

臨界安全評価に係る解析手法の検討

(Ⅱ)

仕様書

令和7年6月

1. 件名

臨界安全評価に係る解析手法の検討（Ⅱ）

2. 目的及び概要

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）が、経済産業省資源エネルギー庁から受託した「令和7年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（直接処分等代替処分総合評価技術開発）」の臨界安全評価技術の高度化の検討では、使用済燃料の多様性への対応等に係る技術開発に重点を置き、未臨界の確保の確実性を高めるとともに、処分容器への燃料集合体の収容体数を合理化するための検討を進めることとしている。

本業務では、この検討の一環として、わが国の多様な使用済燃料の処分を想定した装荷曲線による臨界安全評価の不確実性因子の候補である、使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布および水平方向燃焼度分布に着目した燃焼計算と臨界計算等を行い、これらが処分後の臨界性に及ぼす影響に関するデータを取得する。また、使用済燃料及び処分容器を構成する材料の劣化および破壊・崩落による材料配置の変化を想定した臨界計算を行い、材料の崩落を想定した場合の処分後の臨界性に関するデータを取得する。さらに、これらの検討結果に基づき、わが国の多様な使用済燃料の臨界安全評価手法の構築に向けた課題を整理する。

3. 作業実施場所

受注者側実施施設

4. 納期

令和8年1月30日

5. 作業項目

- (1) 燃料集合体内部の燃焼度分布が処分後の臨界性に及ぼす影響に関する解析
- (2) 処分後の処分容器の状態と使用済燃料の組成の時間変化等を考慮した臨界計算
- (3) 多様な使用済燃料の臨界安全評価手法の構築に向けた課題の整理
- (4) 報告書の作成

6. 作業内容及び方法

- (1) 燃料集合体内部の燃焼度分布が処分後の臨界性に及ぼす影響に関する解析

これまで原子力機構では、わが国の多様な使用済燃料の処分後の臨界安全性の評価を、装荷曲線の手法により行うための具体的な手順や手法の検討を進めており（原子力機構、2024）、海外の先行事例（Agrenius et al., 2010）を参考に、評価に不確実性をもたらす可能性がある因子（これ以降「不確実性因子」と表記する。）の候補を整理している（7. (2)貸与品参照）。

本項目では、上記で整理されている不確実性因子のうち、燃料集合体内部の燃焼度分布の違いが処分後の臨界性に及ぼす影響に着目して、加圧水型軽水炉（これ以降「PWR」と表記する。）の17×17型使用済燃料の処分を想定した臨界計算等を行い、燃料集合体内部で平均燃焼度が一様に分布すると仮定した場合（これ以降「一様分布」と表記する。）の実効増倍率に対する、現実的な分布を考慮した場合の影響（これ以降「 $\Delta k/k$ 」と表記する。）を求めるとともに、燃料の初期濃縮度や平均燃焼度などの種々のパラメータに対する $\Delta k/k$ の変化の傾向やその原因分析を行う。燃料集合体内部の燃焼度分布としては、燃料集合体の軸方向の分布（これ以降「軸方向燃焼度分布」と表記する。）と燃料集合体の鉛直断面における分布（これ以降「水平方向燃焼度分布」と表記する。）を対象とする。

詳細については以下に示す。

1) 軸方向燃焼度分布に関する検討

軸方向燃焼度分布のデータが示されている文献を2件以上調査して（たとえば、山本ほか(2015)）、これらを参考に2種類以上の軸方向燃焼度分布を設定して燃焼計算や臨界計算等を行い、一様分布を仮定した解析結果との違いから $\Delta k/k$ を求める。調査対象とする文献には、国内のPWR燃料集合体に関する情報を含めること。具体的には、表-6.1に基づき原子力機構と協議の上、初期濃縮度3種類と平均燃焼度5種類の組合せから成る13以上のパターンを含むように、7ケース以上の解析ケースを設定して、これらを対象とする燃焼計算を行うとともに、この結果をインプットとする処分後の状態を想定した臨界計算を行う。これらの解析結果について、平均燃焼度が大きいほど $\Delta k/k$ が大きな値となるか等、山本ほか(2015)に示されている軸方向燃焼度分布の影響に関する解析結果との本質的な違いの有無を確認するとともに、違いが生じた原因を分析する。なお、水平方向燃焼度分布については一様分布とする。

表-6.1 軸方向燃焼度分布の影響解析の解析ケースの例
(計算の対象とする組合せパターンを「○」で示す)

解析ケース No.	初期濃縮度 [wt%]	軸方向燃焼度分布※1	平均燃焼度 [Gwd/t]				
			10	20	30	40	50
1	4.5	一様分布	○		○		○
2	4.5	燃焼度分布-1	○		○		○
3	4.5	燃焼度分布-2	○		○		○
4	3.4	一様分布					○※2
5	4.7	一様分布					○※2
6	3.4	ケース No. 2 と No. 3 の解析結果を踏まえて決定					○※2
7	4.7						○※2

※1 既往の文献から引用して2種類以上の軸方向燃焼度分布データを設定。

※2 No. 2 及び No. 3 の解析結果に基づき、対象とする軸方向燃焼度分布データや平均燃焼度を決定。

2) 水平方向燃焼度分布に関する検討

水平方向燃焼度分布のデータが示されている既往の文献（たとえば、山本ほか(2015)など）を参考として2種類以上の水平方向燃焼度分布を設定して燃焼計算や臨界計算等を行い、一様分布を仮定した解析結果との違いから $\Delta k/k$ を求める。具体的には、表-6.2 及び図-6.1に基づき、前項1)と同様の検討を行う。なお、軸方向燃焼度分布については一様分布とする。

表-6.2 水平方向燃焼度分布の影響解析の解析ケースの例
(計算の対象とする組合せパターンを「○」で示す)

解析ケース No.	初期濃縮度 [wt%]	水平方向燃焼度分布※1	燃焼度 [Gwd/t]				
			10	20	30	40	50
1	4.5	一様分布	○		○		○
2	4.5	図-6.1 の配置で燃焼度勾配 20%	○		○		○
3	4.5	図-6.1 以外の配置で燃焼度勾配 20%	○		○		○
4	3.4	一様分布					○※2
5	4.7	一様分布					○※2
6	3.4	ケース No. 2 と No. 3 の解析結果を踏まえて決定※2					○※2
7	4.7						○※2

※1 既往の文献から引用して2種類以上の水平方向燃焼度分布データを設定。

※2 No. 2 及び No. 3 の解析結果から、対象とする軸方向燃焼度分布データや平均燃焼度を決定。

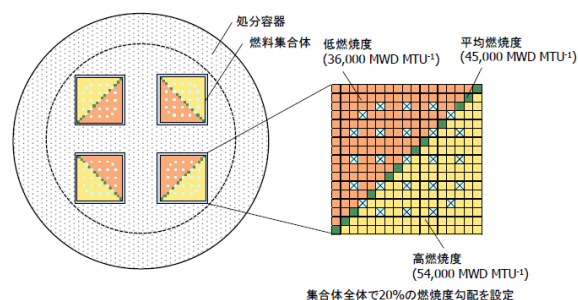


図-6.1 水平方向燃焼度分布の例（原子力機構，2015）

上記の 1) 及び 2) の解析のいずれも、燃焼計算コードとしては ORIGEN2 (Croff, 1980) を、ORIGEN ライブラリセットとしては ORLIBJ40 (奥村ら, 2012) を使用して、軽水炉における燃焼計算及び軽水炉から使用済燃料を取り出した後の崩壊計算を行う。さらに、計算結果から、燃焼度クレジット核種セット (表-6.3 参照) の核種生成量データを抽出し、それらをインプットとして処分後の臨界計算を行う。抽出する核種生成量データについては、処分後に実効増倍率がピークとなる経過時間における値とする。ピークとなる時間については原子力機構から提示する。臨界計算コードとしては MVP-3.0 (長家ら, 2016) を、断面積ライブラリとしては JENDL-4.0 を使用する。ヒストリー数は統計誤差が 0.03% を超えない値を設定する。なお、軸方向燃焼度分布に関する計算では、燃料集合体の燃料棒の軸方向をノードごとに分割し、各々のノードに対応する燃焼度の核種生成量データを、ノードごとの燃焼計算を行い、その結果から設定することで燃焼度分布を持った燃料集合体をモデル化する。また、水平方向燃焼度分布に関する計算では、解析ケースで設定した燃料棒の配置ごとに指定した燃焼度の核種生成量データを、燃焼度の異なる領域ごとの燃焼計算を行い、その結果から設定することで、水平方向の燃焼度分布を持った燃料集合体をモデル化する。

燃料集合体や処分容器、緩衝材の寸法などの設計仕様については原子力機構から提示する。その他の解析条件については、これまでの原子力機構による解析 (7. (2) 貸与品参照) を基本とし、原子力機構と協議のうえ、決定する。

表-6.3 燃焼度クレジット核種セット

アクチノイド+FP +Np-237	U-234、U-235、U-238、Pu-238、Pu-239、Pu-240、Pu-241、Pu-242、Am-241、 Mo-95、Tc-99、Rh-103、Cs-133、Sm-147、Sm-149、Sm-150、Sm-152、Nd-143、 Nd-145、Eu-153、Gd-155、Np-237
----------------------	--

(2) 処分後の処分容器の状態と使用済燃料の組成の時間変化等を考慮した臨界計算

これまで原子力機構では、処分容器の腐食による劣化と腐食生成物の膨張応力の载荷等により、処分容器の破壊や崩落が起こることで臨界が起こりやすい材料配置に至る可能性に着目した力学解析を行い、処分後 1 万年程度で使用済燃料集合体の収容スペースの間の仕切り部等が局所的に破壊する結果が得られている (原子力機構, 2023)。このため、仕切り部が崩落して複数の使用済燃料の収容スペースが一か所に統合すること等により臨界が起こりやすい材料配置に至る可能性が否定できないと考えられたため、仕切り部の板厚を増加した処分容器を対象として力学解析を行ったところ、破壊の時期が処分後 3 万年後以降に遅延することが確認できている (7. (2) 貸与品参照)。

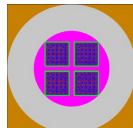
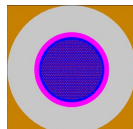
本項目では、処分後の未臨界状態を維持するために、このような仕切り部の板厚の増加による効果がどの程度見込めるかを検証するための臨界計算を行う。

具体的には、表-6.4 に基づき原子力機構と協議のうえ、処分容器の仕切り部等が、劣化等により破壊・崩落する以前の材料配置と、破壊・崩落した後の材料配置の 2 種類の材料配置パターンの臨界計算モデルを作成し、処分後のある経過時間で前者の配置から後者の配置へ切り替わること及び核種の生成・崩壊により使用済燃料組成が時間変化することを同時に考慮した臨界計算を行う。計算では、図-6.2 に示す処分容器の設計仕様を対象とする。燃料集合体については、燃料集合体の形状が維持される状態や燃料棒が離散する状態などを考慮する。また、処分容器や燃料被覆管の腐食生成物ができることで組成や密度などの状態が変化する現象についてもモデルに取り入れること。処分容器の破壊・崩落が起こり、材料配置が変化する時期については、これまでの原子力機構による力学解析の結果(7. (2) 貸与品参照)に基づき、原子力機構と協議のうえ決定する。

臨界計算の基本条件は表-6.5 に示す通りとし、臨界計算コードには、MVP-3.0 を、断面積ライブラリには JENDL-4.0 をそれぞれ使用する。実効増倍率が最大となる時期や上記で決定した材料配置が変化する時期が含まれるように、原子力機構と協議のうえ計算の対象とする処分後経過年数を 10 点以上選定し、これらにおける材料の配置及び使用済燃料の核種組成などをインプットとする臨界計算を行う。ただし、使用済燃料集合体が破損して燃料棒が離散することを想定する場合は、燃料配置が最適減速ピッチとなるようにサーベイ計算を行うこと。

以上の臨界計算の結果を、処分後の経過時間と実効増倍率を対応させた表形式で整理すること。また、実効増倍率がピークとなる処分後の経過時間とピーク値について、原子力機構による処分容器の破壊・崩落を考慮した既往の解析結果（原子力機構，2023）と比較するとともに、両方で違いが生じた要因を、解析条件の違い等から推定して整理すること。

表-6.4 材料の状態変化および配置パターンを考慮した臨界安全解析モデルの例
(原子力機構(2023)を参考に作成)

解 析 モデル	燃料棒の配置等	処分容器および燃料被覆管の材料の状態 ^{※1}			処分容器の 破壊・崩落による 材料配置の変化	解析体系 の概念図
		処分容器外表 面での腐食	燃料被覆管 での腐食	燃料集合体収 容スペースの 腐食		
モデル 1	燃料集合体の形状が 維持される	考慮する	考慮する	考慮する	破壊・崩落が起こら ず、埋め戻し直後と 同様の配置	
モデル 2	離散した燃料棒が 格子状に配列される	考慮する	考慮する	考慮しない	破壊・崩落が起こり、 4 つの收容スペース が統合。收容スペースが拡大 ^{※2}	

※1 処分容器および燃料被覆管の腐食による減肉と腐食生成物を考慮した材料組成をモデルに反映。

※2 燃料棒が六方格子配列で最適減速ピッチとなるように收容スペースの大きさを設定

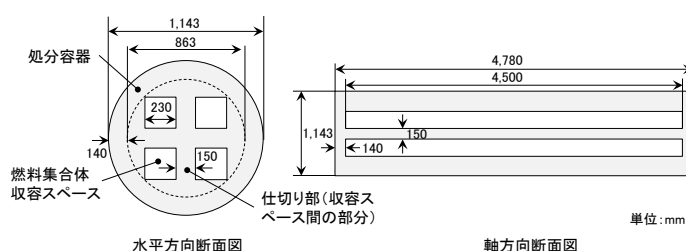


図-6.2 PWR 使用済燃料 4 体收容処分容器の設計仕様（仕切り部厚さ 15cm）

表-6.5 処分容器の状態と使用済燃料の組成の経時的变化を考慮した臨界計算の基本条件

項 目	条 件
対象燃料	・ PWR 燃料（使用済 UO_2 燃料）
解析コード・ライブラリ	・ MVP-3.0 及び JENDL4.0 の組合せとする。 ・ ヒストリー数は統計誤差が 0.03%を超えない値を設定する。
使用済燃料の核種組成	・ 表-6.3 の燃焼度クレジット対象核種とする。 ・ 核種組成データについては原子力機構から貸与(7.(2)貸与品参照)する。
処分容器と緩衝材の設計仕様	・ 処分容器材質；鉄材料（銅等の耐食性材料との混合材料については考慮しない） ・ 緩衝材材質；ペントナイトとケイ砂の混合材料（再冠水後を想定） ・ 燃料集合体収容体数；4 体 ・ 処分容器の寸法（初期状態）；図-6.2 に示す。 ・ PWR 燃料集合体の構成、寸法等の詳細仕様については、原子力機構と協議のうえ決定する。 ・ 処分容器及び緩衝材の組成については、原子力機構から提示する。
解析体系	・ 図-6.2 を基本解析体系とし、原子力機構と協議のうえ決定する。 ・ 燃料集合体は収容スペースの中央に配置するものとする。 ・ 使用済燃料集合体収容スペースの空間は地下水が冠水しているものとする。
未臨界判定基準	$K_{eff} + 3\sigma \leq 0.95$ (K_{eff} ；実効増倍率、 σ ；統計誤差)

(3) 多様な使用済燃料の臨界安全評価手法の構築に向けた課題の整理

(1) 項と(2) 項の検討結果から、たとえば以下に示す観点を具体化すること等により、諸外国における装荷曲線やそれに用いる不確実性因子等の影響評価の先行事例(たとえば、Agrenius(2010)、Agrenius and Spahiu(2016))も参考にしつつ、多様な使用済燃料の臨界安全評価手法の構築に向けた課題を幅広く整理すること。

装荷曲線による臨界安全評価に関する課題

- ✓ (1) 項で検討した燃料集合体内の燃焼度分布の違いが臨界性にもたらす影響について、装荷曲線による評価で対象とする初期濃縮度や燃焼度ごとに $\Delta k/k$ を求めて装荷曲線に反映することで、評価の過剰な保守性を除外できる可能性の有無やそのための解析上の留意点等。
- ✓ (1) 項で求められた燃料集合体内の燃焼度分布の $\Delta k/k$ を不確実性因子として装荷曲線の評価を行ううえで有効な解析手法の選定に向けて、原子力安全解析コードシステム SCALE (Rearden and Jessee, 2016) の燃焼度クレジット用臨界安全性解析自動化モジュール STARBUCS を用いた場合の不確実性の反映方法と課題の有無や、他の解析コードの装荷曲線による評価手法への適用性等。

処分容器の材料配置の変化を考慮した臨界安全評価に関する課題

- ✓ (2) 項の解析結果から整理される、処分容器の仕切り部の板厚の増加による未臨界維持に対する効果（処分容器の破壊・崩落を考慮した既往の解析結果に対するピーク値の低減の程度）が、わが国における多様な使用済燃料を想定する場合でも十分であるか（たとえば、装荷曲線における種々の不確実性因子の $\Delta k/k$ の合計値（7.(2)貸与品に記載の値と(1) 項の解析結果から概算）と同等のマージンを未臨界判定基準値(0.95)に対して確保できるか等）。
- ✓ 上記で未臨界判定基準値に対するマージンが不十分と考えられる場合の対処方策の候補（たとえば、処分容器の仕切り板厚の更なる増加等の工学的対策や補足的な評価の実施等）の検討やそれらの未臨界性の維持に対する効果の検証の進め方。

(4) 報告書の作成

(1)～(3)の内容をまとめ、報告書を作成する。

【参考文献】

Agrenius, L. (2010) : Criticality safety calculations of disposal canisters, SKB Public Report 1193244.

Agrenius, L. and Spahiu, K. (2016): Criticality effects of long-term changes in material compositions and geometry in disposal canisters, SKB, TR-16-06.B.T. Rearden and M.A. Jessee (2016): SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.

Croff, A. G. (1980): ORIGEN2 -- A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code, ORNL-5621, Oak Ridge National Laboratory.

原子力機構 (2015): 平成 26 年度地層処分技術調査等事業 使用済燃料直接処分技術開発 報告書, 平成 27 年 3 月.

原子力機構 (2023): 令和 4 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 直接処分等代替処分技術高度化開発 報告書, 令和 5 年 3 月.

原子力機構 (2024): 令和 5 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 直接処分等代替処分総合評価技術開発 報告書, 令和 6 年 3 月.

長家康展, 奥村啓介, 櫻井健, 森貴正 (2016): MVP/GMVP 第 3 版 : 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード (翻訳資料), JAEA-Data/Code 2016-019.

奥村啓介, 杉野和輝, 小嶋健介, 神智之, 岡本力, 片倉 純一 (2012): JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット:ORLIBJ40, JAEA-Data/Code 2012-032.

山本健士, 秋江拓志, 須山賢也, 細山田龍二 (2015): 使用済燃料直接処分の臨界安全評価—燃焼度クレジット評価のためのデータの整備— (受託研究), JAEA-Technology 2015-019.

7. 支給品及び貸与品

(1) 支給品 : なし

(2) 貸与品 :

- ・「6. 作業内容及び方法」で示した使用済燃料核種組成データ
- ・令和 6 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 直接処分等代替処分総合評価技術開発 報告書 (原子力機構, 令和 7 年 3 月)

8. 提出書類等

表-8.1に示す提出書類等を提出期限までに提出すること。

表-8.1 提出書類等

番号	提出書類名	提出期限	部数
(1)	委任又は下請負届 (機構指定様式)	作業開始2週間前まで	1部
(2)	実施計画書 ¹⁾	契約締結後速やかに	3部
(3)	打合せ議事録 ¹⁾	打合せ後速やかに	3部
(4)	報告書	令和8年1月30日	3部
(5)	電子データファイル ²⁾	令和8年1月30日	1部

1) 一部を確認後返却とする。(打ち合わせ議事録については、決定、確認事項を含むものとする)

2) 報告書の PDF 及び Word ファイルと「6. 作業内容及び方法」で記載した解析のデータファイル及び報告書に掲載した図表の電子データ (Excel 等の機械判読可能な形式のファイル) を含む一式とする。

(提出場所)

茨城県那珂郡東海村村松 4-33
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料サイクル工学研究所 BE 資源・処分システム開発部
地層処分基盤研究施設（研究棟）

9. 検査

「8. 提出書類等」に記載されている内容を検査し、仕様書に定めるところに従って業務が実施され、本仕様書で求めているデータが報告されていることを確認する。

10. 検収条件

「8. 提出書類等」に示す書類及び電子データファイルの納品物とその部数を確認し、「9. 検査」の結果の合格をもって検収とする。

11. 特記事項

- (1) 本契約で使用する設備及び備品（リース物件を含む）については、すべて受注者側で用意する。
- (2) 実施計画書の詳細に関しては、別途、原子力機構と協議の上、決定することとする。
- (3) 本件は、経済産業省資源エネルギー庁から原子力機構が委託を受けて実施するものであり、実施体制を変更する場合、原子力機構は経済産業省資源エネルギー庁の承認を得る必要がある。従って、受注者は、合併又は分割等により本契約に係る権利義務を他社へ承継しようとする場合には、事前に原子力機構（核燃料サイクル工学研究所 BE資源・処分システム開発部 処分システム開発グループ）へ照会し、了解を得るものとする。
- (4) 本仕様書に記載されている事項及び本仕様書に記載のない事項について疑義が生じた場合は、原子力機構と協議のうえ、その決定に従うものとする。

12. 検査員

- (1) 一般検査 原子力機構 財務契約部 管財課長
- (2) 技術検査 原子力機構 核燃料サイクル工学研究所 BE 資源・処分システム開発部
処分システム開発グループリーダー

13. 知的財産権等

知的財産権等の取扱いについては、別紙「知的財産権特約条項」に定められたとおりとする。

14. グリーン購入法の推進

- (1) 本契約において、グリーン購入法（国等による環境物品等の調達に関する法律）に適用する環境物品（事務用品、OA機器等）が発生する場合は、これを採用するものとする。
- (2) 本仕様書に定める提出図書（納入印刷物）については、グリーン購入法の基本方針に定める「紙類」の基準を満たしたものであること。

以上