

高浜発電所第1, 2号機審査資料	
資料番号	2-2 改2
提出年月日	2023年5月9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 表に示す許可時に水位低下時における解析値の傾向を確認するための水位低下時の 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 ケースとして変更予定である。

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。妥当性確認に使用した臨界実験は本評価体系の EALF を包含している。

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。

(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。

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おり、本評価体系の EALF を包括している。

(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と考えられる。その場合は、ノミナル値と製造公差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、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と考えられ、不確定性の変動に対して実効増倍率自体の低下幅の方が大きい場合でも冠水時が最も高い実効増倍率となる。

また、冠水時の不確定性を第 5 表に、塩素を考慮する体系での水位 1000mm での不確定性を第 6 表に、塩素を考慮しない体系での水位 0mm での不確定性をそれぞれ示す。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、塩素を考慮しない体系の水位 0mm の不確定性は 0.0121 であり、部分水位状態においてもその不確定性は小数第 3 位が変動しうる程度であると

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。

判断できる。

以上より、水位毎の不確定性の差はモンテカルロ法による統計誤差の2倍程度の値であり、未臨界性の判定基準となる0.98と比較しても十分小さいことから、液相が支配的である領域に対して冠水時の不確定性を使用することは妥当であると評価している。

5. まとめ

塩素を考慮しない評価結果に基づき記載予定。

第1表 臨界実験ベンチマーク体系と取扱い

臨界実験の体系		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			○	○				
	塩素の不確定性の評価	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※	○	○	○	○	○		○	
	計算コードの不確定性算出	○	○						
	塩素の不確定性の評価※	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7eV※	
解析ケース	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

※SFPに流入した水が局所に集中した体系でのEALF

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7eV*	
解析ケース	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

*SFP に流入した水が局所に集中した水が局所に集中した体系での EALF

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7eV*	
解析ケース	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

*SFPに流入した水が局所に集中した体系でのEALF

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7eV*	
解析 ケ- ース	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

*SFPに流入した水が局所に集中した体系でのEALF

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	²³⁵ U濃縮度	wt%
	燃料材径	mm
	燃料体内の減速材 体積/燃料体積	—
	被覆管外径	mm
	被覆材材質	—
	燃料要素ピッチ	mm
	燃料要素配列条件	—
	体系条件	—
減速材	減速材	—
	水位	mm
反射体	反射体材質	—
EALF		eV
解析ケース	実験ケース数	—
	解析ケース数	—
	実験施設	—

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 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 の不確定性	平均誤差		δk	0.0007 (注1)	
	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	[Redacted]	ラックの内のり公差	ϵ_w	0.0023	[Redacted]
		燃料製作公差	ϵ_r	0.0061	—
		—燃料材直径	ϵ_d	(0.0014)	[Redacted]
		—燃料材密度	ϵ_l	(0.0038)	[Redacted]
		—被覆材内径	ϵ_{cr}	(0.0014)	[Redacted]
		—被覆材外径	ϵ_{cd}	(0.0032)	[Redacted]
		—燃料体外寸	ϵ_a	(0.0029)	[Redacted]
	[Redacted]	ラック内燃料偏心	ϵ_f	0.0042 (注4)	—
	[Redacted]	ラックの中心間距離公差	ϵ_p	0.0036 (注5)	[Redacted]
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) [Redacted] のラック内での燃料体の偏心モデル(第4-3図～第4-5図) [Redacted] 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
[Redacted]	[Redacted]

(注5) 未臨界性評価にはラック間隔が [Redacted] を使用する。

(注6) [Redacted]

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	[Redacted]	ラックセルの内のり公差	ϵ_w	0.0010	[Redacted]
		燃料製作公差	ϵ_r	0.0086	—
		—燃料材直径	ϵ_d	(0.0010)	[Redacted]
		—燃料材密度	ϵ_l	(0.0010)	[Redacted]
		—被覆材内径	ϵ_{cr}	(0.0012)	[Redacted]
		—被覆材外径	ϵ_{cd}	(0.0083)	[Redacted]
		—燃料体外寸	ϵ_a	(0.0010)	[Redacted]
	[Redacted]	ラックセル内燃料偏心	ϵ_f	0.0023 ^{※2}	—
	[Redacted]	ラックセルの中心間距離 公差	ϵ_p	0.0024	[Redacted]
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 [Redacted] のラックセル内での燃料体の偏心モデルでの [Redacted] [Redacted] 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
[Redacted]	[Redacted]

※3 [Redacted]

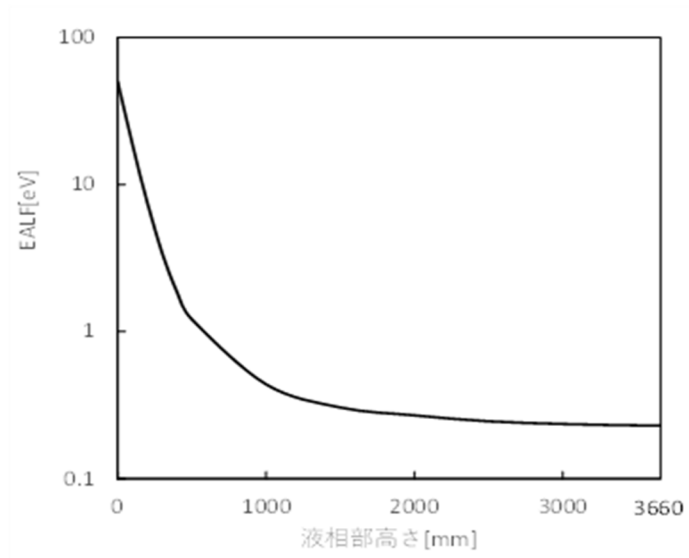
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



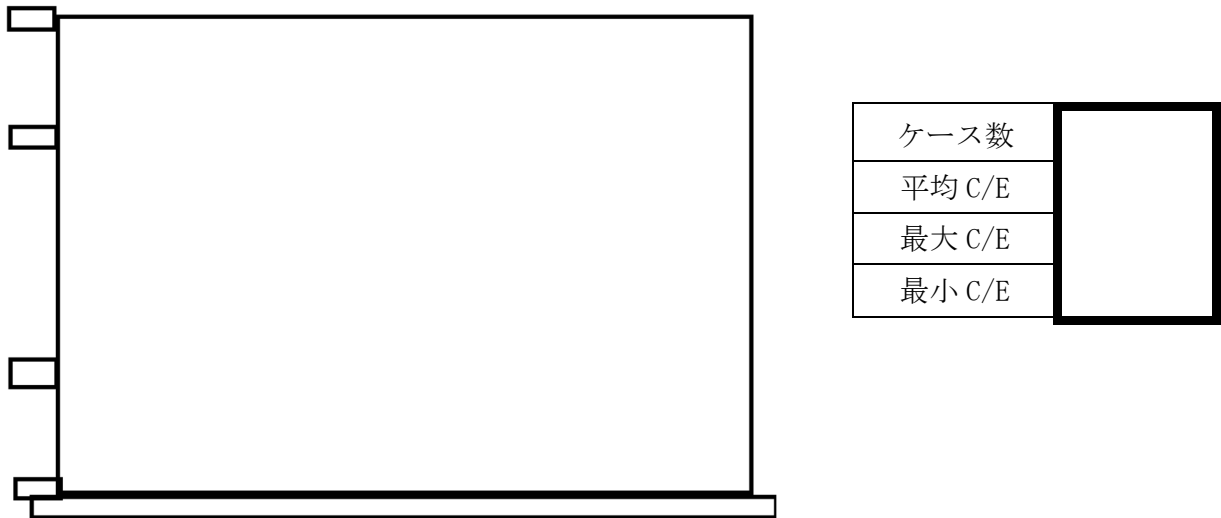
ケース数	
平均 C/E	
最大 C/E	
最小 C/E	

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。

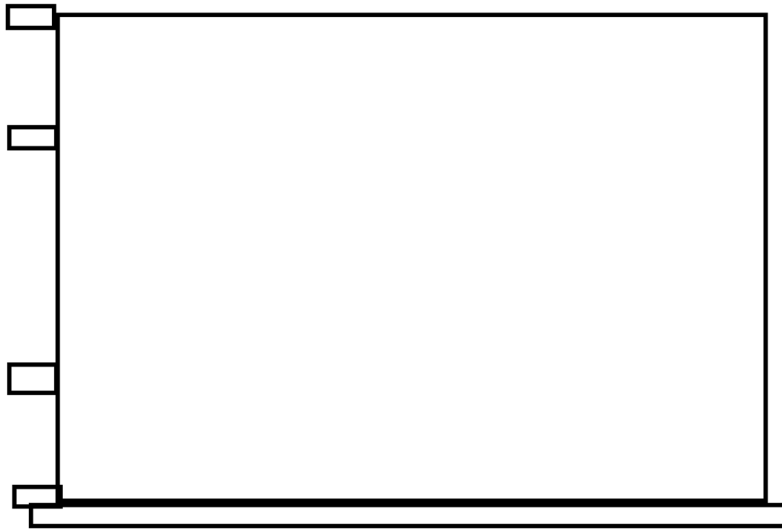


第2図 本評価体系における液相部高さとEALFの関係



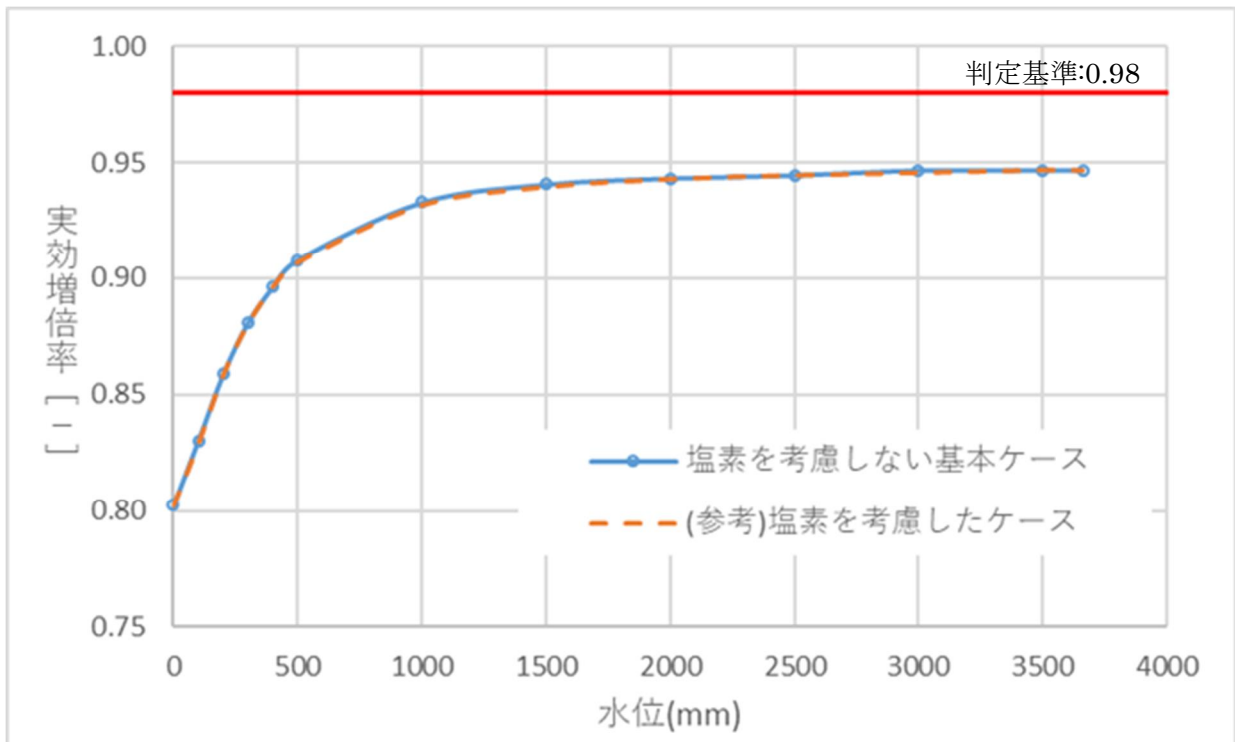
第3図 妥当性確認に用いたベンチマーク実験のEALFとC/Eの関係

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。



ケース数	
平均 C/E	
最大 C/E	
最小 C/E	

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