

制御棒材料照射リグ AMIR-6 の照射後試験  
— キャプセルの非破壊試験結果 —  
(試験報告書)

2002年5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

Inquiries 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)  
2003

制御棒材料照射リグ AMIR-6 の照射後試験  
— キャプセルの非破壊試験結果 —

阿部和幸\*1 佐々木新治\*1  
菊地 晋\*1 勝山幸三\*1  
永峯 剛\*1 松元慎一郎\*1

要 旨

高速実験炉「常陽」において、制御棒材料照射リグ（AMIR）を用いた照射試験が継続的に行われている。AMIR-6 は、制御棒要素の破損限界評価と炭化ホウ素（B<sub>4</sub>C）ペレットの割れ欠けにより生じる再配置（リロケーション）の抑制対策効果の確認を目的に照射試験を実施したものである。

この目的に沿って、製造仕様として、ペレットと被覆管（内側キャプセル管）との間のギャップ幅、<sup>10</sup>B 濃縮度、被覆管肉厚、同材質を変えて試験した。また、リロケーションの抑制対策として、薄いシュラウド管でペレットを覆った照射キャプセルも加えた。照射キャプセルは上下二段にしてコンパートメントに装荷し、7 本を組み合わせ集合体 AMIR-6 とした。照射キャプセルは二重構造となっており、内側キャプセル被覆管と外側キャプセル管の間にはナトリウムを充填している。

AMIR-6 は、「常陽」Mk-II 炉心の第 6 列において、最高燃焼度  $106 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ 、最高照射量  $3.82 \times 10^{26} \text{n/m}^2$  まで照射し、照射温度は、設計値で 530～890℃である。

重量測定の結果、コンパートメント下部側の照射キャプセルで重量変化が見られた。これらに対して行った詳細外観検査などにより、重量増加の見られた 3 つの照射キャプセルでは、外側管（ネジ端栓部のクラック）からナトリウムの浸入が観察された。ナトリウムの充填高さを調べた結果、量の少なかったものが、下部照射キャプセル 7 つの内 6 つにおいて確認された。下部側の照射キャプセル 7 つの内、3 つの内側キャプセルの被覆管にクラックが発見されたが、これは、ナトリウムが少ないことにより温度が上昇し、被覆管強度が低下して生じたと推察される。

なお、シュラウド管を用いた照射キャプセルについては、被覆管に膨れやオーバリティは見られず、初期の目的通りの機能を果たしたと推定される。

---

\*1 大洗工学センター 燃料材料試験部 照射燃料集合体試験室（FMS）

**Post-Irradiation-Examination Results for Absorber Material Irradiation Rig AMIR-6**  
- The Results of Non-destructive Examination for capsules -

Kazuyuki Abe\*<sup>1</sup> Shinji Sasaki\*<sup>1</sup>  
Shin Kikuchi\*<sup>1</sup> Kozo Katsuyama\*<sup>1</sup>  
Tsuyoshi Nagamine\*<sup>1</sup> Shinichiro Matsumoto\*<sup>1</sup>

**ABSTRACT**

Irradiation tests of Absorber Material Irradiation Rig (AMIR) have been continuously conducted, using the experimental fast reactor Joyo. AMIR-6, which was submitted for post-irradiation-examinations (PIE) this time, was irradiated in order to evaluate the limit of failure in control rods and confirm the effect of method for suppression of relocation caused by cracking of boron carbide (B<sub>4</sub>C) pellets.

According to this purpose, gap size between B<sub>4</sub>C pellet and cladding tube (inner capsule tube), enrichment of <sup>10</sup>B, thickness of cladding tube and its material were changed in this test. In addition, thin shroud tube wrapping B<sub>4</sub>C pellets was used as the method for suppression of relocation. Capsules were loaded in compartments, which had the upper and lower stairs, and irradiation rig AMIR-6 was constructed of seven compartments in total. The irradiation capsule had double tubes, namely inner capsule tube and outer capsule tube. Between these tubes, sodium was filled.

AMIR-6 was irradiated at the 6 row in Joyo Mark-II core up to  $106 \times 10^{26}$  cap/m<sup>3</sup> (max. burn-up) and  $3.82 \times 10^{26}$  n/m<sup>2</sup> (max, fluence). Irradiation temperatures were evaluated from 530 to 890 °C in design.

Extraordinary results were observed for lower capsules by weight measurement performed. So, detailed visual inspection was carried out for these capsules. Consequently, sodium entered from the crack of screwhead attached to the outer tube in three irradiation capsules, whose weight increased. It was recognized that the sodium level between cladding tube and outer tube was lower in six capsules of lower stairs. Cladding crack was found out in three cladding tubes of lower irradiation capsule. It was suggested that the crack become for decrease of strength of cladding tube because those temperature increased at the position where sodium was not filled.

The irradiation capsule using a shroud tube showed no diameter increase and ovality in the cladding. It is guessed from the results that the function as the early purpose was achieved.

---

\*1 Fuel Monitoring Section, Fuels and Materials Division, O-arai Engineering Center, JNC

## 目 次

1. はじめに	1
2. 照射リグの構造と照射キャプセルの製造仕様	2
3. 照射条件	7
4. 照射後試験結果	10
4.1 照射リグの取扱	10
4.2 解体作業	10
4.3 照射キャプセル重量	11
4.4 X線ラジオグラフィ試験	11
4.5 キャプセルパンクチャ試験	11
4.6 キャプセル詳細外観検査	12
4.7 内側キャプセル被覆管寸法測定	14
5. 考察	29
5.1 ヘリウム放出挙動	29
5.2 被覆管周方向平均外径増加率に及ぼす各パラメータの影響	29
5.3 クラックについて	30
5.4 被覆管周方向平均最大外径増加率における 実機制御棒との比較について	31
6. おわりに	45
7. 謝辞	46
8. 参考文献	46

## 表 一 覧

表 2.1	照射試料の仕様と試験パラメータ	3
表 3.1	AMIR-6 照射キャプセルの照射条件	8
表 4.1	AMIR-6 照射キャプセル重量測定結果	15
表 4.2	AMIR-6 キャプセルパンクチャ試験結果	16
表 4.3	AMIR-6 内側キャプセル被覆管詳細外観検査まとめ	17
表 4.4	AMIR-6 キャプセルの仕様と周方向平均外径測定結果	18
表 5.1	X線ラジオグラフィ及びキャプセル解体時に確認した Na 液位	33

## 写 真 一 覧

写真 4.1	下部装荷の内側キャプセル解体時の Na 液位観察状況例 (A6-01)	19
写真 4.2	照射キャプセル A6-02・ラジオグラフィ撮影写真	20
写真 4.3	内側キャプセル被覆管のクラック (A6-02)	21
写真 4.4	内側キャプセル被覆管のクラック (A6-04) (1/2)	22
写真 4.5	内側キャプセル被覆管のクラック (A6-04) (2/2)	23
写真 4.6	内側キャプセル被覆管のクラック (A6-07) (1/2)	24
写真 4.7	内側キャプセル被覆管のクラック (A6-07) (2/2)	25

## 図 一 覧

図 2.1	制御棒材料照射リグ (AMIR)	4
図 2.2	AMIR-6 照射キャプセル配置	5
図 2.3	照射キャプセル構造図	6
図 3.1	AMIR-6 の照射位置 (第 34 サイクル炉心構成)	9
図 4.1	AMIR-6 照射後試験取扱フロー	26
図 4.2	PNC316 とフェライト鋼被覆管の周方向平均外径	27
図 4.3	クラックの生じた被覆管の周方向平均外径	28
図 5.1	燃焼度と He ガス放出率の関係 (集合体別)	34
図 5.2	B <sub>4</sub> C ペレット中心温度と He ガス放出率	34
図 5.3	照射温度 500~800℃における He 放出率と燃焼度の関係	35
図 5.4	燃焼度と被覆管周方向平均外径増加率	36
図 5.5	A6-09 のオーバリティと周方向平均外径プロファイル	37
図 5.6	キャプセル肉厚と被覆管周方向平均外径増加率	38
図 5.7	ギャップ幅と被覆管周方向平均外径増加率	39
図 5.8	材質と被覆管周方向平均外径増加率	40
図 5.9	B <sub>4</sub> C ペレットと被覆管の ACMI 発生状況	41
図 5.10	AMIR-6 における周方向平均最大外径増加率	42
図 5.11	周方向平均最大外径増加率と燃焼度	43
図 5.12	最大オーバリティと周方向平均最大外径増加率	44

## 1. はじめに

高速炉において、炉出力の調整や緊急時の炉停止は、制御棒を用いて行われる。その制御棒材料（中性子吸収材）には普通、炭化ホウ素 ( $B_4C$ ) が用いられている。高速炉の制御棒の寿命は、ホウ素水を用いて制御できる軽水炉と比べて一般的に短い。このため、制御棒の寿命延長は、高速炉の経済性を向上させる上でも重要な課題となっている。

制御棒の主要な寿命因子は、核的な制限ではない。問題は、機械的な挙動である。その機械的な挙動として従来考えられていたのは、照射に伴う  $B_4C$  ペレットのスエリングとヘリウムガス放出である。そのスエリングを回避するためには、ペレットと被覆管の間のギャップを広くすることが必要であるが、反面、ペレットの割れによる再配置（リロケーション）が起き、かえってクラックが発生しやすくなることが実験的に確かめられている。

そのため、制御棒の長寿命化に向けて、被覆管の歪制限からの破損限界を見極めるとともに、リロケーション対策が検討されてきた。その対策として有望なものは、薄いシュラウド管をペレットに被せるというものである。また、ペレットのスエリングに対応して広いギャップ幅とすることに対しては、ナトリウムボンドとすることが一般的である。従来のヘリウムボンドでは、ギャップ部での熱伝達率が小さく、ペレットの温度が制限値を超える可能性がある。

制御棒開発のため、サイクル機構では高速実験炉「常陽」を用いた制御棒材料照射計画（Absorber Material Irradiation Rig 計画：略称 AMIR 計画）を進めている。これまで実施した主な試験には、次のようなものがある。

AMIR-1 および AMIR-2<sup>1)</sup>では、 $B_4C$  ペレットの結晶粒度の影響を調べた。その結果、結晶粒度の小さいペレットを使用した場合、「もんじゅ」出力調整棒の2サイクル相当の燃焼度まで使用が可能であることがわかった。

AMIR-3<sup>2)</sup>では高燃焼度における  $B_4C$  ペレットの照射挙動を調べた。照射後試験において、ペレットにクラックが発生し、いくつかの照射キャプセルにおいて ACMI の発生を確認した。

AMIR-4<sup>3)</sup>は、 $^{10}B$  濃縮度や高温での照射による  $B_4C$  ペレットの挙動を着目した試験である。照射後試験の結果、 $^{10}B$  濃縮度によりヘリウム放出率と ACMI の程度に若干の差異が認められ、ACMI によるキャプセルの外径増加が生じていることがわかった。

AMIR-5 はナトリウムボンドの確証とポーラスプラグの照射挙動把握を目指した試験であり、現在、照射後試験を進めている。ここで、ポーラスプラグとは多孔質の金属プラグのことであり、ヘリウムガス放出対策の1つである。将来的な吸収ピンのコンパクト化、海外の動向等から有力視されているが、Na との共存性等の技術的課題を有している。

AMIR-6 では、破損限界を確認するために、内側キャプセル被覆管（以下被覆管とする）の材質と肉厚（0.4mm と 0.8mm）、ペレットの外径と  $^{10}B$  の濃縮度をキャプセル毎に変化させるとともに、一つのキャプセルはシュラウド管型（ボンドはヘリウム）として照射した。

ここでは、AMIR-6 の照射キャプセルに関する非破壊試験結果について報告する。

## 2. 照射リグの構造と照射キャプセルの製造仕様

照射リグの概略構造、およびコンパートメント内のキャプセル配置をそれぞれ図 2.1～2.2 に示す。照射リグは 7 本のコンパートメント（内、1 本は軸心管）により構成される。各コンパートメントは  $B_4C$  ペレット等の装荷されたキャプセル 2 個とスペーサ等により構成されている。

キャプセルの構造を図 2.3 に示す。照射キャプセルは二重管構造であり、外側管と内側の被覆管との間に十分なギャップ幅を設けて、被覆管の照射による歪みを吸収できるようになっている。ギャップ部にはナトリウムを充填し、熱伝導率を改善することにより、被覆管温度を適切に保つようにしている。

内側キャプセル内には  $B_4C$  ペレットを 3 個装荷している。コンパートメント中央部より上部側に装荷する照射キャプセルでは、 $B_4C$  ペレットは内側キャプセルの下部側となる。一方、中央部より下部側に装荷する照射キャプセルでは  $B_4C$  ペレットは内側キャプセルの上部側に配置される。被覆管をベント構造、照射キャプセルを密封構造として、 $(n, \alpha)$  反応により  $B_4C$  ペレットから放出される He ガスを照射キャプセル内のプレナム部に保持するものである。

照射試料の仕様を表 2.1 に示す。

被覆管に照射により定量的な歪み量が生じるよう、ペレットについては外径と  $^{10}B$  濃縮度を変化させている。

被覆管の材質はオーステナイト系の PNC316 鋼を基本とし、一般に、フェライト鋼は熱膨張係数が小さいために、炉のシャットダウン時または取出し時に生じる ACMI 応力がオーステナイト鋼に比べて小さくなることが期待されることから、材料による照射挙動の違いを確認するために高強度フェライト鋼（PNC-FMS 鋼）も使用する。

被覆管の肉厚は「常陽」制御棒仕様を参考に 0.8mm を基本とし、内側キャプセルの変形を加速するため 0.4mm の肉厚も採用している。

また、シュラウド管の有効性を確認するために、一つの内側キャプセルにはシュラウド管付き  $B_4C$  ペレットが装荷されている。



表2.1 照射試料の仕様と試験パラメータ

照射キャプセルNo.	コンパートメント 内装荷位置	被覆管			ペレット		直径ギャップ 幅 ( $\mu\text{m}$ )	シュラウド管
		材質	外径 (mm)	肉厚 (mm)	外径 (mm)	$^{10}\text{B}$ 濃縮度 (w/o)		
A6-01	下部	PNC316	14.2	0.4	13.3	90	100	-
A6-02	下部				13.2	30	200	-
A6-03	上部					90	-	
A6-04	下部		15.0	0.8	13.3	50	100	-
A6-05	下部				13.2	30	200	-
A6-06	下部					50		-
A6-07	下部					90		-
A6-08	下部				12.9	50	500 (注)	-
A6-09	上部				12.7			有り
A6-10	上部	フェライト	14.2	0.4	13.3	30	100	-
A6-11	上部					90		-
A6-12	上部					30		-
A6-13	上部		15.0	0.8	13.2	90	-	
A6-14	上部					30	200	-

注: A6-09はシュラウド管外径と内側キャプセル内径とのギャップの値

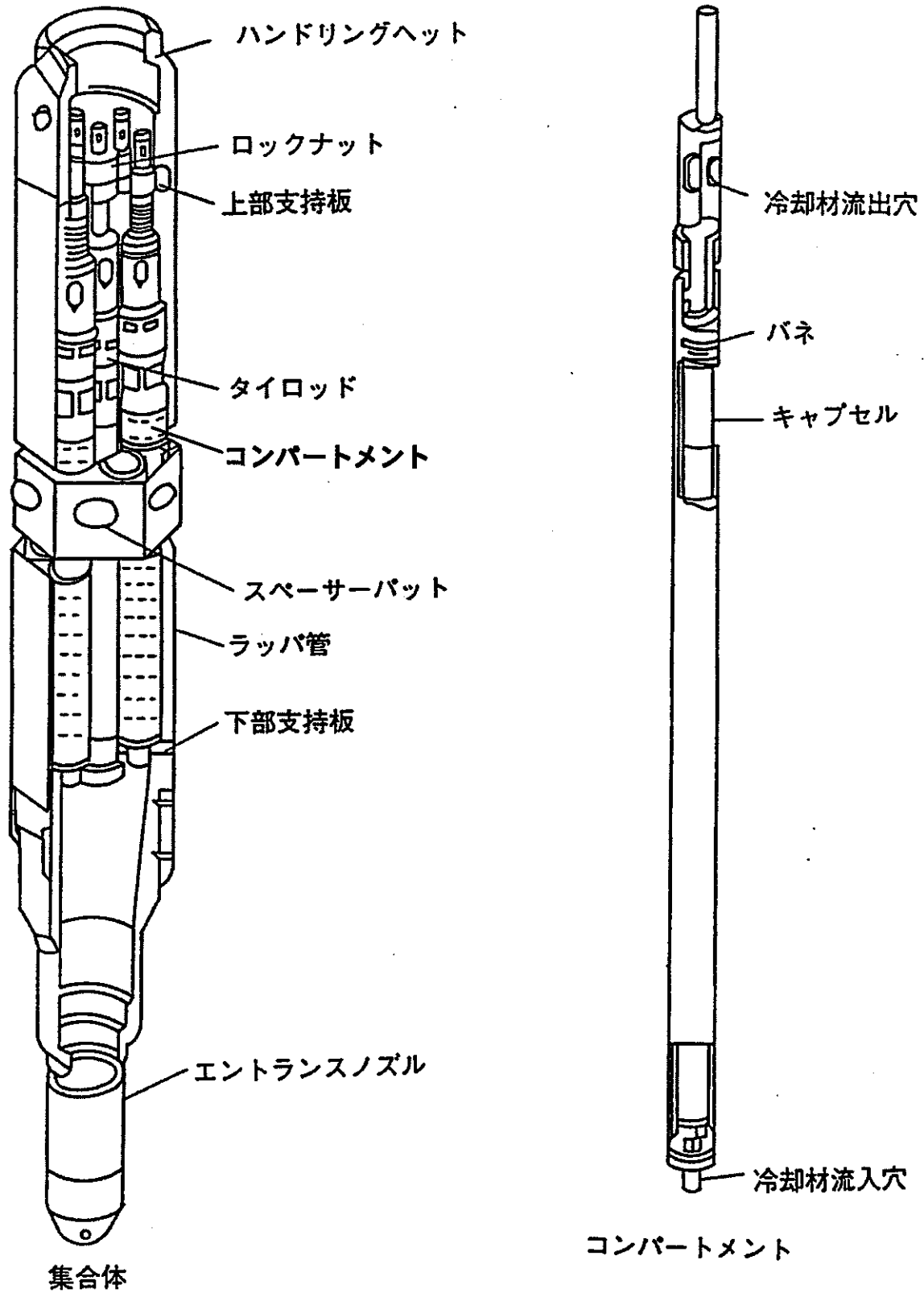
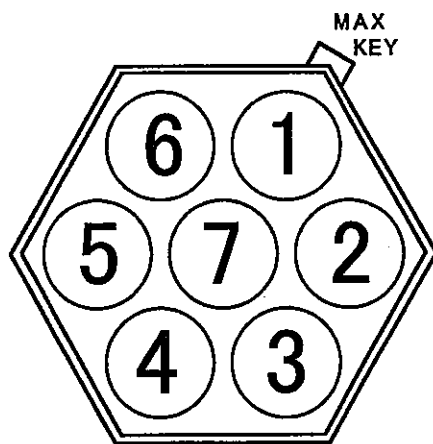


図2.1 制御棒材料照射リグ(AMIR)



装荷位置: 6C6

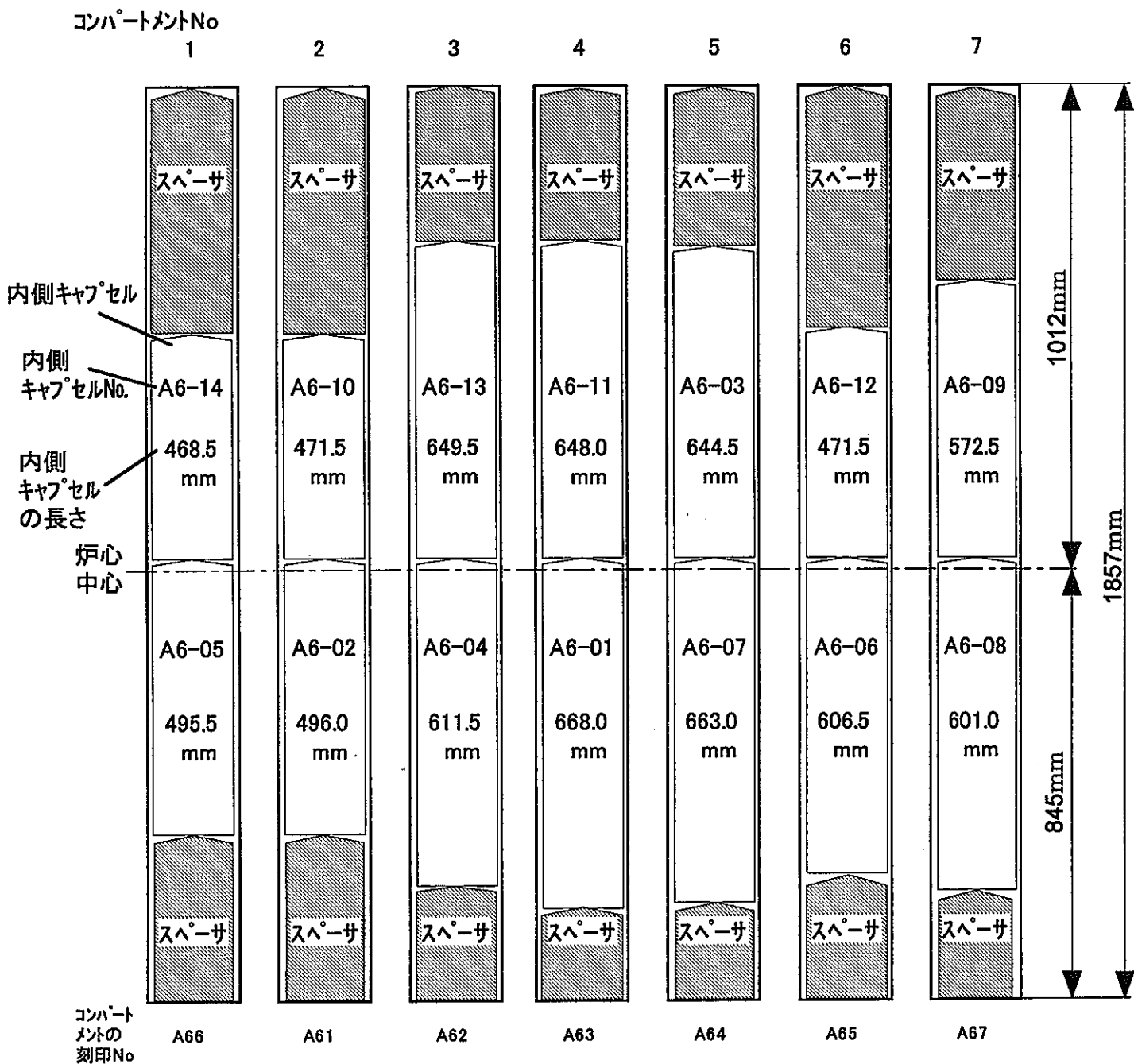
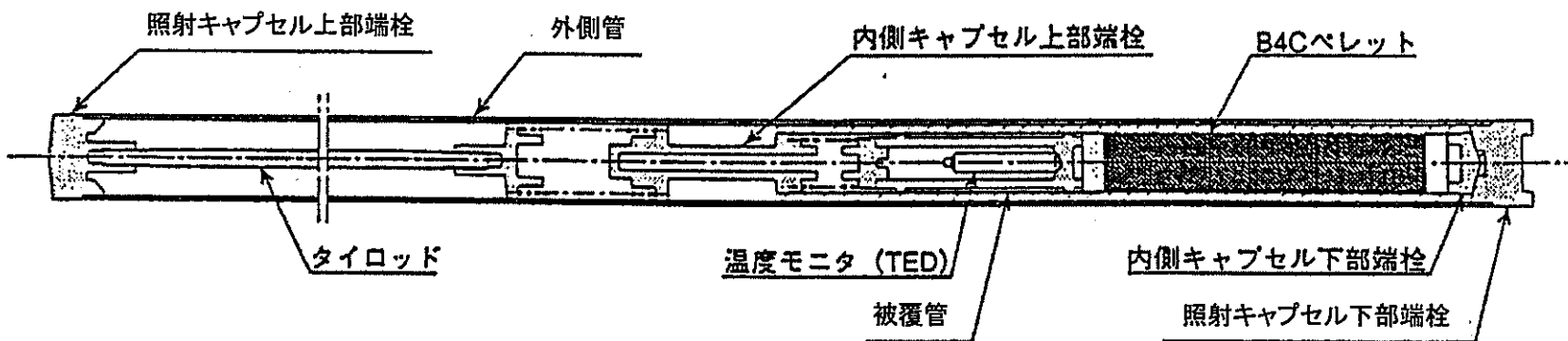
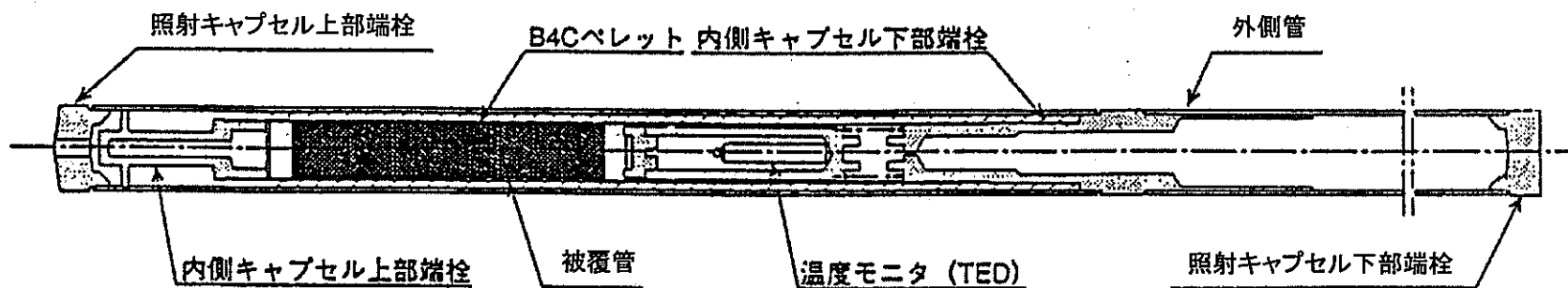


図2.2 AMIR-6 照射キャプセル配置



上部照射キャプセル



下部照射キャプセル

 Na

図 2.3 照射キャプセル構造図

### 3. 照射条件

#### 3.1 炉内照射位置<sup>4)</sup>

本制御棒材料照射リグは、100MW 定格出力第 23 サイクルから第 34 サイクルの間、炉内装荷位置〔6C6〕で照射された。AMIR-6 の照射位置を図 3.1 に示す。

#### 3.2 集合体照射条件

最高燃焼度は  $106 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  である。これは、「常陽」炉心管理コード“MAGI”の計算値を補正したものである。AMIR-1、AMIR-2、AMIR-3、AMIR-4 及び「常陽」制御棒 TCR201 の燃焼度について、実測値と計算値を最小自乗法により整理したところ、次のような関係式が得られた<sup>5)</sup>。

$$\text{実測値} = 0.756 \times \text{MAGI 計算値}$$

これより、AMIR の燃焼度は、MAGI 計算値に 0.756 を乗じて補正した。

なお、AMIR-6 は AMIR-1~4 と同じく第 6 列において照射されており、上述した補正の適用が可能である。最大中性子照射量は  $3.82 \times 10^{26} \text{n/m}^2$  ( $E \geq 0.1 \text{MeV}$ ) である。

#### 3.3 キャプセル照射条件

表 3.1 に各照射キャプセルでの  $B_4C$  ペレットの燃焼度、照射温度等の照射条件を示す。燃焼度は MAGI 計算値に 0.756 を乗じて求めた。軸心管については MAGI を用いたコード計算ができないため、 $^{10}B$  濃縮度を考慮したうえで、隣接する照射キャプセル 6 個の平均値を燃焼度とした。照射温度については、汎用伝熱計算コード HEATING-5 を用いて計算した。

表3.1 AMIR-6照射キャプセルの照射条件

キャプセルNo.	キャプセル概要				燃焼度( $\times 10^{26}$ cap/m <sup>3</sup> ) <sup>*3</sup>		ペレット照射温度(°C) <sup>*3</sup>		被覆管照射温度(°C) <sup>*3</sup>	
	被覆管		直径ギャップ ( $\mu$ m)	濃縮 度	MAGI <sup>*1</sup>	補正值 <sup>*2</sup> $\times 0.756$	中心	表面	中心	外側
	材料	肉厚 (mm)								
A6-01	PNC316	0.4	100	90	136	103	684	483	417	410
A6-02			200	30	58	44	547	453	396	393
A6-03			90	130	98	727	524	429	423	
A6-04		0.8	100	50	85	64	605	455	407	398
A6-05			200	30	59	44	551	457	399	393
A6-06				50	87	66	615	485	404	396
A6-07				90	138	104	730	540	420	408
A6-08			500	50	86	65	702	575	404	396
A6-09			シュラウド <sup>*4</sup>		80	61	698	569	415	408
A6-10	フェライト鋼	0.4	100	30	52	40	526	430	407	405
A6-11				90	128	97	676	473	426	421
A6-12		0.8		30	48	37	517	428	408	404
A6-13				90	141	106	708	485	432	422
A6-14				200	30	55	41	552	454	409

\* 1) 軸心管装荷キャプセルA6-8,A6-9の燃焼度は、上下段各装荷キャプセル燃焼度のボロン濃縮度を考慮した平均

\* 2) 参考文献の2)参照のこと

\* 3) 実際の装荷位置を元に再計算を行ったもの。

\* 4) シュラウド外径と被覆管内径ギャップは500 $\mu$ m

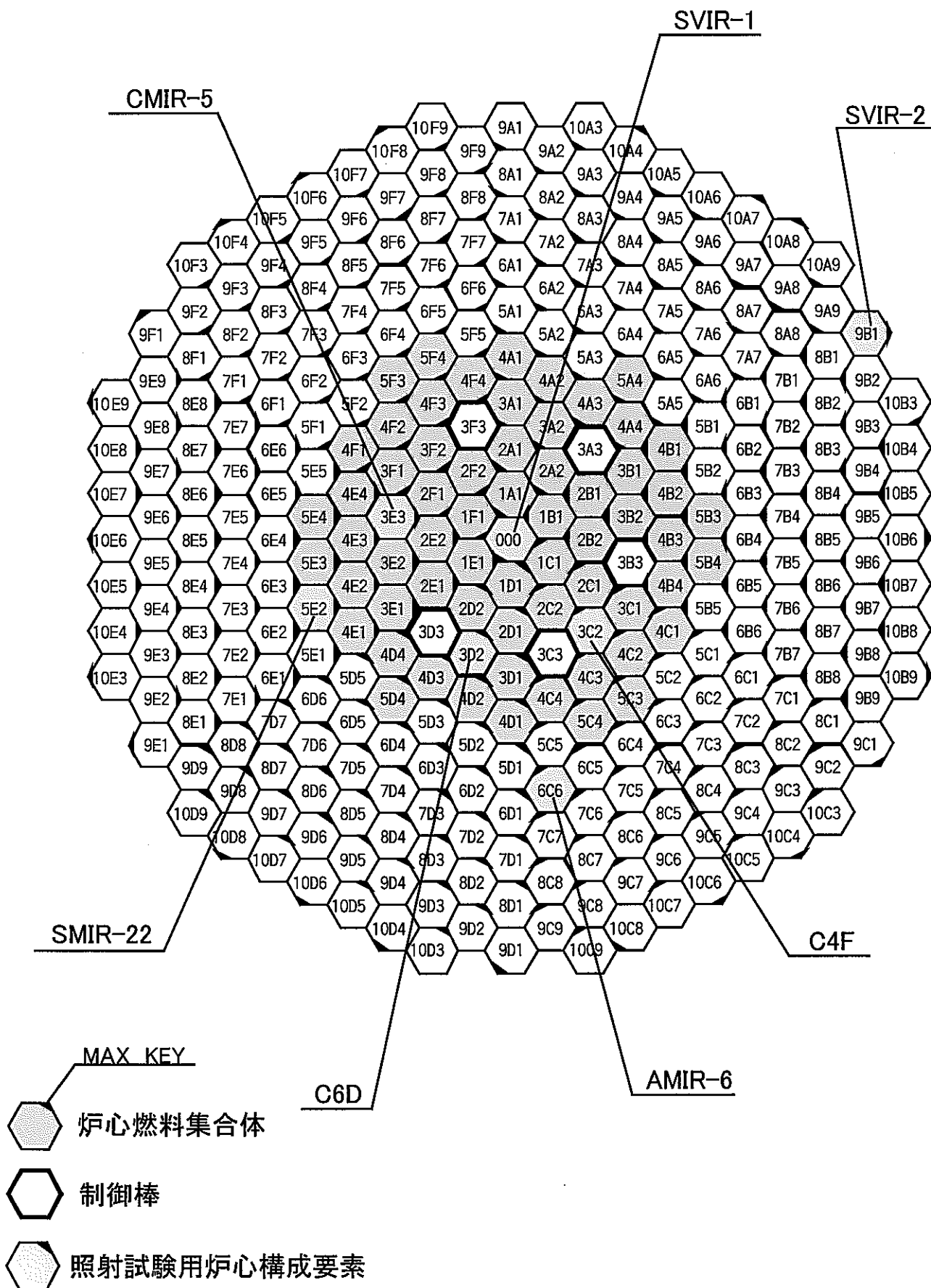


図3.1 AMIR-6の照射位置(第34サイクル炉心構成)

## 4. 照射後試験結果

### 4.1 照射リグの取扱

本制御棒材料照射リグ（集合体）は、「常陽」サイトでナトリウム洗浄され、平成 13 年 5 月 24 日に集合体キャスクで照射燃料集合体試験施設（FMF）に搬入された。FMF では、図 4.1 に示す照射後試験取扱フロー（AMIR-6）に従って、X 線コンピュータトモグラフィ（CT）・透過試験及びコンパートメント等の解体作業を実施し、照射キャプセルの重量測定を行った。その結果、下部照射キャプセルに有意な重量変化が認められたため、照射キャプセルの破壊試験の前に X 線ラジオグラフィ及び詳細外観検査を追加実施し、その後にパンクチャ試験、解体作業、内側キャプセルの詳細外観検査、寸法測定を行った。

### 4.2 解体作業

#### (1) 照射リグの解体

本照射リグは、コンパートメントタイプの集合体である。解体にあたっては、まず、ハンドリングヘッドについて、それを固定するためのロックナットを解除して引抜いた後、6本のコンパートメントと軸心管を取り出した。刻印 No. A62 のコンパートメントを取り出した際に、下端部約 100mm の軸方向範囲に水酸化ナトリウムと推察される白い付着物が観察された。

#### (2) コンパートメント及び軸心管の解体

各コンパートメント及び軸心管内のキャプセル、スペーサを取り出して観察した結果、刻印番号及び装荷位置ともに製造時の情報と一致していることがわかった。取り出した全照射キャプセルについて遮へい窓越しに目視観察した結果、外形形状に大きな変化は確認されなかった。しかし、照射キャプセル番号 A6-02、A6-10 及び A6-04 の表面の一部に水酸化ナトリウムと推察される白い付着物が観察された。

#### (3) 照射キャプセルの解体

コンパートメント及び軸心管内の上部に装荷されていた照射キャプセルの解体では、外側管を円周切削にて切断し、マントルヒータを使用して約 200℃まで昇温させて内側キャプセルを取り出した。上部に装荷されたすべての照射キャプセルにおいて、内側キャプセル上部端栓の中央にナトリウム液面が確認された。取り出した内側キャプセルに対し、アルコールと水（1 対 1）の混合液を化学ガーゼ（商品名：ベンコットン）に含ませ、表面のナトリウムを拭き取りにて除去した。

下部に装荷されていた照射キャプセルの解体では、まず外側管の上部端栓部を円周切削して取り去った。その後に、内側キャプセル下部端栓部を外側管ごと突っ切り切断を行い、ナトリウム付着状況を観察、マントルヒータにて加熱して内側キャプセルと外側



管を分離した。

ここで、製造時より重量減少が認められた照射キャプセル(詳細は次項で説明)、A6-01、A6-05、A6-06、A6-07については、X線ラジオグラフィでナトリウム液面が確認できなかった。照射キャプセルの上部端栓部を取り去った後、外側管と内側キャプセルのギャップ部にピアノ線を差込み、挿入寸法を調べた。さらに、外側管と内側キャプセルを分離した後にナトリウム浸漬跡を観察し、液位の推定を行った。

観察状況の代表例を写真4.1に示す。内側キャプセル上部端栓上端を基準として、A6-01は約40~55mm、A6-05は約55mm、A6-06は約50~70mm、A6-07は約50~100mmにおいて、ナトリウム液位が存在したものと推定された。

取り出した内側キャプセルは、上部照射キャプセルと同様に表面のナトリウムを拭き取りにて除去した。

#### 4.3 照射キャプセル重量

キャプセルの重量変化を照射前後で比較することにより、キャプセルの健全性を確認した。天秤の測定精度は $\pm 0.2g$ である。製造時の測定精度も同様に $\pm 0.2g$ である。このことから、本試験における測定誤差を両者の測定精度の和である $\pm 0.4g$ とする。

測定結果を表4.1に示す。上部照射キャプセル7試料については製造時データと比較して測定誤差を越える重量変化は確認されなかった。しかし、下部照射キャプセルについてはいずれも測定誤差を越える重量変化が認められ、4試料において重量減少(1.4~2.8g)、3試料において重量増加(14.1~62.0g)が確認された。

#### 4.4 X線ラジオグラフィ試験

キャプセル重量測定の結果、コンパートメント下部側に装荷されていたキャプセルすべてに測定誤差を超える重量変化が認められたことから、X線ラジオグラフィ試験を行った。寸法測定精度は $\pm 0.5mm$ である。

撮影した写真の例を写真4.2に示す。プレナム部にはナトリウムは浸入しないように設計されているA6-02、A6-04、A6-08においてプレナム部にナトリウム浸入が確認された。このことにより製造時に比べて重量増加が認められた。また、二重管ギャップ部のナトリウム液位については、A6-02が内側キャプセル上部まで、A6-04はB<sub>4</sub>Cベレット下端から63mmの位置に、A6-08では温度モニタ付近に確認された。その他の重量減が認められている照射キャプセルでは、X線ラジオグラフィによりナトリウム液位は確認できなかったが、4.2に示したように照射キャプセル解体時において液位を確認した。

#### 4.5 キャプセルパンクチャ試験

パンクチャ試験装置により、照射キャプセルを穿孔し、穿孔前後の圧力差から燃料ピン内のガス量及びピン内容積を測定した。また、捕集したガスをガスクロマトグラフにより

分析し、ヘリウム量を測定した。

(1) 上部照射キャプセル

上部照射キャプセルのパンクチャ試験結果を表 4.2 に示す。ガス放出率と燃焼度及び照射温度の関係については、後述する (5.1 を参照のこと)。

(2) 下部照射キャプセル

照射キャプセル重量測定結果より、下部照射キャプセルはすべて照射前後で測定誤差を越える重量変化が確認された。このことから、外側管がリークしている可能性が予想されたため、パンクチャの結果よりクラックの有無を確認した。なお、下部照射キャプセルの試験結果については表 4.2 に、ガス放出率と燃焼度及び照射温度との関係については後述する (5.1 を参照のこと)。

①重量減少が確認されたキャプセル

重量測定において、重量の減少が確認された 4 照射キャプセル (A6-01、A6-05、A6-06、A6-07) の試験の結果、その内部に約 2000~8000Torr の圧力でヘリウムガスが保たれていた。また、ガスクロ分析にてヘリウム以外の有意な元素ピークは確認されず、キャプセル内容積値が図面算出値とほぼ一致したことから、これら 4 試料の外側管は健全であったと考えられる。

②重量増加が確認された照射キャプセル

重量増加が確認された 3 照射キャプセル (A6-02、A6-04、A6-08) のパンクチャ試験の結果、穿孔による圧力の上昇は確認されなかった。このことから、これら 3 試料については外側管がリークしている可能性が示唆された (これは次に述べる外側管の詳細外観検査結果から確認された)。

#### 4.6 キャプセル詳細外観検査

詳細外観検査装置により内側キャプセル被覆管の詳細外観検査 (3 倍及び 15 倍) を行った。キャプセル重量測定の結果、下部照射キャプセルすべてに有意な重量変化が認められたため、下部の外側管についても詳細外観検査を実施した。内側キャプセル被覆管については、すべてのキャプセルを対象に特にクラック及び変形等特異部の有無に着目し観察した。また、クラックについては写真撮影を実施した。

(1) 外側管

キャプセルパンクチャ試験の結果から、製造時より有意な重量増加が確認された 3 試料 (A6-02、A6-04、A6-08) の外側管について、クラックの有無を確認するために詳細外観検査を行った。重量変化の生じていない上部照射キャプセルと構造を比較すると、下部側に装荷されたキャプセルは、外側管においてネジ端栓構造が用いられている点が異なる。下部照射キャプセルは、ナトリウムを充填してネジを挿入後、本体とネジを溶接

することにより気密を保つようになっていた。

この相違点に着目し、リークの可能性はネジ端栓部が最も高いと考え、詳細外観検査を実施した。その結果、A6-02、A6-04、A6-08 の 3 照射キャプセルすべてにおいて、ネジ端栓部の溶接部にクラックが確認された。このことから、これら 3 照射キャプセルの重量増加は、ネジ端栓部の溶接部にクラックが生じたことにより、キャプセル内にナトリウムが侵入して生じたとわかった。

## (2) 内側キャプセル被覆管

観察結果をまとめたものを表 4.3 に示す。観察は内側キャプセル被覆管表面上の刻字位置に施したマジックマーキングを  $0^\circ$  とし、キャプセル Top 側から見て時計回りに  $90^\circ$ 、 $180^\circ$  と定義して実施した。また、観察軸位置は、下部、上部ともに内側キャプセル上端からの距離とした。

### ① 下部照射キャプセル

下部側に装荷した照射キャプセルにおいて、A6-02、A6-04、A6-07 の被覆管にクラックが発生していることがわかった。

#### (i) クラックの生じた内側キャプセル (A6-02、A6-04、A6-07)

A6-02 については、 $B_4C$  ペレット部 (軸位置 45.5~120.5 mm) に顕著な膨れが確認された。また、 $B_4C$  ペレットと熱遮蔽ペレットの境界付近に  $51\sim 95^\circ$  の範囲で周方向のクラックが確認された。周方向クラックを写真 4.3 に示す。同ページには、内側キャプセルの模式図も示した。写真に示してある撮影軸位置は、内側キャプセル上端からの距離を示しており、角度は上述の基準に基づいたものである。

A6-04 は、A6-02 と同様に  $B_4C$  ペレット部 (軸位置 45.5~120.5 mm) に顕著な膨れと、大きな軸方向クラックが観察された。クラックは幅 0.6mm のものが軸位置 61~68mm の範囲で  $40^\circ$  方向に、幅 0.7mm のクラックが 65~88mm の範囲で  $85^\circ$  方向に確認された。観察結果を写真 4.4~4.5 に示す。

A6-07 を観察した結果、 $B_4C$  ペレット部 (軸位置 45.5~120.5 mm) に顕著な膨れとくぼみが生じていた。また、周方向の大きなクラックと軸方向のクラックが確認された。周方向のクラックについては  $B_4C$  ペレットと熱遮蔽ペレットの境界付近に  $133\sim 308^\circ$  の範囲で生じており、リッジングのような膨れ部が観察された。軸方向クラックは、幅 1.0mm のものが軸位置 47~57mm の範囲で  $68^\circ$  方向に、幅 0.3mm のクラックは 54~56mm の範囲で  $357^\circ$  方向に、幅 0.1mm のクラックは 58~66mm の範囲で  $32^\circ$  方向に生じていた。また、くぼみは、幅 0.1mm のものが 49~50mm の範囲で  $338^\circ$  方向に確認された。観察結果を写真 4.6~4.7 に示す。

#### (ii) クラックの無いキャプセル (A6-01、A6-05、A6-06、A6-08)

A6-01 については、幅 0.1mm のくぼみが軸位置 106~109mm の範囲で、 $65^\circ$  方向に確認された。また、A6-01 と A6-06 において  $B_4C$  ペレット部 (軸位置 45.5~120.5 mm)

に顕著な膨れが確認された。A6-05 と A6-08 については詳細外観検査において変形等の特徴部は確認できなかった。

②上部照射キャプセル(A6-03、A6-09、A6-10、A6-11、A6-12、A6-13、A6-14)

A6-14、A6-09 を除くすべてのキャプセルにおいて B<sub>4</sub>C ペレット部(軸位置 117~192 mm)に顕著な膨れが確認された。

#### 4.7 内側キャプセル被覆管寸法測定

内側キャプセルの外径測定はレーザーにより周方向 5° 間隔 (36 方向)、軸方向 1 mm ピッチで測定した。キャプセル外径測定の精度は±0.003mm である。

各試料 36 方向外径データより、周方向平均外形寸法を計算して軸方向プロファイルを求めた。代表例として、PNC316 とフェライト鋼製被覆管それぞれの最大外径増加を生じたキャプセルについて、軸方向プロファイルを図 4.2 に、被覆管にクラックが確認された 3 キャプセルについて図 4.3 に示す。また、各試料における仕様及び外径増加率等の算出結果をまとめたものを表 4.4 に示す。ここで、外径増加率は温度モニタケース部近傍(下部照射キャプセルの場合は内側キャプセル上端から 150~200mm、上側キャプセルの場合は内側キャプセル下端から 110~160mm)の周方向平均外径をリファレンスとして求めている。但し、クラックの生じた被覆管については、最大外径はクラック発生領域両端(軸方向)における外径の平均値を示している。最大外径増加率を示したのは A6-11 であり、 $\Delta D/D=5.95\%$ であった。

内側キャプセルの曲がり量は、最大で約 1mm であった。

表4.1 AMIR-6 照射キャプセル重量測定結果

照射キャプセルNo.	コンパートメント内 装荷位置	試料重量 (g)	製造時重量 (g)	重量差 (g)
A6-01	下部	731.0	733.2	-2.2
A6-02	下部	521.3	478.5	42.8
A6-03	上部	701.0	700.6	0.4
A6-04	下部	621.7	559.7	62.0
A6-05	下部	503.2	504.6	-1.4
A6-06	下部	555.6	558.4	-2.8
A6-07	下部	753.0	755.4	-2.4
A6-08	下部	567.5	553.4	14.1
A6-09	上部	516.2	515.9	0.3
A6-10	上部	439.3	439.3	0.0
A6-11	上部	709.5	709.1	0.4
A6-12	上部	459.2	459.1	0.1
A6-13	上部	729.9	729.5	0.4
A6-14	上部	458.0	457.9	0.1

※本試験においては、製造時重量と比較して測定誤差(±0.4g)を超える重量差が確認された場合には再測定を行うとともに分銅(500g)を用いて装置の信頼性を確認している。

表4.2 AMIR-6キャプセルパンクチャ試験結果

キャプセルNo.	燃焼度 cap/m <sup>3</sup>	キャプセル内容積 (cc)	キャプセル内圧力 (Torr-STP)	キャプセル内ガス量(cc-STP)	製造時キャプセル内ガス量(cc-STP)	生成ガス量 (cc-STP)	ガス放出率(%)
A6-01	1.03E+28	115.92	5800.4	866.12	106.20	3995.0	19.02
A6-02	4.35E+27	---	---	---	---	1660.3	---
A6-03	9.79E+27	104.3	6749.5	921.13	95.53	3736.7	22.1
A6-04	6.44E+27	---	---	---	---	2495.4	---
A6-05	4.43E+27	61.7	2047.2	166.77	56.54	1690.9	6.5
A6-06	6.55E+27	86.20	2790.7	316.47	78.98	2500.0	9.50
A6-07	1.04E+28	112.09	8493.8	1253.09	102.69	3969.5	29.0
A6-08	6.52E+27	---	---	---	---	2451.0	---
A6-09	6.05E+27	93.5	2776.6	353.51	85.7	2137.6	12.5
A6-10	3.96E+27	68.4	1642.4	148.08	62.7	1534.5	5.6
A6-11	9.67E+27	105.7	5541.9	766.32	96.9	3747.0	17.9
A6-12	3.65E+27	66.6	1723.2	151.5	61.0	1414.3	6.4
A6-13	1.06E+28	105.43	6842.0	939.4	96.59	4119.0	20.46
A6-14	4.14E+27	62.5	1405.3	116.4	57.3	1580.2	3.7

A6-02、A6-04、A6-08については、キャプセルの破損等によりキャプセル内容積、キャプセル内圧力等のデータ算出はできない。  
製造時のHeガス量は、本試験で得られたキャプセル内容積中に、25°C状態でHeが封入されていたと仮定した値である。

表4.3 AMIR-6内側キャセル被覆管詳細外観検査まとめ

キャセルNo.	照射条件		材質	肉厚 (mm)	観察結果											
	照射温度 (ペレット中心) (°C)	燃焼度 (MAGI×0.758) (×10 <sup>28</sup> cap/m <sup>3</sup> )			クラック					くぼみ				顕著な膨れ 軸位置 (mm)		
					軸位置 (mm)	角度 (°)	長さ (mm)	巾 (mm)	形状	軸位置 (mm)	角度 (°)	長さ (mm)	巾 (mm)			
A6-01	684	103.1	PNC316	0.4	—	—	—	—	—	—	106~109	65	2.6	0.1	45.5~123.5	
A6-02	547	43.5			45.5	51~95	0.1	5.3	周方向	—	—	—	—	—	—	45.5~124.5
A6-03	727	97.9			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	113.5~192.5
A6-04	605	64.4			0.8	61~68	40	7.5	0.6	軸方向	—	—	—	—	—	46.5~123.5
A6-05	551	44.3				65~88	85	23.4	0.7	軸方向	—	—	—	—	—	—
A6-06	615	65.5				—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A6-07	730	104		—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	48.5~125.5
				45.5		133~308	0.6	27.4	周方向	49~50	338	1.3	0.1	44.5~126.5		
				47~57		68	10.2	1.0	軸方向							
				54~56		357	2.0	0.1	軸方向							
58~66	32	7.3		0.3		軸方向										
A6-08	702	65.2		フェライト	0.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
A6-09	698	60.5				—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
A6-10	526	39.6				—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
A6-11	676	96.7	—			—	—	—	—	—	—	—	—	—		
A6-12	517	36.5	—			—	—	—	—	—	—	—	—	—		
A6-13	708	106.3	—			—	—	—	—	—	—	—	—	—		
A6-14	552	41.4	—			—	—	—	—	—	—	—	—	—		
—	—	—	—			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

MAGIコードでは軸芯管(A6-08、A6-09)についての燃焼度は計算されない。したがって、A6-08、A6-09は周囲6キャセルの燃焼度÷濃縮度の平均値にA6-08、A6-09の濃縮度を掛けて算出した。  
軸位置(mm)はキャセル上端からの距離。

表4.4 AMIR-6キャプセルの仕様と周方向平均外径測定結果

キャプセルNo	被覆管 材質	肉厚 (mm)	直径 キャップ幅 ( $\mu\text{m}$ )	ペレット 外径 (mm)	燃焼度 (MAGI $\times 0.756$ ) ( $\times 10^{26} \text{ cap/m}^3$ )	周方向平均外径測定結果						
						REF(mm)	最大外径			B4Cペレット部平均外径		
							外径(mm)	$\Delta D$ (mm)	$\Delta D/D$ (%)	外径(mm)	$\Delta D$ (mm)	$\Delta D/D$ (%)
A6-01	PNC316	0.4	100	13.3	103	14.196	14.896	0.700	4.933	14.805	0.609	4.290
A6-02			200	13.2	44	14.202	14.464	0.262	1.841	14.428	0.226	1.591
A6-03					98	14.202	14.791	0.589	4.150	14.639	0.437	3.077
A6-04		0.8	100	13.3	64	15.012	15.367	0.355	2.365	15.364	0.352	2.345
A6-05			200	13.2	44	15.005	15.214	0.209	1.393	15.121	0.116	0.773
A6-06					66	14.996	15.383	0.387	2.583	15.249	0.253	1.687
A6-07					104	15.008	15.423	0.415	2.762	15.397	0.389	2.592
A6-08			500	12.9	65	15.010	15.418	0.408	2.716	15.094	0.084	0.560
A6-09				12.7	61	15.007	15.104	0.097	0.647	15.036	0.029	0.193
A6-10	フェライ ト	0.4	100	13.3	40	14.202	14.507	0.305	2.146	14.422	0.220	1.549
A6-11					97	14.204	15.049	0.845	5.951	14.836	0.632	4.449
A6-12					37	14.984	15.253	0.269	1.796	15.166	0.182	1.215
A6-13		0.8	106	14.994	15.670	0.676	4.508	15.554	0.560	3.735		
A6-14			200	13.2	41	14.989	15.196	0.207	1.381	15.118	0.129	0.861

A6-09はシュラウド管外径と内側キャプセル内径とのギャップの値。

周方向平均外径値には36方向外径データにおける平均値。

クラックの生じた被覆管については、最大外径はクラック発生領域両端(軸方向)における外径の平均値。



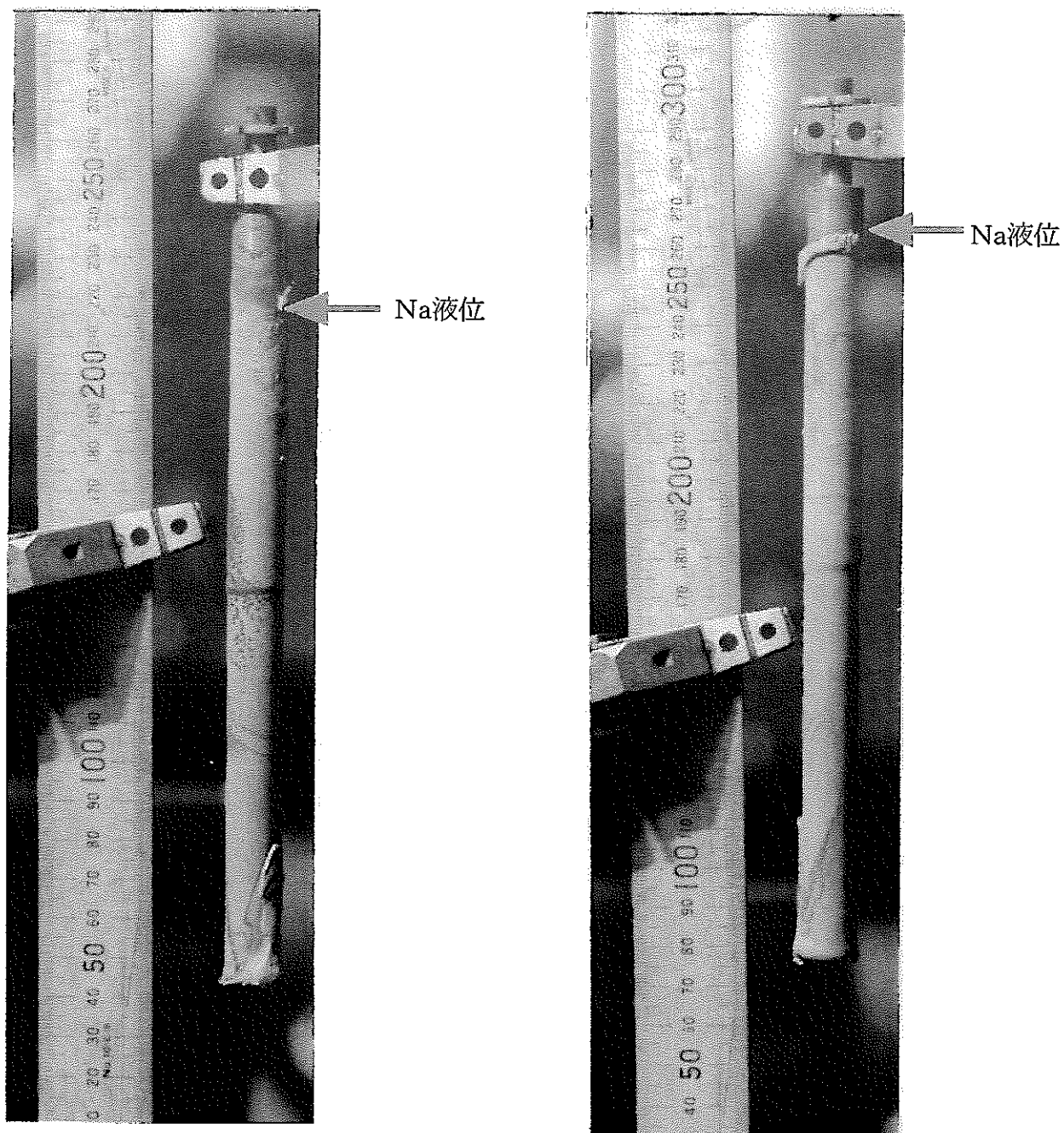


写真4.1 下部装荷の内側キャプセル解体時のNa液位観察状況例(A6-01)

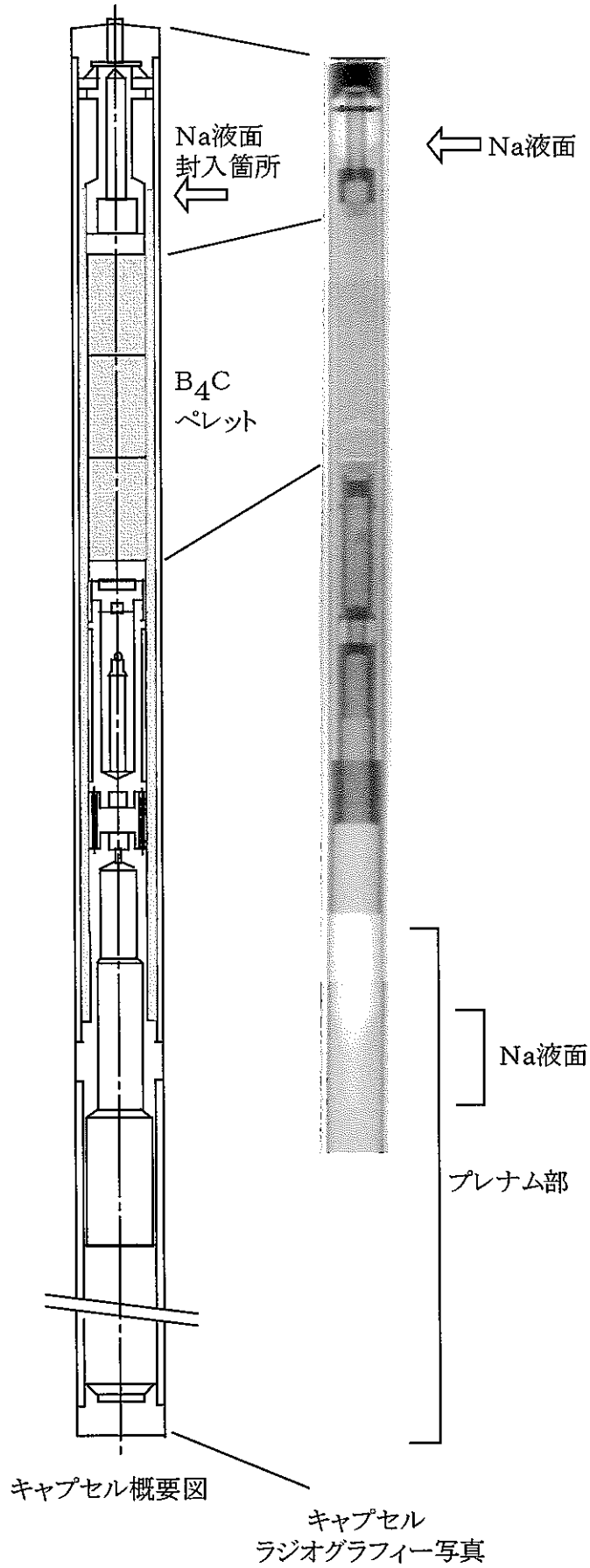


写真4.2 照射キャプセルA6-02・ラジオグラフィ撮影写真

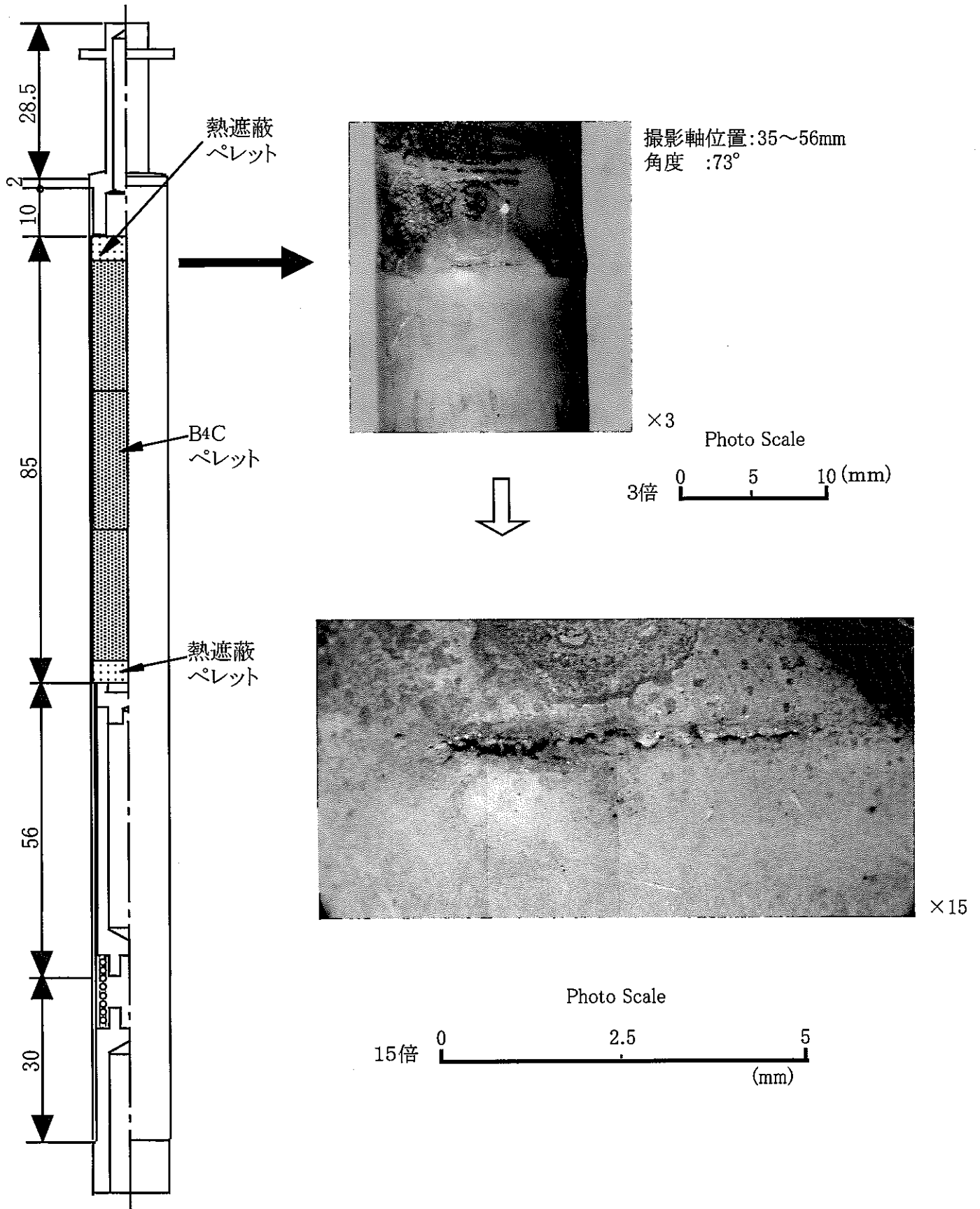


写真4.3 内側キャプセル被覆管のクラック(A6-02)

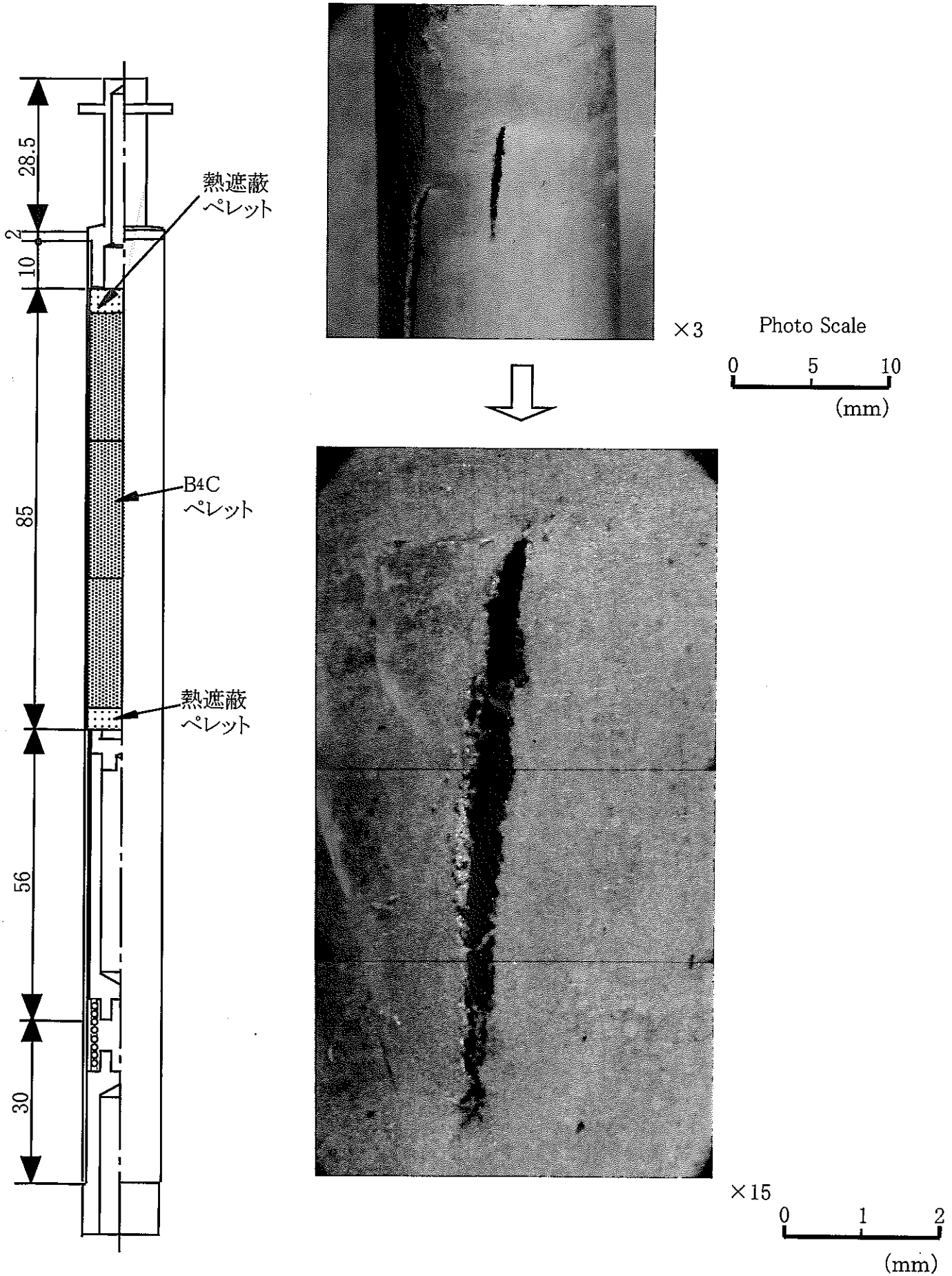
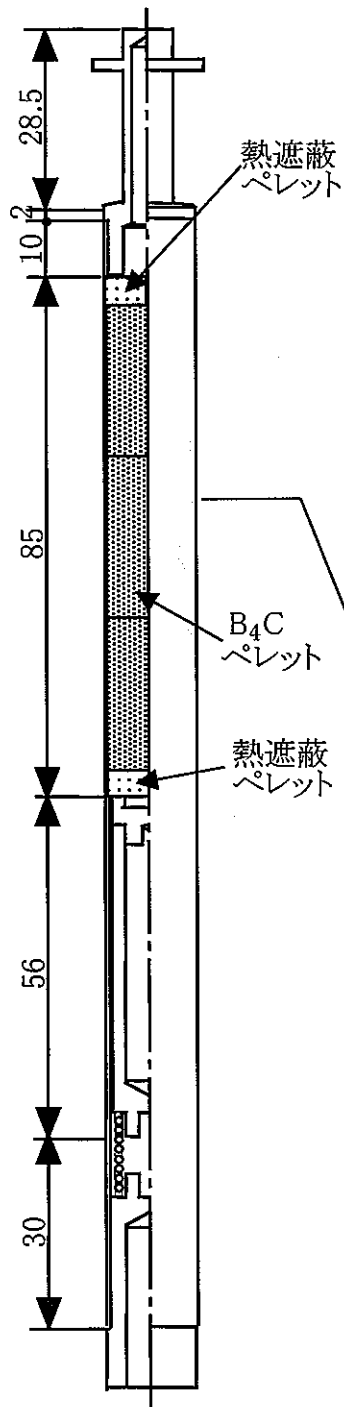


写真4.4 内側キャプセル被覆管のクラック (A6-04) (1/2)



撮影軸位置：61.5～92.5mm、角度：85°

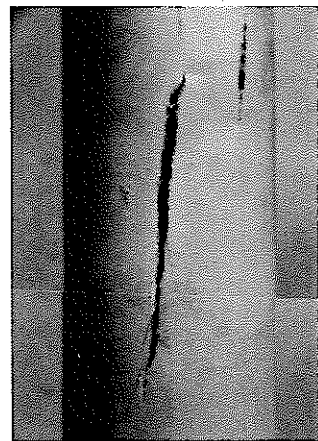


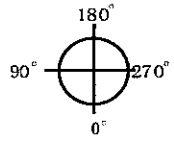
Photo Scale  
3倍 0 5mm



Photo Scale  
15倍 0 1mm

写真4.5 内側キャプセル被覆管のクラック (A6-04) (2/2)

撮影軸位置 34~55.5mm

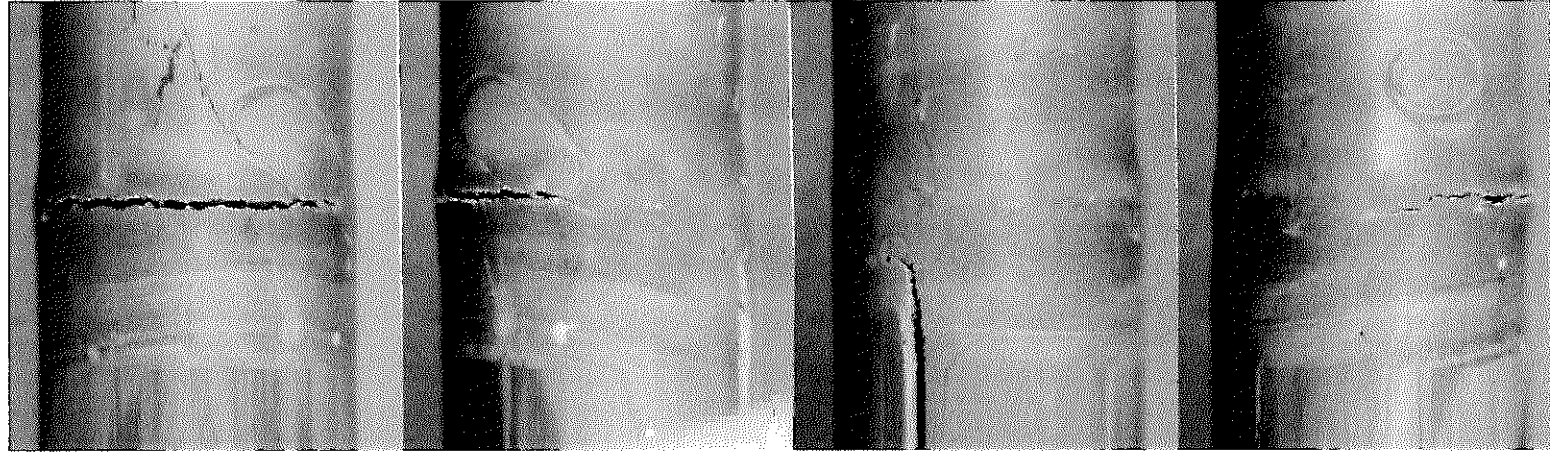


角度:210°

角度:120°

角度:30°

角度:300°

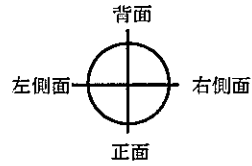


正面

右側面

背面

左側面



写真の見方 (TOP VIEW)

Photo Scale

撮影倍率:3倍 0 5 mm

注) 軸位置は、キャプセル上端からの距離

写真4.6 内側キャプセル被覆管のクラック (A6-07) (1/2)



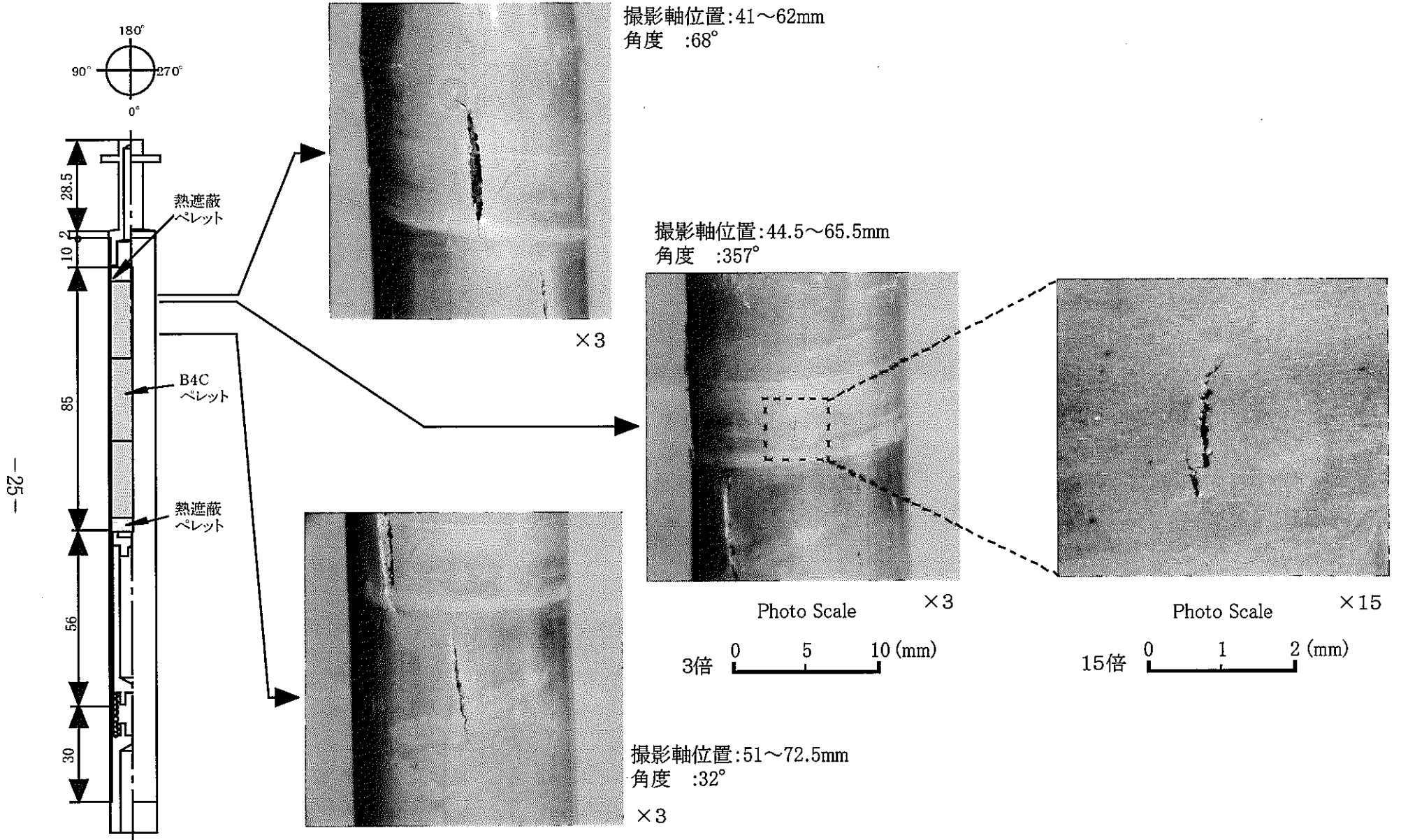


写真4.7 内側キャプセル被覆管のクラック (A6-07) (2/2)

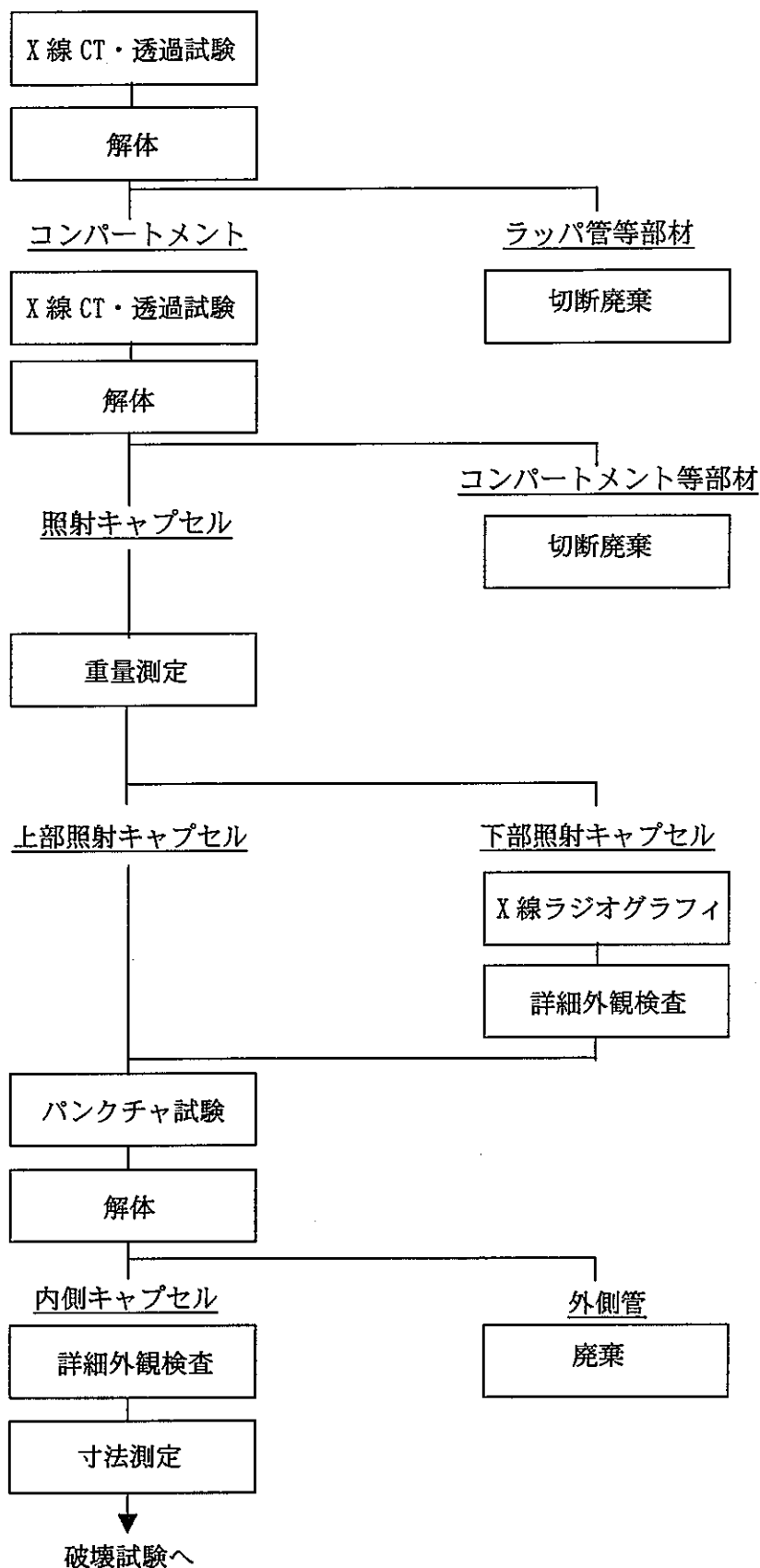
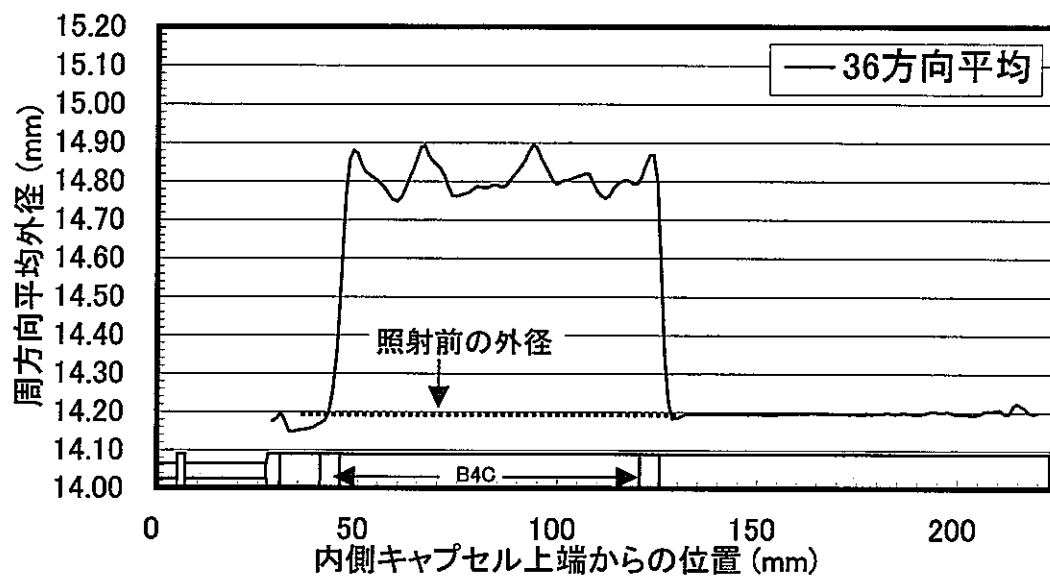
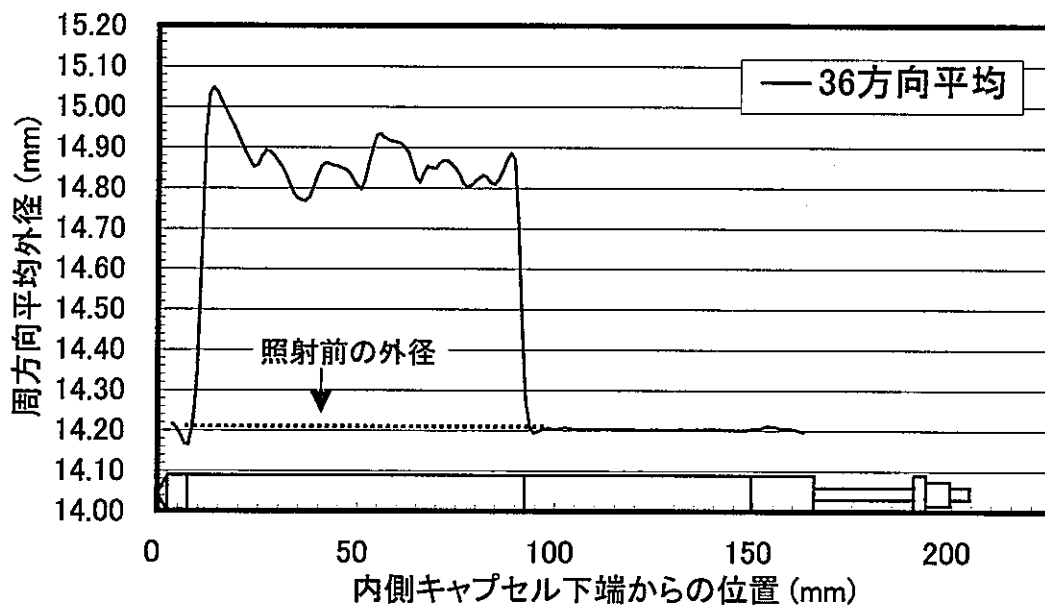


図 4.1 AMIR-6 照射後試験取扱フロー





キャプセルNo. A6-01 (PNC316)



キャプセルNo. A6-11 (フェライト鋼)

図4.2 PNC316とフェライト鋼被覆管の周方向平均外径

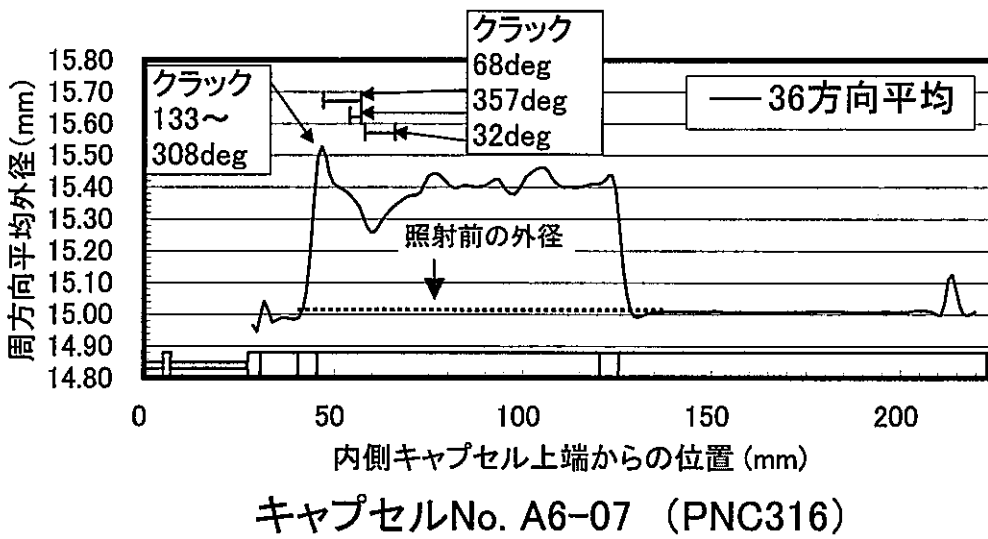
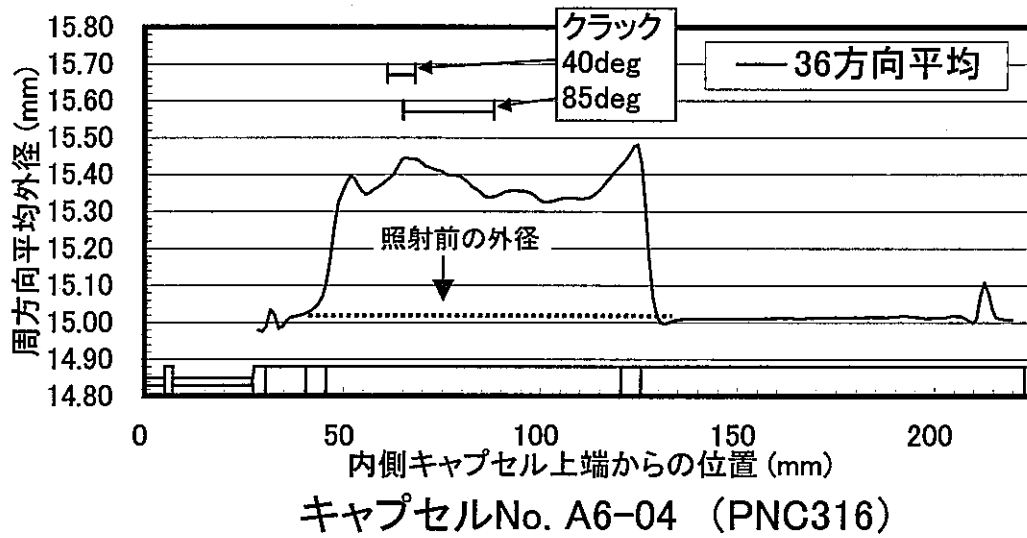
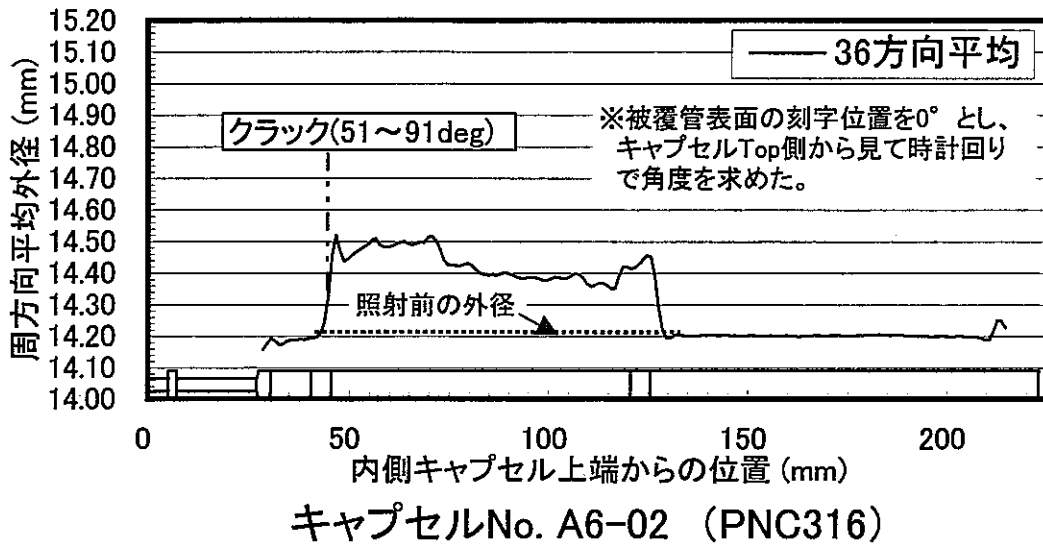


図4.3 クラックの生じた被覆管の周方向平均外径

## 5. 考察

AMIR-6 の非破壊試験結果について考察を行った。なお、下部照射キャプセルにおいて、A6-02、A6-04、A6-08 の3つは外側管がリークしており、照射中にナトリウムが照射キャプセル内に浸入していることがわかったが、浸入したナトリウムの被覆管変形挙動に与える影響については推定が困難であることから、上記3照射キャプセルは対象外とした。

### 5.1 ヘリウム放出挙動

ヘリウム放出率と燃焼度及び照射温度との関係を図 5.1 と 5.2 に示す。比較するため、他の集合体の結果もプロットした。

図 5.1 より、AMIR-6 のヘリウム放出率は燃焼度が大きくなるにつれて増加しており、他の AMIR と同じ傾向を示している。一方、文献値<sup>7)</sup>は燃焼度が  $15 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  程度で約 55% の最大放出率に到達してから低下しており、AMIR の傾向とは異なっている。この違いは、 $^{10}\text{B}$  濃縮度と使用条件の違いによるものと推察される。即ち、AMIR は静止状態で照射されたキャプセルのデータであるのに対して文献値<sup>7)</sup>は照射中に挿入引抜きが行われた実機制御棒の He 放出率であること、AMIR は  $^{10}\text{B}$  濃縮度の大きい  $\text{B}_4\text{C}$  ペレットを用いているのに対して文献値の  $^{10}\text{B}$  濃縮度は約 20% と小さく照射期間が長期であること、等により、放出挙動の違いが生じた可能性がある。

図 5.2 には、照射温度とヘリウム放出率の関係を示した。データは、燃焼度の範囲に合わせてシンボルを変えている。図 5.1 で示した文献値<sup>7)</sup>は照射温度範囲が  $500 \sim 800^\circ\text{C}$  であることが報告されているものの、詳細には不明であることから図 5.2 には載せていない。図より、照射温度  $700^\circ\text{C}$  付近において、AMIR-6 のヘリウム放出率は他の AMIR データに比べて大きい。

図 5.3 に、照射温度  $500 \sim 800^\circ\text{C}$  における He 放出率と燃焼度の関係を示した。 $90 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  未満の燃焼度では、AMIR-6 の放出率は文献値<sup>7)</sup>のパラッキ範囲内にあり、他の AMIR データと同程度である。 $90 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  を越えた燃焼度では、A6-07 以外は  $80 \sim 90 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$  における文献値<sup>7)</sup>の放出率とほぼ同じとなる。ここで、A6-07 の放出率が大きいのは、次のような理由によるものと推察される。

表 5.1 に、外側と内側キャプセルの間に充填されたナトリウム液位について、照射後試験により確認した結果を示す。表より、 $\text{B}_4\text{C}$  ペレット上端位置よりも液位の低いものが幾つかあり、その中には A6-07 も含まれていた。よって、A6-07 はナトリウム液位が低いために照射温度が高くなり、He 放出率が大きくなったと推測される。表 5.1 の結果を基に A6-07 の温度計算を行うと  $\text{B}_4\text{C}$  ペレット中心で約  $1400^\circ\text{C}$  となった。図 5.2 より、照射温度  $1400^\circ\text{C}$  にて放出率 30% という関係は、他の AMIR 試験結果と一致する。

### 5.2 被覆管周方向平均外径増加率に及ぼす各パラメータの影響

AMIR-6 は、被覆管の肉厚、 $B_4C$  ペレットと被覆管内面とのギャップ幅、シュラウド管装着の有無、被覆管材質をパラメータとして設定している。そこで、それらが被覆管の周方向平均外径増加率に与える影響についてまとめた。但し、外側管がリークした 3 照射キャプセル (A6-02、A6-04、A6-08) については、照射中に浸入したナトリウムの内側キャプセルに対する影響評価が困難であることから、検討対象外とした。

図 5.4 に、燃焼度と内側キャプセル被覆管の周方向平均外径増加率 (36 方向の平均値を  $B_4C$  ペレット部について平均化) の関係を示す。被覆管の材質、ペレットと被覆管内面とのギャップ幅、肉厚の違いを記号で区別してある。キャプセル No. も記載しているが、赤字で示しているのは内側キャプセルにクラックが発生したものである。

#### (1) シュラウド管

シュラウド管は A6-09 照射キャプセルに用いられている。図 5.5 に最大オーバリティが生じた  $80^\circ$  と  $170^\circ$  方向の外径値の差 (オーバリティ) と周方向平均外径プロファイルを示す。これらの図より、オーバリティは最大でも  $100\mu\text{m}$  未満と小さいこと、被覆管に大きな膨れは生じていないことが確認された。シュラウド管を用いた照射試験は、「常陽」実機制御棒でも行われている<sup>8)</sup>。同試験では、AMIR-6 と同様にシュラウド管を用いることにより被覆管の平均外径増加が低く抑えられており、塑性歪の発生を低減する効果が認められている。

#### (2) キャプセル肉厚、ギャップ幅、材質

図 5.6 に、ギャップ幅が同じで肉厚が異なる A6-03 と A6-07、A6-10 と A6-12、A6-11 と A6-13 の外径増加率を各々比較して示す。図より、被覆管の材質が同一のものは、肉厚が薄いほど外径増加率の大きいことがわかる。図 5.7 には、肉厚が等しいが、ギャップ幅の異なる A6-01 と A6-03、A6-12 と A6-14 を比較した結果を示す。この図からも、ギャップ幅の小さいキャプセルの膨れ率が大きいことがわかる。

キャプセル肉厚やギャップ幅が等しいが、材質のみ異なる A6-12 と A6-05、A6-11 と A6-01 について、比較した結果を図 5.8 に示す。両者の膨れ率を比較すると、燃焼度が  $100 \times 10^{26} \text{cap}/\text{m}^3$  程度ではフェライト鋼の増加率が大きい、 $40 \times 10^{26} \text{cap}/\text{m}^3$  程度では程度の増加率であるとわかる。

### 5.3 クラックについて

図 5.9 に、これまでの PIE 結果より推察される、 $B_4C$  ペレットと被覆管の ACMI 挙動<sup>5)</sup>を示した。①初期ギャップ幅が大きい場合、ペレットにクラックが発生すると破片のリロケーションが生じる。スエリングによりペレットが膨張するに従い、ACMI が生じて被覆管は異方的に変形し、オーバリティは大きくなる。この時、異方的な引っ張り応力が働き、被覆管にクラックが発生する。②初期ギャップ幅が小さい場合、ペレットにクラックが発

生しても破片のリロケーションは生じない。スエリングによりペレットが膨れても、被覆管は等方的に変形するため、オーバリティは小さい。

図 5.9 に基づき、AMIR-6 の 3 つの照射キャプセルで生じた被覆管クラックについて検討する。被覆管には、周方向と軸方向のクラックが生じていた。軸方向のクラックについては、これまで発生した実機制御棒のクラック形状<sup>5)</sup>と比較してみても著しい違いはなく、上述したようなメカニズムで発生したと思われる。周方向のクラックは実機制御棒では確認されていない。今回の試験結果から発生原因を特定するのは困難であるが、写真 4.6 に示した周方向クラックの写真を見ると、クラックの位置で局所的な膨れが生じていることから、リッジングにより周方向のクラックが発生した可能性もある。

但し、表 5.1 から A6-07 ではクラックの発生領域がナトリウム液位よりも上方にあった可能性がある。その場合、クラックは設計温度である 400℃よりも高温で発生したこととなる。HEATING-5 にて、表 5.1 の結果に基づきナトリウム液位が内側キャプセル上端より 100mm の位置にあると想定して被覆管の温度計算を行ったところ、最大で 1200℃程度まで上昇する結果となった。被覆管の材質である PNC316 は、中性子照射されると材料強度に対する温度の影響が大きくなり、高温ほど強度が低下する<sup>9)</sup>。従って、A6-07 ではナトリウムが充填されていない領域が高温となることにより材料強度が低下し、ACMI の発生によって、クラックが生じたと推察される。

A6-02 と A6-04 はクラック発生領域がナトリウム液位よりも下側にあるが、これらは外側管がリークしている。従って、キャプセル外部よりナトリウムが浸入して液位を上昇させた可能性があり、A6-07 と同様に、温度上昇がクラック発生要因の 1 つに挙げられる。

#### 5.4 被覆管周方向平均最大外径増加率における実機制御棒との比較について

周方向平均外径増加率の軸方向プロファイルにおける最大値を図 5.10 に示す。ここで、クラックのなかった被覆管については周方向平均最大外径増加率を、クラックの生じた被覆管についてはクラック発生領域両端（軸方向）における周方向平均外径増加率の平均値を示している。AMIR-6 では、図 5.10 に示すように約 2~3%の範囲でクラックが発生しているが、一方で、外径増加率が 4%を越えているにも係わらずクラックの生じていない被覆管も確認されている。

次に、実機制御棒との比較を行う。比較に当たっては、AMIR は静止状態（但し流力振動はあり）で照射されているのに対して、実機制御棒は照射中に挿入引抜き操作が行われることを留意しなければならない。制御棒被覆管のクラック発生については報告例は殆どないものの、ロシアの BOR-60 において、外径増加率が 2~4%の範囲でクラックが発生したという報告がなされている<sup>10)</sup>。また、「常陽」実機制御棒においては、外径増加率 1%程度でクラックが確認された<sup>5), 11)~14)</sup>。

周方向平均外径増加率の軸方向プロファイルにおける最大値について、AMIR-6 の内側キャプセル被覆管と「常陽」実機制御棒におけるデータ<sup>5), 11)~14)</sup>を比較した結果を図 5.11

～5.12 に示す。なお、「常陽」実機制御棒については、被覆管にクラックが発生している位置が中性子照射量の一番高い最下端の  $B_4C$  ペレット付近に集中していることから、比較データは最下端の  $B_4C$  ペレット領域の測定結果より求めた。AMIR-6 は、ナトリウムが充填されている領域について整理した結果を比較した。なお、A6-02、A6-04、A6-08 については照射中に外部からナトリウムが浸入していること、A6-09 についてはシュラウド管を装着したキャプセルであること、A6-07 については、クラックの発生が高温下における被覆管強度低下によるものと推察されることから除外した。

周方向平均最大外径増加率と燃焼度の関係を図 5.11 に示す。図より、AMIR-6 照射キャプセルの最大増加率は PNC316 鋼製被覆管で約 5%、フェライト鋼製被覆管で約 6% であった。実機制御棒でクラックは約 1% で発生しているが、AMIR-6 ではそれよりも大きな外径増加が生じているにも係わらずクラックの発生には至っていないキャプセルが幾つかある。

図 5.12 に、周方向最大外径増加率を示した軸位置における最大オーバーリティを示す。実機制御棒において初期ギャップ幅とオーバーリティの関係に着目すると、初期ギャップ幅が 0.2mm 以下のオーバーリティは 0.2mm 以上の制御棒より小さいこと、クラックの発生した制御棒はオーバーリティが大きく、0.2mm 以上の制御棒にのみ発生していることがわかる。AMIR-6 の照射キャプセルはいずれも初期ギャップ幅 0.2mm 以下であり、オーバーリティは 100  $\mu$ m 以下と小さい。これは、フェライト鋼と PNC316 という材質の違いがあっても同じ傾向であった。以上の結果は、制御棒は初期ギャップ幅が小さければオーバーリティも小さく、クラックは生じない傾向を有することを示唆しており、図 5.9 で示したようなメカニズムで被覆管変形が生じていると推察される。

表5.1 X線ラジオグラフィ及びキャプセル解体時に確認したNa液位

キャプセルNo.	コンパートメント 内装荷位置	B <sub>4</sub> Cペレット 位置(mm) *1	Na液位	外側管リークの有無 *2	内側キャプセル被覆管 クラックの有無 *3
A6-01	下部	45.5~120.5	約40~55mmの間	-	-
A6-02			ペレットはNaに完全に覆われていた	リーク	クラック(45.5mm)
A6-03	上部	117~192	ペレットはNaに完全に覆われていた	-	-
A6-04	下部	45.5~120.5	61.8mm	リーク	クラック(61.0~88.0mm)
A6-05			約55mm	-	-
A6-06			約50~70mmの間	-	-
A6-07			約50~100mmの間	-	クラック(45.5~66.0mm)
A6-08			ペレットはNaに覆われていない	リーク	-
A6-09	上部	117~192	ペレットはNaに完全に覆われていた	-	-
A6-10				-	-
A6-11				-	-
A6-12				-	-
A6-13				-	-
A6-14				-	-

\*1:内側キャプセル上端からの位置。

\*2:パンクチャ試験結果より。X線ラジオグラフィにおいてプレナム部にNaを確認。

\*3:詳細外観検査結果より。()内はクラックの存在する範囲。

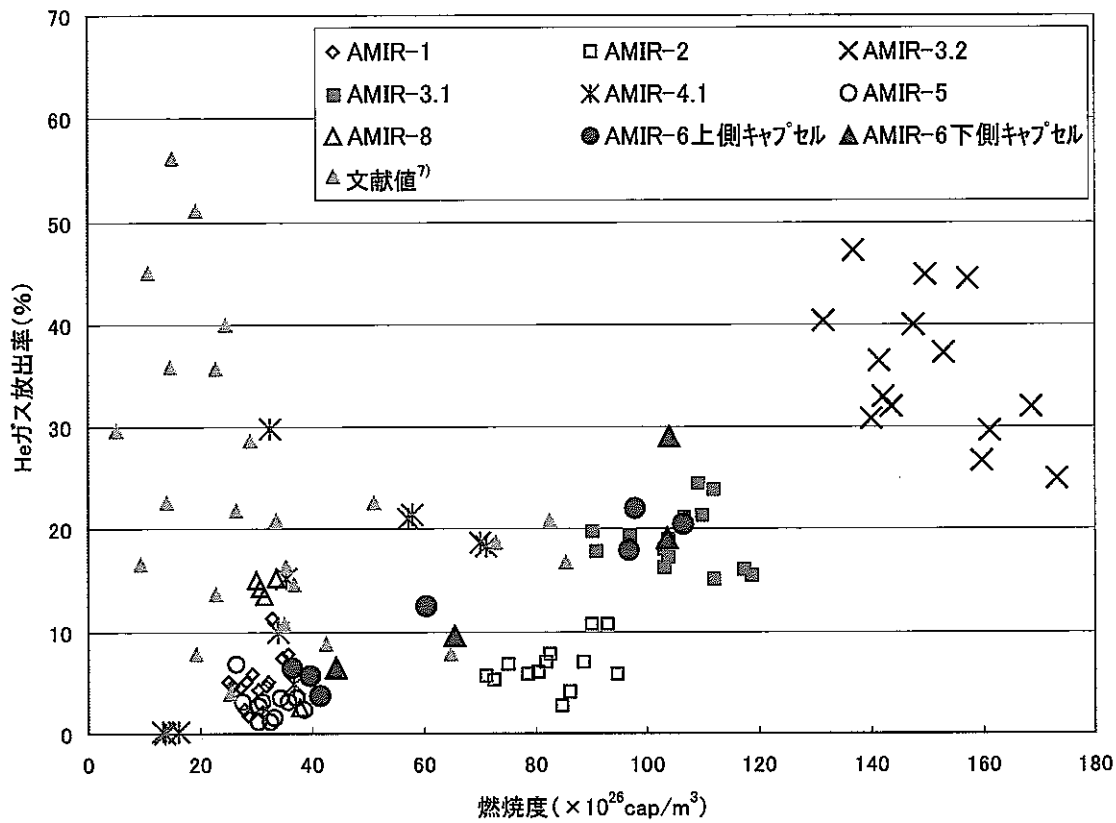


図5.1 燃焼度とHeガス放出率の関係 (集合体別)

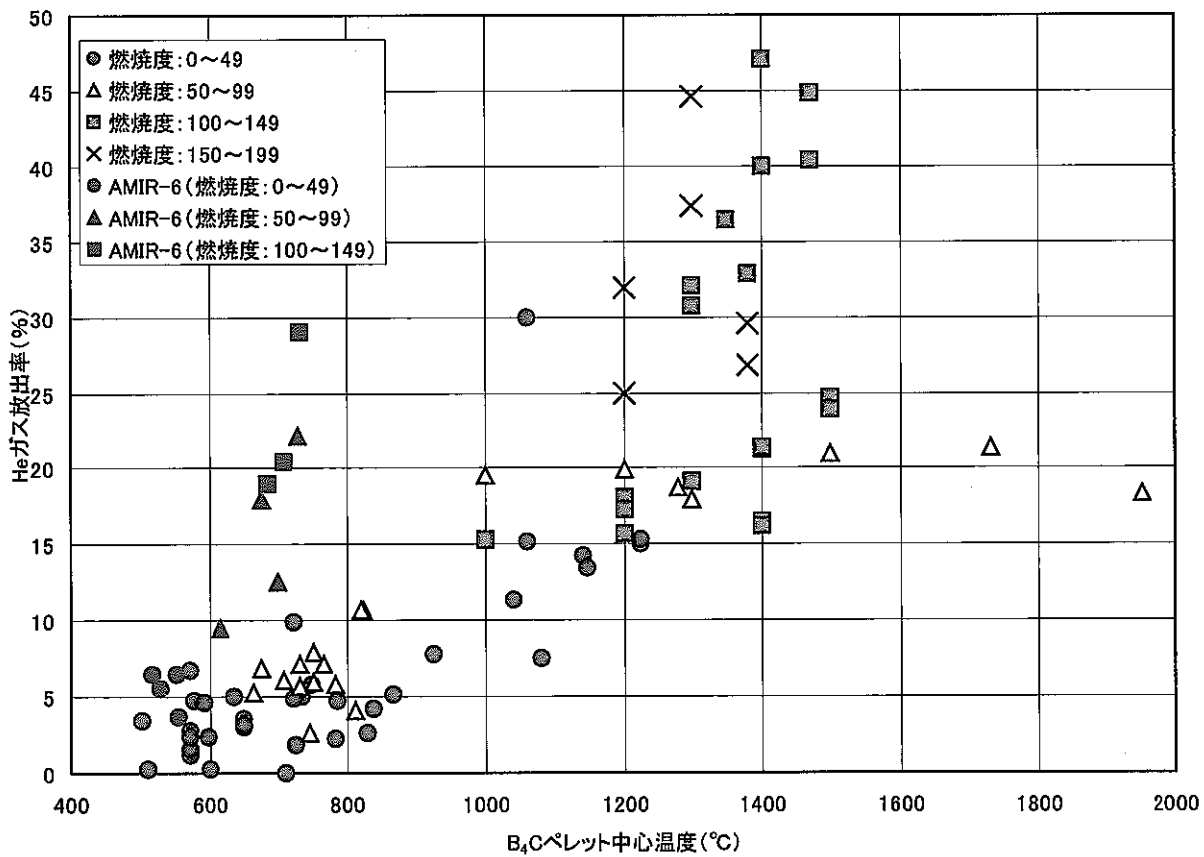


図5.2  $B_4C$ ペレット中心温度とHeガス放出率



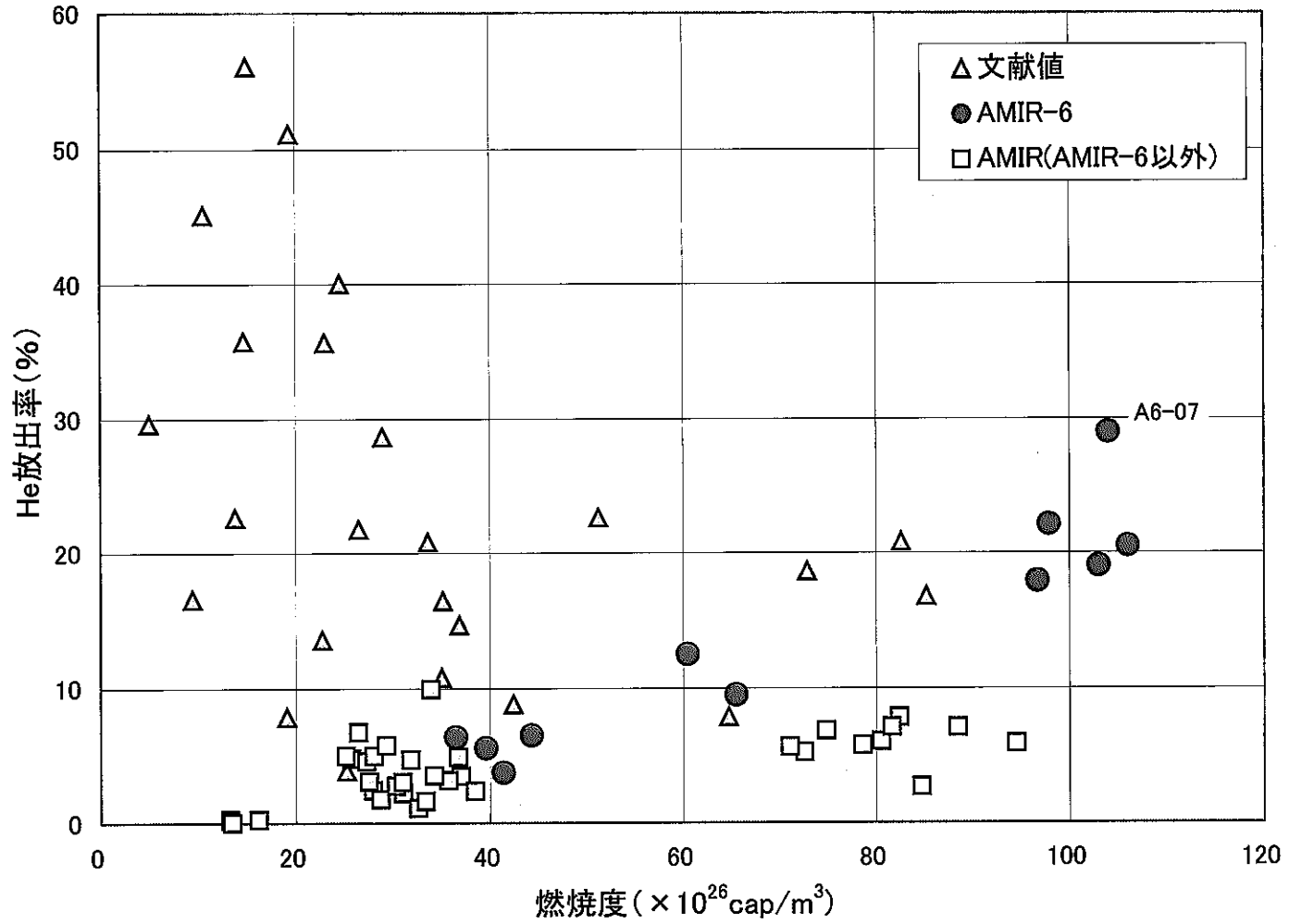


図5.3 照射温度 500~800°CにおけるHe放出率と燃焼度の関係

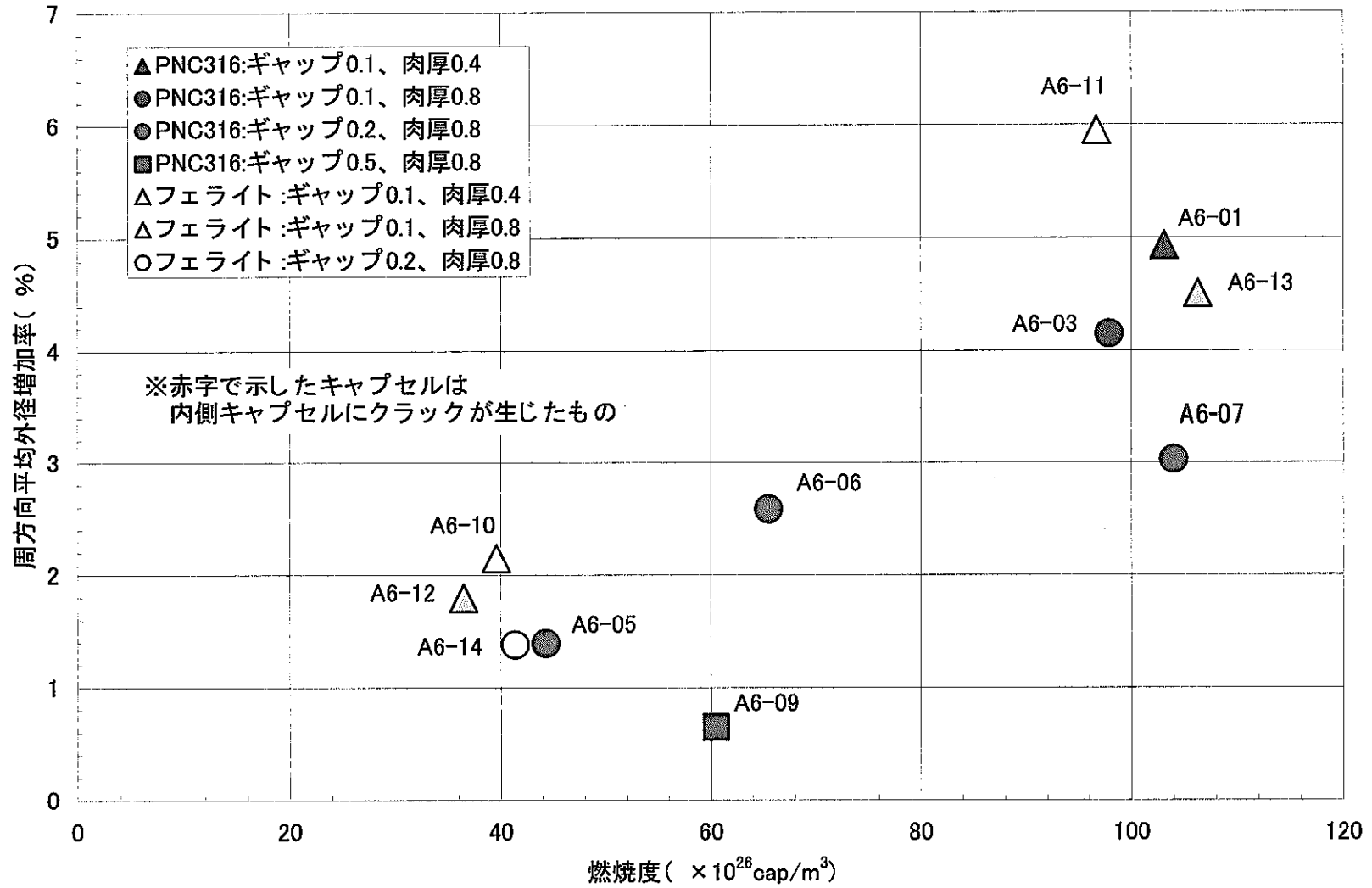


図5.4 燃焼度と被覆管周方向平均外径増加率

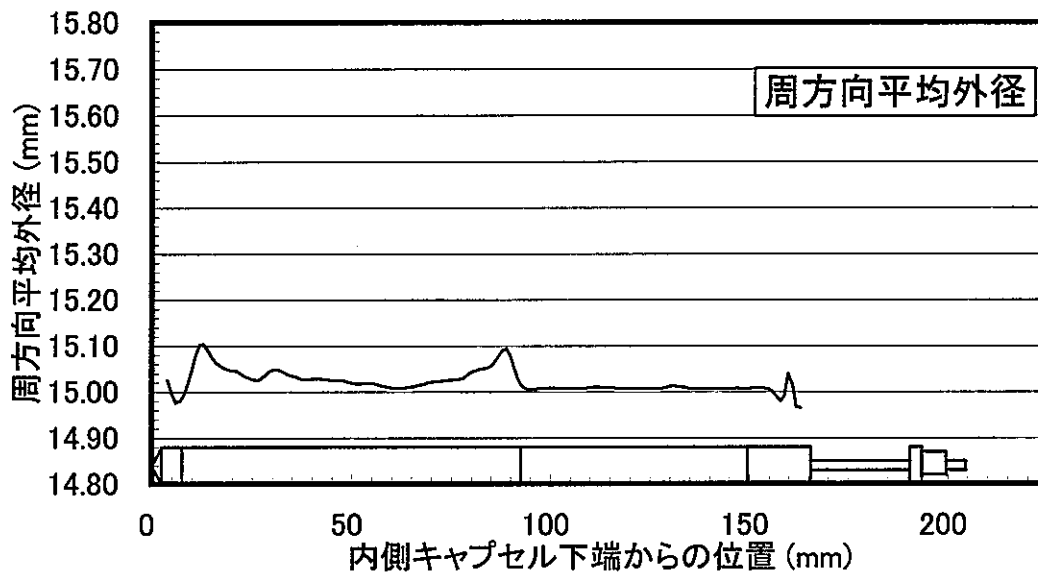
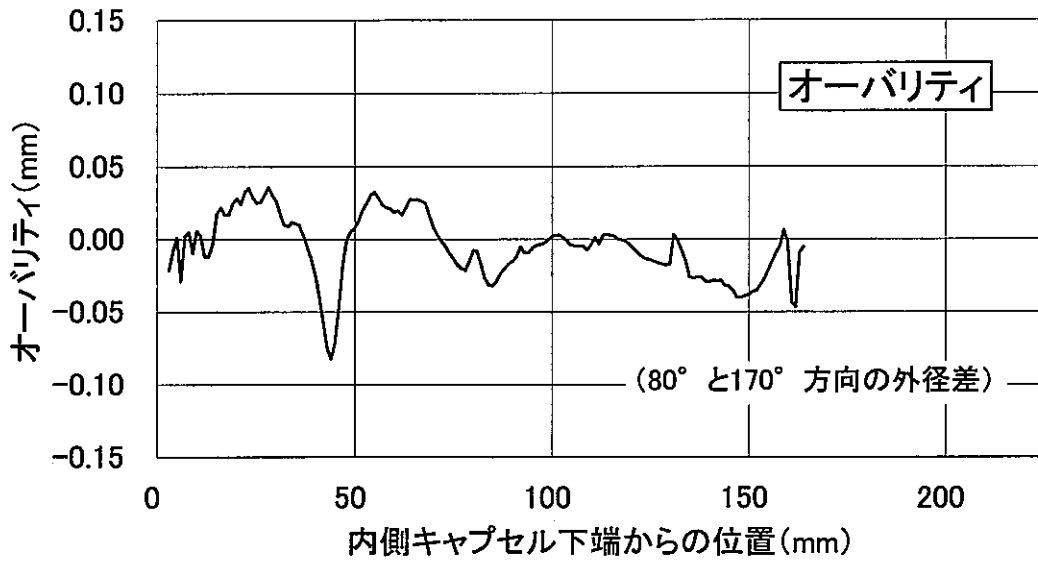


図5.5 A6-09のオーバーバリティと周方向平均外径プロフィール

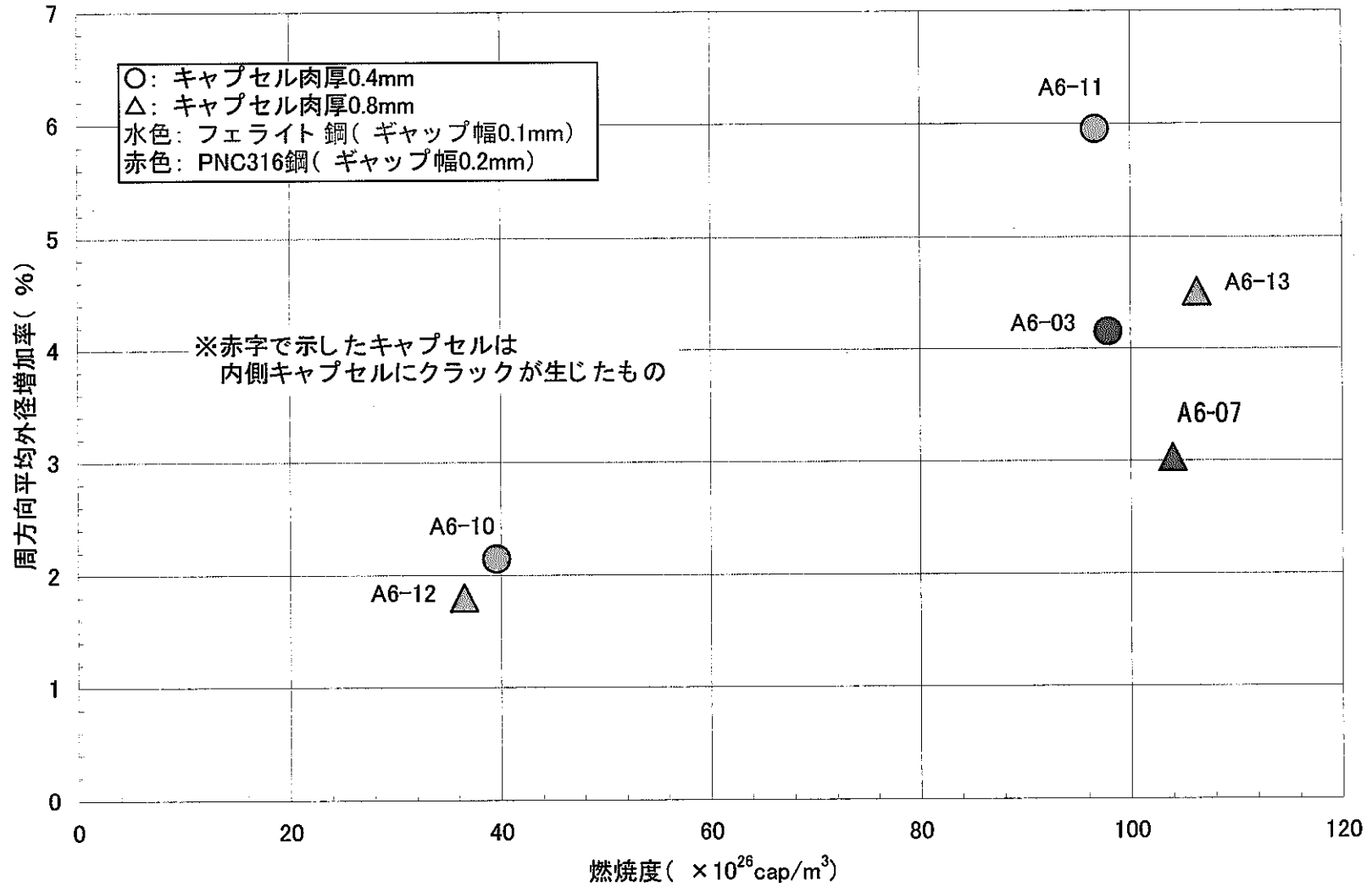


図5.6 キャプセル肉厚と被覆管周方向平均外径増加率

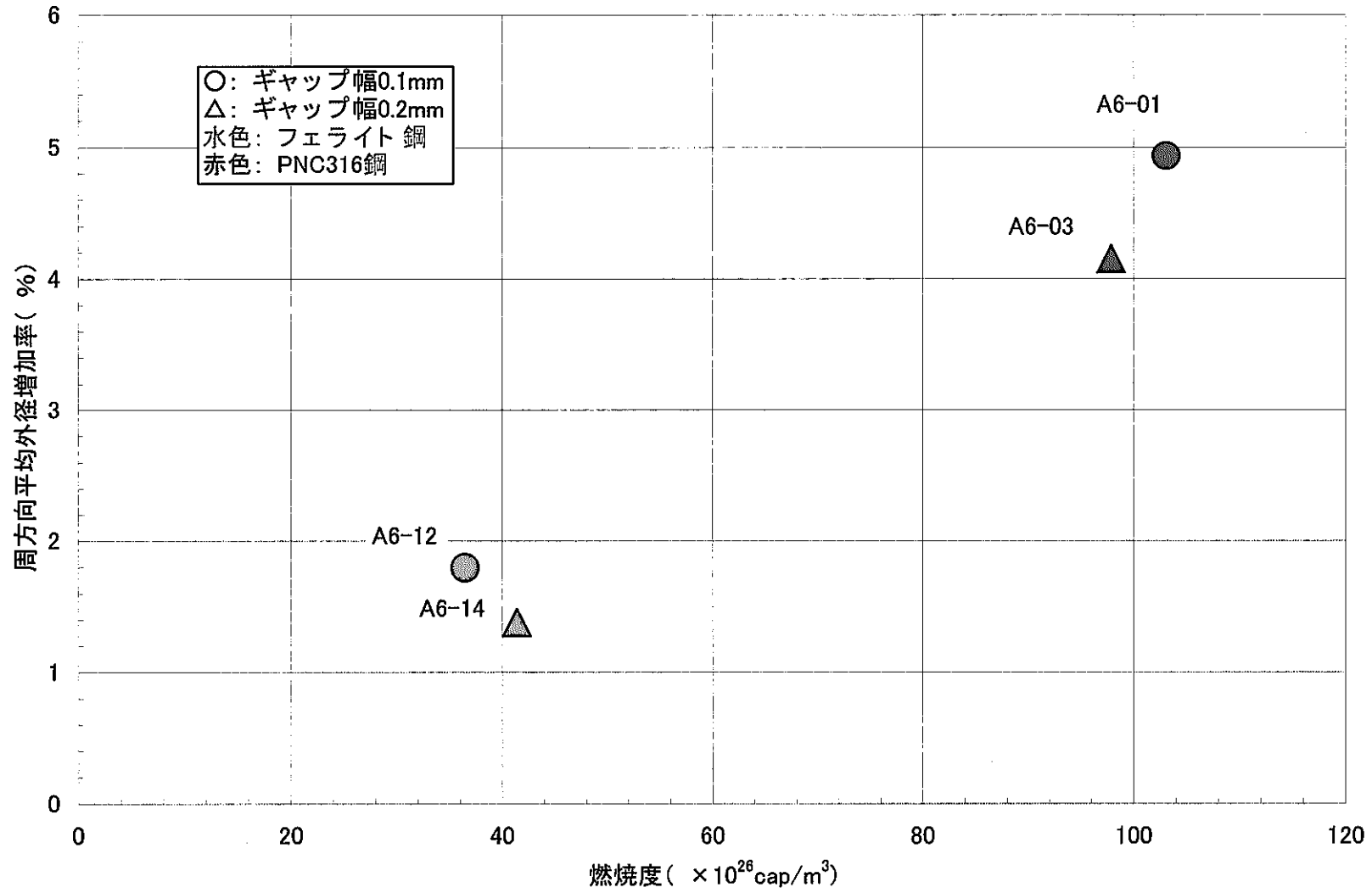


図5.7 ギャップ幅と被覆管周方向平均外径増加率

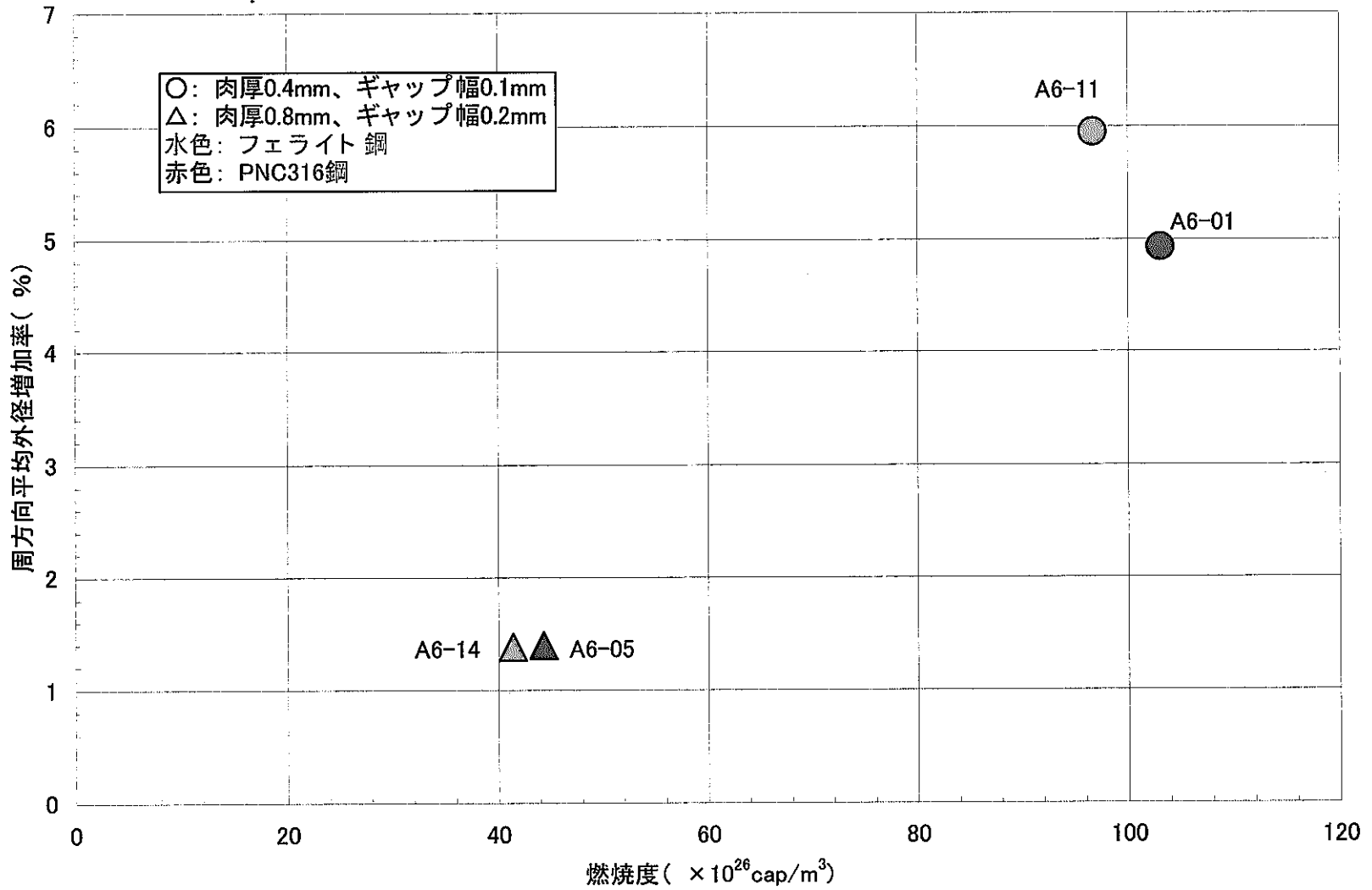
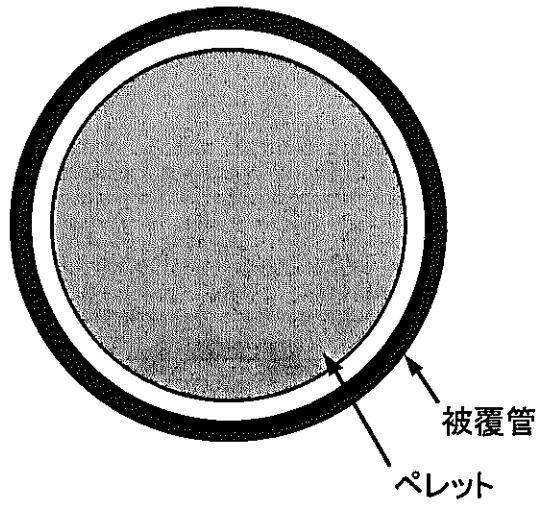
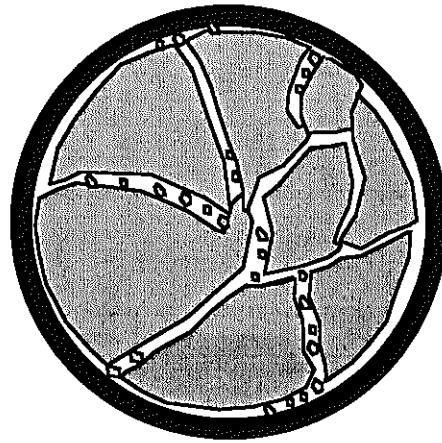


図5.8 材質と被覆管周方向平均外径増加率

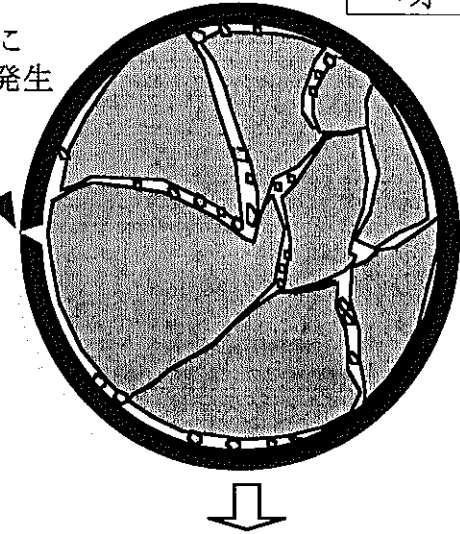
①初期ギャップ幅大



クラックが生じて  
リロケーション発生



被覆管に  
クラック発生



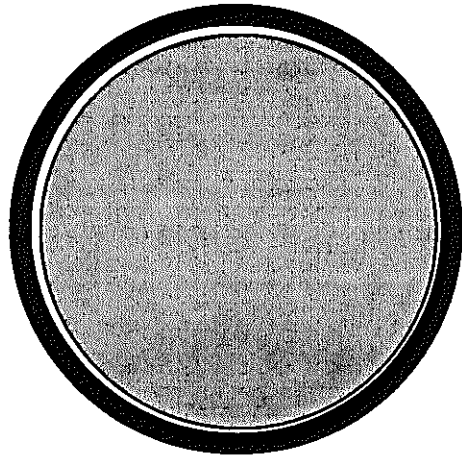
異方的な変形  
→オーバリティ大

照射前

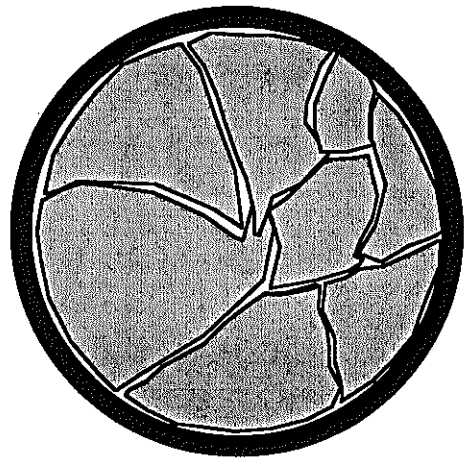
B<sub>4</sub>Cペレットの  
クラック発生

スエリングにより  
ペレット膨張

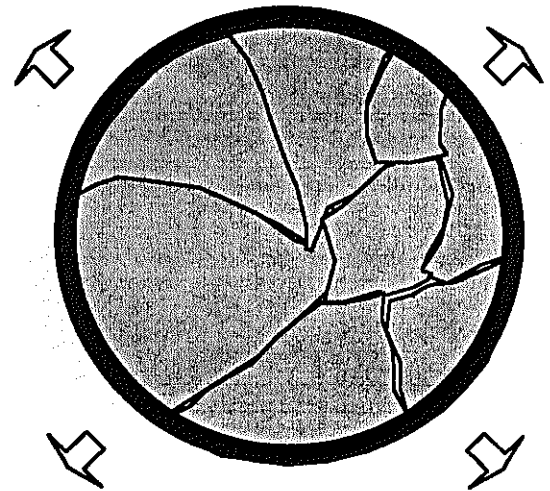
②初期ギャップ幅小



クラックが生じるが  
リロケーション発生せず



等方的な変形→オーバリティ小



JNC TN9430 2002-003

図5.9 B<sub>4</sub>Cペレットと被覆管のACMI 発生状況

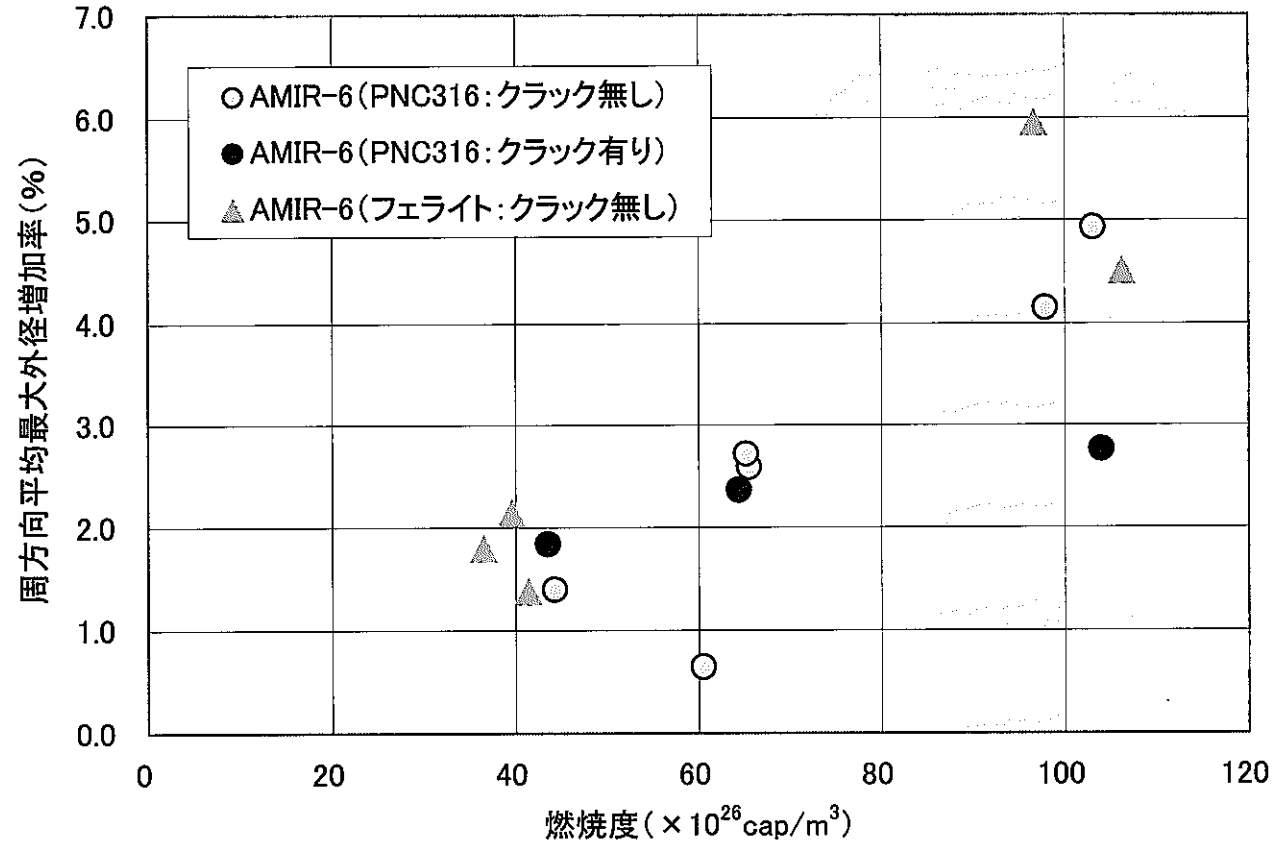


図5.10 AMIR-6における周方向平均最大外径増加率



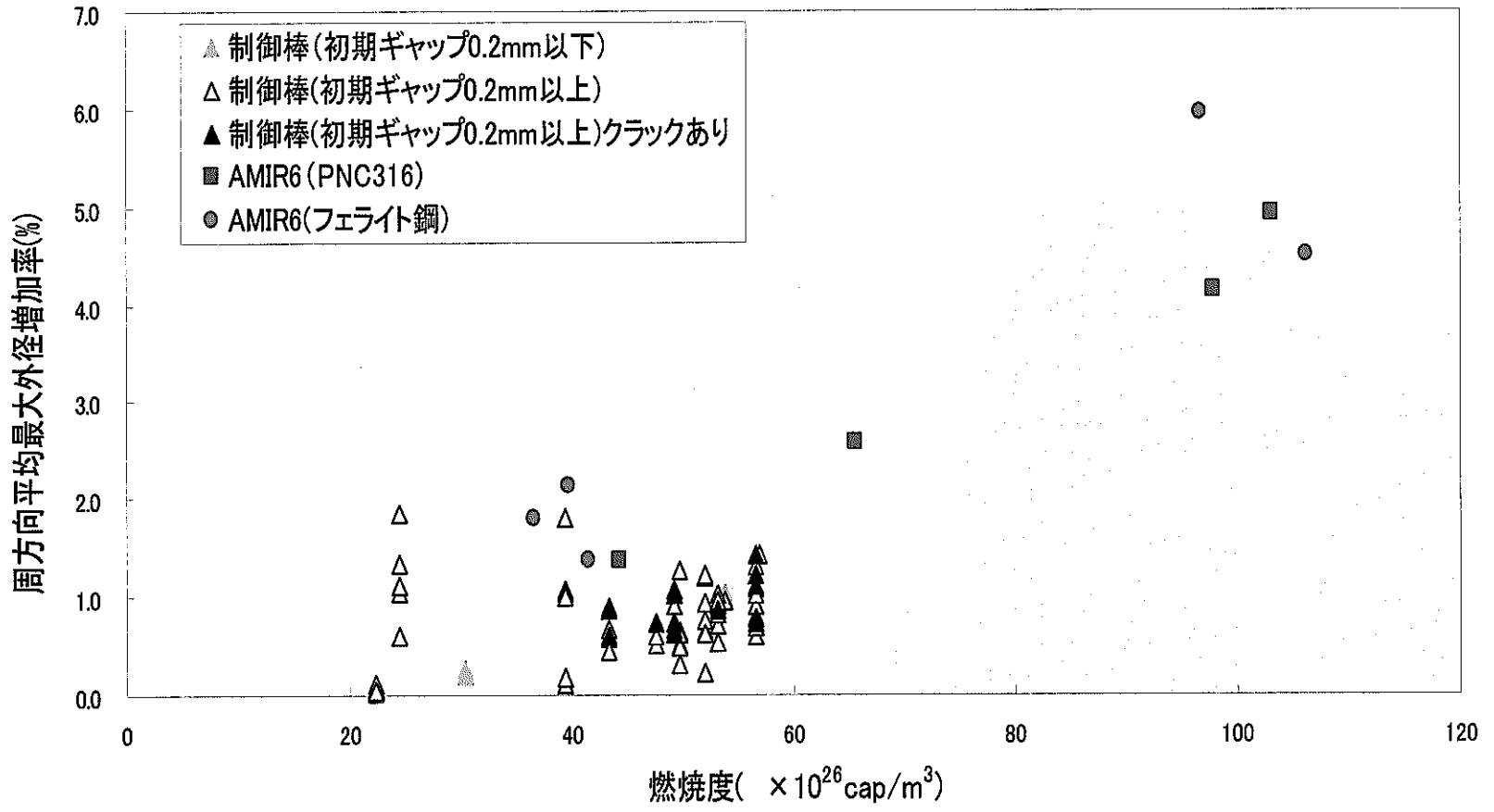


図5.11 周方向平均最大外径増加率と燃焼度

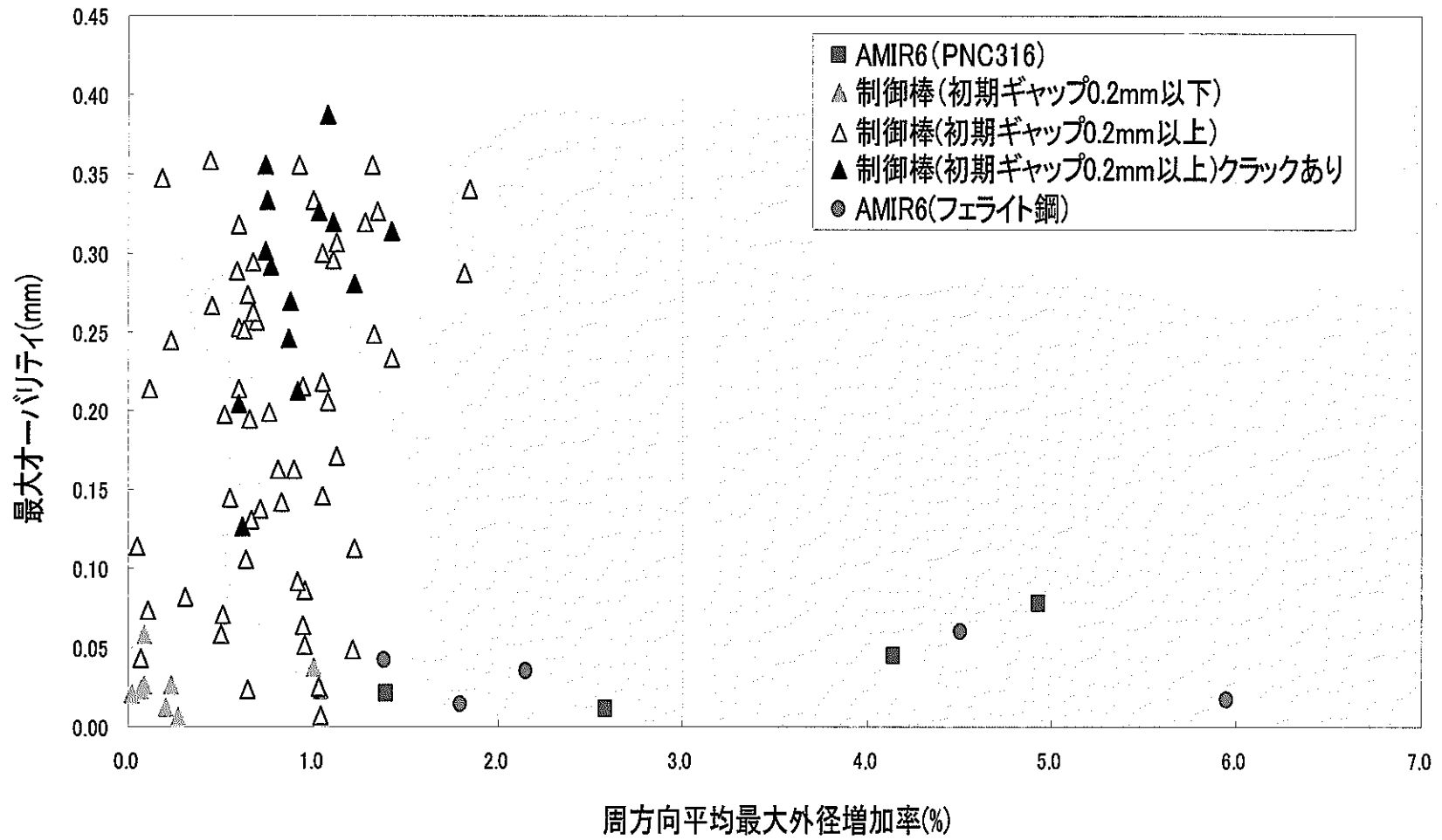


図5.12 最大オーバーバリティと周方向平均最大外径増加率

## 6. おわりに

制御棒材料照射リグ AMIR-6 は、制御棒の破損限界評価とシュラウド管の有効性確認の 2 点を試験目的として照射された。そのために、照射キャプセルに実際にクラックを生じさせる試験条件を設定した。AMIR-6 は最高燃焼度  $106 \times 10^{26}$  cap/m<sup>3</sup> (MAGI  $\times 0.756$ )、最高照射量  $3.82 \times 10^{26}$  n/m<sup>2</sup> ( $E \geq 0.1$  MeV) まで照射され、キャプセル寸法測定、詳細外観検査等の非破壊試験を実施した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 照射キャプセルの重量測定を行ったところ、照射前後において下部照射キャプセルに有意な重量変化が認められた。重量増加したキャプセルについては、外側管のリークによりナトリウムの浸入したことが原因とわかった。
- (2) 3 キャプセルにクラックの発生が確認された。クラック形態は 2 種類であり、周方向と軸方向のクラックが生じていた。被覆管に生じた軸方向のクラックについては ACMI により、周方向のクラックはリッジングにより生じたものと推察された。但し、照射後試験で確認したナトリウム液位が低かったことから、ナトリウムが充填されていない領域が温度上昇により強度低下を起こし、ACMI による変形によってクラックが発生したと推定された。
- (3) ヘリウム放出率と燃焼度及び照射温度の依存性を見ると、A6-07 以外のデータは他の AMIR や文献値と同様の傾向を示した。A6-07 は、照射後試験結果よりナトリウム液位が他のキャプセルよりも低いことから、照射温度が高くなって放出率が増大したと推察される。
- (4) 被覆管の肉厚、B<sub>4</sub>C ペレットと被覆管内面とのギャップ幅について、影響を確認した。その結果、肉厚が薄いほど外径増加率が大きく、肉厚が等しいがギャップ幅の異なるキャプセルについてはギャップ幅の小さいキャプセルの膨れ率が大きかった。
- (5) キャプセル肉厚やギャップ幅が等しいが材質のみ異なる場合、燃焼度が  $100 \times 10^{26}$  cap/m<sup>3</sup> 程度ではフェライト鋼の増加率が大きいのが、 $40 \times 10^{26}$  cap/m<sup>3</sup> 程度では PNC316 とフェライト鋼で同程度の増加率であった。
- (6) シュラウド管は、被覆管に大きな膨れやオーバリティは見られなかった。実機制御棒においても、シュラウド管を装着した場合は被覆管の平均外径増加が低く抑えられており、シュラウド管の効果が認められた。
- (7) 「常陽」実機制御棒では約 1% の外径増加でクラックが生じているが、AMIR-6 は約 5% の外径増加が生じているにも係わらずクラックは発生しなかった。これは、初期ギャップ幅が小さいことで ACMI による被覆管変形が等方的に生じ、クラックが発生しなかったと推察される。これは、フェライト鋼と PNC316 という材質の違いがあっても同じ傾向であった。

## 7. 謝辞

本報告書を作成するに当り、多大なる助言を頂きました燃材部 永井 寛氏、MMS 小野瀬庄二氏、堂野前貴子氏、井上孝行氏、及び関連各部において御協力・御指導頂きました方々に厚く感謝致します。

## 8. 参考文献

- 1) 皆藤威二、他：制御棒材料照射リグ AMIR-2 の照射後試験、ZN9410 91-316
- 2) 堀内博人、他：制御棒材料照射リグ AMIR-3 の照射後試験 -高燃焼度における B<sub>4</sub>C ペレットの挙動評価-、ZN9410 96-049
- 3) 木村好男、他：制御棒材料照射リグ AMIR-4-1 の照射後試験、ZN9410 92-328
- 4) 照射管理課、「常陽」照射試験サイクル報(第 34 サイクル) (業務報告)、TN9440 2000-005、2000 年 6 月
- 5) 丸山忠司、他：「常陽」MK-II 制御棒の照射後試験 -吸収ピンの照射挙動評価-、TN9410 97-077
- 6) Tadashi MARUYAMA, et al. : Effect of Fast Neutron Irradiation on the Properties of Boron Carbide Pellet, J. Nucl. Sci. Technol., 34, 1006-1014(1997).
- 7) V.P. TARASIKOV, et al. : THE EXPERIENCE OF POST IRRADIATION INVESTIGATIONS OF THE BN-600 CONTROL RODS, Proceeding of a Technical Committee meeting held in Obninsk, Russian Federation, 3-7 July 1995.
- 8) 田中康介、他：「常陽」MK-II 制御棒 (CRM601) の照射後試験、TN9430 99-001
- 9) 吉武庸光、他：「もんじゅ」型燃料集合体 (MFA-1、2) 被覆管の引張強度・延性特性評価、TN9400 2001-116
- 10) S.N. Votinov, et al. : IWGFR Specialists Meeting on Absorbing Materials and Control Rods for Fast Reactors, Dimitrovgrad, USSR, June 4-8, 1973.
- 11) 宮川俊一、他：「常陽」MK-II 制御棒の開発と使用実績の評価、TN9410 97-068
- 12) 宇都学、他：「常陽」制御棒の B<sub>4</sub>C ペレットと被覆管の機械的相互作用 (1) 照射後試験、日本原子力学会「1998 春の年会」B 1
- 13) 田中康介、他：「常陽」制御棒の B<sub>4</sub>C ペレットと被覆管の機械的相互作用 (2) 挙動解析、日本原子力学会「1998 春の年会」B 2
- 14) 曾我知則、他：「常陽」制御棒の B<sub>4</sub>C ペレットと被覆管の機械的相互作用 (3) 設計評価、日本原子力学会「1998 春の年会」B 3