

「常陽」MK-III取替炉心の核熱設計に関する設計評価
(技術報告)

2001年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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ください。

〒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

Inquires 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

「常陽」MK-III取替炉心の核熱設計に関する設計評価

(技術報告)

田渕土郎* 吉田昌宏*

要 旨

高速実験炉「常陽」では照射性能の向上を目的とした MK-III 計画を進めており、その初装荷炉心の運転用炉心燃料は、軽水炉の使用済燃料の混合再処理で得られるプルトニウムと濃縮ウラン（濃縮度 18%）を用いて製造されているが、JC0 事故の影響で硝酸ウラン溶液が入手できなくなった。MK-III 用の第 1 次及び第 2 次取替燃料は、サイクル機構の保有する海外返還プルトニウムを用いるため MK-III 初装荷燃料と同一の仕様の燃料を製造することができる。しかし、プルトニウム粉末の保有量には制限があり、また、プルトニウムの海外からの調達には解決すべき課題が多いことから、2010 年以降に使用する第 3 次以降の取替燃料の原料を、入手できる可能性が最も高い再処理施設からの回収ウランペースの MOX 粉末とし、これにより燃料製造を行う場合の炉心の核設計及び熱設計の成立性を検討することとした。

回収ウランペースの MOX 粉末を用いた場合、燃料のウラン濃縮度が低下するが、それによる臨界性の低下をスリック長の増大とプルトニウム富化度の増大により補うこととした。回収ウランペースの MOX 粉末と約 20% の濃縮ウランを使用した場合、炉心高さ 55cm、プルトニウム富化度の上限目標値を 34%（燃料製造上の R&D は不要）とすることにより、現行の MK-III 標準平衡炉心と同等の臨界性が得られた。また、約 5% 濃縮の軽水炉用ウランを使用した場合、炉心高さ 60cm、プルトニウム富化度の上限目標値を 37%（燃料製造上の R&D が必要）とすることにより、現行の MK-III 標準平衡炉心と同等の臨界性が得られた。

燃料スリック長の増加に伴う中性子束低下とプルトニウム富化度増加に伴う中性子束增加の効果が相殺され、取替炉心の最大中性子束は MK-III 標準平衡炉心とほぼ同等となった。

反応度特性では制御棒価値、ドップラー係数、出力係数は絶対値が大きくなり、ナトリウムイド反応度は絶対値が小さくなるものの負の値となった。これらより、いずれの取替炉心も MK-III 標準平衡炉心と同等の安全性を有していると考えられる。

燃料最高温度は、燃料スリック長増加に伴う線出力低下により低下し、プルトニウム富化度増加に伴う融点の低下を考慮した熱設計基準値を下回り、これを満足する見通しを得た。

*大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部 技術課

Analysis and Evaluation Studies on Nuclear and Thermal Design of Joyo MK-III Next Generation Core

Shiro TABUCHI* and Akihiro YOSHIDA*

ABSTRACT

The Joyo experimental fast reactor is being upgraded with MK-III core to improve the irradiation capability. The initial MK-III core fuel is being manufactured with MOX powder with equal parts of uranium and plutonium. The uranium has 18% ^{235}U enrichment with uranyl nitrate. Due to the JCO accident, uranyl nitrate is not available in Japan. The first two fuel campaigns for the MK-III core will use JNC plutonium processed in France so the fuel composition will match the initial fuel. However, this plutonium is limited and future plutonium imports have many unresolved problems and may not be available for MK-III fueling. Assuming that the 3rd fuel campaign in 2010 will use MOX from reprocessing plant as an alternate, a core and thermal design of Joyo MK-III next generation core has started.

The MOX powder extracted from the reprocessing plant will decrease the ^{235}U enrichment of fabricated fuel pellets. To reach criticality with this fuel, the active core height and plutonium content of fuel should be increased. With 20% enriched uranium, the core design requires 34% plutonium content and 55cm fuel height. With 5% enriched uranium for LWR, the core design requires 37% plutonium content and 60cm fuel height.

Neutron flux decreases with increasing core height and increases with increased plutonium content so the two effects can cancel each other out and the maximum fast neutron flux is as high as that of MK-III standard core. While the effect on control rod characteristics due to increasing the fuel height is small, the decrease of effective delayed neutron ratio β_{eff} causes increased control rod reactivity described in the center of unit. The absolute values of Doppler coefficient and power coefficient increase. The absolute value of sodium void reactivity decreases but it is still negative. The maximum fuel temperature meets the thermal design standard value based on the decreased fuel melting point due to the increased plutonium content.

*Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center,
Oarai Engineering Center, JNC

目 次

1 はじめに	1
2 背景及び経緯	2
3 MK-III取替炉心燃料組成の検討	5
3.1 取替炉心の設計方針	5
3.2 取替炉心のプルトニウム同位体組成比	5
3.3 プルトニウム富化度目標値の設定	5
3.4 取替炉心の燃料組成と臨界性	6
4 MK-III取替炉心の核特性評価	20
4.1 反応度バランス	20
4.2 制御棒特性	20
4.3 反応度係数及び動特性	21
4.4 燃焼度	23
5 MK-III取替炉心の熱特性評価	35
5.1 热設計基準値の設定	35
5.2 热特性評価	35
6 おわりに	37
参考文献	38

表リスト

表3. 1	プルトニウム同位体組成比の推定	8
表3. 2	燃料交換バッチ数	8
表3. 3	MK-III標準平衡炉心の主要仕様	9
表3. 4	解析ケース	10
表3. 5	MK-III取替炉心の臨界性、ウラン濃縮度及びプルトニウム富化度	10
表3. 6	各列の最大線出力	11
表3. 7	各列の最大集合体出力	11
表3. 8	MK-III標準平衡炉心の各列の最大中性子束（サイクル初期）	12
表3. 9	MK-III標準平衡炉心の各列の最大中性子束（サイクル末期）	12
表3. 10	MK-III取替炉心（ケース1）の各列の最大中性子束（サイクル初期）	13
表3. 11	MK-III取替炉心（ケース1）の各列の最大中性子束（サイクル末期）	13
表3. 12	MK-III取替炉心（ケース2）の各列の最大中性子束（サイクル初期）	14
表3. 13	MK-III取替炉心（ケース2）の各列の最大中性子束（サイクル末期）	14
表3. 14	MK-III取替炉心（ケース3）の各列の最大中性子束（サイクル初期）	15
表3. 15	MK-III取替炉心（ケース3）の各列の最大中性子束（サイクル末期）	15
表3. 16	MK-III取替炉心（ケース4）の各列の最大中性子束（サイクル初期）	16
表3. 17	MK-III取替炉心（ケース4）の各列の最大中性子束（サイクル末期）	16
表4. 1	反応度バランス	24
表4. 2	全制御棒価値（基準計算値）	24
表4. 3	制御棒価値の最小評価値	24
表4. 4	1本の制御棒価値（基準計算値）	25
表4. 5	1本の制御棒価値の最大評価値	25
表4. 6	最大反応度付加率	25
表4. 7	温度係数及び出力係数評価用温度	26
表4. 8	反応度特性（MK-III標準平衡炉心）	27
表4. 9	反応度特性（ケース2）	27
表4. 10	反応度特性（ケース4）	27
表4. 11	温度係数	28
表4. 12	出力係数	29
表4. 13	遅発中性子発生率	30
表4. 14	崩壊定数	31
表4. 15	遅発中性子スペクトル	32
表4. 16	動特性パラメータ	33
表4. 17	各列の集合体最大燃焼度	34
表4. 18	各列の要素最大燃焼度	34
表5. 1	熱特性評価のまとめ	36

図リスト

図2. 1	従来の燃料製造工程	3
図2. 2	変更工程（その1）	4
図2. 3	変更工程（その2）	4
図3. 1	MK-III標準平衡炉心構成	17
図3. 2	燃焼チーン	18
図3. 3	高速中性子束の径方向分布	19

1 はじめに

現在、「常陽」では照射性能の向上を目的とした MK-III 計画⁽¹⁾を進めており、その初装荷運転用炉心燃料は、軽水炉の使用済燃料の再処理によるプルトニウムと濃縮ウラン（濃縮度 18%）を用いて製造されている。燃料の原料となる MOX 粉末製造において、再処理施設からのプルトニウム（硝酸プルトニウム）とウラン濃縮度 18% の硝酸ウラニルとの 1:1 混合転換を行っているが、JC0 事故の影響でこの硝酸ウラニル溶液が入手できなくなったため、燃料製造方法の変更が必要となつた。

そこで、今回、燃料製造方法変更による仕様変更後の炉心の核設計及び熱設計の成立性を検討した。

2 背景及び経緯

小型高速炉である高速実験炉「常陽」では、運転に必要な核分裂性物質量は軽水炉再処理からのプルトニウムと濃縮ウラン（濃縮度 18%）により確保してきた。図 2.1 に従来の燃料製造工程を示す。再処理施設からのプルトニウム（硝酸プルトニウム）とウラン濃縮度 18% の硝酸ウランとの 1:1 混合転換により燃料製造に必要な MOX 粉末が製造され、これをプルトニウム燃料製造施設でウラン粉末と混合することにより所定のプルトニウム富化度の MOX 粉末とし、これをペレットに焼結していた。このうち、ウラン濃縮度約 18% の硝酸ウラン溶液と酸化ウラン粉末については、JCO で製造していたが、JCO 事故の影響でこの硝酸ウラン溶液が入手できなくなったため、燃料製造方法の変更が必要となった。

MK-III 用の第 1 次及び第 2 次取替燃料は、サイクル機構の保有する海外返還プルトニウムを用いて燃料製造を行う。この場合の製造工程を図 2.2 に示す。この方法は海外返還プルトニウムとウラン等から調達するウラン濃縮度約 20% のウラン粉末を直接混ぜて燃料を製造するもので、MK-III 初装荷燃料と同一の仕様の燃料を製造することができる。

2010 年以降に使用する第 3 次以降の取替燃料の原料の調達方法については次の方法が考えられる。

- ① プルトニウムの海外からの調達
- ② 海外から購入する濃縮（20%）、又は、軽水炉並（5%）のウラン
- ③ 国内再処理（六ヶ所又は東海）で製造される MOX 粉末（ウラン濃縮度約 1%）

サイクル機構の保有するプルトニウム粉末の量には制限があり、また、プルトニウムの海外からの調達には解決すべき課題が多いことから、燃料仕様の変更（低濃縮ウラン燃料）が必要な、①以外のケースについて炉心の成立性を検討した。この場合の製造工程を図 2.3 に示す。将来、入手できる可能性が最も高い③の再処理施設からの硝酸プルトニウムと回収ウランペーストの硝酸ウラン（ウラン濃縮度約 1%）の 1:1 混合転換により製造される MOX 粉末に、②の濃縮ウラン粉末（約 20% 又は約 5%）を混ぜてプルトニウム富化度を調整し、燃料製造を行うもので、従来の製造方法に比べて燃料のウラン濃縮度は低下する。

ここでは、上記の方法で製造した燃料による炉心（低ウラン濃縮度炉心）の核設計及び熱設計の成立性について検討した。

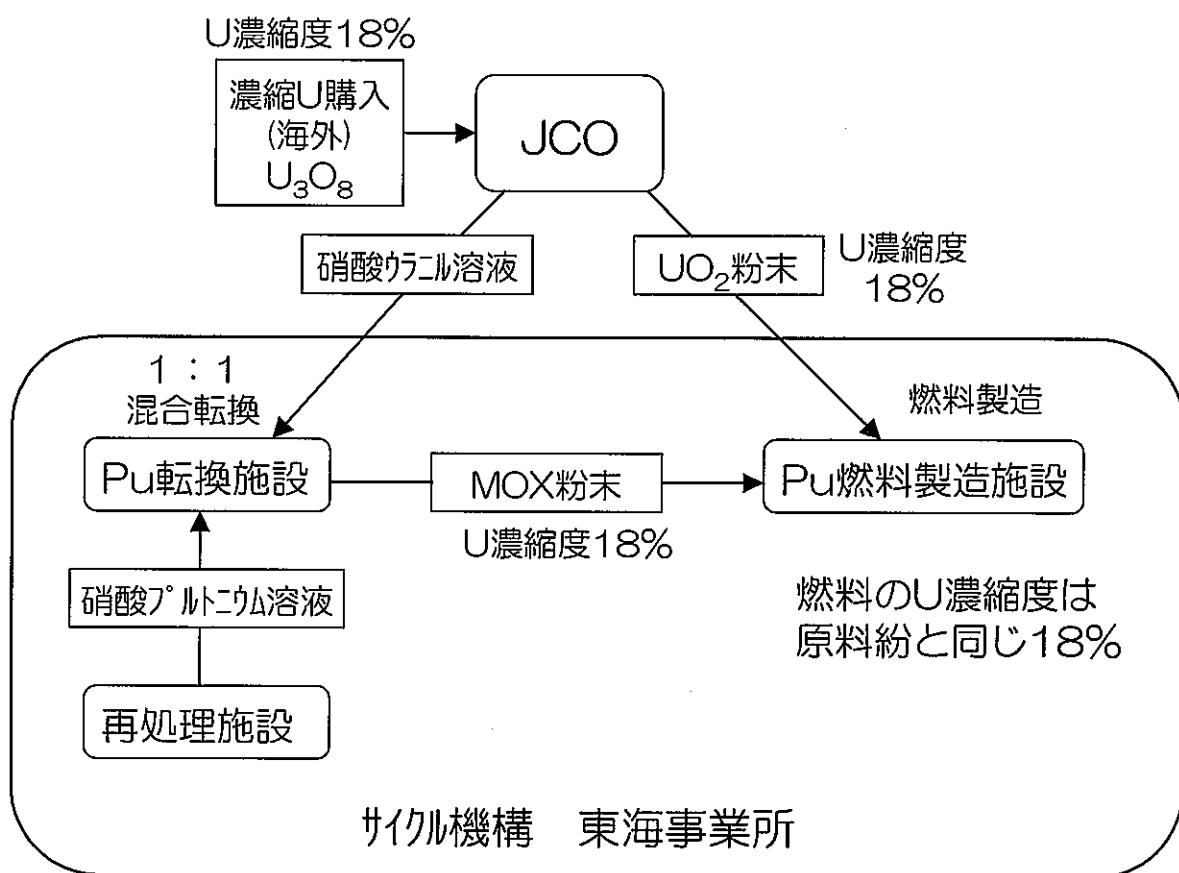


図 2.1 従来の燃料製造工程

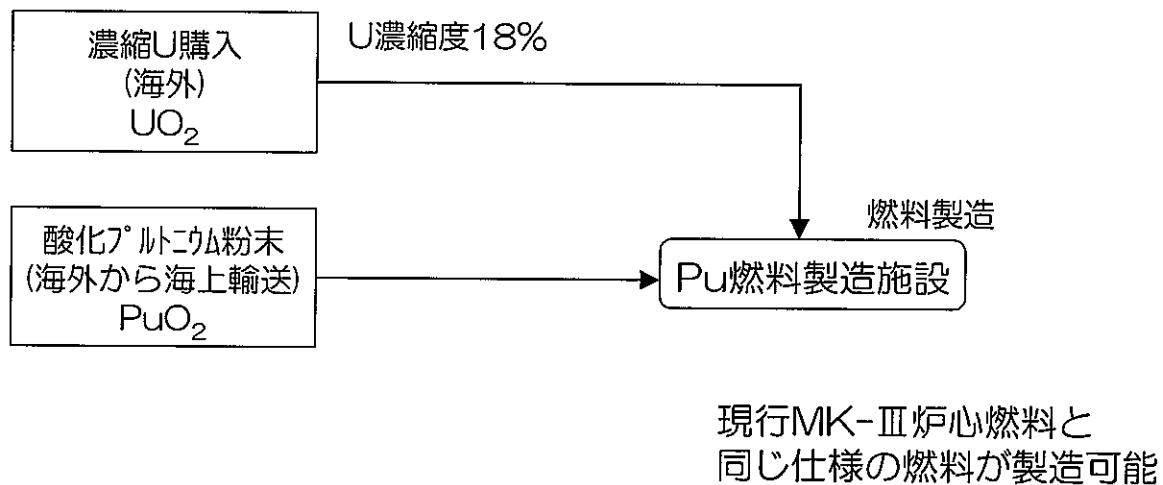


図 2.2 変更工程（その 1）

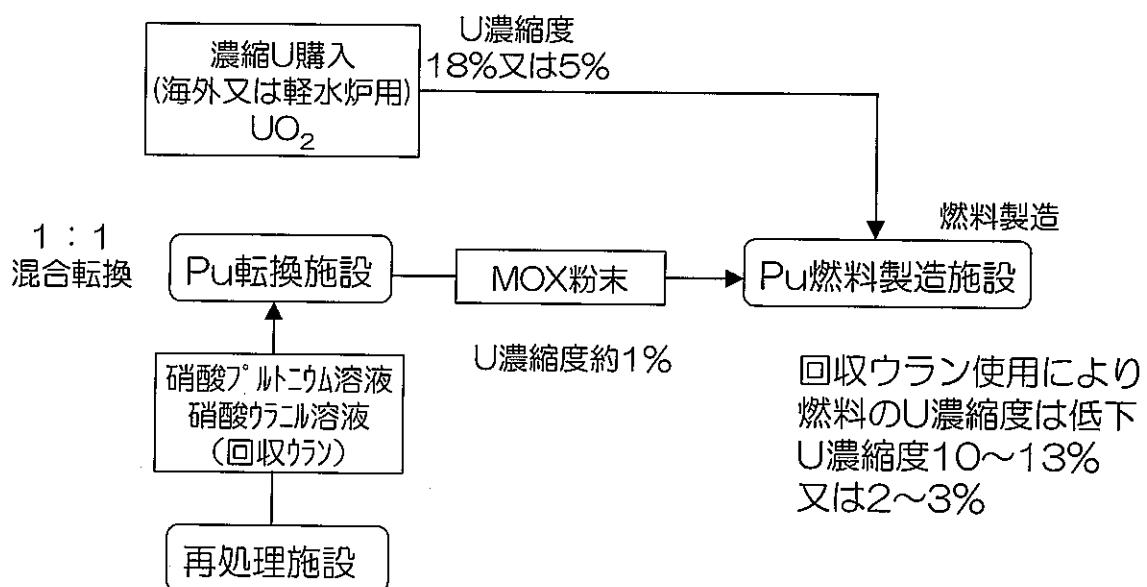


図 2.3 変更工程（その 2）

3 MK-III取替炉心燃料組成の検討

3.1 取替炉心の設計方針

炉心設計にあたっての設計条件を下記に示す。

- ① 原子炉出力は 140MW を維持する。
- ② サイクル当たりの運転日数、燃料装荷数（使用済燃料発生数）は変えず、稼動率を維持する。
- ③ 照射リグの装荷体数は確保する。
- ④ 最大中性子束の低下を抑制する。
- ⑤ 軽水炉燃料の高燃焼度化によるプルトニウムの高次化を考慮する。

これらの条件を踏まえて「常陽」の照射性能を維持することとする。

3.2 取替炉心のプルトニウム同位体組成比

現在、軽水炉の 55Gwd/t 燃料の取出は 2007～2009 年頃の見通しであり、冷却期間を考えると、2010 年頃に製造される第 3 次取替燃料用に六ヶ所再処理工場で再処理される軽水炉燃料の最大燃焼度は現行と変わらないと考えられる。そこで、現在稼動中の軽水炉の取出平均燃焼度 (PWR:43Gwd/t, BWR:39Gwd/t) のプルトニウム同位体組成を安藤、高野らの検討結果⁽²⁾から内挿して求めたプルトニウム同位体組成を MOX 粉末のマジカル値ベースの組成とした。

また、現在、既に六ヶ所再処理工場に搬入されている軽水炉の使用済燃料と同程度と考えられる軽水炉 MOX の設計に使用されたプルトニウム同位体組成比を最大値ベースの組成とした。

いずれのケースも再処理から炉に装荷されるまでの期間を 5 年と想定し、この期間中の ²⁴¹Pu の崩壊による ²⁴¹Am の蓄積を考慮した。以上のプルトニウム同位体組成比を表 3.1 に示す。

3.3 プルトニウム富化度目標値の設定

MOX 粉末に添加する酸化ウランの濃縮度は入手可能 (20%未満) な 19.75%とする。また、19.75%の濃縮ウランが入手できない場合も想定し、これを軽水炉燃料に用いる 4.8%とした場合についても検討した。ここで、回収ウランの濃縮度は 1%、混合転換比は 1:1 とした。

燃料組成及び燃料スティック長以外の条件は現行の MK-III 標準平衡炉心と同じとして計算した。MK-III 標準平衡炉心の仕様及び炉心構成をそれぞれ表 3.3 及び図 3.1 に示す。炉定数セット JFS-3-J2 を用い 70 群実効断面積を作成し、2 次元 RZ 体系の中性子束で縮約して少数群実効断面積を作成し、表 3.2 に示す燃料交換パッチで図 3.2 に示す燃焼チェーンに従って平衡炉心までの燃焼計算を行った。平衡サイクル末期の臨界性が MK-III 標準平衡炉心⁽³⁾ (0.994 ± 0.001) と同等となるよう内側炉心及び外側炉心のプルトニウム富化度をサベイした。このとき、内側炉心と外側炉心の最大線出力が等しくなるようにプルトニウム富化度を調整し、プルトニウム富化度目標値の範囲で反応度が不足する時は内側炉心のプルトニウム富化度を高

くすることとした。

プルトニウム富化度については、東海事業所の燃料製造部門との調整により、第1目標を燃料製造施設の小規模な設備対応によって製造が可能な34%以下（燃料製造上のR&Dは不要）、さらに第2目標を燃料製造に関する新たなR&Dが必要な37%以下とした。

この結果、濃縮度19.75%の濃縮ウランを使用した場合、炉心高さ55cm、プルトニウム富化度の34%以下の範囲内で現行のMK-III標準平衡炉心と同等の臨界性が得られた。また、軽水炉用の濃縮度4.8%の濃縮ウランを使用した場合、プルトニウム富化度34%では炉心高さを60cmにしてもMK-III標準平衡炉心と同等の臨界性は得られず、プルトニウム富化度を第2の目標値の37%以下の範囲内でMK-III標準平衡炉心と同等の臨界性が得られた。

そこで、19.75%の濃縮ウランが使用できる場合は炉心高さを55cmとし、19.75%の濃縮ウランが使用できず、4.8%の濃縮ウランしか使用できない場合は炉心高さを60cmとして、各々について、3.2で検討した最大値ペース及びパキナル値ペースのプルトニウム組成比の炉心の核的成立性を検討した。表3.4に検討ケースを示す。

3.4 取替炉心の燃料組成と臨界性

3.4.1 燃料組成と臨界性

各ケースのウラン濃縮度、プルトニウム富化度、実効増倍率及び最大線出力を表3.5に示す。最大値ペースのケース1及びケース3は、内側炉心と外側炉心の最大線出力を平坦化し、MK-III標準平衡炉心と同等の臨界性が得られ、それぞれのケースの外側炉心のプルトニウム富化度は33.6%及び36.3%となった。パキナル値ペースのケース2及びケース4は外側炉心のプルトニウム富化度を上限目標値まで上げても反応度が不足し、内側炉心のプルトニウム富化度を高くすることにより、MK-III標準平衡炉心と同等の臨界性が得られた。

3.4.2 線出力及び集合体出力

MK-III標準平衡炉心及び取替炉心各ケースの各列の最大線出力を表3.6に示す。各ケースとも第1列（炉心アドレス1B1）の炉心燃料集合体で線出力が最大となった。

MK-III標準平衡炉心及び取替炉心各ケースの各列の最大集合体出力をそれぞれ表3.7に示す。各ケースとも1B1の炉心燃料集合体で出力が最大となり、集合体出力は2.22MW（ケース1）、2.34MW（ケース2）、2.21MW（ケース3）、2.32MW（ケース4）となった。

3.4.3 最大中性子束

MK-III標準平衡炉心及び取替炉心各ケースの平衡炉心初期および末期の各列の最大中性子束を表3.8～17に示す。高速中性子束($E > 0.1\text{MeV}$)が最大となる集合体はいずれのケースも1B1の炉心燃料集合体となり、平衡炉心末期の最大高速中性子束は $3.95 \times 10^{15}/\text{cm}^2\text{s}$ （MK-III標準平衡炉心）、 $3.90 \times 10^{15}/\text{cm}^2\text{s}$ （ケース1）、 $4.01 \times 10^{15}/\text{cm}^2\text{s}$ （ケース2）、 $3.87 \times 10^{15}/\text{cm}^2\text{s}$ （ケース3）、 $3.95 \times 10^{15}/\text{cm}^2\text{s}$ （ケース4）で、MK-III標準平衡炉心と同等となった。

これは燃料タック長が増加すると出力密度が低下し、中性子束が低下する効果とプルトニウム富化度を高くするとuranと比較し等価フィッサル係数の高いプルトニウム核種の存在比が高くなり、少ない核分裂物質量で臨界性を維持できるため、中性子束が上昇する効果とが相殺したためと考えられる。

図 3.3 に高速中性子束の径方向分布を示す。ケ-ス1 及び3 は径方向出力ピ-キング係数は MK-III 標準平衡炉心とほぼ同じとなったが、高速中性子束は MK-III 標準平衡炉心より約 3% 低下した。ケ-ス2 及び4 は内側炉心のプルトニウム富化度を高くしたため中性子束が高くなり、MK-III 標準平衡炉心より高い、もしくは同等となったが、炉心の径方向出力ピ-キング係数は大きくなつた。

表3.1 プルトニウム同位体組成比の推定

		燃焼度 (GWd/t)	プルトニウム同位体組成 238/239/240/241/242/Am241	Pu フィッサイル率 (%)
参考文献(2)	PWR	30	1.46/58.33/23.67/11.25/5.29/0.0	69.58
		45	2.42/54.47/24.20/11.95/6.97/0.0	66.42
		60	3.73/51.67/23.97/12.37/8.25/0.0	64.04
	BWR	30	1.71/55.38/25.97/10.56/6.38/0.0	65.94
		45	2.80/51.77/25.98/11.07/8.38/0.0	62.84
		60	4.19/48.13/26.04/11.09/10.55/0.0	59.22
参考文献(2)より推定した軽水炉取出平均のPu組成比(冷却期間考慮)	PWR	43	2.29/54.98/24.13/9.35/6.74/2.50	64.33
	BWR	39	2.36/53.22/25.98/8.57/7.58/2.29	61.79
	PWR と BWR の平均		2.33/54.10/25.05/8.96/7.16/2.40	63.06
軽水炉 MOX 燃料設計用		1.90/57.50/23.30/10.00/5.40/1.90		67.50
軽水炉 MOX 燃料設計用に冷却期間考慮した Pu 組成比		1.90/57.50/23.30/9.39/5.40/2.51		66.89

表3.2 燃料交換バッチ数

	列	燃料交換バッチ数	炉心燃料集合体数
内側炉心	0	5	0
	1	5	3
	2	6	12
	3	6	4
外側炉心	3	6	8
	4	7	24
	5	8	26

表 3.3 MK-III 標準平衡炉心の主要仕様

項目	仕 様	備 考	
原子炉熱出力	140MWt		
一次冷却材	2,680t/h		
原子炉出口/入口温度	500°C/350°C		
スタック長	50cm(内側、外側)		
炉内燃料装荷本数	内側最大 25 体、外側最大 60 体		
ラッパ管外対面距離	78.5cm		
集合体ピッチ	81.5cm		
燃料 集 合 体	燃料材	プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料	
	燃料要素外径／内径	5.5/4.8mm	
	燃料ペレット外径	4.63mm	
	プルトニウム富化度	内側 23.0w/o/外側 28.8w/o	
	ウラン濃縮度	18w/o	
	ペレット密度	94%T.D.	
	ピン本数	127	
	構造材	PNC1520 計算対象範囲内ではブレナムスリーブのみ SUS相当鋼	
制 御 棒	制御要素材	B ₄ C ペレット	
	¹⁰ B 濃縮度	90%	
	B ₄ C ペレット外径	16.3mm	
	制御材有効長さ	650mm	
	要素本数	7	
遮 へ い 集 合 体	遮へい要素材	B ₄ C ペレット	
	¹⁰ B 濃縮度	20%*	現行 45%
	遮へい要素外径/内径	26.0/24.4mm*	現行 25.6/22.2mm
	B ₄ C ペレット外径	24mm*	現行 20.5mm
	遮へい材有効長さ	1000mm	
	要素本数	7	
反 射 体	反射体要素材	PNC1540(内側、外側)	
	ラッパ管材	フェライト鋼(内側、外側)	

*)参考資料(2)核計算に使用した仕様。今回の計算はリファレンスとの比較のため、同じ条件で実施。

表3.4 解析ケース

ケース	Pu 同位体組成 (Pu フィッサイル率) (%)	添加する ウランの濃縮度	燃料 スタック長	Pu 富化度 上限目標値	備考
約 20% の濃縮ウランが 入手できる場合	1 最大値ペース (66.9%)	19.75%	55cm	34%	燃料製造設備の 設備対応は必要
	2 ノミナル値ペース (63.1%)	19.75%	55cm	34%	
約 5% の濃縮ウランしか 使用できない場合	3 最大値ペース (66.9%)	4.8%	60cm	37%	上記に加えて、燃 料製造に関する R&D が必要
	4 ノミナル値ペース (63.1%)	4.8%	60cm	37%	

表3.5 MK-III取替炉心の臨界性、ウラン濃縮度及びプルトニウム富化度

	MK-III標準 平衡炉心	ケ-ス1	ケ-ス2	ケ-ス3	ケ-ス4
炉心高さ (cm)	50	55	同左	60	同左
プルトニウム同位体組成比 (w/o) *					
238/239/240/241/242/ ²⁴¹ Am/241	1/63/24/8/4 /0	1.90/57.50/ 23.30/9.39/ 5.40/2.51	2.33/54.10/ 25.05/8.96/ 7.16/2.40	1.90/57.50/ 23.30/9.39/ 5.40/2.51	2.33/54.10/ 25.05/8.96/ 7.16/2.40
²³⁵ U濃縮度 (w/o)					
内側炉心	18.0	13.3	11.8	3.0	2.7
外側炉心	18.0	10.2	10.0	2.5	2.5
プルトニウム富化度 (w/o) *					
内側炉心	23.0	25.3	29.7	31.4	34.3
外側炉心	28.8	33.6	34.0	36.3	37.0
実効増倍率					
サイクル初期	1.0087	1.0109	1.0107	1.0106	1.0102
サイクル末期	0.9939	0.9940	0.9940	0.9941	0.9937
燃焼欠損反応度 (% $\Delta k/k'$)	1.74	1.68	1.64	1.62	1.62
最大線出力					
内側炉心	414	382	403	354	372
外側炉心	413	381	377	354	351

* ²⁴¹Amも含んだ値

表 3.6 各列の最大線出力 (W/cm)

	列	MK-III標準 平衡炉心	ケ-ス1	ケ-ス2	ケ-ス3	ケ-ス4
内側炉心	1	414	382	403	354	372
	2	411	379	399	351	369
	3	391	359	377	332	347
外側炉心	3	413	381	377	354	351
	4	395	363	359	337	333
	5	354	326	319	300	294

表 3.7 各列の最大集合体出力 (MW)

	列	MK-III標準 平衡炉心	ケ-ス1	ケ-ス2	ケ-ス3	ケ-ス4
内側炉心	1	2.25	2.22	2.34	2.21	2.32
	2	2.18	2.15	2.26	2.14	2.24
	3	2.02	2.00	2.08	1.97	2.06
外側炉心	3	2.13	2.11	2.08	2.10	2.07
	4	1.99	1.97	1.93	1.95	1.92
	5	1.74	1.71	1.67	1.68	1.65

表 3.8 MK-III標準平衡炉心の各列の最大中性子束 (サイクル初期)

集合体列 エネルギー群	第0列	第1列	第2列	第3列 内側炉心	第3列 外側炉心	第4列	第5列
1群	7.09×10^{14}	7.36×10^{14}	7.27×10^{14}	6.88×10^{14}	6.72×10^{14}	6.20×10^{14}	5.32×10^{14}
2群	1.37×10^{15}	1.38×10^{15}	1.35×10^{15}	1.27×10^{15}	1.24×10^{15}	1.14×10^{15}	9.73×10^{14}
3群	1.96×10^{15}	1.97×10^{15}	1.92×10^{15}	1.80×10^{15}	1.75×10^{15}	1.60×10^{15}	1.37×10^{15}
4群	1.29×10^{15}	1.28×10^{15}	1.25×10^{15}	1.16×10^{15}	1.13×10^{15}	1.03×10^{15}	9.01×10^{14}
5群	2.29×10^{14}	2.10×10^{14}	2.00×10^{14}	1.83×10^{14}	1.83×10^{14}	1.65×10^{14}	1.52×10^{14}
6群	1.67×10^{13}	1.41×10^{13}	1.31×10^{13}	1.21×10^{13}	1.25×10^{13}	1.17×10^{13}	1.57×10^{13}
7群	1.17×10^{10}	7.66×10^9	7.09×10^9	7.64×10^9	8.89×10^9	2.01×10^{10}	2.26×10^{11}
高速群 (E>0.1MeV)	3.85×10^{15}	3.89×10^{15}	3.82×10^{15}	3.58×10^{15}	3.49×10^{15}	3.20×10^{15}	2.74×10^{15}
全群	5.57×10^{15}	5.58×10^{15}	5.46×10^{15}	5.11×10^{15}	4.99×10^{15}	4.56×10^{15}	3.95×10^{15}

表 3.9 MK-III標準平衡炉心の各列の最大中性子束 (サイクル末期)

集合体列 エネルギー群	第0列	第1列	第2列	第3列 内側炉心	第3列 外側炉心	第4列	第5列
1群	7.23×10^{14}	7.49×10^{14}	7.39×10^{14}	6.98×10^{14}	6.81×10^{14}	6.30×10^{14}	5.42×10^{14}
2群	1.40×10^{15}	1.41×10^{15}	1.38×10^{15}	1.29×10^{15}	1.26×10^{15}	1.16×10^{15}	9.94×10^{14}
3群	2.01×10^{15}	2.02×10^{15}	1.97×10^{15}	1.85×10^{15}	1.79×10^{15}	1.64×10^{15}	1.41×10^{15}
4群	1.33×10^{15}	1.32×10^{15}	1.29×10^{15}	1.20×10^{15}	1.17×10^{15}	1.06×10^{15}	9.31×10^{14}
5群	2.38×10^{14}	2.19×10^{14}	2.09×10^{14}	1.91×10^{14}	1.92×10^{14}	1.72×10^{14}	1.59×10^{14}
6群	1.75×10^{13}	1.49×10^{13}	1.39×10^{13}	1.29×10^{13}	1.33×10^{13}	1.24×10^{13}	1.66×10^{13}
7群	1.22×10^{10}	8.02×10^9	7.44×10^9	8.06×10^9	9.41×10^9	2.14×10^{10}	2.39×10^{11}
高速群 (E>0.1MeV)	3.94×10^{15}	3.98×10^{15}	3.90×10^{15}	3.66×10^{15}	3.56×10^{15}	3.27×10^{15}	2.81×10^{15}
全群	5.71×10^{15}	5.72×10^{15}	5.60×10^{15}	5.24×10^{15}	5.11×10^{15}	4.68×10^{15}	4.05×10^{15}

表 3.10 MK-III取替炉心(ケ-ス1)の各列の最大中性子束(サイクル初期)

集合体列 エネルギ群	第0列	第1列	第2列	第3列 内側炉心	第3列 外側炉心	第4列	第5列
1群	6.92×10^{14}	7.14×10^{14}	7.03×10^{14}	6.63×10^{14}	6.49×10^{14}	5.98×10^{14}	5.12×10^{14}
2群	1.35×10^{15}	1.35×10^{15}	1.32×10^{15}	1.23×10^{15}	1.20×10^{15}	1.11×10^{15}	9.43×10^{14}
3群	1.95×10^{15}	1.95×10^{15}	1.91×10^{15}	1.79×10^{15}	1.74×10^{15}	1.58×10^{15}	1.36×10^{15}
4群	1.30×10^{15}	1.29×10^{15}	1.26×10^{15}	1.18×10^{15}	1.15×10^{15}	1.05×10^{15}	9.15×10^{14}
5群	2.38×10^{14}	2.20×10^{14}	2.11×10^{14}	1.94×10^{14}	1.95×10^{14}	1.75×10^{14}	1.63×10^{14}
6群	1.83×10^{13}	1.57×10^{13}	1.48×10^{13}	1.40×10^{13}	1.46×10^{13}	1.36×10^{13}	1.79×10^{13}
7群	1.26×10^{10}	8.59×10^9	8.17×10^9	9.26×10^9	1.07×10^{10}	2.41×10^{10}	2.57×10^{11}
高速群 (E>0.1MeV)	3.80×10^{15}	3.83×10^{15}	3.75×10^{15}	3.51×10^{15}	3.42×10^{15}	3.14×10^{15}	2.68×10^{15}
全群	5.54×10^{15}	5.54×10^{15}	5.42×10^{15}	5.07×10^{15}	4.95×10^{15}	4.52×10^{15}	3.91×10^{15}

表 3.11 MK-III取替炉心(ケ-ス1)の各列の最大中性子束(サイクル末期)

集合体列 エネルギ群	第0列	第1列	第2列	第3列 内側炉心	第3列 外側炉心	第4列	第5列
1群	6.98×10^{14}	7.21×10^{14}	7.11×10^{14}	6.72×10^{14}	6.57×10^{14}	6.08×10^{14}	5.22×10^{14}
2群	1.37×10^{15}	1.37×10^{15}	1.34×10^{15}	1.25×10^{15}	1.22×10^{15}	1.13×10^{15}	9.64×10^{14}
3群	1.99×10^{15}	2.00×10^{15}	1.96×10^{15}	1.83×10^{15}	1.78×10^{15}	1.62×10^{15}	1.39×10^{15}
4群	1.34×10^{15}	1.34×10^{15}	1.31×10^{15}	1.22×10^{15}	1.19×10^{15}	1.08×10^{15}	9.45×10^{14}
5群	2.49×10^{14}	2.30×10^{14}	2.21×10^{14}	2.03×10^{14}	2.04×10^{14}	1.83×10^{14}	1.69×10^{14}
6群	1.94×10^{13}	1.67×10^{13}	1.57×10^{13}	1.48×10^{13}	1.54×10^{13}	1.43×10^{13}	1.88×10^{13}
7群	1.33×10^{10}	9.06×10^9	8.60×10^9	9.78×10^9	1.14×10^{10}	2.57×10^{10}	2.70×10^{11}
高速群 (E>0.1MeV)	3.86×10^{15}	3.90×10^{15}	3.82×10^{15}	3.58×10^{15}	3.49×10^{15}	3.20×10^{15}	2.75×10^{15}
全群	5.67×10^{15}	5.67×10^{15}	5.55×10^{15}	5.19×10^{15}	5.07×10^{15}	4.64×10^{15}	4.01×10^{15}

表 3.12 MK-III 取替炉心 (ケ-ス2) の各列の最大中性子束 (サイクル初期)

集合体列 エネルギ群	第0列	第1列	第2列	第3列 内側炉心	第3列 外側炉心	第4列	第5列
1群	7.20×10^{14}	7.45×10^{14}	7.32×10^{14}	6.84×10^{14}	6.60×10^{14}	6.03×10^{14}	5.09×10^{14}
2群	1.39×10^{15}	1.39×10^{15}	1.36×10^{15}	1.26×10^{15}	1.22×10^{15}	1.12×10^{15}	9.40×10^{14}
3群	1.99×10^{15}	2.00×10^{15}	1.95×10^{15}	1.82×10^{15}	1.76×10^{15}	1.60×10^{15}	1.36×10^{15}
4群	1.32×10^{15}	1.32×10^{15}	1.28×10^{15}	1.19×10^{15}	1.17×10^{15}	1.06×10^{15}	9.25×10^{14}
5群	2.41×10^{14}	2.22×10^{14}	2.13×10^{14}	1.96×10^{14}	1.98×10^{14}	1.78×10^{14}	1.66×10^{14}
6群	1.84×10^{13}	1.58×10^{13}	1.48×10^{13}	1.40×10^{13}	1.48×10^{13}	1.39×10^{13}	1.84×10^{13}
7群	1.28×10^{10}	8.43×10^9	7.99×10^9	9.02×10^9	1.10×10^{10}	2.52×10^{10}	2.68×10^{11}
高速群 (E>0.1MeV)	3.91×10^{15}	3.94×10^{15}	3.85×10^{15}	3.58×10^{15}	3.47×10^{15}	3.16×10^{15}	2.68×10^{15}
全群	5.68×10^{15}	5.69×10^{15}	5.55×10^{15}	5.16×10^{15}	5.02×10^{15}	4.57×10^{15}	3.92×10^{15}

表 3.13 MK-III 取替炉心 (ケ-ス2) の各列の最大中性子束 (サイクル末期)

集合体列 エネルギ群	第0列	第1列	第2列	第3列 内側炉心	第3列 外側炉心	第4列	第5列
1群	7.26×10^{14}	7.51×10^{14}	7.40×10^{14}	6.93×10^{14}	6.69×10^{14}	6.12×10^{14}	5.19×10^{14}
2群	1.41×10^{15}	1.41×10^{15}	1.38×10^{15}	1.28×10^{15}	1.24×10^{15}	1.14×10^{15}	9.61×10^{14}
3群	2.04×10^{15}	2.05×10^{15}	2.00×10^{15}	1.86×10^{15}	1.80×10^{15}	1.64×10^{15}	1.40×10^{15}
4群	1.37×10^{15}	1.36×10^{15}	1.33×10^{15}	1.23×10^{15}	1.21×10^{15}	1.10×10^{15}	9.55×10^{14}
5群	2.53×10^{14}	2.33×10^{14}	2.23×10^{14}	2.05×10^{14}	2.07×10^{14}	1.86×10^{14}	1.72×10^{14}
6群	1.96×10^{13}	1.68×10^{13}	1.58×10^{13}	1.49×10^{13}	1.57×10^{13}	1.47×10^{13}	1.93×10^{13}
7群	1.34×10^{10}	8.88×10^9	8.41×10^9	9.52×10^9	1.16×10^{10}	2.68×10^{10}	2.81×10^{11}
高速群 (E>0.1MeV)	3.98×10^{15}	4.01×10^{15}	3.92×10^{15}	3.66×10^{15}	3.54×10^{15}	3.23×10^{15}	2.74×10^{15}
全群	5.81×10^{15}	5.82×10^{15}	5.68×10^{15}	5.29×10^{15}	5.15×10^{15}	4.69×10^{15}	4.03×10^{15}

表 3.14 MK-III取替炉心(ケ-ス3)の各列の最大中性子束(サイクル初期)

集合体列 エネルギ群	第0列	第1列	第2列	第3列 内側炉心	第3列 外側炉心	第4列	第5列
1群	6.85×10^{14}	7.03×10^{14}	6.90×10^{14}	6.45×10^{14}	6.28×10^{14}	5.78×10^{14}	4.91×10^{14}
2群	1.33×10^{15}	1.33×10^{15}	1.30×10^{15}	1.21×10^{15}	1.17×10^{15}	1.08×10^{15}	9.12×10^{14}
3群	1.95×10^{15}	1.96×10^{15}	1.92×10^{15}	1.79×10^{15}	1.73×10^{15}	1.58×10^{15}	1.34×10^{15}
4群	1.34×10^{15}	1.34×10^{15}	1.30×10^{15}	1.22×10^{15}	1.19×10^{15}	1.08×10^{15}	9.37×10^{14}
5群	2.57×10^{14}	2.41×10^{14}	2.32×10^{14}	2.14×10^{14}	2.15×10^{14}	1.92×10^{14}	1.77×10^{14}
6群	2.17×10^{13}	1.93×10^{13}	1.84×10^{13}	1.76×10^{13}	1.83×10^{13}	1.67×10^{13}	2.13×10^{13}
7群	1.61×10^{10}	1.16×10^{10}	1.14×10^{10}	1.34×10^{10}	1.56×10^{10}	3.36×10^{10}	3.18×10^{11}
高速群 (E>0.1MeV)	3.78×10^{15}	3.80×10^{15}	3.72×10^{15}	3.46×10^{15}	3.37×10^{15}	3.08×10^{15}	2.62×10^{15}
全群	5.59×10^{15}	5.59×10^{15}	5.46×10^{15}	5.08×10^{15}	4.96×10^{15}	4.52×10^{15}	3.88×10^{15}

表 3.15 MK-III取替炉心(ケ-ス3)の各列の最大中性子束(サイクル末期)

集合体列 エネルギ群	第0列	第1列	第2列	第3列 内側炉心	第3列 外側炉心	第4列	第5列
1群	6.90×10^{14}	7.09×10^{14}	6.97×10^{14}	6.53×10^{14}	6.36×10^{14}	5.87×10^{14}	5.00×10^{14}
2群	1.35×10^{15}	1.35×10^{15}	1.32×10^{15}	1.23×10^{15}	1.19×10^{15}	1.10×10^{15}	9.32×10^{14}
3群	2.00×10^{15}	2.00×10^{15}	1.96×10^{15}	1.83×10^{15}	1.77×10^{15}	1.61×10^{15}	1.38×10^{15}
4群	1.38×10^{15}	1.38×10^{15}	1.34×10^{15}	1.25×10^{15}	1.23×10^{15}	1.11×10^{15}	9.65×10^{14}
5群	2.67×10^{14}	2.51×10^{14}	2.41×10^{14}	2.23×10^{14}	2.24×10^{14}	1.99×10^{14}	1.84×10^{14}
6群	2.30×10^{13}	2.04×10^{13}	1.94×10^{13}	1.85×10^{13}	1.92×10^{13}	1.75×10^{13}	2.22×10^{13}
7群	1.69×10^{10}	1.22×10^{10}	1.20×10^{10}	1.41×10^{10}	1.65×10^{10}	3.55×10^{10}	3.32×10^{11}
高速群 (E>0.1MeV)	3.85×10^{15}	3.87×10^{15}	3.78×10^{15}	3.53×10^{15}	3.43×10^{15}	3.14×10^{15}	2.68×10^{15}
全群	5.71×10^{15}	5.71×10^{15}	5.58×10^{15}	5.20×10^{15}	5.07×10^{15}	4.62×10^{15}	3.98×10^{15}

表 3.16 MK-III取替炉心(ケ-ス4)の各列の最大中性子束(サイクル初期)

集合体列 エネルギ群	第0列	第1列	第2列	第3列 内側炉心	第3列 外側炉心	第4列	第5列
1群	7.07×10^{14}	7.27×10^{14}	7.13×10^{14}	6.61×10^{14}	6.37×10^{14}	5.81×10^{14}	4.87×10^{14}
2群	1.37×10^{15}	1.36×10^{15}	1.33×10^{15}	1.23×10^{15}	1.19×10^{15}	1.08×10^{15}	9.09×10^{14}
3群	1.99×10^{15}	1.99×10^{15}	1.94×10^{15}	1.80×10^{15}	1.75×10^{15}	1.59×10^{15}	1.35×10^{15}
4群	1.35×10^{15}	1.35×10^{15}	1.32×10^{15}	1.22×10^{15}	1.20×10^{15}	1.08×10^{15}	9.43×10^{14}
5群	2.57×10^{14}	2.41×10^{14}	2.31×10^{14}	2.14×10^{14}	2.17×10^{14}	1.93×10^{14}	1.79×10^{14}
6群	2.16×10^{13}	1.90×10^{13}	1.81×10^{13}	1.74×10^{13}	1.83×10^{13}	1.69×10^{13}	2.16×10^{13}
7群	1.60×10^{10}	1.13×10^{10}	1.10×10^{10}	1.30×10^{10}	1.57×10^{10}	3.45×10^{10}	3.26×10^{11}
高速群 (E>0.1MeV)	3.87×10^{15}	3.89×10^{15}	3.80×10^{15}	3.52×10^{15}	3.40×10^{15}	3.10×10^{15}	2.61×10^{15}
全群	5.69×10^{15}	5.69×10^{15}	5.55×10^{15}	5.15×10^{15}	5.01×10^{15}	4.55×10^{15}	3.89×10^{15}

表 3.17 MK-III取替炉心(ケ-ス4)の各列の最大中性子束(サイクル末期)

集合体列 エネルギ群	第0列	第1列	第2列	第3列 内側炉心	第3列 外側炉心	第4列	第5列
1群	7.12×10^{14}	7.33×10^{14}	7.19×10^{14}	6.69×10^{14}	6.45×10^{14}	5.90×10^{14}	4.97×10^{14}
2群	1.38×10^{15}	1.38×10^{15}	1.35×10^{15}	1.25×10^{15}	1.21×10^{15}	1.10×10^{15}	9.28×10^{14}
3群	2.03×10^{15}	2.04×10^{15}	1.99×10^{15}	1.85×10^{15}	1.79×10^{15}	1.62×10^{15}	1.38×10^{15}
4群	1.39×10^{15}	1.39×10^{15}	1.35×10^{15}	1.26×10^{15}	1.24×10^{15}	1.12×10^{15}	9.71×10^{14}
5群	2.68×10^{14}	2.51×10^{14}	2.41×10^{14}	2.22×10^{14}	2.25×10^{14}	2.01×10^{14}	1.85×10^{14}
6群	2.28×10^{13}	2.01×10^{13}	1.91×10^{13}	1.82×10^{13}	1.92×10^{13}	1.77×10^{13}	2.25×10^{13}
7群	1.68×10^{10}	1.18×10^{10}	1.16×10^{10}	1.36×10^{10}	1.66×10^{10}	3.63×10^{10}	3.40×10^{11}
高速群 (E>0.1MeV)	3.93×10^{15}	3.95×10^{15}	3.86×10^{15}	3.58×10^{15}	3.47×10^{15}	3.16×10^{15}	2.67×10^{15}
全群	5.81×10^{15}	5.81×10^{15}	5.67×10^{15}	5.26×10^{15}	5.12×10^{15}	4.65×10^{15}	3.98×10^{15}

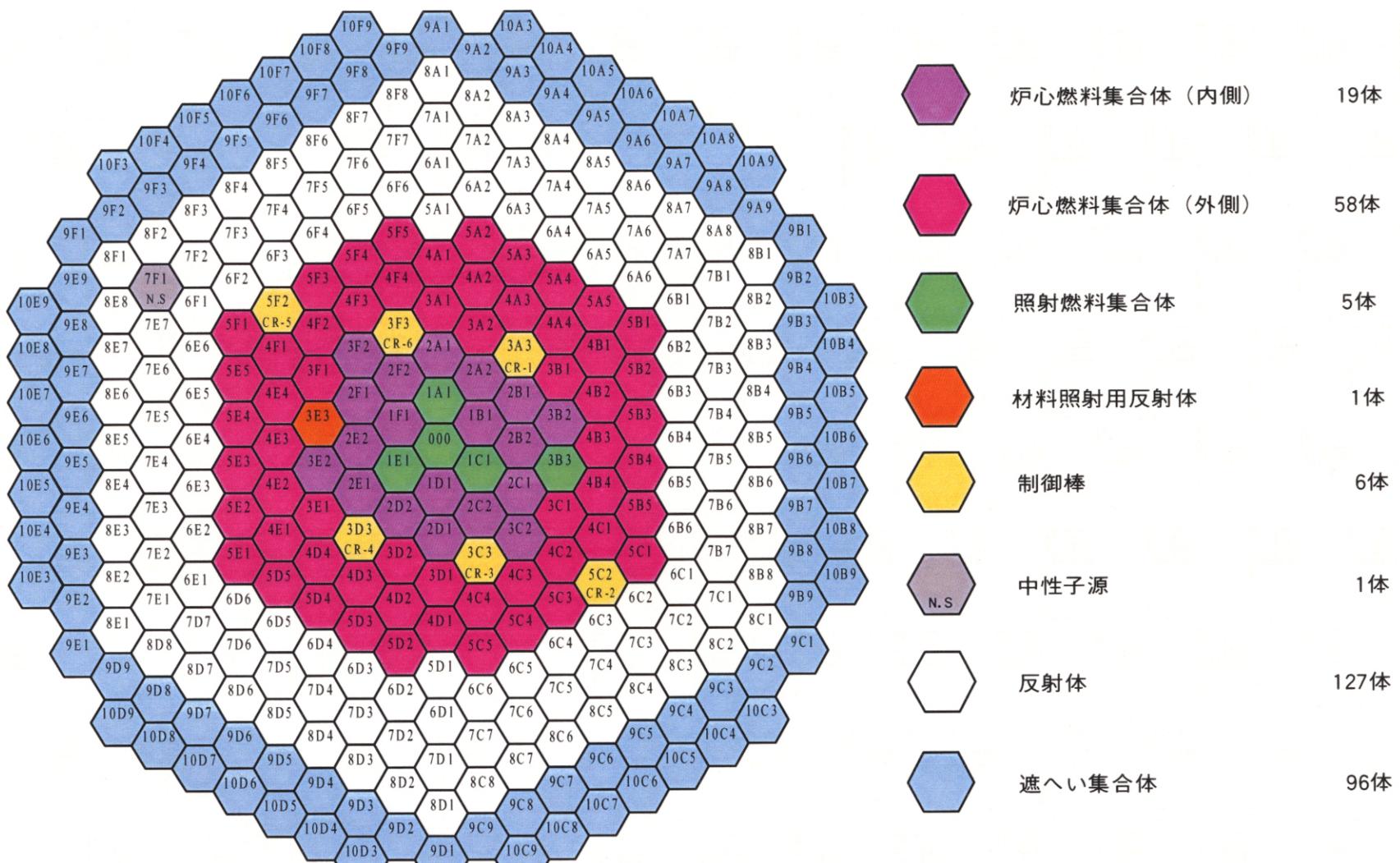


図 3.1 MK-III 標準平衡炉心構成

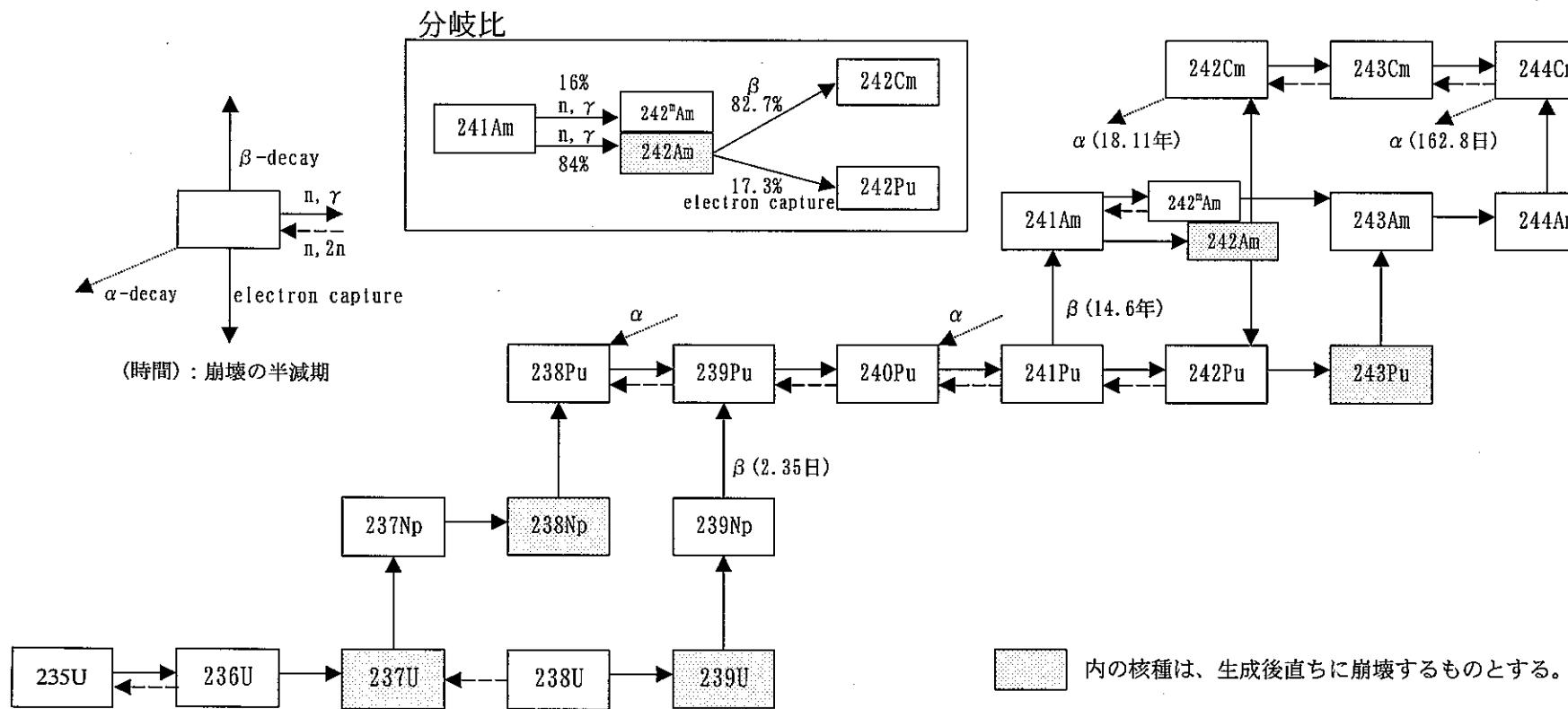


図 3.2 燃焼チェーン

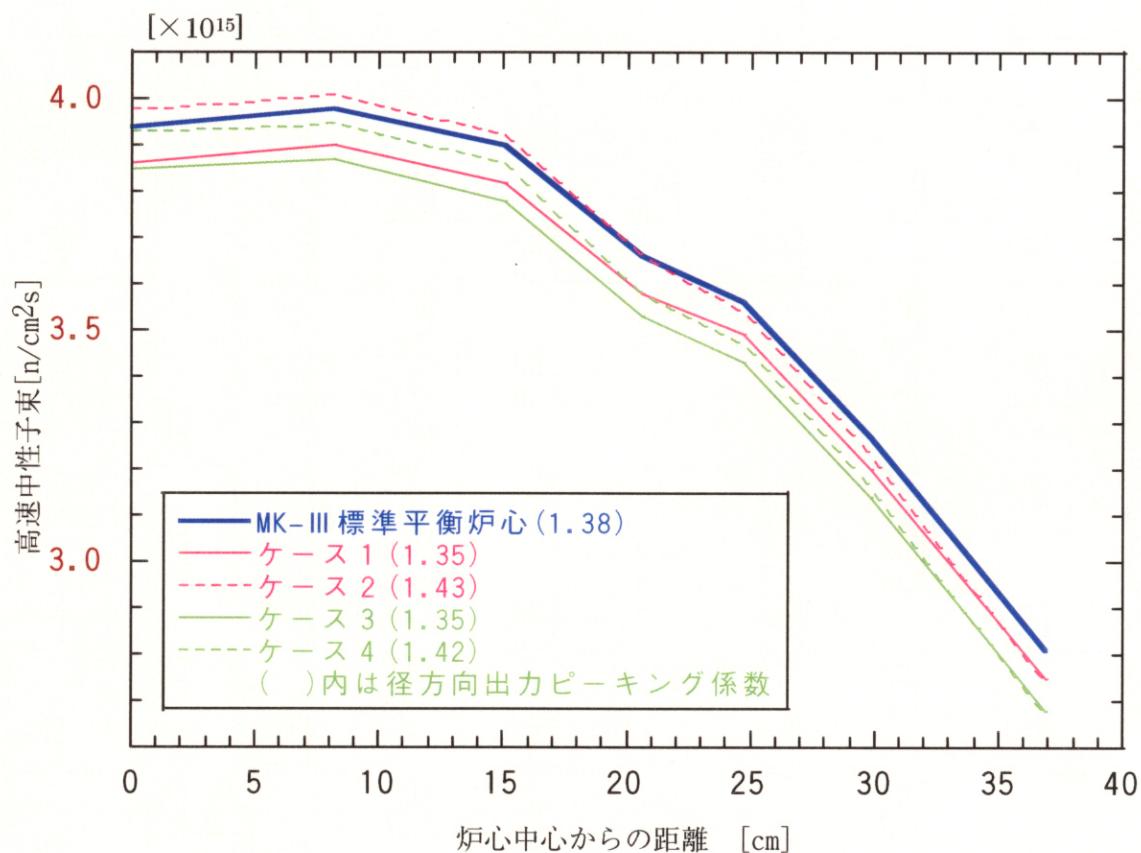


図 3.3 高速中性子束の径方向分布

4 MK-III取替炉心の核特性評価

第3章で設定した取替炉心のうち、線出力が厳しく、かつ、プルトニウム富化度が高く実効遅発中性子割合が小さくなるケ-ス2及び4について詳細な核特性を評価した。

4.1 反応度バランス

表4.1にMK-III標準平衡炉心及び取替炉心(ケ-ス2及び4)の反応度バランスを示す。

2次元RZ計算により求めた取替炉心の燃焼欠損反応度は、 $1.64\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス2)、 $1.62\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス4)となり、プルトニウム富化度の上昇に伴い、減少した。燃焼補償用反応度は、燃焼欠損反応度の計算値に10%の誤差を加えたものとし、 $1.80\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス2)、 $1.78\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス4)となった。運転余裕用反応度はMK-III標準平衡炉心と同じ $0.90\% \Delta k/kk'$ とした。温度欠損・出力欠損反応度から 100°C 等温状態から定格時までの温度補償用及び出力補償用反応度は $1.65\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス2)、 $1.62\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス4)となつた。

これらを合計して求めた 100°C 等温状態の最大過剰反応度は、 $4.35\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス2)、 $4.30\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス4)となり、MK-III標準平衡炉心に比べて2~4%小さい値となつた。

4.2 制御棒特性

4.2.1 全制御棒及びワンロッドスタック時の制御棒価値

2次元7群三角メッシュXY計算体系の直接計算から、制御棒全挿入時及びワンロッドスタック時の制御棒価値を求めた。計算結果を表4.2に示す。ワンロッドスタック時の制御棒価値の基準計算値は、 $8.33\% \Delta k/kk'$ (MK-III標準平衡炉心)、 $8.36\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス2)、 $8.53\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス4)となつた。

制御棒価値の評価にあたっては、MK-III標準平衡炉心の評価と同様にMK-II炉心の試験解析に基づく補正、 ^{10}B 燃焼効果及び設計余裕を考慮し、基準計算値に対して最小及び最大の評価値を与える補正係数としてそれぞれ0.676及び1.180を用いた。制御棒価値の最小値を表4.3に示す。ワンロッドスタック時の制御棒価値の最小評価値は $5.63\% \Delta k/kk'$ (MK-III標準平衡炉心)、 $5.65\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス2)、 $5.76\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス4)となり、表4.1に示す最大過剰反応度を十分に上回ることが確認された。

4.2.2 1本挿入時の制御棒価値

2次元7群三角メッシュXY計算体系の直接計算から、1本挿入時の制御棒価値を求めた。計算結果を表4.4に示す。最大の価値を持つ制御棒1本の価値の基準計算値は $2.24\% \Delta k/kk'$ (MK-III標準平衡炉心)、 $2.26\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス2)、 $2.31\% \Delta k/kk'$ (ケ-ス4)となり、燃料スタック長の増加に伴って大きな値となつた。

1本挿入時の制御棒価値の最大評価値を表4.5に示す。制御棒価値の評価にあたっては、4.2.1と同様に基準計算値に対して最小及び最大の評価値を与える補正係数と

してそれぞれ 0.676 及び 1.180 を用いた。最大の価値を持つ制御棒 1 本の価値の制御棒価値は $2.64\% \Delta k/kk'$ (MK-III 標準平衡炉心)、 $2.66\% \Delta k/kk'$ (ケス 2)、 $2.72\% \Delta k/kk'$ (ケス 4) となった。

4.2.3 最大反応度付加率

最大反応度付加率を表 4.6 に示す。全制御棒価値と最大の価値を持つ制御棒ワンド・スタック時の制御棒価値の差に、全制御棒の相対微分反応度と引抜き速度を乗じて最大反応度付加率を求めた。

燃料スタック長増大による制御棒特性への影響はわずかであるが、4.3.3 に後述する通り、 β_{eff} が低下するため、設置許可申請書添付書類 10 の解析に用いる最大反応度付加率は MK-III 標準平衡炉心の 4.26 c/s より大きく、ケス 2 で 4.65 c/s 、ケス 4 で 5.16 c/s となる。

4.3 反応度係数及び動特性

4.3.1 反応度係数の計算方法

18 群 2 次元 R Z 計算により平衡炉心初期・制御棒全引抜状態定格運転時の中性子束 ϕ と随伴中性子束 ϕ^* を計算し、重金属、酸素及び核分裂性生物の温度を定格時より 500°C 高い状態の断面積を用い、一次摂動計算によってドップラー係数を計算した。

原子数密度を変えた場合の一次摂動計算により燃料、構造材及び冷却材の密度係数を求めた。

18 群 2 次元 R Z 計算により制御棒全引抜状態の中性子束 ϕ と随伴中性子束 ϕ^* の計算を行い、これらとノーマル状態及びボイド状態のミクロ断面積を用い、摂動計算によってナトリウムボイド反応度を計算した。漏洩項の拡散係数の摂動はノーマル時拡散係数とボイド時の拡散係数の差で与えた。

$$\Delta D = D_{(\text{ボイド})} - D_{(\text{ノーマル})}$$

形状係数は炉心の軸方向及び径方向形状係数を 2 次元 R Z 計算の直接計算により求めた。

- ① 軸方向に炉心を膨張させる時は、炉心下端と制御棒下端との距離は一定として、炉心燃料を膨張させる。
- ② 径方向を膨張させる時は、制御棒及び特殊燃料を一様に炉心範囲のみ膨張させる。

以上の反応度係数より、温度係数及び出力係数を計算した。計算に用いた各部の温度を表 4.7 に示す。

4.3.2 反応度係数の計算結果

制御棒全引抜時のドップラー係数は $-1.94 \times 10^{-3} \Delta k/kk' / (\Delta T/T)$ (MK-III 標準平衡炉

心)、 $-2.06 \times 10^{-3} \Delta k/kk' / (\Delta T/T)$ (ケ-ス2)、 $-2.27 \times 10^{-3} \Delta k/kk' / (\Delta T/T)$ (ケ-ス4) となった。制御棒中途挿入時のドップラ-係数は $-1.71 \times 10^{-3} \Delta k/kk' / (\Delta T/T)$ (MK-III標準平衡炉心)、 $-1.82 \times 10^{-3} (\Delta k/kk' / (\Delta T/T))$ (ケ-ス2)、 $-2.00 \times 10^{-3} (\Delta k/kk' / (\Delta T/T))$ (ケ-ス4) となった。取替炉心のドップラ-係数は MK-III標準平衡炉心に比べて絶対値が大きな負の値となった。

MK-III標準平衡炉心及び取替炉心(ケ-ス2、4)のドップラ-係数、密度係数及び形状係数を表4.8~4.10に示す。

ナトリウムボイド反応度は燃料タック長の増加に伴い漏洩成分の減少により絶対値が小さくなつたが、集合体全体のナトリウムボイド反応度が正となる集合体はなかつた。制御棒全引抜時のナトリウムボイド反応度は、 $-1.89 \times 10^{-2} \Delta k/kk'$ (MK-III標準平衡炉心)、 $-1.52 \times 10^{-2} \Delta k/kk'$ (ケ-ス2)、 $-1.12 \times 10^{-2} \Delta k/kk'$ (ケ-ス4) となり、いずれも負の値となつた。

燃料密度係数は、MK-III標準平衡炉心の $0.525 \Delta k/kk' / (\Delta \rho/\rho)$ とほぼ同じで、ケ-ス2及び4ともに $0.526 \Delta k/kk' / (\Delta \rho/\rho)$ となつた。

軸方向形状係数は、燃料タック長の増加に伴つて小さくなり、 $0.241 \Delta k/kk' / (\Delta Z/Z)$ (MK-III標準平衡炉心)、 $0.215 \Delta k/kk' / (\Delta Z/Z)$ (ケ-ス2)、 $0.206 \Delta k/kk' / (\Delta Z/Z)$ (ケ-ス4) となつた。径方向形状係数は、MK-III標準平衡炉心とほぼ同じ($0.365 \Delta k/kk' / (\Delta r/r)$)で、 $0.364 \Delta k/kk' / (\Delta r/r)$ (ケ-ス2)、 $0.365 \Delta k/kk' / (\Delta r/r)$ (ケ-ス4) となつた。

MK-III標準平衡炉心及び取替炉心(ケ-ス2及び4)の温度係数及び出力係数を表4.11及び表4.12に示す。取替炉心出力係数及び温度係数は MK-III標準平衡炉心に比べて絶対値が大きな負の値となつた。

これらより、いずれの取替炉心も MK-III標準平衡炉心と同等の安全性を有していると考えられる。

4.3.3 動特性パラメータ

18群2次元RZ計算により計算された制御棒全引抜状態の中性子束 ϕ と随伴中性子束 ϕ^* 、ノーマル状態のミク断面積と遅発中性子データから摂動計算により、動特性パラメータを計算した。

遅発中性子データとして以下のものを用いた。また、対象核種は ^{235}U 、 ^{236}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Pu 、 ^{242}Pu をとした。

- ・遅発中性子発生率：表4.13
- ・崩壊定数：表4.14
- ・遅発中性子スペクトル：表4.15

動特性パラメータの計算結果を表 4.16 に示す。実効遅発中性子割合 β_{eff} はアルミニウム富化度の増加及びウラン濃縮度の減少により、MK-III 標準平衡炉心の 0.449% と比べて小さくなり、ケ-ス 2 が 0.406%、ケ-ス 4 が 0.359% となった。

4.4 燃焼度

各流量領域毎の集合体燃焼度及び要素最大燃焼度をそれぞれ表 4.17 及び表 4.18 に示す。MK-III 標準平衡炉心の集合体最大燃焼度は $7.92 \times 10^4 \text{ MWD/t}$ であったが、燃料スタック長の増加に伴い重金属量が増え、集合体最大燃焼度は低下し、ケ-ス 2 では $7.02 \times 10^4 \text{ MWD/t}$ 、ケ-ス 4 では $6.41 \times 10^4 \text{ MWD/t}$ となった。要素最大燃焼度も同様に低下し、MK-III 標準平衡炉心の $8.92 \times 10^4 \text{ MWD/t}$ から、 $7.91 \times 10^4 \text{ MWD/t}$ (ケ-ス 2)、 $7.20 \times 10^4 \text{ MWD/t}$ (ケ-ス 4) となった。

表 4.1 反応度バランス (% $\Delta k/kk'$)

		MK-III標準平衡炉心	ケ-ス2		ケ-ス4	
定格時の最大過剰反応度	燃焼補償	2.81	1.91	2.70	1.80	2.68
	運転余裕		0.90		0.90	
温度補償及び出力補償	100~250°C	1.67	0.58	1.65	0.55	0.53
	250~350°C		0.39		0.37	
	350°C~定格		0.70		0.73	
最大過剰反応度 100°C		4.48		4.35		4.30

表 4.2 全制御棒価値 (基準計算値) (% $\Delta k/kk'$)

制御棒挿入状態	MK-III標準 平衡炉心	ケ-ス2	ケ-ス4
制御棒全挿入	11.31	11.33	11.55
ワンロット [†] スタック			
(1)	8.88	8.89	9.06
(3)	8.48	8.50	8.67
(4)	8.78	8.79	8.96
(6)	8.33	8.36	8.53
(66)	10.41	10.46	10.67
(81)	10.31	10.36	10.58

表 4.3 制御棒価値の最小評価値 (% $\Delta k/kk'$)

制御棒挿入状態	MK-III標準 平衡炉心	ケ-ス2	ケ-ス4
制御棒全挿入	7.64	7.66	7.81
ワンロット [†] スタック			
(1)	6.00	6.01	6.12
(3)	5.73	5.75	5.86
(4)	5.94	5.94	6.06
(6)	5.63	5.65	5.76
(66)	7.04	7.07	7.22
(81)	6.97	7.01	7.15

表 4.4 1 本の制御棒価値 (基準計算値) (% $\Delta k/kk'$)

制御棒挿入状態	MK-III標準 平衡炉心	ケ-ス2	ケ-ス4
制御棒全挿入	11.31	11.33	11.55
1 本挿入			
(1)	2.05	2.08	2.13
(3)	2.15	2.17	2.22
(4)	2.13	2.15	2.20
(6)	2.24	2.26	2.31
(66)	0.75	0.74	0.75
(81)	0.81	0.80	0.81

表 4.5 1 本の制御棒価値の最大評価値 (% $\Delta k/kk'$)

制御棒挿入状態	MK-III標準 平衡炉心	ケ-ス2	ケ-ス4
制御棒全挿入	13.37	13.37	13.63
ワンロット・スタック			
(1)	2.42	2.45	2.51
(3)	2.53	2.56	2.62
(4)	2.51	2.54	2.60
(6)	2.64	2.66	2.72
(66)	0.89	0.87	0.88
(81)	0.96	0.94	0.95

表 4.6 最大反応度付加率

項目	MK-III標準 平衡炉心	ケ-ス2	ケ-ス4
全制御棒価値 (最大値) ($\Delta k/kk'$)	0.1335	0.1337	0.1363
ワンロット・スタック時 制御棒価値 (最大値) ($\Delta k/kk'$)	0.0983	0.0986	0.1006
最大価値の制御棒 の引抜き反応度 (最大値) ($\Delta k/kk'$)	0.0352	0.0351	0.0357
相対微分反応度 (/cm)	0.0251	0.0246	0.0237
引抜き速度 (cm/s)	0.217	0.217	0.217
実効遅発中性子割合 (\$/ $\Delta k/kk'$)	0.00449	0.00406	0.00359
最大反応度付加率 ($\Delta k/k/s$)	1.91×10^{-4}	1.87×10^{-4}	1.83×10^{-4}
最大反応度付加率 (φ/s)	4.26	4.61	5.11

表 4.7 溫度係数及び出力係数評価用温度 (°C)

炉心状態	組成	領域				
		炉心	径方向反射体	上部軸方向反射体	下部軸方向反射体	炉心支持板
140MW	燃料ペレット	1232	—	—	—	—
	被覆管	453	—	—	—	—
	ラッパ管構造材	413	400	517	350	350
	冷却材	433	400	517	350	350
100MW	燃料ペレット	955	—	—	—	—
	被覆管	423	—	—	—	—
	ラッパ管構造材	395	386	469	350	350
	冷却材	409	386	469	350	350
60MW	燃料ペレット	758	—	—	—	—
	被覆管	395	—	—	—	—
	ラッパ管構造材	377	371	421	350	350
	冷却材	386	371	421	350	350
高温零出力	全領域	350	350	350	350	350
温態待機	全領域	250	250	250	250	250

表 4.8 反応度特性 (MK-III 標準平衡炉心)

反応度特性		単位	内側炉心	外側炉心	炉心合計
ドップラ-係数		$\Delta k/kk' / (\Delta T/T)$			
制御棒全引抜き			-7.01×10^{-4}	-1.24×10^{-3}	-1.94×10^{-3}
制御棒中途挿入			-6.26×10^{-4}	-1.08×10^{-3}	-1.71×10^{-3}
Na ポット反応度		$\Delta k/kk'$	-5.08×10^{-3}	-1.38×10^{-2}	-1.89×10^{-2}
密度係数	燃料	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	1.91×10^{-1}	3.34×10^{-1}	5.25×10^{-1}
	構造材	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	-2.09×10^{-3}	1.36×10^{-2}	1.15×10^{-2}
	冷却材	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	4.08×10^{-3}	1.17×10^{-2}	1.58×10^{-2}
形状係数*	軸方向	$\Delta k/kk' / (\Delta z/z)$	---	---	2.41×10^{-1}
	径方向	$\Delta k/kk' / (\Delta r/r)$	---	---	3.65×10^{-1}

表 4.9 反応度特性 (ケ-ス2)

反応度特性		単位	内側炉心	外側炉心	炉心合計
ドップラ-係数		$\Delta k/kk' / (\Delta T/T)$			
制御棒全引抜き			-7.34×10^{-4}	-1.33×10^{-3}	-2.06×10^{-3}
制御棒中途挿入			-6.59×10^{-4}	-1.16×10^{-3}	-1.82×10^{-3}
Na ポット反応度		$\Delta k/kk'$	-3.55×10^{-3}	-1.14×10^{-2}	-1.50×10^{-2}
密度係数	燃料	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	2.04×10^{-1}	3.22×10^{-1}	5.26×10^{-1}
	構造材	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	-4.26×10^{-3}	1.09×10^{-2}	6.67×10^{-3}
	冷却材	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	2.79×10^{-3}	9.76×10^{-3}	1.26×10^{-2}
形状係数*	軸方向	$\Delta k/kk' / (\Delta z/z)$	---	---	2.15×10^{-1}
	径方向	$\Delta k/kk' / (\Delta r/r)$	---	---	3.64×10^{-1}

表 4.10 反応度特性 (ケ-ス4)

反応度特性		単位	内側炉心	外側炉心	炉心合計
ドップラ-係数		$\Delta k/kk' / (\Delta T/T)$			
制御棒全引抜き			-8.18×10^{-4}	-1.45×10^{-3}	-2.27×10^{-3}
制御棒中途挿入			-7.36×10^{-4}	-1.27×10^{-3}	-2.00×10^{-3}
Na ポット反応度		$\Delta k/kk'$	-1.65×10^{-3}	-9.57×10^{-3}	-1.12×10^{-2}
密度係数	燃料	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	2.07×10^{-1}	3.20×10^{-1}	5.26×10^{-1}
	構造材	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	-7.06×10^{-3}	8.53×10^{-3}	1.47×10^{-3}
	冷却材	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	1.19×10^{-3}	8.21×10^{-3}	9.40×10^{-3}
形状係数*	軸方向	$\Delta k/kk' / (\Delta z/z)$	---	---	2.06×10^{-1}
	径方向	$\Delta k/kk' / (\Delta r/r)$	---	---	3.65×10^{-1}

表 4.11 溫度係数 ($\times 1.0 \times 10^{-6} \Delta k/kk'/^{\circ}\text{C}$)

出力	項目	MK-III 標準炉心	ケ-ス2	ケ-ス4
140MW	燃料ペレット膨張	-3.79	-4.16	-4.29
	被覆管膨張	-0.96	-0.73	-0.51
	ラッパ管膨張	-2.13	-1.83	-1.59
	炉心支持板膨張	-13.15	-13.00	-12.91
	冷却材膨張	-9.02	-7.77	-6.19
	ドップラ-効果	-1.30	-1.37	-1.51
	合計	-30.35	-28.86	-27.00
100MW	燃料ペレット膨張	-3.41	-3.74	-3.86
	被覆管膨張	-0.95	-0.73	-0.51
	ラッパ管膨張	-2.12	-1.82	-1.59
	炉心支持板膨張	-13.15	-13.00	-12.91
	冷却材膨張	-8.97	-7.72	-6.16
	ドップラ-効果	-1.59	-1.68	-1.85
	合計	-30.20	-28.70	-26.86
60MW	燃料ペレット膨張	-3.15	-3.45	-3.55
	被覆管膨張	-0.94	-0.72	-0.50
	ラッパ管膨張	-2.11	-1.82	-1.58
	炉心支持板膨張	-13.15	-13.00	-12.91
	冷却材膨張	-8.92	-7.68	-6.13
	ドップラ-効果	-1.89	-2.00	-2.20
	合計	-30.17	-28.67	-26.87
350°C	燃料ペレット膨張	-2.60	-2.86	-2.94
	被覆管膨張	-0.94	-0.72	-0.50
	ラッパ管膨張	-2.10	-1.81	-1.57
	炉心支持板膨張	-13.15	-13.00	-12.91
	冷却材膨張	-8.84	-7.62	-6.08
	ドップラ-効果	-3.13	-3.30	-3.64
	合計	-30.76	-29.30	-27.64
250°C	燃料ペレット膨張	-2.47	-2.71	-2.79
	被覆管膨張	-0.92	-0.70	-0.49
	ラッパ管膨張	-2.05	-1.77	-1.54
	炉心支持板膨張	-12.88	-12.73	-12.64
	冷却材膨張	-8.55	-7.37	-5.88
	ドップラ-効果	-3.73	-3.93	-4.34
	合計	-30.61	-29.22	-27.68

表 4.12 出力係数 ($\times 1.0 \times 10^{-5} \Delta k/kk'/MW$)

出力	項目	MK-III標準 平衡炉心	ケ-ス2	ケ-ス4
140MW	燃料ペレット膨張	-2.63	-2.88	-2.97
	被覆管膨張	-0.07	-0.06	-0.04
	ラッパ管膨張	-0.12	-0.10	-0.08
	炉心支持板膨張			
	冷却材膨張	-0.43	-0.35	-0.27
	ドップラ-効果	-0.90	-0.95	-1.05
	合計	-4.15	-4.33	-4.41
100MW	燃料ペレット膨張	-2.02	-2.22	-2.29
	被覆管膨張	-0.07	-0.05	-0.04
	ラッパ管膨張	-0.12	-0.10	-0.08
	炉心支持板膨張			
	冷却材膨張	-0.43	-0.34	-0.27
	ドップラ-効果	-0.94	-0.99	-1.10
	合計	-3.57	-3.71	-3.77
60MW	燃料ペレット膨張	-1.90	-2.09	-2.15
	被覆管膨張	-0.07	-0.05	-0.04
	ラッパ管膨張	-0.11	-0.10	-0.08
	炉心支持板膨張			
	冷却材膨張	-0.42	-0.34	-0.27
	ドップラ-効果	-1.15	-1.21	-1.33
	合計	-3.66	-3.79	-3.87
~1MW	燃料ペレット膨張	-1.77	-1.94	-2.00
	被覆管膨張	-0.07	-0.05	-0.04
	ラッパ管膨張	-0.11	-0.09	-0.08
	炉心支持板膨張			
	冷却材膨張	-0.42	-0.34	-0.26
	ドップラ-効果	-2.13	-2.25	-2.48
	合計	-4.50	-4.68	-4.86

表 4.13 遅発中性子発生率

核種	U235	U238	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242	Am241
生成率	0.01673	0.0439	0.0079	0.0063	0.0095	0.0152	0.0221	0.0051
遅発中性子グループ								
1	0.038	0.013	0.0377	0.038	0.028	0.01	0.01	0.0355
2	0.213	0.137	0.239	0.28	0.273	0.229	0.229	0.254
3	0.188	0.162	0.1577	0.216	0.192	0.173	0.173	0.1563
4	0.407	0.388	0.3562	0.328	0.35	0.39	0.39	0.3364
5	0.128	0.225	0.159	0.103	0.128	0.182	0.182	0.1724

データの出典

U235, U238, Pu239 : R. J. Tuttle, "Delayed-Neutron Yields in Nuclear Fission",
 Pu240, Pu241, Pu242 : Consultant's Meeting on Delayed Neutron Properties, IAEA,
 Vienna 26-30 March 1979
 Pu238, Am241 : M. C. Brady and T. R. England, "Delayed Neutron Data and Group
 Parameters for 43 Fissioning Systems", N. S. E., 103, 129-149 (1989)

表 4.14 崩壊定数

核種	U235	U238	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242	Am241
遅発中性子グループ								
1	0.0127	0.0132	0.0133	0.0129	0.0129	0.0128	0.0128	0.0133
2	0.0317	0.0321	0.0312	0.0311	0.0313	0.0299	0.0299	0.0308
3	0.115	0.139	0.1162	0.134	0.135	0.124	0.124	0.113
4	0.311	0.358	0.2888	0.331	0.333	0.352	0.352	0.2868
5	1.4	1.41	0.8561	1.26	1.36	1.61	1.61	0.8654
6	3.87	4.02	2.7138	3.21	4.04	3.47	3.47	2.643

データの出典

U235, U238, Pu239 : R. J. Tuttle, "Delayed-Neutron Yields in Nuclear Fission",
 Pu240, Pu241, Pu242 Consultant's Meeting on Delayed Neutron Properties, IAEA,
 Vienna 26-30 March 1979
 Pu238, Am241 : M. C. Brady and T. R. England, "Delayed Neutron Data and Group
 Parameters for 43 Fissioning Systems", N.S.E., 103, 129-149 (1989)

表 4.15 遅発中性子スペクトル

核種	U235	U238	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242	Am241
遅発中性子グループ								
4	0.0201	0.0205	0.0184	0.0184	0.0184	0.0184	0.0184	0.0184
5	0.1033	0.0952	0.1021	0.1021	0.1021	0.1021	0.1021	0.1021
6	0.3571	0.3506	0.3570	0.3570	0.3570	0.3570	0.3570	0.3570
7	0.3273	0.3275	0.3342	0.3342	0.3342	0.3342	0.3342	0.3342
8	0.1763	0.1900	0.1692	0.1692	0.1692	0.1692	0.1692	0.1692
9	0.0159	0.0162	0.0191	0.0191	0.0191	0.0191	0.0191	0.0191

データの出典

U235, U238, Pu238, Pu239 : R. J. Tuttle, "Delayed-Neutron Yields in Nuclear Fission",
 Pu240, Pu241, Pu242 : Consultant's Meeting on Delayed Neutron Properties, IAEA,
 Vienna 26-30 March 1979
 Am241 : Pu に同じ。

表 4.16 動特性パラメータ

	MK-III標準 平衡炉心	ケ-ス2	ケ-ス4
実効遅発中性子割合	β_{eff}	4.49×10^{-3}	4.06×10^{-3}
	β_1	1.32×10^{-4}	1.09×10^{-4}
	β_2	9.61×10^{-4}	8.80×10^{-4}
	β_3	8.39×10^{-4}	7.58×10^{-4}
	β_4	1.71×10^{-3}	1.53×10^{-3}
	β_5	6.71×10^{-4}	5.69×10^{-4}
	β_6	1.72×10^{-4}	1.60×10^{-4}
遅発中性子崩壊定数 [sec ⁻¹]	λ_1	1.28×10^{-2}	1.29×10^{-2}
	λ_2	3.14×10^{-2}	3.12×10^{-2}
	λ_3	1.26×10^{-1}	1.28×10^{-1}
	λ_4	3.30×10^{-1}	3.35×10^{-1}
	λ_5	1.40	1.42
	λ_6	3.79	3.77
即発中性子寿命 [$\times 10^{-6}$ sec]	lp	0.312	0.309
逆時間反応度 [%Δk/kk']	Ih	1.47×10^{-5}	1.31×10^{-5}
			1.14×10^{-5}

表 4.17 各列の集合体最大燃焼度

	列	MK-III標準 平衡炉心	ケ-ス2	ケ-ス4
内側炉心	1	6.47×10^4	6.13×10^4	5.58×10^4
	2	7.43×10^4	7.03×10^4	6.40×10^4
	3	6.92×10^4	6.51×10^4	5.91×10^4
外側炉心	3	7.26×10^4	6.49×10^4	5.93×10^4
	4	7.92×10^4	7.02×10^4	6.41×10^4
	5	7.87×10^4	6.94×10^4	6.29×10^4

表 4.18 各列の要素最大燃焼度

	列	MK-III 標準炉心	ケ-ス2	ケ-ス4
内側炉心	1	6.53×10^4	6.20×10^4	5.65×10^4
	2	7.68×10^4	7.29×10^4	6.65×10^4
	3	7.32×10^4	6.92×10^4	6.29×10^4
外側炉心	3	7.70×10^4	6.91×10^4	6.34×10^4
	4	8.68×10^4	7.69×10^4	7.04×10^4
	5	8.92×10^4	7.91×10^4	7.20×10^4

5 MK-III取替炉心の熱特性評価

第3章で検討した4ケースの取替炉心について熱特性を評価した。

5.1 热設計基準値の設定

「常陽」の設置変更許可申請書では、本文で炉心燃料のプルトニウム富化度を30%以下に制限している。熱設計基準値については、プルトニウム再分布を考慮してプルトニウム富化度を最大40%、O/M比を1.90とし、Aitken&Evanceの報告に基づき、本仕様のMOX燃料の融点の下限値を2,650°Cとし、これを熱設計基準値としている。ケース1～4の熱設計基準値を設定するにあたり、プルトニウム再分布の条件は現行と同じとし、プルトニウム富化度は10%増加(ケース1, 2:45%、ケース3, 4:50%)、O/M比1.90とした。

MOX燃料融点のプルトニウム富化度依存性に関する評価結果⁽⁴⁾より、プルトニウム富化度を40%から45%、50%とした時の融点の降下は、それぞれ約25°C、45°Cであるため、熱設計基準値は、現行の2,650°Cに対し、ケース1, 2で2,625°C、ケース3, 4で2,605°Cとする。

5.2 热特性評価

今回、ケース1～4について、現行の設計計算結果における冷却材、被覆管内・外面及び燃料表面温度等を初期値として、各部の温度上昇量(ΔT)を変更前後の線出力の比で補正し、燃料温度を概算した。ここで、工学的安全係数処理、燃料表面温度を境界とした燃料最高温度及び組織変化計算は、現行の設計計算と同じとし、現在、MOX燃料の熱伝導度に関しては、プルトニウム富化度30%以下のデータしか公開されていないことから^(5, 6)、燃料最高温度への影響が大きい熱伝導度には現行の評価式を用いた。結果を表5.1に示す。これより燃料最高温度は、燃料長增加に伴う線出力低下により低下し、プルトニウム富化度増加に伴う融点の低下を考慮した熱設計基準値を下回り、これを満足する見通しである。高プルトニウム富化度燃料の熱設計に使用する熱伝導度については、R&Dの展開によっては不確かさ幅を大きくとる必要があることから、ケース2で行った運用(内側炉心と外側炉心の最大線出力をバランスせず、臨界性を高める)が制限される可能性がある。そのため、今後、許認可上、内側炉心と外側炉心で熱設計基準値を変える等の方策も検討することとする。

表 5.1 热特性評価のまとめ

		MK-III標準 平衡炉心	ケ-ス1	ケ-ス2	ケ-ス3	ケ-ス4
炉心高さ	(cm)	50	55	同左	60	同左
プロトニウムフィッサイル率	(w/o)	71.0	66.9	63.1	66.9	63.1
プロトニウム富化度 (w/o)	内側炉心	23.0	25.3	29.7	31.4	34.3
	外側炉心	28.8	33.6	34.0	36.3	37.0
最大線出力 (W/cm)	内側炉心	414	382	403	354	374
	外側炉心	413	382	380	356	355
設計用線出力	(W/cm)	420	390	410	360	380
熱設計基準値 (℃)	申請書記載値	2,650				
	案		2,625	2,625	2,605	2,605
過出力時 燃料最高温度 ホットスポット(℃)	申請書記載値	2,647				
	簡易計算 結果		2,514	2,604	2,377	2,473

6 おわりに

回収ウランペースの MOX 粉末を使用した「常陽」 MK-III 取替炉心の核設計及び熱設計の成立性について検討した。

ウラン濃縮度約 20% の濃縮ウランを使用した場合、プルトニウム富化度の上限を 34%、炉心高さ 55cm で成立解が得られ、5% 濃縮の軽水炉用ウランを使用した場合、プルトニウム富化度の上限目標値を 37% とし、炉心高さ 60cm とすることにより、成立解が得られる見通しを得た。燃料スタック長増大による最大中性子束の低下が懸念されたが、プルトニウム富化度上昇による効果に相殺され、いずれの取替炉心においても MK-III 標準平衡炉心と同等となった。

反応度特性は制御棒価値、トップラ-係数、出力係数は絶対値が大きくなり、ナトリウム・イト反応度は絶対値が小さくなるものの負の値となった。これらより、いずれの取替炉心も MK-III 標準平衡炉心と同等の安全性を有していると考えられる。

燃料最高温度は、スタック長上昇に伴う線出力低下による燃料温度低減が大きく、プルトニウム富化度上昇に伴う融点の低下と比較し、熱設計基準値を満足する見通しを得た。

今後、プルトニウム富化度 30% 以上の熱伝導率等の物性値の取得及び設計への適用性の評価を行い、この物性値に基づく詳細な熱設計、安全解析を行っていく予定である。

参考文献

- (1) A. Yoshida, S. Yogo, "Upgrading Program of the Experimental Fast Reactor Joyo", *Proc. of Ninth International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-9)*, (2001)
- (2) 安藤良平, 高野秀機, “使用済軽水炉燃料の核種生成評価”, JAERI-Research 99-004, (1999)
- (3) 大洗工学センター 原子炉設置変更許可申請書(高速実験炉設置変更) (その 15まで)
- (4) 石井徹哉, 他：“ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料の融点評価”, PNC TN9410 97-075, (1997)
- (5) 井上賢記, 他：“高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料の熱伝導特性評価－照射初期用熱伝導度式の作成：その 1－”, PNC TN9410 98-014, (1997)
- (6) 井上賢記, 他：“高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料の熱伝導特性評価－照射初期用熱伝導度式の作成：その 1－”, PNC TN9400 98-005, (1998)