

大飯発電所 1 号炉及び 2 号炉  
廃止措置計画認可申請書  
補足説明資料

2019 年 11 月  
関西電力株式会社



大飯 1,2 号炉廃止措置 審査資料	
資料番号	添付 6 追補-1
提出年月日	2019 年 11 月 7 日

大飯発電所 1 号炉及び 2 号炉  
追補 1 (添付資料六)

制御棒を含む評価体系に対する  
SCALEコードの適用性および  
制御棒の中性子吸収効果の  
保守性について

2019 年 11 月  
関西電力株式会社

## 目 次

	頁
1. はじめに .....	1
2. 計算コードの不確定性 .....	1
3. 制御棒を含む評価体系への SCALE コードの適用性 .....	1
4. 制御棒の中性子吸収効果の保守性 .....	2

## 1. はじめに

本資料は、追補 1 「Ⅲ. 使用済燃料ピット水大規模漏えい時の未臨界性評価について」に示す解析において使用した SCALE コードの制御棒を含む体系への適用性および評価における制御棒の中性子吸収効果の保守性を説明するものである。

## 2. 計算コードの不確定性

SCALE コードは使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価に広く使用されており、国内において使用済燃料貯蔵槽大規模漏えい時の未臨界性評価に係る多数の許認可実績を有するコードである。

計算コードの不確定性を求めるために、OECD/NEA によりまとめられた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選定した 147 ケースのベンチマーク解析(以下「ベンチマーク解析」という)を実施している。ベンチマーク解析を行うにあたっては、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包含する範囲を整理し、臨界実験を選定した。選定した結果を第 1 表に示す。

また、147 ケースの臨界実験に対し、横軸に 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。中性子吸収材を考慮することにより影響が生じる。)を、縦軸に C/E (C:計算値と E:測定値の比)をプロットしたものを第 1 図に示す。147 ケースの臨界実験の C/E は 1 近傍であり精度よく一致している。

ベンチマーク解析の結果得られた実効増倍率及び標準偏差並びに各実験の実効増倍率測定値及び実験誤差を用いて、ラック体系の未臨界性評価に用いる SCALE Ver. 6.0 システムの平均誤差( $1-k_c$ )及び不確かさ( $\Delta k_c$ )を、ウラン燃料を対象とした場合、MOX 燃料を対象とした場合および全ケースを対象とした場合のそれぞれについて導出した結果を第 2 表に示す。表に示すとおり、ウラン燃料を対象とした場合の SCALE Ver. 6.0 システムの平均誤差は 0.0007、不確かさは 0.0065 であり、MOX 燃料を対象とした場合の SCALE Ver. 6.0 システムの平均誤差は 0.0013、不確かさは 0.0104、全ケースを対象とした場合の SCALE Ver. 6.0 システムの平均誤差は 0.0007、不確かさは 0.0066 となった。本評価は新燃料と燃焼燃料を含む体系の評価であるため、ウラン燃料と MOX 燃料が混在する全ケースの臨界実験を対象として設定した計算コードの不確定性を使用することも可能であるが、「ウラン燃料」又は「燃焼燃料と同様にプルトニウムを含む MOX 燃料」に対する不確定性のうち、評価結果が厳しくなる MOX 燃料に対する不確定性を使用している。

### 3. 制御棒を含む評価体系への SCALE コードの適用性

補正申請評価では制御棒の中性子吸収効果を考慮しているが、第1表に示す通り147ケースの臨界実験には制御棒を含む体系が含まれていない。しかし、臨界実験ベンチマーク解析に関連する文献<sup>注1</sup>において、計算コードにSCALEコード<sup>注2</sup>、断面積ライブラリにENDF/B-VIIを用いた制御棒（銀-インジウム-カドミウム）を含む体系のベンチマーク解析結果が示されており、実効増倍率計算値の平均誤差は0.00146と精度よく一致することが報告されているため、SCALEコードは制御棒を含む体系を精度良く取扱うことができると言える。

なお、SCALEコードの制御棒を含む体系に対する計算精度が不確定性に与える影響を確認するために、関連する文献に記載されているベンチマーク解析結果6ケースを147ケースのベンチマーク解析結果に追加し、計算コードの不確定性を算出した。その結果を第3表に示す。表に示すとおり、制御棒を含む臨界実験のデータを追加して設定した計算コードの不確定性を用いた不確定性合計(0.0117)は、補正申請評価で使用しているMOX燃料に係る臨界実験を対象として設定した計算コードの不確定性を用いた不確定性合計(0.0154)を超えないことから、補正申請評価において、MOX燃料に係る臨界実験を対象として設定した計算コードの不確定性を使用することは妥当である。

### 4. 制御棒の中性子吸収効果の保守性

補正申請評価では制御棒の中性子吸収効果を考慮しているが、寸法（有効長さ、吸収体外径）および組成（吸収材の原子個数密度）を仕様の下限とし、さらに制御棒値を $\square$ 減じた値を用いた評価としているため、制御棒の中性子吸収効果の取り扱いは十分保守的である。

以上から、SCALEコードは制御棒を含む体系を精度良く取扱うことができ、さらには制御棒の中性子吸収効果を十分保守的に考慮しているため、今回補正申請における制御棒を含む体系の未臨界性評価は妥当である。

以上

注1: Junkyung Jang, Hochul Lee, Hyun Chul Lee, Criticality benchmark of McCARD Monte Carlo code for light-water-reactor fuel in transportation and storage packages, (2018) Nuclear Engineering and Technology

注2: 文献中で使用されているSCALEコードのバージョンはVer. 6.2であり、本申請で使用したSCALEコードのバージョンはVer. 6.0であるが、6.0から6.1及び6.2へのバージョンアップは機能拡充のみであり未臨界性評価に影響を与える変更点はない。

**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 <sup>235</sup> 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 <sup>3</sup>	0	約1.0		
	減速材中の ほう素濃度	ppm	0	4400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	SCALE6.0 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	MOX燃料	全ケース
	ベンチマークケース数	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	147
評価 結果	平均誤差(1-k <sub>c</sub> )	0.0007	0.0013	0.0007
	加重平均実効増倍率 ( $\overline{k_{eff}}$ )	0.9993	0.9987	0.9993
	不確かさ( $\Delta k_c = U \times S_p$ )	0.0065	0.0104	0.0066
	信頼係数(U)* <sup>1</sup>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>
	$\overline{k_{eff}}$ の不確かさ (S <sub>p</sub> )	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>

\*<sup>1</sup> 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3表 制御棒を含む体系のベンチマーク解析を考慮した不確定性と  
補正申請評価において使用した不確定性の比較

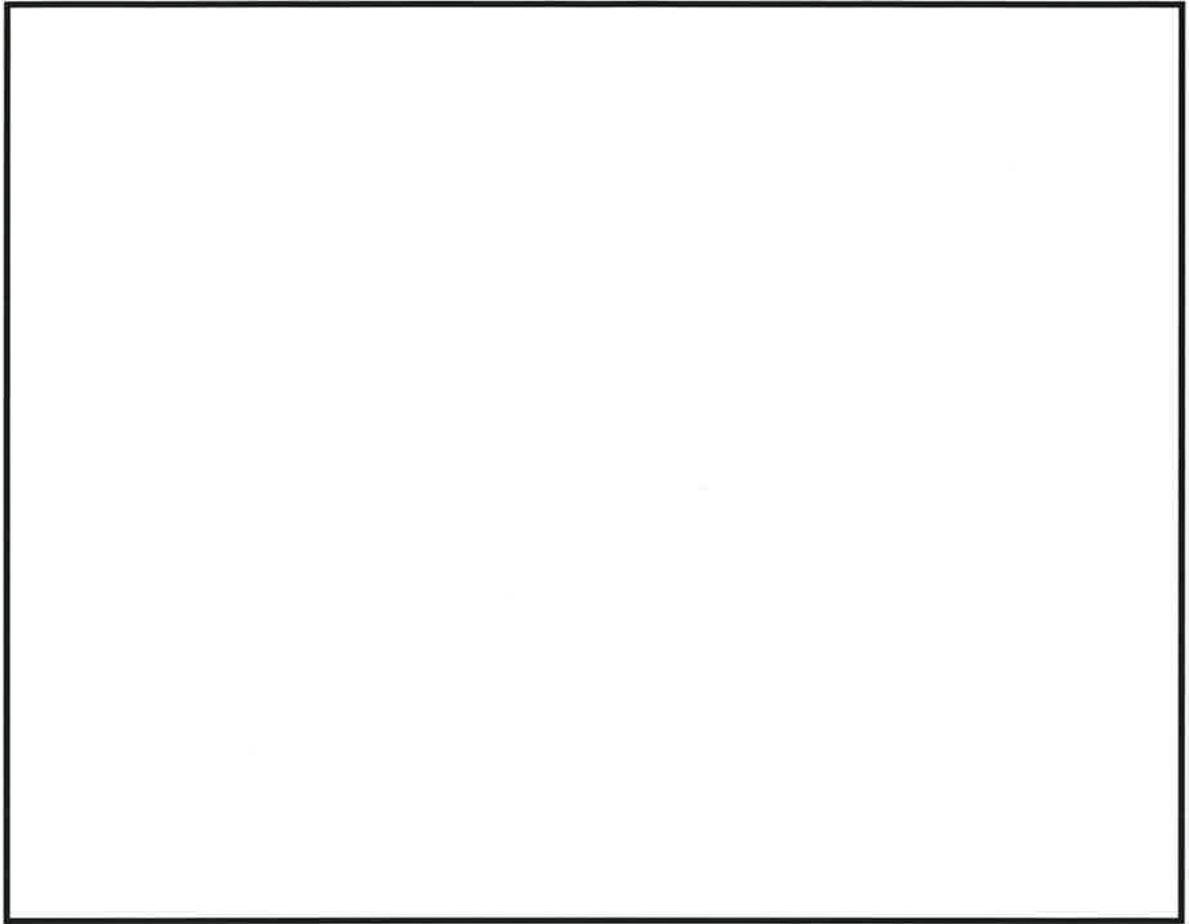
臨界計算上の不確定性評価項目		不確定性		
		記号	MOX 燃料 <input type="checkbox"/> ケース (補正申請評価使用値)	147 ケース + 制御棒を含む 体系 6 ケース
計算コードの 不確定性	平均誤差	$\delta k$	0.0013	0.0014
	95%信頼度×95%確率	$\epsilon c$	0.0104	0.0040 <sup>※3</sup>
製作公差に 基づく 不確定性	ラックの内り公差	$\epsilon w$	0.0026	
	燃料製作公差	$\epsilon r$	0.0069	
	ラックの 中心間距離公差	$\epsilon p$	0.0037	
	ラック内燃料偏心	$\epsilon f$	0.0043	
統計誤差 <sup>※1</sup>		$\sigma$	0.0006	
不確定性合計 <sup>※2</sup>		$\epsilon$	0.0154	0.0117

※1：2000 世代（各世代の中性子発生数を 2000 個とする。）計算した場合の統計誤差



※3：147 ケースと追加した 6 ケースは実験の不確かさの取り扱いが異なる

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 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。