PNC TN9410 97-077

公開資料

「常陽」MK-II制御棒の照射後試験

― 吸収ピンの照射挙動評価 ―

1997年7月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。
〒311-13　茨城県東茨城郡大洗町成田町4002
動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター
システム開発推進部・技術管理室
Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団（Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation）1997

Ⓝ

公　開　資　料
PNC TN9410 97-077
１９９７年７月

「常陽」MK-II 制御棒の照射後試験
―吸収ピンの照射挙動評価―

丸山忠司*、小野瀬庄二*、宇都　学*
浅賀健男**、田中康介**

要　旨

「常陽」MK-II 制御棒の照射後試験は１９８３年に開始され、初装荷制御棒から５次取り替え制御棒まで、合計１６体、ピンにして約１１０本の照射後試験が行なわれた。このうち５体の制御棒で、合計１５本の制御棒吸収ピンにクラックの発生していることが確認された。本報告は、これら吸収ピンのクラック発生原因を究明するために行われた、非破壊試験、破壊試験、および制御棒挙動解析コードＣＯＲＡＬをもちいた解析の結果について述べたものである。

吸収ピンのクラック発生は燃焼度約39×10^{26}cap/m^{3}までは見られず、一方、クラック発生が見られたピンはいずれも燃焼度が43×10^{26}cap/m^{3}以上でかつＢ$_4$Ｃペレットと被覆管の初期ギャップが0.44mm以上のものであった。吸収ピンのクラック発生位置は最下端のＢ$_4$Ｃペレット付近に集中しており、吸収ピン断面金相観察の結果では、Ｂ$_4$Ｃペレットは細かく割れ、被覆管とのギャップは一部閉塞していた。被覆管の変形は異方的で、オーバリティが認められ、クラックは被覆管の短径側で多く発生する傾向が見られた。被覆管の破断面は典型的な粒界破壊をしていることが特徴である。被覆管のHe分析では、被覆管内表面にHeの蓄積が認められていたが、被覆管全体のHe濃度は特に高い結果にはなっていない。ＴＥＭ観察でもHeバブルは明瞭に観察されなかった。

クラック発生原因としては、Ｂ$_4$Ｃペレットのリロケーションにより照射初期に被覆管とのギャップが閉じてしまい、ＡＣＭＩが発生したことによるものと考えられる。ＣＯＲＡＬコードによる挙動解析の結果では、ＡＣＭＩによる発生する被覆管のひずみは、照射クリープで吸収することができず、燃焼が進むとともに塑性ひずみが増大し、被覆管にクラックが発生したものと考える。

---

*　大洗工学センター　燃料材料開発部　照射材料試験室
**　大洗工学センター　燃料材料開発部　照射燃料集合体試験室

PNC TN9410 97-077
July, 1997

Postirradiation Examination of JOYO MK-II Control Rods
- Irradiation Performance of Absorber Pins -

Tadashi Maruyama*, Onose shoji*, Manabu Uto*
Takeo Asaga**, Kousuke Tanaka**

Abstract

Postirradiation examinations of JOYO MK-II control rods have been carried out since 1983, where 16 subassemblies with total 110 absorber pins of initial load to the fifth reload control rods have been subjected to a number of both non-destructive and destructive examinations. In the course of postirradiation examinations, a cracking of cladding tube was found in the total 15 absorber pins in five control assemblies. This paper indicates the results of postirradiation examinations and analysis of absorber pin performance using CORAL code to elucidate the cause of absorber pin cracking in JOYO MK-II control rods.

No crack was found in absorber pins whose maximum burnup was lower than 39 x 10^{26}cap/m^3, whereas all the cracked pins had burnup of higher than 43 x 10^{26}cap/m^3 with the initial gap between B_4C pellet and cladding larger than 0.44 mm. The cracks were found at around positions corresponding to the lowest B_4C pellet in the stack. The ceramography analysis indicated that B_4C pellet exhibited extensive cracking and a part of gap between pellet and cladding closed. The cladding deformation had an ovality and the cracks tended to occur at the shorter diameter side. The cracked surface of absorber pin was of a typical grain boundary fracture. The result of He analysis for the cladding material indicated a substantial amount of He accumulation at the inner surface of cladding, but the bulk He content was not anomalously high compared with those in the neutron irradiated stainless steels. TEM observation indicated He bubbles was not clearly found in the as-irradiated cladding material.

The cause of cladding failure was attributed to the ACMI where the gap closure due to relocation of B_4C pellet took place from early times of irradiation. The code analysis by CORAL indicated that the cladding strain due to ACMI was not fully absorbed by the irradiation creep and that the plastic strain became large enough to make a fracture of absorber pins with an increasing burnup.

* Material Monitoring Section, Fuels and Materials Division, Oarai Engineering Center
** Fuel Monitoring Section, Fuels and Materials Division, Oarai Engineering Center

目 次

1. はじめに …… 1

2. 「常陽」MK－Ⅱ制御棒の概要と照射後試験項目 …… 3
2.1 供試体の概要 …… 3
2.2 照射後試験項目 …… 4

3. 照射後試験結果 …… 16
3.1 非破壊試験 …… 16
3.2 破壊試験 …… 22

4. CORALコードによるACMI挙動解析 …… 141
4.1 CORALコードの概要 …… 141
4.2 CORALコードの整備 …… 141
4.3 解析条件 …… 146
4.4 解析結果 …… 147

5. 制御棒中性子吸収ピンのACMI挙動 …… 164
5.1 吸収ピンクラック発生の特徴 …… 164
5.2 リロケーションとACMI …… 164
5.3 ACMI発生時期 …… 165
5.4 被覆管の粒界破壊挙動 …… 165

6. まとめと今後の課題 …… 173

参考文献 …… 175

付録1. 炭化ホウ素ペレットの燃焼度に関する実測値と計算値の比較 …… 176

1．はじめに

高速炉における制御棒は、中性子吸収材料として^{10}Ｂを濃縮した高密度の炭化ホウ素（B_4C）ペレットをステンレス鋼製の被覆管に挿入した中性子吸収ピンを束ねた集合体形式を一般に採用しており、我が国の高速実験炉「常陽」および高速増殖原型炉「もんじゅ」においても制御棒は同様な形式になっている。高速炉においては、軽水炉などと異なり炉の定常的な出力制御および緊急時の停止は制御棒のみにより行われるため、その安全性、信頼性は炉の安全性と密接につながっている。また、高速炉の経済性の観点からも制御棒の長寿命化は重要な開発課題になっている。

制御棒の寿命を制限するものとしては、中性子吸収材となるB_4Cの核的寿命の他に主なものとしてB_4CペレットのHeガス放出率、スエリングおよびB_4Cペレットと被覆管の化学的相互作用（ＡＣＣＩ: Absorber Cladding Chemical Interaction）などがある。「常陽」ではMK-Ｉ制御棒は密封型の吸収ピン構造を採用していたため、制御棒の寿命制限因子はB_4CペレットからのHeガス放出率が重要なものとなっていたが、MK-II炉心においては制御棒はHeガスをピン外に放出させるベント機構を採用したため、寿命制限因子から除外された。現在 MK-II 制御棒の寿命を制限するものとしてはB_4Cペレットと被覆管との機械的相互作用（ＡＣＭＩ: Absorber Cladding Mechanical Interaction）があり、炉内での使用中B_4Cペレットのスエリングにより被覆管とのギャップが閉じてＡＣＭＩが開始する時点で制御棒寿命が終了するとの考えの基に設計されている。従って、炉内での制御棒の挙動を理解し、長寿命化するためにはB_4Cペレットと被覆管の機械的相互作用についての知見を得ることは非常に重要である。

「常陽」MK-II 制御棒は１９８２年以降使用を開始し、現在７次取り替え制御棒まで４４体が製作され、このうち３２体の照射が終了している。制御棒集合体とピンの健全性を確認するための照射後試験は１９８３年から始められ、初装荷制御棒から５次取り替え制御棒まで、合計１６体、ピンにして約１１０本の照射後試験が行なわれた。そして１９８７年１２月に一次取り替え制御棒集合体MCR 105の吸収ピン３本にクラックの存在が初めて確認され、その後１９８９年３月にはMCR103集合体で２ピン，１９９１年４月に３次取り替え制御棒集合体CR301Mで４ピン，１９９２年１０月と１９９３年５月に４次取り替え制御棒集合体CRT401でそれぞれ１ピン、そして１９９３年４月に同CRT402集合体に４ピンと、今まで合計１５本の制御棒吸収ピンにクラックの入っているのが確認された。

これらの制御棒吸収ピンのクラック発生に関する報告書としては以下の２編がある。

（１）「常陽」MK-II 制御棒の照射後試験 ― 吸収ピンの特異変形挙動 ―
PNC ZN9410 92-03 １９９２年１月

（２）「常陽」MK-II 制御棒の照射後試験 ― 吸収ピンの特異変形挙動（２）―
PNC ZN9410 94-293 １９９４年５月

報告書（１）では、吸収ピンのクラック発生原因として、炉から取り出した後ベント孔からピン内に入り込んだＮａが洗浄水または貯蔵中の管内水によりNaOHに変化し、炉外

での貯蔵中に被覆管の応力腐食割れに発展した可能性が高いと考え、したがって炉内での破損はないとしていた。

一方、報告書（２）では、その後の集合体の照射後試験の結果、Ｎａ洗浄を行っていない吸収ピン（上記CR301M以後の吸収ピン）にもクラック発生が認められているため、アルカリによる応力腐食の可能性が否定され、炉内でクラックが生じた可能性を指摘している。そして、吸収ピンのクラック発生原因としては、B_4Cペレットが照射中に細かく割れ、B_4Cの破片がギャップの中に入り込む、あるいはB_4C片が移動再配置するなどのいわゆるリロケーションにより、照射の早い段階からペレットと被覆管のギャップを埋めてしまい、その状態で照射されるため、B_4CペレットのスエリングによりＡＣＭＩが発生したためと推定している。また、ＡＣＭＩの発生および吸収ピンのクラックは、被覆管とのギャップサイズが大きくなるとかえって低燃焼度から発生する傾向が認められたとしている。クラック発生時期としては、炉の運転中かまたは炉停止時の温度低下によるペレットと被覆管の熱収縮差による応力の発生によるかなどは特定できていない。

前記（２）の報告書による報告を行った以後、さらにクラック発生原因究明のため、４次及び５次取り替え制御棒について追加の照射後非破壊試験、および被覆管金相観察、ヘリウム分析、残留応力の解析、低ひずみ速度引っ張り試験などの破壊試験および計算コードによる制御棒挙動解析も進め、吸収ピンのＡＣＭＩ挙動に関して新たな知見も得られた。以下には「常陽」MK-II制御棒のＡＣＭＩ挙動に関し、上記２編の報告書内容もその後の照射後試験の知見に照らして適宜修正しつつ、総合的に報告する。なお、従来B_4Cの燃焼度は「常陽」運転監視コードＭＡＧＩによる計算値を用いていたが、その後、^{10}B濃縮度の測定値から求めた燃焼度の値と差のあることが判明したので、本報告書ではB_4Cの燃焼度は実測値を用いて較正した値を使用している。

2　「常陽」MK－II制御棒の概要と照射後試験項目

2．1　供試体の概要

2．1．1　仕様と構造

「常陽」MK－II 炉心には6体の制御棒が装荷されており、そのすべてが出力調整機能及びスクラム機能を有している。制御棒は中性子吸収材を装填した7本の制御棒要素（吸収ピン）が、円筒形の保護管内に収納された構造となっている。図２－１に制御棒の構造を示す。

中性子吸収材としては^{10}Bを90％まで濃縮したＢ$_4$Ｃを相対密度90％T.D.のペレット状に成型したものを採用している。ペレット外径の標準寸法は16.3mmである。寸法許容差は初装荷から2次取替までは＋0.05mm、－0.30mmであり、3次取替以降では＋0.05mm、－0.35mmとなっている。また、1次取替以降の吸収ピンでは組み立て段階でピン下部に仕様の範囲内で外径の小さいペレットを装荷している。このため、ピンの下部ほど被覆管とペレットとの間隙（初期ギャップ）が大きい構造となっている。従来、吸収ピンの挙動評価では初期ギャップとしてノミナル値（初装荷：0.2mm、1次取替：0.35mm、2次取替：0.4mm、3次取替以降：0.5mm）を用いて整理してきたが、今回はＢ$_4$Ｃペレット個々の外径測定値及び被覆管内径寸法の製造データから求めた初期ギャップを用いる。表２－１にはこのようにして求めたペレットスタック最下端部の初期ギャップを示す。

吸収ピンは外径18.1mm、内径16.5mm（肉厚0.8mm）の20％冷間加工SUS316相当鋼（以下PNC316とする）製の被覆管に高さ25mmのＢ$_4$Ｃペレットを26個（650mm）装填したものである。吸収ピン上部にはＢ$_4$Ｃペレットの燃焼に伴い発生するHeガスを吸収ピン外部に放出するためのダイビングベル型のベント機構を有している。また、吸収ピン外面には、保護管内に装荷したときに各ピンの間隔を保つため、PNC316（20％冷間加工）製のラッピングワイヤが、らせん状に巻かれている。

吸収ピンの全長は、初装荷制御棒では1151mmであったが、4次取替以降の制御棒ではベント機構の長さの変更にともない1273mmとなっている。保護管は外径64.7mm、肉厚1.5mmのPNC316（20％冷間加工）製の管であり、全長が2250mmのものである。この保護管内に吸収ピン7本が両端を支持板により固定されている。表２－２に初装荷から５次取替までの制御棒の仕様及び改良実績を示す。また、表２－３及び表２－４にペレット及び被覆管の化学組成をそれぞれ示す。

2．1．2　照射条件

現在までに「常陽」MK－II炉心において37体の制御棒が使用されており、このうち16体について照射後試験を実施した。表２－５に照射期間と照射後試験スケジュールを、また表２－６に照射条件をそれぞれ示す（MCR004及びMCR010についてはピン試験を実施していため表には記載していない）。

図２－２に制御棒の装荷位置を示す。「常陽」MK－II炉心においては第２３サイクル運転後の特殊試験を目的とした第23'''サイクルまでは制御棒全6体が第3列に装荷されているが、第24サイクル以降は5体が第3列に、残り1体が第5列にそれぞれ装荷されている。照射後試験に供された集合体のうち、照射日数が最大なのはMCR103の316.4日（E.F.P.D.）である。高速中性子照射量及び燃焼度は４次取替制御棒CRT402の3.1×10^{26}n／m^2（E＞0.1MeV）、56.6×10^{26}cap／m^3が最大である。
表２－７及び図２－３に照射後試験に供された初装荷から5次取替制御棒13体について燃焼度の軸方向分布を示す。また、図２－４に最高燃焼度とペレットスタック最下端における初期ギャップの関係を示す。なお、照射量及び燃焼度の値は、付録１に示すように「常陽」照射用炉心の炉心特性総合評価システム（MAGI）による計算値に補正係数0.756を乗じた値を用いた。

２．２　照射後試験項目

各集合体の照射後試験項目を表２－６に示す。制御棒の非破壊試験としては、集合体及び吸収ピンの健全性を確認する詳細外観検査、重量測定および寸法測定について実施した。また、一部の集合体については吸収ピンの断面金相観察を実施し、B_4Cペレットの割れ、リロケーションの状態およびＡＣＭＩの発生状態を調査している。さらに非破壊試験においてクラックの発生が認められた吸収ピンについては、破断面SEM観察および被覆管のリング引張試験等の破壊試験を実施し、クラック発生の原因究明のための材料試験を行った。以下に、これまでに実施した試験項目およびその内容を示す。

２．２．１　非破壊試験

制御棒の照射後試験として集合体及び吸収ピンの健全性確認を目的とした非破壊試験を実施した。このうち、吸収ピンに関する主な試験項目及び内容は以下の通りである。

（１）吸収ピン詳細外観検査：
　吸収ピン表面の傷、変色及び付着物の有無を調べた。

（２）吸収ピン重量測定：
　吸収ピンの重量変化の有無を調べた。

（３）吸収ピン寸法測定：
　B_4Cペレットのスエリングやリロケーションにより生じる吸収ピン被覆管の外径変化を調べた。また、吸収ピンの全長及び曲がりの有無を調べた。

２．２．２　破壊試験

前項の非破壊試験においてクラックの発生が認められた吸収ピンについて、クラックの発生原因及び発生時期の究明のためにB_4Cペレット及び被覆管の破壊試験を実施した。主

な試験項目及び内容を以下に示す。

（１）断面金相観察：

Ｂ４Ｃペレットの割れ、リロケーションおよびＡＣＭＩの状態を調べた。また、被覆管について組織変化およびＢ４Ｃペレットとの化学的相互作用（ACCI）の有無を調べた。

（２）被覆管SEM観察：

被覆管のクラックの破面を観察し、破断の状態を調べた。

（３）リング引張試験：

クラックの発生した吸収ピンの被覆管に強度的に異常が生じていないかを調べた。また、引張試験後の破断形態を調べた。

（４）短時間クリープ試験：

吸収ピン被覆管の粒界破壊モードの検証のため、荷重を変えてリング引張試験を行った。

（５）He分析：

被覆管中に蓄積したHeの量を調べた。

（６）TEM観察：

クラック発生のメカニズムを微細組織の観点から調べた。

表２－１　ペレットスタック下端の初期ギャップ

制御棒	ピンNo.	初期ギャップ (mm)	制御棒	ピンNo.	初期ギャップ (mm)
MCR002	7901	0.177	MCR107	B901	0.473
	7902	0.180		B902	0.490
	7903	0.180		B903	0.458
	7904	0.180		B904	0.485
	7905	0.195		B905	0.468
	7906	0.180		B906	0.485
	7907	0.185		B907	0.488
MCR003	9001	0.187	TCR201	D301	0.455
	9002	0.290		D302	0.463
	9003	0.185		D303	0.450
	9004	0.187		D304	0.460
	9005	0.180		D305	0.430
	9006	0.187		D306	0.428
	9007	0.180		D307	0.433
MCR005	8501	0.290	CR301M	E601	0.562
	8502	0.200		E602	0.568
	8503	0.193		E603	0.565
	8504	0.200		E604	0.568
	8505	0.178		E605	0.564
	8506	0.178		E606	0.510
	8507	0.180		E607	0.564
MCR006	6901	0.270	CRT401	G701	0.480
	6902	0.188		G702	0.480
	6903	0.200		G703	0.515
	6904	0.198		G704	0.510
	6905	0.178		G705	0.510
	6906	0.180		G706	0.510
	6907	0.183		G707	0.510
MCR101	B801	0.358	CRT402	H301	0.470
	B802	0.448		H302	0.510
	B803	0.440		H303	0.480
	B804	0.450		H304	0.455
	B805	0.448		H305	0.470
	B806	0.460		H306	0.460
	B807	0.428		H307	0.460
MCR103	D101	0.440	CRT405	J601	0.510
	D102	0.435		J602	0.510
	D103	0.438		J603	0.510
	D104	0.438		J604	0.510
	D105	0.438		J605	0.510
	D106	0.458		J606	0.510
	D107	0.458		J607	0.510
MCR105	B201	0.455	CRH501	J501	0.398
	B202	0.460		J502	0.408
	B203	0.450		J503	0.530
	B204	0.450		J504	0.525
	B205	0.445		J505	0.533
	B206	0.448		J506	0.533
	B207	0.450		J507	0.383

表２－２　「常陽」MK－Ⅱ制御棒の仕様と改良実績

項目		初装荷制御棒（10本）	第1次取替制御棒（6体）	第2次取替制御棒（4体）	第3次取替制御棒（5体）	第4次取替制御棒（5体）	第5次取替制御棒（4体）
制御棒	全長	・2,250mm	→	→	→	→	→
	流力振動制御機構	・70.7mm（ボール回転式）	→	コルモノイ金盛（固定突起式）	・72.7mm（二段固定突起式）	→	→
	重量（平均値）	・18.2kg（実測平均）	・18.53kg（実測平均）	・18.67kg（実測平均）	→	→	→
	材質	・SUS316相当　20％CW材	→	→	→	→	→
①保護管および接続管	外径	・64.7mm	→	→	→	→	→
	内径	・61.7mm	→	→	→	→	→
②上部及び下部グリッド板	材質	・JIS G4303 SUS316	→	・SUS316相当（アニール材）	→	→	→
	外径（最大部分）	・74.7mm	→	→	→	→	→
③ハンドリングヘッド	材質	・	→	・SUS316相当（アニール材）	→	→	→
	外径（最大部分）	・78.0mm	→	→	→	→	→
	内径	・56.0mm	→	→	→	→	→
④下部構造物	材質	・	→	・SUS316相当　20％CW材	下部構造物のダッシュラム一体化	→	→
	外径（最大部分）	・64.7mm	→	→	→	→	→
	ダッシュラム平行部外径	・40.25mm	・40.10mm（着座パッド設置）	→	・40.0mm	→	→
	ダッシュラム部テーパ	1/250	→	→	→	→	・ストレート形状
⑤ポール	材質	・ステライトNo.6	→	なし	なし	なし	なし
	外径	・13.3mm	→				
⑥ポール押え金具	材質	・	→	なし	なし	なし	なし
	外径	・20W×42L×7t（mm）	→				
制御要素	全長	・1,151mm	→	・1,173mm	→	・1.273mm	→
	重量	・905.7g（実測平均）	→	・1,000g（実測平均）	→	→	→
	配列ピッチ	・19.95mm	→	→	→	→	→
	ワイヤ巻付ピッチ	・216mm	→	→	→	→	→
①被覆管	材質	・SUS316相当　20％CW材	→	→	→	→	→
	外径	・18.1mm	→	→	→	→	→
	内径	・16.5mm	→	→	→	→	→
②B4Cペレット	材質	・10B90％濃縮B4C	→	→	→	→	→
	外径	・16.3mm（ギャップ0.2mm）	・16.15mm（ギャップ0.35mm）	・16.1mm（ギャップ0.4mm）	・16.0mm（ギャップ0.5mm）	→	→
	高さ	・25.0mm	→	→	→	→	→
	スタック	・650mm	→	→	→	→	→
③スペーサ	・材質	・Al2O3	→	・SUS316相当（アニール材）	→	→	→
	外径	・16.3mm	→	・16.1mm	→	→	→
	高さ	・20.0mm	→	・15.5mm	→	→	→
④ベント管	材質	・JIS G3459 SUS316	→	→	→	→	→
	ベント長	・250mm	→	→	→	・350mm	→
⑤上部、中間、下部端栓	材質	・JIS G3459 SUS316	→	・SUS316相当（アニール材）	→	→	→
	外径（被覆管接合部）	・16.5mm	→	→	→	→	→
⑦ラッピングワイヤ	材質	・SUS316相当　20％CW材	→	→	→	→	→
	外径	・1.7mm	→	→	→	→	→
主な改良点			(1)スエリング対策としてダッシュラム径を変更（φ40.25mm→φ40.1） (2)燃料洗浄槽内での制御棒位置を下げるため、着座パッドを設置 (3)ACMIの発生時期を遅らせるため、B4Cペレット径を縮小化	(1)耐スエリング性強化用主要部材の変更（ダッシュラム20％冷間加工材） (2)防振機構を回転式から固定突起式に変更 (3)ACMIの発生時期を遅らせるため、B4Cペレット径を縮小化	(1)下部構造物本体とダッシュラム部の一体化 (2)防振突起物を二段とし突起の加工方式を油圧による保護管一体成形とした (3)ACMIの発生時期を遅らせるため、B4Cペレット径を縮小化	(1)ベント長の変更およびそれにともなう制御要素の全長変更	(1)ダッシュラム部を1/250のテーパ形状からストレート形状に変更

表２－３　B_4Cペレットの化学成分

(wt%)

成分	全B	全B＋全C	B_2O_3	Fe	Ti	Cl+F	Co	Cu	Mn	Na
規格値	77.0±1.0	>99.0	<0.1	<0.8	<0.1	<0.01	<0.005	<0.01	<0.01	<0.01
分析値	76.96	99.45	0.01	0.05	<0.01	検出限界以下	検出限界以下	0.0042	0.0008	0.0026

検出限界　Cl：50ppm、F：5ppm、Co：2.5ppm

表２－４　被覆管の化学成分

(wt%)

成分	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	Co	B	N	V	Nb	Ta	As	Al	Zr	O
規格値	0.040 ～ 0.080	0.400 ～ 1.000	1.400 ～ 2.000	0.015 ～ 0.040	<0.01	<0.2	13.000 ～ 14.000	16.000 ～ 18.000	2.000 ～ 3.000	0.050 ～ 0.100	<0.05	0.002 ～ 0.006	<0.01	<0.2	0.050 ～ 0.100	<0.05	<0.03	<0.05	<0.1	<0.004
分析値	0.056 ～ 0.059	0.770 ～ 0.790	1.540 ～ 1.740	0.030 ～ 0.032	0.003 ～ 0.004	0.020	13.680 ～ 13.790	16.270 ～ 16.460	2.480 ～ 2.570	0.080	0.001	0.0029 ～ 0.0030	0.0053 ～ 0.0055	0.020	0.018 ～ 0.019	<0.01	0.002 ～ 0.003	0.040 ～ 0.044	<0.01	0.0008 ～ 0.0010

表２－５　「常陽」MK－Ⅱ制御棒の照射期間と照射後試験スケジュール

年度			57	58	59	60	61	62	63	1	2	3	4	5	6	7	8
			1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
集合体番号	燃焼度*	区分**															
MCR002	30.3	初															
MCR003	50.7	初															
MCR005	53.7	初															
MCR006	22.3	初															
MCR101	49.6	1次															
MCR103	56.5	1次															
MCR105	47.5	1次															
MCR107	53.0	1次															
TCR201	51.9	2次															
CR301M	49.1	3次															
CRT401	43.3	4次															
CRT402	56.6	4次															
CRT405	39.3	4次															
CRH501	24.4	5次															

* ポイント最大（$\times 10^{26}$cap/m^3）
** 初装荷、1次取替、2次取替、3次取替、4次取替、5次取替

照射期間
冷却期間
照射後試験期間

表２－６　「常陽」MK－Ⅱ制御棒の照射条件と照射後試験項目

	S/A No.	PIE No.	照射条件					クラックピン発生本数	照射後試験							
									非破壊試験			破壊試験				
			EFPD	サイクル	装荷位置	最高燃焼度 (10^{26}cap/m^3)	最大照射量 (10^{26}n/m^2)	(本)	詳細外観観察	重量測定	寸法測定	断面金相観察	破面SEM観察	リング引張試験	He分析	TEM観察
初装荷	MCR002	79	159.771	0－3	3B3	30.3	1.64	－		○	○					
	MCR003	90	246.996	0, 1 2－4 6	3C3 3F3 3A3	50.7	2.50	－		○						
	MCR005	85	291.824	0－6	3E3	53.7	2.93	－		○	○	○				
	MCR006	69	115.971	0, 1 2	3F3 3C3	22.3	1.24	－		○	○					
1次取替	MCR101	B8	274.037	8－12' 12"－13	3A3 3D3	49.6	2.58	0	○	○	○					
	MCR103	D1	316.357	10 11－12''' 13－15	3B3 3F3 3E3	56.5	3.02	2	○	○	○	○	○	○		
	MCR105	B2	266.028	7－12" 12'''	3E3 3A3	47.5	2.50	3	○		○	○				
	MCR107	B9	289.378	9 10 11 12－12' 12" 12''' 13－14	3C3 3F3 3B3 3B3 3A3 3E3 3F3	53.0	2.81	0	○	○	○					
2次取替	TCR201	D3	283.058	13－17	3A3	51.9	2.76	0	○	○	○	○				
3次取替	CR301M	E6	280.687	16－20'	3C3	49.1	2.56	4	○	○	○	○	○	○	○	
4次取替	CRT401	G7	239.525	21－24'	3C3	43.3	2.29	2	○	○	○					
	CRT402	H3	307.702	21－25'	3B3	56.6	3.10	4	○	○	○	○		○	○	○
	CRT405	J6	209.924	24－28 29	3F3 3D3	39.3	2.01	0	○	○	○					
5次取替	CRH501	J5	185.587	24－28	5F2	24.4	0.91	0	○	○	○					

表２－７　制御棒の軸方向燃焼度分布（MAGI補正値）

（×10^{26}cap/m^3）

ノード	軸位置	MCR002	MCR005	MCR006	MCR101	MCR103	MCR105	MCR107	TCR201	CR301M	CRT401	CRT402	CRT405	CRH501
1	694	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	644	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	594	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	544	1.780	1.780	1.788	1.523	1.527	0.908	1.524	0.921	0.309	1.236	1.855	2.476	1.697
5	494	3.263	5.935	2.383	4.872	7.023	4.238	5.791	5.836	5.564	5.255	6.800	4.953	3.732
6	444	5.339	8.309	3.873	7.917	8.855	7.266	8.534	8.293	8.037	7.419	9.583	7.429	5.429
7	394	6.229	11.573	4.767	10.353	12.824	9.688	11.277	11.364	11.437	9.892	12.983	9.596	6.447
8	344	8.597	14.244	6.554	13.399	14.656	12.412	14.020	13.514	12.674	11.746	15.456	12.072	8.143
9	294	10.382	18.992	7.746	17.053	21.068	16.348	18.897	19.043	18.547	16.383	21.329	14.858	9.840
10	244	13.051	22.553	9.832	21.316	23.511	19.981	22.249	21.807	21.020	18.547	24.420	17.953	11.536
11	194	16.611	29.081	12.513	26.188	30.839	24.824	28.650	27.643	25.965	23.493	30.911	22.287	13.572
12	144	21.356	37.687	16.095	34.410	39.389	32.998	36.879	35.629	33.693	29.984	39.876	28.477	17.305
13	94	30.255	53.711	22.344	49.635	56.487	47.530	53.033	51.907	49.149	43.276	56.568	39.311	24.430

（注１）ノード1～13はB_4Cペレットスタックに対応しており、
各ノード50mm（ペレット2個分）×13（ノード数）＝650mmとなっている。
（注２）ノード１～３での燃焼度はMAGI計算範囲外であるため０としている。
（注３）補正値＝MAGI計算値×0.756
（注４）軸位置はピン下端から各ノードの下端までの距離（mm）

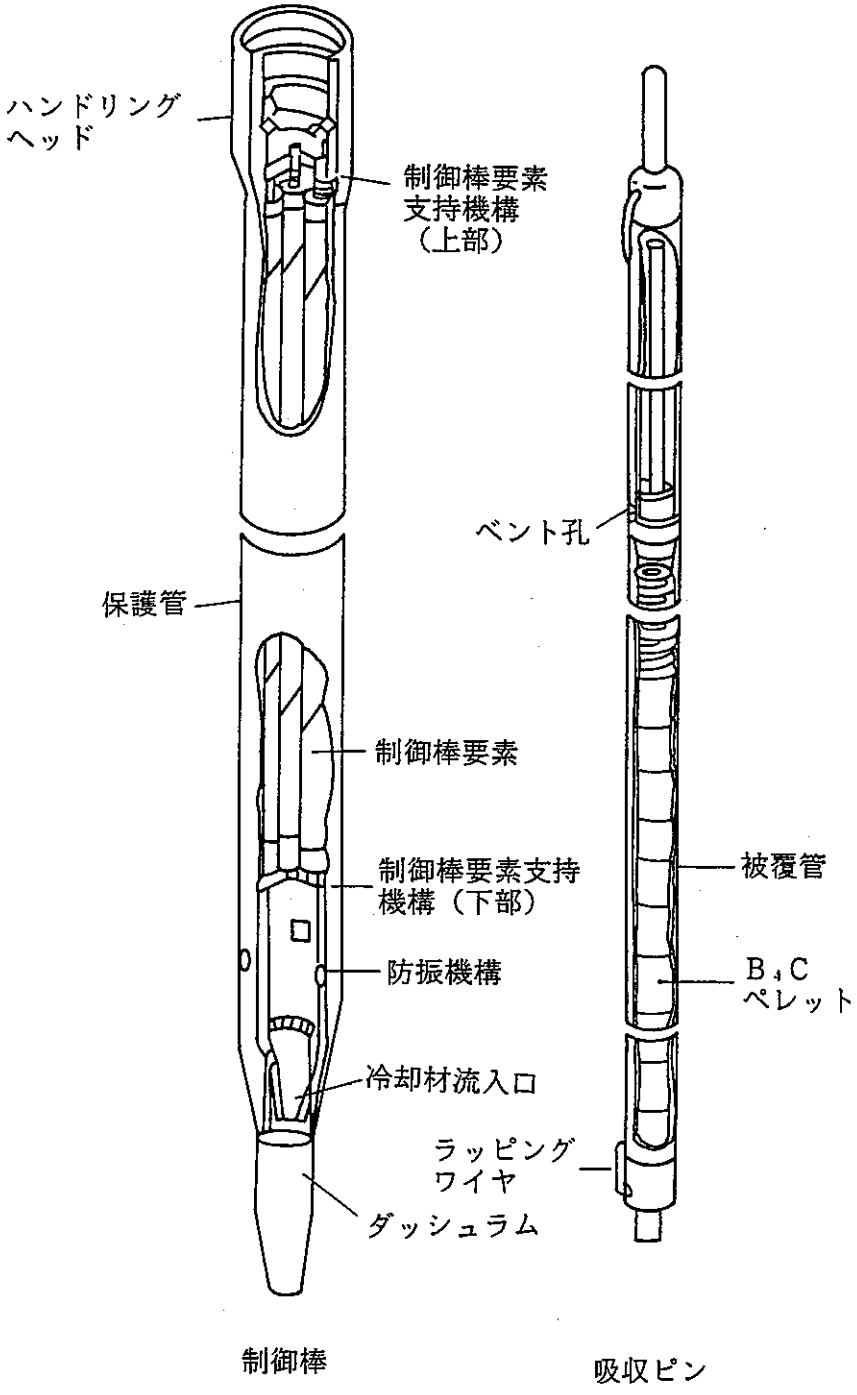


図２－１　「常陽」MK－Ⅱ制御棒の構造

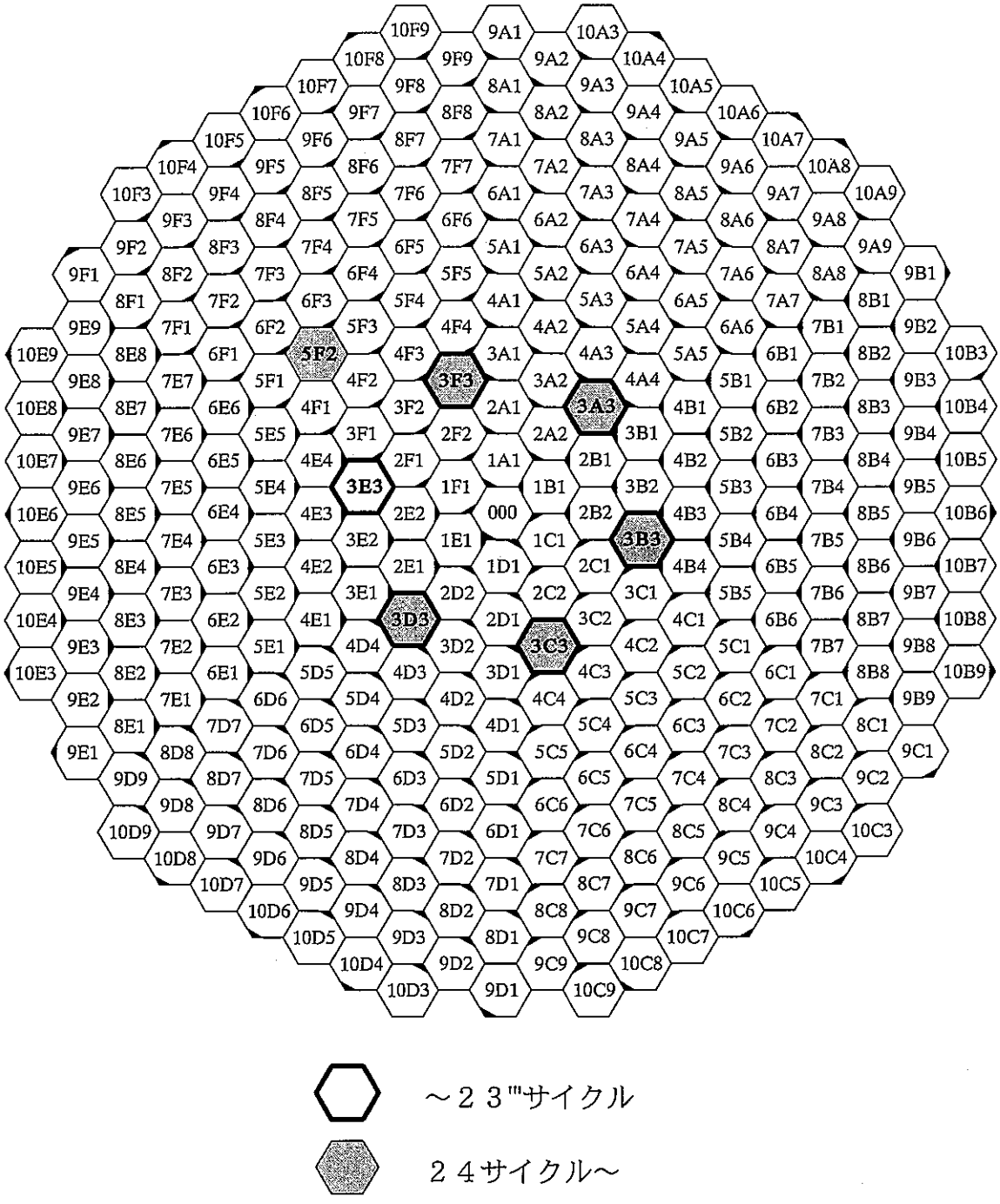


図２－２　「常陽」MK－Ⅱ炉心の制御棒装荷位置

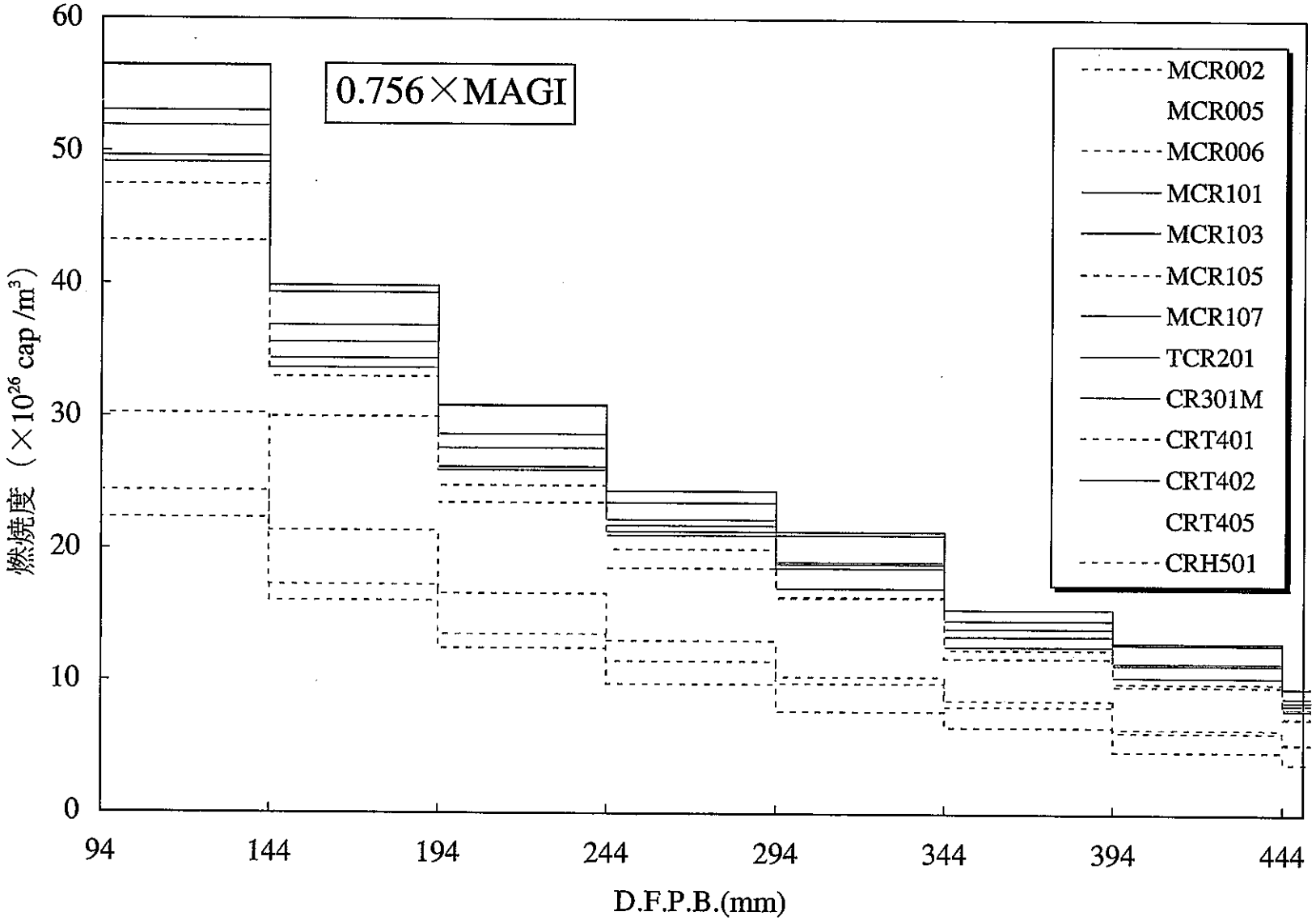


図２－３　「常陽」MK－Ⅱ制御棒の軸方向燃焼度分布（MAGI補正値）

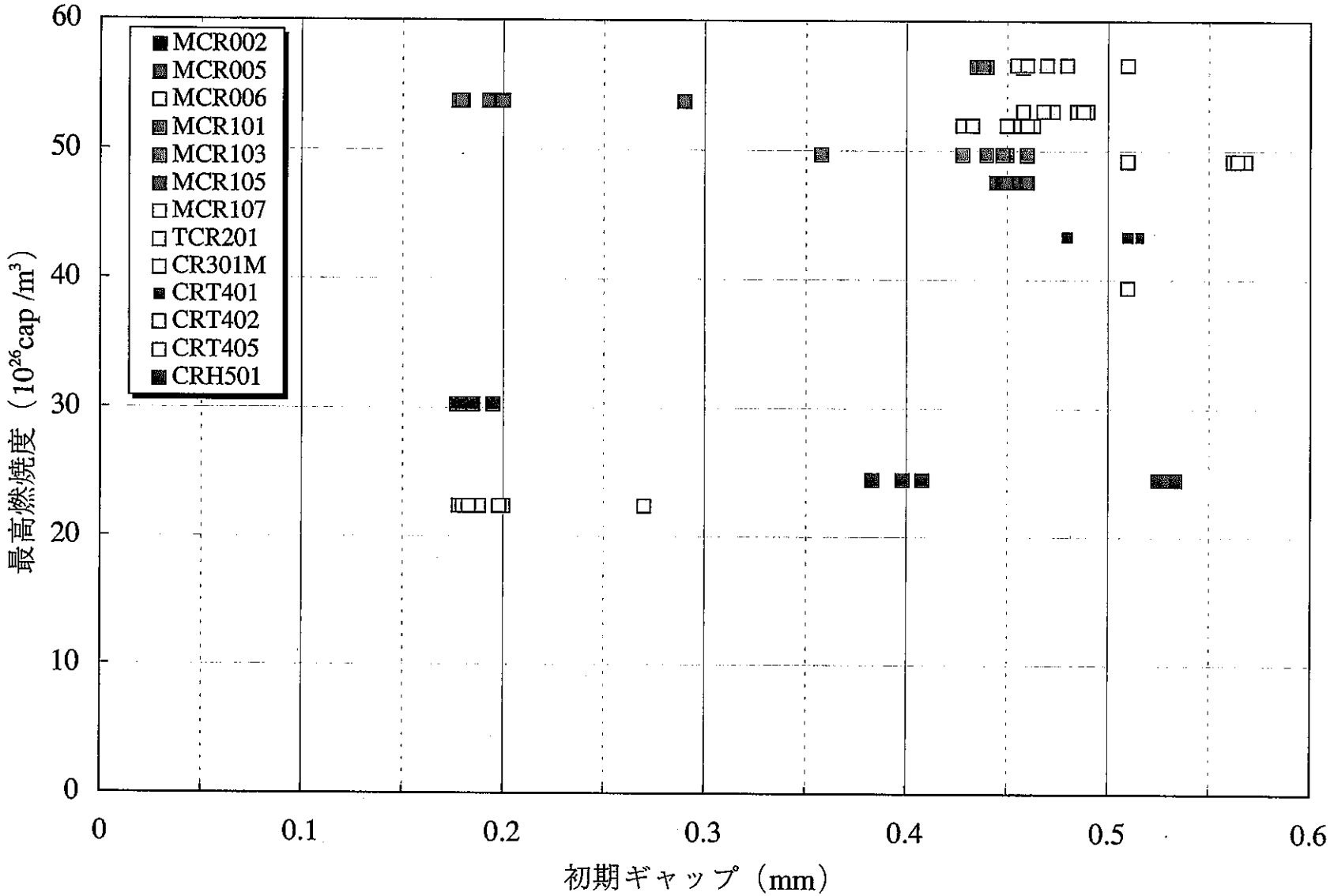


図２－４　初期ギャップと最高燃焼度の関係

3　照射後試験結果

3．1　非破壊試験

3．1．1　詳細外観観察

現在までに被覆管にクラックが発生した吸収ピンは全部で15本あり、その内訳は1次取替制御棒で5本、3次取替制御棒で4本、4次取替制御棒では6本である。初装荷制御棒では詳細外観観察を実施していないため、クラックの有無は未確認である。詳細外観観察からは健全ピンとクラックピンとの間にはクラックの発生以外、表面状態（傷、付着物、変色、腐食等）には顕著な差は認められなかった。

表３－１にクラックの発生位置及びその大きさを示す。なお、クラックの発生が見られたピンは15本であるが、そのうちの1本であるMCR105集合体のB207ピンは破壊試験の一つである金相観察中にクラックの存在が確認された。このため、詳細外観観察により求められるクラックの位置と大きさは不明であるので、ここでは記載を省略した。クラックが最も長かったのはMCR103のD107ピンで、その長さは37mm（複数のクラック長さ合計）である。10mmを越える長さのクラックが発生したピンは数本見られるが、ほとんどのピンのクラックは3～6mm程度の長さであった。

図３－１はクラック長さの燃焼度依存性を示したものである。燃焼度の高いMCR103の2本の吸収ピンには20mmを越えるクラックが生じているが、これよりも燃焼度が高いCRT402には6mmを越えるクラックの発生は認められていない。このことより、クラック長さの有意な燃焼度依存性はみられない。クラックの幅については、どのピンも0.1mm～0.3mm程度の微小なものであった。図３－２は各ピンのクラック発生軸位置をその長さ及び幅とともに示したものである。縦軸の目盛間隔はペレット一個分の高さに対応している。クラックは燃焼度が高いペレットスタック下端部（下から3個目まで）に集中していることが分かる。図３－３は制御棒内でのクラックの周方向位置を示したものである。クラック発生場所に有意な傾向は見られず、制御棒の周辺方向と中心方向のいずれにも、クラックが認められている。

写真３－１～写真３－１４はMCR105のB207ピンを除く全ての吸収ピンにおけるクラックの詳細外観観察結果を示したものである。全てのクラックが軸方向に伸びており、被覆管の周方向に応力が大きく作用したことが考えられる。さらに、10mmを越えるような長いクラックは、蛇行しながら軸方向に伸びているのが特徴的である。クラック形態は、直線的なものと波状化したものに大別できる。写真３－２に示すようにMCR103のD107ピンにおいてはクラックの一部に不連続な所があり、複数のクラックに分かれている様子がみうけられる。これらのクラックの形態はクラック発生原因および時期と密接な関係があると考えられるが、現状では特定できていない。

図３－４は吸収ピンにおける最高燃焼度とペレットスタック最下端の初期ギャップの関係を示したものである。クラックピンの中で初期ギャップが最も小さいのはMCR103の

D105ピンで0.438mmである。一方、クラックピンの中で燃焼度が最も小さいのはCRT401のG702及びG703ピンであり、約43 x 10^{26}cap／m^3である。燃焼度が最も大きいCRT402においては7本の吸収ピン中、4本にクラックの発生が認められた。また、初期ギャップが0.56mmを越える吸収ピン（0.562～0.568mm：CR301M）6本中、4本にクラックが発生している。クラックピンは図中右上の領域に集中しているため、燃焼度が高いほど、また初期ギャップが大きいほどクラックが発生し易い傾向にあるのがわかる。図３－４からわかるように、吸収ピンにおけるクラックはギャップが0.43mm以上、燃焼度が43 x10^{26}cap／m^3以上で発生している。しかし、この領域にあるMCR101、MCR107、TCR201の各吸収ピンの詳細外観観察結果からはクラックの発生は認められていない。なお、この図で初期ギャップ0.3mm以下の詳細外観未実施ピン（初装荷制御棒）に対するクラックの有無は判定できていないが、後述の重量測定結果からクラックの発生はなかったものと考えている。

３．１．２　重量測定

表３－２は全吸収ピンの重量測定結果をクラックの有無とともに示したものである。また、この重量増加量を最高燃焼度でプロットしたのが図３－５である。図中の黒の塗りつぶしがクラックピンを示している。また、緑色のプロットは詳細外観未実施ピン（初装荷制御棒）を示している（なお、TCR201集合体では製造値データが明確でなく、信頼性が低いため図３－５のプロットでは除外している）。クラックピンのほとんどに15gを越える重量増加が見られ、健全ピンと比べて増加量が大きいことがわかる。

現在までの照射後試験結果から、重量増加の原因は被覆管に生じたクラック部およびベント部からのナトリウムの浸入によるものであると推定されている。３次取替以前（ベント長：250mm）の吸収ピンでは健全ピンにおいても有意差（±2.1g）を越える重量増加が認められるものが数本見られる。この重量増加はX線ラジオグラフィーやピン切断時の被覆管内面及びB_4Cペレットの観察結果から、ベント部からのナトリウムの侵入によるものであると考えられている。一方、ベント長を250mmから350mmに延長し、ベント部からのナトリウムの侵入を防いだ４次取替以降の吸収ピンではクラックピンと健全ピンとの間には重量増加に明かな違いが見られている。このため、４次取替の吸収ピンで生じた重量増加の原因は被覆管に生じたクラックからのナトリウムの侵入によるものと考えられる。

クラックピンの中で重量増加が最も小さいのはCRT401、G703ピンの11.8gであるが、健全ピンの中にもこの値よりも大きな重量増加が見られるものもあった。たとえば、MCR101のB806ピン及びMCR107のB902ピンにはクラックが認められていないが、この２本は重量増加が15g前後と大きい値を示している。

詳細外観観察を実施していない（クラックの有無が確認されていない）MCR005の吸収ピンには10g程度の重量増加が見られている。この重量増加の原因は写真３－１５に示す

X線ラジオグラフィーの結果から、ベント部に確認されたNaと思われる付着物によるものと考えられる。実際、付着物の容積とNaの密度から求めた重量が、ピン重量増加量にほぼ一致している。このため、初装荷制御棒にはクラックの発生は見られなかったと考えられる。

３．１．３　ピン寸法測定

（１）全長及び曲がり寸法測定結果

現在までにピン寸法測定に供した制御棒吸収ピンでは全長及び曲がりについてはいずれも有意差（全長：±1mm、曲がり：全長当たり2mm）以内であり、照射による顕著な寸法変化は見られなかった。

（２）外径寸法測定結果

図３－６は外径寸法測定結果の一例として、CRT405のJ601ピンにおける軸方向プロファイルを示したものである。燃焼度が高いピン下端に近い軸位置において外径増加が大きい部分が多く見られる。表３－３及び表３－４に吸収ピンの最大外径増加率と周方向平均の最大外径増加率をそれぞれ示す。

図３－７は周方向平均の最大外径増加率とその軸位置での局所燃焼度の関係を示したものである。ここで局所燃焼度とは最大外径変化を示した部分のB_4Cペレットの燃焼度である。図中の直線は完全剛体とみなしたB_4Cペレットが燃焼度100 x 10^{26}cap／m^3 当たり3.5%の速度でスエリングしたとき（$\Delta D/D(\%)=3.5(\%)$ x Burnup(10^{28}cap／m^3)）に生じる被覆管の外径増加率を、未照射時の初期ギャップごとに整理したものである。初期ギャップが0.15～0.25mmであるピン（初装荷吸収ピン、詳細外観未実施、図中の黄色菱形）は0.15mmの直線にほぼ従い、多少のずれが見られるもののリロケーションがなくペレットのスエリングのみでギャップが閉塞される状態に近い外径増加を示しているが、これよりも初期ギャップが大きいピンのデータは全体的に低初期ギャップ側にシフトしている。これは初期ギャップを大きくとることによりＡＣＭＩの開始時期が早期化したことを示すものであると考えられる。

図３－８は最大外径増加率（複数測定方向での最大値）とその軸位置での局所燃焼度の関係を示したものである。最大外径増加率の方が周方向平均最大外径増加率よりも、低初期ギャップ側にシフトする傾向が強く、ＡＣＭＩがかなり早い時期から発生していることが伺える。これらの結果はＡＣＭＩの緩和を目的とした初期ギャップの拡大が、逆にＡＣＭＩの発生を早期化させたことを示している。なお、図３－７及び図３－８におけるクラックピンの外径増加データはあくまで最大値であり、クラック部における外径増加率とは必ずしも一致しない（後述：図３－１６）。

（３）オーバリティ

制御棒吸収ピンにはＡＣＭＩの緩和を目的としてB_4Cペレットと被覆管の間に隙間

（初期ギャップ）が設けられている。この初期ギャップが存在することにより、中性子照射により割れたＢ４Ｃペレットが被覆管内で移動・再配置する（リロケーション）。リロケーションが発生しない、あるいは発生してもその程度が小さい場合はＢ４ＣペレットのスエリングによりｏＣＭＩが生じても吸収ピンは等方的に膨れる。しかし、リロケーションが生じると吸収ピンは異方的に膨らみ楕円形に変形する（オーバリティ）。したがって、オーバリティの有無とリロケーションの発生とは密接な関係があると考えられる。そこで、同一軸位置における直交２方向データの差をオーバリティと定義し、各吸収ピンにおけるオーバリティの軸方向プロファイルを求めた（例えば0°－90°でのオーバリティでのマイナス値は90°方向が楕円の長径であることを示す）。また、最大オーバリティ及び最大オーバリティを示す軸位置と、その方向についても整理した。表３－５にオーバリティデータの整理結果を、図３－９にオーバリティの軸方向プロファイルの一例をそれぞれ示す。

図３－１０は最大オーバリティとその軸位置での燃焼度との関係を、初期ギャップで整理したものである。初期ギャップが0.15～0.25mm程度の吸収ピンではオーバリティも小さいが、それ以上のギャップを取ると燃焼度依存性は特に見られず、全体的にオーバリティの値が大きくなっている。顕著な燃焼度依存が見られないことから、低比較的い燃焼度からオーバリティの値がほぼ決定することが伺える。

図３－１１、図３－１２は図３－７、図３－８と同一の外径増加率データを、同じ軸位置でのオーバリティで整理し直したものである（クラックピンのデータはクラック部における値と必ずしも一致しない）。これを見ると、周方向平均の最大外径増加率と最大外径増加率のどちらもオーバリティの大きいピンは図中左上に集中していることがわかる。これはＡＣＭＩの開始が早期化したピンはその軸位置でのオーバリティも大きいことを示している。このため、被覆管の外径増加はリロケーションによりギャップの一部が閉塞され、その状態でペレットがスエリングしたことに起因しているものと考えられる。

（４）ＡＣＭＩ開始燃焼度の推定

ＡＣＭＩが開始すると被覆管の変形が始まるわけであるが、その被覆管変形の開始燃焼度、すなわちＡＣＭＩ開始燃焼度を求めることを試みた。そのため、被覆管軸位置方向の燃焼度とＡＣＭＩの関係に着目した。ＡＣＭＩ発生の目安として、オーバリティの状況に着目し、オーバリティの軸方向プロファイルからオーバリティ開始軸位置を求め、その軸位置における燃焼度をＡＣＭＩ開始燃焼度とした。オーバリティ開始軸位置の判定は、図３－１３に示すようにまずオーバリティの軸方向プロファイルを一種の減衰曲線とみなし、その曲線の振動が減衰した軸位置をオーバリティ開始暫定値とする。次に暫定値よりも高い軸位置のオーバリティデータの最大値を求め、その値をピンの先端方向に外装し、プロファイルデータと一致した位置を最終的にオーバリティ開始軸位置とした。表３－６にオーバリティ開始燃焼度を示す。また、図３－１４にオーバリティ開始燃焼度と初期

ギャップとの関係を示す。オーバリティ開始燃焼度は一番早いもので約 6.5 x10^{26}cap／m^3 となっている。オーバリティ開始燃焼度の明瞭な初期ギャップ依存性は見られない。また、クラックの有無との相関は明確に認められていない。すなわち、ＡＣＭＩは約6.5 x10^{26}cap／m^3 程度の燃焼初期ですでに開始し、開始燃焼度に顕著な初期ギャップ依存性が見られていない。

（５）クラック部近傍の外径寸法結果

図３－１５は周方向平均の最大外径増加率、最大外径増加率及び最大オーバリティを示すそれぞれの軸位置とクラック発生位置との関係を示したものである。クラックは必ずしも被覆管の外径変化が最も大きい軸位置では起こっていない。そこで、クラック近傍に特に着目して外径測定データを検討する。

①最下端ペレット部での外径寸法結果

図３－１６は燃焼度が最も高く、かつクラックの発生が多い最下端ペレット部の軸位置（ピン下端から94～119mm）での最大外径増加率と最高燃焼度の関係を初期ギャップごとにプロットしたものである。なお、クラックピンのデータはクラック部での最大値である。また、図中の直線は完全剛体とみなしたＢ$_4$Ｃペレットが燃焼度100 x10^{26}cap／m^3当たり3.5％の速度でスエリングしたときに生じる被覆管の外径増加率を未照射時の初期ギャップごとに整理したものである。クラックの発生は燃焼度が約43 x10^{26}cap／m^3以上、外径増加が約1％以上のピンで見られている。初期ギャップが大きいピンが低い燃焼度から大きな外径増加を示していることは、図３－８と類似傾向にあるが、最下端ペレット部の方が初期ギャップの増大によるＡＣＭＩ発生の早期化がより顕著であると考えられる。図３－１７は図３－１６と同一の外径増加率データを、同じ軸位置でのオーバリティで整理し直したものである（クラックピンのデータはクラック部における値）。これを見ると低い燃焼度から大きな外径増加を示しているピンは、その軸位置でのオーバリティも大きいことがわかる。図３－１８は最下端ペレット部での最大オーバリティと最高燃焼度との関係を示したものである。クラック部でのオーバリティは健全ピンに比べて大きいことがわかる。図３－１６～図３－１８の結果を総括すると、制御棒吸収ピン被覆管に見られるクラックは、燃焼度が高く、外径増加が大きく、なおかつオーバリティが大きい場所で発生していると考えられる。

②クラック部近傍の外径プロファイル

図３－１９～図３－２４にCRT402およびCRT401のクラック部に近い角度及びその直交方向の外径測定プロファイルを周方向平均の外径プロファイルと併せて示す。図中の太線がクラック発生部に最も近い角度における測定データを示している。なお、他のクラック

ピンについては、外径測定方向数が少なく測定角度ピッチが荒いため、クラック発生角度とは一致していない。このため、評価対象データから除外するが、参考として図３－２６～図３－３２に示す。

図３－１９～図３－２４を見ると、クラック発生位置と外径増加との関係はオーバリティの程度により大きく二つに分けられる。クラック部のオーバリティ（クラックが発生した角度の外径値とそれに直交する角度の外径値の差）があまり大きくないH301、H302、G703の各ピンについてはクラック発生軸位置と平均外径が大きい軸位置とはほぼ一致する。一方、オーバリティが大きく異方的に被覆管が変形しているH304、H305、G702の各ピンでは外径増加の小さい所（オーバリティの短径方向）でクラックが発生しているのが特徴的である。また、G702ピンにおけるクラックは、外径が減少している所で発生している。

図３－３３～図３－３７はCRT401及びCRT402のクラックピンにおけるクラック発生軸位置（クラック中心位置）での周方向プロファイルを示したものである。これを見ても楕円の短径方向に近い角度でのクラックの発生が多いことが確認できる。

３．２　破壊試験

３．２．１　吸収ピン断面観察

健全ピンの断面写真を写真３－１６に示す。写真３－１６は初装荷制御棒MCR005のものである。この制御棒はMK-II制御棒のなかではペレットと被覆管間の初期ギャップ（直径ギャップ）が最も小さい0.18mmのものである。B_4Cペレットには、中性子照射により生じたクラックが見られ、ペレットのスエリングにより被覆管とのギャップは閉塞されている様子が見られた。写真３－１７は２次取り替え制御棒TCR201のもので、初期ギャップは0.46mm及び0.43mmである。この写真もMCR005と同様にペレットにはクラックが見られるが、ペレットの偏心によりペレットの片側が被覆管に接触し、その対面側にはギャップが見られた。また、そのギャップにはペレット破片が入り込んでいる様子も見られた。

写真３－１８及び写真３－１９は一次取り替え制御棒MCR103とMCR105のもので、初期ギャップはそれぞれ0.46mm及び0.45mmである。写真３－２０は３次取り替え制御棒CR301Mのものであり、写真３－２１は４次取り替え制御棒CRT402のものである。初期ギャップはそれぞれ0.56mm及び0.47mmである。TCR201と同様にペレットのクラック、偏心、ギャップの残存およびギャップ部へのペレット破片の入り込みが多く見られた。また、被覆管のクラックはギャップが残存している部位で発生している様子が見られた。

写真３－２２はCRT402のクラックピンの縦断面写真であり、オーバリティの長径方向の断面を観察している。被覆管クラックは写真中央部の裏側の位置、すなわち写真のＡとＢの中間の裏側部分に位置する。ペレットのクラックの状況は、横断面に見られた割れに対応する軸方向の割れに加え、斜め及び水平（径方向）に近い割れがあり、複雑な状況となっていた。ペレット外周部において、部分的にペレットの割れ方が異なっていた。ペレットと接触している”Ｂ”部では径方向へ向かった細かなクラックが生じているが、ギャップが残留している”Ａ”部では軸方向に向かった比較的大きなクラックが生じている様子が観察された。写真３－２３及び写真３－２４に拡大した組織を示す。写真３－２３はペレットの非接触部を、また写真３－２４は同接触部のペレットの割れ方を示す。ペレットは、その発熱が被覆管を介して冷却材に伝達されるため温度勾配が生じる。ペレットの配置が偏り、ペレットの一部が被覆管に接触した場合、接触した側のペレット表面部の温度勾配は、接触してない部分に比べ大きくなる。温度勾配が大きいほど熱応力は大きくなり、写真３－２４のＢ部に示すように表面部に細かなクラックが生じたものと推定される。

被覆管クラック部の金相写真を写真３－２５から写真３－３０に示す。クラックは周方向１ヶ所のみに見られ、被覆管内面に対し垂直に発生していた。メインクラックに付随した枝状のサブクラックが結晶粒界に沿って周方向に進展している様子が見られた。写真３－３１はクラック端部のものであり、被覆管内面からクラックが進展している様子が見られ、クラック先端部には塑性変形により生じた変形痕が観察された（写真３－３１点線

内）。クラック破面の状況は概ね粒界破壊となっていた。なお、CR301の一部（写真３－２７）のピンについては、クラックは粒界破壊と粒内破壊がほぼ半々になっており、粒界破壊部は被覆管内面に対してほぼ垂直に発生していたが、粒内破壊部では60度の角度となっていた。

写真３－３２から写真３－３３に被覆管の組織を示す。全般的に析出物はわずかに確認されるが、一部ペレットと被覆管が接触していた部位で、内面側に10μmから25μm幅の析出物が全く見られない白いバンド状の反応相と思われるものが一部に見られた。

３．２．２　硬さ測定

CRT402ピンの断面観察試料の被覆管について、マイクロビッカース硬さ計を用い常温で硬さ測定を実施した。その結果を図３－３８に示す。ペレット非接触部では肉厚方向で変化は無く約350Hvとなっていたが、接触部では被覆管内面から約100μm程度の深さまで硬さが増大傾向をしめしていた。とくに、顕著な硬さの増大は内面から20μm位置付近まで見られており、これは金相試験において観察された反応層と思われるものの幅と一致している。被覆管内表面で硬さが増大しているのは、B_4Cと被覆管の接触により、脱炭とホウ素の浸入により、ホウ化物が形成されたことによるものと思われるが、反応層の詳細な解析は行っていない。

３．２．３　被覆管破断面SEM観察

MCR103（D107211）およびCR301M（E60512C）の被覆管破断面についてSEM観察を実施した。観察結果を写真３－３４及び写真３－３５に示す。破断面は、いずれも典型的な粒界脆性破面であり、破断面にはナトリウム反応物と思われる付着物が認められた。一方、破断部に連なる健全部を室温で強制的に破断させた部分についても観察を実施しているが、先の破断面とは全く異なり、伸張ディンプル及び絞りが観察され典型的な延性破面となっていた。この結果から、材料の機械特性は、少なくとも短時間特性について脆性破面になることはないと言える。

３．２．４　被覆管の強度試験

（１）定歪み速度引張試験

３次取り替え制御棒CR301Mのクラックピン（E604）及び健全ピン（E606）の被覆管についてリング引張試験を実施した。また、同一ロットの非照射材についても試験を実施した。試料の採取位置を図３－３９に、各試料の試験条件と試験結果を合わせて表３－７に示す。試験は、引張特性及び破断形態に及ぼす試験条件の影響を調べるために、試験温度

は室温、200℃及び400℃、引張速度は0.2mm/min及び0.01mm/minの６条件で実施した。

試験結果を試験温度で整理したものを図３－４０及び図３－４１に示す。照射材の0.2%耐力、引張強さはそれぞれ非照射材に比べ30%から40%増加しているが、破断伸びは30%程度低下していた。一様伸びについては、バラツキが大きく照射の影響は確認できなかった。また、照射材、非照射材ともに試験温度が高くなるほど0.2%耐力、引張強さ、一様伸び及び破断伸びは低下する傾向を示した。

健全ピンとクラックピンについて比較すると、試験温度が室温及び 200℃では 0.2% 耐力、引張強さ及び破断伸びにおいて一致しており、有意な差は見られなかった。一方、400℃では測定値のバラツキが大きくなる傾向がみられたが、健全ピンとクラックピンで有意な差は認められなかった。また、これらの結果を引張速度で整理したものを図３－４２～図３－４５に示す。何れも引張速度の違いによる明確な差は認められなかった。

リング引張試験後の外観写真を写真３－３６～写真３－３８に示す。試料は全て引っ張り方向に対して90度方向で切断しており、破断伸びが低かった（0.9%）E606R4を除く全ての試料では破断部に絞りが見られ、延性的な破断形態を示していた。破断伸びが低かったE606R4の破断状況を詳しく調べるため、これと同条件で試験したE604R4とともに破断部の金相試験を実施した。その結果を写真３－３９に示す。両試料とも粒内で破断しており延性破壊であることが確認された。しかし、E604R4では破断部の絞りと結晶粒の伸張変形が見られるのに対し、E606R4では破断部の絞りは僅かで結晶粒の変形も破断部近傍のみであり、更に破断部から1.6mm離れた部位に絞りが大きくなっている様子が見られていることから、破断部近傍で局部的な組織の違いがあったものと推定される。

（２）短時間クリープ試験

４次取り替え制御棒のCRT402のクラックピン（H302,H305）の被覆管についてもリング引張試験を実施した。試験は短時間クリープ試験を模擬し引張荷重一定として、破断形態と破断時間の関係を調べた。試験温度430℃にて通常引張試験を実施し、次に同一ピンから採取した他試料を通常引張試験の引張強さの0.7%及び0.5%耐力相当の応力まで0.1mm/min引張速度で荷重し、その荷重を試料が破断するまで保持した。試料採取位置を図３－４６及び図３－４７に、試験結果を表３－８及び表３－９に示す。通常引張試験では0.2%耐力，引張強さ及び伸びについてCR301M被覆管のリング引張試験データと比較して、ほぼ等しい結果であった。定荷重引張試験では２レベルの応力（855 MPa, 864MPa）で試験を実施した結果、15.6時間，97.5時間及び406.2時間の３レベルの破断時間が得られた。リング引張試験後の試料の外観写真を写真３－４０に示す。いずれの試料とも破断部に絞りが認められ、延性破断の様相を示していた。破断時間が長くなるにしたがい、絞りの程度は少なくなる傾向であった。

更に破断形態を詳細に調べるため金相試験を実施した。金相写真を写真３－４１～写真３－４８に示す。破断形態は通常引張試験、定荷重引張試験とも概ね粒内延性破壊と判断

される。しかし定荷重引張試験の破断時間が15.6時間及び97.5時間の試料では、破面が複雑な形状になっており一部に粒界破壊の可能性も見られた。また破断時間が97.5時間の試料では被覆管内面側に結晶粒の欠陥が見られ、内面側結晶粒界の脆化がうかがえる。

金相写真より求めた、破断時間と絞りの関係を表３－１０に示す。定荷重引張試験と通常引張試験の破断絞りの比較では、断面収縮率は同程度であった。しかし10%絞りの位置（肉厚が10%減少している部分から破断面中央までの距離）は通常引張試験試料が1.25mmに対し、定荷重引張試験試料は0.37mmから0.48mmと約３割程度に低下しており、定荷重引張試験試料は破断伸びが小さいと推定される。なお定荷重引張試験試料における破断絞りと破断時間の関係は、破断時間が長時間側で破断絞りが少ない傾向であった。

３．２．５　被覆管のHe分析

４次取り替え制御棒CRT402のクラックピン（H305）の被覆管について、肉厚方向でのHe濃度の測定を、四重極質量分析装置を用いてダイナミック法にて実施した。試料採取位置は図３－４８に示すように、クラック部近傍、健全部及びスペーサー部について実施した。肉厚方向での試料調整は、機械研磨により、内外表面、肉厚中心及び内表面近傍から試料を採取した。分析試料の厚さは何れも約100μmである。これらの分析結果を表３－１１に示す、ペレット装荷部では、内表面が51appmから212appm、他の部位は3appmから13appmであり、明らかに内表面で高濃度となっていた。一方、スペーサー部では内表面が23appmと他に比べ２倍程度高くなっていた。ペレット装荷部表面でのHe濃化は、ペレットと被覆管の接触によりＢが被覆管表面に移行し、その後中性子核反応により生成したHeの蓄積、ペレットの中性子核反応で生じたHeの打ち込み及びピン内部のHeガスが、中性子の衝突により打ち込まれたものと考えられる。スペーサー部表面については、ピン内部のHeガスが中性子の衝突により打ち込まれたためと考えられる。また、内表面を除いた部位では軸方向で濃度分布がついており、下部側で高濃度となっていた。これは、ピン下部が最も中性子照射量が高くなること、内表面を除いて肉厚方向で濃度差が見られないことから、被覆管材料中のB,Fe,Ni等と中性子反応により生成したHeが蓄積したもの考えられる。また、これらの結果を燃料被覆管及びラッパ管の分析結果とともに中性子照射量で整理したものを図３－４９に示す。内表面を除いた部位では燃料被覆管及びラッパ管とほぼ同じ生成量になっており、これからもその可能性が裏付けられる。

３．２．６　被覆管の残留応力測定

４次取り替え制御棒CRT402のクラックピン（H302）の被覆管について、B_4Cペレット抜き出し前後の外径変化より、被覆管の残留応力測定を実施し、照射末期の炉内における被覆管とB_4CペレットとのＡＣＭＩによる応力を評価した。試料は軸方向に対して垂直に切断した被覆管から、輪切りにしたものを６個採取した。外径測定はレーザー外径測

定装置（測定精度±3μm）を用い、B_4Cペレット抜き出し前後の外径変化を径方向について１０°間隔で測定した。ペレットは、被覆管を切断した時点では被覆管に強く拘束されてはずれないため、ハンマーでたたきながら抜き出した。この際被覆管を変形させないよう細心の注意を払った。試料採取位置を図３－５０に、測定結果を表３－１２及び図３－５１に示す。

被覆管の外径はB_4Cペレット抜き出しにより縮小した。その変化量は、照射による外径変化の大きい部位で大きい傾向にあり、最大値は軸位置146mmのH302S2試料で0.28%であった。この歪み量は、被覆管材の弾性変形限（約0.3%）に近いものである。吸収ピンを炉内から炉外に取り出して室温条件にした場合の被覆管に働く残留弾性応力は、B_4Cペレット外径と被覆管内径の熱収縮歪みをそれぞれd_1，d_2、被覆管の残留弾性応力歪みをd_3とし、被覆管に何れの応力も働かずにB_4Cペレットと接触していたとすると、

$$d_3 = d_2 - d_1$$

と表せる。なお、照射中の被覆管は熱収縮歪み（0.69%）より大きく変形（最大1.2%）しており、室温ではこの変形に伴う弾性歪み（弾性限歪み：約0.3%を限度に）が残っていると考えるべきであるが、B_4Cペレットの熱収縮に伴いこの弾性歪みが減少し、ペレット温度が650℃以上では弾性限歪みを越えるため、炉内の弾性歪みは炉外（室温）では残らないことになる。

炉内での被覆管温度を400℃とすると、炉外に取り出して室温（25℃）まで下げた時の被覆管内径の熱収縮歪みは0.69%となる。一方、残留弾性歪みは0.28%と求められており、この歪みをもたらすためには、B_4Cペレット外径の熱収縮歪みは0.41%となり、この時の炉内でのB_4Cペレットの平均温度は約750℃と計算される。また軸位置149mmのH302S1試料では照射により1.2mmの外径増加をしているにも係わらず残留応力歪みは0.11%であった。同様に炉内でのペレットの平均温度を計算すると約1000℃となった。一方、ＣＯＲＡＬコードによる照射末期でのB_4Cペレットの平均温度は約560℃と計算されており、残留弾性歪みから求めた温度と大きく異なる結果となった。このペレット温度の違いの原因として、

①制御棒を炉外へ取り出す際の熱収縮時に、B_4Cペレットと被覆管の収縮歪み差に基づく応力によりペレットの再配置が起こり、熱収縮歪み差が吸収された。

②ペレットにクラックが発生したため実効的な熱伝導度が低くなり、ペレットの温度がコード計算値と大きく異なった。

が考えられる。①の挙動が支配的であったとすれば、冷却時に炉内での変形は照射クリープ等の機構により、弾性限応力よりかなり低い応力で変形したものと推定できる。

３．２．７　被覆管のTEM観察

前報において、被覆管内面への高濃度のHe蓄積が報告されている。このHeが結晶粒界にバブルを形成し、粒界破壊を引き起こした可能性がある。粒界破壊にHeバブルが係わっているとすれば、粒界Heバブルの形成状況と応力レベルに関連が考えられる。クラックは被覆管軸方向に沿って発生しており、周方向に応力が働いていたと考えられる。したがって、応力方向に垂直な結晶粒界のHeバブルの状況を確認する目的でTEM観察を実施した。観察試料は、照射中の被覆管周応力が異なる３試料とした。周応力は外径変化量にしたがうものとし、照射中に最も被覆管変形が大きかったクラック部、次いで大きい健全部及び変形が無かったスペーサー部から採取した（図３－４８のそれぞれのHe分析試料の隣接部から採取）。TEM試料の調整は、機械研磨により内面から200μm厚さの試料を得、その肉厚中心部を観察した。照射ままでの観察を実施したがHeバブルが明確に確認できなかったため、真空中で700℃×１時間の加熱処理を施した後に観察を実施した。

観察結果を写真３－４９から写真３－５１に示す。何れの試料においても結晶粒界に矢印で示すようにHeバブルの形成が見られた。それらのHeバブルは粒界に沿って点在しており、破断部とスペーサー部で形成状況に違いは認められないが、健全部では前者に比べ形成量が少ない。破断部とスペーサー部で形成状況に違いが認められないことから、Heバブル形成に及ぼす応力レベルの影響は認められなかった。また、粒界強度に影響が考えられる結晶粒界の析出物は、僅かにM_6Cと推定される20nmの析出物が点在している程度であり、強度低下に及ぼす影響は極僅かと考えられる。

Heバブルの形成量は、照射量が同程度の炉心材料（燃料被覆管及びラッパ管）に比べ違いはない。被覆管のHe分析及び硬さ測定によれば、高濃度のHeの蓄積は内表面の20μm以内である可能性が高い。TEM観察は内表面から100μmの位置を行っており、低濃度He域の観察を行ったことになる。そのため、Heバブル形成に及ぼす応力の効果が確認できなかったものと考えられる。これらの結果から、内面を除く結晶粒界に形成したHeバブルが原因で被覆管全体の粒界強度が低下した可能性は低いと考えられる。

表３－１　クラック発生位置および大きさ

集合体No.	ピンNo.	軸位置* (mm)	角度 (°)	長さ** (mm)	幅 (mm)
MCR103	D105	107	186	22.3	0.30
	D107	112	70	37.0	0.30
MCR105	B202	118	93	19.2	0.06
	B204	162	33	3.5	0.05
CR301M	E601	104	255	3.1	0.10
	E603	109	109	2.5	0.10
	E604	94	288	16.4	0.20
	E605	101	14	6.6	0.10
CRT401	G702	107	150	2.5	0.10
	G703	110	209	9.3	0.20
CRT402	H301	104	16	3.0	0.10
	H302	112	351	5.6	0.10
	H304	99	99	3.9	0.10
	H305	104	38	5.8	0.10

＊　：軸位置は吸収ピン下端からクラック中心までの距離
＊＊：長さは複数クラックの合計値

表３－２　制御棒吸収ピン重量測定結果

集合体No.	ピンNo.	重量変化 (g)	詳細外観検査結果	集合体No.	ピンNo.	重量変化 (g)	詳細外観検査結果	集合体No.	ピンNo.	重量変化 (g)	詳細外観検査結果
MCR002	7901	1.0	－	MCR103	D101	0.0	×	CRT401	G701	- 0.4	×
	7902	1.0	－		D102	0.7	×		G702	13.0	○
	7903	1.0	－		D103	6.5	×		G703	11.8	○
	7904	1.2	－		D104	0.8	×		G704	- 1.8	×
	7905	1.1	－		D105	18.4	○		G705	- 0.9	×
	7906	1.2	－		D106	3.0	×		G706	- 1.9	×
	7907	0.2	－		D107	14.8	○		G707	- 1.5	×
MCR003	9001	5.7	－	MCR105	B201	－	×	CRT402	H301	23.5	○
	9002	4.3	－		B202	－	○		H302	19.3	○
	9003	4.8	－		B203	－	×		H303	1.8	×
	9004	2.2	－		B204	－	○		H304	22.4	○
	9005	2.3	－		B205	－	×		H305	18.6	○
	9006	5.6	－		B206	－	×		H306	4.7	×
	9007	0.9	－		B207	－	○		H307	4.1	×
MCR005	8501	1.4	－	MCR107	B901	4.1	×	CRT405	J601	1.2	×
	8502	7.9	－		B902	17.0	×		J602	1.7	×
	8503	9.4	－		B903	1.0	×		J603	- 0.3	×
	8504	10.1	－		B904	0.4	×		J604	0.6	×
	8505	10.5	－		B905	- 0.1	×		J605	2.3	×
	8506	9.6	－		B906	0.9	×		J606	3.0	×
	8507	9.7	－		B907	0.8	×		J607	0.4	×
MCR006	6901	0.4	－	TCR201	D301	-38.1	×	CRH501	J501	1.2	×
	6902	0.7	－		D302	-34.6	×		J502	1.6	×
	6903	0.7	－		D303	-35.8	×		J503	- 0.3	×
	6904	0.8	－		D304	-37.9	×		J504	- 0.6	×
	6905	0.6	－		D305	-34.2	×		J505	0.1	×
	6906	0.8	－		D306	-39.4	×		J506	- 0.4	×
	6907	0.9	－		D307	-22.5	×		J507	- 0.5	×
MCR101	B801	9.7	×	CR301M	E601	21.4	○				
	B802	2.0	×		E602	1.1	×				
	B803	7.8	×		E603	22.3	○				
	B804	6.7	×		E604	16.3	○				
	B805	11.0	×		E605	17.4	○				
	B806	14.8	×		E606	1.5	×				
	B807	5.6	×		E607	1.5	×				

○　クラックピン

×　健全ピン

－　未実施

（注）TCR201の重量増加量は製造値データが明確でなく、信頼性が低いため、評価から除外した

表３－３　吸収ピンの最大外径増加率

集合体No.	ピンNo.	方向(°)	DFPB (mm)	初期ギャップ (mm)	局所燃焼度 (10^{26}cap/m^3)	ΔD/D最大 (%)
MCR002	7903	0	114.2	0.180	30.255	0.227
	7906	60	114.2	0.180	30.255	0.266
	7907	55	104.3	0.185	30.255	0.199
MCR005	8501	145	94.5	0.290	53.711	1.161
	8504	75	124.5	0.180	53.711	1.106
	8507	15	104.2	0.180	53.711	1.095
MCR006	6901	75	94.5	0.270	22.344	0.310
	6902	10	94.5	0.188	22.344	0.254
	6903	5	144.5	0.230	16.095	0.194
	6904	175	134.5	0.278	22.344	0.359
	6905	60	94.5	0.178	22.344	0.160
	6906	140	104.5	0.180	22.344	0.105
	6907	175	114.5	0.183	22.344	0.055
MCR101	B801	0	144.9	0.358	34.410	0.697
	B802	0	194.7	0.438	26.188	0.370
	B803	0	165.1	0.440	34.410	0.713
	B804	0	94.7	0.450	49.635	0.691
	B805	90	165.1	0.448	34.410	1.288
	B806	90	95.2	0.460	49.635	0.542
	B807	0	94.8	0.428	49.635	0.630
MCR103	D101	0	207.4	0.440	30.839	1.879
	D102	0	159.3	0.425	39.389	1.653
	D103	86	183.6	0.413	39.389	2.488
	D104	0	167.7	0.403	39.389	1.526
	D105	0	103.8	0.438	56.487	2.200
	D106	0	159.5	0.428	39.389	1.382
	D107	90	123.6	0.428	56.487	2.211
MCR105	B203	0	104.5	0.450	47.530	1.139
	B206	0	134.8	0.448	47.530	1.205
	B207	0	134.7	0.450	47.530	1.692
MCR107	B901	0	139.9	0.473	53.033	1.116
	B902	89	100.2	0.490	53.033	1.103
	B903	0	120.1	0.458	53.033	1.083
	B904	90	105.4	0.485	53.033	1.260
	B905	0	95.2	0.468	53.033	1.144
	B906	0	125.3	0.465	53.033	1.072
	B907	90	195.0	0.463	28.650	0.927

集合体No.	ピンNo.	方向(°)	DFPB (mm)	初期ギャップ (mm)	局所燃焼度 (10^{26}cap/m^3)	ΔD/D最大 (%)
TCR201	D301	90	111.5	0.455	51.907	1.061
	D302	0	103.4	0.463	51.907	1.873
	D303	0	183.2	0.420	35.629	1.315
	D304	0	183.2	0.410	35.629	1.304
	D305	0	147.8	0.410	35.629	1.905
	D306	0	96.5	0.428	51.907	1.552
	D307	0	123.6	0.433	51.907	1.016
CR301M	E601	45	107.0	0.562	49.149	1.949
	E602	135	107.0	0.568	49.149	1.308
	E603	44	134.0	0.565	49.149	1.590
	E604	135	101.2	0.568	49.149	1.942
	E605	0	104.3	0.564	49.149	1.225
	E606	90	179.5	0.500	33.693	1.110
	E607	45	127.1	0.564	49.149	1.115
CRT401	G701	0	157.5	0.480	29.984	0.614
	G702	90	94.3	0.480	43.276	1.459
	G703	99	109.3	0.515	43.276	1.730
	G704	90	102.2	0.510	43.276	1.802
	G705	90	116.0	0.510	43.276	1.465
	G706	0	176.2	0.510	29.984	1.249
	G707	89	143.6	0.510	43.276	1.095
CRT402	H301	94	143.2	0.455	56.568	2.040
	H302	125	146.8	0.510	39.876	1.929
	H303	0	99.7	0.480	56.568	1.918
	H304	150	141.2	0.450	56.568	2.189
	H305	9	126.7	0.460	56.568	1.946
	H306	90	100.4	0.460	56.568	1.819
	H307	0	174.8	0.450	39.876	1.260
CRT405	J601	90	139.3	0.510	39.311	1.636
	J602	150	119.0	0.510	39.311	1.725
	J603	120	117.4	0.510	39.311	1.802
	J604	150	151.3	0.480	28.477	1.553
	J605	0	223.3	0.450	22.287	1.095
	J606	29	113.3	0.510	39.311	1.786
	J607	90	157.0	0.510	28.477	1.354
CRH501	J501	150	149.3	0.358	17.305	0.911
	J502	29	118.4	0.408	24.430	1.154
	J503	90	140.2	0.530	24.430	0.839
	J504	120	127.5	0.510	24.430	1.049
	J505	0	109.8	0.533	24.430	0.906
	J506	0	155.1	0.383	17.305	1.497
	J507	89	117.4	0.383	24.430	0.795

表３－４　周方向平均の最大外径増加率

集合体No.	ピンNo.	DFPB (mm)	初期ギャップ (mm)	最高燃焼度 (10^{24}cap/m³)	ΔD/D平均 (%)
MCR002	7903	114.2	0.180	30.255	0.227
	7906	114.2	0.180	30.255	0.266
	7907	104.3	0.185	30.255	0.199
MCR005	8501	124.0	0.180	53.711	0.950
	8504	124.0	0.180	53.711	1.040
	8507	104.0	0.180	53.711	1.000
MCR006	6901	134.0	0.200	22.344	0.104
	6902	94.0	0.188	22.344	0.091
	6903	145.0	0.230	16.095	0.068
	6904	175.0	0.178	16.095	0.049
	6905	95.0	0.178	22.344	0.087
	6906	114.0	0.180	22.344	0.070
	6907	94.0	0.183	22.344	0.023
MCR101	B801	144.9	0.358	34.410	0.640
	B802	194.7	0.438	26.188	0.310
	B803	165.1	0.440	34.410	0.650
	B804	94.7	0.450	49.635	0.630
	B805	165.1	0.448	34.410	1.280
	B806	95.2	0.460	49.635	0.500
	B807	94.8	0.428	49.635	0.510
MCR103	D101	155.3	0.440	30.839	0.920
	D102	95.5	0.435	56.487	0.600
	D103	185.5	0.413	39.389	1.320
	D104	165.6	0.403	39.389	0.810
	D105	108.0	0.438	56.487	1.425
	D106	95.4	0.458	56.487	0.770
	D107	110.0	0.458	56.487	1.215
MCR105	B203	104.0	0.450	47.530	0.600
	B206	134.0	0.448	47.530	0.520
	B207	135.0	0.450	47.530	0.746
MCR107	B901	95.0	0.473	53.033	0.712
	B902	100.0	0.490	53.033	0.949
	B903	95.0	0.458	53.033	0.911
	B904	105.0	0.485	53.033	0.829
	B905	95.0	0.468	53.033	0.939
	B906	125.0	0.465	53.033	1.034
	B907	105.0	0.488	53.033	0.544

集合体No.	ピンNo.	DFPB(mm) (mm)	初期ギャップ (mm)	最高燃焼度 (10^{24}cap/m³)	ΔD/D平均 (%)
TCR201	D301	105.3	0.455	51.907	0.760
	D302	145.8	0.443	35.629	0.640
	D303	156.1	0.450	35.629	0.940
	D304	145.3	0.410	35.629	0.620
	D305	145.9	0.410	35.629	1.210
	D306	95.6	0.428	51.907	0.740
	D307	125.1	0.433	51.907	0.910
CR301M	E601	107.0	0.562	49.149	1.076
	E602	110.0	0.568	49.149	0.617
	E603	111.0	0.565	49.149	0.671
	E604	102.0	0.568	49.149	0.890
	E605	122.0	0.564	49.149	0.597
	E606	107.0	0.510	49.149	0.664
	E607	104.0	0.564	49.149	0.442
CRT401	G701	124.0	0.480	43.276	0.449
	G702	94.0	0.480	43.276	1.107
	G703	112.0	0.515	43.276	1.029
	G704	94.0	0.510	43.276	1.220
	G705	116.0	0.510	43.276	1.103
	G706	104.0	0.510	43.276	0.693
	G707	96.0	0.510	43.276	0.598
CRT402	H301	102.0	0.470	56.568	1.124
	H302	116.0	0.510	56.568	1.347
	H303	100.0	0.480	56.568	1.842
	H304	97.0	0.455	56.568	1.043
	H305	116.0	0.470	56.568	1.045
	H306	100.0	0.460	56.568	1.813
	H307	107.0	0.460	56.568	1.072
CRT405	J601	140.0	0.510	39.311	0.922
	J602	117.0	0.510	39.311	0.792
	J603	118.0	0.510	39.311	0.919
	J604	95.0	0.510	39.311	1.056
	J605	95.0	0.510	39.311	0.846
	J606	112.0	0.510	39.311	1.138
	J607	94.0	0.510	39.311	0.859
CRH501	J501	150.0	0.358	17.305	0.116
	J502	119.0	0.408	24.430	0.182
	J503	122.0	0.530	24.430	0.204
	J504	121.0	0.510	24.430	0.247
	J505	118.0	0.533	24.430	0.268
	J506	119.0	0.533	24.430	0.350
	J507	95.0	0.383	24.430	0.207

表３－５　吸収ピンの最大オーバリティ

集合体No.	ピンNo.	測定方向数	方向 (°)	max Ov. (mm)	DFPB (mm)	長軸方向 (°)
MCR002	7903	２方向	0－88	0.050	164.0	88
	7906	２方向	60－150	0.035	124.0	60
	7907	２方向	55－145	0.013	134.0	145
MCR005	8501	２方向	55－150	0.107	114.0	150
	8504	２方向	75－165	0.059	255.0	75
	8507	２方向	15－105	0.088	114.0	15
MCR006	6901	２方向	75－165	0.074	94.0	75
	6902	２方向	10－100	0.058	94.0	10
	6903	２方向	5－95	0.068	114.0	95
	6904	２方向	85－175	0.114	135.0	175
	6905	２方向	60－150	0.026	94.0	60
	6906	２方向	50－140	0.027	135.0	140
	6907	２方向	85－175	0.022	114.0	175
MCR101	B801	２方向	0－90	0.124	115.0	0
	B802	２方向	0－90	0.082	195.0	0
	B803	２方向	0－90	0.194	165.0	0
	B804	２方向	0－90	0.147	125.0	0
	B805	２方向	0－90	0.320	165.0	90
	B806	２方向	0－90	0.076	445.0	0
	B807	２方向	0－90	0.098	135.0	90
MCR103	D101	２方向	0－95	0.373	205.0	0
	D102	２方向	0－90	0.319	160.0	0
	D103	２方向	0－86	0.358	185.0	86
	D104	２方向	0－90	0.249	178.0	0
	D105	２方向	0－90	0.314	104.0	0
	D106	２方向	0－90	0.251	158.0	0
	D107	２方向	0－90	0.306	123.0	90
MCR105	B203	２方向	0－90	0.268	124.0	0
	B206	２方向	0－90	0.197	135.0	0
	B207	２方向	0－90	0.334	135.0	0
MCR107	B901	２方向	0－89	0.186	140.0	0
	B902	２方向	0－90	0.158	165.0	90
	B903	２方向	0－90	0.165	295.0	0
	B904	２方向	0－89	0.207	200.0	89
	B905	２方向	0－90	0.176	295.0	90
	B906	２方向	0－90	0.175	156.0	0
	B907	２方向	0－90	0.170	165.0	0

集合体No.	ピンNo.	測定方向数	方向 (°)	max Ov. (mm)	DFPB (mm)	長軸方向 (°)
TCR201	D301	２方向	0－90	0.242	243.0	90
	D302	２方向	0－90	0.244	103.0	0
	D303	２方向	0－90	0.246	189.0	0
	D304	２方向	0－90	0.293	180.0	0
	D305	２方向	0－90	0.226	144.0	0
	D306	２方向	0－90	0.251	97.0	0
	D307	２方向	0－90	0.190	228.0	0
CR301M	E601	４方向	45－134	0.301	107.0	45
	E602	４方向	0－90	0.241	134.0	90
	E603	４方向	44－135	0.404	137.0	44
	E604	４方向	45－135	0.342	104.0	135
	E605	４方向	0－90	0.266	185.0	0
	E606	４方向	0－90	0.285	206.0	90
	E607	４方向	179－89	0.302	209.0	179
CRT401	G701	２方向	0－90	0.182	155.0	0
	G702	２０方向	0－90	0.304	165.0	0
	G703	２０方向	27－117	0.411	123.0	117
	G704	２０方向	27－117	0.302	181.0	27
	G705	２方向	0－90	0.232	112.0	90
	G706	２方向	0－89	0.359	176.0	0
	G707	２方向	0－89	0.267	142.0	89
CRT402	H301	３６方向	4－94	0.320	143.0	94
	H302	３６方向	65－155	0.314	190.0	155
	H303	２方向	0－90	0.267	185.0	90
	H304	３６方向	20－110	0.435	159.0	20
	H305	３６方向	75－165	0.305	153.0	165
	H306	２方向	0－90	0.396	160.0	0
	H307	２方向	0－90	0.257	175.0	0
CRT405	J601	６方向	60－150	0.327	165.0	150
	J602	６方向	30－120	0.384	113.0	120
	J603	６方向	30－120	0.333	117.0	120
	J604	６方向	59－150	0.332	156.0	150
	J605	６方向	59－150	0.289	195.0	150
	J606	６方向	59－150	0.290	124.0	59
	J607	６方向	0－90	0.347	157.0	90
CRH501	J501	６方向	59－149	0.256	150.0	149
	J502	６方向	29－120	0.332	144.0	29
	J503	６方向	60－150	0.250	151.0	60
	J504	６方向	30－120	0.345	125.0	120
	J505	６方向	59－150	0.262	129.0	150
	J506	６方向	0－90	0.340	155.0	0
	J507	６方向	60－150	0.213	112.0	60

表３－６　オーバリティ開始燃焼度

集合体No.	ピンNo.	Ov.開始燃焼度 (10^{26}cap./m^3)	初期ギャップ (mm)
MCR002	7903	16.611	0.180
	7906	13.051	0.180
	7907	13.051	0.175
MCR005	8501	18.992	0.187
	8504	14.244	0.200
	8507	18.992	0.175
MCR006	6901	6.554	0.197
	6902	16.095	0.190
	6903	9.832	0.200
	6904	12.513	0.280
	6905	16.095	0.175
	6906	9.832	0.200
	6907	7.746	0.235
MCR101	B801	26.188	0.357
	B802	13.399	0.440
	B803	13.399	0.440
	B804	17.053	0.445
	B805	21.316	0.440
	B806	7.917	0.360
	B807	17.053	0.355
MCR103	D101	12.824	0.437
	D102	14.656	0.370
	D103	14.656	0.365
	D104	14.656	0.370
	D105	12.824	0.360
	D106	21.068	0.430
	D107	23.511	0.425
MCR105	B203	12.412	0.365
	B206	16.348	0.345
	B207	24.824	0.435
MCR107	B901	18.897	0.427
	B902	22.249	0.450
	B903	8.534	0.430
	B904	14.020	0.430
	B905	14.020	0.425
	B906	14.020	0.430
	B907	28.650	0.455

集合体No.	ピンNo.	Ov.開始燃焼度 (10^{26}cap./m^3)	初期ギャップ (mm)
TCR201	D301	19.043	0.417
	D302	27.643	0.420
	D303	21.807	0.410
	D304	21.807	0.400
	D305	21.807	0.385
	D306	19.043	0.410
	D307	19.043	0.405
CR301M	E601	18.547	0.477
	E602	21.020	0.490
	E603	18.547	0.490
	E604	12.674	0.490
	E605	12.674	0.475
	E606	21.020	0.480
	E607	25.965	0.535
CRT401	G701	18.547	0.447
	G702	18.547	0.450
	G703	18.547	0.510
	G704	11.746	0.450
	G705	11.746	0.445
	G706	9.892	0.450
	G707	18.547	0.445
CRT402	H301	12.983	0.447
	H302	12.983	0.450
	H303	21.329	0.450
	H304	9.583	0.450
	H305	9.583	0.445
	H306	15.456	0.450
	H307	24.420	0.445
CRT405	J601	9.596	0.472
	J602	12.072	0.480
	J603	12.072	0.475
	J604	7.429	0.470
	J605	9.596	0.445
	J606	12.072	0.450
	J607	17.953	0.505
CRH501	J501	11.536	0.357
	J502	11.536	0.360
	J503	9.840	0.510
	J504	11.536	0.510
	J505	6.447	0.505
	J506	8.143	0.370
	J507	13.572	0.365

表3－7　リング引張試験結果

試験条件		試料No.	試験結果			
引張速度 (mm/min)	試験温度 (℃)		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
0.2	室温	E604R1	971	1049	2.1	7.1
		E606R1	945	1032	1.8	7.0
		COLD1	692	753	4.0	10.3
		COLD2	687	774	2.1	10.6
	200	E604R3	913	954	0.7	3.6
		E606R3	897	946	1.0	4.3
		COLD5	670	690	0.8	5.8
	400	E604R5	799	862	1.1	2.4
		E606R5	942	968	0.8	3.5
		COLD7	569	701	1.5	4.6
0.01	室温	E604R2	982	1070	1.8	7.1
		E606R2	960	1018	2.4	7.8
		COLD3	661	824	1.3	9.7
		COLD4	702	758	1.6	10.6
	200	E604R7	897	976	1.5	3.2
		E606R7	927	978	1.0	3.3
		COLD6	680	716	0.5	5.1
	400	E604R4	883	917	0.7	3.1
		E606R4	845	864	0.6	0.9
		E606R6	902	957	0.8	2.6
		COLD8	624	684	1.2	4.5

表３－８　通常引張試験結果

集合体No	試験温度(℃)	引張速度(mm/min)	0.2%耐力(MPa)	引張強さ(MPa)	一様伸び(%)	破断伸び(%)
CRT402	４３０	０．１	７８１	８９１	１．１	２．４
CR301M	４００	０．２	７９９	８６２	１．５	３．６

表３－９　設定応力と破断時間の関係

試料No.	相当耐力（%）	設定応力（ＭＰａ）	破断時間（ｈｒ）
Ｈ３０５Ｓ２	０．７	８６４	１５．６
Ｈ３０５Ｓ３	０．５	８５５	９７．５
Ｈ３０２Ｓ６	０．５	８５５	４０６．２

表3-10 ＣＲＴ４０２制御棒被覆管のリング引張試験条件及び結果

条　件	試料No.	試料採取位置 D.F.C.B (mm)	引張試験温度 (℃)	引張速度 (mm/min)	引張強さ (MPa)	設定応力 (MPa)	10% 絞りの位置 (mm)	破断時間 (hr)
通常引張試験 (定ひずみ速度)	H302S6	96	430	0.1	891	—	1.25	—
定荷重引張試験	H305S2	133		—	—	864 (0.7% 耐力相当)	0.48	15.6
	H305S3	121		—	—	855 (0.5% 耐力相当)	0.37	97.5
	H302S5	104		—	—	855 (0.5% 耐力相当)	0.40	406.2

表3-11 ＣＲＴ４０２（Ｈ３０５ピン）制御棒被覆管のＨｅ分析結果

試料Ｎｏ.	ピン下端からの距離 (mm)	肉厚方向位置 (内表面からの距離)	Ｈｅ濃度(appm)		
			１回目	２回目	平均
H305G1G (健全部)	161	内　面(0 ～0.1mm)	118.5	50.9	84.7
		内面近傍(0.1～0.2mm)	5.1	8.7	6.9
		肉厚中心(0.4～0.5mm)	5.6	7.0	6.3
		外　面(0.7～0.8mm)	3.2	4.9	4.1
H305G2G (ｸﾗｯｸ近傍)	103	内　面(0 ～0.1mm)	176.1	212.2	194.2
		内面近傍(0.1～0.2mm)	6.8	-	6.8
		肉厚中心(0.4～0.5mm)	8.9	5.6	7.3
		外　面(0.7～0.8mm)	6.5	8.3	7.4
H305G3G (ｽﾍﾟｰｻｰ部)	84	内　面(0 ～0.1mm)	23.1	22.1	22.6
		内面近傍(0.1～0.2mm)	10.5	8.4	9.5
		肉厚中心(0.4～0.5mm)	12.6	12.9	12.8
		外　面(0.7～0.8mm)	10.4	12.2	11.3

被覆管肉厚：0.8mm

表3-12　CRT402(H302ピン)のB4Cペレット抜き出し前後の外径変化

角度	H302S1　(Z=149mm)			H302S2　(Z=145mm)		
(°)	抜き出し前(mm)	抜き出し後(mm)	外径変化率(%)	抜き出し前(mm)	抜き出し後(mm)	外径変化率(%)
0	18.339	18.317	0.12	18.082	18.077	0.03
10	18.314	18.296	0.10	18.095	18.090	0.03
20	18.264	18.234	0.16	18.166	18.152	0.08
30	18.229	18.190	0.21	18.218	18.209	0.05
40	18.234	18.175	0.32	18.256	18.238	0.10
50	18.234	18.177	0.31	18.291	18.269	0.12
60	18.233	18.180	0.29	18.334	18.304	0.16
70	18.214	18.170	0.24	18.346	18.299	0.26
80	18.179	18.144	0.19	18.313	18.267	0.25
90	18.164	18.149	0.08	18.265	18.203	0.00
100	18.187	18.163	0.13	18.181	18.163	0.10
110	18.267	18.237	0.16	18.176	18.158	0.10
120	18.325	18.293	0.17	18.206	18.176	0.16
130	18.329	18.305	0.13	18.203	18.173	0.16
140	18.337	18.314	0.13	18.189	18.163	0.14
150	18.350	18.326	0.13	18.177	18.159	0.10
160	18.349	18.328	0.11	18.144	18.121	0.13
170	18.345	18.324	0.11	18.110	18.089	0.12
180	18.339	18.317	0.12	18.082	18.077	0.03

	H302S3　(Z=124mm)			H302S4　(Z=120mm)		
0	18.185	18.167	0.10	18.279	18.260	0.10
10	18.187	18.170	0.09	18.276	18.246	0.16
20	18.224	18.190	0.19	18.283	18.253	0.16
30	18.238	18.197	0.22	18.309	18.273	0.20
40	18.252	18.246	0.03	18.326	18.289	0.20
50	18.286	18.227	0.32	18.322	18.291	0.17
60	18.268	18.247	0.11	18.324	18.291	0.18
70	18.205	18.210	-0.03	18.317	18.291	0.14
80	18.178	18.175	0.02	18.323	18.302	0.11
90	18.212	18.180	0.18	18.323	18.287	0.20
100	18.231	18.211	0.11	18.272	18.279	-0.04
110	18.230	18.198	0.18	18.273	18.269	0.02
120	18.252	18.207	0.25	18.298	18.304	-0.03
130	18.265	18.232	0.18	18.309	18.300	0.05
140	18.271	18.239	0.18	18.323	18.314	0.05
150	18.263	18.233	0.16	18.342	18.328	0.08
160	18.238	18.233	0.03	18.328	18.292	0.20
170	18.190	18.199	-0.05	18.295	18.283	0.07
180	18.185	18.167	0.10	18.279	18.260	0.10

	H302S5　(Z=103mm)			H302S6　(Z=95mm)		
0	18.131	18.116	0.08	18.275	18.217	0.32
10	18.139	18.120	0.10	18.283	18.240	0.24
20	18.144	18.126	0.10	18.315	18.266	0.27
30	18.147	18.130	0.09	18.329	18.281	0.26
40	18.149	18.137	0.07	18.335	18.295	0.22
50	18.154	18.138	0.09	18.303	18.266	0.20
60	18.175	18.151	0.13	18.265	18.227	0.21
70	18.217	18.186	0.17	18.272	18.233	0.21
80	18.264	18.210	0.30	18.287	18.266	0.11
90	18.293	18.249	0.24	18.266	18.245	0.11
100	18.344	18.281	0.34	18.213	18.204	0.05
110	18.385	18.337	0.26	18.173	18.151	0.12
120	18.368	18.350	0.10	18.170	18.145	0.14
130	18.286	18.288	-0.01	18.193	18.163	0.16
140	18.208	18.208	0.00	18.204	18.169	0.19
150	18.179	18.163	0.09	18.225	18.206	0.10
160	18.147	18.143	0.02	18.251	18.193	0.32
170	18.139	18.123	0.09	18.250	18.195	0.30
180	18.131	18.116	0.08	18.275	18.217	0.32

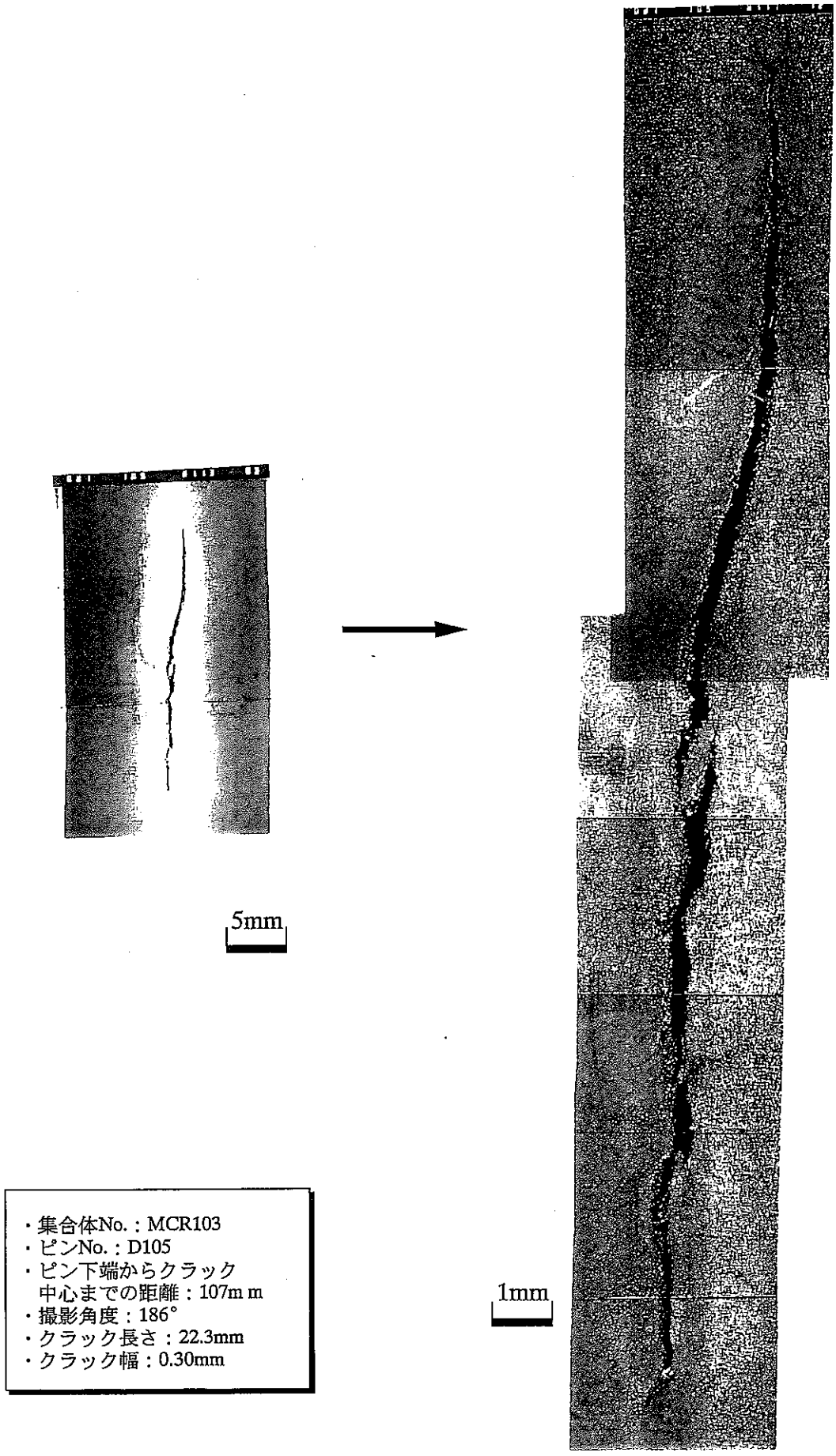


写真３－１　吸収ピンクラック部外観写真（MCR103、D105）

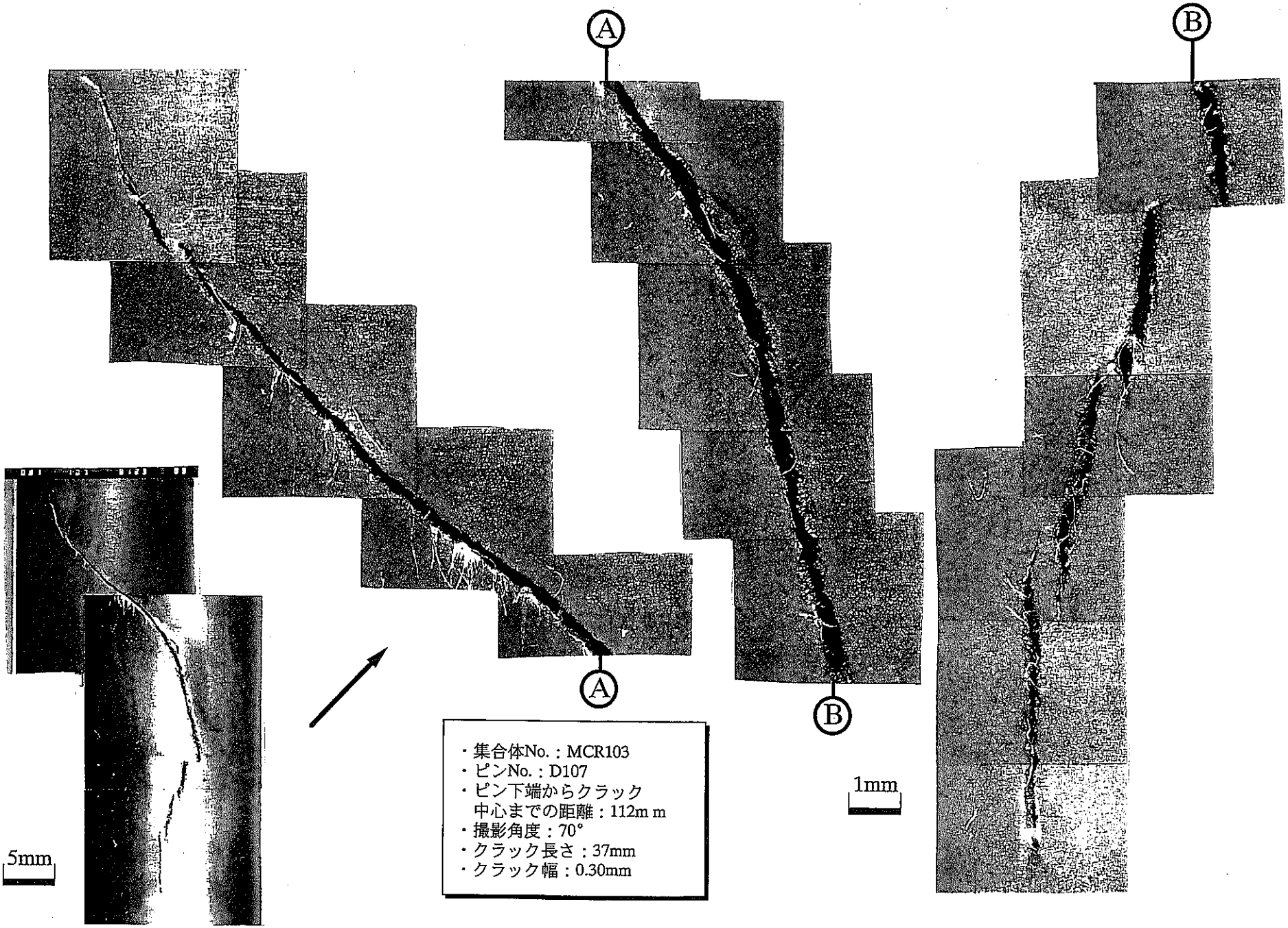
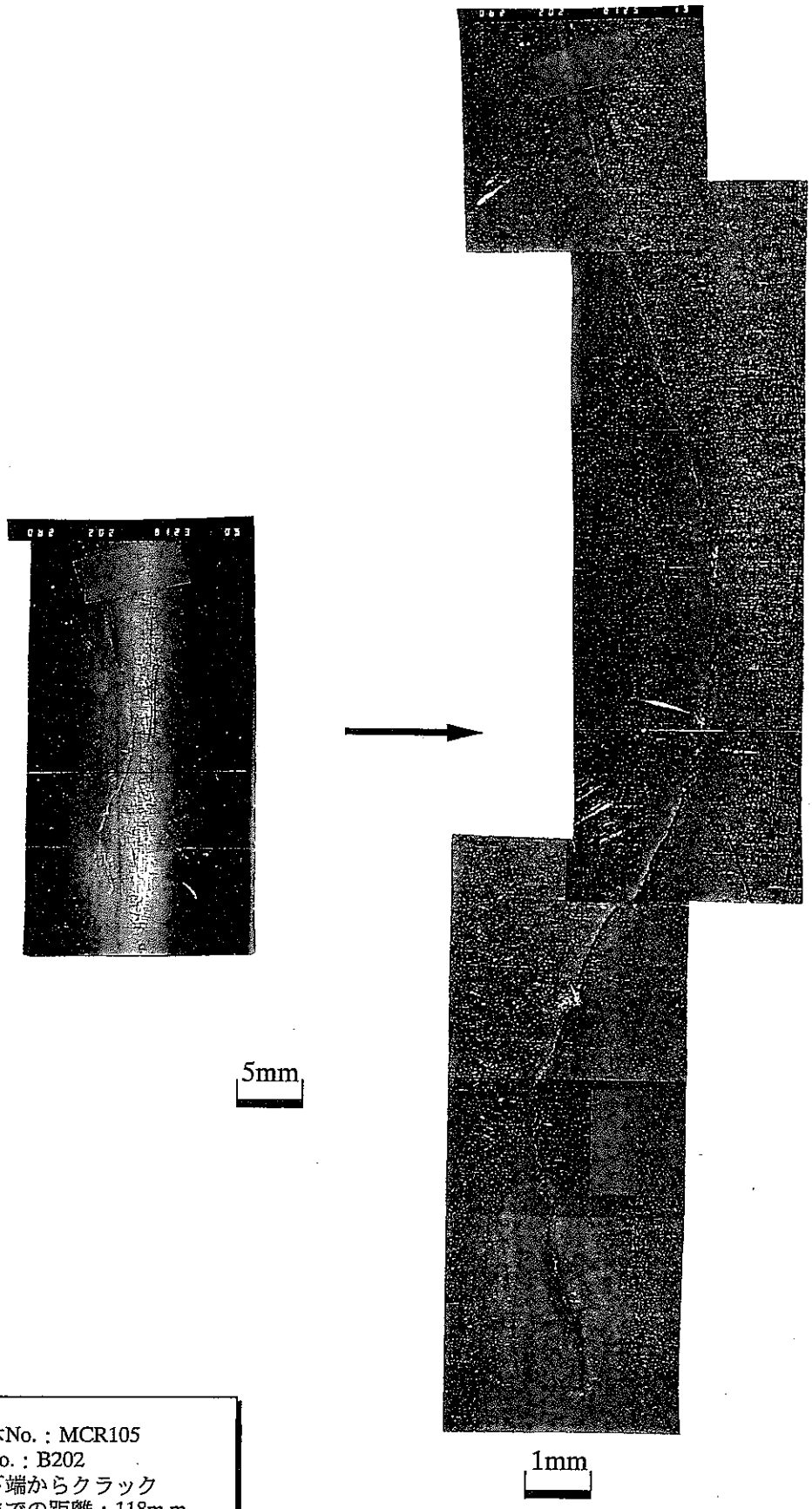
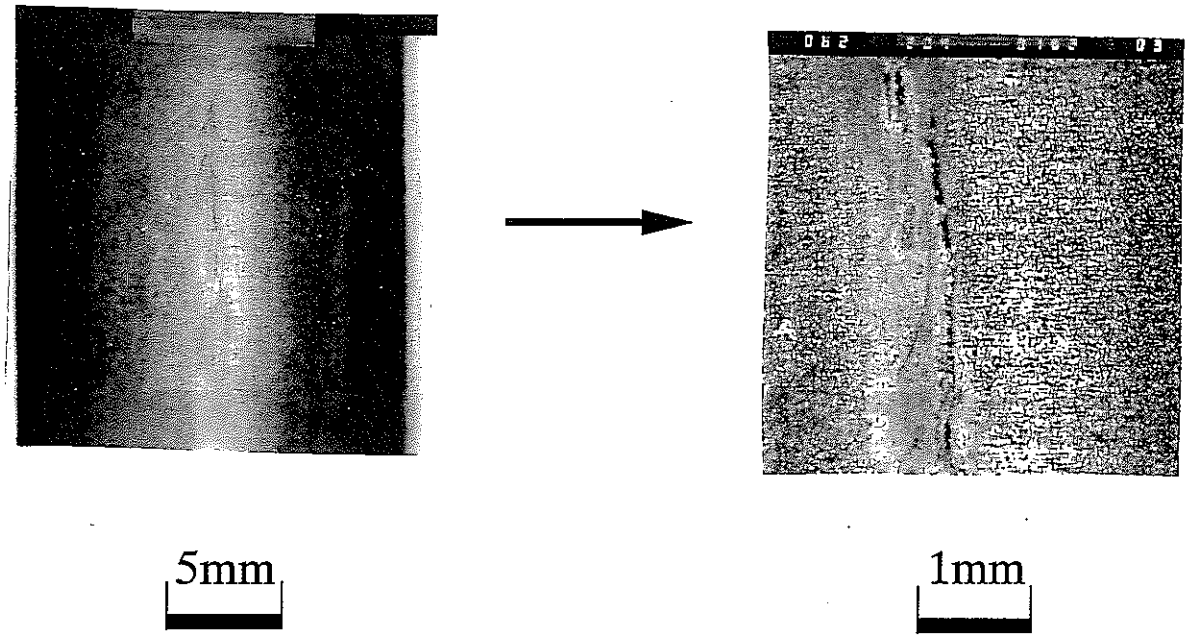


写真３－２　吸収ピンクラック部外観写真（MCR103、D107）



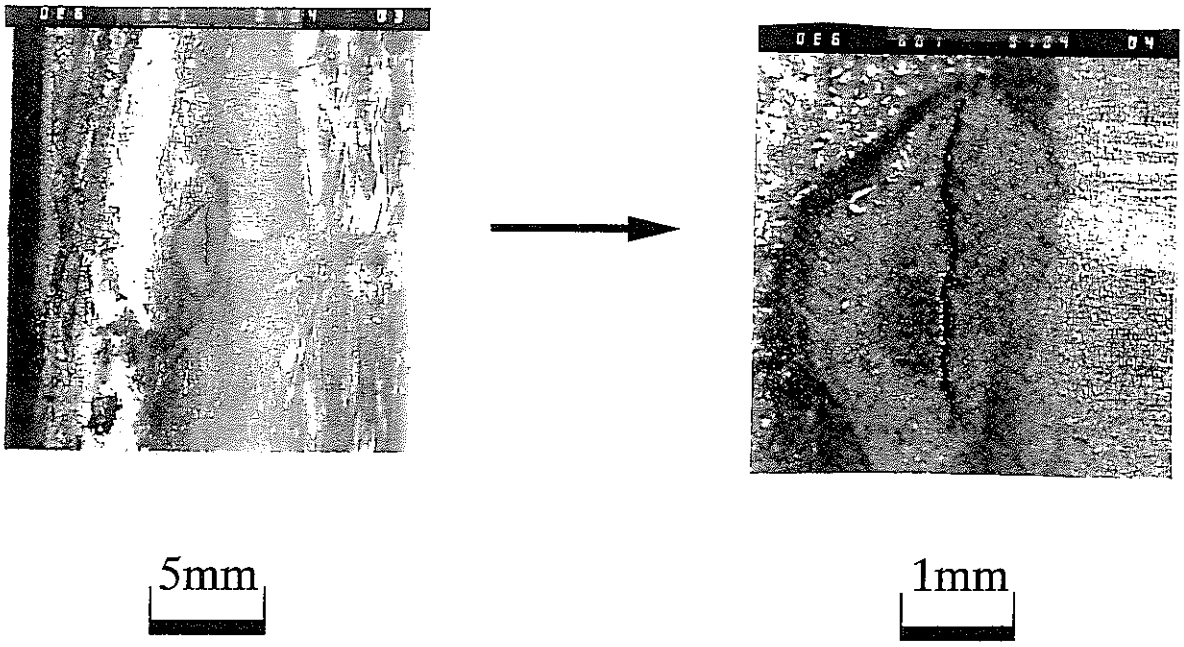
・集合体No.：MCR105
・ピンNo.：B202
・ピン下端からクラック
　中心までの距離：118m m
・撮影角度：93°
・クラック長さ：19.2mm
・クラック幅：0.06mm

写真３－３　吸収ピンクラック部外観写真（MCR105、B202）



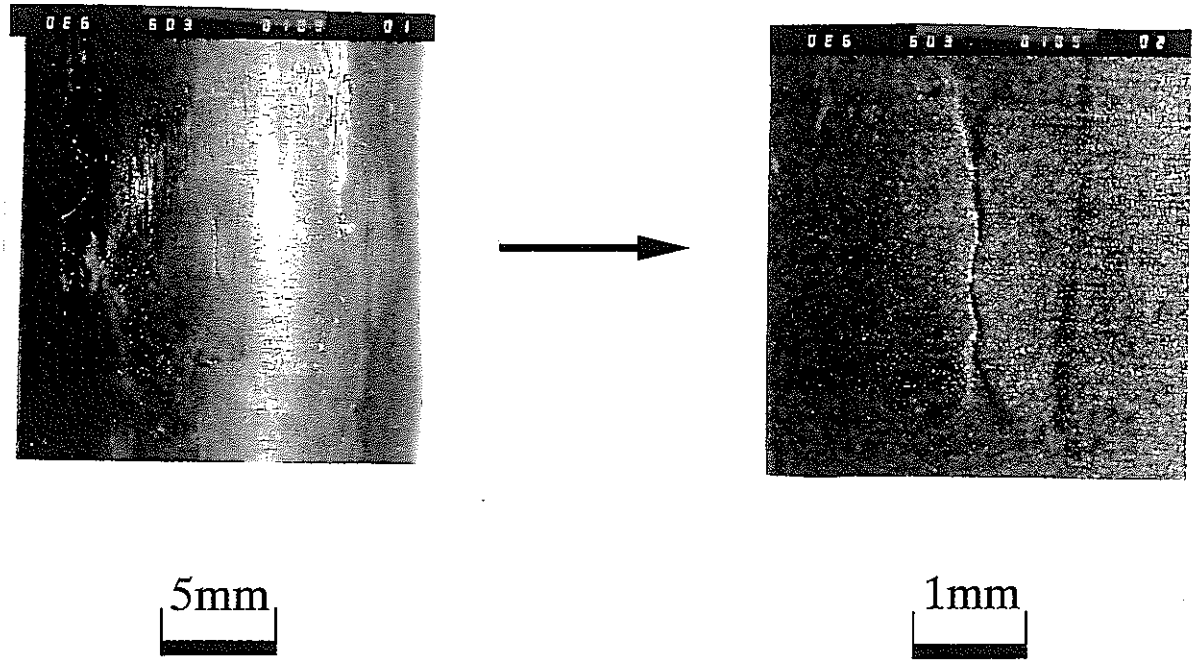
・集合体No.：MCR105
・ピンNo.：B204
・ピン下端からクラック
　中心までの距離：162m m
・撮影角度：33°
・クラック長さ：3.5mm
・クラック幅：0.05mm

写真３－４　吸収ピンクラック部外観写真（MCR105、B204）



・集合体No.：CR301M
・ピンNo.：E601
・ピン下端からクラック
　中心までの距離：104m m
・撮影角度：255°
・クラック長さ：3.1mm
・クラック幅：0.10mm

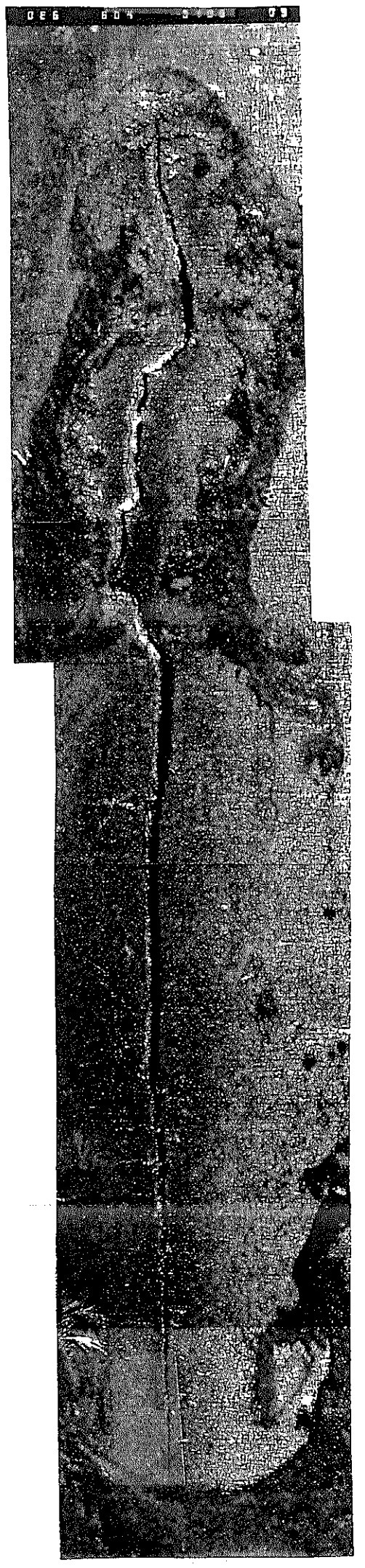
写真３－５　吸収ピンクラック部外観写真（CR301M、E601）



・集合体No.：CR301M
・ピンNo.：E603
・ピン下端からクラック
　中心までの距離：109m m
・撮影角度：109°
・クラック長さ：2.5mm
・クラック幅：0.10mm

写真３－６　吸収ピンクラック部外観写真（CR301M、E603）

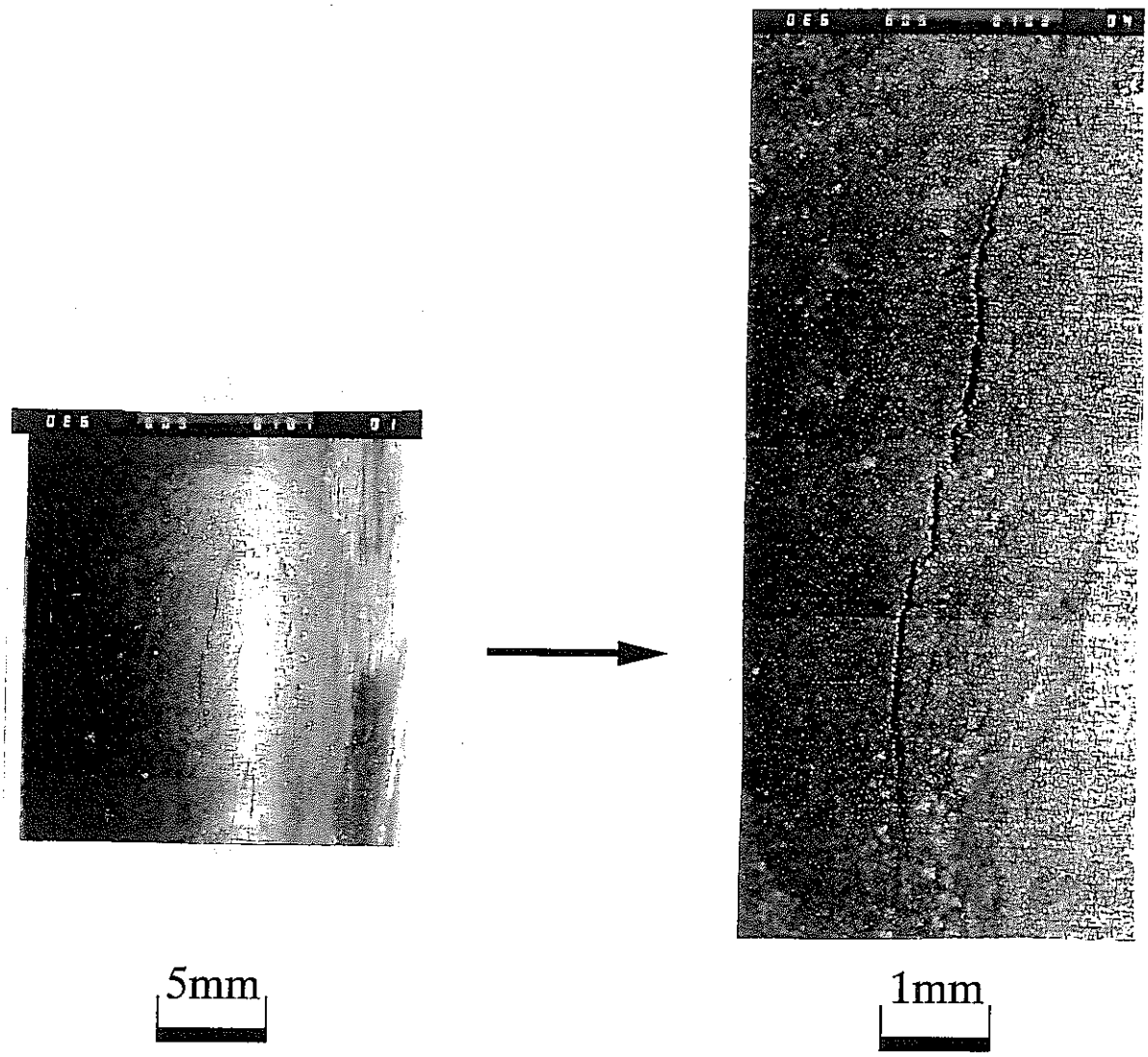
5mm



1mm

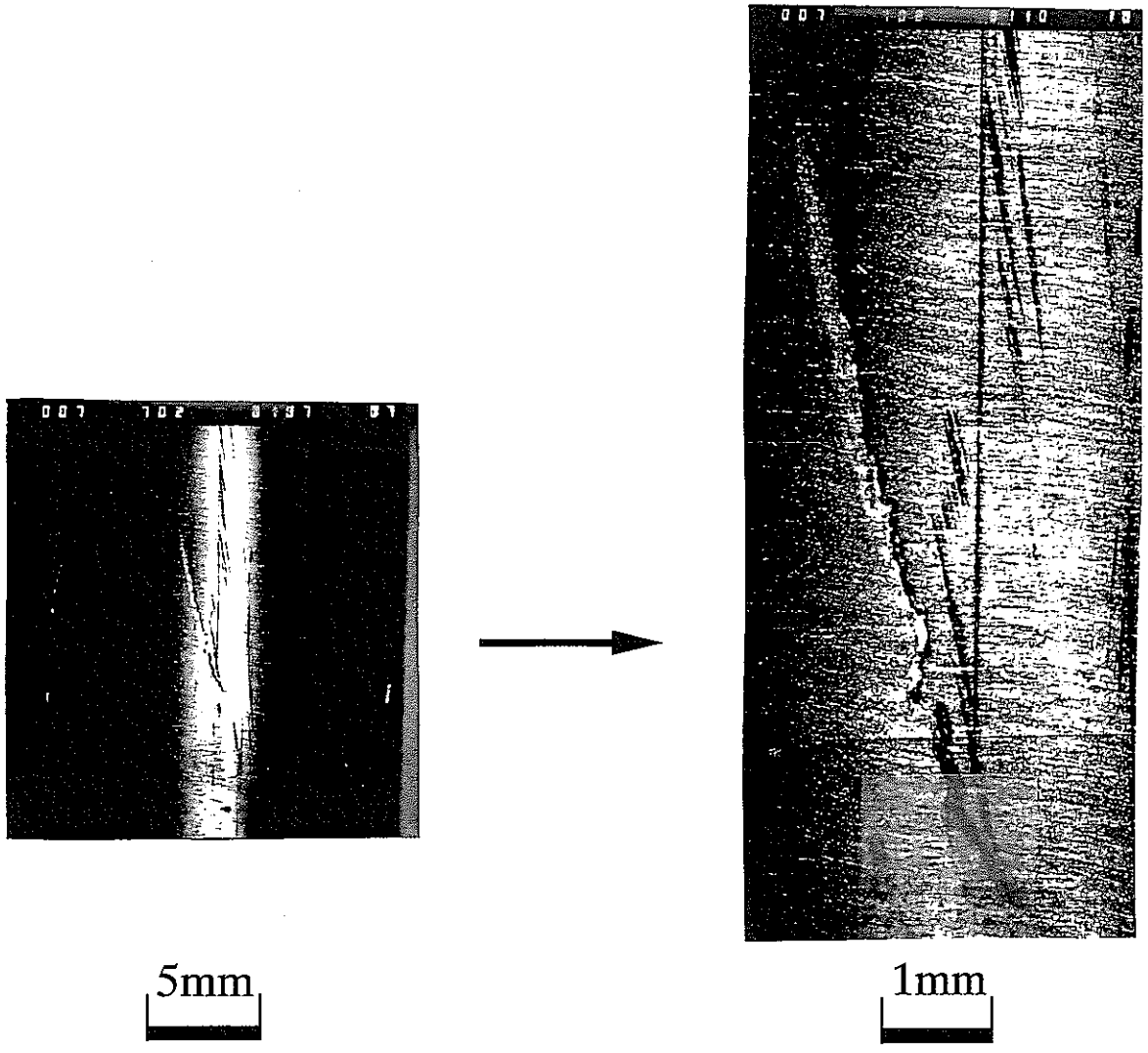
・集合体No.：CR301M
・ピンNo.：E604
・ピン下端からクラック
　中心までの距離：94m m
・撮影角度：288°
・クラック長さ：16.4mm
・クラック幅：0.20mm

写真３－７　吸収ピンクラック部外観写真（CR301M、E604）



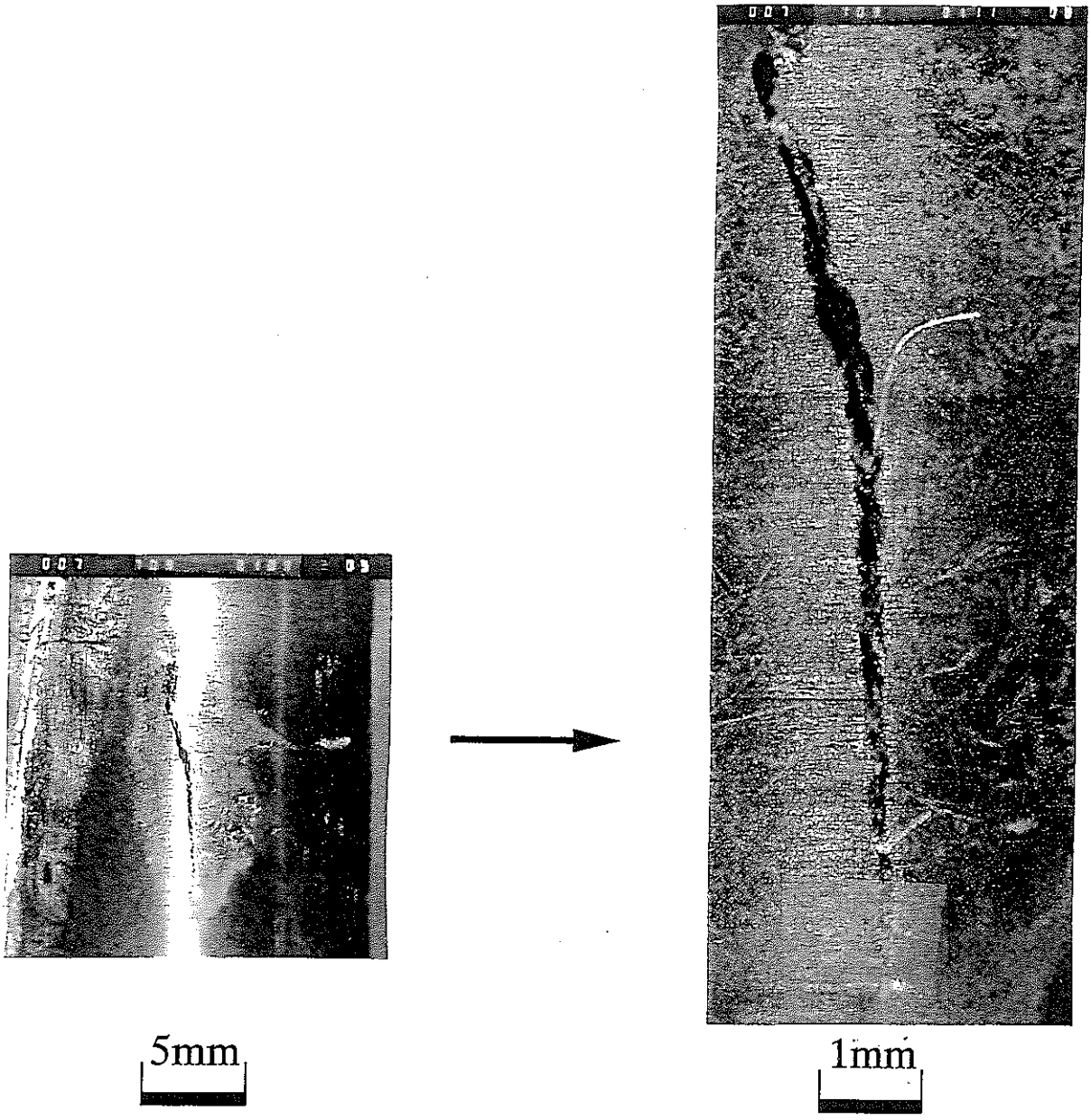
・集合体No.：CR301M
・ピンNo.：E605
・ピン下端からクラック
　中心までの距離：101m m
・撮影角度：14°
・クラック長さ：6.6mm
・クラック幅：0.10mm

写真３－８　吸収ピンクラック部外観写真（CR301M、E605）



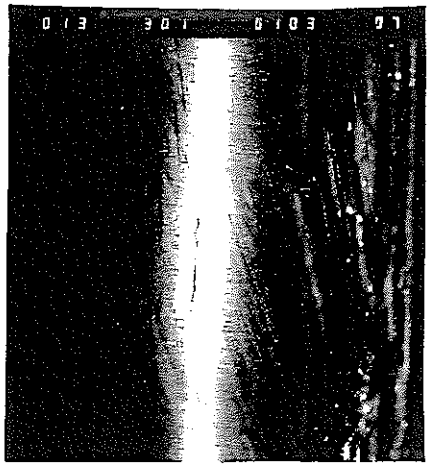
・集合体No.：CRT401
・ピンNo.：G702
・ピン下端からクラック
　中心までの距離：107m m
・撮影角度：150°
・クラック長さ：2.5mm
・クラック幅：0.10mm

写真３－９　吸収ピンクラック部外観写真（CRT401、G702）

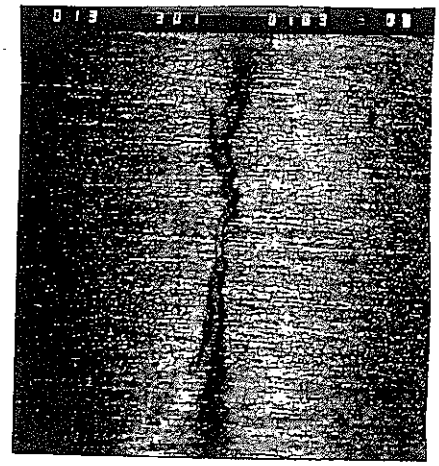


・集合体No.：CRT401
・ピンNo.：G703
・ピン下端からクラック
　中心までの距離：110m m
・撮影角度：209°
・クラック長さ：9.3mm
・クラック幅：0.20mm

写真３－１０　吸収ピンクラック部外観写真（CRT401、G703）



5mm

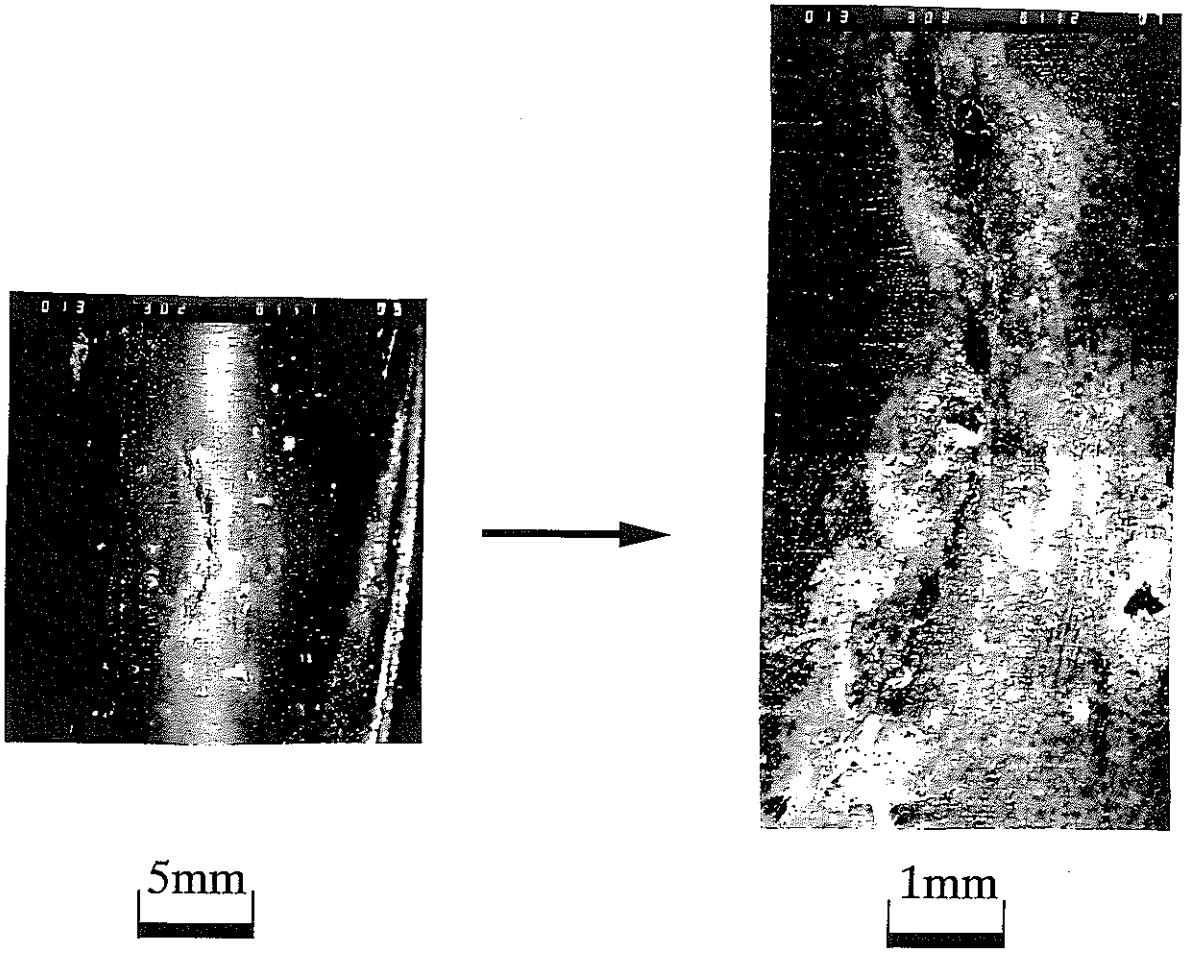


1mm

0.5mm

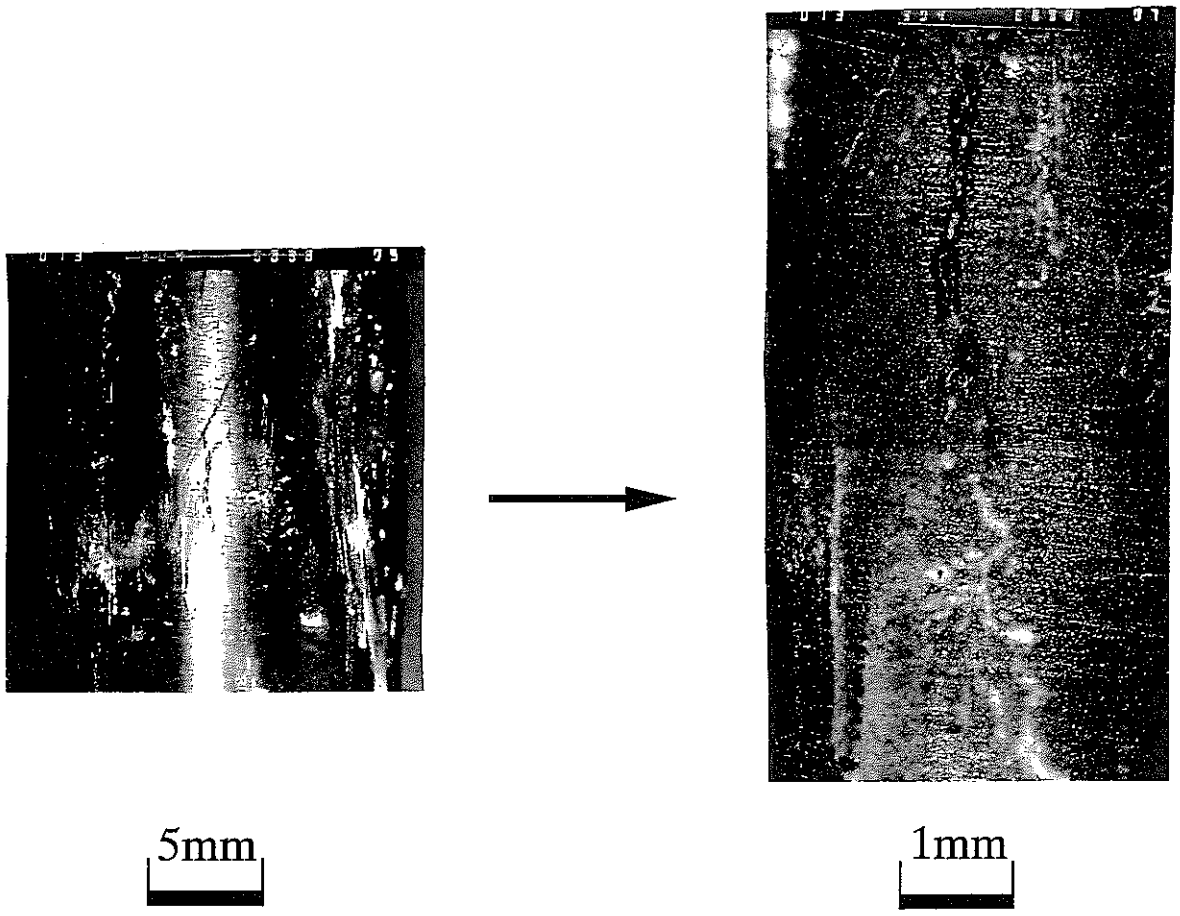
・集合体No.：CRT402
・ピンNo.：H301
・ピン下端からクラック
　中心までの距離：104m m
・撮影角度：16°
・クラック長さ：3.0mm
・クラック幅：0.10mm

写真３－１１　吸収ピンクラック部外観写真（CRT402、H301）



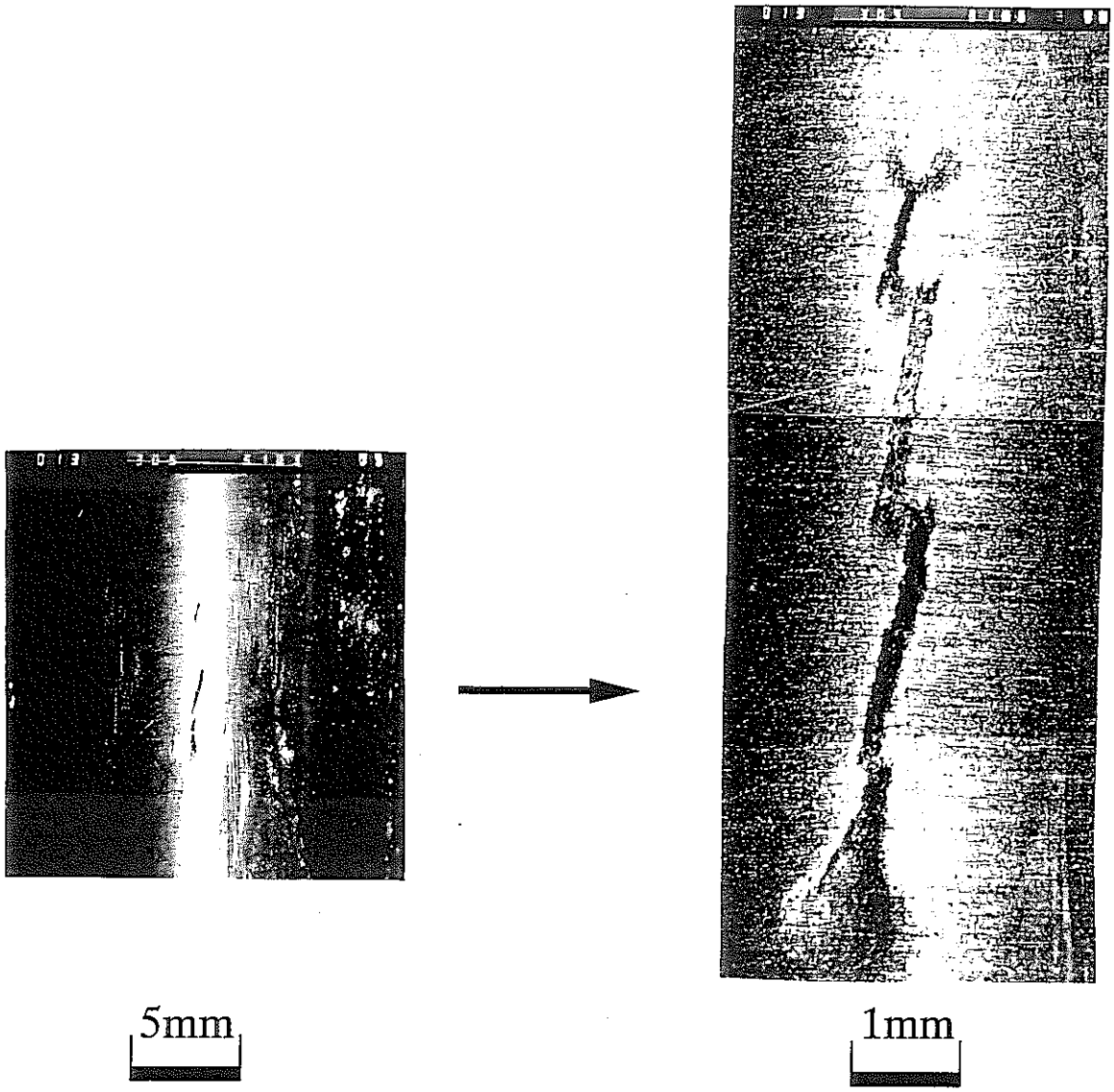
・集合体No.：CRT402
・ピンNo.：H302
・ピン下端からクラック
　中心までの距離：112m m
・撮影角度：351°
・クラック長さ：5.6mm
・クラック幅：0.10mm

写真３－１２　吸収ピンクラック部外観写真（CRT402、H302）



・集合体No.：CRT402
・ピンNo.：H304
・ピン下端からクラック
　中心までの距離：99m m
・撮影角度：99°
・クラック長さ：3.9mm
・クラック幅：0.10mm

写真３－１３　吸収ピンクラック部外観写真（CRT402、H304）



・集合体No.：CRT402
・ピンNo.：H305
・ピン下端からクラック
　中心までの距離：104m m
・撮影角度：38°
・クラック長さ：5.8mm
・クラック幅：0.10mm

写真３－１４　吸収ピンクラック部外観写真（CRT402、H305）

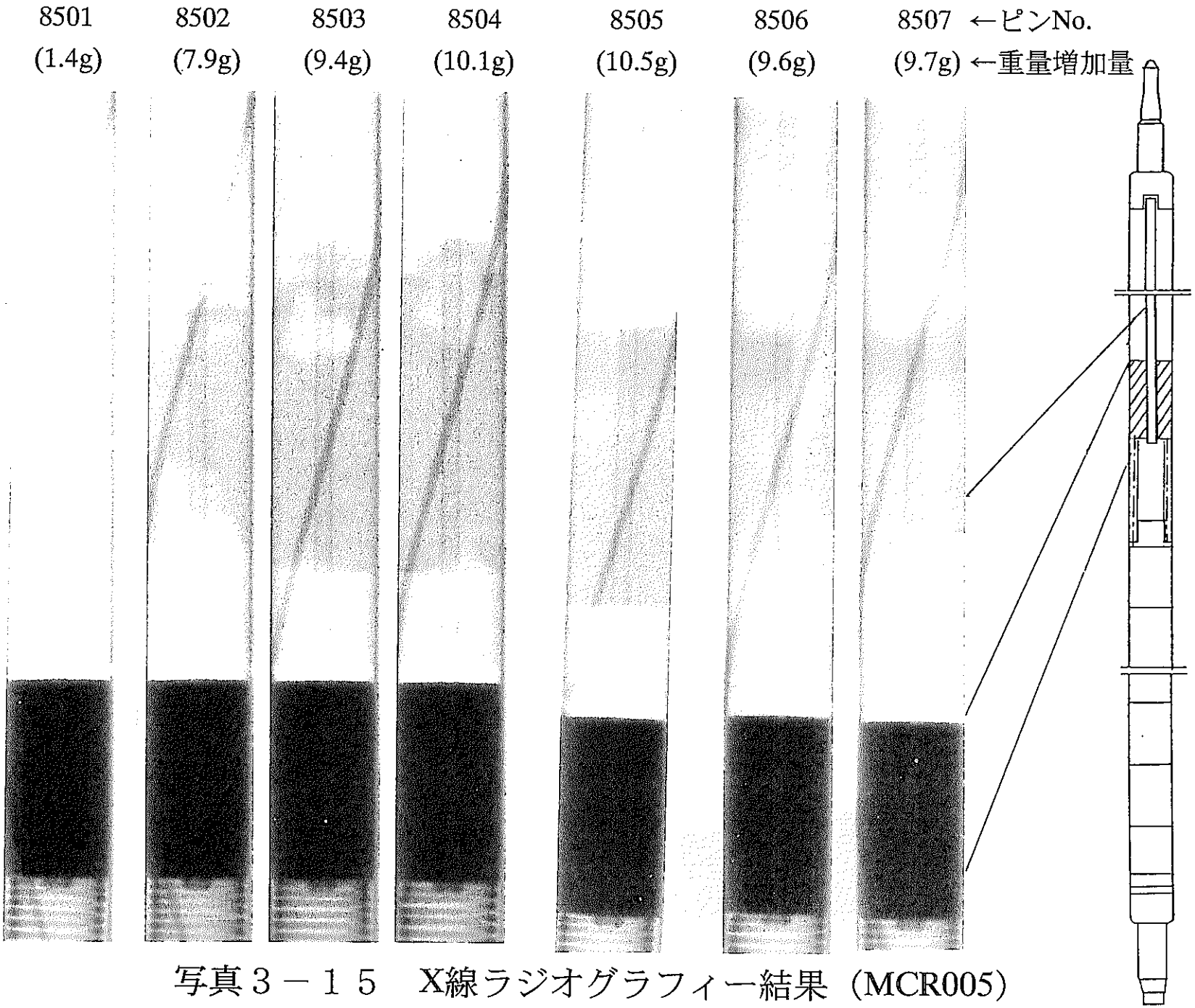
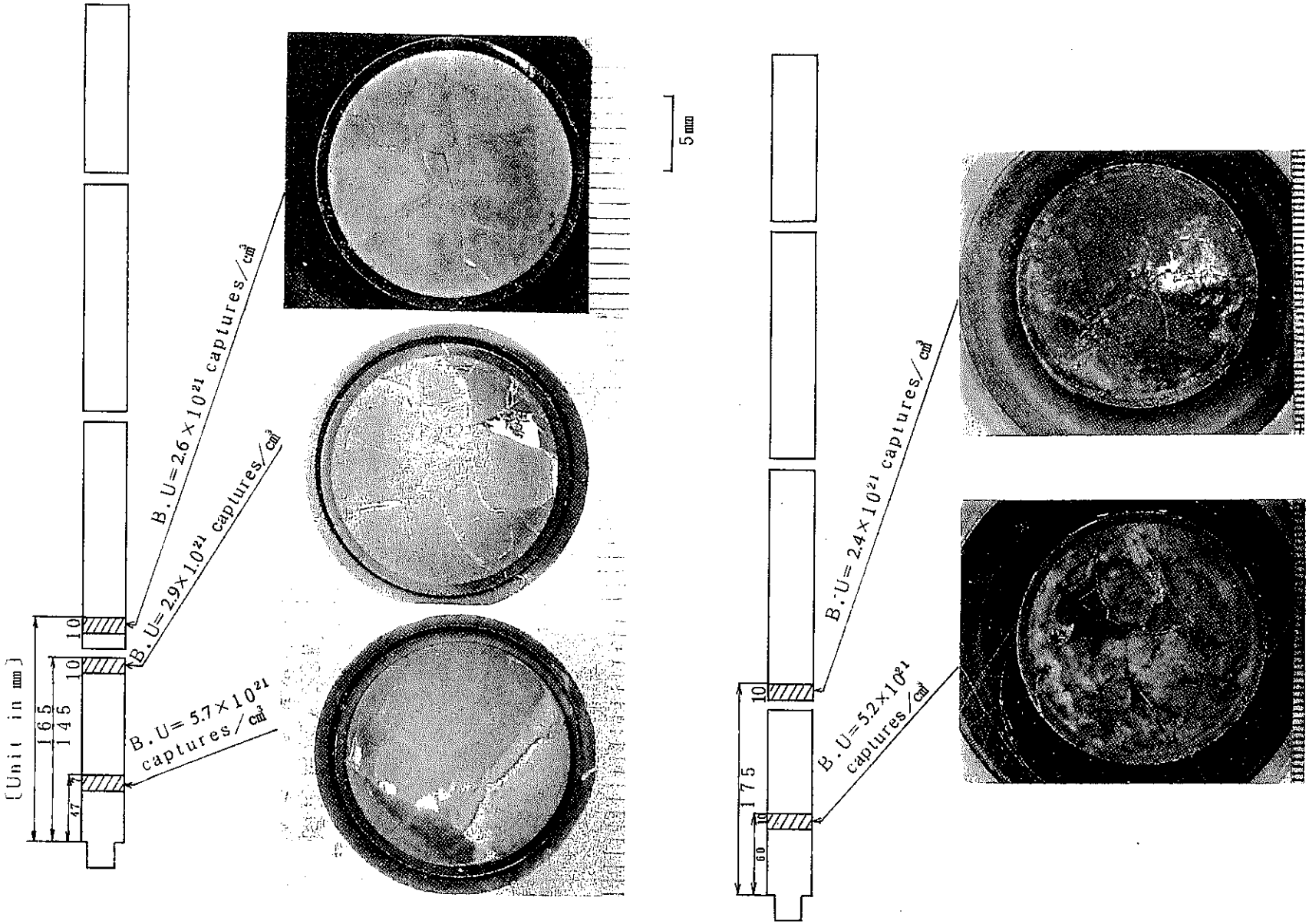
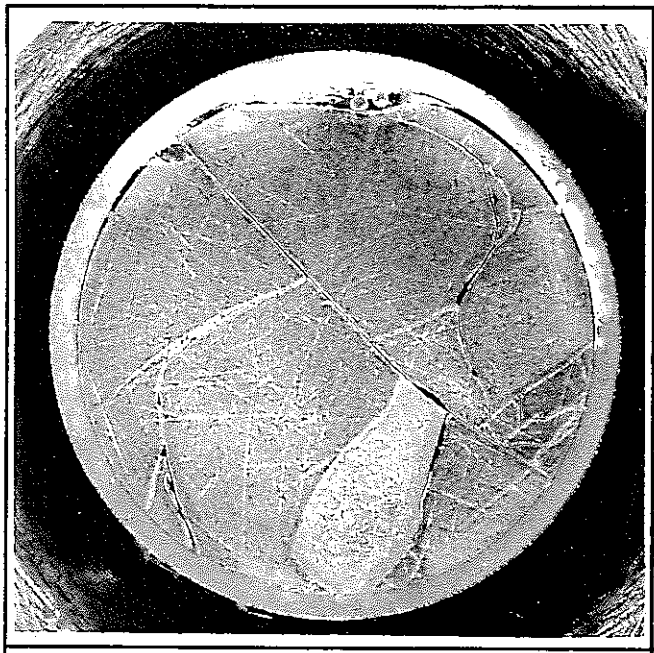


写真３－１５　X線ラジオグラフィー結果（MCR005）



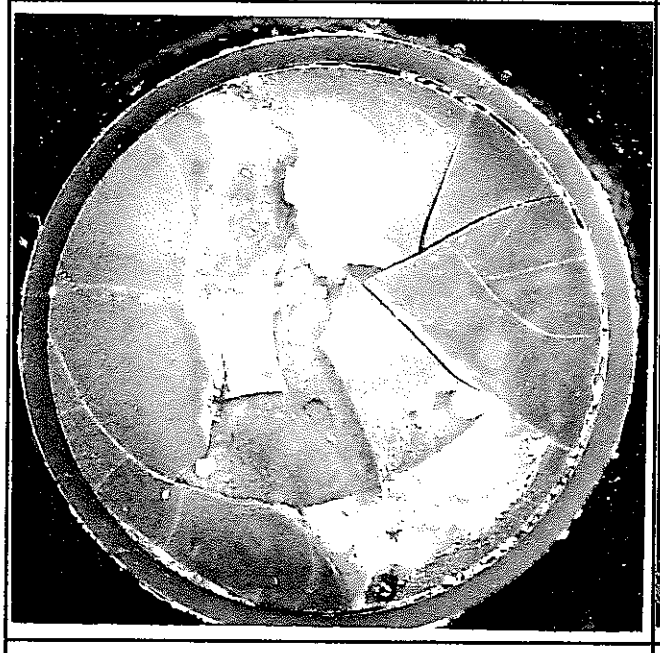
ピンNo：8501　　ピンNo：8507

写真３－１６　吸収ピン断面金相写真（ＭＣＲ００５）



試料No.：D30454
燃焼度：24×10^{26}cap／m^3
(D.K.K.ペレット)

試料No.：D30424
燃焼度：68×10^{26}cap／m^3
(D.K.K.ペレット)



試料No.：D30762
燃焼度：30×10^{26}cap／m^3
(E.P.ペレット)

試料No.：D30732
燃焼度：68×10^{26}cap／m^3
(E.P.ペレット)

写真３－１７　吸収ピン断面金相写真（ＴＣＲ２０１）

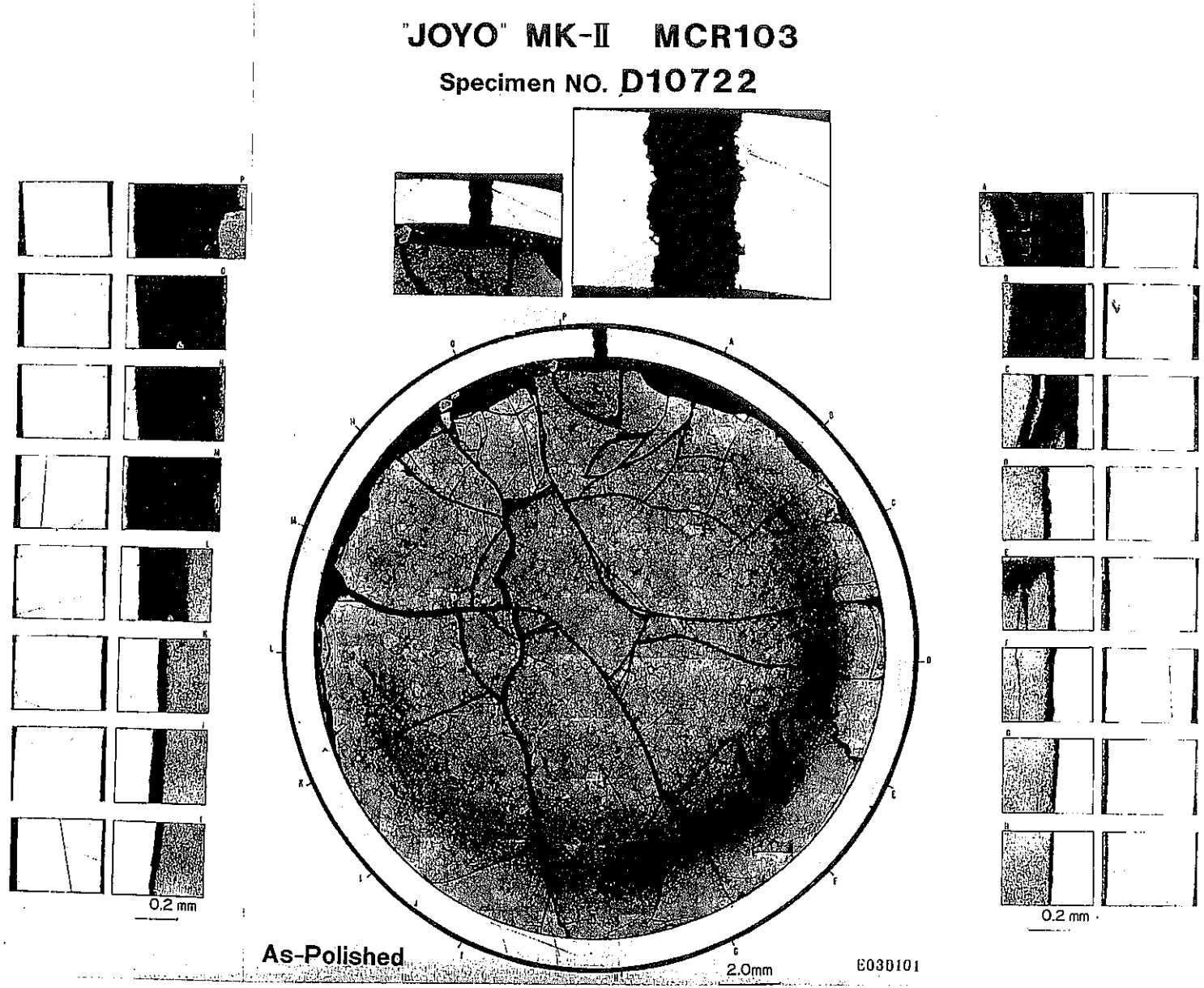


写真3-18　吸収ピン断面金相写真　(MCR103)

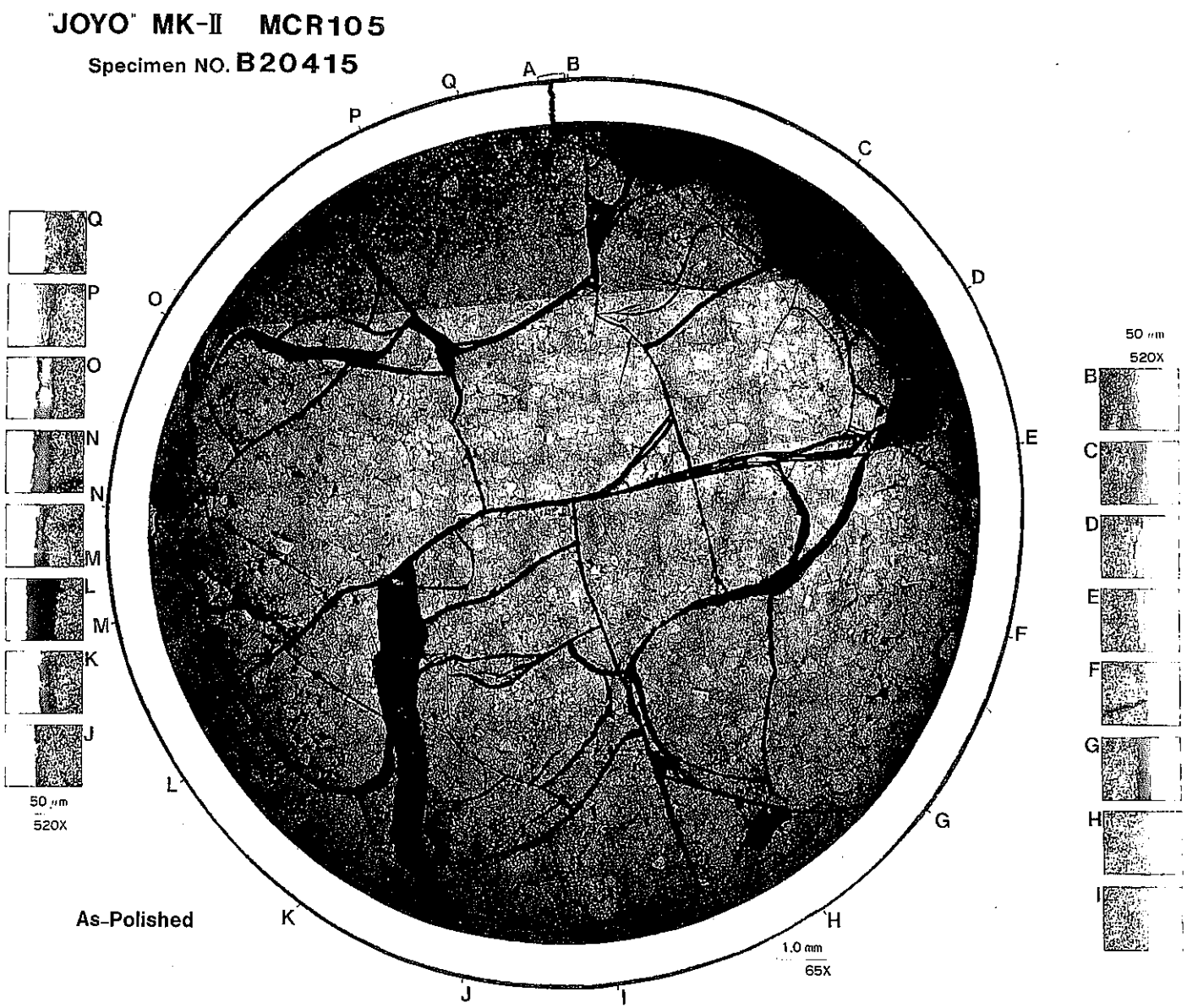


写真3-19　吸収ピン断面金相写真　(MCR105)

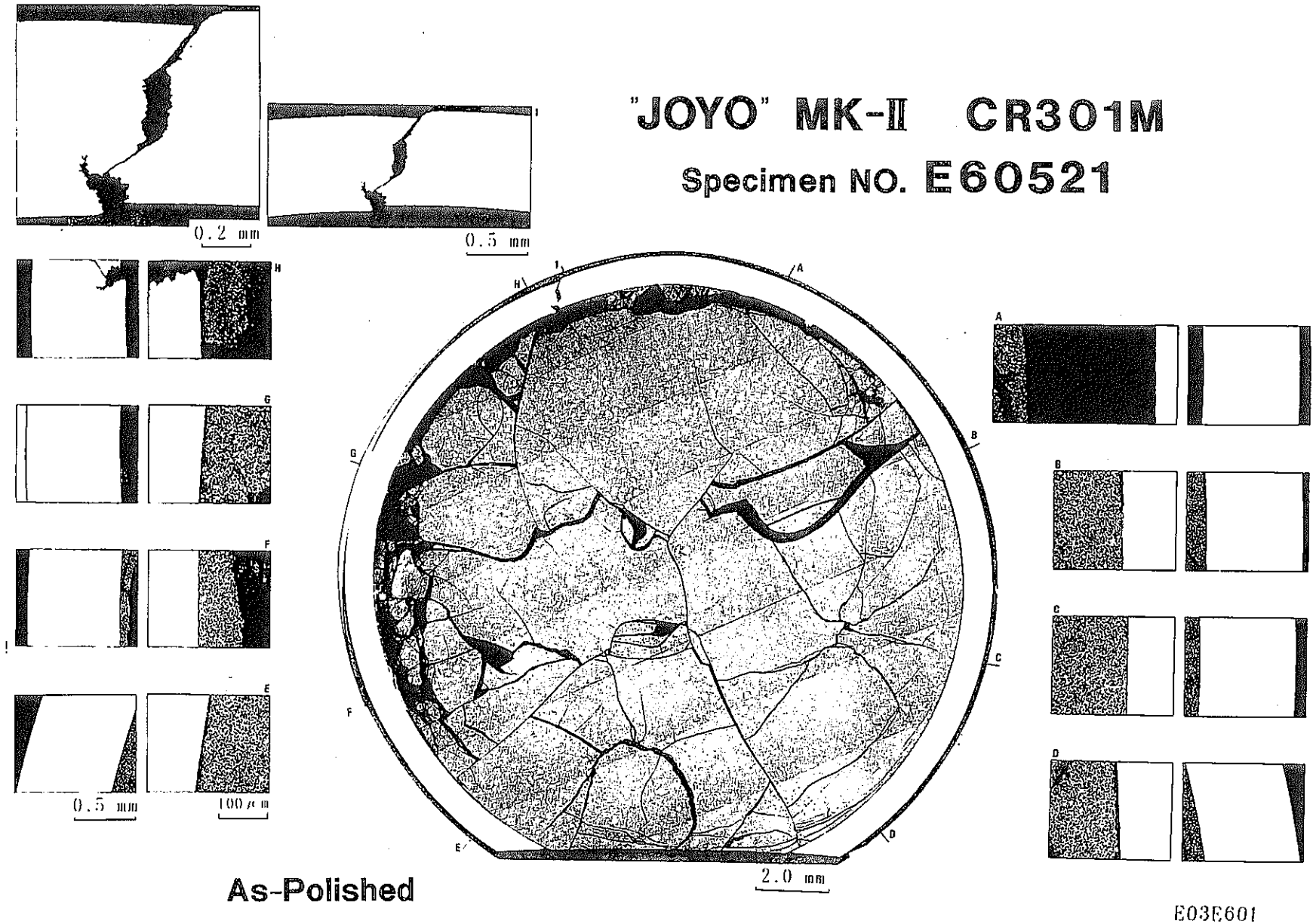
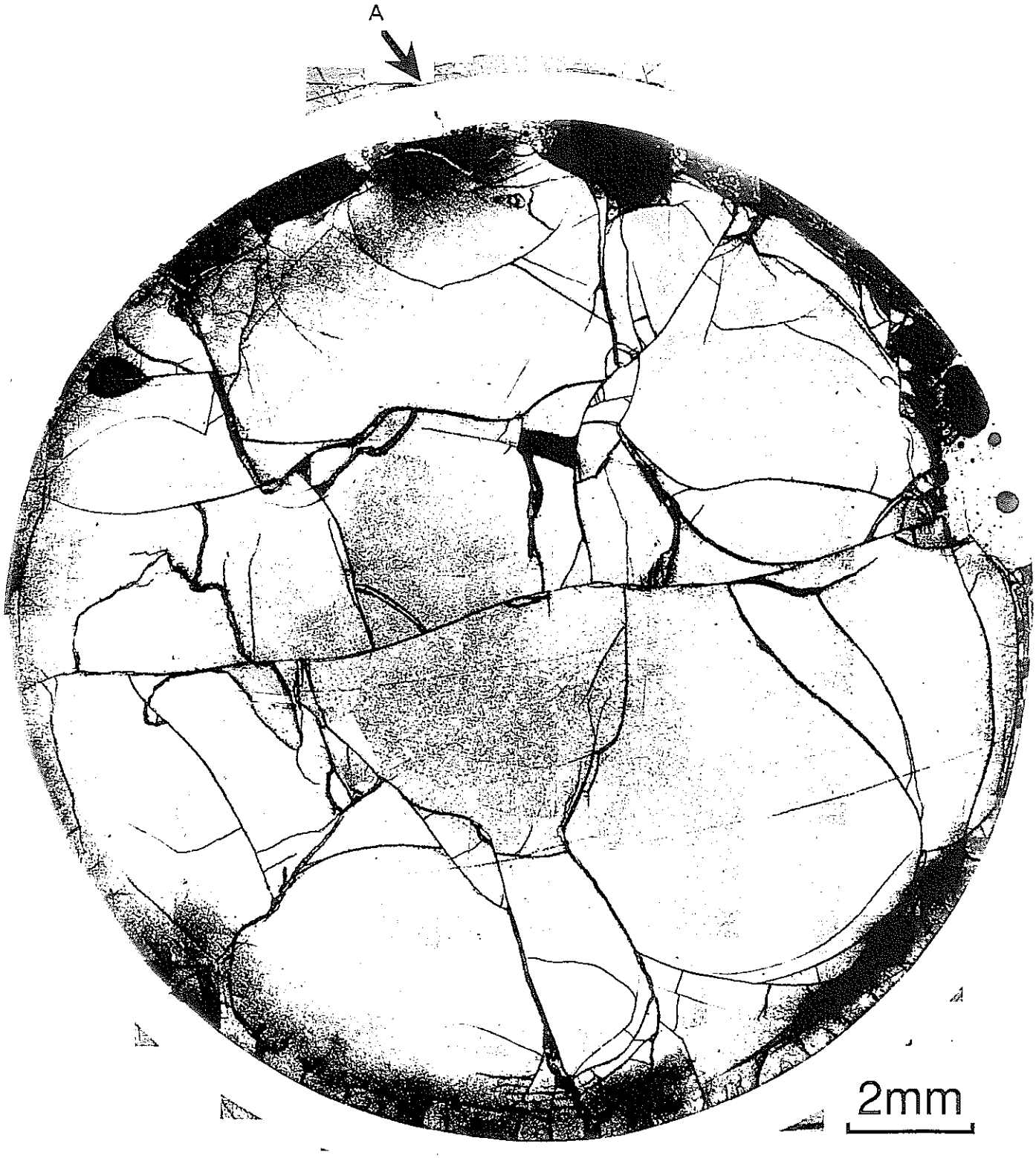


写真3-20　吸収ピン断面金相写真　(CR301M)



ﾋﾟﾝNo. :H301
試料No. :H301O2
D.F.P.B :104mm

写真3-21　吸収ピン断面金相写真　(CRT402)

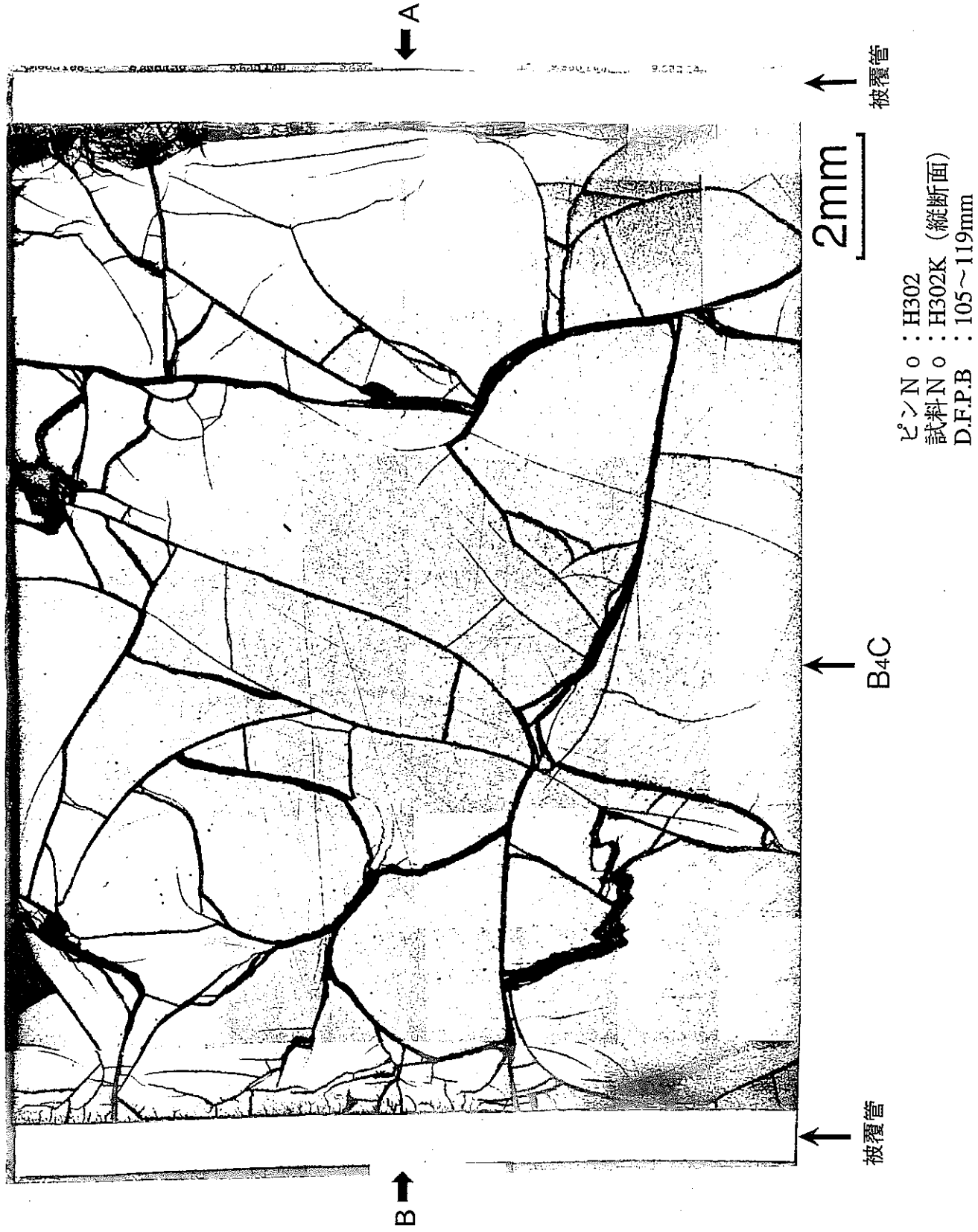


写真3-22　吸収ピン縦断面金相写真　(CRT402)

撮影位置A（非接触部)

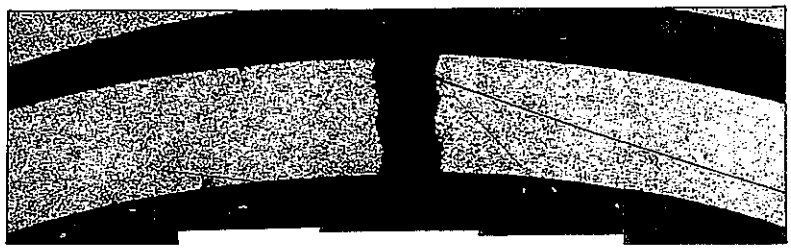
写真3-23　吸収ピン縦断面金相写真　(CRT402)

撮影位置Ｂ（接触部）

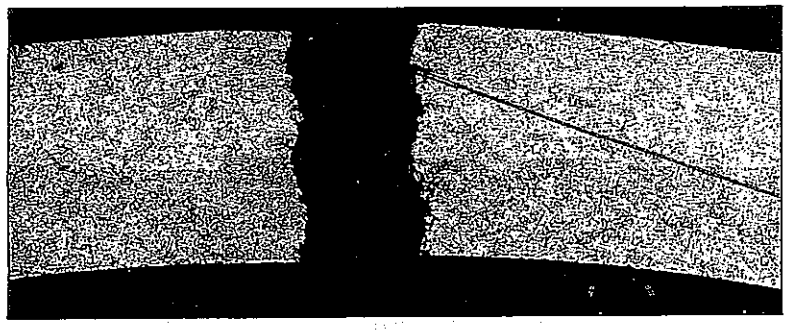
写真3-24　吸収ピン縦断面金相　(CRT402)

"JOYO" MK-Ⅱ MCR103

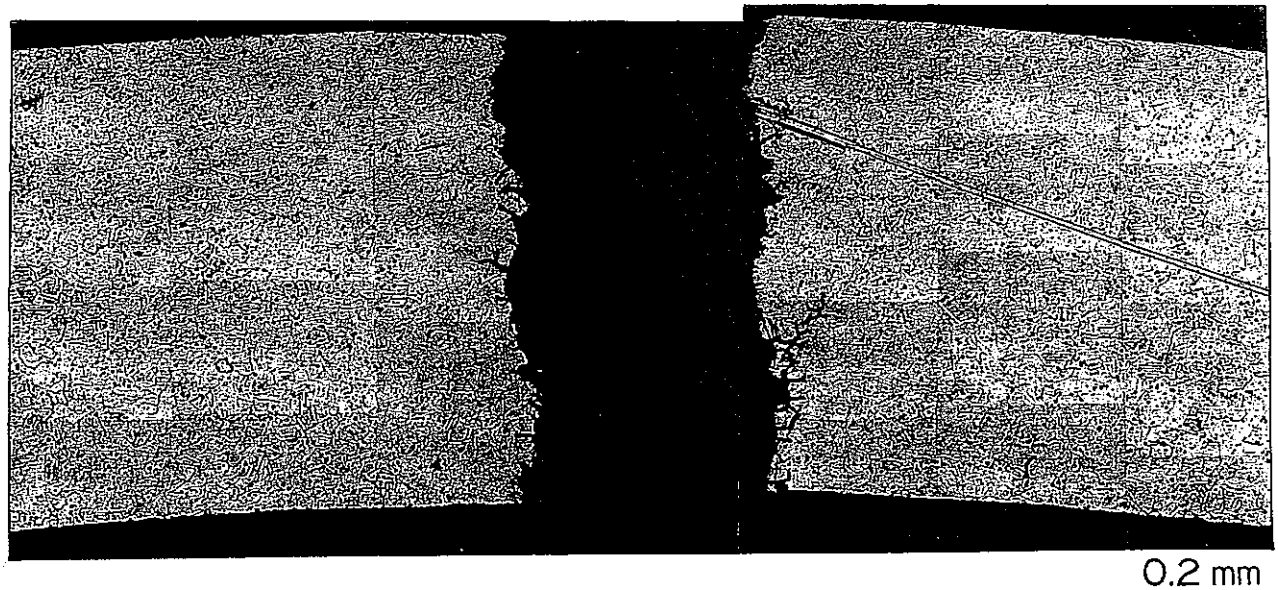
Specimen NO. D10722



1.0 mm



0.5 mm



0.2 mm

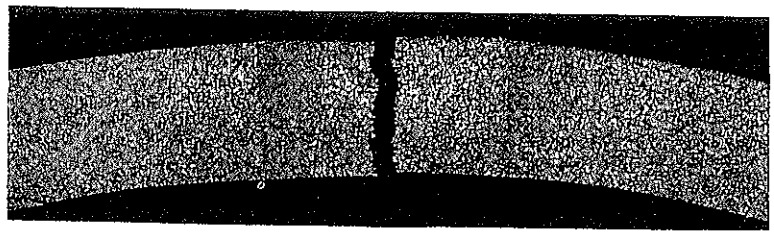
As-Etched

E03D102

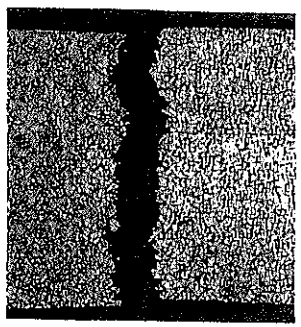
写真3-25　吸収ピン断面金相写真　(MCR103　ｸﾗｯｸ部)

"JOYO" MK－II MCR105

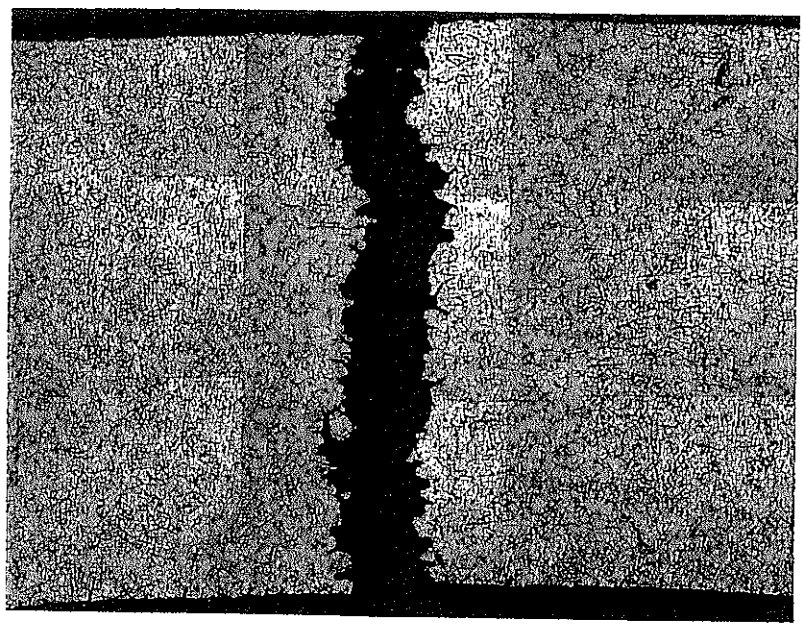
Specimen No. B20415



1.0mm



0.5mm



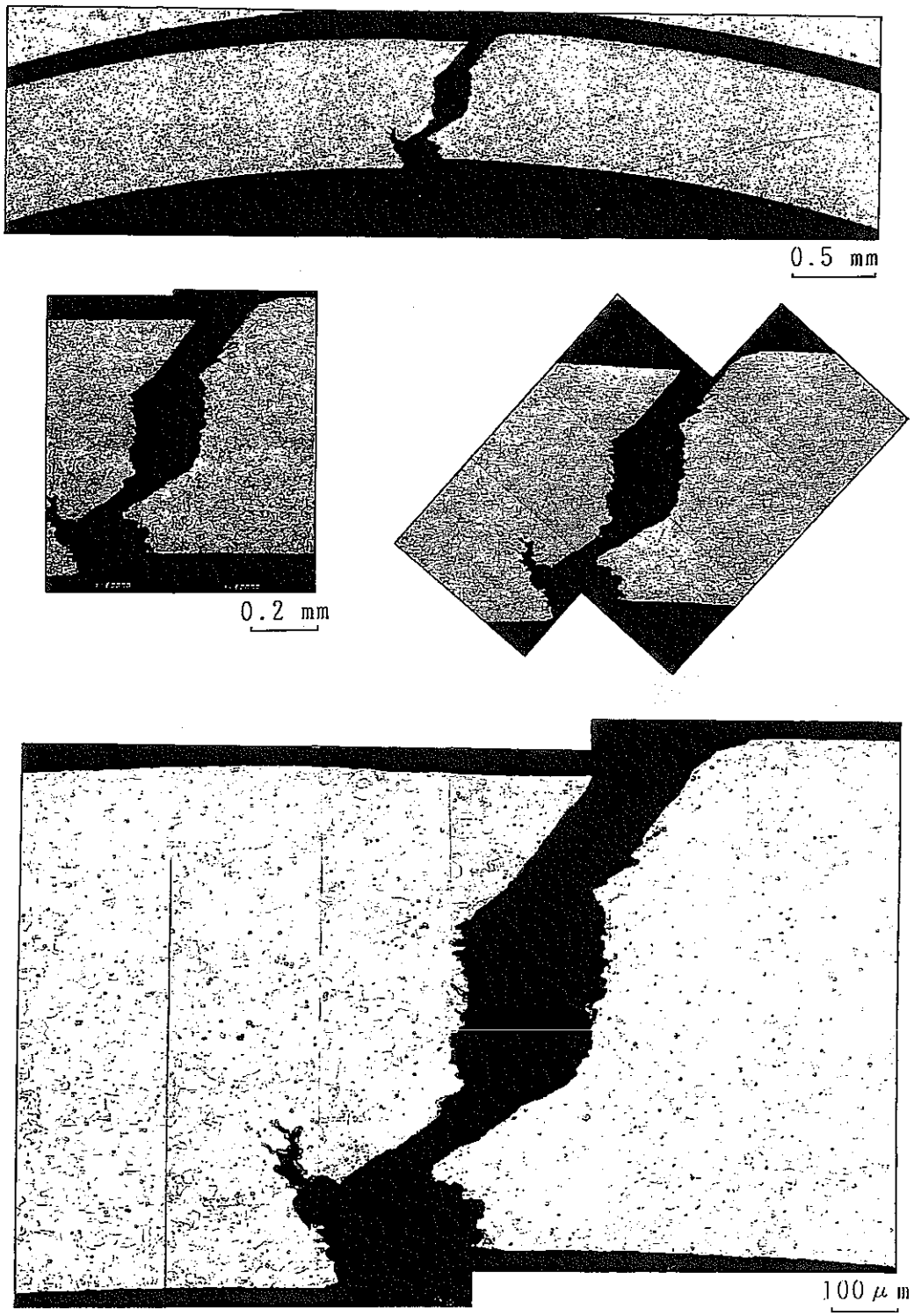
0.2mm

As-Etched

写真3-26　吸収ピン断面金相写真　(MCR105　ｸﾗｯｸ部)

"JOYO" MK-II CR301M

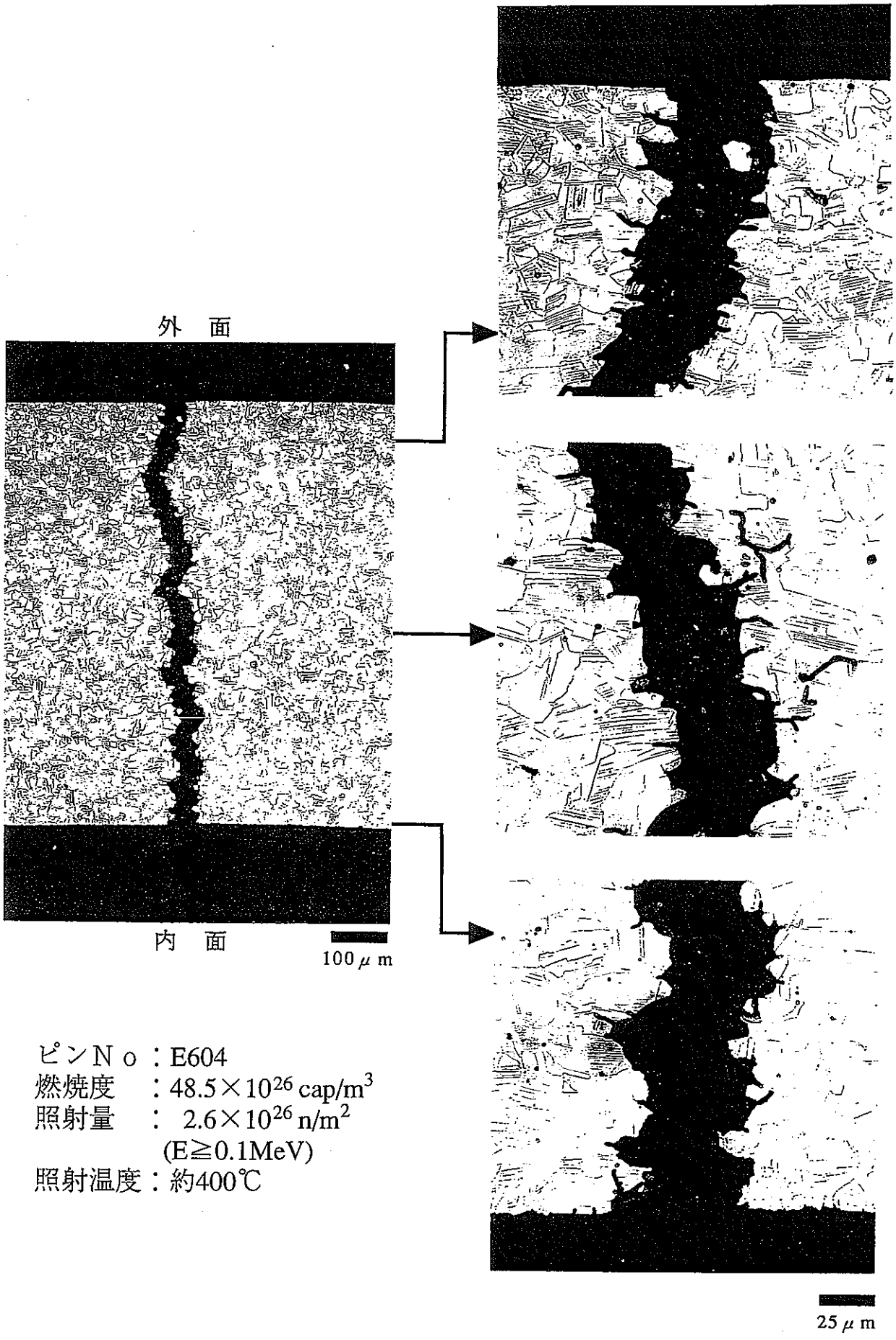
Specimen NO. E60521



Etched

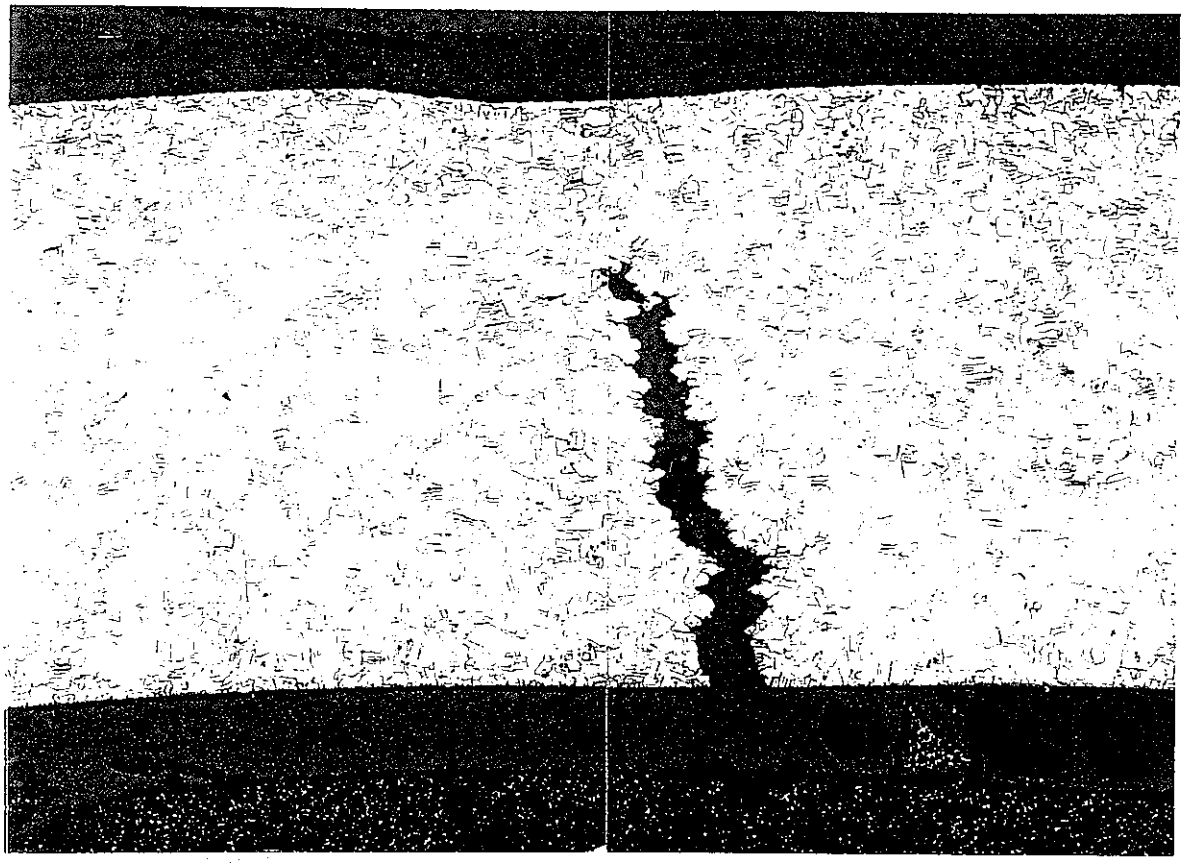
E03E602

写真3-27　吸収ピン断面金相写真　(CR301M　ｸﾗｯｸ部)



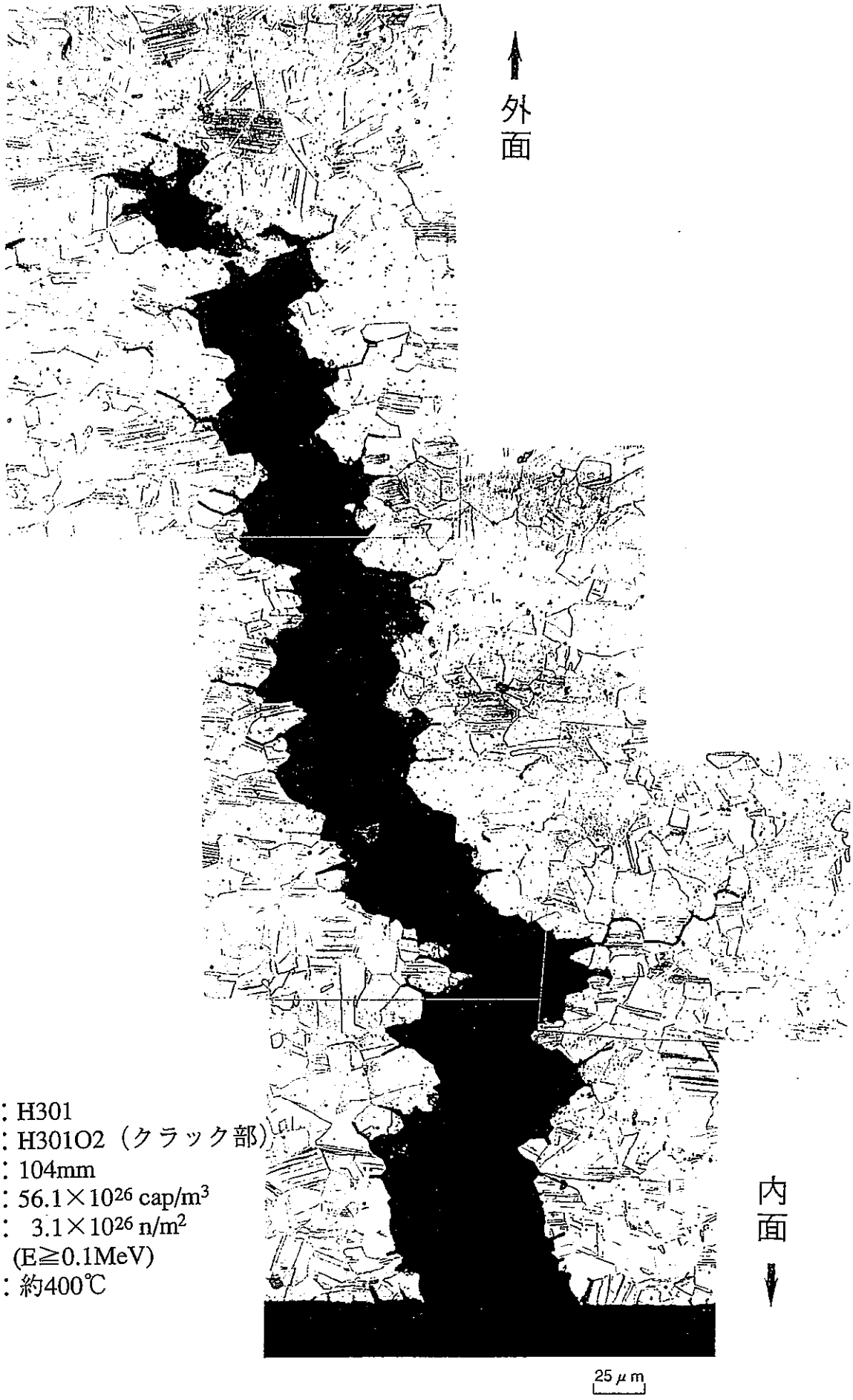
ピンＮｏ：E604
燃焼度　：48.5×10^{26} cap/m^3
照射量　：　2.6×10^{26} n/m^2
(E≧0.1MeV)
照射温度：約400℃

写真3-28　吸収ピン断面金相写真　(CR301M　ｸﾗｯｸ部)



ピンＮｏ：H301
試料Ｎｏ：H301O2（クラック部）
D.F.P.B　：104mm
燃焼度　：56.1×10^{26} cap/m^3
照射量　：　3.1×10^{26} n/m^2
(E≧0.1MeV)
照射温度：約400℃

写真3-29　吸収ピン断面金相写真　(CRT402　ｸﾗｯｸ部)



ピンＮｏ：H301
試料Ｎｏ：H301O2（クラック部）
D.F.P.B　：104mm
燃焼度　：56.1×10^{26} cap/m^3
照射量　：3.1×10^{26} n/m^2
(E≧0.1MeV)
照射温度：約400℃

写真3-30　吸収ピン断面金相写真　(CRT402　クラック部)

外面

内面

25 μm

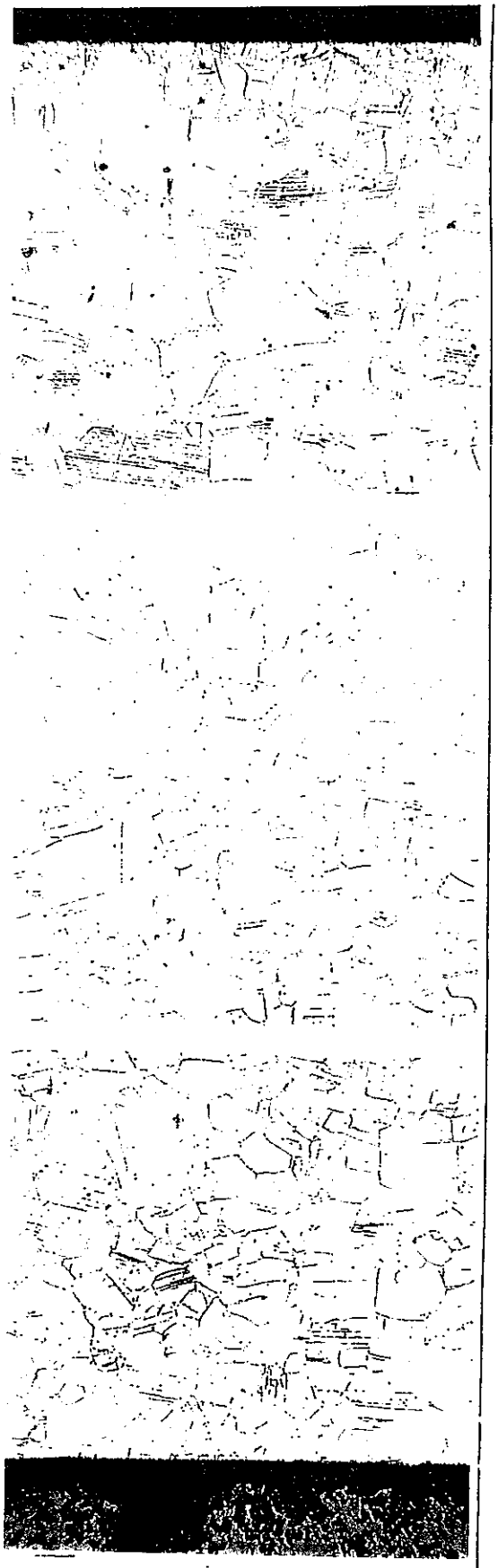
ピンＮｏ：H301
試料Ｎｏ：H301O2（クラック部）
D.F.P.B　：104mm
燃焼度　：56.1×10^{26} cap/m^3
照射量　：3.1×10^{26} n/m^2
(E≧0.1MeV)
照射温度：約400℃

写真3-31　吸収ピン断面金相写真　(CRT402)

外面

内面

100 μm



25 μm

ピンＮｏ：H301
試料Ｎｏ：H301O2（クラック部）
D.F.P.B　：104mm
燃焼度　：56.1×10^{26} cap/m^3
照射量　：3.1×10^{26} n/m^2
(E≧0.1MeV)
照射温度：約400℃

写真3-32　吸収ピン断面金相写真　(CRT402)

外面

内面

ピンＮｏ：H302
試料Ｎｏ：H302K（ｸﾗｯｸの90°）
D.F.P.B　：161～174mm
燃焼度　：56.1×10^{26} cap/m^3
照射量　：3.1×10^{26} n/m^2
(E≧0.1MeV)
照射温度：約400℃

写真3-33　吸収ピン断面金相写真　(CRT402　ｸﾗｯｸ部)

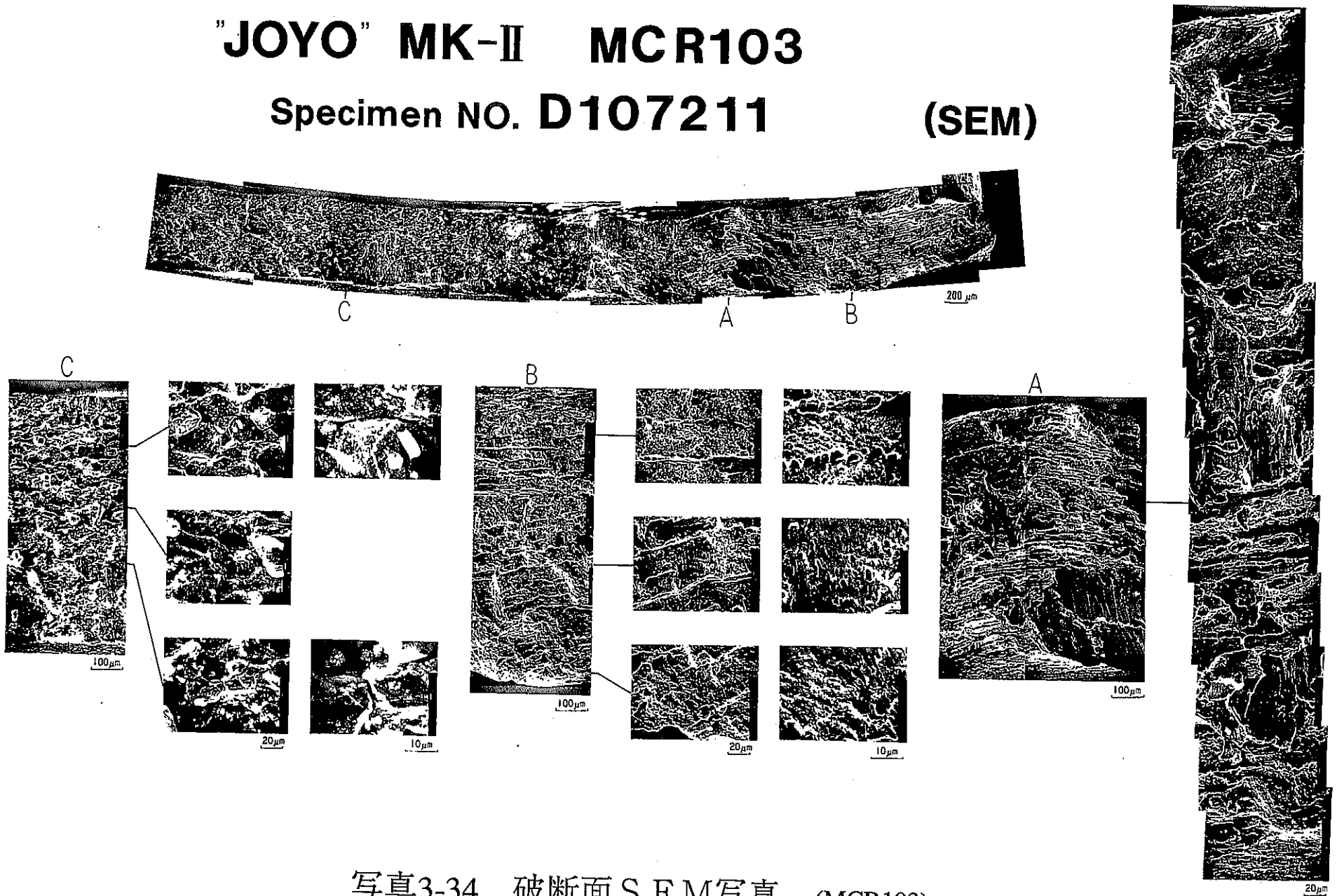


写真3-34　破断面ＳＥＭ写真　(MCR103)

"JOYO" MK-Ⅱ CR301M

Specimen NO. E60512C

(SEM)

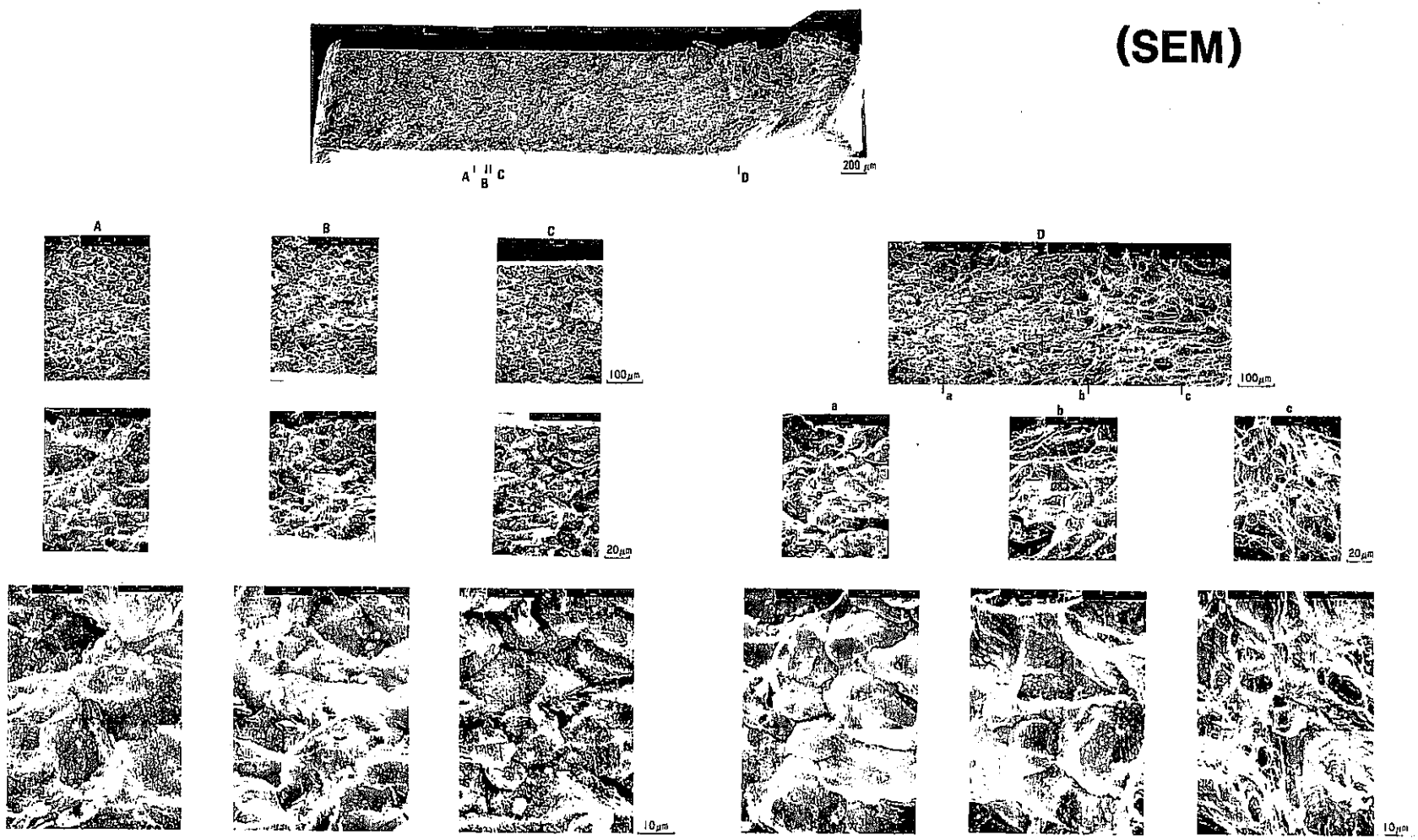


写真3-35　破断面ＳＥＭ写真　(CR301M)

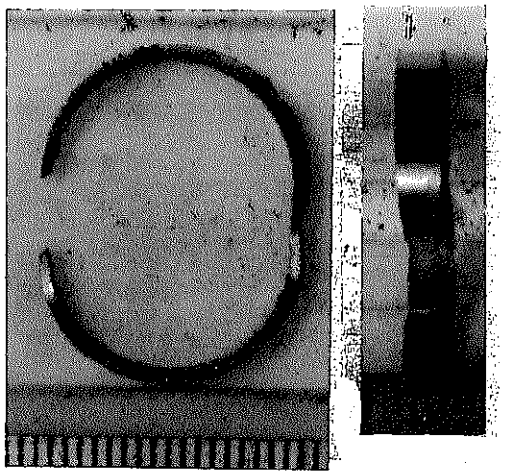
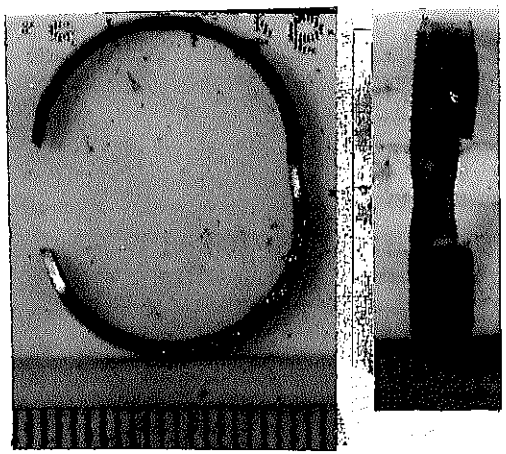
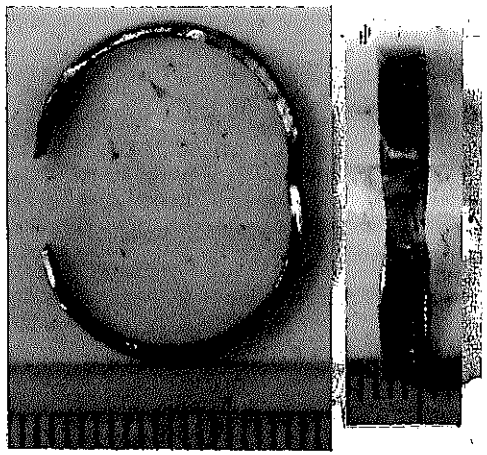
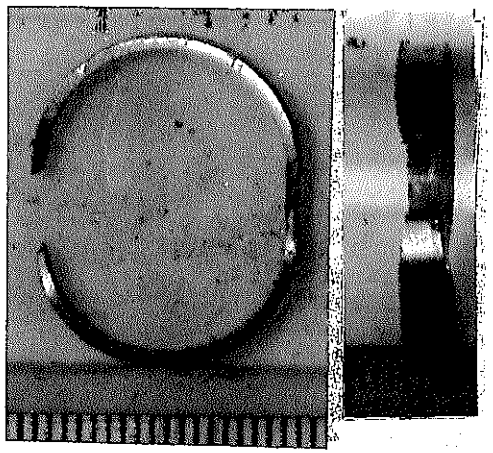
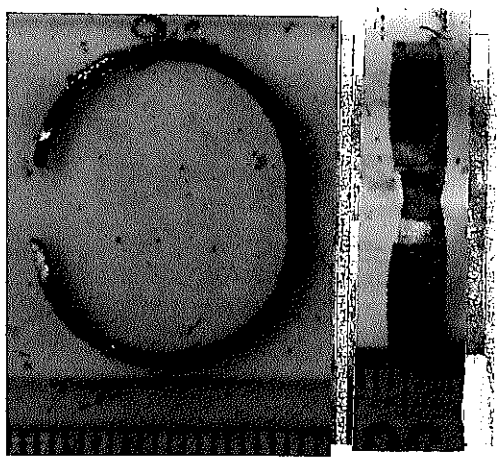
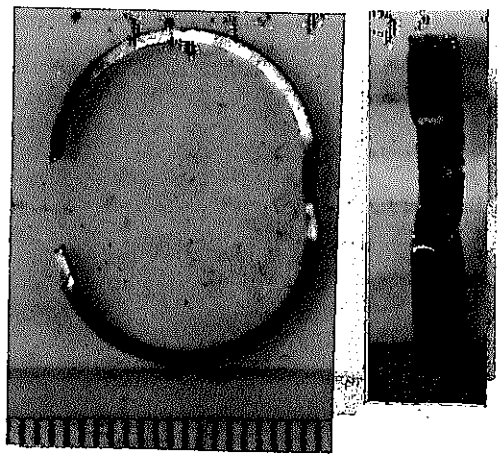
引張速度	非照射材	E604（クラックピン）	E606（健全ピン）
0.2 mm／min			
0.01 mm／min			

写真3-36　リング引張試験後の外観写真　(CR301M　室温)

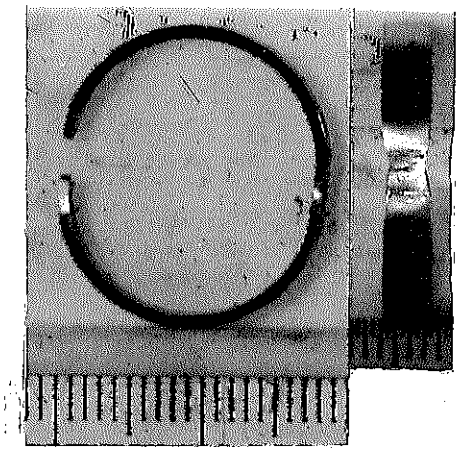
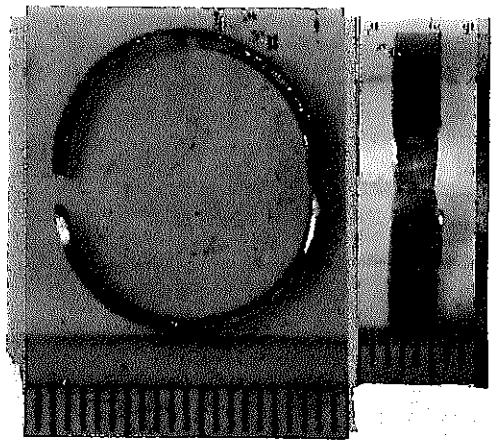
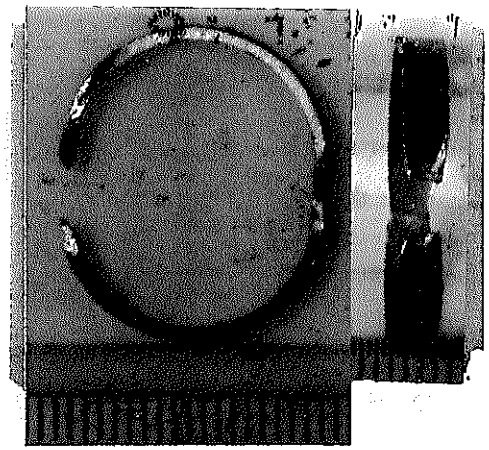
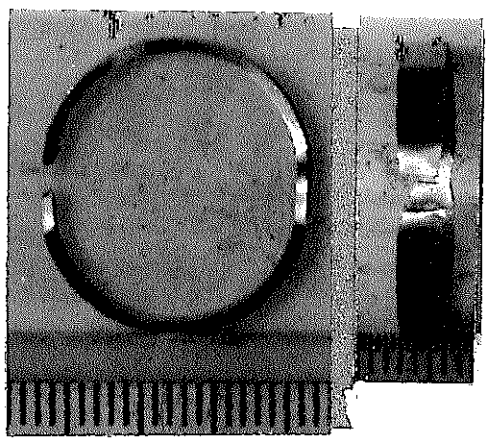
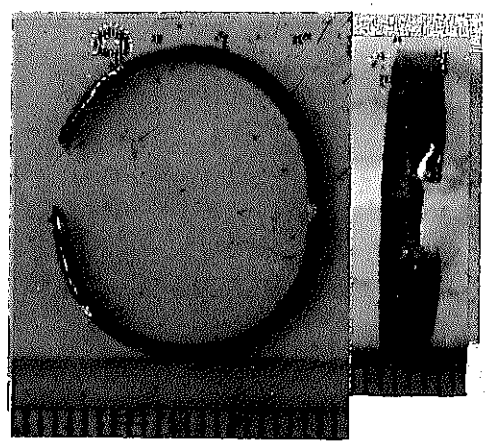
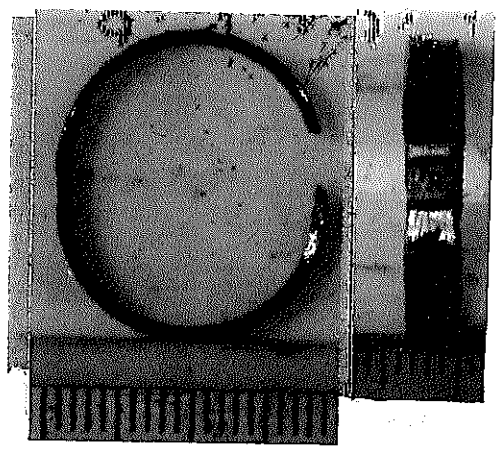
引張速度	非照射材	E604（クラックピン）	E606（健全ピン）
0.2 mm／min			
0.01 mm／min			

写真3-37　リング引張試験後の外観写真　(CR301M　200℃)

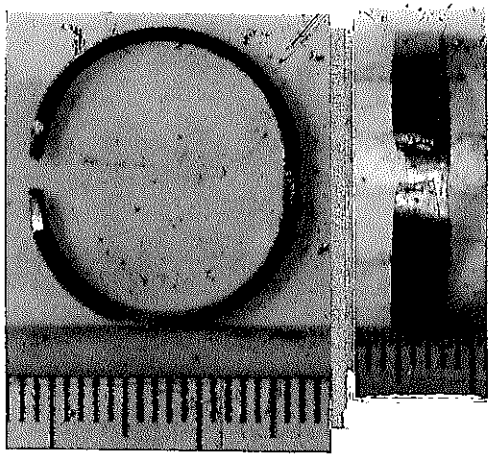
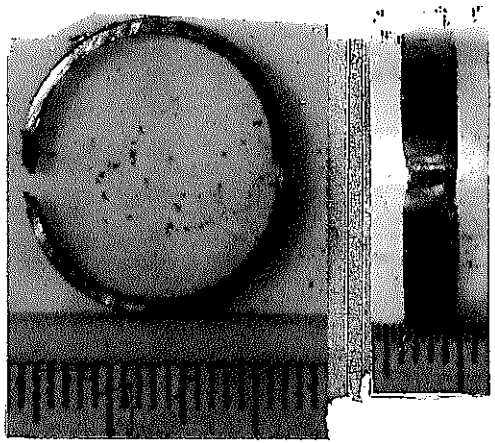
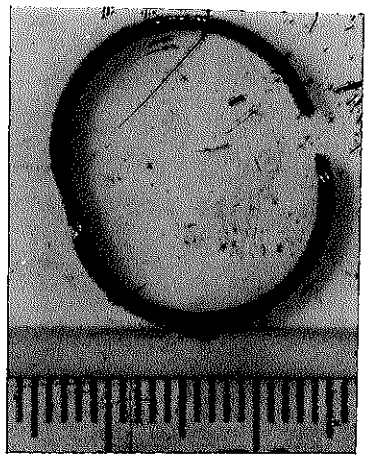
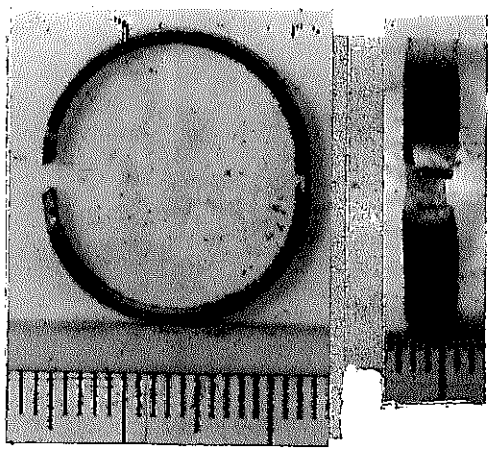
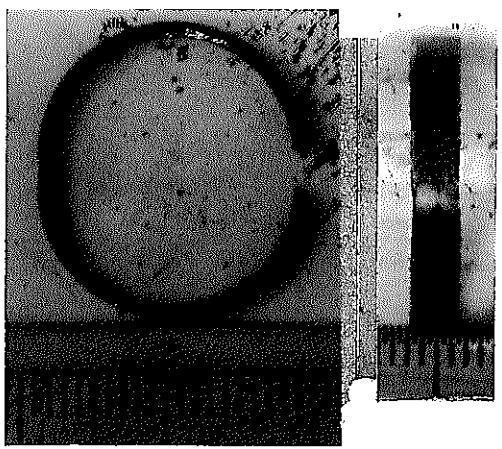
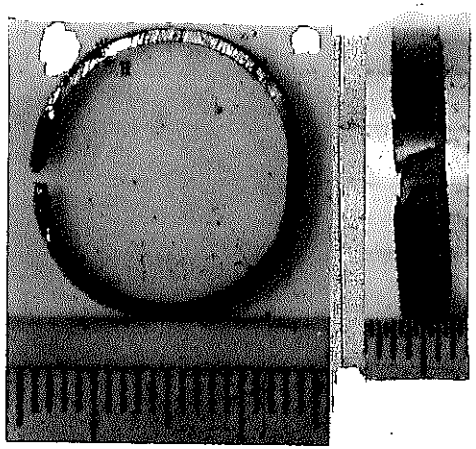
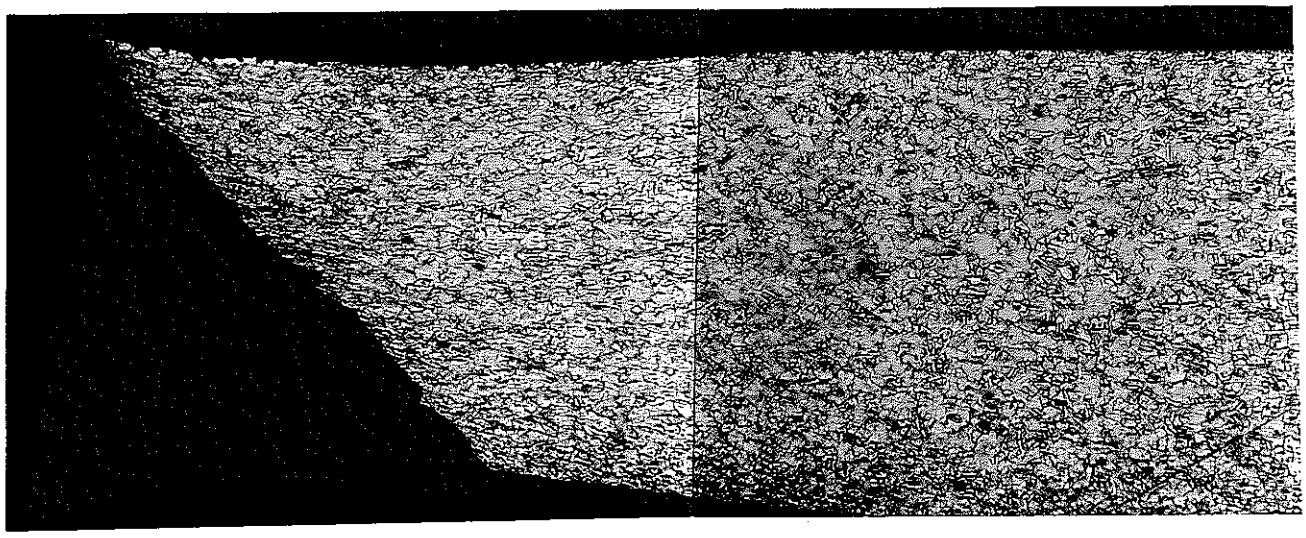
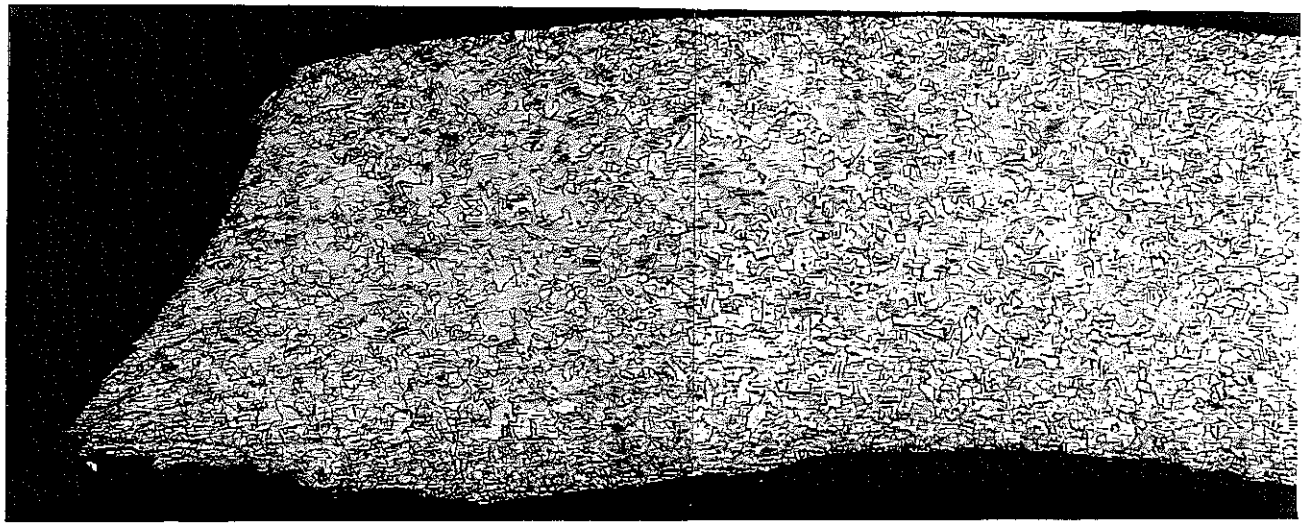
引張速度	非照射材	E604（クラックピン）	E606（健全ピン）
0.2 mm／min			
0.01 mm／min			

写真3-38　リング引張試験後の外観写真　(CR301M　400℃)



ピンNo：E604R4
試験条件　引張速度：0.01mm／min
試験温度：400℃
破断伸び：3.1％



200μm

ピンNo：E606R4
試験条件　引張速度：0.01mm／min
試験温度：400℃
破断伸び：0.9％

写真3-39　リング引張試験後の破断部金相写真　(CR301M)

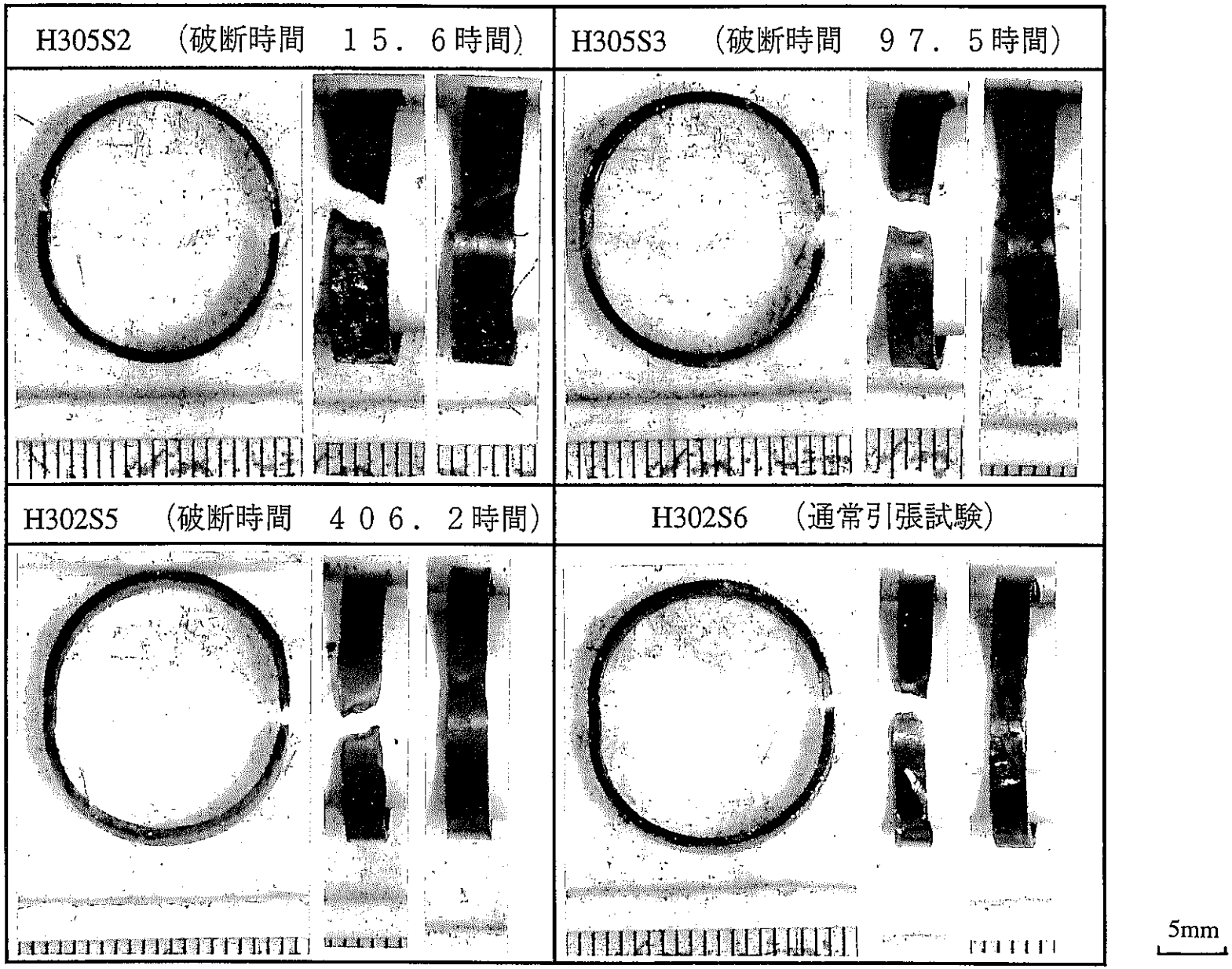
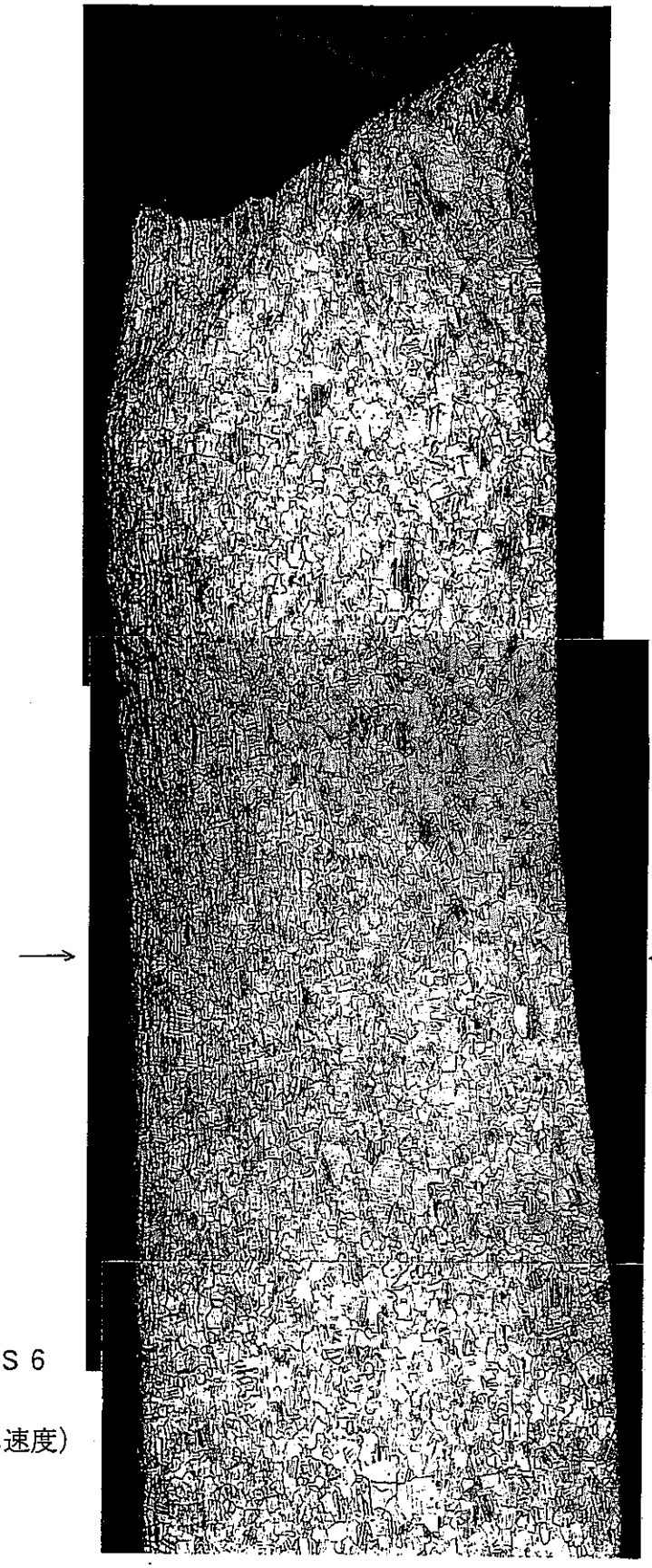


写真3-40 リング引張試験後の外観写真 (CRT402 430℃)



試料Ｎｏ：Ｈ３０２Ｓ６
通常引張
(定ひずみ速度)

D.F.P.B　：96mm

引張試験条件

引張試験温度：430℃
引張速度　：0.1mm/min
引張強さ　：891MPa

写真3-41　リング引張試験後の破断部の金相写真　(CRT402)

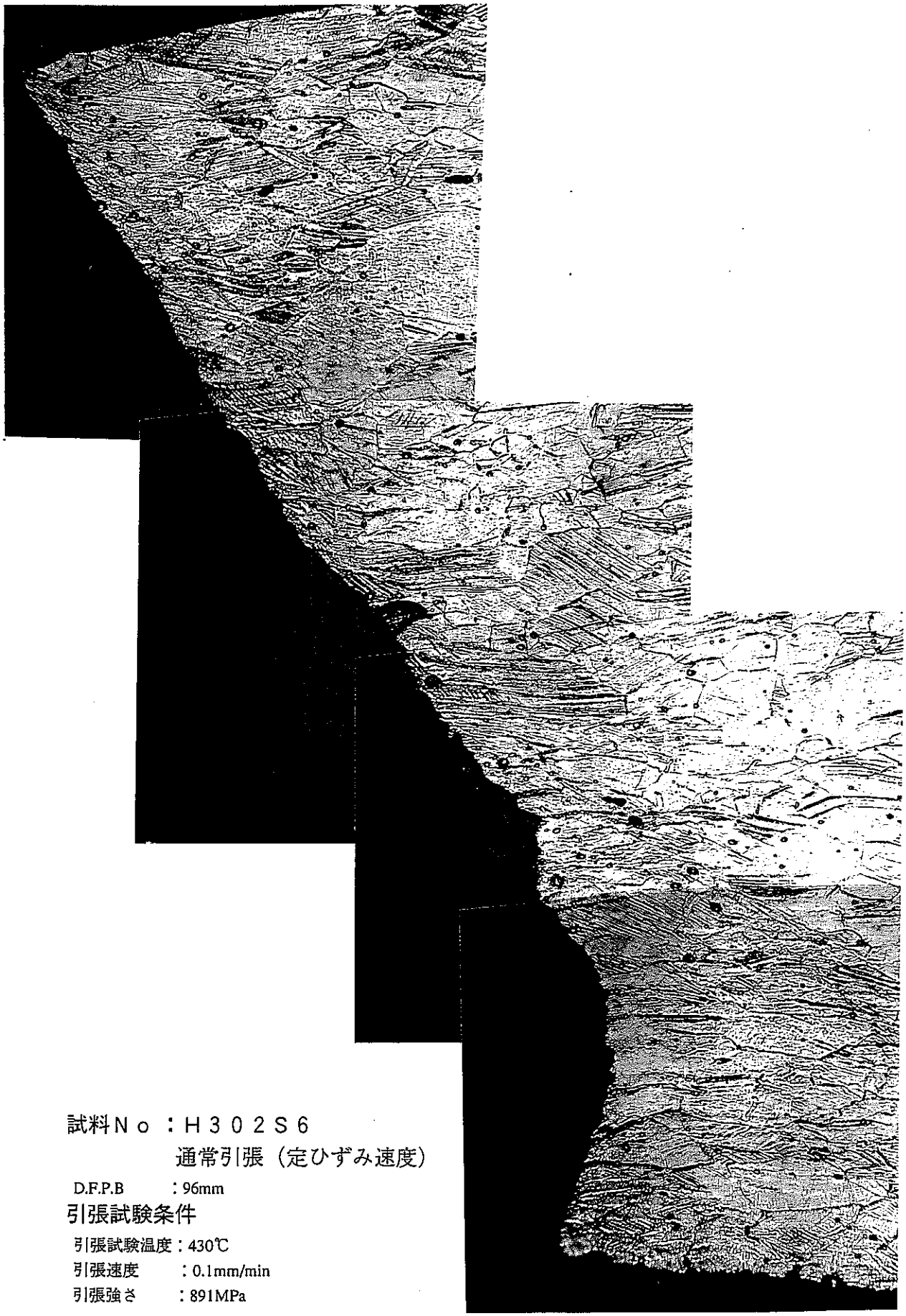


写真3-42 リング引張試験後の破断部金相写真 (CRT402)

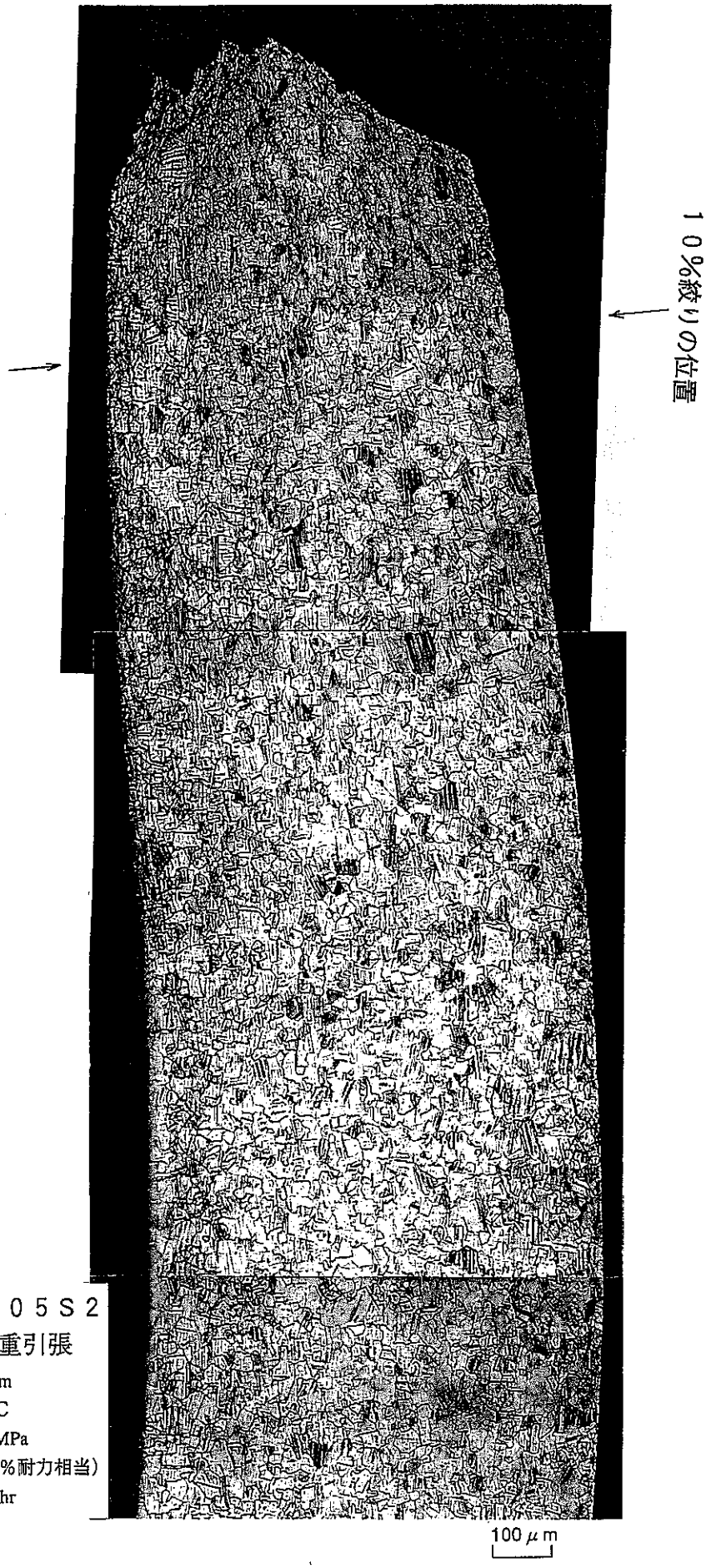
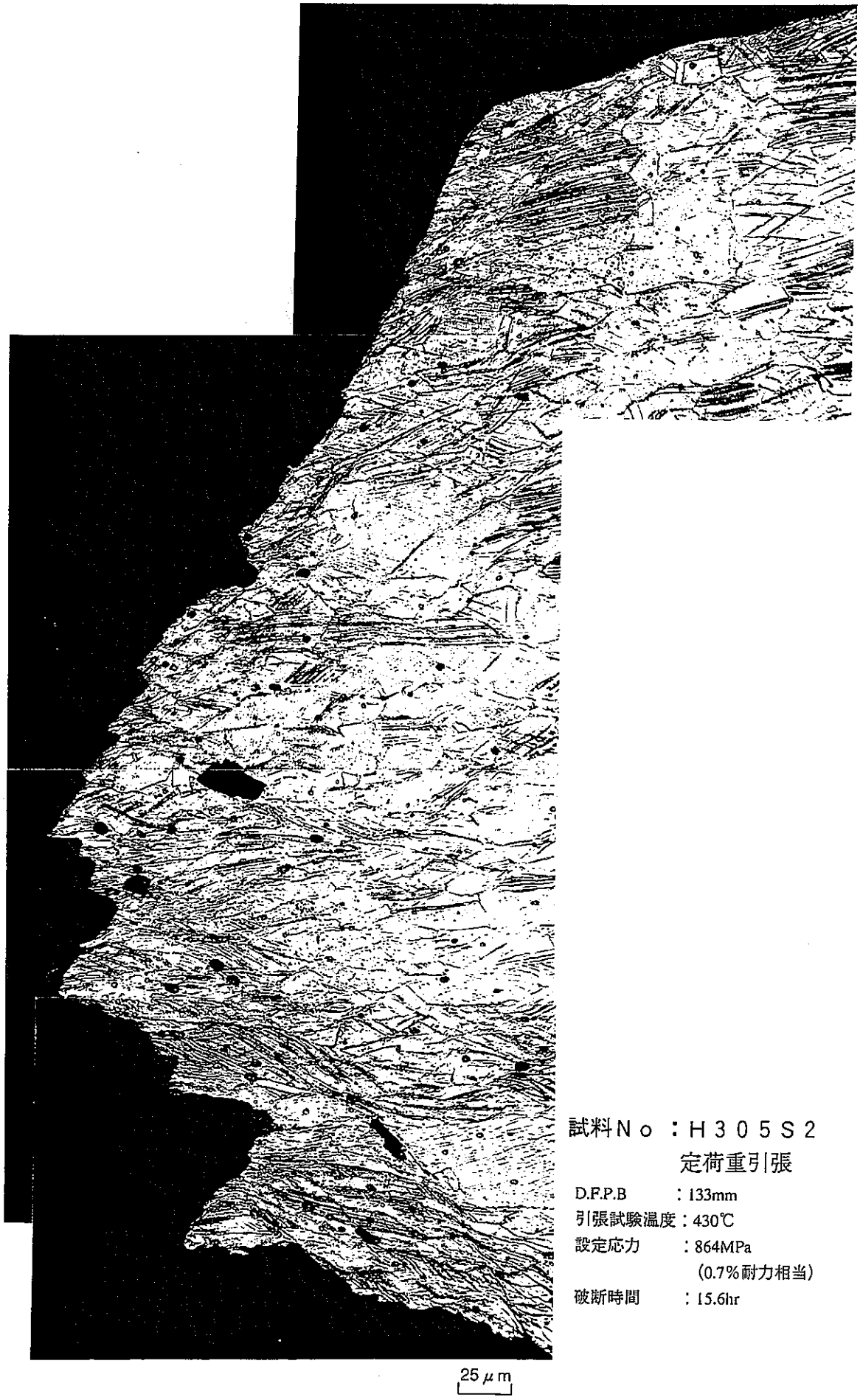


写真3-43　リング引張試験後の破断部金相写真　(CRT402)



試料No：H305S2
定荷重引張
D.F.P.B　：133mm
引張試験温度：430℃
設定応力　：864MPa
(0.7%耐力相当)
破断時間　：15.6hr

写真3-44　リング引張試験後の破断部金相写真　(CRT402)

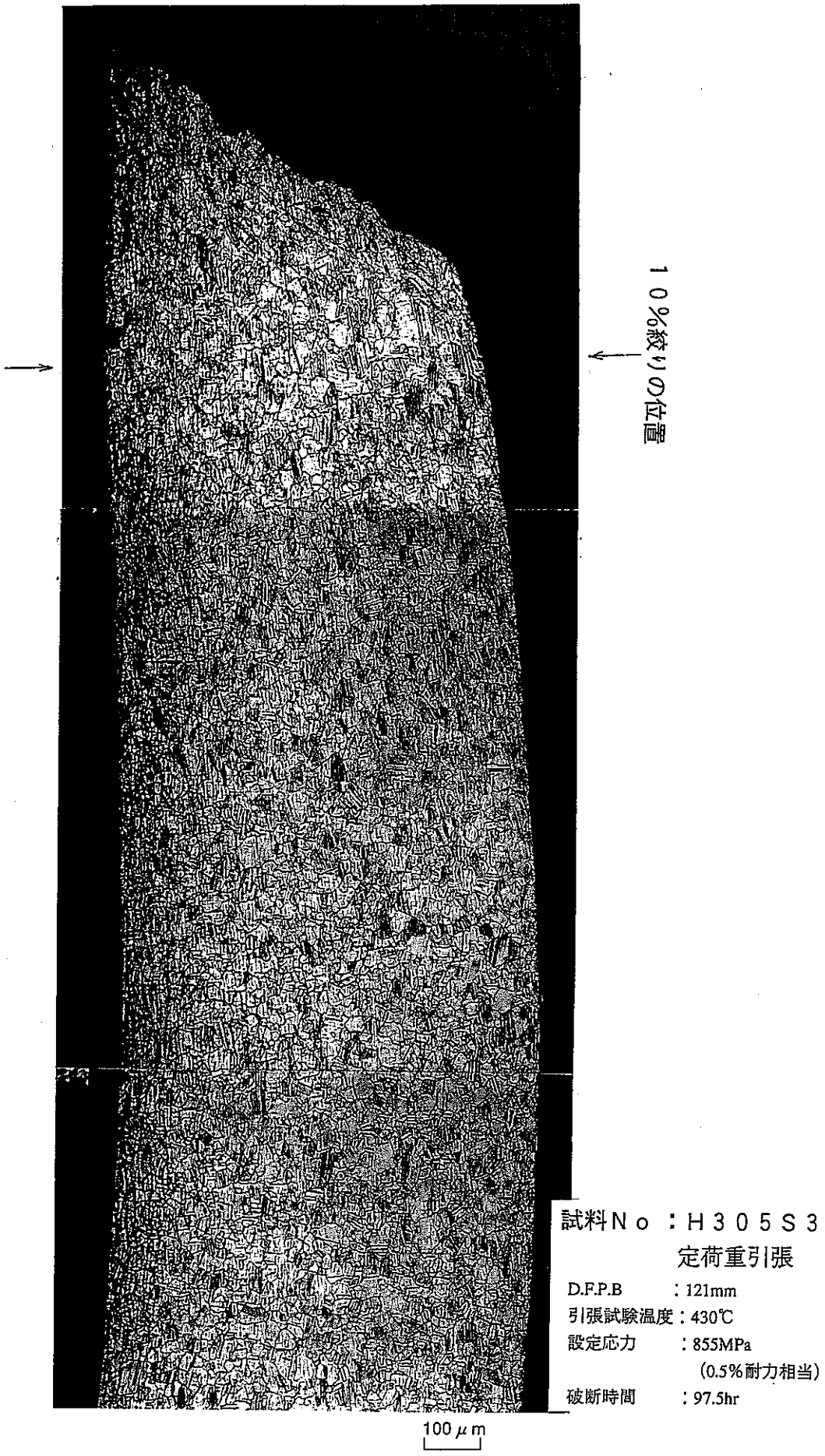
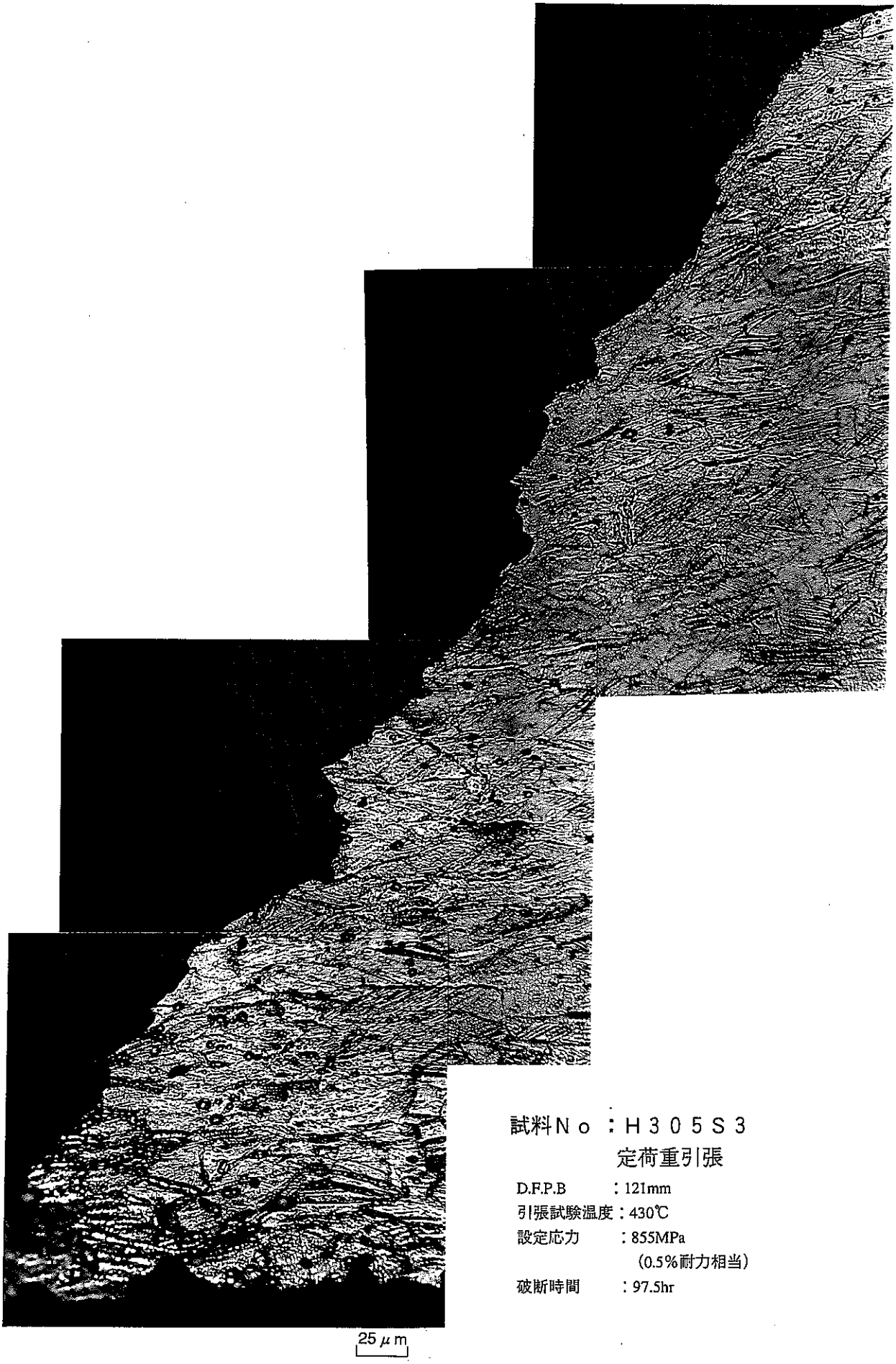


写真3-45　リング引張試験後の破断部金相写真　(CRT402)



試料No：H305S3
定荷重引張

D.F.P.B　：121mm
引張試験温度：430℃
設定応力　：855MPa
(0.5%耐力相当)
破断時間　：97.5hr

写真3-46　リング引張試験後の破断部金相写真　(CRT402)

試料No：H302S5
定荷重引張

D.F.P.B　：104mm
引張試験温度：430℃
設定応力　：855MPa
(0.5%耐力相当)
破断時間　：406.2hr

写真3-47　リング引張試験後の破断部金相写真　(CRT402)

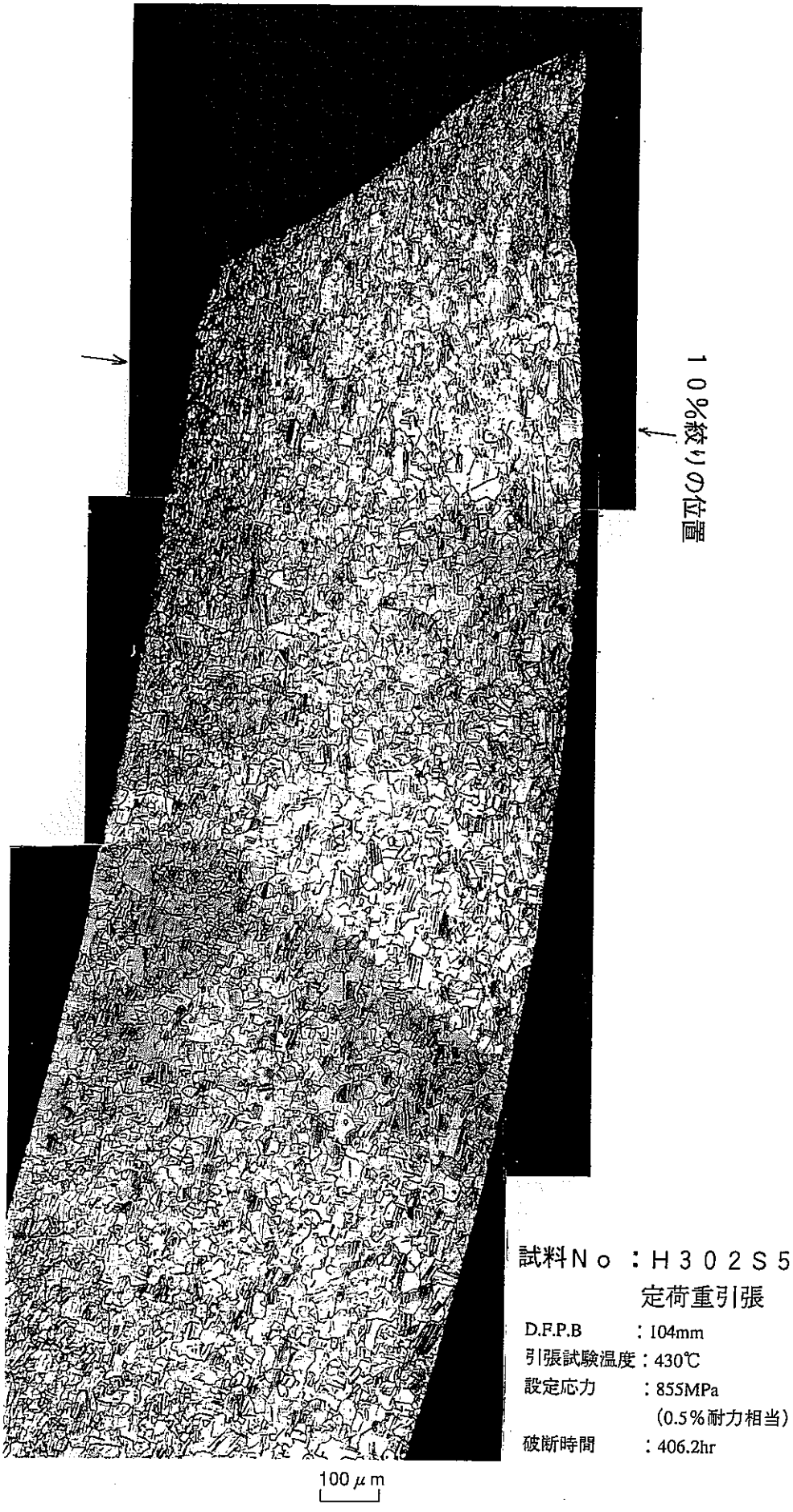
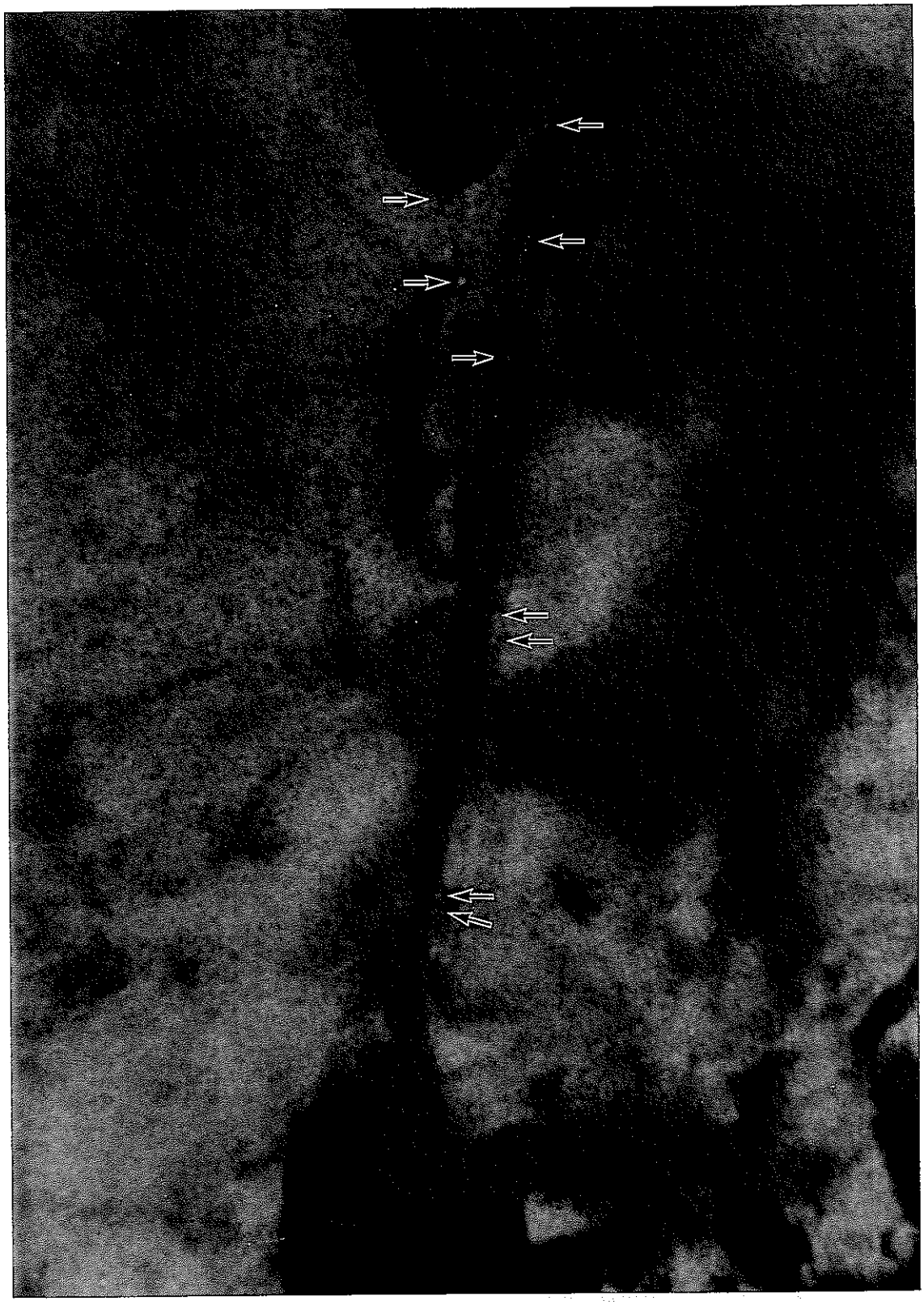


写真3-48　リング引張試験後の破断部金相写真　(CRT402)

写真3-49　吸収ピンＴＥＭ写真　(CRT402　健全部)

ＣＲＴ４０２制御棒　Ｈ３０５Ｇ１Ｔ

← 応力方向 →



20nm

写真3-50　吸収ピンＴＥＭ写真　(CRT402　ｸﾗｯｸ部)

ＣＲＴ４０２制御棒　Ｈ３０５Ｇ２Ｔ

写真3-51　吸収ピンＴＥＭ写真　(CRT402　ｽﾍﾟｰｻｰ部)

ＣＲＴ４０２制御棒　Ｈ３０５Ｇ３Ｔ

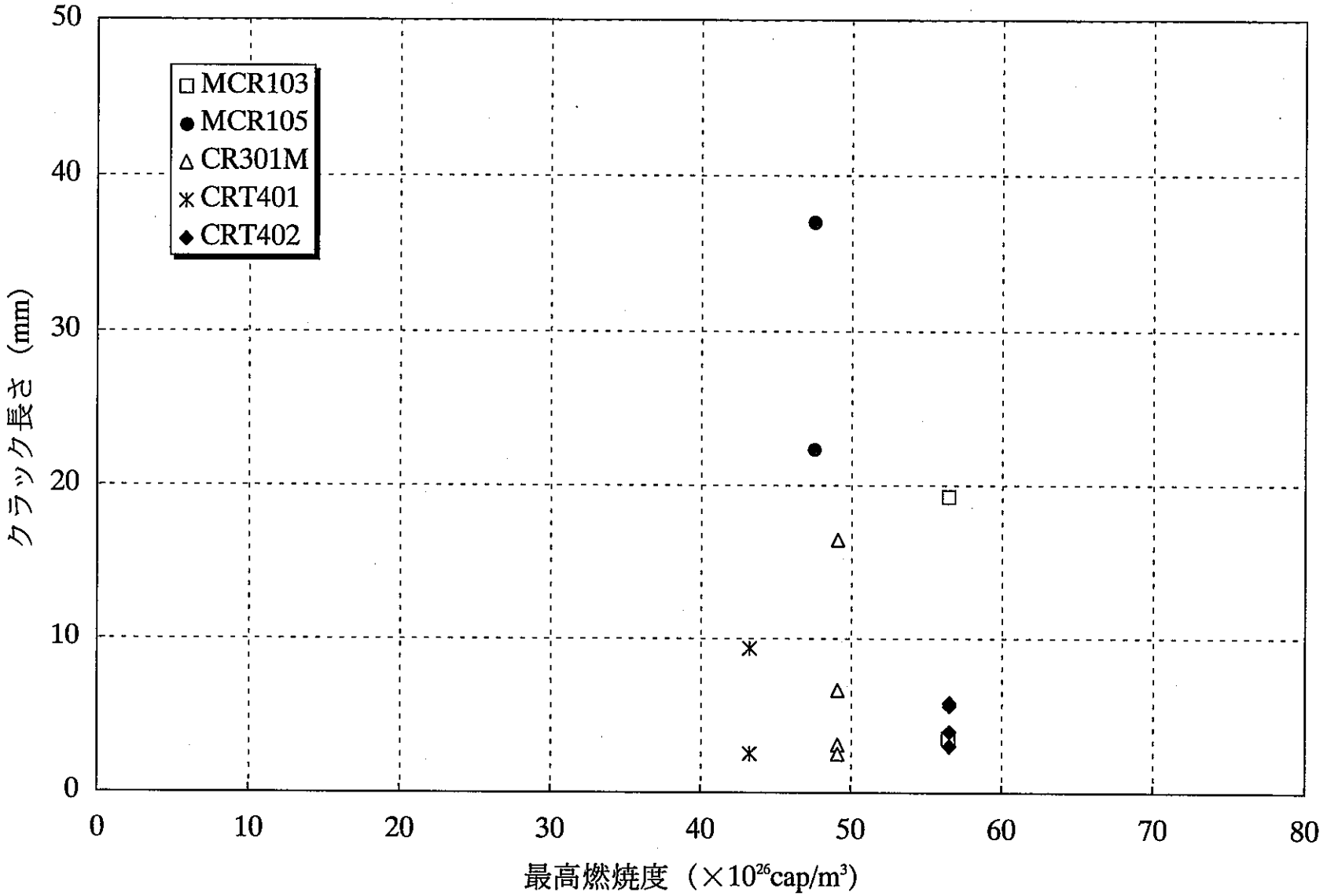


図３－１　クラック長さと燃焼度の関係

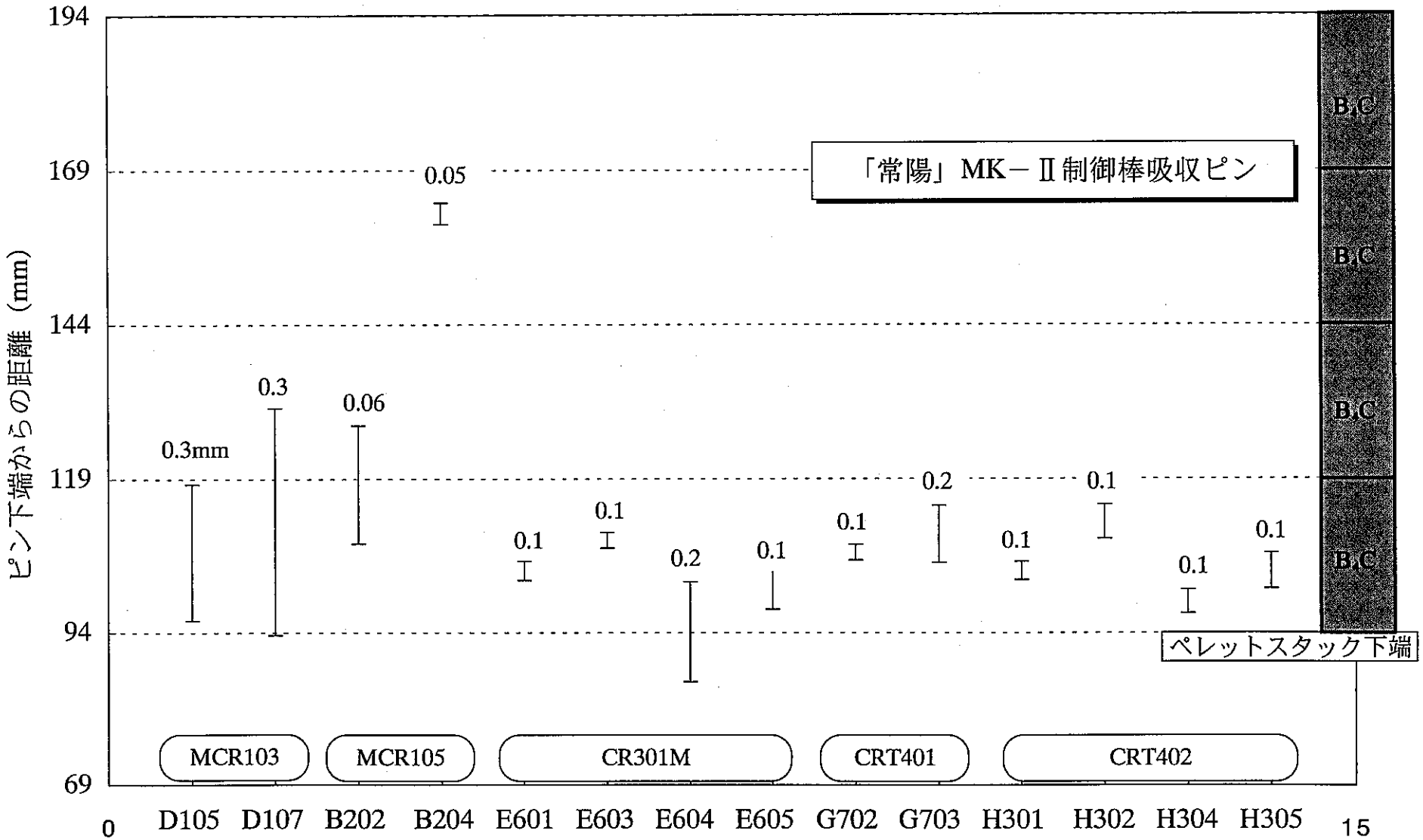


図３－２　クラック発生軸位置とその長さ及び幅

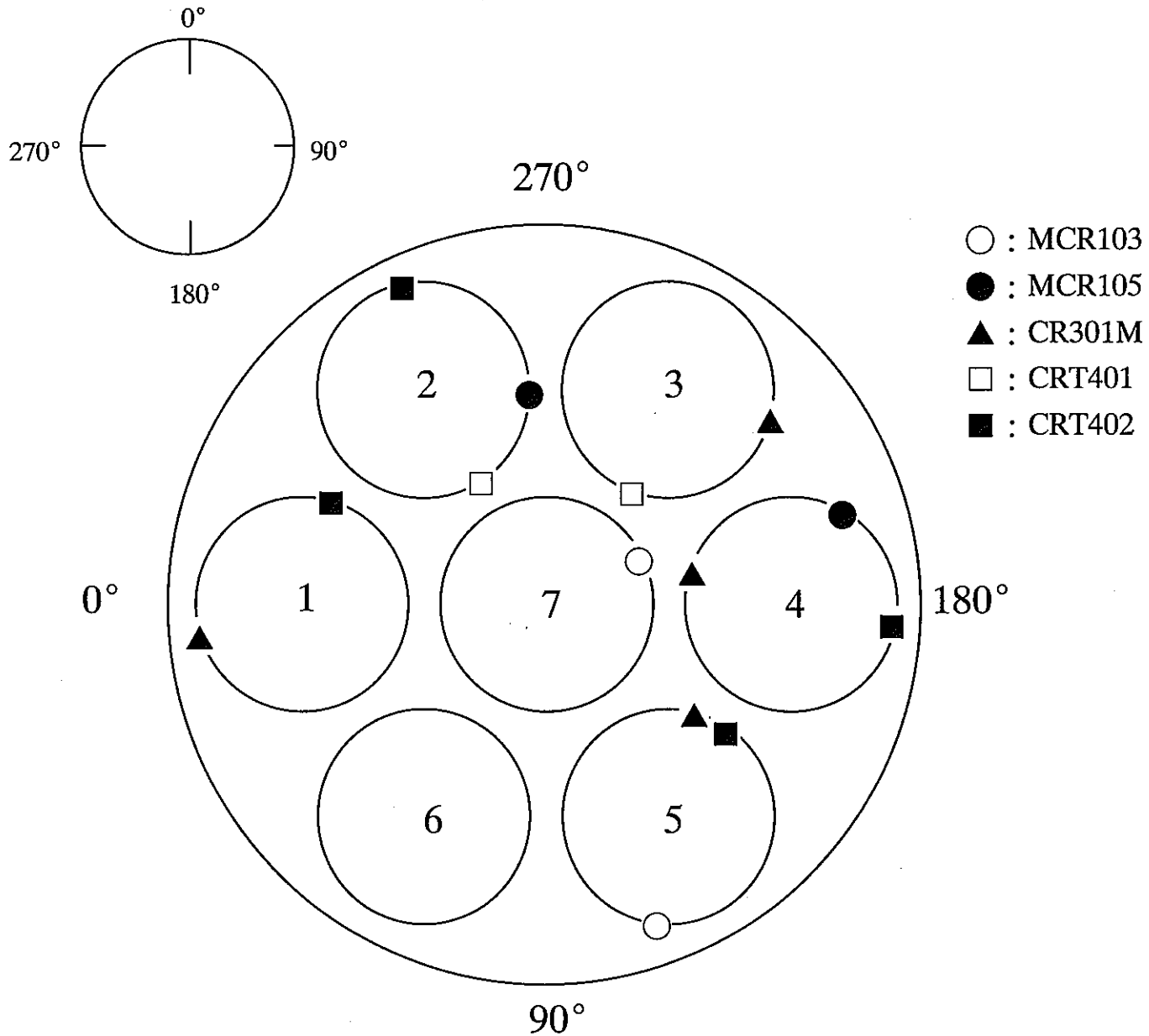


図３－３　周方向クラック発生位置模式図

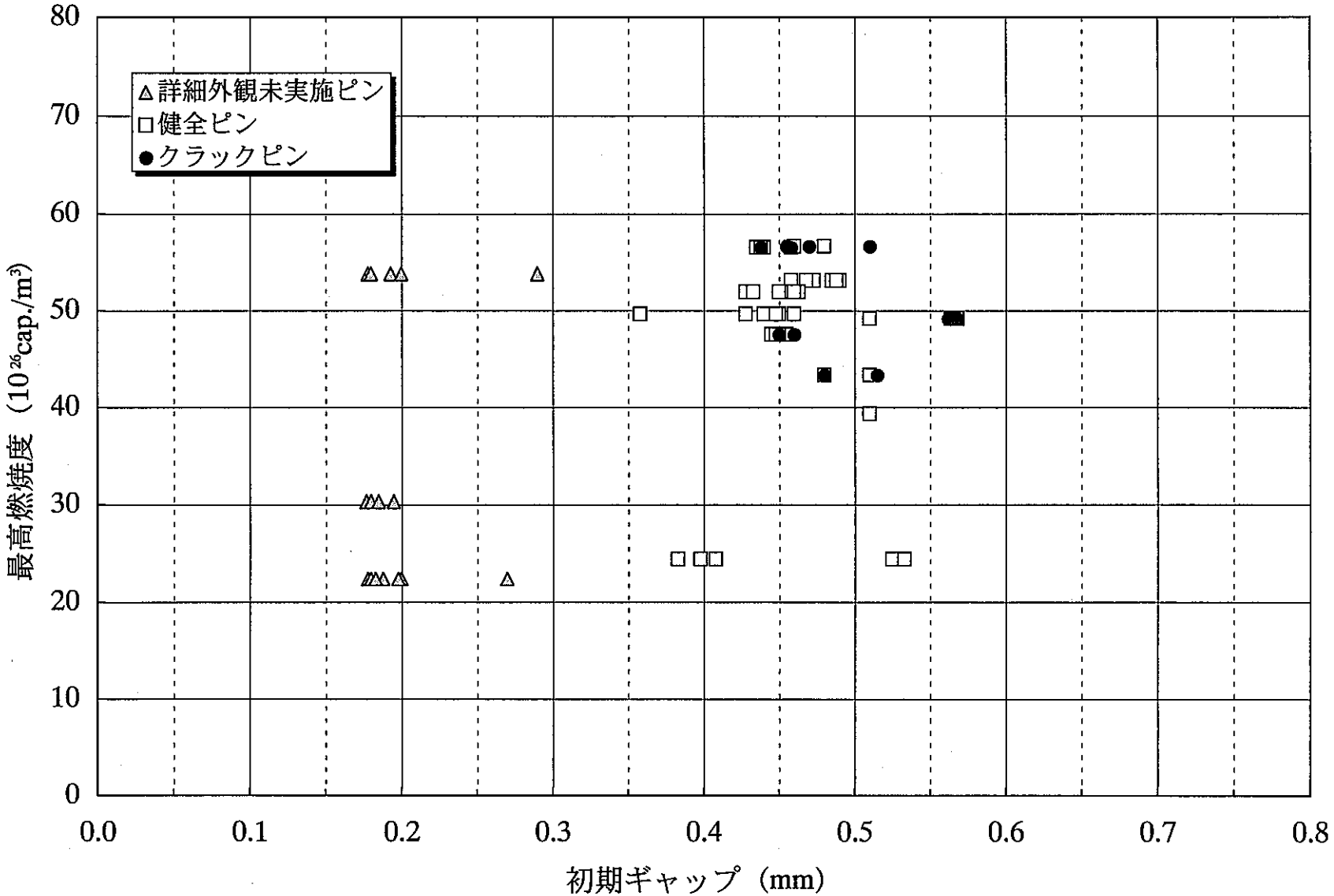


図３－４　最高燃焼度とペレット最下端初期ギャップの関係

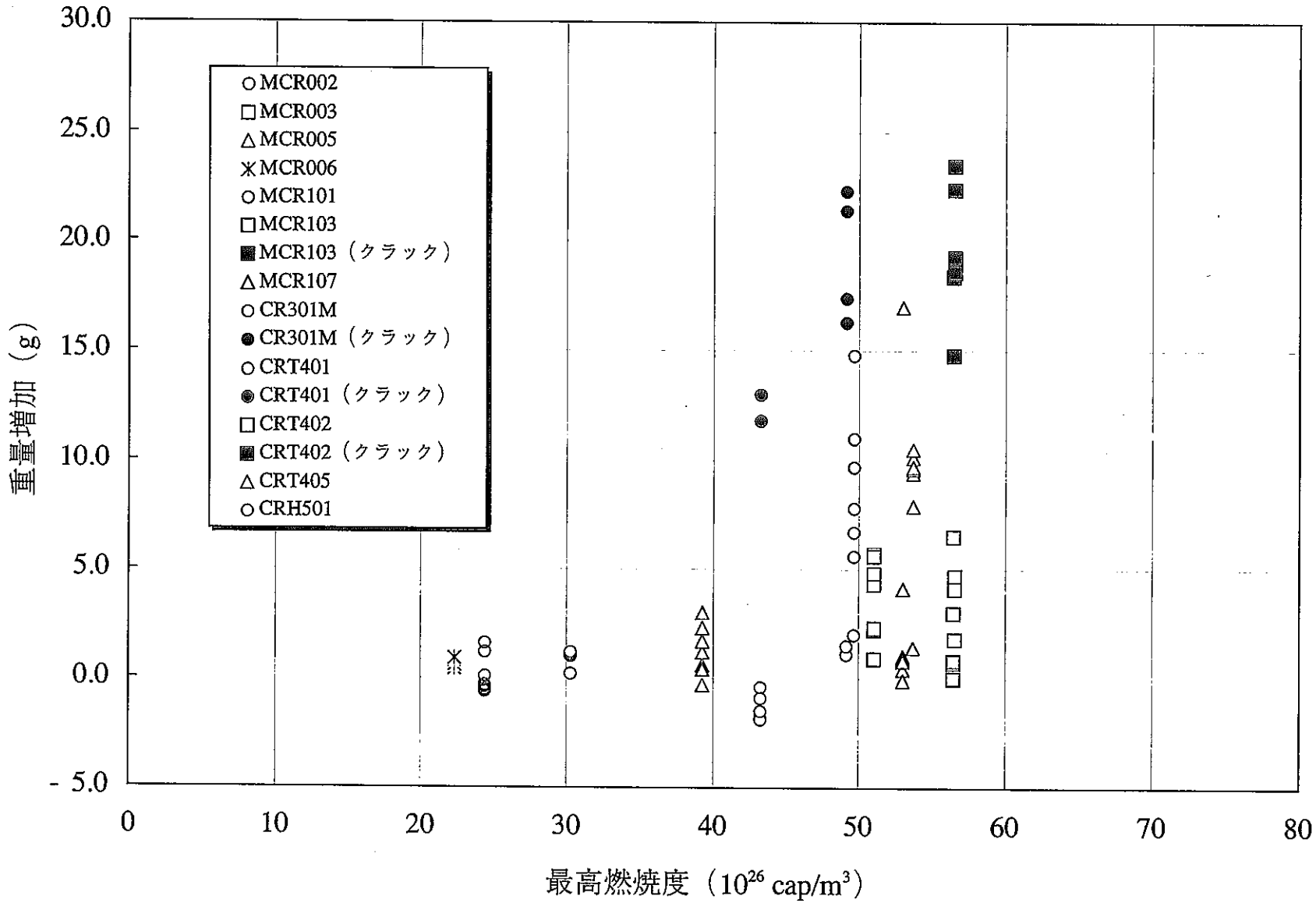


図３－５　重量増加と燃焼度の関係

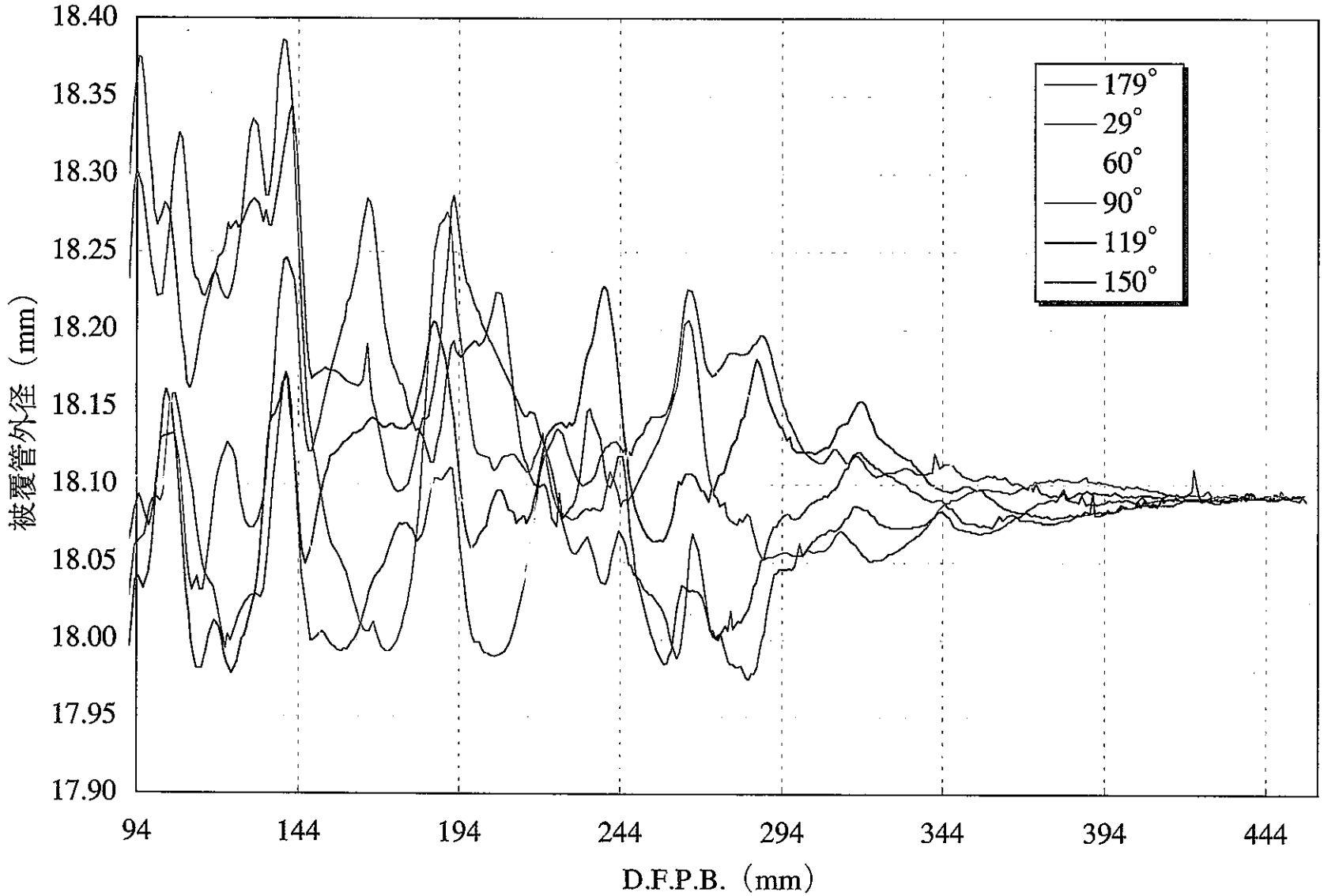


図３－６　外径軸方向プロファイル（CRT405：J601）

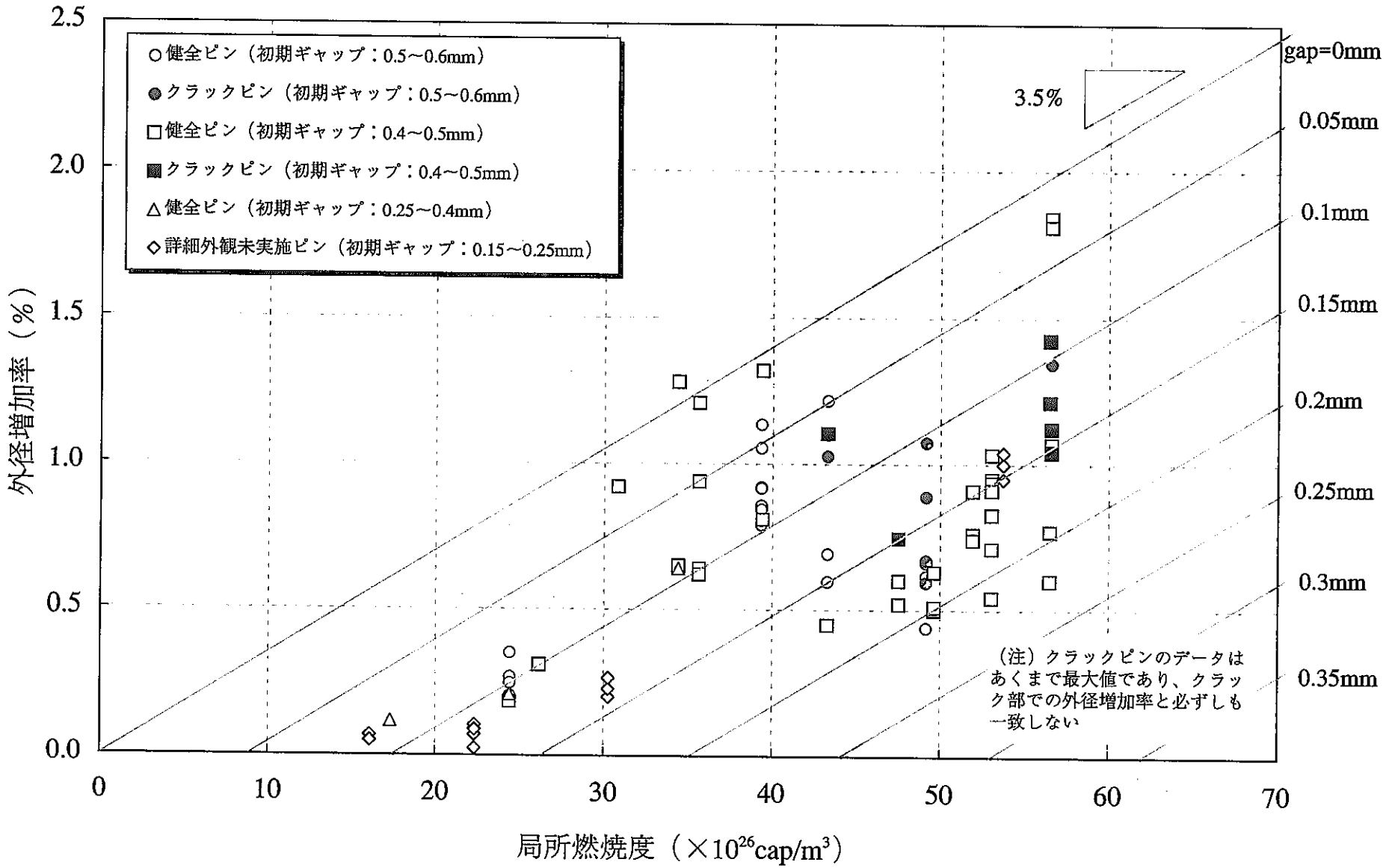


図３－７　周方向平均の最大外径増加率と局所燃焼度の関係（初期ギャップ依存性）

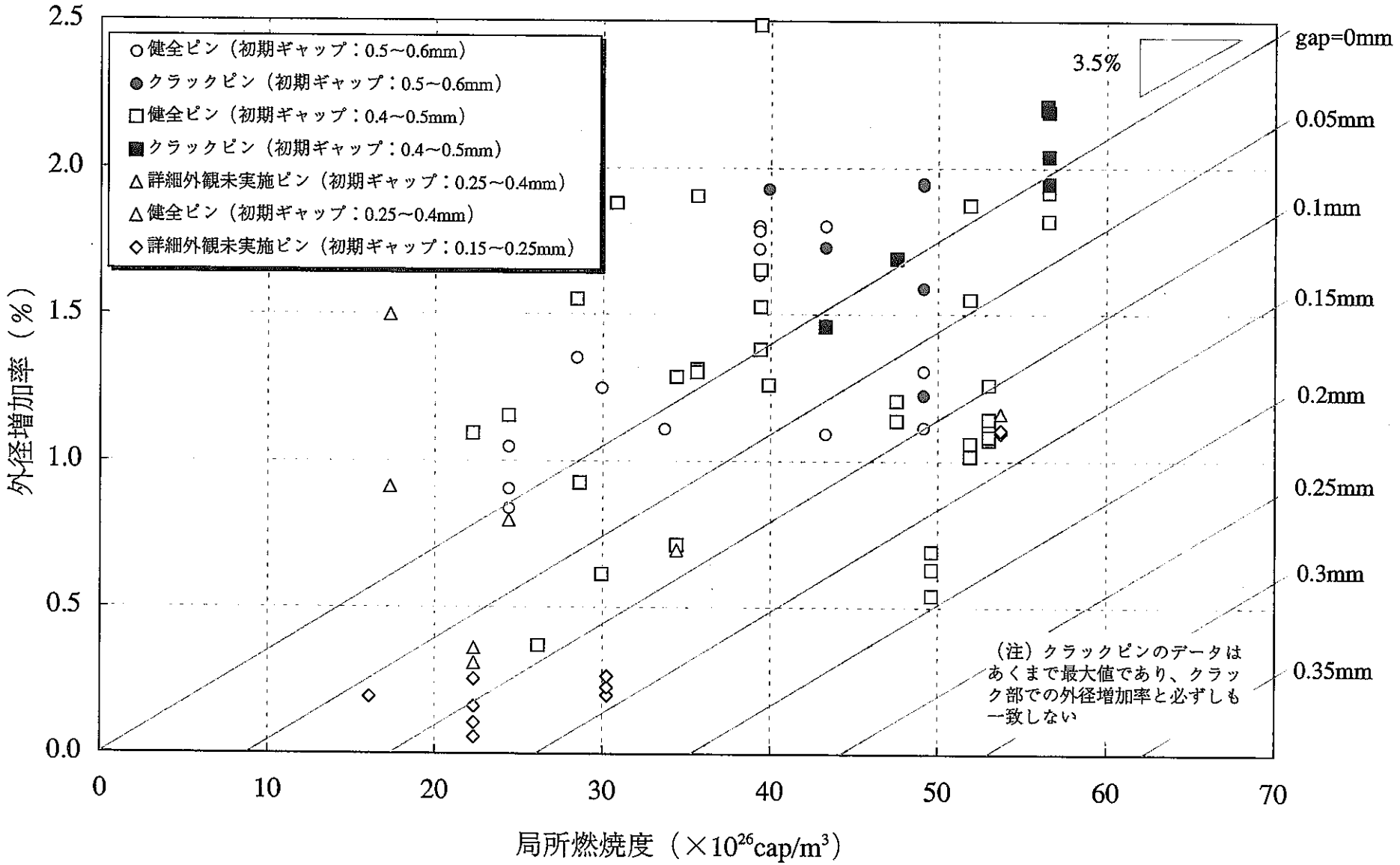


図３－８　最大外径増加率と局所燃焼度の関係（初期ギャップ依存性）

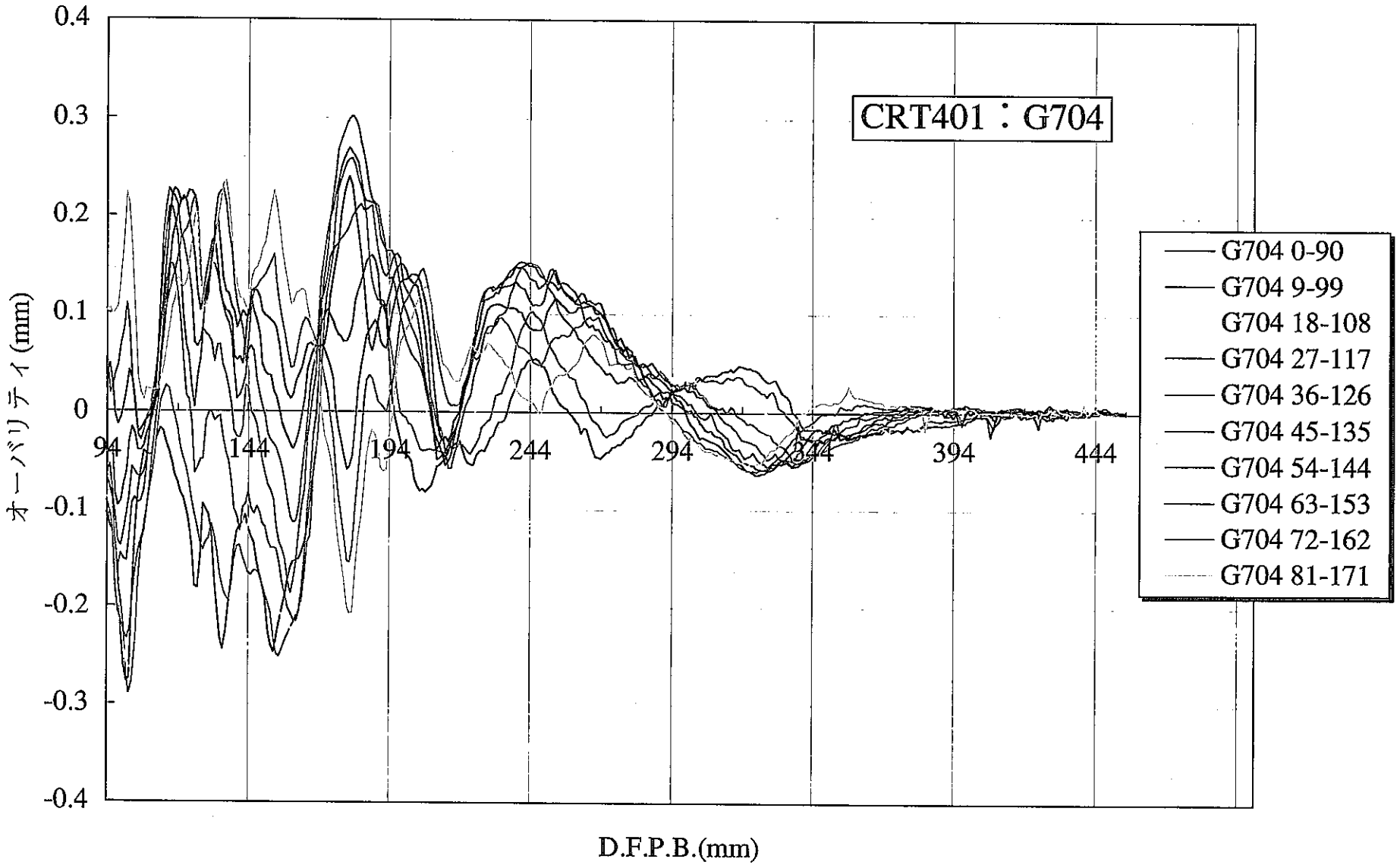


図３－９　オーバリティ軸方向プロファイル（CRT401，G704）

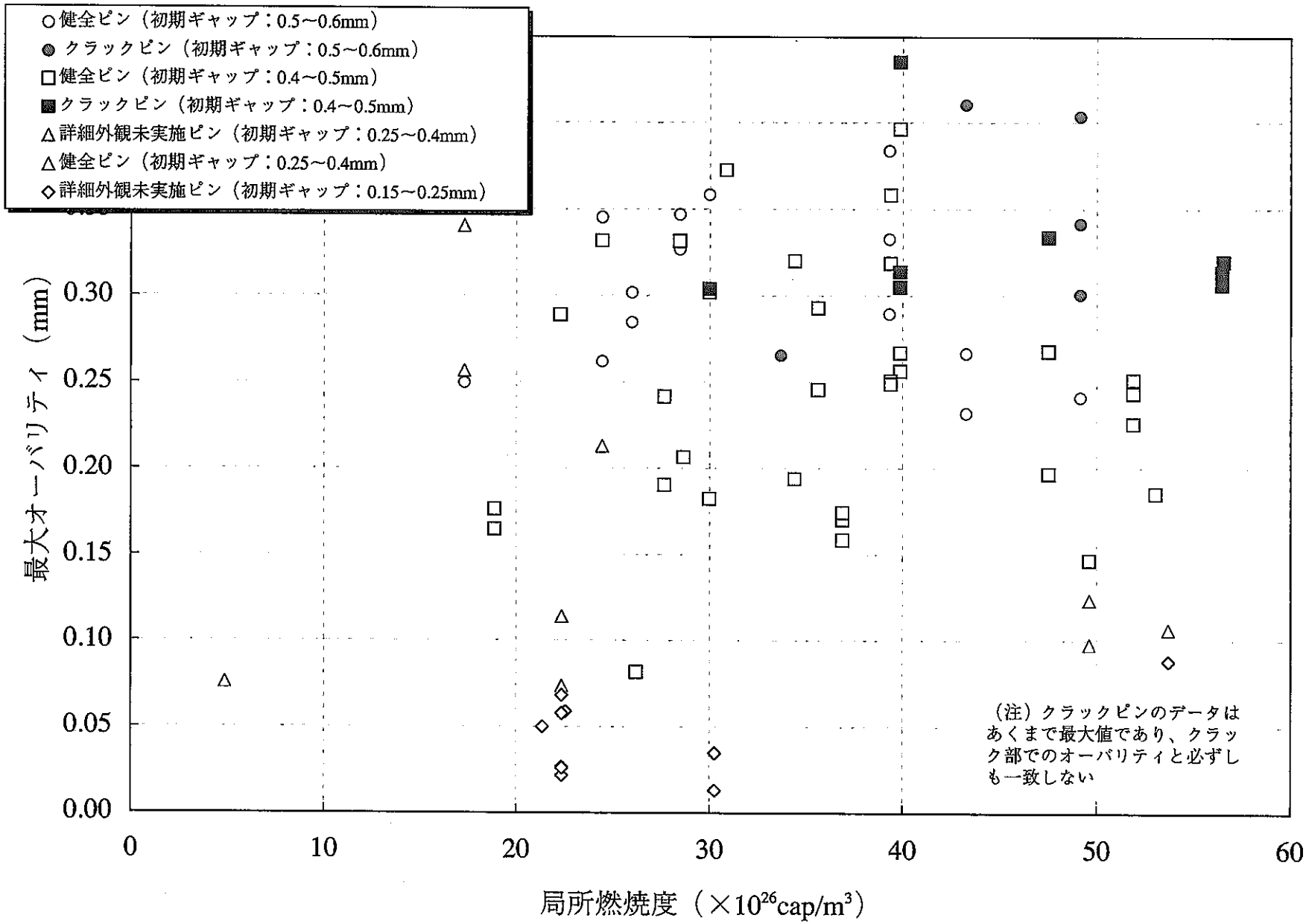


図３－１０　最大オーバリティと局所燃焼度の関係

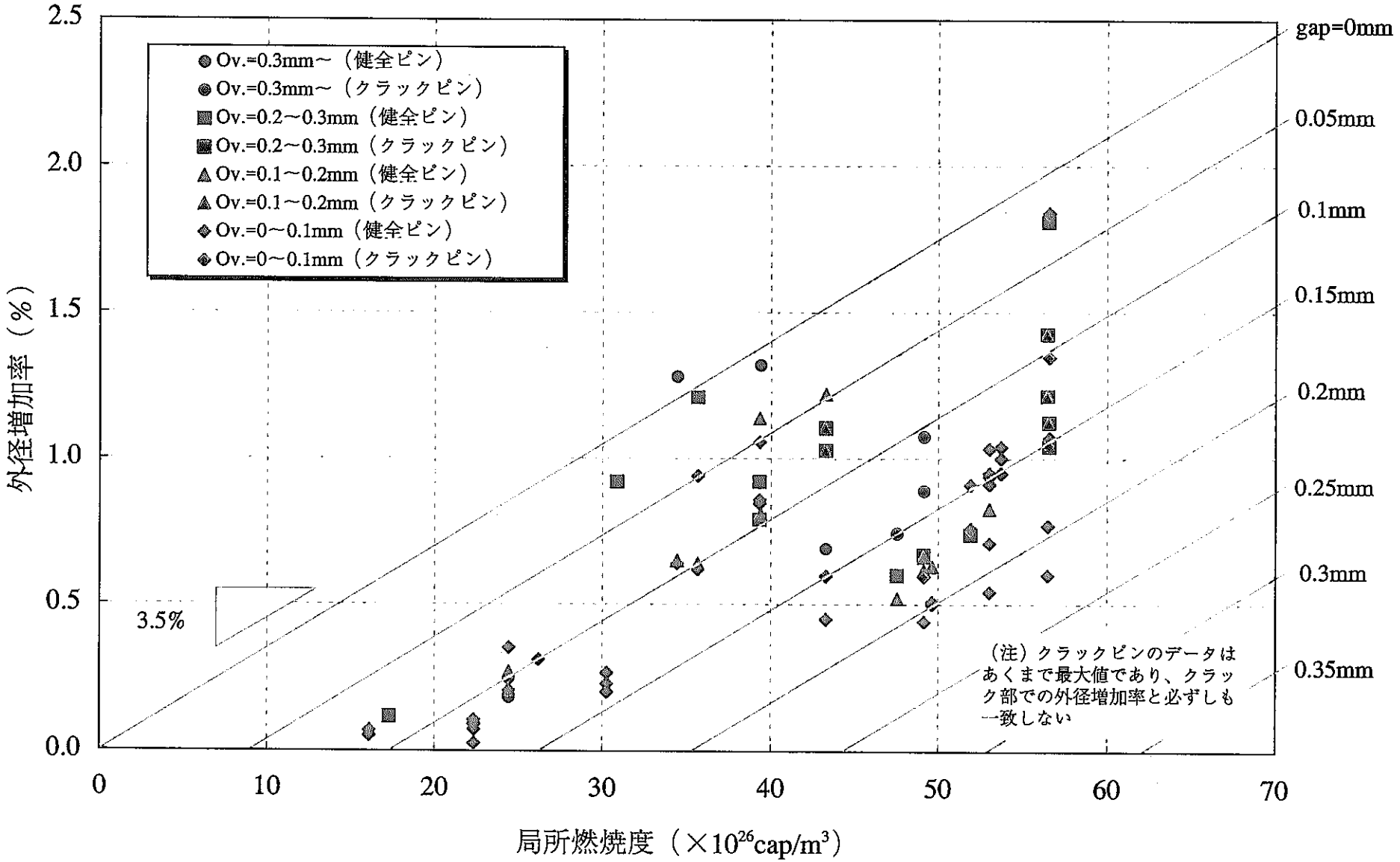


図３－１１　周方向平均の最大外径増加率と局所燃焼度の関係（オーバリティ依存性）

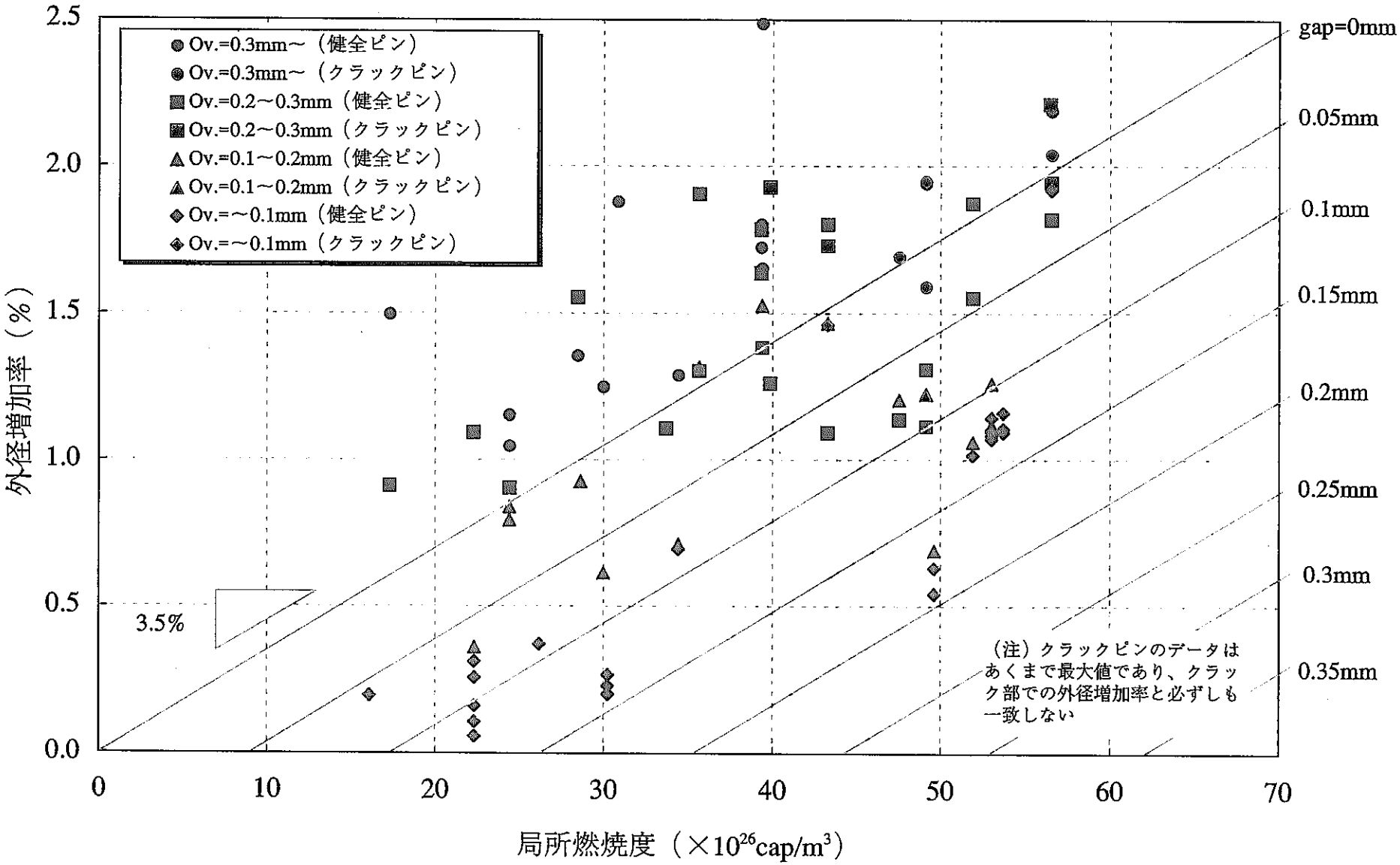


図３－１２　最大外径増加率と局所燃焼度の関係（オーバリティ依存性）

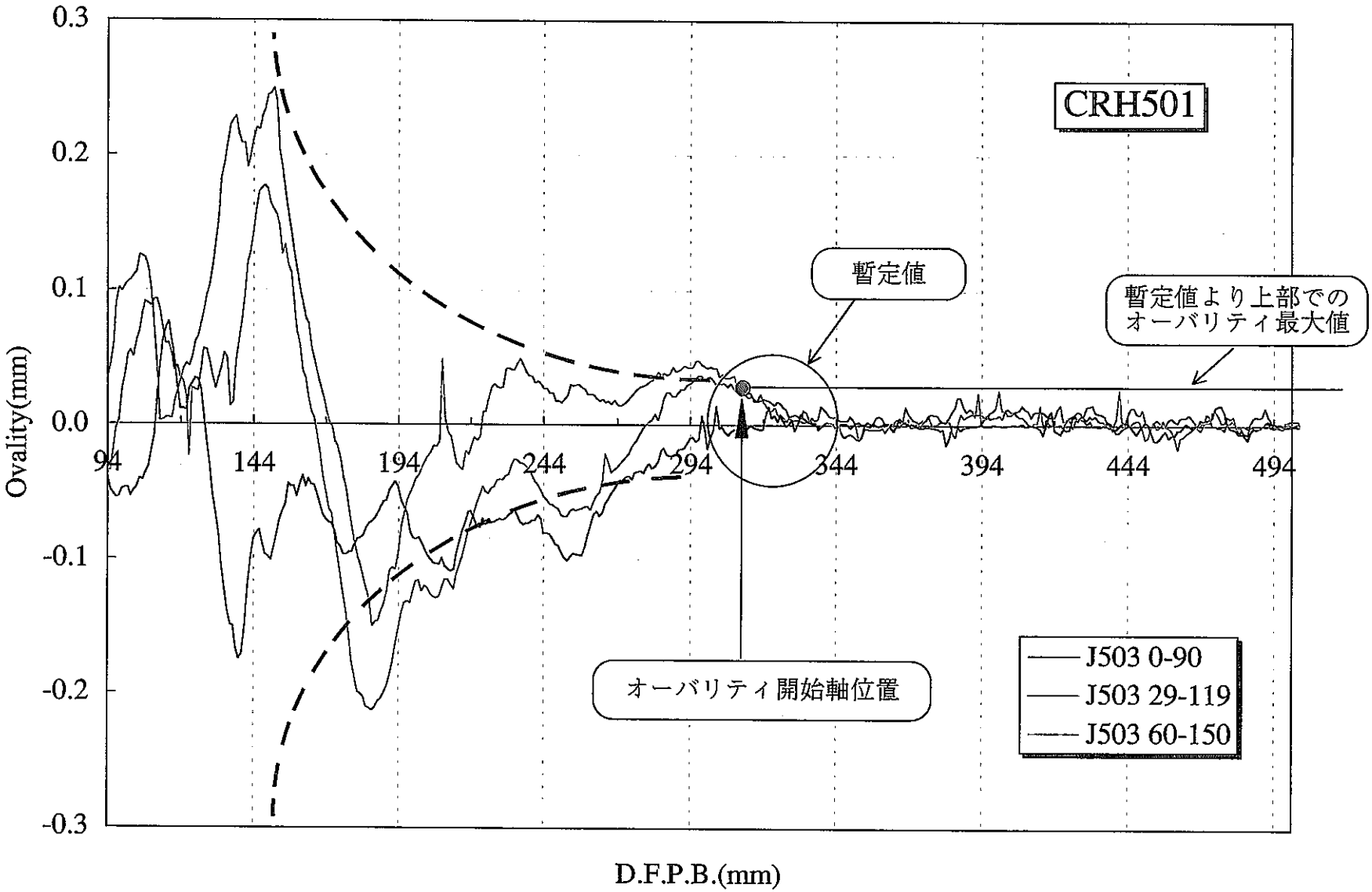


図３－１３　　オーバリティ開始軸位置の判定方法

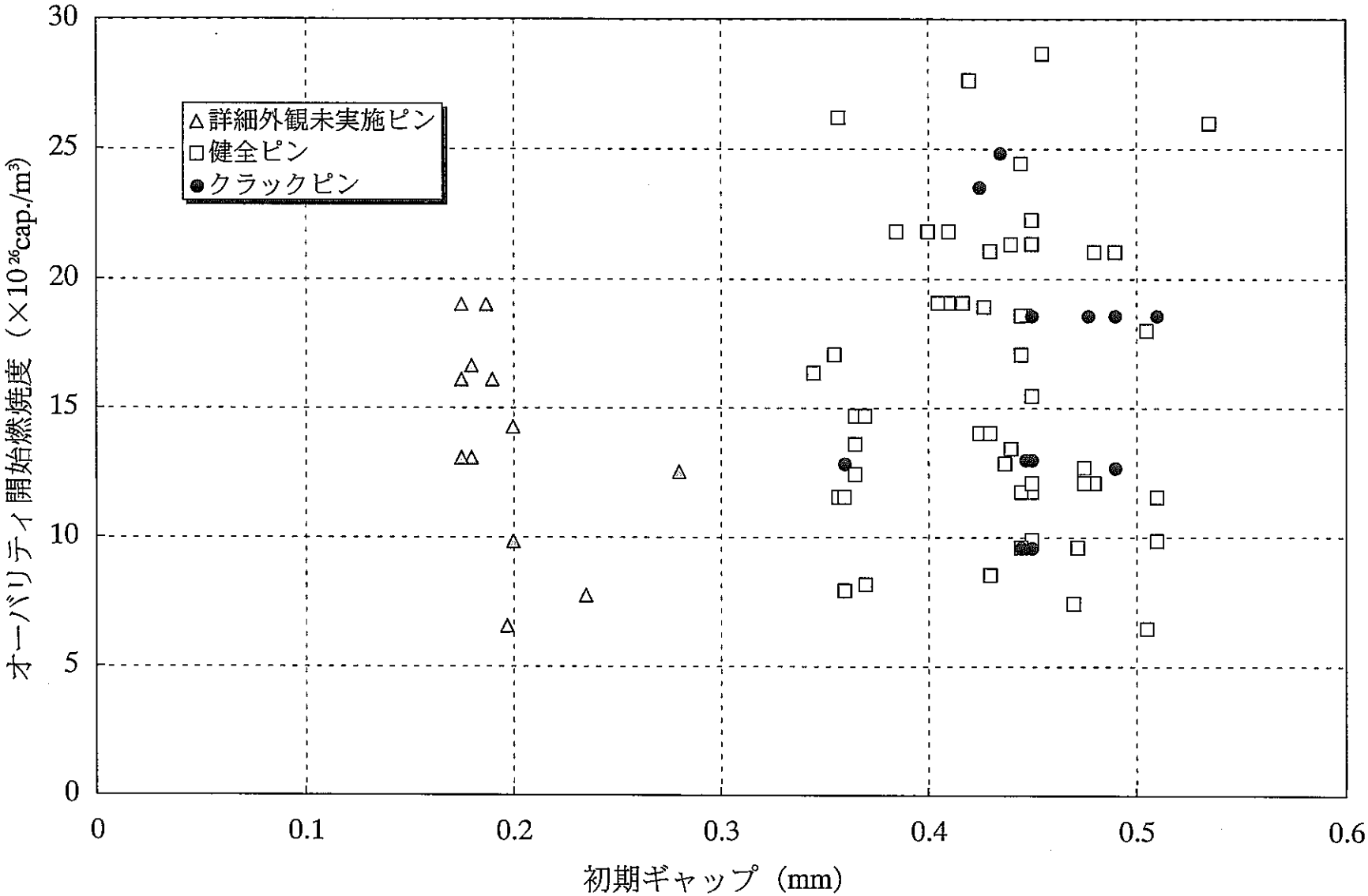


図３－１４　オーバリティ開始燃焼度と初期ギャップの関係

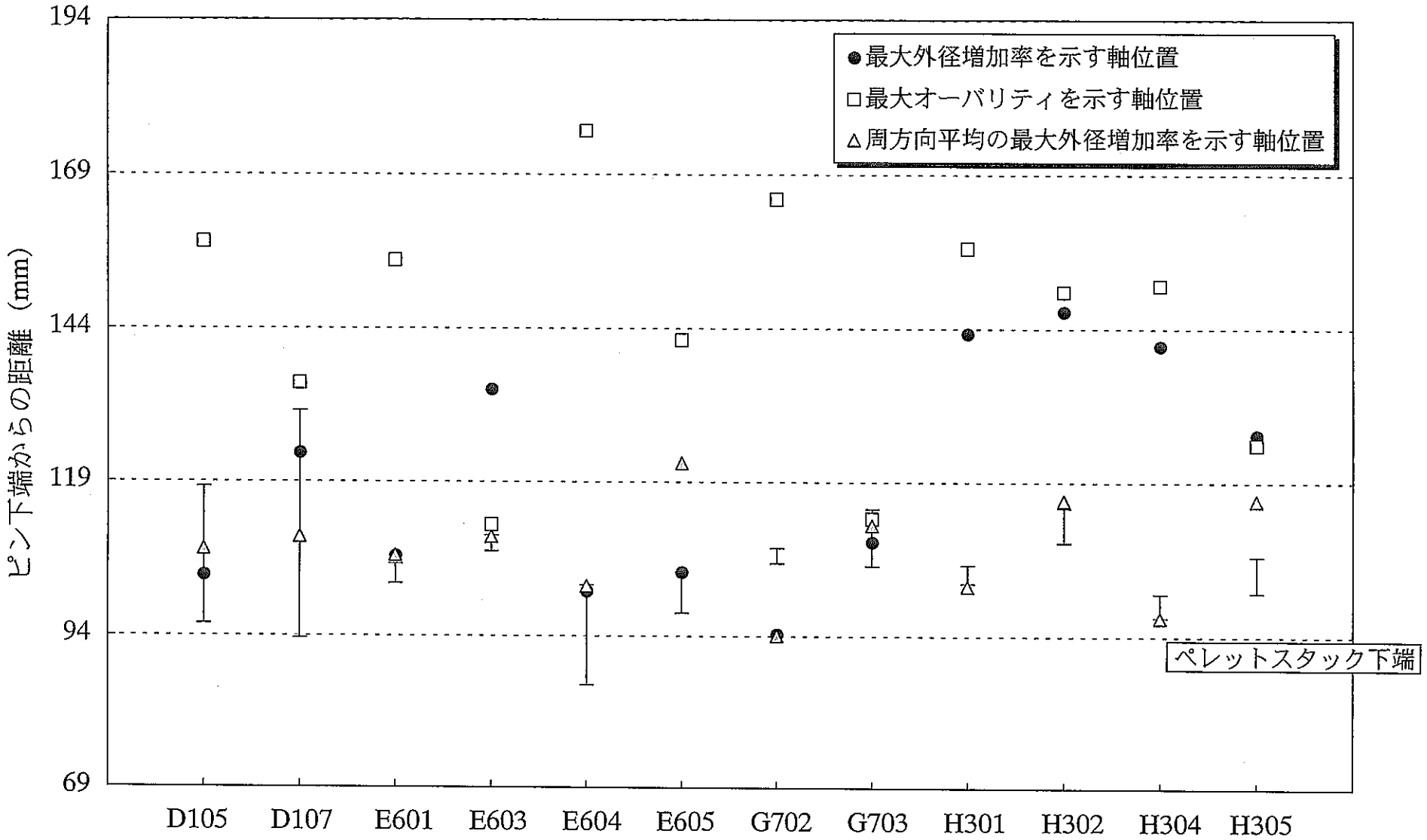


図３－15　クラック発生軸位置と最大外径データを示す軸位置の関係

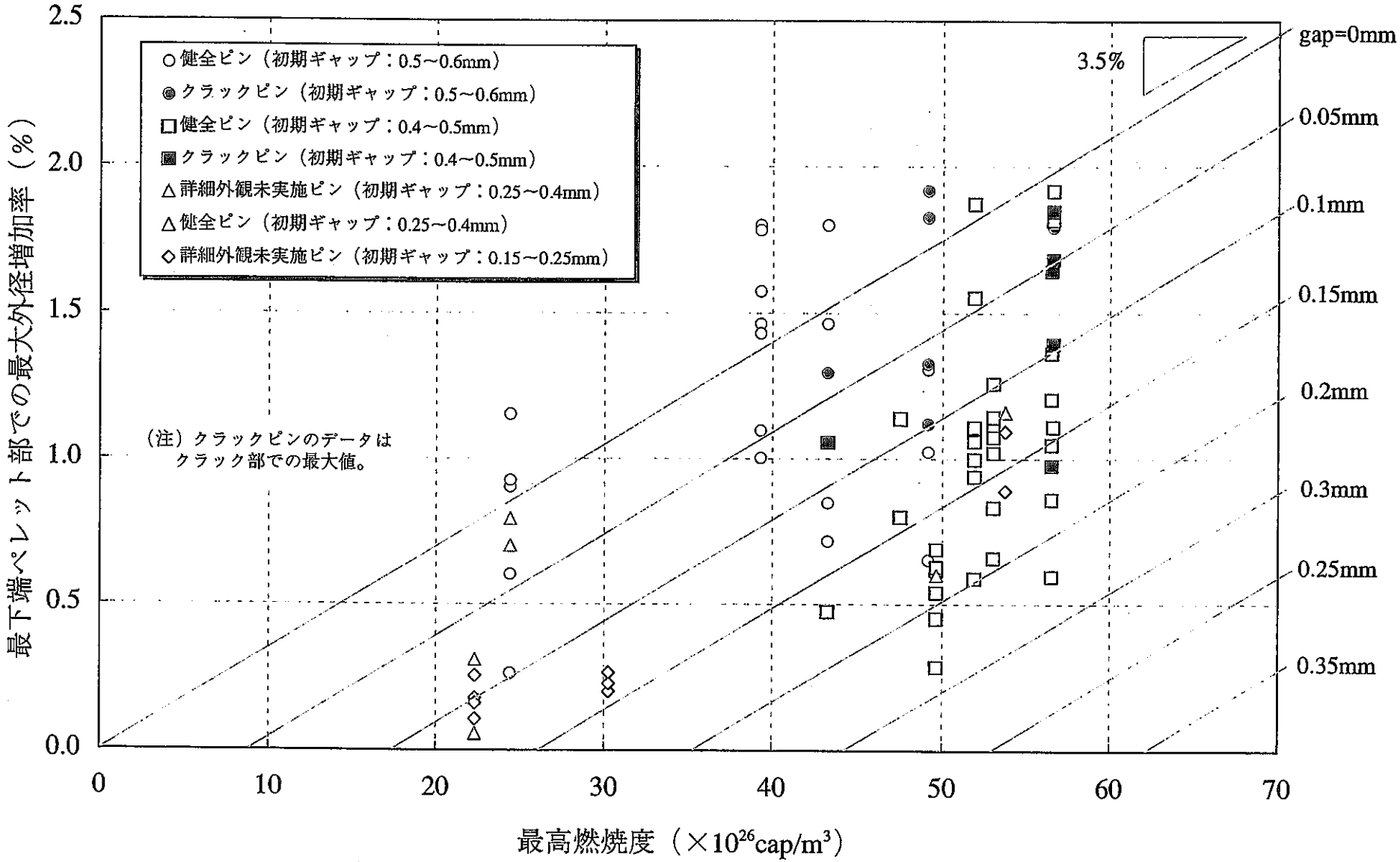


図３－16　最下端ペレット部での最大外径増加率と燃焼度の関係
（初期ギャップ依存性）

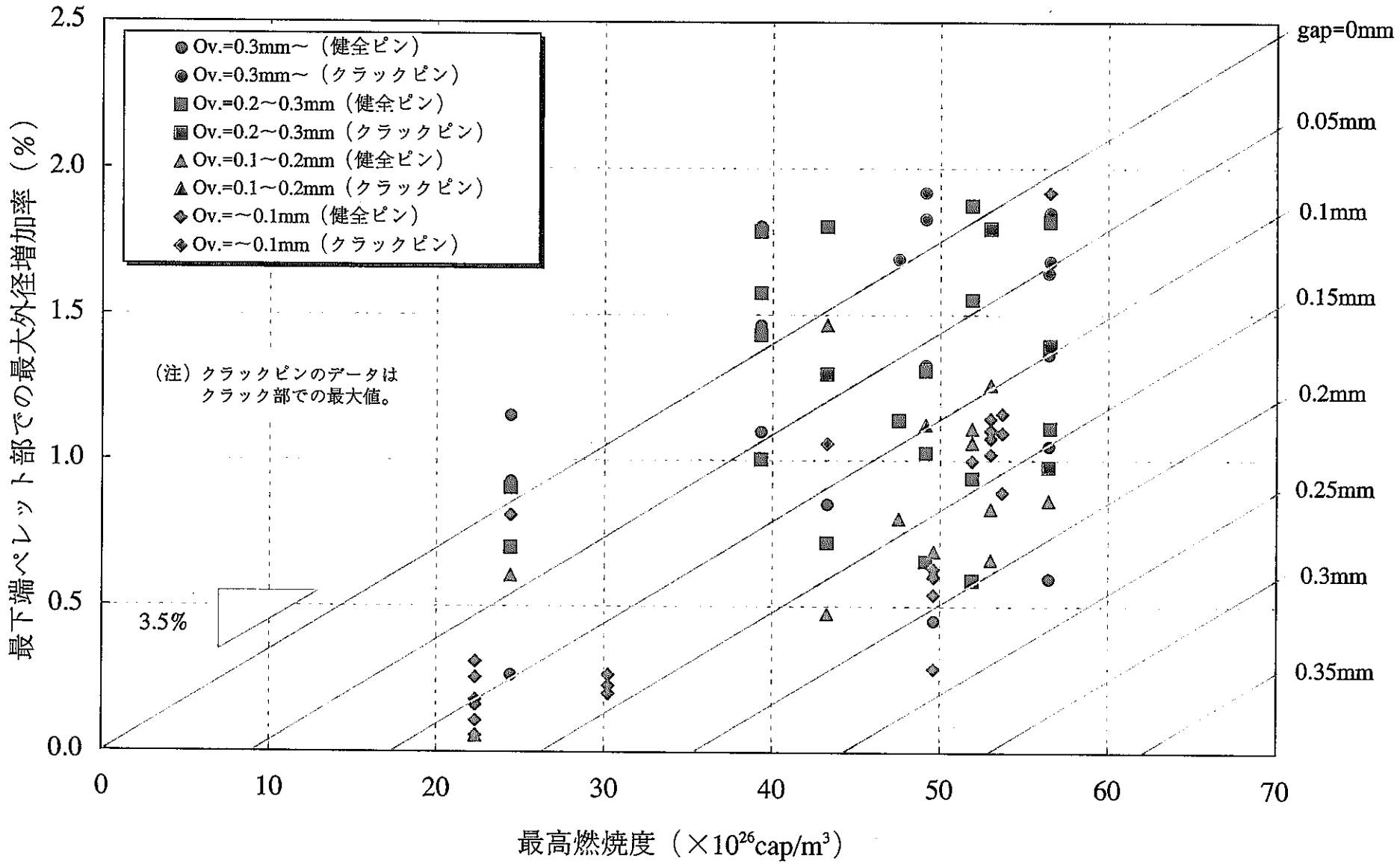


図３－17　最下端ペレット部での最大外径増加率と燃焼度の関係
（オーバリティ依存性）

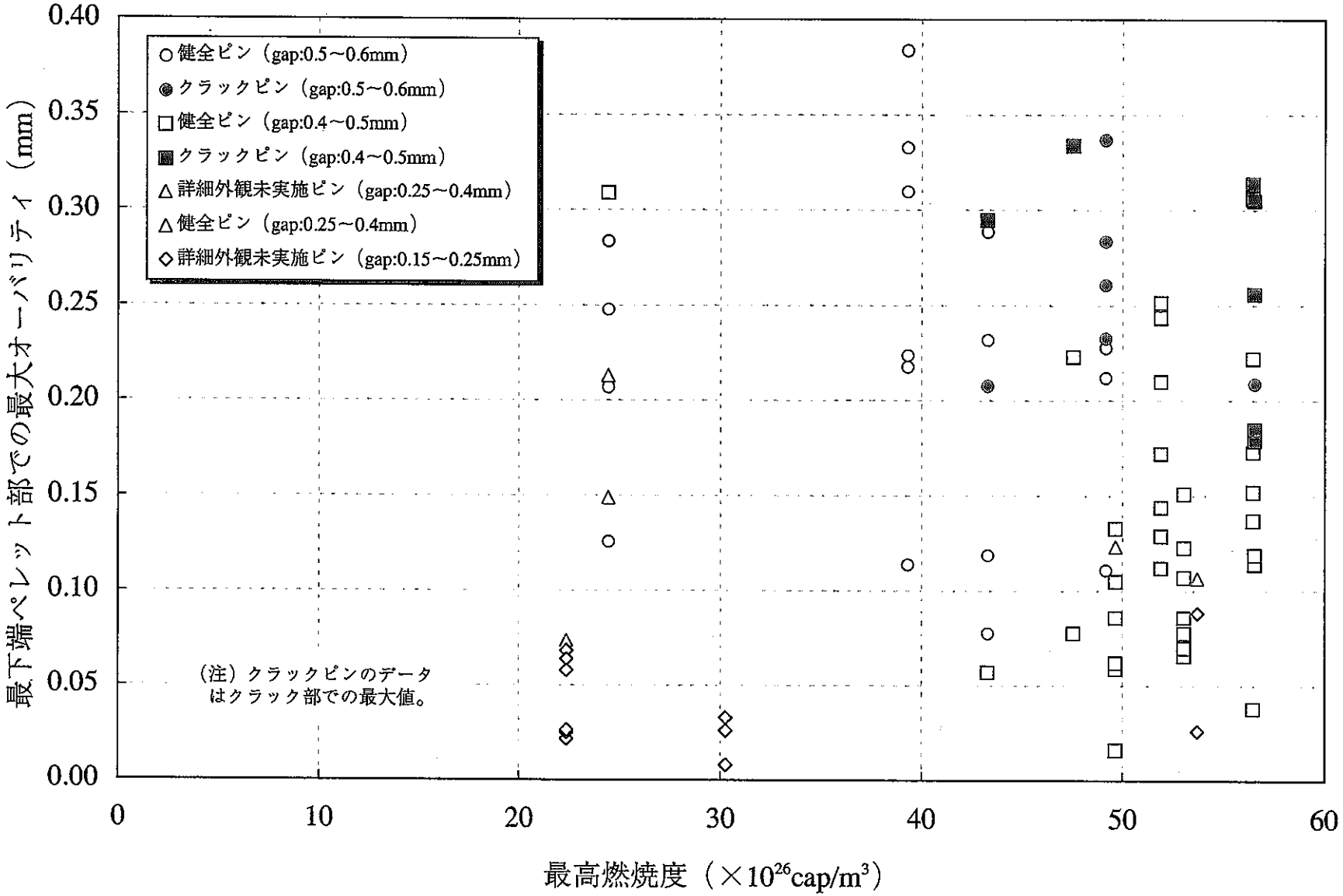


図３－18　最下端ペレット部での最大オーバリティと最高燃焼度の関係

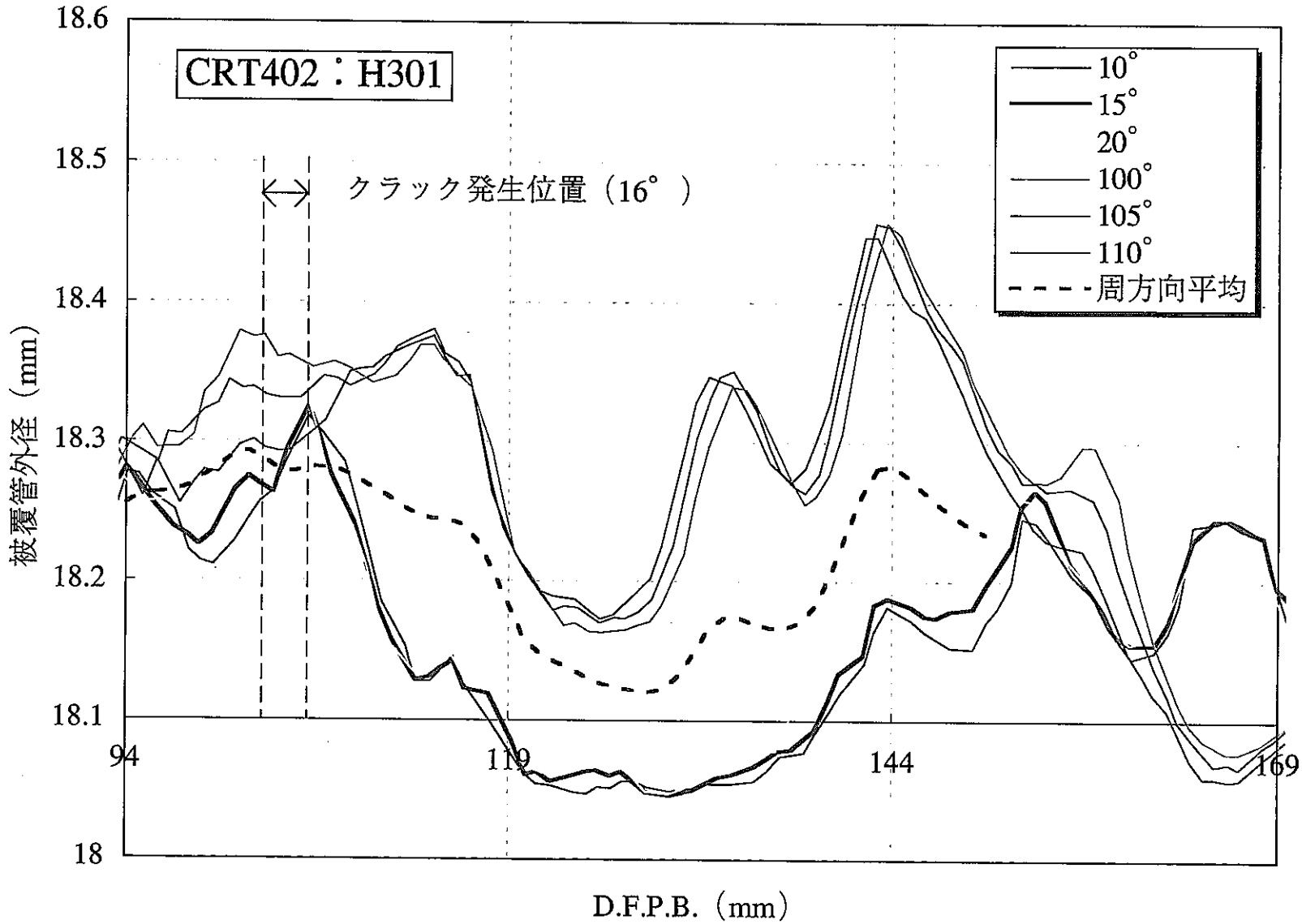


図３－19　外径軸方向プロファイル（CRT402：H301）

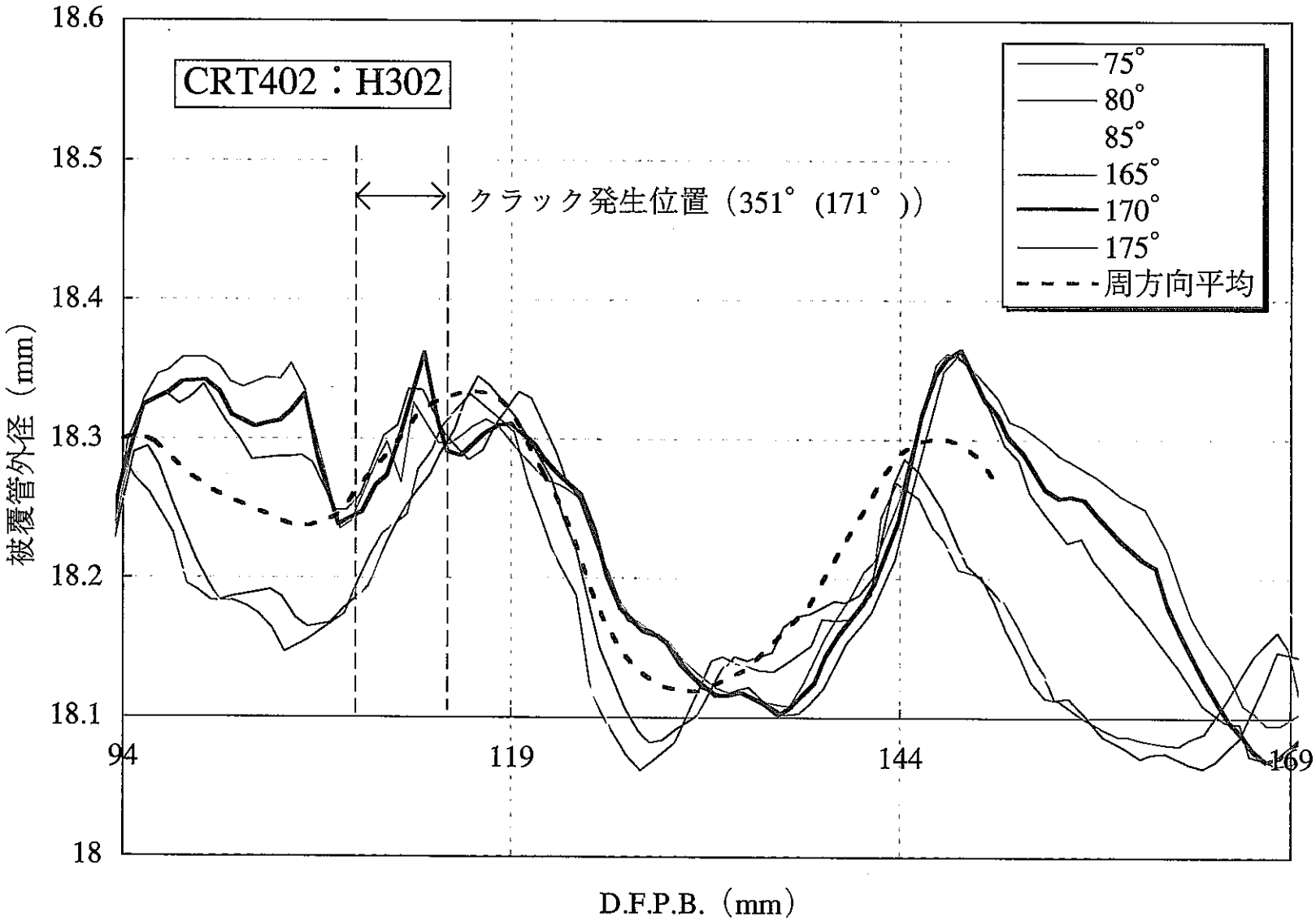


図３－20　外径軸方向プロファイル（CRT402：H302）

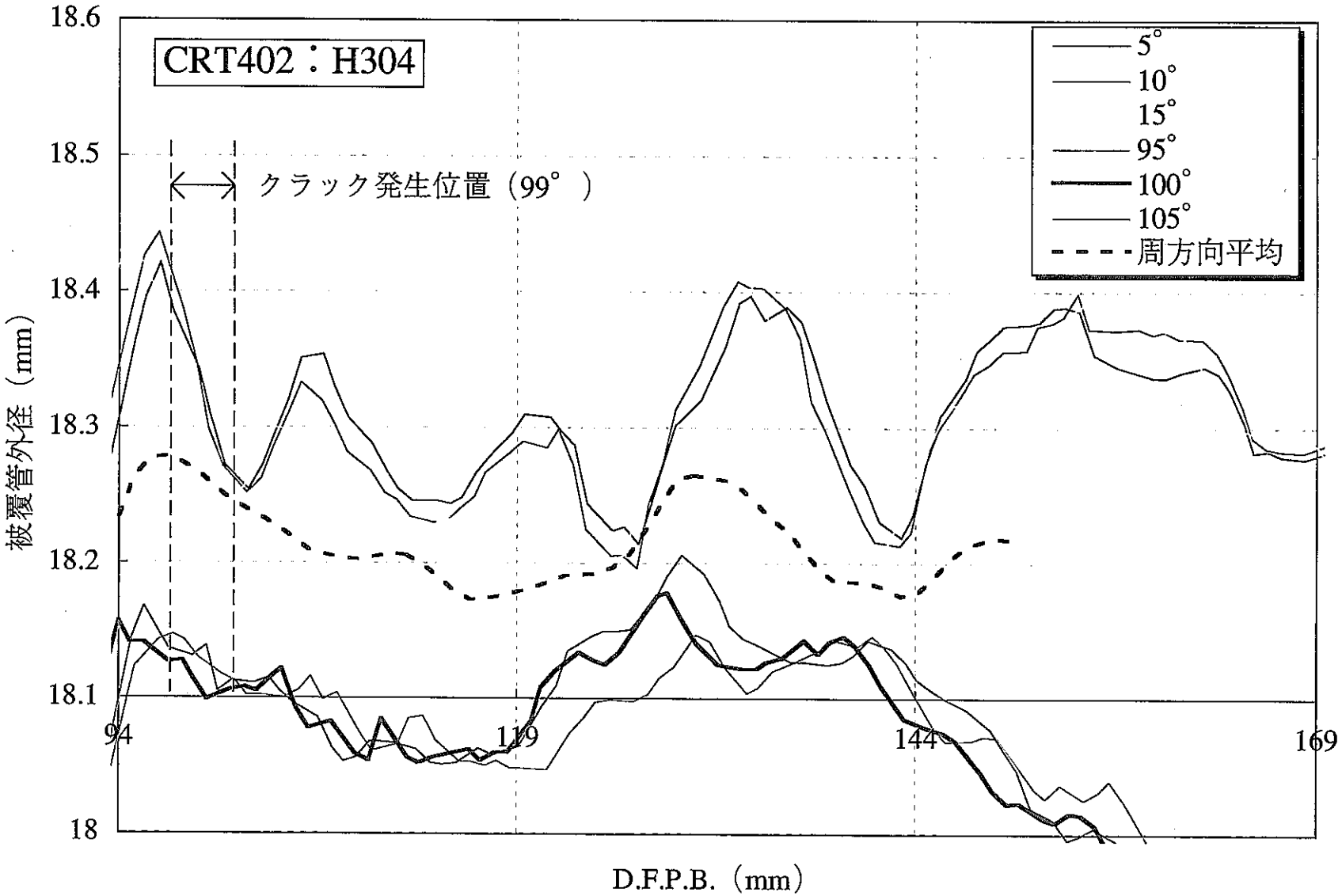


図３－21　外径軸方向プロファイル（CRT402：H304）

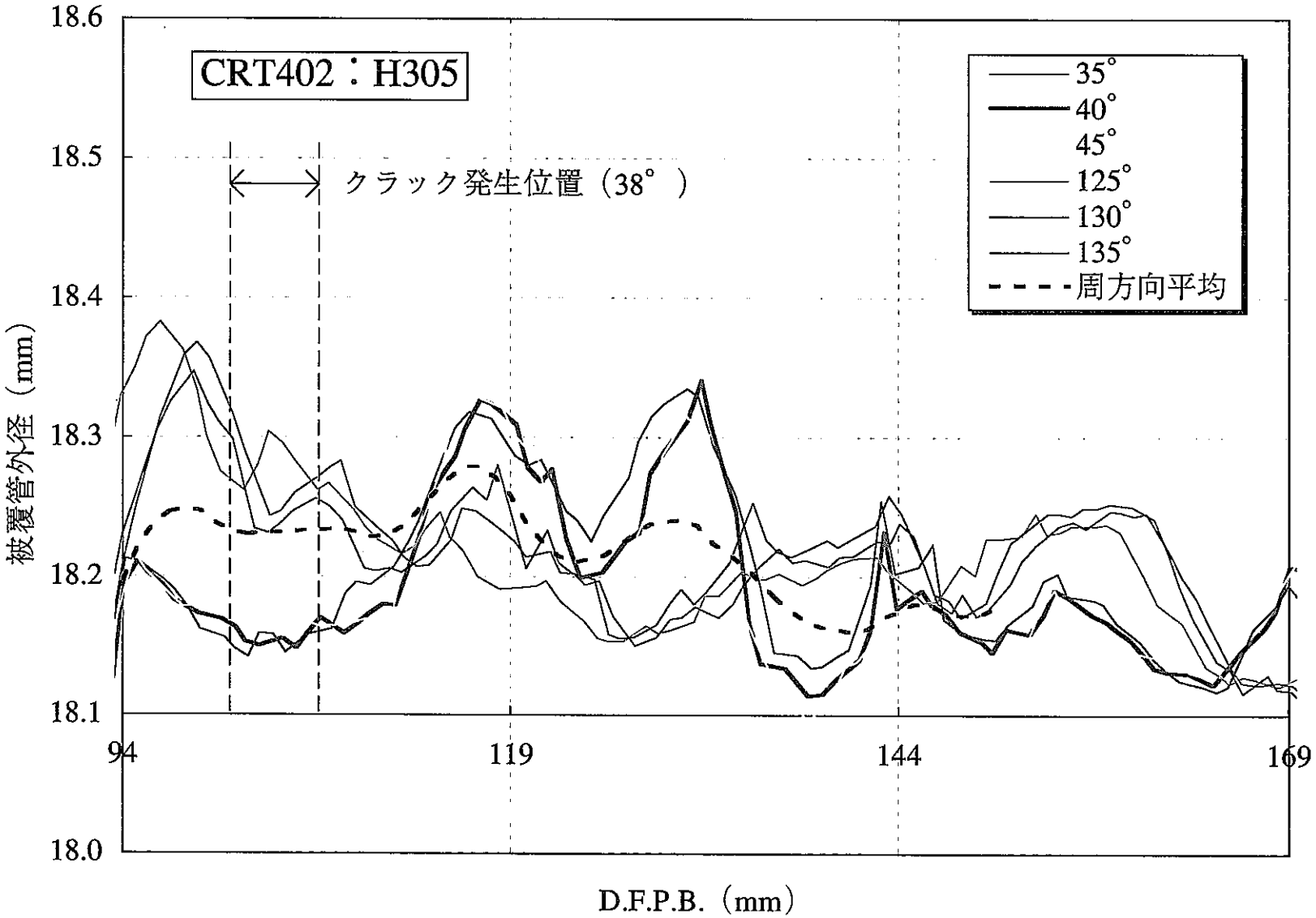


図３－22　外径軸方向プロファイル（CRT402：H305）

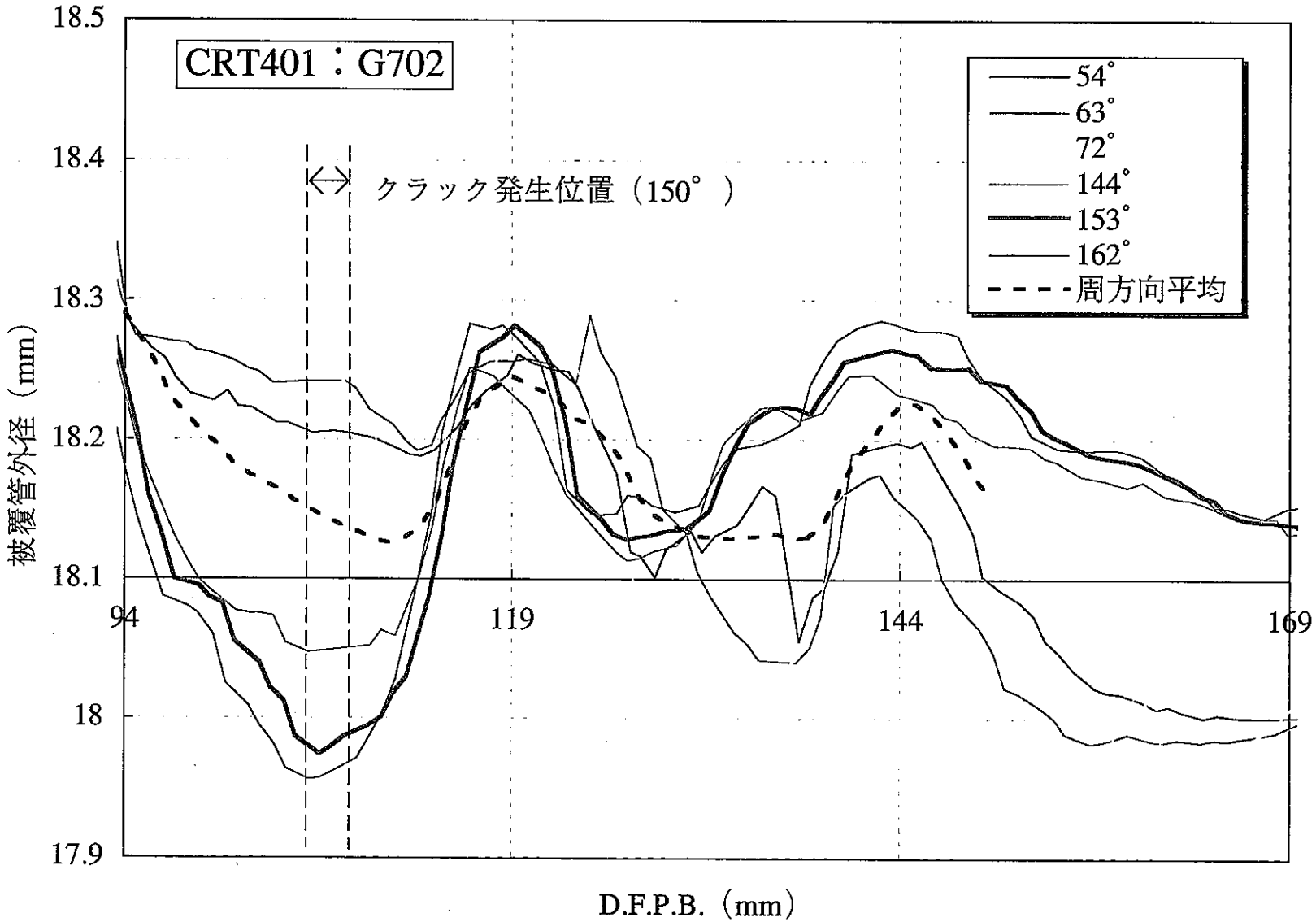


図３－23　外径軸方向プロファイル（CRT401：G702）

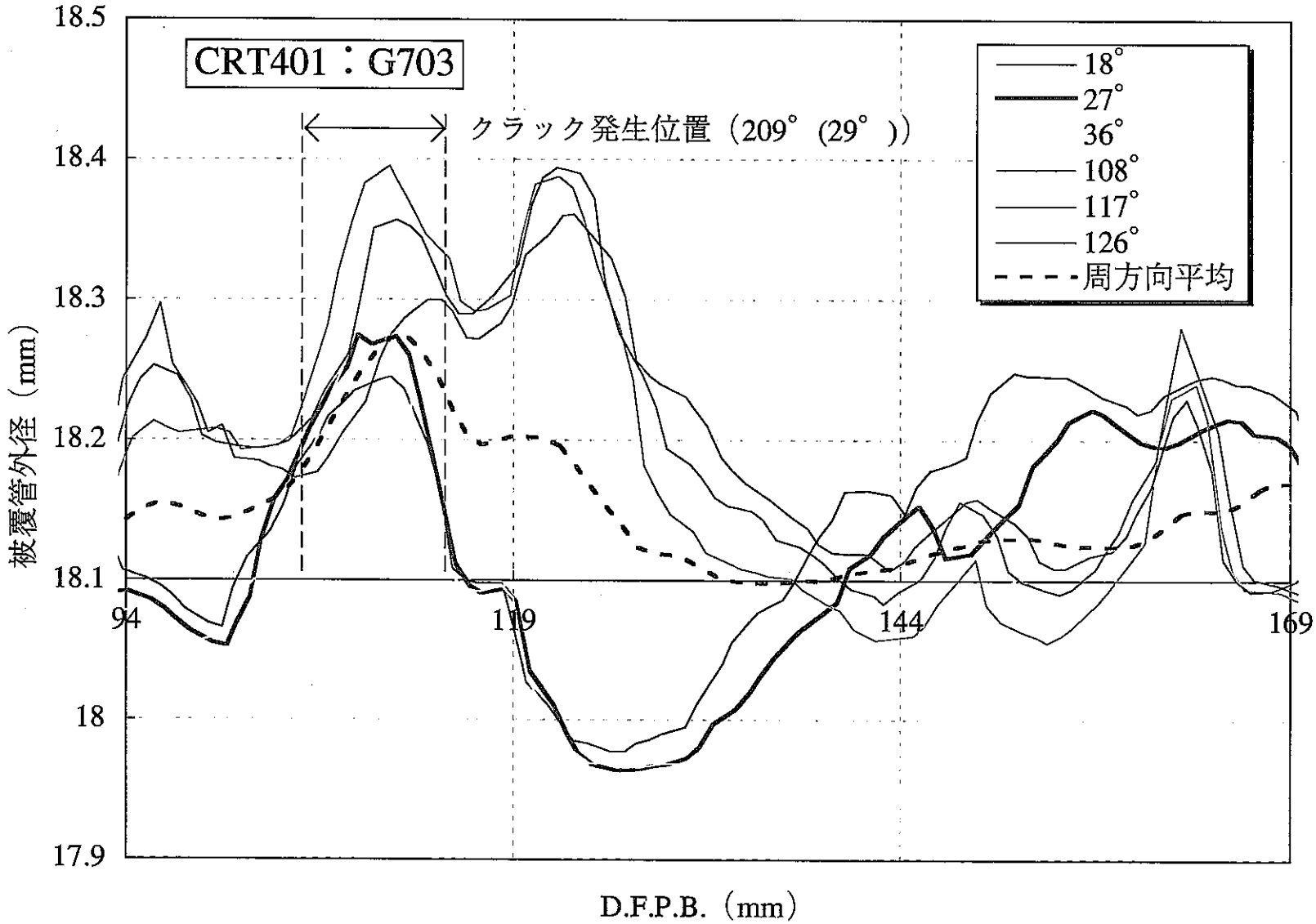


図３－24　外径軸方向プロファイル（CRT401：G703）

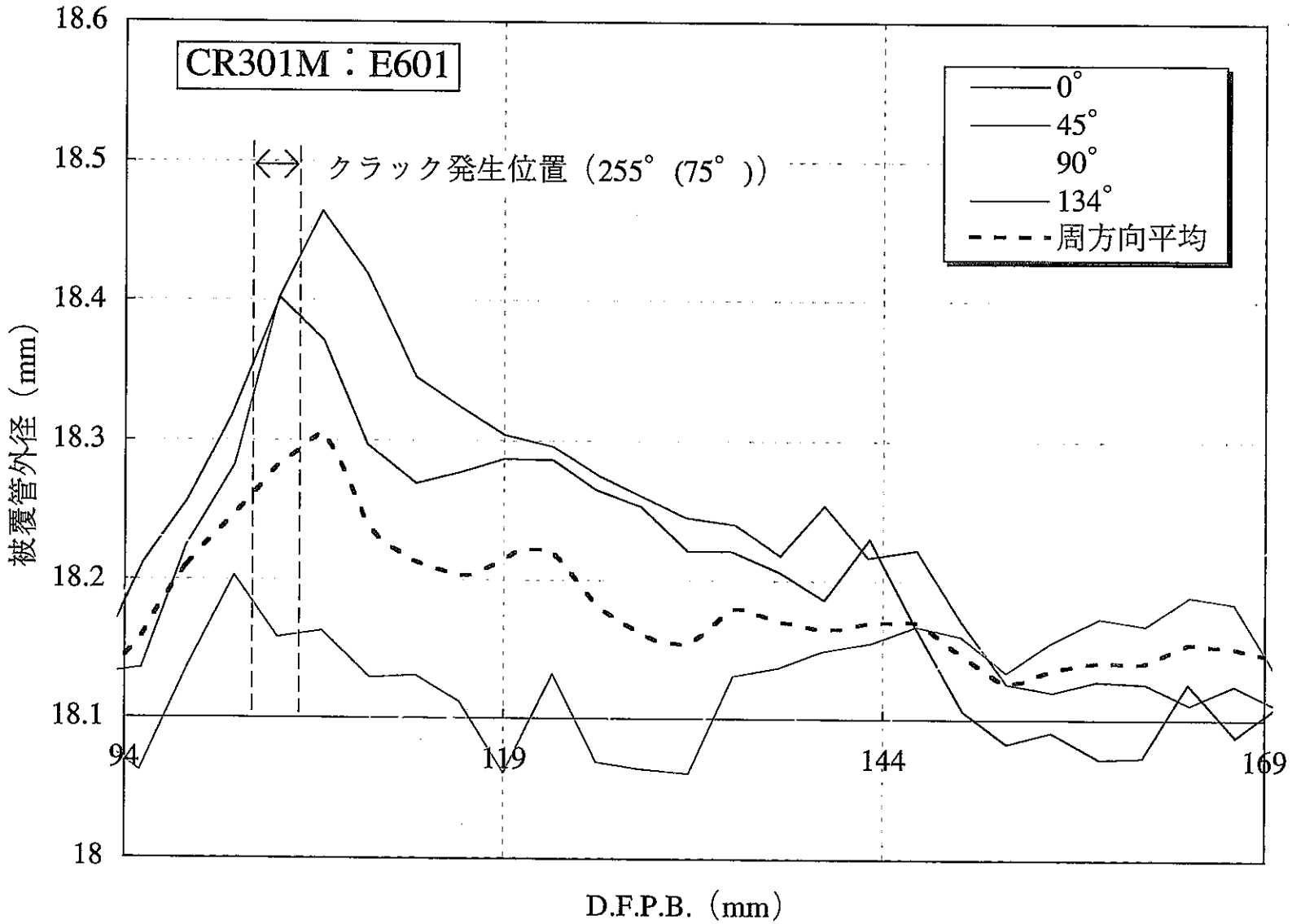


図３－25　外径軸方向プロファイル（CR301M：E601）

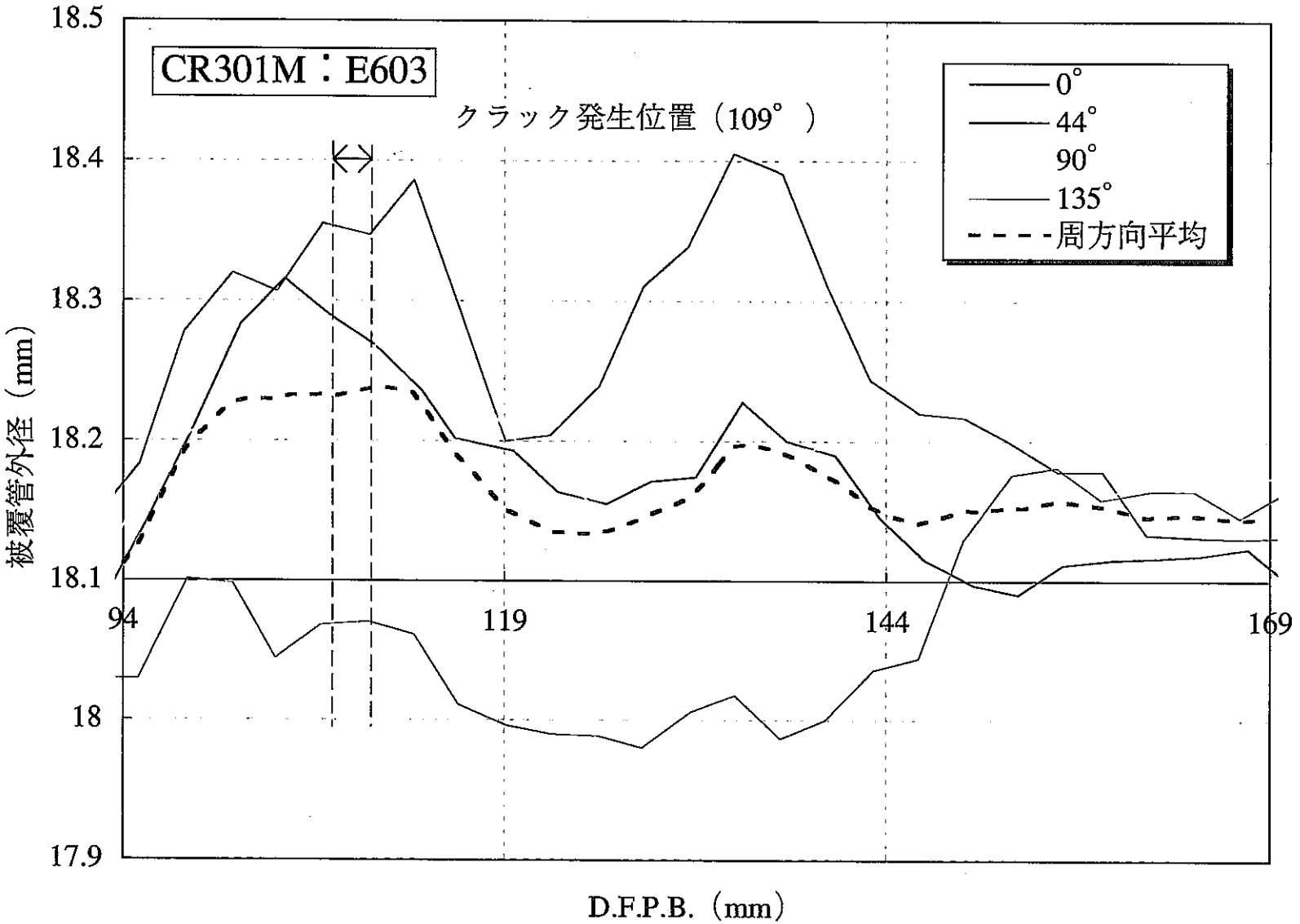


図３－26　外径軸方向プロファイル（CR301M：E603）

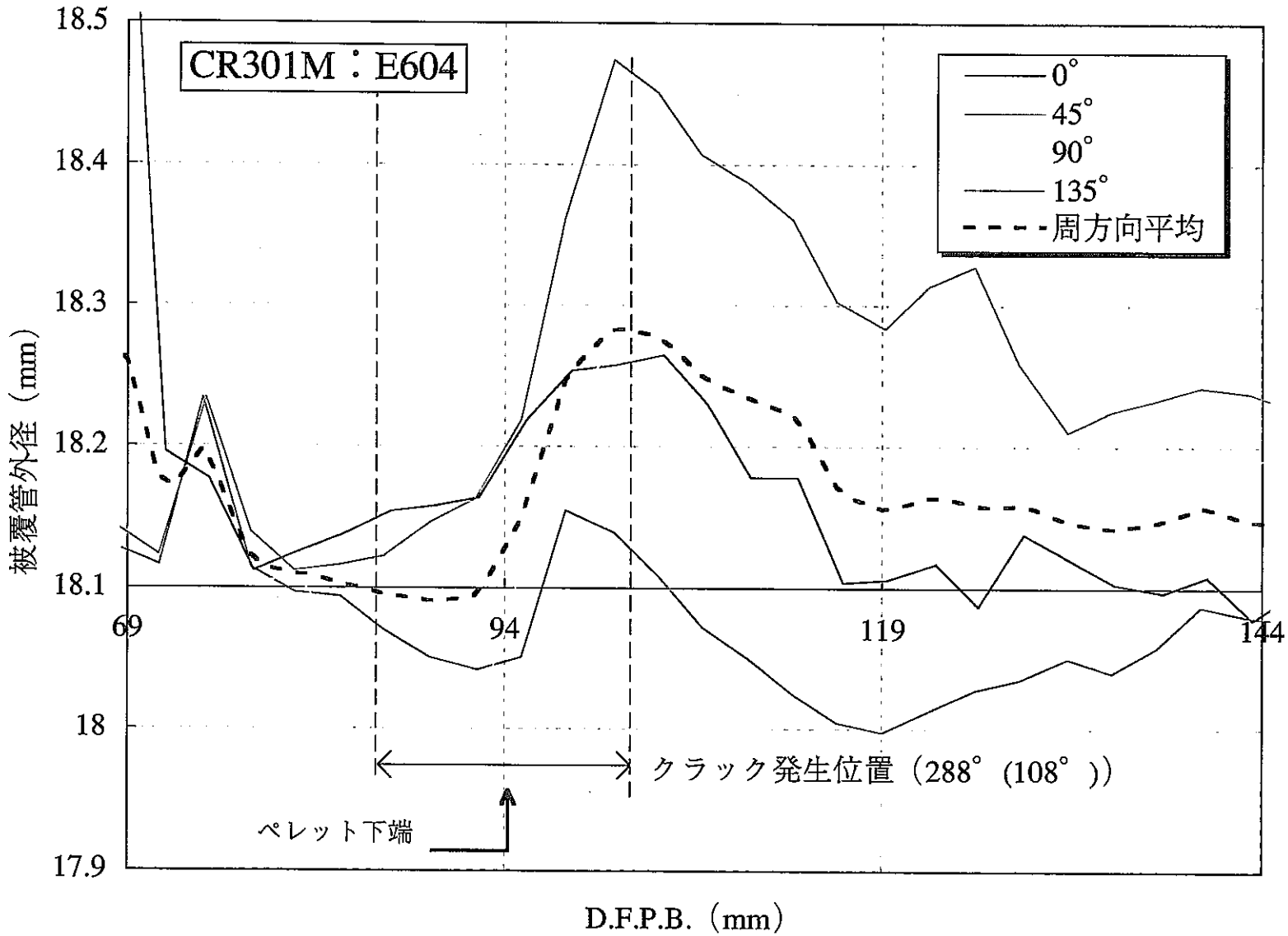


図３－27　外径軸方向プロファイル（CR301M：E604）

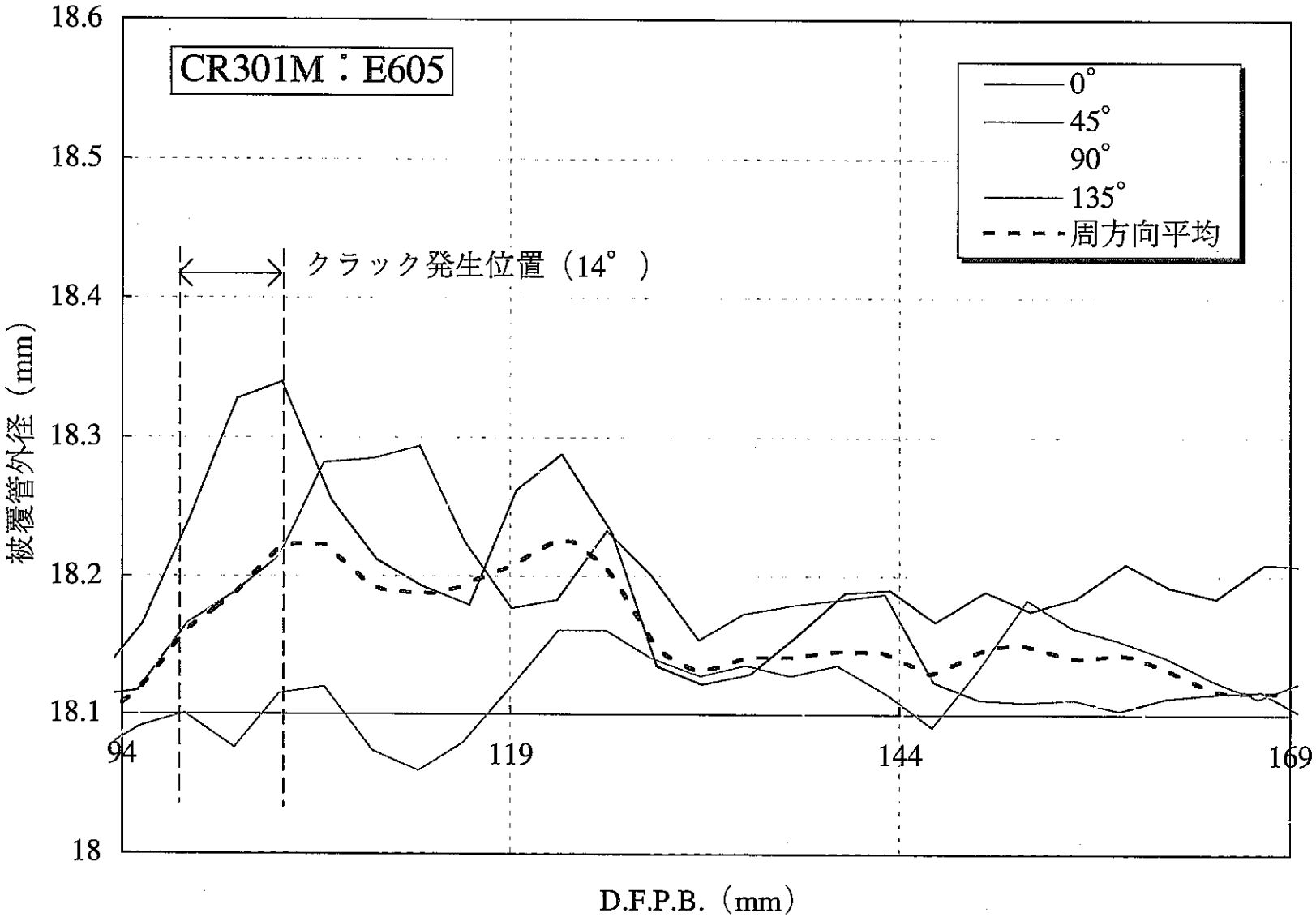


図３－28　外径軸方向プロファイル（CR301M：E605）

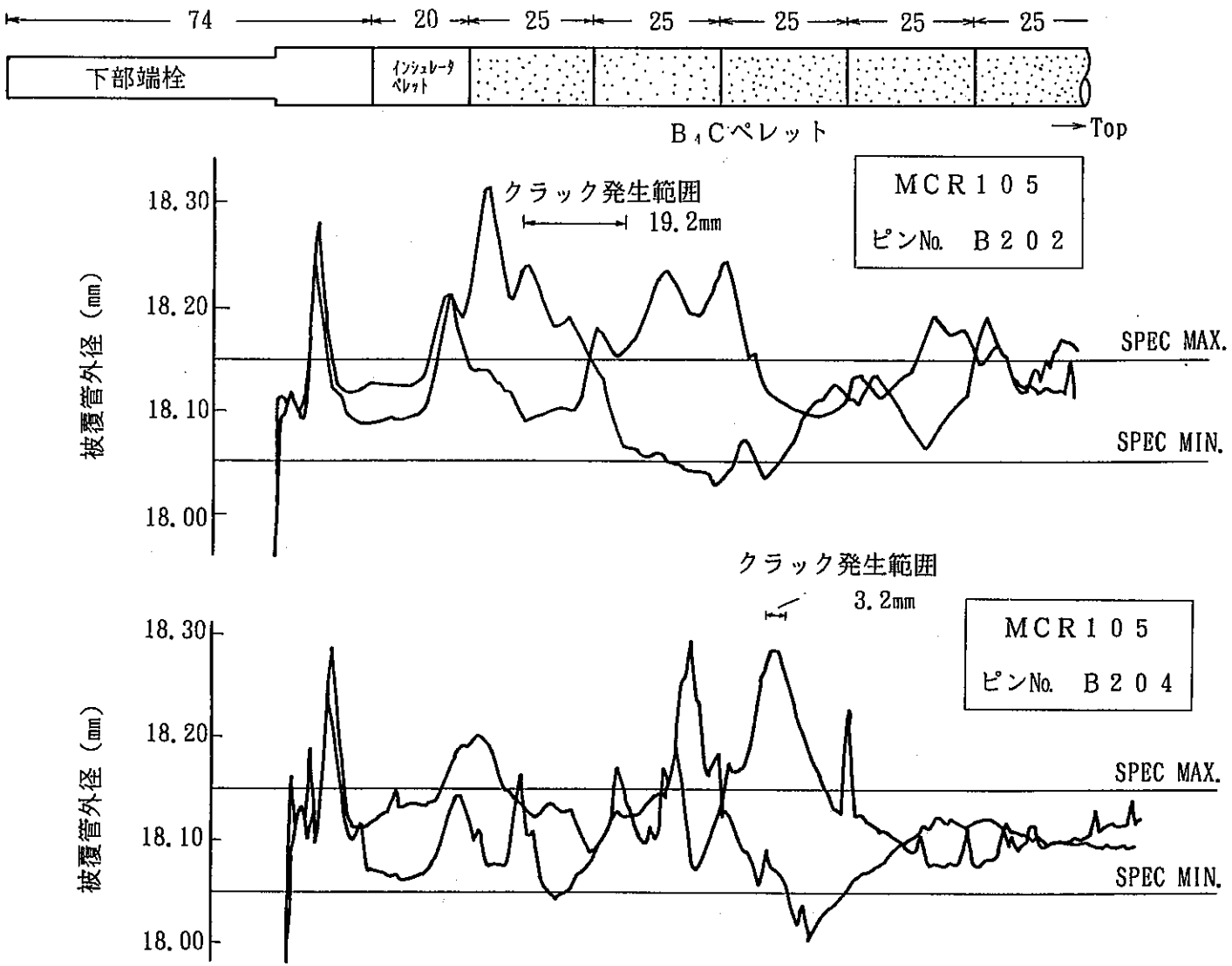


図３－29　外径軸方向プロファイル（MCR105：B202、B204）

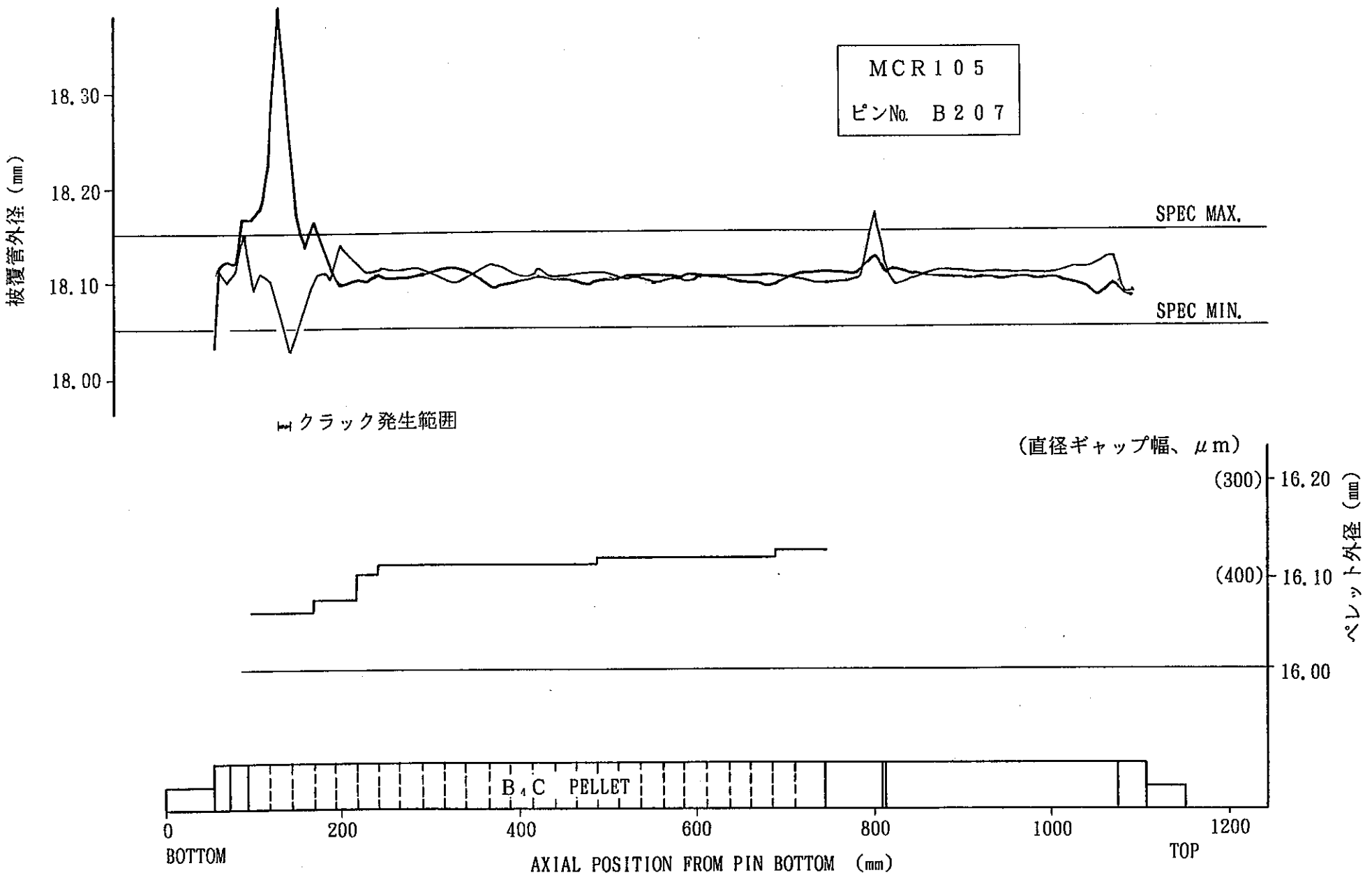


図３－30　外径軸方向プロファイル（MCR105：B207）

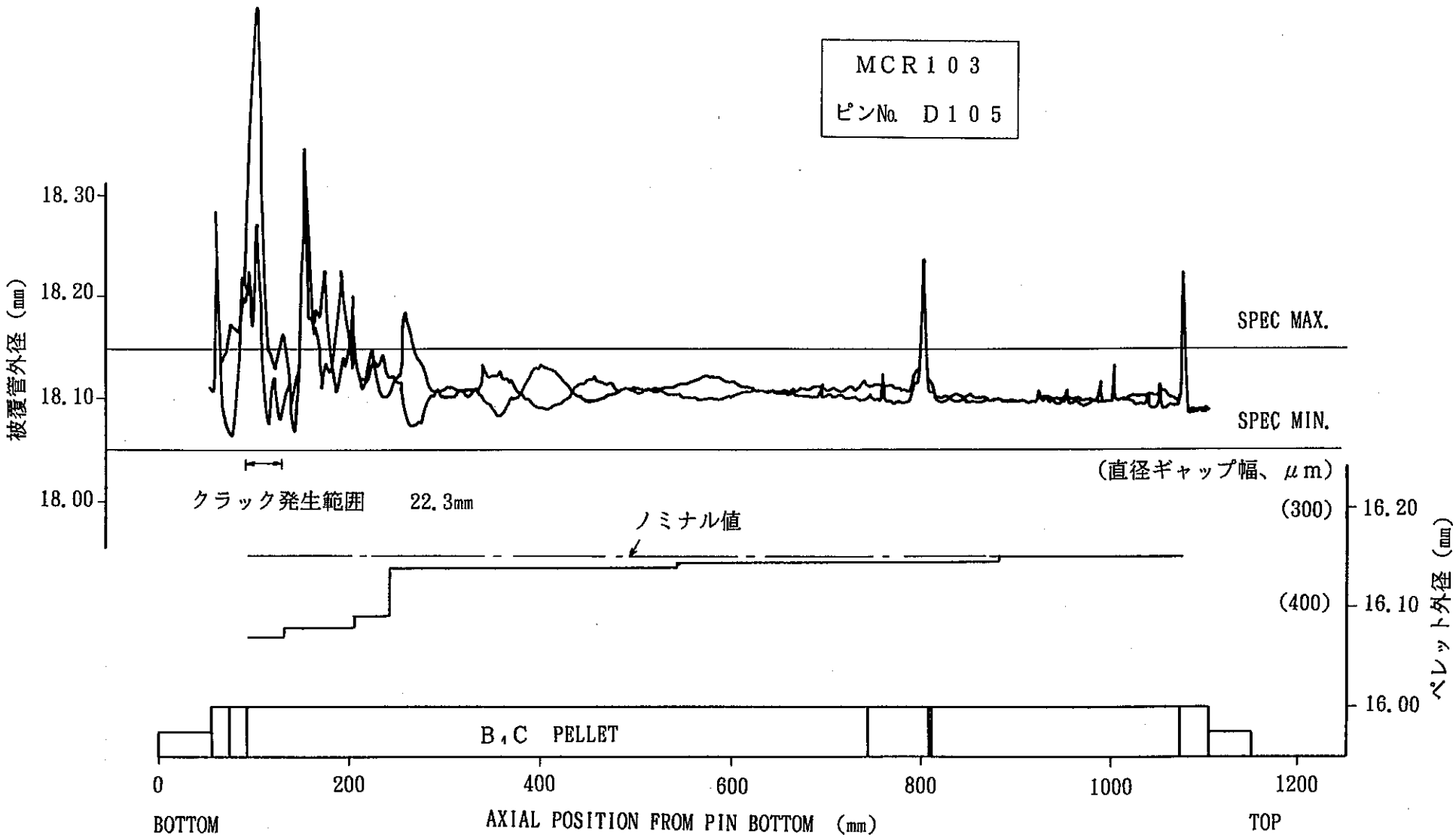


図３－31　外径軸方向プロファイル（MCR103：D105）

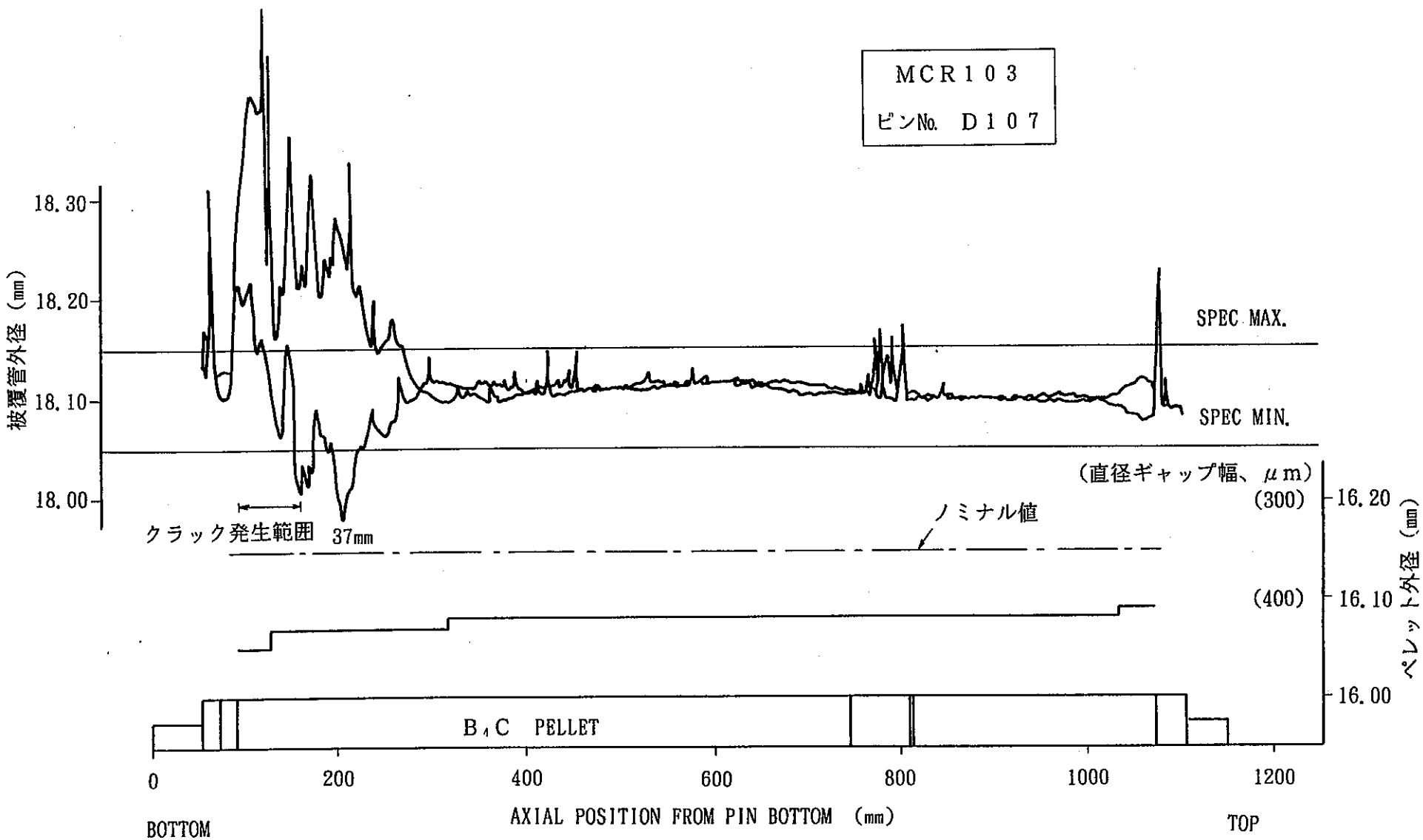


図３－32　外径軸方向プロファイル（MCR103：D107）

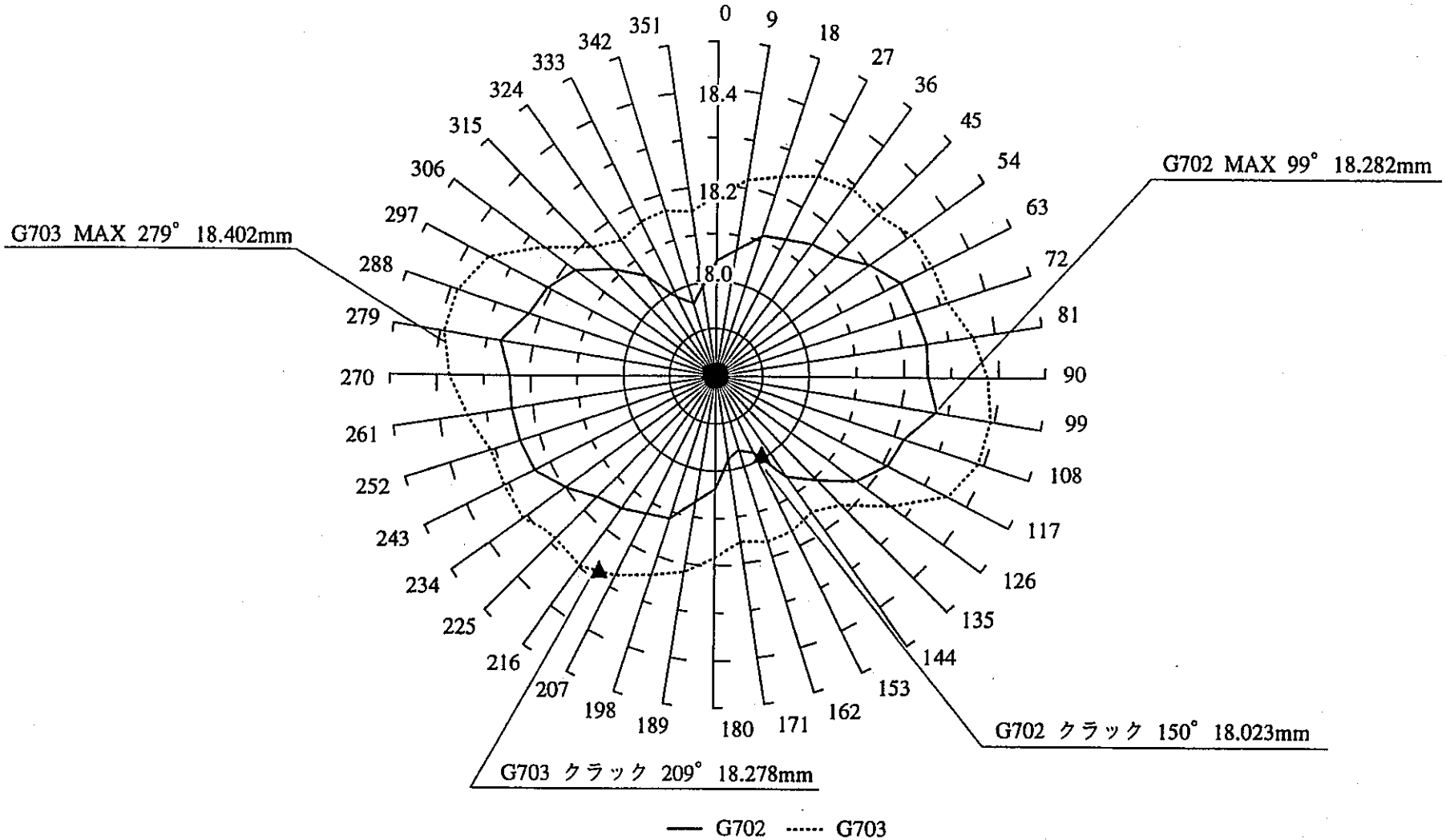


図３－33　クラック発生位置の周方向プロファイル（CRT401）

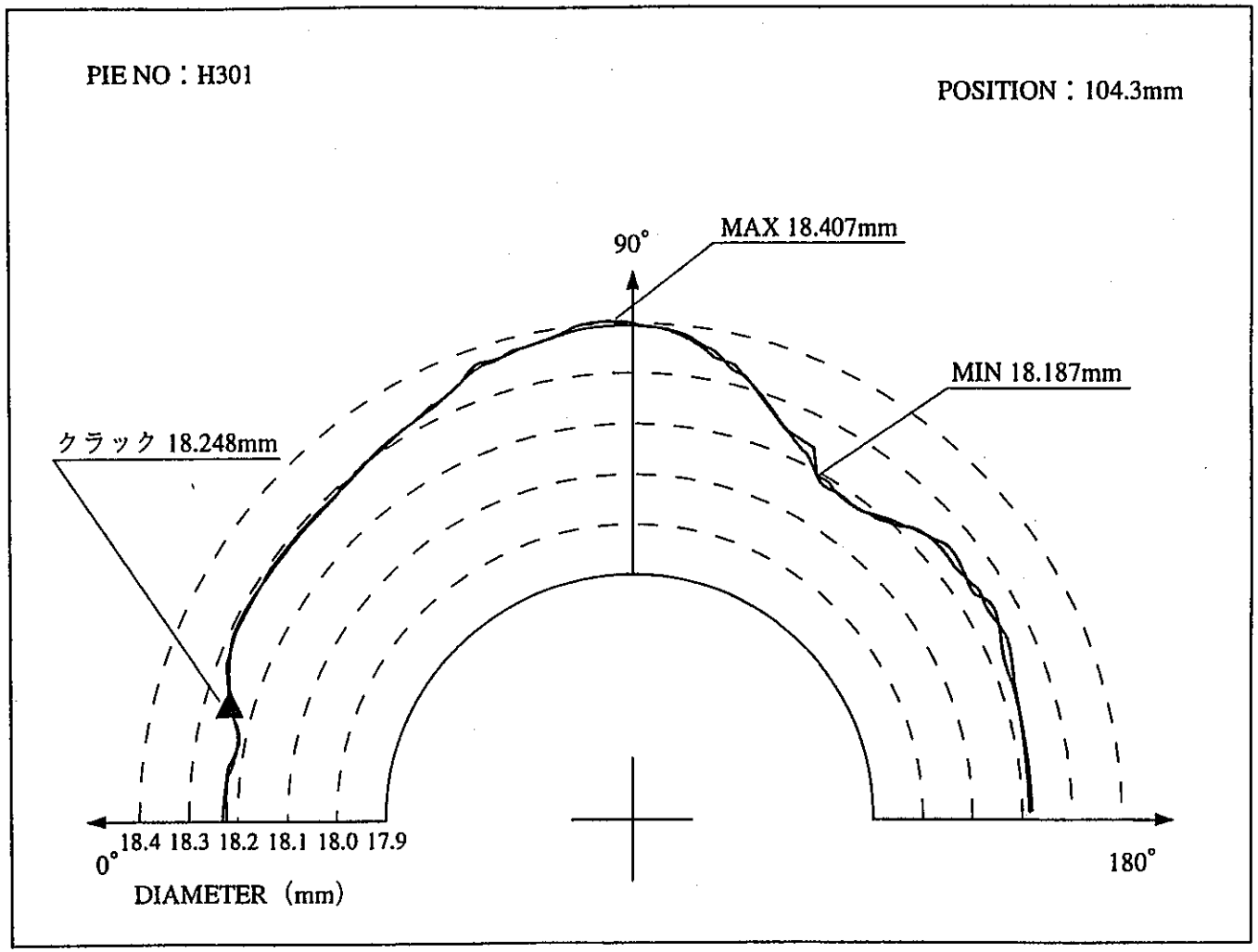


図３－34　クラック発生位置の周方向プロファイル（CRT402：H301）

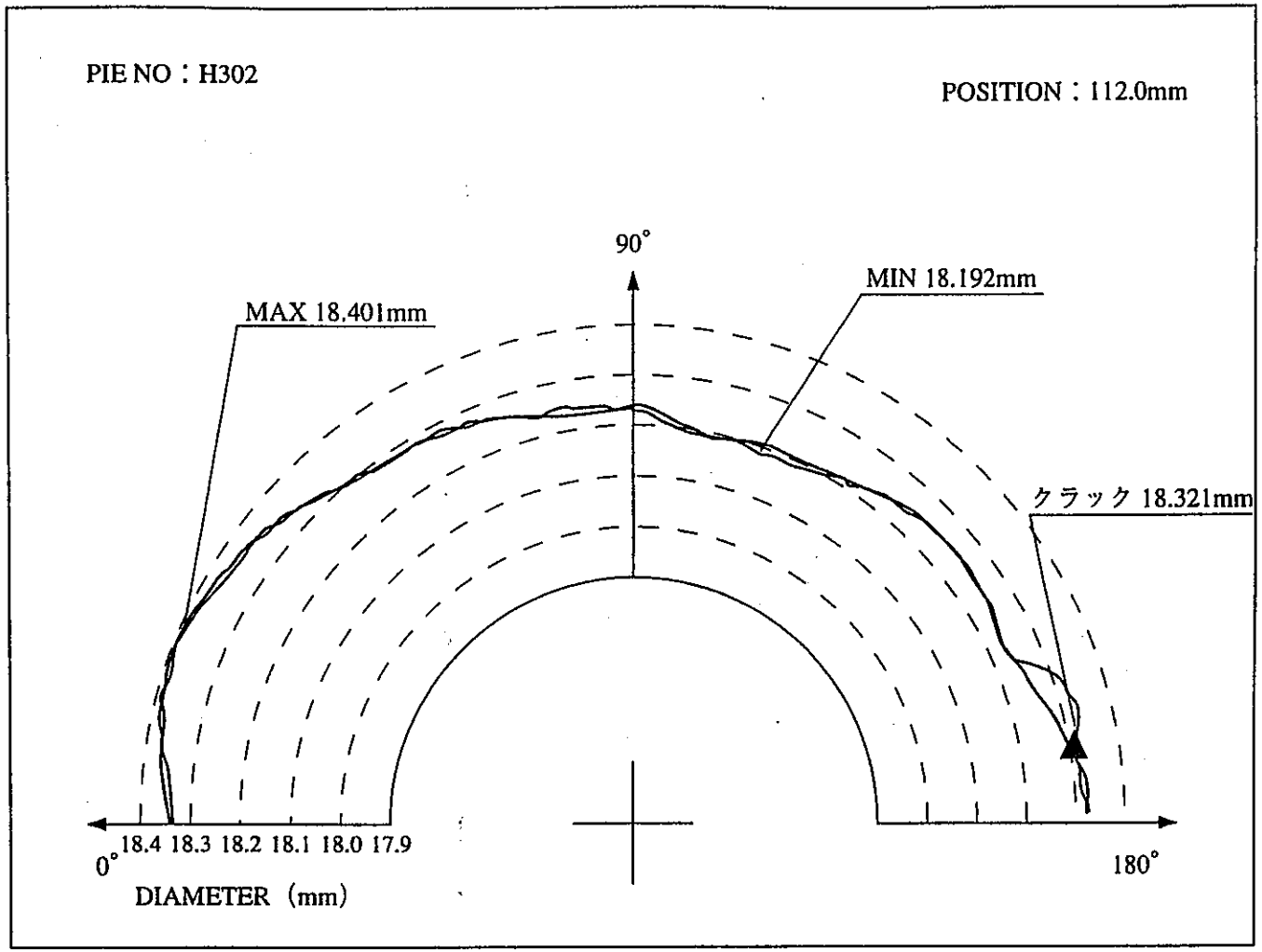


図３－35　クラック発生位置の周方向プロファイル（CRT402：H302）

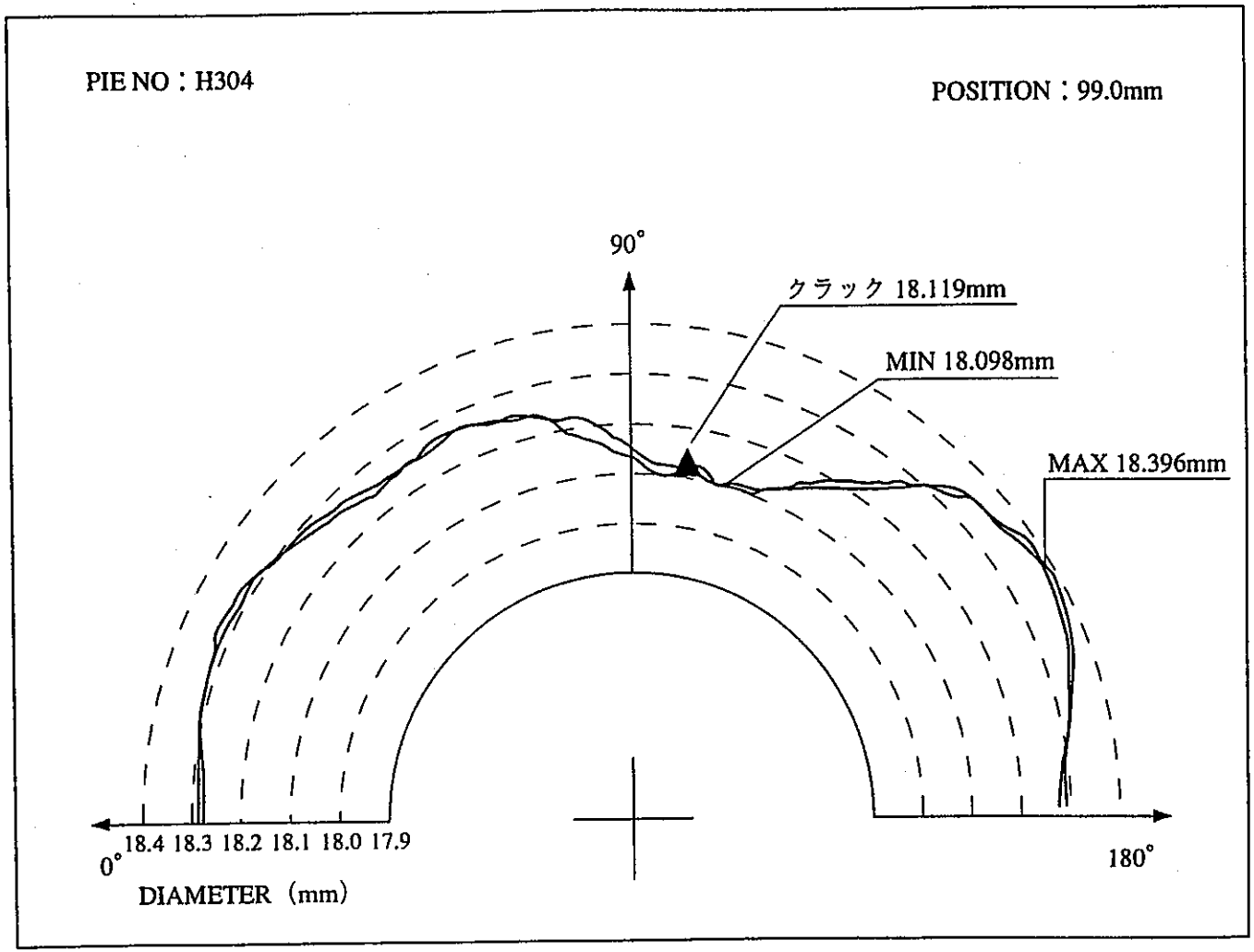


図３－36　クラック発生位置の周方向プロファイル（CRT402：H304）

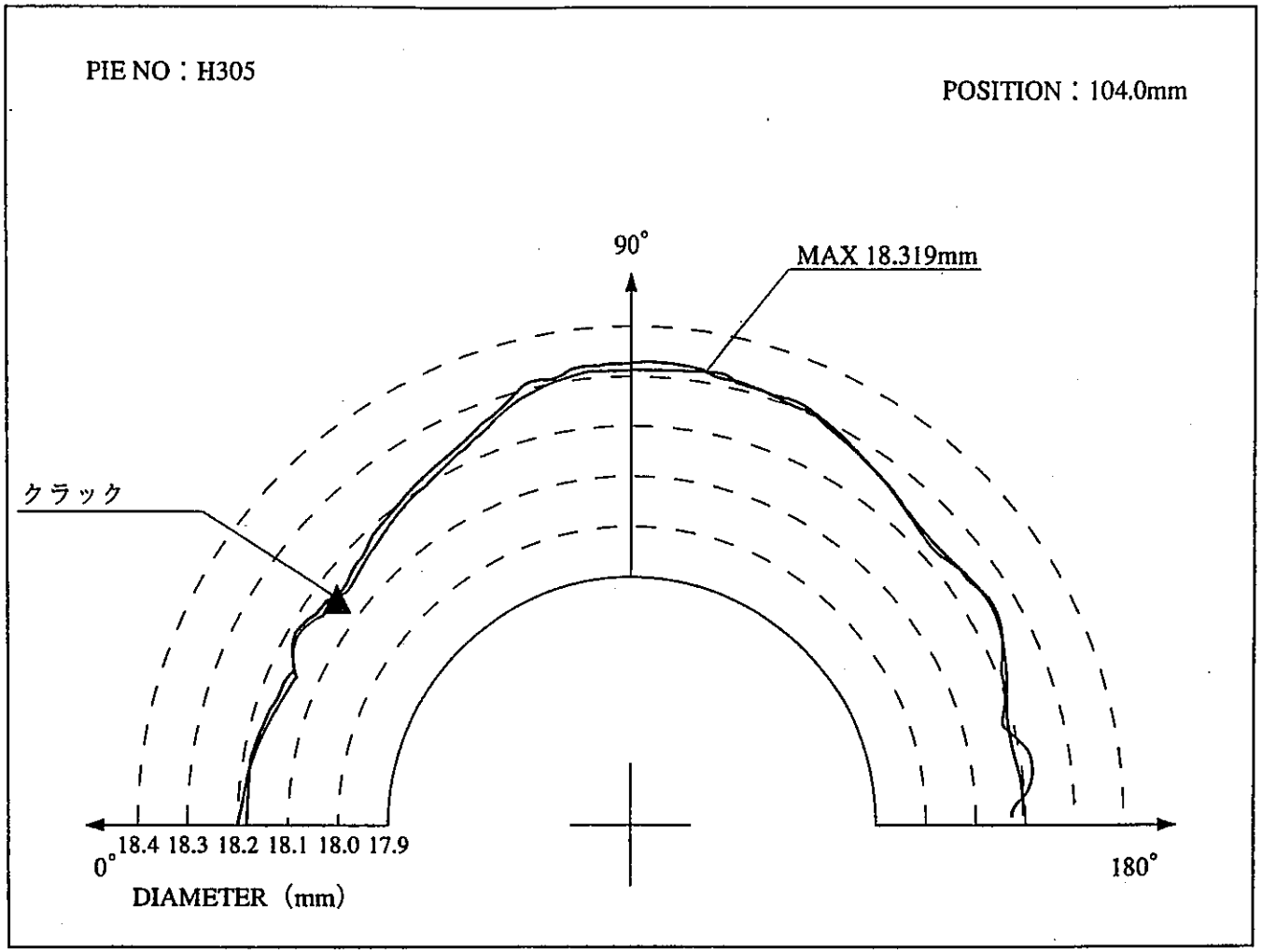


図３－37　クラック発生位置の周方向プロファイル（CRT402：H305）

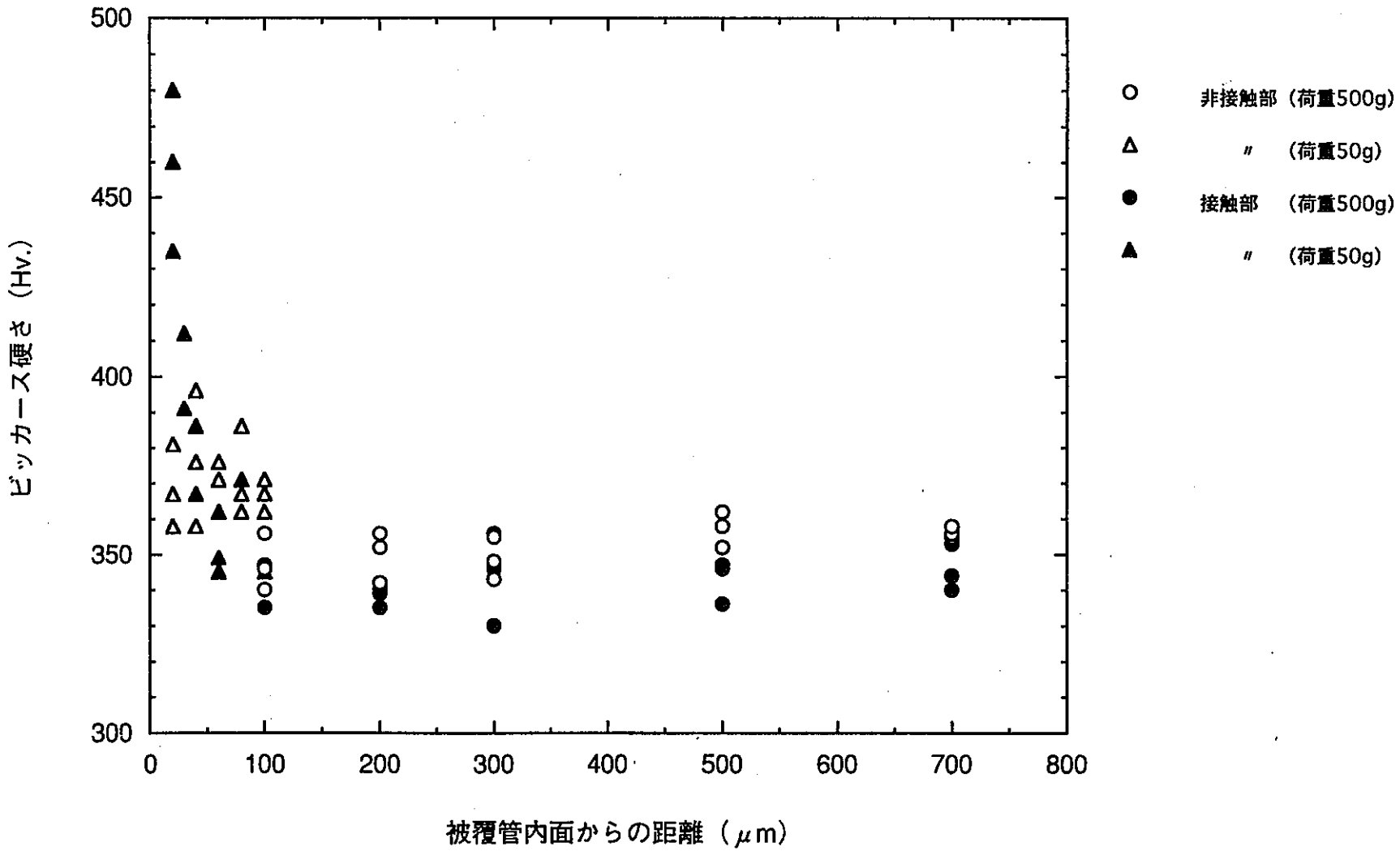


図３－38 CRT402制御棒被覆管（H301O2）横断面の硬さ

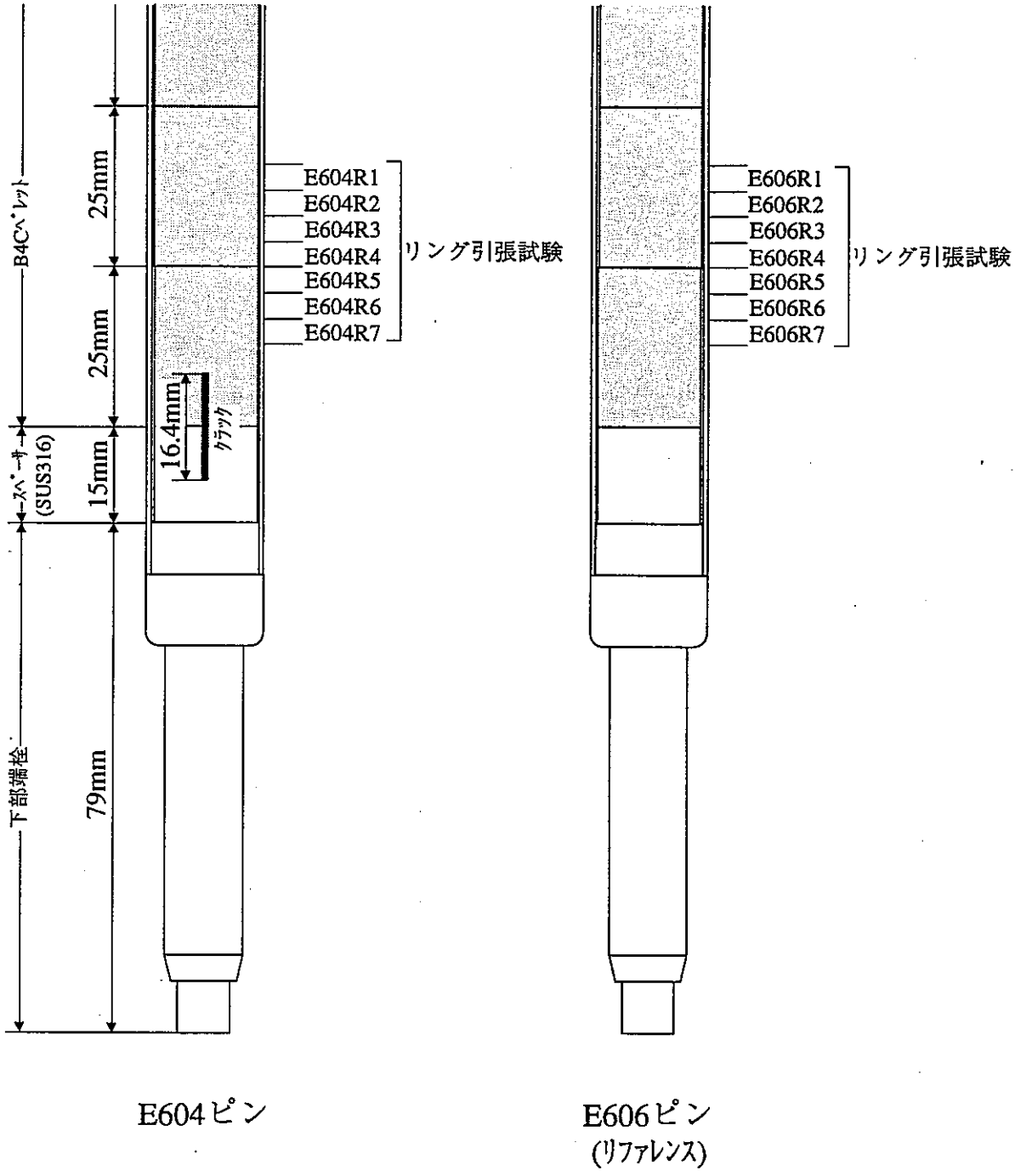
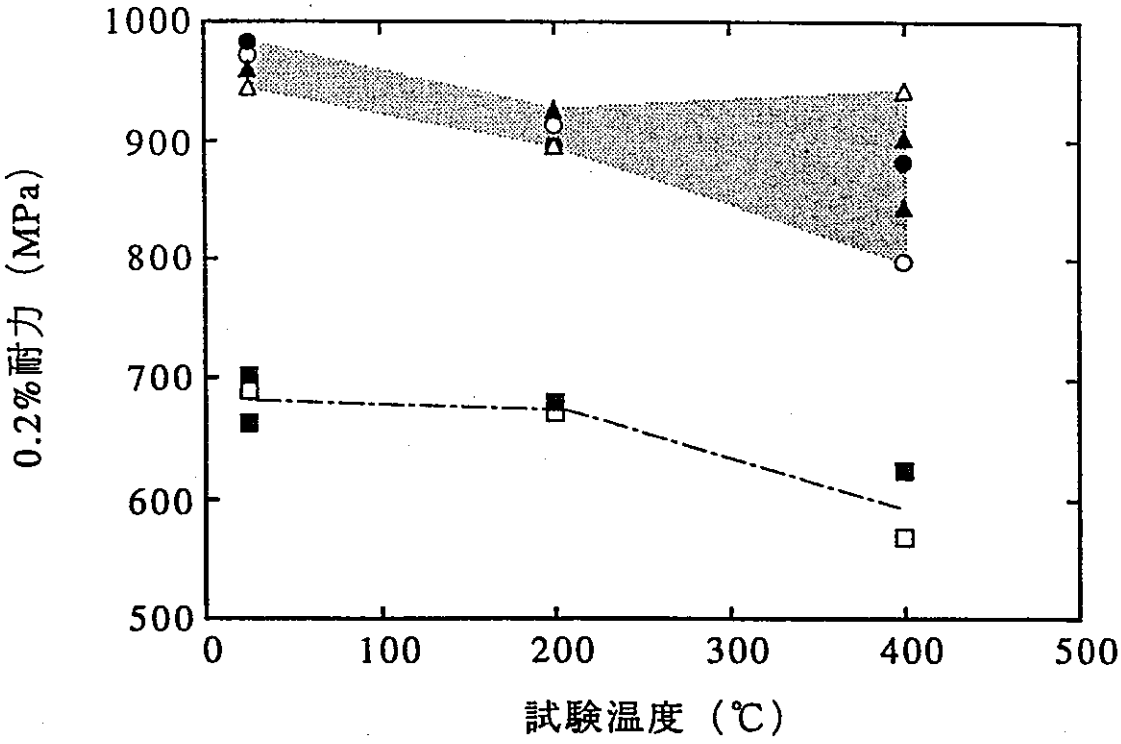
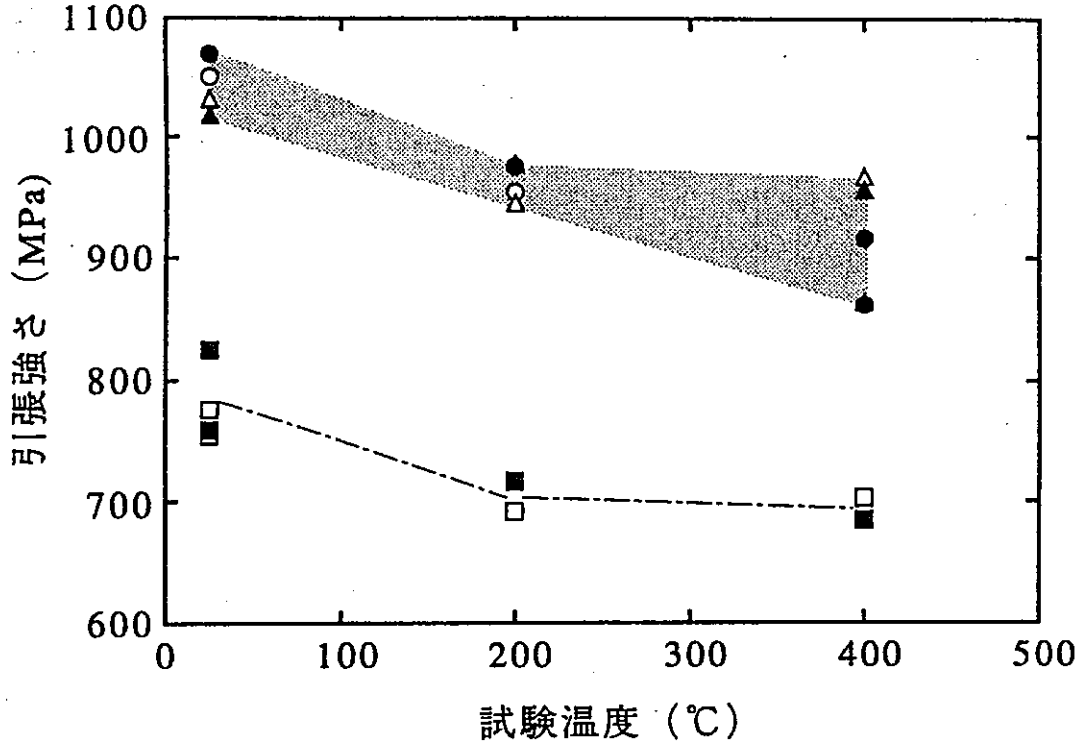


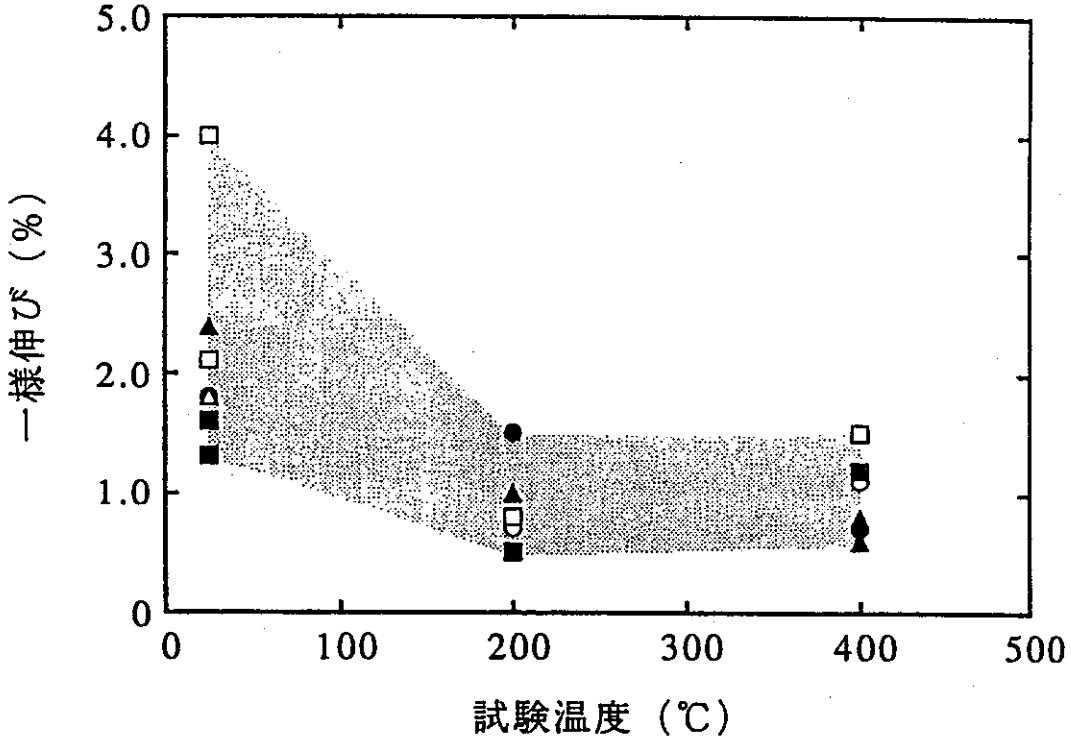
図３－39 リング引張試験用試料の試料採取位置

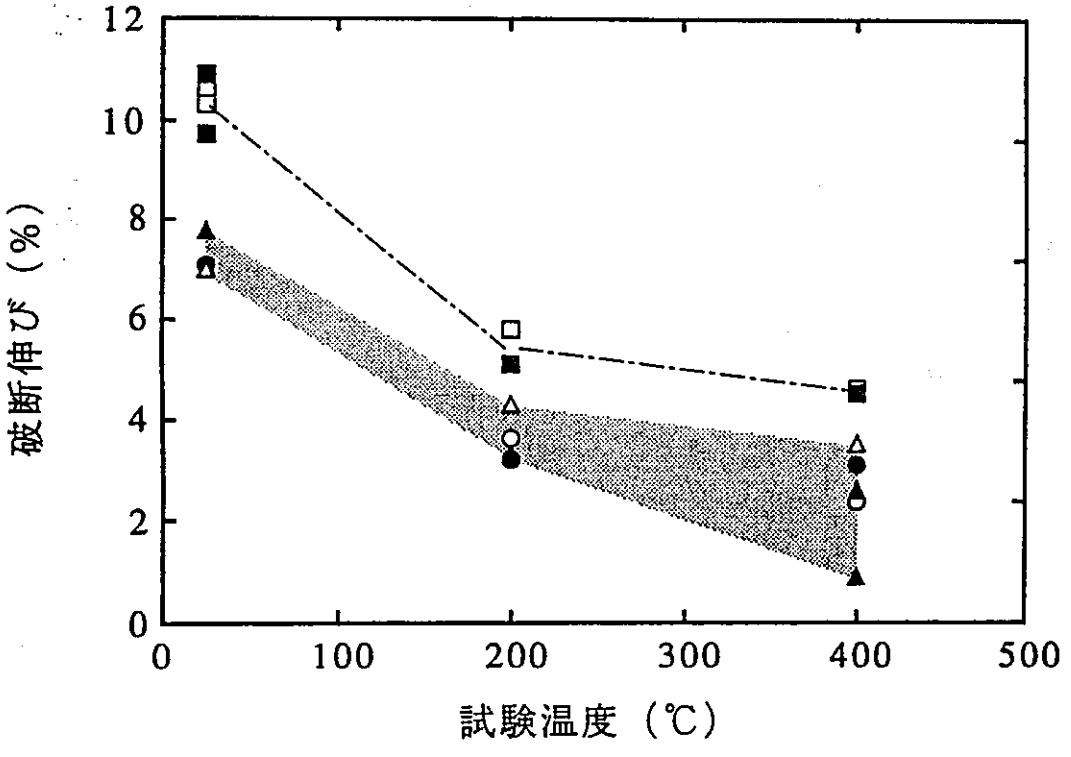




引張速度 ＼ 試料No.	E604	E606	非照射材
0.2mm/min	○	△	□
0.01mm/min	●	▲	■

図３－40　0.2%耐力、引張強さと試験温度との関係





引張速度 ＼ 試料No.	E604	E606	非照射材
0.2mm/min	○	△	□
0.01mm/min	●	▲	■

図３－41　一様伸び、破断伸びと試験温度との関係

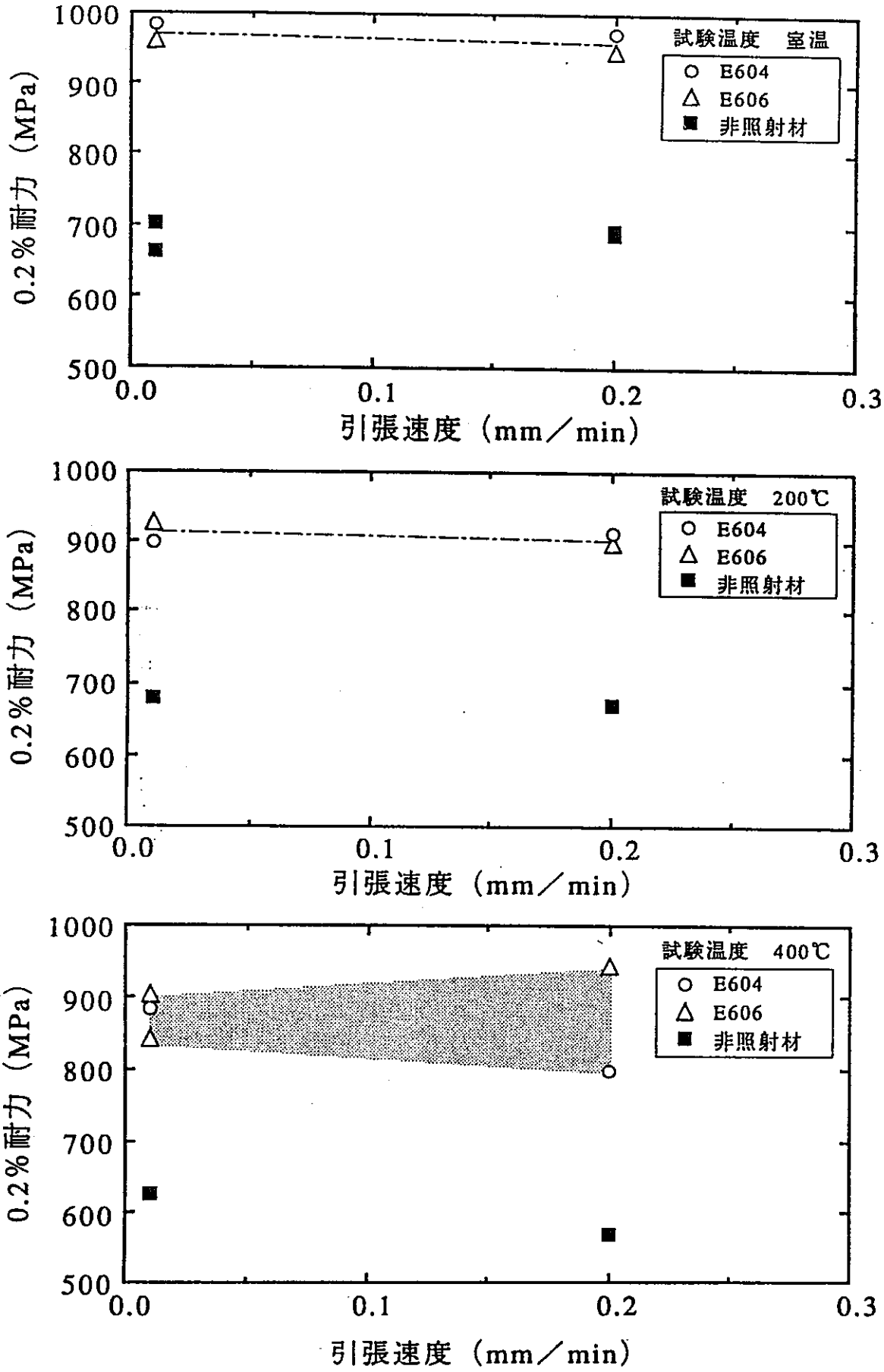


図３－42　0.2%耐力と引張速度の関係

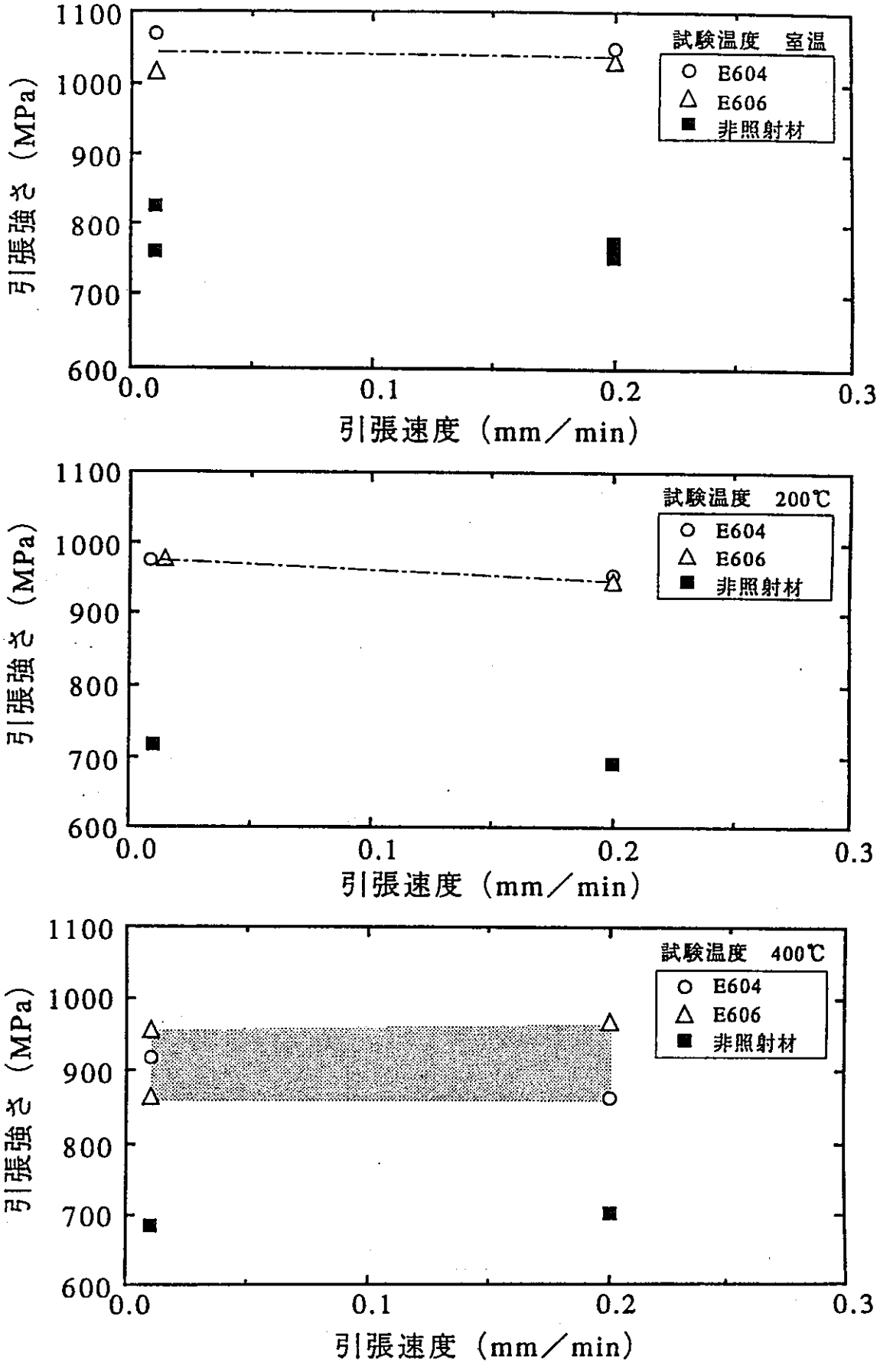
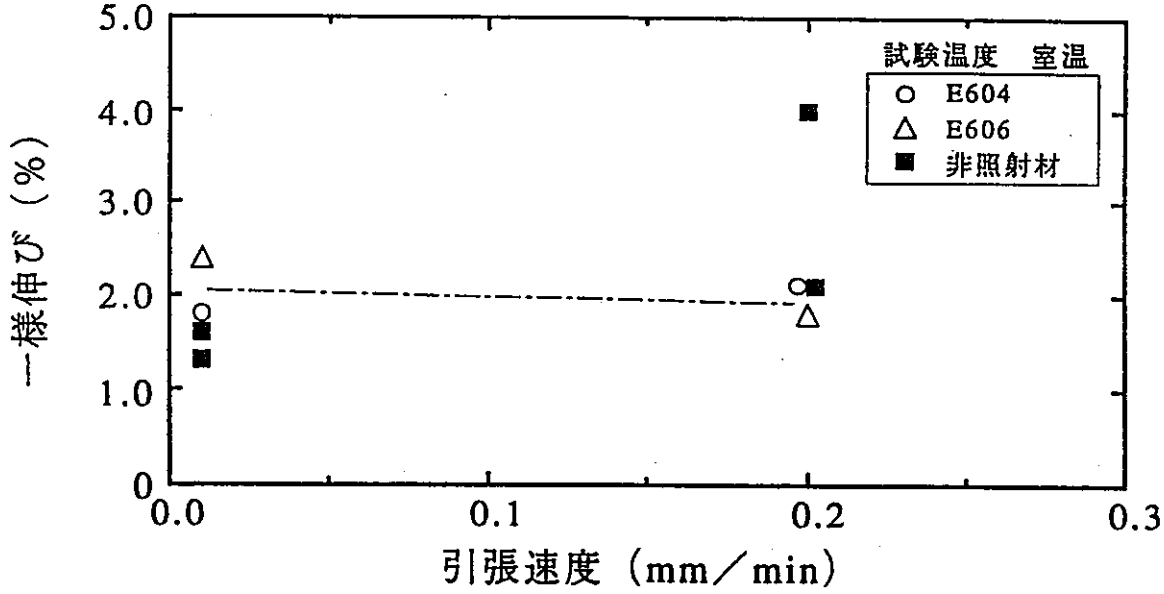
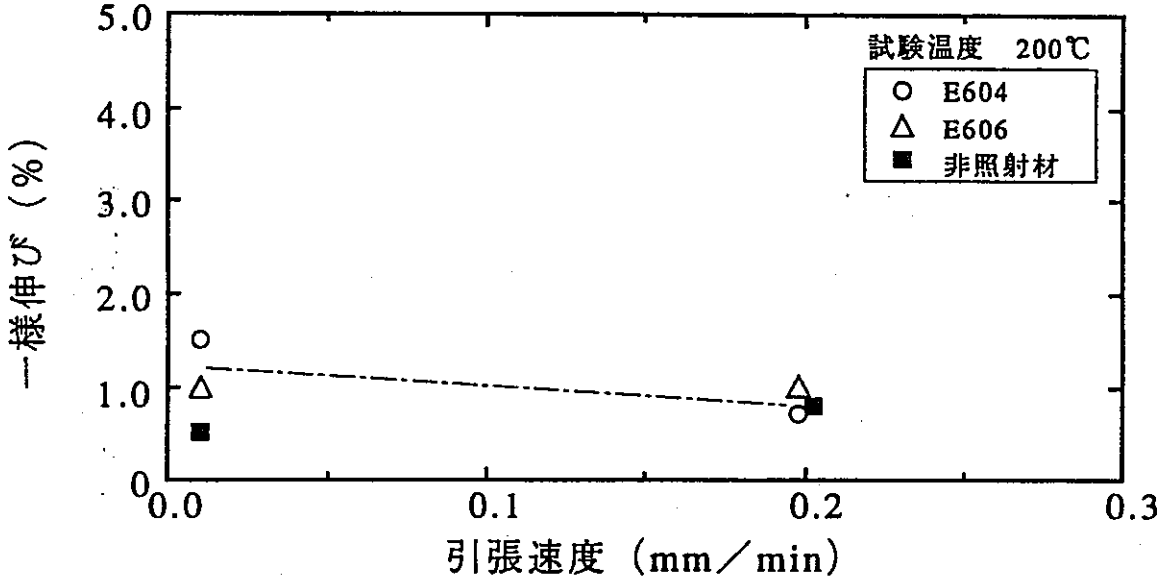


図３－43　引張強さと引張速度の関係





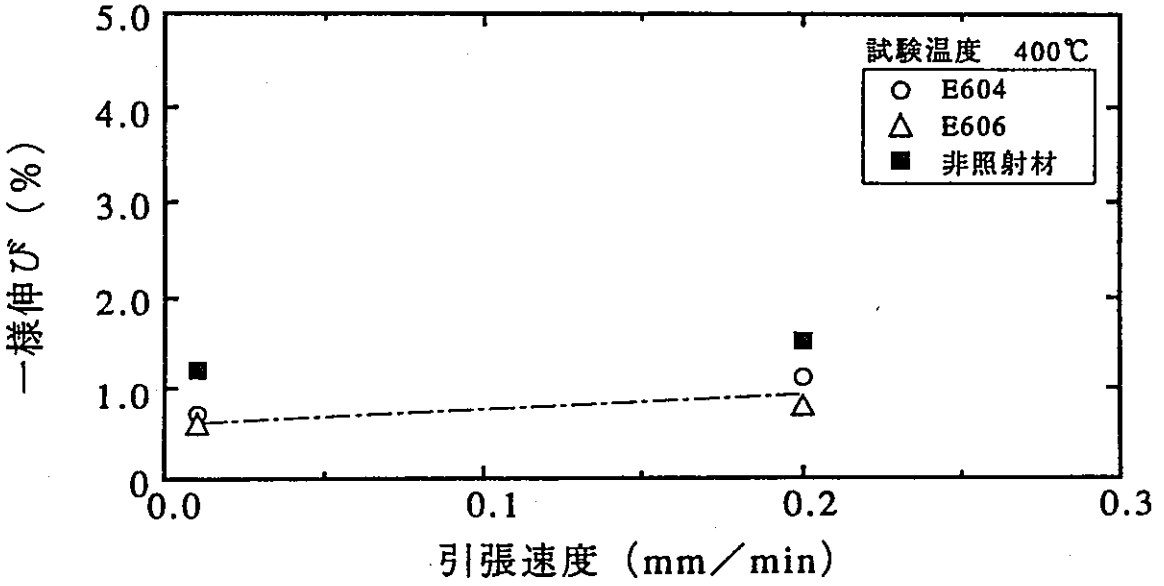


図３－44　一様伸びと引張速度の関係

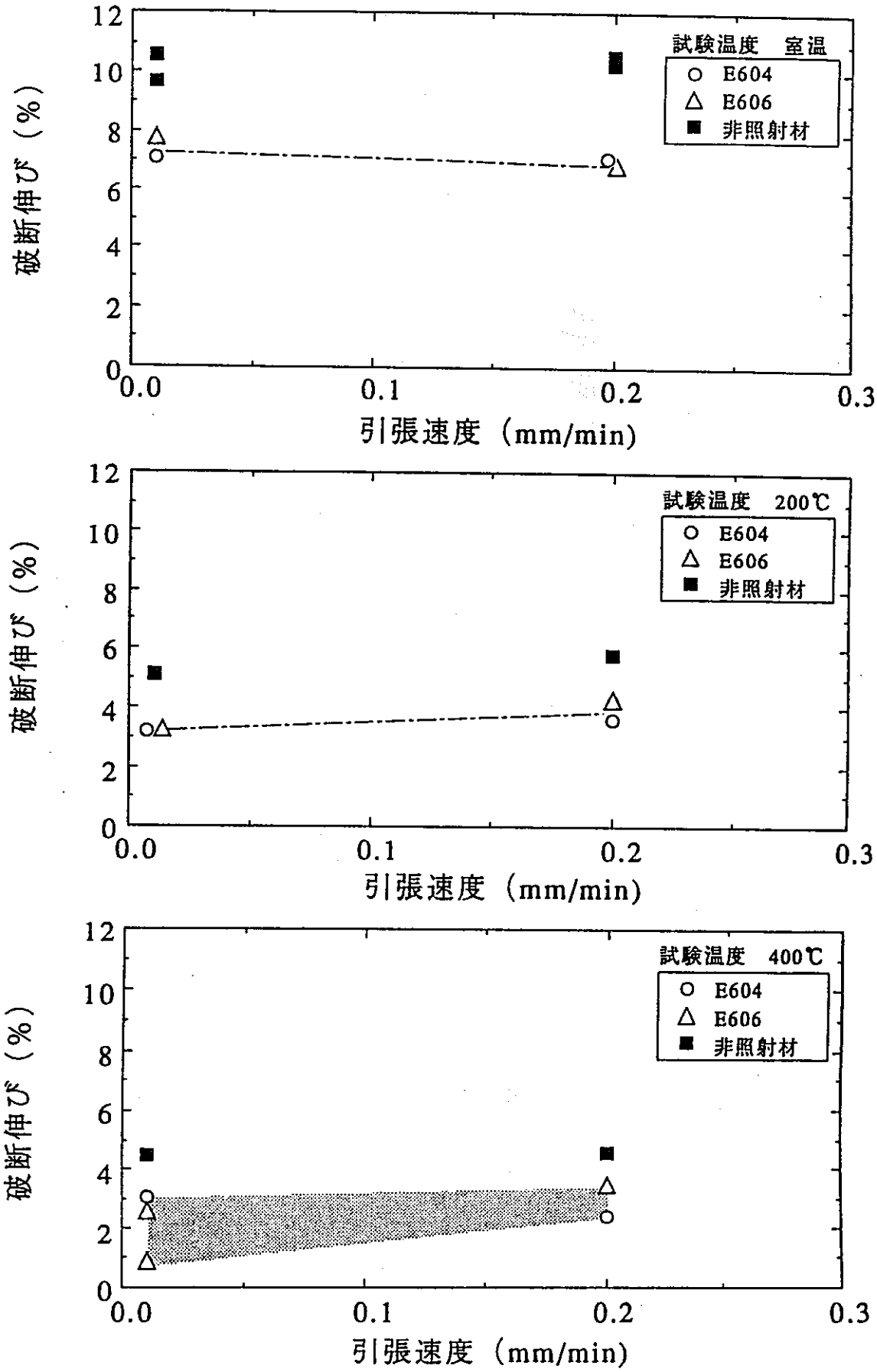


図３－45　破断伸びと引張速度の関係

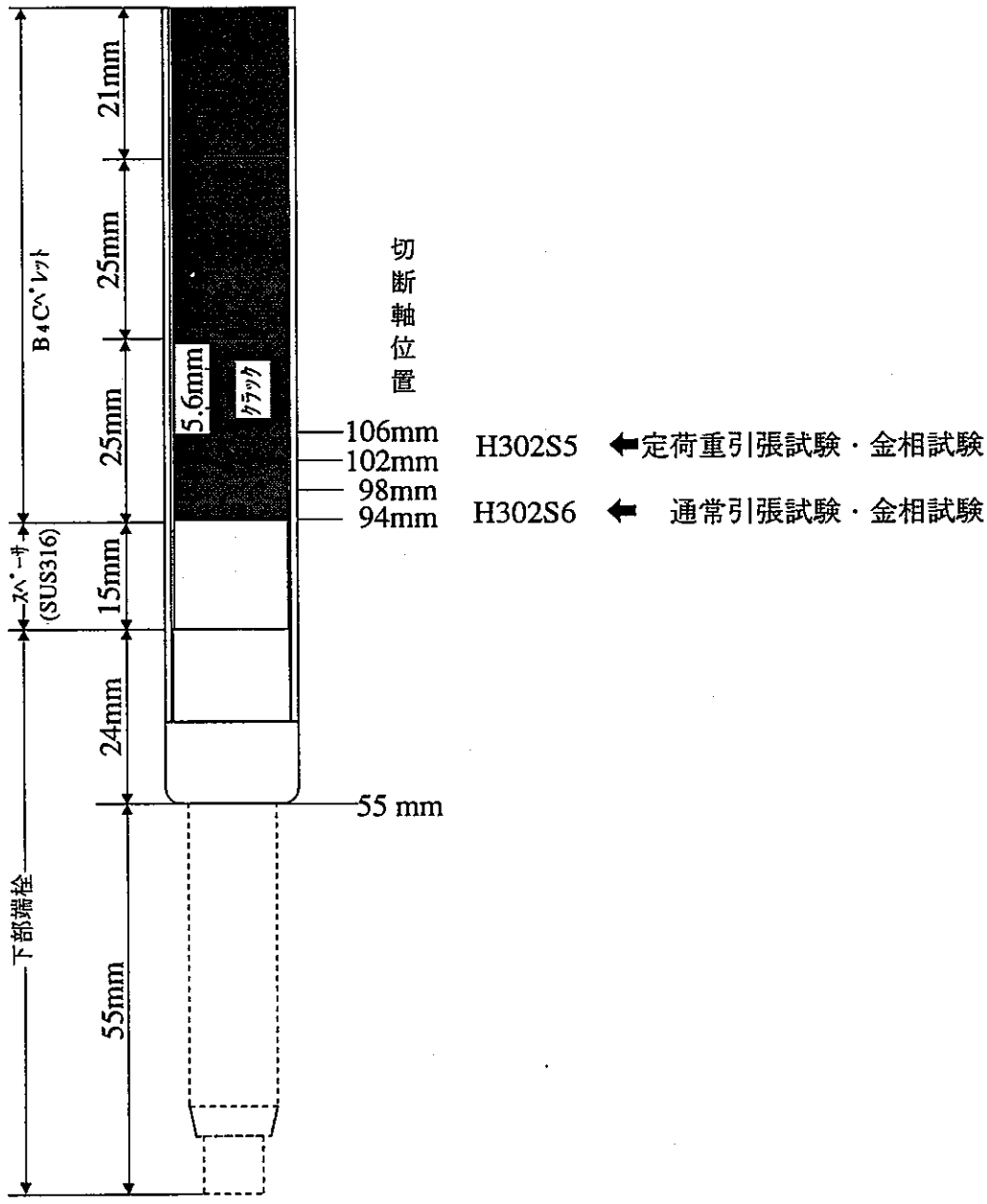


図３－46　ＣＲＴ４０２（Ｈ３０２ピン）試料採取位置

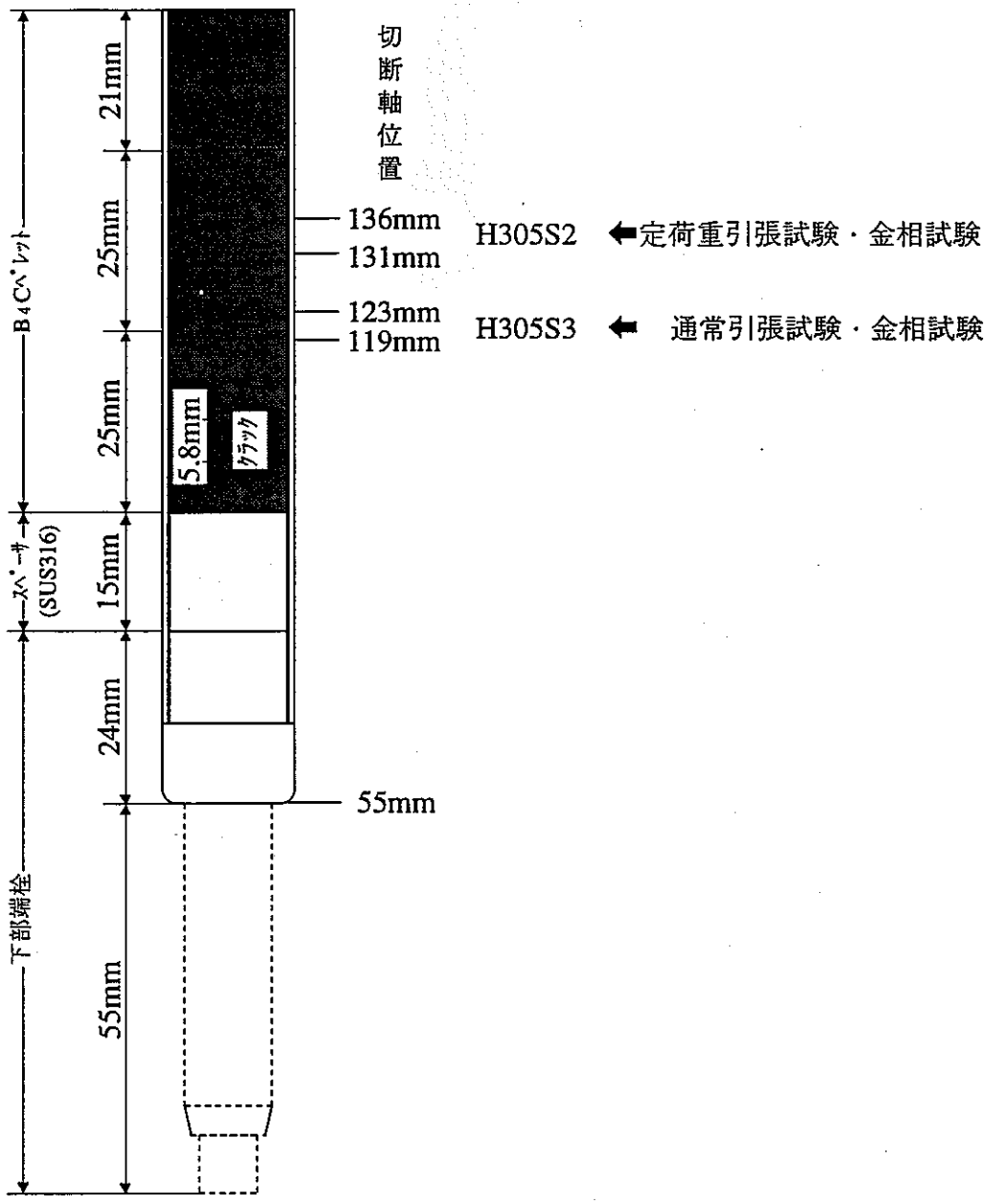
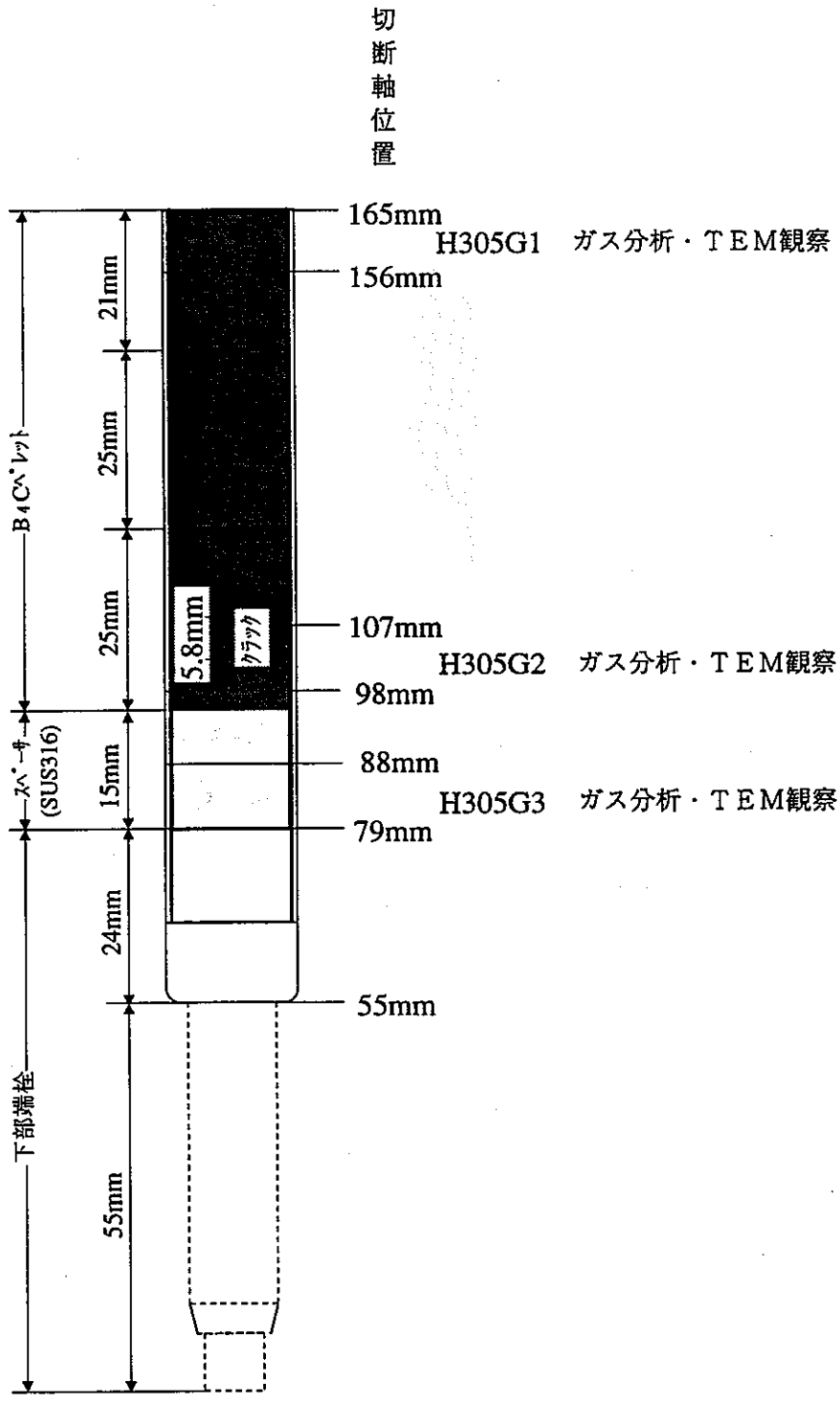


図３－47　ＣＲＴ４０２（Ｈ３０５ピン）試料採取位置



H305ピン

図３－48.CRT402制御棒被覆管のガス分析・ＴＥＭ観察試料の採取位置

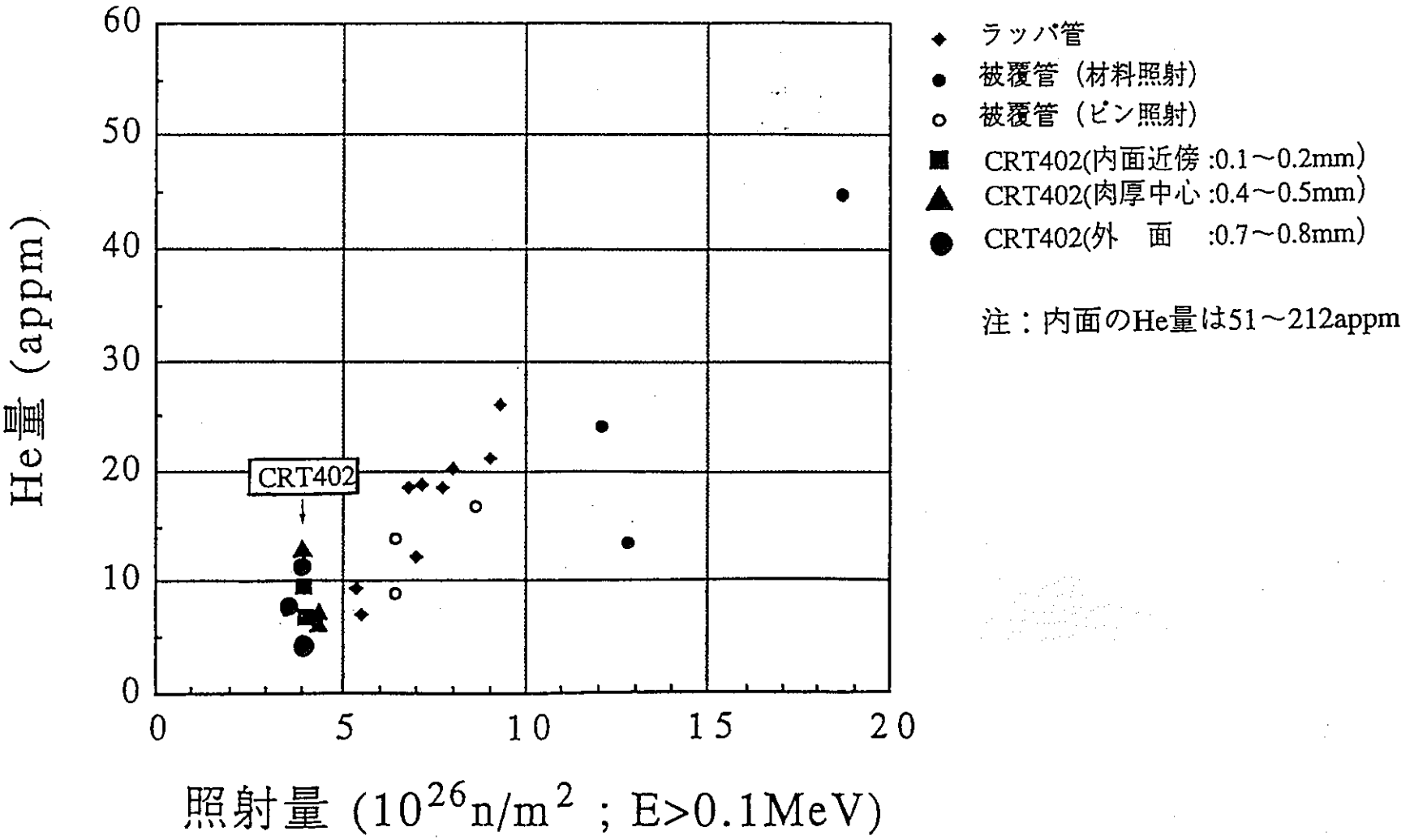


図３－49 He分析結果と照射量との関係

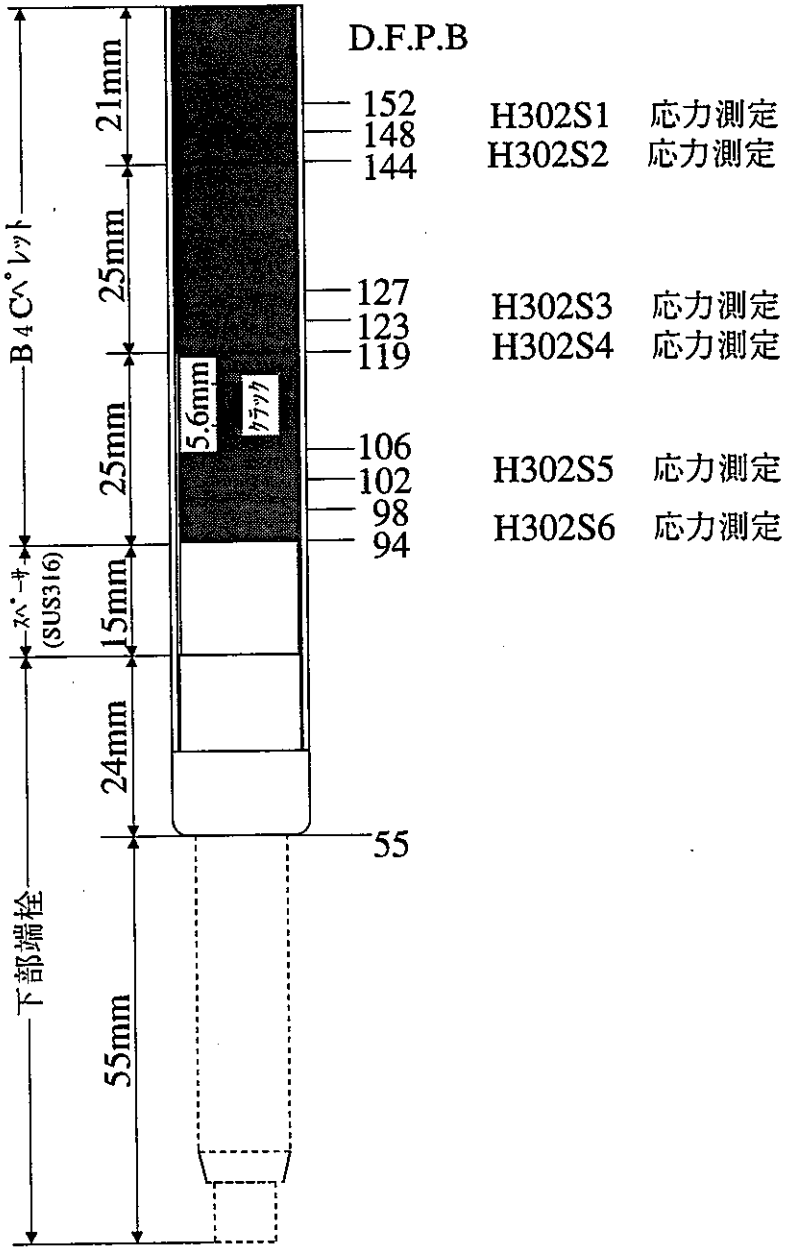


図３－50 ＣＲＴ４０２（Ｈ３０２ピン）試料採取位置

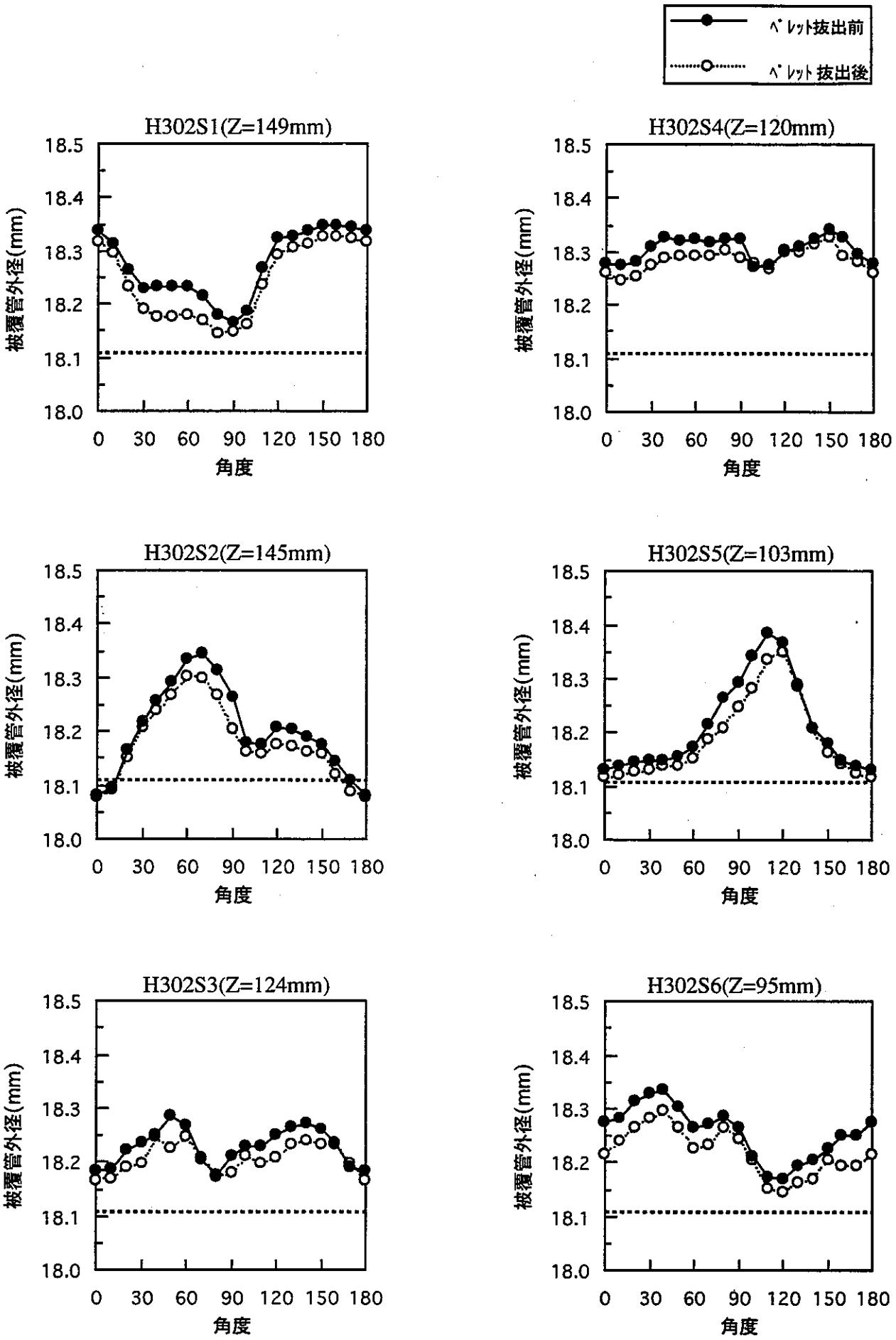


図３－51 ＣＲＴ４０２（Ｈ３０２ピン）のペレット抜き出し前後の外径変化

4　CORALコードによるＡＣＭＩ挙動解析

４．１　CORALコードの概要

高速炉制御棒の挙動を解析するコードとしてCORAL（Control - Rod - Analysis - Code）が既に整備されている。CORALでは、B_4Cペレットをステンレス製被覆管に装填した吸収ピン１本を計算対象としている。また、CORALでは中性子束を入力データとして燃焼度、冷却材、被覆管及びB_4Cペレットの温度、被覆管及びB_4Cペレットの変形量、ペレット・被覆管接触圧力、Heガス放出、吸収ピン寿命等を出力する。中性子束は同一軸方向ノードではペレット内均一とし、半径方向の中性子束減衰の効果は考慮していない。実機制御棒は使用中に炉心内挿入量（引抜量）が刻々と変動するため、制御棒自身の軸方向中性子束分布は変動する。CORALコードでは、各サイクル初期と終期の制御棒引抜量およびMAGIによる7群中性子束データをもとにサイクル中の制御棒引抜速度一定として計算することで、実機での運転状況を模擬した解析が行える。

４．２　CORALコードの整備

「常陽」MK－II制御棒吸収ピンのＡＣＭＩ解析を実施するにあたり、解析手段として用いるCORALコードの物性式を全面的に見直し、最新の知見を踏まえた物性式へ変更した。また、弾性歪、塑性歪の計算方法に若干の改良を行った。

４．２．１　B_4Cペレットと被覆管の接触圧計算

CORALコードでは、B_4Cペレットと被覆管が接触したときの接触圧は、円管と丸棒の「やきばめ」として取扱っている。つまり、B_4Cペレットと被覆管が接触せずに自由に変位したと仮定したときに生じる相互干渉量（やきばめ代）から両者の縦弾性係数（ヤング率）とポアソン比を用いて接触圧を計算する。接触圧の計算式を以下に示す。

$$P_r = \frac{\delta_r / R}{\dfrac{(1+\nu_f)(1-2\nu_f)}{E_f} + \dfrac{(1+\nu_c)\{R_{co}^2 + (1-2\nu_c)R^2\}}{E_c(R_{co}^2+R^2)}}$$

ここでそれぞれの記号は以下の物理量を表す。

P_r：接触圧力

δ_r：相互干渉量（やきばめ代）

R：接触面の半径

ν_f、ν_c：ペレット、被覆管のポアソン比

E_f、E_c：ペレット、被覆管の縦弾性係数

R_{co}：被覆管の外半径

4．2．2　3主応力計算

接触圧から次式により被覆管にはたらく径方向応力（σ_r）、周方向応力（σ_θ）、軸方向応力（σ_z）をそれぞれ算出する。

$$\sigma_r = -\frac{Ri^2\,(Ro^2-r^2)}{r^2\,(Ro^2-Ri^2)}\cdot Pi - \frac{Ro^2\,(r^2-Ri^2)}{r^2\,(Ro^2-Ri^2)}\cdot Po$$

$$\sigma_\theta = -\frac{Ri^2\,(Ro^2-r^2)}{r^2\,(Ro^2-Ri^2)}\cdot Pi - \frac{Ro^2\,(r^2+Ri^2)}{r^2\,(Ro^2-Ri^2)}\cdot Po$$

$$\sigma_z = 2\,\nu_c\left\{\frac{Ri^2}{Ro^2-Ri^2}\cdot Pi - \frac{Ro^2}{Ro^2-Ri^2}\cdot Po\right\}$$

ここで、それぞれの記号の意味はつぎのとおりである。

Ri：被覆管内半径（接触面半径）

Ro：被覆管外半径

r：応力計算位置（＝（Ri＋Ro）／2）

Pi：内圧（接触圧）

Po：外圧

ν_c：被覆管ポアソン比

σ_r：径方向応力

σ_θ：周方向応力

σ_z：軸方向応力

なお、相当応力（σ）は次式により計算する。

$$\sigma = \left\{(\sigma_\theta-\sigma_z)^2+(\sigma_z-\sigma_r)^2+(\sigma_r-\sigma_\theta)^2\right\}^{1/2}$$

4．2．3　弾性歪計算

3主応力および被覆管のヤング率（Ec）から、下記の式を用いて周方向弾性歪を算出する。

$$\varepsilon_{\theta,\,elastic} = \left\{\sigma_\theta-\nu_c\,(\sigma_z+\sigma_r)\right\}/Ec$$

4．2．4　クリープ歪計算

炉内でのクリープ歪は照射量依存項、熱依存項、スエリング依存項からなる下記物性式により算出する。

$$\varepsilon_{creep}=B_o \cdot \phi t \cdot \sigma + K \cdot t^{1.9} \cdot \sigma^{2.3} + D \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma$$

（ノミナル式）

$B_o=3.46\times10^{-5}$

$K=7.07\times10^{-2}\cdot\exp(-21880/T)$

$D=0.088$

（上限式）

$B_o=4.80\times10^{-5}$

$K=11.1\times10^{-2}\cdot\exp(-21880/T)$

$D=0.110$

（下限式）

$B_o=2.00\times10^{-5}$

$K=4.51\times10^{-2}\cdot\exp(-21880/T)$

$D=0.063$

ここでそれぞれの記号は以下を表す。

ε_{creep}：炉内クリープ歪（相当歪、－）

ε_s：スエリング歪（相当歪、－）

ϕt：中性子照射量（10^{26} n／m^2、E＞0.1MeV）

σ：応力（相当応力、kgf／mm^2）

t：照射時間（h）

T：照射温度（K）

B_o：照射クリープ係数（（（10^{26} n／m^2）$^{-1}$）・（kgf／mm^2）$^{-1}$）

K：熱クリープ係数（h$^{-1.9}$（kgf／mm^2）$^{-2.3}$）

D：スエリング係数（（kgf／mm^2）$^{-1}$）

炉内（照射及び熱）クリープ変形による周方向歪は、相当応力、相当歪、３主応力から以下に示すPrandtl-Reussの流れ則を適用して算出する。

$$\varepsilon_{\theta,creep}=(\varepsilon/\sigma)\ \{\sigma_\theta-(\sigma_z+\sigma_r)/2\}$$

4．2．5　スエリング歪計算

スエリング歪は下記物性式により算出する。スエリングによる周方向の歪は体積増分の3分の1とした。

$$\Delta V/V = R \cdot \left[\phi_t + \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \frac{1+\exp \alpha (\tau - \phi_t)}{1+\exp(\alpha \cdot \tau)} \right\} \right]$$

$$R = R_1 + R_2 \exp \{A(T - T_{PR})\}$$

$$\tau = \tau_0 \exp \{B(T - T_{Pr})\}$$

ここでそれぞれの値は以下のようである。

$R_1 = 0.52$

$A = -2.0 \times 10^{-4}$

$T_{PR} = 500$

$T_{Pr} = 400$

$\alpha = 0.8$

$R_2 = 1.16$

$\tau_0 = 17.445$

$B = 4.249 \times 10^{-6}$

また、それぞれの記号の意味は以下のようである。

$\Delta V/V$：スエリング量（vol%）

ϕ_t：高速中性子照射量（10^{26} n／m^2、E>0.1MeV）

T：照射温度（℃）

R：定常スエリング速度［vol%・$(10^{26}$ n／m$^2)^{-1}$］

τ：スエリング潜伏期間（10^{26} n／m^2、E>0.1MeV）

α：曲率 $(10^{26}$ n／m$^2)^{-1}$

T_{PR}：定常スエリング速度のピーク温度（℃）

T_{Pr}：潜伏期間のピーク温度（℃）

$R_1 + R_2$：定常スエリング速度のピーク値［vol%・$(10^{26}$ n／m$^2)^{-1}$］

τ_0：潜伏期間のピーク値（10^{26} n／m^2、E>0.1MeV）

周方向のスエリングひずみ（$\varepsilon_{\theta,swelling}$）は次式で表せる。

$$\varepsilon_{\theta,swelling} = (1/3) \cdot (1/100) \cdot \Delta V/V$$

4．2．6　降伏応力計算

被覆管の降伏応力は「もんじゅ」材料強度基準の温度依存性およびPNC316照射材の引張試験から得られた0.2%耐力の照射量依存性（図4－1）から、次式のような温度及び照射量依存をもつ値とした。

$0 \leqq \phi_t \leqq 2$ のとき

$\sigma_{yir.} = -6(\phi_t - 2) + (\sigma_y + 24)$

$2 \leqq \phi_t$ のとき

$\sigma_{yir.} = \sigma_y + 36$

$$\sigma_y = 75.759 - 0.12904 \cdot T + 8.2778 \times 10^{-4} \cdot T^2 - 3.3136 \times 10^{-6} \cdot T^3 + 7.2493 \times 10^{-9} \cdot T^4 - 8.0280 \times 10^{-12} \cdot T^5 + 3.3576 \times 10^{-15} \cdot T^6$$

$\sigma_{yir.}$：照射後の0.2%耐力（kgf／mm^2）

σ_y：非照射の0.2%耐力（kgf／mm^2）

ϕ_t：中性子照射量（$\times 10^{26}$ n／m^2、E＞0.1MeV）

T：温度（℃）

4．2．7　塑性歪計算

相当応力 $\sigma = 0.667\sigma_{yir.}$（比例限）の時に被覆管は降伏するとし、塑性歪を次式で算出する。

$$\Delta\varepsilon_{\theta,plastic} = \Delta\varepsilon_{\theta,total} - (\Delta\varepsilon_{\theta,creep} + \Delta\varepsilon_{\theta,swelling} + \Delta\varepsilon_{thermal})$$

ここで、$\varepsilon_{\theta,total}$ はB$_4$Cペレットの外径を基準にした被覆管の全歪を表す。

また $\sigma = 0.667\sigma_{yir.}$ として次式により接触圧(Pint)、3主応力を再計算する。

$$P_{int} = \frac{r^2(R_o^2 - R_i^2)}{R_i^2(R_o^2 + r^2)} \left\{ \sigma_\theta + \frac{R_o^2(r^2 + R_i^2)}{r^2(R_o^2 - R_i^2)} \cdot P_o \right\}$$

$$\sigma_r = -\frac{R_i^2(R_o^2 - r^2)}{r^2(R_o^2 - R_i^2)} \cdot P_{int} - \frac{R_o^2(r^2 - R_i^2)}{r^2(R_o^2 - R_i^2)} \cdot P_o$$

$$\sigma_\theta = -\frac{R_i^2(R_o^2 - r^2)}{r^2(R_o^2 - R_i^2)} \cdot P_{int} - \frac{R_o^2(r^2 + R_i^2)}{r^2(R_o^2 - R_i^2)} \cdot P_o$$

$$\sigma_z = 2\nu c \left\{ \frac{Ri^2}{Ro^2 - Ri^2} \cdot Pint - \frac{Ro^2}{Ro^2 - Ri^2} \cdot Po \right\}$$

4．2．8　B4Cペレットスエリング

B4Cペレットのスエリング式は照射後試験結果のノミナル値である燃焼度 100 x 10^{26} cap / m^3 当たり3.5%で外径増加する条件を用いる。

$$\Delta D / D = 0.035 \times B.U.$$

ΔD／D：B4Cペレット外径増加率（%）

B.U.：燃焼度（10^{26} cap / m^3）

4．3　解析条件

今回は「常陽」MK－II制御棒について、

(1) 制御棒引抜量を一定

(2) 制御棒引抜量を考慮

の2ケースについて、解析を行った。

4．3．1　制御棒引抜量を一定とした解析条件

制御棒の使用状況は原子炉の運転履歴と密接な関係があり、各制御棒間で使用サイクル数と使用日数、及び炉停止回数などの条件が異なっている。また、サイクル中の挿入量も変動しているため、その照射挙動は非常に複雑である。そこで、本ケースでは汎用性があり、且つ簡易的に制御棒のＡＣＭＩ挙動を解析するために、中性子束および引抜き量を一定として解析した。本解析で用いた中性子束は「常陽」MK－II制御棒（３列装荷時）の平均中性子束である約1.1×10^{19} n／m^2（E＞0.1MeV）である。吸収ピンの初期ギャップはペレットのリロケーションによって照射初期（燃焼度 0 cap／m^3）に完全閉塞するものとして解析した。また、照射後5×10^{26} cap／m^3毎に炉停止（250℃）、炉外取出（20℃）を模擬する解析も併せて行った。さらに、塑性歪量に大きく影響すると思われる炉内クリープ歪（照射クリープ＋熱クリープ）については物性式のノミナル値だけでなく上限及び下限値についても解析を行った。なお、炉停止時及び炉取出時の期間は便宜上５日として計算した。

4．3．2　制御棒引抜量を考慮した解析条件

本ケースでは、実機制御棒の引抜き量や炉停止等の運転履歴を模擬した解析を行った。解析対象制御棒としては燃焼度、照射量、サイクル平均中性子束が最も大きく、かつシャフリングを経験していない4次取替制御棒であるCRT402を選定した。表4－1にその運転履歴を示す。解析は「常陽」MK－II炉心、第21、22、23、24、25サイクルを対象とした（各サイクル終了後特殊試験を目的に行われた短期間の照射サイクル23'、23''、23'''、24'、25'サイクルについては照射日数が少ないため今回の解析には含まなかった）。炉停止時の温度については燃料交換時では250℃、定期検査時では200℃とし、炉外取出時の温度は20℃とした。解析は第21サイクル定格運転→炉停止（250℃）→第22サイクル定格運転→炉停止（250℃）→第23サイクル定格運転→炉停止（200℃）→第24サイクル定格運転→炉停止（250℃）→第25サイクル定格運転→炉停止（250℃）→炉外取出（20℃）の条件で行った。使用した中性子束データはMAGIによる計算値に0.75 を乗じた値を用いた。図4－2にCRT402制御棒の全サイクルにおける引抜き位置を示す。

CRT402吸収ピンのノミナル寸法（ペレット外径：16.0mm、被覆管内径：16.5mm、初期ギャップ：0.5mm）では、ペレットが燃焼度100　$x10^{26}$cap／m^3当たり3.5％の速度でスエリング（ΔD/D(%)=3.5(%)×Burnup($x10^{26}$cap／m^3)）する場合、リロケーションのない状態でのギャップ閉塞時期は約90 $x10^{26}$cap／m^3である。これは最終サイクル終了後（56.6 $x10^{26}$cap／m^3）もペレットと被覆管は接触せず、ＡＣＭＩが発生しない値である。しかし照射後試験結果から被覆管の外径増加が認められ、さらに数本のピンにクラックの発生が観察されたことから、B_4Cペレットのリロケーションに起因した燃焼初期のギャップ閉塞の可能性が示唆されることは前述の通りである。本解析では、リロケーションによるギャップの閉塞を模擬する目的で、燃焼度が0～40　$x10^{26}$cap／m^3の範囲で5　$x10^{26}$cap／m^3毎にB_4Cペレットと被覆管を接触させることでＡＣＭＩを発生させる条件で解析した。また、炉内クリープ歪については物性式のノミナル値だけでなく上限及び下限値についても解析を行った。なお、炉停止時及び炉取出時の期間は便宜上5日として計算した。

4．4　解析結果

4．4．1　制御棒の引抜き量を一定とした条件での解析結果

ＡＣＭＩによる制御棒吸収ピン被覆管の歪は弾性歪、塑性歪、炉内（照射、熱）クリープ歪、スエリング歪、熱膨張歪の総和として表される。図4－3は炉起動直後の定格運転初期（0 cap/m^3）に被覆管とペレットのギャップが完全に閉塞した状況を模擬した時の被覆管に生じる歪成分の変化を解析した結果である（炉内クリープはノミナル式）。

被覆管にはＡＣＭＩ発生後、燃焼度約10$x10^{26}$cap／m^3で照射クリープでは緩和しきれずに塑性歪が発生し、その後照射量の増加とともに増大する。また、接触圧力及び周方向応力についても図4－4に示すように照射量の増加とともに増大する。表4－2は、ギャッ

プ閉塞後、5 x10^{26}cap／m^{3}ごとの照射中、炉停止時、炉外取出時の全歪と塑性歪のCORAL解析結果を示したものである。図３－１６からクラックの発生は外径増加率が約1％以上のピンで見られている。そこで、表４－２から、炉外取り出し時の被覆管全歪が1％に対応する塑性歪を読み取ると約0.55％となる。この0.55％をクラックが発生する塑性歪の目安とすることができる。表４－２で炉外取出時に塑性歪が0.55％を越えるのは、ギャップが完全に閉塞してから約15x10^{26}cap／m^{3}程度である。一方、炉停止時に塑性歪が0.55％を越えるのは、ギャップが完全に閉塞してから25～30 x10^{26}cap／m^{3}程度である。さらに、連続照射では完全ギャップ閉塞後、約35 x10^{26}cap／m^{3}程で0.55％塑性歪に達する。

４．４．２　制御棒の引抜き量を考慮した条件での解析結果

図４－５はCRT402制御棒の引抜き量を考慮した条件において、燃焼度が０～45 x10^{26}cap／m^{3}の範囲で5 x10^{26}cap／m^{3}毎にＢ４Ｃペレットと被覆管のギャップを閉塞させ、その時に被覆管に生じる全歪を示したものである。炉停止ごとに熱収縮による歪の低下が見られる。また、図中のプロットはCRT402制御棒吸収ピンの最下端ペレット部での最大外径増加率（照射後試験結果）を示したものである。なお、クラックピンのデータはクラック部の最大値である。これを見ると、ほとんどのピンの照射後試験データはギャップ閉塞を15 x10^{26}cap／m^{3}の条件で解析した結果と近い値を示しているのがわかる。これは、表３－６より求まるCRT402吸収ピンにおけるオーバリティ開始時期10～20　x10^{26}cap／m^{3}とほぼ一致する。

図４－６は、15 x10^{26}cap／m^{3}でギャップが閉塞する条件において、被覆管に生じる歪の内訳をノミナルのクリープ式を用いて解析した結果を示したものである。また、このときの接触圧力及び周方向応力の変化を図４－７に示す。さらに、各サイクルの初期および終期、ならびに炉停止時の解析結果を表４－３に、ペレット中心温度と被覆管肉厚中心温度の変化を図４－８にそれぞれ示す。被覆管に生じる塑性歪は炉停止時において特に顕著な増加がみられる。定格運転中も塑性歪の増加がみられることから、被覆管に生じた応力は炉内クリープでは完全には緩和しきれていないことを示している。ノミナル条件において最終サイクル終了後に炉外へ取出した時の塑性歪は約1.13％である。また、接触圧および周方向応力はそれぞれ70.58MPa、686.73MPa程度であり、いずれも大きな値を示している。

炉内クリープの上限および下限式を用いて解析した結果を表４－４、表４－５に示す。被覆管に生じる塑性歪は上限式で約1.00％、下限式で約1.26％となり、炉内クリープ速度が大きい上限式では、被覆管にはたらく応力が若干緩和されて塑性歪量が小さく見積られる傾向がみられた。いずれの物性式を用いても、被覆管には1％を越える塑性歪が生じており、クラック発生の目安となる0.55％を大きく越える値となっている。塑性歪が0.55％を越えるのは第24サイクル終了後の炉停止時または第25サイクル照射中（炉内クリープ歪式の値に依存する）である。これは４．４．１で求めた炉停止時または照射中に塑性歪が

0.55%を越えるのはギャップが閉塞してから25 ～ 35 x10^{26}cap／m^3程度であるという解析結果とほぼ一致する。

4．4．3　クラック発生時期の推定

上記結果では、現在までに照射後試験に供した「常陽」MK－II制御棒吸収ピンにおけるクラック部の外径増加率とCORALの解析結果から、被覆管の健全性の塑性歪制限値を0.55%とした。ここでは、この0.55%塑性歪をもとにクラックの発生時期を推定する。

表４－２に示されている値に依れば、炉外取出時において0.55%の塑性歪が生じているピンには全歪で1.0～1.3%程度の外径増加が生じていることになる。同様に、最終サイクル終了後の炉停止時及び照射中に塑性歪が0.55%に達するには、それぞれ1.3～1.5%程度、1.5%程度以上の全歪が生じている計算になる。つまり、全歪が1.0～1.3%であるピンは炉外取出時にクラックが発生したと評価される。また、全歪が1.3～1.5%であるピンは最終サイクル終了後の炉停止時に、そして全歪が1.5%以上のピンは照射中にそれぞれクラックが発生したものと推定される。

図４－９は、１２本のクラックピンに関し、上記の考えに基づいてそのクラック発生時期を整理して示したものである。なお、ここではMCR105のクラックピン３本については、外径測定データがないため除外している。この結果よれば、照射中にクラックが発生したと推定されるピン数は６本、それ以外は炉停止時や炉外取り出し時など被覆管の温度低下にともなってクラックが発生したと推定される。

表４－１　制御棒運転履歴（CRT402）

サイクル	炉停止	日　数	熱出力(MW)	通常停止回数
21		68.837	100	1
	燃料交換	33		
22		68.71	100	1
	燃料交換	32		
23		52.845	100	1
	燃料交換	14		
23'		0.241	95	①
	燃料交換	11		
23"		0.005	3	①
	燃料交換	58		
23'''		7.199	100	①
	定期検査	184		①
24		41.522	100	1
	燃料交換	41		
24'		0.166	99	①
	燃料交換	57		
25		64.849	100	1
	燃料交換	33		
25'		3.328	100	①
	炉心取出			

運転日数	307.702EFPD
停止日数	463日

（注１）表中の丸付き数字は特殊運転の通常停止回数と定検時の出力０でのスクラム回数を表す。
（注２）表中の運転日数は100MW運転相当日数である。

表４－２　ギャップ閉塞後に被覆管に生じる全歪および塑性歪（CORAL解析結果）

閉塞後の燃焼度(10^{20}cap/m^3)		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
全歪	照射中	0.0070	0.0089	0.0108	0.0127	0.0145	0.0163	0.0181	0.0199	0.0217	0.0234	0.0252	0.0269	0.0286	0.0304
	炉停止	0.0053	0.0070	0.0088	0.0105	0.0123	0.0140	0.0158	0.0175	0.0193	0.0211	0.0228	0.0246	0.0263	0.0281
	炉外取出	0.0042	0.0059	0.0077	0.0095	0.0112	0.0130	0.0147	0.0165	0.0183	0.0200	0.0218	0.0235	0.0253	0.0270
塑性歪	照射中	0.0000	0.0000	0.0001	0.0014	0.0027	0.0039	0.0052	**0.0065**	**0.0077**	**0.0090**	**0.0103**	**0.0115**	**0.0127**	**0.0140**
	炉停止	0.0000	0.0001	0.0013	0.0025	0.0037	0.0050	**0.0062**	**0.0074**	**0.0087**	**0.0099**	**0.0112**	**0.0125**	**0.0137**	**0.0150**
	炉外取出	0.0014	0.0029	0.0042	**0.0054**	**0.0066**	**0.0078**	**0.0091**	**0.0103**	**0.0116**	**0.0128**	**0.0141**	**0.0154**	**0.0166**	**0.0179**

※１：太数字は約0.55％塑性歪を越える値
※２：炉内ｸﾘｰﾌﾟ式はﾉﾐﾅﾙ

表４－３　CORAL解析結果（CRT402、15×10^{26}cap/m^{3}でギャップ閉塞、炉内クリープノミナル式）

		日数		燃焼度	被覆管歪							被覆管温度	高速フラックス	照射量	周方向応力	接触圧力	ペレット中心温度
		(DAYS)	(EFPD)	(E26cap/m^3)	スエリング歪	照射クリープ歪	熱クリープ歪	熱歪	弾性歪	塑性歪	全歪	(℃)	(n/cm^2・s)	(n/cm^2)	(MPa)	(MPa)	(℃)
21cy.	BOC	0	0	0	0	0	0	0.00704	0	0	0.00704	416.40	1.31E+15	0	0	0	798.0
	EOC	68.8	68.8	13.31	1.74E-09	0.00000	3.43E-14	0.00687	0	0	0.00687	407.70	7.33E+14	6.10E+21	0	0	635.7
炉停止		73.8	68.8	13.31	1.74E-09	0.00000	3.43E-14	0.00388	0	0	0.00401	250.00	0.00225	6.10E+21	0	0	250.0
22cy.	BOC	73.8	68.8	13.31	1.74E-09	0.00000	3.32E-12	0.00704	0	0	0.00718	416.30	1.35E+15	6.10E+21	0	0	890.9
	EOC	142.5	137.5	26.32	4.64E-09	0.00044	1.76E-06	0.00687	0.00304	0	0.01035	407.60	7.43E+14	1.23E+22	467.11	47.96	651.8
炉停止		147.5	137.5	26.32	4.64E-09	0.00044	1.76E-06	0.00388	0.00356	0.00068	0.00855	250.00	0.00225	1.23E+22	598.05	61.45	250.0
23cy.	BOC	147.5	137.5	26.32	4.64E-09	0.00044	1.92E-06	0.00701	0.00305	0.00068	0.01118	414.80	1.19E+15	1.23E+22	466.84	47.93	891.8
	EOC	207.8	197.8	36.63	8.03E-09	0.00128	1.75E-05	0.00686	0.00388	0.00180	0.01385	407.30	6.45E+14	1.71E+22	596.19	61.26	663.0
炉停止		212.8	197.8	36.63	8.03E-09	0.00128	1.75E-05	0.00298	0.00364	0.00399	0.01190	200.00	0.00225	1.71E+22	626.48	64.38	200.0
24cy.	BOC	212.8	197.8	36.63	8.03E-09	0.00128	1.8E-05	0.00702	0.00263	0.00399	0.01494	415.10	1.39E+15	1.71E+22	401.99	41.25	950.3
	EOC	254.5	239.5	44.52	1.27E-08	0.00202	3.56E-05	0.00691	0.00391	0.00404	0.01691	409.50	1.11E+15	2.16E+22	599.35	61.58	750.4
炉停止		259.5	239.5	44.52	1.27E-08	0.00202	3.56E-05	0.00388	0.00371	0.00527	0.01492	250.00	0.00225	2.16E+22	622.71	63.99	250.0
25cy.	BOC	259.5	239.5	44.52	1.27E-08	0.00202	3.63E-05	0.00703	0.00345	0.00527	0.01781	415.60	1.36E+15	2.16E+22	527.50	54.18	975.8
	EOC	327.7	307.7	56.89	2.30E-08	0.00321	8.46E-05	0.00687	0.00391	0.00693	0.02100	407.80	8.11E+14	2.80E+22	599.64	61.61	684.9
炉停止		327.7	307.7	56.89	2.30E-08	0.00321	8.46E-05	0.00388	0.00371	0.00835	0.01924	250.00	0.00225	2.80E+22	622.72	63.99	250.0
炉外取出		332.7	307.7	56.89	2.30E-08	0.00321	8.47E-05	0.00000	0.00364	0.01125	0.01818	20.00	0.00225	2.80E+22	686.73	70.58	20.0

表４－４　CORAL解析結果（CRT402、15×10^{26}cap/m^{3}でギャップ閉塞、炉内クリープ上限式）

		日数		燃焼度	被覆管歪							被覆管温度	高速フラックス	照射量	周方向応力	接触圧力	ペレット中心温度
		(DAYS)	(EFPD)	(E26cap/m^3)	スエリング歪	照射クリープ歪	熱クリープ歪	熱歪	弾性歪	塑性歪	全歪	(℃)	(n/cm^2・s)	(n/cm^2)	(MPa)	(MPa)	(℃)
21cy.	BOC	0	0	0	0	0	0	0.00704	0	0	0.00704	416.40	1.31E+15	0	0	0	798.0
	EOC	68.8	68.8	13.31	1.74E-09	0.00000	5.39E-14	0.00687	0	0	0.00687	407.70	7.33E+14	6.10E+21	0	0	635.7
炉停止		73.8	68.8	13.31	1.74E-09	0.00000	5.39E-14	0.00388	0	0	0.00401	250.00	0.00225	6.10E+21	0	0	250.0
22cy.	BOC	73.8	68.8	13.31	1.74E-09	0.00000	5.21E-12	0.00704	0	0	0.00718	416.30	1.35E+15	6.10E+21	0	0	890.9
	EOC	142.5	137.5	26.32	4.64E-09	0.00058	2.55E-06	0.00687	0.00288	0	0.01034	407.60	7.43E+14	1.23E+22	443.05	45.48	651.8
炉停止		147.5	137.5	26.32	4.64E-09	0.00058	2.55E-06	0.00388	0.00356	0.00053	0.00855	250.00	0.00225	1.23E+22	598.04	61.45	250.0
23cy.	BOC	147.5	137.5	26.32	4.64E-09	0.00058	2.78E-06	0.00701	0.00305	0.00053	0.01118	414.80	1.19E+15	1.23E+22	466.83	47.93	891.8
	EOC	207.8	197.8	36.63	8.03E-09	0.00176	2.67E-05	0.00686	0.00388	0.00132	0.01385	407.30	6.45E+14	1.71E+22	596.19	61.26	663.0
炉停止		212.8	197.8	36.63	8.03E-09	0.00176	2.67E-05	0.00298	0.00364	0.00351	0.01191	200.00	0.00225	1.71E+22	626.48	64.38	200.0
24cy.	BOC	212.8	197.8	36.63	8.03E-09	0.00176	2.74E-05	0.00702	0.00263	0.00351	0.01494	415.10	1.39E+15	1.71E+22	401.95	41.25	950.3
	EOC	254.5	239.5	44.52	1.27E-08	0.00274	5.35E-05	0.00691	0.00384	0.00351	0.01705	409.50	1.11E+15	2.16E+22	589.13	60.53	750.4
炉停止		259.5	239.5	44.52	1.27E-08	0.00274	5.35E-05	0.00388	0.00371	0.00453	0.01491	250.00	0.00225	2.16E+22	622.71	63.99	250.0
25cy.	BOC	259.5	239.5	44.52	1.27E-08	0.00274	5.46E-05	0.00703	0.00345	0.00453	0.01781	415.60	1.36E+15	2.16E+22	527.45	54.17	975.8
	EOC	327.7	307.7	56.89	2.30E-08	0.00439	0.000129	0.00687	0.00391	0.00570	0.02100	407.80	8.11E+14	2.80E+22	599.64	61.61	684.9
炉停止		327.7	307.7	56.89	2.30E-08	0.00439	0.000129	0.00388	0.00371	0.00713	0.01924	250.00	0.00225	2.80E+22	622.72	63.99	250.0
炉外取出		332.7	307.7	56.89	2.30E-08	0.00439	0.000129	0.00000	0.00364	0.01003	0.01819	20.00	0.00225	2.80E+22	686.73	70.58	20.0

表４－５　CORAL解析結果（CRT402、15×10^{26}cap/m^{3}でギャップ閉塞、炉内クリープ下限式）

		日数		燃焼度	被覆管歪							被覆管温度	高速フラックス	照射量	周方向応力	接触圧力	ペレット中心温度
		(DAYS)	(EFPD)	(E26cap/m^3)	スエリング歪	照射クリープ歪	熱クリープ歪	熱歪	弾性歪	塑性歪	全歪	(℃)	(n/cm^2・s)	(n/cm^2)	(MPa)	(MPa)	(℃)
21cy.	BOC	0	0	0	0	0	0	0.00704	0	0	0.00704	416.40	1.31E+15	0	0	0	798.0
	EOC	68.8	68.8	13.31	1.74E-09	0.00000	2.19E-14	0.00687	0	0	0.00687	407.70	7.33E+14	6.10E+21	0	0	635.7
炉停止		73.8	68.8	13.31	1.74E-09	0.00000	2.19E-14	0.00388	0	0	0.00401	250.00	0.00225	6.10E+21	0	0	250.0
22cy.	BOC	73.8	68.8	13.31	1.74E-09	0.00000	2.12E-12	0.00704	0	0	0.00718	416.30	1.35E+15	6.10E+21	0	0	890.9
	EOC	142.5	137.5	26.32	4.64E-09	0.00026	1.23E-06	0.00687	0.00323	0	0.01036	407.60	7.43E+14	1.23E+22	495.23	50.86	651.8
炉停止		147.5	137.5	26.32	4.64E-09	0.00026	1.23E-06	0.00388	0.00356	0.00085	0.00855	250.00	0.00225	1.23E+22	598.05	61.45	250.0
23cy.	BOC	147.5	137.5	26.32	4.64E-09	0.00026	1.33E-06	0.00701	0.00305	0.00085	0.01118	414.80	1.19E+15	1.23E+22	466.85	47.93	891.8
	EOC	207.8	197.8	36.63	8.03E-09	0.00075	1.15E-05	0.00686	0.00388	0.00234	0.01385	407.30	6.45E+14	1.71E+22	596.19	61.26	663.0
炉停止		212.8	197.8	36.63	8.03E-09	0.00075	1.15E-05	0.00298	0.00364	0.00453	0.01190	200.00	0.00225	1.71E+22	626.48	64.38	200.0
24cy.	BOC	212.8	197.8	36.63	8.03E-09	0.00075	1.18E-05	0.00702	0.00263	0.00453	0.01494	415.10	1.39E+15	1.71E+22	402.02	41.25	950.3
	EOC	254.5	239.5	44.52	1.27E-08	0.00119	2.36E-05	0.00691	0.00391	0.00488	0.01691	409.50	1.11E+15	2.16E+22	599.35	61.58	750.4
炉停止		259.5	239.5	44.52	1.27E-08	0.00119	2.36E-05	0.00388	0.00371	0.00612	0.01492	250.00	0.00225	2.16E+22	622.71	63.99	250.0
25cy.	BOC	259.5	239.5	44.52	1.27E-08	0.00119	2.4E-05	0.00703	0.00345	0.00612	0.01781	415.60	1.36E+15	2.16E+22	527.54	54.18	975.8
	EOC	327.7	307.7	56.89	2.30E-08	0.00188	5.54E-05	0.00687	0.00391	0.00829	0.02100	407.80	8.11E+14	2.80E+22	599.64	61.61	684.9
炉停止		327.7	307.7	56.89	2.30E-08	0.00188	5.54E-05	0.00388	0.00371	0.00972	0.01924	250.00	0.00225	2.80E+22	622.72	63.99	250.0
炉外取出		332.7	307.7	56.89	2.30E-08	0.00188	5.54E-05	0.00000	0.00364	0.01261	0.01818	20.00	0.00225	2.80E+22	686.73	70.58	20.0

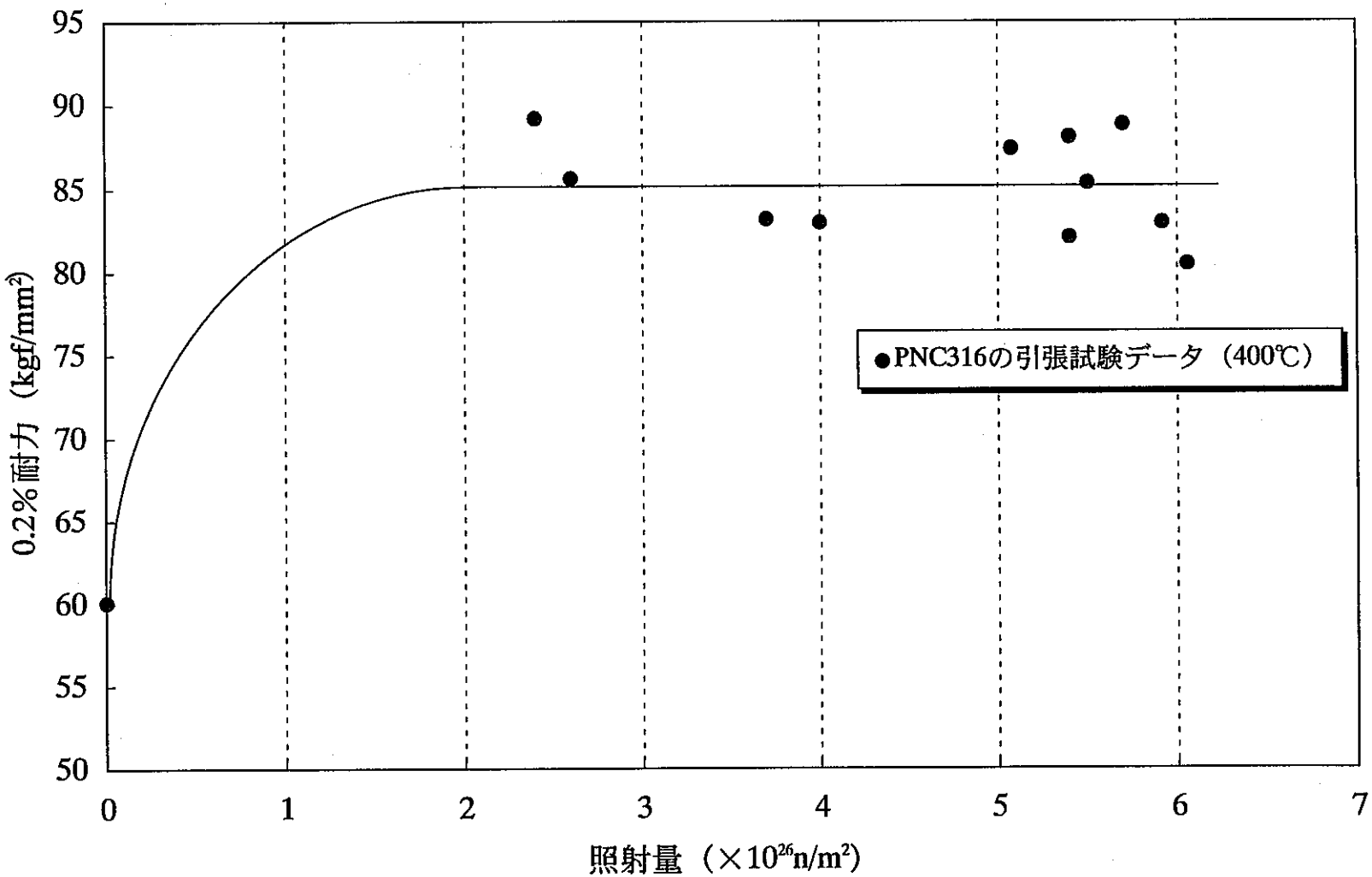


図４－１　PNC316における0.2%耐力の照射量依存性

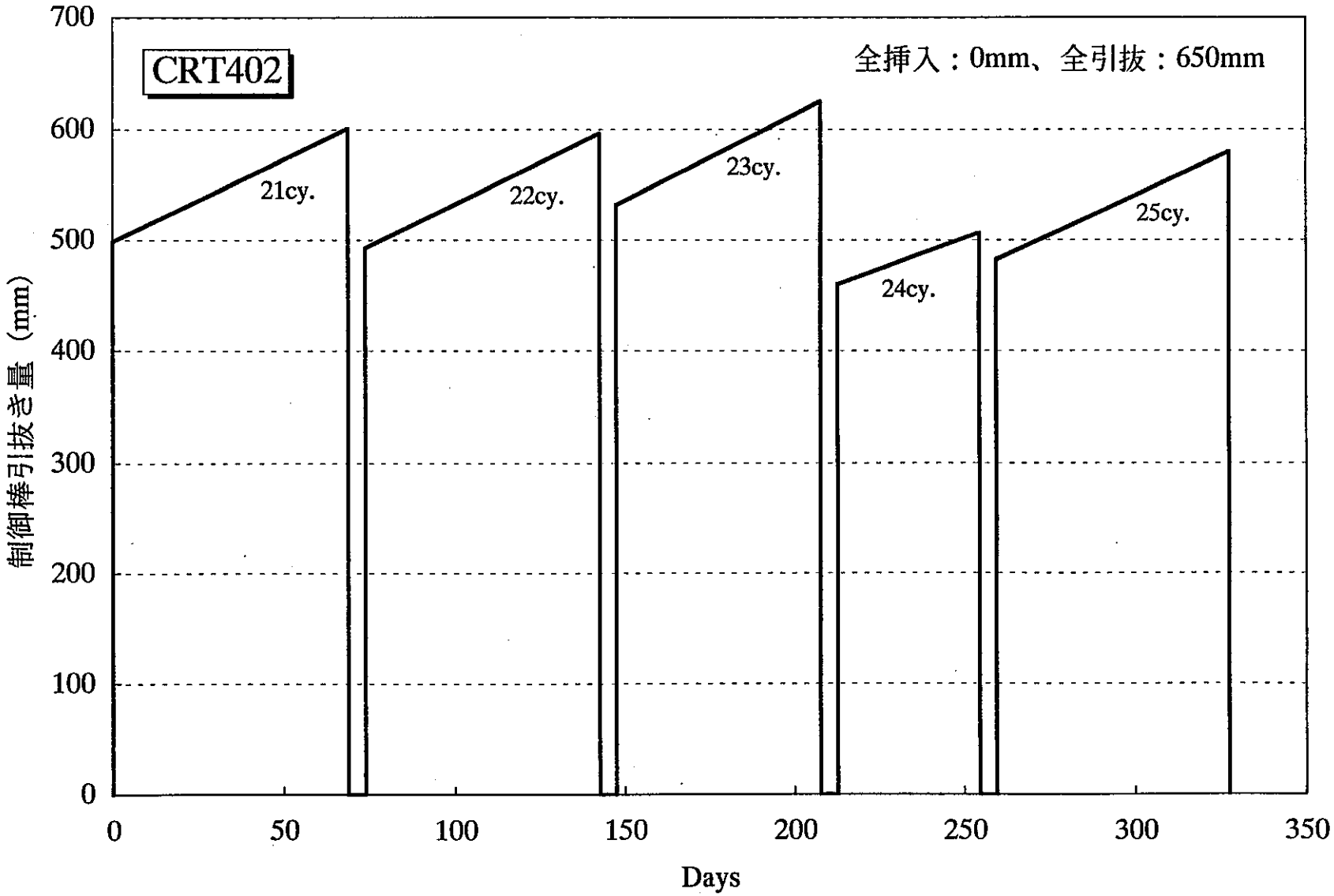


図４－２　運転中における制御棒引抜量（CRT402）

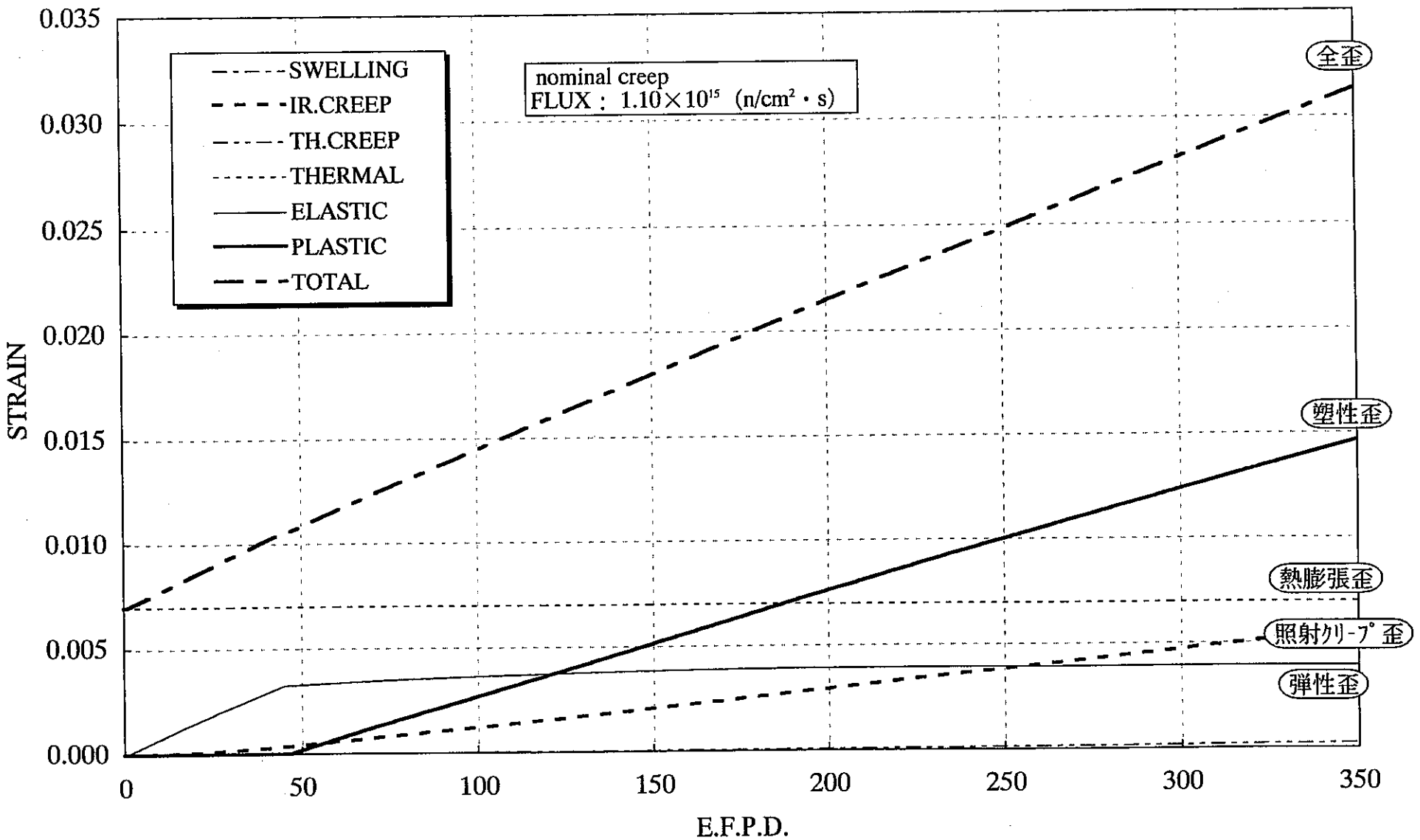


図４－３　　吸収ピン被覆管に生じる歪成分の変化

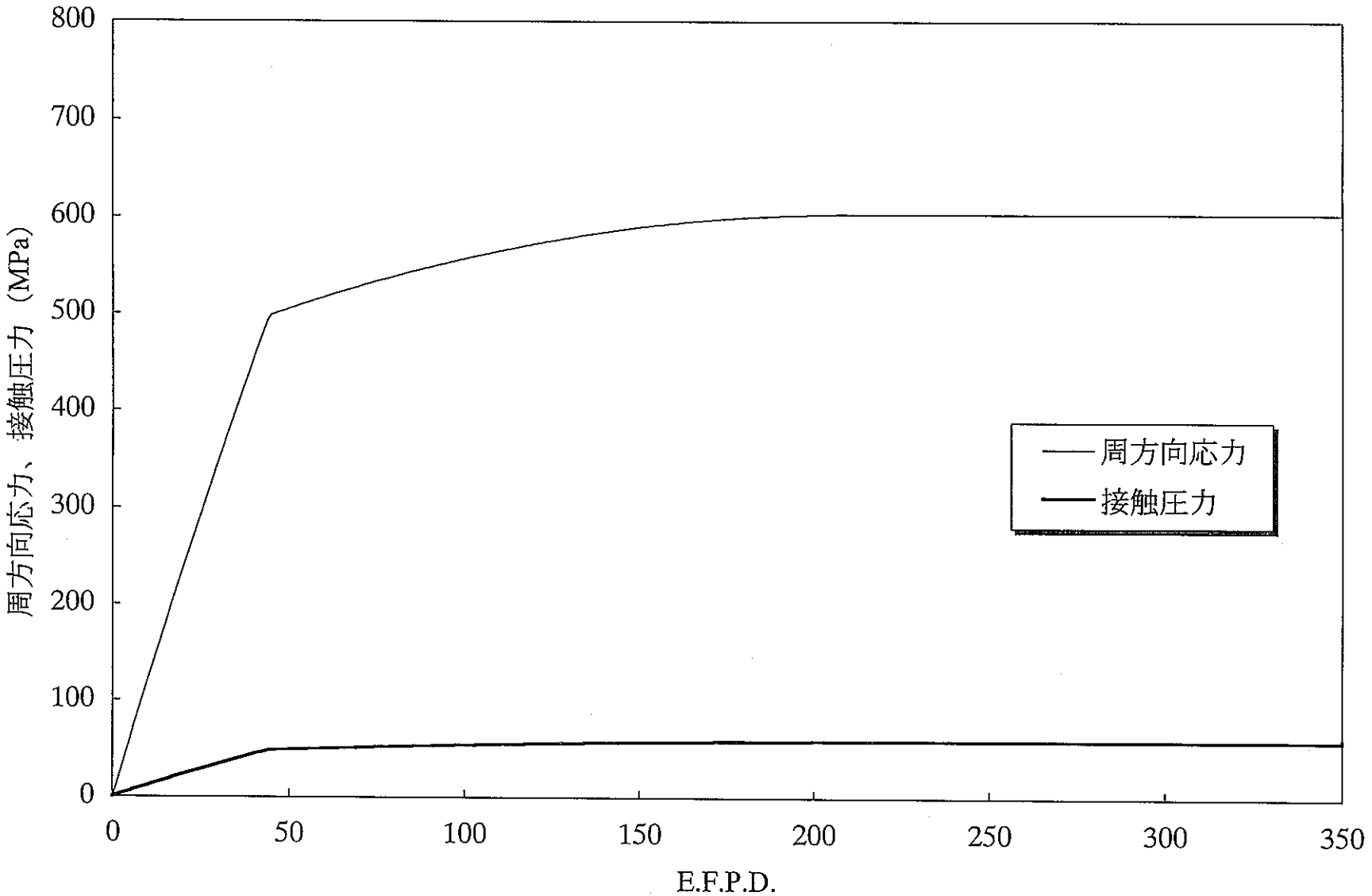


図４－４　ACMIにより被覆管に生じる周方向応力及び接触圧力の変化

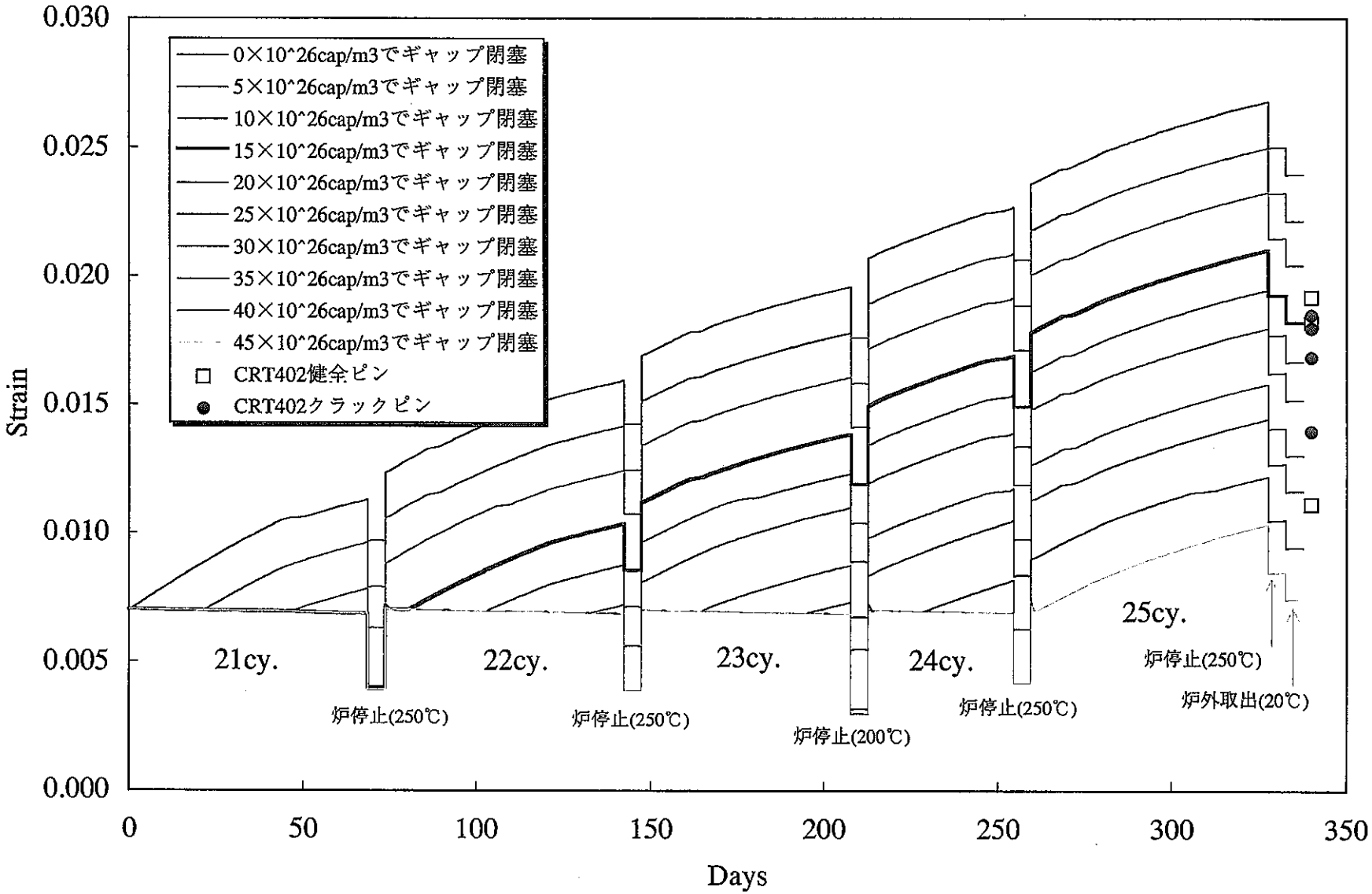


図４－５　CRT402制御棒吸収ピン被覆管における全歪の変化

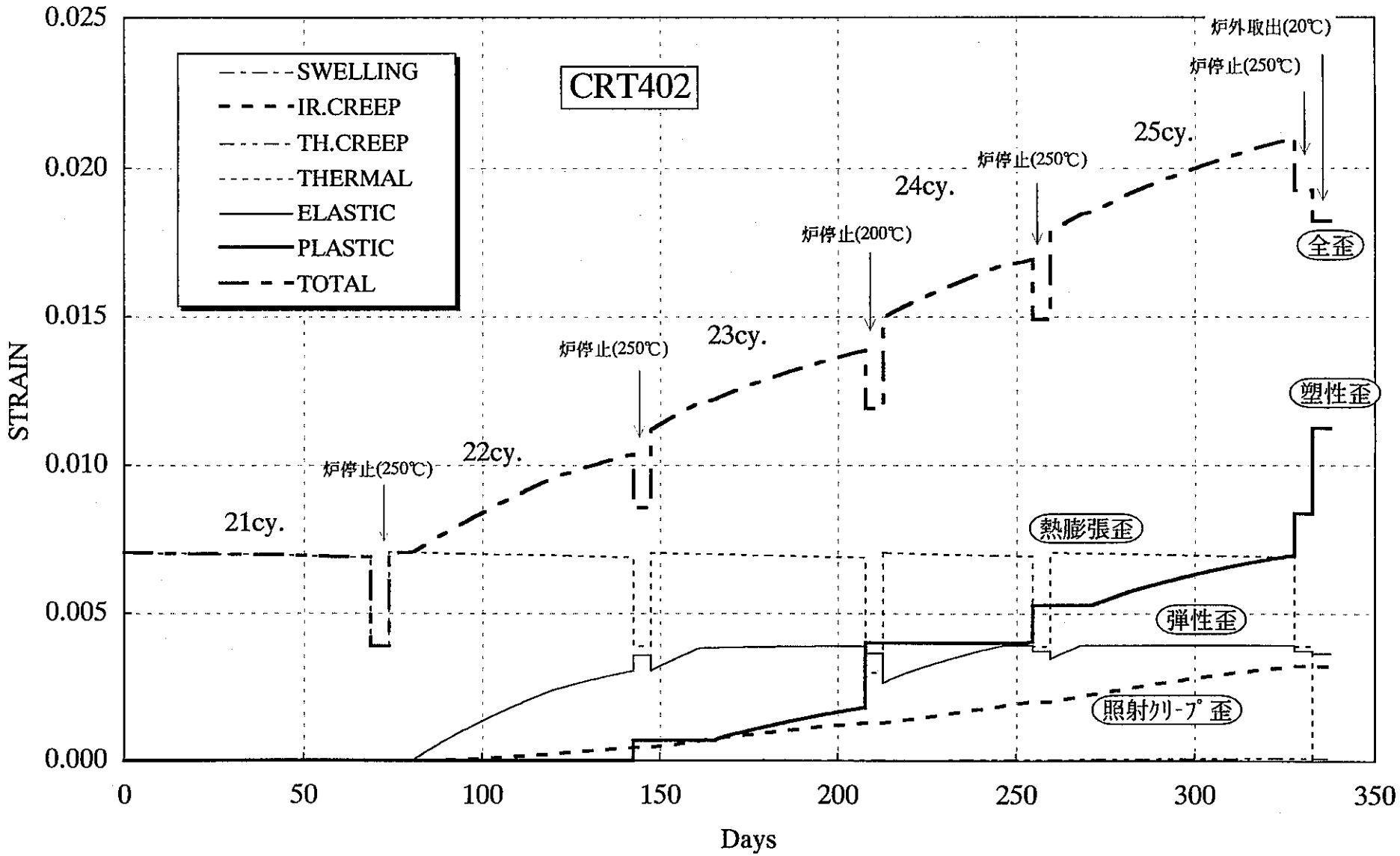


図４－６　CRT402制御棒被覆管に生じる歪成分の変化
(15E26cap/m^3でギャップ閉塞、炉内ｸﾘｰﾌﾟﾉﾐﾅﾙ式)

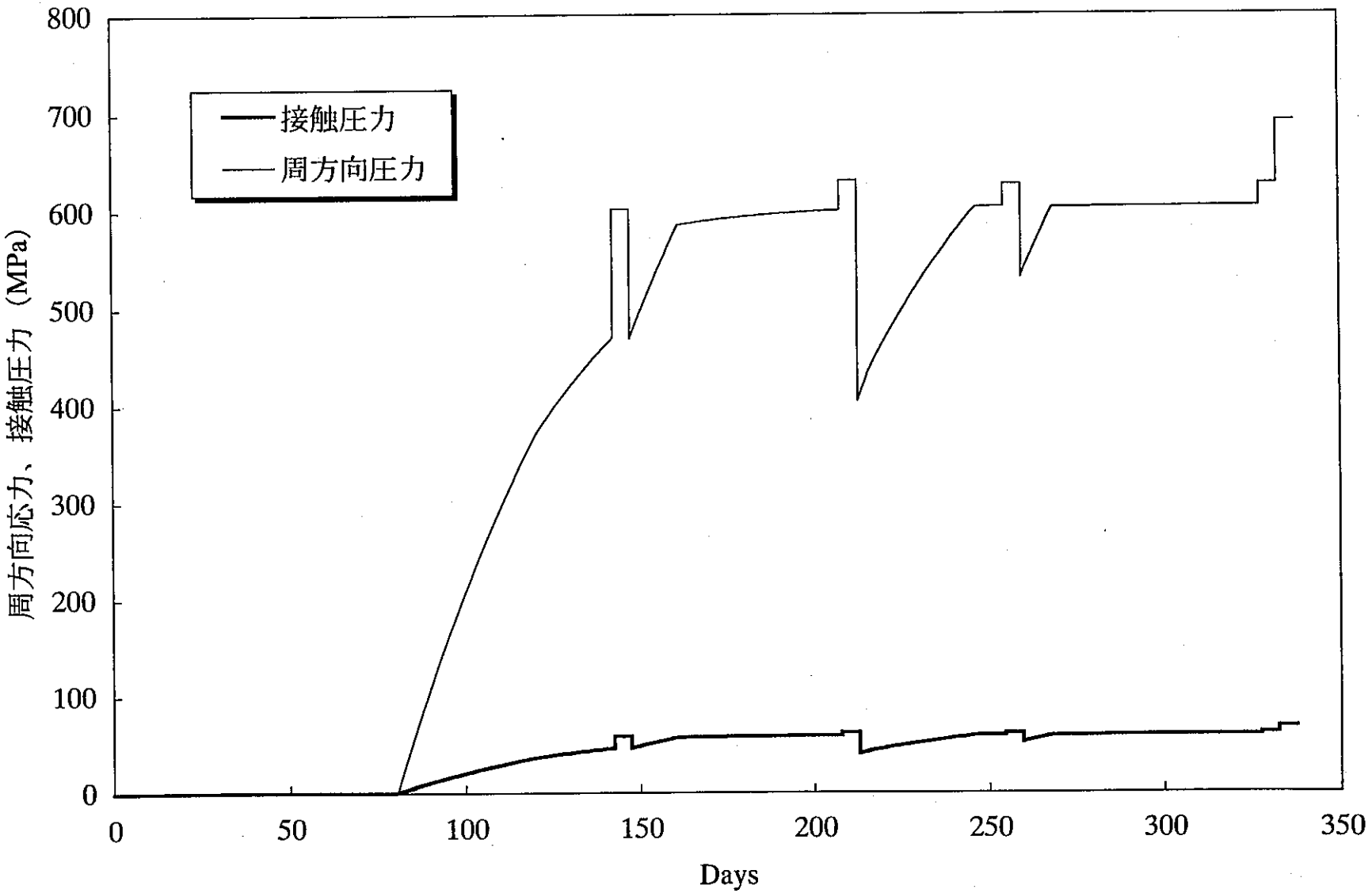


図４－７　CRT402制御棒被覆管に生じる周方向応力及び接触圧力の変化
(15E26cap/m^3でギャップ閉塞、炉内ｸﾘｰﾌﾟﾉﾐﾅﾙ式)

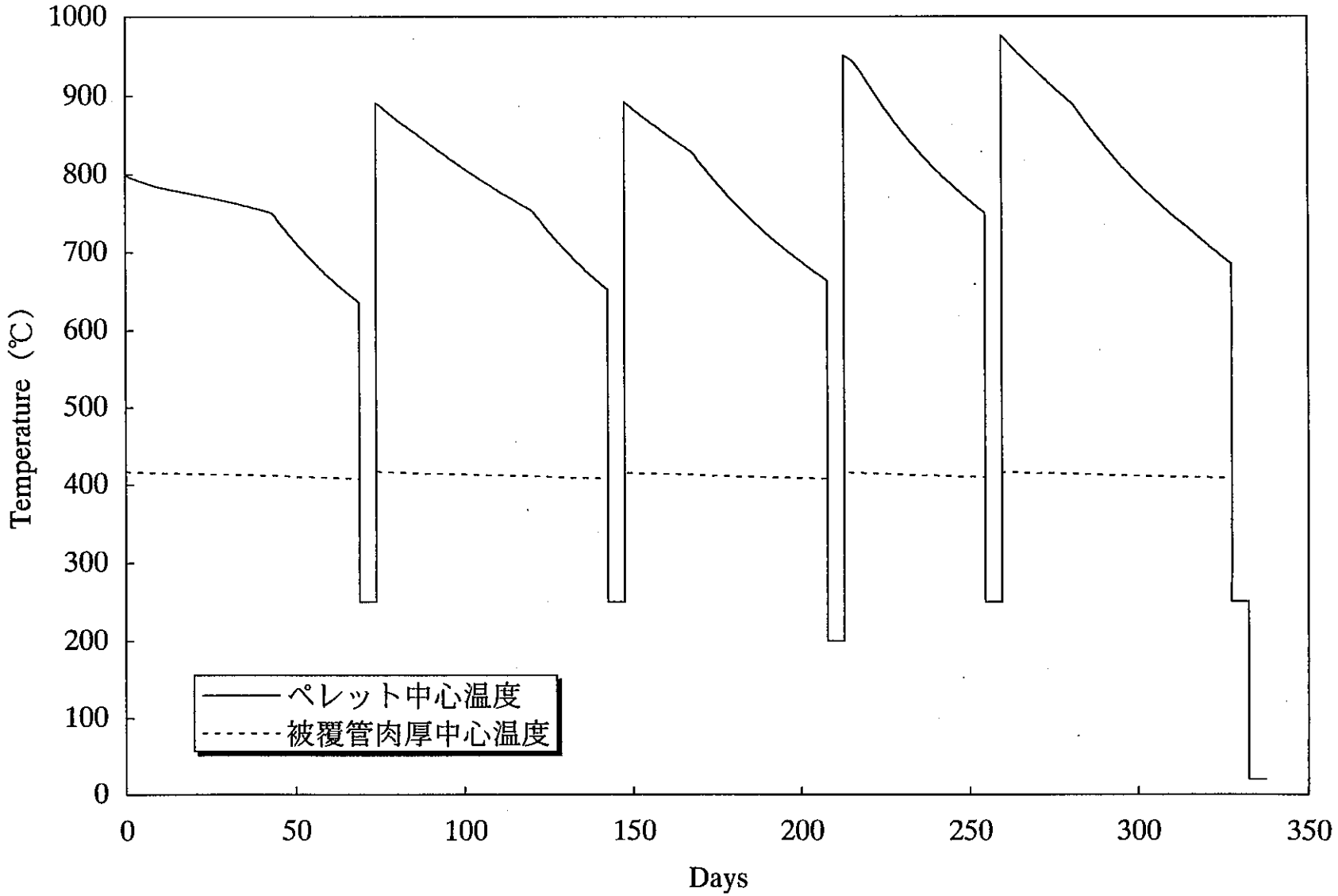


図４－８　Ｂ4Cペレットおよび被覆管の温度変化
(CRT402、15E26 cap/m^3でギャップ閉塞)

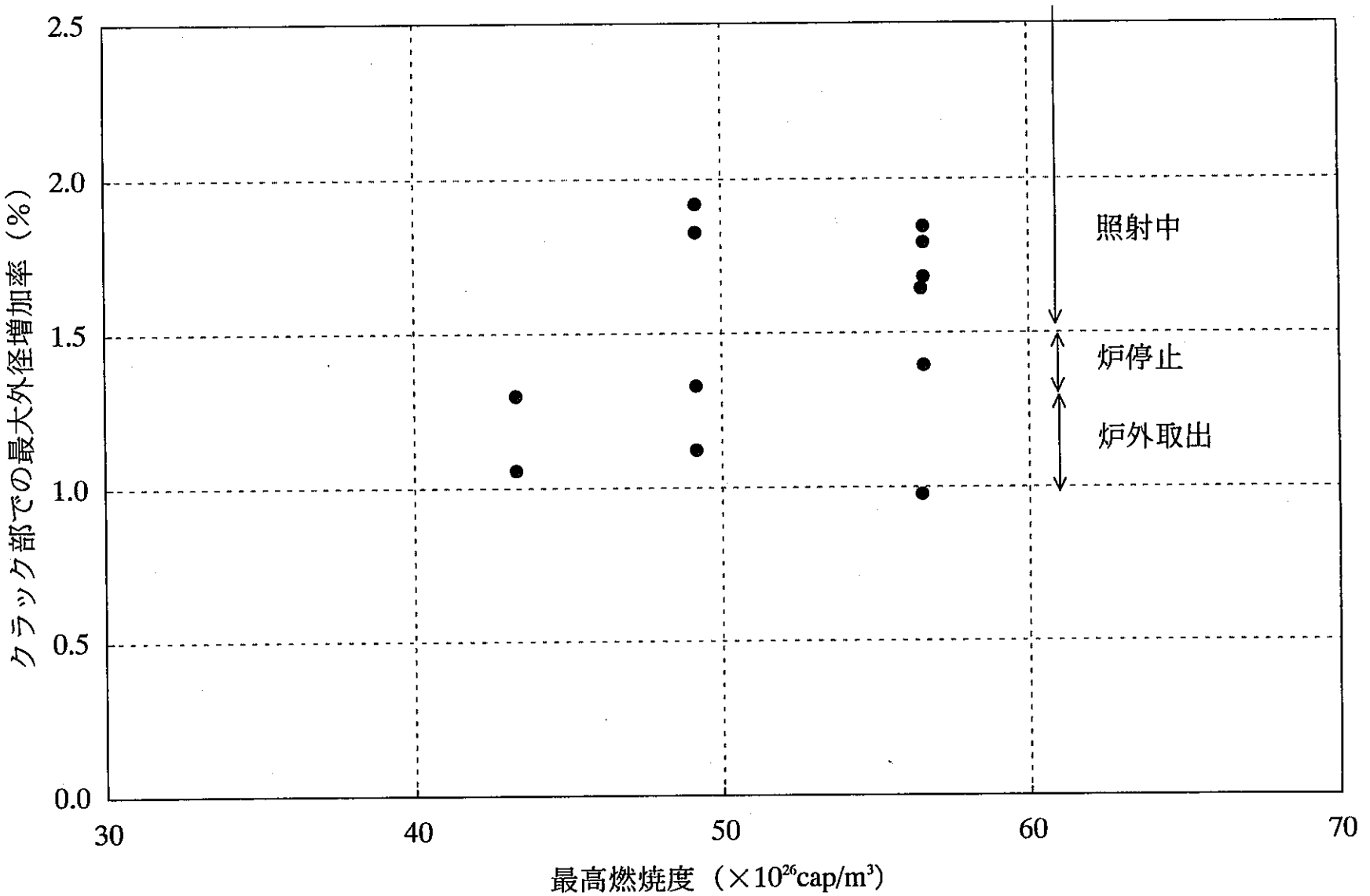


図４－９　CORALによる被覆管クラック発生時期の推定

5. 制御棒中性子吸収ピンのＡＣＭＩ挙動

5.1 吸収ピンクラック発生の特徴

前章までの照射後試験結果を総合的に検討してみると、吸収ピンクラック発生の特徴として、つぎのことが言える。

吸収ピンのクラック発生位置は最下端のＢ$_4$Ｃペレット付近に集中しており、中性子照射量の一番高い場所付近でクラック発生があった。クラック幅は0.1～0.3mm、長さが最大37mm 程度で被覆管軸方向に細長く伸びている。また、被覆管破面は典型的な粒界破壊であり、クラックは被覆管の内面から発生している。Ｂ$_4$Ｃペレットは被覆管内で多数の破片に分かれて亀裂が入り、リロケーションによりギャップの一部分を閉塞させている。照射後試験の際、Ｂ$_4$Ｃペレットを被覆管から取り出そうとしても、ペレットは容易に被覆管から抜き出すことができず、クラック発生部分の被覆管には引っ張りの残留応力が存在していた．すなわち、Ｂ$_4$Ｃペレットは照射中被覆管に固く拘束されており、クラックはＡＣＭＩにより発生したことを示している。被覆管の変形は異方的でオーバリテイが認められ、どちらかというとクラック発生は、被覆管の短径側でギャップの残存している部分で見られるものが多い。燃焼度に関しては、少なくとも約$39x10^{26}$cap/m^{3}まではクラックの発生したピンが見つかっておらず、一方、クラック発生が見られたピンはいずれも燃焼度が$43x10^{26}$cap/m^{3}以上でかつＢ$_4$Ｃペレットと被覆管の初期ギャップが0.44mm以上のものであった。

5.2 リロケーションとＡＣＭＩ

「常陽」制御棒のクラック発生原因となったＢ$_4$Ｃペレットと被覆管のＡＣＭＩの状況を模式的に示すと図５－１になる。図５－１（ａ）は照射前のＢ$_4$Ｃペレットと被覆管の様子で、Ｂ$_4$Ｃペレットがギャップをもって被覆管内に挿入されている状態である。照射を受けるとＢ$_4$Ｃペレットは発熱し、中心部分と外周部の温度差による急激な熱応力の発生により、Ｂ$_4$Ｃペレットに割れが入る。ペレット破片は5mm 程度の比較的大きなものから、小さなものは0.1mm 程度の細かいものもあり、さまざまな形をもって移動したり、被覆管とのギャップの中に入り込んだり、あるいはＢ$_4$Ｃペレットのクラックの間に入り込んだりする。このようなＢ$_4$Ｃペレットの移動、再配置（リロケーション）により、被覆管のギャップ閉塞は照射とともに急速に始まってしまう。

図５－１（ｂ）はＢ$_4$Ｃペレットが割れても被覆管は等方的に変形する場合である。ギャップが小さい吸収ピンの場合、Ｂ$_4$Ｃ破片の移動できる余地が少ないため、比較的等方変形に近い形でＡＣＭＩが起こるといえる。実際、図３－１０に見られるように、オーバリテイの値は初期ギャップの小さなピンほど小さくなっている。一方、図５－１（ｂ）または（ｃ）は異方的変形が生じるようなリロケーションの模式図である。図５－１（ｃ）は比較的大きなペレット破片がリロケーションして、図の左右方向のギャップを埋

めてしまう状態で、この状態でペレットのスエリングが進行すると、被覆管とのＡＣＭＩにより異方的な変形が生じる。この場合、たとえば図上部のギャップ部に微細なペレット破片が落ち込んでも被覆管の変形に寄与しない。一方、図５－１（ｄ）は図右側のギャップ部に微細なペレット破片が落ち込んで埋めてしまう状態で、この場合もＡＣＭＩにより異方的変形が生じる。実際の吸収ピンでは、（ｂ）または（ｃ）の状態のリロケーションが混合した形で生じており、オーバリテイの発生およびクラック発生に至っていると考えられる。被覆管の変形が異方的でオーバリテイが生じると、被覆管には異方的な引っ張り応力が働くため、図５－１（ｃ）や（ｄ）に示すように被覆管の短径側でクラック発生に至る例が多いと考えられる。図５－２にB_4Cのクラック発生とリロケーションおよびＡＣＭＩによる被覆管クラックに至る機構の模式図を示す。

図３－１０に示すように、クラックピンはいずれも最大オーバリテイが大きな値を有していた。ギャップサイズが大きくなるとリロケーションが発生しやすくなり、ＡＣＭＩによる被覆管のオーバリテイが大きくなることから、クラックが発生しやすくなることを示している。これがクラックピンはいずれも初期ギャップが 0.44mm 以上あり、これより小さなギャップサイズの吸収ピンにはクラックが見られなかったことと関係しているものと思われる。したがって、「常陽」MK-II 制御棒で、初装荷から２次、３次、４次と取り替え制御棒の吸収ピンギャップサイズを拡大して、ＡＣＭＩを遅らせようとしたが、結果的に単なるギャップの拡大は制御棒寿命延長につながらなかったことが明らかになった。

5.3　ＡＣＭＩ発生時期

リロケーションによるＡＣＭＩ発生の時期についてであるが、図３－１１と３－１２に示すように、外径増加率と局所燃焼度の関係を見ると、ギャップが燃焼初期から閉塞していると仮定しても差し支えないようなデータが見られている。また、図３－１４に示す吸収ピン軸方向プロファイルの解析から求めたオーバリテイ開始燃焼度と初期ギャップの関係からは、約 7 $x10^{26}$cap／m^3の燃焼度ですでにＡＣＭＩが発生していると考えられることを示したデータになっている。これら被覆管外径変化の解析からは、いずれも照射のごく初期からＡＣＭＩが発生すると考えても差し支えない結果になっている。

5.4　被覆管の粒界破壊挙動

被覆管の破断面観察に依れば、破断面は典型的な粒界脆性破面である。一方、照射済み被覆管のリング引っ張り試験では、粒界破壊は見られず破断部では絞りがみられ、典型的な延性破面となり、クラックピンとは様相が大きく異なっている。したがって、ＡＣＭＩによる被覆管の破壊挙動は、単純な引っぱり試験で得られる破壊挙動とはかなり様相が異なるものであることを示唆する。

被覆管のHe分析を行った結果によれば、被覆管の内表面のごく薄い層には高濃度の He が蓄積されていたが、被覆管内部のHe濃度は同程度に中性子照射された燃料被覆管ある

いはラッパー管のHe生成量と比較してもほぼ同様な値になっていて、特にHe蓄積が多かったわけではない。実際、被覆管のＴＥＭ観察を行ったが、照射したままの材料では高倍率で観察してもHeバブルが観察されず、７００℃に加熱してようやく小さなHeバブルが粒界に析出しているのが認められていた。しかし、Heバブルの析出状況は特に破断部と健全部で差がなく、粒界破壊に及ぼすHeバブルの影響は顕著に認められなかった。これらの結果から、クラック部に見られた粒界破壊は、現時点ではHeの影響により生じたとの直接的な証拠は得られなかった。粒界破壊を生じさせる原因として、Heの粒界析出以外の要因を考える必要があることを示している。

制御棒中性子吸収ピンの粒界破壊については、軽水炉でもいくつかの例が報告されており、表５－１にこれらを軽水炉における類似事象としてまとめて示す。Eickelpaschら[1]によれば、ドイツのＢＷＲで、SUS304被覆管にＢ$_4$Ｃ粉末を振動充填で装荷した制御棒吸収ピンで、クラックが入り、吸収ピンからＢ$_4$Ｃが流出したことを報告している。彼等の報告によれば、ホットセルでの渦電流を用いた探傷ならびに外観検査では、多数のクラックが吸収ピン上部の照射量の高い付近に集中し、吸収ピンの外径増加は約0.2％程度であった。クラックの進展は被覆管外表面から始まり、破面は典型的な粒界脆性破壊で多くの枝分かれしたクラックが見られた。制御棒吸収ピンのクラック発生原因は、Ｂ$_4$Ｃ粉末が照射によりスエリングし、ＡＣＭＩを発生させ、このため周方向に応力が働き応力腐食機構が働いて、被覆管外面からクラックが内部に向けて進展した。そしてクラックから冷却材が浸入し、Ｂ$_4$Ｃ粉末が冷却材中に流出してしまったとのことである。

一方、PWRにおいても制御棒吸収ピンの破損例が報告されている。Manahanら[2]によれば、米国のPWR（Point Beach １号炉）で、１１サイクル運転した制御棒の照射後試験で、２本の中性子吸収ピンにクラックが入っていることが認められている。クラック発生位置は吸収ピンの先端部分で照射量の一番高いところ、またクラックは軸方向に伸びる長さ約 10～15 cmのヘヤークラックで、被覆管破面は 100% の粒界破壊であった。クラック発生原因としては、中性子吸収材となるAg-In-Cd合金とSUS304被覆管とのＡＣＭＩであるとしている。

被覆管の粒界破壊挙動を炉外で再現するため、かれらは照射されたSUS304のクラック入り被覆管材からミニチュア試験片を採取し、300℃、アルゴンの不活性雰囲気中で引っ張り試験を行った。その結果、ひずみ速度が1×10^{-6}／s 以下の低ひずみ速度になると粒界割れが認められはじめ、2×10^{-7}～1×10^{-8}／s とひずみ速度が更に小さくなると粒界割れの割合も増大してくると報告している。この引っ張り試験の結果では、粒界割れを起こすには中性子照射だけで十分であるとしている。図５－３にひずみ速度と粒界割れの割合を示す。粒界割れした重照射材料では粒界にS, Si, Al, Ni, Zn が存在していることが認められていると報告し、３０４や３１６ステンレス鋼の照射誘起偏析により、クロムが粒界から除去され、照射誘起応力腐食割れ（RISCC）の感受性を上げたことが、低歪速度で引っぱり試験を行うと粒界破壊になる原因であると説明している[3]。

我が国でも軽水炉の制御棒に粒界破壊によるクラックの入った例が松岡らによって報告されている[4、5]。前述の例と同じように、SUS304で作られた吸収ピンの高照射部位でクラック発生が見られている。クラックは約 0.8～1.0x10^{26} n／m^2以上の中性子照射を受けた被覆管に見られ、外径増加は約1%程度でまた破壊モードは典型的な粒界破壊である。クラック進展は被覆管の内面から始まっているとしている。

彼等の報告によれば、被覆管のクラック発生メカニズムは次のようであるとしている。制御棒吸収ピンは炉内で高速中性子の重照射を受けると、Ag-In-Cd合金の中性子吸収材がスエリングしＡＣＭＩが発生し、周方向に引っぱり応力が発生する。中性子照射がある閾値以上になると、被覆管の延性および一様伸びが減少し、周方向の伸びが限界以上に達してクラックが発生したと説明している。

約１%程度の小さなひずみで粒界破壊が生じた原因として、彼らは次のように説明している。Manahanら[4]の報告と同じように、微小試験片を照射した被覆管から採取し室温と300℃で引っ張り試験を行った。300℃で引っ張り試験を行った重照射材では、破壊ひずみは5～6%程度であったが、一様伸びは1.4%程度であり、被覆管のクラック挙動を説明するとしている。また、この引っ張り試験のひずみ速度は約 6x10^{-8}／sであったが、この場合、破面は粒界破壊モードを示したのはごく一部で、大部分は延性的な破壊様式であった。この結果はManahanらの結果と一致していて、ひずみ速度が10^{-10}～10^{-11}／s程度にならないと完全な粒界破壊にならないとしている。

以上、軽水炉で見られた吸収ピンのクラック発生挙動を総合してみると、Ｂ４Ｃ粉末またはAg-In-Cdの中性子吸収材は中性子照射によりスエリングし、被覆管とのギャップが閉塞、あるいはＢ４Ｃ粉末の場合は最初からギャップがとられていないため、ＡＣＭＩが発生し、クラックが発生する。吸収ピンのクラック発生部位は中性子照射量の最大付近であり、被覆管破面は典型的な粒界破壊モードになる。この粒界破壊は約1 x 10^{26}n／m^2以上の中性子照射を受けたＳＵＳ材で発生し、炉の定常的運転中、ＡＣＭＩによる約 1x10^{-10}／s程度の非常に小さなひずみ速度で被覆管が変形を受けたときに生じるものである。Eickelpaschらは粒界破壊はBWRの水環境における応力腐食割れ機構が働いたものとしているが、Manahanらは粒界破壊は材料の照射誘起偏析とＡＣＭＩによる小さなひずみ速度によりもたらされと考えている。

「常陽」MK-II 制御棒においても上記軽水炉とほぼ同様な被覆管の粒界破壊挙動を示すことから、本質的にほぼ同様な機構、すなわちＡＣＭＩと材料の照射効果、および極度に小さなひずみ速度が働いて粒界破壊になったものと思われる。

なお、粒界破壊機構に関して液体金属脆性による吸収ピンのクラック発生の可能性も挙げることができる。金属材料は液体金属存在下で応力を受けると脆化することが知られている。この現象は液体金属脆性（Liquid Metal Embrittlement：LME）と呼ばれている。^{10}Bの（ｎ、α）反応により生じる^{7}Liは液体状態下で鋼を著しく脆化させることが知られている。このLiのLMEにより、9Cr－1Mo鋼及び2.25Cr－1Mo鋼の単軸引張試験では断面減少

率及び伸びの低下等がみられ、その破面は脆性破面を示す[16]、また、2.25Cr-1Mo鋼の疲労試験では疲労亀裂進展速度が増大する[17]等が報告されている。「常陽」MK-II制御棒では、吸収ピン内に^{10}Bの（n，α）反応によりLiが高濃度で存在することが考えられる。このためLiによるLMEとＡＣＭＩによる応力との複合作用により吸収ピンにクラックが発生した可能性があるとも考えられる。今後この点についてさらに詳細な実験を含めた検討を進める必要がある。

表５－１　軽水炉における類似事象

原子炉	BWR（ドイツ） N. Eickelpasch、1982	PWR（米国） M. Manahan, 1987	PWR（日本） 松岡ら,1993
中性子吸収材	B4Cを粉末充填（GE製制御棒）	Ag-In-Cd合金	Ag-In-Cd合金
被覆管	SUS 304	SUS 304	SUS 304
クラック発生状況	多数の吸収ピン先端付近にクラックが発生、冷却材が浸入しＢ４Ｃ粉末一部流出、ピン直径約 0.2% 増大．被覆管外面からクラックの進展開始．	２本の中性子吸収ピン先端付近にクラック発生、軸方向に伸びる長さ約10cmのヘヤークラック	SUS 304吸収ピンの先端、高照射部位で軸方向に伸びるクラック発生、外径増加約１％程度、被覆管内面からクラック進展開始
被覆管破面	典型的粒界破壊	１００％の粒界破壊	典型的粒界破壊
クラック発生原因	B4C のスエリングによるACMIに基づく応力腐食	Ag-In-Cd 合金とSUS304被覆管とのACMI	被覆管の延性の低下とAg-In-Cd合金のスエリングによるACMI
その他	運転中に冷却材中のトリチウム濃度が増大し、ピン破損が予想された．B4C は照射により塊状になり、かつスエリングしたため被覆管から抜けなくなっていた．塊状になったのは、焼結によるものでなく、Li によるものと思われる．水に濡れると容易に崩壊した．	照射材を2X10^-7/s から1X10^-8/s の低ひずみ速度で引張試験、粒界破壊は不活性雰囲気でも中性子照射と低ひずみ速度だけで十分（水環境は必ずしも必要でない）．照射誘起偏析によるCr の粒界からの除去および、C, P, Si などの粒界への析出が、粒界割れ感受性を上げるようだ．応力腐食現象であるかどうか究明必要．	一様伸びは照射により1.4% に低下．クラックは外径増加が 0.7% 以上のものにみられる．中性子照射量が 0.8 x 10^26 n /m^2 以上のものにクラック発生．ミニチュア試験片で引っ張り試験を実施、6 X 10^-6 /s ではわずかに粒界破壊を示し、大部分が延性破壊．

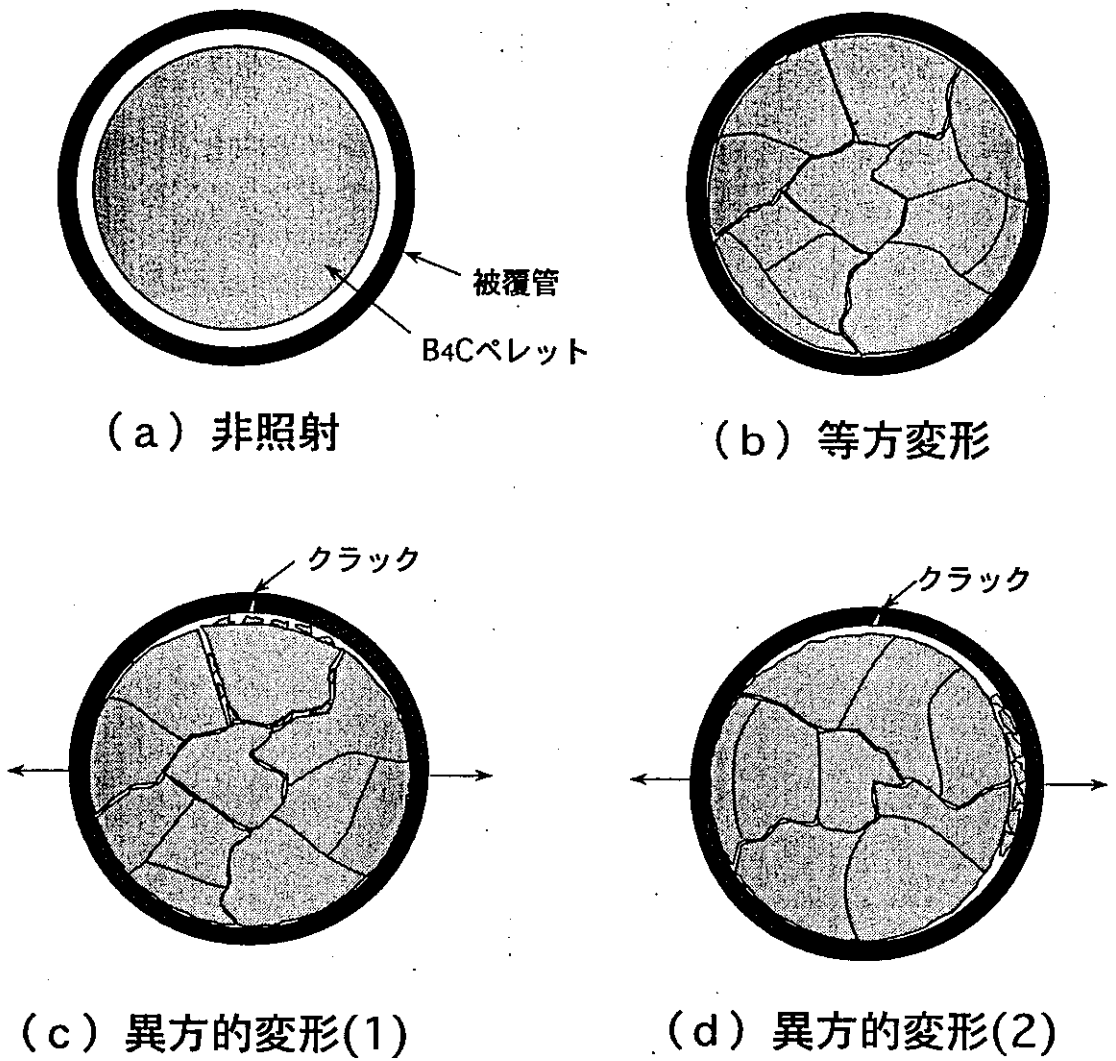


図5-1　B4Cペレットの割れとリロケーション模式図

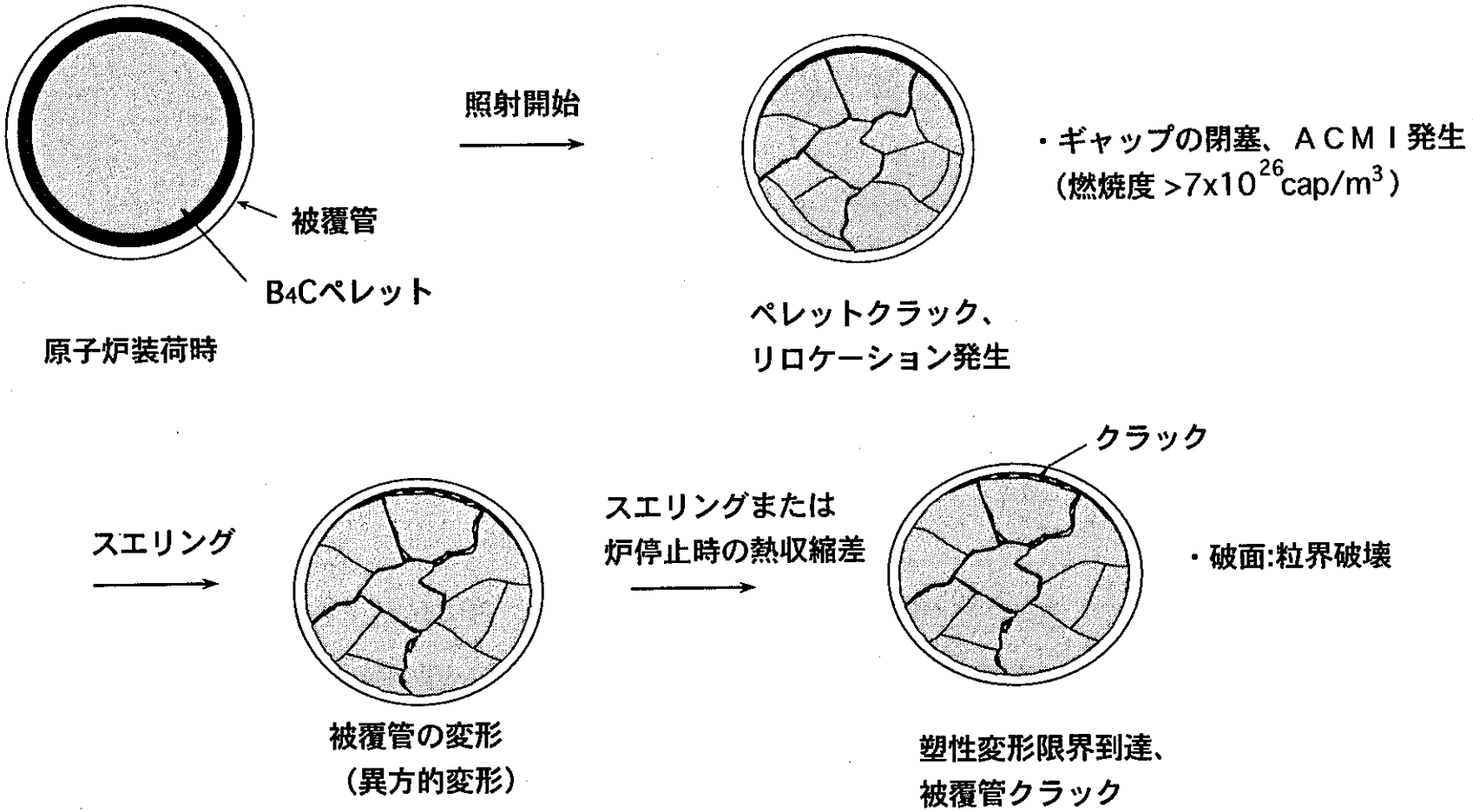


図５－２　B_4Cのクラック・リロケーションとＡＣＭＩ模式図

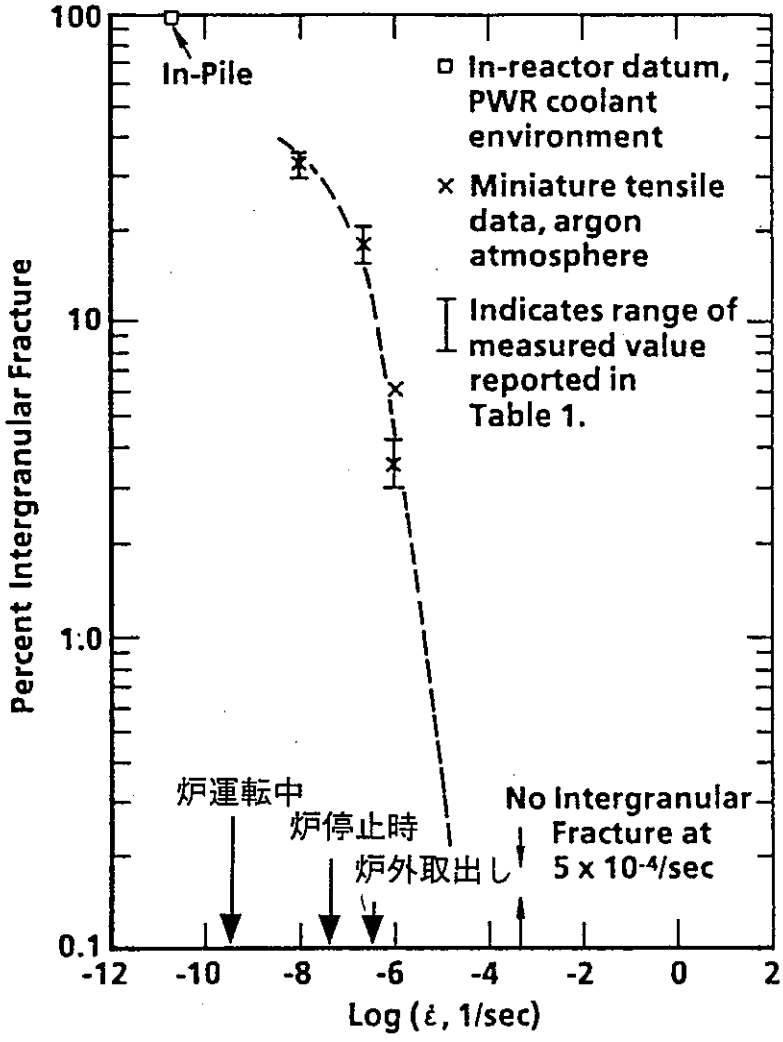


図５－３　照射済み被覆管の３５０℃での引張り試験における粒界破壊の割合とひずみ速度の関係[2]。

6．まとめと今後の課題

以上、「常陽」MK-II　制御棒の照射後試験およびコード計算を用いた挙動解析結果から、中性子吸収ピンにおけるクラック発生の状況とその原因を明らかにした。

吸収ピンのクラック発生は、照射によるB_4Cペレットの割れとリロケーションによるＡＣＭＩが関与していることが明らかになった。このＡＣＭＩは、B_4Cペレットの割れとリロケーションという非常に再現性の乏しい確率的な現象が入ってくるため、定量的な解析を難しくしている。たとえば、ＡＣＭＩがどの時点で発生するのか、また、被覆管の変形量はどのようになるかなどは、ペレットの割れ方やリロケーションの生じ方によっても大きく変わって来る。しかしながら、クラック発生ついては基本的なメカニズムが明らかになった。すなわち、

（1）B_4Cペレットが照射により割れてリロケーションが生じ、その結果照射の早い段階からギャップが閉じてしまう。

（2）更に照射が進むと、B_4CのスエリングのためにＡＣＭＩが発生し、オーバリテイをもった被覆管の変形が始まる。

（3）ＡＣＭＩによる被覆管の変形は照射クリープでも吸収できず、被覆管に塑性変形が生じる。そして炉の運転中、あるいは停止時のペレットと被覆管の熱膨張差により、被覆管の塑性ひずみが限界を超えてクラックが入る。

（4）破面が典型的な粒界破壊であることから、被覆管の受けるひずみ速度が非常に小さいことを示唆する。このことから、炉の定常運転中にクラックが発生した可能性が高い。

（5）CORALによるコード解析でも、上記ＡＣＭＩによるクラック挙動は実機の状況を良く模擬する結果を得た。

以上、照射後試験とコード解析により吸収ピンのクラック発生に関しては基本的理解が得られ、設計評価の基礎的知見が得られた。しかしながら、更に今後の課題として究明する必要のあることは以下の項目である。

（1）被覆管の粒界破壊機構の解明：引っ張り試験におけるひずみ速度と破壊モードの関係から被覆管クラック発生機構のより詳細な解明をすすめ、さらに粒界破壊をおこすための材料科学的な研究ならびに$^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$ 反応の結果生じるLiによる液体金属脆性の可能性などの検討も進める必要がある.

（2）リロケーションモデルを取り入れたCORALコードの解析：CORALでは、被覆管が等方的に変型が進むとの仮定で挙動解析している。しかし、実際はオーバリテイがみとめられ、吸収ピンは異方的変型をしている。これら、リロケーションモデルを取り入れたより精密な解析を進める必要がある。

なお、ＡＣＭＩによるクラック発生はB_4Cペレットの照射による割れと吸収ピン内でのリロケーションおよびスエリングが関与している。したがって、吸収ピンのＡＣＭＩ破損を防ぐためには、リロケーションを防ぐ必要があり、このために吸収ピン内にシュラウド管を導入する事が有効と考えられている。このシュラウド型吸収ピンについてすでに「常陽」MK－IIの６次取り替え制御棒で試用しており、近いうちに照射後試験をおこない、その有効性を確認することになっている。

参考文献

(1) N. Eickelpasch, R.W.Seepolt, J. Mullauer and W. Spalthoff;Nuclear Technology, 60 (1983) 362-366.

(2) M.P. Manahan and R. Kohli, J. Santucci, P. Sipush, R.L. Harris; "Irradiation-assisted cracking of control rod cladding ", Trans. 9th International Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology / Lausanne, 1987 p.75-85.

(3) S. Dumbill and W. Hanks: Trans. 9th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lausanne 1987, p.521-529

(4) T. Matsuoka, M. Mori, H. Myojin, Y. Sasaki, T. Nagata: "Cladding Tube Crack Initiation Limit of PWR RCCA Rodlets for Absorber Swelling", The 3rd JSME/ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering, Kyoto, Japan 1995, p.369-373

(5) T. Matsuoka, T. Yonezawa, K. Nakamura, H. Myojin, J. Shimizu, T. Nagata: Proc.ASME.JSME 4th Int. Conf. Nucl. Engineering , Tokyo, 1996 p.249-256.

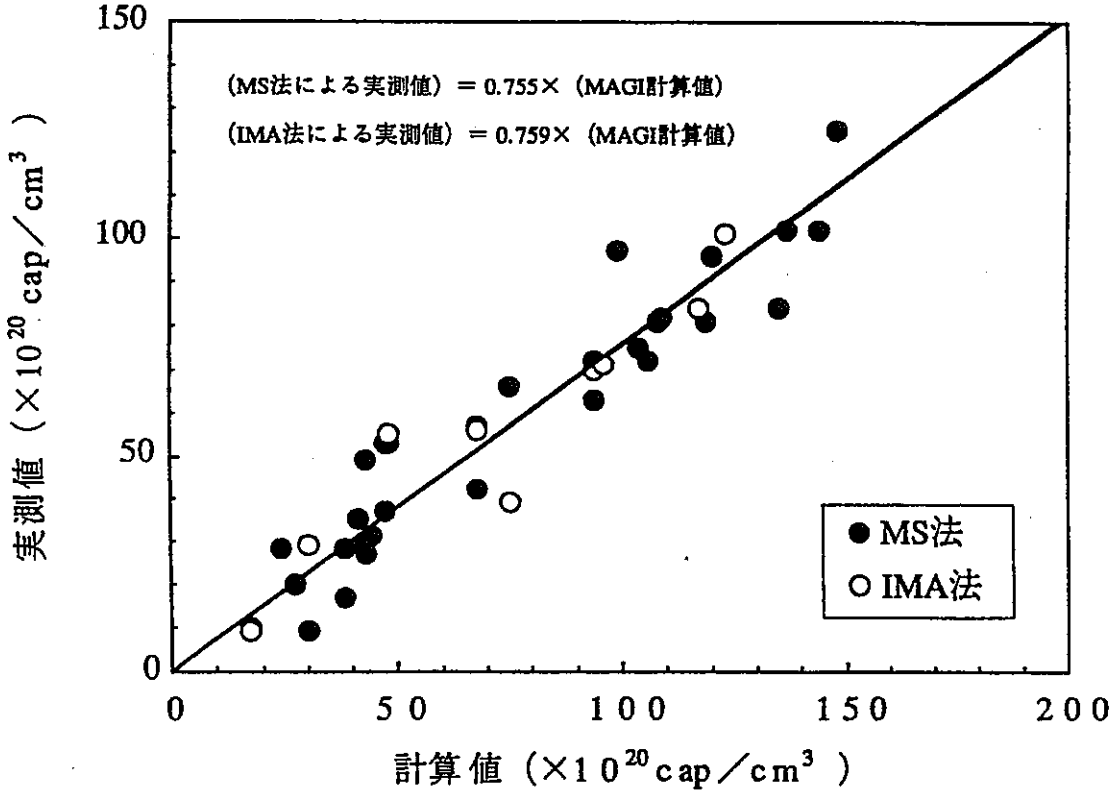
(6) J. E. Cordwell: "Liquid Metal Embrittlement of Steels by Alkali Metals and Alloys", International Conference of Liquid Metal (1973) , 177

(7) R. E. Spencer, D.K.Matlock and D.L.Olson :"The Effect of Liquid Metal Embrittlement on High Temperature Fatigue of 2.25Cr-1Mo Steel in Liquid Lithium " , J. Materials For Energy Systems 4 (1983) , 187

付録１．　炭化ホウ素ペレットの燃焼度に関する実測値と計算値の比較

リグ名	ｷｬﾌﾟｾﾙNo.	照射量 10^{22}n/cm² E>0.1MeV	照射温度 (℃)	^{10}B濃縮度 (atom%)	ﾍﾟﾚｯﾄ密度 (%T.D.)	燃焼度 (10^{20}cap/cm³) MAGI 計算値	実測値 MS法	実測値 IMA法
AMIR-1	AU001	1.3	1200	37	95	43	27	
	BU001	1.3	1000	37	95	43	30	
	FU001	1.0	800	37	95	38	17	
	BL001	1.3	1000	37	95	47	37	
	FL001	1.2	800	37	95	41	35	
	FU002	1.1	800	37	95	38	28	
AMIR-2	AU002	3.7	1200	37	95	119	81	
	BU002	3.6	1000	37	95	117		84
	AL002	3.7	1200	37	95	123		101
	DU003	3.1	900	37	95	104	75	
	BL004	3.2	1000	37	95	109	82	
	FU003	2.8	800	37	95	94	72	70
	GU002	2.9	700	37	95	96		71
	GL003	2.9	700	37	95	99	97	
	DU004	2.9	800	37	95	108	81	
	FU004	3.2	800	37	95	106	72	
AMIR-3-1	D6A411	1.9	1470	92	95	144	102	
	D6A442	1.9	1470	92	95	148	125	
	D6A611	1.5	1400	92	95	135	84	
	D6A711	1.3	1300	92	95	120	96	
	D6A742	1.5	1300	92	95	137	102	
AMIR-4-1	C2201	1.2	920	50	95	48	53	55
	C1301	—	700	20	95	47	53	
	A2201	0.6	920	92	95	44	31	
	A2301	0.6	1060	92	95	43	49	
	B1201	1.0	1500	92	95	75	66	39
	B1401	1.3	1950	92	95	94	63	
	A1204	—	600	20	95	17	10	9
TCR201	D30722	(3.7)	(1300)	90	90	68		56
	D30752	(3.7)	(1300)	90	90	30		29
	D30731	(3.7)	(1300)	90	90	68	42	
	D30761	(3.7)	(1300)	90	90	30	9	
	D30421	(3.7)	(1300)	90	90	68	57	
	D30441	(3.7)	(1300)	90	90	27	20	
	D30451	(3.7)	(1300)	90	90	24	28	

*1　MAGI計算値　　*2　設計値　　(照射量、照射温度ともにTCR201については参考値)



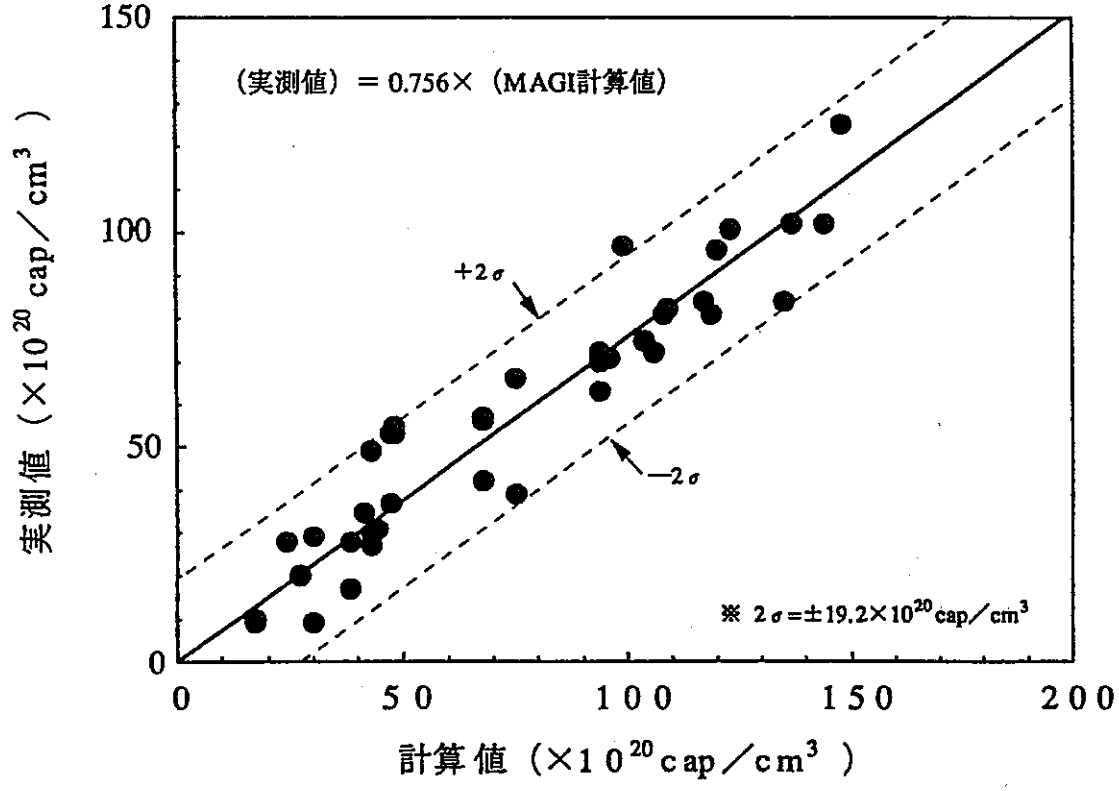


図１　燃焼度（実測値と計算値との比較）