



炉心構成要素の高性能化

飛田 公一 曾我 知則 三次 岳志

大洗工学センター 照射施設運転管理センター

Upgrading of Core Components

Kouichi TOBITA Tomonori SOGA Takeshi MITSUGI

Irradiation Center, O-arai Engineering Center

「常陽」の照射性能の向上を目的とした高度化計画（MK-III計画）に対応し、MK-III炉心から新たに使用する遮蔽集合体の設計・製作を行なった。この遮蔽集合体は、 B_4C ペレットを装填し、遮蔽性能を高めている。このためMK-II炉心で取得された B_4C ペレットの照射挙動データをもとに設計を行った。また炉心の高中性子束化に伴い制御棒、反射体について運転経費の削減や廃棄物の低減の観点から取替寿命の延長が急務となった。反射体では、耐スエリング性等に優れたフェライト鋼ラッパ管及び高Niオーステナイト鋼反射体要素を採用した。また、 B_4C 被覆管機械的相互作用による寿命を延長するため、Naボンド型制御棒を開発した。

本報では、これらの技術開発について設計の観点から報告する。

Regarding the "JOYO" MK-III program, aiming at improving its irradiation capability, shielding subassemblies which were newly introduced into the MK- III core, were designed and fabricated. This shielding subassembly has high shielding capability with boron carbide pellets. The design was based on the irradiation behavior of the boron carbide that was obtained from the MK- II core.

And as a result of the enhanced neutron flux level in the MK-III core, lifetime extension of the control rod and the reflector was also required to decrease the reactor operation cost and the total amount of radioactive waste. A ferritic steel wrapper tube and a high nickel austenitic steel element were introduced into the reflector. And a sodium bonded control rod was developed to extend the lifetime of the boron carbide - cladding mechanical interaction.

This report describes the development of JOYO core components from the perspective of those designs.

キーワード

高速炉，常陽，MK-III，制御棒，反射体，遮蔽集合体，長寿命，炉心構成要素，フェライト鋼，高Niオーステナイト鋼， B_4C

Fast Reactor, JOYO, MK-III, Control Rod, Reflector, Shielding Subassembly, Long Life, Core Component, Ferritic Steel, High Nickel Austenitic Steel, Boron Carbide



飛田 公一

照射管理課
課長代理
炉心構成要素設計
製作及び照射計画
業務に従事



曾我 知則

照射管理課
計画チーム所属
炉心構成要素設計
製作及び各種照射
試験業務に従事



三次 岳志

照射管理課
課長
炉心構成要素製作
管理，各種照射試
験及び照射装置の
開発業務に従事
核燃料取扱主任者
第一種放射線取扱
主任者

1. はじめに

「常陽」の照射性能の向上を目的とした高度化計画（MK- 計画）において、炉心の核特性、熱流特性、遮蔽特性等の設計検討が実施された¹⁾。この結果を受け、MK- 炉心から新たに使用を開始する遮蔽集合体の設計・製作を実施した。また炉心の高中性子束化に伴い、制御棒、反射体についても長寿命化に向けた設計を取入れた取替品の製作を実施した。これにより、運転経費の削減や廃棄物の抑制上の観点から寿命の延長を図っていく計画である。本報ではこれら MK- 炉心構成要素の高性能化について述べる。

なお、MK- 炉心を代表する標準炉心配置については、同技報「照射性能向上のための MK- 炉心の設計」を参照されたい。

2. 遮蔽集合体

2.1 設計目標

遮蔽集合体は、MK- 炉心から新たに使用を開始する炉心構成要素であり、従来ステンレス鋼の反射体が装荷されていた炉心最外層（炉心第9列、第10列の計96体）に設置される。

本集合体の設置目的は、炉心から漏洩する中性子を遮蔽し、炉内貯蔵ラック内にて冷却貯蔵される使用済燃料の発熱を抑制することである。これより、これまで実施していた冷却材流路孔付きの炉内貯蔵ラック内専用ポットでの冷却貯蔵を不要とした。すなわち、使用済燃料を流路孔のないポット内でも自然循環により冷却が可能のようにした。こうすることで、使用済燃料をポット交換なしで取り出せるようにして、燃料取扱作業の合理化を図るものである。従来、燃料交換のためには約20日間の原子炉停止期間を要していた。MK- 炉心の運転では本遮蔽集合体の採用により、燃料取扱設備の自動化と合わせ、これを約1/3に短縮する計画である。

設計寿命の目標としては、実効定格出力運転年数での使用期間を、炉心第9列、第10列に対し、それぞれ6年（MK- 炉心運転期間中1回交換）、12年（MK- 炉心運転期間中無交換）に設定した。

2.2 構造検討

必要な中性子の遮蔽能力については、炉心まわりの遮蔽設計の一環として検討した¹⁾。その結果、貯蔵中の使用済燃料の発熱を約50kW以下に抑え

る観点から、遮蔽集合体のB₄C装荷量として、充填率40%、¹⁰B濃縮度45%とする基本仕様を決定した。また中性子の回り込みを抑制する観点からB₄Cペレットスタック長は、炉心高さの2倍に相当する1,000mmに設定した。

遮蔽集合体の基本構造は、類似の炉心構成要素の使用実績や製造コストも考慮し、遮蔽要素（ピン）7本から構成されるピンバンドル型とした。また所定のB₄C充填率を確保するため、ペレット径は約20mm、ペレット密度は92% T.D.（理論密度比）とした。

B₄Cを装てんした遮蔽集合体の構造設計上のポイントは、B₄Cペレットのスエリングや使用中生成されるHeガス放出等、照射挙動に対する遮蔽要素の健全性評価である。この観点では設計項目及び設計手法は、従来の反射体より、むしろ同様の材料を使用する制御棒に類似している。

また、前述のとおり、B₄Cペレットの基本仕様は、核設計上定められることから、それらを基本に遮蔽要素の構造設計を実施した。

被覆管鋼種としては、MK- 燃料の被覆管に採用しているPNC1520鋼²⁾と、制御棒被覆管に使用しているPNC316鋼²⁾を候補としたが、遮蔽集合体の被覆管の使用温度条件は、通常時で最高500と低く、PNC316鋼の高温クリープ強度で十分対応できる。また、同鋼は比較的材料コストが低く、加工も容易との理由から、初装荷遮蔽集合体の被覆管材としてはPNC316鋼を採用した。

B₄Cペレットは、¹⁰B(n, γ)⁷Li反応によって、中性子を吸収し、Heガスを生成する。「常陽」制御棒は、MK- 炉心ではHeガスをピン内に貯留する密封型の制御棒要素を使用していたが、MK- 炉心以降、生成Heガスを要素外へ放出するダイピングベル型ベント機構を採用している。遮蔽要素の基本構造検討に当たり、このベント機構を採用するか否かについて検討を行った。

なお、当時制御棒のために開発中であったNaボンド型の概念は、遮蔽集合体には採用しなかった。遮蔽集合体のB₄Cペレットの発熱密度は、制御棒と比較して充分小さい。したがってHeボンド型でも比較的大きいギャップを確保しうる。また、Naボンド型では、Na充てん機構等、構造の複雑化に伴う製造コストの増加、試験研究にかかる開発コストの増加が予想された。

以上の理由から、遮蔽集合体は、検討の初期段

階からHeボンド型を基本構造としている。

ダイビングベル型のベント機構においては、原子炉運転期間中及び停止期間中に想定される温度変化及び圧力変化を考慮しても、炉内Naが要素内に侵入しないよう、ベント機構の長さを設計する。

しかしながら、遮蔽集合体の場合、制御棒に比べてペレットが装てんされる空間の容積が大きい。このため、予備検討では必要なベント機構長さを確保することは困難であることが明らかになった。

これは、炉内における温度変化及び圧力変化に伴うガス体積の変動（Na液位変動）が大きいため、ベント機構を長く取る必要があるが、遮蔽集合体の構造上、遮蔽要素の長さには限界があるためである。

また、ベント機構の設置は、中間端栓など構造の複雑化に伴う、コスト増の要因にもなり得る。このため、密封型要素を採用することとした。

これらの検討の結果、得られた遮蔽集合体及び遮蔽要素の基本構造を図1に示す。遮蔽集合体の構造設計上、寿命制限因子となる主要な機械設計項目は二つある。遮蔽要素仕様は、これら二項目の評価でほぼ決定される。

第一は、制御棒設計における課題でもあるB₄C-被覆管の機械的相互作用（以下ACMI；Absorber Cladding Mechanical Interaction）の評価である。

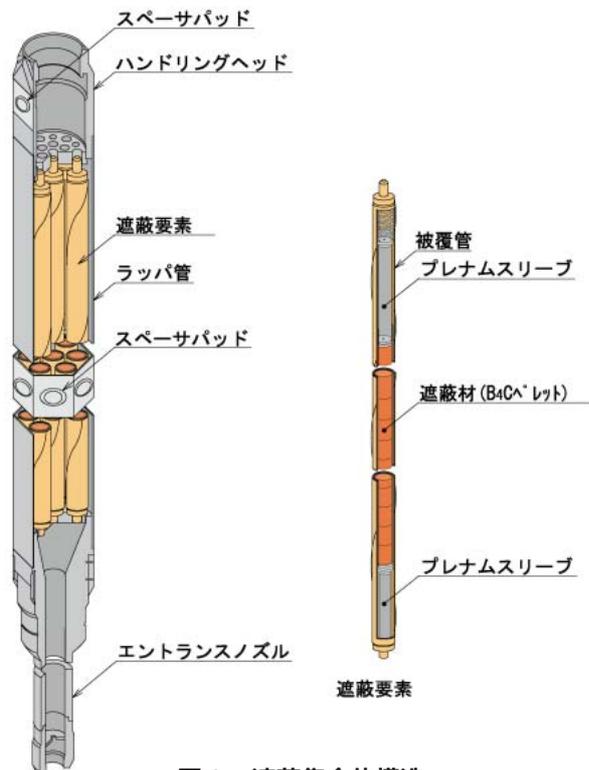


図1 遮蔽集合体構造

第二は、前述のB₄CペレットからのHe生成に伴う内圧評価（一次応力に加え、クリープ寿命評価、疲労寿命評価を含む）である。

すなわちACMI評価によりB₄Cペレット-被覆管間のギャップ寸法を定め、内圧評価によって被覆管肉厚を定めることとした。

2.3 ACMI評価

遮蔽集合体のACMI評価は、遮蔽要素被覆管の健全性を確保するための判断基準とする。ACMIが発生した場合、被覆管に機械的相互作用による応力が発生するが、機械設計上は被覆管の強度や伸びが期待できることから、本来は、ギャップ消失時（被覆管とのコンタクト開始時）が設計限界とはならない。しかしながら、後述する内圧評価の設計余裕とのバランスも考慮し、保守側の評価として使用末期までACMIを発生させないように、B₄Cペレットと被覆管のギャップを設定することとした。

ACMIを発生させないように、製造時ギャップを適切に設定するためには、B₄Cペレットの照射挙動を正確に予測することが重要である。「常陽」では、制御棒及び制御棒材料照射用反射体（Absorber Material Irradiation Rig：AMIR）においてB₄Cスエリングデータを取得してきた³⁾。B₄Cペレットのスエリング挙動を図2に示す。ACMI評価には、この「常陽」での照射によって得られたスエリングデータを使用することとした。

また、ACMIを評価する上で重要な挙動に、B₄Cペレットの割れに伴う再配置（リロケーション）がある。「常陽」制御棒の照射後試験では、ACMIによる被覆管外径増加が確認されている⁴⁾。この外径増加は、B₄Cペレットの単純な（リロケーションを考慮しない）スエリング速度とペレット-被覆管間ギャップから予測される接触時期よりかなり前の時期から発生している。また、被覆管の変形は異方的で、初期のギャップが広い制御要素ほどオーバリティ（長径と短径の差）が大きくなる傾向がある。これらの結果から、ACMIはペレットリロケーションによって助長されることが明らかにされている。

当時の制御棒開発においては、薄肉のステンレス鋼管（シュラウド管）をB₄Cペレットに被せ、リロケーションを抑制する方法が効果的と考えられていた。その後、シュラウド管を装着した制御

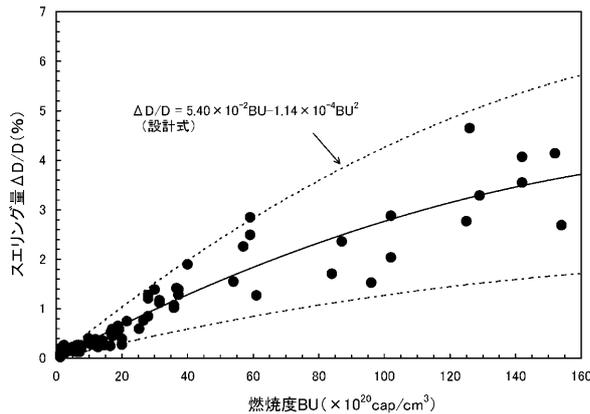


図2 B₄Cペレットスエリングの燃焼度依存性

要素の試験により、ACMIが緩和されることが確認された⁵⁾。そこで遮蔽集合体においても、リロケーションを抑制するため、シュラウド管を遮蔽要素に採用することとした。

これより、図2のスエリングデータの95%信頼幅上限を用い、被覆管 - シュラウド管間ギャップが閉じる時期を寿命とし、初期ギャップ幅を約1.2mm (被覆管内径22.2mm) に設定した。

なお、このときのペレット径は20.55mm、シュラウド管内径及び外径は、それぞれ20.75mm、20.95mmである。

2.4 内圧評価

遮蔽要素の内圧評価において重要なB₄CペレットからのHe放出率も、スエリング挙動と同様AMIRのキャプセル及びMK-制御棒要素(密封型)のピンバンクチャ試験において取得したものをを用いた³⁾。照射後試験により得られた、He放出率(照射後試験で求めたHe放出量/He生成量評価値)の値を図3に示す。第9列における遮蔽要素平均の最高燃焼度は $100 \times 10^{20} \text{cap/cm}^3$ 、B₄Cペレット最高温度は900°Cである。1,000°C以下で照射されたペレットの照射後試験データに限れば、データの取得されている燃焼度 $100 \times 10^{20} \text{cap/cm}^3$ まで、He放出率は25%を下回っている。したがって、遮蔽集合体の使用条件をカバーするこの温度範囲、燃焼度範囲においては、He放出率25%で設計することができる。

燃焼度 $100 \times 10^{20} \text{cap/cm}^3$ のとき、ピン内圧は約24MPaまで上昇する。この圧力による応力評価及びクリープ寿命分数和、疲労損傷和の計算をもとに、遮蔽要素の必要被覆管肉厚(被覆管外径)を

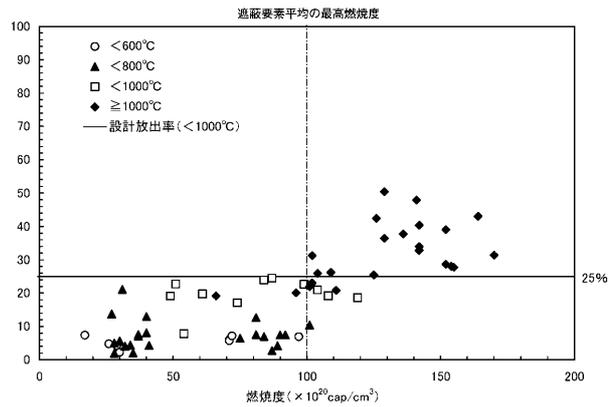


図3 He放出率(%)の燃焼度及び照射温度依存性

1.7mmと定めた。この肉厚において、内圧による応力は、過渡変化時も含め、制限値を下回る。また、クリープ寿命分数和と疲労損傷和の合計は約0.74であり、制限である1.0を下回る。

なお、遮蔽集合体は、炉心最外周に装荷されるため、高速中性子照射量は最大でも約 $6 \times 10^{22} \text{n/cm}^2 [E < 0.1 \text{MeV}]$ である。このときラッパ管のスエリング量は約0.4%であり、DDI (Duct-Duct-Interaction) は問題とはならない。また、被覆管とラッパ管は同じPNC316鋼であるため、スエリング差は無視できる。ただし、被覆管側は内圧によるクリープ変形が生じる。このため、この評価に基づき、使用末期までBDI (Bundle-Duct-Interaction) が発生しないよう、スパイラルワイヤ径を定めた。

また、遮蔽集合体は、長期間炉内に滞在するが、被覆管外面のNa腐食は、最高温度500°Cでも16μmと僅かである。B₄Cペレットはシュラウド管に包まれており、被覆管内面には接触しない。このため、Heボンド型では、被覆管内面への炭素やホウ素の浸入はなく、強度評価への影響はない。

2.5 設計結果

以上の構造設計の結果、被覆管内径22.2mm、肉厚1.7mm、ワイヤ径1.0mmを定め、設計目標である第9列6年、第10列12年を達成できることを確認した。

MK-遮蔽集合体の構造設計にあたっては、「常陽」MK-炉心における実機制御棒の約40体の製作実績と使用経験、及びAMIRで得られた照射データ等を十分反映することで合理的な設計を達成した。

3. 反射体

3.1 設計目標

「常陽」MK- 炉心では、炉心からの漏洩中性子を散乱反射し、炉心中性子束分布の平坦化と透過中性子を減ずる遮蔽体としての機能を目的に、炉心燃料集合体の外側に2種類の反射体を配置している。各反射体の装荷位置及び体数は、炉心第5列～第6列に内側反射体約40体（ただし5列はコーナ部2体のみ）、炉心第7列～第8列に外側反射体約90体の合計約130体である。

MK- 炉心での使用経験によれば、反射体はラッパ管のスエリング差に伴う集合体の曲がりや反射体要素とラッパ管のスエリング差による両者間の干渉が生じる。そのため、炉心湾曲や自身の健全性及び燃料取扱設備での取扱いに支障を来さぬよう、定期的な交換を行っている。また取替品の製作に当たっては、これまでも交換寿命の延長を図るため、反射体要素材質変更、内側反射体の一部構造変更等の改良を行ってきた。

反射体の交換寿命は、累積高速中性子照射量により支配される。その結果、MK- 炉心における実績としては、内側反射体で約 $6 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ [E 0.1Mev] 外側反射体で約 $5 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ [E 0.1Mev] を達成している。

「常陽」における反射体の使用実績及び照射後試験結果を含めた使用経験は、先行炉の実証データとして、高速炉の実用化に向けた炉心構成要素の開発上できわめて貴重なものである。同時に「常陽」の運転管理においても、運転経費の節減や使用済反射体の発生に伴うそれらの貯蔵、さらに将来的な廃棄物処理対策にも影響する。したがって、その寿命は軽視できない問題である。しかもMK-

炉心では、高速中性子束が約1.3倍となり、使用条件が益々厳しくなる。

よって、これらを勘案し、MK- 炉心後の取替反射体として、炉心材料開発の最新の成果を取入れることで、最大高速中性子照射量 $3 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ [E 0.1Mev] を目標とする長寿命反射体の開発に取組んできた。これはMK- 炉心で使用してきた反射体寿命を約5倍に伸張するもので、将来的な反射体の交換を不要とすることも視野に入れたものである。

3.2 材料選定及びスエリング評価

反射体の長寿命化の制限因子としては、ラッパ管及び反射体要素のスエリングによる集合体のふ

くれや曲がり支配的である。これは、集合体の変形による燃料交換設備での取扱いや燃料集合体等の健全性に与える影響を防止するためである。そこで反射体の長寿命化に向け、目標照射量に耐える材料の選定とスエリング評価を実施した。

(1) ラッパ管材

ラッパ管材としては、これまで用いてきたPNC316鋼に対し、より耐スエリング特性に優れ、かつ所定の強度を持った材料選定が必要となる。

高速炉用ラッパ管材としては、将来のFBR実用化を念頭に、高強度フェライト/マルテンサイト鋼（鋼名PNC-FMS⁶⁾が開発されていた。そこで、同鋼の長寿命反射体への適応性を評価した。

本材料は、Fe-12Crを主成分とするフェライト系ステンレス鋼に、固溶強化元素としてMo、Wを、また析出強化元素として、V、Nbをそれぞれ添加したものである。これにより、従来のフェライト系ステンレス鋼に対し高温強度を改良している。また、照射試験データは米国FFTF照射等によって、材料のスエリング特性が確認されている⁶⁾。これら照射データに基づき運転時のラッパ管使用条件である温度510℃でスエリング量を評価した。その結果、最大高速中性子照射量 $3.0 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ [E 0.1Mev] とした場合でも、ラッパ管外対辺間距離の増加量は0.08%と僅かであった。これらの結果から、自身の健全性はもちろんのこと他の集合体への影響や燃料取扱設備での取扱い上問題のないことを確認した。さらに強度評価では、ラッパ管肉厚を従来同様1.9mmとし、地震時も考慮した機械的強度について評価した。その結果、ラッパ管に生じる最大発生応力はパット部で98.6N/mm²であり、許容応力に対し設計比で0.43と十分許容応力を満足し、健全性上問題のないことを確認した。これらの検討を踏まえて高強度フェライト/マルテンサイト鋼をラッパ管材に選定することにした。

(2) 反射体要素

反射体要素には、炉心からの中性子を散乱反射し漏洩中性子量を減ずる機能が要求される。そのため材料選定に当たっては、炉心の核特性への影響も考慮した。候補材としては、ラッパ管材に選定した高強度フェライト/マルテンサイト鋼と将来の高速炉実用化のための被覆管候補材の一つとして開発が進められていた高Niオーステナイト鋼を取り上げた。

炉心の核特性の影響について両者を比較した結果、高Niオーステナイト鋼は、フェライト鋼に対し格段に中性子の反射効果が優れていることが明らかとなった。また、炉心の過剰反応度へも寄与し、炉心燃料集合体の効率的な運用も可能との見通しが得られた。これらのことから、高Ni鋼オーステナイトを反射体要素に採用することとした。

高Niオーステナイト鋼⁷⁾は、Ni濃度を35~45%に増加させ、耐スエリング特性の改善を図った材料である。代表的な高Ni鋼であるPE 16は、英国の高速原型炉PFRでの使用実績により優れた耐スエリング特性を有することが確認されている⁸⁾。

今回反射体要素に用いる高Ni鋼は、高速炉用炉心材料の一つとして開発が進められ、製造技術が確立されている炭・窒化物析出強化型材料である。

反射体要素の実機材料の化学成分及び熱処理条件を表1に示す。これは、PE 16と同様優れた耐スエリング特性が期待される材料である。

PE 16の特性を基に最大高速中性子照射量 $3.0 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ [E 0.1MeV]に対する反射体要素のスエリングとして、ラッパ管との干渉の有無を評価した。評価条件は、炉心の基本設計で定められている反射体要素のステンレス鋼充填率を確保するため、外径寸法は従来と同一とした。その結果、スエリングによる外形増加率は、最大でも1% D/D以下であり、ラッパ管の干渉を防止するための許容外径増加率4% D/Dを十分満足することを確認した。なお、高Niオーステナイト鋼は、耐スエリング性を高めるため、照射により生成され

る点欠陥(原子空孔、格子間原子)を消滅させるためのシンク(点欠陥消滅場所)、すなわち結晶粒内の析出物を十分に形成させることが重要である。これは、同一材料を用いた「常陽」での先行照射結果からも確認されている。このため、本材料の製造に当っては、析出物の生成を促進させるための熱時効条件を選定し、実機製作に反映した。

今後の反射体の使用に当たっては、計画的な照射後試験を実施し、これらのスエリング特性を確認しつつ、段階的な使用寿命の延長を行なっていく予定である。

3.3 反射体構造検討

反射体は、ステンレス鋼の丸棒を反射体要素に用いた内側反射体と、六角ブロック状のステンレス鋼を反射体要素に用いた外側反射体がある。これらとともに、六角形状のラッパ管内に反射体要素を収納し、その上部にハンドリングヘッドを、下部にエントランスノズルを取付けた構造である。

反射体構造を図4に示す。

従来これらの材料はすべてSUS316ステンレス鋼等オーステナイト系ステンレス鋼を使用していた。

しかし、今回ラッパ管にフェライト鋼を用いるため、オーステナイト鋼とフェライト鋼の異材溶接を行う必要がある。そこで構造検討では、ラッパ管接合方法として、溶接接合及び機械的接合について検討した。

(1) 溶接接合

高温、高中性子照射、Na中等の条件で使用され

表1 高Niオーステナイト鋼の化学成分及び熱処理条件

化 学 成 分 (wt%)											
成 分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	Ti	Nb
規格値	0.020 ∧ 0.060	0.50	0.10 ∧ 0.30	0.010 ∧ 0.040	0.01	35.00 ∧ 36.50	14.00 ∧ 16.00	2.10 ∧ 2.70	1.50 ∧ 1.80	0.20	0.32 ∧ 0.38
目標値	0.050	-	0.20	0.025	-	35.50	15.00	2.40	1.60	-	0.35
成 分	Ta	V	B	O	N	Al	Cu	Co	Ca	Zr	Fe
規格値	0.05	0.15 ∧ 0.25	0.002 ∧ 0.006	0.0040	0.030 ∧ 0.070	0.05	0.20	0.05	0.10	0.10	残
目標値	-	-	0.004	-	0.040	-	-	-	-	-	-

熱 処 理 条 件			
素材寸法	固 溶 化 熱 処 理		時 効
30棒材	1,150	30min	650 3.0h
80棒材	1,130	90min	650 3.0h

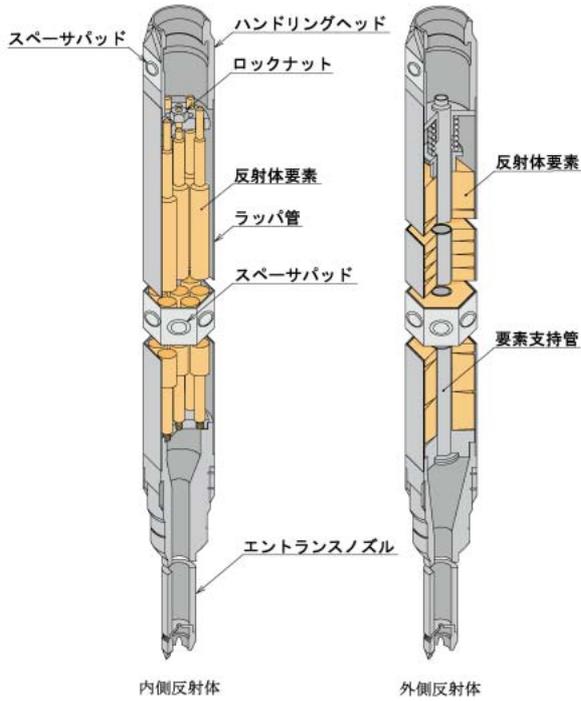


図4 反射体構造

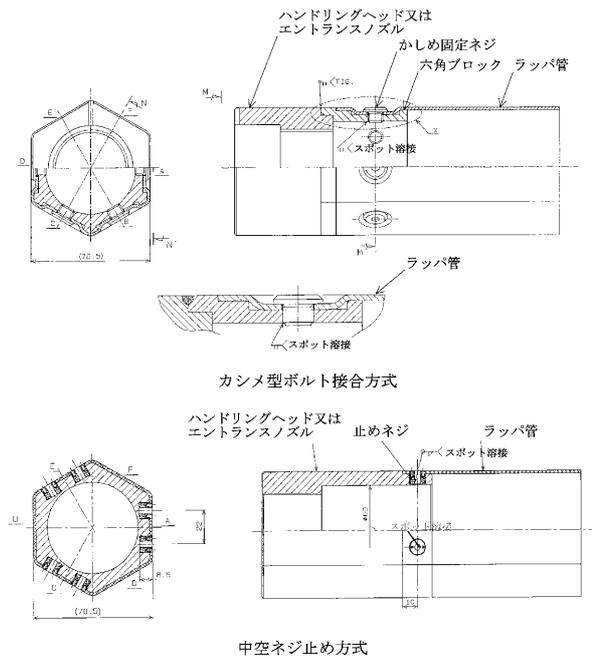


図5 反射体ラップ管機械接合構造概念

る高速炉用炉心構成要素についてフェライト鋼とオーステナイト鋼の異材溶接に関する国内・外の調査を実施した。その結果、実績例はないことが分かった。以上から溶接接合は、技術開発に時間を要し、量産性及び製造コスト面でも課題が予想されたことから、今回の採用は見送ることにした。

(2) 機械的接合

従来の反射体構造を基本に、上述の溶接接合の課題を避けるため、フェライト鋼ラップ管とハンドリングヘッド及びエントランスノズルの機械的接合構造を検討した。検討に当たっては、海外炉での同類の使用実績調査を含め、反射体に適応可能な複数の構造案について構造健全性及び製作性の観点から比較検討を行った。また、その中で最も成立性の高いと考えられた方式について、その後試作、強度試験を行い最終構造の絞り込みを行った。試作・試験を行なった中空ネジ止め方式及びカシメ型ボルト接合方式の構造概念を図5に示す。

中空ネジ止め方式は、ラップ管にネジ穴加工を施しておき、SUS316ステンレス鋼製の中空固定ネジを用い、エントランスノズル又はハンドリングヘッドと勘合し、脱落防止を行なう構造とした。その際、固定後ネジの回り止めは、中空穴を利用しエントランスノズル等のSUS316鋼同士で点付け溶接を行うものとした。

カシメ型ボルト接合方式は、より強固にラップ管を固定出来るようつば付きボルトを用い、ラップ管を外側から直接構造材にボルトで固定する方式である。この際、ボルト頂部がラップ管の外に出ない様、ラップ管のボルト固定部に窪みを設けたカシメ構造を特徴としている。さらにカシメ部は加工性や反射体全体の組立て性を考慮し、長さ約50mmのSUS316ステンレス鋼を加工した六角ブロックとした。また、本ブロックとエントランスノズル又はハンドリングヘッド間はそれぞれ溶接で接合する構造とした。

強度試験では、それぞれの試作体を用い、次の3つの試験を実施した。まず、熱サイクル試験では、原子炉の運転・停止の温度差の繰り返しに対する健全性確認として、250 - 550 の熱サイクルを90サイクル実施した。次に、引張り試験として、燃料交換機での最大引き荷重約1 tonに対し最大4 tonまでの荷重を加えた耐久試験を実施した。更に、曲げ試験では、地震時等の曲げモーメントを模擬した荷重を加え曲げ特性試験を実施した。その結果、加工性、機械的強度ともに優れたカシメ型ボルト接合方式を最終構造に選定した。

3.4 実機反射体製作

上記反射体設計に基づき、MK-炉心の取替用として、内側、外側合わせて98体の反射体の製作



写真1 反射体外観

を行った。反射体完成品外観を写真1に示す。この内、既に12体がMK-炉心運転用として使用を開始している。今後は、MK-炉心の運転のもと、MK-炉心から継続使用してきた反射体の交換寿命に合せ、順次長寿命反射体との交換を行っていく予定である。

4. 制御棒

4.1 設計目標

「常陽」制御棒は、ステンレス鋼管内に B_4C ペレットを装てんした制御要素（ピン）7本を束ねた構造を基本としており、炉心に6体装荷される。「常陽」MK-制御棒の構造を図6に示す。

FBR実用化に向け、後継炉ではサイクル運転日数の増大が必須であり、制御棒も長期使用に耐えるよう高度化を図っていく必要がある。この観点から、先行炉である「常陽」の制御棒には、高燃焼度までの使用実績と照射データを蓄積していく役割が期待されている。また、運転費削減の観点でも長寿命化は重要な開発テーマであった。そのため、中性子束が増大するMK-炉心への適用を目指し、長寿命化の検討を進めてきた。

MK-制御棒は、要素内部がHe雰囲気でのHeボンド型である。このうち、116EFPD～308EFPDまで使用されたピーク燃焼度 $22\sim 57 \times 10^{20} \text{cap/cm}^3$ の18体の制御棒について照射後試験を行っている⁴⁾。その結果、比較的燃焼度の高い8体の制御棒の被覆管（15本）に前述のACMIに起因した微小なクラックが確認されている。

このACMI挙動が確認されてから、MK-制御棒は、被覆管の塑性歪が、炉内の塑性歪限界に達

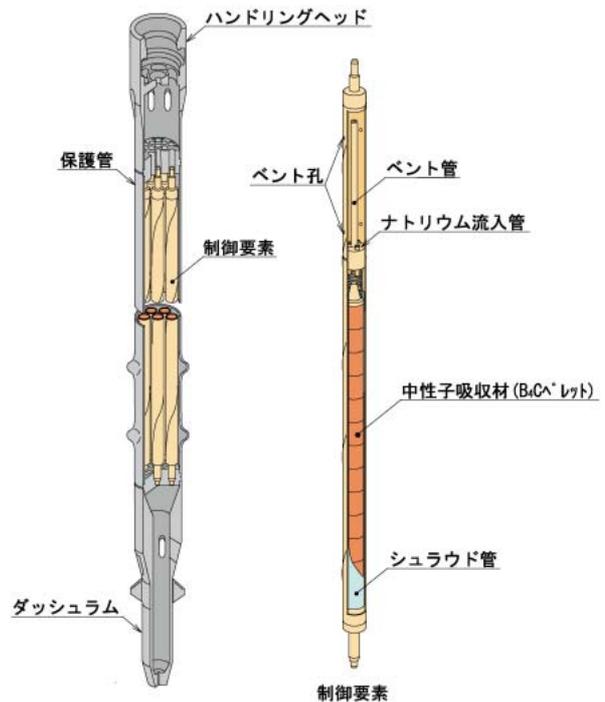


図6 「常陽」MK-制御棒構造

する燃焼度（約 $40 \times 10^{20} \text{cap/cm}^3$ ）で使用を制限している⁹⁾。本評価燃焼度は、照射後試験におけるクラック発生下限燃焼度（ $43 \times 10^{20} \text{cap/cm}^3$ ）と良く一致している。一方、核設計における制御能力を担保するための燃焼度制限は、 ^{10}B 平均燃焼率10at%（ピーク燃焼度 $260 \times 10^{20} \text{cap/cm}^3$ に相当）である。すなわち、ACMIによって実際の使用燃焼度は核的制限値の1/6程度に制限されている。

このような状況のもと、MK-炉心に向けた制御棒設計においては、可能な限り長寿命化を図ることとした。このため、ACMI対策構造の検討を実施し、海外炉の設計、照射データ等も踏まえた現状の知見を反映することとした。

4.2 構造検討

高度化に当たり、中性子吸収能力、高温、高照量での使用実績、照射データの充実度等から、吸収材は B_4C ペレットを継続して用いることとした。このため、ACMI対策として、リロケーションを抑制しつつ、被覆管-ペレット間ギャップを拡大する必要があった。

リロケーション抑制の観点では、MK-の6次取替制御棒以降 B_4C ペレットにシュラウド管を装着し、試験的な使用を開始している⁵⁾。一方、被覆管-ペレット間ギャップを拡げるためには、伝熱

性を改善し、ペレットやシュラウド管の過熱を抑制する必要がある。Heに比べてはるかに高い熱伝導特性を有するボンド材としては、高速炉冷却材であり、B,Cとの共存性に優れたNaが最良であると判断した。これにより、「常陽」MK- 制御棒構造として、シュラウド管を装着したNaボンド型制御棒を選定した。この概念を図7に示す。

「常陽」のNaボンド型制御棒の要素構造の型式候補としては下記3タイプを比較検討した。各構造を図8に示す。

上下ポーラスプラグ型（炉内Na流入充てん）

ダイビングベルNa封入型（製造時Na充てん）
 ダイビングベルNa流入型（炉内Na流入充てん）
 は仏国フェニックス炉，スーパーフェニックス炉の制御棒が採用している構造である¹⁰⁾。要素上下にポーラスプラグを設置し，炉内で要素下部からNaを充てんする。本構造は，ポーラスプラグのメッシュ径等の設計等により，取り出し時のNaドレンも期待できる。この場合，洗浄時に蒸気や水が浸入しやすくなり，洗浄性を高められると思われる。ただし，照射中のB,Cペレットの割れに伴って発生が予想される，B,C粉末の保持性を確

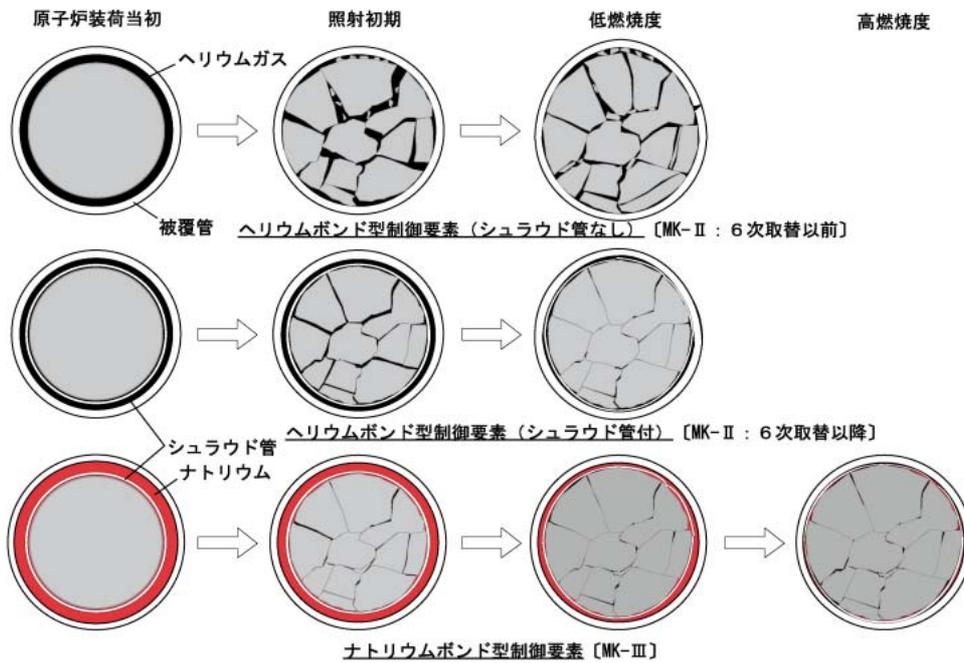


図7 ACMI対策のための構造改良(概念図)

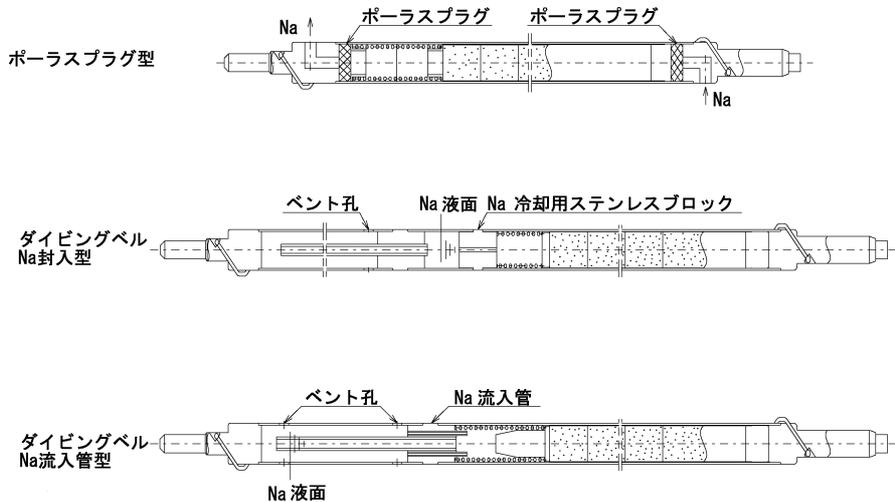


図8 Naボンド型制御要素型式候補

認しておく必要がある。また、ポーラスプラグの目詰まり等でNaドレンが充分でない場合、長期水中保管中のNaと水の反応速度が過大にならないことを確認しておく必要がある。更に、下部ポーラスプラグは、高い照射量に達するため、信頼性を示す上で、十分な照射データが必要と判断された。製作コストは従来並みと予想される。

は過去にロシアで検討されていた構造である¹¹⁾。製作時にNaを封入するため、Na充てん性の確認は不要であり、B₄C粉末を要素内に確実に保持できる。しかし、Naベーパーの発生による制御要素内Naの減少を防ぐため、冷却ブロックによりNaベーパーを液化する必要がある、この機能を長期試験で確認する必要がある。さらに、使用後のNa洗浄は解体しなければ不可能である。製作方法の検討を要し、また製作時Na充てん設備の設置、保管管理等の観点から高価になるものと判断された。

は「常陽」が独自に考案したもので、MK-制御棒にNa充てん機能を付加した構造である。Naドレン機能がない代わりに、B₄C粉末は確実に保持できる。取り出し後の洗浄性を確認する必要があるが、蒸気や水の浸入速度は遅いため、反応速度は緩慢になると予想される。したがって、ポーラスプラグ型と同様に、長期水中保管中のNaと水の反応速度につき、確認が必要である。充てん機構部の照射量は低いため、短期の炉外試験で機能を確認できる。製作コストは従来並みである。「常陽」では、MK-炉心運転用として実機制御棒の製作設計に反映するまでの開発時間が短い点を考慮し、ダイビングベルNa流入充てん型を選択した。

構造上重要なNa充てん機構は、実験によって主要寸法を設定した。Na充てんに必要な差圧を確保するダイビングベル部の上下ベント孔間距離については、炉内装荷時(250)のNa物性において、炉外Na中実験に基づく実測値のばらつきを考慮すると約170mmとなった。実機ではこれに更に余裕を見て260mmを確保することとした。

ペレット-被覆管間ギャップへのNa充てん性については、ギャップ幅をパラメータにNaの浸入性を炉外実験により確認した。

以上の試験結果に基づき、実機制御要素のフルモックアップ試験体を用い、炉外Na中試験を実施した。その結果、本制御要素構造が十分なNa充てん性を有していることを確認した¹²⁾。

なお、本構造の洗浄性と長期水中貯蔵性については、4.5において述べる。

4.3 熱設計

MK-炉心での制御棒チャンネルの冷却材流量は最小1.98kg/sである。この冷却材流は制御棒保護管内流路と周囲のバイパス流路に分配される。

保護管寸法やB₄Cペレット径は、従来と同等の挿入性、制御能力を確保するため、変更しないこととした。そこで、その他の被覆管外径、肉厚、ワイヤ径、要素配列ピッチ等をパラメータに、保護管内外の流量配分を計算し、被覆管温度を評価した。

なお、保護管内の冷却材温度は、保護管外の低温バイパス流、隣接燃料集合体からの熱流束等によって影響を受ける。特に、低温のバイパス側流量は、保護管内流量の約2倍であるため、この影響によって温度が下がる効果が支配的である。したがって、最高温度評価に当たっては、保守的に保護管内サブチャンネルを断熱条件として被覆管温度を計算した。

被覆管外径18.9mm、肉厚0.5mm、ワイヤ外径1.1mmのとき、被覆管最高温度は上端部で約630 となる。この条件で、Na環境下で加速されるB₄C-被覆管化学的相互作用(以下ACCI; Absorber Cladding Chemical Interaction)を考慮しても使用末期に適切な被覆管肉厚を残すことができることを確認した。更にこのバンドル仕様において、シュラウド-被覆管間ギャップで1.3mmを確保できる。このため、これを実機バンドル仕様とした。

また、Naボンド環境でのB₄Cペレットやシュラウド管の温度は、Heボンド環境に比べて大幅に低下する。しかし、B₄Cペレットは照射中Heを放出するため、万一NaギャップにHe気泡が滞留した場合、局所的にB₄Cペレットやシュラウド管の温度が上昇するおそれがある。このため、生成Heの気泡がNaギャップに滞留したモデルで温度解析を実施した。

B₄Cペレットは溶融防止の観点から2,350 を制限温度としている。また、シュラウド管はペレット保持機能を維持する観点から温度を制限する必要がある。本評価のHe滞留は、過渡的な事象であり、温度上昇も気泡中心でスポット的に生じる。このため、溶融防止の観点から1,100 を制限

とした。解析においては、燃焼に伴う、ギャップ幅の変化、発熱量変化、照射ペレットの熱伝導率の低下³⁾等の経時変化を考慮した。これに過出力係数を考慮し、 B_4C ペレット及びシュラウド管の温度履歴を評価した。

この結果、使用期間中の最高温度はペレット約2,050℃、シュラウド管約1,060℃であり、いずれも溶融の恐れはないことを確認した。

4.4 機械設計

(1) ACMI 評価

Naボンド型制御棒におけるACMI設計では、高燃焼度領域での挙動の不確かさを考慮して従来の塑性歪制限は適用しないこととした。その代わりに、 B_4C ペレットの単純スエリングによってギャップが閉塞する評価時期を寿命とした。すなわち、ペレットリロケーションはシュラウド管によって充分抑制できるものと想定した。 B_4C ペレット温度の低いNaボンド型制御要素では、スエリング速度の増加が予想される。低温でのスエリング挙動に関する報告は多くないが、「常陽」でもHeボンド環境で、90～95%T.D.の B_4C ペレットについてスエリングデータを取得している。また、フランスは、84%T.D.及び96%T.D.の2種類のペレットについてNaボンド環境での低温照射時のスエリングデータを報告している¹³⁾。

「常陽」での低温照射データの取得範囲は低燃焼度領域に限られ、データ点数も少ない。そこで、高燃焼度領域までデータが取得されており、密度も高く安全側の値を与えるフェニックス炉での96%T.D.のスエリングデータをもとにACMI評価を実施することとした。この結果、ACMI寿命は、図9のとおり $104 \times 10^{20} \text{cap/cm}^3$ に延長できることを確認した。

なお、シュラウド管の効果については、「常陽」制御棒、AMIR等で一部照射データが取得されつつある。また、フェニックスの照射試験においても、シュラウド管を装着した制御棒ピンでは、前述のACMI評価寿命の約2倍に相当する燃焼度 $220 \times 10^{20} \text{cap/cm}^3$ まで、被覆管の健全性が確認されている¹⁰⁾。

(2) ACCI 評価

Naボンド型制御棒では B_4C -Na-ステンレス鋼の化学的共存性も確認する必要がある。サイクル機構では、450～650℃のNa中浸せき試験¹⁵⁾によ

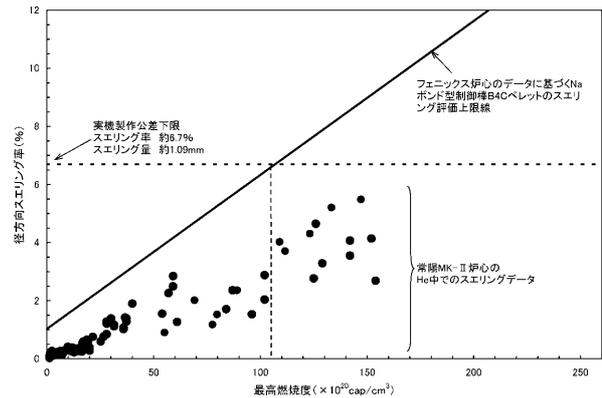


図9 Naボンド型制御棒におけるACMI評価線図

り、20,000時間(約830日)までNa中の B_4C ペレットが安定であることを確認した。また同時に316ステンレス鋼に生じたACCI反応層の深さを測定している。反応層深さは時間 t の平方根に比例し、 $x = kt^{1/2}$ で表される。 $k = A \exp(Q/RT)$ 、 A : 頻度定数、 Q : 活性化エネルギー、 R : 気体定数、 T : 温度(K)である。

DUNNERら¹⁴⁾は炉外試験データから $k(\text{cm/s}^{1/2}) = 0.522 \exp(-97200/RT)$ ($R = 0.00831 \text{kJ/Kmol}$)を導いており、サイクル機構の炉外試験データ¹⁵⁾もこれに近い。しかし、「常陽」のAMIR、フェニックスの照射試験データ¹⁶⁾から、炉内の k は、DUNNERの炉外実験式の約1.5～3.8倍と大きいことが示唆されている。そこで、炉内ACCIは、上式の4倍として評価することとした。

また、炉外試験により、表面へのクロム、チタン、ニオブ、ニッケルの被膜によるACCI抑制効果についても確認している。特にクロム被膜は、650℃の条件で、10,000時間まで母材316ステンレス鋼にACCI反応層を生じさせず、最も優れた性質を示した¹⁵⁾。これらの結果を受け、実機被覆管内面には、クロム被膜を施すこととした。ただし、設計上は照射環境下での不確かさを考慮し、被膜なしの場合の反応層深さを被覆管の減肉分(強度を期待しない層)として取り扱った。

内外圧力差のないベント型制御要素では、一次応力は元々低い。制御棒の最大応力の発生要因は、被覆管-下部端栓溶接部スエリング差に伴い発生する応力である。しかし、この二次応力については、被覆管肉厚にほとんど依存しない。

被覆管温度630℃の条件において、寿命末期での被覆管内面のクロム皮膜を考慮しない場合の

ACCI反応層とNa外面腐食の合計は、約370 μm となる。この寸法条件において強度評価を実施し、その健全性が確保されることを確認した。

4.5 使用済制御棒の洗浄・貯蔵

使用済制御棒は、蒸気、水によって付着Naを洗浄した後、水冷却池に缶詰缶に封入した状態で貯蔵する。しかし、Naボンド型制御棒の場合、従来の外部付着量に、要素内部の残留Naを加えると、1体当たりの残留Na量は約300gと評価される。これは従来のHeボンド型制御棒の残留Na量（約50g）の約6倍に相当するため、使用後の取り扱いに関する検討が必要であった。具体的な使用後の取扱方法としては、湿式洗浄貯蔵（従来の方法）、未洗浄乾式貯蔵、解体洗浄による廃棄等が想定される。ただし、この方法では、制御棒の貯蔵又は解体・洗浄のため、専用の設備が必要になると考えられた。

したがって、既存設備を利用でき、また、最終処分の観点でもNaを可能な限り減少できるの湿式法が望ましい。このため、その実現性について試験を実施することとした。湿式法の課題は、Na-水反応に伴う安全性確認であったため、モックアップ試験体による洗浄貯蔵試験を行った。

洗浄貯蔵試験は、図10のとおり、「常陽」のNa洗浄設備、貯蔵設備において実施した^{12),17)}。供試体として製作した洗浄模擬体は、炉内燃料貯蔵ラ

ック中に約24時間保管しNa充てんを行った後、蒸気洗浄、脱塩水洗浄の試験を行い、その後約75日間の缶詰缶内で水中貯蔵の試験を行った。洗浄中の水素濃度、水導電率及び圧力等は、通常の炉心構成要素と比較して同程度であり、安全上問題なく取り扱うことができた。また、本試験の結果、ピン内の残留Na量は、1本当たり約20g程度であった。

引き続き実施した、水中貯蔵では残留Naの水との緩やかな反応による缶詰缶の継続的な内圧上昇が確認された。その値は、Na反応量換算で、平均0.25g/日程度に相当し、大まかには2年程度の水中貯蔵でNaを全て除去できる可能性を確認した。本試験に基づき、Naボンド型制御棒水中貯蔵用缶詰缶には、ガスバント機能を設けることとした。

以上、一連の試験の結果、湿式洗浄貯蔵の安全性とNa除去の可能性を確認でき、使用後の処理方法について見通しを得た。

4.6 今後の高度化計画

MK-炉心での使用に向けて開発された、Naボンド型制御棒の寿命は、現状の知見に基づく設計では $104 \times 10^{20} \text{cap/cm}^3$ と評価される。これは、従来のHeボンド型制御棒寿命の2.5倍以上に相当し、フェニックス炉の制御棒の最高燃焼度約 $150 \times 10^{20} \text{cap/cm}^3$ に近いレベルに到達しつつある。

寿命を決定付けるACMI評価はB.Cスエリング

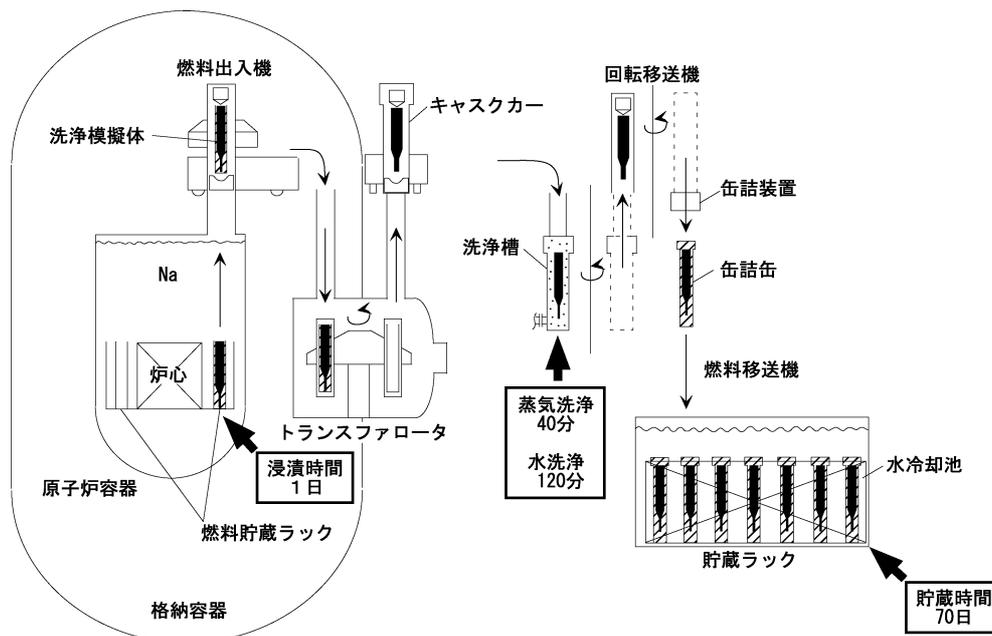


図10 Naボンド型制御棒洗浄貯蔵試験の概要

挙動に大きく依存する。そのため、今後MK-炉心において、実機制御棒のスエリングデータを取得しつつ、これを適宜設計に反映することにより、さらなる高燃焼度化を追及していく計画としている。

また原子炉運転中、炉心の上方に引き抜いて使用される制御棒の B_4C ペレットスタックでは、下端に著しい燃焼ピークを生じる。例えば、スタック下端部の燃焼度は、平均燃焼度の約3倍となる。 B_4C スタックの全長としての制御能力を同等に保ちつつ、下部の ^{10}B 濃縮度またはペレット密度を、上部に比べて低くすれば、下端に生じる燃焼ピークを抑制することができる。現在の使用期間は、スタック下端での局所的なACMIによって決定されている。したがって、軸方向燃焼度分布の平坦化によって、使用期間を延長できる可能性がある。

今後は、最終的には、核的制御能力から決まる燃焼度制限まで使用することを目標に、この軸非均質化の検討も含め、制御棒開発に取り組んでいく計画である。

5. おわりに

「常陽」MK-計画に対応し、炉心構成要素の高性能化のため、遮蔽集合体、反射体、制御棒の設計・製作を実施した。本設計ではMK-炉心の要求機能を満たすとともに、制御棒、反射体については、炉心の高中性子束化に対応し設計目標を満足する長寿命化を達成した。これにより、MK-炉心の運転経費及び廃棄物発生量の低減に寄与することができる。また、遮蔽集合体も、使用済燃料のポット内発熱を充分低減できる見通しであり、稼働率の向上に寄与することができる。

遮蔽集合体及びフェライト鋼反射体については、既にMK-炉心に装荷され、使用を開始している。また、Naボンド型制御棒についても、MK-炉心第1サイクルより装荷され、使用を開始する予定である。

これら炉心構成要素は、今後MK-炉心の運転に供しつつ、設計の妥当性、健全性評価を目的とした照射後試験を計画的に実施し、さらなる高性能化に取り組んでいく予定である。

<参考文献>

1) 吉田昌宏, 青山卓史 他: “照射性能向上のためのMK-炉心の設計”, サイクル機構技報No.21別冊,

(2003)

- 2) 大洗工学センター特集 “高速増殖炉(FBR)の研究開発, 燃料材料開発”, 動燃技報No.73-5, PNC TN1340 90-001 (1990).
- 3) Maruyama, T., Onose, S. et al.: “Effect of fast neutron irradiation on the properties of boron carbide pellet”, Journal of Nuclear Science Technology, Vol.34, No.10, P.1006~1014 (1997)
- 4) 丸山忠司, 小野瀬庄二 他: “「常陽」MK-制御棒の照射後試験 - 吸収ピンの照射挙動評価 - ”, PNC TN9410 97-077 (1997).
- 5) 田中康介, 菊池 晋 他: “「常陽」MK-制御棒(CRM601)の照射後試験 - シュラウド型制御棒吸収ピンの照射挙動評価 - ”, JNC TN9430 99-001 (1998).
- 6) 鹿倉 栄, 野村茂雄, 鶴飼重治 他 “高速炉炉心材料としての高強度フェライト/マルテンサイト鋼開発”日本原子力学会vol.33, No.12, P.47~60(1991)
- 7) 村田純教 他 “高速炉炉心材料としての高ニッケルオーステナイト鋼の開発(1)”日本原子力学会vol.41, No.12, P.44~51(1999)
- 8) 鹿倉 栄, 鶴飼重治 他 “高速炉炉心材料用改良オーステナイト鋼の開発”日本原子力学会vol.36, No.5, P.89~90(1994)
- 9) 宮川俊一, 曾我知則 他: “「常陽」MK-制御棒の開発と使用実績の評価”, PNC TN9410 97-068 (1997).
- 10) Kryger, B., Gosset, D. et al.: “Irradiation performance of the SUPERPHENIX type absorber element”. Proc. IAEA-IWGFR technical committee meeting, Obninsk, Russia (1995)
- 11) Matveev, V.I., Nbahob, A.P. et al. “BN型高速炉制御棒の炉物理的概念の発展”, IAEA-IWGFR specialist's meeting, Obninsk, USSR (1983)
- 12) 曾我知則, 宮川俊一 他: “「常陽」制御棒の高度化 - Naボンド型制御棒の設計 - モ, JNC TN9400 99-052 (1999).
- 13) Stoto, T., Housseau, N. et al.: “Swelling and micro cracking of boron carbide subjected to fast neutron irradiations”Journal of applied physics 68(7) P.3198~3206 (1990)
- 14) Düner, Ph., Heuvel, H.J. et al.: “Absorber materials for control rod systems of fast breeder reactors”Journal of nuclear materials 124, P.185~194 (1984)
- 15) 小野瀬庄二, 木村好男 他: “ナトリウムボンド型制御棒の開発 - B_4C ペレットと被覆管のナトリウム中での両立性試験 - ”, PNC ZN9400 99-052 (1992).
- 16) Kelly, B.T. Kryger, B. et al.: “Development of fast breeder reactor absorber elements for high endurance in Europe”, Proc. of international conference on fast reactors and related fuel cycles, Vol-3 P.1.10-1~10, Kyoto, Japan (1991)
- 17) 曾我知則, 飛田公一 他: “「常陽」Naボンド型制御棒の開発”, サイクル機構技報No.8-2, JNC TN1340 2000-003 (2000).