

高浜発電所第1, 2号機審査資料	
資料番号	2-2 改3
提出年月日	2023年5月26日

SFP 水位低下時における不確定性に関する補足説明

関西電力株式会社

目 次

1. はじめに
2. 臨界実験ベンチマーク数について
3. 水位低下時における解析コード適用の妥当性について
4. 解析結果に対する不確定性について
5. まとめ

1. はじめに

本資料は、SCALE ver6.0（以下、「本解析コード」という）を本評価に適用することの妥当性確認に用いた臨界実験ベンチマーク数を整理し、水位低下時における本解析コード適用の妥当性について述べるとともに、水位低下時における「計算コードに係る不確定性」及び「製作公差に基づく不確定性」の取扱いについて補足説明するものである。

2. 臨界実験ベンチマーク数について

本解析コードの使用に際して、臨界実験ベンチマーク集（「INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS」 September 2010 Edition(OECD/NEA)）に登録されている臨界実験からベンチマーク解析を実施することで解析コードの妥当性確認を実施しているが、本評価体系と完全に一致する臨界実験は存在しない。そのため、国内 PWR の燃料貯蔵設備及び燃料仕様のパラメータ範囲を整理し、それを包絡する形で臨界実験を選定し、そのベンチマーク解析を実施することで、本解析コードを本評価に適用することの妥当性確認を行っている。

既工事計画並びに今回評価に係る設置許可及び設工認申請における臨界実験ベンチマークの取扱いを第 1 表に示す。既工事計画においては、ウラン新燃料を用いた臨界実験及び MOX 新燃料を用いた臨界実験に対してベンチマークを実施した。今回評価に係る設置許可申請に際しては、既工事計画で用いた臨界実験ベンチマークに加え、燃焼燃料を含んだ体系及び塩素を含んだ体系への本解析コード適用の妥当性を確認するために FP を含んだウラン燃料の臨界実験及び塩素を含んだ体系の臨界実験のベンチマークを追加で実施し、計 ケースの臨界実験ベンチマークにより、本解析コード適用の妥当性を確認していた。これらに加え、水位低下時における解析値の傾向を確認するために水位低下時の EALF (Energy corresponding to the Average neutron Lethargy causing Fission:核分裂に寄与する中性子平均エネルギー) に相当する臨界実験ベンチマークを追加で実施し、C/E (C:計算値と E:測定値の比) の傾向を示していた。

一方で、設工認審査の過程で塩素を考慮しない体系に変更することとしたことから、塩素を含む体系のケースを妥当性確認に用いたケース数から除外する。また、低水位状態における適用妥当性の確認結果を拡充するため、第 2 表に示す、水位低下時における解析値の傾向を確認するため、許可時に参考として示した水位低下時の EALF に相当する臨界実験を本解析コードの妥当性確認に使用したベンチマーク数に加えることで、既工認時のベンチマーク数と合わせた計 ケースとして変更する。

3. 水位低下時における解析コード適用の妥当性について

本解析コードの妥当性確認において選定した臨界実験のうち、部分水位で臨界となった臨界実験を第 3 表に示す。臨界実験においては、水位を変化させて臨界を達成させる実験は一般的であり、水位調整により臨界調整された実験は部分水位条件であるとみなすことができる。ベンチマークした臨界実験には部分水位で臨界となったケースも相当数存在しており、その EALF と C/E の関係を第 1 図に示す。その平均 C/E は 1.0 近傍であり、特異な傾向はみられない。

また、臨界実験ベンチマークには第 4 表に示す低水密度での臨界実験が含まれており、低水密度状態においても C/E の傾向に特異な傾向がないことが確認できる。

本評価体系における EALF と液相部高さの関係を第 2 図に、妥当性確認に選定したベンチマーク実

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。

験ケースの EALF と C/E の関係を第 3 図に示す。冠水状態から水位 1000mm 程度までの EALF は横ばいであることから実効増倍率への寄与は液相部が支配的であるが、さらに水位が低下した場合には EALF が上昇し、気相部が支配的な状態へと遷移していく。妥当性確認のベンチマークには、実効増倍率への寄与は気相部が支配的である水位約 200mm 程度の EALF に相当する約 7eV の臨界実験結果が含まれており、その C/E は 1 近傍であり特異な傾向はみられないことから、同様にすべてが気相部となる水位 0mm においても適用可能であると判断している。

以上より、SFP 水位低下時に生じる、部分水位状態を含む体系の評価に本解析コードを用いることは妥当である。

4. 解析結果に対する不確定性について

評価体系の実効増倍率を解析で求める際、解析結果に対する不確定性を考慮する必要があるが、その不確定性は「計算コードの不確定性」と「制作公差による不確定性」で構成される。本項では計算コードの不確定性及び製作公差の不確定性は冠水時の値を代表して用いることへの妥当性を説明する。

(1) 計算コードの不確定性

「計算コードの不確定性」は、計算コードの妥当性確認に用いた臨界実験ベンチマーク結果の平均誤差及びその不確かさより算出しているため、どの臨界実験ベンチマーク結果を用いるかに依存するものの、評価体系の水位に依らず一定の値となる。

既工事計画においては、計算コードの不確定性算出に用いるベンチマークの対象は評価体系に類する燃料要素を用いたベンチマーク実験をもとに計算コードを算出している。評価体系にはウラン新燃料及び燃焼燃料が含まれるが、選定ケース数を増加させた場合には信頼係数の観点から不確定性が小さくなることから燃焼燃料により組成が近く、評価条件が厳しくなるよう MOX 新燃料のケースのみを使用して不確定性算出を行っている。

計算コードの不確定性を第 5 表に示す。本申請においても同様に燃料要素に着目し、プルトニウムや FP を含んだ体系のベンチマークを用いることなく、第 4 図に示す FP を含まないウラン燃料の□ケースを選定して計算コードの不確定性を算出しており、それらのケースは部分水位状態を含む臨界実験が含まれている。

この計算コードの不確定性が新たな仕様を含む体系でも適用できるか、すなわち低水位状態においても適用できるかは、その仕様を含む実験結果を算出に用いるベンチマーク結果にその要素を含むものを追加した場合でも影響がないことを確認できればよい。実効増倍率への気相部の寄与が大きくなる、低水位時相当の EALF の結果を計算コードの不確定性の算出に加えた場合においても、平均誤差 δk 及び計算コードの不確かさ ϵ_c に影響がないことから、低水位状態において適用した場合においても不確定性の評価結果は変わらず、燃料要素に着目したウラン燃料□ケースにより算出した値を用いることは妥当である。

(2) 製作公差による不確定性

「製作公差に基づく不確定性」は、計算体系において入力項目別に算出しており、ノミナル値を入

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。

力値として算出した実効増倍率に対して、製作公差の範囲で入力値を変化させた際の最大となった実効増倍率との差をその入力項目に起因する不確定性としたものであり、水位の変動により、入力値及び不確定性は変動しうるものである。

第5図に示す通り、気相部が存在しない冠水状態から水位 1,000mm 程度までは実効増倍率が横ばいであり、また、第2図においても EALF の値は横ばいであることから、実効増倍率への寄与は液相部が支配的である。その場合は、不確定性を考慮しないノミナルの実効増倍率と入力値に製作公差を考慮した実効増倍率の差により決定される不確定性についても液相部の評価結果に依存しており、気相部に起因する不確定性の変動は実効増倍率への寄与と同様にわずかであることから、冠水時の不確定性を液相部が支配的な状態に対して適用することは妥当である。

なお、冠水時の不確定性を第6表に、塩素を考慮する体系での水位 1000mm での不確定性を第7表に示す。冠水状態での不確定性は 0.0115、塩素を考慮した体系の水位 1000mm の不確定性は 0.0104 である。冠水時と部分水位状態において不確定性を比較した場合において、その不確定性は小数第3位が変動する程度であり、モンテカルロ法による統計誤差の 2σ 程度の値であることを確認している。なお、本評価体系においては塩素の中性子吸収効果を考慮していないが、上述の理由で気相部の気相部の影響をほとんど受けておらず、また、実効増倍率を比較した場合においても塩素の有無による影響はほとんど存在していないことから、塩素を考慮しない水位 1000mm での不確定性もモンテカルロ法による統計誤差の 2σ 程度の範囲となる。

また、さらに水位が低い状態においては、未臨界性の判定基準となる実効増倍率 0.98 に対し、不確定性を考慮しない実効増倍率は約 0.90 以下と十分に小さいことから、あらためての不確定性の評価は不要と判断しているが、参考に塩素を考慮しない体系での水位 0mm での不確定性を第8表に示す。塩素を考慮しない体系における水位 0mm の不確定性は 0.0121 であり、本評価体系においては気相部が支配的な状態においても不確定性がほとんど変わらないことを確認しており、保守的に 0.02 と評価した場合でも実効増倍率が 0.98 を超えることはない。

5. まとめ

本解析コードを全水位において適用すること及び実効増倍率が最も大きい冠水状態から横ばいである水位 1000mm までの範囲において冠水時の不確定性を用いることは妥当であり、不確定性を考慮した実効増倍率も冠水状態において最大となる。

また、塩素を抜いた体系における感度解析ケースの評価結果を第6図示す。各感度解析ケースにおいても、実効増倍率は冠水時が最も高く水位が低下するにしたがって単調に減少する基本ケースと同様の傾向を示すことを確認している。

以上により、実効増倍率は未臨界上の判定基準である 0.98 以下を満足しており、臨界に至らないことが確認できている。

第1表 臨界実験ベンチマーク体系と取扱い

臨界実験の評価体系		ウラン燃料		MOX燃料		FPを含む ウラン燃料	塩素を含む 体系	低水位時の EALF 相当の体系	合計
		部分 水位	その他	部分 水位	その他				
ケース数									
既 工 事 計 画	計算コードの妥当性評価	○	○	○	○				
	計算コードの不確定性算出			○	○				
	塩素の不確定の評価	体系に塩素を考慮しない							
設 置 許 可	計算コードの妥当性評価	○	○	○	○	○	○		
	計算コードの不確定性算出	○	○						
	塩素の不確定性の評価						○		
設 工 認	計算コードの妥当性評価	○	○	○	○			○	
	コードの不確定性算出	○	○						
	塩素の不確定性評価	体系に塩素を考慮しない							

※検討中の変更内容を反映したもの

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表 水位低下時の中性子エネルギー近傍の臨界実験 (1/2)

項目		単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様のパラメータ範囲	
			MIN	MAX
燃料	²³⁵ U濃縮度	wt%	1.6	4.8
	Pu含有率	wt%	5.5	10.9
	燃料材径	mm	8.19	9.29
	燃料体内の減速材 体積／燃料体積	—	1.88	2.00
	被覆管外径	mm	9.5	10.72
	被覆材材質	—	ジルコニウム合金	
	燃料要素ピッチ	mm	12.6	14.3
	燃料要素配列条件	—	正方配列	
	体系条件	—	燃料体配列体系	
	減速	減速材	—	無／軽水
水位		mm	完全喪失／冠水	
反射体	反射体材質	—	軽水／コンクリート	
	EALF	eV	0.2～約50eV*	
解析ケース	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

*本評価体系における水位0mmでの値

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ありません。

第2表 水位低下時の中性子エネルギー近傍の臨界実験(2/2)

項目	
実験体系	
ベンチマーク 解析結果	SCALE Ver. 6.0による C/Eの平均、 σ

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3表 水位調整による臨界実験 (1/6)

項目		単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲	
			MIN	MAX
燃料	²³⁵ U濃縮度	wt%	1.6	4.8
	燃料材径	mm	8.19	9.29
	燃料体内の減速材 体積/燃料体積	—	1.88	2.00
	被覆管外径	mm	9.5	10.72
	被覆材材質	—	ジルコニウム合金	
	燃料要素ピッチ	mm	12.6	14.3
	燃料要素配列条件	—	正方配列	
	体系条件	—	燃料体配列体系	
	減速	減速材	—	無/軽水
水位		mm	完全喪失/冠水	
反射体	反射体材質	—	軽水/コンクリート	
	EALF	eV	0.2~約50eV※	
解析ケース	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

※本評価体系における水位0mmでの値

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3表 水位調整による臨界実験 (2/6)

項目	
実験体系	
ベンチマーク 解析結果	SCALE Ver. 6.0による C/Eの平均、 σ

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3表 水位調整による臨界実験 (3/6)

項目		単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲	
			MIN	MAX
燃料	²³⁵ U濃縮度	wt%	1.6	4.8
	燃料材径	mm	8.19	9.29
	燃料体内の減速材 体積/燃料体積	—	1.88	2.00
	被覆管外径	mm	9.5	10.72
	被覆材材質	—	ジルコニウム合金	
	燃料要素ピッチ	mm	12.6	14.3
	燃料要素配列条件	—	正方配列	
	体系条件	—	燃料体配列体系	
	減速	減速材	—	無/軽水
水位		mm	完全喪失/冠水	
反射体	反射体材質	—	軽水/コンクリート	
	EALF	eV	0.2~約50eV※	
解析ケース	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

※本評価体系における水位0mmでの値

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3表 水位調整による臨界実験 (4/6)

項目	
実験体系	
ベンチマーク 解析結果	SCALE Ver. 6.0による C/Eの平均、 σ

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3表 水位調整による臨界実験 (5/6)

項目		単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲	
			MIN	MAX
燃料	²³⁵ U濃縮度	wt%	1.6	4.8
	Pu含有率	wt%	5.5	10.9
	燃料材径	mm	8.19	9.29
	燃料体内の減速材 体積／燃料体積	—	1.88	2.00
	被覆管外径	mm	9.5	10.72
	被覆材材質	—	ジルコニウム合金	
	燃料要素ピッチ	mm	12.6	14.3
	燃料要素配列条件	—	正方配列	
	体系条件	—	燃料体配列体系	
	減速材	減速材	—	無／軽水
水位		mm	完全喪失／冠水	
反射体	反射体材質	—	軽水／コンクリート	
EALF		eV	0.2～約50eV*	
解析 ケ ー ス	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

*本評価体系における水位0mmでの値

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3表 水位調整による臨界実験 (6/6)

項目	
実験体系	
ベンチマーク 解析結果	SCALE Ver. 6.0による C/Eの平均、 σ

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4表 低水密度の臨界実験 (1/3)

項目		単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲	
			MIN	MAX
燃料	²³⁵ U濃縮度	wt%	1.6	4.8
	燃料材径	mm	5.5	10.9
	燃料体内の減速材 体積／燃料体積	—	8.19	9.29
	被覆管外径	mm	1.88	2.00
	被覆材材質	—	ジルコニウム合金	
	燃料要素ピッチ	mm	12.6	14.3
	燃料要素配列条件	—	正方配列	
	体系条件	—	燃料体配列体系	
減速材	減速材	—	無／軽水	
	水位	mm	完全喪失／冠水	
反射体	反射体材質	—	軽水／コンクリート	
EALF		eV	0.2～約50eV※	
解析ケース	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

※本評価体系における水位 0mm での値

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4表 低水密度状態の臨界実験(2/3)

項目	
実験体系	
ベンチマーク 解析結果	SCALE Ver. 6.0による C/Eの平均、 σ

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4表 低水密度状態の臨界実験 (3/3)

臨界実験	減速材密度	ケース数

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5表 SCALE ver. 6.0システムの平均誤差及び不確かさ

条件	計算コード	SCALE6.0 システム (KENO-VI)					
	ベンチマーク概要	ウラン燃料 (FPなし)	ウラン燃料 (FPなし) +低水位	低水位	MOX燃料 (FPなし)	ウラン燃料 (FPあり)	全ベンチマーク
	ベンチマークケース数						
評価結果	平均誤差 δk	0.0007	0.0007	0.0001	0.0013	0.0001	0.0001
	不確かさ ε_c ($=U \times S_p$)	0.0065	0.0065	0.0376	0.0104	0.0067	0.0062
	信頼係数 U^{*1}						
	$\overline{k_{eff}}$ の不確かさ (S_p)						

※1 ベンチマーク解析ケース数に対する95%信頼度・95%確率での信頼係数。

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5表 高浜1/2号機 大規模漏えい時の未臨界性における不確定性評価結果（純水冠水時）

臨界計算上の不確定性評価項目				不確定性	
計算コード	平均誤差		δk	0.0007 (注1)	
の不確定性	95%信頼度×95%確率		ϵ_c	0.0065 (注2)	
				不確定性	入力値 (注3)
製作公差に基づく不確定性	[]	ラックの内のり公差	ϵ_w	0.0023	[]
		燃料製作公差	ϵ_r	0.0061	—
		—燃料材直径	ϵ_d	(0.0014)	[]
		—燃料材密度	ϵ_l	(0.0038)	[]
		—被覆材内径	ϵ_{cr}	(0.0014)	[]
		—被覆材外径	ϵ_{cd}	(0.0032)	[]
		—燃料体外寸	ϵ_a	(0.0029)	[]
		[]	ラック内燃料偏心	ϵ_f	0.0042 (注4)
[]	ラックの中心間距離公差	ϵ_p	0.0036 (注5)	[]	
統計誤差			σ	0.0005	
不確定性合計 (注6)			ϵ	0.0115	

(注1) 国際的に臨界実験データを評価収集しているOECD/NEAによるINTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTSに登録されているウラン燃料に係る臨界実験を対象にSCALE Ver. 6.0システムのベンチマーク解析を実施して得られる加重平均実効増倍率の平均誤差。

(注2) 上記の臨界実験を対象にSCALE Ver. 6.0システムのベンチマーク解析を実施して得られる加重平均実効増倍率の不確かさ（95%信頼度×95%確率での信頼係数を考慮）。

(注3) 正負の製作公差のうち未臨界性評価上厳しくなる側の値を入力値とした。

(注4) [] のラック内での燃料体の偏心モデルでの [] [] 評価結果。なお、評価結果は下表のとおり。

ラックの中心間距離公差による不確定性評価結果

解析モデル	不確定性評価結果
[]	[]

(注5) 未臨界性評価にはラック間隔が [] を使用する。

(注6) $\epsilon =$ []

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表 高浜1/2号機 大規模漏えい時の未臨界性評価における不確定性評価結果
(塩素を考慮するケース(旧基本ケース)、水位1000mm)

臨界計算上の不確定性評価項目				不確定性	
計算コード の不確定性	平均誤差		δk	0.0007	
	95%信頼度×95%確率		ϵ_c	0.0065	
				不確定性	入力値 ^{※1}
製作公差に 基づく不確 定性	[]	ラックセルの内のり公差	ϵ_w	0.0016	[]
		燃料製作公差	ϵ_r	0.0044	—
		—燃料材直径	ϵ_d	(0.0014)	[]
		—燃料材密度	ϵ_l	(0.0025)	[]
		—被覆材内径	ϵ_{cr}	(0.0015)	[]
		—被覆材外径	ϵ_{cd}	(0.0026)	[]
		—燃料体外寸	ϵ_a	(0.0014)	[]
	[]	ラックセル内燃料偏心	ϵ_f	0.0039 ^{※2}	—
	[]	ラックセルの中心間距離 公差	ϵ_p	0.0035	[]
統計誤差			σ	0.0005	—
不確定性合計 ^{※3}			ϵ	0.0104	
実効増倍率			k_{eff}	0.9316	
未臨界性評価結果			$k_{eff} + \epsilon$	0.943	

※1 正負の製作公差のうち未臨界性評価上厳しくなる側の値を入力値とした。

※2 []のラックセル内での燃料体の偏心モデルでの []
[] 評価結果。なお、評価結果は下表
のとおり。

ラックセル内燃料偏心による不確定性評価結果

解析モデル	不確定性評価結果
[]	[]

※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。

第7表 高浜1/2号機 大規模漏えい時の未臨界性評価における不確定性評価結果
(塩素を除いたケース(新基本ケース)、水位0mm)

臨界計算上の不確定性評価項目				不確定性	
計算コード の不確定性	平均誤差		δk	0.0007	
	95%信頼度×95%確率		ϵ_c	0.0065	
				不確定性	入力値 ^{※1}
製作公差に 基づく不確 定性	[]	ラックセルの内のり公差	ϵ_w	0.0010	[]
		燃料製作公差	ϵ_r	0.0086	—
		—燃料材直径	ϵ_d	(0.0010)	[]
		—燃料材密度	ϵ_l	(0.0010)	[]
		—被覆材内径	ϵ_{cr}	(0.0012)	[]
		—被覆材外径	ϵ_{cd}	(0.0083)	[]
		—燃料体外寸	ϵ_a	(0.0010)	[]
	[]	ラックセル内燃料偏心	ϵ_f	0.0023 ^{※2}	—
	[]	ラックセルの中心間距離 公差	ϵ_p	0.0024	[]
統計誤差			σ	0.0004	—
不確定性合計 ^{※3}			ϵ	0.0121	
実効増倍率			k_{eff}	0.8024	
未臨界性評価結果			$k_{eff} + \epsilon$	0.815	

※1 正負の製作公差のうち未臨界性評価上厳しくなる側の値を入力値とした。

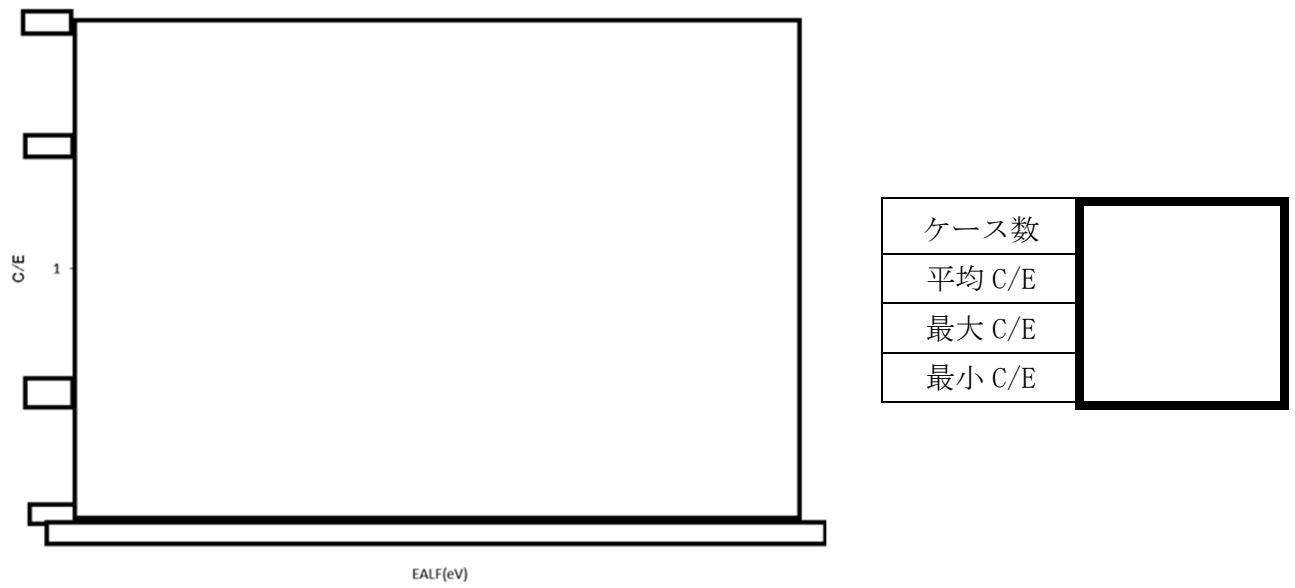
※2 [] のラックセル内での燃料体の偏心モデルでの []
[] 評価結果。なお、評価結果は下表のと
おり。

ラックセル内燃料偏心による不確定性評価結果

解析モデル	不確定性評価結果
[]	[]

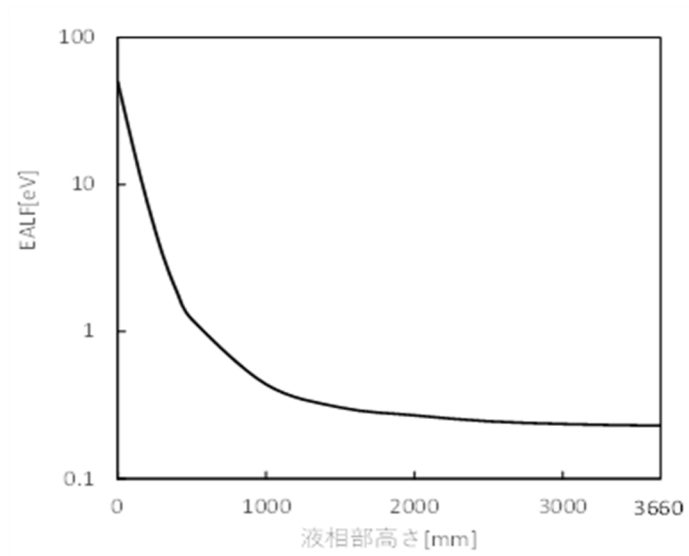
[]

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。

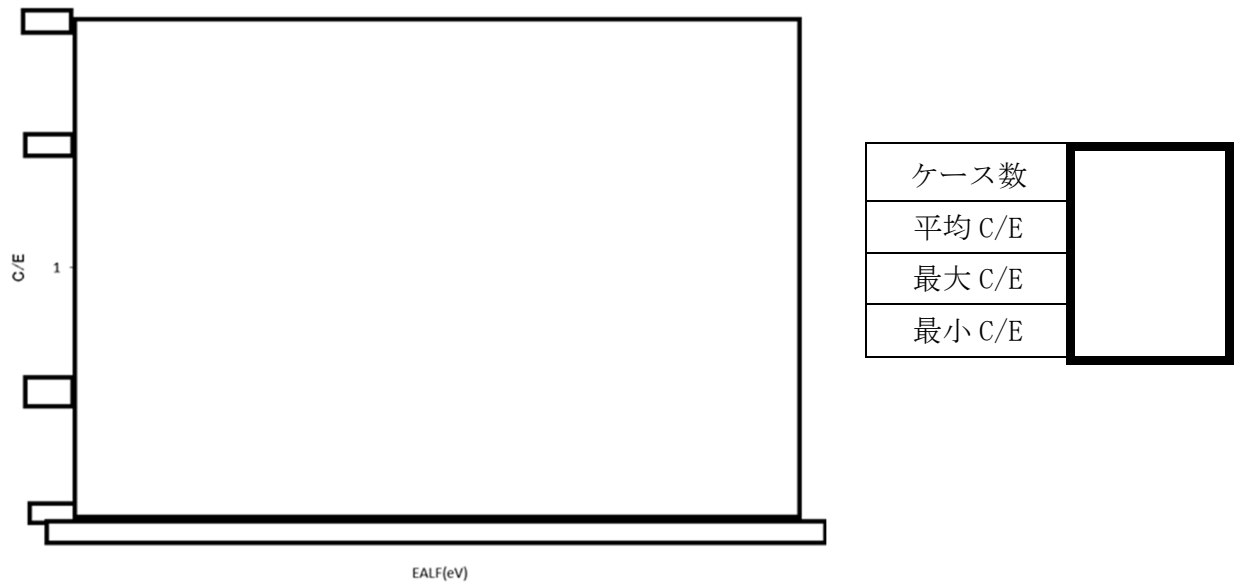


第1図 部分水位で臨界となったベンチマーク実験のEALFとC/Eの関係

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。

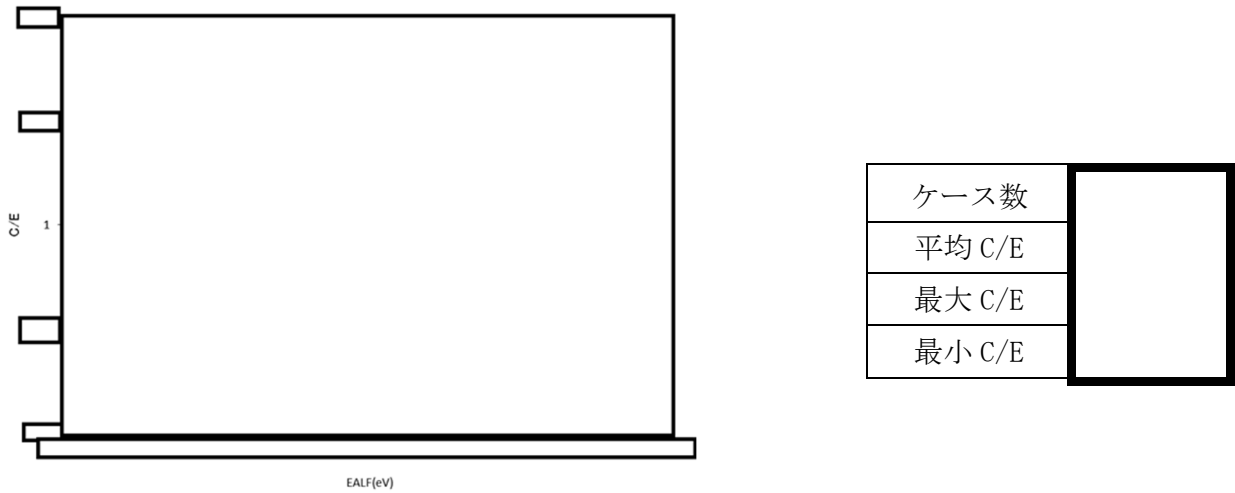


第2図 本評価体系における液相部高さとEALFの関係

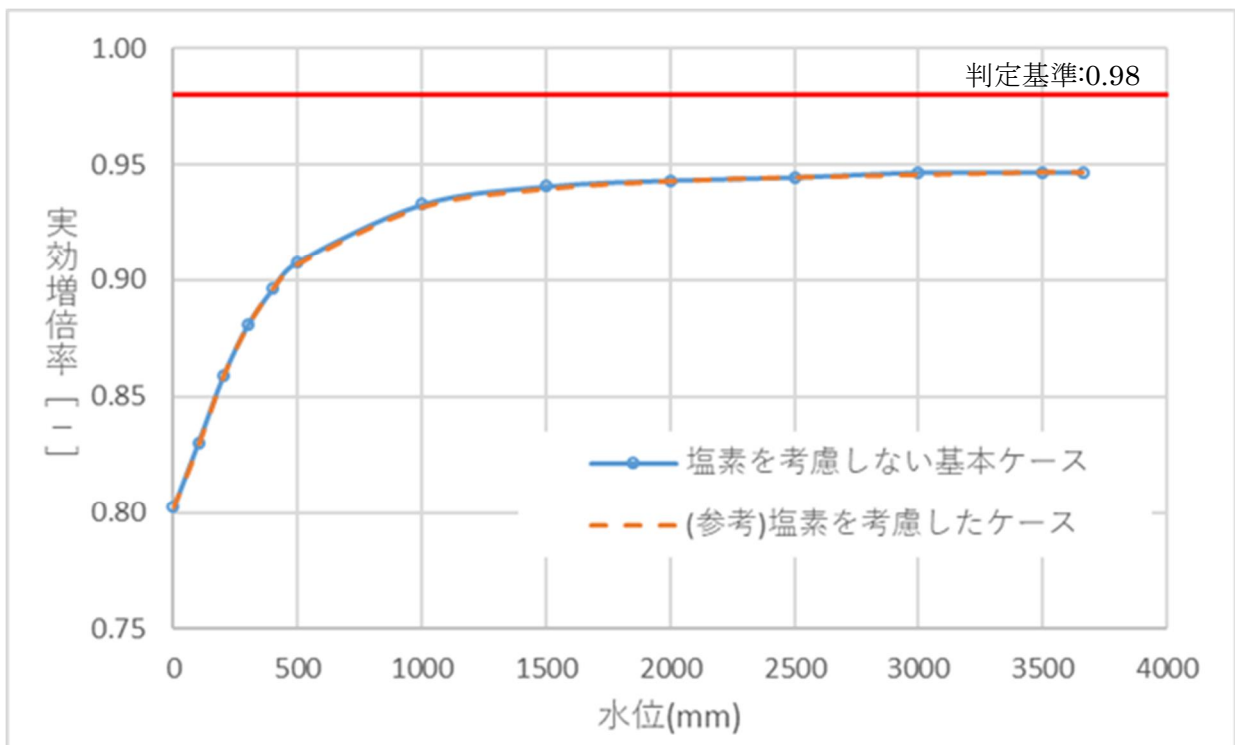


第3図 妥当性確認に用いたベンチマーク実験のEALFとC/Eの関係

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。

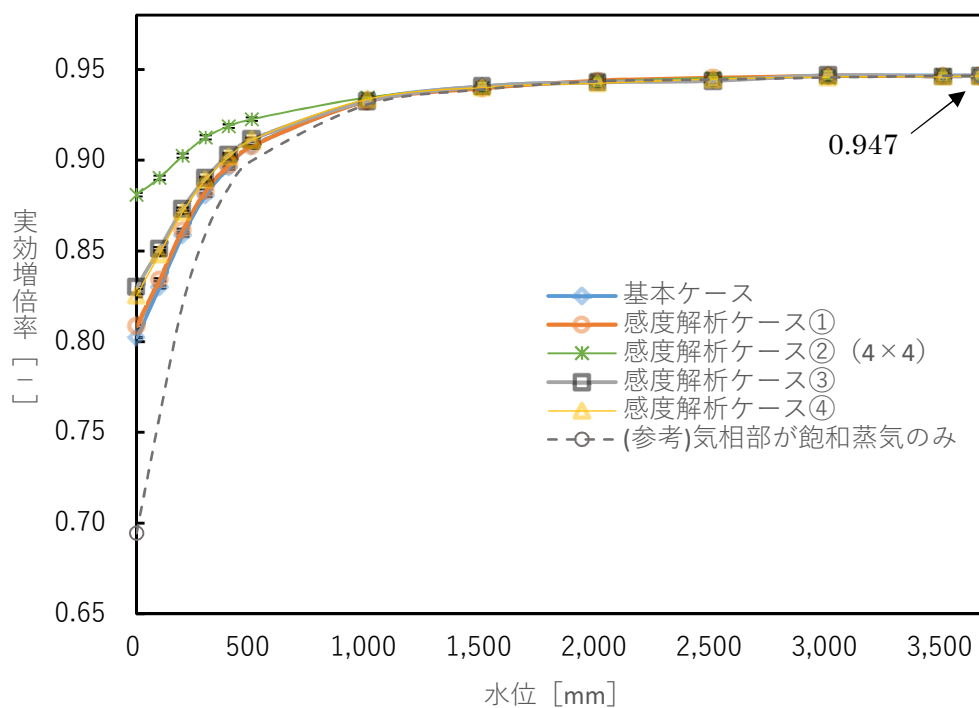


第4図 不確定性の算出に用いたベンチマーク実験のC/EとEALFの関係



第5図 実効増倍率評価結果※
製作公差、計算コード等による不確定性を含まない値

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6図 各ケース実効増倍率評価結果

※製作公差、計算コード等による不確定性を含まない値