



MK-III 総合機能試験の結果

伊東秀明 則次明広 山崎 学

大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部

Results of JOYO MK-III Function Tests

Hideaki ITOH Hiroaki NORITSUGI Manabu YAMAZAKI

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

「常陽」MK-III炉心では、炉内の高速中性子束を従来の1.3倍に増加させるため、燃料領域の拡大、制御棒の移設及び遮蔽体の装荷等の炉心改造を実施した。これに伴い、原子炉熱出力が140MWに増加したことに対応して、1次冷却材流量を増加させるとともに、原子炉入口温度を低下させ、さらに、主中間熱交換器2基、主冷却機4基を交換した。

これらの改造が終了した2001年8月末から2003年3月までに、改造した各系統の設備や機器を組み合わせた状態で総合機能試験を実施し、プラントとしての機能及び性能（空気冷却器の風量、主中間熱交換器の予熱性能、ナトリウムの純度、1次・2次冷却系の運転特性、炉内流量分布など）が設計条件を満足していることを確認した。

The fast neutron fluence is 1.3 times larger in the "JOYO" MK-III core than in the MK-II core. To achieve this, the fuel region was expanded, two of six control rods were shifted, and reflector subassemblies were replaced by shielding subassemblies in the outer two rows. To accommodate the resulting 40% power increase, the sodium coolant flow rate in the primary system was increased, and the two intermediate heat exchangers and four dump heat exchangers were replaced.

MK-III function tests were successfully conducted from August 2001 to March 2003 and the performance of the primary and secondary cooling system; flow rate of the dump heat exchangers, preheating of the intermediate heat exchangers, sodium purity, operability of cooling loops, core flow distribution, etc. was confirmed to be satisfied with the design criteria.

キーワード

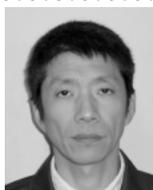
ナトリウム冷却型高速炉、「常陽」、MK-III計画、機能試験、主冷却機、中間熱交換器、炉内流量分布、ナトリウムの純化

Sodium-Cooled Fast Reactor, JOYO, MK-III Program, Function Test, dump heat exchanger, intermediate heat exchanger, core flow distribution, sodium purification



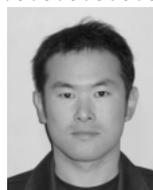
伊東 秀明

原子炉第一課
技術主幹
MK-III総合機能試験
運営担当、「常陽」
MK-III燃料取扱設備の
自動化、燃料取扱設備の
運転保守に従事



則次 明広

原子炉第一課 運
転第3チーム副当
直長
副主任技術員
MK-III総合機能
試験担当、「常陽」
の運転に従事



山崎 学

原子炉第一課 運
転第3チーム所属
副主任技術員
MK-III総合機能試
験担当、「常陽」
の運転に従事

1. はじめに

「常陽」MK- 炉心では、炉内の高速中性子束を従来の1.3倍に増加させるため、燃料領域の拡大、制御棒の移設及び遮蔽体の装荷等の炉心改造を実施した。これに伴い、原子炉熱出力が140MWに増加したことに対応して、1次冷却材流量を増加させるとともに、原子炉入口温度を低下させ、さらに、主中間熱交換器2基、主冷却機4基を交換した。

これらの改造工事が終了した2001年8月末から2003年3月までに、改造した各系統の設備や機器を組み合わせた状態で総合機能試験を実施し、プラントとしての機能を確認した。

2. 総合機能試験の概要¹⁾

総合機能試験は、MK- 改造工事において、更新あるいは改造された各系統の設備や機器の据付・調整後、プラントを構成する設備、機器としての機能及び性能が設計条件を満足していることを確認するために行った。これにより、原子炉を運転した状態で行うMK- 性能試験に移行できる条件が整っていることを見きわめた。

試験の実績工程を図1に示す。試験は、大きく5つの段階に分けられ、各々の段階で以下に示す諸機能及び性能を確認した。

常温での試験（系統温度：常温）

原子炉容器内を除く冷却系統に冷却材ナトリウム（以下、Naと略す）がない常温状態で、主送風機4基を起動し、主冷却器出口の風速分布を熱線風速計で測定して4基で140MWの除熱に必要な風量が確保できていることを、また、所定の制御動作ができることを確認した。

昇温試験（系統温度：常温～200℃）

Naの充てんに先立ち、予熱状態における系統の気密性、熱変位及び更新した主中間熱交換器と主冷却器の昇温特性等を確認し、Naの充てんに支障のないことを確認した。

Na純度測定試験（系統温度：200～250℃）

冷却系改造工事後初めてNaを冷却系に充てんし、工事中に系統内に混入した不純物（主に酸素）をNa純化系のコールドトラップにより捕獲し、Na純度を基準値以下にできることを確認した。

Na充てん状態での試験「MK- 炉心構成前」（系統温度：200～250℃）

冷却系統へNaを充てんした状態で、改造あるいは更新した機器の所期の機能及び性能を、1次主冷却系統は定格流量の約80%まで、2次主冷却系統は定格流量で確認した。

Na充てん状態での試験「MK- 炉心構成後」（系統温度：200～250℃）

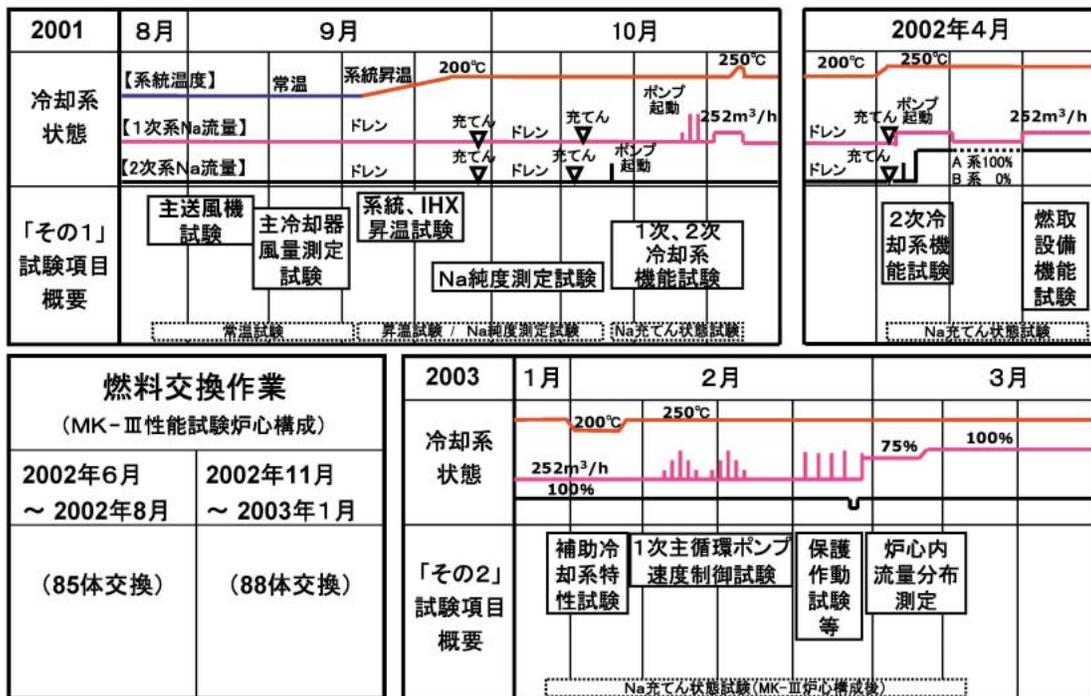


図1 MK- 総合機能試験概略工程

MK- 炉心構成後、炉心圧損を含むすべてのMK- のプラント条件が揃った状態で、1次冷却システムの機能及び性能を確認したほか、インターロック動作などの総合的なプラント機能及び炉内の流量配分を確認した。

3. 主な試験の内容と結果

本章では、総合機能試験のうち、冷却系改造工事に伴い更新した主中間熱交換器の昇温特性試験及び冷却系改造工事によって1次、2次冷却系統内に混入した不純物の除去を目的とした1次、2次系Na純度測定試験の結果と、1次及び2次主冷却系統の運転特性に係る試験の内容と結果を紹介する。

3.1 主中間熱交換器昇温特性試験

1次冷却系統の主配管及び主要機器（原子炉容器、主中間熱交換器、主循環ポンプ等）は、Na漏れ防止の観点から内管と外管または内容器と外容器からなる二重構造を採用しているため、1次冷却系統の主配管及び主要機器の予熱には、二重構造のアニュラス部に加熱した窒素ガスを循環させる予熱窒素ガス循環方式を採用している。

予熱窒素ガス循環方式では、昇温対象物の外部から熱を伝えるため、中間熱交換器等の機器類は

内部まで均一の温度になるには保持時間が必要である。「常陽」MK-₁、MK-₂ で使用した主中間熱交換器には、内容器の表面温度計のみで、内部温度を直接確認する温度計がなかったため、コールド施設の大型機器の昇温試験データを基にした昇温特性から、加熱窒素ガスの通気開始から14日間の通気状態保持をもって昇温完了と判断していた。

そこで、昇温工程短縮を目的として、更新した主中間熱交換器では新たに中心部に位置する2次冷却系Naのドレン配管の3ヵ所に温度検出器を設置し、これにより主中間熱交換器の昇温時における内部温度の推移を確認できるようにした。

1次冷却系統の昇温操作は、予熱窒素ガス系統の出入口弁を開として、加熱した窒素ガスを通気して系統を常温から200℃まで昇温するものである。加熱窒素ガス通気操作によるMK-₁までの主中間熱交換器の昇温率は約20℃/hであったが、今回は更新した主中間熱交換器の最初の昇温操作であるため、昇温率は従来の1/2の10℃/hを目標とした。

図2に主中間熱交換器昇温率特性を示す。加熱窒素ガスの通気開始と共に、主中間熱交換器の壁面温度が応答良く上昇を始め、内部温度は遅れて上昇したものの、通気を開始してから約5日で内部温度の上昇は飽和し、壁面との温度差も10℃

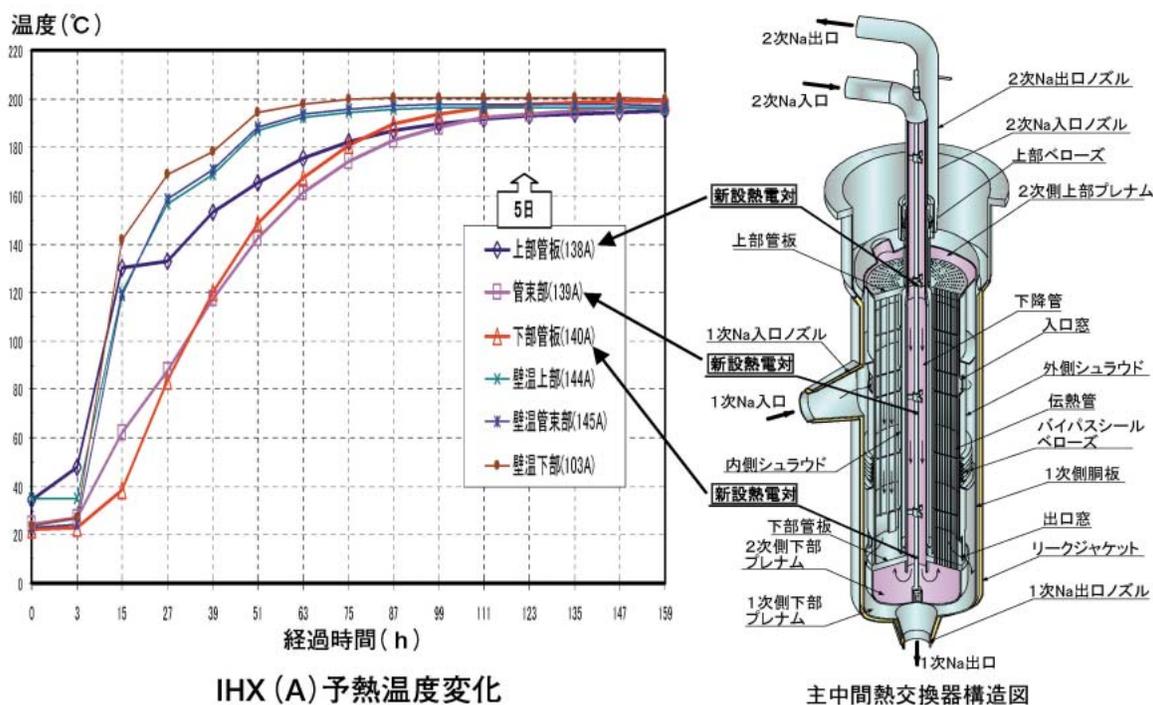


図2 主中間熱交換器予熱試験結果

内で安定した。

この結果から、主中間熱交換器の昇温時に内外温度差により生じる応力及びNa充てん時に生じる熱過渡応力を抑制することにより構造健全性を担保した上で、昇温工程の短縮化を図ることが可能となった。すなわち、定期検査時の1次冷却系統の予熱開始から、Naを充てんするまでの昇温期間を従来の2週間から5日間に短縮できることが確認できた。

3.2 1次、2次系Na純度測定試験

Naによるステンレス鋼の腐食は、Na中の不純物濃度、特に酸素濃度を低く保つことにより抑制することができる。「常陽」では、燃料被覆管及び1次冷却系の配管・機器にステンレス鋼が使用されているため、Na中の酸素濃度の維持基準値を酸素濃度10ppmに相当するブラギング温度200以下としている。

1次系Na純度測定試験は、主中間熱交換器の更新に伴い、系統内に混入した不純物（主に空気中の酸素）をNa純化系統に設置しているコールドトラップにより捕獲し、Naの純度を維持基準値以下にできることを確認するために実施するものである。

ここで、コールドトラップは、Na中の不純物（主に酸化物）の溶解度が温度低下と共に減少することを利用して、Naを冷却することによりコールドトラップ内のステンレス鋼製の金網に不純物を析出させて捕獲し、取り除く装置である。ブラギング計は、コールドトラップの原理と同様に、不純物の析出によるオリフィス部の流量の低下を検出し、その時の温度（ブラギング温度）を測定する装置である。

純化運転期間中の工程とNa純度データを図3に示すが、Naの純度を十分維持基準値以下、更には目標値であるブラギング温度150以下にできることを確認した。

この中で、「常陽」の1次冷却系統には、Naを保有するタンクが3基（ダンプタンクA/B、オーバフロータンク）あり、冷却系改造工事中に不純物が混入したNaを効率良く純化するため、まず、各タンクの純化と1次冷却系統への充てん・ドレンによる機器及び配管表面に付着した不純物のフラッシングを組み合わせることでNaの純化運転を実施した。



図3 ナトリウム純度測定試験結果

次に、1次主循環ポンプは不純物の析出が懸念されたことから、主循環ポンプ停止状態で主循環ポンプ出口側のドレン弁よりNaをオーバフロータンクにドレンし、オーバフロータンクから原子炉容器にNaを汲み上げることにより1次主冷却系Naを循環させるドレン循環操作を行いながら1次冷却系統の純化運転を行った。その後、1次主循環ポンプの運転によるNaの強制循環にて冷却系統内のフラッシングを実施した。

各純化運転過程において、コールドトラップ温度を調整することによりブラギング温度は低下しており、また、1次主循環ポンプの起動によるブラギング温度の上昇傾向はみられなかったことから、Naの充てん・ドレン及びドレン循環によって十分な系統のフラッシングが行われたものと考えられる。

2次冷却系の配管・機器の材料はクロモリ鋼（21/4Cr-1Mo鋼）であり、Na中の酸素濃度の維持基準値を酸素濃度20ppmに相当するブラギング温度225以下としており、1次系と同様の考え方、方法で2次系Na純度測定試験を実施した。純化運転期間中の工程とNa純度データを図3に示すが、1次系と同様にNaの純度を十分維持基準値以下、更には目標値であるブラギング温度150以下にできることを確認した。

また、ブラギング温度データから推定した純化運転期間中にコールドトラップが捕獲した不純物酸素量は1次冷却系で約0.4kg、2次冷却系で約1.1kgと少量であった。

3.3 2次主冷却系統運転特性試験

MK-改造工事では、冷却系流量を増加するため、2次主循環ポンプ速度制御系、2次主循環ポ

ンプモータの更新を実施しており、本試験では、これらの運転特性を確認した。

まず、2次主循環ポンプ速度制御装置の制御性を確認するため、最低回転数から段階的に昇速して、定格流量が得られる運転点を確認した。2次主循環ポンプのQ-H特性を図4に示すが、更新した主中間熱交換器及び主冷却器を含めた2次主冷却系の圧力損失が設計値の範囲内であることを確認した。

次に、2次主循環ポンプを定格流量運転からトリップさせた後のフリーフローコストダウン時の流量半減時間を測定し、Aループ：6.56秒、Bループ：6.18秒と、設置変更許可申請書の事故解析条件4.3秒以上を満足する結果を得た。これらは、MK- 改造工事前（MK- の総合機能試験結果、Aループ：5.3秒、Bループ：5.4秒）と比較し約1秒長くなっており、ポンプモータの重量が増えたことによる慣性モーメントの増加等が流量半減時間の増加に寄与したものである。

3.4 1次主冷却系統運転特性試験

1次主循環ポンプは、原子炉スクラム時（外部電源喪失及び1次主循環ポンプ故障の場合を除く）に、約10秒の時定数で慣性降下して原子炉停止後の崩壊熱除去に必要な流量で一定に制御されるランバック制御に移行する。また、ポンプ駆動電源喪失時には、非常用直流電源で運転できるポニーモータ運転に引継がれる。

MK- 改造工事では、冷却系流量の増加と原子炉スクラム時の熱過渡緩和を目的としたランバック制御の追加のため、1次主循環ポンプ速度制御系、1次主循環ポンプモータ及び主中間熱交換器の更新を実施しており、本試験では、これらの運

転特性を確認した。

まず、更新された1次主循環ポンプモータ及び速度制御設備によって定格流量（1,538m³/h）が得られること、最低流量から定格流量までの昇速、定格流量から最低流量までの降速時に安定した制御性が得られること、原子炉スクラム時及びポンプ駆動電源喪失時にそれぞれランバック運転、ポニーモータ運転に引継がれることを確認した。同時に、系統の圧力損失、炉容器、1次主循環ポンプ、オーバフローカラムのNa液面を測定し、配管の圧力損失より推定した各更新設備の圧力損失値を求め、設計値との比較を行った。1次主循環ポンプのQ-H特性を図5に示すが、系統圧力損失は各流量段階で、1次主循環ポンプの運転制限値内にあることを確認した。各部液面に関しては、定格流量（1,538m³/h）運転で、炉容器Na液面、1次主循環ポンプNa液面、オーバフローカラムNa液面とも設計の範囲内であった。

本試験では、系統温度が約250℃であったこと及び燃料集合体数75体の性能試験用炉心であり同85体のMK- 標準炉心より炉心部の圧力損失が高いことから、1次主冷却系で定格流量を得られるポンプ回転数がA側で設計上の最高回転数（930rpm）に近いものであった。MK- 運転時の炉心部の圧力損失は、炉心領域の拡大により本試験より低くなっていくこと及び低温側の系統温度も350℃となることから、流量一定制御で運転されるポンプ回転数はこれよりも低くなる。すなわち、性能試験以降の本格的な原子炉運転時には余裕のある運転となる。

次に、1次主循環ポンプを定格流量運転からトリップさせた後のフリーフローコストダウン時の時定数（1/eまでの時間）を測定し、Aループ：

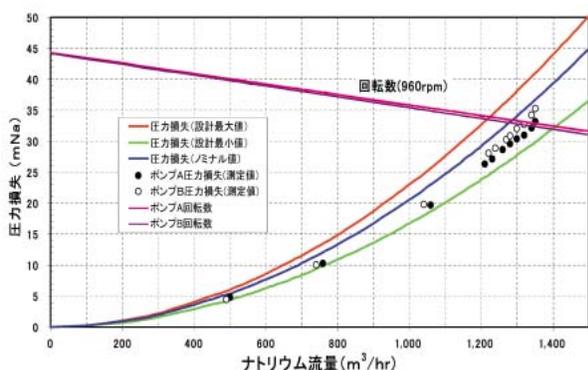


図4 2次主循環ポンプ流量制御試験結果

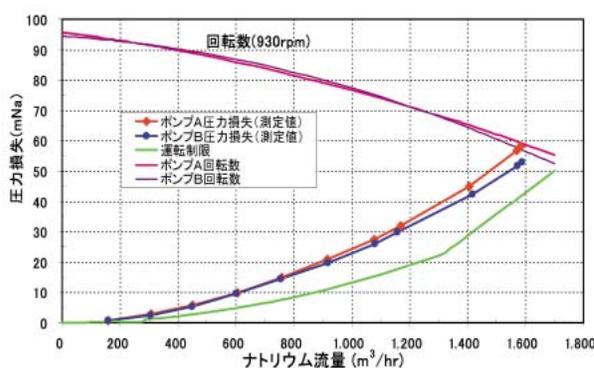


図5 1次主冷却系統圧損測定試験結果

11.6秒, Bループ: 11.7秒と, 設置変更許可申請書の事故解析条件10秒以上を満足する結果を得た。今後の原子炉出力運転時には炉心部圧力損失が低下し, また, 冷却材温度の上昇によりポンプ回転数が本試験条件よりも低下するため時定数はさらに長くなると考えられる。

3.5 炉心内流量分布測定試験

MK- 性能試験炉心体系における炉心内の冷却材流量が適切に配分されて, 各集合体の必要流量が確保されていることを確認することを目的として実施した。

試験は, 流量検出ポールを燃料交換機孔より炉内に挿入し, 回転プラグを操作して被測定集合体位置に移動させ, 集合体頂部に着座させて各集合体を通過する冷却材の流量を測定した(図6)。この試験の開始時には流量計を炉心燃料集合体位置に固定し1次主冷却系流量0~94%の範囲で連続的に測定して電磁流量計出力に直線性があること, 測定結果に再現性があることを確認した。

流量分布測定は1次主冷却系流量75%にて実施し, 測定結果を試験装置着座による圧損増の影響の補正と100%流量への外挿を行った。その結果, 全燃料集合体(75体)の流量は解析値とおおむね一致(解析値/測定値 1.05)し, 判定基準の最低必要流量(燃料被覆管最高温度が熱的制限値となる最低必要流量)を満足していることを確認し

た(図6)。また, 反射体(22体), 遮蔽体(9体)についても, 必要流量を満足していることを確認した。

4. おわりに

MK- 冷却系改造工事の終了後に実施した総合機能試験により, 常温状態から冷却材Na充てん状態に至るまでの機器の機能及び健全性並びに性能について, 設計値を満足していることを確認することができた。これにより, 原子炉を起動して行うMK- 性能試験に移行できる条件が整っていることを見きわめた。

総合機能試験により, 得られた主な成果は以下のとおりである。

従来の主中間熱交換器には内部温度計がなく, 大型機器の昇温試験結果により予熱時間を決めていたが, 更新した主中間熱交換器では中心部3カ所に温度計を設置し各部の温度上昇を確認しながら予熱が可能となり, 昇温期間を従来の2週間から5日間に短縮できた。

工事中に系統内に混入し, ナトリウム中に溶出した酸素等の不純物は, コールドトラップにより捕獲し純度を維持した。捕獲した酸素は1次冷却系で約0.4kg, 2次冷却系で約1.1kgと少量であった。

更新した1次, 2次冷却系循環ポンプモータと制御設備によって最低流量から定格までの流

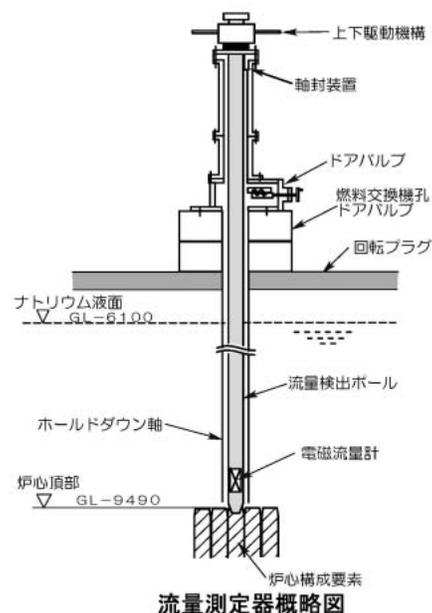
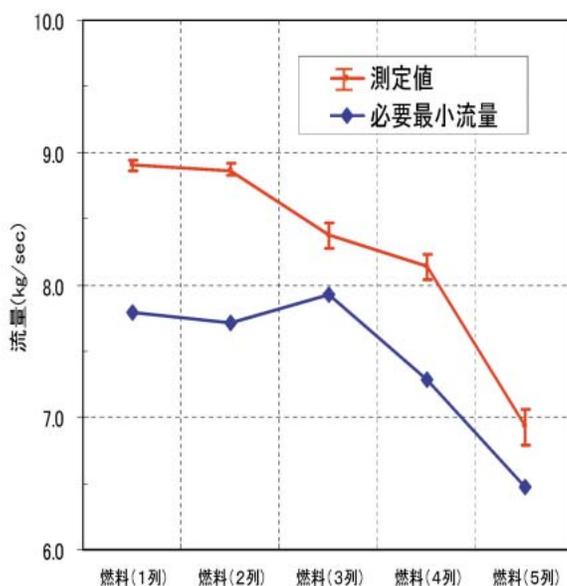


図6 炉心内流量分布測定試験結果

量調節の安定性を確認した。また、1次冷却系については、原子炉スクラム後の温度変化を緩やかにするために、崩壊熱除去に必要な低流量で一定に制御するランバック制御や、電源喪失時にポンプモータ運転に引継がれることを確認した。

炉心燃料集合体や反射体などの炉心構成要素

を通過するナトリウムの流量を測定し、炉内流量配分の適切性を確認した。

参考文献

- 1) 則次明広,他：“MK- 総合機能試験”,「研究炉等の運転・管理及び改良に関する研究会」発表要約集 10-1～10-11 (2002.3)