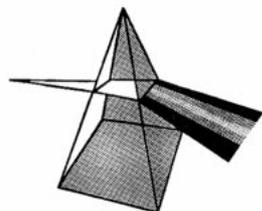


## 【技術報告】



## 「常陽」Naボンド型制御棒の開発

曾我 知則 飛田 公一 三次 岳志  
宮川 俊一

大洗工学センター 照射施設運転管理センター

資料番号 : 8 - 2

The Development of a Sodium Bonded Type Control Rod in Joyo

Tomonori SOGA Kouichi TOBITA Takeshi MITSUGI  
Shunichi MIYAKAWA  
Irradiation Center, O-arai Engineering Center

「常陽」制御棒寿命は、 $B_4C$ ペレットのリロケーション及びスエリングに起因する吸収材 - 被覆管の機械的相互作用 (ACMI) によって約  $40 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  に制限されている。この問題を解決し長寿命化を図るため、シュラウド管を装着したNaボンド型制御棒の開発を進めてきた。本構造におけるACMI及び吸収材-被覆管の化学的相互作用 (ACCI) 等の挙動評価の結果、約  $120 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  までの高燃焼度化が可能であるとの結論を得た。また、一連の試験研究によって炉内でのNaの充てん機構の信頼性を確認し、使用済制御棒の処理についても見通しを得た。本制御棒は2002年以降、「常陽」での使用を開始する計画である。

*The lifetime of the Joyo control rod is limited to approximately  $40 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  by the Absorber Cladding Mechanical Interaction (ACMI) which originates from relocation and swelling of the boron carbide pellets. The sodium bonded type control rod, which has a shroud tube, has been developed to attempt a lifetime-extension by solving this problem. Evaluation of ACMI and Absorber Cladding Chemical Interaction (ACCI) behavior, resulted in approximately  $120 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  was achieved for a possible extended burnup. In addition, a reliability of the sodium charging mechanism, and the possibility of processing of the spent control rods were also confirmed. This type of control rod will be implemented in Joyo after 2002.*

キーワード

高速炉、常陽、制御棒、炭化ほう素ペレット、長寿命、ACMI、ACCI、Naボンド、シュラウド管

*Fast Reactor, Joyo, Control rod, Boron-Carbide Pellet, Long Life, ACMI, ACCI, Sodium Bonded, Shroud Tube*

## 1. はじめに

原子炉の出力制御や緊急停止に用いられる制御棒には高い性能と信頼性が要求される。高速炉の制御棒は、一般に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を束ねたクラスタ構造である。高速実験炉「常陽」も同様の構造を持つ制御棒6体を設置し、現在、熱出力100MWの照射用炉心(MK・炉心)の運転に供している(図1)。原型炉、実証炉ではサイクル運転日数の増大に伴い、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り、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ある。また、「常陽」制御棒の従来の経費は年平均約1.5億円であり、運転費削減の観点でも長寿命化は重要な開発テーマで

ある。制御棒では、 $^{10}B$ 減少に伴う核的寿命よりも前に、特に $B_4C$ ペレットの照射挙動に起因した機械的寿命に至るケースが多く、長寿命化ではこの対策がポイントになる。 $^{10}B(n, \alpha)$ 反応で生成するHeを排出するベント型制御棒はその代表例であるが、各国で制御要素のHeガス内圧上昇を防ぐ構造改良が進む一方で、 $B_4C$ ペレットと被覆管の機械的相互作用(以下、ACMI: Absorber Cladding Mechanical Interaction)が寿命を左右する挙動として認識されるようになった。

フランスはこの問題について早くから開発を行い、1980年頃から伝熱性の向上によってペレット-被覆管ギャップを拡げるNaボンド型制御棒<sup>1)</sup>の使用を開始している。一方、「常陽」ではMK・

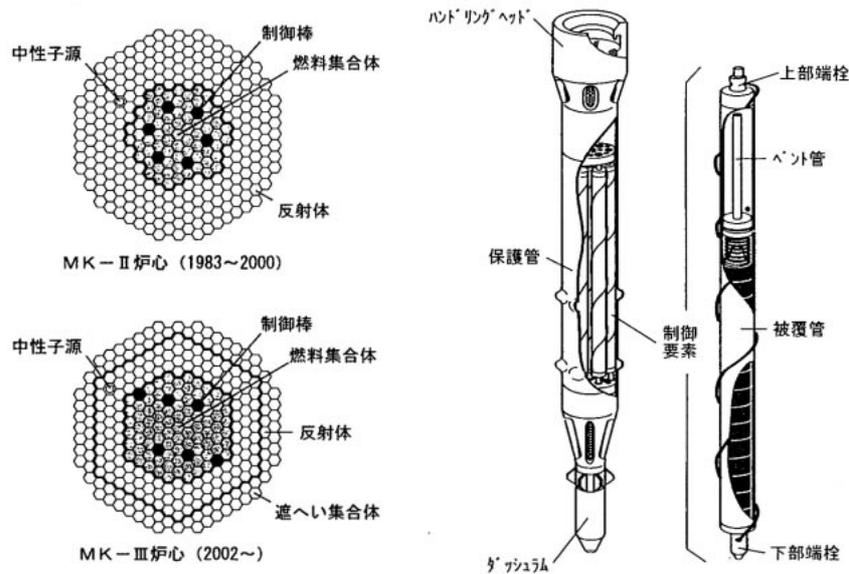


図1 「常陽」炉心構成とMK- 制御棒構造

制御棒にACMIの発生が確認された<sup>2)</sup>ため、本挙動のメカニズムを検討<sup>3)</sup>し、その知見に基づき高度化を図ることとした。この結果、ACMI対策としてシュラウド管を装着したNaボンド型制御棒への改良が有効であるとの結論を得た。

本報では、2002年以降の熱出力140MWの高性能照射炉心（MK- 炉心）に向けて実施してきた「常陽」Naボンド型制御棒の開発<sup>4)</sup>について報告する。

## 2. MK- Heボンド型制御棒の照射挙動

MK- 制御棒は要素内部にHe雰囲気では $B_4C$ ペレットを装てんしたHeボンド型である。これまでに53体の制御棒が製作され、このうち、116EFPD～308EFPDまで使用された18体について照射後試験（以下、PIE：Post Irradiation Examination）を行っている。これら制御棒のピーク燃焼度は、 $22 \sim 57 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ 、ピーク燃焼度位置の高速中性子照射量（ $> 0.1 \text{MeV}$ ）は、 $1.2 \sim 3.1 \times 10^{26} \text{n/m}^3$ である。

PIEの結果、制御要素下端にACMIによると見られる2%程度の外径増加が確認された。しかし、この外径増加は、 $B_4C$ ペレットのスエリング速度<sup>5)</sup>とペレット-被覆管ギャップから予測される接触時期より前に開始しており、同じ燃焼度の要素でも外径増加率は大きくばらついている。また、被覆管の変形は異方性の強い複雑なもので、初期のギャップが広い要素ほどオーバーリティ（長径と短径の差）が大きくなる傾向がある。このため、

ACMIは割れたペレットのリロケーションによって加速されているものと判断された。

さらに、詳細外観検査に供したピーク燃焼度 $43 \sim 56 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ までの8体の制御棒（制御要素56本）のうち、15本の被覆管にクラックが確認された。クラックは、外径増加の大きいスタック下部に発生しており、その最大長さは約4cm、最大幅は約0.3mmである。破面は、脆性的なものがほとんどであった。

図2に、MK- 制御棒におけるACMIによる被覆管変形とクラックの代表例を示す。

現在の制御棒は、クラックの発生を抑制するために、被覆管の塑性歪評価に基づき燃焼度を制限している。図3にこの設計線図を示す。本評価では、ギャップはリロケーションの発生頻度が最も高いと推定される $20 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ で消失するものとし、その後の $B_4C$ スエリング速度に基づく被覆管の弾塑性クリープ計算を行い、累積塑性歪を計算している。燃焼度制限（寿命）は、この塑性歪計算値が実際に制御棒でクラックが発生している塑性歪下限（炉内塑性歪限界）に達する時点であり、図3のとおり約 $40 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ と評価される。本寿命はPIEにおけるクラック発生下限燃焼度（ $43 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ ）とよく一致している。

このように、MK- 制御棒の寿命はACMIによって決定されており、現寿命は核的寿命（ $^{10}B$ 平均燃焼10at%、ピーク $260 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ ）のわずか1/6程度に制限されている。このため、長寿命化を図る上では、ACMIを解決するための新しい設

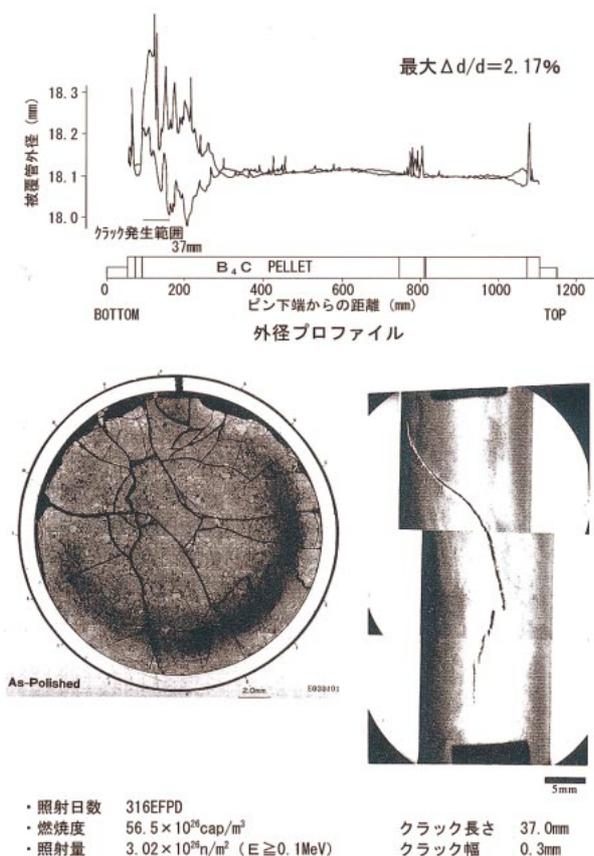


図2 ACMIによる被覆管変形とクラック発生の代表例 (MCR103 D107ピン)

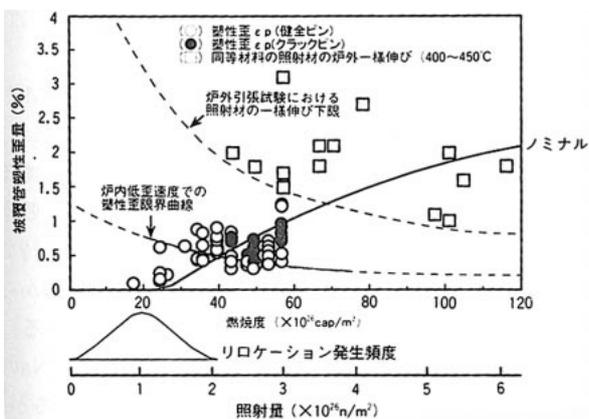


図3 「常陽」MK- 制御棒のACMI設計線図

設計概念を取り入れる必要があった。

### 3. Naボンドシュラウド型制御棒の開発

#### 3.1 「常陽」制御棒の開発方針の決定

「常陽」制御棒の長寿命化の目標は、PHENIXがANTIMAG3照射試験<sup>6)</sup>で達成した最高燃焼度  $220 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  を超え、また、核的なポテンシャルを最大限に引き出すため、核的寿命 (260 ×

$10^{26} \text{cap/m}^3$ ) に設定した。

前述したACMIは、中性子吸収材 $B_4C$ ペレットのリロケーションとスエリングが原因であるが、本吸収材は高い中性子吸収能力を有し、高温、高照射量での実績に富んだ材料である。したがって、吸収材は変更せずリロケーションを抑制しつつギャップを拡大することとした。

リロケーションを抑制するためには、破片を機械的に拘束することが必要である。そこで、被覆管と同等材の薄肉管 (シュラウド管) をペレットスタックに被せ、スタックの形状を維持することとした。シュラウド管は、既にHeボンド型制御棒で試験的な使用を開始している<sup>7)</sup>。

一方、ギャップを広げるためには、伝熱性を改善し、高い線出力の $B_4C$ ペレットを除熱する必要がある。Heよりはるかに高い熱伝導を持つボンド材としては、高速炉冷却材であり、伝熱性及び $B_4C$ との共存性に優れたNaが最良であると判断した。

以上の長寿命化制御棒の設計概念について図4に示す。

このように「常陽」は、MK- 炉心用としてNaボンドシュラウド型制御棒を開発することにした。開発に当たっては、主に以下の課題があった。

#### (1) 構造検討

Naボンド型制御棒の構造には、Na充てん機能 (Naボンドの形成)、Heボンド機能、 $B_4C$ 粉末の保持等についての検討が必要である。「常陽」ではこれに加え、製作費や、早期実用性 (照射試験等、長期の検討の有無) も検討対象になる。

#### (2) 熱設計

熱的に許容できる範囲で被覆管の内外径を広げ、ACMIのためのギャップを広げる必要がある。ミート部の定常温度は、基本的にHeボンド型に比べて低下するため、本報では、生成He気泡の影響や、ボンド材Naの喪失等の非定常的な事象について評価した結果を紹介する。

#### (3) 機械設計

ACMIや、Naボンドで新たに問題となる吸収材 - 被覆管化学相互作用 (以下、ACCI : Absorber Cladding Chemical Interaction) を考慮した、高燃焼度領域での機械設計の成立性について確認する必要がある。

#### (4) 使用済制御棒の処理

制御棒を含む炉心構成要素は、通常、水蒸気洗浄及び水洗浄を行った後、水中貯蔵を行っている。Naボンド型制御棒では、使用後に残留するNaが

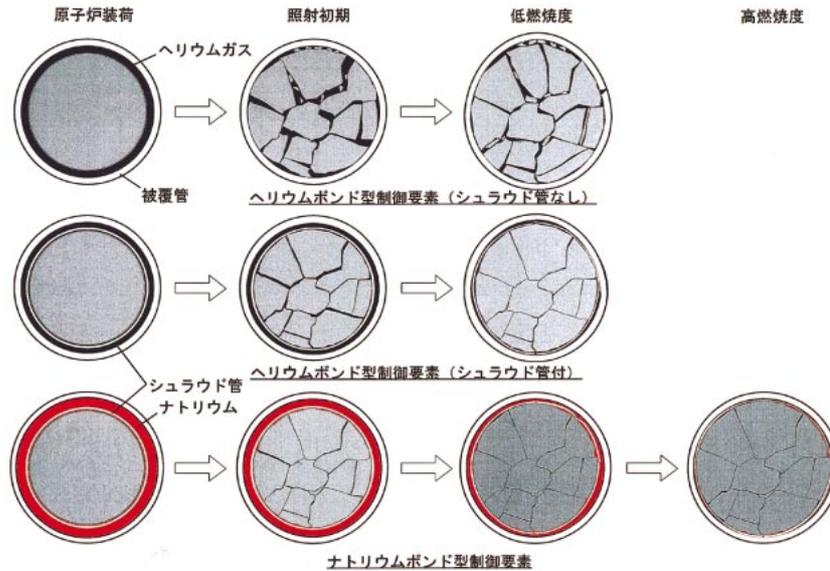


図4 ACMI対策のための構造改良（概念図）

他の炉心構成要素に比べて増加するため、上記の湿式法における安全性確認、又は特別な処理方法について吟味する必要がある。

これらの課題に対し「常陽」で行ってきた開発と設計について、以下に記述する。

### 3.2 構造検討

#### (1) 要素型式選定

Naボンド型制御要素の型式候補としては、Na充てん方法で区別される下記3タイプが考えられた。いずれもHeガスバント機能を有する。

- ポーラスプラグ型（下部充てん型）
- ダイビングベルNa封入型（封入型）
- Na流入管付ダイビングベル改良型（上部充てん型）

はフランスの実機<sup>1)</sup>に採用されている構造である。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、Na充てん機能の確認が必要であるが、これが確保されれば使用中Naが供給されるため、蒸発によるNaの減少は考慮する必要はない。また、炉外取出し時のNaドレン機能を持つため、使用後の残留Naは減少するが、 $B_4C$ 粉末の保持が課題である。残留Naが少ないと、水蒸気や水が入りやすくなり、洗浄によるNa除去性の点で有利であるが、Na - 水の反応速度が大きくなるので安全性の確認が必要である。下部ポーラスプラグは、高い照射量に達するため、十分な照射データが必要である。製作コストは従来並みと予想される。

はロシアで過去に検討されていた構造<sup>8)</sup>である。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、 $B_4C$ 粉末を要素内に保持できる。しかし、Naの減少を防ぐため、冷却ブロックによりNa蒸気を液化する必要があり、この機能を長期試験で確認する必要がある。また、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Na充てん設備の設置、保管管理等の観点から高価になる。

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。機能上は、と同じく、Na充てん性を確認する必要がある。また、Naドレン機能がなく、要素内にNaの流れもないので、 $B_4C$ 粉末をほぼ保持できる（本構造の水中試験において、要素下部からガスを流し、 $B_4C$ 粉末の保持性を確認している）。使用後、要素内にそのままNaが残るため、Naの除去性、洗浄時の安全性を確認する必要があるが、に比べてNa - 水反応は緩慢になると予想される。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。

これらの比較検討の結果を図5に示すとおり、 $B_4C$ 粉末を保持できNa洗浄の可能性もあること、また製作コスト、長期試験が不要である等の利点に着目し、上部充てん型を選択した。

機能上、最も重要であるNa充てん性に関する研究について、以下に説明する。また、本構造の使用後処理の検討については3.5で説明する。

ピン構造	初期 充填性	Naペーパー の発生	B <sub>4</sub> C の保持	Na洗浄 ・貯蔵	製作性 (コスト)	長期試験 の必要性
下部充填型 (充填機能有、ドレン機能有)	△	○	×	△	○	×
封入型 (充填機能無、ドレン機能無)	○	△	○	×	×	△
上部充填型 (充填機能有、ドレン機能無)	△	○	△	△	○	○

○ 問題なし  
△ 問題小、解決の見通し有  
× 問題大、解決のため十分な検討を要す

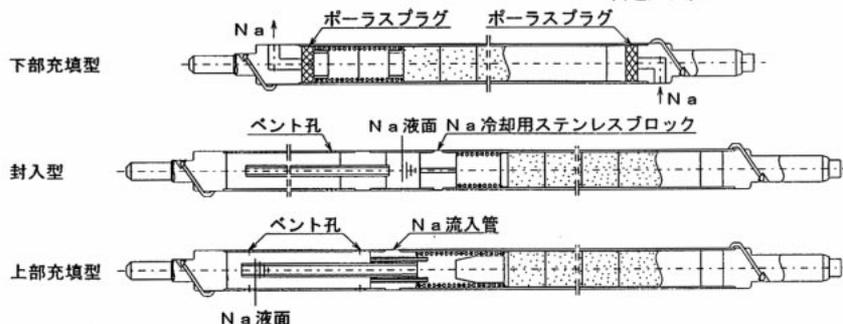


図5 Naボンド型制御要素型式候補

(2) Na充てん機能確認

上部充てん型では炉内装荷時に図6のように、Na充てんが行われる。Naが下部ベント孔から浸入し、内部Heが上部ベント孔から放出されるための条件は、 $h > 8 / d_1$ で表現される。

ここで、

- h : ベント孔間隔
- $d_1$  : ベント孔径
- : 表面張力
- : 流体密度

である。流入管をNaが通過するための必要液面高さ $h'$ は、 $h' > 4 / d_2$ となる。

ここで、

- $h'$  : ベント機構部に生じる液面高さ
- $d_2$  : Na流入管内径

である。「常陽」の実機寸法計画値は $d_1 = 3$  mm、 $d_2 = 2$  mmであり、 $h'_{max} = h$ と見なせることから、ベント機構部の充てん判定式は、 $h > 8 / d_1$ に帰着される。本式は水中試験での挙動を良く模擬したが、実機ベント孔はハンダシールを施すため、これを模擬した250 のNa中試験を行った結果、 $h$ の実測値にばらつきが見られた。したがって、これを統計的に整理し、3 相当のNa充てん判定式 $h > 24 / d_1$ を導いた。本式により炉内装荷時

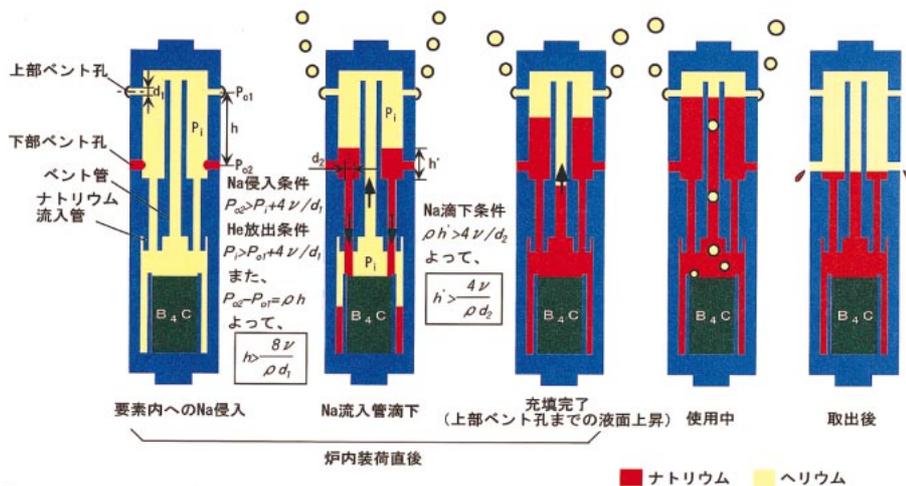


図6 上部充てん機構のNa充てん原理

(250 )のNa物性での必要 $h$ は170mmとなる。実機ではこの約2倍の300mmとした。

また、250 でペレット・被覆管ギャップにNaを充てんするための必要最小幅を確認した結果、0.7~1.0mmの範囲にあった。したがって実機のギャップ幅はこれ以上確保する必要があるが、後述の熱流設計で示すとおり、実機のギャップは1.3mmとする計画であり、この寸法条件を満たしている。

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<sup>4)</sup>を実施した。この結果、要素内の空間体積に対しほぼ100%のNa充てん率が得られている。

また、ペレットスエリングによってギャップが狭まり、生成Heが溜まっていくおそれがあるため、運転中の被覆管温度を模擬した450 でのギャップ部充てん性試験を実施した。この結果、運転温度ではNaの濡れ性が改善され、Heボンドでの熱的な限界ギャップ約0.3mmを下回る0.2mm(試験パラメータの最小値)まで、直ちにNaが充てんできた。以上のように、使用中のギャップ縮小とHe生成に伴うNaの排出は、これが問題となる広いギャップでは起こらない。

ただし、これらNa中試験体の解体観察では、Naギャップに約5mm以下の気泡が観察された。万一気泡が成長すると、ミートの局所加熱をもたらすおそれがあるため、上述の450 ギャップ部充てん性試験の結果から、ギャップ幅の変化に応じた最大気泡径を推定し、このときの熱的影響を、後述する熱設計において確認している。

### 3.3 熱設計

#### (1) 熱流設計(バンドル仕様の検討)

熱流設計では、制御要素の被覆管はACMIに

対する十分なギャップを確保するとともに、要素間の冷却材流路を確保することによって温度を抑制してACCIを低減し、強度上も適当な肉厚を確保しなければならない。そこで、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熱流設計を実施した。なお、保護管やB<sub>4</sub>Cペレットの仕様は、従来と同等の挿入性、制御能力を確保するため、変更しないものとした。

制御棒チャンネルの冷却材流量はMK・炉心で最小1.98kg/sであり、各バンドル仕様での保護管内外の流量配分を考慮し、被覆管温度を評価した。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620 となる。このとき、ACCIを考慮しても使用末期に適当な被覆管肉厚を残すことができ、ACMIのためのシュラウド・被覆管ギャップとして1.3mmを確保できるため、これをNaボンド型制御棒のバンドル仕様とした。表1にMK・Heボンド型とMK・Naボンド型の主要仕様及び照射条件を比較して示す。

#### (2) 非定常時の温度解析

ここではNaボンド型のギャップに、He気泡が滞留した場合の温度解析について記述する。ただし、この温度上昇は気泡滞留部にスポット的に生じるものであり、また、ナトリウムの表面張力は減少し、濡れ性は改善され、大きい気泡はギャップに滞留できなくなることから、短期的な事象である。実際に気泡による加熱の事例は海外のNaボンド型制御棒でも報告されていないため、非定常的な事象と考え、機械設計には本評価温度を反映しない。

また、ここでは熱設計上想定しうる最も過酷な事象として、ボンド材Naの喪失について評価し

表1 MK- Heボンド型とMK- Naボンド型の使用条件、基本仕様の対比

項目	MK- Heボンド(8次取替)	MK- Naボンド
原子炉熱出力 (MW)	100	140
原子炉1次冷却材流量 (t/h)	2200	2700
原子炉入口温度 ( )	370	350
核的寿命 (at%)	10	同左
制御棒挿入量 (cm) BOC/MOC/EOC <sup>*1</sup>	2~16	約18/14/8
設計燃焼度 (cap/m <sup>3</sup> )	約40×20 <sup>26</sup> (1.6at%)	260×20 <sup>26</sup> (核的寿命、目標)
使用日数 (EFPD) <sup>*1</sup>	約240	約660(核的寿命、目標)
B <sub>4</sub> C下部高速中性子束 (n/m <sup>2</sup> ・s) <sup>*1</sup>	1.5×10 <sup>19</sup>	2.8×10 <sup>19</sup>
ピーク (n、) 反応率 (cap/m <sup>3</sup> ・s) <sup>*1</sup>	2×10 <sup>20</sup>	4.6×10 <sup>20</sup>
被覆管 材質	PNC316(20%CW)	同左
外径 (mm)	18.5	18.9
内径 (mm)	16.9	17.9
肉厚 (mm)	0.8	0.5
シュラウド管 材質	SUS316(低CW)	同左
(MK- は一部) 内径 (mm)	16.4	同左
肉厚 (mm)	0.1	同左
シュラウド管-被覆管ギャップ (mm)	0.3	1.3

\*1 MK- は実測ベース又は運転監視コードシステム“MAGI”記録計算値、MK- は2DBURN、TRIANGLEコードによる設計値

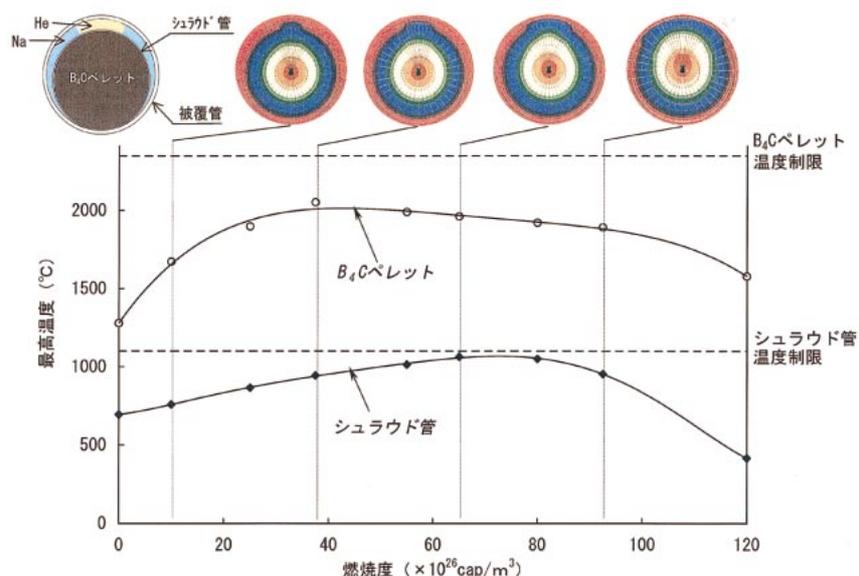


図7 He気泡滞留モデルにおける最高温度履歴

た結果についても紹介する。Na充てん性は3.1(2)のとおり確認しており、本評価は事故的な事象であるが、この場合にも制御要素の健全性に影響がないことを確認することとした。

これら温度解析では、工学的安全係数、過出力係数を考慮し、燃焼に伴う発熱減少、ギャップの縮小、ペレット熱伝導率の低下等の経時変化を模擬した。

B<sub>4</sub>Cペレットの温度制限は融点<sup>9)</sup>に100の余裕を見込んだ2,350とした。316ステンレス鋼の融点は1,300～1,400であるが、シュラウド管ではB<sub>4</sub>Cとの接触による共晶の可能性もある。したがって、高温照射を経験したにもかかわらず、ACMIが発生していない制御棒材料照射リグ(Absorber Material Irradiation Rig、AMIR-8)のシュラウド管最高温度1,100(ノミナル計算値)をシュラウド管の温度制限とした。この温度は、ホットスポット温度の評価における制限値としては十分厳しい。このB<sub>4</sub>C2,350、シュラウド管1,100の制限を超える温度ではそれぞれ溶融が起こると仮定した。

He気泡滞留は、ミートの偏心、各燃焼度におけるギャップ縮小を考慮してモデル化した。本モデルにおけるB<sub>4</sub>Cペレットとシュラウド管の最高温度履歴を図7に示す。最高温度はペレット約2,050、シュラウド管約1,060であり、いずれも溶融制限を下回る。

ボンド材Naの喪失は、ミートの偏心がないモデルでギャップをHeとして評価した。最高温度

はペレットでは約2,120のため溶融しない。一方シュラウド管は約1,630になり、スタック下端から約26cmの範囲が溶融する結果となった。そこで、溶融物が被覆管に接触したとき、この熱が被覆管に与えられ、溶融物と被覆管が等温になる収束温度を求めた。この結果、接触部における被覆管温度は約570であり、最高使用温度620より低い。したがって、Na喪失という最悪のケースでも被覆管破損は起こらない。

### 3.4 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せず、B<sub>4</sub>Cペレットの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。ここでB<sub>4</sub>Cスエリングは、生成Heのペレット内部の蓄積によって起こると考えられており、ペレット密度が高く、温度が低いほど大きい傾向がある。したがって、Naボンドではスエリング速度の増加が予想されるため、これを考慮した評価が必要になる。

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.のペレットについてスエリングデータが取得されている<sup>5)</sup>。また、PHENIXでも84% T.D.、96% T.D.の2種類のペレットについてNaボンド環境でのスエリングデータ<sup>6), 10)</sup>が報告されている。これらの上限カーブを用いて評価したACMI

寿命は、図 8 に示すとおり、 $120 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  と従来型 ( $40 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ ) の約 3 倍に延長できることが明らかになった。本評価では、「常陽」の低温データの取得範囲が低燃焼度領域に限られ、データ点数も少ないことを考慮し、高燃焼度領域までデータが取得されており、密度も高く最も安全側の値を与える PHENIX の 96% T.D. の上限カーブによる評価結果を寿命とした。同図から明らかなように、評価結果はスエリング挙動に大きく依存する。したがって、今後は「常陽」実機でスエリングデータを拡充し、スエリングカーブの最適化を図ることにより、高燃焼度化を図り、最終目標  $260 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  の達成を目指す。

なお、シュラウド管は、 $B_4C$  破片を包む形状を維持する観点から、クラックの発生を許容し、溶融・変形・腐食を（変形・腐食は管形状を保持するレベルに）制限する。このうち、熱設計で説明したとおり、He 気泡の滞留を考慮してもシュラウド管の溶融は起こらない。また、316 ステンレス鋼焼鈍材のスエリング速度によれば、シュラウド管径の増加は、核的寿命末期（照射量約  $1.4 \times 10^{27} \text{n/m}^2$ ）で約 3.5 D/D% となるが、 $B_4C$  ペレットのスエリングはこの数倍大きいので、シュラウド管の変形による拘束の緩みや、ギャップの閉塞は起こらない。また、シュラウド管は被覆管の ACCI と同等の腐食を生じるが、これは、ほう素、炭素の侵入であり、形状を損なうものではないため、強度メンバーでないシュラウド管では、これを許容できる。

以上のとおり、シュラウド管はその管形状を維持し、使用中のリロケーションを抑制できるものとする。シュラウド管の効果は、「常陽」制御棒<sup>7)</sup>、AMIR 等で一部照射データが取得されつつあり、また、PHENIX においても最高燃焼度

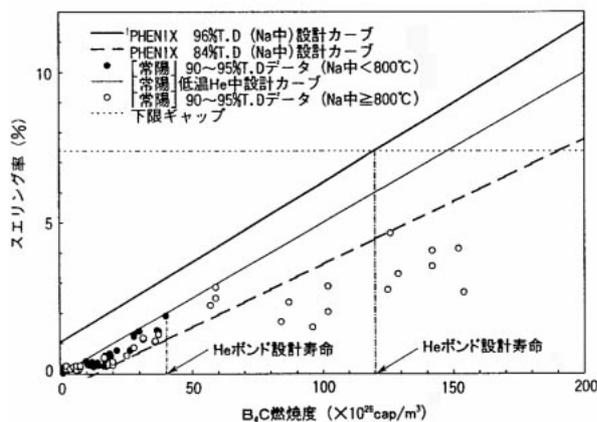


図 8 ACMI 評価結果

$220 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  までの照射試験<sup>6), 11)</sup>で確認されている。

(2) ACCI 評価

Na ボンド型制御棒では、 $B_4C$  - Na - ステンレスの化学的共存性を確認する必要がある。特に B.T.KELLY<sup>11)</sup>、Ph.DUNNER<sup>9)</sup>らが指摘する被覆管へのほう素、炭素の侵入 (ACCI) は、高燃焼度領域での被覆管の健全性上、無視できない問題である。サイクル機構では、450 ~ 650 の Na 中浸せき試験により、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するとともに、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。係数  $k$  はアレニウス式  $k = A \exp(Q/RT)$  に従う。

ここで、

- 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。上述の DUNNER<sup>9)</sup> は炉外試験データから  $k (\text{cm/s}^{1/2}) = 0.522 \exp(-97.200/RT)$  ( $R = 0.00831 \text{kJ/Kmol}$ ) を導いており、サイクル機構の炉外試験データもこれに近い。しかし、「常陽」の AMIR、PHENIX の PrecuresabA4<sup>6), 11)</sup> 等の照射試験データから、ACCI は炉内で加速される傾向があることが分かっており、これら炉内の  $k$  は DUNNER の炉外実験式の約 1.5 ~ 3.8 倍と大きい。このため、炉内 ACCI は、上式の 4 倍として評価することとした。この方法で評価した反応層深さを図 9 に示す。本図のとおり、ACCI 反応層深さは核的寿命  $260 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  においても被覆管初期肉厚 (500  $\mu\text{m}$ ) より小さく、使用末期まで未反応領域を残すことができる。

また、上述のサイクル機構の炉外試験では、表

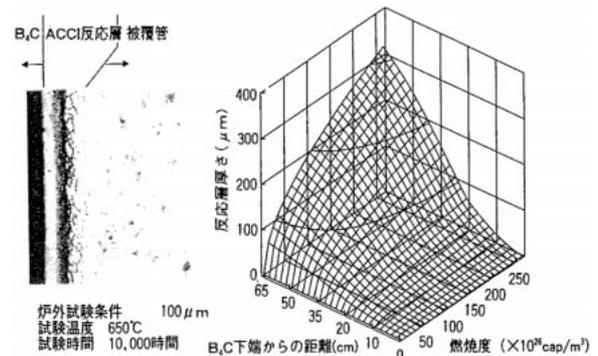


図 9 ACCI 反応層評価結果

面へのクロム、チタン、ニオブ、ニッケルの被膜による反応層深さの低減量についても測定している。このうちクロム被膜は、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。H.J.Heuvelら<sup>12)</sup>も、750 、4,320時間の試験において被覆管に生じた約300 $\mu\text{m}$ の反応層深さは、クロム被膜を施した試験体では、純Na中で150 $\mu\text{m}$ に、またNa中にリチウムを添加した環境（彼らは $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応で生成するリチウムを模擬した）で90 $\mu\text{m}$ にまで低減されたと報告している。これらの結果から、実機の被覆管内面はACCIを低減するためクロムで被膜する。ただし、後述の強度評価においては、照射環境下での不確かさを考慮し、クロムの耐食効果を期待せず、図9の反応層深さの評価結果を被覆管の減肉分として取り扱うこととした。

### (3) 強度評価

被覆管はギャップ確保のために薄くしており、また、高燃焼度化に伴うACCIの促進及びステンレス鋼のスエリングの問題があるため、これらを考慮した被覆管の強度評価を行った。

このうち、薄肉化及びACCIの促進による一次応力の増加については、内外圧力差のないベント型制御要素では、一次膜応力の許容値 $3\text{Sm}^{13)}$ 又は一次膜応力+一次曲げ応力の許容値 $1.5\text{Sm}^{13)}$ に対する核的寿命末期の応力値の比（設計比）は、最高温度部で最大0.28、最高燃焼度部で最大0.19と十分な余裕がある<sup>4)</sup>。

一方、被覆管 - 下部端栓溶接部に生じるスエリング差（変位制御型の二次応力）については、被覆管肉厚にはほとんど依存しない。しかし、運転中この部位が高い中性子束下にさらされる制御棒においては、高燃焼度化に伴い歪及び応力が非常に大きくなる。本部位の照射温度は約390 であり、 $3\text{Sm}^{13)}$ で制限することになるが、健全性の判定上、塑性歪を確認することも重要と考え、塑性歪と $3\text{Sm}$ で二重に制限することにした。塑性歪限界は、図2の低速歪と照射の効果を考慮したものを適用した。

中性子束 $2.8 \times 10^{19} \text{n/m}^2 \cdot \text{s}$  ( $E = 0.1 \text{MeV}$ ) の条件で、照射クリープによる応力緩和を考慮して、有限要素法解析コードによる弾塑性クリープ解析を実施した結果、応力及び塑性歪は、核的寿命末期まで $3\text{Sm}$ 、塑性歪制限を下回ることを確認した。以上のとおり、強度評価は核的寿命まで成立することから、Naボンド型制御棒の機械的寿命は、従来と同様にACMIによって決定されること

が分かる。

## 3.5 使用済制御棒の処理

### (1) 処理方法の検討

原子炉での使用によって放射化された炉心構成要素は、長期間の貯蔵保管が必要である。「常陽」の場合、炉心燃料集合体は、蒸気、水によって付着Naを洗浄した後、崩壊熱を除去するため、水冷却池に缶詰缶に封入して貯蔵している。制御棒等、燃料以外の炉心構成要素についても、PIE対象のものを除いて、燃料と同様の洗浄貯蔵を行ってきた。しかし、Naボンド型制御棒では要素内部にNaが残り、外部付着分も含む総量は約300g（Heボンド型の約6倍）と評価されるため、使用後処理に関する特別な検討が必要であった。具体的に下記の方法が候補に挙げられる。

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

このうち、 は現設備で対応でき、付着Naを減少させる点では有効な方法である。しかし、残留Naと水の反応による安全性が問題であった。

は、水冷却池内に水無缶詰缶で貯蔵する案もあるが、湿度管理やプール水浸入等の問題があり、専用の貯蔵設備が必要と考えられた。またNaがそのまま残り、廃炉以降の最終処分の問題が先送りになるという問題もある。

は、PIE施設での実施が技術的に可能と思われる。しかしNaボンド化による寿命延長後も年平均3～4体の使用済制御棒の発生が予想され、このキャスク移送、解体洗浄を行うには、本来の目的であるPIE作業に相当大きい影響を及ぼすものと予想される。したがって、全数解体と内部Na洗浄を行う場合には、 と同じく専用設備を設置するのが現実的と考えられた。

このように、 、 では新たな施設建設と維持が必要であり、この処理コストによって長寿命化によるコスト効果は十分得られなくなる。したがって、既存の設備を利用でき、また、最終処分の観点でもNaを可能な限り減少できる湿式法が望ましい。本法を検討する上でのポイントは、Na - 水反応に伴う安全性である。これについては、以下のとおりモックアップ試験において確認した。

### (2) 洗浄貯蔵試験

洗浄貯蔵試験は、実際のNa洗浄設備、貯蔵設備において実施した<sup>4)</sup>。供試体として製作した洗浄模擬体は、「常陽」第12回定期検査中に、炉内燃料貯蔵ラックに約24時間装荷しNaを付着充て

んさせた後、蒸気洗浄、脱塩水洗浄を行い、その後約75日間の缶詰水中貯蔵を行った。

この結果、洗浄時の水素濃度、水導電率及び圧力等は、従来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。水中貯蔵においては、貯蔵期間中、Na - 水反応速度に換算すると平均0.25g/日程度に相当する缶詰缶の継続的な内圧上昇が確認され、開缶後に検査した結果、7本中5本のダミー制御要素内に金属Naの残留が確認された。実機の要素7本に同等のNaが残留したとすると、その量は約140gと推定される。ただし、貯蔵中の反応速度を考慮すれば2年程度の水中貯蔵でNaを除去できる可能性がある。本試験結果に基づき、缶詰缶での長期貯蔵については、水素の発生を考慮してガスベント機能を設けることとした。

このように、本試験によって、Naボンド型制御棒について、湿式洗浄貯蔵の安全性とNa除去の可能性を確認でき、使用後処理の方法を具体化することができた。

#### 4. おわりに

「常陽」MK- 制御棒では、 $B_4C$ ペレットのリロケーションとスエリングによってACMIが発生し、燃焼に伴い被覆管の塑性歪が増加することにより、燃焼度約 $40 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ 以上で被覆管にクラックが発生すると評価されている。このため、割れた $B_4C$ ペレットを拘束するシュラウド管を装着し、さらにスエリングを吸収するための十分なギャップを確保できるNaボンド型制御棒の実用化に向けて、構造検討、熱設計、機械設計、使用済制御棒の処理の開発課題に取り組んできた。この結果、得られた成果は以下のとおりである。

Naボンド型制御棒構造を具体化し、炉内Na充てん機構の信頼性を確認した。

熱設計の成立性を確認するとともに、ACMI、ACCI等を考慮した機械設計によって、従来の約3倍に相当する $120 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ までの高燃焼度化が可能であるとの結論を得た。

洗浄貯蔵方法として湿式法を選択し、使用済制御棒の処理について見通しを得た。

これらの開発状況を海外と比較すると、代表的なPHENIX制御棒の最高燃焼度が約 $150 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ であり、これに近いレベルに到達しつつある。また、制御棒の長寿命化によって年間約2億円の

経費削減が期待できる。

Naボンド型制御棒は、MK- 炉心の初期から使用を開始する予定であり、今後はNaボンド条件下における $B_4C$ 照射挙動データの拡充を図り、スエリングカーブの見直しを図るとともに、被覆管の歪評価の適用について検討し、核的寿命 $260 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ を最終目標とした更なる高燃焼度化を目指していく。

#### 謝 辞

Na充てん機構の設計及び機能試験に当たり、(株)日立製作所の原田清氏に多大なる協力、支援をいただいた。また、検査開発(株)の遠峰洋氏には、洗浄貯蔵試験、解析計算全般に協力していただいた。ここに深く感謝の意を表したい。

#### 参考文献

- 1) Arnaud, G., Guigon, G. et al. : " Les Barres de Commande des R.N.R.Francais Experience et Development ", Proc. of IAEA-IWGFR Specialist's Meeting, Obninsk, USSR ( 1983 ).
- 2) 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 ).
- 3) 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 ).
- 4) 曾我知則, 宮川俊一 他 : " 「常陽」制御棒の高度化 - ナトリウムボンド型制御棒の設計 - ", JNC TN9400 99-052 ( 1999 ).
- 5) Maruyama, T., Onose, S. et al. : " Effect of Fast Neutron Irradiation on the Properties of Boron Carbide Pellet ", Journal of Nuclear Science Technology, Vol34, No.10, 1006 ( 1997 ).
- 6) Kryger, B., Gosset, D. et al. : " IRRADIATION PERFORMANCES OF THE SUPERPHENIX TYPE ABSORBER ELEMENT ", Proc. IAEA-IWGFR Technical Committee Meeting, Obninsk, Russia ( 1995 ).
- 7) 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 ).
- 8) Matveev, V.I., Nbahob, A.P. et al. : " BN型高速炉制御の炉物理的概念の発展 ", IAEA-IWGFR Specialists Meeting, Obninsk, USSR ( 1983 ).
- 9) Dunner, Ph., Heuvel, H.J. et al. : " ABSORBER MATERIALS FOR CONTROL ROD SYSTEMS OF FAST BREEDER REACTORS ", Journal of Nuclear Materials 124, 185-194 ( 1984 ).
- 10) Stoto, T., Housseau, N. et al. : " Swelling and micro cracking of boron carbide subjected to fast neutron irradiations ", Journal of applied physics 68(7) ( 1990 ).
- 11) Kelly, B.T., Kryger, B. et al. : " Development of Fast Breeder Reactor Absorber Elements for High Endurance in Europe ", Proc. of Inter-national Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Vol.3, p.1.10-1 ~ 10, Kyoto, Japan ( 1991 ).
- 12) Heuvel, H.J., Holler P. et al. : " Absorber Material Cladding Chemical Interaction in Sodium Environment ", Proc. of IAEA-IWGFR Specialists Meeting, Obninsk, USSR ( 1983 ).
- 13) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section .