



照射性能向上のための MK-III 炉心の設計

吉田 昌宏 青山 卓史

大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部

Design Works for the "JOYO" MK-III Core from a Viewpoint of Improving the Irradiation Capability

Akihiro YOSHIDA Takafumi AOYAMA Yukimoto MAEDA

Experimental Reactor Division, Irradiation Center, O-arai Engineering Center

炉心の高中性子束化，照射スペース拡大等のMK-III計画の目的を踏まえて設計目標を設定し，「常陽」MK-III炉心の一連の設計を行った。核設計の結果，最大高速中性子束をMK-II炉心の1.3倍とし，過剰反応度，炉停止余裕等の設計目標を満足する炉心・燃料仕様を定めた。

熱設計では，炉心の2領域化による出力平坦化に対応した冷却材流量調節機構の仕様を定め，被覆管最高温度，燃料最高温度等が制限値を満足することを確認した。

また，遮蔽設計により，炉内貯蔵ラック位置の燃料の発熱量を目標値以下に低減できる遮蔽集合体の仕様を設定した。

以上により，MK-III炉心が所定の照射性能を有するとともに，原子炉施設としての安全性が確保されていることを確認した。

Whole design works of the JOYO MK-III upgraded core was carried out. Design goals were selected based on the objectives of MK-III program such as increasing a fast neutron flux and an extension of the irradiation space. As the result of the neutronics design, maximum fast neutron flux was increased by a factor of 1.3, and the excess reactivity and the shut down margin satisfied design goals. The specification of the coolant flow control system was determined based on the thermo-hydraulics calculations, and it was shown that the maximum cladding temperature and the maximum fuel temperature satisfied their design criteria. The specification of shielding subassembly that reduces a heat generation of spent fuel at in-vessel fuel storage to the sufficient level was selected. As a result, it was confirmed that the MK-III core shows expected core performance along with the integrity of the whole core as a nuclear facility.

キーワード

「常陽」，MK-III計画，照射性能，炉心設計，核計算，熱計算，遮蔽計算，高速中性子束，冷却材流量調節機構，炉内燃料貯蔵

JOYO, MK-III Program, Irradiation Capability, Core Design, Nuclear Characteristics Calculation, Thermo-Hydraulics Calculation, Shielding Calculation, Fast Neutron Flux, Coolant Flow Allocation System, In-Vessel Fuel Storage



吉田 昌宏

技術課
副主任技術員
「常陽」の許認可，
MK-III性能試験等
に関する業務に従
事



青山 卓史

技術課
課長代理
「常陽」の炉心管理，ドシ
メトリー，燃料破損検出
等に係る試験研究及び
MK-III性能試験に従事
原子炉主任技術者
核燃料取扱主任者
第一種放射線取扱主任者

1. はじめに

炉心の高中性子束化及び照射スペース拡大の観点から選定された基本仕様に基づき、設計用の標準炉心を設定して、核熱特性、遮蔽特性等を評価し、一連の炉心設計を行った。本作業を通じ、MK- 炉心仕様の詳細化を図るとともに総合的な設計成立性を確認した。

2. 設計方針

設計成立性のある炉心を構築するとともに、MK- 炉心として期待される諸性能を満たすよう、以下の方針に基づき炉心を設計した。

- (1) 中性子束分布：最大高速中性子束をMK- 炉心の約1.3倍とするとともに、出力平坦化を図ることにより、MK- 炉心と比較して空間的にも高中性子束領域を拡大する。
- (2) 過剰反応度：MK- 炉心より多くの照射試験用集合体が装荷される炉心構成で、平衡炉心運転サイクル末期（以下、平衡末期）において、MK- 炉心と同程度の過剰反応度を有することとする。あわせて、後述(3)の炉停止余裕を確保できるよう、100における過剰反応度を核的制限値として設定する。なお、MK- 炉心と同様に計装のない照射試験用集合体（照射燃料集合体と燃料物質を含まない材料照射用反射体の2種類がある）は、照射目的に合わせて炉内の任意の位置に装荷できることとする。
- (3) 炉停止余裕：照射スペースの拡大及び回転ブラグ貫通孔の計測線付照射試験用集合体への利用拡大等の目的から制御棒配置を変更する。この時にあっても、ワンロッドスタック時の炉停止余裕を100で1% k/kk' 以上確保する。
- (4) 反応度係数等：以下の反応度係数、ナトリウムボイド反応度は負とする。
 - ドップラ係数
 - ナトリウムボイド反応度
 - 燃料温度係数
 - 構造材温度係数
 - 冷却材温度係数
 - 炉心支持板温度係数
- (5) 熱的制限値：炉心燃料要素の温度制限については、Pu 富化度 ($Pu/(Pu + U)$) の上限を30wt.%としていることから、Pu 再分布を考慮し、Pu 富化度40wt.%の混合酸化物燃料の熔融温度を基準とする。これに安全余裕等を考慮して燃料

最高温度を2,650とした。これを基に、定格出力時の熱的制限値を設定する。被覆管最高温度は、運転時の異常な過渡変化時については、被覆管の破損を防止するため、急速過熱パースト試験結果を踏まえて830とし、定格出力時の熱的制限値を675とした。

- (6) 炉心領域：炉心領域は、313からなる炉心構成要素のうち、中心を第0列として、第5列までとする。内側燃料集合体は第0～3列に最大は25体、外側燃料集合体は第3～5列に最大60体装荷できるものとし、前述の核的制限値、熱的制限値を満足するよう、最大85体までの範囲で体数を調整する。
- (7) 燃料交換方式：燃料交換方式は、基本的にMK- 炉心の方式を踏襲する。炉心燃料集合体の交換計画は、運転サイクル毎の炉内の出力分布の変化が小さく、一様かつ高い取出平均燃焼度を達成することを目標として策定する。交換は、MK- 炉心と同様に可変バッチ分散方式（炉心第0, 1, 2, 3, 4, 5列についてそれぞれ5, 5, 6, 6, 7, 8バッチ）で行う。これと最大装荷体数より、1運転サイクル当たりの燃料交換体数は約12体とする。
- (8) 熱特性：1次冷却系冷却材流量の増大、炉内出力分布の平坦化、遮蔽集合体の導入等に伴い、上記(6)の熱的制限値を満足する冷却材流量配分が得られるよう、炉心支持板連結管と炉心燃料集合体のエントランスノズル部からなる冷却材流量調節機構（以下、流調機構）の改造仕様を策定する。改造にあたり、キャビテーション等が流調機構の健全性に影響を与えない構造とする。
- (9) 炭化ホウ素 (B_4C) を装填した遮蔽集合体を導入することにより、炉心から漏えいしてくる中性子を遮蔽して炉内燃料貯蔵ラックにおける燃料の核分裂反応による発熱を低減し、燃料移送用ポット内の自然対流で冷却できるようにする。

3. 計算条件・計算手法

MK- 炉心及び移行炉心の核熱流力設計には、基本的にMK- 炉心と同一の手法を用いることとし、適宜最新の知見を反映した。

3.1 核特性

群定数には、MK- の炉心設計に使用した

MICS5 3¹⁾に替え、JENDL-2²⁾を基に作成された高速炉用群定数セットJFS-3-J2³⁾(70群)を用いた。JFS-3-J2を計算コードODDBURN¹⁾の1次元拡散計算による領域毎の中性子束を用いて7群または18群に縮約した。

計算では、2次元RZモデルを用いた計算コード2DBURN¹⁾の7群拡散計算と2次元XY 3角メッシュモデルを用いた計算コードTRIANGLE¹⁾(1集合体6分割)の7群拡散計算の組み合わせを基準とし、また、3次元Hex-ZモデルによるCITATIONによる計算も実施した。基準計算の計算フローを図1に示す。ドップラ係数等の反応度係数計算は、PERT-DFBR¹⁾の一次摂動計算(18群)により行った。

上記の手法を用いた場合のMK-性能試験⁴⁾及びSEFOR炉の解析を行い、実測値との比較から過剰反応度、出力分布、制御棒価値及びドップラ係数の計算精度を確認し、核設計に反映させた。

3.2 熱特性

熱設計では、まず、核計算で評価した出力分布とサブチャンネル計算結果から、炉心第0~5列に装荷される炉心燃料集合体の必要冷却材流量を概算し、次に、「常陽」の流調機構の改造検討を行った。

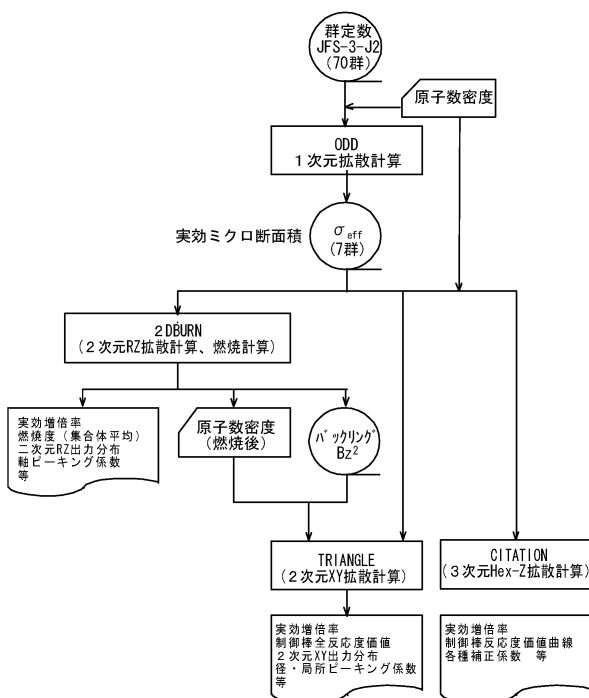


図1 核設計用基準計算フロー図

まず、「常陽」の流調機構を部分的に模擬したアクリル試験体を用いた水中試験を実施した。これより、エントランスノズル部と連結管の間隙部の冷却材の分岐、合流状況等を可視下で把握するとともに圧力損失測定を行った。その結果を踏まえて汎用流量配分計算コードGENERAL⁵⁾を整備し、エントランスノズル部のオリフィス仕様を変更した場合の流調機構各部の圧力損失を計算できるようにした。次に、上記の方法で策定されたMK-用オリフィス仕様を有する流調機構模擬体を製作し、水中及びナトリウム中試験を実施した。これより、圧力損失係数を測定するとともに、キャビテーションの発生状況を確認し、燃料集合体バンドル部及び流調機構の構造健全性への影響を評価した。また、上記試験で測定した炉内各列の圧力損失係数を用いて炉内冷却材流量配分計算を行った。この結果と核計算による出力分布を入力として、サブチャンネル計算を行い、各列の燃料集合体の定格出力時の被覆管温度と過出力時の冷却材温度、燃料温度等を工学的安全係数も考慮して評価した。

3.3 遮蔽特性

遮蔽計算は、日米共同大型遮蔽実験研究計画⁶⁾(JASPER計画)の成果を取り入れ、前述の核計算と同じくJENDL-2を基に作成されたJSDJ2を群定数とし、2次元Sn輸送計算コードDOT3 5⁷⁾を用いて行った。計算のフローを図2に示す。モデル化の範囲は、径方向:炉心中心~原子炉容器外側、軸方向:連結管領域~回転プラグ下部の2次元RZ体系を基準とした。

遮蔽集合体の設計では、まずANISN⁸⁾コードによる1次元輸送計算により、設計目標を満足する仕様(B₄Cの¹⁰B濃縮度、実効体積比:幾何学的体積比にB₄C充填率を乗じたもの)をサーベイした。その結果を基にDOT3 5コードの2次元RZ計算で炉内燃料貯蔵ラック位置の中性子束を求め、燃料の発熱量を評価した。また、炉内燃料貯蔵ラックは、炉心外周に30体離散化した状態で配置されているが、隣接ラックに燃料が貯蔵されている場合、その中性子増倍・吸収効果が発熱量に影響する。そこで、炉心水平面をモデル化した2次元XY計算を実施し、貯蔵ラックの燃料配置パターン効果を評価した。燃料装填時の燃料移送用ポット内の自然対流と各部温度の計算には、単相多次元熱流動解析コードAQUA⁹⁾を使用した。

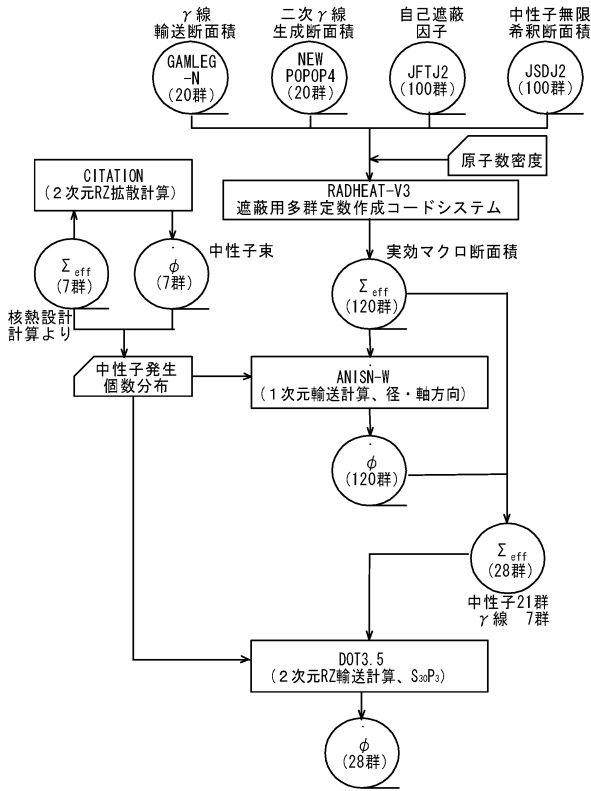


図2 遮蔽設計用基準計算フロー図

4. 設計結果¹⁰⁾

MK- 炉心の核熱計算，遮蔽計算等を実施し，炉心設計を行った。設計作業を通じて詳細化を図ったMK- 炉心の主要仕様を表1に示す。

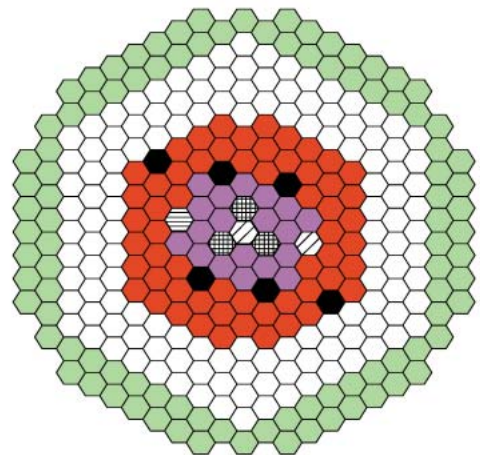
4.1 標準炉心構成

MK- 炉心における炉心燃料集合体の最大体数は，内側炉心25体，外側炉心60体である。照射試験用集合体を装荷する場合は炉心燃料集合体と置換する。標準炉心は，照射スペース拡大を考慮し，MK- 炉心の照射実績より多い照射試験用集合体を配置した構成とした。具体的には，第0，1列に照射燃料集合体4体，第3列に照射燃料集合体と燃料物質を全く含まない材料照射用反射体をそれぞれ1体装荷した。ここで，第3列の装荷位置は，計測線付集合体の装荷を考慮し，制御棒を移設した後の位置とした。また，設計上，炉心燃料集合体数が少ない方が燃料温度を保守側に評価するので，炉心第5列（最外周）の炉心燃料集合体2体を内側反射体とした。以上により，標準炉心は，内側炉心燃料集合体19体，外側炉心燃料集合体58体とした。標準炉心の構成を図3に示す。

標準炉心の2次元RZ計算体系図を図4に示す。

表1 MK- 炉心の主要目

項目	仕様
原子炉熱出力	140MWt
1次冷却材流量	2,680t/h
原子炉入口温度	350
原子炉出口温度	500
炉心高さ	500mm(内側,外側共通)
炉内燃料装荷体数	内側最大25体,外側最大60体
ラッパ管外対面間距離	78.5mm
集合体配列ピッチ	81.5mm
燃料材	プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料
被覆管外径/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23.0wt.%,外側28.8wt.%
ウラン濃縮度	18wt.%
ペレット密度(理論密度比)	94%T.D.
ピン本数/集合体	127
制御要素材	B ₄ C
制御要素 ¹⁰ B濃縮度	90%
B ₄ Cペレット外径	16.3mm
ペレット密度(理論密度比)	90%T.D.
制御材ペレットスタック長	650mm
要素本数/集合体	7
遮蔽要素材	B ₄ C
遮蔽要素 ¹⁰ B濃縮度	45%
ペレット密度(理論密度比)	92%T.D.
被覆管外径/内径	25.6/22.2mm
B ₄ Cペレット外径	20.5mm
遮蔽材ペレットスタック長	1,000mm
要素本数/集合体	7



- 内側炉心燃料集合体 (19体)
- 外側炉心燃料集合体 (58体)
- 反射対 (128体)
- 遮蔽集合体 (96体)
- 制御棒 (6体)
- 照射試験用集合体 (2体) (B型照射燃料集合体)
- 照射試験用集合体 (3体) (C型照射燃料集合体)
- 照射試験用集合体 (1体) (材料照射用反射体)

図3 MK- 標準平衡炉心構成*

*)各集合体の最大装荷体数を以下に示す。

- 燃料集合体の最大装荷対数: 85体
- 照射試験用集合体の最大装荷対数: 21体
- 内側燃料集合体: 25体
- 外側燃料集合体: 60体
- A型照射燃料集合体: 7体
- B型照射燃料集合体: 7体
- C型照射燃料集合体: 7体

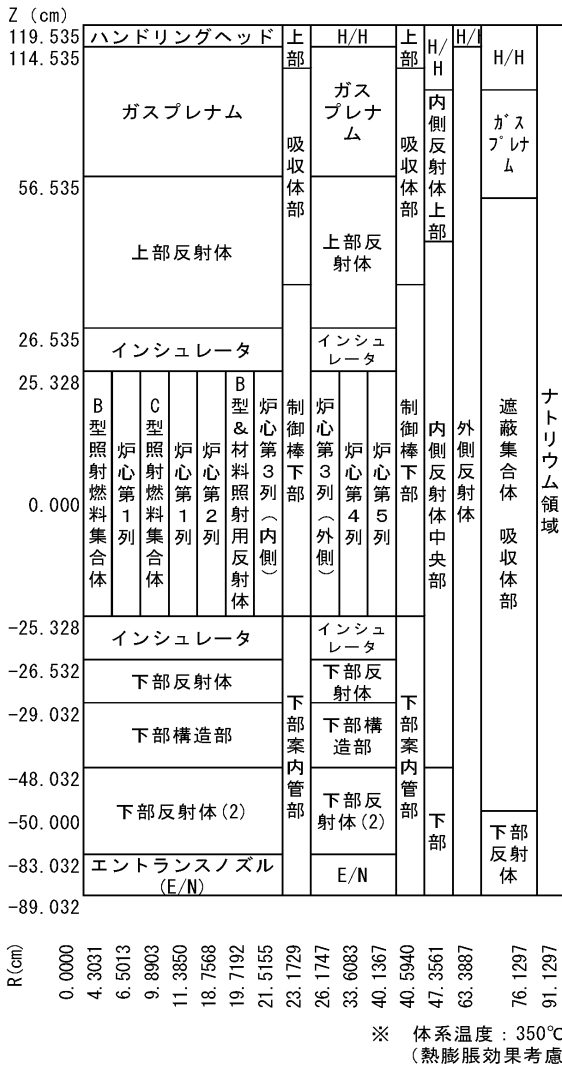


図4 標準炉心2次元RZ計算体系(円柱体系)図

図中に示すように、燃料領域は等価直径約80cm、炉心高さ約50cm(室温、図4には定格出力運転状態の熱膨張を考慮した寸法を記載)の円筒形状で、内側炉心と外側炉心の核分裂性物質の含有率が異なる2領域炉心とした。炉心の径方向外側は、等価厚さ約23cm、上下方向はそれぞれ約30、38cmのステンレス鋼製の反射体領域とした。径方向のさらに外側には、厚さ約13cmの遮蔽集合体領域を配置した。

4.2 核特性

4.2.1 実効増倍率

サーベイ計算の結果、MK- 新燃料のPu富化度を内側炉心約23.0wt%、外側炉心約28.8wt%としたケースで、TRIANGLEコードの2次元XY拡散計算による標準炉心の平衡末期の実効増倍率

は0.994となった。計算結果を表2に示す。MK- 性能試験解析に基づくバイアス値(E-C値)を用いて補正した結果は1.011であり、MK- 標準炉心の平衡末期の約1.013とほぼ同等の値が得られた。また、核設計の基準計算より、各燃料集合体について最大線出力密度を求め、これに炉内燃料集合体の燃焼パターンの違いによる影響や制御棒挿入状態の影響等を考慮した結果、最大線出力密度は、内側燃料で414W/cm、外側炉心燃料で413W/cmとほぼ一致した。これより、出力分布の平坦化が図られていることが確認できた。

4.2.2 中性子束

平衡末期の炉内最大中性子束は、0.1MeV以上の高速中性子束が $4.0 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 、全中性子束が $5.7 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ となった。MK- 標準平衡炉心とMK- 炉心の中性子束分布の比較を図5に示す。これより、MK- 炉心の最大中性子束はMK- 炉心の1.3倍以上が確保され、空間的にも、高速中性子照射場が拡大されていることがわかる。

4.2.3 制御棒価値

MK-、MK- 炉心では、¹⁰B濃縮度90%の炭化ホウ素(B₄C)を装填した制御棒6体を炉心第3列に装荷していた。MK- 炉心では、計測線付の照射試験用集合体の照射スペース拡大等の観点から、このうち2体を燃料領域と内側反射体の境界である炉心第5列へ移設することとした。なお、このうち1体については、1991年に先行的に第5列に移設し、照射スペースの有効利用を図るとともに、制御棒価値の計算精度を確認した。

核設計では、2次元XY拡散計算により、6本合計、ワンロードスタック時及び各1本の制御棒価値を求め、これにMK- 性能試験解析に基づくバイアス補正、¹⁰Bの燃焼効果、燃料領域の大きさ(装荷体数)を変動させた場合の計算誤差等を考慮し、最大値、最小値及び標準値を求めた。結果を

表2 実効増倍率計算結果

MK- 性能試験 炉心解析		MK- 標準炉心平衡運転 サイクル末期	
計算値(C)	1.015	計算値(C)	0.995
実測値(E)	1.031	評価値 (E-C補正後)	1.011
差(E-C)	0.016		

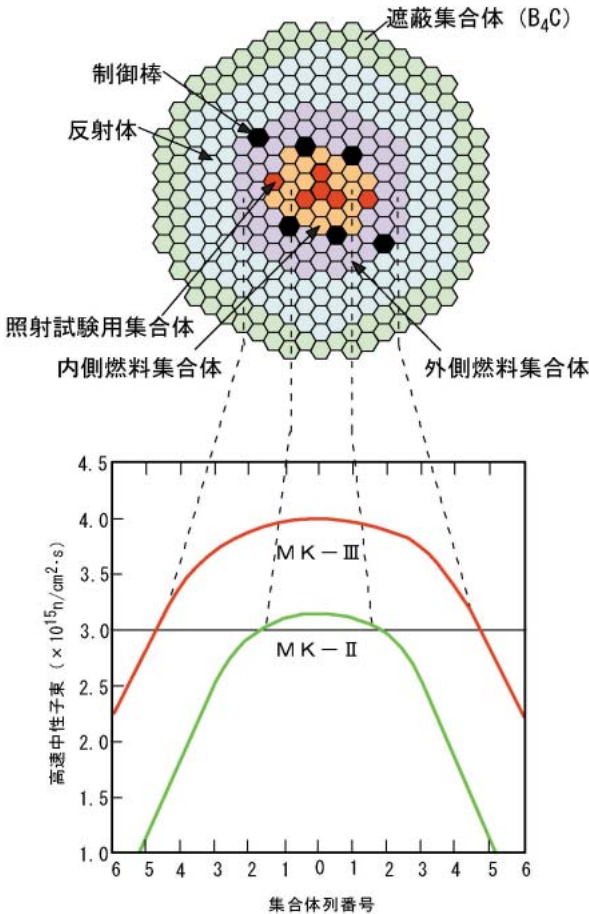


図5 MK-II 炉心高速中性子束計算結果

表3に示す。これより、炉心第5列の2体の制御棒値は、それぞれ0.67, 0.72% k/kk' であり、第3列の4体の制御棒値は、それぞれ1.83~2.00% k/kk' の約1/3であった(いずれも1体全挿入時の標準値)。

4.2.4 過剰反応度・反応度バランス

燃焼欠損反応度は、標準平衡炉心の2次元RZ拡散計算による評価値に、MK-II, MK-II 炉心の設計経験より10%の不確かさを考慮して1.9% k/kk' とした。温度及び出力補償用の反応度は、燃料、構造材、冷却材等の膨張及びドップラ効果を考慮して算出した後述の温度係数から求めた。次に、ワンロッドスタック時の制御棒値の最小値5.6% k/kk' から、この場合でも炉停止余裕が1% k/kk' 以上確保できるように、100体系における最大過剰反応度を4.5% k/kk' に設定した。反応度バランス評価結果を表4に示す。

4.2.5 反応度係数等、動特性パラメータ

反応度係数と動特性パラメータの評価結果を表5に示す。これより、ドップラ係数、ナトリウムポイド反応度及び各温度係数はすべて負の値となり、設計目標を満足した。なお、各温度係数の組み合わせで算出される出力係数は、すべての温度係数が負の値であることから、負の値となる。

4.2.6 燃焼度

炉心燃料集合体の燃焼度(燃料要素軸方向平均最大)は、MK-II 炉心における75,000MWd/tから90,000MWd/tとなった。これを受けて、炉心燃料要素の機械設計として、内圧上昇に伴う被覆管周方向応力、クリープ寿命分数和及び被覆管の使用期間中スエリングによる外径増加率等を評価して健全性が確保されることを確認した。なお、燃料スタック長の55cmから50cmへの変更に伴い、燃

表3 制御棒値計算結果

K_{eff} (TRIANGLE 計算結果)	制御棒値(% k/kk')				備考		
	補正前	最小値	標準値	最大値			
6本全引抜	1.0109						
6本全引抜本全挿入	0.9072	11.3	7.6	10.1	13.3		
ワンロッドスタック*	0.9324	8.3	5.6	7.4	9.8	No.1引抜	
1本全挿入	No.1	0.9885	2.2	1.5	2.0	2.6	第3列
	No.2	1.0027	0.8	0.5	0.7	1.0	第5列
	No.3	0.9896	2.1	1.4	1.9	2.5	第3列
	No.4	0.9894	2.2	1.5	1.9	2.5	
	No.5	1.0033	0.8	0.5	0.7	0.9	第5列
	No.6	0.9903	2.1	1.4	1.8	2.4	第3列

*) 最大の反応度値を持つ制御棒1本が、万が一挿入されなかった場合の、残り5本の制御棒の反応度値。

表4 炉心の反応度バランス

(単位: % k/k')

定格出力時の最大の過剰反応度		2.8
内訳	燃焼補償用	1.9
	運転余裕用	0.9
温度補償用及び出力補償用		1.7
内訳	100 ~ 250 (0 MWt)	0.6
	250 ~ 350 (0 MWt)	0.4
	350 ~ 定格 (0 ~ 140 MWt)	0.7
最大過剰反応度(100%)		4.5以下

表5 反応度係数と動特性パラメータ

ドップラ係数(T·dk/dT) 制御棒全引抜 制御棒1/3挿入	- 1.94 × 10 ⁻³ - 1.71 × 10 ⁻³
Na ボイド反応度 (k/k)	- 1.89 × 10 ⁻²
温度係数(k/k/) 燃料温度係数 [*]	- 3.8 × 10 ⁻⁶
構造材温度係数	- 1.2 × 10 ⁻⁶
冷却材温度係数	- 9.20 × 10 ⁻⁶
炉心支持板温度係数	- 1.31 × 10 ⁻⁵
動特性パラメータ 実効遅発中性子割合, β_{eff} 即発中性子寿命(s)	4.49 × 10 ⁻³ 3.12 × 10 ⁻⁷

*) ドップラ効果を除く熱膨張による密度変化と軸方向寸法変化の寄与分

料要素内のプレナム長さをMK- より2.5cm増加させている。併せて、輸送・取扱い時及び原子炉内における通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に炉心燃料集合体に発生する応力等を評価し、健全性が確保されることを確認した。

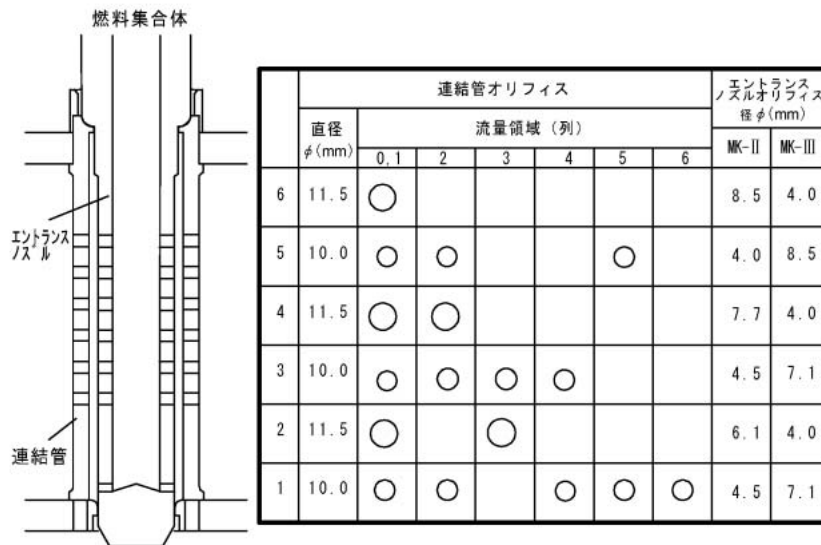


図6 「常陽」MK- 炉心冷却材流量調節機構エントランスノズルオリフィス設計

4.3 熱特性

4.3.1 流調機構

MK- 炉心の出力分布に対応した流調機構の燃料集合体エントランスノズルオリフィス仕様検討結果を図6に示す。流調機構模擬体の水流動試験から求めた圧力損失係数に基づき、GENERALコードにより炉内流量配分を計算した結果を表6に示す。MK- 炉心では、流調機構改造により、燃料集合体1体に配分される冷却材流量がMK- 炉心と比較して平坦化されたことがわかる。これは、MK- 炉心での出力分布平坦化に流調機構を対応させた結果である。また、一連の炉外試験を通じ、燃料集合体バンドル部はもとより、流調機構についても構造健全性に影響するキャビテーションの発生がないことを確認した。

後述のサブチャンネル計算結果から、被覆管最高温度が定格出力時の制限値である675 に達する時の冷却材流量(必要流量)を求めた。結果を表6に併せて示す。これより、すべての流量領域

表6 炉内冷却材流量配分計算結果

[単位: kg/s]

	MK- 炉心	MK- 炉心	必要流量*
第1列	9.50	8.48	7.87
第2列	8.93	8.35	7.71
第3列	7.93	7.83	7.62
第4列	7.35	7.72	7.28
第5列	6.30	6.79	6.47

*) 被覆管最高温度が制限値(675)となる流量

で炉心燃料集合体に配分される冷却材流量は必要流量を満足することを確認した。

4.3.2 燃料、被覆管温度

核計算により得られる出力分布に基づき、各列で出力が最大となる炉心燃料集合体について、サブチャンネル計算を行った。その結果、定格出力時の被覆管最高温度は、炉心第5列の649であり、制限値である675を満足した。さらに、出力が最大となる炉心第1列の炉心燃料集合体について、冷却材流量を絞り、仮想的に被覆管最高温度を675とした場合の計算を行った。その結果、過出力時の燃料最高温度は2,647となり、このような仮想的な保守的条件でも、設計目標である2,650以下を満足することが確認できた。

4.4 遮蔽特性

遮蔽集合体の設計では、まず、遮蔽能力の目標値として、炉内燃料貯蔵ラックに貯蔵する燃料集合体出力の制限値を設定した。AQUAコードにより、燃料集合体出力をパラメータとして、燃料貯蔵中のラック周りのナトリウム自然循環計算を行った。その結果、燃料集合体内部の発熱により、エントランスノズル部オリフィス孔から流入した冷却材が、燃料バンドル部を上昇してハンドリングヘッドから流出し、その後、ラッパ管とポット内壁の間隙を降下する自然循環パスが形成される結果となった。上記計算により求められた集合体内冷却材流量を基にサブチャンネル解析を行った。その結果、燃料集合体出力50kWで、被覆管最高温度が633.1となり、運転時の制限値である675を十分下回った。

次に、ANISNコードを用いた1次元輸送計算により、遮蔽集合体のB,C実効体積比と ^{10}B 濃縮度をパラメータとしたサーベイ計算を行った。これによるラック位置の中性子束を基に、燃料集合体出力を求めた。その結果、設計目標を満足する遮蔽集合体仕様として、B,C実効体積比40%、 ^{10}B 濃縮度45%とした。ただし、これは炉心からの中性子の直接透過成分の寄与に関する結果であり、遮蔽体上下からの回り込み成分の寄与は含まれない。そこで、遮蔽集合体のB,Cペレットのスタック長をパラメータとして、拡散計算コードCITATION¹¹⁾による2次元RZ計算を行った。その結果、ラック位置における燃料集合体出力の低減

効果がスタック長100cmでほぼ飽和することがわかった。これより、炉心高さ50cmに対して、遮蔽集合体のB,Cペレットスタック長を100cmとした。

最後に、DOT3 5コードを用いた2次元RZ輸送計算を行った。DOT3 5コードによるMK-炉心とMK-炉心の径方向中性子束分布の比較を図7に示す。MK-炉心では燃料領域の高速中性子束がMK-炉心と比較して1.3倍以上高くなっている。しかし、遮蔽集合体の効果により、その外周では中性子束が低減されていることがわかる。炉内燃料貯蔵ラック位置の中性子束から求めた燃料集合体出力は、MK-外側炉心燃料の新燃料を貯蔵した場合で27.5kWとなった。一方、2次元XY輸送計算結果より、隣接する貯蔵ラックに燃料が存在した場合、それによる中性子増倍効果よりも熱化した中性子が吸収される効果が大きく、燃料集合体出力が低下することが分かった。DOT3 5コードによる2次元RZ計算では、すべてのラックに燃料を配置したモデルを用いたため、燃料配置パターンを変えたXY計算結果に基づき、燃料集合体出力が最大となるようRZ計算による計算値を補正した。

設計では、保守的にすべての遮蔽集合体の組成を ^{10}B の燃焼が最も進んだ寿命末期の値として、DOT3 5コードによる一連の計算を行い、燃料集合体出力を求めた。これにJASPER計画の径方向透過実験解析から評価した計算誤差を考慮し、計算結果より別途評価した発熱及び最大燃焼度90,000MWd/t相当の崩壊熱を加算した。その結果、燃料集合体出力は48.4kWとなり、設計目標である50kW以下を満足した。

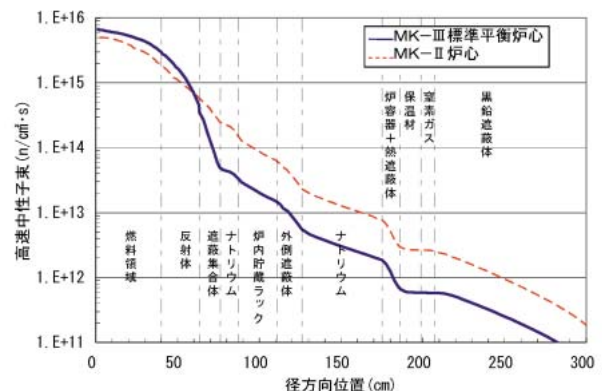


図7 高速中性子束径の方向分布

5. おわりに

MK- 炉心の基本仕様に基づき、核熱計算、遮蔽計算を行い、MK- 炉心が当初計画通りの性能を有することを確認した。また、同時に、一連の設計が核熱制限値を満足し、技術的に成立することを確認した。以上の結果に基づき、1994年1月27日付けでMK- 改造に係る原子炉設置変更許可申請を行い、当時の科学技術庁、原子力委員会及び原子力安全委員会の安全審査を経て、1995年9月28日付けで許可を受領した。

「常陽」MK- 炉心の実際の特性は、2003年7月の初臨界から11月の定格出力達成までの性能試験により確認されている。詳細は別稿に譲るが、今後はこれらの実測データとの対比を通じて、炉心設計の更なる高度化を図りたい。

参考文献

- 1) 三菱原子力工業株式会社：“高速増殖炉核設計コードの概要”，MAPI-F-0001（1981）
- 2) Nakagawa T.：“Summary of JENDL-2 General Purpose File”，JAERI-M 84-103（1984）
- 3) H.Takano, et al.：“Revision of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2”，JAERI-M 89-141（1982）
- 4) 溝尾宣辰，秋山孝夫，他，：“「常陽」照射用炉心の性能試験について”，動燃技報 No.49，pp.45-60（1984）
- 5) 宮越博幸，佐藤和二郎，他，：“汎用炉内流量配分解析手法の解析と適用解析”，日本原子力学会「'94年春の年会」，J11，（1994）
- 6) 庄野彰，角田弘和，他，：“大型高速炉遮蔽解析手法の開発JASPER（日米共同高速炉遮蔽実験）実験解析の成果”，日本原子力学会誌 Vol.38，No.9，P.760-770（1996）
- 7) W. A. Rhoades and F.R.Mynatt，“The DOT3.5 Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code”，ORNL/RSIC/CCC-276（1975）
- 8) R. K. Disney, L. L. Moran, et al,“Revised WANL AN-1SN Program User's Manual”，WANL-TMI-1967（1969）
- 9) 村松壽晴，二ノ方壽，“単相多次元熱流動解析コードAQUA利用手引書”，TN 9460 91-006（1991）
- 10) 有井祥夫，富田直樹，他，“高速実験炉「常陽」の炉心高性能化計画（MK- 計画）”，日本原子力学会誌 Vol.38，No.7，pp.577-584（1996）
- 11) 中川正幸，他，“高速炉の核特性解析コードシステム”，JAERI-M 83-006（1983）