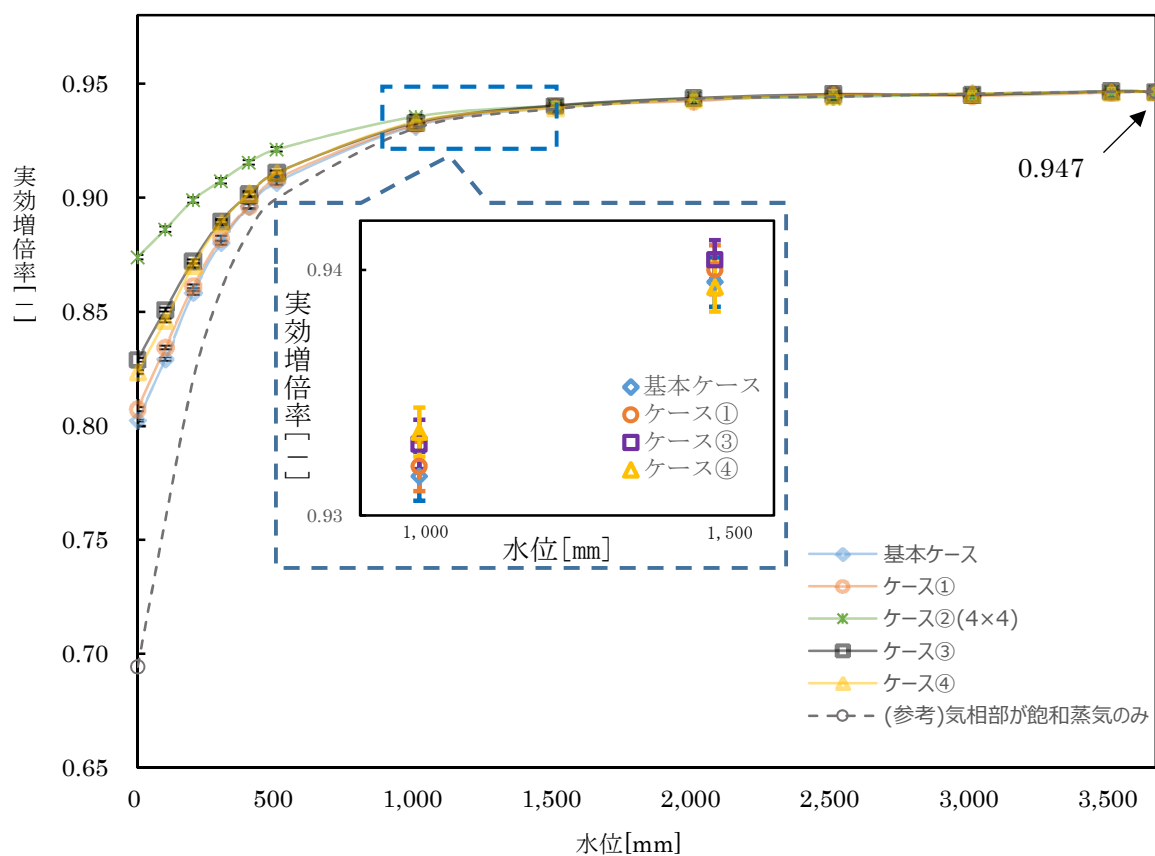
この順位は、低水密度である気相部において水分が多くなる順位、すなわち中性子の減速がより進みやすいケースの順位と整合している。なお水位 1000mm 以上においては、一部上述の順位が変わる解析点が存在するが、全ケースでモンテカルロ計算上の標準偏差 $\pm 2\sigma$ 分のエラーバー同士が重なっていることから、当該順位の変更に炉物理的な違いはなく、これら4ケースにおける水位 1000mm 以上での実効増倍率は同等であると言える。

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

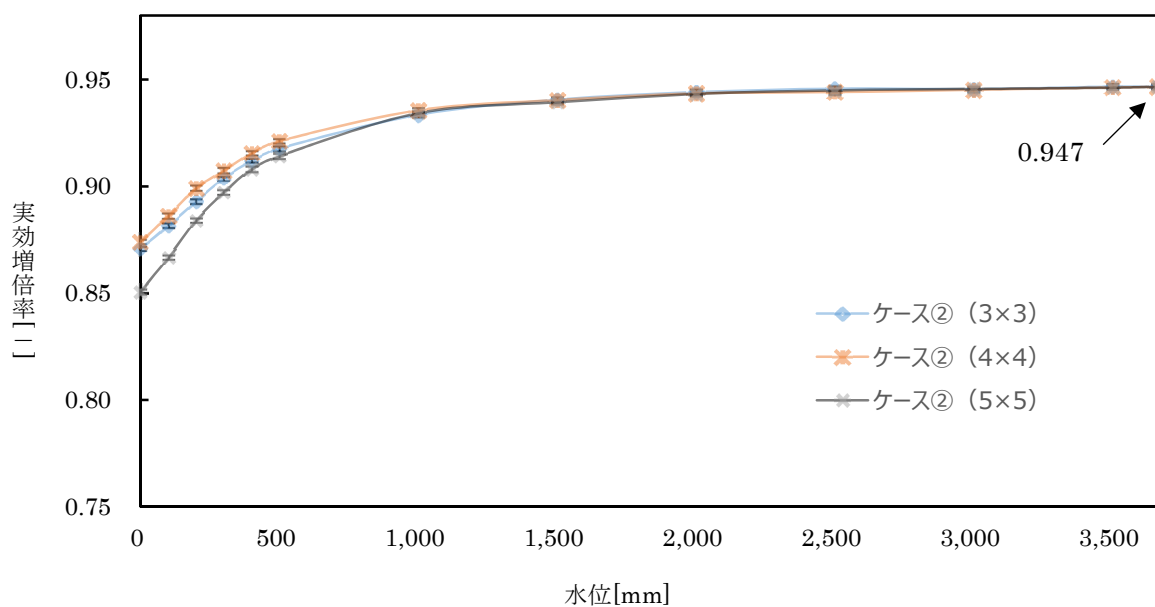
		基本ケース	ケース① (1手順あたりのポンプ台数による感度を確認する解析)	ケース② (「流入範囲を狭める風の影響」による感度を確認する解析)	ケース③ (「斜め方向に液滴を落下させ燃料集合体内への流入割合に影響を与える風の影響」による感度を確認する解析)	ケース④ (スプレイ試験における測定箇所毎の結果の差異による感度を確認する解析)
燃料条件	燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP 有限体系)				
	燃料種類	15×15 型 通常ウラン燃料				
水分条件	液膜厚さ [mm]					
	燃料集合体内 気相部水密度 [g/cm ³]	0.0006 (飽和蒸気密度)				
	燃料集合体外*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

3.1 既許可条件での実効増倍率挙動との違いを踏まえた妥当性確認

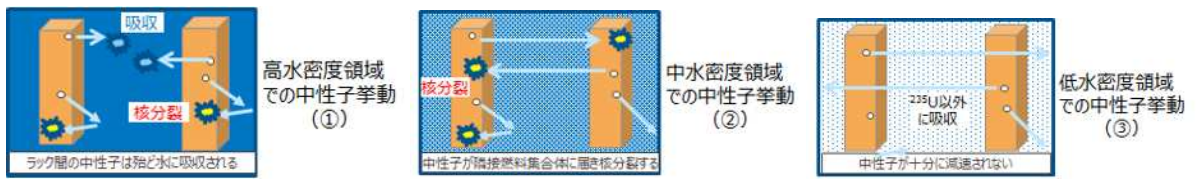
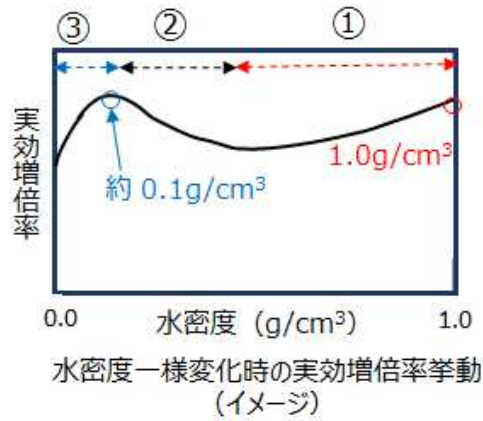
既許可の、水密度を一様に変化させた場合における各水密度状態での実効増倍率挙動は第2図に示すとおり、水密度約 0.1g/cm^3 でピークを持つ。この挙動は、水密度の変化により体系内の中性子挙動が変化することが大きな要因であると考えられる。高浜1, 2号炉のSFP体系（アングル型ステンレス鋼製ラック）において水密度を変化させた場合における各水密度状態での中性子挙動イメージを第2図に示す。

- 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るため、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、中性子が隣接燃料へ到達し、隣接燃料で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。

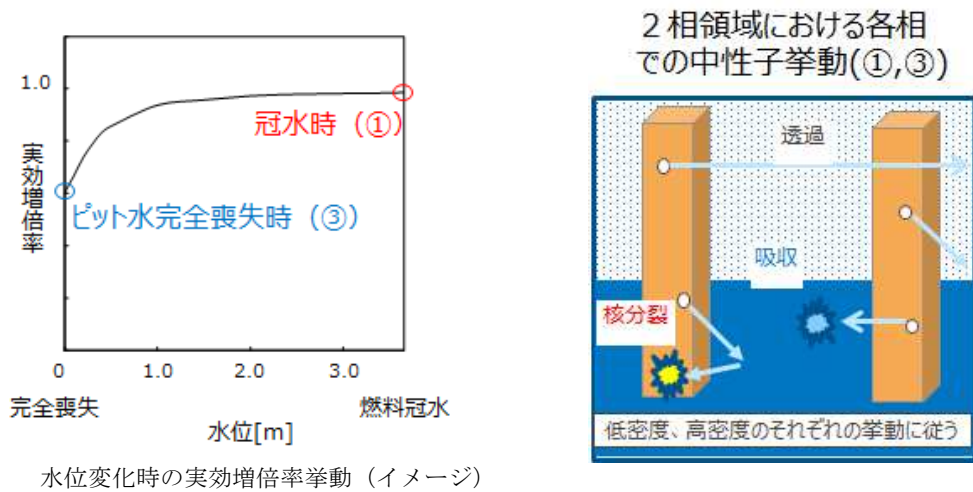
上記のように、水密度が変化するとともに中性子挙動の大きな変化が生じるため、実効増倍率は減速・吸収の効果に応じて変化し、約 0.1g/cm^3 でピークを持つ。

一方で今回の、体系を液相部・気相部に分け水位を変化させる評価における実効増倍率は、既許可のようなピークを持たず水位の低下に伴い単調減少している。水位を変化させる評価における中性子挙動イメージを第3図に示す。

水位が変化した場合、各相の領域の大きさは変わるものの水分条件は固定であるため、液相部、気相部それぞれで第3図の①高水密度領域、③低水密度領域のような挙動を示すことから、②中水密度領域のような、体系全体として核反応が起こりやすい状態にはならない。よって、水位が変化しても各相の中性子挙動は変化しないことから、実効増倍率はピークを持たず、今回の解析条件表に示す流量等の条件のもとで形成される水分状態では、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中性子挙動



第3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

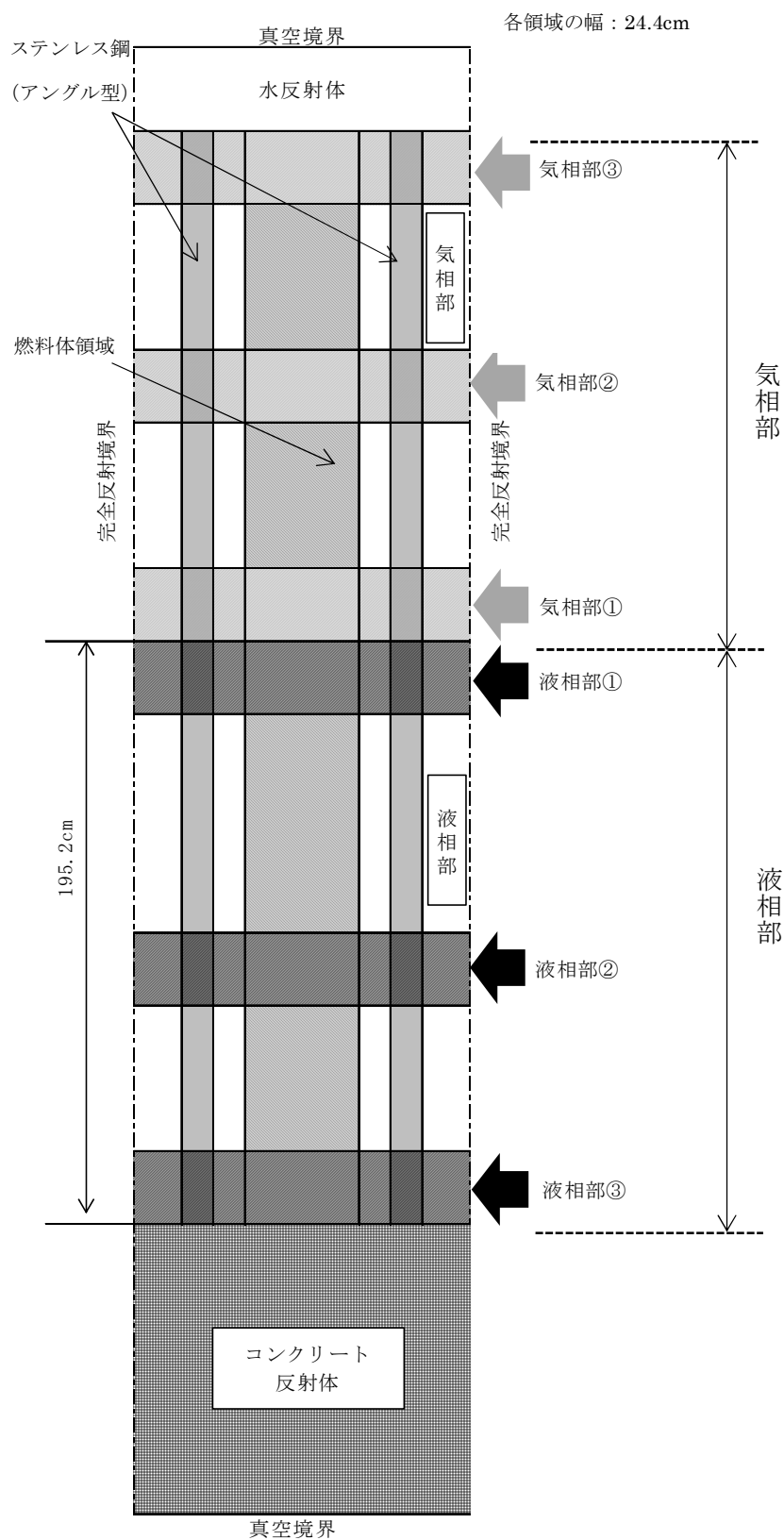
3.1 に示す通り、今回評価での実効増倍率挙動は、各相の中性子挙動が異なることが大きな要因であると考えられる。また、各相の中性子スペクトルは、液相部では水による中性子減速効果によりスペクトルが柔らかく（熱中中性子が相対的に多い）なり、液相中の各位置においてもスペクトル形状に大きな差はないと予想される。また、気相部では水密度が低いことから、スペクトルは硬く（高速中中性子が相対的に多い）なり、液相部及び上部反射体との境界面では境界部の水による減速効果により、スペクトルがやや柔らかくなると考えられる。そこで各相の中性子スペクトルを分析し、その特性が第3図に示す中性子挙動イメージ、および上述した各相のスペクトル傾向と合致するかを確認した。確認評価は、MVPコードを用いて、第4図に示す通常ウラン新燃料のみを貯蔵した無限配列体系を対象とし、また各相の位置毎のスペクトル特性を確認するため、液相領域・気相領域の上部、中央、下部それぞれの中性子スペクトルを比較した。

評価結果を第5-1図、第5-2図に示す。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、熱中中性子が相対的に多い状態であり、また各位置においてもスペクトル形状に大きな差は見られない。一方で低水密度である気相部では、液相部と比較してスペクトルは硬く、高速中中性子が相対的に多い状態であり、また境界面においては境界部の水による減速効果により、気相部中央と比較してスペクトルが柔らかくなっている。

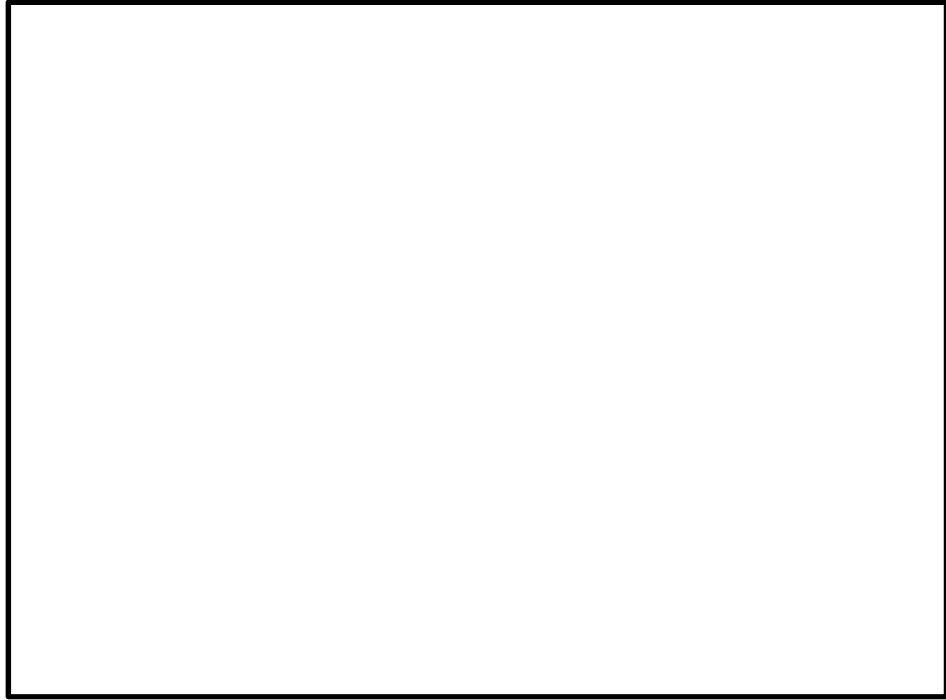
これらの結果から、気相部・液相部それぞれでスペクトル特性が異なることを確認でき、またスペクトル特性は評価体系より予想される特性と同様の傾向を示しており、気相部、液相部それぞれが適切に評価されていると判断できる。

また気相部ではエネルギーの高い中中性子が比較的多いため、気相部側が体系の実効増倍率を有意に決定づけるには、ある程度大きな気相部が必要となる。すなわち水位が高い場合から水位低下した際に、一定の大きさの気相部が形成されるまでは、体系のEALF

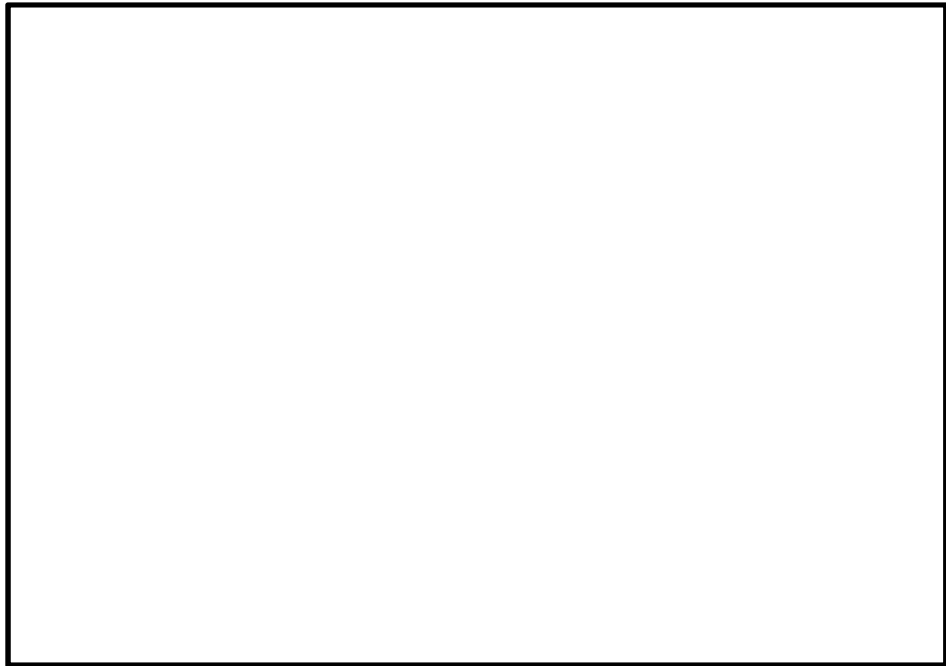
(Energy corresponding to the Average neutron Lethargy causing Fission: 核分裂に寄与する中中性子の平均エネルギー) はほぼ一定であり、所定の水位を超えて水位が低下した後は、水位の低下に伴ってEALFは上昇すると考えられる。この傾向を確認するため、解析条件表に記載の全ケースにおいて各水位でのEALFを比較したところ、第6-1図および第6-2図に示す通り、全ケースでEALFの挙動は上述の予想と同等の傾向を示しており、この傾向は実効増倍率の挙動とも整合する。



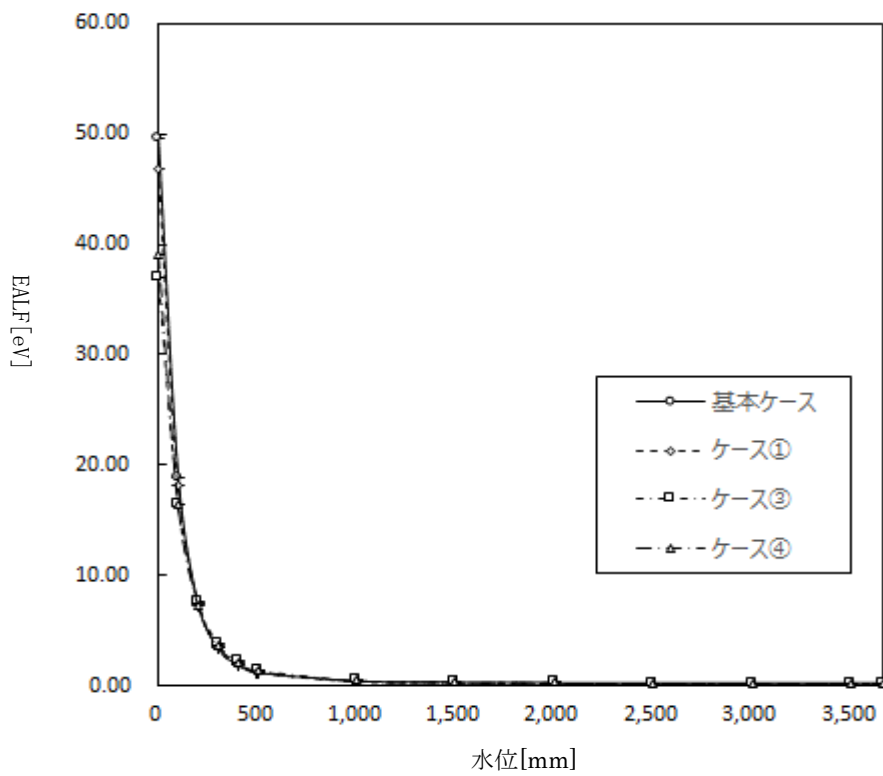
第4図 境界における中性子スペクトルの評価体系 (軸方向)



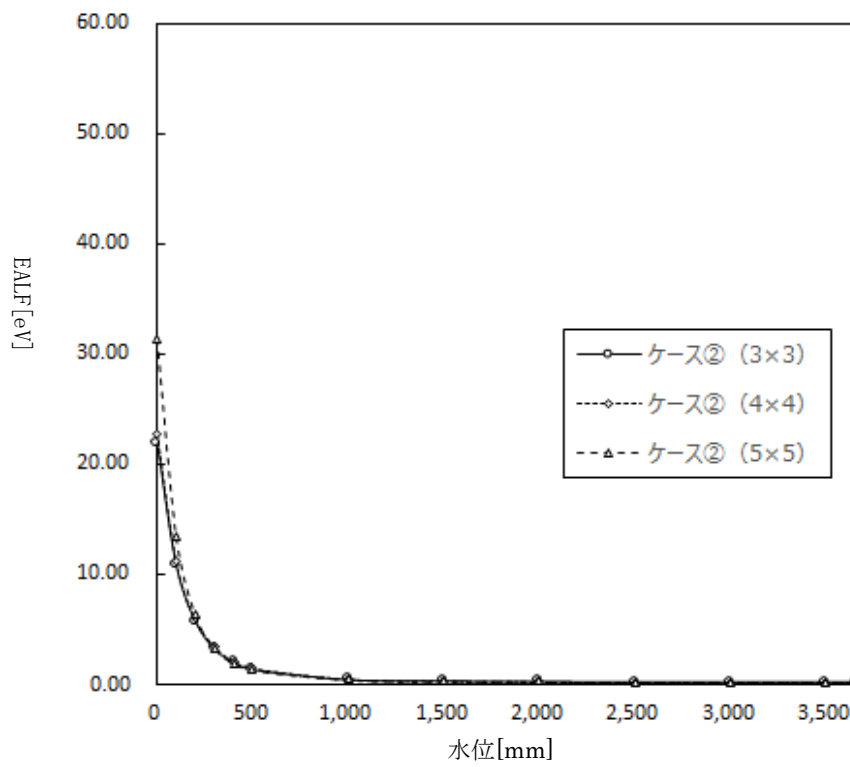
第 5-1 図 液相部における中性子スペクトル評価結果



第 5-2 図 気相部の中性子スペクトル評価結果



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. 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という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 MVP コードを用いた中性子スペクトル分析、および水位の変化による EALF の変化傾向から、中性子エネルギーという観点からも各相の中性子挙動は異なっており、また水位の変化に伴う EALF と実効増倍率の挙動が一致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という両方の観点から見て、その挙動が整合しているといえることから、評価結果は妥当であることを確認した。

以上

(参考)

解析条件表に記載のケースは全て、実効増倍率に対する気相部の寄与が小さい条件であり水位が低下するにつれ実効増倍率が減少したが、仮に気相部の寄与が大きい条件下では、水位の低下に伴い実効増倍率は上昇する傾向となる。一方で、液相部で発生した中性子の一部には気相部へ移るものもあるため、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。

- ・ 液相部より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
- ・ 液相部より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、そのような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、その時点から水位がさらに低下しても、実効増倍率の増加要因としての影響はほぼ無いこととなる。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だす水位において、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すこととなる。

気相部の寄与が大きい状態を含めた条件として、局所に放水が集中する場合において放水量を変化させた解析を行った。解析条件を表 1 に、結果を図 1 に示すが、実効増倍率に対する気相部の寄与が大きい流量条件においては、実効増倍率のピークが確認された。

表1 評価条件（流量に対するパラメータスタディ）

評価条件		パラスタ条件		
燃料条件		SFPは燃料で満杯、貯蔵燃料は新燃料のみ		
水分条件	流量(m ³ /h)	500、1000、 、1500、2200		
	SFPへの流入範囲、流量分布	流入範囲	ケース②で実効増倍率が最大となる範囲(4×4)	
		流量分布	一定	
	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(g/cm ³)	0.0006
		燃料集合体外(g/cm ³)		液滴径1.5mmの液滴の下降速度を使用した水密度
		流入範囲外(g/cm ³)		0.0006
海水中の塩分濃度(%)		3.3		

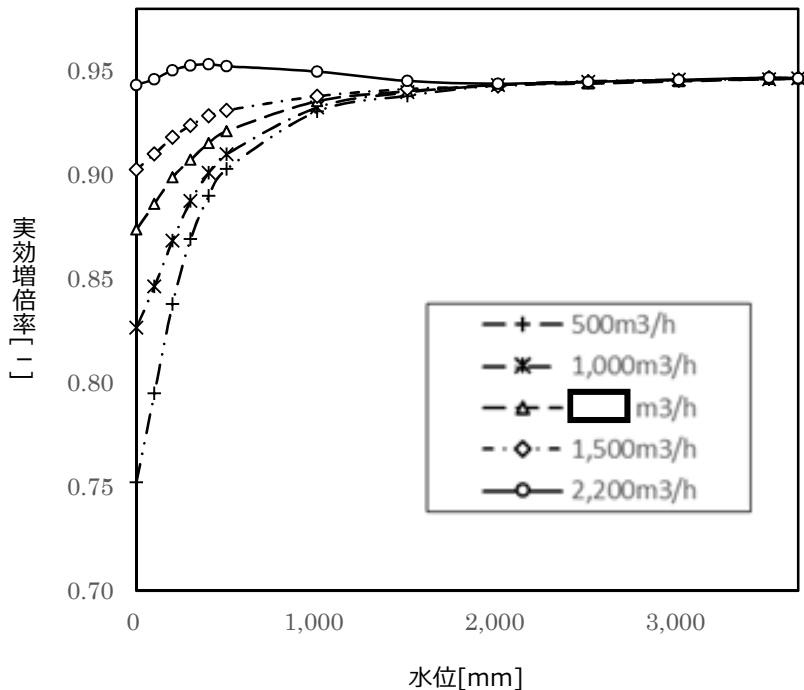


図1 流量パラスタ結果

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。