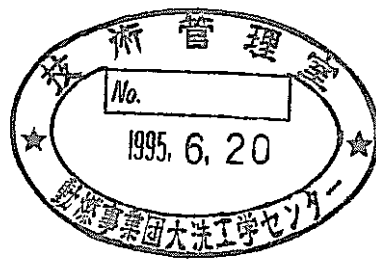


TRU消滅処理炉心の特性解析（Ⅲ）

（動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書）



1995年3月

新型炉技術開発株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

N_p と $Am+ Cm$ の分離装荷方式を採用することにより、従来のターゲット集合体装荷方式の課題であった出力変動の増大が回避され、炉心特性を損ねることなく、高いTRU消滅特性を得ることができた。これは、TRU全体混入率を高めることができるため、TRU消滅量を大きくすることができるということである。しかし、一方、TRUの消滅率としては従来の均質装荷型や非均質装荷型より低下する。すなわち、炉心部での N_p の消滅特性は良いが、ターゲット部での $Am+ Cm$ の消滅効率は悪い。また、ターゲット集合体内の Am 、 Cm の体積比が大きい高添加ターゲットが必要である等の欠点がある。これに関連して、この「 N_p 、 $Am+ Cm$ 」分離型の課題として、 Am の熱伝導率が低いことに起因したターゲットピンの許容線出力の問題がある。現状では、 $Am+ Cm$ とREの体積比が90%以上を占めるターゲット燃料ピンの許容線出力は 215 W/cm と評価したが、今後はTRU核種の熱伝導率をはじめとする各種の物性データを蓄積し、溶融線出力の値を明らかにしていくことにより、さらに合理的な設計が可能になるものと期待される。

TRU消滅炉心ではTRUの装荷方法に係わらず、ボイド反応度の増大、ドブプラー係数の減少が免れないが、ULOF及びUTOPのATWS（異常な過渡変化時の原子炉停止系不作動事象）時の炉心動特性では、以下の様な特徴がある。

ULOFに対しては、冷却材密度反応度が大きくなる傾向を持つが、ドブプラー反応度による正の反応度投入量の寄与が小さくなることから、従来の酸化物燃料炉心と比べて不利になることはない。また、TRUの添加により燃料の溶融温度が低下するが、炉心の燃焼反応度は小さくなるため、制御棒誤引抜きによる投入反応度が低減されるポテンシャルがある。これにより、制御棒一本の誤引抜きによるUTOP事象を想定した場合、従来の酸化物燃料炉心より燃料溶融に対し裕度が大きくなる可能性がある。

March, 1995

An Evaluation of Core Characteristics for TRU Transmutation(III)

Mari YANO (*), Mineo MIZUNO (***)
Yoshiyuki OKUBO (*), Kunihiro ITO (**)
Yoji TANAKA (**), Kazuya KOYAMA (**)

Abstract

In preceding years, as the method of TRU transmutation (TRU means Minor Actinide such as Np, Am and Cm in this report) in FBR, we have evaluated core characteristics and TRU transmuted characteristics for two TRU loading methods: homogeneous TRU-loading method where the TRU fuel is dispersed uniformly throughout the core; and heterogeneous TRU-loading method where a few number of subassemblies with concentrated TRU fuel (target S/As) are loaded in the core. Also, as the research on the TRU transmutation by FBR plant, the survey have been conducted for the effect upon the core characteristics and the TRU transmuted characteristics affected by RE (Rare Earth) which is entrapped when TRU is separated from the high level waste. At the same time, the effect have been surveyed in the case where the TRU recycle was executed in FBR.

In this fiscal year, the investigation have been conducted for a core concept in which TRU are loaded separately between the group of Np and the group of Am + Cm + RE, according to the results of advancement of nuclear fuel reprocessing technology. The core concepts with excellent TRU transmuted characteristic have been investigated for the separate loading method of Np and Am + Cm, by adding only Np in the core region and adding Am, Cm and RE in the target assemblies located at radial blanket location of the core periphery.

This report is the result of the works performed by Advanced Reactor Technology Development, Ltd. under the contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC).

Contract Number : 06C3263

* Advanced Reactor Technical Department, Atomic Power Technical Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

** Advanced Reactor Technology Development, Ltd.

*** Nuclear Development, Ltd.

目次

要旨

Abstract

図表リスト

1. 目的と概要
 - 1.1 評価項目
 - 1.2 評価内容

2. ターゲット燃料集合体の検討
 - 2.1 ターゲット母材の検討
 - 2.2 ターゲット燃料の許容線出力の評価

3. TRU分離装荷炉心（初期平衡炉心）の解析
 - 3.1 主要条件
 - 3.2 炉心パラメータサーベイ
 - 3.3 代表炉心の選定および特性評価

4. 炉心動特性解析用データの整備（TRU分離装荷代表炉心）
 - 4.1 反応度特性評価
 - 4.2 出力・流量データ

5. 炉心動特性解析（TRU分離装荷代表炉心）
 - 5.1 解析条件
 - 5.2 解析結果
 - 5.3 まとめ

6. TRUリサイクルの炉心特性への影響解析（TRU分離装荷代表炉心）
 - 6.1 TRUリサイクルの影響評価
 - 6.2 炉心特性評価（TRUリサイクル 15年目, 30年目炉心）

7. 総合評価
 - 7.1 主要炉心特性のまとめ
 - 7.2 炉心動特性解析のまとめ

付録A 構造材膨張に関する反応度フィードバックモデル

付録B 平成5年度TRU消滅処理炉心のULOF（TRU100E）の結果

表リスト (1 / 3)

表 1 - 1	TRU, Pu 組成 (LWR 取出 : 3 年燃焼, 5 年冷却後)
表 1 - 2	RE の組成比 (LWR 取出 : 3 年燃焼, 5 年冷却後)
表 2. 1 - 1	ターゲット燃料母材候補の特性調査結果
表 2. 1 - 2	融点評価用ターゲット母材元素組成
表 2. 1 - 3	TRU, RE 並びに母材元素の酸化物形態、分子量及び融点
表 2. 1 - 4	TRU, RE の構成酸化物重量及び融点
表 2. 1 - 5	各評価ケースにおける TRU / RE / 母材酸化物重量組成比
表 2. 1 - 6	TRU, RE 混入燃料の融点評価結果 (母材使用の場合)
表 2. 1 - 7	TRU, RE 混入燃料の融点評価結果 (母材不使用の場合)
表 2. 2 - 1	TRU, RE 混入燃料の熱伝導度係数 $f_{v,r}$
表 2. 2 - 2	TRU, RE 混入燃料の許容線出力 Q_{max}
表 2. 2 - 3	セラミックスの熱伝導度
表 2. 2 - 4	各種物質の熱伝導度 (25 °C)
表 2. 2 - 5	各種物質のデバイ温度 (K)
表 3. 1 - 1	レファレンス炉心の炉心主要仕様
表 3. 1 - 2	レファレンス炉心の炉心構成要素主要仕様
表 3. 1 - 3	サーベイ解析ケース
表 3. 2. 1 - 1	TRU 混入率と燃料およびターゲットピンの体積比
表 3. 2. 1 - 2	炉心主要特性の比較
表 3. 2. 1 - 3	TRU サイクル消滅率
表 3. 2. 1 - 4	TRU 取出消滅率
表 3. 2. 2 - 1	TRU (Np) 混入率での燃料許容線出力
表 3. 2. 3 - 1	炉心主要特性一覧 (TRU 20% 混入炉心 : 基準ケース)
表 3. 2. 3 - 2	炉心主要特性一覧 (RE 上限値設定炉心)
表 3. 2. 3 - 3	炉心主要特性一覧 (ターゲット 5 バッチ炉心)
表 3. 2. 3 - 4	炉心主要特性一覧 (母材 Al ₂ O ₃ 炉心)
表 3. 2. 3 - 5	TRU サイクル消滅率 (基準ケース)
表 3. 2. 3 - 6	TRU サイクル消滅率 (RE 上限値設定炉心)

表リスト (2 / 3)

表 3.2.3-7(1)	TRU サイクル消滅率 (ターゲット 5 バッチ装荷本数増大型)
表 3.2.3-7(2)	TRU サイクル消滅率 (ターゲット 5 バッチ炉心 : 混入率増大型)
表 3.2.3-8	TRU サイクル消滅率 (母材 Al_2O_3 炉心)
表 3.2.3-9	TRU 取出消滅率 (基準ケース)
表 3.2.3-10	TRU 取出消滅率 (RE 上限値設定炉心)
表 3.2.3-11(1)	TRU 取出消滅率 (ターゲット 5 バッチ装荷本数増大型)
表 3.2.3-11(2)	TRU 取出消滅率 (ターゲット 5 バッチ炉心 : 混入率増大型)
表 3.2.3-12	TRU 取出消滅率 (母材 Al_2O_3 炉心)
表 3.2.3-13	増殖比の内訳
表 3.3.1-1	選定炉心のターゲット集合体仕様
表 3.3.1-2	炉心主要特性一覧 (TRU 消滅選定炉心)
表 3.3.1-3	TRU サイクル消滅率
表 3.3.1-4	TRU 取出消滅率
表 4.1-1	領域毎温度 (TRU 消滅選定炉心)
表 4.1-2	燃料、構造材の熱膨張率及び冷却材密度
表 4.1-3	膨張反応度係数の評価式
表 4.1-4	主要燃料仕様 (TRU 消滅選定炉心)
表 4.1-5	出力分担 (TRU 消滅選定炉心)
表 4.1-6	定格時平均集合体流量 (TRU 消滅選定炉心)
表 4.1-7	遅発中性子発生率 (ν_d)
表 4.1-8	遅発中性子割合
表 4.1-9	遅発中性子スペクトル
表 4.1-10	崩壊定数
表 4.1-11	密度係数 (TRU 消滅選定炉心)
表 4.1-12	形状係数 (TRU 消滅選定炉心)
表 4.1-13	ドブラー係数 (TRU 消滅選定炉心)
表 4.1-14	各部温度係数 (TRU 消滅選定炉心)
表 4.1-15	動特性パラメータ (TRU 消滅選定炉心)

表リスト (3 / 3)

表 4. 2 - 1	動特性解析用出力及び流量データ (T R U 消滅選定炉心)
表 5. 4 - 1	T R U 炉心の U L O F 事象の結果
表 6. 1. 1 - 1	O R I G E N - 2 の計算条件
表 6. 1. 2 - 1	各サイクルステップでの T R U 装荷割合
表 6. 1. 2 - 2	リサイクルによる T R U (A m + C m) 組成比の変化
表 6. 1. 2 - 3	各サイクルステップでの P u 組成比の変化
表 6. 1. 2 - 4	T R U 装荷・取出量の変化 (C O R E)
表 6. 1. 2 - 5	T R U 装荷・取出量の変化 (T A R G E T)
表 6. 2. 2 - 1	T R U サイクル消滅率 (1 5 年目炉心)
表 6. 2. 2 - 2	T R U サイクル消滅率 (3 0 年目炉心)
表 6. 2. 2 - 3	T R U 取出消滅率 (1 5 年目炉心)
表 6. 2. 2 - 4	T R U 取出消滅率 (3 0 年目炉心)
表 6. 2. 2 - 5	アクチニド核種の毒性ファクター
表 6. 2. 2 - 6	取出燃料の毒性指標 (初期炉心)
表 6. 2. 2 - 7	取出燃料の毒性指標 (1 5 年目炉心)
表 6. 2. 2 - 8	取出燃料の毒性指標 (3 0 年目炉心)
表 7. 1 - 1	各炉心の主要炉心性能の比較
表 7. 1 - 2	T R U 装荷方式の得失比較

図リスト (1 / 3)

- 図 1 - 1 レファレンス炉心の炉心構成
- 図 1 - 2 (Np, Am+Cm)分離型TRU消滅炉心検討用の炉心概念
- 図 2.2 - 1 UO₂等の熱伝導度
- 図 2.2 - 2 AmO₂の熱伝導度
- 図 2.2 - 3 CeO₂の熱伝導度
- 図 2.2 - 4 Sm₂O₃の熱伝導度
- 図 2.2 - 5 セラミックス熱伝導度の温度による変化の概念
- 図 2.2 - 6 MA含有酸化物の熱伝導度
- 図 3.1 - 1 TRU燃焼チェーン (actinide build up path)
- 図 3.1 - 2 検討の流れ
- 図 3.2.2 - 1 TRU (Np) 混入率と炉心燃料の許容線出力の関係
- 図 3.2.2 - 2 TRU (Am + Cm) 混入率とターゲット燃料の許容線出力の関係
- 図 3.2.3 - 1 径方向出力分布 (基準炉心)
- 図 3.2.3 - 2 径方向出力分布 (RE上限値設定炉心)
- 図 3.2.3 - 3 (1) 径方向出力分布 (ターゲット装荷本数増大型炉心)
- 図 3.2.3 - 3 (2) 径方向出力分布 (ターゲットS/A混入率増大型炉心)
- 図 3.2.3 - 4 径方向出力分布 (母材Al₂O₃装荷炉心)
- 図 3.3.1 - 1 (Np, Am+Cm) 分離型 選定炉心構成図
- 図 3.3.1 - 2 径方向出力分布 (選定炉心)
- 図 3.3.1 - 3 (Np, Am+Cm) 分離型TRU消滅炉心の選定の流れおよび
その主要特性のまとめ
- 図 4.1 - 1 温度係数評価用炉心分割モデル (TRU消滅選定炉心)
- 図 5.3 - 1 動特性計算冷却材流路構成
- 図 5.3 - 2 流量半減時間と炉心流量の関係
- 図 5.4 - 1 ケースTRUA100 UL OF 解析結果 (炉出力・P/F)
- 図 5.4 - 2 ケースTRUA100 UL OF 解析結果 (ホットチャンネル温度)
- 図 5.4 - 3 ケースTRUA100 UL OF 解析結果 (反応度)
- 図 5.4 - 4 ケースTRUA000 UL OF 解析結果 (炉出力・P/F)

図リスト (2 / 3)

- 図 5.4-5 ケースTRUA000 U L O F 解析結果(ホットチャンネル温度)
- 図 5.4-6 ケースTRUA000 U L O F 解析結果(反応度)
- 図 5.4-7 ケースTRUA100E U L O F 解析結果(炉出力・P / F)
- 図 5.4-8 ケースTRUA100E U L O F 解析結果(ホットチャンネル温度)
- 図 5.4-9 ケースTRUA100E U L O F 解析結果(反応度)
- 図 5.4-10 ケースMOX100E U L O F 解析結果(炉出力・P / F)
- 図 5.4-11 ケースMOX100E U L O F 解析結果(ホットチャンネル温度)
- 図 5.4-12 ケースMOX100E U L O F 解析結果(反応度)
- 図 5.4-13 ケースMOX100E U T O P 時の投入反応度と燃料最高温度の関係
- 図 5.4-14 ケースTRUA100 U T O P (60 ϕ) 解析結果(ホットチャンネル温度)
- 図 5.4-15 ケースTRUA100 U T O P (60 ϕ) 解析結果(炉出力)
- 図 5.4-16 ケースTRUA100 U T O P (60 ϕ) 解析結果(反応度)
- 図 5.4-17 ケースTRUA000 U T O P (60 ϕ) 解析結果(ホットチャンネル温度)
- 図 5.4-18 ケースTRUA000 U T O P (60 ϕ) 解析結果(炉出力)
- 図 5.4-19 ケースTRUA000 U T O P (60 ϕ) 解析結果(反応度)
- 図 6-1 F B R リサイクルの概念
- 図 6.1.2-1 全炉心燃料に対する T R U の装荷割合の変化
- 図 6.1.2-2 リサイクルによる (A m, C m) 組成比の変化
- 図 6.1.2-3 リサイクルによる P u 組成比の変化
- 図 6.1.2-4 T R U 装荷・取出量の変化 (C O R E)
- 図 6.1.2-5 T R U 装荷・取出量の変化 (T A R G E T)
- 図 6.2.2-1 径方向出力分布の比較 (B O E C)
- 図 6.2.2-2 径方向出力分布の比較 (E O E C)
- 図 6.2.2-3 径方向中性子束分布 (全中性子束・平衡初期)
- 図 6.2.2-4 径方向中性子束分布 (全中性子束・平衡末期)
- 図 6.2.2-5 径方向中性子束分布 (高速中性子束・平衡初期)
- 図 6.2.2-6 径方向中性子束分布 (高速中性子束・平衡末期)
- 図 6.2.2-7 炉中心での中性子束スペクトルの比較

図リスト (3 / 3)

- 図 6. 2. 2 - 8 炉中心での随伴中性子束スペクトルの比較
- 図 7. 1 - 1 レファレンス炉心及び均質装荷型炉心構成図
- 図 7. 1 - 2 ターゲット集合体装荷炉心の炉心構成 (集中装荷型)
- 図 7. 1 - 3 ターゲット集合体の装荷パターン (CASE-A)
(分散装荷型 : 同心円配列型)
- 図 7. 1 - 4 ターゲット集合体の装荷パターン (CASE-F)
(分散装荷型 : IC/OC境界位置増加型)
- 図 7. 1 - 5 ターゲット集合体装荷拡大炉心の炉心構成 (炉心拡大型)
- 図 7. 1 - 6 (Np, Am+Cm) 分離型 (従来炉心型) 構成図
- 図 7. 1 - 7 (Np, Am+Cm) 分離型 選定炉心構成図
- 付録 A 構造材膨張に関わるる反応度フィードバックモデル
- 図 A - 1 構造材膨張にかかわる反応度フィードバックモデルの概念
- 図 A - 2 パッド膨張反応度計算用高さ関係
- 付録 B 平成 5 年度 T R U 消滅処理炉心の U L O F (TRU100E) の結果
- 図 2. 3. 4 - 13 出力 / 流量時間変化 (ケース TRU100E)
- 図 2. 3. 4 - 14 最大温度変化 (ケース TRU100E)
- 図 2. 3. 4 - 15 反応度時間変化 (ケース TRU100E)

1. 目的と概要

FBRにおけるTRU消滅処理炉心については、これまでに均質装荷炉心、非均質装荷炉心等の概念について検討を加えてきた。これらの検討の成果を踏まえた上で、さらに今年度は、核燃料サイクル側の進捗状況を反映したTRU形態として、 N_p と $A_m + C_m$ に分離し、各々、炉心部及び炉心外周のブランケット部に装荷する概念について検討を行う。この概念は、核燃料サイクル側の進捗状況を反映した実現性の高い炉心概念と考えられ、本概念の炉心特性並びに安全性の観点からの成立性を確認することは重要な意義がある。本研究では、従来検討された炉心概念と今年度実施する上記の炉心概念とを併せて総合的に評価を加え、TRU消滅処理炉心として実現性の高いFBR炉心概念を明らかにすることを、その主要な目的とする。

第2章において、 A_m と C_m を含むターゲット燃料集合体について、含有するTRU量、RE量並びに母材の種類による融点の変化を推定し、許容線出力を評価する。

第3章では、 N_p と $A_m + C_m$ 分離型のTRU消滅炉心の炉心仕様を選定するため、TRU混入率、RE混入率、ターゲット集合体装荷期間及びターゲット母材等をパラメータとした炉心パラメータサーベイの結果について述べ、TRU分離装荷炉心の代表的な仕様を明らかにする。

第4章では、選定されたTRU分離装荷炉心に対する動特性解析に必要な反応度特性、流量及び出力データ等の炉心特性データについて記述する。

第5章では、選定されたTRU分離装荷炉心の炉心安全性の特徴を調べる目的で実施された、ULOF及びUTOP時の過渡時温度応答解析の結果について述べる。

第6章において、分離装荷法によりTRU燃料をリサイクルした場合の炉心特性への影響について検討する。

第7章で、従来の均質装荷並びに非均質装荷等のTRU装荷概念と第6章までに述べた N_p と $A_m + C_m$ 分離装荷型のTRU消滅炉心概念を含め、主要な炉心特性及び炉心動特性について総合的な評価を加える。

1.1 評価項目

- (1) TRU分離装荷炉心の解析
- (2) リサイクルの影響解析
- (3) 総合評価

1.2 評価内容

1) TRU分離装荷炉心の解析

1000MWe クラスFBR 炉心（前年度と同一）を基準炉心とし、TRUを消滅処理する際のTRU装荷方法および装荷量を明らかにするための炉心特性解析、熱特性解析、動特性解析を実施する。

(1) 検討条件

対象炉心	1000MWe クラスFBR（初期平衡炉心） レファレンス炉心の炉心構成を図1-1に示す。 （主要仕様は3章の表3.1-1～表3.1-2参照）
燃料形態	MOX
PuおよびTRU組成	軽水炉取出（冷却期間5年）のものとする。 表1-1にPuおよびTRUの組成比を示す。 またREの組成比を表1-2に示した。
TRU形態	$Np, Am + Cm + RE$ の群に分離出来るものとする。 Np と $(Am + Cm)$ の比は軽水炉取出の組成比とする。
TRU装荷方法	NpO_2 炉心部に均質装荷 $(Am + Cm + RE)Oxide$ ターゲット集合体を構成して 径ブランケット領域に装荷
ターゲット母材	UO_2 , 不活性母材 (Al_2O_3, MgO, BeO, CeO)
RE混入率	分離技術の進歩により $(Am + Cm) / RE = 1$ 程度になることを期待し、REの混入率は1から軽水炉取出燃料中の存在比まで検討する。尚、 $(Am + Cm) / RE$ は元素重量比とした。

図1-2にレファレンス炉心と比較して、 $(Np, Am + Cm)$ 分離型TRU消滅炉心検討用の炉心概念を示した。

2) リサイクルの影響解析

核燃料リサイクルによるTRU組成の変化がTRU分離装荷炉心のTRU消滅量および炉心特性に与える影響を解析する。

(1) 検討条件

対象炉心	1000MWe クラスFBR (15年目炉心, 30年目炉心)
	TRU消滅選定炉心: 1) で選定した炉心とする。
燃料形態	MOX
PuおよびTRU組成	FBRリサイクルの結果を使用する。
TRU形態	$Np, Am + Cm + RE$
TRU装荷方法	} TRU消滅選定炉心と同一
ターゲット母材	
RE混入率	

3) 総合評価

平成元年度から実施してきたTRU消滅炉心の総合評価を行う。

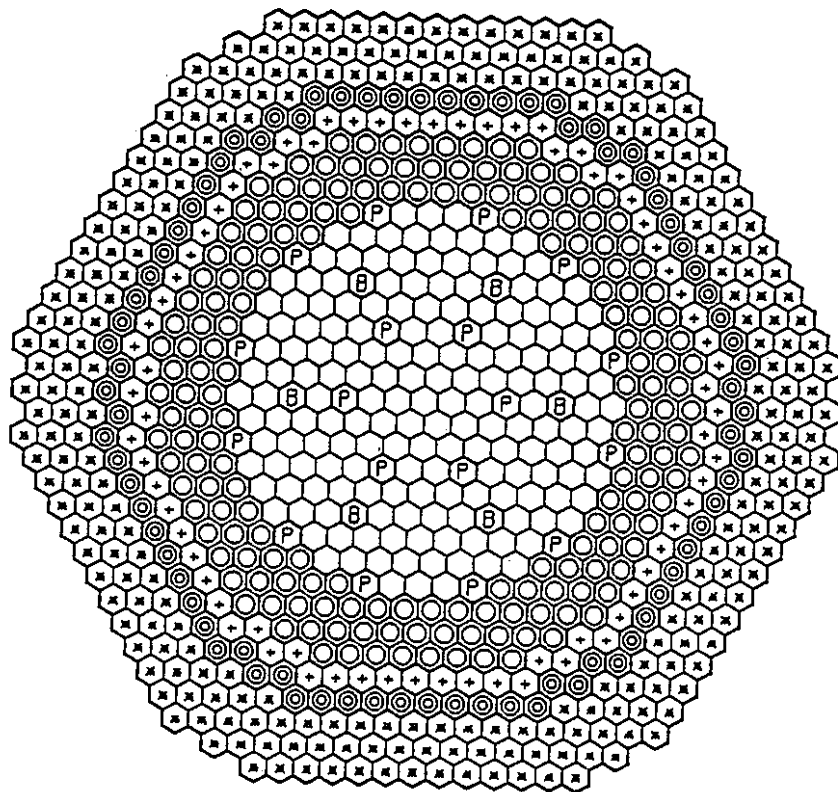
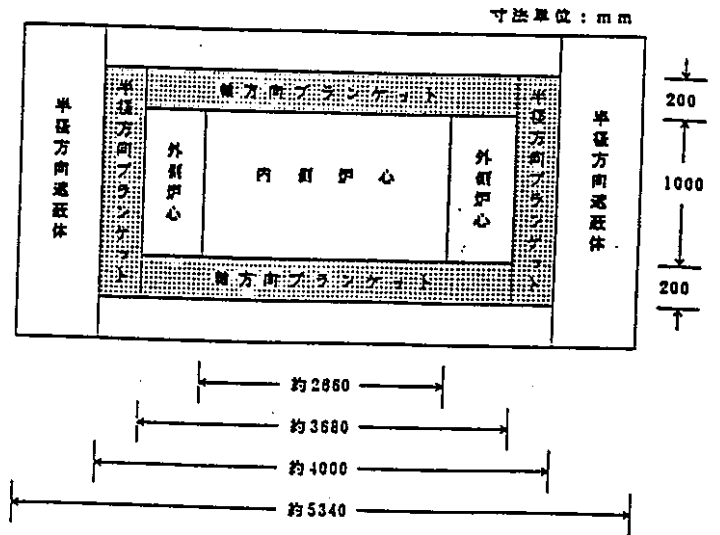
表1-1 TRU, Pu組成 (LWR取出: 3年燃焼, 5年冷却後)

核種	インベントリ - (相対値: g)	組成比 (wt%)
Np-237	6.032-01	49.115
Am-241	3.681-01	29.972
Am-242m	9.375-04	0.076
Am-243	1.903-01	15.495
Cm-242	1.076-05	0.001
Cm-243	6.208-04	0.051
Cm-244	6.125-02	4.987
Cm-245	3.169-03	0.258
Cm-246	5.494-04	0.045
TRU合計	1.228	100
Pu-238	2.429-01	2.43
Pu-239	5.106+00	51.07
Pu-240	2.686+00	26.87
Pu-241	1.203+00	12.03
Pu-242	7.600-01	7.60
Pu合計	9.9979	100

表 1-2 REの組成比 (LWR取出: 3年燃焼、5年冷却後)

核種名	インベントリー(相対値)	組成比(w/o)
Y - 89	7.379E+02	4.361E+00
Y - 90	1.909E-01	1.128E-03
Y - 91	2.116E-08	1.250E-10
LA-138	1.648E-01	9.739E-04
LA-139	2.006E+03	1.185E+01
LA-140	4.464E-43	2.638E-45
CE-136		0.0
CE-138		0.0
CE-140	2.063E+03	1.219E+01
CE-141	8.659E-16	5.117E-18
CE-142	1.862E+03	1.100E+01
CE-143	0.0	0.0
CE-144	5.880E+00	3.475E-02
PR-141	1.827E+03	1.080E+01
PR-142	0.0	0.0
PR-143	8.585E-40	5.073E-42
ND-142	6.440E+01	3.806E-01
ND-143	1.103E+03	6.518E+00
ND-144	2.344E+03	1.385E+01
ND-145	1.043E+03	6.164E+00
ND-146	1.207E+03	7.133E+00
ND-147	1.970E-49	1.164E-51
ND-148	6.123E+02	3.618E+00
ND-150	2.959E+02	1.749E+00
PM-147	4.159E+01	2.458E-01
PM-148	5.849E-16	3.456E-18
PM-148M	7.990E-14	4.722E-16
PM-149	0.0	0.0
PM-151	0.0	0.0
SM-144		0.0
SM-145	0.0	0.0
SM-147	1.900E+02	1.123E+00
SM-148	3.297E+02	1.948E+00
SM-149	3.635E+00	2.148E-02
SM-150	4.058E+02	2.398E+00
SM-151	1.711E+01	1.011E-01
SM-152	1.689E+02	9.981E-01
SM-153	0.0	0.0
SM-154	6.550E+01	3.871E-01

核種名	インベントリー(相対値)	組成比(w/o)
EU-151	6.815E-01	4.027E-03
EU-152	2.898E-02	1.713E-04
EU-153	1.867E+02	1.103E+00
EU-154	5.317E+01	3.142E-01
EU-155	1.493E+01	8.823E-02
EU-156	5.507E-36	3.254E-38
GD-152	1.437E-02	8.492E-05
GD-154	3.285E+01	1.941E-01
GD-155	1.526E+01	9.018E-02
GD-156	1.719E+02	1.016E+00
GD-157	2.213E-01	1.308E-03
GD-158	4.160E+01	2.458E-01
GD-160	2.295E+00	1.356E-02
GD-161	0.0	0.0
TB -159	4.845E+00	2.863E-02
TB -160	5.356E-09	3.165E-11
DY-156		0.0
DY-158		0.0
DY-160	6.934E-01	4.098E-03
DY-161	7.556E-01	4.465E-03
DY-162	6.307E-01	3.727E-03
DY-163	6.250E-01	3.693E-03
DY-164	9.938E-02	5.873E-04
DY-165	0.0	0.0
HO-165	3.582E-01	2.117E-03
ER-162		0.0
ER-164		0.0
ER-166	1.325E-01	7.830E-04
ER-167	5.994E-03	3.542E-05
ER-168	2.039E-02	1.205E-04
ER-170	1.226E-07	7.245E-10
ER-171	0.0	0.0
TM-169	1.794E-04	1.060E-06
TM-170	1.974E-09	1.167E-11
TM-171	8.103E-07	4.789E-09
YB-168	0.0	0.0
YB-170	8.132E-05	4.806E-07
YB-171	7.611E-06	4.498E-08
YB-172	3.865E-07	2.284E-09
YB-173		0.000E+00
YB-174		0.000E+00
YB-176		0.000E+00
LU-175		0.000E+00
LU-176		0.000E+00
TOTAL	1.692E+04	1.000E+02



⊗ I 179.8 mm

- | | | |
|----|------------|---------|
| ⊙ | 内側炉心 | 175本 |
| ⊗ | 外側炉心 | 180本 |
| P | 主炉停止系制御棒 | 18本 |
| B | 後備炉停止系制御棒 | 6本 |
| + | 半径方向ブランケット | 72本(1層) |
| ⊙* | 半径方向遮蔽体 | 78本 |
| * | 半径方向遮蔽体 | 270本 |

合計 799本

図1-1 レファレンス炉心の炉心構成

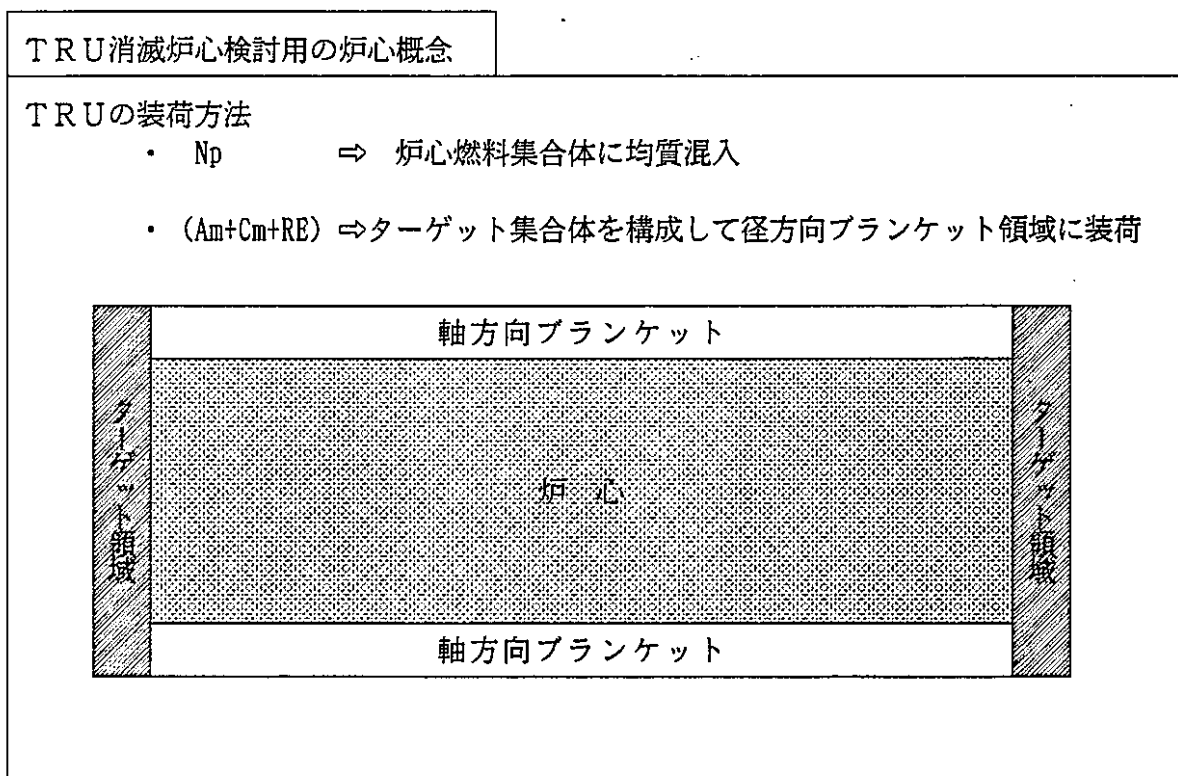
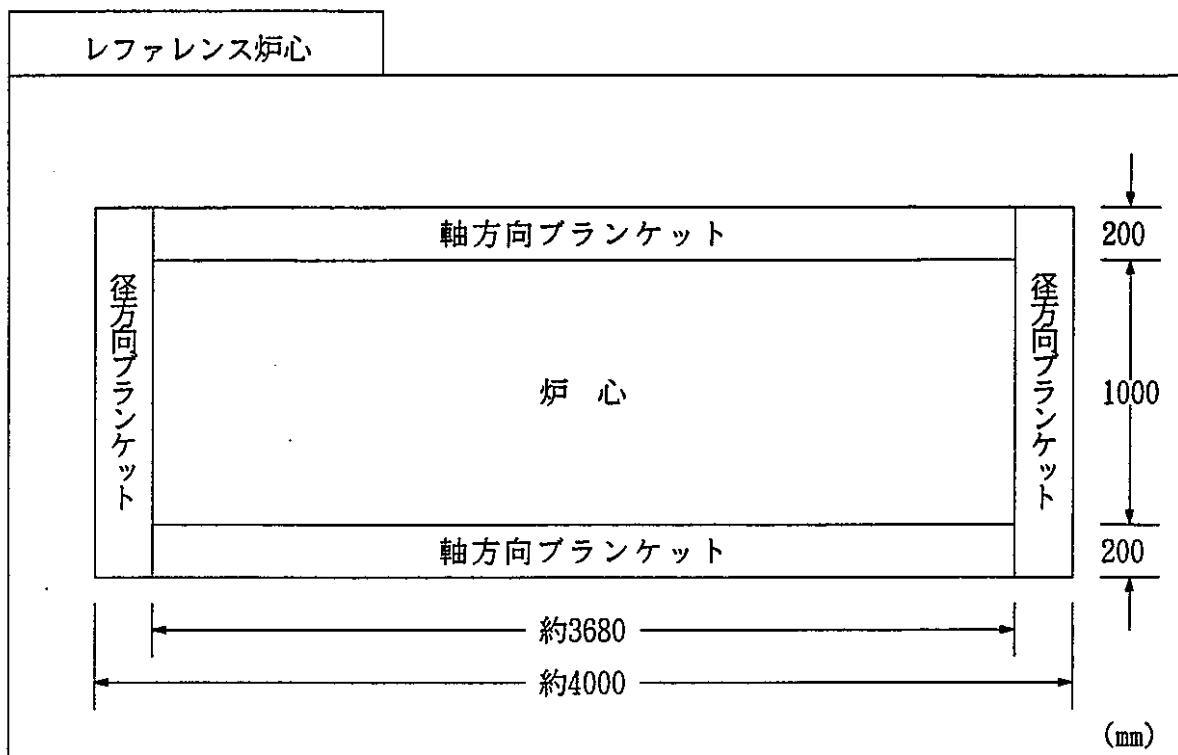


図1-2 $(Np, Am+Cm)$ 分離型TRU消滅炉心検討用の炉心概念

2. ターゲット燃料集合体の検討

本章の検討ではターゲット燃料集合体としての各種組み合わせ候補について、簿材及び混入TRU、RE量をパラメータとして融点評価を行った。次いで燃料候補の熱伝導特性について文献調査を基にした検討を行い、設計上の安全率を考慮しての許容設計最大線出力（定格運転時）を評価する。

TRUの主成分であるAmO₂の熱伝導度については取得された高温データが少ない為、一般のセラミックスの熱伝導度特性から高温側の推定を行った。

その結果として、炉心設計側で選定した燃料材料であるU入りTRU46%、RE46%構成のターゲット集合体炉心の最大線出力200W/cmが成立する見通しであることを示した。

2.1 ターゲット母材の検討

(1) ターゲット燃料母材候補について特性の調査

ターゲット燃料母材候補について特性の調査を実施した。結果を表2.1-1に示す。参考にした文献名は表中に示した。母材としては Al_2O_3 、 MgO 、 U が適すると判断される。 BeO については毒性の点、 CeO_2 は成型性の点等に難点があり、今回の検討対象からは除外する。

(2) ターゲット燃料の融点評価

a. 目的

ターゲット燃料候補材について、含有するTRU元素量、希土類(RE)元素量並びに選定母材の種類による融点の変化量を推定し、許容線出力の評価に反映する。

b. 評価方法及び条件

評価対象とするTRU元素、RE元素並びに母材の種類及び母材量の組み合わせを表2.1-2に示す。

本検討ではTRU及びREは酸化物を形成し、均一な固溶状態にあるものと仮定し^{*}、融点はモル混合平均により評価する事とした。

評価手順は、まず元素組成比の確定しているTRU及びREについて個々に融点評価を実施し、その評価値をTRU/RE/母材組成比の異なる各評価ケースに適用する事とした。

*ここでは均一な固溶状態を仮定したが「共晶」による融点降下にも留意する必要があると考えられる。

c. 結果

各TRU、RE元素並びに母材の酸化物形態及び融点を表2.1-3に示す。評価ケースとして想定しているTRU/RE/母材の組成比は元素重量比であるので、酸化物重量比に換算する必要がある。

TRU及びREについて、構成元素が表2.1-3で示した酸化物形態で存在しているものとして評価した酸化物重量比とこれを基に推定した融点を表2.1-4に示す。

また母材の種類によりターゲット燃料内のこれらの酸化物の重量組成比も相対的に変化するので、母材毎に評価したTRU及びRE酸化物の重量組成比を表2.1-5に示した。

表2.1-3の各酸化物の融点及び表2.1-5の重量組成比よりモル混合平均で求めた各評価ケースにおける融点を、表2.1-6(母材使用の場合)及び表2.1-7(母材不使用の場合)に示した。

表2.1-1 ターゲット燃料母材候補の特性調査結果

母材候補	特性	結晶構造	理論密度 (g/cm ³)	融点	熱膨張率 %	熱伝導率 W/(m·K)	比熱 J/g·K	蒸気圧 Pa	SUS との共存性	Na との共存性	製作性 入手容易度	高温安定性 (~2000℃)	照射安定性 熱伝導度変化	総合判定
Al ₂ O ₃		六方晶(α) ①	3.97(α) ⑩、⑪	2049℃①	約1 at 1000℃	6.55 at 1200K ②	1.258 at 1200K ②	6×10 ⁻⁴ at 2200K ⑧	共存性は良好 と推定	800℃まで 可	良 安価 成型性良	大 相変態なし	-50% at 323K, 0.6×10 ⁻⁴ ⑩ (1/m ²)	良 SUS, Naと両立性有 製作性良, 融点やや低
BeO		六方晶(α) 正方晶(β) α→β *1 at 2049℃①	3.03(α) ⑩、⑪	2570℃① 2530℃⑥	約1 at 1000℃	33.0 at 1200K ②	2.044 at 1200K ②	3×10 ⁻⁴ at 2200K ⑧	1000℃以上で 反応 ⑩ それ以下では 良好と推定	800℃まで 良好	毒性が有る為 取扱いに注意 を要する。 高価	大 2049℃付近で 相変態有り	-80% at 373K, 0.6×10 ⁻⁴ ⑩ (1/m ²)	可 毒性有り、高価 照射による下降大 熱伝導率、比熱大
CeO ₂		立方晶①	7.13 ⑩	2341℃①	約1 at 1000℃	1.0-0.76 at 2000K ②	0.494 at 1200K ①				成型特性不明	大 相変態なし		可 熱伝導率小、 不明特性多し (共存性、製作性等)
MgO		立方晶①	3.58 ①、②	2852℃①、⑤	約1.5 at 1000℃	7.7 at 1200K ②	1.298 at 1200K ②		共存性は良好 と推定	600℃まで 可	良	大 高融点 相変態なし	-44% at 343K 0.6×10 ⁻⁴ ⑩ (1/m ²)	可 熱膨張率大 (PCMI, 割れ特性に影響) SUS, Naと共存性有
UO ₂		立方晶①	10.96±0.01 ①、⑩、⑪	2877℃①	約1 at 1000℃	3.9 at 1000K ②	0.293 at 1200K ①	3×10 ⁻³ at 2200K ⑧	600℃まで 両立性良好⑬	(U, Pu)O ₂ での 試験では、 750℃まで両 立性良好⑨	良	大 高融点 相変態なし	Max -30% 程度③	良 高温安定性大 照射安定性大 SUS, Naと共存性有
(参考データ) ΛmO ₃		立方晶 ⑦	11.68 ⑥	2120℃ ⑥										
Cm ₂ O ₃		立方晶 ⑦	(CmO ₂) 11.92 ⑥	2260~ 2275℃ ⑥										
La ₂ O ₃		六方晶 ①	6.51 ①	2299℃ ①										
Pr ₂ O ₃		立方晶 ①	10.9 ①	2199℃ ①										
Nd ₂ O ₃		六方晶 ①	7.24 ①	2271℃ ①										

- ① Engineering Properties of Selected Ceramic Materials, 1966 II
- ② 熱物性ハンドブック (日本熱物性学会編)
- ③ Uranium Dioxide: properties and nuclear applications, J. Bolle
- ④ Handbook of Thermo-physical Properties of Solid Materials, Volume 3
- ⑤ ベリリウム利用への叢知、『ベリリウム技術研究』特別専門委員会、日本原子力学会
- ⑥ TRU燃料の基本特性評価 三菱原子力工業(株) 平成2年6月
- ⑦ 『アクチニドの化学』、カッツ・シーボーク、朝倉書店
- ⑧ Phase Diagrams for Ceramists Vol. I, The American Ceramic Society, Inc. 1964
- ⑨ Summary of (U, Pu)O₂ Properties and Fabrication Methods, GEAP-13582
- ⑩ 最新酸化物便覧 (物理化学的性質) サムソノフ、日ソ通商社
- ⑪ 日本原子力学会誌、昭和63年年会 核データ；炉物理合同特別会合講演要旨
- ⑫ 酸化物便覧 サムソノフ、日ソ通商社
- ⑬ 酸化物の熱物理的性質、日ソ通商社
- ⑭ 超高融点材料便覧、日ソ通商社

表2.1-2 融点評価用ターゲット母材元素組成

ケース	TRU*1 (wt%)	RE*2 (wt%)	母材 (wt%)
①	10	10	80
②	25	25	50
③	10	90	0
④	25	75	0
⑤	50	50	0

*1 Am : Cm = 9 : 1 (重量比)

*2 La、Ce、Pr、Nd、Sm (主要5元素)

軽水炉より取り出し後5年経過のもの

表2.1-3 TRU、RE並びに母材元素の酸化物形態、分子量及び融点

	元素名	原子量 :M1	酸化物形態	酸化物分子 量*1 :M2	融点 :Tm (°C)
TRU	Am	241.7	AmO ₂	273.7	2120
	Cm	244.0	Cm ₂ O ₃	268.0	2265
RE	La	138.9	La ₂ O ₃	162.9	2299
	Ce	139.9	CeO ₂	171.9	2341
	Pr	140.9	Pr ₂ O ₃	164.9	2199
	Nd	141.9	Nd ₂ O ₃	165.9	2271
	Sm	151.9	Sm ₂ O ₃	175.9	2350
母材	U	238.1	UO ₂	270.1	2840
	Al	27.0	Al ₂ O ₃	51.0	2049
	Mg	24.0	MgO	40.0	2852

*1 TRU/RE/母材元素 原子1個当たり

表2.1-4 TRU、REの構成酸化物重量比及び融点

	元素名	原子重量 比 :W1 *1	酸化物形態	酸化物重量 比 :W2	融点 *2 (℃)
TRU	Am	0.903	AmO ₂	0.906	2135
	Cm	0.097	Cm ₂ O ₃	0.094	
RE	La	0.1285	La ₂ O ₃	0.1273	2290
	Ce	0.2517	CeO ₂	0.2612	
	Pr	0.1170	Pr ₂ O ₃	0.1157	
	Nd	0.4271	Nd ₂ O ₃	0.4218	
	Sm	0.0756	Sm ₂ O ₃	0.0739	

1 $W2i=W1i(M2i/M1i)/\sum W1i*(M2i/M1i)$ iは対象元素No

*2 $\sum W2i*Tmi$

表2.1-5 各評価ケースにおけるTRU/RE/母材酸化物重量組成比

ケース	酸化物 種類	酸化物重量比 (fraction)			
		TRU *1	RE *2	母材	合計
①		1.0wt%	1.0wt%	8.0wt%	100wt%
	UO ₂	0.0991	0.1040	0.7968	1.00
	Al ₂ O ₃	0.0648	0.0680	0.8674	1.00
	MgO	0.0722	0.0757	0.8523	1.00
②	元素重量比	2.5	2.5	5.0	100wt%
	UO ₂	0.2463	0.2584	0.4940	1.00
	Al ₂ O ₃	0.1854	0.1944	0.6201	1.00
	MgO	0.1999	0.2097	0.5902	1.00
③	元素重量比	1.0	9.0	0	100wt%
	母材なし	0.0958	0.9042	0.0	1.00
④	元素重量比	2.5	7.5	0	100wt%
	母材なし	0.2411	0.7585	0.0	1.00
⑤	元素重量比	5.0	5.0	0	100wt%
	母材なし	0.4880	0.5118	0.0	1.00

*1 TRU 平均原子量 : 241.9、酸化物平均分子量 (1原子あたり) : 273.2

*2 RE 平均原子量 : 141.6、酸化物平均分子量 (1原子あたり) 167.7

表2.1-6 TRU、RE混入燃料の融点評価結果（母材使用の場合）

ケース	TRU 混入率 (wt%)	その他の 組成比 (wt%)		母材の種類		
				UO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
		RE	母材	融点 (℃)	融点 (℃)	融点 (℃)
①	10	10	80	2713	2071	2758
②	25	25	50	2521	2112	2590

表2.1-7 TRU、RE混入燃料の融点評価結果（母材不使用の場合）

ケース	TRU 混入率	その他の 組成比 (%)		融点 (℃)
		RE	母材	
③	10	90	0	2275
④	25	75	0	2252
⑤	50	50	0	2214

2.2 ターゲット燃料の許容線出力の評価

2.2.1 評価方法

(1) 溶融線出力評価方法

MOXの燃料温度評価方法（3領域モデル）を準用することにより、燃料中心温度を計算する。即ち、ギャップコンダクタンス、燃料組織変化境界温度は仮想的にMOXの溶融線出力評価手法と同等とする。ここで得られる値はノミナル温度に相当するものとする（モデルにホットスポットファクタを取り込まない）。但し、熱伝導度として母材にTRUが混入した状態の値を推定し、簡便的にMOXからの相対値として熱伝導度式の定数に乗ずる係数 f_{var} の形で入力する。

融点は表2.1-6、及び表2.1-7の値を用いる。

f_{var} は表2.2-1のとおりである。

(2) f_{var} の設定方法

1) 母材熱伝導度

UO₂はMOXと同等とする。図2.2-1⁽¹⁾のUO₂とMOXの熱伝導度の相対比較からO/Mが2.0ではほぼ同等と判断する。

Al₂O₃は表2.1-1から、6.55 W/mK (1200 K)とする。

MgOは表2.1-1から、7.7 W/mK (1200 K)とする。

2) TRU熱伝導度

混入するTRUはAmが大部分であるので、またCmはAmより熱伝導度が高いので、ここではAmの熱伝導度で代表させて考える。

純粋なAmO₂の熱伝導度データは入手が限られており、図2.2-2⁽²⁾に示すものが唯一であった。図2.2-2は温度が60℃のものであるが、同図においてUO₂とAmO₂を比較するとAmO₂はUO₂の1/5程度である。今後データが取得された場合の高温状態での熱伝導度を推定する判断材料が乏しいので、ここでは暫定的に1/5を用いざるを得ないと考える。

3) RE熱伝導度

現在入手可能であるデータはCeO₂（図2.2-3⁽³⁾）、Sm₂O₃（図2.2-4⁽⁴⁾）のみ

である。1000℃近辺で熱伝導度がそれぞれ1.5W/mK、2.1W/mKであり、UO₂ (2.5W/mK) に対する比として、REの熱伝導度は約1/2程度と推定される。

4) 次の簡便式で f_{var} を計算する。

$$f_{var} = X \cdot f_{TRU} + Y \cdot f_{RE} + Z \cdot f_{母材}$$

X : TRU重量組成比

f_{TRU} : TRUのUO₂に対する熱伝導度比 (= 1/5)

Y : RE重量組成比

f_{RE} : REのUO₂に対する熱伝導度比 (= 1/2)

Z : 母材重量組成比

$f_{母材}$: 母材のUO₂に対する熱伝導度比

f_{var} の計算結果は表2-7に示したとおりである。

(3) 許容線出力評価方法

以下の計算式で定格時設計最大線出力を求める。

$$Q_{max} = Q_{molt} / f_{unc} / f_{op}$$

Q_{max} : 定格時設計最大線出力

Q_{molt} : 溶融線出力 (ノミナル値)

f_{unc} : 溶融線出力不確かさ係数 (ここでは従来設計例の誤差幅 [溶融線出力～500W/cmにおける不確かさ約100W/cmから1.2とする。])

f_{op} : 過出力係数 (ここでは大型炉の例から1.15とする。)

2.2.2 許容線出力評価結果

許容線出力結果を表2.2-2に示す。

ケース1とケース2を比較した場合、TRUの混入率がケース2では増す結果、熱伝

導度及び融点が低下する効果（ Al_2O_3 では融点が逆に増加するが熱伝導度低減効果が勝っている）により、許容線出力が低下している。 UO_2 と Al_2O_3 の比較では、前者が融点が大幅に高いが、熱伝導度が低いためにキャンセルされ、許容線出力レベルは両者間で類似する結果となっている。 MgO は熱伝導度が非常に高いことと、融点も高いことから許容線出力が高い結果となっている。

母材を用いない場合は、ここでの限られた情報に基づく熱伝導度設定結果を使用すると、熱伝導度が非常に設定とならざるを得ないことから、許容線出力が低い結果となっている。

炉心設計検討で、現行のターゲット集合体の燃料ピン径（燃料ピン本数／集合体）では線出力が高くならざるを得ないことが判明したので、REが約50%、TRUが約50%の燃料の場合で熱伝導度を高める設計が必要となった。本問題解決のためには、燃料熱伝導度を高める工夫を行うか、燃料ピン本数をさらに多くして最大線出力を低減する方法が考えられる。

ここでは、燃料にUメタルを約7%程度混入して熱伝導度を高めることを検討した。このときの熱伝導度は、UメタルがMOXの少なくとも10倍以上の熱伝導度であるので、炉心設計で採用した炉心に相当する「TRU46%（熱伝導度MOXの1/5倍）、RE46%（熱伝導度MOXの1/2倍）、U7%（熱伝導度MOXの10倍）」の混合物の熱伝導度は2.2.1 4)式から、 f_{var} が1.0となりMOXと同等の熱伝導度となる。Uメタルの分散割合が少なく飛び飛びの状態であるときには、後述するように平行平板モデル、直行平板モデルいずれも成立せず等価熱伝導度は悪化する。そこでここではUメタルの混合物中の熱伝導度をMOXの5倍と保守側に考慮する。このときの f_{var} は0.67となる。選定炉心の設計許容線出力は上記 f_{var} のもとで215W/cmとなり、200W/cm以上が確保できると評価される。

2.2.3 AmO₂・RE混相セラミックスの熱伝導度の検討

(1) セラミックスの熱伝導度の一般特性

セラミックスの熱伝導度を表わす代表モデルを図2.2-5に示す。

セラミックスの熱伝導はフォノン支配（金属では伝導電子支配）である。セラミックスの熱伝導 k の基本式は以下で表わされる。

$$k \propto C \cdot v \cdot \ell$$

C : 熱容量

v : 熱キャリア運動速度

ℓ : 平均自由行程

図2.2-5の各温度領域の熱伝導メカニズムをまとめると次のようになる。

低温域 (①)	デバイ温度より十分低い温度領域	$\propto T^3$
	C支配 (v, ℓ : 一定)	
中温域 (②)	フォノンの衝突による減少 ℓ	$\propto T^{-1}$
高温域 (③)	フォトンの熱輻射の寄与	$\propto T^3 \cdot \ell$

(2) セラミックスでは①から②への移行で、熱伝導度が $1/3 \sim 1/5$ に減少する。表2.2-2⁽⁵⁾参照。AmO₂も基本的には同様な傾向を有すると考えられる。

セラミックス (MgO等) を含む各種物質のデバイ温度の例を表2.2-5⁽⁶⁾に示す。

(3) 金属Amの熱伝導度が小さいことから、AmO₂の熱伝導度も小さくなっていると予想される。表2.2-3⁽⁷⁾のAlとAl₂O₃の関係の例から、酸化物化により熱伝導度が低下することがわかる。図2.2-6にMA含有酸化物の熱伝導度⁽⁸⁾を示す。UO₂母材にAmを50%含有させたケースでは熱伝導度が、MOXの半分になっており、AmO₂の熱伝導度が非常に低いことが反映されている。2.2.1の簡便式でU_{0.5}Am_{0.5}O₂の $f_{v,r}$ を計算すると0.6であり、ほぼAmO₂の熱伝導度予想と簡便式が妥当であることがわかる。

(4) 以上のことから、前項でのAmO₂の熱伝導度推定の考え方は大略肯定されると考える。

(5) 但し、REとの相形成の状況で、混相となった時の熱伝導度が、AmまたはREのいずれの支配となるかによっては、熱伝導度に変化する。2.2.1の式は平行平板モデルであ

る。一方、熱が平行平板に直交して流れる時には、悪い熱伝導に支配されることになる（更に熱伝導度が悪化する可能性もある）。

しかし、図2.2-1の $UO_2 \cdot AmO_2$ （約13%）の温度依存性は、上記①から②の変化が比較的小さい可能性を示しており、設計で着目する温度領域②では、熱伝導度が予想より良好である可能性もある。

- (6) 現在の入手データからは温度領域②の AmO_2 の熱伝導度を結論づけることは困難である。故に、今後もデータの調査收拾を継続する必要があるが、本設計では、 $AmO_2 \cdot RE$ に金属添加物を加えること等の対策により、熱伝導度が約2倍程度には高められることを想定した2.2.2の評価は妥当なものとする。

参考文献

- (1)H.E.Schmidt et.al.,J.Less-Com.Met.121(1986)621
- (2)H.E.Schmidt,AERE-R-7961
- (3)"Engineering Properties of Selected Ceramic Materials",1966.
- (4)「酸化物の熱物理的性質」日ソ通信社
- (5)キンガリー、ホウエン、ウーلمان「セラミックス材料科学入門応用編」内田老鶴園
- (6)理科年表 P.54 1992年版
- (7)水田、河本「材料テクノロジー-13、セラミック材料」東京大学出版会
- (8)小川、「TRU燃料挙動予測とデータベースの現状」
消滅処理研究の現状、日本原子力学会、1994年

表2.2-1 TRU、RE混入燃料の熱伝導度係数 f_{var}

ケース	TRU 混入率 (wt%)	その他の組成比 (wt%)		母材の種類			
				UO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	なし
		RE	母材	f_{var}	f_{var}	f_{var}	f_{var}
①	10	10	80	0.866	1.498	1.729	—
②	25	25	50	0.668	1.155	1.306	
③	10	90	0	—	—	—	0.473
④	25	75	0	—	—	—	0.431
⑤	50	50	0	—	—	—	0.358

表2.2-2 TRU、RE混入燃料の許容線出力 Q_{max}

ケース	TRU 混入率 (wt%)	その他の組成比 (wt%)		母材の種類			
				UO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	なし
		RE	母材	Q_{max}	Q_{max}	Q_{max}	Q_{max}
①	10	10	80	335	360	520	—
②	25	25	50	240	295	450	—
③	10	90	0	—	—	—	145
④	25	75	0	—	—	—	125
⑤	50	50	0	—	—	—	95

表2.2-3 セラミックスの熱伝導度

材 料	熱伝導率 (cal/sec/cm ² /°C/cm)	
	100°C	1000°C
Al ₂ O ₃	0.072	0.015
BeO	.525	.049
MgO	.090	.017
MgAl ₂ O ₄	.036	.014
ThO ₂	.025	.007
ムライト	.014	.009
UO _{2.00}	.024	.008
黒鉛	.43	.15
安定化 ZrO ₂	.0047	.0055
熔融シリカガラス	.0048	.006
ソーダ石灰ガラス	.004	—
TiC	.060	.014
磁器	.004	.0045
粘土質耐火物	.0027	.0037
TiC サーメット	.08	.02

出典 キンガリー、ホウエン、ウーラム「セラミックス材料科学入門応用編」内田老鶴園

表2.2-4 各種物質の熱伝導度 (25°C)

分類	物質名	κ (W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹) *
セラミックス	SiC	0.6-1.6
	BeO	2.5
	Al ₂ O ₃	0.4
	MgO	0.6
	Si ₃ N ₄	0.15-0.2
	TiC	0.15-0.2
	石英ガラス	~0.01
金属	Cu	4.16
	Ag	4.17
	Al	2.38
	V	0.074
	Bi	0.112
	Ti	0.041
有機高分子	ナイロン	2.5×10 ⁻³
	ポリエチレン	3.4×10 ⁻³
	ポリスチレン	8.4×10 ⁻⁴
	ポリ塩化ビニル	1.5×10 ⁻³
	PMMA	1.6×10 ⁻³

* 4.2 W·cm⁻¹·K⁻¹ = 1 cal·cm⁻¹·s⁻¹·K⁻¹

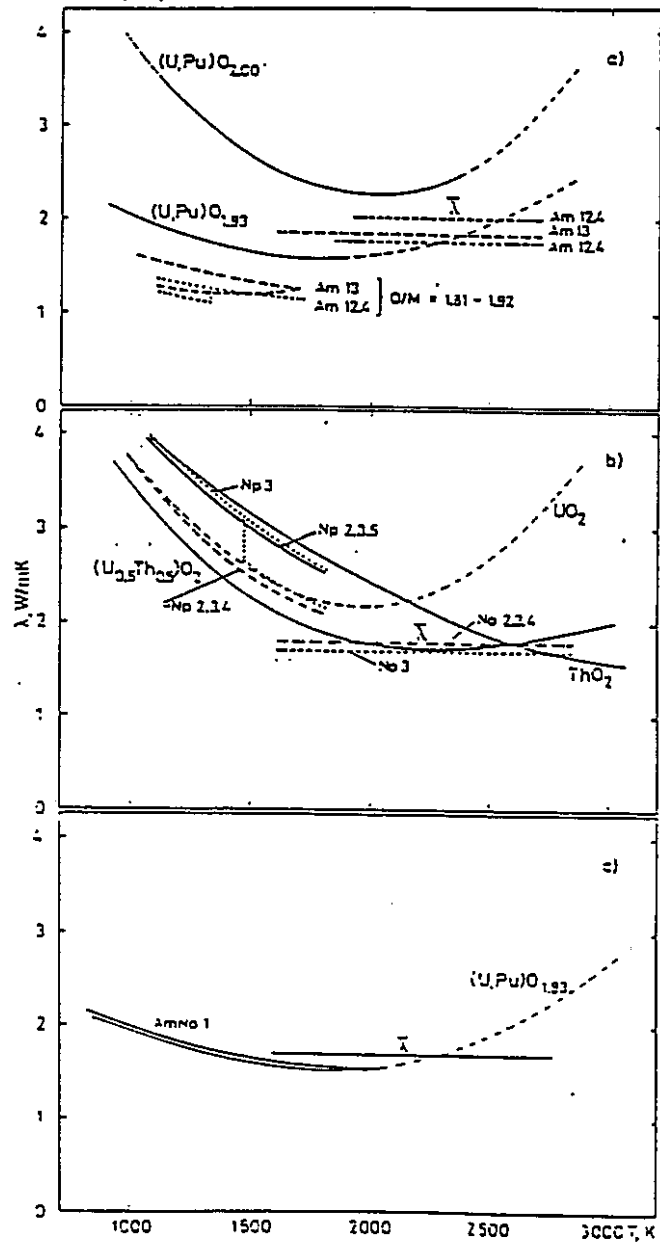
出典 水田、河本「材料テクノロジー-13、セラミック材料」東京大学出版会

表2.2-5 各種物質のデバイ温度 (K)

物質	θ (K)	物質	θ (K)	物質	θ (K)
非 金 属		金 属		銅	343
アルゴン	93	亜鉛	327	トリウム	163
塩素	115	アルミニウム	428	ナトリウム	158
塩化銀	183	アンチモン	211	鉛	105
塩化カリウム	235	イリジウム	420	ニオブ	275
塩化ナトリウム	321	インジウム	108	ニッケル	450
ケイ素	640	ウラン	207	白金	240
ゲルマニウム	370	カドミウム	209	バナジウム	380
酸化チタン	760	ガドリニウム	195	ハフニウム	252
酸化マグネシウム	946	カリウム	100	パラジウム	274
酸素	91	ガリウム	320	バリウム	110
臭化カリウム	174	カルシウム	230	ベリリウム	1440
臭化銀	144	金	165	マグネシウム	400
臭化ルビジウム	131	銀	225	マンガン	410
重水素	97	クロム	630	モリブデン	450
水素	105	コバルト	445	ランタン	142
石墨	420	ジルコニウム	291	リチウム	344
ダイヤモンド	2230	水銀	71.9	ルビジウム	56
窒素	68	スズ(白)	199	レニウム	430
ネオン	75	ストロンチウム	147	ロジウム	480
フッ化カルシウム	510	セシウム	38		
ヘリウム ⁴ H(hcp)	26.4	ビスマス	119		
ヘリウム ³ H(bcc)	16	タリウム	78.5		
ヨウ素	106	タングステン	400		
ヨウ化カリウム	235	タンタル	240		
ヨウ化ルビジウム	165	チタン	420		
硫化亜鉛	315	鉄	467		

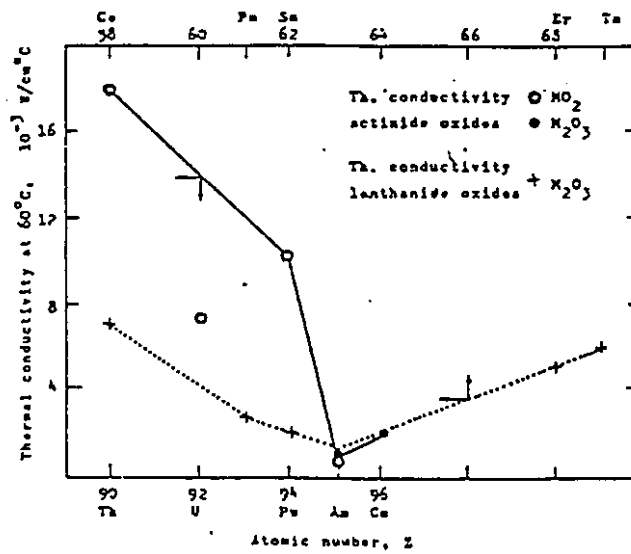
主として Amer. Inst. Phys. Handbook, 3rd. ed. による.

出典 理科年表 P.54 1992年版



出典 H.E.Schmidt et.al., J.Less-Com.Met.121(1986)621

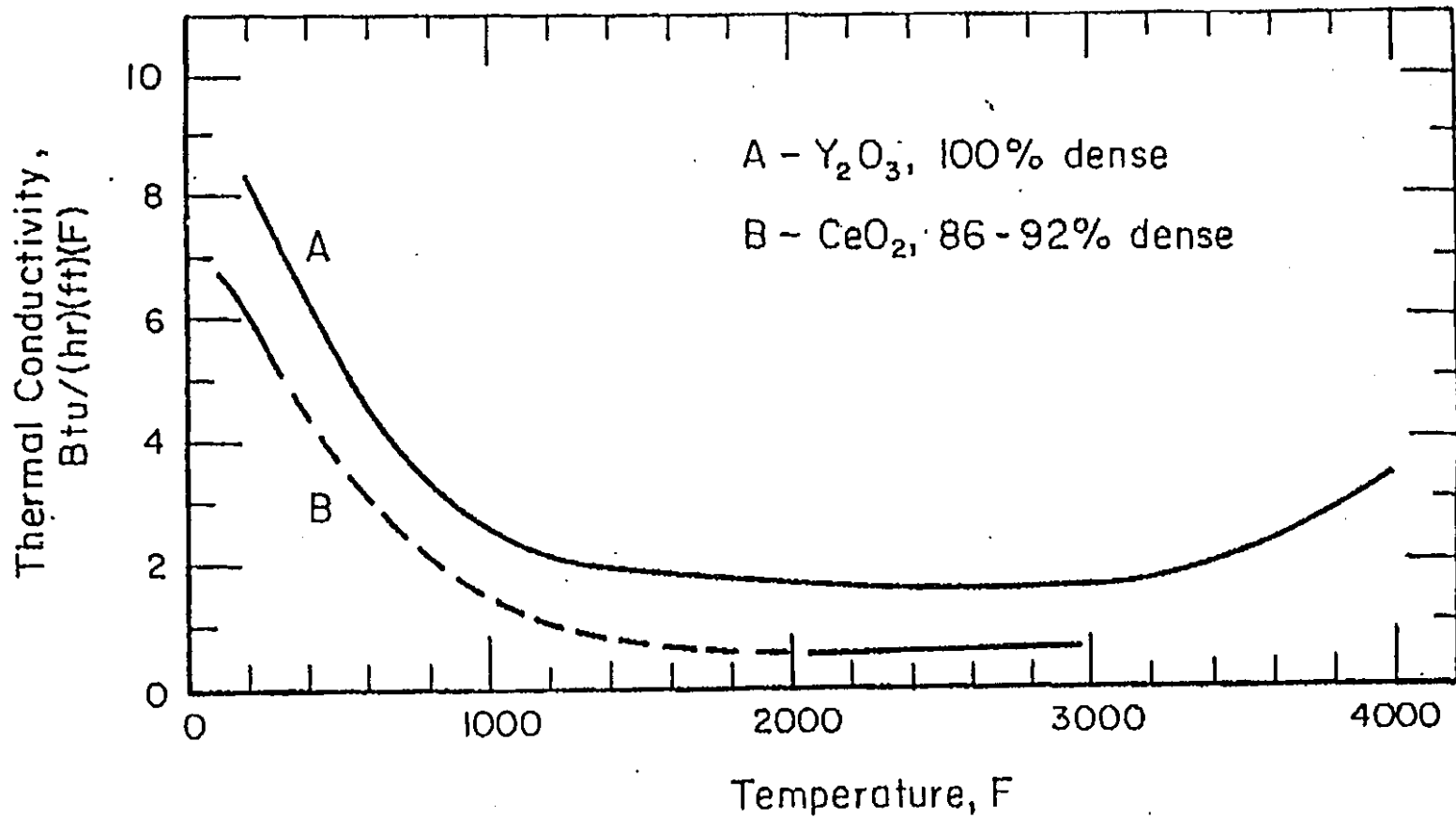
図2.2-1 UO_2 等の熱伝導度



at 60°C

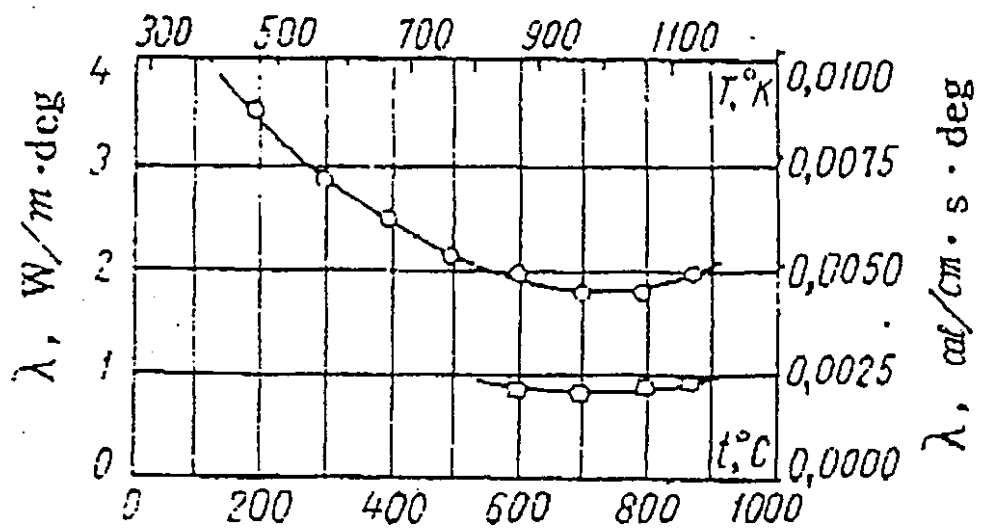
出典 H.E.Schmidt, AERE-R-7961

図2.2-2 $A m O_2$ の熱伝導度



出典 "Engineering Properties of Selected Ceramic Materials", 1966.

図2.2-3 CeO_2 の熱伝導度



上のライン：緻密試験片

下のライン：多孔質試験片

出典 「酸化物の熱物理的性質」日ソ通信社

図2.2-4 Sm_2O_3 の熱伝導度

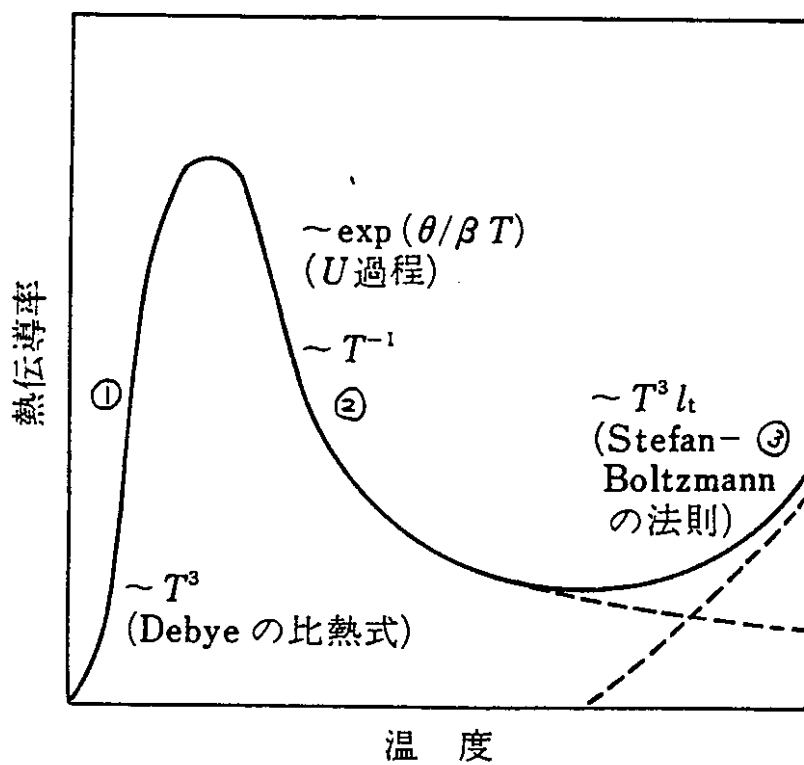


図2.2-5 セラミックス熱伝導度の温度による変化の概念

3. TRU分離装荷炉心(平衡初期炉心)の解析

1000MWe クラスFBR 炉心(前年度と同一)を基準炉心とし、TRUを消滅処理する際のTRU装荷方法及び装荷量を明らかにするための炉心パラメータサーベイを実施した。

3.1 主要条件

(1) 検討条件

対象炉心	1000MWe クラスFBR (初期平衡炉心)
	レファレンス炉心 : 図1-1
燃料形態	MOX
PuおよびTRU組成	軽水炉取出(冷却期間5年)のもの
TRU形態	Np, Am+Cm+RE
TRU装荷方法	{ NpO ₂ 炉心部に均質装荷 (Am+Cm+RE)Oxide ターゲット集合体を構成し 径ブランケット領域に装荷
ターゲット母材	UO ₂ 及び不活性母材。 不活性母材は2章の検討よりMgO とAl ₂ O ₃ が考えられる。 ここでは代表例としてAl ₂ O ₃ で評価を行う。
RE混入率	分離技術の進歩により(Am+Cm)/RE=1程度になることを期待し、REの混入率は1から軽水炉取出燃料中の存在比まで検討する。なお(Am+Cm)/REは元素重量比とした。

(2) 基本条件

原子炉出力	1000MWe (2517MWt)
サイクル長さ	15カ月
燃料交換	{ 炉心部 : 3 バッチ ターゲット部 : 3 バッチおよび5 バッチ
炉心高さ	100cm
燃焼チェーン	燃焼計算における燃焼チェーンを図3.1-1に示す。 半減期およびAm242の崩壊の分岐比は、Table of isotopes(7th EDN.)を用いた。

レファレンス炉心の炉心主要仕様を表3.1-1 に、炉心構成要素主要仕様を表3.1-2 に示した。

(3) 評価項目および評価方法

① TRUおよびREの装荷量の許容範囲の決定

(a) TRU (Np+Am+Cm)混入率

ここでのTRU混入率とは、レファレンス炉心の炉心部全重金属重量に対するTRU重量割合である。そこでまずTRU (Np+Am+Cm)混入率をパラメータとして、下記に示した混入率を制限する因子を考慮し許容混入率を選定し、その他のサーベイ計算の基準ケースとする。サーベイのTRU混入率は5%及び、20%とし、LWR 取出5年冷却の組成で、Npを炉心領域へ、(Am+Cm)をターゲット集合体としてブランケット領域1層へ装荷する。

LWR 取出5年冷却のTRU組成は(Np:Am:Cm=49.1 : 45.6 : 5.3)である。

TRU混入率の制限因子

- ・ 燃焼欠損反応度が正
- ・ TRU燃料の物性 (融点等)

┌ 炉心燃料 (U+Pu+Np)
└ ターゲット TRU燃料 (Am+Cm+RE+ 母材)

(b) RE混入率

RE混入率については、RE混入率の最小値を、再処理でのRE分離技術の進歩を考慮して、REが $RE/(Am+Cm)=1$ にまで分離されるとする。

またRE混入率の最大値は軽水炉取出燃料中の存在比までを検討する。具体的には、TRU混入率とRE装荷量の関係を、ピン径および装荷本数(層数)をパラメータに評価し、最大RE混入率を選定する。

・ ピン径

太径ピン 基準炉心の径方向ブランケット燃料ピン仕様と同程度

(ピン径13.4mm, 127ピン/集合体)

細径ピン 基準炉心の炉心燃料ピン仕様と同程度

(ピン径 7.22mm, 271ピン/集合体)

・ 装荷本数

径方向ブランケット1層分 (72体)

径方向ブランケット1層+径方向遮へい体(1層) (150体)

径方向ブランケット1層+径方向遮へい体(2層) (240体)

② ターゲット燃料の母材の選定

ターゲット燃料の母材として UO_2 及び不活性母材についてメリット、デメリットを調査した結果、不活性母材として Al_2O_3 を選定した。

ターゲット母材として UO_2 と選定した不活性母材(Al_2O_3)をパラメータとし、炉心サーベイ解析により炉心性能(出力分布、消滅量等)の比較を行う。

③ ターゲット集合体の最適炉内装荷期間

最適炉内装荷期間のサーベイは時間積分でTRU装荷総量維持を条件とし、ターゲット集合体のバッチ数をパラメータとする。

ターゲット集合体の炉内装荷期間は15カ月3バッチ及び5バッチとし、炉心サーベイ解析により炉心性能(消滅量等)の比較を行いバッチ数を選定する。

また、炉内装荷期間を増大させる場合は、ターゲット集合体装荷本数を増大させるか、またはターゲット集合体($Am+Cm$)の混入率を増加させるかとする。

(4) 検討手順

(3) の評価方法に基づきTRU消滅炉心の各仕様を最適化する為のサーベイ計算を実施する。

炉心パラメータサーベイの解析ケースを表3.1-3に示す。

また最適炉心仕様の選定の為の検討の流れを図3.1-2に示した。

(5) 計算手法

出力分布・燃焼解析手法は、「TRU消滅処理炉心の特性解析」(H4, H5年度、三菱原子力工業株式会社)で用いた手法と同一である。

① 炉定数

JENDL-2ライブラリーをベースにして原研で作成された「JFS-3-J2」とする。

② 縮約群数

半径方向および軸方向各々1次元の燃焼拡散計算の結果得られる70群の中性子束を重みとして7群に縮約して用いる。

③ 計算コード

群縮約には弊社所有の1次元燃焼拡散コード[ODDBURN]、出力分布・燃焼解析には弊社所有の2次元燃焼拡散コード[2DBURN]を使用する。

④ 計算モデル

炉心解析は2次元RZ全炉心体系とする。

⑤ Pu富化度調整

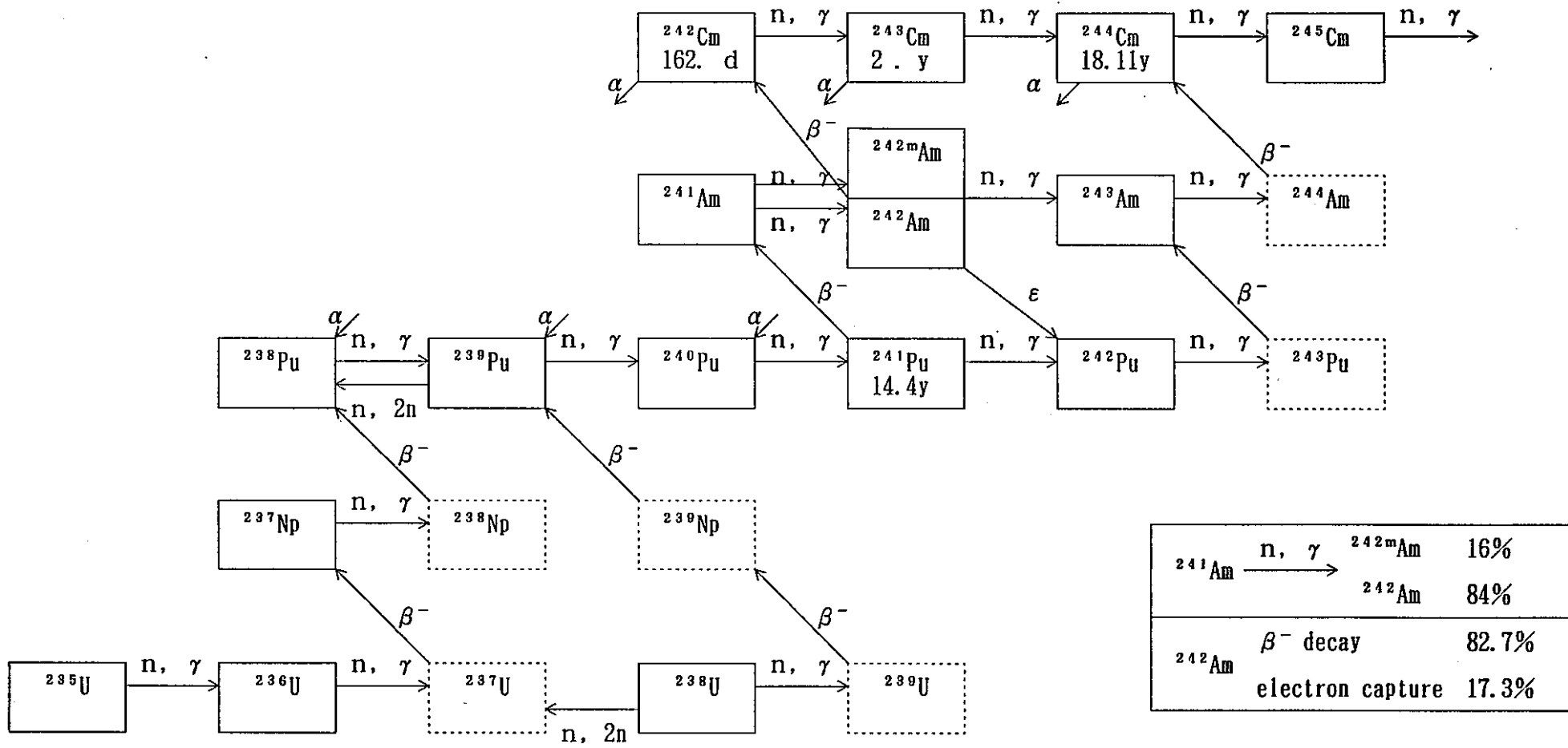
EOECの k_{eff} が ~ 0.995 程度、および内側炉心と外側炉心の最大線出力比がほぼ同程度になるように、Pu富化度調整をおこなう。

⑥ 制御棒状態

制御棒中途挿入とする。

⑦ 出力分布の補正

2次元RZ計算の結果得られた平均出力に燃焼補正を行う。



内の核種は、生成後直ちに崩壊するものとする

図3.1-1 TRU燃焼チェーン (actinide build up path)

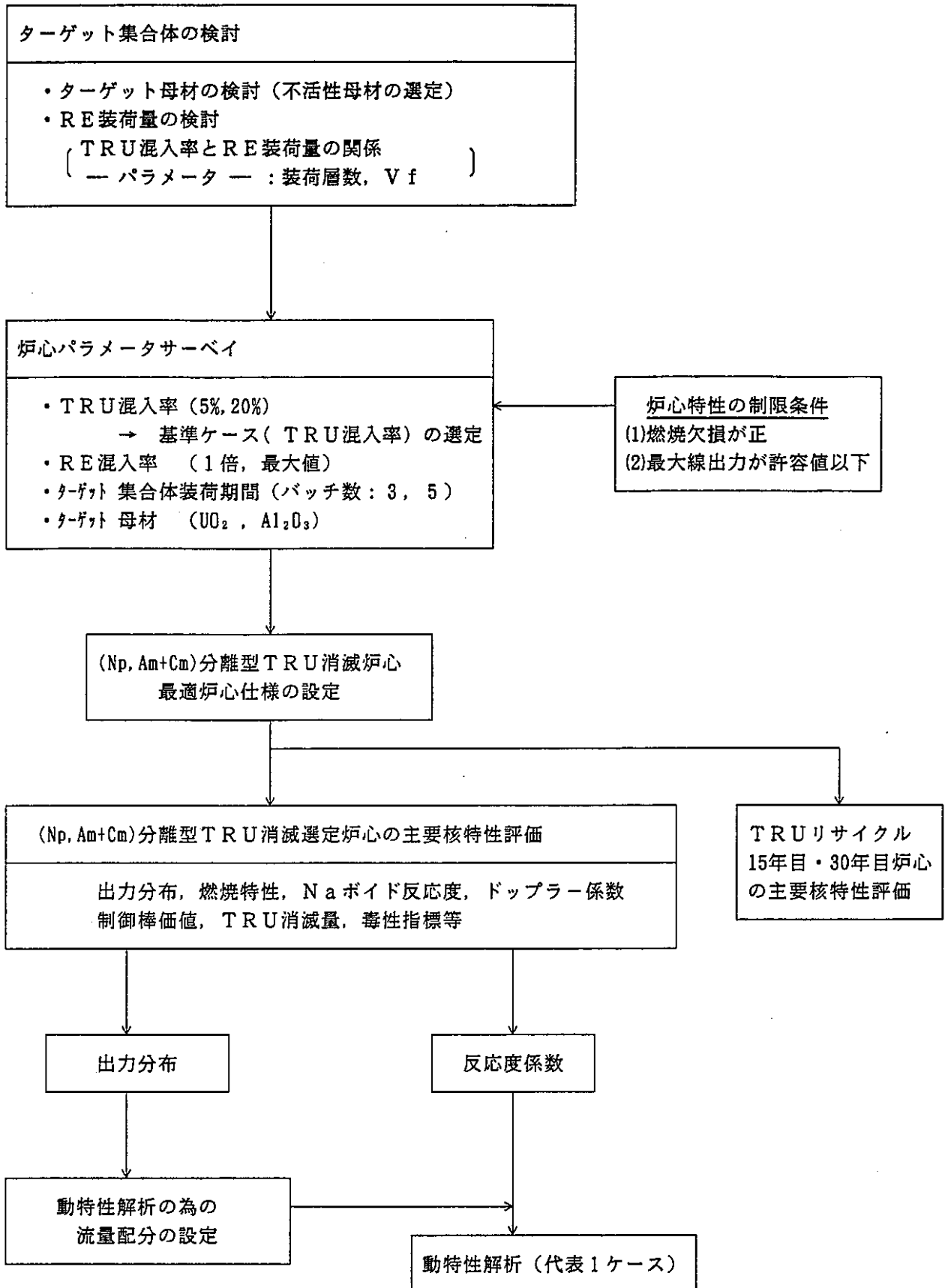


図3.1-2 検討の流れ

表3.1-1 レファレンス炉心の炉心主要仕様 (1/2)

項 目	仕 様	備 考
1. 基本プラント仕様		
1) 出 力		
原子炉熱出力 (MW)	2517	
2) 一次主冷却系冷却材		
原子炉入口温度 (°C)	375	
原子炉出口温度 (°C)	530	
冷却材流量 (kg/s)	$1.272_2 \times 10^4$	
3) プラント運転		
プラント計画寿命 (年)	30	
稼働率 (-)	約0.87	
燃焼期間 (EFPD/サイクル)	456	
2. 炉 心		
1) 炉心型式	均質炉心	
2) 炉心富化度領域数	2	
3. 炉心構成		図1-1参照
1) 炉心構成要素数		
a) 内側炉心燃料集合体 (体)	175	
b) 外側炉心燃料集合体 (体)	180	
c) <u>ターゲット</u> 燃料集合体 (体)	72	(1層) : <u>ターゲット</u> 集合体は
d) 主炉停止系制御棒 (体)	18	(Am+Cm+RE)Oxide混入。
e) 後備炉停止系制御棒 (体)	6	
f) SUS遮蔽体 (体)	78	(1層)
g) B ₄ C遮蔽体 (体)	270	(3層)
h) 合 計 (体)	799	
2) 炉心寸法		
a) 高 さ (mm)	1,000	
b) 等価直径 (mm)	約 3,680	制御棒を含む
c) 高さ/等価直径比 (-)	0.272	
d) 容 積 (l)	約10,640	制御棒を含む
3) ブランケット厚さ		
a) 軸方向厚さ(上/下)(mm)	200/200	
b) 半径方向等価厚さ (mm)	約 167	1層分
4) 炉心構成要素配列		
a) 集合体配列ピッチ (mm)	179.8	
b) 集合体全長 (mm)	約 3,500	

表3.1-1 レファレンス炉心の炉心主要仕様 (2/2)

項 目	仕 様	備 考
5) 炉心外接円		
a) 炉心外接円 (mm)	約 3,850	
b) 制御棒外接円 (mm)	約 2,793	
c) 炉心マトリクス 外接円 (mm)		
6) 組成体積比 (v/o)		
	燃料 キャップ 構造材 冷却材 吸収材	
a) 炉心燃料集合体	39.6 2.0 20.9 37.5 -	
b) ブランケット燃料集合体	54.9 1.8 16.2 27.1 -	
c) 主炉停止系制御棒	- 3.2 12.7 48.2 35.9	吸収体部
d) 後備炉停止系制御棒	- 3.2 12.7 48.2 35.9	吸収体部
e) SUS遮蔽体	- - 80.0 20.0 -	
f) B ₄ C遮蔽体	- - 20.0 20.0 60.0	
4. 燃 料		
1) 燃料ペレット材料		
炉 心	PuO ₂ ・UO ₂	PuO ₂ ・UO ₂
半径方向ブランケット	UO ₂	UO ₂
軸方向ブランケット	UO ₂	UO ₂
2) プルトニウム富化度 (w/o)		PuO ₂ / (PuO ₂ + UO ₂)
平衡炉心 (内側 / 外側炉心)	15.4 / 18.6	
3) プルトニウム同位元素比 (w/o)	Pu ²³⁹ :Pu ²⁴⁰ :Pu ²⁴¹ :Pu ²⁴²	
初装荷炉心	58:24:14:4	
平衡炉心	58:24:14:4	
4) ウラン同位元素比 (w/o)	U ²³⁵ :U ²³⁸	
炉 心	0.3:99.7	
ブランケット	0.3:99.7	
5) 燃料ペレット密度 (%TD)		
炉 心	92	
ブランケット	94.5	
5. 燃料交換		
1) 燃料交換方式		
a) 炉 心	固定 3 バッチ分散方式	
b) 半径方向ブランケット	固定 4 バッチ分散方式	ターゲット 集合体 (Am+Cm+RE)Oxide 混入 3, 5 バッチでサーベイ

表3.1-2 レファレンス炉心の炉心構成要素主要仕様 (1/3)

項 目	仕 様	備 考
1. 炉心燃料		
1) 炉心燃料ペレット		NpO ₂ 均一混入
a) 材 質	プルトニウム・ウラン 混合酸化物	
b) プルトニウム富化度(w/o) 平衡炉心(内側/外側)	15.4/18.6	PuO ₂ / (PuO ₂ + UO ₂)
c) 外 径 (mm)	7.22	
d) 密 度 (%TD)	92	
e) O/M比 (-)	1.98	
2) 軸方向ブランケット燃料ペレット		
a) 材 質	劣化ウラン酸化物	
b) ウラン235含有率(w/o)	0.3	
c) 外 径 (mm)	7.22	
d) 密 度 (%TD)	94.5	
e) O/M比 (-)	2.0	
3) 被覆管		
a) 材 質	改良オーステナイト鋼	
b) 外 径 (mm)	8.3	
c) 内 径 (mm)	7.4	
d) ペレット間ギャップ(mm)	0.18	直径ギャップ
4) 燃料要素		
a) 型 式	インテグラル密封型 下部ガスプレナム	
b) 全 長 (mm)		
i) 炉心燃料体長さ (mm)	1,000	
ii) ブランケット (mm) 燃料体長さ(上部/下部)	200/200	
c) スペーサワイヤ径 (mm)	1.50	
d) ワイヤ巻付けピッチ (mm)	165	
5) 燃料集合体		
a) 形 状	正六角形断面	
b) 燃料要素配列ピッチ (mm)	9.9	p / d = 1.19
c) 燃料要素数 (本)	正三角形配列 271	
d) ラPPER管		
i) 材 質	フェライト/ マルテンサイト鋼	
ii) 内対面間距離 (mm)	165.8	
iii) 板 厚 (mm)	4.0	
e) 全 長 (mm)	3,500	

表3.1-2 レファレンス炉心の炉心構成要素主要仕様 (2/3)

項 目	仕 様	備 考
2. 半径方向ブランケット		
1) ブランケット燃料ペレット		ターゲット 集合体は (Am+Cm+RE)Oxide混入
a) 材 質	劣化ウラン酸化物	
b) ウラン235 含有率 (w/o)	0.3	
c) 外 径 (mm)	12.4	
d) 密 度 (%TD)	94.5	
e) O/M比 (-)	2.0	
2) 被覆管		
a) 材 質	改良オーステナイト鋼	
b) 外 径 (mm)	13.4	
c) 内 径 (mm)	12.6	
d) ペレット間ギャップ (mm)	0.2	直径ギャップ
3) 燃料要素		
a) 型 式	密封型 下部ガスプレナム	
b) 全 長 (mm)		
c) 燃料部長さ (mm)	1.400	
d) スペーサワイヤ径 (mm)	1.0	
e) ワイヤ巻付けピッチ (mm)	165	
4) 燃料集合体		
a) 形 状	正六角形断面	
b) 燃料要素配列ピッチ (mm)	14.46	p / d = 1.08
c) 燃料要素 (本)	正三角形配列 127	
d) ラPPER管		
i) 材 質	改良オーステナイト鋼	
ii) 内対面間距離 (mm)	165.8	
iii) 板 厚 (mm)	4.0	
e) 全 長 (mm)	3.500	
3. 主炉停止系制御棒		
a) 集合体数 (体)	18	
b) 中性子吸収材	B ₄ C	
c) B-10濃縮度 (w/o)	33.3	
d) B-10装荷量 (kg/集合体)	6.55	
e) 制御要素数 (本/集合体)	37	
f) 吸収体有効長 (mm)	1,000	
g) 被覆材材質	改良オーステナイト鋼	
h) B ₄ Cペレット密度 (%TD)	95	

表3.1-2 レファレンス炉心の炉心構成要素主要仕様 (3/3)

項 目	仕 様	備 考
4. 後備炉停止系制御棒		
a) 集合体数 (体)	6	
b) 中性子吸収材	B ₄ C	
c) B-10濃縮度 (w/o)	84.7	
d) B-10装荷量 (kg/集合体)	15.76	
e) 制御要素数 (本/集合体)	37	
f) 吸収体有効長 (mm)	1,000	
g) 被覆材材質	改良オーステナイト鋼	
h) B ₄ Cペレット密度 (%TD)	95	
5. SUS遮蔽体		
a) 集合体数 (体)	78	
b) 遮蔽材		
c) 遮蔽要素数 (本/集合体)		
6. B ₄ C遮蔽体		
a) 集合体数 (体)	270	
b) 遮蔽材	B ₄ C	
c) B ₄ C密度 (%TD)		
d) 遮蔽要素数 (本/集合体)		
e) 型 式	密度型 下部ガスプレナム	
7. 炉心構成要素共通事項		
a) 配列ピッチ (mm)	179.8	
b) 炉心構成要素全長 (mm)	3,500	
c) 炉心中心位置 (軸方向)(mm)	1,990	支持板上端から
(mm)	1,510	集合体頂部から
d) スペーサパッド中心位置と幅		
上部パッド (mm)	200	集合体頂部から
	(40)*	* ; () 内はパッド幅
中間パッド (mm)	910	集合体頂部から
	(40)*	* ; () 内はパッド幅
e) スペーサパッドの対辺間寸法		
上部パッド (mm)	179.1	
	(0.7)**	** ; () 内はパッド間
中間パッド (mm)	178.8	ギャップ
	(1.0)**	

表3.1-3 サーベイ解析ケース

ケース NO	TRU ($Np+Am+Cm$) 混入率 (%)	RE 混入率 ($RE/(Am+Cm)$)	炉内装荷期間 バッチ数 (炉心/ターゲット)	母材
1	5	1	3 / 3	UO ₂
2	20	1	3 / 3	UO ₂
3	○	上限値	○	○
4	○	○	3 / 5	○
5	○	○	○	不活性母材 (Al ₂ O ₃)

○: ケース2 と同じ。

3.2 炉心パラメータサーベイ

3.2.1 TRU混入率設定(基準ケース)の為の検討

(1) TRU混入率のサーベイ

ケース

TRU混入率20%および5%とする。

・Np : 炉心部へ均一装荷

・Am+Cm : ターゲット集合体を構成してブランケット領域に装荷

前提条件

- ①混入TRUの組成はLWR取出5年冷却の組成(NP:Am:Cm=49.1 : 45.6 : 5.3)
- ②ターゲット集合体は径方向ブランケット位置1層に装荷(72体)
- ③ターゲットピン仕様はブランケット燃料と同一
- ④TRU混入率と燃料およびターゲットピンの組成比は表3.2.1-1の通り。

(2)主な結果および基準ケースの選定

表3.2.1-2に主要炉心特性を示した。

燃焼欠損反応度はTRU20%混入時で0.86% $\Delta k/kk'$ と正となり、Np混入炉心燃料での最大線出力はTRU5%混入で404 W/cm, TRU20%混入で405W/cmとなった。またTRU消滅に関しては、TRU5%混入時に比べTRU20%混入時のサイクル消滅率が約2%大きい結果が得られた。またサイクル消滅量は、TRU20%混入時では514 kgであり、TRU5%混入時の場合の5倍以上となった。

またNaボイド反応度は7群直接計算でTRU5%混入時に約5.4%、TRU20%混入時に約6.7%である。但し、ボイド領域は(炉心部+軸ブランケット部+ターゲット部)である。

以上より、燃焼欠損反応度が正という条件のもとで、なるべく多くTRUを消滅させかつAm+Cmの正味の消滅の達成という観点から、TRU混入率20%のケースを基準ケースとして選定し、その他のパラメータサーベイ解析の基準とする。

またTRU5%混入時の各領域毎のTRUサイクル消滅率及び取出し消滅率を表3.2.1-3, 表3.2.1-4に示した。TRU20%混入時(基準ケース)の結果は表3.2.3-5, 表3.2.3-9に示している。混入率5%のケースに比べ混入率20%の方が全体の消滅率が向上しており、従ってTRUの消滅量も混入率の比率以上に増大している。

表3.2.1-1 TRU混入率と燃料およびターゲットピンの組成比

TRU混入率(*2)		燃料及びターゲットピンの組成比 (*3)		備 考	
合計	内 訳	(w/o)			
5 %	炉心部	2.46 w/o	Np (U, Pu)	2.46 97.54	NpO ₂ で混入
	ターゲット部	2.54 w/o	(Am+Cm) (*1) RE 母材 (U)	6.4 6.4 87.2	RE/(Am+Cm) = 1 (Am+Cm+RE)Oxide, UO ₂ で混入
20 %	炉心部	9.82 w/o	Np (U, Pu)	9.82 90.18	
	ターゲット部	10.18 w/o	(Am+Cm) (*1) RE 母材 (U)	25.9 25.9 48.2	RE/(Am+Cm) = 1 (Am+Cm+RE)Oxide, UO ₂ で混入

(*1) $\left[\frac{\text{炉心燃料}}{\text{集合体数}} \right] \times \left[\frac{\text{ターゲット部}}{\text{TRU混入率}} \right] \times \left(\frac{\text{炉心高さ}}{\text{径} \times \text{高さ}} \right) \times \left(\frac{\text{炉心Vf}}{\text{径} \times \text{高さ} \times \text{Vf}} \right) \div (\text{ターゲット集合体数})$

(*2) 炉心部全重金属重量に対するTRU重量割合。

(*3) 燃料ペレットの重金属(U, Pu)重量に対する組成重量比。

ターゲット集合体に於いては、(Am+Cm)の組成比をTRU混入率と称している。

表3.2.1-2 炉心主要特性の比較

項 目		TRU (Np+Am+Cm) 混入率		備 考
		5 %	20 %	
TG 仕様	RE混入率 (RE/(Am+Cm))	6.4 (6.4 / 6.4 = 1)	25.9 (25.9 / 25.9 = 1)	TG: ターゲット 集合体
	装荷層数	1層(72体)	1層(72体)	
Pu富化度 (IC/OC)		17.8/21.7	19.0/23.4	
k e f f	BOEC EDEC	1.0189 0.9951	1.0065 0.9978	
燃焼欠損反応度 (% Δk/kk')		2.35	0.87	
ピク出力密度 (W/cc) (IC/OC/TG)	BOEC	344 / 365 / 60	332 / 371 / 86	
	EDEC	379 / 333 / 71	381 / 337 / 88	
燃焼因子 (IC/OC/TG)	BOEC	1.033/1.072/1.313	1.016/1.056/1.147	
	EDEC	1.033/1.062/1.210	1.021/1.052/1.118	
最大線出力 (W/cm) (IC/OC/TG)	BOEC	369 / 404 / 174	349 / 405 / 217	ピン数 (本) (CORE / TG) = 271 / 127
	EDEC	404 / 365 / 189	402 / 366 / 217	
出力分担 (MW) (IC/OC/TG)	BOEC	1251 / 1142 / 54	1209 / 1166 / 80	
	EDEC	1298 / 1050 / 68	1294 / 1050 / 85	
増殖比 (平均) (BOEC / EDEC)		1.090 (1.086 / 1.093)	1.007 (0.984 / 1.029)	
Naボイド反応度 (% Δk/kk')		2.1 (約 5.4 \$)	2.6 (約 6.7 \$)	7群直接計算
TRU サイクル消滅率(%) (IC+OC / TG)		6.2 (Total) (9.4 / 3.3)	8.0 (Total) (13.9 / 2.9)	(Np+Am+Cm) の消滅特性
TRU サイクル消滅量(kg) (IC+OC / TG)		102 (Total) (74 / 29)	514 (Total) (414 / 101)	
TRU 取出消滅率(%) (IC+OC / TG)		17.0 (Total) (26.0 / 9.7)	22.0 (Total) (36.0 / 8.5)	
TRU 取出消滅量(kg) (IC+OC / TG)		102 (Total) (74 / 29)	514 (Total) (414 / 101)	
(参考用) TG燃料許容線出力		365 W/cm	235 W/cm	

表3.2.1-3 TRUサイクル消滅率

(TRU 5 wt% Pu17.8/21.7)

	a 平衡初期 (kg/炉心)				b 平衡末期 (kg/炉心)				c=a-b 消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
Np237	719.44	0.29	0.45	720.18	594.18	0.56	0.88	595.62	125.26	-0.27	-0.43	124.56	17.41	-93.10	-95.56	17.30
Am241	34.02	488.96	0.00	522.98	59.82	460.24	0.01	520.07	-25.80	28.72	-0.01	2.91	-75.84	5.87	0.00	0.56
Am242	0.76	5.23	0.00	5.99	1.72	8.66	0.00	10.38	-0.96	-3.43	0.00	-4.39	-126.32	-65.58	0.00	-73.29
Am243	21.29	257.21	0.00	278.50	39.80	244.43	0.00	284.23	-18.51	12.78	0.00	-5.73	-86.94	4.97	0.00	-2.06
Am TOTAL	56.07	751.40	0.00	807.47	101.34	713.33	0.01	814.68	-45.27	38.07	-0.01	-7.21	-80.74	5.07	0.00	-0.89
Cm242	1.62	5.92	0.00	7.54	3.11	8.81	0.00	11.92	-1.49	-2.89	0.00	-4.38	-91.98	-48.82	0.00	-58.09
Cm243	0.06	0.91	0.00	0.97	0.16	0.94	0.00	1.10	-0.10	-0.03	0.00	-0.13	-166.67	-3.30	0.00	-13.40
Cm244	3.00	93.27	0.00	96.27	7.60	98.33	0.00	105.93	-4.60	-5.06	0.00	-9.66	-153.33	-5.43	0.00	-10.03
Cm245	0.11	5.70	0.00	5.81	0.37	6.86	0.00	7.23	-0.26	-1.16	0.00	-1.42	-236.36	-20.35	0.00	-24.44
Cm TOTAL	4.79	105.80	0.00	110.59	11.24	114.94	0.00	126.18	-6.45	-9.14	0.00	-15.59	-134.66	-8.64	0.00	-14.10
TOTAL	780.30	857.49	0.45	1638.24	706.76	828.83	0.89	1536.48	73.54	28.66	-0.44	101.76	9.42	3.34	-97.78	6.21
Am+Cm	60.86	857.20	0.00	918.06	112.58	828.27	0.01	940.86	-51.72	28.93	-0.01	-22.80	-84.98	3.37	0.00	-2.48

表3.2.1-4 TRU取出消滅率

(TRU 5 wt% Pu17.8/21.7)

	a 装荷時 (kg/炉心)				b 取出時 (kg/炉心)				c=a-b 取出消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 取出消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
Np237	287.66	0.00	0.00	287.66	162.40	0.28	0.43	163.11	125.26	-0.28	-0.43	124.55	43.54	0.00	0.00	43.30
Am241	0.00	173.04	0.00	173.04	25.81	144.32	0.01	170.14	-25.81	28.72	-0.01	2.90	0.00	16.60	0.00	1.68
Am242	0.00	0.44	0.00	0.44	0.97	3.88	0.00	4.85	-0.97	-3.44	0.00	-4.41	0.00	-781.82	0.00	-1002.27
Am243	0.00	90.20	0.00	90.20	18.51	77.42	0.00	95.93	-18.51	12.78	0.00	-5.73	0.00	14.17	0.00	-6.35
Am TOTAL	0.00	263.68	0.00	263.68	45.29	225.62	0.01	270.92	-45.29	38.06	-0.01	-7.24	0.00	14.43	0.00	-2.75
Cm242	0.00	0.10	0.00	0.10	1.49	2.90	0.00	4.39	-1.49	-2.80	0.00	-4.29	0.00	-2800.00	0.00	-4290.00
Cm243	0.00	0.30	0.00	0.30	0.10	0.33	0.00	0.43	-0.10	-0.03	0.00	-0.13	0.00	-10.00	0.00	-43.33
Cm244	0.00	29.15	0.00	29.15	4.61	34.22	0.00	38.83	-4.61	-5.07	0.00	-9.68	0.00	-17.39	0.00	-33.21
Cm245	0.00	1.51	0.00	1.51	0.26	2.67	0.00	2.93	-0.26	-1.16	0.00	-1.42	0.00	-76.82	0.00	-94.04
Cm TOTAL	0.00	31.06	0.00	31.06	6.46	40.12	0.00	46.58	-6.46	-9.06	0.00	-15.52	0.00	-29.17	0.00	-49.97
TOTAL	287.66	294.74	0.00	582.40	214.15	266.02	0.44	480.61	73.51	28.72	-0.44	101.79	25.55	9.74	0.00	17.48
Am+Cm	0.00	294.74	0.00	294.74	51.75	265.74	0.01	317.50	-51.75	29.00	-0.01	-22.76	0.00	9.84	0.00	-7.72

3.2.2 ターゲット燃料集合体の検討

(1) ターゲット集合体のピン仕様の検討

3.2.1 項での検討結果を受けてTRU 20%混入炉心（以下、基準ケースと称す）を対象にターゲット集合体のピン仕様を検討する。

① TRU混入率と許容線出力

炉心部

炉心部に N_p を均一に装荷した場合のTRU (N_p) 混入率と許容線出力の関係を表3.2.2-1（出展：ターゲット集合体装荷TRU燃料高速炉の核熱特性計算（その2）1992年3月）および図3.2.2-1に示した。

基準ケースでは、LWR取出5年冷却の組成 ($N_p:Am:Cm=49.1:45.6:5.3$) より炉心部には N_p を9.82%均一に装荷している。図3.2.2-1より炉心部の N_p 混入燃料の許容線出力は414 W/cmである。

ターゲット部

ターゲット燃料の許容線出力は、2章の表2.2-2の通りである。またTRU ($Am + Cm$) 混入率とターゲット燃料の許容線出力の関係を図3.2.2-2に示した。

基準ケースではターゲット集合体を径方向ブランケット部（1層）に装荷することを前提としているため、ターゲット燃料の組成比は、 $RE/(Am+Cm)=1$ の条件の下で、 $(Am+Cm)/RE/母材(UO_2)$ で約25.9% / 25.9% / 48.2%である。この場合の許容線出力は同図より235 W/cmとなる。

② ターゲット燃料仕様

TRU ($Am + Cm$) の消滅量増大を意図して、ターゲット燃料ピンを太径にして V_f を増大させることを考える。その場合のピン本数と V_f の関係を以下に示す。（ワイヤ径およびピン径／肉厚比を保持）

ピン本数	ピン径	V_f
127 ピン	13.4mm	54.8%
91 ピン	16.0mm	56.2%
61 ピン	19.8mm	58.1%

V_f は61ピンでも127ピンに比べ、約3%増大する程度であり、ターゲット部の出力分担への影響は小さいと考えられる為、今回の解析結果の127ピン使用時のピーク出力密度を基に各ピン数の場合の最大線出力を予測した結果を以下に示す。

ピン本数	V f	最大線出力	許容線出力
127 ピン	54.8%	217 W/cm	約240 W/cm
91 ピン	56.2%	303 W/cm	
61 ピン	58.1%	452 W/cm	

91ピン以下の場合には、許容線出力を超えることが予想される為、他のサーベイ炉心でも、ターゲット集合体のピン本数は127ピンでのV fを用いた解析を実施する。

(2) RE混入率上限値の検討

①検討の条件等

RE混入率については、RE混入率の最小値を、再処理でのRE分離技術の進歩を考慮して、REが $RE/(Am+Cm)=1$ にまで分離されるとする。

またRE混入率の最大値は軽水炉取出燃料中の存在比までを検討する。具体的には、TRU混入率とRE装荷量の関係を、ピン径(Vf)および装荷本数(層数)をパラメータに評価し、最大RE混入率を選定する。

・ピン径

太径ピン …………… 基準炉心の径方向ブランケット燃料ピン仕様と同一

(ピン径13.4mm, 127ピン/ 集合体)

細径ピン……………基準炉心の炉心燃料ピン仕様と同一

(ピン径7.22mm, 271ピン/ 集合体)

・装荷本数

径方向ブランケット(1層) : 72体

径方向ブランケット(1層) + 径方向遮へい体(1層) : 150体

径方向ブランケット(1層) + 径方向遮へい体(2層) : 240体

前提条件

- ・なるべく多くのTRU(Am+Cm)を装荷すると言う観点からターゲット燃料の母材の組成比は0%とする。

②結果

TRU(Np+Am+Cm)混入率とRE/(Am+Cm)の関係は以下のとおり。

TRU 混入率 装荷層数	RE/(Am+Cm)			燃料体積比 Vf
	5%	10%	20%	
1層	14.5	6.7	2.9	54.9% :フラット燃料仕様
2層	<u>31.2</u>	15.1	7.1	
3層	50.6	24.8	<u>11.9</u>	
1層	10.2	4.6	1.8	39.6% :炉心燃料仕様
2層	22.2	10.6	4.8	
3層	36.2	17.6	8.3	

軽水炉取出燃料の内、TRU(Np+Am+Cm)は0.12%、でその内、Am+Cmは0.06%である。またREは1.7%である。

従ってREを軽水炉取出燃料の存在比まで混入する場合、REは(Am+Cm)の約28倍($RE/(Am+Cm)=1.7/0.06=28.3$)混入する必要がある。上記より、Vfが約55%のフラット燃料仕様でもTRU5%混入時には2層装荷する必要があり、TRU20%混入時には3層装荷してもREは(Am+Cm)の10倍程度までとなる。

ターゲット集合体を3層装荷した場合には、TRU(Am+Cm)の消滅量が低減することが予想される為、炉心パラメータサーベイでの、RE上限値設定炉心は、ターゲット集合体装荷層数は2層の条件で解析する。

(3) ターゲット集合体の炉内装荷期間延長（装荷量増大）の検討

炉内装荷期間のサーベイは、時間積分でTRU装荷総量維持を条件とし、ターゲット集合体のバッチ数をパラメータとする。

ここで炉内装荷期間を変更する際、時間積分でTRU装荷総量維持の条件を設けた理由は、再処理後 N_p あるいは A_m+C_m が装荷されずに残留している状態を避ける為である。

従って各バッチの炉心及びターゲット部における装荷量は、再処理で得られる N_p と A_m+C_m の比率を維持した設定とする。

ターゲット集合体の炉内装荷期間は15カ月3バッチ（基準ケース）及び5バッチとし、炉心サーベイ解析により炉心性能（消滅量等）の比較を行いバッチ数を選定する。

また、炉内装荷期間を増大させることは、TRU装荷総量維持の条件から考えて、ターゲット集合体領域に於けるTRU装荷量を増大させることになる。

その方法として、ここでのサーベイでは、ターゲット集合体装荷本数を増大させる場合と、ターゲット集合体（ A_m+C_m ）の混入率を増加させる場合を検討する。

i) 条件

①ターゲット集合体の炉内装荷期間は15カ月3バッチ（基準ケース）及び5バッチ

②炉内装荷期間のサーベイは時間積分でTRU装荷総量維持とする。

従ってターゲット5バッチの場合の（ A_m+C_m ）の装荷量は、基準ケース（3バッチ）の5/3倍の装荷量となる。

③ $RE/(A_m+C_m) = 1$

ii) 解析ケース

①ターゲット集合体装荷本数を増大させるケース（装荷本数増大型）

基準装荷本数 : 72体(1層) → $\left\{ \begin{array}{l} 120体(1.6層) \\ (72体 \times 5/3) \end{array} \right.$

②ターゲット集合体（ A_m+C_m ）の混入率を増加させるケース（混入率増大型）

基準(A_m+C_m)混入率 : 25.9% → 43.2% ($25.9 \times 5/3$)

内訳 $\left\{ \begin{array}{ll} A_m+C_m & 43.2\% \\ RE & 43.2\% \\ 母材(UO_2) & 13.6\% \end{array} \right.$

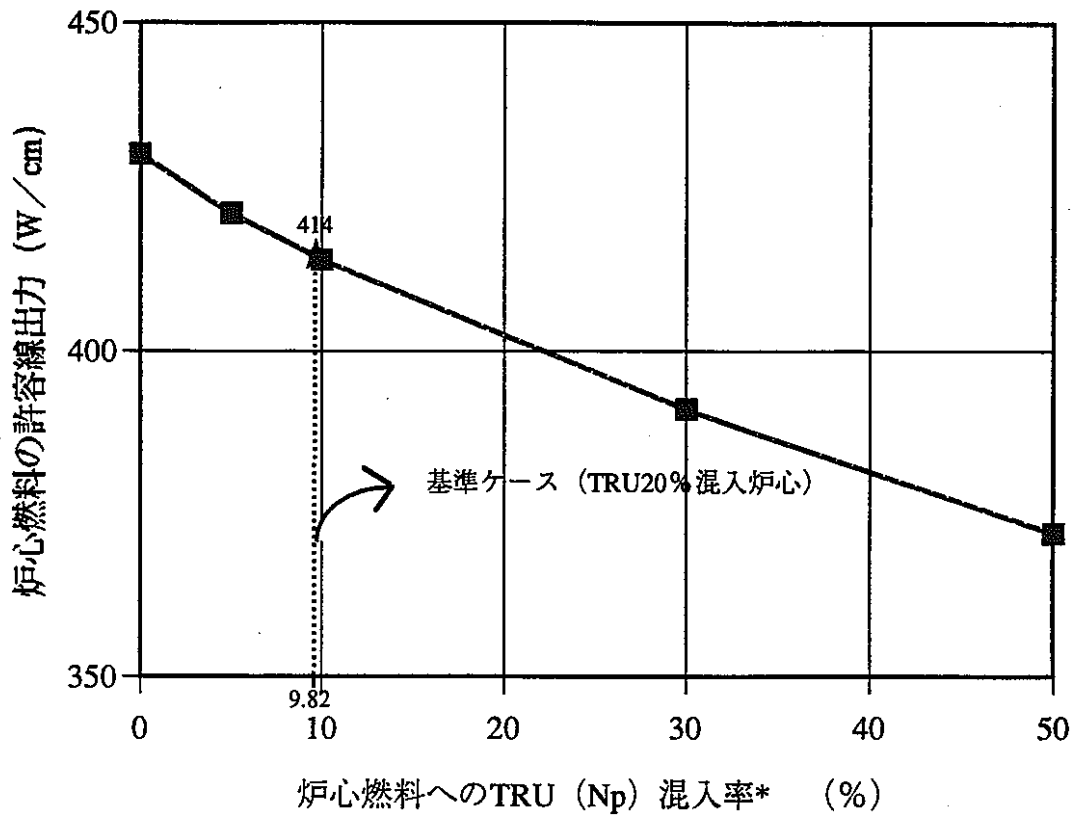
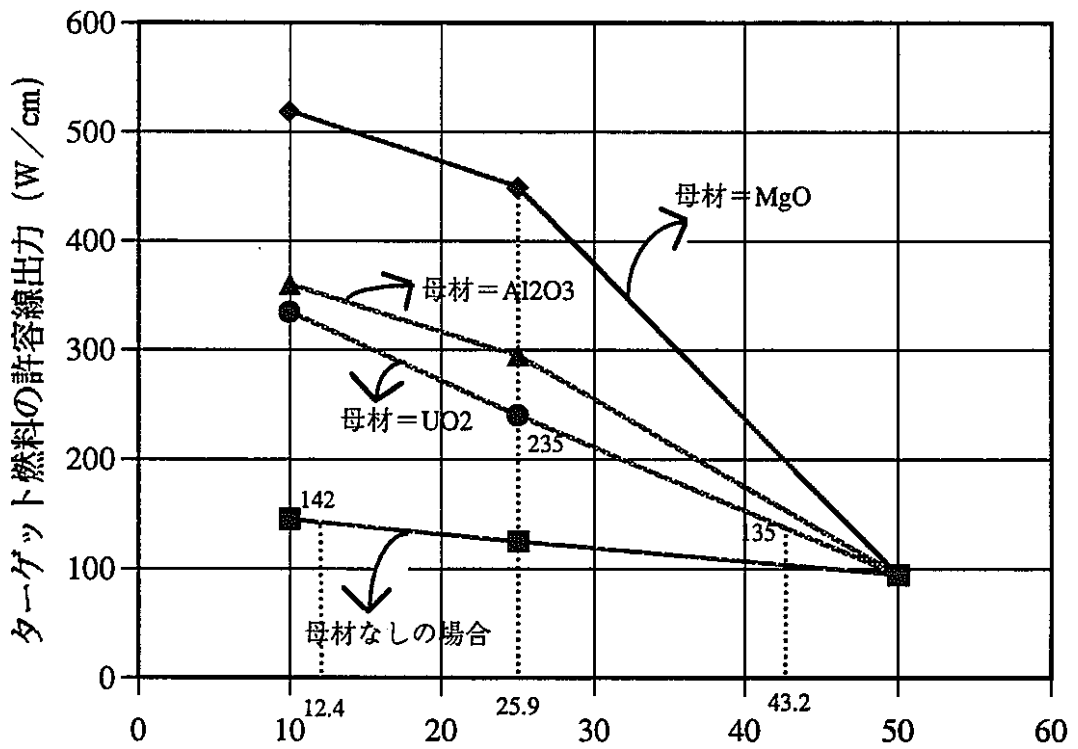


図3.2.2-1 TRU (Np) 混入率と炉心燃料の許容線出力の関係

*ペレットに占める体積比



ターゲット燃料へのTRU (Am+Cm) 混入率* (%)

※ 母材有りの場合 $R.E/(Am+Cm) = 1$

図3.2.2-2 TRU (Am+Cm) 混入率とターゲット燃料の許容線出力の関係

*ペレットに占める体積比

表3.2.2-1 TRU (Np) 混入率での燃料許容線出力

TRU (Np) 混入率 (%)	許容線出力
0	430 W/cm
5	421 W/cm
10	414 W/cm
30	391 W/cm
50	372 W/cm

(注) ターゲット燃料については2章 (表2.2-2) を参照の事。

3.2.3 サーベイ炉心の主要特性のまとめ

各サーベイ炉心の主要炉心特性を表3.2.3 - 1～表3.2.3 - 4に、またTRU消滅特性を、各領域毎に表3.2.3 - 5～表3.2.3 - 12に示した。また表3.2.3 - 13に増殖比の内訳を示した。各炉心のBOEC, EOECの炉中心面での半径方向出力分布を図3.2.3 - 1～図3.2.3 - 4に示した。

(1) TRU 20%混入炉心（基準ケース）の結果：表3.2.3 - 1

最大線出力

TRU 20% 混入炉心のサーベイでは、炉心部の最大線出力は内側炉心及び外側炉心でそれぞれ405W/cm と402W/cm となり、いずれも許容線出力(414W/cm) を満足している。一方ターゲット集合体は127 ピンで許容線出力(235W/cm) を満足している。

TRU消滅

TRUサイクル消滅量は514 kgである。またTRU全体のサイクル消滅率としては8%であり、その内訳は炉心部14%、ターゲット部3%である。

TRU取出消滅率は22%となった。

(2) RE上限値炉心の結果：表3.2.3 - 2

ターゲット集合体では、Am+Cm の混入率は基準ケースの約1/2、装荷層数2層である。表3.2.3 - 2より燃焼欠損反応度は、0.95% $\Delta k/kk'$ である。

最大線出力

ターゲット集合体の、出力分担が減少したこと、および燃焼因子が小さくなったことで、最大線出力は基準ケースに比べ、約1/3 となり、85W/cmとなった。このケースのターゲット燃料の許容線出力は母材無しでTRU (Am+Cm)混入率が12.4% であるので、図3.2.2-2 より、142 W/cmであり、ターゲット燃料の最大線出力は許容線出力を満足する。一方、炉心の出力分担が増大したことにより、炉心部最大線出力は増大し420 W/cmとなり、許容線出力414/cmを超える。

TRU消滅

TRUサイクル消滅量は、基準ケースに比べ、Total として約20kg減少した。この主要因はターゲット領域が2層になり、フラックスの低いところへAm, Cm が配置された為、ターゲット集合体の消滅量が減った為である。

(3) ターゲット 5 バッチ炉心の結果：表3.2.3 - 3

表3.2.3 - 3 より燃焼欠損反応度は装荷本数増大型と混入率増大型で差は無く、0.90 % $\Delta k/kk'$ である。

最大線出力

装荷本数増大型でのターゲット集合体の最大線出力は、基準ケースに比べ、ターゲット集合体のバッチ数を増大したことで燃焼因子が増大し、その分最大線出力が増大し、243W/cm となった。またターゲット集合体の出力分担が増大したことにより、炉心部の出力分担が減り、炉心部最大線出力は1～3%減少し、内側炉心、外側炉心でそれぞれ390W/cm, 402W/cm になった。混入率増大型では装荷本数増大型と同様にターゲット集合体の出力分担は基準ケースより増大して、炉心部の出力分担が減り、炉心部最大線出力は基準ケースに比べ1～7%減少し内側炉心、外側炉心でそれぞれ375W/cm, 399W/cm になった。また混入率を増大させたことにより、ターゲット燃料のピーク出力密度が増大し、最大線出力は324W/cm となり許容線出力135W/cm(図3.2.2-2 参照)を大幅に超える。従って、混入率増大型ではピン本数を増大させる等の対策が必要となる。

TRU消滅

TRUサイクル消滅量は、基準ケースに比べターゲット 5 バッチ炉心の方がいずれも多いが、装荷本数増大型と、混入率増大型で比較すると、混入率増大型のほうが30kg多い。

(4) 母材Al₂O₃ 炉心の結果：表3.2.3 - 4

表3.2.3 - 4 より燃焼欠損反応度は、0.90% $\Delta k/kk'$ である。

最大線出力

母材をAl₂O₃ にしたことによりターゲット燃料の出力分担が低下し最大線出力は基準ケース(母材UO₂)の場合に比べ減少し、174W/cm となった。母材Al₂O₃ を用いれば、母材UO₂ の場合より許容線出力は増大する為、十分満足できる。またターゲット集合体の出力分担が減少したことにより炉心部の出力分担が増え炉心部最大線出力は大きくなったが、1%以下である。内側炉心、外側炉心でそれぞれ404W/cm, 406W/cm になった。

TRU消滅

TRUサイクル消滅量は、ターゲット集合体の消滅量が約13kg多く、Total として約15kg増大したが、基準ケースに比べ大差はない。

(5) 増殖比の内訳の比較：表3.2.3 -13

各炉心の増殖比の違いは、主にターゲット領域の増殖比の違いに因っている。

即ち、母材Uの装荷量に対応しているといえる。

母材UO₂の装荷割合は、装荷本数増大型(48.2%×5/3)、基準ケース(48.2%)、混入率増大型(13.6%)の順で小さくなっており、増殖比もこのケースの順で小さくなっている。基準ケースの増殖比は1.01であるが、混入率増大型では0.97と増殖比は1.0以下である。

またRE上限値設定炉心、母材Al₂O₃炉心では、母材UO₂は装荷していないので、ターゲット領域の増殖比の寄与が殆ど無く、サーベイ炉心の中では増殖比0.97と一番小さくなっている。

(6) まとめ

サーベイの結果から、RE混入率増大の効果、ターゲット集合体の炉内装荷期間延長の効果、および不活性母材を用いた効果がTRU消滅性能および最大線出力へ与える影響を以下にまとめた。

①RE混入率増大の効果

RE混入率を増大させる為、ターゲット領域を2層に拡大させたため、フラックスの低いところへAm+Cmが配置されることになりターゲット集合体の消滅特性は悪化する。一方許容線出力の観点からは、ターゲット集合体の出力分担が減少し、その分炉心部の出力分担が増大するため、炉心部最大線出力は増大する。

②ターゲット集合体の炉内装荷期間延長の効果

ターゲット集合体の炉内装荷期間延長させるということは、TRU装荷総量維持の条件から、ターゲット集合体領域に於けるTRU装荷量を増大させることになる。その方法として、ターゲット集合体装荷本数を増大させる方法と、ターゲット集合体での混入率を増加させる2つの方法を検討したが、いずれもTRU装荷量が基準ケースより増加バッチ数分(5/3バッチ分)増大させている為、TRUの消滅量は両ケースとも増大している。

しかし、装荷本数増大型では、ターゲット領域が2層目にまで広がる為、フラックスの低いところへAm+Cmが配置されることになり、ターゲット集合体の消滅率としては基準ケースより小さくなる。一方、混入率増大型ではターゲット集合体の消滅

量および消滅率も増大する。

また許容線出力の観点からは、炉内装荷期間延長に伴いターゲット領域のTRU量を増大させた為、ターゲット領域の出力分担は増大する。混入率増大型では、ピーク出力密度が増大する効果が大きく、ターゲット集合体の許容線出力が問題となってくる。

③不活性母材 (Al_2O_3) を用いた効果

母材にUを用いていない為、 ^{238}U の中性子吸収が無いことにより、ターゲット集合体でのTRU消滅量および消滅率は基準ケース(母材 UO_2)より大きくなる。

母材の混入率が小さくなれば、TRU消滅性能に差はなくなる。

また母材 Al_2O_3 を用いれば、ターゲット集合体の出力分担が減少し、線出力は小さくなる。また、 Al_2O_3 の許容線出力は UO_2 の場合より増大している。

表3.2.3-1 炉心主要特性一覧 (TRU 20%混入炉心: 基準ケース)

項目		ケース	基準ケース	備考
			TRU 20%混入炉心	
Pu 富化度 (IC/OC)			19.0/23.4	
k e f f	BOEC		1.0065	
	EDEC		0.9978	
燃焼欠損反応度 (% $\Delta k/kk'$)			0.87	
ピン出力密度 (W/cc) (IC/OC/TG)	BOEC		332 / 371 / 86	TG: ターゲット集合体 ピン数(本): (CORE/TG)=271/127
	EDEC		381 / 337 / 88	
燃焼因子 (IC/OC/TG)	BOEC		1.016/1.056/1.147	
	EDEC		1.021/1.052/1.118	
最大線出力 (W/cm) (IC/OC/TG)	BOEC		349 / 405 / 217	TG燃料許容線出力 235 (W/cm)
	EDEC		402 / 366 / 217	
出力分担 (MW) (IC/OC/TG)	BOEC		1209 / 1166 / 80	
	EDEC		1294 / 1050 / 85	
増殖比(平均) (BOEC / EDEC)			1.007 (0.984 / 1.029)	
Na ボイド反応度 (% $\Delta k/kk'$)			2.6 (約 6.7 \$)	7群 直接計算
TRU サイクル消滅率(%) (IC+OC / TG)			8.0 (Total) (13.9 / 2.9)	(Np+Am+Cm) の消滅特性
TRU サイクル消滅量(kg) (IC+OC / TG)			514 (Total) (414 / 101)	
TRU 取出消滅率(%) (IC+OC / TG)			22.0 (Total) (36.0 / 8.5)	
TRU 取出消滅量(kg) (IC+OC / TG)			514 (Total) (414 / 101)	

表3.2.3-2 炉心主要特性一覧 (RE 上限値設定炉心)

項目 \ ケース		基準ケース	RE 上限値設定炉心 (母材無し)	備考
TG 仕様	RE 混入率 (RE/(Am+Cm))	25.9 (25.9/25.9= 1)	87.6 (87.6/12.4=7.1)	TG: ターゲット 集合体
	装荷層数	1層(72体)	2層(150体)	
Pu 富化度 (IC/OC)		19.0/23.4	18.8/23.6	
k e f f	BOEC	1.0065	1.0038	
	EOEC	0.9978	0.9943	
燃焼欠損反応度 (% Δk/kk')		0.87	0.95	
ピク出力密度 (W/cc) (IC/OC/TG)	BOEC	332 / 371 / 86	337 / 383 / 35	
	EOEC	381 / 337 / 88	394 / 346 / 32	
燃焼因子 (IC/OC/TG)	BOEC	1.016/1.056/1.147	1.014/1.059/1.098	
	EOEC	1.021/1.052/1.118	1.020/1.055/1.089	
最大線出力 (W/cm) (IC/OC/TG)	BOEC	349 / 405 / 217	353 / 419 / 85	ピン数 (本) (CORE/ TG) = 271 / 127
	EOEC	402 / 366 / 217	415 / 377 / 77	
出力分担 (MW) (IC/OC/TG)	BOEC	1209 /1166 / 80	1214 /1197 / 41	
	EOEC	1294 /1050 / 85	1330 /1058 / 39	
増殖比 (平均) (BOEC / EOEC)		1.007 (0.984 / 1.029)	0.967 (0.941 / 0.992)	
TRU サイクル消滅率(%) (IC+OC / TG)		8.0 (Total) (13.9 / 2.9)	7.6 (Total) (14.1 / 2.1)	(Np+Am+Cm) の消滅特性
TRU サイクル消滅量(kg) (IC+OC / TG)		514 (Total) (414 / 101)	493 (Total) (420 / 73)	
TRU 取出消滅率(%) (IC+OC / TG)		22.0 (Total) (36.0 / 8.5)	21.1 (Total) (36.6 / 6.2)	
TRU 取出消滅量(kg) (IC+OC / TG)		514 (Total) (414 / 101)	493 (Total) (420 / 73)	
(参考用) TG燃料許容線出力		235 W/cm	140 W/cm	

表3.2.3-3 炉心主要特性一覧 (ターゲット5バッチ炉心)

項 目		ケース	基準ケース (3バッチ)	ターゲット5バッチ炉心	
				装荷本数増大型	混入率増大型
TG 仕様	装 荷 本 数		72体 (1層)	120体 (約1.6層)	72体 (1層)
	(Am+Cm) 混入率		25.9	25.9	43.2
Pu 富化度 (IC/DC)			19.0/23.4	19.0/23.4	19.0/23.4
k e f f	BOEC		1.0065	1.0076	1.0089
	EOEC		0.9978	0.9986	0.9999
燃焼欠損反応度 (% Δk/k')			0.87	0.90	0.90
β- 出力密度 (W/cc) (IC/DC/TG)	BOEC		332 / 371 / 86	327 / 368 / 93	322 / 366 / 129
	EOEC		381 / 337 / 88	370 / 334 / 92	356 / 332 / 127
燃焼因子 (IC/DC/TG)	BOEC		1.016/1.056/1.147	1.016/1.056/1.184	1.015/1.056/1.139
	EOEC		1.021/1.052/1.118	1.021/1.052/1.153	1.020/1.052/1.113
最大線出力 (W/cm) (IC/DC/TG)	BOEC		349 / 405 / 217	343 / 402 / 243	338 / 399 / 324
	EOEC		402 / 366 / 217	390 / 363 / 234	375 / 361 / 311
出力分担 (MW) (IC/DC/TG)	BOEC		1209 / 1166 / 80	1180 / 1166 / 109	1184 / 1172 / 99
	EOEC		1294 / 1050 / 85	1268 / 1050 / 113	1272 / 1057 / 101
増殖比 (平均) (BOEC / EOEC)			1.007 (0.984 / 1.029)	1.016 (0.993 / 1.038)	0.973 (0.948 / 0.998)
TRU サイクル消滅率(%) (IC+DC / TG)			8.0 (Total) (13.9 / 2.9)	6.3 (Total) (13.8 / 2.4)	6.7 (Total) (13.6 / 3.0)
TRU サイクル消滅量(kg) (IC+DC / TG)			514 (Total) (414 / 101)	546 (Total) (411 / 135)	577 (Total) (407 / 170)
TRU 取出消滅率(%) (IC+DC / TG)			22.0 (Total) (36.0 / 8.5)	23.3 (Total) (35.8 / 11.4)	24.6 (Total) (35.4 / 14.3)
TRU 取出消滅量(kg) (IC+DC / TG)			514 (Total) (414 / 101)	546 (Total) (411 / 135)	576 (Total) (407 / 170)
備 考 TG燃料許容線出力			235 W/cm	235 W/cm	135 W/cm

表3.2.3-4 主要炉心特性一覧（母材Al₂O₃ 炉心）

パラメータ 項目		基準ケース (母材: UO ₂)	母材Al ₂ O ₃ 炉心 (母材: Al ₂ O ₃)	備考
Pu 富化度 (IC/OC)		19.0/23.4	19.0/23.4	
k e f f	BOEC	1.0065	1.0076	
	EDEC	0.9978	0.9986	
燃焼欠損反応度 (% Δk/k')		0.87	0.90	
β-η 出力密度 (W/cc) (IC/OC/TG)	BOEC	332 / 371 / 86	333 / 372 / 70	TG: ターゲット 集合体
	EDEC	381 / 337 / 88	383 / 339 / 70	
燃焼因子 (IC/OC/TG)	BOEC	1.016/1.056/1.147	1.016/1.056/1.130	
	EDEC	1.021/1.052/1.118	1.021/1.053/1.106	
最大線出力 (W/cm) (IC/OC/TG)	BOEC	349 / 405 / 217	350 / 406 / 174	ピン数 (本) (CORE/ TG) = 271 / 127
	EDEC	402 / 366 / 217	404 / 369 / 171	
出力分担 (MW) (IC/OC/TG)	BOEC	1209 / 1166 / 80	1209 / 1179 / 66	
	EDEC	1294 / 1050 / 85	1300 / 1060 / 68	
増殖比 (平均) (BOEC / EDEC)		1.007 (0.984 / 1.029)	0.966 (0.941 / 0.991)	
TRU サイクル消滅率 (%) (IC+OC / TG)		8.0 (Total) (13.9 / 2.9)	8.2 (Total) (14.0 / 3.3)	(Np+Am+Cm) の消滅特性
TRU サイクル消滅量 (kg) (IC+OC / TG)		514 (Total) (414 / 101)	529 (Total) (416 / 114)	
TRU 取出消滅率 (%) (IC+OC / TG)		22.0 (Total) (36.0 / 8.5)	22.6 (Total) (36.2 / 9.6)	
TRU 取出消滅量 (kg) (IC+OC / TG)		514 (Total) (414 / 101)	529 (Total) (416 / 114)	
(参考用) TG燃料許容線出力		235 W/cm	290 W/cm	

表3.2.3-5 TRUサイクル消滅率 (基準ケース)

(TRU 20wt% Pu19.0/23.4)

	a 平衡初期 (kg/炉心)				b 平衡末期 (kg/炉心)				c=a-b 消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
	Np237	2923.03	0.19	0.44	2923.66	2460.37	0.38	0.86	2461.61	462.66	-0.19	-0.42	462.05	15.83	-100.00	-95.45
Am241	34.85	2002.18	0.00	2037.03	61.82	1906.88	0.01	1968.71	-26.97	95.30	-0.01	68.32	-77.39	4.76	0.00	3.35
Am242	0.68	17.84	0.00	18.52	1.59	29.13	0.00	30.72	-0.91	-11.29	0.00	-12.20	-133.82	-63.28	0.00	-65.87
Am243	18.30	1052.22	0.00	1070.52	34.46	1010.69	0.00	1045.15	-16.16	41.53	0.00	25.37	-88.31	3.95	0.00	2.37
Am TOTAL	53.83	3072.24	0.00	3126.07	97.87	2946.70	0.01	3044.58	-44.04	125.54	-0.01	81.49	-81.81	4.09	0.00	2.61
Cm242	1.44	18.71	0.00	20.15	2.78	28.02	0.00	30.80	-1.34	-9.31	0.00	-10.65	-93.06	-49.76	0.00	-52.85
Cm243	0.05	3.53	0.00	3.58	0.12	3.50	0.00	3.62	-0.07	0.03	0.00	-0.04	-140.00	0.85	0.00	-1.12
Cm244	2.20	367.26	0.00	369.46	5.63	378.97	0.00	384.60	-3.43	-11.71	0.00	-15.14	-155.91	-3.19	0.00	-4.10
Cm245	0.07	21.65	0.00	21.72	0.23	24.90	0.00	25.13	-0.16	-3.25	0.00	-3.41	-228.57	-15.01	0.00	-15.70
Cm TOTAL	3.76	411.15	0.00	414.91	8.76	435.39	0.00	444.15	-5.00	-24.24	0.00	-29.24	-132.98	-5.90	0.00	-7.05
TOTAL	2980.62	3483.58	0.44	6464.64	2567.00	3382.47	0.87	5950.34	413.62	101.11	-0.43	514.30	13.88	2.90	-97.73	7.96
Am+Cm	57.59	3483.39	0.00	3540.98	106.63	3382.09	0.01	3488.73	-49.04	101.30	-0.01	52.25	-85.15	2.91	0.00	1.48

3-32

表3.2.3-6 TRUサイクル消滅率 (R.E 上限値設定炉心)

(TRU 20wt% Pu18.8/23.6)

	a 平衡初期 (kg/炉心)				b 平衡末期 (kg/炉心)				c=a-b 消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
	Np237	2914.82	0.00	0.45	2915.27	2445.94	0.00	0.88	2446.82	468.88	0.00	-0.43	468.45	16.09	0.00	-95.56
Am241	34.69	2027.92	0.00	2062.61	61.45	1961.60	0.01	2023.06	-26.76	66.32	-0.01	39.55	-77.14	3.27	0.00	1.92
Am242	0.69	14.36	0.00	15.05	1.60	22.83	0.00	24.43	-0.91	-8.47	0.00	-9.38	-131.88	-58.98	0.00	-62.33
Am243	18.59	1062.79	0.00	1081.38	34.97	1033.79	0.00	1068.76	-16.38	29.00	0.00	12.62	-88.11	2.73	0.00	1.17
Am TOTAL	53.97	3105.07	0.00	3159.04	98.02	3018.22	0.01	3116.25	-44.05	86.85	-0.01	42.79	-81.62	2.80	0.00	1.35
Cm242	1.46	13.29	0.00	14.75	2.82	20.06	0.00	22.88	-1.36	-6.77	0.00	-8.13	-93.15	-50.94	0.00	-55.12
Cm243	0.05	3.46	0.00	3.51	0.12	3.35	0.00	3.47	-0.07	0.11	0.00	0.04	-140.00	3.18	0.00	1.14
Cm244	2.27	358.30	0.00	360.57	5.81	362.97	0.00	368.78	-3.54	-4.67	0.00	-8.21	-155.95	-1.30	0.00	-2.28
Cm245	0.07	20.59	0.00	20.66	0.24	22.83	0.00	23.07	-0.17	-2.24	0.00	-2.41	-242.86	-10.88	0.00	-11.67
Cm TOTAL	3.85	395.64	0.00	399.49	8.99	409.21	0.00	418.20	-5.14	-13.57	0.00	-18.71	-133.51	-3.43	0.00	-4.68
TOTAL	2972.64	3500.71	0.45	6473.80	2552.95	3427.43	0.89	5981.27	419.69	73.28	-0.44	492.53	14.12	2.09	-97.78	7.61
Am+Cm	57.82	3500.71	0.00	3558.53	107.01	3427.43	0.01	3534.45	-49.19	73.28	-0.01	24.08	-85.07	2.09	0.00	0.68

表3.2.3-7(1) TRUサイクル消滅率 (ターゲット5バッチ装荷本数増大型)

(TRU 20wt% Pu19.0/23.4)

	a 平衡初期 (kg/炉心)				b 平衡末期 (kg/炉心)				c=a-b 消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
	Np237	2928.40	0.51	0.44	2929.35	2468.83	0.76	0.86	2470.45	459.57	-0.25	-0.42	458.90	15.69	-49.02	-95.45
Am241	34.95	3258.93	0.00	3293.88	62.03	3143.81	0.01	3205.85	-27.08	115.12	-0.01	88.03	-77.48	3.53	0.00	2.67
Am242	0.68	38.54	0.00	39.22	1.58	51.63	0.00	53.21	-0.90	-13.09	0.00	-13.99	-132.35	-33.96	0.00	-35.67
Am243	18.13	1720.15	0.00	1738.28	34.19	1670.13	0.00	1704.32	-16.06	50.02	0.00	33.96	-88.58	2.91	0.00	1.95
Am TOTAL	53.76	5017.62	0.00	5071.38	97.80	4865.57	0.01	4963.38	-44.04	152.05	-0.01	108.00	-81.92	3.03	0.00	2.13
Cm242	1.43	28.49	0.00	29.92	2.77	35.16	0.00	37.93	-1.34	-6.67	0.00	-8.01	-93.71	-23.41	0.00	-26.77
Cm243	0.05	5.63	0.00	5.68	0.12	5.48	0.00	5.60	-0.07	0.15	0.00	0.08	-140.00	2.66	0.00	1.41
Cm244	2.15	606.83	0.00	608.98	5.52	613.08	0.00	618.60	-3.37	-6.25	0.00	-9.62	-156.74	-1.03	0.00	-1.58
Cm245	0.07	38.32	0.00	38.39	0.23	42.00	0.00	42.23	-0.16	-3.68	0.00	-3.84	-228.57	-9.60	0.00	-10.00
Cm TOTAL	3.70	679.27	0.00	682.97	8.64	695.72	0.00	704.36	-4.94	-16.45	0.00	-21.39	-133.51	-2.42	0.00	-3.13
TOTAL	2985.86	5697.40	0.44	8683.70	2575.27	5562.05	0.87	8138.19	410.59	135.35	-0.43	545.51	13.75	2.38	-97.73	6.28
Am+Cm	57.46	5696.89	0.00	5754.35	106.44	5561.29	0.01	5667.74	-48.98	135.60	-0.01	86.61	-85.24	2.38	0.00	1.51

表3.2.3-7(2) TRUサイクル消滅率 (ターゲット5バッチ炉心：混入率増大型)

(TRU 20wt% Pu19.0/23.4)

	a 平衡初期 (kg/炉心)				b 平衡末期 (kg/炉心)				c=a-b 消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
Np237	2933.84	0.14	0.44	2934.42	2478.42	0.20	0.86	2479.48	455.42	-0.06	-0.42	454.94	15.52	-42.86	-95.45	15.50
Am241	35.04	3191.87	0.00	3226.91	62.24	3045.62	0.01	3107.87	-27.20	146.25	-0.01	119.04	-77.63	4.58	0.00	3.69
Am242	0.67	44.70	0.00	45.37	1.57	59.94	0.00	61.51	-0.90	-15.24	0.00	-16.14	-134.33	-34.09	0.00	-35.57
Am243	17.93	1692.15	0.00	1710.08	33.84	1628.89	0.00	1662.73	-15.91	63.26	0.00	47.35	-88.73	3.74	0.00	2.77
Am TOTAL	53.64	4928.72	0.00	4982.36	97.65	4734.45	0.01	4832.11	-44.01	194.27	-0.01	150.25	-82.05	3.94	0.00	3.02
Cm242	1.41	35.24	0.00	36.65	2.75	43.24	0.00	45.99	-1.34	-8.00	0.00	-9.34	-95.04	-22.70	0.00	-25.48
Cm243	0.04	5.77	0.00	5.81	0.12	5.67	0.00	5.79	-0.08	0.10	0.00	0.02	-200.00	1.73	0.00	0.34
Cm244	2.10	621.06	0.00	623.16	5.40	632.71	0.00	638.11	-3.30	-11.65	0.00	-14.95	-157.14	-1.88	0.00	-2.40
Cm245	0.60	40.30	0.00	40.90	0.22	44.90	0.00	45.12	0.38	-4.60	0.00	-4.22	63.33	-11.41	0.00	-10.32
Cm TOTAL	4.15	702.37	0.00	706.52	8.49	726.52	0.00	735.01	-4.34	-24.15	0.00	-28.49	-104.58	-3.44	0.00	-4.03
TOTAL	2991.63	5631.23	0.44	8623.30	2584.56	5461.17	0.87	8046.60	407.07	170.06	-0.43	576.70	13.61	3.02	-97.73	6.69
Am+Cm	57.79	5631.09	0.00	5688.88	106.14	5460.97	0.01	5567.12	-48.35	170.12	-0.01	121.76	-83.66	3.02	0.00	2.14

表3.2.3-8 TRUサイクル消滅率 (母材Al2O3炉心)

(TRU 20wt% Pu19.0/23.4)

	a 平衡初期 (kg/炉心)				b 平衡末期 (kg/炉心)				c=a-b 消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
	Np237	2920.44	0.00	0.44	2920.88	2455.62	0.00	0.87	2456.49	464.82	0.00	-0.43	464.39	15.92	0.00	-97.73
Am241	34.78	1985.93	0.00	2020.71	61.65	1875.57	0.01	1937.23	-26.87	110.36	-0.01	83.48	-77.26	5.56	0.00	4.13
Am242	0.69	19.98	0.00	20.67	1.59	33.02	0.00	34.61	-0.90	-13.04	0.00	-13.94	-130.43	-65.27	0.00	-67.44
Am243	18.39	1044.04	0.00	1062.43	34.61	994.91	0.00	1029.52	-16.22	49.13	0.00	32.91	-88.20	4.71	0.00	3.10
Am TOTAL	53.86	3049.95	0.00	3103.81	97.85	2903.50	0.01	3001.36	-43.99	146.45	-0.01	102.45	-81.67	4.80	0.00	3.30
Cm242	1.44	22.02	0.00	23.46	2.80	32.83	0.00	35.63	-1.36	-10.81	0.00	-12.17	-94.44	-49.09	0.00	-51.88
Cm243	0.05	3.64	0.00	3.69	0.12	3.73	0.00	3.85	-0.07	-0.09	0.00	-0.16	-140.00	-2.47	0.00	-4.34
Cm244	2.21	373.65	0.00	375.86	5.66	390.93	0.00	396.59	-3.45	-17.28	0.00	-20.73	-156.11	-4.62	0.00	-5.52
Cm245	0.07	22.80	0.00	22.87	0.23	27.22	0.00	27.45	-0.16	-4.42	0.00	-4.58	-228.57	-19.39	0.00	-20.03
Cm TOTAL	3.77	422.11	0.00	425.88	8.81	454.71	0.00	463.52	-5.04	-32.60	0.00	-37.64	-133.69	-7.72	0.00	-8.84
TOTAL	2978.07	3472.06	0.44	6450.57	2562.28	3358.21	0.88	5921.37	415.79	113.85	-0.44	529.20	13.96	3.28	-100.00	8.20
Am+Cm	57.63	3472.06	0.00	3529.69	106.66	3358.21	0.01	3464.88	-49.03	113.85	-0.01	64.81	-85.08	3.28	0.00	1.84

表3.2.3-9 TRU取出消滅率（基準ケース）

(TRU 20wt% Pu19.0/23.4)

	a 装荷時 (kg/炉心)				b 取出時 (kg/炉心)				c=a-b 取出消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 取出消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
Np237	1148.28	0.00	0.00	1148.28	685.61	0.19	0.42	686.22	462.67	-0.19	-0.42	462.06	40.29	0.00	0.00	40.24
Am241	0.00	700.27	0.00	700.27	26.97	604.97	0.01	631.95	-26.97	95.30	-0.01	68.32	0.00	13.61	0.00	9.76
Am242	0.00	1.78	0.00	1.78	0.90	13.08	0.00	13.98	-0.90	-11.30	0.00	-12.20	0.00	-634.83	0.00	-685.39
Am243	0.00	365.03	0.00	365.03	16.16	323.51	0.00	339.67	-16.16	41.52	0.00	25.36	0.00	11.37	0.00	6.95
Am TOTAL	0.00	1067.08	0.00	1067.08	44.03	941.56	0.01	985.60	-44.03	125.52	-0.01	81.48	0.00	11.76	0.00	7.64
Cm242	0.00	0.02	0.00	0.02	1.35	9.33	0.00	10.68	-1.35	-9.31	0.00	-10.66	0.00	-46550.00	0.00	-53300.00
Cm243	0.00	1.20	0.00	1.20	0.08	1.18	0.00	1.26	-0.08	0.02	0.00	-0.06	0.00	1.67	0.00	-5.00
Cm244	0.00	117.97	0.00	117.97	3.43	129.67	0.00	133.10	-3.43	-11.70	0.00	-15.13	0.00	-9.92	0.00	-12.83
Cm245	0.00	6.13	0.00	6.13	0.17	9.38	0.00	9.55	-0.17	-3.25	0.00	-3.42	0.00	-53.02	0.00	-55.79
Cm TOTAL	0.00	125.32	0.00	125.32	5.03	149.56	0.00	154.59	-5.03	-24.24	0.00	-29.27	0.00	-19.34	0.00	-23.36
TOTAL	1148.28	1192.40	0.00	2340.68	734.67	1091.31	0.43	1826.41	413.61	101.09	-0.43	514.27	36.02	8.48	0.00	21.97
Am+Cm	0.00	1192.40	0.00	1192.40	49.06	1091.12	0.01	1140.19	-49.06	101.28	-0.01	52.21	0.00	8.49	0.00	4.38

表3.2.3-10 TRU取出消滅率 (R.E 上限値設定炉心)

(TRU 20wt% Pu18.8/23.6)

	a 装荷時 (kg/炉心)				b 取出時 (kg/炉心)				c=a-b 取出消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 取出消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
	Np237	1148.28	0.00	0.00	1148.28	679.41	0.00	0.43	679.84	468.87	0.00	-0.43	468.44	40.83	0.00	0.00
Am241	0.00	698.47	0.00	698.47	26.76	632.15	0.01	658.92	-26.76	66.32	-0.01	39.55	0.00	9.50	0.00	5.66
Am242	0.00	1.78	0.00	1.78	0.91	10.25	0.00	11.16	-0.91	-8.47	0.00	-9.38	0.00	-475.84	0.00	-526.97
Am243	0.00	364.09	0.00	364.09	16.37	335.09	0.00	351.46	-16.37	29.00	0.00	12.63	0.00	7.97	0.00	3.47
Am TOTAL	0.00	1064.34	0.00	1064.34	44.04	977.49	0.01	1021.54	-44.04	86.85	-0.01	42.80	0.00	8.16	0.00	4.02
Cm242	0.00	0.02	0.00	0.02	1.36	6.80	0.00	8.16	-1.36	-6.78	0.00	-8.14	0.00	-33900.00	0.00	-40700.00
Cm243	0.00	1.20	0.00	1.20	0.08	1.09	0.00	1.17	-0.08	0.11	0.00	0.03	0.00	9.17	0.00	2.50
Cm244	0.00	117.66	0.00	117.66	3.53	122.34	0.00	125.87	-3.53	-4.68	0.00	-8.21	0.00	-3.98	0.00	-6.98
Cm245	0.00	6.11	0.00	6.11	0.17	8.35	0.00	8.52	-0.17	-2.24	0.00	-2.41	0.00	-36.66	0.00	-39.44
Cm TOTAL	0.00	124.99	0.00	124.99	5.14	138.58	0.00	143.72	-5.14	-13.59	0.00	-18.73	0.00	-10.87	0.00	-14.99
TOTAL	1148.28	1189.33	0.00	2337.61	728.59	1116.07	0.44	1845.10	419.69	73.26	-0.44	492.51	36.55	6.16	0.00	21.07
Am+Cm	0.00	1189.33	0.00	1189.33	49.18	1116.07	0.01	1165.26	-49.18	73.26	-0.01	24.07	0.00	6.16	0.00	2.02

表3.2.3-11(1) TRU取出消滅率 (ターゲット5バッチ装荷本数増大型)

(TRU 20wt% Pu19.0/23.4)

	a 装荷時 (kg/炉心)				b 取出時 (kg/炉心)				c=a-b 取出消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 取出消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
Np237	1148.28	0.00	0.00	1148.28	688.71	0.24	0.42	689.37	459.57	-0.24	-0.42	458.91	40.02	0.00	0.00	39.96
Am241	0.00	700.25	0.00	700.25	27.08	585.14	0.01	612.23	-27.08	115.11	-0.01	88.02	0.00	16.44	0.00	12.57
Am242	0.00	1.78	0.00	1.78	0.90	14.87	0.00	15.77	-0.90	-13.09	0.00	-13.99	0.00	-735.39	0.00	-785.96
Am243	0.00	365.02	0.00	365.02	16.06	315.01	0.00	331.07	-16.06	50.01	0.00	33.95	0.00	13.70	0.00	9.30
Am TOTAL	0.00	1067.05	0.00	1067.05	44.04	915.02	0.01	959.07	-44.04	152.03	-0.01	107.98	0.00	14.25	0.00	10.12
Cm242	0.00	0.02	0.00	0.02	1.34	6.70	0.00	8.04	-1.34	-6.68	0.00	-8.02	0.00	-33400.00	0.00	-40100.00
Cm243	0.00	1.20	0.00	1.20	0.07	1.05	0.00	1.12	-0.07	0.15	0.00	0.08	0.00	12.50	0.00	6.67
Cm244	0.00	117.97	0.00	117.97	3.37	124.21	0.00	127.58	-3.37	-6.24	0.00	-9.61	0.00	-5.29	0.00	-8.15
Cm245	0.00	6.13	0.00	6.13	0.16	9.81	0.00	9.97	-0.16	-3.68	0.00	-3.84	0.00	-60.03	0.00	-62.64
Cm TOTAL	0.00	125.32	0.00	125.32	4.94	141.77	0.00	146.71	-4.94	-16.45	0.00	-21.39	0.00	-13.13	0.00	-17.07
TOTAL	1148.28	1192.37	0.00	2340.65	737.69	1057.03	0.43	1795.15	410.59	135.34	-0.43	545.50	35.76	11.35	0.00	23.31
Am+Cm	0.00	1192.37	0.00	1192.37	48.98	1056.79	0.01	1105.78	-48.98	135.58	-0.01	86.59	0.00	11.37	0.00	7.26

表3.2.3-11(2) TRU取出消滅率 (ターゲット5バッチ炉心：混入率増大型)

(TRU 20wt% Pu19.0/23.4)

	a 装荷時 (kg/炉心)				b 取出時 (kg/炉心)				c=a-b 取出消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 取出消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
Np237	1148.28	0.00	0.00	1148.28	692.86	0.07	0.42	693.35	455.42	-0.07	-0.42	454.93	39.66	0.00	0.00	39.62
Am241	0.00	700.82	0.00	700.82	27.20	554.57	0.01	581.78	-27.20	146.25	-0.01	119.04	0.00	20.87	0.00	16.99
Am242	0.00	1.78	0.00	1.78	0.90	17.02	0.00	17.92	-0.90	-15.24	0.00	-16.14	0.00	-856.18	0.00	-906.74
Am243	0.00	365.32	0.00	365.32	15.91	302.06	0.00	317.97	-15.91	63.26	0.00	47.35	0.00	17.32	0.00	12.96
Am TOTAL	0.00	1067.92	0.00	1067.92	44.01	873.65	0.01	917.67	-44.01	194.27	-0.01	150.25	0.00	18.19	0.00	14.07
Cm242	0.00	0.02	0.00	0.02	1.33	8.03	0.00	9.36	-1.33	-8.01	0.00	-9.34	0.00	-40050.00	0.00	-46700.00
Cm243	0.00	1.20	0.00	1.20	0.07	1.11	0.00	1.18	-0.07	0.09	0.00	0.02	0.00	7.50	0.00	1.67
Cm244	0.00	118.06	0.00	118.06	3.30	129.71	0.00	133.01	-3.30	-11.65	0.00	-14.95	0.00	-9.87	0.00	-12.66
Cm245	0.00	6.13	0.00	6.13	0.16	10.73	0.00	10.89	-0.16	-4.60	0.00	-4.76	0.00	-75.04	0.00	-77.65
Cm TOTAL	0.00	125.41	0.00	125.41	4.86	149.58	0.00	154.44	-4.86	-24.17	0.00	-29.03	0.00	-19.27	0.00	-23.15
TOTAL	1148.28	1193.33	0.00	2341.61	741.73	1023.30	0.43	1765.46	406.55	170.03	-0.43	576.15	35.41	14.25	0.00	24.60
Am+Cm	0.00	1193.33	0.00	1193.33	48.87	1023.23	0.01	1072.11	-48.87	170.10	-0.01	121.22	0.00	14.25	0.00	10.16

表3.2.3-12 TRU取出消減率 (母材Al2O3炉心)

(TRU 20wt% Pu19.0/23.4)

	a 装荷時 (kg/炉心)				b 取出時 (kg/炉心)				c=a-b 取出消減量 (kg/CYC)				c/a*100 取出消減率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
	Np237	1148.28	0.00	0.00	1148.28	683.46	0.00	0.42	683.88	464.82	0.00	-0.42	464.40	40.48	0.00	0.00
Am241	0.00	700.27	0.00	700.27	26.87	589.91	0.01	616.79	-26.87	110.36	-0.01	83.48	0.00	15.76	0.00	11.92
Am242	0.00	1.78	0.00	1.78	0.91	14.82	0.00	15.73	-0.91	-13.04	0.00	-13.95	0.00	-732.58	0.00	-783.71
Am243	0.00	365.03	0.00	365.03	16.22	315.91	0.00	332.13	-16.22	49.12	0.00	32.90	0.00	13.46	0.00	9.01
Am TOTAL	0.00	1067.08	0.00	1067.08	44.00	920.64	0.01	964.65	-44.00	146.44	-0.01	102.43	0.00	13.72	0.00	9.60
Cm242	0.00	0.20	0.00	0.20	1.35	10.83	0.00	12.18	-1.35	-10.63	0.00	-11.98	0.00	-5315.00	0.00	-5990.00
Cm243	0.00	1.20	0.00	1.20	0.08	1.29	0.00	1.37	-0.08	-0.09	0.00	-0.17	0.00	-7.50	0.00	-14.17
Cm244	0.00	117.97	0.00	117.97	3.45	135.24	0.00	138.69	-3.45	-17.27	0.00	-20.72	0.00	-14.64	0.00	-17.56
Cm245	0.00	6.13	0.00	6.13	0.17	10.54	0.00	10.71	-0.17	-4.41	0.00	-4.58	0.00	-71.94	0.00	-74.71
Cm TOTAL	0.00	125.50	0.00	125.50	5.05	157.90	0.00	162.95	-5.05	-32.40	0.00	-37.45	0.00	-25.82	0.00	-29.84
TOTAL	1148.28	1192.58	0.00	2340.86	732.51	1078.54	0.43	1811.48	415.77	114.04	-0.43	529.38	36.21	9.56	0.00	22.61
Am+Cm	0.00	1192.58	0.00	1192.58	49.05	1078.54	0.01	1127.60	-49.05	114.04	-0.01	64.98	0.00	9.56	0.00	5.45

表3.2.3-13 増殖比の内訳

ケース	領域	BOEC	EOEC	BOEC, EOEC 平均
基準ケース	炉心	0.777	0.814	
	軸方向フランケット	0.159	0.166	
	ターゲット領域	0.048	0.048	
	合計	0.984	1.029	1.007
RE 上限値 設定炉心	炉心	0.781	0.823	
	軸方向フランケット	0.160	0.168	
	ターゲット領域	0.001	0.001	
	合計	0.941	0.992	0.967
ターゲット 5 バッチ炉心： 装荷本数増大型	炉心	0.773	0.812	
	軸方向フランケット	0.158	0.165	
	ターゲット領域	0.061	0.061	
	合計	0.993	1.038	1.016
ターゲット 5 バッチ炉心： 混入率増大型 (代表炉心)	炉心	0.774	0.814	
	軸方向フランケット	0.158	0.166	
	ターゲット領域	0.016	0.018	
	合計	0.948	0.998	0.973
母材 Al ₂ O ₃ 炉心	炉心	0.780	0.820	
	軸方向フランケット	0.160	0.168	
	ターゲット領域	0.002	0.003	
	合計	0.941	0.991	0.966

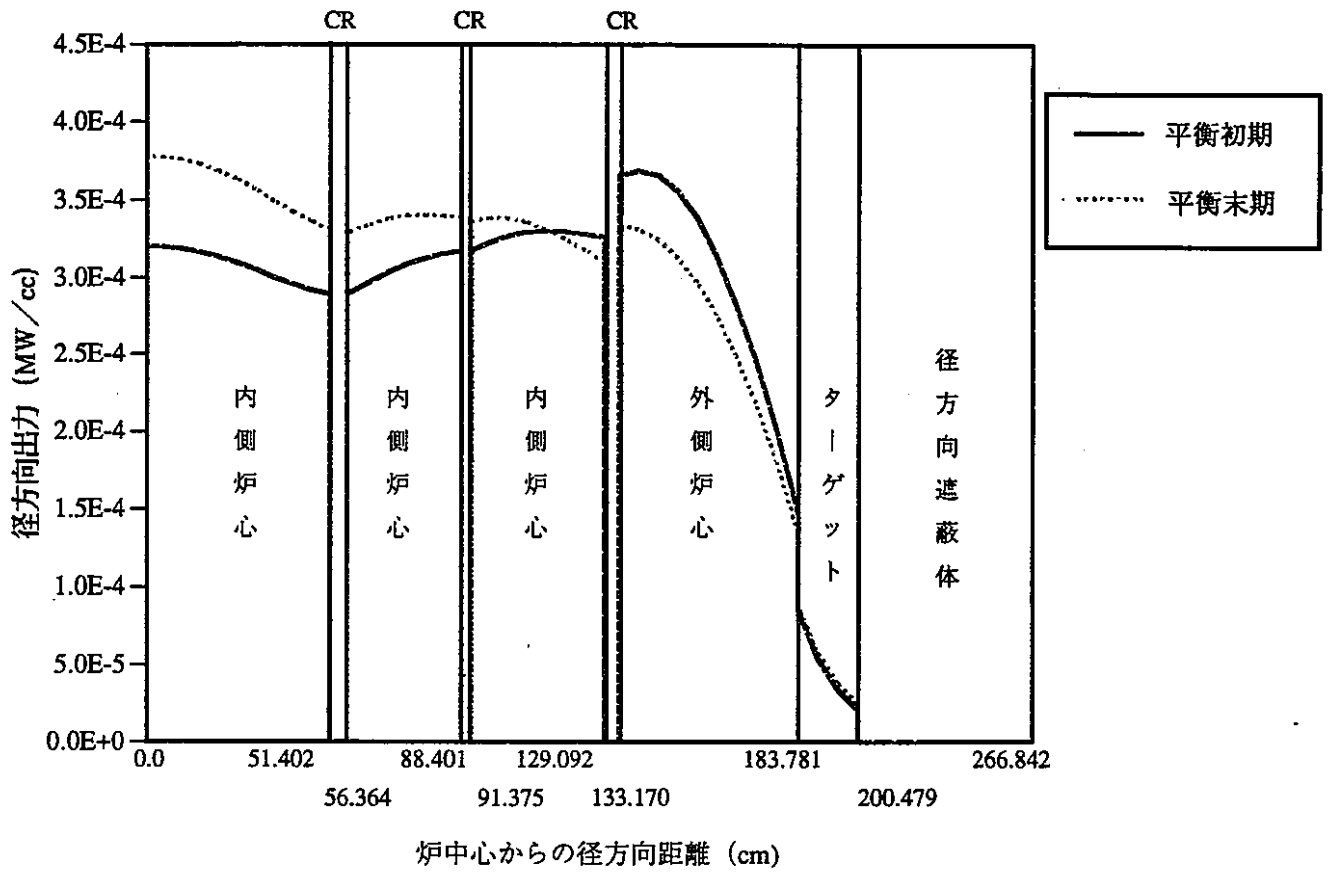


図3.2.3-1 径方向出力分布 (基準炉心)

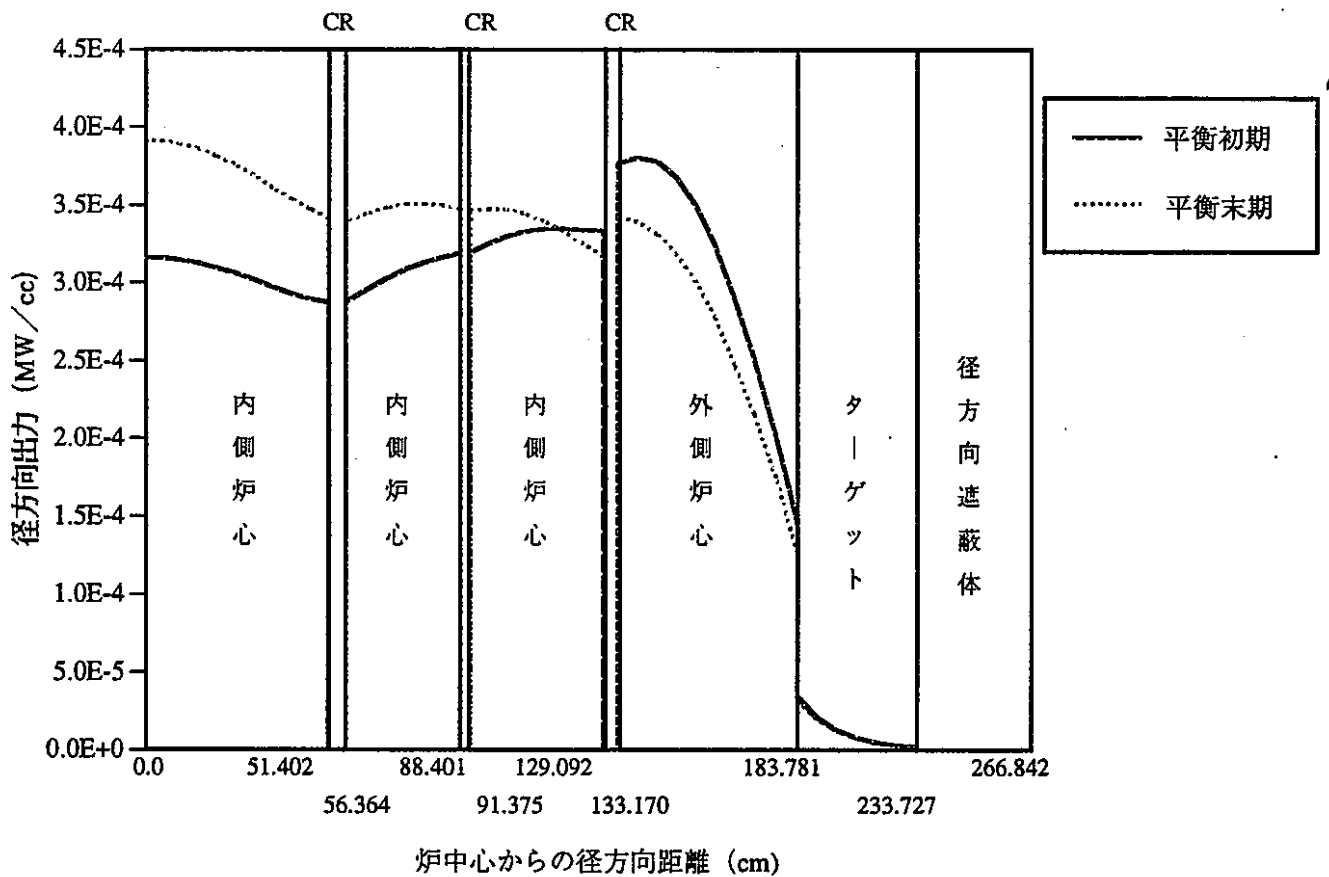


図3.2.3-2 径方向出力分布 (R.E上限値設定炉心)

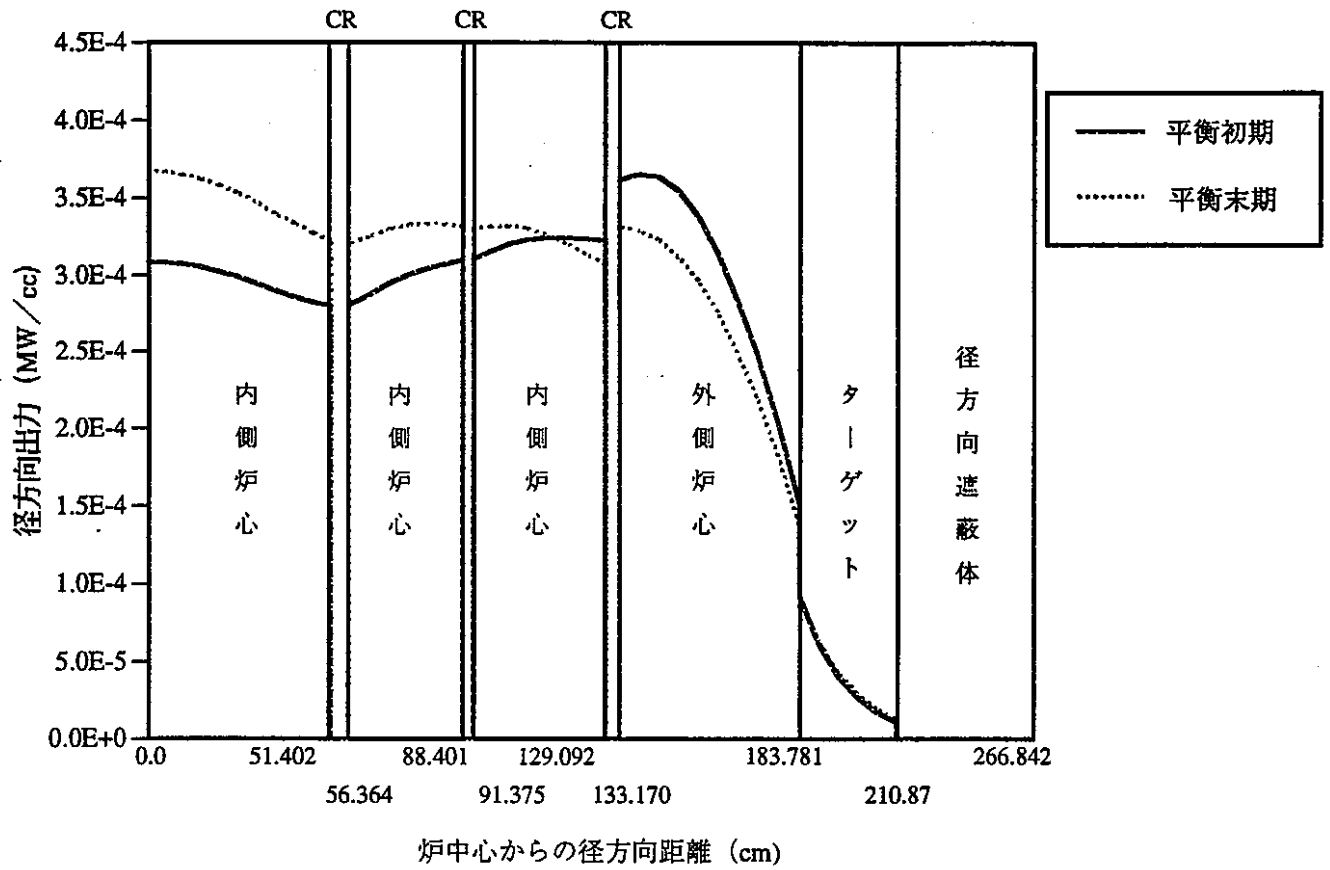


図3.2.3-3(1) 径方向出力分布 (ターゲット装荷本数増大型炉心)

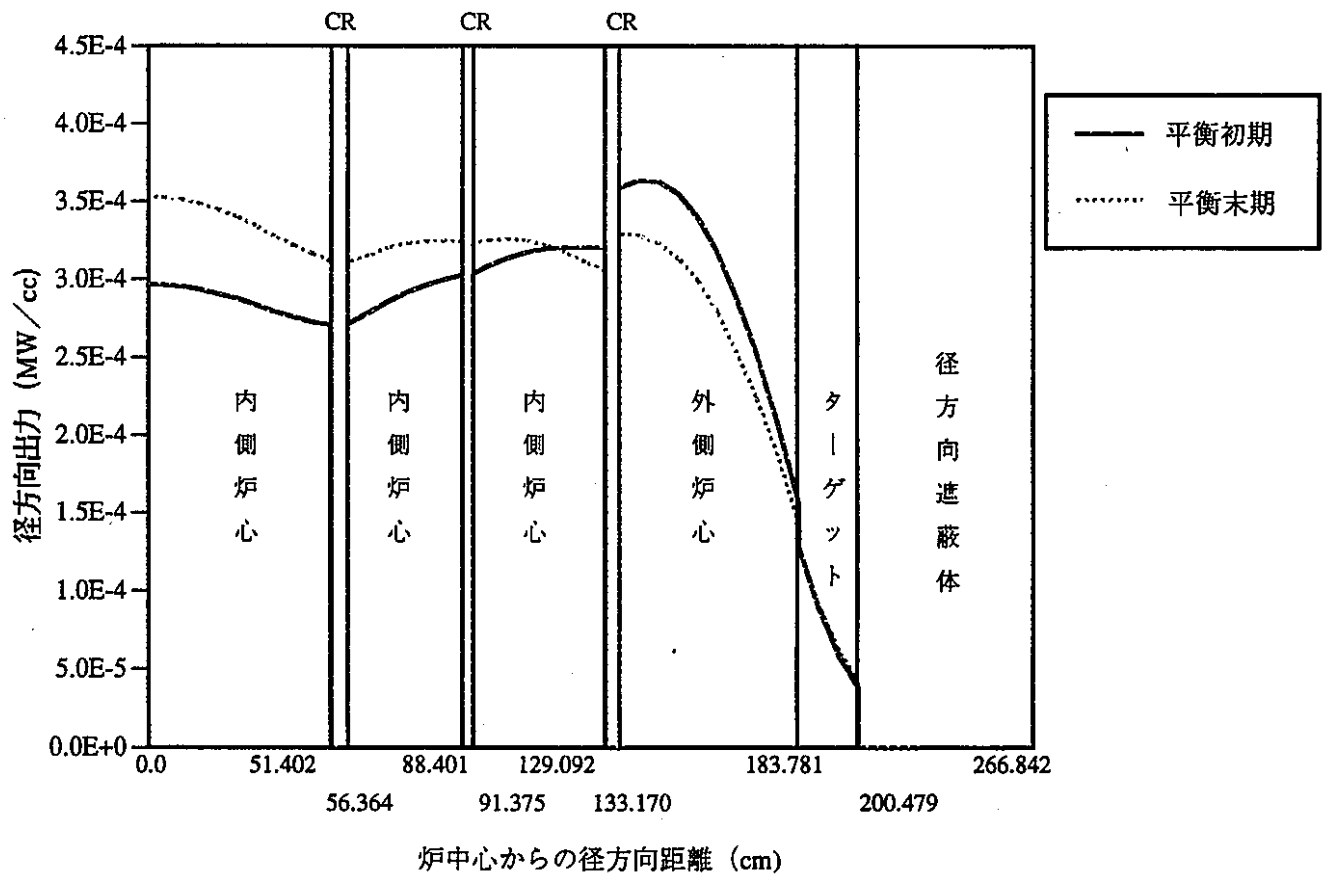


図3.2.3-3(2) 径方向出力分布 (ターゲットS/A混入率増大型炉心)

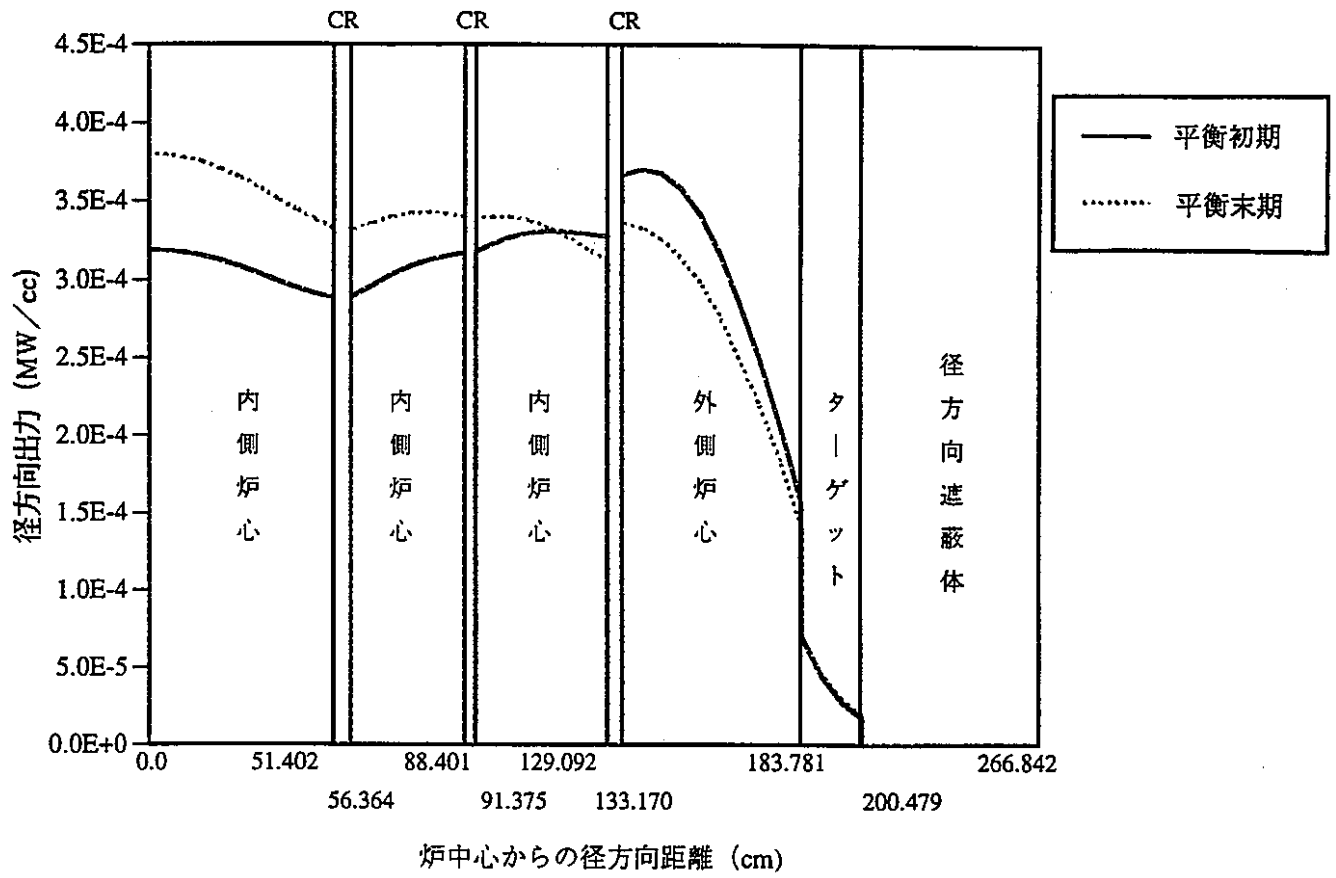


図3.2.3-4 径方向出力分布 (母材Al₂O₃装荷炉心)

3.3 代表炉心の選定及び炉心特性評価

3.3.1 代表炉心の選定

Np, Am+Cm分離装荷法のTRU消滅特性を最大限に追求するため、3.2節でサーベイした各炉心の中の代表炉心は「ターゲット5バッチ炉心：混入率増大型」とする。

しかし、この代表炉心には以下の問題点がある。

- ①ターゲット集合体の最大線出力が324W/cmとなり許容値135W/cmを超えている。
- ②増殖比が1.0を下回っている。

従って、最終的な選定炉心の目標性能は下記の通りとする。

- (1) ターゲット集合体の最大線出力は許容値以下とする。
- (2) 増殖比は1.0を超えること。

目標達成の方法としては、

- (1)については現在の代表炉心のターゲット集合体燃料仕様は太径(127ピン)を採用しているため、細径ピンの採用で許容値を満足させるようにする。
- (2)については、まず軸方向ブランケット厚を最大35cmまで増大させるが、まだ増殖比が1.0を下回った場合は内部転換比を上げる為の工夫をする。

こととする。

1) 代表炉心仕様の検討

(1) ターゲットピン仕様の設定

下記の条件のもとでターゲット燃料が許容線出力を満足するためのピン仕様（ピン数、Vf）を選定した。

代表炉心（ターゲット5パッチ炉心：混入率増大型）の最大線出力324 W/cm をもとに、各ピン仕様での最大線出力の予測を行い、許容線出力を満足するピン仕様（ピン本数）を選定する。

① 各ピン仕様での最大線出力の予測

ターゲット集合体のピン本数と燃料体積比の関係をベースに各ピン仕様での最大線出力の予測をおこなった。

ピン本数とVfの関係を以下に示す。（ワイヤ径および肉厚を保持）

ピン本数	ピン径	Vf
127ピン	13.4 mm	54.9% (最大線出力:324 W/cm)
271ピン	8.79 mm	46.2%
331ピン	7.85 mm	43.6%
397ピン	7.07 mm	41.0%

127ピン時の最大線出力を基にVfを考慮し、各ピン数に対応する最大線出力を予測した結果を以下に示す。

ピン本数	最大線出力（予測）	許容線出力
127ピン	324 W/cm	約135W/cm (43%混入率での値)
271ピン	(128 W/cm)	
331ピン	(99 W/cm)	
397ピン	(77 W/cm)	

271ピン以上の場合には、許容線出力を下回ることが予想されることと、また2章でも示したように母材として金属Uを少量添加する等の工夫で最大線出力を上げることが可能であることからターゲット集合体のピン本数は炉心燃料並の271ピンを採用する。

② 選定ピン（271ピン）仕様の検討

①で設定したピンでの最大線出力の予測では許容線出力を十分満足する為、消滅量を代表炉心と同等程度のもので得る為、ピン仕様を検討しVfを増大させた。

表3.3.1-1 に、選定炉心のターゲット集合体仕様を示した。

3.3.2 代表炉心の炉心特性評価

1) 主要条件

(1) 全般

軸方向ブランケット厚さは増殖比の観点から35cmとする。

その他炉心条件は代表炉心（TRU混入率増大型）と同一。

(2) ターゲット集合体

主要条件

① 混入率増大型

② バッチ数 5バッチ

ターゲット集合体の炉内装荷期間は15カ月×5バッチとする。

③ 前節で炉内装荷期間を変更する際、時間積分でTRU装荷総量維持の条件を設けた。その理由は再処理後 N_p あるいは A_m+C_m が装荷されずに残留している状態を避ける為である。

従って各バッチの炉心及びターゲット部における装荷量は、再処理で得られる N_p と A_m+C_m の比率を維持した設定とした。

即ちターゲット5バッチの場合の (A_m+C_m) の全炉内装荷量は、基準ケース（3バッチ）の5/3倍の装荷量となる。

④ $RE/(A_m+C_m) = 1$ （母材無し）

⑤ 軸方向ピン長さ：140 cm

⑥ ピン数：271本（ V_f ：51.6%）

⑦ 混入率とターゲット集合体装荷本数

ターゲット集合体装荷本数 72体

ターゲット燃料組成比	(A_m+C_m) 混入率	4.6%
	RE 混入率	4.6%
	母材 混入率	8%

である。

母材としてUを少量添加することで許容線出力が増加する為、母材混入率を8%とする。

2) 代表炉心の主要炉心特性のまとめ

代表炉心の主要炉心特性を変更前のもの (TG5 バッチ混入率増大型) と共に表3.3.1-1 に示した。またTRU消滅特性を、各領域毎に表3.3.1-2, 表3.3.1-3 に、炉心のBOEC, EOECの炉中心面での半径方向出力分布を図3.3.1-1 に示した。

(1) 燃焼欠損反応度

表3.3.1-2 より燃焼欠損反応度は、0.75% $\Delta k/kk'$ である。

(2) 最大線出力

最大線出力は145W/cm となった。またターゲット燃料の許容線出力は2章より母材にUを添加することで約215W/cm となることが示されており、本炉心のターゲット燃料の最大線出力は許容線出力を満足する。

炉心部の最大線出力は395 W/cmとなり、TRU (Np) 混入率は約10% であるので、炉心燃料の許容線出力414 W/cm (図3.2.1-2 参照) を満足する。

(3) TRU消滅

TRUサイクル消滅量は、580 kgとなった。

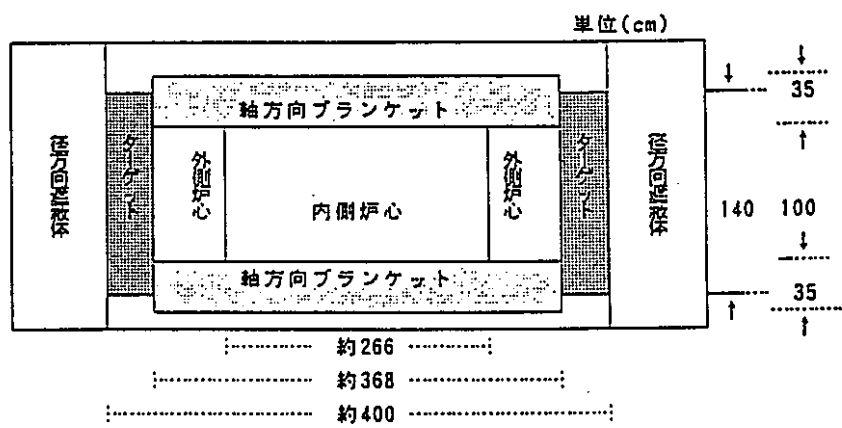
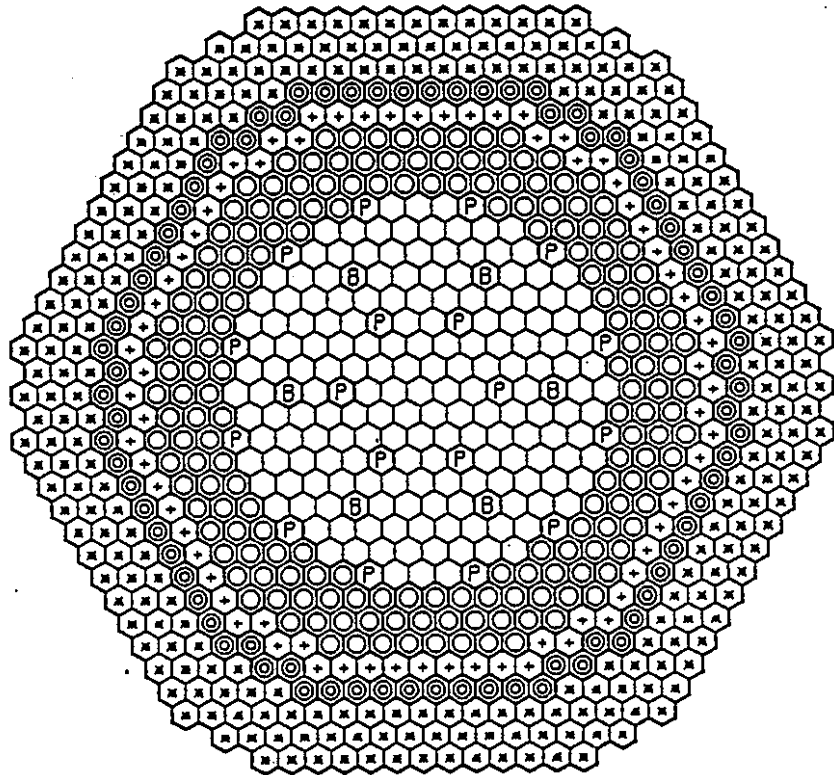
(4) 増殖比

増殖比はBOEC, EOEC でそれぞれ1.016, 1.067 となり、目標値 1.0を超えた。BOEC, EOEC 平均としては1.04である。

以上より本炉心は、ターゲット集合体の最大線出力は許容値を満足し、また増殖比も 1.0 を超え、炉心の目標性能を達成している。

図3.3.1-2 に(Np, Am+Cm)分離型TRU消滅選定炉心の構成を示した。

また、図3.3.1-3 に(Np, Am+Cm)分離型TRU消滅炉心の選定までの流れを纏めて示した。



- ⬡ 内側炉心 175本
- ⊙ 外側炉心 180本
- Ⓟ 主炉停止系制御棒 18本
- Ⓟ 後備炉停止系制御棒 6本
- ⊕ ターゲット集合体 72本 (1層)
- ⊙ 半径方向遮蔽体 78本
- ⊗ 半径方向遮蔽体 270本

合計 799本

図 3. 3. 1 - 1 (Np, Am+Cm)分離型 選定炉心構成図

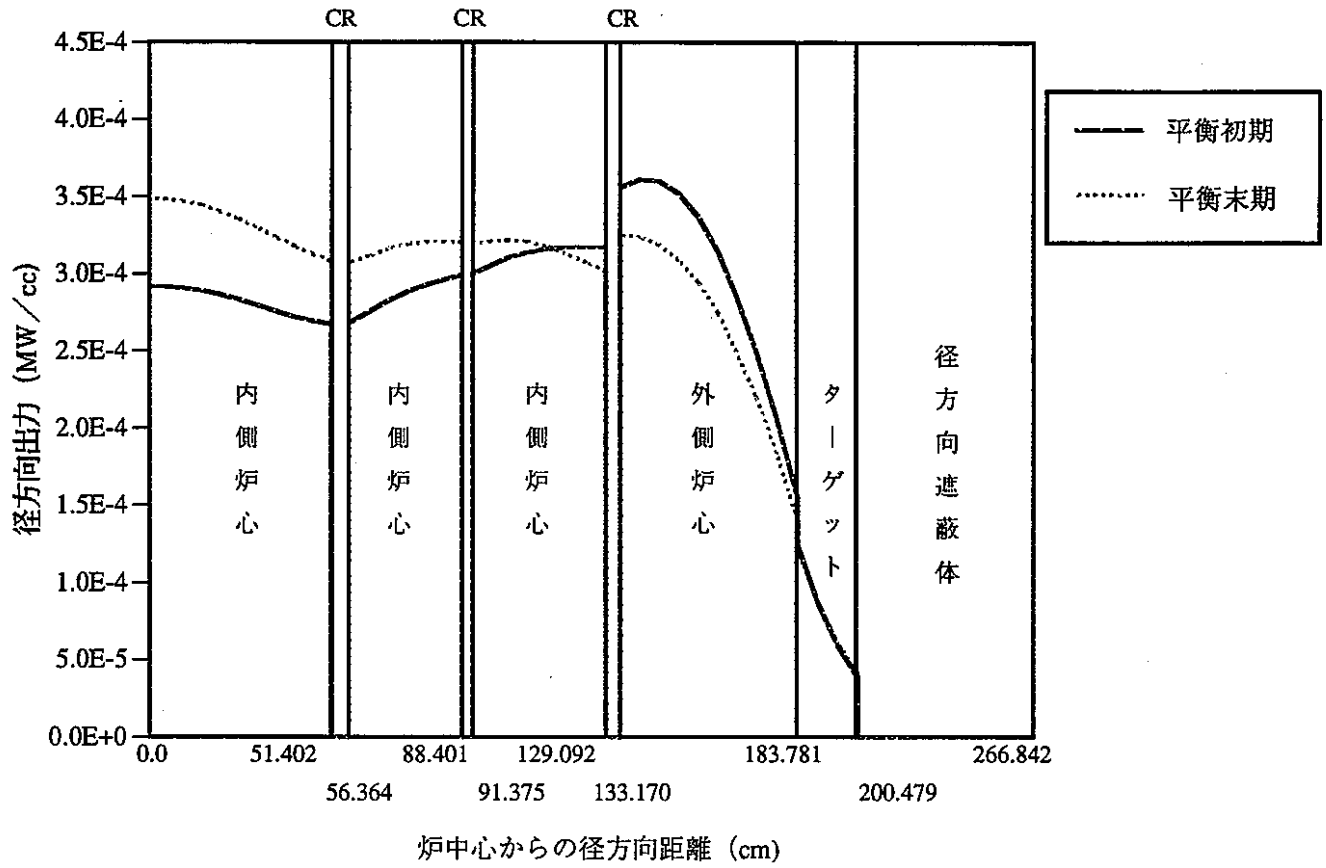
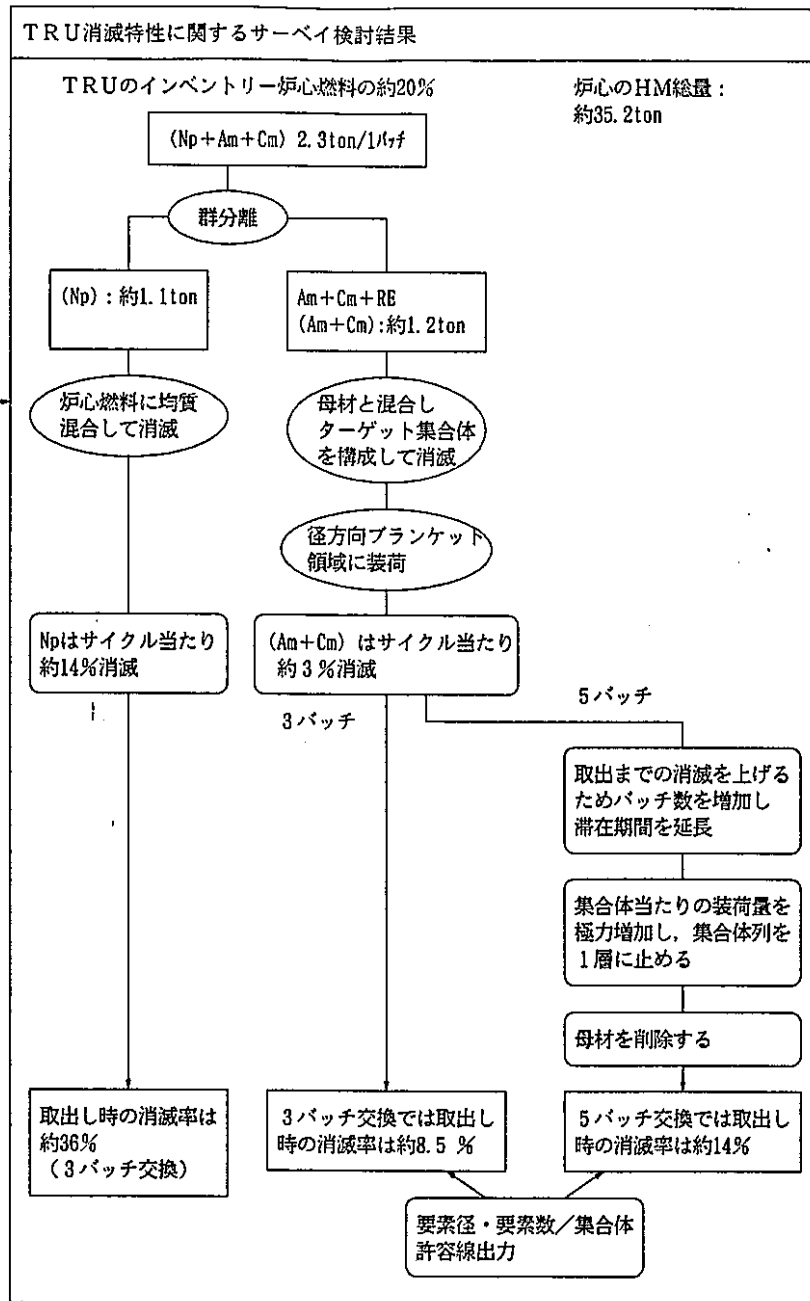


図3.3.1-2 径方向出力分布 (選定炉心)

目的
1000MWeの酸化物燃料炉心において、Npと(Am+Cm+RE)とを分離して装荷することで炉心性能の劣化を回避しながら消滅特性の向上を狙う

検討項目
Np混入した炉心燃料要素の許容線出力
(Am+Cm+RE) 装荷ターゲット集合体概念
(Am+Cm+RE) ターゲット要素の許容線出力
炉心の反応度特性
炉心の燃焼特性
炉心燃料要素及びターゲット要素の最大線出力特性
ターゲット集合体の交換バッチ数
ターゲット集合体の層数
RE混入率許容値の検討

炉心特性の制限条件
燃焼欠損反応度 > 0
増殖比 > 1.0
最大線出力 < 許容線出力



(Np, Am+Cm)分離型TRU消滅炉心の選定 (TRU混入率:20%)

仕様
炉心燃料の交換バッチ数 : 3バッチ
ターゲット集合体の概念 : 271ピン/集合体
ターゲット集合体の交換バッチ数 : 5バッチ
ターゲット集合体装荷対数 : 72体
軸方向ブランケット厚(上/下) : 35cm

炉心特性
燃焼欠損反応度 : 0.75 % Δk/kk'
最大線出力(Core/Target) : 395 / 145 W/cm
増殖比(BOEC, EDEC平均) : 1.04
TRUサイクル消滅量 : 580 kg (407/173)
TRUサイクル消滅率 : 6.7 % (13.6/3.1)

図3.3.1-3 (Np, Am+Cm)分離型TRU消滅炉心の選定の流れおよびその主要特性のまとめ

表 3.3.1-1 選定炉心のターゲット集合体仕様

項 目	仕 様
<u>組成体積比 (v%)</u>	
(1) ターゲット 燃料 (ペレット面積比)	51.6
(2) ギャップ (被覆管-ペレット間)	1.9
(3) 構造材	16.9
(4) 冷却材	29.6
<u>ターゲット ピン</u>	
ペレット組成(v%)	
{ (Am+Cm), RE, 母材(UO ₂) }	{46.0, 46.0, 8.0 }
ペレット外径 (mm)	8.24
ペレット密度 (%TD)	95
被覆管 外径 (mm)	8.99
内径 (mm)	8.39
肉厚 (mm)	0.3
直径ギャップ (被覆管-ペレット間)	0.15
ピンピッチ (mm)	9.94
ワイヤ径 (mm)	0.9
<u>ターゲット 集合体</u>	
集合体当り要素数	271
ラッパ管外対面間距離 (mm)	173.8
内対面間距離 (mm)	165.8
肉厚 (mm)	4.0
ラッパ管間ギャップ (mm)	6.0
集合体配列ピッチ (mm)	179.8

表3.3.1-2 炉心主要特性一覧 (TRU消滅選定炉心)

項目	ケース	サーベイ炉心	TRU消滅選定炉心	備考
		TG5バッチ混入率増大型	TG5バッチ混入率増大型	
TG仕様	バッチ数	5	5	
	装荷本数	72体(1層)	72体(1層)	
	TG燃料体積比	54.8%	51.6%	
	(Am+Cm)混入率 % [RE/母材(UO ₂)]	43.2% [43.2% / 13.6%]	46.0% [46.0% / 8.0%]	
	ピン本数	127本	271本	
	軸長さ	140 cm	140 cm	
上/下軸ファンケット厚		20 cm	35 cm	
Pu富化度 (IC/OC)		19.0/23.4	18.8/23.2	
k _{eff}	BOEC	1.0089	1.0062	
	EOEC	0.9999	0.9987	
燃焼欠損反応度 (% Δk/k')		0.90	0.75	
ピン出力密度 (W/cc) (IC/OC/TG)	BOEC	322 / 366 / 129	319 / 363 / 124	TG: ターゲット 集合体
	EOEC	356 / 332 / 127	352 / 328 / 121	
燃焼因子 (IC/OC/TG)	BOEC	1.015/1.056/1.139	1.013/1.054/1.132	
	EOEC	1.020/1.052/1.113	1.018/1.050/1.107	
最大線出力 (W/cm) (IC/OC/TG)	BOEC	338 / 399 / 324	334 / 395 / 145	ピン数(本) (CORE/ TG) = 271 / 127
	EOEC	375 / 361 / 311	370 / 356 / 138	
出力分担 (MW) (IC/OC/TG)	BOEC	1184 / 1172 / 99	1144 / 1167 / 128	
	EOEC	1272 / 1057 / 101	1229 / 1049 / 129	
増殖比(平均) (BOEC / EOEC)		0.973 (0.948 / 0.998)	1.041 (1.016 / 1.067)	
TRU サイクル消滅率(% (IC+OC / TG)		6.7 (Total) (13.6 / 3.0)	6.7 (Total) (13.6 / 3.1)	(Np+Am+Cm) の消滅特性
TRU サイクル消滅量(kg) (IC+OC / TG)		577 (Total) (407 / 170)	580 (Total) (407 / 173)	
TRU 取出消滅率(% (IC+OC / TG)		24.6 (Total) (35.4 / 14.3)	24.8 (Total) (35.5 / 14.5)	
TRU 取出消滅量(kg) (IC+OC / TG)		576 (Total) (407 / 170)	580 (Total) (407 / 173)	
TG燃料許容線出力		135 W/cm	約 200 W/cm	(参考用)

表3.3.1-3 TRUサイクル消滅率

(TRU 20wt% 選定炉心 Pu18.8/23.2)

	a 平衡初期 (kg/炉心)				b 平衡末期 (kg/炉心)				c=a-b 消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
Np237	2933.32	0.06	0.52	2933.90	2477.44	0.08	1.03	2478.55	455.88	-0.02	-0.51	455.35	15.54	-33.33	-98.08	15.52
Am241	34.70	3188.01	0.00	3222.71	61.64	3038.57	0.01	3100.22	-26.94	149.44	-0.01	122.49	-77.64	4.69	0.00	3.80
Am242	0.67	45.39	0.00	46.06	1.56	60.90	0.00	62.46	-0.89	-15.51	0.00	-16.40	-132.84	-34.17	0.00	-35.61
Am243	17.80	1690.70	0.00	1708.50	33.60	1626.05	0.00	1659.65	-15.80	64.65	0.00	48.85	-88.76	3.82	0.00	2.86
Am TOTAL	53.17	4924.10	0.00	4977.27	96.80	4725.52	0.01	4822.33	-43.63	198.58	-0.01	154.94	-82.06	4.03	0.00	3.11
Cm242	1.40	35.93	0.00	37.33	2.72	44.08	0.00	46.80	-1.32	-8.15	0.00	-9.47	-94.29	-22.68	0.00	-25.37
Cm243	0.04	5.78	0.00	5.82	0.12	5.69	0.00	5.81	-0.08	0.09	0.00	0.01	-200.00	1.56	0.00	0.17
Cm244	2.08	623.13	0.00	625.21	5.36	635.46	0.00	640.82	-3.28	-12.33	0.00	-15.61	-157.69	-1.98	0.00	-2.50
Cm245	0.06	40.55	0.00	40.61	0.22	45.27	0.00	45.49	-0.16	-4.72	0.00	-4.88	-266.67	-11.64	0.00	-12.02
Cm TOTAL	3.58	705.39	0.00	708.97	8.42	730.50	0.00	738.92	-4.84	-25.11	0.00	-29.95	-135.20	-3.56	0.00	-4.22
TOTAL	2990.07	5629.55	0.52	8620.14	2582.66	5456.10	1.04	8039.80	407.41	173.45	-0.52	580.34	13.63	3.08	-100.00	6.73
Am+Cm	56.75	5629.49	0.00	5686.24	105.22	5456.02	0.01	5561.25	-48.47	173.47	-0.01	124.99	-85.41	3.08	0.00	2.20

表3.3.1-4 TRU取出消滅率

(TRU 20wt% 選定炉心 Pu18.8/23.2)

	a 装荷時 (kg/炉心)				b 取出時 (kg/炉心)				c=a-b 取出消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 取出消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
Np237	1148.28	0.00	0.00	1148.28	692.40	0.03	0.51	692.94	455.88	-0.03	-0.51	455.34	39.70	0.00	0.00	39.65
Am241	0.00	701.38	0.00	701.38	26.94	551.95	0.01	578.90	-26.94	149.43	-0.01	122.48	0.00	21.31	0.00	17.46
Am242	0.00	1.79	0.00	1.79	0.89	17.29	0.00	18.18	-0.89	-15.50	0.00	-16.39	0.00	-865.92	0.00	-915.64
Am243	0.00	365.61	0.00	365.61	15.80	300.96	0.00	316.76	-15.80	64.65	0.00	48.85	0.00	17.68	0.00	13.36
Am TOTAL	0.00	1068.78	0.00	1068.78	43.63	870.20	0.01	913.84	-43.63	198.58	-0.01	154.94	0.00	18.58	0.00	14.50
Cm242	0.00	0.02	0.00	0.02	1.32	8.17	0.00	9.49	-1.32	-8.15	0.00	-9.47	0.00	-40750.00	0.00	-47350.00
Cm243	0.00	1.20	0.00	1.20	0.07	1.11	0.00	1.18	-0.07	0.09	0.00	0.02	0.00	7.50	0.00	1.67
Cm244	0.00	118.16	0.00	118.16	3.28	130.49	0.00	133.77	-3.28	-12.33	0.00	-15.61	0.00	-10.44	0.00	-13.21
Cm245	0.00	6.14	0.00	6.14	0.16	10.85	0.00	11.01	-0.16	-4.71	0.00	-4.87	0.00	-76.71	0.00	-79.32
Cm TOTAL	0.00	125.52	0.00	125.52	4.83	150.62	0.00	155.45	-4.83	-25.10	0.00	-29.93	0.00	-20.00	0.00	-23.84
TOTAL	1148.28	1194.30	0.00	2342.58	740.86	1020.85	0.52	1762.23	407.42	173.45	-0.52	580.35	35.48	14.52	0.00	24.77
Am+Cm	0.00	1194.30	0.00	1194.30	48.46	1020.82	0.01	1069.29	-48.46	173.48	-0.01	125.01	0.00	14.53	0.00	10.47

4 炉心動特性解析用データの整備（TRU分離装荷代表炉心：ターゲット 5 バッチ 混入率増大型）

4.1 反応度特性評価

1) 解析対象炉心

3章で選定したTRU消滅選定炉心について平衡炉心末期を対象に、ATWS時の炉心動特性解析の為のデータとして以下の反応度特性を評価した。

- ① ドップラー係数
- ② 形状係数
- ③ 密度係数（燃料、構造材、冷却材）
- ④ 温度係数（冷却材、燃料、被覆管、ラッパー管、炉心支持板）
- ⑤ 動特性パラメーター（実効遅発中性子割合、崩壊定数、即発中性子寿命）

2) 評価方法

(1) 基準体系の中性子束分布

2次元RZ全炉心体系モデルにより、基準体系の18群の中性子束、随伴中性子束（ ϕ 、 ϕ^* ）を拡散計算により求める。

(2) ドップラー係数

エネルギー群は18群、計算モデルは2次元RZ全炉心体系とする。

計算法は、定格出力運転時の燃料温度分布から、燃料温度が一様に500K変化した場合の反応度変化を一次摂動計算により求める。

燃料温度は表4.1-1の通りである。

(3) 温度係数

温度係数は、形状係数と密度係数より算出する。

① 密度係数

エネルギー群は18群、計算モデルは2次元RZ全炉心体系とする。

計算法は、（燃料、冷却材、構造材）の各密度が炉内各領域で一様に変化した場合の反応度変化の割合を、一次摂動計算により求める。

② 形状係数

エネルギー群は6群、計算モデルは2次元RZ全炉心体系とする。

計算法は、炉心組成を変えずに、炉心高さ、炉心半径（集合体配列ピッチ）を変化（5%変化）させた場合の反応度変化の割合を拡散計算による直接計算で求める。

$$\text{軸方向形状係数：} KH = (\Delta k / k k') / (\Delta H / H)$$

$$\text{径方向形状係数：} KR = (\Delta k / k k') / (\Delta R / R)$$

($\Delta H / H$) : 炉心高さの変化割合

($\Delta R / R$) : 炉心半径の変化割合

③ 温度係数

温度係数評価用炉心分割モデルを図4.1-1に示す。また定格出力状態における各部温度分布を表4.1-1に示す。

温度係数計算法は、炉心、ブランケット内の燃料、構造材、冷却材の温度が変化し、膨張効果等により反応度が変化する割合を、上記の形状係数、密度係数及び表4.1-2に示す燃料、構造材の熱膨張率および冷却材の密度を用い、表4.1-3に示す評価式により求める。

④ 温度条件の設定

また温度係数評価用の炉心各部平均温度の設定は以下の通りとした。

炉心の基本仕様はS.63年度PNC大型炉レファレンス炉心をベースとしている。

(a)基本プラント仕様

原子炉熱出力	2 5 1 7 MW
原子炉入口／出口温度	3 7 5 °C / 5 3 0 °C
一次冷却材流量	1. 2 7 2 2 × 1 0 ⁴ kg / s ec

(a)ピン及び集合体仕様

表4.1-4に示す。

(b)出力及び流量条件

表4.1-5にTRU選定炉心の各領域での出力分担率を示す。また流量条件は実証炉合理化設計炉心（100万kWe）での温度係数評価用の集合体出力及び流量データをベースに集合体出力分の補正を行い設定した。各領域の流量を表4.1-6に示す。

これらの出力及び流量データを基に、領域平均線出力を求め、以下の評価方法により各部温度を算出した。

(c) 温度計算手法

燃料仕様および集合体平均流量、平均線出力を用いて下記の方法で各部温度デ
ータを求めた。

$$\overline{T_F} = T_{Na} + \Delta T_{film} + \Delta T_{clad} + \Delta T_{gap} + \overline{\Delta T_{fuel}}$$

但し、 $\overline{T_F}$: 燃料平均温度

$$\textcircled{1} \quad T_{Na} = T_{Na,in} + \frac{1}{2} \Delta T_{Na}$$

$$\textcircled{2} \quad \Delta T_{film} = \frac{q \cdot D_o}{\pi d_{co} \cdot k_{Na} \cdot N_u}$$

$$k_{Na}(455^\circ\text{C}) = 0.164 \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$N_u = 7.0 + 0.0025(\phi \cdot Pe)^{0.8} \quad ; \text{ ヌッセルト数}$$

D_o ; 水力等価直径
 q ; 線出力
 d_{co} ; 被覆管外径
 ϕ ; 乱流拡散補正因子 $\phi = 0.5$
 Pe ; ペクレ数

$$\textcircled{3} \quad \Delta T_{clad} = \frac{q}{2\pi k} \cdot \ln\left(\frac{d_{co}}{d_{ci}}\right)$$

$$k = 0.132 + 1.3 \times 10^{-4} T \quad (\text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$k(500^\circ\text{C}) = 0.197$$

d_{ci} ; 被覆管内径

$$\textcircled{4} \quad \Delta T_{gap} = \frac{q}{\pi d_{ci} \cdot hg}$$

$$hg = 1000 \text{ Btu/ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{hr}$$

$$= 0.568 \text{ W/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\textcircled{5} \quad \overline{\Delta T_{fuel}} = \frac{1}{2} \Delta T_{fuel} = \frac{q}{8\pi k_f}$$

$$k_f = 0.022 \text{ W/cm} \cdot ^\circ\text{K}$$

(4) 動特性パラメータ

エネルギー群は18群、計算モデルは2次元RZ全炉心体系とする。

拡散計算による中性子束、随伴中性子束データと下記の遅発中性子データを用いて以下の評価式により求める。

a) 実効遅発中性子割合 (β_{eff})

$$\beta_{eff} = \frac{\sum_m \int (\sum_i \nu_a^{l,m} \cdot \Sigma_r^{m,i} \cdot \phi^i) \cdot (\sum_i X_d^{m,i} \cdot \phi^{*i}) dV}{\sum_m \int (\sum_i \nu \Sigma_f^{m,i} \cdot \phi^i) \cdot (\sum_i X^{m,i} \cdot \phi^{*i}) dV}$$

b) 崩壊定数

$$\lambda_{eff} = \frac{\sum_m \lambda_i^m \int (\sum_i \nu_a^{l,m} \cdot \Sigma_f^{m,i} \cdot \phi^i) dV}{\sum_m \int (\sum_i \nu_a^{l,m} \cdot \Sigma_r^{m,i} \cdot \phi^i) dV}$$

c) 即発中性子寿命

$$l_p = \frac{\int \sum_i (\phi^i \phi^{*i} / \bar{\nu}^i) dV}{\sum_i \int (\sum_m \nu \Sigma_f^{m,i} \cdot \phi^i) (\sum_i X_p^i \cdot \phi^{*i}) dV}$$

記号:

- i : エネルギーグループ
- m : 元素
- l : 1番目の遅発中性子グループ
- X_{mi} : 元素 m の核分裂即発中性子スペクトル
- X_{mi} : 元素 m の遅発中性子スペクトル
- d
- ν_a^m : 核分裂当り遅発中性子発生数
- $\beta^{l,m}$: 1番目の遅発中性子の割合
- $\nu_a^{l,m} = \nu_a^m \cdot \beta^{l,m}$
- ϕ^i : エネルギーグループ i の中性子束
- ϕ^{*i} : エネルギーグループ i の随伴中性子束
- $\bar{\nu}^i$: エネルギーグループ i の平均中性子速度
- ν : 核分裂当りの中性子発生数
- Σ_f : マクロ核分裂断面積

遅発中性子データは下記の通りである。

- ① 遅発中性子発生率 表 4.1 - 7
- ② 遅発中性子割合 表 4.1 - 8
- ③ 遅発中性子スペクトル 表 4.1 - 9
- ④ 崩壊定数 表 4.1 - 10

3) 評価結果

以下に各反応度係数の結果を示す。

- ① 密度係数 表 4.1 - 11
(燃料, 冷却材, 構造材)
- ② 形状係数 表 4.1 - 12
- ③ ドップラー係数 表 4.1 - 13
- ④ 各部温度係数 表 4.1 - 14
- ⑤ 動特性パラメータ 表 4.1 - 15
- ⑥ Na ボイド反応度 表 4.1 - 16

4.2 炉心動特性解析用流量及び出力データ

ATWS解析に用いる各領域毎の流量データは以下のように設定した。

1) 流量配分基本設定条件

(A) 集合体必要最小流量設定条件

- (1) 炉容器入口／出口温度 375／530 °C
- (2) 被覆管最高温度 700°C以下 (H.S 値)

① H.S.F.

┌	炉心燃料	1.26
	ブランケット燃料	1.36

② 周辺流れ係数(f_w) 1.1

③ 集合体内ピーキング係数 F_{xv} 1.0

(B) 炉心計画流量配分設定条件

- (1) 炉容器入口／出口温度
375／530 °C
- (2) 1次系全流量
 1.2722×10^4 (kg/s)
- (3) 炉心+ターゲット集合体流量割合
91 % (1.1577×10^4 (kg/s))

(4) 流量配分領域数 (3領域)

内側炉心／外側炉心／ターゲット集合体

2) 計算方法

炉心部及びブランケット部の各流量領域毎のホット集合体(最大発熱)の被覆管最高温度が700°C以下となるホット集合体出口冷却材混合温度からホット集合体出力が集合体出口冷却材混合温度を満たす流量を算出し、計画流量で規格化して求めた。

3) 結果

表4.2-1に各流量領域毎の出力及び流量配分結果を示す。

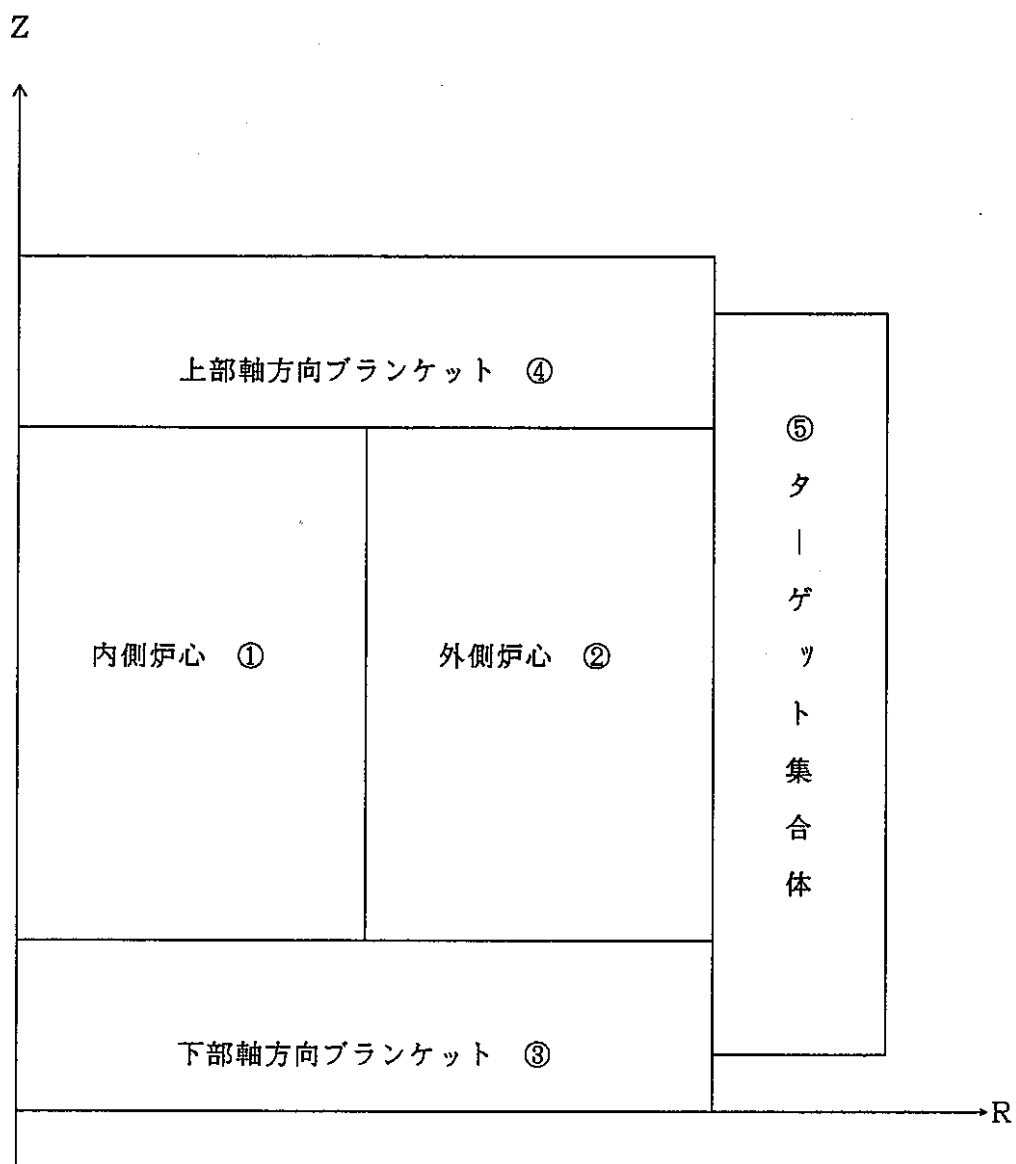


図4.1-1 温度係数評価用炉心分割モデル (TRU消滅選定炉心)

表 4.1 - 1 領域毎温度 (TRU 消滅選定炉心)

(°C)

領域NO.		冷却材	燃料	被覆管	ラッパ管	炉心支持板
炉心部	内側炉心①	480.7	1176.6	499.5	480.7	375.0
	外側炉心②	463.1	1040.5	478.6	463.1	
軸方向	(下部)③	377.8	434.2	379.4	377.8	
ブランケット	(上部)④	564.5	595.4	565.4	564.5	
ターゲット 集合体 ⑤		406.9	527.3	409.0	406.9	

表4.1-2 燃料、構造材の熱膨張率及び冷却材密度

項目		熱膨張率及び密度
燃料	(Pu, U)O ₂	$\alpha (Pu, U)O_2 = (X \cdot \alpha PuO_2 + (1.0 - X) \alpha UO_2) \cdot \beta$ <p>ここで、</p> $\alpha (Pu, U)O_2 = (Pu, U)O_2 \text{の熱膨張率 } (^{\circ}C^{-1})$ $\alpha PuO_2 = PuO_2 \text{の熱膨張率 } (^{\circ}C^{-1})$ $= 8.496 \times 10^{-6} + 4.302 \times 10^{-8}T + 11.14 \times 10^{-10}T^2$ $\alpha UO_2 = UO_2 \text{の熱膨張率 } (^{\circ}C^{-1})$ $= 7.107 \times 10^{-6} + 5.162 \times 10^{-8}T + 3.42 \times 10^{-10}T^2$ $X = PuO_2 \text{の重量比}$ $T = \text{温度 } (^{\circ}C)$ $\beta = 1 - 5.1 \{ (O/M) - 2.00 \}$ $O/M = \text{酸素と金属の比}$
	UO ₂	$\alpha UO_2 = 7.107 \times 10^{-6} + 5.162 \times 10^{-8}T + 3.42 \times 10^{-10}T^2$ <p>ここで、</p> $\alpha UO_2 = UO_2 \text{の熱膨張率 } (^{\circ}C^{-1})$ $T = \text{温度 } (^{\circ}C)$
冷却材		$\rho = 0.95001 - 2.2977 \times 10^{-4} \cdot T - 1.4605 \times 10^{-8} \cdot T^2 + 5.6308 \times 10^{-12} \cdot T^3$ <p>ρ : 冷却材密度(g/cm³)</p> <p>T : 温度(°C)</p> <p>(100 ~ 1400°C)</p>
構造材		$\alpha = 14.8778 + 1.6999 \times 10^{-2} \cdot T - 1.4541 \times 10^{-5} \cdot T^2 + 4.5929 \times 10^{-8} \cdot T^3$ <p>α : 熱膨張率(mm/mm/°C × 10⁻⁶)</p> <p>T : 温度(°C)</p>

表 4. 1 - 3 膨張反応度係数の評価式

項目	反応度変化の要因	評価式
燃料	<ul style="list-style-type: none"> ・軸方向膨張による炉心高さの増加 ・軸方向膨張による燃料密度の減少 	$\left(\frac{\Delta k / k k'}{\Delta T} \right)_{\text{Fuel}} = \alpha_F(T) \cdot (K_R - K_F)$
冷却材	<ul style="list-style-type: none"> ・膨張による冷却材密度の減少 	$\left(\frac{\Delta k / k k'}{\Delta T} \right)_{\text{Coolant}} = \alpha_{Na}(T) \cdot K_{Na}$
被覆管	<ul style="list-style-type: none"> ・軸方向による構造材密度の減少 ・軸方向膨張による冷却材の排除 (冷却材体積比の減少) 	$\left(\frac{\Delta k / k k'}{\Delta T} \right)_{\text{Clad}} = -\alpha_{\delta\delta}(T) \left[\frac{V_{\text{Clad}}}{V_{\delta\delta}} \cdot K_{\delta\delta} + \frac{2V_{\text{Pin}}}{V_{Na}} \cdot K_{Na} \right]$
ラップ管	<ul style="list-style-type: none"> ・軸方向膨張による構造材密度の減少 ・径方向膨張による冷却材の排除 (冷却材体積比の減少) 	$\left(\frac{\Delta k / k k'}{\Delta T} \right)_{\text{Wrapper}} = -\alpha_{\delta\delta}(T) \left[\frac{V_{\text{Wrapper}}}{V_{\delta\delta}} \cdot K_{\delta\delta} + \frac{2V_{\text{Wrapper}}}{V_{Na}} \cdot K_{Na} \right]$
下部支持板	<ul style="list-style-type: none"> ・径方向膨張による炉心半径の増加 ・径方向膨張による燃料・構造材体積比の減少 ・径方向膨張による冷却材の流入 (冷却材体積比の増加) 	$\left(\frac{\Delta k / k k'}{\Delta T} \right)_{\text{Support}} = \alpha_{\delta\delta}(T) \cdot \left[-2 \cdot (K_F + K_{\delta\delta}) + K_R + 2 \cdot \frac{1 - V_{Na}}{V_{Na}} \cdot K_{Na} \right]$

・記号の説明

記号	内 容
K_F	燃料密度係数
K_{Na}	冷却材密度係数
$K_{\delta\delta}$	構造材密度係数
K_H	軸方向形状係数
K_R	径方向形状係数
$\alpha_F(T)$	燃料の熱膨張率
$\alpha_{Na}(T)$	冷却材の密度変化率
$\alpha_{\delta\delta}(T)$	構造材の熱膨張率
T	温度
V_{Pin}	燃料要素の体積比
V_{Na}	冷却材の体積比
V_{Clad}	被覆管の体積比
V_{Wrapper}	ラップ管の体積比
$V_{\delta\delta}$	全構造材の体積比

表 4.1-4 主要燃料仕様 (TRU消滅選定炉心)

項 目	仕 様	
	炉心燃料集合体	ターゲット燃料集合体
<u>組成体積比 (v%)</u>		
(1) 燃 料 (ペレット面積比)	39.6	51.6
(2) ギャップ (被覆管-ペレット間)	2.0	1.9
(3) 構造材	20.9	16.9
{ ラッパ管	{ 8.4	{ 8.4
{ 被覆管	{ 12.5	{ 8.5
(4) 冷却材	37.5	29.6
<u>燃料ピン</u>		
ペレット外径 (mm)	7.22	8.24
ペレット密度 (%TD)	92	95
被覆管 外径 (mm)	8.3	8.99
内径 (mm)	7.4	8.39
肉厚 (mm)	0.45	0.3
直径ギャップ (被覆管-ペレット間)	0.18	0.15
スペースワイヤ径 (mm)	1.5	0.9
ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	165	165
ピンピッチ (mm)	9.9	9.94
<u>燃料集合体</u>		
集合体当り要素数	271	271
ラッパ管外対面間距離 (mm)	173.8	同 左
内対面間距離 (mm)	165.8	
肉厚 (mm)	4.0	
ラッパ管間ギャップ (mm)	6.0	
集合体配列ピッチ (mm)	179.8	同 左

表 4.1 - 5 出力分担 (TRU 消滅選定炉心)

時 期	領 域	出力 (MW t)	出力分担率 (%)
BOEC	内側炉心	1 1 4 3 . 9	4 5 . 4 5
	外側炉心	1 1 6 7 . 2	4 6 . 3 7
	軸方向ブランケット	7 8 . 1	3 . 1 0
	ターゲット集合体	1 2 7 . 9	5 . 0 8
EOEC	内側炉心	1 2 2 9 . 4	4 8 . 8 4
	外側炉心	1 0 4 9 . 1	4 1 . 6 8
	軸方向ブランケット	1 0 9 . 6	4 . 3 5
	ターゲット集合体	1 2 8 . 9	5 . 1 2

表 4.1 - 6 定格時平均集合体流量 (TRU 消滅選定炉心)

領域	領 域 流 量 (k g / s)	集 合 体 本 数	平均集合体流量 (k g / s)
内 側 炉 心	4 8 4 4	1 7 5	2 7 . 6 8
外 側 炉 心	5 0 1 3	1 8 0	2 7 . 8 5
ターゲッ 集合体	1 5 9 3	7 2	2 2 . 1 3

1次系主冷却材流量の約90%に相当する。

表4.1-7 遅発中性子発生率 (ν_d)

核種	生成率 ^{<1>}
U - 235	0.0167 <1>
U - 238	0.0439 <1>
Pu - 239	0.0063 <1>
Pu - 240	0.0095 <1>
Pu - 241	0.0152 <1>
Pu - 242	0.0167 <2>
U - 236	0.0232 <2>
Np - 237	0.0114 <2>
Pu - 238	0.0079 <2>
Am - 241	0.0051 <2>
Am - 242m	0.0078 <2>
Am - 243	0.0080 <2>
Cm - 242	0.0014 <2>
Cm - 243	—
Cm - 244	0.0053 <3>
Cm - 245	0.0064 <2>

< 1 > R. J. Tuttle, "Delayed Neutron Yields in Nuclear Fission,"

Consultants Meeting on Delayed Neutron Properties, IAEA, Vienna, 1979

< 2 > M. C. Brady, et al., NSE, 103, 129(1989)

< 3 > Y. Ronen, Int. Conf. on the Physics of Reactors : Operation,

Design and Computation, session III-B, April, 1990

表 4.1 - 8 遲 発 中 性 子 割 合

核種	群						
		1	2	3	4	5	6
U - 235 < 4 >		0.038	0.213	0.188	0.407	0.128	0.026
U - 238 < 4 >		0.013	0.137	0.162	0.388	0.225	0.075
P u - 239 < 4 >		0.038	0.280	0.216	0.328	0.103	0.035
P u - 240 < 4 >		0.028	0.273	0.192	0.350	0.128	0.029
P u - 241 < 4 >		0.010	0.229	0.173	0.390	0.182	0.016
P u - 242							
U - 236 < 2 >		0.0302	0.1722	0.1619	0.3841	0.1775	0.0741
N p - 237 < 2 >		0.0400	0.2162	0.1558	0.3633	0.1659	0.0589
P u - 238 < 2 >		0.0377	0.2390	0.1577	0.3562	0.1590	0.0504
A m - 241 < 2 >		0.0355	0.2540	0.1563	0.3364	0.1724	0.0454
A m - 242m < 2 >		0.0247	0.2659	0.1512	0.3337	0.1756	0.0489
A m - 243 < 2 >		0.0234	0.2945	0.1537	0.3148	0.1656	0.0480
C m - 242 < 2 >		0.0763	0.2847	0.1419	0.2833	0.1763	0.0375
C m - 243		-	-	-	-	-	-
C m - 244		-	-	-	-	-	-
C m - 245 < 2 >		0.0222	0.1788	0.1672	0.3706	0.2054	0.0559

< 2 > M. C. Brady, et al., NSE, 103, 129(1989)

< 4 > L. Tomlinson, AERE-R6993

表4.1-9 遅発中性子スペクトル

1 8 群 構 造		遅発中性子スペクトル<5>		
群	エネルギー(MeV)	U-235	U-238	Pu*
4	2.2313 ~1.3534	0.0201	0.0205	0.0184
5	1.3534 ~0.82085	0.1033	0.0952	0.1021
6	0.82085 ~0.38774	0.3571	0.3506	0.3570
7	0.38774 ~0.18316	0.3273	0.3275	0.3342
8	0.18316 ~0.086517	0.1763	0.1900	0.1692
9	0.086517~0.040868	0.0159	0.0162	0.0191

* Pu及びTRUに使用した。

<5> D. Saphier et al., "Evaluated Delayed Neutron Spectra and Their Importance in Reactor Calculations"

表 4.1 - 1 0 崩 壞 定 數

核種 \ 群	崩 壞 定 數					
	1	2	3	4	5	6
U - 235 < 4 >	0.0127	0.0317	0.1150	0.3110	1.4000	3.8700
U - 238 < 4 >	0.0132	0.0321	0.1390	0.3580	1.4100	4.0200
P u - 239 < 4 >	0.0129	0.0311	0.1340	0.3310	1.2600	3.2100
P u - 240 < 4 >	0.0129	0.0313	0.1350	0.3330	1.3600	4.0400
P u - 241 < 4 >	0.0128	0.0299	0.1240	0.3520	1.6100	3.4700
P u - 242 < 4 >	0.0128	0.0299	0.1240	0.3520	1.6100	3.4700
U - 236 < 2 >	0.0134	0.0322	0.1202	0.3113	0.8794	2.8405
N p - 237 < 2 >	0.0133	0.0316	0.1168	0.3006	0.8667	2.7600
P u - 238 < 2 >	0.0133	0.0312	0.1162	0.2888	0.8561	2.7138
A m - 241 < 2 >	0.0133	0.0308	0.1130	0.2868	0.8654	2.6430
A m - 242m < 2 >	0.0135	0.0301	0.1152	0.2994	0.8646	2.8107
A m - 243 < 2 >	0.0135	0.0298	0.1138	0.2986	0.8820	2.8111
C m - 242 < 2 >	0.0130	0.0312	0.1129	0.2783	0.8710	2.1969
C m - 243	-	-	-	-	-	-
C m - 244	-	-	-	-	-	-
C m - 245 < 2 >	0.0134	0.0307	0.1130	0.3001	0.8340	2.7686

< 2 > M. C. Brady, et al., NSE, 103, 129(1989)

< 4 > L. Tomlinson, AERE-R6993

表4.1-11 密度係数 (TRU消滅選定炉心)

(単位: $\Delta k/k' / \Delta \rho / \rho$)

項目	領域	平衡末期
燃料	炉心	0.2870
	内側炉心	0.1442
	外側炉心	0.1428
	軸方向ブランケット ターゲット集合体	0.0018 0.0079
	合計	0.2967
冷却材	炉心	-0.0310
	内側炉心	-0.0190
	外側炉心	-0.0120
	軸方向ブランケット ターゲット集合体	0.0006 -0.0007
	合計	-0.0311
構造材	炉心	-0.0670
	内側炉心	-0.0405
	外側炉心	-0.0265
	軸方向ブランケット ターゲット集合体	0.0013 -0.0121
	合計	-0.0778

表4.1-12 形状係数 (TRU 消滅選定炉心)

項 目	平 衡 末 期
半 径 方 向 ($\Delta k/kk' / \Delta R/R$)	0.0544
軸 方 向 ($\Delta k/kk' / \Delta H/H$)	0.1281

表4.1-13 ドップラー係数 (TRU 消滅選定炉心)

$$\left[\text{単位: } T \frac{dk}{dT} \right]$$

領 域	平 衡 末 期
炉 心	-2.866×10^{-3}
内側炉心	-1.809×10^{-3}
外側炉心	-1.057×10^{-3}
軸方向ブランケット	-4.798×10^{-4}
ターゲット集合体	-2.708×10^{-6}
合 計	-3.3485×10^{-3}

表 4.1 - 1 4 各部温度係数 (TRU消滅選定炉心)

単位 ($\times 10^{-5} \Delta k/kk' / ^\circ C$)

領域No	①	②	③	④	⑤	総計	①+②
	内側炉心	外側炉心	下部軸方向 フラケット	上部軸方向 フラケット	ターゲット 集合体	合計	炉心部
燃料	-0.127	-0.119	0.000	-0.001	-0.004	-0.251	-0.246
被ふく管	0.159	0.101	-0.002	-0.003	0.007	0.262	0.260
ラッパ管	0.050	0.032	-0.001	-0.001	0.002	0.082	0.082
炉心支持板	-0.472	-0.476	-0.002	-0.005	-0.030	-0.985	-0.948
冷却材	0.541	0.339	-0.009	-0.010	-0.020	0.881	0.880
ドップラー	-0.125	-0.080	-0.052	-0.013	0.000	-0.270	-0.205
合計	0.026	-0.204	-0.066	-0.032	-0.005	-0.281	-0.177

表4.1-15 動特性パラメータ (TRU 消滅選定炉心)

項 目		
実効遅発中性子割合 β_{eff}		3.28×10^{-3}
$\left. \begin{array}{l} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \\ \beta_6 \end{array} \right\}$	β_1	7.66×10^{-5}
	β_2	6.81×10^{-4}
	β_3	5.86×10^{-4}
	β_4	1.20×10^{-3}
	β_5	5.65×10^{-4}
	β_6	1.63×10^{-4}
遅発中性子崩壊定数 (S^{-1})	λ_1	1.30×10^{-2}
	λ_2	3.12×10^{-2}
	λ_3	1.32×10^{-1}
	λ_4	3.41×10^{-1}
	λ_5	$1.35 \times 10^{+0}$
	λ_6	$3.66 \times 10^{+0}$
即発中性子寿命 (10^{-8}sec) ℓ_p		0.250
逆時間反応度 ($\% \Delta k/k'$) I_h		9.95×10^{-4}

表 4.2 - 1 動特性解析用出力及び流量データ (TRU消滅選定炉心)

領 域	チャンネル	S/A 本数	出力 (MW) (EOEC)	流量(kg/S)
内側炉心 (小計)	Hot	1	8.15	
	Ave	174 (175)	1286.55 (1294.7)	(5955.0)
外側炉心	—	(180)	(1093.4)	(5029.0)
ターゲット	—	(72)	(128.9)	(593.0)
Total			2517	11577.0 *

* 一次系主冷却材流量 12722.0 Kg/sec の 91% に相当

5. 炉心動特性解析（TRU分離装荷代表炉心）

5.1 解析の目的

「TRU消滅処理炉心」の炉心安全上の特徴を調べる目的で、ATWS（異常な過渡変化時の原子炉停止系不作動事象）時の炉心の温度応答を解析した。

5.2 解析条件

(1) 解析対象事象

ATWS事象の代表事象として以下の2種類の事象を評価する。これらの事象の発生は、原子炉停止系をはじめとするシステムにより設計上考慮する必要がない程度に防止されているが、炉心の反応度特性の特徴を調べる目的で解析した。いずれも定格出力での運転状態からATWS発生を仮定する。

ULOF

電源喪失により全ループのポンプがフリーコストダウンし、ポニーモータ流量（定格運転時の15%）で整定する。

UTOP

制御棒誤引抜きにより3¢/秒の反応度が添加される。制御棒誤引抜きによる添加反応度をパラメータとして計算し、「燃料溶融防止」の制限条件より、添加反応度の量にどのような要求が生じるかを整理する。

(2) 対象炉心

対象炉心は初期平衡炉心とする。

反応度係数は、平衡末期のものを用いる。冷却材温度係数が初期に比べて正の大きな値の側に変化する等、やや保守的な条件である。

また、先年度のTRU消滅処理炉心及び典型的な酸化物燃料炉心（これを以下MOX炉心と呼ぶ）についても同一事象の解析を行っているのでそれらと比較して、今年度のTRU炉心の特性を比較してその特徴を把握する。

(3) 判断基準

解析結果を判断するにあたっては、以下の判断基準を目安とする。但し、この条件を満たす炉心を設計するのが目的ではないので、解析結果がこの条件を超えた場合にも計算を継続

し、応答の傾向を調べる。

① 冷却材沸騰防止

ノミナルホットストチャンネルの冷却材温度が沸点以下とする。冷却材の沸点には冷却材圧力依存性があるため、920℃～990℃であると考える。(本検討では解析結果の比較のため、目安として960℃を沸騰開始温度とした)

② 燃料溶融防止

ノミナルホットストチャンネルの燃料温度が融点(2638℃)以下と考える。

5.3 解析モデル

解析コードとしてHARHO-IN-Sを使用した。

(1) 炉心熱流動

炉心部を2つの平均チャンネルとホットチャンネル(ノミナルホットチャンネル:温度が最大となる集合体の中心燃料ピンに対応するチャンネル)の3チャンネル, ターゲット(或いは径ブランケット)のチャンネル及びバイパス流を表わす非発熱チャンネルにより模擬する。解析体系を図5.3-1に示した。

燃料ピンおよび集合体の仕様, 炉心の熱流動特性は前章の表3.1-1及び表4.2-1を参照した。

解析結果が冷却材沸点, 燃料融点を超えた場合にも計算を継続し, 応答の傾向を調べるが, 冷却材, 燃料の物性にはそれぞれ沸騰, 溶融以前のもものを外挿して用いる。

(2) 反応度フィードバック効果

1点炉近似動特性により以下の反応度フィードバック効果を考慮し, 炉心の出力変化及びそれに伴う温度変化等を評価する。

冷却材温度係数

被覆管温度係数

構造材温度係数

ドップラー反応度係数

集合体パッドの膨張による反応度*

制御棒駆動軸の膨張による反応度*

燃料温度係数(燃料が被覆管と独立に膨張収縮すると考えた)

* 考え方と模擬の方法については付録A参照

解析に使用した反応度データ及び動特性パラメータは前章の表4.2-1に示してある。

(3) その他の主要なデータ

○燃料物性値：熱伝導度，比熱，密度，融点は動燃殿に支給いただいた。

○炉心出入口温度は 530/375°C

○主1次冷却系のポンプが停止する際の流量変化特性（コストダウンカーブ）は，半減時間 τ の，下式のカーブで近似する。但し， W/W_0 がポニーモータ流量である15%に達した後は15%で一定とする。 τ として，通常のループ型FBRで典型的な5.5秒をレファレンスとし，事象緩和の対策を行ったケースとして，20秒のケースを評価した。

$$W = W_0 \left[\frac{1}{1 + \frac{t}{\tau}} \right]$$

半減時間が5.5秒と20秒の場合の炉心流量の変化を図5.3-2に示した。

○集合体パッドの膨張による反応度に関連し，以下のデータを使用した。

定常時の集合体パッド間ギャップ：ギャップなし

炉心支持板の温度時定数：500秒

炉心中心高さと同上部パッド高さとの比：0.71

○制御棒駆動軸の膨張による反応度に関連し，以下のデータを使用した。

駆動軸膨張の反応度係数： $-5.6 \times 10^{-4} \text{ } \$/\text{ }^\circ\text{C}$

駆動軸の温度時定数：10秒

尚，駆動軸膨張の反応度係数は，制御棒が炉心上端にパーキングしていると想定して算出したものである。

○その他のデータに関しては，典型的なFBR炉心の知見を用いて設定した。

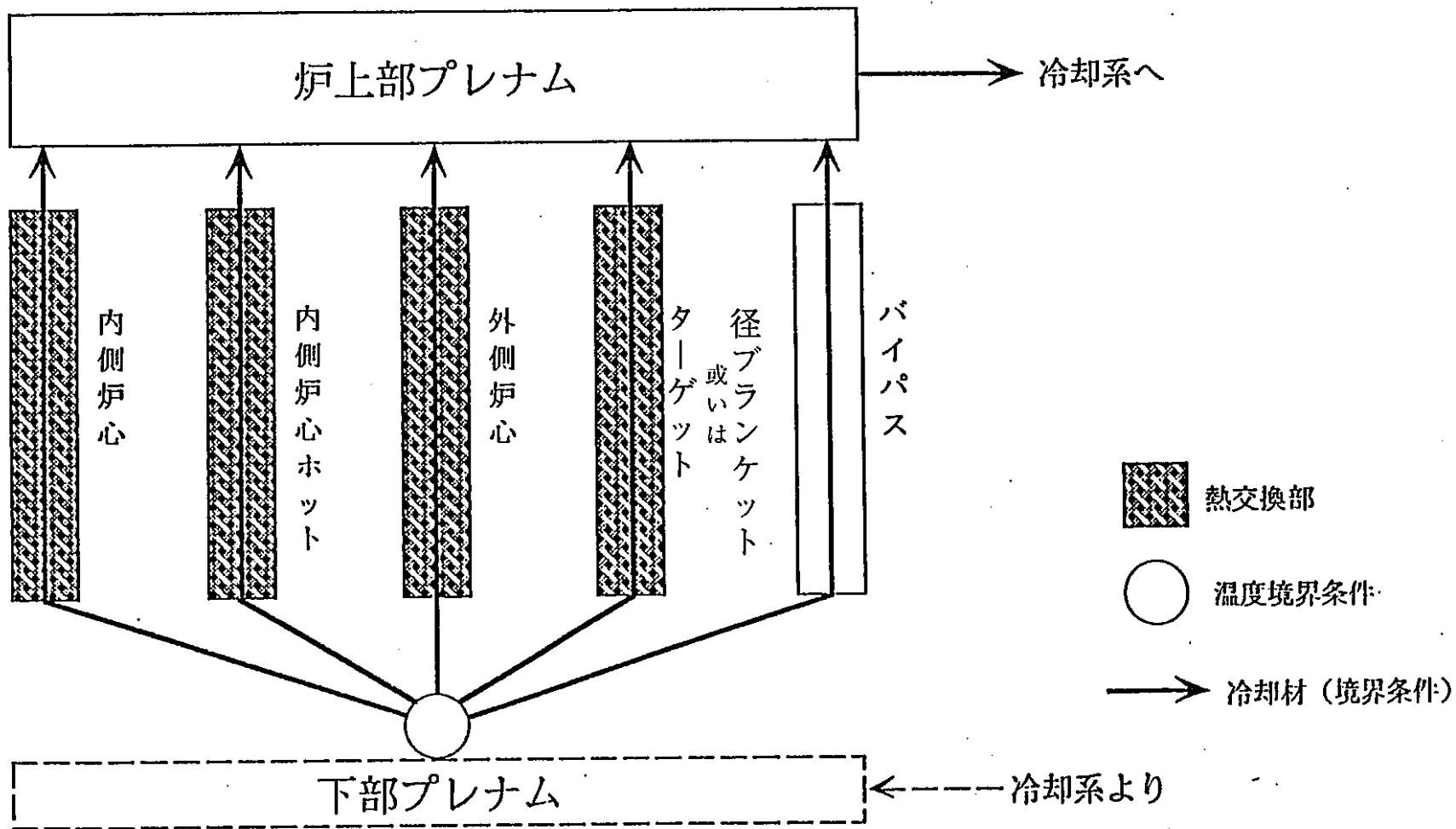


図5.3-1 動特性計算冷却材流路構成

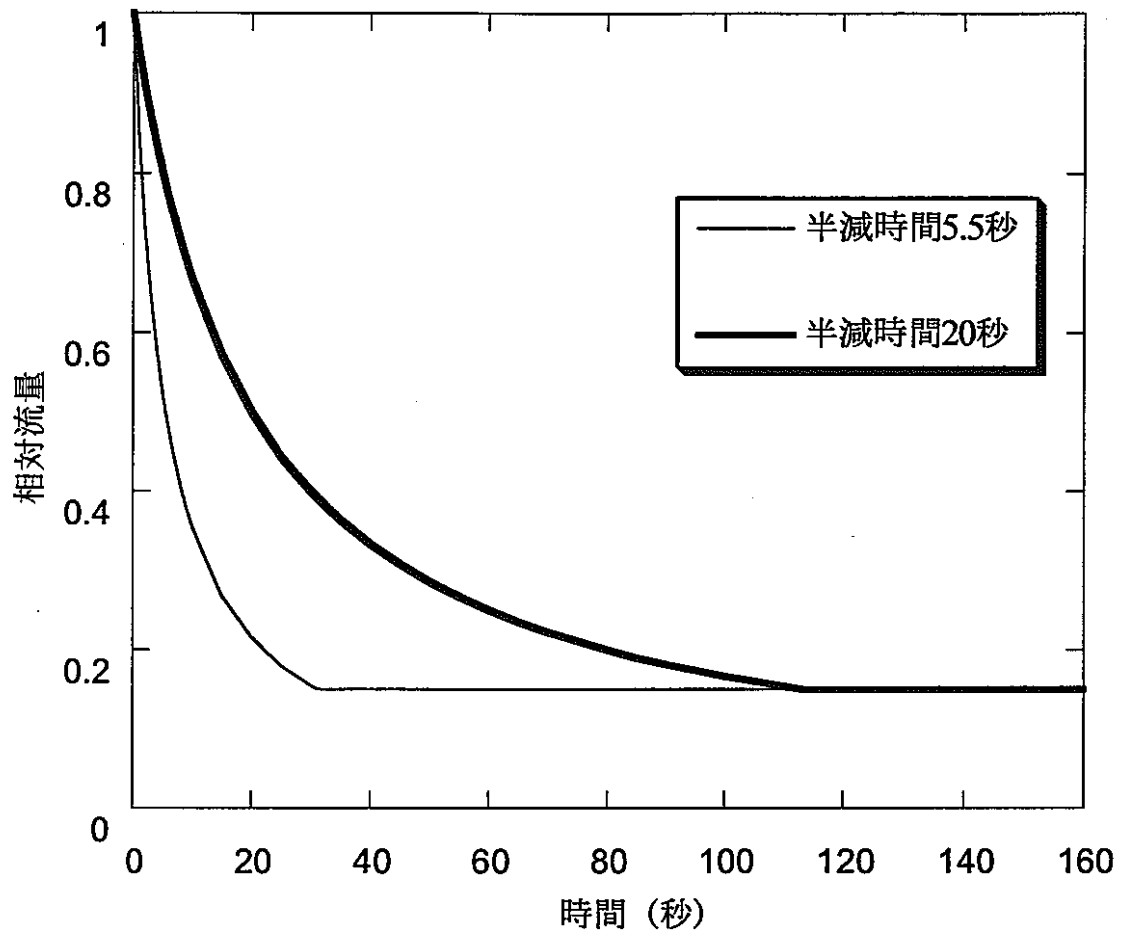


図5.3-2 流量半減時間と炉心流量の関係

5.4 解析結果

5.4.1 考え方

TRUを添加した本炉心の反応度特性を酸化燃料炉心と比較すると、以下のような特徴を有する（負の符号を持つ変量に関しては、絶対値の大小を比較した）。

	今年度	平成5年度	典型的な
	TRU炉心	TRU炉心	MOX炉心
実効遅発中性子割合が小（-）	3.28×10^{-3}	3.23×10^{-3}	3.67×10^{-3}
冷却材温度係数が大（ $\$/\text{°C}$ ）	2.6×10^{-3}	2.7×10^{-3}	2.0×10^{-3}
ドップラー係数が小（ $T\$/\text{°C}$ ）	-1.2	-1.3	-2.0
燃料温度係数が大（ $\$/\text{°C}$ ）	-7.7×10^{-4}	-8.0×10^{-4}	-5.5×10^{-4}
支持板温度係数が大（ $\$/\text{°C}$ ） （ \Rightarrow パッド膨張による反応度）	-3.0×10^{-3}	-3.0×10^{-3}	-2.6×10^{-3}

注）実際の動特性解析では冷却材温度係数，ドップラー係数，燃料温度係数は領域依存の係数を使っているため，上記はあくまでも目安である。

実効遅発中性子割合が小さいことにより「ドル」単位で表わした反応度係数の絶対値が、（ドップラー係数を除いて）正負いずれの場合についても大きな値となること、動特性上重要となる。

これらのうち、冷却材温度係数と、集合体パッドの膨張による反応度（支持板温度係数の値により支配される）の影響が特に大きい。TRU炉心では特に冷却材温度係数が30～35%大きい。一方ドップラ係数が35～40%小さくなる。

冷却材温度係数は炉心の核特性を表わすものとして、炉心の形状、組成が決まれば核計算により比較的精度よく求められる。また実測データもある。

一方、集合体パッドの膨張による反応度は炉心全体の変形挙動に関するものであり、集合体の湾曲挙動や隣接集合体とのギャップの存在等に影響される。従って炉心の形状、組成が決まっても集合体設計、炉心拘束機構等の設計に依存すること、また実測データを取得するのが非常に難しいことが問題となる。

そのため、集合体パッドの膨張による反応度効果を100%考慮した場合と全く考慮しない場合を解析し、酸化燃料炉心の応答と比べることでTRUを約20%添加した本炉心の特徴を調べる。

5.4.2 ULOF 事象

(1)解析ケース

TRUA100: TRU添加炉心, 集合体パッドの膨張 100%考慮

TRUA000: TRU添加炉心, 集合体パッドの膨張考慮せず

TRUA100E: TRU添加炉心, 集合体パッドの膨張 100%考慮, ポンプコストダウン
半減時間20秒

MOX100E: 典型的MOX炉心, 集合体パッドの膨張 100%考慮, ポンプコストダウン
半減時間20秒

尚, MOX100E は昨年度の解析に追加して, パッドの膨張を考慮しポンプコストダウンを延長したケースを実施したものである。なお, 平成5年度のTRU炉心のULOF (TRU100E) の解析結果を, 比較の便宜のため付録Bに示した。

(2)ULOF 事象の解析結果

上記のケースを解析し, 事象の推移のプロットを図5.4-1～図5.4-12に示した。

更に冷却材沸騰開始温度及びピーク温度の結果を纏めて表5.4-1に示した。平成5年度のTRU炉心及びMOX炉心の結果も記載して比較した。

a. 各解析ケースの推移

各解析ケースについて①炉出力, ②ホットチャネル温度, ③反応度の推移を示す。実際には, 反応度, 炉出力, 炉心温度は相互に依存するものであるため, 以下の説明はあくまでも目安である。

(a)TRUA100 のケース

冷却材は沸騰温度を越えた。解析結果を図5.4-1～図5.4-3に示す。

①炉出力及び出力/流量比

出力/流量比は, 冷却材流量が低下してポニーモータに引き継がれる約35秒時点でピークとなり約3.3である。下記の③項で示すように全(正味)反応度が負であるため炉出力は更に低下して約43%に漸近した。

②ホットチャネル温度

冷却材温度は約25秒で沸騰温度(約960℃)を越え, 冷却材及び被覆管のピーク温度は約1005℃となった。その後約900℃に整定する。ULOF事象時には燃料温度は余り重要ではないが, 初期に一旦上昇し, その後下降する。約3秒後にピーク

が約1950℃となった。

③反応度

全（正味）反応度は初期の数秒間正になり、その後負に転じる。冷却材流量が低下してポニーモータに引き継がれる約35秒時点では全（正味）反応度は約-25 %である。ULOF事象では、初期に大きな負の反応度フィードバックが入るのが肝要である。

正の反応度フィードバックでは、冷却材温度反応度が最大で、ついで被覆管及び構造材の温度反応度である。ドップラ反応度は燃料温度が一旦上昇することから、事象の初期には負となるが、燃料温度が低下するに従って正に転じる。

負の反応度で最大の寄与を持つものはパッド膨張反応度である。制御棒軸方向伸びの反応度の寄与はその1/5 程度である。

(b)TRUA000 のケース

冷却材は急速に沸騰温度を越えた。解析結果を図5.4-4～図5.4-6に示す。

①炉出力及び出力／流量比

炉出力及び出力／流量比は急速に増加しており、事象は逸走の傾向を示す。

②ホットチャネル温度

出力が急上昇することから、炉心の温度は急上昇する。冷却材ピーク温度は約10秒で沸騰温度を越える。

③反応度

負の反応度フィードバックが大幅に不足することから、全（正味）反応度は急速に増加する。

(c)TRUA100Eのケース

冷却材は沸騰に至らなかった。解析結果を図5.4-7～図5.4-9に示す。

①炉出力及び出力／流量比

流量半減時間が長くなったことから出力／流量比は改善される。そのピーク値は約2.9 となった。炉出力は約43% に漸近する。

②ホットチャネル温度

流量半減時間が5.5 秒の場合と比べると温度応答は緩和されている。冷却材及び被覆管のピーク温度は約922℃になった。冷却材温度は沸騰温度未満であった。燃料温度は初期に一旦上昇し、その後下降する。ピーク値は約1900℃である。

③反応度

全（正味）反応度は事象の初期に数秒間正になり、その後負に転じる。ポニーモーター引き継ぎ時点近傍では約-10 φ程度である。

正の反応度フィードバックの最大は冷却材温度反応度で、ついで被覆管及び構造材の温度反応度である。冷却材流量が低下してポニーモータに引き継がれる約 120 秒時点ではドップラ反応度は約12φである。

負の反応度で最大の寄与を持つものはパッド膨張反応度である。約120 秒の時点で約 -75φである。制御棒軸方向伸びの反応度の寄与はその1/6 程度であった。

(d)MOX100E のケース

冷却材は沸騰温度を越えた。解析結果を図5.4-10～図5.4-12に示す。

①炉出力及び出力／流量比

出力／流量比のピークは約3.0 となった。炉出力は約 45%に漸近する。

②ホットチャネル温度

燃料ピーク温度は初期に一旦僅かに上昇し、その後下降する。ピークは約2040℃となった。流量半減時間が5.5 秒のケースと比べると温度応答は緩和されている。冷却材及び被覆管のピーク温度は約1020℃になった。

③反応度

全（正味）反応度は一旦僅かに上昇して正になり、その後負に転じる。

TRUA100Eのケースと比べると、冷却材温度反応度及びパッド膨張反応度の寄与は縮小しているが、ドップラ反応度の正の寄与が相対的に大きいことから、正味の反応度が負ではあるが絶対値が小さくなっている。これにより出力の低下が遅れ、温度応答が厳しくなっている。

正の反応度は最大が冷却材密度反応度で、ついで被覆管及び構造材の温度反応度である。負の反応度で最大の寄与を持つものはパッド膨張反応度である。制御棒軸方向伸びの反応度の寄与は1/5 程度である。

b. 設定パラメータの影響

(a)パッド膨張の影響

ポンプコーストダウン半減時間を5.5秒とし、集合体パッドの膨張を100%考慮したケースTRUA100 と、膨張を全く考慮しないケースTRUA000 を比較する。

ケースTRUA100 では約20秒で冷却材沸点を超えるが、冷却材沸騰が生じないと仮定して計算を継続すると、約1100℃をピークとして減少する。反応度の内訳を見ると、集合体パッドの膨張の反応度効果が負の反応度として大きく寄与している。一方、冷却材温度の反応度が正の最大の成分である。

集合体パッドの膨張の反応度を無視したケースTRUA000 の場合には、出力、冷却材温度が急上昇するという結果となった。この推移は平成5年度のTRU炉心と同様である。

しかし、ポンプコストダウン半減時間が5.5秒では集合体パッドの膨張を考慮した場合、しない場合いずれにしても冷却材の沸騰を無視した仮想的な条件での解析であり、実際にはもしこのような状態が生じれば、冷却材の沸騰が生じて出力の上昇が促進され、炉心損傷が生じることが避けられない見通しである。

(b)ポンプコストダウン半減時間の影響

一般にポンプコストダウン半減時間を延長することにより出力／流量比の上昇が緩和される。ポンプコストダウン半減時間を5.5秒としたケースTRUA100の場合には、上記のように約20秒で冷却材沸点を超えた。

これに対し、ポンプコストダウン半減時間を20秒としたケースTRUA100Eでは、出力／流量比の増大が緩やかなために温度上昇が遅れ、冷却材最高温度は約116秒後に922℃と最大となった。この温度は、冷却材沸点として考えられる920℃～990℃の上限よりは低くなっており、ノミナルホットテストチャンネルでの冷却材沸騰防止の可能性が示唆される。

今年度のTRU炉心では、昨年のものに比べ冷却材温度の反応度が約5%小さく、ドップラー係数も約5%小さくなっていることから、冷却材ピーク温度の応答が緩和されている。また、酸化物炉心と比べると冷却材温度係数が約30%大きい、ドップラ係数が約40%小さく、且つ集合体パッドの膨張の反応度の絶対値も大きいことにより、冷却材ピーク温度の応答が緩和されている。

5.4.3 UTOP事象

(1)解析ケース

ULOFと同じく、集合体パッドの膨張を100%考慮したケースと考慮しないケースを、解析した、これらをTRUA100, TRUA00と表す。添加反応度量（制御棒誤引抜きにより添加さ

れる反応度の量に対応する)をパラメータとして60¢の場合と120 ¢の場合を解析した。結果のプロットは60 ¢の場合だけを記載した。

また前年度解析したTRU消滅処理炉心と典型的なMOX炉心の結果とも比較した。これらはTRU100, TRU000, MOX100, MOX000 と表す。

(2)UTOP事象の解析結果

解析結果を、添加反応度と燃料最高温度の関係として図5.4-13に整理して示した。

また添加反応度60 ¢のケースにつき、TRUA100, TRUA000 の2つの炉心状態の出力、最高温度、反応度の履歴を図5.4-14から図5.4-19に示す。

UTOP事象では出力は、3 ¢/秒で添加される反応度が60 ¢となる20秒まで増加し、ドップラ、燃料温度等の負の反応度フィードバックの時間遅れ分によりオーバーシュートが生じる。その後も全反応度が正であるためわずかに出力の増加が続いているが、計算終了の時点で温度上昇はほとんど停止している(炉上部冷却材プレナムの温度は上昇している)。平成5年度の結果のいずれのケースも傾向は同じである。

a. 各解析ケースの推移

各解析ケースについて①炉出力、②ホットチャネル温度、③反応度の推移を示す。

(a)TRUA100 のケース

解析結果を図5.4-14～図5.4-16に示す。

①ホットチャネル温度

反応度投入により炉出力が上昇することから、燃料温度は急上昇し、約20秒後には約2600℃となり、約100秒後には約2650℃に上昇する。

②炉出力

炉出力は反応度投入に従って上昇し、約20秒後にはピーク値約160%に到達する。炉出力は反応度投入が終了するまで増加し、ドップラ、燃料温度及びパッド膨張等の負の反応度フィードバック等の時間遅れ分によりオーバーシュートが生じる。その後も全(正味の)反応度が正であるため僅かに出力の増加が続いている。

③反応度

事象の初期には全反応度は略投入反応度に追従して増加するが、次第に反応度フィードバックが効くようになり、全反応度の増加は抑制される。負の反応度フィードバックでは燃料膨張、ドップラ、パッド膨張の反応度の寄与が大きい。反応度投入の終了直後では燃料温度反応度が約27 ¢、ドップラが約23 ¢、パッド膨張が約20

φである。

全(正味)反応度は、反応度投入の終了直後に約12φで、ドップラ、燃料温度及びパッド膨張等の時間遅れ分の投入後では約5φになり、温度がバランスするのに従って次第に零に漸近する。

(b)TRUA000 のケース

解析結果を図5.4-17～図5.4-19に示す。

①ホットチャネル温度

反応度投入により燃料温度は急上昇し、約20秒後では約2900℃となり燃料の融点を越える。燃料温度は約100秒後には約3000℃に上昇する。被覆管温度は約730℃になった。

②炉出力

炉出力は反応度投入に従い上昇し、そのピーク値は約20秒後に約190%になった。

③反応度

負の反応度フィードバックが不足することから温度が上昇し、反応度フィードバックはそれぞれ絶対値が大きく拡大されて入る。全(正味)反応度のピーク値は約15φである。TRUA100のケースに比べ全(正味)反応度のバランスする位置はより正側に大きくなった。

b. 設定パラメータの影響

ケースTRUA100ではパッド膨張反応度を100%考慮し、ケースTRUA000ではパッド膨張反応度を全く考慮していない。パッド膨張を考慮しないと約-20φの反応度フィードバックを失うことになる。燃料のピーク温度が約300℃の上昇し、炉出力は約30%増加するような影響がある。

c. 投入反応度のUTOP事象へ影響の整理

(a)同一反応度の添加の場合

上記の解析結果より、TRU消滅処理炉心は、同一反応度投入に対して燃料最高温度が高く、かつ燃料の融点が低いため、UTOP時の燃料溶解マージンに関して不利な方向にある。この傾向は図5.4-21に顕著に現れている。

(b)制御棒誤引抜き反応度の場合

UTOPで考慮すべき添加反応度の量として制御棒1本の通常運転からの完全引き

抜きによる反応度が通常選ばれる。これを下記のように推定する

制御棒一本の誤引抜き反応度＝

燃焼反応度/ 主炉停止系制御棒×2 (干渉効果を考慮して2倍する)

今年度のTRU炉心では、一本誤引抜き反応度約 15 φ (燃焼反応度0.8%Δk/kk, 主炉停止系制御棒18本) となる。

MOX炉心では、一本誤引抜き反応度約 75 φ (燃焼反応度3.3%Δk/kk, 主炉停止系制御棒24本) となる。

図5.4-13にそれぞれの炉心の制御棒一本誤引抜き反応度を記載して、誤引抜きによる燃料最高温度を予測して燃料溶融温度と比較する。図からTRU炉心は、燃料の溶融に対し酸化物以上の余裕をもっていることが判る。

5.4.4 まとめ

ULOF, UTOPの過渡温度変化を解析し、昨年度のTRU炉心及び典型的なMOX炉心と比べることで、TRU消滅処理炉心の特性を調べた。今回解析した20%のTRUを分離装荷した炉心では下記の事が判った。

・ULOF事象

TRU炉心はMOX炉心と比較して、冷却材温度反応度は大きくなるが、ドップラ係数が小さいことからドップラ反応度による正の反応度投入量が小さくなり、MOX炉心に比べ特に不利にならない可能性がある。

今年度のTRU炉心では、1次主冷却系ポンプコストダウン半減時間を合理的範囲と考えられる20秒まで延長して、集合体パッド膨張の反応度フィードバックに期待することで冷却材沸騰を防止できる可能性が示された。

昨年度のTRUを分離装荷しない炉心では、冷却材沸騰を防止するのは厳しい。MOX炉心ではさらに厳しい。

・UTOP事象

TRU炉心では、燃料の溶融温度は低下するが、燃焼反応度が低下する事から、想定される制御棒誤引抜き時の投入反応度が十分小さく、MOX炉心と比較して燃料溶融に対し余裕が出来ると考えられる。

図5.4-1 TRU炉心のULOF事象の結果

炉心	記号	径方向膨張 反応度 (%)	ポンプ 流量半減時 (秒)	制御棒 膨張反応度	冷却材沸騰 開始時間* (秒)	冷却材 ピーク温度 (°C)	冷却材ピーク 温度時刻 (秒)	備考
平成5年度	TRU100	100	5.5	-5.60E-02	20	1056	35	逸走
	TRU000	0	5.5	同上	10	NA	NA	
	TRU100E	100	20.0	同上	98	989	118	
(追加)	MOX100	100	5.5	同上	20	1068	35	
	MOX000	0	5.5	同上	12	1689	42	
	MOX100E	100	20.0	同上	88	1013	118	
平成6年度	TRUA100	100	5.5	-5.60E-02	25	1005	34	逸走
	TRUA000	0	5.5	同上	10	NA	NA	
	TRUA100E	100	20.0	同上	-	922	116	

* : 960°Cに到達した時間とした

NA : Not Assessed

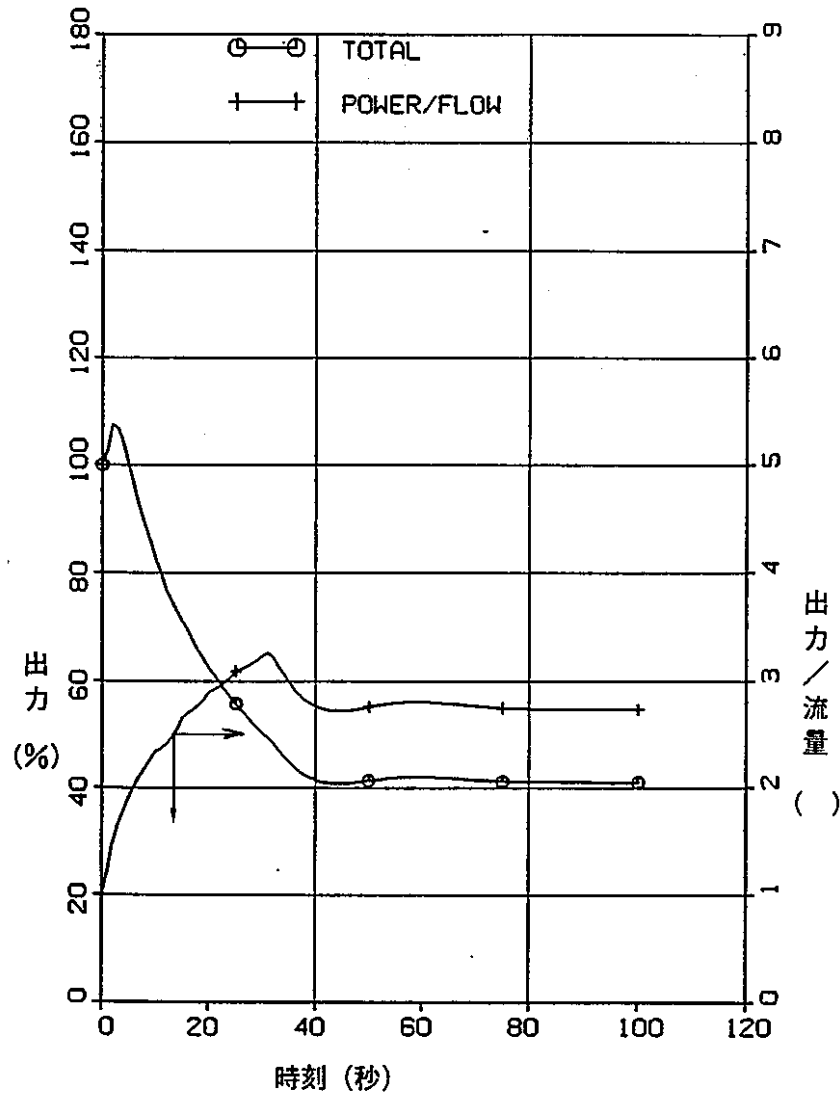


図5.4-1 ケースTRUA100 ULOF解析結果 (炉出力・P/F)

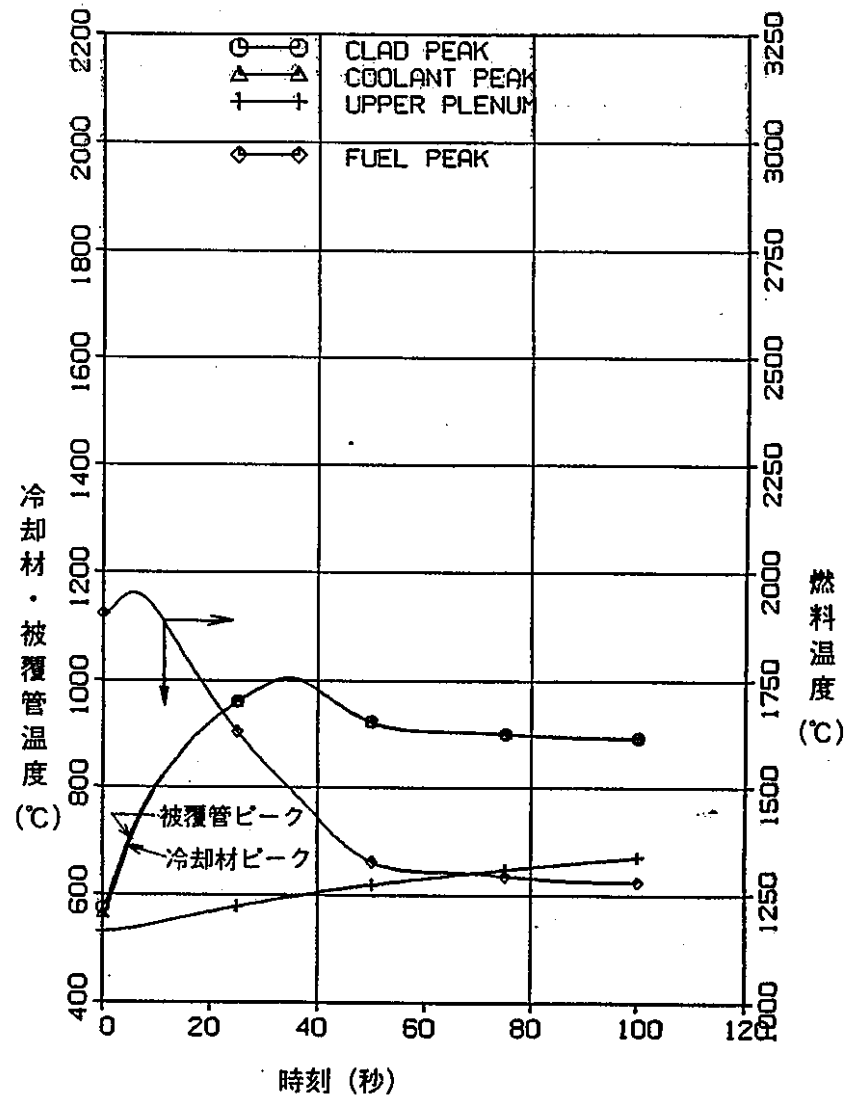


図5.4-2 ケースTRUA100 ULOF解析結果 (ホットチャンネル温度)

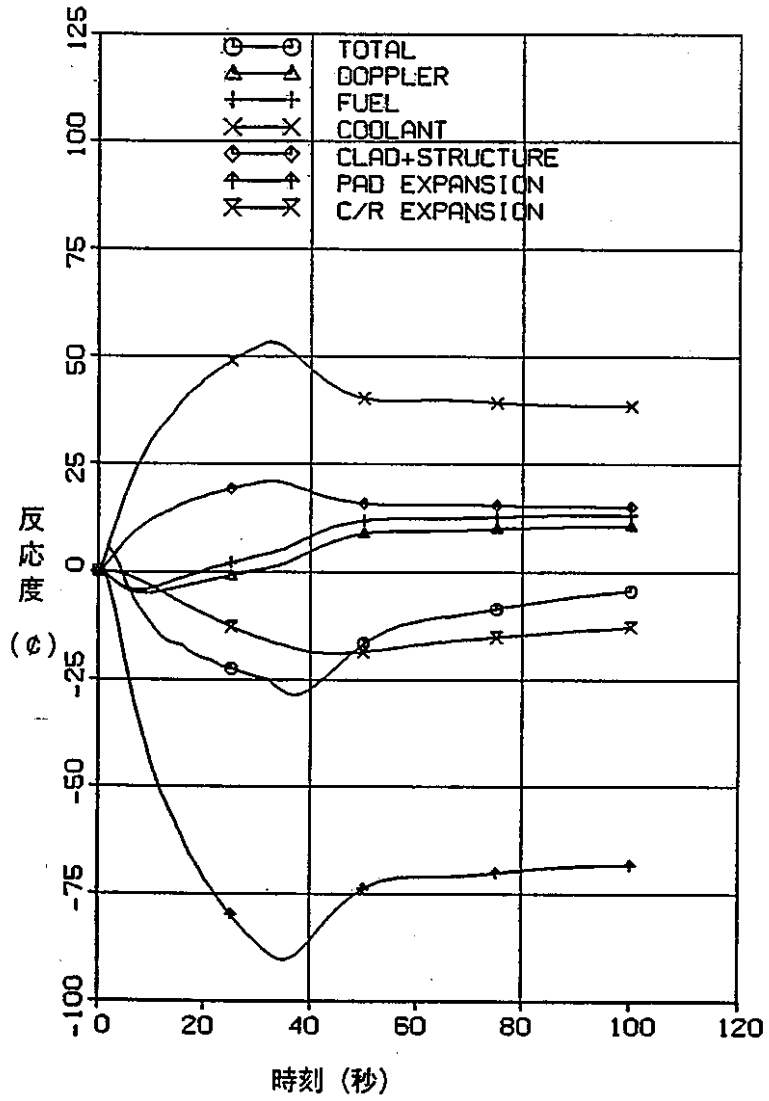


図5.4-3 ケースTRUA100 ULOF解析結果
(反応度)

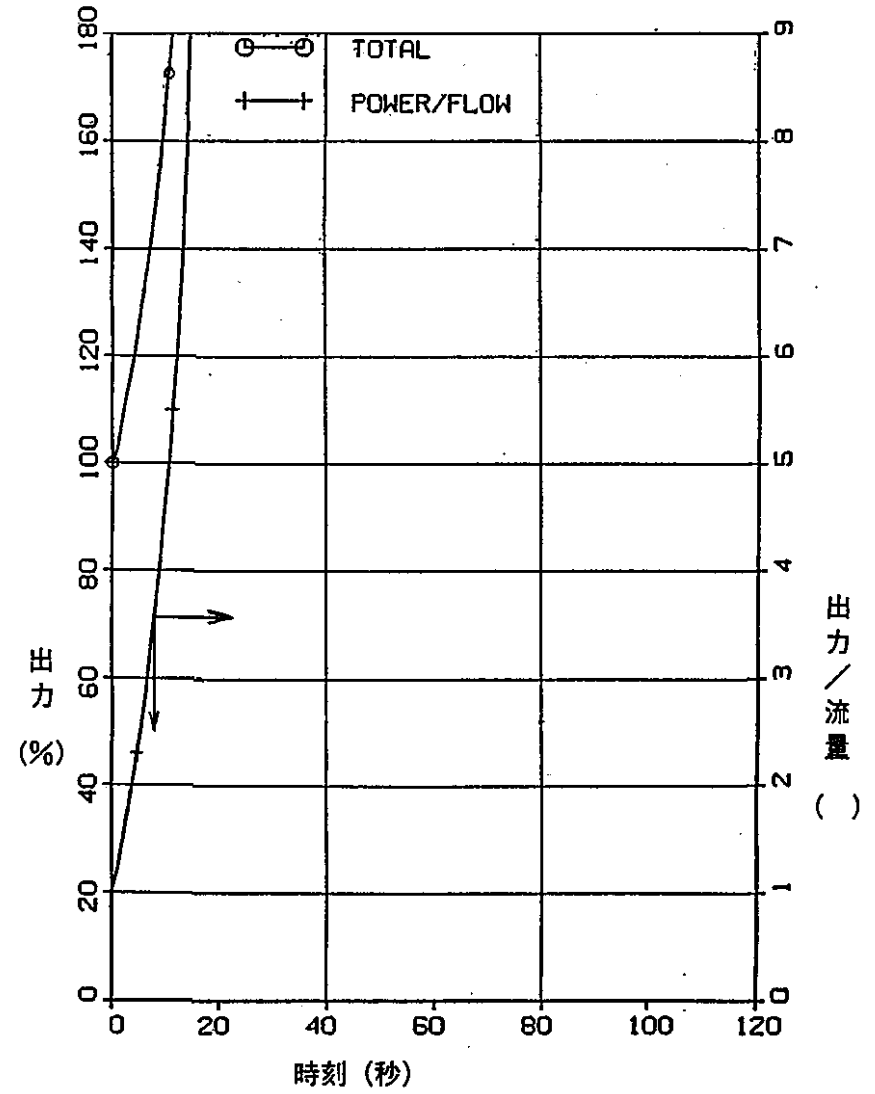


図5.4-4 ケースTRUA000 ULOF解析結果
(炉出力・P/F)

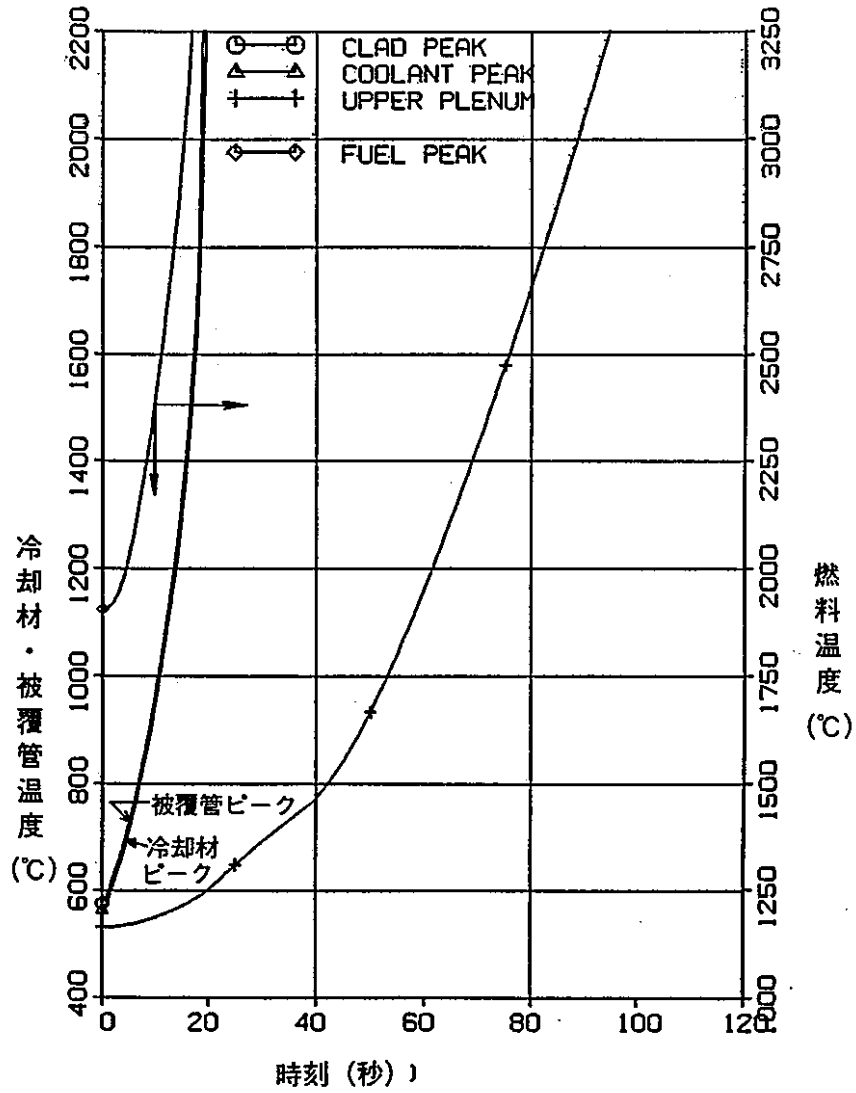


図5.4-5 ケースTRUA000 ULOF解析結果 (ホットチャンネル温度)

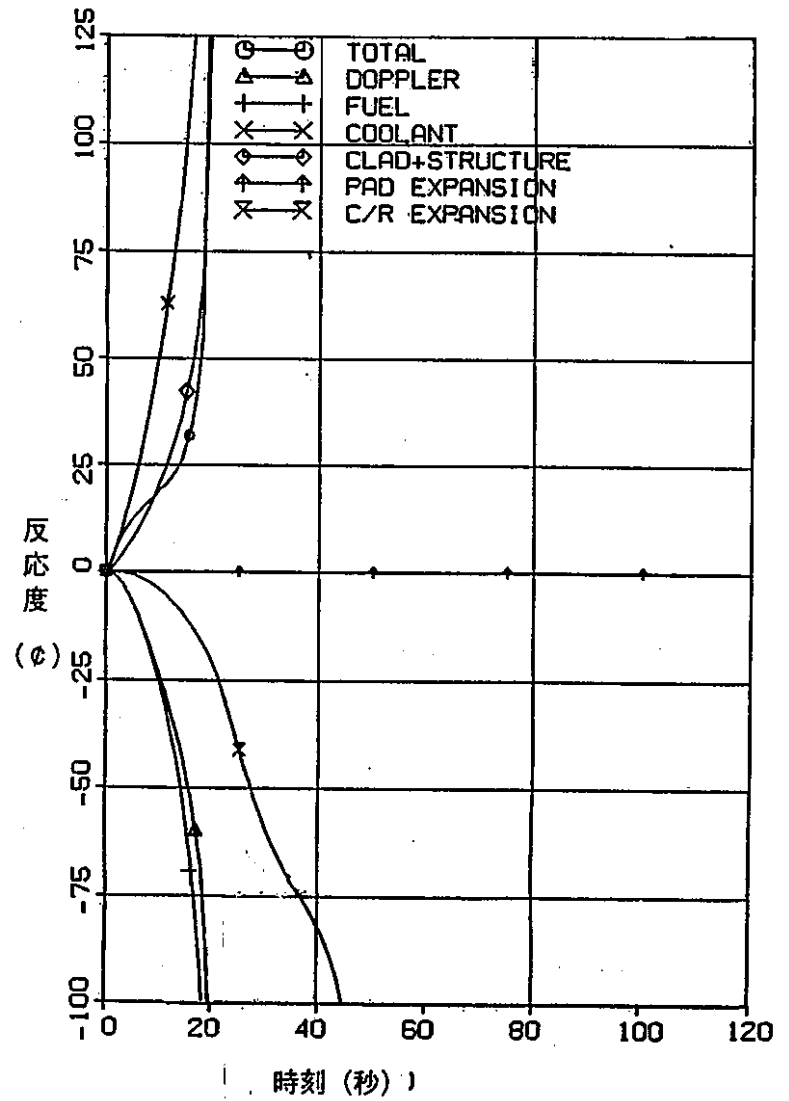


図5.4-6 ケースTRUA000 ULOF解析結果 (反応度)

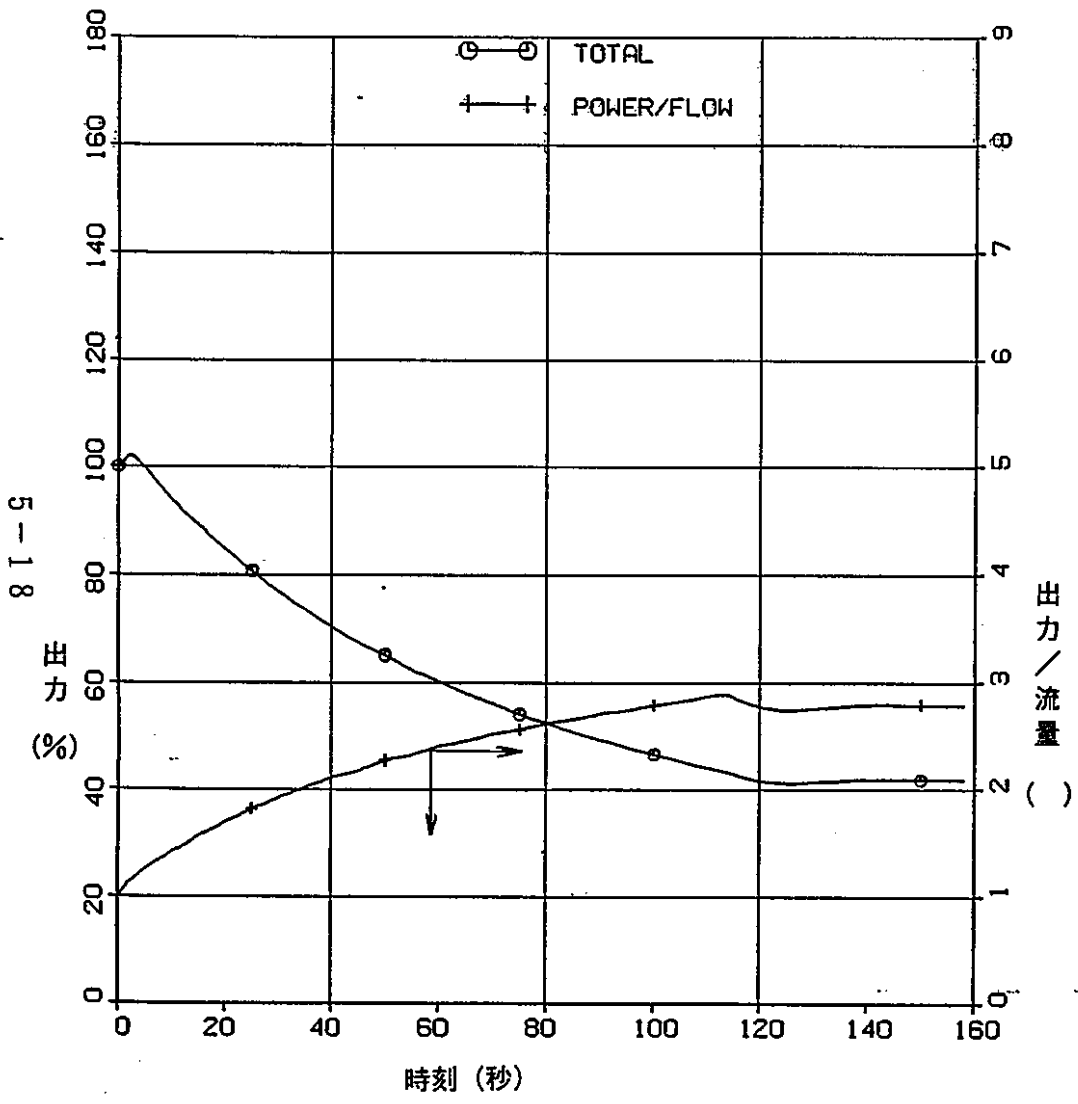


図5.4-7 ケースTRUA100E ULOF解析結果 (炉出力・P/F)

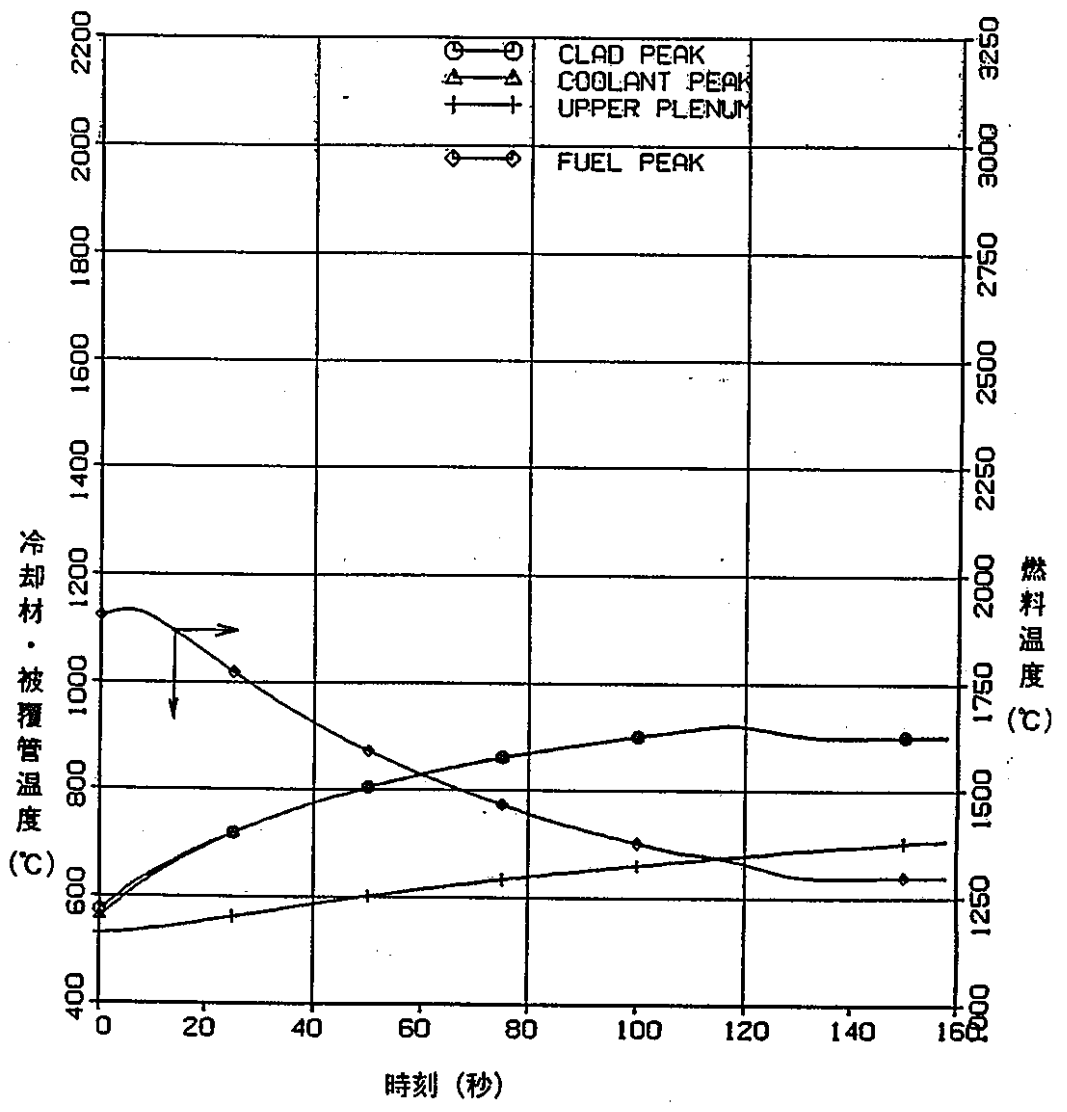


図5.4-8 ケースTRUA100E ULOF解析結果 (ホットチャンネル温度)

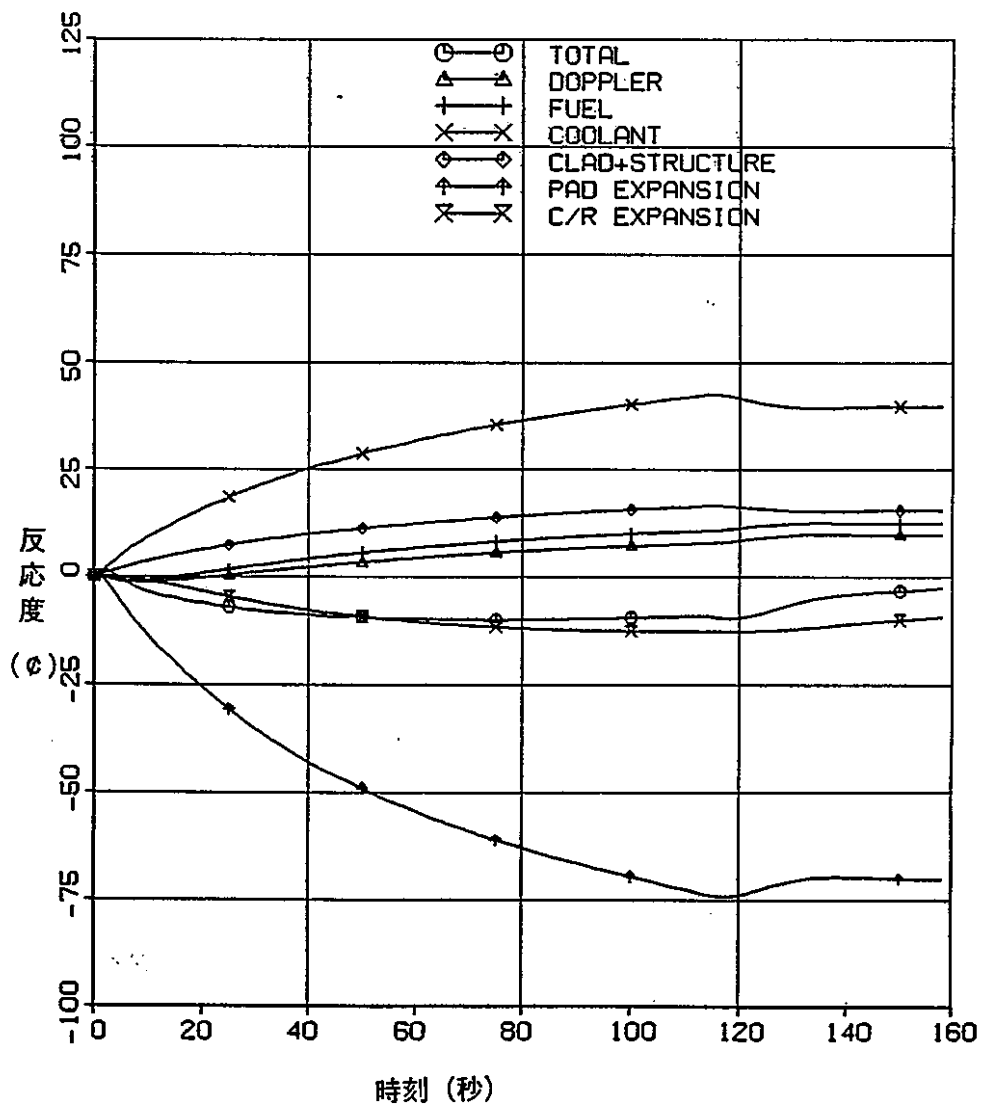


図5.4-9 ケースTRUA100B ULOF解析結果 (反応度)

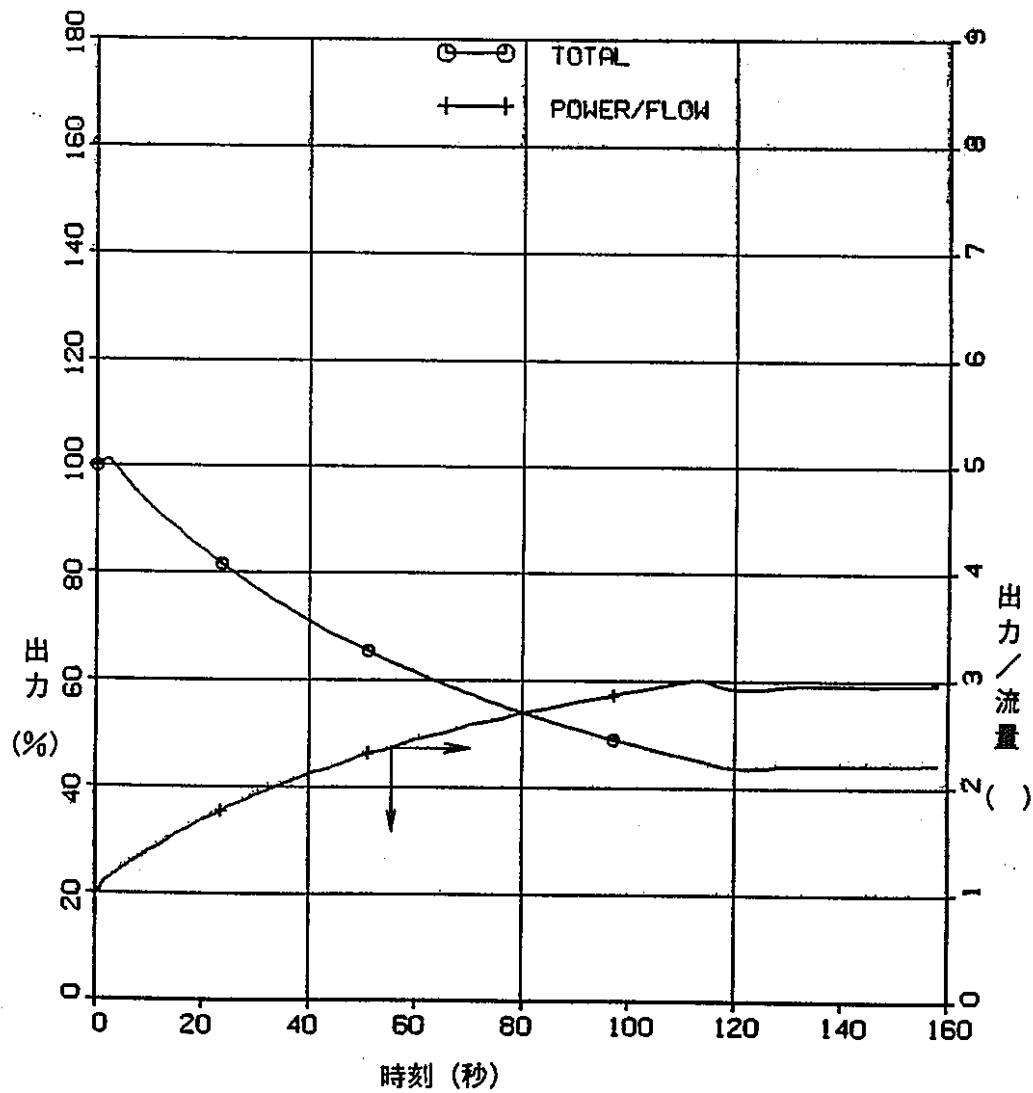


図5.4-10 ケースMOX100B ULOF解析結果 (炉出力・P/F)

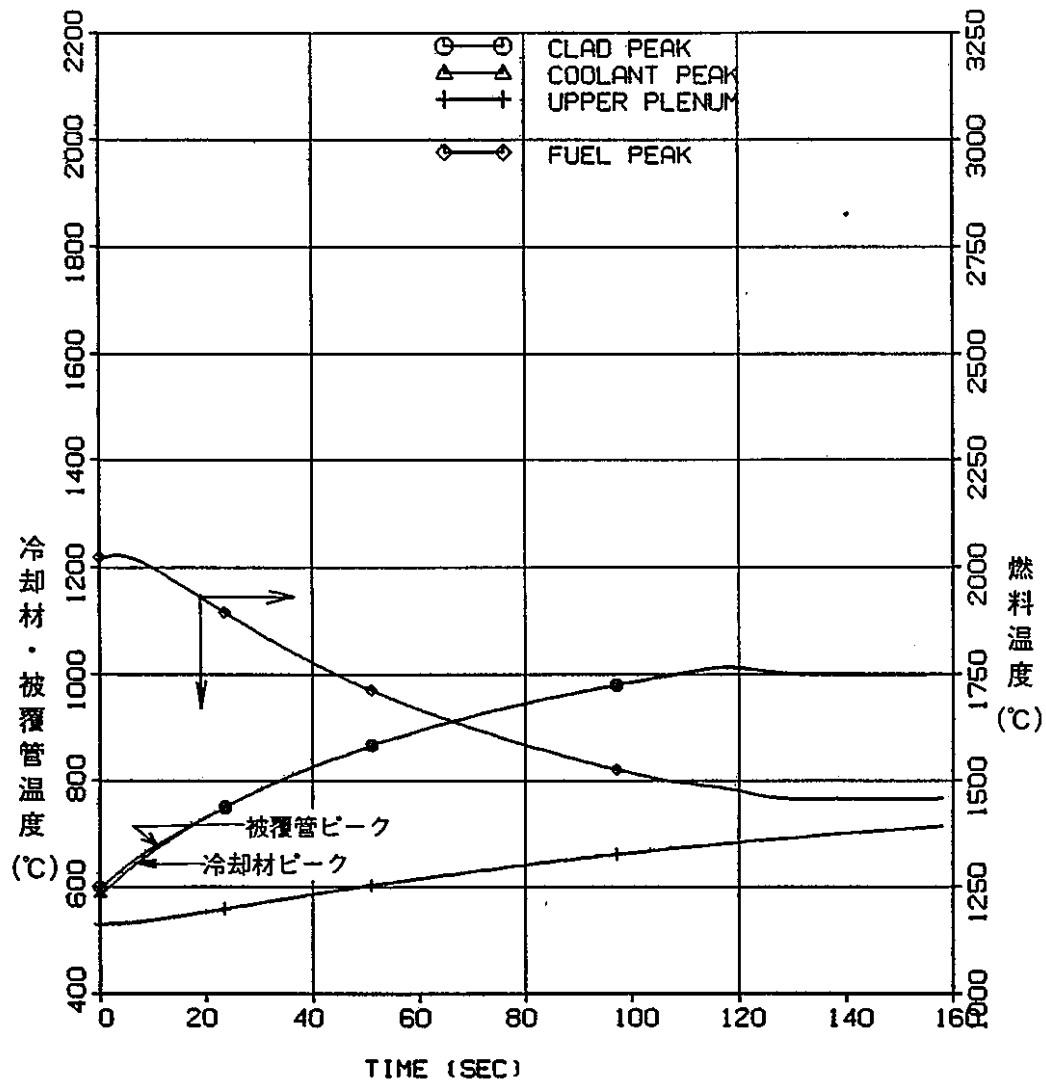


図5.4-11 ケースMOX100E ULOF解析結果
(ホットチャンネル温度)

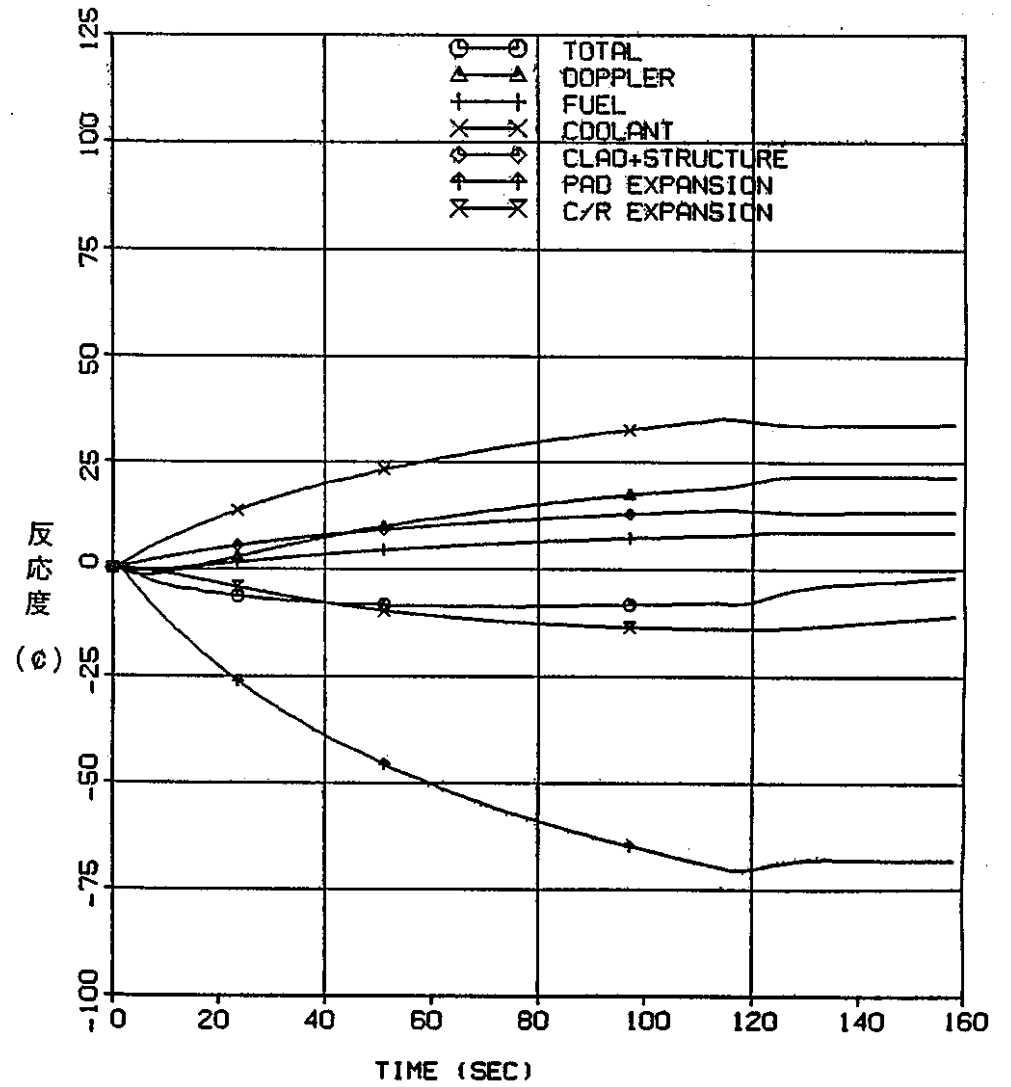


図5.4-12 ケースMOX100E ULOF解析結果
(反応度)

TRU のUTOP 図 Chart 4

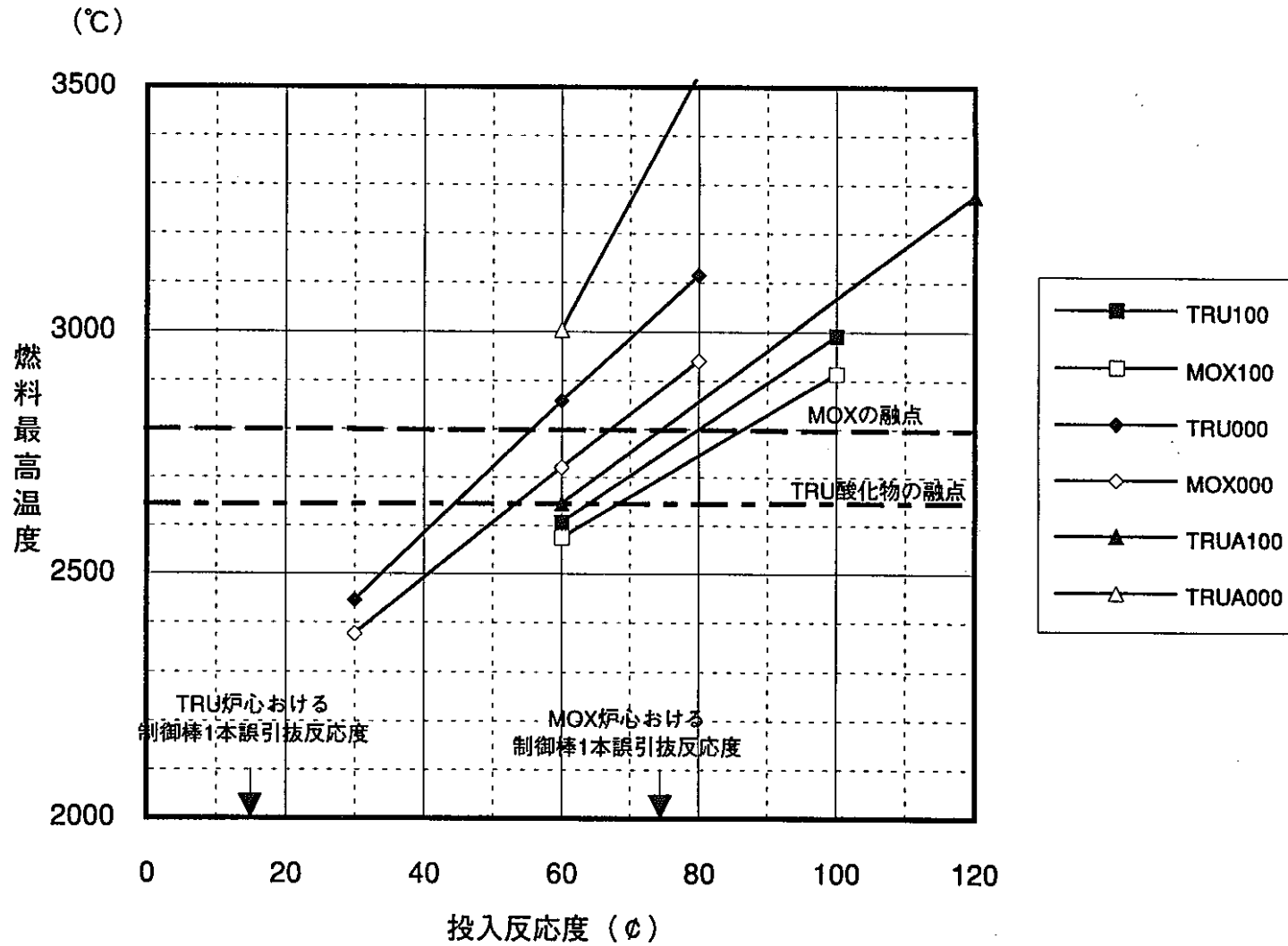


図5.4-13 UTOP時の投入反応度と燃料最高温度の関係

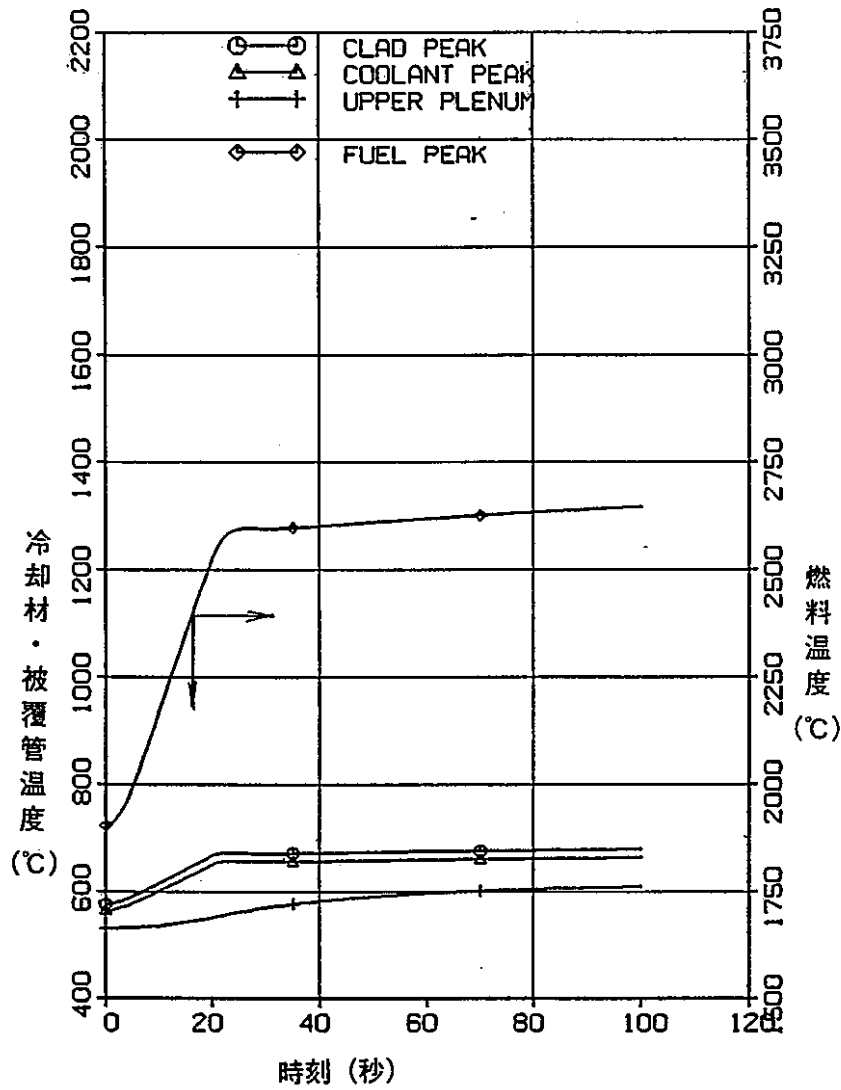


図5.4-14 ケースTRUA100 UTOP(60φ) 解析結果 (ホットチャンネル温度)

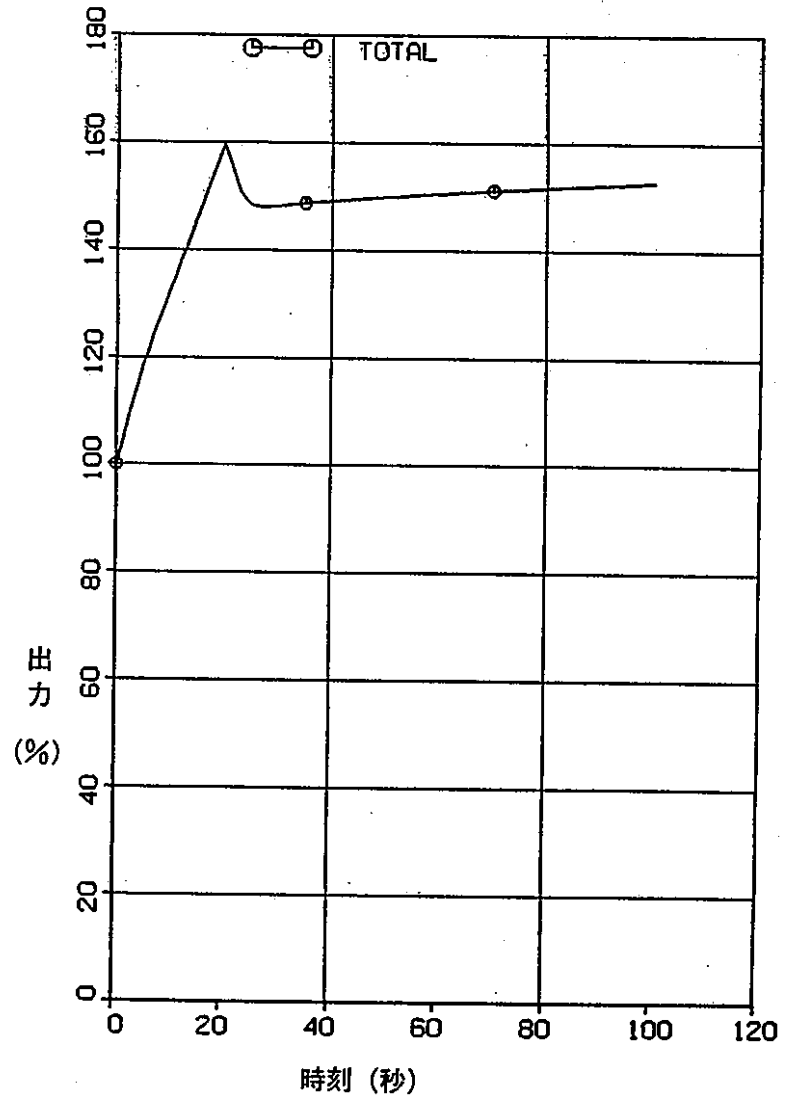


図5.4-15 ケースTRUA100 UTOP(60φ) 解析結果 (炉出力)

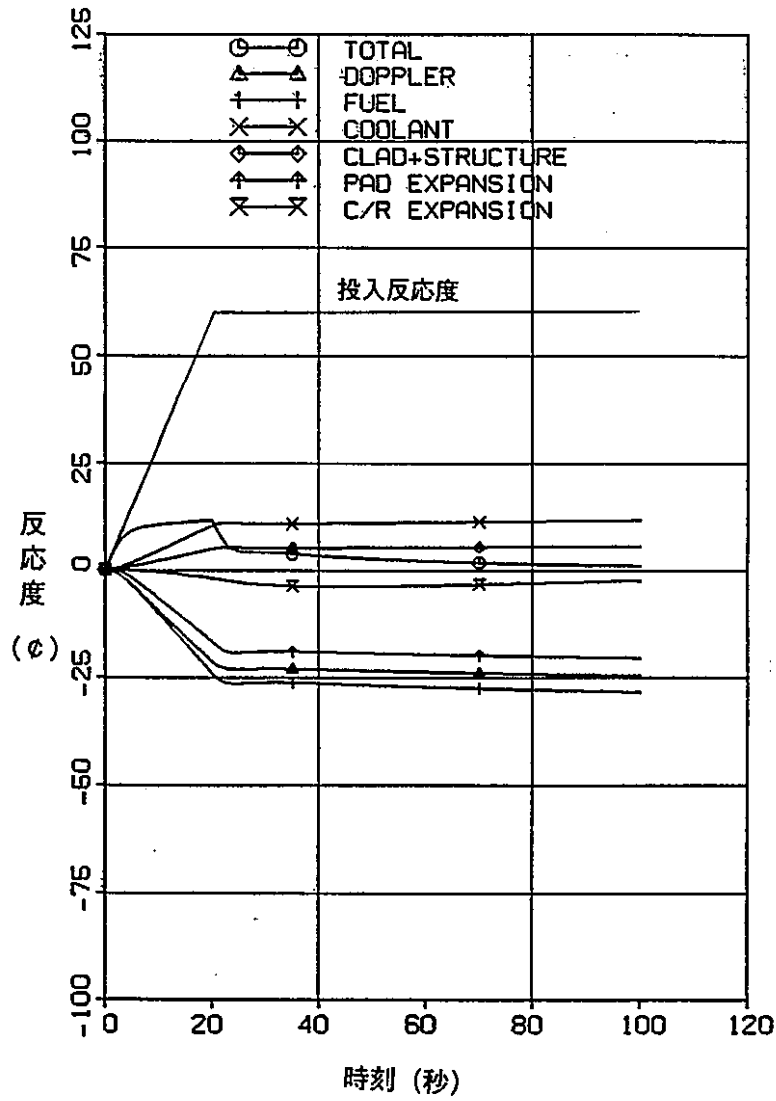


図5.4-16 ケースTRUA100 UTOP(60φ) 解析結果 (反応度)

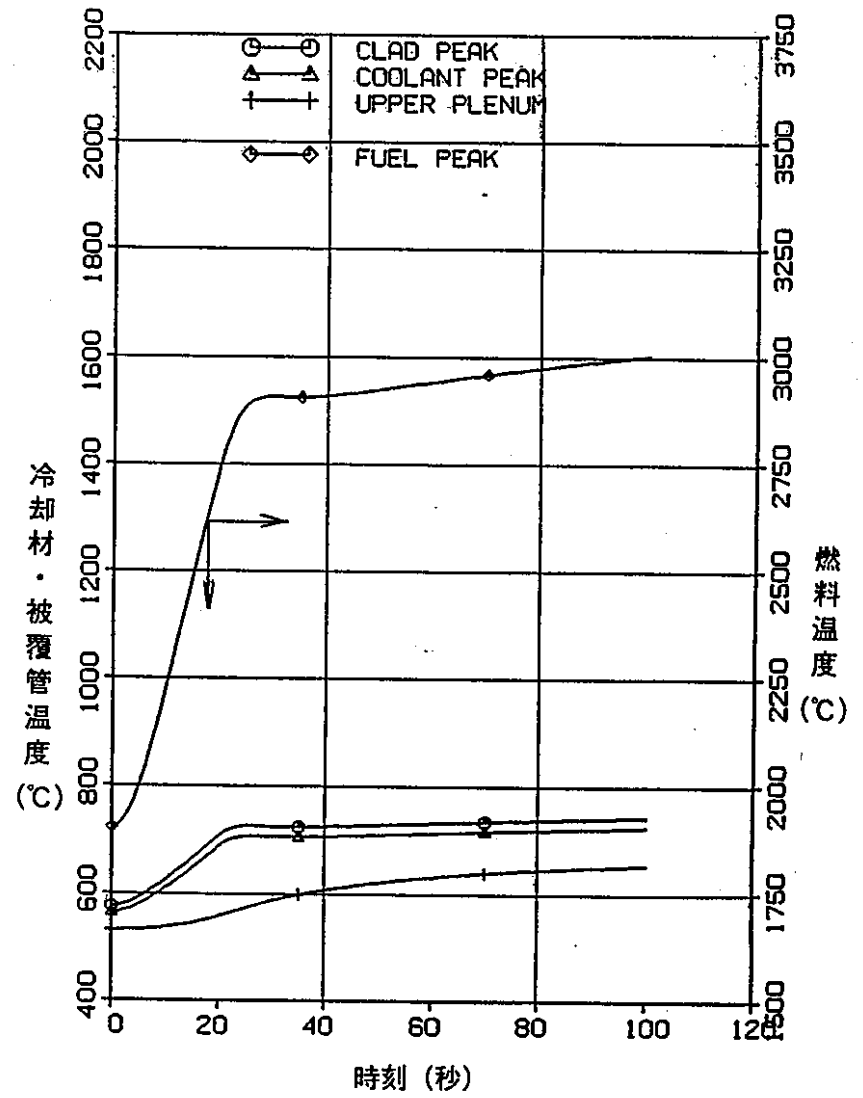


図5.4-17 ケースTRUA000 UTOP(60φ) 解析結果 (ホットチャネル温度)

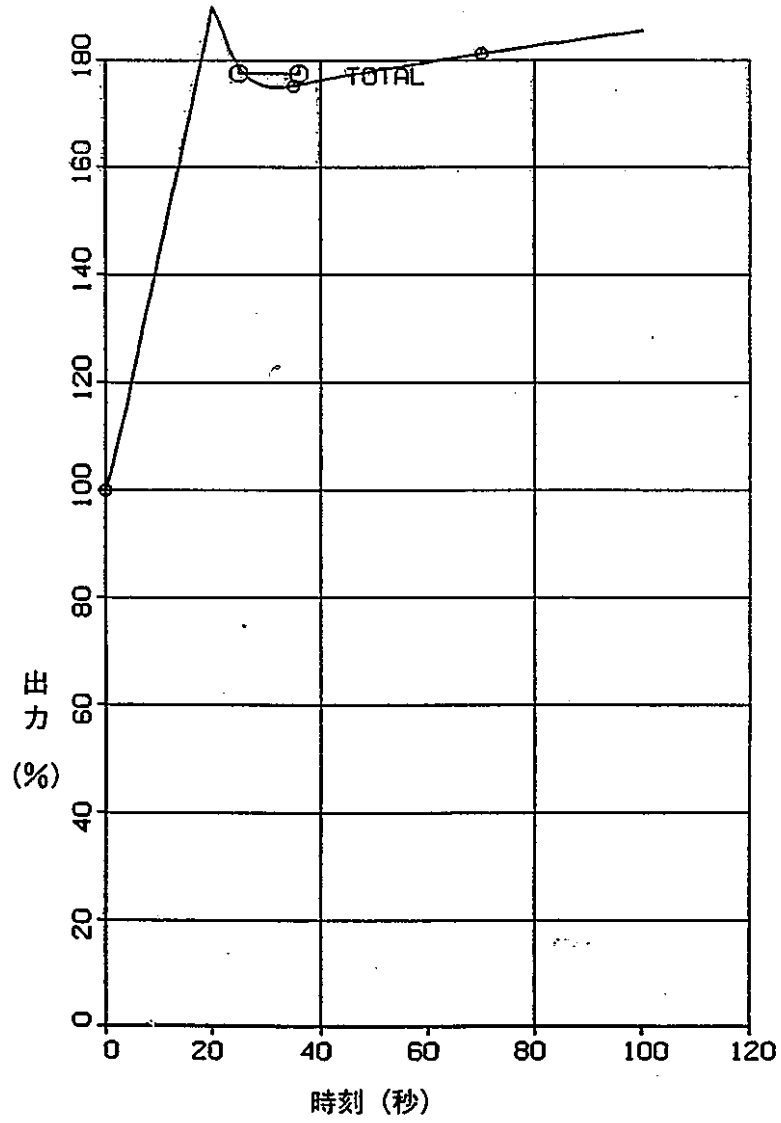


図5.4-18 ケースTRUA000 UTOP(60¢) 解析結果(炉出力)

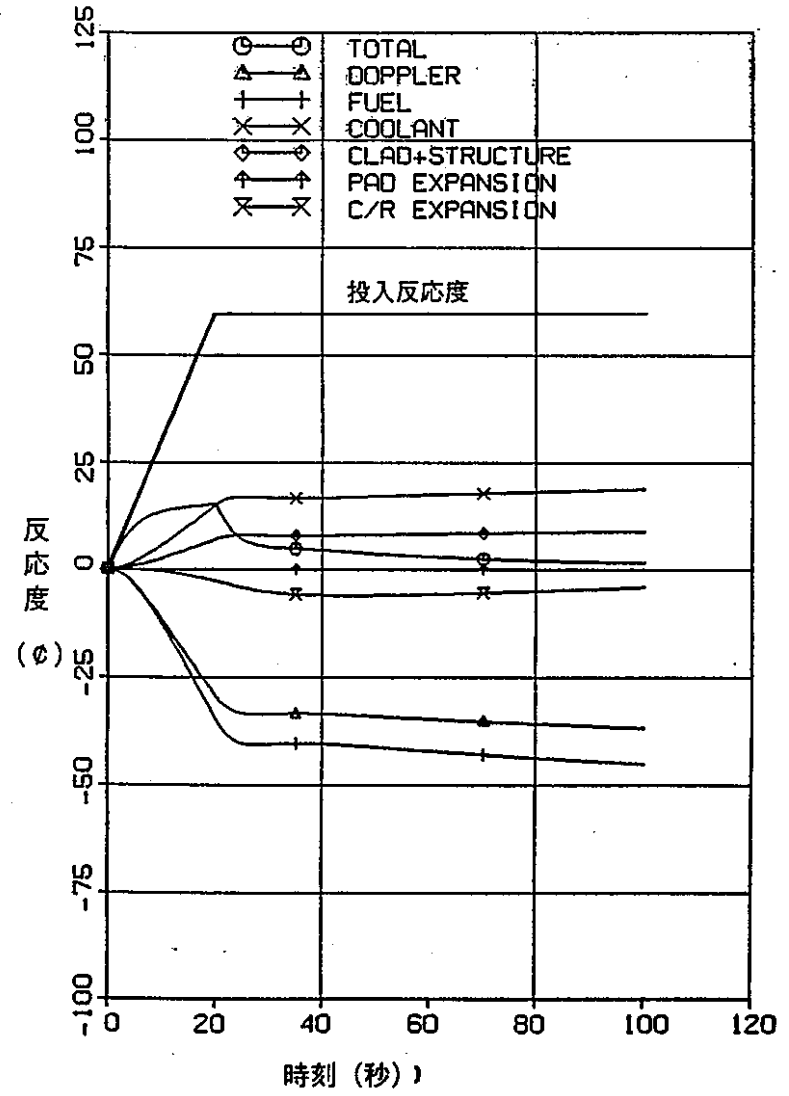


図5.4-19 ケースTRUA000 UTOP(60¢) 解析結果 (反応度)

6. TRUリサイクルの炉心特性への影響解析 (TRU分離装荷代表炉心)

核燃料リサイクルによるTRU組成の変化がTRU分離装荷代表炉心のTRU消滅量および炉心特性に与える影響を解析した。

具体的には軽水炉から取り出されたTRUを20%装荷した(Np, Am+Cm)分離型TRU消滅選定炉心(3章で選定)で、その後FBRでリサイクルする場合について、炉心パラメータサーベイを行いTRUリサイクルの影響をまとめた。また、Puもリサイクルを行うこととする。

図6-1にFBRにおけるTRUリサイクルの概念を示す。

1) 検討条件

対象炉心 1000MWe クラスFBR (15年目炉心, 30年目炉心)

TRU消滅選定炉心: 図3.3.1-1

燃料形態 MOX

PuおよびTRU組成 FBRリサイクルの結果を使用する。

TRU形態

TRU装荷方法

ターゲット母材

RE混入率

} TRU消滅選定炉心(初期炉心)と同一とする。

2) 評価手順

評価手順を簡単に示すと、先ず第一ステップで、一点近似燃焼計算コード「ORIGEN-2」を用いてTRU(Puも含む)のリサイクルを5回行った場合(リサイクル開始後の通算日数: 約30年間に相当)の計算を行い、リサイクルTRUの組成の変化、およびTRU発熱量及び中性子発生量を評価する。

次に、リサイクルの結果得られたTRUおよびPuの組成比を用いて、2次元RZ体系での炉心特性解析を行い消滅特性等の評価を行う。また特性解析を行う時期は初期、15年目、30年目の3ケースとし主要炉心特性の他、反応度係数(Naボイド反応度、ドップラー係数)、制御棒価値等の評価を行う。

6.1 TRUリサイクルの影響解析

一点近似燃焼計算コード「ORIGEN-2」を用いてTRU（Puも含む）のリサイクルを5回行った場合（リサイクル開始後の通算日数：約30年間に相当）の計算を行い、リサイクルTRUの組成の変化 およびTRU発熱量及び中性子発生量を評価し、TRUリサイクルの影響を検討する。

6.1.1 解析条件

「ORIGEN-2」での計算条件を以下に示す。

(1) 計算ケース

リサイクルTRUとして下記に示す炉心燃料（Np）と、ターゲット燃料（Am+Cm）の2種類について、5リサイクルSTEPの解析を行う。

ケース	炉心部	ターゲット部
リサイクルTRU	(Np)	(Am+Cm)

(2) 評価項目

- ① TRU組成の変化
- ② TRU発熱量及び中性子発生量

(3) 燃料組成

炉心燃料（Np）は炉心燃料とNpの総重量が1kgとなるように調整する。
またターゲット燃料は総重量170g(5/3 バッチ分)となるように調整する。

① 第1回目装荷TRU燃料組成

LWR取出TRU燃料を用いる。

TRUの組成比は「FBR 大型炉心によるTRU消滅率等の計算」（H元年3月、MAP I）で使用したものとする。

これは、表6.1.1-1に示した様にLWRの標準的なドライバー燃料を3年燃焼させ、その後5年間冷却した場合のTRU組成である。

これをFBR燃料に20%混入して用いる。内訳はNpは9.8%、(Am+Cm)は10.2%である。表1-1にこの場合のTRU組成を示す。

② FBRリサイクルに於けるTRU燃料組成

(a) ターゲット燃料(Am+Cm)の組成比及び装荷量

ターゲット燃料から取り出されたTRU(Am+Cm)と炉心燃料(Np)から取り出されたTRU(Am+Cm)の合計の組成比とする。

具体的には、ターゲット燃料(Am+Cm)を75ヵ月間(15ヵ月×5バッチ分)燃焼後、5年間冷却したTRU(Am+Cm)と、炉心燃料(Np)を45ヵ月間(15ヵ月×3バッチ分)燃焼後取り出されたTRU(Am+Cm)を5年間冷却したものに5サイクル分の補正を行ったものの合計のTRU(Am+Cm)組成比を使用する。

ターゲット燃料の装荷総量は各リサイクルステップで170gとなるように調整する。

(b) 炉心燃料(Np)のNp装荷量

- ・炉心燃料(Np)を45ヵ月間(15ヵ月×3バッチ分)燃焼後5年間冷却したTRU(Np)重量に5サイクル分の補正を行ったものと、
- ・ターゲット燃料に装荷するTRU(Am+Cm)の取出重量(ターゲット燃料から取り出されたTRU(Am+Cm)と炉心燃料(Np)から取り出されたTRU(Am+Cm)の合計)との比を用いる。

但し、ターゲット燃料の装荷総量は各リサイクルステップで170gとなるように調整したものである。

③ Pu燃料組成

第1回目装荷Pu燃料組成は①と同様LWR取出のPu燃料組成比を用いる。
またFBRリサイクルに於けるPu燃料組成は、②と同様リサイクルSTEPで得られたPu組成比を使用する。

④ Pu富化度

またPu富化度は、3章のTRU消滅選定炉心の内側炉心、外側炉心の平均富化度(21%)を各リサイクルSTEPで用いる。

(4) 燃焼ステップ

① 燃焼

(a) 炉心燃料 (Np)

各リサイクルSTEPでの燃焼は45カ月間行い、15カ月、30カ月、45カ月の各時点で出力する。

45カ月間における燃焼ステップは以下のようにする。

0,	150,	300,	365,	<u>456,</u>	600,	730,	<u>913,</u>	1050,	1200,	<u>1369</u> (日)
				15カ月			30カ月			45カ月

(b) ターゲット燃料 (Am+Cm)

各リサイクルSTEPでの燃焼は75カ月間行い、15カ月、30カ月、45カ月、60カ月、75カ月の各時点で出力する。

② 冷却

冷却は炉心燃料 (Np) は45カ月燃焼後、5年間行う。

ターゲット燃料 (Am+Cm) は75カ月燃焼後、5年間行う。

計算は、冷却期間10年まで実施。

(5) 断面積ライブラリ

ORIGEN-2のFBRに相当する「Puリサイクル」のライブラリを使用する。(LMFBR: Advanced oxide, 100GWD/MT, RECYCLE-Pu/U/U/U)

(6) 全中性子束

炉心部 2.0×10^{15} (n/cm²・sec)

ターゲット部 6.5×10^{14} (n/cm²・sec)

6.1.2 解析結果及び検討

(1) TRUおよびPuの組成変化

図6.1.2-1 に全炉心燃料(1kg) に対する、TRU(Np)、TRU(Am+Cm) 装荷割合のリサイクルによる変化を示す。ターゲット集合体はブランケット領域の1層に装荷する為、TRU(Am+Cm) の装荷総量はリサイクルステップの間維持することとなり約17%と一定であるが、TRU(Np+Am+Cm) の組成比はFBR 取出の組成比とするため、Npはリサイクルにより減少してゆく。1リサイクルステップ目(軽水炉取出組成比) ではNpの装荷割合は約10%あるが、6リサイクルステップ目(約30年目) では約3%にまで減少した。

図6.1.2-2 にリサイクルによるTRU(Am, Cm) 組成比の変化を、また図6.1.2-3 にリサイクルによるPu(Pu238, Pu239, Pu240, Pu241, Pu242) 組成比の変化および核分裂性Puの変化を示した。リサイクルによりAm241, 243の組成比は減少し、Am242m, Cm244, 245, 246は増大するが、Am, Cmの組成比全体で見ると、Amが6リサイクルステップ目(約30年目) までに90%から82%へ約8%減少し、一方、Cmは10%から18%へ増大した。

リサイクルによるPu(Pu238, Pu239, Pu240, Pu241, Pu242) 組成比の変化で特徴的なことは、Pu238が3リサイクルステップ(15年目) までに急激に増加しその後緩慢に減少することである。これは主にNpの中性子吸収により、Pu238に変換された効果のあらわれである。

炉心部のTRUの装荷・取出重量のリサイクルによる変化を図6.1.2-4に、ターゲット部の変化を図6.1.2-5に示した。炉心部での各リサイクルステップでのTRU(Am, Cm)の生成量は、Pu241のリサイクルステップによる減少に伴い、減少する。また図6.1.2-1～図6.1.2-5に対応するデジタル値を表6.1.2-1～表6.1.2-5に示した。

(2) 発熱量

- ① 炉心部の各リサイクルSTEPでの装荷時、取出時および取出後冷却5年目の発熱量は以下の通りとなった。

リサイクル STEP	装荷時	取出時	取出後 冷却5年目
1	3.2	221.5	15.0
2	14.0	208.3	18.4
3	18.0	191.5	17.2
4	17.4	173.7	13.4
5	13.7	162.6	9.4

(単位：W/kg)

また、リサイクルSTEP1の装荷時の炉心燃料集合体1体当たりの発熱量は0.3 kWとなる。

- ② ターゲット部の各リサイクルSTEPでの装荷時、取出時および取出後冷却5年目の発熱量は以下の通りとなった。

リサイクル STEP	装荷時	取出時	取出後 冷却5年目
1	59.7	231.5	60.7
2	63.2	227.3	61.3
3	64.6	223.4	61.3
4	66.9	220.4	62.0
5	68.2	217.8	62.3

(単位：W/kg)

また、リサイクルSTEP1の装荷時のターゲット集合体1体当たりの発熱量は、5.5 kWで、炉心燃料集合体の発熱量の19倍である。

(2) 中性子発生量

- ① 炉心部の各リサイクルSTEPでの装荷時、取出時および取出後冷却5年目の (α, n) 反応および自発核分裂反応による中性子発生量は以下の通りとなった。

リサイクル STEP	装荷時	取出時	取出後 冷却5年目
1	2.6×10^6	5.9×10^6	2.6×10^6
2	9.3×10^5	4.6×10^6	2.6×10^6
3	11.4×10^5	3.9×10^6	2.5×10^6
4	11.6×10^5	3.6×10^6	2.2×10^6
5	10.8×10^5	3.3×10^6	2.0×10^6

(単位：n/s/kg)

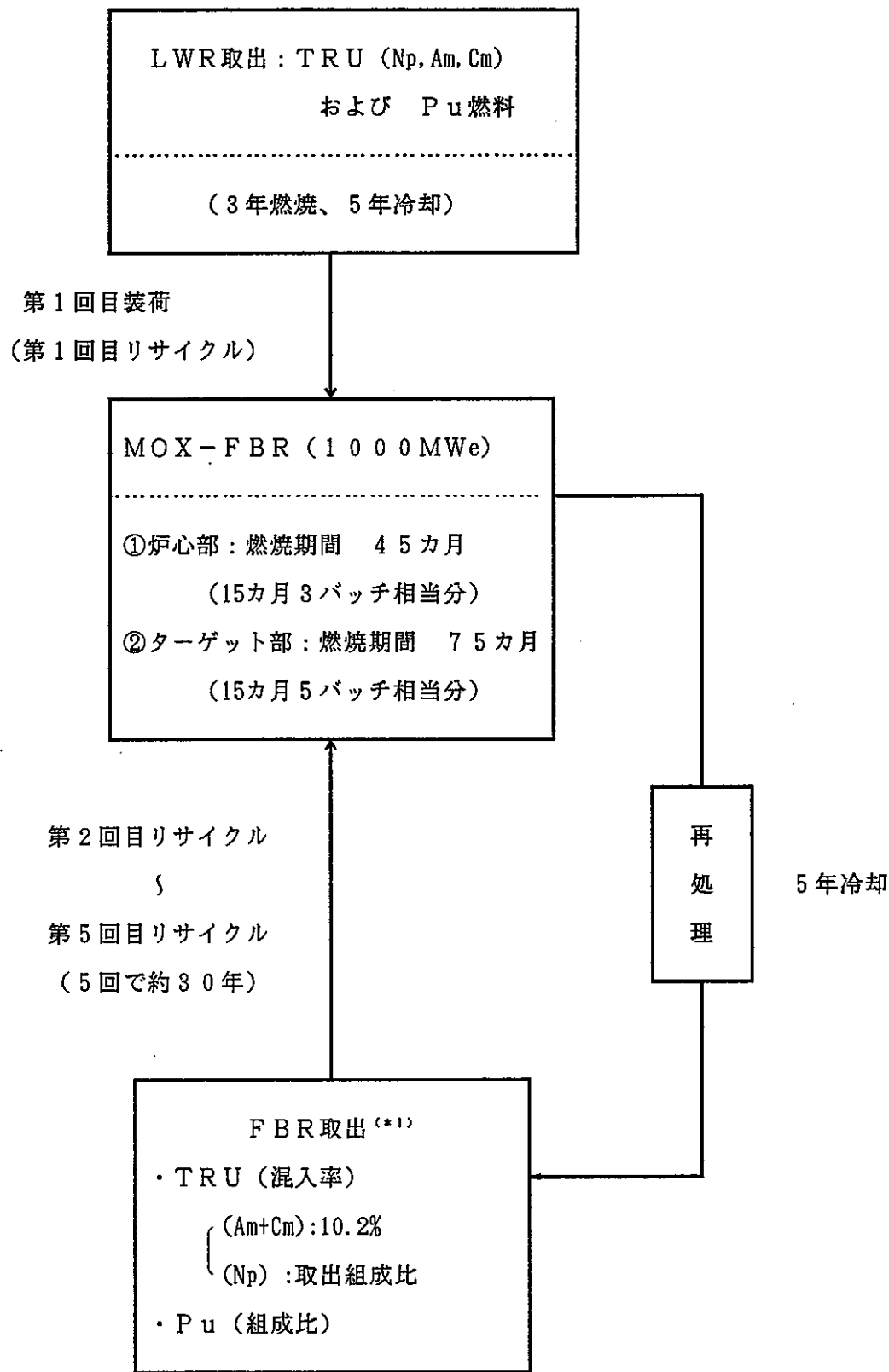
また、リサイクルSTEP1の装荷時の炉心燃料集合体1体当たりの中性子発生数は 2.6×10^7 となる。

- ② ターゲット部の各リサイクルSTEPでの装荷時、取出時および取出後冷却5年目の中性子発生量は以下の通りとなった。

リサイクル STEP	装荷時	取出時	取出後 冷却5年目
1	1.1×10^9	1.5×10^9	1.1×10^9
2	1.2×10^9	1.5×10^9	1.1×10^9
3	1.3×10^9	1.5×10^9	1.1×10^9
4	1.3×10^9	1.6×10^9	1.2×10^9
5	1.4×10^9	1.6×10^9	1.2×10^9

(単位：n/s/kg)

また、リサイクルSTEP1の装荷時のターゲット集合体1体当たりの中性子発生数は 1.1×10^{11} となる。



(*1)各リサイクルSTEPでは、Pu富化度は一定とし、燃焼にともなうPuの欠損分は補充する。

図6-1 FBRリサイクルの概念

表 6.1.1-1 ORIGEN-2 の計算条件

	LWR	MOX-FBR										
燃焼度 (MWd/t)	3.3 万	10 万										
燃焼日数	36 カ月 (3 年) (12 カ月 3 バッチ相当)	炉心部 45 カ月 (3.75 年) (15 カ月 3 バッチ相当) ターゲット部 75 カ月 (6.25 年) (15 カ月 5 バッチ相当)										
冷却期間	5 年	5 年										
燃料組成	U 濃縮度 : 3.2 wt% U 235 3.2 % U 238 96.8 %	Pu 富化度 21.0 wt% U 235 0.3 % U 238 99.7 % <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>Pu 238</td><td>2.4</td></tr> <tr><td>Pu 239</td><td>51.1 %</td></tr> <tr><td>Pu 240</td><td>26.9 %</td></tr> <tr><td>Pu 241</td><td>12.0 %</td></tr> <tr><td>Pu 242</td><td>7.6 %</td></tr> </table>	Pu 238	2.4	Pu 239	51.1 %	Pu 240	26.9 %	Pu 241	12.0 %	Pu 242	7.6 %
Pu 238	2.4											
Pu 239	51.1 %											
Pu 240	26.9 %											
Pu 241	12.0 %											
Pu 242	7.6 %											
TRU 混入率	—	20 %										

表 6.1.2-1 各サイクルステップでのTRU装荷割合

リサイクル STEP	TRU装荷割合(w/o)	
	Am + Cm	Np
1	17.0	9.8
2	17.0	7.2
3	17.0	5.5
4	17.0	4.3
5	17.0	3.3

表 6. 1. 2 - 2 リサイクルによる TRU (Am + Cm) 組成比の変化

単位 : w/o

	リサイクル STEP				
	1	2	3	4	5
^{241}Am	58.90	57.41	55.92	54.44	53.29
^{242m}Am	0.15	1.38	2.01	2.32	2.47
^{243}Am	30.45	28.56	27.86	27.38	27.00
Am Total	89.50	87.35	85.79	84.15	82.75
^{242}Cm	0.002	0.004	0.005	0.006	0.006
^{243}Cm	0.100	0.097	0.096	0.096	0.095
^{244}Cm	9.801	10.52	10.80	11.30	11.62
^{245}Cm	0.507	1.863	2.998	3.908	4.676
^{246}Cm	0.088	0.159	0.310	0.539	0.845
Cm Total	10.50	12.65	14.21	15.85	17.25

表 6.1.2-3 各サイクルステップでの P u 組成比の変化

単位 : w/o

	リサイクル STEP				
	1	2	3	4	5
^{238}Pu	2.43	12.18	14.99	14.95	13.73
^{239}Pu	51.07	48.80	48.93	49.91	51.07
^{240}Pu	26.87	26.48	26.43	26.84	27.62
^{241}Pu	12.03	5.52	3.43	2.79	2.64
^{242}Pu	7.60	7.02	6.21	5.50	4.94
Pu-fissile	63.10	54.32	52.36	52.70	53.71

表 6.1.2 - 4 TRU 装荷・取出量の変化 (CORE)

単位 : g

	リサイクル STEP									
	1		2		3		4		5	
	装荷	取出	装荷	取出	装荷	取出	装荷	取出	装荷	取出
^{237}Np	9.800E+1	6.395E+1	7.183E+1	4.694E+1	5.484E+1	3.590E+1	4.250E+1	2.789E+1	3.322E+1	2.187E+1
^{241}Am	0.000E+0	5.352E+0	0.000E+0	3.175E+0	0.000E+0	2.480E+0	0.000E+0	2.297E+0	0.000E+0	2.299E+0
$^{242\text{m}}\text{Am}$	0.000E+0	6.006E-2	0.000E+0	3.149E-2	0.000E+0	2.223E-2	0.000E+0	1.955E-2	0.000E+0	1.917E-2
^{243}Am	0.000E+0	1.547E+0	0.000E+0	1.421E+0	0.000E+0	1.269E+0	0.000E+0	1.137E+0	0.000E+0	1.033E+0
Am Total	0.000E+0	6.959E+0	0.000E+0	4.627E+0	0.000E+0	3.771E+0	0.000E+0	3.454E+0	0.000E+0	3.351E+0
^{242}Cm	0.000E+0	1.879E-4	0.000E+0	9.904E-5	0.000E+0	7.025E-5	0.000E+0	6.195E-5	0.000E+0	6.084E-5
^{243}Cm	0.000E+0	2.539E-3	0.000E+0	1.314E-3	0.000E+0	9.152E-4	0.000E+0	7.986E-4	0.000E+0	7.807E-4
^{244}Cm	0.000E+0	1.406E-1	0.000E+0	1.304E-1	0.000E+0	1.167E-1	0.000E+0	1.046E-1	0.000E+0	9.495E-2
^{245}Cm	0.000E+0	9.714E-3	0.000E+0	9.054E-3	0.000E+0	8.114E-3	0.000E+0	7.275E-3	0.000E+0	6.599E-3
^{246}Cm	0.000E+0	1.822E-4	0.000E+0	1.705E-4	0.000E+0	1.529E-4	0.000E+0	1.371E-4	0.000E+0	1.244E-4
Cm Total	0.000E+0	1.532E-1	0.000E+0	1.410E-1	0.000E+0	1.260E-1	0.000E+0	1.129E-1	0.000E+0	1.025E-1

表 6.1.2-5 TRU 装荷・取出量の変化 (TARGET)

単位 : g

	リサイクル STEP									
	1		2		3		4		5	
	装荷	取出	装荷	取出	装荷	取出	装荷	取出	装荷	取出
²⁴¹ A m	1.001E+2	7.800E+1	9.759E+1	7.603E+1	9.506E+1	7.405E+1	9.255E+1	7.210E+1	9.059E+1	7.057E+1
^{242m} A m	2.539E-1	1.993E+0	2.350E+0	2.871E+0	3.417E+0	3.294E+0	3.943E+0	3.480E+0	4.191E+0	3.552E+0
²⁴³ A m	5.177E+1	4.067E+1	4.856E+1	3.815E+1	4.736E+1	3.721E+1	4.655E+1	3.658E+1	4.590E+1	3.606E+1
A m Total	1.522E+2	1.207E+2	1.485E+2	1.171E+2	1.458E+2	1.146E+2	1.430E+2	1.122E+2	1.407E+2	1.102E+2
²⁴² C m	3.340E-3	5.338E-3	6.350E-3	7.451E-3	8.900E-3	8.465E-3	1.016E-2	8.901E-3	1.074E-2	9.066E-3
²⁴³ C m	1.704E-1	1.420E-1	1.642E-1	1.377E-1	1.635E-1	1.359E-1	1.627E-1	1.304E-1	1.615E-1	1.323E-1
²⁴⁴ C m	1.666E+1	1.570E+1	1.789E+1	1.549E+1	1.837E+1	1.604E+1	1.922E+1	1.639E+1	1.976E+1	1.659E+1
²⁴⁵ C m	8.619E-1	2.804E+0	3.167E+0	4.345E+0	5.097E+0	5.598E+0	6.643E+0	6.651E+0	7.949E+0	7.523E+0
²⁴⁶ C m	1.503E-1	2.397E-1	2.695E-1	4.511E-1	5.276E-1	7.741E-1	9.167E-1	1.204E+0	1.437E+0	1.745E+0
C m Total	1.785E+1	1.889E+1	2.150E+1	2.044E+1	2.416E+1	2.256E+1	2.695E+1	2.439E+1	2.932E+1	2.600E+1

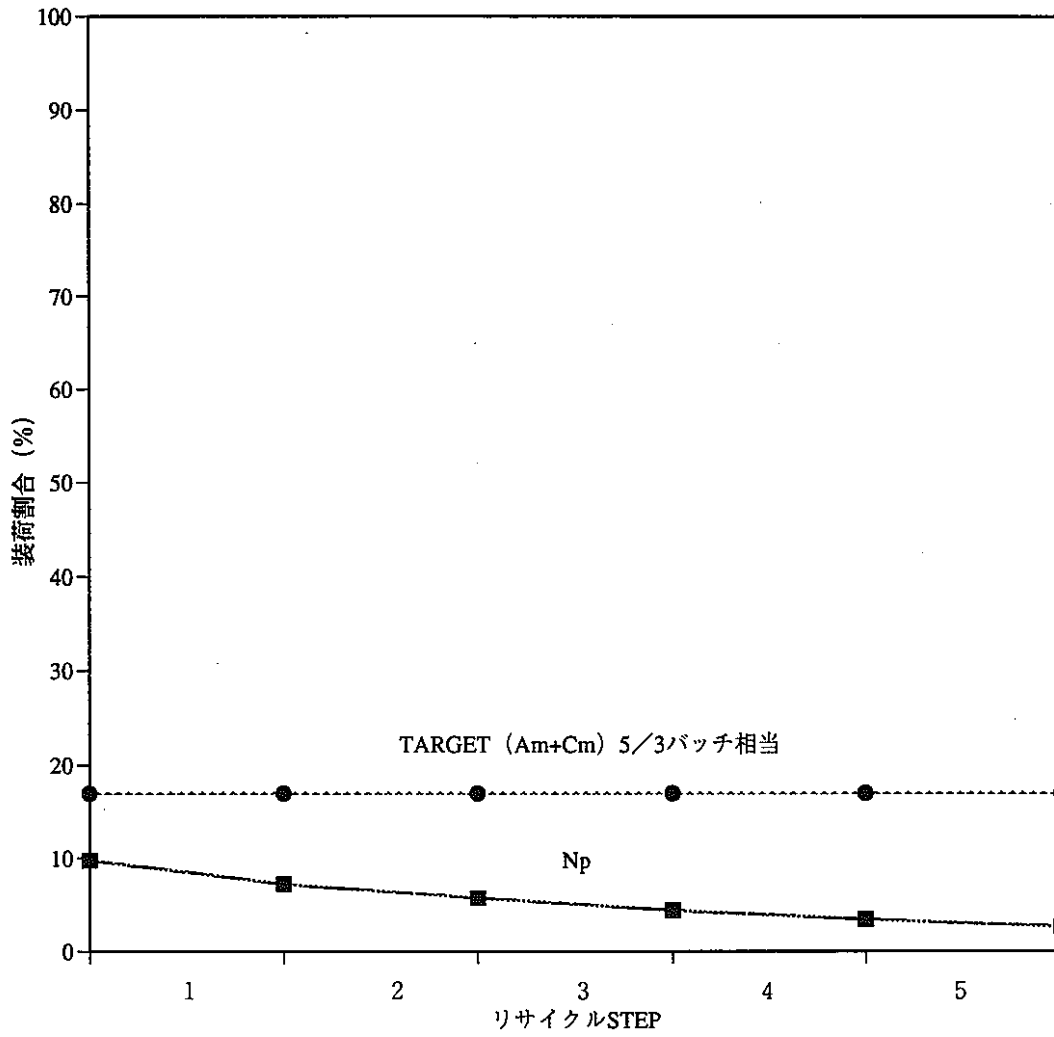


図6.1.2-1 全炉心燃料に対するTRUの装荷割合の変化

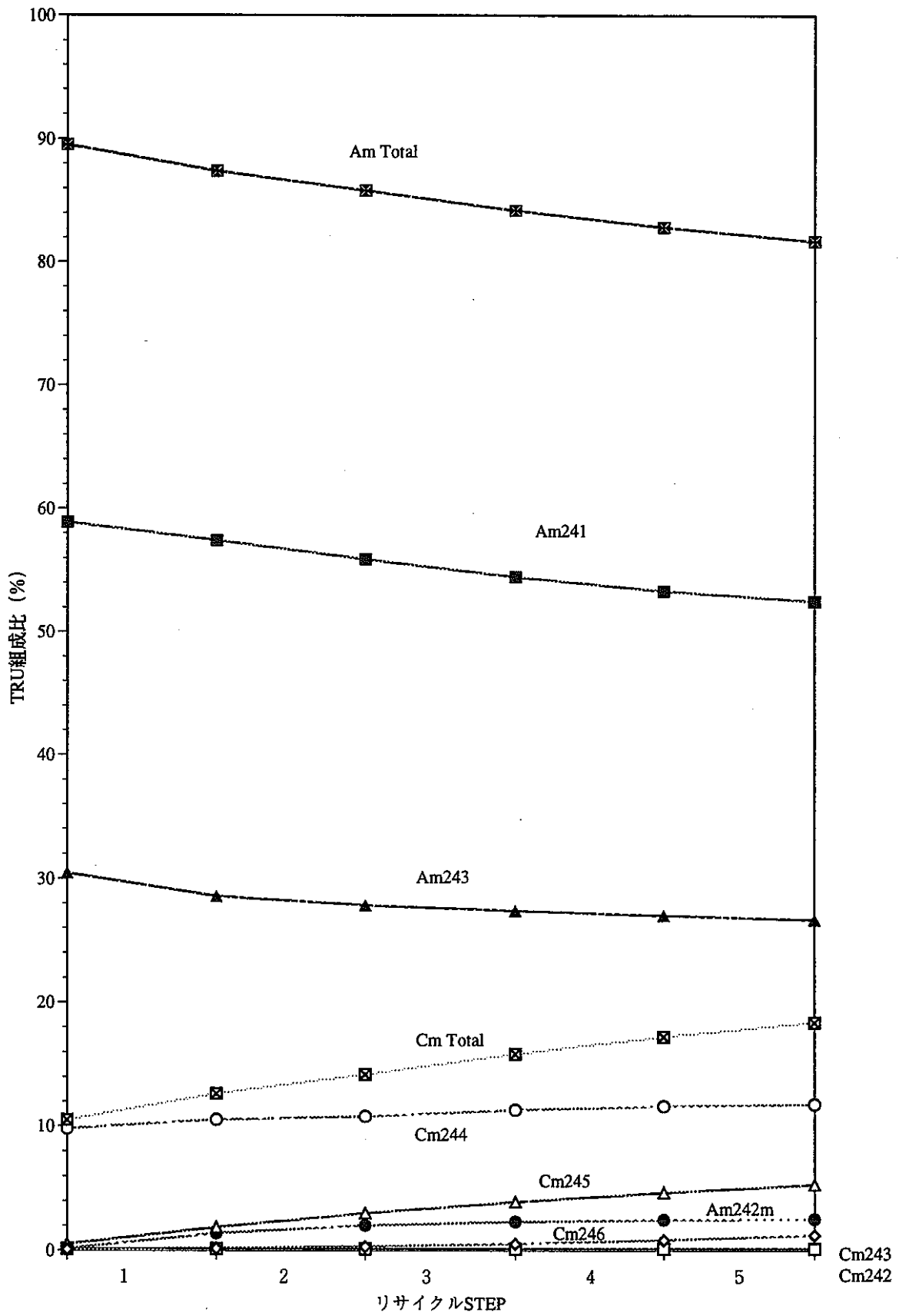


図6.1.2-2 リサイクルによるTRU (Am+Cm) 組成比の変化

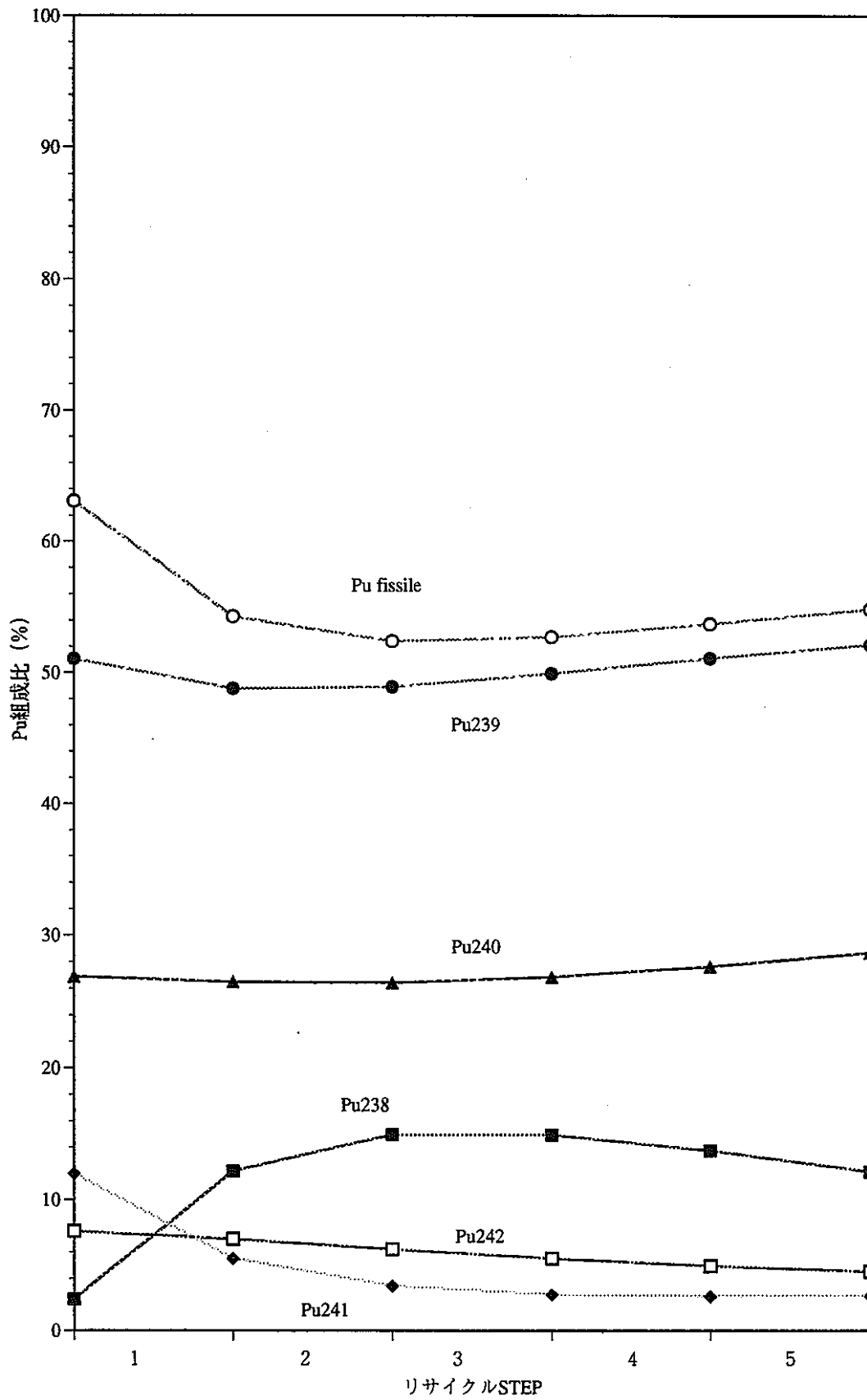


図6.1.2-3 リサイクルによるPu組成比の変化

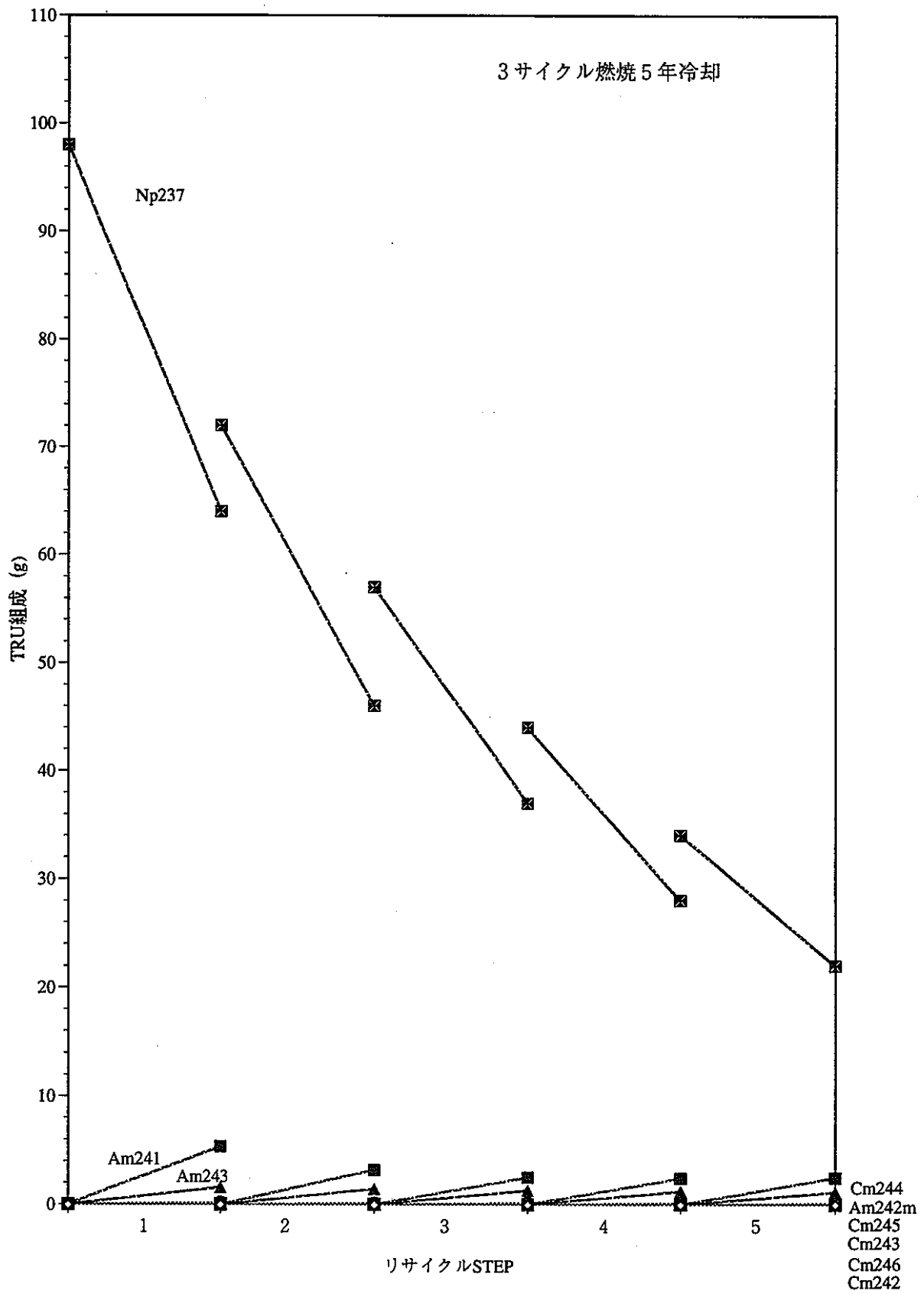


図6.1.2-4 TRU装荷・取出量の変化 (CORE)

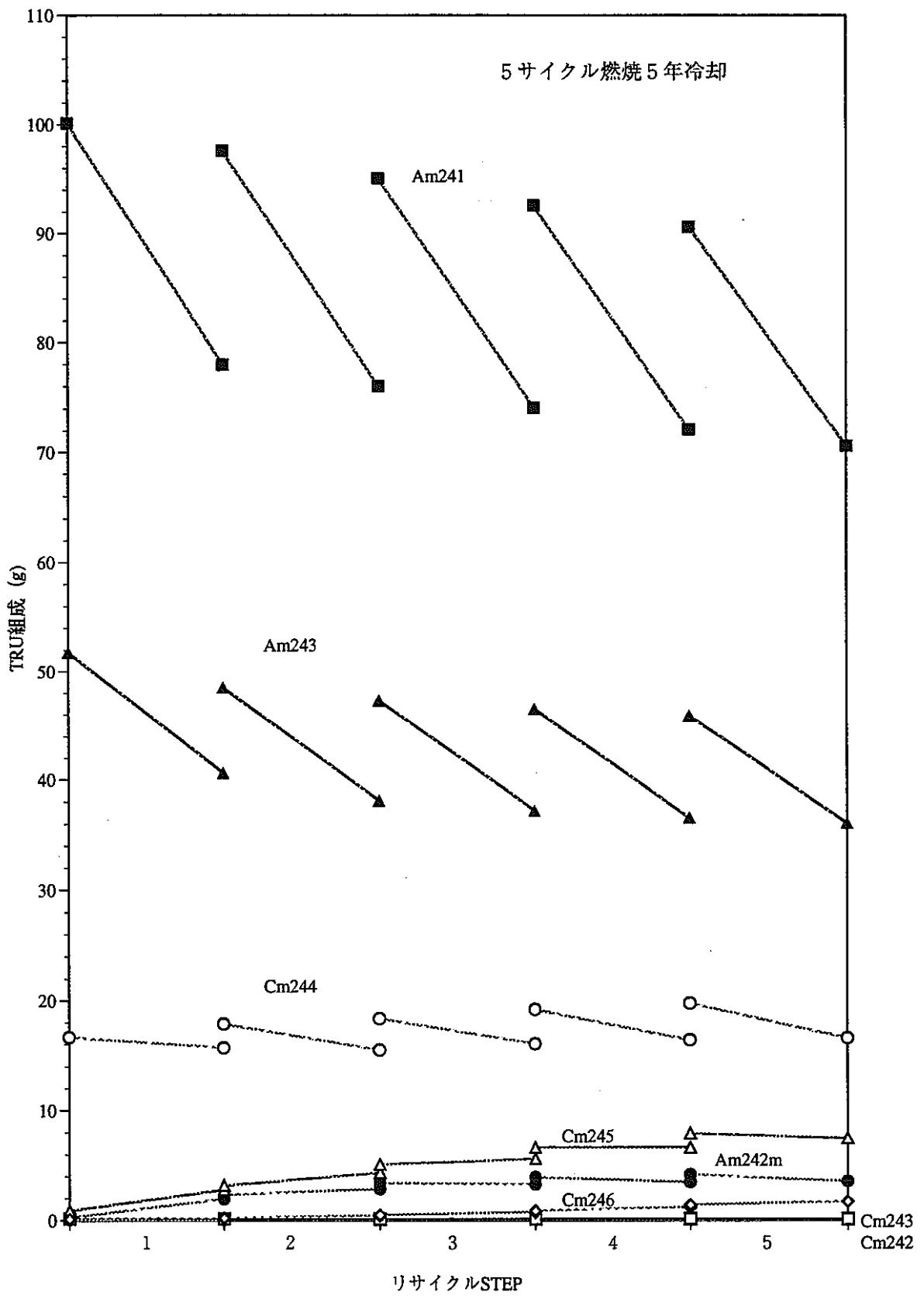


図6.1.2-5 TRU装荷・取出量の変化 (TARGET)

6.2 炉心特性評価

前節の Np, Am, Cm 及び Pu のリサイクルで得られた TRU 組成および、Pu 燃料組成を用いて、2次元 RZ 体系による出力分布・燃焼解析、ドップラー係数、Na ボイド反応度及び、制御棒価値解析を実施し、FBR リサイクルによる、主要核特性への影響を調べた。

6.2.1 解析条件

1) 解析対象ケース

前節の FBR リサイクルのケースとする。

2) 解析対象炉心 (3 炉心)

(1) 15 年目炉心

前節の ORIGEN-2 で計算した 3 リサイクル STEP 装荷時 (12.5 年) と 4 リサイクル STEP 装荷時 (18.75 年) の燃料組成から 15 年目相当の組成比を求め、これを適用したケースで、平衡初期及び末期の特性を評価する。

(2) 30 年目炉心

前節の ORIGEN-2 で計算したリサイクル 30 年目相当の燃料組成を使用したケースで、平衡初期及び末期の特性を評価する。

3) (Np, Am+Cm) 分離型 TRU 燃料および Pu 燃料の組成 (装荷時)

TRU (Np) の炉心燃料への装荷割合および Pu 燃料 (Pu238, Pu239, Pu240, Pu241, Pu242) の組成比、並びにターゲット燃料の TRU (Am+Cm) の組成比を以下に示した。15 年目炉心および、30 年目炉心装荷時の TRU 及び Pu 燃料組成を表 6.2-1 に示した。

ターゲット集合体は、初期炉心と同じく径方向ブランケット 1 層に装荷し、ターゲット燃料の混入率は (Am+Cm):46%、RE:46%、母材 (UO₂):8% である。

4) 基本条件等は、3 章で選定した TRU 消滅選定炉心と同一とする。

・炉心構成	図 3.3.1-1(Np, Am+Cm) 分離型選定炉心
・原子炉出力	1000 MWe (2517 MWt)
・サイクル長さ	15 か月
・燃料交換	3 バッチ (炉心)、5 バッチ (ターゲット)
・炉心高さ	100 cm
・上/下軸ブランケット厚さ	35 cm

5) 計算手法

出力分布・燃焼解析手法は、3章のTRU分離装荷炉心の解析で用いたものと同
一である。

(1) 炉定数

JENDL-2ライブラリーをベースにして原研で作成された「JFS-3
-J2」とする。

(2) 縮約群数

半径方向および軸方向各々1次元の燃焼拡散計算の結果得られる70群の中性
子束を重みとして7群に縮約して用いる。

(3) 計算コード

群縮約には弊社所有の1次元燃焼拡散コード[ODDBURN]、出力分布・燃焼解
析には弊社所有の2次元燃焼拡散コード[2DBURN]を使用する。

(4) 燃焼チェーン

燃焼計算における燃焼チェーンを図3.1-1に示す。

半減期およびAm242の崩壊の分岐比は、Table of isotopes(7th EDN.)を
用いた。

(5) 計算モデル

炉心解析は2次元RZ全炉心体系とする。

(6) Pu富化度調整

EOECの k_{eff} が ~ 0.995 程度、および内側炉心と外側炉心の最大線出力比
がほぼ同程度になるように、Pu富化度調整をおこなう。

(7) 制御棒状態

制御棒中途挿入とする。

(8) 出力分布の補正

2次元RZ計算の結果得られた平均出力に燃焼補正を行う。

6.2.2 評価結果

初期炉心も含め、15年目炉心および30年目炉心の主要特性をまとめた。

(1) Pu 富化度 [Pu/(Pu+U)]

各ケースのPu 富化度の結果を以下に示す。

	IC / OC	平均 (%)
初期炉心	18.8 / 23.2	21.0
15年目炉心	18.6 / 22.3	20.5
30年目炉心	18.1 / 20.8	19.5

Pu 富化度の定義は $Pu/(Pu+U)$ (w/o) である。

上記よりリサイクルが進むに従ってPu 富化度は低減しており、30年目炉心では初期炉心の平均富化度より1.5w/o小さい。これは主に、リサイクルにより装荷するNpの割合が減少する為、Npによる中性子吸収が減り、Pu 富化度を低減することが出来た為である。

初期炉心ではNpの装荷割合は炉心燃料の9.8%あるが、15年目炉心では5%、30年目炉心では3%である。

(2) 実効増倍率および燃焼欠損反応度

各ケースの結果を以下に示す。

	BOEC	EOEC	燃焼欠損反応度
初期炉心	1.0062	0.9987	0.75% $\Delta k/kk'$
15年目炉心	0.9958	0.9979	-0.21% $\Delta k/kk'$
30年目炉心	0.9976	0.9972	0.04% $\Delta k/kk'$

燃焼欠損反応度は、初期で0.75% $\Delta k/kk'$ であるがリサイクル15年目の炉心では-0.21% $\Delta k/kk'$ と負になる。これは主にNpの中性子吸収により、Pu238に変換された効果のあらわれである。更にリサイクルが進むと装荷Npの量が減少するため燃焼欠損反応度は大きくなっていき、30年目の炉心では0.04% $\Delta k/kk'$ となった。

(3) 増殖比

各ケースの結果は以下の通りである。

	BOEC	EOEC	平均
初期炉心	1.016	1.067	1.04
15年目炉心	1.291	1.240	1.27
30年目炉心	1.295	1.231	1.26

増殖比は、15年目および30年目炉心でPu富化度を低減出来たため内部転換比が大きくなり、初期炉心に比べ、15年目および30年目炉心では約20%増大する。またこれはNpの中性子吸収により、Pu238に変換される効果が、リサイクルが進むと装荷Npの量が減少する効果と相まって、30年目炉心では、15年目炉心より減少した。

(4) 出力分布および中性子束分布

各炉心のBOECおよびEOECでの炉中心面における半径方向の出力分布を図6.2.2-1～図6.2.2-2に比較して示した。

また径方向中性子束分布を図6.2.2-3～図6.2.2-6に各炉心で比較して示した。

最大線出力は以下の通りとなった。

	BOEC	EOEC
初期炉心	334 / 395 / 145	370 / 356 / 138
15年目炉心	316 / 363 / 192	343 / 335 / 178
30年目炉心	319 / 338 / 205	351 / 312 / 192

但し、(内側炉心/外側炉心/ターゲット) (単位; W/cm)

リサイクルによってターゲット領域における出力分担が増加していくためターゲット集合体の最大線出力は増大していく傾向にある。30年のリサイクルをおこなった場合、ターゲット集合体の最大線出力はほぼ許容線出力(215W/cm)近くにまで達する。

(5) TRU消滅率

TRU (Np) とTRU (Am+Cm)の合計でのTRUサイクル消滅率及びTRU取出消滅率を以下に示した。

またTRU核種毎のサイクル消滅率の内訳を表6.2.2-1～表6.2.2-2に、取出消滅率の内訳を表6.2.2-3～表6.2.2-4に示す。

① TRUサイクル消滅率

TRUサイクル消滅率はTRUリサイクルに従って減少する。これはNpの装荷量の減少の影響である。

	初期炉心	15年目炉心	30年目炉心	
TRU重量(kg)	BOEC	8620	7024	6278
	EOEC	8040	6582	5920
TRUサイクル消滅量(kg)	580	442	353	
TRUサイクル消滅率(%)	6.7	6.3	5.6	

但し

$$\text{TRUサイクル消滅率}(\%) = \frac{\text{TRU重量(BOEC)} - \text{TRU重量(EOEC)}}{\text{TRU重量(BOEC)}} \times 100$$

② TRU取出消滅率

TRU取出消滅率は以下の様になる。

TRU取出消滅率はNpの装荷量の減少の影響でリサイクルに従って減少する。

	初期炉心	15年目炉心	30年目炉心	
TRU重量(kg)	装荷時	2343	1778	1502
	取出時	1762	1336	1149
TRU取出消滅量(kg)	580	442	353	
TRU取出消滅率(%)	25	25	24	

但し

$$\text{TRU取出消滅率}(\%) = \frac{\text{TRU重量(装荷時)} - \text{TRU重量(取出時)}}{\text{TRU重量(装荷時)}} \times 100$$

(6) ドップラー係数

エネルギー群は18群、計算モデルは2次元RZ全炉心体系とし平衡炉心末期を対象とする。

計算法は、定格出力運転時の燃料温度分布から、燃料温度が一様に500K変化した場合の反応度変化を直接計算により求めた。

以下に各炉心のドップラー係数の結果を示す。

	ドップラー係数 (T_{dk}/dT)	相対値
初期炉心 (EOEC)	-3.35×10^{-3}	1.0
15年目炉心 (EOEC)	-4.26×10^{-3}	1.27
30年目炉心 (EOEC)	-5.11×10^{-3}	1.53

ドップラー係数がリサイクルに従って増大するのは、 N_p の装荷量がリサイクルに従って減少するため、その分炉心燃料の装荷量が増えることと、更にPu富化度も低くなることで、 ^{238}U が増大している為である。

(7) Naボイド反応度

エネルギー群は18群、計算モデルは2次元RZ全炉心体系とし平衡炉心末期を対象に、炉心及び上部軸方向ブランケット領域のNaがボイド化した場合の反応度変化を直接計算により求めた。また集合体間ギャップもボイド化する。

計算法は、Naがボイド化した場合の k_{eff} と、ボイド化しない場合の k_{eff} の差から直接計算により求めた。

Naボイド反応度の結果を以下に示す。

	Naボイド反応度	相対値
初期炉心 (EOEC)	3.80% $\Delta k/kk'$ ($\$11.6$)	1.0
15年目炉心 (EOEC)	3.01% $\Delta k/kk'$	0.79
30年目炉心 (EOEC)	2.80% $\Delta k/kk'$	0.74

リサイクルに従って、炉心部のTRU (N_p) 混入率が減少し、中性子スペクトルが軟らかくなるためNaボイド反応度は小さくなる。各炉心のEOECでの炉中心位置における中性子スペクトルと随伴中性子スペクトルを図6.2.2-7～図6.2.2-8に比較して示した。

(8) TRUの毒性

各炉心（初期，15年目炉心，30年目炉心）の取出燃料のTRUの毒性を評価した。

① 毒性ファクター

毒性ファクターは、表6.2.2-5に示した経口摂取によるガン死亡の毒性ファクターCD/Ci（動燃殿支給値）を用いた。

② 評価方法

炉心部及びターゲット集合体領域の取出燃料について核種毎の放射能に毒性ファクターを乗じた値を毒性指標として評価した。

結果を表6.2.2-6～表6.2.2-8に一覧表にして示した。

また下記に各炉心のPu，TRUの毒性指標を比較して示した。

		核 種	炉心部(1/3バッチ)	ターゲット領域(1/5バッチ)
初期炉心	Pu		$1.38 \times 10^9 (1.0)$	$2.95 \times 10^8 (1.0)$
	TRU		$1.03 \times 10^8 (1.0)$	$2.50 \times 10^9 (1.0)$
	計		1.48×10^9	2.80×10^9
15年目炉心	Pu		$1.52 \times 10^9 (1.10)$	$3.30 \times 10^8 (1.12)$
	TRU		$6.34 \times 10^7 (0.61)$	$2.66 \times 10^9 (1.06)$
	計		1.58×10^9	2.99×10^9
30年目炉心	Pu		$1.05 \times 10^9 (0.76)$	$3.30 \times 10^8 (1.12)$
	TRU		$5.48 \times 10^7 (0.53)$	$2.74 \times 10^9 (1.10)$
	計		1.10×10^9	3.07×10^9

()内は初期炉心との比。

炉心部のPuの毒性指標のリサイクルによる変化は、Pu238の変化が主要因である。またTRUの毒性指標がリサイクルにより低減しているのはNpの装荷量がリサイクルに従って低減しているからである。またTRUの毒性指標の割合はPuの4～7%程度である。

ターゲット領域のPuの毒性指標のリサイクルによる変化は、Pu238の変化が主要因である。またTRUの毒性指標がリサイクルにより増加しているのは主にCm244の影響であり、TRUの毒性指標の約7割を占める。毒性指標(計)の9割はTRUの毒性指標が占める。

(9) 制御棒価値

エネルギー群は6群、計算モデルは2次元RZ全炉心体系とし、BOECの制御棒部分挿入状態と全引き抜き状態の実効増倍率の差から各炉心の制御棒価値の相対値を求めた。

結果は以下の通りである。

	部分制御棒価値	相対値
初期炉心 (BOEC)	1.14% $\Delta k/kk'$	1.0
15年目炉心 (BOEC)	1.19% $\Delta k/kk'$	1.04
30年目炉心 (BOEC)	1.27% $\Delta k/kk'$	1.11

リサイクルにより制御棒価値は大きくなり30年目炉心は初期炉心に比べ制御棒価値は11%増大した。

表6.2.2-1 TRUサイクル消滅率 (15年目炉心)

(TRU 20wt% Pu18.6/22.3)

	a 平衡初期 (kg/炉心)				b 平衡末期 (kg/炉心)				c=a-b 消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
Np237	1476.32	0.08	0.52	1476.92	1233.66	0.12	1.03	1234.81	242.66	-0.04	-0.51	242.11	16.44	-50.00	-98.08	16.39
Am241	11.69	2925.73	0.00	2937.42	22.33	2750.29	0.01	2772.63	-10.64	175.44	-0.01	164.79	-91.02	6.00	0.00	5.61
Am242	0.23	147.32	0.00	147.55	0.58	154.45	0.00	155.03	-0.35	-7.13	0.00	-7.48	-152.17	-4.84	0.00	-5.07
Am243	14.95	1510.65	0.00	1525.60	27.86	1438.01	0.00	1465.87	-12.91	72.64	0.00	59.73	-86.35	4.81	0.00	3.92
Am TOTAL	26.87	4583.70	0.00	4610.57	50.77	4342.75	0.01	4393.53	-23.90	240.95	-0.01	217.04	-88.95	5.26	0.00	4.71
Cm242	0.50	41.57	0.00	42.07	1.06	50.59	0.00	51.65	-0.56	-9.02	0.00	-9.58	-112.00	-21.70	0.00	-22.77
Cm243	0.02	5.79	0.00	5.81	0.05	5.81	0.00	5.86	-0.03	-0.02	0.00	-0.05	-150.00	-0.35	0.00	-0.86
Cm244	1.91	694.13	0.00	696.04	4.85	703.76	0.00	708.61	-2.94	-9.63	0.00	-12.57	-153.93	-1.39	0.00	-1.81
Cm245	0.06	192.48	0.00	192.54	0.21	187.37	0.00	187.58	-0.15	5.11	0.00	4.96	-250.00	2.65	0.00	2.58
Cm TOTAL	2.49	933.97	0.00	936.46	6.17	947.53	0.00	953.70	-3.68	-13.56	0.00	-17.24	-147.79	-1.45	0.00	-1.84
TOTAL	1505.68	5517.75	0.52	7023.95	1290.60	5290.40	1.04	6582.04	215.08	227.35	-0.52	441.91	14.28	4.12	-100.00	6.29
Am+Cm	29.36	5517.67	0.00	5547.03	56.94	5290.28	0.01	5347.23	-27.58	227.39	-0.01	199.80	-93.94	4.12	0.00	3.60

表6.2.2-2 TRUサイクル消滅率 (30年目炉心)

(TRU 20wt% Pu18.1/20.8)

	a 平衡初期 (kg/炉心)				b 平衡末期 (kg/炉心)				c=a-b 消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
Np237	771.99	0.09	0.53	772.61	642.44	0.13	1.05	643.62	129.55	-0.04	-0.52	128.99	16.78	-44.44	-98.11	16.70
Am241	10.38	2770.22	0.00	2780.60	20.24	2591.85	0.01	2612.10	-9.86	178.37	-0.01	168.50	-94.99	6.44	0.00	6.06
Am242	0.21	165.97	0.00	166.18	0.53	170.27	0.00	170.80	-0.32	-4.30	0.00	-4.62	-152.38	-2.59	0.00	-2.78
Am243	11.63	1455.45	0.00	1467.08	21.68	1380.56	0.00	1402.24	-10.05	74.89	0.00	64.84	-86.41	5.15	0.00	4.42
Am TOTAL	22.22	4391.64	0.00	4413.86	42.45	4142.68	0.01	4185.14	-20.23	248.96	-0.01	228.72	-91.04	5.67	0.00	5.18
Cm242	0.46	42.04	0.00	42.50	1.00	51.03	0.00	52.03	-0.54	-8.99	0.00	-9.53	-117.39	-21.38	0.00	-22.42
Cm243	0.02	5.78	0.00	5.80	0.05	5.81	0.00	5.86	-0.03	-0.03	0.00	-0.06	-150.00	-0.52	0.00	-1.03
Cm244	1.56	741.40	0.00	742.96	3.96	747.51	0.00	751.47	-2.40	-6.11	0.00	-8.51	-153.85	-0.82	0.00	-1.15
Cm245	0.05	294.78	0.00	294.83	0.18	281.28	0.00	281.46	-0.13	13.50	0.00	13.37	-260.00	4.58	0.00	4.53
Cm TOTAL	2.09	1084.00	0.00	1086.09	5.19	1085.63	0.00	1090.82	-3.10	-1.63	0.00	-4.73	-148.33	-0.15	0.00	-0.44
TOTAL	796.30	5475.73	0.53	6272.56	690.08	5228.44	1.06	5919.58	106.22	247.29	-0.53	352.98	13.34	4.52	-100.00	5.63
Am+Cm	24.31	5475.64	0.00	5499.95	47.64	5228.31	0.01	5275.96	-23.33	247.33	-0.01	223.99	-95.97	4.52	0.00	4.07

表6.2.2-3 TRU取出消滅率 (15年目炉心)

(TRU 20wt% Pu18.6/22.3)

	a 装荷時 (kg/炉心)				b 取出時 (kg/炉心)				c=a-b 取出消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 取出消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
Np237	583.49	0.00	0.00	583.49	340.84	0.04	0.51	341.39	242.65	-0.04	-0.51	242.10	41.59	0.00	0.00	41.49
Am241	0.00	660.90	0.00	660.90	10.64	485.46	0.01	496.11	-10.64	175.44	-0.01	164.79	0.00	26.55	0.00	24.93
Am242	0.00	25.60	0.00	25.60	0.34	32.73	0.00	33.07	-0.34	-7.13	0.00	-7.47	0.00	-27.85	0.00	-29.18
Am243	0.00	333.27	0.00	333.27	12.91	260.62	0.00	273.53	-12.91	72.65	0.00	59.74	0.00	21.80	0.00	17.93
Am TOTAL	0.00	1019.77	0.00	1019.77	23.89	778.81	0.01	802.71	-23.89	240.96	-0.01	217.06	0.00	23.63	0.00	21.29
Cm242	0.00	0.07	0.00	0.07	0.55	9.08	0.00	9.63	-0.55	-9.01	0.00	-9.56	0.00	-12871.43	0.00	-13657.14
Cm243	0.00	1.16	0.00	1.16	0.03	1.17	0.00	1.20	-0.03	-0.01	0.00	-0.04	0.00	-0.86	0.00	-3.45
Cm244	0.00	133.08	0.00	133.08	2.94	142.71	0.00	145.65	-2.94	-9.63	0.00	-12.57	0.00	-7.24	0.00	-9.45
Cm245	0.00	40.83	0.00	40.83	0.15	35.71	0.00	35.86	-0.15	5.12	0.00	4.97	0.00	12.54	0.00	12.17
Cm TOTAL	0.00	175.14	0.00	175.14	3.67	188.67	0.00	192.34	-3.67	-13.53	0.00	-17.20	0.00	-7.73	0.00	-9.82
TOTAL	583.49	1194.91	0.00	1778.40	368.40	967.52	0.52	1336.44	215.09	227.39	-0.52	441.96	36.86	19.03	0.00	24.85
Am+Cm	0.00	1194.91	0.00	1194.91	27.56	967.48	0.01	995.05	-27.56	227.43	-0.01	199.86	0.00	19.03	0.00	16.73

表6.2.2-4 TRU取出消滅率 (30年目炉心)

(TRU 20wt% Pu18.1/20.8)

	a 装荷時 (kg/炉心)				b 取出時 (kg/炉心)				c=a-b 取出消滅量 (kg/CYC)				c/a*100 取出消滅率 (%)			
	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL	内・外側炉心	TARGET	AX/BL	TOTAL
Np237	306.36	0.00	0.00	306.36	176.81	0.04	0.52	177.37	129.55	-0.04	-0.52	128.99	42.29	0.00	0.00	42.10
Am241	0.00	631.40	0.00	631.40	9.86	453.03	0.01	462.90	-9.86	178.37	-0.01	168.50	0.00	28.25	0.00	26.69
Am242	0.00	30.54	0.00	30.54	0.32	34.84	0.00	35.16	-0.32	-4.30	0.00	-4.62	0.00	-14.08	0.00	-15.13
Am243	0.00	323.29	0.00	323.29	10.05	248.41	0.00	258.46	-10.05	74.88	0.00	64.83	0.00	23.16	0.00	20.05
Am TOTAL	0.00	985.23	0.00	985.23	20.23	736.28	0.01	756.52	-20.23	248.95	-0.01	228.71	0.00	25.27	0.00	23.21
Cm242	0.00	0.08	0.00	0.08	0.53	9.06	0.00	9.59	-0.53	-8.98	0.00	-9.51	0.00	-11225.00	0.00	-11887.50
Cm243	0.00	1.14	0.00	1.14	0.03	1.17	0.00	1.20	-0.03	-0.03	0.00	-0.06	0.00	-2.63	0.00	-5.26
Cm244	0.00	143.90	0.00	143.90	2.40	150.02	0.00	152.42	-2.40	-6.12	0.00	-8.52	0.00	-4.25	0.00	-5.92
Cm245	0.00	65.00	0.00	65.00	0.13	51.49	0.00	51.62	-0.13	13.51	0.00	13.38	0.00	20.78	0.00	20.58
Cm TOTAL	0.00	210.12	0.00	210.12	3.09	211.74	0.00	214.83	-3.09	-1.62	0.00	-4.71	0.00	-0.77	0.00	-2.24
TOTAL	306.36	1195.35	0.00	1501.71	200.13	948.06	0.53	1148.72	106.23	247.29	-0.53	352.99	34.67	20.69	0.00	23.51
Am+Cm	0.00	1195.35	0.00	1195.35	23.32	948.02	0.01	971.35	-23.32	247.33	-0.01	224.00	0.00	20.69	0.00	18.74

表 6. 2. 2 - 5 アクチニド核種の毒性ファクター

Table 3. Actinide Isotopic Toxicity Factors

TRU	Isotope	Toxicity Factor CD/Ci
	Ac ²²⁷	1.1850E+03
	Th ²²⁹	1.2730E+02
	Th ²³⁰	1.9100E+01
	Pa ²³¹	3.7200E+02
	U ²³⁴	7.5900E+00
	U ²³⁵	7.2300E+00
	U ²³⁶	7.5000E+00
	U ²³⁸	6.9700E+00
	Np ²³⁷	1.9720E+02
	Pu ²³⁸	2.4610E+02
	Pu ²³⁹	2.6750E+02
	Pu ²⁴⁰	2.6750E+02
	Pu ²⁴²	2.6750E+02
	Am ²⁴¹	2.7290E+02
	Am ^{242m}	2.6750E+02
	Am ²⁴³	2.7290E+02
	Cm ²⁴²	6.9000E+00
	Cm ²⁴³	1.9690E+02
	Cm ²⁴⁴	1.6300E+02
	Cm ²⁴⁵	2.8400E+02
	Cm ²⁴⁶	2.8400E+02
Other		
	Pb ²¹⁰	4.5500E+02
	Ra ²²³	1.5600E+01
	Ra ²²⁶	3.6300E+01
	Sr ⁹⁰	1.6700E+01
	Y ⁹⁰	6.0000E-01
	Zr ⁹³	9.5000E-02
	Tc ⁹⁹	1.7200E-01
	I ¹²⁹	6.4800E+01
	Cs ¹³⁵	8.4000E-01
	Cs ¹³⁷	5.7700E+00
	C ¹⁴	2.0000E-01
	Ni ⁵⁹	8.0000E-02
	Ni ⁶³	3.0000E-02
	Sn ¹²⁶	1.7000E+00

Cancer Deaths/Curie Upon Oral Ingestion

表6.2.2-6 取出燃料の毒性指標（初期炉心）

核種	半減期	(C) 毒性ファクター (CD/Ci)	炉心領域			TARGET集合体領域			AX / BL			Total		
			(B) 取出量 (×E+03 g)	*(A) 放射能 (Ci)	(A)×(C) 毒性指標	(B) 取出量 (×E+03 g)	*(A) 放射能 (Ci)	(A)×(C) 毒性指標	(B) 取出量 (×E+03 g)	*(A) 放射能 (Ci)	(A)×(C) 毒性指標	(B) 取出量 (×E+03 g)	*(A) 放射能 (Ci)	(A)×(C) 毒性指標
U235	7.04E+08 y	7.23	12.94	2.80E-02	2.03E-01	0.35	7.58E-04	5.48E-03	19.96	4.32E-02	3.13E-01	33.25	7.20E-02	5.21E-01
U236	2.34E+07 y	7.50	2.44	1.58E-01	1.19E+00	0.02	1.30E-03	9.73E-03	1.28	8.31E-02	6.23E-01	3.74	2.43E-01	1.82E+00
U238	4.47E+09 y	6.97	7606.96	2.56E+00	1.79E+01	148.35	5.00E-02	3.48E-01	8136.35	2.74E+00	1.91E+01	15891.66	5.35E+00	3.73E+01
Pu238	87.7 y	246.10	312.98	5.37E+06	1.32E+09	69.47	1.19E+06	2.93E+08	0.06	1.03E+03	2.53E+05	382.51	6.57E+06	1.62E+09
Pu239	2.41E+04 y	267.50	1089.63	6.78E+04	1.81E+07	7.55	4.70E+02	1.26E+05	189.79	1.18E+04	3.16E+06	1286.97	8.01E+04	2.14E+07
Pu240	6.57E+03 y	267.50	589.26	1.34E+05	3.58E+07	28.14	6.39E+03	1.71E+06	7.14	1.62E+03	4.34E+05	624.54	1.42E+05	3.80E+07
Pu241	14.4 y	0.00	154.01	1.59E+07	0.00E+00	0.76	7.85E+04	0.00E+00	0.19	1.96E+04	0.00E+00	154.96	1.60E+07	0.00E+00
Pu242	3.76E+05 y	267.50	162.08	6.38E+02	1.71E+05	17.69	6.97E+01	1.86E+04	0.00	0.00E+00	0.00E+00	179.77	7.08E+02	1.89E+05
Np237	2.14E+06 y	197.20	692.40	4.89E+02	9.65E+04	0.03	2.12E-02	4.18E+00	0.51	3.60E-01	7.11E+01	692.94	4.90E+02	9.65E+04
Am241	432 y	272.90	26.94	9.27E+04	2.53E+07	551.95	1.90E+06	5.18E+08	0.01	3.44E+01	9.39E+03	578.90	1.99E+06	5.44E+08
Am242m	152 y	267.50	0.89	8.67E+03	2.32E+06	17.29	1.68E+05	4.51E+07	0.00	0.00E+00	0.00E+00	18.18	1.77E+05	4.74E+07
Am243	7.38E+03 y	272.90	15.80	3.16E+03	8.62E+05	300.96	6.01E+04	1.64E+07	0.00	0.00E+00	0.00E+00	316.76	6.33E+04	1.73E+07
Am Total			43.63	1.05E+05	2.85E+07	870.20	2.13E+06	5.80E+08	0.01	3.44E+01	9.39E+03	913.84	2.23E+06	6.08E+08
Cm242	163 d	6.90	1.32	4.38E+06	3.02E+07	8.17	2.71E+07	1.87E+08	0.00	0.00E+00	0.00E+00	9.49	3.15E+07	2.17E+08
Cm243	28.5 y	196.90	0.07	3.62E+03	7.13E+05	1.11	5.74E+04	1.13E+07	0.00	0.00E+00	0.00E+00	1.18	6.11E+04	1.20E+07
Cm244	18.1 y	163.00	3.28	2.66E+05	4.34E+07	130.49	1.06E+07	1.73E+09	0.00	0.00E+00	0.00E+00	133.77	1.09E+07	1.77E+09
Cm245	8.50E+03 y	284.00	0.16	2.75E+01	7.82E+03	10.85	1.87E+03	5.30E+05	0.00	0.00E+00	0.00E+00	11.01	1.89E+03	5.38E+05
Cm Total			4.83	4.65E+06	7.43E+07	150.62	3.77E+07	1.92E+09	0.00	0.00E+00	0.00E+00	155.45	4.24E+07	2.00E+09
U Total			7622.34	2.75E+00	1.92E+01	148.72	5.20E-02	3.63E-01	8157.59	2.87E+00	2.00E+01	15928.65	5.67E+00	3.96E+01
Pu Total			2307.96	2.15E+07	1.38E+09	123.61	1.28E+06	2.95E+08	197.18	3.41E+04	3.85E+06	2628.75	2.28E+07	1.68E+09
TRU Total			740.86	4.75E+06	1.03E+08	1020.85	3.99E+07	2.50E+09	0.52	3.48E+01	9.46E+03	1762.23	4.46E+07	2.61E+09
Total			10671.16	2.62E+07	1.48E+09	1293.18	4.11E+07	2.80E+09	8355.29	3.41E+04	3.86E+06	20319.63	6.74E+07	4.28E+09

*(A)=1.13 E+13 × (B) / (原子量×半減期)

表6.2.2-7 取出燃料の毒性指標 (15年目炉心)

核種	半減期	(C) 毒性ファクター (CD/Ci)	炉心領域			TARGET集合体領域			AX / BL			Total		
			(B) 取出量 (×E+03 g)	*(A) 放射能 (Ci)	(A)×(C) 毒性指標	(B) 取出量 (×E+03 g)	*(A) 放射能 (Ci)	(A)×(C) 毒性指標	(B) 取出量 (×E+03 g)	*(A) 放射能 (Ci)	(A)×(C) 毒性指標	(B) 取出量 (×E+03 g)	*(A) 放射能 (Ci)	(A)×(C) 毒性指標
U235	7.04E+08 y	7.23	13.11	2.84E-02	2.05E-01	0.33	7.15E-04	5.17E-03	19.76	4.28E-02	3.09E-01	33.20	7.19E-02	5.20E-01
U236	2.34E+07 y	7.50	2.73	1.77E-01	1.33E+00	0.03	1.95E-03	1.46E-02	1.33	8.63E-02	6.47E-01	4.09	2.65E-01	1.99E+00
U238	4.47E+09 y	6.97	8022.48	2.70E+00	1.88E+01	146.68	4.94E-02	3.44E-01	8127.17	2.74E+00	1.91E+01	16296.33	5.49E+00	3.83E+01
Pu238	87.7 y	246.10	347.69	5.97E+06	1.47E+09	77.61	1.33E+06	3.28E+08	0.06	1.03E+03	2.53E+05	425.36	7.30E+06	1.80E+09
Pu239	2.41E+04 y	267.50	1138.26	7.08E+04	1.89E+07	9.78	6.08E+02	1.63E+05	197.03	1.23E+04	3.28E+06	1345.07	8.37E+04	2.24E+07
Pu240	6.57E+03 y	267.50	606.25	1.38E+05	3.69E+07	30.85	7.01E+03	1.88E+06	7.74	1.76E+03	4.71E+05	644.84	1.47E+05	3.92E+07
Pu241	14.4 y	0.00	83.21	8.59E+06	0.00E+00	1.04	1.07E+05	0.00E+00	0.21	2.17E+04	0.00E+00	84.46	8.72E+06	0.00E+00
Pu242	3.76E+05 y	267.50	119.70	4.71E+02	1.26E+05	20.16	7.94E+01	2.12E+04	0.00	0.00E+00	0.00E+00	139.86	5.51E+02	1.47E+05
Np237	2.14E+06 y	197.20	340.84	2.41E+02	4.75E+04	0.04	2.83E-02	5.57E+00	0.51	3.60E-01	7.11E+01	341.39	2.41E+02	4.76E+04
Am241	432 y	272.90	10.64	3.66E+04	9.99E+06	485.46	1.67E+06	4.56E+08	0.01	3.44E+01	9.39E+03	496.11	1.71E+06	4.66E+08
Am242m	152 y	267.50	0.34	3.31E+03	8.86E+05	32.73	3.19E+05	8.53E+07	0.00	0.00E+00	0.00E+00	33.07	3.22E+05	8.62E+07
Am243	7.38E+03 y	272.90	12.91	2.58E+03	7.04E+05	260.62	5.21E+04	1.42E+07	0.00	0.00E+00	0.00E+00	273.53	5.47E+04	1.49E+07
Am Total			23.89	4.25E+04	1.16E+07	778.81	2.04E+06	5.55E+08	0.01	3.44E+01	9.39E+03	802.71	2.08E+06	5.67E+08
Cm242	163 d	6.90	0.55	1.82E+06	1.26E+07	9.08	3.01E+07	2.08E+08	0.00	0.00E+00	0.00E+00	9.63	3.19E+07	2.20E+08
Cm243	28.5 y	196.90	0.03	1.55E+03	3.06E+05	1.17	6.05E+04	1.19E+07	0.00	0.00E+00	0.00E+00	1.20	6.21E+04	1.22E+07
Cm244	18.1 y	163.00	2.94	2.39E+05	3.89E+07	142.71	1.16E+07	1.89E+09	0.00	0.00E+00	0.00E+00	145.65	1.18E+07	1.93E+09
Cm245	8.50E+03 y	284.00	0.15	2.58E+01	7.33E+03	35.71	6.14E+03	1.74E+06	0.00	0.00E+00	0.00E+00	35.86	6.17E+03	1.75E+06
Cm Total			3.67	2.06E+06	5.18E+07	188.67	4.18E+07	2.11E+09	0.00	0.00E+00	0.00E+00	192.34	4.38E+07	2.16E+09
U Total			8038.32	2.91E+00	2.04E+01	147.04	5.21E-02	3.64E-01	8148.26	2.87E+00	2.00E+01	16333.62	5.83E+00	4.08E+01
Pu Total			2295.11	1.48E+07	1.52E+09	139.44	1.45E+06	3.30E+08	205.04	3.67E+04	4.00E+06	2639.59	1.63E+07	1.86E+09
TRU Total			368.40	2.11E+06	6.34E+07	967.52	4.38E+07	2.66E+09	0.52	3.48E+01	9.46E+03	1336.44	4.59E+07	2.73E+09
Total			10701.83	1.69E+07	1.59E+09	1254.00	4.52E+07	2.99E+09	8353.82	3.68E+04	4.01E+06	20309.65	6.22E+07	4.59E+09

*(A)=1.13 E+13 × (B) / (原子量×半減期)

表6.2.2-8 取出燃料の毒性指標 (30年目炉心)

核種	半減期	(C) 毒性ファクター (CD/Ci)	炉心領域			TARGET集合体領域			AX / BL			Total		
			(B) 取出量 (×E+03 g)	*(A) 放射能 (Ci)	(A)×(C) 毒性指標	(B) 取出量 (×E+03 g)	*(A) 放射能 (Ci)	(A)×(C) 毒性指標	(B) 取出量 (×E+03 g)	*(A) 放射能 (Ci)	(A)×(C) 毒性指標	(B) 取出量 (×E+03 g)	*(A) 放射能 (Ci)	(A)×(C) 毒性指標
U235	7.04E+08 y	7.23	13.24	2.87E-02	2.07E-01	0.32	6.93E-04	5.01E-03	19.62	4.25E-02	3.07E-01	33.18	7.19E-02	5.20E-01
U236	2.34E+07 y	7.50	2.92	1.89E-01	1.42E+00	0.03	1.95E-03	1.46E-02	1.37	8.89E-02	6.67E-01	4.32	2.80E-01	2.10E+00
U238	4.47E+09 y	6.97	8292.86	2.79E+00	1.95E+01	146.11	4.92E-02	3.43E-01	8120.08	2.73E+00	1.91E+01	16559.05	5.58E+00	3.89E+01
Pu238	87.7 y	246.10	235.01	4.03E+06	9.93E+08	77.55	1.33E+06	3.28E+08	0.06	1.03E+03	2.53E+05	312.62	5.37E+06	1.32E+09
Pu239	2.41E+04 y	267.50	1161.64	7.23E+04	1.93E+07	10.37	6.45E+02	1.73E+05	202.27	1.26E+04	3.37E+06	1374.28	8.55E+04	2.29E+07
Pu240	6.57E+03 y	267.50	636.74	1.45E+05	3.87E+07	32.68	7.43E+03	1.99E+06	8.26	1.88E+03	5.02E+05	677.68	1.54E+05	4.12E+07
Pu241	14.4 y	0.00	82.95	8.56E+06	0.00E+00	1.18	1.22E+05	0.00E+00	0.23	2.37E+04	0.00E+00	84.36	8.71E+06	0.00E+00
Pu242	3.76E+05 y	267.50	90.52	3.56E+02	9.54E+04	20.29	7.99E+01	2.14E+04	0.01	3.94E-02	1.05E+01	110.82	4.36E+02	1.17E+05
Np237	2.14E+06 y	197.20	176.81	1.25E+02	2.46E+04	0.04	2.83E-02	5.57E+00	0.52	3.67E-01	7.24E+01	177.37	1.25E+02	2.47E+04
Am241	432 y	272.90	9.86	3.39E+04	9.26E+06	453.03	1.56E+06	4.26E+08	0.01	3.44E+01	9.39E+03	462.90	1.59E+06	4.35E+08
Am242m	152 y	267.50	0.32	3.12E+03	8.34E+05	34.84	3.39E+05	9.08E+07	0.00	0.00E+00	0.00E+00	35.16	3.43E+05	9.16E+07
Am243	7.38E+03 y	272.90	10.05	2.01E+03	5.48E+05	248.41	4.96E+04	1.35E+07	0.00	0.00E+00	0.00E+00	258.46	5.16E+04	1.41E+07
Am Total			20.23	3.91E+04	1.06E+07	736.28	1.95E+06	5.30E+08	0.01	3.44E+01	9.39E+03	756.52	1.99E+06	5.40E+08
Cm242	163 d	6.90	0.53	1.76E+06	1.21E+07	9.06	3.00E+07	2.07E+08	0.00	0.00E+00	0.00E+00	9.59	3.18E+07	2.19E+08
Cm243	28.5 y	196.90	0.03	1.55E+03	3.06E+05	1.17	6.05E+04	1.19E+07	0.00	0.00E+00	0.00E+00	1.20	6.21E+04	1.22E+07
Cm244	18.1 y	163.00	2.40	1.95E+05	3.17E+07	150.02	1.22E+07	1.98E+09	0.00	0.00E+00	0.00E+00	152.42	1.24E+07	2.02E+09
Cm245	8.50E+03 y	284.00	0.13	2.24E+01	6.35E+03	51.49	8.86E+03	2.52E+06	0.00	0.00E+00	0.00E+00	51.62	8.88E+03	2.52E+06
Cm Total			3.09	1.95E+06	4.42E+07	211.74	4.23E+07	2.21E+09	0.00	0.00E+00	0.00E+00	214.83	4.42E+07	2.25E+09
U Total			8309.02	3.01E+00	2.11E+01	146.46	5.19E-02	3.63E-01	8141.07	2.87E+00	2.00E+01	16596.55	5.93E+00	4.15E+01
Pu Total			2206.86	1.28E+07	1.05E+09	142.07	1.46E+06	3.30E+08	210.83	3.92E+04	4.12E+06	2559.76	1.43E+07	1.38E+09
TRU Total			200.13	1.99E+06	5.48E+07	948.06	4.42E+07	2.74E+09	0.53	3.48E+01	9.46E+03	1148.72	4.62E+07	2.79E+09
Total			10716.01	1.48E+07	1.11E+09	1236.59	4.57E+07	3.07E+09	8352.43	3.93E+04	4.13E+06	20305.03	6.05E+07	4.18E+09

*(A)=1.13 E+13 × (B) / (原子量×半減期)

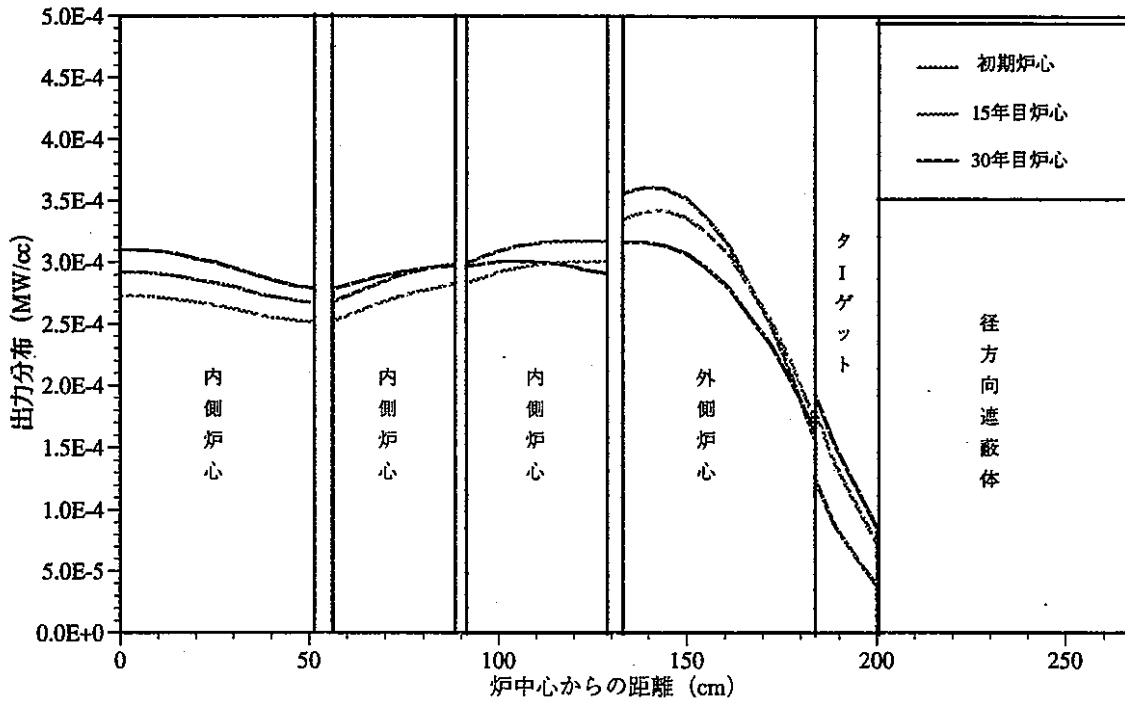


図6.2.2-1 径方向出力分布の比較 (BOEC)

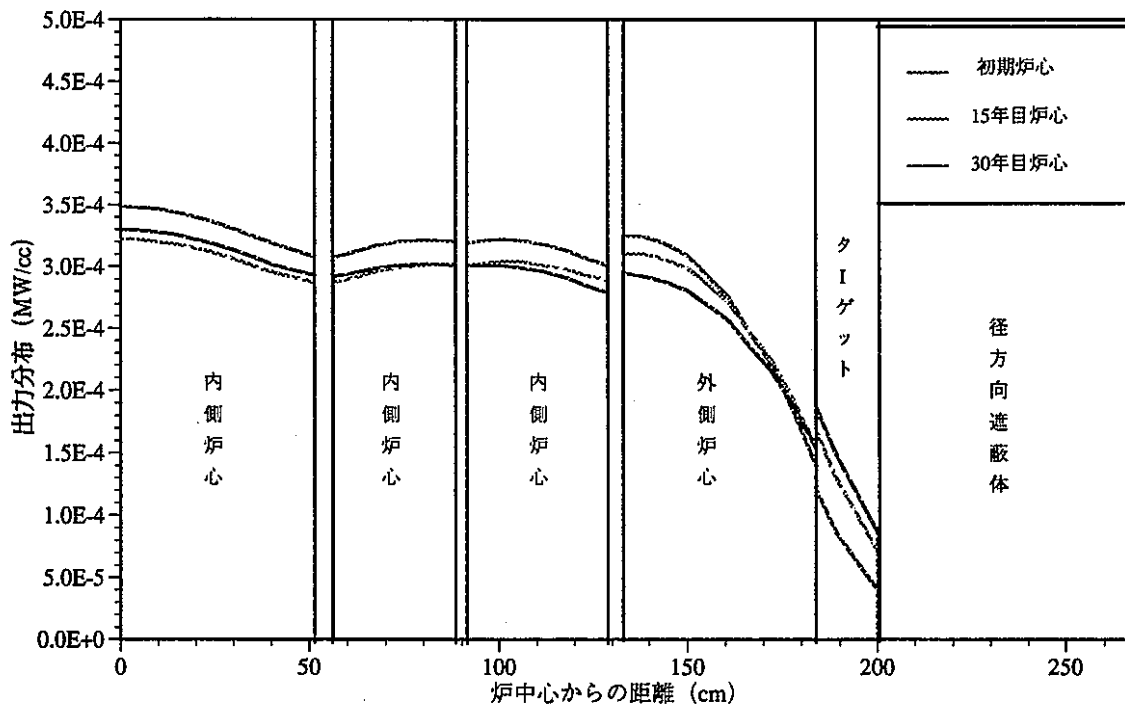


図6.2.2-2 径方向出力分布の比較 (EOEC)

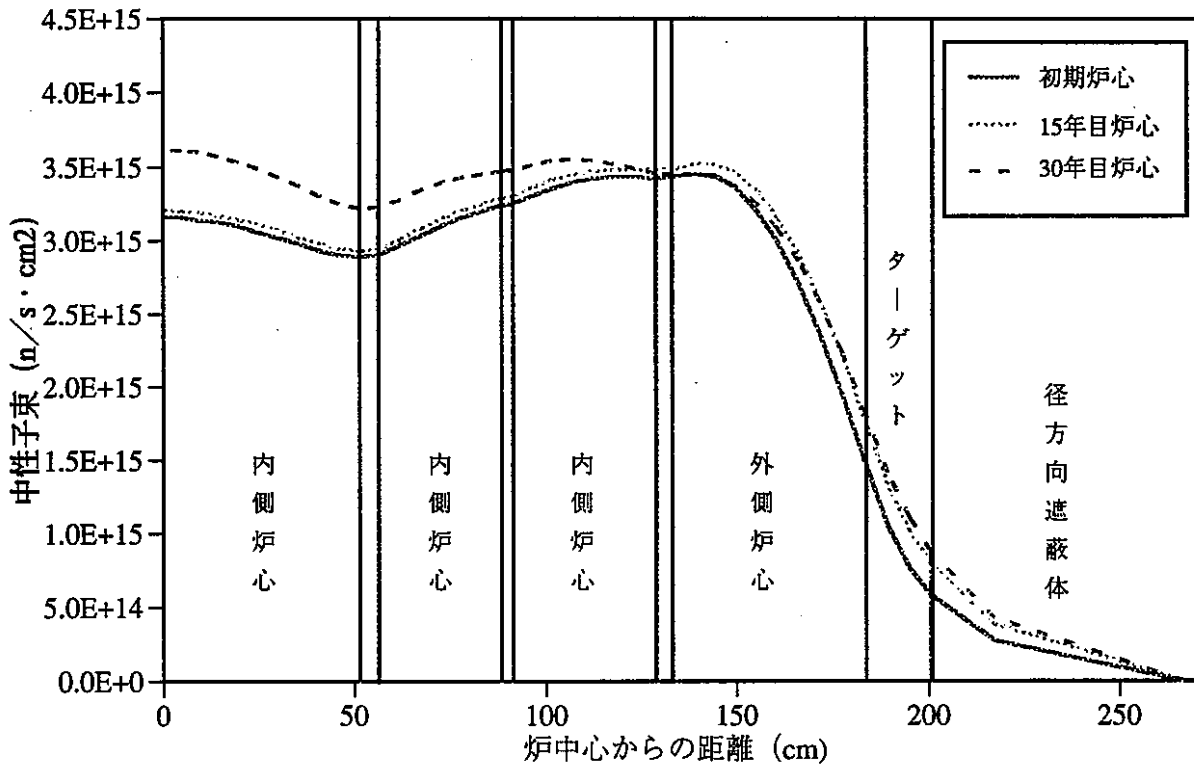


図6.2.2-3 径方向中性子束分布 (全中性子束・平衡初期)

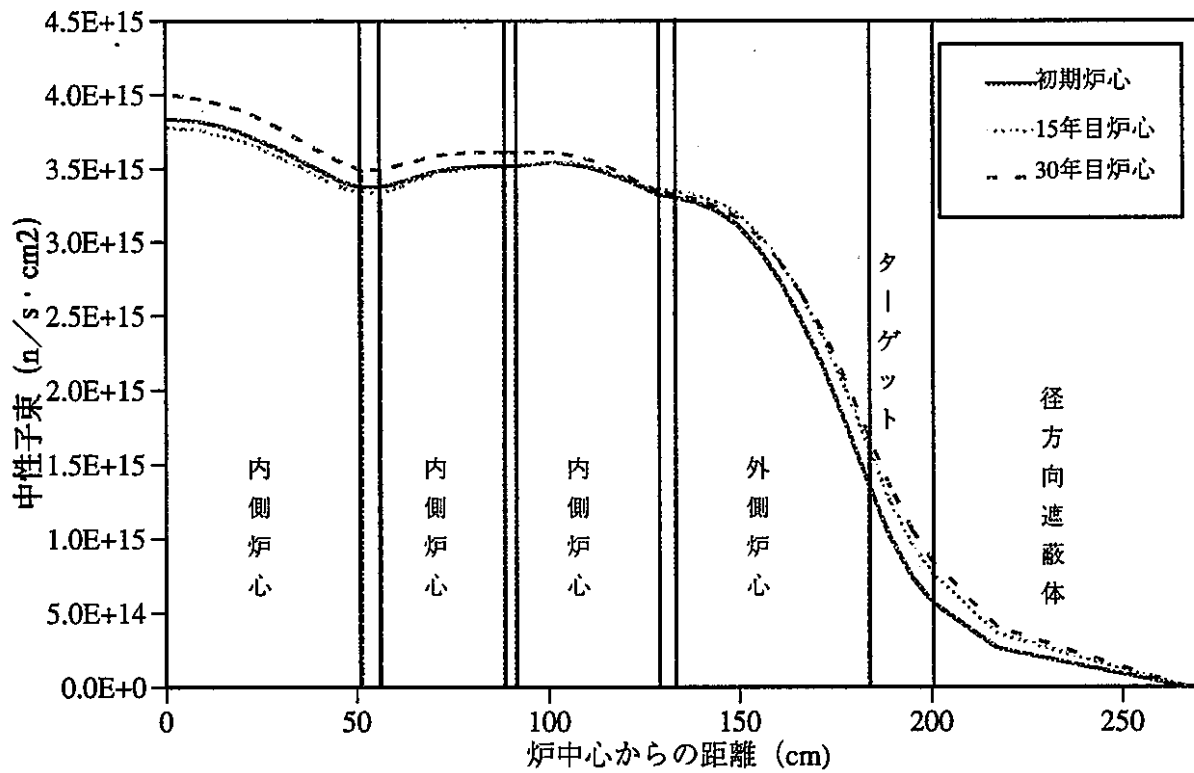


図6.2.2-4 径方向中性子束分布 (全中性子束・平衡末期)

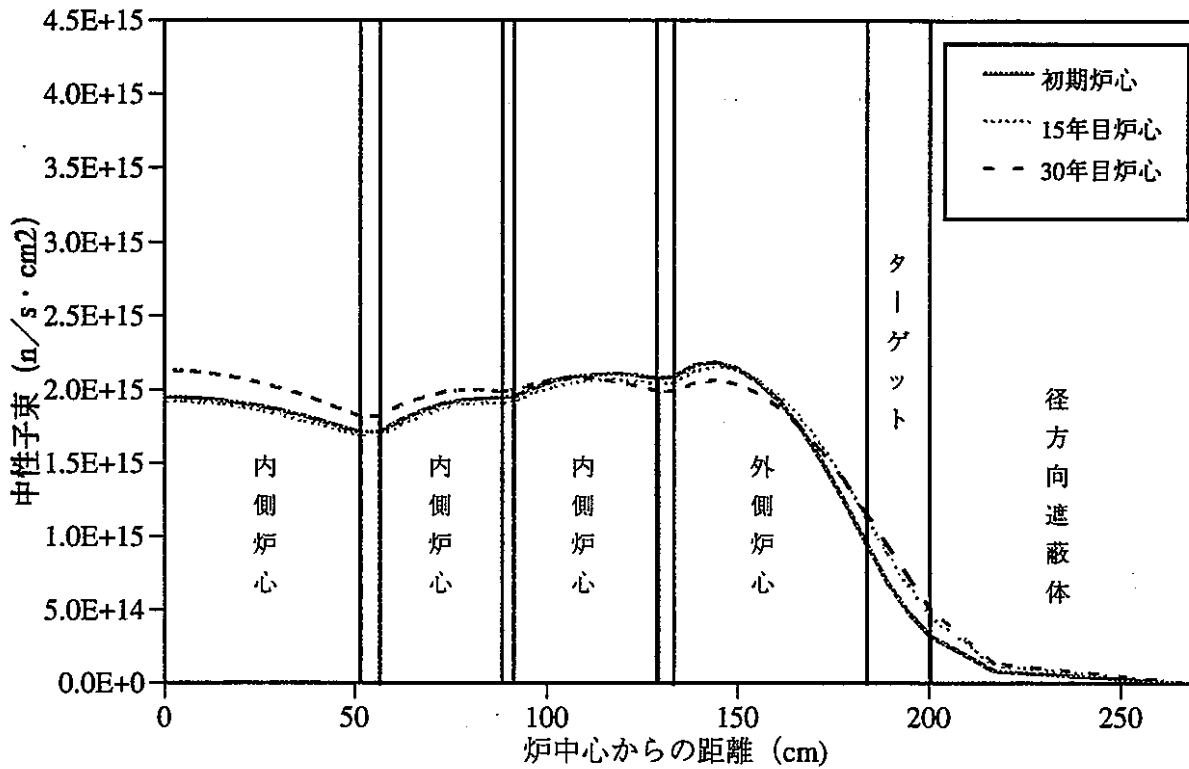


図6.2.2-5 径方向中性子束分布（高速中性子束・平衡初期）

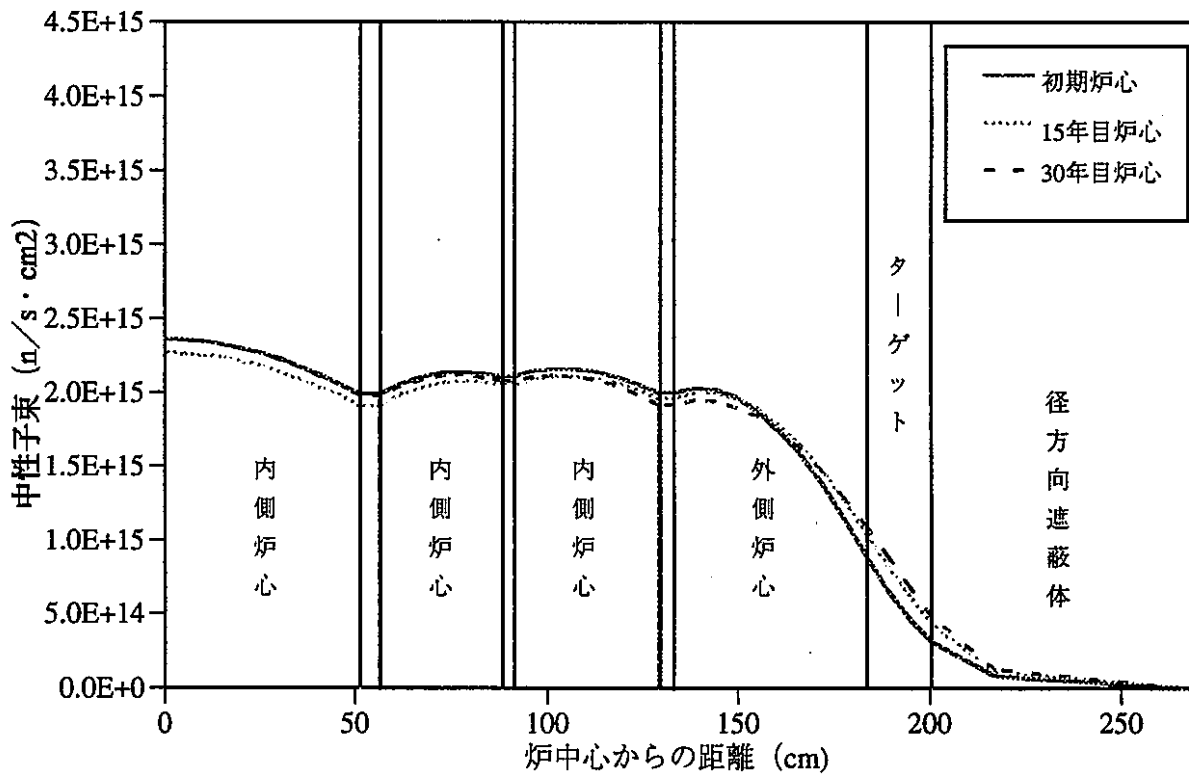


図6.2.2-6 径方向中性子束分布（高速中性子束・平衡末期）

中性子束/レサジー (相対値)

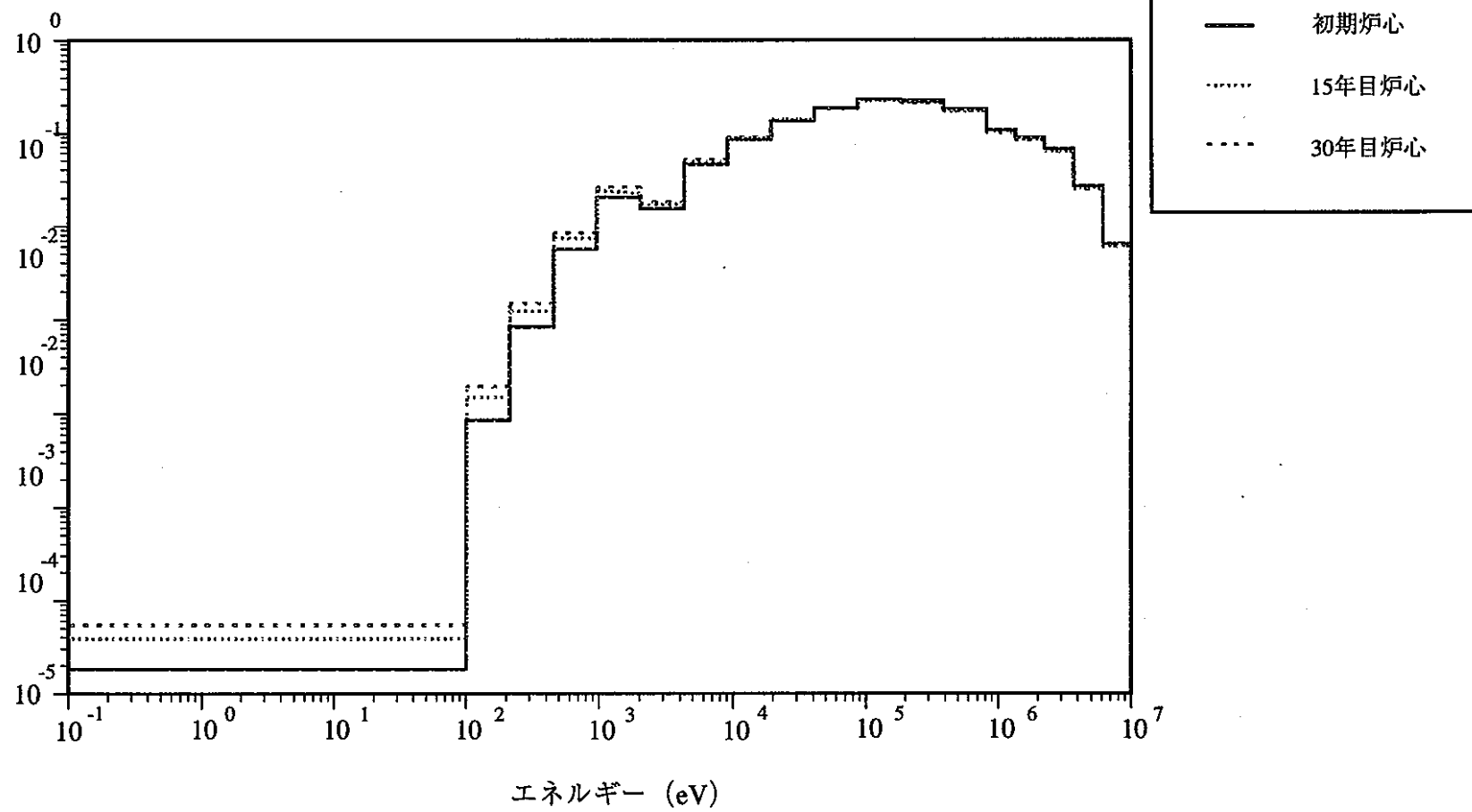


図6.2.2-7 炉中心での中性子束スペクトルの比較

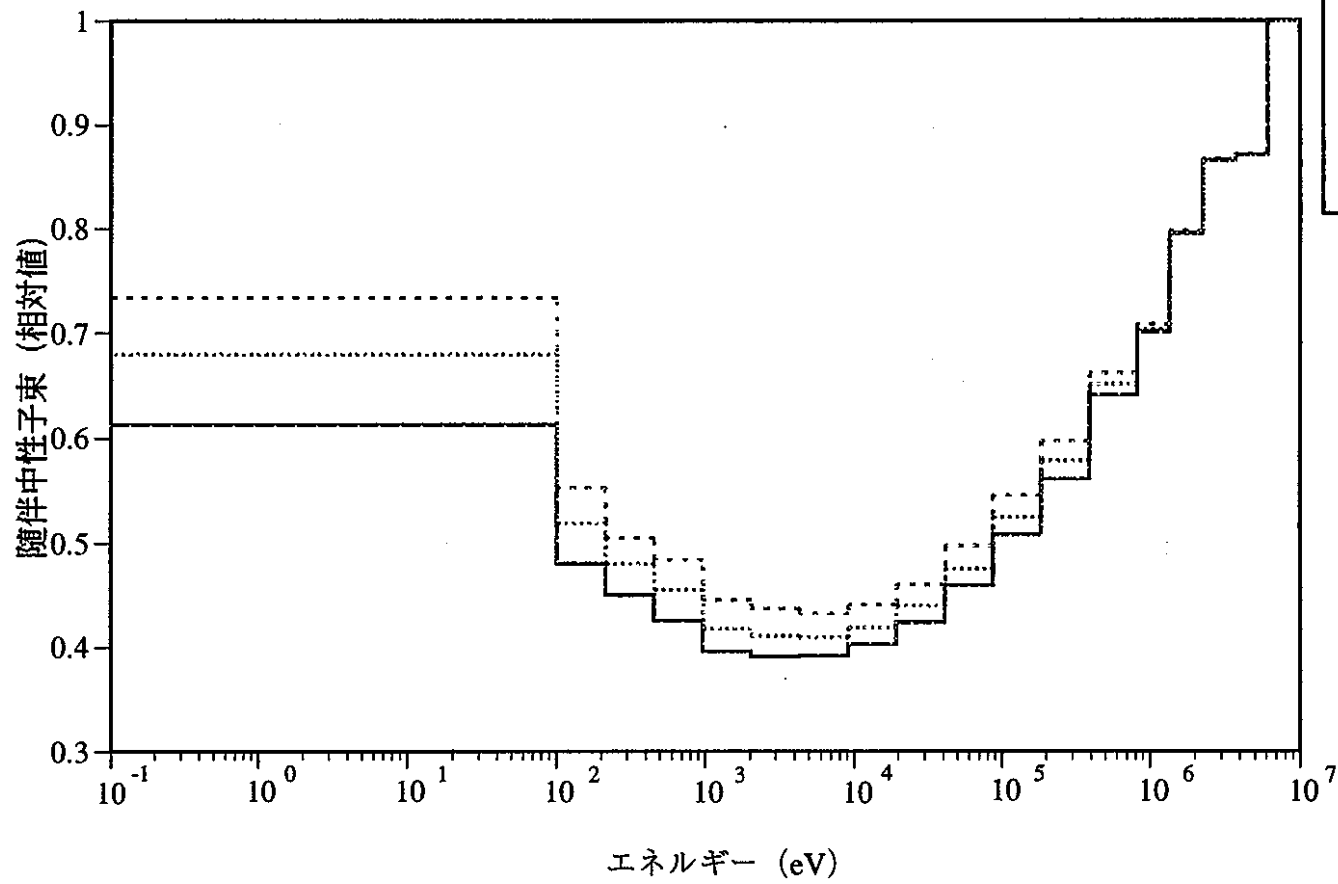


図6.2.2-8 炉中心での随伴中性子束スペクトルの比較

7. 総合評価

7.1 主要炉心特性のまとめ

これまでにFBRでTRUを消滅させる方式として、炉心燃料集合体にTRUを均一に混入させて消滅させる方法と、TRUを多量に含むターゲット集合体を炉心に装荷してTRUを消滅させる方法が考えられ、これらの方式を具体化して炉心特性への影響、およびTRU消滅特性を評価してきた。

また、FBRプラントによるTRU消滅に関する研究として、高レベル廃液からTRUを分離した時に混入するREがTRU消滅および炉心特性に与える影響についてサーベイするとともに、FBRでTRUリサイクルを行った場合の影響をサーベイした。

本年度は、これまでの計算および検討結果と併せて、核燃料サイクル側の進捗状況を反映した実現性の高い炉心概念の検討として、TRU形態としてNpとAm+Cm+REの群に分離した場合の検討を行った。

本節において、これまで検討してきた各炉心の燃焼欠損反応度、最大線出力および増殖比等の主要な炉心核特性ならびにドップラー係数、Naボイド反応度等の安全性評価における主要な反応度特性についてまとめるとともに、TRU消滅性能を相互比較し、主要な炉心特性の総合評価を行った。各炉心の主要な炉心特性を表7.1-1に示す。

以下に、主要炉心特性について各炉心概念相互の比較評価を行うが、最初に各炉心概念についてその特徴と狙いを概括しておく。

(a)均質装荷型

均質装荷型は、再処理過程で抽出されたNp, Am, CmをPu, Uと均質に混入させた炉心燃料集合体で炉心を構成する概念であり、全ての炉心燃料にTRUが均一に混入していることになる。図7.1-1に炉心構成図を示す。

この均質装荷型をベースとして、RE混入が炉心特性に与える影響、並びにFBRでTRUリサイクルを行った場合の炉心特性の評価を実施している。

(b)非均質装荷型

非均質装荷型の概念は、TRUを多量に含むターゲット集合体を炉心燃料集合体とは別個に製造し、炉心燃料集合体と混在させて炉心を構成するものである。これは、均質装荷型の場合におけるTRUを含む多数の炉心燃料集合体を取り扱わなければな

らないという新燃料取扱上の諸問題を緩和させることを狙った概念と言える。

ターゲット集合体の装荷方法、位置等により様々な炉心構成が考えられる。

(i) 集中装荷型----- 図 7.1 - 2 参照

ターゲット集合体を内側炉心に 19 体、外側炉心に 18 体装荷させた。内側炉心でのターゲット集合体装荷方法として、炉心中心位置に集中して装荷させた。

(ii) 分散装荷-同心円配列型----- 図 7.1 - 3 参照

ターゲット集合体の集中装荷型では、ターゲット集合体の時間的な出力変動が大きく、熱的な成立性が得られなかったため、ターゲット集合体を炉心内に同心円状に分散配置したものである。

(iii) 分散装荷-IC/OC 境界位置増加型-----図 7.1 - 4 参照

炉心出力分布の観点からはターゲット集合体を分散配置する方が望ましいが、さらに内側炉心と外側炉心の境界近傍に装荷することにより炉心燃料の発熱量への影響を低減することを狙った装荷パターンである。

また、ターゲット集合体の最大線出力を許容線出力以下とするため、細径化 (6.7mm)し、397 本/ 集合体とした。

(iv) 分散装荷-炉心拡大型-----図 7.1 - 5 参照

上記 (iii) の IC/OC 境界位置増加型に対して、炉心燃料集合体の線出力を低減するために、径方向ブランケットの一部(18 体)を炉心燃料と置換し、炉心領域を拡大させた炉心概念である。

(c)均質装荷/非均質装荷折衷型

上記の非均質装荷型の (i) から (iv) までの装荷概念におけるターゲット集合体には N_p , A_m , C_m は分離せずに混入させている。すなわち、炉心燃料集合体は U , Pu から成り、ターゲット集合体は N_p , A_m , C_m 及び場合によっては U , Pu も混入した状態となっている。これに対し、燃料サイクル側の技術開発の成果を反映した形で、 N_p と A_m , C_m とを分離し、炉心燃料集合体には U , Pu 及び N_p を、ターゲット集合体には A_m , C_m 及び $R E$ を混入させた概念を検討した。

(i) 「 N_p , A_m+C_m 」分離型-----図 7.1 - 6 及び図 7.1 - 7 参照

炉心燃料集合体に N_p を混入させ、ターゲット集合体に $A_m+C_m+R E$ を混入させる。さらに、ターゲット集合体は径方向ブランケット位置、すなわち炉心の外周に装荷することとし、炉心特性への影響を可能な限り回避することを狙った概念である。

以下に、各炉心概念（TRU装荷概念）における主要な炉心特性について比較検討し、総合評価を行った。

(1) TRU混入率

TRUを炉心に装荷した時の炉心特性への影響として、大きく二つのことが指摘できる。

- ・ TRU混入率が増大すると燃焼反応度が低下する。
- ・ TRU混入率が増大すると、出力分布への影響（出力変動）が増大する。

燃焼欠損反応度が負となると、原子炉の運転操作上は煩雑となり好ましくない面が生じるため、燃焼欠損反応度が負とならない範囲のTRU混入率とする必要がある。このためにはTRU混入率は10%程度とするのが一つの目安である。

一方、TRU消滅率は、TRU混入率が高い程大きくなり、TRU混入率が約5%以上でほぼ一定値に達する。

これらのことを勘案して、均質装荷型並びに非均質装荷型（ N_p と A_m+C_m を分離しない場合）では、TRU混入率を全体で5%と設定して評価を行っている。

これに対し、 N_p と A_m+C_m を分離し炉心に N_p のみを添加する場合には、 N_p と A_m+C_m との比率がほぼ1対1であるため、燃焼欠損反応度を負にしないという観点からは、TRU全体でほぼ20%程度まで混入可能である。

(2) 燃焼欠損反応度

電気出力100万kW_e、炉心等価直径約3.7m、炉心高さ1mの炉心を対象とした場合、燃焼サイクル15ヵ月での燃焼欠損反応度は、TRU均質装荷あるいは非均質装荷に関わらず、TRU全体混入率5%で、 $1.8\% \Delta k/kk' \sim 2\% \Delta k/kk'$ であり、TRU混入なしの炉心の値約 $3.3\% \Delta k/kk'$ に比べて約1.5% $\Delta k/kk'$ 程度減少する。

これに対し、RE混入の影響は、REによる中性子吸収による中性子経済の悪化を補うためのPu富化度増大により燃焼欠損反応度は増大し、RE混入率10%で $+1.8\% \Delta k/kk'$ 程度の効果があり、TRU混入（5%）による燃焼欠損反応度低減効果を相殺する。

「 N_p 、 A_m+C_m 」分離型では、炉心には N_p のみ添加されていることと、REが炉心領域外に添加されていることにより、TRU混入率20%、RE混入率10%の条件でも燃焼欠損反応度は $1\% \Delta k/kk'$ 以下となっている。

(3)最大線出力

TRU混入により、出力変動が大きくなることは前述したが、均質装荷型ではその影響はあまり顕著ではなく、非均質装荷型で影響が大きい。

非均質装荷型でターゲット集合体を炉心中心に集中装荷した場合には、炉心燃料のピーク線出力を低減する効果はあるが、ターゲット集合体自身の出力変動が大きく熱設計上の成立性が得られなかった。このため、ターゲット集合体を分散配置することとして装荷位置をサーベイしたが、ターゲット集合体のTRU混入率約50%、ピン本数271本の条件では、ターゲット集合体の最大線出力は531W/cmとなり、許容線出力を超える。これを回避するためには、ターゲット集合体のピン径を細径化しピン数を397本/集合体程度まで増大する必要がある。

「Np、Am+Cm」分離型では、Am、Cmが炉心領域内になく径ブランケット位置に装荷されているため、出力変動の増大効果は小さいが、ターゲットピンにはAmとCmのみ添加されているため、許容線出力が低下するという問題がある。しかしながら、Al₂O₃やU等の母材を若干添加することにより許容線出力増大の効果が期待でき、今年度の選定炉心におけるターゲット燃料ピンの許容線出力は215W/cmと評価された。

従って、「Np、Am+Cm」分離型では、ターゲット集合体のピン数271本の条件で設計は成立すると判断できる。

(4)増殖比

増殖比に対しては基本的にTRU混入による影響は大きくないといえる。しかし、RE混入の影響は、Pu富化度を増大させるため増殖比を低減させる結果となり、RE混入率10%では増殖比は1.0以下となる。

これに対し、「Np、Am+Cm」分離型ではREが炉心外周の径ブランケット位置にあるため、RE混入によるPu富化度増大効果はほとんどなく、この意味では増殖比低減には繋がらないが、ターゲット集合体を径ブランケット位置に装荷していること自体によって増殖比が低減し、1.0以下となる。この対策として、軸ブランケットを上各20cmから35cmに増大させることで、増殖比1.0以上を確保できる。

(5)反応度係数

ドップラー係数は、TRU混入によりその絶対値が低減する。TRU混入なしの炉心の値 $-7.57 \times 10^{-3} \text{ Tdk/dT}$ が、TRUを5%混入させることにより、 $-5 \sim 6 \times 10^{-3} \text{ Tdk/dT}$ 程度に減少する。これは、TRU混入により²³⁸Uの量が

減ることが主な原因である。

「Np、Am+Cm」分離型では、TRU混入率をさらに増大させているため、ドップラ-係数は、 $-3.35 \times 10^{-3} \text{ Tdk/dT}$ 程度まで減少する。

ナトリウムボイド反応度は、TRU混入により中性子スペクトルが硬くなることにより増大する。TRU混入なしの炉心のボイド反応度の値約5\$に対し、TRU混入率約5%でボイド反応度は約8~9\$程度に増大し、「Np、Am+Cm」分離型ではTRU混入率20%であるがボイド反応度は約12\$程度に収まっている。これは、NpとAm、Cmを分離して炉心領域内にはNpが10%添加されているのみだからである。

(6) TRU消滅特性

TRU消滅特性は、均質装荷と非均質装荷であり差はなくTRU混入率5%の場合、サイクル消滅率は約10~11%程度、サイクル消滅量で約170kg程度となる。これに対し、「Np、Am+Cm」分離型では、Am、Cmを炉心領域外周に配置することにより炉心特性への影響を極力低減させたため、TRU混入率を20%とすることが可能となった。これにより、TRUのサイクル消滅量は他の装荷概念と比べて格段に大きく、約580kgとなる。しかし、サイクル消滅率でみるとAm、Cmが中性子束レベルの低い径ブランケット位置に装荷されているため若干低くなり、約7%程度となる。

(7) TRUリサイクルの影響

TRU燃料をリサイクルして使用した場合の炉心特性に対する影響は、リサイクルによるTRU燃料の組成の変化、すなわちNp、Amの減少、Cmの増加に依存することになる。このTRU燃料の組成の変化は、均質装荷あるいは非均質装荷に係わらず同様の傾向を示す。リサイクルにより装荷するNpの割合が減少すると、Pu富化度は低減することになるが、リサイクルにおいてCmを除去する場合には、その分Npの割合を増加させるため、Pu富化度は逆に増大することになる。均質装荷の場合のリサイクルによる炉心特性への影響は、概して大きな影響はないといえる。

「Np、Am+Cm」分離型では、リサイクルによってターゲット領域における出力分担が増加していくためターゲット集合体の最大線出力が増大していく傾向にある。

TRUの全体混入率を20%とし、30年のリサイクルを行った場合、ターゲット集合体の最大線出力はほぼ許容線出力近くにまで達する。TRUの全体混入率20%は、この装荷方式による上限と考えられ、従ってこの条件で30年以上のリサイクル

を行う場合には、TRU全体混入率をもう少し低減させる等の最適化が必要である。

TRU全体混入率を20%より下げた場合でも「Np、Am+Cm」分離型では、ターゲット集合体を炉心内に装荷する非均質装荷型よりはTRU全体混入率を大きくすることができ、TRU消滅量の観点からは有利であると考えられる。

以上、炉心の主要特性について、各炉心概念相互の比較を行った。表7.1-2に各装荷方法におけるメリット、デメリット等についてまとめた。

TRU混入による炉心特性への影響という観点からは、均質装荷型が影響が少ないと言えるが、TRUが混入した新燃料の線源強度、発熱量増大の問題を考えると、燃料取扱系の設備対応が必要となるものと考えられ、多数の燃料集合体にTRUを混入させることは回避すべきであり、TRU混入燃料集合体数を少なく抑えるためには、ターゲット集合体方式の非均質装荷という形式をとることになる。

非均質装荷の場合の課題は出力変動の増大であり、TRUの混入による許容線出力の低減という制限条件の中で、いかに設計成立点を見いだすかがポイントである。ターゲット集合体を炉心内に分散配置する場合には、ターゲットピンを細径化して線出力を低減させる必要があり、炉心燃料のドライバーピンより細径のターゲットピンを採用するようなことになる。

これに対し、燃料サイクル側の技術開発成果を取り入れ、NpとAm、Cmとを分離して添加する方式を採用する場合には、様々な改良点を見出すことができる。

すなわち、炉心領域内にはNpのみを添加し、Am、Cm及びREはターゲット集合体に添加して炉心外周の径ブランケット位置に装荷することにより、炉心特性への影響を極力緩和することができる。これによりTRU混入率を大きくとることが可能となり20%程度までTRUを添加できる。これに伴い、TRUの消滅量も増大し、従来方式と比べて約3～4倍のTRU消滅量が得られることとなった。ただし、TRUの消滅率という観点では、分離型装荷方式ではターゲット部でのTRU消滅率が低く、全体としてのTRU消滅率は他の均質装荷や非均質装荷方式に比べると低下する。

この「Np、Am+Cm」分離型の課題として、Am+Cmを添加したターゲットピンの許容線出力の低下がある。これは、Amの熱伝導率が低いことに起因しているが、 Al_2O_3 やU等の母材を添加することにより改善されることが予想される。今年度の選定炉心として採用したAm+CmとREの体積比が90%以上を占めるターゲット燃料ピンの許容

線出力は215 W/cmと評価された。今後はTRU核種の熱伝導率をはじめとする各種の物性データを蓄積し、また溶融線出力の値を明らかにしていくことが必要である。

7.2 炉心動特性解析のまとめ

TRU消滅処理炉心の炉心安全上の特徴を調べる目的でULOF及びUTOPのATWS(異常な過渡変化時の原子炉停止系不作為事象)時のプラント過渡時温度応答を解析した。

TRU消滅処理炉心は典型的な酸化物燃料炉心と比べ、反応度係数等に関し下記の特徴がある。これら差異がATWS時の炉心の応答に影響を与える。

- ・ドップラ係数が小さい(35~40% 小さい)
- ・冷却材温度係数が大きい(30~35% 大きい)
- ・燃焼反応度が小さい(約1/4)
- ・実効遅発中性子割合が小さい

TRU消滅処理炉心は代表的なATWSに対して下記のようにいえる

(1)ULOFに対しては、下記の利点が期待できる。

冷却材密度反応度が大きくなる傾向を持つが、ドップラ係数は小さくなるのでドップラ係数による正の反応度投入量の寄与が小さくなる事から、ULOF事象に対して不利になる事はない。

パッドの膨張の反応度が期待できるようになれば、主冷却系のポンプコーストダウン半減時間の合理的範囲の中で冷却材沸騰に至らない様な設計を行うことが、酸化物燃料炉心より容易となる可能性がある。

(2)UTOPに対しては、下記の利点が期待できる

TRUの添加により燃料の溶融温度が低下する。一方TRUの約半分を占めるNpが照射によりPu238に変換する事から炉心の燃焼反応度が小さく、制御棒誤引抜きによる投入反応度が低減されるポテンシャルがある。これにより、制御棒一本の誤引抜きによるUTOP事象を想定した場合、酸化物燃料より燃料溶融に対し裕度が大きくなる可能性がある。

表 7.1-1

各炉心の主要炉心性能の比較

比較対象炉心		主要仕様				出力分布・燃焼特性			反応度係数		TRU消滅特性		備考	
		全体 TRU 混入率	全体 RE 混入率	TG仕様	Pu 富化度 (IC/OC) (w/o)	燃焼欠損 反応度 (% Δk/kk')	最大線出力 (炉心/TG) (W/cm)	増殖比 (BOEC, EOE 平均)	ドブラー 係 数 (Tdk/dT)	Na ボイド 反応度 (炉心 部+上軸方) (% Δk/kk')	TRU消滅量 (炉心/TG) (kg/年)	TRU消滅率 (炉心/TG) (%/年)		
				TG内混入率, 装荷体数, ɛノ数										
レファレンス炉心 (PNC 大型炉心)	炉出力 2517Mwt 運転サイクル 15 カ月 (炉心/径BL: 3/4 バッチ)	—	—	—	15.4/18.6	3.31	420	1.08	-7.57×10^{-3}	2.12 (5.7\$)	—	—	炉心構成図 図 3-1	
均 質 装 荷	(A) 均一混入型	5%	—	—	16.6/20.1	2.12	407	1.07	-4.32×10^{-3}	2.65 (7.6 \$)	172	10.9	図 7.1-1	
	(B) RE 混入型 (1) RE 10% 型 (2) TRU 20% 混入型	5%	10%	—	20.0/24.2	3.71	400	0.95	-3.55×10^{-3}	2.86 (8.5 \$)	164	10.3		
		20%	10%	—	21.9/26.5	0.69	409	0.94	—	—	710	11.3		
	(C) FB 再サイクル型 (1) Np+Am+Cm 初期 15年 30年	5%	—	—	17.8/21.6	1.6	405	1.12	-5.50×10^{-3}	2.98 (9.2 \$)	163	10.3		図 7.1-1
		—	—	—	17.6/21.3	0.4	415	1.26	-5.94×10^{-3}	2.85 (8.8 \$)	167	10.5		
		—	—	—	16.9/20.4	0.5	383	1.23	-6.26×10^{-3}	2.77 (8.6 \$)	162	10.1		
(2) Cm 除去型 初期 15年 30年	5%	—	—	18.0/22.1	1.7	402	1.10	-5.48×10^{-3}	2.99 (9.3 \$)	163	10.3	図 7.1-1		
	—	—	—	18.4/22.6	0.5	406	1.19	-5.40×10^{-3}	3.04 (9.4 \$)	152	9.5			
	—	—	—	18.5/22.6	0.5	409	1.18	-5.73×10^{-3}	3.03 (9.4 \$)	154	9.6			
(3) FP 装荷型 15年 (径bl)	5%	—	—	18.4/24.5	1.1	396	1.04	—	—	(TC99: 57 1129: 112)	(14 8)	—		
非 均 質 装 荷	(A) 集中装荷型 (*1)	5%	—	—	15.4/18.6	1.97	419	—	-5.99×10^{-3}	—	176	10.6	図 7.1-2	
	(B) 分散装荷型 (*1) (1) 同心円配列型 (Case A1-1) (2) IC/OC 境界位置増加型 (Case F4-b)	5%	—	—	15.4/18.6	—	427 / 531	—	—	— (*2)	186	11.3	図 7.1-3	
		—	—	50%, 36体, 271ɛ 49%, 39体, 397ɛ	15.4/18.6	1.83	439 / 309	1.14	-5.33×10^{-3}	2.78 (8.6\$)	—	—	—	図 7.1-4
(3) 炉心拡大型	—	—	49%, 39体, 397ɛ	15.4/18.6	—	416 / 337	—	—	—	—	—	—	図 7.1-5	
均 質 + 非 均 質 装 荷	「NP, Am+Cm」分離型 (1) [炉心: Np/TG (径方領域): Am+C] ターゲット5バッチ, 混入率増大型	20% [9.8/10.2]	10%	43%, 72体, 127ɛ	19.0/23.4	0.90	399 / 324	0.97	—	—	576 (407/170)	6.7 (13.6/3.0)	図 7.1-6	
	(2) 選定炉心 初期 ターゲット5バッチ, 混入率増大, 軸方35cm 15年 30年	[9.8/10.2]	—	46%, 72体, 271ɛ	18.8/23.2	0.75	395 / 145	1.04	-3.35×10^{-3}	3.15 (9.6\$)	580 (407/173)	6.7 (13.6/3.1)	図 7.1-7	
—	—	—	—	18.6/22.3	-0.21	363 / 192	1.27	-4.26×10^{-3}	3.01 (9.2\$)	444	6.3	—		
—	—	—	—	18.1/20.8	0.04	351 / 205	1.26	-5.11×10^{-3}	2.80 (8.5\$)	353	5.6	—		

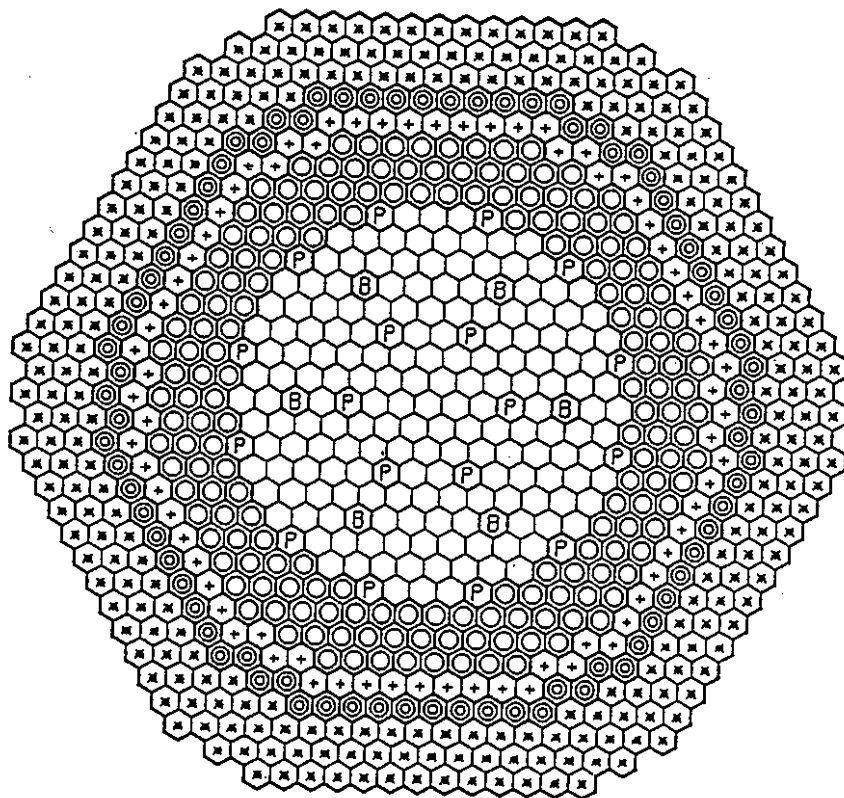
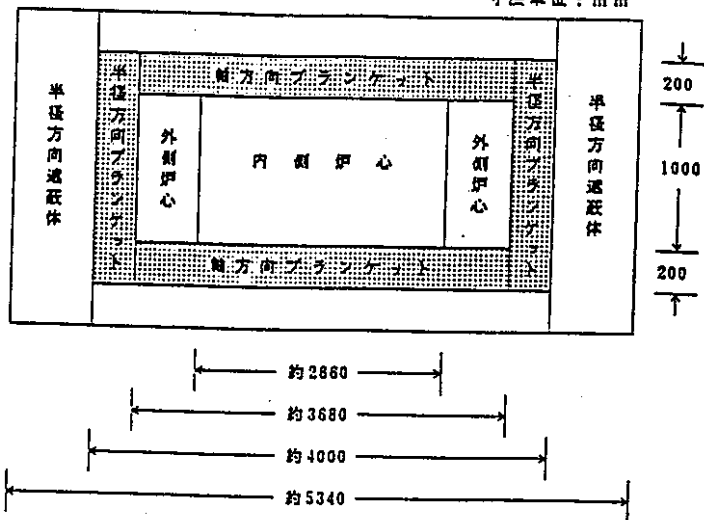
(*1) Pu 富化度は基準炉心と同一。

(*2) 1\$=0.323%Δk/kk' で換算。

表7.1-2 TRU装荷方式の得失比較

TRU装荷方式	メリット	デメリット	炉心設計上の制限及び改善点
均質装荷	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心特性への影響が少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・TRU混入集合体の取扱本数が多い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心設計上の制限、改善点は、他の装荷方法に比べ少ない。
非均質装荷	<ul style="list-style-type: none"> ・TRU混入がターゲット集合体に限定されているため、TRU混入集合体の取扱い本数が少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・TRU混入燃料をターゲット集合体形式で炉心内に装荷するため、出力の変動が大きくなる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ターゲット集合体の線出力低減が課題であり、ターゲットピンの細径化等の対策が必要となる。
「Np, Am+Cm」分離装荷	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心特性への影響を極力回避しつつ、TRU混入率を増大させることができ、TRU消滅量大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心の外側に配置するターゲット集合体領域でのTRU消滅効率が低い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ターゲット集合体におけるAm、Cmの混入率が高く、ターゲットピンの許容線出力が低いため、TRU混入率はターゲットピンの線出力制限で決まる可能性が高い。

寸法単位：mm

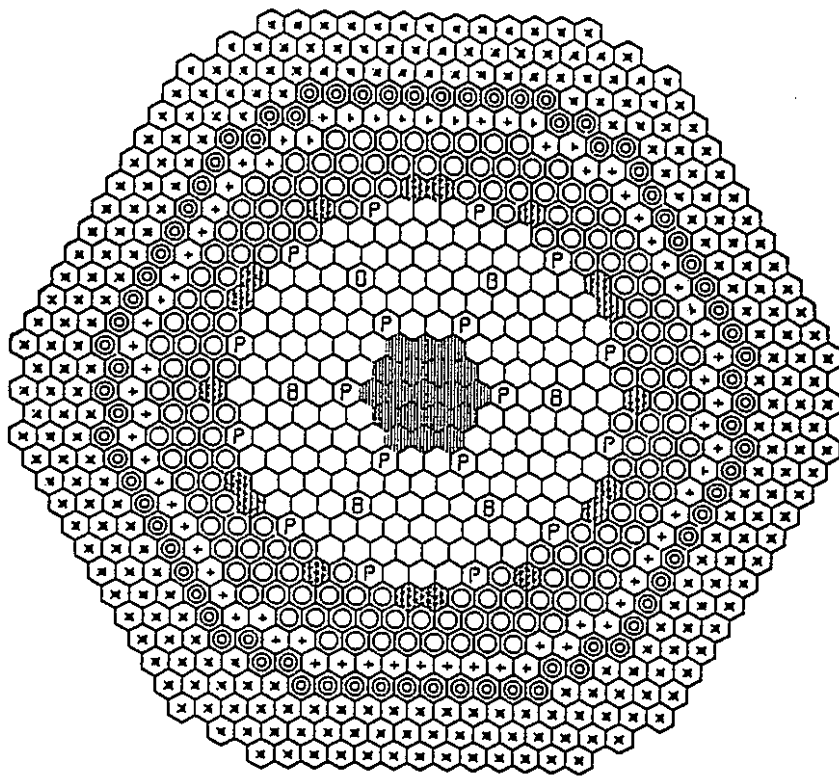


⊗ I 179.8mm

- ⬡ 内側炉心 175本
- ⊗ 外側炉心 180本
- ⊕ P 主炉停止系制御棒 18本
- ⊕ B 後備炉停止系制御棒 6本
- ⊕ + 半径方向ブランケット 72本 (1層)
- ⊗ ⊙ 半径方向遮蔽体 78本
- ⊗ * 半径方向遮蔽体 270本

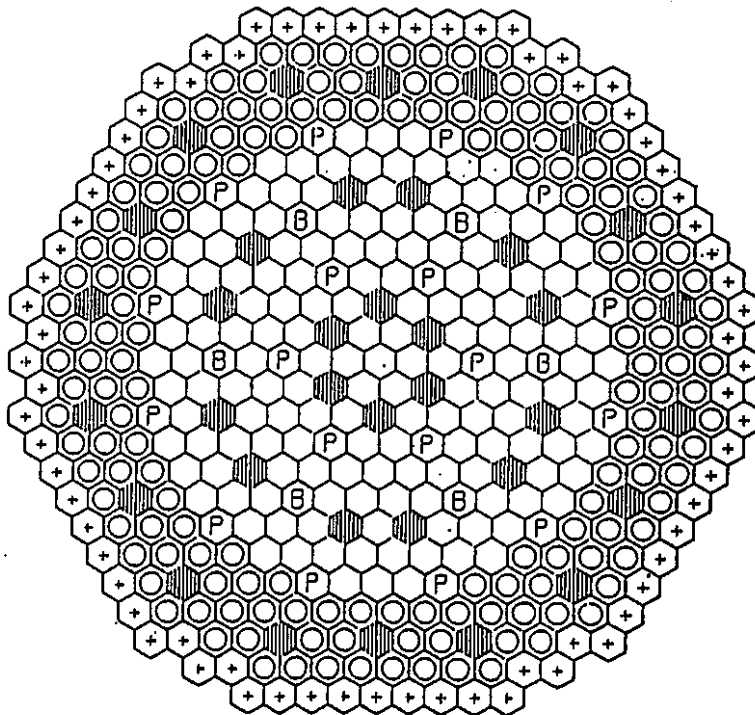
合計 799本

図 7.1-1 レファレンス炉心及び均質装荷型炉心構成図



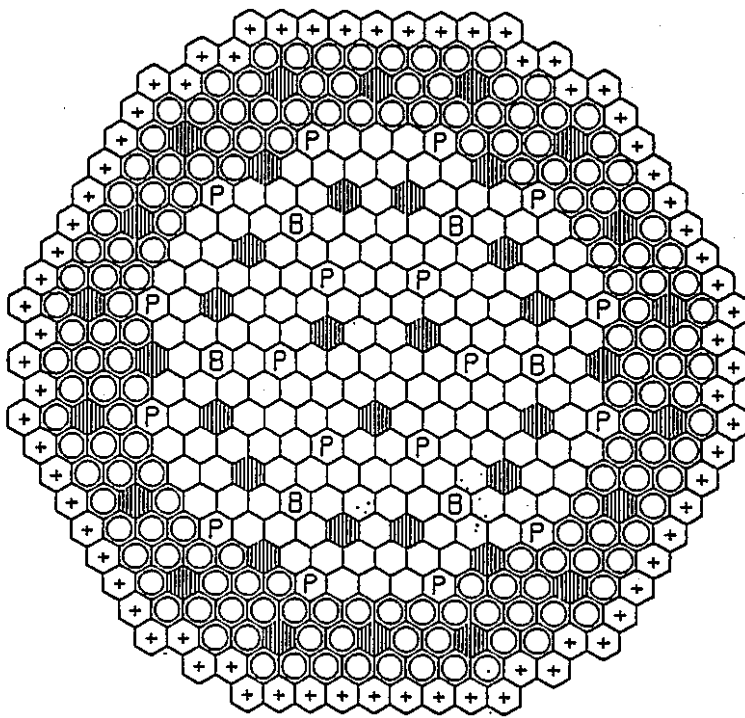
	内側炉心	156
	外側炉心	162
	主炉停止系制御棒	18
	後備炉停止制御棒	6
	半径方向ブランケット	72
	中性子遮蔽体 (SUS)	78
	中性子遮蔽体 (B4C)	270
	ターゲット集合体 (内側炉心)	19
	ターゲット集合体 (外側炉心)	18
合計		799

図 7.1 - 2 ターゲット集合体装荷炉心の炉心構成 (集中装荷型)



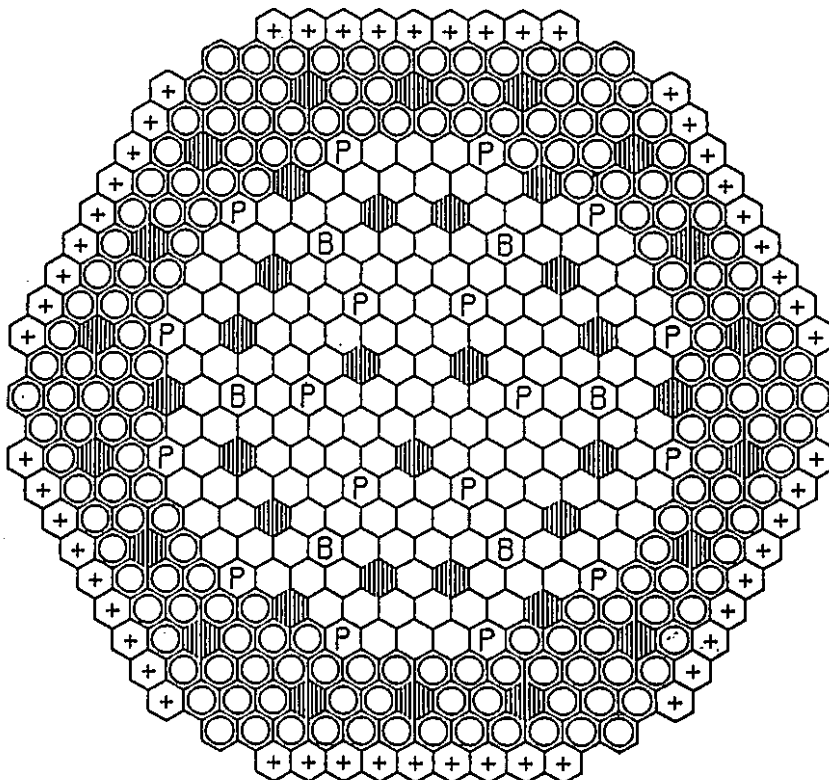
	INNER CORE
	OUTER CORE
	PRIMARY ROD
	BACK UP ROD
	RADIAL BLANKET
	TARGET ASSEMBLY

図 7.1 - 3 ターゲット集合体の装荷パターン (CASE-A) (分散装荷型 : 同心円配列型)



- INNER CORE
- OUTER INSU.
- P PRIMARY ROD
- B BUCK UP ROD
- + RADIAL BLANKET
- ▨ TARGET ASSEMBLY

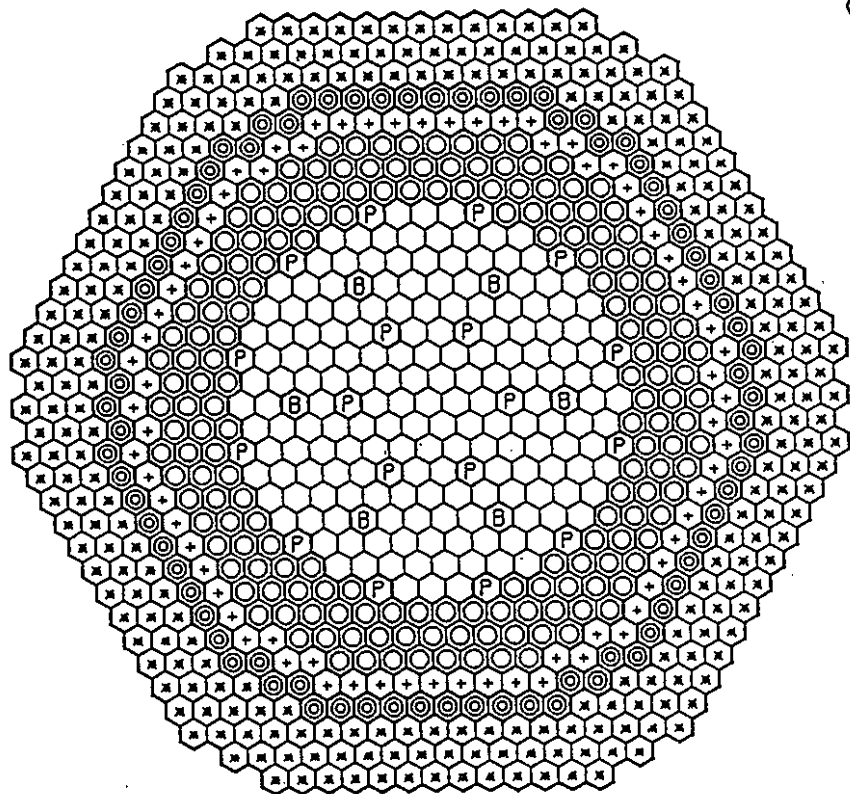
図 7.1 - 4 ターゲット集合体の装荷パターン(CASE-F)
(分散装荷型：IC/OC境界位置増加型)



- INNER CORE
- OUTER CORE
- P PRIMARY ROD
- B BUCK UP ROD
- + RADIAL BLANKET
- ▨ TARGET ASSEMBLY

図 7.1 - 5 ターゲット集合体装荷拡大炉心の炉心構成 (炉心拡大型)

⊗ I 179.8 mm



⊙	内側炉心	175本
⊗	外側炉心	180本
P	主炉停止系制御棒	18本
B	後備炉停止系制御棒	6本
+	ターゲット集合体	72本 (1層)
⊗	半径方向遮蔽体	78本
*	半径方向遮蔽体	270本

合計 799本

7-13

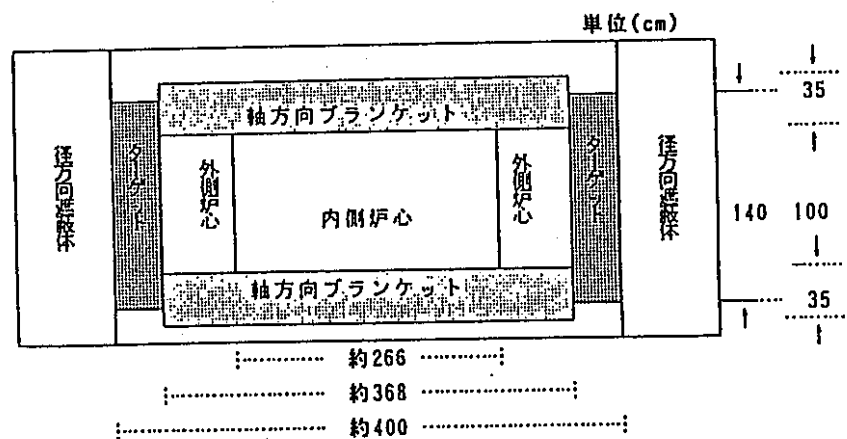
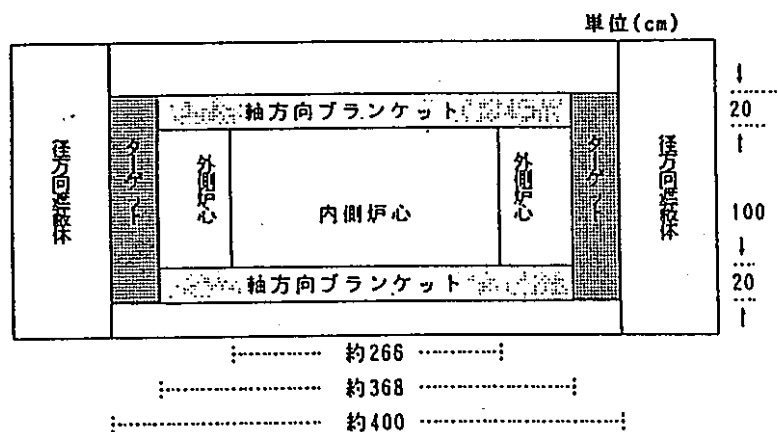


図 7.1 - 6 (Np, Am+Cm)分離型 (従来炉心型) 構成図

図 7.1 - 7 (Np, Am+Cm)分離型 選定炉心構成図

付録A 構造材膨張に関する反応度フィードバックモデル

集合体の熱膨張により、炉心が半径方向に膨張することによる反応度および、制御棒駆動軸の熱膨張により制御棒が相対的に炉心に挿入される効果を、以下のように模擬する。

1. 炉心の径方向膨張（グリッド膨張）による反応度

炉心冷却材温度の上昇による集合体の熱膨張で炉心の半径が増加することによる負の反応度フィードバックを計算する。炉心支持板の膨張による反応度と合わせてパッド膨張による反応度と呼ぶ（図A-1参照）

以下のモデルを用いる。

$$\rho_R = k_S \Delta T_R$$

$$\Delta T_R = X_R (\Delta T_{WP} - \Delta T_{in})$$

$$\Delta T_R < 0 \text{ なら } \Delta T_R = 0$$

$$\Delta T_{WP} = \left\{ \sum_{i=0}^n (\Delta T_{Wpi} \Delta L_i) - (G_{wp}/as) \right\} / \sum_{i=0}^n \Delta L_i$$

ここで、 k_S : 径方向膨張温度係数（炉心支持板温度係数と同じ値）

X_R : 炉心上端のグリッドの膨張と炉心高さ平均の膨張の差異を考慮する幾何学的係数

ΔT_R : 径方向膨張に寄与する温度上昇

n : 炉心の半径方向リング数（内側炉心、外側炉心の2領域）

G_{wp} : 炉心上端のグリッド位置での通常運転時ギャップ幅

as : 線膨張係数（パッド、支持板共通）

ΔT_{Wpi} : i 列（リング）の集合体パッド温度の定常からの上昇

ΔL_i : i 番目のリングの厚み。

主な仮定は、

- ①炉心冷却材温度の上昇により、燃料集合体のグリッドが膨張し、炉心直径が膨張する。
グリッドのうち炉心上端近傍にあるものが隣接集合体のグリッドと押し合って炉心膨張につながると考える。
- ②集合体のグリッド間に通常運転時にギャップがあり、熱膨張がすぐには炉心の膨張につ

ならない場合の影響も評価出来るモデルである。

③炉心支持板と燃料集合体グリッドの線膨張係数が等しい。

④過渡時の集合体の湾曲は模擬しない。集合体はグリッドの押し合いにより外側に倒れると想定する。集合体の湾曲は定常時から変化しないと考える。(保守側の扱いと言われている)。

炉心支持板とパッド部の膨張による炉心中心の膨張量を簡易的に算出している。

反応度係数として炉心支持板の温度係数を使用する。炉心支持板の温度係数は、炉心が円筒形状を保ったまま径方向に膨張する条件を想定しているが、わずかに傾いた図の条件に適用するのは妥当であると考え。

2. 制御棒駆動軸の膨張による反応度

冷却材出口温度の上昇により制御棒駆動が熱膨張することによる反応度効果を評価する。

また炉容器の熱膨張で制御棒が引き抜かれる効果も考慮する(図A-2)。

$$\rho_{CR} = k_{CR}(a_{CR}L_{CR}\Delta T_{CR} - a_{RV}L_{RV}\Delta T_{RV})$$

ρ_{CR} : 制御棒駆動軸膨張による反応度

k_{CR} : 制御棒反応度価値のS字曲線の傾き

a_{CR} : 駆動軸の線膨張係数

ΔT_{CR} : 制御棒駆動軸膨張に係わる温度の上昇

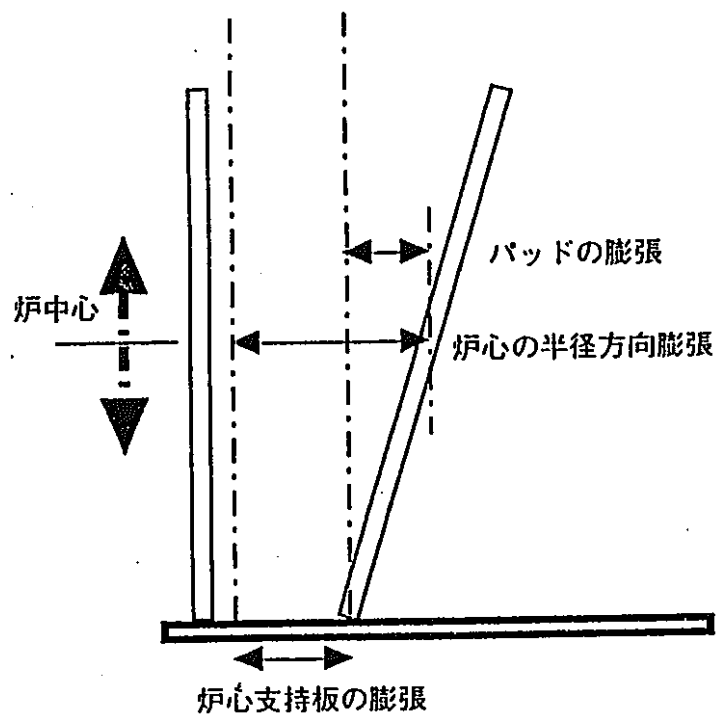
L_{CR} : 寄与する駆動軸の長さ

a_{RV} : 駆動軸の線膨張係数

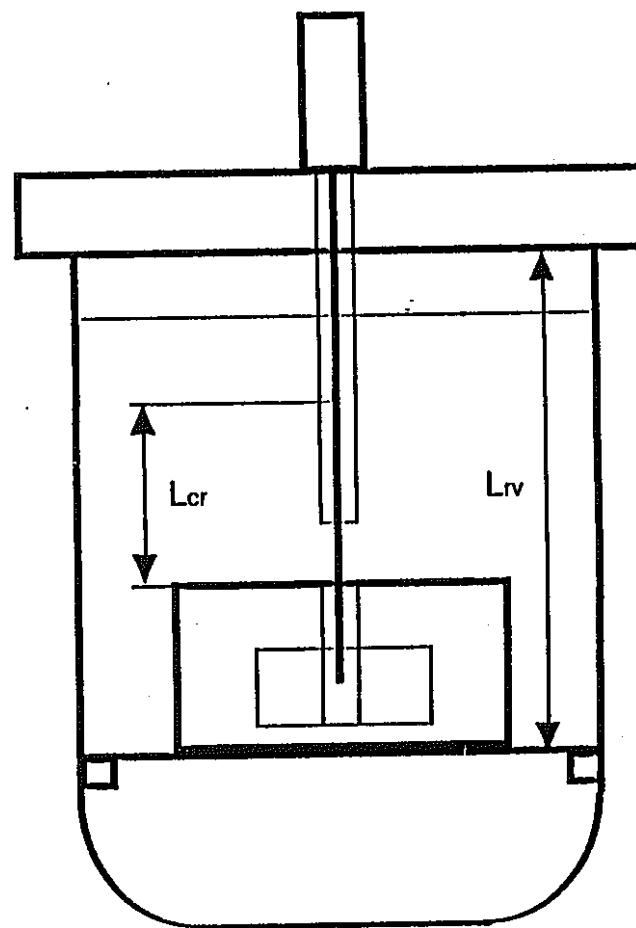
ΔT_{RV} : 炉容器温度の上昇

L_{RV} : 寄与する炉容器部の長さ

駆動軸および炉容器温度は、それぞれ炉心出口温度、炉上部プレナム冷却材温度と、1次遅れ時定数(入力)より計算する。

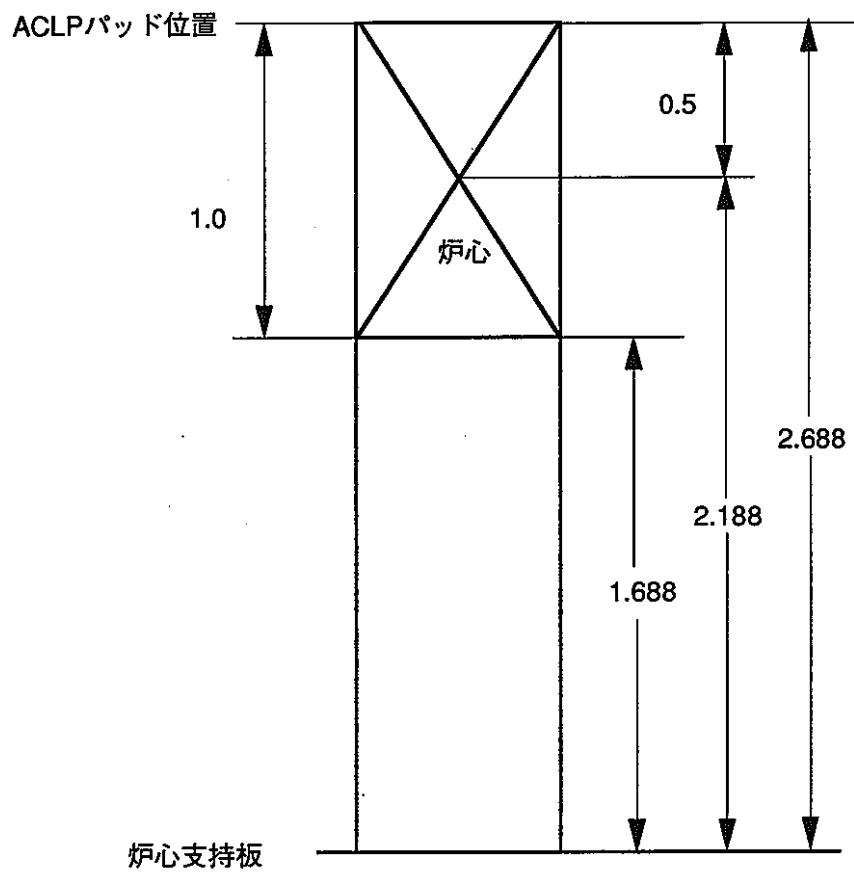


炉心半径方向膨張（バッド膨張）による反応度



制御棒駆動軸膨張による反応度

図A-1 構造物の膨張にかかわる反応度フィードバックモデルの概念



[単位：m]

$$X = \frac{2.188}{2.688} = 0.814$$

図A-2 パッド膨張反応度計算用高さ関係

付録B 平成5年度TRU 消滅処理炉心のULOF (TRU100E) の結果

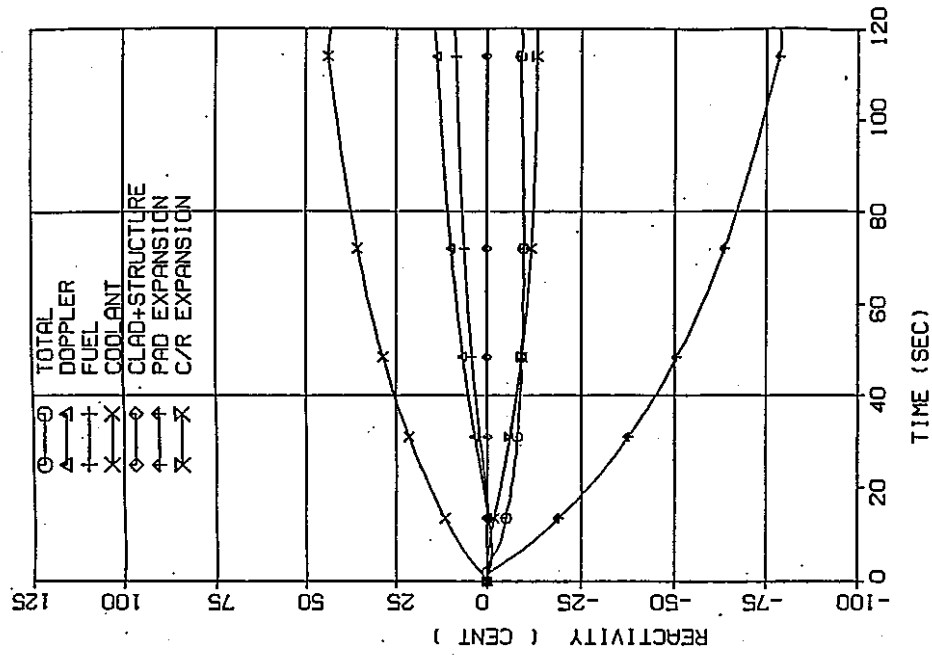


図2.3.4-15 反応度時間変化 (ケースTRU100E)

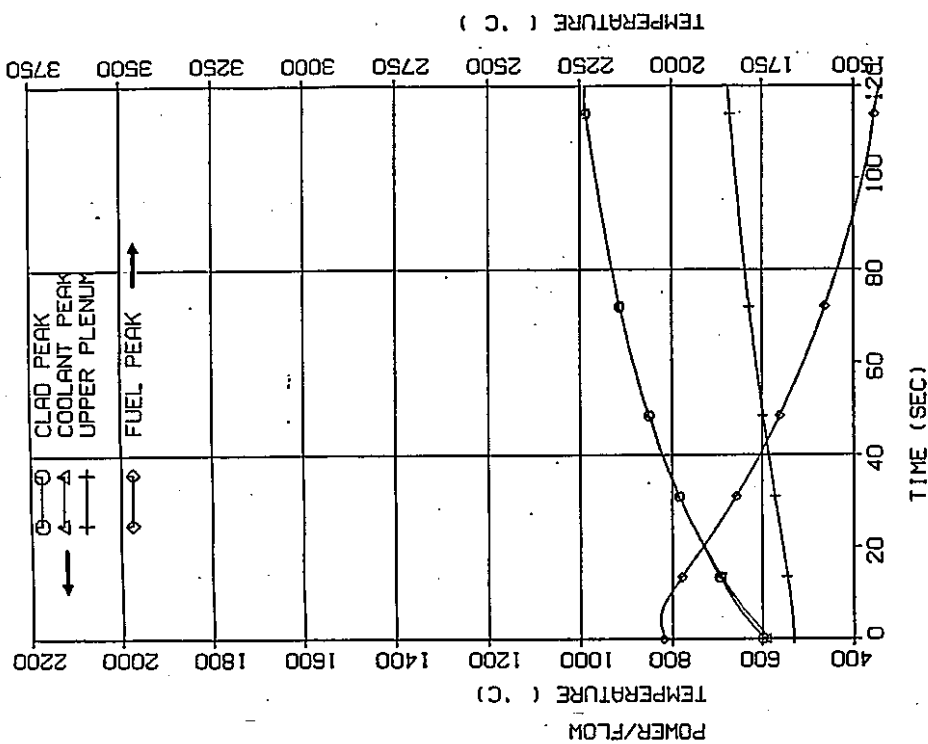


図2.3.4-14 最大温度変化 (ケースTRU100E)

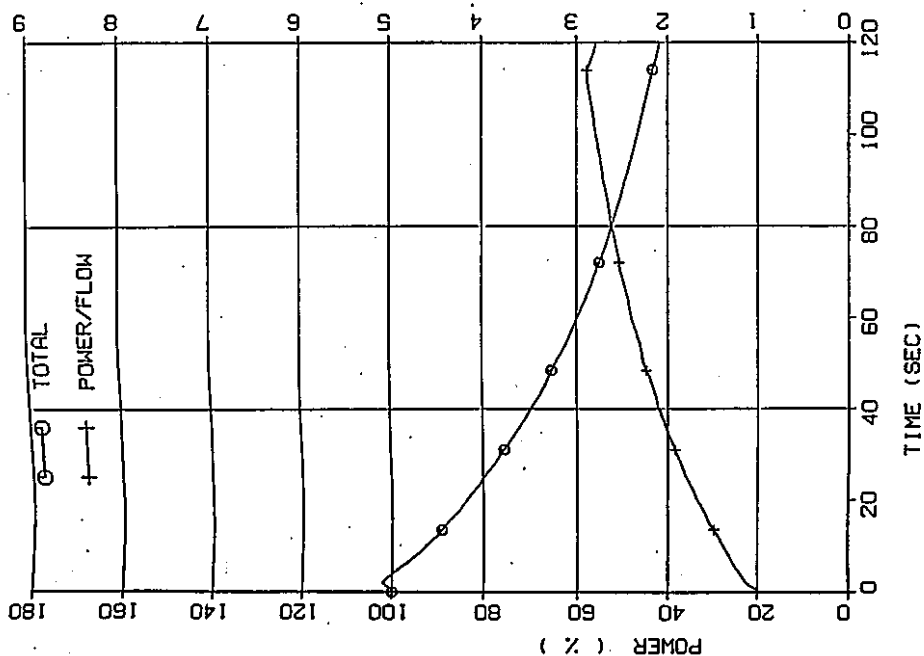


図2.3.4-13 出力/流量時間変化 (ケースTRU100E)