

高浜発電所第1，2号機審査資料	
資料番号	2-2
提出年月日	2023年3月22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. 水位低下時における解析コード適用の妥当性と不確定性について
3. 製作交差による不確定性について
4. まとめ

1. はじめに

使用済燃料ピットの未臨界性評価における不確定性には「①解析コードに係る不確定性」、「②製作公差に基づく不確定性」が含まれており、本資料は、未臨界性評価において使用済燃料ピット水位低下時において SCALE ver. 6.0 (以下「本解析コード」という) を使用することへの妥当性及び不確かさの考え方について補足説明するものである。

2. 水位低下時における解析コード適用の妥当性と不確定性について

(1) 臨界実験ベンチマークについて

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、第1表のとおり国内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、そのベンチマーク解析を実施することで、本評価体系に対して本解析コードを使用することに対する妥当性確認を行っているものである。

ベンチマーク解析により得られた本解析コードの平均誤差及び不確かさを第2表に示す。ここで、塩素に関するベンチマーク解析結果は「(3)塩素を含む系における本解析コード適用の妥当性と塩素による不確定性について」に記載する理由により計算コードの不確定性の算出のためのベンチマークケースに含めていない。このうち、本評価において計算コードの不確定として使用している平均誤差 $\delta k_0.007$ 及び95%信頼度 \times 95%確率0.0065は、本解析コードの妥当性確認に供した臨界ベンチマーク解析結果□ケースのうち、FPを含まないウラン燃料□ケースに対する平均誤差及びその不確かさより算出しており、水位低下した際でも使用可能である。

(2) 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

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のうち、部分水位で臨界となったケースは計□ケース存在し、その平均C/E(C:計算値とE:測定値の比)は□程度であり、特異な傾向はみられない。そのため、SFP水位低下時に生じる、気相部と液相部に分かれた体系の評価に本解析コードを用いることは妥当であると評価している。

また、第1図に本評価体系における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)と液相部高さの関係、第2図に妥当性確認に選定したベンチマーク実験□ケースに加えて、低水位状態に相当するEALFに対する傾向を確認するため選定した□ケースの結果を追加した計□ケースのEALFとC/Eの関係を、第4表に追加した□ケースの臨界実験を示す。なお、第2図には後述する塩素に関する□ケースについても参考に図示している。第2図に示す通り、本評価体系におけるEALFを含む範囲に対して、C/Eは1.0近傍で精度よく一致しており、特異な傾向を持たないことから、SCALEコードは選定した臨界実験のEALF範囲に良好な計算精度を有していると判断でき、部分水位状態における中性子エネルギーという観点か

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。

らも本評価体系において本解析コードを使用することは妥当であると評価している。

(3) 塩素を含む体系における本解析コード適用の妥当性と塩素による不確定性について

塩素を含む体系の計□ケースのベンチマーク結果の C/E は 1.01 程度と高い傾向にあるが、この結果は計算値が実験値よりも実効増倍率を高く評価するもの（安全側の評価）であり、本評価体系に対し本解析コードを使用することに問題はないと評価している。ただし、第 5 表に示す統計的検定により、塩素を含まない体系計□ケースと塩素を含む体系計□ケースの母平均と母分散が異なるという結果が示されたことから、計算コードの不確定性を算出する際に塩素を含む体系のベンチマーク結果は使用していない。

一方で、塩素による誤差については、臨界実験ベンチマーク解析に関する文献（Sobes, VALIDATION STUDY FOR CREDITING CHLORINE IN CRITICALITY ANALYSES FOR SPENT NUCLEAR FUEL DISPOSITION (2015), ICON）において、塩素に起因する計算コードの誤差は 100pcm（実効増倍率で 0.001 に相当）程度と評価されており、計算結果が有する裕度（解析値が約 1% 高く計算されること）によりその誤差は包括されているといえる。

なお、保守的に文献記載の塩素による誤差 100pcm を適用し、現在使用している不確定性 0.0115 に塩素による不確定性 0.001 を加えた場合でも、いかなる水位においても実効増倍率は 0.98 を下回り、本評価結果に影響はない。

3. 製作公差による不確定性について

「②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の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 3 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いため、不確定性を考慮した場合でも冠水時が最も高い実効増倍率となる。

なお、気相部の拡大により実効増倍率が大きく低下し始める水位 1,000mm 時点での基本ケースにおける実効増倍率は第 6 表に示す通り 0.9316 であり、不確定性 0.0104 を考慮した場合でも 0.943 であり、判定基準を満足している。

上記のとおり、気相部の実効増倍率の不確定性に起因する体系の実効増倍率変動への影響はわずかであることから、本評価モデルにおいて水位低下時に不確定性が極端に大きくはならず、冠水時の不確定性を加えた実効増倍率 0.959 よりも大きくなることはない。

4. まとめ

以上の通り、ベンチマーク結果から水位低下時においても本解析コードを適用することは妥当であ

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。

り、不確定性についても適切に評価できており、不確定性を考慮しても冠水状態で実効増倍率が最も大きくなるという本評価結果は妥当である。

なお、今回評価した冠水状態での不確定性 0.0115 を基に気相中には塩素が加わることも考慮し、従来の未臨界性評価の不確定と同様に保守的に 0.02 と仮定した場合でも、いかなる水位においても実効増倍率が 0.98 を超えることはない。

第1表 選定したパラメータ範囲（製作公差を含まない）

項目	単位	燃料貯蔵設備 及び燃料仕様の パラメータ範囲		選定した臨界実験の パラメータ範囲	
		MIN	MAX	MIN	MAX
燃料	ウラン燃料 ²³⁵ U濃縮度	wt%	1.60	4.80	
	MOX燃料 Pu含有率	wt%	5.5	10.9	
	燃料材径	mm	8.19	9.29	
	燃料要素径	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	
	燃料体内の減速材 体積/燃料体積	—	1.88	2.00	
	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		
	減速材密度	g/cm ³	0	約1.0	
	減速材中の ほう素濃度	ppm	0	4,400以上	
ラック	ラック 材質	—	無/SUS/B-SUS		
	SUS製ラックの ほう素添加量	wt%	0	1.05	
反射体	反射体 材質	—	軽水 /コンクリート		

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 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	SCALE Ver. 6.0 システム (KENO-VI)			
	断面積ライブラリ	ENDF/B-VII 238群			
	対象燃料	ウラン燃料 (FPなし)	MOX燃料 (FPなし)	ウラン燃料 (FPあり)	ウラン+MOX燃料 (FPあり)
	ベンチマークケース数				
評価 結果	平均誤差($1-k_c$)	0.0007	0.0013	0.0001	0.0001
	加重平均実効増倍率 $\overline{k_{eff}}$	0.9993	0.9987	0.9999	0.9999
	不確かさ($\Delta k_c = U \times S_p$)	0.0065	0.0104	0.0067	0.0062
	信頼係数(U)*1				
	$\overline{k_{eff}}$ の不確かさ(s_p)				

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-	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 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-	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

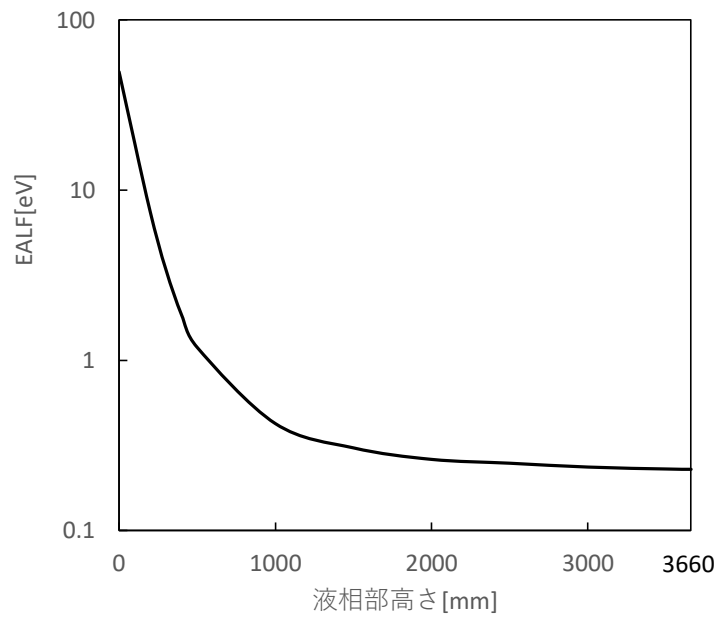
※SFPに流入した水が局所に集中した体系でのEALF

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。

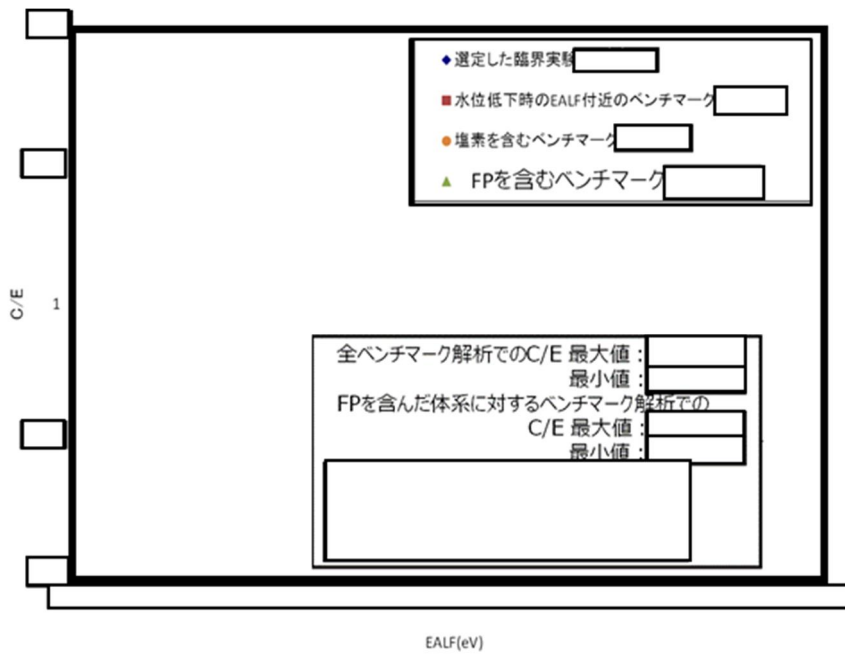
第4表 水位低下時の中性子エネルギー近傍の臨界実験(2/2)

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1図 本評価体系における液相部高さとEALFの関係



第2図 選定し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5-1表 塩素を含む臨界実験ベンチマーク結果とそれ以外の
臨界実験ベンチマーク結果に対するF検定

帰無仮説 H_0 ：2群間の分散に差がない（等分散である）

対立仮説 H_1 ：2群間の分散に差がある（等分散ではない）

検定対象	<input type="checkbox"/> ケースの ベンチマーク結果	塩素を含む <input type="checkbox"/> ケースの ベンチマーク結果
分散		
自由度		
F値		
P値（片側）		
F境界値（片側）		
判定	P<0.05より、対立仮説 H_1 を採択	

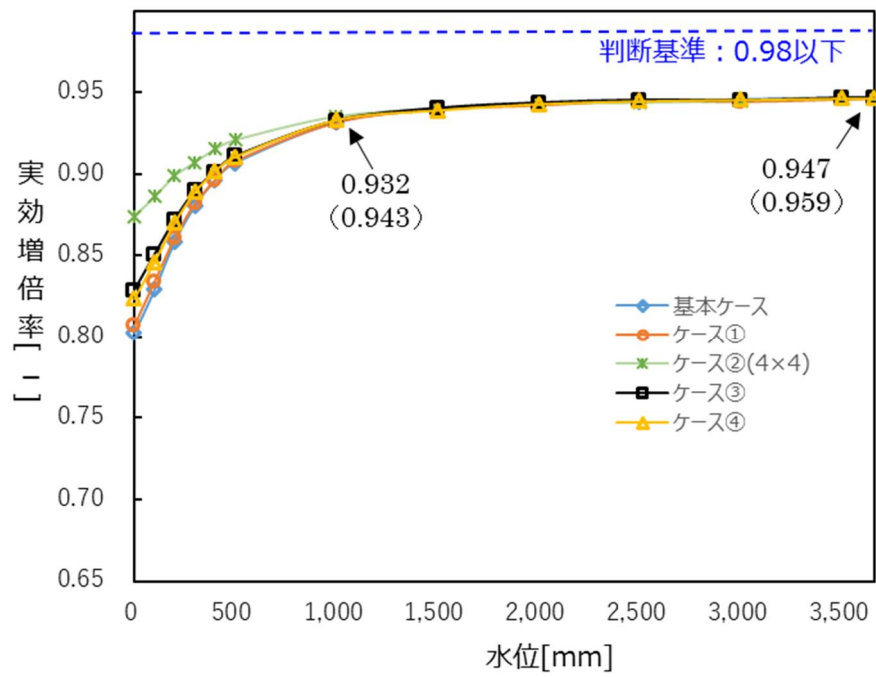
第5-2表 塩素を含む臨界実験ベンチマーク結果とそれ以外の
臨界実験ベンチマーク結果に対するt検定

帰無仮説 H_0 ：2群間の平均に差が無い

対立仮説 H_1 ：2群間の平均に差がある

検定対象	<input type="checkbox"/> ケースの ベンチマーク結果	塩素を含む <input type="checkbox"/> ケースの ベンチマーク結果
自由度		
t値		
P値（両側）		
t境界値（両側）		
判定	P<0.05より、対立仮説 H_1 を採択	

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。



※不確定性を含まない値、括弧は不確定性を含む値

第3図 各ケース評価結果

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
(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	計算体系を第4-1 図に示す。	ラックセルの内のり公差	ϵ_w	0.0016	<input type="text"/>
		燃料製作公差	ϵ_r	0.0044	—
		—燃料材直径	ϵ_d	(0.0014)	<input type="text"/>
		—燃料材密度	ϵ_l	(0.0025)	<input type="text"/>
		—被覆材内径	ϵ_{cr}	(0.0015)	<input type="text"/>
		—被覆材外径	ϵ_{cd}	(0.0026)	<input type="text"/>
	—燃料体外寸	ϵ_a	(0.0014)	<input type="text"/>	
	計算体系を第4-2 図に示す。	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	<input type="text"/>
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。

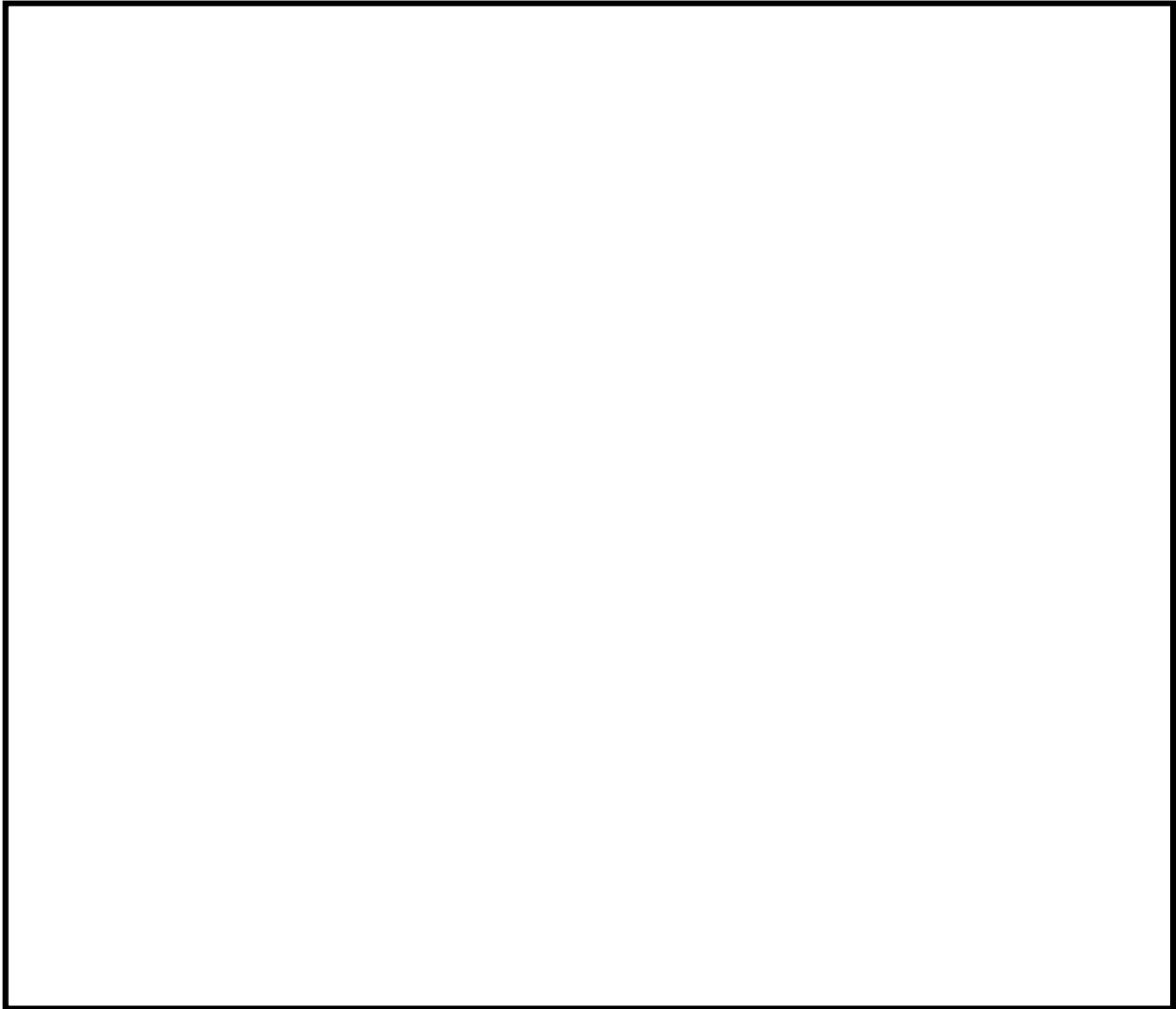
※2 のラックセル内での燃料体の偏心モデル（第4-3図～第4-5図）での での評価結果。
なお、評価結果は下表のとおり。

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
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>

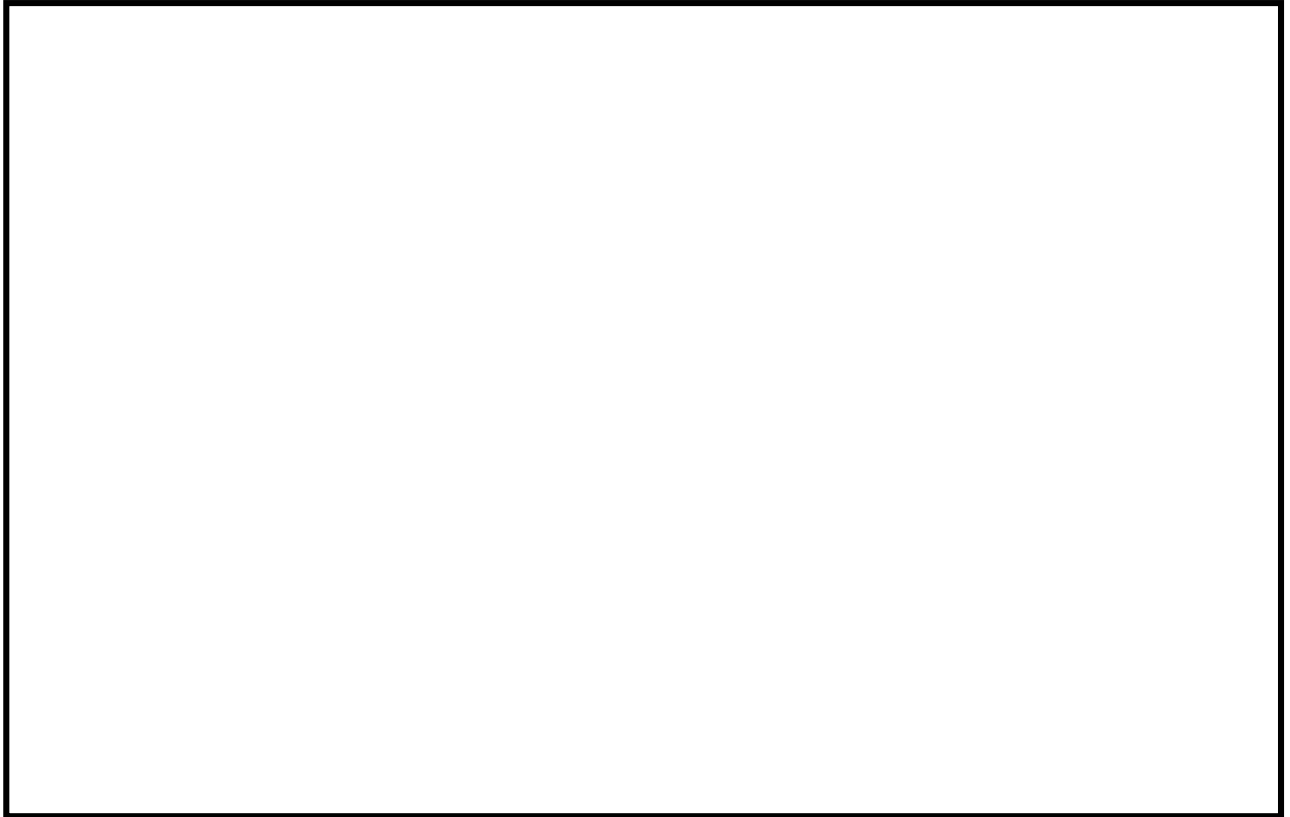
※3

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。



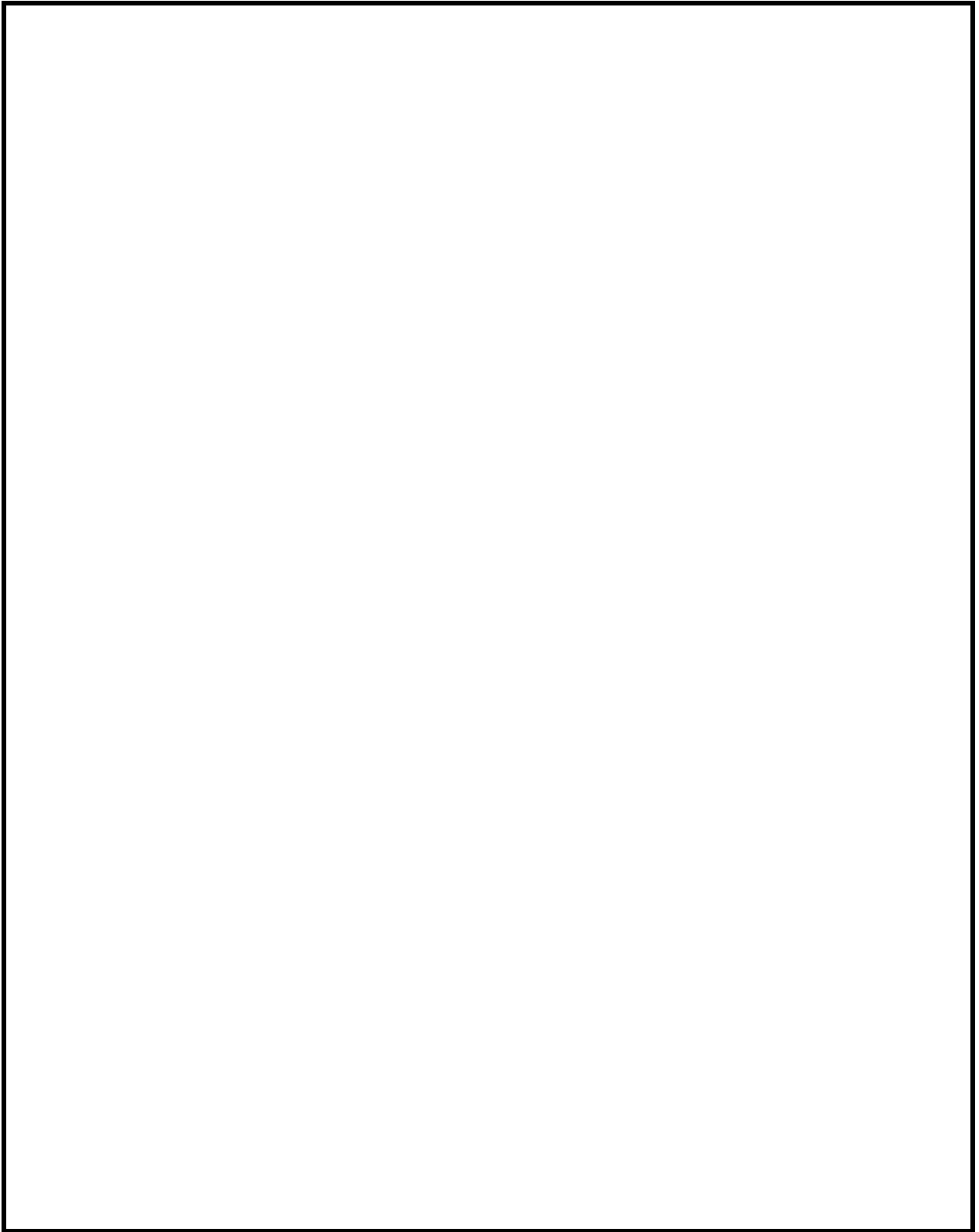
第 4-1 図 製作公差に基づく不確定性評価の計算

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4-2図 製作公差に基づく不確定性評価の計算体系

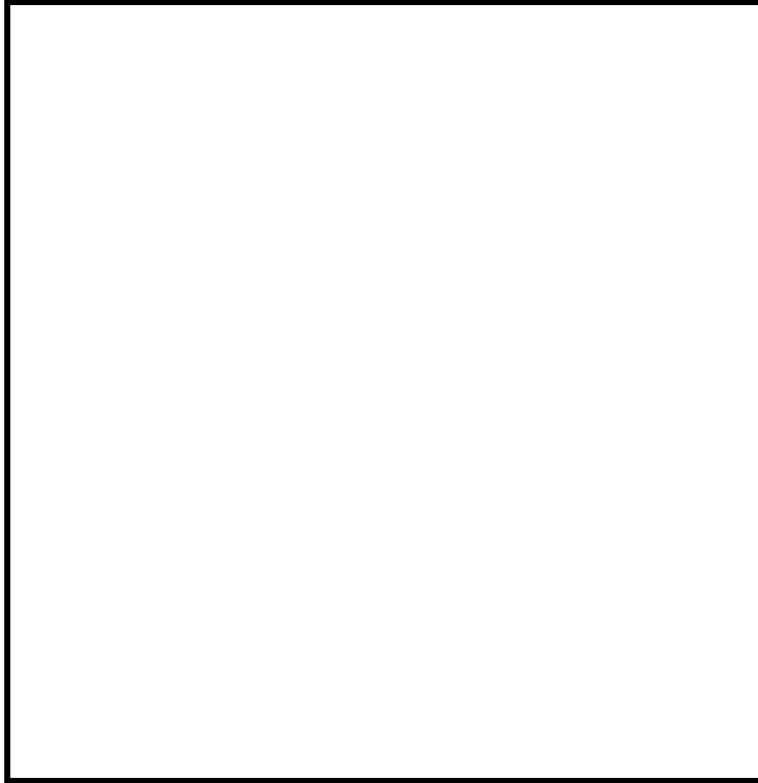
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第4-3図 ラック内での燃料体偏心モデル



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4-4図 ラック内での燃料体偏心モデル



第4-5図 ラック内での燃料体偏心モデル



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。

(参考)

塩素を含んだ臨界実験に対するベンチマーク結果(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
	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※	
中性子吸収	FP（中性子吸収体） 核種／元素	—	収率曲線に応じた核種	
	中性子吸収体性状	—	固体／液体／気体	
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。

塩素を含んだ臨界実験に対するベンチマーク結果 (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。

(参考) 高浜 1 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	計算体系を第4-1図 に示す。	ラックの内のり公差	ϵ_w	0.0023	<input type="text"/>
		燃料製作公差	ϵ_r	0.0061	—
		—燃料材直径	ϵ_d	(0.0014)	<input type="text"/>
		—燃料材密度	ϵ_l	(0.0038)	<input type="text"/>
		—被覆材内径	ϵ_{cr}	(0.0014)	<input type="text"/>
		—被覆材外径	ϵ_{cd}	(0.0032)	<input type="text"/>
		—燃料体外寸	ϵ_a	(0.0029)	<input type="text"/>
	計算体系を第4-2図 に示す。	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)	<input type="text"/>
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(第4-3図～第4-5図) 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
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>

(注5) 未臨界性評価にはラック間隔が を使用する。

(注6)

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。