

JAERI-Research

JP0150809

2001-046



軽水炉次世代燃料の炉物理に関する
ベンチマーク問題の提案及び解析結果

2001年10月

炉物理研究委員会

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財團法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行　　日本原子力研究所

軽水炉次世代燃料の炉物理に関するベンチマーク問題の提案及び解析結果

日本原子力研究所
炉物理研究委員会*

(2001年9月4日受理)

日本原子力研究所炉物理研究委員会では、軽水炉次世代燃料の核特性計算手法の精度を評価するため、「軽水炉次世代燃料の炉物理ワーキングパーティ」を設置し、一連のベンチマーク問題の検討を行った。次世代燃料とは、70GWd/t程度と現行の設計を大きく上回る燃焼度の増大を目指す燃料をいう。ワーキングパーティでは、ウランまたはMOX燃料を装荷したピンセル、PWR燃料集合体、BWR燃料集合体の計6つのベンチマーク問題を提案した。作成されたベンチマーク問題の仕様は、 ^{235}U 濃縮度 5wt%といった現行の設計限界を上回るものとなっている。ワーキングパーティ参加の11機関がベンチマーク問題の解析を実施し、現在のデータと手法による解析精度の現状と今後検討すべき課題を明らかにした。本報告書では、このベンチマーク問題の詳細仕様を示すとともに、解析の結果とその比較による検討結果について記述する。

Proposal and Analysis of the Benchmark Problem Suite for
Reactor Physics Study of LWR Next Generation Fuels

Research Committee on Reactor Physics*

Japan Atomic Energy Research Institute
Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo

(Received September 4, 2001)

In order to investigate the calculation accuracy of the nuclear characteristics of LWR next generation fuels, the Research Committee on Reactor Physics organized by JAERI has established the Working Party on Reactor Physics for LWR Next Generation Fuels. The next generation fuels mean the ones aiming for further extended burn-up such as 70GWd/t over the current design. The Working Party has proposed six benchmark problems, which consists of pin-cell, PWR fuel assembly and BWR fuel assembly geometries loaded with uranium and MOX fuels, respectively. The specifications of the benchmark problem neglect some of the current limitations such as 5wt% ^{235}U to achieve the above-mentioned target. Eleven organizations in the Working Party have carried out the analyses of the benchmark problems. As a result, status of accuracy with the current data and method and some problems to be solved in the future were clarified. In this report, details of the benchmark problems, result by each organization, and their comparisons are presented.

Keywords : High Burnup, PWR, BWR, MOX Fuel, Cell Burnup Calculation,
Benchmark Problem, Next Generation Fuel, Calculation Accuracy

*Working Party on Reactor Physics for LWR Next Generation Fuels

目 次

1.はじめに.....	1
2.課題の検討.....	3
2.1 国際ベンチマーク問題のレビュー.....	3
2.1.1 隣接する可燃性毒物棒入りBWR小格子の燃焼計算.....	3
2.1.2 高転換軽水炉格子の燃焼計算.....	4
2.1.3 プルトニウム燃料の燃焼に関する国際ベンチマーク.....	5
2.1.4 燃焼度クレジットに関する国際ベンチマーク.....	8
2.1.5 まとめ.....	13
2.2 PWRにおける燃料高度化の現状とベンチマーク問題への要望.....	15
2.2.1 PWRにおける高度化燃料利用.....	15
2.2.2 高度化燃料炉心に対する解析手法及び検証用データ.....	16
2.2.3 まとめ.....	16
2.3 BWRにおける燃料高度化の現状とベンチマーク問題への要望.....	22
2.3.1 BWR燃料の開発動向.....	22
2.3.2 MOX燃料装荷臨界試験.....	27
2.3.3 まとめ.....	30
2.4 バックエンド部門からのベンチマーク問題への要望.....	31
2.4.1 バックエンド分野における課題.....	31
2.4.2 炉物理計算コードへの要望.....	32
2.4.3 照射後試験データ.....	33
2.4.4 現在の六ヶ所再処理施設の受け入れ基準について.....	34
3.ベンチマーク問題の提案.....	42
3.1 基本方針.....	42
3.2 ピンセル編.....	42
3.2.1 UO ₂ 燃料.....	42
3.2.2 MOX燃料.....	47
3.2.3 計算条件.....	51
3.3 PWR集合体編.....	56
3.3.1 UO ₂ 集合体.....	56
3.3.2 MOX集合体.....	62
3.3.3 計算条件.....	67
3.4 BWR集合体編.....	70
3.4.1 UO ₂ 集合体.....	70
3.4.2 MOX集合体.....	75

3.4.3 計算条件.....	80
4. ベンチマーク計算結果と考察.....	83
4.1 ピンセル計算.....	83
4.1.1 UO ₂ 燃料.....	84
4.1.2 MOX 燃料	128
4.1.3 今後の検討方針.....	158
4.2 PWR 集合体.....	160
4.2.1 PWR 集合体ベンチマーク解析参加機関及びコードシステム	160
4.2.2 解析結果の相互比較.....	161
4.2.3 まとめ及び今後の検討課題.....	172
4.3 BWR 集合体	174
4.3.1 BWR 集合体ベンチマーク解析参加機関及びコードシステム	174
4.3.2 解析結果の相互比較.....	174
4.3.3 まとめ及び今後の検討課題.....	185
5. まとめ.....	186
付録 1：軽水炉次世代燃料の炉物理 WP 活動の経緯.....	189
付録 2：各機関のベンチマーク予備計算結果	192

Contents

1.	Introduction.....	1
2.	Discussion of Tasks.....	3
2.1	Review of International Benchmark Problems	3
2.1.1	Burn-up Calculation for Small BWR Lattice with Adjacent Gadolinium Pins.....	3
2.1.2	Burnup Calculation for High Conversion Light Water Reactor Lattice	4
2.1.3	International Benchmark on Burn-up of Plutoniumu Fuel.....	5
2.1.4	International Benchmark on Burn-up Credit.....	8
2.1.5	Summary	13
2.2	Present Status of Advanced Fuel for PWRs and Requests for Benchmark Problem	15
2.2.1	Utilization of Advanced Fuel in PWR	15
2.2.2	Analitical Method and Validation Data for Avdance Fueled Core.....	16
2.2.3	Summary	16
2.3	Present Status of Advanced Fuel for BWRs and Requests for Benchmark Problem.....	22
2.3.1	Trend of Development of BWR Fuel.....	22
2.3.2	Critical Experiments for MOX Fueled Core	27
2.3.3	Summary	30
2.4	Requests for Benchmark Problem from the Back-end of Fuel Cycle	31
2.4.1	Subjects from Back-end of Fuel Cycle	31
2.4.2	Requests for Reactor Physics Code.....	32
2.4.3	Post Irradiation Experiment Data.....	33
2.4.4	Current Criteria of Acceptable Spent Fuel in Rokkasyo Reprocessing Facility	34
3.	Proposal of Benchmark Problems.....	42
3.1	Basis of Benchmark Problems	42
3.2	Pin-cell Problem.....	42
3.2.1	UO_2 Fuel	42
3.2.2	MOX Fuel	47
3.2.3	Calculation Condition and Requirement	51
3.3	PWR Assembly Problem.....	56
3.3.1	UO_2 Fuel Assembly.....	56
3.3.2	MOX Fuel Assembly	62
3.3.3	Calculation Condition and Requirement	67
3.4	BWR Assembly Problem	70
3.4.1	UO_2 Fuel Assembly.....	70
3.4.2	MOX Fuel Assembly	75
3.4.3	Calculation Condition and Requirement	80

4. Analysis Results and Discussions	83
4.1 Pin-cell	83
4.1.1 UO ₂ Fuel	84
4.1.2 MOX Fuel	128
4.1.3 Summary and Future Work	158
4.2 PWR Assembly	160
4.2.1 Participants and Code Systems	160
4.2.2 Comparison of Results	161
4.2.3 Summary and Future Work	172
4.3 BWR Assembly	174
4.3.1 Participants and Code Systems	174
4.3.2 Comparison of Results	174
4.3.3 Summary and Future Work	185
5. Summary	186
Appendix 1 : Activity Record of the Working Party on LWR Next Generation Fuels	189
Appendix 2 : Preliminary Results Submitted by Member Organizations	192

1. はじめに

平成 11 年度より、炉物理研究委員会の下部組織である原子炉システム専門部会はその活動形態を変え、NEANSC 関連活動の国内窓口と情報交換の場という性格から、一步進んで何らかの具体的な成果を決められた期間であげるという方向へと転換を図ることとなった。具体的には、ワーキングパーティ(以下 WP)と称するテーマ別小グループを複数個設け、そこに個々のテーマに沿った専門家が集い、より深い議論を行える環境を提供するというものである。各委員より、テーマの候補が提案され、当 WP は、以下の 3 つのテーマを統合する形で発足した。

- ・ MOX 燃料の炉物理
- ・ 高燃焼度燃料の炉物理
- ・ 今後の軽水炉開発に必要な炉物理実験

以上のテーマに関心の深いメンバーが集まって、当 WP を構成することとなったが、まずは、これらのテーマの下にどのような内容の活動を行うのかについて議論することから WP の活動が開始された。

具体的な活動内容についての提案を WP メンバーに募集した結果、軽水炉燃料の高度化が核計算精度に及ぼす影響についての関心が高いことが伺えた。WP 会合での議論を経て、直近の MOX 燃料や高燃焼度燃料については工学的に見て概ね不安がないものの、現状の制約(例えば 5wt%²³⁵U)を大幅に超える設計については検討対象とする価値があることが確認された。これらのこと踏まえ、本 WP の活動の骨子として、当面の軽水炉燃料高度化計画の次を狙ったある程度チャレンジングな設計、具体的にはウラン燃料、MOX 燃料共に取出平均燃焼度約 70GWd/t を狙った設計を対象に、既存の計算手法間での結果の一致度の確認や課題の抽出、また精度検証や向上に必要な実験の提案につながる可能性をもった核計算ベンチマーク問題を提案することとした。なお、WP の名称は、これらのこと踏まえ「軽水炉次世代燃料の炉物理」WP と命名された。表 1.1 に本 WP のメンバー一覧を示す。

ベンチマーク問題を設定するにあたっては、まず PWR, BWR における燃料高度化の現状、国際ベンチマーク問題のレビュー、バックエンドからの要望等について調査を実施した。その上でベンチマーク問題設定作業に着手し、結果的に、ウラン燃料、MOX 燃料それぞれについて、ピンセル形状、PWR 集合体形状、BWR 集合体形状の 3 種類、合計、6 種類のベンチマーク問題を設定した。そして、各ベンチマーク問題のねらいを踏まえ、ピンセル形状と集合体形状で異なる評価項目を決定した。こうしたベンチマーク問題の設定作業の過程では、平行して行われた試解析の結果からのフィードバックや電子メールを活用した WP メンバー間の活発な議論がなされ、それらによってベンチマーク問題が洗練されていった。最終的に問題仕様が確定したのは、活動期間が 3 ヶ月を切った平成 13 年初頭であった。

それから、各メンバーによる最終解析が開始され、最終的に各メンバーが所属する 11 の機関からの結果を得ることが出来た。当初、ベンチマーク問題の設定と試解析までを成果の目標と

していたが、各メンバーの積極的な WP 活動への参画により、多数の解析結果の集約とそれらの比較検討に着手することができた。

本報告書は、「軽水炉次世代燃料の炉物理」WP の 1 年間にわたる活動成果をまとめたものである。第 2 章でベンチマーク問題を作成するに当たっての事前調査内容をまとめ、第 3 章においてはベンチマーク問題を設定するに当たっての基本的考え方、及び設定されたベンチマーク問題の詳細がまとめられている。第 4 章では、メンバー所属の各機関から提出された計算結果を相互に比較するとともに、結果について予備的な検討を加えている。第 5 章は全体のまとめとして成果を総括するとともに今後の活動についての提言を行っている。なお、付録 1 においては、WP 活動経過報告を記載しており、また付録 2 においては、各機関から提出された計算結果が、用いた計算コードの説明とともに掲載されている。

表 1.1 軽水炉次世代燃料の炉物理ワーキングパーティメンバー表 (2001 年 6 月現在)

氏名	所属	執筆分担*
佐治 悅郎 (リーダー)	内閣府原子力安全委員会事務局	1 章, 5 章
北田 孝典	大阪大学	4.3 節
亀山 高範	電力中央研究所	
猪原 敏照	電源開発(株)	
相沢 乙彦	武藏工業大学	
山本 章夫 (幹事)	原子燃料工業(株)	3 章
中島 鐵雄	(財)原子力発電技術機構	
宇根崎 博信 (幹事)	京都大学	4.2 節
濱崎 学 [1999 年 12 月まで]	三菱重工業(株) [現、文部科学省]	
井田 俊一 [2000 年 1 月から]	三菱重工業(株)	2.2 節
岩本 達也 [2000 年 6 月まで]	日本ニュクリア・フュエル(株)	
池原 正 [2000 年 7 月から]	日本ニュクリア・フュエル(株)	2.3 節, 3 章
大木 繁夫	核燃料サイクル開発機構	
青山 肇男	(株)日立製作所	2.3 節
中島 健 (幹事)	日本原子力研究所	
長谷川 明	日本原子力研究所	
奥村 啓介	日本原子力研究所	2.1 節, 4.1 節
阪元 重康	東海大学	
高木 直行	核燃料サイクル開発機構	
伊藤 卓也	原子燃料工業(株)	2.3 節, 3 章
山本 徹	(財)原子力発電技術機構	
吉岡 研一	(株)東芝	2.4 節
秋保 秀一	(株)開発計算センター	
宮本 豊一	四国電力(株)	

* 本報告書の執筆担当個所 (章あるいは節) を示す。

2. 課題の検討

2.1 國際ベンチマーク問題のレビュー

本 WPにおいてベンチマーク問題を作成するにあたり、過去にどのようなベンチマーク問題が提案され実施されているかを調査しておくことは、過去の問題との重複を避け、本 WPによるベンチマーク問題の位置付けを明らかにする上で重要である。

国際的に取り上げられるベンチマーク問題は、1人の著者が論文で設定した問題を他の研究者が引用して自然に国際的な広がりを見せる場合と、OECD/NEA や IAEAなどの国際的な原子力機関がベンチマーク問題を公式に設定する場合とがある。後者の場合には、各国の代表が出席する小規模な専門家会合において、ベンチマーク問題の提案と詳細な仕様の決定が行われ、運営委員会などで正式に採用されて関係各国にアナウンスされることが多い。こうした国際ベンチマークに関する活動内容は、関連する国際会議などで紹介される。

以下では、軽水炉の格子燃焼計算問題に限定して、過去に行われた代表的な国際ベンチマーク問題を紹介する。また、過去のベンチマーク活動において反省すべき点も併せて記述し、本 WPによるベンチマーク活動に反映させる。

2.1.1 隣接する可燃性毒物棒入り BWR 小格子の燃焼計算

古いものでは、1980 年代に OECD/NEA/CRP(現在の NEA/NSC)の主催でガドリニアの毒物効果を題材にした国際ベンチマーク[1]が行われている。これは図 2.1.1 に示すような BWR を模擬した 4×4 の小格子の中心に対角に隣接する $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 燃料棒を置いた体系で、無限中性子増倍率、ピン出力分布、主要な重核種や Gd 同位体核種の燃焼組成変化を比較する数値ベンチマーク問題である。この問題におけるウラン濃縮度は 3.0wt.%であるが、問題の主眼は可燃性毒物効果であるため、毒物がほぼ燃え尽きるまでの 10GWd/t までの計算結果を比較している。

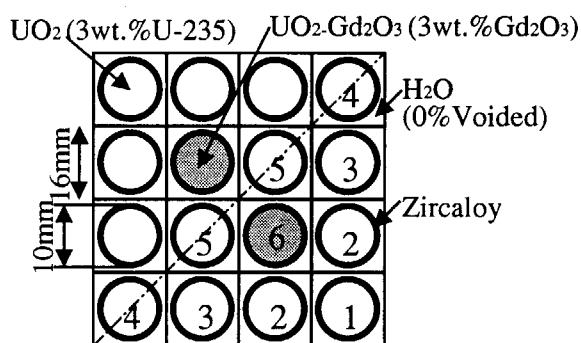


図 2.1.1 可燃性毒物入り BWR 小格子燃焼ベンチマーク問題(1984 年)の体系[1]

この国際ベンチマーク問題には日本を含む7カ国から12機関が参加している。ベンチマーク問題自体は古いものであるが、可燃性毒物を含んだ非均質体系を代表する問題として、近年でも新しく開発された格子燃焼計算コードの検証用にしばしば引用されている。実機の燃料集合体体系に比べると問題としての迫力に欠けるが、簡便な体系でガドリニア燃焼の計算手法の検討ができる点がこの問題の特長である。しかしながら、仮想的な数値ベンチマーク問題の常として、正確な参考解が無いことが問題となる。核データや炉定数の違いはあるものの、現在の最も信頼できるライブラリやコード及び計算手法を使って、同問題をやり直して見ると、当時としては参加機関中で最も平均値からずれていた解がベストな解であることが分かる。これは、参加機関の多くが1980年代の計算機能力に見合った燃焼ステップ数で燃焼計算を実施したため、燃焼ステップ幅が粗く、ガドリニアの燃焼特性を正確に扱えなかつたためと思われる。参考解の無い燃焼問題では、大勢の占める結果が正しいという保証がないため、差異の原因を明らかにすることが何よりも重要と言える。

2.1.2 高転換軽水炉格子の燃焼計算

1980年代の後半は高転換軽水炉の研究が国内外で盛んに行われ始めた時期である。これに対応し、中富化度のMOX燃料を稠密六角格子に配列した単一燃料棒の無限格子体系に対する燃焼計算問題が原研から提案されOECD/NEA/CRPの国際ベンチマーク問題[2]として採用された。高転換軽水炉格子は、現行軽水炉に比べて減速材対燃料体積比(V_m/V_f)が小さく、中性子スペクトルが硬いことを特徴としている。以下の2種類の格子に対して燃焼計算を行い、50GWd/tまでの無限中性子増倍率、瞬時転換比、主要な重核種とF.P.核種の燃焼組成変化、1群または3群の微視的断面積と反応率、燃焼初期および末期でのボイド反応度(0%、45%、90%、99%)などが比較されている。

- ・稠密格子 : $V_m/V_f=0.5$ 、核分裂性Pu富化度=8%、SUS被覆管
- ・準稠密格子 : $V_m/V_f=1.1$ 、核分裂性Pu富化度=7%、Zr被覆管

このベンチマークは、もともと国内で内々に行われていた計算比較が国際ベンチマークとして発展したもので、最終的に8カ国15機関が参加し20の計算結果が提出されている。新型炉を対象とするベンチマーク問題としては珍しく、研究機関だけの参加に留まらず、三菱、東芝、日立などの国内原子力メーカーも参加している。

高転換軽水炉以外にも新型炉を対象とする国際ベンチマーク問題は幾つか提案されているが、現行の軽水炉概念からあまりにかけ離れた問題には、電力や原子力メーカーにとってベンチマークに参加するメリットが少ないものとして敬遠されることが多い。また、再処理やMOX燃料に関連した最近の国際ベンチマーク問題では、米国なども参加し易いように、東欧や発展途上国の支援を目的にあげるなどの配慮がなされている。ベンチマーク問題の設定においては、提案の目的や問題の内容及び難易度が多くの参加者に受け入れられるようにする必要がある。

2.1.3 プルトニウム燃料の燃焼に関する国際ベンチマーク

1980 年代には軽水炉格子の燃焼計算を題材とするベンチマーク問題はそれほど多く提案されていない。一方、1990 年代になると、軽水炉によるプルトニウム利用や燃焼度クレジットがトピックスとして挙げられ、OECD/NEA から幾つかの国際ベンチマーク問題が提案され実施されている。本節では、OECD/NEA/NSC 傘下のワーキングパーティの 1 つである WPPR (Working Party on Physics of Plutonium Recycling and Innovative Fuel Recycling) の活動で取り上げられたベンチマーク問題を紹介する。なお、WPPR はバックエンドまで含めた将来のプルトニウム利用のポテンシャルを検討することを目的として 1992 年に設置され、軽水炉、重水炉、高速炉、その他の新型炉を対象に調査やベンチマーク活動を現在も継続的に行っている。これらの成果については、OECD/NEA の公開文献や国際会議の論文など[3-5]にまとめられている。以下に、軽水炉燃焼に関するベンチマークの概要をまとめる。

(1) PWR による多重プルトニウムリサイクルベンチマーク

1) Phase I ベンチマーク(1993-1994)

- ・ 計算体系 : PWR を模擬した単一燃料棒無限格子($V_m/V_f=1.9$)モデルによる燃焼計算
- ・ 燃料 : MOX、Pu 燃料組成は以下の 2 種類

	Pu-total	Pu-fiss.	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
Dirty Pu*	12.5wt.%	6.0wt.%	4	36	28	12	20
Better Pu	5.5wt.%	2.8wt.%	1.8	59	23	12.2	4

*50GWd/t の self-generation モードで 5 回目のリサイクル Pu 組成

- ・ ポロン濃度 : 500ppm、出力 : 38.3W/g、燃焼ステップ : 0~50GWd/t を 18 分割
- ・ 比較項目 : 燃焼度(0、10、33、42、50GWd/t)における U、Pu、MA の組成、主要 F.P.30 核種の組成、無限中性子増倍率、1 群断面積(吸収、核分裂、 ν 値)、反応率(吸収、核分裂)、中性子スペクトル
- ・ 問題ケース数 : 2 (Benchmark-1A(Dirty)、Benchmark-1B(Better))
- ・ 計算結果 : 14(A)、13(B)セット(9 カ国、12 機関)
- 中性子増倍率の差異(Spread)は、Dirty-Pu の場合で 3.1%(BOL)~4.9%(EOL)、Better-Pu の場合で 1.3%(BOL)~2.9%(EOL)
- ・ 詳細資料 : 文献[3]の Vol.1 及び Vol.2

2) Phase II ベンチマーク(1995-1997)

- ・ 計算体系 : 標準型($V_m/V_f=2.0$)と高減速型($V_m/V_f=3.5$)PWR を模擬した単一燃料棒無限格子モデルによる燃焼計算
- ・ 燃料 : MOX(マルチリサイクル Pu)
線出力 178W/cm(標準型)または 280W/cm(高減速型) で 51GWd/t 燃焼後、5 年冷却(再処理前) + 2 年冷却(再処理後)したプルトニウム。
- ・ 比較項目 : Pu 燃焼量、MA 蓄積量、断面積(捕獲、 $(n,2n)$ 、核分裂)、34GWd/t 時点での反応度パラメータ(ポロン反応度、温度係数、ボイド係数、反応度バランス)、放射能及び放射能毒

性など

- ・問題ケース数：初期 Pu 組成(Pu-fiss./Pu=64%)を固定して 5 サイクル燃焼する問題と、各サイクルの初期 Pu 組成を全て与える問題の 2 種類
- ・計算結果：20 セット(9 カ国 17 機関)
高減速型 PWR の方が標準型 PWR の場合に比べて計算結果のばらつきが大きい。特に、Am、Cm の生成量及び放射能については大きなばらつきが認められる。
- ・詳細資料：文献[3]の Vol.6 と文献[4]

(2) MOX 燃料 BWR 集合体燃焼ベンチマーク(1998-2001)

- ・計算体系：Siemens 設計に基づく 10×10 型 BWR 燃料集合体(図 2.1.2 参照)に対する燃焼計算
- ・燃料：6 種類の MOX と 1 種類の UO₂-Gd₂O₃ で構成され、体系平均では U-235 が 0.43wt.%、Pu-fiss で 3.93wt.% である。
- ・比較項目：燃焼度 5 点(0,5,10,30,50GWd/t)における無限中性子増倍率、出力分布、重核種(U-235, 238; Pu-238, 239, 240, 241, 242; Am-241, 243, Cm-244)及び Gd-155,157 の数密度とミクロ断面積(核分裂反応と捕獲反応)など。
- ・問題ケース数：1(40%ボイド燃焼)+5(フレッシュ燃料に対して、0%、40%、80%、100%ボイド率、Cold 条件)
- ・計算結果：24 セット(10 カ国、17 機関)
日本からは原研(MVP-BURN+JENDL-3.2)、日立(VMONT+JENDL-3.2)、東電ソフトウェア(CASMO-4+JEF2.2)が参加している。最近では十字型制御棒を挿入した問題も追加されている(日本から TSI のみが参加)。
- ・詳細資料：
2001 年 6 月までに報告書ドラフトの作成が終了し、ベンチマーク参加者に配布される。その後、10 月 25-26 日開催予定の WPPR で承認され、詳細な最終報告書が刊行される予定である。これに先立ち、Global'2001(パリ、9 月 9-13 日開催)において同ベンチマーク計算結果の概要が発表される予定である[6]。

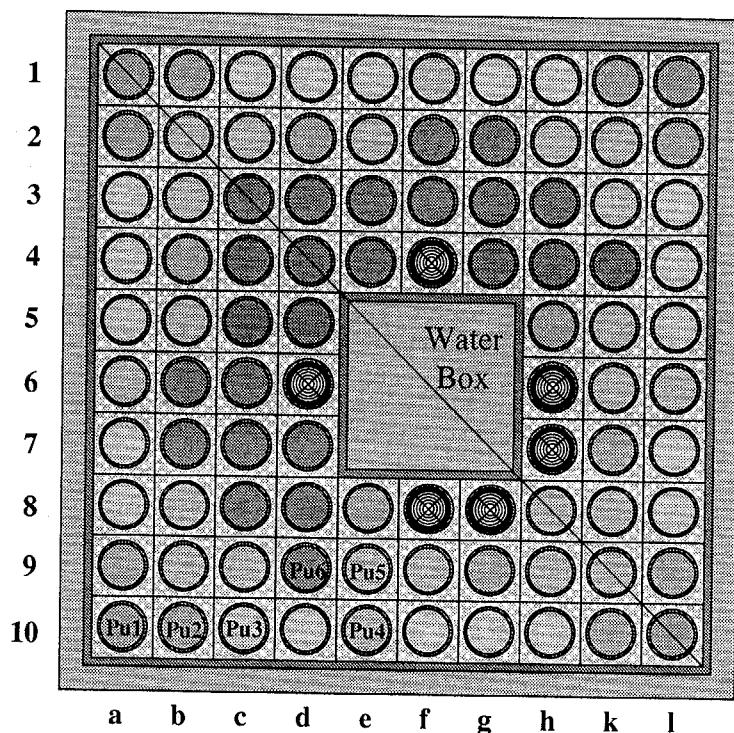


図 2.1.2 OECD/NEA/NSC の MOX 燃料 BWR 集合体燃焼計算ベンチマーク問題体系[6]
(集合体仕様は Siemense 社の ATRIUM-10 型燃料集合体設計に基づく)

(3) VVER-1000 MOX ベンチマーク

これは、例年 WPPR と前後して開催される TFRPD(The Expert Group (元 Task Force) on Reactor-based Pu Disposition)で実施されているベンチマークである。ロシア・東欧で使用されるコードの信頼性向上に資するため、クルチャトフ研究所(KI)から提案されて現在実施されている。VVER-1000 を想定した MOX 燃料を含む六角型燃料集合体体系で、6 種類の状態 (Hot、Cold、Xe 有無、ボロン有無など)に対する中性子増倍率、ピン出力分布を解析する他、集合体燃焼計算も行って重要核種の組成や出力分布の変化を比較している。

MCU、TVS-M、WIMS8A、HELIOS-1.4、MCNP-4B、MULTICELL といったコードによる解析結果の比較が TFRPD-4 で提出され、計算結果の見直し作業が進められている。今のところ日本からの参加は無い。

2.1.4 燃焼度クレジットに関する国際ベンチマーク

OECD/NEA/NSC の臨界安全ワーキングパーティ(WPNCS)配下に組織されている「A Burnup Credit Criticality Calculation Working Group」により、1991年以降、以下のシリーズの燃焼度クレジットに関するベンチマークが実施されている[7-9]。下線を引いたものは、格子燃焼計算を行っているベンチマーク問題である。

1) Phase I-A : Multiplication Factors-PWR Infinite Lattice Studies(1D)

- ・ 計算体系：PWR 単一燃料棒の無限格子
- ・ 燃料：3.6wt.%濃縮 UO₂燃料、燃焼度(0、30、40GWd/t)、冷却期間 1年または 5年相当の固定(given)組成
- ・ 計算内容： major actinides (U-234,235,236,238; Pu-239, 240, 241)、 minor actinides(Pu-238, 242; Am-241,243; Np-237)、 major F.P.(Mo-95, Tc-99, Ru-101, Rh-103, Ag-109, Cs-133, Sm-147, 149, 150, 151, 152, Nd-143, Nd-145, Eu-153, Gd-155)、 minor F.P.(その他、参加者依存)の中性子増倍率に対する効果
- ・ 比較項目：無限中性子増倍率、燃料及び水領域の中性子スペクトル、各核種の吸収・生成反応率など
- ・ 問題ケース数：13(燃焼度、冷却期間、actinides 及び F.P.考慮有り/無しの組み合わせ)
- ・ 計算結果：17～25 セット(11カ国、19 機関)
- ・ 詳細資料：文献[10]

2) Phase I-B : Spent Fuel Compositions, PWR Fuel

- ・ 計算体系：PWR 単一燃料棒の無限格子
- ・ 燃料：低濃縮 UO₂燃料
- ・ 計算内容： PIE ベースの格子燃焼計算問題。サイクル毎の出力、積算燃焼度、ボロン濃度が与えられる。
- ・ 比較項目：無限中性子増倍率と燃料組成変化：12 actinides(U-234,235,236,238; Np-237; Pu-238, 239, 240, 241, 242; Am-241,243)と 15F.P.(Mo-95, Tc-99, Ru-101, Rh-103, Ag-109, Cs-133, Sm-147, 149, 150, 151, 152, Nd-143,145, Eu-153, Gd-155)
- ・ 問題ケース数：燃焼度(27.35、37.12、44.34GWd/t)の異なる 3 ケース
- ・ 計算結果：21 セット(11カ国、16 機関)
- ・ 詳細資料：文献[11]

Phase I-B における計算結果の概要を表 2.1.1 に示す。これは、計算値数密度の標準偏差(σ)が 10%を超えるもの、または、% ΔN 当たりの中性子増倍率への寄与が 10pcm(0.01% Δk)を超える核種をまとめたものである。

表 2.1.1 Phase I-B 計算結果の概要[7]

Nuclide	Case A (27.35GWd/MTU) ^a		Case B (37.12GWd/MTU)		Case C (44.34GWd/MTU)	
	σ ^b	Δk^c ($\times 100$)	σ	Δk^c ($\times 100$)	σ	Δk^c ($\times 100$)
U-235	2.98	0.4410	6.01	0.6485	8.12	0.6285
Pu-238	15.68	0.0329	14.80	0.0562	13.86	0.0679
Pu-239	5.16	0.7085	6.08	1.0611	7.12	1.3962
Pu-240	3.95	0.2054	4.27	0.2404	5.27	0.2772
Pu-241	6.45	0.2219	5.97	0.3248	6.86	0.4583
Am-243	11.31	0.0079	10.41	0.0198	10.40	0.0302
Ag-109	11.03	0.0143	10.61	0.0191	10.21	0.0214
Sm-149	14.14	0.1386	15.01	0.1471	15.61	0.1499
Sm-150	5.30	0.0090	7.07	0.0177	8.50	0.0255
Sm-151	22.41	0.1502	21.72	0.1434	22.31	0.1539
Sm-152	7.20	0.0331	9.01	0.0469	9.68	0.0503
Gd-155	33.45	0.5252	33.28	0.8120	32.97	0.9792

^aBurnup is given in gigawatt days per metric ton uranium.^bThe standard deviation among participant results.^cRepresents an example of the change in multiplication factor times 100 from a one σ change in isotopic composition. The quantity is given as a positive value since the change in composition may be +/-.

3) Phase II-A : Multiplication Factors-Distributed Burnup Studies(2D)

- 計算体系：水平方向無限、軸方向有限の PWR 燃料棒格子体系($V_m/V_f=2.0$)
- 燃料：3.6wt.%または4.5wt.%濃縮 UO₂燃料、燃焼度4 ケース(0、10、30、50GWd/t)、冷却期間1年または5年、有効長365.7cmを9領域に分割し、燃焼度分布(軸方向対象)を想定して燃料組成を与える。上下に30cmのエンド・プラグ及び水反射体を考慮する。
- 計算内容：軸方向燃焼度分布が臨界性に与える効果(end effect)の検討(臨界計算)、major actinides 及び F.P.効果の検討。
- 比較項目：中性子増倍率、軸方向9領域核分裂分布
- 問題ケース数：26(濃縮度、燃焼度、冷却期間、燃焼度分布の有無、F.P.考慮の有無などの組み合わせ)
- 計算結果：全22(10カ国、18参加者)
- 詳細資料：文献[12]

4) Phase II-B : Multiplication Factors-Distributed Burnup Studies(3D)

- Phase II-A の3次元版(輸送キャスクを対象とする燃焼クレジットベンチマーク)で、21集合体収納のPWR 使用済み燃料輸送キャスクの現実的なモデルによる臨界計算。
- 詳細資料：文献[13]

5) Phase III-A : Criticality Calculations of BWR Spent Fuel in Storage and Transportation

- ・ 計算体系：日本のBWR、Step-2燃料集合体(8×8、Large Water Rod、平均燃焼度40GWd/t、最大燃焼度50GWd/t)をモデル化したものを水平方向に無限配列とし、軸方向は有限で扱う体系(図2.1.3参照)。
- ・ 燃料: 3.5wt.%濃縮UO₂燃料(集合体内燃料棒及び軸方向濃縮度分布一様)、燃焼度4ケース(0、20、30、40GWd/t)、冷却期間1年または5年、有効長365.76cmを9領域に分割し、燃焼度分布とボイド分布を想定して燃料組成を与える。
- ・ 計算内容：燃焼度、ボイド率(40%、70%)、冷却期間、軸方向燃焼度分布の有無、ボイド分布の有無、F.P.(主要15核種)が臨界性に与える効果の検討(臨界計算)
- ・ 比較項目：中性子増倍率、軸方向9領域核分裂分布
- ・ 問題ケース数：22(燃焼度、ボイド率、冷却期間、燃焼度分布の有無、ボイド分布の有無、F.P.考慮の有無などの組み合わせ)
- ・ 計算結果：21セット(9加盟、17機関)
- ・ 詳細資料：文献[8],[14],[15]

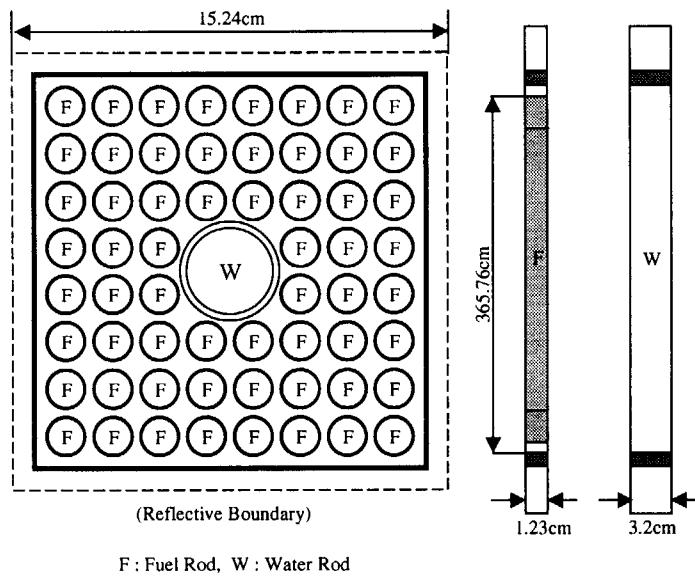


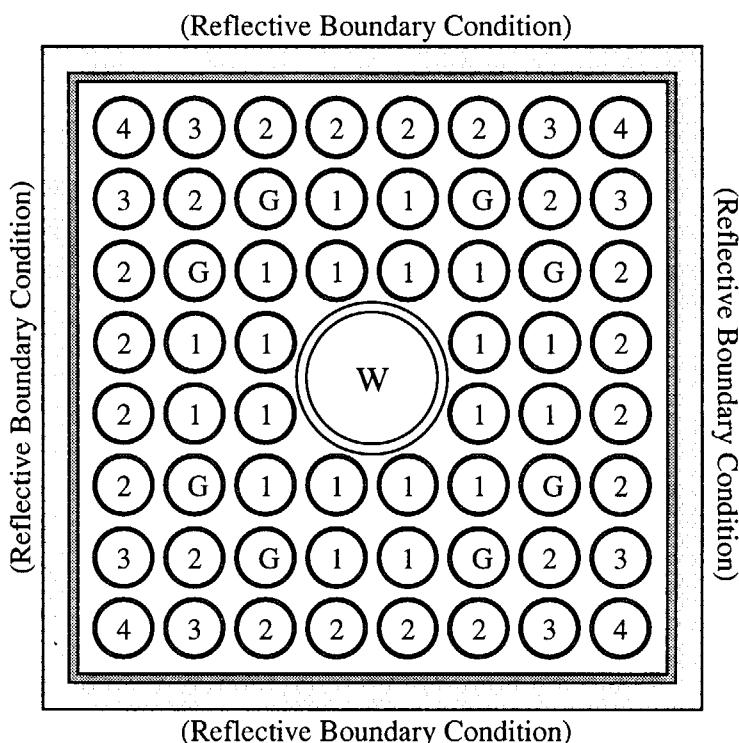
図2.1.3 Phase III-A ベンチマーク体系[14]

6) Phase III-B : Burnup Calculation for BWR Fuel Assembly

- ・ 計算体系：BWR、Step-2燃料集合体の現実的なモデルによる集合体燃焼計算(図2.1.4参照)
- ・ 燃料：5種類UO₂(濃縮度4.9wt.%、3.6、3.0、2.3、3.0+3.0wt.%Gd)
- ・ 計算内容：新燃料での数密度を与え、平均燃焼度40GWd/t、出力密度25.6MW/tHM、冷却期

間 0 及び 4 年、ボイド率(0%、40%、70%)の条件で集合体燃焼計算を行う。

- ・ 比較項目：燃焼度 6 点(0,2,10,20,30,40GWd/t)における無限中性子増倍率とピーク値及びピーク時燃焼度。1/8 体系中の 9 燃料棒毎の燃焼度分布、燃料組成(アクチニド 12 核種、F.P.20 核種：Phase I での F.P.核種 + Eu-155; Gd-156, 157,158; Xe-131)
- ・ 問題ケース数：6(ボイド率 3 × 冷却期間 2)
- ・ 計算結果：15 セット(7 国、15 機関)：表 2.1.2、図 2.1.5 参照
- ・ 詳細資料：文献[8],[16]



各燃料棒の初期濃縮度 1:4.9、2:3.6、3:3.0
4:2.3、G:3.0 ; G燃料棒のGd濃度:4.5 [wt%]

図 2.1.4 Phase III-B ベンチマーク体系[8],[16]

表 2.1.2 Phase III-B ベンチマーク参加コードと機関[16]

計算コード	機関(国)
APOLLO2	CEA(仏)
BOXER	PSI(スイス)
CASMO-4	原子力機構
FLEXBURN	電中研
HELIOS	ORNL(米)
MKENO-BURN(2)	原研
SCALE4.3	サイクル機構
SCALE4/ORIGEN-S	ENEA(伊)
SWAT ^{*1}	原研
TGBLA/ORIGEN2.1	東芝
TRIPOLI-4 ^{*2}	CE-SACLAY(仏)
VMONT	日立
WIMS7	BNFL(英)
WIMS7	Belgonucleaire(ベルギー)

註 *1 : 2 種類の計算結果を提出

*2 : 新燃料での臨界計算結果のみ

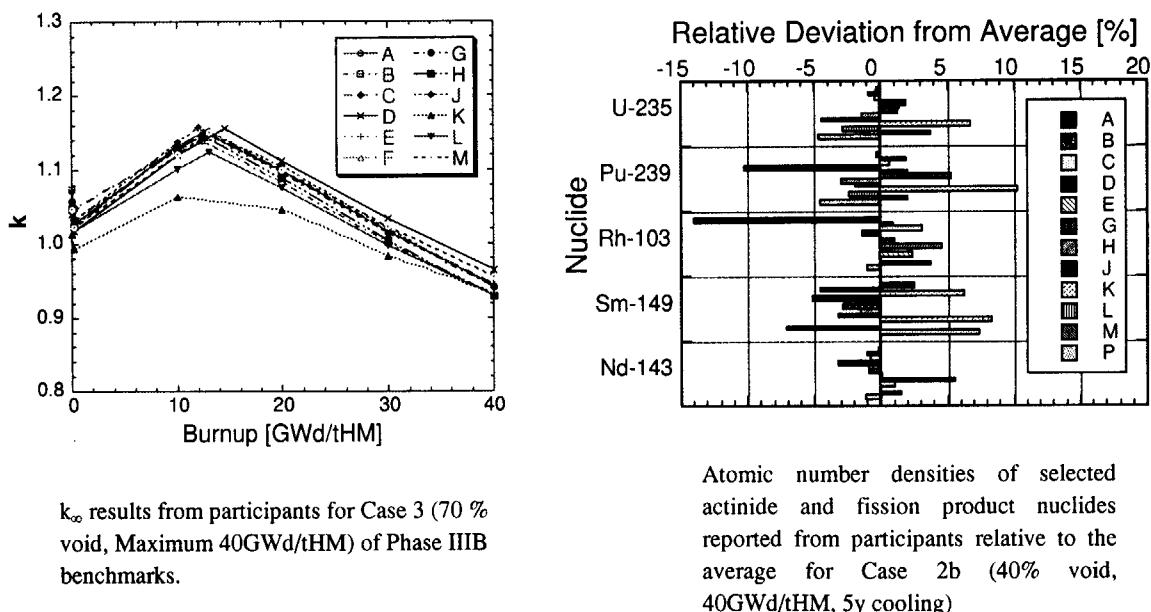


図 2.1.5 Phase III-B ベンチマーク計算結果[8],[16]

以上その他、次のベンチマークが実施中である。

7) Phase IV : Burnup Credit for MOX Spent Fuel

- ・ PWR 用 MOX 燃料棒の無限格子燃焼計算
- ・ 17×17 型 PWR 4 集合体燃焼計算(MOX+3UO₂)

2.1.5 まとめ

これまでに行われてきた軽水炉ベースの格子燃焼計算ベンチマーク問題は、取り出し燃焼度がせいぜい 50GWd/t までの範囲で設定されており、70GWd/t もの高燃焼度を狙った国際ベンチマーク問題は調べた範囲では見当たらない。国際ベンチマーク比較では、主として計算結果のばらつきの範囲やそれが及ぼす影響についての議論はなされているが、差異要因を詳細に追及するような活動はあまり見られない。しかしながら、良くできたベンチマーク問題は、ベンチマーク活動が終了した後も、新規開発コードや解析手法の検証・派生問題の作成などに長期にわたって利用されている。従って、ベンチマーク問題の仕様が関係者に広く知られるならば、問題の作成自体にも大きな価値がある。特に、詳細な軽水炉燃料集合体の形状を想定したベンチマーク問題が提案されはじめたのはごく最近のことである。現実的な燃料集合体の寸法や内部の燃料濃縮度分布などは燃料メーカーのノウハウに係る情報が含まれており、この種のベンチマーク問題が作成されること自体が貴重と言える。

【第 2.1 節の参考文献】

- [1] C.Maeder and P.Wydler : "International Comparison Calculations for A BWR Lattice with Adjacent Gadolinium Pins", NEACRP-L-271 (1984)
- [2] H.Akie, Y.Ishiguro and H.Takano : "Summary Report on the International Comparison of NEACRP Burnup Benchmark Calculations for High Conversion Light Water Reactor Lattices", JAERI-M 88-200 or NEACRP-L-309 (1988)
- [3] OECD Nuclear Energy Agency, "Physics of Plutonium Recycling", Vol.1-Vol.6, OECD Publications, France (1995-1998)
- [4] K.Hesketh, M.Delpech and E.Sartori : "Multiple Recycling of Plutonium in PWR - A Physics Code Benchmark Study by the OECD/NEA", Proc. of Int. Conf. Global'97, Yokohama, 297 (1997)
- [5] OECD Nuclear Energy Agency, "Benchmark on the VENUS-2 MOX Core Measurements", OECD Publications, France (2000)
- [6] M.Delpech, K.Hesketh, E.Sartori and W.Timm : "Physics of BWR MOX Fuel - Results of an

- International Benchmark Study by the OECD/NEA Nuclear Science Committee", to be published in Proc. of Int. Conf. Global 2001, Paris, 9-13 September (2001)
- [7] M.C.Brady, M.Takano, M.D.DeHart, H.Okuno, A.Nouri and E. Sartori, "Findings of an International Study on Burnup Credit", PHYSOR'96, Mito, September 16-20, Volume 4, L-41 (1996)
 - [8] H.Okuno, Y.Naito, K.Suyama and Y.Ando, "International Studies on Burnup Credit Criticality Safety by an OECD/NEA Working Group (2) Calculation Benchmarks for BWR Spent Fuels", ICNC'99, Versailles, 599 (1999)
 - [9] 燃料安全サイクル研究室, "燃焼度クレジット導入ガイド原案(受託研究)", JAERI-Tech 2001-055 (2001).
 - [10] M.Takano, "OECD/NEA Burnup Credit Criticality Benchmark -Result of Phase-1A-", NEA/NSC/DOC(93)22, JAERI-M 94-003 (1994)
 - [11] M.D.DeHart, M.C. Brady and C.V.Parks, "OECD/NEA Burnup Credit Critical Benchmark- Phase I-B Results", ORNL/TM-6901, NEA/NSC/DOC(96)06
 - [12] M.Takano and H.Okuno, "OECD/NEA Burnup Credit Criticality Benchmark - Result of Phase II-A", JAERI-Research 96-003, NEA/NSC/DOC(96)01 (1996)
 - [13] A.Nouri, "OECD/NEA Burnup Credit Criticality Benchmark, Analysis of Phase II-B Results: Conceptual PWR Fuel Transportation Cask", Rapport IPSN/98-05, NEA/NSC/DOC(98)1 (1998).
 - [14] H.Okuno, Y.Naito and Y.Ando, "OECD/NEA Burnup Credit Criticality Benchmarks Phase IIIA: Criticality Calculations of BWR Spent Fuel Assemblies in Storage and Transport", JAERI-Research 2000-041 (2000)
 - [15] 奥野浩、内藤淑孝、安藤良平、"BWR 使用済燃料集合体の臨界計算結果の国際比較", 日本原子力学会「1997年春の年会」、東大、E25 (1997)
 - [16] 奥野浩、須山賢也、内藤淑孝、"BWR 使用済燃料集合体の燃焼計算結果の国際比較", 日本原子力学会「1999年春の年会」、広島大学、G42 (1999)

2.2 PWRにおける燃料高度化の現状とベンチマーク問題への要望

PWR プラントにおける燃料及び炉心に関しては、プラント利用率向上及び燃料サイクルコスト低減を目的とした燃料の高度化、すなわち長サイクル化／高燃焼度燃料利用が進められている。また、一方では、軽水炉でのプルトニウム利用を目的とした燃料の高度化、すなわち MOX 燃料の利用が計画されている。

本節では、PWR におけるこれら燃料高度化についての現状を述べると共に、軽水炉次世代燃料に関するベンチマーク問題に対する期待・要望についてまとめる。

2.2.1 PWRにおける高度化燃料利用

(1) 高燃焼度燃料の利用

まず、国内の PWR での高燃焼度燃料利用[1],[2]について述べる。

PWRにおいては、当初、集合体最大燃焼度は 39000MWd/t に制限され、燃料濃縮度は～3.4wt%程度であった。この集合体最大燃焼度は、燃料サイクルコストを低減することを目的として、現状 48000MWd/t まで引き上げられ、燃料濃縮度は約 4%、運転期間はおよそ 13 ヶ月となっている。また、現在さらに検討が加えられており、集合体最大燃焼度を 55000MWd/t、濃縮度も～4.8wt%程度まで引き上げることを計画している。表 2.2.1 にこれをまとめた。同表に示したとおり、照射実績の上でも燃料は燃焼度制限ぎりぎりまで照射され、有効に使用されていることがわかる。

高燃焼度炉心及び長サイクル炉心では、余剰反応度が大きく、制御に必要な一時冷却材のほう素濃度が増大する。高ほう素濃度は水質悪化や減速材温度係数を正側とすることから、これを抑制するために可燃性毒物、最近ではガドリニア入り燃料が一般的に使用されている。ガドリニア入り燃料は出力分布上のピーキング抑制の観点でも有効であり、高燃焼度化に伴いガドリニアの重要度はさらに増大する。現在計画している 55000MWd/t 燃料炉心では、ガドリニア濃度を 10wt%に増大させるとともに集合体 1 体あたりのガドリニア入り燃料棒の本数も増加させることが検討されている。尚、現在国内の 4 ループプラントにおいて 55000MWd/t 燃料の実証性を確認すべく 10wt%濃度のガドリニア燃料 8 体を先行照射中である。

次に海外 PWR(米国)の現況について述べる。

表 2.2.1 に示したとおり、国内では最大燃焼度制限が集合体、燃料棒、燃料ペレットそれぞれに対して課せられているが、米国では燃料棒最大燃焼度を制限としている。現状の制限値は 62000MWd/t であり、燃料濃縮度は 4.0～4.95wt%が使用されている。照射実績では、国内同様に燃焼度制限ぎりぎりまで照射される場合が多い。表 2.2.2 にこれをまとめた。

米国でも高燃焼度燃料とともに可燃性毒物が使用されている。ただし、米国の場合は国内と異なり、ガドリニア燃料よりはむしろボロンコーティング燃料の使用が一般的である。

米国においても、更なる高燃焼度に対する検討が進められており、いくつかの先行照射が行われている。現在、約 70000MWd/t(燃料棒)を目指して照射中のものが存在している。

(2) MOX 燃料の利用

国内 PWR では、昭和 63 年より関西電力美浜発電所 1 号機において 3 サイクル照射された MOX 燃料集合体 4 体が唯一の照射実績であるといえる[3],[4]。図 2.2.1 にこの MOX 燃料集合体を示す。

海外 PWR では、フランス、ベルギー、スイス等で照射実績がある。これを表 2.2.3 に示す。実績燃焼度としては、約 43000MWd/t が最大である。

2.2.2 高度化燃料炉心に対する解析手法及び検証用データ

前項で述べた高燃焼度燃料炉心及び MOX 燃料炉心の本格採用に対応して、解析手法についても高度化が進められている。

まず、核データについて、ENDF/B-VI 及び JENDL3.2 の使用等、できる限り最新知見を核計算に反映させる努力がなされている。

一方、炉心体系計算は一般的に少数エネルギー群で行われるが、ここで使用する核定数は、一般的に二次元輸送計算により求められている。ただし、燃料高度化に伴う種々の非均質性や非等方性を考慮すべく、Characteristic 法や CCCP(Current Coupling Collision Probability)法など新しい計算手法が導入されている。

炉心体系計算は、少数エネルギー群による三次元拡散計算が一般的であり、近代ノード法が利用されている。また、高燃焼度燃料及び MOX 燃料の導入により Pu 核種の重要度が増大することに伴い、燃料集合体間のスペクトル干渉効果が問題となるため、これを考慮する計算手法・計算モデルが工夫されている。

これらの計算手法・計算コードは、照射後試験、臨界実験解析、プラント運転データ解析(含、炉物理試験)、各種ベンチマーク解析等を通じて検証される。表 2.2.4 は、高燃焼度燃料及び MOX 燃料を対象とした照射後試験についてまとめたものである。本表から、現状までの高度化燃料炉心に対しては、照射実績とともに照射後試験データも拡充されつつあるといえる。また、表 2.2.5 は、種々の臨界実験についてまとめたものであるが、最近では、主に MOX 燃料を対象とした臨界実験が多く、測定項目も主に Pu の特性を確認する位置付けのものとなっている。

しかしながら、軽水炉次世代燃料として、燃焼度や濃縮度のより高い燃料、または MOX 燃料におけるより高い Pu 富化度を考える場合においては、現状の照射後試験や臨界実験は決して十分なものとは言い難い。現時点でのこのような領域を対象とした計算手法・計算コードの検証を行う場合、連続エネルギーモンテカルロ計算コードとの比較等、コード間比較に依らざるを得ない。

2.2.3 まとめ

以上、軽水炉次世代燃料を考えるにあたり、現状の PWR 燃料の高度化についてまとめた。今後の PWR 燃料高度化の方向については、高濃縮度化及び高燃焼度化がさらに進むものと考えられる。また、現状 13 ヶ月である運転期間も、今後、長サイクル化されると考えられ、18

ヶ月運転～24ヶ月運転も検討され始めている。今、現状の濃縮度制限 5wt%以下を維持すると考えた場合、18ヶ月運転では 2.1～2.4 バッチ取替、21～24ヶ月運転では 2 バッチ以下の取替という運用になるが、この場合の集合体最大燃焼度は、包絡的におよそ 60～65GWD/t となる。一方、濃縮度 5wt%を超える燃料を許容する場合、例えば濃縮度 6wt%を考えた場合には、18ヶ月運転で 3 バッチ取替が可能となる。この場合の集合体最大燃焼度はおよそ 70GWD/t となる。

この将来動向を考慮した場合、軽水炉次世代燃料の位置付け及びこの領域を対象としたベンチマーク問題設定に関し、PWR 側からの要望として、以下の通りまとめる。

- 1) 5wt%を超える濃縮度を想定するか否かは議論の余地があるが、到達燃焼度として 70GWD/t (集合体最大)をカバーできるものが望ましい。
- 2) 高燃焼度化に伴いガドリニア入り燃料の重要度がより大きくなることを考慮する。
- 3) MOX 燃料については、機械特性上の種々制約が満足できるものと仮定した上で、現状よりも高い富化度域を考えるべきである。
- 4) ベンチマーク問題としては、燃焼に伴う反応度変化、高燃焼度域での各核種(特に、高次アクチニド、高次 FP 等)の重要度を観察できるもの、また、ガドリニア入り燃料集合体におけるガドリニア燃料棒の燃焼挙動について観察できるものが望ましい。

最後に、本 WPにおいて、次世代燃料域を対象としたベンチマーク問題を設定することは、新たな問題点の抽出や、今後の臨界実験の必要性を議論する上でも有意義である。PWR 側からも、今後の更なる燃料高度化に貢献できるものとなるよう期待したい。

【第 2.2 節の参考文献】

- [1] "高燃焼度対応改良燃料の開発", 三菱重工技報, Vol.35, No.4 (1998-7)
- [2] "地球環境と原子力－高燃焼度燃料の開発－", 三菱重工技報, Vol.35, No.6 (1998-11)
- [3] "美浜 1 号機における MOX 燃料の少数体実証照射", 三菱原子力技報, No.54 (1989)
- [4] "美浜 1 号機における MOX 燃料の少数体実証照射(その 2)", 三菱原子力技報, No.63 (1992)

表 2.2.1 国内 PWR における高燃焼度燃料利用

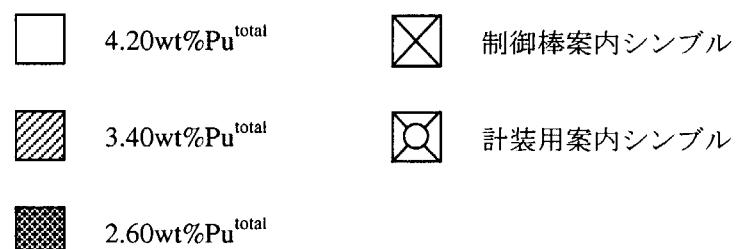
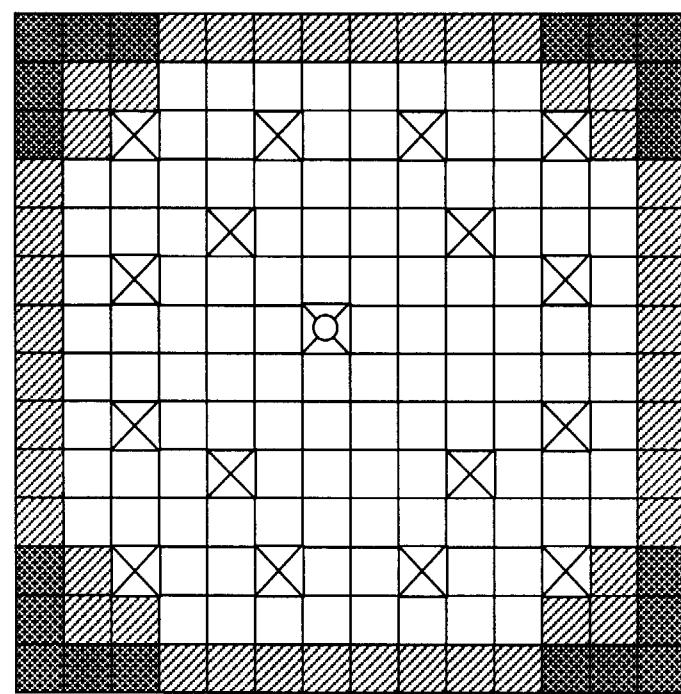
	国内 PWR 高燃焼度燃料		
	39GWd/t	48GWd/t	55GWd/t
濃縮度(wt%)	~3.4	~4.1	~4.8
集合体最大燃焼度	39000	48000	55000
燃料棒最大燃焼度	43000	53000	61000
ペレット最大燃焼度	50000	62000	71000
照射実績(集合体最大)	~39000	~48000	—
備 考			(計画中)

(燃焼度単位 : MWd/t)

表 2.2.2 海外 PWR(米国)における高燃焼度燃料利用

	海外 PWR(米国)高燃焼度燃料
濃縮度(wt%)	4.0~4.8(約 7 割) > 4.8 (約 1 割強)
燃料棒最大燃焼度	62000
照射実績(燃料棒最大)	~62000
〃 (集合体最大)	~60000
備 考	

(燃焼度単位 : MWd/t)



実績燃焼度(集合体最大) : 24000 MWd/t

図 2.2.1 国内 PWR(美浜 1 号機)における MOX 燃料集合体

表 2.2.3 海外 PWR における MOX 燃料利用

	Pu 富化度 (wt%Pu ^{total})	実績燃焼度 (集合体最大)
海外プラント A	~5.4	~40000
海外プラント B	~7.3	~43000
海外プラント C	~5.0	~38000

表 2.2.4 PWR 高度化燃料炉心を対象とした照射後試験

	照射プラント (PWR)	初期濃縮度 (wt%)	サンプル燃焼度 (GWd/t)
軽水炉使用済燃料中の核種組成データ集(原研)	美浜 3 号機 玄海 1 号機	3.24 3.42	約 40
使用済燃料核種組成安全裕度実証試験(原研)	高浜 3 号機	4.1	15~38
軽水炉使用済燃料臨界安全管理技術開発(原研)	高浜 3 号機	4.1	18~48
ARIANE 国際プログラム	海外プラント	約 6 (wt%Pu ^{total}) 約 3.5	約 47 約 60
美浜 1 号機 MOX 燃料 PIE	美浜 1 号機	約 4.2 (wt%Pu ^{total})	約 28
Saxton 炉 MOX 燃料 PIE	Saxton	約 6.6(wt%Pu ^{total})	約 51

表 2.2.5 PWR 高度化燃料炉心を対象とした臨界実験

	燃料・炉心	測定項目	実験期間
TCA (原研)	MOX(3~5wt%Pu ^{total})	出力分布等	1970~1980 (公開)
VIP (VENUS)	MOX(5~14wt%Pu ^{total}) 複数領域富化度集合体	出力分布、 検出器反応率等	1989~1992 (非公開)
VIPO (VENUS)		反応率分布、 ボイド反応度等	1993~1994 (非公開)
VIPEX (VENUS)		制御棒価値、 β_{eff} 等	1995~1996 (非公開)
EPICURE (EOLE)	MOX(7wt%Pu ^{total}) 1/3MOX 炉心相当	出力分布、 吸収材価値等	1989~1994 (非公開)
MISTRAL (EOLE)	MOX(7wt%Pu ^{total}) 全 MOX 炉心相当	制御棒価値、 β_{eff} 等	1996~2000 (非公開)

2.3 BWRにおける燃料高度化の現状とベンチマーク問題への要望

BWR用の炉心燃料の分野では、燃料の信頼性向上、プラント負荷率向上とともに、燃料サイクル費の低減、ウラン資源節約など燃料の経済性向上のための技術開発を進めている。

ここでは、ベンチマーク問題設定に対する要望を明らかにするため、BWR燃料開発の実績と今後の開発動向、さらに設計手法の検証のため実施された臨界試験について述べる。尚、最近のBWR設計手法の高度化については文献[1]にまとめられているので、ここでは詳述しない。

2.3.1 BWR燃料の開発動向

(1) 高燃焼度BWR燃料の開発

沸騰水型原子炉(BWR)用燃料は、これまで燃料の信頼性向上と運転性向上に重点をおいて研究開発が進められてきた。この結果、新型8×8燃料、上下2領域の燃料核設計による出力分布制御、少数の制御棒挿入セルによる運転、ヘリウム加圧燃料などの技術が開発・採用され極めて高い信頼性が実現されるとともに、プラント負荷率が大幅に向上された。

・高燃焼度化の経緯

このような土台に立った上で、1990年前後より、更に高い燃料経済性、ウラン資源節約、使用済燃料削減を目指して、BWR燃料の高燃焼度化計画が段階的に進められ、国内では現在までに3段階の高燃焼度化が完了している。以下にその経緯の概略を示す。

ステップⅠ燃料（新型8×8ジルコニウムライナ燃料）

ジルコニウムライナ被覆管の採用により、PCI性能を大きく改善した。これによりそれまで行なわれていた慣らし運転が緩和され、取出平均燃焼度を新型8×8燃料の28GWd/tから33GWd/tにまで高めることができた。

ステップⅡ燃料（高燃焼度8×8燃料）

燃焼度を高めても原子炉停止余裕や反応度係数など炉心の核特性が適切に保たれるよう、太径水ロッドを燃料集合体中央部に配置して水対ウラン体積比を増加した。丸セル型スペーサにより熱的特性も改善し、取出平均燃焼度を39.5GWd/tに高めた。

ステップⅢ燃料（9×9燃料）

取出平均燃焼度を45GWd/tにまで増加するため、燃料格子配列を9×9にして燃料棒線出力密度を低減し、また燃料集合体の熱伝達面積増加により沸騰遷移限界出力も改善した。現在、国内で導入されているステップⅢ燃料にはA/B両型があり、燃料棒などの仕様は異なるが、いずれもステップⅡ燃料の太径水ロッド断面積より水ロッド／ウォーターチャンネル断面積をさらに大型化して核特性の改善を図っている。

また、このような高燃焼度化技術の開発に加え、濃縮度・ガドリニア設計の最適化による出力ピーニングの活用や、スペクトルシフト運転といった省ウラン技術も常に開発・採用され、燃料経済性に寄与してきた。

更に高燃焼度燃料は、開発状況に応じて隨時、初装荷炉心へもフィードバックされてきた。ステップⅠ燃料やステップⅡ燃料を用いた濃縮度多種類初装荷炉心はこれまでに国内の10基以上のプラントで採用され、それまでの一樣炉心に比して飛躍的に初装荷炉心の燃料経済性を高めてきた。

もちろんこのような高燃焼度化の過程では、より高い燃焼度、様々な水ロッドやウォーターチャンネル形状、濃縮度・ガドリニア分布の高度利用、多種類の濃縮度の燃料の混在炉心（初装荷）などのあらゆる設計概念に対応できるよう、炉心核設計評価コードの高度化が必須となっていた。燃料集合体の核特性評価では、中性子挙動解析モデルや高燃焼度領域での燃焼特性の高精度化のためのモデル詳細化など、また、炉心3次元シミュレータでは多群化などの改良が進められてきた。

また、これらの設計コードを適用するにあたっては、実機での運転実績や々スキャンデータに基づく検証、及び新設計概念に対する中性子輸送モンテカルロコードや臨界実験によるベンチマークが行なわれ、その適用性が確認してきた。図2.3.1-1は設計計算コードシステムの解析値と実機核計装による信号が良好に一致していることを示した一例である[2]。

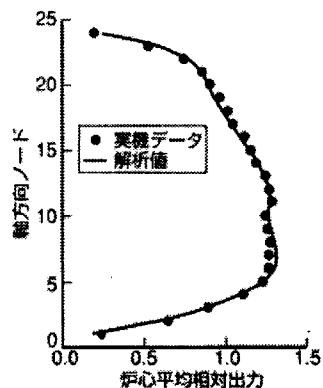


図 2.3.1-1
炉心平均出力解析値と実機
核計装信号

表2.3.1-1. ステップⅠ, Ⅱ, Ⅲ燃料の概要

ステップ	I	II	III
燃料断面			
○ 燃料棒			
◎ 部分長燃料棒			
● 水ロッド／ウォーターチャンネル			
格子	8 × 8		9 × 9
取出燃焼度 (GWd/t)	33	39.5	45
燃料サイクル費*	-10%	-20%	-30%
使用済燃料発生量*	-15%	-29%	-38%
実用化時期	1987年	1991年	1999年

* 基準：新型8×8燃料（平均取出燃焼度28GWd/t）

- 今後の燃料開発

原子力以外の発電技術の進歩や電力事業規制緩和の流れが進み、原子力発電に更なる経済性向上が期待される中、以上のような BWR 燃料の高燃焼度化への動きは今後も確実に継続されると考えられる。

現在、ステップⅢ燃料に継ぐ次期高燃焼度燃料の開発が進められている。その特徴は、現行の燃料設計に対するペレット濃縮度の制限 5wt%未満の範囲で、取出燃焼度を最大化する点にある。更に、現在の再処理施設での最大受入燃焼度である集合体平均燃焼度 55GWd/t を考慮すると、平均取出燃焼度は 50GWd/t 前後と考えられる。

一方、濃縮度 5wt%以上のペレットが利用可能になった場合、BWR 燃料は飛躍的な高燃焼度化を目指すことができる。その場合、輸送設備、加工施設の改造等の費用の発生が予想されるため、大幅な取出し燃焼度の増加を実現し全体として経済性を向上させることが望ましい。

このような大幅高燃焼度燃料を開発する上で最も大きな課題は材料の改良である。これについては既に、炉内滞在期間増加による被覆管及びスペーサの腐食・水素化に対応する高耐食性合金や FP ガス放出及び PCI 抑制を目的とした改良ペレットの開発が進められ、種々の照射試験が行なわれている。

また、大幅高燃焼度化に適応した燃料集合体の設計開発も進められている。例えば、高出力密度化や長期サイクル化の進む欧米などで採用されている 10×10 燃料の高性能化、その他の格子等が考えられている。このような動向の下、濃縮度 5wt%以上のペレットを用いた燃料開発では、現在の核設計コードの大幅高燃焼度・高濃縮度領域における適用性について事前に検討することが重要である。

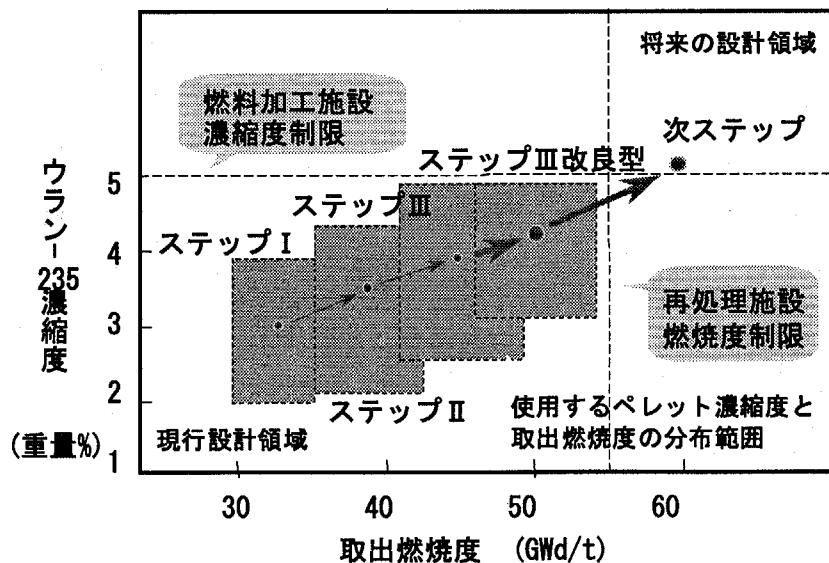


図 2.3.1-2 BWR 燃料開発の実績と今後の開発動向

(2) MOX 燃料開発

我が国は、長期的なエネルギーセキュリティの確保と、ウラン資源節約の観点から Pu の軽水炉利用を原子力推進の基本方針として掲げている。この方針に沿ってメーカ、電力各社は Pu の軽水炉利用のための MOX 燃料・炉心開発を進めており、1980 年代から実施された小数体実証の実績を踏まえ、現在、既設炉で取替燃料の一部としてとして MOX 燃料を本格的に利用する部分 MOX 利用が準備されている。また全炉心 MOX 燃料装荷を目指すフル MOX-ABWR の建設計画も進められている。

部分 MOX 利用及びフル MOX-ABWR で用いられる現行 MOX 燃料は、ウラン燃料での使用実績が豊富な高燃焼度 8×8 燃料構造を使用することとし、また、目標燃焼度は、照射実績から燃料集合体最高で $40,000\text{MWd/t}$ 、取出し平均で $33,000\text{MWd/t}$ としている。また、最新のウラン燃料（ステップⅢ 9×9 燃料、取出し平均で $45,000\text{MWd/t}$ ）並の燃焼度を目指した高燃焼度 MOX 燃料も検討されている。

以下、現行 MOX 燃料（フル MOX-ABWR 設計例）と、高燃焼度 MOX 燃料の検討例について紹介する。

(a) 現行 MOX 燃料（フル MOX-ABWR 設計例）[3]

改良型沸騰水型原子炉（ABWR）では、燃料集合体間の間隔（ギャップ水幅）がこれまでの沸騰水型原子炉に比べて約 3mm 大きい構成となっている。このため、炉心の水素対重金属原子数比（H/HM）が大きくなり、ボイド反応度係数の低減、炉停止余裕の増加などが期待できるため、燃料の高燃焼度化や MOX 燃料の装荷に適合しやすい炉心構成となっている。このような ABWR の特長を活かして、現行炉でのプルサーマル（ $1/3\text{MOX}$ 炉心）の約 3 倍の MOX 装荷を可能とするフル MOX-ABWR の炉心設計を実施してきた。

フル MOX-ABWR の燃料・炉心の設計では、現在の ABWR の基本仕様、すなわち、熱出力 3926MW 、燃料集合体体数 872 体、制御棒本数 205 本などを保持し、かつ、ウラン炉心から炉心特性を大幅に変えないことを基本方針としている。また、MOX 燃料装荷割合を初装荷炉心から段階的に増加して最終的にフル MOX 炉心を実現する計画である。フル MOX-ABWR 炉心及び燃料集合体の基本仕様を、表 2.3.1-2 に示す。また、MOX 燃料集合体の構成を図 2.3.1-3 に示す。

MOX 燃料の基本構造は、これまでウラン燃料で十分な使用実績のある高燃焼度 8×8 燃料と同一としている。MOX 燃料集合体は、ペレット材として $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ を使用する MOX 燃料棒と、 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ を使用するガドリニア入りのウラン燃料棒で構成される。MOX 燃料棒については、集合体内の局所ピーニング係数を適切な値とするため、4 種類の Pu 富化度燃料棒を使用し、軸方向富化度分

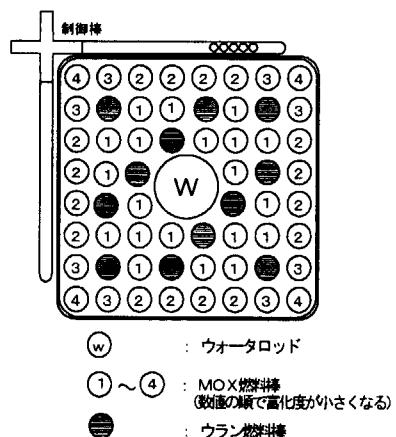


図 2.3.1-3 MOX 燃料集合体の
燃料配置

布は一様としている。また、燃料集合体の軸方向出力分布平坦化のため、ウラン燃料棒については軸方向にガドリニア濃度分布をついている。取替燃料集合体平均の Pu富化度及び²³⁵U濃縮度はそれぞれ約 2.9wt%、及び約 1.2wt%であり、集合体平均の取出燃焼度は約 33,000MWd/tである。

また、混在するウラン燃料集合体は、燃料棒を 9 行 9 列(9×9) に配列して構成した 9×9 燃料である。

表 2.3.1-2 炉心及び燃料の基本仕様

項目	基本仕様	
<u>炉心</u>	改良型沸騰水型軽水炉 (ABWR)	
型式		3,926
熱出力 (MW)		約 52.2 × 10 ³
炉心流量 (t/h)		約 7.17 (73.1 kg/cm ² a)
原子炉圧力 (MPa[abs])		872
燃料集合体数 (体)		205
制御棒本数 (本)		
<u>燃料集合体</u>	MOX 燃料集合体	ウラン燃料集合体 (9×9 燃料 A 型の場合)
配列	8 行 8 列	9 行 9 列
ウラン濃縮度 *1 (wt%)	約 1.2	約 3.8
核分裂性プルトニウム	約 2.9	—
富化度 *1 (wt%)		
最高燃焼度 (MWd/t)	40,000	55,000
全長 [つかみ部を含む] (m)	約 4.47	同左
燃料棒本数 (本)	60	74 *3
ペレット直径 (mm)	約 10.4	約 9.6
ペレット材	UO ₂ -PuO ₂ (MOX 燃料棒) UO ₂ -Gd ₂ O ₃ (ウラン燃料棒)	UO ₂ UO ₂ -Gd ₂ O ₃
被覆管外径 (mm)	約 12.3	約 11.2
被覆管厚さ *2 (mm)	約 0.86	約 0.71
被覆管材料	シリカロイ-2 (Zr 内張)	同左
ペレット-被覆管間隙 (mm)	約 0.20	同左
ウォータロッド本数 (本)	1	2
ウォータロッド外径 (mm)	約 34.0 (太径部)	約 24.9 (太径部)
ウォータロッド材料	ジルカロイ-2	同左
スペーサ型式	丸セル型	同左

*1 取替燃料集合体平均

$$\text{ウラン濃縮度} = \frac{\text{²³⁵U 重量}}{\text{燃料集合体ウラン重量}}$$

核分裂性プルトニウム富化度

$$= \frac{\text{核分裂性プルトニウム重量}}{(\text{プルトニウム重量} + \text{ウラン重量})}$$

*2 ジルコニア内張り約 0.1mm を含む

*3 8 本の部分長燃料棒を含む

(b) 高燃焼度 MOX 燃料

ウラン燃料では既に、9×9 燃料により、取出し平均燃焼度を 45,000MWd/t とするステップⅢ燃料の使用が開始されており、MOX 燃料でも実績を積みつつ、今後は 9×9 燃料等の利用による高燃焼度化が進められると考えられる。以下に、高燃焼度 MOX 燃料の設計検討例を公開文献より紹介する[4]。本設計例は NUPEC が経済産業省からの委託事業として実施している「プルトニウム有効利用炉心技術調査」にて検討しているものである。

この設計例は、9×9 燃料により取出し平均燃焼度を 45GWd/t とした MOX 燃料であり、これ

を 1350MWe 級 ABWR プラントに 100% 装荷（全 MOX）することを前提に、基準 9×9 燃料、及び核分裂性プルトニウムの消費量を増大させる目的で燃料の水対燃料比（H/HM）（H；水素原子数、HM；重金属原子数）を増加させた燃料を合計 3 種類検討している。表 2.3.1-3 にその仕様を示す。

- ① 基準 9×9 燃料；標準的な 9×9 燃料を用いた場合 (H/HM=4.9)
- ② Pu 有効利用燃料集合体 1；ウォーターロッドを 8 本増加 (H/HM=5.9)
- ③ Pu 有効利用燃料集合体 2；燃料棒を細径化（標準の 88%）(H/HM=7.0)

主な結論を下記としている。

- ・核熱水力的にはどの仕様も成立性がある見通し。
- ・核分裂性プルトニウムの消費割合は H/HM を増加した炉心で約 20% 増加。

表 2.3.1-3 高燃焼度 MOX 仕様[3]

	基準 9×9 燃料	Pu 有効利用 燃料集合体 1	Pu 有効利用 燃料集合体 2
H/HM	4.9	5.9	7.0
燃料棒径	基準	基準	88%
追加ウォーターロッド本数	0	8	0
全核分裂性物質割合 (wt%)	5.0	4.6	4.7
核分裂性 Pu 富化度 (wt%)	3.6	3.3	3.5
ガドリニア仕様			
ガドリニア平均濃度 (wt%)	2.0	2.5	2.8
母材	濃縮ウラン	濃縮ウラン	濃縮ウラン
ガドリニア棒本数	18	14	16
ガドリニア濃度差 (wt%)	1.0	1.0	1.0
上部ガドリニア濃度 (wt%)	1.5	2.0	2.3
下部ガドリニア濃度 (wt%)	2.5	3.0	3.3

2.3.2 MOX 燃料装荷臨界試験

MOX 燃料を装荷した臨界試験としてはこれまでに下記のような試験が実施されており、これらの試験結果に基づき BWR 核設計手法の MOX 燃料炉心に対する適用性評価が行われている。各試験の主な特徴は、①は BWR 高燃焼度 8×8 配列の MOX 燃料集合体とウラン燃料集合体の混在装荷を模擬した試験、②は MOX 燃料棒もしくはウラン燃料を一様に配置した全 MOX 体系、全ウラン体系での試験、③は②と比べ比較的高い Pu 富化度の MOX 燃料棒を炉心の中央に一様に配置した体系等での試験である。

- ① ベルギー VENUS (VULCAN Experimental Nuclear Study) 炉での臨界試験
- ② 日本原子力研究所 TCA (Tank-type Critical Assembly) での臨界試験
- ③ フランス EOLE 炉での EPICURE 臨界試験

また、現在実施されている試験としては、MISTRAL 計画（比較的高い Pu 富化度の MOX 燃料棒を一様に配置した全 MOX 体系等での試験）、及び BASALA 計画（BWR9×9 配列の MOX 燃料集合体を模擬した体系での試験）がある。

以下、各試験の内容及び評価結果の概要について示す[5],[6]。

(1) VENUS 炉臨界試験による検証

VENUS 炉はベルギー国立原子力研究所の臨界試験装置である。この試験の炉心構成は、BWR 高燃焼度 8×8 配列の MOX 燃料集合体とウラン燃料集合体の混在装荷を模擬した領域と体系を臨界するための UO₂燃料棒により構成されたドライバー領域からなる。MOX 燃料集合体には、核分裂性プルトニウム富化度 3.4～9.9wt% の MOX 燃料棒が配置されている。MOX 核設計手法の適用性検証評価としては、ウラン燃料集合体及び MOX 燃料集合体における各燃料棒の核分裂反応率等の測定値と解析値の比較を行い、MOX 燃料集合体についてもウラン燃料集合体と同程度の解析精度を有することを確認している。

(2) TCA 臨界試験による検証

TCA は日本原子力研究所の臨界試験装置であり、軽水炉体系を模擬するように MOX 燃料棒もしくはウラン燃料棒を一様に格子状に配置することにより全 MOX 体系、及び全ウラン体系を構成している。ウラン燃料棒の ²³⁵U 濃縮度は約 2.6wt%、MOX 燃料棒のプルトニウム含有率は約 3.0wt%で母材は天然ウランである。MOX 燃料体系の燃料棒格子配列は 19×20 から 24×24 まで、ウラン燃料体系の燃料棒格子配列は 15×15 から 25×25 まで、MOX 燃料体系、ウラン燃料体系、ともに 4 種類の異なった水対燃料体積比で測定を行っている。MOX 核設計手法の適用性検証評価としては、MOX 燃料体系及びウラン燃料体系における実効増倍率評価及び各燃料棒の核分裂反応率等の測定値と解析値の比較を行い、MOX 燃料についてもウラン燃料と同程度の解析精度を有することを確認している。解析結果の例として図 2.3.2-1 及び図 2.3.2-2 に実効増倍率の解析結果を示す。ウラン燃料体系と MOX 燃料体系における平均値の差は 0.001、標準偏差はともに 0.002 であり、ウラン燃料体系と MOX 燃料体系で有意な差はないことが分かる。

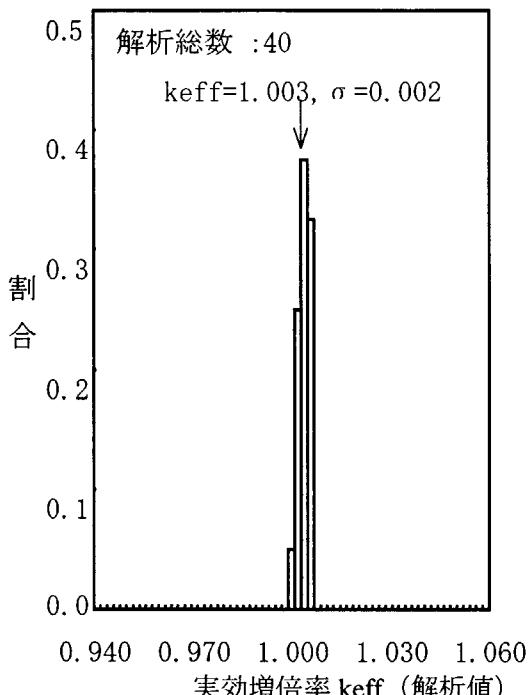


図 2.3.2-1 ウラン燃料体系の実効増倍率の解析結果

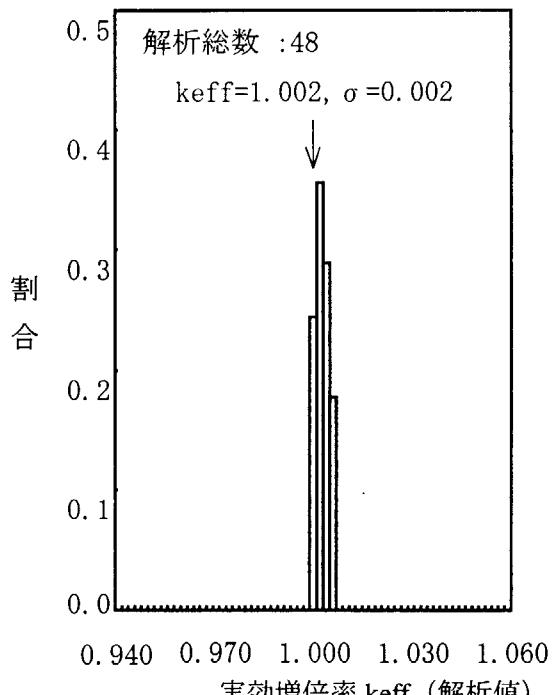


図 2.3.2-2 MOX 燃料体系の実効増倍率の解析結果

(3) EPICURE 臨界試験による検証

EPICURE 臨界試験は、フランス原子力庁カダラッシュ研究所の臨界試験装置 EOLE 炉で行われた MOX 燃料に関する炉物理試験である。EOLE 炉は軽水炉体系を模擬するように MOX 燃料棒もしくはウラン燃料棒を一様に格子状に配置することにより、MOX 燃料体系（炉心中央：MOX 燃料棒領域、炉心周囲：ウラン燃料棒領域）及び全ウラン燃料体系を構成している。ウラン燃料棒の ^{235}U 濃縮度は約 3.7wt%、MOX 燃料棒のプルトニウム含有率は約 7.0wt%である。MOX 核設計手法の適用性検証評価としては、ウラン燃料体系及び MOX 燃料体系におけるボイド反応度、吸収材反応度価値、及び各燃料棒の核分裂反応率の測定値と解析値の比較等を行い、MOX 燃料体系についてもウラン燃料体系と同程度の解析精度を有することを確認している。

(4) 最近の MOX 臨界試験

現在進行している MOX 臨界試験としては、水対燃料比を高めた MOX 炉心について、NUPEC とフランス原子力庁 (CEA) との共同研究で進めている EOLE 炉における MISTRAL 計画 (1996 ~2000 年) 及び BASALA 計画がある。これらのデータも、今後の BWR 解析手法の MOX 燃料適用性評価上有用となると考えられる。以下、試験内容を紹介する。

MISTRAL 計画は、水対燃料比を高めた格子の炉物理パラメータを系統的に得るために、水対燃料体積比等の異なる 4 つの炉心（炉心 1：均質ウラン炉心、炉心 2、3：均質フル MOX 炉心、

炉心 4 : PWR フル MOX) に対し、臨界質量、出力分布、吸収材価値等の測定を実施している。ウラン燃料棒の ^{235}U 濃縮度は約 3.7wt%、MOX 燃料棒のプルトニウム含有率は約 7.0wt%である。

BASALA 計画は高減速 BWR-MOX 炉心のモックアップ試験であり、BWR9×9 配列の MOX 燃料集合体を模擬した領域と体系を臨界するための MOX 燃料棒により構成されたドライバー領域からなる。MOX 燃料集合体には、プルトニウム含有率は約 8.7wt%、約 7.0wt%、及び約 4.3wt% の MOX 燃料棒が配置されている。この体系において BWR の特徴である十字型制御棒、バーナブルポイズンであるガドリニアの炉物理特性を測定する計画である[7]。

MISTRAL 計画に対しては既に日本原子力研究所で開発された一般公開コード SRAC コードシステム及び MVP コードによる解析評価が進められている。これまでに、炉心 1～炉心 4 のうち、炉心 1 と炉心 2 までの評価結果が、EPICURE 試験に対する評価結果とともに公表されているが、何れも実験結果を良く再現しており、ウラン燃料体系と MOX 燃料体系で解析精度に差が見られなかったことが報告されている。

2.3.3 まとめ

経済性向上の観点からウラン燃料、MOX 燃料ともに更なる高燃焼度化に向けた開発が進められている。設計手法適用の妥当性確認のためにも将来の設計範囲を想定したベンチマーク問題の設定が望まれる。

【第 2.3 節の参考文献】

- [1] “核計算手法の研究成果と炉心設計手法の進歩”, 日本原子力学会誌, Vol.39, No.1, P3～27 (1997)
- [2] “BWR 炉心・燃料技術の動向”, 東芝レビュー, Vol.53, No.12 (1998)
- [3] “ABWR におけるフル MOX 炉心の設計”, 火力原子力発電, Vol.50, No.2, P194～201 (1999)
- [4] “MOX 燃料炉物理試験と解析の現状—プルトニウムの有効利用に向けて”, 日本原子力学会誌, Vol.40, No.11, P834～854 (1998)
- [5] Izutsu, S., et al., “Progress of Full MOX Core Design in ABWR”, IAEA-SM-358, 27 (1999.5)
- [6] “騰水型原子力発電所 フル MOX-ABWR における混合酸化物燃料装荷炉心の設計解析手法について”, HLR-066 (平成 11 年 8 月、株式会社 日立製作所)
- [7] 桜田 他、“高減速 MOX-BWR モックアップ炉物理試験計画(BASALA 計画)”, 日本原子力学会「2000 年春の年会」

2.4 バックエンド部門からのベンチマーク問題への要望

2.4.1 バックエンド分野における課題

使用済燃料輸送、貯蔵における臨界安全設計では、従来、新燃料仮定での設計が行われてきた。この場合、燃焼計算は必要とせず、また、非常に保守的なモデルであるため、設計コードの精度もそれほど議論されることはなかった。近年、燃料の初期濃縮度の増加に伴い、新燃料仮定モデルでの臨界安全設計が困難になりつつあり、燃焼度クレジットの導入が検討されている。燃焼度クレジットの概念を図 2.4-1 に示す。

図 2.4-1 は BWR STEP3 燃料を例にした冷温体系の無限増倍率を示している。燃焼度クレジットを導入することにより、合理的な臨界安全設計が可能となる。

燃焼度クレジットを導入する場合、燃焼による反応度の低下を評価する必要がある。

反応度の低下要因は、

- 1) 核分裂性物質の減少
- 2) アクチニド核種の中性子吸収
- 3) FP 核種の中性子吸収

である。

合理的な臨界安全設計をするためには、これらの反応度価値を精度良く評価する必要がある。従来、アクチニド核種、FP 核種の組成評価には ORIGEN2 コードが利用されてきたが、ORIGEN2 コードでは、出力変動や BWR でのボイド率変化等による中性子スペクトル変化を考慮できないため、より精度良い評価のためには、格子計算コード、モンテカルロ計算コード等と ORIGEN2 コードの組み合わせによる評価が必要となってくる。

また、輸送、貯蔵時の燃焼度確認、誤装荷防止のため、燃焼度モニタの利用が考えられる。燃焼度モニタにおいても燃焼計算の精度は重要な要素である。図 2.4-2 は六ヶ所再処理施設に設置されている燃焼度モニタの概念図である。燃焼度の測定方法には、以下の 3 方式が採用されている。

- 1) ガンマ線スペクトル測定
- 2) 中性子測定
- 3) グロスガンマ線測定

1)、2)は燃焼度の絶対値を測定する装置である。3)は燃焼度分布を測定する装置である。この中で中性子測定は装置が簡易であり、測定装置の位置ずれによる燃焼度への影響が小さいことから、発電所燃料プールに設置できるような小型システムへの採用も考案されている。図 2.4-3 に簡易型燃焼度モニタ案の一例を示す。燃料の中性子放出率と燃焼度の相関を評価する際には、ORIGEN2 を用いているが、この部分についても、今後、より精度良い評価計算を確立する必要性が増していく。特に、MOX 燃料と UO₂ 燃料では中性子放出率と燃焼度の相間に相違がある。

図 2.4-4 は敦賀 MOX 燃料の中性子放出率を示した一例であるが、図のように MOX 燃料の中性

子放出率は燃焼度の約2乗、 UO_2 燃料は3~4乗程度の相関を示す。

線源評価もまた、遮蔽および除熱評価のために重要である。線源評価についても、高燃焼度燃料、MOX燃料では、従来より線源強度が強くなり、特に輸送時の遮蔽、除熱設計が困難となる。高燃焼度化やMOX燃料の採用においては、アクチニドの蓄積のため、中性子遮蔽が、重要な要素となる可能性が高い。図2.4-5に中性子発生率の一例を示すが、特に、Cm242、Cm244の影響が大きく、合理的な遮蔽設計を行うためには、これらの精度良い評価が必要となる。

2.4.2 廉物理計算コードへの要望

バックエンドにおける核的な問題としては、上記のように臨界安全と遮蔽および除熱評価のための線源評価が挙げられる。また、出力分布や燃焼度等の使用済燃料測定時に利用される核種、再処理時の不溶残さ等についても精度良い評価が求められる。通常、燃料炉心設計コードでは、反応度計算を主目的とするが、今後のバックエンド分野での利用も考え、核種組成計算にも十分対応できる廉物理計算コードが望まれる。

以下に、特に重要と考えられる核種について、項目別に示す。

(1) 臨界安全

燃焼度クレジットを採用した輸送・貯蔵施設においては、FP、MAの負の反応度効果を正確に評価する必要がある。「臨界安全ハンドブック第2版」および補足資料には燃焼度クレジット採用時に考慮してもよいとされるFP核種が以下のように挙げられている[1-3]。

FP核種：
Mo95, Tc99, Rh103, Cs133,
Sm147, 149, 150, 152
Nd143, 145, Eu153, Gd155

核種の選定基準は

- ・ 中性子吸収断面積が大きいこと
- ・ 長寿命であること（半減期3万年以上）
- ・ 気体状でないこと、また、揮発性でないこと

である。

なお、中間貯蔵や輸送を考える場合は数十年程度の半減期の核種も考慮して問題ないと考えられ、さらに、以下の2核種を追加できる。

Ru101, Sm151

Actinide核種については「臨界安全ハンドブック第2版」に記述がないが、OECD/NEAの国際ベンチマーク計算[4-6]を参考にすると、以下の核種が選定されている。

Actinide 核種 : U234,235,236,238, Np237,
 Pu238,239,240,241,242
 Am241,243

なお、70GWd/tを超えるような超高燃焼度ではCm245の反応度も若干寄与する可能性がある。
 (~1% $\Delta k/k$ 程度)

(2) 線源評価

線源については高燃焼度燃料、MOX 燃料については、中性子遮蔽が重要な問題となる。また、MOX 燃料の場合、アクチニドによる発熱の寄与が大きくなる。これらに関連する核種は以下のとおりである。

Cm244, Cm242, Pu240, Pu238

(3) 燃焼度、出力測定に利用できる核種

FP の中でも、収率が高く、比較的半減期の長いものは、燃焼度測定や出力分布の測定に役立つ。以下に主要な核種を示す。

燃焼度測定に利用可能な核種 : Cs137, Cs134, Ce144, Eu154

出力分布測定に利用可能な核種 : Ba140, La140

(4) 再処理時の不溶残さ

再処理時、アクチニドおよび大部分の FP は溶解槽で硝酸により溶解されるが、Mo, Tc, Ru, Rh, Pd 等の元素の一部は不溶残さとして残る。特に図 2.4-6 に示すように Pu, U の核分裂収率の違いから Ru106, Rh106 は MOX 燃料では大幅に増え、不溶残さの放射能強度の増加につながる可能性がある。

2.4.3 照射後試験データ

計算コードの検証のためには照射後試験データが重要である。照射後試験データは非公開のものが多いが、公開データとして、JAERI-Data/Code 96-036 では 10 プラント(6PWR, 4BWR)の使用済燃料の試験データがまとめられており利用しやすい[7]。MOX 燃料、高燃焼度燃料についての照射後試験データは数少ないのが現状であるが、電中研で進められている EU 超ウラン元素研究所(IUT)での試験[8]は高燃焼度 (~60GWd/t) の測定が行われており、結果も公開されている。また、科学技術省の委託を受けて日本原子力研究所で行われた「軽水炉使用済燃料臨界安全管理技術開発」事業では、高浜 3 号機及び福島第 2 発電所 2 号機による照射後試験を行っており、燃焼度 48GWd/t までの使用済燃料の核種組成分析結果が公開されている[9]。その他、非公開ではあるが、日欧のメーカー・機関が参加している ARIANE プログラム、欧米の機関で

実施された CERES プログラムがある。表 2.4-1,2 に ARIANE プログラムの対象燃料、測定対象核種を示す。

2.4.4 現在の六ヶ所再処理施設の受け入れ基準について

参考までに、現在の六ヶ所再処理施設に受け入れられる燃焼度と初期濃縮度を以下に示す。

項目	領域	範囲	BWR 燃料集合体	PWR 燃料集合体
燃焼度	1 体	最高	55GWd/t 45GWd/t 45GWd/t	
	1 日平均	最高		
	1 年平均	最高		
初期濃縮度	1 体	最高		5.0wt%
平均残留濃縮度	1 体	最高		3.5wt%

【第 2.4 節の参考文献】

- [1] 日本原子力研究所 核燃料施設安全性研究委員会 臨界安全性専門部会 臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ, “臨界安全ハンドブック第 2 版”, JAERI 1340 (1999)
- [2] H.Okuno et al., “Supplement Report to the Nuclear Criticality Safety Handbook of Japan”, JAERI-Tech 95-048 (1995)
- [3] 燃料サイクル安全研究委員会, “燃焼度クレジット導入ガイド原案 (受託研究)”, JAERI-Tech 2001-055 (2001)
- [4] M.Takano, “OECD/NEA Burnup Credit Calculational Criticality Benchmark -Result of Phase I-A-”, NEA/NSC/DOC(93)22, JAERI-M 94-003 (1994)
- [5] M.D.DeHart et al., “OECD/NEA Burnup Credit Calculational Criticality Benchmark Phase I-B Results”, NEA/NSC/DOC(96)06 ORNL-6901 (1996)
- [6] M.Takano and H.Okuno, “OECD/NEA Burnup Credit Calculational Criticality Benchmark -Result of Phase II-A-”, NEA/NSC/DOC(96)01, JAERI-Reseach 96-003 (1996)
- [7] M.Kurosawa et al., “The Isotopic Compositions Database System on Spent Fuels in Light Water Reactors (SFCOMPO)”, JAERI-Data/Code 96-036 (1997)
- [8] 笹原昭博、他, “高燃焼度 UO₂ 燃料と MOX 燃料の照射後試験と解析コードの評価性能の検討”, 電力中央研究所報告, T95012 (1995)
- [9] (編)中原嘉則、須山賢也、須崎武則, “軽水路使用済燃料の燃焼度クレジットに関する技術開発”, JAERI-Tech 2000-071 (2000)

表 2.4-1 ARIANE プログラム測定燃料概要

ID	BM				DM		DU	GU
照射炉	ベズナウ 1 (PWR)				ドッドワード (BWR)		ゲスゲン (PWR)	
燃料タイプ 製造者	MOX-MIMAS BN				MOX-MIMAS BN	UO2 JNF	UO2 SIMENS	
U-235 (w/o) Pu / U+Pu (w/o)		0.2 5.9			0.2 6.4	4.9 -	3.4 -	
燃料密度(%TD)		95			94	95	10.4 (g/cm ³)	
燃料集合体 ID	M109				Y014	Y012	Y013	12-40
燃料棒 ID	E11	G5			M09	M05	U004	14H13 14H29
取出年月	'93 年 4 月				'93 年 1 月	'92 年 1 月	'93 年 1 月	'94 年 6 月
サンプル ID	BM1	BM2	BM3	BM4	DM1	DM2	DU1	GU1 GU2
サンプル 燃焼度(GWd/t)	50	35	40	30	55	40	55	55 30
サンプル移送先	PSI TUI CEN	PSI - -	PSI TUI CEN	PSI - -	CEN TUI PSI	CEN - -	TUI CEN PSI	TUI - -

表 2.4-2 ARIANE プログラム測定核種

No.	項目	核種
1	ウラン同位体	²³⁴ U, ²³⁵ U, ²³⁶ U, ²³⁸ U
2	プルトニウム同位体	²³⁸ Pu, ²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Pu, ²⁴² Pu
3	マイナーアクチニド	²³⁷ Np, ²⁴¹ Am, ²⁴² Am, ²⁴³ Am, ²⁴² Cm, ²⁴³ Cm, ²⁴⁴ Cm
4	核分裂生成物	⁹⁵ Mo, ⁹⁹ Tc, ¹⁰¹ Ru, ¹⁰³ Rh, ¹⁰⁹ Ag, ¹²⁹ I, ¹³³ Cs, ¹³⁴ Cs, ¹³⁵ Cs, ¹³⁷ Cs, ¹⁴³ Nd, ¹⁴⁵ Nd, ¹⁴⁸ Nd, ¹⁵¹ Eu, ¹⁵³ Eu, ¹⁴⁷ Sm, ¹⁴⁹ Sm, ¹⁵⁰ Sm, ¹⁵¹ Sm, ¹⁵² Sm, ¹⁵⁵ Gd

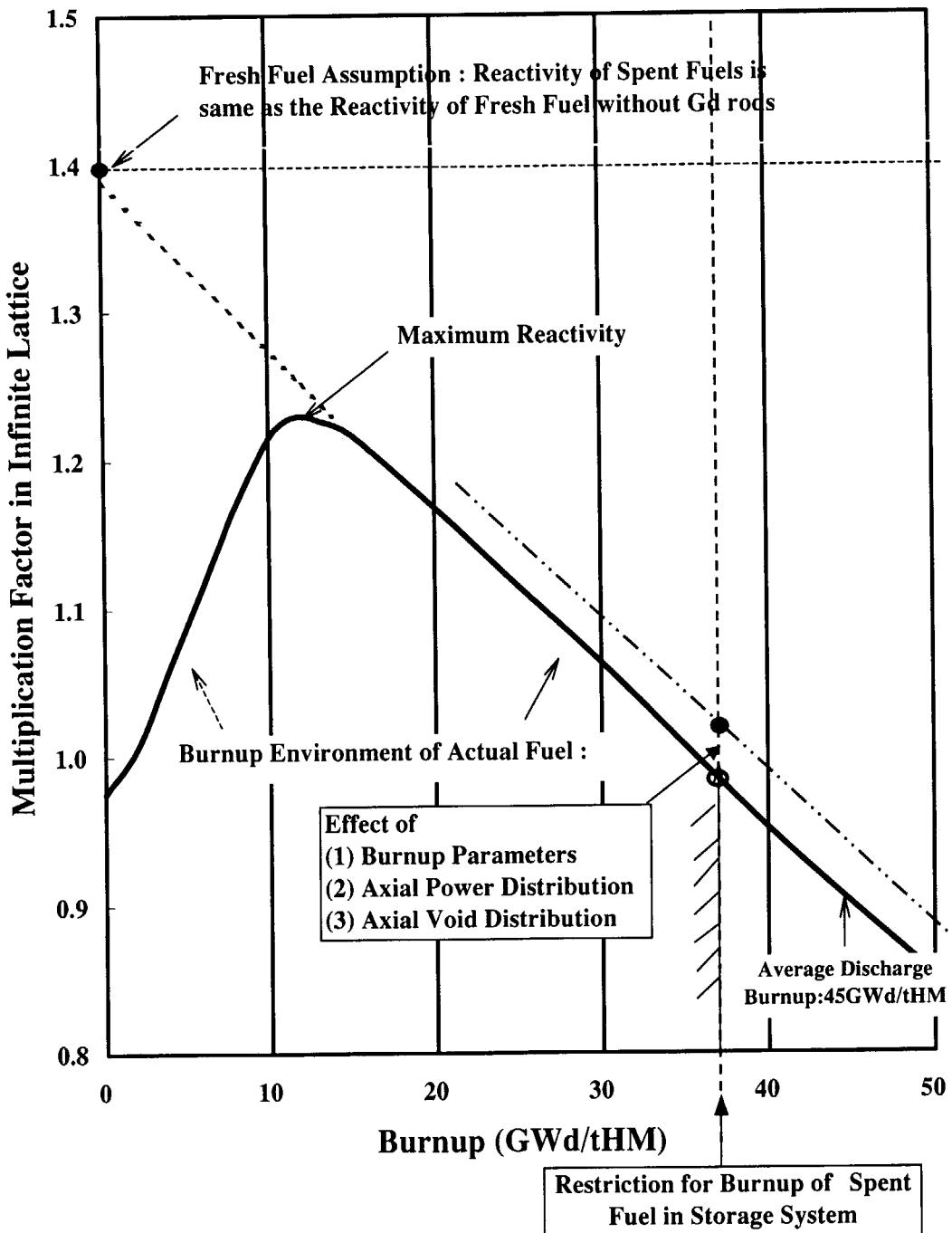


図 2.4-1 燃焼度クレジット概念図 (BWR STEP3 燃料)

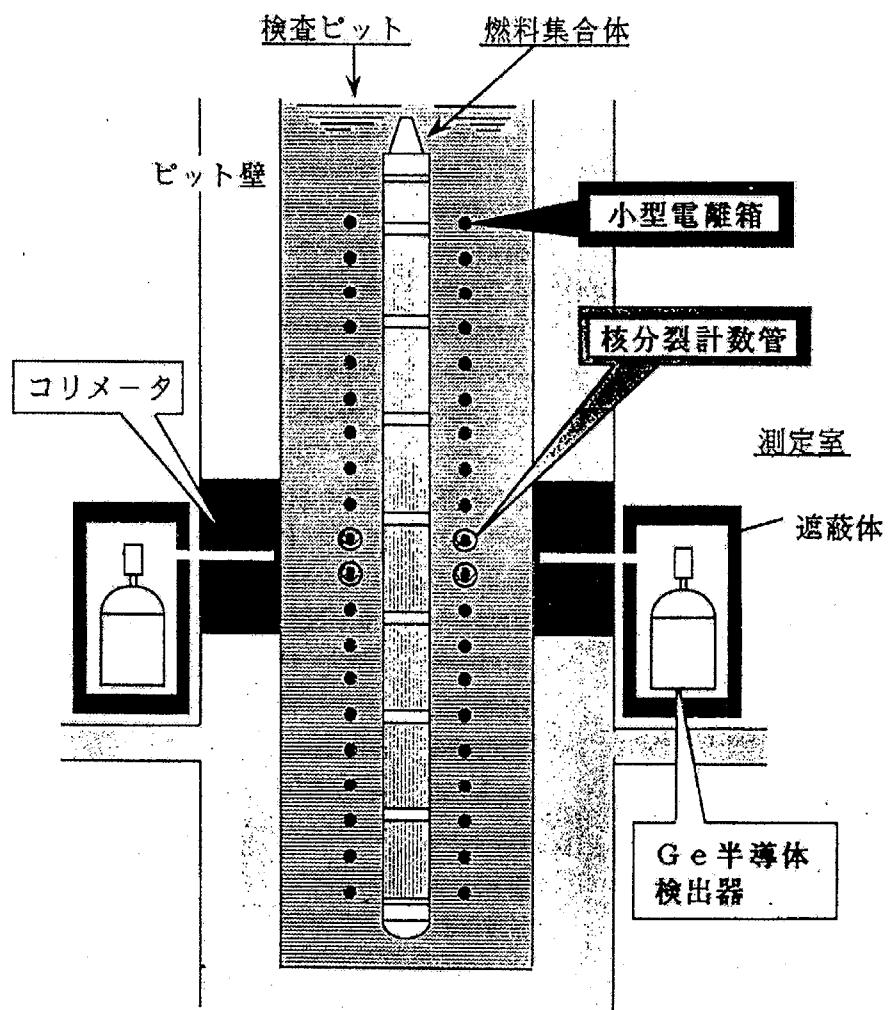
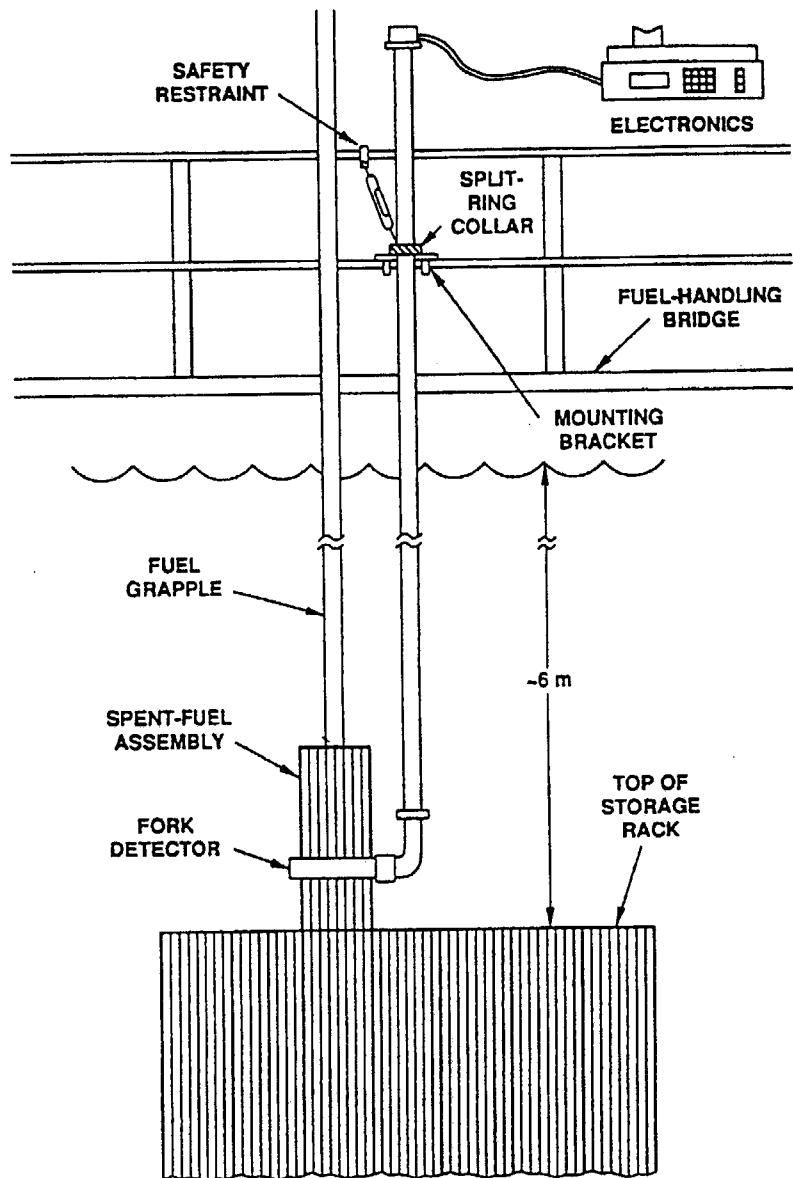


図 2.4-2 燃焼度計測装置構成概念図



Sketch of a FORK Detector in Operation

図 2.4-3 簡易燃焼度モニタの一例 (FORK Detector)

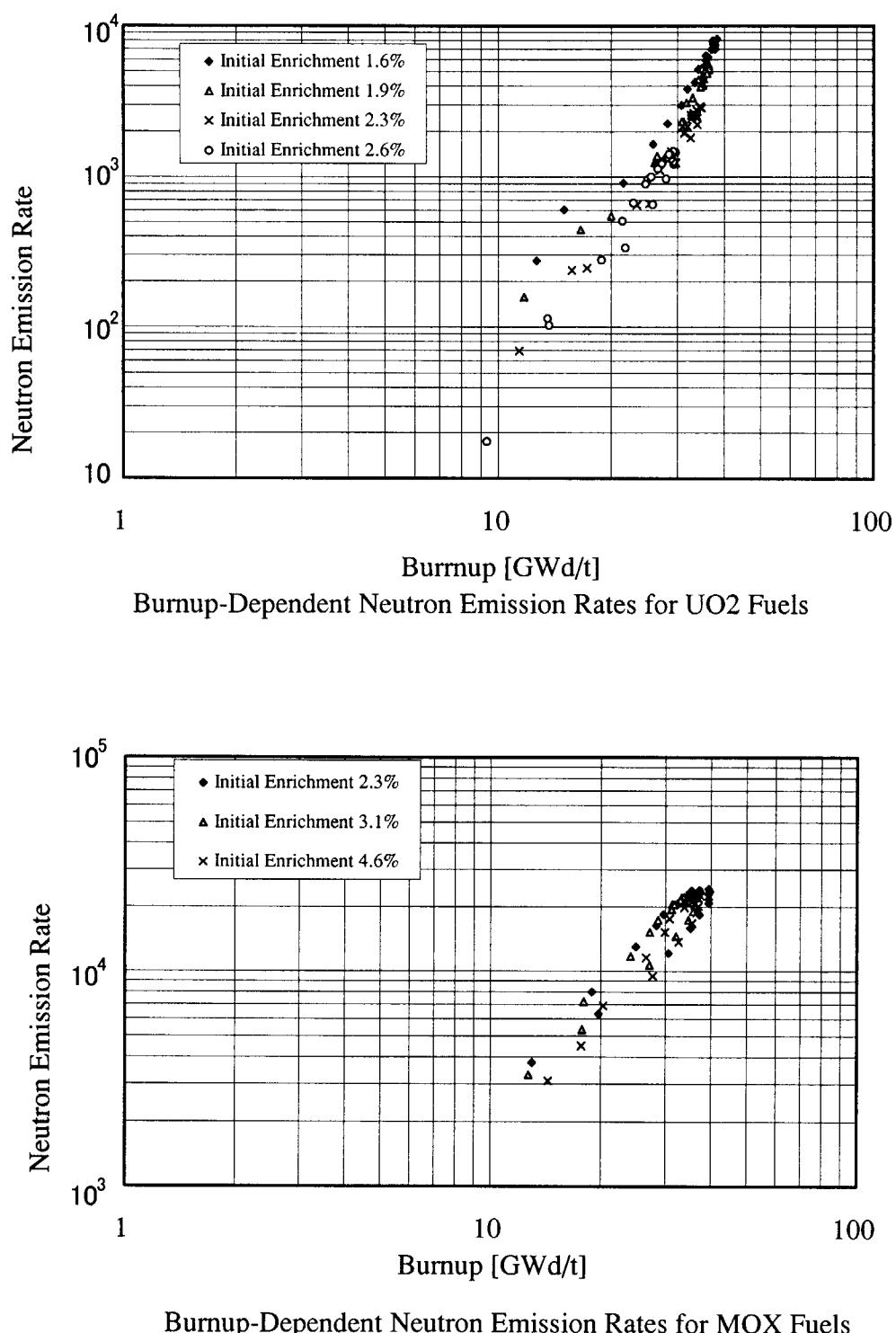


図 2.4-4 中性子放出率と燃焼度の関係

(K.Yoshioka, Y.Ando, I.Mitsuhashi, et al., "Measurement of Burn up and Neutron Emission Rates from a Spent MOX Fuel", ICNC'99, Versailles, pII1675-1683, 1999 より)

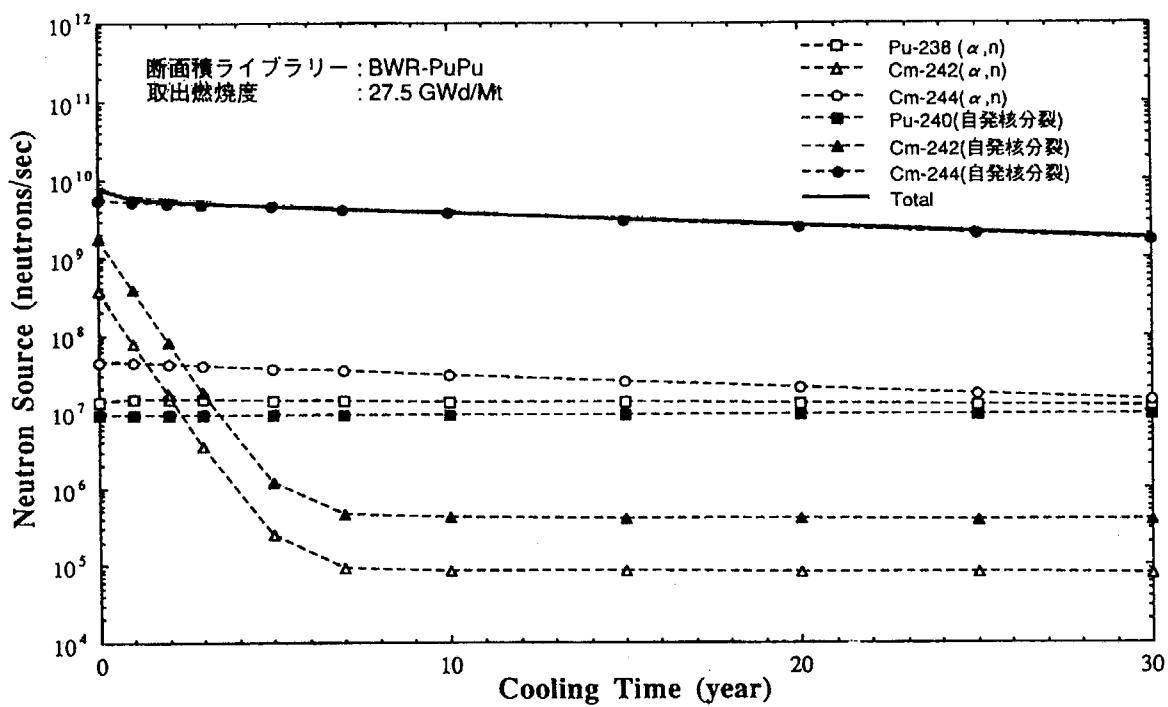


図 2.4-5 使用済 MOX 燃料における中性子発生源の比較 (ORIGEN2 による計算例)

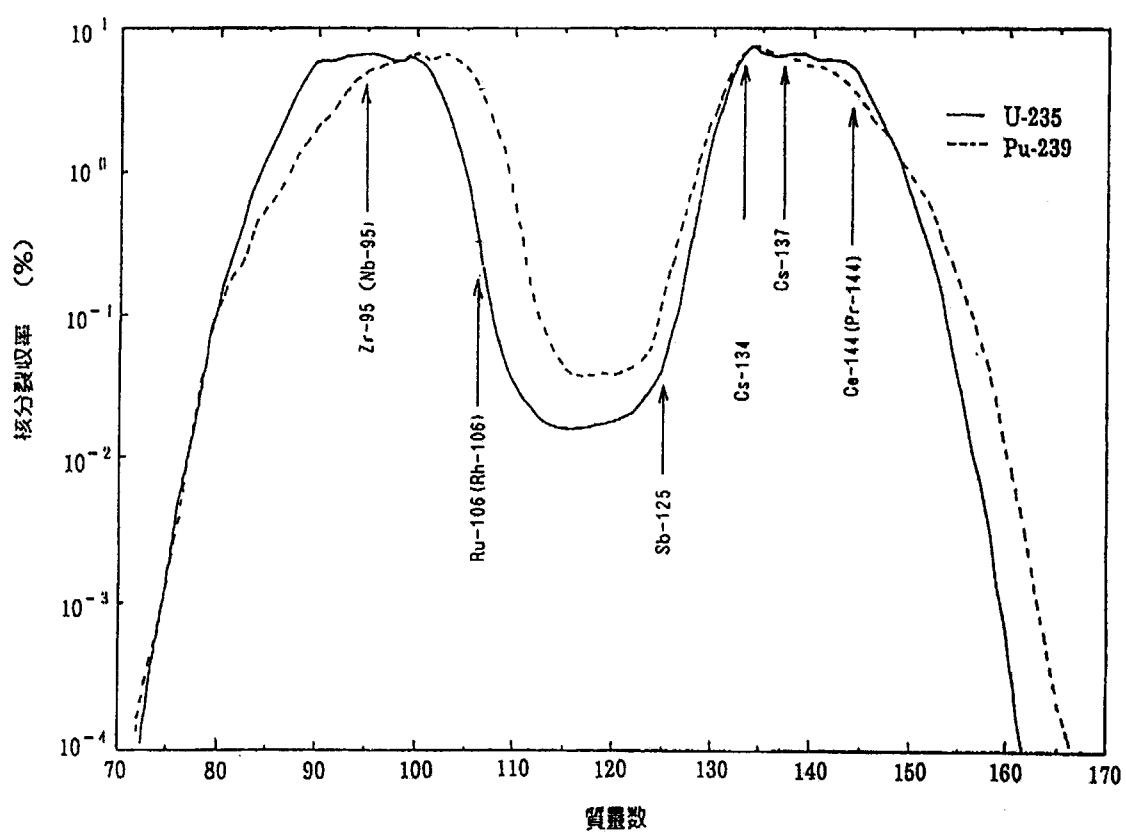


図 2.4-6 U-235 と Pu-239 の核分裂収率の比較

3. ベンチマーク問題の提案

3.1 基本方針

第2章の課題の検討において、軽水炉で当面想定される燃料については、核計算精度に関して大きな問題がないと考えられることが明らかになった。現時点では計算ベンチマークに求められているものは、臨界実験、実炉データなどが存在しない高燃焼度領域における核計算精度の確認であると考えられたことから、現行燃料設計の枠、例えば ^{235}U 濃縮度制限(5wt%)、最高燃焼度制限、機械的健全性などにとらわれることなく問題の設定を行うこととした。

ベンチマーク問題では、取り出し燃焼度 70GWd/t を想定した。これは、PWR の高燃焼度燃料および BWR Step III 燃料の最高燃焼度制限値(それぞれ 55GWd/t)を勘案して設定したものである。

対象燃料は UO_2 および MOX 燃料とした。

ベンチマーク体系としては、ピンセル、PWR 集合体、BWR 集合体の 3 体系を対象とした。ピンセル体系では各核種の反応度寄与などを含む基礎的な核特性を評価項目とし、炉物理的な観点からベンチマーク問題の結果を分析できるように配慮した。また、PWR、BWR 集合体はより実機に近い体系となっており、局所ピーキング係数など実機の設計に当たり重要となる項目を含んでいる。

これら 3 体系で高燃焼度燃料に対する包絡的なベンチマーク問題を形成するが、それぞれ問題としては独立した形を取っており、例えばピンセル体系のみ、ピンセル体系と BWR 体系などのように、必要な問題についてのみ解析を行うことが可能になっている。

3.2 ピンセル編

3.2.1 UO_2 燃料

(1) 概要

4 ループ PWR 17x17 型燃料集合体の単一燃料セルをベースとし、サイクル長 21 ヶ月・3 パッチ運転を想定して取り出し燃焼度が 70GWd/t を上回るように濃縮度の設定を行った。設定された濃縮度は 6.5wt% であり、現行の軽水炉燃料の濃縮度制限(5wt%)を上回ったものとなっている。

(2) 幾何形状

表 3.2.1-1 に寸法諸元を、図 3.2.1-1 にピンセル形状の模式図を示す。

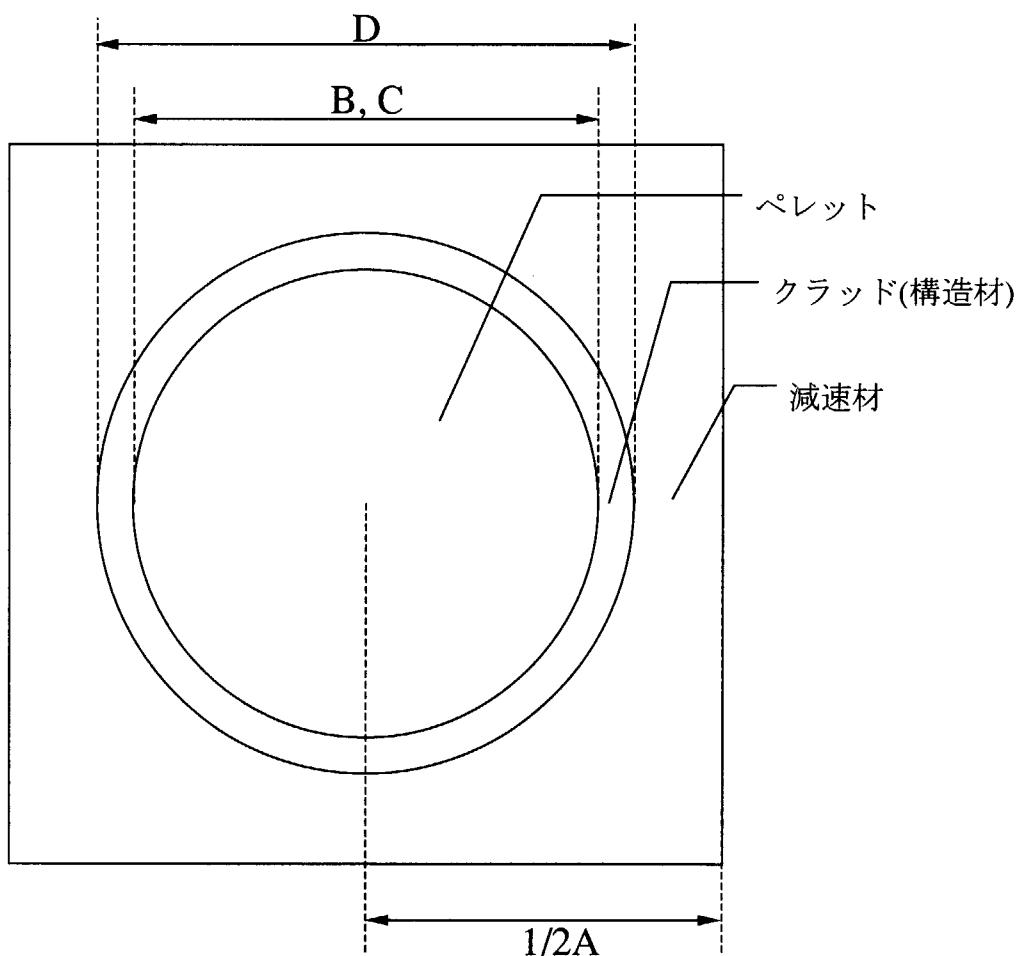
表 3.2.1-1 寸法諸元

記号(図 3.2.1-1)	内容	cm
A	燃料棒ピッチ	1.265
B	ペレット外径	0.824
C	燃料被覆管内径	0.824
D	燃料被覆管外径	0.952

メモ :

燃料被覆管肉厚 : 0.064cm
ペレット-被覆管ギャップ : 0.0cm(ギャップなし)

[注: 寸法はシグマ研究委員会・核種生成量評価 WG^{[1],[2]}で採用されたものと同一とした。]



- 格子形状は正方格子
- 径方向完全反射、軸方向寸法無限大 (バックリング 0)

図 3.2.1-1 ピンセル形状模式図

(3) 組成

表 3.2.1-2 に UO₂燃料の原子数密度を、表 3.2.1-3 に構造材及び減速材の原子数密度を示す。

表 3.2.1-2 UO₂燃料 原子数密度

項目	数値
U235 濃縮度	6.5wt%
UO ₂ 密度	10.3g/cc
原子数密度	[#/barn/cm]
U235	1.5122E-03
U238	2.1477E-02
O16	4.5945E-02

[注 1 : UO₂密度は、95%TD、ディッシュ・チャンファをスマアした値]

[注 2 : 実際の燃料に含まれる U234 は核特性に対して若干ながら影響を与えるが、問題を簡略化するため本ベンチマークでは U235 および U238 のみを考慮する。また、本ベンチマークの目的はあくまでも“次世代燃料”に関するものであり、実際の燃料をできる限り模擬することは必要ないと考えたことも U234 を無視した根拠である。]

[注 3 : ペレット温度が変化しても個数密度は変化しないとした。]

【注 1 の用語説明】

ディッシュ：燃焼に伴う軸方向の体積増加を吸収させるため、燃料ペレットの端面に設けられる皿上の凹みのこと

チャンファ：燃料ペレットのつづみ形変形によるペレット-被覆管相互作用を軽減するためにペレットコーナー部に設けられる面取り

表 3.2.1-3 構造材及び減速材 原子数密度

	構造材	減速材			
		低温状態 ボイド率 0%	高温状態 ボイド率 0%	高温状態 BWR ボイド率 40%相当	高温状態 BWR ボイド率 70%相当
密度	6.53g/cc	0.996g/cc	0.660g/cc	0.549g/cc	0.409g/cc
原子数密度	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]
Zr-nat.	4.3107E-02	0.0	0.0	0.0	0.0
H ₂ O	0.0	3.3315E-02	2.2074E-02	1.8383E-02	1.3678E-02

メモ :

構造材 : 被覆管

ほう素濃度 : 0ppm

[注 1 : 実機ではジルカロイが使用されるが、計算しやすさの観点から天然組成のジルコニウム(Zr-nat.)とした。なお、試計算によると Zr-nat.とジルカロイ-4 の差異はセル無限増倍率で 0.1% $\Delta k/k$ 程度であり、ベンチマーク問題としては無視できると判断した。]

[注 2 : 核データライブラリによっては、Zr-nat.がない場合も想定される。同位体毎に個数密度を入力する場合、表 3.2.1-4 を推奨する。]

[注 3 : クラッド温度が変化しても個数密度は変化しないとした]

[注 4 : ピンセル体系のベンチマークは PWR/BWR 共通の問題としての位置づけであるため、ほう素濃度は 0ppm とした。]

[注 5 : 600K, ボイド率 0%については、PWR 運転条件を模擬したものとなっている。]

[注 6 : 600K, BWR ボイド率 40, 70%における密度及び数密度は、BWR 運転条件での集合体平均減速材密度に対応した値である。すなわち、ボイド率 40%または 70%のインチャンネル水とボイド率 0%のギャップ水、ウォータロッドもしくはウォーターチャンネル内の減速材を考慮した平均値である。]

[注 7 : 実機では、グリッドスペーサーが存在するが、計算の簡略化のため無視している]

[注 8 : 高温状態、低温状態の温度については次項(4)を参照のこと]

表 3.2.1-4 Zr-nat.を同位体毎に指定する場合の原子数密度

同位体	原子数密度
	[#/barn/cm]
Zr90	2.2200E-02
Zr91	4.8280E-03
Zr92	7.3713E-03
Zr94	7.5006E-03
Zr96	1.2070E-03

(4) 温度

表 3.2.1-5 に各領域の温度を示す。

表 3.2.1-5 各領域の温度

領域	計算条件	温度
ペレット	ドップラー	1800K
	高温状態	900K
	低温状態	300K
減速材および構造材	ドップラー	600K
	高温状態	600K
	低温状態	300K

[注：燃焼計算は高温状態、ボイド率 0%で行う。低温状態およびドップラーは温度変化に伴う反応度算出に使用する。]

(5) 出力密度

出力密度は 37.0W/gU(179W/cm, 111.9W/cm³)とする。

3.2.2 MOX 燃料

(1) 概要

4 ループ PWR 17x17 型燃料集合体の単一燃料セルをベースとし、サイクル長 21 ヶ月・3 バッチ運転を想定して取り出し燃焼度が 70GWD/t を上回るように Pu 富化度の設定を行った。設定された Puf 富化度は 11wt% ある。PWR の現行の設計では、Puf 富化度が 6wt%程度となるので、これよりかなり高くなる。

なお、燃料のハード面から現実性を追求すると現在の MOX 燃料の設計と大差ないものになってしまい、ベンチマーク計算としての価値がなくなることから上記の設定とした。

(2) 幾何形状

表 3.2.2-1 に寸法諸元を、図 3.2.1-1 にピンセル形状の模式図を示す。

表 3.2.2-1 寸法諸元

記号 (図 3.2.1-1)	内容	cm
A	燃料棒ピッチ	1.265
B	ペレット外径	0.824
C	燃料被覆管内径	0.824
D	燃料被覆管外径	0.952

メモ :

燃料被覆管肉厚 : 0.064cm

ペレット-被覆管ギャップ : 0.0cm(ギャップなし)

[注：寸法はシグマ研究委員会・核種生成量評価 WG^{[1],[2]}で採用されたものと同一とした。]

(3) 組成

表 3.2.2-2 に本ベンチマーク問題で仮定した Pu 組成を示す。

表 3.2.2-2 Pu 組成 ([シグマ研究委員会・核種生成量評価 WG]^{[1],[2]}より)

核種	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242	Am241
組成 wt%	2.1	54.5	25.0	9.3	6.4	2.7

表 3.2.2-3 に MOX 燃料の原子数密度を、表 3.2.2-4 に構造材及び減速材の原子数密度を示す。

表 3.2.2-3 MOX 燃料 原子数密度

項目	数値
MOX 密度	10.4g/cc
U235 濃縮度	0.2wt%
Pu富化度	17.2wt%
Puf 富化度	11.0wt%
原子数密度	[#/barn/cm]
U235	3.8879E-05
U238	1.9159E-02
Pu238	8.3986E-05
Pu239	2.1706E-03
Pu240	9.9154E-04
Pu241	3.6732E-04
Pu242	2.5174E-04
Am241	1.0664E-04
O16	4.6330E-02

[注 1 : Puf 富化度の定義は、(Pu239+Pu241)/(Pu238+Pu239+Pu240+Pu241+Pu242+Am241)]

表 3.2.2-4 構造材及び減速材 原子数密度

	構造材	減速材			
		低温状態 ボイド率 0%	高温状態 ボイド率 0%	高温状態 BWR ボイド率 40%相当	高温状態 BWR ボイド率 70%相当
密度	6.53g/cc	0.996g/cc	0.660g/cc	0.549g/cc	0.409g/cc
原子数密度	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]
Zr-nat.	4.3107E-02	0.0	0.0	0.0	0.0
H ₂ O	0.0	3.3315E-02	2.2074E-02	1.8383E-02	1.3678E-02

メモ :

構造材 : 被覆管

ほう素濃度 : 0ppm

[注 1 : 実機ではジルカロイが使用されるが、計算しやすさの観点から天然組成のジルコニウム(Zr-nat.)とした。なお、試計算によると Zr-nat.とジルカロイ-4 の差異はセル無限増倍率で 0.1% $\Delta k/k$ 程度であり、ベンチマーク問題としては無視できると判断した。]

[注 2 : 核データライブラリによっては、Zr-nat.がない場合も想定される。同位体毎に個数密度を入力する場合、表 3.2.1-4 を推奨する。]

[注 3 : クラッド温度が変化しても個数密度は変化しないとした]

[注 4 : ピンセル体系のベンチマークは PWR/BWR 共通の問題としての位置づけであるため、ほう素濃度は 0ppm とした。]

[注 5 : 600K, ボイド率 0%について、PWR 運転条件を模擬したものとなっている。]

[注 6 : 600K, BWR ボイド率 40, 70%における密度及び数密度は、BWR 運転条件での集合体平均減速材密度に対応した値である。すなわち、ボイド率 40%または 70%のインチャンネル水とボイド率 0%のギャップ水、ウォータロッドもしくはウォーターチャンネル内の減速材を考慮した平均値である。]

[注 7 : 実機では、グリッドスペーサーが存在するが、計算の簡略化のため無視している]

[注 8 : 高温状態、低温状態の温度については次項(4)を参照のこと]

(4) 温度

表 3.2.2-5 に各領域の温度を示す。

表 3.2.2-5 各領域の温度

領域	計算条件	温度
ペレット	ドップラー	1800K
	高温状態	900K
	低温状態	300K
減速材および構造材	ドップラー	600K
	高温状態	600K
	低温状態	300K

[注：燃焼計算は高温状態、ボイド率 0%で行う。低温状態およびドップラーは温度変化に伴う反応度算出に使用する。]

(5) 出力密度

出力密度は 36.6W/gHM(179W/cm, 111.9W/cm³)とする。

3.2.3 計算条件

1) 燃焼計算条件

- ・温度状態は高温状態(表3.2.1-5または表3.2.2-5参照)
- ・ボイド率は0%(表3.2.1-3または表3.2.2-4参照)
- ・出力密度は3.2.1節の(5)及び3.2.2節の(5)に示した値
- ・0GWd/tでの値はXeなし、0.1GWd/t以降は平衡Xe

2) 計算項目

(1) 無限増倍率の燃焼特性

- ・出力フォーマット：表3.2.3-1
- ・燃焼度点：0, 0.1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70GWd/t

表3.2.3-1 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度 (GWd/t)	無限増倍率
0.0	
0.1	
5.0	
10.0	
15.0	
20.0	
30.0	
50.0	
70.0	

[注1：燃焼度点は燃焼計算ステップを定義するものではない。燃焼計算ステップの設定は解析コードにも依存するため、計算者の裁量に任せることとする。]

[注2：より詳細に比較するため、計算点全ての無限増倍率を提出することを推奨する。]

(2) 主要同位体組成の燃焼特性

- ・出力フォーマット：表 3.2.3-2
- ・燃焼度点：0, 0.1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70GWd/t
- ・重核種：U235, U236, U238, Np237, Pu238～Pu242, Am241, Am242m, Am243, Cm242～Cm246
- ・FP：Mo95, Tc99, Rh103, Cs133, Sm147, Sm149, Sm150, Sm152, Nd143, Nd145, Eu153, Gd155
- ・原子数密度はセル内の体積平均値とする。

表 3.2.3-2 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

(1/barn/cm)

核種	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
U235									
U236									
U238									
Np237									
Pu238									
Pu239									
Pu240									
Pu241									
Pu242									
Am241									
Am242m									
Am243									
Cm242									
Cm243									
Cm244									
Cm245									
Cm246									
Mo95									
Tc99									
Rh103									
Cs133									
Sm147									
Sm149									
Sm150									
Sm152									
Nd143									
Nd145									
Eu153									
Gd155									

[注：2.4 節を参考として選定した。]

(3) 中性子生成断面積の燃焼度依存性

- ・出力フォーマット：表 3.2.3-3
- ・燃焼度点：0, 0.1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70GWD/t
- ・全ての核種を総和した 1 群巨視的断面積
- ・重核種：U235, U238, Pu238～Pu242, Am241, Am243, Cm242, Cm244 の 1 群微視的断面積
- ・断面積は何れも燃料セル平均値とする。

表 3.2.3-3 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性 (燃料セル平均)

断面積	燃焼度(GWD/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma f$ (全核種)									
$\nu \sigma f$ (U235)									
$\nu \sigma f$ (U238)									
$\nu \sigma f$ (Pu238)									
$\nu \sigma f$ (Pu239)									
$\nu \sigma f$ (Pu240)									
$\nu \sigma f$ (Pu241)									
$\nu \sigma f$ (Pu242)									
$\nu \sigma f$ (Am241)									
$\nu \sigma f$ (Am243)									
$\nu \sigma f$ (Cm242)									
$\nu \sigma f$ (Cm244)									

 $\nu \Sigma f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma f$: 一群微視的断面積(barn)

(4) 中性子吸収断面積の燃焼度依存性

- ・出力フォーマット：表 3.2.3-4
- ・燃焼度点：0, 0.1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70GWD/t
- ・全ての核種を総和した 1 群巨視的断面積
- ・重核種：U235, U238, Pu238～Pu242, Am241, Am243, Cm242, Cm244 の 1 群微視的断面積
- ・上記の重核種以外の核分裂性核種・親核種を総和した 1 群巨視的断面積 (その他 1)
- ・核分裂生成核種および燃料中の O16 を総和した 1 群巨視的断面積 (その他 2)
- ・被覆管(Zr-nat.)の 1 群巨視的断面積
- ・減速材(H₂O)の 1 群巨視的断面積
- ・断面積は何れも燃料セル平均値とする。

表 3.2.3-4 中性子吸收反応断面積の燃焼度依存性 (燃料セル平均)

断面積	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)									
σ_a (U235)									
σ_a (U238)									
σ_a (Pu238)									
σ_a (Pu239)									
σ_a (Pu240)									
σ_a (Pu241)									
σ_a (Pu242)									
σ_a (Am241)									
σ_a (Am243)									
σ_a (Cm242)									
σ_a (Cm244)									
Σ_a (その他1)									
Σ_a (その他2)									
Σ_a (Zy-4)									
Σ_a (H2O)									

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1 : その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2 : O16及び核分裂生成核種の総和

(5) 表 3.2.3-2, 表 3.2.3-3, 表 3.2.3-4 に関わる出力量の定義

$$\bar{N}(i) = \frac{\int d\mathbf{r} N_i(\mathbf{r})}{V} \quad : \text{ 燃料セル平均核種 } i \text{ 原子数密度}$$

$$\bar{\phi} = \frac{\int dE \int d\mathbf{r} \phi(\mathbf{r}, E)}{V} \quad : \text{ 燃料セル平均一群中性子束}$$

$$\bar{\sigma}_x(i) = \frac{\int dE \int d\mathbf{r} N_i(\mathbf{r}) \sigma_{x,i}(\mathbf{r}, E) \phi(\mathbf{r}, E)}{\bar{N}(i) \bar{\phi} V} \quad : \text{ 核種 } i \text{ 反応 } x \text{ の燃料セル平均一群微視的断面積}$$

$$\bar{\Sigma}_x = \frac{\sum_i \int dE \int d\mathbf{r} N_i(\mathbf{r}) \sigma_{x,i}(\mathbf{r}, E) \phi(\mathbf{r}, E)}{\bar{\phi} V} \quad : \text{ 反応 } x \text{ の燃料セル平均一群巨視的断面積}$$

尚、表 3.2.3-3, 3.2.3-4 中のシンボル表示では $\bar{\sigma}_x(i)$ 、 $\bar{\Sigma}_x$ の上線は省略している。

これらの表を利用して、2 つの計算結果を比較する場合、以下のようにして反応度差の要因分析を行う。

$$\frac{\delta K_\infty}{K_\infty} = \frac{\delta P}{P} - \frac{\delta A}{A} = \frac{\delta v \Sigma_f}{v \Sigma_f} - \frac{\delta \Sigma_a}{\Sigma_a} = \frac{\sum_i (\delta \bar{N}(i) v \bar{\sigma}_f(i) + \bar{N}(i) \delta v \bar{\sigma}_f(i))}{v \Sigma_f} - \frac{\sum_i (\delta \bar{N}(i) \bar{\sigma}_a(i) + \bar{N}(i) \delta \bar{\sigma}_a(i))}{\Sigma_a}$$

ここで、P : 全生成率、A : 全吸収率、 δ : 各出力項目の比較計算結果の差異、である。

(6) 無限増倍率のボイド率、温度瞬時変化特性

- ・出力フォーマット：表 3.2.3-5
- ・燃焼度点：0, 0.1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70GWd/t
- ・計算点は以下の通り。
 - 低温状態, 0%ボイド
 - 高温状態, 40, 70%ボイド
 - ドップラー, 0%ボイド

表 3.2.3-5 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
高温状態, 0%ボイド									
高温状態, 40%ボイド									
高温状態, 70%ボイド									
ドップラー, 0%ボイド									
低温状態, 0%ボイド									

HOT, 0%ボイドより瞬時変化

[注 1：これらの無限増倍率と燃焼計算時の無限増倍率を比較することで、高温-冷温反応度差、ボイド反応度、ドップラー反応度を算出することが可能となる。]

[注 2：表 3.2.3-5 の高温状態, 0%ボイドの無限増倍率は表 3.2.3-1 と同一の値となる。]

3.3 PWR 集合体編

3.3.1 UO₂集合体

(1) 概要

4 ループ PWR 17x17 型燃料集合体をベースに、サイクル長 21 ヶ月・3 バッチ運転を想定した設計を行っている。集合体は UO₂燃料、UO₂-Gd₂O₃(Gd)燃料それぞれ 1 種類から構成されており、集合体平均濃縮度は 6.2wt%である。

(2) 幾何形状

表 3.3.1-1 に寸法諸元を、図 3.3.1-1 に集合体形状の模式図を示す。

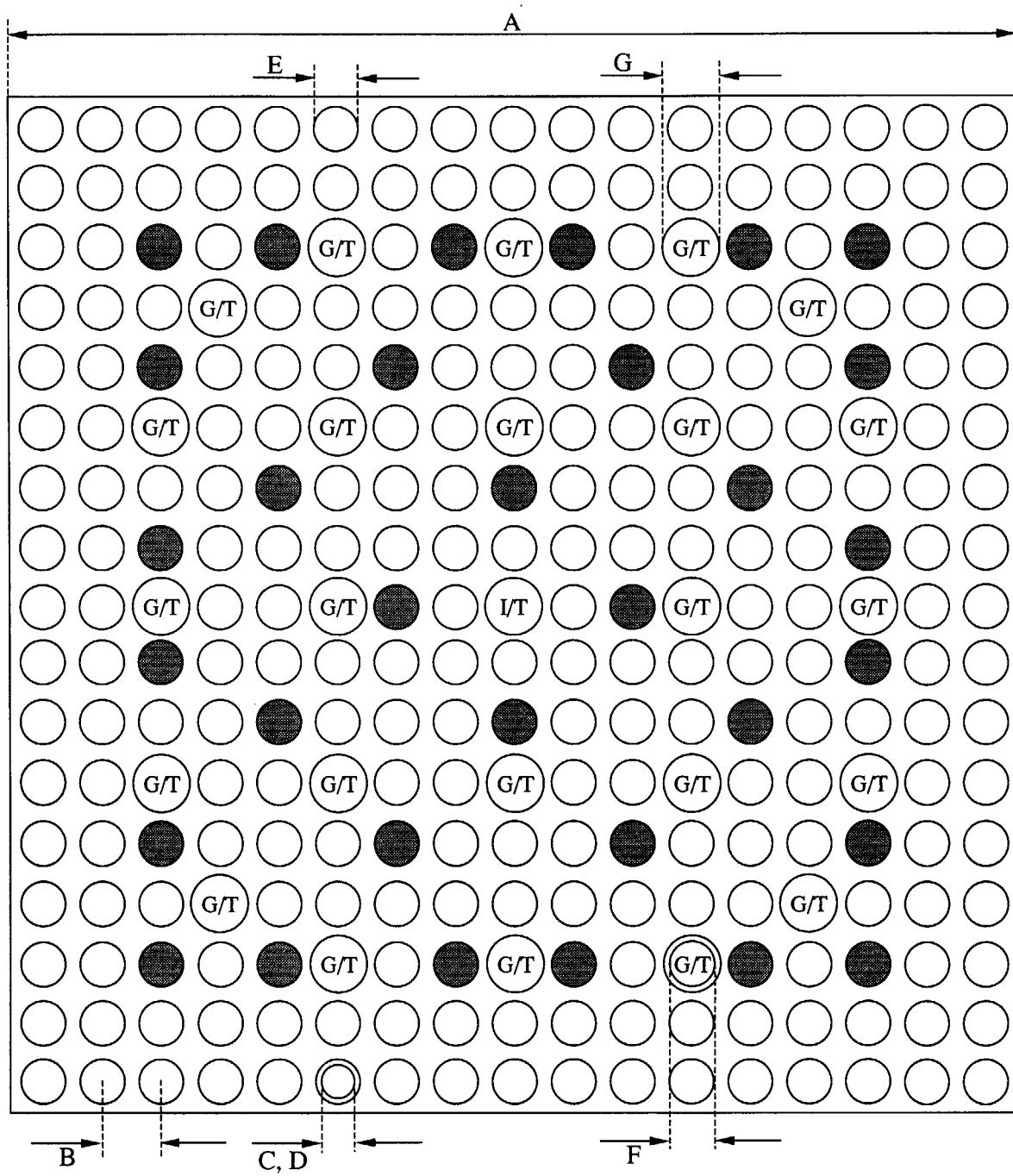
表 3.3.1-1 寸法諸元

記号(図 3.3.1-1)	内容	寸法(cm)
A	集合体ピッチ	21.505
B	燃料棒ピッチ	1.265
C	ペレット外径	0.824
D	燃料被覆管内径	0.824
E	燃料被覆管外径	0.952
F	I/T, G/T 内径	1.140
G	I/T, G/T 外径	1.220

メモ：

燃料被覆管肉厚：0.064cm
 ペレット-被覆管ギャップ：0.0cm(ギャップなし)
 UO₂, Gd 入り燃料棒はピンセルと同一寸法
 I/T；計装用案内シンプル管、 G/T；制御棒案内シンプル管
 I/T, G/T 肉厚：0.040cm
 集合体間ギャップ：0.0cm(ギャップなし)
 Gd 入り燃料棒本数：32

[注：Gd 本数は現行の設計(16 本)に比べて多い。これは減速材温度係数抑制の観点からこのように設定したものである。]



- : Gd 燃料棒
 - : UO₂ 燃料棒
 - G/T : 制御棒案内シンブル
 - I/T : 計装用案内シンブル
- 径方向完全反射、軸方向寸法無限大(バックリング 0)

図 3.3.1-1 PWR UO₂集合体形状模式図

(3) 組成

表 3.3.1-2 に UO_2 燃料、表 3.3.1-3 に $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 燃料の原子数密度を、表 3.3.1-4 に構造材(計算用案内シンプルル、制御棒案内シンプルルは被覆管と同一とする)、減速材の原子数密度を示す。

表 3.3.1-2 UO_2 燃料 原子数密度

項目	数値
U235 濃縮度	6.5wt%
UO_2 密度	10.3g/cc
原子数密度	[#/barn/cm]
U235	1.5122E-03
U238	2.1477E-02
O16	4.5945E-02

[注 1 : UO_2 密度は、95%TD、ディッシュ・チャンファをスマアした値]

[注 2 : 実際の燃料に含まれる U234 は核特性に対して若干ながら影響を与えるが、問題を簡略化するため本ベンチマークでは U235 および U238 のみを考慮する。また、本ベンチマークの目的はあくまでも“次世代燃料”に関するものであり、実際の燃料をできる限り模擬することは必要ないと考えたことも U234 を無視した根拠である。]

[注 3 : ペレット温度が変化しても個数密度は変化しないとした。]

表 3.3.1-3 Gd 燃料 原子数密度

項目	数値
密度	10.0g/cc
U235 濃縮度	4.0wt%
Gd ₂ O ₃ 濃度	10.0wt%
原子数密度	[#/barn/cm]
U235	8.1312E-04
U238	1.9268E-02
Gd154	7.1289E-05
Gd155	4.8938E-04
Gd156	6.8028E-04
Gd157	5.2077E-04
Gd158	8.2650E-04
Gd160	7.2761E-04
O16	4.5130E-02

[注 1 : ペレット密度は 95%TD、ディッシュ・チャンファをスマアした値]

[注 2 : Gd152 は存在割合が少なく、吸収に寄与しないことから無視している。]

[注 3 : Gd 燃料棒の U235 濃縮度は、Gd₂O₃ 添加による熱伝導度低下を考慮して 4.0wt%と低めの値に設定している。]

表 3.3.1-4 構造材及び減速材 原子数密度

構造材	減速材	
	低温状態 ボイド率 0%	高温状態 ボイド率 0%
密度	6.53g/cc	0.996g/cc
原子数密度	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]
Zr-nat.	4.3107E-02	0.0
H ₂ O	0.0	3.3315E-02
		2.2074E-02

[注 1 : 実機ではジルカロイが使用されるが、計算しやすさの観点から天然組成のジルコニウム(Zr-nat.)とした。なお、試計算によると Zr-nat.とジルカロイ-4 の差異はセル無限増倍率で 0.1% $\Delta k/k$ 程度であり、ベンチマーク問題としては無視できると判断した。]

[注 2 : 核データライブラリによっては、Zr-nat.がない場合も想定される。同位体毎に個数密度を入力する場合、表 3.2.1-4 を推奨する。]

[注 3 : クラッド温度が変化しても個数密度は変化しないとした]

[注 4 : ピンセル体系のベンチマークは PWR/BWR 共通の問題としての位置づけであるため、ほう素濃度は 0ppm とした。]

[注 5 : 600K, ボイド率 0%について、PWR 運転条件を模擬したものとなっている。]

[注 6 : 実機では、グリッドスペーサが存在するが、計算の簡略化のため無視している]

[注 7 : 高温状態、低温状態の温度については次項(4)を参照のこと]

(4) 温度

表 3.3.1-5 に各領域の温度を示す。なお、 UO_2 と Gd 燃料棒共に同じペレット温度を使用する。

表 3.3.1-5 各領域の温度

領域	計算条件	温度
ペレット	ドップラー	1800K
	高温状態	900K
	低温状態	300K
減速材および構造材	ドップラー	600K
	高温状態	600K
	低温状態	300K

[注：燃焼計算は高温状態、ボイド率 0%で行う。低温状態およびドップラーは温度変化に伴う反応度算出に使用する。]

(5) 出力密度

出力密度は 37.5W/gU (102.2W/cm^3 , 179W/cm)とする。ただし、 $[\text{W/cm}^3]$ は集合体平均の値。

3.3.2 MOX 集合体

(1) 概要

4 ループ PWR 17x17 型燃料集合体をベースに、サイクル長 21 ヶ月・3 バッチ運転を想定した設計を行っている。集合体は高・中・低富化度の燃料から構成されており、集合体平均 P_{uf} 富化度は 11.0wt%である。

(2) 幾何形状

表 3.3.2-1 に寸法諸元を、図 3.3.2-1 に集合体形状の模式図を示す。

表 3.3.2-1 寸法諸元

記号 (図 3.3.2-1)	内容	cm
A	集合体ピッチ	21.505
B	燃料棒ピッチ	1.265
C	ペレット外径	0.824
D	燃料被覆管内径	0.824
E	燃料被覆管外径	0.952
F	I/T, G/T 内径	1.140
G	I/T, G/T 外径	1.220

メモ :

燃料被覆管肉厚 : 0.064cm

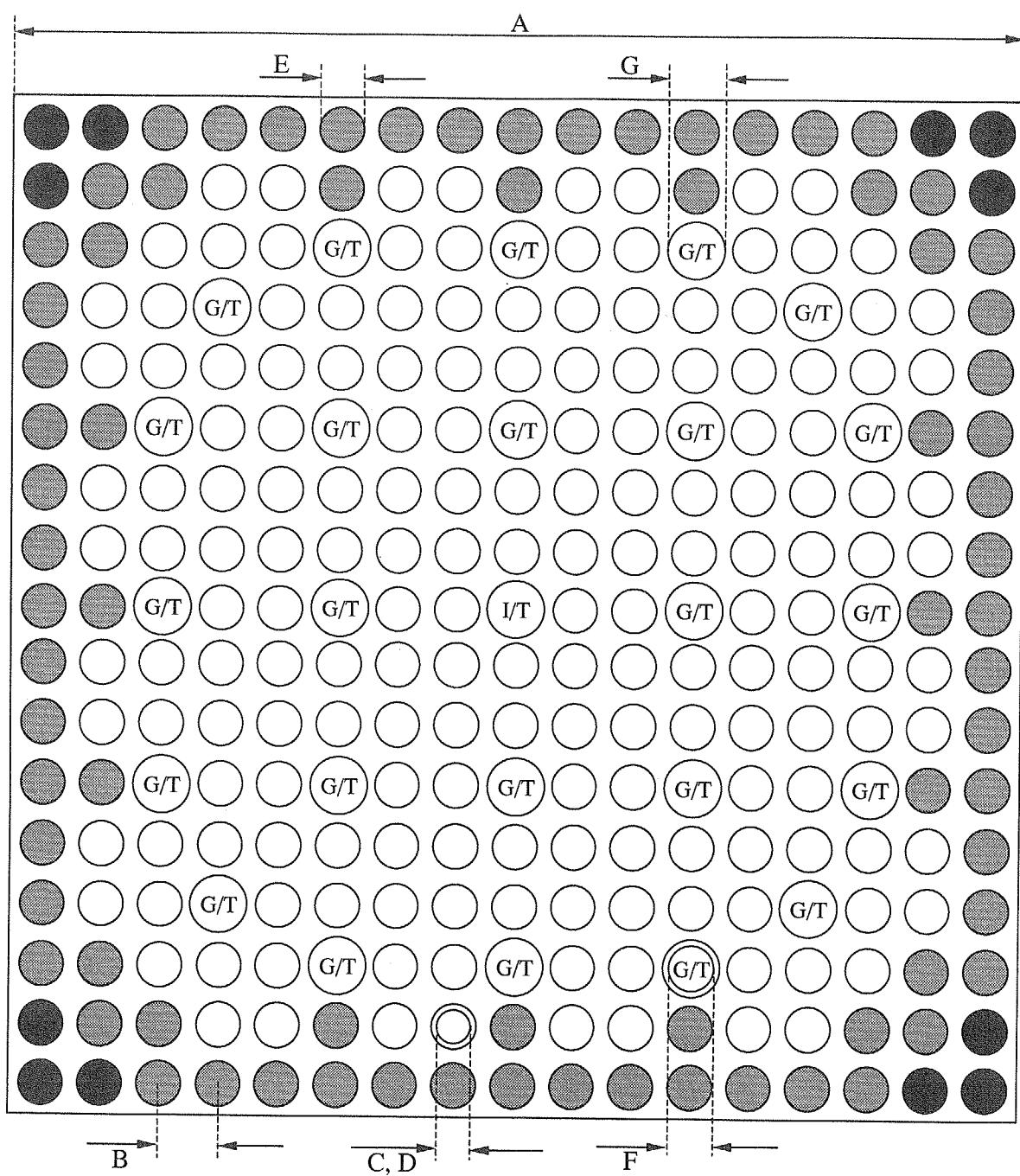
ペレット-被覆管ギャップ : 0.0cm(ギャップなし)

燃料棒はピンセルと同一寸法

I/T ; 計装用案内シンプル管、 G/T ; 制御棒案内シンプル管

I/T, G/T 肉厚 : 0.040cm

集合体間ギャップ : 0.0cm(ギャップなし)



- : 低富化度燃料棒
 - : 中富化度燃料棒
 - : 高富化度燃料棒
 - G/T : 制御棒案内シンブル
 - I/T : 計装用案内シンブル
- 径方向完全反射、軸方向寸法無限大(バックリング0)

図 3.3.2-1 PWR MOX 集合体形状模式図

(3) 組成

表 3.3.2-2 に MOX 燃料の富化度毎の原子数密度を、表 3.3.2-3 に構造材(計装用案内シングル、制御棒案内シングルは被覆管と同一とする)、減速材の原子数密度を示す。

表 3.3.2-2 MOX 燃料 富化度毎の原子数密度

項目	低富化度	中富化度	高富化度
密度	10.4g/cc	10.4g/cc	10.4g/cc
U235 濃縮度	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%
Pu富化度	7.5wt%	14.4wt%	19.1wt%
Pu富化度	4.8wt%	9.2wt%	12.2wt%
原子数密度	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]
U235	4.3463E-05	4.0212E-05	3.8000E-05
U238	2.1408E-02	1.9812E-02	1.8724E-02
Pu238	3.6652E-05	7.0251E-05	9.3169E-05
Pu239	9.4712E-04	1.8154E-03	2.4075E-03
Pu240	4.3265E-04	8.2927E-04	1.0997E-03
Pu241	1.6026E-04	3.0720E-04	4.0739E-04
Pu242	1.0984E-04	2.1052E-04	2.7920E-04
Am241	4.6536E-05	8.9200E-05	1.1828E-04
O16	4.6358E-02	4.6338E-02	4.6325E-02

[注 1 : Pu 組成はいずれの富化度もピンセル体系での仕様とした]

[注 2 : 95%TD、ディッシュ・チャンファをスマアした値]

表 3.3.2-3 構造材及び減速材 原子数密度

	構造材	減速材	
		低温状態 ボイド率 0%	高温状態 ボイド率 0%
密度	6.53g/cc	0.996g/cc	0.660g/cc
原子数密度	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]
Zr-nat.	4.3107E-02	0.0	0.0
H ₂ O	0.0	3.3315E-02	2.2074E-02

[注 1 : 実機ではジルカロイが使用されるが、計算しやすさの観点から天然組成のジルコニウム(Zr-nat.)とした。なお、試計算によると Zr-nat.とジルカロイ-4 の差異はセル無限増倍率で 0.1% $\Delta k/k$ 程度であり、ベンチマーク問題としては無視できると判断した。]

[注 2 : 核データライブラリによっては、Zr-nat.がない場合も想定される。同位体毎に個数密度を入力する場合、表 3.2.1-4 を推奨する。]

[注 3 : クラッド温度が変化しても個数密度は変化しないとした]

[注 4 : ピンセル体系のベンチマークは PWR/BWR 共通の問題としての位置づけであるため、ほう素濃度は 0ppm とした。]

[注 5 : 600K, ボイド率 0%については、PWR 運転条件を模擬したものとなっている。]

[注 6 : 実機では、グリッドスペーサーが存在するが、計算の簡略化のため無視している]

[注 7 : 高温状態、低温状態の温度については次項(4)を参照のこと]

(4) 温度

表 3.3.2-4 に各領域の温度を示す。

表 3.3.2-4 各領域の温度

領域	計算条件	温度
ペレット	ドップラー	1800K
	高温状態	900K
	低温状態	300K
減速材および構造材	ドップラー	600K
	高温状態	600K
	低温状態	300K

[注：燃焼計算は高温状態、ボイド率 0%で行う。低温状態およびドップラーは温度変化に伴う反応度算出に使用する。]

(5) 出力密度

出力密度は 36.6W/gHM (102.2W/cm^3 , 179W/cm)とする。ただし、[W/cm^3]は集合体平均の値。

3.3.3 計算条件

1) 燃焼計算条件

- ・温度状態は高温状態(表 3.3.1-5 または表 3.3.2-4 参照)
- ・ボイド率は 0% (表 3.3.1-4 または表 3.3.2-3 参照)
- ・出力密度は 3.3.1 節の(5)及び 3.3.2 節の(5)に示した値
- ・0GWd/t での値は Xe なし、0.1GWd/t 以降は平衡 Xe

2) 計算項目

(1) 無限増倍率及び局所ピーキング係数の燃焼特性

- ・出力フォーマット : 表 3.3.3-1
- ・燃焼度点 : 0, 0.1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70GWd/t

表 3.3.3-1 無限増倍率、局所ピーキング係数の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーキング係数*
0		
0.1		
5		
10		
15		
20		
30		
50		
70		

* 核分裂率

[注 1 : 燃焼度点は燃焼計算ステップを定義するものではない。燃焼計算ステップの設定は解析コードにも依存するため、計算者の裁量に任せることとする。]

[注 2 : 局所ピーキング係数は、相対核分裂率の最大値とする。]

[注 3 : より詳細に比較するため、計算点全ての無限増倍率・局所ピーキング係数を提出することを推奨する。]

(2) 核分裂率分布の燃焼特性

- ・出力フォーマット：表 3.3.3-2
- ・燃焼度点：0, 0.1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70GWd/t

表 3.3.3-2 核分裂率分布

		燃焼度(GWd/t)= 0								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓	i →	1								
		2								
		3								
		4								
		5								
		6								
		7								
		8								
		9								

(1に規格化)

		燃焼度(GWd/t)= 0.1								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓	i →	1								
		2								
		3								
		4								
		5								
		6								
		7								
		8								
		9								

(1に規格化)

[注 1 : 燃焼度は 0, 0.1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70GWd/t]

[注 2 : (1,1)が集合体中心、(9,9)が集合体右下となる]

[注 3 : 核分裂率の規格化は、全燃料棒(264 本)の平均値が 1.0 となるように行う]

(3) 無限増倍率の温度瞬時変化特性

- ・出力フォーマット：表 3.3.3-3
- ・燃焼度点：0, 0.1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70GWd/t
- ・計算点は以下の通り。

低温状態, 0%ボイド

ドップラー, 0%ボイド

表 3.3.3-3 無限増倍率の温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
高温状態, 0%ボイド									
低温状態, 0%ボイド									
ドップラ, 0%ボイド									

高温状態, 0%ボイドより瞬時変化

[注 1：これらの無限増倍率と燃焼計算時の無限増倍率を比較することで、高温-冷温反応度差、ドップラー反応度を算出することが可能となる。]

[注 2：高温状態, 0%ボイドの値は表 3.3.3-1 と同じとなる]

3.4 BWR 集合体編

3.4.1 UO₂集合体

(1) 概要

STEP3型(9×9)燃料集合体ハードをベースに18ヶ月70GWd/t取出しを想定したBWR-U燃料集合体である。燃料には、4種類のUO₂燃料と1種類のUO₂-Gd₂O₃燃料を使用し、集合体平均ウラン濃縮度は5.5wt%である。

[注1:集合体ピッチ及びC/Bの形状はUO₂集合体、MOX集合体とで共通]

(2) 幾何形状

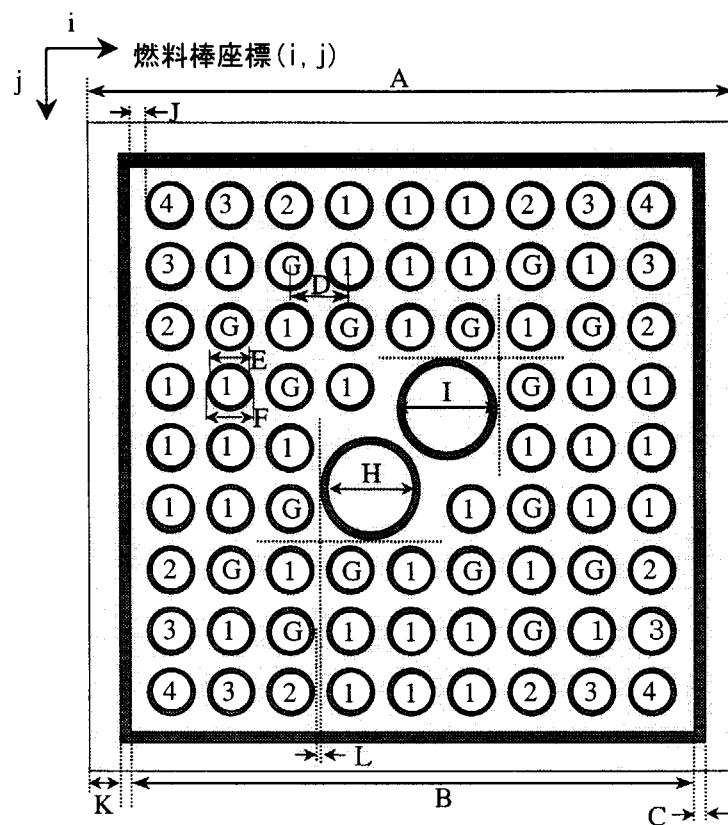
表3.4.1-1に寸法諸元を示す。図3.4.1-1に集合体形状の模式図を示す。

表3.4.1-1 寸法諸元

記号 (図3.4.1-1)	内容	寸法(cm)
A	集合体ピッチ	15.24
B	C/B内幅	13.40
C	C/B厚	0.250
D	燃料棒ピッチ	1.440
E	ペレット直径	0.980
F	燃料被覆管外直径	1.120
H	W/R内径	2.350
I	W/R外径	2.490
J	C/B-燃料被覆管間距離	0.380
K	水ギャップ幅(片側)	0.670
L	W/R-燃料被覆管距離	0.160

メモ:

C/B; チャンネルボックス、 W/R; ウォータロッド、
 燃料被覆管肉厚: 0.070 cm、 ペレット-被覆管ギャップ=0.0 (ペレットの密度を小さくし、 被覆管内面まで体積膨張させている)
 W/R厚: 0.070 cm、 水ギャップは制御棒側、 反制御棒側共通
 C/Bコーナー半径は0



- UO_2 燃料の濃縮度タイプを1~4で示す
- Gd燃料をGで示す
- 制御棒は(1,1)燃料棒側に位置する(計算では制御棒を考慮しない)
- 径方向完全反射、軸方向寸法無限大(バックリング0)

図 3.4.1-1 BWR UO_2 集合体形状模式図

(3) 組成

表 3.4.1-2 に UO₂燃料の濃縮度タイプ毎の原子数密度、表 3.4.1-3 に Gd 燃料の原子数密度を示す。U234、U236 は問題の単純化のため非考慮とした。

表 3.4.1-2 UO₂燃料 濃縮度タイプ毎の原子数密度

	タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4
本数	38	8	8	4
UO ₂ 密度	10.1 g/cc	10.1 g/cc	10.1 g/cc	10.1 g/cc
U235 濃縮度	6.3wt%	5.0wt%	4.0wt%	3.0wt%
原子数密度	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]
U235	1.4322E-03	1.1367E-03	9.0936E-04	6.8203E-04
U238	2.1032E-02	2.1324E-02	2.1549E-02	2.1774E-02
O16	4.4928E-02	4.4921E-02	4.4916E-02	4.4912E-02

表 3.4.1-3 Gd 燃料 原子数密度

項目	数値
本数	16
密度	9.8g/cc
U235 濃縮度	5.0wt%
Gd ₂ O ₃ 濃度	6.0wt%
原子数密度	[#/barn/cm]
U235	1.0389E-03
U238	1.9490E-02
Gd154	4.1864E-05
Gd155	2.8739E-04
Gd156	3.9950E-04
Gd157	3.0602E-04
Gd158	4.8536E-04
Gd160	4.3093E-04
O16	4.3985E-02

[注 : Gd152 は吸収に対する寄与が小さいため考慮しない。]

表 3.4.1-4 に構造材および減速材の原子数密度を示す。

表 3.4.1-4 構造材および減速材原子数密度

	構造材	減速材			
		低温状態 ボイド率0%	高温状態 ボイド率0%	高温状態 ボイド率40%	高温状態 ボイド率70%
密度	6.53g/cc	0.996g/cc	0.737g/cc	0.457g/cc	0.247g/cc
原子数密度	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]
Zr-nat.	4.3107E-02	0.0	0.0	0.0	0.0
H ₂ O	0.0	3.3315E-02	2.4658E-02	1.5294E-02	8.2712E-03

[注 1 : 構造材とは被覆管、チャンネルボックスおよびウォータロッド]

[注 2 : 構造材の熱膨張は無視]

[注 3 : 構造材の材質は問題の単純化のため、ジルカロイではなく天然組成のジルコニウム(Zr-nat.)とする。]

[注 4 : 減速材のボイド率は BWR の定格運転状態における炉心下部、中央部および上部でのインチャンネルのボイド率の典型値である。]

Zr-nat.の原子数密度を同位体毎に与える場合の推奨値を表 3.4.1-5 に示す。

表 3.4.1-5 Zr-nat.の同位体毎の原子数密度

同位体	原子数密度
	[#/barn/cm]
Zr90	2.2200E-02
Zr91	4.8280E-03
Zr92	7.3713E-03
Zr94	7.5006E-03
Zr96	1.2070E-03

(4) 温度

各領域の温度を表 3.4.1-6 に示す。

表 3.4.1-6 各領域の温度

領域	計算条件	温度
燃料	ドップラー	1800K
	高温状態	900K
	低温状態	300K
減速材および構造材	ドップラー	600K
	高温状態	600K
	低温状態	300K

[注 1 : 低温状態の温度は 20°C 相当、高温状態の温度は定格出力運転状態の典型値]

[注 2 : ドップラー計算条件の燃料温度は反応度事故解析におけるピーク出力部断熱エンタルピを想定]

(5) 出力密度

出力密度は 25W/gU (52.32W/cm^3) とする。

3.4.2 MOX 集合体

(1) 概要

取出平均燃焼度 70GWd/t 程度およびサイクル燃焼度 16~18GWd/t 程度を想定した BWR-MOX 燃料集合体^[1]である。集合体形状は、ATRIUM-10 型^[2]（10×10-9 燃料、角管ウォーターチャンネルあり）である。劣化ウランにプルトニウムを加えた MOX 燃料棒（77 本、富化度種類 5）と濃縮ウランにガドリニアを加えた Gd 燃料棒（14 本）を使用している。

集合体平均 Pu 富化度は 10.92wt%Pu、6.97wt%Puf である。Pu 組成は[シグマ研究委員会・核種生成量評価 WG^{[1],[2]}]で使用されたものを使用した。

[注 1：集合体ピッチ及び C/B の形状は UO₂集合体、MOX 集合体とで共通]

[注 2：ATRIUM-10 は Siemens 社の登録商標である。今回のベンチマーク問題作成にあたり、

Siemens 社が作成した NEA/NSC/DOC(98)10 の BWR-MOX ベンチマーク問題^[3]を参照した。]

(2) 幾何形状

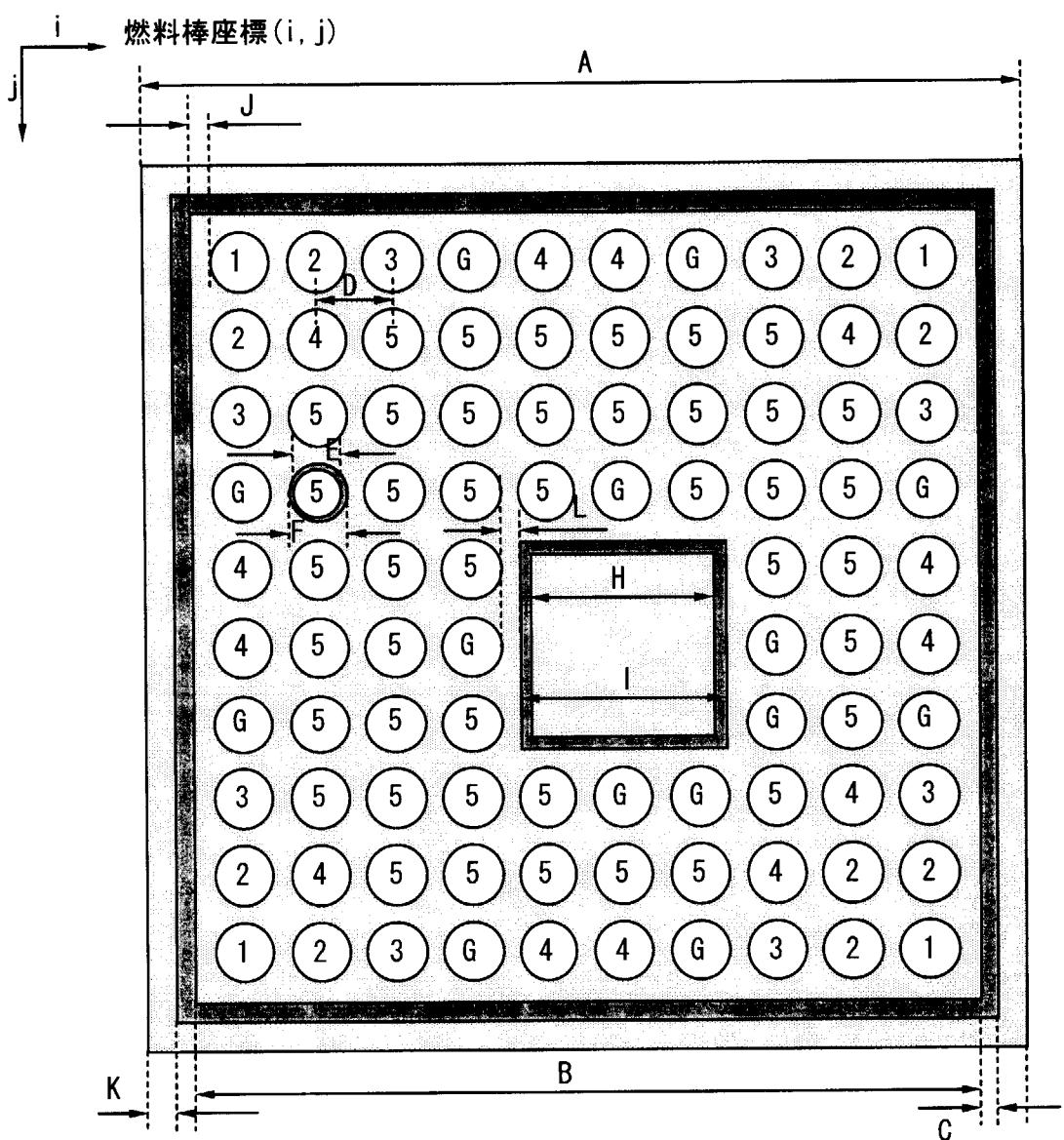
表 3.4.2-1 に寸法諸元を示す。図 3.4.2-1 に集合体形状の模式図を示す。

表 3.4.2-1 寸法諸元

記号 (図 3.4.2-1)	内容	寸法 (cm)
A	集合体ピッチ	15.24
B	C/B 内幅	13.40
C	C/B 厚	0.250
D	燃料棒ピッチ	1.295
E	ペレット直径	0.884
F	燃料被覆管外直径	1.005
H	W/C 内幅	3.355
I	W/C 外幅	3.500
J	C/B-燃料被覆管間距離	0.370
K	水ギャップ幅 (片側)	0.670
L	W/C-燃料被覆管距離	0.3375

メモ：

C/B ; チャンネルボックス、 W/C ; ウォーターチャンネル
 燃料被覆管肉厚 : 0.0605 cm
 ペレット-被覆管ギャップ=0.0 (ペレットの密度を小さくし、被覆管内面まで体積膨張させている)
 W/C 厚 : 0.0725 cm、水ギャップは制御棒側、反制御棒側共通
 C/B コーナーおよび W/C コーナーの半径は 0



- MOX 燃料の富化度タイプを 1~5 で示す
- Gd 燃料を G で示す
- 制御棒は(1,1)燃料棒側に位置する (計算では制御棒を考慮しない)
- 径方向完全反射、軸方向寸法無限大 (バックリング 0)

図 3.4.2-1 BWR MOX 集合体形状模式図

(3) 組成

本ベンチマーク問題で仮定した Pu 組成は表 3.4.2-2 のとおり。

表 3.4.2-2 Pu 組成 ([シグマ研究委員会・核種生成量評価 WG]^{[1],[2]}より)

核種	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242	Am241
組成 wt%	2.1	54.5	25.0	9.3	6.4	2.7

表 3.4.2-3 に MOX 燃料の富化度タイプ毎の原子数密度、表 3.4.2-4 に Gd 燃料の原子数密度を示す。U234、U236 は問題の単純化のため非考慮とした。

表 3.4.2-3 MOX 燃料 富化度タイプ毎の原子数密度

	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3	タイプ 4	タイプ 5
本数	4	9	8	13	43
密度	10.0g/cc	10.0g/cc	10.0g/cc	10.0g/cc	10.0g/cc
U235 濃縮度	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%
Pu 富化度	4.0wt%	6.0wt%	10.0wt%	12.0wt%	16.0wt%
Puf 富化度	2.552wt%	3.828wt%	6.380wt%	7.656wt%	10.208wt%
原子数密度	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]
U235	4.3208E-05	4.2347E-05	4.0621E-05	3.9755E-05	3.8019E-05
U238	2.1288E-02	2.0864E-02	2.0014E-02	1.9587E-02	1.8732E-02
Pu238	1.8680E-05	2.8046E-05	4.6831E-05	5.6249E-05	7.5139E-05
Pu239	4.8276E-04	7.2482E-04	1.2103E-03	1.4537E-03	1.9419E-03
Pu240	2.2053E-04	3.3110E-04	5.5286E-04	6.6405E-04	8.8705E-04
Pu241	8.1694E-05	1.2266E-04	2.0481E-04	2.4600E-04	3.2861E-04
Pu242	5.5987E-05	8.4059E-05	1.4036E-04	1.6859E-04	2.2520E-04
Am241	2.3718E-05	3.5610E-05	5.9460E-05	7.1419E-05	9.5403E-05
016	4.4430E-02	4.4466E-02	4.4538E-02	4.4574E-02	4.4646E-02

表 3.4.2-4 Gd 燃料 原子数密度

項目	数値
本数	14
密度	9.8g/cc
U235 濃縮度	4.0wt%
Gd ₂ O ₃ 濃度	3.5wt%
原子数密度 [#/barn/cm]	
U235	8.5735E-04
U238	2.0316E-02
Gd154	2.4930E-05
Gd155	1.6925E-04
Gd156	2.3409E-04
Gd157	1.7897E-04
Gd158	2.8407E-04
Gd160	2.5228E-04
016	4.4063E-02

[注 : Gd152 は吸収に対する寄与が小さいため考慮しない。]

表 3.4.2-5 に構造材および減速材の原子数密度を示す。

表 3.4.2-5 構造材および減速材原子数密度

構造材	減速材			
	低温状態 ボイド率0%	高温状態 ボイド率0%	高温状態 ボイド率40%	高温状態 ボイド率70%
密度	6.53g/cc	0.996g/cc	0.737g/cc	0.457g/cc
原子数密度 [#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]
Zr-nat.	4.3107E-02	0.0	0.0	0.0
H ₂ O	0.0	3.3315E-02	2.4658E-02	1.5294E-02
				8.2712E-03

[注 1 : 構造材とは被覆管、チャンネルボックスおよびウォータロッド]

[注 2 : 構造材の熱膨張は無視]

[注 3 : 構造材の材質は問題の単純化のため、ジルカロイではなく天然組成のジルコニウム(Zr-nat.)とする。]

[注 4 : 減速材のボイド率は BWR の定格運転状態における炉心下部、中央部および上部でのインチャンネ

ルのボイド率の典型値である。]

Zr-nat.の原子数密度を同位体毎に与える場合の推奨値を表 3.4.2-6 に示す。

表 3.4.2-6 Zr-nat.の同位体毎の原子数密度

同位体	原子数密度
	[#/barn/cm]
Zr90	2.2200E-02
Zr91	4.8280E-03
Zr92	7.3713E-03
Zr94	7.5006E-03
Zr96	1.2070E-03

(4) 温度

各領域の温度を表 3.4.2-7 に示す。

表 3.4.2-7 各領域の温度

領域	計算条件	温度
燃料	ドップラー	1800K
	高温状態	900K
	低温状態	300K
減速材および構造材	ドップラー	600K
	高温状態	600K
	低温状態	300K

[注 1 : 低温状態の温度は 20°C相当、高温状態の温度は定格出力運転状態の典型値]

[注 2 : ドップラー計算条件の燃料温度は反応度事故解析におけるピーク出力部断熱エンタルピを想定]

(5) 出力密度

出力密度は 25W/gHM(52.61W/cm³) とする。

3.4.3 計算条件

1) 燃焼計算条件

- ・温度状態は高温状態(表3.4.1-6または表3.4.2-7参照)
- ・インチャンネルのボイド率は40%(表3.4.1-4または表3.4.2-5参照)
- ・ギャップ水、ウォータロッド、ウォータチャンネル内部水のボイド率は0%
(表3.4.1-4または表3.4.2-5参照)
- ・出力密度は3.4.1節の(5)及び3.4.2節の(5)に示した値
- ・0GWd/tではXeなし、0.1GWd/t以降は平衡Xe

2) 計算項目

(1) 無限増倍率および局所ピーキング係数の燃焼特性

- ・出力フォーマット：表3.4.3-1
- ・局所ピーキング係数は、相対核分裂率の最大値と定義する。
- ・燃焼度点：0, 0.1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70GWd/t

表3.4.3-1 無限増倍率、局所ピーキング係数の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーキング係数*
0		
0.1		
5		
10		
15		
20		
30		
50		
70		

*核分裂率

[注1:燃焼度点は燃焼計算ステップを定義するものではない。燃焼計算ステップの設定は任意とする。]

(2) 核分裂率分布の燃焼特性

- ・出力フォーマット：表 3.4.3-2
- ・燃焼度点：0, 0.1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70GWd/t

表 3.4.3-2 核分裂率分布

UO₂集合体

燃焼度(GWd/t)=	0	0.1	5	10	15	20	30
	50	70					

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										

W/R

(1に規格化)

MOX集合体

燃焼度(GWd/t)=	0	0.1	5	10	15	20	30
	50	70					

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

W/C

(1に規格化)

(3) 無限増倍率の瞬時ボイド率変化、瞬時温度変化特性

- ・出力フォーマット：表 3.4.3-3
- ・燃焼度点：0, 0.1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70GWd/t
- ・瞬時ボイド率計算点は以下のとおり
高温状態：ボイド率 0%、70%
- ・瞬時温度計算点は以下のとおり
低温状態：ボイド率 0%
ドップラー：ボイド率 40%
- ・ギャップ水、ウォータロッド、ウォーターチャンネル内部水のボイド率は常に 0%

表 3.4.3-3 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

計算条件	燃焼度 (GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
高温状態, 0%ボイド									
高温状態, 40%ボイド									
高温状態, 70%ボイド									
ドップラー, 40%ボイド									
低温状態, 0%ボイド									

[注 1：高温状態、40%ボイドの値は表 3.4.3-1 の値と同一となる]

【第 3 章の参考文献】

- [1] 須山賢也 他, "JENDL-3.2 に基づく ORIGEN2 用ライブラリ : ORLIBJ32 (Libraries Based on JENDL-3.2 for ORIGEN2 code : ORLIBJ32)," JAERI-Data/Code 99-003 (1999)
- [2] 須山賢也, 尾上昌晃, "JENDL-3.2 に基づく軽水炉 MOX 燃料用 ORIGEN2 ライブラリ", JAERI Data/Code 2000-036 (2000)
- [3] G.Schlosser, W.Timm, "Proposal for a BWR MOX Benchmark (3)", NEA/NSC/DOC(98)10

4. ベンチマーク計算結果と考察

本章では、ピンセル、PWR 燃料集合体、及び BWR 燃料集合体の各ベンチマーク問題に対する解析結果をまとめる。これらは、2001 年 6 月時点までに集計された試解析の結果であり、今後 2 年間の予定で計画されている次期ワーキングパーティ(WP)の活動において、計算結果の修正や追加も有り得る。

第 1 期 WP の主たる目的はベンチマーク問題の作成そのものであり、解析結果の詳細な分析や見直しは第 2 期 WP の活動として計画されている。ここでの試解析の目的は、各種評価項目に対する解析結果の差異の現状を認識し、i)ベンチマーク参加者に解析結果の見直しに必要な情報を提供すること、ii)重点検討項目を洗い出し、第 2 期 WP における具体的な活動計画の立案に資することである。

4.1 ピンセル計算

ピンセルベンチマーク問題には、これまでに 8 機関からの参加があり、UO₂燃料編及び MOX 燃料編のそれぞれに対し 13 セットの解析結果が寄せられている。参加機関と使用コードの一覧を表 4.1.1 に示す。各コードの解析手法、計算条件、及び計算結果の詳細については付録 2 を参照されたい。

表 4.1.1 ピンセル問題参加機関と使用コード及びライブラリ

機関名	使用コード	ライブラリ区分*	備考
日本原子力研究所 (JAERI)	SRAC95	JENDL-3.2	107 群衝突確率法、公開版ライブラリに Sm-152 の MCROSS(超多群 PEACO 計算用データ)を追加
日本原子力研究所	SRAC95	JEF-2.2	同上
日本原子力研究所	SRAC95	ENDF/B-VI (Rev.5)	同上
日本原子力研究所	MVP-BURN	JENDL-3.2	連続エネルギーモンテカルロ法
東芝	MCNP-BURN	JENDL-3.2	連続エネルギーモンテカルロ法
日本ニュクリア・フュエル (JNF)	VMONT	JENDL-3.2	190 群モンテカルロ法
日本ニュクリア・フュエル	TGBLA	ENDF/B-IV ベース(U-235, U-238, Pu-239, Pu-240 は ENDF/B-V)	98 群 + L-method U-235, U-238, Pu-239, Pu-240 は ENDF/B-V に基づく
電力中央研究所 (CRIEPI)	FLEXBURN	JENDL-3.2	任意四角形状メッシュによる S _N 法(S ₈ P ₃) 26 群 MGCL ライブラリ
四国電力 (SEPCO)	SHETRAN	ENDF/B-VI (Rev.3)	280 群 Characteristics 法 超多群による共鳴実効断面積計算
東電ソフトウェア(TSI)	CASMO-4	JEF-2.2	70 群 Characteristics 法

(次ページへ)

表 4.1.1 (続き)

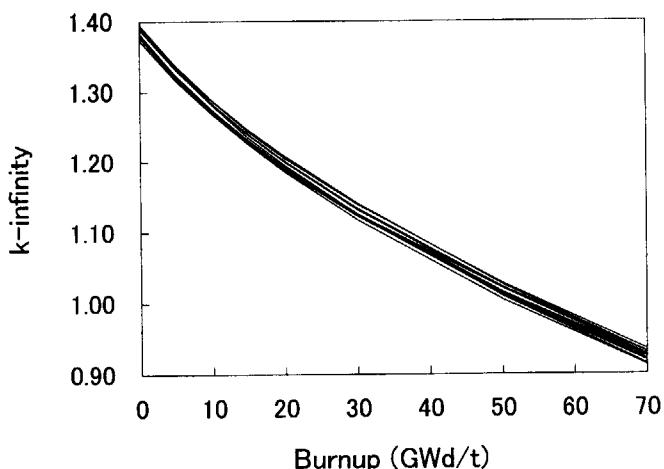
電源開発(EDPC)	WIMS-LWR	JEF-2.2	解析は開発計算センターによる
原子燃料工業 (NFI)	CASMO-4	L-Library (ENDF/B-IV ベース)	70 群 Characteristics 法
原子燃料工業	NULIF	ENDF/B-V	MOX 問題については準備中

ライブラリ区分は各コードの炉定数ライブラリでベースとしている核データを示しているが、必ずしも全ての核種に対してここで示される核データが使用されているとは限らない。

4.1.1 UO₂燃料

(1) 無限中性子増倍率

各機関から寄せられた 13 セットの解析結果に基づく無限中性子増倍率(高温状態, ポイド率 0%)の燃焼変化を図 4.1.1 に示す。また、これらのデータを統計処理した結果を表 4.1.2 に示す。

図 4.1.1 無限中性子増倍率の燃焼変化 (UO₂問題)

燃焼度ゼロ時点(BOL)において無限中性子増倍率の最大値と最小値の反応度差(R_{MAX})は $1.3\% \Delta k/k'$ であり、相対標準偏差で見るばらつきは燃焼度とともに増大し、70GWd/t 時点(EOL)の R_{MAX} は $2.6\% \Delta k/k'$ である。これらのばらつきの原因には以下のものが考えられる。

- ・ 核データや炉定数ライブラリの差異
- ・ 中性子輸送方程式に対する解法の差異
- ・ 核種崩壊生成計算における燃焼方程式の解法 (燃焼時のみ)
- ・ 燃焼チェーンモデル (燃焼時のみ)
- ・ 崩壊定数、核分裂収率、分岐比等のデータの差異

表 4.1.2 無限中性子増倍率に対する統計量

燃焼度 (GWd/t)	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
平均値	1.4224	1.3844	1.3266	1.2774	1.2338	1.1954	1.1285	1.0167	0.9248
最大値	1.4322	1.3945	1.3372	1.2879	1.2458	1.2082	1.1411	1.0276	0.9346
最小値	1.4093	1.3722	1.3159	1.2678	1.2247	1.1856	1.1178	1.0045	0.9124
$R_{MAX}(\% \Delta k/k^*)$ *	1.13	1.17	1.21	1.23	1.38	1.58	1.83	2.23	2.60
標準偏差	0.0077	0.0074	0.0070	0.0070	0.0068	0.0068	0.0069	0.0068	0.0070
相対標準偏差(%)**	0.54	0.54	0.53	0.55	0.55	0.57	0.61	0.67	0.75

* R_{MAX} は最大値と最小値の反応度差

**相対標準偏差(%) = 標準偏差/平均値 × 100

1) 核データの差異による影響

今後、詳細な検討を進める上で先ず把握しておかなければならぬのは核データの差異による影響である。13の解析結果のうち、JENDL-3.2ベースの炉定数を使用しているものが5セット、JEF-2.2ベースのものが3セット、ENDF/B(-IV、V、VI)ベースのものが5セットある。図4.1.2は、これらのライブラリ区分に注目して、図4.1.1を10GWd/tまでの範囲で拡大して示したものである。JENDL-3.2ベースのものは実線、ENDF/Bベースのものは破線、JEF-2.2ベースのものはマーカーを付けて示してある。ENDF/Bベースのライブラリを使用した計算結果に比

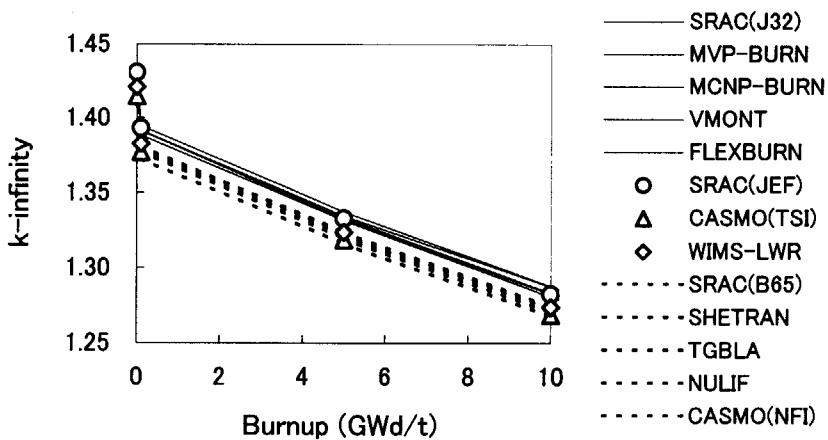


図 4.1.2 無限中性子増倍率の燃焼変化 (ライブラリ区分による差異)

べて、JENDL-3.2ベースの結果は無限中性子増倍率が大きくなっている。一方、JEF-2.2ベースの結果には、他の核データによる結果に比べて比較的大きなばらつきがあり、明確な傾向は見られない。

SRACによる3つの計算結果、すなわち SRAC(J32)、SRAC(JEF)、SRAC(B65)は、炉定数ライブラリ作成法、輸送計算手法、燃焼計算手法(チェーンモデルや崩壊データを含む)が共通であり、核データによる差異だけを抽出して見ることができる。これらの結果を表4.1.3に示す。

同表には、SRAC(J32)の計算精度を確認できるように JENDL-3.2 ライブライアリを使用した MVP-BURN の計算結果も示してある。SRAC と MVP-BURN の計算では、F.P.核種に対する燃焼チェーンモデルと計算時の燃焼ステップ幅(MVP-BURN では Predictor-Corrector 法を採用)が異なるが、燃焼方程式の解法と燃焼計算用のデータ値は同じものを使用している。

表 4.1.3 無限中性子増倍率の核データ依存性

Burnup (GWd/t)	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
MVP-BURN	1.4312	1.3915	1.3330	1.2834	1.2387	1.1996	1.1318	1.0202	0.9267
統計誤差(fsd)	0.058%	0.051%	0.057%	0.057%	0.057%	0.061%	0.060%	0.083%	0.075%
SRAC	JENDL-3.2	1.4289	1.3910	1.3321	1.2827	1.2393	1.2009	1.1338	1.0216
	JEF-2.2	1.4307	1.3931	1.3328	1.2826	1.2388	1.2003	1.1335	1.0221
	ENDF/B-VI(R5)	1.4185	1.3811	1.3226	1.2735	1.2305	1.1925	1.1263	1.0155
									0.9252

表 4.1.3 より、MVP-BURN と SRAC(J32)の差異は EOL で $0.36\% \Delta k/kk'$ の差異があるものの、50GWd/t までの範囲では $0.15\% \Delta k/kk'$ 以内でよく一致している。特に燃焼計算の影響がない BOL での差異は $0.1\% \Delta k/kk'$ であり、核データによる差異を議論する上で十分な精度があると言える。SRAC(B65)と SRAC(J32)との差異は、BOL と EOL において、それぞれ $0.51\% \Delta k/kk'$ と $0.54\% \Delta k/kk'$ であり、燃焼度によってそれほど大きくは拡大しない。したがって、ベンチマーク計算結果における EOL での最大差異 $2.6\% \Delta k/kk'$ のうち、大部分は核データ以外の効果によるものと考えられる(ENDF/B-IV については別途評価する必要がある)。なお、EOL において SRAC と MVP-BURN の差異が拡大した原因是、後述するように核分裂生成核種(F.P.)に対する燃焼チェーンモデルの違いによる。

2) MVP-BURN と MCNP-BURN の比較

MVP-BURN と MCNP-BURN は、共に信頼性が高い連続エネルギーモンテカルロコードを利用した燃焼計算コードであり、JENDL-3.2 に基づくライブライアリを利用している。これらのコードによる本問題に対する解析結果の信頼性を確認しておけば、今後のベンチマーク結果の検討に大いに役立つものと期待される。MVP と MCNP は決定論的手法コードの参照解を与えるものとして広く利用されている。しかし、燃焼問題に対しては必ずしも参照解を提供するとは限らない。これは以下の理由による。

- ・ 燃焼方程式の解法の違いによる影響
- ・ 燃焼チェーンモデルとこれに使用する崩壊データ等の差異による影響
- ・ ユーザーが設定する燃焼ステップ幅や燃焼領域分割に対する依存性
- ・ 統計誤差伝播の影響

表 4.1.4 に、本ベンチマーク問題における MVP-BURN と MCNP-BURN の解析手法とモデルの違いをまとめる。

表 4.1.4 MVP-BURN と MCNP-BURN の解析条件の違い

項目	MVP-BURN	MCNP-BURN
核種崩壊生成計算	DCHAIN コード[1]と同じ手法 (Bateman の手法を循環チェーンに対応できるように改良したもの)	改良ルンゲクッタ法
燃焼チェーン	重核種 : U-234 から Cm-245 までの 20 核種、F.P.核種 : 30 核種 + 4 個の Lump 化 F.P. (擬似 F.P.) (チェーンライブラリの U4CM5FP34)	重核種 : Th-228 から Cm-244 までの 25 核種(ただし U-234 以降は 18 核種) F.P.核種 : 53 核種 (擬似 F.P. 無し)
ライブラリ	JENDL-3.2 に基づくポイントワイズ断面積 (擬似 F.P.核種のみ SRAC95 の 107 群断面積をポイントワイズ断面積データに変換して使用)	JENDL-3.2 に基づくポイントワイズ断面積 (反応度に影響が無い核種に対しては MCNP では扱わず、多群無限希釈断面積を MCNP で得られるスペクトルで縮約して燃焼計算に使用)
燃焼ステップ	0GWd/t, 0.1, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10 から 40 まで 5GWd/t 刻み、以降は 70GWd/t まで 10GWd/t 刻みで、全ステップに Predictor-Corrector 法を適用 (核種崩壊生成計算は各ステップを 20 に分割するサブステップで行う)	0GWd/t, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 10, 15, 20 以降は 70GWd/t まで 5GWd/t 刻み (Predictor-Corrector 法は使用せず)
ステップ当たりの追跡粒子数	UO ₂ 燃料、MOX 燃料問題共に 40 万ヒストリ (1 万 × 40 バッチ + 捨てバッチ 10) k_{∞} に対する統計誤差は表 4.1.3 参照	UO ₂ 燃料問題 : 50 万ヒストリ (1 万 × 50 サイクル + 捨てサイクル 10) MOX 燃料問題 : 100 万ヒストリ (1 万 × 100 サイクル + 捨てサイクル 10)
その他	非分離共鳴は確率テーブルの扱い	非分離共鳴は無限希釈の扱い

MVP-BURN と MCNP-BURN(共に JENDL-3.2 ベース)による無限中性子増倍率の燃焼変化を表 4.1.5 に示す。

表 4.1.5 MVP-BURN と MCNP-BURN による無限中性子増倍率の比較

Burnup (GWd/t)	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
MVP-BURN	1.4312	1.3915	1.3330	1.2834	1.2387	1.1996	1.1318	1.0202	0.9267
MCNP-BURN	1.4295	1.3912	1.3343	1.2874	1.2430	1.2050	1.1395	1.0276	0.9346
$R(\% \Delta k/kk')^*$	-0.082	-0.01	0.07	0.24	0.28	0.38	0.60	0.70	0.91

* $R = \{ k(\text{MCNP-BURN}) - k(\text{MVP-BURN}) \} / k(\text{MCNP-BURN}) / k(\text{MVP-BURN}) * 100$

無限中性子増倍率は BOL では僅かに MCNP-BURN の方が小さく、燃焼とともに MCNP の方が大きくなり、EOL での差異は 0.9% $\Delta k/kk'$ となる。BOL での差異は、燃焼計算によるものではなく、統計精度、ライブラリ作成条件(プロセスコードの違いやポイントワイズ断面積のフィーティング精度など)によるものがある。以下にこれらの寄与を簡単な考察から推定する。

- ・ 統計精度

MVP および MCNP の統計誤差に基づく R の誤差を σ_R とすれば、これは以下の式で評価される。

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{k_{MVP}^2} \left(\frac{\sigma_{MVP}}{k_{MVP}} \right)^2 + \frac{1}{k_{MCNP}^2} \left(\frac{\sigma_{MCNP}}{k_{MCNP}} \right)^2} * 100 \quad (\% \Delta k/kk')$$

ただし、 σ_{MVP} と σ_{MCNP} は、MVP と MCNP による中性子増倍率に対する標準偏差($=k \times$ 相対標準偏差(%)/100)である。BOL では $(\sigma_{MCNP} / k_{MCNP}) \approx (\sigma_{MVP} / k_{MVP}) = 0.058\% = 0.00058$ とすると、 $\sigma_R(BOL) = 0.06\% \Delta k/kk'$ となる。同様な計算を EOL でも行うと $\sigma_R(EOL) = 0.11\% \Delta k/kk'$ となる。すなわち、本計算におけるモンテカルロ計算同士の無限中性子増倍率の比較では、これら以下(あるいは $2\sigma_R$ 以下)の差異を議論する意味はない。

- ・ ライブライリ作成条件等

MVP と MCNP の計算では、熱中性子散乱モデルの違いやライブルリ作成プロセスコード及びその入力条件の違いにより、同じ核データに基づくライブルリを使用しても最大 0.2% $\Delta k/kk'$ の差異が生じることがあるとの報告がある。計算者やコードが異なる場合には 0.2% $\Delta k/kk'$ 以下の差異要因を詰めることは一般的のユーザには困難である。非分離共鳴領域の扱いの違いにより、スペクトルが非常に硬い場合には、最大 0.7% $\Delta k/kk'$ の寄与を与えることがある。軽水炉の燃焼計算条件ではこの影響はほとんど無視することができるものと考えられるが、ボイド条件では留意する必要がある。MCNP/4B は無限希釈の扱いであるが、MCNP/4C では非分離共鳴領域の自己遮蔽を考慮できるようになっている。

3) MVP-BURN の簡略化 F.P.燃焼チェーンモデルの影響

MVP-BURN は、重核種に関しては SRAC の計算とほぼ同じ燃焼チェーンモデルを使用している。しかし、F.P.核種に関しては、MVP-BURN は SRAC の F.P.燃焼チェーンモデルを簡略化したもの(U4CM5FP34)を使用している。このモデルは、30 個の F.P.核種と 4 個の擬似 F.P.核種を扱うものであり、65 個の F.P.核種と 1 つの擬似 F.P.核種を扱う SRAC のモデル(U4CM6FP66)や 53 個の F.P.核種を扱う MCNP-BURN などの他コードに比べて見劣りがする。

MVP-BURN が簡略化 F.P.チェーンモデルを採用している理由は、断面積の収納に必要なメモリ容量を節約しているためである。特に、MVP では他の連続エネルギーモンテカルロコードに比べてポイントワイス断面積のフィッティング精度を高くしていること、任意温度の断面積を精度よく内部生成するために最もシャープな共鳴が現れる常温で必要なポイント数を決めていること、非分離共鳴領域の断面積確率テーブルを内蔵していることなどの理由により、断面積データの収納に多くのメモリが必要となる。簡略化 F.P.チェーンモデルは、多くのユーザが比較的安価に使用できる約 200MB のメモリ容量内で多様な燃焼計算ができるように F.P.核種の

数を減らしたもので、中性子増倍率や出力分布などの積分値、及び重核種の燃焼組成などについては、約 50GWd/tまでの範囲で十分な精度が保たれるようにしてある。この簡略化 F.P.チェーンモデルの本ベンチマーク問題への適用性は、SRAC によって MVP-BURN に使用した簡略化F.P.チェーンモデルと詳細なF.P.チェーンモデルを使用した燃焼計算結果を行って比較することにより確認できる。結果を表 4.1.6 に示す。

表 4.1.6 MVP-BURN が使用する F.P.チェーンモデルの検討 (SRAC+JENDL3.2 による評価)

Burnup (GWd/t)	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
MVP-BURN のチェーン	1.4289	1.3912	1.3313	1.2819	1.2386	1.2002	1.1332	1.0207	0.9281
SRAC のチェーン	1.4289	1.3910	1.3321	1.2827	1.2393	1.2009	1.1338	1.0216	0.9298
$R(\% \Delta k/kk')^*$	0.00	0.01	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.08	-0.20

* $R = \{ k(\text{MVP チェーン}) - k(\text{SRAC チェーン}) \} / k(\text{MVP チェーン}) / k(\text{SRAC チェーン}) * 100$

MVP-BURN が使用する簡略化 F.P.チェーンモデルは、中性子増倍率を小さく評価する傾向があるものの、詳細な SRAC の F.P.チェーンによる計算との差異は 50GWd/tまでの範囲で 0.1% $\Delta k/kk'$ 以下であり、EOL でも 0.2% $\Delta k/kk'$ 程度である。表 4.1.3において、燃焼末期に近づくほど MVP-BURN の値が SRAC(J32)の結果に比べて小さくなっているのは、この簡略化 F.P.チェーンモデルの影響による効果が大きい。

SRAC、MVP-BURN、MCNP-BURN についての比較を行ったが、これらコードの計算結果は、燃焼期間を通じて比較的よく一致しており、無限中性子増倍率の燃焼変化に対する信頼性は高いものと判断される。今後、他コードによる計算結果との比較を進める上で、参照解とまでは言えないが、比較基準となる計算結果として利用できるものと考えられる。

(2) 燃焼反応度損失

図 4.1.3 は $\{k(\text{BOL}) - k(\text{EOL})\} / k(\text{EOL}) / k(\text{BOL}) * 100$ として定義する EOL での燃焼反応度損失(% $\Delta k/kk'$)を比較したものである。燃焼反応度損失は、中性子増倍率の値そのものではなく、燃焼に伴う変化の勾配を表す指標である。EOL における最大差異は 2.3% $\Delta k/kk'$ であり、同図に見られるように、ばらつきの原因は核データよりはコードの計算手法や炉定数ライブラリの差異によるところが大きい。

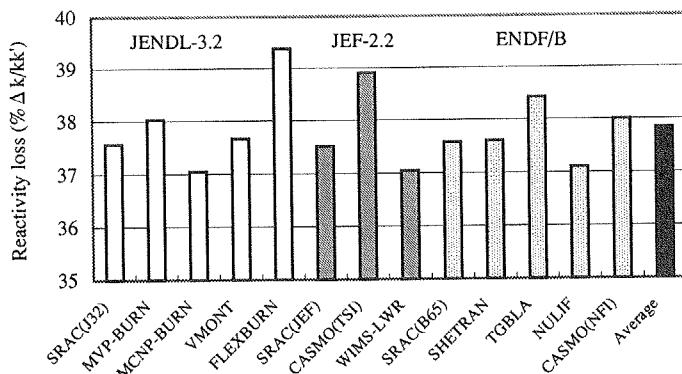


図 4.1.3 EOL(70GWd/t)における燃焼反応度損失の比較

(3) ボイド反応度

ボイド反応度は、各燃焼度点における瞬時ボイド変化による反応度として、次の式で定義する。

$$\text{ボイド反応度} (\% \Delta k/kk') = \{ k'(\text{ボイド条件}) - k(\text{運転条件}) \} / k(\text{運転条件}) / k'(\text{ボイド条件}) * 100$$

図 4.1.4 に 40% ボイド反応度の燃焼変化を示す。ボイド反応度は燃焼にともない負の値が大きくなり、ばらつきも大きくなる。70% ボイド反応度の場合には、BOL と EOL での反応度がそれぞれ-6.1% $\Delta k/kk'$ 及び-13.6% $\Delta k/kk'$ と絶対値が大きくなるが、各コードによる全体的な計算結果の傾向は 40% ボイドの場合と同じである。燃焼に伴いボイド反応度のばらつきが大きくなる要因としては、燃焼とともに蓄積するプルトニウムや MA 及び F.P. 核種に対する反応率計算の精度が十分でないためと考えられる。EOLにおいてボイド反応度に寄与が大きい核種について実効断面積などの比較を行うことが望まれる。

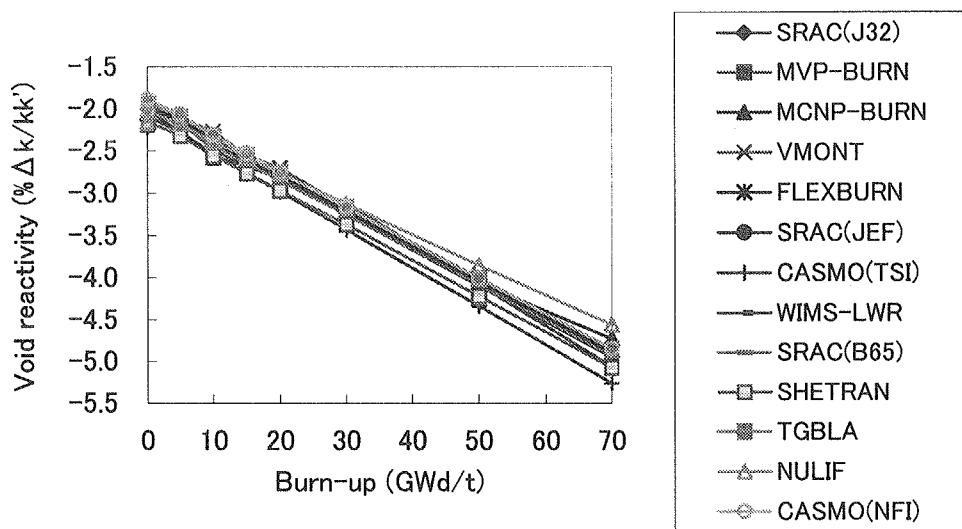


図 4.1.4 40%ボイド反応度の燃焼変化

平均値が妥当である保証は何も無いが、各コードのボイド反応度評価に対する傾向を知るために、平均値からの反応度差異を図 4.1.5(40%ボイドケース)及び図 4.1.6(70%ボイドケース)に示す。これらの両図に見られる傾向はほとんど同じであり、40%ボイドの場合と 70%ボイドの場合で、ボイド反応度のばらつきの原因はほぼ同じであると判断される。したがって、反応度差が顕著に現れる 70%ボイドのケースに対して今後の検討を進めることが望ましい。

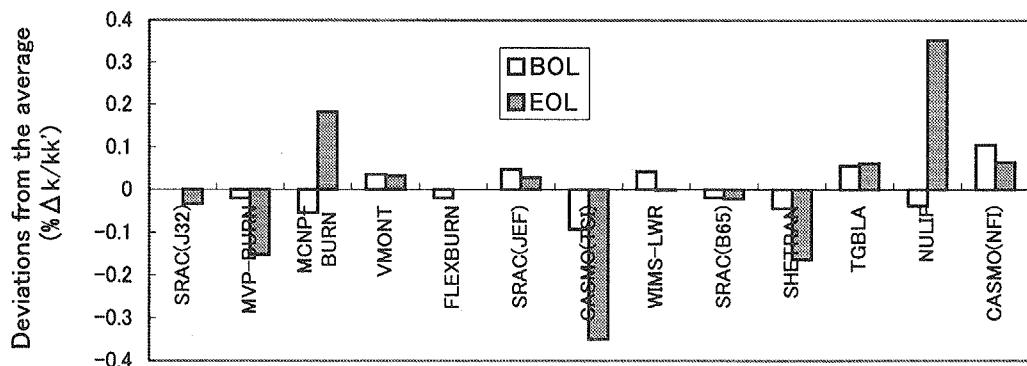


図 4.1.5 40%ボイド反応度の平均値からの差異

(正の値は負の反応度が平均値に比べて浅いことを意味する。)

EOL では FLEXBURN の評価が無いため 12 セットの比較である。)

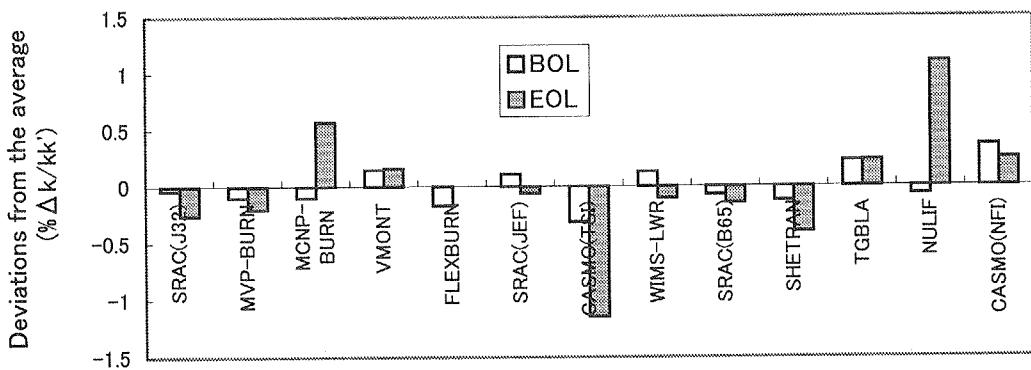


図 4.1.6 70%ボイド反応度の平均値からの差異

(正の値は負の反応度が平均値に比べて浅いことを意味する。)

EOL では FLEXBURN の評価が無いため 12 セットの比較である。)

ボイド反応度の比較において、モンテカルロ法による計算結果には統計誤差に注意する必要がある。ボイド反応度が小さい場合には統計誤差の影響が大きくなるためである。ボイド反応の統計誤差は、燃焼による誤差伝播の影響を無視すれば、各燃焼ステップにおける無限中性子増倍率に対する誤差を使用して次の式で評価することができる。

$$\sigma_{Rv} = \sqrt{\frac{1}{k_{Void}^2} (\frac{\sigma_{Void}}{k_{Void}})^2 + \frac{1}{k_{No-void}^2} (\frac{\sigma_{No-void}}{k_{No-void}})^2} * 100 \quad (\% \Delta k/kk')$$

MVP-BURN(各燃焼度点で 40 万ヒストリ)による計算結果を利用すると、ボイド反応度に対する統計誤差は表 4.1.7 に示すようになる。

表 4.1.7 ボイド反応度に対する統計誤差(MVP-BURN による計算)

Burnup (GWd/t)	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$k(0\% \text{ボイド})$	1.4312	1.3915	1.3330	1.2834	1.2387	1.1996	1.1318	1.0202	0.9267
fsd (%)	0.043	0.051	0.057	0.057	0.057	0.061	0.059	0.083	0.075
$k(40\% \text{ボイド})$	1.3885	1.3545	1.2960	1.2436	1.1988	1.1603	1.0917	0.9795	0.8852
fsd (%)	0.053	0.054	0.062	0.061	0.053	0.068	0.058	0.082	0.096
$k(70\% \text{ボイド})$	1.3154	1.2897	1.2292	1.1798	1.1345	1.0944	1.0256	0.9122	0.8216
fsd (%)	0.052	0.060	0.065	0.057	0.077	0.060	0.066	0.088	0.077
40%ボイド反応度	-2.15	-1.96*	-2.14	-2.49	-2.68	-2.82	-3.24	-4.08	-5.06
統計誤差 σ_{Rv}	± 0.049	± 0.054	± 0.064	± 0.066	± 0.063	± 0.078	± 0.075	± 0.117	± 0.136
70%ボイド反応度	-6.15	-5.67*	-6.34	-6.85	-7.41	-8.01	-9.15	-11.60	-13.80
統計誤差 σ_{Rv}	± 0.055	± 0.061	± 0.072	± 0.069	± 0.081	± 0.080	± 0.084	± 0.128	± 0.144

*ボイド反応度の傾向が 0.1GWd/t で変わるのは Xe の生成によるもので統計精度によるゆらぎではない。

40%ボイド反応度に対しては、 $2\sigma_{Rv}$ まで考慮すると統計誤差の影響は相対値で5%弱あり無視できない。実際、3つのモンテカルロコード(MVP-BURN、MCNP-BURN、VMONT)による40%ボイド反応度の燃焼変化には、図4.1.7に示すように大小の差はあるが、統計誤差によるゆら

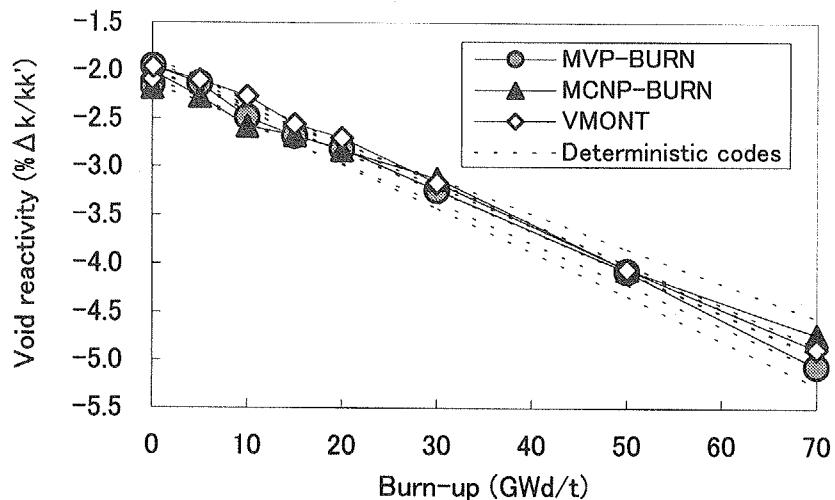


図4.1.7 40%ボイド反応度の燃焼変化(図4.1.4と同じ)
(モンテカルロコードによる統計誤差の影響)

ぎが見られる。モンテカルロ燃焼計算では、同図のように複数の燃焼度点に対して評価量をプロットすることにより、おおよその精度予測が可能である。単一燃料ピン格子に対する中性子増倍率や燃料組成変化のみに着目する場合には、30万ヒストリ程度でも多くの場合は十分である。しかし、比較的小さい反応度を評価する場合には、予め誤差予測をしておき、統計精度を十分に上げておくか、あるいは瞬時ボイド率変化点についてのみ統計精度を上げて別に計算をする必要がある。

(4) ドップラー反応度

ドップラー反応度は、各燃焼度点における瞬時燃料温度変化による反応度として、次の式で定義する。

$$\begin{aligned} \text{ドップラー反応度} (\%) &= \{ k'(\text{ドップラー条件}) - k(\text{運転条件}) \} / k(\text{運転条件}) / k'(\text{ドップラー条件}) * 100 \\ &= \{ k'(\text{ドップラー条件}) - k(\text{運転条件}) \} / k(\text{運転条件}) * 100 \end{aligned}$$

ドップラー反応度の燃焼変化の比較を図4.1.8に示す。ドップラー反応度の平均値はBOL

から EOL にかけて、 $-1.46\% \Delta k/kk'$ から $-2.80\% \Delta k/kk'$ までおよそ 2 倍の変化をする。この間、各燃焼度点での最大値と最小値の差異は約 $0.30\% \Delta k/kk'$ の範囲であり変化していない。参考として、各コードの平均値からのずれを図 4.1.9 に示す。MVP-BURN の統計誤差(σ_{Rd})は BOL と EOL でそれぞれ $\pm 0.05\% \Delta k/kk'$ と $0.12\% \Delta k/kk'$ であり、他コードのばらつきや要求精度と照らして今後統計精度を上げる必要がある。燃焼度に対するカーブのゆらぎから判断して、他のモンテカルロコードの精度も同程度と見られる。

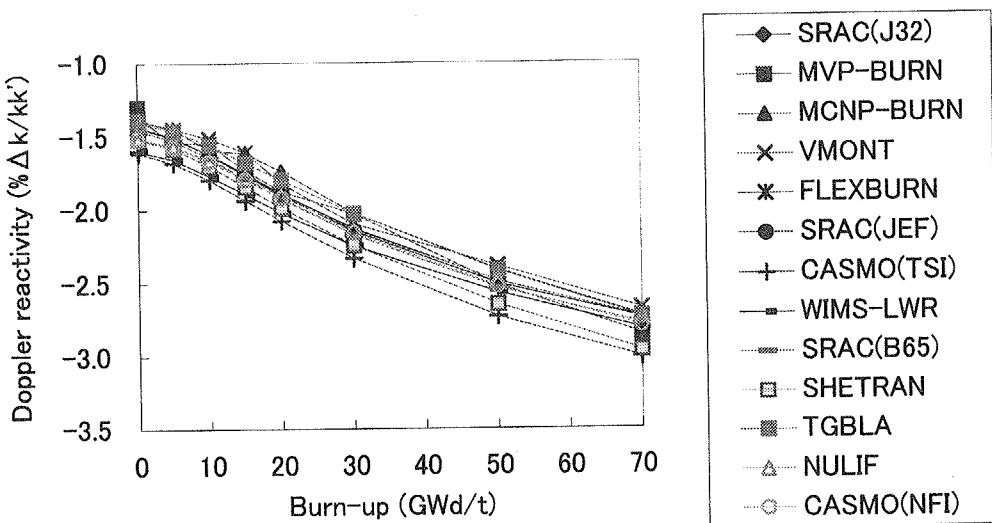


図 4.1.8 ドップラー反応度(燃料温度 900K→1800K)の燃焼変化

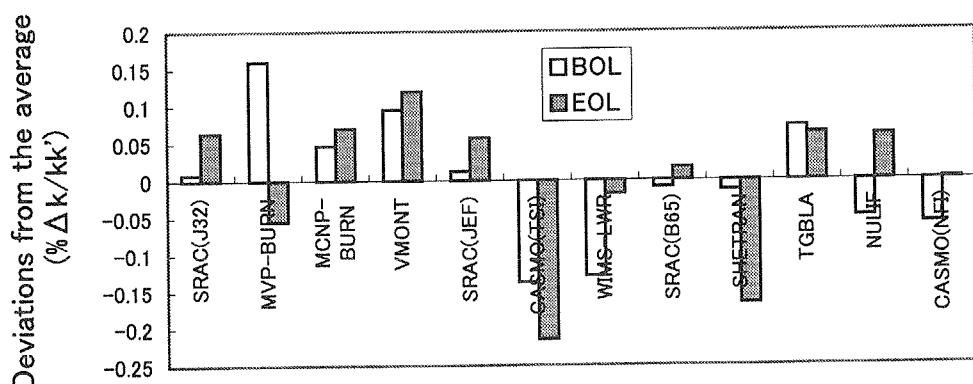


図 4.1.9 ドップラー反応度の平均値からの差異

(正の値は負の反応度が平均値に比べて浅いことを意味する。)

(5) 降温反応度

降温反応度は、運転時の燃料組成のまま物質温度を全て 300K とした時の中性子増倍率を k (冷温条件)として、次の式で定義する。

$$\text{降温反応度}(\% \Delta k/kk') = \{ k'(\text{冷温条件}) - k(\text{運転条件}) \} / k(\text{運転条件})/k'(\text{冷温条件}) * 100$$

図 4.1.10 に降温反応度の燃焼変化の比較を示す。また、BOL と EOL での各コードによる計算値の平均値からの差異を図 4.1.11 に示す。

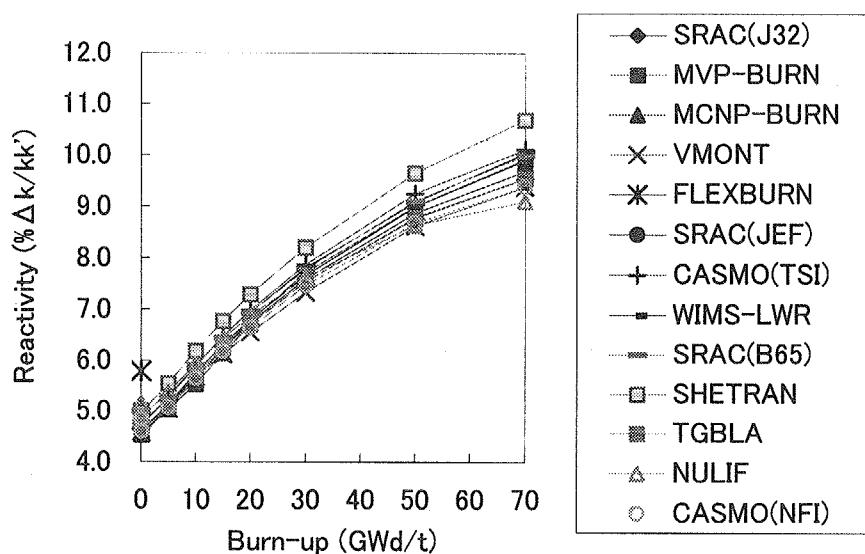


図 4.1.10 降温反応度の燃焼変化

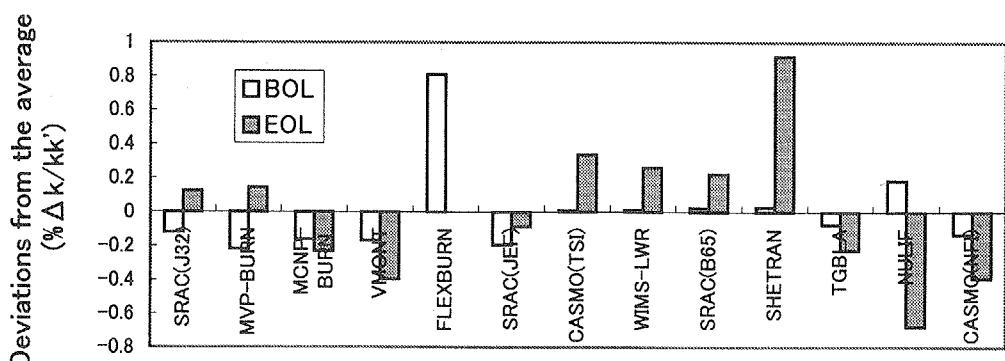


図 4.1.11 降温反応度の平均値からの差異

FLEXBURN の結果は BOL のみであるが、冷温時の中性子増倍率が他コードに比べて特に大きく評価されている。KENO コード等を使用して MGCL26 群ライブラリによるものか、あるいは FLEXBURN コードの解析手法によるものかを明確にすべきである。

SHETRAN コードの結果は、BOL ではほぼ平均値に近いが、燃焼とともに他コードとの差異が増大する傾向が見られる。高温時の計算結果については燃料組成を含めて平均的な振る舞いをしていることから、特に冷温条件において効く燃焼による蓄積核種の影響を検討する必要がある。

(6) 燃料組成

燃焼燃料組成の差異を比較する場合には、各コードの使用目的やそのための要求精度と併せて議論する必要がある。例えば、原子炉の核特性に着目する場合には、運転範囲の条件における燃焼核種の反応度寄与が重要となり、寄与が無視できる核種に関しては必ずしも燃料組成変化予測に対する高い精度は要求されない。また、使用済み燃料の燃焼度クレジットに着目する場合には、取り出し後に必要年数の冷却期間をおいた場合の冷温時臨界性への寄与を考慮する必要がある。さらに、核燃料の重量管理、放射能、毒性、照射後試験解析などに着目する場合には、反応度寄与ではなく、組成そのものの精度が要求される。目的に応じた要求精度に関しては今後の検討で議論する予定である。なお、本節で記述する組成(数密度)の値は全てセル平均値であり、燃料部での値ではない。

1) 燃焼核種の反応率割合

ベンチマークの試解析に参加している多くのコードが主として核設計を目的としたものであることから、EOL での高温運転条件における燃焼核種の吸収反応率及び生成反応率への寄与を SRAC(J32)の計算結果に基づき調べた。表 4.1.8 に結果を示す。なお、各値はセル全体の吸収反応率と生成反応率をそれぞれ 100% に規格化してある。

EOL における重核種の吸収割合はセル全体の 83% 程度であり、その大部分を占めるウランとプルトニウムの寄与はほぼ等しい。生成反応率への寄与はウランとプルトニウムの寄与がそれぞれ 36% と 63% 程度である。また、F.P.核種の吸収割合は 14.1% であり、ベンチマーク問題で核種組成の出力が要求されている F.P.核種は F.P. 全体の吸収割合の約半分である。

表 4.1.8 EOL(70GWd/t)における燃焼核種の吸収反応率と生成反応率 (SRAC(J32)による)

重核種			核分裂生成核種(F.P.)					
核種	吸収(%)	生成(%)	核種	吸収(%)	核種	吸収(%)	核種	吸収(%)
U234	5.63E-03	5.29E-04	Xe135	1.50E+00	Cs135	1.43E-01	Nd148	2.10E-02
U235	1.28E+01	2.65E+01	Rh103	1.36E+00	Pd108	1.35E-01	Cd113	2.04E-02
U236	1.56E+00	2.33E-01	Nd143	1.05E+00	Cs134	1.35E-01	Pd106	2.03E-02
U237	2.14E-02	2.50E-03	Cs133	1.03E+00	Pd107	1.18E-01	Cd110	1.38E-02
U238	2.75E+01	9.48E+00	Xe131	8.77E-01	Pr141	1.06E-01	Gd155	1.31E-02
Np237	1.00E+00	6.96E-02	Tc99	6.95E-01	Mo97	8.96E-02	Eu156	1.25E-02
Np239	4.04E-02	6.18E-03	Sm149	6.34E-01	La139	7.93E-02	Nd147	1.19E-02
Pu238	3.94E-01	1.52E-01	Sm152	5.32E-01	Rh105	7.56E-02	Ru103	1.15E-02
Pu239	2.43E+01	4.80E+01	Pm147	5.07E-01	Zr93	7.28E-02	In115	9.37E-03
Pu240	7.56E+00	2.27E-01	Eu153	4.96E-01	KR3	7.02E-02	Pm148g	8.41E-03
Pu241	6.37E+00	1.50E+01	Eu155	4.42E-01	Gd157	6.43E-02	Cd111	7.94E-03
Pu242	7.48E-01	5.22E-02	Nd145	4.24E-01	Gd156	4.43E-02	Pr143	7.84E-03
Am241	2.50E-01	1.31E-02	Eu144	4.23E-01	I129	3.58E-02	Pm149	5.27E-03
Am242g	1.80E-03	2.40E-03	Sm151	4.19E-01	Ce141	3.19E-02	Xe133	4.76E-03
Am242m	2.74E-02	8.10E-02	Mo95	3.67E-01	Mo98	3.18E-02	Gd154	3.95E-03
Am243	3.90E-01	1.65E-02	Ru101	3.52E-01	Sm148	3.10E-02	Gd158	3.91E-03
Cm242	6.09E-03	5.93E-03	Ag109	3.40E-01	Ru102	2.68E-02	Xe136	2.68E-03
Cm243	2.73E-03	8.83E-03	PSD*	3.09E-01	Zr96	2.60E-02	I131	2.09E-03
Cm244	8.85E-02	1.64E-02	Pd105	2.10E-01	Xe132	2.32E-02	Pm151	9.23E-04
Cm245	4.21E-02	1.39E-01	Sm150	1.92E-01	I127	2.24E-02	Mo99	4.78E-04
Cm246	2.06E-04	1.31E-04	Sm147	1.82E-01	Mo100	2.24E-02	Ru105	4.34E-06
Total (H.M)	8.31E+01	1.00E+02	Pm148m	1.70E-01	Ru104	2.21E-02	I135	3.56E-08
							Total (F.P.)	1.41E+01

註
 ・体系全体の吸収反応率及び生成反応率をそれぞれ 100%に規格化
 ・F.P.は吸収反応率が大きい順に配置、PSD は擬似 F.P.
 ・太字はベンチマーク問題における数密度出力要請核種

2) 燃料核種組成の比較

一般に燃焼核種の数密度は燃焼度に対して単調に増加するか減少するため(Sm-149 を除く)、燃焼度とともに各コードによる評価値のばらつきは大きくなる。ただし、燃焼度が小さい場合(例えば 0.1~1.0GWd/t)においては、数密度の最大差異は 100%を超えることもある。これは例えば短寿命核種の経由を無視して累積核分裂収率で扱うなどの各コードの目的に応じた燃焼チエーンモデルの差異によるものであり、あまり比較の意味が無い。そこで、先ずは EOL における燃焼核種の数密度のばらつきを表 4.1.9 に比較する。

表 4.1.9 EOL(70GWd/t)における燃焼核種の数密度評価値[10^{24} 個/cm³]のばらつき

核種	データ数	平均値	最大値	最小値	最大-最小	相対標準偏差(%)	最大差異 [*] (%)
U235	13	1.025E-04	1.070E-04	9.531E-05	1.173E-05	3.21	11.45
U236	13	6.873E-05	7.094E-05	6.676E-05	4.182E-06	2.26	6.08
U238	13	6.789E-03	6.794E-03	6.782E-03	1.180E-05	0.06	0.17
Np237	13	9.559E-06	1.120E-05	7.295E-06	3.904E-06	10.62	40.84
Pu238	12	5.688E-06	6.872E-06	5.192E-06	1.681E-06	8.97	29.55
Pu239	13	6.973E-05	7.230E-05	6.505E-05	7.248E-06	2.73	10.39
Pu240	13	2.597E-05	2.756E-05	2.454E-05	3.019E-06	3.08	11.62
Pu241	13	2.009E-05	2.064E-05	1.926E-05	1.376E-06	2.11	6.85
Pu242	13	7.577E-06	8.543E-06	7.199E-06	1.344E-06	4.92	17.74
Am241	13	9.260E-07	1.089E-06	8.589E-07	2.302E-07	6.18	24.86
Am242m	13	1.808E-08	2.183E-08	1.592E-08	5.905E-09	9.27	32.66
Am243	13	2.216E-06	2.450E-06	1.936E-06	5.136E-07	6.76	23.18
Cm242	12	3.013E-07	3.774E-07	2.818E-07	9.555E-08	8.39	31.71
Cm243	10	1.056E-08	1.123E-08	9.770E-09	1.464E-09	4.68	13.87
Cm244	12	1.214E-06	1.416E-06	1.013E-06	4.029E-07	7.97	33.20
Cm245	10	1.346E-07	1.605E-07	1.096E-07	5.088E-08	11.54	37.79
Cm246	6	1.284E-08	1.362E-08	1.110E-08	2.521E-09	7.93	19.64
Mo95	7	2.791E-05	2.918E-05	2.670E-05	2.483E-06	4.12	8.90
Tc99	11	2.844E-05	2.968E-05	2.754E-05	2.140E-06	2.06	7.52
Rh103	13	1.346E-05	1.498E-05	1.188E-05	3.101E-06	5.17	23.04
Cs133	13	2.891E-05	2.956E-05	2.730E-05	2.258E-06	2.36	7.81
Sm147	9	1.936E-06	2.068E-06	1.739E-06	3.286E-07	5.53	16.97
Sm149	13	6.023E-08	6.566E-08	5.299E-08	1.267E-08	5.86	21.04
Sm150	13	7.252E-06	7.516E-06	6.847E-06	6.684E-07	2.87	9.22
Sm152	13	2.093E-06	3.015E-06	1.791E-06	1.224E-06	16.96	58.47
Nd143	12	2.083E-05	2.228E-05	2.042E-05	1.860E-06	2.63	8.93
Nd145	12	1.636E-05	1.718E-05	1.544E-05	1.741E-06	2.86	10.64
Eu153	13	2.801E-06	3.179E-06	2.586E-06	5.933E-07	6.07	21.18
Gd155	10	4.324E-09	8.020E-09	2.971E-09	5.049E-09	40.76	116.77

註 *最大差異(%) = (最大-最小)/平均*100

太字は、相対標準偏差が 5%を超えるか、最大差異が 20%を超えるもの

数密度の値は全てセル平均値

表 4.1.9 では、相対標準偏差が 5%を超えるか、最大差異が 20%を超えるものを太字で示してある。ただし、中性子増倍率や反応度のばらつきを検討する場合には、数密度に対する感度解析が必要である。例えば、Gd-155 の数密度に非常に大きなばらつきが見られるが、表 4.1.8 より体系全体の吸収反応率への寄与は僅かに 0.0013%であり、このばらつきは反応度にはほとんど影響しない。むしろ Pu-239 の 10%の最大差異の方が重要である。詳細な感度解析は今後の課題とし、表 4.1.9 に示した 29 核種に対する数密度の燃焼変化を図 4.1.12(1)～図 4.1.12(29)に示す。

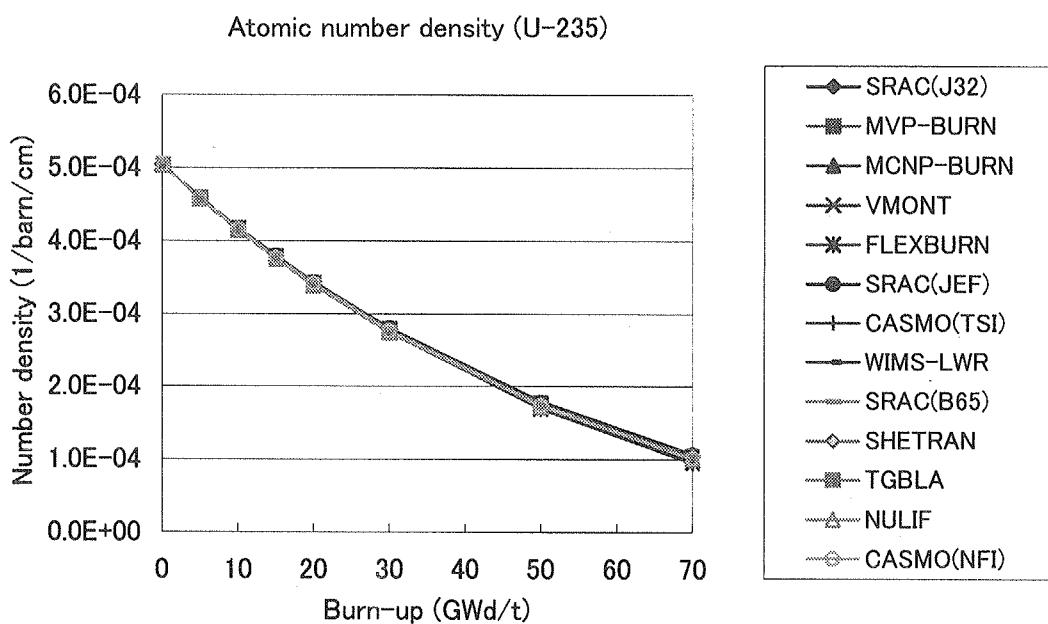


図 4.1.12 (1) U-235 数密度の燃焼変化

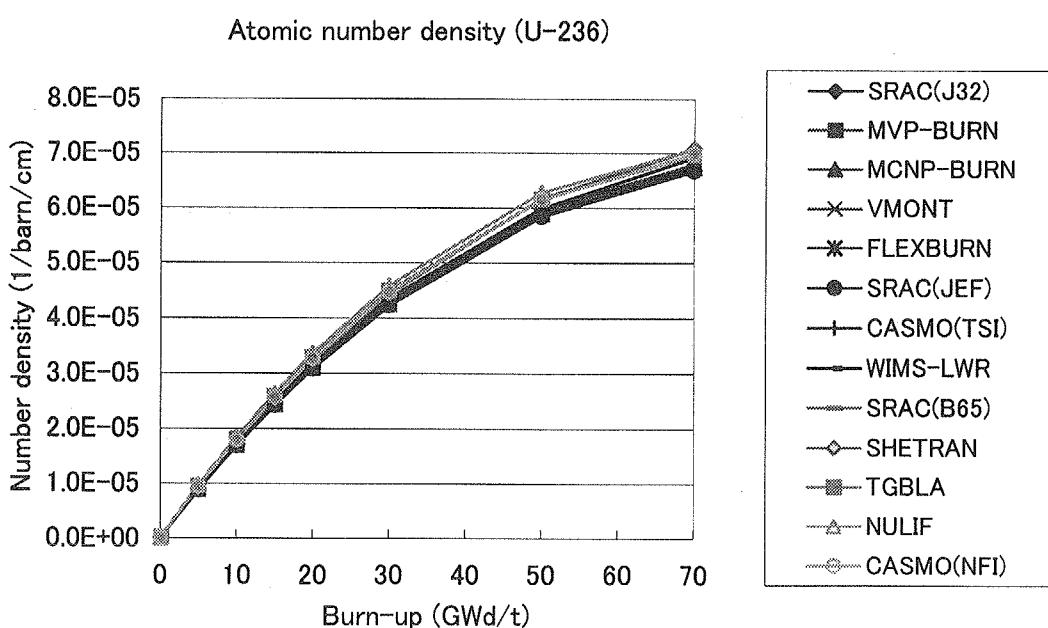


図 4.1.12 (2) U-236 数密度の燃焼変化

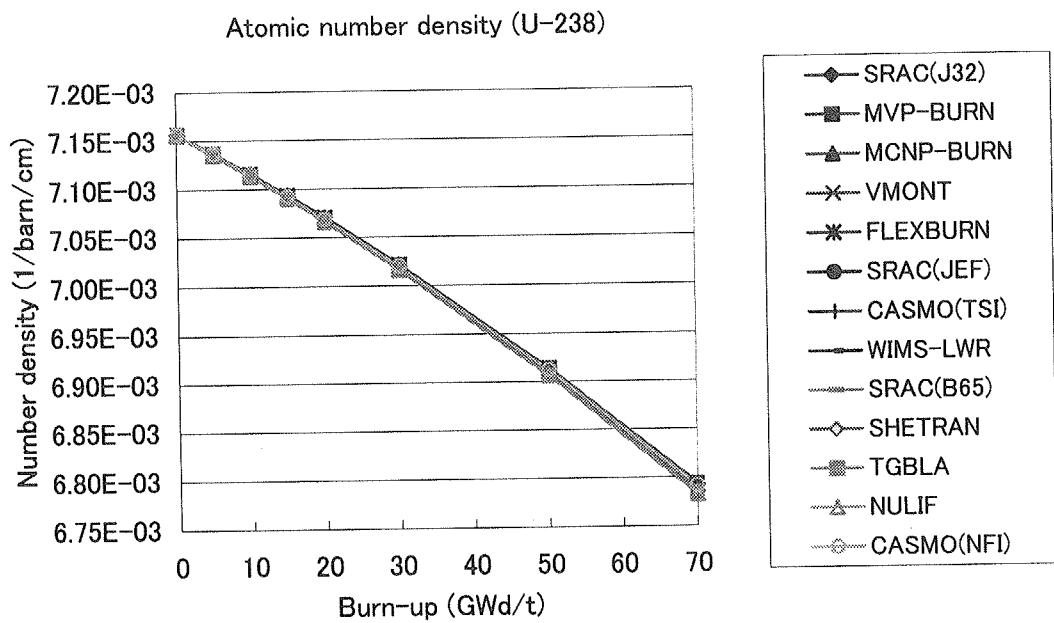


図 4.1.12 (3) U-238 数密度の燃焼変化

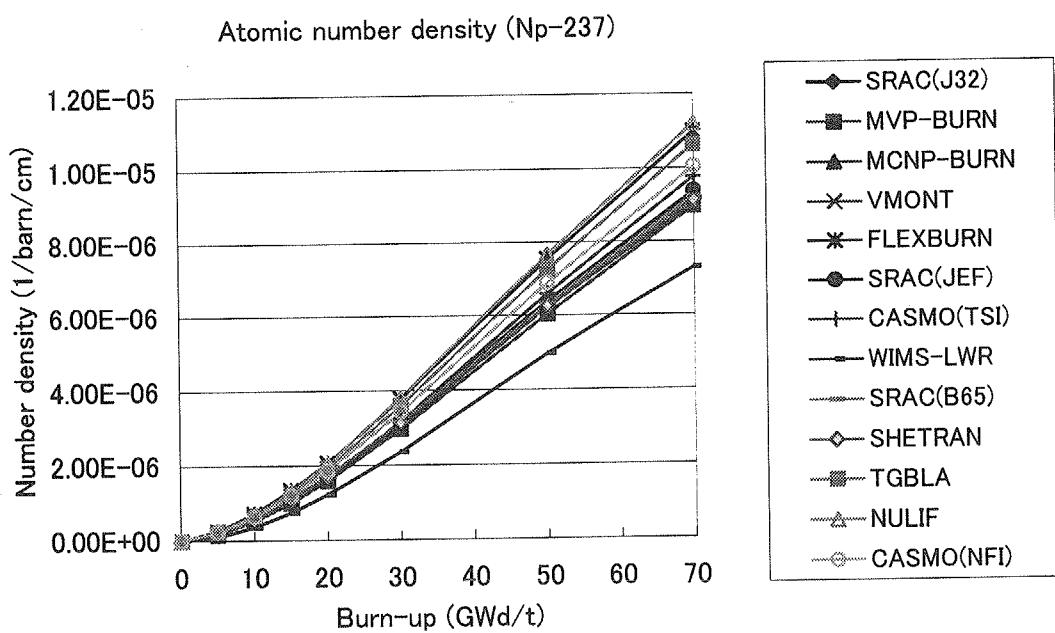


図 4.1.12 (4) Np-237 数密度の燃焼変化

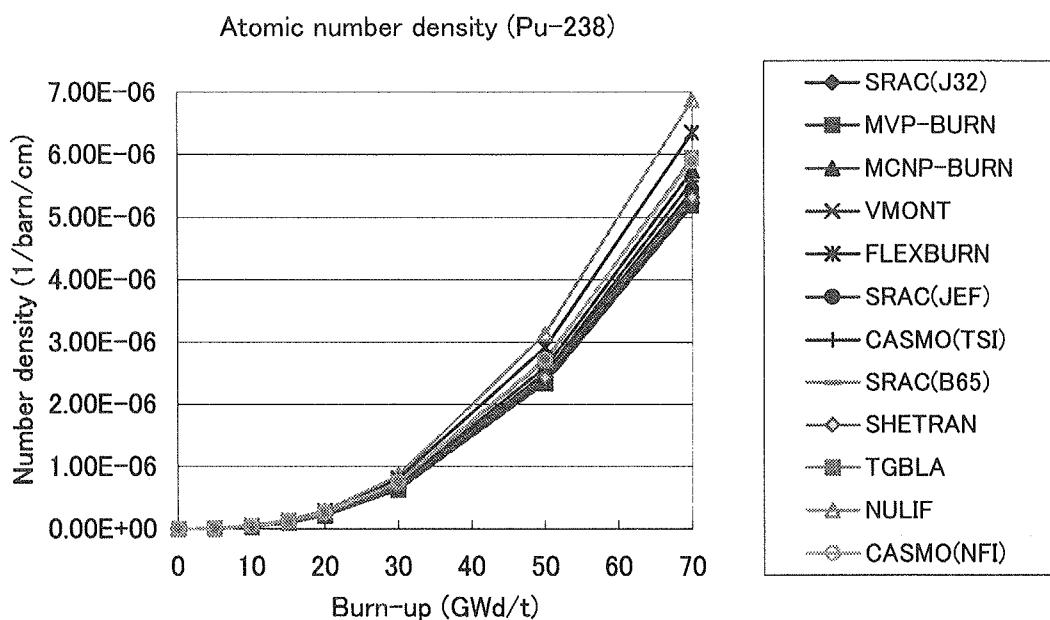


図 4.1.12 (5) Pu-238 数密度の燃焼変化

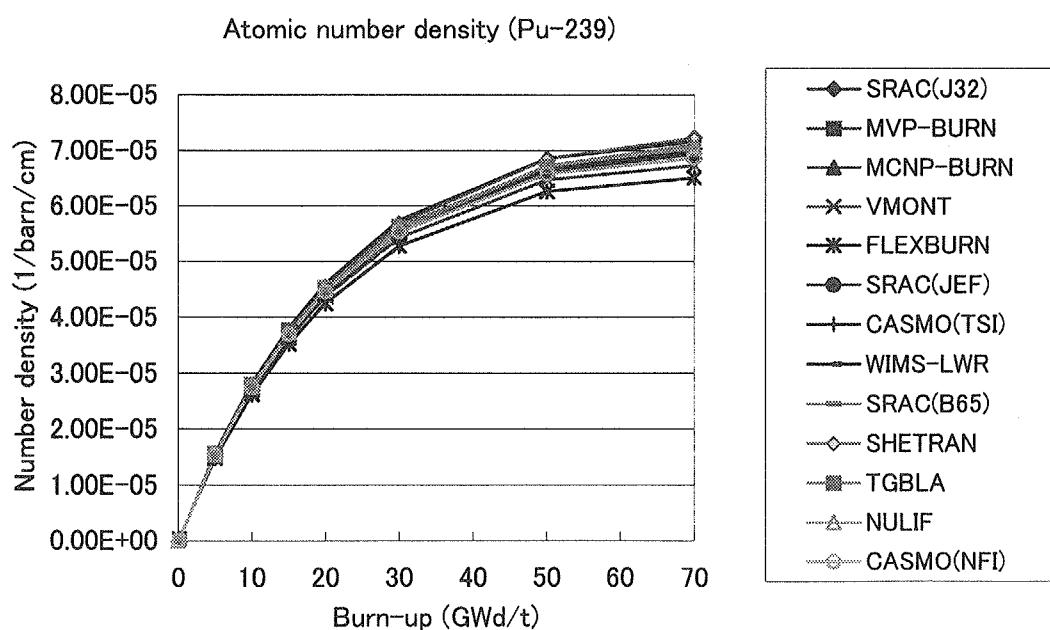


図 4.1.12 (6) Pu-239 数密度の燃焼変化

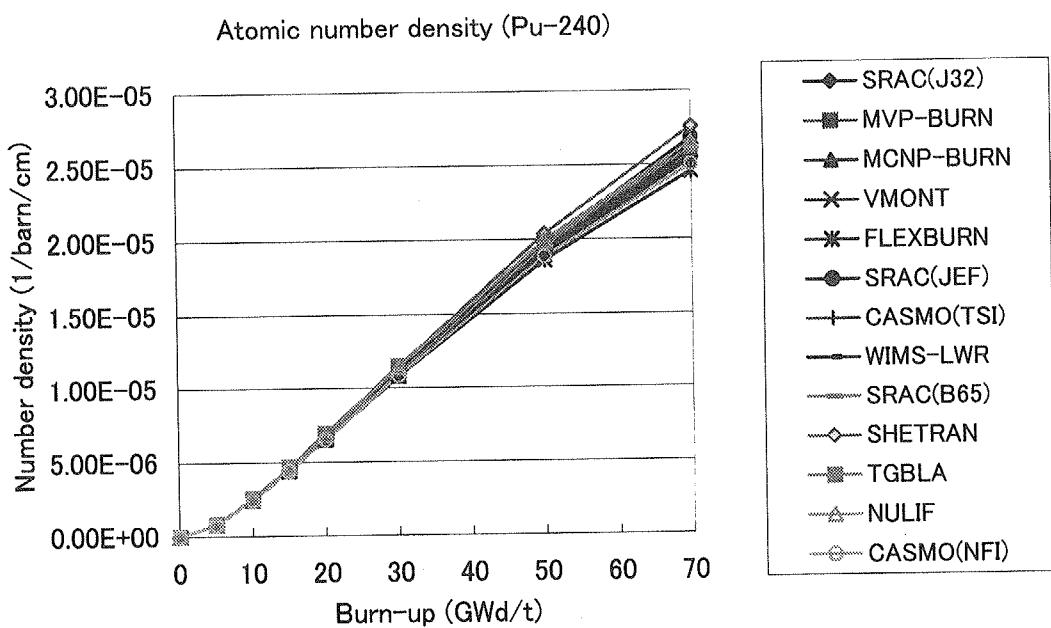


図 4.1.12 (7) Pu-240 数密度の燃焼変化

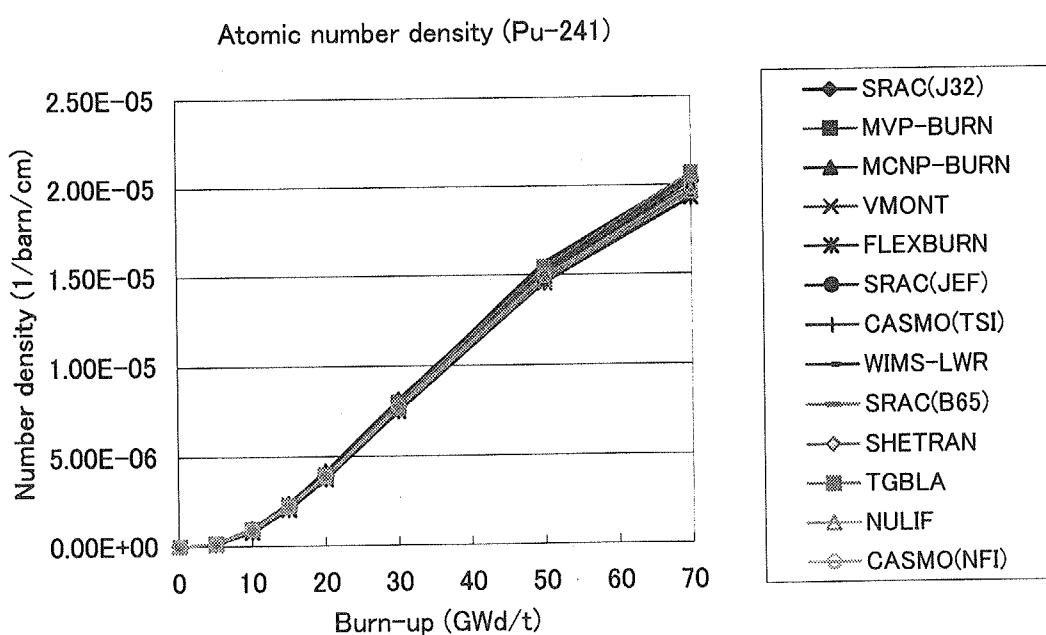


図 4.1.12 (8) Pu-241 数密度の燃焼変化

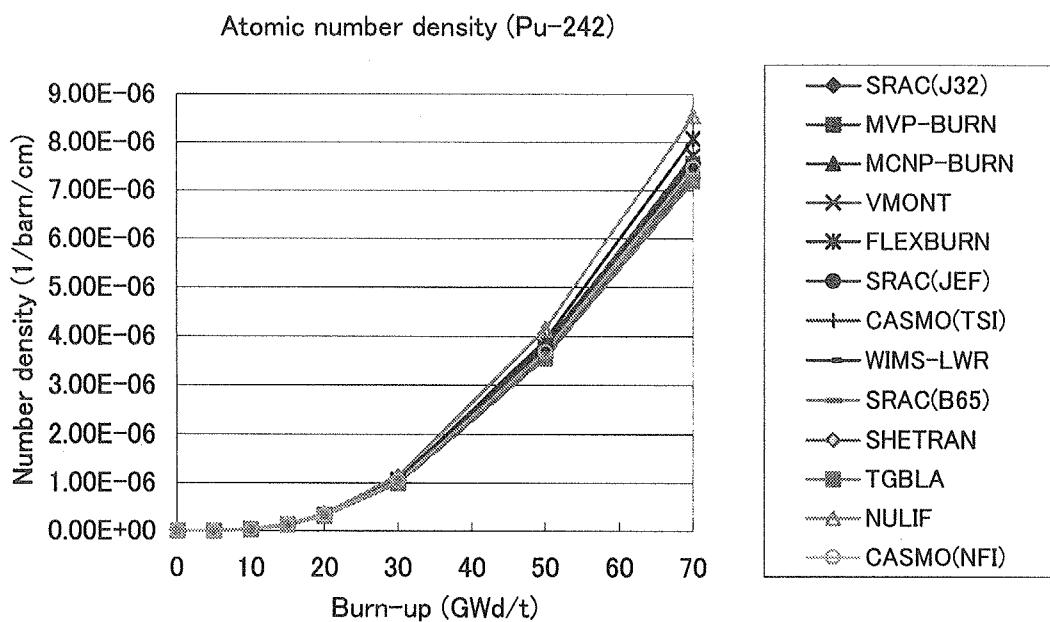


図 4.1.12 (9) Pu-242 数密度の燃焼変化

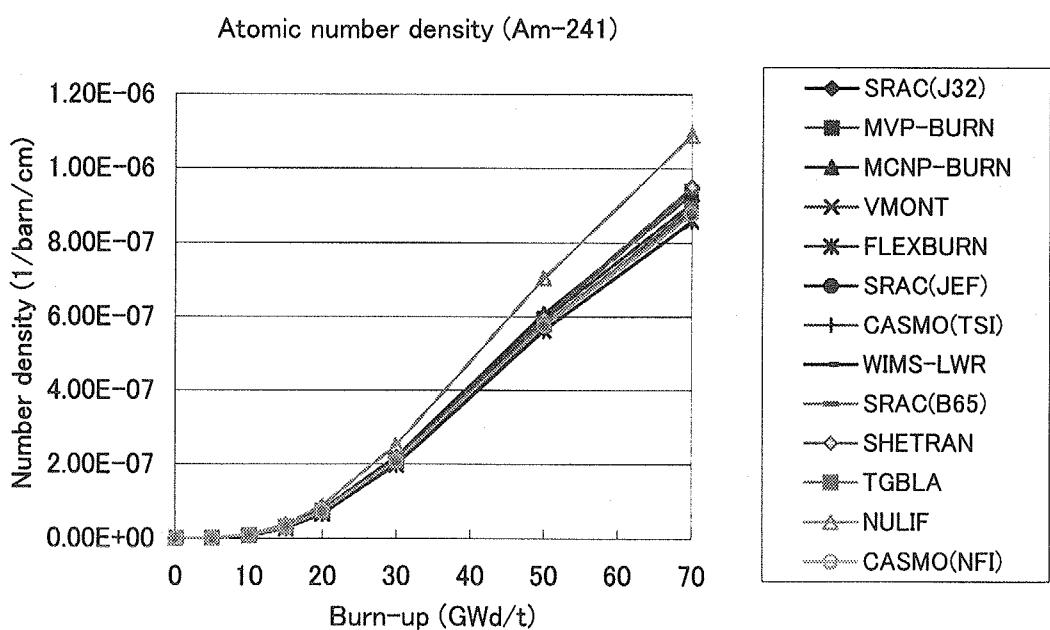


図 4.1.12 (10) Am-241 数密度の燃焼変化

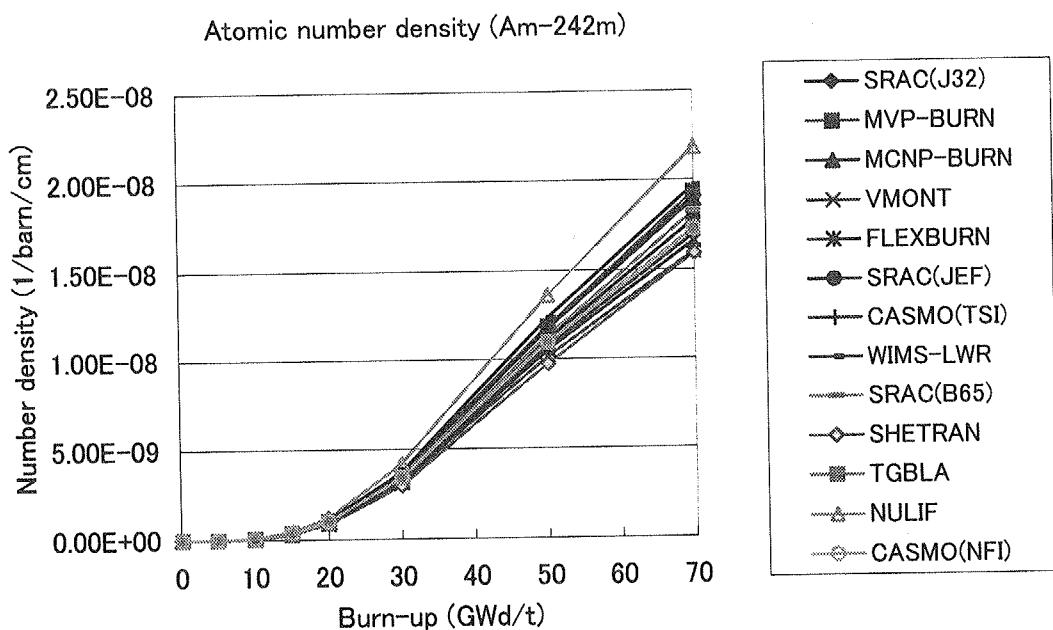


図 4.1.12 (11) Am-242m 数密度の燃焼変化

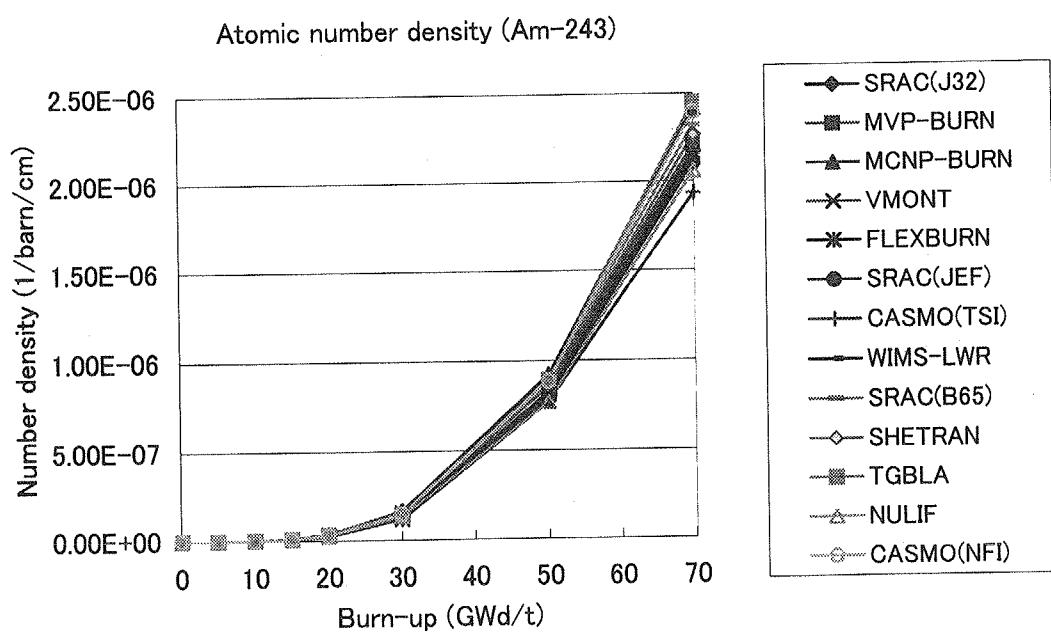


図 4.1.12 (12) Am-243 数密度の燃焼変化

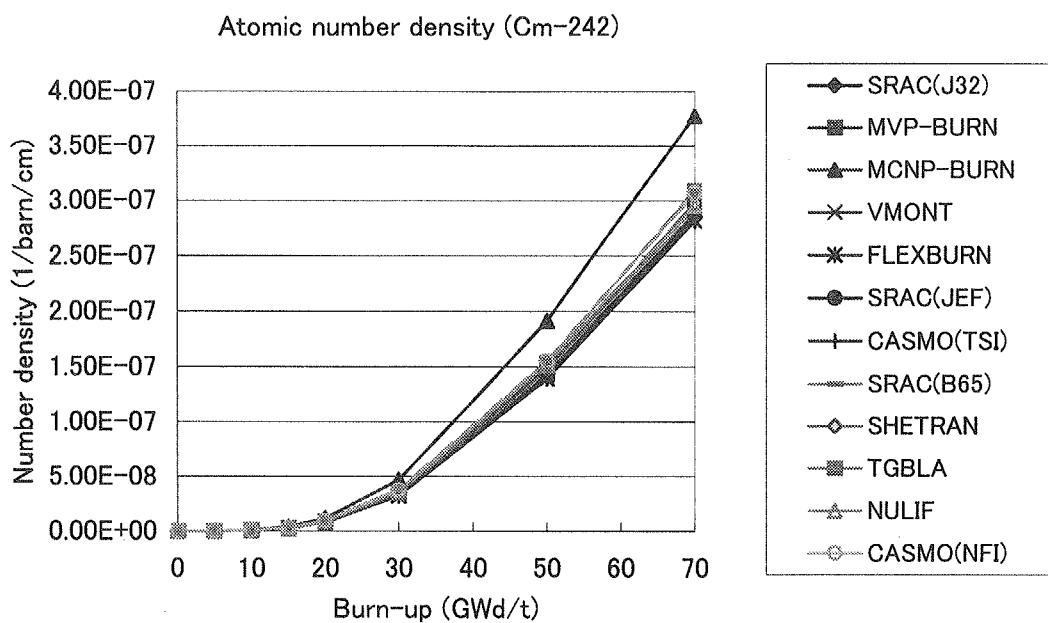


図 4.1.12 (13) Cm-242 数密度の燃焼変化

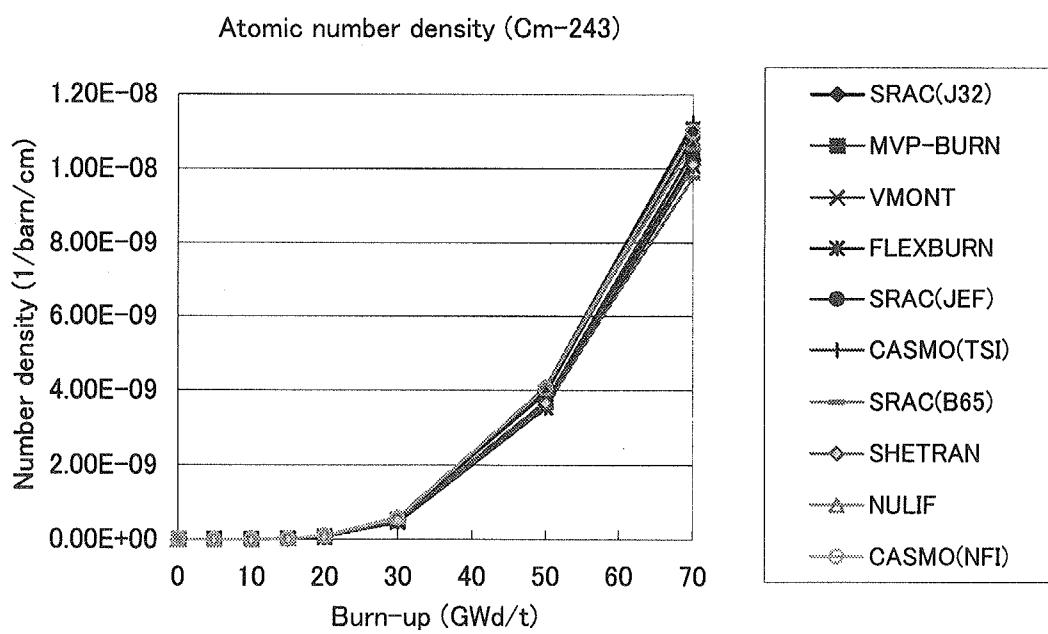


図 4.1.12 (14) Cm-243 数密度の燃焼変化

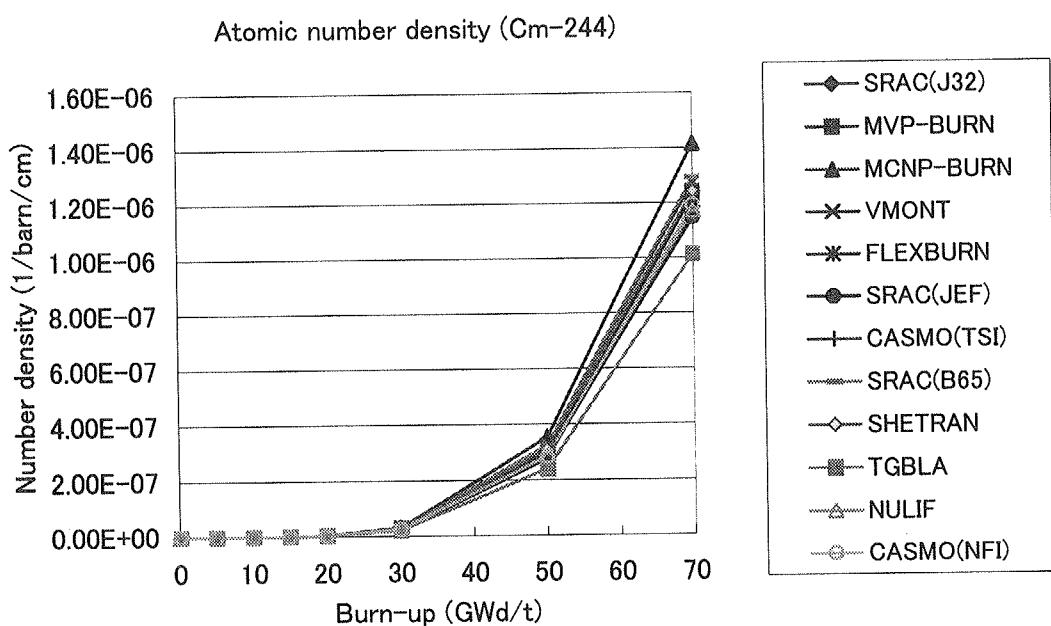


図 4.1.12 (15) Cm-244 数密度の燃焼変化

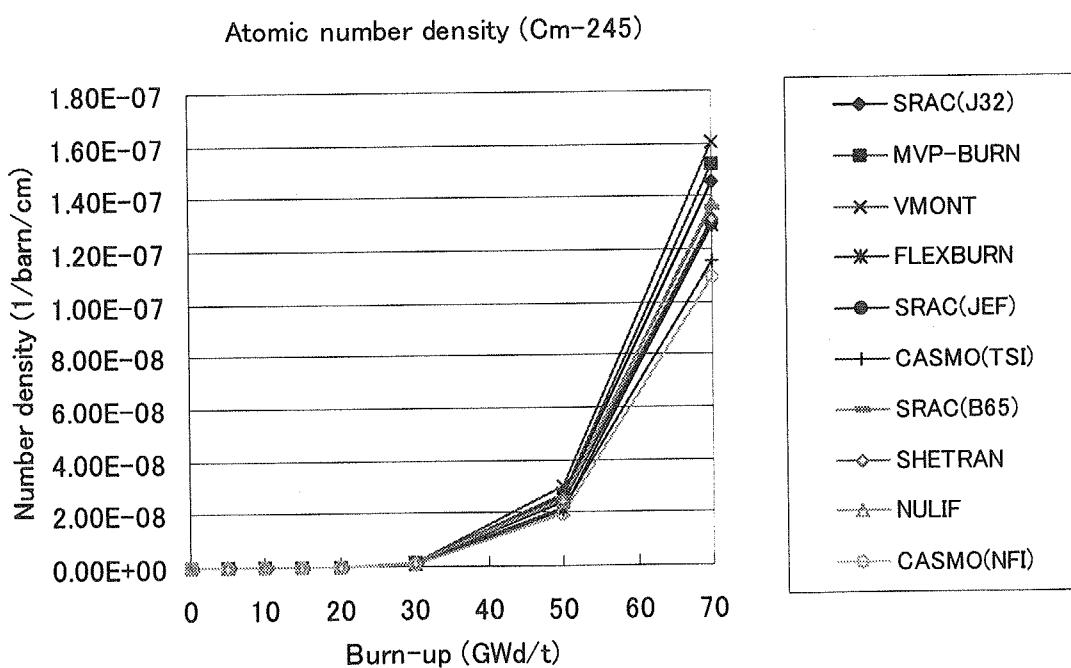


図 4.1.12 (16) Cm-245 数密度の燃焼変化

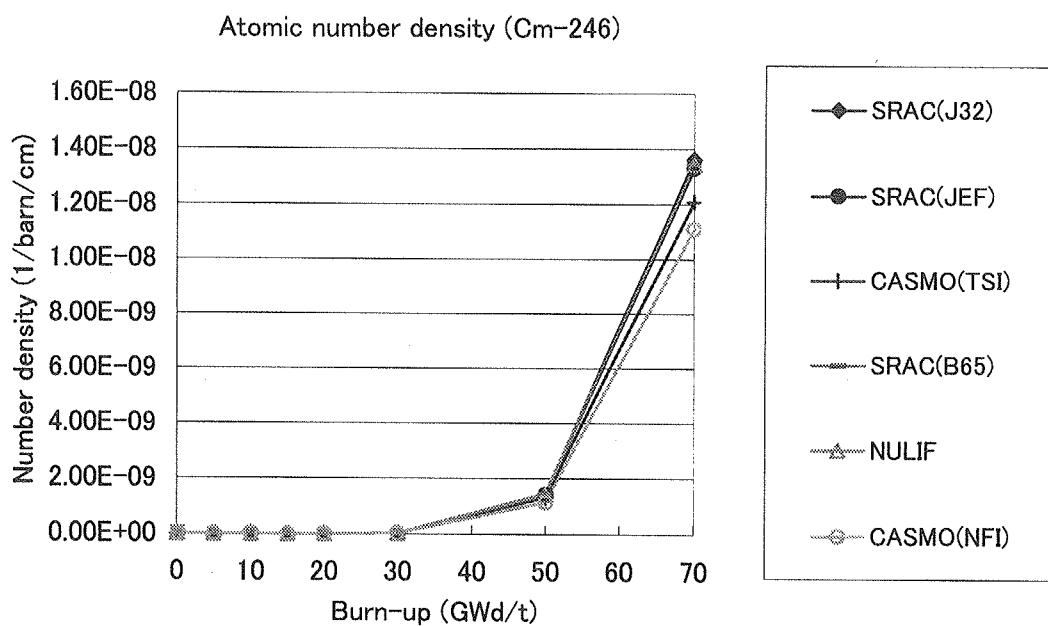


図 4.1.12 (17) Cm-246 数密度の燃焼変化

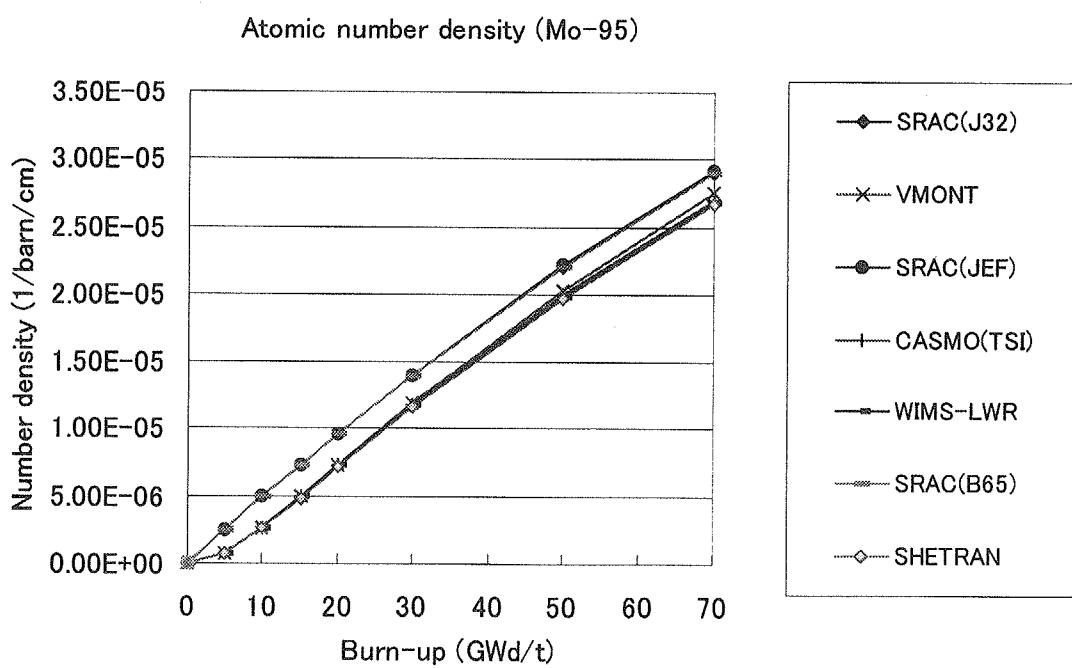
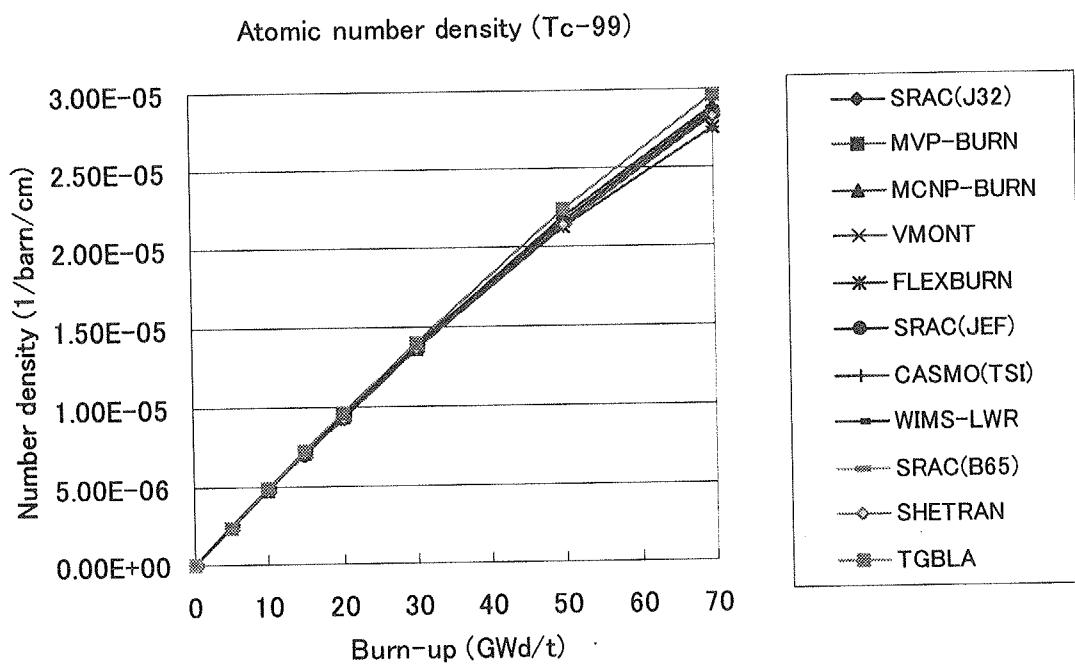
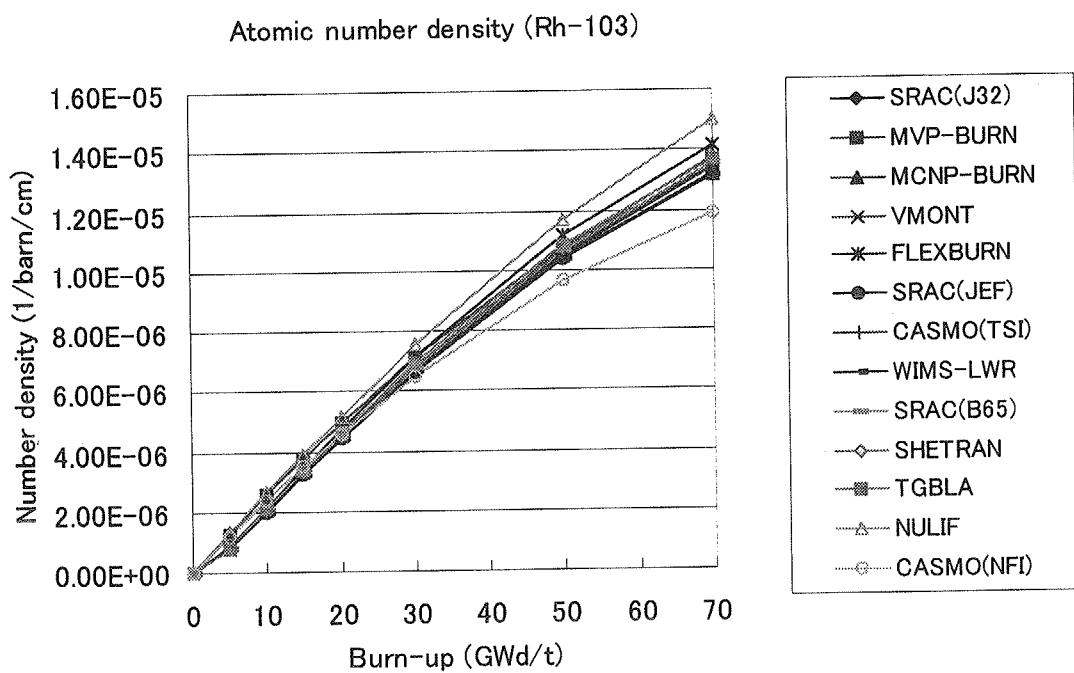


図 4.1.12 (18) Mo-95 数密度の燃焼変化

図 4.1.12 (19) $Tc-99$ 数密度の燃焼変化図 4.1.12 (20) $Rh-103$ 数密度の燃焼変化

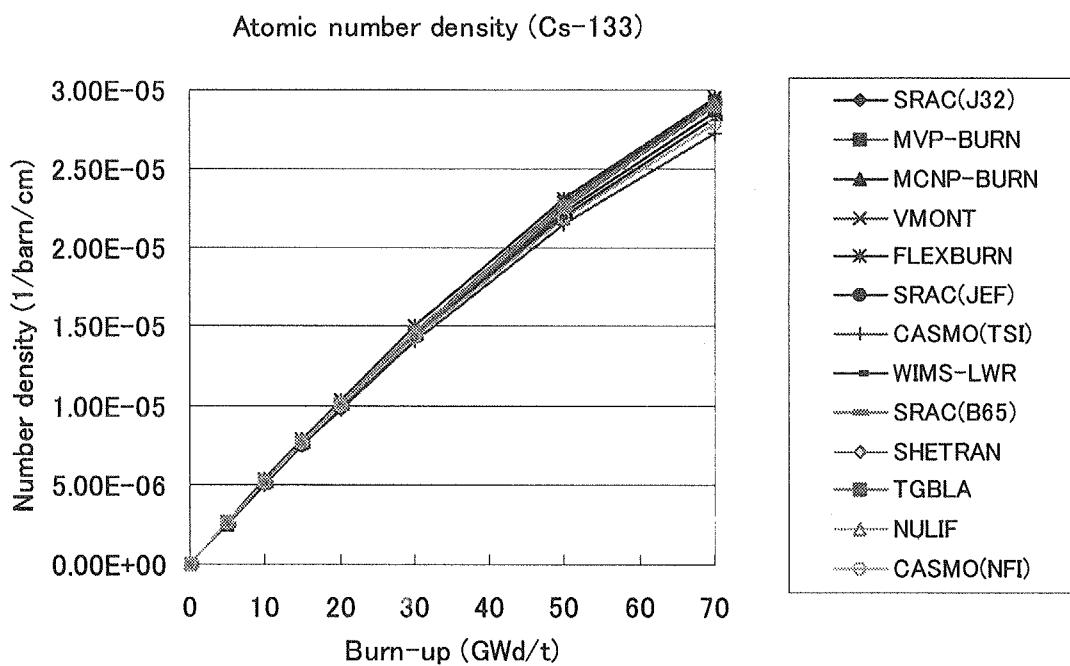


図 4.1.12 (21) Cs-133 数密度の燃焼変化

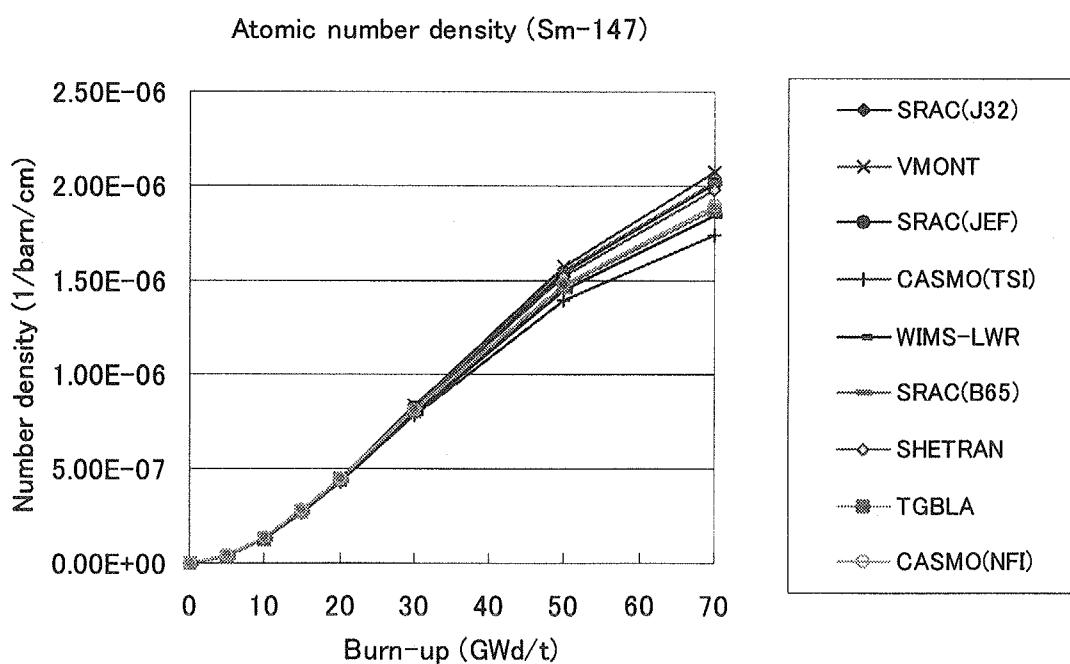


図 4.1.12 (22) Sm-147 数密度の燃焼変化

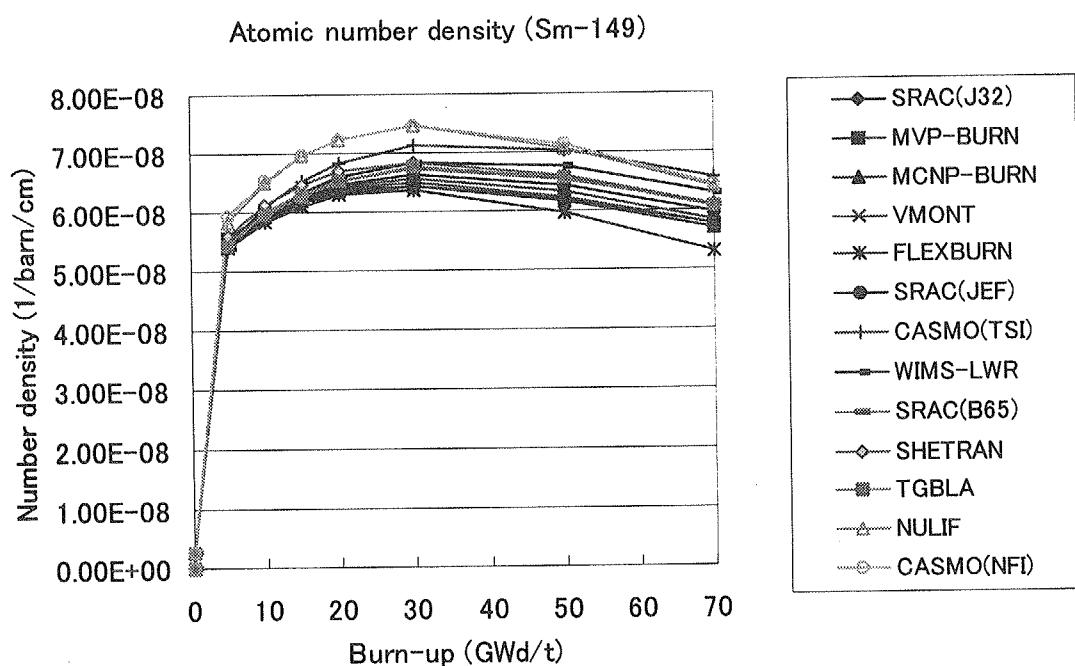


図 4.1.12 (23) Sm-149 数密度の燃焼変化

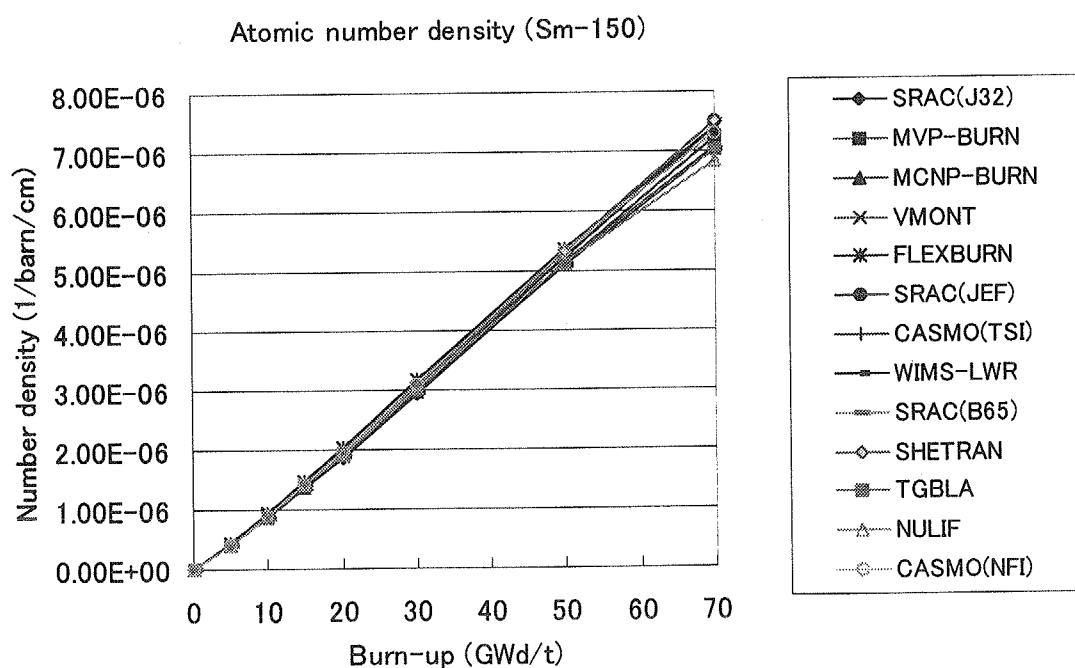


図 4.1.12 (24) Sm-150 数密度の燃焼変化

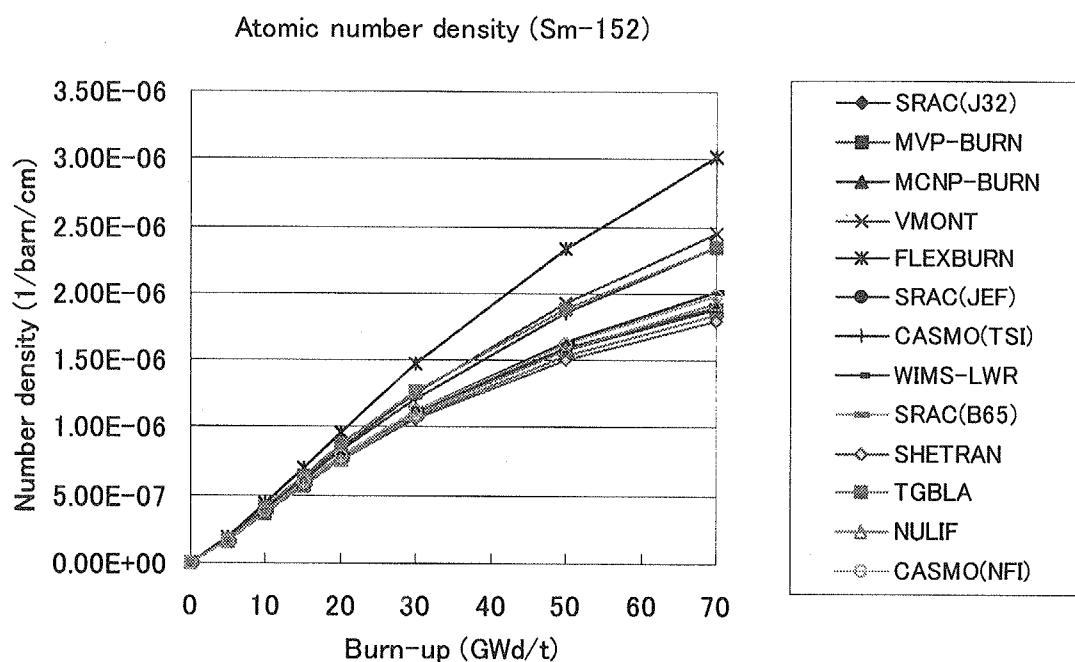


図 4.1.12 (25) Sm-152 数密度の燃焼変化

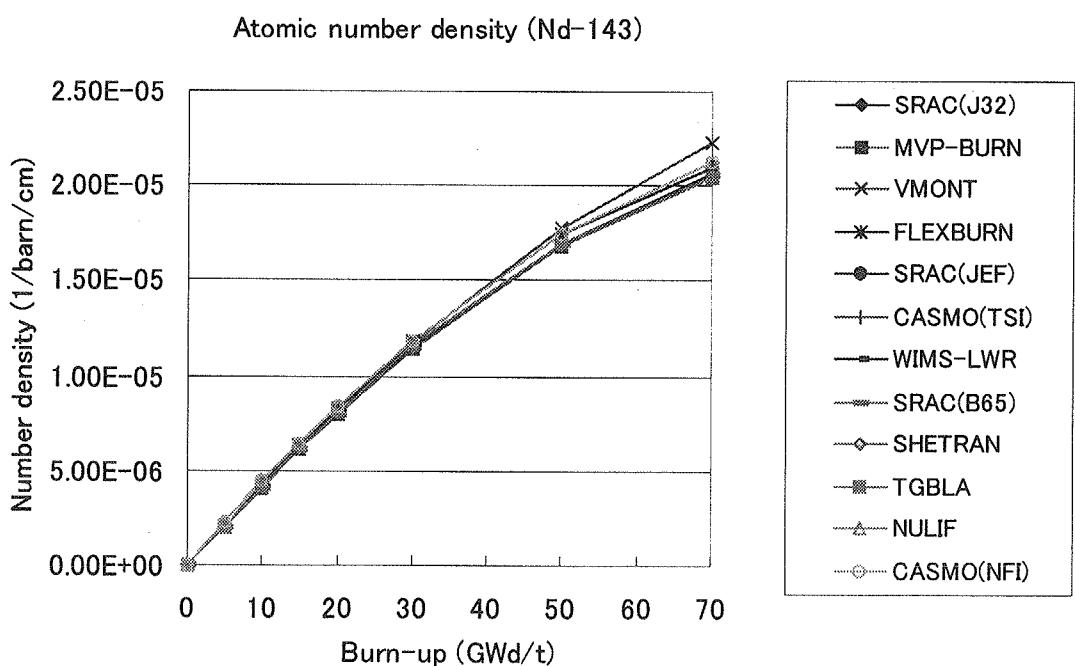


図 4.1.12 (26) Nd-143 数密度の燃焼変化

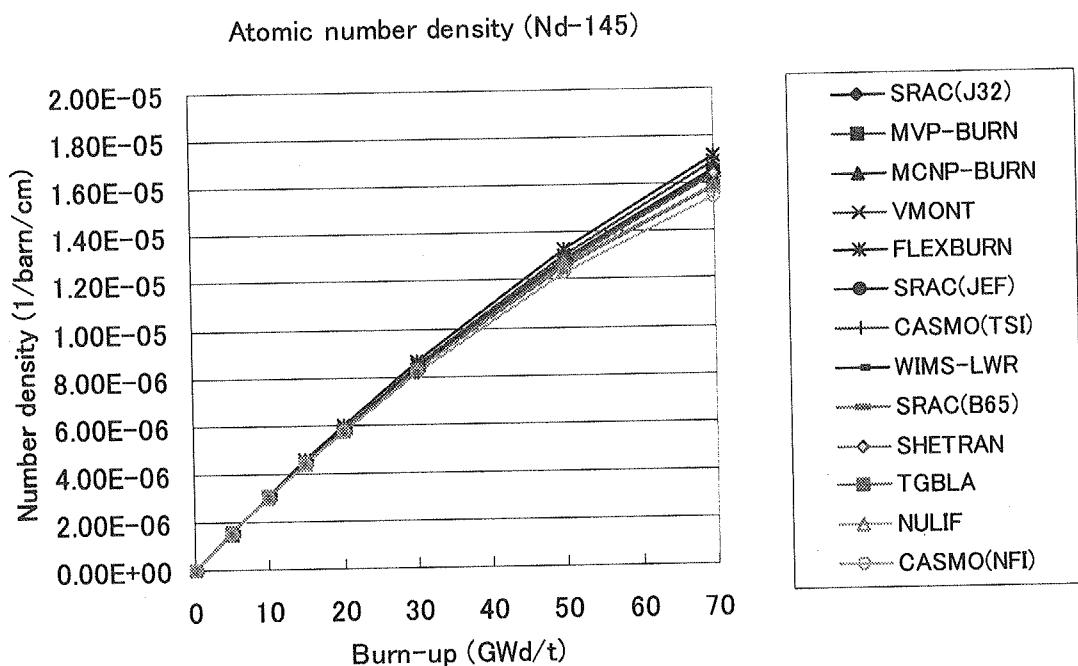


図 4.1.12 (27) Nd-145 数密度の燃焼変化

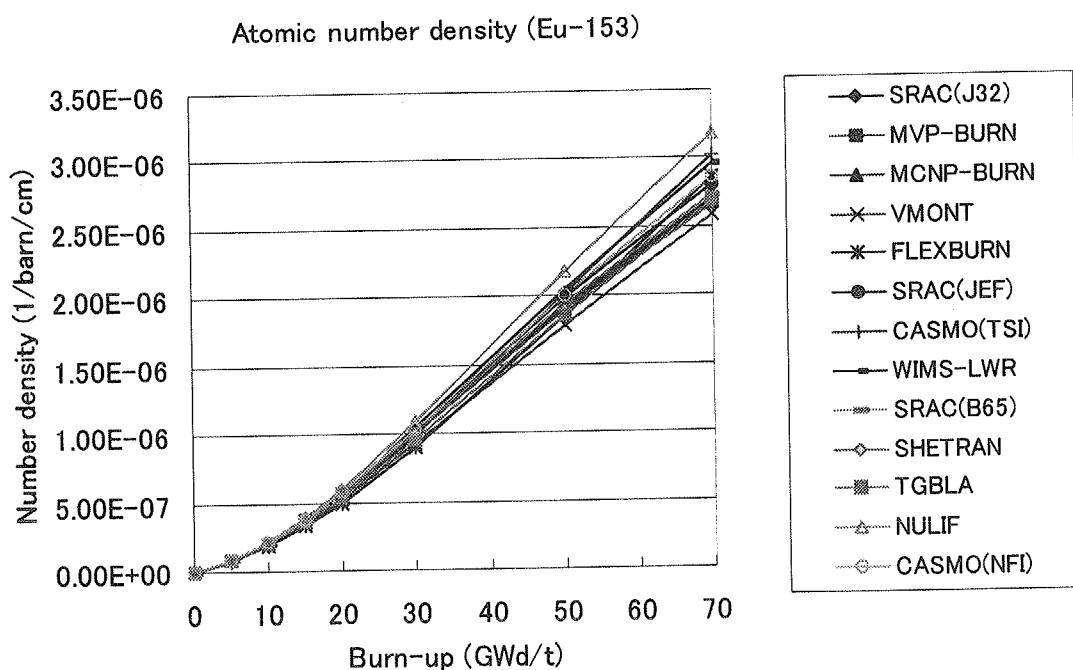


図 4.1.12 (28) Eu-153 数密度の燃焼変化

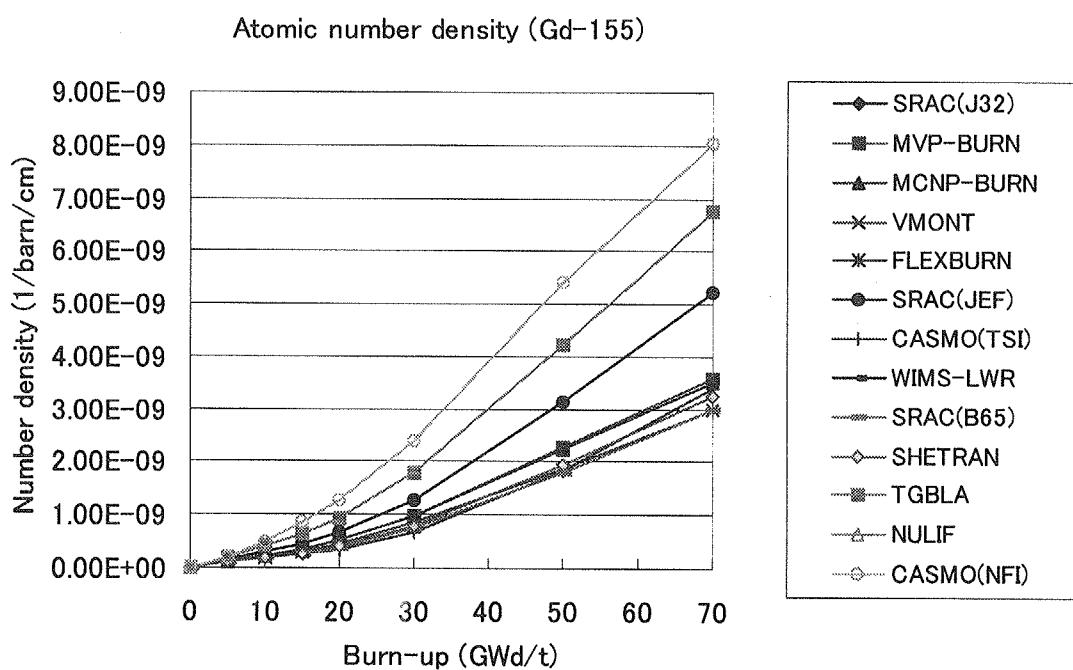


図 4.1.12 (29) Gd-155 数密度の燃焼変化

燃焼末期における数密度の差異は、必ずしも差異を持つ核種自身の断面積に原因があるわけではなく、燃焼チェーンの中でその核種が生成・消滅する主要なパスを検討しなければならない。参考までに、図 4.1.13 と図 4.1.14 に SRAC が本ベンチマーク計算に使用した重核種及び F.P 核種の燃焼チェーンモデル(U4CM6FP66)を示す。

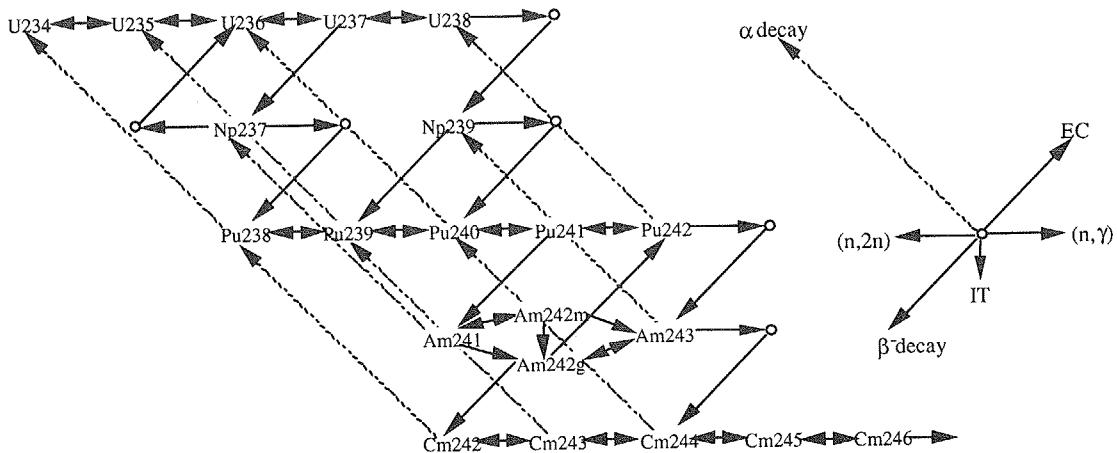


図 4.1.13 SRAC の重核種燃焼チェーンモデル

以下では、図 4.1.12 に示した核種のうち、特に数密度の差異が顕著な核種について、SRAC の燃焼チェーンモデルと照らして考察と今後の検討方針を述べる。

【U-236、Np-237、Pu-238】

これらの核種は核特性の観点からは重要度が低いが、Np-237 と Pu-238 は過去に SRAC、MVP-BURN、SWAT を使用して行われた PIE 解析[2]において C/E の過小評価がみられたものである(美浜 3 号機の UO_2 燃料 34GWd/t 照射サンプルで 10%~20%)。Pu-238 とその先行核である Np-237 の生成パスは、 $\text{U}-235 \rightarrow \text{U}-236$ を経由するものと $\text{U}-238 \rightarrow \text{U}-237$ を経由するものがあり、特に後者は無視できない寄与がある。このため、 $\text{U}-238$ の $(n,2n)$ 反応を正確に扱うコードを使用して、両生成パスの寄与を定量的に評価して検討を行う必要がある。SRAC の場合には、ライブラリのエネルギー上限を 10MeV としている点に問題がある。なお、ばらつきは小さいが $\text{U}-236$ の生成量に核データ依存性が見られる。ENDF/B ベースの結果は、JENDL-3.2 及び JEF-2.2 を使用したものに比べ、EOL における $\text{U}-236$ の生成量を 5%程度大きく評価している。

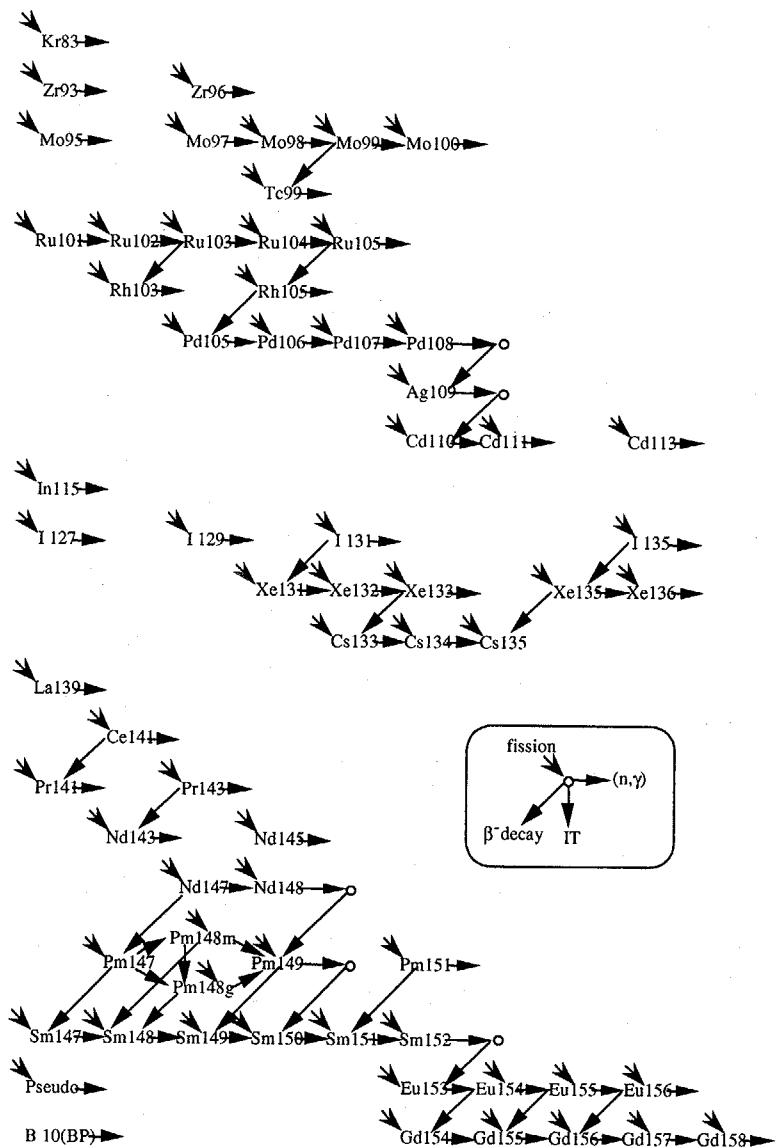


図 4.1.14 SRAC の F.P.核種燃焼チェーンモデル

図 4.1.12(4)では、WIMS-LWR が他コードの結果に比べて Np-237 の数密度を大幅に小さく評価しており、これが最大差異を 41%と大きくしている。先ずは、WIMS-LWR の Np-237 の生成パスを検討する必要がある。仮に WIMS-LWR の結果を除いても、最大差異は 23%であり、他コードの結果のばらつきも大きい。Pu-238 については WIMS-LWR の評価はないため、30% 近い Pu-238 数密度のばらつきは Np-237 のばらつき(23%)が更に拡大したものである。

【Pu-239、Pu-240、Pu-241、Pu-242】

これらの核種は数密度のばらつきが小さくても EOL における反応度寄与が大きいため、感度解析と併せて詳細に検討する必要がある。EOL における数密度のばらつきを図 4.1.15～図 4.1.18 に示す。

JENDL-3.2 ベースの中では、MVP-BURN と MCNP-BURN の結果はいずれの核種に対しても良く一致している。FLEXBURN は他コードの結果に比べて、Pu-239、Pu-240、Pu-241 の生成量を小さく、Pu-242 の生成量を大きく評価する傾向がある。JEF-2.2 ベースのものには、あまり共通した傾向が見られない。NULIF は Pu-239、Pu-240、Pu-241 に対しては平均的な結果を与えているが、Pu-242 の生成量だけは特に大きく評価している。

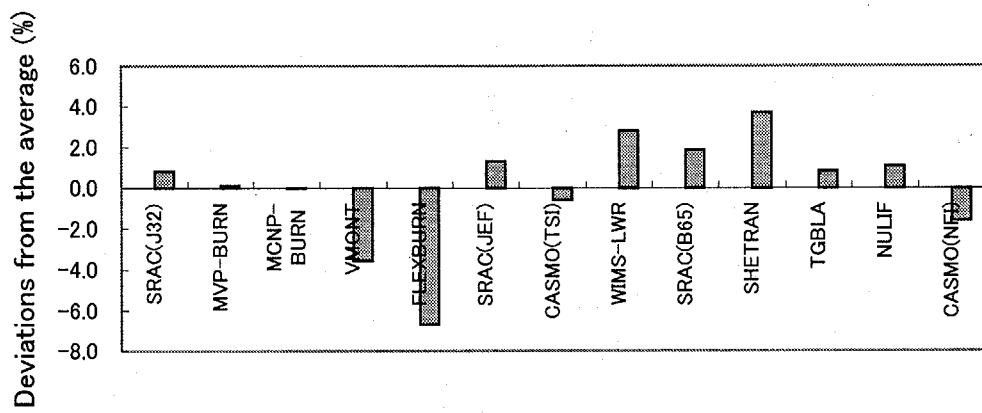


図 4.1.15 EOL における Pu-239 の数密度の比較 (平均値からの差異)

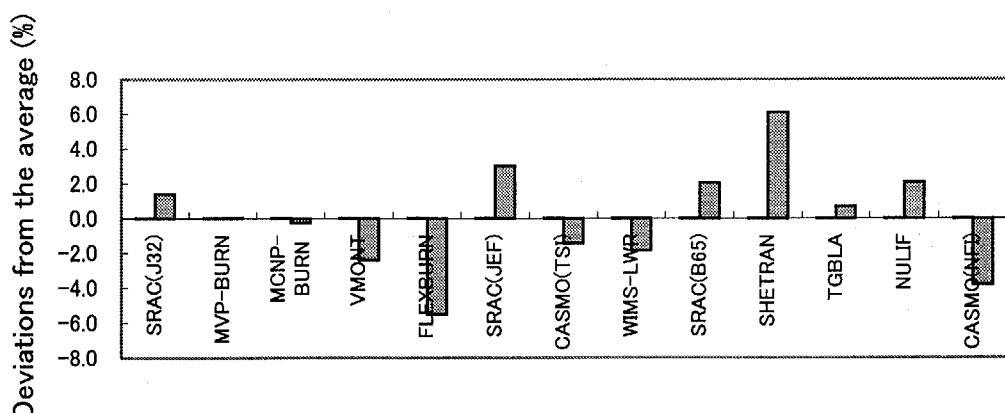


図 4.1.16 EOL における Pu-240 の数密度の比較 (平均値からの差異)

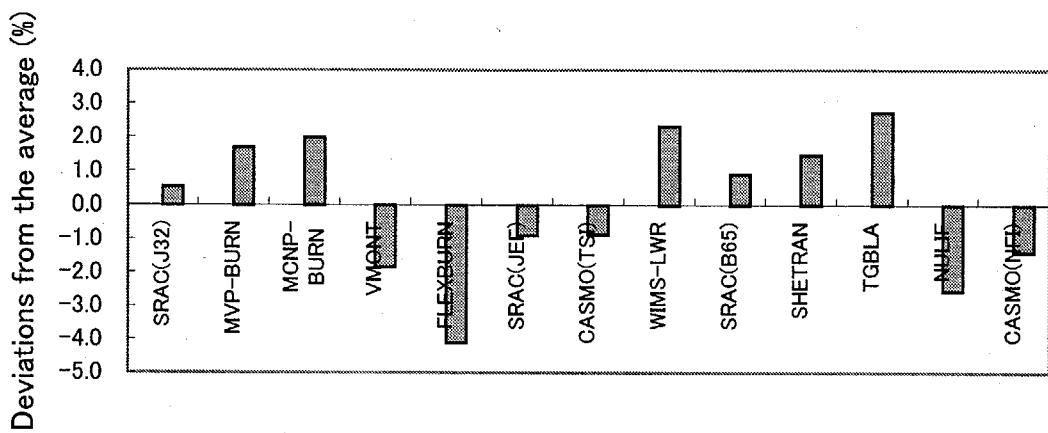


図 4.1.17 EOL における Pu-241 の数密度の比較 (平均値からの差異)

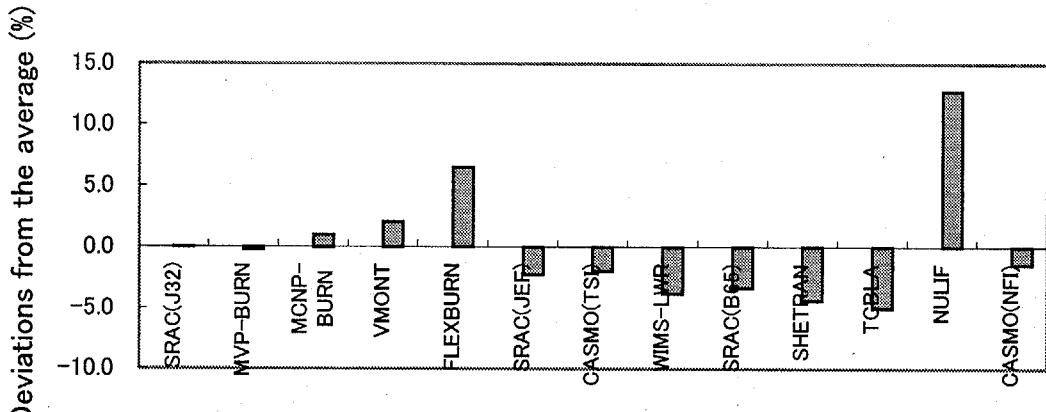


図 4.1.18 EOL における Pu-242 の数密度の比較 (平均値からの差異)

【Am-241、Am-242m、Am-243】

Am-241 については NULIF の結果が他の計算結果に比べて大きくなっている。これが Am-242m にも影響している。Am-241 の生成は主として Pu-241 の β 崩壊によるものである。Pu-241 に対する NULIF の結果は他コードの結果と同程度であるため、考えられる原因是 Pu-241 の崩壊定数が大きいか、Am-241 の吸収断面積が小さいかのいずれかと考えられる。NULIF は Pu-242 の数密度を平均値に比べて 13%程度大きく評価しており、先ずは崩壊定数を他コードの値と比較すべきである。

Am-242m は吸収反応率への寄与が EOL で 0.3%程度と小さく、核特性に関して言えば検討の優先順位は低い。しかし数密度の差異は大きく、NULIF の結果を除いても、平均値に対する

最大差異は 21% 程度あり、この核種の生成量に対する評価精度を上げるには、特に以下の 4 点を検討する必要がある。

- Am-241 から Am-242m 及び Am-242g への分岐比の差異
- 分岐比以外の燃焼チェーンモデルの差
- 核データの違いによる影響
- Am-241 の吸収断面積の評価

Am-241 の分岐比については、JENDL-3.2 には評価がなく、SRAC と MVP-BURN の計算では、何れのケースも ENDF/B-VI に基づく値(Am-242m ～ 11.6%)を使用している。しかし、先述した美浜の PIE 解析では 30% 程度の大幅な過小評価の結果が得られている。分岐比はエネルギー依存であり、特に高エネルギーで値が変化するため、高速炉で使用される値は参考とならない。また、ORIGEN コードでは、使用するライブラリによって分岐比の値が異なっており、正確な分岐比の値が無いのが現状である。Am-242m の生成量はこの分岐比に直接影響を受けるため、信頼できる分岐比を調査・検討する必要がある。

図 4.1.19 は各コードによって得られた Am-242m の EOL での数密度を平均値からのずれで示したものである。ただし、Am-241 から既に差異が大きい NULIF の結果は除いてある。

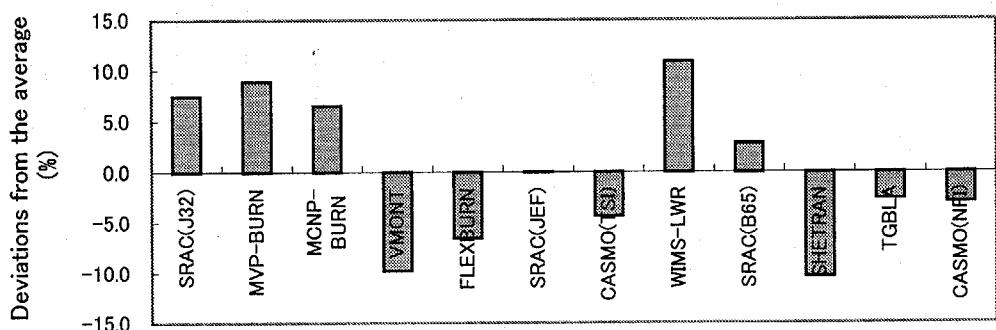


図 4.1.19 EOL における Am-242m の数密度の比較 (平均値からの差異)

SRAC の結果からは、核データの差異による Am-242m の生成量への影響は 7% 程度であり、JENDL-3.2 ライブラリは生成量を大きく、JEF-2.2 は小さく評価する傾向が見られる。しかし、VMONT(JENDL-3.2 ベース)、FLEXBURN(JENDL-3.2 ベース)、WIMS-LWR(JEF-2.2 ベース)の結果はむしろ逆の傾向が見られる。また、SRAC の結果は核データに依らず何れも全体的に大きな評価であることから、平均値は SRAC 等のコードによる美浜 PIE 解析での C/E 過小評価と矛盾する方向である。すなわち、現在の主要な核データでは Am-242m 生成量の予測精度を上げることができない可能性もある。Am-242m の生成量は、Am-241 の吸収断面積にも依存するた

め、近年中に公開が予定されている JENDL-3.3 による解析が望まれる。

Am-243 の主要な生成パスは Pu-242 の中性子捕獲によるものであり、Am-242 のばらつきの影響は少ない。EOL における Pu-242 と Am-243 の最大差異は、それぞれ 18% と 23% であり、まずは Pu-242 のばらつきを小さくすることが重要である。

【Cm-242、Cm-243】

Cm-242 は主として Am-242g の β 崩壊(約 16h)により生成され、約 163 年の半減期で α 崩壊する。MCNP-BURN の結果は Cm-242 の生成量を他コードの結果に比べて特に大きく評価しており、最大差異(32%)を大きくする要因となっている。MCNP-BURN の結果を除けば、EOL での最大差異は 9% 程度であり、比較的良く一致しているといえる。MCNP-BURN の結果を検討するには、Cm-242 に至る燃焼チェーンモデルを他コードのものと比較するとともに、本ベンチマークでは評価対象核種ではない Am-242g の生成量も比較する必要がある。

MCNP-BURN は、連続エネルギーモンテカルロコードを使用しているが、反応度寄与が小さい核種については、多群無限希釈断面積を MCNP で得られるスペクトルで群縮約して核種崩壊生成計算に使用している点にも注意する必要がある。これは、反応度寄与が小さい核種やそれを先行核として生成される核種の生成量が多群スペクトルの統計精度に左右されやすいためである。MVP-BURN では、こうした問題を避けるため、多群断面積は扱わずにエネルギー積分された微視的反応率を使用して核種崩壊生成計算を行っている。

Cm-243 は主として Cm-242 の中性子捕獲により生成される。Cm-243 は MCNP-BURN では燃焼チェーンで扱われていないため、EOL における生成量の最大差異は 14% である。EOL での Cm-242 と Cm-243 の吸収割合は合わせて 0.009% であり、これらの生成量のばらつきによる反応度寄与は小さい。

【Cm-244、Cm-245、Cm-246】

Cm-244 は、主として Am-243 の中性子捕獲を介して生成され、約 18 年の半減期で α 崩壊をする。Cm-244 は、反応度寄与は小さいものの、Cm-242 とともにバックエンドにおける線源評価で重要となる核種であり、数密度そのものの精度が要求される。Cm-244 の EOL における数密度の最大差異は 33% であるが、特に MCNP-BURN と TGBLA の結果が他コードの結果と異なっている。これらの両コードの結果を除けば、EOL での最大差異は 12% となる。Cm-242 から Cm-244 への生成パスは、EOL での Am-243 と Cm-243 の数密度の比較から、小さいことが分かる。したがって、MCNP-BURN が Cm-244 を大きく評価していることは、Cm-242 の数密度を大きく評価していることとは関係がない。SRAC、MVP-BURN、SWAT を使用して行われた PIE 解析 [2] では、34GWd/t における Cm-244 の生成量が 20% ~ 30% 過小評価されており、MCNP-BURN の結果が正しい可能性もある。TGBLA は MCNP-BURN の結果に次いで Am-243 の生成量を大きく評価しているにもかかわらず、Cm-244 の生成量は最も小さく評価している。TGBLA の場合、他コードに比べ Am-243 の吸収断面積が小さいか、Cm-244 の吸収断面積が大きいのかのいずれかと考えられる。

Cm-245 の生成量については、Cm-244 の生成量で差異があった MCNP-BURN と TGBLA の評価が無いにもかかわらず、38%もの大きな最大差異が見られる。SRAC の 3 つの結果から核データによる最大差異を Cm-244 の生成パスに沿って調べると、Pu-242(3.4%)、Am-243(9.6%)、Cm-244(12%)、Cm-245(12%)となる。すなわち、核データの差異に関しては先ずは Am-243 の生成パスに関わる断面積を比較検討する必要がある。

Cm-246 については、評価値が 6 つしかないことにより、生成量の最大差異は約 20%となる。SRAC(J32)、SRAC(JEF)、SRAC(B65)と NULIF が、CASMO (TSI) と CASMO(NFI)の結果に比べて生成量を大き目に評価している。この傾向は、Cm-245 にも見られる。

【Mo-95】

Mo-95 は表 4.1.8 に挙げた F.P.核種の中で、EOL での吸収割合が 15 番目に大きい核種である。Mo-95 生成量の評価コードは SRAC(J32, JEF, B65)と VMONT、CASMO(TSI)、SHETRAN、WIMS-LWR のみであるが、SRAC による 3 つ結果だけが、他コードの結果と異なる振る舞いをしており、これが最大差異 8.9%の要因となっている。この原因は既に明らかとなっている。SRAC の F.P.用燃焼チェーンにおいて、Mo-95 の先行核である Nb-95(半減期 35 日)と Zr-95(半減期 64 日)が陽に扱われておらず、Mo-95 の累積核分裂収率で扱われているためである。これらの核種を組み込んだ改良 F.P.チェーンを使用すると、SRAC の結果は他コードの結果と良く一致し、Mo-95 生成量の最大差異は 3%程度まで改善される。

【Tc-99】

Tc-99 は EOL での F.P.吸収割合で第 6 位に位置する。図 4.1.20 に EOL での生成量の平均値からのずれを示す。Tc-99 の生成曲線には、コード間やライブラリ間で際立った差異は見られない。燃焼末期近くで数密度の差異は拡大傾向にあり、EOL での最大差異は 7.5%である。

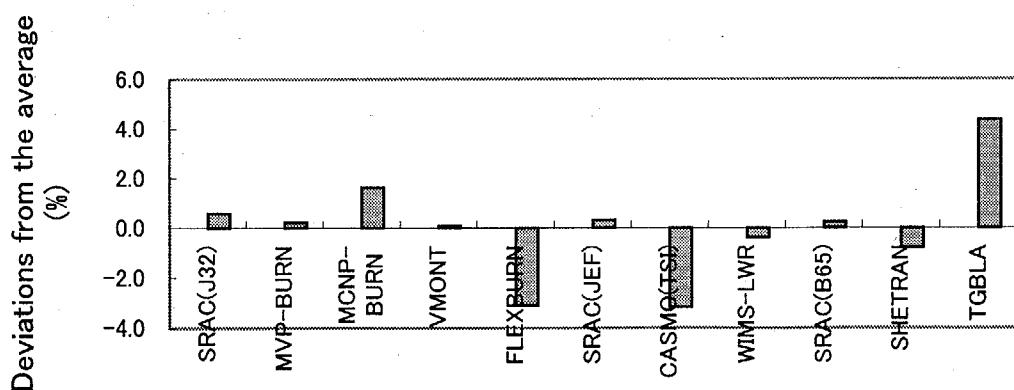


図 4.1.20 EOL における Tc-99 の数密度の比較 (平均値からの差異)

【Rh-103】

Rh-103 は、希ガスである Xe-135 を除けば、F.P.核種の吸収割合で第 1 位に位置し、半減期が長いため燃焼度クレジットにおいても重要となる核種である。相対値で見た生成量のばらつきは EOL よりはむしろ燃焼初期において大きい(10GWd/t で 30%)。一つの要因としては、Rh-103 の生成パスで、Ru-103(半減期 39 日)を陽に考慮するかどうかの差異による。燃焼初期において Rh-103 の生成量を大きく評価している MVP-BURN はこの扱いをしている。一般に、Rh-103 の生成量が多くなると Ru-103 の崩壊寄与は相対的に小さくなるため、反応度寄与の観点からはあまり問題とはならない。しかし、燃焼度が小さい試料の PIE 解析では過大評価の原因となるので注意を要する。図 4.1.21 に示すように、MVP-BURN の結果は EOL では平均的な値に漸近しているが、燃焼初期で MVP-BURN と同様な結果を与えていている NULIF と CASMO(NFI)の結果は、むしろ燃焼度の増大とともに他コードとの差異が拡大している。これにより、EOL での数密度の最大差異は 23%となっており、これらの結果を除けば、最大差異は 7.5%となる。

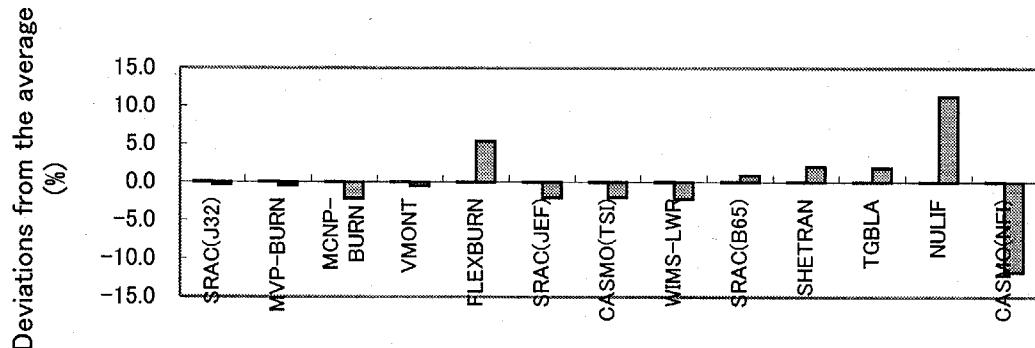


図 4.1.21 EOL における Rh-103 の数密度の比較 (平均値からの差異)

【Cs-133】

Cs-133 は EOL での F.P.核種による吸収割合で第 4 位に位置する。その生成量は、燃焼度の増大とともに差異が拡大する傾向があり、EOL での数密度の最大差異は 7.8%である。図 4.1.22 は EOL での生成量の平均値からのずれを示したものである。JENDL-3.2 ベースの結果は生成量を大きめに評価し、JEF-2.2 の結果は小さめに評価する傾向が見られる。JENDL-3.2 は他の核データ評価に比べて Xe-132 の吸収断面積を大きく、Xe-133 の吸収断面積を小さく評価しているため、Xe-133 の β 崩壊(半減期 127 日)による Cs-133 生成の寄与が大きいものと考えられる。一方、JEF-2.2 は Cs-133 の吸収断面積を他の評価に比べて大きく評価している。

JEF-2.2 と ENDF/B-IV ベースの 2 つの CASMO の結果は、どちらも生成量を小さめに評価しており、燃焼チェーンモデルなどの別の要因も考えられる。

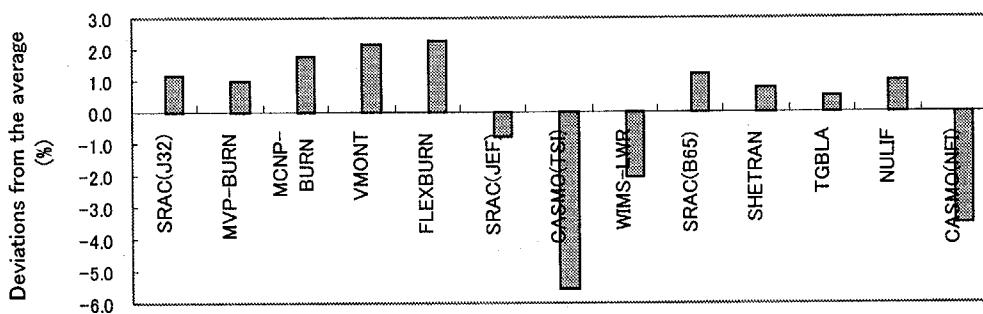


図 4.1.22 EOL における Cs-133 の数密度の比較(平均値からの差異)

【Sm-147、Sm-149、Sm-150、Sm-152】

Sm 同位体核種の EOL における F.P.核種吸収割合の順位は、Sm-147(21 位)、Sm-149(7 位)、Sm-150(20 位)、Sm-152(8 位)であるが、いずれも長半減期の非揮発性核種であることから燃焼度クレジットで重要となる核種である。ベンチマーク計算では、70GWd/t までの連続運転を想定したセル燃焼計算により得られる数密度を比較しているが、実際には炉停止毎に Pm-147(半減期 2.7 年)や Pm-149(半減期 53 時間)から Sm が生成され、運転再開により燃焼する。したがって、ここで比較される Sm の数密度はあくまでコード間の比較を行うためのものであり、燃焼度クレジットなどを問題にする場合には、現実的な原子炉の運転履歴を考慮して Pm の生成量と併せて議論する必要がある。参考までに、図 4.1.23 に SRAC(J32)で計算された Pm と Sm の生成量の燃焼変化を示す。

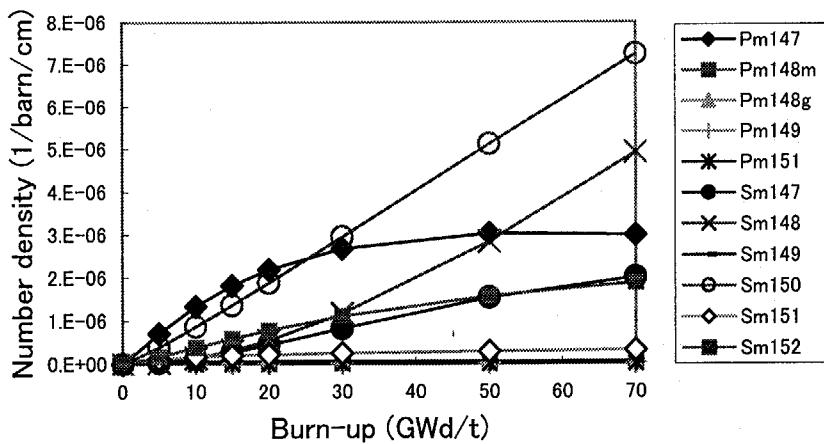


図 4.1.23 Pm と Sm 同位体核種の生成量(SRAC(J32)による計算)

Sm-147 の生成量のばらつきは、EOL における最大差異で 17%である。一方、SRAC による 3 つの計算値は 0.8%以内で良く一致しており、核データの差異によるものとは考えられない。詳しい検討をするためには、Pm-147 の生成量や燃焼チェーンモデルを比較する必要がある。

図 4.1.12(23)に示した Sm-149 の生成曲線は、いずれも 30GWd/t 近傍でピーク値を示すが、コード間で大きく異なり、EOL における数密度の最大差異は 21%である。同図をライブラリ区分で比較したものを図 4.1.24 に示す。

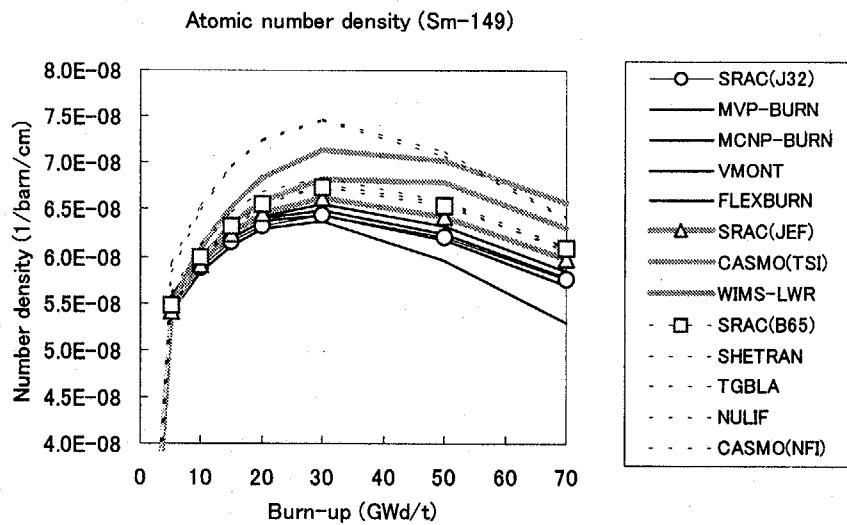


図 4.1.24 Sm-149 数密度の燃焼変化 (ライブラリ区分による比較)

ENDF/B ベースの結果は、JENDL-3.2 ベースの結果に比べて、Sm-149 の生成量を大きく評価する傾向があり、JEF-2.2 はこれらの中間的な結果を与える。核データによる差異は、同じ計算手法と燃焼チェーンモデルによる SRAC の結果から約 6%である。CASMO(NFI)と NULIF の Sm-149 の生成曲線は良く似ており、他コードに比べて生成量を大きく評価している。FLEXBURN の結果は、30GWd/t 以降で他の結果と比べて Sm-149 の生成量を小さく評価する傾向が見られる。

Sm-150 は、Sm-149 の中性子捕獲の他、核分裂と Pm-149 の β 崩壊(半減期 53 時間)により生成される。主要な生成パスは後者であるため、Sm-149 のばらつきの影響はあまり受けず、EOL での数密度の最大差異は 9%程度である。核データによる差異は小さく、SRAC の結果から 2%以下である。

Sm-152 の EOL における数密度のばらつきを図 4.1.25 に示す。最大差異は約 58%あり、FLEXBURN は特に生成量を大きく評価している。FLEXBURN の結果を除いても、最大差異は 33%と大きい。核データによる差異は、SRAC の結果から僅かに 2.4%であり、差異の原因は

Sm-150 の実効吸収断面積の差によるものと考えられる。ここで示した SRAC の結果は MVP-BURN や MCNP-BURN とも良く一致しており、信頼性は高いと判断される。

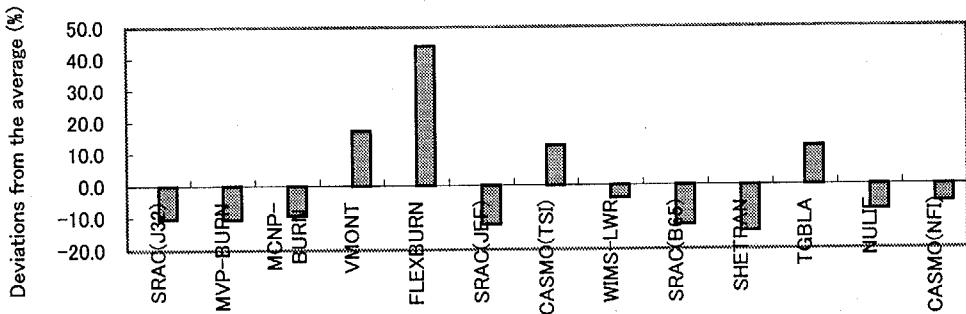


図 4.1.25 EOL における Sm-152 の数密度の比較(平均値からの差異)

同じ SRAC95 コードでも、1997 年 5 月以前に配布されたライブラリを使用すると、VMONT の結果と同程度に Sm-152 の生成量を大きく評価する。これは、SRAC の 107 群構造において、Sm-150 の 8.0eV の共鳴が U-238 の 6.7eV の共鳴と干渉をおこすためである。旧 SRAC95 では、Sm-150 に対して超詳細群による実効断面積計算の対象としておらず、実効断面積の計算には NR 近似に基づく自己遮蔽因子が使用される。一方、ここで使用している SRAC95 では、Sm-150、Sm-151、Sm-152 を超詳細群実効断面積計算の対象としており、Sm 核種の実効断面積は MVP-BURN により検証されている。旧 SRAC95 による計算では、同一群内にある Sm-150 と U-238 の共鳴ピークのレベルが僅かにずれていることにより、自己遮蔽が効きすぎる結果となり、Sm-152 の実効断面積が過小評価される。これにより、Sm-152 生成量の精度は無限希釈の扱いよりかえって悪化されることもある。Sm-152 の吸収断面積を過小評価すると、Sm-152 の生成量を過大評価するとともに、これを先行核とする Eu 同位体や Gd-155 の生成量を過小評価する原因となる。これらのこととは、旧 SRAC95 の実効断面積を利用した SWAT コードによる PIE 解析の結果にも現れている[3]。Sm-152 の微視的実効断面積の精度を確認するには、例えば、BOL の燃料組成に EOL 時の数密度相当の Sm-152 を混入させて、MVP や MCNP によって得られる実効断面積と比較すれば良い。

【Nd-143、Nd-145】

Nd-143 と Nd-145 は、EOL における F.P.核種の吸収割合で、それぞれ 3 位と 12 位に位置する核種である。EOL での数密度の最大差異は、それぞれ 9% と 11% であり、SRAC の計算から評価される核データによる差異は、それぞれ 0.2% と 1.4% である。図 4.1.26 に示すように、Nd-143 については、VMONT の結果が他の結果に比べて生成量を大きく評価している。Nd-145 については、FLEXBURN と CASMO(NFI) の結果が最大差異の要因となっている。

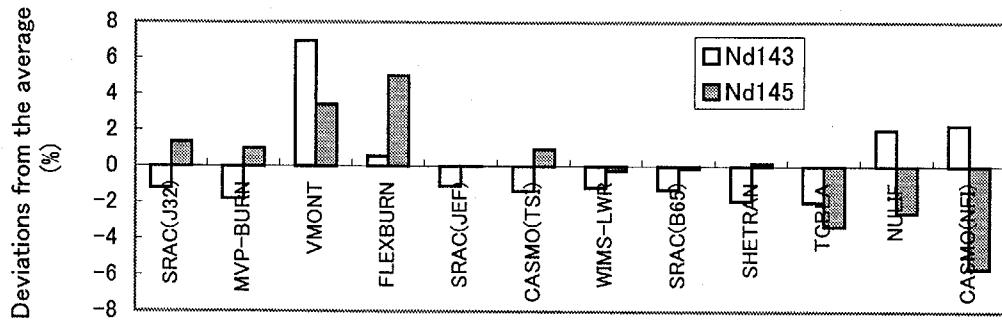


図 4.1.26 EOL における Nd-143 と Nd-145 の数密度の比較(平均値からの差異)

【Eu-153、Gd-155】

Eu-153 と Gd-155 は、EOL における F.P.核種の吸収割合で、それぞれ 10 位と 49 位に位置する核種である。Gd-155 の順位は低いが、5 年程度の冷却期間を経ると順位が 5 位程度まで上がるため燃焼度クレジットに関しては重要な核種である。ただし、これは EOL での数密度が Gd-155 よりも 1 術大きい Eu-155 の β 崩壊(半減期 5 年)によるものである。Eu-155 については、本ベンチマークでの比較対象核種ではないため、燃焼度クレジットに関しては、別に燃料取り出し後の冷却期間を考慮した問題で検討を行う必要がある。

Eu-153 や F.P.核種としての Gd-155 に対する生成量のばらつきは、図 4.1.27 と図 4.1.28 に示すように、EOL における最大差異でそれぞれ 21% と 117% であり、特に Gd-155 の差異が際だって大きい。

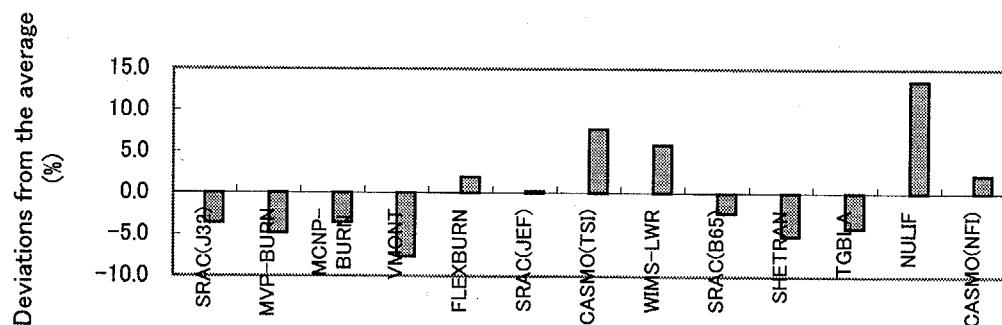


図 4.1.27 EOL における Eu-153 の数密度の比較 (平均値からの差異)

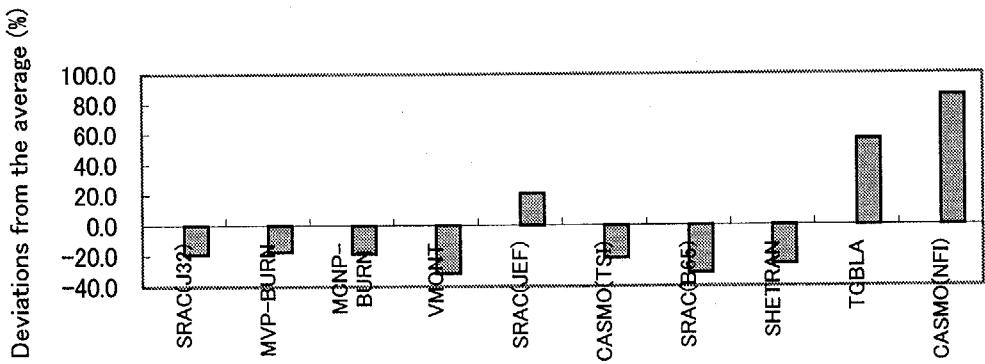


図 4.1.28 EOL における Gd-155(F.P.) の数密度の比較(平均値からの差異)

これらの差異の原因を明らかにするには、以下の 2 点を考慮する必要がある。

- Eu 同位体核種と Gd 同位体(F.P.)核種の生成量は、ばらつきの大きい Sm-152 の生成量に少なからぬ影響を受ける。
- Gd-155 の生成パスに関する核種の核データ評価が大きく異なる。SRAC(J32, JEF, B65)による BOL での Sm-152、Eu 同位体、Gd 同位体の 1 群断面積を表 4.1.10 に示す。

表 4.1.10 BOL における 1 群微視的実効断面積(barn)の比較

	Sm152	Eu153	Eu154	Eu155	Eu156	Gd154	Gd155	Gd156	Gd157
SRAC(J32)	7.47E+01	4.42E+01	1.55E+02	5.85E+02	3.76E+01	8.45E+00	9.22E+02	3.64E+00	3.87E+03
SRAC(JEF)	7.92E+01 [5.91]	4.32E+01 [-2.33]	8.48E+01 [-45.39]	3.69E+02 [-36.91]	4.94E+01 [31.37]	9.47E+00 [12.05]	9.17E+02 [-0.51]	2.92E+00 [-19.67]	3.84E+03 [-0.86]
SRAC(B65)	7.80E+01 [4.16]	4.46E+01 [0.81]	1.37E+02 [-13.23]	8.32E+02 [29.74]	4.88E+01 [22.95]	8.30E+00 [-1.75]	9.08E+02 [-1.47]	3.07E+00 [-18.70]	3.82E+03 [-1.35]

[]内は SRAC(J32)との差異(%)

特に、JEF-2.2 の場合には、Eu-154 及び Eu-155 の吸収断面積が小さく、かつ Gd-154 の吸収断面積が大きいため、Eu-154 や Gd-155 の生成量を他の核データを使用した場合に比べ大きく評価する。Eu-154 については、MVP-BURN や SRAC による PIE 解析が行われており、JENDL-3.2 ライブライアリを使用すると C/E=1.01 程度であるのに対し、JEF-2.2 ライブライアリを使用すると 60% 以上の過大評価が見られる[2]。これは、Eu-154 に対する JEF-2.2 の評価が古く、実験データによらずに理論補完に基づいた評価がなされているためである。F.P.核種に関しては、評価が新しい JENDL-3.2 の信頼性が高いものと考えられる。なお、ENDF/B-VI では、Eu 同位体核種の評価は 80 年代後半に見直され、Gd-154 の評価も 1996 年に JENDL-3.2 と同じものを採用している。

Gd-155 の生成量は同じ条件で計算された SRAC の結果だけでも、EOL での最大差異は 58% にも達する。このばらつきは、あくまで F.P.核種としての生成量に対するものであり、可燃性毒物核種としての Gd-155 や Gd-157 の効果にはほとんど関係しない。なぜなら、表 4.1.10 に見られるように、吸収断面積が他の同位体に比べて格段に大きい Gd-155 と Gd-157 には、核データによる依存性はほとんど認められないからである。しかも、天然 Gd の Gd-154 の存在比は僅かに 2% 程度である。結局、ここで見られた Gd-155 生成量の大きなばらつきは、核特性や燃焼度クレジットにはほとんど影響しないと言える。可燃性毒物の効果を比較するのであれば集合体ベンチマーク問題で検討し、燃焼度クレジットを問題にするのであれば Eu-155 の生成量も比較する必要がある。表 4.1.10 の Eu 核種の断面積が核データに大きく依存しているため、冷却後に Eu-155 から β 崩壊により生成される Gd-155 もばらつきが大きいものと予想される。

4.1.2 MOX 燃料

MOX 燃料のピンセルベンチマーク問題には、まだ計算結果が出されていない NULIF を除き、UO₂ 問題と同じコードによる 12 セットの結果が寄せられている。以下ではこれらの結果を比較検討する。

(1) 無限中性子増倍率

高温状態、ボイド率 0%における無限中性子増倍率の燃焼変化の比較を表 4.1.11 と図 4.1.29 に示す。

表 4.1.11 無限中性子増倍率の燃焼変化の比較 (MOX 燃料)

Burnup (GWd/t)	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
SRAC(J32)	1.1970	1.1898	1.1679	1.1511	1.1364	1.1227	1.0970	1.0497	1.0070
MVP-BURN 統計誤差(%)	1.1909 (0.071)	1.1858 (0.068)	1.1644 (0.086)	1.1475 (0.083)	1.1330 (0.064)	1.1182 (0.058)	1.0936 (0.065)	1.0442 (0.091)	1.0017 (0.076)
MCNP-BURN	1.1916	1.1850	1.1629	1.1458	1.1302	1.1171	1.0918	1.0453	1.0028
VMONT	1.1998	1.1932	1.1720	1.1547	1.1404	1.1274	1.1006	1.0536	1.0115
FLEXBURN	1.1938	1.1869	1.1661	1.1494	1.1347	1.1210	1.0956	1.0497	1.0088
SRAC(JEF)	1.1955	1.1885	1.1664	1.1496	1.1349	1.1212	1.0955	1.0488	1.0070
CASMO(TSI)	1.1885	1.1821	1.1603	1.1437	1.1291	1.1155	1.0898	1.0422	0.9989
WIMS-LWR	1.1825	1.1760	1.1545	1.1381	1.1237	1.1102	1.0848	1.0386	0.9948
SRAC(B65)	1.1998	1.1927	1.1705	1.1534	1.1383	1.1243	1.0980	1.0499	1.0067
SHETRAN	1.1963	1.1895	1.1682	1.1514	1.1367	1.1230	1.0972	1.0499	1.0077
TGBLA	1.1890	1.1826	1.1627	1.1469	1.1329	1.1198	1.0949	1.0485	1.0055
CASMO(NFI)	1.1608	1.1540	1.1359	1.1214	1.1084	1.0961	1.0731	1.0308	0.9926
平均値	1.1905	1.1838	1.1626	1.1461	1.1316	1.1180	1.0926	1.0459	1.0038
最大値	1.1998	1.1932	1.1720	1.1547	1.1404	1.1274	1.1006	1.0536	1.0115
最小値	1.1608	1.1540	1.1359	1.1214	1.1084	1.0961	1.0731	1.0308	0.9926
R _{MAX} (% Δ k/kk') *	2.80	2.85	2.72	2.57	2.53	2.53	2.33	2.10	1.88
標準偏差	0.0106	0.0106	0.0097	0.0090	0.0086	0.0082	0.0074	0.0063	0.0058
相対標準偏差(%)**	0.89	0.89	0.83	0.78	0.76	0.74	0.68	0.60	0.58

*R_{MAX} は最大値と最小値の反応度差

**相対標準偏差(%) = 標準偏差/平均値 × 100

UO₂ 問題と比べると、BOL における余剰反応度は半分以下であり、EOL での燃焼反応度損失も UO₂ 問題の 38% Δ k/kk' に比べて、MOX 問題では 16% Δ k/kk' と小さい。したがって、MOX 問題では、中性子増倍率が UO₂ 問題に比べて小さな値の差異を比較することになる。

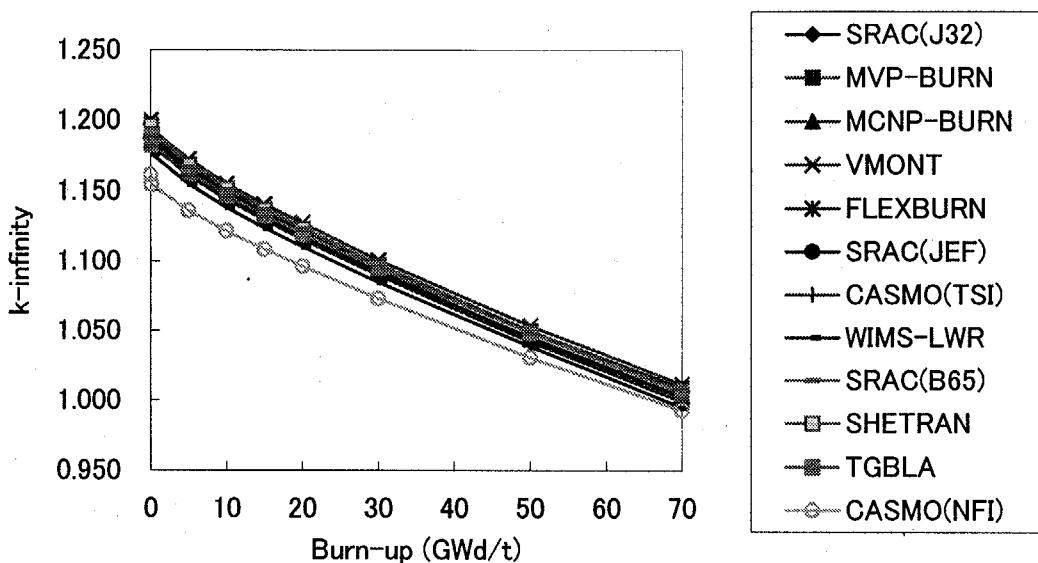


図 4.1.29 無限中性子増倍率の燃焼変化 (MOX 燃料)

これらの図表から、無限中性子増倍率に関して以下のことが言える。

- CASMO(NFI)の結果は、BOL での中性子増倍率を他の結果に比べて特に小さく評価している。このような傾向は、UO₂ 問題における CASMO(NFI)の結果や MOX 問題における CASMO(TSI: JEF-2.2 ベース)の結果には見られない。したがって、計算に誤りがなければ、L-ライブラリの高富化度プルトニウム燃料問題に対する特徴と考えられる。L-ライブラリは ENDF/B-IV をベースに作成された炉定数であるが、プルトニウムやガドリニア同位体核種の共鳴自己遮蔽に関しては、JEF ベースのデータが使用されているため、必ずしも核データの差異によるものとは言えない。
- SRAC による 3 つの結果から、MOX 問題では、UO₂ 問題で見られた無限中性子増倍率の核データ依存性はほとんど見られない。ただし、SRAC(JEF-2.2)の結果は、JEF-2.2 ベースのライブラリを使用する CASMO(TSI)と WIMS-LWR の結果に比べて、中性子増倍率を大きく評価している。この傾向は UO₂ 問題でも見られる。
- SRAC(J32)と MVP-BURN による無限中性子増倍率は、BOLにおいて 0.42% Δ k/kk' の差異があり、SRACの方が大きめの値となっている。この差異は、UO₂ 問題での差異(0.15% Δ k/kk')に比べて拡大している。SRAC の計算では、高速群ライブラリと熱群ライブラリにおける水の散乱断面積の連続性を確保するために、Cut-off エネルギーを 2.38eV に設定している。このため、Pu-240 の 1.06eV 共鳴は超詳細群の扱いがされず、NR 近似に基づく自己遮蔽因子

のテーブル内挿で考慮される。このため、Pu-240 の共鳴吸収が過小評価され、プルトニウム富化度が大きい熱中性子炉の問題でこの効果が強調されたものと推定される。Pu-240 の数密度は燃焼とともに減少するため、SRAC と MVP-BURN との差異は燃焼によってそれほど拡大せず、燃焼期間中の最大差異は $0.52\% \Delta k/kk'$ である。

- MVP-BURN と MCNP-BURN の比較では、BOL での差異は $0.05\% \Delta k/kk'$ 以下であり、燃焼期間中も $0.2\% \Delta k/kk'$ 以内で比較的良く一致している。

MOX 問題では、特にプルトニウム核種に着目して断面積や反応度寄与を比較し、BOL での差異要因を明らかにする必要がある。

(2) 燃焼反応度損失

図 4.1.30 に各コードによる EOL での燃焼反応度損失を比較して示す。図 4.1.29 にも見られるように、CASMO(NFI)の結果は BOL での無限中性子増倍率が他コードに比べて小さいが、燃焼とともに他コードの結果に漸近している。このため、燃焼反応度損失は最も小さくなっている。燃焼反応度損失が小さくなる要因としては、転換比が高い、F.P. や M.A. の吸収寄与が小さいなどが考えられる。一般に、中性子増倍率の値が小さいと転換比は高くなるトレードオフの関係があるため、まずは中性子スペクトルや親核種の捕獲反応率などを他コードの結果と比較して、BOL での無限中性子増倍率の差異要因を明らかにすることが必要と考えられる。

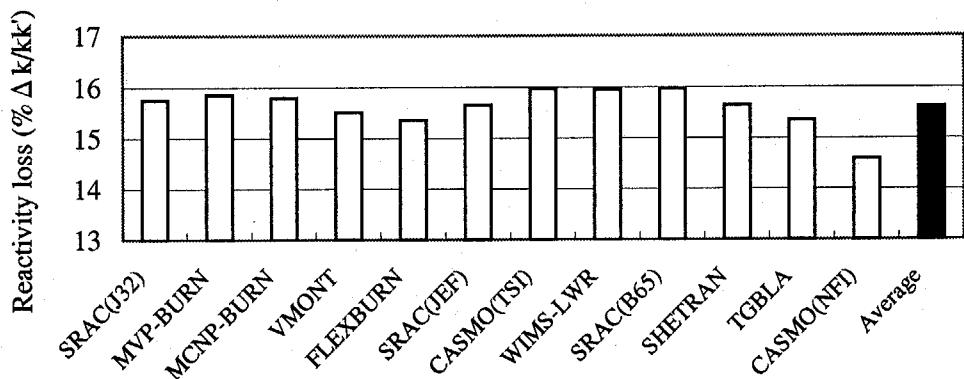


図 4.1.30 EOL(70GWd/t)における燃焼反応度損失の比較 (MOX 燃料)

(3) ボイド反応度

図 4.1.31 と図 4.1.32 に、それぞれ 40% ボイド反応度と 70% ボイド反応度の燃焼変化を示す。

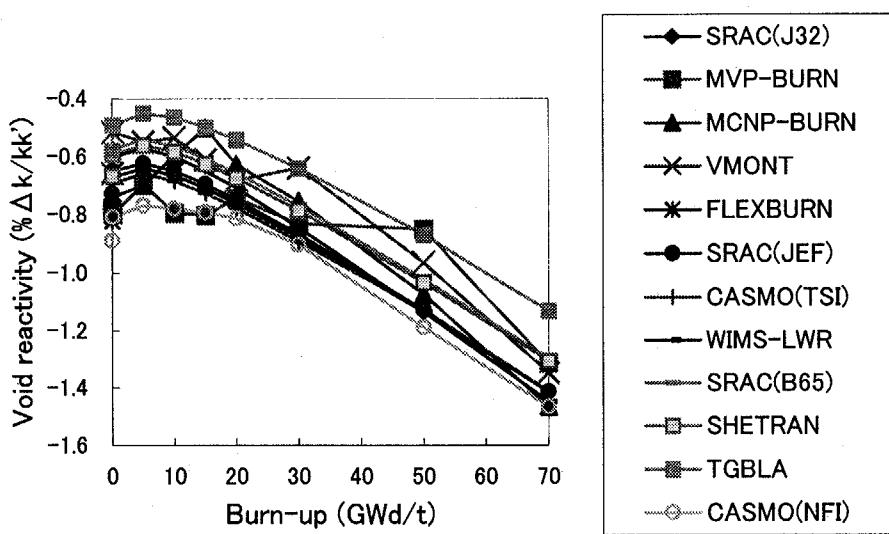


図 4.1.31 40%ボイド反応度の燃焼変化 (MOX 燃料)

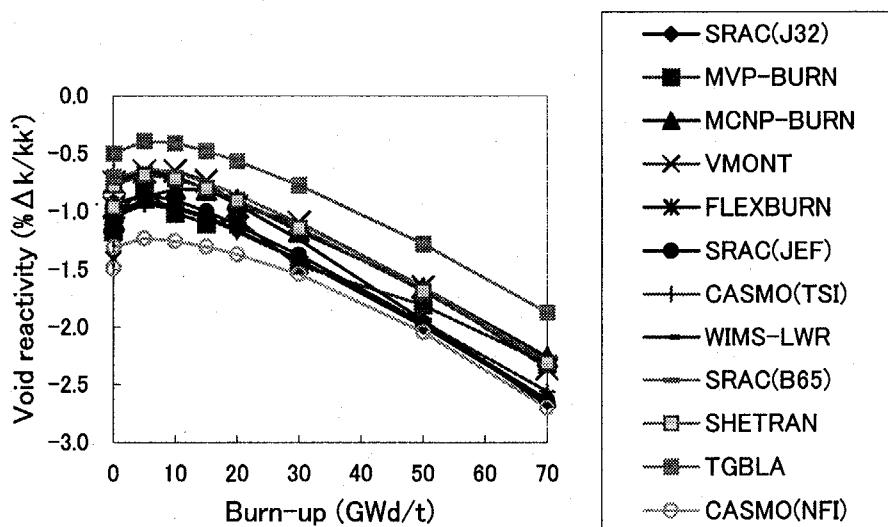


図 4.1.32 70%ボイド反応度の燃焼変化 (MOX 燃料)

40%ボイド反応度と70%ボイド反応度の絶対値は、UO₂問題の場合と比べて、それぞれ1/3および1/6程度まで小さくなっている。また、UO₂問題では0.1GWd/tからボイド反応度の絶対値が単調に大きくなるが、MOX問題では5GWd/t近傍から大きくなる。

図4.1.31に見られるように、ボイド反応度の絶対値が小さくなったことにより、モンテカ

ルロ法では統計誤差の寄与が大きくなり、ボイド反応度に対する相対的な計算精度は悪くなる。40%ボイド反応度では、モンテカルロコードによる結果はいずれもかろうじて決定論的手法コードのばらつきの範囲内にあるが、詳細な検討をするための参照解として利用できるとは考えられない。負の反応度が大きくなる70%ボイド条件では、モンテカルロ法の統計誤差によるゆらぎは小さくなっている。MVP-BURNのヒストリ数は30万であるが、MCNP-BURNはMOX問題では100万ヒストリの追跡を行っており、燃焼度に沿ったボイド反応度のゆらぎは小さい。

各コードによる40%ボイド反応度と70%ボイド反応度の全体的な傾向はほぼ同じであるため、差異が強調される70%ボイド条件でボイド反応度の差異要因を検討する方が良い。

各コードによるBOLとEOLでの70%ボイド反応度の平均値からの差異を図4.1.33に示す。

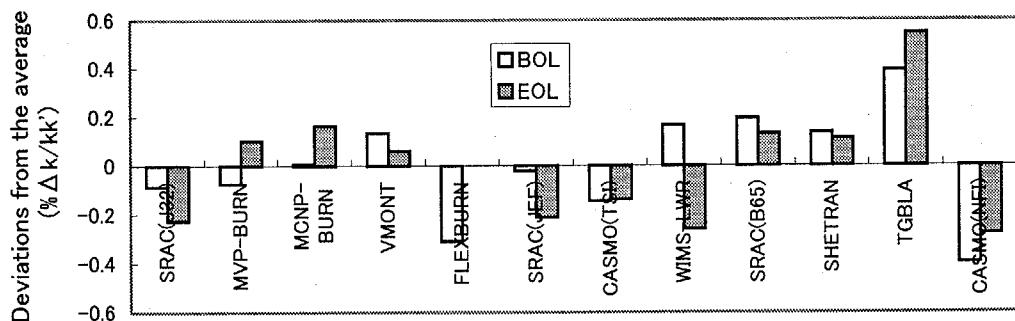


図 4.1.33 70%ボイド反応度の平均値からの差異 (MOX 燃料)

(正の値は負のボイド反応度が平均値に比べて浅いことを意味する。

EOL では FLEXBURN の評価が無いため 11 セットの比較である。)

燃焼期間を通じて、TGBLA が最大値(浅い反応度)を与え、CASMO(NFI)が最小値(深い反応度)を与えていている。CASMO(NFI)の結果は、燃焼度の増大とともに平均値との差異が減少する傾向にあるが、燃焼反応度損失の差異は拡大傾向にあるため、何らかの相殺の可能性も考えられる。ボイド反応度の差異は、BOL から既に大きいため、特にプルトニウムの同位体核種と Am-241 のボイド反応度寄与を BOL で検討する必要がある。なお、70%ボイド反応度に対する核データの違いによる影響は、SRAC の結果から EOL で最大 $0.36\Delta k/kk'$ 程度である。ENDF/B-VI(R5) は、JENDL-3.2 と JEF-2.2 に比べ、負の反応度の絶対値を小さく評価する傾向が見られる。

(4) ドップラー反応度

ドップラー反応度の燃焼変化を図 4.1.34 に示す。UO₂問題ではドップラー反応度の絶対値は燃焼度とともに大きくなり、 $-1.5\Delta k/kk'$ (BOL 平均)から $-2.8\Delta k/kk'$ (EOL 平均)の範囲で変化する。一方、MOX 問題ではドップラー反応度の値は、 $-1.8\Delta k/kk'$ (BOL 平均)から $-2.0\Delta k/kk'$ (EOL 平均)の範囲にあり、燃焼度にあまり依存しない。このため同図ではばらつきが拡大

されて表示されている。ドップラー反応度の要求精度が $0.2\% \Delta k/kk'$ 以下であるならば、いずれのモンテカルロ計算も更に統計精度を上げる必要がある。モンテカルロ法については、2%程度の反応度でも高い精度で計算できる摂動計算手法の開発が期待される。

ライブラリーが異なる 2 つの CASMO の結果は、中性子増倍率の燃焼変化は異なるが、ドップラー反応度の結果は良く一致している。これらはいずれも燃焼初期での反応度の絶対値を他の結果に比べて大きく評価している。なお、SRAC の結果からはドップラー反応度の核データ依存性はほとんど認められない。

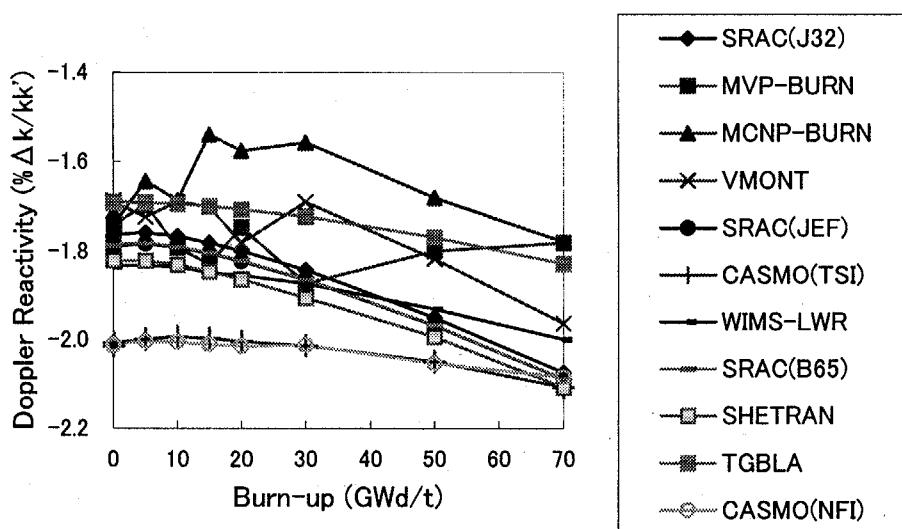


図 4.1.34 ドップラー反応度の燃焼変化 (MOX 燃料)

(5) 降温反応度

図 4.1.35 に降温反応度の燃焼変化を示す。また、BOL と EOL での各コードによる計算値の平均値からの差異を図 4.1.36 に示す。コード間の最大反応度差異は、BOL と EOL でそれぞれ $1.27\% \Delta k/kk'$ と $1.05\% \Delta k/kk'$ である。BOL では、 UO_2 問題の場合と同様に FLEXBURN が大きな反応度を与えており、これは、FLEXBURN の冷温条件における中性子増倍率の値が特に大きいためである。 UO_2 問題の EOL で差異が見られた SHETTRAN の結果は、MOX 問題では他コードの結果と良く一致している。一方、 UO_2 問題では他コードの結果と良く一致していた TGBLA の結果は、反応度を他に比べて $0.5\% \Delta k/kk'$ 以上小さく評価している。核データによる差異の影響は、SRAC の結果から燃焼期間を通じて $0.15\% \Delta k/kk'$ 程度である。

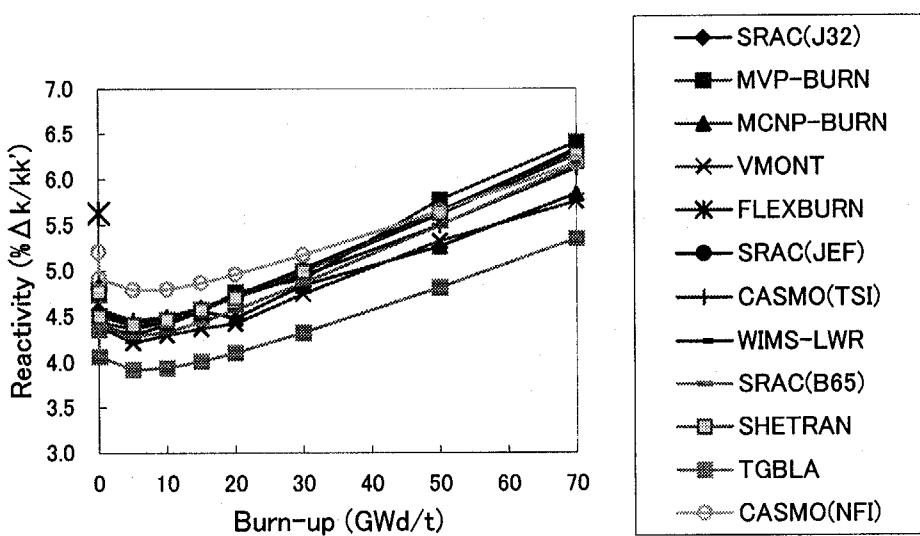
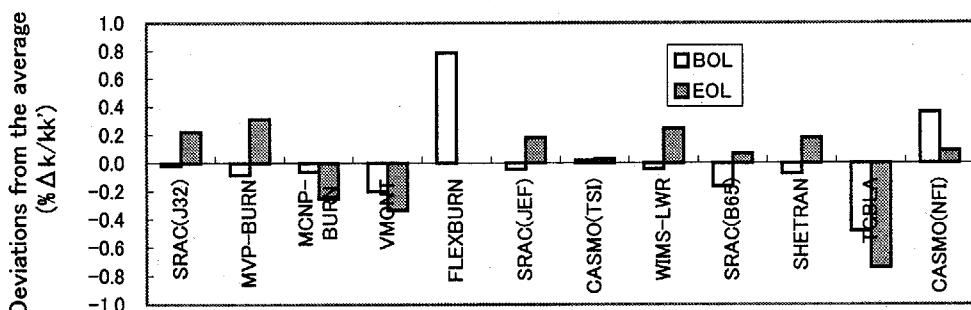


図 4.1.35 降温反応度の燃焼変化 (MOX 燃料)

図 4.1.36 降温反応度の平均値からの差異 (MOX 燃料)
(FLEXBURN の結果は BOL のみ)

(6) 燃料組成

MOX 問題で注目されるのは、プルトニウム同位体核種やその他の超ウラン元素の燃焼による数密度変化である。本ベンチマーク問題では、プルトニウム富化度と取り出し燃焼度が大きいことにより、従来の燃焼ベンチマーク問題に比べて、これら核種の実効断面積の差異や燃焼チェーンモデルの差異などの影響がより顕著に数密度の差異となって現れる。特に、Pu-240 や Pu-242 のように、数 eV 近傍に大きな共鳴を持つ核種の断面積精度が問われ、高速炉体系には無い解析上の難しさがある。

1) 燃焼核種の反応率割合

SRAC(J32)の計算結果を基にして得られた EOL(高温運転条件)における主要な重核種と F.P. 核種の反応率割合を表 4.1.12 に示す。

表 4.1.12 EOL(70GWd/t)における燃焼核種の吸収反応率と生成反応率 (SRAC(J32)による)

重核種			核分裂生成核種(F.P.)					
核種	吸収(%)	生成(%)	核種	吸収(%)	核種	吸収(%)	核種	吸収(%)
U234	4.21E-02	5.88E-03	Rh103	8.66E-01	PSD*	1.60E-01	Zr96	2.04E-02
U235	3.11E-01	5.45E-01	Cs133	7.50E-01	Sm150	8.60E-02	Xe132	2.01E-02
U236	3.75E-02	5.12E-03	Xe131	6.52E-01	Mo97	6.76E-02	Ce141	1.92E-02
U237	9.47E-04	1.74E-04	Ag109	5.77E-01	Gd157	6.05E-02	Gd155	1.74E-02
U238	2.04E+01	7.92E+00	Sm149	5.54E-01	Pr141	5.78E-02	Nd148	1.67E-02
Np237	8.86E-02	1.11E-02	Tc99	5.32E-01	Pm148m	5.13E-02	Cd111	1.30E-02
Np239	2.07E-02	3.96E-03	Sm152	4.70E-01	Cs134	4.46E-02	In115	1.21E-02
Pu238	1.02E+00	8.08E-01	Xe135	4.02E-01	Zr93	4.17E-02	Ru103	1.01E-02
Pu239	3.20E+01	5.92E+01	Pm147	4.01E-01	Pd106	3.86E-02	Nd147	5.78E-03
Pu240	1.49E+01	2.31E+00	Eu153	3.94E-01	La139	3.55E-02	Gd158	4.94E-03
Pu241	1.20E+01	2.67E+01	Sm151	3.56E-01	Rh105	3.54E-02	Gd154	4.67E-03
Pu242	2.71E+00	5.61E-01	Nd143	3.05E-01	Ru104	3.24E-02	Eu156	4.01E-03
Am241	2.50E+00	2.95E-01	Ru101	2.97E-01	Cd113	3.17E-02	Pr143	3.43E-03
Am242g	3.37E-03	5.92E-03	Pd105	2.96E-01	Gd156	3.03E-02	Pm148g	2.53E-03
Am242m	2.86E-01	7.85E-01	Nd145	2.45E-01	I127	2.91E-02	Pm149	1.70E-03
Am243	1.75E+00	1.43E-01	Pd108	2.40E-01	Mo98	2.68E-02	Xe133	1.23E-03
Cm242	5.23E-02	5.46E-02	Pd107	2.33E-01	Sm148	2.56E-02	I131	9.27E-04
Cm243	2.69E-02	8.10E-02	Mo95	2.25E-01	Ru102	2.43E-02	Xe136	6.37E-04
Cm244	4.67E-01	1.39E-01	Eu155	2.20E-01	I129	2.38E-02	Pm151	5.35E-04
Cm245	1.61E-01	4.93E-01	Eu144	2.01E-01	Cd110	2.29E-02	Mo99	3.47E-04
Cm246	1.03E-03	7.55E-04	Cs135	1.99E-01	KR3	2.21E-02	Ru105	5.34E-06
Total (H.M)	8.87E+01	1.00E+02	Sm147	1.63E-01	Mo100	2.04E-02	I135	1.75E-08
							Total (F.P.)	9.71E+00

註 ・体系全体の吸収反応率及び生成反応率をそれぞれ 100%に規格化

・F.P.は吸収反応率が大きい順に配置、PSD は擬似 F.P.

・太字はベンチマーク問題における数密度出力要請核種

EOL における重核種の吸収割合はセル全体の 89%で UO₂燃料の場合に比べて 6%程度増大している。その内訳は、U(20.76%)、Np(0.11%)、Pu(62.6%)、Am(4.6%)、Cm(0.66%)である。また、生成反応率の内訳は U(8.48%)、Np(0.02%)、Pu(89.51%)、Am(1.28%)、Cm(0.71%)である。F.P. 核種の吸収割合は 9.7%であり、ベンチマーク問題で核種組成の出力が要求されている F.P.核種は F.P.全体の吸収割合の約半分である。UO₂ 燃料の場合と比べて、スペクトルが硬くなっているため、F.P.核種の吸収割合の順位が変わっている。

2) 燃料核種組成の比較

UO₂問題の場合と同様に EOL における燃焼核種の数密度のばらつきを表 4.1.13 に比較する。

表 4.1.13 EOL(70GWd/t)における燃焼核種の数密度評価値[10^{24} 個/cm³]のばらつき

核種	データ数	平均値	最大値	最小値	最大-最小	相対標準偏差(%)	最大差異(%)
U235	12	6.962E-06	7.231E-06	6.801E-06	4.305E-07	1.91	6.18
U236	12	1.577E-06	1.730E-06	1.468E-06	2.624E-07	<5.34>	<16.64>
U238	12	6.081E-03	6.088E-03	6.064E-03	2.362E-05	0.10	<0.39>
Np237	12	1.596E-06	2.456E-06	2.372E-07	2.219E-06	<31.79>	<139.01>
Pu238	12	3.760E-05	4.327E-05	1.856E-05	2.471E-05	<16.67>	<65.71>
Pu239	12	4.422E-04	4.479E-04	4.272E-04	2.069E-05	1.41	4.68
Pu240	12	2.955E-04	3.010E-04	2.893E-04	1.173E-05	1.21	3.97
Pu241	12	1.415E-04	1.459E-04	1.381E-04	7.795E-06	1.54	5.51
Pu242	12	8.740E-05	9.645E-05	8.253E-05	1.392E-05	4.18	15.93
Am241	12	2.985E-05	3.138E-05	2.682E-05	4.555E-06	4.15	15.26
Am242m	12	1.089E-06	1.487E-06	8.468E-07	6.402E-07	<14.09>	<58.82>
Am243	12	2.148E-05	2.550E-05	1.827E-05	7.230E-06	<7.63>	<33.66>
Cm242	11	3.496E-06	4.293E-06	3.289E-06	1.004E-06	8.25	28.71
Cm243	9	2.218E-07	2.392E-07	1.948E-07	4.444E-08	<6.04>	<20.04>
Cm244	11	1.182E-05	1.371E-05	9.646E-06	4.065E-06	<10.54>	<34.38>
Cm245	9	1.889E-06	2.468E-06	1.611E-06	8.567E-07	<13.73>	<45.35>
Cm246	5	8.955E-08	1.008E-07	8.140E-08	1.943E-08	<9.37>	<21.70>
Mo95	7	2.274E-05	2.396E-05	2.088E-05	3.073E-06	<5.38>	<13.52>
Tc99	11	2.918E-05	3.063E-05	2.771E-05	2.915E-06	<2.72>	<9.99>
Rh103	12	2.799E-05	2.888E-05	2.444E-05	4.439E-06	4.18	15.86
Cs133	12	3.078E-05	3.180E-05	2.902E-05	2.779E-06	<2.79>	<9.03>
Sm147	9	2.361E-06	2.521E-06	2.217E-06	3.037E-07	5.32	12.87
Sm149	12	3.973E-07	4.779E-07	3.616E-07	1.163E-07	<7.70>	<29.27>
Sm150	12	6.929E-06	7.348E-06	6.542E-06	8.065E-07	<4.19>	<11.64>
Sm152	12	3.031E-06	3.742E-06	2.556E-06	1.186E-06	12.28	39.14
Nd143	11	2.273E-05	3.030E-05	2.076E-05	9.537E-06	<11.24>	<41.95>
Nd145	11	1.500E-05	1.562E-05	1.395E-05	1.668E-06	<3.13>	<11.12>
Eu153	12	3.607E-06	3.821E-06	3.300E-06	5.205E-07	4.44	14.43
Gd155	10	4.420E-08	8.036E-08	2.813E-08	5.223E-08	<42.82>	<118.17>

註 *最大差異(%) = (最大-最小)/平均*100

太字は、相対標準偏差が 5%を超えるか、最大差異が 20%を超えるもの

数密度の値は全てセル平均値

< > は UO₂問題に比べて相対標準偏差または最大差異が拡大したもの

表 4.1.13 では、相対標準偏差が 5%を超えるか、最大差異が 20%を超えるものを太字で示してある。また、記号<>を付したものは、UO₂問題に比べて相対標準偏差または最大差異が拡大したものである。UO₂問題に比べて EOL でのばらつきが特に大きくなった重核種は、Np-237、Pu-238、Am および Cm 同位体核種である。F.P.では Nd-143 の差異が大きく拡大しているが、これは後で示すように特定のコードによるものである。表 4.1.13 に示した 29 核種に対する数密度の燃焼変化を図 4.1.37(1)～図 4.1.37(29)に示す。

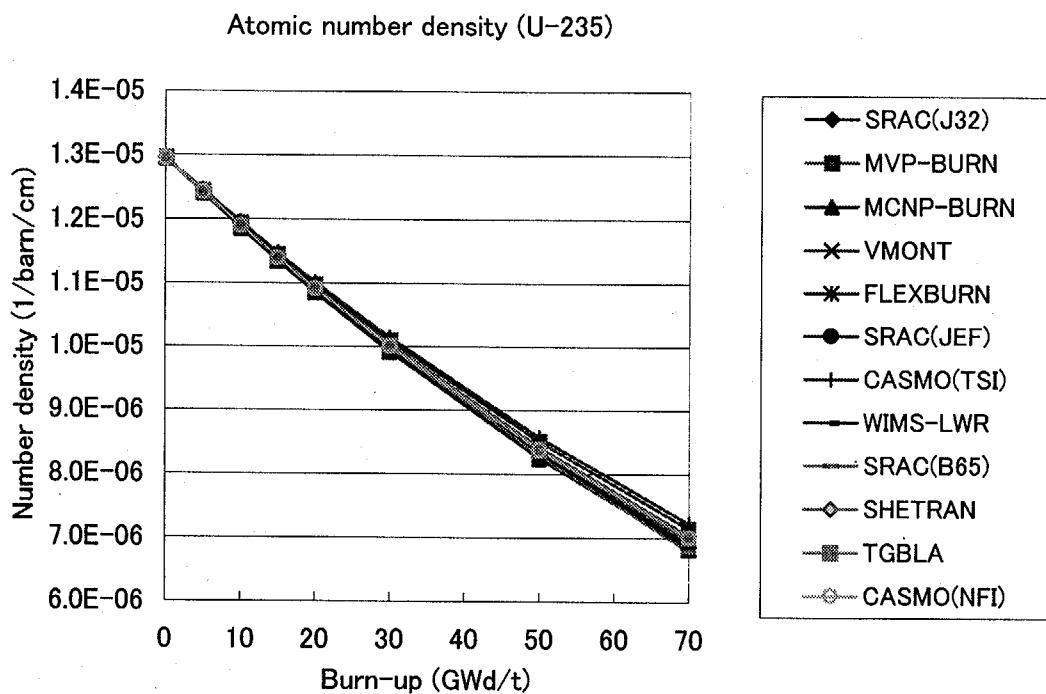


図 4.1.37(1) U-235 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

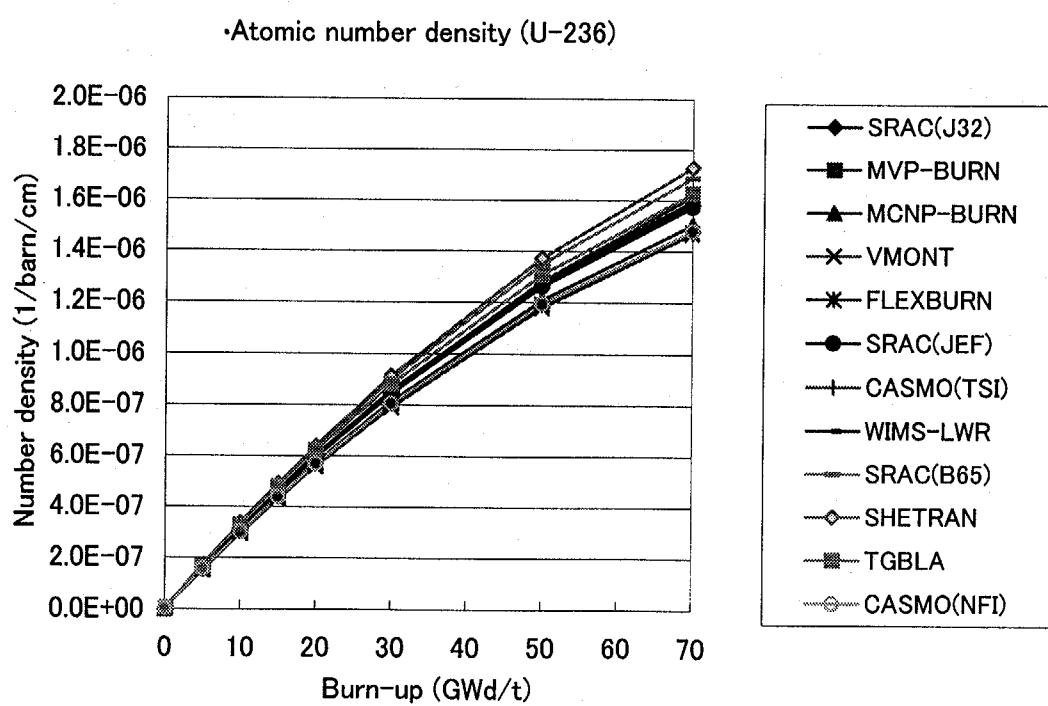


図 4.1.37(2) U-236 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

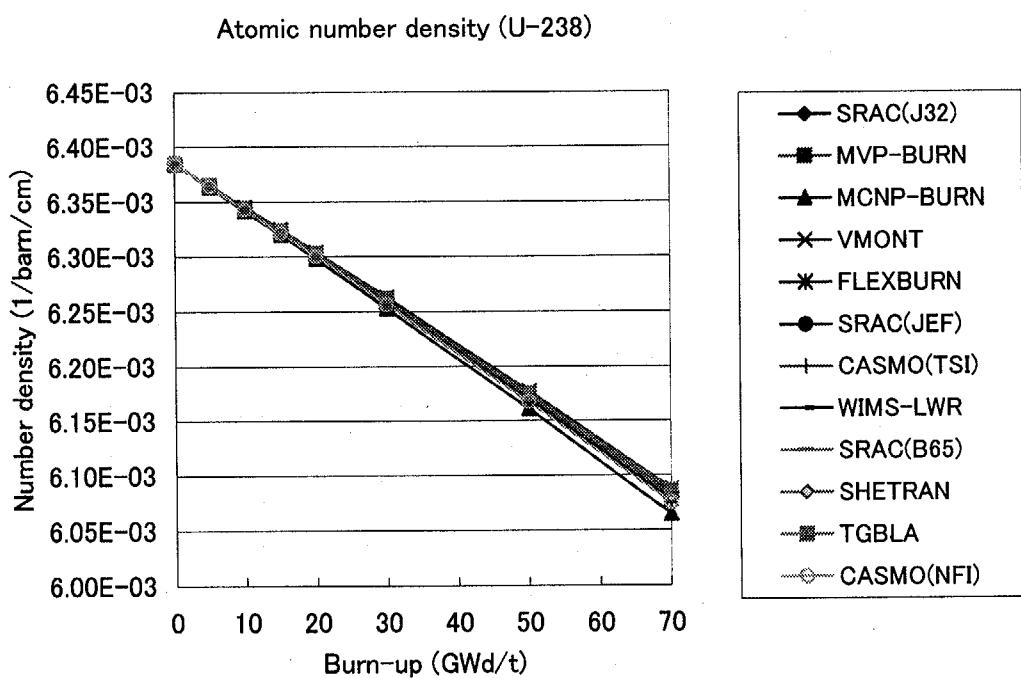


図 4.1.37 (3) U-238 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

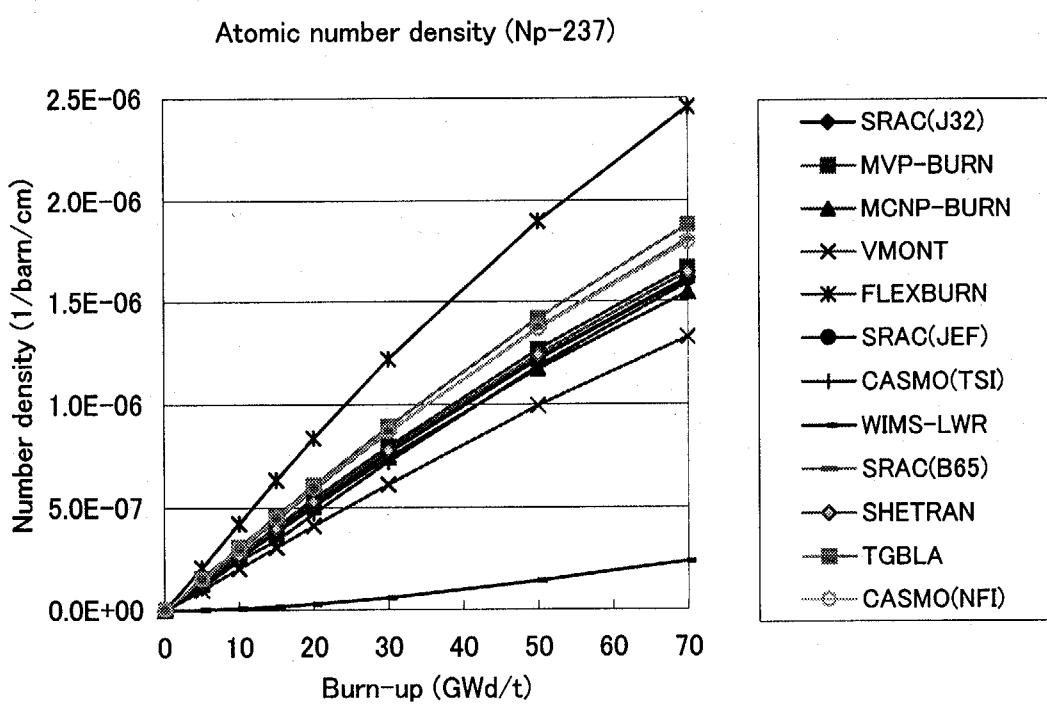


図 4.1.37 (4) Np-237 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

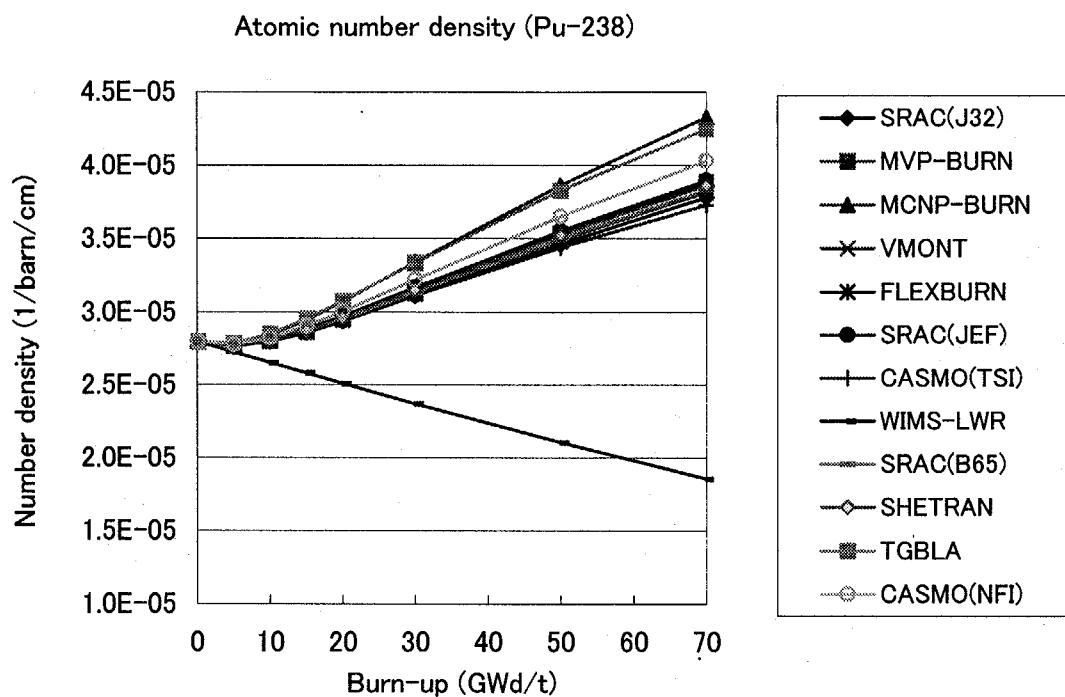


図 4.1.37(5) Pu-238 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

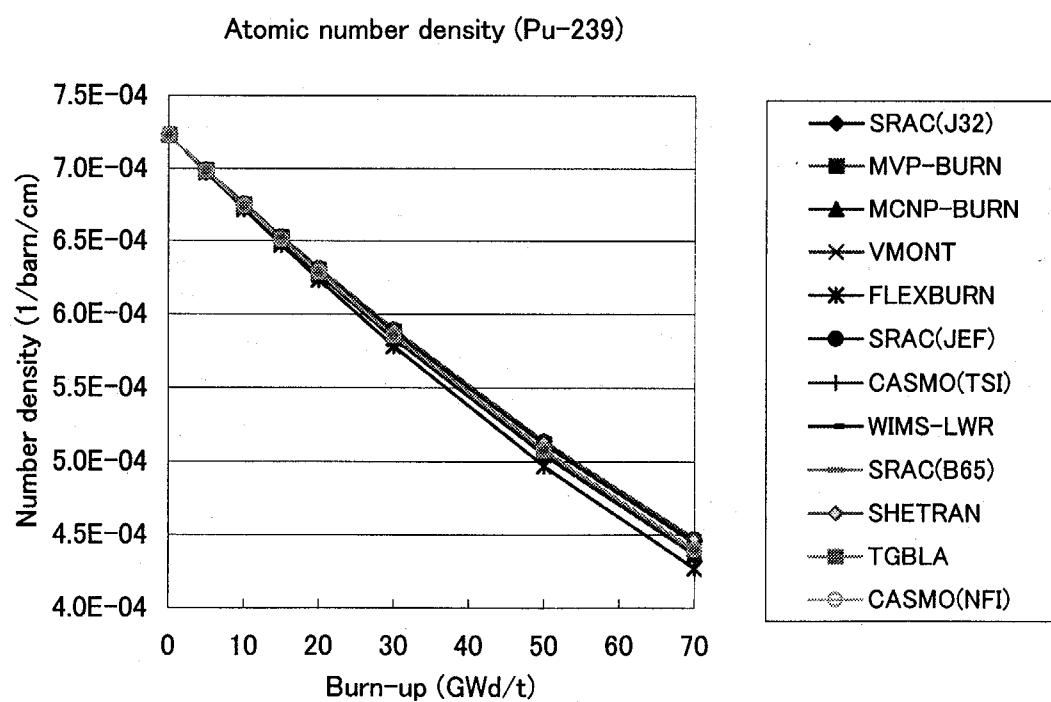


図 4.1.37 (6) Pu-239 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

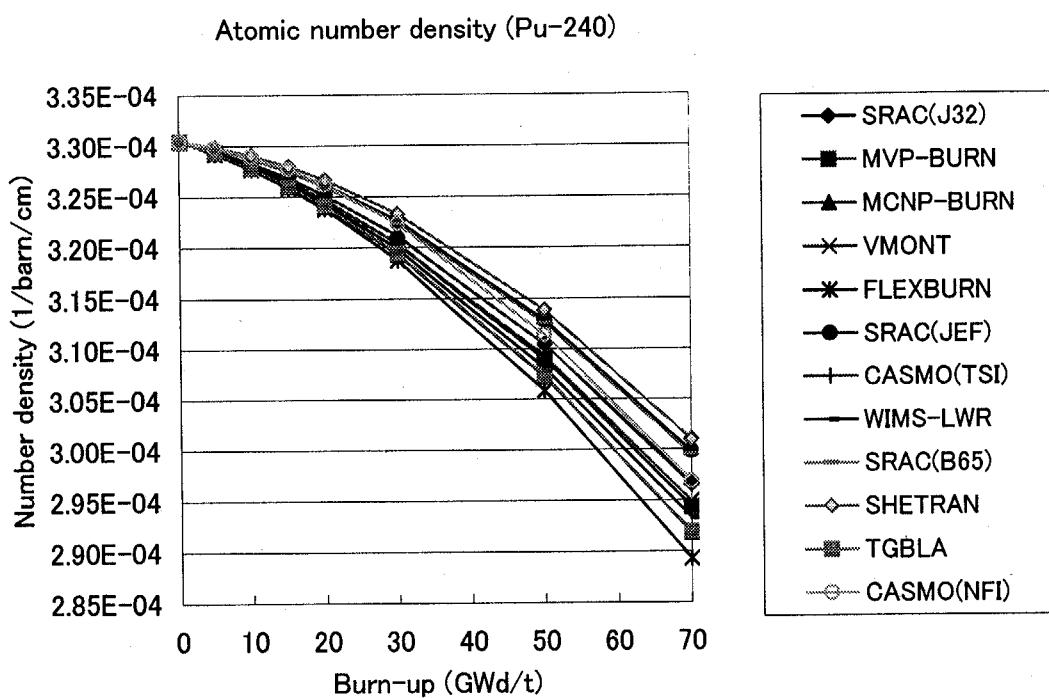


図 4.1.37 (7) Pu-240 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

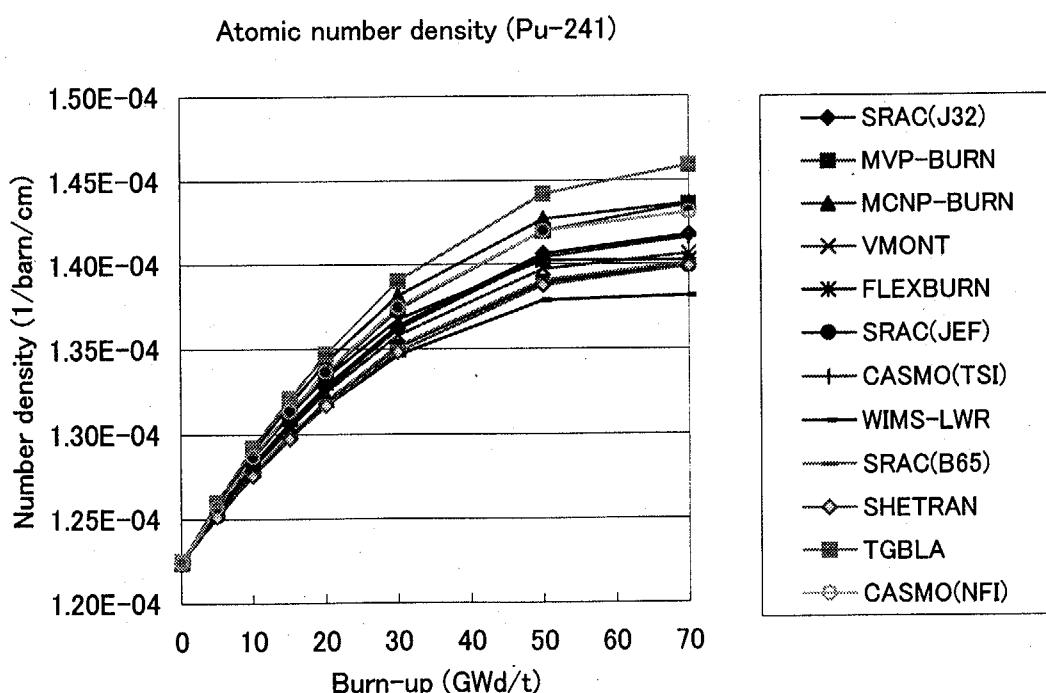


図 4.1.37 (8) Pu-241 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

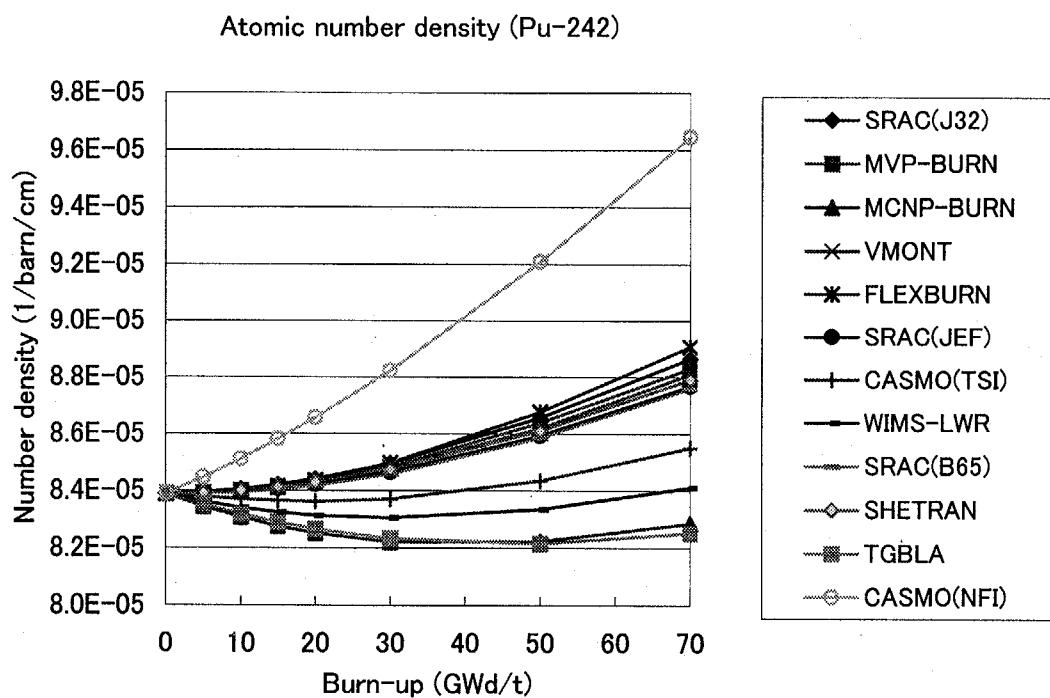


図 4.1.37(9) Pu-242 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

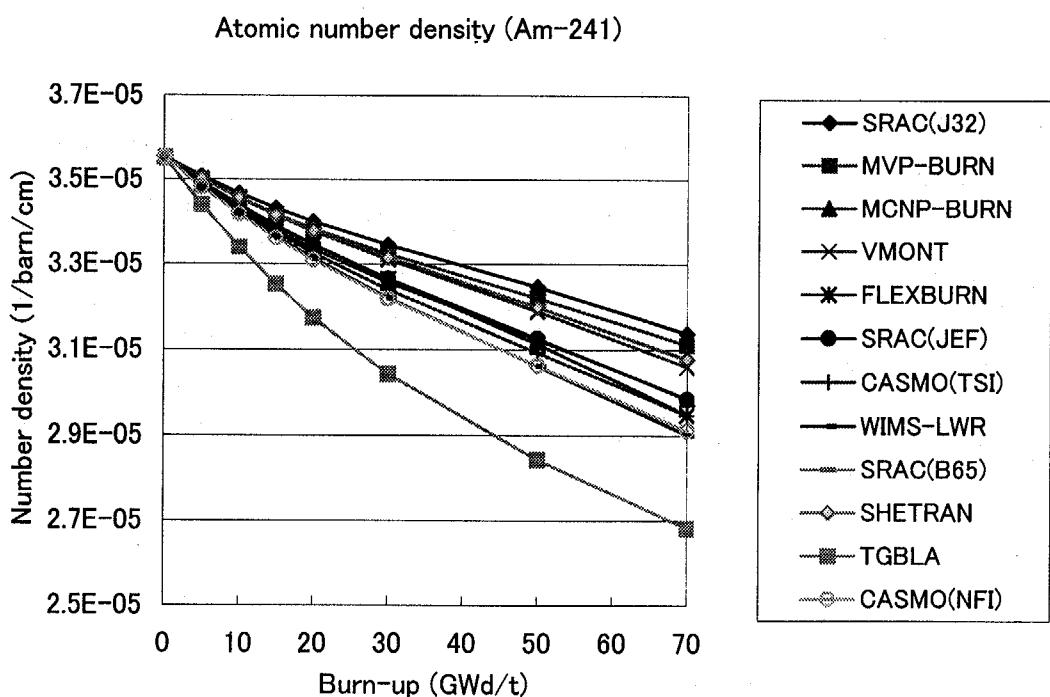


図 4.1.37(10) Am-241 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

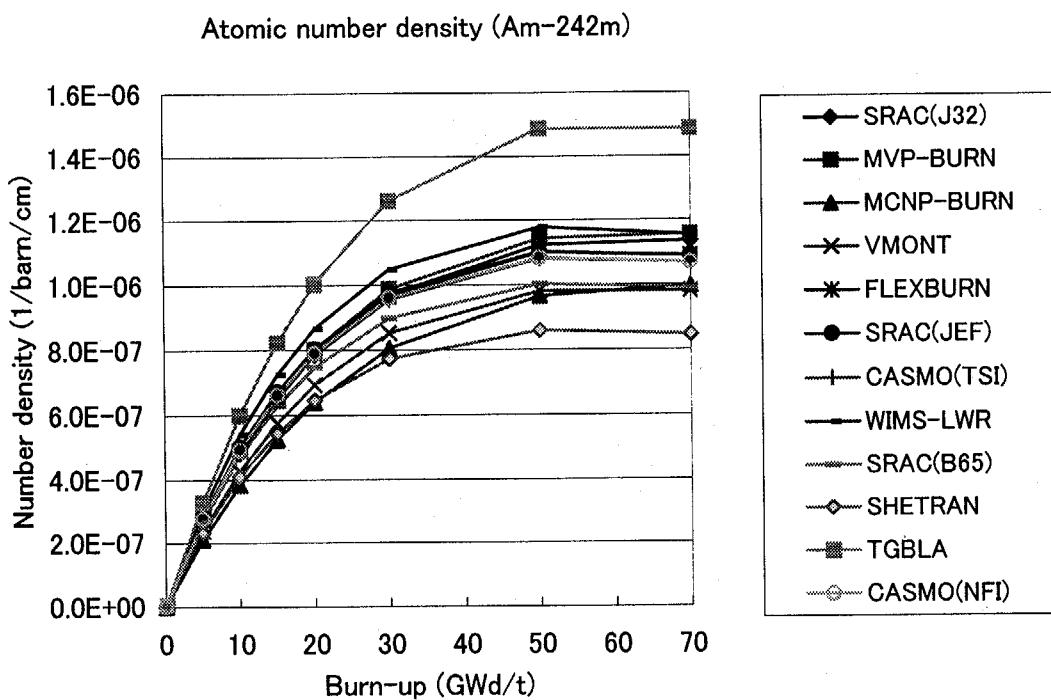


図 4.1.37(11) Am-242m 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

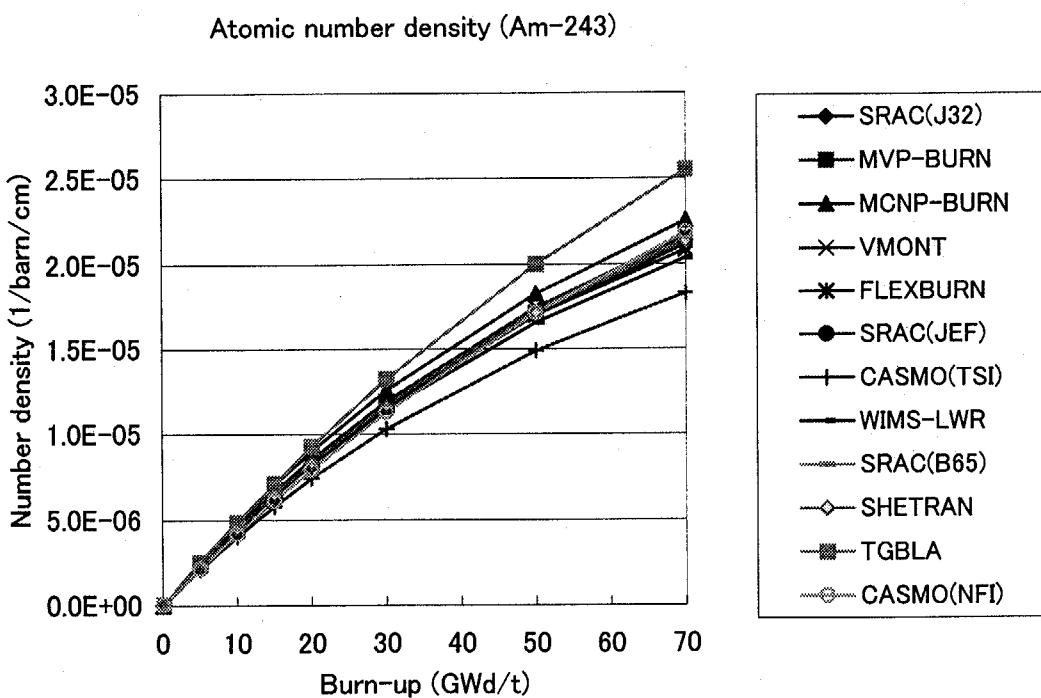


図 4.1.37(12) Am-243 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

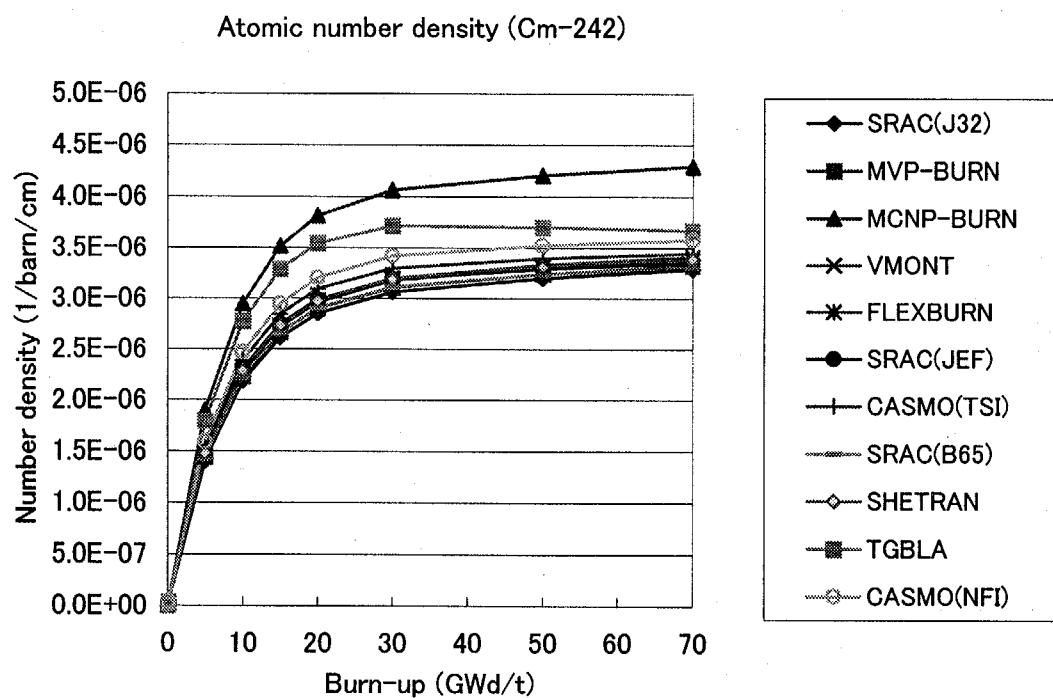


図 4.1.37(13) Cm-242 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

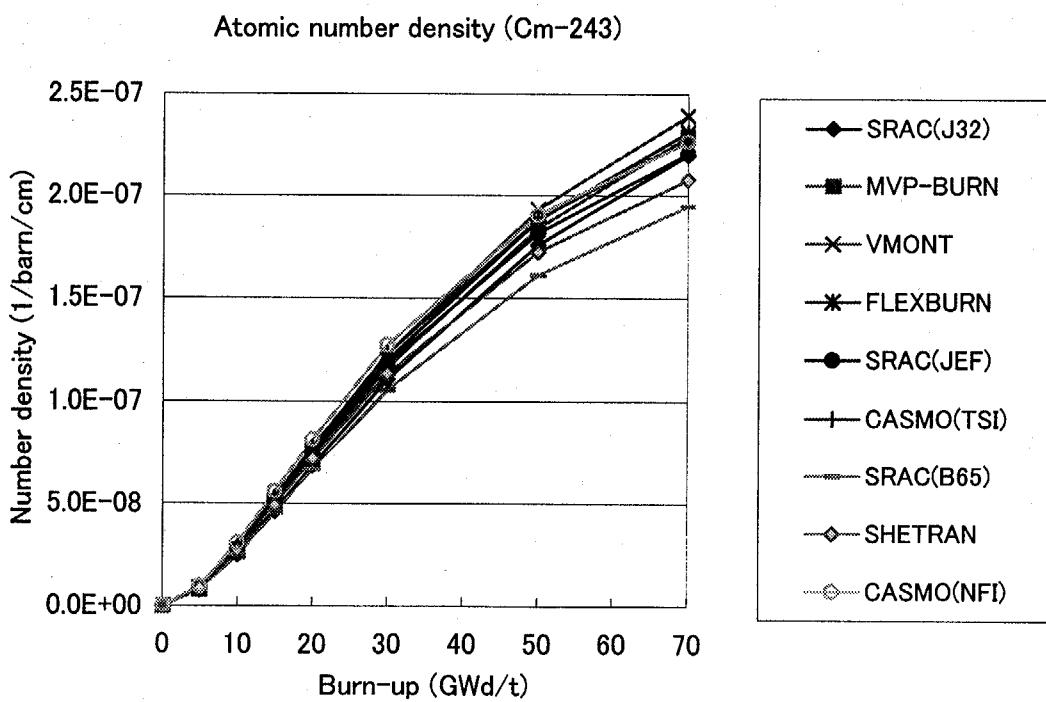


図 4.1.37(14) Cm-243 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

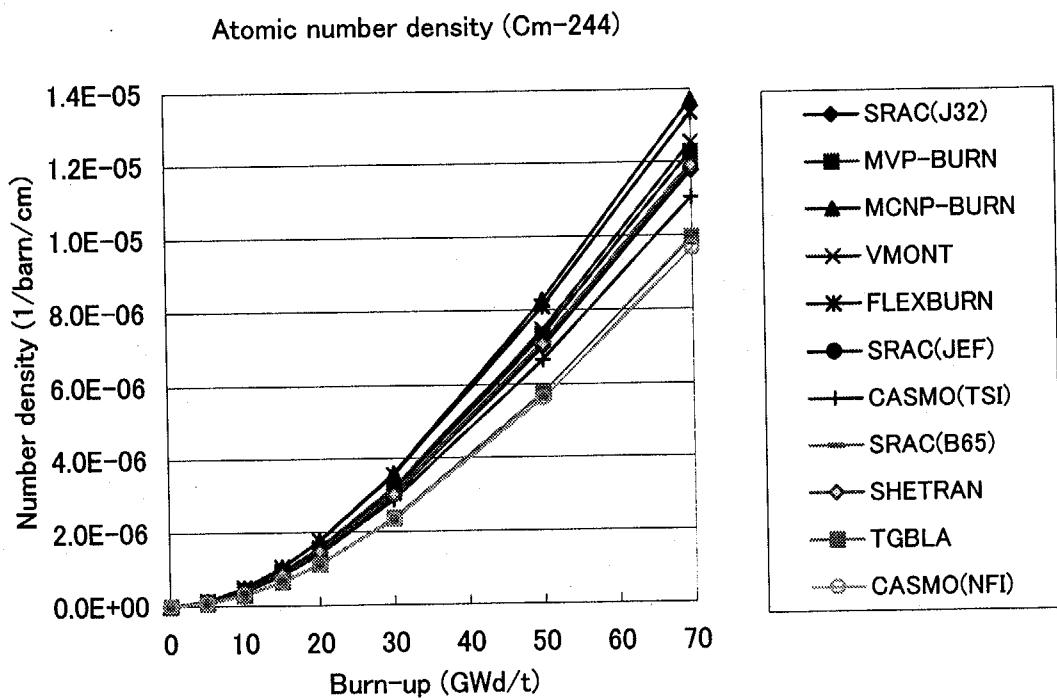


図 4.1.37 (15) Cm-244 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

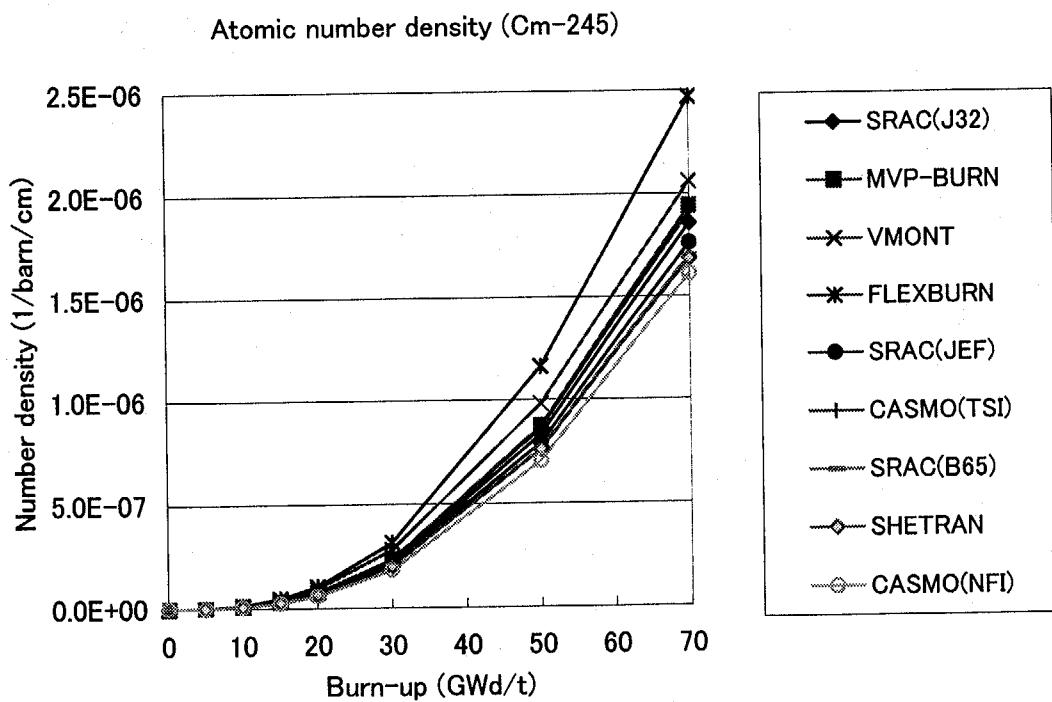


図 4.1.37 (16) Cm-245 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

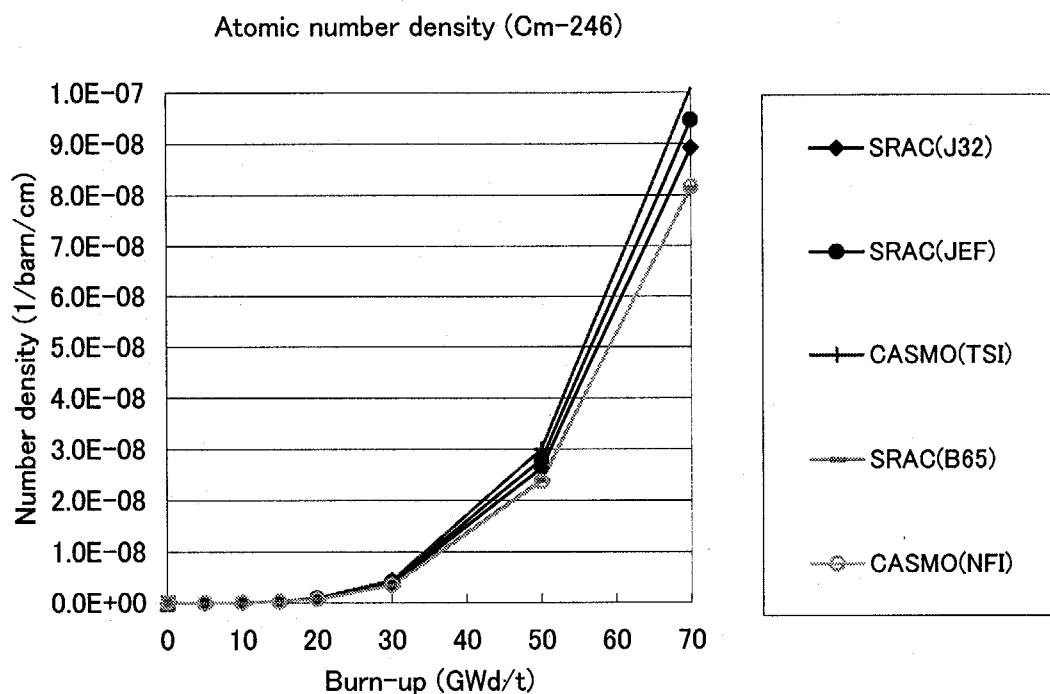


図 4.1.37(17) Cm-246 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

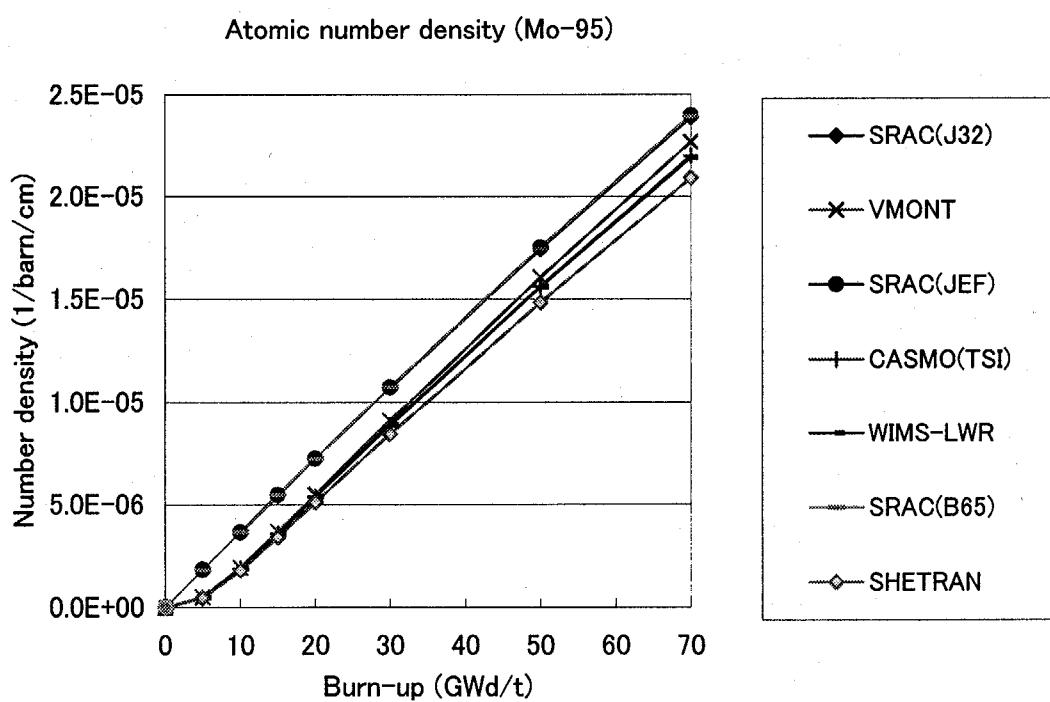


図 4.1.37(18) Mo-95 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

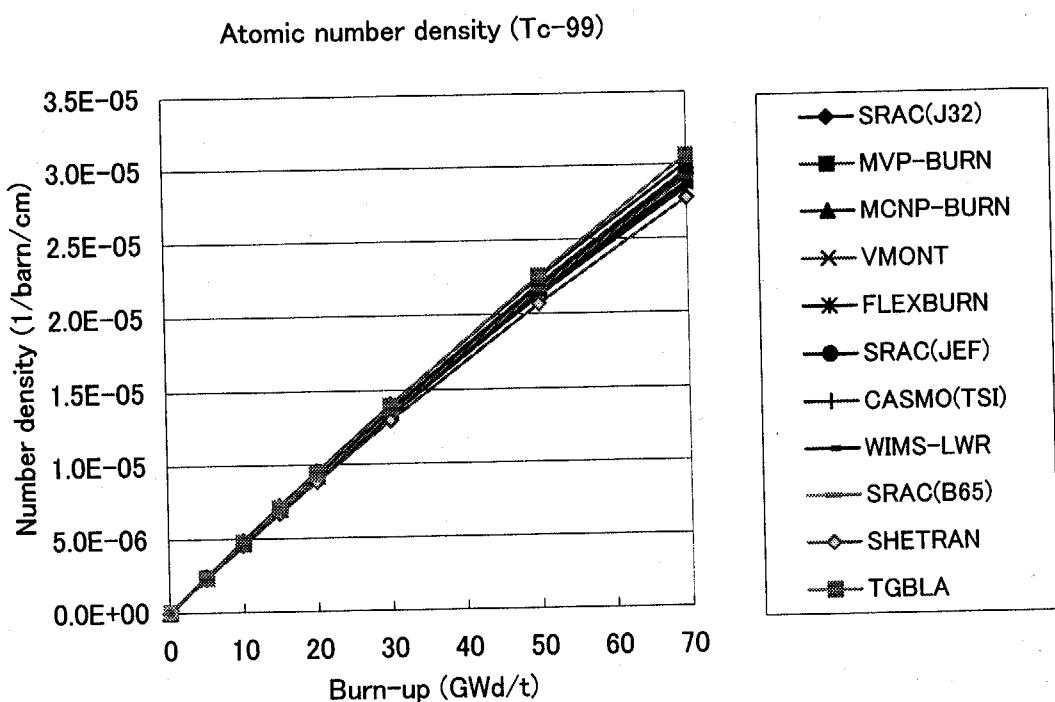


図 4.1.37 (19) Tc-99 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

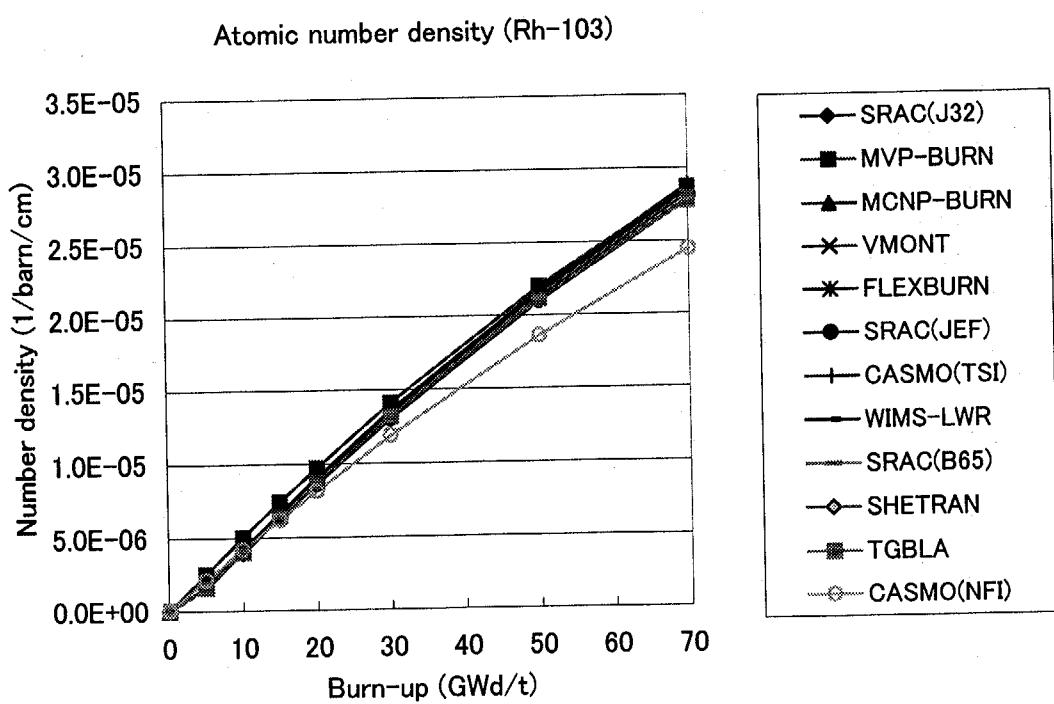


図 4.1.37 (20) Rh-103 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

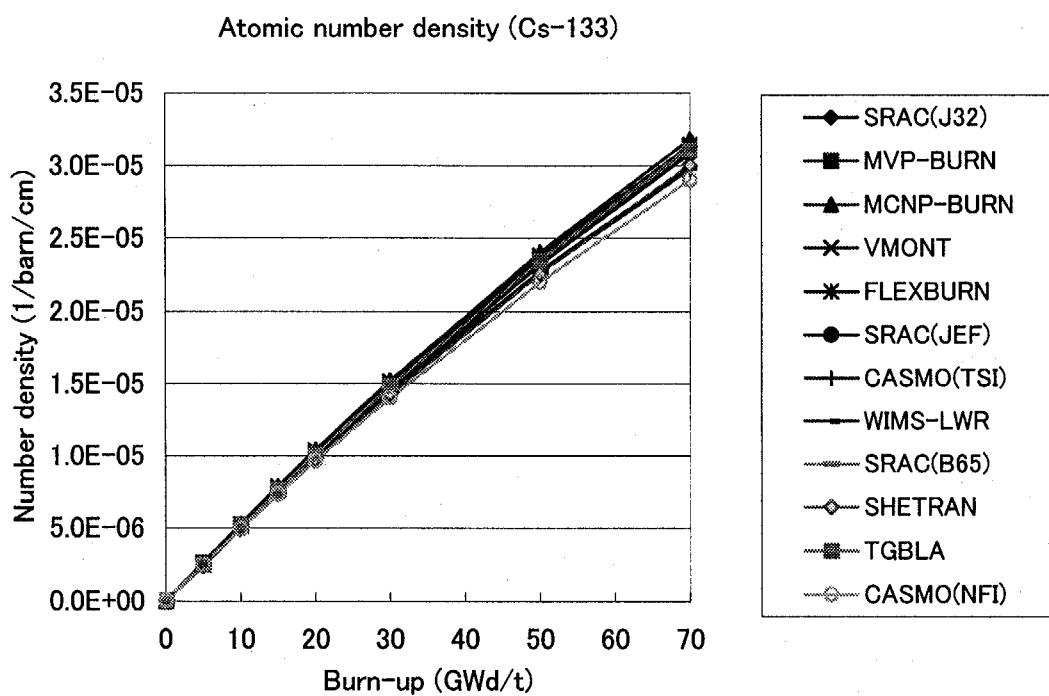


図 4.1.37(21) Cs-133 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

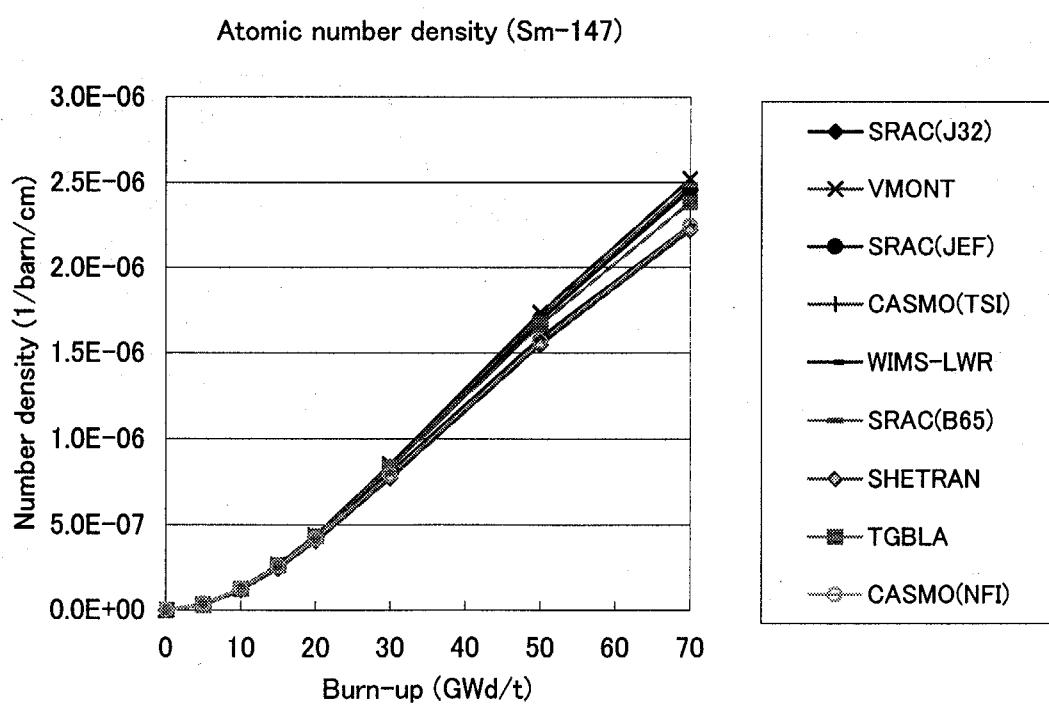


図 4.1.37(22) Sm-147 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

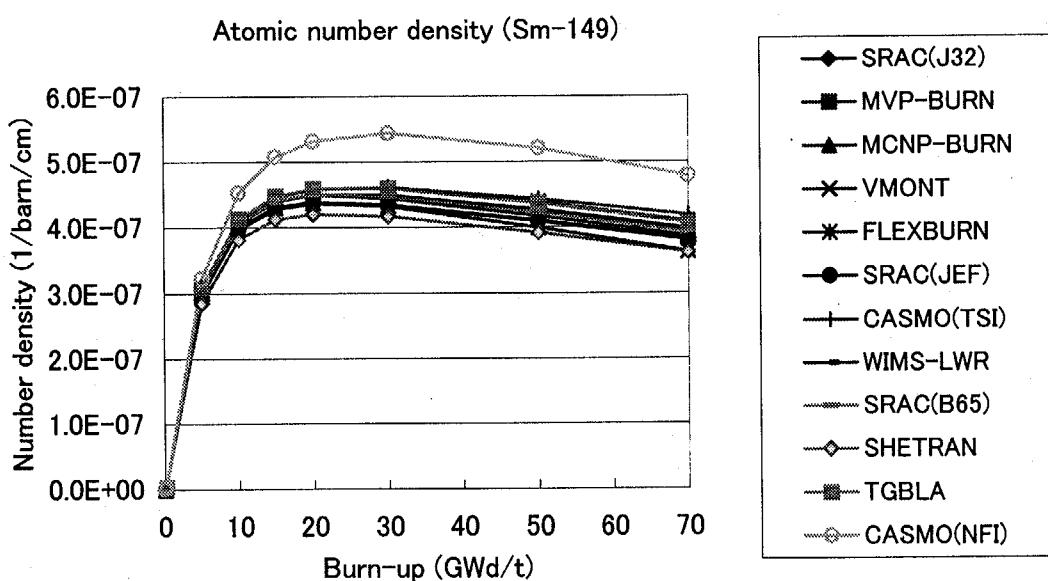


図 4.1.37(23) Sm-149 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

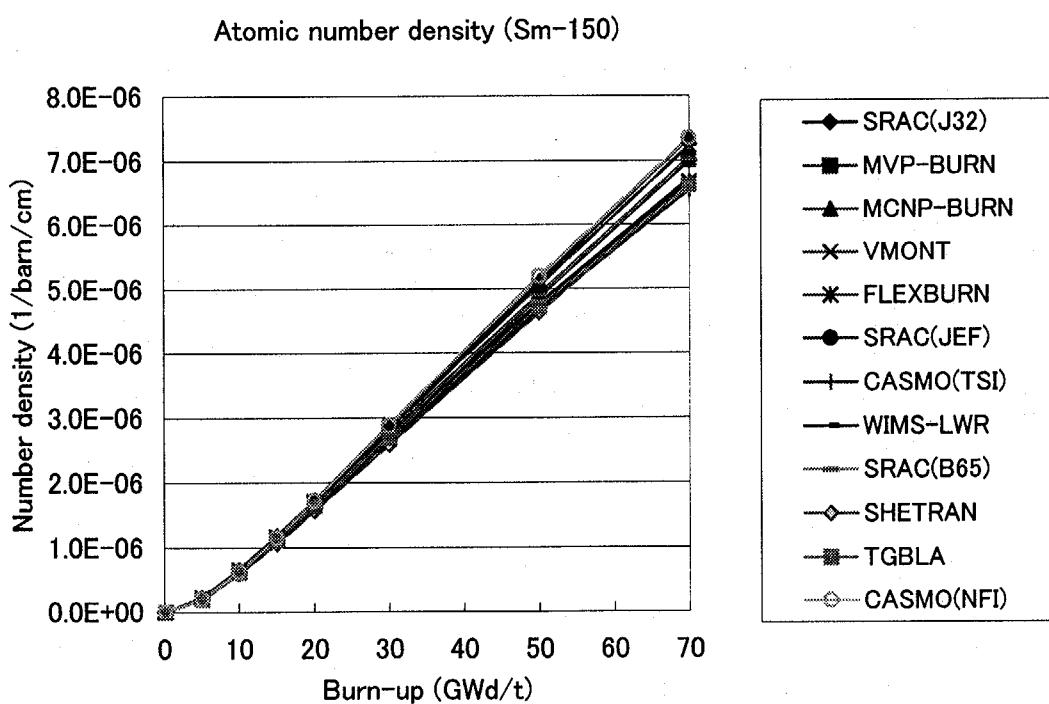


図 4.1.37(24) Sm-150 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

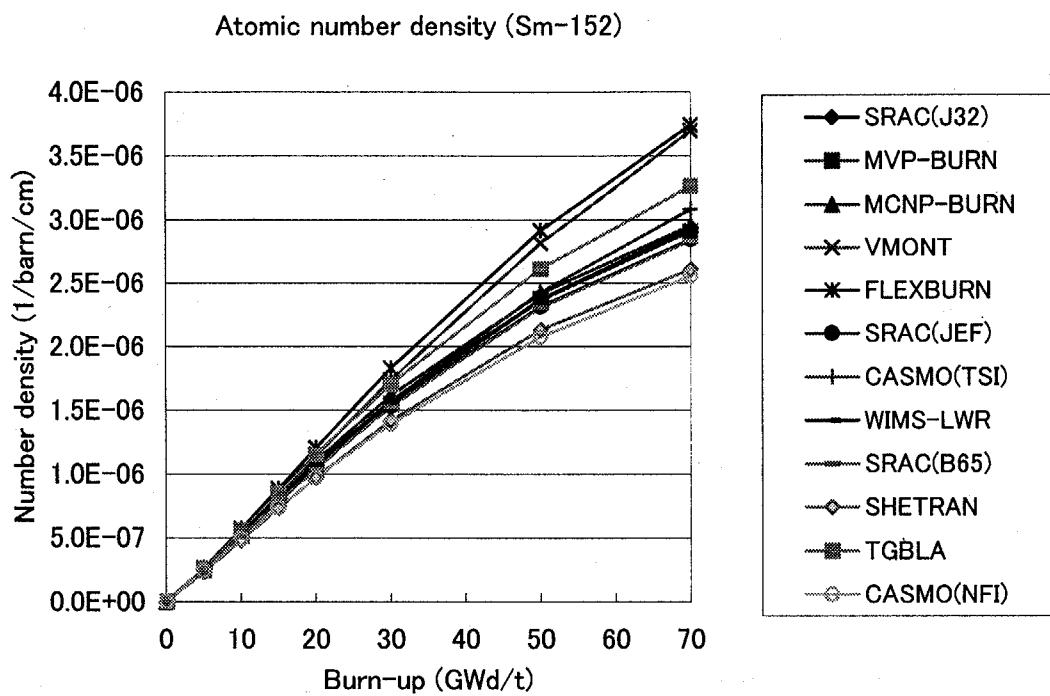


図 4.1.37 (25) Sm-152 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

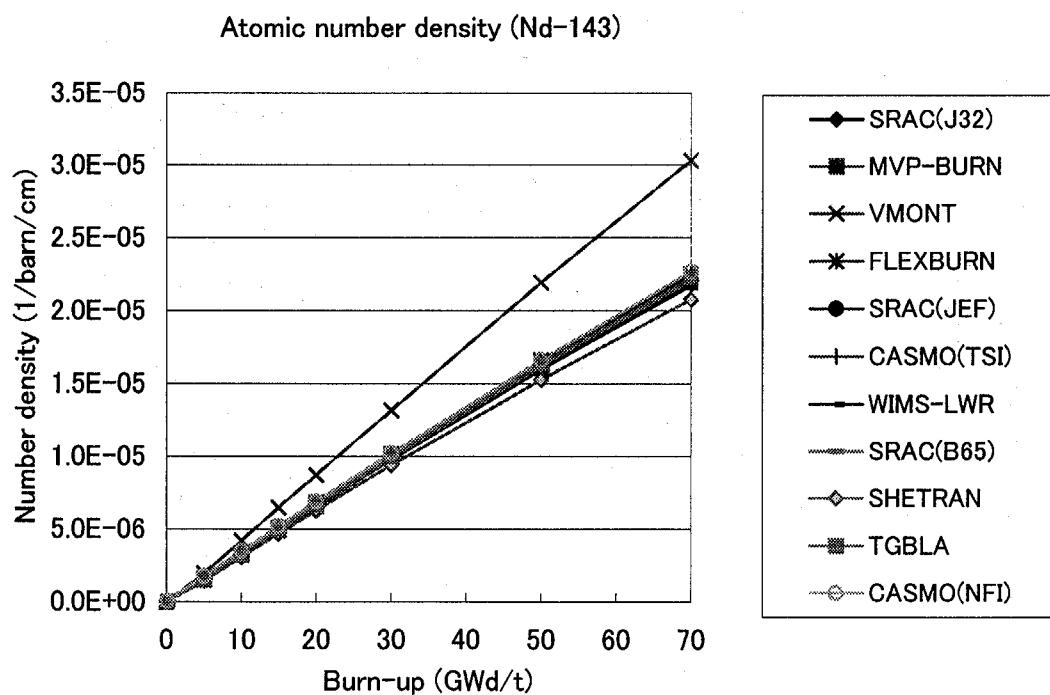


図 4.1.37 (26) Nd-143 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

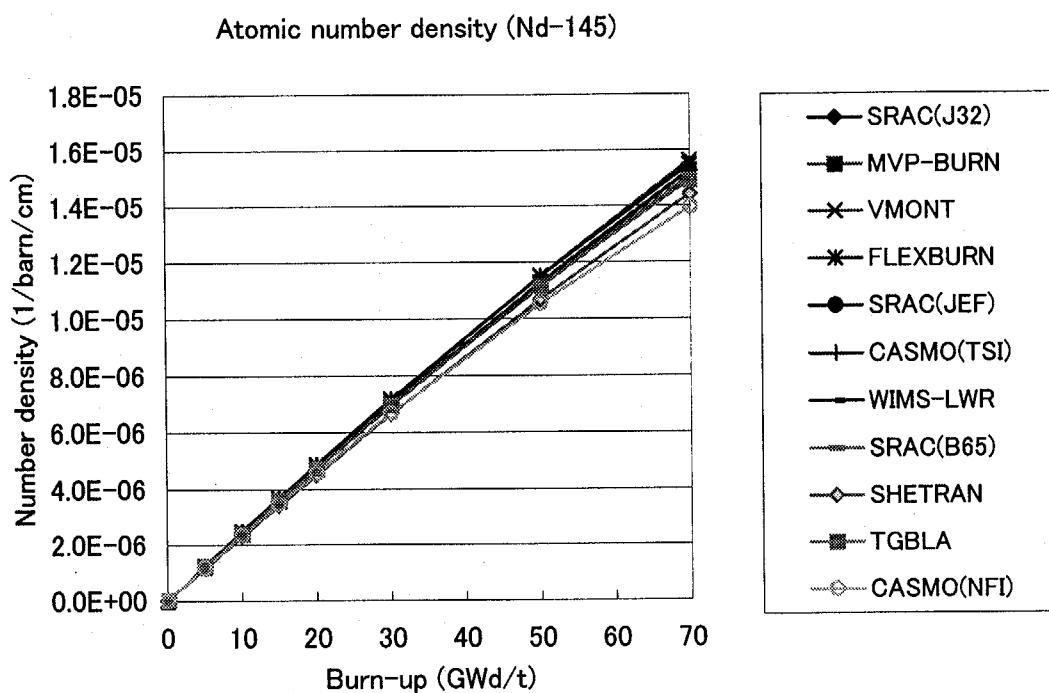


図 4.1.37(27) Nd-145 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

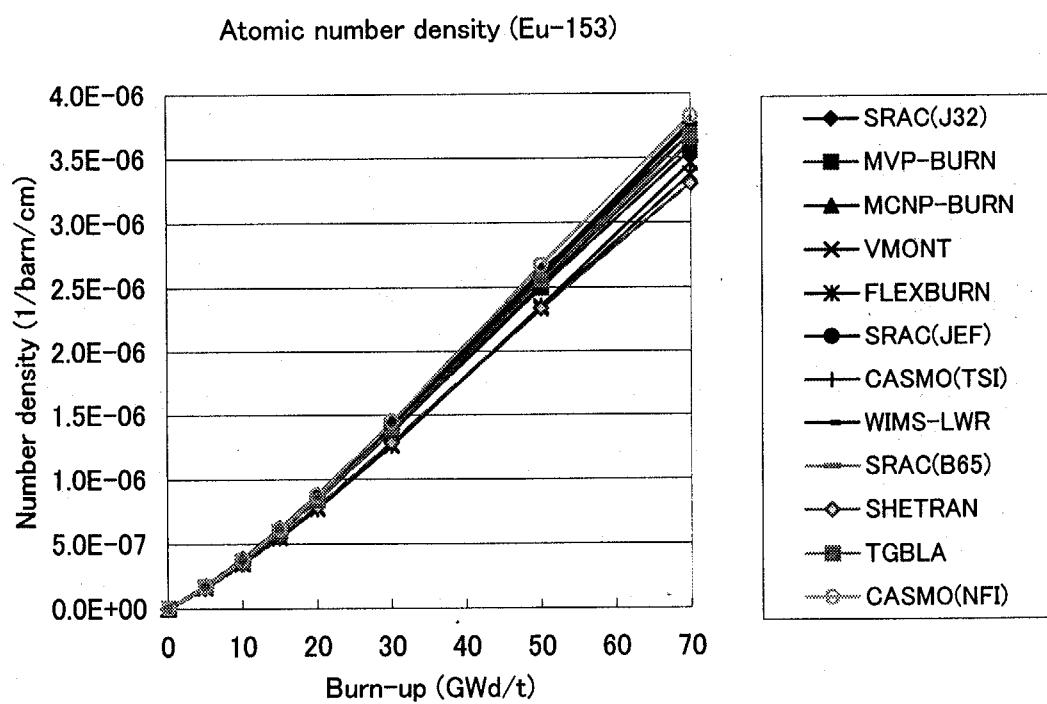


図 4.1.37 (28) Eu-153 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

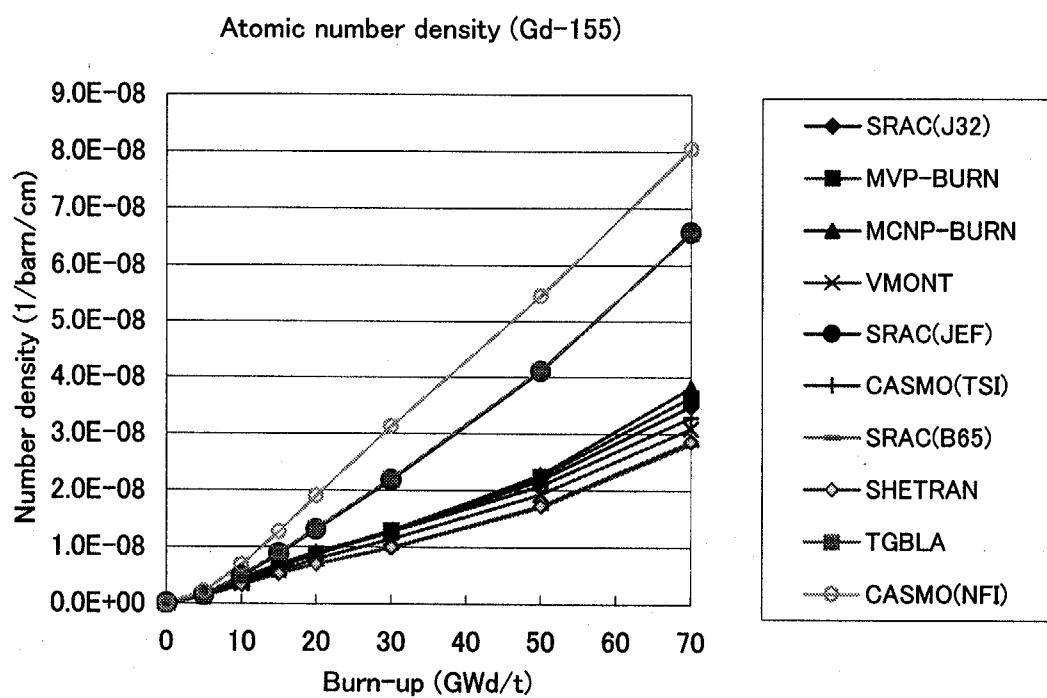


図 4.1.37 (29) Gd-155 数密度の燃焼変化 (MOX 燃料)

数密度の燃焼変化に関しては、概ね UO_2 問題での考察結果と同じである。ここでは、主に MOX 問題で特有な結果を拾い上げて結果の比較と考察を行う。

【Np-237、Pu-238】

WIMS-LWR は Np-237 の生成量を他コードの結果に比べて小さく評価している。この傾向は UO_2 問題でも見られたが、MOX 問題で特に顕著となっている。FLEXBURN は逆に他コードの結果に比べて Np-237 の生成量を大きく評価している。これらの結果により EOL における Np-237 の数密度の最大差異は 139% となっている。両コードの結果を除いても、最大差異は依然 37% 近くある。

Pu-238 の生成量については、WIMS-LWR の結果だけが燃焼度の増加とともに減少している。Np-237 と併せて燃焼チェーンモデルを比較するなどの検討を要する。なお、 UO_2 問題では、WIMS-LWR による Pu-238 の生成量は計算されていない。WIMS-LWR の結果を除けば、EOL における Pu-238 の数密度の最大差異は 15% 程度となる。

これらの 2 核種は、 UO_2 燃料と MOX 燃料の場合に共通して、燃焼による生成量のばらつきが大きい核種である。

【Pu-239、Pu-240、Pu-241、Pu-242】

UO_2 問題では Pu 同位体は全て燃焼度とともに数密度が増大するが、MOX 問題では Pu-239 と Pu-240 は減少し、Pu-241 は増大する。一方、Pu-242 についてはコードによって結果が異なっている。これらの核種の EOL における数密度のばらつきを図 4.1.38～図 4.1.41 に示す。なお、MOX 問題では、Pu 核種は最初から大きな数密度を持っているため、燃焼にともなう数密度変化のばらつきは UO_2 問題に比べて小さい。

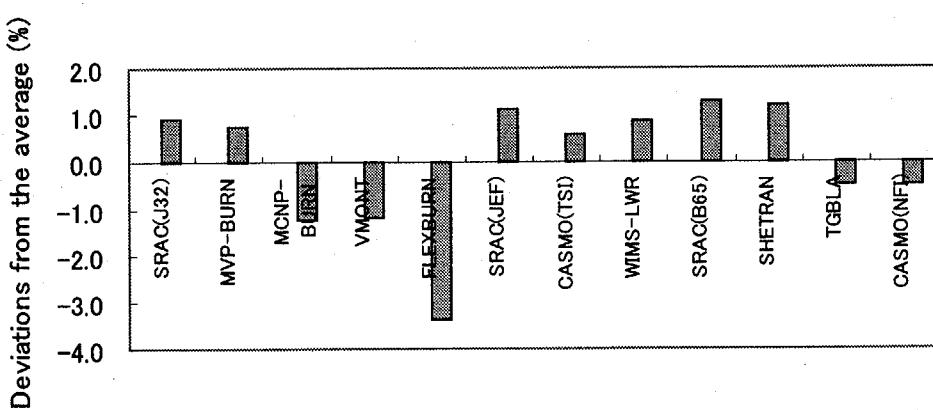


図 4.1.38 EOL における Pu-239 の数密度の比較 (平均値からの差異)

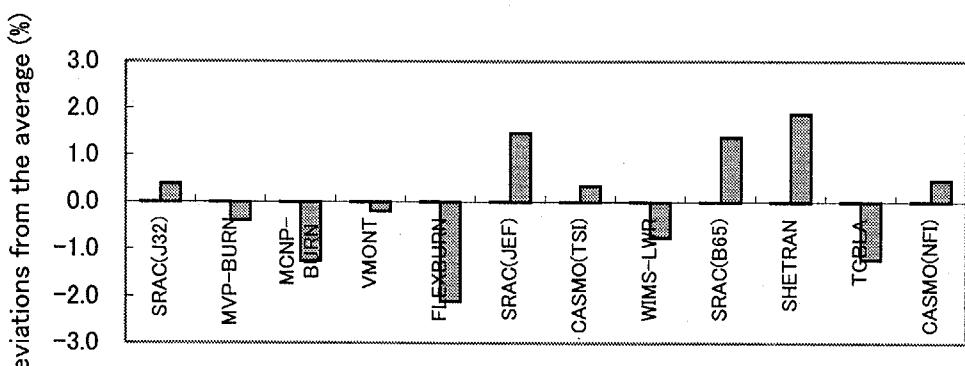


図 4.1.39 EOL における Pu-240 の数密度の比較 (平均値からの差異)

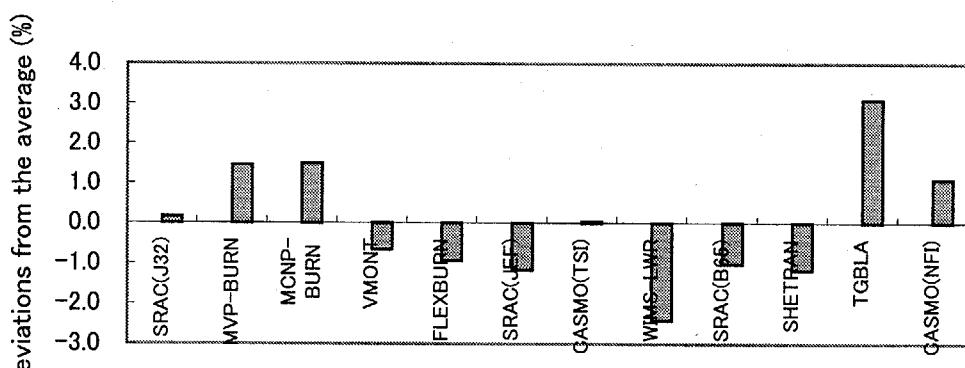


図 4.1.40 EOL における Pu-241 の数密度の比較 (平均値からの差異)

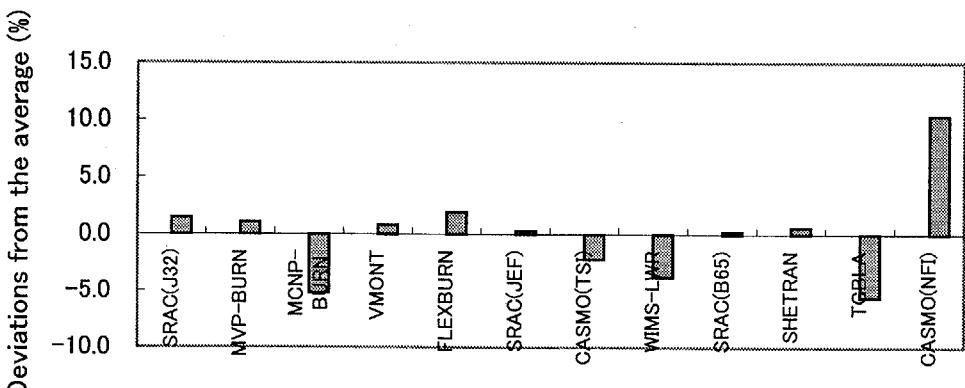


図 4.1.41 EOL における Pu-242 の数密度の比較 (平均値からの差異)

プルトニウムの生成量に関して UO_2 問題では良く一致していた MVP-BURN と MCNP-BURN の結果が、MOX 問題では $\text{Pu}-242$ の EOL での生成量に約 6% の差異が見られる。また、CASMO(NFI) の結果は他コードの結果に比べて $\text{Pu}-242$ の生成量を特に大きく評価している。これは UO_2 問題では見られなかった傾向である。

【Am-241、Am-242m、Am-243】

これらの核種の EOL における数密度のばらつきを図 4.1.42～図 4.1.44 に示す。 $\text{Pu}-241$ の生成量が最も大きい TGBLA の結果が、Am 同位体核種の生成量についても他コードとの差異が顕著である。TGBLA の結果は Am-241 の消滅量が多く Am-242 の生成量が多いため、Am-241 の捕獲断面積を他コードのものと比較する必要がある。一方、 $\text{Pu}-242$ の生成量に大きな差異が見られた CASMO(NFI) の結果では、Am-243 の生成量には大きな差異は見られない。

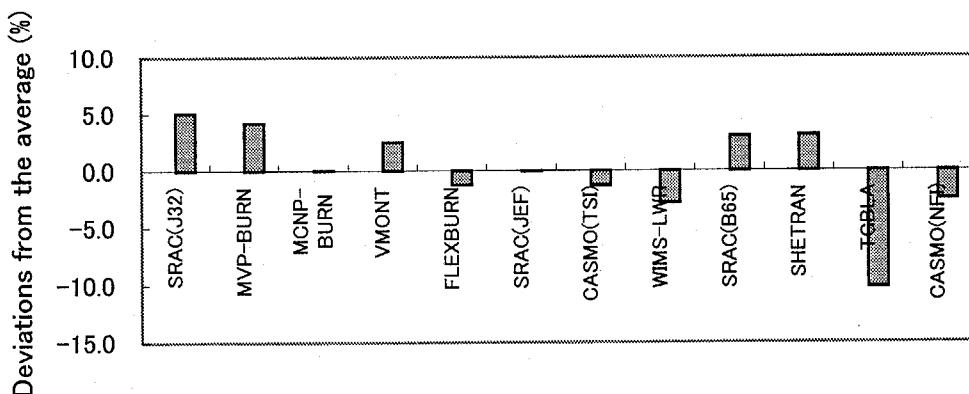


図 4.1.42 EOL における Am-241 の数密度の比較 (平均値からの差異)

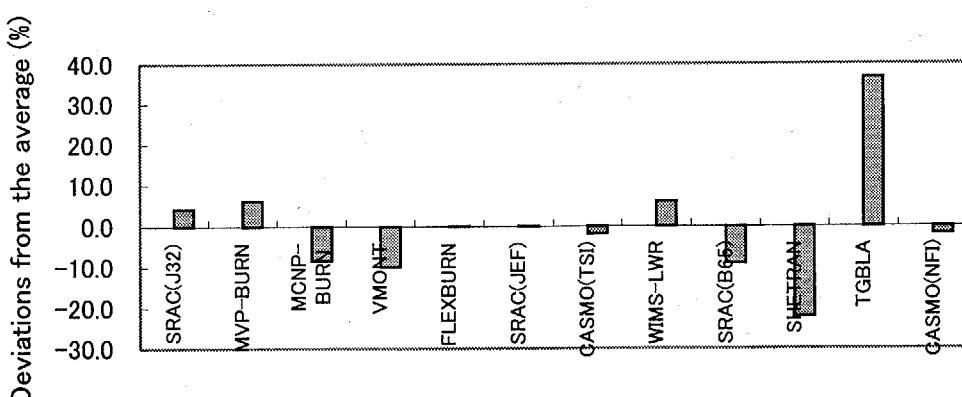


図 4.1.43 EOL における Am-242m の数密度の比較 (平均値からの差異)

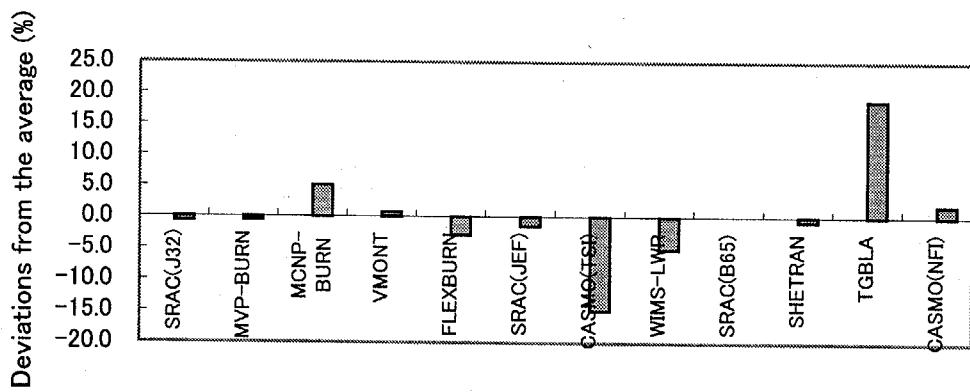


図 4.1.44 EOL における Am-243 の数密度の比較 (平均値からの差異)

ENDF/B-VI(R3)に基づく SHETRAN の結果は、Pu 同位体核種、Am-241、Am-243 の生成量が SRAC(B65)の結果と良く一致しているが、Am-242m の生成量については約 15%の差異が見られる。Am-241 からの分岐比や Am-242m の吸収断面積を比較する必要がある。

【Cm-242、Cm-243、Cm-244、Cm-245、Cm-246】

Cm 同位体核種の EOL における数密度のばらつきを図 4.1.45～図 4.1.49 に示す。これら核種の EOL における生成量は UO₂問題の場合に比べて 1 衡大きい。特に、Cm-242 は図 4.1.37(13)に見られるように約 30GWd/t 以降には平衡濃度に達している。MCNP-BURN と TGBLA は平衡に至るまでの生成曲線が他コードのものと異なっている。また、MCNP-BURN の EOL での数密度は他コードの結果に比べて約 25%高い結果となっている。

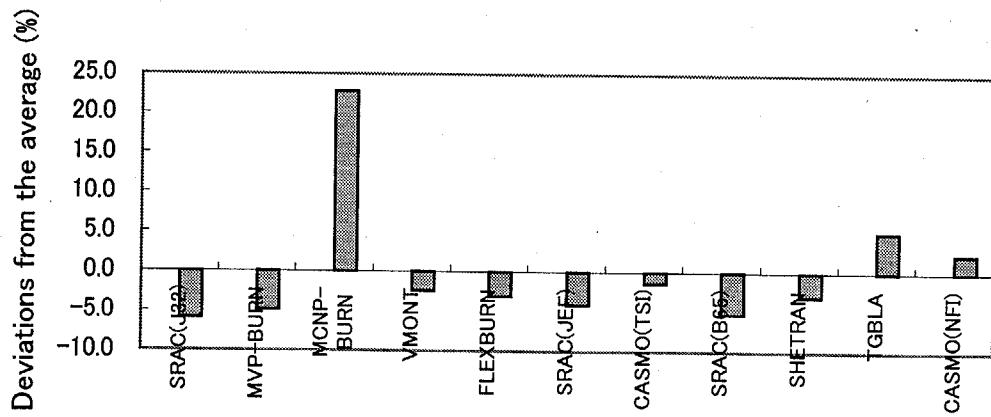


図 4.1.45 EOL における Cm-242 の数密度の比較 (平均値からの差異)

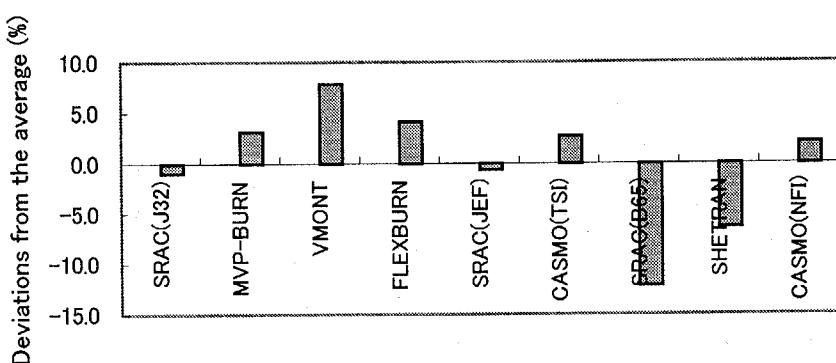


図 4.1.46 EOL における Cm-243 の数密度の比較 (平均値からの差異)

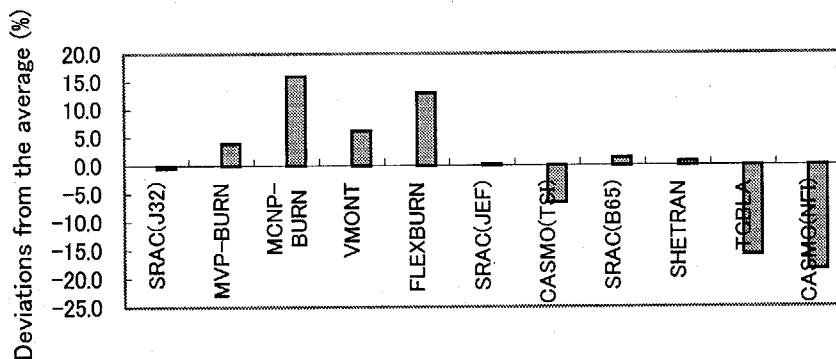


図 4.1.47 EOL における Cm-244 の数密度の比較 (平均値からの差異)

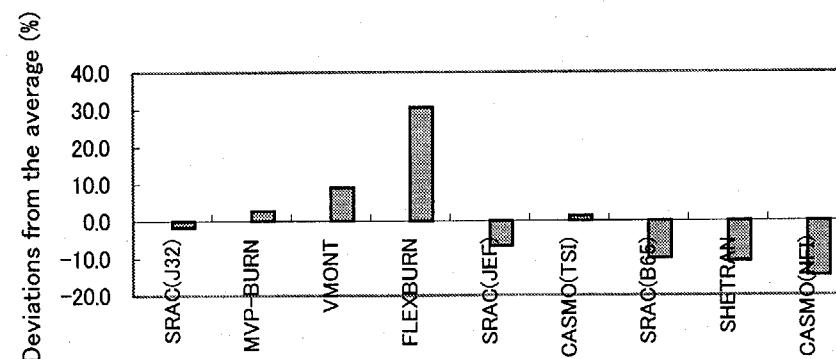


図 4.1.48 EOL における Cm-245 の数密度の比較 (平均値からの差異)

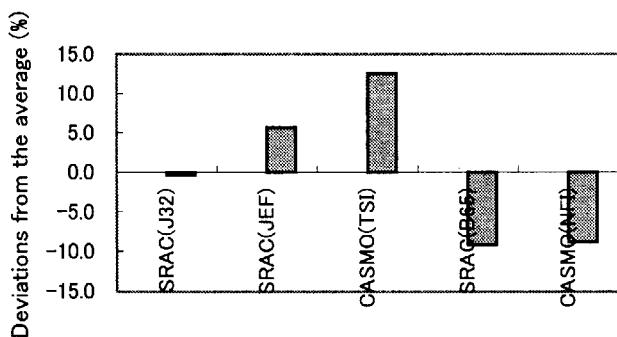


図 4.1.49 EOL における Cm-246 の数密度の比較
(平均値からの差異)

SRAC の結果から、Cm-243、Cm-245、Cm-246 の生成量には核データに対する依存性が認められる。JENDL-3.2 による結果は ENDF/B-VI(R5)による結果に比べて、EOL における Cm-243、Cm-245、Cm-246 の生成量をそれぞれ 13%、9%、10%程度大きく与えている。Cm-246については、JEF-2.2 による結果は JENDL-3.2 によるものよりも更に 5%高く、ライブラリ間の最大差異は約 15%である。どの断面積による効果かを特定する必要がある。

F.P.核種の生成量については、UO₂問題とほぼ同じ傾向が見られるため詳細な比較は省略する。MOX 問題の計算結果で特有な点についてのみ簡単に述べておく。

【Rh-103】

EOL における Rh-103 の生成量は UO₂問題の約 2 倍となる。これは、Rh-103 が熱エネルギーに共鳴吸収を持ち、プルトニウムによる中性子吸収が大きい MOX 燃料体系では燃焼期間平均での Rh-103 の吸収反応率が相対的に小さくなるためと考えられる。しかし、EOL 時点での吸収割合は F.P.核種中第 1 位である。CASMO(NFI)の結果は EOL における Rh-103 の生成量が他コードの結果に比べて 14%程度小さい。

【Nd-143】

VMONT は Nd-143 の生成量を他コードに比べて大きく評価しており、その差異は燃焼度とともに拡大している。EOL における生成量の他コードとの差異は約 38%である。同様な傾向は、UO₂問題の EOL 近傍でも見られたが、MOX 問題で特に顕著となっている。Nd-143 の生成量自体には UO₂問題と MOX 問題では大きな差異はない。

4.1.3 今後の検討方針

複雑な燃料集合体ベンチマーク問題で、計算結果の差異要因を特定することは難しい。したがって、ピンセル問題の範囲で、できる限りコードや炉定数に係る問題点を摘出しておくことが必要である。このためには、ピンセル問題に関して今後以下の検討をすることが望まれる。

1) 無限中性子増倍率や各種反応度に対する寄与成分の分析または感度解析

まずは BOL で差異要因となっている核種、断面積、エネルギー範囲を特定する。引き続き燃焼度依存性を検討する。

2) 実効微視的断面積の比較

BOL での実効微視的断面積を連続エネルギーモンテカルロ法による値と比較する。EOL については、各コードで組成が異なっているため、重要核種を選定して標準的な組成を仮定した補足問題を設定して比較することが好ましい。

3) 燃焼チェーンモデルの比較

特に差異が大きい結果については、燃焼チェーンモデルや燃焼計算に使用される定数(F.P. 収率、分岐比、崩壊定数等)を比較する。

4) 核種生成パスの解析

燃焼による数密度に差異が大きく見られる核種については、生成パスの寄与を解析し、重要な反応を特定する。

5) 異なる核データによる微視的断面積の比較

重要と判断された生成パスと反応については、核データによる微視的断面積の差異を比較する。

6) 照射後試験解析

異なる核データに基づく炉定数ライブラリを使用し、既存の UO₂、MOX 燃料に対する照射後試験解析を行う。これにより、核種生成量評価精度の核データ依存性を明らかにするとともに、それぞれの核データの問題点を洗い出す。

7) バックエンド分野のための派生ベンチマーク問題の設定

現在のベンチマーク問題を基に、冷却期間を含めた運転履歴を仮定し、燃焼度クレジットなどの検討に利用できるベンチマーク問題を作成する。

8) JENDL-3.3 による解析

JENDL-3.3[4]に基づくベンチマーク解析と PIE 解析を実施し、従来核データを使用した場合と比較して、今後の核データの改良や必要な実験計画の立案に資する。

【第 4.1 節の参考文献】

- [1] 田坂完二：“DCHAIN：放射性ならびに安定核種の生成崩壊解析コード”，JAERI 1250 (1977)
- [2] Okumura K., Mori T., Nakagawa M. and Kaneko K.：“Validation of a Continuous-Energy Monte Carlo Burn-up Code MVP-BURN and Its Application to Analysis of Post Irradiation Experiment”，*J. Nucl. Sci. Technol.*, 37, 128 (2000)
- [3] 中原嘉則、須山賢也、須崎武則（編）：“軽水炉使用済燃料の燃焼度クレジットに関する技術開発”，JAERI-Tech 2000-071 (2000)
- [4] Shibata K.：“JENDL-3.3: A New Version of JENDL General-Purpose Library”，*Trans. Am. Nucl. Soc.*, 84, 41 (2001)

4.2 PWR 集合体

4.2.1 PWR 集合体ベンチマーク解析参加機関及びコードシステム

PWR 集合体ベンチマーク解析には、原子燃料工業、四国電力、電力中央研究所及び京都大学原子炉実験所の 4 機関が参加した。各機関により用いられたコードシステム及びライブラリ、ならびに主要な計算条件を表 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 PWR 集合体ベンチマーク解析参加機関及びコードシステム、計算条件

機関名		原子燃料工業	四国電力	電力中央研究所	京都大学 原子炉実験所
使用コード		CASMO-4	SHETRAN	FLEXBURN	MVP-BURN
使用断面積		L-library (ENDF/B-IV ベース)	ENDF/B-VI rev3	JENDL-3.2	JENDL-3.2
燃焼ステップ幅 (GWd/t)	UO ₂ -Gd	0~30GWd: 0.25 刻み、 30~50GWd: 0.5 刻み、 50~70GWd: 1.0 刻み (P/Cあり)	0, 0.1, 0.5, 以降、 0.5~30GWd/t: 0.5 刻み 30~70GWd/t: 2.5 刻み	0, 0.055, 0.1, 0.2, 0.4, 0.7, 1.0, 以降、 1~20GWd/t: 0.5 刻み 20~70GWd/t: 1.0 刻み	0, 0.1 以降、 1~30GWd/t: 1.0 刻み (P/Cあり) 30~40GWd/t: 1.0 刻み (P/Cなし) 40~70GWd/t: 2.0 刻み (P/Cなし)
	MOX	同上	0, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0, 以降 10~70GWd/t: 2.5 刻み	0, 0.055, 0.1, 0.5, 1.0, 以降 1~70GWd/t: 1.0 刻み	同上
集合体計算時の エネルギー群数、 計算手法		7 群(UO ₂)、16 群(MOX) Characteristics 法	70 群 Characteristics 法	26 群 S _N (S ₈ P ₃)	連続エネルギー モンテカルロ
Gd ピンメッシュ 分割数		[註 1]	径方向 10 分割	径方向 5 分割	径方向 8 分割
燃焼チェーン		CASMO4 内蔵 チェーン	101 核種 (アクチノイド 18+ FP83)	アクチニド 18+ FP45 + Lumped FP 1	U4CM5FP34 ライブ ラリ (HM20+FP34)
その他		註 1 : 分割あり・メッシュ数非公開		F-Table による温度 内挿 (基準点: 293K, 560K, 900K) Doppler: 計算なし Cold: 0%燃焼のみ	燃焼計算: 40 万ヒストリー 無限増倍率、出力分布: 200 万ヒストリー
本章で用いる略称		CASMO-4(NFI)	SHETRAN(SEPCO)	FLEXBURN(CRIEPI)	MVP-BURN(KURRI)

4.2.2 解析結果の相互比較

ここでは、無限増倍率、燃焼反応度、核分裂率分布及び局所ピーキング係数、瞬時変化ドップラー反応度及び瞬時変化全温度反応度について、報告された解析結果の相互比較を行う。

(1) 無限増倍率

$\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体に対する無限増倍率の燃焼変化を図 4.2.1 に示す。30GWd/t の手前で Gd が燃え尽きるという、全体的な燃焼特性は 4 機関で良く一致している。

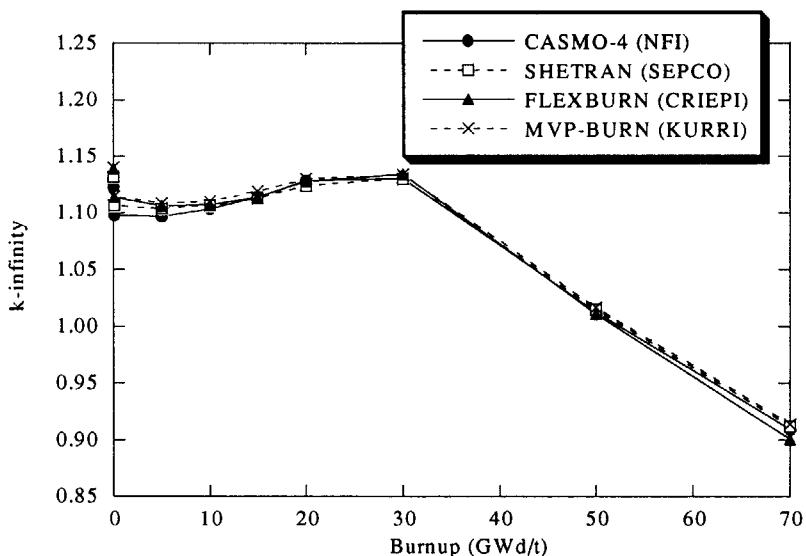
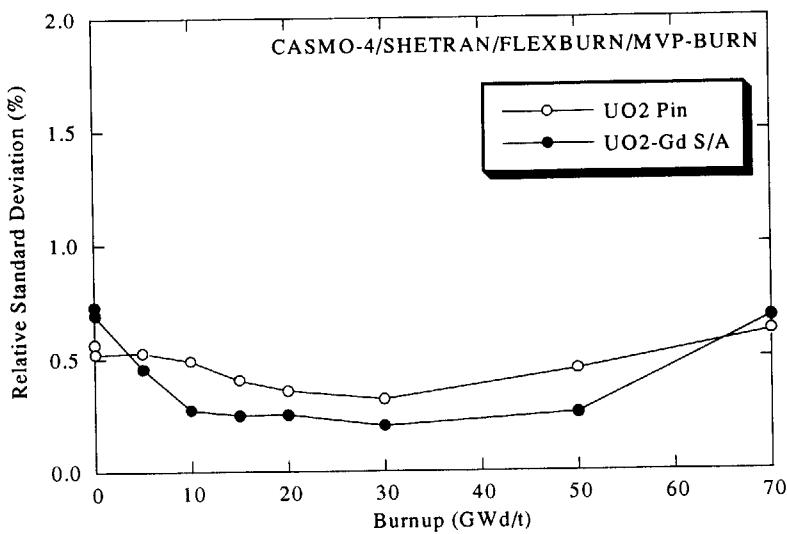


図 4.2.1 無限増倍率の燃焼変化 ($\text{PWR-UO}_2\text{-Gd}$ 集合体)

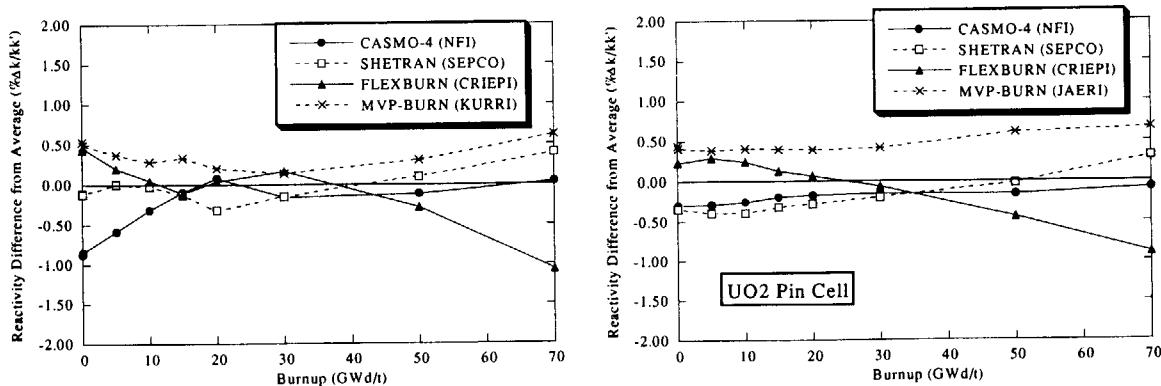
0%燃焼時点における無限増倍率の最大値 (MVP-BURN) と最小値 (CASMO-4) の差はおよそ $1.4\% \Delta k/k$ である。 UO_2 ピンセル計算においても、MVP-BURN は、同じく JENDL-3.2 を用いた MCNP-BURN、SRAC95 とほぼ同じ値を与え、CASMO-4 (TSI 及び NFI) との差違はおよそ $0.8\% \Delta k/k$ であった。ピンセル、集合体計算で観察された差違には整合性があり、ライブラリの違いが共通した原因であると推定される。ただし、MVP-BURN と CASMO-4 の差は燃焼が進むにつれて減少し、およそ 15GWd/t 燃焼以降は両者はほぼ一致する。

一方、ピンセル計算では差がほとんど見られなかった SHETRAN と CASMO-4 の差は、0%燃焼でおよそ $0.76\% \Delta k/k$ と顕著であり、集合体計算に特有の傾向が見うけられる。

集合体計算に用いられている 4 つのコードシステムについて、無限増倍率のばらつきを相対標準偏差 (標準偏差/平均値) で表し、相対標準偏差の燃焼度依存性をピンセル及び集合体計算について示したものが図 4.2.2 である。ピンセルと集合体での相対標準偏差はほぼ同程度であるといえる。ただし、集合体計算では、ばらつきの燃焼度依存性がより顕著であり、特に、燃焼初期及び末期におけるばらつきがそれ以外のものよりも大きいことが特徴的である。

図 4.2.2 UO₂ ピンセルと PWR-UO₂-Gd 集合体に対する無限増倍率の相対標準偏差

ピンセルと集合体計算におけるばらつきの差について考察するため、個々のコードシステムについて、無限増倍率の平均値からの差を反応度差としたものを、ピンセル及び集合体計算について求めた。その結果を図 4.2.3 に示す。CASMO-4 は全体として若干低い値を示しており、その傾向は燃焼初期の方が大きく、また、集合体計算でより顕著で、燃焼初期の無限増倍率は平均値よりおよそ $1\% \Delta k/kk'$ 小さい。このことが図 4.2.2 で示した燃焼初期におけるばらつきの差異の原因であると考えられる。SHETRAN は燃焼初期で若干低く、末期で若干高い値を示す。この傾向はピンセルでより顕著である。逆に、FLEXBURN は燃焼初期で高く、末期で低い値を示しており、特に、燃焼末期の無限増倍率はピン、集合体共に平均値よりおよそ $1\% \Delta k/kk'$ 小さい。MVP-BURN はピン、集合体ともにおよそ $0.5\% \Delta k/kk'$ 高い値を示し、燃焼による変化は少ない。

図 4.2.3 無限増倍率の平均値からの差： PWR-UO₂-Gd 集合体と UO₂ ピンセルの比較

MOX 集合体に対する無限増倍率の燃焼変化を図 4.2.4 に示す。

全燃焼期間を通じて SHETRAN、FLEXBURN、MVP-BURN の 3 者は良く一致している。これに対し、CASMO-4 は明らかに他の結果に比べて小さい値を示し、かつ、その差は燃焼と共に減少するという傾向を示す。CASMO-4 と、最も大きな無限増倍率を示す SHETRAN とでは、0%燃焼で 2.3% $\Delta k/kk'$ 、70%燃焼で 1.4% $\Delta k/kk'$ の差がある。この傾向はピンセル計算の結果と同一であり、主としてライブラリの違いに起因するものであると考えられる。

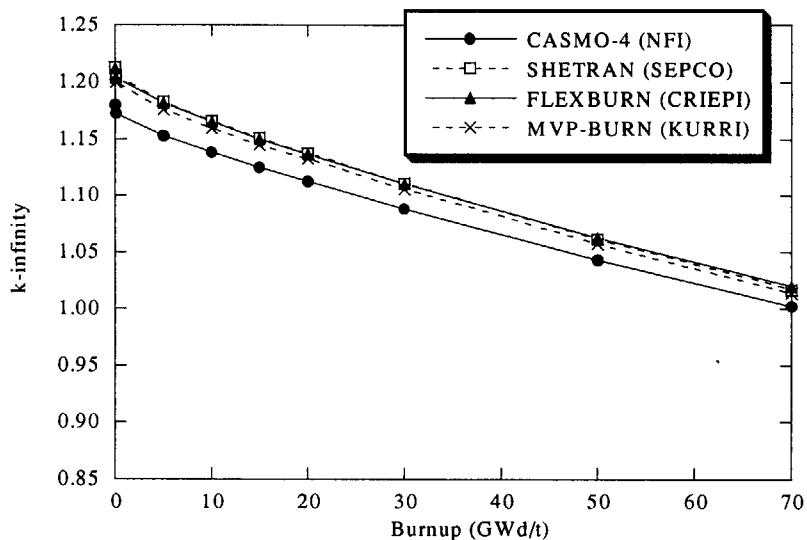


図 4.2.4 無限増倍率の燃焼変化 (PWR-MOX 集合体)

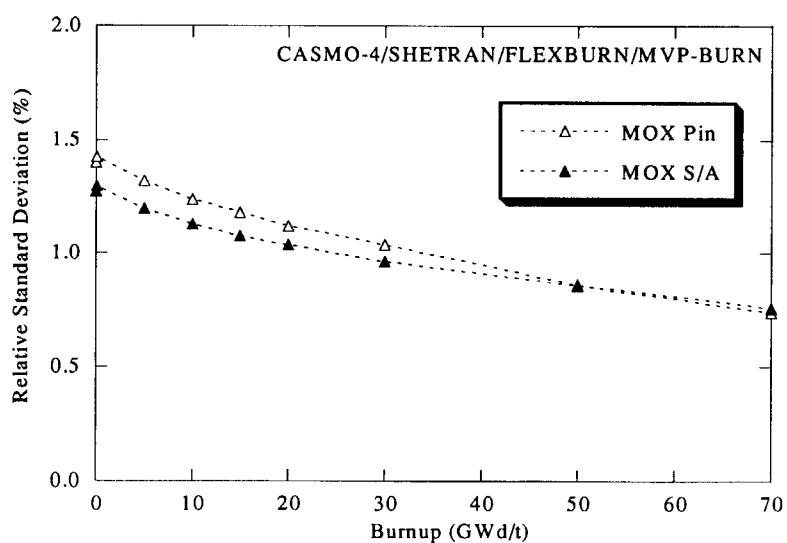


図 4.2.5 MOX ピンセルと PWR-MOX 集合体に対する無限増倍率の相対標準偏差

UO_2 問題と同様に、集合体計算に用いられている 4 つのコードシステムについて、相対標準偏差の燃焼度依存性を MOX ピンセル及び PWR-MOX 集合体計算について示したものが図 4.2.5 である。ピンセルと集合体での相対標準偏差は同程度であり、燃焼と共に若干減少する。

個々のコードシステムについて、無限増倍率の平均値からの差を反応度差としたものをピンセル及び集合体計算について求めた。その結果を図 4.2.6 に示す。SHETRAN と FLEXBURN とはほぼ同じ結果を示しており、MVP-BURN はそれに比べて若干低い値を示す。この 3 コードシステムについては明確な燃焼度依存性は見られない。CASMO-4 は前述のように前 3 者に比べて小さな値を示しており、平均値からの差は燃焼と共に減少するという傾向を示している。いずれのコードシステムについても、集合体とピンセル計算の傾向は極めて似通っており、集合体計算に固有の現象は認められない。

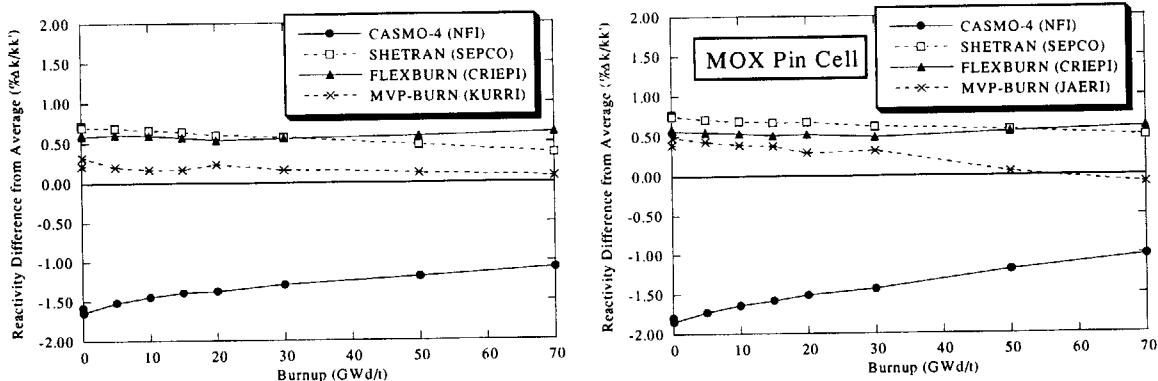
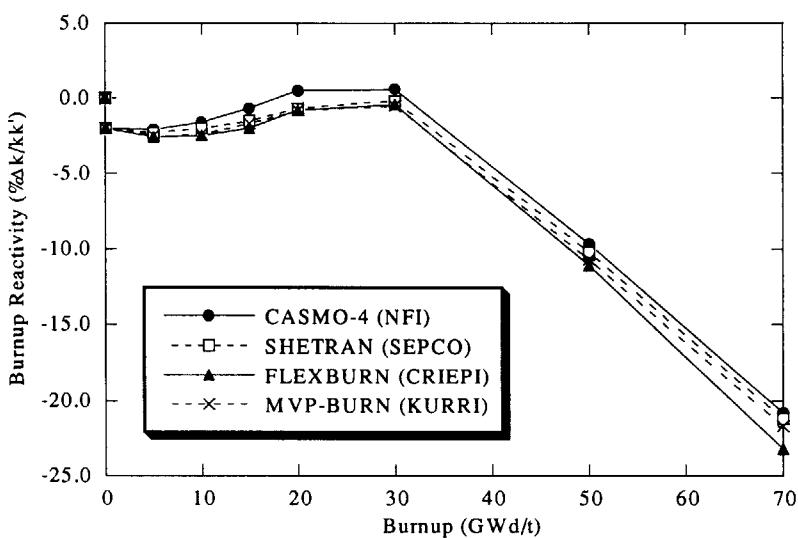


図 4.2.6 無限増倍率の平均値からの差： PWR-MOX 集合体と MOX ピンセルの比較

(2) 燃焼反応度

以下、0%燃焼の無限増倍率からの反応度差を燃焼反応度と定義する。

$\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体の燃焼反応度を図 4.2.7 に示す。全体として、CASMO-4 は最も正側の値を示す。その傾向は 10~30GWd/t で顕著であり、特に、20~30GWd/t では 4 コードシステム中唯一正の値を示す。30GWd/t 以降では、CASMO-4・FLEXBURN の組(図中実線)と SHETRAN・MVP-BURN の組(図中破線)とでは燃焼反応度の傾きが異なり、後者の方が緩やかな変化を示す。その結果、燃焼末期では、SHETRAN・MVP-BURN は CASMO-4 とほぼ同一の値となり、FLEXBURN は他 3 者に比べておよそ 2% $\Delta k/k$ 小さい値を示す。

図 4.2.7 燃焼反応度 (PWR-UO₂-Gd 集合体)

MOX 集合体における燃焼反応度を図 4.2.8 に示す。

燃焼と共に全体のばらつきが若干増加する傾向にあるものの、差異に複雑な燃焼度依存性が認められた UO₂-Gd と異なって、全体的に一致は良い。

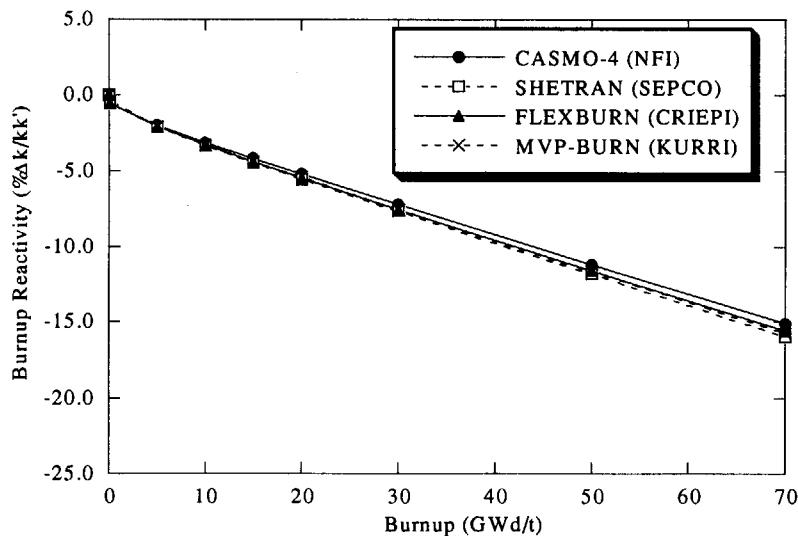


図 4.2.8 燃焼反応度 (PWR-MOX 集合体)

(3) 核分裂率分布及び局所ピーキング係数

ここでは、まず、局所ピーキング係数の比較を行い、必要に応じて、個々の燃料ピンの核分裂率の比較を行うこととする。

$\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体における局所ピーキング係数の燃焼特性を図 4.2.9 に示す。全体的な傾向は良く一致している。特に、無限増倍率に明かな差違が見られた 20~30 GWd/t の範囲においても、局所ピーキング係数の差は 1% 以下と小さい。燃焼中期～末期において、FLEXBURN が若干小さい値を示しているが、その差も 1% 以下であり、全体として良く一致している。

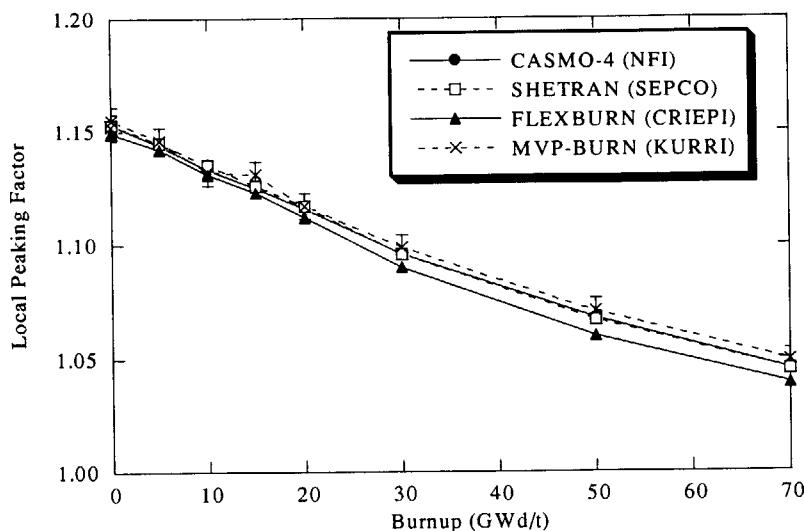


図 4.2.9 PWR- $\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体における局所ピーキング係数の燃焼特性

表 4.2.2 に、各コードシステムについて、局所ピーキング発生ピン位置と局所ピーキング係数を示す。局所ピーキング係数の絶対値そのものについては良い一致が得られているが、僅かな差で、局所ピーキングが発生している燃料ピンの位置は必ずしも一致していないことがわかる。特に、燃焼末期（50 GWd/t 以降）では、全体として出力が平坦化されており、僅かな分布の差が影響して、局所ピーキング発生位置は 4 機関で異なっている。なお、ピンの具体的な位置については図 4.2.10 に示した $\text{UO}_2\text{-Gd}$ 燃料集合体内ピン配列図を参照されたい。

表 4.2.2 局所ピーキング発生ピン位置及び局所ピーキング係数
(PWR- $\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体)

燃焼度 (GWd/t)	CASMO-4(NFI)		SHETRAN(SEPCO)		FLEXBURN(CRIEPI)		MVPBURN(KURRI)	
	ピン位置	ピーキング 係数	ピン位置	ピーキング 係数	ピン位置	ピーキング 係数	ピン位置	ピーキング 係数
0	(5,5)	1.152	(5,5)	1.153	(5,5)	1.149	(8,4)	1.152
0.1	(5,5)	1.153	No data	No data	(5,5)	1.149	(5,5)	1.155
5	(5,5)	1.144	(5,5)	1.145	(5,5)	1.142	(6,5)	1.146
10	(6,5)	1.133	(6,5)	1.135	(6,5)	1.131	(6,5)	1.132
15	(6,5)	1.125	(6,5)	1.126	(6,5)	1.123	(6,5)	1.131
20	(6,5)	1.116	(6,5)	1.117	(6,5)	1.112	(6,5)	1.117
30	(6,5)	1.096	(6,5)	1.096	(6,5)	1.090	(6,5)	1.099
50	(6,5)	1.068	(6,5)	1.067	(5,4)	1.060	(6,5)	1.071
70	(6,5)	1.045	(2,1)	1.045	(2,1)	1.039	(4,3)	1.049

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		(2,1)	Gd							
2								Gd		
3	Gd				Gd					
4										
5			Gd		(5,5)	(6,5)	Gd			
6										
7		Gd			Gd		Gd			
8										
9										

註) 塗り潰し部 : 案内シンプル、Gd: Gd ピン

図 4.2.10 PWR-UO₂-Gd 集合体内燃料ピン配列

表 4.2.2 から、5GWd/t までは(5,5)ピン、10GWd/t 以降は(6,5)ピンで局所ピーキングが発生し、燃焼末期では(2,1)ピンの相対出力が増加し、局所ピーキングが再び移動するケースもあることがわかる。なお、MVP-BURN については、核分裂率の相対誤差がおよそ 0.4~0.6%であり、統計誤差を考慮すると局所ピーキング発生位置の差異は有意なものとは言えないことに留意されたい。

この(5,5)ピン、(6,5)ピン及び(2,1)ピンの 3ヶ所の燃料ピンについて、相対核分裂分布の燃焼特性を図 4.2.11~4.2.13 に示す。(5,5)ピン及び(6,5)ピンでは、燃焼とともにコードシステム間の差異が拡大するのに対し、(2,1)ピンでは全燃焼期間を通じて良い一致を示していることがわかる。このようなピン位置による核分裂率のばらつきの違いについて検討するために、集合体内ピン位置毎に核分裂率の相対標準偏差を求めたものを図 4.2.14 に示す。通常ピンの相対標準偏差はほとんどの場合 0.5%以下である。燃焼度とともに若干増加する傾向があるものの、その程度は小さく、上で観察されたようなピン位置による違いを定性的に説明することは現時点では困難である。これに対し、Gd ピンでは燃焼初期における相対標準偏差がおよそ 2%で、通常ピンのおよそ 3 倍のばらつきを示す。Gd ピンの相対標準偏差は燃焼度とともに複雑に変化し、Gd が燃焼を終えた 30GWd/t 以降ではおよそ 1 %程度の値となる。このばらつきは通常ピンに比べて約 2 倍である。

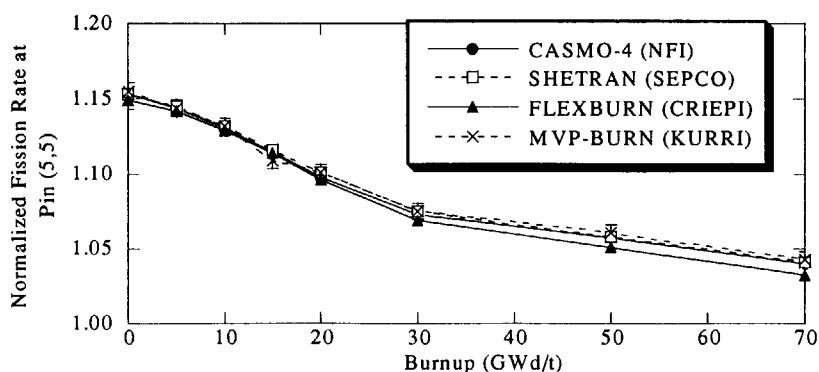


図 4.2.11 PWR-UO₂-Gd 集合体(5,5)ピンにおける核分裂率の燃焼特性

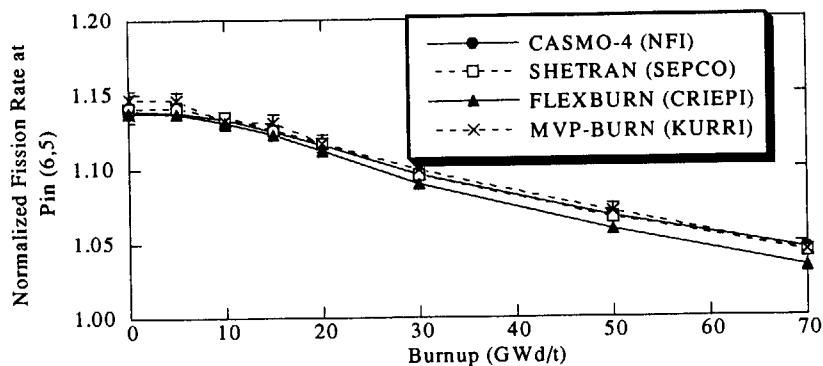


図 4.2.12 PWR- UO_2 -Gd 集合体(6,5)ピンにおける核分裂率の燃焼特性

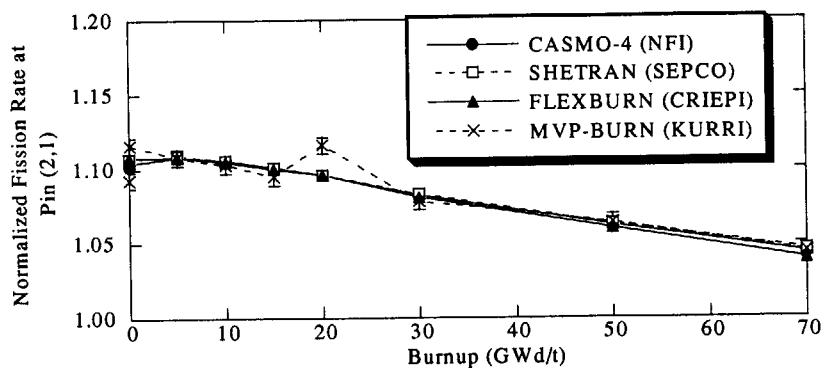


図 4.2.13 PWR-UO₂-Gd 集合体(2,1)ピンにおける核分裂率の燃焼特性

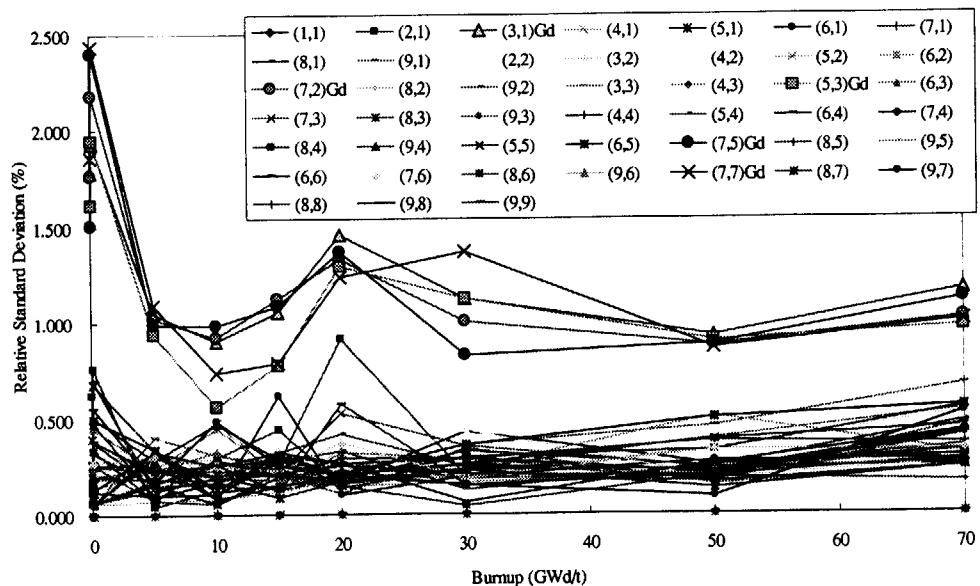


図 4.2.14 PWR-UO₂-Gd 集合体各ピン位置における核分裂率相対標準偏差

MOX 集合体に対する局所ピーリング係数の燃焼特性を図 4.2.15 に示す。MOX では $\text{UO}_2\text{-Gd}$ に増してばらつきが小さく、全体的に極めて良い一致が得られている。MVP-BURN の結果は系統的に若干大きい値を示しているものの、統計誤差を考慮すると有意な差とは言いがたい。集合体内ピン位置毎に核分裂率の相対標準偏差を求めたものを図 4.2.16 に示す。燃焼初期のばらつきは $\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体の通常ピンに比べるとやや大きい。燃焼とともにうばらつきの変化は明確には認められない。集合体のコーナー部、(9,8)及び(9,9)ピンは、その他のピンに比べて燃焼期間を通じておよそ 2 倍のばらつきを示す

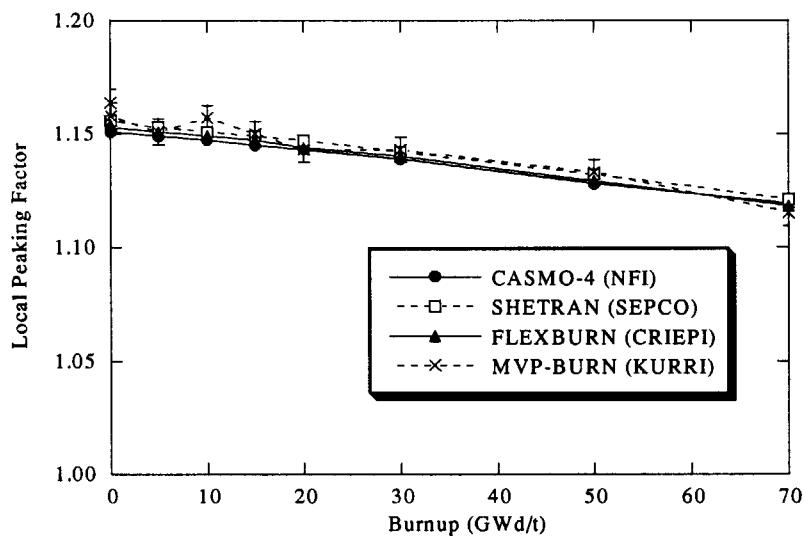


図 4.2.15 PWR-MOX 集合体における局所ピーキング係数の燃焼特性

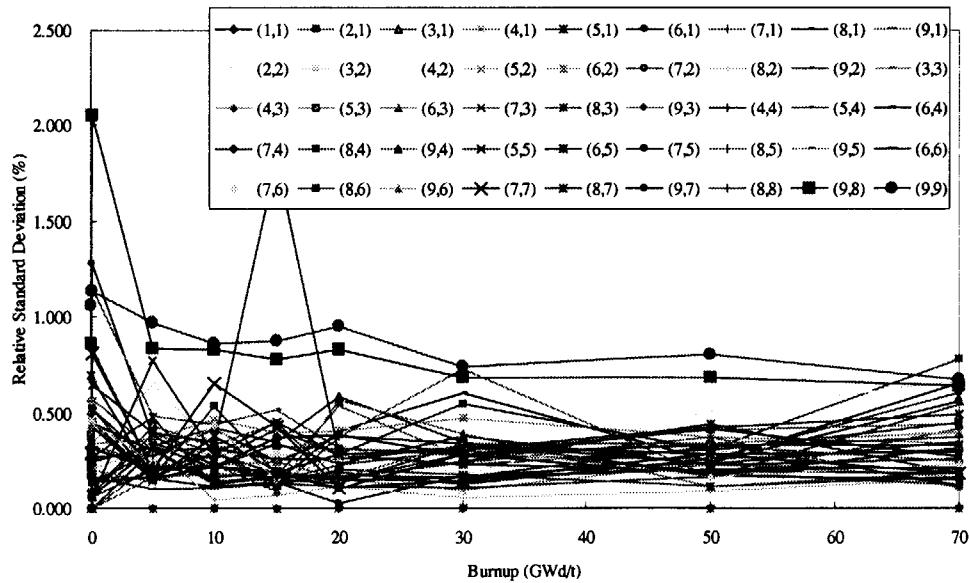


図 4.2.16 PWR-MOX 集合体各ピン位置における核分裂率相対標準偏差

(4) 瞬時変化ドップラー反応度

ここでは、瞬時変化ドップラー反応度を「高温状態 0% Void」と「ドップラー条件 0% Void」との反応度差として定義し、比較検討を行った。

$\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体における瞬時変化ドップラー反応度の燃焼特性を図 4.2.17 に示す。なお、FLEXBURN の結果は与えられていないので、図中には legend のみを示した。ドップラー反応度は燃焼初期で $-1.7\% \Delta k/\text{kk}'$ 、燃焼末期で $-2.69\% \Delta k/\text{kk}'$ であり、燃焼と共に緩やかに絶対値が増加する。この傾向はピンセルと同様である。燃焼初期～中期にかけての SHETRAN と CASMO-4 の一致は良い。30GWd/t 以降では両者の差は若干拡大する。MVP-BURN は概して大きい値を示しているが、反応度の絶対値と統計精度を考慮すると、十分な精度で全ての結果が一致しているといえよう。

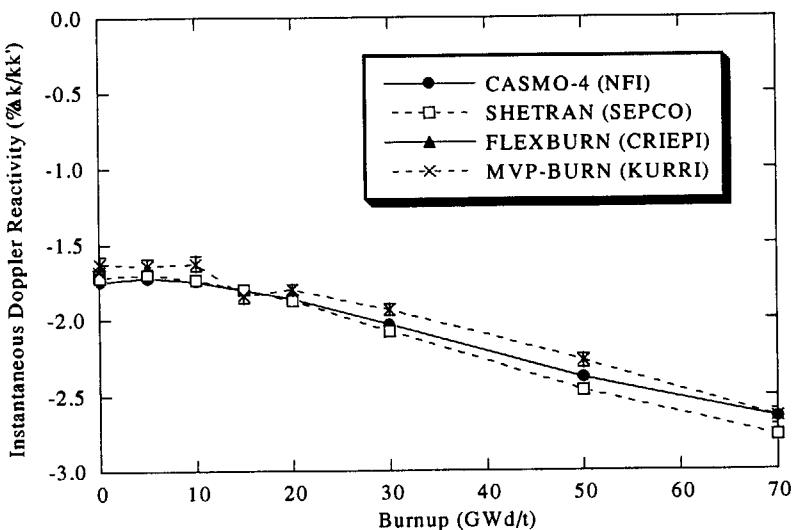


図 4.2.17 PWR-UO₂-Gd 集合体における瞬時変化ドップラー反応度の燃焼特性

MOX 集合体における瞬時変化ドップラー反応度の燃焼特性を図 4.2.18 に示す ($\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体と同様 FLEXBURN は legend のみ)。ドップラー反応度の平均値は燃焼初期で $-1.78\% \Delta k/\text{kk}'$ 、燃焼末期で $-2.01\% \Delta k/\text{kk}'$ であり、燃焼に伴う変化は $\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体に比べて小さい。MVP-BURN と SHETRAN は燃焼期間を通じてほぼ同じ値を示す。一方、CASMO-4 の結果は燃焼に伴う変化が小さく、燃焼初期～中期で MVP-BURN・SHETRAN と CASMO-4 との差異は顕著である。この差異は燃焼が進むにつれて減少し、燃焼末期では差異はほとんど認められない。

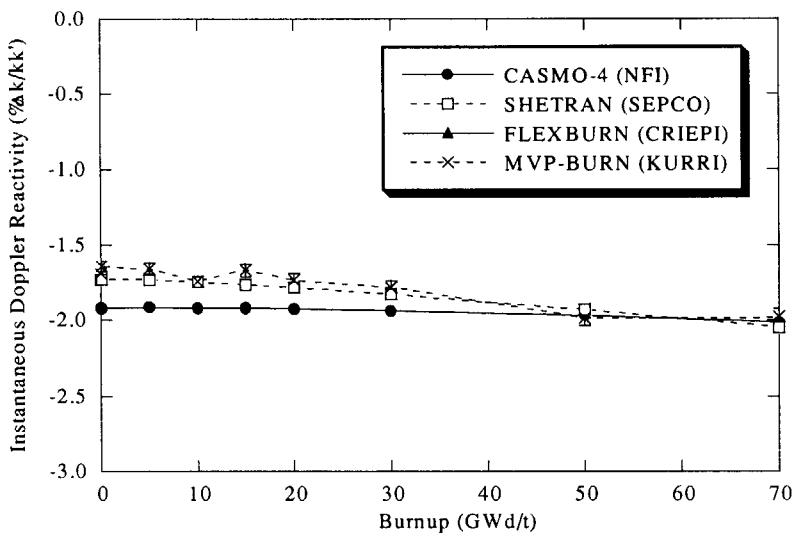
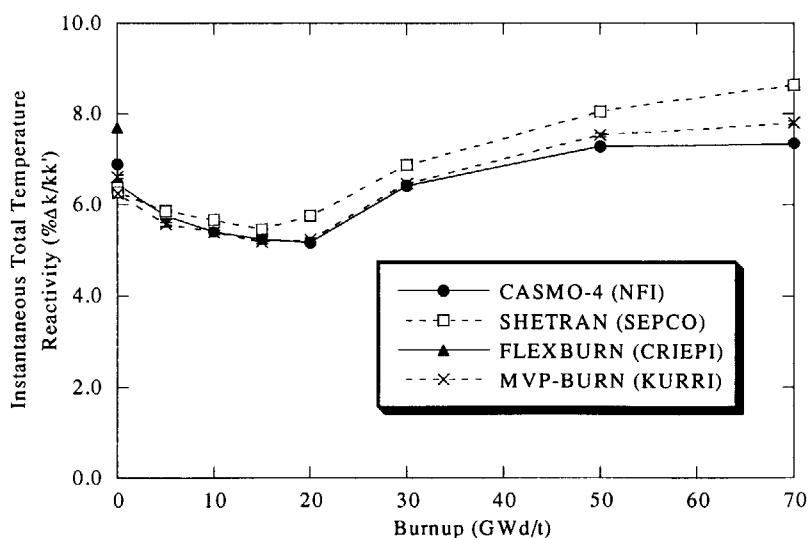


図 4.2.18 PWR-MOX 集合体における瞬時変化ドップラー反応度の燃焼特性

(5) 瞬時変化全温度反応度

ここでは、瞬時変化全温度反応度を「高温状態 0% Void」と「低温状態 0% Void」との反応度差と定義し、比較検討を行った。なお、FLEXBURN については、0%燃焼の 1 点のみ結果が与えられている。

$\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体における瞬時変化全温度反応度の燃焼特性を図 4.2.19 に示す。瞬時変化全温度反応度の値は燃焼初期で約 6.6% $\Delta k/kk'$ で、20 GWd/t にかけて緩やかに減少し、およそ 5.3% $\Delta k/kk'$ という最小値をとった後、燃焼と共に増加傾向に転じ、燃焼末期ではおよそ 7.9% $\Delta k/kk'$ となる。全体的な傾向は各コードシステムで一致するものの、絶対値については、ドップラー

図 4.2.19 PWR-UO₂-Gd 集合体における瞬時変化全温度反応度の燃焼特性

反応度と異なり、各機関の結果には大きな差が見られる。CASMO-4 と MVP-BURN は燃焼末期を除いてほぼ同一の値を示す。一方、SHETRAN は他の 3 コードシステムに比べて大きい値を示しており、特に 20GWd/t 以降での差は顕著で、最も小さい値を示す CASMO-4 との相対差は 20GWd/t で 13%、70GWd/t で 17%である。

MOX 集合体における瞬時変化全温度反応度の燃焼特性を図 4.2.20 に示す。瞬時変化全温度反応度は燃焼初期で $5.4\% \Delta k/kk'$ で、燃焼と共に僅かに減少し、およそ 5GWd/t で最小値 $4.9\% \Delta k/kk'$ をとった後は増加に転じ、燃焼末期でおよそ $6.8\% \Delta k/kk'$ となる。全体的な傾向は各コードシステムで一致しているが、絶対値としては、CASMO-4 が燃焼期間を通じて SHETRAN、MVP-BURN よりも大きな値を示す。SHETRAN と比較すると、燃焼初期～中期では絶対値でおよそ 0.6%、相対値でおよそ 13% の差違が見られる。SHETRAN と MVP-BURN とは極めて良く一致しており、両者共に CASMO-4 よりも小さめの値を示しているが、これは図 4.2.19 に示した $\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体とは逆の傾向である。

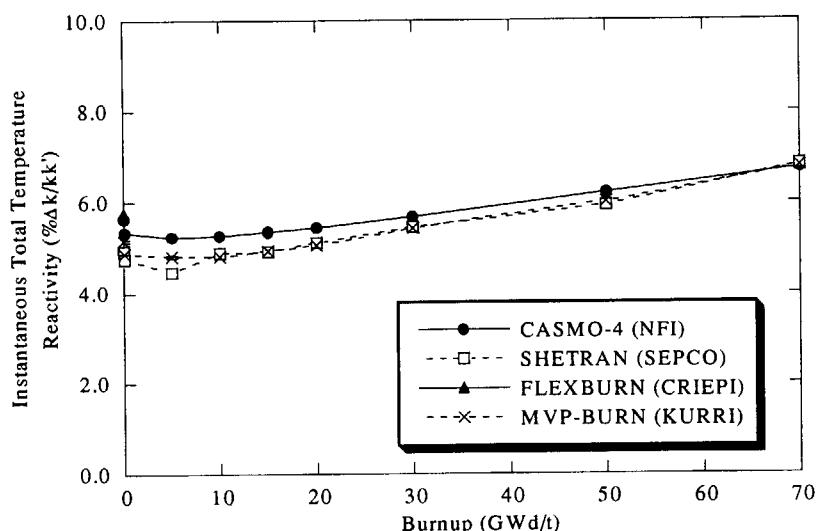


図 4.2.20 PWR-MOX 集合体における瞬時変化全温度反応度の燃焼特性

4.2.3 まとめ及び今後の検討課題

本章では、PWR 集合体ベンチマークについて、結果の相互比較および分析をおこなった。今回の分析は、4 セット（場合によっては 3 セット）のみの解析結果に基づいたものであり、相対標準偏差などの統計分析に基づく議論のためには母集団が必ずしも十分とは言えないと考えられる。今後、解析セット数を増加することにより、今回の分析とはまた異なった結論が導かれることもありうることに留意されたい。今回の分析結果を以下にまとめる。

- 無限増倍率：0%燃焼時点から顕著な差異が認められる。ピンセル問題と共に要因、主としてライブラリの差異が影響しているものと考えられるが、UO₂-Gd 集合体では、ピンセルではみられなかったコードシステム間の差異も認められた。
- 燃焼反応度：UO₂-Gd 集合体におけるコードシステム間の差異が大きい。
- 核分裂率分布及び局所ピーキング係数：局所ピーキング係数のコード間の差異は1%程度である。UO₂-Gd 集合体では、Gd ピンの核分裂率のばらつきが通常ピンのそれに比べて2~3倍あり、局所ピーキング係数のばらつきの要因になっているものと考えられる。MOX 集合体では、集合体コーナー部ピンのばらつきが他のピンに比べて2倍程度である。
- 瞬時変化ドップラー反応度：UO₂-Gd 集合体では結果のばらつきは小さい。これに対し、MOX 集合体ではコード間で明確な差異が認められる。この差異は燃焼とともに減少する。
- 瞬時変化全温度反応度：コード間の差異は大きい。UO₂-Gd 集合体では燃焼とともにばらつきが拡大するが、MOX 集合体では逆に減少する。

これらの傾向のうち、多くはピンセル問題と共に要因に基づくものであると考えられる。特に、MOX 集合体については、観測された差異の大部分はピンセル問題と共に通である。一方、UO₂-Gd 集合体については、Gd ピンの燃焼特性評価の差異に起因すると考えられる差異がいくつか見うけられた。今後、より詳細な原因分析を行う上で、Gd 同位体組成の燃焼度依存性の相互比較を行うことが必要であると考えられる。

4.3 BWR 集合体

4.3.1 BWR 集合体ベンチマーク解析参加機関及びコードシステム

BWR 集合体ベンチマーク解析には、原子燃料工業、日本ニュクリアフュエル、東電ソフトウェア、原子力発電技術機構及び大阪大学の 5 機関が参加した。各機関により用いられたコードシステム及びライブラリならびに計算ケースを表 4.3.1 に示す。

表 4.3.1 BWR 集合体ベンチマーク解析参加機関及びコードシステム、計算ケース

機関名		原子燃料 工業	日本ニュクリアフュエル	東電ソフ トウェア	原子力発電 技術機構	大阪大学
使用コード		CASMO-4	TGBLA	VMONT	CASMO-4	CASMO-4
使用断面積		L-Library (ENDF/B-I V ベース)	ENDF/B-V と ENDF/B-IV	JENDL3.2 と JENDL2	JEF2.2	L-Library (ENDF/B-IV ベース)
計算ケ ース	UO ₂ -Gd	—	○	○	○	○
	MOX	○*	—	—	○	○

○：解析結果あり、—：解析結果なし、*：一部解析結果なし

以下の節においては、各コードシステムの結果を区別するにあたり、それぞれを次のような略称で示している。表 4.3.1 の左から順に、CASMO4 (B4,NFI)、TGBLA (B5,JNF)、VMONT (J32,JNF)、CASMO4 (JEF22,TSI)、CASMO4 (B4,NUPEC)、MVP-BURN (J32,OSAKA-U) としている。

4.3.2 解析結果の相互比較

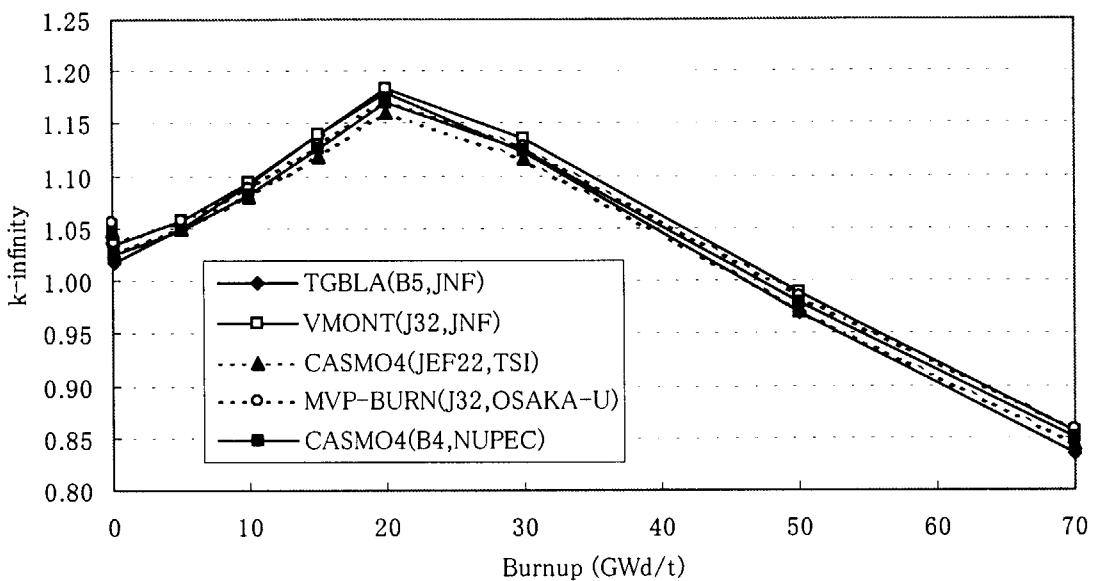
ここでは、無限増倍率、燃焼反応度、核分裂率分布及び局所ピーキング係数、瞬時ボイド率変化特性及び瞬時温度変化特性について、報告された解析結果の相互比較を行う。

(1) 無限増倍率

UO₂-Gd 集合体に対する無限増倍率の燃焼特性を図 4.3.1 に示す。

燃焼に伴う無限増倍率の変化については、20GWd/t のあたりで Gd が燃え尽きるという、全体的な燃焼特性は 4 機関(5 コードシステム)で一致している。しかしながら詳細な点については以下のような差異が認められる。

0%燃焼時点における MVP-BURN(J32,OSAKA-U)と TGBLA(B5,JNF)の差はおよそ 1.7% Δk/kk' である。この差異については、ピンセル計算及び PWR 集合体ベンチマーク解析結果で観察された差異と整合性があり、ライブラリの違いが原因であると推定される。

図 4.3.1 BWR-UO₂-Gd 集合体における無限増倍率の燃焼特性

MOX 集合体に対する無限増倍率の燃焼特性を図 4.3.2 に示す。

燃焼に伴う無限増倍率の変化については、20GWd/t のあたりで Gd が燃え尽きるという、全体的な燃焼特性は 4 機関(4 コードシステム)で一致している。CASMO4(B4,NFI)及び CASMO4(B4,NUPEC)はほぼ一致している(両結果をまとめて CASMO4(B4)と示すことにする)。Gd が燃え尽きる 20GWd/t までの燃焼期間では、CASMO4 (B4)、CASMO4 (JEF22,TSI)及び MVP-BURN (J32,OSAKA-U)の結果の間に違いがみられる。

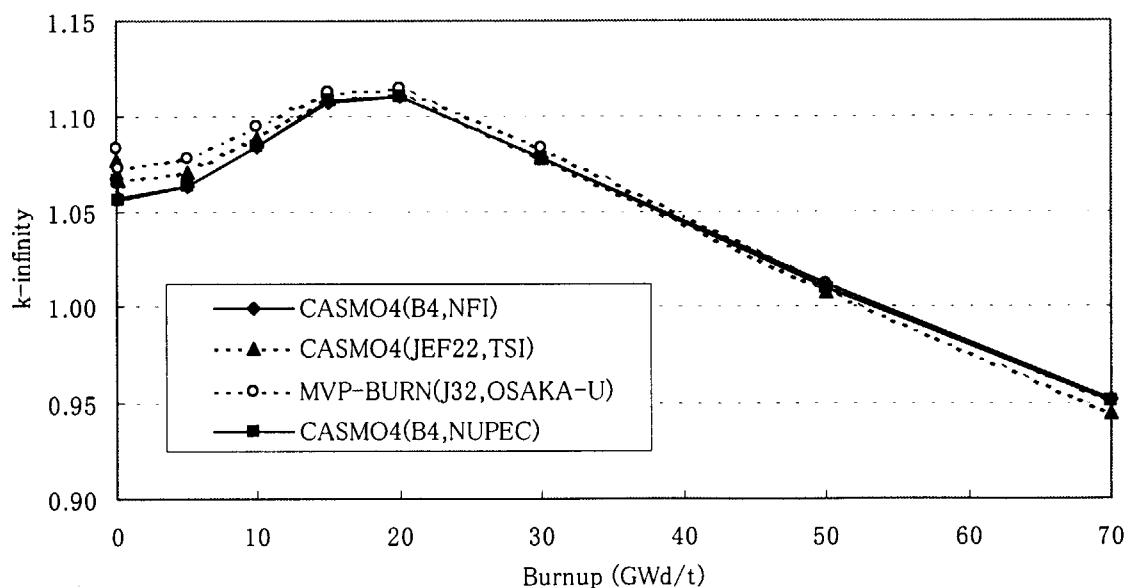


図 4.3.2 BWR-MOX 集合体における無限増倍率の燃焼特性

また同じ CASMO-4 の場合でもライブラリが異なることで傾向が異なっている。0%燃焼時点での最大値を示す MVP-BURN (J32,OSAKA-U)と同じく最小値を示す CASMO4 (B4)の差はおよそ $1.4\% \Delta k/kk'$ である。この違いはピンセル計算結果などと同様であることから、主としてライブラリの違いに起因すると考えられる。

(2) 燃焼反応度

ここでも、0%燃焼時点の無限増倍率からの反応度差を燃焼反応度と定義して示す。

$\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体の燃焼反応度を図 4.3.3 に示す。Gd の燃焼がすすむ 20GWd/t までは TGBLA (B5,JNF) の燃焼反応度は他の結果より大きく、Gd の反応度効果に差異があるものと推定される。燃焼反応度が最大となる 20GWd/tにおいて、最大値を示す TGBLA(B5,JNF) と最小値を示す CASMO4(JEF22, TSI) の間ではおよそ $2.4\% \Delta k/kk'$ の違いがある。70GWd/t における同様の差はおよそ $1.6\% \Delta k/kk'$ である。

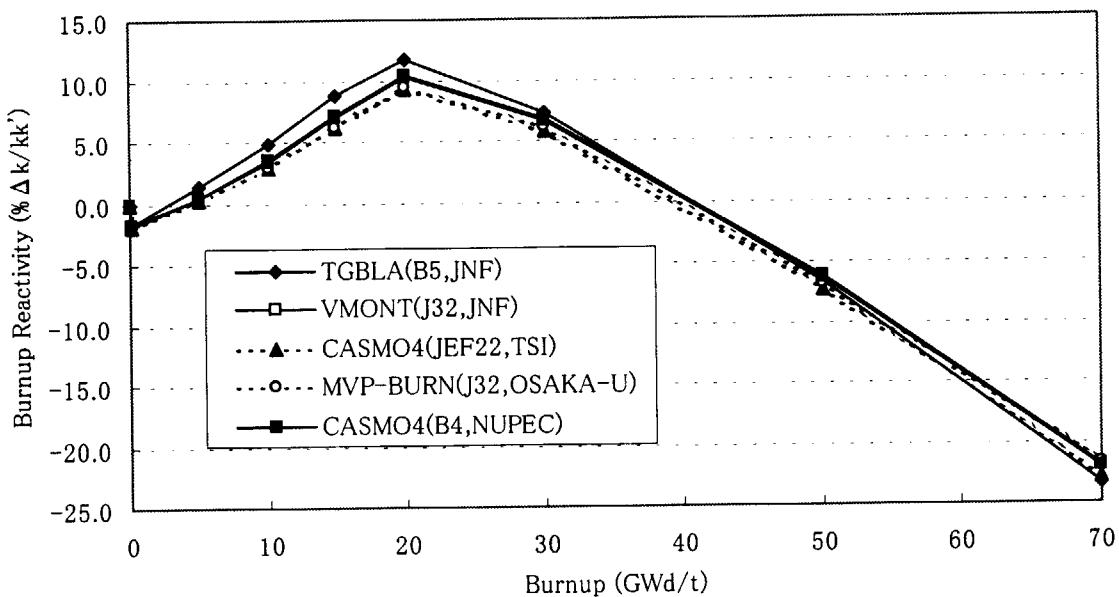


図 4.3.3 BWR-UO₂-Gd 集合体の燃焼反応度

次に MOX 集合体の燃焼反応度を図 4.3.4 に示す。

$\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体の場合に比べて傾向の差がはっきりと見られる。CASMO4 (B4)、CASMO4 (JEF22,TSI) 及び MVP-BURN (J32,OSAKA-U) では、異なった傾向を示す。CASMO4 (JEF22,TSI) と MVP-BURN (J32,OSAKA-U) は、ほぼ同様な値を示している。そして CASMO4 (B4) では、CASMO4 (JEF22,TSI) 及び MVP-BURN (J32,OSAKA-U) に比べて Gd の燃焼に伴う正の燃焼反応度が大きいという結果である。同じ CASMO4 を用いた解析であっても解析機関が異なることでの傾向が異なっているが、その一因として、図 4.3.2 に示した無限増倍率の燃焼特性でみられるように 0GWd/t 燃焼時点での無限増倍率の違いが考えられる。燃焼反応度に見られた傾向の差に

について、ライブラリや燃焼チェーンの違い、また Gd ロッドの扱いを含めた計算モデルの違いによる影響などについて検討し、今後の課題として差の原因解明をすすめるべきであると考える。

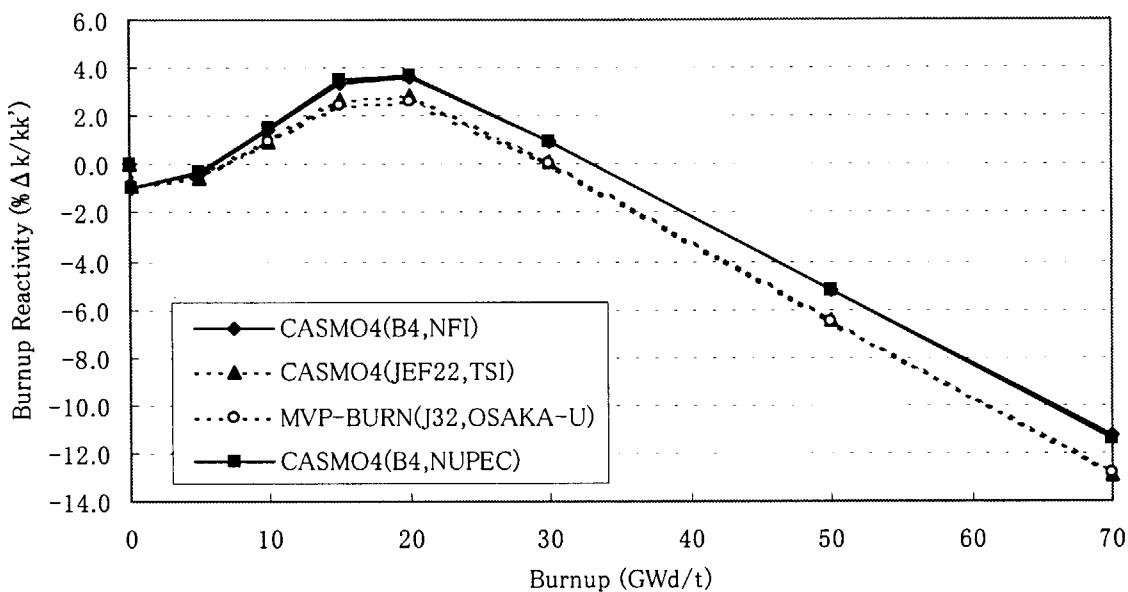


図 4.3.4 BWR-MOX 集合体の燃焼反応度

(3) 核分裂率分布及び局所ピーキング係数

$\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体の局所ピーキング係数の燃焼特性を図 4.3.5 に示す。

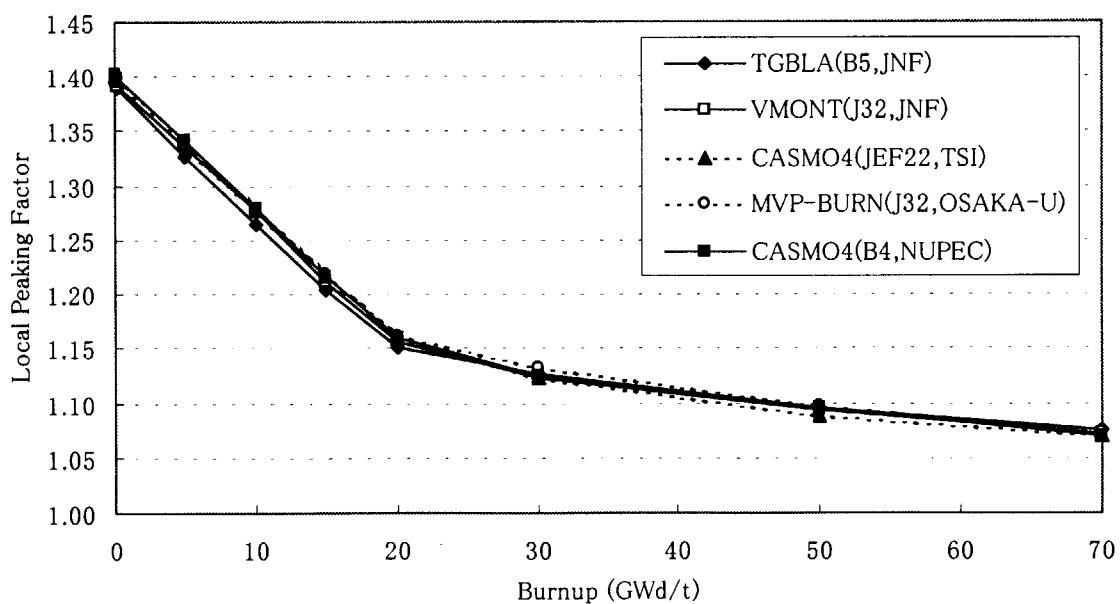


図 4.3.5 BWR-UO₂-Gd 集合体における局所ピーキング係数の燃焼特性

無限増倍率や燃焼反応度に比べ、各コードシステム間の局所ピーキング係数の違いは小さく最大でもおよそ 1%である。ただし、0GWd/t から 20GWd/t の燃焼期間において TGBLA(B5,JNF) の値は他の結果と比べ、常に小さい。この原因について考察するため図 4.3.6 に示した 2ヶ所の燃料ピン位置(Gd ロッド)における核分裂率分布の値を比較する。

図 4.3.6 に示した燃料ピン位置における各コードシステムの結果を表 4.3.2 に示す。20GWd/t までの燃焼期間において各コードシステム間の差は最大でおよそ 5%あるが、20GWd/t 以降においてはその差はおよそ 1%である。20GWd/t までの燃焼期間においては TGBLA(B5,JNF)が他の結果に比べて常に 5%程度大きな値となっている。Gd ロッドにおける核分裂率を大きく評価していることが、集合体としての局所ピーキング係数を小さく評価していることにつながっていると考えられる。

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1										
2			Gd					Gd		
3		Gd(2, 3)		Gd		Gd		Gd		
4			Gd					Gd		
5										
6			Gd(3, 6)					Gd		
7		Gd		Gd		Gd		Gd		
8			Gd					Gd		
9										

Gd : Gd ピン W/R : ウォーターロッド部

図 4.3.6 BWR-UO₂-Gd 集合体における核分裂率分布の比較に用いた燃料ピン位置

表 4.3.2 BWR-UO₂-Gd 集合体の(2,3)及び(3,6)位置における核分裂率分布の燃焼変化

コードシステム	TGBLA (B5, JNF)	VMONT (J32, JNF)	CASMO4 (JEF22, TSI)	CASMO4 (B4, NUPEC)	MVP-BURN (J32, OSAKA-U)
(2, 3) 0 (GWd/t)	0.381	0.363	0.360	0.364	0.359
0.1	0.389	0.371	0.367	0.371	0.370
5	0.501	0.480	0.475	0.478	0.481
10	0.628	0.607	0.599	0.604	0.605
15	0.753	0.737	0.728	0.736	0.732
20	0.852	0.850	0.842	0.848	0.841
30	0.892	0.894	0.896	0.896	0.891
50	0.925	0.924	0.930	0.927	0.925
70	0.929	0.925	0.935	0.931	0.930

(3, 6) 0 (GWd/t)	0.378	0.357	0.356	0.361	0.355
0.1	0.386	0.364	0.364	0.369	0.362
5	0.496	0.471	0.473	0.476	0.471
10	0.626	0.599	0.604	0.606	0.601
15	0.764	0.739	0.744	0.747	0.740
20	0.883	0.877	0.875	0.878	0.868
30	0.918	0.917	0.926	0.926	0.921
50	0.943	0.942	0.953	0.955	0.946
70	0.954	0.955	0.966	0.967	0.959

次に MOX 集合体の局所ピーキング係数の燃焼特性を図 4.3.7 に示す。

UO₂-Gd 集合体よりも参加機関が少ないこともあるが、各コードシステム間での差は最大でも 1%未満であり、良く一致している。

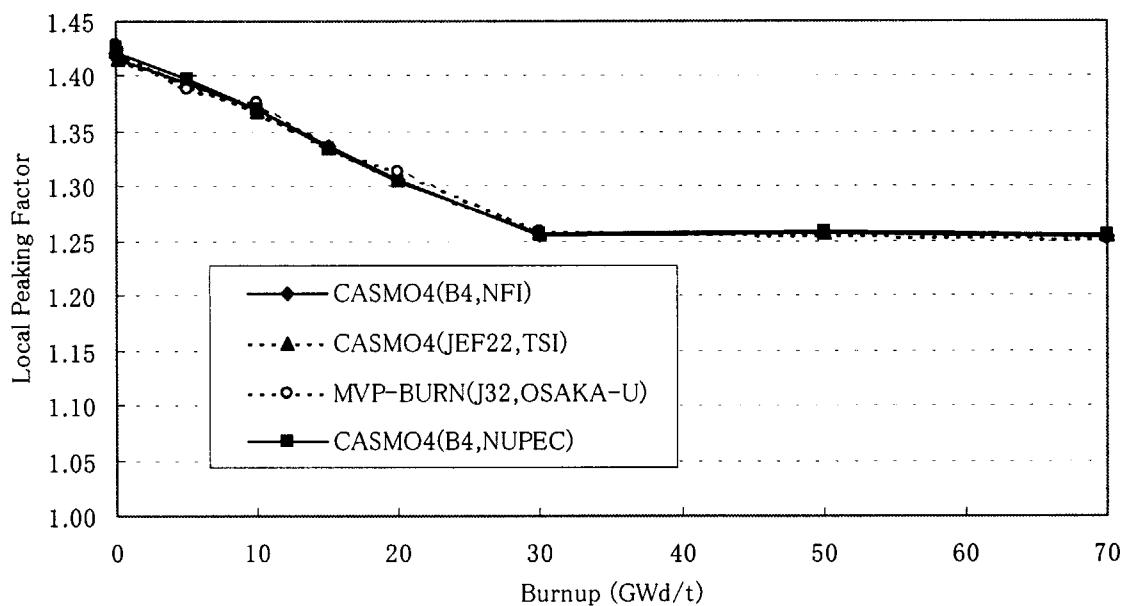


図 4.3.7 BWR-MOX 集合体における局所ピーキング係数の燃焼特性

(4) 瞬時ボイド率変化特性

UO₂-Gd 集合体のボイド反応度(0%から 40%)の燃焼特性を図 4.3.8、ボイド反応度(40%から 70%)の燃焼特性を図 4.3.9、ボイド反応度(0%から 70%)の燃焼特性を図 4.3.10 に示す。

図 4.3.9 に示したボイド反応度(40%から 70%)の燃焼特性においては、0GWd/t から 20GWd/t の燃焼期間における傾向は、TGBLA(B5,JNF)が他の結果と傾向が異なる。これまでにも述べたように Gd の燃焼速度の影響などが一因と考えられるが、詳細な検討は今後の課題したい。TGBLA(B5, JNF)を除いた他のコードシステム結果では、ほぼ全燃焼期間にわたり CASMO4(JEF22, TSI)が絶対値で大きい反応度、CASMO4(B4, NUREC)が絶対値で小さい反応度となっている。また各コードシステム間では、全燃焼期間にわたってボイド反応度(0%から 40%)

の燃焼特性では 15%から 20%程度の差、ボイド反応度(40%から 70%)の燃焼特性では 0GWd/tにおいて 50%程度の差が見られる。ライブラリの違いや Gd ロッドの扱いによる影響などが原因と考えられるが、ピンセル計算ベンチマークにおけるボイド反応度の比較結果を参考しながら、原因の究明を図っていきたいところである。

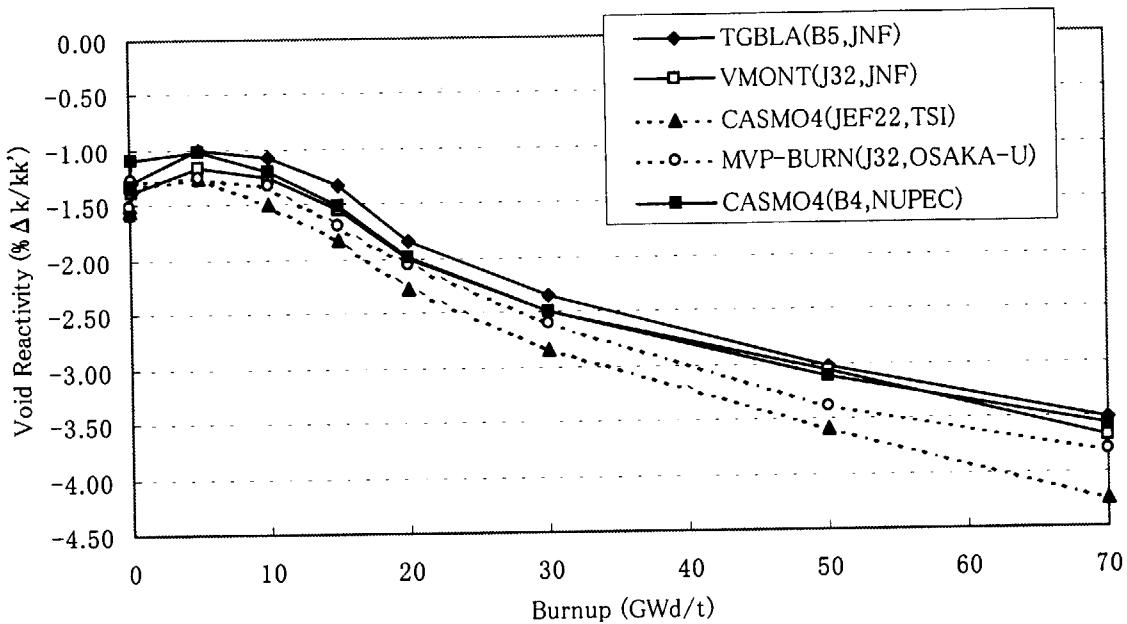


図 4.3.8 BWR-UO₂-Gd 集合体におけるボイド反応度(0%から 40%)の燃焼特性

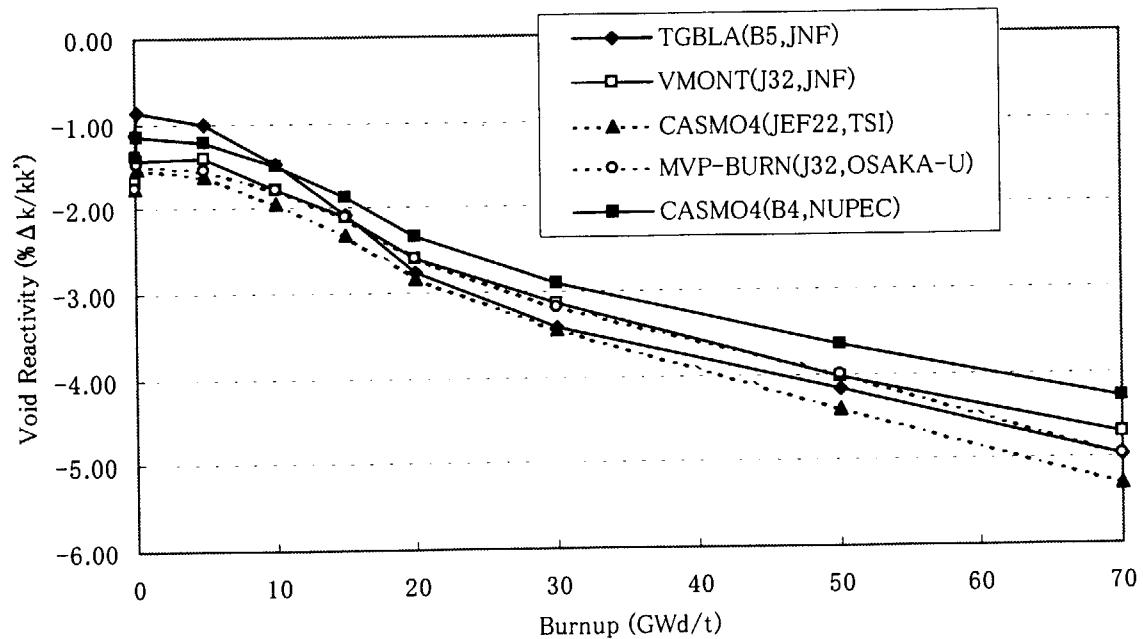


図 4.3.9 BWR-UO₂-Gd 集合体におけるボイド反応度(40%から 70%)の燃焼特性

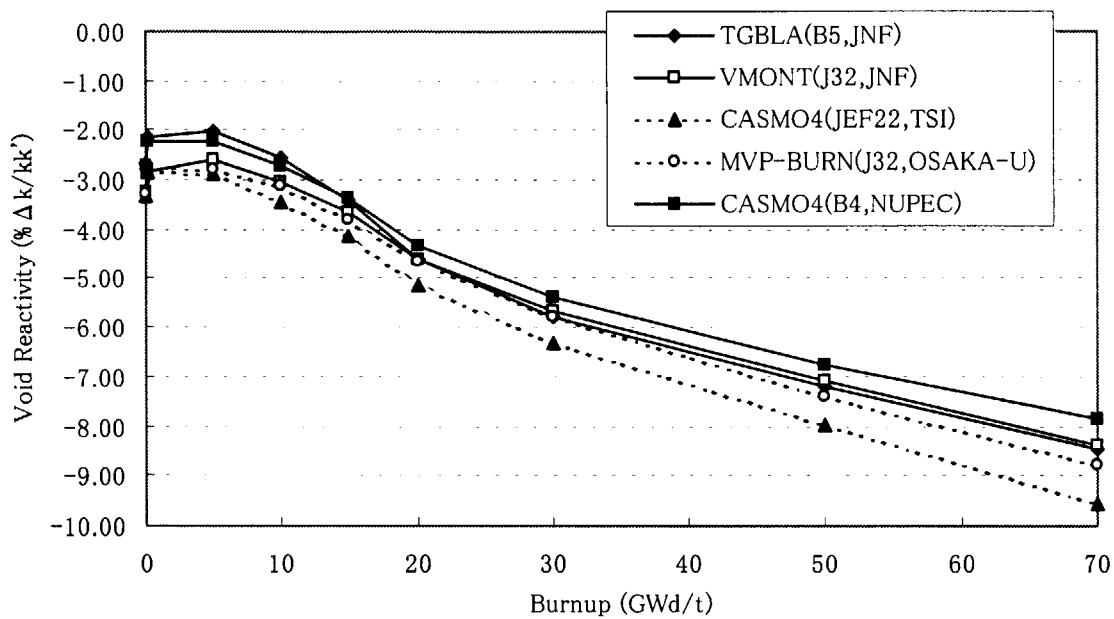


図 4.3.10 BWR-UO₂-Gd 集合体におけるボイド反応度(0%から 70%)の燃焼特性

次に MOX 集合体のボイド反応度(0%から 40%)の燃焼特性を図 4.3.11、ボイド反応度(40%から 70%)の燃焼特性を図 4.3.12、ボイド反応度(0%から 70%)の燃焼特性を図 4.3.13 に示す。

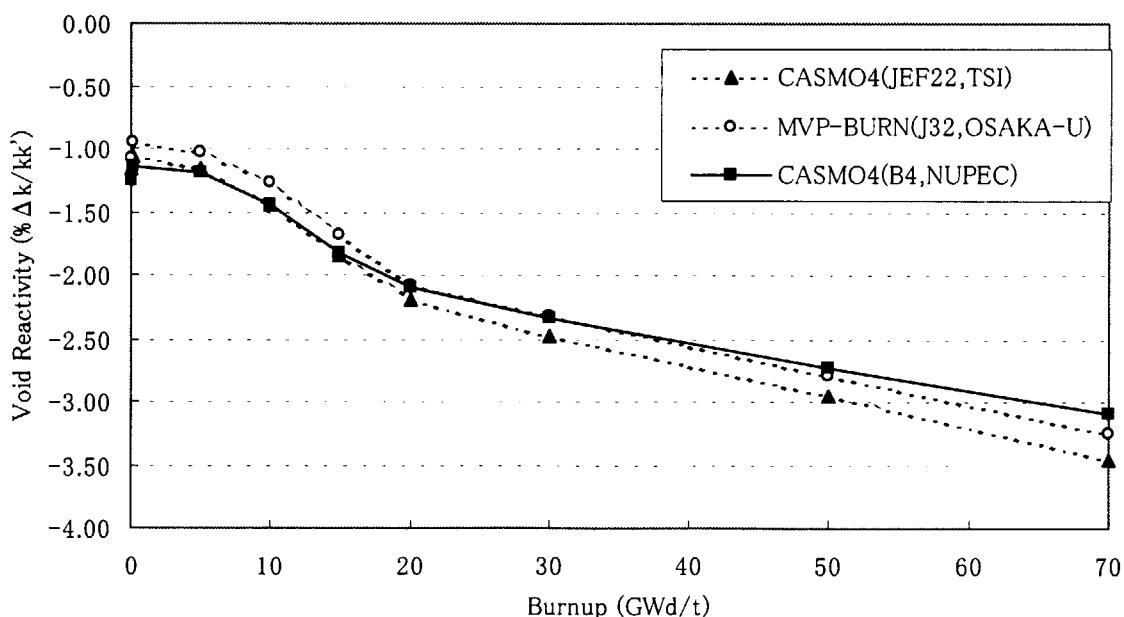


図 4.3.11 BWR-MOX 集合体におけるボイド反応度(0%から 40%)の燃焼特性

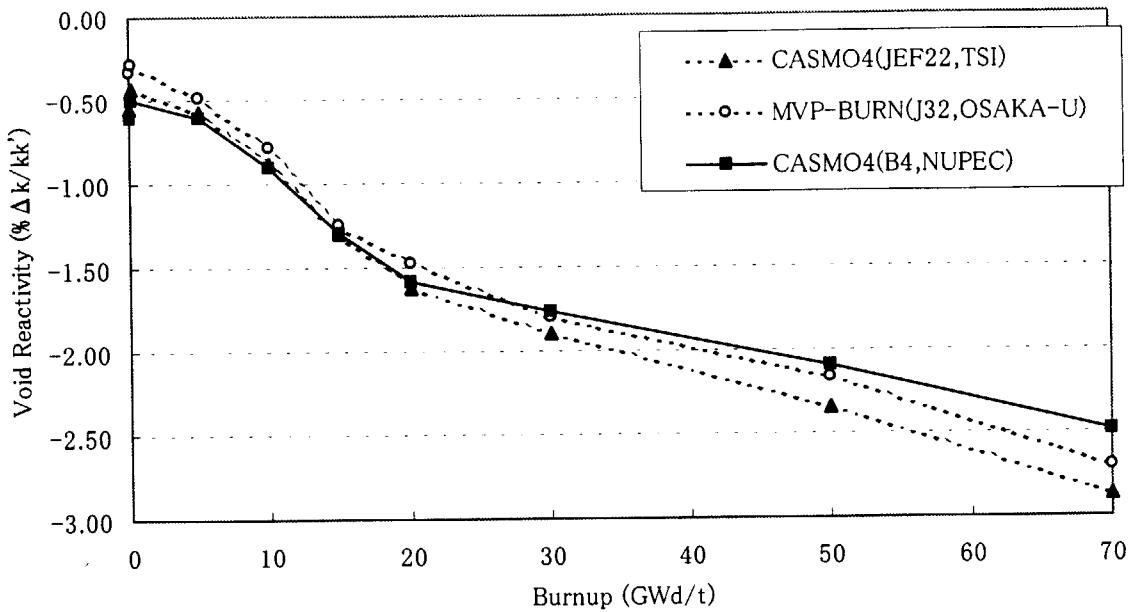


図 4.3.12 BWR-MOX 集合体におけるボイド反応度(40%から 70%)の燃焼特性

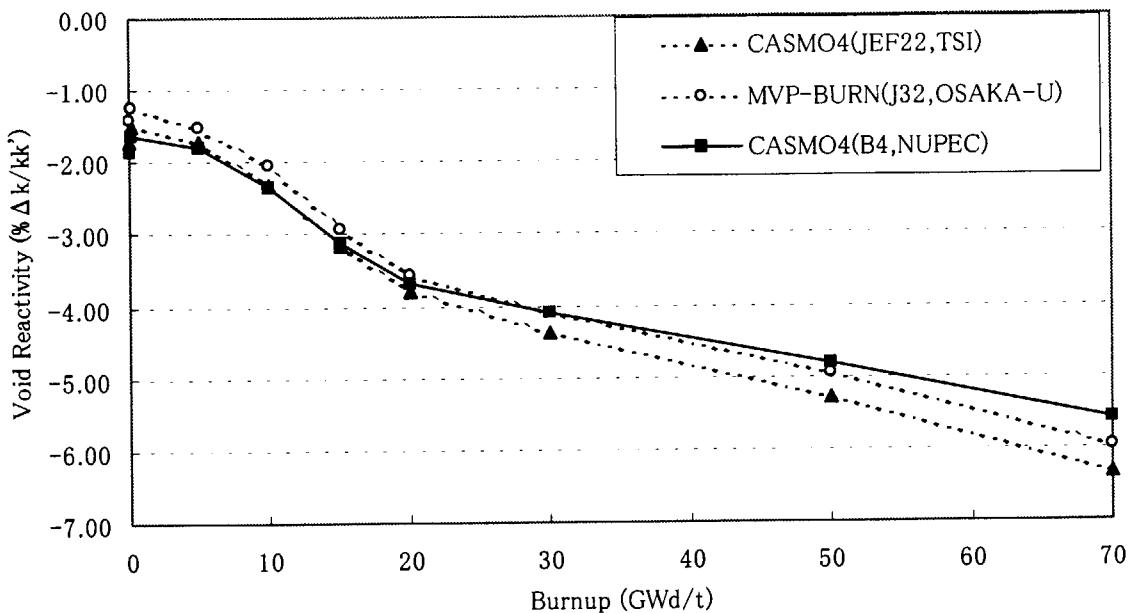


図 4.3.13 BWR-MOX 集合体におけるボイド反応度(0%から 70%)の燃焼特性

上記の図より、CASMO4(JEF22, TSI)とMVP-BURN (J32, OSAKA-U)の燃焼特性とCASMO4(B4, NUPEC)の燃焼特性では、20GWd/tを境に異なった傾向となることが特徴的である。またこの3機関の結果だけについて見た場合、同様の傾向はUO₂-Gd集合体の場合にも見られる。しかしながら20GWd/tを境に傾向が変化するという燃焼特性における傾向の違いはピンセル計算ベンチマークでは見られなかったものである。集合体体系における水ロッドやGdロッド

ドなどの影響が、燃焼特性における傾向の違いの一因と考えられるが、詳細な検討は今後の課題としたい。

ボイド反応度の絶対値を比較した場合、ボイド反応度(0%から40%)の燃焼特性では全燃焼期間にわたって各コードシステム間で15%程度の差、ボイド反応度(40%から70%)の燃焼特性では、0GWd/tにおけるボイド反応度の絶対値が小さいこともあり70%以上の大きな差が見られる。

(5) 瞬時温度変化特性

まず「Hot 40% void(燃料900K、被覆材と減速材600K)」と「Doppler 40% void(燃料1800K、被覆材と減速材600K)」の結果を基にドップラー反応度を求め比較検討を行う。UO₂-Gd集合体における燃焼特性を図4.3.14に示す。各コードシステムの結果を比較すると、TGBLA(B5,JNF)の燃焼特性は他のコードシステムと少し異なった傾向であるようだが、全体的にはほぼ同じ燃焼特性が得られている。概ね CASMO4(JEF22,TSI)が最も絶対値が大きく、同じく MVP-BURN(J32,OSAKA-U)が最も絶対値が小さいドップラー反応度を示している。これはピンセル計算結果にもみられる同様の傾向である。

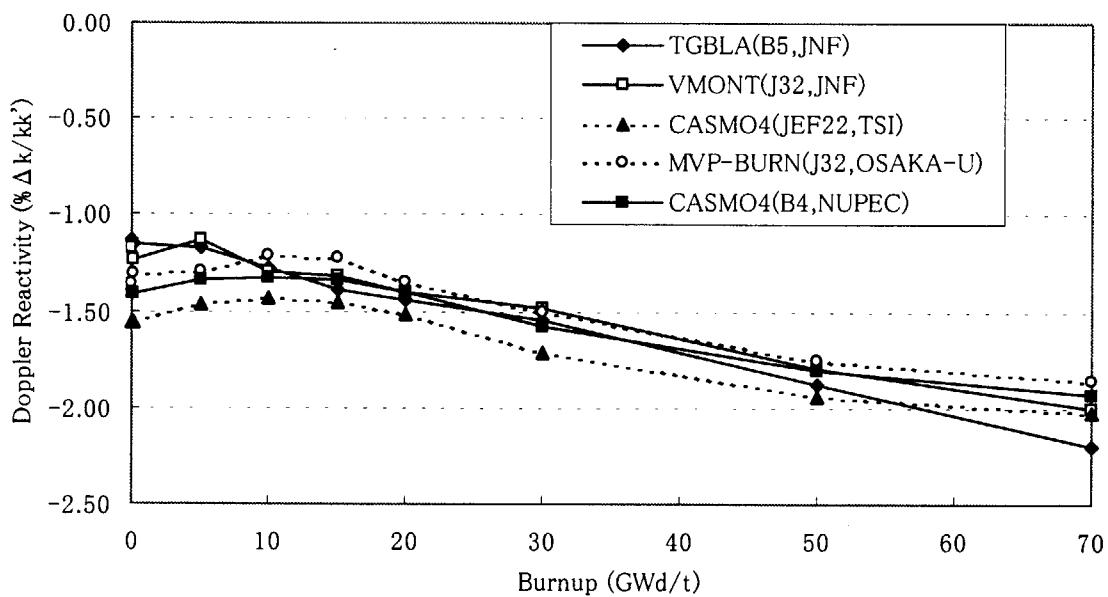


図4.3.14 BWR-UO₂-Gd集合体におけるドップラー反応度の燃焼特性

次に MOX 集合体におけるドップラー反応度の燃焼特性を図4.3.15に示す。

CASMO4(JEF22,TSI)と CASMO4(B4,NUPEC)の燃焼特性は良く似ているが、MVP-BURN(J32,OSAKA-U)の燃焼特性は、10GWd/tまでの燃焼初期においてCASMO4の結果とは異なった傾向が見られる。しかしながら MVP-BURN(J32,OSAKA-U)はモンテカルロ解析結果であり反応度の絶対値でおよそ0.1%Δk/kk'の偏差があることを考慮に入れると、燃焼特性としては有意な違いとはみなせないと考えられる。ただし全燃焼期間にわたり、各コードシステム間で10%から20%の差がみられる。

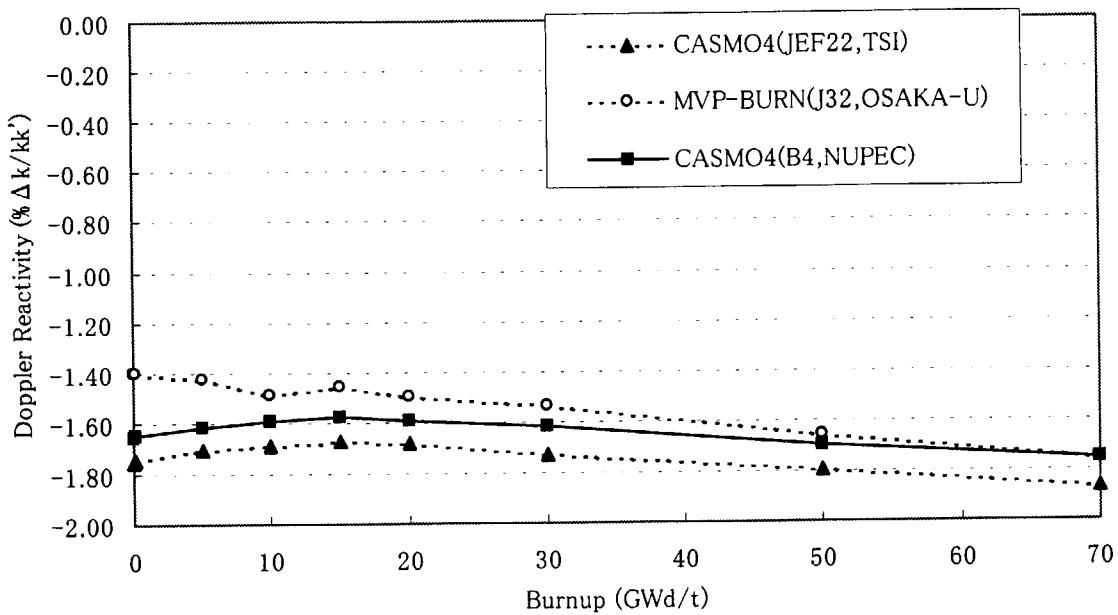
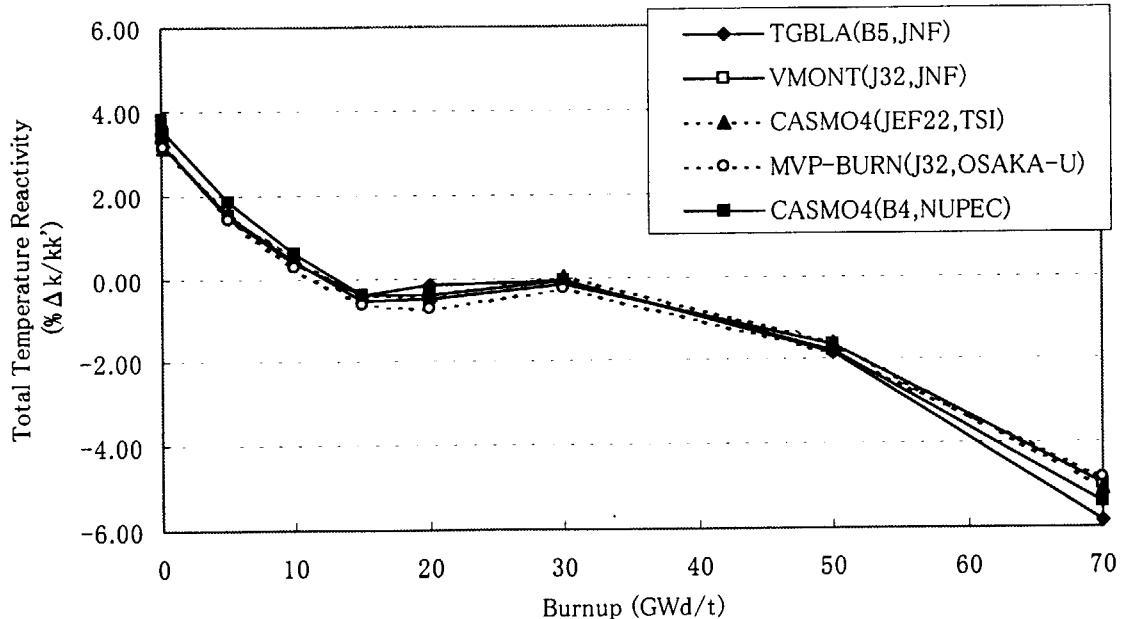


図 4.3.15 BWR-MOX 集合体におけるドップラー反応度の燃焼特性

次に「Hot 0% void(燃料 900K、被覆材と減速材 600K)」と「Cold 0% void(燃料、被覆材、減速材すべて 300K)」の結果を基に全温度反応度($1/(Hot)-1/(Cold)$)を求め比較検討を行う。

$\text{UO}_2\text{-Gd}$ 集合体における全温度反応度の燃焼特性を図 4.3.16 に示す。各コードシステム間でよく一致していることがわかる。

図 4.3.16 BWR-UO₂-Gd 集合体における全温度反応度の燃焼特性

次に MOX 集合体における全温度反応度の燃焼特性を図 4.3.17 に示す。

反応度の絶対値が小さいために、各コードシステム間の差の相対値は大きくなるものの、全体的な燃焼特性はほぼ同じである。また 20GWd/t 以降の燃焼期間における傾向が各コードシステム間で少し異なる。また同様の傾向がボイド反応度についても見られる。しかしながら傾向の違いに関する詳細な検討は今後の課題としたい。

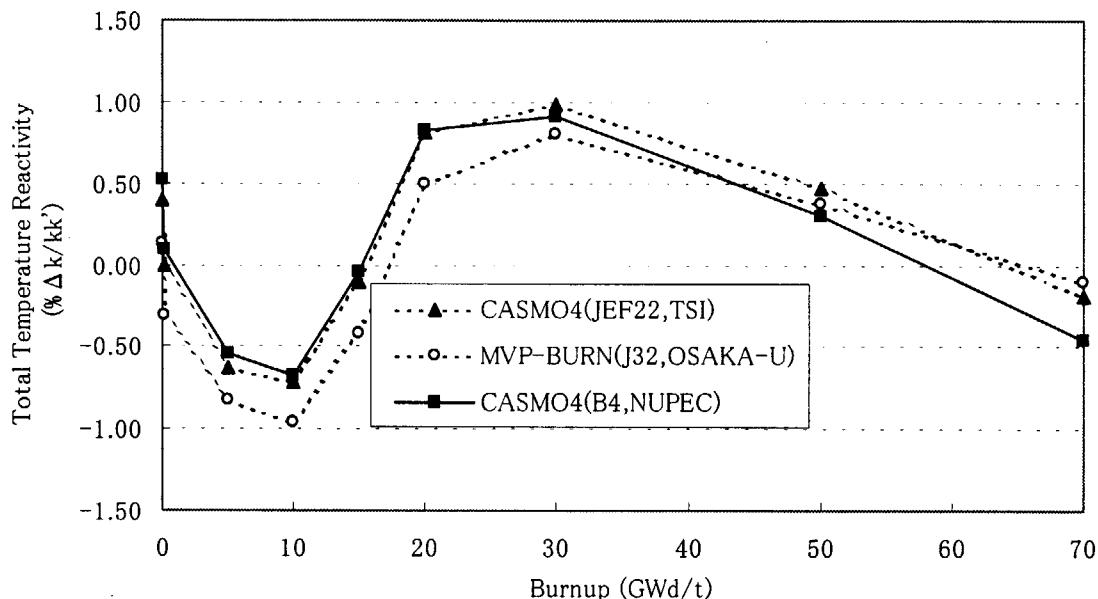


図 4.3.17 BWR-MOX 集合体における全温度反応度の燃焼特性

4.3.3 まとめ及び今後の検討課題

本節では、BWR 集合体ベンチマークにおいて、5 機関（6 コードシステム）から提出された解析結果に基づいて結果の相互比較及び分析を行った。

無限増倍率については、0GWd/t 燃焼時点において、差が $1\% \Delta k/kk'$ 以上存在している。また、ボイド反応度や全温度反応度については、各コードシステム間での差が大きい。しかしながら各コードシステムで使用している断面積ライブラリや燃焼チェーンが異なるにも係わらず 70GWd/t までの燃焼期間では似通った傾向を示す。さらに本ベンチマークで検討した 70GWd/t までの燃焼期間において、燃焼度がすすむにつれ各コードシステム間の差が拡大するということはみられない。一方、局所ピーキング係数は各コードシステム間で極めて良く一致している。核分裂率分布の一致も良く Gd ロッドの核分裂率分布の値に幾らかの差が見られる程度である。

今後の検討課題としては、次のような事柄が挙げられる。ピンセル計算結果にも見られた同様の差や傾向については、ピンセル計算結果の詳細な検討により基本的な部分を解明できるものと期待している。しかしながら集合体計算結果のみに見られた傾向であるボイド反応度の燃焼特性の違いについては、集合体計算レベルでの原因究明が望まれる。そのため、本ベンチマーク問題では課されていなかったデータ、例えば燃料ピン内の主要核種の原子数密度などを比較検討することも必要となると考えられる。

5. まとめ

表 5.1 には、提出された結果すべてについて提出機関と使用コードをまとめて一覧表として示した。これだけ広範な機関や解析コードによる結果が集まり、比較検討がなされた例は国内ではかつて例を見ず、画期的な試みである。

前章に示した通り、提出された結果は、ピンセル問題の一群縮約断面積を除くすべてについて相互比較が行われた。比較の初期の段階で、特異な結果を示したいくつかについては既に計算ミスであることが判明し再評価がなされている。前章の結果は 6 月現在のもので、それまでに分かっている再評価結果は反映済みである。現在は、前章の比較結果を受けて引き続き各提出機関による結果の品質チェックが行われている段階である。従って、現在、集約された結果は正確には予備解析として位置付けられるべきものである。

表 5.1 ベンチマーク計算参加機関及び使用コード一覧

No.	機関	使用コード	ベース ライブラリ	ピンセル		PWR 集合体		BWR 集合体	
				UO ₂	MOX	UO ₂	MOX	UO ₂	MOX
1	原研	MVP-BURN	JENDL-3.2	○	○				
2	原研	SRAC95	JENDL-3.2	○	○				
3	原研	SRAC95	ENDF/B-VI(R5)	○	○				
4	原研	SRAC95	JEF-2.2	○	○				
5	京大炉	MVP-BURN	JENDL-3.2			○	○		
6	大阪大学	MVP-BURN	JENDL-3.2					○	○
7	TSI	CASMO-4	JEF-2.2	○	○			○	○
8	原燃工	CASMO-4	ENDF/B-IV	○	○	○	○		
9	原燃工	NULIF	ENDF/B-V	○					
10	NUPEC	CASMO-4	ENDF/B-IV					○	○
11	四電	SHETRAN	ENDF/B-VI(R3)	○	○	○	○		
12	JNF	TGBLA	ENDF/B-V	○	○			○	
13	JNF	VMONT	JENDL-3.2	○	○			○	
14	東芝	MCNP-BURN	JENDL-3.2	○	○				
15	電中研	FLEXBURN	JENDL-3.2	○	○	○	○		
16	電源開発*	LWR-WIMS	JEF-2.2	○	○				
計	11	10		13	12	4	4	5	4

(*計算は開発計算センターによる)

完全に品質チェックが終了していない段階ではあるが、そういう状態であることを踏まえつつ、今までに得られた結果と今後の課題について、本章で総括してみたい。

まず、計算ミスとは考えられないものの、ひとつの結果だけが明らかに特異な結果を示して

いるケース、例えば、図 4.1.37(5) ^{238}Pu 数密度の燃焼変化(MOX 燃料)に見られるようなケースについては、比較的単純な問題点が当該コードに見つかる可能性がある。こうしたケースは当該コードを開発または使用する機関にとって大変に有益な情報であり、本 WP 活動の成果のひとつと考えられる。

正解のないベンチマーク問題の場合は、結果の相互比較が重要な意味を持つがその際、差異が核データによるものなのか、計算手法によるものなのかということを検討することは非常に重要である。こうした観点から今回は、SRAC95 を用いて、3 つの異なる核データライブラリによる計算が実施されている(表 5.1 の No.2,3,4)。今までに得られた結果からは、ウラン燃料では例えば、図 4.1.3 や図 4.1.5 に見られるように、同一コードによる異なる核データ間の差より、同一核データによる異なるコード間のほうが大きく、つまり計算手法の差異に注目すべきとの結果を得ている。但し、同一核データとは言え、コードが違えば、多群定数に縮約するときの方法も異なり、それが違いを生むことも十分考えられる。またひとつの群定数セットに含まれる群定数すべてが同一核データセットからのものであるかという点にも注意が必要であり、今後の検討の際に念頭においておく必要がある。MOX 燃料においては、核データ間のばらつきは少し大きくなり、コード間のばらつきに比べても無視し得なくなる(例：図 4.1.30, 図 4.1.33)。

計算手法の違いを検討するに当たっては、最も確からしい計算方法による結果がひとつの基準解としての性格を持つ(正解とは限らない)。連続エネルギーモンテカルロ計算はその候補に該当するが、結果には常に統計誤差を伴う。更に燃焼計算の場合は、燃焼チェインモデルや燃焼ステップ、領域分割等にも左右されるので注意が必要である。第 4.1 節では、ウラン燃料ピンセルにおけるふたつの連続エネルギーモンテカルロ計算結果(MVP-BURN と MCNP-BURN)について比較検討を行い、燃焼計算における無限増倍率については比較的信頼性が高いことを確認している。しかし、ボイド反応度やドップラー反応度の計算のような小さな反応度量を計算する場合には、統計誤差が無視し得ないことも同時に指摘しており、再計算が必要なケースもある(例：図 4.1.34)。

結果のばらつきの大小は、検討課題を抽出するための重要な情報である。その中で、一致度の良いものは、正解とは限らないものの、やはり比較的良好な精度が期待できる。例えば、ウラン燃料ピンセルにおける無限増倍率の燃焼変化(図 4.1.1)や集合体問題の局所ピーキング係数(図 4.2.9, 図 4.2.15, 図 4.3.5, 図 4.3.7)などがそれに該当する。一方では、MOX 燃料ピンセルのボイド反応度(図 4.1.32)のように比較的重要なパラメータではばらつきの大きいものも見られ、今後の検討に期待がかかる。

集合体の結果を検討する場合は、ピンセルの結果との比較が重要になる。ピンセルでは見られなかった傾向が見られる場合、それは集合体に特有の問題である。例えば、BWR ウラン集合体のボイド反応度の燃焼変化(図 4.3.9)を見るとひとつだけ異なる挙動をとるものがあり、この傾向はピンセルでは見られていない。ガドリニアの燃焼特性に関係すると思われるが、大変興味深い検討課題である。

本格的な検討はこれからであるが、それに当たってはばらつきの原因特定による課題抽出と

とともに、専門家の間での最良解についての合意形成に努力したい。今後、WP 関係者以外によって本ベンチマーク問題が利用される場合、我が国の専門家の多くが「お手本」としてのお墨付きを与えたような解があれば、利用者にとっては非常に有益な情報となる。そのためには、現在使用可能な実験データや照射後試験データを用いて、ベンチマーク問題の正解を推定することも重要である。また合意形成については、WP メンバーを超えて広く意見を求める努力も払っていくべきと考える。

炉物理研究委員会は、先頃、本 WP の今後 2 年間の活動継続を決定した。そもそも本 WP の活動内容は継続が必須のものであったが、それが正式に認められたわけである。今後の検討では、個々の解析コードの中身に立ち入る必要が生じることも十分考えられ、WP メンバー間の相互理解と協力がより一層重要になってくる。立場の違いや個々の事情にも互いに配慮しつつ、全体として今後の炉物理研究の発展に対し、多少なりとも貢献できるような成果が得られるよう努力していきたい。

付録1：軽水炉次世代燃料の炉物理 WP 活動の経緯

本 WP では、約 2 年間の活動期間中に 4 回の会合が行われた。会合の開催日と主な議事内容を以下に示す。なお、会合前後の期間には、メーリングリスト (ML) を利用した議論が多く行われ、会合そのものと同等の役割を果たしていたことを記しておく。

回 数	開 催 日	主な議事内容
第 1 回	平成 11 年 12 月 3 日	<ul style="list-style-type: none"> ・ リーダー及び幹事の選出 WP 設立の経緯説明の後、WP リーダー及び幹事の選出を行った。 リーダーとして佐治委員、幹事として中島専門委員(H11 年度中は奥村専門委員が代行)、宇根崎専門委員、山本(章)委員が選出された。 ・ 活動内容の検討 予め ML にて募集した本 WP の活動に関する提案の内容を各提案者が紹介し、これをもとに活動内容の検討を行った。この結果、当面の軽水炉高度化計画の次を狙った領域を検討対象とし、相互に信頼性を高めていくことが出来るベンチマーク問題を提案することとした。 以下に、本 WP 活動計画を示す。 <p>活動項目：「軽水炉燃料高度化に係る解析精度検証のためのベンチマーク問題提案」</p> <p>活動内容</p> <ul style="list-style-type: none"> - PWR と BWR における現状、国際ベンチマーク問題のレビュー、バックエンドからの要望調査 (H11 年度) - ベンチマーク問題仕様決定のための調査と設定作業(H12 年度前半) - プレアナリシス及び成果のまとめ (H12 年度後半)

(次頁に続く)

回数	開催日	主な議事内容
第2回	平成12年 3月8日	<ul style="list-style-type: none"> ・国際ベンチマークの紹介 OECD/NEA における幾つかのベンチマーク問題の紹介が行われた。 ・PWR 燃料高度化の現状 PWR 燃料高度化の現状として、国内外での照射及び PIE の実績、解析手法の現状、関連する臨界実験、今後の計画、ベンチマーク問題への要望 (70GWd/t をカバーしてほしい) が説明された。 ・BWR 燃料高度化の現状 BWR 燃料高度化の現状として、高燃焼燃料及び MOX 燃料の開発、MOX 臨界試験について説明があった。 ・バックエンドからの要望 貯蔵及び輸送を主としたバックエンドからの炉物理計算手法に対する要望の説明があった。 ・ベンチマーク問題の提案に向けての議論 以上の報告を受け、本 WP から提案するベンチマーク問題についての議論が行われ、問題作成における以下の基本方針を固めた。 <ul style="list-style-type: none"> - ピンセル及び集合体計算をウラン及び MOX 燃料について行う。 - ピンセルは PWR,BWR 共通の 1 体系とする。 - 燃焼度は 70GWd/t 程度とする。 その後、PWR,BWR について担当者を決め、上記方針に基づき原案を作成してもらい、ML 上で議論し、その結果をもとに、次回会合までにベンチマーク問題（案）として提案することとなった。
第3回	平成12年 10月5日	<ul style="list-style-type: none"> ・ベンチマーク問題の提案 ピンセル、PWR 集合体、BWR 集合体に関するベンチマーク問題設定案の説明が各担当者により行われ、内容に関する議論が行われた。 ・解析例の紹介 設定案に基づく解析例の紹介が行われ、問題の設定条件の妥当性の検討を行った。 ・今後の進め方について ベンチマーク問題の最終仕様決定、各機関による解析の実施、成果の取りまとめについてのスケジュールを検討した。

(次頁に続く)

回 数	開 催 日	主な議事内容
第 4 回	平成 13 年 3 月 12 日	<ul style="list-style-type: none"> ・ ベンチマーク問題予備解析結果の紹介及び結果の比較検討 <p>各機関にて実施した予備解析結果の報告が行われた。また、本会合までに ML 上で配布された結果を用いて行った、結果の比較についての報告・議論が行われた。</p> ・ 学会企画セッションにおける活動報告について <p>学会春の年会炉物理部会企画セッションにおける本 WP の活動報告内容について検討した。</p> ・ 成果のまとめ方について <p>成果報告書の作成スケジュールについて検討した。炉物理研究委員会が開催される 7 月上旬頃の完成を目指すこととした。なお、報告書は原研の公開レポートとして発行することとし、学会誌への投稿、国外への発信については、次期 WP への申し送り事項とすることとなった。</p> ・ 次期活動への意見集約について <p>本 WP の継続の是非について、意見を ML 上で集約し、炉物理研究委員会に提出することとした。</p>

付録2：各機関のベンチマーク予備計算結果

本ベンチマーク計算に参加した各機関ごとの予備計算結果を以下に示す。はじめに、各機関で使用したコード及びライブラリの概要と計算手法について述べた後、ベンチマーク問題により指定された書式における予備計算結果が記載されている。なお、標題に記してある番号は、表5.1のNo.に対応している。

付録2の目次

1.	MVP-BURN コードの概要とベンチマーク計算手法 (原研)	193
2~4.	SRAC95 コードの概要とベンチマーク計算手法 (原研)	199
5.	MVP-BURN コードの概要とベンチマーク計算手法 (京大炉)	214
6.	MVP-BURN コードの概要とベンチマーク計算手法 (大阪大学)	225
7.	CASMO-4 コードの概要とベンチマーク計算手法 (TSI)	235
8(1).	CASMO-4 コードの概要とベンチマーク計算手法 (原燃工)	249
8(2).	CASMO-4 コードの概要とベンチマーク計算手法 (原燃工 : その 2)	260
9.	NULIF コードの概要とベンチマーク計算手法 (原燃工)	261
10.	CASMO-4 コードの概要とベンチマーク計算手法 (NUPEC)	264
11.	SHETRAN コードの概要とベンチマーク計算手法 (四電)	274
12.	TGBLA コードの概要とベンチマーク計算手法 (JNF)	286
13.	VMONT コードの概要とベンチマーク計算手法 (JNF)	295
14.	MCNP-BURN コードの概要とベンチマーク計算手法 (東芝)	304
15.	FLEXBURN コードの概要とベンチマーク計算手法 (電中研)	312
16.	LWRWIMS コードの概要とベンチマーク計算手法 (電源開発)	322

1. MVP-BURN コードの概要とベンチマーク計算手法（原研）

1. 参加者名

奥村啓介

2. 所属機関

日本原子力研究所(JAERI)

3. 使用したコード名及び参考文献

MVP-BURN (MVP/GMVPシステムのVersion2.0 β 6に付属)

Okumura K., Mori T., Nakagawa M. and Kaneko K. : "Validation of a Continuous-Energy Monte Carlo Burn-up Code MVP-BURN and Its Application to Analysis of Post Irradiation Experiment", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **37**, 128 (2000).

4. ベースの核データライブラリ

JENDL-3.2

5. 使用した断面積データ作成のための処理コード及び方法

連続エネルギーモンテカルロコードMVP用中性子断面積ライブラリ作成コードシステム
LICEM(JAERI-Data/Code 96-018)

基準温度MVPライブラリからの任意温度ライブラリ作成ユーティリティ ART

(Mori T., et al., Proc of Int. Conf. M&C'99, Madrid, Vol.2, p.987 (1999))

なお、燃焼計算で使用する擬似F.P.核種には、SRAC95の107群断面積をポイントワイズ断面積に変換したものを使用している。

6. スペクトル計算手法

連続エネルギーモンテカルロ計算 (20MeV~ 10^{-5} eV)

7. 燃焼計算

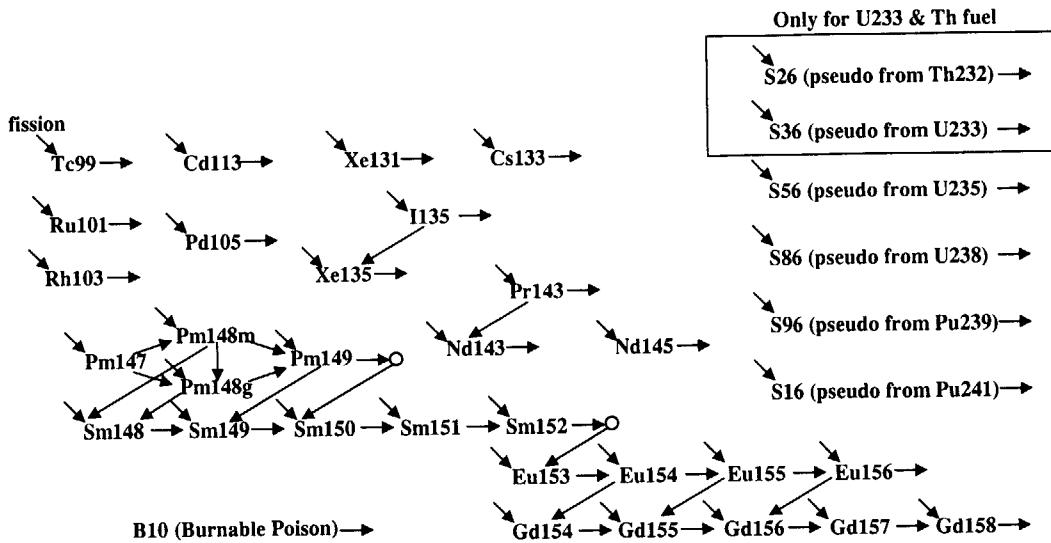
・燃焼方程式の解法

SRAC95とほぼ同じDCHAINコードの手法に基づく。ただし、Predictor-Corrector法を採用している。MVP-BURNでは、全核種を連続エネルギーモデルで扱い、MVPで得られるエネルギー積分された微視的反応率(捕獲、核分裂、N2N)を使用して核種崩壊生成計算を行う。

・燃焼チェーンモデル

U4CM5FP34チェーンモデル：重核種はU-234からCm-245までの20核種、F.P.核種は主要な30核種と4つの擬似F.P.核種を扱う。

重核種については、Cm-246が含まれないことを除けば、SRAC95のU4CM6FP66チェーンモデルの扱いと同じである。F.P.核種については、必要メモリ容量を節約するため詳細なF.P.チェーンモデルと等価な計算結果が得られるように作成した下図の簡略化チェーンモデルを採用している(本文第4.1節参照)。



MVP-BURN の F.P. チェーンモデル(メモリ節約用)

・燃焼ステップ

以下の16ステップで計算を行う。

0GWd/t、0.1、0.5、1.0、2.5、5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、30.0

35.0、40.0、50.0、60.0、70.0

ただし、全燃焼ステップでPredictor-Corrector法を採用する。すなわち、ステップ初期と末期でMVPにより得られる計算結果から微視的反応率を平均値として修正し、再度末期までの核種崩壊生成計算を行う(ステップ当たり2回のMVPを実行)。核種崩壊生成計算は各ステップを更に20のサブステップに分割して行う。

・燃焼ゾーンの分割

本ベンチマーク問題(単一ピンセル計算)では、燃料領域を分割せずに1燃焼領域として扱っている

・その他の燃焼データ

核分裂核種の収率、崩壊定数、核分裂当たりの放出エネルギー、分岐比等のデータはSRAC95と同じ扱いである。

Pin Cell (UO_2) with MVP-BURN + JENDL-3.2

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.4312
0.1	1.3915
5	1.3330
10	1.2834
15	1.2387
20	1.1996
30	1.1318
50	1.0202
70	0.9267

各ステップ 40 万ヒストリ(40 バッチ+捨てバッチ 10)

統計誤差は燃焼平均で 0.06%(表 4 参照)

(n,2n)反応等の寄与により無限増倍率は完全には全生成反応率と全吸収(核分裂+捕獲)反応率との比には一致しない。例えば、燃焼度 0GWd/t において、P/A=1.4294 となる。

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

	燃焼度(GWd/t)									(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
U235	5.0393E-04	5.0299E-04	4.5876E-04	4.1734E-04	3.7899E-04	3.4337E-04	2.7940E-04	1.7717E-04	1.0481E-04	
U236	0.0000E+00	1.8704E-07	8.9240E-06	1.6999E-05	2.4338E-05	3.1012E-05	4.2514E-05	5.8916E-05	6.7534E-05	
U238	7.1571E-03	7.1567E-03	7.1366E-03	7.1151E-03	7.0928E-03	7.0698E-03	7.0210E-03	6.9137E-03	6.7933E-03	
Np237	0.0000E+00	2.0582E-10	1.6718E-07	5.1541E-07	1.0021E-06	1.5872E-06	2.9690E-06	6.0386E-06	8.9653E-06	
Pu238	0.0000E+00	1.2123E-13	5.5485E-09	3.3912E-08	9.9271E-08	2.1422E-07	6.2807E-07	2.3437E-06	5.1918E-06	
Pu239	0.0000E+00	1.0919E-07	1.5178E-05	2.7197E-05	3.6688E-05	4.4184E-05	5.5203E-05	6.6274E-05	6.9799E-05	
Pu240	0.0000E+00	2.0443E-10	7.9857E-07	2.4726E-06	4.4705E-06	6.6478E-06	1.1139E-05	1.9460E-05	2.5982E-05	
Pu241	0.0000E+00	7.6915E-13	1.5992E-07	9.3010E-07	2.2624E-06	3.9421E-06	7.7758E-06	1.5235E-05	2.0429E-05	
Pu242	0.0000E+00	2.6541E-16	2.9383E-09	3.5575E-08	1.3621E-07	3.3060E-07	1.0411E-06	3.7029E-06	7.5587E-06	
Am241	0.0000E+00	6.4782E-17	7.0856E-10	8.3801E-09	3.1171E-08	7.2767E-08	2.0955E-07	5.9587E-07	9.3914E-07	
Am242m	0.0000E+00	7.2675E-21	3.5218E-12	7.3331E-11	3.6308E-10	1.0153E-09	3.5612E-09	1.1839E-08	1.9357E-08	
Am243	0.0000E+00	8.9039E-20	5.4741E-11	1.4027E-09	8.5052E-09	2.8869E-08	1.4259E-07	8.2592E-07	2.1964E-06	
Cm242	0.0000E+00	1.4853E-20	2.3405E-11	5.3761E-10	2.8783E-09	8.6424E-09	3.4451E-08	1.4381E-07	2.8908E-07	
Cm243	0.0000E+00	4.7452E-25	4.4970E-14	2.1949E-12	1.8695E-11	7.8445E-11	5.0074E-10	3.6985E-09	1.0478E-08	
Cm244	0.0000E+00	6.8858E-23	1.4414E-12	7.8748E-11	7.4605E-10	3.5224E-09	2.8281E-08	3.0753E-07	1.2414E-06	
Cm245	0.0000E+00	2.2531E-26	1.0999E-14	1.2555E-12	1.8496E-11	1.1794E-10	1.4746E-09	2.7264E-08	1.5243E-07	
Cm246	0.0000E+00									
Mo95	0.0000E+00									
Tc99	0.0000E+00	4.9090E-08	2.4230E-06	4.7860E-06	7.0887E-06	9.3342E-06	1.3649E-05	2.1572E-05	2.8505E-05	
Rh103	0.0000E+00	2.5701E-08	1.2850E-06	2.5506E-06	3.7760E-06	4.9538E-06	7.1332E-06	1.0757E-05	1.3394E-05	
Cs133	0.0000E+00	5.3754E-08	2.6469E-06	5.2123E-06	7.6929E-06	1.0091E-05	1.4621E-05	2.2636E-05	2.9198E-05	
Sm147	0.0000E+00									
Sm149	0.0000E+00	2.6939E-09	5.5727E-08	5.9888E-08	6.2493E-08	6.4081E-08	6.4952E-08	6.2451E-08	5.7815E-08	
Sm150	0.0000E+00	1.8665E-10	3.8790E-07	8.6762E-07	1.3704E-06	1.8896E-06	2.9578E-06	5.1258E-06	7.2318E-06	
Sm152	0.0000E+00	2.2944E-09	1.6845E-07	3.8164E-07	5.9015E-07	7.8224E-07	1.1056E-06	1.5694E-06	1.8740E-06	
Nd143	0.0000E+00	3.1039E-09	1.9491E-06	4.0944E-06	6.1078E-06	7.9952E-06	1.1409E-05	1.6837E-05	2.0456E-05	
Nd145	0.0000E+00	3.1376E-08	1.5349E-06	3.0060E-06	4.4199E-06	5.7768E-06	8.3327E-06	1.2828E-05	1.6521E-05	
Eu153	0.0000E+00	1.4100E-09	8.6318E-08	2.1028E-07	3.7272E-07	5.6321E-07	9.9858E-07	1.8976E-06	2.6659E-06	
Gd155	0.0000E+00	1.5165E-13	1.1869E-10	2.2731E-10	3.4623E-10	5.0539E-10	9.7300E-10	2.2655E-09	3.5886E-09	

ここで使用した燃焼チェーンモデルではCm246の生成を無視している。Mo95とSm147は擬似F.P.の扱い。

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性（燃料セル平均）

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.2723E-02	3.1931E-02	3.0647E-02	2.9620E-02	2.8710E-02	2.7844E-02	2.6320E-02	2.3590E-02	2.1342E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	6.0928E+01	5.9420E+01	5.6287E+01	5.4550E+01	5.3492E+01	5.2856E+01	5.2318E+01	5.2661E+01	5.3875E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	2.8213E-01	2.8236E-01	2.8396E-01	2.8871E-01	2.8860E-01	2.9165E-01	2.9223E-01	2.9558E-01	2.9597E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	0.0000E+00	6.1782E+00	6.1136E+00	6.1112E+00	6.0934E+00	6.1312E+00	6.1291E+00	6.1711E+00	6.2190E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	0.0000E+00	2.0065E+02	1.8183E+02	1.6988E+02	1.6307E+02	1.5729E+02	1.5121E+02	1.4636E+02	1.4659E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	0.0000E+00	1.8465E+00	1.8491E+00	1.8517E+00	1.8430E+00	1.8478E+00	1.8385E+00	1.8369E+00	1.8318E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	0.0000E+00	1.9429E+02	1.7994E+02	1.7132E+02	1.6648E+02	1.6262E+02	1.5874E+02	1.5652E+02	1.5831E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	0.0000E+00	1.4151E+00	1.4244E+00	1.4382E+00	1.4400E+00	1.4514E+00	1.4525E+00	1.4604E+00	1.4604E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	0.0000E+00	3.3343E+00	3.2242E+00	3.1560E+00	3.1052E+00	3.0747E+00	3.0251E+00	2.9795E+00	2.9528E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.0000E+00	1.5808E+00	1.5887E+00	1.6026E+00	1.6014E+00	1.6135E+00	1.6117E+00	1.6185E+00	1.6135E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.0000E+00	4.3976E+00	4.3731E+00	4.3845E+00	4.3840E+00	4.3966E+00	4.3969E+00	4.4184E+00	4.4270E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.0000E+00	2.8588E+00	2.8681E+00	2.8904E+00	2.8899E+00	2.9064E+00	2.9177E+00	2.9309E+00	2.9418E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸收反応断面積の燃焼度依存性（燃料セル平均）

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.2892E-02	2.2979E-02	2.3041E-02	2.3111E-02	2.3189E-02	2.3227E-02	2.3281E-02	2.3146E-02	2.2485E-02
σ_a (U235)	3.1135E+01	3.0422E+01	2.8922E+01	2.8109E+01	2.7612E+01	2.7322E+01	2.7103E+01	2.7318E+01	2.7938E+01
σ_a (U238)	9.0701E-01	9.0938E-01	9.0508E-01	9.0465E-01	9.0664E-01	9.1015E-01	9.1388E-01	9.2010E-01	9.3090E-01
σ_a (Pu238)	0.0000E+00	1.8406E+01	1.7505E+01	1.7139E+01	1.6844E+01	1.6771E+01	1.6690E+01	1.6895E+01	1.7357E+01
σ_a (Pu239)	0.0000E+00	1.1118E+02	1.0049E+02	9.3656E+01	8.9796E+01	8.6484E+01	8.2957E+01	8.0029E+01	7.9975E+01
σ_a (Pu240)	0.0000E+00	2.0010E+02	1.8523E+02	1.5914E+02	1.3590E+02	1.2045E+02	9.9139E+01	7.6762E+01	6.7865E+01
σ_a (Pu241)	0.0000E+00	8.9788E+01	8.3024E+01	7.8920E+01	7.6650E+01	7.4786E+01	7.2925E+01	7.1805E+01	7.2576E+01
σ_a (Pu242)	0.0000E+00	2.9192E+01	2.9284E+01	2.9308E+01	2.9187E+01	2.9174E+01	2.8099E+01	2.5963E+01	2.3524E+01
σ_a (Am241)	0.0000E+00	8.2904E+01	7.7087E+01	7.2811E+01	7.0421E+01	6.8110E+01	6.5697E+01	6.3041E+01	6.1844E+01
σ_a (Am243)	0.0000E+00	4.9546E+01	4.9033E+01	4.8524E+01	4.7468E+01	4.7326E+01	4.5956E+01	4.4672E+01	4.2460E+01
σ_a (Cm242)	0.0000E+00	4.8697E+00	4.8217E+00	4.8489E+00	4.8644E+00	4.8765E+00	4.8832E+00	4.9445E+00	4.9496E+00
σ_a (Cm244)	0.0000E+00	1.7978E+01	1.7819E+01	1.7902E+01	1.7725E+01	1.7520E+01	1.7569E+01	1.7507E+01	1.7318E+01
Σ_a (その他1)	0.0000E+00	4.9157E-06	8.1346E-05	1.4215E-04	2.0191E-04	2.5287E-04	3.4407E-04	4.9871E-04	6.1685E-04
Σ_a (その他2)	3.5978E-05	4.8722E-04	9.0660E-04	1.1620E-03	1.3920E-03	1.6119E-03	2.0117E-03	2.7369E-03	2.7374E-03
Σ_a (Zr)	2.0512E-04	2.0512E-04	2.0209E-04	2.0016E-04	2.0115E-04	2.0215E-04	2.0259E-04	2.0235E-04	2.0398E-04
Σ_a (H2O)	4.6988E-04	4.5957E-04	4.3681E-04	4.2302E-04	4.1452E-04	4.0814E-04	4.0215E-04	3.9946E-04	4.0437E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.4312	1.3915	1.3330	1.2834	1.2387	1.1996	1.1318	1.0202	0.9267
Hot, 40%ボイド	1.3885	1.3545	1.2960	1.2436	1.1988	1.1603	1.0917	0.9795	0.8852
Hot, 70%ボイド	1.3154	1.2897	1.2292	1.1798	1.1345	1.0944	1.0256	0.9122	0.8216
Doppler, 0%ボイド	1.4051	1.3655	1.3062	1.2584	1.2126	1.1732	1.1064	0.9947	0.9029
Cold, 0%ボイド	1.5356	1.4869	1.4301	1.3828	1.3426	1.3059	1.2401	1.1233	1.0205

Hot 0%ボイドより瞬時変化

統計誤差(%)									
Hot, 0%ボイド	0.043	0.051	0.057	0.057	0.057	0.061	0.059	0.083	0.075
Hot, 40%ボイド	0.053	0.054	0.062	0.061	0.053	0.068	0.058	0.082	0.096
Hot, 70%ボイド	0.052	0.060	0.065	0.057	0.077	0.060	0.066	0.088	0.077
Doppler, 0%ボイド	0.052	0.047	0.060	0.047	0.065	0.063	0.071	0.065	0.082
Cold, 0%ボイド	0.048	0.038	0.036	0.041	0.056	0.049	0.052	0.062	0.078

Pin Cell (MOX) with MVP-BURN + JENDL-3.2

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.1909
0.1	1.1858
5	1.1644
10	1.1475
15	1.1330
20	1.1182
30	1.0936
50	1.0442
70	1.0017

各ステップ 40 万ヒストリ(40 バッチ+捨てバッチ 10)

統計誤差は燃焼平均で 0.07%

(n,2n)反応等の寄与により無限増倍率は完全には全生成反応率と全吸収(核分裂+捕獲)反応率との比には一致しない。例えば、燃焼度 0GWd/t において、P/A=1.1887 となる。

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

	燃焼度(GWd/t)								(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	
U235	1.2956E-05	1.2946E-05	1.2437E-05	1.1934E-05	1.1450E-05	1.0982E-05	1.0095E-05	8.5063E-06	7.1503E-06
U236	0.0000E+00	3.3047E-09	1.6161E-07	3.1531E-07	4.6087E-07	5.9848E-07	8.5276E-07	1.2822E-06	1.6159E-06
U238	6.3846E-03	6.3842E-03	6.3647E-03	6.3445E-03	6.3240E-03	6.3033E-03	6.2613E-03	6.1746E-03	6.0845E-03
Np237	0.0000E+00	7.3457E-10	1.3307E-07	2.7317E-07	4.0986E-07	5.4301E-07	7.9546E-07	1.2658E-06	1.6662E-06
Pu238	2.7988E-05	2.7973E-05	2.7684E-05	2.8007E-05	2.8658E-05	2.9472E-05	3.1286E-05	3.4878E-05	3.8151E-05
Pu239	7.2334E-04	7.2261E-04	6.9860E-04	6.7502E-04	6.5222E-04	6.3018E-04	5.8799E-04	5.1184E-04	4.4552E-04
Pu240	3.3043E-04	3.3041E-04	3.2927E-04	3.2797E-04	3.2641E-04	3.2460E-04	3.2032E-04	3.0895E-04	2.9432E-04
Pu241	1.2241E-04	1.2248E-04	1.2573E-04	1.2862E-04	1.3120E-04	1.3350E-04	1.3730E-04	1.4198E-04	1.4357E-04
Pu242	8.3891E-05	8.3888E-05	8.3914E-05	8.4001E-05	8.4138E-05	8.4322E-05	8.4839E-05	8.6378E-05	8.8307E-05
Am241	3.5537E-05	3.5526E-05	3.5010E-05	3.4566E-05	3.4177E-05	3.3829E-05	3.3230E-05	3.2201E-05	3.1110E-05
Am242m	0.0000E+00	6.1166E-09	2.7517E-07	4.9311E-07	6.6585E-07	8.0196E-07	9.8758E-07	1.1437E-06	1.1560E-06
Am243	0.0000E+00	4.8995E-08	2.3531E-06	4.5147E-06	6.5247E-06	8.3745E-06	1.1709E-05	1.7119E-05	2.1360E-05
Cm242	0.0000E+00	2.5678E-08	1.4432E-06	2.2309E-06	2.6609E-06	2.8987E-06	3.1064E-06	3.2402E-06	3.3248E-06
Cm243	0.0000E+00	2.1816E-12	8.1782E-09	2.6374E-08	4.8994E-08	7.2396E-08	1.1631E-07	1.8396E-07	2.2891E-07
Cm244	0.0000E+00	4.6926E-11	1.1243E-07	4.2662E-07	9.0846E-07	1.5419E-06	3.1408E-06	7.3376E-06	1.2288E-05
Cm245	0.0000E+00	1.1497E-14	1.3781E-09	1.0452E-08	3.3530E-08	7.6019E-08	2.3230E-07	8.7385E-07	1.9417E-06
Cm246	0.0000E+00								
Mo95	0.0000E+00								
Tc99	0.0000E+00	4.7920E-08	2.3722E-06	4.6972E-06	6.9762E-06	9.2087E-06	1.3549E-05	2.1733E-05	2.9279E-05
Rh103	0.0000E+00	5.2128E-08	2.5614E-06	5.0348E-06	7.4242E-06	9.7302E-06	1.4112E-05	2.1979E-05	2.8716E-05
Cs133	0.0000E+00	5.3769E-08	2.6531E-06	5.2353E-06	7.7494E-06	1.0195E-05	1.4897E-05	2.3574E-05	3.1348E-05
Sm147	0.0000E+00								
Sm149	0.0000E+00	3.3522E-09	3.0366E-07	4.0767E-07	4.4151E-07	4.5092E-07	4.4638E-07	4.2335E-07	3.9464E-07
Sm150	0.0000E+00	4.4087E-11	2.0297E-07	6.2460E-07	1.1214E-06	1.6457E-06	2.7212E-06	4.8813E-06	7.0181E-06
Sm152	0.0000E+00	4.7587E-09	2.5107E-07	5.1742E-07	7.8796E-07	1.0525E-06	1.5508E-06	2.3617E-06	2.9116E-06
Nd143	0.0000E+00	2.3402E-09	1.4947E-06	3.2179E-06	4.9175E-06	6.5934E-06	9.8707E-06	1.6122E-05	2.1945E-05
Nd145	0.0000E+00	2.4403E-08	1.2112E-06	2.4037E-06	3.5775E-06	4.7327E-06	6.9873E-06	1.1278E-05	1.5268E-05
Eu153	0.0000E+00	3.1634E-09	1.7136E-07	3.7023E-07	5.9232E-07	8.3701E-07	1.3688E-06	2.4969E-06	3.5540E-06
Gd155	0.0000E+00	7.2577E-13	1.3007E-09	3.8102E-09	6.4354E-09	8.8308E-09	1.2984E-08	2.2434E-08	3.6455E-08

ここで使用した燃焼チェーンモデルではCm246の生成を無視している。Mo95とSm147は擬似F.P.の扱い。

表3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.1106E-02	3.0999E-02	3.0430E-02	2.9994E-02	2.9632E-02	2.9156E-02	2.8536E-02	2.7154E-02	2.6022E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	1.9785E+01	1.9805E+01	1.9737E+01	1.9681E+01	1.9737E+01	1.9724E+01	1.9905E+01	2.0147E+01	2.0536E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	3.4048E-01	3.3964E-01	3.4029E-01	3.4095E-01	3.4128E-01	3.4067E-01	3.3928E-01	3.3933E-01	3.3660E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	5.5319E+00	5.5183E+00	5.5286E+00	5.5350E+00	5.5405E+00	5.5393E+00	5.5426E+00	5.5534E+00	5.5575E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	3.0193E+01	3.0089E+01	3.0107E+01	3.0281E+01	3.0548E+01	3.0691E+01	3.1426E+01	3.2709E+01	3.4413E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	2.0217E+00	2.0166E+00	2.0216E+00	2.0222E+00	2.0251E+00	2.0216E+00	2.0216E+00	2.0193E+00	2.0096E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	4.7277E+01	4.7219E+01	4.6804E+01	4.6724E+01	4.6775E+01	4.6675E+01	4.6999E+01	4.7621E+01	4.8830E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	1.6452E+00	1.6411E+00	1.6449E+00	1.6452E+00	1.6468E+00	1.6451E+00	1.6438E+00	1.6415E+00	1.6334E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	2.4666E+00	2.4595E+00	2.4573E+00	2.4554E+00	2.4561E+00	2.4492E+00	2.4451E+00	2.4437E+00	2.4362E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.0000E+00	1.7567E+00	1.7578E+00	1.7574E+00	1.7575E+00	1.7538E+00	1.7490E+00	1.7456E+00	1.7340E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.0000E+00	4.3192E+00	4.3162E+00	4.3301E+00	4.3236E+00	4.3283E+00	4.3260E+00	4.3310E+00	4.3177E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.0000E+00	3.0737E+00	3.0826E+00	3.0771E+00	3.0832E+00	3.0796E+00	3.0776E+00	3.0703E+00	3.0556E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.6169E-02	2.6178E-02	2.6175E-02	2.6169E-02	2.6188E-02	2.6091E-02	2.6121E-02	2.6060E-02	2.6002E-02
σ_a (U235)	1.1323E+01	1.1342E+01	1.1804E+01	1.1273E+01	1.1298E+01	1.1290E+01	1.1388E+01	1.1499E+01	1.1683E+01
σ_a (U238)	8.5194E-01	8.4717E-01	8.4967E-01	8.5067E-01	8.5456E-01	8.5118E-01	8.5289E-01	8.6072E-01	8.6302E-01
σ_a (Pu238)	6.7390E+00	6.7429E+00	6.8125E+00	6.7457E+00	6.7409E+00	6.6919E+00	6.7426E+00	6.8498E+00	6.9503E+00
σ_a (Pu239)	1.6077E+01	1.6024E+01	1.6573E+01	1.6145E+01	1.6304E+01	1.6397E+01	1.6816E+01	1.7543E+01	1.8517E+01
σ_a (Pu240)	1.3107E+01	1.3063E+01	1.3107E+01	1.2894E+01	1.2843E+01	1.2802E+01	1.2853E+01	1.3030E+01	1.3292E+01
σ_a (Pu241)	2.0974E+01	2.0964E+01	2.0418E+01	2.0768E+01	2.0760E+01	2.0731E+01	2.0900E+01	2.1200E+01	2.1790E+01
σ_a (Pu242)	8.4814E+00	8.5902E+00	8.5865E+00	8.3815E+00	8.3223E+00	8.3233E+00	8.1956E+00	8.3002E+00	8.1128E+00
σ_a (Am241)	2.1167E+01	2.1062E+01	2.1369E+01	2.0712E+01	2.0680E+01	2.0594E+01	2.0566E+01	2.0739E+01	2.1096E+01
σ_a (Am243)	0.0000E+00	2.6882E+01	5.5965E-01	2.5429E+01	2.4964E+01	2.4410E+01	2.3679E+01	2.2901E+01	2.2161E+01
σ_a (Cm242)	0.0000E+00	4.1761E+00	7.4293E-02	4.1848E+00	4.1686E+00	4.1834E+00	4.1862E+00	4.2140E+00	4.2295E+00
σ_a (Cm244)	0.0000E+00	1.0957E+01	4.5725E-03	1.0746E+01	1.0927E+01	1.0973E+01	1.0866E+01	1.0646E+01	1.0176E+01
Σ_a (その他1)	0.0000E+00	3.7935E-06	3.7930E-06	4.3628E-05	5.8946E-05	7.2349E-05	9.6147E-05	1.3674E-04	1.7804E-04
Σ_a (その他2)	4.7403E-05	1.4229E-04	1.4227E-04	7.0197E-04	4.8635E-05	1.0881E-03	1.4269E-03	2.0341E-03	2.5911E-03
Σ_a (Zr)	1.8359E-04	1.8228E-04	1.8226E-04	1.8436E-04	9.9443E-04	1.8553E-04	1.8468E-04	1.8340E-04	1.8548E-04
Σ_a (H2O)	1.7229E-04	1.7234E-04	1.7232E-04	1.7092E-04	2.1897E-04	1.7045E-04	1.7011E-04	1.7043E-04	1.7262E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.1909	1.1858	1.1644	1.1475	1.1330	1.1182	1.0936	1.0442	1.0017
Hot, 40%ボイド	1.1800	1.1746	1.1551	1.1372	1.1228	1.1090	1.0837	1.0350	0.9887
Hot, 70%ボイド	1.1745	1.1716	1.1534	1.1344	1.1190	1.1050	1.0764	1.0248	0.9790
Doppler, 0%ボイド	1.1661	1.1618	1.1419	1.1244	1.1100	1.0968	1.0716	1.0250	0.9842
Cold, 0%ボイド	1.2625	1.2516	1.2268	1.2091	1.1945	1.1811	1.1556	1.1112	1.0704

Hot 0%ボイドより瞬時変化

統計誤差(%)									
Hot, 0%ボイド	0.071	0.068	0.086	0.083	0.064	0.058	0.065	0.091	0.076
Hot, 40%ボイド	0.066	0.062	0.069	0.065	0.081	0.070	0.076	0.048	0.078
Hot, 70%ボイド	0.077	0.075	0.057	0.069	0.067	0.048	0.072	0.059	0.066
Doppler, 0%ボイド	0.070	0.073	0.057	0.065	0.067	0.073	0.074	0.076	0.090
Cold, 0%ボイド	0.074	0.073	0.078	0.056	0.068	0.054	0.082	0.050	0.069

2~4. SRAC95 コードの概要とベンチマーク計算手法（原研）

1. 参加者名

奥村啓介

2. 所属機関

日本原子力研究所(JAERI)

3. 使用したコード名及び参考文献

SRAC95 (Ver.2001.4)

奥村啓介、金子邦男、土橋敬一郎：「SRAC95；汎用核計算コードシステム」，

JAERI-Data/Code 96-015 (1996)

RISTから公開されているSRAC95に比べて以下の3点が異なる(本文第4.1節参照)。

- 1) MCROSSライブラリにSm-152のデータが追加されている。
- 2) ウラン燃料用の標準的な燃焼チェーンモデル(ucm66fp)にU-234とCm-246を加えたチェーンモデル(U4CM6FP66)を新たに作成して使用している。
- 3) 燃焼ステップ数の上限が61まで上げられている。

4. ベースの核データライブラリ

3ケースの計算に対応してライブラリを以下のように変更

- SRAC(J32) : JENDL-3.2 例外核種 : I-131(ENDF/B-IV)、Pm-151(ENDF/B-IV)
- SRAC(JEF) : JEF-2.2
- SRAC(B65) : ENDF/B-VI(R5)

なお、 $S(\alpha, \beta)$ はENDF/B-VIを除き、ENDF/B-IIIに基づく。

5. 使用した断面積データ作成のための処理コード及び方法

処理コード : NJOY91.108(一部SRACの用途のために改良有り)とTIMSの他、SRACライブラリ編集用コード群

6. スペクトル計算手法

ベンチマーク問題 : 単一ピンセル計算

107群衝突確率計算を高速群と熱群を分離して行い、得られた実効断面積とスペクトルを使用して107群セル平均断面積を作成し、全群による1点炉B1方程式(本間ではゼロバックリング)を解いてセル平均スペクトルと中性子増倍率を得る。この際、(n,2n)反応は散乱マトリックスに組み込まれて考慮される。また、核分裂スペクトルは核種依存で与えられ、ライブラリ内臓の漸近スペクトル(典型的な熱炉のスペクトル)により計算される核分裂率を重みに平均化された値が使用される。衝突確率計算ではメッシュ分割内で平坦中性子束近似が適用される。本ベンチマーク問題(単一ピンセル)の場合、正方格子体系において、高速群計算では3領域分割(燃料1、被覆管1、減速材1)、熱群計算では7領域分割(燃料3、

被覆管1、減速材3)とし、完全反射境界条件を使用している。なお、共鳴エネルギー領域では、後述する超詳細群スペクトル計算オプション(PEACO)によって中性子束分布を計算し、107群中性子束分布と実効微視的断面積を修正する。

7. エネルギー群数

高速群61群 (10MeV～2.3824eV)

熱群46群 (2.3824eV～10⁻⁵eV)

カットオフエネルギー(2.3824eV)は、ベンチマーク問題の減速材温度(600K以下)において、水素の散乱断面積が高速群ライブラリ(Free-H)と熱群ライブラリ(H-of-H₂O)の間でほぼ連続となる下限値(PEACOを適用する共鳴レベルを増やすため)として選定してある。

PEACO計算のエネルギー範囲は961.12eVから2.3824eVまでであり、レサジー幅は0.00025(961.12eV～130.07eV)及び0.0005(130.07eV～2.3824eV)である。したがって本ベンチマーク計算でのPEACOの群数は16000群である。

8. 実効断面積

共鳴の自己遮蔽に関しては、NR近似に基づくTable-Look-Up法が採用される。すなわち、自己遮蔽因子が σ_0 と温度の関数としてテーブル内挿され、無限希釈断面積に乗せられる。燃料と被覆管内の共鳴核種については衝突確率ルーチンで内部計算されるダンコフ係数を使用して非均質補正が行われる。自己遮蔽因子テーブルは、高速群及び熱群において共鳴の評価がある全ての核種に対して与えられる。

主要な共鳴核種には、ポイントワイズ断面積(Public MCROSSライブラリ)が与えられており、指定された物質温度でドップラーブローディングした後に超詳細群断面積(User MCROSS)を内部作成する。PEACOのエネルギー範囲では、核分裂源や非弾性散乱源は無視できるため、多領域に対する減速方程式を直接解いて実効微視的断面積が計算される。PEACOの計算範囲以外のエネルギー領域及びPublic MCROSSライブラリにデータを有しない共鳴核種については、上記のTable-Look-Up法の扱いで実効断面積が与えられる。本ベンチマーク問題の場合、以下の核種をPEACOで扱っている。

重核種 : U-234/235/236/238, Np-237/239, Pu-238/239/240/241/242,

Am-241/242g/242m/243, Cm-244/245

F.P.核種 : Ag-109, Cs-133, In-115, Pd-105, Rh-103, Tc-99, Xe-131, Ru-101,

Sm-150/151/152, Gd-155/156/157/158

9. 燃焼計算

- 燃焼方程式の解法

Batemanの解析的手法を α 崩壊などの循環チェーンに対応させたDCHAINコード(JAERI 1250)の手法とほぼ同じ。

・燃焼チェーンモデル

U4CM6FP66チェーンモデル：重核種はU-234からCm-246までの21核種、F.P.核種は66核種と1つの擬似F.P.核種を扱う(本文中の図4.1.13と図4.1.14参照)。

・燃焼ステップ

以下の31ステップ(微視的断面積の更新ステップであり、核種崩壊生成計算では更にサブステップに分割されて扱われる)

0.0(GWd/t)、0.1、1.0、2.5、5.0、7.5、10.0、12.5、15.0、17.5、20.0、22.5、25.0、30.0、32.5、
35.0、37.5、40.0、42.5、45.0、47.5、50.0、52.5、55.0、57.5、60.0、62.5、65.0、67.5、70.0

・核分裂核種の収率、崩壊定数等

JNDCの核分裂生成物核データライブラリ第2版(JAERI-M 89-204、JAERI-1320)に基づく

・核分裂当たりの放出エネルギー(J/fission)

JNDCの核分裂生成物核データライブラリ第2版に基づく核種依存の値を燃焼ステップ毎に計算される核分裂率を重みとして平均した値を使用する。

・Am-241分岐比

JENDLに評価がないため、ENDF/B-VI(R2)に基づくエネルギー依存データを典型的なPWRスペクトル(107群)によるAm-241の吸収反応率を重みとして得られた平均値(Am-242mへ11.6%)を一定値として使用する。

Pin Cell (UO_2) with SRAC + JENDL-3.2

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.4289
0.1	1.3910
5	1.3321
10	1.2827
15	1.2393
20	1.2009
30	1.1338
50	1.0216
70	0.9298

(n,2n)反応の寄与により無限増倍率は完全には全生成反応率と全吸收(核分裂+捕獲)反応率との比には一致しない。SRAC では、 $k_{\text{inf}} = P/(A-N)$ として計算される。例えば、燃焼度 0GWd/tにおいて、 $P/A=1.4272$ となる。

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

(1/b/cm)

核種	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
U235	5.0393E-04	5.0299E-04	4.5881E-04	4.1741E-04	3.7907E-04	3.4346E-04	2.7954E-04	1.7736E-04	1.0506E-04
U236	0.0000E+00	1.8624E-07	8.8862E-06	1.6917E-05	2.4216E-05	3.0848E-05	4.2268E-05	5.8480E-05	6.6943E-05
U238	7.1571E-03	7.1567E-03	7.1366E-03	7.1153E-03	7.0930E-03	7.0699E-03	7.0210E-03	6.9135E-03	6.7928E-03
Np237	0.0000E+00	1.9408E-10	1.6627E-07	5.2192E-07	1.0178E-06	1.6203E-06	3.0418E-06	6.2338E-06	9.2161E-06
Pu238	0.0000E+00	1.1123E-13	5.3532E-09	3.3394E-08	9.8693E-08	2.1336E-07	6.2916E-07	2.3564E-06	5.2274E-06
Pu239	0.0000E+00	1.0852E-07	1.5092E-05	2.7065E-05	3.6564E-05	4.4181E-05	5.5236E-05	6.6619E-05	7.0289E-05
Pu240	0.0000E+00	2.0058E-10	8.0088E-07	2.4675E-06	4.4680E-06	6.6224E-06	1.1085E-05	1.9542E-05	2.6338E-05
Pu241	0.0000E+00	7.3063E-13	1.5910E-07	9.2090E-07	2.2418E-06	3.9262E-06	7.7633E-06	1.5032E-05	2.0196E-05
Pu242	0.0000E+00	2.5060E-16	2.9244E-09	3.5711E-08	1.3664E-07	3.3170E-07	1.0466E-06	3.7148E-06	7.5792E-06
Am241	0.0000E+00	6.1534E-17	7.0264E-10	8.4088E-09	3.1197E-08	7.2943E-08	2.1054E-07	5.9993E-07	9.4501E-07
Am242m	0.0000E+00	6.7325E-21	3.4430E-12	7.2663E-11	3.5950E-10	1.0021E-09	3.5242E-09	1.1682E-08	1.9093E-08
Am243	0.0000E+00	8.1098E-20	5.2152E-11	1.3751E-09	8.3435E-09	2.8091E-08	1.3888E-07	8.1806E-07	2.1709E-06
Cm242	0.0000E+00	1.3675E-20	2.2889E-11	5.3305E-10	2.8541E-09	8.5375E-09	3.4113E-08	1.4213E-07	2.8552E-07
Cm243	0.0000E+00	4.3544E-25	4.3170E-14	2.1663E-12	1.8433E-11	7.6950E-11	4.9210E-10	3.6326E-09	1.0249E-08
Cm244	0.0000E+00	4.8758E-23	1.3156E-12	7.3920E-11	7.0924E-10	3.3313E-09	2.6642E-08	2.9353E-07	1.1852E-06
Cm245	0.0000E+00	1.1124E-26	9.9655E-15	1.1612E-12	1.7255E-11	1.1090E-10	1.3810E-09	2.6176E-08	1.4525E-07
Cm246	0.0000E+00	1.4327E-30	3.6772E-17	8.8524E-15	2.0532E-13	1.8359E-12	3.7493E-11	1.4334E-09	1.3617E-08
Mo95	0.0000E+00	5.1538E-08	2.5300E-06	4.9744E-06	7.3421E-06	9.6381E-06	1.4026E-05	2.2030E-05	2.9054E-05
Tc99	0.0000E+00	1.3498E-08	2.3533E-06	4.7190E-06	7.0268E-06	9.2777E-06	1.3610E-05	2.1585E-05	2.8608E-05
Rh103	0.0000E+00	6.0150E-10	7.9478E-07	2.0249E-06	3.2672E-06	4.4711E-06	6.7248E-06	1.0538E-05	1.3413E-05
Cs133	0.0000E+00	8.4932E-09	2.4970E-06	5.0644E-06	7.5495E-06	9.9510E-06	1.4501E-05	2.2568E-05	2.9240E-05
Sm147	0.0000E+00	9.6407E-13	3.1714E-08	1.2799E-07	2.6950E-07	4.4015E-07	8.2117E-07	1.5359E-06	2.0068E-06
Sm149	0.0000E+00	2.6901E-09	5.4538E-08	5.8804E-08	6.1540E-08	6.3206E-08	6.4367E-08	6.2009E-08	5.7570E-08
Sm150	0.0000E+00	1.8990E-10	3.8546E-07	8.6054E-07	1.3595E-06	1.8757E-06	2.9410E-06	5.1174E-06	7.2406E-06
Sm152	0.0000E+00	2.2713E-09	1.6734E-07	3.7973E-07	5.8934E-07	7.8167E-07	1.1068E-06	1.5687E-06	1.8781E-06
Nd143	0.0000E+00	3.1041E-09	1.9494E-06	4.0954E-06	6.1102E-06	8.0007E-06	1.1425E-05	1.6891E-05	2.0580E-05
Nd145	0.0000E+00	3.1376E-08	1.5349E-06	3.0061E-06	4.4194E-06	5.7780E-06	8.3379E-06	1.2852E-05	1.8579E-05
Eu153	0.0000E+00	1.4095E-09	8.5996E-08	2.1026E-07	3.7154E-07	5.6230E-07	9.9858E-07	1.9126E-06	2.6988E-06
Gd155	0.0000E+00	1.5157E-13	1.1955E-10	2.2923E-10	3.4768E-10	5.0745E-10	9.6816E-10	2.2375E-09	3.5113E-09

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.2695E-02	3.1894E-02	3.0690E-02	2.9642E-02	2.8690E-02	2.7827E-02	2.6284E-02	2.3637E-02	2.1450E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	6.0841E+01	5.9308E+01	5.6357E+01	5.4620E+01	5.3514E+01	5.2834E+01	5.2272E+01	5.2780E+01	5.4090E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	2.8434E-01	2.8516E-01	2.8849E-01	2.9086E-01	2.9263E-01	2.9397E-01	2.9586E-01	2.9800E-01	2.9924E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	0.0000E+00	6.1940E+00	6.1549E+00	6.1407E+00	6.1355E+00	6.1360E+00	6.1472E+00	6.1888E+00	6.2363E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	0.0000E+00	1.9918E+02	1.8125E+02	1.6979E+02	1.6204E+02	1.5666E+02	1.5020E+02	1.4598E+02	1.4656E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	0.0000E+00	1.8605E+00	1.8684E+00	1.8664E+00	1.8637E+00	1.8613E+00	1.8576E+00	1.8531E+00	1.8505E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	0.0000E+00	1.9362E+02	1.8010E+02	1.7179E+02	1.6625E+02	1.6251E+02	1.5834E+02	1.5685E+02	1.5910E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	0.0000E+00	1.4294E+00	1.4424E+00	1.4514E+00	1.4579E+00	1.4626E+00	1.4687E+00	1.4740E+00	1.4760E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	0.0000E+00	3.3305E+00	3.2293E+00	3.1601E+00	3.1115E+00	3.0760E+00	3.0286E+00	2.9821E+00	2.9645E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.0000E+00	1.5936E+00	1.6059E+00	1.6139E+00	1.6194E+00	1.6232E+00	1.6278E+00	1.6308E+00	1.6305E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.0000E+00	4.4165E+00	4.4087E+00	4.4081E+00	4.4095E+00	4.4120E+00	4.4190E+00	4.4371E+00	4.4557E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.0000E+00	2.8732E+00	2.8892E+00	2.9024E+00	2.9129E+00	2.9214E+00	2.9344E+00	2.9513E+00	2.9602E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.2909E-02	2.2956E-02	2.3067E-02	2.3137E-02	2.3179E-02	2.3202E-02	2.3213E-02	2.3168E-02	2.3100E-02
σ_a (U235)	3.1053E+01	3.0361E+01	2.8954E+01	2.8133E+01	2.7616E+01	2.7305E+01	2.7065E+01	2.7365E+01	2.8038E+01
σ_a (U238)	9.1247E-01	9.1093E-01	9.1015E-01	9.1086E-01	9.1212E-01	9.1373E-01	9.1760E-01	9.2662E-01	9.3578E-01
σ_a (Pu238)	0.0000E+00	1.8375E+01	1.7576E+01	1.7149E+01	1.6893E+01	1.6749E+01	1.6670E+01	1.6939E+01	1.7404E+01
σ_a (Pu239)	0.0000E+00	1.1032E+02	1.0015E+02	9.3611E+01	8.9181E+01	8.6092E+01	8.2349E+01	7.9771E+01	7.9923E+01
σ_a (Pu240)	0.0000E+00	1.9501E+02	1.7995E+02	1.5510E+02	1.3464E+02	1.1897E+02	9.7803E+01	7.6245E+01	6.6296E+01
σ_a (Pu241)	0.0000E+00	8.9446E+01	8.3065E+01	7.9130E+01	7.6499E+01	7.4715E+01	7.2711E+01	7.1926E+01	7.2903E+01
σ_a (Pu242)	0.0000E+00	2.8280E+01	2.8249E+01	2.8207E+01	2.8104E+01	2.7917E+01	2.7270E+01	2.5185E+01	2.2786E+01
σ_a (Am241)	0.0000E+00	8.1627E+01	7.5899E+01	7.1983E+01	6.9228E+01	6.7222E+01	6.4579E+01	6.2054E+01	6.1118E+01
σ_a (Am243)	0.0000E+00	4.7775E+01	4.7320E+01	4.6752E+01	4.6214E+01	4.5716E+01	4.4799E+01	4.3111E+01	4.1458E+01
σ_a (Cm242)	0.0000E+00	4.8669E+00	4.8452E+00	4.8393E+00	4.8391E+00	4.8425E+00	4.8557E+00	4.8928E+00	4.9255E+00
σ_a (Cm244)	0.0000E+00	1.7878E+01	1.7691E+01	1.7602E+01	1.7549E+01	1.7517E+01	1.7493E+01	1.7463E+01	1.7248E+01
Σ_a (その他1)	0.0000E+00	4.8939E-06	8.1840E-05	1.4641E-04	2.0401E-04	2.5669E-04	3.5128E-04	5.0738E-04	6.2546E-04
Σ_a (その他2)	3.5028E-05	4.8429E-04	8.9527E-04	1.1484E-03	1.3779E-03	1.5928E-03	1.9927E-03	2.7011E-03	3.2953E-03
Σ_a (Zr)	2.0192E-04	2.0116E-04	1.9980E-04	1.9904E-04	1.9858E-04	1.9831E-04	1.9812E-04	1.9842E-04	1.9902E-04
Σ_a (H2O)	4.7261E-04	4.6318E-04	4.4160E-04	4.2790E-04	4.1864E-04	4.1243E-04	4.0571E-04	4.0401E-04	4.0851E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.4289	1.3910	1.3321	1.2827	1.2393	1.2009	1.1338	1.0216	0.9298
Hot, 40%ボイド	1.3867	1.3533	1.2945	1.2441	1.2000	1.1612	1.0935	0.9806	0.8889
Hot, 70%ボイド	1.3145	1.2881	1.2305	1.1795	1.1351	1.0961	1.0282	0.9150	0.8237
Doppler, 0%ボイド	1.3999	1.3637	1.3058	1.2566	1.2129	1.1742	1.1070	0.9963	0.9068
Cold, 0%ボイド	1.5352	1.4864	1.4299	1.3848	1.3444	1.3077	1.2416	1.1250	1.0241

Hot 0%ボイドより瞬時変化

Pin Cell (MOX) with SRAC + JENDL-3.2

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.1970
0.1	1.1898
5	1.1679
10	1.1511
15	1.1364
20	1.1227
30	1.0970
50	1.0497
70	1.0070

(n,2n)反応の寄与により無限増倍率は完全には全生成反応率と全吸收(核分裂+捕獲)反応率との比には一致しない。SRACでは、 $k_{\text{inf}} = P/(A \cdot N)$ として計算される。例えば、燃焼度 0GWd/tにおいて、 $P/A=1.1953$ となる。

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

	燃焼度(GWd/t)								(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	
U235	1.2956E-05	1.2946E-05	1.2435E-05	1.1927E-05	1.1433E-05	1.0952E-05	1.0031E-05	8.3460E-06	6.8628E-06
U236	0.0000E+00	3.2794E-09	1.6071E-07	3.1351E-07	4.5837E-07	5.9546E-07	8.4714E-07	1.2662E-06	1.5824E-06
U238	6.3846E-03	6.3842E-03	6.3646E-03	6.3444E-03	6.3238E-03	6.3030E-03	6.2609E-03	6.1740E-03	6.0837E-03
Np237	0.0000E+00	7.1971E-10	1.2751E-07	2.6137E-07	3.9279E-07	5.2141E-07	7.6928E-07	1.2228E-06	1.6136E-06
Pu238	2.7988E-05	2.7973E-05	2.7670E-05	2.7967E-05	2.8589E-05	2.9373E-05	3.1122E-05	3.4624E-05	3.7818E-05
Pu239	7.2334E-04	7.2261E-04	6.9870E-04	6.7529E-04	6.5261E-04	6.3063E-04	5.8869E-04	5.1254E-04	4.4622E-04
Pu240	3.3043E-04	3.3041E-04	3.2949E-04	3.2828E-04	3.2683E-04	3.2515E-04	3.2112E-04	3.1046E-04	2.9661E-04
Pu241	1.2241E-04	1.2247E-04	1.2547E-04	1.2823E-04	1.3068E-04	1.3284E-04	1.3636E-04	1.4060E-04	1.4175E-04
Pu242	8.3891E-05	8.3889E-05	8.3946E-05	8.4051E-05	8.4207E-05	8.4412E-05	8.4965E-05	8.6558E-05	8.8649E-05
Am241	3.5537E-05	3.5528E-05	3.5076E-05	3.4671E-05	3.4316E-05	3.4000E-05	3.3448E-05	3.2464E-05	3.1375E-05
Am242m	0.0000E+00	5.9257E-09	2.6786E-07	4.8216E-07	6.5216E-07	7.8580E-07	9.6930E-07	1.1240E-06	1.1351E-06
Am243	0.0000E+00	4.7536E-08	2.3069E-06	4.4493E-06	6.4390E-06	8.2897E-06	1.1624E-05	1.7092E-05	2.1331E-05
Cm242	0.0000E+00	2.4876E-08	1.4058E-06	2.1851E-06	2.6125E-06	2.8487E-06	3.0604E-06	3.1993E-06	3.2894E-06
Cm243	0.0000E+00	2.0193E-12	7.6506E-09	2.5001E-08	4.6325E-08	6.8580E-08	1.1056E-07	1.7586E-07	2.1981E-07
Cm244	0.0000E+00	4.3519E-11	1.0550E-07	4.0238E-07	8.6231E-07	1.4611E-06	2.9968E-06	7.0145E-06	1.1770E-05
Cm245	0.0000E+00	1.0441E-14	1.2793E-09	9.8409E-09	3.1772E-08	7.1864E-08	2.2002E-07	8.3245E-07	1.8593E-06
Cm246	0.0000E+00	8.1963E-19	3.4227E-12	5.3495E-11	2.6363E-10	8.0968E-10	3.8610E-09	2.6332E-08	8.9263E-08
Mo95	0.0000E+00	3.7084E-08	1.8428E-06	3.6625E-06	5.4599E-06	7.2355E-06	1.0723E-05	1.7455E-05	2.3873E-05
Tc99	0.0000E+00	1.3280E-08	2.3043E-06	4.6318E-06	6.9143E-06	9.1533E-06	1.3505E-05	2.1726E-05	2.9329E-05
Rh103	0.0000E+00	1.2319E-09	1.5955E-06	4.0107E-06	6.4250E-06	8.7674E-06	1.3227E-05	2.1289E-05	2.8269E-05
Cs133	0.0000E+00	8.5710E-09	2.5059E-06	5.0921E-06	7.6108E-06	1.0064E-05	1.4784E-05	2.3511E-05	3.1345E-05
Sm147	0.0000E+00	9.0329E-13	2.9868E-08	1.2184E-07	2.5983E-07	4.3054E-07	8.3068E-07	1.6912E-06	2.4572E-06
Sm149	0.0000E+00	3.3515E-09	2.9973E-07	3.9982E-07	4.3118E-07	4.3901E-07	4.3456E-07	4.0998E-07	3.8200E-07
Sm150	0.0000E+00	4.5047E-11	2.0614E-07	6.3017E-07	1.1273E-06	1.6505E-06	2.7200E-06	4.8694E-06	6.9974E-06
Sm152	0.0000E+00	4.7464E-09	2.5087E-07	5.1850E-07	7.9005E-07	1.0572E-06	1.5582E-06	2.3723E-06	2.9343E-06
Nd143	0.0000E+00	2.3403E-09	1.4953E-06	3.2196E-06	4.9217E-06	6.6008E-06	9.8893E-06	1.6178E-05	2.2060E-05
Nd145	0.0000E+00	2.4406E-08	1.2111E-06	2.4029E-06	3.5755E-06	4.7290E-06	6.9798E-06	1.1258E-05	1.5241E-05
Eu153	0.0000E+00	3.1633E-09	1.7149E-07	3.7013E-07	5.9395E-07	8.3938E-07	1.3778E-06	2.5291E-06	3.6143E-06
Gd155	0.0000E+00	7.2558E-13	1.2997E-09	3.7998E-09	6.4007E-09	8.7577E-09	1.2830E-08	2.1813E-08	3.4891E-08

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.1255E-02	3.1089E-02	3.0517E-02	3.0073E-02	2.9679E-02	2.9309E-02	2.8608E-02	2.7308E-02	2.6119E-02	
$\nu \sigma_f$ (U235)	1.9951E+01	1.9872E+01	1.9801E+01	1.9803E+01	1.9834E+01	1.9882E+01	2.0005E+01	2.0329E+01	2.0729E+01	
$\nu \sigma_f$ (U238)	3.4515E-01	3.4447E-01	3.4432E-01	3.4409E-01	3.4384E-01	3.4355E-01	3.4294E-01	3.4161E-01	3.4019E-01	
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	5.5673E+00	5.5636E+00	5.5642E+00	5.5655E+00	5.5669E+00	5.5681E+00	5.5705E+00	5.5752E+00	5.5804E+00	
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	3.0307E+01	3.0145E+01	3.0168E+01	3.0344E+01	3.0587E+01	3.0866E+01	3.1494E+01	3.2951E+01	3.4624E+01	
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	2.0467E+00	2.0444E+00	2.0444E+00	2.0440E+00	2.0434E+00	2.0426E+00	2.0409E+00	2.0366E+00	2.0319E+00	
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	4.7471E+01	4.7252E+01	4.6940E+01	4.6847E+01	4.6857E+01	4.6925E+01	4.7178E+01	4.8008E+01	4.9161E+01	
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	1.6661E+00	1.6640E+00	1.6640E+00	1.6635E+00	1.6629E+00	1.6622E+00	1.6605E+00	1.6565E+00	1.6520E+00	
$\nu \sigma_f$ (Am241)	2.4878E+00	2.4840E+00	2.4794E+00	2.4755E+00	2.4723E+00	2.4698E+00	2.4652E+00	2.4598E+00	2.4577E+00	
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.0000E+00	1.7803E+00	1.7781E+00	1.7758E+00	1.7736E+00	1.7714E+00	1.7673E+00	1.7599E+00	1.7531E+00	
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.0000E+00	4.3370E+00	4.3356E+00	4.3350E+00	4.3349E+00	4.3350E+00	4.3352E+00	4.3357E+00	4.3361E+00	
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.0000E+00	3.1028E+00	3.1029E+00	3.1025E+00	3.1017E+00	3.1005E+00	3.0974E+00	3.0891E+00	3.0796E+00	

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
Σ_a (全核種)	2.6148E-02	2.6166E-02	2.6166E-02	2.6161E-02	2.6152E-02	2.6141E-02	2.6115E-02	2.6050E-02	2.5973E-02	
σ_a (U235)	1.1400E+01	1.1363E+01	1.1326E+01	1.1325E+01	1.1339E+01	1.1361E+01	1.1420E+01	1.1579E+01	1.1777E+01	
σ_a (U238)	8.5466E-01	8.5477E-01	8.5490E-01	8.5541E-01	8.5610E-01	8.5692E-01	8.5888E-01	8.6375E-01	8.6958E-01	
σ_a (Pu238)	6.8024E+00	6.7736E+00	6.7525E+00	6.7518E+00	6.7587E+00	6.7694E+00	6.7978E+00	6.8753E+00	6.9751E+00	
σ_a (Pu239)	1.6109E+01	1.6029E+01	1.6057E+01	1.6164E+01	1.6307E+01	1.6468E+01	1.6829E+01	1.7658E+01	1.8604E+01	
σ_a (Pu240)	1.2951E+01	1.2933E+01	1.2827E+01	1.2756E+01	1.2713E+01	1.2688E+01	1.2684E+01	1.2811E+01	1.3086E+01	
σ_a (Pu241)	2.1068E+01	2.0969E+01	2.0835E+01	2.0800E+01	2.0810E+01	2.0847E+01	2.0974E+01	2.1375E+01	2.1924E+01	
σ_a (Pu242)	8.3541E+00	8.3555E+00	8.3146E+00	8.2789E+00	8.2458E+00	8.2142E+00	8.1538E+00	8.0406E+00	7.9362E+00	
σ_a (Am241)	2.0626E+01	2.0590E+01	2.0426E+01	2.0322E+01	2.0259E+01	2.0226E+01	2.0221E+01	2.0384E+01	2.0715E+01	
σ_a (Am243)	0.0000E+00	2.5729E+01	2.5109E+01	2.4512E+01	2.4000E+01	2.3561E+01	2.2853E+01	2.1902E+01	2.1343E+01	
σ_a (Cm242)	0.0000E+00	4.0762E+00	4.0715E+00	4.0709E+00	4.0730E+00	4.0765E+00	4.0853E+00	4.1063E+00	4.1295E+00	
σ_a (Cm244)	0.0000E+00	1.0825E+01	1.0859E+01	1.0883E+01	1.0888E+01	1.0875E+01	1.0810E+01	1.0582E+01	1.0302E+01	
Σ_a (その他1)	0.0000E+00	3.7412E-06	2.5627E-05	4.2842E-05	5.7835E-05	7.1122E-05	9.4180E-05	1.3398E-04	1.7345E-04	
Σ_a (その他2)	4.6141E-05	1.4920E-04	4.7205E-04	7.1317E-04	9.1680E-04	1.1012E-03	1.4372E-03	2.0338E-03	2.5666E-03	
Σ_a (Zr)	1.8713E-04	1.8721E-04	1.8732E-04	1.8744E-04	1.8757E-04	1.8770E-04	1.8796E-04	1.8846E-04	1.8895E-04	
Σ_a (H2O)	1.7504E-04	1.7464E-04	1.7361E-04	1.7306E-04	1.7275E-04	1.7259E-04	1.7257E-04	1.7341E-04	1.7507E-04	

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
Hot, 0%ボイド	1.1970	1.1898	1.1679	1.1511	1.1364	1.1227	1.0970	1.0497	1.0070	
Hot, 40%ボイド	1.1864	1.1804	1.1592	1.1424	1.1273	1.1132	1.0865	1.0373	0.9928	
Hot, 70%ボイド	1.1803	1.1758	1.1556	1.1386	1.1231	1.1083	1.0802	1.0282	0.9809	
Doppler, 0%ボイド	1.1722	1.1653	1.1444	1.1282	1.1139	1.1005	1.0752	1.0286	0.9864	
Cold, 0%ボイド	1.2704	1.2576	1.2316	1.2138	1.1990	1.1856	1.1608	1.1158	1.0753	

Hot 0%ボイドより瞬時変化

Pin Cell (UO_2) with SRAC + ENDF/B-VI(R5)

表 1 - 1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.4185
0.1	1.3811
5	1.3226
10	1.2735
15	1.2305
20	1.1925
30	1.1263
50	1.0155
70	0.9252

(n,2n)反応の寄与により無限増倍率は完全には全生成反応率と全吸収(核分裂+捕獲)反応率との比には一致しない。SRAC では、 $k_{\text{inf}} = P/(A \cdot N)$ として計算される。例えば、燃焼度 0GWd/tにおいて、 $P/A=1.4164$ となる。

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

(1/b/cm)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
U235	5.0393E-04	5.0298E-04	4.5850E-04	4.1685E-04	3.7832E-04	3.4256E-04	2.7845E-04	1.7628E-04	1.0429E-04
U236	0.0000E+00	1.9527E-07	9.3252E-06	1.7760E-05	2.5434E-05	3.2414E-05	4.4457E-05	6.1648E-05	7.0793E-05
U238	7.1571E-03	7.1567E-03	7.1364E-03	7.1148E-03	7.0923E-03	7.0689E-03	7.0195E-03	6.9108E-03	6.7890E-03
Np237	0.0000E+00	2.4728E-10	1.8731E-07	5.6596E-07	1.0823E-06	1.7012E-06	3.1417E-06	6.3214E-06	9.2493E-06
Pu238	0.0000E+00	1.4579E-13	6.2866E-09	3.7617E-08	1.0863E-07	2.3126E-07	6.6842E-07	2.4472E-06	5.3557E-06
Pu239	0.0000E+00	1.0916E-07	1.5179E-05	2.7225E-05	3.6788E-05	4.4463E-05	5.5617E-05	6.7175E-05	7.1019E-05
Pu240	0.0000E+00	2.1492E-10	8.0096E-07	2.4563E-06	4.4423E-06	6.5860E-06	1.1046E-05	1.9573E-05	2.6502E-05
Pu241	0.0000E+00	8.2356E-13	1.6582E-07	9.4930E-07	2.2931E-06	3.9847E-06	7.8454E-06	1.5103E-05	2.0273E-05
Pu242	0.0000E+00	2.8455E-16	3.0504E-09	3.6794E-08	1.3936E-07	3.3542E-07	1.0439E-06	3.6344E-06	7.3248E-06
Am241	0.0000E+00	6.9796E-17	7.3357E-10	8.6884E-09	3.1973E-08	7.4278E-08	2.1235E-07	5.9797E-07	9.3689E-07
Am242m	0.0000E+00	7.7718E-21	3.6138E-12	7.5023E-11	3.6601E-10	1.0083E-09	3.4825E-09	1.1290E-08	1.8267E-08
Am243	0.0000E+00	1.0333E-19	6.0859E-11	1.5885E-09	9.5531E-09	3.1906E-08	1.5547E-07	8.9275E-07	2.3202E-06
Cm242	0.0000E+00	1.5909E-20	2.4386E-11	5.6409E-10	3.0030E-09	8.9397E-09	3.5450E-08	1.4613E-07	2.9155E-07
Cm243	0.0000E+00	5.2417E-25	4.6513E-14	2.3065E-12	1.9409E-11	8.0163E-11	5.0240E-10	3.5748E-09	9.7699E-09
Cm244	0.0000E+00	7.9109E-23	1.5295E-12	8.5232E-11	8.1224E-10	3.7921E-09	3.0005E-08	3.2469E-07	1.2921E-06
Cm245	0.0000E+00	1.2111E-26	1.0411E-14	1.2008E-12	1.7678E-11	1.1261E-10	1.3782E-09	2.5279E-08	1.3602E-07
Cm246	0.0000E+00	3.0273E-30	4.0608E-17	9.6563E-15	2.2167E-13	1.9631E-12	3.9392E-11	1.4585E-09	1.3449E-08
Mo95	0.0000E+00	5.1502E-08	2.5285E-06	4.9718E-06	7.3389E-06	9.6344E-06	1.4023E-05	2.2030E-05	2.9064E-05
Tc99	0.0000E+00	1.3498E-08	2.3518E-06	4.7132E-06	7.0148E-06	9.2581E-06	1.3572E-05	2.1511E-05	2.8509E-05
Rh103	0.0000E+00	6.0323E-10	7.9783E-07	2.0343E-06	3.2851E-06	4.4988E-06	6.7756E-06	1.0643E-05	1.3580E-05
Cs133	0.0000E+00	8.4914E-09	2.4946E-06	5.0607E-06	7.5454E-06	9.9475E-06	1.4500E-05	2.2579E-05	2.9263E-05
Sm147	0.0000E+00	9.6441E-13	3.1768E-08	1.2833E-07	2.7045E-07	4.4204E-07	8.2573E-07	1.5471E-06	2.0236E-06
Sm149	0.0000E+00	2.6927E-09	5.4786E-08	5.9910E-08	6.3318E-08	6.5498E-08	6.7327E-08	6.5437E-08	6.0970E-08
Sm150	0.0000E+00	1.8907E-10	3.8857E-07	8.7280E-07	1.3860E-06	1.9198E-06	3.0269E-06	5.2916E-06	7.4856E-06
Sm152	0.0000E+00	2.2769E-09	1.6716E-07	3.7725E-07	5.8260E-07	7.6958E-07	1.0834E-06	1.5292E-06	1.8343E-06
Nd143	0.0000E+00	3.1018E-09	1.9470E-06	4.0897E-06	6.1010E-06	7.9880E-06	1.1405E-05	1.6864E-05	2.0563E-05
Nd145	0.0000E+00	3.1370E-08	1.5331E-06	2.9996E-06	4.4053E-06	5.7536E-06	8.2856E-06	1.2720E-05	1.6343E-05
Eu153	0.0000E+00	1.4156E-09	8.7295E-08	2.1500E-07	3.8115E-07	5.7725E-07	1.0231E-06	1.9465E-06	2.7345E-06
Gd155	0.0000E+00	1.5193E-13	9.6920E-11	1.7097E-10	2.5669E-10	3.7803E-10	7.3905E-10	1.7971E-09	2.9753E-09

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性（燃料セル平均）

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.2039E-02	3.1259E-02	3.0083E-02	2.9056E-02	2.8127E-02	2.7288E-02	2.5787E-02	2.3214E-02	2.1098E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	5.9410E+01	5.7917E+01	5.5031E+01	5.3319E+01	5.2231E+01	5.1562E+01	5.1003E+01	5.1455E+01	5.2642E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	2.9353E-01	2.9424E-01	2.9714E-01	2.9917E-01	3.0062E-01	3.0168E-01	3.0306E-01	3.0436E-01	3.0498E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	0.0000E+00	5.9302E+00	5.8935E+00	5.8798E+00	5.8746E+00	5.8747E+00	5.8843E+00	5.9204E+00	5.9610E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	0.0000E+00	1.9483E+02	1.7728E+02	1.6601E+02	1.5840E+02	1.5312E+02	1.4677E+02	1.4251E+02	1.4283E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	0.0000E+00	1.9472E+00	1.9528E+00	1.9483E+00	1.9435E+00	1.9395E+00	1.9335E+00	1.9256E+00	1.9210E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	0.0000E+00	1.9102E+02	1.7762E+02	1.6934E+02	1.6382E+02	1.6008E+02	1.5592E+02	1.5430E+02	1.5624E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	0.0000E+00	1.4454E+00	1.4571E+00	1.4651E+00	1.4708E+00	1.4747E+00	1.4795E+00	1.4830E+00	1.4837E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	0.0000E+00	3.4071E+00	3.3094E+00	3.2417E+00	3.1935E+00	3.1579E+00	3.1096E+00	3.0593E+00	3.0371E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.0000E+00	1.6418E+00	1.6532E+00	1.6603E+00	1.6650E+00	1.6680E+00	1.6711E+00	1.6716E+00	1.6694E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.0000E+00	1.7636E+00	1.7546E+00	1.7506E+00	1.7485E+00	1.7477E+00	1.7485E+00	1.7554E+00	1.7652E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.0000E+00	3.5387E+00	3.5533E+00	3.5648E+00	3.5737E+00	3.5808E+00	3.5911E+00	3.6018E+00	3.5986E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性（燃料セル平均）

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.2621E-02	2.2667E-02	2.2779E-02	2.2850E-02	2.2894E-02	2.2918E-02	2.2932E-02	2.2896E-02	2.2839E-02
σ_a (U235)	3.0637E+01	2.9923E+01	2.8543E+01	2.7731E+01	2.7221E+01	2.6914E+01	2.6676E+01	2.6951E+01	2.7568E+01
σ_a (U238)	9.0290E-01	9.0142E-01	9.0098E-01	9.0185E-01	9.0325E-01	9.0498E-01	9.0908E-01	9.1840E-01	9.2768E-01
σ_a (Pu238)	0.0000E+00	1.8479E+01	1.7652E+01	1.7204E+01	1.6933E+01	1.6778E+01	1.6687E+01	1.6935E+01	1.7373E+01
σ_a (Pu239)	0.0000E+00	1.0804E+02	9.8065E+01	9.1635E+01	8.7280E+01	8.4245E+01	8.0564E+01	7.7974E+01	7.7990E+01
σ_a (Pu240)	0.0000E+00	1.9876E+02	1.8242E+02	1.5599E+02	1.3461E+02	1.1840E+02	9.6694E+01	7.4783E+01	6.4716E+01
σ_a (Pu241)	0.0000E+00	8.7780E+01	8.1491E+01	7.7589E+01	7.4983E+01	7.3216E+01	7.1224E+01	7.0384E+01	7.1216E+01
σ_a (Pu242)	0.0000E+00	3.0909E+01	3.0899E+01	3.0860E+01	3.0740E+01	3.0510E+01	2.9711E+01	2.7189E+01	2.4375E+01
σ_a (Am241)	0.0000E+00	8.0935E+01	7.5494E+01	7.1738E+01	6.9089E+01	6.7161E+01	6.4608E+01	6.2115E+01	6.1110E+01
σ_a (Am243)	0.0000E+00	4.6472E+01	4.6057E+01	4.5521E+01	4.5014E+01	4.4544E+01	4.3673E+01	4.2034E+01	4.0404E+01
σ_a (Cm242)	0.0000E+00	4.0237E+00	4.0020E+00	3.9959E+00	3.9958E+00	3.9993E+00	4.0130E+00	4.0507E+00	4.0832E+00
σ_a (Cm244)	0.0000E+00	1.5953E+01	1.5840E+01	1.5773E+01	1.5733E+01	1.5710E+01	1.5694E+01	1.5670E+01	1.5477E+01
Σ_a (その他1)	0.0000E+00	5.2089E-06	8.2197E-05	1.4592E-04	2.0239E-04	2.5383E-04	3.4593E-04	4.9768E-04	6.1280E-04
Σ_a (その他2)	5.7437E-05	4.9625E-04	9.0245E-04	1.1589E-03	1.3916E-03	1.6092E-03	2.0130E-03	2.7242E-03	3.3168E-03
Σ_a (Zr)	1.8094E-04	1.8021E-04	1.7890E-04	1.7816E-04	1.7771E-04	1.7745E-04	1.7728E-04	1.7759E-04	1.7819E-04
Σ_a (H2O)	4.8109E-04	4.7182E-04	4.5060E-04	4.3704E-04	4.2790E-04	4.2176E-04	4.1510E-04	4.1315E-04	4.1699E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.4185	1.3811	1.3226	1.2735	1.2305	1.1925	1.1263	1.0155	0.9252
Hot, 40%ボイド	1.3766	1.3435	1.2853	1.2353	1.1917	1.1533	1.0865	0.9751	0.8848
Hot, 70%ボイド	1.3051	1.2791	1.2222	1.1716	1.1278	1.0894	1.0224	0.9107	0.8208
Doppler, 0%ボイド	1.3896	1.3538	1.2964	1.2474	1.2040	1.1657	1.0994	0.9900	0.9020
Cold, 0%ボイド	1.5266	1.4782	1.4219	1.3768	1.3365	1.3001	1.2345	1.1190	1.0195

Hot 0%ボイドより瞬時変化

Pin Cell (MOX) with SRAC + ENDF/B-VI(R5)

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.1998
0.1	1.1927
5	1.1705
10	1.1534
15	1.1383
20	1.1243
30	1.0980
50	1.0499
70	1.0067

(n,2n)反応の寄与により無限増倍率は完全には全生成反応率と全吸收(核分裂+捕獲)反応率との比には一致しない。SRAC では、 $k_{inf} = P/(A-N)$ として計算される。例えば、燃焼度 0GWd/tにおいて、 $P/A=1.1978$ となる。

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

	燃焼度(GWd/t)									(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
U235	1.2956E-05	1.2946E-05	1.2428E-05	1.1914E-05	1.1413E-05	1.0927E-05	9.9951E-06	8.2938E-06	6.8006E-06	
U236	0.0000E+00	3.4814E-09	1.7070E-07	3.3311E-07	4.8719E-07	6.3311E-07	9.0130E-07	1.3490E-06	1.6887E-06	
U238	6.3846E-03	6.3842E-03	6.3646E-03	6.3442E-03	6.3235E-03	6.3027E-03	6.2602E-03	6.1728E-03	6.0819E-03	
Np237	0.0000E+00	7.6621E-10	1.4404E-07	2.9518E-07	4.4327E-07	5.8791E-07	8.6589E-07	1.3720E-06	1.8057E-06	
Pu238	2.7988E-05	2.7973E-05	2.7690E-05	2.8021E-05	2.8682E-05	2.9508E-05	3.1343E-05	3.4995E-05	3.8302E-05	
Pu239	7.2334E-04	7.2262E-04	6.9886E-04	6.7561E-04	6.5309E-04	6.3125E-04	5.8958E-04	5.1386E-04	4.4786E-04	
Pu240	3.3043E-04	3.3042E-04	3.2971E-04	3.2870E-04	3.2747E-04	3.2600E-04	3.2240E-04	3.1259E-04	2.9954E-04	
Pu241	1.2241E-04	1.2247E-04	1.2520E-04	1.2773E-04	1.2997E-04	1.3194E-04	1.3516E-04	1.3904E-04	1.4007E-04	
Pu242	8.3891E-05	8.3888E-05	8.3895E-05	8.3943E-05	8.4036E-05	8.4175E-05	8.4582E-05	8.5852E-05	8.7594E-05	
Am241	3.5537E-05	3.5527E-05	3.5027E-05	3.4572E-05	3.4166E-05	3.3799E-05	3.3149E-05	3.1987E-05	3.0763E-05	
Am242m	0.0000E+00	6.0289E-09	2.6762E-07	4.7338E-07	6.2994E-07	7.4768E-07	8.9818E-07	1.0022E-06	9.9029E-07	
Am243	0.0000E+00	4.7983E-08	2.3295E-06	4.4937E-06	6.5036E-06	8.3727E-06	1.1737E-05	1.7240E-05	2.1485E-05	
Cm242	0.0000E+00	2.5331E-08	1.4327E-06	2.2272E-06	2.6625E-06	2.9018E-06	3.1124E-06	3.2382E-06	3.3128E-06	
Cm243	0.0000E+00	2.0534E-12	7.7060E-09	2.4918E-08	4.5672E-08	6.6875E-08	1.0547E-07	1.6110E-07	1.9476E-07	
Cm244	0.0000E+00	4.3809E-11	1.0632E-07	4.0593E-07	8.7080E-07	1.4769E-06	3.0344E-06	7.1227E-06	1.1977E-05	
Cm245	0.0000E+00	9.6358E-15	1.1812E-09	9.0832E-09	2.9308E-08	6.6251E-08	2.0258E-07	7.6435E-07	1.7015E-06	
Cm246	0.0000E+00	8.6124E-19	3.1256E-12	4.8846E-11	2.4068E-10	7.3908E-10	3.5235E-09	2.4023E-08	8.1398E-08	
Mo95	0.0000E+00	3.7086E-08	1.8434E-06	3.6647E-06	5.4644E-06	7.2430E-06	1.0739E-05	1.7492E-05	2.3937E-05	
Tc99	0.0000E+00	1.3280E-08	2.3028E-06	4.6258E-06	6.9014E-06	9.1315E-06	1.3461E-05	2.1623E-05	2.9161E-05	
Rh103	0.0000E+00	1.2319E-09	1.5963E-06	4.0140E-06	6.4319E-06	8.7791E-06	1.3251E-05	2.1345E-05	2.8367E-05	
Cs133	0.0000E+00	8.5696E-09	2.5034E-06	5.0875E-06	7.6050E-06	1.0058E-05	1.4777E-05	2.3507E-05	3.1342E-05	
Sm147	0.0000E+00	9.0359E-13	2.9932E-08	1.2227E-07	2.6105E-07	4.3300E-07	8.3687E-07	1.7080E-06	2.4853E-06	
Sm149	0.0000E+00	3.3538E-09	3.0263E-07	4.0675E-07	4.4100E-07	4.5056E-07	4.4742E-07	4.2202E-07	3.9211E-07	
Sm150	0.0000E+00	4.1649E-11	2.0449E-07	6.2815E-07	1.1275E-06	1.6547E-06	2.7342E-06	4.8994E-06	7.0267E-06	
Sm152	0.0000E+00	4.7457E-09	2.4980E-07	5.1434E-07	7.8104E-07	1.0419E-06	1.5274E-06	2.3060E-06	2.8361E-06	
Nd143	0.0000E+00	2.3404E-09	1.4946E-06	3.2180E-06	4.9192E-06	6.5975E-06	9.8844E-06	1.6170E-05	2.2051E-05	
Nd145	0.0000E+00	2.4414E-08	1.2104E-06	2.3993E-06	3.5670E-06	4.7138E-06	6.9454E-06	1.1166E-05	1.5068E-05	
Eu153	0.0000E+00	3.1650E-09	1.7226E-07	3.7283E-07	5.9927E-07	8.4755E-07	1.3910E-06	2.5438E-06	3.6164E-06	
Gd155	0.0000E+00	7.2440E-13	1.1979E-09	3.2780E-09	5.2492E-09	6.9291E-09	9.8193E-09	1.7008E-08	2.8131E-08	

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性 (燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.0941E-02	3.0784E-02	3.0212E-02	2.9762E-02	2.9364E-02	2.8991E-02	2.8284E-02	2.6977E-02	2.5794E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	1.9676E+01	1.9605E+01	1.9533E+01	1.9531E+01	1.9559E+01	1.9603E+01	1.9719E+01	2.0026E+01	2.0406E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	3.4786E-01	3.4687E-01	3.4671E-01	3.4650E-01	3.4625E-01	3.4599E-01	3.4543E-01	3.4424E-01	3.4300E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	5.3591E+00	5.3547E+00	5.3552E+00	5.3562E+00	5.3571E+00	5.3578E+00	5.3592E+00	5.3617E+00	5.3648E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	2.9908E+01	2.9759E+01	2.9774E+01	2.9937E+01	3.0168E+01	3.0436E+01	3.1041E+01	3.2447E+01	3.4061E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	2.1079E+00	2.1047E+00	2.1047E+00	2.1043E+00	2.1038E+00	2.1031E+00	2.1016E+00	2.0978E+00	2.0936E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	4.7015E+01	4.6821E+01	4.6513E+01	4.6409E+01	4.6409E+01	4.6467E+01	4.6702E+01	4.7492E+01	4.8598E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	1.6614E+00	1.6586E+00	1.6585E+00	1.6582E+00	1.6577E+00	1.6571E+00	1.6557E+00	1.6523E+00	1.6484E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	2.5418E+00	2.5369E+00	2.5320E+00	2.5278E+00	2.5244E+00	2.5215E+00	2.5171E+00	2.5117E+00	2.5098E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.0000E+00	1.8166E+00	1.8146E+00	1.8124E+00	1.8103E+00	1.8083E+00	1.8045E+00	1.7977E+00	1.7915E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.0000E+00	1.7133E+00	1.7122E+00	1.7113E+00	1.7105E+00	1.7097E+00	1.7081E+00	1.7051E+00	1.7024E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.0000E+00	3.5970E+00	3.5984E+00	3.5986E+00	3.5978E+00	3.5960E+00	3.5905E+00	3.5744E+00	3.5555E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸收反応断面積の燃焼度依存性 (燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.5831E-02	2.5852E-02	2.5851E-02	2.5846E-02	2.5837E-02	2.5826E-02	2.5800E-02	2.5736E-02	2.5660E-02
σ_a (U235)	1.1439E+01	1.1407E+01	1.1370E+01	1.1367E+01	1.1379E+01	1.1399E+01	1.1454E+01	1.1604E+01	1.1793E+01
σ_a (U238)	8.5015E-01	8.5035E-01	8.5055E-01	8.5101E-01	8.5165E-01	8.5242E-01	8.5427E-01	8.5891E-01	8.6449E-01
σ_a (Pu238)	6.6407E+00	6.6129E+00	6.5914E+00	6.5900E+00	6.5964E+00	6.6067E+00	6.6345E+00	6.7110E+00	6.8094E+00
σ_a (Pu239)	1.5899E+01	1.5825E+01	1.5849E+01	1.5950E+01	1.6086E+01	1.6242E+01	1.6591E+01	1.7394E+01	1.8310E+01
σ_a (Pu240)	1.2578E+01	1.2562E+01	1.2452E+01	1.2377E+01	1.2328E+01	1.2298E+01	1.2283E+01	1.2385E+01	1.2631E+01
σ_a (Pu241)	2.0747E+01	2.0660E+01	2.0528E+01	2.0488E+01	2.0494E+01	2.0526E+01	2.0643E+01	2.1022E+01	2.1545E+01
σ_a (Pu242)	8.3660E+00	8.3712E+00	8.3327E+00	8.2972E+00	8.2643E+00	8.2332E+00	8.1743E+00	8.0654E+00	7.9657E+00
σ_a (Am241)	2.0805E+01	2.0774E+01	2.0601E+01	2.0491E+01	2.0425E+01	2.0389E+01	2.0378E+01	2.0528E+01	2.0843E+01
σ_a (Am243)	0.0000E+00	2.5429E+01	2.4808E+01	2.4209E+01	2.3694E+01	2.3252E+01	2.2539E+01	2.1576E+01	2.1004E+01
σ_a (Cm242)	0.0000E+00	3.2427E+00	3.2370E+00	3.2357E+00	3.2371E+00	3.2398E+00	3.2473E+00	3.2659E+00	3.2868E+00
σ_a (Cm244)	0.0000E+00	9.9984E+00	1.0037E+01	1.0056E+01	1.0059E+01	1.0047E+01	9.9882E+00	9.7866E+00	9.5392E+00
Σ_a (その他1)	0.0000E+00	3.3778E-06	2.7938E-05	4.6933E-05	6.2937E-05	7.6675E-05	9.9579E-05	1.3737E-04	1.7460E-04
Σ_a (その他2)	7.2168E-05	1.7014E-04	4.9151E-04	7.3557E-04	9.4186E-04	1.1287E-03	1.4692E-03	2.0729E-03	2.6093E-03
Σ_a (Zr)	1.6667E-04	1.6677E-04	1.6685E-04	1.6695E-04	1.6705E-04	1.6715E-04	1.6736E-04	1.6777E-04	1.6817E-04
Σ_a (H2O)	1.9250E-04	1.9201E-04	1.9096E-04	1.9035E-04	1.8999E-04	1.8978E-04	1.8967E-04	1.9030E-04	1.9177E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.1998	1.1927	1.1705	1.1534	1.1383	1.1243	1.0980	1.0499	1.0067
Hot, 40%ボイド	1.1905	1.1845	1.1632	1.1459	1.1305	1.1160	1.0888	1.0387	0.9938
Hot, 70%ボイド	1.1869	1.1824	1.1620	1.1446	1.1287	1.1136	1.0849	1.0319	0.9840
Doppler, 0%ボイド	1.1746	1.1678	1.1466	1.1300	1.1154	1.1017	1.0760	1.0286	0.9860
Cold, 0%ボイド	1.2711	1.2586	1.2323	1.2140	1.1989	1.1852	1.1599	1.1141	1.0733

Hot 0%ボイドより瞬時変化

Pin Cell (UO_2) with SRAC + JEF-2.2

表 1-1. 無限倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限倍率
0	1.4307
0.1	1.3931
5	1.3328
10	1.2826
15	1.2388
20	1.2003
30	1.1335
50	1.0221
70	0.9310

(n,2n)反応の寄与により無限倍率は完全には全生成反応率と全吸收(核分裂+捕獲)反応率との比には一致しない。SRAC では、 $k_{\text{inf}} = P/(A-N)$ として計算される。例えば、燃焼度 0GWd/tにおいて、 $P/A=1.4288$ となる。

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

	(1/b/cm)									
	燃焼度(GWd/t)	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
U235	5.0393E-04	5.0299E-04	4.5886E-04	4.1751E-04	3.7924E-04	3.4368E-04	2.7989E-04	1.7793E-04	1.0572E-04	
U236	0.0000E+00	1.8651E-07	8.8971E-06	1.6936E-05	2.4237E-05	3.0866E-05	4.2265E-05	5.8397E-05	6.6763E-05	
U238	7.1571E-03	7.1567E-03	7.1366E-03	7.1151E-03	7.0927E-03	7.0695E-03	7.0205E-03	6.9126E-03	6.7919E-03	
Np237	0.0000E+00	2.1037E-10	1.7373E-07	5.3950E-07	1.0476E-06	1.6637E-06	3.1148E-06	6.3620E-06	9.3779E-06	
Pu238	0.0000E+00	1.2224E-13	5.7271E-09	3.5296E-08	1.0373E-07	2.2353E-07	6.5697E-07	2.4527E-06	5.4309E-06	
Pu239	0.0000E+00	1.0859E-07	1.5113E-05	2.7124E-05	3.6667E-05	4.4331E-05	5.5467E-05	6.6947E-05	7.0633E-05	
Pu240	0.0000E+00	2.0019E-10	7.9510E-07	2.4453E-06	4.4308E-06	6.5790E-06	1.1064E-05	1.9693E-05	2.6757E-05	
Pu241	0.0000E+00	7.5538E-13	1.6321E-07	9.3615E-07	2.2624E-06	3.9407E-06	7.7329E-06	1.4857E-05	1.9911E-05	
Pu242	0.0000E+00	2.5549E-16	2.9615E-09	3.5930E-08	1.3667E-07	3.3022E-07	1.0349E-06	3.6449E-06	7.4088E-06	
Am241	0.0000E+00	6.3588E-17	7.1976E-10	8.5287E-09	3.1345E-08	7.2678E-08	2.0683E-07	5.7653E-07	8.9388E-07	
Am242m	0.0000E+00	7.3004E-21	3.6580E-12	7.5813E-11	3.6870E-10	1.0123E-09	3.4732E-09	1.1120E-08	1.7775E-08	
Am243	0.0000E+00	8.1372E-20	5.2055E-11	1.3665E-09	8.2520E-09	2.7669E-08	1.3595E-07	7.9562E-07	2.1083E-06	
Cm242	0.0000E+00	1.4872E-20	2.4704E-11	5.7234E-10	3.0445E-09	9.0489E-09	3.5731E-08	1.4590E-07	2.8850E-07	
Cm243	0.0000E+00	4.9573E-25	4.9233E-14	2.4605E-12	2.0813E-11	8.6329E-11	5.4509E-10	3.9317E-09	1.0888E-08	
Cm244	0.0000E+00	3.9950E-23	1.3017E-12	7.2930E-11	6.9729E-10	3.2644E-09	2.5968E-08	2.8442E-07	1.1471E-06	
Cm245	0.0000E+00	9.7597E-27	9.4200E-15	1.0930E-12	1.6152E-11	1.0322E-10	1.2712E-09	2.3654E-08	1.2945E-07	
Cm246	0.0000E+00	1.3240E-30	3.8311E-17	9.1826E-15	2.1179E-13	1.8825E-12	3.8008E-11	1.4246E-09	1.3328E-08	
Mo95	0.0000E+00	5.1518E-08	2.5300E-06	4.9761E-06	7.3470E-06	9.6475E-06	1.4049E-05	2.2095E-05	2.9185E-05	
Tc99	0.0000E+00	1.3498E-08	2.3537E-06	4.7199E-06	7.0277E-06	9.2777E-06	1.3605E-05	2.1555E-05	2.8531E-05	
Rh103	0.0000E+00	6.0231E-10	7.8851E-07	2.0010E-06	3.2232E-06	4.4070E-06	6.6224E-06	1.0368E-05	1.3188E-05	
Cs133	0.0000E+00	8.4915E-09	2.4910E-06	5.0454E-06	7.5110E-06	9.8871E-06	1.4370E-05	2.2249E-05	2.8677E-05	
Sm147	0.0000E+00	9.6426E-13	3.1741E-08	1.2815E-07	2.6993E-07	4.4095E-07	8.2292E-07	1.5396E-06	2.0117E-06	
Sm149	0.0000E+00	2.6888E-09	5.4043E-08	5.9066E-08	6.2403E-08	6.4530E-08	6.6283E-08	6.4288E-08	5.9714E-08	
Sm150	0.0000E+00	1.9111E-10	3.8908E-07	8.7332E-07	1.3866E-06	1.9207E-06	3.0284E-06	5.2945E-06	7.4910E-06	
Sm152	0.0000E+00	2.2744E-09	1.6689E-07	3.7666E-07	5.8178E-07	7.6866E-07	1.0827E-06	1.5307E-06	1.8390E-06	
Nd143	0.0000E+00	3.1028E-09	1.9481E-06	4.0927E-06	6.1065E-06	7.9964E-06	1.1421E-05	1.6896E-05	2.0606E-05	
Nd145	0.0000E+00	3.1372E-08	1.5334E-06	3.0005E-06	4.4071E-06	5.7563E-06	8.2907E-06	1.2731E-05	1.6363E-05	
Eu153	0.0000E+00	1.4131E-09	8.7349E-08	2.1557E-07	3.8291E-07	5.8107E-07	1.0340E-06	1.9831E-06	2.8068E-06	
Gd155	0.0000E+00	1.5290E-13	1.4541E-10	3.0384E-10	4.6303E-10	6.6544E-10	1.2694E-09	3.1383E-09	5.2370E-09	

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.2590E-02	3.1795E-02	3.0577E-02	2.9525E-02	2.8578E-02	2.7723E-02	2.6202E-02	2.3597E-02	2.1440E-02	
$\nu \sigma_f$ (U235)	6.0524E+01	5.8996E+01	5.6046E+01	5.4300E+01	5.3190E+01	5.2508E+01	5.1950E+01	5.2473E+01	5.3791E+01	
$\nu \sigma_f$ (U238)	2.9205E-01	2.9324E-01	2.9617E-01	2.9821E-01	2.9966E-01	3.0071E-01	3.0206E-01	3.0323E-01	3.0365E-01	
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	0.0000E+00	6.1775E+00	6.1353E+00	6.1179E+00	6.1100E+00	6.1082E+00	6.1155E+00	6.1511E+00	6.1940E+00	
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	0.0000E+00	1.9683E+02	1.7908E+02	1.6769E+02	1.6000E+02	1.5467E+02	1.4832E+02	1.4430E+02	1.4504E+02	
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	0.0000E+00	2.0074E+00	2.0135E+00	2.0093E+00	2.0046E+00	2.0006E+00	1.9943E+00	1.9854E+00	1.9794E+00	
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	0.0000E+00	1.9702E+02	1.8317E+02	1.7463E+02	1.6893E+02	1.6509E+02	1.6084E+02	1.5940E+02	1.6177E+02	
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	0.0000E+00	1.4685E+00	1.4799E+00	1.4878E+00	1.4931E+00	1.4966E+00	1.5000E+00	1.4993E+00	1.4952E+00	
$\nu \sigma_f$ (Am241)	0.0000E+00	3.8194E+00	3.6915E+00	3.6023E+00	3.5390E+00	3.4925E+00	3.4300E+00	3.3674E+00	3.3419E+00	
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.0000E+00	1.5416E+00	1.5533E+00	1.5609E+00	1.5660E+00	1.5694E+00	1.5728E+00	1.5734E+00	1.5709E+00	
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.0000E+00	3.4222E+00	3.3983E+00	3.3843E+00	3.3751E+00	3.3693E+00	3.3638E+00	3.3665E+00	3.3769E+00	
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.0000E+00	3.4704E+00	3.4797E+00	3.4878E+00	3.4942E+00	3.4993E+00	3.5072E+00	3.5155E+00	3.5114E+00	

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
Σ_a (全核種)	2.2809E-02	2.2853E-02	2.2974E-02	2.3051E-02	2.3099E-02	2.3128E-02	2.3148E-02	2.3118E-02	2.3062E-02	
σ_a (U235)	3.0897E+01	3.0167E+01	2.8761E+01	2.7935E+01	2.7416E+01	2.7103E+01	2.6863E+01	2.7168E+01	2.7843E+01	
σ_a (U238)	9.1145E-01	9.0990E-01	9.0928E-01	9.1002E-01	9.1131E-01	9.1293E-01	9.1683E-01	9.2589E-01	9.3512E-01	
σ_a (Pu238)	0.0000E+00	1.8102E+01	1.7286E+01	1.6846E+01	1.6579E+01	1.6429E+01	1.6343E+01	1.6611E+01	1.7079E+01	
σ_a (Pu239)	0.0000E+00	1.0929E+02	9.9200E+01	9.2704E+01	8.8305E+01	8.5246E+01	8.1563E+01	7.9102E+01	7.9349E+01	
σ_a (Pu240)	0.0000E+00	2.0072E+02	1.8419E+02	1.5738E+02	1.3567E+02	1.1921E+02	9.7160E+01	7.4931E+01	6.4760E+01	
σ_a (Pu241)	0.0000E+00	9.0128E+01	8.3664E+01	7.9665E+01	7.6995E+01	7.5188E+01	7.3173E+01	7.2429E+01	7.3467E+01	
σ_a (Pu242)	0.0000E+00	2.7726E+01	2.7680E+01	2.7638E+01	2.7538E+01	2.7359E+01	2.6743E+01	2.4772E+01	2.2499E+01	
σ_a (Am241)	0.0000E+00	8.5330E+01	7.9638E+01	7.5703E+01	7.2928E+01	7.0912E+01	6.8268E+01	6.5798E+01	6.4938E+01	
σ_a (Am243)	0.0000E+00	4.7073E+01	4.6635E+01	4.6086E+01	4.5569E+01	4.5088E+01	4.4203E+01	4.2565E+01	4.0959E+01	
σ_a (Cm242)	0.0000E+00	4.7770E+00	4.7520E+00	4.7440E+00	4.7424E+00	4.7448E+00	4.7569E+00	4.7938E+00	4.8275E+00	
σ_a (Cm244)	0.0000E+00	1.7214E+01	1.7066E+01	1.6977E+01	1.6921E+01	1.6885E+01	1.6851E+01	1.6812E+01	1.6611E+01	
Σ_a (その他1)	0.0000E+00	4.8568E-06	8.2129E-05	1.4743E-04	2.0589E-04	2.5949E-04	3.5599E-04	5.1562E-04	6.3619E-04	
Σ_a (その他2)	5.9012E-05	5.0396E-04	9.2156E-04	1.1795E-03	1.4117E-03	1.6275E-03	2.0260E-03	2.7268E-03	3.3147E-03	
Σ_a (Zr)	1.6959E-04	1.6880E-04	1.6744E-04	1.6668E-04	1.6622E-04	1.6596E-04	1.6579E-04	1.6617E-04	1.6687E-04	
Σ_a (H2O)	4.8715E-04	4.7789E-04	4.5650E-04	4.4290E-04	4.3373E-04	4.2760E-04	4.2105E-04	4.1967E-04	4.2440E-04	

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
Hot, 0%ボイド	1.4307	1.3931	1.3328	1.2826	1.2388	1.2003	1.1335	1.0221	0.9310	
Hot, 40%ボイド	1.3893	1.3562	1.2959	1.2447	1.2003	1.1613	1.0938	0.9816	0.8905	
Hot, 70%ボイド	1.3186	1.2926	1.2333	1.1814	1.1366	1.0975	1.0296	0.9169	0.8259	
Doppler, 0%ボイド	1.4017	1.3658	1.3065	1.2564	1.2123	1.1735	1.1066	0.9966	0.9078	
Cold, 0%ボイド	1.5356	1.4870	1.4293	1.3836	1.3428	1.3061	1.2401	1.1240	1.0232	

Hot 0%ボイドより瞬時変化

Pin Cell (MOX) with SRAC + JEF-2.2

表 1-1. 無限倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限倍率
0	1.1955
0.1	1.1885
5	1.1664
10	1.1496
15	1.1349
20	1.1212
30	1.0955
50	1.0488
70	1.0070

(n,2n)反応の寄与により無限倍率は完全には全生成反応率と全吸収(核分裂+捕獲)反応率との比には一致しない。SRAC では、 $k_{inf} = P/(A-N)$ として計算される。例えば、燃焼度 0GWd/tにおいて、 $P/A=1.1940$ となる。

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

	燃焼度(GWd/t)									(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
U235	1.2956E-05	1.2946E-05	1.2435E-05	1.1928E-05	1.1433E-05	1.0953E-05	1.0031E-05	8.3462E-06	6.8635E-06	
U236	0.0000E+00	3.2737E-09	1.6041E-07	3.1286E-07	4.5734E-07	5.9400E-07	8.4465E-07	1.2608E-06	1.5731E-06	
U238	6.3846E-03	6.3842E-03	6.3646E-03	6.3442E-03	6.3236E-03	6.3028E-03	6.2605E-03	6.1733E-03	6.0828E-03	
Np237	0.0000E+00	7.1683E-10	1.2702E-07	2.6039E-07	3.9131E-07	5.1943E-07	7.6635E-07	1.2182E-06	1.6075E-06	
Pu238	2.7988E-05	2.7973E-05	2.7726E-05	2.8112E-05	2.8835E-05	2.9725E-05	3.1679E-05	3.5523E-05	3.8966E-05	
Pu239	7.2334E-04	7.2262E-04	6.9881E-04	6.7550E-04	6.5292E-04	6.3103E-04	5.8926E-04	5.1338E-04	4.4721E-04	
Pu240	3.3043E-04	3.3042E-04	3.2976E-04	3.2882E-04	3.2762E-04	3.2619E-04	3.2264E-04	3.1287E-04	2.9981E-04	
Pu241	1.2241E-04	1.2246E-04	1.2519E-04	1.2770E-04	1.2993E-04	1.3190E-04	1.3510E-04	1.3892E-04	1.3988E-04	
Pu242	8.3891E-05	8.3889E-05	8.3907E-05	8.3967E-05	8.4070E-05	8.4218E-05	8.4640E-05	8.5925E-05	8.7669E-05	
Am241	3.5537E-05	3.5525E-05	3.4929E-05	3.4383E-05	3.3891E-05	3.3444E-05	3.2650E-05	3.1253E-05	2.9846E-05	
Am242m	0.0000E+00	6.2651E-09	2.8070E-07	5.0100E-07	6.7207E-07	8.0331E-07	9.7590E-07	1.1018E-06	1.0895E-06	
Am243	0.0000E+00	4.7426E-08	2.3011E-06	4.4370E-06	6.4200E-06	8.2634E-06	1.1580E-05	1.7000E-05	2.1173E-05	
Cm242	0.0000E+00	2.6306E-08	1.4839E-06	2.3017E-06	2.7454E-06	2.9857E-06	3.1888E-06	3.2936E-06	3.3509E-06	
Cm243	0.0000E+00	2.2788E-12	8.5595E-09	2.7726E-08	5.0908E-08	7.4675E-08	1.1818E-07	1.8159E-07	2.2045E-07	
Cm244	0.0000E+00	4.3631E-11	1.0579E-07	4.0368E-07	8.6558E-07	1.4675E-06	3.0128E-06	7.0815E-06	1.1856E-05	
Cm245	0.0000E+00	9.9938E-15	1.2257E-09	9.4255E-09	3.0414E-08	6.8755E-08	2.1022E-07	7.9259E-07	1.7623E-06	
Cm246	0.0000E+00	6.3418E-19	3.6555E-12	5.7124E-11	2.8142E-10	8.6394E-10	4.1157E-09	2.7998E-08	9.4595E-08	
Mo95	0.0000E+00	3.7061E-08	1.8423E-06	3.6630E-06	5.4624E-06	7.2411E-06	1.0738E-05	1.7498E-05	2.3958E-05	
Tc99	0.0000E+00	1.3280E-08	2.3042E-06	4.6309E-06	6.9120E-06	9.1486E-06	1.3493E-05	2.1683E-05	2.9234E-05	
Rh103	0.0000E+00	1.2311E-09	1.5821E-06	3.9641E-06	6.3411E-06	8.6464E-06	1.3033E-05	2.0955E-05	2.7804E-05	
Cs133	0.0000E+00	8.5685E-09	2.4993E-06	5.0719E-06	7.5709E-06	9.9996E-06	1.4655E-05	2.3208E-05	3.0822E-05	
Sm147	0.0000E+00	9.0389E-13	2.9912E-08	1.2209E-07	2.6049E-07	4.3178E-07	8.3340E-07	1.6967E-06	2.4637E-06	
Sm149	0.0000E+00	3.3545E-09	2.9793E-07	3.9667E-07	4.2804E-07	4.3644E-07	4.3313E-07	4.0900E-07	3.8036E-07	
Sm150	0.0000E+00	4.2677E-11	2.0946E-07	6.3874E-07	1.1411E-06	1.6695E-06	2.7491E-06	4.9118E-06	7.0355E-06	
Sm152	0.0000E+00	4.7502E-09	2.5026E-07	5.1556E-07	7.8314E-07	1.0449E-06	1.5321E-06	2.3138E-06	2.8472E-06	
Nd143	0.0000E+00	2.3408E-09	1.4949E-06	3.2185E-06	4.9198E-06	6.5981E-06	9.8849E-06	1.6170E-05	2.2049E-05	
Nd145	0.0000E+00	2.4420E-08	1.2106E-06	2.3998E-06	3.5676E-06	4.7144E-06	6.9458E-06	1.1165E-05	1.5066E-05	
Eu153	0.0000E+00	3.1702E-09	1.7281E-07	3.7460E-07	6.0294E-07	8.5382E-07	1.4045E-06	2.5782E-06	3.6777E-06	
Gd155	0.0000E+00	7.2857E-13	1.4608E-09	4.7507E-09	8.8107E-09	1.3114E-08	2.1816E-08	4.1095E-08	6.5829E-08	

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性 (燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.1190E-02	3.1028E-02	3.0452E-02	3.0008E-02	2.9614E-02	2.9245E-02	2.8546E-02	2.7260E-02	2.6097E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	2.0029E+01	1.9952E+01	1.9878E+01	1.9881E+01	1.9913E+01	1.9961E+01	2.0085E+01	2.0412E+01	2.0817E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	3.4756E-01	3.4692E-01	3.4672E-01	3.4644E-01	3.4613E-01	3.4580E-01	3.4510E-01	3.4360E-01	3.4204E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	5.5245E+00	5.5209E+00	5.5208E+00	5.5217E+00	5.5227E+00	5.5237E+00	5.5255E+00	5.5295E+00	5.5342E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	3.0025E+01	2.9868E+01	2.9885E+01	3.0058E+01	3.0297E+01	3.0572E+01	3.1193E+01	3.2644E+01	3.4321E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	2.1506E+00	2.1484E+00	2.1485E+00	2.1481E+00	2.1475E+00	2.1467E+00	2.1450E+00	2.1410E+00	2.1366E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	4.8165E+01	4.7953E+01	4.7633E+01	4.7542E+01	4.7555E+01	4.7629E+01	4.7894E+01	4.8759E+01	4.9956E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	1.6497E+00	1.6478E+00	1.6476E+00	1.6470E+00	1.6463E+00	1.6455E+00	1.6436E+00	1.6392E+00	1.6344E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	2.6305E+00	2.6266E+00	2.6218E+00	2.6179E+00	2.6148E+00	2.6122E+00	2.6086E+00	2.6054E+00	2.6064E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.0000E+00	1.7367E+00	1.7350E+00	1.7330E+00	1.7311E+00	1.7291E+00	1.7253E+00	1.7181E+00	1.7112E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.0000E+00	3.1901E+00	3.1884E+00	3.1872E+00	3.1862E+00	3.1853E+00	3.1837E+00	3.1808E+00	3.1786E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.0000E+00	3.4525E+00	3.4539E+00	3.4539E+00	3.4529E+00	3.4509E+00	3.4447E+00	3.4270E+00	3.4064E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性 (燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.6125E-02	2.6142E-02	2.6143E-02	2.6138E-02	2.6130E-02	2.6119E-02	2.6093E-02	2.6028E-02	2.5951E-02
σ_a (U235)	1.1391E+01	1.1356E+01	1.1317E+01	1.1316E+01	1.1331E+01	1.1353E+01	1.1412E+01	1.1572E+01	1.1772E+01
σ_a (U238)	8.5665E-01	8.5680E-01	8.5696E-01	8.5746E-01	8.5814E-01	8.5896E-01	8.6091E-01	8.6575E-01	8.7154E-01
σ_a (Pu238)	6.4760E+00	6.4473E+00	6.4234E+00	6.4223E+00	6.4292E+00	6.4400E+00	6.4691E+00	6.5490E+00	6.6519E+00
σ_a (Pu239)	1.6058E+01	1.5980E+01	1.6005E+01	1.6112E+01	1.6254E+01	1.6414E+01	1.6773E+01	1.7604E+01	1.8557E+01
σ_a (Pu240)	1.2778E+01	1.2760E+01	1.2651E+01	1.2580E+01	1.2534E+01	1.2508E+01	1.2498E+01	1.2613E+01	1.2875E+01
σ_a (Pu241)	2.1165E+01	2.1070E+01	2.0934E+01	2.0901E+01	2.0914E+01	2.0953E+01	2.1085E+01	2.1500E+01	2.2065E+01
σ_a (Pu242)	8.3451E+00	8.3481E+00	8.3024E+00	8.2681E+00	8.2373E+00	8.2082E+00	8.1533E+00	8.0524E+00	7.9605E+00
σ_a (Am241)	2.1775E+01	2.1738E+01	2.1578E+01	2.1483E+01	2.1430E+01	2.1406E+01	2.1422E+01	2.1645E+01	2.2057E+01
σ_a (Am243)	0.0000E+00	2.5835E+01	2.5207E+01	2.4613E+01	2.4104E+01	2.3668E+01	2.2964E+01	2.2017E+01	2.1457E+01
σ_a (Cm242)	0.0000E+00	3.9483E+00	3.9425E+00	3.9416E+00	3.9436E+00	3.9469E+00	3.9555E+00	3.9763E+00	3.9994E+00
σ_a (Cm244)	0.0000E+00	1.0481E+01	1.0521E+01	1.0542E+01	1.0544E+01	1.0529E+01	1.0460E+01	1.0228E+01	9.9491E+00
Σ_a (その他1)	0.0000E+00	3.8009E-06	2.7520E-05	4.6150E-05	6.2120E-05	7.6032E-05	9.9581E-05	1.3877E-04	1.7696E-04
Σ_a (その他2)	7.4239E-05	1.7389E-04	5.0184E-04	7.4378E-04	9.4856E-04	1.1343E-03	1.4723E-03	2.0676E-03	2.5941E-03
Σ_a (Zr)	1.5351E-04	1.5357E-04	1.5364E-04	1.5374E-04	1.5384E-04	1.5394E-04	1.5416E-04	1.5459E-04	1.5502E-04
Σ_a (H2O)	1.9572E-04	1.9534E-04	1.9427E-04	1.9369E-04	1.9335E-04	1.9316E-04	1.9309E-04	1.9381E-04	1.9540E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.1955	1.1885	1.1664	1.1496	1.1349	1.1212	1.0955	1.0488	1.0070
Hot, 40%ボイド	1.1852	1.1794	1.1580	1.1411	1.1260	1.1119	1.0852	1.0365	0.9929
Hot, 70%ボイド	1.1798	1.1755	1.1549	1.1378	1.1222	1.1074	1.0793	1.0276	0.9810
Doppler, 0%ボイド	1.1705	1.1638	1.1427	1.1264	1.1121	1.0988	1.0736	1.0276	0.9863
Cold, 0%ボイド	1.2683	1.2559	1.2297	1.2118	1.1971	1.1837	1.1589	1.1144	1.0748

Hot 0%ボイドより瞬時変化

5. MVP-BURN コードの概要とベンチマーク計算手法（京大炉）

1. 参加者名

宇根崎博信

2. 所属機関

京都大学原子炉実験所（KURRI）

3. 使用したコード名及び参考文献

MVP-BURN (MVP/GMVPシステムのVersion2.0 β 5に付属)

Okumura K., Mori T., Nakagawa M. and Kaneko K. : "Validation of a Continuous- Energy Monte Carlo Burn-up Code MVP-BURN and Its Application to Analysis of Post Irradiation Experiment", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 37, 128 (2000).

4. ベースの核データライブラリ

JENDL-3.2

5. 使用した断面積データ作成のための処理コード及び方法

連続エネルギーモンテカルロコードMVP用中性子断面積ライブラリ作成コードシステム
LICEM(JAERI-Data/Code 96-018)

基準温度MVPライブラリからの任意温度ライブラリ作成ユーティリティ ART
(Mori T., et al., Proc of Int. Conf. M&C'99, Madrid, Vol.2, p.987 (1999))

なお、燃焼計算で使用する擬似FP核種には、SRAC95の107群断面積をポイントワイズ断面積に変換したものを使用している。

8. スペクトル計算手法

連続エネルギーモンテカルロ計算 (20MeV~ 10^5 eV)

6. 燃焼計算

・燃焼方程式の解法

SRAC95とほぼ同じDCHAINコードの手法に基づく。ただし、Predictor-Corrector法を採用している。MVP-BURNでは、全核種を連続エネルギーモデルで扱い、MVPで得られるエネルギー積分された微視的反応率(捕獲、核分裂、N2N)を使用して核種崩壊生成計算を行う。

・燃焼チェーンモデル

U4CM5FP34チェーンモデル：重核種はU-234からCm-245までの20核種、F.P.核種は主要な30核種と4つの擬似F.P.核種を扱う。

・燃焼ステップ

以下のステップで計算を行った（単位GWd/t）

0, 0.1, 0.5, 1.0, その後30まで1刻み（Predictor-Corrector法あり），

その後40まで1刻み（Predictor-Corrector法無し）、

その後70まで2刻み（Predictor-Corrector法無し）

30GWd/tまではPredictor-Corrector法を採用した。すなわち、ステップ初期と末期でMVPにより得られる計算結果から微視的反応率を平均値として修正し、再度末期までの核種崩壊生成計算を行う（ステップ当たり2回のMVPを実行）。

・燃焼ゾーンの分割

Gd入り燃料についてはペレット領域を径方向に等体積で8分割して扱った。Azimuthal方向への分割は行っていない。その他の燃料については、ペレット領域分割せずに1燃焼領域として扱っている

・その他の燃焼データ

燃焼計算におけるヒストリ数は40万（ 10000×40 バッチ、捨てバッチ数5）とした。k-effの統計誤差は0.05～0.09%程度であった。なお、燃焼計算は、異なる初期乱数値を用いて2回行い、無限増倍率の燃焼度依存性に、統計誤差を超える差違が生じていないことを確認している。

核分裂率分布及び局所ピーキング係数、並びに瞬時変化ドップラー反応度、瞬時変化全温度反応度については、燃焼計算の結果得られた組成を用いて、各edit点において、Hot0%，Doppler0%，Cold0%の各ケースについて改めて200万ヒストリ（ 20000×50 バッチ、捨てバッチ数10）の計算を実施した。

PWR (UO_2) with MVP-BURN + JENDL-3.2

表 1-1. 無限増倍率、局所ピーキング係数の燃焼度依存性

燃焼度 (GWd/t)	無限増倍率	局所ピーキング係数*
0	1.13823	1.152
0.1	1.11253	1.155
5	1.10832	1.146
10	1.11155	1.132
15	1.11904	1.131
20	1.12941	1.117
30	1.13427	1.099
50	1.01777	1.071
70	0.91533	1.049

*核分裂率

計算条件

- ・MVPBURN+JENDL3.2 on Dell PowerEdge1400 + Solaris 8 Intel + g77
- ・40万ヒストリー (10000×40バッチ、捨てバッチ数5)。k-effの統計誤差は0.05～0.09%程度。
- ・燃焼計算ステップ (単位: MWd/t) :
0.1, 0.5, 1.0, その後30まで1刻み (P/Cあり), その後40まで1刻み (P/C無し)、その後70まで2刻み (P/C無し)
- ・燃焼計算終了後、各edit点で200万ヒストリーの計算を実施。各種無限増倍率及び局所ピーキング係数を求めた。
- ・統計誤差は 1σ で
無限増倍率 : 0.02～0.04%、
局所ピーキング係数 : 0.4～0.6%。

表 1-2. 核分裂率分布

燃焼度(GWd/t)= 0

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓	0.000	1.093	0.280	0.000	1.144	1.105	0.000	1.117	1.115
i →	1.093	1.090	1.075	1.133	1.062	1.043	0.282	1.075	1.110
1	0.280	1.075	1.120	1.127	0.279	1.054	1.113	1.115	1.122
2	0.000	1.133	1.127	0.000	1.131	1.147	0.000	1.152	1.122
3	1.144	1.062	0.279	1.131	1.149	1.137	0.285	1.071	1.109
4	1.105	1.043	1.054	1.147	1.137	0.000	1.043	1.059	1.099
5	0.000	0.282	1.113	0.000	0.285	1.043	0.279	1.035	1.088
6	1.117	1.075	1.115	1.152	1.071	1.059	1.035	1.071	1.095
7	1.115	1.110	1.122	1.122	1.109	1.099	1.088	1.095	1.107

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 0.1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓	0.000	1.116	0.289	0.000	1.154	1.111	0.000	1.123	1.109
i →	1.116	1.090	1.076	1.132	1.066	1.040	0.288	1.074	1.111
1	0.289	1.076	1.117	1.127	0.287	1.052	1.108	1.112	1.117
2	0.000	1.132	1.127	0.000	1.127	1.150	0.000	1.147	1.125
3	1.154	1.066	0.287	1.127	1.155	1.147	0.290	1.071	1.098
4	1.111	1.040	1.052	1.150	1.147	0.000	1.044	1.062	1.083
5	0.000	0.288	1.108	0.000	0.290	1.044	0.285	1.029	1.087
6	1.123	1.074	1.112	1.147	1.071	1.062	1.029	1.063	1.093
7	1.109	1.111	1.117	1.125	1.098	1.083	1.087	1.093	1.095

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 5

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓	0.000	1.108	0.375	0.000	1.144	1.113	0.000	1.106	1.079
i →	1.108	1.078	1.074	1.139	1.067	1.052	0.372	1.067	1.085
1	0.375	1.074	1.106	1.124	0.364	1.055	1.101	1.088	1.092
2	0.000	1.139	1.124	0.000	1.125	1.139	0.000	1.133	1.087
3	1.144	1.067	0.364	1.125	1.144	1.146	0.380	1.059	1.075
4	1.113	1.052	1.055	1.139	1.146	0.000	1.058	1.045	1.062
5	0.000	0.372	1.101	0.000	0.380	1.058	0.356	1.023	1.057
6	1.106	1.067	1.088	1.133	1.059	1.045	1.023	1.046	1.066
7	1.079	1.085	1.092	1.087	1.075	1.062	1.057	1.066	1.070

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 10

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.103	0.476	0.000	1.125	1.104	0.000	1.095	1.058	
2	1.103	1.083	1.072	1.122	1.059	1.046	0.468	1.056	1.062	
3	0.476	1.072	1.092	1.117	0.461	1.058	1.095	1.078	1.064	
4	0.000	1.122	1.117	0.000	1.125	1.132	0.000	1.110	1.056	
5	1.125	1.059	0.461	1.125	1.132	1.132	0.483	1.053	1.050	
6	1.104	1.046	1.058	1.132	1.132	0.000	1.059	1.037	1.045	
7	0.000	0.468	1.095	0.000	0.483	1.059	0.440	1.005	1.040	
8	1.095	1.056	1.078	1.110	1.053	1.037	1.005	1.021	1.030	
9	1.058	1.062	1.064	1.056	1.050	1.045	1.040	1.030	1.036	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 15

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.095	0.581	0.000	1.108	1.109	0.000	1.077	1.039	
2	1.095	1.069	1.072	1.109	1.063	1.058	0.567	1.045	1.038	
3	0.581	1.072	1.090	1.108	0.557	1.059	1.093	1.056	1.037	
4	0.000	1.109	1.108	0.000	1.106	1.119	0.000	1.092	1.034	
5	1.108	1.063	0.557	1.106	1.109	1.131	0.588	1.039	1.030	
6	1.109	1.058	1.059	1.119	1.131	0.000	1.062	1.026	1.014	
7	0.000	0.567	1.093	0.000	0.588	1.062	0.527	0.995	0.999	
8	1.077	1.045	1.056	1.092	1.039	1.026	0.995	0.998	1.003	
9	1.039	1.038	1.037	1.034	1.030	1.014	0.999	1.003	0.997	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 20

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.116	0.699	0.000	1.099	1.087	0.000	1.062	1.016	
2	1.116	1.073	1.069	1.104	1.062	1.055	0.677	1.034	1.015	
3	0.699	1.069	1.069	1.103	0.656	1.056	1.092	1.043	1.008	
4	0.000	1.104	1.103	0.000	1.112	1.108	0.000	1.065	1.011	
5	1.099	1.062	0.656	1.112	1.101	1.117	0.698	1.032	1.000	
6	1.087	1.055	1.056	1.108	1.117	0.000	1.057	1.001	0.984	
7	0.000	0.677	1.092	0.000	0.698	1.057	0.608	0.977	0.973	
8	1.062	1.034	1.043	1.065	1.032	1.001	0.977	0.966	0.963	
9	1.016	1.015	1.008	1.011	1.000	0.984	0.973	0.963	0.954	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 30

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓	i →								
1	0.000	1.078	0.830	0.000	1.077	1.071	0.000	1.048	0.988
2	1.078	1.047	1.059	1.080	1.060	1.056	0.822	1.021	0.980
3	0.830	1.059	1.055	1.087	0.812	1.062	1.075	1.012	0.971
4	0.000	1.080	1.087	0.000	1.091	1.086	0.000	1.038	0.972
5	1.077	1.060	0.812	1.091	1.075	1.099	0.840	1.019	0.962
6	1.071	1.056	1.062	1.086	1.099	0.000	1.067	0.987	0.953
7	0.000	0.822	1.075	0.000	0.840	1.067	0.765	0.965	0.940
8	1.048	1.021	1.012	1.038	1.019	0.987	0.965	0.948	0.930
9	0.988	0.980	0.971	0.972	0.962	0.953	0.940	0.930	0.925

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 50

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓	i →								
1	0.000	1.064	0.850	0.000	1.050	1.059	0.000	1.032	1.001
2	1.064	1.048	1.051	1.064	1.052	1.040	0.841	1.017	0.988
3	0.850	1.051	1.038	1.059	0.839	1.049	1.051	1.016	0.989
4	0.000	1.064	1.059	0.000	1.065	1.056	0.000	1.030	0.987
5	1.050	1.052	0.839	1.065	1.061	1.071	0.852	1.012	0.985
6	1.059	1.040	1.049	1.056	1.071	0.000	1.052	0.994	0.977
7	0.000	0.841	1.051	0.000	0.852	1.052	0.810	0.985	0.961
8	1.032	1.017	1.016	1.030	1.012	0.994	0.985	0.960	0.956
9	1.001	0.988	0.989	0.987	0.985	0.977	0.961	0.956	0.949

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 70

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓	i →								
1	0.000	1.044	0.861	0.000	1.036	1.036	0.000	1.024	0.992
2	1.044	1.037	1.038	1.049	1.045	1.041	0.867	1.018	0.995
3	0.861	1.038	1.026	1.049	0.862	1.041	1.038	1.017	0.995
4	0.000	1.049	1.049	0.000	1.047	1.043	0.000	1.030	1.002
5	1.036	1.045	0.862	1.047	1.043	1.044	0.868	1.014	0.998
6	1.036	1.041	1.041	1.043	1.044	0.000	1.033	1.001	0.991
7	0.000	0.867	1.038	0.000	0.868	1.033	0.839	0.995	0.973
8	1.024	1.018	1.017	1.030	1.014	1.001	0.995	0.984	0.967
9	0.992	0.995	0.995	1.002	0.998	0.991	0.973	0.967	0.962

(1に規格化)

表 2-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度 (GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.13823	1.11253	1.10832	1.11155	1.11904	1.12941	1.13427	1.01777	0.91533
Doppler, 0%ボイド	1.11695	1.09276	1.08855	1.09182	1.09645	1.10689	1.10992	0.99476	0.89369
Cold, 0%ボイド	1.23084	1.19548	1.18116	1.18224	1.18789	1.20015	1.22384	1.10217	0.98568

Hot 0%ボイドより瞬時変化

%ERROR ("ALL")	燃焼度 (GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	0.0309	0.0394	0.0379	0.0383	0.0373	0.0314	0.0251	0.0305	0.0319
Doppler, 0%ボイド	0.0399	0.0340	0.0325	0.0433	0.0324	0.0310	0.0331	0.0352	0.0352
Cold, 0%ボイド	0.0298	0.0327	0.0381	0.0370	0.0278	0.0279	0.0246	0.0242	0.0312

PWR (MOX) with MVP-BURN + JENDL-3.2

表 1-1. 無限増倍率、局所ピーキング係数の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーキング係数*
0	1.20631	1.164
0.1	1.19761	1.158
5	1.17565	1.151
10	1.15968	1.157
15	1.14474	1.150
20	1.13167	1.143
30	1.10533	1.143
50	1.05725	1.133
70	1.01194	1.115

* 核分裂率

計算条件

- MVPBURN+JENDL3.2 on Dell PowerEdge1400 + Solaris 8 Intel + g77
- 40万ヒストリー (10000×40バッチ、捨てバッチ数 5)。k-effの統計誤差は0.05~0.09%程度。
- 燃焼計算ステップ (単位 : MWd/t) :
0.1, 0.5, 1.0, その後30まで1刻み (P/Cあり), その後40まで1刻み (P/C無し)、その後70まで2刻み (P/C無し)
- 燃焼計算終了後、各edit点で、200万ヒストリーの計算を実施し、各種無限増倍率及び局所ピーキング係数を計算。
- 統計誤差は 1σ で
無限増倍率 : 0.02~0.04%
局所ピーキング係数 : 0.4~0.6%程度となった。

表 1-2. 核分裂率分布

		燃焼度(GWd/t)= 0										
		↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
			1	0.000	1.084	1.088	0.000	1.104	1.090	0.000	0.949	0.865
			2	1.084	1.034	1.025	1.083	1.037	1.038	1.101	1.048	0.863
			3	1.088	1.025	1.023	1.090	1.041	1.042	1.105	1.045	0.858
			4	0.000	1.083	1.090	0.000	1.105	1.112	0.000	0.951	0.864
			5	1.104	1.037	1.041	1.105	1.096	1.164	1.149	1.047	0.862
			6	1.090	1.038	1.042	1.112	1.164	0.000	1.113	1.004	0.854
			7	0.000	1.101	1.105	0.000	1.149	1.113	1.048	0.872	0.889
			8	0.949	1.048	1.045	0.951	1.047	1.004	0.872	0.903	0.654
			9	0.865	0.863	0.858	0.864	0.862	0.854	0.889	0.654	0.679

(1に規格化)

		燃焼度(GWd/t)= 0.1										
		↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
			1	0.000	1.082	1.084	0.000	1.095	1.114	0.000	0.951	0.859
			2	1.082	1.024	1.030	1.096	1.039	1.039	1.106	1.045	0.861
			3	1.084	1.030	1.035	1.090	1.035	1.044	1.099	1.042	0.862
			4	0.000	1.096	1.090	0.000	1.108	1.113	0.000	0.948	0.866
			5	1.095	1.039	1.035	1.108	1.103	1.158	1.153	1.041	0.854
			6	1.114	1.039	1.044	1.113	1.158	0.000	1.108	1.008	0.859
			7	0.000	1.106	1.099	0.000	1.153	1.108	1.053	0.870	0.888
			8	0.951	1.045	1.042	0.948	1.041	1.008	0.870	0.910	0.644
			9	0.859	0.861	0.862	0.866	0.854	0.859	0.888	0.644	0.682

(1に規格化)

		燃焼度(GWd/t)= 5										
		↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
			1	0.000	1.091	1.082	0.000	1.090	1.085	0.000	0.943	0.862
			2	1.091	1.045	1.033	1.084	1.039	1.038	1.091	1.050	0.864
			3	1.082	1.033	1.044	1.091	1.033	1.039	1.097	1.055	0.865
			4	0.000	1.084	1.091	0.000	1.112	1.105	0.000	0.949	0.864
			5	1.090	1.039	1.033	1.112	1.083	1.151	1.145	1.050	0.859
			6	1.085	1.038	1.039	1.105	1.151	0.000	1.106	1.009	0.861
			7	0.000	1.091	1.097	0.000	1.145	1.106	1.046	0.871	0.891
			8	0.943	1.050	1.055	0.949	1.050	1.009	0.871	0.912	0.657
			9	0.862	0.864	0.865	0.864	0.859	0.861	0.891	0.657	0.692

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 10

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.087	1.094	0.000	1.093	1.097	0.000	0.945	0.868	
2	1.087	1.038	1.038	1.089	1.032	1.033	1.089	1.043	0.866	
3	1.094	1.038	1.042	1.088	1.039	1.048	1.093	1.043	0.860	
4	0.000	1.089	1.088	0.000	1.107	1.103	0.000	0.952	0.868	
5	1.093	1.032	1.039	1.107	1.095	1.157	1.145	1.054	0.861	
6	1.097	1.033	1.048	1.103	1.157	0.000	1.110	0.997	0.861	
7	0.000	1.089	1.093	0.000	1.145	1.110	1.029	0.879	0.892	
8	0.945	1.043	1.043	0.952	1.054	0.997	0.879	0.907	0.662	
9	0.868	0.866	0.860	0.868	0.861	0.861	0.892	0.662	0.685	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 15

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.076	1.091	0.000	1.089	1.088	0.000	0.942	0.868	
2	1.076	1.032	1.036	1.094	1.034	1.036	1.093	1.044	0.868	
3	1.091	1.036	1.038	1.090	1.039	1.043	1.098	1.043	0.859	
4	0.000	1.094	1.090	0.000	1.100	1.105	0.000	0.950	0.866	
5	1.089	1.034	1.039	1.100	1.106	1.150	1.142	1.045	0.860	
6	1.088	1.036	1.043	1.105	1.150	0.000	1.100	1.010	0.861	
7	0.000	1.093	1.098	0.000	1.142	1.100	1.051	0.880	0.897	
8	0.942	1.044	1.043	0.950	1.045	1.010	0.880	0.907	0.665	
9	0.868	0.868	0.859	0.866	0.860	0.861	0.897	0.665	0.696	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 20

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.079	1.096	0.000	1.084	1.090	0.000	0.936	0.862	
2	1.079	1.026	1.039	1.093	1.034	1.036	1.094	1.045	0.867	
3	1.096	1.039	1.044	1.089	1.038	1.032	1.100	1.041	0.868	
4	0.000	1.093	1.089	0.000	1.099	1.106	0.000	0.954	0.875	
5	1.084	1.034	1.038	1.099	1.093	1.143	1.137	1.053	0.866	
6	1.090	1.036	1.032	1.106	1.143	0.000	1.103	1.008	0.865	
7	0.000	1.094	1.100	0.000	1.137	1.103	1.042	0.878	0.898	
8	0.936	1.045	1.041	0.954	1.053	1.008	0.878	0.910	0.664	
9	0.862	0.867	0.868	0.875	0.866	0.865	0.898	0.664	0.687	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 30

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0.000	1.082	1.088	0.000	1.087	1.084	0.000	0.954	0.878
2		1.082	1.031	1.034	1.087	1.036	1.033	1.089	1.042	0.872
3		1.088	1.034	1.022	1.090	1.038	1.036	1.099	1.041	0.871
4		0.000	1.087	1.090	0.000	1.092	1.106	0.000	0.958	0.870
5		1.087	1.036	1.038	1.092	1.097	1.143	1.138	1.052	0.871
6		1.084	1.033	1.036	1.106	1.143	0.000	1.102	1.005	0.863
7		0.000	1.089	1.099	0.000	1.138	1.102	1.040	0.884	0.890
8		0.954	1.042	1.041	0.958	1.052	1.005	0.884	0.909	0.674
9		0.878	0.872	0.871	0.870	0.871	0.863	0.890	0.674	0.701

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 50

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0.000	1.071	1.076	0.000	1.087	1.077	0.000	0.939	0.877
2		1.071	1.039	1.039	1.090	1.034	1.037	1.088	1.041	0.877
3		1.076	1.039	1.035	1.089	1.048	1.043	1.091	1.042	0.880
4		0.000	1.090	1.089	0.000	1.101	1.093	0.000	0.946	0.880
5		1.087	1.034	1.048	1.101	1.089	1.133	1.125	1.047	0.876
6		1.077	1.037	1.043	1.093	1.133	0.000	1.088	1.007	0.870
7		0.000	1.088	1.091	0.000	1.125	1.088	1.047	0.881	0.890
8		0.939	1.041	1.042	0.946	1.047	1.007	0.881	0.905	0.690
9		0.877	0.877	0.880	0.880	0.876	0.870	0.890	0.690	0.704

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 70

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0.000	1.087	1.079	0.000	1.075	1.089	0.000	0.950	0.883
2		1.087	1.030	1.039	1.060	1.038	1.042	1.090	1.040	0.876
3		1.079	1.039	1.031	1.076	1.050	1.042	1.081	1.047	0.885
4		0.000	1.060	1.076	0.000	1.086	1.095	0.000	0.948	0.886
5		1.075	1.038	1.050	1.086	1.086	1.115	1.114	1.040	0.885
6		1.089	1.042	1.042	1.095	1.115	0.000	1.088	1.011	0.875
7		0.000	1.090	1.081	0.000	1.114	1.088	1.043	0.899	0.898
8		0.950	1.040	1.047	0.948	1.040	1.011	0.899	0.906	0.704
9		0.883	0.876	0.885	0.886	0.885	0.875	0.898	0.704	0.720

(1に規格化)

表 2-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度 (GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.20631	1.19761	1.17565	1.15968	1.14474	1.13167	1.10533	1.05725	1.01194
Doppler, 0%ボイド	1.18223	1.17454	1.15320	1.13671	1.12328	1.10989	1.08397	1.03553	0.99211
Cold, 0%ボイド	1.28638	1.27202	1.24637	1.22836	1.21328	1.20042	1.17583	1.12895	1.08646

Hot 0%ボイドより瞬時変化

%ERROR ("ALL")	燃焼度 (GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	0.0250	0.0322	0.0321	0.0266	0.0297	0.0330	0.0386	0.0352	0.0362
Doppler, 0%ボイド	0.0326	0.0295	0.0330	0.0319	0.0339	0.0397	0.0328	0.0357	0.0393
Cold, 0%ボイド	0.0291	0.0313	0.0267	0.0304	0.0318	0.0277	0.0279	0.0276	0.0300

6. MVP-BURN コードの概要とベンチマーク計算手法（大阪大学）

1. 参加者名

北田孝典

2. 所属機関

大阪大学

3. 使用したコード名及び参考文献

MVP-BURN (MVP/GMVPシステムのVersion2.0 β 5に付属)

Okumura K., Mori T., Nakagawa M. and Kaneko K. : "Validation of a Continuous- Energy Monte Carlo Burn-up Code MVP-BURN and Its Application to Analysis of Post Irradiation Experiment", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 37, 128 (2000).

4. ベースの核データライブラリ

JENDL-3.2

5. 使用した断面積データ作成のための処理コード及び方法

連続エネルギーモンテカルロコードMVP用中性子断面積ライブラリ作成コードシステム
LICEM(JAERI-Data/Code 96-018)

基準温度MVPライブラリからの任意温度ライブラリ作成ユーティリティ ART

(Mori T., et al., Proc of Int. Conf. M&C'99, Madrid, Vol.2, p.987 (1999))

なお、燃焼計算で使用する擬似F.P.核種には、SRAC95の107群断面積をポイントワイズ断面積に変換したものを使用している。

9. スペクトル計算手法

連続エネルギーモンテカルロ計算 ($20\text{MeV} \sim 10^{-5}\text{eV}$)

7. 燃焼計算

・燃焼方程式の解法

SRAC95とほぼ同じDCHAINコードの手法に基づく。ただし、Predictor-Corrector法を採用している。MVP-BURNでは、全核種を連続エネルギーモデルで扱い、MVPで得られるエネルギー積分された微視的反応率(捕獲、核分裂、N2N)を使用して核種崩壊生成計算を行う。

・燃焼チェーンモデル

U4CM5FP34チェーンモデル：重核種はU-234からCm-245までの20核種、F.P.核種は主要な30核種と4つの擬似F.P.核種を扱う。

・燃焼ステップ

以下のステップで計算を行った（単位GWD/t）

0, 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 4, ..., 19, 20, 22, 24, 26, ..., 38, 40, 45, 50, ..., 65, 70 GWD/t

20 GWD/t まではプレディクター・コレクター使用

- ・ヒストリ数
200万、(20000x(100+10)、10サイクルを捨てバッチ)

BWR (UO_2) with MVP-BURN + JENDL-3.2

表 3-1 無限増倍率、局所ピーピング係数の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーピング係数*
0	1.0561	1.418
0.1	1.0349	1.407
5	1.0555	1.341
10	1.0850	1.286
15	1.1224	1.228
20	1.1646	1.172
30	1.1285	1.126
50	0.9894	1.087
70	0.8632	1.078

* 核分裂率

表 3-2 核分裂率分布の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)= 0

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.237									
2	1.247	1.262								
3	1.256	0.362	0.800							
4	1.398	0.966	0.345	1.165						
5	1.373	1.019	1.036							
6	1.418	0.973	0.356			1.142				
7	1.278	0.364	0.821	0.355	1.026	0.346	0.796			
8	1.244	1.279	0.365	0.969	1.022	0.953	0.356	1.261		
9	1.254	1.248	1.264	1.388	1.373	1.386	1.253	1.253	1.244	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 0.1

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.254									
2	1.256	1.259								
3	1.253	0.368	0.798							
4	1.387	0.951	0.356	1.137						
5	1.369	1.023	1.027							
6	1.407	0.969	0.363			1.150				
7	1.250	0.369	0.827	0.363	1.035	0.355	0.773			
8	1.234	1.246	0.372	0.965	1.030	0.955	0.367	1.256		
9	1.256	1.244	1.257	1.384	1.385	1.407	1.257	1.267	1.263	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 5

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.206									
2	1.203	1.231								
3	1.204	0.480	0.832							
4	1.341	0.960	0.444	1.157						
5	1.307	1.012	1.040							
6	1.314	0.962	0.463			1.158				
7	1.209	0.486	0.869	0.473	1.048	0.440	0.819			
8	1.205	1.233	0.480	0.972	1.004	0.955	0.477	1.235		
9	1.207	1.198	1.215	1.331	1.330	1.327	1.197	1.192	1.202	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 10

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.140									
2	1.164	1.239								
3	1.187	0.604	0.855							
4	1.276	0.960	0.541	1.163						
5	1.257	0.994	1.044		W/R					
6	1.286	0.975	0.596			1.174				
7	1.171	0.606	0.892	0.593	1.043	0.538	0.859			
8	1.135	1.186	0.607	0.972	0.981	0.967	0.598	1.204		
9	1.120	1.139	1.160	1.259	1.244	1.273	1.146	1.111	1.116	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 15

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.039									
2	1.069	1.161								
3	1.115	0.717	0.889							
4	1.214	0.965	0.637	1.110						
5	1.202	0.989	1.033		W/R					
6	1.228	0.992	0.726			1.152				
7	1.128	0.738	0.942	0.727	1.057	0.643	0.897			
8	1.067	1.165	0.736	0.990	0.993	0.962	0.716	1.155		
9	1.028	1.075	1.114	1.218	1.199	1.211	1.101	1.075	1.047	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 20

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.949									
2	0.988	1.131								
3	1.062	0.818	0.942							
4	1.149	0.968	0.751	1.117						
5	1.126	0.979	1.054		W/R					
6	1.169	0.993	0.850			1.143				
7	1.060	0.856	0.996	0.870	1.063	0.768	0.954			
8	1.000	1.125	0.870	1.003	0.976	0.984	0.826	1.115		
9	0.957	0.993	1.062	1.165	1.139	1.172	1.059	0.993	0.958	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 30

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.899									
2	0.945	1.093								
3	1.024	0.905	0.990							
4	1.112	1.004	0.859	1.112						
5	1.116	0.991	1.068		W/R					
6	1.115	1.010	0.924			1.130				
7	1.018	0.900	1.024	0.933	1.056	0.878	0.983			
8	0.949	1.110	0.905	1.010	0.992	0.994	0.893	1.097		
9	0.890	0.950	1.030	1.126	1.108	1.122	0.997	0.943	0.889	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 50

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.885									
2	0.909	1.068								
3	0.990	0.928	1.057							
4	1.068	1.060	0.931	1.093						
5	1.078	1.050	1.077		W/R					
6	1.078	1.040	0.949			1.070				
7	0.989	0.933	1.058	0.945	1.066	0.917	1.043			
8	0.899	1.063	0.931	1.060	1.040	1.041	0.913	1.059		
9	0.890	0.901	0.990	1.078	1.081	1.087	0.970	0.915	0.875	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 70

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.974									
2	0.935	0.994								
3	0.982	0.930	1.062							
4	1.027	1.049	0.959	1.069						
5	1.037	1.047	1.078		W/R					
6	1.031	1.039	0.966			1.046				
7	0.980	0.928	1.059	0.955	1.068	0.955	1.051			
8	0.957	1.003	0.942	1.052	1.046	1.052	0.938	1.009		
9	0.970	0.942	0.976	1.032	1.037	1.035	0.977	0.931	0.960	

(1に規格化)

[注 1 : 燃焼度は 0,0.1,5,10,15,20,30,50,70GWd/t]

[注 2 : 燃料棒位置(1,1)が制御棒側コーナーに対応する]

[注 3 : 核分裂率の規格化は、全燃料棒の平均値が 1.0 となるようを行う]

表 3-3 無限増倍率の瞬時ボイド率変化、瞬時温度変化特性

計算条件	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot,0%ボイド	1.0729	1.0491	1.0702	1.1016	1.1451	1.1921	1.1622	1.0232	0.8945
Hot,40%ボイド	1.0561	1.0349	1.0555	1.0850	1.1224	1.1646	1.1285	0.9894	0.8632
Hot,70%ボイド	1.0361	1.0197	1.0395	1.0633	1.0963	1.1306	1.0892	0.9518	0.8287
Doppler,40%ボイド	1.0390	1.0199	1.0426	1.0702	1.1069	1.1457	1.1101	0.9728	0.8493
Cold,0%ボイド	1.1119	1.0864	1.0859	1.1061	1.1368	1.1811	1.1597	1.0045	0.8569

Hot,40%ボイドより瞬時変化

[注: Hot,40%ボイドの値は表3-1と同一となる]

BWR (MOX) with MVP-BURN + JENDL-3.2

表 3-1 無限増倍率、局所ピーキング係数の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーキング係数*
0	1.0832	1.437
0.1	1.0724	1.423
5	1.0766	1.401
10	1.0915	1.372
15	1.1095	1.339
20	1.1142	1.301
30	1.0837	1.253
50	1.0160	1.265
70	0.9530	1.246

* 核分裂率

表 3-2 核分裂率分布の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)= 0

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.381										
2	1.289	1.173									
3	1.379	1.032	0.834								
4	0.324	0.926	0.809	0.942							
5	1.273	0.908	0.841	1.234							
6	1.270	0.914	0.867	0.309							
7	0.326	0.932	0.861	1.254							
8	1.362	1.044	0.873	0.986	1.298	0.318	0.308	1.124			
9	1.278	1.178	1.050	0.971	1.008	1.053	1.075	1.008	0.847		
10	1.365	1.277	1.386	0.327	1.322	1.332	0.330	1.437	1.319	1.395	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 0.1

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.360										
2	1.268	1.160									
3	1.362	1.044	0.838								
4	0.327	0.926	0.808	0.932							
5	1.277	0.918	0.841	1.246							
6	1.283	0.918	0.884	0.312							
7	0.326	0.951	0.868	1.258							
8	1.367	1.054	0.879	0.997	1.305	0.319	0.312	1.135			
9	1.269	1.163	1.056	0.986	1.006	1.050	1.072	1.009	0.851		
10	1.368	1.267	1.362	0.331	1.309	1.315	0.332	1.423	1.308	1.374	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 5

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.242										
2	1.209	1.149									
3	1.331	1.037	0.825								
4	0.421	0.938	0.803	0.925							
5	1.268	0.911	0.835	1.236							
6	1.269	0.914	0.883	0.389							
7	0.421	0.945	0.871	1.254							
8	1.334	1.043	0.873	0.986	1.282	0.409	0.383	1.171			
9	1.211	1.150	1.052	0.997	1.020	1.072	1.108	1.023	0.847		
10	1.244	1.213	1.343	0.427	1.296	1.313	0.438	1.401	1.242	1.257	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 10

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.118										
2	1.141	1.140									
3	1.294	1.036	0.812								
4	0.517	0.942	0.794	0.906							
5	1.243	0.911	0.837	1.205							
6	1.238	0.916	0.883	0.466							
7	0.516	0.961	0.854	1.243							
8	1.298	1.042	0.862	0.970	1.291	0.502	0.463	1.176			
9	1.142	1.145	1.044	1.001	1.039	1.104	1.149	1.034	0.855		
10	1.127	1.147	1.318	0.528	1.296	1.310	0.552	1.372	1.187	1.150	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 15

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.038										
2	1.081	1.126									
3	1.253	1.029	0.816								
4	0.606	0.945	0.776	0.895							
5	1.228	0.914	0.829	1.179							
6	1.223	0.923	0.893	0.535							
7	0.615	0.968	0.850	1.218							
8	1.265	1.045	0.853	0.954	1.272	0.597	0.547	1.186			
9	1.080	1.133	1.051	1.026	1.043	1.139	1.198	1.048	0.841		
10	1.034	1.087	1.279	0.622	1.270	1.296	0.653	1.339	1.129	1.051	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 20

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.967										
2	1.035	1.116									
3	1.230	1.046	0.810								
4	0.658	0.963	0.787	0.888							
5	1.202	0.916	0.833	1.174							
6	1.196	0.926	0.909	0.586							
7	0.655	0.985	0.853	1.203							
8	1.228	1.038	0.854	0.962	1.263	0.660	0.613	1.202			
9	1.044	1.124	1.053	1.043	1.044	1.168	1.228	1.071	0.846		
10	0.970	1.036	1.246	0.678	1.258	1.273	0.711	1.301	1.069	0.996	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 30

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.903										
2	0.980	1.123									
3	1.185	1.056	0.826								
4	0.694	0.983	0.799	0.904							
5	1.180	0.938	0.855	1.171							
6	1.176	0.938	0.934	0.639							
7	0.698	1.003	0.873	1.191							
8	1.190	1.075	0.882	0.966	1.253	0.692	0.666	1.230			
9	0.980	1.141	1.088	1.049	1.068	1.178	1.254	1.081	0.844		
10	0.907	0.986	1.206	0.712	1.225	1.241	0.736	1.246	1.015	0.915	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 50

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.862										
2	0.910	1.125									
3	1.114	1.113	0.884								
4	0.730	1.030	0.835	0.923							
5	1.136	0.971	0.888	1.150							
6	1.134	0.982	0.961	0.659							
7	0.726	1.040	0.918	1.177							
8	1.111	1.132	0.939	0.996	1.231	0.718	0.701	1.265			
9	0.910	1.138	1.146	1.096	1.109	1.202	1.250	1.113	0.843		
10	0.858	0.910	1.121	0.738	1.179	1.194	0.765	1.153	0.930	0.868	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 70

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.854										
2	0.891	1.095									
3	1.032	1.147	0.945								
4	0.737	1.067	0.893	0.966							
5	1.090	1.012	0.928	1.141							
6	1.093	1.029	0.989	0.688							
7	0.743	1.069	0.972	1.163							
8	1.032	1.162	1.003	1.054	1.214	0.731	0.721	1.230			
9	0.882	1.109	1.177	1.121	1.134	1.202	1.246	1.098	0.852		
10	0.854	0.885	1.037	0.756	1.120	1.131	0.784	1.069	0.898	0.859	

(1に規格化)

[注 1 : 燃焼度は 0,0.1,5,10,15,20,30,50,70GWd/t]

[注 2 : 燃料棒位置(1,1)が制御棒側コーナーに対応する]

[注 3 : 核分裂率の規格化は、全燃料棒の平均値が 1.0 となるようを行う]

表 3-3 無限増倍率の瞬時ポイド率変化、瞬時温度変化特性

計算条件	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot,0%ポイド	1.0959	1.0837	1.0888	1.1075	1.1310	1.1396	1.1119	1.0445	0.9841
Hot,40%ポイド	1.0832	1.0724	1.0766	1.0915	1.1095	1.1142	1.0837	1.0160	0.9530
Hot,70%ポイド	1.0783	1.0696	1.0713	1.0830	1.0960	1.0962	1.0631	0.9930	0.9304
Doppler,40%ポイド	1.0669	1.0556	1.0604	1.0746	1.0918	1.0958	1.0659	0.9974	0.9378
Cold,0%ポイド	1.0975	1.0810	1.0791	1.0959	1.1250	1.1457	1.1218	1.0488	0.9831

Hot,40%ポイドより瞬時変化

[注: Hot,40%ポイドの値は表3-1と同一となる]

7. CASMO-4 コードの概要とベンチマーク計算手法 (TSI)

1 : コード名

CASMO-4

2 : 計算手法

Characteristics 法

3 : 核データ

JEF2.2 ベース

4 : その他

高速 14 群 + 共鳴 13 群 + 熱群 43 群

取り扱い核種数 : 305 核種

燃焼ステップ 基本的に 0.5GWd/mt (Gd なし時 1.0GWd/mt)

燃焼後期 2.5GWd/mt

Gd ピンは 10 等体積分割にて燃焼。

Pin Cell (UO_2) with CASMO4 + JEF2.2

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0.0	1.4146
0.1	1.3771
5.0	1.3188
10.0	1.2689
15.0	1.2247
20.0	1.1856
30.0	1.1178
50.0	1.0045
70.0	0.9124

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

(1/b/cm)

核種	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
U235	5.0393E-04	5.0298E-04	4.5847E-04	4.1678E-04	3.7824E-04	3.4246E-04	2.7830E-04	1.7606E-04	1.0397E-04
U236	0.0000E+00	1.9179E-07	9.1798E-06	1.7480E-05	2.4991E-05	3.1792E-05	4.3460E-05	5.9748E-05	6.7929E-05
U238	7.1570E-03	7.1566E-03	7.1363E-03	7.1147E-03	7.0923E-03	7.0690E-03	7.0200E-03	6.9124E-03	6.7922E-03
Np237	0.0000E+00	4.1050E-12	1.6386E-07	5.2760E-07	1.0149E-06	1.6567E-06	3.1663E-06	6.5982E-06	9.7653E-06
Pu238	0.0000E+00	2.3670E-15	4.9987E-09	3.3498E-08	1.0030E-07	2.1923E-07	6.5804E-07	2.5033E-07	5.5776E-06
Pu239	0.0000E+00	1.0664E-07	1.5237E-05	2.7362E-05	3.6866E-05	4.4490E-05	5.5415E-05	6.6262E-05	6.9308E-05
Pu240	0.0000E+00	9.3305E-11	7.7415E-07	2.4149E-06	4.3817E-06	6.5102E-06	1.0918E-05	1.9171E-05	2.5602E-05
Pu241	0.0000E+00	2.9887E-13	1.5994E-07	9.2087E-07	2.2631E-06	3.9532E-06	7.7789E-06	1.4950E-05	1.9915E-05
Pu242	0.0000E+00	8.3245E-17	2.8557E-09	3.4807E-08	1.3340E-07	3.2283E-07	1.0145E-06	3.5931E-06	7.4282E-06
Am241	0.0000E+00	2.1642E-17	7.0666E-10	8.4032E-09	3.1077E-08	7.2231E-08	2.0627E-07	5.7444E-07	8.8360E-07
Am242m	0.0000E+00	2.3181E-21	3.4082E-12	7.1354E-11	3.4998E-10	9.6551E-10	3.3374E-09	1.0713E-08	1.6996E-08
Am243	0.0000E+00	3.0169E-18	5.0947E-11	1.3504E-09	8.1695E-09	2.7443E-08	1.3480E-07	7.6956E-07	1.9364E-06
Cm242	0.0000E+00	9.0068E-21	2.4255E-11	5.7062E-10	3.0417E-09	9.0893E-09	3.6321E-08	1.4984E-07	2.9597E-07
Cm243	0.0000E+00	1.0542E-24	5.4650E-14	2.5744E-12	2.2059E-11	9.0739E-11	5.6814E-10	4.0835E-09	1.1234E-08
Cm244	0.0000E+00	1.0118E-18	1.2854E-12	7.4216E-11	7.1421E-10	3.3652E-09	2.6980E-08	2.9530E-07	1.1599E-06
Cm245	0.0000E+00	4.3897E-22	9.3102E-15	1.0179E-12	1.5477E-11	9.7665E-11	1.1793E-09	2.1557E-08	1.1521E-07
Cm246	0.0000E+00	3.3331E-25	3.9290E-17	8.6223E-15	2.0182E-13	1.7983E-12	3.5581E-11	1.3123E-09	1.2097E-08
Mo95	0.0000E+00	1.3311E-11	6.7142E-07	2.5932E-06	4.9054E-06	7.2572E-06	1.1792E-05	1.9985E-05	2.7004E-05
Tc99	0.0000E+00	1.3686E-08	2.3844E-06	4.7734E-06	7.0923E-06	9.3390E-06	1.3609E-05	2.1219E-05	2.7540E-05
Rh103	0.0000E+00	6.0324E-10	7.8940E-07	2.0014E-06	3.2231E-06	4.4053E-06	6.6187E-06	1.0367E-05	1.3191E-05
Cs133	0.0000E+00	8.4847E-09	2.4708E-06	4.9972E-06	7.4271E-06	9.7572E-06	1.4111E-05	2.1556E-05	2.7303E-05
Sm147	0.0000E+00	1.4514E-12	3.2032E-08	1.2790E-07	2.6656E-07	4.3045E-07	7.8393E-07	1.3950E-06	1.7394E-06
Sm149	0.0000E+00	2.4955E-09	5.4785E-08	6.0921E-08	6.5297E-08	6.8385E-08	7.1430E-08	7.0222E-08	6.5657E-08
Sm150	0.0000E+00	1.6823E-10	3.8474E-07	8.6652E-07	1.3788E-06	1.9112E-06	3.0038E-06	5.1456E-06	7.0511E-06
Sm152	0.0000E+00	2.2267E-09	1.6815E-07	3.8787E-07	6.1210E-07	8.2577E-07	1.2119E-06	1.8483E-06	2.3539E-06
Nd143	0.0000E+00	1.0517E-09	1.9282E-06	4.0892E-06	6.1168E-06	8.0188E-06	1.1457E-05	1.6913E-05	2.0544E-05
Nd145	0.0000E+00	3.1647E-08	1.5483E-06	3.0318E-06	4.4554E-06	5.8217E-06	8.3879E-06	1.2872E-05	1.6514E-05
Eu153	0.0000E+00	4.6696E-10	7.8463E-08	1.9650E-07	3.5344E-07	5.4336E-07	9.9470E-07	2.0217E-06	3.0181E-06
Gd155	0.0000E+00	1.4846E-13	9.7493E-11	1.6915E-10	2.4568E-10	3.5085E-10	6.8009E-10	1.8187E-09	3.4120E-09

表3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.230E-02	3.151E-02	3.032E-02	2.925E-02	2.828E-02	2.740E-02	2.584E-02	2.315E-02	2.093E-02	
$\nu \sigma_f$ (U235)	6.000E+01	5.849E+01	5.559E+01	5.380E+01	5.265E+01	5.191E+01	5.126E+01	5.153E+01	5.275E+01	
$\nu \sigma_f$ (U238)	2.887E-01	2.893E-01	2.919E-01	2.939E-01	2.956E-01	2.970E-01	2.994E-01	3.029E-01	3.059E-01	
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	0.000E+00	6.143E+00	6.099E+00	6.080E+00	6.071E+00	6.068E+00	6.075E+00	6.115E+00	6.165E+00	
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	0.000E+00	1.950E+02	1.777E+02	1.666E+02	1.590E+02	1.536E+02	1.472E+02	1.430E+02	1.435E+02	
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	0.000E+00	2.003E+00	2.008E+00	2.004E+00	2.001E+00	1.997E+00	1.994E+00	1.993E+00	1.997E+00	
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	0.000E+00	1.956E+02	1.823E+02	1.740E+02	1.684E+02	1.645E+02	1.600E+02	1.583E+02	1.605E+02	
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	0.000E+00	1.445E+00	1.456E+00	1.464E+00	1.470E+00	1.475E+00	1.483E+00	1.493E+00	1.500E+00	
$\nu \sigma_f$ (Am241)	0.000E+00	3.825E+00	3.706E+00	3.622E+00	3.564E+00	3.521E+00	3.465E+00	3.414E+00	3.399E+00	
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.000E+00	1.549E+00	1.560E+00	1.568E+00	1.574E+00	1.579E+00	1.587E+00	1.597E+00	1.605E+00	
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.000E+00	3.403E+00	3.380E+00	3.366E+00	3.358E+00	3.354E+00	3.352E+00	3.364E+00	3.385E+00	
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.000E+00	3.353E+00	3.362E+00	3.370E+00	3.375E+00	3.380E+00	3.386E+00	3.398E+00	3.407E+00	

 $\nu \Sigma_f$:一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$:一群微視的断面積(barn)

表3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
Σ_a (全核種)	2.284E-02	2.288E-02	2.299E-02	2.306E-02	2.309E-02	2.311E-02	2.312E-02	2.304E-02	2.294E-02	
σ_a (U235)	3.099E+01	3.027E+01	2.887E+01	2.801E+01	2.746E+01	2.711E+01	2.683E+01	2.698E+01	2.761E+01	
σ_a (U238)	9.034E-01	9.019E-01	9.000E-01	8.993E-01	8.990E-01	8.989E-01	8.996E-01	9.028E-01	9.066E-01	
σ_a (Pu238)	0.000E+00	1.800E+01	1.720E+01	1.675E+01	1.648E+01	1.631E+01	1.620E+01	1.644E+01	1.689E+01	
σ_a (Pu239)	0.000E+00	1.084E+02	9.862E+01	9.225E+01	8.789E+01	8.482E+01	8.108E+01	7.853E+01	7.868E+01	
σ_a (Pu240)	0.000E+00	2.051E+02	1.885E+02	1.617E+02	1.395E+02	1.226E+02	9.989E+01	7.737E+01	6.719E+01	
σ_a (Pu241)	0.000E+00	8.974E+01	8.352E+01	7.957E+01	7.693E+01	7.509E+01	7.294E+01	7.208E+01	7.304E+01	
σ_a (Pu242)	0.000E+00	2.805E+01	2.808E+01	2.809E+01	2.801E+01	2.781E+01	2.703E+01	2.373E+01	2.058E+01	
σ_a (Am241)	0.000E+00	8.541E+01	8.004E+01	7.624E+01	7.355E+01	7.155E+01	6.889E+01	6.634E+01	6.534E+01	
σ_a (Am243)	0.000E+00	4.844E+01	4.811E+01	4.764E+01	4.715E+01	4.667E+01	4.575E+01	4.409E+01	4.254E+01	
σ_a (Cm242)	0.000E+00	4.832E+00	4.808E+00	4.797E+00	4.791E+00	4.789E+00	4.790E+00	4.808E+00	4.828E+00	
σ_a (Cm244)	0.000E+00	1.522E+01	1.512E+01	1.503E+01	1.494E+01	1.486E+01	1.472E+01	1.455E+01	1.440E+01	
Σ_a (その他1)	0.000E+00	9.030E-06	1.629E-04	2.922E-04	4.162E-04	5.326E-04	7.487E-04	1.143E-03	1.488E-03	
Σ_a (その他2)	5.854E-05	5.018E-04	8.450E-04	1.055E-03	1.246E-03	1.425E-03	1.753E-03	2.318E-03	2.767E-03	
Σ_a (Zr)	2.164E-04	2.156E-04	2.144E-04	2.137E-04	2.133E-04	2.131E-04	2.129E-04	2.131E-04	2.135E-04	
Σ_a (H2O)	4.753E-04	4.661E-04	4.456E-04	4.322E-04	4.230E-04	4.167E-04	4.097E-04	4.078E-04	4.121E-04	

 Σ_a :一群巨視的断面積(1/cm) σ_a :一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
Hot, 0%ボイド	1.4146	1.3771	1.3188	1.2689	1.2247	1.1856	1.1178	1.0045	0.9124	
Hot, 40%ボイド	1.3715	1.3385	1.2803	1.2294	1.1845	1.1451	1.0765	0.9626	0.8706	
Hot, 70%ボイド	1.2977	1.2719	1.2150	1.1634	1.1182	1.0787	1.0097	0.8957	0.8042	
Doppler, 0%ボイド	1.3834	1.3472	1.2902	1.2406	1.1963	1.1571	1.0894	0.9777	0.8880	
Cold, 0%ボイド	1.5217	1.4731	1.4170	1.3713	1.3301	1.2926	1.2256	1.1074	1.0051	

Pin Cell (MOX) with CASMO4 + JEF2.2

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0.0	1.1885
0.1	1.1821
5.0	1.1603
10.0	1.1437
15.0	1.1291
20.0	1.1155
30.0	1.0898
50.0	1.0422
70.0	0.9989

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

(1/b/cm)

核種	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
U235	1.2956E-05	1.2946E-05	1.2447E-05	1.1954E-05	1.1477E-05	1.1016E-05	1.0142E-05	8.5748E-06	7.2311E-06
U236	0.0000E+00	3.2795E-09	1.6064E-07	3.1325E-07	4.5796E-07	5.9481E-07	8.4598E-07	1.2649E-06	1.5843E-06
U238	6.3846E-03	6.3842E-03	6.3645E-03	6.3441E-03	6.3236E-03	6.3029E-03	6.2608E-03	6.1746E-03	6.0852E-03
Np237	0.0000E+00	4.2556E-10	1.1091E-07	2.4453E-07	3.4222E-07	4.7162E-07	7.2192E-07	1.1842E-06	1.5892E-06
Pu238	2.7988E-05	2.7973E-05	2.7732E-05	2.8109E-05	2.8747E-05	2.9494E-05	3.1147E-05	3.4397E-05	3.7289E-05
Pu239	7.2333E-04	7.2261E-04	6.9879E-04	6.7543E-04	6.5279E-04	6.3079E-04	5.8870E-04	5.1189E-04	4.4473E-04
Pu240	3.3042E-04	3.3041E-04	3.2948E-04	3.2828E-04	3.2681E-04	3.2513E-04	3.2110E-04	3.1047E-04	2.9647E-04
Pu241	1.2241E-04	1.2247E-04	1.2541E-04	1.2812E-04	1.3054E-04	1.3267E-04	1.3616E-04	1.4040E-04	1.4158E-04
Pu242	8.3890E-05	8.3890E-05	8.3787E-05	8.3714E-05	8.3655E-05	8.3628E-05	8.3712E-05	8.4355E-05	8.5498E-05
Am241	3.5537E-05	3.5523E-05	3.4869E-05	3.4273E-05	3.3734E-05	3.3249E-05	3.2391E-05	3.0921E-05	2.9481E-05
Am242m	0.0000E+00	6.1084E-09	2.7355E-07	4.8855E-07	6.5612E-07	7.8490E-07	9.5493E-07	1.0802E-06	1.0685E-06
Am243	0.0000E+00	3.8574E-08	2.0858E-06	4.0106E-06	5.7833E-06	7.4154E-06	1.0309E-05	1.4893E-05	1.8270E-05
Cm242	0.0000E+00	2.7284E-08	1.5384E-06	2.3844E-06	2.8439E-06	3.0912E-06	3.2971E-06	3.3952E-06	3.4472E-06
Cm243	0.0000E+00	3.0060E-12	8.9338E-09	2.8931E-08	5.3108E-08	7.7853E-08	1.2302E-07	1.8831E-07	2.2784E-07
Cm244	0.0000E+00	2.1395E-11	1.0054E-07	3.8524E-07	8.2776E-07	1.4023E-06	2.8702E-06	6.6618E-06	1.1044E-05
Cm245	0.0000E+00	8.9207E-15	1.4141E-09	1.0686E-08	3.4259E-08	7.6814E-08	2.3180E-07	8.6243E-07	1.9136E-06
Cm246	0.0000E+00	6.8678E-19	4.1667E-12	6.3849E-11	3.1202E-10	9.5119E-10	4.4768E-09	2.9994E-08	1.0083E-07
Mo95	0.0000E+00	9.7079E-12	4.8743E-07	1.8902E-06	3.5996E-06	5.3683E-06	8.8772E-06	1.5618E-05	2.1964E-05
Tc99	0.0000E+00	1.3168E-08	2.2830E-06	4.5840E-06	6.8345E-06	9.0354E-06	1.3291E-05	2.1226E-05	2.8406E-05
Rh103	0.0000E+00	1.2695E-09	1.6318E-06	4.0915E-06	6.5493E-06	8.9366E-06	1.3488E-05	2.1735E-05	2.8882E-05
Cs133	0.0000E+00	8.5416E-09	2.4729E-06	5.0121E-06	7.4723E-06	9.8558E-06	1.4399E-05	2.2630E-05	2.9775E-05
Sm147	0.0000E+00	1.3433E-12	2.9862E-08	1.2091E-07	2.5612E-07	4.2139E-07	8.0082E-07	1.5810E-06	2.2315E-06
Sm149	0.0000E+00	3.1382E-09	3.0354E-07	4.0939E-07	4.4605E-07	4.5842E-07	4.6072E-07	4.4334E-07	4.1825E-07
Sm150	0.0000E+00	3.9746E-11	2.0358E-07	6.2357E-07	1.1145E-06	1.6280E-06	2.6638E-06	4.6708E-06	6.5416E-06
Sm152	0.0000E+00	4.8466E-09	2.5467E-07	5.2423E-07	7.9668E-07	1.0649E-06	1.5716E-06	2.4273E-06	3.0846E-06
Nd143	0.0000E+00	7.9007E-10	1.4620E-06	3.1760E-06	4.8667E-06	6.5336E-06	9.7938E-06	1.6008E-05	2.1788E-05
Nd145	0.0000E+00	2.4491E-08	1.2139E-06	2.4057E-06	3.5756E-06	4.7240E-06	6.9560E-06	1.1164E-05	1.5031E-05
Eu153	0.0000E+00	1.1650E-09	1.7083E-07	3.7253E-07	6.0034E-07	8.5036E-07	1.4018E-06	2.6010E-06	3.7704E-06
Gd155	0.0000E+00	9.5174E-13	1.5991E-09	4.3597E-09	6.9495E-09	9.1203E-09	1.2695E-08	2.0817E-08	3.2882E-08

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性 (燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.100E-02	3.084E-02	3.025E-02	2.980E-02	2.939E-02	2.901E-02	2.829E-02	2.693E-02	2.569E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	1.930E+01	1.922E+01	1.912E+01	1.911E+01	1.912E+01	1.914E+01	1.922E+01	1.947E+01	1.980E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	3.442E-01	3.442E-01	3.446E-01	3.450E-01	3.453E-01	3.455E-01	3.460E-01	3.468E-01	3.475E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	5.485E+00	5.483E+00	5.484E+00	5.486E+00	5.489E+00	5.493E+00	5.499E+00	5.512E+00	5.525E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	2.980E+01	2.963E+01	2.962E+01	2.977E+01	2.998E+01	3.023E+01	3.081E+01	3.215E+01	3.367E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	2.141E+00	2.141E+00	2.143E+00	2.144E+00	2.146E+00	2.147E+00	2.149E+00	2.153E+00	2.156E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	4.824E+01	4.802E+01	4.765E+01	4.748E+01	4.741E+01	4.740E+01	4.750E+01	4.808E+01	4.904E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	1.652E+00	1.652E+00	1.653E+00	1.654E+00	1.655E+00	1.656E+00	1.658E+00	1.660E+00	1.661E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	2.649E+00	2.648E+00	2.646E+00	2.646E+00	2.646E+00	2.646E+00	2.649E+00	2.656E+00	2.666E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.000E+00	1.753E+00	1.754E+00	1.754E+00	1.754E+00	1.755E+00	1.756E+00	1.757E+00	1.758E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.000E+00	3.183E+00	3.184E+00	3.185E+00	3.186E+00	3.188E+00	3.191E+00	3.197E+00	3.203E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.000E+00	3.517E+00	3.512E+00	3.508E+00	3.504E+00	3.501E+00	3.495E+00	3.487E+00	3.481E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性 (燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.608E-02	2.609E-02	2.607E-02	2.605E-02	2.603E-02	2.601E-02	2.596E-02	2.584E-02	2.572E-02
σ_a (U235)	1.114E+01	1.110E+01	1.105E+01	1.103E+01	1.103E+01	1.104E+01	1.107E+01	1.118E+01	1.134E+01
σ_a (U238)	8.499E-01	8.498E-01	8.483E-01	8.472E-01	8.463E-01	8.455E-01	8.444E-01	8.436E-01	8.441E-01
σ_a (Pu238)	6.304E+00	6.274E+00	6.248E+00	6.247E+00	6.255E+00	6.267E+00	6.298E+00	6.382E+00	6.488E+00
σ_a (Pu239)	1.598E+01	1.590E+01	1.591E+01	1.600E+01	1.613E+01	1.628E+01	1.662E+01	1.739E+01	1.825E+01
σ_a (Pu240)	1.298E+01	1.295E+01	1.284E+01	1.276E+01	1.271E+01	1.267E+01	1.264E+01	1.272E+01	1.295E+01
σ_a (Pu241)	2.121E+01	2.111E+01	2.094E+01	2.087E+01	2.084E+01	2.084E+01	2.089E+01	2.117E+01	2.163E+01
σ_a (Pu242)	7.637E+00	7.635E+00	7.591E+00	7.561E+00	7.534E+00	7.509E+00	7.460E+00	7.370E+00	7.291E+00
σ_a (Am241)	2.229E+01	2.224E+01	2.208E+01	2.199E+01	2.194E+01	2.191E+01	2.191E+01	2.208E+01	2.241E+01
σ_a (Am243)	0.000E+00	2.736E+01	2.679E+01	2.627E+01	2.582E+01	2.542E+01	2.476E+01	2.384E+01	2.329E+01
σ_a (Cm242)	0.000E+00	3.950E+00	3.949E+00	3.949E+00	3.950E+00	3.952E+00	3.956E+00	3.967E+00	3.983E+00
σ_a (Cm244)	0.000E+00	1.247E+01	1.232E+01	1.219E+01	1.207E+01	1.196E+01	1.177E+01	1.149E+01	1.130E+01
Σ_a (その他1)	0.000E+00	7.486E-06	1.101E-04	1.879E-04	2.590E-04	3.266E-04	4.548E-04	6.983E-04	9.389E-04
Σ_a (その他2)	7.397E-05	1.653E-04	4.264E-04	6.231E-04	7.870E-04	9.344E-04	1.201E-03	1.667E-03	2.072E-03
Σ_a (Zr)	1.935E-04	1.935E-04	1.935E-04	1.935E-04	1.935E-04	1.936E-04	1.937E-04	1.938E-04	1.940E-04
Σ_a (H ₂ O)	1.906E-04	1.901E-04	1.892E-04	1.886E-04	1.883E-04	1.881E-04	1.880E-04	1.886E-04	1.901E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.1885	1.1821	1.1603	1.1437	1.1291	1.1155	1.0898	1.0422	0.9989
Hot, 40%ボイド	1.1776	1.1725	1.1515	1.1348	1.1199	1.1059	1.0793	1.0301	0.9850
Hot, 70%ボイド	1.1712	1.1677	1.1478	1.1311	1.1158	1.1011	1.0732	1.0214	0.9740
Doppler, 0%ボイド	1.1607	1.1547	1.1340	1.1182	1.1042	1.0911	1.0664	1.0204	0.9783
Cold, 0%ボイド	1.2614	1.2498	1.2236	1.2057	1.1909	1.1773	1.1519	1.1055	1.0639

BWR (UO_2) with CASMO4 + JEF2.2

表 3-1 無限増倍率、局所ピーピング係数の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーピング係数*
0.0	1.0470	1.401
0.1	1.0274	1.396
5.0	1.0491	1.338
10.0	1.0796	1.278
15.0	1.1190	1.216
20.0	1.1602	1.160
30.0	1.1158	1.123
50.0	0.9723	1.089
70.0	0.8446	1.070

* 核分裂率

表 3-2 核分裂率分布の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)= 0

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.237									
2	1.247	1.262								
3	1.260	0.360	0.792							
4	1.400	0.966	0.348	1.136						
5	1.379	1.024	1.036	0.000	0.000					
6	1.401	0.968	0.356	0.000	0.000	1.136				
7	1.262	0.362	0.829	0.356	1.036	0.348	0.792			
8	1.249	1.268	0.362	0.968	1.024	0.966	0.360	1.262		
9	1.239	1.249	1.262	1.401	1.379	1.400	1.260	1.247	1.237	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 0.1

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.236									
2	1.243	1.256								
3	1.256	0.367	0.796							
4	1.395	0.965	0.355	1.142						
5	1.374	1.022	1.040	0.000	0.000					
6	1.396	0.968	0.364	0.000	0.000	1.142				
7	1.258	0.369	0.834	0.364	1.040	0.355	0.796			
8	1.245	1.261	0.369	0.968	1.022	0.965	0.367	1.256		
9	1.238	1.245	1.258	1.396	1.374	1.395	1.257	1.243	1.236	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 5

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.188									
2	1.192	1.215								
3	1.211	0.475	0.829							
4	1.336	0.967	0.442	1.147						
5	1.317	1.008	1.048	0.000	0.000					
6	1.338	0.973	0.473	0.000	0.000	1.147				
7	1.214	0.480	0.873	0.473	1.048	0.442	0.829			
8	1.195	1.222	0.480	0.973	1.008	0.967	0.475	1.215		
9	1.190	1.195	1.214	1.338	1.317	1.336	1.211	1.192	1.188	

(1に規格化)

燃焼度(GWd) 10

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
i ↓	1.108								
1	1.127	1.180							
2	1.159	0.599	0.866						
3	1.274	0.969	0.544	1.143					
4	1.257	0.996	1.050	0.000	0.000				
5	1.278	0.980	0.604	0.000	0.000	1.143			
6	1.165	0.611	0.916	0.604	1.050	0.544	0.866		
7	1.131	1.190	0.611	0.980	0.996	0.969	0.599	1.180	
8	1.111	1.131	1.165	1.278	1.257	1.274	1.159	1.127	1.108

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 15

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓	1.022								
1	1.056	1.146							
2	1.105	0.728	0.904						
3	1.211	0.971	0.655	1.132					
4	1.195	0.982	1.050	0.000	0.000				
5	1.216	0.989	0.744	0.000	0.000	1.132			
6	1.112	0.749	0.960	0.744	1.050	0.655	0.904		
7	1.062	1.159	0.749	0.989	0.982	0.971	0.728	1.146	
8	1.026	1.062	1.112	1.216	1.195	1.211	1.105	1.056	1.022

(1に規格化)

燃焼度(GWd) 20

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓	0.943								
1	0.989	1.115							
2	1.053	0.842	0.944						
3	1.153	0.976	0.773	1.122					
4	1.138	0.972	1.050	0.000	0.000				
5	1.160	0.998	0.875	0.000	0.000	1.122			
6	1.061	0.866	1.000	0.875	1.050	0.773	0.944		
7	0.995	1.128	0.866	0.998	0.972	0.976	0.842	1.115	
8	0.946	0.995	1.061	1.160	1.138	1.153	1.053	0.989	0.943

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 30

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.886									
2	0.941	1.096								
3	1.016	0.896	0.990							
4	1.119	1.003	0.876	1.116						
5	1.108	0.991	1.060	0.000	0.000					
6	1.123	1.016	0.926	0.000	0.000	1.116				
7	1.021	0.907	1.027	0.926	1.060	0.876	0.990			
8	0.944	1.103	0.907	1.016	0.991	1.003	0.896	1.096		
9	0.887	0.944	1.021	1.123	1.108	1.119	1.016	0.941	0.886	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 50

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.879									
2	0.906	1.058								
3	0.980	0.930	1.048							
4	1.076	1.047	0.928	1.089						
5	1.076	1.037	1.071	0.000	0.000					
6	1.077	1.054	0.953	0.000	0.000	1.089				
7	0.981	0.935	1.068	0.953	1.071	0.928	1.048			
8	0.907	1.061	0.935	1.054	1.037	1.047	0.930	1.058		
9	0.880	0.907	0.981	1.077	1.076	1.076	0.980	0.906	0.879	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 70

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.967									
2	0.937	1.005								
3	0.973	0.935	1.064							
4	1.034	1.052	0.958	1.060						
5	1.039	1.044	1.062	0.000	0.000					
6	1.034	1.051	0.966	0.000	0.000	1.060				
7	0.974	0.935	1.070	0.966	1.062	0.958	1.064			
8	0.938	1.005	0.935	1.051	1.044	1.052	0.935	1.005		
9	0.968	0.938	0.974	1.034	1.039	1.034	0.973	0.937	0.967	

(1に規格化)

表 3-3 無限増倍率の瞬時ボイド率変化、瞬時温度変化特性

計算条件	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot,0%ボイド	1.0643	1.0416	1.0632	1.0972	1.1422	1.1918	1.1524	1.0074	0.8760
Hot,40%ボイド	1.0470	1.0274	1.0491	1.0796	1.1190	1.1602	1.1158	0.9723	0.8446
Hot,70%ボイド	1.0281	1.0116	1.0315	1.0575	1.0907	1.1232	1.0744	0.9324	0.8084
Doppler,40%ボイド	1.0302	1.0112	1.0333	1.0632	1.1011	1.1401	1.0949	0.9543	0.8304
Cold,0%ボイド	1.1045	1.0765	1.0813	1.1028	1.1369	1.1859	1.1527	0.9915	0.8386

Hot,40%ボイドより瞬時変化

[注: Hot,40%ボイドの値は表3-1と同一となる]

BWR (MOX) with CASMO4 + JEF2.2

表 3-1 無限増倍率、局所ピーキング係数の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーキング係数*
0.0	1.0770	1.423
0.1	1.0668	1.416
5.0	1.0703	1.394
10.0	1.0882	1.368
15.0	1.1090	1.336
20.0	1.1115	1.306
30.0	1.0780	1.256
50.0	1.0073	1.257
70.0	0.9454	1.255

* 核分裂率

表 3-2 核分裂率分布の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)= 0

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.372										
2	1.275	1.170									
3	1.374	1.037	0.832								
4	0.319	0.930	0.816	0.952							
5	1.292	0.909	0.846	1.238	0.000						
6	1.293	0.913	0.877	0.303	0.000	0.000					
7	0.319	0.941	0.863	1.265	0.000	0.000	0.000				
8	1.374	1.045	0.875	0.998	1.296	0.311	0.304	1.123			
9	1.273	1.173	1.051	0.982	1.001	1.040	1.064	1.004	0.854		
10	1.369	1.275	1.380	0.320	1.321	1.332	0.323	1.423	1.310	1.391	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 0.1

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.363										
2	1.267	1.163									
3	1.369	1.036	0.835								
4	0.323	0.933	0.820	0.956							
5	1.293	0.912	0.851	1.242	0.000						
6	1.294	0.916	0.882	0.307	0.000	0.000					
7	0.323	0.945	0.866	1.269	0.000	0.000	0.000				
8	1.369	1.044	0.877	1.001	1.299	0.315	0.307	1.125			
9	1.265	1.166	1.050	0.985	1.004	1.044	1.067	1.002	0.848		
10	1.360	1.267	1.374	0.324	1.321	1.331	0.327	1.416	1.300	1.381	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 5

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.243										
2	1.207	1.151									
3	1.337	1.032	0.827								
4	0.414	0.943	0.810	0.941							
5	1.276	0.913	0.847	1.227	0.000						
6	1.277	0.916	0.887	0.377	0.000	0.000					
7	0.415	0.956	0.862	1.253	0.000	0.000	0.000				
8	1.339	1.042	0.872	0.989	1.291	0.398	0.375	1.142			
9	1.208	1.156	1.049	0.998	1.014	1.072	1.105	1.015	0.849		
10	1.242	1.209	1.347	0.419	1.311	1.323	0.429	1.394	1.244	1.263	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 10

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.128										
2	1.139	1.135									
3	1.299	1.027	0.815								
4	0.516	0.951	0.795	0.920							
5	1.253	0.912	0.840	1.205	0.000						
6	1.255	0.915	0.891	0.454	0.000 0.000						
7	0.518	0.968	0.855	1.232	0.000 0.000 0.000						
8	1.304	1.039	0.863	0.974	1.280	0.495	0.455	1.161			
9	1.142	1.143	1.048	1.013	1.027	1.106	1.152	1.031	0.847		
10	1.130	1.144	1.313	0.529	1.297	1.313	0.549	1.368	1.181	1.151	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 15

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.030										
2	1.073	1.114									
3	1.258	1.021	0.803								
4	0.612	0.960	0.781	0.899							
5	1.227	0.912	0.833	1.181	0.000						
6	1.230	0.915	0.899	0.530	0.000 0.000						
7	0.616	0.980	0.850	1.211	0.000 0.000 0.000						
8	1.264	1.036	0.854	0.959	1.269	0.595	0.544	1.183			
9	1.077	1.125	1.047	1.028	1.042	1.145	1.203	1.047	0.841		
10	1.034	1.080	1.276	0.632	1.278	1.298	0.662	1.336	1.119	1.056	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 20

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.964										
2	1.026	1.107									
3	1.226	1.024	0.802								
4	0.663	0.967	0.779	0.893							
5	1.206	0.915	0.836	1.172	0.000						
6	1.208	0.919	0.912	0.591	0.000 0.000						
7	0.667	0.989	0.853	1.202	0.000 0.000 0.000						
8	1.233	1.040	0.855	0.956	1.265	0.663	0.623	1.208			
9	1.031	1.120	1.051	1.037	1.052	1.168	1.234	1.061	0.840		
10	0.968	1.033	1.245	0.681	1.258	1.279	0.710	1.306	1.071	0.989	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 30

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.898										
2	0.972	1.122									
3	1.187	1.054	0.827								
4	0.692	0.986	0.799	0.905							
5	1.183	0.936	0.854	1.167	0.000						
6	1.185	0.941	0.929	0.632	0.000	0.000					
7	0.695	1.008	0.874	1.196	0.000	0.000	0.000				
8	1.193	1.070	0.881	0.973	1.256	0.692	0.668	1.228			
9	0.976	1.134	1.082	1.056	1.072	1.182	1.247	1.084	0.847		
10	0.901	0.978	1.203	0.708	1.232	1.250	0.734	1.256	1.008	0.918	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 50

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.845										
2	0.898	1.127									
3	1.105	1.113	0.887								
4	0.725	1.029	0.848	0.938							
5	1.138	0.985	0.894	1.151	0.000						
6	1.140	0.990	0.958	0.662	0.000	0.000					
7	0.728	1.049	0.920	1.178	0.000	0.000	0.000				
8	1.109	1.130	0.943	1.014	1.234	0.714	0.699	1.246			
9	0.900	1.138	1.143	1.099	1.116	1.201	1.257	1.113	0.846		
10	0.846	0.902	1.116	0.740	1.177	1.191	0.763	1.151	0.922	0.858	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 70

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.836										
2	0.862	1.091									
3	1.030	1.152	0.950								
4	0.745	1.067	0.901	0.971							
5	1.088	1.030	0.936	1.133	0.000						
6	1.089	1.037	0.988	0.687	0.000	0.000					
7	0.747	1.085	0.969	1.160	0.000	0.000	0.000				
8	1.033	1.169	1.006	1.055	1.211	0.732	0.725	1.255			
9	0.863	1.099	1.183	1.135	1.154	1.214	1.254	1.108	0.834		
10	0.836	0.865	1.038	0.759	1.119	1.129	0.777	1.059	0.880	0.847	

(1に規格化)

表 3-3 無限増倍率の瞬時ボイド率変化、瞬時温度変化特性

計算条件	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot,0%ボイド	1.0907	1.0790	1.0837	1.1055	1.1322	1.1392	1.1075	1.0381	0.9774
Hot,40%ボイド	1.0770	1.0668	1.0703	1.0882	1.1090	1.1115	1.0780	1.0073	0.9454
Hot,70%ボイド	1.0707	1.0619	1.0638	1.0778	1.0933	1.0919	1.0564	0.9840	0.9204
Doppler,40%ボイド	1.0570	1.0473	1.0511	1.0686	1.0888	1.0911	1.0583	0.9894	0.9290
Cold,0%ボイド	1.0955	1.0789	1.0764	1.0968	1.1308	1.1499	1.1197	1.0432	0.9756

Hot,40%ボイドより瞬時変化

[注: Hot,40%ボイドの値は表3-1と同一となる]

8(1). CASMO-4 コードの概要とベンチマーク計算手法（原燃工）

1. コード名

CASMO4 コード

2. コードの概要

CASMO4 コードは、PWR および BWR 燃料集合体のセル及び集合体計算を行い、集合体少數群断面積をもとめるコードである。

3. 核データライブラリ

L ライブラリを使用している。L ライブラリは主として ENDF/B-IV をデータソースとしており、一部 ENDF/B-V 等が使用されている。

4. 計算概要

(1) セル計算

- 群構造 : 70 群
- 計算モデル : UO₂燃料セルの場合は、燃料ペレット・被覆管+ギャップ・減速材の 3 領域。Gd 燃料セルの場合は、Gd 入り燃料ペレット・被覆管+ギャップ・減速材・均質領域の 4 領域。均質領域とは周辺 UO₂燃料セルを均質化したものである。また、Gd 燃料セル以外の吸収セル(RCC, BP)や水セルも同様の空間メッシュをとるが、Gd 燃料セルについてはペレット領域を径方向にメッシュ分割している。
- 計算手法 : 衝突確率法にもとづく、1 次元輸送計算。

(2) 集合体計算

- 群構造 : 16 群(MOX), 7 群(UO₂)
- 計算モデル : 非均質集合体体系
- 計算手法 : セル計算により得られたセル内非均質少數群断面積を用い、Characteristics 法で集合体計算を行う。

(3) 燃焼計算

- Matrix exponential 法を用いて線形化された燃焼チェーンを解く。
- Predictor-Corrector 法を使用。

5. 参考文献

M.Ednius, B.H.Forssen and C. Gragg, "The Physics Model of CASMO-4," Proc. Int. Topl. Mtg. Advances in Mathematics, Computations, and Reactor Physics, Pittsburgh, PA, 1991, Vol.2, p.10.11-1, American Nuclear Society (1991).

Pin Cell (UO_2) with CASMO4 + L-library

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度 (GWd/t)	無限増倍率
0.0	1.41554
0.1	1.37795
5.0	1.32117
10.0	1.27271
15.0	1.22955
20.0	1.19146
30.0	1.12465
50.0	1.01235
70.0	0.92035

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

(1/barn/cm)

核種	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
U235	5.0392E-04	5.0297E-04	4.5814E-04	4.1613E-04	3.7726E-04	3.4117E-04	2.7646E-04	1.7341E-04	1.0105E-04
U236	0.0000E+00	1.9843E-07	9.4366E-06	1.7966E-05	2.5691E-05	3.2689E-05	4.4696E-05	6.1495E-05	6.9922E-05
U238	7.1572E-03	7.1568E-03	7.1365E-03	7.1149E-03	7.0924E-03	7.0691E-03	7.0200E-03	6.9123E-03	6.7914E-03
Np237	0.0000E+00	2.3021E-09	2.2459E-07	6.3130E-07	1.1901E-06	1.8608E-06	3.4235E-06	6.8916E-06	1.0040E-05
Pu238	0.0000E+00	2.0232E-12	8.4652E-09	4.5469E-08	1.2649E-07	2.6503E-07	7.5408E-07	2.7267E-06	5.8954E-06
Pu239	0.0000E+00	1.0892E-07	1.5244E-05	2.7352E-05	3.6891E-05	4.4466E-05	5.5260E-05	6.5777E-05	6.8615E-05
Pu240	0.0000E+00	9.5170E-11	7.6657E-07	2.3937E-06	4.3591E-06	6.4761E-06	1.0829E-05	1.8863E-05	2.4983E-05
Pu241	0.0000E+00	3.1634E-13	1.5943E-07	9.1723E-07	2.2324E-06	3.9113E-06	7.7346E-06	1.4905E-05	1.9810E-05
Pu242	0.0000E+00	9.1651E-17	2.8710E-09	3.5095E-08	1.3448E-07	3.2708E-07	1.0352E-06	3.6787E-06	7.4697E-06
Am241	0.0000E+00	2.3051E-17	7.1158E-10	8.4497E-09	3.1159E-08	7.2475E-08	2.0704E-07	5.7499E-07	8.7707E-07
Am242m	0.0000E+00	1.5482E-21	3.4528E-12	7.2436E-11	3.5538E-10	9.8300E-10	3.4064E-09	1.0938E-08	1.7240E-08
Am243	0.0000E+00	1.7430E-20	5.3281E-11	1.4107E-09	8.5957E-09	2.9114E-08	1.4596E-07	8.8505E-07	2.3940E-06
Cm242	0.0000E+00	1.3549E-20	2.5971E-11	5.9621E-10	3.1739E-09	9.4677E-09	3.7677E-08	1.5538E-07	3.0675E-07
Cm243	0.0000E+00	0.0000E+00	5.3961E-14	2.6434E-12	2.2156E-11	9.1433E-11	5.7310E-10	4.0664E-09	1.1001E-08
Cm244	0.0000E+00	7.3293E-20	1.1829E-12	6.6919E-11	6.4514E-10	3.0503E-09	2.4790E-08	2.8401E-07	1.1924E-06
Cm245	0.0000E+00	0.0000E+00	7.2545E-15	8.5107E-13	1.2622E-11	8.1052E-11	1.0098E-09	1.9335E-08	1.0962E-07
Cm246	0.0000E+00	2.1236E-21	2.8392E-17	6.9493E-15	1.6119E-13	1.4410E-12	2.9476E-11	1.1412E-09	1.1096E-08
Mo95	0.0000E+00								
Tc99	0.0000E+00								
Rh103	0.0000E+00	2.4683E-08	1.2177E-06	2.3912E-06	3.5105E-06	4.5711E-06	6.5104E-06	9.6575E-06	1.1876E-05
Cs133	0.0000E+00	5.3431E-08	2.6266E-06	5.1610E-06	7.6019E-06	9.9479E-06	1.4349E-05	2.1950E-05	2.7901E-05
Sm147	0.0000E+00	1.7428E-11	3.9120E-08	1.4021E-07	2.8278E-07	4.5079E-07	8.1657E-07	1.4763E-06	1.8896E-06
Sm149	0.0000E+00	2.7226E-09	5.9206E-08	6.5350E-08	6.9660E-08	7.2479E-08	7.4719E-08	7.1260E-08	6.4230E-08
Sm150	0.0000E+00	1.7613E-10	3.9365E-07	8.9133E-07	1.4208E-06	1.9720E-06	3.1063E-06	5.3365E-06	7.3094E-06
Sm152	0.0000E+00	2.1632E-09	1.6615E-07	3.7981E-07	5.9123E-07	7.8595E-07	1.1197E-06	1.6207E-06	1.9818E-06
Nd143	0.0000E+00	4.6928E-08	2.2770E-06	4.4229E-06	6.4480E-06	8.3575E-06	1.1839E-05	1.7462E-05	2.1305E-05
Nd145	0.0000E+00	3.1289E-08	1.5272E-06	2.9824E-06	4.3698E-06	5.6917E-06	8.1430E-06	1.2288E-05	1.5439E-05
Eu153	0.0000E+00	1.3903E-09	8.5419E-08	2.1140E-07	3.7740E-07	5.7573E-07	1.0336E-06	2.0068E-06	2.8623E-06
Gd155	0.0000E+00	1.6337E-13	1.9738E-10	4.9821E-10	8.4309E-10	1.2614E-09	2.3889E-09	5.4101E-09	8.0196E-09

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

断面積	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma f$ (全核種)	3.2403E-02	3.1611E-02	3.0453E-02	2.9417E-02	2.8463E-02	2.7598E-02	2.6039E-02	2.3335E-02	2.1094E-02
$\nu \sigma f$ (U235)	6.0048E+01	5.8536E+01	5.5722E+01	5.4023E+01	5.2930E+01	5.2271E+01	5.1759E+01	5.2311E+01	5.3757E+01
$\nu \sigma f$ (U238)	2.9948E-01	3.0007E-01	3.0283E-01	3.0494E-01	3.0664E-01	3.0806E-01	3.1036E-01	3.1372E-01	3.1666E-01
$\nu \sigma f$ (Pu238)	0.0000E+00	3.1171E+00	3.1400E+00	3.1565E+00	3.1689E+00	3.1784E+00	3.1919E+00	3.2064E+00	3.2168E+00
$\nu \sigma f$ (Pu239)	0.0000E+00	1.9587E+02	1.7873E+02	1.6770E+02	1.6023E+02	1.5508E+02	1.4896E+02	1.4551E+02	1.4673E+02
$\nu \sigma f$ (Pu240)	0.0000E+00	1.9738E+00	1.9788E+00	1.9747E+00	1.9706E+00	1.9676E+00	1.9643E+00	1.9623E+00	1.9643E+00
$\nu \sigma f$ (Pu241)	0.0000E+00	1.9607E+02	1.8296E+02	1.7487E+02	1.6943E+02	1.6579E+02	1.6177E+02	1.6082E+02	1.6359E+02
$\nu \sigma f$ (Pu242)	0.0000E+00	1.4139E+00	1.4248E+00	1.4329E+00	1.4390E+00	1.4439E+00	1.4510E+00	1.4592E+00	1.4652E+00
$\nu \sigma f$ (Am241)	0.0000E+00	3.7652E+00	3.6439E+00	3.5612E+00	3.5033E+00	3.4621E+00	3.4087E+00	3.3637E+00	3.3545E+00
$\nu \sigma f$ (Am243)	0.0000E+00	1.0868E+00	1.0957E+00	1.1024E+00	1.1075E+00	1.1117E+00	1.1181E+00	1.1266E+00	1.1336E+00
$\nu \sigma f$ (Cm242)	0.0000E+00	3.3719E+00	3.3486E+00	3.3357E+00	3.3280E+00	3.3241E+00	3.3233E+00	3.3367E+00	3.3593E+00
$\nu \sigma f$ (Cm244)	0.0000E+00	3.3899E+00	3.4030E+00	3.4131E+00	3.4205E+00	3.4265E+00	3.4353E+00	3.4480E+00	3.4586E+00

 $\nu \Sigma f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

断面積	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σa (全核種)	2.2891E-02	2.2940E-02	2.3050E-02	2.3114E-02	2.3149E-02	2.3163E-02	2.3153E-02	2.3050E-02	2.2919E-02
σa (U235)	3.1193E+01	3.0462E+01	2.9098E+01	2.8275E+01	2.7750E+01	2.7441E+01	2.7220E+01	2.7519E+01	2.8265E+01
σa (U238)	9.0223E-01	9.0066E-01	8.9869E-01	8.9808E-01	8.9780E-01	8.9792E-01	8.9885E-01	9.0264E-01	9.0712E-01
σa (Pu238)	0.0000E+00	2.2320E+01	2.1186E+01	2.0488E+01	2.0023E+01	1.9722E+01	1.9426E+01	1.9509E+01	1.9926E+01
σa (Pu239)	0.0000E+00	1.0836E+02	9.8697E+01	9.2462E+01	8.8227E+01	8.5298E+01	8.1788E+01	7.9677E+01	8.0189E+01
σa (Pu240)	0.0000E+00	2.0769E+02	1.9016E+02	1.6315E+02	1.4092E+02	1.2416E+02	1.0186E+02	7.9766E+01	6.9848E+01
σa (Pu241)	0.0000E+00	8.9977E+01	8.3851E+01	8.0063E+01	7.7524E+01	7.5823E+01	7.3947E+01	7.3502E+01	7.4771E+01
σa (Pu242)	0.0000E+00	2.8648E+01	2.8701E+01	2.8740E+01	2.8716E+01	2.8616E+01	2.8144E+01	2.6340E+01	2.3871E+01
σa (Am241)	0.0000E+00	8.5496E+01	8.0028E+01	7.6283E+01	7.3637E+01	7.1729E+01	6.9229E+01	6.7035E+01	6.6376E+01
σa (Am243)	0.0000E+00	4.1437E+01	4.0980E+01	4.0523E+01	4.0083E+01	3.9674E+01	3.8899E+01	3.7549E+01	3.6338E+01
σa (Cm242)	0.0000E+00	4.8513E+00	4.8260E+00	4.8152E+00	4.8103E+00	4.8092E+00	4.8145E+00	4.8431E+00	4.8756E+00
σa (Cm244)	0.0000E+00	1.4531E+01	1.4431E+01	1.4355E+01	1.4284E+01	1.4227E+01	1.4128E+01	1.4016E+01	1.3933E+01
Σa (その他1)	0.0000E+00	1.7353E-06	7.7361E-05	1.4582E-04	2.1097E-04	2.6690E-04	3.7160E-04	5.4001E-04	6.5866E-04
Σa (その他2)	3.9296E-05	4.9415E-04	9.2022E-04	1.1869E-03	1.4301E-03	1.6579E-03	2.0795E-03	2.8221E-03	3.4337E-03
Σa (Zy-4)	2.1088E-04	2.1013E-04	2.0899E-04	2.0841E-04	2.0808E-04	2.0793E-04	2.0793E-04	2.0854E-04	2.0934E-04
Σa (H2O)	4.6470E-04	4.5534E-04	4.3459E-04	4.2135E-04	4.1230E-04	4.0627E-04	3.9977E-04	3.9912E-04	4.0464E-04

 Σa : 一群巨視的断面積 σa : 一群微視的断面積

その他1 : その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2 : O16及び核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

温度状態	ボイド率(%)	燃焼度(GWd/t)								
		0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
HOT	0	1.41554	1.37795	1.32117	1.27271	1.22955	1.19146	1.12465	1.01235	0.92035
HOT	40	1.37611	1.34292	1.28604	1.23633	1.19239	1.15363	1.08591	0.97286	0.88104
HOT	70	1.30999	1.28378	1.22737	1.17655	1.13224	1.09298	1.02470	0.91100	0.81960
Doppler	0	1.38582	1.34957	1.29425	1.24618	1.20300	1.16477	1.09801	0.98710	0.89727
Cold	0	1.51961	1.47085	1.41579	1.37107	1.33053	1.29386	1.22770	1.10978	1.00734

HOT, 0%ボイドより瞬時変化

Pin Cell (MOX) with CASMO4 + L-library

表 1-1.無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度 (GWd/t)	無限増倍率
0.0	1.16079
0.1	1.15395
5.0	1.13585
10.0	1.12143
15.0	1.10840
20.0	1.09614
30.0	1.07307
50.0	1.03080
70.0	0.99262

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

(1/barn/cm)

核種	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
U235	1.2956E-05	1.2945E-05	1.2418E-05	1.1899E-05	1.1399E-05	1.0916E-05	1.0003E-05	8.3781E-06	7.0036E-06
U236	0.0000E+00	3.1843E-09	1.5500E-07	3.0140E-07	4.3939E-07	5.6927E-07	8.0575E-07	1.1929E-06	1.4789E-06
U238	6.3848E-03	6.3844E-03	6.3639E-03	6.3428E-03	6.3215E-03	6.3000E-03	6.2564E-03	6.1672E-03	6.0751E-03
Np237	0.0000E+00	3.1002E-09	1.5383E-07	3.0458E-07	4.5179E-07	5.9521E-07	8.6991E-07	1.3674E-06	1.7918E-06
Pu238	2.7988E-05	2.7974E-05	2.7766E-05	2.8226E-05	2.9044E-05	3.0039E-05	3.2216E-05	3.6489E-05	4.0298E-05
Pu239	7.2335E-04	7.2260E-04	6.9814E-04	6.7417E-04	6.5095E-04	6.2846E-04	5.8559E-04	5.0783E-04	4.4005E-04
Pu240	3.3043E-04	3.3042E-04	3.2983E-04	3.2891E-04	3.2769E-04	3.2617E-04	3.2230E-04	3.1143E-04	2.9686E-04
Pu241	1.2241E-04	1.2248E-04	1.2572E-04	1.2869E-04	1.3133E-04	1.3366E-04	1.3745E-04	1.4198E-04	1.4307E-04
Pu242	8.3892E-05	8.3903E-05	8.4467E-05	8.5104E-05	8.5802E-05	8.6557E-05	8.8228E-05	9.2093E-05	9.6449E-05
Am241	3.5536E-05	3.5520E-05	3.4821E-05	3.4183E-05	3.3611E-05	3.3094E-05	3.2182E-05	3.0623E-05	2.9113E-05
Am242m	0.0000E+00	6.2113E-09	2.7683E-07	4.9367E-07	6.6191E-07	7.9089E-07	9.6019E-07	1.0824E-06	1.0682E-06
Am243	0.0000E+00	4.4146E-08	2.1501E-06	4.1858E-06	6.1128E-06	7.9384E-06	1.1312E-05	1.7106E-05	2.1868E-05
Cm242	0.0000E+00	4.2063E-08	1.5927E-06	2.4659E-06	2.9420E-06	3.2009E-06	3.4192E-06	3.5249E-06	3.5757E-06
Cm243	0.0000E+00	4.8297E-12	9.5868E-09	3.0670E-08	5.5874E-08	8.1400E-08	1.2715E-07	1.9054E-07	2.2648E-07
Cm244	0.0000E+00	3.2457E-11	7.8218E-08	3.0115E-07	6.5218E-07	1.1164E-06	2.3326E-06	5.6250E-06	9.6462E-06
Cm245	0.0000E+00	8.9557E-15	1.0745E-09	8.2046E-09	2.6410E-08	5.9712E-08	1.8344E-07	7.0532E-07	1.6114E-06
Cm246	0.0000E+00	4.3290E-18	3.0749E-12	4.7739E-11	2.3449E-10	7.1938E-10	3.4356E-09	2.3688E-08	8.1662E-08
Mo95	0.0000E+00								
Tc99	0.0000E+00								
Rh103	0.0000E+00	4.3460E-08	2.1392E-06	4.2115E-06	6.2194E-06	8.1650E-06	1.1876E-05	1.8604E-05	2.4443E-05
Cs133	0.0000E+00	5.0903E-08	2.5094E-06	4.9470E-06	7.3144E-06	9.6129E-06	1.4008E-05	2.2018E-05	2.9022E-05
Sm147	0.0000E+00	1.5336E-11	3.4831E-08	1.2658E-07	2.5926E-07	4.2038E-07	7.9116E-07	1.5680E-06	2.2420E-06
Sm149	0.0000E+00	3.3408E-09	3.2209E-07	4.5289E-07	5.0769E-07	5.3150E-07	5.4362E-07	5.2057E-07	4.7789E-07
Sm150	0.0000E+00	1.5543E-10	2.0256E-07	6.3377E-07	1.1565E-06	1.7187E-06	2.8835E-06	5.1946E-06	7.3481E-06
Sm152	0.0000E+00	4.7411E-09	2.4372E-07	4.9199E-07	7.3557E-07	9.6908E-07	1.3952E-06	2.0727E-06	2.5559E-06
Nd143	0.0000E+00	3.5284E-08	1.7544E-06	3.4888E-06	5.2032E-06	6.8976E-06	1.0225E-05	1.6622E-05	2.2649E-05
Nd145	0.0000E+00	2.4007E-08	1.1855E-06	2.3407E-06	3.4662E-06	4.5621E-06	6.6667E-06	1.0533E-05	1.3952E-05
Eu153	0.0000E+00	3.1285E-09	1.7338E-07	3.7989E-07	6.1572E-07	8.7594E-07	1.4485E-06	2.6706E-06	3.8207E-06
Gd155	0.0000E+00	1.0121E-12	2.0718E-09	6.8195E-09	1.2745E-08	1.9015E-08	3.1247E-08	5.4480E-08	8.0362E-08

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

断面積	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma f$ (全核種)	3.0338E-02	3.0162E-02	2.9667E-02	2.9262E-02	2.8892E-02	2.8540E-02	2.7871E-02	2.6634E-02	2.5505E-02
$\nu \sigma f$ (U235)	1.9436E+01	1.9345E+01	1.9287E+01	1.9285E+01	1.9312E+01	1.9355E+01	1.9468E+01	1.9772E+01	2.0160E+01
$\nu \sigma f$ (U238)	3.5867E-01	3.5870E-01	3.5902E-01	3.5929E-01	3.5950E-01	3.5969E-01	3.5998E-01	3.6049E-01	3.6095E-01
$\nu \sigma f$ (Pu238)	3.5977E+00	3.5983E+00	3.6005E+00	3.6021E+00	3.6032E+00	3.6039E+00	3.6048E+00	3.6052E+00	3.6054E+00
$\nu \sigma f$ (Pu239)	2.9126E+01	2.8951E+01	2.9035E+01	2.9236E+01	2.9482E+01	2.9760E+01	3.0391E+01	3.1886E+01	3.3646E+01
$\nu \sigma f$ (Pu240)	2.1154E+00	2.1155E+00	2.1170E+00	2.1181E+00	2.1190E+00	2.1197E+00	2.1208E+00	2.1226E+00	2.1246E+00
$\nu \sigma f$ (Pu241)	4.6564E+01	4.6315E+01	4.6074E+01	4.6006E+01	4.6033E+01	4.6117E+01	4.6393E+01	4.7255E+01	4.8439E+01
$\nu \sigma f$ (Pu242)	1.6248E+00	1.6249E+00	1.6259E+00	1.6266E+00	1.6271E+00	1.6275E+00	1.6280E+00	1.6286E+00	1.6292E+00
$\nu \sigma f$ (Am241)	2.5794E+00	2.5785E+00	2.5779E+00	2.5780E+00	2.5785E+00	2.5794E+00	2.5818E+00	2.5898E+00	2.6014E+00
$\nu \sigma f$ (Am243)	0.0000E+00	1.2750E+00	1.2760E+00	1.2768E+00	1.2774E+00	1.2779E+00	1.2787E+00	1.2800E+00	1.2811E+00
$\nu \sigma f$ (Cm242)	0.0000E+00	3.1541E+00	3.1547E+00	3.1556E+00	3.1566E+00	3.1576E+00	3.1596E+00	3.1640E+00	3.1697E+00
$\nu \sigma f$ (Cm244)	0.0000E+00	3.6160E+00	3.6122E+00	3.6089E+00	3.6059E+00	3.6033E+00	3.5988E+00	3.5923E+00	3.5892E+00

 $\nu \Sigma f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

断面積	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σa (全核種)	2.6135E-02	2.6138E-02	2.6118E-02	2.6094E-02	2.6066E-02	2.6036E-02	2.5973E-02	2.5838E-02	2.5695E-02
σa (U235)	1.1243E+01	1.1198E+01	1.1164E+01	1.1159E+01	1.1169E+01	1.1188E+01	1.1240E+01	1.1386E+01	1.1578E+01
σa (U238)	8.5620E-01	8.5577E-01	8.5445E-01	8.5352E-01	8.5292E-01	8.5250E-01	8.5197E-01	8.5182E-01	8.5317E-01
σa (Pu238)	6.2605E+00	6.2258E+00	6.1958E+00	6.1878E+00	6.1914E+00	6.2016E+00	6.2342E+00	6.3356E+00	6.4731E+00
σa (Pu239)	1.6001E+01	1.5911E+01	1.5967E+01	1.6083E+01	1.6223E+01	1.6381E+01	1.6736E+01	1.7574E+01	1.8560E+01
σa (Pu240)	1.3139E+01	1.3109E+01	1.3012E+01	1.2949E+01	1.2910E+01	1.2889E+01	1.2886E+01	1.3017E+01	1.3294E+01
σa (Pu241)	2.1370E+01	2.1257E+01	2.1156E+01	2.1133E+01	2.1153E+01	2.1197E+01	2.1335E+01	2.1749E+01	2.2306E+01
σa (Pu242)	7.5054E+00	7.4993E+00	7.4453E+00	7.3937E+00	7.3458E+00	7.2992E+00	7.2085E+00	7.0384E+00	6.8812E+00
σa (Am241)	2.1877E+01	2.1821E+01	2.1733E+01	2.1691E+01	2.1682E+01	2.1694E+01	2.1766E+01	2.2061E+01	2.2512E+01
σa (Am243)	0.0000E+00	1.9910E+01	1.9574E+01	1.9277E+01	1.9021E+01	1.8794E+01	1.8414E+01	1.7881E+01	1.7559E+01
σa (Cm242)	0.0000E+00	3.9554E+00	3.9562E+00	3.9587E+00	3.9627E+00	3.9674E+00	3.9774E+00	3.9990E+00	4.0243E+00
σa (Cm244)	0.0000E+00	1.1971E+01	1.1853E+01	1.1750E+01	1.1663E+01	1.1586E+01	1.1459E+01	1.1276E+01	1.1166E+01
Σa (その他1)	0.0000E+00	4.6507E-07	2.1377E-05	3.9449E-05	5.4765E-05	6.7751E-05	8.8145E-05	1.1421E-04	1.2953E-04
Σa (その他2)	4.9282E-05	1.5732E-04	4.5655E-04	6.8893E-04	8.8999E-04	1.0735E-03	1.4076E-03	1.9941E-03	2.5101E-03
Σa (Zy-4)	1.8990E-04	1.8983E-04	1.8985E-04	1.8992E-04	1.9000E-04	1.9008E-04	1.9025E-04	1.9059E-04	1.9092E-04
Σa (H ₂ O)	1.6987E-04	1.6940E-04	1.6871E-04	1.6837E-04	1.6822E-04	1.6821E-04	1.6842E-04	1.6962E-04	1.7150E-04

 Σa : 一群巨視的断面積(1/cm) σa : 一群微視的断面積(barn)

その他1 : その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2 : O16及び核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

温度状態	ボイド率 (%)	燃焼度(GWd/t)								
		0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
HOT	0	1.16079	1.15395	1.13585	1.12143	1.10840	1.09614	1.07307	1.03080	0.99262
HOT	40	1.14893	1.14329	1.12600	1.11169	1.09874	1.08645	1.06277	1.01832	0.97838
HOT	70	1.14102	1.13685	1.12021	1.10589	1.09264	1.07995	1.05563	1.00952	0.96671
Doppler	0	1.13427	1.12779	1.11057	1.09676	1.08423	1.07245	1.05039	1.00943	0.97249
Cold	0	1.23544	1.22329	1.20121	1.18513	1.17157	1.15913	1.13609	1.09450	1.05742

HOT, 0%ボイドより瞬時変化

PWR (UO_2) with CASMO4 + L-library

表 1-1 無限増倍率、局所ピーキング係数(核分裂率)の燃焼特性

燃焼度 (GWd/t)	無限増倍率	局所 ピーキング係数
0	1.12218	1.152
0.1	1.09788	1.153
5	1.09652	1.144
10	1.10297	1.133
15	1.11363	1.125
20	1.12857	1.116
30	1.12981	1.096
50	1.01235	1.068
70	0.90957	1.045

表 2-1 核分裂率分布

燃焼度= 0 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.102	0.290	0.000	1.143	1.107	0.000	1.114	1.115
2	1.102	1.086	1.074	1.129	1.065	1.041	0.291	1.076	1.111
3	0.290	1.074	1.116	1.122	0.288	1.054	1.103	1.113	1.118
4	0.000	1.129	1.122	0.000	1.131	1.141	0.000	1.150	1.122
5	1.143	1.065	0.288	1.131	1.152	1.137	0.293	1.072	1.107
6	1.107	1.041	1.054	1.141	1.137	0.000	1.045	1.058	1.093
7	0.000	0.291	1.103	0.000	0.293	1.045	0.288	1.037	1.089
8	1.114	1.076	1.113	1.150	1.072	1.058	1.037	1.069	1.095
9	1.115	1.111	1.118	1.122	1.107	1.093	1.089	1.095	1.105

燃焼度= 0.1 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.104	0.297	0.000	1.143	1.107	0.000	1.112	1.108
2	1.104	1.087	1.075	1.130	1.067	1.042	0.297	1.073	1.106
3	0.297	1.075	1.116	1.124	0.295	1.055	1.104	1.111	1.113
4	0.000	1.130	1.124	0.000	1.133	1.141	0.000	1.148	1.117
5	1.143	1.067	0.295	1.133	1.153	1.139	0.300	1.072	1.104
6	1.107	1.042	1.055	1.141	1.139	0.000	1.048	1.057	1.090
7	0.000	0.297	1.104	0.000	0.300	1.048	0.295	1.036	1.086
8	1.112	1.073	1.111	1.148	1.072	1.057	1.036	1.066	1.091
9	1.108	1.106	1.113	1.117	1.104	1.090	1.086	1.091	1.101

燃焼度= 5 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.108	0.382	0.000	1.137	1.107	0.000	1.103	1.085
2	1.108	1.086	1.076	1.126	1.068	1.049	0.379	1.066	1.083
3	0.382	1.076	1.109	1.120	0.372	1.058	1.101	1.095	1.088
4	0.000	1.126	1.120	0.000	1.128	1.135	0.000	1.130	1.091
5	1.137	1.068	0.372	1.128	1.144	1.138	0.386	1.063	1.079
6	1.107	1.049	1.058	1.135	1.138	0.000	1.053	1.044	1.065
7	0.000	0.379	1.101	0.000	0.386	1.053	0.365	1.021	1.058
8	1.103	1.066	1.095	1.130	1.063	1.044	1.021	1.042	1.060
9	1.085	1.083	1.088	1.091	1.079	1.065	1.058	1.060	1.066

燃焼度= 10 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.106	0.484	0.000	1.125	1.103	0.000	1.090	1.060
2	1.106	1.081	1.075	1.118	1.068	1.053	0.476	1.057	1.057
3	0.484	1.075	1.097	1.114	0.465	1.060	1.096	1.076	1.061
4	0.000	1.118	1.114	0.000	1.121	1.125	0.000	1.110	1.064
5	1.125	1.068	0.465	1.121	1.131	1.133	0.490	1.053	1.053
6	1.103	1.053	1.060	1.125	1.133	0.000	1.058	1.030	1.038
7	0.000	0.476	1.096	0.000	0.490	1.058	0.446	1.007	1.029
8	1.090	1.057	1.076	1.110	1.053	1.030	1.007	1.017	1.027
9	1.060	1.057	1.061	1.064	1.053	1.038	1.029	1.027	1.031

燃焼度= 15 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.101	0.594	0.000	1.111	1.096	0.000	1.075	1.035
2	1.101	1.075	1.072	1.108	1.066	1.055	0.581	1.046	1.032
3	0.594	1.072	1.084	1.105	0.567	1.060	1.088	1.058	1.034
4	0.000	1.108	1.105	0.000	1.113	1.114	0.000	1.088	1.036
5	1.111	1.066	0.567	1.113	1.115	1.125	0.601	1.042	1.026
6	1.096	1.055	1.060	1.114	1.125	0.000	1.062	1.016	1.011
7	0.000	0.581	1.088	0.000	0.601	1.062	0.533	0.993	1.001
8	1.075	1.046	1.058	1.088	1.042	1.016	0.993	0.993	0.996
9	1.035	1.032	1.034	1.036	1.026	1.011	1.001	0.996	0.997

燃焼度= 20 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.096	0.707	0.000	1.095	1.088	0.000	1.061	1.011
2	1.096	1.068	1.067	1.097	1.062	1.057	0.689	1.036	1.007
3	0.707	1.067	1.070	1.096	0.671	1.060	1.081	1.039	1.008
4	0.000	1.097	1.096	0.000	1.103	1.101	0.000	1.067	1.009
5	1.095	1.062	0.671	1.103	1.098	1.116	0.713	1.031	1.000
6	1.088	1.057	1.060	1.101	1.116	0.000	1.064	1.002	0.985
7	0.000	0.689	1.081	0.000	0.713	1.064	0.621	0.978	0.973
8	1.061	1.036	1.039	1.067	1.031	1.002	0.978	0.969	0.965
9	1.011	1.007	1.008	1.009	1.000	0.985	0.973	0.965	0.963

燃焼度= 30 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.082	0.837	0.000	1.071	1.074	0.000	1.040	0.981
2	1.082	1.054	1.057	1.077	1.057	1.057	0.827	1.022	0.977
3	0.837	1.057	1.050	1.082	0.818	1.059	1.069	1.015	0.976
4	0.000	1.077	1.082	0.000	1.086	1.080	0.000	1.036	0.976
5	1.071	1.057	0.818	1.086	1.073	1.096	0.838	1.016	0.969
6	1.074	1.057	1.059	1.080	1.096	0.000	1.067	0.987	0.956
7	0.000	0.827	1.069	0.000	0.838	1.067	0.775	0.970	0.943
8	1.040	1.022	1.015	1.036	1.016	0.987	0.970	0.946	0.931
9	0.981	0.977	0.976	0.976	0.969	0.956	0.943	0.931	0.925

燃焼度= 50 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.062	0.854	0.000	1.054	1.056	0.000	1.032	0.992
2	1.062	1.047	1.049	1.058	1.048	1.048	0.846	1.022	0.989
3	0.854	1.049	1.045	1.061	0.844	1.049	1.051	1.016	0.988
4	0.000	1.058	1.061	0.000	1.062	1.057	0.000	1.028	0.988
5	1.054	1.048	0.844	1.062	1.057	1.068	0.854	1.016	0.983
6	1.056	1.048	1.049	1.057	1.068	0.000	1.049	0.995	0.972
7	0.000	0.846	1.051	0.000	0.854	1.049	0.814	0.983	0.962
8	1.032	1.022	1.016	1.028	1.016	0.995	0.983	0.964	0.951
9	0.992	0.989	0.988	0.988	0.983	0.972	0.962	0.951	0.946

燃焼度= 70 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.043	0.875	0.000	1.037	1.038	0.000	1.025	1.002
2	1.043	1.037	1.037	1.039	1.036	1.037	0.869	1.022	1.000
3	0.875	1.037	1.035	1.041	0.869	1.036	1.034	1.017	1.000
4	0.000	1.039	1.041	0.000	1.040	1.036	0.000	1.022	0.998
5	1.037	1.036	0.869	1.040	1.040	1.045	0.876	1.016	0.995
6	1.038	1.037	1.036	1.036	1.045	0.000	1.033	1.002	0.988
7	0.000	0.869	1.034	0.000	0.876	1.033	0.847	0.994	0.982
8	1.025	1.022	1.017	1.022	1.016	1.002	0.994	0.983	0.973
9	1.002	1.000	1.000	0.998	0.995	0.988	0.982	0.973	0.969

表 2-2 無限増倍率のボイド率、温度瞬時変化特性

温度状態	ボイド率 (%)	燃焼度(GWd/t)								
		0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
HOT	0	1.12218	1.09788	1.09652	1.10297	1.11363	1.12857	1.12981	1.01235	0.90957
Doppler	0	1.10067	1.07724	1.07624	1.08213	1.09172	1.10537	1.10445	0.98850	0.88815
Cold	0	1.21618	1.18139	1.17032	1.17287	1.18251	1.19836	1.21812	1.09292	0.97464

PWR (MOX) with CASMO4 + L-library

表 1-1 無限増倍率、局所ピーキング係数(核分裂率)の燃焼特性

燃焼度 (GWd/t)	無限増倍率	局所 ピーキング係数
0	1.1803	1.151
0.1	1.17221	1.151
5	1.15292	1.149
10	1.1381	1.147
15	1.12485	1.145
20	1.11229	1.143
30	1.08801	1.139
50	1.04284	1.128
70	1.00185	1.119

表 2-1 核分裂率分布

燃焼度= 0 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.083	1.084	0.000	1.087	1.094	0.000	0.944	0.867
2	1.083	1.028	1.032	1.091	1.035	1.034	1.093	1.043	0.863
3	1.084	1.032	1.035	1.090	1.033	1.043	1.098	1.046	0.864
4	0.000	1.091	1.090	0.000	1.106	1.107	0.000	0.956	0.869
5	1.087	1.035	1.033	1.106	1.102	1.151	1.143	1.045	0.868
6	1.094	1.034	1.043	1.107	1.151	0.000	1.101	1.006	0.863
7	0.000	1.093	1.098	0.000	1.143	1.101	1.041	0.878	0.893
8	0.944	1.043	1.046	0.956	1.045	1.006	0.878	0.911	0.664
9	0.867	0.863	0.864	0.869	0.868	0.863	0.893	0.664	0.695

燃焼度= 0.1 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.084	1.085	0.000	1.088	1.094	0.000	0.944	0.866
2	1.084	1.029	1.033	1.091	1.036	1.034	1.093	1.043	0.863
3	1.085	1.033	1.036	1.090	1.034	1.044	1.098	1.046	0.864
4	0.000	1.091	1.090	0.000	1.106	1.106	0.000	0.955	0.869
5	1.088	1.036	1.034	1.106	1.102	1.151	1.142	1.045	0.868
6	1.094	1.034	1.044	1.106	1.151	0.000	1.101	1.006	0.863
7	0.000	1.093	1.098	0.000	1.142	1.101	1.041	0.878	0.892
8	0.944	1.043	1.046	0.955	1.045	1.006	0.878	0.910	0.663
9	0.866	0.863	0.864	0.869	0.868	0.863	0.892	0.663	0.693

燃焼度= 5 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.083	1.084	0.000	1.087	1.093	0.000	0.943	0.867
2	1.083	1.029	1.034	1.090	1.036	1.035	1.092	1.044	0.864
3	1.084	1.034	1.037	1.089	1.035	1.044	1.097	1.046	0.865
4	0.000	1.090	1.089	0.000	1.105	1.105	0.000	0.954	0.870
5	1.087	1.036	1.035	1.105	1.101	1.149	1.141	1.045	0.869
6	1.093	1.035	1.044	1.105	1.149	0.000	1.100	1.007	0.864
7	0.000	1.092	1.097	0.000	1.141	1.100	1.041	0.879	0.892
8	0.943	1.044	1.046	0.954	1.045	1.007	0.879	0.909	0.666
9	0.867	0.864	0.865	0.870	0.869	0.864	0.892	0.666	0.695

燃焼度= 10 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.082	1.083	0.000	1.086	1.092	0.000	0.943	0.868
2	1.082	1.030	1.034	1.089	1.036	1.035	1.091	1.043	0.865
3	1.083	1.034	1.037	1.088	1.035	1.044	1.096	1.046	0.867
4	0.000	1.089	1.088	0.000	1.104	1.104	0.000	0.953	0.871
5	1.086	1.036	1.035	1.104	1.100	1.147	1.139	1.045	0.870
6	1.092	1.035	1.044	1.104	1.147	0.000	1.099	1.007	0.865
7	0.000	1.091	1.096	0.000	1.139	1.099	1.041	0.880	0.893
8	0.943	1.043	1.046	0.953	1.045	1.007	0.880	0.909	0.670
9	0.868	0.865	0.867	0.871	0.870	0.865	0.893	0.670	0.697

燃焼度= 15 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.081	1.082	0.000	1.085	1.091	0.000	0.943	0.870
2	1.081	1.030	1.034	1.088	1.036	1.035	1.090	1.043	0.867
3	1.082	1.034	1.037	1.087	1.035	1.044	1.095	1.046	0.868
4	0.000	1.088	1.087	0.000	1.103	1.103	0.000	0.953	0.872
5	1.085	1.036	1.035	1.103	1.099	1.145	1.137	1.045	0.871
6	1.091	1.035	1.044	1.103	1.145	0.000	1.098	1.007	0.866
7	0.000	1.090	1.095	0.000	1.137	1.098	1.041	0.909	0.893
8	0.943	1.043	1.046	0.953	1.045	1.007	0.881	0.910	0.673
9	0.870	0.867	0.868	0.872	0.871	0.866	0.893	0.673	0.700

燃焼度= 20 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.080	1.081	0.000	1.084	1.090	0.000	0.943	0.871
2	1.080	1.030	1.034	1.087	1.036	1.035	1.090	1.043	0.869
3	1.081	1.034	1.037	1.086	1.036	1.044	1.094	1.046	0.870
4	0.000	1.087	1.086	0.000	1.101	1.102	0.000	0.952	0.874
5	1.084	1.036	1.036	1.101	1.098	1.143	1.135	1.045	0.872
6	1.090	1.035	1.044	1.102	1.143	0.000	1.096	1.008	0.867
7	0.000	1.090	1.094	0.000	1.135	1.096	1.041	0.882	0.894
8	0.943	1.043	1.046	0.952	1.045	1.008	0.882	0.910	0.676
9	0.871	0.869	0.870	0.874	0.872	0.867	0.894	0.676	0.702

燃焼度= 30 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.078	1.079	0.000	1.081	1.088	0.000	0.943	0.874
2	1.078	1.030	1.034	1.084	1.037	1.036	1.087	1.043	0.872
3	1.079	1.034	1.038	1.084	1.037	1.044	1.091	1.045	0.873
4	0.000	1.084	1.084	0.000	1.099	1.099	0.000	0.951	0.877
5	1.081	1.037	1.037	1.099	1.095	1.139	1.131	1.045	0.875
6	1.088	1.036	1.044	1.099	1.139	0.000	1.094	1.009	0.870
7	0.000	1.087	1.091	0.000	1.131	1.094	1.041	0.884	0.896
8	0.943	1.043	1.045	0.951	1.045	1.009	0.884	0.911	0.682
9	0.874	0.872	0.873	0.877	0.875	0.870	0.896	0.682	0.706

燃焼度= 50 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.073	1.075	0.000	1.076	1.082	0.000	0.944	0.881
2	1.073	1.032	1.035	1.079	1.037	1.037	1.082	1.042	0.880
3	1.075	1.035	1.039	1.080	1.038	1.045	1.086	1.044	0.881
4	0.000	1.079	1.080	0.000	1.093	1.093	0.000	0.950	0.883
5	1.076	1.037	1.038	1.093	1.090	1.128	1.121	1.044	0.882
6	1.082	1.037	1.045	1.093	1.128	0.000	1.088	1.011	0.877
7	0.000	1.082	1.086	0.000	1.121	1.088	1.040	0.890	0.899
8	0.944	1.042	1.044	0.950	1.044	1.011	0.890	0.912	0.696
9	0.881	0.880	0.881	0.883	0.882	0.877	0.899	0.696	0.716

燃焼度= 70 GWd/t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.068	1.071	0.000	1.071	1.077	0.000	0.944	0.888
2	1.068	1.033	1.035	1.074	1.037	1.037	1.076	1.040	0.887
3	1.071	1.035	1.040	1.075	1.039	1.045	1.080	1.043	0.888
4	0.000	1.074	1.075	0.000	1.088	1.088	0.000	0.949	0.890
5	1.071	1.037	1.039	1.088	1.085	1.119	1.112	1.043	0.888
6	1.077	1.037	1.045	1.088	1.119	0.000	1.082	1.013	0.883
7	0.000	1.076	1.080	0.000	1.112	1.082	1.039	0.896	0.903
8	0.944	1.040	1.043	0.949	1.043	1.013	0.896	0.914	0.710
9	0.888	0.887	0.888	0.890	0.888	0.883	0.903	0.710	0.726

表 2-2 無限増倍率のボイド率、温度瞬時変化特性

温度状態	ボイド率 (%)	燃焼度(GWd/t)								
		0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
HOT	0	1.18030	1.17221	1.15292	1.13810	1.12485	1.11229	1.08801	1.04284	1.00185
Doppler	0	1.15416	1.14645	1.12801	1.11379	1.10108	1.08898	1.06558	1.02187	0.98203
Cold	0	1.26448	1.25039	1.22698	1.21073	1.19686	1.18397	1.15969	1.11503	1.07455

8(2). CASMO-4 コードの概要とベンチマーク計算手法（原燃工：その 2）

1. コード（あるいはコードシステム）名

CASMO-4

2. コード（計算手法）の概要

70 群もしくは 40 群の群定数を少数群（通常 7 群～16 群）に縮約する。少数群群定数を使
用し、Characteristics 法（MOC: 特性法）による 2 次元輸送計算により集合体内中性子束分布、
無限増倍係数等を得る。

3. 核データライブラリ名及びベースとなっている核データ（JENDL-3.2 等）

L ライブラリ（CASMO-4 用ライブラリの一つ、70 群構造と 40 群構造が用意されている）
ENDF/B-V ベース

4. 計算概要（群構造、空間メッシュ、ヒストリ数等、その他特記事項）

70 群 L ライブラリを使用し、これを 16 群に縮約し、Characteristics 法（MOC: 特性法）に
よる 2 次元輸送計算を実施した。MOC 輸送計算における空間メッシュは CASMO-4 の自動設
定によるもの（コードのデフォルトの空間メッシュを使用）である。

BWR (MOX) with CASMO4 + L-library

表 3-1 無限増倍率、局所ピーピング係数の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーピング係数*
0	1.06769	1.421
0.1	1.05682	1.416
5	1.06347	1.394
10	1.08399	1.369
15	1.10705	1.337
20	1.10996	1.306
30	1.07813	1.255
50	1.01163	1.256
70	0.95272	1.254

* 核分裂率

9. NULIF コードの概要とベンチマーク計算手法（原燃工）

1. コード名

改良 NULIF コード

2. コードの概要

改良 NULIF コードは、UO₂燃料、MOX 燃料等の燃料棒セル並びに非燃料セルに含まれる各元素の微視的少數群断面積を求めるものである。

3. 核データライブラリー

ENDF/B-V をもとに作成されている。

4. 計算概要

- ・ 群構造 : 94 群
- ・ 計算モデル : UO₂燃料ペレット・被覆管+ギャップ・冷却材の 3 領域
- ・ 計算手法 : 熱群の損失因子は ABH 法で計算。高速群の空間依存に対してはバックリング近似、角度依存に対しては P1 近似を用いる。

5. 参考文献

「PWR 核設計手法と信頼性(改良 NULIF システム)」、NFK-8102、原子燃料工業株式会社、平成 7 年

Pin Cell (UO_2) with NULIF + ENDF/B-V

表 1-1.無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度 (GWd/t)	無限増倍率
0.0	1.40931
0.1	1.37219
5.0	1.31589
10.0	1.26783
15.0	1.22540
20.0	1.18784
30.0	1.12266
50.0	1.01398
70.0	0.92539

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

(1/barn/cm)

核種	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
U235	5.0385E-04	5.0289E-04	4.5784E-04	4.1559E-04	3.7649E-04	3.4019E-04	2.7517E-04	1.7191E-04	9.9912E-05
U236	3.3325E-31	2.0358E-07	9.7087E-06	1.8475E-05	2.6413E-05	3.3600E-05	4.5863E-05	6.2776E-05	7.0792E-05
U238	7.1562E-03	7.1558E-03	7.1351E-03	7.1131E-03	7.0901E-03	7.0663E-03	7.0162E-03	6.9059E-03	6.7822E-03
Np237	3.3325E-31	3.7145E-10	2.2987E-07	6.8488E-07	1.3066E-06	2.0537E-06	3.8015E-06	7.6702E-06	1.1199E-05
Pu238	3.3325E-31	2.2766E-13	8.1932E-09	4.8097E-08	1.3821E-07	2.9420E-07	8.5275E-07	3.1388E-06	6.8724E-06
Pu239	3.3325E-31	1.2899E-07	1.5366E-05	2.7534E-05	3.7141E-05	4.4835E-05	5.5886E-05	6.6999E-05	7.0466E-05
Pu240	3.3325E-31	2.4030E-10	8.1014E-07	2.5153E-06	4.5770E-06	6.8073E-06	1.1398E-05	1.9931E-05	2.6512E-05
Pu241	3.3325E-31	8.9760E-13	1.5916E-07	9.0440E-07	2.2015E-06	3.8458E-06	7.6056E-06	1.4653E-05	1.9575E-05
Pu242	3.3325E-31	3.3572E-16	3.2079E-09	3.8576E-08	1.4767E-07	3.5983E-07	1.1459E-06	4.1412E-06	8.5429E-06
Am241	3.3325E-31	9.3136E-17	8.7615E-10	1.0233E-08	3.7655E-08	8.7665E-08	2.5107E-07	7.0405E-07	1.0891E-06
Am242m	3.3325E-31	1.0378E-20	4.2907E-12	8.8272E-11	4.3239E-10	1.1987E-09	4.1769E-09	1.3595E-08	2.1829E-08
Am243	3.3325E-31	9.6694E-20	5.0565E-11	1.2981E-09	7.8065E-09	2.6248E-08	1.2979E-07	7.7035E-07	2.0610E-06
Cm242	3.3325E-31	2.4979E-20	2.8513E-11	6.3818E-10	3.3278E-09	9.8159E-09	3.8113E-08	1.5226E-07	2.9524E-07
Cm243	3.3325E-31	9.1342E-25	6.1091E-14	2.9131E-12	2.3924E-11	9.7430E-11	5.9576E-10	4.0662E-09	1.0711E-08
Cm244	3.3325E-31	4.8386E-23	1.3550E-12	7.3810E-11	6.9983E-10	3.2747E-09	2.6137E-08	2.8884E-07	1.1725E-06
Cm245	3.3325E-31	6.9028E-27	1.0042E-14	1.1385E-12	1.6693E-11	1.0673E-10	1.3195E-09	2.4754E-08	1.3706E-07
Cm246	3.3325E-31	1.5319E-30	3.8813E-17	9.1120E-15	2.0850E-13	1.8518E-12	3.7558E-11	1.4237E-09	1.3458E-08
Mo95	0.0000E+00								
Tc99	0.0000E+00								
Rh103	3.3325E-31	2.6102E-08	1.3152E-06	2.6293E-06	3.9207E-06	5.1780E-06	7.5628E-06	1.1717E-05	1.4977E-05
Cs133	3.3325E-31	5.4075E-08	2.6662E-06	5.2534E-06	7.7580E-06	1.0177E-05	1.4746E-05	2.2754E-05	2.9189E-05
Sm147	0.0000E+00								
Sm149	3.3325E-31	2.7202E-09	5.8221E-08	6.4933E-08	6.9502E-08	7.2425E-08	7.4529E-08	7.0724E-08	6.4003E-08
Sm150	3.3325E-31	1.8190E-10	3.8958E-07	8.8122E-07	1.4037E-06	1.9443E-06	3.0415E-06	5.1186E-06	6.8471E-06
Sm152	3.3325E-31	2.3120E-09	1.6247E-07	3.6660E-07	5.7073E-07	7.6045E-07	1.0880E-06	1.5808E-06	1.9314E-06
Nd143	3.3325E-31	4.7260E-08	2.2900E-06	4.4431E-06	6.4710E-06	8.3792E-06	1.1849E-05	1.7431E-05	2.1254E-05
Nd145	3.3325E-31	3.1548E-08	1.5413E-06	3.0132E-06	4.4207E-06	5.7659E-06	8.2744E-06	1.2576E-05	1.5940E-05
Eu153	3.3325E-31	1.4280E-09	8.8439E-08	2.1905E-07	3.9233E-07	6.0193E-07	1.0955E-06	2.1833E-06	3.1793E-06
Gd155	0.0000E+00								

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

断面積	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma f$ (全核種)	3.2106E-02	3.1326E-02	3.0156E-02	2.9112E-02	2.8158E-02	2.7290E-02	2.5741E-02	2.3079E-02	2.0879E-02
$\nu \sigma f$ (U235)	5.9404E+01	5.7908E+01	5.5140E+01	5.3492E+01	5.2448E+01	5.1810E+01	5.1312E+01	5.1863E+01	5.3021E+01
$\nu \sigma f$ (U238)	3.0390E-01	3.0454E-01	3.0702E-01	3.0894E-01	3.1047E-01	3.1174E-01	3.1377E-01	3.1692E-01	3.1977E-01
$\nu \sigma f$ (Pu238)	0.0000E+00	5.9828E+00	5.9461E+00	5.9319E+00	5.9265E+00	5.9266E+00	5.9374E+00	5.9789E+00	6.0251E+00
$\nu \sigma f$ (Pu239)	0.0000E+00	1.9136E+02	1.7441E+02	1.6352E+02	1.5617E+02	1.5107E+02	1.4502E+02	1.4119E+02	1.4151E+02
$\nu \sigma f$ (Pu240)	0.0000E+00	1.9333E+00	1.9381E+00	1.9352E+00	1.9322E+00	1.9301E+00	1.9277E+00	1.9274E+00	1.9309E+00
$\nu \sigma f$ (Pu241)	0.0000E+00	1.9710E+02	1.8398E+02	1.7584E+02	1.7042E+02	1.6675E+02	1.6273E+02	1.6134E+02	1.6312E+02
$\nu \sigma f$ (Pu242)	0.0000E+00	1.4641E+00	1.4739E+00	1.4812E+00	1.4868E+00	1.4911E+00	1.4977E+00	1.5065E+00	1.5140E+00
$\nu \sigma f$ (Am241)	0.0000E+00	3.2356E+00	3.1621E+00	3.1133E+00	3.0801E+00	3.0566E+00	3.0275E+00	3.0052E+00	3.0033E+00
$\nu \sigma f$ (Am243)	0.0000E+00	1.7060E+00	1.7188E+00	1.7285E+00	1.7359E+00	1.7419E+00	1.7509E+00	1.7638E+00	1.7750E+00
$\nu \sigma f$ (Cm242)	0.0000E+00	1.7833E+00	1.7734E+00	1.7694E+00	1.7679E+00	1.7682E+00	1.7721E+00	1.7873E+00	1.8061E+00
$\nu \sigma f$ (Cm244)	0.0000E+00	3.6337E+00	3.6537E+00	3.6690E+00	3.6808E+00	3.6901E+00	3.7043E+00	3.7237E+00	3.7380E+00

 $\nu \Sigma f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

断面積	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σa (全核種)	2.2781E-02	2.2829E-02	2.2917E-02	2.2962E-02	2.2978E-02	2.2975E-02	2.2929E-02	2.2761E-02	2.2562E-02
σa (U235)	3.0852E+01	3.0135E+01	2.8813E+01	2.8036E+01	2.7551E+01	2.7262E+01	2.7061E+01	2.7399E+01	2.8014E+01
σa (U238)	9.0549E-01	9.0403E-01	9.0263E-01	9.0251E-01	9.0299E-01	9.0386E-01	9.0638E-01	9.1309E-01	9.2037E-01
σa (Pu238)	0.0000E+00	1.8263E+01	1.7468E+01	1.7032E+01	1.6768E+01	1.6618E+01	1.6533E+01	1.6793E+01	1.7205E+01
σa (Pu239)	0.0000E+00	1.0618E+02	9.6561E+01	9.0351E+01	8.6151E+01	8.3222E+01	7.9715E+01	7.7361E+01	7.7370E+01
σa (Pu240)	0.0000E+00	1.9125E+02	1.7516E+02	1.5071E+02	1.3068E+02	1.1551E+02	9.5266E+01	7.4885E+01	6.5522E+01
σa (Pu241)	0.0000E+00	9.1449E+01	8.5214E+01	8.1331E+01	7.8740E+01	7.6981E+01	7.5033E+01	7.4298E+01	7.5073E+01
σa (Pu242)	0.0000E+00	2.3945E+01	2.3917E+01	2.3861E+01	2.3749E+01	2.3567E+01	2.2994E+01	2.1259E+01	1.9271E+01
σa (Am241)	0.0000E+00	8.0101E+01	7.5143E+01	7.1740E+01	6.9346E+01	6.7602E+01	6.5323E+01	6.3158E+01	6.2253E+01
σa (Am243)	0.0000E+00	4.8772E+01	4.8294E+01	4.7758E+01	4.7245E+01	4.6757E+01	4.5839E+01	4.4097E+01	4.2424E+01
σa (Cm242)	0.0000E+00	4.3568E+00	4.3411E+00	4.3359E+00	4.3348E+00	4.3362E+00	4.3436E+00	4.3665E+00	4.3890E+00
σa (Cm244)	0.0000E+00	1.6878E+01	1.6944E+01	1.6993E+01	1.7028E+01	1.7055E+01	1.7096E+01	1.7144E+01	1.7144E+01
Σa (その他1)	0.0000E+00	1.9076E-06	8.9289E-05	1.6623E-04	2.3542E-04	2.9919E-04	4.1416E-04	6.0207E-04	7.3272E-04
Σa (その他2)	5.6050E-05	4.9968E-04	8.8770E-04	1.1277E-03	1.3430E-03	1.5413E-03	1.9017E-03	2.5228E-03	3.0348E-03
Σa (Zy-4)	2.3626E-04	2.3554E-04	2.3447E-04	2.3393E-04	2.3363E-04	2.3348E-04	2.3345E-04	2.3385E-04	2.3428E-04
Σa (H2O)	4.6384E-04	4.5430E-04	4.3348E-04	4.2016E-04	4.1116E-04	4.0511E-04	3.9870E-04	3.9733E-04	4.0102E-04

 Σa : 一群巨視的断面積(1/cm) σa : 一群微視的断面積(barn)

その他1 : その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2 : O16及び核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

温度状態	ボイド率 (%)	燃焼度(GWd/t)								
		0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
HOT	0	1.40931	1.37219	1.31589	1.26783	1.22540	1.18784	1.12266	1.01398	0.92539
HOT	40	1.36755	1.33508	1.27924	1.23054	1.18777	1.15001	1.08459	0.97588	0.88793
HOT	70	1.29733	1.27229	1.21811	1.16940	1.12691	1.08945	1.02442	0.91626	0.82947
Doppler	0	1.38002	1.34423	1.28934	1.24167	1.19918	1.16149	1.09635	0.98903	0.90254
Cold	0	1.51967	1.47102	1.41585	1.37071	1.33016	1.29347	1.22764	1.11132	1.01044

HOT, 0%ボイドより瞬時変化

10. CASMO-4 コードの概要とベンチマーク計算手法 (NUPEC)

1. 計算手法の概要

CASMO-4/SIMULATE-3 は、米国 Studsvik 社において長期にわたって開発された炉心核特性解析コードシステムであり、BNL、EPRI 等の公国立研究機関、アメリカの電力会社約 30 社や、日本を含む世界各国の数十の電力会社や研究機関において利用実績がある。

CASMO-4 は、多群輸送理論を用いて BWR 又は PWR 燃料集合体の燃焼特性及び核特性を解析するコードである。CASMO-4 は現在の軽水炉の燃料集合体によく見られる非均質性の強い燃料集合体の解析に適用することができる。

燃料集合体を対象として、燃料棒の寸法や組成、配置、ウォーターロッド寸法等の入力と、中性子エネルギーが 70 群からなる核種ごとの中性子断面積のライブラリを用いて、その燃料集合体内で空間及びエネルギーで一均質化した 2 群（核）定数を作成する。

以下に CASMO-4 の特徴を示す。

- (1) ENDF/B-IV 又は ENDF/B-V に基づく 70 群の断面積データを用いる。共鳴計算方法としては、NR 近似を使用している。
- (2) ガドリニアの吸収断面積は、CASMO-3 までは、あらかじめ MICBURN-3 コードにより計算した実効断面積を使用して計算していたが、CASMO-4 では直接計算できるようになった。
- (3) 群縮約及び燃料ピンセルの均質化に必要となる詳細な中性子スペクトルを得るために、それぞれの燃料ピンセルごとに 70 群での衝突確率計算を行う。
- (4) 2 次元計算においては、最大 40 群までの Characteristics 法による輸送計算を行うことにより、燃料集合体の非均質性を正確に取り扱うことができる。
- (5) 各燃料棒及び可燃吸収棒に対して燃焼計算を実行する。
- (6) 燃焼計算では予測子—修正子法を採用し、燃焼ステップを少なくできるようにしている。
- (7) CASMO-4 は単一の集合体又は複数の集合体に対して行った輸送計算の結果より、中性子束の不連続因子を計算し、集合体間の非均質性を考慮する計算に使用する。
- (8) PWR のバッフル板と反射体の近傍でのスペクトルの影響を考慮するために、バッフル板／反射体モデルが組み込まれている。

2. 断面積ライブラリ

CASMO-4 コードで使用するライブラリは ENDF/B-IV を基本とする複数の評価済み核データファイルから処理されたもので、全 108 核種に対する断面積データが 70 群又は 40 群構造(上限エネルギー 10MeV) で供給されている。但し、最新バージョンからは、70 群ライブラリのみが処理可能となっている。

ライブラリの温度点として、300K が全核種共通に用意されており、重要な核種については、複数（例えば ^{239}Pu ～ ^{242}Pu では 300、600、900、1500K の 4 種類）が用意されている。

3. 燃焼チェーンモデル

重核種については 14 種類、FP 核種については 18 種類、可燃性毒物については 10 種類の燃焼チェーンモデルを設定している。

BWR (UO_2) with CASMO4 + L-library

表 3-1 無限増倍率、局所ピーピング係数の燃焼特性

燃焼度 (GWd/t)	無限増倍係数	局所ピーピング係数 *
0.0	1.0447	1.403
0.1	1.0253	1.398
5.0	1.0484	1.341
10.0	1.0819	1.280
15.0	1.1259	1.217
20.0	1.1694	1.159
30.0	1.1233	1.124
50.0	0.9796	1.096
70.0	0.8489	1.070

* 核分裂率

表 3-2 核分裂率分布の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)= 0

	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓		1.233								
1		1.233								
2		1.247	1.261							
3		1.262	0.364	0.791						
4		1.402	0.965	0.353	1.135					
5		1.382	1.024	1.032	0.000	0.000				
6		1.403	0.968	0.361	0.000	0.000	1.135			
7		1.263	0.366	0.827	0.361	1.032	0.353	0.790		
8		1.248	1.265	0.366	0.967	1.023	0.964	0.364	1.258	
9		1.233	1.247	1.261	1.401	1.380	1.399	1.259	1.244	1.230

燃焼度(GWd/t)= 0.1

	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓		1.232								
1		1.232								
2		1.243	1.255							
3		1.258	0.371	0.795						
4		1.397	0.964	0.359	1.141					
5		1.377	1.022	1.036	0.000	0.000				
6		1.398	0.967	0.369	0.000	0.000	1.141			
7		1.259	0.373	0.832	0.369	1.035	0.359	0.794		
8		1.244	1.259	0.372	0.966	1.021	0.963	0.371	1.253	
9		1.232	1.243	1.258	1.396	1.375	1.395	1.256	1.240	1.229

燃焼度(GWd/t)= 5

	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓		1.185								
1		1.185								
2		1.190	1.214							
3		1.213	0.478	0.828						
4		1.338	0.966	0.446	1.147					
5		1.321	1.009	1.044	0.000	0.000				
6		1.341	0.973	0.476	0.000	0.000	1.147			
7		1.215	0.483	0.871	0.476	1.044	0.445	0.827		
8		1.192	1.219	0.483	0.972	1.008	0.965	0.477	1.211	
9		1.186	1.191	1.214	1.339	1.319	1.336	1.210	1.188	1.183

燃焼度(GWd/t)= 10

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
i ↓	1.104								
j →	1.124	1.180							
3	1.159	0.604	0.866						
4	1.277	0.970	0.547	1.144					
5	1.260	0.997	1.048	0.000	0.000				
6	1.280	0.981	0.606	0.000	0.000	1.144			
7	1.164	0.615	0.915	0.606	1.048	0.547	0.865		
8	1.127	1.188	0.615	0.980	0.996	0.969	0.602	1.178	
9	1.106	1.126	1.162	1.279	1.258	1.275	1.157	1.121	1.102

燃焼度(GWd/t)= 15

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
i ↓	1.017								
j →	1.051	1.145							
3	1.103	0.736	0.907						
4	1.212	0.973	0.659	1.135					
5	1.196	0.984	1.049	0.000	0.000				
6	1.217	0.990	0.747	0.000	0.000	1.134			
7	1.109	0.756	0.962	0.747	1.048	0.658	0.906		
8	1.056	1.156	0.755	0.989	0.983	0.972	0.734	1.143	
9	1.020	1.056	1.108	1.216	1.195	1.210	1.101	1.050	1.016

燃焼度(GWd/t)= 20

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
i ↓	0.939								
j →	0.985	1.113							
3	1.050	0.848	0.949						
4	1.153	0.978	0.780	1.126					
5	1.138	0.975	1.051	0.000	0.000				
6	1.159	0.999	0.878	0.000	0.000	1.125			
7	1.058	0.870	1.003	0.877	1.050	0.779	0.947		
8	0.990	1.124	0.869	0.999	0.974	0.977	0.846	1.111	
9	0.942	0.99	1.057	1.158	1.137	1.151	1.048	0.984	0.938

燃焼度(GWd/t)= 30

	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓										
1	0.889									
2	0.940	1.094								
3	1.016	0.896	0.992							
4	1.120	1.004	0.876	1.121						
5	1.109	0.993	1.061	0.000	0.000					
6	1.124	1.016	0.926	0.000	0.000	1.121				
7	1.020	0.906	1.027	0.926	1.060	0.875	0.991			
8	0.943	1.100	0.905	1.016	0.992	1.003	0.895	1.092		
9	0.890	0.943	1.019	1.123	1.108	1.119	1.015	0.940	0.888	

燃焼度(GWd/t)= 50

	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓										
1	0.884									
2	0.906	1.054								
3	0.979	0.927	1.049							
4	1.076	1.046	0.928	1.096						
5	1.076	1.038	1.074	0.000	0.000					
6	1.078	1.052	0.955	0.000	0.000	1.096				
7	0.981	0.932	1.068	0.954	1.074	0.927	1.048			
8	0.907	1.056	0.932	1.052	1.037	1.046	0.927	1.054		
9	0.884	0.907	0.981	1.078	1.076	1.076	0.979	0.906	0.884	

燃焼度(GWd/t)= 70

	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓										
1	0.972									
2	0.937	1.000								
3	0.973	0.931	1.065							
4	1.034	1.049	0.957	1.069						
5	1.039	1.045	1.067	0.000	0.000					
6	1.034	1.049	0.967	0.000	0.000	1.069				
7	0.974	0.930	1.070	0.967	1.067	0.957	1.065			
8	0.938	0.999	0.930	1.049	1.045	1.049	0.931	1.000		
9	0.973	0.938	0.974	1.035	1.040	1.035	0.973	0.938	0.972	

表 3-3 無限増倍率の瞬時ボイド率変化、瞬時温度変化特性

計算条件	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot,0%ボイド	1.0594	1.0370	1.0598	1.0962	1.1453	1.1972	1.1556	1.0105	0.8754
Hot,40%ボイド	1.0447	1.0253	1.0484	1.0819	1.1259	1.1694	1.1233	0.9796	0.8489
Hot,70%ボイド	1.0297	1.0134	1.0352	1.0647	1.1027	1.1381	1.0879	0.9458	0.8190
Doppler,40%ボイド	1.0295	1.0107	1.0339	1.0666	1.1092	1.1505	1.1038	0.9626	0.8352
Cold,0%ボイド	1.1040	1.0761	1.0810	1.1035	1.1401	1.1912	1.1545	0.9927	0.8357

Hot,40%ボイドより瞬時変化

BWR (MOX) with CASMO4 + L-library

表 3-1 無限増倍率、局所ピーキング係数の燃焼特性

燃焼度 (GWd/t)	無限増倍係数	局所ピーキング係数 *
0.0	1.0667	1.427
0.1	1.0559	1.42
5.0	1.0632	1.398
10.0	1.0846	1.370
15.0	1.1080	1.336
20.0	1.1103	1.305
30.0	1.0779	1.256
50.0	1.0103	1.258
70.0	0.9509	1.255

* 核分裂率

表 3-2 核分裂率分布の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)= 0

	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
j ↓		1.375									
1		1.375									
2		1.285	1.172								
3		1.382	1.031	0.822							
4		0.325	0.922	0.806	0.943						
5		1.305	0.902	0.836	1.234	0.000					
6		1.306	0.906	0.868	0.309	0.000	0.000				
7		0.325	0.934	0.854	1.261	0.000	0.000	0.000			
8		1.382	1.039	0.865	0.990	1.293	0.318	0.310	1.118		
9		1.282	1.174	1.045	0.974	0.994	1.033	1.058	1.002	0.858	
10		1.372	1.283	1.386	0.326	1.332	1.342	0.329	1.427	1.315	1.389

燃焼度(GWd/t)= 0.1

	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
j ↓		1.367									
1		1.367									
2		1.276	1.165								
3		1.376	1.030	0.825							
4		0.329	0.926	0.810	0.947						
5		1.305	0.905	0.841	1.238	0.000					
6		1.306	0.909	0.873	0.312	0.000	0.000				
7		0.329	0.937	0.857	1.265	0.000	0.000	0.000			
8		1.377	1.038	0.868	0.994	1.297	0.321	0.313	1.121		
9		1.274	1.167	1.044	0.977	0.997	1.037	1.061	1.000	0.852	
10		1.364	1.275	1.380	0.330	1.332	1.342	0.333	1.420	1.306	1.380

燃焼度(GWd/t)= 5

	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
j ↓		1.244									
1		1.244									
2		1.212	1.152								
3		1.344	1.028	0.818							
4		0.422	0.937	0.801	0.933						
5		1.285	0.907	0.838	1.224	0.000					
6		1.287	0.911	0.878	0.382	0.000	0.000				
7		0.422	0.951	0.854	1.250	0.000	0.000	0.000			
8		1.346	1.038	0.863	0.983	1.289	0.404	0.380	1.139		
9		1.212	1.157	1.045	0.993	1.009	1.068	1.101	1.013	0.852	
10		1.244	1.214	1.352	0.426	1.318	1.331	0.436	1.398	1.246	1.261

燃焼度(GWd/t)=

10

j ↓

i →

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.126									
2	1.141	1.134								
3	1.305	1.024	0.807							
4	0.527	0.948	0.787	0.912						
5	1.261	0.908	0.832	1.201	0.000					
6	1.263	0.912	0.884	0.458	0.000	0.000				
7	0.529	0.965	0.848	1.228	0.000	0.000	0.000			
8	1.309	1.036	0.856	0.967	1.278	0.501	0.460	1.158		
9	1.143	1.142	1.045	1.010	1.024	1.104	1.151	1.029	0.848	
10	1.128	1.145	1.317	0.539	1.302	1.318	0.559	1.370	1.180	1.147

燃焼度(GWd/t)=

15

j ↓

i →

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.027									
2	1.072	1.112								
3	1.261	1.019	0.797							
4	0.624	0.960	0.774	0.891						
5	1.234	0.909	0.826	1.177	0.000					
6	1.236	0.913	0.893	0.534	0.000	0.000				
7	0.627	0.980	0.844	1.207	0.000	0.000	0.000			
8	1.267	1.034	0.848	0.953	1.267	0.601	0.550	1.181		
9	1.076	1.123	1.044	1.027	1.040	1.144	1.204	1.045	0.841	
10	1.031	1.079	1.278	0.642	1.283	1.302	0.671	1.336	1.116	1.051

燃焼度(GWd/t)=

20

j ↓

i →

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.965									
2	1.026	1.106								
3	1.229	1.023	0.797							
4	0.669	0.966	0.773	0.886						
5	1.213	0.913	0.830	1.169	0.000					
6	1.216	0.918	0.907	0.595	0.000	0.000				
7	0.673	0.988	0.849	1.199	0.000	0.000	0.000			
8	1.236	1.039	0.850	0.952	1.263	0.666	0.628	1.207		
9	1.031	1.118	1.049	1.035	1.051	1.167	1.234	1.060	0.840	
10	0.969	1.033	1.246	0.686	1.263	1.283	0.713	1.305	1.069	0.989

燃焼度(GWd/t)= 30

	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
j ↓											
1		0.903									
2		0.973	1.122								
3		1.189	1.052	0.822							
4		0.697	0.986	0.793	0.900						
5		1.191	0.935	0.848	1.162	0.000					
6		1.193	0.940	0.924	0.634	0.000	0.000				
7		0.700	1.007	0.870	1.191	0.000	0.000	0.000			
8		1.195	1.069	0.876	0.969	1.253	0.694	0.671	1.225		
9		0.977	1.133	1.080	1.055	1.071	1.180	1.246	1.084	0.846	
10		0.906	0.978	1.204	0.712	1.237	1.256	0.737	1.255	1.008	0.922

燃焼度(GWd/t)= 50

	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
j ↓											
1		0.851									
2		0.900	1.125								
3		1.107	1.112	0.883							
4		0.728	1.028	0.842	0.931						
5		1.142	0.983	0.888	1.147	0.000					
6		1.144	0.989	0.952	0.664	0.000	0.000				
7		0.730	1.048	0.915	1.176	0.000	0.000	0.000			
8		1.111	1.129	0.938	1.009	1.234	0.716	0.701	1.245		
9		0.903	1.135	1.141	1.098	1.116	1.201	1.258	1.112	0.843	
10		0.852	0.904	1.118	0.742	1.180	1.195	0.765	1.152	0.924	0.865

燃焼度(GWd/t)= 70

	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
j ↓											
1		0.841									
2		0.864	1.088								
3		1.031	1.152	0.946							
4		0.745	1.067	0.895	0.963						
5		1.090	1.030	0.931	1.131	0.000					
6		1.092	1.037	0.984	0.687	0.000	0.000				
7		0.747	1.085	0.966	1.159	0.000	0.000	0.000			
8		1.034	1.169	1.003	1.052	1.211	0.734	0.726	1.255		
9		0.866	1.096	1.182	1.135	1.155	1.214	1.254	1.107	0.831	
10		0.842	0.867	1.040	0.758	1.122	1.132	0.776	1.062	0.882	0.853

表 3-3 無限増倍率の瞬時ボイド率変化、瞬時温度変化特性

計算条件	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot,0%ボイド	1.0811	1.0688	1.0769	1.1018	1.1308	1.1367	1.1057	1.0389	0.9798
Hot,40%ボイド	1.0667	1.0559	1.0632	1.0846	1.1080	1.1103	1.0779	1.0103	0.9509
Hot,70%ボイド	1.0599	1.0504	1.0564	1.0740	1.0923	1.0911	1.0578	0.9893	0.9289
Doppler,40%ボイド	1.0482	1.0378	1.0452	1.0662	1.0890	1.0910	1.0594	0.9933	0.9353
Cold,0%ボイド	1.0872	1.0698	1.0706	1.0936	1.1302	1.1475	1.1169	1.0422	0.9754

Hot,40%ボイドより瞬時変化

11. SHETRAN コードの概要とベンチマーク計算手法（四電）

1. 参加者名

坂井浩二*、宮本豊一*、櫻木廣隆**、梅原陽一**

2. 所属機関

四国電力(株)*、四電エンジニアリング(株)**

3. 使用したコード名及び参考文献

SHETRANコード

参考文献；・日本原子力学会 1997年秋の大会予稿集 第II分冊（核分裂工学）

F47 超多群による集合体計算コードの開発

・日本原子力学会 2000年（第38回）春の年会要旨集 第II分冊（総論、核分裂工学） C6 四国電力炉心管理コードシステムの改良

4. ベースの核データライブラリ

ENDF/B-VI-rev3

5. 使用した断面積データ作成のための処理コード及び方法

処理コード：NJOY94.105

6. スペクトル計算及び縮約方法

高速領域及び熱領域は多群定数、共鳴領域は数万群の超多群断面積を用い、單一ロッドセル及び 3×3 ロッドセル体系でCharacteristics法による非均質輸送計算を行い、得られた中性子束を用いて70群定数に縮約する。 3×3 ロッドセルは中央にウォーターホール等の非燃料棒を配置し、周辺は燃料棒セルで取り囲んだ体系である。次に、集合体体系（ピンセル問題解析時はピンセル体系）でCharacteristics法による70群非均質輸送計算を行う。

7. エネルギー群数

群定数計算時：高速領域 56群（10MeV～約10keV）

共鳴領域 約6万群（約10keV～2.1eV）

熱領域 160群（2.1eV～1.0E-5eV）

カットオフエネルギーは2.1eVとしている。

集合体計算時：70群（10MeV～1.0E-5eV）

8. 断面積作成時の仮定 ((n,2n)反応の断面積等)

疑似FP等の仮定した核種はなし。

9. 自己遮蔽及び相互遮蔽を行った核種

共鳴領域は、材料組成を含む全核種を一括で超多群により正確に取り扱う。

高速群、熱群については、NR近似に基づく自己遮蔽を考慮している。

10. セル等の計算方法

Gdピンメッシュ分割数：径方向10分割、周方向4分割

11. その他の情報

・燃焼ステップ幅 (GWd/t)

UO₂ピンセル、MOXピンセル、MOX集合体：0, 0.1, 0.5, 1, 2, 4, 5, 6, 8, 10

10～70：2.5 毎（計 34 ステップ）

Gd集合体：0, 0.1, 0.5, 0.5～30:0.5 毎, 30～70：2.5 毎（計 78 ステップ）

・燃焼チェーン

101核種（アクチノイド18核種、FP83核種）

Pin Cell (UO_2) with SHETRAN + ENDF/B-VI(R3)

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.41531
0.1	1.37712
5	1.31929
10	1.27048
15	1.2277
20	1.18995
30	1.12404
50	1.01373
70	0.923633

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

	燃焼度(GWd/t)									(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
U235	5.0393E-04	5.0298E-04	4.5849E-04	4.1684E-04	3.7832E-04	3.4256E-04	2.7845E-04	1.7628E-04	1.0432E-04	
U236	0	1.9514E-07	9.2817E-06	1.7686E-05	2.5342E-05	3.2319E-05	4.4378E-05	6.1663E-05	7.0945E-05	
U238	7.1571E-03	7.1567E-03	7.1361E-03	7.1141E-03	7.0913E-03	7.0675E-03	7.0176E-03	6.9079E-03	6.7852E-03	
Np237	0	2.0263E-09	2.0971E-07	5.9671E-07	1.1132E-06	1.7248E-06	3.1379E-06	6.2517E-06	9.1352E-06	
Pu238	0	1.7309E-12	7.5263E-09	4.1159E-08	1.1467E-07	2.3931E-07	6.7699E-07	2.4385E-06	5.3151E-06	
Pu239	0	1.1237E-07	1.5480E-05	2.7788E-05	3.7555E-05	4.5410E-05	5.6793E-05	6.8489E-05	7.2299E-05	
Pu240	0	2.2445E-10	8.0487E-07	2.4938E-06	4.5411E-06	6.7742E-06	1.1449E-05	2.0379E-05	2.7559E-05	
Pu241	0	8.7145E-13	1.6275E-07	9.2988E-07	2.2532E-06	3.9262E-06	7.7436E-06	1.5066E-05	2.0385E-05	
Pu242	0	3.0030E-16	2.9646E-09	3.5456E-08	1.3406E-07	3.2274E-07	1.0094E-06	3.5574E-06	7.2470E-06	
Am241	0	7.4566E-17	7.2978E-10	8.5541E-09	3.1431E-08	7.3100E-08	2.1012E-07	5.9955E-07	9.4996E-07	
Am242m	0	0	3.0750E-12	6.3191E-11	3.0764E-10	8.4866E-10	2.9556E-09	9.7205E-09	1.5924E-08	
Am243	0	0	5.9874E-11	1.5286E-09	9.1377E-09	3.0508E-08	1.4917E-07	8.6437E-07	2.2655E-06	
Cm242	0	0	2.5335E-11	5.6918E-10	3.0021E-09	8.9138E-09	3.5488E-08	1.4786E-07	2.9820E-07	
Cm243	0	0	4.9713E-14	2.3716E-12	1.9707E-11	8.1167E-11	5.1030E-10	3.6646E-09	1.0113E-08	
Cm244	0	0	1.5096E-12	8.2413E-11	7.7861E-10	3.6260E-09	2.8613E-08	3.1041E-07	1.2419E-06	
Cm245	0	0	1.0526E-14	1.1884E-12	1.7286E-11	1.0956E-10	1.3333E-09	2.4386E-08	1.3151E-07	
Cm246	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mo95	0	1.3248E-11	6.6574E-07	2.5665E-06	4.8490E-06	7.1681E-06	1.1636E-05	1.9721E-05	2.6701E-05	
Tc99	0	4.9062E-08	2.4207E-06	4.7774E-06	7.0720E-06	9.3053E-06	1.3589E-05	2.1416E-05	2.8219E-05	
Rh103	0	6.0701E-10	8.0116E-07	2.0422E-06	3.2983E-06	4.5186E-06	6.8128E-06	1.0731E-05	1.3728E-05	
Cs133	0	8.5673E-09	2.4984E-06	5.0657E-06	7.5498E-06	9.9492E-06	1.4490E-05	2.2520E-05	2.9123E-05	
Sm147	0	9.6979E-13	3.1678E-08	1.2755E-07	2.6812E-07	4.3724E-07	8.1368E-07	1.5156E-06	1.9730E-06	
Sm149	0	2.7350E-09	5.6078E-08	6.1312E-08	6.4765E-08	6.6892E-08	6.8438E-08	6.5927E-08	6.1039E-08	
Sm150	0	1.8673E-10	3.9353E-07	8.8545E-07	1.4067E-06	1.9481E-06	3.0668E-06	5.3371E-06	7.5155E-06	
Sm152	0	2.2735E-09	1.6601E-07	3.7356E-07	5.7566E-07	7.5895E-07	1.0650E-06	1.4972E-06	1.7914E-06	
Nd143	0	3.1144E-09	1.9536E-06	4.1013E-06	6.1152E-06	8.0025E-06	1.1412E-05	1.6824E-05	2.0436E-05	
Nd145	0	3.1514E-08	1.5396E-06	3.0113E-06	4.4212E-06	5.7729E-06	8.3104E-06	1.2753E-05	1.6390E-05	
Eu153	0	5.0152E-10	8.3965E-08	2.0982E-07	3.7394E-07	5.6756E-07	1.0063E-06	1.9052E-06	2.6564E-06	
Gd155	0	1.6344E-13	1.0438E-10	1.8380E-10	2.7532E-10	4.0495E-10	7.9343E-10	1.9460E-09	3.2322E-09	

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.2204E-02	3.1402E-02	3.0227E-02	2.9195E-02	2.8261E-02	2.7416E-02	2.5906E-02	2.3319E-02	2.1193E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	5.9830E+01	5.8301E+01	5.5358E+01	5.3601E+01	5.2486E+01	5.1799E+01	5.1223E+01	5.1659E+01	5.2827E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	2.8695E-01	2.8712E-01	2.9017E-01	2.9243E-01	2.9412E-01	2.9540E-01	2.9720E-01	2.9947E-01	3.0086E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	5.9509E+00	5.9113E+00	5.8761E+00	5.8641E+00	5.8599E+00	5.8618E+00	5.8748E+00	5.9183E+00	5.9656E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	1.9802E+02	1.9459E+02	1.7674E+02	1.6530E+02	1.5760E+02	1.5226E+02	1.4587E+02	1.4156E+02	1.4178E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	1.9144E+00	1.9164E+00	1.9218E+00	1.9176E+00	1.9132E+00	1.9097E+00	1.9050E+00	1.9004E+00	1.8989E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	1.9531E+02	1.9068E+02	1.7731E+02	1.6891E+02	1.6332E+02	1.5955E+02	1.5533E+02	1.5362E+02	1.5541E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	1.4148E+00	1.4164E+00	1.4285E+00	1.4371E+00	1.4434E+00	1.4479E+00	1.4538E+00	1.4600E+00	1.4632E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	3.3812E+00	3.3674E+00	3.2661E+00	3.1972E+00	3.1491E+00	3.1167E+00	3.0695E+00	3.0225E+00	3.0031E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	1.7265E+00	1.7280E+00	1.7410E+00	1.7496E+00	1.7556E+00	1.7597E+00	1.7644E+00	1.7686E+00	1.7695E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	1.7382E+00	1.7273E+00	1.7187E+00	1.7154E+00	1.7142E+00	1.7143E+00	1.7168E+00	1.7277E+00	1.7406E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	3.5109E+00	3.5134E+00	3.5280E+00	3.5399E+00	3.5493E+00	3.5567E+00	3.5679E+00	3.5812E+00	3.5810E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.2755E-02	2.2806E-02	2.2915E-02	2.2983E-02	2.3023E-02	2.3044E-02	2.3051E-02	2.3007E-02	2.2947E-02
σ_a (U235)	3.0830E+01	3.0100E+01	2.8699E+01	2.7870E+01	2.7351E+01	2.7038E+01	2.6795E+01	2.7067E+01	2.7677E+01
σ_a (U238)	9.0825E-01	9.0664E-01	9.0586E-01	9.0637E-01	9.0743E-01	9.0884E-01	9.1236E-01	9.2074E-01	9.2926E-01
σ_a (Pu238)	1.9057E+01	1.8511E+01	1.7680E+01	1.7226E+01	1.6943E+01	1.6788E+01	1.6696E+01	1.6943E+01	1.7375E+01
σ_a (Pu239)	1.0971E+02	1.0793E+02	9.7779E+01	9.1244E+01	8.6837E+01	8.3767E+01	8.0053E+01	7.7421E+01	7.7372E+01
σ_a (Pu240)	1.9886E+02	1.9885E+02	1.8118E+02	1.5399E+02	1.3202E+02	1.1556E+02	9.3909E+01	7.2560E+01	6.2926E+01
σ_a (Pu241)	8.9702E+01	8.7611E+01	8.1333E+01	7.7370E+01	7.4731E+01	7.2939E+01	7.0921E+01	7.0031E+01	7.0793E+01
σ_a (Pu242)	3.0903E+01	3.0946E+01	3.0939E+01	3.0905E+01	3.0793E+01	3.0571E+01	2.9786E+01	2.7238E+01	2.4346E+01
σ_a (Am241)	8.1904E+01	8.1041E+01	7.5430E+01	7.1589E+01	6.8903E+01	6.7083E+01	6.4508E+01	6.1979E+01	6.0932E+01
σ_a (Am243)	4.6700E+01	4.6693E+01	4.6279E+01	4.5745E+01	4.5236E+01	4.4757E+01	4.3728E+01	4.2014E+01	4.0351E+01
σ_a (Cm242)	4.0704E+00	4.0548E+00	4.0461E+00	4.0481E+00	4.0536E+00	4.0609E+00	4.0780E+00	4.1131E+00	4.1406E+00
σ_a (Cm244)	1.6260E+01	1.6280E+01	1.6150E+01	1.6068E+01	1.6013E+01	1.5976E+01	1.5934E+01	1.5868E+01	1.5642E+01
Σ_a (その他1)	2.1657E-18	5.3892E-06	8.2265E-05	1.4450E-04	1.9928E-04	2.4914E-04	3.3851E-04	4.8667E-04	5.9995E-04
Σ_a (その他2)	5.7230E-05	5.0872E-04	9.0827E-04	1.1644E-03	1.3982E-03	1.6171E-03	2.0239E-03	2.7447E-03	3.3497E-03
Σ_a (Zr)	1.8503E-04	1.8431E-04	1.8303E-04	1.8231E-04	1.8187E-04	1.8161E-04	1.8140E-04	1.8158E-04	1.8197E-04
Σ_a (H ₂ O)	4.7621E-04	4.6692E-04	4.4584E-04	4.3239E-04	4.2338E-04	4.1736E-04	4.1092E-04	4.0921E-04	4.1291E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.41531	1.37712	1.31929	1.27048	1.2277	1.18995	1.12404	1.01373	0.923633
Hot, 40%ボイド	1.37307	1.33747	1.28007	1.23049	1.18738	1.14933	1.08302	0.972191	0.882276
Hot, 70%ボイド	1.30146	1.271	1.21511	1.1653	1.12217	1.08421	1.01792	0.907212	0.817873
Doppler, 0%ボイド	1.38646	1.34901	1.29231	1.24363	1.20055	1.16246	1.09639	0.987256	0.899033
Cold, 0%ボイド	1.52302	1.47838	1.42336	1.3788	1.33903	1.30307	1.23819	1.1236	1.02482

Hot 0%ボイドより瞬時変化

Pin Cell (MOX) with SHETRAN + ENDF/B-VI(R3)

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.19628
0.1	1.18950
5	1.16817
10	1.15143
15	1.13671
20	1.12296
30	1.09715
50	1.04993
70	1.00767

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

核種	燃焼度(GWd/t)									(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
U235	1.2956E-05	1.2945E-05	1.2426E-05	1.1913E-05	1.1418E-05	1.0940E-05	1.0035E-05	8.4171E-06	7.0409E-06	
U236	0	3.5304E-09	1.7244E-07	3.3648E-07	4.9227E-07	6.4002E-07	9.1257E-07	1.3726E-06	1.7304E-06	
U238	6.3846E-03	6.3842E-03	6.3643E-03	6.3437E-03	6.3229E-03	6.3018E-03	6.2591E-03	6.1710E-03	6.0796E-03	
Np237	0	2.7065E-09	1.3510E-07	2.6896E-07	4.0078E-07	5.3011E-07	7.8031E-07	1.2415E-06	1.6439E-06	
Pu238	2.7988E-05	2.7973E-05	2.7705E-05	2.8061E-05	2.8751E-05	2.9609E-05	3.1502E-05	3.5250E-05	3.8627E-05	
Pu239	7.2334E-04	7.2262E-04	6.9892E-04	6.7569E-04	6.5317E-04	6.3132E-04	5.8958E-04	5.1369E-04	4.4751E-04	
Pu240	3.3043E-04	3.3042E-04	3.2987E-04	3.2904E-04	3.2796E-04	3.2665E-04	3.2331E-04	3.1387E-04	3.0100E-04	
Pu241	1.2241E-04	1.2246E-04	1.2512E-04	1.2756E-04	1.2975E-04	1.3168E-04	1.3484E-04	1.3874E-04	1.3987E-04	
Pu242	8.3891E-05	8.3891E-05	8.3929E-05	8.4007E-05	8.4128E-05	8.4293E-05	8.4748E-05	8.6099E-05	8.7913E-05	
Am241	3.5537E-05	3.5526E-05	3.5022E-05	3.4566E-05	3.4158E-05	3.3792E-05	3.3144E-05	3.1990E-05	3.0782E-05	
Am242m	0	5.2724E-09	2.3250E-07	4.1039E-07	5.4510E-07	6.4578E-07	7.7335E-07	8.5902E-07	8.4677E-07	
Am243	0	4.7971E-08	2.3146E-06	4.4631E-06	6.4574E-06	8.3112E-06	1.1648E-05	1.7110E-05	2.1329E-05	
Cm242	0	3.9094E-08	1.4794E-06	2.2903E-06	2.7338E-06	2.9765E-06	3.1889E-06	3.3145E-06	3.3900E-06	
Cm243	0	4.2227E-12	8.4010E-09	2.6953E-08	4.9252E-08	7.1983E-08	1.1326E-07	1.7238E-07	2.0766E-07	
Cm244	0	4.4438E-11	1.0574E-07	4.0361E-07	8.6891E-07	1.4681E-06	3.0157E-06	7.0795E-06	1.1906E-05	
Cm245	0	9.8843E-15	1.1837E-09	9.0716E-09	2.9227E-08	6.5995E-08	2.0151E-07	7.5876E-07	1.6861E-06	
Cm246	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mo95	0	9.3358E-12	4.6483E-07	1.8002E-06	3.4258E-06	5.1065E-06	8.4393E-06	1.4843E-05	2.0885E-05	
Tc99	0	4.6383E-08	2.2911E-06	4.5271E-06	6.7110E-06	8.8452E-06	1.2971E-05	2.0684E-05	2.7715E-05	
Rh103	0	1.2256E-09	1.5836E-06	3.9760E-06	6.3649E-06	8.6815E-06	1.3088E-05	2.1043E-05	2.7916E-05	
Cs133	0	8.3939E-09	2.4311E-06	4.9338E-06	7.3665E-06	9.7321E-06	1.4270E-05	2.2612E-05	3.0036E-05	
Sm147	0	8.6078E-13	2.8256E-08	1.1486E-07	2.4411E-07	4.0301E-07	7.7167E-07	1.5475E-06	2.2173E-06	
Sm149	0	3.1719E-09	2.8499E-07	3.8136E-07	4.1231E-07	4.2049E-07	4.1659E-07	3.9124E-07	3.6161E-07	
Sm150	0	3.8929E-11	1.9405E-07	5.9604E-07	1.0690E-06	1.5678E-06	2.5881E-06	4.6299E-06	6.6270E-06	
Sm152	0	4.4890E-09	2.3510E-07	4.8233E-07	7.3040E-07	9.7220E-07	1.4201E-06	2.1312E-06	2.6069E-06	
Nd143	0	2.2458E-09	1.4313E-06	3.0770E-06	4.6971E-06	6.2914E-06	9.4017E-06	1.5304E-05	2.0763E-05	
Nd145	0	2.3421E-08	1.1603E-06	2.2989E-06	3.4166E-06	4.5138E-06	6.6483E-06	1.0684E-05	1.4413E-05	
Eu153	0	1.0866E-09	1.5847E-07	3.4562E-07	5.5603E-07	7.8579E-07	1.2861E-06	2.3369E-06	3.3002E-06	
Gd155	0	7.3234E-13	1.2140E-09	3.3179E-09	5.3152E-09	7.0213E-09	9.9687E-09	1.7324E-08	2.8666E-08	

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.1051E-02	3.0879E-02	3.0320E-02	2.9874E-02	2.9479E-02	2.9107E-02	2.8403E-02	2.7104E-02	2.5931E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	1.9917E+01	1.9828E+01	1.9766E+01	1.9770E+01	1.9802E+01	1.9849E+01	1.9972E+01	2.0290E+01	2.0681E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	3.4021E-01	3.4026E-01	3.4026E-01	3.4017E-01	3.4006E-01	3.3992E-01	3.3963E-01	3.3888E-01	3.3815E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	5.3496E+00	5.3474E+00	5.3495E+00	5.3523E+00	5.3549E+00	5.3575E+00	5.3624E+00	5.3713E+00	5.3806E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	3.0081E+01	2.9908E+01	2.9949E+01	3.0129E+01	3.0373E+01	3.0653E+01	3.1280E+01	3.2727E+01	3.4384E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	2.0747E+00	2.0749E+00	2.0753E+00	2.0753E+00	2.0752E+00	2.0748E+00	2.0741E+00	2.0715E+00	2.0688E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	4.7391E+01	4.7156E+01	4.6876E+01	4.6789E+01	4.6800E+01	4.6868E+01	4.7118E+01	4.7937E+01	4.9072E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	1.6303E+00	1.6305E+00	1.6308E+00	1.6307E+00	1.6306E+00	1.6303E+00	1.6295E+00	1.6272E+00	1.6246E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	2.5032E+00	2.5026E+00	2.4976E+00	2.4933E+00	2.4899E+00	2.4872E+00	2.4833E+00	2.4793E+00	2.4794E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	1.9231E+00	1.9232E+00	1.9215E+00	1.9198E+00	1.9181E+00	1.9165E+00	1.9134E+00	1.9078E+00	1.9029E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	1.6798E+00	1.6793E+00	1.6789E+00	1.6786E+00	1.6783E+00	1.6781E+00	1.6777E+00	1.6767E+00	1.6761E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	3.5620E+00	3.5624E+00	3.5646E+00	3.5654E+00	3.5651E+00	3.5639E+00	3.5596E+00	3.5453E+00	3.5285E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.5958E-02	2.5961E-02	2.5955E-02	2.5946E-02	2.5934E-02	2.5921E-02	2.5889E-02	2.5816E-02	2.5734E-02
σ_a (U235)	1.1595E+01	1.1553E+01	1.1520E+01	1.1520E+01	1.1534E+01	1.1556E+01	1.1613E+01	1.1768E+01	1.1960E+01
σ_a (U238)	8.5241E-01	8.5231E-01	8.5246E-01	8.5283E-01	8.5335E-01	8.5401E-01	8.5562E-01	8.5980E-01	8.6496E-01
σ_a (Pu238)	6.7108E+00	6.6788E+00	6.6625E+00	6.6646E+00	6.6738E+00	6.6865E+00	6.7185E+00	6.8023E+00	6.9085E+00
σ_a (Pu239)	1.6010E+01	1.5922E+01	1.5959E+01	1.6068E+01	1.6210E+01	1.6371E+01	1.6728E+01	1.7548E+01	1.8481E+01
σ_a (Pu240)	1.2582E+01	1.2555E+01	1.2454E+01	1.2385E+01	1.2340E+01	1.2315E+01	1.2306E+01	1.2419E+01	1.2673E+01
σ_a (Pu241)	2.0904E+01	2.0799E+01	2.0678E+01	2.0643E+01	2.0652E+01	2.0687E+01	2.0809E+01	2.1199E+01	2.1732E+01
σ_a (Pu242)	8.3514E+00	8.3500E+00	8.3156E+00	8.2834E+00	8.2533E+00	8.2247E+00	8.1703E+00	8.0691E+00	7.9753E+00
σ_a (Am241)	2.1122E+01	2.1071E+01	2.0889E+01	2.0768E+01	2.0693E+01	2.0650E+01	2.0630E+01	2.0773E+01	2.1088E+01
σ_a (Am243)	2.5889E+01	2.5856E+01	2.5079E+01	2.4490E+01	2.3982E+01	2.3539E+01	2.2817E+01	2.1836E+01	2.1246E+01
σ_a (Cm242)	3.3843E+00	3.3830E+00	3.3782E+00	3.3778E+00	3.3796E+00	3.3824E+00	3.3893E+00	3.4043E+00	3.4192E+00
σ_a (Cm244)	1.0080E+01	1.0082E+01	1.0120E+01	1.0139E+01	1.0141E+01	1.0128E+01	1.0066E+01	9.8584E+00	9.6051E+00
Σ_a (その他1)	6.0667E-19	3.1259E-06	2.5480E-05	4.2643E-05	5.7179E-05	6.9730E-05	9.0914E-05	1.2690E-04	1.6341E-04
Σ_a (その他2)	7.2473E-05	1.7206E-04	4.7814E-04	7.1369E-04	9.1411E-04	1.0962E-03	1.4291E-03	2.0210E-03	2.5487E-03
Σ_a (Zr)	1.6526E-04	1.6523E-04	1.6529E-04	1.6539E-04	1.6548E-04	1.6558E-04	1.6577E-04	1.6613E-04	1.6645E-04
Σ_a (H2O)	1.9165E-04	1.9121E-04	1.9030E-04	1.8981E-04	1.8954E-04	1.8941E-04	1.8943E-04	1.9031E-04	1.9197E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.19628	1.18950	1.16817	1.15143	1.13671	1.12296	1.09715	1.04993	1.00767
Hot, 40%ボイド	1.18681	1.18117	1.16056	1.14374	1.12868	1.11452	1.08777	1.03867	0.99458
Hot, 70%ボイド	1.18269	1.17865	1.15892	1.14198	1.12645	1.11167	1.08358	1.03168	0.98475
Doppler, 0%ボイド	1.17077	1.16428	1.14383	1.12765	1.11334	1.09993	1.07468	1.02840	0.98671
Cold, 0%ボイド	1.26864	1.25678	1.23160	1.21383	1.19905	1.18561	1.16071	1.11599	1.07558

Hot 0%ボイドより瞬時変化

PWR (UO_2) with SHETRAN + ENDF/B-VI(R3)

表 1-1. 無限増倍率、局所ピーピング係数の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーピング係数*
0	1.13184	1.15293
0.1	1.10669	1.15296
5	1.10362	1.14464
10	1.10644	1.13478
15	1.11315	1.12642
20	1.12355	1.11668
30	1.12989	1.09576
50	1.01447	1.06705
70	0.91256	1.04469

* 核分裂率

表 1-2. 核分裂率分布

燃焼度(GWd/t)= 0										
j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.107	0.282	0.000	1.142	1.108	0.000	1.117	1.112	
2	1.107	1.090	1.079	1.130	1.068	1.047	0.282	1.076	1.110	
3	0.282	1.079	1.116	1.122	0.281	1.056	1.105	1.112	1.117	
4	0.000	1.130	1.122	0.000	1.131	1.141	0.000	1.149	1.120	
5	1.142	1.068	0.281	1.131	1.153	1.141	0.286	1.077	1.105	
6	1.108	1.047	1.056	1.141	1.141	0.000	1.050	1.060	1.094	
7	0.000	0.282	1.105	0.000	0.286	1.050	0.280	1.037	1.090	
8	1.117	1.076	1.112	1.149	1.077	1.060	1.037	1.070	1.095	
9	1.112	1.110	1.117	1.120	1.105	1.094	1.090	1.095	1.105	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 5										
j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.109	0.375	0.000	1.135	1.108	0.000	1.106	1.084	
2	1.109	1.089	1.081	1.126	1.072	1.054	0.371	1.067	1.083	
3	0.375	1.081	1.109	1.120	0.367	1.061	1.103	1.094	1.087	
4	0.000	1.126	1.120	0.000	1.129	1.135	0.000	1.129	1.089	
5	1.135	1.072	0.367	1.129	1.145	1.141	0.380	1.067	1.076	
6	1.108	1.054	1.061	1.135	1.141	0.000	1.059	1.045	1.064	
7	0.000	0.371	1.103	0.000	0.380	1.059	0.358	1.022	1.058	
8	1.106	1.067	1.094	1.129	1.067	1.045	1.022	1.042	1.059	
9	1.084	1.083	1.087	1.089	1.076	1.064	1.058	1.059	1.065	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 10

j	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		→								
1	0.000	1.106	0.475	0.000	1.123	1.103	0.000	1.092	1.060	
2	1.106	1.084	1.080	1.118	1.071	1.057	0.467	1.058	1.058	
3	0.475	1.080	1.098	1.114	0.460	1.063	1.096	1.077	1.060	
4	0.000	1.118	1.114	0.000	1.122	1.126	0.000	1.109	1.062	
5	1.123	1.071	0.460	1.122	1.132	1.135	0.481	1.057	1.051	
6	1.103	1.057	1.063	1.126	1.135	0.000	1.063	1.031	1.038	
7	0.000	0.467	1.096	0.000	0.481	1.063	0.439	1.008	1.030	
8	1.092	1.058	1.077	1.109	1.057	1.031	1.008	1.018	1.027	
9	1.060	1.058	1.060	1.062	1.051	1.038	1.030	1.027	1.030	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 15

j	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		→								
1	0.000	1.101	0.581	0.000	1.110	1.096	0.000	1.078	1.036	
2	1.101	1.078	1.076	1.108	1.068	1.059	0.568	1.048	1.034	
3	0.581	1.076	1.085	1.106	0.559	1.063	1.090	1.060	1.035	
4	0.000	1.108	1.106	0.000	1.114	1.115	0.000	1.089	1.036	
5	1.110	1.068	0.559	1.114	1.116	1.126	0.587	1.047	1.026	
6	1.096	1.059	1.063	1.115	1.126	0.000	1.065	1.018	1.013	
7	0.000	0.568	1.090	0.000	0.587	1.065	0.523	0.994	1.003	
8	1.078	1.048	1.060	1.089	1.047	1.018	0.994	0.994	0.997	
9	1.036	1.034	1.035	1.036	1.026	1.013	1.003	0.997	0.998	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 20

j	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		→								
1	0.000	1.096	0.686	0.000	1.096	1.088	0.000	1.064	1.013	
2	1.096	1.071	1.071	1.097	1.065	1.060	0.669	1.038	1.010	
3	0.686	1.071	1.073	1.097	0.658	1.063	1.082	1.042	1.010	
4	0.000	1.097	1.097	0.000	1.104	1.103	0.000	1.069	1.011	
5	1.096	1.065	0.658	1.104	1.101	1.117	0.692	1.036	1.002	
6	1.088	1.060	1.063	1.103	1.117	0.000	1.066	1.004	0.989	
7	0.000	0.669	1.082	0.000	0.692	1.066	0.606	0.981	0.977	
8	1.064	1.038	1.042	1.069	1.036	1.004	0.981	0.972	0.968	
9	1.013	1.010	1.010	1.011	1.002	0.989	0.977	0.968	0.967	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 30

j	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		→								
1	0.000	1.083	0.829	0.000	1.072	1.075	0.000	1.043	0.980	
2	1.083	1.058	1.062	1.078	1.061	1.062	0.818	1.025	0.978	
3	0.829	1.062	1.053	1.082	0.812	1.063	1.070	1.018	0.976	
4	0.000	1.078	1.082	0.000	1.088	1.082	0.000	1.037	0.976	
5	1.072	1.061	0.812	1.088	1.075	1.096	0.828	1.020	0.968	
6	1.075	1.062	1.063	1.082	1.096	0.000	1.067	0.987	0.956	
7	0.000	0.818	1.070	0.000	0.828	1.067	0.760	0.968	0.943	
8	1.043	1.025	1.018	1.037	1.020	0.987	0.968	0.945	0.931	
9	0.980	0.978	0.976	0.976	0.968	0.956	0.943	0.931	0.925	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 50

	i ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓	→	0.000	1.063	0.842	0.000	1.056	1.057	0.000	1.034	0.991
1		1.063	1.051	1.054	1.060	1.053	1.053	0.834	1.025	0.990
2		0.842	1.054	1.048	1.063	0.835	1.053	1.053	1.020	0.988
3		0.000	1.060	1.063	0.000	1.065	1.060	0.000	1.030	0.987
4		1.056	1.053	0.835	1.065	1.058	1.067	0.838	1.021	0.982
5		1.057	1.053	1.053	1.060	1.067	0.000	1.051	0.996	0.972
6		0.000	0.834	1.053	0.000	0.838	1.051	0.805	0.982	0.962
7		1.034	1.025	1.020	1.030	1.021	0.996	0.982	0.963	0.951
8		0.991	0.990	0.988	0.987	0.982	0.972	0.962	0.951	0.945

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 70

	i ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9
j ↓	→	0.000	1.045	0.858	0.000	1.040	1.041	0.000	1.028	1.001
1		1.045	1.042	1.043	1.043	1.042	1.042	0.852	1.025	1.001
2		0.858	1.043	1.039	1.044	0.855	1.042	1.037	1.022	0.999
3		0.000	1.043	1.044	0.000	1.044	1.041	0.000	1.024	0.998
4		1.040	1.042	0.855	1.044	1.041	1.043	0.853	1.022	0.995
5		1.041	1.042	1.042	1.041	1.043	0.000	1.035	1.002	0.988
6		0.000	0.852	1.037	0.000	0.853	1.035	0.834	0.994	0.981
7		1.028	1.025	1.022	1.024	1.022	1.002	0.994	0.981	0.972
8		1.001	1.001	0.999	0.998	0.995	0.988	0.981	0.972	0.968

(1に規格化)

表 2-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.13184	1.10669	1.10362	1.10644	1.11315	1.12355	1.12989	1.01447	0.91256
Doppler, 0%ボイド	1.11049	1.08601	1.08334	1.08563	1.09126	1.10038	1.10396	0.98972	0.89007
Cold, 0%ボイド	1.21969	1.18921	1.17992	1.18048	1.18506	1.20121	1.22492	1.10468	0.99060

Hot 0%ボイドより瞬時変化

PWR (MOX) with SHETRAN + ENDF/B-VI(R3)

表 1-1. 無限増倍率、局所ピーピング係数の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーピング係数*
0	1.21323	1.15640
0.1	1.20518	1.15576
5	1.18291	1.15323
10	1.16604	1.15109
15	1.15112	1.14886
20	1.13708	1.14655
30	1.11046	1.14176
50	1.06125	1.13160
70	1.01660	1.12068

* 核分裂率

表 1-2. 核分裂率分布

燃焼度(GWd/t)= 0

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.086	1.089	0.000	1.089	1.094	0.000	0.946	0.864	
2	1.086	1.034	1.039	1.089	1.036	1.043	1.094	1.043	0.862	
3	1.089	1.039	1.034	1.092	1.042	1.043	1.102	1.044	0.861	
4	0.000	1.089	1.092	0.000	1.106	1.108	0.000	0.952	0.865	
5	1.089	1.036	1.042	1.106	1.102	1.156	1.147	1.050	0.860	
6	1.094	1.043	1.043	1.108	1.156	0.000	1.104	1.004	0.858	
7	0.000	1.094	1.102	0.000	1.147	1.104	1.043	0.872	0.889	
8	0.946	1.043	1.044	0.952	1.050	1.004	0.872	0.908	0.652	
9	0.864	0.862	0.861	0.865	0.860	0.858	0.889	0.652	0.683	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 5

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	1.085	1.088	0.000	1.088	1.093	0.000	0.945	0.865	
2	1.085	1.035	1.040	1.088	1.037	1.044	1.093	1.043	0.863	
3	1.088	1.040	1.035	1.091	1.043	1.044	1.101	1.045	0.863	
4	0.000	1.088	1.091	0.000	1.105	1.107	0.000	0.950	0.866	
5	1.088	1.037	1.043	1.105	1.101	1.153	1.144	1.050	0.862	
6	1.093	1.044	1.044	1.107	1.153	0.000	1.102	1.006	0.859	
7	0.000	1.093	1.101	0.000	1.144	1.102	1.043	0.873	0.889	
8	0.945	1.043	1.045	0.950	1.050	1.006	0.873	0.906	0.654	
9	0.865	0.863	0.863	0.866	0.862	0.859	0.889	0.654	0.683	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 10

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0.000	1.084	1.087	0.000	1.087	1.092	0.000	0.944	0.866
2		1.084	1.036	1.040	1.087	1.037	1.044	1.092	1.043	0.865
3		1.087	1.040	1.036	1.090	1.043	1.044	1.100	1.045	0.864
4		0.000	1.087	1.090	0.000	1.103	1.106	0.000	0.950	0.867
5		1.087	1.037	1.043	1.103	1.100	1.151	1.142	1.050	0.864
6		1.092	1.044	1.044	1.106	1.151	0.000	1.101	1.006	0.861
7		0.000	1.092	1.100	0.000	1.142	1.101	1.042	0.874	0.889
8		0.944	1.043	1.045	0.950	1.050	1.006	0.874	0.907	0.658
9		0.866	0.865	0.864	0.867	0.864	0.861	0.889	0.658	0.686

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 15

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0.000	1.083	1.086	0.000	1.086	1.091	0.000	0.944	0.868
2		1.083	1.036	1.040	1.086	1.038	1.044	1.091	1.043	0.866
3		1.086	1.040	1.036	1.089	1.043	1.044	1.098	1.045	0.866
4		0.000	1.086	1.089	0.000	1.102	1.104	0.000	0.949	0.869
5		1.086	1.038	1.043	1.102	1.099	1.149	1.140	1.050	0.865
6		1.091	1.044	1.044	1.104	1.149	0.000	1.100	1.006	0.862
7		0.000	1.091	1.098	0.000	1.140	1.100	1.042	0.875	0.890
8		0.944	1.043	1.045	0.949	1.050	1.006	0.875	0.907	0.661
9		0.868	0.866	0.866	0.869	0.865	0.862	0.890	0.661	0.688

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 20

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0.000	1.082	1.085	0.000	1.085	1.089	0.000	0.943	0.869
2		1.082	1.036	1.041	1.085	1.038	1.044	1.090	1.043	0.868
3		1.085	1.041	1.036	1.088	1.044	1.045	1.097	1.045	0.867
4		0.000	1.085	1.088	0.000	1.101	1.103	0.000	0.948	0.870
5		1.085	1.038	1.044	1.101	1.099	1.147	1.138	1.050	0.867
6		1.089	1.044	1.045	1.103	1.147	0.000	1.098	1.007	0.864
7		0.000	1.090	1.097	0.000	1.138	1.098	1.042	0.876	0.891
8		0.943	1.043	1.045	0.948	1.050	1.007	0.876	0.907	0.665
9		0.869	0.868	0.867	0.870	0.867	0.864	0.891	0.665	0.691

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 30

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0.000	1.080	1.083	0.000	1.083	1.087	0.000	0.942	0.872
2		1.080	1.036	1.041	1.082	1.038	1.045	1.087	1.043	0.871
3		1.083	1.041	1.037	1.086	1.044	1.045	1.094	1.045	0.870
4		0.000	1.082	1.086	0.000	1.099	1.100	0.000	0.947	0.873
5		1.083	1.038	1.044	1.099	1.097	1.142	1.133	1.050	0.870
6		1.087	1.045	1.045	1.100	1.142	0.000	1.096	1.008	0.867
7		0.000	1.087	1.094	0.000	1.133	1.096	1.042	0.879	0.892
8		0.942	1.043	1.045	0.947	1.050	1.008	0.879	0.908	0.672
9		0.872	0.871	0.870	0.873	0.870	0.867	0.892	0.672	0.696

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 50

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0.000	1.075	1.078	0.000	1.078	1.082	0.000	0.939	0.879
2		1.075	1.038	1.042	1.078	1.040	1.045	1.082	1.043	0.878
3		1.078	1.042	1.038	1.081	1.045	1.046	1.089	1.045	0.877
4		0.000	1.078	1.081	0.000	1.093	1.095	0.000	0.944	0.880
5		1.078	1.040	1.045	1.093	1.093	1.132	1.123	1.049	0.876
6		1.082	1.045	1.046	1.095	1.132	0.000	1.090	1.011	0.873
7		0.000	1.082	1.089	0.000	1.123	1.090	1.042	0.884	0.895
8		0.939	1.043	1.045	0.944	1.049	1.011	0.884	0.908	0.687
9		0.879	0.878	0.877	0.880	0.876	0.873	0.895	0.687	0.707

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 70

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0.000	1.071	1.073	0.000	1.074	1.077	0.000	0.937	0.886
2		1.071	1.039	1.042	1.074	1.041	1.046	1.077	1.043	0.884
3		1.073	1.042	1.040	1.076	1.046	1.047	1.083	1.045	0.884
4		0.000	1.074	1.076	0.000	1.088	1.090	0.000	0.941	0.886
5		1.074	1.041	1.046	1.088	1.089	1.121	1.112	1.049	0.883
6		1.077	1.046	1.047	1.090	1.121	0.000	1.084	1.014	0.880
7		0.000	1.077	1.083	0.000	1.112	1.084	1.042	0.889	0.898
8		0.937	1.043	1.045	0.941	1.049	1.014	0.889	0.909	0.702
9		0.886	0.884	0.884	0.886	0.883	0.880	0.898	0.702	0.718

(1に規格化)

表2-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
Hot, 0%ボイド	1.21323	1.20518	1.18291	1.16604	1.15112	1.13708	1.11046	1.06125	1.01660	
Doppler, 0%ボイド	1.18826	1.18055	1.15912	1.14276	1.12823	1.11451	1.08841	1.03999	0.99591	
Cold, 0%ボイド	1.29053	1.27874	1.24912	1.23659	1.22038	1.20734	1.18210	1.13255	1.09244	

Hot 0%ボイドより瞬時変化

12. TGBLA コードの概要とベンチマーク計算手法 (JNF)

1. コード名

TGBLA

2. コード（計算手法）の概要

拡散コード

3. ベース核データ

- U-235,238,Pu-239,240,Th-232 : ENDF/B-V
- その他：主に ENDF/B-IV

4. 計算概要

- 热群：30 群、高速・共鳴群：68 群
- 25 重核種 + 55FP + 疑似 FP

5. 文献

- M. Yamamoto et al., "Recent Developments in TGBLA Lattice Physics Code", Int. Topical Mtg. on Advances in Reactor Physics, Mathematics and Computation, Paris, Apr. 27-30 (1987)
- M. Yamamoto et al., "Development and Validation of TGBLA Lattice Physics Methods", Proc. Topical Mtg. on Reactor Physics and Shielding, Chicago, Sept. 17-19 (1984)

Pin Cell (UO_2) with TGBLA + ENDF/B-V(+IV)

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.41832
0.1	1.38024
5	1.32369
10	1.27429
15	1.23067
20	1.19167
30	1.12356
50	1.01032
70	0.91798

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

	燃焼度(GWd/t)									(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
U235	5.039E-04	5.030E-04	4.573E-04	4.147E-04	3.754E-04	3.390E-04	2.740E-04	1.713E-04	1.000E-04	
U236	0.000E+00	2.014E-07	9.551E-06	1.815E-05	2.591E-05	3.293E-05	4.491E-05	6.152E-05	6.971E-05	
U238	7.157E-03	7.157E-03	7.136E-03	7.114E-03	7.091E-03	7.067E-03	7.017E-03	6.907E-03	6.785E-03	
Np237	0.000E+00	2.316E-09	2.336E-07	6.664E-07	1.251E-06	1.952E-06	3.592E-06	7.249E-06	1.064E-05	
Pu238	0.000E+00	1.880E-12	8.030E-09	4.402E-08	1.232E-07	2.584E-07	7.385E-07	2.702E-06	5.944E-06	
Pu239	0.000E+00	1.088E-07	1.558E-05	2.792E-05	3.760E-05	4.527E-05	5.623E-05	6.709E-05	7.030E-05	
Pu240	0.000E+00	1.476E-10	8.153E-07	2.555E-06	4.653E-06	6.904E-06	1.149E-05	1.984E-05	2.615E-05	
Pu241	0.000E+00	4.694E-13	1.605E-07	9.278E-07	2.265E-06	3.983E-06	7.936E-06	1.543E-05	2.064E-05	
Pu242	0.000E+00	1.597E-16	2.770E-09	3.390E-08	1.294E-07	3.144E-07	9.958E-07	3.545E-06	7.199E-06	
Am241	0.000E+00	4.114E-17	7.105E-10	8.439E-09	3.108E-08	7.233E-08	2.071E-07	5.786E-07	8.911E-07	
Am242m	0.000E+00	1.363E-21	3.571E-12	7.464E-11	3.639E-10	9.996E-10	3.438E-09	1.097E-08	1.730E-08	
Am243	0.000E+00	1.575E-20	5.199E-11	1.412E-09	8.578E-09	2.908E-08	1.463E-07	8.934E-07	2.450E-06	
Cm242	0.000E+00	0.000E+00	1.178E-11	4.769E-10	2.391E-09	7.899E-09	3.480E-08	1.532E-07	3.094E-07	
Cm243										
Cm244	0.000E+00	0.000E+00	9.279E-13	5.775E-11	5.498E-10	2.605E-09	2.115E-08	2.410E-07	1.013E-06	
Cm245										
Cm246										
Mo95										
Tc99	0.000E+00	1.383E-08	2.416E-06	4.853E-06	7.237E-06	9.567E-06	1.406E-05	2.236E-05	2.968E-05	
Rh103	0.000E+00	6.220E-10	8.206E-07	2.092E-06	3.372E-06	4.611E-06	6.926E-06	1.082E-05	1.371E-05	
Cs133	0.000E+00	8.767E-09	2.555E-06	5.173E-06	7.699E-06	1.013E-05	1.470E-05	2.267E-05	2.905E-05	
Sm147	0.000E+00	9.839E-13	3.230E-08	1.297E-07	2.713E-07	4.399E-07	8.082E-07	1.468E-06	1.874E-06	
Sm149	0.000E+00	2.772E-09	5.418E-08	5.973E-08	6.270E-08	6.533E-08	6.775E-08	6.568E-08	6.055E-08	
Sm150	0.000E+00	1.910E-10	3.947E-07	8.790E-07	1.385E-06	1.908E-06	2.990E-06	5.126E-06	7.037E-06	
Sm152	0.000E+00	2.341E-09	1.787E-07	4.114E-07	6.463E-07	8.679E-07	1.262E-06	1.882E-06	2.345E-06	
Nd143	0.000E+00	3.183E-09	1.995E-06	4.183E-06	6.230E-06	8.140E-06	1.157E-05	1.693E-05	2.042E-05	
Nd145	0.000E+00	3.217E-08	1.567E-06	3.056E-06	4.474E-06	5.822E-06	8.322E-06	1.256E-05	1.582E-05	
Eu153	0.000E+00	1.444E-09	8.520E-08	2.042E-07	3.570E-07	5.378E-07	9.559E-07	1.862E-06	2.684E-06	
Gd155	0.000E+00	1.604E-13	1.732E-10	4.019E-10	6.415E-10	9.383E-10	1.779E-09	4.221E-09	6.763E-09	

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.235E-02	3.154E-02	3.041E-02	2.937E-02	2.842E-02	2.755E-02	2.599E-02	2.333E-02	2.113E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	6.002E+01	5.849E+01	5.576E+01	5.412E+01	5.312E+01	5.251E+01	5.207E+01	5.272E+01	5.409E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	2.937E-01	2.943E-01	2.962E-01	2.976E-01	2.986E-01	2.993E-01	3.003E-01	3.014E-01	3.022E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	0.000E+00	5.689E+00	5.657E+00	5.645E+00	5.640E+00	5.641E+00	5.651E+00	5.688E+00	5.731E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	0.000E+00	1.936E+02	1.767E+02	1.657E+02	1.584E+02	1.533E+02	1.473E+02	1.437E+02	1.445E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	0.000E+00	1.911E+00	1.914E+00	1.910E+00	1.905E+00	1.902E+00	1.897E+00	1.891E+00	1.889E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	0.000E+00	1.931E+02	1.803E+02	1.723E+02	1.671E+02	1.636E+02	1.598E+02	1.588E+02	1.613E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	0.000E+00	1.519E+00	1.529E+00	1.535E+00	1.540E+00	1.544E+00	1.548E+00	1.553E+00	1.556E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	0.000E+00	3.940E+00	3.839E+00	3.769E+00	3.721E+00	3.686E+00	3.640E+00	3.597E+00	3.582E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.000E+00	1.268E+00	1.276E+00	1.282E+00	1.286E+00	1.289E+00	1.293E+00	1.297E+00	1.300E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.000E+00	0.000E+00	3.735E-01	3.573E-01	3.473E-01	3.410E-01	3.357E-01	3.399E-01	3.515E-01
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.000E+00	0.000E+00	4.876E+00	4.883E+00	4.887E+00	4.889E+00	4.891E+00	4.892E+00	4.888E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.281E-02	2.285E-02	2.297E-02	2.305E-02	2.309E-02	2.312E-02	2.313E-02	2.309E-02	2.301E-02
σ_a (U235)	3.092E+01	3.019E+01	2.888E+01	2.810E+01	2.763E+01	2.735E+01	2.717E+01	2.754E+01	2.824E+01
σ_a (U238)	9.045E-01	9.031E-01	9.019E-01	9.019E-01	9.025E-01	9.034E-01	9.062E-01	9.133E-01	9.208E-01
σ_a (Pu238)	0.000E+00	1.752E+01	1.676E+01	1.633E+01	1.609E+01	1.596E+01	1.589E+01	1.618E+01	1.665E+01
σ_a (Pu239)	0.000E+00	1.071E+02	9.750E+01	9.124E+01	8.706E+01	8.416E+01	8.069E+01	7.844E+01	7.873E+01
σ_a (Pu240)	0.000E+00	1.926E+02	1.764E+02	1.516E+02	1.315E+02	1.167E+02	9.690E+01	7.689E+01	6.773E+01
σ_a (Pu241)	0.000E+00	8.731E+01	8.132E+01	7.757E+01	7.511E+01	7.346E+01	7.164E+01	7.110E+01	7.218E+01
σ_a (Pu242)	0.000E+00	2.875E+01	2.880E+01	2.880E+01	2.872E+01	2.856E+01	2.795E+01	2.591E+01	2.355E+01
σ_a (Am241)	0.000E+00	8.758E+01	8.217E+01	7.838E+01	7.572E+01	7.379E+01	7.123E+01	6.878E+01	6.785E+01
σ_a (Am243)	0.000E+00	3.527E+01	3.495E+01	3.446E+01	3.398E+01	3.352E+01	3.269E+01	3.134E+01	3.028E+01
σ_a (Cm242)	0.000E+00	0.000E+00	7.853E-01	7.575E-01	7.395E-01	7.279E-01	7.167E-01	7.192E-01	7.342E-01
σ_a (Cm244)	0.000E+00	0.000E+00	1.325E+01	1.323E+01	1.321E+01	1.320E+01	1.317E+01	1.314E+01	1.310E+01
Σ_a (その他1)	0.000E+00	2.221E-06	8.173E-05	1.506E-04	2.118E-04	2.698E-04	3.693E-04	5.375E-04	6.534E-04
Σ_a (その他2)	4.418E-05	4.983E-04	8.935E-04	1.155E-03	1.393E-03	1.619E-03	2.042E-03	2.794E-03	3.433E-03
Σ_a (Zr)	2.498E-04	2.491E-04	2.480E-04	2.475E-04	2.471E-04	2.470E-04	2.469E-04	2.474E-04	2.479E-04
Σ_a (H ₂ O)	4.559E-04	4.464E-04	4.263E-04	4.132E-04	4.045E-04	3.987E-04	3.926E-04	3.915E-04	3.962E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.41832	1.38024	1.32369	1.27429	1.23067	1.19167	1.12356	1.01032	0.91798
Hot, 40%ボイド	1.37780	1.34433	1.28797	1.23756	1.19326	1.15379	1.08500	0.97104	0.87884
Hot, 70%ボイド	1.30999	1.28380	1.22847	1.17740	1.13276	1.09310	1.02395	0.90947	0.81762
Doppler, 0%ボイド	1.39100	1.35390	1.29858	1.24948	1.20572	1.16664	1.09852	0.98624	0.89551
Cold, 0%ボイド	1.52413	1.47492	1.41991	1.37401	1.33285	1.29527	1.22753	1.10876	1.00618

Pin Cell (MOX) with TGBLA + ENDF/B-V(+IV)

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.1890
0.1	1.1826
5	1.1627
10	1.1469
15	1.1329
20	1.1198
30	1.0949
50	1.0485
70	1.0055

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

核種	燃焼度(GWd/t)									(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
U235	1.296E-05	1.295E-05	1.242E-05	1.190E-05	1.140E-05	1.092E-05	1.001E-05	8.386E-06	7.016E-06	
U236	0.000E+00	3.468E-09	1.689E-07	3.286E-07	4.793E-07	6.213E-07	8.803E-07	1.307E-06	1.627E-06	
U238	6.385E-03	6.384E-03	6.365E-03	6.344E-03	6.324E-03	6.303E-03	6.261E-03	6.175E-03	6.086E-03	
Np237	0.000E+00	3.116E-09	1.552E-07	3.084E-07	4.591E-07	6.068E-07	8.924E-07	1.419E-06	1.879E-06	
Pu238	2.799E-05	2.797E-05	2.785E-05	2.850E-05	2.954E-05	3.077E-05	3.338E-05	3.828E-05	4.247E-05	
Pu239	7.233E-04	7.226E-04	6.980E-04	6.740E-04	6.508E-04	6.283E-04	5.854E-04	5.077E-04	4.401E-04	
Pu240	3.304E-04	3.304E-04	3.293E-04	3.278E-04	3.261E-04	3.241E-04	3.194E-04	3.073E-04	2.919E-04	
Pu241	1.224E-04	1.225E-04	1.260E-04	1.292E-04	1.321E-04	1.347E-04	1.390E-04	1.442E-04	1.459E-04	
Pu242	8.389E-05	8.388E-05	8.351E-05	8.318E-05	8.290E-05	8.266E-05	8.233E-05	8.216E-05	8.253E-05	
Am241	3.554E-05	3.551E-05	3.440E-05	3.340E-05	3.252E-05	3.174E-05	3.043E-05	2.844E-05	2.682E-05	
Am242m	0.000E+00	7.171E-09	3.284E-07	6.003E-07	8.233E-07	1.004E-06	1.262E-06	1.487E-06	1.487E-06	
Am243	0.000E+00	5.112E-08	2.499E-06	4.875E-06	7.131E-06	9.271E-06	1.323E-05	2.001E-05	2.550E-05	
Cm242	0.000E+00	3.174E-08	1.796E-06	2.772E-06	3.285E-06	3.544E-06	3.714E-06	3.701E-06	3.671E-06	
Cm243										
Cm244	0.000E+00	3.207E-11	7.789E-08	3.013E-07	6.552E-07	1.125E-06	2.366E-06	5.760E-06	9.950E-06	
Cm245										
Cm246										
Mo95										
Tc99	0.000E+00	1.356E-08	2.358E-06	4.749E-06	7.103E-06	9.420E-06	1.395E-05	2.257E-05	3.063E-05	
Rh103	0.000E+00	1.246E-09	1.610E-06	4.040E-06	6.459E-06	8.795E-06	1.321E-05	2.108E-05	2.776E-05	
Cs133	0.000E+00	8.749E-09	2.535E-06	5.144E-06	7.677E-06	1.014E-05	1.485E-05	2.347E-05	3.108E-05	
Sm147	0.000E+00	9.255E-13	3.051E-08	1.241E-07	2.635E-07	4.347E-07	8.310E-07	1.664E-06	2.385E-06	
Sm149	0.000E+00	3.416E-09	3.074E-07	4.132E-07	4.478E-07	4.589E-07	4.593E-07	4.371E-07	4.060E-07	
Sm150	0.000E+00	4.175E-11	2.070E-07	6.328E-07	1.129E-06	1.647E-06	2.693E-06	4.722E-06	6.612E-06	
Sm152	0.000E+00	4.857E-09	2.639E-07	5.547E-07	8.538E-07	1.150E-06	1.705E-06	2.613E-06	3.267E-06	
Nd143	0.000E+00	2.383E-09	1.521E-06	3.273E-06	5.001E-06	6.704E-06	1.003E-05	1.638E-05	2.228E-05	
Nd145	0.000E+00	2.484E-08	1.229E-06	2.432E-06	3.610E-06	4.762E-06	6.991E-06	1.115E-05	1.491E-05	
Eu153	0.000E+00	3.225E-09	1.726E-07	3.703E-07	5.929E-07	8.381E-07	1.380E-06	2.556E-06	3.678E-06	
Gd155	0.000E+00	7.496E-13	1.500E-09	4.850E-09	8.950E-09	1.327E-08	2.200E-08	4.128E-08	6.570E-08	

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.130E-02	3.113E-02	3.059E-02	3.015E-02	2.976E-02	2.939E-02	2.868E-02	2.735E-02	2.611E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	2.027E+01	2.019E+01	2.013E+01	2.013E+01	2.016E+01	2.020E+01	2.031E+01	2.060E+01	2.098E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	3.416E-01	3.416E-01	3.419E-01	3.423E-01	3.426E-01	3.428E-01	3.433E-01	3.442E-01	3.449E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	5.205E+00	5.203E+00	5.204E+00	5.207E+00	5.209E+00	5.212E+00	5.217E+00	5.227E+00	5.238E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	3.003E+01	2.986E+01	2.992E+01	3.011E+01	3.036E+01	3.063E+01	3.126E+01	3.271E+01	3.440E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	2.051E+00	2.051E+00	2.053E+00	2.054E+00	2.056E+00	2.057E+00	2.059E+00	2.062E+00	2.065E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	4.946E+01	4.923E+01	4.897E+01	4.888E+01	4.889E+01	4.894E+01	4.916E+01	4.992E+01	5.103E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	1.737E+00	1.737E+00	1.739E+00	1.740E+00	1.741E+00	1.742E+00	1.744E+00	1.747E+00	1.749E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	3.006E+00	3.005E+00	3.005E+00	3.004E+00	3.004E+00	3.004E+00	3.006E+00	3.011E+00	3.019E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)		1.449E+00	1.451E+00	1.452E+00	1.453E+00	1.454E+00	1.456E+00	1.458E+00	1.461E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)		4.296E-02	4.253E-02	4.267E-02	4.305E-02	4.354E-02	4.472E-02	4.765E-02	5.122E-02
$\nu \sigma_f$ (Cm244)		4.735E+00	4.726E+00	4.717E+00	4.707E+00	4.698E+00	4.681E+00	4.651E+00	4.629E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.632E-02	2.632E-02	2.631E-02	2.629E-02	2.627E-02	2.624E-02	2.619E-02	2.609E-02	2.596E-02
σ_a (U235)	1.163E+01	1.159E+01	1.156E+01	1.155E+01	1.156E+01	1.158E+01	1.163E+01	1.177E+01	1.195E+01
σ_a (U238)	8.383E-01	8.382E-01	8.381E-01	8.381E-01	8.382E-01	8.384E-01	8.392E-01	8.417E-01	8.453E-01
σ_a (Pu238)	6.066E+00	6.035E+00	6.016E+00	6.015E+00	6.023E+00	6.035E+00	6.065E+00	6.146E+00	6.250E+00
σ_a (Pu239)	1.604E+01	1.595E+01	1.600E+01	1.612E+01	1.627E+01	1.643E+01	1.679E+01	1.762E+01	1.859E+01
σ_a (Pu240)	1.326E+01	1.324E+01	1.317E+01	1.313E+01	1.310E+01	1.310E+01	1.311E+01	1.327E+01	1.358E+01
σ_a (Pu241)	2.089E+01	2.079E+01	2.068E+01	2.065E+01	2.066E+01	2.069E+01	2.081E+01	2.118E+01	2.170E+01
σ_a (Pu242)	8.802E+00	8.801E+00	8.780E+00	8.758E+00	8.738E+00	8.718E+00	8.680E+00	8.606E+00	8.537E+00
σ_a (Am241)	2.582E+01	2.578E+01	2.563E+01	2.551E+01	2.543E+01	2.537E+01	2.531E+01	2.538E+01	2.565E+01
σ_a (Am243)		1.741E+01	1.721E+01	1.700E+01	1.682E+01	1.665E+01	1.636E+01	1.594E+01	1.567E+01
σ_a (Cm242)		1.958E-01	1.943E-01	1.938E-01	1.938E-01	1.940E-01	1.949E-01	1.982E-01	2.031E-01
σ_a (Cm244)		1.075E+01	1.069E+01	1.064E+01	1.058E+01	1.052E+01	1.042E+01	1.024E+01	1.011E+01
Σ_a (その他1)	0.000E+00	2.319E-06	2.066E-05	3.645E-05	4.890E-05	6.092E-05	8.165E-05	1.130E-04	1.288E-04
Σ_a (その他2)	5.546E-05	1.509E-04	4.698E-04	7.226E-04	9.406E-04	1.140E-03	1.507E-03	2.157E-03	2.736E-03
Σ_a (Zr)	2.293E-04	2.293E-04	2.292E-04	2.293E-04	2.293E-04	2.293E-04	2.294E-04	2.295E-04	2.295E-04
Σ_a (H ₂ O)	1.708E-04	1.703E-04	1.695E-04	1.691E-04	1.689E-04	1.687E-04	1.688E-04	1.696E-04	1.712E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.18898	1.18263	1.16270	1.14688	1.13292	1.11980	1.09492	1.04851	1.00545
Hot, 40%ボイド	1.18085	1.17580	1.15664	1.14080	1.12654	1.11303	1.08729	1.03904	0.99414
Hot, 70%ボイド	1.17911	1.17569	1.15745	1.14151	1.12685	1.11276	1.08571	1.03467	0.98685
Doppler, 0%ボイド	1.16553	1.15945	1.14027	1.12502	1.11152	1.09880	1.07465	1.02942	0.98730
Cold, 0%ボイド	1.25401	1.24236	1.21825	1.20114	1.18686	1.17378	1.14933	1.10424	1.06259

Hot 0%ボイドより瞬時変化

BWR (UO_2) with TGBLA + ENDF/B-V(+IV)

表 3-1 無限増倍率、局所ピーピング係数の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーピング係数*
0	1.03635	1.395
0.1	1.01775	1.389
5	1.05071	1.327
10	1.09119	1.265
15	1.13914	1.204
20	1.17880	1.151
30	1.12153	1.126
50	0.96948	1.096
70	0.83426	1.075

* 核分裂率

表 3-1 無限増倍率、局所ピーピング係数の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)= 0

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.222	1.235	1.234	1.389	1.373	1.394	1.239	1.239	1.226	
2	1.235	1.247	0.381	0.975	1.044	0.988	0.383	1.252	1.239	
3	1.234	0.381	0.797	0.369	1.018	0.378	0.821	0.383	1.239	
4	1.389	0.975	0.369	1.14			0.378	0.988	1.395	
5	1.373	1.044	1.018				1.019	1.045	1.374	
6	1.394	0.988	0.378			1.14	0.369	0.976	1.391	
7	1.239	0.383	0.821	0.378	1.019	0.369	0.798	0.382	1.237	
8	1.239	1.252	0.383	0.988	1.045	0.976	0.382	1.249	1.238	
9	1.226	1.239	1.239	1.395	1.374	1.391	1.237	1.238	1.225	

燃焼度(GWd/t)= 0.1

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.219	1.23	1.23	1.383	1.367	1.389	1.235	1.234	1.223	
2	1.23	1.241	0.389	0.975	1.043	0.988	0.39	1.247	1.234	
3	1.23	0.389	0.802	0.376	1.023	0.386	0.827	0.391	1.235	
4	1.383	0.975	0.376	1.145			0.386	0.989	1.389	
5	1.367	1.043	1.023				1.023	1.044	1.369	
6	1.389	0.988	0.386			1.146	0.377	0.976	1.385	
7	1.235	0.39	0.827	0.386	1.023	0.377	0.804	0.389	1.232	
8	1.234	1.247	0.391	0.989	1.044	0.976	0.389	1.243	1.233	
9	1.223	1.234	1.235	1.389	1.369	1.385	1.232	1.233	1.222	

(1行規格化)

燃焼度(GWd/t)= 5

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.169	1.174	1.186	1.32	1.308	1.327	1.192	1.179	1.173	
2	1.174	1.205	0.501	0.975	1.026	0.992	0.508	1.213	1.179	
3	1.186	0.501	0.84	0.463	1.033	0.496	0.872	0.508	1.192	
4	1.32	0.975	0.463	1.15			0.496	0.992	1.327	
5	1.308	1.026	1.033				1.034	1.027	1.309	
6	1.327	0.992	0.496			1.151	0.464	0.976	1.322	
7	1.192	0.508	0.872	0.496	1.034	0.464	0.841	0.503	1.188	
8	1.179	1.213	0.508	0.992	1.027	0.976	0.503	1.207	1.176	
9	1.173	1.179	1.192	1.327	1.309	1.322	1.188	1.176	1.171	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 10

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.086	1.107	1.137	1.257	1.246	1.265	1.145	1.113	1.09	
2	1.107	1.175	0.628	0.976	1.01	0.998	0.642	1.186	1.113	
3	1.137	0.628	0.878	0.565	1.04	0.626	0.92	0.642	1.144	
4	1.257	0.976	0.565	1.146			0.627	0.998	1.265	
5	1.246	1.01	1.04				1.041	1.011	1.246	
6	1.265	0.998	0.626			1.147	0.565	0.977	1.258	
7	1.145	0.642	0.92	0.627	1.041	0.565	0.88	0.629	1.138	
8	1.113	1.186	0.642	0.998	1.011	0.977	0.629	1.177	1.109	
9	1.09	1.113	1.144	1.265	1.246	1.258	1.138	1.109	1.088	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 15

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.999	1.037	1.085	1.195	1.183	1.204	1.095	1.044	1.003	
2	1.037	1.145	0.753	0.978	0.995	1.004	0.776	1.16	1.044	
3	1.085	0.753	0.917	0.673	1.045	0.764	0.968	0.776	1.094	
4	1.195	0.978	0.673	1.137			0.765	1.004	1.204	
5	1.183	0.995	1.045				1.046	0.996	1.183	
6	1.204	1.004	0.764			1.137	0.674	0.979	1.195	
7	1.095	0.776	0.968	0.765	1.046	0.674	0.918	0.755	1.086	
8	1.044	1.16	0.776	1.004	0.996	0.979	0.755	1.147	1.038	
9	1.003	1.044	1.094	1.204	1.183	1.195	1.086	1.038	1	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 20

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.924	0.976	1.039	1.142	1.129	1.151	1.048	0.982	0.927	
2	0.976	1.119	0.852	0.983	0.985	1.009	0.876	1.133	0.982	
3	1.039	0.852	0.956	0.787	1.053	0.883	1.008	0.876	1.047	
4	1.142	0.983	0.787	1.132			0.883	1.01	1.151	
5	1.129	0.985	1.053				1.053	0.986	1.129	
6	1.151	1.009	0.883			1.133	0.788	0.984	1.143	
7	1.048	0.876	1.008	0.883	1.053	0.788	0.958	0.854	1.039	
8	0.982	1.133	0.876	1.01	0.986	0.984	0.854	1.121	0.976	
9	0.927	0.982	1.047	1.151	1.129	1.143	1.039	0.976	0.924	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 30

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.874	0.935	1.01	1.116	1.106	1.121	1.016	0.938	0.875	
2	0.935	1.105	0.892	1.011	1.006	1.027	0.905	1.113	0.937	
3	1.01	0.892	0.999	0.868	1.065	0.918	1.034	0.905	1.015	
4	1.116	1.011	0.868	1.126			0.918	1.028	1.121	
5	1.106	1.006	1.065				1.065	1.007	1.106	
6	1.121	1.027	0.918		1.126	0.869	1.012	1.116		
7	1.016	0.905	1.034	0.918	1.065	0.869	1	0.893	1.01	
8	0.938	1.113	0.905	1.028	1.007	1.012	0.893	1.106	0.935	
9	0.875	0.937	1.015	1.121	1.106	1.116	1.01	0.935	0.874	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 50

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.872	0.902	0.974	1.073	1.073	1.075	0.977	0.904	0.872	
2	0.902	1.066	0.925	1.056	1.051	1.062	0.931	1.07	0.902	
3	0.974	0.925	1.057	0.921	1.079	0.943	1.076	0.931	0.975	
4	1.073	1.056	0.921	1.096			0.944	1.063	1.074	
5	1.073	1.051	1.079				1.079	1.051	1.072	
6	1.075	1.062	0.943		1.096	0.921	1.057	1.072		
7	0.977	0.931	1.076	0.944	1.079	0.921	1.058	0.926	0.974	
8	0.904	1.07	0.931	1.063	1.051	1.057	0.926	1.068	0.901	
9	0.872	0.902	0.975	1.074	1.072	1.072	0.974	0.901	0.871	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 70

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.966	0.937	0.969	1.03	1.035	1.03	0.97	0.939	0.966	
2	0.937	1.014	0.929	1.059	1.055	1.057	0.93	1.015	0.937	
3	0.969	0.929	1.073	0.949	1.07	0.954	1.075	0.931	0.968	
4	1.03	1.059	0.949	1.067			0.954	1.057	1.028	
5	1.035	1.055	1.07				1.07	1.056	1.033	
6	1.03	1.057	0.954		1.067	0.95	1.06	1.029		
7	0.97	0.93	1.075	0.954	1.07	0.95	1.074	0.93	0.968	
8	0.939	1.015	0.931	1.057	1.056	1.06	0.93	1.016	0.936	
9	0.966	0.937	0.968	1.028	1.033	1.029	0.968	0.936	0.965	

(1に規格化)

[注 1 : 燃焼度は 0,0.1,5,10,15,20,30,50,70GWd/t]

[注 2 : 燃料棒位置(1,1)が制御棒側コーナーに対応する]

[注 3 : 核分裂率の規格化は、全燃料棒の平均値が 1.0 となるようを行う]

表 3-3 無限増倍率の瞬時ボイド率変化、瞬時温度変化特性

計算条件	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot,0%ボイド	1.05332	1.03126	1.06187	1.10418	1.15666	1.20483	1.15199	0.99868	0.85944
Hot,40%ボイド	1.03635	1.01775	1.05071	1.09119	1.13914	1.17880	1.12153	0.96948	0.83426
Hot,70%ボイド	1.02430	1.00874	1.03961	1.07388	1.11275	1.14153	1.08011	0.93170	0.80111
Doppler,40%ボイド	1.02435	1.00598	1.03791	1.07622	1.12138	1.15907	1.10242	0.95212	0.81920
Cold,0%ボイド	1.09339	1.06606	1.07877	1.10880	1.15136	1.20238	1.15111	0.98066	0.81838

Hot,40%ボイドより瞬時変化

[注: Hot,40%ボイドの値は表3-1と同一となる]

13. VMONT コードの概要とベンチマーク計算手法 (JNF)

1. コード名

VMONT

2. コード（計算手法）の概要

モンテカルロ中性子輸送計算

3. ベース核データ

- ・アクチノイド : JENDL-3.2
- ・その他 : JENDL-2

4. 計算概要

- ・エネルギー群 : 190 群
- ・燃焼計算 : 32 重核種 + 82FP + 疑似 FP
- ・中性子無限増倍率の統計誤差 : $0.05\%\Delta k$ 以下

5. 文献

- ・ T. Morimoto et al., Nucl. Sci. Eng., 103, 351 (1989)
- ・ H. Maruyama et al., Proc. First Int. Conf. on Supercomputing in Nuclear Applications, Mito, Mar. (1990) p156

Pin Cell (UO_2) with VMONT + JENDL-3.2(+2)

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.4322
0.1	1.3945
5	1.3372
10	1.2879
15	1.2458
20	1.2082
30	1.1411
50	1.0259
70	0.9303

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

核種	燃焼度(GWd/t)									(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
U235	5.039E-04	5.030E-04	4.586E-04	4.169E-04	3.783E-04	3.424E-04	2.778E-04	1.743E-04	1.010E-04	
U236	0.000E+00	1.876E-07	8.972E-06	1.709E-05	2.446E-05	3.116E-05	4.270E-05	5.916E-05	6.784E-05	
U238	7.157E-03	7.157E-03	7.136E-03	7.115E-03	7.093E-03	7.070E-03	7.021E-03	6.914E-03	6.794E-03	
Np237	0.000E+00	1.817E-10	1.664E-07	5.241E-07	1.024E-06	1.633E-06	3.060E-06	6.215E-06	9.042E-06	
Pu238	0.000E+00	2.200E-14	5.116E-09	3.306E-08	9.866E-08	2.152E-07	6.404E-07	2.417E-06	5.343E-06	
Pu239	0.000E+00	1.087E-07	1.510E-05	2.698E-05	3.626E-05	4.367E-05	5.423E-05	6.468E-05	6.726E-05	
Pu240	0.000E+00	2.030E-10	7.939E-07	2.450E-06	4.393E-06	6.486E-06	1.078E-05	1.890E-05	2.535E-05	
Pu241	0.000E+00	7.476E-13	1.604E-07	9.243E-07	2.294E-06	3.995E-06	7.836E-06	1.491E-05	1.972E-05	
Pu242	0.000E+00	2.551E-16	2.930E-09	3.597E-08	1.396E-07	3.401E-07	1.069E-06	3.779E-06	7.730E-06	
Am241	0.000E+00	6.362E-17	7.167E-10	8.477E-09	3.164E-08	7.419E-08	2.128E-07	5.924E-07	9.062E-07	
Am242m	0.000E+00	6.030E-21	3.021E-12	6.405E-11	3.183E-10	8.912E-10	3.136E-09	1.015E-08	1.603E-08	
Am243	0.000E+00	8.377E-20	5.315E-11	1.393E-09	8.558E-09	2.997E-08	1.515E-07	8.579E-07	2.214E-06	
Cm242	0.000E+00	1.454E-20	2.364E-11	5.531E-10	2.980E-09	8.973E-09	3.607E-08	1.493E-07	2.962E-07	
Cm243	0.000E+00	4.718E-25	1.285E-14	2.113E-12	1.957E-11	8.287E-11	5.328E-10	3.956E-09	1.107E-08	
Cm244	0.000E+00	1.580E-23	9.020E-13	7.636E-11	7.343E-10	3.553E-09	2.957E-08	3.237E-07	1.274E-06	
Cm245	0.000E+00	2.132E-27	1.110E-15	2.005E-13	1.743E-11	1.191E-10	1.537E-09	3.012E-08	1.605E-07	
Cm246	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mo95	0.000E+00	1.427E-11	6.792E-07	2.614E-06	4.943E-06	7.315E-06	1.190E-05	2.026E-05	2.754E-05	
Tc99	0.000E+00	1.104E-08	2.366E-06	4.749E-06	7.072E-06	9.335E-06	1.368E-05	2.161E-05	2.847E-05	
Rh103	0.000E+00	6.096E-10	8.064E-07	2.055E-06	3.315E-06	4.534E-06	6.808E-06	1.060E-05	1.339E-05	
Cs133	0.000E+00	3.867E-09	2.490E-06	5.085E-06	7.602E-06	1.004E-05	1.466E-05	2.285E-05	2.954E-05	
Sm147	0.000E+00	9.614E-13	3.239E-08	1.302E-07	2.730E-07	4.458E-07	8.342E-07	1.573E-06	2.068E-06	
Sm149	0.000E+00	2.558E-09	5.507E-08	5.935E-08	6.233E-08	6.419E-08	6.562E-08	6.322E-08	5.835E-08	
Sm150	0.000E+00	1.687E-10	3.910E-07	8.719E-07	1.376E-06	1.897E-06	2.970E-06	5.146E-06	7.232E-06	
Sm152	0.000E+00	2.294E-09	1.712E-07	3.945E-07	6.245E-07	8.462E-07	1.252E-06	1.927E-06	2.455E-06	
Nd143	0.000E+00	1.053E-09	1.935E-06	4.108E-06	6.161E-06	8.107E-06	1.171E-05	1.777E-05	2.228E-05	
Nd145	0.000E+00	2.737E-08	1.541E-06	3.024E-06	4.452E-06	5.828E-06	8.429E-06	1.305E-05	1.692E-05	
Eu153	0.000E+00	5.065E-10	8.283E-08	2.009E-07	3.501E-07	5.244E-07	9.226E-07	1.787E-06	2.586E-06	
Gd155	0.000E+00	1.539E-13	1.115E-10	2.051E-10	3.067E-10	4.589E-10	8.605E-10	1.864E-09	2.971E-09	

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.278E-02	3.195E-02	3.080E-02	2.972E-02	2.878E-02	2.794E-02	2.635E-02	2.361E-02	2.131E-02	
$\nu \sigma_f$ (U235)	6.108E+01	5.949E+01	5.669E+01	5.499E+01	5.403E+01	5.348E+01	5.306E+01	5.406E+01	5.599E+01	
$\nu \sigma_f$ (U238)	2.786E-01	2.798E-01	2.835E-01	2.855E-01	2.866E-01	2.885E-01	2.920E-01	2.935E-01	2.957E-01	
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	-	6.141E+00	6.107E+00	6.083E+00	6.087E+00	6.096E+00	6.109E+00	6.156E+00	6.221E+00	
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	-	1.991E+02	1.816E+02	1.698E+02	1.625E+02	1.578E+02	1.518E+02	1.488E+02	1.512E+02	
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	-	1.825E+00	1.832E+00	1.830E+00	1.824E+00	1.825E+00	1.825E+00	1.818E+00	1.818E+00	
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	-	1.931E+02	1.810E+02	1.733E+02	1.684E+02	1.650E+02	1.612E+02	1.611E+02	1.650E+02	
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	-	1.409E+00	1.423E+00	1.432E+00	1.436E+00	1.443E+00	1.452E+00	1.455E+00	1.459E+00	
$\nu \sigma_f$ (Am241)	-	3.311E+00	3.219E+00	3.149E+00	3.100E+00	3.079E+00	3.043E+00	3.001E+00	2.995E+00	
$\nu \sigma_f$ (Am243)	-	1.572E+00	1.586E+00	1.594E+00	1.596E+00	1.604E+00	1.614E+00	1.615E+00	1.616E+00	
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	-	4.412E+00	4.408E+00	4.408E+00	4.406E+00	4.418E+00	4.427E+00	4.458E+00	4.490E+00	
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	-	2.870E+00	2.888E+00	2.901E+00	2.906E+00	2.916E+00	2.931E+00	2.952E+00	2.956E+00	

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
Σ_a (全核種)	2.291E-02	2.294E-02	2.306E-02	2.310E-02	2.313E-02	2.315E-02	2.312E-02	2.304E-02	2.293E-02	
σ_a (U235)	3.123E+01	3.047E+01	2.915E+01	2.835E+01	2.790E+01	2.766E+01	2.748E+01	2.803E+01	2.902E+01	
σ_a (U238)	8.970E-01	8.944E-01	8.940E-01	8.948E-01	8.949E-01	8.957E-01	8.984E-01	9.070E-01	9.147E-01	
σ_a (Pu238)	-	1.839E+01	1.762E+01	1.720E+01	1.701E+01	1.692E+01	1.689E+01	1.730E+01	1.796E+01	
σ_a (Pu239)	-	1.103E+02	1.003E+02	9.359E+01	8.937E+01	8.669E+01	8.315E+01	8.124E+01	8.235E+01	
σ_a (Pu240)	-	1.954E+02	1.795E+02	1.555E+02	1.343E+02	1.196E+02	9.881E+01	7.758E+01	6.817E+01	
σ_a (Pu241)	-	8.915E+01	8.352E+01	7.993E+01	7.757E+01	7.596E+01	7.410E+01	7.389E+01	7.563E+01	
σ_a (Pu242)	-	2.828E+01	2.839E+01	2.865E+01	2.967E+01	2.992E+01	2.849E+01	2.556E+01	2.231E+01	
σ_a (Am241)	-	8.205E+01	7.665E+01	7.268E+01	7.004E+01	6.859E+01	6.615E+01	6.403E+01	6.355E+01	
σ_a (Am243)	-	4.825E+01	4.797E+01	4.757E+01	4.707E+01	4.664E+01	4.624E+01	4.475E+01	4.267E+01	
σ_a (Cm242)	-	4.936E+00	4.917E+00	4.923E+00	4.913E+00	4.944E+00	4.952E+00	5.047E+00	5.098E+00	
σ_a (Cm244)	-	1.811E+01	1.793E+01	1.792E+01	1.786E+01	1.775E+01	1.758E+01	1.820E+01	1.744E+01	
Σ_a (その他1)	0.000E+00	4.973E-06	8.217E-05	1.454E-04	2.031E-04	2.542E-04	3.501E-04	5.001E-04	6.132E-04	
Σ_a (その他2)	4.058E-05	4.920E-04	8.806E-04	1.123E-03	1.349E-03	1.562E-03	1.965E-03	2.691E-03	3.315E-03	
Σ_a (Zr)	2.440E-04	2.432E-04	2.421E-04	2.408E-04	2.399E-04	2.403E-04	2.397E-04	2.414E-04	2.414E-04	
Σ_a (H2O)	4.664E-04	4.568E-04	4.361E-04	4.227E-04	4.156E-04	4.093E-04	4.054E-04	4.068E-04	4.144E-04	

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
Hot, 0%ボイド	1.43220	1.39450	1.33720	1.28790	1.24580	1.20820	1.14110	1.02590	0.93030	
Hot, 40%ボイド	1.39050	1.35730	1.30060	1.25130	1.20730	1.17000	1.10130	0.98490	0.88990	
Hot, 70%ボイド	1.32050	1.29260	1.23710	1.18760	1.14400	1.10490	1.03740	0.92260	0.82690	
Doppler, 0%ボイド	1.40480	1.36780	1.31180	1.26330	1.22130	1.18220	1.11440	1.00140	0.90770	
Cold, 0%ボイド	1.53790	1.48960	1.43370	1.38920	1.34870	1.31200	1.24530	1.12540	1.01920	

Hot 0%ボイドより瞬時変化

Pin Cell (MOX) with VMONT + JENDL-3.2(+2)

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.1998
0.1	1.1932
5	1.1720
10	1.1547
15	1.1404
20	1.1274
30	1.1006
50	1.0536
70	1.0115

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

核種	燃焼度(GWd/t)									(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
U235	1.296E-05	1.295E-05	1.242E-05	1.190E-05	1.140E-05	1.092E-05	1.000E-05	8.366E-06	6.975E-06	
U236	0.000E+00	3.101E-09	1.516E-07	2.950E-07	4.307E-07	5.586E-07	7.919E-07	1.178E-06	1.468E-06	
U238	6.385E-03	6.384E-03	6.365E-03	6.345E-03	6.325E-03	6.304E-03	6.263E-03	6.177E-03	6.088E-03	
Np237	0.000E+00	2.757E-10	9.902E-08	2.038E-07	3.083E-07	4.125E-07	6.125E-07	9.949E-07	1.324E-06	
Pu238	2.799E-05	2.797E-05	2.770E-05	2.806E-05	2.874E-05	2.960E-05	3.150E-05	3.526E-05	3.866E-05	
Pu239	7.233E-04	7.226E-04	6.981E-04	6.740E-04	6.508E-04	6.282E-04	5.849E-04	5.061E-04	4.369E-04	
Pu240	3.304E-04	3.304E-04	3.294E-04	3.281E-04	3.265E-04	3.247E-04	3.204E-04	3.093E-04	2.949E-04	
Pu241	1.224E-04	1.225E-04	1.254E-04	1.280E-04	1.304E-04	1.325E-04	1.358E-04	1.397E-04	1.406E-04	
Pu242	8.389E-05	8.389E-05	8.392E-05	8.400E-05	8.411E-05	8.429E-05	8.477E-05	8.619E-05	8.809E-05	
Am241	3.554E-05	3.553E-05	3.502E-05	3.456E-05	3.414E-05	3.377E-05	3.310E-05	3.189E-05	3.060E-05	
Am242m	0.000E+00	5.250E-09	2.371E-07	4.266E-07	5.765E-07	6.937E-07	8.527E-07	9.809E-07	9.808E-07	
Am243	0.000E+00	4.899E-08	2.386E-06	4.594E-06	6.652E-06	8.534E-06	1.192E-05	1.743E-05	2.164E-05	
Cm242	0.000E+00	2.603E-08	1.470E-06	2.286E-06	2.733E-06	2.980E-06	3.197E-06	3.331E-06	3.412E-06	
Cm243	0.000E+00	2.247E-12	8.612E-09	2.798E-08	5.175E-08	7.642E-08	1.226E-07	1.932E-07	2.392E-07	
Cm244	0.000E+00	3.064E-11	1.140E-07	4.338E-07	9.279E-07	1.568E-06	3.203E-06	7.466E-06	1.255E-05	
Cm245	0.000E+00	7.677E-15	1.657E-09	1.334E-08	4.293E-08	9.540E-08	2.799E-07	9.811E-07	2.059E-06	
Cm246	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mo95	0.000E+00	1.071E-11	5.020E-07	1.940E-06	3.691E-06	5.505E-06	9.109E-06	1.606E-05	2.265E-05	
Tc99	0.000E+00	1.102E-08	2.342E-06	4.710E-06	7.028E-06	9.301E-06	1.371E-05	2.199E-05	2.959E-05	
Rh103	0.000E+00	1.243E-09	1.612E-06	4.054E-06	6.492E-06	8.856E-06	1.335E-05	2.143E-05	2.838E-05	
Cs133	0.000E+00	3.930E-09	2.499E-06	5.106E-06	7.641E-06	1.011E-05	1.486E-05	2.361E-05	3.140E-05	
Sm147	0.000E+00	9.195E-13	3.105E-08	1.259E-07	2.666E-07	4.408E-07	8.499E-07	1.733E-06	2.521E-06	
Sm149	0.000E+00	3.199E-09	3.066E-07	4.119E-07	4.479E-07	4.591E-07	4.595E-07	4.390E-07	4.085E-07	
Sm150	0.000E+00	3.558E-11	2.119E-07	6.493E-07	1.164E-06	1.707E-06	2.821E-06	5.049E-06	7.225E-06	
Sm152	0.000E+00	4.809E-09	2.573E-07	5.404E-07	8.367E-07	1.139E-06	1.736E-06	2.816E-06	3.696E-06	
Nd143	0.000E+00	1.486E-09	1.934E-06	4.211E-06	6.479E-06	8.733E-06	1.320E-05	2.192E-05	3.030E-05	
Nd145	0.000E+00	2.153E-08	1.228E-06	2.440E-06	3.634E-06	4.811E-06	7.113E-06	1.151E-05	1.562E-05	
Eu153	0.000E+00	1.124E-09	1.643E-07	3.533E-07	5.620E-07	7.868E-07	1.275E-06	2.332E-06	3.370E-06	
Gd155	0.000E+00	6.989E-13	1.242E-09	3.534E-09	5.802E-09	7.844E-09	1.144E-08	1.933E-08	3.091E-08	

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.130E-02	3.114E-02	3.060E-02	3.011E-02	2.972E-02	2.935E-02	2.862E-02	2.729E-02	2.611E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	2.012E+01	2.003E+01	1.999E+01	1.997E+01	2.002E+01	2.006E+01	2.021E+01	2.052E+01	2.098E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	3.375E-01	3.374E-01	3.371E-01	3.372E-01	3.376E-01	3.372E-01	3.377E-01	3.366E-01	3.362E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	5.480E+00	5.475E+00	5.475E+00	5.481E+00	5.477E+00	5.482E+00	5.488E+00	5.492E+00	5.498E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	3.033E+01	3.016E+01	3.026E+01	3.040E+01	3.068E+01	3.100E+01	3.165E+01	3.327E+01	3.519E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	1.998E+00	1.997E+00	1.996E+00	1.998E+00	1.998E+00	2.000E+00	1.997E+00	1.994E+00	
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	4.824E+01	4.806E+01	4.787E+01	4.773E+01	4.774E+01	4.784E+01	4.812E+01	4.899E+01	5.034E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	1.637E+00	1.636E+00	1.636E+00	1.638E+00	1.637E+00	1.637E+00	1.639E+00	1.637E+00	1.634E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	2.457E+00	2.456E+00	2.451E+00	2.450E+00	2.446E+00	2.445E+00	2.446E+00	2.444E+00	2.445E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	-	1.753E+00	1.751E+00	1.750E+00	1.748E+00	1.747E+00	1.747E+00	1.742E+00	1.737E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	-	4.327E+00	4.332E+00	4.332E+00	4.330E+00	4.330E+00	4.335E+00	4.337E+00	4.337E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	-	3.097E+00	3.101E+00	3.104E+00	3.100E+00	3.095E+00	3.089E+00	3.077E+00	3.062E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.612E-02	2.613E-02	2.614E-02	2.611E-02	2.609E-02	2.607E-02	2.604E-02	2.594E-02	2.585E-02
σ_a (U235)	1.154E+01	1.150E+01	1.148E+01	1.147E+01	1.149E+01	1.151E+01	1.158E+01	1.173E+01	1.196E+01
σ_a (U238)	8.300E-01	8.303E-01	8.287E-01	8.299E-01	8.285E-01	8.285E-01	8.312E-01	8.304E-01	8.351E-01
σ_a (Pu238)	6.627E+00	6.590E+00	6.582E+00	6.590E+00	6.581E+00	6.601E+00	6.626E+00	6.702E+00	6.816E+00
σ_a (Pu239)	1.611E+01	1.603E+01	1.609E+01	1.619E+01	1.635E+01	1.653E+01	1.691E+01	1.783E+01	1.892E+01
σ_a (Pu240)	1.298E+01	1.295E+01	1.287E+01	1.277E+01	1.276E+01	1.272E+01	1.274E+01	1.289E+01	1.314E+01
σ_a (Pu241)	2.142E+01	2.133E+01	2.125E+01	2.119E+01	2.120E+01	2.125E+01	2.138E+01	2.179E+01	2.243E+01
σ_a (Pu242)	8.555E+00	8.613E+00	8.582E+00	8.577E+00	8.468E+00	8.446E+00	8.406E+00	8.316E+00	8.197E+00
σ_a (Am241)	2.110E+01	2.106E+01	2.094E+01	2.081E+01	2.077E+01	2.073E+01	2.076E+01	2.097E+01	2.138E+01
σ_a (Am243)	-	2.688E+01	2.636E+01	2.549E+01	2.496E+01	2.446E+01	2.379E+01	2.276E+01	2.212E+01
σ_a (Cm242)	-	4.238E+00	4.260E+00	4.245E+00	4.237E+00	4.230E+00	4.230E+00	4.243E+00	4.249E+00
σ_a (Cm244)	-	1.301E+01	1.337E+01	1.337E+01	1.303E+01	1.266E+01	1.201E+01	1.095E+01	1.014E+01
Σ_a (その他1)	0.000E+00	3.686E-06	2.347E-05	3.910E-05	5.293E-05	6.538E-05	8.741E-05	1.270E-04	1.666E-04
Σ_a (その他2)	5.359E-05	1.488E-04	4.614E-04	6.983E-04	8.993E-04	1.081E-03	1.413E-03	2.013E-03	2.557E-03
Σ_a (Zr)	2.218E-04	2.219E-04	2.222E-04	2.225E-04	2.220E-04	2.219E-04	2.210E-04	2.227E-04	2.224E-04
Σ_a (H2O)	1.751E-04	1.747E-04	1.742E-04	1.728E-04	1.735E-04	1.734E-04	1.731E-04	1.745E-04	1.768E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.19980	1.19320	1.17200	1.15470	1.14040	1.12740	1.10060	1.05360	1.01150
Hot, 40%ボイド	1.19040	1.18590	1.16450	1.14760	1.13250	1.11880	1.09290	1.04300	0.99790
Hot, 70%ボイド	1.18610	1.18260	1.16310	1.14610	1.13090	1.11540	1.08750	1.03560	0.98790
Doppler, 0%ボイド	1.17600	1.16960	1.14880	1.13260	1.11870	1.10520	1.08050	1.03380	0.99180
Cold, 0%ボイド	1.27060	1.25920	1.23290	1.21500	1.20020	1.18660	1.16120	1.11620	1.07400

Hot 0%ボイドより瞬時変化

BWR (UO_2) with VMONT + JENDL-3.2(+2)

表 3-1 無限増倍率、局所ピーピング係数の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーピング係数*
0	1.053	1.396
0.1	1.034	1.392
5	1.0578	1.337
10	1.0931	1.277
15	1.1385	1.212
20	1.1837	1.157
30	1.1349	1.123
50	0.9892	1.093
70	0.8556	1.071

* 核分裂率

表 3-2 核分裂率分布の燃焼特性

燃焼度(GWd/t)= 0

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.240	1.250	1.256	1.394	1.379	1.396	1.259	1.257	1.244	
2	1.250	1.262	0.363	0.962	1.024	0.968	0.366	1.275	1.257	
3	1.256	0.363	0.787	0.349	1.030	0.357	0.819	0.366	1.259	
4	1.394	0.962	0.349	1.155			0.357	0.968	1.396	
5	1.379	1.024	1.030				1.030	1.024	1.379	
6	1.396	0.968	0.357		1.155	0.349	0.962	1.394		
7	1.259	0.366	0.819	0.357	1.030	0.349	0.787	0.363	1.256	
8	1.257	1.275	0.366	0.968	1.024	0.962	0.363	1.262	1.250	
9	1.244	1.257	1.259	1.396	1.379	1.394	1.256	1.250	1.240	

燃焼度(GWd/t)= 0.1

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.242	1.251	1.252	1.385	1.369	1.392	1.256	1.252	1.246	
2	1.251	1.264	0.371	0.961	1.018	0.970	0.371	1.268	1.252	
3	1.252	0.371	0.790	0.356	1.038	0.364	0.825	0.371	1.256	
4	1.385	0.961	0.356	1.149			0.364	0.970	1.392	
5	1.369	1.018	1.038				1.038	1.018	1.369	
6	1.392	0.970	0.364		1.149	0.356	0.961	1.385		
7	1.256	0.371	0.825	0.364	1.038	0.356	0.790	0.371	1.252	
8	1.252	1.268	0.371	0.970	1.018	0.961	0.371	1.264	1.251	
9	1.246	1.252	1.256	1.392	1.369	1.385	1.252	1.251	1.242	

(1行規格化)

燃焼度(GWd/t)= 5

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.191	1.194	1.211	1.332	1.318	1.337	1.209	1.196	1.194	
2	1.194	1.219	0.480	0.965	1.011	0.974	0.484	1.225	1.196	
3	1.211	0.480	0.827	0.439	1.041	0.471	0.859	0.484	1.209	
4	1.332	0.965	0.439	1.160			0.471	0.974	1.337	
5	1.318	1.011	1.041				1.041	1.011	1.318	
6	1.337	0.974	0.471		1.160	0.439	0.965	1.332		
7	1.209	0.484	0.859	0.471	1.041	0.439	0.827	0.480	1.211	
8	1.196	1.225	0.484	0.974	1.011	0.965	0.480	1.219	1.194	
9	1.194	1.196	1.209	1.337	1.318	1.332	1.211	1.194	1.191	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 10

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.112	1.134	1.157	1.270	1.254	1.277	1.158	1.133	1.109	
2	1.134	1.185	0.607	0.967	1.003	0.981	0.618	1.196	1.133	
3	1.157	0.607	0.862	0.542	1.038	0.599	0.912	0.618	1.158	
4	1.270	0.967	0.542	1.150			0.599	0.981	1.277	
5	1.254	1.003	1.038				1.038	1.003	1.254	
6	1.277	0.981	0.599		1.150	0.542	0.967	1.270		
7	1.158	0.618	0.912	0.599	1.038	0.542	0.862	0.607	1.157	
8	1.133	1.196	0.618	0.981	1.003	0.967	0.607	1.185	1.134	
9	1.109	1.133	1.158	1.277	1.254	1.270	1.157	1.134	1.112	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 15

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.021	1.056	1.100	1.204	1.186	1.212	1.108	1.057	1.027	
2	1.056	1.153	0.737	0.973	0.983	0.997	0.758	1.167	1.057	
3	1.100	0.737	0.914	0.654	1.044	0.739	0.960	0.758	1.108	
4	1.204	0.973	0.654	1.144			0.739	0.997	1.212	
5	1.186	0.983	1.044				1.044	0.983	1.186	
6	1.212	0.997	0.739		1.144	0.654	0.973	1.204		
7	1.108	0.758	0.960	0.739	1.044	0.654	0.914	0.737	1.100	
8	1.057	1.167	0.758	0.997	0.983	0.973	0.737	1.153	1.056	
9	1.027	1.057	1.108	1.212	1.186	1.204	1.100	1.056	1.021	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 20

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.940	0.987	1.046	1.147	1.134	1.157	1.051	0.990	0.940	
2	0.987	1.122	0.850	0.980	0.978	1.000	0.873	1.128	0.990	
3	1.046	0.850	0.950	0.774	1.044	0.877	1.012	0.873	1.051	
4	1.147	0.980	0.774	1.131			0.877	1.000	1.157	
5	1.134	0.978	1.044				1.044	0.978	1.134	
6	1.157	1.000	0.877		1.131	0.774	0.980	1.147		
7	1.051	0.873	1.012	0.877	1.044	0.774	0.950	0.850	1.046	
8	0.990	1.128	0.873	1.000	0.978	0.980	0.850	1.122	0.987	
9	0.940	0.990	1.051	1.157	1.134	1.147	1.046	0.987	0.940	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 30

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.890	0.939	1.011	1.112	1.105	1.123	1.018	0.945	0.891	
2	0.939	1.100	0.894	1.007	0.999	1.024	0.907	1.116	0.945	
3	1.011	0.894	0.994	0.867	1.060	0.917	1.028	0.907	1.018	
4	1.112	1.007	0.867	1.123			0.917	1.024	1.123	
5	1.105	0.999	1.060				1.060	0.999	1.105	
6	1.123	1.024	0.917		1.123	0.867	1.007	1.112		
7	1.018	0.907	1.028	0.917	1.060	0.867	0.994	0.894	1.011	
8	0.945	1.116	0.907	1.024	0.999	1.007	0.894	1.100	0.939	
9	0.891	0.945	1.018	1.123	1.105	1.112	1.011	0.939	0.890	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 50

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.883	0.907	0.980	1.075	1.079	1.077	0.977	0.904	0.882	
2	0.907	1.063	0.924	1.050	1.044	1.055	0.930	1.064	0.904	
3	0.980	0.924	1.061	0.921	1.075	0.942	1.074	0.930	0.977	
4	1.075	1.050	0.921	1.093			0.942	1.055	1.077	
5	1.079	1.044	1.075				1.075	1.044	1.079	
6	1.077	1.055	0.942		1.093	0.921	1.050	1.075		
7	0.977	0.930	1.074	0.942	1.075	0.921	1.061	0.924	0.980	
8	0.904	1.064	0.930	1.055	1.044	1.050	0.924	1.063	0.907	
9	0.882	0.904	0.977	1.077	1.079	1.075	0.980	0.907	0.883	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 70

j ↓	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.975	0.936	0.973	1.031	1.040	1.031	0.971	0.942	0.974	
2	0.936	1.010	0.925	1.055	1.056	1.055	0.931	1.010	0.942	
3	0.973	0.925	1.070	0.949	1.067	0.955	1.071	0.931	0.971	
4	1.031	1.055	0.949	1.057			0.955	1.055	1.031	
5	1.040	1.056	1.067				1.067	1.056	1.040	
6	1.031	1.055	0.955		1.057	0.949	1.055	1.031		
7	0.971	0.931	1.071	0.955	1.067	0.949	1.070	0.925	0.973	
8	0.942	1.010	0.931	1.055	1.056	1.055	0.925	1.010	0.936	
9	0.974	0.942	0.971	1.031	1.040	1.031	0.973	0.936	0.975	

(1に規格化)

[注 1 : 燃焼度は 0,0.1,5,10,15,20,30,50,70GWd/t]

[注 2 : 燃料棒位置(1,1)が制御棒側コーナーに対応する]

[注 3 : 核分裂率の規格化は、全燃料棒の平均値が 1.0 となるようを行う]

表 3-3 無限増倍率の瞬時ボイド率変化、瞬時温度変化特性

計算条件	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot,0%ボイ	1.07080	1.04910	1.07100	1.10830	1.15890	1.21240	1.16810	1.02000	0.88340
Hot,40%ボ	1.05300	1.03400	1.05780	1.09310	1.13850	1.18370	1.13490	0.98920	0.85560
Hot,70%ボ	1.03470	1.01900	1.04220	1.07220	1.11190	1.14830	1.09580	0.95120	0.82240
Doppler,40	1.04020	1.02100	1.04530	1.07780	1.12170	1.16440	1.11610	0.97190	0.84120
Cold,0%ボ	1.11240	1.08510	1.08860	1.11320	1.15130	1.20540	1.16580	1.00290	0.84590

Hot,40%ボイドより瞬時変化

[注: Hot,40%ボイドの値は表3-1と同一となる]

14. MCNP-BURN コードの概要とベンチマーク計算手法（東芝）

1. 参加者名

吉岡 研一

2. 所属機関

(株) 東芝 電力産業システム技術開発センター
システム解析技術開発部 サイクル解析担当

3. 使用したコード名及び参考文献

コード名

MCNP-BURN

参考文献

J.F. Briesmeister, Ed., "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A,"
LA-12625 (1993)

4. ベースの核データライブラリ

JENDL3.2

5. 使用した断面積データ作成のための処理コード及び方法

NJOY94により、各温度点の断面積を作成した。

6. スペクトル計算及び縮約方法

連続エネルギーモンテカルロ法

7. エネルギー群数

連続エネルギー

8. 断面積作成時の仮定 ((n,2n) 反応の断面積等)

全ての核反応を正確に取り扱う。

ただし、Pseudo核種は取り扱わない。

9. 自己遮蔽及び相互遮蔽を行った核種

連続エネルギーモンテカルロにより正確に取り扱う。

ただし、中性子吸収に寄与の少ないアクチニド、FP核種については多群（50群程度）

の無限希釈断面積を使用し、中性子吸収への寄与が一定割合以上に達した時点で、

MCNPにより正確に取り扱う。

10. セル等の計算方法

モンテカルロ法により幾何学的配置を正確に取り扱う。

11. その他の情報

MCNP-BURN の燃焼計算方式はルンゲクッタ法を改良したものを探用している。オプションで Predictor Corrector 法を使うことが出来るが、本ベンチマーク（ピンセル問題）では使用していない。

燃焼ステップ[GWd/t]を以下に示す。

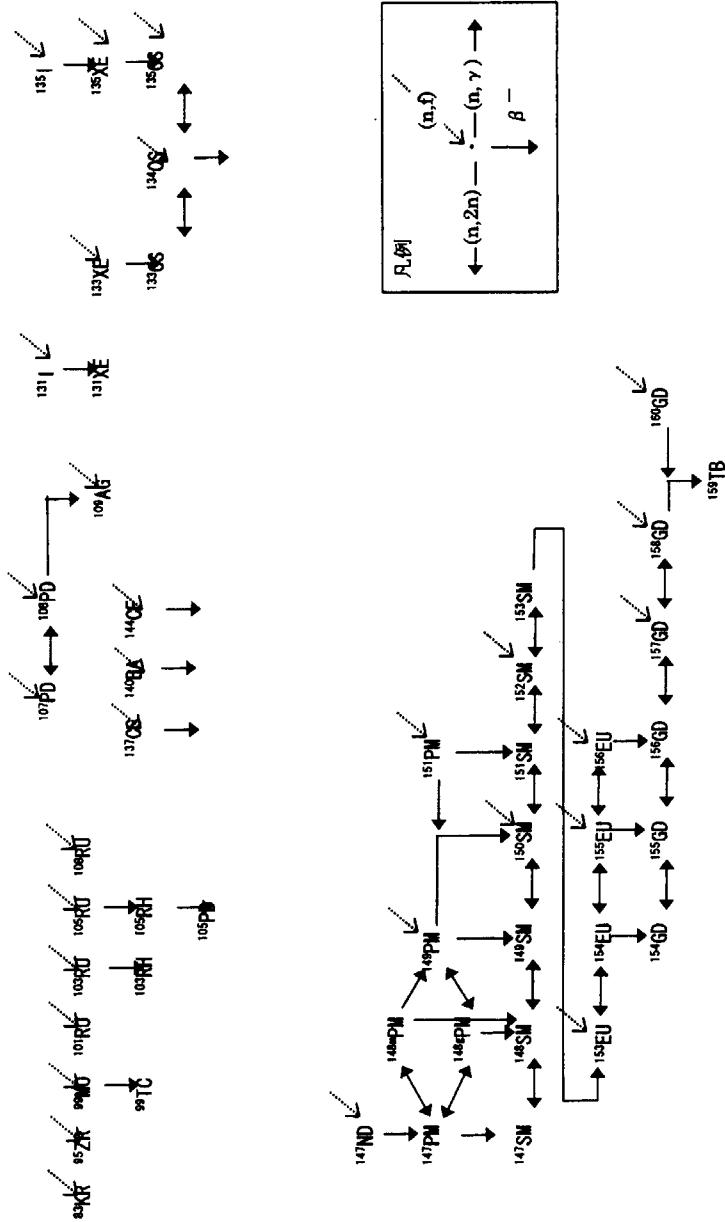
0 0.1 0.3 0.5 1 3 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70

燃焼点当たりのヒストリ数を以下に示す。

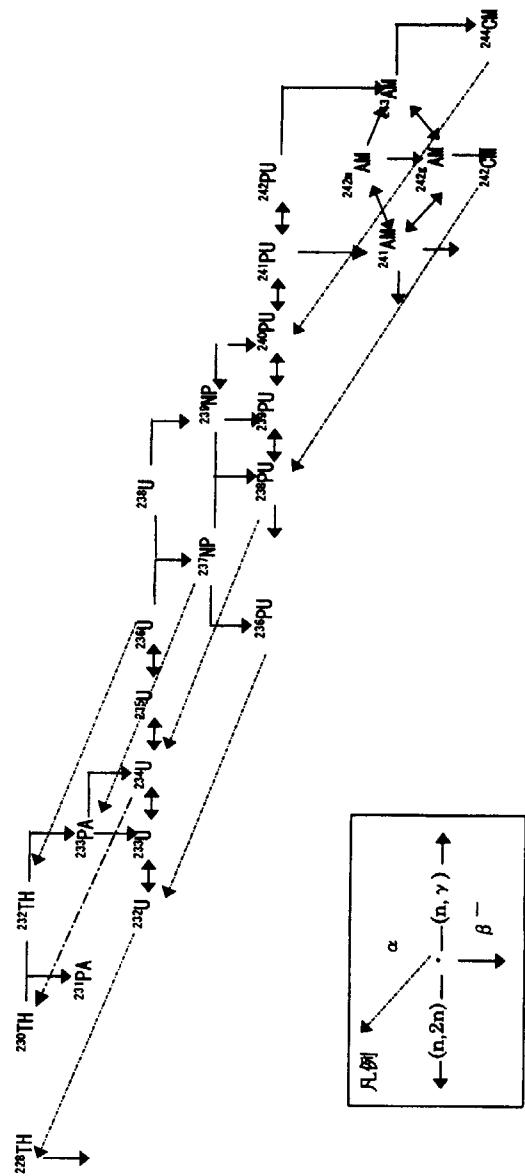
UO₂燃料：10000×50 バッチ+捨てバッチ 10

MOX 燃料：10000×100 バッチ+捨てバッチ 10

燃焼チェーンを以下に示す。



MCNP-BURNで用いた核分裂生成物の燃焼チーン



MCNP-BURN で用いた重核の燃焼チャーン

Pin Cell (UO_2) with MCNP-BURN + JENDL-3.2

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.42950
0.1	1.39122
5	1.33429
10	1.28739
15	1.24302
20	1.20501
30	1.13952
50	1.02756
70	0.93460

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

(1/b/cm)

核種	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
U235	5.039E-04	5.030E-04	4.584E-04	4.166E-04	3.777E-04	3.416E-04	2.766E-04	1.727E-04	9.952E-05
U236	0.000E+00	1.865E-07	8.929E-06	1.698E-05	2.432E-05	3.103E-05	4.259E-05	5.897E-05	6.738E-05
U238	7.157E-03	7.157E-03	7.136E-03	7.115E-03	7.092E-03	7.069E-03	7.019E-03	6.908E-03	6.783E-03
Np237	0.000E+00	1.635E-09	1.917E-07	5.723E-07	1.087E-06	1.704E-06	3.153E-06	6.393E-06	9.359E-06
Pu238	0.000E+00	1.364E-12	6.721E-09	3.856E-08	1.108E-07	2.368E-07	6.921E-07	2.596E-06	5.745E-06
Pu239	0.000E+00	1.094E-07	1.522E-05	2.710E-05	3.654E-05	4.413E-05	5.517E-05	6.636E-05	6.971E-05
Pu240	0.000E+00	2.041E-10	8.058E-07	2.470E-06	4.426E-06	6.497E-06	1.087E-05	1.928E-05	2.591E-05
Pu241	0.000E+00	7.076E-13	1.650E-07	9.842E-07	2.393E-06	4.182E-06	8.129E-06	1.542E-05	2.049E-05
Pu242	0.000E+00	2.477E-16	3.054E-09	3.783E-08	1.446E-07	3.522E-07	1.098E-06	3.821E-06	7.653E-06
Am241	0.000E+00	5.990E-17	7.333E-10	8.855E-09	3.301E-08	7.719E-08	2.198E-07	6.078E-07	9.313E-07
Am242m	0.000E+00	4.782E-21	2.782E-12	6.241E-11	3.245E-10	9.351E-10	3.440E-09	1.170E-08	1.893E-08
Am243	0.000E+00	9.558E-20	6.634E-11	1.711E-09	1.060E-08	3.330E-08	1.618E-07	9.200E-07	2.418E-06
Cm242	0.000E+00	1.708E-20	3.061E-11	7.227E-10	3.911E-09	1.171E-08	4.672E-08	1.914E-07	3.774E-07
Cm243									
Cm244	0.000E+00	4.565E-23	1.733E-12	9.371E-11	9.088E-10	4.086E-09	3.252E-08	3.544E-07	1.416E-06
Cm245									
Cm246									
Mo95									
Tc99	0.000E+00	1.359E-08	2.373E-06	4.764E-06	7.102E-06	9.383E-06	1.378E-05	2.185E-05	2.891E-05
Rh103	0.000E+00	6.085E-10	8.046E-07	2.049E-06	3.299E-06	4.506E-06	6.749E-06	1.047E-05	1.317E-05
Cs133	0.000E+00	8.614E-09	2.525E-06	5.125E-06	7.648E-06	1.008E-05	1.469E-05	2.283E-05	2.943E-05
Sm147									
Sm149	0.000E+00	2.730E-09	5.516E-08	5.932E-08	6.185E-08	6.365E-08	6.443E-08	6.175E-08	5.691E-08
Sm150	0.000E+00	1.822E-10	3.914E-07	8.759E-07	1.385E-06	1.911E-06	2.999E-06	5.222E-06	7.394E-06
Sm152	0.000E+00	2.290E-09	1.697E-07	3.850E-07	5.981E-07	7.925E-07	1.122E-06	1.584E-06	1.898E-06
Nd143									
Nd145									
Eu153	0.000E+00	1.411E-09	8.661E-08	2.136E-07	3.774E-07	5.722E-07	1.016E-06	1.937E-06	2.702E-06
Gd155	0.000E+00	1.546E-13	1.204E-10	2.298E-10	3.488E-10	5.129E-10	9.769E-10	2.261E-09	3.516E-09

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性 (燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.269E-02	3.178E-02	3.069E-02	2.962E-02	2.861E-02	2.781E-02	2.627E-02	2.357E-02	2.128E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	6.086E+01	5.910E+01	5.641E+01	5.473E+01	5.358E+01	5.311E+01	5.271E+01	5.350E+01	5.512E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	2.824E-01	2.833E-01	2.876E-01	2.896E-01	2.917E-01	2.922E-01	2.947E-01	2.978E-01	3.004E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.133E+00	6.138E+00	6.152E+00	6.202E+00	6.277E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	0.000E+00	1.976E+02	1.805E+02	1.693E+02	1.612E+02	1.566E+02	1.506E+02	1.472E+02	1.483E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	0.000E+00	0.000E+00	1.862E+00	1.858E+00	1.857E+00	1.851E+00	1.848E+00	1.846E+00	1.848E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	0.000E+00	0.000E+00	1.799E+02	1.716E+02	1.659E+02	1.629E+02	1.589E+02	1.585E+02	1.613E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.452E+00	1.453E+00	1.460E+00	1.468E+00	1.475E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.109E+00	3.074E+00	3.032E+00	2.992E+00	2.985E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.621E+00	1.627E+00	1.631E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.475E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.952E+00	2.968E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性 (燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.219E-02	2.174E-02	2.144E-02	2.121E-02	2.094E-02	2.075E-02	2.029E-02	1.937E-02	1.858E-02
σ_a (U235)	3.107E+01	3.024E+01	2.896E+01	2.817E+01	2.765E+01	2.744E+01	2.728E+01	2.772E+01	2.854E+01
σ_a (U238)	9.121E-01	9.104E-01	9.098E-01	9.100E-01	9.088E-01	9.137E-01	9.185E-01	9.249E-01	9.357E-01
σ_a (Pu238)	0.000E+00	1.832E+01	1.761E+01	1.718E+01	1.699E+01	1.693E+01	1.691E+01	1.722E+01	1.781E+01
σ_a (Pu239)	0.000E+00	1.094E+02	9.964E+01	9.329E+01	8.870E+01	8.601E+01	8.252E+01	8.039E+01	8.079E+01
σ_a (Pu240)	0.000E+00	1.858E+02	1.835E+02	1.584E+02	1.386E+02	1.212E+02	9.969E+01	7.783E+01	6.850E+01
σ_a (Pu241)	0.000E+00	8.965E+01	8.297E+01	7.904E+01	7.631E+01	7.491E+01	7.298E+01	7.266E+01	7.391E+01
σ_a (Pu242)	0.000E+00	3.369E+01	3.331E+01	3.348E+01	2.986E+01	2.972E+01	2.898E+01	2.695E+01	2.407E+01
σ_a (Am241)	0.000E+00	8.225E+01	7.675E+01	7.290E+01	6.976E+01	6.797E+01	6.555E+01	6.326E+01	6.247E+01
σ_a (Am243)	0.000E+00	4.911E+01	4.785E+01	4.665E+01	4.540E+01	4.425E+01	4.628E+01	4.484E+01	4.255E+01
σ_a (Cm242)	0.000E+00	4.670E+00	4.654E+00	4.648E+00	4.654E+00	4.659E+00	4.676E+00	4.710E+00	5.018E+00
σ_a (Cm244)	0.000E+00	1.524E+01	1.519E+01	1.515E+01	1.530E+01	1.528E+01	1.543E+01	1.752E+01	1.730E+01
Σ_a (その他1)	0.000E+00	4.659E-06	8.151E-05	1.445E-04	2.004E-04	2.537E-04	3.516E-04	5.025E-04	6.185E-04
Σ_a (その他2)	3.621E-05	4.879E-04	8.702E-04	1.104E-03	1.317E-03	1.525E-03	1.894E-03	2.553E-03	3.081E-03
Σ_a (Zr)									
Σ_a (H ₂ O)									

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.42950	1.39122	1.33429	1.28739	1.24302	1.20501	1.13952	1.02756	0.93460
Hot, 40%ボイド	1.38623	1.35325	1.29494	1.24601	1.20297	1.16527	1.10034	0.98642	0.89503
Hot, 70%ボイド	1.31393	1.28667	1.23166	1.18150	1.13912	1.09946	1.03508	0.92212	0.83316
Doppler, 0%ボイド	1.40125	1.36492	1.30908	1.26146	1.21853	1.18024	1.11380	1.00270	0.91138
Cold, 0%ボイド	1.53496	1.48471	1.43033	1.38603	1.34576	1.31098	1.24661	1.12927	1.02610

Hot 0%ボイドより瞬時変化

Pin Cell (MOX) with MCNP-BURN + JENDL-3.2

表 1 - 1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.19162
0.1	1.18502
5	1.16286
10	1.14577
15	1.13021
20	1.11712
30	1.09176
50	1.04526
70	1.00282

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

(1/b/cm)

核種	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
U235	1.296E-05	1.294E-05	1.240E-05	1.187E-05	1.135E-05	1.085E-05	9.914E-06	8.244E-06	6.836E-06
U236	0.000E+00	3.182E-09	1.559E-07	3.046E-07	4.432E-07	5.746E-07	8.145E-07	1.208E-06	1.504E-06
U238	6.385E-03	6.384E-03	6.363E-03	6.342E-03	6.320E-03	6.298E-03	6.253E-03	6.161E-03	6.064E-03
Np237	0.000E+00	2.546E-09	1.291E-07	2.569E-07	3.816E-07	5.063E-07	7.419E-07	1.172E-06	1.542E-06
Pu238	2.799E-05	2.797E-05	2.779E-05	2.841E-05	2.946E-05	3.072E-05	3.342E-05	3.864E-05	4.327E-05
Pu239	7.233E-04	7.226E-04	6.975E-04	6.732E-04	6.496E-04	6.267E-04	5.834E-04	5.048E-04	4.367E-04
Pu240	3.304E-04	3.304E-04	3.293E-04	3.278E-04	3.260E-04	3.240E-04	3.193E-04	3.072E-04	2.918E-04
Pu241	1.224E-04	1.225E-04	1.259E-04	1.290E-04	1.318E-04	1.342E-04	1.381E-04	1.427E-04	1.436E-04
Pu242	8.389E-05	8.388E-05	8.345E-05	8.308E-05	8.276E-05	8.252E-05	8.220E-05	8.223E-05	8.286E-05
Am241	3.554E-05	3.552E-05	3.489E-05	3.431E-05	3.380E-05	3.334E-05	3.257E-05	3.123E-05	2.986E-05
Am242m	0.000E+00	4.591E-09	2.099E-07	3.833E-07	5.250E-07	6.400E-07	8.054E-07	9.652E-07	9.967E-07
Am243	0.000E+00	5.244E-08	2.521E-06	4.855E-06	7.026E-06	9.012E-06	1.258E-05	1.826E-05	2.256E-05
Cm242	0.000E+00	3.377E-08	1.898E-06	2.947E-06	3.513E-06	3.816E-06	4.063E-06	4.205E-06	4.293E-06
Cm243									
Cm244	0.000E+00	4.626E-11	1.273E-07	4.878E-07	1.043E-06	1.770E-06	3.592E-06	8.272E-06	1.371E-05
Cm245									
Cm246									
Mo95									
Tc99	0.000E+00	1.391E-08	2.411E-06	4.839E-06	7.214E-06	9.535E-06	1.403E-05	2.244E-05	3.012E-05
Rh103	0.000E+00	1.285E-09	1.660E-06	4.164E-06	6.654E-06	9.057E-06	1.360E-05	2.169E-05	2.853E-05
Cs133	0.000E+00	8.985E-09	2.608E-06	5.287E-06	7.887E-06	1.041E-05	1.523E-05	2.404E-05	3.180E-05
Sm147									
Sm149	0.000E+00	3.504E-09	3.098E-07	4.098E-07	4.406E-07	4.496E-07	4.443E-07	4.167E-07	3.864E-07
Sm150	0.000E+00	4.654E-11	2.182E-07	6.605E-07	1.183E-06	1.731E-06	2.852E-06	5.111E-06	7.343E-06
Sm152	0.000E+00	4.994E-09	2.637E-07	5.446E-07	8.265E-07	1.104E-06	1.615E-06	2.418E-06	2.956E-06
Nd143									
Nd145									
Eu153	0.000E+00	3.313E-09	1.799E-07	3.879E-07	6.227E-07	8.801E-07	1.443E-06	2.622E-06	3.680E-06
Gd155	0.000E+00	7.693E-13	1.351E-09	3.873E-09	6.443E-09	8.722E-09	1.268E-08	2.277E-08	3.819E-08

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性 (燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.121E-02	3.105E-02	3.043E-02	2.997E-02	2.951E-02	2.913E-02	2.841E-02	2.708E-02	2.577E-02	
$\nu \sigma_f$ (U235)	1.990E+01	1.984E+01	1.976E+01	1.974E+01	1.979E+01	1.985E+01	1.998E+01	2.040E+01	2.082E+01	
$\nu \sigma_f$ (U238)	3.425E-01	3.434E-01	3.443E-01	3.432E-01	3.432E-01	3.436E-01	3.429E-01	3.425E-01	3.424E-01	
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	5.561E+00	5.566E+00	5.572E+00	5.561E+00	5.564E+00	5.560E+00	5.577E+00	5.572E+00	5.582E+00	
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	3.026E+01	3.010E+01	3.012E+01	3.035E+01	3.056E+01	3.087E+01	3.158E+01	3.323E+01	3.501E+01	
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	2.033E+00	2.035E+00	2.039E+00	2.036E+00	2.035E+00	2.037E+00	2.034E+00	2.032E+00	2.032E+00	
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	4.757E+01	4.735E+01	4.706E+01	4.695E+01	4.693E+01	4.707E+01	4.737E+01	4.834E+01	4.953E+01	
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	1.654E+00	1.656E+00	1.660E+00	1.657E+00	1.656E+00	1.657E+00	1.655E+00	1.653E+00	1.652E+00	
$\nu \sigma_f$ (Am241)	2.480E+00	2.482E+00	2.481E+00	2.474E+00	2.470E+00	2.468E+00	2.464E+00	2.463E+00	2.467E+00	
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.000E+00	0.000E+00	1.775E+00	1.769E+00	1.767E+00	1.766E+00	1.762E+00	1.757E+00	1.756E+00	
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.000E+00	0.000E+00	4.355E+00	4.347E+00	4.353E+00	4.344E+00	4.349E+00	4.356E+00	4.361E+00	
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.000E+00	0.000E+00	3.105E+00	3.103E+00	3.101E+00	3.105E+00	3.100E+00	3.094E+00	3.090E+00	

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性 (燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
Σ_a (全核種)	2.585E-02	2.573E-02	2.539E-02	2.515E-02	2.489E-02	2.470E-02	2.431E-02	2.363E-02	2.297E-02	
σ_a (U235)	1.140E+01	1.138E+01	1.134E+01	1.132E+01	1.135E+01	1.138E+01	1.143E+01	1.164E+01	1.186E+01	
σ_a (U238)	8.559E-01	8.556E-01	8.567E-01	8.561E-01	8.560E-01	8.590E-01	8.604E-01	8.631E-01	8.706E-01	
σ_a (Pu238)	6.810E+00	6.803E+00	6.760E+00	6.766E+00	6.753E+00	6.773E+00	6.820E+00	6.882E+00	6.970E+00	
σ_a (Pu239)	1.611E+01	1.602E+01	1.604E+01	1.618E+01	1.630E+01	1.649E+01	1.689E+01	1.783E+01	1.883E+01	
σ_a (Pu240)	1.308E+01	1.302E+01	1.295E+01	1.290E+01	1.288E+01	1.282E+01	1.281E+01	1.304E+01	1.337E+01	
σ_a (Pu241)	2.112E+01	2.103E+01	2.090E+01	2.085E+01	2.084E+01	2.092E+01	2.107E+01	2.152E+01	2.208E+01	
σ_a (Pu242)	8.742E+00	8.680E+00	8.652E+00	8.687E+00	8.618E+00	8.663E+00	8.641E+00	8.554E+00	8.554E+00	
σ_a (Am241)	2.123E+01	2.115E+01	2.099E+01	2.090E+01	2.079E+01	2.073E+01	2.072E+01	2.098E+01	2.137E+01	
σ_a (Am243)	0.000E+00	2.367E+01	2.637E+01	2.570E+01	2.531E+01	2.446E+01	2.375E+01	2.264E+01	2.228E+01	
σ_a (Cm242)	0.000E+00	4.000E+00	4.200E+00	4.178E+00	4.216E+00	4.156E+00	4.202E+00	4.235E+00	4.256E+00	
σ_a (Cm244)	0.000E+00	1.198E+01	1.101E+01	1.110E+01	1.099E+01	1.096E+01	1.093E+01	1.074E+01	1.032E+01	
Σ_a (その他1)	0.000E+00	8.318E-06	1.844E-05	5.972E-05	9.641E-05	1.276E-04	1.575E-04	2.075E-04	2.702E-04	
Σ_a (その他2)	1.427E-04	4.565E-04	1.393E-03	2.096E-03	2.678E-03	3.205E-03	4.167E-03	5.834E-03	7.307E-03	
Σ_a (Zr)										
Σ_a (H ₂ O)										

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
Hot, 0%ボイド	1.19162	1.18502	1.16286	1.14577	1.13021	1.11712	1.09176	1.04526	1.00282	
Hot, 40%ボイド	1.18075	1.17473	1.15347	1.13798	1.12383	1.10934	1.08283	1.03367	0.98829	
Hot, 70%ボイド	1.17632	1.17014	1.15110	1.13527	1.11988	1.10603	1.07798	1.02750	0.98061	
Doppler, 0%ボイド	1.16777	1.16109	1.14105	1.12405	1.11088	1.09779	1.07351	1.02722	0.98524	
Cold, 0%ボイド	1.26363	1.25038	1.22404	1.20679	1.19162	1.17602	1.15266	1.10611	1.06514	

Hot 0%ボイドより瞬時変化

15. FLEXBURN コードの概要とベンチマーク計算手法（電中研）

1. 計算コード

電力中央研究所の中性子輸送および燃焼計算コード FLEXBURN

2. 計算手法の概要

任意の凸四角形を計算メッシュに用い、discrete ordinates 法 (Sn 法) に基づき、各計算メッシュを Sn 角度方向ごとの中性子が透過、漏洩する確率を用い、中性子輸送計算を 2 次元で行う。

燃料集合体の計算には燃料棒セルなどの取り扱いは不要で、体系を表現する計算メッシュと燃焼領域を細かくすることにより、燃料ペレット内の詳細な燃焼計算が可能である。

中性子輸送計算により多群の中性子束を算出した後、1 群に縮約した実効断面積を用い、燃焼計算を Matrix exponential 法 (ORIGEN2 型) により行う。

文献 1) 亀山高範、他; "Neutron transport code FLEXBURN by Sn method with transmission probabilities in arbitrary square meshes for light water reactor fuel assemblies," Nuclear Science and Engineering, 123, 86 (1996).

3. 核データライブラリ及びベースとなる核データ

電力中央研究所の MGCL(multi group constant library)を利用する。MGCL は JENDL-3.2 から作成し、エネルギー群数は 26 群である。

MGCL では共鳴核種の自己遮蔽因子には F テーブルを、²³⁸U の相互遮蔽因子には G テーブルを用い、それぞれ考慮する。温度因子は、293K, 560K, 900K を基準点とした内挿法による F テーブルで対応する。

アクチニドは 18 核種、FP は 45 核種、その他の FP は 1 つにまとめた仮想核種(lumped FP)からなる燃焼チェインを利用する。

文献 2) 松村哲夫、他: 「軽水炉用多群定数ライブラリーの開発」、
電力中央研究所報告 279065 (1980)。

3) 小室雄一、他: 「臨界計算用多群定数ライブラリー MGCL-J3 の作成と検証」、
JAERI-M 93-190 (1993)。

4. ベンチマーク計算の概要

1) 輸送計算

輸送計算では、角度分点は S8、非等方散乱は P3 まで設定した。

[燃料棒セル]

燃料ペレット内は径方向 10 領域、被覆管は径方向 2 領域に分割した。

計算体系は 1/4 セルを対象にし、 22×22 メッシュを用いた。

[PWR: Gd 集合体, MOX 集合体]

各燃料ペレット内は径方向 5 領域、各被覆管内は径方向 1 領域に分割した。

計算体系は 1/4 集合体を対象にし、 187×187 メッシュを用いた。

2) 燃焼計算

[燃料棒セル]

燃料ペレット内は径方向 10 領域で、それぞれ燃焼計算を行った。

燃焼ステップは、1–70MWd/kgHM では 1MWd/kgHM 毎に設定した。

0–1MWd/kgHM ではさらに細かい燃焼ステップを設定した。

[PWR: Gd 集合体]

UO_2 燃料ペレット内は径方向 1 領域として燃焼計算を行った。

U-Gd 燃料ペレット内は径方向 5 領域で、それぞれ燃焼計算を行った。

燃焼ステップは、1–20MWd/kgHM では 0.5MWd/kgHM 毎、

20–70MWd/kgHM では 1.0MWd/kgHM 毎に設定した。

0–1MWd/kgHM ではさらに細かい燃焼ステップを設定した。

[PWR: MOX 集合体]

MOX 燃料ペレット内は径方向 1 領域として燃焼計算を行った。

燃焼ステップは 1–70MWd/kgHM では 1MWd/kgHM 毎に設定した。

0–1MWd/kgHM ではさらに細かい燃焼ステップを設定した。

Pin Cell (UO_2) with FLEXBURN + JENDL-3.2

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.42682
0.1	1.38811
5	1.33135
10	1.28088
15	1.23451
20	1.19494
30	1.12576
50	1.00946
70	0.91350

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

(1/b/cm)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
U235	5.03933E-04	5.02978E-04	4.58214E-04	4.16008E-04	3.76758E-04	3.40177E-04	2.74324E-04	1.68991E-04	9.53060E-05
U236	0.00000E+00	1.91424E-07	9.13754E-06	1.74252E-05	2.49690E-05	3.18209E-05	4.35785E-05	5.99153E-05	6.76582E-05
U238	7.15710E-03	7.15671E-03	7.13690E-03	7.11577E-03	7.09367E-03	7.07064E-03	7.02184E-03	6.91330E-03	6.78967E-03
Np237	0.00000E+00	4.18255E-10	2.54366E-07	7.17746E-07	1.33386E-06	2.06716E-06	3.76869E-06	7.53310E-06	1.09795E-05
Pu238	0.00000E+00	2.62765E-13	8.79054E-09	4.90014E-08	1.36640E-07	2.85212E-07	8.08028E-07	2.91912E-06	6.35200E-06
Pu239	0.00000E+00	3.34258E-07	1.47881E-05	2.62133E-05	3.52439E-05	4.24423E-05	5.27094E-05	6.26300E-05	6.50510E-05
Pu240	0.00000E+00	4.14062E-10	8.02585E-07	2.48587E-06	4.45875E-06	6.52847E-06	1.07885E-05	1.86151E-05	2.45402E-05
Pu241	0.00000E+00	1.64185E-12	1.32177E-07	7.99210E-07	2.06004E-06	3.72592E-06	7.50326E-06	1.45584E-05	1.92643E-05
Pu242	0.00000E+00	5.92295E-16	2.47356E-09	3.09954E-08	1.25128E-07	3.17982E-07	1.05611E-06	3.90718E-06	8.07068E-06
Am241	0.00000E+00	1.42282E-16	5.82934E-10	7.07089E-09	2.73748E-08	6.63216E-08	1.97189E-07	5.62459E-07	8.58913E-07
Am242m	0.00000E+00	1.58179E-20	2.80726E-12	5.90423E-11	3.01822E-10	8.70882E-10	3.17241E-09	1.05228E-08	1.66089E-08
Am243	0.00000E+00	1.93894E-19	4.32554E-11	1.05631E-09	6.43591E-09	2.24597E-08	1.18474E-07	7.70415E-07	2.15029E-06
Cm242	0.00000E+00	1.00881E-19	1.96657E-11	4.49435E-10	2.48028E-09	7.69393E-09	3.22491E-08	1.39434E-07	2.81848E-07
Cm243	0.00000E+00	3.67596E-24	3.84588E-14	1.84258E-12	1.59699E-11	6.86744E-11	4.59746E-10	3.54279E-09	1.00809E-08
Cm244	0.00000E+00	9.49161E-23	1.13429E-12	5.92855E-11	5.58754E-10	2.65200E-09	2.24657E-08	2.77843E-07	1.22760E-06
Cm245	0.00000E+00	0.00000E+00	8.25359E-15	9.02550E-13	1.30876E-11	8.47545E-11	1.04960E-09	2.12194E-08	1.29321E-07
Cm246	0.00000E+00	-	-	-	-	-	-	-	-
Mo95	0.00000E+00	-	-	-	-	-	-	-	-
Tc99	0.00000E+00	1.10409E-08	2.39081E-06	4.78736E-06	7.11337E-06	9.36699E-06	1.36498E-05	2.12702E-05	2.75597E-05
Rh103	0.00000E+00	6.21823E-10	8.41935E-07	2.14469E-06	3.45955E-06	4.73480E-06	7.12733E-06	1.11808E-05	1.41793E-05
Cs133	0.00000E+00	3.58194E-09	2.60591E-06	5.30056E-06	7.89645E-06	1.03919E-05	1.50756E-05	2.31798E-05	2.95606E-05
Sm147	0.00000E+00	-	-	-	-	-	-	-	-
Sm149	0.00000E+00	2.82026E-09	5.39702E-08	5.82637E-08	6.11594E-08	6.28957E-08	6.37205E-08	5.95095E-08	5.29874E-08
Sm150	0.00000E+00	2.02087E-10	4.18395E-07	9.30201E-07	1.46717E-06	2.02136E-06	3.15458E-06	5.38176E-06	7.39756E-06
Sm152	0.00000E+00	2.36947E-09	1.83343E-07	4.33155E-07	6.93976E-07	9.63914E-07	1.46625E-06	2.33613E-06	3.01510E-06
Nd143	0.00000E+00	1.06544E-09	1.98890E-06	4.21263E-06	6.30439E-06	8.26831E-06	1.18182E-05	1.73989E-05	2.09436E-05
Nd145	0.00000E+00	2.78143E-08	1.56885E-06	3.08360E-06	4.54372E-06	5.95079E-06	8.60973E-06	1.33098E-05	1.71803E-05
Eu153	0.00000E+00	5.20806E-10	8.13849E-08	1.90752E-07	3.29544E-07	4.96099E-07	8.97832E-07	1.86339E-06	2.85451E-06
Gd155	0.00000E+00	-	-	-	-	-	-	-	-

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.29150E-02	3.20960E-02	3.09320E-02	2.98550E-02	2.88370E-02	2.79440E-02	2.63390E-02	2.35610E-02	2.12420E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	6.06490E+01	5.89960E+01	5.64780E+01	5.50130E+01	5.40520E+01	5.35560E+01	5.33650E+01	5.46940E+01	5.69100E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	3.28520E-01	3.29280E-01	3.30860E-01	3.31900E-01	3.32610E-01	3.32970E-01	3.33090E-01	3.32210E-01	3.30860E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	0.00000E+00	6.29230E+00	6.25120E+00	6.23350E+00	6.22670E+00	6.22690E+00	6.24030E+00	6.29460E+00	6.35960E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	0.00000E+00	1.95130E+02	1.79700E+02	1.69560E+02	1.62490E+02	1.57820E+02	1.52650E+02	1.51000E+02	1.54280E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	0.00000E+00	2.01040E+00	1.99850E+00	2.00060E+00	2.00070E+00	1.99620E+00	1.98830E+00	1.97540E+00	1.96520E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	0.00000E+00	1.94040E+02	1.82510E+02	1.75510E+02	1.70740E+02	1.67780E+02	1.65020E+02	1.66290E+02	1.71370E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	0.00000E+00	1.51380E+00	1.52140E+00	1.52600E+00	1.52950E+00	1.53150E+00	1.53290E+00	1.53040E+00	1.52520E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	0.00000E+00	3.48470E+00	3.39710E+00	3.33120E+00	3.28080E+00	3.24680E+00	3.20330E+00	3.16520E+00	3.15660E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.00000E+00	1.76310E+00	1.76980E+00	1.77360E+00	1.77490E+00	1.77450E+00	1.77360E+00	1.76790E+00	1.76060E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.00000E+00	4.60260E+00	4.59250E+00	4.58910E+00	4.58790E+00	4.58640E+00	4.58780E+00	4.60200E+00	4.62030E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.00000E+00	3.07790E+00	3.08780E+00	3.09570E+00	3.10190E+00	3.10600E+00	3.09610E+00	3.09600E+00	3.09590E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸收反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.30480E-02	2.31020E-02	2.32130E-02	2.32870E-02	2.33370E-02	2.33620E-02	2.33730E-02	2.33150E-02	2.32260E-02
σ_a (U235)	3.10930E+01	3.03040E+01	2.91110E+01	2.84240E+01	2.79800E+01	2.77600E+01	2.77030E+01	2.84020E+01	2.95120E+01
σ_a (U238)	8.77930E-01	8.76240E-01	8.76420E-01	8.77910E-01	8.79870E-01	8.82170E-01	8.87390E-01	8.98930E-01	9.10550E-01
σ_a (Pu238)	0.00000E+00	1.82910E+01	1.75880E+01	1.72110E+01	1.69850E+01	1.68860E+01	1.69130E+01	1.74520E+01	1.82300E+01
σ_a (Pu239)	0.00000E+00	1.07890E+02	9.91360E+01	9.33550E+01	8.93140E+01	8.66260E+01	8.35970E+01	8.24170E+01	8.40210E+01
σ_a (Pu240)	0.00000E+00	1.92590E+02	1.51050E+02	1.42090E+02	1.32770E+02	1.18980E+02	9.98330E+01	8.00760E+01	7.10970E+01
σ_a (Pu241)	0.00000E+00	8.93270E+01	8.38680E+01	8.05450E+01	7.82760E+01	7.68570E+01	7.55060E+01	7.59830E+01	7.82610E+01
σ_a (Pu242)	0.00000E+00	2.68760E+01	2.67530E+01	2.41660E+01	2.37960E+01	2.36680E+01	2.35220E+01	2.32850E+01	2.13990E+01
σ_a (Am241)	0.00000E+00	7.90440E+01	7.41940E+01	7.06200E+01	6.79160E+01	6.61350E+01	6.39620E+01	6.24140E+01	6.24700E+01
σ_a (Am243)	0.00000E+00	4.78650E+01	4.75570E+01	4.71130E+01	4.61990E+01	4.52200E+01	4.44340E+01	4.34370E+01	4.25710E+01
σ_a (Cm242)	0.00000E+00	4.86550E+00	4.85210E+00	4.85000E+00	4.85210E+00	4.84680E+00	4.85050E+00	4.89210E+00	4.93610E+00
σ_a (Cm244)	0.00000E+00	1.65140E+01	1.65850E+01	1.66510E+01	1.67160E+01	1.67730E+01	1.55700E+01	1.54190E+01	1.55270E+01
Σ_a (その他1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ_a (その他2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ_a (Zr)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ_a (H2O)	-	-	-	-	-	-	-	-	-

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: 016および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.42682	-	-	-	-	-	-	-	-
Hot, 40%ボイド	1.38438	-	-	-	-	-	-	-	-
Hot, 70%ボイド	1.31043	-	-	-	-	-	-	-	-
Doppler, 0%ボイド	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cold, 0%ボイド	1.55501	-	-	-	-	-	-	-	-

Hot 0%ボイドより瞬時変化

Pin Cell (MOX) with FLEXBURN + JENDL-3.2

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.19383
0.1	1.18692
5	1.16605
10	1.14940
15	1.13471
20	1.12104
30	1.09561
50	1.04968
70	1.00883

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

核種	燃焼度(GWd/t)								(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	
U235	1.29562E-05	1.29452E-05	1.24121E-05	1.18864E-05	1.13788E-05	1.08891E-05	9.96206E-06	8.30886E-06	6.90784E-06
U236	0.00000E+00	3.18717E-09	1.55357E-07	3.02206E-07	4.40613E-07	5.70779E-07	8.07366E-07	1.19251E-06	1.47306E-06
U238	6.38464E-03	6.38423E-03	6.36440E-03	6.34385E-03	6.32303E-03	6.30196E-03	6.25909E-03	6.17048E-03	6.07814E-03
Np237	0.00000E+00	9.48798E-10	2.08128E-07	4.24440E-07	6.33935E-07	8.36368E-07	1.21957E-06	1.89756E-06	2.45627E-06
Pu238	2.79879E-05	2.79729E-05	2.77027E-05	2.80588E-05	2.87515E-05	2.96144E-05	3.15304E-05	3.53641E-05	3.88517E-05
Pu239	7.23341E-04	7.22802E-04	6.97010E-04	6.71618E-04	6.47087E-04	6.23379E-04	5.78326E-04	4.97168E-04	4.27173E-04
Pu240	3.30426E-04	3.30406E-04	3.29206E-04	3.27669E-04	3.25850E-04	3.23758E-04	3.18781E-04	3.05826E-04	2.89273E-04
Pu241	1.22407E-04	1.22477E-04	1.25709E-04	1.28621E-04	1.31153E-04	1.33332E-04	1.36728E-04	1.40241E-04	1.40205E-04
Pu242	8.38910E-05	8.38910E-05	8.39112E-05	8.39980E-05	8.41517E-05	8.43687E-05	8.49763E-05	8.67622E-05	8.90805E-05
Am241	3.55372E-05	3.55245E-05	3.49323E-05	3.43910E-05	3.39026E-05	3.34554E-05	3.26433E-05	3.11274E-05	2.94856E-05
Am242m	0.00000E+00	6.13482E-09	2.74250E-07	4.90328E-07	6.59309E-07	7.90207E-07	9.65533E-07	1.10011E-06	1.08897E-06
Am243	0.00000E+00	5.05638E-08	2.42611E-06	4.64163E-06	6.66552E-06	8.52174E-06	1.18029E-05	1.70044E-05	2.08694E-05
Cm242	0.00000E+00	3.89020E-08	1.47202E-06	2.27782E-06	2.71875E-06	2.96152E-06	3.17719E-06	3.31166E-06	3.38766E-06
Cm243	0.00000E+00	4.26846E-12	8.54288E-09	2.76272E-08	5.08989E-08	7.50050E-08	1.19915E-07	1.87775E-07	2.31016E-07
Cm244	0.00000E+00	5.43031E-11	1.28430E-07	4.88297E-07	1.04298E-06	1.75635E-06	3.55216E-06	8.09990E-06	1.33534E-05
Cm245	0.00000E+00	1.78417E-14	1.92448E-09	1.44575E-08	4.62716E-08	1.03958E-07	3.14699E-07	1.16107E-06	2.46806E-06
Cm246	0.00000E+00	-	-	-	-	-	-	-	-
Mo95	0.00000E+00	-	-	-	-	-	-	-	-
Tc99	0.00000E+00	1.09917E-08	2.35459E-06	4.71982E-06	7.02552E-06	9.27338E-06	1.36002E-05	2.16002E-05	2.87575E-05
Rh103	0.00000E+00	1.24218E-09	1.64259E-06	4.12704E-06	6.60077E-06	8.98954E-06	1.35031E-05	2.15287E-05	2.82939E-05
Cs133	0.00000E+00	3.61031E-09	2.58468E-06	5.26140E-06	7.85242E-06	1.03614E-05	1.51433E-05	2.38167E-05	3.13776E-05
Sm147	0.00000E+00	-	-	-	-	-	-	-	-
Sm149	0.00000E+00	3.46586E-09	3.00245E-07	3.98473E-07	4.30018E-07	4.38039E-07	4.31817E-07	3.99287E-07	3.62431E-07
Sm150	0.00000E+00	5.23373E-11	2.22921E-07	6.62251E-07	1.16691E-06	1.69126E-06	2.74464E-06	4.77618E-06	6.66210E-06
Sm152	0.00000E+00	4.88417E-09	2.66968E-07	5.67058E-07	8.83256E-07	1.20395E-06	1.82920E-06	2.91676E-06	3.74210E-06
Nd143	0.00000E+00	8.23432E-10	1.54298E-06	3.33702E-06	5.10150E-06	6.83615E-06	1.02154E-05	1.66044E-05	2.24755E-05
Nd145	0.00000E+00	2.20127E-08	1.25028E-06	2.48002E-06	3.68643E-06	4.86968E-06	7.16798E-06	1.14982E-05	1.54771E-05
Eu153	0.00000E+00	1.16118E-09	1.64587E-07	3.48964E-07	5.51517E-07	7.71943E-07	1.25969E-06	2.35088E-06	3.45804E-06
Gd155	0.00000E+00	-	-	-	-	-	-	-	-

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.16880E-02	3.15080E-02	3.09460E-02	3.04910E-02	3.00850E-02	2.97030E-02	2.89840E-02	2.76670E-02	2.64780E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	1.96490E+01	1.95540E+01	1.95010E+01	1.95150E+01	1.95600E+01	1.96230E+01	1.97880E+01	2.02230E+01	2.07660E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	3.74520E-01	3.74560E-01	3.74460E-01	3.74300E-01	3.74080E-01	3.73840E-01	3.73250E-01	3.71880E-01	3.70330E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	5.59910E+00	5.59650E+00	5.59700E+00	5.59840E+00	5.59990E+00	5.60140E+00	5.60440E+00	5.61080E+00	5.61810E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	3.03760E+01	3.01870E+01	3.02350E+01	3.04280E+01	3.06880E+01	3.09910E+01	3.16860E+01	3.33490E+01	3.53360E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	2.15460E+02	2.15480E+02	2.15500E+02	2.15490E+02	2.15450E+02	2.15390E+02	2.15240E+02	2.14830E+02	2.14330E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	4.87230E+01	4.84730E+01	4.84260E+01	4.85540E+01	4.87620E+01	4.90150E+01	4.96190E+01	5.10960E+01	5.28650E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	1.71100E+00	1.71120E+00	1.71120E+00	1.71090E+00	1.71040E+00	1.70970E+00	1.70790E+00	1.70320E+00	1.69750E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	2.63400E+00	2.63340E+00	2.63130E+00	2.62980E+00	2.62870E+00	2.62790E+00	2.62720E+00	2.62810E+00	2.62160E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.00000E+00	1.91260E+00	1.91090E+00	1.90920E+00	1.90710E+00	1.90490E+00	1.90080E+00	1.89300E+00	1.88570E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.00000E+00	4.48690E+00	4.48640E+00	4.48690E+00	4.48740E+00	4.48790E+00	4.48880E+00	4.49010E+00	4.49120E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.00000E+00	3.27730E+00	3.26240E+00	3.26150E+00	3.26080E+00	3.26010E+00	3.25830E+00	3.24880E+00	3.23500E+00

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性(燃料セル平均)

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.65210E-02	2.65230E-02	2.65170E-02	2.65050E-02	2.64900E-02	2.64720E-02	2.64310E-02	2.63320E-02	2.62190E-02
σ_a (U235)	1.13060E+01	1.12610E+01	1.12320E+01	1.12350E+01	1.12540E+01	1.12830E+01	1.13610E+01	1.15730E+01	1.18430E+01
σ_a (U238)	8.21210E-01	8.21110E-01	8.22300E-01	8.23750E-01	8.25360E-01	8.27070E-01	8.30720E-01	8.38670E-01	8.47290E-01
σ_a (Pu238)	6.50250E+00	6.46890E+00	6.45140E+00	6.45460E+00	6.46680E+00	6.48390E+00	6.52860E+00	6.64710E+00	6.79780E+00
σ_a (Pu239)	1.61380E+01	1.60430E+01	1.60870E+01	1.62060E+01	1.63610E+01	1.65390E+01	1.69400E+01	1.78910E+01	1.90160E+01
σ_a (Pu240)	1.31510E+01	1.31240E+01	1.30390E+01	1.29850E+01	1.29580E+01	1.29530E+01	1.29950E+01	1.32360E+01	1.36500E+01
σ_a (Pu241)	2.15000E+01	2.13870E+01	2.13700E+01	2.14320E+01	2.15300E+01	2.16490E+01	2.19310E+01	2.26200E+01	2.34430E+01
σ_a (Pu242)	8.52260E+00	8.52190E+00	8.48280E+00	8.44570E+00	8.41220E+00	8.38140E+00	8.32600E+00	8.22860E+00	8.14440E+00
σ_a (Am241)	2.06560E+01	2.06060E+01	2.05130E+01	2.04710E+01	2.04690E+01	2.04970E+01	2.06240E+01	2.10720E+01	2.17040E+01
σ_a (Am243)	0.00000E+00	2.86320E+01	2.80730E+01	2.76310E+01	2.70900E+01	2.65620E+01	2.57420E+01	2.47090E+01	2.41710E+01
σ_a (Cm242)	0.00000E+00	4.16520E+00	4.16130E+00	4.16210E+00	4.16400E+00	4.16650E+00	4.17360E+00	4.19270E+00	4.21590E+00
σ_a (Cm244)	0.00000E+00	1.38570E+01	1.25420E+01	1.24830E+01	1.24630E+01	1.24520E+01	1.24480E+01	1.20210E+01	1.13180E+01
Σ_a (その他1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ_a (その他2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ_a (Zr)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ_a (H ₂ O)	-	-	-	-	-	-	-	-	-

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.19383	-	-	-	-	-	-	-	-
Hot, 40%ボイド	1.18222	-	-	-	-	-	-	-	-
Hot, 70%ボイド	1.17412	-	-	-	-	-	-	-	-
Doppler, 0%ボイド	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cold, 0%ボイド	1.27984	-	-	-	-	-	-	-	-

Hot 0%ボイドより瞬時変化

PWR (UO_2) with FLEXBURN + JENDL-3.2

表 1-1. 無限増倍率、局所ピーキング係数の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーキング係数
0	1.13885	1.14941
0.1	1.11379	1.14945
5	1.10597	1.14200
10	1.10731	1.13136
15	1.11339	1.12268
20	1.12804	1.11200
30	1.13393	1.08958
50	1.01063	1.06042
70	0.90053	1.03908

* 核分裂率

表 1-2. 核分裂率分布

燃焼度(GWd/t)=

0

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.10802	0.28921	0.00000	1.14629	1.10726	0.00000	1.11579	1.11394
2		1.08820	1.07628	1.12925	1.06600	1.04312	0.29081	1.07456	1.11041
3			1.11559	1.12090	0.28744	1.05248	1.10484	1.11256	1.11750
4				0.00000	1.12986	1.14052	0.00000	1.14748	1.12108
5					1.14941	1.13799	0.29253	1.07174	1.10515
6						0.00000	1.04469	1.05849	1.09401
7							0.28916	1.03623	1.08917
8								1.06958	1.09658
9									1.10426

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)=

5

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.10835	0.37317	0.00000	1.13912	1.10691	0.00000	1.10474	1.08971
2		1.08598	1.07719	1.12541	1.06873	1.04934	0.37128	1.06599	1.08624
3			1.10897	1.11931	0.36571	1.05697	1.10185	1.09582	1.09131
4				0.00000	1.12800	1.13566	0.00000	1.12931	1.09442
5					1.14200	1.13744	0.37712	1.06259	1.08002
6						0.00000	1.05244	1.04590	1.06797
7							0.35967	1.02297	1.06113
8								1.04469	1.06404
9									1.06838

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)=

10

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.10503	0.47480	0.00000	1.12661	1.10178	0.00000	1.09111	1.06552
2		1.08111	1.07531	1.11707	1.06795	1.05254	0.46753	1.05632	1.06207
3			1.09816	1.11304	0.45901	1.05871	1.09549	1.07784	1.06542
4				0.00000	1.12125	1.12619	0.00000	1.10884	1.06810
5					1.12919	1.13136	0.47894	1.05248	1.05482
6						0.00000	1.05630	1.03248	1.04206
7							0.44054	1.00902	1.03332
8								1.02017	1.03250
9									1.03410

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)=

15

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.10048	0.58644	0.00000	1.11176	1.09461	0.00000	1.07622	1.04051
2		1.07496	1.07203	1.10678	1.06568	1.05449	0.57279	1.04585	1.03706
3			1.08538	1.10493	0.56161	1.05934	1.08789	1.05885	1.03882
4				0.00000	1.11247	1.11460	0.00000	1.08712	1.04099
5					1.11379	1.12268	0.58958	1.04157	1.02881
6						0.00000	1.05894	1.01829	1.01546
7							0.52765	0.99457	1.00489
8								0.99526	1.00062
9									0.99955

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 20										
j	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.09561	0.70736	0.00000	1.09507	1.08597	0.00000	1.06029	1.01445	
2		1.06838	1.06798	1.09519	1.06233	1.05561	0.68601	1.03454	1.01101	
3			1.07117	1.09522	0.67259	1.05914	1.07947	1.03892	1.01116	
4				0.00000	1.10191	1.10147	0.00000	1.06442	1.01287	
5					1.09633	1.11200	0.70776	1.03008	1.00185	
6						0.00000	1.06062	1.00349	0.98790	
7							0.61949	0.97928	0.97546	
8								0.96960	0.96780	
9									0.96409	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 30										
j	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.08105	0.84957	0.00000	1.06872	1.07100	0.00000	1.03760	0.98193	
2		1.05442	1.05808	1.07488	1.05774	1.05690	0.83745	1.02046	0.97852	
3			1.04982	1.07963	0.83157	1.05916	1.06584	1.01254	0.97634	
4				0.00000	1.08482	1.07895	0.00000	1.03120	0.97717	
5					1.06905	1.08958	0.84446	1.01378	0.96831	
6						0.00000	1.06300	0.98788	0.95524	
7							0.78329	0.96903	0.94183	
8								0.94330	0.92970	
9									0.92213	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 50										
j	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.05996	0.86105	0.00000	1.05147	1.05225	0.00000	1.02798	0.99609	
2		1.04746	1.04982	1.05574	1.04925	1.04785	0.85101	1.02050	0.99351	
3			1.04443	1.05875	0.85260	1.04907	1.04695	1.01490	0.99160	
4				0.00000	1.06042	1.05534	0.00000	1.02261	0.99175	
5					1.05135	1.05856	0.85239	1.01434	0.98458	
6						0.00000	1.04412	0.99857	0.97441	
7							0.82170	0.98490	0.96301	
8								0.96374	0.95218	
9									0.94506	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 70										
j	i →	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.03908	0.87872	0.00000	1.03407	1.03432	0.00000	1.02052	1.00825	
2		1.03561	1.03687	1.03641	1.03617	1.03519	0.87114	1.01932	1.00650	
3			1.03371	1.03775	0.87455	1.03532	1.03025	1.01583	1.00492	
4				0.00000	1.03702	1.03367	0.00000	1.01643	1.00476	
5					1.03242	1.03258	0.86964	1.01427	0.99970	
6						0.00000	1.02736	1.00719	0.99324	
7							0.85307	0.99902	0.98506	
8								0.98481	0.97694	
9									0.97122	

(1に規格化)

表 2-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.13885								
Doppler, 0%ボイド	-								
Cold, 0%ボイド	1.24813								

Hot 0%ボイドより瞬時変化

PWR (MOX) with FLEXBURN + JENDL-3.2

表 1-1. 無限増倍率、局所ピーキング係数の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率	局所ピーキング係数*
0	1.21158	1.15410
0.1	1.20356	1.15336
5	1.18183	1.15101
10	1.16507	1.14898
15	1.15026	1.14676
20	1.13636	1.14449
30	1.11032	1.13960
50	1.06252	1.12908
70	1.01924	1.11775

* 核分裂率

表 1-2. 核分裂率分布

燃焼度(GWd/t)= 0

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.09005	1.09068	0.00000	1.09184	1.09480	0.00000	0.94687	0.86635
2		1.03276	1.03337	1.09166	1.03513	1.03746	1.09740	1.04198	0.86037
3			1.03444	1.09434	1.03857	1.04172	1.10202	1.04426	0.86085
4				0.00000	1.10768	1.11392	0.00000	0.95166	0.86774
5					1.09635	1.15405	1.14557	1.04515	0.86077
6						0.00000	1.10645	1.00772	0.85881
7							1.04401	0.87229	0.88817
8								0.90703	0.65280
9									0.68095

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 5

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.08919	1.08977	0.00000	1.09087	1.09371	0.00000	0.94599	0.86789
2		1.03378	1.03441	1.09075	1.03605	1.03823	1.09612	1.04237	0.86217
3			1.03542	1.09337	1.03936	1.04232	1.10067	1.04457	0.86263
4				0.00000	1.10621	1.11210	0.00000	0.95055	0.86922
5					1.09538	1.15101	1.14267	1.04534	0.86249
6						0.00000	1.10473	1.00883	0.86041
7							1.04407	0.87334	0.88810
8								0.90585	0.65522
9									0.68162

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 10

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.08804	1.08869	0.00000	1.08977	1.09249	0.00000	0.94556	0.86940
2		1.03384	1.03439	1.08959	1.03611	1.03824	1.09491	1.04217	0.86374
3			1.03546	1.09219	1.03940	1.04232	1.09935	1.04440	0.86418
4				0.00000	1.10497	1.11083	0.00000	0.95007	0.87069
5					1.09457	1.14898	1.14066	1.04519	0.86399
6						0.00000	1.10335	1.00918	0.86189
7							1.04379	0.87463	0.88905
8								0.90648	0.65912
9									0.68473

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)= 15

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.08690	1.08746	0.00000	1.08865	1.09129	0.00000	0.94500	0.87087
2		1.03390	1.03446	1.08851	1.03625	1.03830	1.09363	1.04215	0.86526
3			1.03555	1.09115	1.03959	1.04242	1.09803	1.04434	0.86573
4				0.00000	1.10385	1.10950	0.00000	0.94943	0.87219
5					1.09393	1.14676	1.13848	1.04503	0.86548
6						0.00000	1.10201	1.00980	0.86337
7							1.04368	0.87592	0.88993
8								0.90700	0.66264
9									0.68739

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)=

20

j	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.08575	1.08635	0.00000	1.08748	1.09009	0.00000	0.94430	0.87240	
2		1.03408	1.03468	1.08732	1.03644	1.03854	1.09233	1.04212	0.86686	
3			1.03579	1.08999	1.03983	1.04260	1.09679	1.04433	0.86731	
4				0.00000	1.10259	1.10824	0.00000	0.94869	0.87368	
5					1.09317	1.14449	1.13612	1.04500	0.86703	
6						0.00000	1.10060	1.01039	0.86488	
7							1.04365	0.87722	0.89079	
8								0.90743	0.66599	
9									0.68985	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)=

30

j	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.08352	1.08413	0.00000	1.08520	1.08769	0.00000	0.94286	0.87552	
2		1.03466	1.03528	1.08507	1.03693	1.03893	1.08975	1.04213	0.87009	
3			1.03633	1.08771	1.04035	1.04308	1.09410	1.04431	0.87052	
4				0.00000	1.10009	1.10546	0.00000	0.94714	0.87675	
5					1.09153	1.13960	1.13141	1.04494	0.87014	
6						0.00000	1.09779	1.01193	0.86793	
7							1.04353	0.87982	0.89245	
8								0.90824	0.67245	
9									0.69449	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)=

50

j	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.07873	1.07926	0.00000	1.08035	1.08236	0.00000	0.93999	0.88216	
2		1.03593	1.03654	1.08029	1.03824	1.04003	1.08424	1.04221	0.87704	
3			1.03760	1.08285	1.04167	1.04408	1.08831	1.04430	0.87748	
4				0.00000	1.09484	1.09960	0.00000	0.94401	0.88335	
5					1.08822	1.12908	1.12097	1.04484	0.87689	
6						0.00000	1.09164	1.01526	0.87456	
7							1.04332	0.88543	0.89590	
8								0.90974	0.68554	
9									0.70397	

(1に規格化)

燃焼度(GWd/t)=

70

j	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00000	1.07366	1.07422	0.00000	1.07524	1.07695	0.00000	0.93726	0.88911	
2		1.03734	1.03797	1.07523	1.03967	1.04121	1.07837	1.04214	0.88436	
3			1.03907	1.07775	1.04317	1.04528	1.08222	1.04417	0.88484	
4				0.00000	1.08916	1.09336	0.00000	0.94102	0.89028	
5					1.08446	1.11775	1.10986	1.04467	0.88402	
6						0.00000	1.08513	1.01885	0.88159	
7							1.04312	0.89125	0.89931	
8								0.91097	0.69949	
9									0.71437	

(1に規格化)

表 2-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

		燃焼度(GWd/t)								
		0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド		1.21158								
Doppler, 0%ボイド		-								
Cold, 0%ボイド		1.30259								

Hot 0%ボイドより瞬時変化

16. LWRWIMS コードの概要とベンチマーク計算手法（電源開発）

1. コード名

LWRWIMS

2. コードの概要

LWRWIMS は WIMS コードファミリーのコードで、軽水炉燃料集合体を容易に取り扱える機能を持っている。

正方領域に囲まれた正方燃料棒配置、BWR に特有な形状－水ギャップ、十字制御棒等を模擬出来る。

3. 核データライブラリ

JEF2.2 ベース、172 群

4. 計算概要

(1) 計算手法

172 群構造のライブラリから、エネルギー群縮約とペレット、被覆管、減速材の 3 領域の空間的均質化を実施して、11 群の断面積を作成し、PERSEUS 法衝突確率方程式を使って計算した。

燃料組成の燃焼変化は、2 群に縮約した断面積を使用して計算した。Pu238 及び Cm242、Cm243、Cm244、Cm245、Cm246 は、ライブラリで燃焼チェーンが繋がっていないので原子個数密度は計算していない。

(2) エネルギー群構造

	輸送計算時		燃焼計算時
1 群	$\sim 8.21 \times 10^5$ eV	1 群	$\sim 6.25 \times 10^{-1}$ eV
2 群	$\sim 5.53 \times 10^3$ eV	2 群	$\sim 1.10 \times 10^{-4}$ eV
3 群	$\sim 4.00 \times 10^0$ eV		
4 群	$\sim 1.12 \times 10^0$ eV		
5 群	$\sim 6.25 \times 10^{-1}$ eV		
6 群	$\sim 3.00 \times 10^{-1}$ eV		
7 群	$\sim 1.80 \times 10^{-1}$ eV		
8 群	$\sim 5.00 \times 10^{-2}$ eV		
9 群	$\sim 3.00 \times 10^{-2}$ eV		
10 群	$\sim 1.50 \times 10^{-2}$ eV		
11 群	$\sim 1.10 \times 10^{-4}$ eV		

Pin Cell (UO_2) with LWRWIMS + JEF2.2

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.42095
0.1	1.38254
5	1.32369
10	1.27394
15	1.23026
20	1.19198
30	1.12561
50	1.02014
70	0.93091

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

	燃焼度(GWd/t) (1/b/cm)									
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70	
U235	5.0393E-04	5.0298E-04	4.5853E-04	4.1695E-04	3.7851E-04	3.4286E-04	2.7900E-04	1.7861E-04	1.0703E-04	
U236	0.0000E+00	1.8946E-07	9.0372E-06	1.7224E-05	2.4682E-05	3.1477E-05	4.3229E-05	5.9844E-05	6.9234E-05	
U238	7.1571E-03	7.1567E-03	7.1359E-03	7.1137E-03	7.0907E-03	7.0669E-03	7.0168E-03	6.9088E-03	6.7887E-03	
Np237	0.0000E+00	4.0300E-12	9.3956E-08	3.5714E-07	7.4644E-07	1.2253E-06	2.3609E-06	4.9698E-06	7.2950E-06	
Pu238	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	
Pu239	0.0000E+00	1.1154E-07	1.5669E-05	2.8150E-05	3.8047E-05	4.5971E-05	5.7411E-05	6.8557E-05	7.1683E-05	
Pu240	0.0000E+00	2.0882E-10	8.0781E-07	2.4991E-06	4.5403E-06	6.7477E-06	1.1329E-05	1.9071E-05	2.5492E-05	
Pu241	0.0000E+00	8.0461E-13	1.6735E-07	9.5191E-07	2.3008E-06	4.0143E-06	7.9090E-06	1.5669E-05	2.0557E-05	
Pu242	0.0000E+00	2.6466E-16	2.9888E-09	3.5984E-09	1.3635E-07	3.2874E-07	1.0281E-06	3.6230E-06	7.2908E-06	
Am241	0.0000E+00	6.6648E-17	7.4090E-10	8.7265E-09	3.2025E-08	7.4255E-08	2.1164E-07	6.0567E-07	9.3522E-07	
Am242m	0.0000E+00	4.9888E-19	3.8898E-12	8.0691E-11	3.9280E-10	1.0806E-09	3.7237E-09	1.2332E-08	1.9706E-08	
Am243	0.0000E+00	5.9233E-19	5.4933E-11	1.4295E-09	8.5763E-09	2.8625E-08	1.3961E-07	8.1217E-07	2.1249E-06	
Cm242	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	
Cm243	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	
Cm244	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	
Cm245	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	
Cm246	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	
Mo95	0.0000E+00	1.3082E-11	6.7118E-07	2.5983E-06	4.9148E-06	7.2679E-06	1.1797E-05	1.9894E-05	2.6791E-05	
Tc99	0.0000E+00	4.9925E-08	2.4656E-06	4.8664E-06	7.2031E-06	9.4755E-06	1.3826E-05	2.1619E-05	2.8332E-05	
Rh103	0.0000E+00	6.0144E-10	7.9217E-07	2.0106E-06	3.2382E-06	4.4272E-06	6.6543E-06	1.0372E-05	1.3164E-05	
Cs133	0.0000E+00	8.4634E-09	2.4809E-06	5.0226E-06	7.4760E-06	9.8405E-06	1.4301E-05	2.2026E-05	2.8306E-05	
Sm147	0.0000E+00	9.6554E-13	3.1988E-08	1.2845E-07	2.6861E-07	4.3528E-07	7.9850E-07	1.4471E-06	1.8368E-06	
Sm149	0.0000E+00	2.6656E-09	5.4097E-08	5.9562E-08	6.3382E-08	6.5909E-08	6.8259E-08	6.7805E-08	6.3128E-08	
Sm150	0.0000E+00	1.8477E-10	3.8648E-07	8.6613E-07	1.3730E-06	1.8983E-06	2.9772E-06	5.0958E-06	7.0463E-06	
Sm152	0.0000E+00	2.2397E-09	1.6702E-07	3.7977E-07	5.9060E-07	7.8582E-07	1.1236E-06	1.6297E-06	2.0108E-06	
Nd143	0.0000E+00	3.1111E-09	1.9676E-06	4.1326E-06	6.1641E-06	8.0687E-06	1.1512E-05	1.6939E-05	2.0585E-05	
Nd145	0.0000E+00	3.1742E-08	1.5528E-06	3.0380E-06	4.4611E-06	5.8246E-06	8.3794E-06	1.2769E-05	1.6320E-05	
Eu153	0.0000E+00	4.6667E-10	8.0707E-08	2.0544E-07	3.7175E-07	5.7192E-07	1.0389E-06	2.0464E-06	2.9636E-06	
Gd155	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性（燃料セル平均）

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.2391E-02	3.1583E-02	3.0415E-02	2.9386E-02	2.8450E-02	2.7605E-02	2.6102E-02	2.3640E-02	2.1513E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	6.0094E+01	5.8553E+01	5.5612E+01	5.3846E+01	5.2712E+01	5.2000E+01	5.1402E+01	5.2020E+01	5.3729E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	2.9425E-01	2.9489E-01	2.9651E-01	2.9757E-01	2.9824E-01	2.9859E-01	2.9884E-01	2.9833E-01	2.9729E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	0.0000E+00								
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	0.0000E+00	1.9373E+02	1.7606E+02	1.6462E+02	1.5689E+02	1.5164E+02	1.4535E+02	1.4162E+02	1.4346E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	0.0000E+00	2.0073E+00	2.0089E+00	2.0016E+00	1.9945E+00	1.9883E+00	1.9789E+00	1.9662E+00	1.9553E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	0.0000E+00	1.9426E+02	1.8065E+02	1.7215E+02	1.6649E+02	1.6279E+02	1.5870E+02	1.5759E+02	1.6122E+02
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	0.0000E+00	1.4610E+00	1.4692E+00	1.4747E+00	1.4781E+00	1.4800E+00	1.4808E+00	1.4758E+00	1.4677E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	0.0000E+00	3.7968E+00	3.6672E+00	3.5770E+00	3.5127E+00	3.4663E+00	3.4030E+00	3.3404E+00	3.3181E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.0000E+00	1.5354E+00	1.5429E+00	1.5474E+00	1.5500E+00	1.5512E+00	1.5513E+00	1.5467E+00	1.5396E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.0000E+00								
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.0000E+00								

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸収反応断面積の燃焼度依存性（燃料セル平均）

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.2795E-02	2.2844E-02	2.2977E-02	2.3067E-02	2.3126E-02	2.3159E-02	2.3189E-02	2.3174E-02	2.3110E-02
σ_a (U235)	3.0717E+01	2.9979E+01	2.8585E+01	2.7756E+01	2.7230E+01	2.6900E+01	2.6638E+01	2.7002E+01	2.7870E+01
σ_a (U238)	9.2326E-01	9.2174E-01	9.2036E-01	9.2048E-01	9.2117E-01	9.2225E-01	9.2489E-01	9.3147E-01	9.3931E-01
σ_a (Pu238)	0.0000E+00								
σ_a (Pu239)	0.0000E+00	1.0751E+02	9.7472E+01	9.0948E+01	8.6540E+01	8.3526E+01	7.9883E+01	7.7586E+01	7.8421E+01
σ_a (Pu240)	0.0000E+00	2.0318E+02	1.8534E+02	1.5805E+02	1.3591E+02	1.1941E+02	9.7495E+01	7.7238E+01	6.7438E+01
σ_a (Pu241)	0.0000E+00	8.8754E+01	8.2402E+01	7.8426E+01	7.5778E+01	7.4041E+01	7.2116E+01	7.1545E+01	7.3174E+01
σ_a (Pu242)	0.0000E+00	2.8457E+01	2.8457E+01	2.8448E+01	2.8362E+01	2.8197E+01	2.7549E+01	2.5376E+01	2.2937E+01
σ_a (Am241)	0.0000E+00	8.4926E+01	7.9336E+01	7.5473E+01	7.2753E+01	7.0833E+01	6.8299E+01	6.6062E+01	6.5599E+01
σ_a (Am243)	0.0000E+00	4.8151E+01	4.7788E+01	4.7310E+01	4.6838E+01	4.6420E+01	4.5598E+01	4.4018E+01	4.2478E+01
σ_a (Cm242)	0.0000E+00								
σ_a (Cm244)	0.0000E+00								
Σ_a (その他1)	0.0000E+00	4.9444E-06	7.5700E-05	1.3023E-04	1.7990E-04	2.2263E-04	3.0203E-04	4.2721E-04	5.1729E-04
Σ_a (その他2)	6.1750E-05	5.1325E-04	8.9241E-04	1.1374E-03	1.3598E-03	1.5673E-03	1.9474E-03	2.5994E-03	3.1380E-03
Σ_a (Zr)	1.7154E-04	1.7079E-04	1.6956E-04	1.6891E-04	1.6852E-04	1.6833E-04	1.6828E-04	1.6886E-04	1.6985E-04
Σ_a (H2O)	4.7466E-04	4.6514E-04	4.4392E-04	4.3011E-04	4.2075E-04	4.1462E-04	4.0790E-04	4.0649E-04	4.1323E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.42095	1.38254	1.32369	1.27394	1.23026	1.19198	1.12561	1.02014	0.93091
Hot, 40%ボイド	1.38003	1.34611	1.28733	1.23640	1.19221	1.15345	1.08623	0.97974	0.89019
Hot, 70%ボイド	1.31059	1.28388	1.22607	1.17432	1.12986	1.09092	1.02329	0.91549	0.82557
Doppler, 0%ボイド	1.38963	1.35265	1.29529	1.24584	1.20224	1.16391	1.09783	0.99412	0.90714
Cold, 0%ボイド	1.52915	1.47949	1.42304	1.37718	1.33620	1.29950	1.23406	1.12430	1.02682

Hot 0%ボイドより瞬時変化

Pin Cell (MOX) with LWRWIMS + JEF2.2

表 1-1. 無限増倍率の燃焼度依存性

燃焼度(GWd/t)	無限増倍率
0	1.18245
0.1	1.17595
5	1.15450
10	1.13807
15	1.12366
20	1.11018
30	1.08481
50	1.03857
70	0.99481

表 2. 主要核種原子数密度の燃焼度依存性

核種	燃焼度(GWd/t)								(1/b/cm)
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	
U235	1.2956E-05	1.2946E-05	1.2433E-05	1.1923E-05	1.1427E-05	1.0945E-05	1.0021E-05	8.3395E-06	6.8559E-06
U236	0.0000E+00	3.3291E-09	1.6270E-07	3.1728E-07	4.6378E-07	6.0241E-07	8.5692E-07	1.2774E-06	1.5955E-06
U238	6.3846E-03	6.3842E-03	6.3641E-03	6.3433E-03	6.3223E-03	6.3011E-03	6.2580E-03	6.1699E-03	6.0785E-03
Np237	0.0000E+00	7.1608E-14	1.7514E-09	7.2455E-09	1.6055E-08	2.7770E-08	5.8469E-08	1.4087E-07	2.3721E-07
Pu238	2.7988E-05	2.7973E-05	2.7247E-05	2.6516E-05	2.5795E-05	2.5084E-05	2.3693E-05	2.1045E-05	1.8557E-05
Pu239	7.2334E-04	7.2261E-04	6.9892E-04	6.7570E-04	6.5316E-04	6.3127E-04	5.8931E-04	5.1350E-04	4.4612E-04
Pu240	3.3043E-04	3.3041E-04	3.2926E-04	3.2783E-04	3.2617E-04	3.2429E-04	3.1984E-04	3.0811E-04	2.9324E-04
Pu241	1.2241E-04	1.2247E-04	1.2517E-04	1.2763E-04	1.2978E-04	1.3166E-04	1.3464E-04	1.3785E-04	1.3810E-04
Pu242	8.3891E-05	8.3886E-05	8.3624E-05	8.3410E-05	8.3250E-05	8.3140E-05	8.3063E-05	8.3362E-05	8.4118E-05
Am241	3.5537E-05	3.5523E-05	3.4838E-05	3.4209E-05	3.3641E-05	3.3123E-05	3.2197E-05	3.0613E-05	2.9016E-05
Am242m	0.0000E+00	6.8063E-09	3.0388E-07	5.4166E-07	7.2570E-07	8.6627E-07	1.0492E-06	1.1780E-06	1.1542E-06
Am243	0.0000E+00	4.8196E-08	2.3183E-06	4.4512E-06	6.4160E-06	8.2290E-06	1.1456E-05	1.6552E-05	2.0376E-05
Cm242	0.0000E+00								
Cm243	0.0000E+00								
Cm244	0.0000E+00								
Cm245	0.0000E+00								
Cm246	0.0000E+00								
Mo95	0.0000E+00	9.5523E-12	4.8769E-07	1.8960E-06	3.6114E-06	5.3851E-06	8.9015E-06	1.5607E-05	2.1891E-05
Tc99	0.0000E+00	4.7732E-08	2.3604E-06	4.6713E-06	6.9342E-06	9.1505E-06	1.3447E-05	2.1424E-05	2.8727E-05
Rh103	0.0000E+00	1.2682E-09	1.6368E-06	4.1007E-06	6.5587E-06	8.9426E-06	1.3479E-05	2.1582E-05	2.8550E-05
Cs133	0.0000E+00	8.5386E-09	2.4829E-06	5.0323E-06	7.5042E-06	9.9013E-06	1.4481E-05	2.2730E-05	2.9975E-05
Sm147	0.0000E+00	8.9549E-13	2.9803E-08	1.2106E-07	2.5668E-07	4.2249E-07	8.0397E-07	1.5897E-06	2.2452E-06
Sm149	0.0000E+00	3.3603E-09	3.0281E-07	4.0563E-07	4.3966E-07	4.4990E-07	4.4894E-07	4.2703E-07	3.9756E-07
Sm150	0.0000E+00	4.4007E-11	2.0724E-07	6.3372E-07	1.1320E-06	1.6539E-06	2.7108E-06	4.7649E-06	6.7153E-06
Sm152	0.0000E+00	4.8859E-09	2.5708E-07	5.2919E-07	8.0361E-07	1.0720E-06	1.5720E-06	2.3698E-06	2.9305E-06
Nd143	0.0000E+00	2.3258E-09	1.4932E-06	3.2131E-06	4.9091E-06	6.5805E-06	9.8475E-06	1.6011E-05	2.1723E-05
Nd145	0.0000E+00	2.4601E-08	1.2184E-06	2.4142E-06	3.5875E-06	4.7384E-06	6.9730E-06	1.1132E-05	1.4935E-05
Eu153	0.0000E+00	1.1681E-09	1.7116E-07	3.7269E-07	6.0003E-07	8.5030E-07	1.4036E-06	2.5966E-06	3.7439E-06
Gd155	0.0000E+00								

表 3-1. 中性子生成反応断面積の燃焼度依存性（燃料セル平均）

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
$\nu \Sigma_f$ (全核種)	3.0994E-02	3.0827E-02	3.0258E-02	2.9814E-02	2.9419E-02	2.9046E-02	2.8338E-02	2.7030E-02	2.5778E-02
$\nu \sigma_f$ (U235)	1.9795E+01	1.9711E+01	1.9640E+01	1.9644E+01	1.9679E+01	1.9730E+01	1.9866E+01	2.0223E+01	2.0706E+01
$\nu \sigma_f$ (U238)	3.3651E-01	3.3653E-01	3.3645E-01	3.3627E-01	3.3607E-01	3.3584E-01	3.3530E-01	3.3408E-01	3.3258E-01
$\nu \sigma_f$ (Pu238)	5.4797E+00	5.4775E+00	5.4781E+00	5.4803E+00	5.4830E+00	5.4858E+00	5.4914E+00	5.5025E+00	5.5145E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu239)	2.9608E+01	2.9441E+01	2.9453E+01	2.9622E+01	2.9863E+01	3.0145E+01	3.0803E+01	3.2378E+01	3.4216E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu240)	2.1071E+00	2.1072E+00	2.1075E+00	2.1074E+00	2.1070E+00	2.1065E+00	2.1052E+00	2.1017E+00	2.0966E+00
$\nu \sigma_f$ (Pu241)	4.9796E+01	4.9567E+01	4.9247E+01	4.9153E+01	4.9167E+01	4.9246E+01	4.9529E+01	5.0485E+01	5.1911E+01
$\nu \sigma_f$ (Pu242)	1.6114E+00	1.6115E+00	1.6116E+00	1.6112E+00	1.6108E+00	1.6102E+00	1.6086E+00	1.6048E+00	1.5996E+00
$\nu \sigma_f$ (Am241)	2.5868E+00	2.5860E+00	2.5816E+00	2.5779E+00	2.5750E+00	2.5729E+00	2.5699E+00	2.5683E+00	2.5710E+00
$\nu \sigma_f$ (Am243)	0.0000E+00	1.6934E+00	1.6919E+00	1.6900E+00	1.6883E+00	1.6865E+00	1.6831E+00	1.6765E+00	1.6696E+00
$\nu \sigma_f$ (Cm242)	0.0000E+00								
$\nu \sigma_f$ (Cm244)	0.0000E+00								

 $\nu \Sigma_f$: 一群巨視的断面積(1/cm) $\nu \sigma_f$: 一群微視的断面積(barn)

表 3-2. 中性子吸收反応断面積の燃焼度依存性（燃料セル平均）

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Σ_a (全核種)	2.6211E-02	2.6214E-02	2.6209E-02	2.6197E-02	2.6181E-02	2.6163E-02	2.6122E-02	2.6026E-02	2.5912E-02
σ_a (U235)	1.1309E+01	1.1269E+01	1.1231E+01	1.1231E+01	1.1246E+01	1.1270E+01	1.1334E+01	1.1503E+01	1.1743E+01
σ_a (U238)	8.6599E-01	8.6590E-01	8.6552E-01	8.6553E-01	8.6565E-01	8.6597E-01	8.6699E-01	8.6985E-01	8.7497E-01
σ_a (Pu238)	6.4634E+00	6.4331E+00	6.4087E+00	6.4111E+00	6.4234E+00	6.4410E+00	6.4850E+00	6.5986E+00	6.7468E+00
σ_a (Pu239)	1.5829E+01	1.5745E+01	1.5768E+01	1.5873E+01	1.6017E+01	1.6181E+01	1.6561E+01	1.7464E+01	1.8501E+01
σ_a (Pu240)	1.3025E+01	1.2999E+01	1.2893E+01	1.2826E+01	1.2787E+01	1.2767E+01	1.2774E+01	1.2944E+01	1.3290E+01
σ_a (Pu241)	2.2004E+01	2.1902E+01	2.1763E+01	2.1727E+01	2.1738E+01	2.1779E+01	2.1918E+01	2.2368E+01	2.3029E+01
σ_a (Pu242)	8.3432E+00	8.3419E+00	8.3103E+00	8.2918E+00	8.2764E+00	8.2636E+00	8.2405E+00	8.2055E+00	8.1897E+00
σ_a (Am241)	2.2506E+01	2.2456E+01	2.2300E+01	2.2203E+01	2.2149E+01	2.2127E+01	2.2152E+01	2.2416E+01	2.2932E+01
σ_a (Am243)	0.0000E+00	2.7621E+01	2.6863E+01	2.6201E+01	2.5646E+01	2.5180E+01	2.4434E+01	2.3486E+01	2.2997E+01
σ_a (Cm242)	0.0000E+00								
σ_a (Cm244)	0.0000E+00								
Σ_a (その他1)	8.2641E-18	3.1584E-06	2.4873E-05	4.0708E-05	5.3380E-05	6.3540E-05	7.8184E-05	9.3598E-05	9.9921E-05
Σ_a (その他2)	7.1164E-05	1.6557E-04	4.5238E-04	6.7207E-04	8.5947E-04	1.0302E-03	1.3422E-03	1.8889E-03	2.3802E-03
Σ_a (Zr)	1.5089E-04	1.5087E-04	1.5092E-04	1.5102E-04	1.5112E-04	1.5123E-04	1.5144E-04	1.5189E-04	1.5239E-04
Σ_a (H2O)	1.8596E-04	1.8550E-04	1.8450E-04	1.8399E-04	1.8373E-04	1.8363E-04	1.8373E-04	1.8489E-04	1.8719E-04

 Σ_a : 一群巨視的断面積(1/cm) σ_a : 一群微視的断面積(barn)

その他1: その他の核分裂性核種、親核種の総和

その他2: O16および核分裂生成核種の総和

表 4-1. 無限増倍率のボイド率・温度瞬時変化特性

	燃焼度(GWd/t)								
	0	0.1	5	10	15	20	30	50	70
Hot, 0%ボイド	1.18245	1.17595	1.15450	1.13807	1.12366	1.11018	1.08481	1.03857	0.99481
Hot, 40%ボイド	1.17296	1.16770	1.14692	1.13034	1.11550	1.10151	1.07495	1.02647	0.98068
Hot, 70%ボイド	1.16958	1.16591	1.14593	1.12906	1.11355	1.09874	1.07041	1.01807	0.96897
Doppler, 0%ボイド	1.15733	1.15114	1.13058	1.11478	1.10079	1.08778	1.06320	1.01815	0.97541
Cold, 0%ボイド	1.25360	1.24179	1.21631	1.19891	1.18454	1.17148	1.14729	1.10291	1.06170

Hot 0%ボイドより瞬時変化

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s ²
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m ²
工率、放射束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	A·s
電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	オーム	Ω	C/V
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665		1	2.20462
4.44822		0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	= 4.1855 J(15 °C)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸		= 4.1868 J(国際蒸気表)
9.80665		1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.61272 × 10 ¹⁹			
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹			仕事率 1 PS(仏馬力)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹			= 75 kgf·m/s
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸			= 735.499 W
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1			

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

軽水炉次世代燃料の炉物理に関するベンチマーク問題の提案及び解析結果

R100
古紙配合率100%
白度70%再生紙を使用しています