

TRU 専焼炉及び発電用高速炉の比較検討

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)



2001年3月

株式会社 日立製作所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2001

TRU 専焼炉及び発電用高速炉の比較検討

藤村 幸治* 三田 敏男**
小川 隆***

要 旨

環境負荷低減の観点から原子炉の使用済み燃料中に含まれる放射性廃棄物、特に長寿命の TRU 核種を高速炉で照射・核変換し、安定化、短寿命化をはかる研究開発が行われている。高速炉への TRU 装荷方法としては、全ての発電用高速炉燃料に TRU を薄く添加する方法と、TRU 変換に特化した少数の専焼炉のみに TRU を多量に装荷する方法が考えられている。

本研究では、実用化高速炉の炉心候補概念の明確化に資するため、TRU 専焼炉に関する既存情報の調査、TRU 専焼炉の核変換性能及び炉心核特性について標準的な発電用高速炉を用いた核変換方法との比較検討を行い、その得失について整理した。

本研究の主要結果を以下に示す。

1. TRU 専焼炉に関する既存情報の整理

公開文献に基づき、TRU 専焼炉炉心概念及び高速炉を中心とした発電用原子炉を用いる核変換処理システムを調査し、核変換性能、炉心核特性、及び研究開発課題を整理した。

- ・発電用高速炉の炉心燃料に 5wt%程度のマイナーアクチニド (MA) を均質装荷する場合、炉心の核特性に大幅な影響を及ぼさず同出力規模の高速炉 5 基分程度から発生する MA を核変換できる見通しが得られている。

- ・日本原子力研究所 (原研) から提案されている MA 専焼高速炉概念 (He 冷却) は、MA 富化度を 60wt%以上とした被覆粒子型窒化物燃料を用いてほぼ MA のみで臨界を達成するもので 100 万 kWe 級軽水炉 10 数基分から発生する MA を核変換できる。

- ・MA の可燃性吸収材燃料親核種としての核的な特長を活用して 30 年程度以上燃料無交換運転を達成する超長寿命炉心の概念が提案されている。

- ・課題として、MA 装荷に起因する反応度係数の正側への移行及び MA 装荷燃料の中性子発生数・発熱量増大への設計、設備対策が挙げられる。

2. TRU 専焼炉の設定

実用化戦略調査研究で検討されている発電用高速炉 (ナトリウム冷却窒化物燃料大型

炉心(3800MWt)の仕様に基づき、MA 窒化物燃料を用いるナトリウム冷却 TRU 専焼炉大型炉心の仕様を設定し、核変換特性及び炉心核特性を評価した。MA 組成は軽水炉使用済み燃料に含まれるものを想定した。MA の核変換量を最大化する観点より MA 富化度は原研の設計例で示されている 60wt%とした。MA の大量装荷に起因する反応度係数の正側への移行を改善し、発電用高速炉に MA を 5wt%富化した炉心と同程度のドップラ一係数を確保するには、炉心燃料の 25%を水素化ジルコニウム($ZrH_{1.6}$)と置換する必要がある。また、同出力のナトリウム冷却窒化物燃料大型炉心 48 基分から発生する MA を核変換できる。

MA 核変換特性の炉心出力規模依存性を確認するため、上記 TRU 専焼炉大型炉心の燃料集合体数を減らして原子炉出力を 1200MWt とした TRU 専焼炉中小型炉心を設定し核変換特性及び炉心核特性を評価した。中小型炉心は大型炉心と比べ Pu 富化度増大に伴い中性子束レベルが低下するため、MA の核変換率が減少する。

3. TRU 専焼炉と発電用高速炉の比較検討

TRU 専焼炉大型炉心の仕様設定の基準としたナトリウム冷却窒化物燃料大型炉心の炉心燃料に MA を 5wt%富化した発電用高速炉を設定し、核変換特性及び炉心核特性を比較整理した。発電用高速炉の MA 核変換量は同出力のナトリウム冷却窒化物燃料大型炉心 7 基分程度と少ないが、TRU 専焼炉大型炉心と比べて MA 核変換率が高く、既存の高速炉概念からの変更点が少ない利点を有する。ここでは、高速炉使用済み燃料に含まれる MA 組成を用いた場合も検討し、 Np_{237} が半分を占める軽水炉使用済み燃料の MA 組成と比べ、MA 核変換量、核変換率が減少することが分かった。

本報告書は、(株)日立製作所が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究の成果である。

核燃料サイクル開発機構担当部課室：大洗工学センター システム技術開発部

炉心技術開発グループ

担当者：大木 繁夫

(*) 電力・電機開発研究所 原子力・産業第 1 部

(**) 原子力事業部日立生産本部 燃料サイクル部

(***) 日立エンジニアリング (株)

Comparison between TRU Burning Reactors and Commercial Fast Reactor

Koji Fujimura* , Toshio Sanda** , Takashi Ogawa***

Abstract

Research and development for stabilizing or shortening the radioactive wastes included in spent nuclear fuel are widely conducted in view point of reducing the environmental impact. Especially it is effective way to irradiate and transmute long-lived TRU by fast reactors. Two types of loading way were previously proposed. The former is loading relatively small amount of TRU in all commercial fast reactors and the latter is loading large amount of TRU in a few TRU burning reactors.

This study has been intended to contribute to the feasibility studies on commercialized fast reactor cycle system. The transmutation and nuclear characteristics of TRU burning reactors were evaluated and compared with those of conventional transmutation system using commercial type fast reactor based upon the investigation of technical information about TRU burning reactors.

Major results are summarized as follows.

(1) Investigation of technical information about TRU burning reactors

Based on published reports and papers, technical information about TRU burning reactor concepts and transmutation system using conventional commercial type fast reactors were investigated. Transmutation and nuclear characteristics or R & D issue were investigated based on these results.

- Homogeneously loading of about 5wt% MAs on core fuels in the conventional commercial type fast reactor may not cause significant impact on the nuclear core characteristics. Transmutation of MAs being produced in about five fast reactors generating the same output is feasible.
- The helium cooled MA burning fast reactor core concept propose by JAERI attains criticality using particle type nitride fuels which contain more than 60 wt% MA. This reactor could transmute MAs being produced in more than ten 1000MWe-LWRs.

- Ultra-long life core concepts attaining more than 30 years operation without refueling by utilizing MA's nuclear characteristics as burnable absorber and fertile nuclides were proposed.
- Those were pointed out that additional consideration should be required in nuclear design and fuel treating facilities due to reactivity coefficient being shifted to the plus side, larger neutron yield and increased heat source caused by MA loading.

(2) Confirmation of TRU burning reactor core concepts

The core specification of sodium cooled - nitride fueled TRU burning large reactor was designed based on commercial type fast reactor (sodium cooled nitride fueled large fast reactor, 3800MWt) which was designed in the feasibility studies on commercialized fast reactor cycle system. The composition of MAs from LWR's spent fuel was supposed. MA content in the core fuel is settled to 60wt% based on the JAERI's design in order to maximize the MA transmutation amount. We need to exchange 25% of core fuel with zirconium hydride ($ZrH_{1.6}$) to attain Doppler coefficient being equivalent to that of the conventional type commercial fast reactor loaded 5wt% MA. Furthermore, this reactor could transmute MAs produced in forty-eight sodium cooled nitride fueled large fast reactors generating the same output.

In order to investigate the dependency of MA transmutation characteristics on the reactor output, 1200MWt TRU burning middle or small reactor core concept was designed. This core was settled by reducing the number of core fuel assemblies from that of TRU burning large reactor designed above. MA transmutation rate in this core is smaller than that in the TRU burning large reactor core because the neutron flux of this core becomes smaller than that of the TRU burning large reactor core due to the higher Pu enrichment.

(3) Comparison between TRU burning reactor and conventional type commercial fast reactor

MA transmutation and nuclear characteristics of the sodium cooled nitride fuel commercial type fast reactor loaded 5wt% MA were evaluated and compared with those

of TRU burning large reactor designed in (2). The commercial type fast reactor could only transmute MAs produced in seven sodium cooled nitride fueled large fast reactor generating the same output. But it is merit that this concept is very similar to the conventional fast reactor core concepts. In this section, the MAs composition from the FBR's multi recycle is also used and the dependency of transmutation and nuclear characteristics on the MAs composition were evaluated. It was clarified that MA transmutation amount and transmutation rate in the TRU burning large reactor core being loaded the MAs from the FBRs multi recycle are smaller than those in the core being loaded the MAs from the spent fuel of light water reactor.

This work has been performed by Hitachi, Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Shigeo Ohki, Reactor Physics Research Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

* 1st Nuclear & Industrial Systems Department, Power & Industrial Systems R & D Laboratory

** Nuclear Fuel Cycle Engineering Department

*** Hitachi Engineering Co., Ltd.

目 次

1. 目的	1
2. 検討計画	2
3. 検討結果	5
3.1 TRU 専焼炉に関する既存情報の整理	5
3.1.1 TRU 専焼炉システム	5
3.1.2 発電炉を用いる TRU 核変換システム	6
3.1.3 海外の研究開発状況	8
3.1.4 研究開発の課題	10
3.2 TRU 専焼炉心の設定	18
3.2.1 TRU 専焼炉大型炉心	18
3.2.2 TRU 専焼炉中小型炉心	43
3.3 TRU 専焼炉心と発電用高速炉の比較検討	49
3.3.1 TRU 専焼炉と発電用原子炉を用いる核変換処理システムの比較検討	49
3.3.2 MA 組成の影響把握	54
4. まとめ	57
5. 参考文献	61
[付録]	
付録 A. 代表炉心の 1 群マイクロ断面積	A-1
付録 B. 炉心物質収支表	B-1
付録 C. 代表炉心のドップラー係数成分内訳	C-1

表リスト

表 3.1-1	Table 2	Reactor design parameters of modified Actinide Burner Reactors	12
表 3.1-2	Table 3	Comparison of MA transmutation in various reactors	12
表 3.1-3		各種 MA 装荷法における炉心特性の比較	14
表 3.1-4	Table 2	Design Parameters of 1000MWe Super Long-Life LMFBR Core	14
表 3.1-5	Table 2	Core design parameters of actinide-burning ULLC	16
表 3.1-6	Table 3	Nuclear performance of actinide-burning LMFBR cores	16
表 3.1-7	Table 6	Comparison of MA transmutation characteristics and reactivity coefficient in various core concepts	17
表 3.2-1		炉心の主要仕様	24
表 3.2-2		炉心燃料集合体仕様	24
表 3.2-3		Na-MN 炉心 (Na ボンド) : 領域別均質原子数密度	25
表 3.2-4		TRU 専焼炉 (MA 60w/o) のサーベイ結果	27
表 3.2-5		主要核特性の比較	28
表 3.2-6		MA 核変換特性	28
表 3.2-7		TRU 専焼炉の主要核特性の比較	29
表 3.2-8		MA 核変換特性	29
表 3.2-9		中小型炉心の主要仕様	44
表 3.2-10		TRU 専焼炉中小型炉の主要核特性の比較	44
表 3.2-11		中小型炉の MA 核変換特性	44
表 3.3-1		TRU 専焼炉と発電用高速炉の主要核特性の比較	51
表 3.3-2		MA 組成の違いによる核特性、核変換特性 (大型炉 3800MWt)	55
表 4-1		主要核特性のまとめ	60

図リスト

図 3.1-1	階層核燃料サイクル	11
図 3.1-2	Fig.2 Fuel Concept of ABR (unit mm)	11
図 3.1-3	Fig.3 Comparison of core averaged neutron spectra between minor actinide burner reactors (ABR) and MOX-FBR	11
図 3.1-4	FBRにおける MA 装荷法	13
図 3.1-5	Fig.4 Relationship between Burnup Reactivity Loss and Ratio of MA Amount loaded in Fuel (Homogeneous MA loading Method)	15
図 3.1-6	Fig.5 Reactivity Change of Super Long-Life Core due to Burnup	15
図 3.1-7	Fig.6 Variation of Assembly Power Distribution of Super Long-Life Core due to Burnup	15
図 3.1-8	Fig.6 Core configuration of actinide-burning ULLC	16
図 3.1-9	Fig.1 Core layout of 1,000MWe fast reactor with 36 target assemblies	17
図 3.1-10	Fig.4 Comparison of neutron energy spectra between inner core and hydride fuel target assembly	17
図 3.1-11	Fig.5 Neutron flux radial distributions at typical energies near the target assembly loaded in core center	17
図 3.2-1	Na-MN 炉心 (Na ボンド) : 炉心平面図	30
図 3.2-2	2次元 RZ 計算体系	31
図 3.2-3	Pu 富化度比と EOEC 線出力比の関係 (TRU 専焼炉 MA60w/o)	32
図 3.2-4	実効増倍率の燃焼変化	33
図 3.2-5	径方向線出力分布 (基準炉心、炉心中央断面)	33
図 3.2-6	径方向線出力分布 (TRU 専焼炉 MA60w/o、炉心中央断面)	34
図 3.2-7	中性子スペクトルの比較 (MA 装荷の影響)	34
図 3.2-8	減速材本数比とドップラー係数 (未燃焼時) の関係	35
図 3.2-9	中性子スペクトルの比較	36
図 3.2-10	ドップラー係数内訳 (発電用高速炉大型炉心, MA5wt%, ZrH _{1.6} 0.0)	37
図 3.2-11	ドップラー係数内訳 (TRU 専焼炉大型炉心, MA60wt%, ZrH _{1.6} 0.0)	37
図 3.2-12	ドップラー係数内訳 (TRU 専焼炉大型炉心, MA60wt%, ZrH _{1.6} 0.25)	38
図 3.2-13	ドップラー係数内訳 (MA5wt%, ZrH _{1.6} 0.0)	38
図 3.2-14	ドップラー係数内訳 (MA60wt%, ZrH _{1.6} 0.0)	39
図 3.2-15	ドップラー係数内訳 (MA60wt%, ZrH _{1.6} 0.25)	39

図 3.2-16	径方向線出力分布 (TRU 専焼炉 MA60 w/o、ZrH _{1.6} 本数比 0.25、 炉心中央断面)	40
図 3.2-17	径方向線出力分布 (TRU 専焼炉 MA30%、ZrH _{1.6} 本数比 0.05、 炉心中央断面)	40
図 3.2-18	核種重量変化 (基準炉心)	41
図 3.2-19	TRU 専焼炉の核種重量変化 (MA60wt%、ZrH _{1.6} 本数比 0)	41
図 3.2-20	TRU 専焼炉の核種重量変化 (MA60w/o,ZrH _{1.6} 比 0.25)	42
図 3.2-21	TRU 専焼炉の核種重量変化 (MA30w/o,ZrH _{1.6} 比 0.05)	42
図 3.2-22	TRU 専焼炉中小型炉心の炉心配置図	45
図 3.2-23	中小型炉の実効増倍率の燃焼変化	46
図 3.2-24	径方向線出力分布 (中小型炉基準炉心、炉心中央断面)	46
図 3.2-25	径方向線出力分布 (TRU 専焼炉中小型炉 MA60w/o、 炉心中央断面)	47
図 3.2-26	径方向線出力分布 (TRU 専焼炉中小型炉 MA60w/o、ZrH _{1.6} 本数比 0.25、 炉心中央断面)	47
図 3.2-27	径方向線出力分布 (中小型発電用高速炉 MA5w/o、炉心中央断面)	48
図 3.3-1	実効増倍率の燃焼変化	52
図 3.3-2	径方向線出力分布 (発電炉 MA5wt%、炉心中央断面)	52
図 3.3-3	中性子スペクトルの比較	53
図 3.3-4	TRU 専焼炉の核種重量変化 (FBR-MA60w/o、ZrH _{1.6} 比 0.25)	55
図 3.3-5	径方向線出力分布 (TRU 専焼炉：FBR-MA60w/o、ZrH _{1.6} 本数比 0.25、 炉心中央断面)	56
図 3.3-6	径方向線出力分布 (発電用高速炉：FBR-MA5w/o、炉心中央断面)	56

1. 目的

TRU 専焼炉に関する既存情報の調査、TRU 専焼炉の核変換性能及び炉心核特性について標準的な発電用高速炉を用いた核変換方法との比較検討により、実用化高速炉の炉心候補概念の明確化に資することを目的とする。

2. 検討計画

(1) TRU 専焼炉に関する既存情報の整理

公開文献に基づき、TRU 専焼炉炉心概念及び高速炉を中心とした発電用原子炉を用いる核変換処理システムを調査し、核変換性能、炉心核特性、及び研究開発課題を整理する。

(2) TRU 専焼炉心の設定

文献[1]に示されている発電用高速炉（ナトリウム冷却窒化物燃料大型炉心）の仕様^{*1)}をベースに、TRU 専焼炉の炉心仕様の設定を行う。TRU 専焼炉は大型及び中小型の二炉心を設定し、核変換性能^{*2)} 及び炉心核特性^{*3)} を評価し、核変換性能と出力の関係を整理する。なお、MA 組成は軽水炉使用済み燃料に含まれるもの^{*4)} を用いる。

*1) ナトリウム冷却窒化物燃料大型炉心仕様

- ・ Na ボンド
- ・ 熱出力：3800MWt
- ・ 運転サイクル長：18 ヶ月、5 バッチ燃料取り替え
- ・ 取出平均燃焼度：15 万 MWd/t
- ・ 燃料集合体数（内側炉心/外側炉心/径ブランケット）：
252（内部ダクト付き） / 210/150
- ・ 炉心高さ 120cm
- ・ バンドル部圧損：約 3kg/cm²

*2) 核変換性能

MA 変換率（%/サイクル）、MA 変換量（kg/サイクル）

*3) 炉心核特性

燃焼反応度、増殖比、最大線出力、ナトリウムボイド反応度、ドップラー係数、動特性パラメータ

*4) MA 組成（軽水炉使用済み燃料に含まれるもの）

ウラン燃料軽水炉からの TRU 組成^[2]

Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Np237/Am241/Am243/Cm244/Cm245

=3.5/ 43.5/ 21.8/ 0.2/ 8.2/ 6.4/ 3.3/ 2.1/ 0.9/ 0.1

→MA 組成は上記 TRU 組成で MA のみを抽出した下記と仮定する。

Np237/Am241/Am243/Cm244/Cm245=50.0/25.8/ 16.4/7.0/0.8

(i) TRU 専焼炉大型炉心

TRU 専焼炉大型炉心は発電用高速炉の炉心燃料に MA^{*4)} を富化した炉心とし、基準炉心の仕様に基つき炉心の仕様を設定する。MA の富化度は 60wt%^{*5)} とし、規準炉心と同じ運転条件（取出平均燃焼度：15 万 MWd/t、運転サイクル長 18 ヶ月、5 バッチ取り替え）で平衡サイクル末期の実効増倍率が規準炉心と同程度となるように Pu の富化度を設定し、核変換性能及び炉心核特性を評価する。

*5) MA 富化度の設定

MA 専焼高速炉の設計例[3]における MA の富化度は約 65% である。本研究では、MA を最大限核変換する観点より、MA 富化度の上限を従来設計例に近い 60wt% とし、サーベイクケースとしてその 1/2 の 30wt% の場合も検討する。

(ii) TRU 専焼炉中小型炉心

TRU 専焼炉中小型炉心の炉心仕様は、TRU 専焼炉大型炉心（3800MWt、ナトリウム冷却窒化物燃料炉心）の出力規模を 1200MWt^{*6)} に変えて設定する。MA 富化度は TRU 専焼炉大型炉心と同じとし、TRU 専焼炉大型炉心と同様の条件で Pu の富化度を設定し、核変換性能及び炉心核特性を評価する。

*6) 「実用化戦略調査研究—タンク型炉 Na 冷却 MOX 燃料中型炉心」で検討中の中型炉の出力規模

(iii) 核変換性能の比較

TRU 専焼炉大型炉心と TRU 専焼炉中小型炉心の核変換性能及び炉心核特性を比較し、核変換性能と出力の関係を整理する。

(3) TRU 専焼炉心と発電用高速炉の比較検討

(2) で設定した TRU 専焼炉の核変換性能及び炉心核特性について、発電用原子炉を用いる核変換処理システムとの比較検討を行い、両概念の得失を整理する。ここで、MA 組成は (2) で用いる軽水炉使用済み燃料中のものに加え、高速炉使用済み燃料中のものも検討し、その違いを把握するものとする。

(i) TRU 専焼炉と発電用原子炉を用いる核変換処理システムの比較検討

発電用原子炉を用いる核変換処理システムは、(2) で示した発電用高速炉の炉心燃料に MA を 5wt% 富化した炉心とする。MA の組成は (2) (i) で用いたウラン燃料軽水炉からの TRU 組成に基づくものとする (*4) 参照)。Pu の富化度は、発電用高速炉と同じ条件で設定し、核変換性能及び炉心核特性を評価し、(2) (i) で設定した TRU 専焼炉大型炉心の評価結果と比較する。

(ii) MA 組成の影響把握

(2)で設定した TRU 専焼炉大型炉心及び(i)で設定した発電用原子炉を用いる核変換処理システム (いずれも、軽水炉使用済み燃料中の MA 組成を使用) のそれぞれにおいて、MA の組成を高速炉使用済み燃料に含まれるもの*7) として、Pu の富化度を設定し、核変換性能及び炉心核特性を評価し、MA の組成の違いによる影響を把握する。

*7) MA 組成 (高速炉使用済み燃料に含まれるもの)

FBR 多重サイクル時の TRU 組成^[2]

Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Np237/Am241/Am243/Cm244/Cm245=

1.1/ 54.1/ 32.1/ 4.3/ 3.9/ 0.5/ 2.0/ 1.0/ 1.0/ 0.0

→MA 組成は上記 TRU 組成で MA のみを抽出した下記と仮定する。

Np237/Am241/Am243/Cm244/Cm245=11.1/44.5/ 22.2/22.2/0.0

3 検討結果

3.1 TRU 専焼炉に関する既存情報の整理

公開文献に基づき、TRU 専焼炉炉心概念及び高速炉を中心とした発電用原子炉を用いる核変換処理システムを調査し、核変換性能、炉心核特性、及び研究開発課題を整理する。

3.1.1 TRU 専焼炉システム

日本原子力研究所では、通常の発電炉燃料サイクルを第1階層サイクル、核変換専用の専焼システムを第2階層サイクルとする階層型の燃料サイクルを提案している（図 3.1-1）^[4]。専焼システムとしては MA を燃料として直接核分裂させるために中性子スペクトルを非常に硬くする MA 専焼高速炉概念及び、加速器からの陽子をターゲットに照射し、核破砕反応で発生する中性子を外部中性子源として駆動される MA 燃料未臨界高速炉が検討されている。以下、MA 専焼高速炉概念の概要を示す。

MA 専焼高速炉^[3]

MA 専焼高速炉概念の設定にあたり、MA 核変換効率の良い原子炉として持つべき特性を以下のように設定している。

- a) MA を燃料の主成分とする、
- b) MA 燃料で臨界になるように非常に硬い中性子スペクトルを達成する、
- c) 核変換速度を大きくするために中性子束密度を大きくする、
- d) 専焼炉 1 基で軽水炉 10 基以上から発生する MA を核変換する。

以上に加えて高速中性子照射量が $3.5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ 以下で、サイクルの燃焼反応度が 3% $\Delta k/k$ を越えない条件で、燃料組成・形状、炉心形状のサーベイを行い、下記の 2 つの専焼高速炉概念が提案された。（図 3.1-2、図 3.1-3、表 3.1-1、表 3.1-2）。

① Na 冷却金属燃料炉心 (M-ABR)

当初は Na を冷却材とし、合金燃料（内側炉心：Np-Pu-Zr、外側炉心：(Am-Cm)-Pu-Y）を用いる M-ABR が検討された。Pu を添加するのは MA（親核種）(n, γ) Fissile 変換による正の燃焼反応度を相殺するためである。M-ABR の燃料集合体構造を図 3.1-2 に示す。その後、温度特性、安全特性改善のため、冷却材を Na から鉛へ、燃料を金属

から窒化物へ変更した L-ABR が提案された。また、 β_{eff} の改善策として 90% 高濃縮 U が想定されている。L-ABR の燃料集合体構造は、上記の M-ABR と同様である。主要な仕様と核特性を表 3.1-1 に示す。MA の富化度は 64wt% で、年間の核変換量は約 280kg/1 GWt である。

②He 冷却 MA 窒化物粒子燃料炉心 (P-ABR)

MA 窒化物の小球を Ti-N で被覆しフリット (金属製の籠) に入れて小球の表面を He で冷却。中性子束が L-ABR の約 2 倍。MA の富化度は 65wt% で、年間の核変換量は約 290kg/1 GWt (3000MWt 軽水炉 10 数基分) である。

3.1.2 発電炉を用いる TRU 核変換システム

(1) 高速中性子利用

a. 発電用大型 MOX 燃料高速炉による MA 核変換

国内の各研究機関による検討例があるが、ここではサイクル機構による検討結果を中心に示す。

(a) 基本特性^[3]

MOX 燃料高速炉の炉心燃料に MA を均質に装荷した場合の核特性評価結果より下記が明らかになった。

- ① MA 核変換率の原子炉出力依存性：炉心が大きいほど中性子経済が良く、平均中性子束が高くなるため MA 核変換率は大きくなる。
- ② MA 核変換率の出力密度依存性：同じ原子炉出力、燃料の炉内滞在時間の場合、炉心をコンパクトにして出力密度を上げた方が、燃焼度が高くなるため MA 核変換率は大きくなる。
- ③ MA 核変換率の MA 組成依存性：Np 含有率が大きい組成の方が MA 核変換率は大きくなる。
- ④ 燃焼反応度：図 3.1-5 に示すように MA 含有率が増加するに従って減少し、MA 含有率が 10% 付近でほぼゼロとなる。

(b) MA 装荷方法の検討^{[3], [4]}

図 3.1-4 に示すように、炉心平均に MA を 5% 添加した均質装荷炉心と非均質装荷炉

心について、炉心特性を比較検討し、下記が明らかになった。(表 3.1-3 参照)

- ① MA 核変換率の炉内装荷方法に対する依存性：均質装荷でも非均質装荷でも炉心領域に装荷する場合はほぼ同一となる。但し、ブランケット燃料に MA を添加する場合には中性子束が低いため、核変換率は半分以下となる。
- ② 最大線出力：MA を均質装荷した場合の方が、MA を装荷しない場合よりも最大線出力はわずかに小さくなっている。MA を非均質装荷した場合(例 1)は、MA を装荷しない場合よりも最大線出力は大きくなっている。
- ③ Na ボイド反応度、ドップラー係数は、MA 装荷によって中性子スペクトルが硬化するため正側に移行する。
- ④ 制御棒価値は、MA 燃料を装荷した場合 10%程度低下するが、燃焼反応度が大幅に低減できるため、炉停止余裕を考慮しても制御棒の設計変更なしに、反応度制御が可能である。

b. 超長寿命炉心の検討

^{237}Np や ^{241}Am の中性子捕獲断面積は ^{238}U よりも 4～5 倍大きく、かつその娘核種は核分裂断面積が大きい、中性子捕獲断面積が小さい。従って、燃焼に伴う反応度利得を大きくできる可能性がある。この特長を最大限に活かして、原子炉寿命中の燃料交換を無くした超長寿命炉心が検討されている。

(a) サイクル機構による検討例^{[3], [5]}

MOX 燃料をベースに電気出力 1000MWe で炉心寿命 30 年、燃焼度 20 万 MWd/t の達成を目標とする超長寿命炉心が検討された。表 3.1-4 に主要仕様を示す。図 3.1-7 に示すように、内側炉心と外側炉心の MA 添加割合を 1:2 とすることによって、径方向の出力分布を平坦化できると共に集合体の出力変動を抑制できる事が示されている。

(b) その他の検討例

(a)と同様、MOX 燃料をベースに電気出力 1000MWe で炉心寿命 40 年、燃焼度 20 万 MWd/t の達成を目標とする超長寿命炉心が検討された^{[3], [6]} (表 3.1-5, 6、図 3.1-8)。この検討例では、炉心寿命を通じた内側炉心と外側炉心の反応度差を、燃料体積割合の最適化により確保する。すなわち、Pu 富化度および MA の添加割合を一様としたまま、内側炉心の燃料体積割合を外側炉心のそれよりも低くすることによって、集合体

の出力変動抑制を実現している。炉心寿命 40 年間の燃焼反応度は約 3% $\Delta k/k$ と小さい。

(2) 高速炉+減速スペクトル

MA の水素化物 (U-MA-Zr-H) で構成する MA ターゲットを高速炉の炉心領域内に非均質に装荷する方法が提案されている^[7] (図 3.1-9)。この方法では、図 3.1-11 に示すように高速炉の炉心領域の高い中性子束を活用し、ターゲット内に減速スペクトルを実現することによって MA の核変換率を従来例の 2 倍程度迄高められることが示されている (表 3.1-7)。

3.1.3 海外の研究開発状況

日本の TRU 核変換技術は、主にオメガ計画の下で研究開発が行われている。

海外の同様の計画としては以下の計画がある。

(1) SPIN 計画：フランスにおける長寿命核種の分離変換技術研究開発の全体計画

(2) CAPRA 計画：欧州における高速炉を用いたプルトニウム等の燃焼に関する
研究計画

(3) SUPERFACT 計画：欧州におけるマイナーアクチニド含有酸化物燃料の
研究開発計画

(4) EFTTRA 計画：欧州における核変換用ターゲットの研究開発計画

最近では、TRU 核変換処理システムとして高速炉を用いているのは、日本、フランス、ロシアなどのみであり、この 3 国を含めて世界的には加速器駆動未臨界炉に注力している。

以下に、フランスを中心とした欧州の高速炉を用いた MA 核変換の開発状況について説明する。炉心は、種々の燃料形態について均質炉心と非均質炉心を検討している。

(1) 均質炉心

燃料としては、MA (含有率 10%以下) を含有した標準燃料、CAPRA タイプ燃料 (Pu 含有率の高い燃料) を検討している。酸化物燃料は SUPERFACT プロジェクト (実施済) で、金属燃料 (U-Pu-Zr+MA, RE) は METAPHIX プロジェクト (電中研との協定) で照射試験を実施して、標準燃料との比較検討を行っている。

(2) 非均質炉心

MA (含有率 20%以上) を不活性母材に分散させたもの、MA 固溶体を検討している。不活性母材については、照射燃料の製作、照射挙動、特性に関するデータを取得している。また、MA 化合物やターゲット形態の検討・選定を行っている。

なお、同時に LLFP についてもターゲット形態の検討を行っている。

以下に国際学会 Global'99 で報告された関連論文の概要を紹介する。

(1) MA 専焼炉関連^[8]

フランスの CEA の研究で、MA を最大限核変換する液体金属冷却高速炉の専焼炉 (この論文にはないがガス炉も検討) を検討している。

本検討では、ボイド反応度を低減するため炉心を小型化 (例えば、熱出力 95MWt、炉心高さ 45cm、半径 47cm) し、ドップラー効果を改善するため減速材 ($^{14}\text{B}_4\text{C}$, $\text{ZrH}_{1.8}$) を使用、冷却材を Na から Pb に変更 等を検討してその効果を評価している。MA 核変換量を大きくするためには、燃料物質の供給を最小にして MA のみリサイクルする方がよいという結果を得ている。本検討では、MA 核分裂量は、最大 107kg/TWhe である。

また、加速器駆動未臨界炉は、反応度係数に余裕があり、より少ない燃料物質供給量でよいため MA 核変換量も大きいという結果を得ている。

(2) ターゲット関連^[9]

EFTTRA (Experimental Feasibility of Target for TRANsmutation) 計画における Am ターゲット関連の報告である。本計画では、照射試験 (MA と LLFP) は、HFR (高中性子束炉) と Phenix (高速炉) で実施している。

MgAl_2O_4 母材に Am 酸化物を分散 (10-12%) させたターゲットを HFR で 358EFPD 照射した結果、初装荷 MA (100%Am-241) の 28%が核分裂し、Am-241 の含有率は 4%となった。しかし、ターゲットは FP や He 生成の影響で大きなスエリングを生じていた。その原因は完全には解明されていないが、この試験結果をもとに、今後は、50-300 μm の球形燃料 (Zr, Am, Y) O_2 を多孔性の MgO 母材に分散したターゲット仕様に変更する予定である。このターゲットでは、核分裂片による母材へのダメージは小さい体積に局所化され、またスエリングの原因となる He ガス蓄積も少ないと考えられる。さらに、今後の実験では、ターゲットのバックアップまたは他の選択肢についてスクリーニングを行う。これ

らの実験（燃料製造、照射、照射後試験）は2000年から2006年まで実施される予定である。

3.1.4 研究開発の課題

主に核的にはMA核変換の可能性が示されているが、核変換技術の確立には多くの課題がある。主な研究開発課題を以下に示す。

- ①システム設計研究による炉物理、熱流力特性、動特性、安全性等の評価
- ②MA核種の核データの収集・評価による核設計精度の向上
- ③MA燃料の基礎物性データの収集・評価
- ④MA燃料の製造技術開発（MA含有燃料取り扱い時の遮蔽対策等）
- ⑤MA燃料の照射挙動の評価
- ⑥経済性評価

(図 3.1-1)

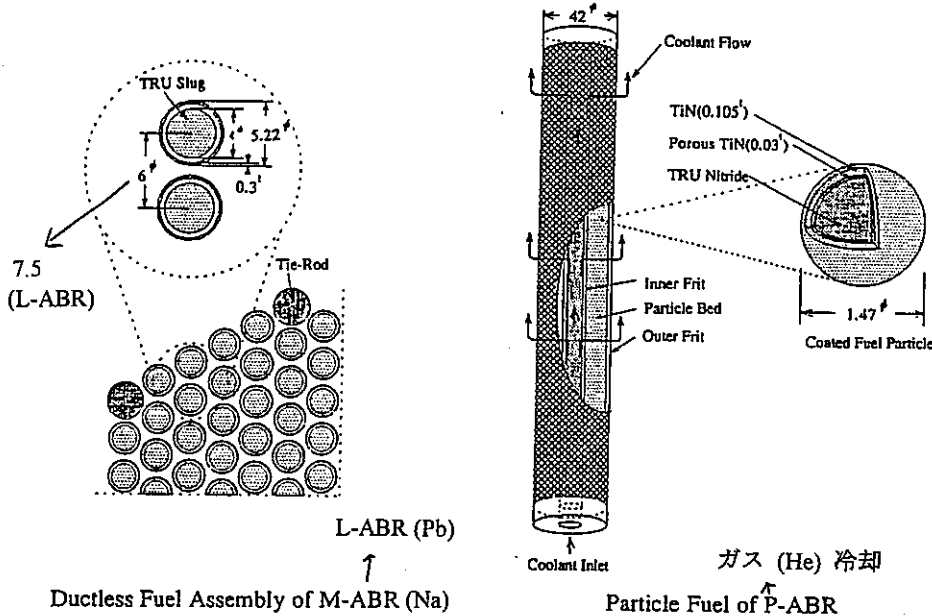
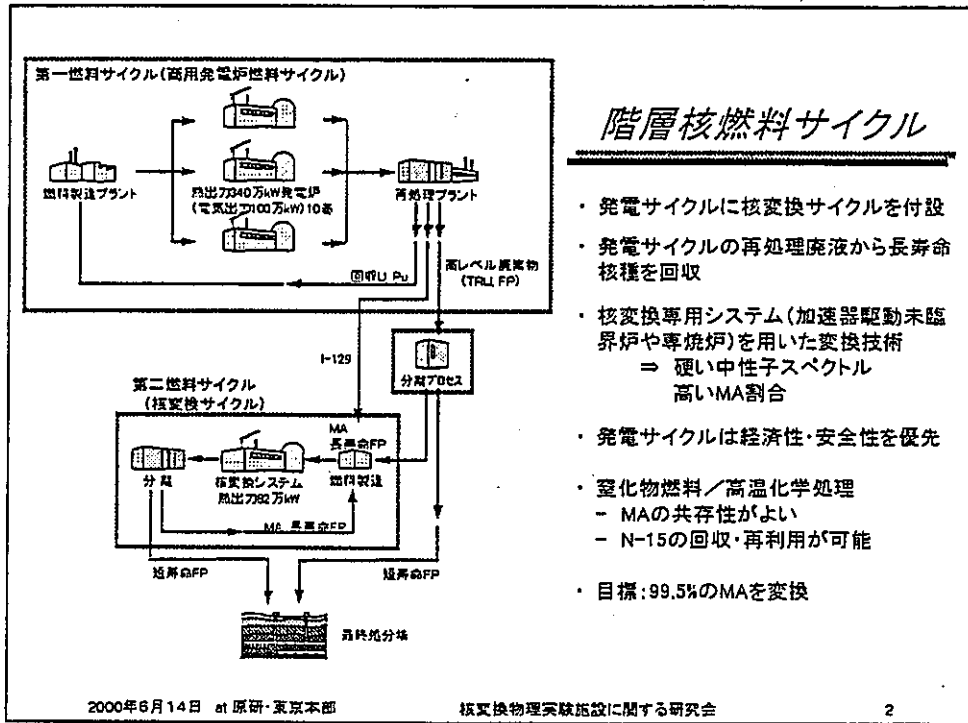


Fig.2 Fuel Concept of ABR (unit mm) *

(図 3.1-2)

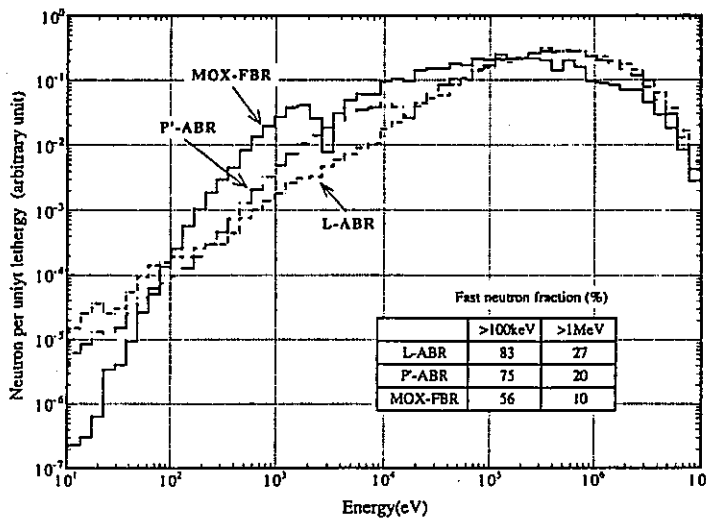


Fig.3 Comparison of core averaged neutron spectra between * minor actinide burner reactors (ABR) and MOX-FBR

(図 3.1-3)

* 消滅処理研究の現状、
(社)日本原子力学会 (1994/8)

(表 3.1-1)

Table 2 Reactor design parameters of modified Actinide Burner Reactors *

	L-ABR ¹⁾	P-ABR ²⁾
Fuel concept material	pin-bundle ($^{64}\text{NpAmCm-36U}^{3)}$) _{1.0} N ⁴⁾ _{1.0}	coated particle ($^{65}\text{NpAmCm-35U}^{3)}$) _{1.0} N ⁴⁾ _{1.0}
MA initial loading, kg	918	2870
MA/U	588/230	1865/1005
Reactor power, MWe	180	1200
Coolant material	Lead	Helium
Neutron flux, $10^{15}\text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$	3.1	6.6
Core averaged mean neutron energy, keV	700	700
Reactivity (% $\Delta k/k$)		
Coolant-void reactivity/core	-1.3	—
Doppler reactivity/core ($\Delta t=300^\circ\text{C}$)	-0.01	-0.01
Kinetic parameters		
β_{eff}	2.6×10^{-3}	2.6×10^{-3}
L_p , sec	1.3×10^{-7}	1.5×10^{-7}
Cycle length, full-power days	550	300
MA burnup, %/cycle	11	13

- 1) L-ABR:MA nitride fuel with lead cooling burner reactor
- 2) P-ABR:MA particle fuel with He cooling burner reactor
- 3) 90% enriched uranium
- 4) ¹³N enriched

(表 3.1-2)

Table 3 Comparison of MA transmutation in various reactors *

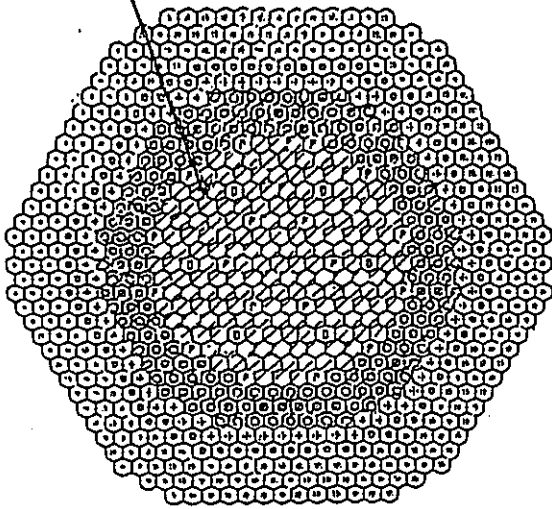
	MA Burner Reactors		Power Reactors		
	L-ABR	P'-ABR	U-PWR	MOX-FBR	LMR ¹⁾
Output (MWt)	180	1200	3410	2600	2632
Cycle length ²⁾ (EFPD)	550	300	850	1368	900
Core averaged					
Fast neutron flux ($\times 10^{15}\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$)	3.1	5.9	0.37	4.1(3.0)	6.1(4.1)
Mean neutron energy (keV)	720	720	thermal	480	490
MA loaded (kg)	573	1865	180 ³⁾	1450 ³⁾	1200 ³⁾
MA transmutation ratio ⁴⁾ (%/cycle)	16.0	18.8	9.0	33.5	29.8
MA burnup ratio ⁵⁾ (%/cycle)	11	13	-23.8	8.8	8.3
MA transmutation (kg/1GW · year)	278	292	1.7	40.9	44.5
MA burnup (kg/1GW · year)	191	202	-4.4	10.7	12.4

- 1) Metal fuel FBR
 - 2) Effective fuel irradiation time
 - 3) Concentration of MA in fuel; 0.2% for U-PWR, 5% for MOX-FBR and LMR
 - 4) MA transmutation ratio = (MA(BOC) - MA(EOC)) / MA(BOC)
 - 5) MA burnup ratio = (MA fissioned - MA generated) / MA(BOC)
- Values of 4) and 5) are those for the equilibrium cycle in ABRs, and average values of 1 to 10th cycle for power reactors.

*) Values in the parentheses are for the outer core

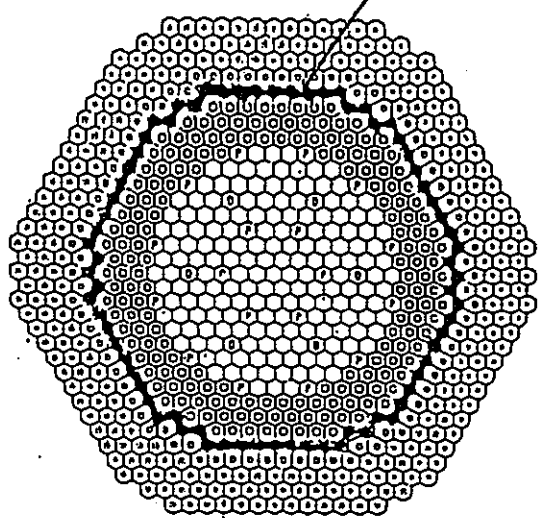
* 消滅処理研究の現状、(社) 日本原子力学会 (1994/8)

(Np+Am+Cm+(RE))



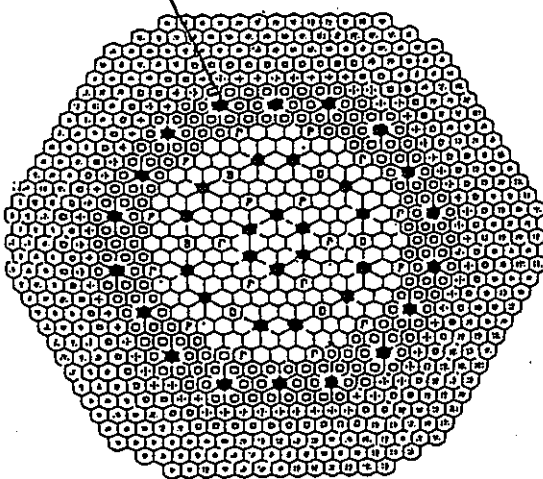
均質装荷

(Np+Am+Cm+(RE))



ブランケット装荷

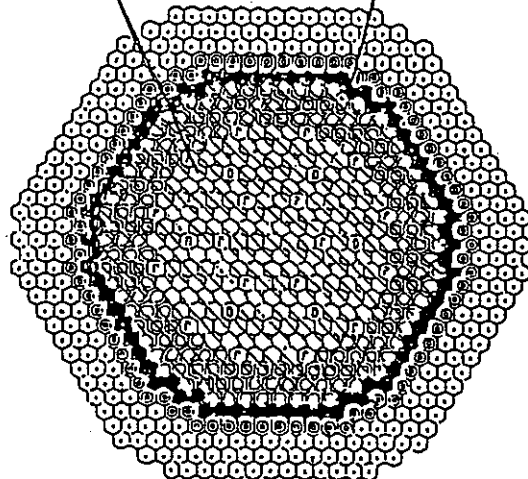
(Np+Am+Cm+(RE))



非均質装荷 (例1)

Np

ターゲット (Am+Cm+(RE))



非均質装荷 (例2)

(図 3.1-4) FBRにおけるMA装荷法*

* 若林利男 (JNC)、核変換物理実験施設に関する研究会 (2000/6)

(表 3.1-3) 各種 MA 装荷法における炉心特性の比較 *

項目	基準(MAなし)	均質装荷	非均質装荷(例1)	非均質装荷(例2)
炉心内 MA装荷	-	Np,Am,Cm:5%	Np,Am,Cm:49% (集合体数:39)	Np:9.8%(均質)
ブランケット MA装荷	-	-	-	Am,Cm:46% (集合体数:72)
Pu 富化度 (wt%)	15.4(内側) 18.6(外側)	16.6(内側) 20.1(外側)	15.4(内側) 18.6(外側)	19.0(内側) 23.4(外側)
燃焼反応度 (% $\delta k/kk'$)	3.31	2.12	1.83	0.90
最大線出力 (W/cm)	420	407	439(炉心燃料) 309(MA集合体)	406(炉心燃料) 174(MA集合体)
Na ボイド 反応度	1.0	1.3(相対値)	1.3(相対値)	1.5(相対値)
ドブロー係数	1.0	0.6(相対値)	0.7(相対値)	0.45(相対値)
MA 消費量 (kg/15ヶ月)	-	172	186	529

* 若林利男 (JNC)、核変換物理実験施設に関する研究会 (2000/6)

(表 3.1-4)

Table 2 Design Parameters of 1000MWe
Super Long-Life LMFBR Core

Parameters	Data
Thermal Power	2520(MW)
Core life	30(EFPY*)
Fuel Material	PuO ₂ -UO ₂ -(Np,Am,Cm)O ₂
Number of Subassemblies Core/Blanket/Control Rods	462/84/49
Core Height	180(cm)
Equivalent Core Diameter	494(cm)
Axial Blanket Thickness	15(cm)
Fuel Pin Diameter	1.22(cm)
Assembly Lattice Pitch	20.8(cm)
Volume Fraction Fuel/Coolant/Structure	53.0/24.7/22.3(%)
Pu Isotopic Ratio (²³⁹ Pu/ ²⁴⁰ Pu/ ²⁴¹ Pu/ ²⁴² Pu)	58/24/14/4(w/o)

*Effective Full Power Year

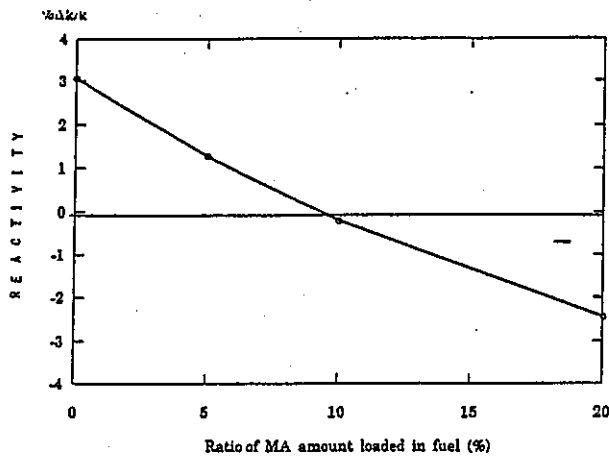


Fig. 4 Relationship between Burnup Reactivity Loss and Ratio of MA Amount loaded in Fuel (Homogeneous MA-loading Method)

(☒ 3.1-5)

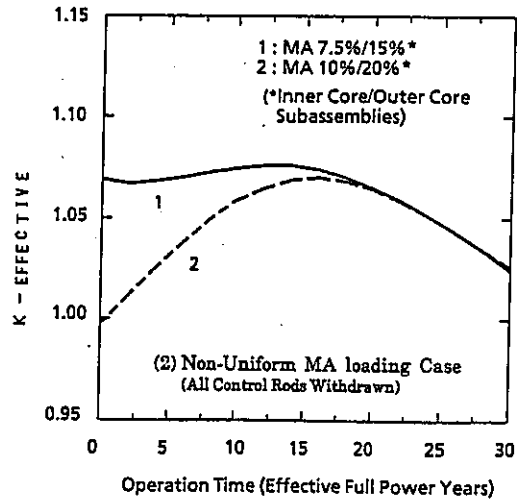


Fig. 5 Reactivity Change of Super Long-Life Core due to Burnup

(☒ 3.1-6)

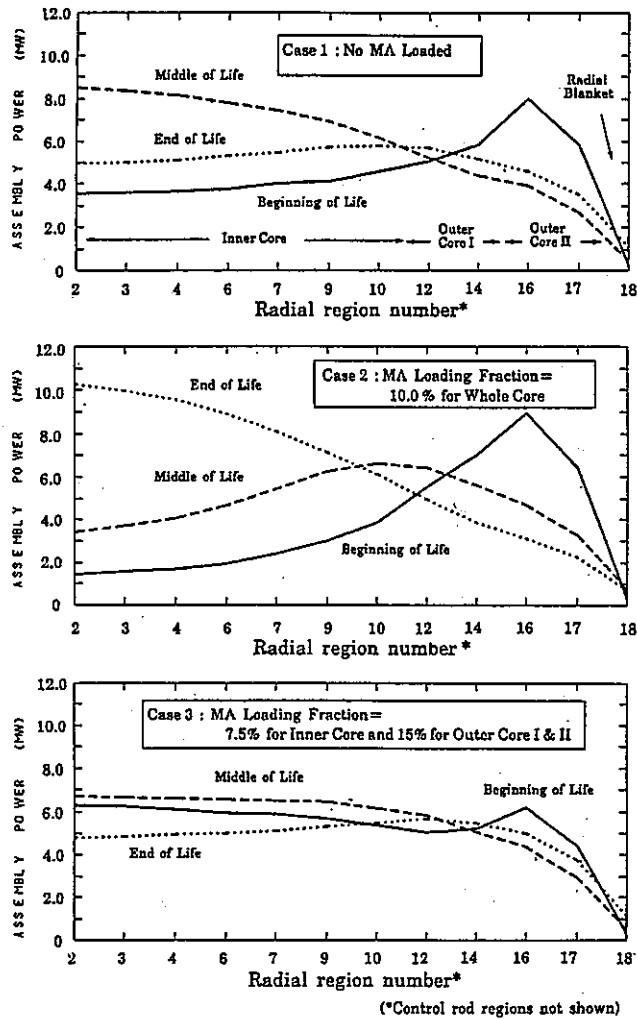


Fig. 6 Variation of Assembly Power Distribution of Super Long-Life Core due to Burnup

(☒ 3.1-7)

* 消滅処理研究の現状、日本原子力学会、「消滅処理」研究専門委員会 (1994)

(表 3.1-5)

Table 2 Core design parameters of actinide-burning ULLC

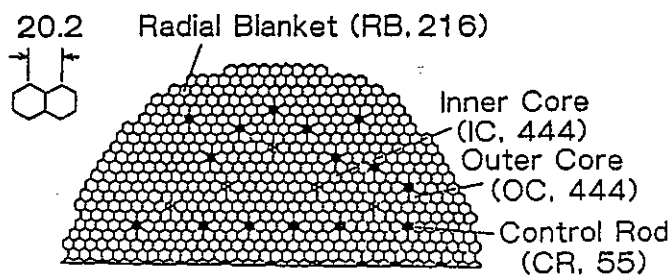
Item	Specification
Reactor Electric Power (MW)	1000
Reactor Thermal Power (MW)	2600
Core Fuel Material	MA-mixed PuO ₂ -UO ₂
Structure Material	Improved Ferritic Steel
Coolant Material	Sodium
Blanket Fuel Material	UO ₂
Core Fuel Weight (t)	~170
Core Volume Fraction (%)	
Fuel/Structure/Coolant/Void	38-46/22/30/10-2
Fuel Smear Density (%TD)	92

(表 3.1-6)

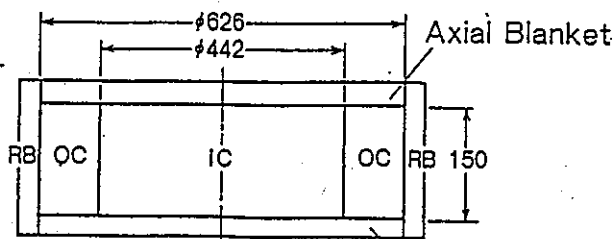
Table 3 Nuclear performance of actinide-burning LMFBR cores

Item	Batch-refueling MA-mixed Core	MA-mixed ULLC	Reference Core
Cycle length (year)	2.2	40	1
Average Discharge Burnup (GWd/t)	200	200	90
Average Power Density (W/cc)	280	50	280
Average Pu Enrichment (wt %)	20.0	14.0	18.1
Fuel Volume Fraction (%)	42	38/46(42)*	42
Relative Pu Fissile Inventory Per Unit Energy Production	0.50	0.35	1.0
Maximum Excess Reactivity (% Δk/k)	3.4	3.0	3.4
Maximum Assembly Power Swing (%)	-10	-10	-10
Peak Fast Neutron Fluence (n/cm ²)	6.1 × 10 ²³	8.5 × 10 ²³	2.8 × 10 ²³
Fissile**/Loading Fissile	1.31	1.45	1.13
Sodium Void Reactivity (% Δk/k)	2.7	3.2	2.0
Average MA Enrichment (wt %)	10	20	0
Loading MA Inventory (t)	2.8	34	0
MA Transmutation Amount (t)	1.7	25	-0.1

* Inner Core/Outer Core (Core Average)

** ²³⁵U, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴¹Pu, ²⁴²Am, ²⁴³Am, ²⁴⁴Cm, ²⁴⁵Cm

(a) Horizontal section

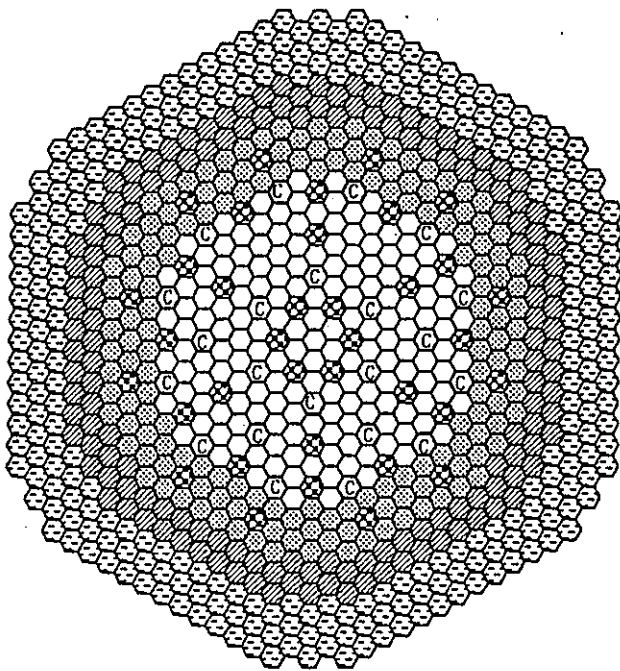


(b) Vertical section

Unit : cm

Fig.6 Core configuration of actinide-burning ULLC

(图 3.1-8)



- Inner core fuel
- ⊙ Outer core fuel
- ⊗ Radial blanket fuel
- ⊗ Radial reflector
- ⊙ Control rod
- ⊗ Target assembly

Fig. 1 Core layout of 1,000 MWe fast reactor with 36 target assemblies

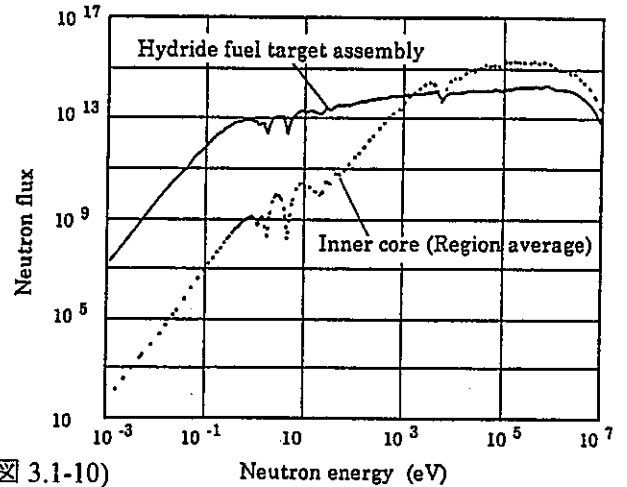
(图 3.1-9)

(表 3.1-7)

Table 6 Comparison of MA transmutation characteristics and reactivity coefficient in various core concepts

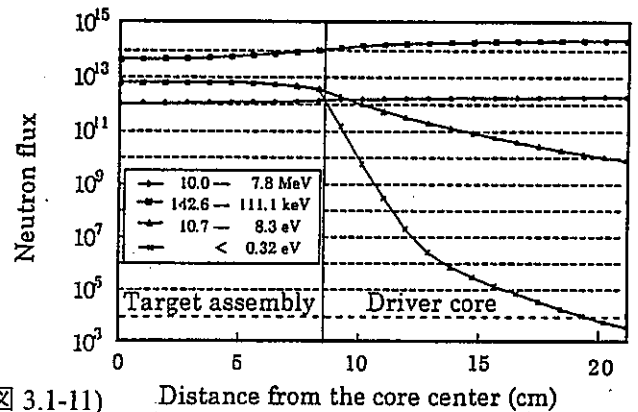
Type of MA loading	Conventional fast reactor core			Burner core		Incineration core
	Reference (No MAs)	Homogeneous 3.8% MAs	Heterogeneous MA target	36 MA hydride targets (U/MAs/Zr/H = 1/4/10/27)		36 MA hydride targets (MAs/Zr/H = 0.7/10/15, with 2 layers of ⁹⁹ Tc)
MA loaded (kg)	0	1,050	1,050	1,050		176
Annual transmutation rate (%/yr)	(—)	14 ⁻¹	11 ⁻¹	28 ^{-2,t} (31) ^{††}	26 ^{-3,t} (29) ^{††}	16 ^{-1,t} (31) ^{††}
Sodium void reactivity (relative)	1.0	1.4	1.2	0.7		0.7
Doppler coefficient (relative)	1.0	0.7	0.8	1.1		0.9

⁻¹: 3-year irradiation, ⁻²: 1-year irradiation, ⁻³: 2-year irradiation, ^t: Driver core+Targets, ()^{††}: Targets



(图 3.1-10)

Fig. 4 Comparison of neutron energy spectra between inner core and hydride fuel target assembly



(图 3.1-11)

Fig. 5 Neutron flux radial distributions at typical energies near the target assembly loaded in core center

3.2 TRU 専焼炉心の設定

3.2.1 TRU 専焼炉大型炉心

文献[1]に示されている発電用高速炉（ナトリウム冷却窒化物燃料大型炉心）の仕様をベースに、TRU 専焼炉大型炉心の仕様を設定する。

(1) 発電用高速炉の仕様

表 3.2-1 に炉心の主要仕様、表 3.2-2 に炉心燃料集合体の仕様を、また図 3.2-1 に炉心構成を示す。燃料は U と Pu の混合窒化物燃料(U-Pu)¹⁶N で、燃料ピンのボンド材は冷却材と同じナトリウムを想定している。原子炉熱出力は 3800MWt、運転サイクル長 18 ヶ月、5 バッチ取り替えで炉心燃料の平均取出し燃焼度は 15 万 MWd/t である。炉心燃料集合体の内、内側炉心は 252 体で内部ダクトを有する SASS 内臓型を想定している。外側炉心は 210 体で内部ダクトの無い、通常の燃料集合体である。集合体の燃料ピン本数は内側炉心が 234、外側炉心が 271 で、窒化物燃料のスミヤ密度を 80%とした場合の実効燃料体積割合は、それぞれ 28.6%、33.2%となる。径ブランケット集合体は 2 層配列で 150 体である。炉心の有効長は 120cm で炉心の下部に軸ブランケットが設置されている。ブランケットの燃料物質は、劣化ウランの窒化物 U¹⁵N である。サイクル機構殿に提示頂いた、各領域の均質化原子数密度を表 3.2-3 に示す。

(2) TRU 専焼炉大型炉心の仕様

TRU 専焼炉大型炉心は、(1)に示した発電用高速炉の炉心燃料を U、Pu、MA の混合窒化物燃料(U-Pu-MA)¹⁶N に置換するのみで、他の全ての炉心、燃料仕様は発電用高速炉と同じとする。

(3) TRU 専焼炉大型炉心の設定

a. MA 富化度 60wt%の場合

内側炉心と外側炉心の MA の富化度を 60wt%一様とし、内側炉心と外側炉心の Pu 富化度をパラメータとして TRU 専焼炉大型炉心のサーベイを実施した。サーベイの検討条件を以下に示す。

- ・ 核定数 JENDL-3.2 統合炉定数
- ・ 計算体系 2次元 RZ (図 3.2-2)
- ・ 臨界条件 平衡サイクルにおける実効増倍率の最小値が発電用高速炉(MA 富化度 0wt%)

の実効増倍率*と同程度となること。

* サイクル機構殿に提示頂いた原子数密度 (表 3.2-3) を用いた場合の、平衡サイクル末期の実効増倍率 1.005 を使用

- 出力分布 内側炉心と外側炉心の最大線出力の比率が発電用高速炉と同程度
- Pu 組成 サイクル機構殿に提示頂いた下記組成

Pu238/Pu239/Pu241/Pu240/Am241 = 3.0/52.0/27.0/9.5/7.0/1.5wt%

- MA 組成 ウラン燃料軽水炉からの TRU 組成^[2]に基づく下記組成

Np237/Am241/Am243/Cm244/Cm245=50.0/25.8/ 16.4/7.0/0.8wt%

また、解析検討に用いる諸量は以下のように定義する。

- Pu 富化度

Pu 富化度は重核種の重量比によって定義する：

$$\text{Pu 富化度} = M_{\text{Pu}} / (M_{\text{U}} + M_{\text{Pu}} + M_{\text{MA}})$$

ここで、Mは質量を表す。M_{Pu}にはPu-241の崩壊により生じ、新燃料中のPuと共に存在するAm-241の質量も含まれる。

- MA 富化度

Pu 富化度と同様、重核種の重量比によって定義する：

$$\text{MA 富化度} = M_{\text{MA}} / (M_{\text{U}} + M_{\text{Pu}} + M_{\text{MA}})$$

- 増殖比

核分裂性物質としてPu-239及びPu-241に着目した瞬時増殖比を用いる。

親核種 (U-238、Pu-240) の中性子捕獲反応率

$$\text{増殖比} = \frac{\text{核分裂性核種 (Pu-239、Pu-241) の吸収反応率}}{\text{親核種 (U-238、Pu-240) の中性子捕獲反応率}}$$

- MA 核変換特性

MA 核変換量 (率) は MA インベントリの減少量 (率) を表すものであり、核分裂反応による減少、捕獲反応及び崩壊による非 MA 核種への変換、非 MA 核種の捕獲反応及び崩壊による生成を考慮した正味の減少量 (率) として次のように定義する：

$$\text{MA 核変換量 (kg/cycle)} = \text{平衡初期の MA 重量 (kg)} - \text{平衡末期の MA 重量 (kg)}$$

$$\text{MA 核変換率 (\%/cycle)} = \text{MA 核変換量 (kg/cycle)} / \text{平衡初期の MA 重量 (kg)}$$

尚、核分裂反応による MA の減少に着目して、MA 核分裂率を次のように定義する：

$$\text{MA 核分裂率 (\%/cycle)} = \frac{1 \text{ サイクルあたりに核分裂反応により減少した MA 重量 (kg)}}{\text{平衡初期の MA 重量 (kg)}}$$

炉心燃料の原子数密度は、表 3.2-2 の燃料集合体仕様と、混合窒化物の密度 14.3g/cm^3 より算出した。炉心燃料以外の領域の原子数密度は表 3.2-3 に従った。

表 3.2-4 及び図 3.2-3 にサーベイ結果をまとめて示す。図 3.2-3 より、燃焼末期の内側炉心と外側炉心の最大線出力の比率が基準炉心（発電用高速炉、MA 富化度 0wt%）の値 0.9 に近く、かつ燃焼期間中の実効増倍率の最小値が基準炉心の値 1.005 となる条件を満たすのは case-1 (Pu 富化度 (内側/外側) = 2.2/2.9wt%) である。従って、これを TRU 専焼炉大型炉心の候補とし核特性を評価した。

表 3.2-5 に主要核特性を、図 3.2-4 に実効増倍率の燃焼変化を、それぞれ基準炉心と比較して示す。MA の中性子捕獲によって生成する核分裂性核種による反応度利得が大きいため、TRU 専焼炉大型炉心の燃焼反応度は負となり、増殖比も 2 に近くなっている。一方、ボイド反応度は基準炉心の約 3 倍となり、ドップラー係数は 2 桁小さくなっており、炉心安全の観点より非常に厳しくなっている。MA の核変換量は表 3.2-6 に示すように、サイクル当たり 3 トンを超えており、基準炉心からの生成量換算で 69 基分処理できる可能性がある。

図 3.2-6 に示す径方向の出力分布は、基準炉心の分布（図 3.2-5）と比べて平坦化が不十分であり、MA 富化度分布の最適化等による改善の余地がある。

図 3.2-7 に中性子スペクトルを比較して示す。MA 富化度の増加に伴い、中性子スペクトルが硬くなることが分かる。

b. 反応度係数の改善

ここでは、炉心燃料に減速材を装荷する反応度係数（特にドップラー係数）改善の可能性を検討する。減速材としては高速炉の設計研究における検討例が多い水素化ジルコニウム $\text{ZrH}_{1.6}$ を用いることとし、炉心燃料集合体の燃料ピンを $\text{ZrH}_{1.6}$ ピンと置換する均質装荷方式とする。 $\text{ZrH}_{1.6}$ ピンは燃料ピンと同じ直径 8.4mm の被覆管内に、燃料ペレットと同じ直径 7.06mm の $\text{ZrH}_{1.6}$ が内包されると想定する。 $\text{ZrH}_{1.6}$ ピンと燃料ピンの本数比をパラメータとして MA 富化度 60wt% の場合のドップラー係数を計算した。図 3.2-8 にドップラー係数の $\text{ZrH}_{1.6}$ ピンと燃料ピンの本数比依存性を示す。 $\text{ZrH}_{1.6}$ 本数比に比例してドップラー係数の絶対値は増大する。MA 富化度が 60wt% の場合には、 $\text{ZrH}_{1.6}$ 本数比を 0.25 とすれば MA 富化度が 5wt%

の場合とほぼ同等のドップラー係数となる。図 3.2-9 に各ケースの中性子スペクトルの比較を、図 3.2-10～-12 に MA 富化度 5wt%、60wt%で $ZrH_{1.6}$ 本数比が 0.0 の場合、及び MA 富化度 60wt%で $ZrH_{1.6}$ 本数比が 0.25 の場合の炉心領域ドップラー係数の核種内訳を示す。また図 3.2-13～-15 に、左記の各場合のドップラー係数のエネルギー分布を示す。

図 3.2-10 に示すように、MA 富化度が 5wt%で $ZrH_{1.6}$ を装荷しない場合、ドップラー係数内訳の大部分は U-238 が占めている。わずかではあるが、Pu-239 はドップラー係数に対して正の寄与を示す。図 3.2-13 に示すように、ドップラー係数への寄与が大きいエネルギー領域は、100eV～数 10keV で、これは U-238 の中性子捕獲断面積の共鳴領域に相当している。

表 3.2-5 に示すように MA 富化度が 60wt%で、 $ZrH_{1.6}$ を装荷しない場合は、MA 富化度が 5wt%の場合と比べて U の割合が 1/2 以下に減っており、かつ中性子スペクトルが図 3.2-9 に示すように非常に硬いため、図 3.2-11、-14 に示すように U-238 のドップラー係数が、MA 富化度 5wt%の場合と比べ 2 桁近く小さく、Fe の寄与の方が大きい。

一方、MA 富化度が 60wt%で、ドップラー係数を改善するための $ZrH_{1.6}$ 本数比を 0.25 とした場合、図 3.2-15 に示すように、ドップラー係数への寄与が大きいエネルギー領域は、10eV～1keV で、このエネルギー領域の中性子束は MA 富化度が 5wt%で $ZrH_{1.6}$ を装荷しない場合と比べ 1～2 桁程度増加する。表 3.2-5、-7 に示すように MA 富化度が 60wt%で $ZrH_{1.6}$ 本数比を 0.25 とした場合、MA 富化度が 5wt%の場合と比べて U の割合が約 1/4 に減少しており、U-238 のドップラー係数は図 3.2-10、-12 の比較から MA 富化度 5wt%の場合の 1/3 程度となる。更に、Np-237 の寄与が顕著となるが、Pu-239 の正の寄与が増加して負の寄与が相殺されている事が分かる。その他の、MA 核種 (Am-241、Am-243、Cm-244) 及び Fe の寄与を積算するとドップラー係数は MA 富化度 5wt%の場合と同程度となる。

MA 富化度が 30wt%の場合には、 $ZrH_{1.6}$ 本数比を 0.05 とすれば左記と同等のドップラー係数となる。

そこで、この 2 ケース (MA 富化度 60wt%— $ZrH_{1.6}$ 本数比 0.25、MA 富化度 30wt%— $ZrH_{1.6}$ 本数比 0.05) の核特性を評価した。表 3.2-7 に主要核特性を示す。尚、MA 富化度 60wt%— $ZrH_{1.6}$ 本数比 0.25 のケースでは燃料重量が 25%減少しているため、取出し燃焼度を基準炉心と同程度に保つため、運転期間を 14 ヶ月に短縮している。MA 富化度 60wt%— $ZrH_{1.6}$ 本数比 0.25 の場合、増殖比は 1 を切るが、MA 富化度 30wt%— $ZrH_{1.6}$ 本数比 0.05 の場合の増殖比は 1 を超える。いずれのケースも $ZrH_{1.6}$ 装荷によりポイド反応度も大幅に減少している。

一方、表 3.2-8 に示すように、MA 核変換量を出来るだけ多くする観点では、MA 富化度 60wt%

のケースが望ましい。尚、表中に示す MA 核変換量、MA 核変換率の内の核分裂分は、次式で定義する MA 核種の核分裂割合の平衡サイクル初期と末期の平均値を用いて直接核分裂のみを概略評価した。

$$\text{MA 核種の核分裂割合} = \Sigma \Sigma^i_f \phi^i / (\Sigma (\Sigma^i_f \phi^i + \Sigma^i_c \phi^i))$$

$\Sigma^i_f \phi^i$: MA 核種 i の核分裂反応率のサイクル初期と末期における平均値

$\Sigma^i_c \phi^i$: MA 核種 i の中性子捕獲反応率のサイクル初期と末期における平均値

この表より、TRU 専焼炉 (MA 富化度 60wt%、ZrH_{1.6} を装荷しない場合と ZrH_{1.6} 本数比を 0.25 とした場合) 及び 3.3 で検討する発電用高速炉 (MA 富化度 5wt%、ZrH_{1.6} を装荷しない) の MA の核変換率を比較すると、トータルの MA 核変換率は発電用高速炉が最も大きく、TRU 専焼炉で ZrH_{1.6} 本数比を 0.25 とした場合が最も小さい。一方、MA 核変換率の内、核分裂分については、TRU 専焼炉で ZrH_{1.6} を装荷しない場合が最も大きく、ZrH_{1.6} 本数比を 0.25 とした場合が最も小さい。すなわち、MA 富化度の増加 (5wt%→60wt%) による MA 核種の核分裂率の増加割合が小さいのに比べ、ZrH_{1.6} 炉内装荷に伴う核分裂率の低下割合は大きい。以上は、炉心の平均中性子束 ϕ と、MA の実効マイクロ断面積を用いて説明できる。

炉心燃料領域の中性子束は、発電用高速炉で 3.0×10^{15} (1/cm²/s)、TRU 専焼炉 (MA 富化度 60wt%) で ZrH_{1.6} を装荷しない場合 2.4×10^{15} (1/cm²/s)、ZrH_{1.6} 本数比を 0.25 とした場合 1.4×10^{15} (1/cm²/s) となっている。付録 A に示すように、代用的 MA である Np237 の内側炉心中性子スペクトルにおける一群実効マイクロ吸収断面積 σa は、発電用高速炉で 1.86 (b)、TRU 専焼炉 (MA 富化度 60wt%) で ZrH_{1.6} を装荷しない場合 1.44 (b)、ZrH_{1.6} 本数比を 0.25 とした場合 2.32 (b) となっている。Np237 の直接核分裂或いは中性子捕獲による核変換率の大小は、 σa と ϕ の積の大小に依存するため、発電用高速炉、TRU 専焼炉 (MA 富化度 60wt%) で ZrH_{1.6} を装荷しない場合及び ZrH_{1.6} 本数比を 0.25 とした場合の $\sigma a \times \phi$ を比較すると、それぞれ 5.6×10^{-9} 、 3.5×10^{-9} 、 3.3×10^{-9} (1/s) となり、トータルの MA 核変換率の大小と一致している。一方、Np237 の一群実効マイクロ核分裂断面積 σf は、発電用高速炉で 0.32 (b)、TRU 専焼炉 (MA 富化度 60wt%) で ZrH_{1.6} を装荷しない場合 0.43 (b)、ZrH_{1.6} 本数比を 0.25 とした場合 0.55 (b) となっており、 $\sigma f \times \phi$ はそれぞれ 9.6×10^{-10} 、 1.0×10^{-9} 、 7.7×10^{-10} (1/s) となり MA 核変換率の核分裂分の大小関係と一致している。Am241 の場合も、同じ大小関係となっている。

図 3.2-16、-17 に両ケースの径方向出力分布を示す。ZrH_{1.6} 炉内装荷に伴い Pu 富化度が大幅に増加するため、Pu 富化度比による出力分布平坦化が比較的容易となっている。また、

図 3.2-18～21 に両ケース及び基準炉心、 $ZrH_{1.6}$ を装荷しない場合の平衡サイクル初期及び末期の炉心燃料領域における核種の重量変化を示す。

MA 富化度 5wt% の発電用高速炉と同程度のドップラー係数確保と、MA 核変換量最大化の観点より、TRU 専焼炉としては MA 富化度 60wt% - $ZrH_{1.6}$ 本数比 0.25 のケースを選定する。

表3.2-1 炉心の主要仕様

項目	単位	仕様	備考
原子炉熱出力	MWt	3800	
運転サイクル長さ	ヶ月	18	
燃料交換バッチ数	—	5	
取出し平均燃焼度	万MWd/t	15	
燃料	—	混合窒化物	N-15 100%濃縮 炉心燃料
燃焼スミヤ密度	%	80	
冷却材	—	Na	
ボンド材	—	Na	
燃料集合体数(IC/OC/RB)	—	252/210/150	
等価直径(炉心/RB)	cm	418/477	
炉心高さ/燃料要素長	cm	120/217	
軸ブランケット長(上/下)	cm	1.2/10.0	
ガスプレナム長(上/下)	cm	160.3/0	

表3.2-2 炉心燃料集合体仕様

項目	単位	内側炉心	外側炉心
集合体配列ピッチ	mm	178.2	178.2
集合体間ギャップ	mm	3.0	3.0
ラッパ管肉厚	mm	3.0	3.0
ラッパ管外対面幅	mm	175.2	175.2
ラッパ管内対面幅	mm	169.2	169.2
燃料ピン数		234	271
SASS模擬ピン数		37	0
スミヤ密度		80.0%	80.0%
ペレット密度(暫定)		86.0%	86.0%
ピン外径	mm	8.4	8.4
ピン内径	mm	7.32	7.32
ペレット外径(暫定)	mm	7.06	7.06
ワイヤ径	mm	1.65	1.65
セル面積	mm ²	27500.8	27500.8
ラッパ管内冷却材面積	mm ²	9195.5	9195.5
ラッパ管間冷却材面積	mm ²	918.2	918.2
燃料ピン内ボンドNa面積	mm ²	2244.1	795.7
実効燃料体積割合		28.6%	33.2%
構造材割合*1		21.8%	21.8%
冷却材割合*1		36.8%	36.8%
ラッパ管内有効冷却材割合		33.4%	33.4%
冷却材割合(含む燃料ピン内Na)		44.9%	39.7%
ボイド時/定格時Na密度比		0.256	0.157
定格時Na密度*2		1.08903E-02	9.63135E-03
ボイド時Na密度*2		1.64620E-03	1.45589E-03

*1 内部ダクト領域内を除く、*2 JNC殿提示値

表 3.2-3 Na-MN炉心 (Naボンド) : 領域別均質原子数密度(1/3)

(UNIT:1.0E+24/cc)

核種 \ 領域	内側炉心	外側炉心	径ブランケット	軸ブランケット	インシュレータベレット
U235	2.52910E-05	2.85968E-05	5.71094E-05	3.41593E-05	3.15682E-05
U238	8.29888E-03	9.38363E-03	1.87396E-02	1.12089E-02	1.03586E-02
Pu238	4.15320E-05	5.49467E-05	-	-	-
Pu239	7.16868E-04	9.48414E-04	-	-	-
Pu240	3.70668E-04	4.90392E-04	-	-	-
Pu241	1.29878E-04	1.71827E-04	-	-	-
Pu242	9.53035E-05	1.26086E-04	-	-	-
Am241	2.05054E-05	2.71286E-05	-	-	-
N15	9.69892E-03	1.12310E-02	1.87967E-02	1.12430E-02	-
O	-	-	-	-	2.07804E-02
Na	1.08903E-02	9.63135E-03	6.26888E-03	9.63135E-03	7.15904E-03
Cr	2.70885E-03	2.70885E-03	1.67196E-03	2.70885E-03	2.64895E-03
Fe	1.52134E-02	1.52134E-02	9.39007E-03	1.52134E-02	1.48770E-02
Ni	1.06795E-04	1.06795E-04	6.59163E-05	1.06795E-04	1.04434E-04
Mo	3.68074E-05	3.68074E-05	2.27183E-05	3.68074E-05	3.59935E-05

表 3.2-3 Na-MN炉心 (Naボンド) : 領域別均質原子数密度(2/3)

(UNIT:1.0E+24/cc)

核種 \ 領域	径方向遮蔽体	軸方向遮蔽体	ガスプレナム (燃料部)	ガスプレナム (径ブランケット部)	ガスプレナム (径方向遮蔽体部)	構造材 (燃料部)
Na	6.38300E-03	5.55674E-03	7.22756E-03	6.85516E-03	2.01838E-02	7.45000E-03
Cr	9.95491E-03	1.04735E-02	3.18543E-03	2.51265E-03	1.29305E-03	8.27000E-03
Mn	1.09921E-03	1.15647E-03	3.51733E-04	2.77445E-04	1.42777E-04	-
Fe	3.75373E-02	3.94927E-02	1.20114E-02	9.47455E-03	4.87573E-03	4.64500E-02
Ni	1.17553E-02	1.23677E-02	3.76282E-03	2.96810E-03	1.52690E-03	3.25900E-04
Mo	8.99472E-04	9.46329E-04	2.87732E-04	2.26961E-04	1.16833E-04	1.12400E-04

表 3.2-3 Na-MN炉心 (Naボンド) : 領域別均質原子数密度(3/3)

(UNIT:1.0E+24/cc)

核種 \ 領域	構造材 (径ブランケット部)	B4C遮蔽体 (燃料部)	B4C遮蔽体 (径ブランケット部)	B4C遮蔽体 (径方向遮蔽体部)	Na層	Naフォロー
C	-	1.31701E-02	1.38309E-02	1.52502E-02	-	-
Na	5.82700E-03	7.22164E-03	5.60460E-03	4.28467E-03	2.00200E-02	2.03057E-02
Cr	9.17800E-03	2.28020E-03	2.94057E-03	2.89636E-03	1.24400E-03	1.21654E-03
Mn	-	2.51777E-04	3.24694E-04	3.19813E-04	-	1.34329E-04
Fe	5.15500E-02	8.59800E-03	1.10881E-02	1.09214E-02	6.98500E-03	4.58722E-03
Ni	3.61700E-04	2.69258E-03	3.47238E-03	3.42018E-03	4.90100E-05	1.43655E-03
Mo	1.24700E-04	2.06026E-04	2.65694E-04	2.61699E-04	1.69000E-05	1.09920E-04
B10	-	1.05361E-02	1.10647E-02	1.22001E-02	-	-
B11	-	4.21443E-02	4.42587E-02	4.88005E-02	-	-

表3.2-4 TRU専焼炉(MA 60w/o)のサーベイ結果

	Pu富化度(w/o)					実効増倍率		線出力(W/cm)					
	IC	OC	平均	OC/IC	OC-IC	BOEC	EOEC	BOEC			EOEC		
								IC	OC	OC/IC	IC	OC	OC/IC
基準炉心	14.2	16.2	15.2	1.14	2.0	1.018	1.005	391	361	0.92	393	341	0.87
case-a	14.2	16.2	15.2	1.14	2.0	1.230	1.223	382	429	1.12	366	393	1.07
case-b	9.4	10.7	10.0	1.14	1.3	1.138	1.147	391	414	1.06	386	393	1.02
case-c	10.0	10.0	10.0	1.00	0.0	1.150	1.150	510	349	0.68	507	393	0.77
case-d	4.8	5.2	5.0	1.10	0.5	1.053	1.084	569	347	0.61	686	393	0.57
case-e	1.0	3.0	2.0	3.00	2.0	0.998	1.032	447	554	1.24	448	506	1.13
case-f	0.0	4.1	2.0	∞	4.1	1.006	1.034	415	607	1.46	429	543	1.27
case-g	1.5	2.5	2.0	1.67	1.0	0.996	1.003	451	504	1.12	445	466	1.05
case-h	2.0	2.0	2.0	1.00	0.0	1.014	1.053	990	225	0.23	851	224	0.26
case-I	1.6	2.5	2.0	1.56	0.9	0.997	1.034	449	495	1.10	444	458	1.03
case-j	1.7	2.5	2.1	1.47	0.8	0.998	1.035	447	486	1.09	442	448	1.01
case-k	2.0	2.5	2.2	1.25	0.5	1.001	1.040	435	439	1.01	436	395	0.91
case-l	2.2	2.9	2.5	1.32	0.7	1.005	1.043	437	452	1.03	432	410	0.95

表3.2-5 主要核特性の比較

項目		単位	基準炉心	TRU専焼炉	発電用高速炉
MA富化度(IC/OC/平均)		wt%	0.0/0.0/0.0	60.0/60.0/60.0	5.0/5.0/5.0
Pu富化度(IC/OC/平均)		wt%	14.2/16.2/15.2	2.2/2.9/2.5	13.2/15.0/14.1
運転サイクル長		ヶ月	18	←	←
燃料交換バッチ数		—	5	←	←
取出し平均燃焼度		万MWd/t	15.6	15.8	15.6
燃焼反応度		% Δk/kk'	1.3	-3.6	-0.4
最大線出力(IC/OC)	平衡サイクル初期	W/cm	392/361	437/452	417/364
	平衡サイクル末期	〃	393/341	432/410	428/339
ナトリウムボイド反応度*1	初装荷初期	% Δk/kk'	2.9	7.5	3.7
ドブラー係数	初装荷初期	Tdk/dT	-8.4E-03	-8.9E-05	-3.2E-03
実効遅発中性子割合	初装荷初期	—	3.73E-03	1.67E-03	3.62E-03
増殖比*2	平衡サイクル中期	—	1.14	1.96	1.17

*1 炉心領域のラッパ管内側(内部ダクト領域内を除く)のみボイド化

*2 核分裂性核種:U-235, Pu-239, Pu-241、親核種:U-238, Pu-240

表3.2-6 MA核変換特性

	MA装荷重量(t)		MA核変換量		MA核変換率
	BOEC	EOEC	kg/cycle	基準炉心基数換算	%/cycle
基準炉心	0.26	0.31	-46	-1	
TRU専焼炉(MA 60wt%)	30.93	27.79	3133	69	10
発電用高速炉(MA 5wt%)	2.55	2.23	316	7	12

表3.2-7 TRU専焼炉の主要核特性の比較

項目		単位	MA60ZrH00	MA60ZrH25	MA30ZrH05
ZrH _{1.6} ロッド本数比(IC/OC/平均)		-	0/0/0	0.25/0.25/0.25	0.05/0.05/0.05
MA富化度(IC/OC/平均)		wt%	60/60/60	60/60/60	30/30/30
Pu富化度(IC/OC/平均)		wt%	2.2/2.9/2.5	16.2/18.5/17.3	12.5/14.3/13.4
運転サイクル長		ヶ月	18	14	18
燃料交換パッチ数		-	5	←	←
取出し平均燃焼度		万MWd/t	15.8	15.5	16.6
燃焼反応度		%Δk/kk'	-3.6	-0.6	-1.5
最大線出力(IC/OC)	平衡サイクル初期	W/cm	437/452	488/528	402/416
	平衡サイクル末期	//	432/410	485/490	441/376
ナトリウムボイド反応度* ¹	初装荷初期	%Δk/kk'	8.1	3.7	5.0
ドブラー係数	初装荷初期	Tdk/dT	-8.9E-05	-2.5E-03	-2.2E-03
実効遅発中性子割合	初装荷初期	-	1.37E-03	1.67E-03	-
増殖比* ²	平衡サイクル中期	-	1.96	0.63	1.04

*1 炉心領域のラッパ管内側(内部ダクト領域内を除く)のみボイド化

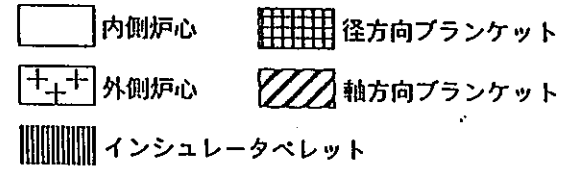
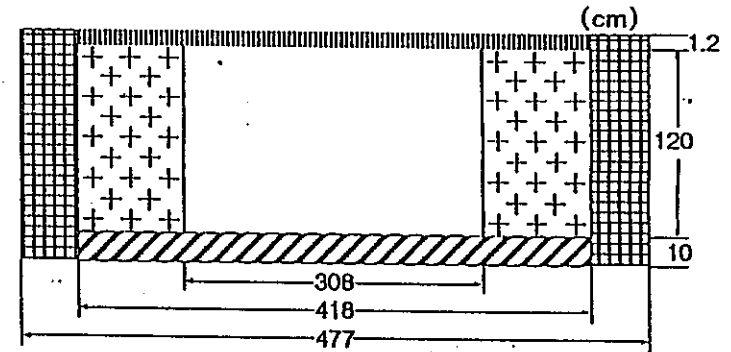
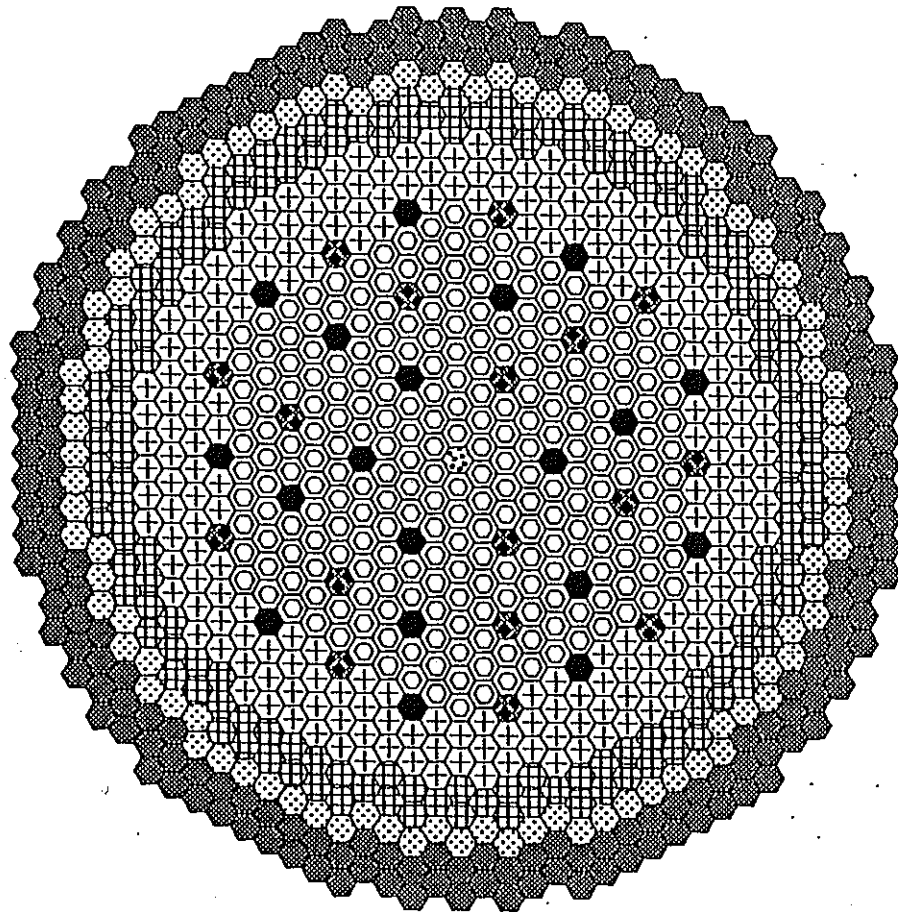
*2 核分裂性核種: U-235, Pu-239, Pu-241、親核種: U-238, Pu-240

表3.2-8 MA核変換特性

	ZrH _{1.6} /燃料本数比	MA装荷重量(t)		MA核変換量				MA核変換率	
		BOEC	EOEC	トータル		核分裂分*		トータル %/cycle	核分裂分* %/cycle
				kg/cycle	基準炉心基数換算	kg/cycle	基準炉心基数換算		
基準炉心	0.00	0.26	0.31	-46	-1	-	-	-	-
TRU専焼炉(MA60wt%)	0.00	30.9	27.8	3133	69	1996	22	10	3.2
	0.25	25.7	23.5	2205	48	564	12	9	2.2
TRU専焼炉(MA30wt%)	0.05	14.1	13.2	1757	38	721	16	13	3.0
発電用高速炉(MA5wt%)	0.00	2.55	2.23	316	7	128	2	12	2.8

*平衡サイクル初期及び末期におけるMAの核分裂割合の平均値を次式より概略評価

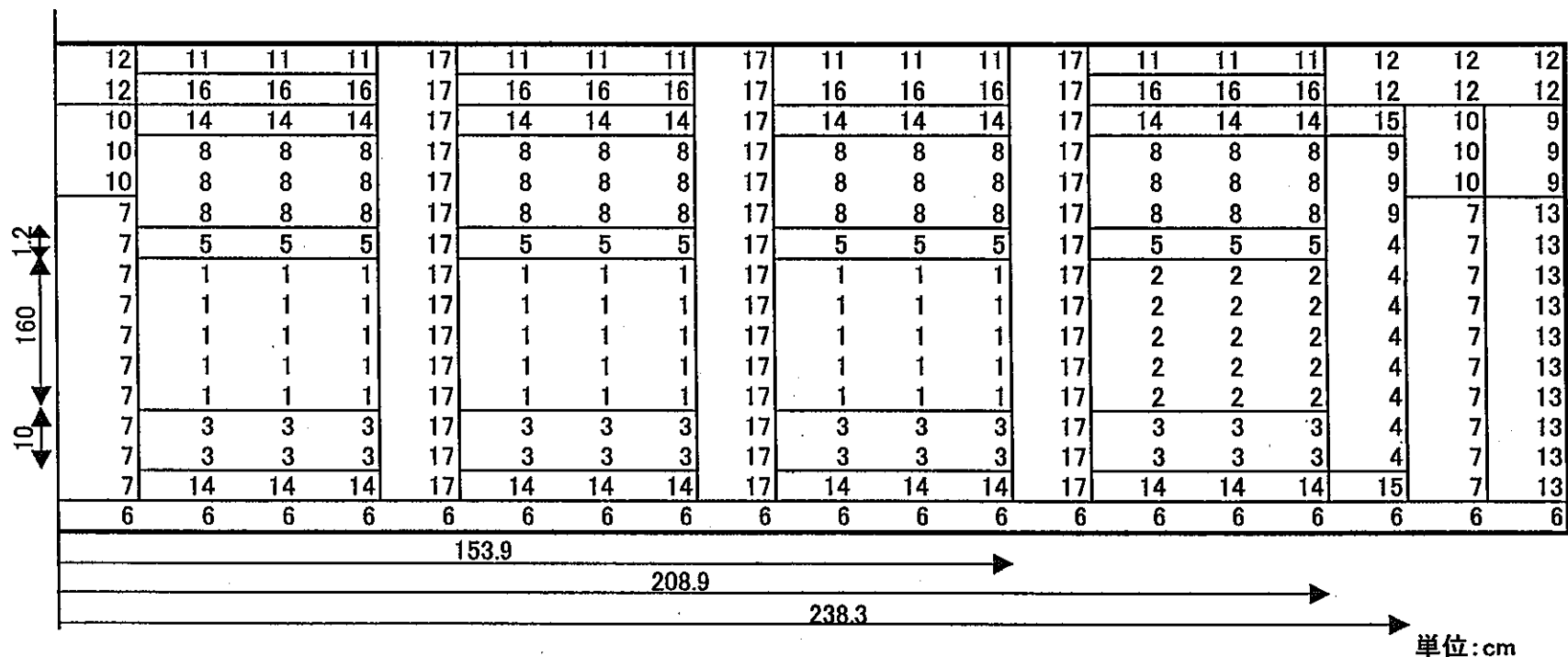
$$\frac{\sum \sum f_i \phi_i}{(\sum \sum f_i \phi_i + \sum c_i \phi_i)}$$



⊙	内側炉心燃料集合体 (SASS付)	252体
⊕	外側炉心燃料集合体	210体
⊗	径方向ブランケット	150体
⊘	SUS遮蔽体	96体
⊙	B ₄ C遮蔽体	210体
●	A主炉停止系制御棒	18体
⊗	B主炉停止系制御棒	18体
⊘	SUS集合体	1体

合計 955体

図 3.2-1 Na-MN 炉心 (Na ボンド) : 炉心平面図



番号 領域名

- 1 IC
- 2 OC
- 3 AB
- 4 RB
- 5 インシュレータペレット
- 6 下部遮蔽体
- 7 SUS集合体
- 8 ガスプレナム(燃料部)
- 9 ガスプレナム(径ブランケット部)

- 10 ガスプレナム(SUS遮蔽体部)
- 11 B₄C遮蔽体(燃料部)
- 12 B₄C遮蔽体(径ブランケット部)
- 13 B₄C遮蔽体(径方向遮蔽体部)
- 14 上部構造材領域(燃料部)
- 15 上部構造材領域(径ブランケット部)
- 16 Na層
- 17 Naフロアー

図3.2-2 2次元RZ計算体系

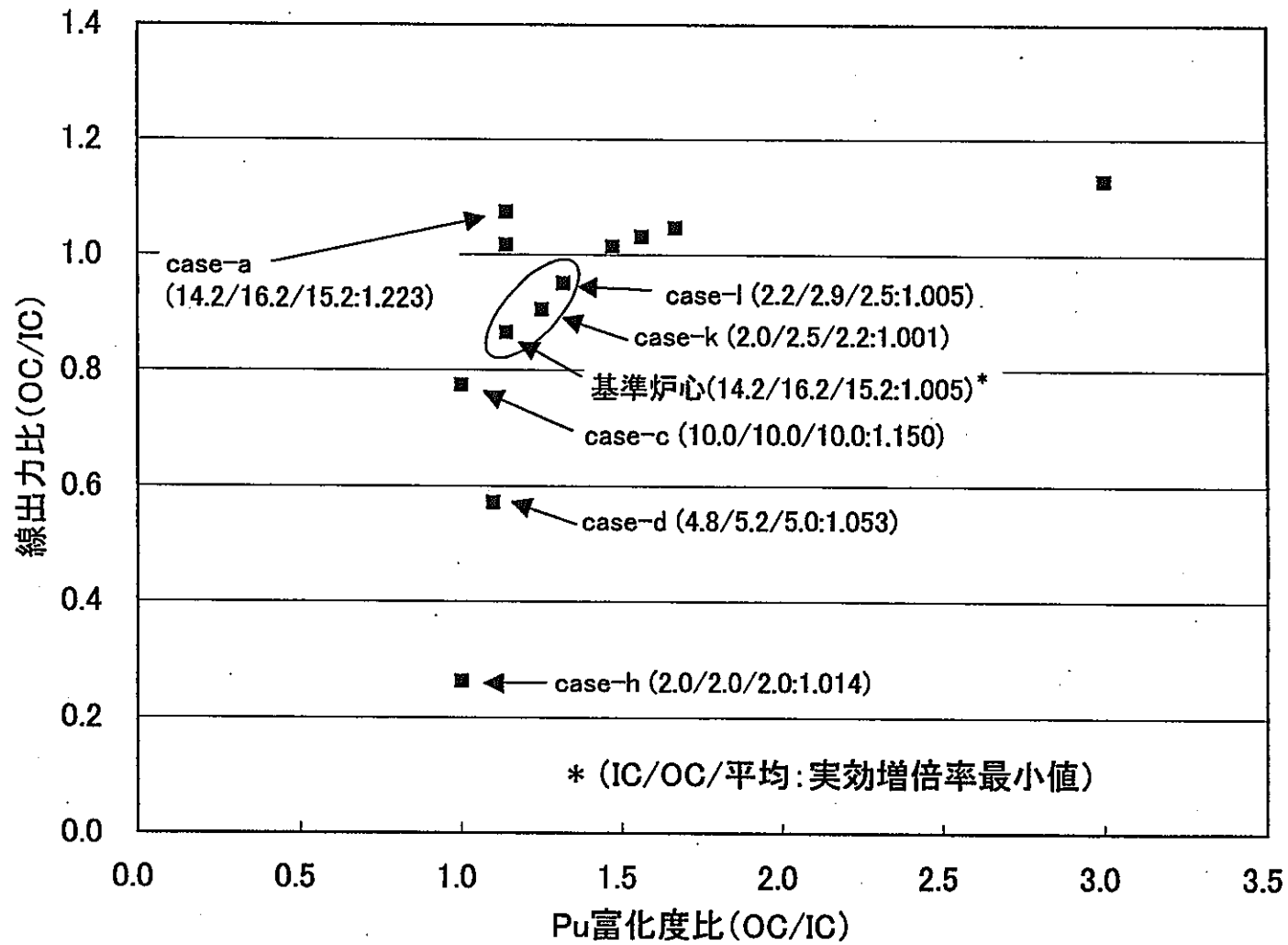


図3.2-3 Pu富化度比とEOEC線出力比の関係(TRU専焼炉MA60w/o)

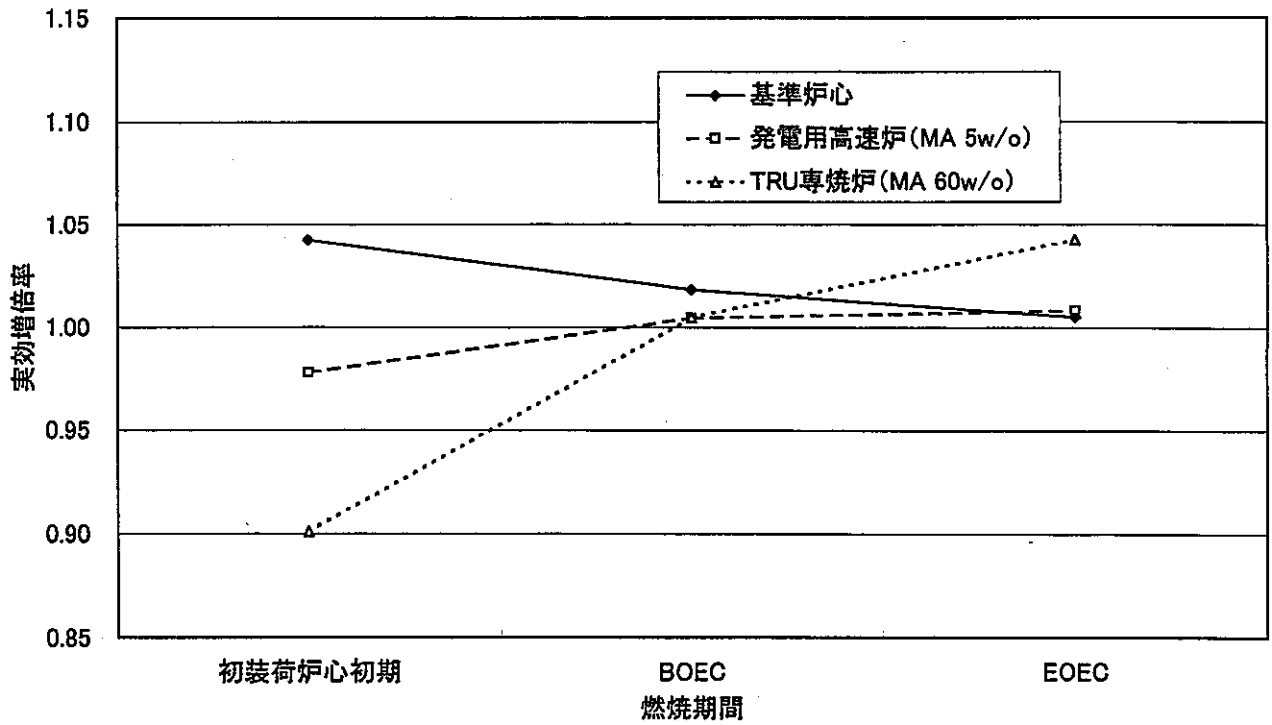


図3.2-4 実効増倍率の燃焼変化

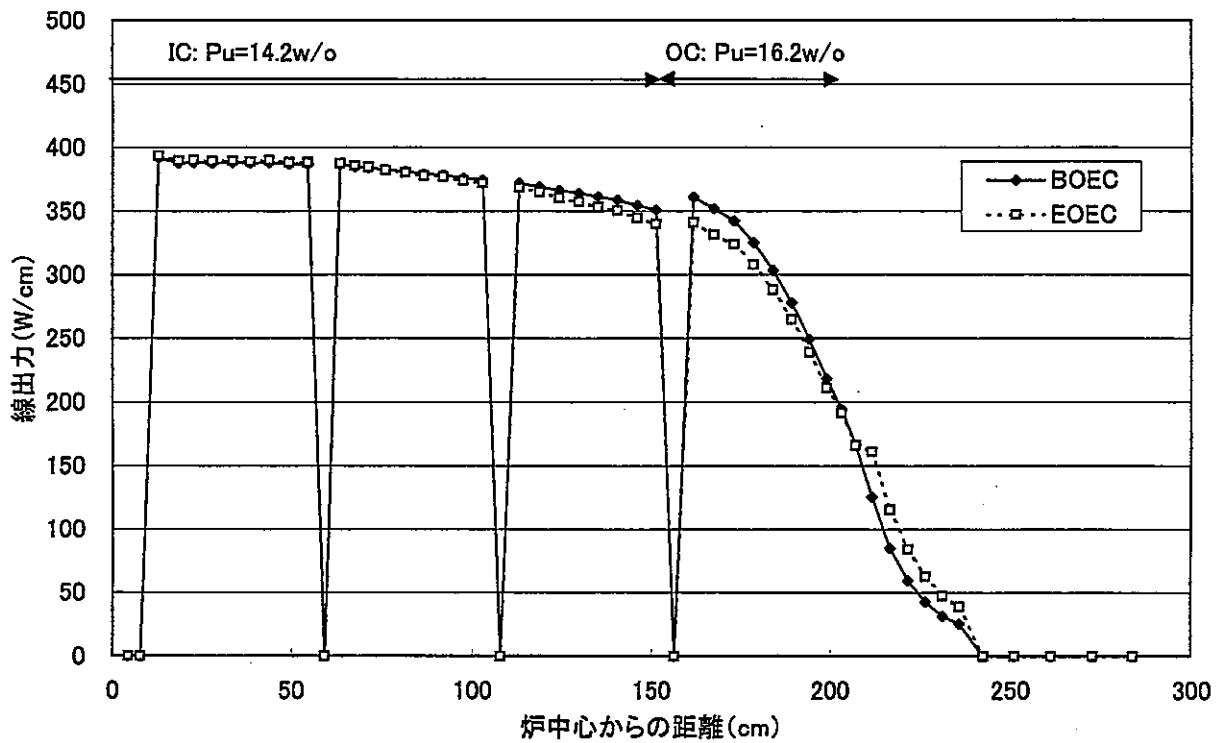


図3.2-5 径方向線出力分布(基準炉心、炉心中央断面)

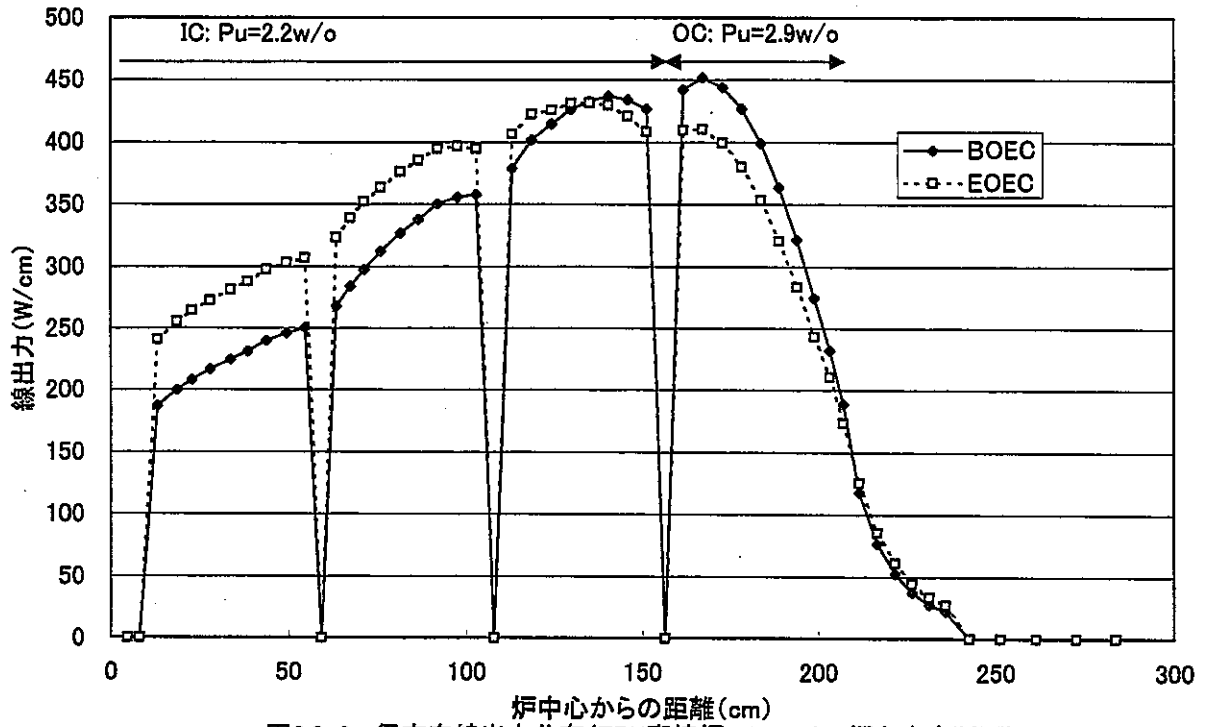


図3.2-6 径方向線出力分布 (TRU専焼炉MA60w/o、炉心中央断面)

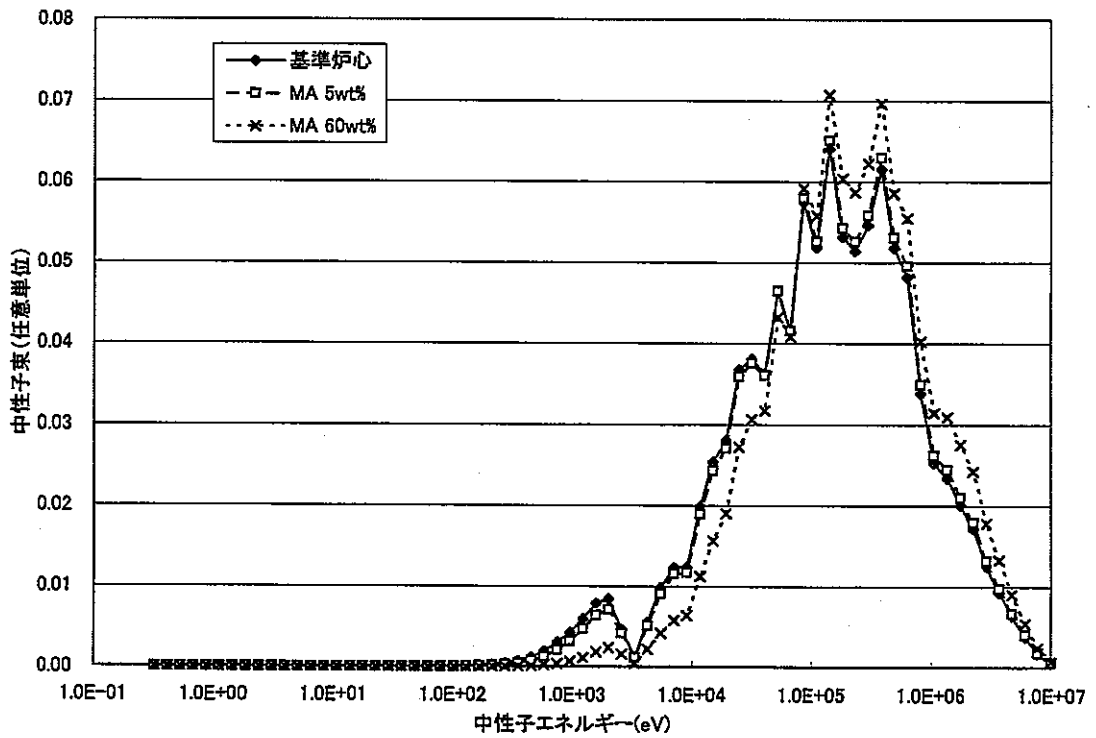


図3.2-7 中性子スペクトルの比較 (MA装荷の影響)

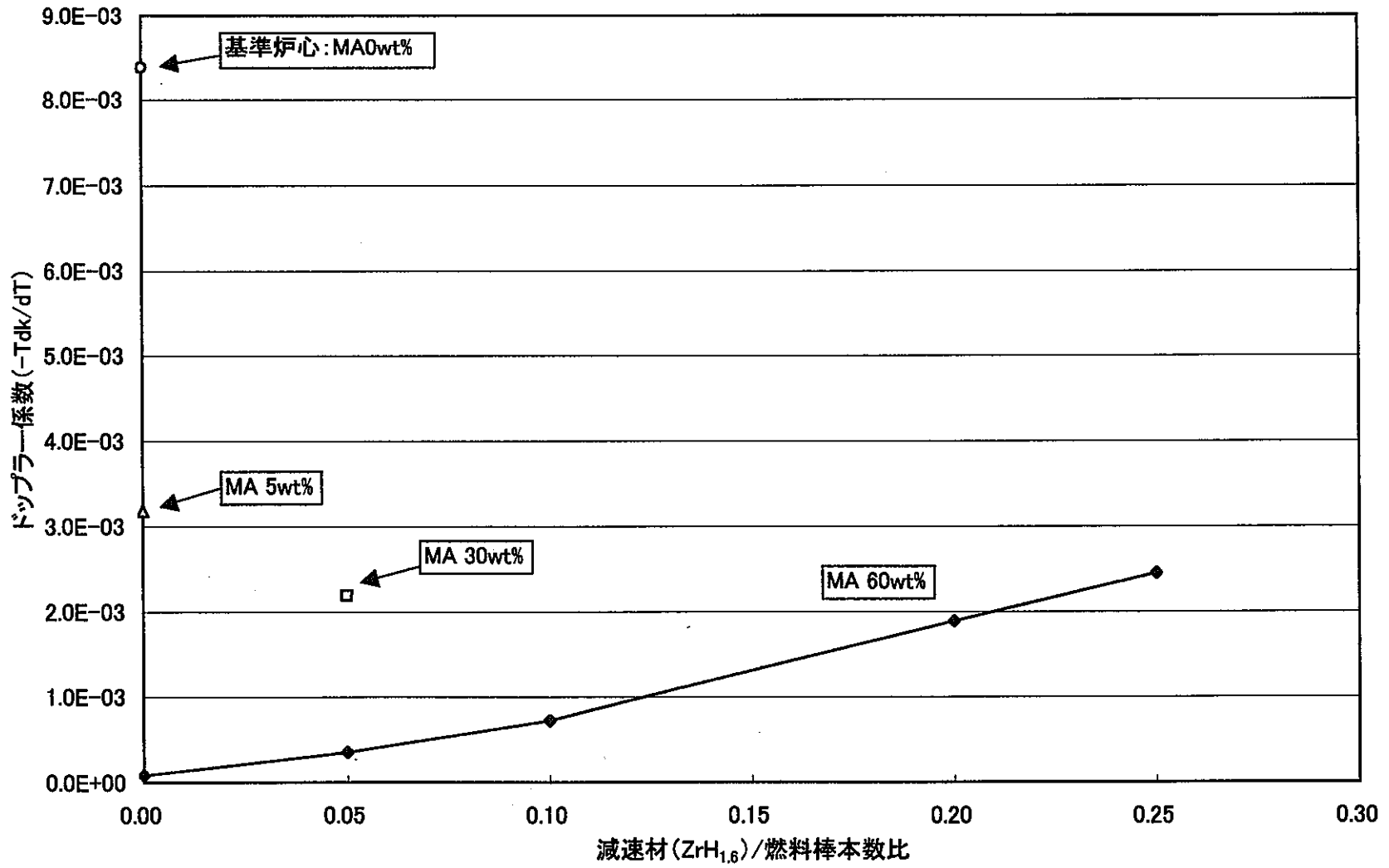


図3.2-8 減速材本数比とドップラー係数(未燃焼時)の関係

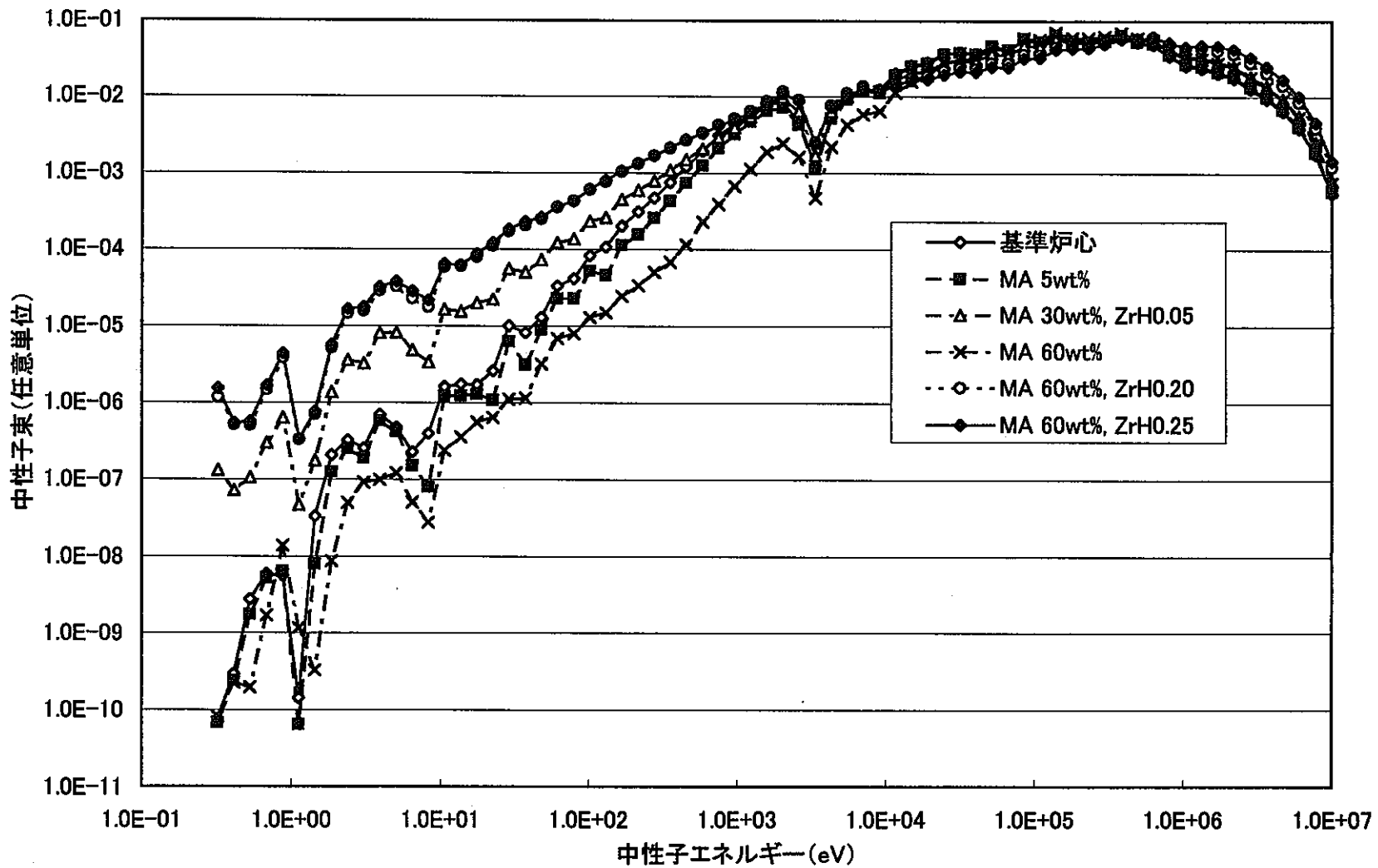


図3.2-9 中性子スペクトルの比較

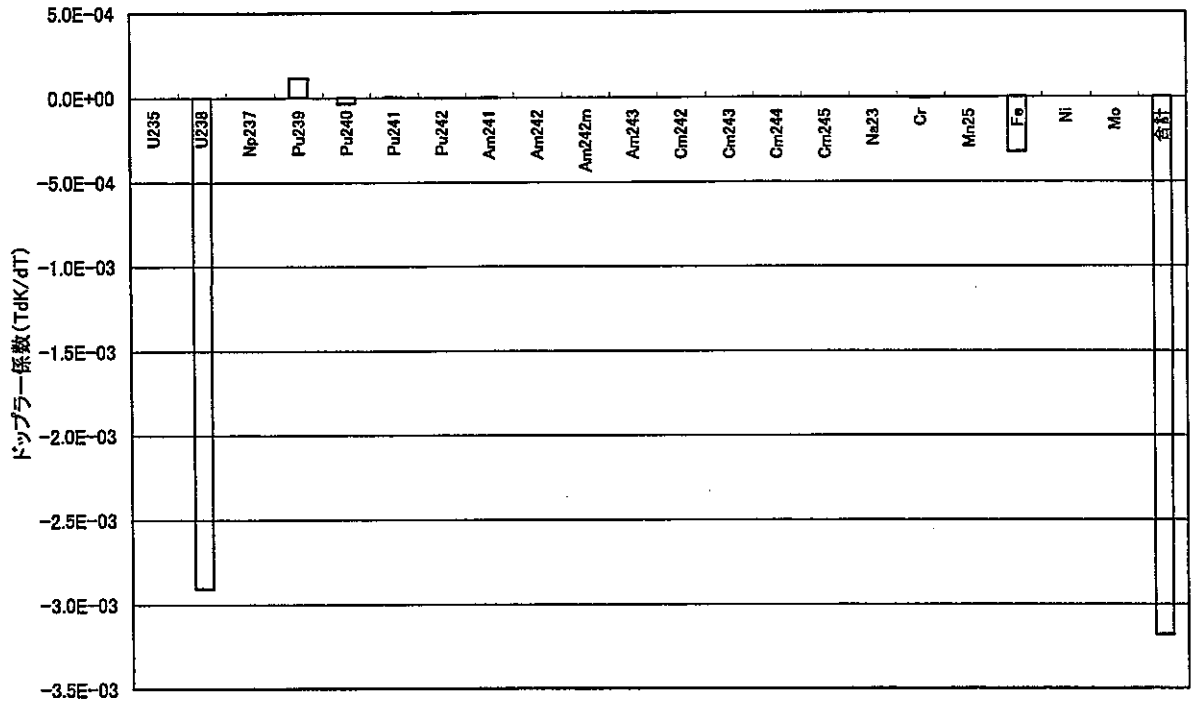


図3.2-10 ドップラー係数内訳(発電用高速炉大型炉心、MA 5wt%、ZrH_{1.8} 0.0)

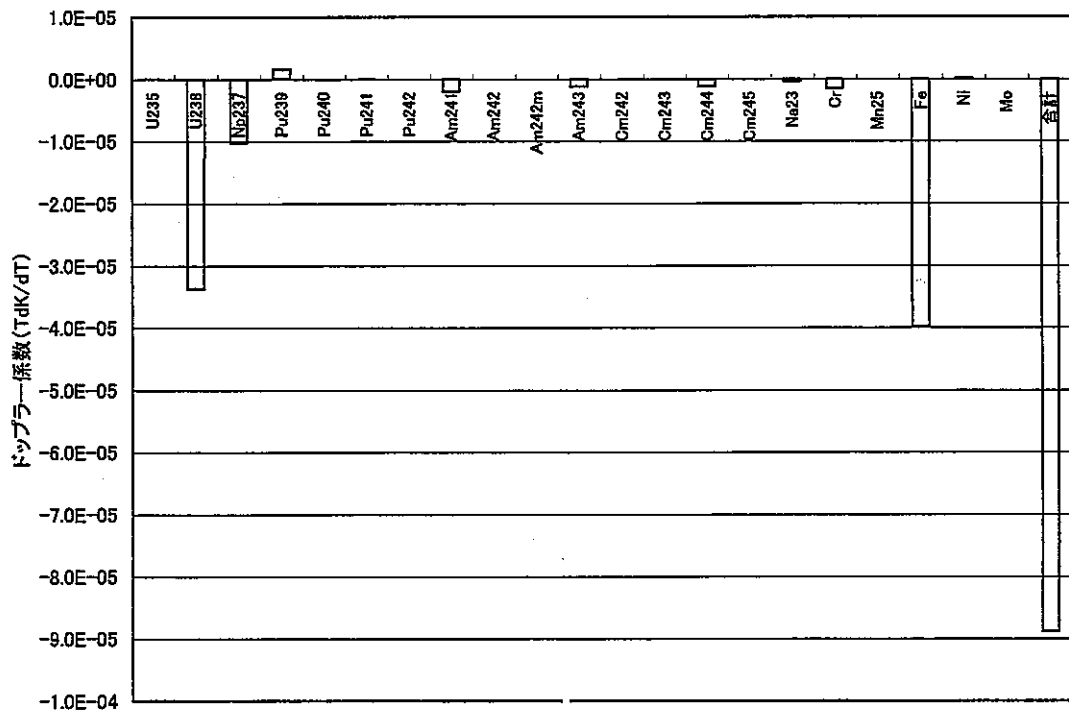


図3.2-11 ドップラー係数内訳(TRU専焼炉大型炉心、MA 60wt%、ZrH_{1.8} 0.0)

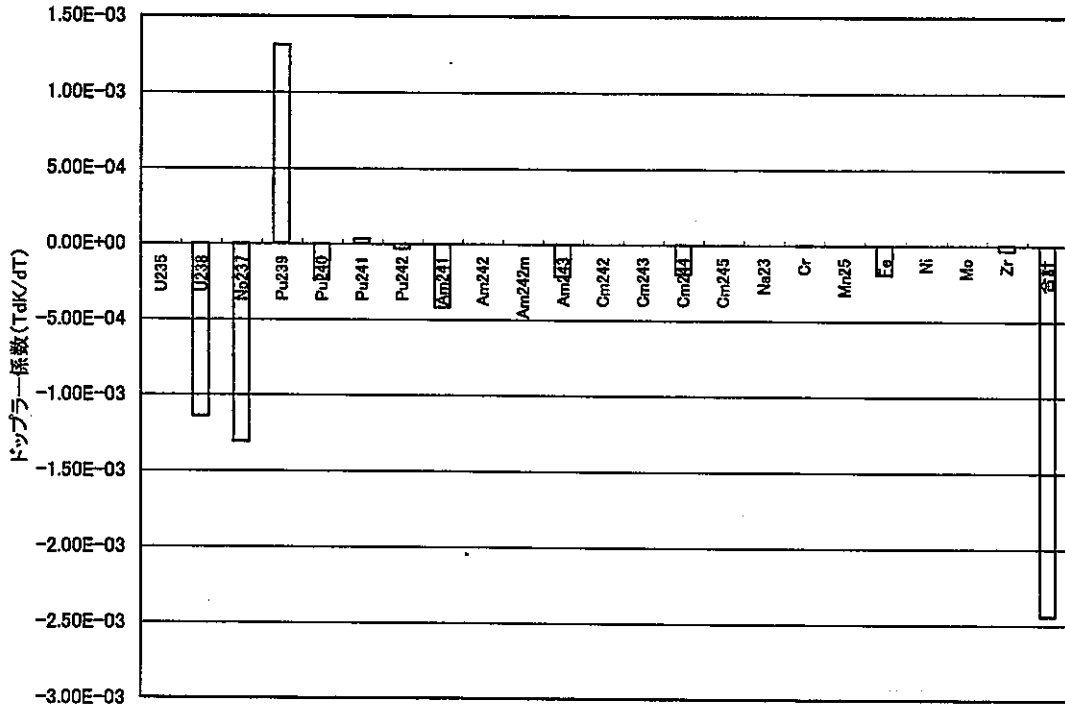


図3.2-12 ドップラー係数内訳 (TRU専焼炉大型炉心、MA 60wt%、ZrH_{1.6} 0.25)

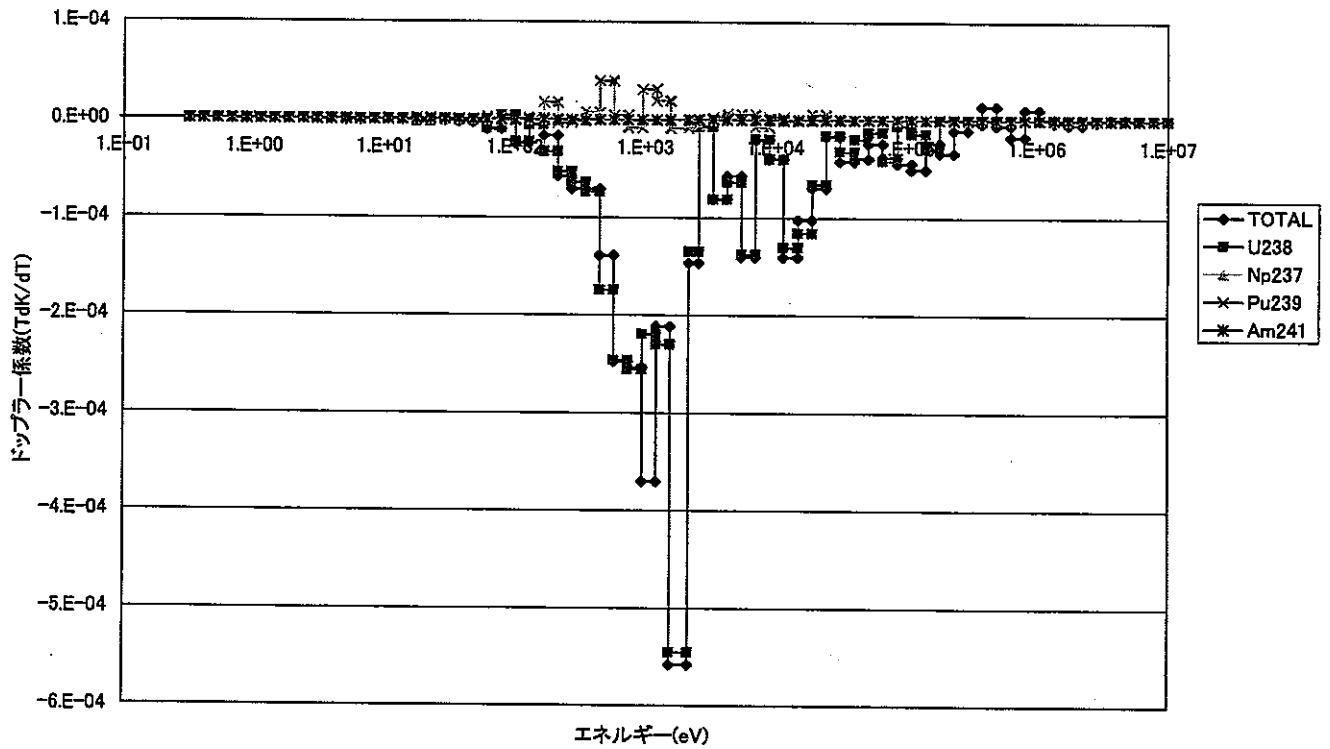


図3.2-13 ドップラー係数内訳 (MA 5wt%、ZrH_{1.6} 0.0)

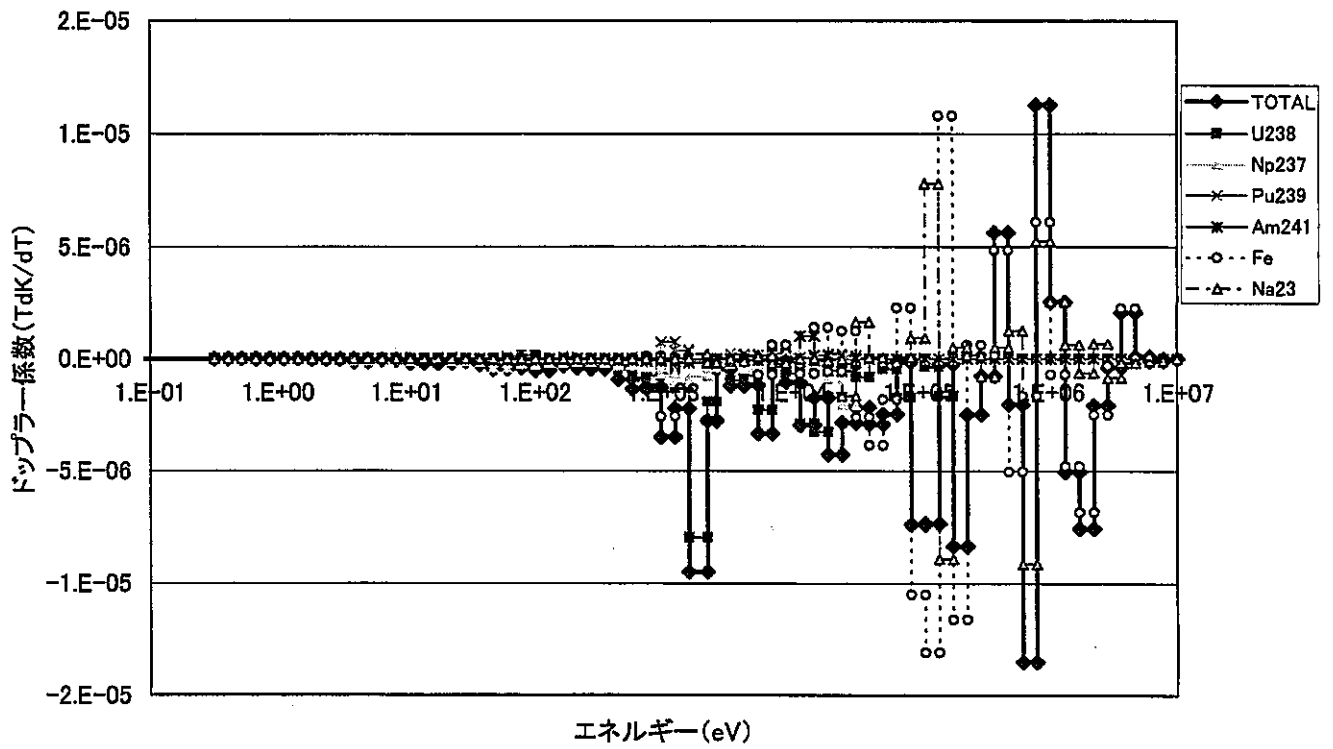


図3.2-14 ドップラー係数内訳 (MA60wt%, ZrH_{1.6} 0.0)

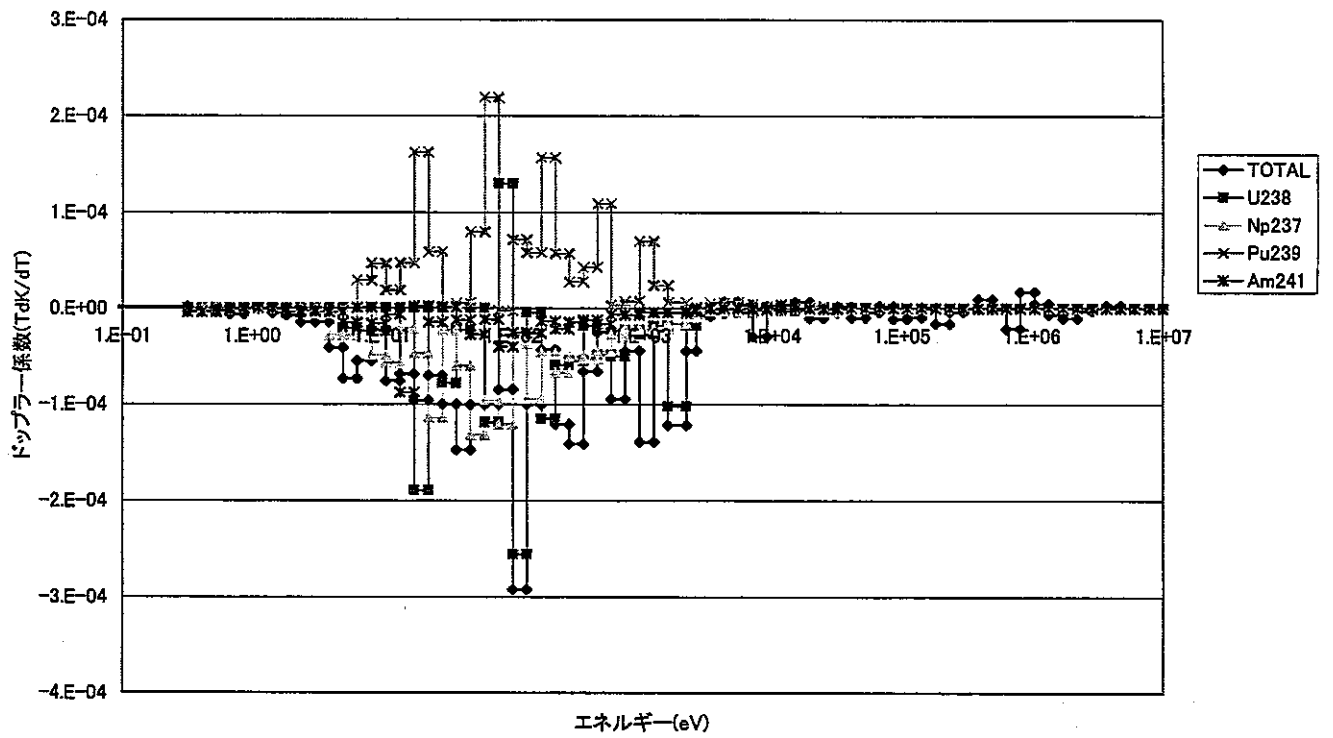


図3.2-15 ドップラー係数内訳 (MA60wt%, ZrH_{1.6} 0.25)

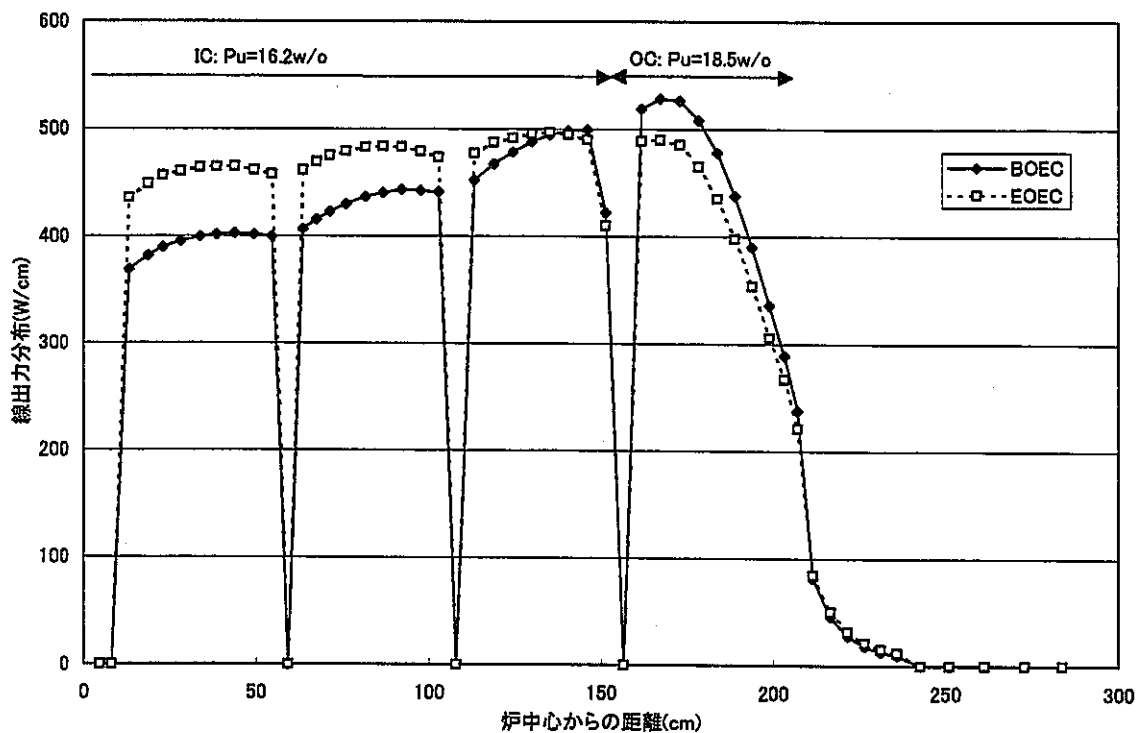


图3.2-16 径方向線出力分布 (TRU専焼炉MA60w/o、ZrH_{1.6}本数比0.25、炉心中央断面)

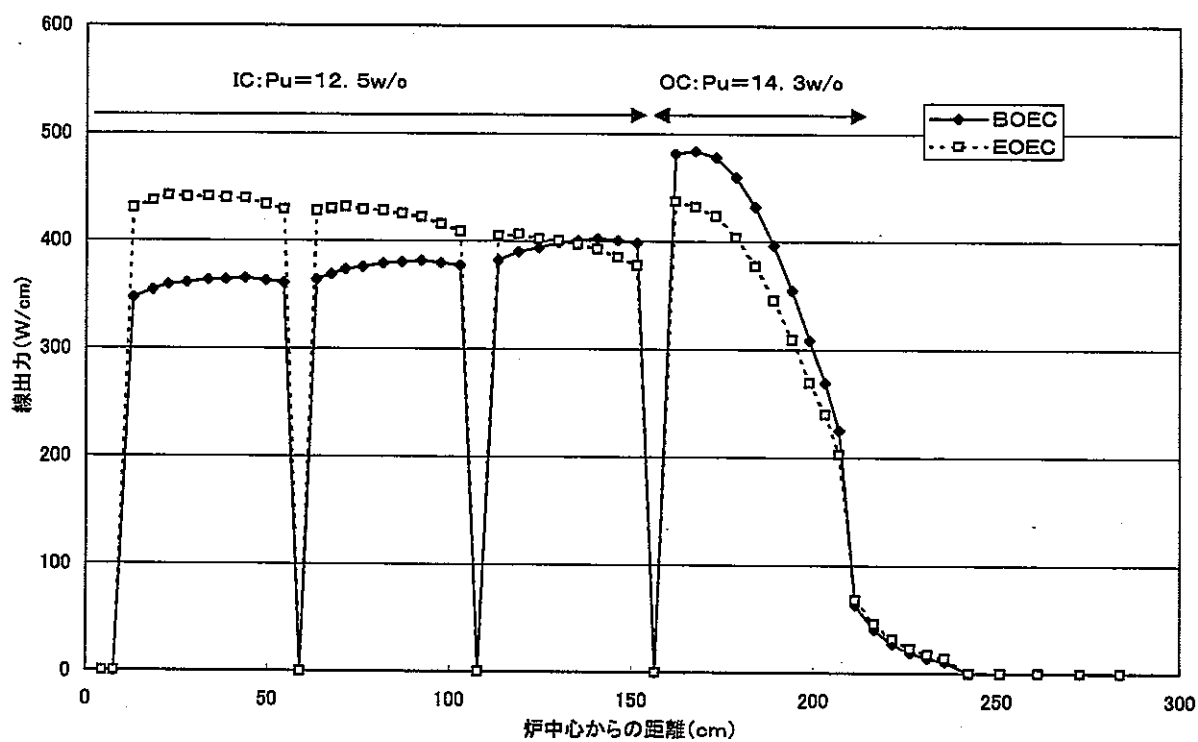


图3.2-17 径方向線出力分布 (TRU専焼炉MA30%、ZrH_{1.6}本数比0.05、炉心中央断面)

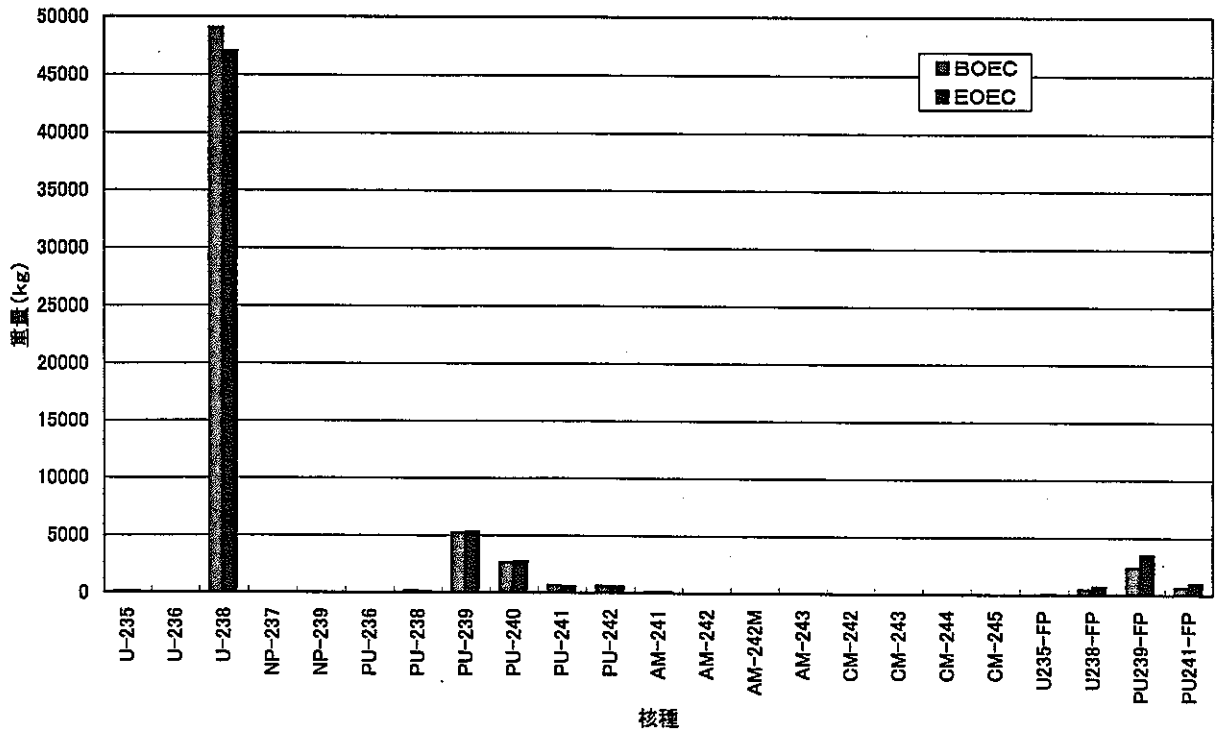


図3.2-18 核種重量変化(標準炉心)

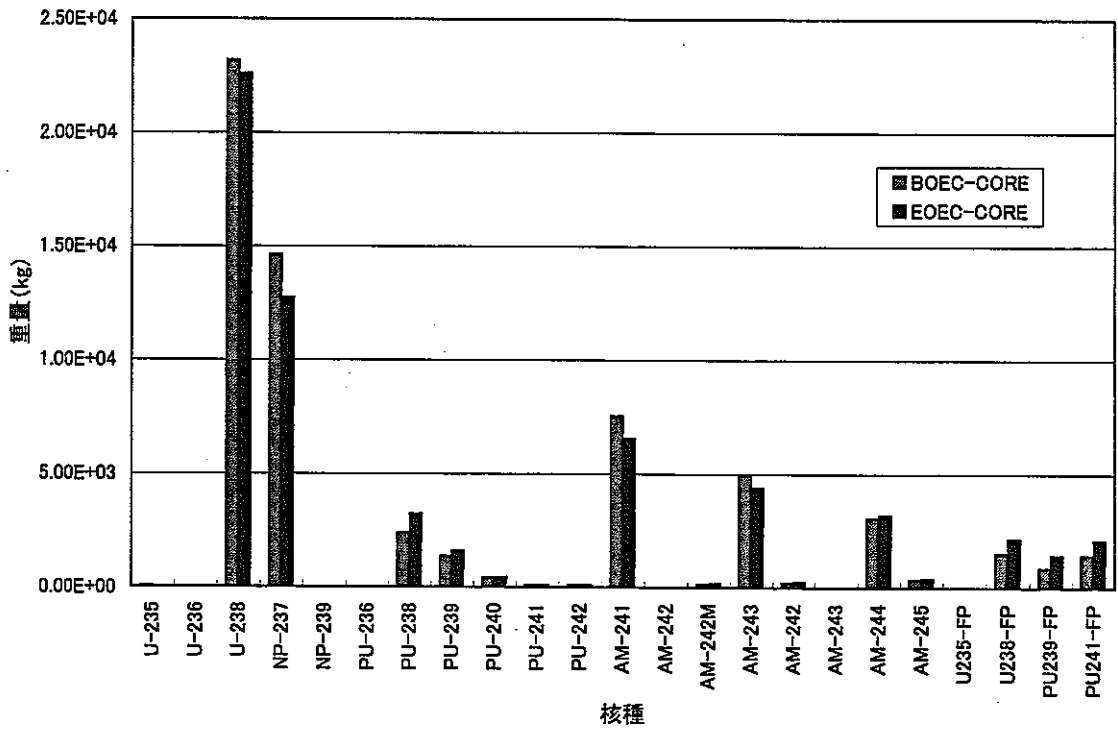


図3.2-19 TRU専焼炉の核種重量変化(MA60wt%、ZrH1.6本数比0)

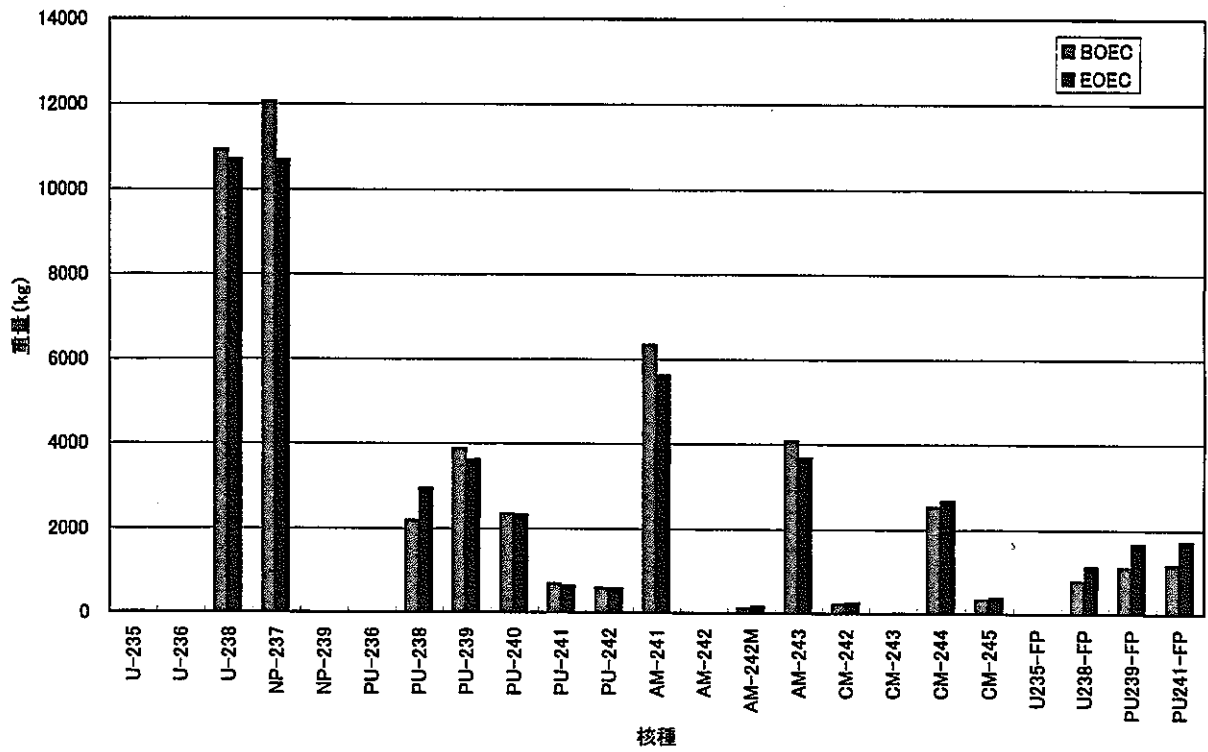


図3.2-20 TRU専焼炉の核種重量変化(MA60w/o、ZrH_{1.6}比0.25)

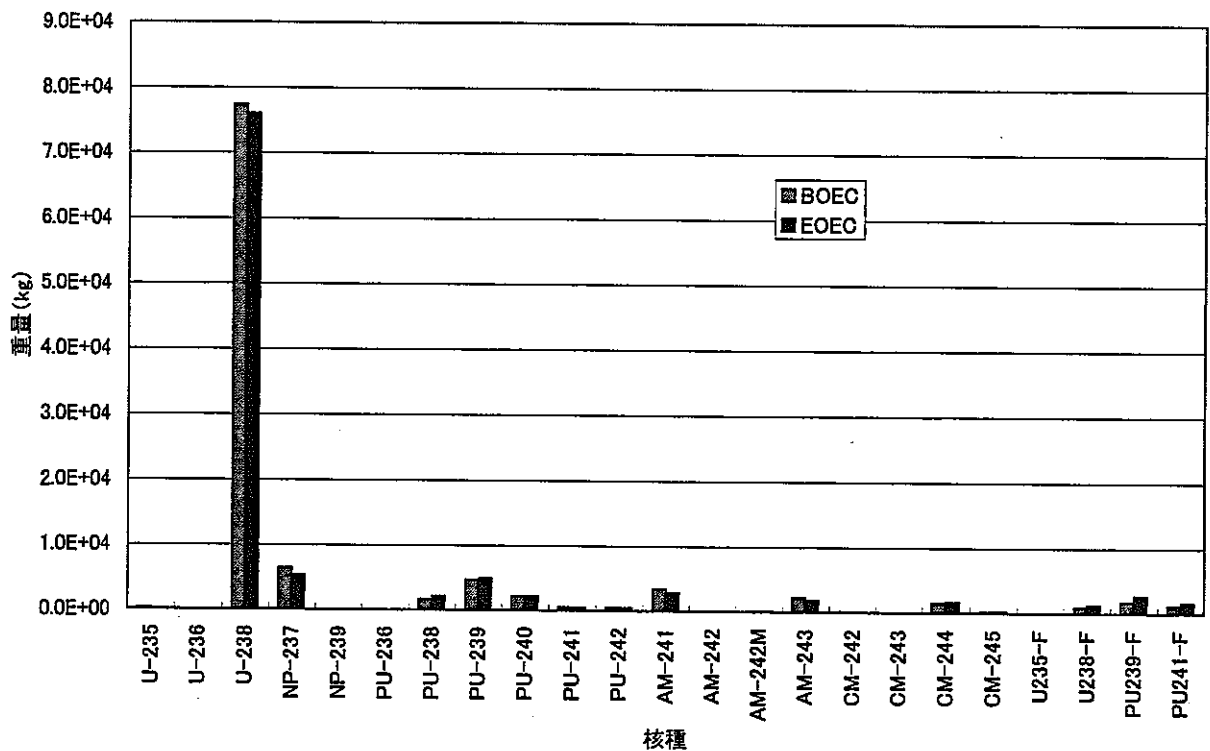


図3.2-21 TRU専焼炉の核種重量変化(MA30w/o、ZrH_{1.6}比0.05)

3.2.2 TRU 専焼炉中小型炉心

MA 核変換特性の炉心出力規模依存性を確認するため、3.2.1 で設定した TRU 専焼炉大型炉心 (3800MWt) の燃料集合体数を減らして原子炉出力を 1200MWt とした TRU 専焼炉中小型炉心を設定し核変換特性及び炉心核特性を評価した。

図 3.2-22 に設定した中小型炉心の配置を、また表 3.2-9 に炉心の主要な仕様を示す。燃料集合体の仕様は、表 3.2-2 に示した大型炉心の仕様と同じである。表 3.2-10 に主要な核特性を比較して示す。MA を装荷しない基準の炉心 (M-MA00ZrH00) 及び大型炉心と同じ考え方にに基づき MA 富化度を 60wt%、 $ZrH_{1.6}$ の本数比を 0.25 とした TRU 専焼中小型炉心 (M-MA60ZrH25) を設定した。比較のため、TRU 専焼中小型炉心で $ZrH_{1.6}$ を装荷しない場合 (M-MA60ZrH00) 、及び MA 富化度を 5wt%とした発電用中小型高速炉 (M-MA05ZrH00) の核特性も併記した。図 3.2-22 に示すように、中小型炉心においても大型炉心と同様径ブランケット集合体を 2 層設置したため、炉心燃料集合体に対する径ブランケット集合体の装荷体数比が 2 倍程度と増加している。その結果、径ブランケット集合体の出力分担比が増え炉心の取出し平均燃焼度が減少している (運転期間、燃料取り替えバッチ数は大型炉心と同じとした)。TRU 専焼中小型炉心は表 3.2-7 で示した TRU 専焼大型炉心と類似の核特性が得られている。また、発電用中小型高速炉とほぼ同程度のドップラー係数が得られている。図 3.2-23 に中小型炉心の実効増倍率の燃焼変化を、図 3.2-24~27 に各炉心の径方向線出力分布を示す。MA 核変換特性を表 3.2-11 に示す。TRU 専焼中小型炉心は基準炉心約 40 基分の MA を核変換できる事が分かる。表 3.2-8 に示した大型炉の MA 核変換特性と比較すると、TRU 専焼炉、発電用高速炉のいずれにおいても、中小型炉の方が MA の核変換率 (トータル、核分裂分いずれも) がわずかに小さいことが分かる。これは、中小型炉の方が中性子の漏れが大きく、所要の Pu 富化度が高くなり中性子束レベルが低くなるためである。

表3.2-9 中小型炉心の主要仕様

項目	単位	仕様	備考
原子炉熱出力	MWt	1200	
運転サイクル長さ	ヶ月	18	
燃料交換バッチ数	—	5	
取出し平均燃焼度	万MWd/t	15	
燃料	—	混合窒化物	N-15 100%濃縮 炉心燃料
燃焼スミヤ密度	%	80	
冷却材	—	Na	
ボンダ材	—	Na	
燃料集合体数(IC/OC/RB)	—	78/78/102	
等価直径(炉心/RB)	cm	243/308	
炉心高さ/燃料要素長	cm	120/217	
軸ブランケット長(上/下)	cm	1.2/10.0	
ガスプレナム長(上/下)	cm	160.3/0	

表3.2-10 TRU専焼炉中小型炉の主要核特性の比較

項目	単位	M-MA00ZrH00	M-MA05ZrH00	M-MA60ZrH00	M-MA60ZrH25	
ZrH _{1.6} ロッド本数比(IC/OC/平均)	—	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0.25/0.25/0.25	
MA富化度(IC/OC/平均)	wt%	0/0/0	5.0/5.0/5.0	60/60/60	60/60/60	
Pu富化度(IC/OC/平均)	wt%	15.8/19.0/17.5	14.9/17.9/16.5	3.0/4.5/3.8	17.5/21.0/19.38	
運転サイクル長さ	ヶ月	18	18	18	14	
燃料交換バッチ数	—	5	←	←	←	
取出し平均燃焼度	万MWd/t	14.0	14.1	14.5	14.6	
燃焼反応度	%Δk/kk'	2.0	0.7	-3.1	-0.3	
最大線出力(IC/OC)	平衡サイクル初期	W/cm	364/327	373/329	448/349	365/364
	平衡サイクル末期	"	351/308	369/310	473/331	379/351
ナトリウムボイド反応度*1	初装荷初期	%Δk/kk'	2.0	3.7	7.7	4.3
ドブラー係数	初装荷初期	Tdk/dT	-6.9E-03	-2.7E-03	-9.8E-05	-2.2E-03
実効遅発中性子割合	—	—	3.75E-03	3.54E-03	—	1.69E-03
増殖比*2	平衡サイクル中期	—	1.19	1.18	2.01	0.72

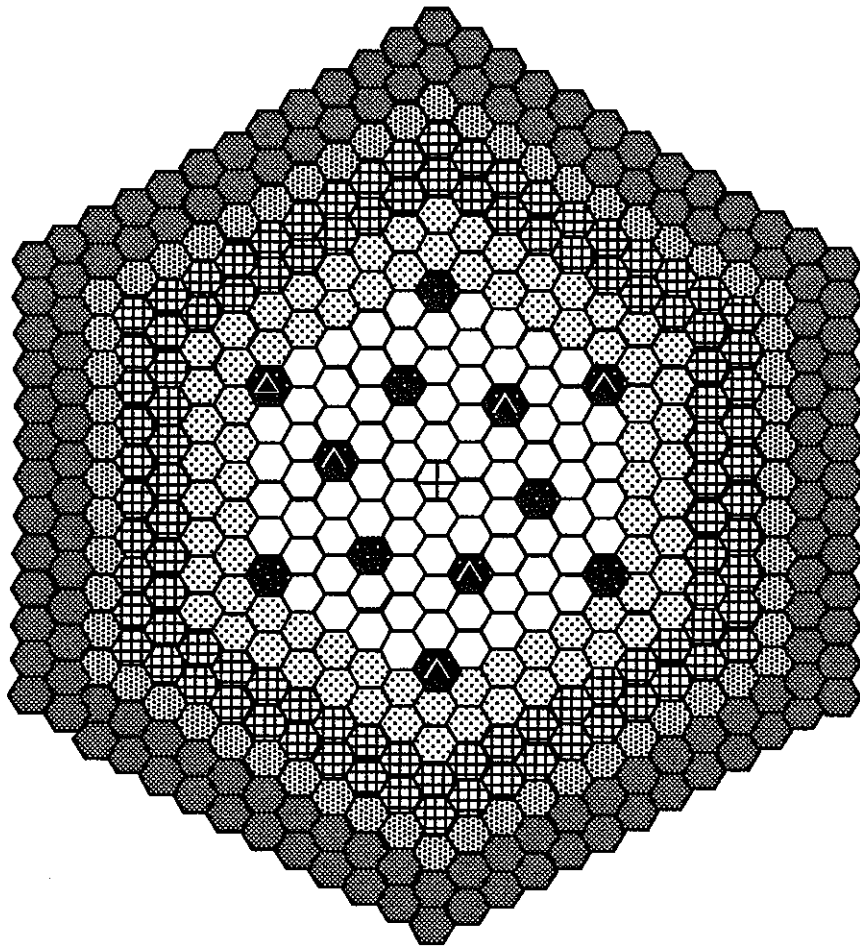
*1 炉心領域のラップ管内側(内部ダクト領域内を除く)のみボイド化
 *2 核分裂性核種:U-235, Pu-239, Pu-241、親核種:U-238, Pu-240

表3.2-11 中小型炉のMA核変換特性

	ZrH1.6/燃料本数比	MA装荷重量(t)		MA核変換量				MA核変換率	
		BOEC	EOEC	トータル		核分裂分*		トータル	核分裂分*
		kg/cycle	kg/cycle	kg/cycle	基準炉心基数換算	kg/cycle	基準炉心基数換算	%/cycle	%/cycle
基準炉心	0.00	0.09	0.11	-16	-1	—	—	—	—
TRU専焼炉(MA60wt%)	0.00	10.7	9.8	988	59	312	19	9	2.9
	0.25	8.9	8.3	671	41	173	11	8	1.9
発電用高速炉(MA5wt%)	0.00	0.91	0.81	95	6	22	1	10	2.4

*平衡サイクル初期及び末期におけるMAの核分裂割合の平均値を次式より概略評価

$$\frac{\sum \beta_i \phi_i}{\sum (\beta_i \phi_i + \sum c_i \phi_i)}$$











	内側炉心燃料集合体(内部ダケ外付)	78体
	外側炉心燃料集合体	78体
	径ブランケット集合体	102体
	SUS遮蔽体	60体
	B ₄ C遮蔽体	138体
	A系統炉停止制御棒	6体
	B系統炉停止制御棒	6体
	SUS集合体	1体

図3.2-22 TRU専焼炉中小型炉心の炉心配置図

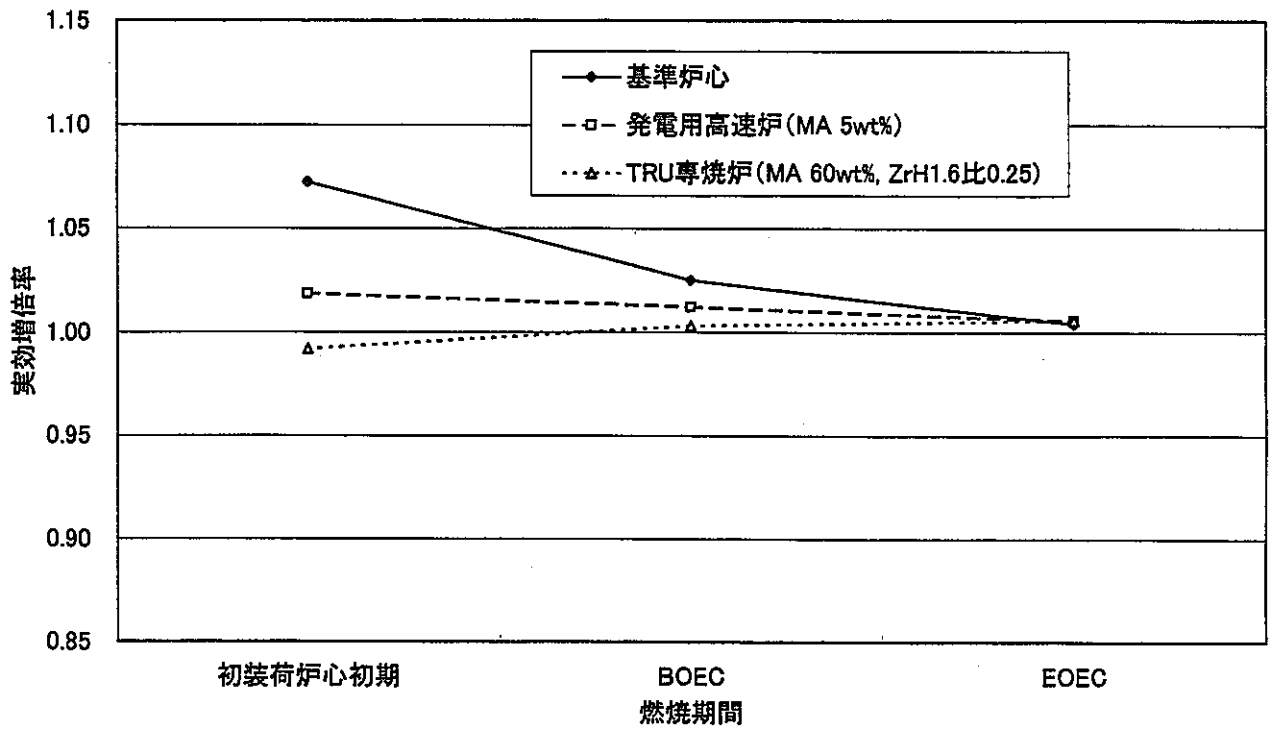


図3.2-23 中小型炉の実効増倍率の燃焼変化

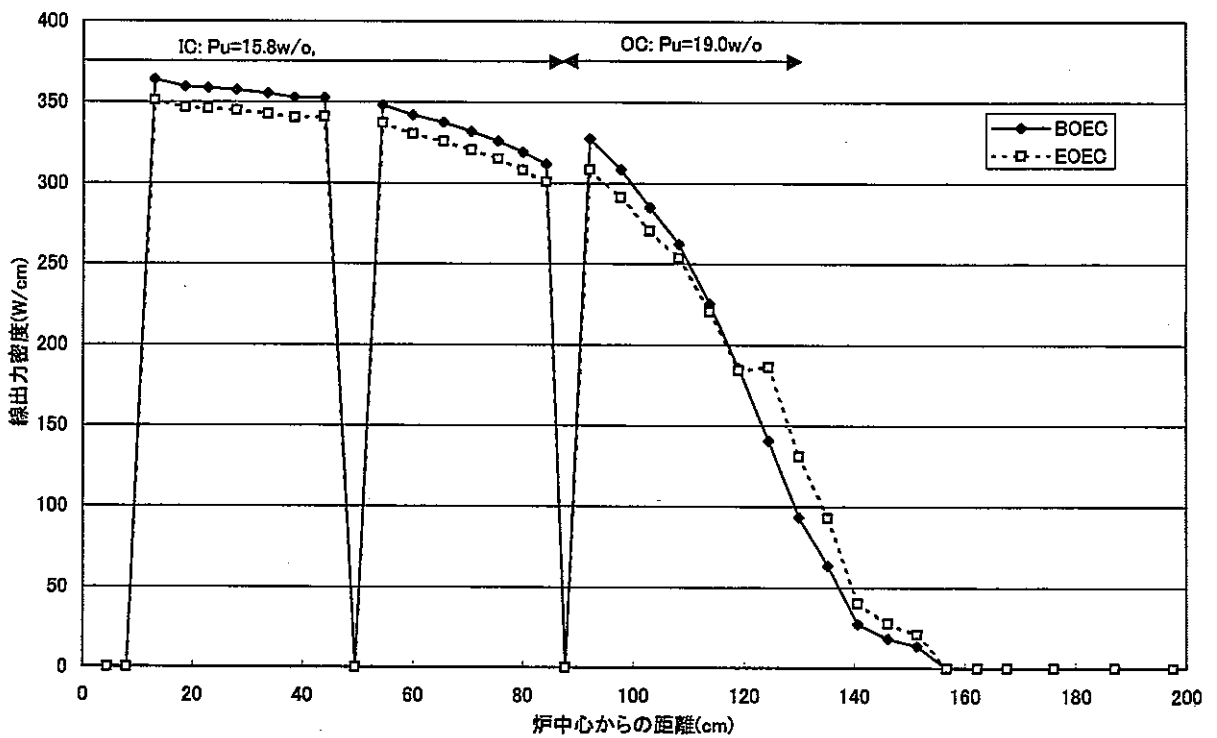


図3.2-24 径方向線出力分布(中小型炉基準炉心、炉心中央断面)

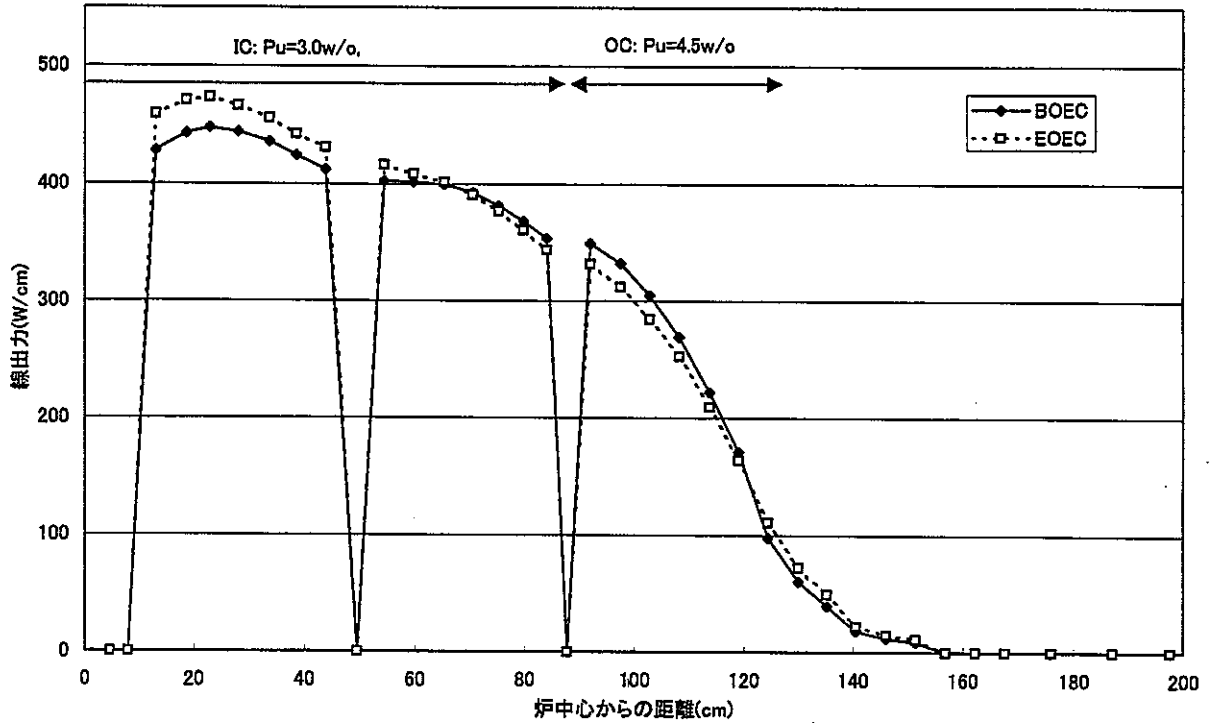


図3.2-25 径方向線出力分布 (TRU専焼炉中小型炉MA60w/o、炉心中央断面)

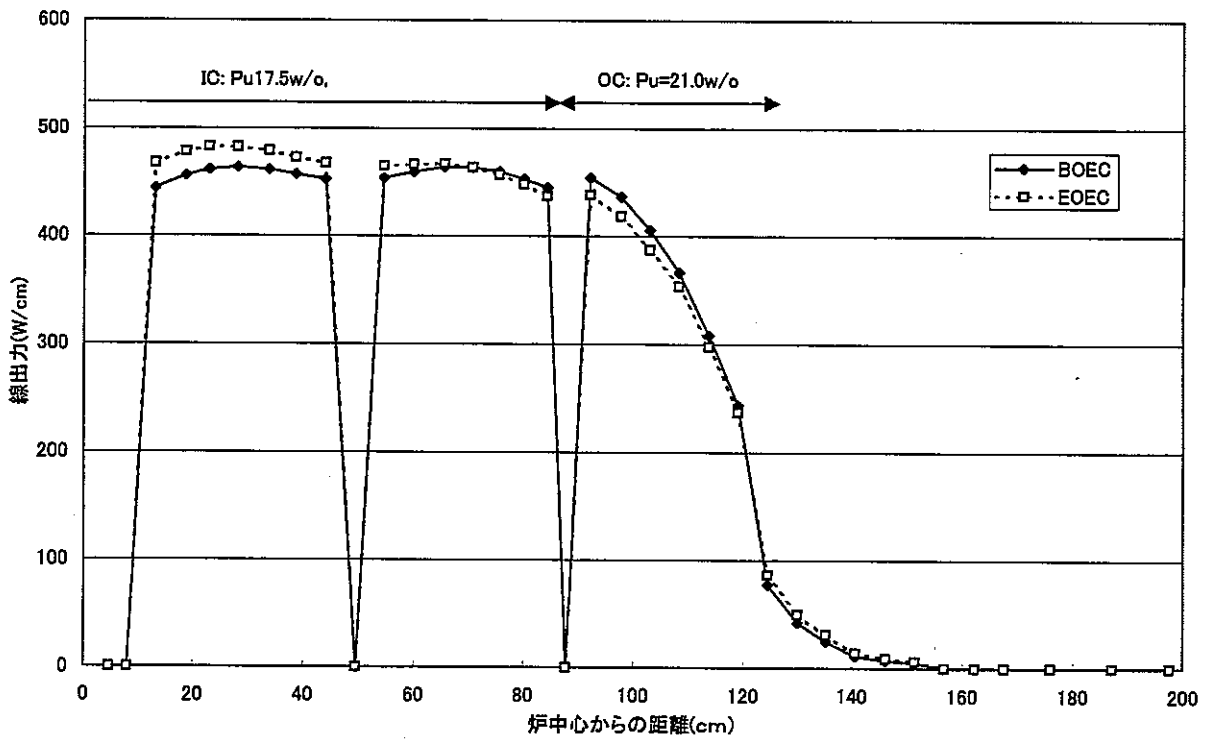


図3.2-26 径方向線出力分布 (TRU専焼炉中小型炉MA60w/o、 $ZrH_{1.6}$ 本数比0.25、炉心中央断面)

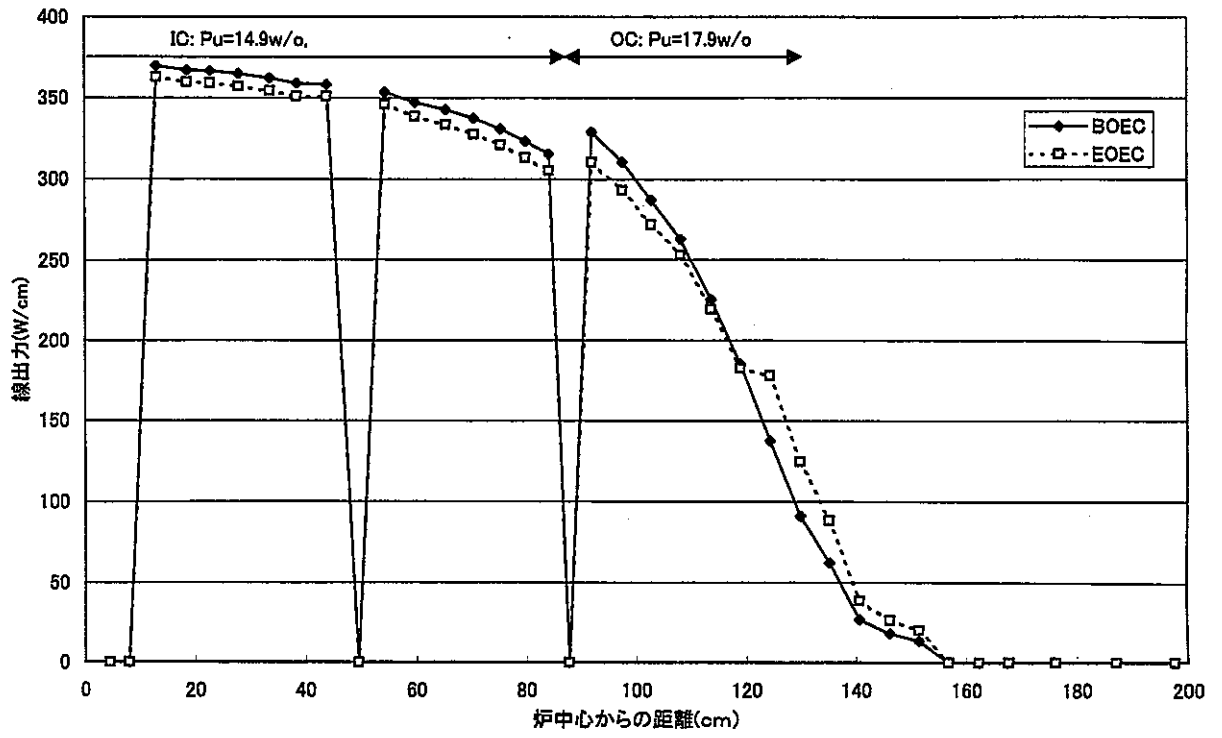


図3.2-27 径方向線出力分布(中小型発電用高速炉MA5w/o、炉心中央断面)

3.3 TRU 専焼炉心と発電用高速炉の比較検討

3.2 で設定した TRU 専焼炉の核変換性能及び炉心核特性について、発電用原子炉を用いる核変換処理システムとの比較検討を行い、両概念の得失を整理する。ここで、MA 組成は 3.2 で用いた軽水炉使用済み燃料中のものに加え、高速炉使用済み燃料中のものも検討し、その違いを把握するものとする。

3.3.1 TRU 専焼炉と発電用原子炉を用いる核変換処理システムの比較検討

発電用原子炉を用いる核変換処理システムは、3.2 で示した発電用高速炉（3800MWt、ナトリウム冷却窒化物燃料炉心）の炉心燃料に MA を 5wt% 富化した炉心とする。MA の組成は 3.2 で用いたウラン燃料軽水炉からの TRU 組成に基づくものとする。Pu の富化度は、発電用高速炉と同じ条件で設定し、核変換性能及び炉心核特性を評価し TRU 専焼炉大型炉心の評価結果と比較する。

表 3.3-1 に大型及び中小型の両炉心について、発電用高速炉の炉心燃料に MA を 5wt% 富化した発電用高速炉の主要核特性を基準炉心 (MA 富化度 0wt%)、TRU 専焼炉心 (MA 富化度 60wt%、 $ZrH_{1.6}$ 比 0.25) と比較して示す。

この表より、MA の核変換量は、炉心出力規模によらず TRU 専焼炉の方が多いが、MA の核変換率は、発電用高速炉の方が大きくなるのが分かる。これは、炉心の平均中性子束 ϕ と、MA の実効マイクロ吸収断面積 σ_a を用いて以下のように説明できる。大型炉の炉心燃料領域の中性子束は、発電用高速炉で 3.0×10^{15} (1/cm²/s)、TRU 専焼炉で 1.4×10^{15} (1/cm²/s) となっている。これは、TRU 専焼炉の Pu 富化度が発電用高速炉よりも高いためである。一方、付録 A に示すように、代用的 MA である Np237 の内側炉心中性子スペクトルにおける一群実効マイクロ吸収断面積は、発電用高速炉で 1.86 (b)、TRU 専焼炉の内側炉心で 2.32 (b) となっている。Np237 の直接核分裂或いは中性子捕獲による核変換率の大小は、 σ_a と ϕ の積の大小に依存するため、 $\sigma_a \times \phi$ が約 2 倍大きい発電用高速炉の Np237 核変換率の方が、TRU 専焼炉よりも大きくなる。Am241 の場合も、ほぼ同じ傾向となっている。また、TRU 専焼炉、発電用高速炉のいずれにおいても、大型炉の方が MA の核変換率及び単位熱出力当りの MA 核変換量 (kg/cycle/GWt) がわずかに大きいことが分かる。これは、中性子の漏れが少ない大型炉の中性子経済が向上するため、所要の Pu 富化度が低くなり中性子束レベルが高くなるためである。

図 3.3-1 に大型炉心の実効増倍率の燃焼変化を比較して示す。Pu 富化度は基準炉心より

1 wt%程度低くなり、増殖比は 0.03 増加する。燃焼反応度は TRU 専焼炉大型炉心と同様に負の値となる。出力分布は図 3.3-2 に示すように、基準炉心と同様に平坦化されている。中性子スペクトルの比較を図 3.3-3 に示す。発電用高速炉と基準炉心は同様の中性子スペクトルであるが、TRU 専焼炉大型炉心の中性子スペクトルは高エネルギー領域で硬くなっていることが分かる。

TRU 専焼炉の発電用高速炉に対する得失は以下のように整理できる。

(1) MA 処理能力

TRU 専焼炉は発電用高速炉と比べて多量の MA を 1 基で処理することが可能となる。大型炉 (3800MWt) の場合、同出力の基準炉心 48 基相当分(表 3.2-8 参照)、中小型炉 (1200MWt) の場合、同出力の基準炉心 41 基相当分(表 3.2-11 参照)を核変換できる。従って、MA を装荷しない基準の高速炉 40~50 基に対して、TRU 専焼炉 1 基を導入すれば、両者を含む燃料サイクルシステム全体として MA の増加を抑えることが可能となる。この場合、大部分の原子炉では MA 取り扱いに係る問題が回避できる。その一方で、MA の核変換率 (%/cycle) は発電用高速炉の方が TRU 専焼炉よりも高いため、再処理工程において使用済み燃料に含まれる MA を分離変換するための負担が軽減できる可能性がある。

(2) 増殖性

TRU 専焼炉は発電用高速炉と比べて Pu 富化度が高く、中性子スペクトルが軟らかいため増殖比が 1 を下回っている。しかしながら、(1) で述べたように MA を装荷しない基準の高速炉 40~50 基に 1 基程度の導入であれば、燃料サイクルシステム全体としての燃料増殖は可能と考えられる。

(3) 核特性

TRU 専焼炉は発電用高速炉と比べて Pu 富化度が高いため、実効遅発中性子割合が約 50% 小さくなっており、過渡事象に対する余裕は小さいと予想される。また、燃料集合体数を変えずに燃料の一部を $ZrH_{1.6}$ ピンと置換しているため、平均線出力が増加しており、熱的余裕が減少している。

(4) その他

TRU 専焼炉の燃料における MA の富化度は 60wt% を想定しており、燃料製造性、取り扱い性、健全性(熱特性、照射特性)等を確認するための研究開発課題は、MA 富化度が 5wt% の発電用高速炉と比べて大きいと考えられる。

表3.3-1 TRU専焼炉と発電用高速炉の主要核特性の比較

項目	単位	大型炉(3800MWt)			中小型炉(1200MWt)			
		基準炉心	TRU専焼炉	発電用高速炉	基準炉心	TRU専焼炉	発電用高速炉	
ZrH _{1.6} ロッド本数比(IC/OC/平均)	%	0/0/0	0.25/0.25/0.25	0/0/0	0/0/0	0.25/0.25/0.25	0/0/0	
MA富化度(IC/OC/平均)	wt%	0/0/0	60/60/60	5/5/5	0/0/0	60/60/60	5/5/5	
Pu富化度(IC/OC/平均)	wt%	14.2/16.2/15.2	16.2/18.5/17.3	13.2/15.0/14.1	15.8/19.0/17.5	17.5/21.0/19.4	14.9/17.9/16.5	
運転サイクル長	ヶ月	18	14	18	18	14	18	
燃料交換バッチ数	—	5	←	←	5	←	←	
取出し平均燃焼度	万MWd/t	15.6	15.5	15.6	14.0	14.6	14.1	
燃焼反応度	% Δk/kk'	1.3	-0.6	-0.4	2.0	-0.3	0.7	
最大線出力(IC/OC)	平衡サイクル初期	W/cm	392/361	488/528	417/364	364/327	365/364	373/329
	平衡サイクル末期	"	393/341	485/490	428/339	351/308	379/351	369/310
ナトリウムボイド反応度*1	初装荷初期	% Δk/kk'	2.6	3.7	3.7	2.0	4.3	3.7
ドブラー係数	初装荷初期	Tdk/dT	-8.4E-03	-2.5E-03	-3.2E-03	-6.9E-03	-2.2E-03	-2.7E-03
実効遅発中性子割合	—	—	3.73E-03	1.67E-03	3.62E-03	3.75E-03	1.69E-03	3.54E-03
増殖比*2	平衡サイクル中期	—	1.14	0.63	1.17	1.19	0.72	1.18
MA変換量	kg/cycle	—	2205	318	—	671	95	
	kg/cycle/GWt	—	580	84	—	559	79	
MA変換率	%/cycle	—	8.6	12.5	—	7.5	10.4	

*1 炉心領域のラッパ管内側(内部ダクト領域内を除く)のみボイド化

*2 核分裂性核種:U-235, Pu-239, Pu-241、親核種:U-238、Pu-240

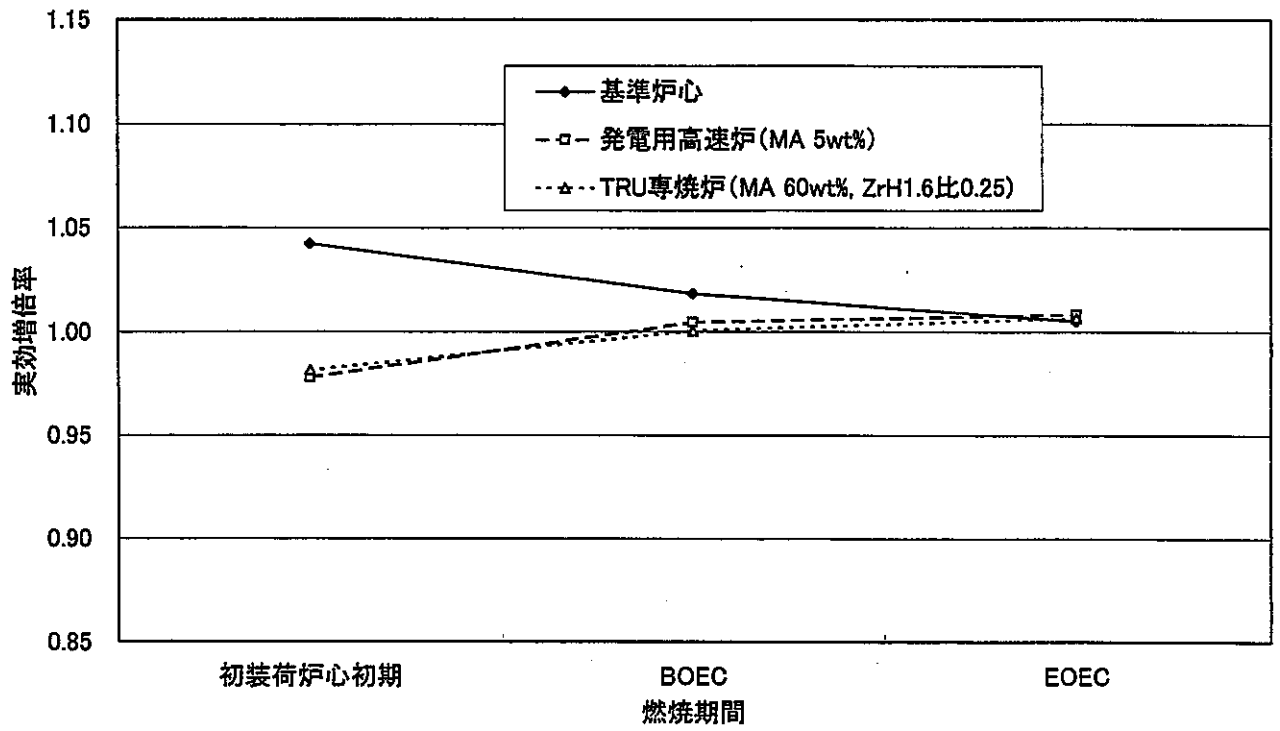


図3.3-1 実効増倍率の燃焼変化

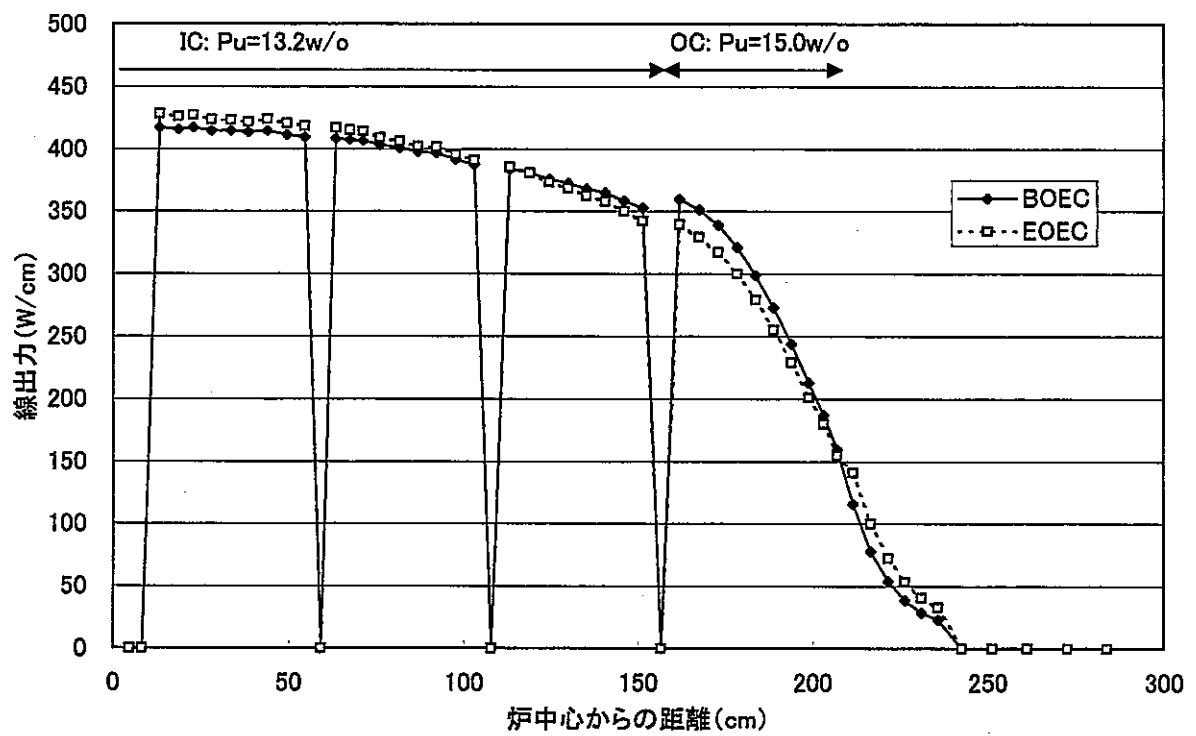


図3.3-2 径方向線出力分布(発電炉MA5wt%、炉心中央断面)

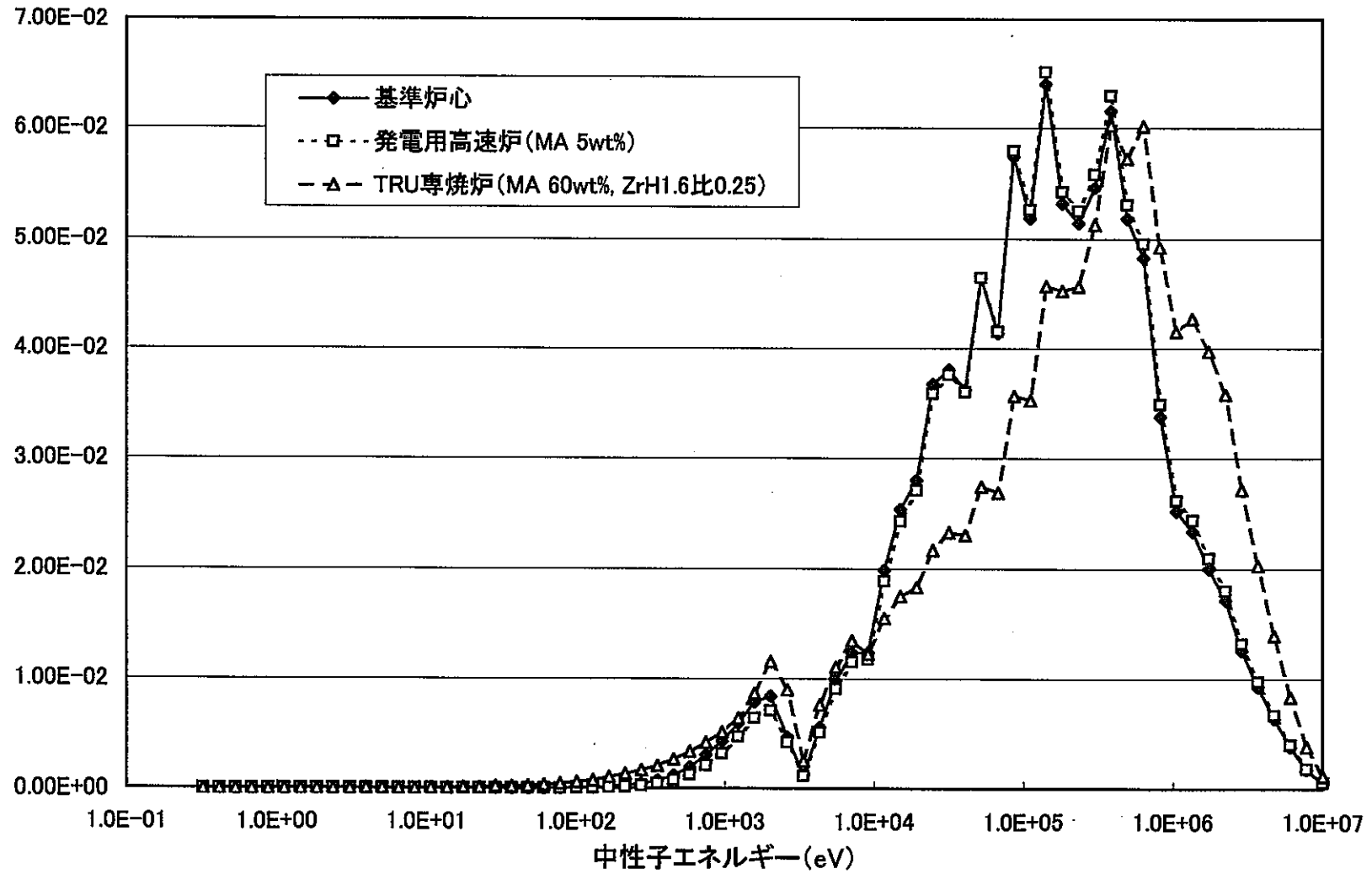


図3.3-3 中性子スペクトルの比較

3.3.2 MA 組成の影響把握

ここでは、これ迄の検討で想定したウラン燃料軽水炉からの TRU 組成に基づく MA に加えて、下記に示す高速炉使用済み燃料に含まれる MA 組成を用いた場合も検討し、MA 組成の違いが 3.2.1 で設定した TRU 専焼炉大型炉心の核変換特性及び炉心核特性に及ぼす影響を検討した。

・MA 組成 FBR 多重リサイクル時の TRU 組成^[2]に基づく下記組成

Np237/Am241/Am243/Cm244/Cm245=11.1/44.5/ 22.2/22.2/0.0wt%

表 3.3-2 に TRU 専焼炉及び発電用高速炉について、MA 組成を変えた場合の主要な核特性及び核変換特性の評価結果を比較して示す。FBR 取出し組成の MA を用いると、LWR 取出し組成の場合に比べ、ボイド反応度が増加する。また、MA の核変換率、核変換量が 10~20% 程度減少する。これは、Np237 の割合が 50% の LWR 取出し組成の場合、図 3.2-20 に示したように Np237 の中性子吸収による Pu238 への転換が直接 MA の減少につながるのに対して、Np237 が少なく Am が半分以上を占める FBR 平衡組成の場合は、Np237 から Pu238 への転換がわずかになるとともに、Am243 の Cm244 への転換等の寄与が相対的に大きくなるためである^[10]。組成の違いが、MA の核変換特性、所要 Pu 富化度、ボイド反応度、実効遅発中性子割合等の核特性に及ぼす影響は、発電用高速炉よりも TRU 専焼炉の方が大きい。図 3.3-4 に FBR 平衡組成の場合の、炉心領域における核種の重量変化を示す。図 3.3-5、-6 に FBR 取出し組成の MA を用いる場合の TRU 専焼炉及び発電用高速炉の径方向線出力分布を示す。

表3.3-2 MA組成の違いによる核特性、核変換特性(大型炉3800MWt)

項目	単位	LWR取出し組成		FBR取出し組成	
		TRU専焼炉	発電用高速炉	TRU専焼炉	発電用高速炉
ZrH _{1.6} ロッド本数比(IC/OC/平均)	%	0.25/0.25/0.25	0/0/0	0.25/0.25/0.25	0/0/0
MA富化度(IC/OC/平均)	wt%	60/60/60	5/5/5	60/60/60	5/5/5
Pu富化度(IC/OC/平均)	wt%	16.2/18.5/17.3	13.2/15.0/14.1	14.2/16.2/15.2	13.1/14.9/14.0
運転サイクル長	ヶ月	14	18	14	18
燃料交換バッチ数	—	←	←	←	←
取出し平均燃焼度	万MWd/t	15.5	15.6	15.5	15.6
燃焼反応度	% Δk/k'	-0.6	-0.4	-0.8	-0.3
最大線出力(IC/OC)	平衡サイクル初期	W/cm	488/528	541/461	414/360
	平衡サイクル末期	"	485/490	428/339	541/456
ナトリウムボイド反応度*1	初装荷初期	% Δk/k'	3.7	3.7	4.9
ドブラー係数	初装荷初期	Tdk/dT	-2.5E-03	-3.2E-03	-2.2E-03
実効遅発中性子割合	—	—	1.67E-03	3.62E-03	1.33E-03
増殖比*2	平衡サイクル中期	—	0.63	1.17	0.65
MA変換量	kg/cycle	—	2205	318	1976
	kg/cycle/GWt	—	580	84	520
MA変換率	%/cycle	—	8.6	12.5	7.5

*1 炉心領域のラッパ管内側(内部ダクト領域内を除く)のみボイド化
 *2 核分裂性核種:U-235, Pu-239, Pu-241、親核種:U-238, Pu-240

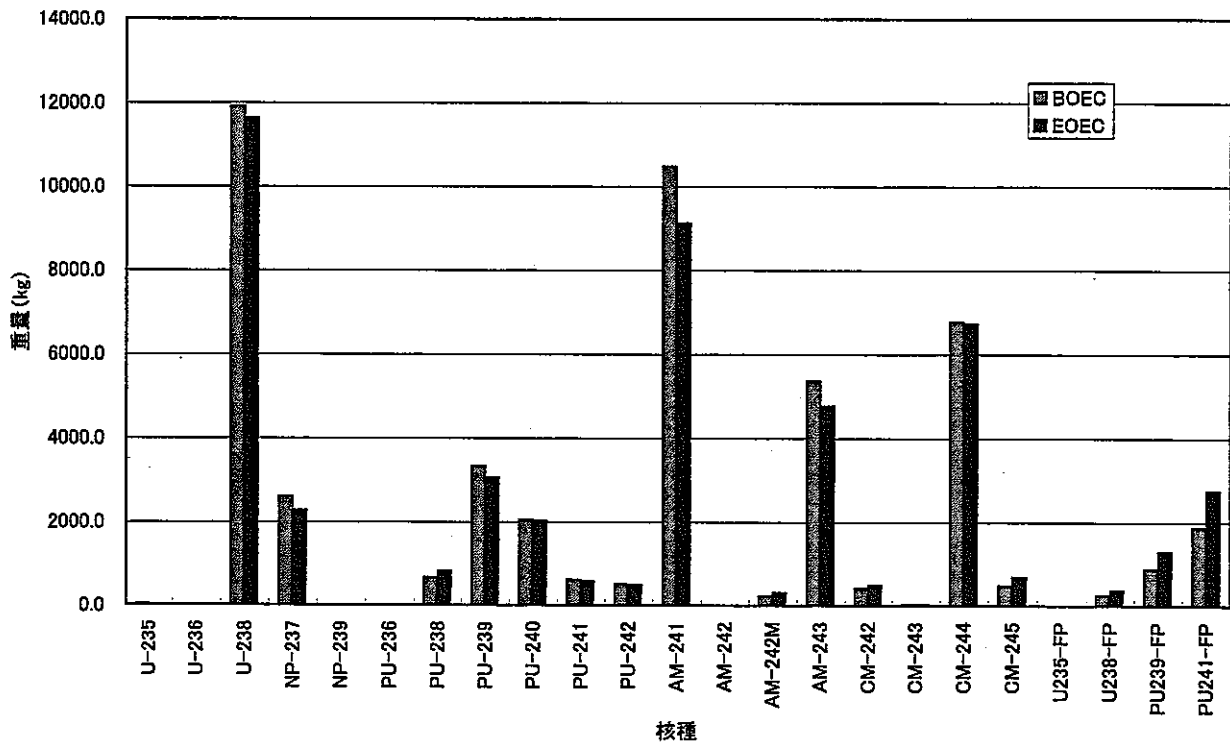


図3.3-4 TRU専焼炉の核種重量変化(FBR-MA60w/o、ZrH_{1.6}比0.25)

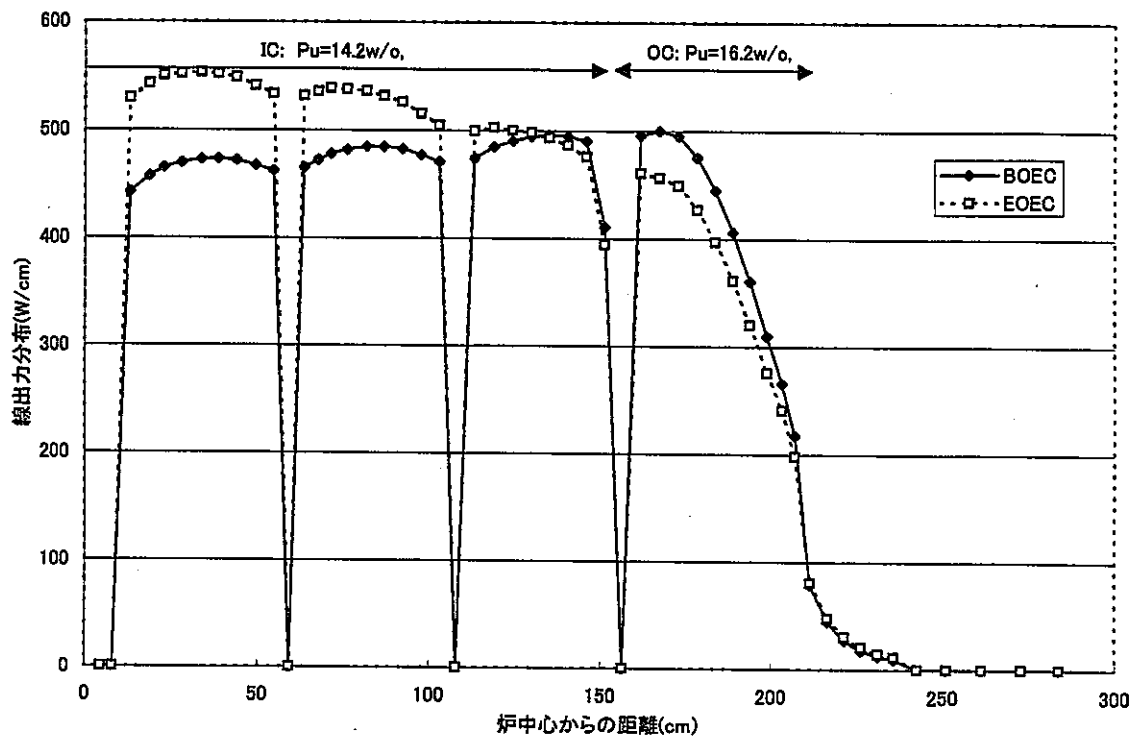


図3.3-5 径方向線出力分布 (TRU専焼炉: FBR-MA60w/o, ZrH_{1.6}本数比0.25、炉心中央断面)

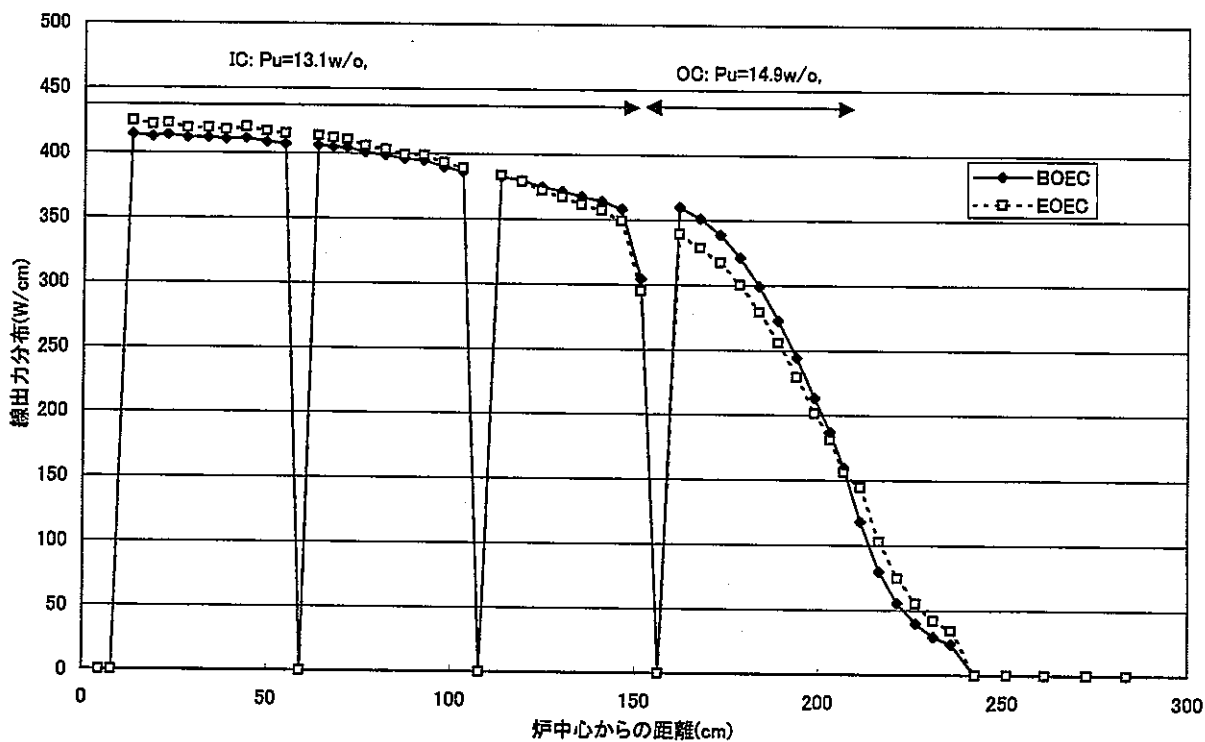


図3.3-6 径方向線出力分布 (発電用高速炉: FBR-MA5w/o、炉心中央断面)

4. まとめ

環境負荷低減の観点から原子炉の使用済み燃料中に含まれる放射性廃棄物、特に長寿命の TRU 核種を高速炉で照射・核変換し、安定化、短寿命化をはかる研究開発が行われている。高速炉への TRU 装荷方法としては、全ての発電用高速炉燃料に TRU を薄く添加する方法と、TRU 変換に特化した少数の専焼炉のみに TRU を多量に装荷する方法が考えられている。

本研究では、実用化高速炉の炉心候補概念の明確化に資するため、TRU 専焼炉に関する既存情報の調査、TRU 専焼炉の核変換性能及び炉心核特性について標準的な発電用高速炉を用いた核変換方法との比較検討を行い、その得失について整理した。

本研究の主要結果を以下に示す。

(1) TRU 専焼炉に関する既存情報の整理

公開文献に基づき、TRU 専焼炉炉心概念及び高速炉を中心とした発電用原子炉を用いる核変換処理システムを調査し、核変換性能、炉心核特性、及び研究開発課題を整理した。

- ・発電用高速炉の炉心燃料に 5wt%程度のマイナーアクチニド (MA) を均質装荷する場合、炉心の核特性に大幅な影響を及ぼさず同出力規模の高速炉 5 基分程度から発生する MA を核変換できる見通しが得られている。
- ・原研から提案されている MA 専焼高速炉概念 (He 冷却) は、MA 富化度を 60wt%以上とした被覆粒子型窒化物燃料を用いてほぼ MA のみで臨界を達成するもので 100 万 kWe 級軽水炉 10 数基分から発生する MA を核変換できる。
- ・MA の可燃性吸収材燃料親核種としての核的な特長を活用して 30 年程度以上燃料無交換運転を達成する超長寿命炉心の概念が提案されている。
- ・課題として、MA 装荷に起因する反応度係数の正側への移行及び MA 装荷燃料の中性子発生数・発熱量増大への設計、設備対策が挙げられる。

(2) TRU 専焼炉の設定

a. 大型炉心

実用化戦略調査研究で検討されている発電用高速炉 (ナトリウム冷却窒化物燃料大型炉心, 3800MWt) の仕様に基づき、MA 窒化物燃料を用いるナトリウム冷却 TRU 専焼炉

大型炉心の仕様を設定し、核変換特性及び炉心核特性を評価した（表 4-1）。MA 組成は軽水炉使用済み燃料に含まれるものを想定した。MA の核変換量を最大化する観点より MA 富化度は原研の設計例で示されている 60wt%とした。発電用高速炉に MA を 5wt% 富化した炉心とほぼ同程度のドップラー係数を確保するためには、水素化ジルコニウム ($ZrH_{1.6}$) 添加などの設計対策が不可避になる。ここでは、MA 富化度を 60wt%とし、炉心燃料の 25%を $ZrH_{1.6}$ と置換した炉心を TRU 専焼炉として設定した。ドップラー係数は $-2.5 \times 10^{-3} \text{TdK/dT}$ である。本炉心概念による正味の MA 核変換量は、サイクル当り約 2.2t (580kg/cycle/GWt) で、これは同出力のナトリウム冷却室化物燃料大型炉心 48 基分から発生する量に相当する。核変換率はサイクル当り 8.6%である。

b. 中型炉心

MA 核変換特性の炉心出力規模依存性を確認するため、上記 TRU 専焼炉大型炉心の燃料集合体数を減らして原子炉出力を 1200MWtとした TRU 専焼炉中小型炉心を設定し核変換特性及び炉心核特性を評価した。燃料集合体の仕様及び、炉心燃料と $ZrH_{1.6}$ との置換割合は大型炉心と同じ 25%とした。MA 組成も、大型炉心と同じ軽水炉使用済み燃料に含まれるものを想定した。表 4-1 に示すように、本炉心概念による正味の MA 核変換量は、サイクル当り約 670kg (559kg/cycle/GWt) で、これは同出力のナトリウム冷却室化物燃料中型炉心 41 基分から発生する量に相当する。核変換率はサイクル当り 7.5%である。中小型炉心は大型炉心と比べ Pu 富化度増大に伴い中性子束レベルが低下するため、MA の核変換率が減少する。また、ドップラー係数の絶対値も大型炉心と比べ 10%程度減少する。

(3) TRU 専焼炉と発電用高速炉の比較検討

a. 発電用高速炉

TRU 専焼炉大型炉心の仕様設定の基準としたナトリウム冷却室化物燃料大型炉心の炉心燃料に MA を 5wt%富化した発電用高速炉を設定し、核変換特性及び炉心核特性を比較整理した。本発電用高速炉の正味の MA 核変換量は、サイクル当り約 320kg (84kg/cycle/GWt) で、これは同出力のナトリウム冷却室化物燃料大型炉心 7 基分程度と少ない。一方、TRU 専焼炉大型炉心より Pu 富化度が低く中性子束レベルが高いため、MA 核変換率も大きくなり、サイクル当り 12.5%である。従って、再処理工程において使用済み燃料に含まれる MA を分離変換するための負担が軽減できる可能性がある。また、既存の高速炉概念からの変更点が少ない利点を有する。

b. MA 組成の影響把握

ここでは、高速炉使用済み燃料に含まれる MA 組成を用いた場合を検討し、MA 組成の違いが、TRU 専焼炉大型炉心及び発電用高速炉の核変換特性及び炉心核特性に及ぼす影響を比較検討した。表 4-1 に示すように、いずれの場合にも、MA 核変換量、核変換率が減少する。これは、Np の割合が 50% の軽水炉取出し組成の場合、Np の中性子吸収による Pu への転換が直接 MA の減少につながるのに対して、Np が少なく Am が半分以上を占める高速炉使用済み燃料に含まれる MA 組成の場合は、Np から Pu への転換がわずかになるとともに、Am の Cm への転換等の寄与が相対的に大きくなるためである。

表4-1 主要核特性のまとめ

項目	単位	大型炉(3800MWt)					中小型炉(1200MWt)			
		基準炉心		TRU専焼炉		発電用高速炉		基準炉心	TRU専焼炉	発電用高速炉
		LWR取出し	LWR取出し	FBR取出し	LWR取出し	FBR取出し	LWR取出し	LWR取出し	LWR取出し	
MA組成	—									
ZrH ₁₆ ロッド本数比(IC/OC/平均)	%	0/0/0	0.25/0.25/0.25	←	0/0/0	←	0/0/0	0.25/0.25/0.25	0/0/0	
MA富化度(IC/OC/平均)	wt%	0/0/0	60/60/60	←	5/5/5	←	0/0/0	60/60/60	5/5/5	
Pu富化度(IC/OC/平均)	wt%	14.2/16.2/15.2	16.2/18.5/17.3	14.2/16.2/15.2	13.2/15.0/14.1	13.1/14.9/14.0	15.8/19.0/17.5	17.5/21.0/19.4	14.9/17.9/16.5	
運転サイクル長	ヶ月	18	14	←	18	←	18	14	18	
燃料交換バッチ数	—	5	←	←	←	←	5	←	←	
取出し平均燃焼度	万MWd/t	15.6	15.5	15.5	15.6	15.6	14.0	14.6	14.1	
燃焼反応度	% Δk/kk'	1.3	-0.6	-0.8	-0.4	-0.3	2.0	-0.3	0.7	
最大線出力(IC/OC)	平衡サイクル初期	W/cm	392/361	488/528	541/461	417/364	414/360	364/327	365/364	373/329
	平衡サイクル末期	"	393/341	485/490	541/456	428/339	424/339	351/308	379/351	369/310
ナトリウムボイド反応度*	初装荷初期	% Δk/kk'	2.6	3.7	4.9	3.7	4.1	2.0	4.3	3.7
ドブラー係数	初装荷初期	Tdk/dT	-8.4E-03	-2.5E-03	-2.2E-03	-3.2E-03	-3.3E-03	-6.9E-03	-2.2E-03	-2.7E-03
実効遅発中性子割合	初装荷初期	—	3.73E-03	1.67E-03	1.33E-03	3.62E-03	3.55E-03	3.75E-03	1.69E-03	3.54E-03
増殖比*2	平衡サイクル中期	—	1.14	0.63	0.65	1.17	1.18	1.19	0.72	1.18
MA変換量	kg/cycle		2205	1976	318	267		671	95	
	kg/cycle/GWt		580	520	84	70		559	79	
MA変換率	%/cycle		8.6	7.5	12.5	9.9		7.5	10.4	

*1 炉心領域のラッパ管内側(内部ダクト領域内を除く)のみボイド化

*2 核分裂性核種:U-235, Pu-239, Pu-241、親核種:U-238, Pu-240

5. 参考文献

- [1] 池上、他、” ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討—平成11年度報告—”、JNC TN9400 2000-068
- [2] 平成11年度電共研「FBR リサイクルシステムに関する研究」(その4) IV、日本原子力発電株式会社
- [3] 「消滅処理研究の現状」、「消滅処理」研究専門委員会、(社)日本原子力学会(1994/8)
- [4] 核変換物理実験施設に関する研究会、日本原子力研究所東京本部(2000.6.14)配布資料
- [5] M. Yamaoka et al., “Feasibility Study of TRU Transmutation by LMFBRs”, Proc. FR '91(1991)
- [6] K. Fujimura et al., “Actinide-Burning Ultra-Long Life FBR Core Concepts”, Proc. FR '91 (1991)
- [7] T. Sanda, et al., “Fast Reactor Core Concepts for Minor Actinide Transmutation Using Hydride Fuel Targets”, JNST, Vol. 37, No. 4, pp. 335-343 April 2000
- [8] J. Tommasi, S. Massara, “L. M. F. R. Dedicated Cores for Transmutation Critical Vs. Subcritical Systems Comparison”, Proc. Global'99(1999)
- [9] D. Haas et al., “The EFTTRA European Collaboration for the Development of Fuels and Targets for Transmutation: Status of Recent Developments”, Proc. Global'99(1999)
- [10] 大木、他、” 種々の炉心概念に関するMA消滅特性の整理” JNC TN9400 2000-080(2000.3)

付録目次

付録 A. 代表炉心の 1 群マイクロ断面積	・ ・ ・ ・ ・	A-1
付録 B. 炉心物質収支表	・ ・ ・ ・ ・	B-1
付録 C. 代表炉心のドブラー係数成分内訳	・ ・ ・ ・ ・	C-1

付表A-1 発電用高速炉(3800MWt,Na-MN,MA 5wt%)内側炉心の1群マイクロ断面積 [b]

核種	σ_a	σ_c	σ_f	$\nu \sigma_f$	ν^*	$\eta(\nu \sigma_f / \sigma_a)$	Scattering
U235	2.30	0.50	1.79	4.41	2.46	1.92	9.22
U236	0.51	0.42	0.10	0.26	2.65	0.50	11.14
U238	0.30	0.26	0.04	0.11	2.75	0.37	10.58
Np237	1.86	1.55	0.32	0.88	2.76	0.47	9.72
Np239	2.26	1.81	0.45	1.29	2.90	0.57	9.73
Pu236	1.52	0.89	0.63	1.90	3.00	1.25	11.29
Pu238	1.72	0.62	1.09	3.28	3.00	1.91	11.78
Pu239	2.30	0.53	1.77	5.24	2.95	2.28	9.21
Pu240	0.90	0.53	0.37	1.11	3.00	1.23	10.95
Pu241	2.86	0.45	2.41	7.24	3.00	2.53	8.88
Pu242	0.70	0.45	0.25	0.75	3.04	1.08	11.68
Am241	1.90	1.64	0.26	0.91	3.51	0.48	9.99
Am242	3.64	0.57	3.07	10.21	3.32	2.80	8.39
Am242m	3.52	0.52	3.00	9.95	3.32	2.83	8.47
Am243	1.67	1.48	0.19	0.67	3.53	0.40	10.25
Cm242	1.18	0.48	0.70	2.40	3.42	2.03	10.59
Cm243	3.25	0.35	2.90	10.09	3.48	3.11	8.76
Cm244	1.05	0.65	0.40	1.41	3.50	1.34	10.97
Cm245	2.88	0.33	2.55	9.11	3.57	3.16	8.99

* $\nu \sigma_f / \sigma_f$ より計算

付表A-2 TRU専焼炉(3800MWt,Na-MN,MA 60wt%, ZrH_{1.6}割合0%)内側炉心の1群マイクロ断面積 [b]

核種	σ_a	σ_c	σ_f	$\nu \sigma_f$	ν^*	$\eta(\nu \sigma_f / \sigma_a)$	Scattering
U235	1.84	0.36	1.49	3.69	2.48	2.00	8.60
U236	0.42	0.28	0.14	0.37	2.66	0.89	10.13
U238	0.25	0.19	0.06	0.17	2.76	0.68	10.00
Np237	1.44	1.01	0.43	1.20	2.78	0.83	9.25
Np239	1.75	1.17	0.58	1.70	2.91	0.97	9.30
Pu236	1.39	0.60	0.79	2.39	3.03	1.72	10.21
Pu238	1.57	0.40	1.17	3.55	3.03	2.26	10.61
Pu239	1.97	0.31	1.65	4.92	2.98	2.51	8.52
Pu240	0.82	0.35	0.48	1.44	3.03	1.75	9.90
Pu241	2.35	0.32	2.03	6.14	3.03	2.62	8.29
Pu242	0.64	0.30	0.34	1.05	3.05	1.64	10.55
Am241	1.46	1.10	0.37	1.29	3.52	0.88	9.39
Am242	2.99	0.43	2.55	8.54	3.35	2.86	7.80
Am242m	2.91	0.39	2.53	8.46	3.35	2.90	7.88
Am243	1.26	0.99	0.27	0.97	3.55	0.77	9.70
Cm242	1.13	0.31	0.82	2.85	3.46	2.52	9.73
Cm243	2.66	0.24	2.41	8.49	3.52	3.19	8.04
Cm244	0.96	0.43	0.52	1.85	3.54	1.93	10.05
Cm245	2.42	0.25	2.16	7.78	3.60	3.22	8.43

* $\nu \sigma_f / \sigma_f$ より計算

付表A-3 TRU専焼炉(3800MWt,Na-MN,MA 60wt%,ZrH_{1.6}割合25%)内側炉心の1群マイクロ断面積 [b]

核種	σ_a	σ_c	σ_f	$\nu \sigma_f$	ν^*	$\eta(\nu \sigma_f / \sigma_a)$	Scattering
U235	2.65	0.58	2.07	5.12	2.47	1.93	8.58
U236	0.79	0.59	0.20	0.53	2.66	0.67	10.64
U238	0.43	0.34	0.09	0.24	2.76	0.57	10.28
Np237	2.32	1.77	0.55	1.54	2.80	0.66	8.99
Np239	2.84	2.14	0.70	2.04	2.94	0.72	8.89
Pu236	2.17	1.17	1.00	3.04	3.05	1.41	10.39
Pu238	2.16	0.77	1.39	4.24	3.05	1.96	10.96
Pu239	2.83	0.73	2.10	6.25	2.98	2.21	8.48
Pu240	1.34	0.74	0.60	1.84	3.05	1.37	10.06
Pu241	3.34	0.55	2.79	8.44	3.02	2.52	8.25
Pu242	1.03	0.59	0.45	1.37	3.07	1.33	10.78
Am241	2.42	1.93	0.50	1.75	3.53	0.72	9.15
Am242	4.16	0.70	3.46	11.55	3.34	2.78	7.81
Am242m	3.96	0.57	3.39	11.34	3.34	2.86	7.86
Am243	2.09	1.71	0.37	1.33	3.56	0.64	9.44
Cm242	1.63	0.62	1.01	3.51	3.48	2.16	9.69
Cm243	3.78	0.42	3.36	11.79	3.51	3.12	8.02
Cm244	1.47	0.79	0.68	2.41	3.56	1.64	10.15
Cm245	3.27	0.36	2.91	10.47	3.59	3.20	8.30

* $\nu \sigma_f / \sigma_f$ より計算

付表B-1 炉心物質収支(大型発電炉:MA5wt%、LWR取出L組成)

	初装荷初期重量[kg]	平衡初期重量[kg]	平衡末期重量[kg]	変化量*	変化率*
U-235	1.53E+02	9.34E+01	7.05E+01	-22.9	-24.5%
U-236	5.98E-09	1.14E+01	1.54E+01	4	34.8%
U-238	5.08E+04	4.69E+04	4.50E+04	-1895	-4.0%
NP-237	1.58E+03	1.05E+03	8.33E+02	-212	-20.3%
NP-239	6.05E-09	8.16E+00	9.97E+00	2	22.2%
PU-236	5.98E-09	5.98E-09	5.98E-09	0	0.0%
PU-238	2.66E+02	4.80E+02	5.36E+02	55	11.5%
PU-239	4.61E+03	5.05E+03	5.16E+03	117	2.3%
PU-240	2.39E+03	2.48E+03	2.52E+03	43	1.7%
PU-241	8.42E+02	6.11E+02	5.31E+02	-80	-13.1%
PU-242	6.20E+02	5.83E+02	5.63E+02	-20	-3.5%
AM-241	9.46E+02	6.89E+02	5.83E+02	-106	-15.4%
AM-242	6.13E-09	1.51E-01	1.75E-01	0	15.5%
AM-242M	6.13E-09	2.01E+01	2.55E+01	5	26.7%
AM-243	5.17E+02	4.06E+02	3.61E+02	-46	-11.3%
CM-242	6.13E-09	3.61E+01	4.19E+01	6	16.0%
CM-243	6.15E-09	3.20E+00	4.12E+00	1	28.8%
CM-244	2.21E+02	2.98E+02	3.24E+02	26	8.8%
CM-245	2.52E+01	4.27E+01	5.02E+01	8	17.7%
U235-FP	5.95E-09	4.35E+01	5.93E+01	16	36.1%
U238-FP	6.03E-09	6.03E+02	8.68E+02	265	44.0%
PU239-FF	6.05E-09	2.29E+03	3.40E+03	1107	48.3%
PU241-FF	6.10E-09	7.72E+02	1.12E+03	343	44.5%
O	4.05E-10	4.05E-10	4.05E-10	0	0.0%
NA-23	6.01E+03	6.01E+03	6.01E+03	0	0.0%
CR	3.57E+03	3.57E+03	3.57E+03	0	0.0%
MN	1.39E-09	1.39E-09	1.39E-09	0	0.0%
FE	2.15E+04	2.15E+04	2.15E+04	0	0.0%
NI	1.59E+02	1.59E+02	1.59E+02	0	0.0%
MO	8.94E+01	8.94E+01	8.94E+01	0	0.0%
ZR	3.04E-10	3.04E-10	3.04E-10	0	0.0%
B-10	2.53E-10	2.53E-10	2.53E-10	0	0.0%
H-1	2.79E-10	2.79E-10	2.79E-10	0	0.0%
N-15	3.96E+03	3.96E+03	3.96E+03	0	0.0%
MA total	3.28E+03	2.55E+03	2.23E+03	-317	-12.4%
Np total	1.58E+03	1.05E+03	8.43E+02	-211	-20.0%
Am total	1.46E+03	1.12E+03	9.69E+02	-147	-13.1%
Cm total	2.46E+02	3.80E+02	4.20E+02	40	10.7%
HM total	6.30E+04	5.87E+04	5.66E+04	-2116	-3.6%

付表B-2 炉心物質収支(大型TRU専焼炉:MA60wt%、ZrH_{1.8} 0.0、LWR取出し組成)

	初装荷初期重量[kg]	平衡初期重量[kg]	平衡末期重量[kg]	変化量*	変化率*
U-235	7.08E+01	5.14E+01	4.32E+01	-8.2	-15.9%
U-236	5.98E-09	3.49E+00	4.88E+00	1	40.1%
U-238	2.43E+04	2.32E+04	2.26E+04	-571	-2.5%
NP-237	1.89E+04	1.46E+04	1.27E+04	-1876	-12.8%
NP-239	6.05E-09	2.16E+00	2.67E+00	1	23.5%
PU-236	5.98E-09	5.98E-09	5.98E-09	0	0.0%
PU-238	4.81E+01	2.39E+03	3.25E+03	856	35.8%
PU-239	8.33E+02	1.38E+03	1.63E+03	247	17.9%
PU-240	4.33E+02	4.42E+02	4.54E+02	12	2.7%
PU-241	1.52E+02	1.12E+02	9.62E+01	-15	-13.7%
PU-242	1.12E+02	1.06E+02	1.03E+02	-3	-3.1%
AM-241	9.78E+03	7.54E+03	6.57E+03	-975	-12.9%
AM-242	6.13E-09	9.07E-01	1.06E+00	0	17.2%
AM-242M	6.13E-09	1.43E+02	1.89E+02	46	32.2%
AM-243	6.20E+03	4.95E+03	4.40E+03	-554	-11.2%
CM-242	6.13E-09	2.17E+02	2.55E+02	39	17.8%
CM-243	6.15E-09	1.15E+01	1.56E+01	4	35.7%
CM-244	2.65E+03	3.07E+03	3.21E+03	143	4.7%
CM-245	3.02E+02	3.86E+02	4.24E+02	38	9.9%
U235-FP	5.95E-09	1.51E+01	2.13E+01	6	41.1%
U238-FP	6.03E-09	1.52E+03	2.17E+03	651	42.9%
PU239-FP	6.05E-09	8.85E+02	1.45E+03	562	63.5%
PU241-FP	6.10E-09	1.44E+03	2.11E+03	667	46.3%
O	4.05E-10	4.05E-10	4.05E-10	0	0.0%
NA-23	6.01E+03	6.01E+03	6.01E+03	0	0.0%
CR	3.57E+03	3.57E+03	3.57E+03	0	0.0%
MN	1.39E-09	1.39E-09	1.39E-09	0	0.0%
FE	2.15E+04	2.15E+04	2.15E+04	0	0.0%
NI	1.59E+02	1.59E+02	1.59E+02	0	0.0%
MO	8.94E+01	8.94E+01	8.94E+01	0	0.0%
ZR	3.04E-10	3.04E-10	3.04E-10	0	0.0%
B-10	2.53E-10	2.53E-10	2.53E-10	0	0.0%
H-1	2.79E-10	2.79E-10	2.79E-10	0	0.0%
N-15	3.95E+03	3.95E+03	3.95E+03	0	0.0%
MA total	3.78E+04	3.09E+04	2.78E+04	-3133	-10.1%
Np total	1.89E+04	1.46E+04	1.27E+04	-1875	-12.8%
Am total	1.60E+04	1.26E+04	1.12E+04	-1482	-11.7%
Cm total	2.95E+03	3.68E+03	3.91E+03	224	6.1%
HM total	6.38E+04	5.86E+04	5.60E+04	-2615	-4.5%

* 平衡サイクル

付表B-3 炉心物質収支(大型TRU専焼炉:MA60wt%, ZrH_{1.6} 0.25, LWR取出し組成)

	初装荷初期重量[kg]	平衡初期重量[kg]	平衡末期重量[kg]	変化量*	変化率*
U-235	3.44E+01	2.65E+01	2.31E+01	-3.4	-12.9%
U-236	5.98E-09	1.62E+00	2.29E+00	1	41.5%
U-238	1.14E+04	1.09E+04	1.07E+04	-232	-2.1%
NP-237	1.52E+04	1.21E+04	1.07E+04	-1375	-11.4%
NP-239	6.05E-09	1.18E+00	1.46E+00	0	23.7%
PU-236	5.98E-09	5.98E-09	5.98E-09	0	0.0%
PU-238	2.63E+02	2.19E+03	2.94E+03	747	34.0%
PU-239	4.55E+03	3.88E+03	3.61E+03	-268	-6.9%
PU-240	2.36E+03	2.34E+03	2.32E+03	-21	-0.9%
PU-241	8.32E+02	6.98E+02	6.42E+02	-55	-7.9%
PU-242	6.13E+02	5.89E+02	5.76E+02	-13	-2.2%
AM-241	7.95E+03	6.33E+03	5.62E+03	-718	-11.3%
AM-242	6.13E-09	9.71E-01	1.14E+00	0	17.9%
AM-242M	6.13E-09	1.28E+02	1.74E+02	45	35.2%
AM-243	4.97E+03	4.08E+03	3.67E+03	-402	-9.9%
CM-242	6.13E-09	2.26E+02	2.69E+02	43	19.1%
CM-243	6.15E-09	1.38E+01	1.94E+01	6	40.5%
CM-244	2.12E+03	2.52E+03	2.67E+03	149	5.9%
CM-245	2.43E+02	3.41E+02	3.88E+02	47	13.8%
U235-FP	5.95E-09	5.84E+00	8.32E+00	2	42.3%
U238-FP	6.03E-09	7.88E+02	1.13E+03	339	43.1%
PU239-FF	6.05E-09	1.11E+03	1.67E+03	559	50.5%
PU241-FF	6.10E-09	1.17E+03	1.72E+03	548	46.9%
O	4.05E-10	4.05E-10	4.05E-10	0	0.0%
NA-23	6.01E+03	6.01E+03	6.01E+03	0	0.0%
CR	1.65E+03	1.65E+03	1.65E+03	0	0.0%
MN	1.39E-09	1.39E-09	1.39E-09	0	0.0%
FE	2.15E+04	2.15E+04	2.15E+04	0	0.0%
NI	1.59E+02	1.59E+02	1.59E+02	0	0.0%
MO	8.94E+01	8.94E+01	8.94E+01	0	0.0%
ZR	6.38E+03	6.38E+03	6.38E+03	0	0.0%
B-10	2.53E-10	2.53E-10	2.53E-10	0	0.0%
H-1	1.13E+02	1.13E+02	1.13E+02	0	0.0%
N-15	3.17E+03	3.17E+03	3.17E+03	0	0.0%
MA total	3.05E+04	2.57E+04	2.35E+04	-2205	-8.6%
Np total	1.52E+04	1.21E+04	1.07E+04	-1374	-11.4%
Am total	1.29E+04	1.05E+04	9.47E+03	-1075	-10.2%
Cm total	2.37E+03	3.10E+03	3.34E+03	244	7.9%
HM total	5.05E+04	4.64E+04	4.43E+04	-2050	-4.4%

* 平衡サイクル

付表B-4 炉心物質収支(中型発電炉:MA5wt%、LWR取出L組成)

	初装荷初期重量[kg]	平衡初期重量[kg]	平衡末期重量[kg]	変化量*	変化率*
U-235	5.04E+01	3.28E+01	2.58E+01	-7.0	-21.3%
U-236	2.02E-09	3.41E+00	4.66E+00	1	36.7%
U-238	1.68E+04	1.57E+04	1.52E+04	-514	-3.3%
NP-237	5.35E+02	3.75E+02	3.09E+02	-66	-17.6%
NP-239	2.04E-09	2.18E+00	2.68E+00	0	22.7%
PU-236	2.02E-09	2.02E-09	2.02E-09	0	0.0%
PU-238	1.06E+02	1.71E+02	1.89E+02	18	10.7%
PU-239	1.84E+03	1.83E+03	1.82E+03	-15	-0.8%
PU-240	9.55E+02	9.64E+02	9.67E+02	3	0.3%
PU-241	3.36E+02	2.46E+02	2.14E+02	-33	-13.3%
PU-242	2.47E+02	2.35E+02	2.28E+02	-7	-3.0%
AM-241	3.29E+02	2.57E+02	2.26E+02	-31	-12.1%
AM-242	2.07E-09	4.93E-02	5.78E-02	0	17.2%
AM-242M	2.07E-09	6.88E+00	8.92E+00	2	29.7%
AM-243	1.76E+02	1.45E+02	1.32E+02	-13	-9.0%
CM-242	2.07E-09	1.17E+01	1.38E+01	2	17.7%
CM-243	2.08E-09	9.14E-01	1.21E+00	0	32.3%
CM-244	7.50E+01	9.90E+01	1.08E+02	9	8.9%
CM-245	8.57E+00	1.37E+01	1.61E+01	2	17.1%
U235-FP	2.01E-09	1.30E+01	1.80E+01	5	37.8%
U238-FP	2.03E-09	1.82E+02	2.64E+02	82	44.8%
PU239-FP	2.04E-09	7.13E+02	1.05E+03	338	47.4%
PU241-FP	2.06E-09	2.61E+02	3.77E+02	116	44.6%
O	1.37E-10	1.37E-10	1.37E-10	0	0.0%
NA-23	2.02E+03	2.02E+03	2.02E+03	0	0.0%
CR	1.20E+03	1.20E+03	1.20E+03	0	0.0%
MN	4.70E-10	4.70E-10	4.70E-10	0	0.0%
FE	7.26E+03	7.26E+03	7.26E+03	0	0.0%
NI	5.36E+01	5.36E+01	5.36E+01	0	0.0%
MO	3.02E+01	3.02E+01	3.02E+01	0	0.0%
ZR	1.03E-10	1.03E-10	1.03E-10	0	0.0%
B-10	8.55E-11	8.55E-11	8.55E-11	0	0.0%
H-1	9.40E-11	9.40E-11	9.40E-11	0	0.0%
N-15	1.35E+03	1.35E+03	1.35E+03	0	0.0%
MA total	1.12E+03	9.12E+02	8.17E+02	-94	-10.3%
Np total	5.35E+02	3.77E+02	3.12E+02	-66	-17.4%
Am total	5.05E+02	4.09E+02	3.67E+02	-42	-10.3%
Cm total	8.35E+01	1.25E+02	1.39E+02	14	10.8%
HM total	2.14E+04	2.01E+04	1.94E+04	-647	-3.2%

* 平衡サイクル

付表B-5 炉心物質収支(中型TRU専焼炉:MA60wt%、ZrH_{1.6} 0.0、LWR取出し組成)

	初装荷初期重量[kg]	平衡初期重量[kg]	平衡末期重量[kg]	変化量*	変化率*
U-235	2.32E+01	1.74E+01	1.50E+01	-2.5	-14.2%
U-236	2.02E-09	1.05E+00	1.47E+00	0	40.6%
U-238	7.72E+03	7.39E+03	7.23E+03	-163	-2.2%
NP-237	6.42E+03	5.10E+03	4.52E+03	-582	-11.4%
NP-239	2.04E-09	6.13E-01	7.57E-01	0	23.5%
PU-236	2.02E-09	2.02E-09	2.02E-09	0	0.0%
PU-238	2.44E+01	7.54E+02	1.03E+03	272	36.0%
PU-239	4.24E+02	5.45E+02	6.02E+02	56	10.3%
PU-240	2.20E+02	2.18E+02	2.18E+02	1	0.3%
PU-241	7.74E+01	5.77E+01	5.00E+01	-8	-13.4%
PU-242	5.70E+01	5.43E+01	5.29E+01	-1	-2.7%
AM-241	3.33E+03	2.64E+03	2.34E+03	-301	-11.4%
AM-242	2.07E-09	2.81E-01	3.30E-01	0	17.5%
AM-242M	2.07E-09	4.55E+01	6.06E+01	15	33.3%
AM-243	2.11E+03	1.72E+03	1.55E+03	-171	-9.9%
CM-242	2.07E-09	6.70E+01	7.92E+01	12	18.1%
CM-243	2.08E-09	3.30E+00	4.51E+00	1	36.7%
CM-244	8.99E+02	1.03E+03	1.08E+03	46	4.4%
CM-245	1.03E+02	1.28E+02	1.39E+02	12	9.0%
U235-FP	2.01E-09	4.54E+00	6.43E+00	2	41.6%
U238-FP	2.03E-09	4.71E+02	6.76E+02	204	43.4%
PU239-FP	2.04E-09	2.80E+02	4.53E+02	173	61.8%
PU241-FP	2.06E-09	4.57E+02	6.70E+02	213	46.5%
O	1.37E-10	1.37E-10	1.37E-10	0	0.0%
NA-23	2.02E+03	2.02E+03	2.02E+03	0	0.0%
CR	1.20E+03	1.20E+03	1.20E+03	0	0.0%
MN	4.70E-10	4.70E-10	4.70E-10	0	0.0%
FE	7.26E+03	7.26E+03	7.26E+03	0	0.0%
NI	5.36E+01	5.36E+01	5.36E+01	0	0.0%
MO	3.02E+01	3.02E+01	3.02E+01	0	0.0%
ZR	1.03E-10	1.03E-10	1.03E-10	0	0.0%
B-10	8.55E-11	8.55E-11	8.55E-11	0	0.0%
H-1	9.40E-11	9.40E-11	9.40E-11	0	0.0%
N-15	1.34E+03	1.34E+03	1.34E+03	0	0.0%
MA total	1.29E+04	1.07E+04	9.77E+03	-968	-9.0%
Np total	6.42E+03	5.10E+03	4.52E+03	-581	-11.4%
Am total	5.43E+03	4.41E+03	3.95E+03	-457	-10.4%
Cm total	1.00E+03	1.23E+03	1.30E+03	71	5.7%
HM total	2.14E+04	1.98E+04	1.90E+04	-813	-4.1%

* 平衡サイクル

付表B-6 炉心物質収支(中型TRU専焼炉:MA60wt%, ZrH_{1.6} 0.25, LWR取出し組成)

	初装荷初期重量[kg]	平衡初期重量[kg]	平衡末期重量[kg]	変化量*	変化率*
U-235	1.06E+01	8.44E+00	7.47E+00	-1.0	-11.5%
U-236	2.02E-09	4.52E-01	6.43E-01	0	42.3%
U-238	3.53E+03	3.40E+03	3.34E+03	-64	-1.9%
NP-237	5.15E+03	4.22E+03	3.79E+03	-421	-10.0%
NP-239	2.04E-09	3.22E-01	3.98E-01	0	23.8%
PU-236	2.02E-09	2.02E-09	2.02E-09	0	0.0%
PU-238	9.98E+01	6.90E+02	9.25E+02	235	34.0%
PU-239	1.73E+03	1.48E+03	1.37E+03	-104	-7.0%
PU-240	8.98E+02	8.90E+02	8.82E+02	-7	-0.8%
PU-241	3.16E+02	2.66E+02	2.45E+02	-21	-7.8%
PU-242	2.33E+02	2.25E+02	2.21E+02	-4	-1.9%
AM-241	2.71E+03	2.22E+03	2.01E+03	-218	-9.8%
AM-242	2.07E-09	2.97E-01	3.52E-01	0	18.6%
AM-242M	2.07E-09	4.01E+01	5.49E+01	15	36.7%
AM-243	1.69E+03	1.42E+03	1.30E+03	-122	-8.6%
CM-242	2.07E-09	6.90E+01	8.27E+01	14	19.9%
CM-243	2.08E-09	3.77E+00	5.35E+00	2	42.0%
CM-244	7.21E+02	8.42E+02	8.89E+02	47	5.6%
CM-245	8.24E+01	1.11E+02	1.25E+02	14	12.5%
U235-FP	2.01E-09	1.64E+00	2.34E+00	1	43.0%
U238-FP	2.03E-09	2.43E+02	3.49E+02	106	43.8%
PU239-FP	2.04E-09	3.54E+02	5.32E+02	177	50.0%
PU241-FP	2.06E-09	3.67E+02	5.40E+02	173	47.2%
O	1.37E-10	1.37E-10	1.37E-10	0	0.0%
NA-23	2.02E+03	2.02E+03	2.02E+03	0	0.0%
CR	6.10E+02	6.10E+02	6.10E+02	0	0.0%
MN	4.70E-10	4.70E-10	4.70E-10	0	0.0%
FE	7.26E+03	7.26E+03	7.26E+03	0	0.0%
NI	5.36E+01	5.36E+01	5.36E+01	0	0.0%
MO	3.02E+01	3.02E+01	3.02E+01	0	0.0%
ZR	2.17E+03	2.17E+03	2.17E+03	0	0.0%
B-10	8.55E-11	8.55E-11	8.55E-11	0	0.0%
H-1	3.84E+01	3.84E+01	3.84E+01	0	0.0%
N-15	1.08E+03	1.08E+03	1.08E+03	0	0.0%
MA total	1.04E+04	8.93E+03	8.26E+03	-671	-7.5%
Np total	5.15E+03	4.22E+03	3.79E+03	-421	-10.0%
Am total	4.40E+03	3.68E+03	3.36E+03	-326	-8.8%
Cm total	8.04E+02	1.03E+03	1.10E+03	76	7.4%
HM total	1.72E+04	1.59E+04	1.52E+04	-637	-4.0%

* 平衡サイクル

付表B-7 炉心物質収支(大型TRU専焼炉:MA5wt%、FBR取出し組成)

	初装荷初期重量[kg]	平衡初期重量[kg]	平衡末期重量[kg]	変化量*	変化率*
U-235	1.53E+02	9.29E+01	6.98E+01	-23.1	-24.9%
U-236	5.98E-09	1.15E+01	1.55E+01	4	34.7%
U-238	5.09E+04	4.69E+04	4.49E+04	-1926	-4.1%
NP-237	3.50E+02	2.31E+02	1.84E+02	-47	-20.4%
NP-239	6.05E-09	8.31E+00	1.01E+01	2	22.2%
PU-236	5.98E-09	5.98E-09	5.98E-09	0	0.0%
PU-238	2.64E+02	2.45E+02	2.31E+02	-14	-5.9%
PU-239	4.57E+03	5.01E+03	5.12E+03	113	2.3%
PU-240	2.37E+03	2.46E+03	2.51E+03	45	1.8%
PU-241	8.35E+02	6.06E+02	5.27E+02	-79	-13.1%
PU-242	6.15E+02	5.78E+02	5.58E+02	-20	-3.5%
AM-241	1.53E+03	1.07E+03	8.81E+02	-189	-17.6%
AM-242	6.13E-09	2.36E-01	2.70E-01	0	14.4%
AM-242M	6.13E-09	3.17E+01	3.97E+01	8	25.5%
AM-243	7.00E+02	5.31E+02	4.62E+02	-69	-13.1%
CM-242	6.13E-09	5.68E+01	6.52E+01	8	14.9%
CM-243	6.15E-09	5.16E+00	6.59E+00	1	27.6%
CM-244	7.00E+02	7.10E+02	7.04E+02	-7	-1.0%
CM-245	6.20E-09	6.98E+01	9.46E+01	25	35.4%
U235-FP	5.95E-09	4.40E+01	5.98E+01	16	36.0%
U238-FP	6.03E-09	5.33E+02	7.72E+02	239	44.8%
PU239-FP	6.05E-09	2.24E+03	3.32E+03	1073	47.9%
PU241-FP	6.10E-09	8.82E+02	1.28E+03	394	44.7%
O	4.05E-10	4.05E-10	4.05E-10	0	0.0%
NA-23	6.01E+03	6.01E+03	6.01E+03	0	0.0%
OR	3.57E+03	3.57E+03	3.57E+03	0	0.0%
MN	1.39E-09	1.39E-09	1.39E-09	0	0.0%
FE	2.15E+04	2.15E+04	2.15E+04	0	0.0%
NI	1.59E+02	1.59E+02	1.59E+02	0	0.0%
MO	8.94E+01	8.94E+01	8.94E+01	0	0.0%
ZR	3.04E-10	3.04E-10	3.04E-10	0	0.0%
B-10	2.53E-10	2.53E-10	2.53E-10	0	0.0%
H-1	2.79E-10	2.79E-10	2.79E-10	0	0.0%
N-15	3.96E+03	3.96E+03	3.96E+03	0	0.0%
MA total	3.28E+03	2.71E+03	2.45E+03	-267	-9.9%
Np total	3.50E+02	2.40E+02	1.94E+02	-45	-18.9%
Am total	2.23E+03	1.63E+03	1.38E+03	-250	-15.3%
Cm total	7.00E+02	8.42E+02	8.70E+02	28	3.3%
HM total	6.30E+04	5.86E+04	5.64E+04	-2169	-3.7%

* 平衡サイクル

付表B-8 炉心物質収支(大型TRU専焼炉:MA60wt%、ZrH_{1.6}0.25、FBR取出し組成)

	初装荷初期重量[kg]	平衡初期重量[kg]	平衡末期重量[kg]	変化量*	変化率*
U-235	3.76E+01	2.81E+01	2.40E+01	-4.1	-14.5%
U-236	5.98E-09	1.98E+00	2.78E+00	1	40.4%
U-238	1.25E+04	1.19E+04	1.16E+04	-284	-2.4%
NP-237	3.37E+03	2.61E+03	2.27E+03	-333	-12.8%
NP-239	6.05E-09	1.48E+00	1.83E+00	0	23.6%
PU-236	5.98E-09	5.98E-09	5.98E-09	0	0.0%
PU-238	2.30E+02	6.70E+02	8.31E+02	162	24.2%
PU-239	3.99E+03	3.34E+03	3.06E+03	-278	-8.3%
PU-240	2.07E+03	2.06E+03	2.04E+03	-20	-1.0%
PU-241	7.30E+02	6.17E+02	5.71E+02	-46	-7.4%
PU-242	5.38E+02	5.15E+02	5.04E+02	-12	-2.3%
AM-241	1.36E+04	1.05E+04	9.12E+03	-1367	-13.0%
AM-242	6.13E-09	1.83E+00	2.14E+00	0	16.8%
AM-242M	6.13E-09	2.37E+02	3.16E+02	79	33.3%
AM-243	6.73E+03	5.37E+03	4.77E+03	-602	-11.2%
CM-242	6.13E-09	4.27E+02	5.04E+02	77	18.0%
CM-243	6.15E-09	3.03E+01	4.20E+01	12	38.7%
CM-244	6.73E+03	6.77E+03	6.72E+03	-44	-0.7%
CM-245	6.20E-09	4.89E+02	6.91E+02	202	41.3%
U235-FP	5.95E-09	6.97E+00	9.84E+00	3	41.3%
U238-FP	6.03E-09	2.66E+02	3.82E+02	116	43.7%
PU239-FP	6.05E-09	8.88E+02	1.29E+03	405	45.7%
PU241-FP	6.10E-09	1.87E+03	2.75E+03	883	47.3%
O	4.05E-10	4.05E-10	4.05E-10	0	0.0%
NA-23	6.01E+03	6.01E+03	6.01E+03	0	0.0%
CR	1.65E+03	1.65E+03	1.65E+03	0	0.0%
MN	1.39E-09	1.39E-09	1.39E-09	0	0.0%
FE	2.15E+04	2.15E+04	2.15E+04	0	0.0%
NI	1.59E+02	1.59E+02	1.59E+02	0	0.0%
MO	8.94E+01	8.94E+01	8.94E+01	0	0.0%
ZR	6.38E+03	6.38E+03	6.38E+03	0	0.0%
B-10	2.53E-10	2.53E-10	2.53E-10	0	0.0%
H-1	1.13E+02	1.13E+02	1.13E+02	0	0.0%
N-15	3.15E+03	3.15E+03	3.15E+03	0	0.0%
MA total	3.05E+04	2.64E+04	2.44E+04	-1976	-7.5%
Np total	3.37E+03	2.61E+03	2.28E+03	-333	-12.8%
Am total	2.04E+04	1.61E+04	1.42E+04	-1889	-11.7%
Cm total	6.73E+03	7.72E+03	7.96E+03	246	3.2%
HM total	5.05E+04	4.56E+04	4.31E+04	-2457	-5.4%

付表C-1 ドブラー係数の内訳(TdK/dT)
(大型炉代表炉心、LWR取出しMA組成)

(1)発電炉 MA 5wt%

	合計	U238	Pu239	Np237	Fe
Yield	2.74E-04	2.23E-06	2.56E-04	0.00E+00	0.00E+00
Fission	-6.33E-05	-5.30E-07	-5.93E-05	-1.49E-08	0.00E+00
Capture	-3.53E-03	-3.05E-03	-7.75E-05	-4.50E-06	-3.33E-04
Scattering	-4.91E-06	1.85E-06	1.91E-07	5.51E-10	-4.14E-06
Leakage	1.43E-04	1.36E-04	-4.30E-06	-3.23E-07	9.44E-06
Total	-3.18E-03	-2.91E-03	1.16E-04	-4.84E-06	-3.28E-04

(2)TRU専焼炉 MA 60wt%、ZrH_{1.6} 0.0

	合計	U238	Pu239	Np237	Fe
Yield	2.29E-06	6.09E-08	1.69E-06	0.00E+00	0.00E+00
Fission	-1.84E-07	-1.76E-09	-5.29E-08	-4.92E-08	0.00E+00
Capture	-8.49E-05	-3.59E-05	-4.84E-08	-9.76E-06	-3.27E-05
Scattering	-9.48E-06	-9.49E-07	9.35E-12	-8.48E-08	-6.61E-06
Leakage	3.36E-06	3.09E-06	-8.84E-09	-3.90E-07	-5.39E-07
Total	-8.89E-05	-3.37E-05	1.58E-06	-1.03E-05	-3.99E-05

(3)TRU専焼炉 MA 60wt%、ZrH_{1.6} 0.25

	合計	U238	Pu239	Np237	Fe
Yield	1.92E-03	2.27E-07	1.83E-03	0.00E+00	0.00E+00
Fission	-2.47E-04	-3.32E-08	-2.26E-04	-3.58E-06	0.00E+00
Capture	-4.18E-03	-1.20E-03	-2.89E-04	-1.31E-03	-1.89E-04
Scattering	3.28E-05	4.07E-05	-6.17E-07	5.15E-07	-6.28E-06
Leakage	2.68E-05	1.92E-05	6.99E-07	1.71E-06	-4.10E-07
Total	-2.45E-03	-1.14E-03	1.31E-03	-1.31E-03	-1.96E-04