

高浜発電所

1号炉及び2号炉

設置許可基準規則等への適合性について
(使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更)

〈補足説明資料〉

(抜粋)

2022年7月

関西電力株式会社

: 今回抜粋箇所

目 次

1. はじめに
2. 設置許可基準規則への適合性
3. 評価の基本方針
4. 実効増倍率の計算方法
5. 計算結果

別添1 使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更に伴う関係条文の整理表

別添2 大規模漏えい時の未臨界性評価手法について

別添3 解析結果の妥当性確認について

別添4 大規模漏えい時の未臨界性評価における不確定性評価の考え方

別紙1 計算機プログラム（解析コード）の概要

別紙2 SFPへの注水・放水流量の設定について

別紙3 実機スプレイ設備を用いた液滴径計測試験および液滴条件設定について

別紙4 液滴下降速度の算出について

別紙5 流量条件に対する使用済燃料ピットの未臨界性評価上の頑健性について

解析結果の妥当性確認について

目 次

1. はじめに
2. 解析に用いたコードの特徴
3. 解析結果の妥当性確認
 - 3.1. 類似解析結果との整合性
 - 3.1.1. 評価条件および結果
 - 3.1.2. 妥当性確認
 - 3.1.2.1 燃料冠水時の実効増倍率
 - 3.1.2.2 水位 0mm での実効増倍率
 - 3.2. 一般的な物理式により求まる実効増倍率との整合性
 - 3.2.1. 前提条件
 - 3.2.2. 妥当性確認
4. 解析に適用した品証プロセスの確認
5. まとめ

1. はじめに

今回の未臨界性評価では、最適評価手法を用い、最確状態を踏まえた基本ケースと不確かさ影響を確認する感度解析ケースについて解析を実施した。各ケースにおける臨界計算コード (SCALE コード) へのインプット条件を第 3-1 表に、実効増倍率評価結果を第 3-1-1 図および第 3-1-2 図に示す。

今回の評価条件は、既許認可での解析と異なり、以下のとおり空間中の水分状態を非均質に設定している点で特徴がある。

- ・ 体系を軸方向に気相部と液相部に大きく分割
- ・ 気相部においては、燃料集合体の中と外で異なる水分状態を設定するとともに、燃料棒周りに液膜が形成されることを考慮

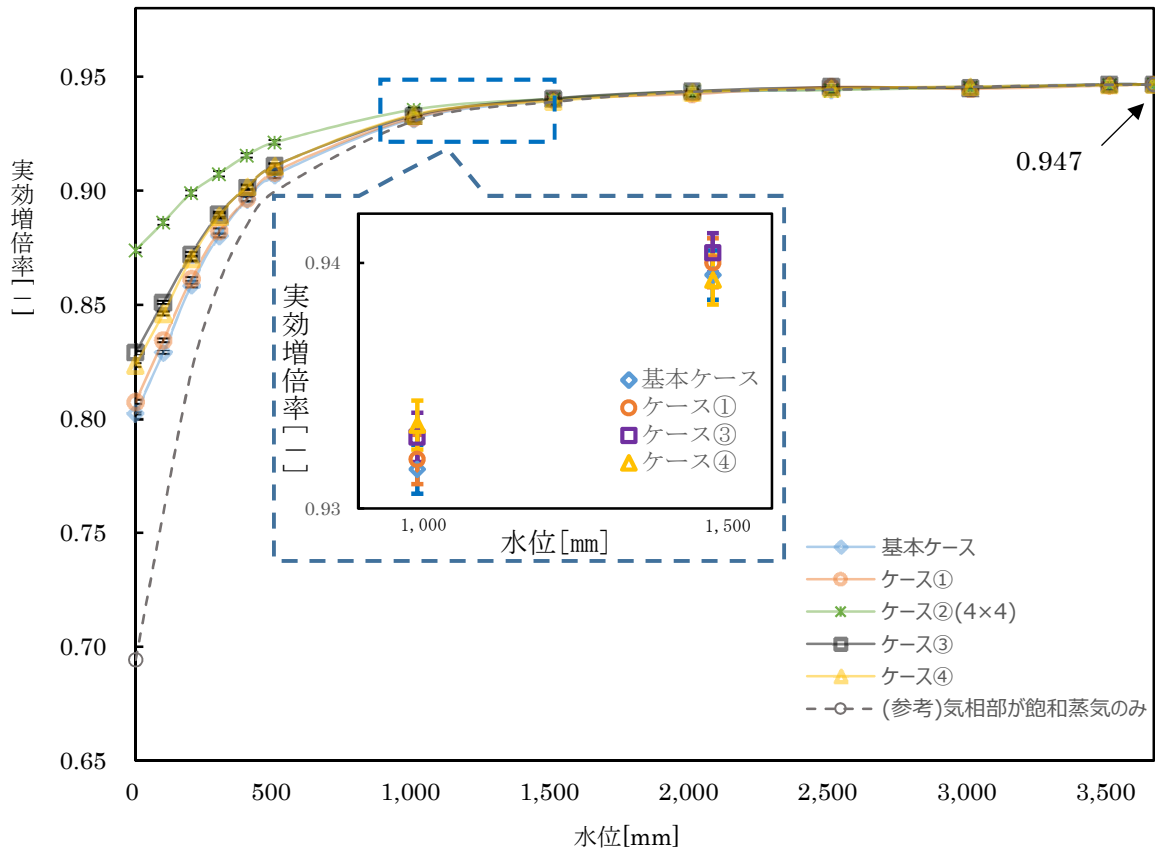
本資料では、上記のような特徴を有し、水位が低下するにつれ単調減少した基本ケースの実効増倍率解析結果の妥当性について確認するとともに、今回解析業務を実施するに当たり適用した品証プロセスの解析結果の適切性を説明する。

第3-1表 各ケースにおける臨界計算コードへのインプット

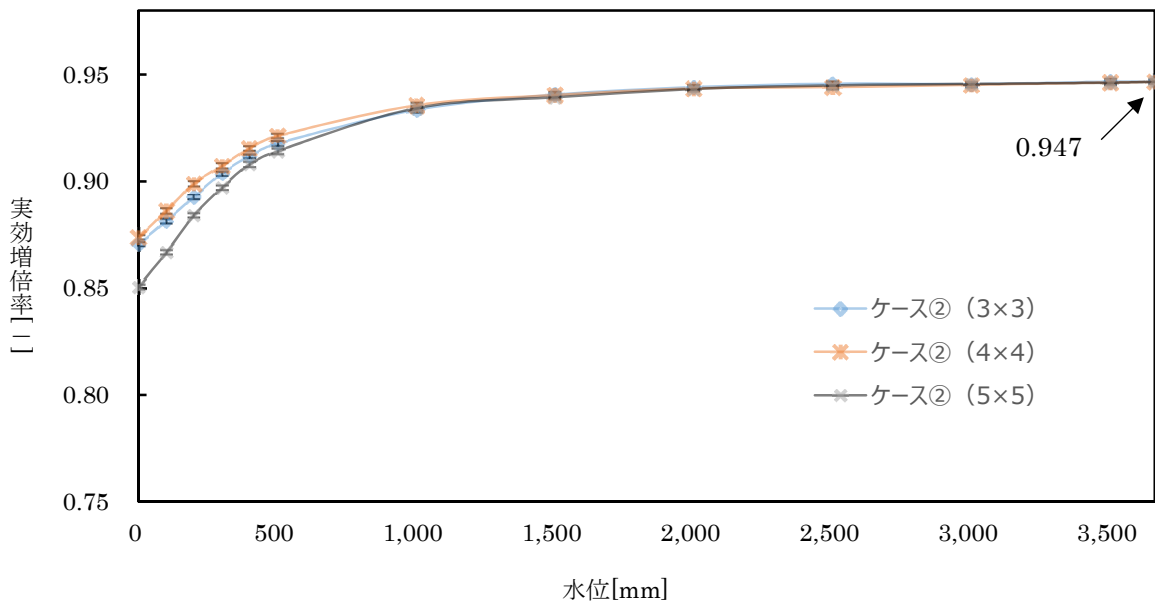
	基本ケース	ケース① (1手順あたりのポンプ台数による感度を確認する解析)	ケース② (「流入範囲を狭める風の影響」による感度を確認する解析)	ケース③ (「斜め方向に液滴を落下させ燃料集合体内への流入割合に影響を与える風の影響」による感度を確認する解析)	ケース④ (スプレイト試験における測定箇所毎の結果の差異による感度を確認する解析)
燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP 有限体系)				
燃料種類	15×15型 通常ウラン燃料				
液膜厚さ [mm]					
燃料集合体内 気相部水密度 [g/cm ³]	0.0006 (飽和蒸気密度)				
燃料集合体外※ 気相部水密度 [g/cm ³]					
流入範囲外 気相部水密度 [g/cm ³]	—	—	0.0006 (飽和蒸気密度)	—	—

※ 淡水由来の流入水による水密度を「純水」、海水由来の流入水による水密度を「海水」と記載。

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 3-1-1 図 実効増倍率評価結果^{※1,2} (基本ケース、感度解析ケース)



第 3-1-2 図 実効増倍率評価結果^{※1,2} (感度解析ケース②詳細)

※1 エラーバーはモンテカルロ計算における標準偏差 ($\pm 2\sigma$)

※2 製造公差、計算コード等による不確定性を含まない値

2. 解析に用いたコードの特徴

解析に用いた SCALE コードは別紙 1 に記載の通り、燃料及び構造材の材料組成と幾何形状を与える（形状情報を設定し、形状ごとに物質の原子個数密度を設定する。）ことにより解析を行う 3 次元輸送計算コードであり、今回液膜を考慮した解析で設定する形状（円管）、物質（軽水）を含んだ体系を精度よく評価できることをベンチマーク解析により妥当性確認している。既許認可解析においても、円管形状（燃料材や被覆管）および軽水を考慮した解析を実施している。また、ベンチマーク解析のため選定した臨界実験には中途水位により臨界を達成するものもあり、SCALE は各水位での実効増倍率も精度よく評価できている。

よって SCALE コードは、液膜の存在および水位条件を考慮した SFP 体系であっても、当該水分条件を適切に入力すれば、適切な解析結果を提示できるコードである。

3. 解析結果の妥当性確認

SCAEL コードを使用した基本ケース解析結果の妥当性について、大きく 2 つの観点で確認した。これらの詳細について以下で説明する。

- ①類似解析との比較
- ②一般的な物理式との整合

3.1 類似解析結果との整合性

基本ケース解析結果について、妥当性が確認された既許認可解析にて考慮していた燃料・水分条件を採用した類似解析の結果との比較を行い、条件の差異に対して実効増倍率の増減の方向が適切であることを確認する。

3.1.1 評価条件および結果

基本ケース及び類似解析の燃料・水分条件と実効増倍率評価結果を第 3-2 表に示す。類似解析には、既許可解析で採用した実績がある燃料条件（新燃料敷き詰め、または 3 領域管理）と水分条件（冠水または水密度 $0 \sim 1\text{g/cm}^3$ で一様変化）を持つものを選定した。

ここで、類似解析では体系全体に様な水密度を設定するのに対し、基本ケースでは気相部において燃料集合体の内側と外側で異なる水密度を設定していることから、両者の解析結果の比較を行うにあたり、気相部の水分量を評価する共通の指標が必要となる。水密度が $1.0\text{g/cm}^3 \sim 0.5\text{g/cm}^3$ の範囲では水密度低下に伴い実効増倍率が単調減少し、その後水密度約 0.1g/cm^3 に向けて実効増倍率が上昇するという既許認可解析結果の特徴より、低水密度においては中性子が隣接燃料以遠まで到達し核分裂反応を起こしていると考えられる（中性子の平均自由行程が冠水時に比べて約 10 倍程度に長くなっている）。SFP の燃料間隔は基本ケースで想定する液膜厚さより十分大きく、中性子が隣接燃料以遠まで移動する間の減速は、水分の存在形態が液滴か液膜かといったマイクロな条件の差よりも、体系内に保持される水の総量に主に依存すると考えられることから、気相部の水分量を評価する共通の指標として、空間平均水密度*を採用するのが適当である。

基本ケースと類似解析の実効増倍率を空間平均水密度を横軸にプロットしたものを第 3-2

図に示す。なお燃料冠水時と水位0 cmにおいて中性子の移動距離が大きく異なるのは、中性子のエネルギー分布の違いによるものであり、気相部・液相部のスペクトル分析によって視覚的に確認でき、それを参考2に示す。

※空間平均水密度：気相部内の、「液膜+燃料集合体外気相部水密度」という非均質な水分状態について、体系に保持される水分量を保存した状態で一様水密度へ換算したもの。

<空間平均水密度 ρ の算出方法>

$$\rho = \rho_x + \rho_y + \text{飽和蒸気密度}$$

ρ_x ：燃料集合体外気相部水密度による空間平均水密度への寄与分

ρ_y ：液膜による空間平均水密度への寄与分

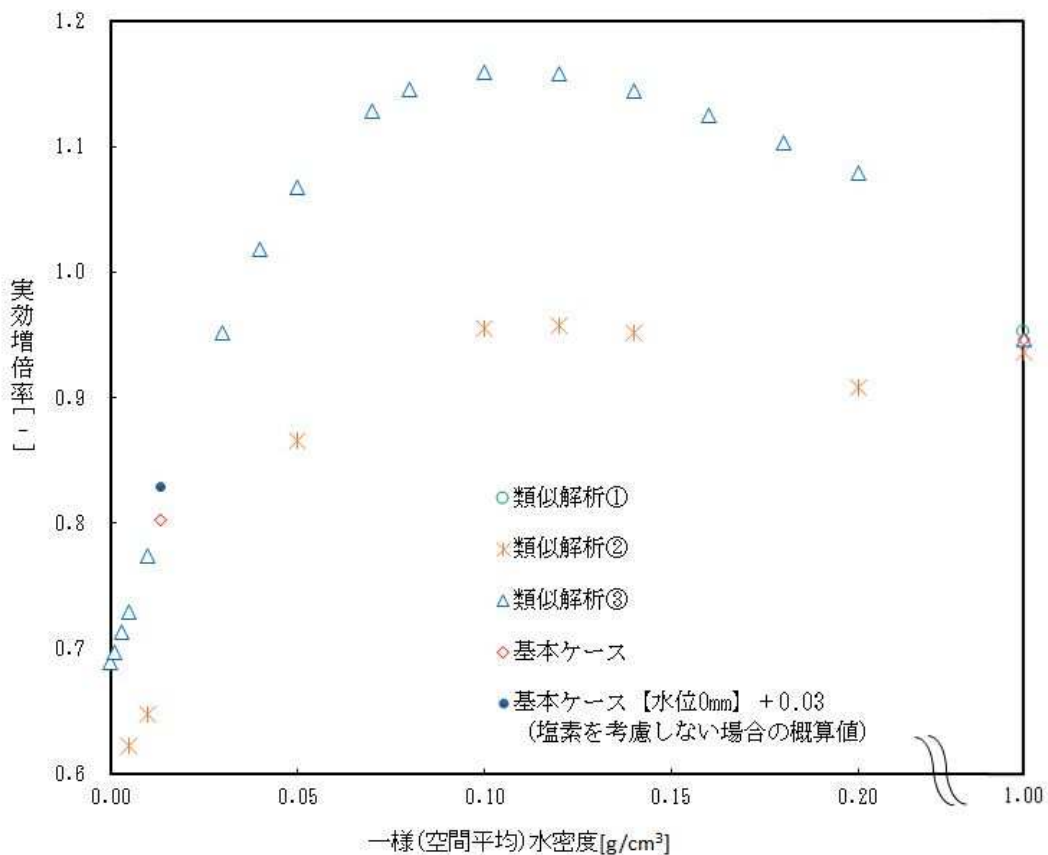
$$\rho_x = (\text{燃料集合体外気相部水密度} - \text{飽和蒸気密度}) \times \frac{(\text{ラックピッチ面積} - \text{燃料集合体外寸面積})}{S}$$

$$\rho_y = \frac{S_m}{S} \times 1[\text{g/cm}^3]$$

(S_m ：ラックピッチあたりの液膜占有面積、 S ：ラックピッチあたりの間隙面積)

第 3-2 表 基本ケース、類似解析の解析条件および結果

	基本ケース条件	類似解析① (既許認可での 16 条および 54 条 1 項に係る評価)	類似解析② (既許認可での 54 条 2 項に係る評価)	類似解析③
燃料配置	ウラン新燃料 敷き詰め	ウラン新燃料 敷き詰め	3 領域管理 (0、20、50Gwd/t)	ウラン新燃料 敷き詰め
ウラン濃縮度	□ wt%	□ wt%	□ wt%	□ wt%
液膜厚さ	□ mm	—	—	—
燃料集合体内 気相部水密度	0.0006 g/cm ³	1.0 g/cm ³	0~1.0 g/cm ³ で一様変化	0~1.0 g/cm ³ で一様変化
燃料集合体外 気相部水密度	□			
液相部条件	純水 (水密度 1.0g/cm ³)	—	—	—
変動 パラメータ	水位	なし	水密度	水密度
実効増倍率 ^{*1} 評価結果	第 3-2 図参照			



第 3-2 図 基本ケースおよび類似解析の評価結果

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。

3.1.2 妥当性確認

3.1.2.1 燃料冠水時の実効増倍率

解析結果は、類似解析②<基本ケース<類似解析①となっている。

これは、この3つの水分状態が冠水状態で共通しており、実効増倍率の差異は燃料条件に依存すること、燃料条件（燃焼度、濃縮度）は、類似解析②<基本ケース<類似解析①の順に厳しくなることから妥当である。

3.1.2.2 水位 0cmでの実効増倍率

類似解析③は、軸方向の燃料有効長全域にわたり一様な水密度を設定し解析している（すなわち気相・液相の分かれ目がない）ため、今回の未臨界評価手法における水位が 0 cmである状態（すべて気相部、ただし液膜が無い条件）に相当する状態と捉えることが出来る。第 3-2 図に示される通り実効増倍率は、類似解析③（水密度 0.01g/cm³）<基本ケース<類似解析③（水密度 0.03g/cm³）となっている。

これは、参考 3 に示すように、空間平均水密度が 0g/cm³ から約 0.1g/cm³ の範囲においては、空間平均水密度が大きくなるほど実効増倍率が高くなること、および基本ケース（水位 0cm）の空間平均水密度（0.0134g/cm³）が、0.01 g/cm³ と 0.03 g/cm³ の間にあることから妥当である。

また、基本ケースにおける気相部には塩素が含まれている。塩素による中性子吸収効果は実効増倍率換算で約 0.03 であり、塩素の中性子吸収効果を考慮しない場合の想定値として基本ケース（水位 0cm）の実効増倍率に 0.03 の加算を仮定しても 0.833 となり、この値でも類似解析③（水密度 0.01g/cm³）<基本ケース<類似解析③（水密度 0.03g/cm³）の関係を満たす。

3.2 一般的な物理式により求まる実効増倍率との整合性

基本ケースの実効増倍率評価結果は、冠水時で最大となり、水位低下に伴い単調に減少する挙動を示した。本挙動が、一般的な物理式から得られる水位低下時の実効増倍率挙動と整合していることを確認する。

3.2.1 前提条件

- 基本ケースの水位 0cm における実効増倍率（0.803）は、冠水時の実効増倍率（0.947）と比較して小さいことから、基本ケースの水分条件では、液相部のほうが気相部より反応度が相当大きいと言える。この特徴を踏まえ、議論を単純化するため、第 3-3-1 図に示すような液相部と燃料からなる体系（軸方向寸法の低下により液相水位および燃料高さも同時に低下する）を考える。この場合、実効増倍率(k_{eff})は以下の式より求められる。

$$k_{eff} = \frac{k_{\infty}}{1+M^2B^2} \cdot \dots \textcircled{1}$$

ここで、 k_{∞} は液相部の無限増倍率、 M^2 は移動面積、 B^2 は液相部のバックリングである。

- SFP 冠水時の実効増倍率は、体系が十分に大きいことから有限体系でも無限体系でも大きな差は無いため、液相部の無限増倍率（中性子の体系外への漏れがないとした増倍率）は、今回基本ケース冠水時の実効増倍率を保守側に切り上げ $k_{\infty} = 0.95$ とする。
- バックリングの算出には、直方体の体系における一般的な導出式である下式を用いる。X と Y は SFP の水平方向寸法であり固定値とし、Z は液相部の高さとする。

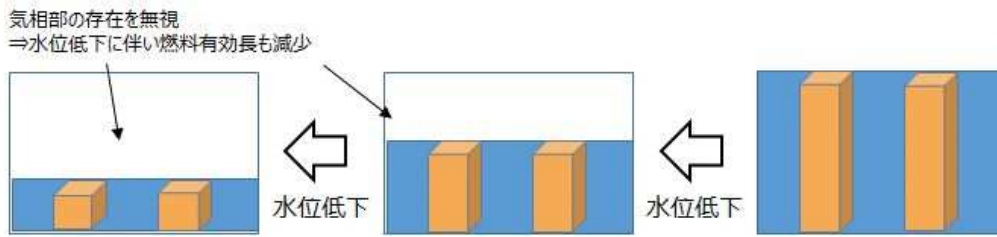
$$B^2 = \left(\frac{\pi}{X+2\delta_x}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{Y+2\delta_y}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{Z+2\delta_z}\right)^2 \quad \dots \textcircled{2}$$

ここで、 δ は外挿距離である。

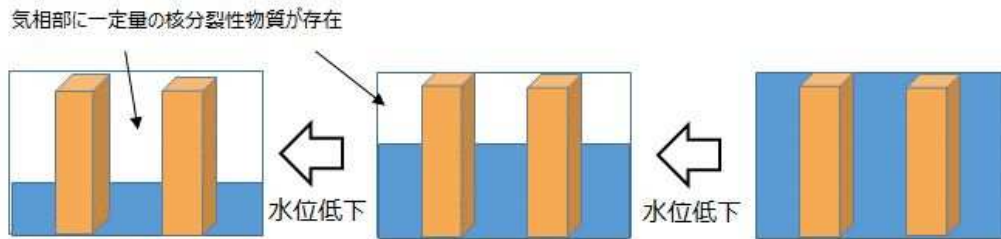
- 実効増倍率の算出に必要なとなる移動面積 M^2 および外挿距離 δ は、文献（軽水減速 UO_2 および PuO_2-UO_2 燃料炉心の臨界量、JAERI 1254、鶴田晴通ら (1977)）に示される TCA 実験炉の試験データを元に、以下の通り設定する。これらの導出過程を参考 1 に示す。

$$M^2 = 37.7、\delta_x = \delta_y = 8.5、\delta_z = 6.3$$

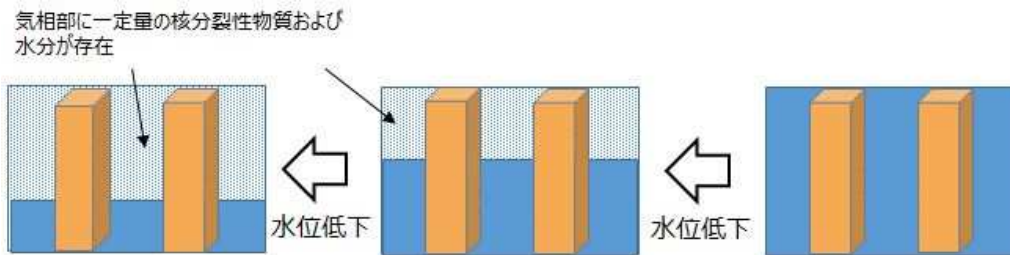
TCA 実験炉の体系概念図を、基本ケースの体系概念図と共に第 3-3-2 図に示す。



第 3-3-1 図 物理式に基づく評価で考慮する体系の概念図



TCA 実験炉の体系概念図



基本ケースの体系概念図

第 3-3-2 図 TCA 実験炉および基本ケースの体系概念図（燃料領域のみ）

ここで、 M^2 は拡散係数および中性子吸収・散乱断面積により求まる値であり、TCA 実験炉データと、物理式に基づく概略評価で考慮する体系や基本ケース体系は H/U が同等であるため、体系間での差は小さいと考えられる。また各体系で水平方向には軽水が存在するため、水平方向の外挿距離も各体系間での差は小さいと考えられる。

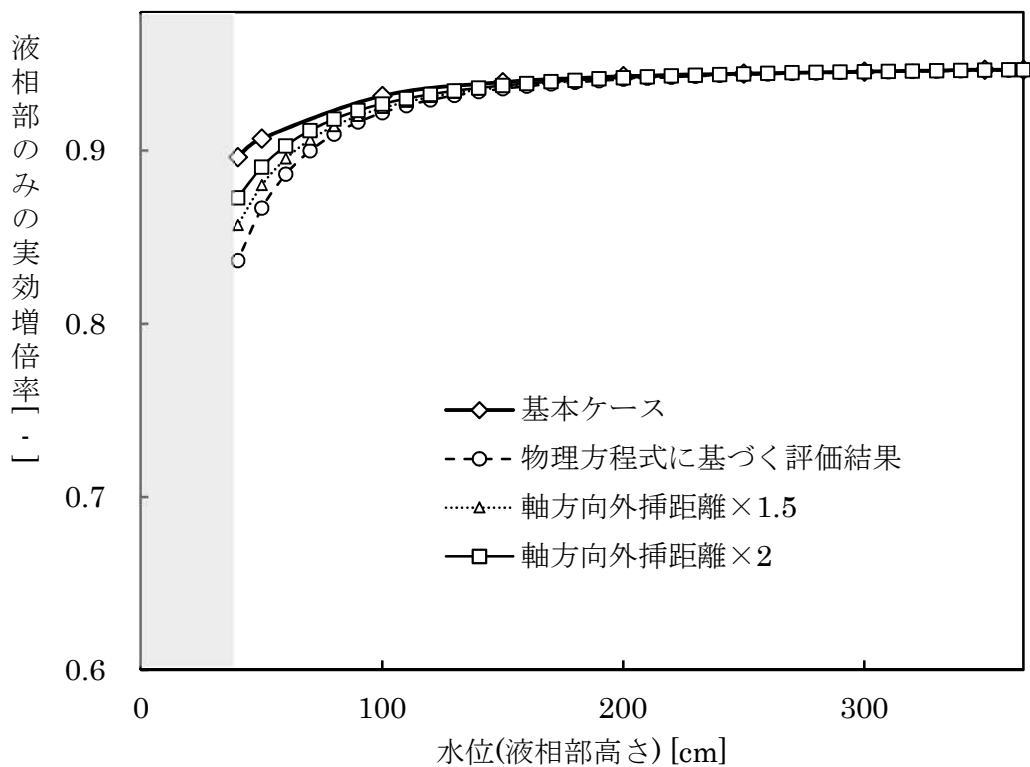
一方で、TCA 実験炉では液面上部には水分がほぼ存在しない一方、基本ケースでは一定量の水分が存在している。また基本ケースの解析においては下部反射体として厚さ 1000mm のコンクリートを設定していることを踏まえると、基本ケースの体系における軸方向外挿距離は、TCA 実験炉で取得された値より大きな値となることが考えられる。軸方向外挿距離が大きくなることによる実効増倍率への感度を確認するため、外挿距離 δ_z を 1.2 倍、1.5 倍、2 倍とした場合の物理式に基づく実効増倍率を合わせて確認する。

なお、体系が小さくなり中性子の漏れが極端に多くなる場合には、②式において体系寸法に対して定数である外挿距離の影響が大きくなり、①式による k_{eff} の値は実際の実効増倍率と差が生じてくるため、水位変化に対する実効増倍率変化挙動を①式にて確認するに当たっては、ある程度の水位以上で適用できることに注意が必要となる。本評価においては、文献での T C A 試験炉では臨界状態を達成するために炉心水位 40cm 以上にて測定が実施されていることから、バックリングを踏まえた妥当性確認においては、水位 40cm 以上を確認対象とする。

3.2.2 妥当性確認

液相高さを変化させた場合の実効増倍率を概算した結果を第 3-4 図に示す。一般的な物理式により算出した実効増倍率は、水位低下に伴い単調に減少しており、基本ケースの評価結果も同様に単調減少していることから、今回評価結果が物理的に妥当であることが確認できる。

また基本ケースと T C A 試験炉の体系の違いを踏まえ、文献の T C A 実験で得られた外挿距離よりも長い値を物理式に適用した場合の実効増倍率への感度を確認した。



第 3-4 図 物理式より求まる実効増倍率

4. 解析に適用した品証プロセスの確認

今回の未臨界性評価に係る解析の実施に当たっては、「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」（以下、本ガイドラインという。）に則った品質管理を実施している。本ガイドラインでは、解析結果の検証を含め解析業務全般に対する審査を実施することが要求されており、今回解析業務の発注者である当社は、検証を含む審査を受注者が適切に行っていることを確認することで持って解析結果の適切性を確認している。

本ガイドライン規定項目のうち、解析コードの取り扱いや解析結果の確認に関する規定項目に係る当社の実施事項を第3-5表に示す。なお「解析結果の審査、検証」について、本ガイドラインに記載される〈解説、事例等〉に沿って記載している。

第 3-5 表 「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」の適用確認 (1/2)

項目 (原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン)		実施事項	確認結果 (○：実施 ×：未実施)
番号			
(i)	<p>【発注者 (事業者)】</p> <p>(1) 発注者は、受注者によって使用する計算機プログラムが適正であることが検証され、その検証方法及び登録方法を明確にして管理されていることを確認すること。</p> <p>【受注者 (解析者)】</p> <p>(1) 受注者は使用する計算機プログラムが適正であることを検証するための検証方法や、適切に管理するための登録方法 (登録リストによる管理方法等)を明確にすること。</p> <p>(2) 受注者は(1)の方法に基づき、計算機プログラムが適正なものであることを事前に検証し、受注者の組織が定めた登録リストにて管理すること。登録管理を行わない計算機プログラムを使用する場合には、その都度、検証を行うこと。</p> <p>(3) その登録リストには、検証された計算機プログラム名称及びバージョンを明記すること。また、計算機プログラム名称が同じであってもバージョンが相違する計算機プログラムを使用する場合は、改めて検証を行うこと。</p>	<p>【発注者】</p> <p>SCALE コードが適正なものであることが以下の通り事前に検証されていることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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した。(既許可時点で確認) ・解析業務調達時における SCALE コードの運用環境について、開発機関 (ORNL) から提示された要件を満足している。(今回解析に当たっても確認) <p>【受注者】</p> <p>SCALE コードの検証方法および結果 (ベンチマーク解析等によりコードとしての V&V を実施済みであることを確認する等) を図書に纏めている。また SCALE コードはソフトウェアリストに登録し管理することとしている。</p> <p>解析実施前に、SCALE コードの検証を行っている (動作環境が適切であること、SFP 未臨界性評価に用いるための妥当性確認済みのプログラムであること等)。</p> <p>登録リストにはプログラム名称及びバージョンを明記している。</p>	○
(ii)	<p>【発注者 (事業者)】</p> <p>(1) 発注者は、受注者が解析ごとの入力根拠を明確にしていることを確認すること。</p> <p>【受注者 (解析者)】</p> <p>(1) 受注者は、業務計画書等に基づき解析ごとの入力根拠を明確にした文書を作成すること。</p>	<p>【発注者】</p> <p>今回解析に係る業務計画書に基づき受注者が作成する、入力条件を取り纏めた図書において、以下の通り入力根拠が明確になっていることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・液膜厚さ、気相部水密度等の水分条件が当社指定の条件通りであること。 ・燃料仕様やラック仕様の詳細 (燃料材の径、被覆管内外厚さ、ラック内のり等) について、設備図書に基づき設定されていること、または既許認可での設定条件と同じであること。 <p>【受注者】</p> <p>入力条件の根拠を取り纏めた図書を作成した。</p>	○
(iii)	<p>【発注者 (事業者)】</p> <p>(1) 発注者は、受注者が計算機プログラムへの入力 が正 確に実施されたことを確認していることを確認すること。</p> <p>【受注者 (解析者)】</p> <p>(1) 受注者は、計算機プログラムへの入力 が正 確に実施されたこと の確認を行うこと。</p>	<p>【発注者】</p> <p>エコーバック^{**2}されたデータにより、図書で定めた通り適切に入力 がなされたことをチェックしていることを確認した。</p> <p>【受注者】</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 3-5 表 「原子力施設における許認可申請等に係る許認可申請等に関する許認可申請等」の適用確認 (2/2)

項目	項目		実施事項	確認結果 (○：実施 ×：未実施)
	番号	規定内容		
(iv)	<p>解析結果の審査[※]、検証</p>	<p>【発注者 (事業者)】</p> <p>(1) 発注者は、受注者が解析結果の検証項目と内容を明確にし、検証を含む審査状況を確認すること。</p> <p><解説、事例等></p> <p>発注者は、受注者が解析結果を、以下の観点で審査していることを、添付 1「解析業務の業務フローチャートの例」に示すように、受注者の作業工程の中で適宜確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 入力根拠を明確にしており、計算機プログラムへの入力を正確に実施しているか。 汎用表計算ソフトウェアを使用していることを明確にしており、必要な管理をしているか。 解析結果が適切であることを確認しているか。 <p>【受注者 (解析者)】</p> <p>(1) 受注者は、あらかじめ策定した業務計画書に従って解析結果の検証を含む審査を行うこと。また、検証の結果を客観的な証拠によって示せるようにすること。</p> <p>(2) 受注者は、審査する者の活動内容を明確にして審査を行うこと。</p> <p><解説、事例等></p> <p>(1)-① 解析結果は、以下の観点で審査を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> 入力根拠を明確にしており、計算機プログラムへの入力を正確に実施しているか。また、過去に実績のある入力データを流用している場合は、根拠を明確にしているか確認する。 汎用表計算ソフトウェアの使用を明確にしており、入力した計算式を事前に検証して登録しているか。また、登録していない場合には、その都度、検証しているか。 解析結果が受容できるものであることを次の例に示す方法で確認しているか。 <ul style="list-style-type: none"> a. 類似解析結果との比較 (適切な比較対象を選定すること。) b. 物理的又は工学的整合性の確認 (解析結果を理論値や経験値と比較) 	<p>【発注者】</p> <p>▶ 原解析者以外の、適切な力量を有した検証者 (兼、審査者) が、以下の通り解析結果を審査していることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> 原解析者は、入力根拠を図書として整備し明確にしている。また原解析者により、エコーバックされた入力が入力がチェックされており、SCALE コードへの入力が正確に実施されている。 解析業務において汎用計算ソフトウェアは使用していない。 解析結果が適切である。 <p>【受注者】</p> <p>▶ 解析結果が受容できるものについて、 <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> </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。

	<p>(1)～② 許認可申請用の解析に変更又は新規性が認められる場合には、デザインレビュー等により適切か確認する。例として、以下のものがある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新設計の燃料、炉心、系統・設備等を採用した場合 ・新しい解析手順又は計算機プログラムを適用した場合 	<p>液膜を考慮した解析は今回新たに実施している。</p>
<p>(1)～③ 新たに解析を行わずに過去の検証済みの解析結果をそのまま使用する場合には、適用する設計インプットが同等であることを個々の使用ごとに検証する。また、過去の検証済みの解析結果に適用された検証方法・内容程度が(1) - ①、②に記載する最新の手順と同等でない場合には、最新の手順に従って改めて検証を行うか、又は不足分に対する追加の検証を行う。</p>	<p>【発注者（事業者）】</p> <p>(1) 発注者は、解析結果に影響がある変更が発生した場合、受注者に対して変更内容を確認し伝え、解析業務の変更管理を行わせること。</p> <p>(2) 発注者は、受注者が解析業務における変更を管理していることを確認すること。</p> <p>【受注者（解析者）】</p> <p>(1) 受注者は、解析業務に変更が生じた場合は変更内容を文書化し、解析業務の各段階においてその変更内容を反映すること。</p>	<p>【発注者】</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 解析条件変更の都度、変更内容を受注者へ伝えている。 ➤ 受注者にて変更管理が行なわれていることを確認している。 <p>【受注者】</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 発注者より変更連絡があった都度、変更内容を文書化し、解析業務の各段階においてその変更内容を反映している。
<p>(v) 解析業務の変更管理</p>	<p>※1 本ガイドラインにおいては、計算機プログラム並びに解析結果の適切性を確認する行為を指す。 ※2 計算機が読み込んだ入力データを出力として書き出したもの。 ※3 本ガイドラインにおいては、検証を含め解析業務全般を広い視点で確認する行為を指す。</p>	<p>○</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。

5. まとめ

今回解析結果について、以下に示す観点により、その妥当性を確認した。

- ・一般的な物理式により求まる水位変化時の実効増倍率挙動と、基本ケースにおける実効増倍率の挙動が一致している。
- ・既許認可において妥当性が確認されている類似解析結果と基本ケース解析結果を比較した結果、条件の差異に対して実効増倍率の増減の方向は適切であった。

また今回解析業務において適用した品証プロセスを確認し、解析結果の適切性を確認した。

以上

(参考1) JAERI-1254 掲載値からの核定数算出について

1. はじめに

基本ケースの解析結果については、一般的な物理式により求まる液相部の実効増倍率の傾向と整合していることを確認している。物理式による実効増倍率の算出に使用した核定数は、JAERI-1254（以下、文献という。）で示される実験データより算出した。

ここでは、文献の実験データを用いた核定数の算出過程を示す。

2. 算出過程

- TABLE2 に掲載のある実験結果のうち、高浜 1, 2 号炉の 15×15 型燃料集合体のピンセル領域の H/U (=4.8) に近い 1.50U 格子を今回の数値算出対象とした。

TABLE 2 Name of lattice

Lattice name	H/U or H/Pu	Lattice pitch (cm)
1.50U	4.33	1.849
1.83U	5.28	1.956
2.48U	7.16	2.150
3.00U	8.65	2.293
2.42P U	402	1.825
2.98P U	494	1.956
4.24P U	703	2.225
5.55P U	921	2.474

- TABLE10 に、実験結果から内挿などの手順を踏んで算出した臨界バックリングの値が掲載されている。1.50U 格子の場合 0.00833cm^{-2} である。

TABLE 10 Critical bucklings, B_c^2

Lattice name	$B_c^2 (\times 10^{-2} \text{cm}^{-2})$	Note
1.50U	0.833 ± 0.010	pattern=28
1.83U	0.943 ± 0.013	=24
2.48U	0.983 ± 0.008	=20
3.00U	0.952 ± 0.014	=18
2.42P U	0.808 ± 0.004	on 1972-4-1
2.98P U	0.828 ± 0.004	
4.24P U	0.779 ± 0.003	
5.55P U	0.651 ± 0.002	

- ここで、実効増倍率は以下の式が成り立ち、かつ、TABLE10 は臨界バックリングの値であるので $k_{eff} = 1$ が成り立つ。

$$k_{eff} = \frac{k_{\infty}}{1 + M^2 B^2} = 1$$

したがって、下式が得られる。

$$k_{\infty} = 1 + M^2 B^2$$

- ・文献中 TABLE7 には M^2/k_∞ の値が掲載されている。

TABLE 7 Ratios between migration area, M^2 , and infinite multiplication factor, k_∞ .

Lattice name	M^2/k_∞ (cm ²)
1.50U	28.7±0.4
1.83U	28.8±0.3
2.48U	28.7±0.4
3.00U	27.9±0.2
2.42PU	28.9±1.1
2.98PU	28.8±1.3
4.24PU	30.2±0.9
5.55PU	32.0±0.5

この $M^2/k_\infty = A$ とおくと、 $k_\infty = M^2/A$ となるので上式に代入すると

$$\frac{M^2}{A} = 1 + M^2 B^2$$

となり、整理すると下式が得られる。

$$M^2 = \frac{A}{1 - A \times B^2}$$

したがって、 A の値を TABLE7 から、 B^2 の値を TABLE10 から適用すると、1.50U 格子の移動面積 M^2 は以下のように求められる。

$$M^2 = \frac{28.7}{1 - 28.7 \times 0.00833} \approx 37.7$$

- ・一方、反射体節約の数値が TABLE6 により与えられており、これらの値は軸方向、水平方向における両側の値である、と説明されている。外挿距離が反射体節約の片側、すなわち TABLE6 記載値の半分に等しいとして、1.50U 格子の外挿距離は、軸方向で $\delta_V = 12.6/2 = 6.3$ 、水平方向で $\delta_H = 17.0/2 = 8.5$ となる。

TABLE 6 Reflector savings

Lattice name	Vertical (cm)	Horizontal (cm)
1.50U	12.6±0.3	17.0±0.8
1.83U	12.2±0.3	13.9±0.8
2.48U	11.3±0.2	13.7±0.5
3.00U	11.1±0.5	14.0±0.8
2.42PU	12.5±0.2	14.6±0.3
2.98PU	12.0±0.2	14.1±0.3
4.24PU	11.6±0.2	13.4±0.2
5.55PU	11.3±0.2	13.1±0.2

以上

(参考2) 液相部・気相部それぞれの中性子スペクトルについて

1. はじめに

今回評価では、体系を液相部と気相部に分割し、それぞれに異なる水分状態を設定する。各相の中性子スペクトルを評価することで、各相における中性子挙動の特徴を確認する。

2. 中性子スペクトルとの関連性

今回評価では、SFP 全体を液相と気相に分け、水位を変化させて評価している。一般的に、液相部では水による中性子減速効果によりスペクトルが柔らかく（熱中性子が相対的に多い）、気相部ではスペクトルが硬くなる。これらスペクトルの特徴を視覚的に確認するため、気相部および液相部の高さ方向における中性子スペクトル分析を行った。分析には、SCALE コードではスペクトル分析を実施し難いことから、中性子を連続エネルギーで取り扱い SCALE コードと同等の精度で3次元体系の中性子挙動を評価でき、中性子スペクトルの出力が容易な MVP コードを用い、図1に示す通常ウラン新燃料を貯蔵した無限配列体系を対象に、液相部及び気相部それぞれの上部、中央部、下部の3つの高さ位置において求めた。

評価結果を図2-1、図2-2に示すが、気相部では相対的に高速中性子の割合が多く、液相部では熱中性子の割合が多くなっている。また気相部の特徴として、高さ方向の違いによりスペクトルの形状に差がみられる。具体的には、境界面に近い気相部①、③に比べて、中央部の気相②の熱中性子の割合が小さくなっており、境界面に近い気相部においては、隣接する水（液相部や反射体）による減速効果が現れているものと考えられる。一方、液相部では、軸方向位置の違いによるスペクトル形状差は見られない。

これらの結果から、気相部・液相部それぞれでスペクトル特性が異なることを確認でき、またスペクトル特性は評価体系より想定できる定性的な特性と同様の傾向を示している。

なお基本ケースは気相よりも液相の方が反応度が十分大きく、また上述の通り気相部の方が中性子エネルギーが高く、 ^{235}U の核分裂断面積は図3の通りエネルギーが高いほど小さいことから、定性的には液相水位が低下し（気相部が拡大し）体系中にエネルギーが高い中性子が多くなるほど、体系全体としての核分裂数が減り実効増倍率が低下すると言える。今回の水位低下に伴う基本ケース解析結果も本定性的考察と同様の傾向を示している。

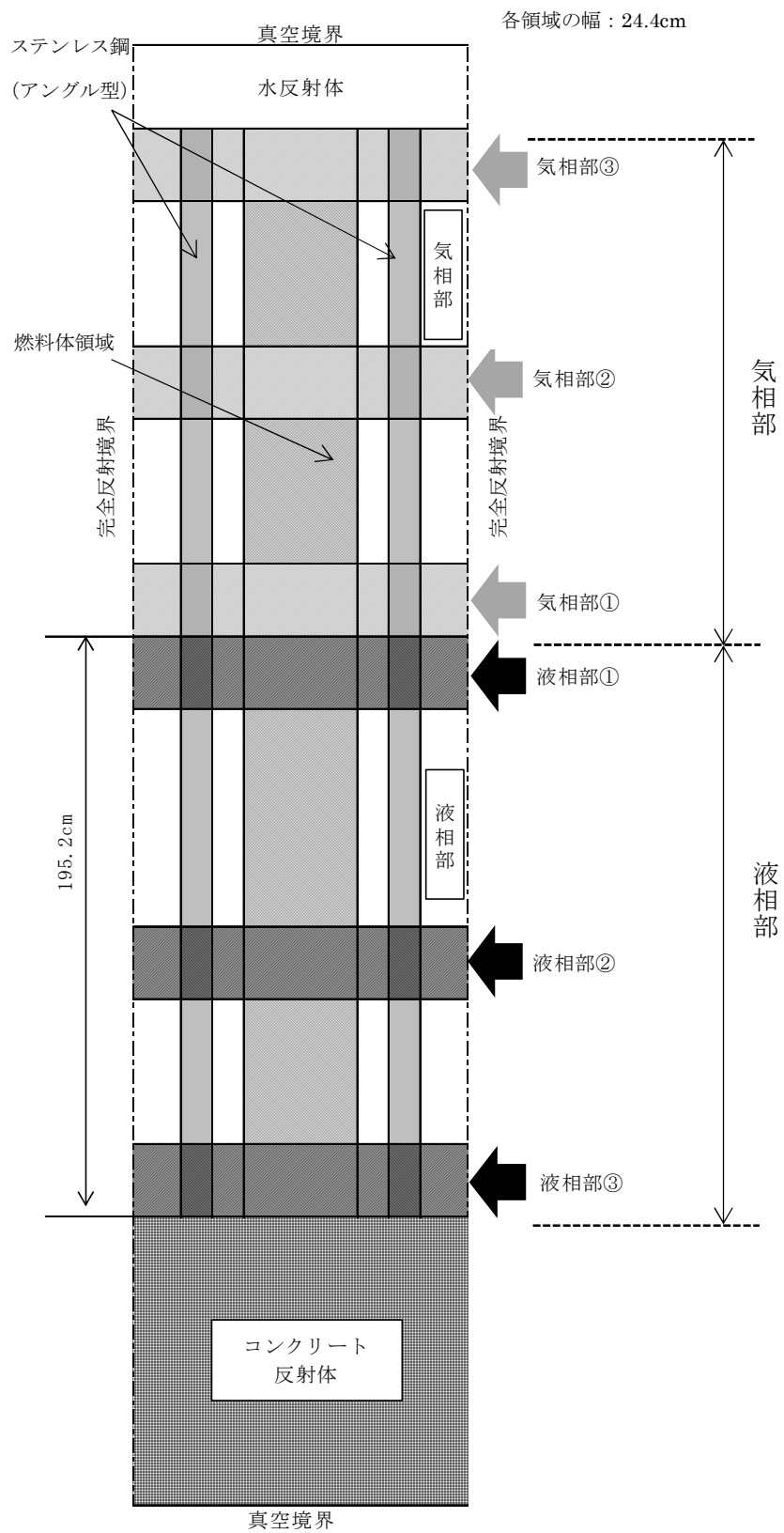


図1 境界における中性子スペクトルの評価体系 (軸方向)



図 2-1 気相部の中性子スペクトル評価結果

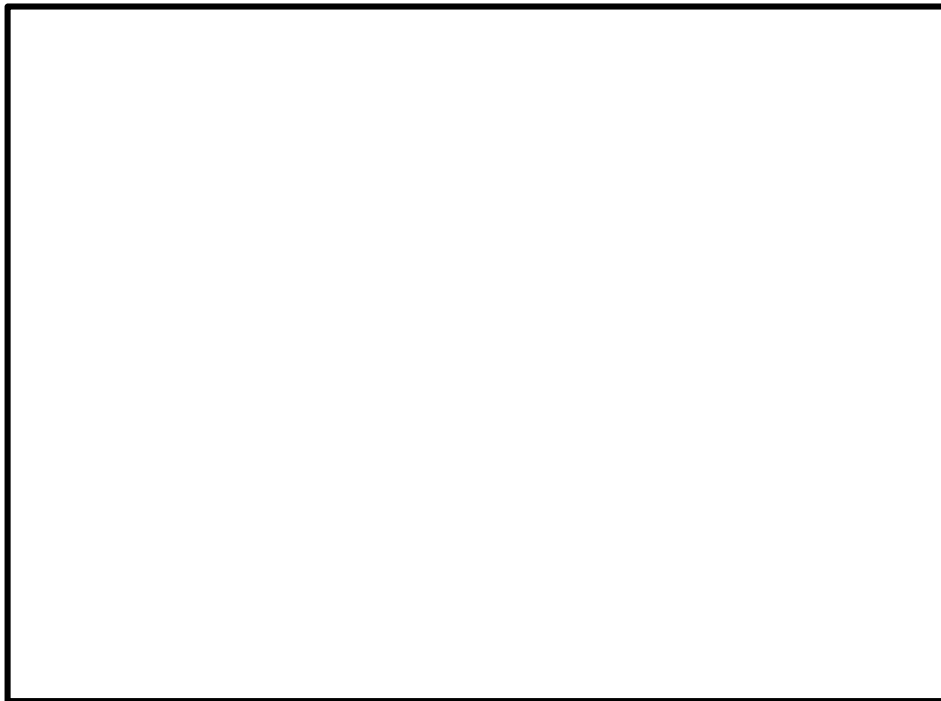


図 2-2 液相部における中性子スペクトル評価結果

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。

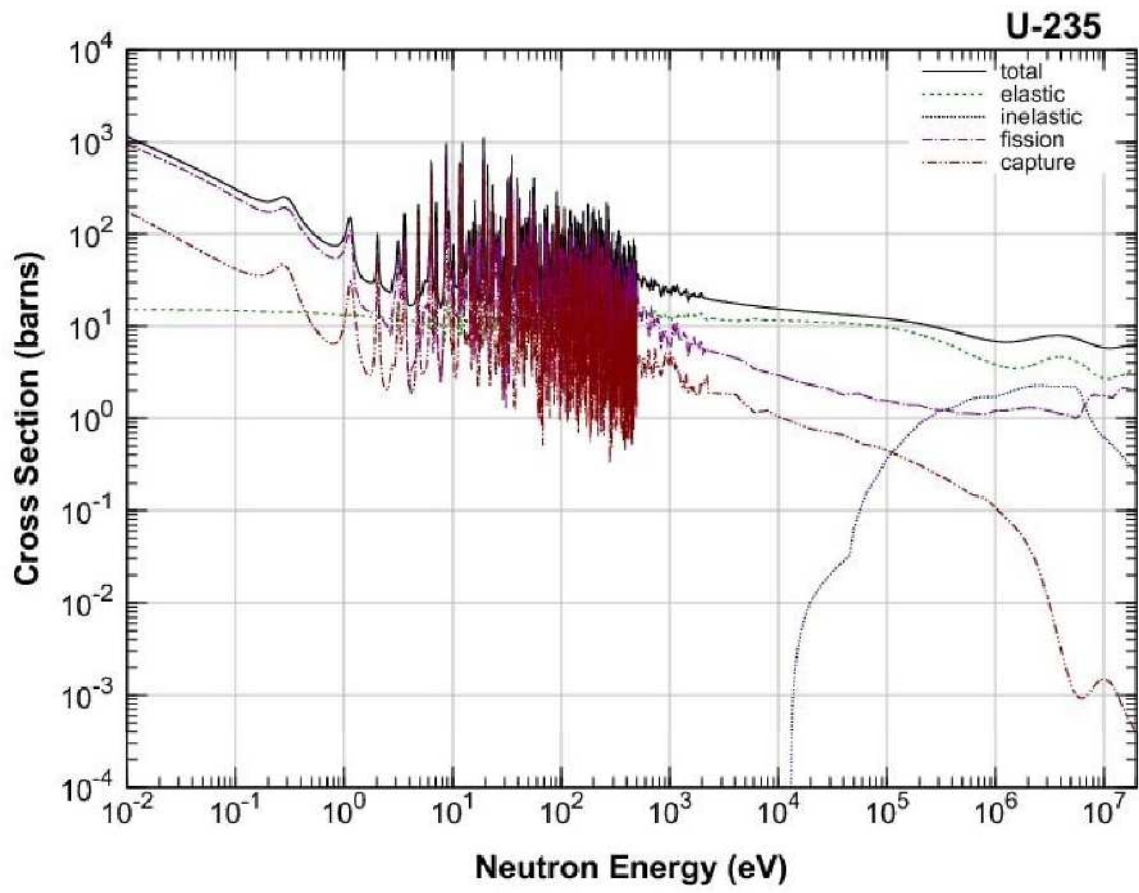


図3 ^{235}U 断面積

(参考3) 水分条件変化時の実効増倍率への影響評価

1. はじめに

今回解析では、既許可の水分条件と異なり、集合体の内側と外側それぞれに異なる水分条件を設定する。これらの水分条件が変化した場合の実効増倍率影響に関する基礎データを得るために、燃料集合体の内側の水分状態のみ、もしくは外側の水分状態のみを変化させた場合の実効増倍率への影響を確認するパラメータスタディを実施した。

2. 燃料集合体の内側の水分状態のみを変化させた場合

燃料集合体の中の水分状態、すなわち液膜厚さのみを変化させた解析を行った。解析条件を図1に、解析結果を図2に示す。図2に示すとおり、液膜が厚くなるほど実効増倍率は高くなった。これは、核燃料の近くに減速材が多く存在するほうが実効増倍率は上がりやすいためである。

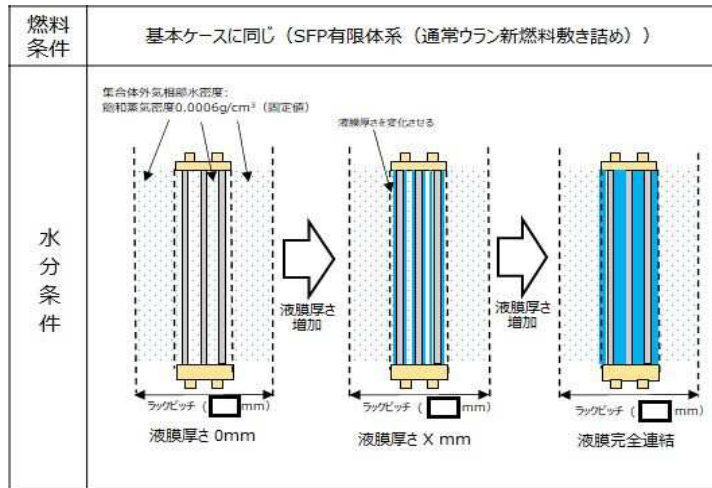
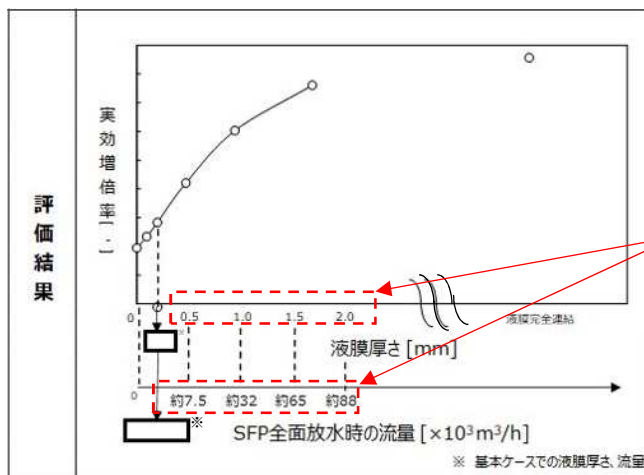


図1 燃料集合体の中の水分条件のみを変化させるパラメータスタディ 評価条件



これらの液膜厚さ条件における空間平均水密度 (3.1.1 項に記載の者に同じ。) を求め、それと等しい空間平均水密度を発生させる流量 (その流量により液膜と液滴も発生する) を第2X軸に記載した。なお、SFP 全面放水時の流量と液膜厚さの評価式 (包絡式) を用いて換算している。

流量 $7500\text{m}^3/\text{h}$ での液膜厚さ、集合体間気相部水密度 (それぞれ 0.38mm 、 0.0083g/cm^3) での空間平均水密度は約 0.0282g/cm^3

図2 燃料集合体の中のみを変化させるパラメータスタディ 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。

(2) 燃料集合体の外側の水密度のみを変化させた場合

燃料集合体の外側の水分状態、すなわち燃料集合体外気相部水密度のみを変化させた解析を実施した。解析条件を図3に、解析結果を図4に示す。図4に示すとおり、体系全体の集合体間の気相部水密度は、水密度 0g/cm^3 から約 0.1g/cm^3 に上昇するまでは実効増倍率が上昇し、その後減少に転じるが、水密度 1g/cm^3 に向けて再度上昇しない点が既許可とは異なっている。本パラメータスタディでは、集合体の外の水密度のみを変化させていることから、燃料集合体間の水密度が約 0.1g/cm^3 より大きくなる（中性子が隣接燃料へ到達するまでに集合体間の水分子に吸収されやすくなる）一方で、燃料集合体単体の反応度は増加することがないため、実効増倍率は単調に減少したものである。

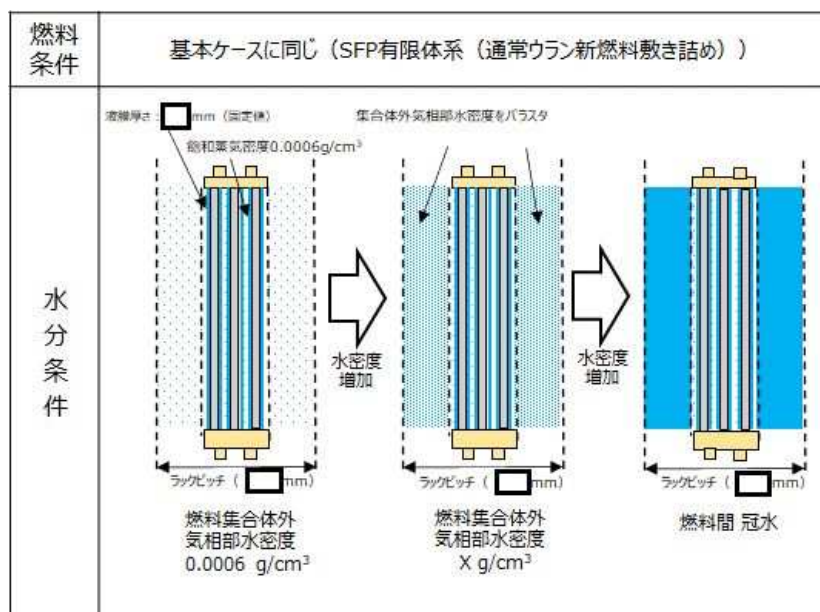


図3 燃料集合体の外の水密度のみを変化させるパラメータスタディ 評価条件

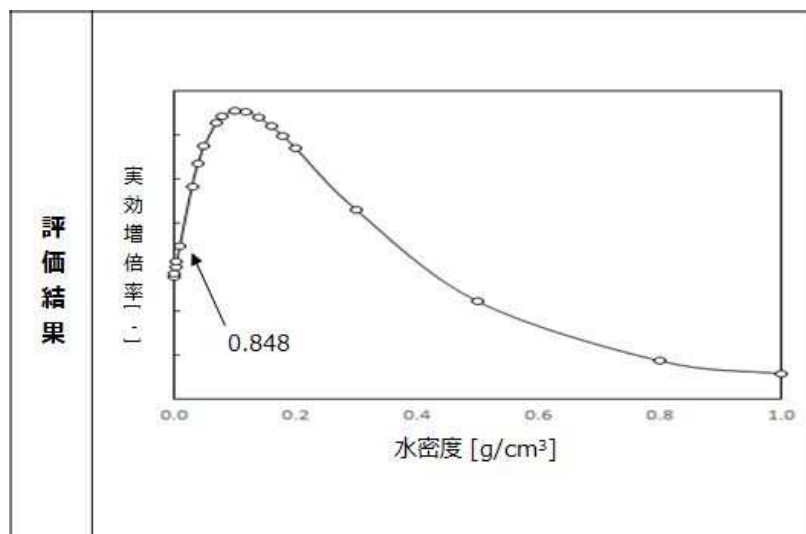


図4 燃料集合体の外のみを変化させるパラメータスタディ 評価結果

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。

3. まとめ

図2および図4の結果より、今回の評価体系においては、液膜厚さや燃料集合体外気相部水密度が変化した場合、実効増倍率は以下挙動を示すことを確認した。

- ・液膜厚さが厚いほど、実効増倍率は大きくなる。
- ・燃料集合体外気相部水密度は、0～約 0.1g/cm^3 の範囲では、水密度が大きいほど実効増倍率は大きくなる。

計算機プログラム（解析コード）の概要

目 次

1. はじめに
2. 解析コードの概要
 - 2.1. SCALE Ver. 6.0
 - 2.1.1. SCALE Ver. 6.0 の概要
 - 2.1.2. SCALE Ver. 6.0 の解析手法について

1. はじめに

本資料は、高浜 1, 2 号炉 設置変更許可申請（使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更）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 Ver. 6.0

2.1.1 SCALE Ver. 6.0 の概要

対象：使用済燃料貯蔵設備

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	Ver. 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>SCALE Ver. 6.0は、モンテカルロコードによる使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none">・ 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。・ 本解析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>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none">・ OECD/NEA によりまとめられた臨界実験のベンチマーク集 (INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS September 2010 Edition (OECD/NEA)) に登

	<p>録されている臨界実験から、国内PWRの燃料貯蔵設備仕様及び燃料仕様等を考慮して選定した179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">• 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、さらに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。• 本設置許可において使用するバージョンは、既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。• 本設置許可における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	---

2.1.2 SCALE Ver. 6.0 の解析手法について

(1) 一般事項

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) 解析コードの特徴

- ・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。
- ・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) 断面積ライブラリの特徴

- ・断面積ライブラリは SCALE Ver. 6.0 の内蔵ライブラリデータのうち、ENDF/B-VII ベースの 238 群ライブラリを使用している。
- ・ENDF/B-VII は、米国およびカナダの国立研究所、産業界、および大学が構成する CSEWG (Cross Section Evaluation Working Group、断面積評価ワーキンググループ) により作成された断面積ライブラリであり、ENDF/B-VI を基に IAEA と OECD/NEA によるワーキング委員会である WPEC (Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation) によって開発された H、Li6、B10、Au の断面積データを新たに登録する等の更新がなされている。断面積ライブラリについては、JAEA-Data/Code2017-006 (JENDL 開発のための軽水炉ベンチマークに関するデータ集の整備) の臨界実験データを用いて国内の最新断面積ライブラリである JENDL4 と ENDF-B/VII の比較を行っており、ライブラリ間の計算誤差の差が小さいことを確認している。

(4) 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。

a. 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

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。

b. 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。

c. 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。

d. 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。

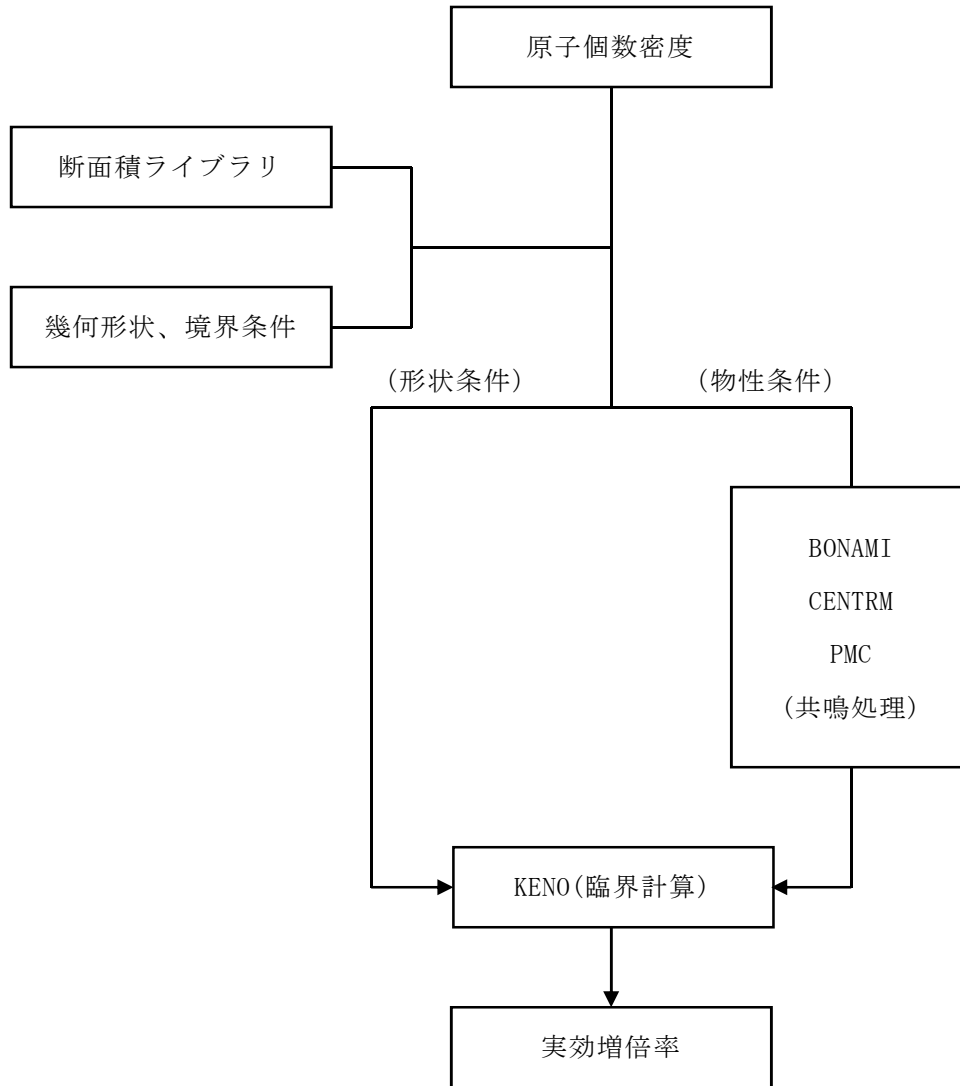
本コードでは、体系内の一つ一つの中性子の振舞いを追跡し、核分裂によって発生する中性子数 F 、吸収されて消滅する中性子数 A 、体系から漏えいする中性子数 L を評価し、次式により実効増倍率 k_{eff} を算出する。

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

(5) 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを第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1図 解析フローチャート

(6) 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

OECD/NEA によりまとめられた臨界実験ベンチマーク集とのベンチマーク解析により SCALE コードの適用検証及び妥当性確認を実施し、本解析コードを使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価へ適用することについて評価を行った。

a. 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、本解析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。

b. 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179ケース(「MOX燃料を使用(FPなし)した実験 ケース」+「ウラン燃料を使用(FPなし)した実験 ケース」+「FPを含む実験 ケース」+「塩素を含む実験 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。臨界実験の選定結果を第1-1表に、MOX燃料(FPなし)を使用した臨界実験体系を第1-2表に、またFPを含んだ体系および塩素を含んだ体系の臨界実験として選定した結果をそれぞれ第1-3表、第1-4表に示す。

ベンチマーク解析により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(Δk_c)を導出した結果を第2表に示す。なお塩素を含む体系に対するベンチマーク解析は、「C. 使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価への適用性確認」に示す理由により第2表には記載していない。

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 1-1 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	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 1-2 表 MOX 燃料 (FP なし) を使用した臨界実験

項目	単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲
燃料	²³⁵ U 濃縮度	MIN MAX
	Pu 含有率	1.6 4.8
	燃料材径	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	1.88 2.00
	被覆材材質	9.5 10.72
	燃料要素ピッチ	ジルコニウム合金
	燃料要素配列条件	12.6 14.3
	体系条件	正方配列
	減速材	燃料体配列体系
	水位	無 / 軽水
	反射体	完全喪失 / 冠水
	反射体材質	軽水 / コンクリート
減速	EALF	0.2 ~ 約 7eV*
	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。

項目	<p style="text-align: center;">実験体系</p>	<p>ベンチマーク 解析結果</p> <p>SCALE6.0 による 実効増倍率の平均、σ</p>
----	---	---

※ 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 1-3 表 FP を含む体系の臨界実験

項目	単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲	
燃料	^{235}U 濃縮度	WT%	MIN MAX
	燃料材径	mm	1.6 4.8
	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	—	9.5 10.72
	燃料要素ピッチ	mm	ジルコニウム合金
	燃料要素配列条件	—	12.6 14.3
	体系条件	—	正方配列
	減速材	—	燃料体配列体系
	水位	mm	無／軽水
反射体	反射体材質	—	完全喪失／冠水
	EALF	eV	軽水／コンクリート
		0.2～約 7eV**	

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。

燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲		パラメータ範囲		
		MIN	MAX	
収率曲線に応じた核種				
固体／液体／気体				
		—		
		—		
		—		
項目	単位			
FP (中性子吸収体) 核種／元素	—			
中性子吸収体性状	—			
中性子吸収材	実験ケース数			—
	解析ケース数			—
	実験施設			—
解析ケース				

※ 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。

項目	<p style="text-align: center;">実験体系</p>	<p>ベンチマーク 解析結果</p>	<p>SCALE6.0 による 実効増倍率の平均、σ</p>
<div style="border: 2px solid black; height: 550px; width: 100%;"></div>			

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 1-4 表 塩素を含んだ臨界実験に対するベンチマーク結果

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。

項目	
実験体系	
ベンチマーク 解析結果	SCALE6.0 による 実効増倍率の平均、 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 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 (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)				

*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。

c. 使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価への適用性確認

塩素を有する臨界実験以外では、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、第 2 図のとおりその差は正規性を有することを確認している。選定した臨界実験には、冠水状態の実験及び第 3 表に示す低水密度状態の実験が含まれており、冠水状態及び低水密度状態の実効増倍率の計算値と測定値の差の傾向に大きな差異がないことが確認できる。また、選定した臨界実験には、部分水位で臨界となるケースも含まれており、気相と液相の境界についても適切に取り扱うことができると言える。

臨界実験ベンチマーク解析の対象となる臨界実験の選定において重要なパラメータは、体系に含まれる「物質（燃料、構造材（吸収材含む）、減速材等）」、その「形状」、及び「中性子エネルギー」であり、ベンチマーク解析では第 1-1 表に示すとおり燃料貯蔵設備仕様及び燃料仕様等を踏まえ臨界実験を選定している。これ

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。

らのパラメータのうち、中性子スペクトルの特性を表す指標である 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) について、高浜発電所 1, 2 号炉の使用済燃料ピットにおける大量の水の漏えい時の EALF は約 0.2~約 10eV (実効増倍率が判定基準に迫るような、厳しい気相部水密度条件の場合) となる。塩素を含む体系以外の選定済みの [] ケースの臨界実験、および上述した EALF 範囲の最大値近傍における計算精度の確認用に別途選定した [] ケースの臨界実験の C/E (C: 計算値と E: 測定値の比) に対する EALF を第 3 図に示す。これらケース全ての臨界実験について、C/E は EALF に対して特異な傾向を持たず、1 近傍で安定していることから、SCALE は EALF に対し良好な計算精度を有していると判断できる。

したがって、本解析コードを減速材密度条件が異なる 2 相モデルに対して使用する場合においても、第 2 表の臨界計算に考慮すべき平均誤差及びその不確かさを適用することは妥当である。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、本解析コードを使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価に使用することは妥当である。

なお第 3 図に示す通り、塩素を含む体系に対し実施した臨界実験ベンチマークの結果は、他の臨界実験ベンチマーク結果と比較して C/E が比較的高い傾向にあり全てのケースで C/E は 1.01 を超えており、塩素を含んだ体系は 1% (実効増倍率 0.01 に相当) 以上、安全側の評価結果を与えることを確認している。一方、塩素に起因する誤差については、ベンチマーク解析に関連する文献 (Sobes, VALIDATION STUDY FOR CREDITING CHLORINE IN CRITICALITY ANALYSES FOR SPENT NUCLEAR FUEL DISPOSITION (2015), ICNC) において、100pcm (実効増倍率 0.001 に相当) 程度と小さいことが報告されている。以上のことから、塩素が実効増倍率に与える影響は、安全側な実効増倍率となる評価結果が有する裕度に包含されることとなる。

また、第 4-1 表、第 4-2 表に示す通り、統計的検定により母分散および母平均が等しいかを有意水準 5%とした検定により確認した結果、これらが等しいとする仮説は棄却された。つまり平易に言えば、SCALE6.0 にとって塩素を含む臨界実験は、95%の確率で塩素を含まない体系の臨界実験とは母集団が異なると言える。よって塩素を含む体系に対し SCALE6.0 の不確かさを算出するに当たっては、塩素を含む体系での臨界実験ベンチマーク結果は考慮しない。

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3表 低水密度状態の臨界実験リスト

臨界実験	減速材密度	ケース数

第4-1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)

--

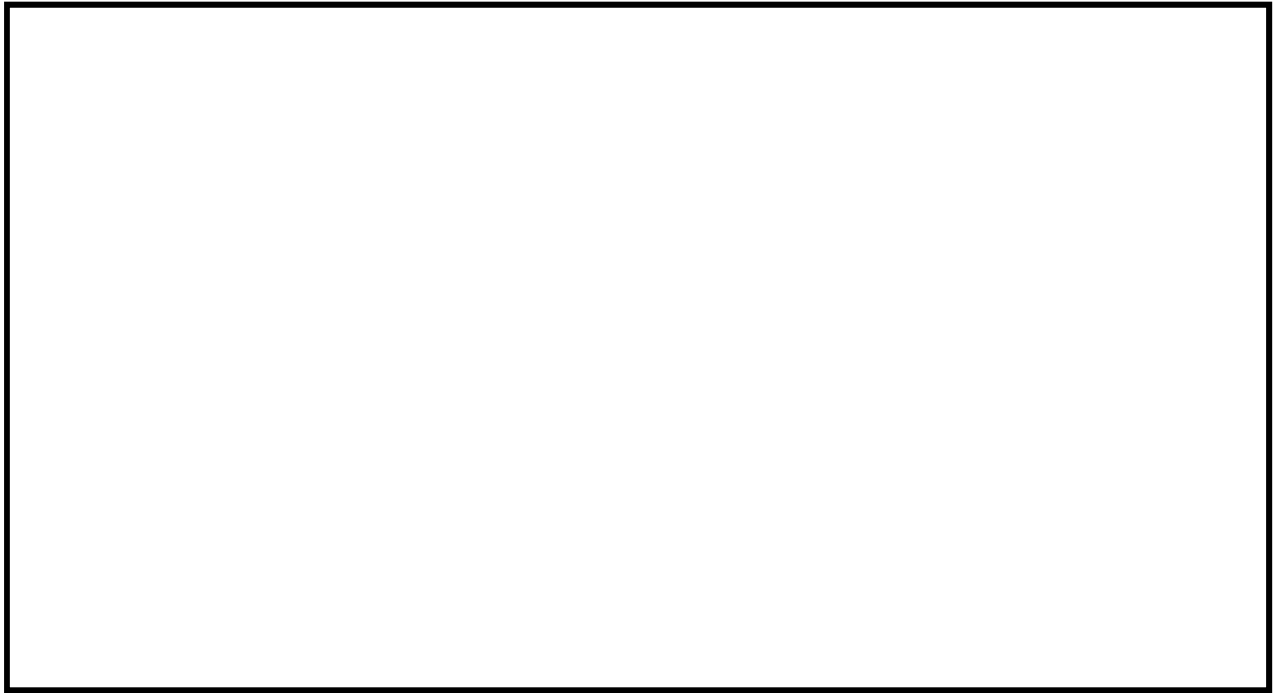
第4-2表 塩素を含む臨界実験ベンチマーク結果とそれ以外の臨界実験ベンチマーク結果に対するt検定

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

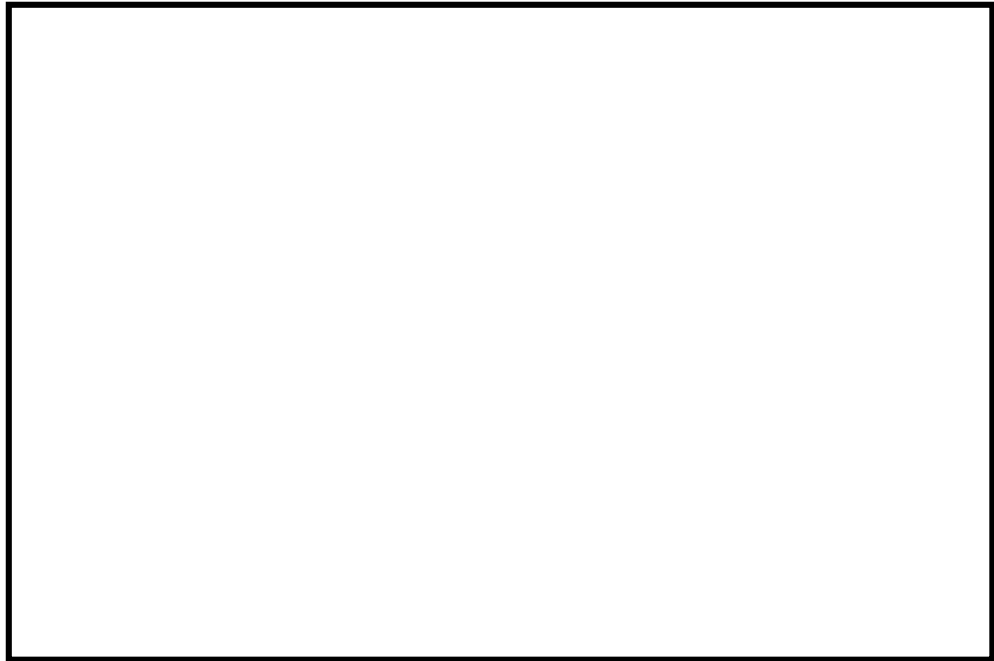
--

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 Δk に対するヒストグラム

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。

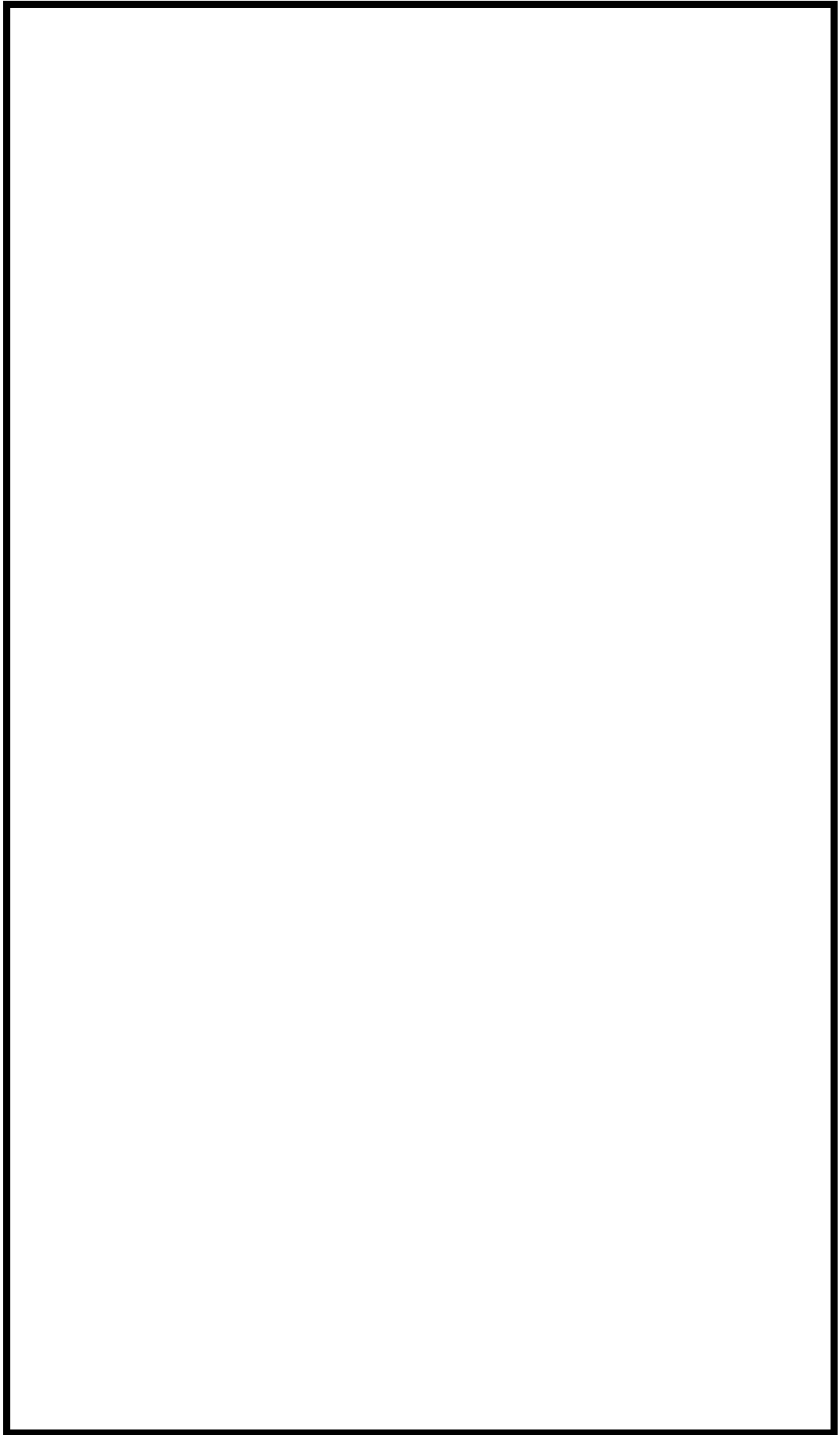
(参考1) 第3表に示す臨界実験の概要



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2) FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析の結果

表1 FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析結果



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。

表1 FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析結果（続き）

--

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。

また、表 1 に示す計算結果を FP 核種毎に整理したもの表 2 に、C/E 評価結果を核種毎でヒストグラムに整理したものを図 1 に示す。

表 2 FP 毎でのベンチマーク解析結果整理

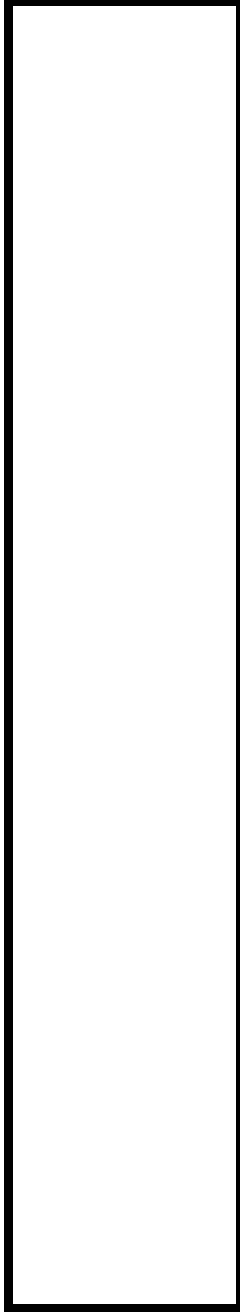


図 1-1 C/E の核種毎のヒストグラム

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。

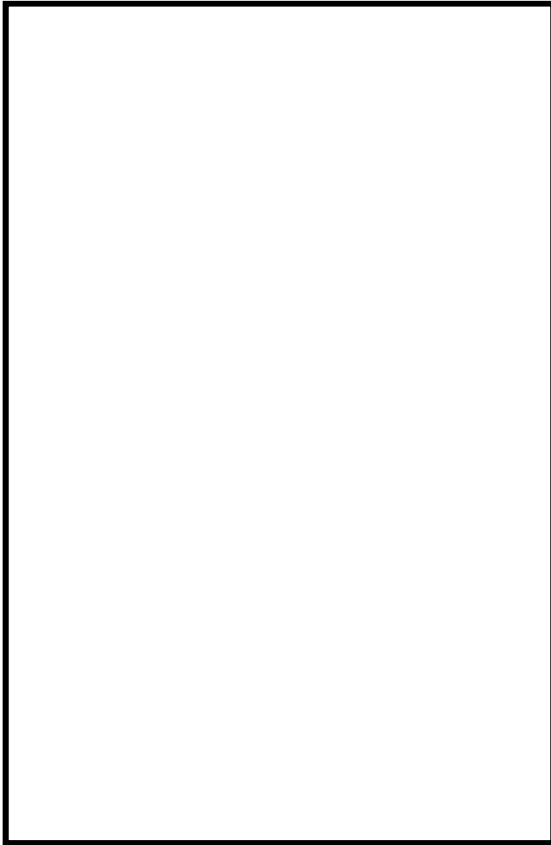
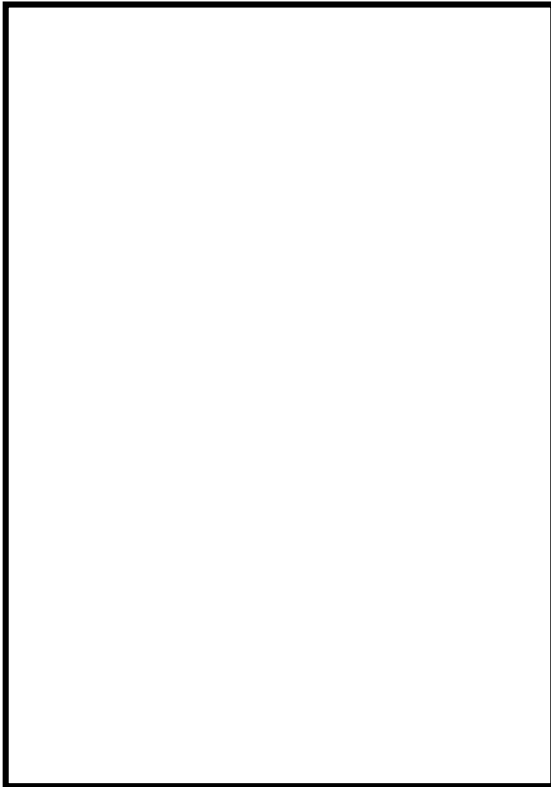


図1-2 C/Eの核種毎のヒストグラム



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3) 臨界実験の各 FP 核種を無視した場合の感度解析

【解析条件】

- ・解析対象の実験： []
- ・対照実験ケース： [] ([] が含まれる実験)
- ・FP 組成： 実験論文より参考表 1 のとおり。
- ・解析手法： 同位体の個数密度を 1 種類ずつ無視し、基準となる全核種考慮時の実効増倍率を比較する。

表 1 解析対象実験の FP 組成情報

--

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。

【解析結果】

断面積が大きい核種である の実効増倍率変化が見られ、その他の核種については明確な感度は見られなかった。

表 2 解析結果

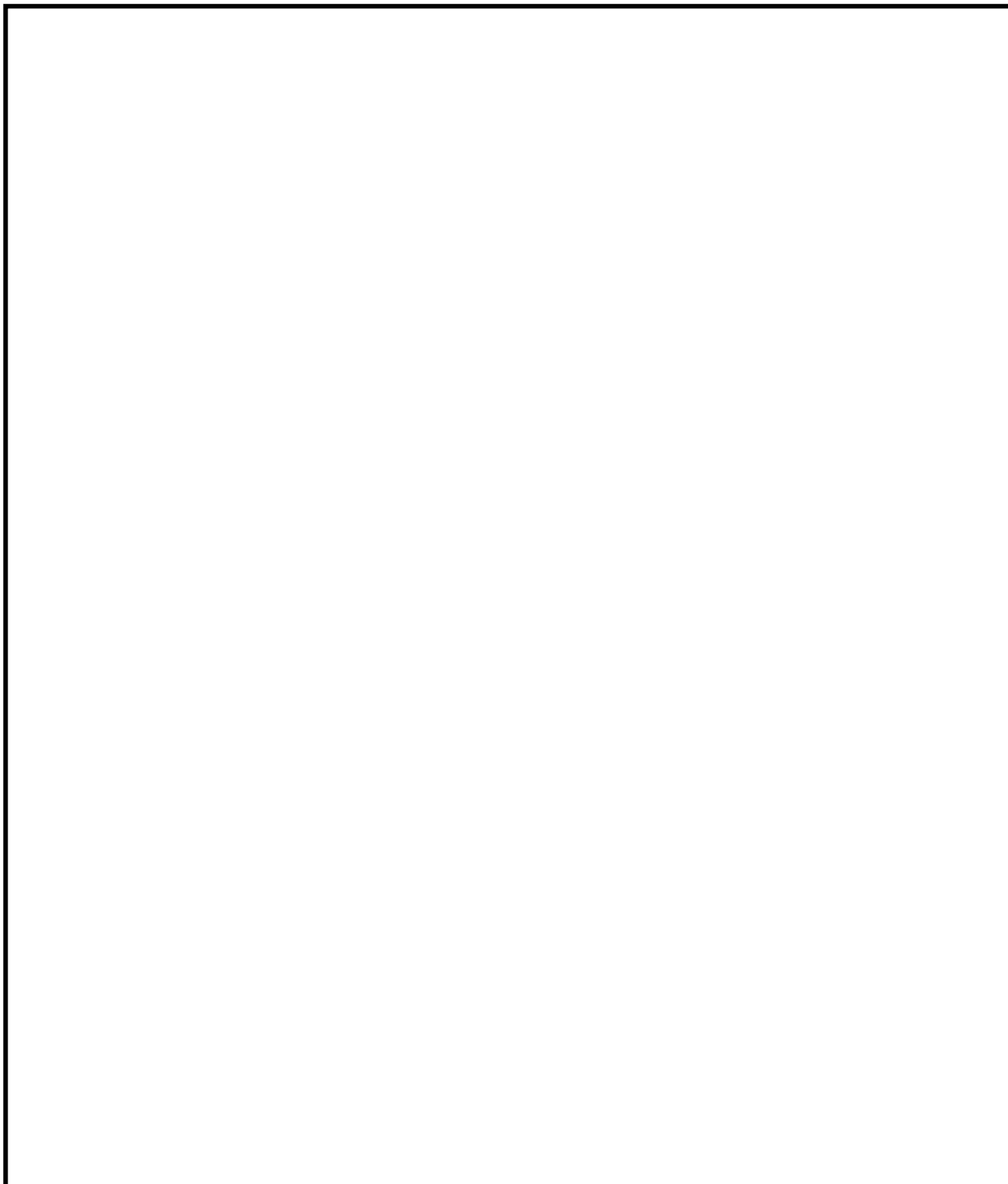
Case ID	keff	σ	$\Delta keff$	考慮しない核種	未臨界性評価で考慮する核種

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。

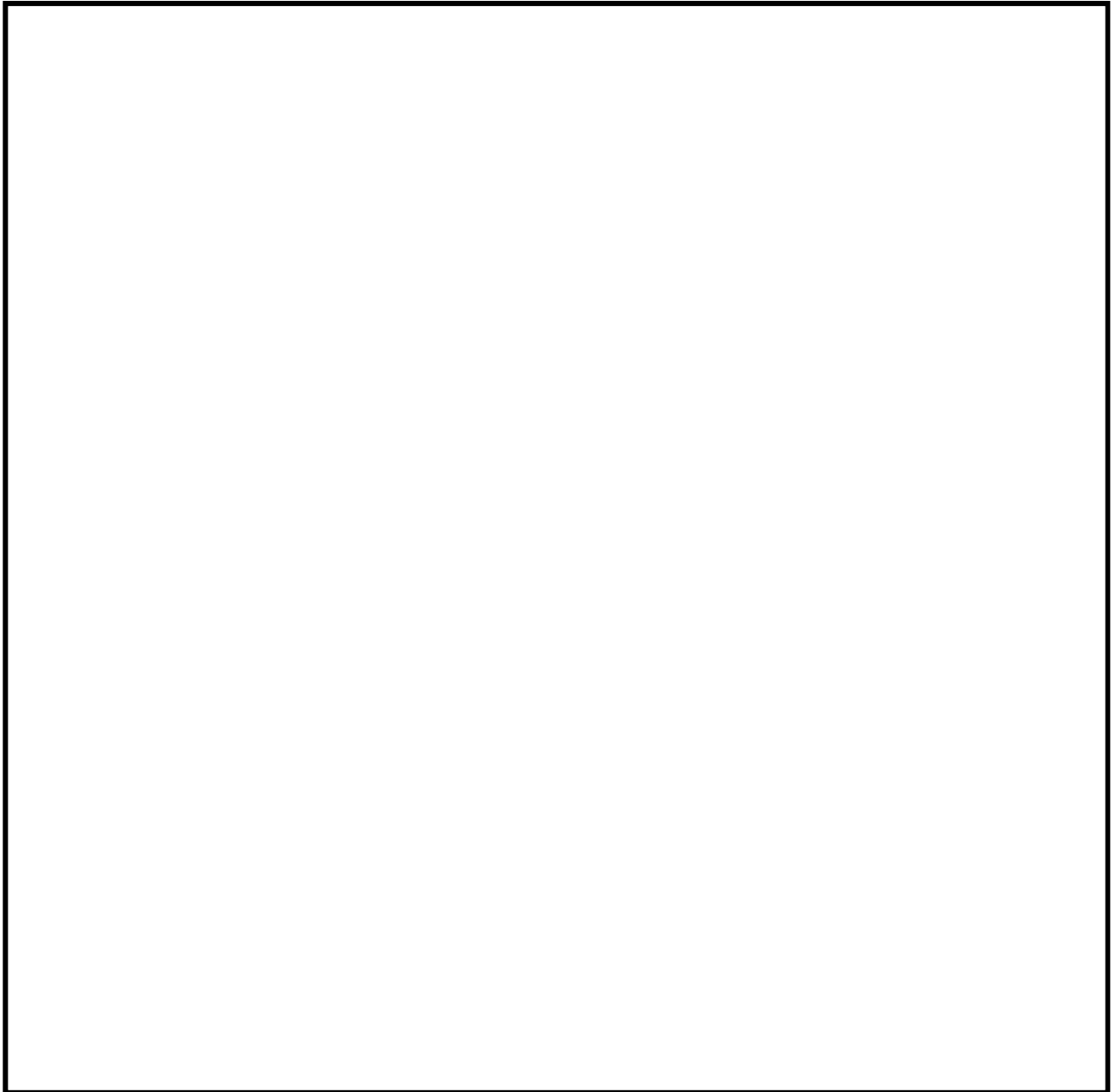
Case	keff	σ	$\Delta keff$	考慮しない核種	未臨界性評価で 考慮する核種

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4) 計算コードの不確かさの算出方法

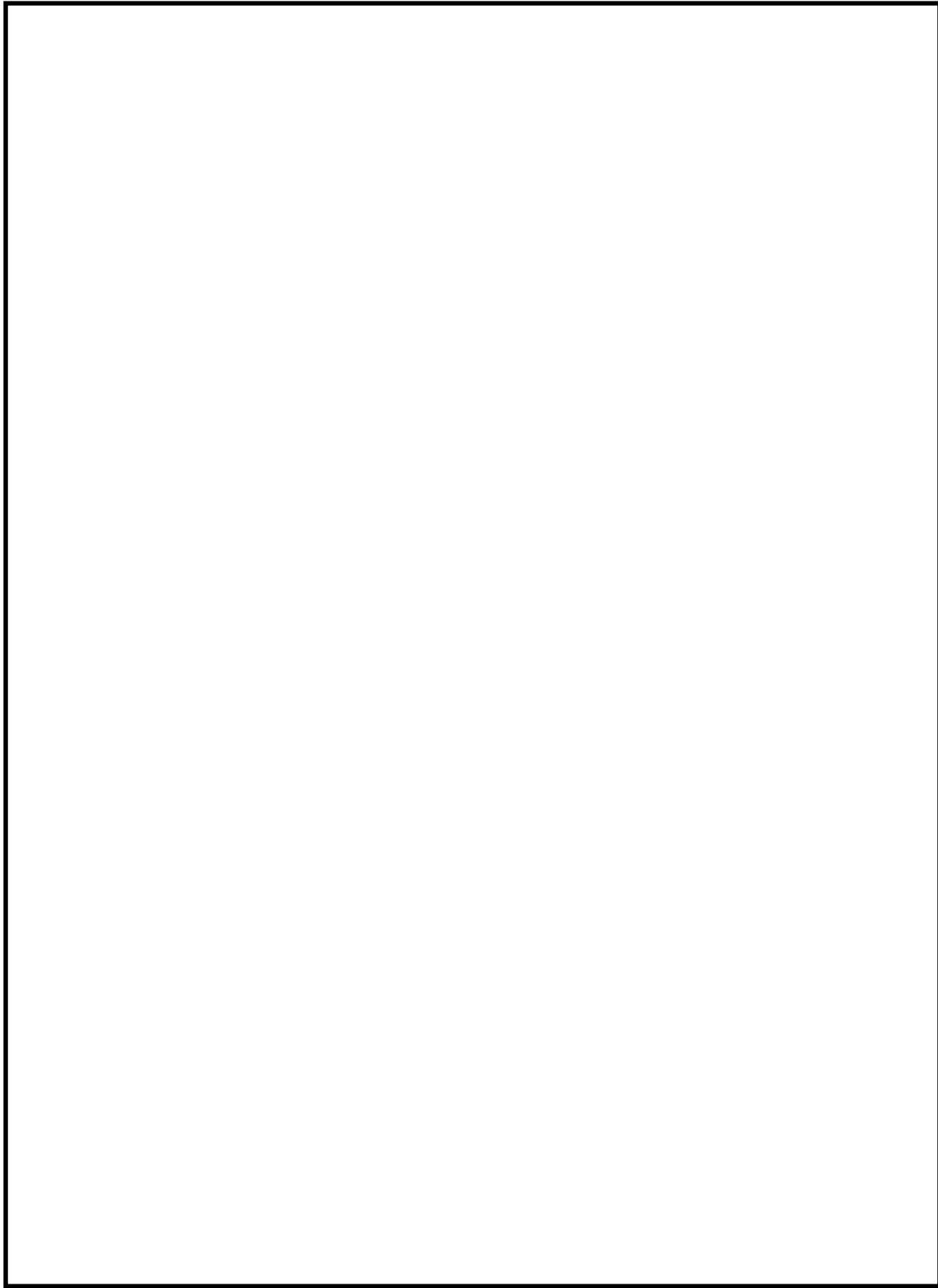


枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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。

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。



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。

