

第 1-3 図 ラックセル内での燃料偏心モデル [ ]

[ ]: 商業機密に係る事項のため、公開できません。



第1-4図 ラックセル内での燃料偏心モデル

：商業機密に係る事項のため、公開できません。



第 1-5 図 ラックセル内での燃料偏心モデル [ ]

[ ]: 商業機密に係る事項のため、公開できません。

## 計算機プログラム（解析コード）の概要

## 1. はじめに

本説明書は、使用済燃料ピットの未臨界性評価において使用した解析コードについて説明するものである。

## 2. 解析コードの概要

## 2.1 SCALE

項目 \ コード名	SCALE
開発機関	米国オークリッジ国立研究所(ORNL)
開発時期	2009年
使用したバージョン	6.0
使用目的	使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価
コード概要	米国オークリッジ国立研究所(ORNL)により米国原子力規制委員会(NRC)の原子力関連許認可評価用に作成された公開コードシステムであり、臨界計算コードが整備されている。本解析では臨界計算のCSAS6モジュールを用い、モンテカルロコードとしてKENO-VI、断面積ライブラリはENDF/B-VIIベースの238群ライブラリを使用している。
検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)	<p>今回の解析は、モンテカルロコードを用いた使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価である。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b>            本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。            ・コードに付属のサンプル問題を実行し、解析解があらかじめ準備された参照解を再現することを確認している。            ・本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</p> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b>            本解析コードの妥当性確認の内容は以下のとおりである。            ・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、国内</p>

<p>検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)</p>	<p>PWRの新燃料貯蔵庫、使用済燃料ピット仕様及び燃料仕様等を考慮して選定した147ケースのベンチマーク解析を実施している。ベンチマーク解析結果と臨界実験の実効増倍率は概ね一致しており、その差はほぼ正規分布となることを確認している。また、ベンチマーク解析の実効増倍率が特定のピット仕様や燃料仕様に依存する傾向もない。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ベンチマーク解析において、軽水減速体系の臨界実験データ及びボロン添加ステンレス板を含む体系の臨界実験データ、更にMOX燃料を用いた臨界実験データを使用した解析結果から、臨界計算に考慮すべき平均誤差及びその不確かさを適切に評価している。</li> </ul>
--------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 2.1.1 SCALEの解析手法について

#### (1) 概要

SCALEは、米国オークリッジ国立研究所(ORNL)により米国原子力規制委員会(NRC)の原子力関連許認可評価用に作成された公開コードシステムであり、臨界計算コードが整備されている。本解析では臨界計算のCSAS6モジュールを用い、モンテカルロ法に基づく3次元輸送計算コードとしてKENO-VI、断面積ライブラリは、ENDF/B-VIIベースの238群ライブラリを使用している。

#### (2) 特徴

- ① 米国NRCにより認証された標準解析コードであり、国内外の臨界解析の分野で幅広く使用されている。
- ② 燃料及び構造材の材質組成と幾何形状を与えることにより、断面積作成から実効増倍率評価まで一連の解析を実行できる。
- ③ 3次元輸送計算コードであり、複雑な幾何形状における臨界計算が可能である。

#### (3) 解析手法

本解析で用いた臨界計算のCSAS6モジュールについて、以下に示す。

##### (3)-1 BONAMI

BONAMIコードは、バックグラウンド断面積と領域の温度から、自己遮蔽因子を内挿し、多群実効断面積を作成する。BONAMIコードは、非分離共鳴エネルギー領域に適用する。作成された多群実効断面積は、CENTRMコードにおける中性子スペクトル計算に使用される。

### (3)–2 CENTRM

CENTRM コードは、セル形状をモデル化して連続エネルギーの中性子スペクトルを求める。CENTRM コードは、分離共鳴エネルギー領域に適用する。

### (3)–3 PMC

PMC コードは、CENTRM コードにより作成された連続エネルギーの中性子スペクトルを用いて連続エネルギーの断面積を多群に縮約し、分離共鳴エネルギー領域の多群実効断面積を作成し、BONAMI で評価された非分離共鳴エネルギー領域の多群実効断面積と組み合わせる。

### (3)–4 KENO-VI

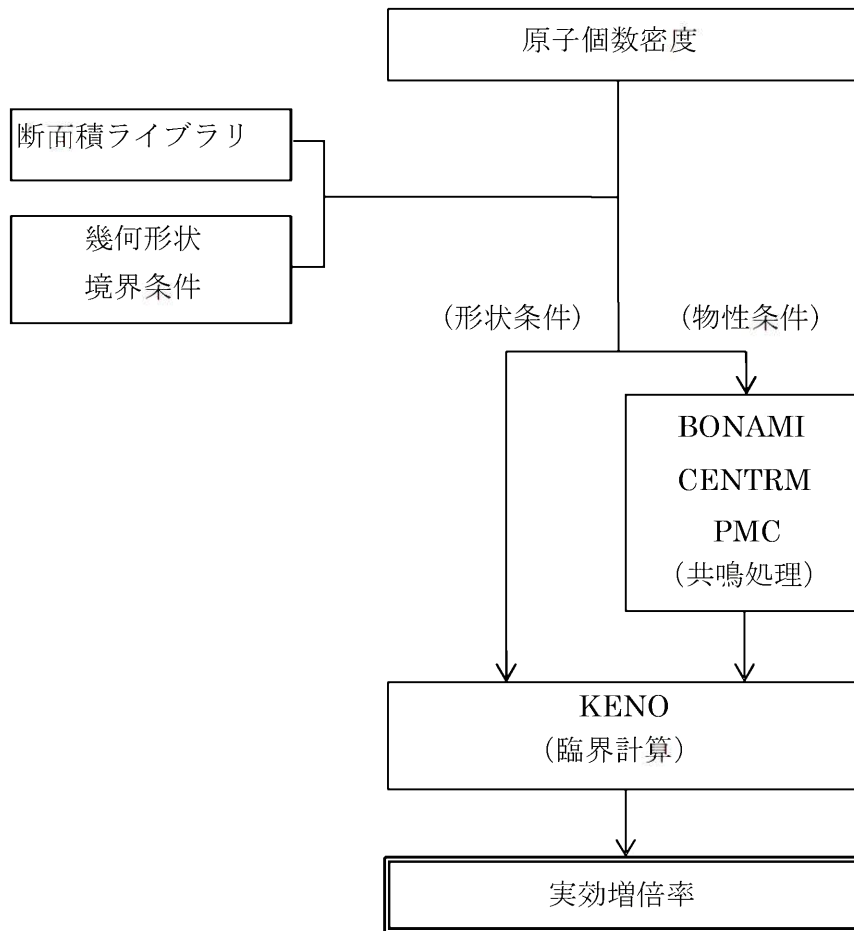
KENO-VI は、ORNL で開発された多群モンテカルロ臨界計算コードであり、複雑な体系の中性子増倍率の計算を行うことができる。本コードでは、体系内の一つ一つの中性子の振舞いを追跡し、核分裂によって発生する中性子数  $F$ 、吸収されて消滅する中性子数  $A$ 、体系から漏えいする中性子数  $L$  を評価し、次式により実効増倍率  $k_{eff}$  を算出する。

$$k_{eff} = \frac{F}{A + L}$$

#### (4) 解析フローチャート

本計算機コードの解析フローチャートを第 2-1 図に示す。

なお、今回の解析で使用する SCALE の機能は、臨界計算であるため、第 2-1 図の解析フローチャートは、臨界計算の CSAS6 モジュールについて記載している。



第 2-1 図 解析フローチャート

## (5) 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

### (5)‑1 バージョン・使用目的

今回の解析に用いた解析コード(SCALE)のバージョン、件名及び解析方法を第2‑1表に示す。本解析に係る検証及び妥当性確認の内容を(5)‑2及び(5)‑3に示す。

第2‑1表 使用件名

解析 No.	使用バージョン	件名
1	6.0	使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価

### (5)‑2 検証(Verification)

コードに付属のサンプル問題を実行し、解析解があらかじめ準備された参照解を再現することを確認した。また、本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認した。

### (5)‑3 妥当性確認(Validation)

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。）を実施した。ベンチマーク解析を行うにあつては、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2‑2表に示す。

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SCALE6.0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とMOX燃料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2‑3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SCALE6.0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SCALE6.0システムの平均誤差は0.0013、不確かさは0.0104となった。

上記のベンチマーク解析結果と臨界実験の実効増倍率は概ね一致しており、その差はほぼ正規分布となることを確認している。また、ベンチマーク解析結果の実効増倍率が特定のピット仕様や燃料仕様に依存する傾向もないため、本コードを使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価に用いることは妥当である。



第2-2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	[ ]	[ ]
ラックセル	ラックセル材質	—	無／SUS／B-SUS		[ ]	
	SUS製ラックセル 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		[ ]	

[ ] : 商業機密に係る事項のため、公開できません。

第 2-3 表 SCALE6.0 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
	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
	加重平均実効増倍率 ( $\overline{k_{eff}}$ )	0.9993	0.9987
	不確かさ( $\Delta k_c = U \times S_p$ )	0.0065	0.0104
	信頼係数( $U$ ) (注 1)	[ ]	[ ]
	$\overline{k_{eff}}$ の不確かさ ( $S_p$ )	[ ]	[ ]

(注 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

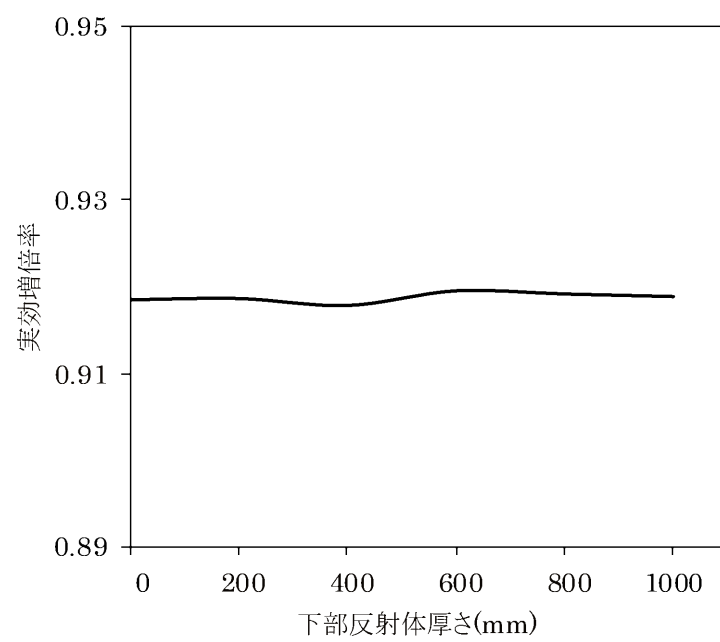
[ ] : 商業機密に係る事項のため、公開できません。

## 大規模漏えい時の未臨界性評価における燃料体等上下部の計算体系設定の考え方

大規模漏えい時の未臨界性評価における燃料体上下部の計算体系は、有限の体系とし、以下のとおり設定している。

大規模漏えい時の燃料有効長上下部付近は低水密度状態となっていることが推測されるが、低水密度状態においても十分な中性子の反射効果が得られる厚さ（中性子の反射効果が飽和する厚さ）となる反射体を仮定して解析を実施している。

具体的には、燃料体等の上下部構造物、ラックの支持脚等及び使用済燃料ピット下部コンクリートのライニングは SUS 材で構成されており、上記で考慮した反射体と比較して反射効果は小さく、中性子吸収材として働くため計算体系上は無視している。その上で、上部については、臨界安全ハンドブック第 2 版（JAERI-1340 日本原子力研究所 1999.3）において、20cm 以上の厚さがあれば十分な反射体厚さ（その厚さの反射体を考慮した場合の実効増倍率と厚さ無限大の反射体を考慮した場合の実効増倍率がほぼ同等となる場合の反射体厚さ（実効増倍率が同等となる場合とは、両者の実効増倍率の差が厚さ無限大の反射体を考慮した場合の実効増倍率に対して  $10^{-3}\Delta k/k$  以下となる厚さ））であるとされており、これを包絡する値として厚さ 300mm の水反射体としている。また、下部については、厚さ 1,000mm のコンクリート反射体とした。厚さ 1,000mm のコンクリート反射体の妥当性については、玄海 4 号炉の使用済燃料ピットにおける大規模漏えい時の未臨界性評価を実施した評価モデルに対する最適減速状態（水密度  $1.0g/cm^3$ ）での下部コンクリートの感度評価結果（第 3-1 図）により、下部コンクリートは十分な厚さが設定されていることを確認している。



第3-1図 玄海4号炉 SFP における下部コンクリート厚さの感度評価結果  
 (最適減速状態：水密度  $1.0\text{g/cm}^3$ )

## 玄海 4 号炉未臨界性評価における温度条件について

未臨界性評価における温度条件は 20℃として評価している。

未臨界性評価において、温度条件の変動による影響を確認するにあたり、未臨界性評価の入力条件となる体系（燃料温度、冷却材温度、構造材温度（被覆材、制御棒案内シンブル、計装用案内シンブル、ラックセル材）、反射体）の温度を大気圧下における水の飽和温度 100℃に設定して解析を実施した。

## 1. 評価条件

燃料仕様、ラック寸法及び解析モデル等の評価条件は、第 1,2 表及び第 1,2,3,4 図と同じである。

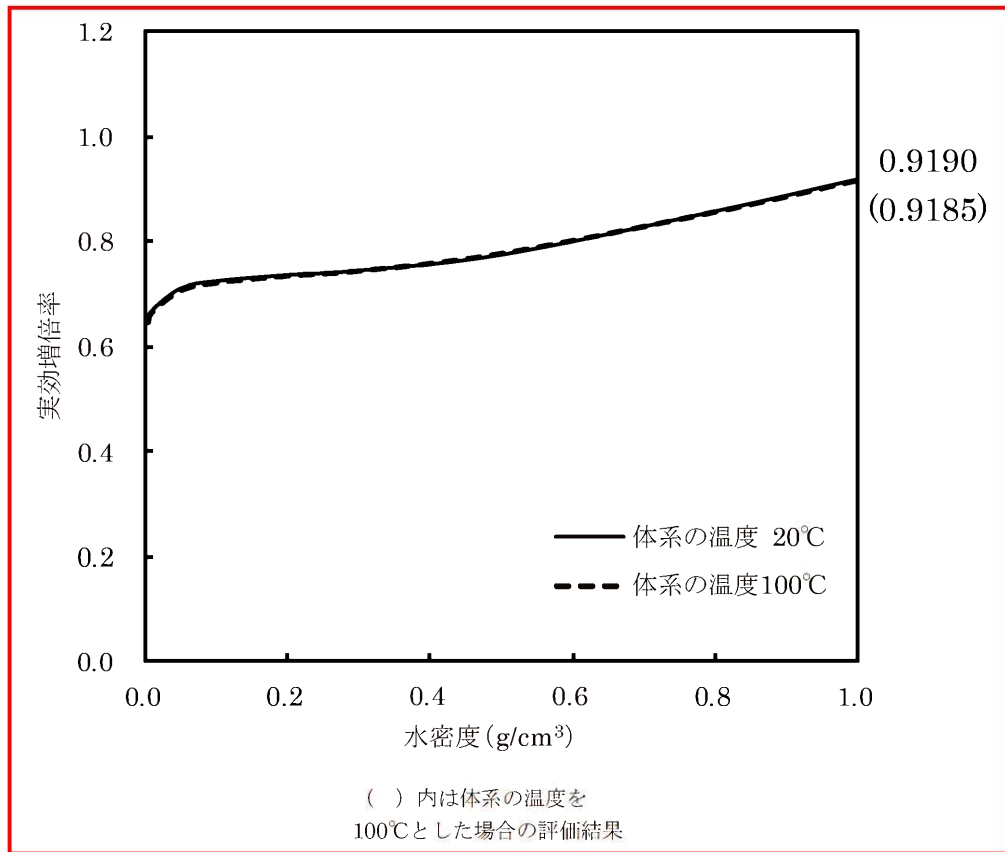
## 2. 評価結果

第 4-1 表及び第 4-1 図に示す。温度条件 100℃の場合の実効増倍率は最大で **0.9185**（水密度 1.0g/cm<sup>3</sup>）、20℃の場合の実効増倍率は最大で **0.9190**（水密度 1.0 g/cm<sup>3</sup>）となり、体系の温度 20℃を採用した。

第4-1表 玄海4号炉 SFP 未臨界性評価結果

評価項目	体系の温度	実効増倍率 <sup>(注)</sup>	水密度
Aピット	20℃	0.9190	1.0g/cm <sup>3</sup>
	100℃	0.9185	1.0g/cm <sup>3</sup>

(注) 不確定性を含まない。



第4-1図 実効増倍率と水密度の関係