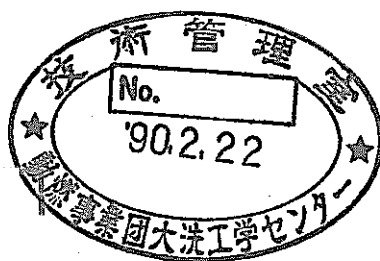


「常陽」MK-II 計測線付C型特殊燃料集合体 (PFI010) の照射後試験(2)

計測線付燃料要素の組織観察及び機器分析



1989年10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ください。

〒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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, 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)

「常陽」MK-II 計測線付C型特殊燃料集合体 (PFI010) の照射後試験(2)

計測線付燃料要素の組織観察及び機器分析

叶野 一郎^{*}, 額賀 貞芳^{**}, 鶴飼 重治^{*}
熊倉 忠夫^{*}, 櫛田 尚也^{*}, 野村 茂雄^{*}
鹿倉 栄^{*}

要 旨

計測線付C型特殊燃料集合体PFI010(INTA-1)は、「常陽」MK-II炉心装荷位置5F2において、100MW第8サイクルから第12サイクルの間照射された。集合体平均燃焼度は32,200 MWd/t, 集合体平均中性子照射量は 3.4×10^{22} n/cm² (E>0.1MeV)である。計測線付C型特殊燃料集合体の照射試験の目的は、計測センサー、信号ケーブル、コネクター及び計測器などの計測系の照射下での性能確認、及び「もんじゅ」燃料仕様の燃料要素を含む燃料要素を集合体形式で計測照射することにより、集合体の熱流力特性及び燃料、材料に関する経時データを取得し、「もんじゅ」設計手法の検証、挙動解析コードの改良に資することである。

ADS全相セルでは、中空ペレットと中実ペレットの燃料組織変化挙動及び、計測センサー、信号ケーブル等の健全性を調べるために組織観察と機器分析を実施した。

本試験により以下の結果が得られた。

- (1) 燃料の組織変化は顕著に生じており、中心空孔の生成、柱状晶の発達が認められた。中空ペレットの内径も増加した。
- (2) SXMAによるXe, I, Csのペレット径方向濃度分布測定の結果、それらの径方向分布は類似しており、組織変化を生じているペレット中央部での放出が認められた。
- (3) SXMAによるU, Puの径方向分布測定により、Puの再分布が確認された。中空ペレットでは中心空孔端で、製造時の29.55%から34.23%にまでPuは増加していた。
- (4) SXMAによる分析の結果、熱電対素線の組成は、W-26Re合金において照射前のW濃度74.61wt%から、照射によりW濃度が54.5wt%と77.6wt%の2相共存となり、 σ 相とW-richな固溶体に相分離した可能性がある。一方、W-5Re合金の組成は均一であるが、表面は不均一に侵食されている。また、照射によるW-Reの核変換におけるOsの生成量は、分析値と計算予測値がよく一致した結果となった。

* 大洗工学センター、燃料材料開発部、燃料材料技術開発室

** 原子力技術(株)

(5) IMAによる中性子検出器の中性子照射量の測定において測定値は計算値とよく一致した結果となり、本手法を用いて評価可能であることがわかった。

目 次

1. まえがき	1
2. 試験用集合体及び燃料要素の構造	2
2.1 試料部集合体の構造	2
2.2 燃料要素の構造	2
3. 照射履歴	3
4. 供試体及び試験方法	4
4.1 供試体	4
4.2 光学顕微鏡による観察	4
4.3 画像解析	4
4.4 X線マイクロアナライザ(SXMA)による元素分析	4
4.5 イオンマイクロアナライザ(IMA)による質量分析	5
5. 試験結果	6
5.1 光学顕微鏡による燃料組織観察結果	6
5.2 SXMAによる元素分析	7
5.3 IMAによる中性子検出器の中性子照射量の測定	8
6. ま と め	13
7. 謝 辞	14
8. 参考文献	15

List of Tables

Table 1	試験用燃料ピンの仕様	16
Table 2	燃料ペレットの製造時検査結果	17
Table 3	燃料集合体(PFI010)の照射条件	18
Table 4	燃料組織変化領域径測定結果	19
Table 5	金相断面位置でのXe, Cs放出率計算結果	20
Table 6	熱電対素線の組成分析結果	21
Table 7	熱電対素線のSXMA分析値と「FPGS-3・5」コードにより求めた計算値の比較結果	21
Table 8	中性子束密度と ²³⁵ Uの核分裂断面積	22

List of Figures

Fig.1	試料部集合体の構造図	23
Fig.2	燃料中心温度測定用燃料ピンの構造図	24
Fig.3	「もんじゅ」仕様燃料ピンの構造図	25
Fig.4	中性子検出器用模擬燃料ピンの構造図	26
Fig.5	PFI010の「常陽」MK-II炉内装荷位置	27
Fig.6	燃料ピンの集合体位置	28
Fig.7	中性子束の軸方向分布(ピンNo. I1104, I1102, I1616)	29
Fig.8	被覆管温度の軸方向分布(ピンNo. I1104)	30
Fig.9	被覆管温度の軸方向分布(ピンNo. I1102)	31
Fig.10	燃焼度の軸方向分布(ピンNo. I1104)	32
Fig.11	燃焼度の軸方向分布(ピンNo. I1102)	33
Fig.12	燃焼度の軸方向分布(ピンNo. I1616)	34
Fig.13	線出力の軸方向分布(ピンNo. I1104)	35
Fig.14	線出力の軸方向分布(ピンNo. I1102)	36
Fig.15	線出力の軸方向分布(ピンNo. I1616)	37
Fig.16	ピンNo. I1104とI1102の試料採取位置	38
Fig.17	SXMAによるXe, I, Csの径方向分布測定結果	39
Fig.18	SXMAによるカラーマッピング結果	40
Fig.19	U, Pu濃度の径方向分布(ピンNo. I1104, I1102)	41
Fig.20	W-Re合金の二元系状態図	42
Fig.21	中性子検出器の深さ方向測定結果	43

List of Photographs

Photo. O-1	金相試料の切断位置と低倍写真(ピンNo. I 1104)	44
Photo. O-2	金相試料の切断位置と低倍写真(ピンNo. I 1102)	45
Photo. O-3	金相試料の切断位置と低倍写真(ピンNo. I 1616)	46
Photo. O-4	試料No. A 51331の横断面写真(Etched)	47
Photo. O-5	試料No. A 51331熱電対の高倍写真(Etched)	48
Photo. O-6	試料No. A 51822の横断面写真(As-Polished)	49
Photo. O-7	試料No. A 51822の高倍写真(As-Polished)	50
Photo. O-8	試料No. A 51822の横断面写真(Etched)	51
Photo. O-9	試料No. A 51822の高倍写真(Etched)	52
Photo. O-10	試料No. A 51822熱電対の縦断面写真(Etched)	53
Photo. O-11	試料No. A 52522の横断面写真(As-Polished)	54
Photo. O-12	試料No. A 52522の高倍写真(As-Polished)	55
Photo. O-13	試料No. A 52522の横断面写真(Etched)	56
Photo. O-14	試料No. A 52522の高倍写真(Etched)	57
Photo. X-1	照射後の熱電対素線の面分析結果	58

1. ま え が き

計測線付C型特殊燃料集合体PF1010(INTA-1)の照射試験の目的は、計測センサー、信号ケーブル、コネクタ及び計測器などの計測系の照射下での性能確認、さらに、「もんじゅ」仕様の燃料を含む燃料要素を集合体形式で計測照射することにより、集合体の熱流力特性及び燃料・材料に関する経時データを取得し、「もんじゅ」設計手法の検証、挙動解析コードの改良に資することにある。本照射試験は、高速実験炉「常陽」MK-II炉心装荷位置5F2において、100MW第8サイクルから12サイクルの間実施された。

ADS金相セルでは、中心温度測定用燃料要素の中実ペレットと無計装燃料の中実ペレットの燃料組織変化挙動を調べるため、光学顕微鏡による組織観察、X線マイクロアナライザ(SXMA)による元素分析を実施した。また、信号ケーブル、計測器については、X線マイクロアナライザによる中心温度測定用熱電対素線の元素分析及び、イオンマイクロアナライザ(IMA)による中性子検出器の質量分析を行なった。本報告書はADS金相セルにおいて実施した上記試験結果について記述したものである。

2. 試験用集合体及び燃料要素の構造

2.1 試料部集合体の構造

試料部集合体は、Ⅱ型燃料要素(34本)及び模擬燃料要素(3本)の計37本を収納したもので、ハンドリングヘッド、内側六角管、外側六角管、ノズル、オリフィス等から構成される。試料部集合体の構造図をFig.1に示す。

燃料要素と模擬燃料要素37本は内側六角管内に収納され、炉心燃料集合体と同様にフック型ノックバーと組棒により構成される支持格子により要素束をノズルに固定している。内側六角管は外側六角管に収納され共に上部に設けられるハンドリングヘッドで78mmφである。このうちADS金相セルにおいて照射後試験を実施したピンは、中心温度測定用燃料要素2本、計測線なし燃料要素1本、中性子検出器模擬燃料要素2本の5本である。

2.2 燃料要素の構造

試験に供した燃料ピンの構造図をFig.2, Fig.3及びFig.4に示す。中心温度測定用燃料要素は燃料中心温度温度計を燃料ペレット内に装荷し、燃料中心温度をオンラインで測定するものである。燃料中心温度計の測温体は熱電対(W-Re)で、測温部は軸方向炉心中心位置に挿入されており、そのため中空ペレットが装填されている(Fig.2)。計測線なし燃料要素は上記のリファレンスとしての「もんじゅ」仕様燃料ピンである(Fig.3)。さらに中性子検出器模擬燃料要素は、小型核分裂電離箱型中性子検出器を軸方向炉心中心に位置させ、オンラインで中性子束の測定を行なうものである(Fig.4)。中性子検出器外径は燃料要素と同じく6.5mmφであり、外観は他の燃料要素と変わりなくワイヤラッピングされている。試験用燃料ピンの主要な仕様をTable 1に示す。また、Table 2に燃料ペレットの製造時検査結果を示す。

3. 照射履歴

計測線付C型特殊燃料集合体PFI010(INTA-1)の照射試験はFig.5に示す「常陽」MK-II炉内装荷位置5F2において100MW(8)から100MW(12^{'''})サイクルの間実施された。集合体平均燃焼度は約32,400MWd/tであり、集合体平均線出力は約290w/cm(BOC)である。本集合体は照射試験終了後、炉内貯蔵ラック「R-16」で1日間冷却保管された後、S61年12月15日にキャスクにてFMFに搬入された。本集合体の照射条件をTable 3に示す。

金相試験に供した燃料ピンは、PinNo.I1104(A513)、PinNo.I1102(A518)、PinNo.I1616(A525)、PinNo.IN3(A506)及びPinNo.IN4(A521)の計5本であり、これらの燃料ピンの集合体内位置をFig.6に示す。また、金相試験に供したPinNo.I1104、I1102、I1616の中性子束、被覆管温度、燃焼度及び線出力の軸方向分布をそれぞれFig.7からFig.15に示す。これらの値は「SATURN-C」コード、「MAGI」コードによる出力結果⁽¹⁾である。

4. 供試体及び試験方法

4.1 供試体

ADS金相セルでは、「もんじゅ」仕様燃料（燃料密度85%TD）の中実ペレット及び中実ペレットの組織変化を調べるため、中心温度測定用燃料要素であるPinNo. I1104(A513)とPinNo. I1102(A518)及び、そのリファレンスとしての無計装燃料要素であるPinNo. I1616(A525)の計3本のピンより、それぞれ軸方向炉心中心部から各々1ケの金相試料を採取した。さらに計測系については、オンラインで中性子束の測定が行なわれてきた中性子検出器模擬燃料要素であるPinNo. IN3(A506)とPinNo. IN4(A521)の2ケの中性子検出器につき、試料を採取した。

4.2 光学顕微鏡による観察

研磨終了後における組織観察は、ユニオン光学社製、低倍率光学顕微鏡（ROM）を用いて12.5倍のAs-Polished状態のマクロ観察を行なった。その後高倍率光学顕微鏡（FAROM）による65倍全体コンポーズ写真撮影、130倍直径方向スリットコンポーズ写真撮影、さらに520倍半径方向スリットコンポーズ写真撮影をAs-Polished及びEtched状態において行なった。

4.3 画像解析

65倍コンポーズ写真からタブレットディジタイザを用いて、組織変化領域径とペレット面積を測定した。測定項目は以下の通りである。

- (1) 中心空孔，柱状晶，FPガスバブル，等軸晶領域径
- (2) ペレット外径，被覆管内径，外径
- (3) ペレット面積，クラック面積

なお、燃料-被覆管ギャップ幅は周方向8ケ所の520倍光顕写真からノギスを用いて測定した。

4.4 X線マイクロアナライザ（SXMA）による元素分析

遮蔽型X線マイクロアナライザ（仏，CAMECA社，CAMEBAX-R型）を用いて元素分析を実施した。測定内容は、①ペレット内U，Puの径方向濃度分布測定，②Xe，I，Csの径方向分布，③中心温度測定用熱電対素線の組成分析，面分析である。分析条件は下記の通りである。

- ・加速電圧 : 25 kV
- ・ビーム電流 : 100 nA (Xe, I分析時 1 μ A)
- ・ビーム径 : 1 μ m ϕ 以下 (Xe, I分析時 50 μ m ϕ)

- カウンター : ガスフロー比例計数管
- 分光結晶 : LiF, PET

4.5 イオンマイクロアナライザ（IMA）による質量分析

遮蔽型イオンマイクロアナライザ（HITACHI IMA-2RI型）を用いて、中性子検出器内の²³⁵Uの減少量から、中性子照射量を求めるもので、IMAによる測定技術の開発を兼ねて測定を実施した。測定条件を下記に示す。

条 件	測定内容	中性子検出器 深さ方向の測定
使用ガス		O ²
一次イオン加速電圧		15 kV
一次イオンスポット径		600 μmφ
二次イオン加速電圧		3 kV
質量測定範囲		1~300
カソード電極		SUS
深さ方向測定回数		10回

5. 試 験 結 果

5.1 光学顕微鏡による燃料組織観察結果

金相試験を実施したピンは、中空ペレットが装填された中心温度測定用燃料要素の I1104ピンと I1102ピンおよび、リファレンスとしての無計装燃料要素の I1616ピンである。これらのピンから採取した金相試料の軸方向位置とそれらのマクロ写真をそれぞれ Photo. O-1 から Photo. O-3 に示す。

(1) I1104(A513)ピンの金相観察結果

本燃料ピンのピーク線出力は約 314 W/cm であり、ピーク燃焼度は約 $36,630 \text{ MWd/t}$ である。I1104ピンは中心温度測定用燃料要素で、軸方向中心部近傍から熱電対を含む金相試料の Etched 状態における光顕写真を Photo. O-4 と Photo. O-5 に示す。

Photo. O-4 から燃料、シース管、絶縁材、熱電対素線の間では反応は全く生じていない。燃料組織変化はペレット中央部から、中空部、FPガスバブル領域、等軸晶領域、不変領域が観察される。中空径は製造時の中空外径 1.93 mm から 2.089 mm に増加しているが、これはポアの中心部への移動によるものと考えられ、その周りにはガスバブルが析出している。また、中空内熱電対の偏りに対応して、FPガスバブル領域、等軸晶領域が偏心していることが分かる。これは熱電対の影響により径方向燃料温度が変化していることが原因と考えられる。燃料-被覆管ギャップ幅は製造時の $77.5 \mu\text{m}$ (半径値) から $20 \mu\text{m}$ にまで減少している。なお、FCCIによる被覆管の肉厚減少は認められない。

(2) I1102(A518)ピンの金相観察結果

本燃料ピンのピーク線出力は約 313 W/cm であり、ピーク燃焼度は約 $36,520 \text{ MWd/t}$ である。I1102ピンは上述 I1104ピン同様に中心温度測定用ピンである。軸方向中心部から採取した金相試料の As-Polished 及び Etched 状態の光顕写真を Photo. O-6 から Photo. O-10 に示す。また同ピンに装荷されていた熱電対縦断面試料の Etched 状態の光顕写真を Photo. O-11 に示す。

燃料組織はペレット中央部から、中心空孔(中空領域含む)、柱状晶領域、等軸晶領域、不変領域に区分される。中心空孔径は製造時の中空外径値 1.93 mm から 2.14 mm に増加している。これに対応して、その周りに柱状晶が認められるが、その領域は後で述べる中実ペレットに比べて大きい。各試料の組織変化領域径をまとめた結果を Table 4 に示す。線出力が低い中空ペレットで柱状晶領域径が大きい理由については、中空ペレットの焼きしまりによりギャップ熱伝達率の低下による燃料中心温度の上昇が考えられる。中実ペレットでは出力上昇後中心温度が高いため、クラック・リロケーションによるギャップ熱伝達率の改善と組織変化・中心空孔の形成による温度低下寄与が支配的であるため、徐々に中心温度は低下していくことになる。しかし、中空ペレットのリロケーションは中空のためクラックも少なく、且つ中心方向への移動も考えられることから、中実ペレットに比べ寄与は小さいと推測される。燃料組織は、等軸晶(柱状晶)と不変領域が形成され、焼きしまりが支配的であることからギャップ熱伝達率の低下により中心温度が徐々に上昇することになる。そのことが柱状晶領域径が大きい理由であると考えられる。また、照射条件がほぼ同様で中空ペレットを装填している I1104ピン

の組織変化はI1102ピンと違いがある。Fig. 16に両ピンの試料採取位置における熱電対の位置関係を示す。I1104ピンの試料は熱電対を完全に含んだ位置(Photo. O-4)であるが、I1102ピンは熱電対の最下端部を試料としているため、熱電対を含まない中空ペレットのみの組織変化である。組織変化からI1104ピンはI1102ピンに比べ中心温度は低下していたことが推測され、熱電対の存在により燃料温度の変化が著しいことが考えられる。(別途解析を実施する予定である)。燃料-被覆管ギャップは製造時の $88\mu\text{m}$ (半径値)から $33\mu\text{m}$ まで減少している。なお、FCCIによる被覆管の肉厚減少は認められない。

Photo. O-11に軸方向中心部に位置する熱電対下端(測温部)の縦断面試料のEtched状態の写真を示す。熱電対はシース管(50%Mo-50%Re)、絶縁材(BeO)及び素線(W-5%Re, W-26%Re)で構成されているが、写真からはシース管、絶縁材、素線1本(どちらかは不明)が観察することができる。シース管の結晶粒は粗大化しており、その粒塊内には小さなポアが多数存在している。

(3) I1616(A525)ピンの金相観察結果

本燃料ピンのピーク線出力は約 $312\text{W}/\text{cm}$ であり、ピーク燃焼度は約 $36,813\text{MWd}/\text{t}$ である。I1616ピンは上述I1104, I1102ピンのリファレンスとしての無計装ピンであり、炉心燃料は全て中実ペレットが装填された「もんじゅ」仕様燃料ピンである。軸方向中心部より採取した金相試料のAs-Polished及びEtched状態の顕微鏡写真をPhoto. O-12からPhoto. O-15に示す。

燃料組織はペレット中心部から、中心空孔、柱状晶領域、等軸晶領域、不変領域の4層に区分される。柱状晶領域の結晶粒はI1102ピンのそれと比較して、よく発達している。さらに、等軸晶領域から不変領域にかけて製造時の大きなボイドが多数観察される。また、燃料-被覆管ギャップ幅は製造時の $77\mu\text{m}$ (半径値)から $20\mu\text{m}$ にまで減少している。なお、FCCIによる被覆管の肉厚減少は認められない。

5.2 SXMAによる元素分析

(1) 燃料内Xe, I, Csの放出挙動

I1102(A518)ピンの中空ペレット及びI1616(A525)ピンの中実ペレットのXe, I, Csの径方向分布を調べるためSXMAによる分析を行なった。ペレット中心部から外周部にかけて径方向に8点測定した結果をFig. 7に示す。Xe, I, Csのペレット径方向分布は類似しており、組織変化しているペレット中央部で放出している。なお、金相断面位置でのXeとCsの放出率の計算結果をTable 5に示す。Cs放出率はXe放出率に比べ低いことが分かる。これはペレット中央部からギャップ部に向かって移動したCsが低温部のペレット外周部周辺で燃料と反応することにより、蓄積したためと考えられる。Fig. 18に金相断面についてのCsのマクロ的な分布を強度別にカラー表示したマッピング結果を示す。このCs分布は

径方向分布と良く一致していることが分かる。また、熱電対を装填した中空ペレットの方が中実ペレットよりもXe, Csの放出率が高く、中空ペレットの燃料温度が高かったことを示しており、そのことは組織変化領域径からも推測することができる。

(2) 燃料内径方向のPu再分布

I1102ピンとI1616ピンについて、径方向18～23点につき各々の位置でU, Puの特性X線強度を計数し、ZAF補正を施すことにより径方向のU, Pu濃度分布を求めた。測定結果をFig.19に示す。また、Puについて実施したマッピング結果をFig.18に示す。中空ペレットのPu濃度は中心空孔付近で製造時の29.55wt%から34.23wt%にまで急激に増加しているのに対し、中実ペレットのPu濃度は中心空孔端で製造時の29.93wt%から31.31wt%に増加している程度である。中心空孔端のPu濃度の増加は、中心空孔発生メカニズムと関係があり、中心空孔はボイドが蒸発-凝縮により中心部にスweepした結果形成されたものであり、同時にその過程で、Puが中心空孔端に濃縮したものと考えられる。よって中空ペレットでのPu濃度の急激な増加は、組織変化で柱状晶領域が中実ペレットのそれより外側から開始していることを考え合せると、熱電対を装填した中空ペレットは照射中に温度が上昇していたことが考えられる。

(3) 熱電対素線の組成変化

I1104ピンの中心温度測定用熱電対素線の組成を調べるため、SXMAによる分析を行った。Photo.O-5に示す光顕写真においては、燃料、シース管、絶縁材、素線の間では反応は全く生じていない。Photo.X-1に照射後の熱電対素線の面分析結果を示す。W-26Re合金は2相状態になっていることが分かる。W-26Re合金において、照射前のW濃度は74.61wt%であり、これが照射によりW濃度が54.5wt%と77.6wt%の2相共存になった理由はFig.20に示すW-Re状態図において、 σ 相とW-richな固溶体に相分離した可能性がある。一方、W-5Re合金の組成は均一であるが、表面は不均一に侵食されている。Table6に熱電対素線の組成分析結果を、Table7に素線の組成変化についてSXMAの分析値と「FPGS-3.5」コードにより求めた計算値⁽²⁾の比較した結果を示す。照射によりW-Reの核変換によるOsの生成量は、W-5Re:Os0.43wt%、W-26Re:Os1.21wt%となり、分析値と計算値の一致は良い。また、Reについても、W-5Reでは照射により増加し、W-26Reでは減少する傾向は分析値と計算値で一致している。しかし、W-5Reにおいて、Reの増加量は計算値に比べ分析値は大きくなっている。

5.3 IMAによる中性子検出器の中性子照射量の測定

INTA-1において、核分裂電離箱型中性子検出器により、オンラインで中性子束の測定が行なわれてきた。本試験は、IMAを用いて照射後における中性子検出器内の²³⁵U減少量から、中性子照射量を求めるもので、IMAによる測定技術の開発を兼ねて、オンライン中性子検出器測

定結果の検証を行なうためのデータを提供することである。

(1) 測定試料

INTA-1において、照射中の中性子束をオンライン計測していた2ケの中性子検出器につき、濃縮ウラン(89.89%)がコーティングされている炉心軸方向中心部から以下に示す2ケの試料を採取した。

Pin No. IN3 (A50623) : 炉心中心部 (D.F.P.B. 439~452 mm)

Pin No. IN4 (A52123) : 炉心中心部 (D.F.P.B. 439~452 mm)

(2) 中性子照射量の測定方法

未照射中性子検出器とINTA-1中性子検出器につき、濃縮ウランがコーティングされている表面をIMAにより測定し、以下の方法に従って中性子照射量を求めた。

① 単位体積当りの²³⁵Uの核分裂割合 (Bu; at%)

照射前に単位体積当り存在している²³⁵Uのうち、核分裂した割合 (Bu; at%) は(1)式で表わされる。

$$Bu (at\%) = \left(1 - \frac{\text{照射後の単位体積当りの}^{235}\text{U原子数}}{\text{照射前の単位体積当りの}^{235}\text{U原子数}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

IMAで測定される核種*i*の単位体積当りの原子数*N_i*はその二次イオン強度*I_i*と(2)式の関係にある。

$$N_i = \frac{I_i}{I_p \cdot \eta \cdot S_i \cdot K_i} \dots\dots\dots (2)$$

I_p : 一次イオン強度

η : 一次イオン利用効率

S_i, K_i : 核種*i*のスパッタリング収率とイオン化効率

未照射試料と照射試料では、その測定条件は同一でないため、それぞれを*c, h*で区別して(2)式を(1)式に代入すると(*S_i, K_i*は消去される)。

$$Bu (at\%) = \left(1 - \frac{I_{235}^h}{I_{235}^c} \cdot \frac{I_p^c \cdot \eta^c}{I_p^h \cdot \eta^h} \right) \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

測定中における $I_p^c \cdot \eta^c / I_p^h \cdot \eta^h$ をモニターする方法として、原子数の変化が無視できる²³⁸Uに着目し、未照射試料と照射試料のそれぞれの強度を、*I₂₃₈^c, I₂₃₈^h*とすると

$$\frac{I_p^c \cdot \eta^c}{I_p^h \cdot \eta^h} = \frac{I_{238}^c}{I_{238}^h} \left\{ \frac{1 + I_{235}^c / I_{238}^c}{1 + I_{235}^c / I_{238}^c (1 - Bu / 100)} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

となる。(4)式を(3)式に代入すると

$$\frac{B u}{100} = 1 - \frac{I_{235}^h / I_{238}^h}{I_{235}^c / I_{238}^c} \left\{ \frac{1 + I_{235}^c / I_{238}^c}{1 + I_{235}^c / I_{238}^c (1 - B u / 100)} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

となり、B u は(6)式で求まることになる。

$$B u (a t \%) = \left\{ \frac{(c + 2c^2) - \sqrt{4hc^3 + c^2 + 4hc^2}}{2c^2} \right\} \times 100 \dots\dots\dots (6)$$

ここで $c = I_{235}^c / I_{238}^c$

$h = I_{235}^h / I_{238}^h$

従って、未照射試料と照射試料につき、²³⁵U と ²³⁸U の強度比を測定することにより、INTA-1 中性子検出器における ²³⁵U の核分裂割合を求めることができる。

② 中性子照射量

中性子エネルギーを7群にわけた時の中性子束を ϕ_i 、²³⁵U の核分裂断面積を σ_i^f とすると、²³⁵U の核分裂による原子数の減少は(7)式の微分方程式で表わされる。

$$\frac{dN_{235}}{dt} = -N_{235} \sum_{i=1}^7 \sigma_i^f \cdot \phi_i \dots\dots\dots (7)$$

ここで N_{235} は ²³⁵U の原子数である。

照射前の ²³⁵U 原子数を $N_{235(0)}$ として、これを解くと、

$$\frac{N_{235}}{N_{235(0)}} = \exp \left(-t \sum_{i=1}^7 \sigma_i^f \cdot \phi_i \right) \dots\dots\dots (8)$$

となる。 N_{235} は照射後に存在している ²³⁵U の原子数であるから、(6)式で求まる B u とは(9)式の関係にある。

$$\frac{N_{235}}{N_{235(0)}} = \frac{100 - B u}{100} \dots\dots\dots (9)$$

これを(8)式に代入すると

$$t \sum_{i=1}^7 \sigma_i \cdot \phi_i^f = \ell_n \frac{100}{100 - B u} \dots\dots\dots (10)$$

となり、これを用いて中性子照射量を求めることができる。

(3) 測定結果

① 単位体積当りの ^{235}U の核分裂割合の算出

^{235}U , ^{238}U は単体よりも一酸化物の強度が高く, 安定しているため, それらの強度(^{251}UO , ^{254}UO)を用いた。表面から10回の深さ方向測定結果をFig. 21に示す。これから求めた10回の平均値とその標準偏差 σ は下表の通りである。

試料No.	二次イオン強度比 (I_{251}/I_{254}) $\pm \sigma$
未照射試料	1 0.0 4 \pm 0.2 8
A 5 0 6 2 3	8.5 8 \pm 0.2 5
A 5 2 1 2 3	8.5 7 \pm 0.1 9

これらの値を用いて(6)式に従い ^{235}U の核分裂割合 (Bu; at%) を求めると次のようになる。

試料No.	^{235}U の核分裂割合 (at%) $\pm \sigma$
A 5 0 6 2 3	7.9 1 \pm 1.9 5
A 5 2 1 2 3	7.9 7 \pm 1.7 2

② 中性子照射量の算出

「常陽」8サイクルから12サイクルの軸方向炉心中心における中性子エネルギーを7群に分割した場合, 1群の中性子密度を1.0とした時の各群の中性子束密度と ^{235}U の核分裂断面積をそれぞれTable 8に示す。

Table 8の値を(10)式に代入すると

$$\begin{aligned}
 & 1.2598 \times 10^{-24} \phi \cdot t + (1.753 \times 10^{-24}) \cdot 1.99 \phi \cdot t \\
 & + (1.3856 \times 10^{-24}) \cdot 2.82 \phi \cdot t + (2.0526 \times 10^{-24}) \cdot 2.94 \phi \cdot t \\
 & + (2.0526 \times 10^{-24}) \cdot 2.94 \phi \cdot t + (4.5468 \times 10^{-24}) \cdot 0.58 \phi \cdot t \\
 & + (11.4145 \times 10^{-24}) \cdot 0.17 \phi \cdot t + (28.8244 \times 10^{-24}) \cdot 0.023 \phi \cdot t \\
 & = \ell_n \frac{100}{100 - \text{Bu}}
 \end{aligned}$$

従って

$$\phi \cdot t = \frac{1}{1.8781 \times 10^{-23}} \ell_n \left(\frac{100}{100 - \text{Bu}} \right)$$

となる。

Pin No. IN3 (A50623) の場合

Bu=7.91 を代入すると、 $\phi \cdot t = 4.388 \times 10^{21}$ となる。

従って

$$\begin{aligned} E > 0.1 \text{ MeV の中性子照射量} &= (1 + 1.99 + 2.82) \cdot \phi \cdot t \\ &= 2.55 \pm 0.66 \times 10^{22} / \text{cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E \text{ Total の中性子照射量} &= (1 + 1.99 + 2.82 + 2.94 + 0.58 \\ &\quad + 0.17 + 0.023) \cdot \phi \cdot t \\ &= 4.18 \pm 1.08 \times 10^{22} / \text{cm}^2 \end{aligned}$$

Pin No. IN4 (A52123) の場合

Bu=7.97 を代入すると、 $\phi \cdot t = 4.42 \times 10^{21}$ となる。

従って

$$E > 0.1 \text{ MeV の中性子照射量} = 2.57 \pm 0.58 \times 10^{22} / \text{cm}^2$$

$$E \text{ Total の中性子照射量} = 4.21 \pm 0.95 \times 10^{22} / \text{cm}^2$$

MAGI コードによる照射情報の結果は

$$E > 0.1 \text{ MeV の中性子照射量} = 2.45 \times 10^{22} / \text{cm}^2$$

$$E \text{ Total の中性子照射量} = 3.99 \times 10^{22} / \text{cm}^2$$

であり、両者はよく一致した結果となった。

一方、炉内照射中に中性子検出器によりオンライン測定された flux を積算することにより求めた中性子照射量は 2.57×10^{22} ($E > 0.1 \text{ MeV}$) である。中性子検出器によるオンライン測定値は表面にコーティングされている ^{235}U の原子数が照射に伴ない減少するため、その信号値がみかけ上低下する欠点がある。しかし、今回 IMA により求めた ^{235}U の減少量からその低下割合を評価することが可能であることがわかった。

6. ま と め

「もんじゅ」仕様燃料の計測照射下における、中空ペレットと中実ペレットの組織変化挙動及び信号ケーブル、計測器などの計測系の組成変化を調べるため、光学顕微鏡観察、元素分析並びに質量分析を行なった。本試験により得られた結果は以下の通りである。

- (1) 燃料の組織変化は顕著に生じており、中心空孔の生成、柱状晶の発達が認められた。中空ペレットの内径も増加した。
- (2) SXMAによるXe, I, Csのペレット径方向濃度分布測定の結果、それらの径方向分布は類似しており、組織変化しているペレット中央部で減少していた。
- (3) SXMAによるU, Puの径方向分布測定により、Puの再分布が確認された。また、ボイドが蒸発-凝縮により中心部に移動集積の結果としての中心空孔径増大に伴ない、中心空孔端でPuが徐々に濃縮しており、中空ペレットでは中心空孔端で製造時のPu濃度29.55wt%から34.23wt%にまで増加していた。
- (4) SXMAによる照射後の中心温度測定用熱電対素線の組成は、W-26Re合金において照射前のW濃度は74.6wt%であった。これが照射によりW濃度が54.5wt%と77.6wt%の2相共存となり、 σ 相とW-richな固溶体に相分離した可能性がある。また、W-5Re合金の組成は均一であるが、表面は不均一に侵食されている。なお、照射によりW-Reの核変換によるOsの生成量は、W-5Re:Os0.43wt%、W-26Re:Os1.21wt%となり、分析値と計算値の結果は良い一致を示していた。
- (6) IMAによる中性子検出器の中性子照射量の測定により、測定値は計算値とよく一致した結果となり、本手法を用いて評価可能であることがわかった。

7. 謝 辞

燃料集合体からの試料の採取などの準備作業にあたり、照射燃料集合体試験室（FMF）の松島室長をはじめとする関係室員に、また放射線管理に当っては安全管理部放射線管理課大内課長をはじめとする係員に御支援いただいた。また試験遂行に際しては、原子力技術㈱の大里行弘氏に御支援いただきましたことを付記し、これらの方々に感謝の意を表します。

8. 参 考 文 献

- (1) INTA-1 照射データ提供依頼に対する回答 照-(62)-234
- (2) INTA-1 熱電対組成変化の計算 枝-(62)-394

Table 1 試験用燃料ピンの仕様

(入口温度測定用燃料要素, 冷却材温度測定用燃料要素, 出口温度測定用燃料要素計測線なし燃料要素, 中心及び冷却材温度測定用燃料要素)

型 式	ワイヤラッピング型密封式
全 長	1,555 mm
被覆管外径	6.5 mm
被覆管内径	5.56 mm
被覆管肉厚	0.47 mm
被覆管-ペレット間隔	0.08 mm
燃料部長さ	550 mm
インシュレータペレット(上・下)	8 mm
要素反射体全長(上)	52 mm
(下)	112 mm
ガスペナム容積	15.7 cc
ラッピングワイヤ径	1.32 mm
ラッピングピッチ	302 mm
(i) 燃料ペレット材料	
種 類	ウラン・プルトニウム混合酸化物ペレット
ペレット直径	5.4 mm
ペレット内径(熱電対挿入部)	1.9 mm
ペレット長	8 mm
ペレット密度	85% TD
(ii) インシュレータペレット材料	
種 類	劣化ウラン酸化物ペレット
ペレット直径	5.4 mm
ペレット長	8 mm
ペレット密度	94% TD
個 数	上下各1個

Table 2 燃料ペレットの製造時検査結果

	規 格	Pin No.		
		I 1 1 0 2	I 1 1 0 4	I 1 6 1 6
		TIM-001	TIM-003	TIM-007
不 純 物 元 素	(ppm)			
Al	≤ 2000	650	1400	150
B	≤ 20	< 5	< 5	< 5
C	≤ 300	30	< 30	40
Ca	≤ 120	< 30	< 30	45
Cd	≤ 20	< 5	< 5	< 5
Cℓ	≤ 25	< 10	< 10	< 10
Cr	≤ 500	140	160	85
F	≤ 40	< 10	< 10	< 10
Mg	≤ 150	< 15	< 15	15
N	≤ 200	70	< 50	250
Fe	≤ 1600	800	750	380
Ni	≤ 500	100	210	170
V	≤ 500	50	< 100	< 50
Cu } Zn } Si }	≤ 1400	< 210	< 240	1000
Ag } Mn } Mo } Pd } Sn }	≤ 400	< 135	< 135	< 135
Total	< 4000 ppm	2260	3150	2350
プルトニウム富化度 PuO ₂ /PuO ₂ +UO ₂	30 ± 1 wt%	29.60	29.55	29.93
U-235濃縮度	約 35 wt%	33.2	33.2	33.5
蒸発性不純物	150 μℓ/g Mo 以下	< 30	< 30	< 30
水分	30 ppm以下	14	< 10	< 10
O/M比	1.97 ± 0.02 0.03	1.94	1.96	1.97
核分裂性物質含有率	46 ± 1 wt%	45.8	45.8	47.0

Table 3 燃料集合体 (PFI010) の照射条件

計測線付燃料集合体			計画番号 INTA-1			集合体番号 PFI010					
サ イ ク ル			8	9	10	11	12	12'	12''	12'''	
装 荷 位 置			5F2							5F2	
燃 焼 度	ポイント最大		NWD/T	7600	14900	22300	29600	36500	36600	36700	36800
	集合体平均		NWD/T	6700	13100	19600	26100	32200	32300	32400	32400
中 性 子 照 射 量	En≥0.1Mev.	ポイント最大	$\times 10^{20}n/cm^2$	50.4	98.8	149	198	245	246	246	247
		集合体平均	$\times 10^{20}n/cm^2$	42.3	82.9	125	166	206	206	206	207
	Total	ポイント最大	$\times 10^{20}n/cm^2$	81.6	160	242	322	399	400	401	402
		集合体平均	$\times 10^{20}n/cm^2$	70.1	138	208	277	342	343	344	345
線 出 力	BOC	ポイント最大	W/cm	-	-	-	-	-	-	-	-
		集合体平均	W/cm	290	286	281	279	268	272	80.5	53.7
	EOC	ポイント最大	W/cm	-	-	-	-	-	-	-	-
		集合体平均	W/cm	290	287	282	279	268	272	80.5	53.7
被覆管最高温度	BOC		℃	-	-	-	-	-	-	-	-
	EOC		℃	-	-	-	-	-	-	-	-
燃料最高温度	BOC		℃	-	-	-	-	-	-	-	-
	EOC		℃	-	-	-	-	-	-	-	-
集合体出口温度	BOC		℃	456	454	453	453	451	452	395	387
	EOC		℃	456	454	453	453	452	452	395	387
ピーキング係数	BOC	径 方 向	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		軸 方 向	-	1.138	1.136	1.135	1.131	1.132	1.117	1.124	1.124
	EOC	径 方 向	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		軸 方 向	-	1.129	1.128	1.127	1.122	1.123	1.117	1.124	1.123
冷却材流量	BOC		kg/sec	5.0	5.1	5.1	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	EOC		kg/sec	5.0	5.1	5.1	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

Table 4 燃料組織変化領域径測定結果

Pin No.	Specimen No.	Distance from Core Bottom (mm)	Burn up (MWD/T)	Linear Heat Rate (W/cm)	Clad Dia. (mm)		Fuel Outer Dia. (mm)	Restructured Region Dia. (mm)				Residual Radial Gap Size (μm)
					Outer	Inner		Central Void	Columnar Region	Gas Bubble Region	Equiaxed Region	
I1104	A51331	287.0	32,337	274	6.503	5.579	5.543	2.089	—	2.674	4.172	20
I1102	A51822	275.2	32,441	275	6.511	5.597	5.507	2.141	3.513	—	4.846	33
I1616	A52522	275.0	36,813	313	6.507	5.592	5.534	1.052	3.028	—	4.953	20

Table 5 金相断面位置でのXe, Cs放出率計算結果

		A51822(中空ペレット)	A52522(中実ペレット)
Xe 生成量	(1) 生成量(Mol/cm ³)	7.05×10 ⁻⁵	7.704×10 ⁻⁵
	(2) 保持量(Mol/cm ³)	1.404×10 ⁻⁵	2.902×10 ⁻⁵
	(3) Xe放出率(%)	80.1	62.3
Cs 生成量	(1) 生成量(Mol/cm ³)	5.553×10 ⁻⁵	6.417×10 ⁻⁵
	(2) 保持量(Mol/cm ³)	1.6881×10 ⁻⁵	3.1837×10 ⁻⁵
	(3) Cs放出率(%)	69.6	50.39
ピンパンクチャー試験によるFPガス放出率(%)		—	41.18(ピン平均)

- (*1)
- 1) 生成量 $\frac{\text{ペレット密度}}{270} \times \frac{\text{燃焼度(at.\%)}}{100} \times (\text{Xe収率 or Cs収率}) \times \left(\frac{\text{ペレット平均直径}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot (1\text{cm})$
- 2) 保持量 SXMA分析結果より求めた値(プログラム Total Σ)
- 3) 放出率 $\frac{\text{生成量} - \text{保持量}}{\text{生成量}} \times 100$

(*1) 中空ペレットは中空部の体積を引いた値を使用した。

Table 6 熱電対素線の組成分析結果

	A51331			コールド試料		
	W26Re素線			W5Re素線	W26Re素線	W5Re素線
	*1	*2	平均*3			
Re	40.40 ^{wt%}	21.73	24.03	8.80	25.39	4.89
W	54.48	77.61	74.76	90.77	74.61	95.11
Os	5.12	0.66	1.21	0.43	-	-

*3 画像解析(MPAS)により
 求めた面積割合を用いて重
 みつき平均した値

(*1 Re多い部位……面積率 12.34%)
 (*2 Re少ない部位…面積率 87.66%)

画像解析の値

Table 7 熱電対素線のSXMA分析値と「FPGS-3・5」
 コードにより求めた計算値の比較結果

			W(wt.%)	Re(wt.%)	Os(wt.%)
W-5Re	分析値	照射前	95.11	4.89	0
		照射後	90.77	8.80	0.43
	計* 算値	照射前	94.48	5.52	0
		照射後	93.72	5.91	0.37
W-26Re	分析値	照射前	74.61	25.39	0
		照射後	74.76	24.03	1.21
	計* 算値	照射前	71.95	28.05	0
		照射後	71.37	26.84	1.79

* FPGS-3・5コード

Table 8 中性子束密度と ^{235}U の核分裂断面積

Item	1 G	2 G	3 G	4 G	5 G	6 G	7 G
中性子エネルギー (eV)	10.5M~1.4M	1.4M~400K	400K~100K	100K~10K	10K~1K	1K~100	100以下
中性子束密度比	1	1.99	2.82	2.94	0.58	0.17	0.023
^{235}U 核分裂断面積 (バーン)	1.2598	1.1753	1.3856	2.0526	4.5468	11.4145	28.8244

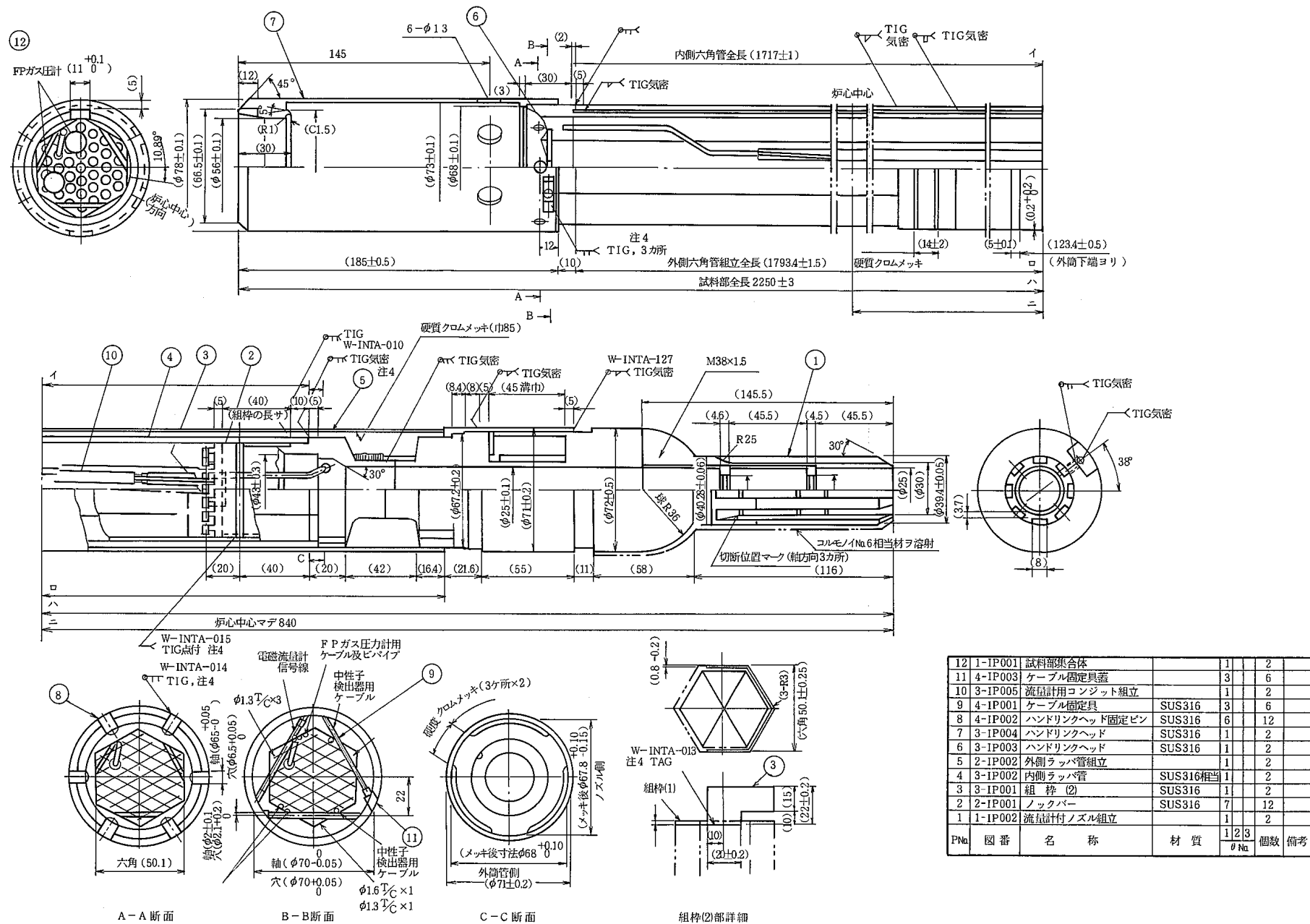


Fig. 1 試料部集合体の構造図

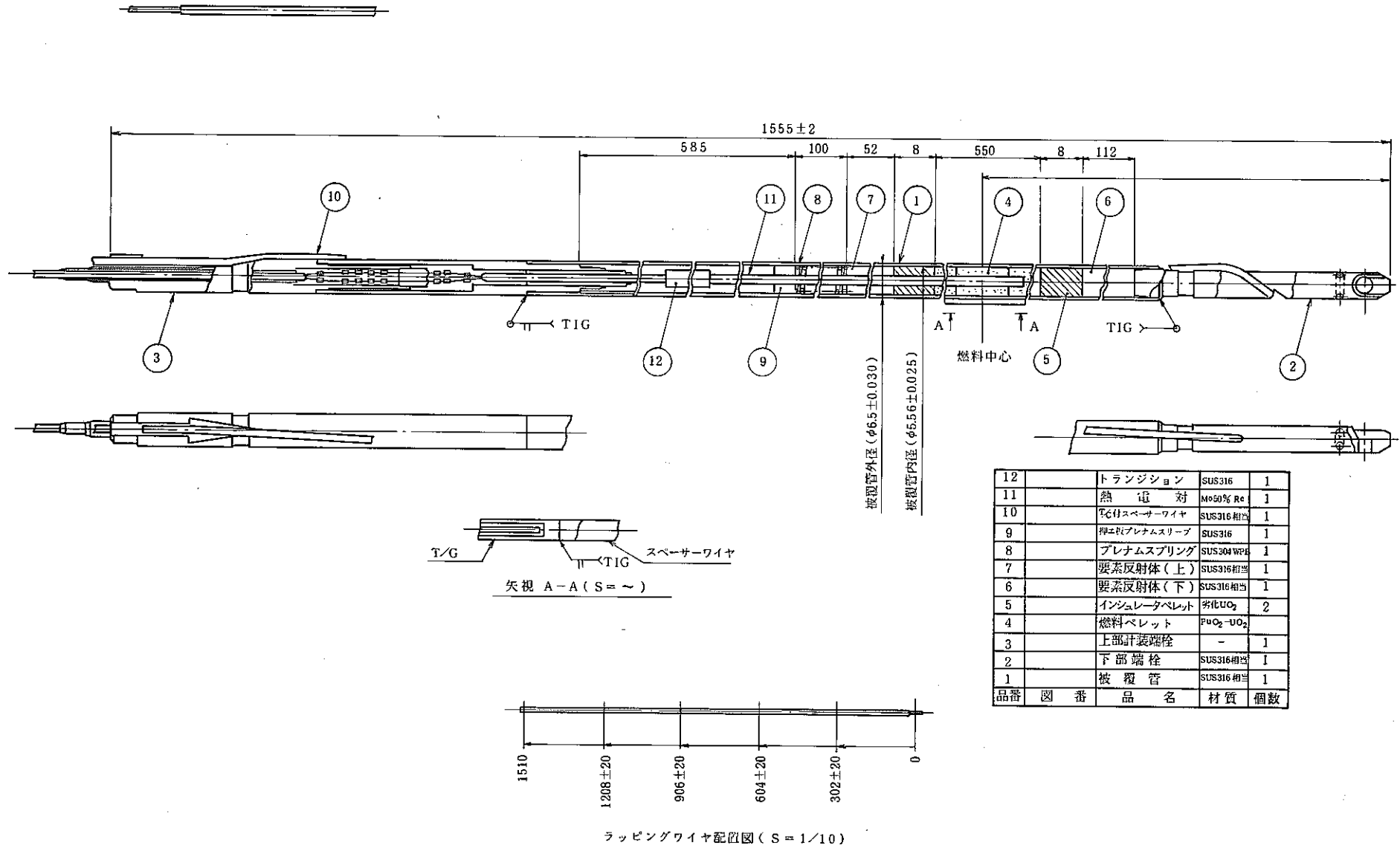
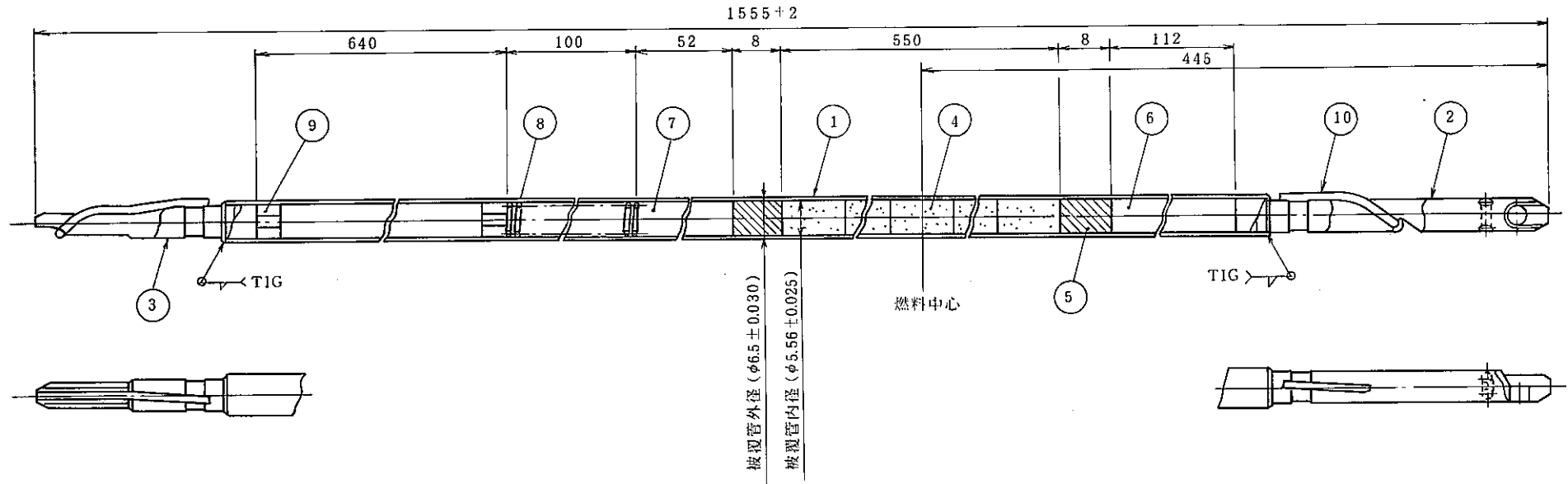


Fig. 2 燃料中心温度測定用燃料ピンの構造図



品番	図番	品名	材質	個数
10		スペーサーワイヤ	SUS316相当	1
9		抑圧板プラナムスリーブ	SUS316	1
8		プラナムスプリング	SUS304WFE	1
7		要素反射体(上)	SUS316相当	1
6		要素反射体(下)	SUS316相当	1
5		インシュレータペレット	劣化UO ₂	2
4		燃料ペレット	PuO ₂ -UO ₂	
3		上部端栓	SUS316相当	1
2		下部端栓	*	1
1		被覆管	SUS316相当	1

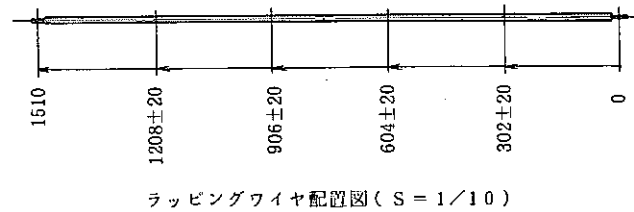
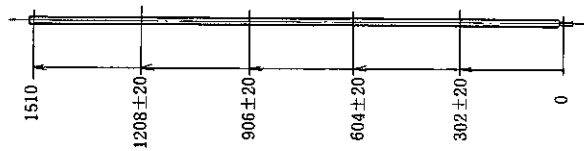
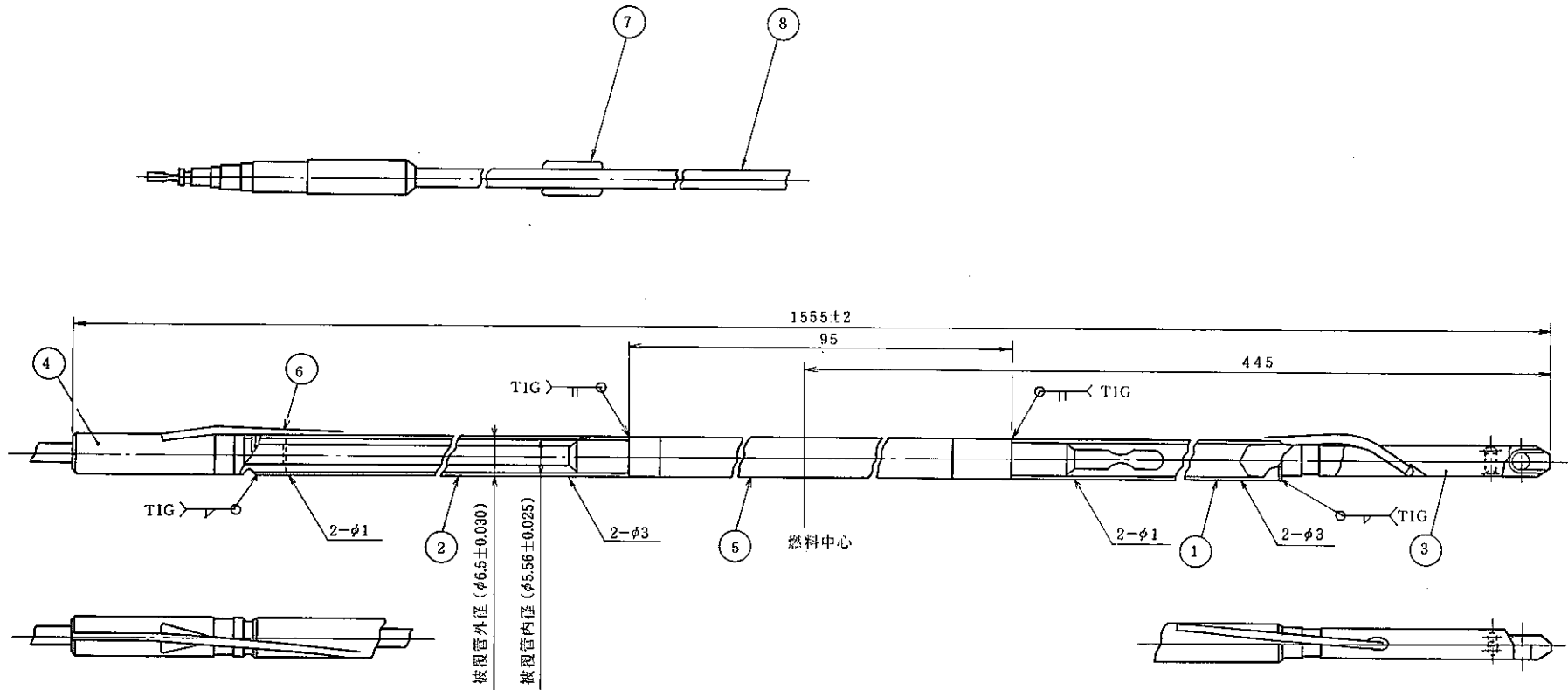


Fig. 3 「もんじゅ」仕様燃料ピンの構造図



ラッピングワイヤ配置図 (S = 1/10)

品番	図番	品名	材質	個数	備考
8		ケーブル	ステン SUS316	1	二重同軸ケーブル
7		スリーブ	SUS304	1	
6		スペーサワイヤ	SUS316相当	1	
5		中性子検出器		1	
4		上部端栓	SUS316相当	1	
3		下部端栓	"	1	
2		上部被覆管	"	1	
1		下部被覆管	SUS316相当	1	

Fig.4 中性子検出器用模擬燃料ピンの構造図

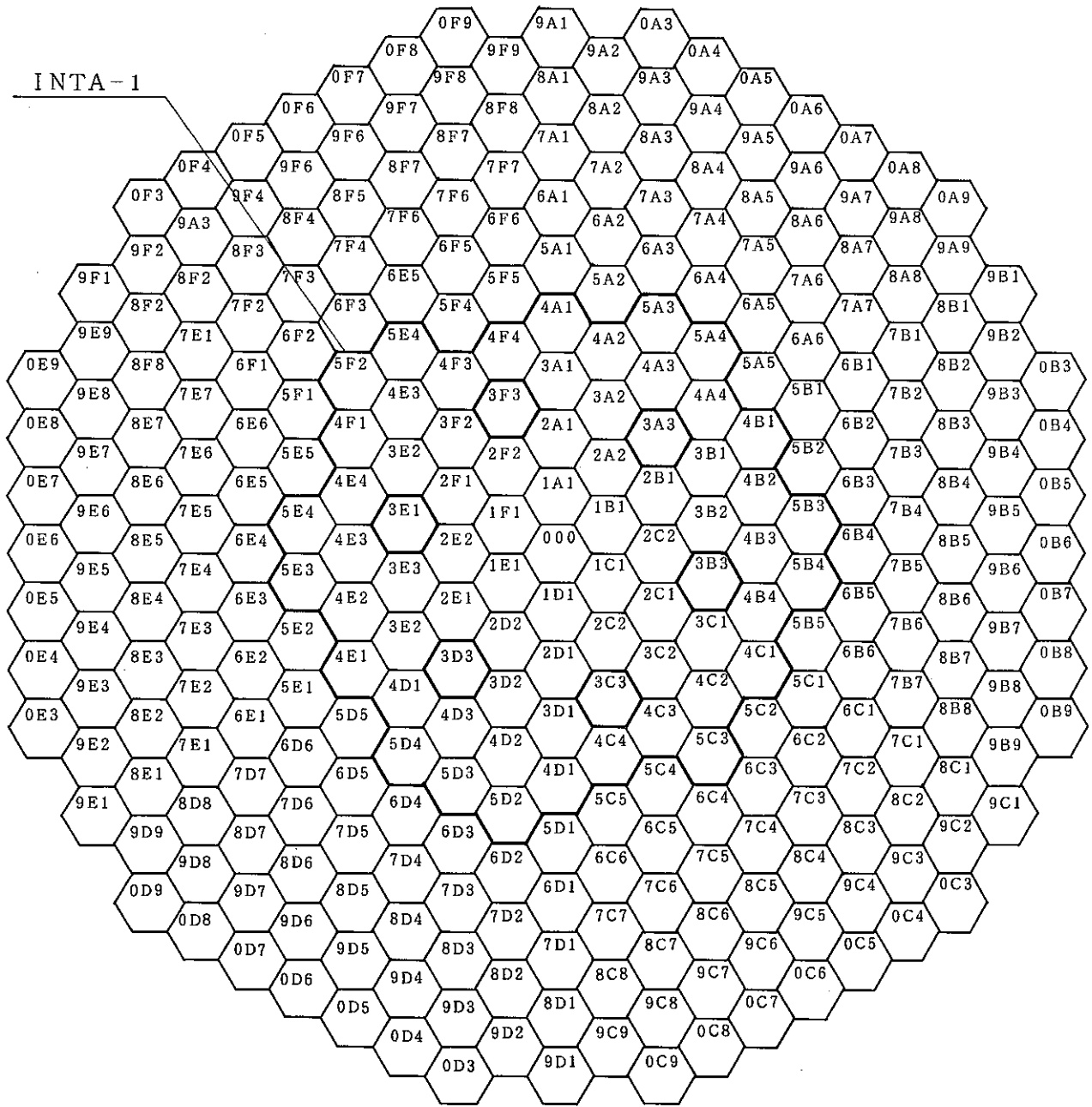
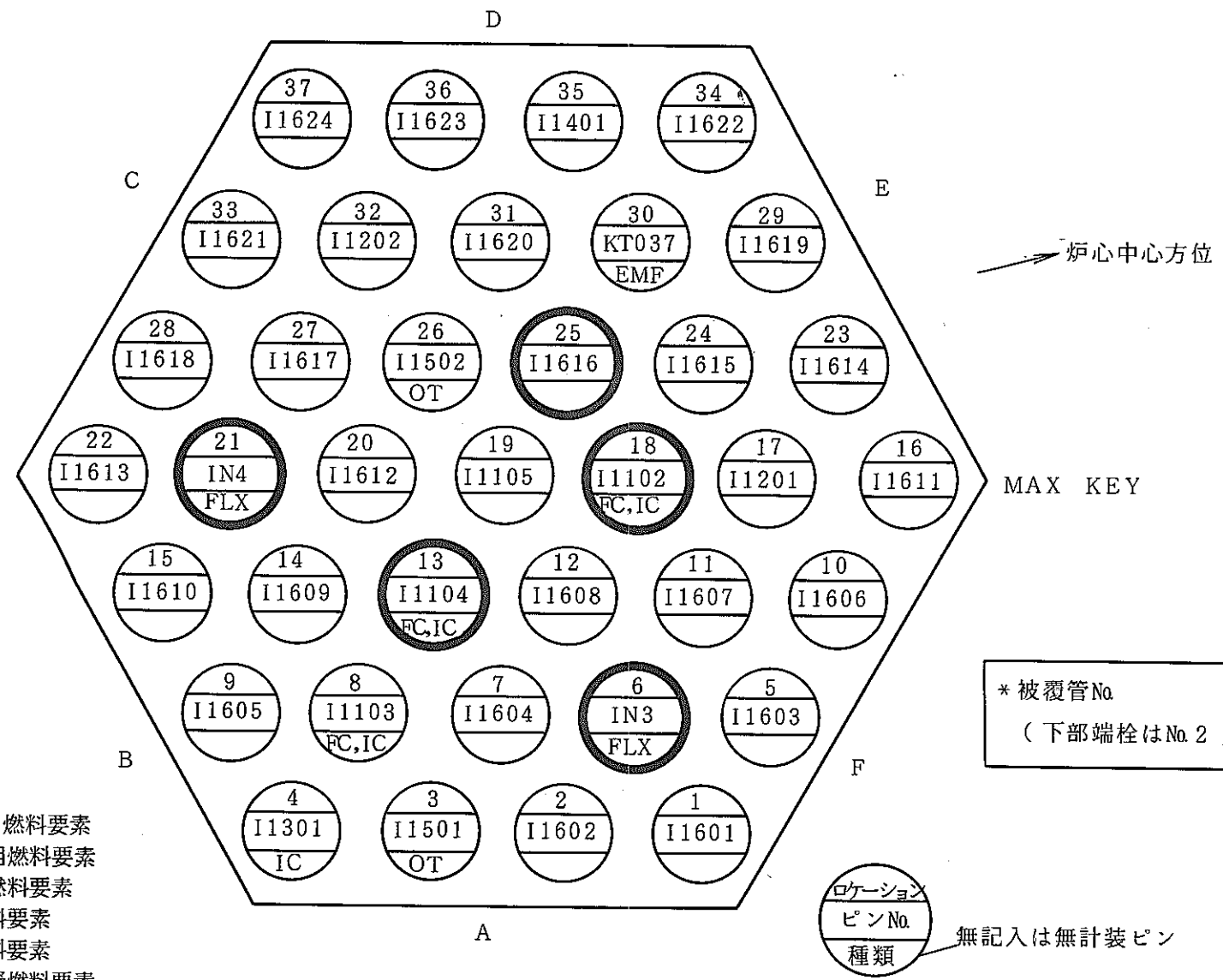


Fig. 5 PFI010の「常陽」MK-II炉内装荷位置



- 記号説明
- FP : FP ガス圧力測定用燃料要素
 - FC : 燃料中心温度測定用燃料要素
 - IC : 冷却材温度測定用燃料要素
 - IT : 入口温度測定用燃料要素
 - OT : 出口温度測定用燃料要素
 - FLX : 中性子検出器用模擬燃料要素
 - EMF : 電磁流量計信号線用模擬燃料要素

Fig. 6 燃料ピンの集合体位置

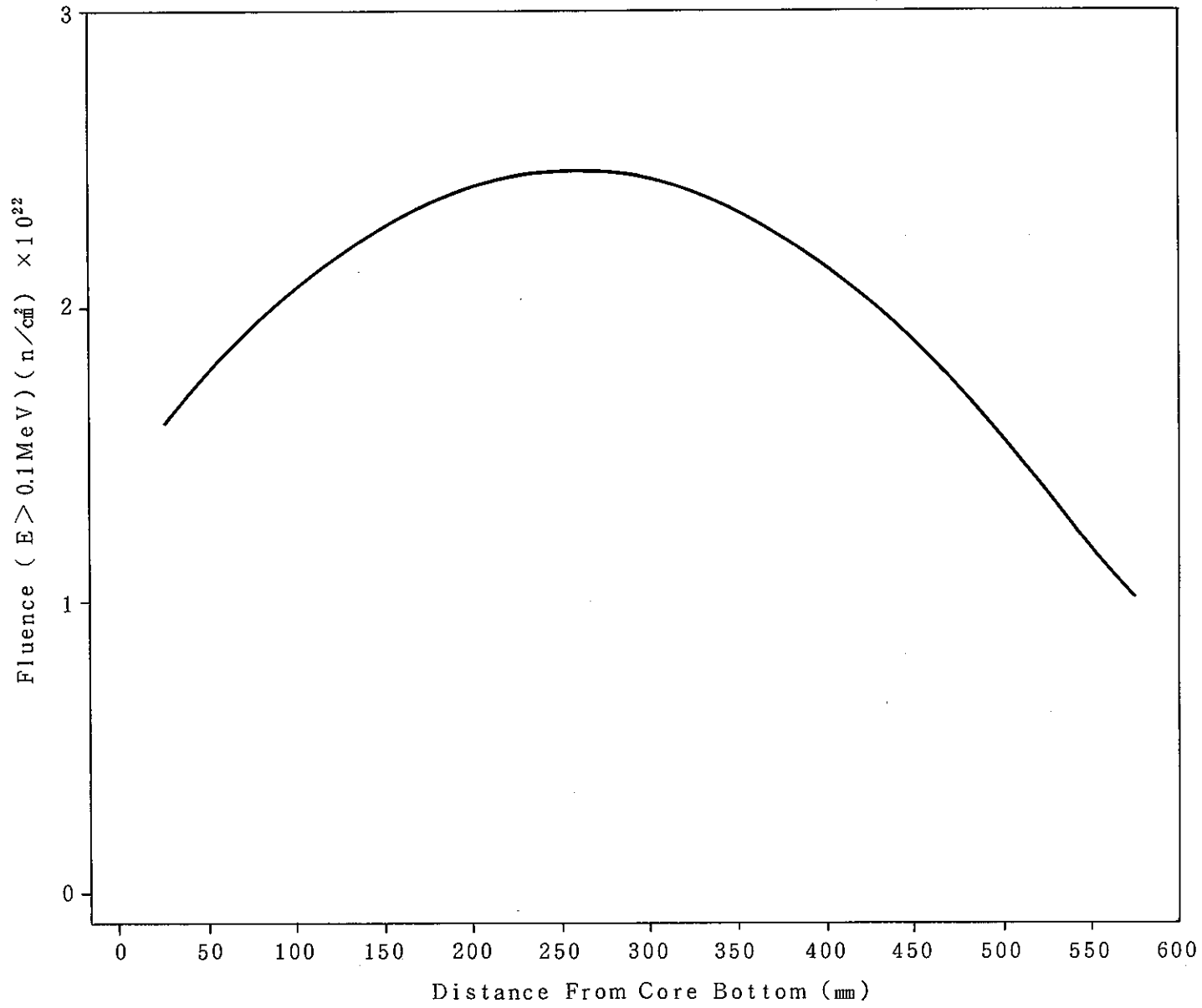


Fig. 7 中性子束の軸方向分布 (ピンNo. 11104, 11102, 11616)

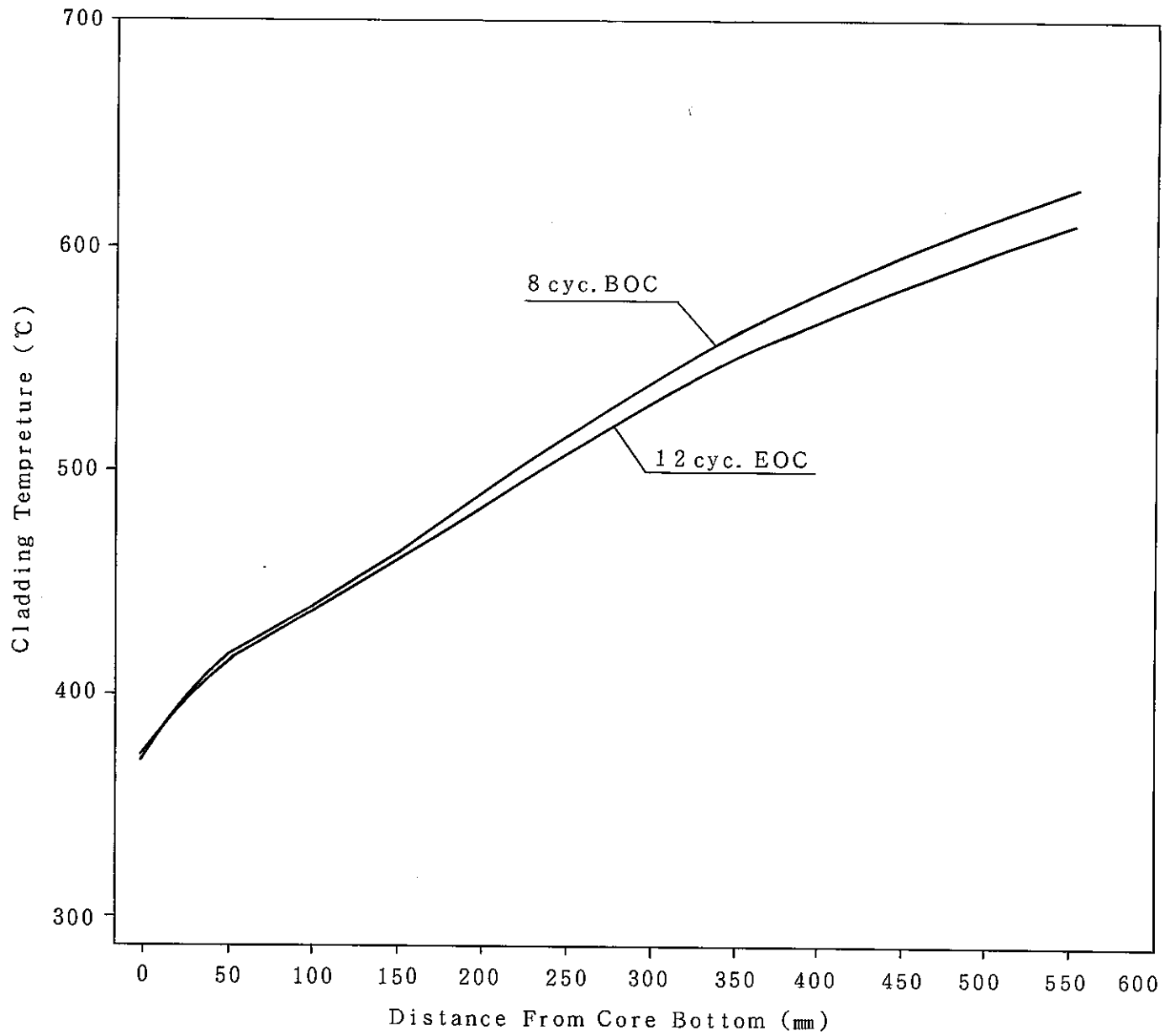


Fig. 8 被覆管温度の軸方向分布 (ピンNo. 11104)

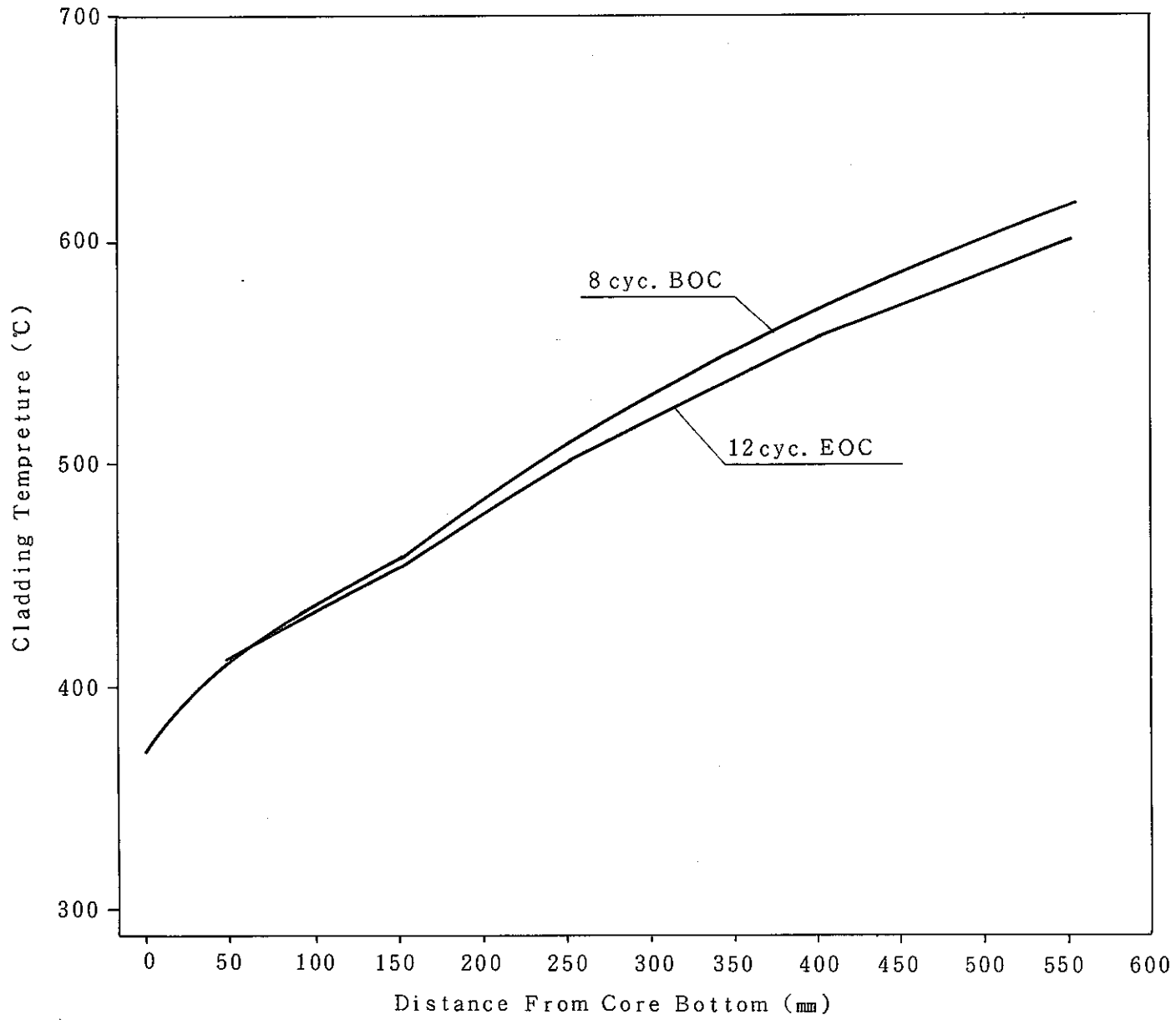


Fig.9 被覆管温度の軸方向分布 (ピンNo. I 1102)

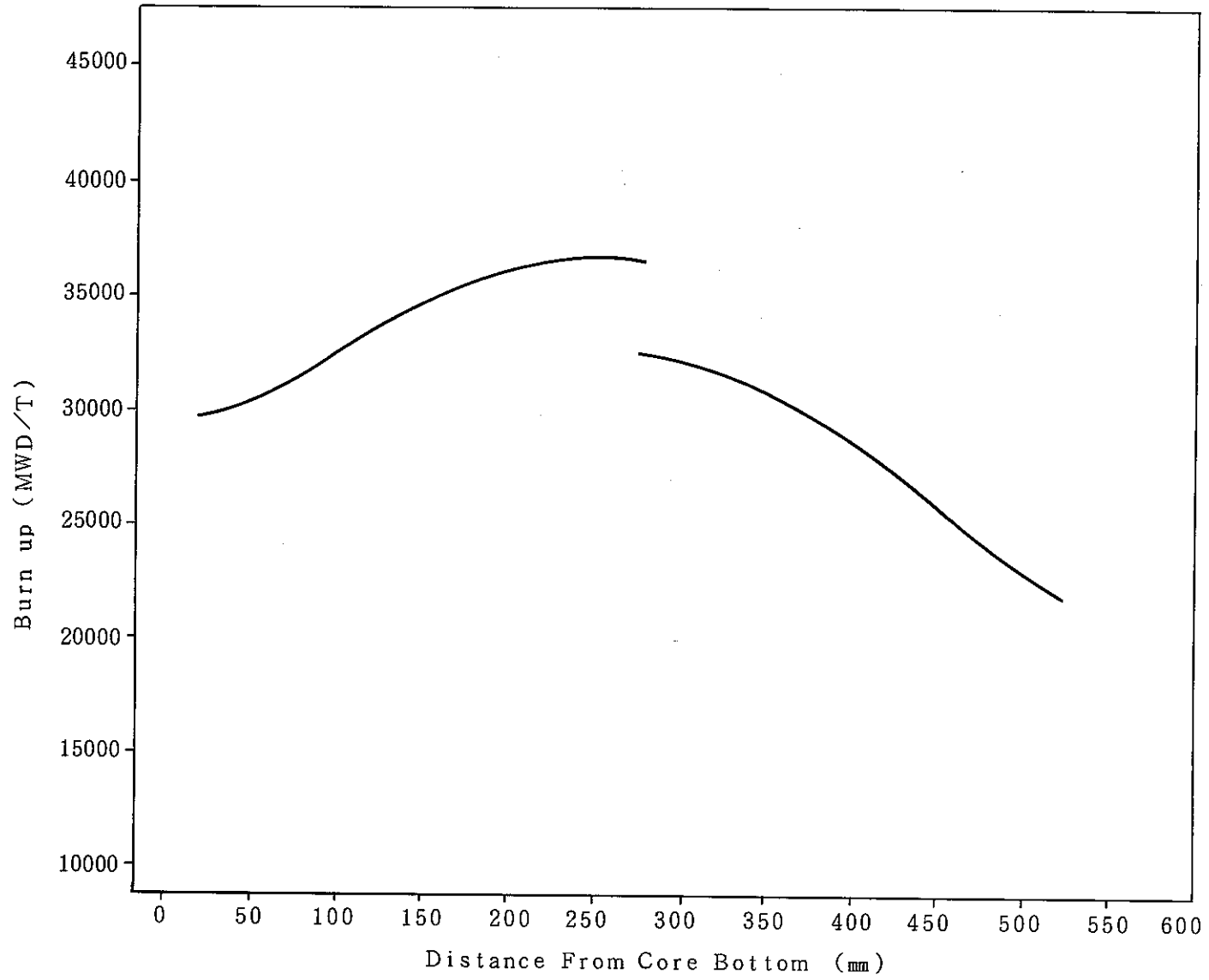


Fig. 10 燃烧度の軸方向分布 (ピンNo. 11104)

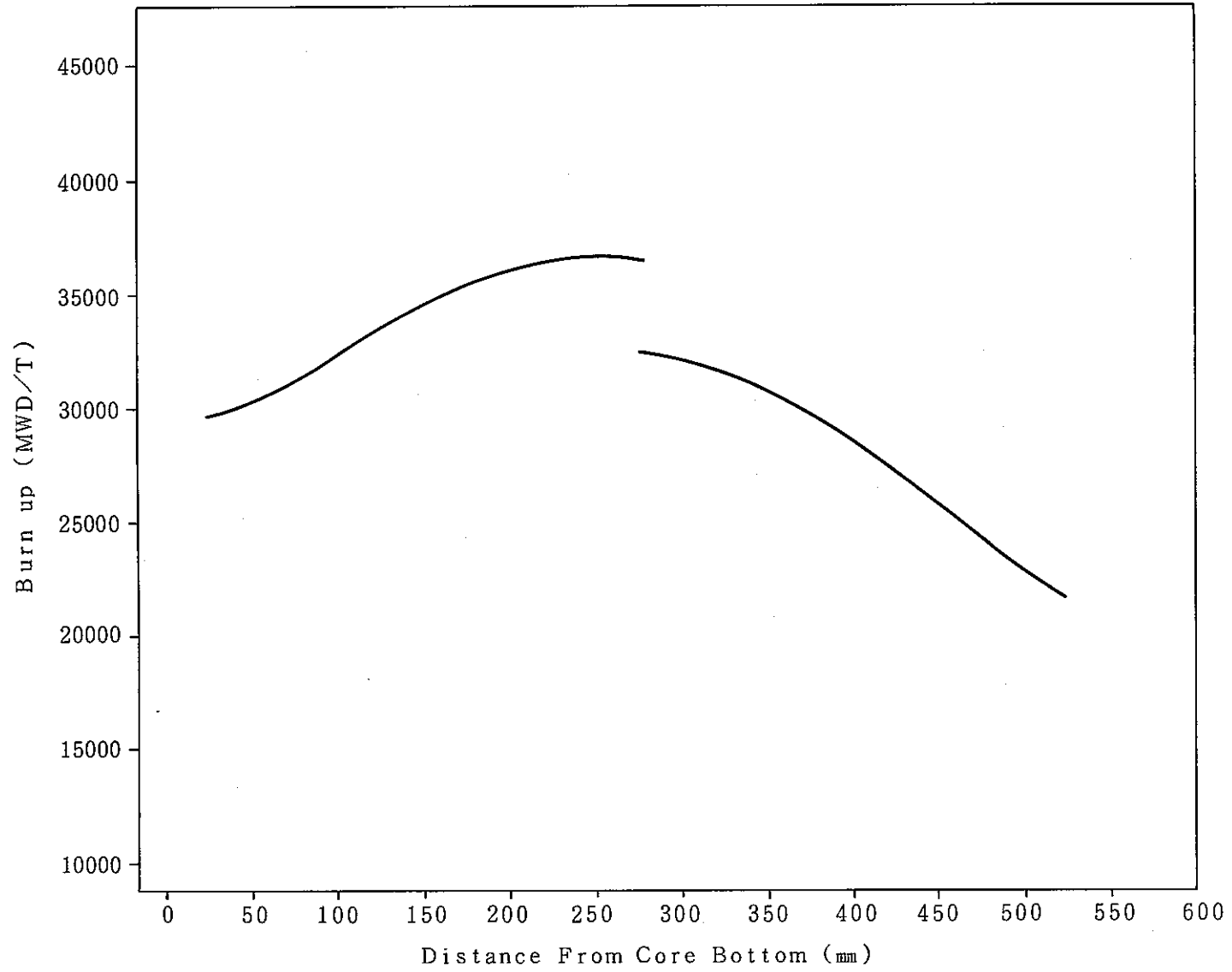


Fig. 1 1 燃焼度の軸方向分布 (ピンNo. I1102)

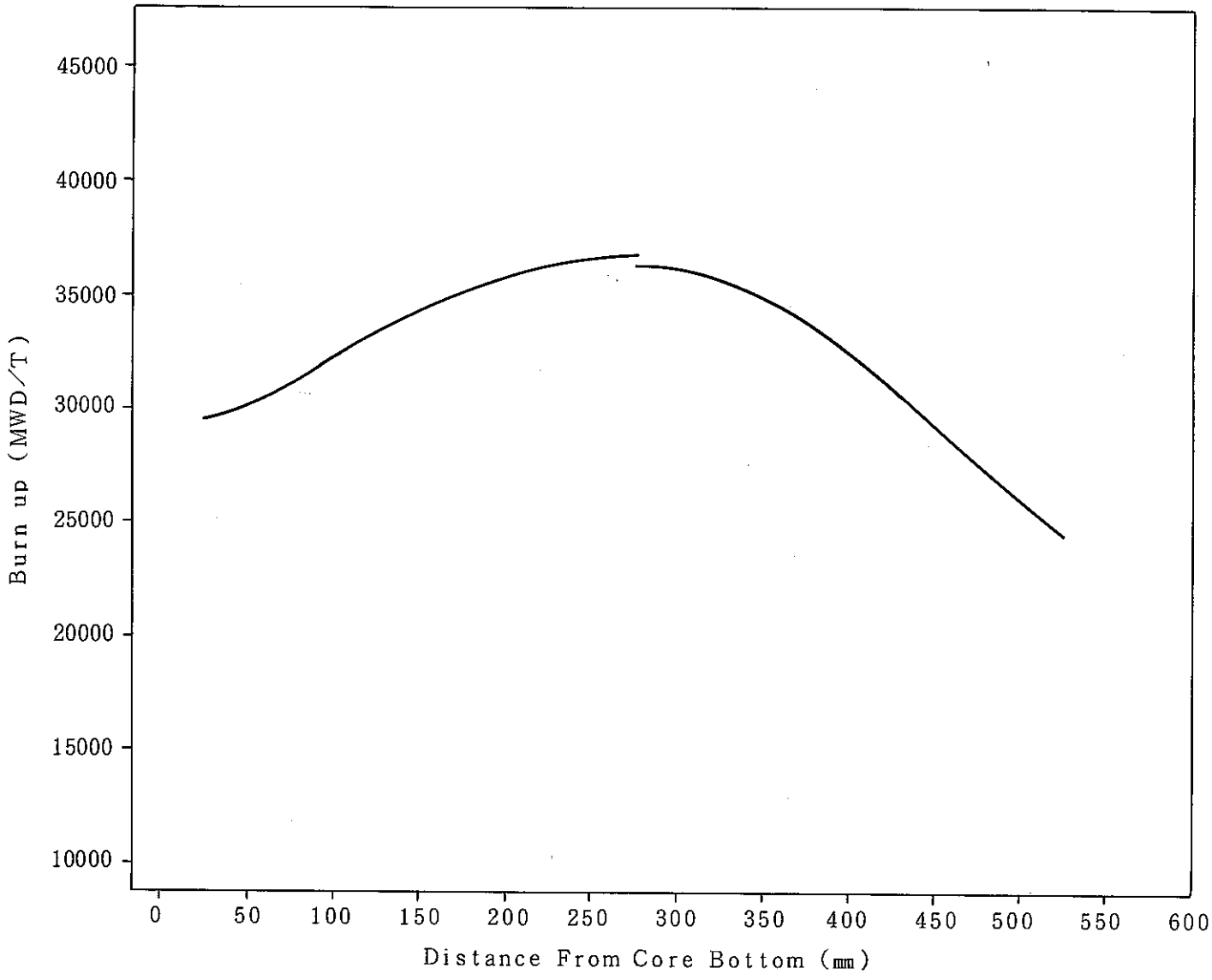


Fig. 1 2 燃烧度の軸方向分布 (ピンNo. I 1 6 1 6)

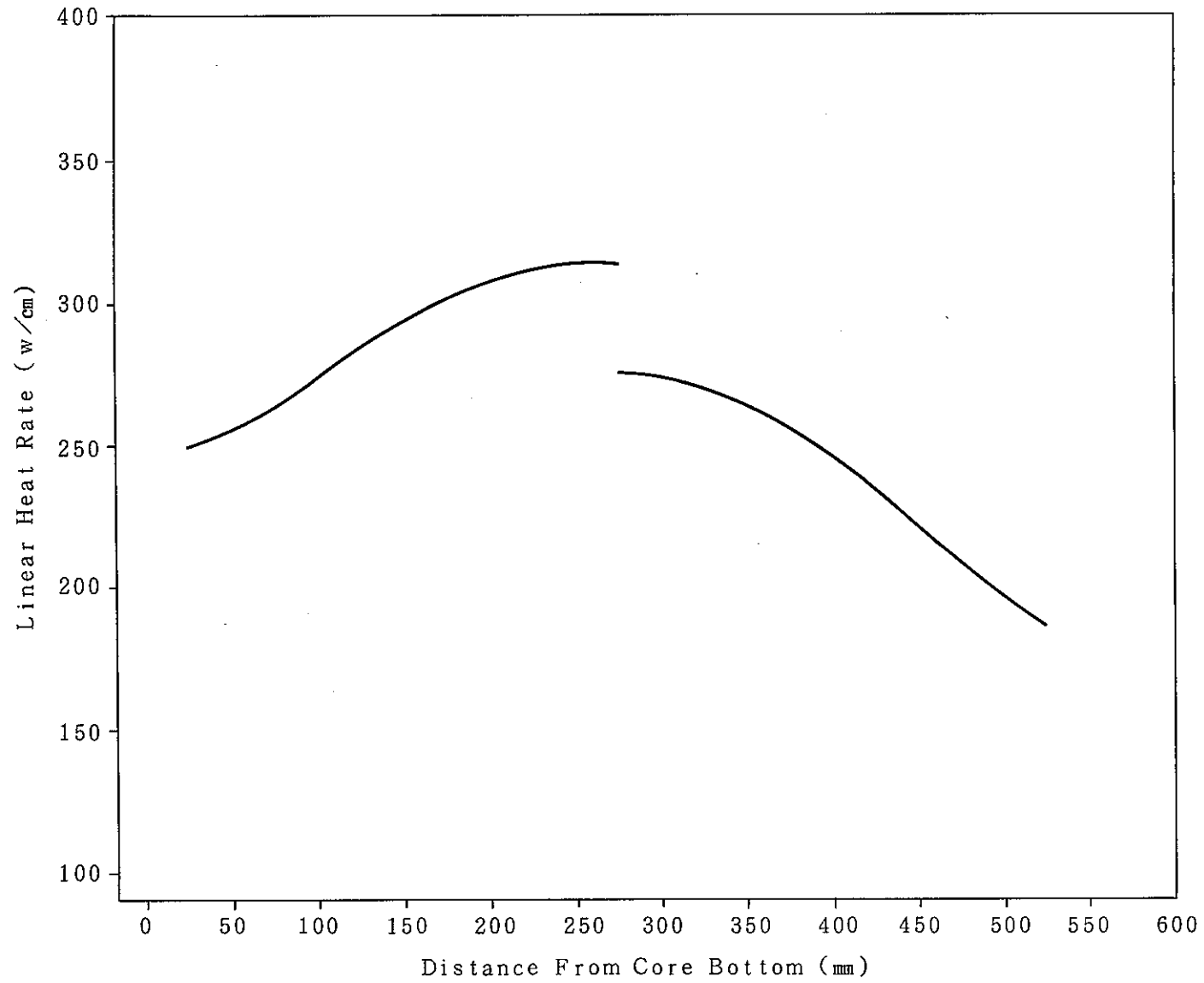


Fig. 13 線出力の軸方向分布 (ピンNo.11104)

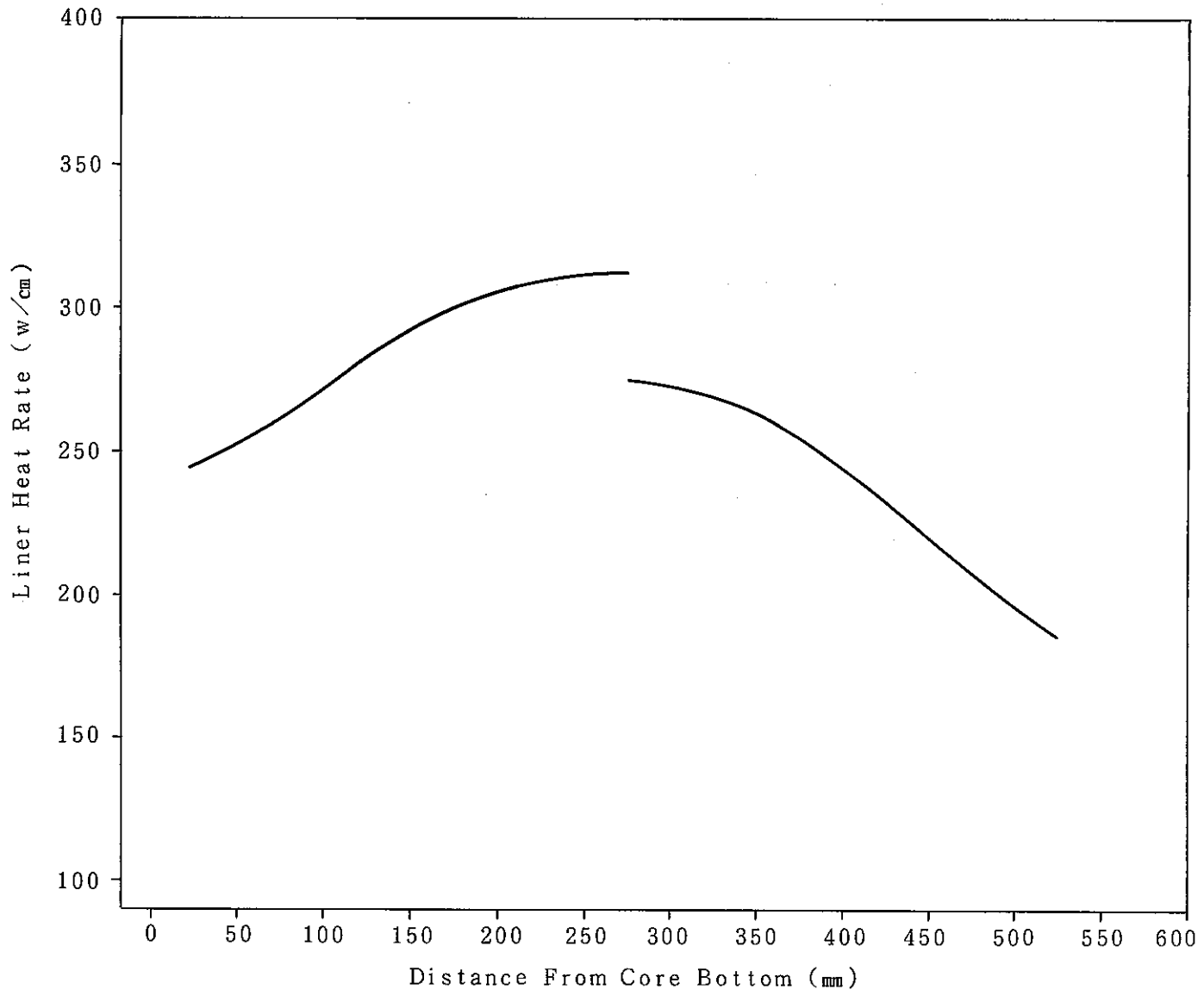


Fig. 1 4 線出力の軸方向分布 (ピンNo. I 1 1 0 2)

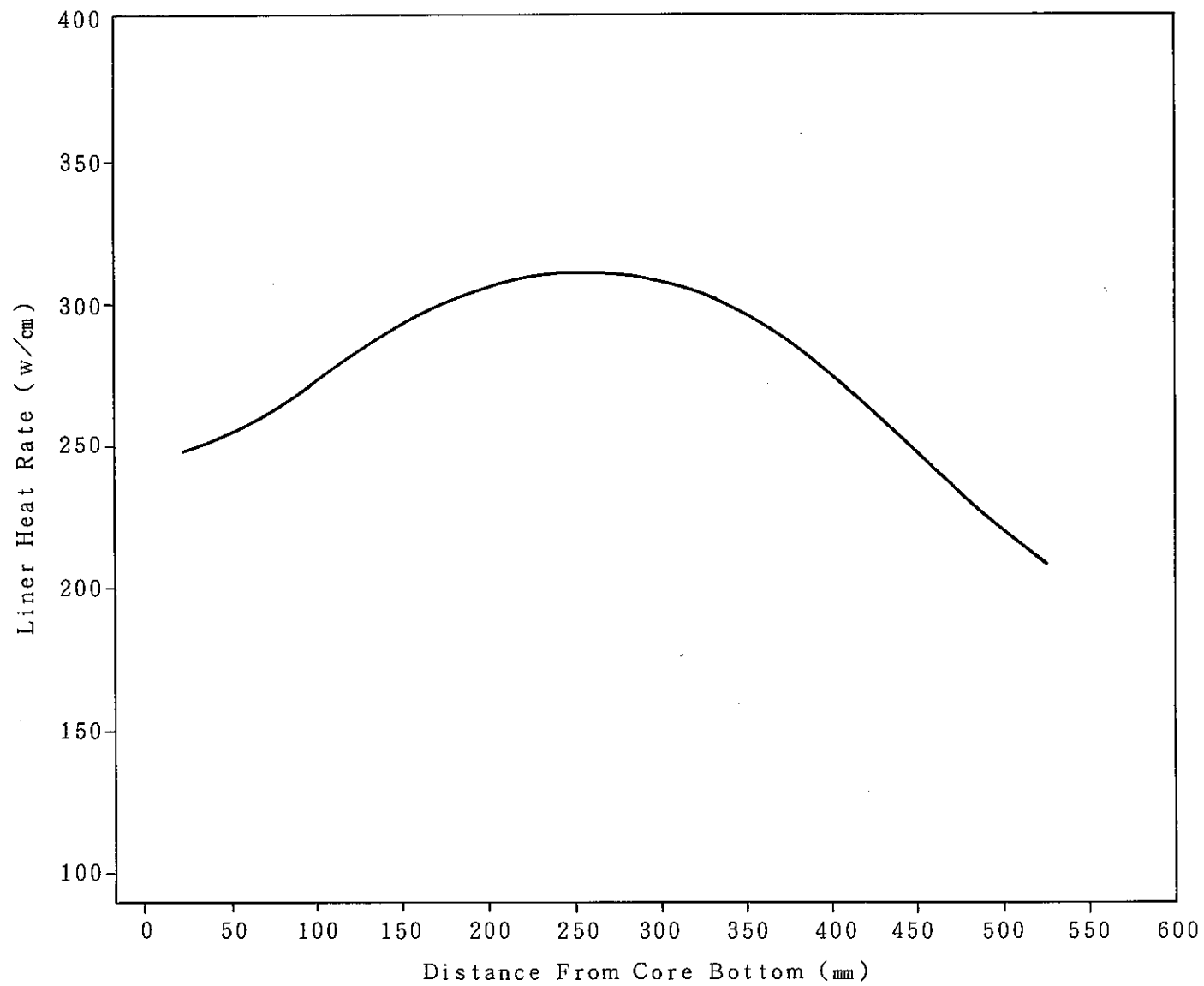


Fig. 15 線出力の軸方向分布 (ピンNo. I1616)

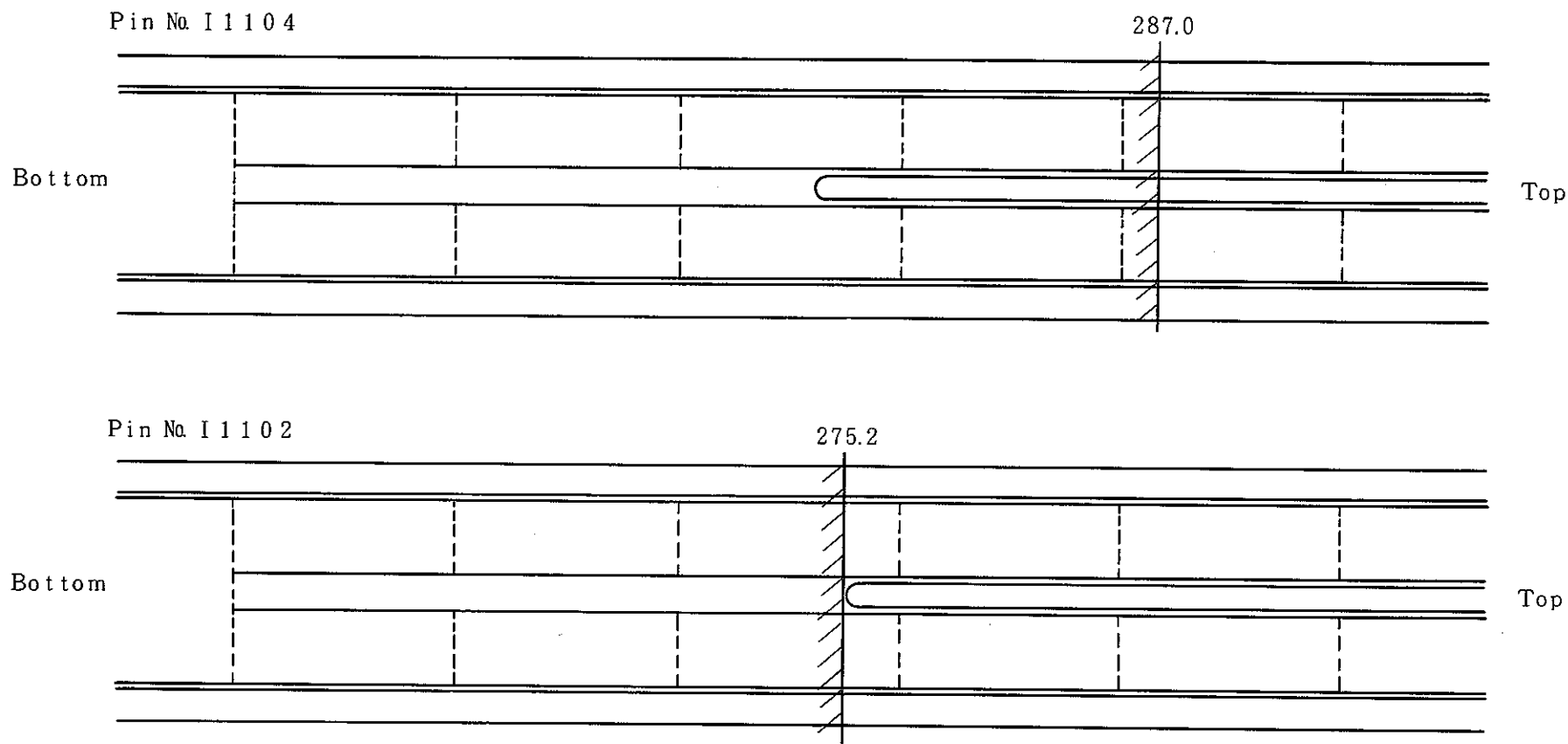


Fig.16 ピンNo. I1104とI1102の試料採取位置

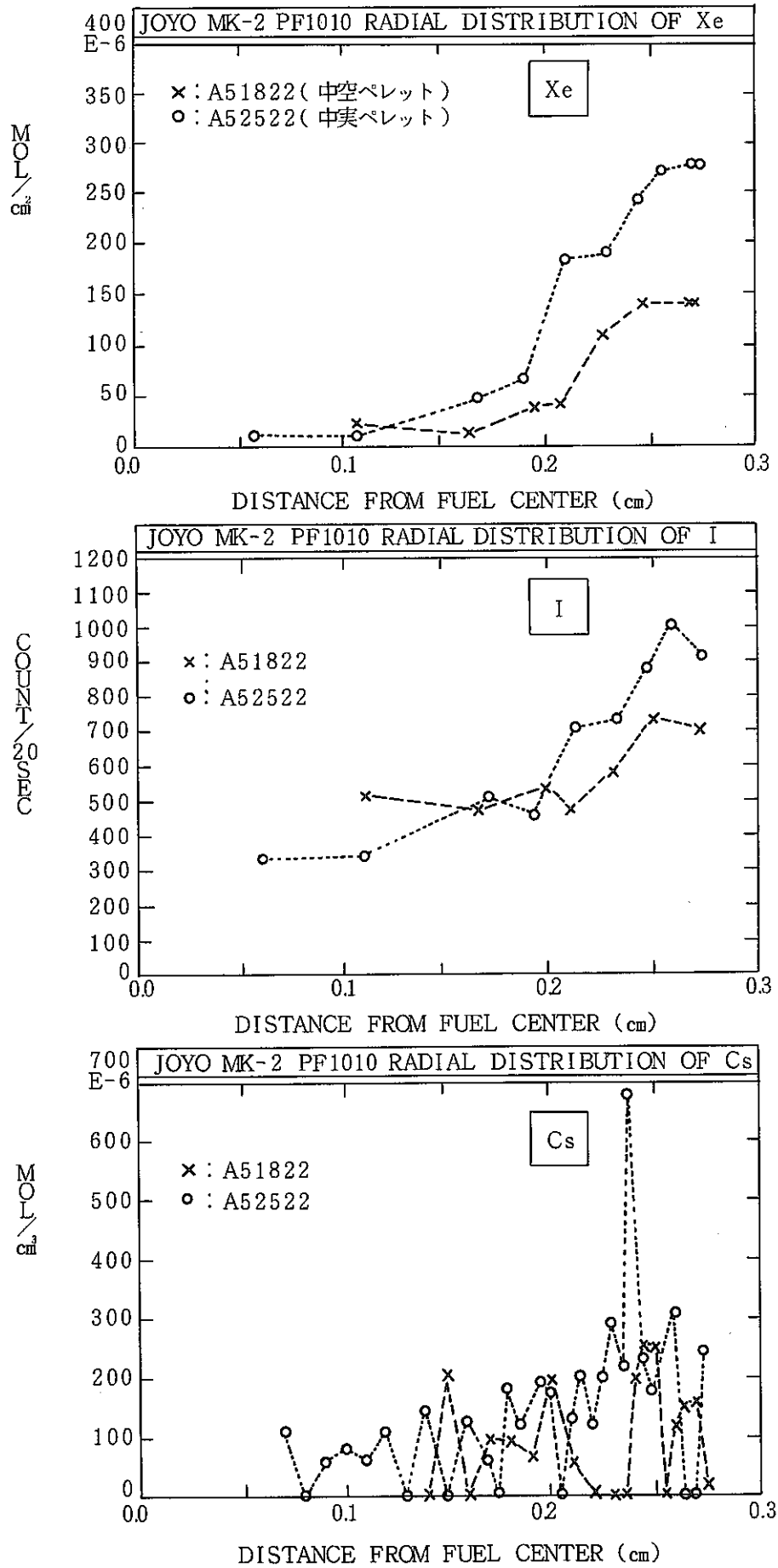


Fig.17 SXMAによるXe, I, Csの径方向分布測定結果

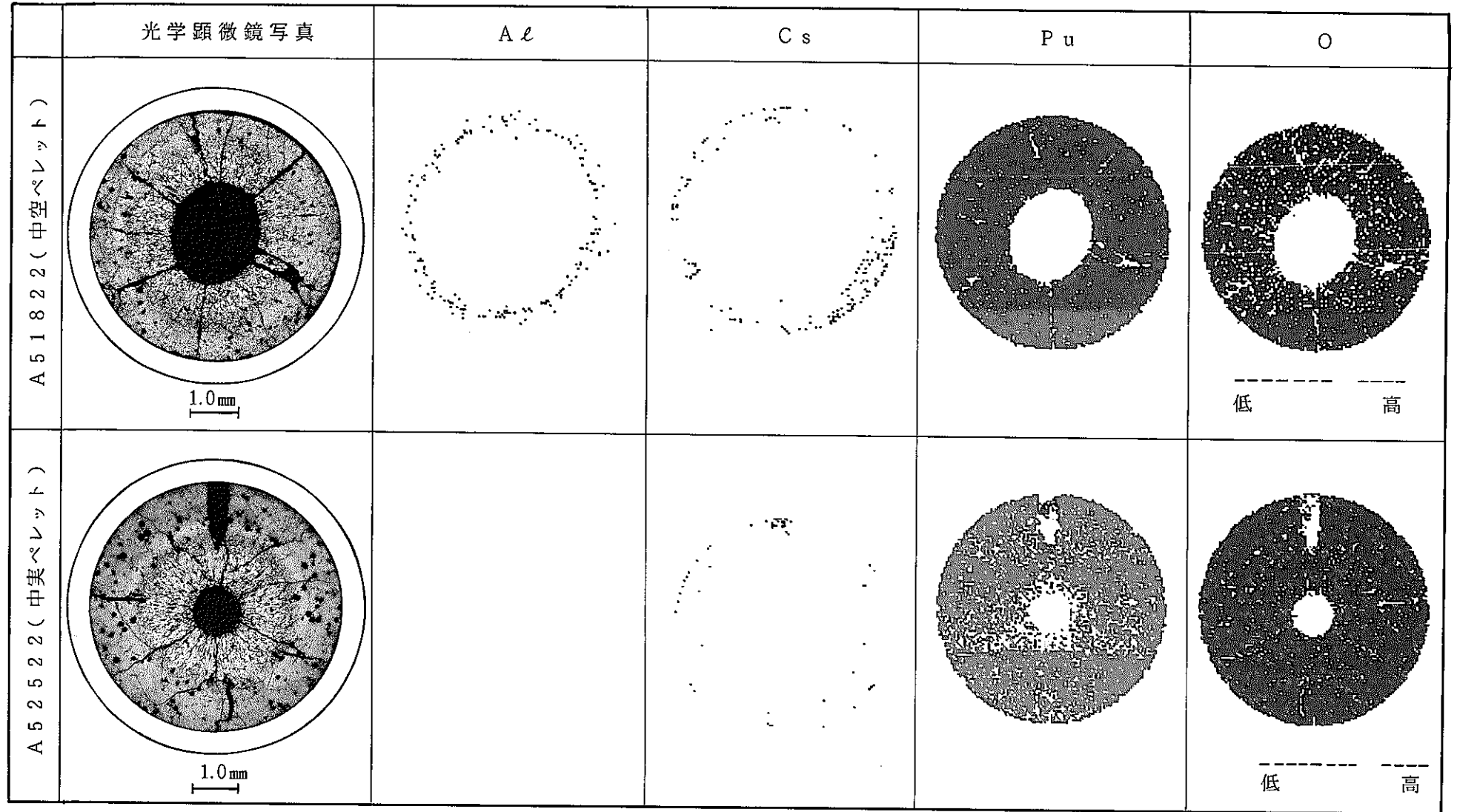


Fig.18 SXMAによるカラーマッピング結果

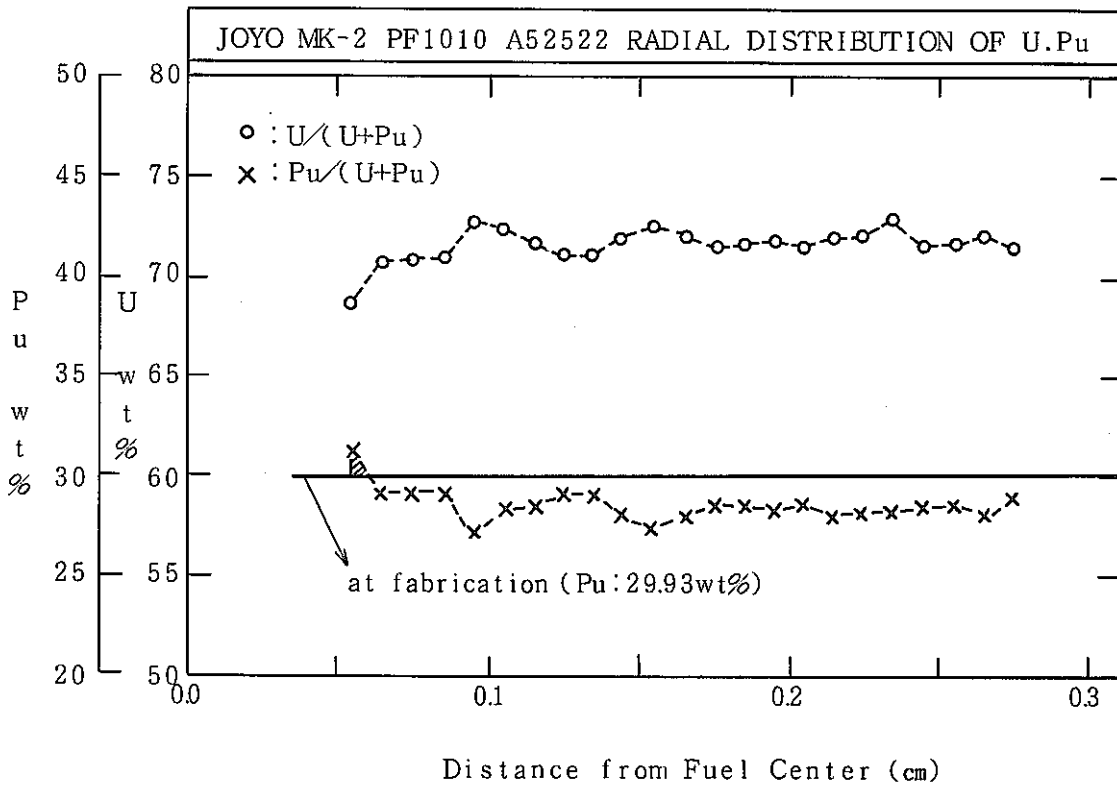
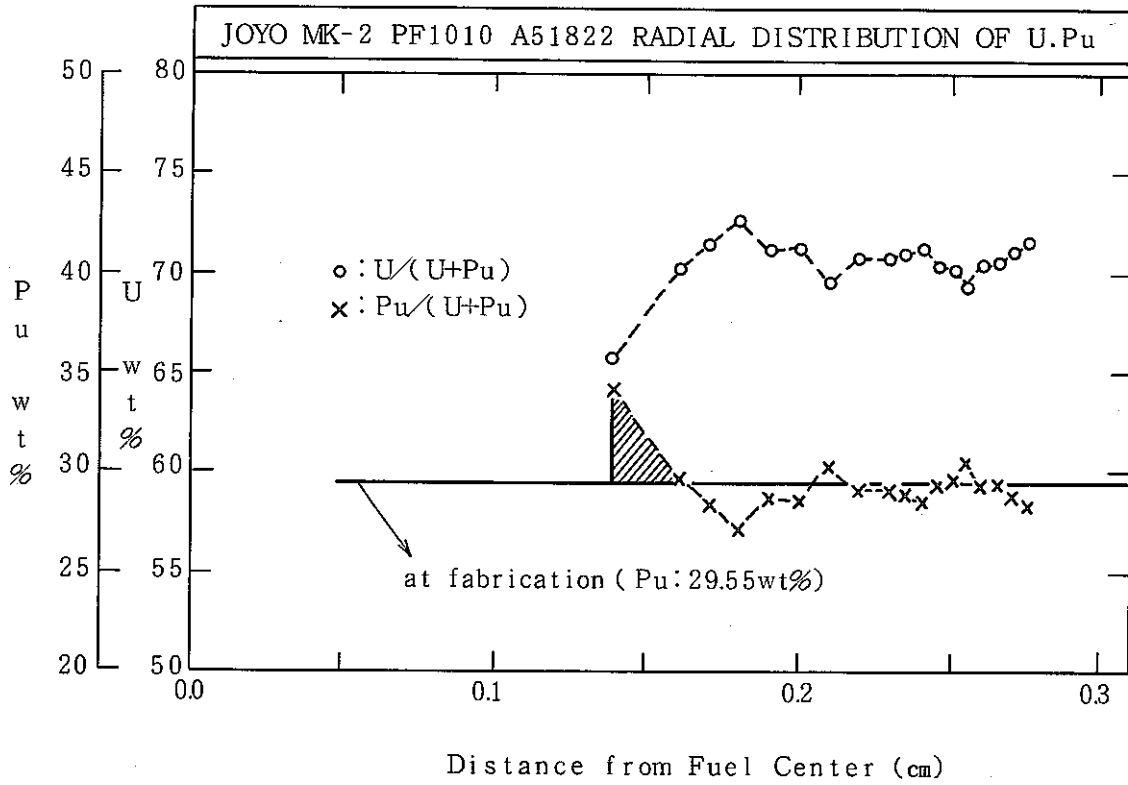


Fig.19 U, Pu濃度の径方向分布(ピンNo I1104, I1102)

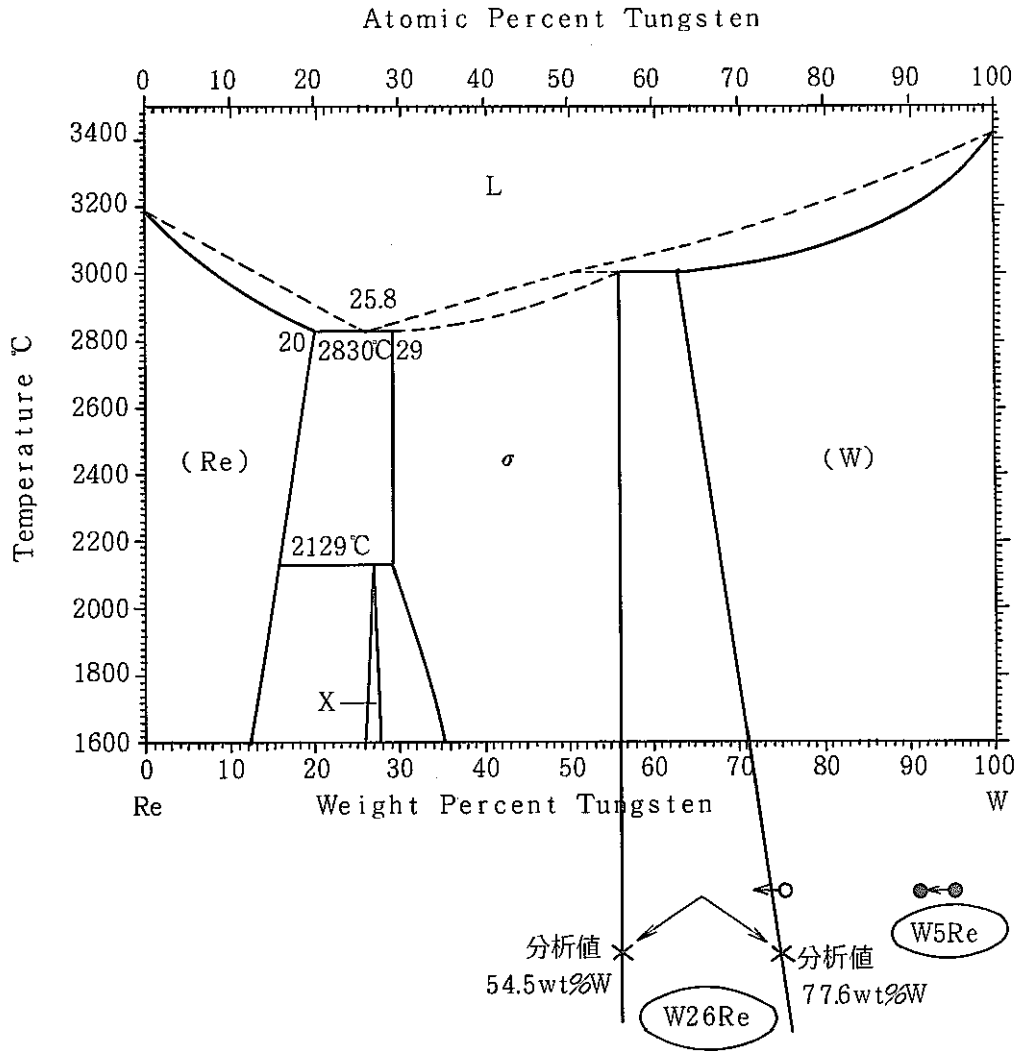


Fig.20 W-Re合金の二次系状態図

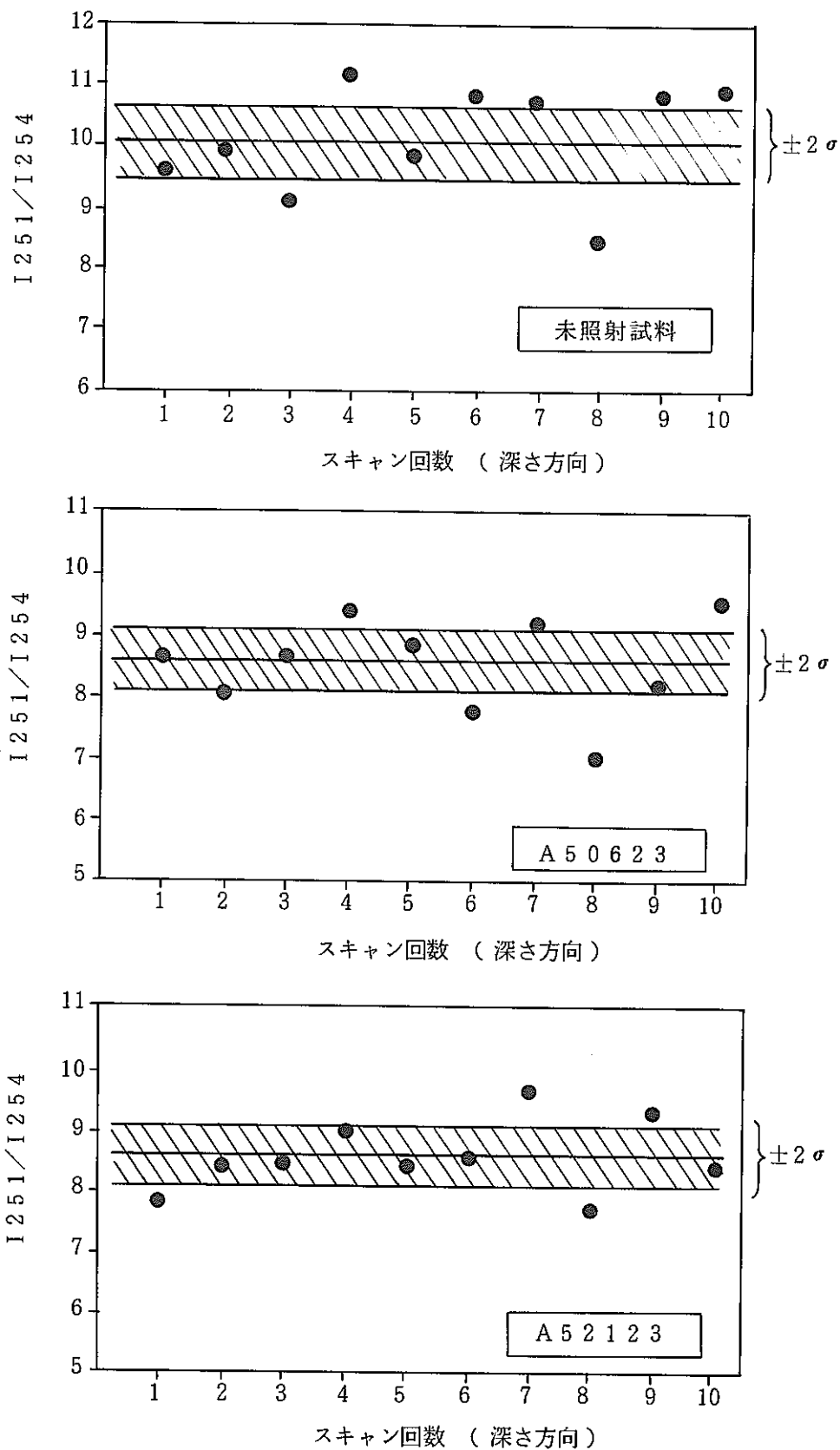
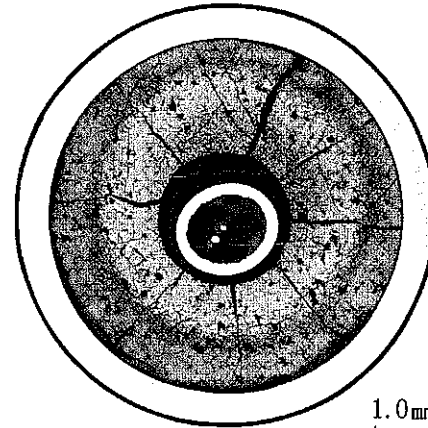


Fig.21 中性子検出器の深さ方向測定結果

PFI010(A513)の切断位置及び低倍写真



1.0mm Specimen No. A51331

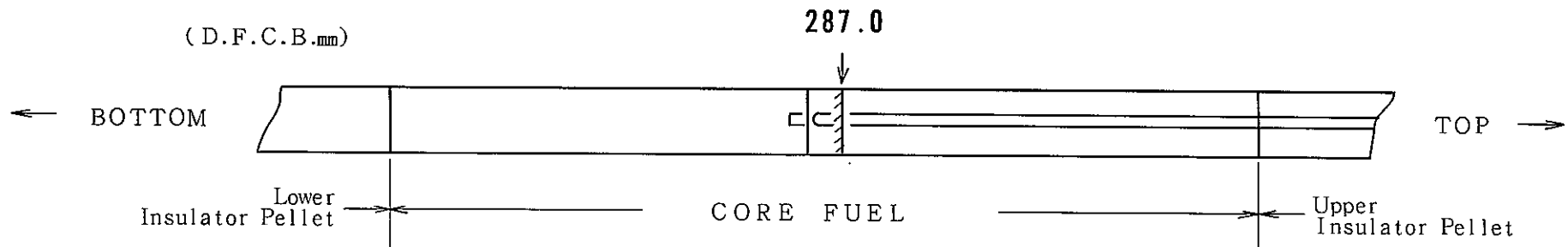


Photo.O-1 金相試料の切断位置と低倍写真(ピンNo. I1104)

PFI010(A518)の切断位置及び低倍写真

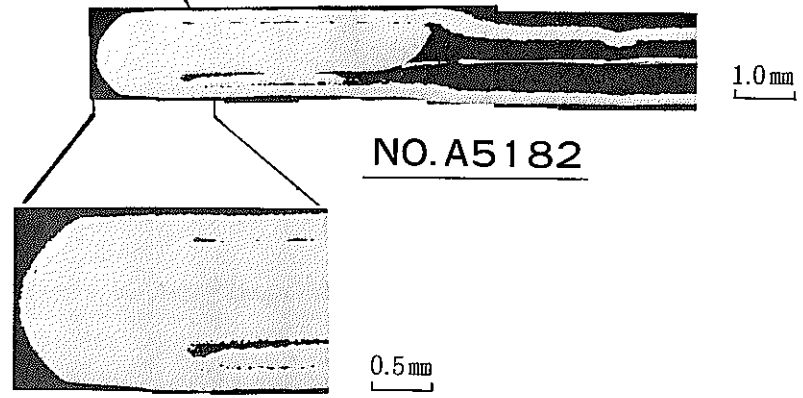
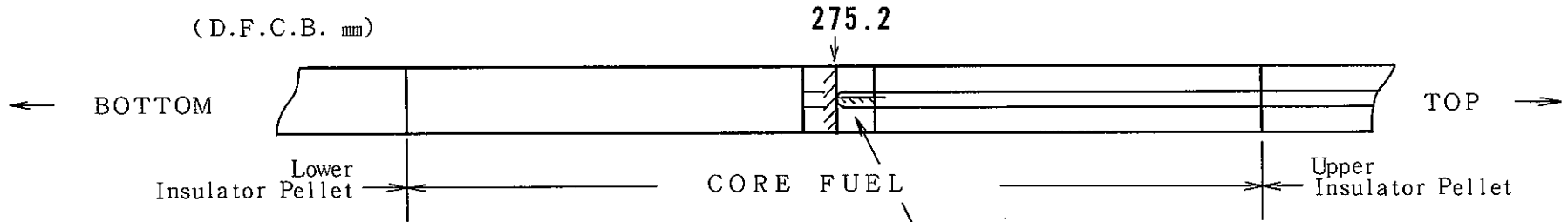
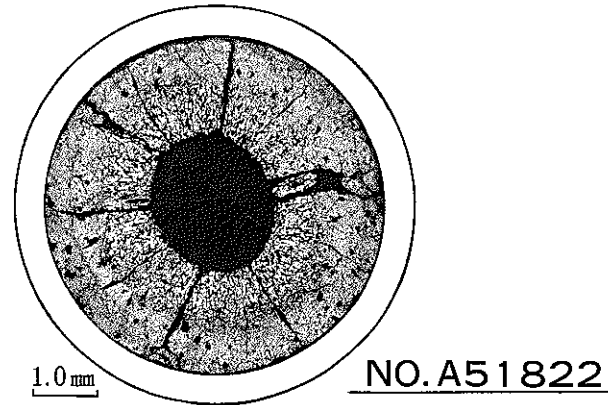
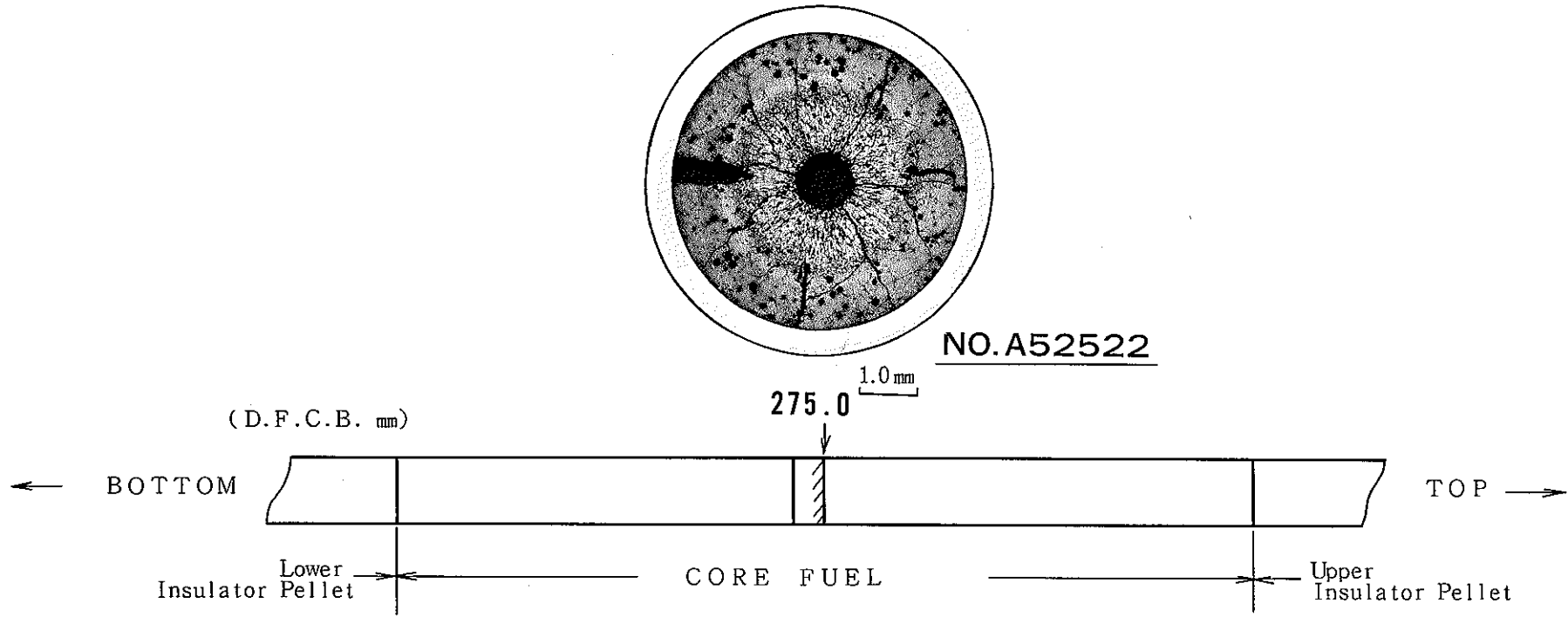


Photo. O-2 金相試料の切断位置と低倍写真(ピンNo. I1102)

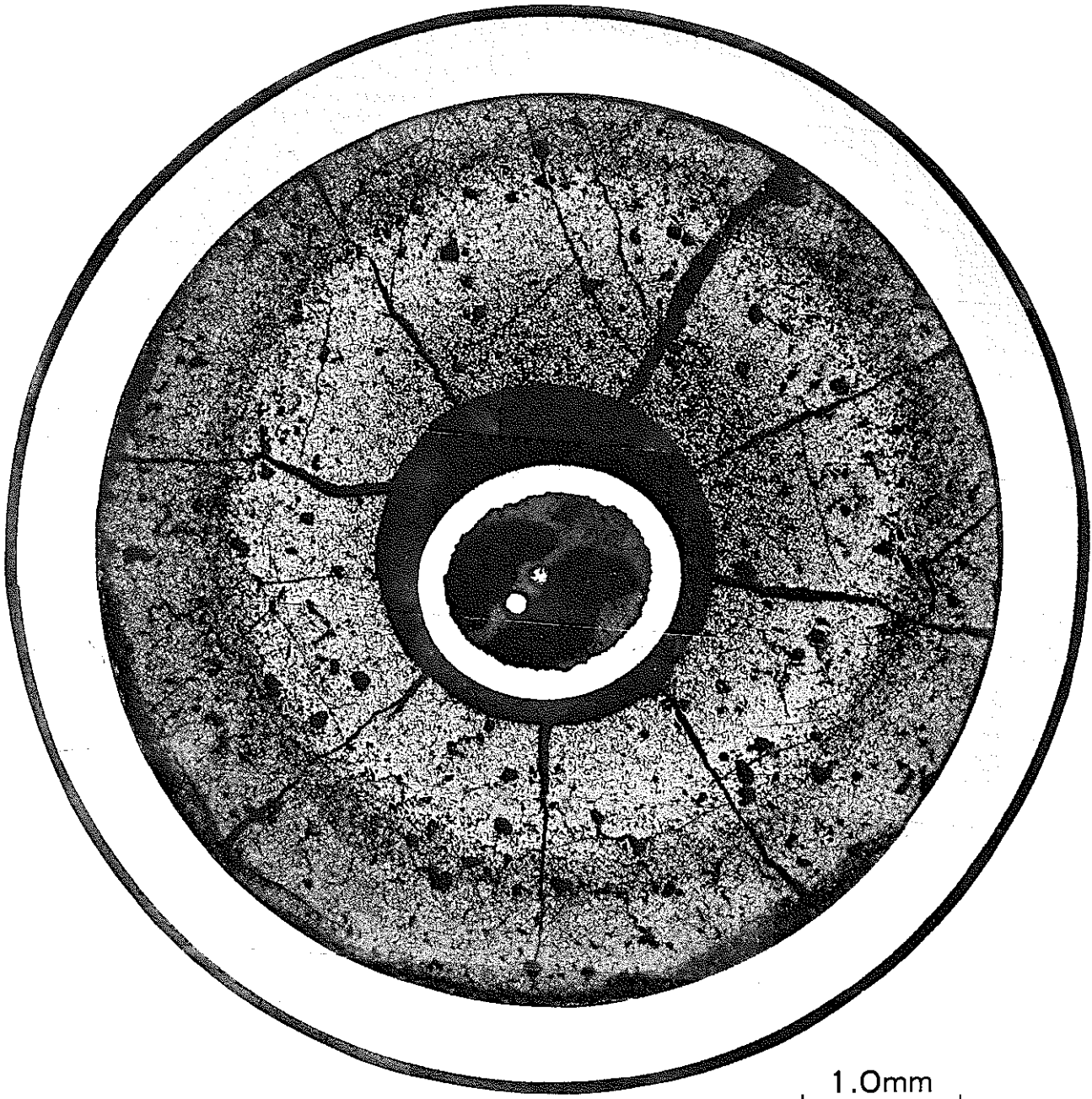
PFI010(A525)の切断位置及び低倍写真



- 46 -

Photo.O-3 金相試料の切断位置と低倍写真(ピンNo.I1616)

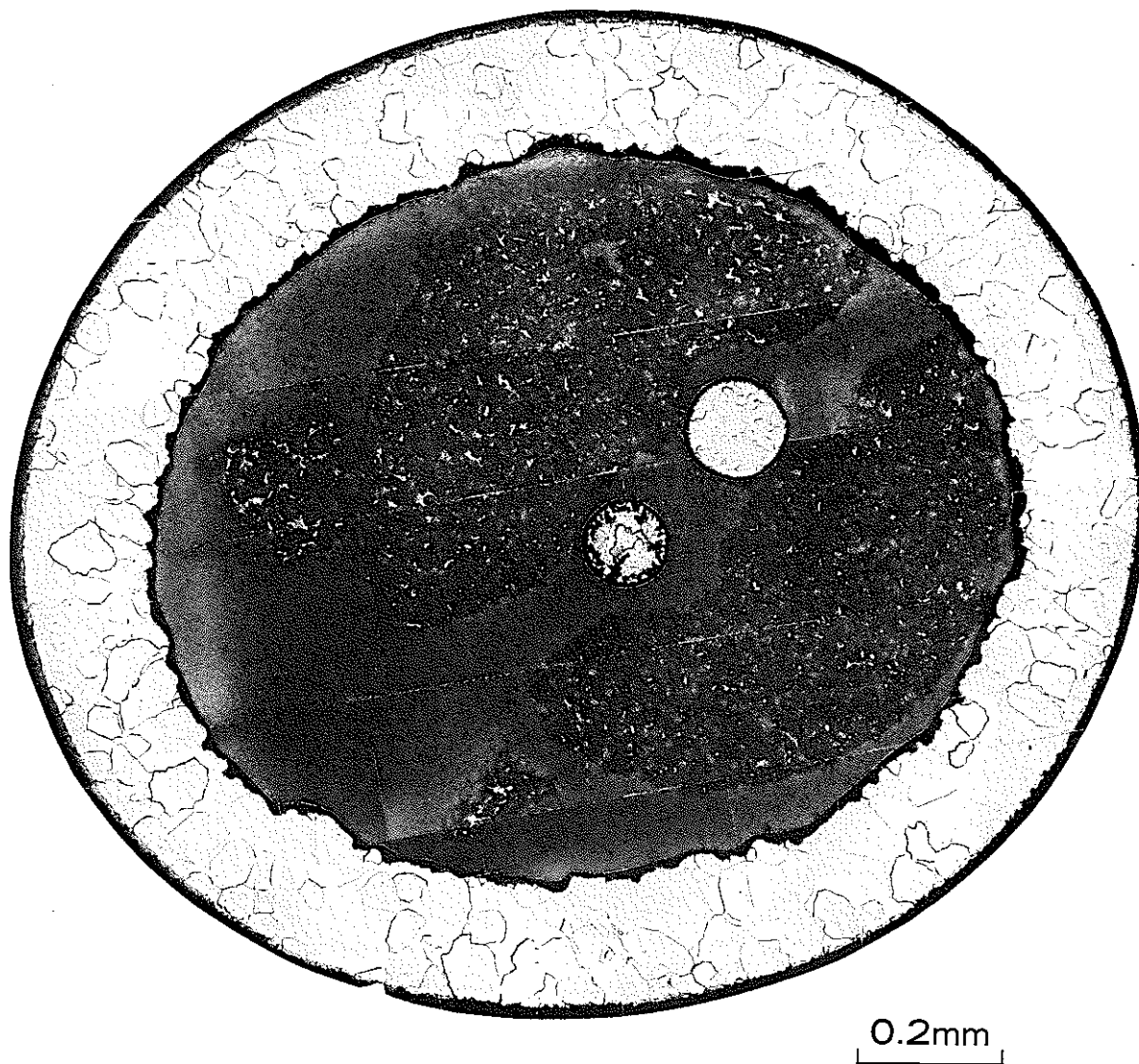
**“JOYO” MK-II PFI010
Specimen NO.A51331**



Etched

Photo. O-4 試料No.A51331の横断面写真 (Etched)

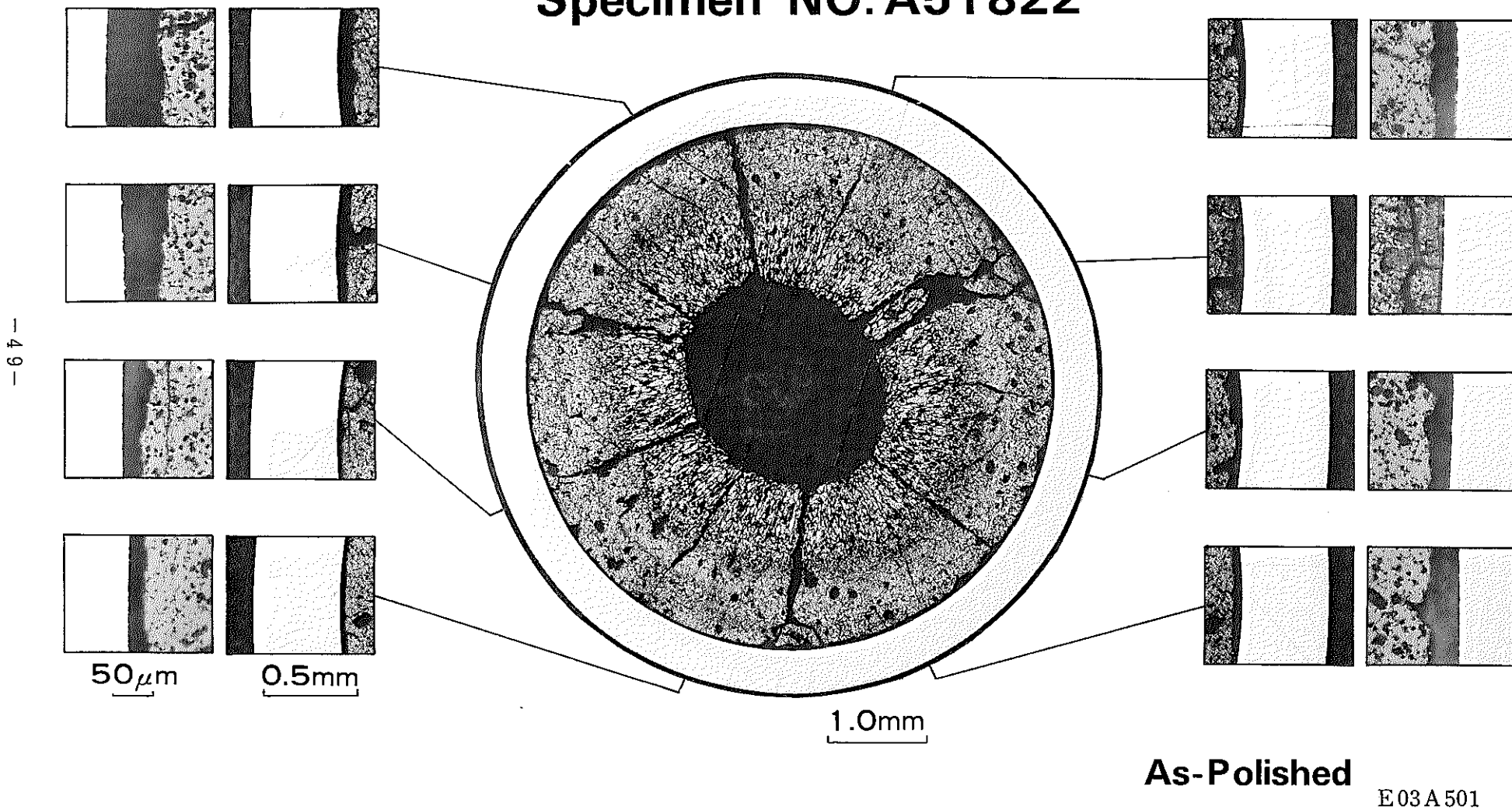
“JOYO” MK-II PFI010
Specimen NO.A51331



Etched

Photo.O-5 試料No.A51331 熱伝対の高倍写真 (Etched)

“JOYO” MK-II PFI010 Specimen NO. A51822



- 49 -

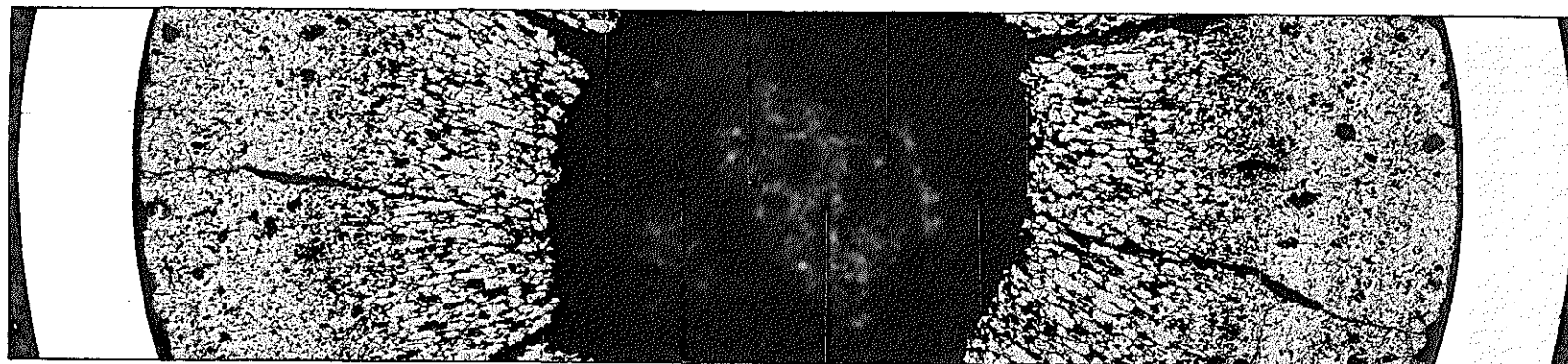
Photo.O-6 試料No.A51822の横断面写真(As-Polished)

As-Polished

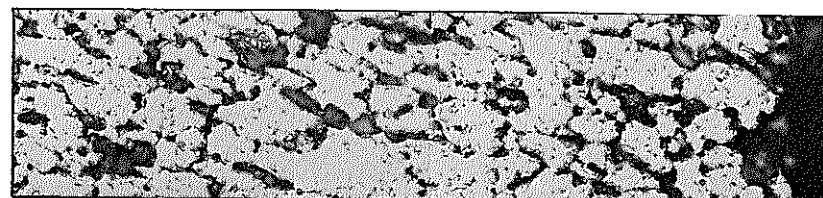
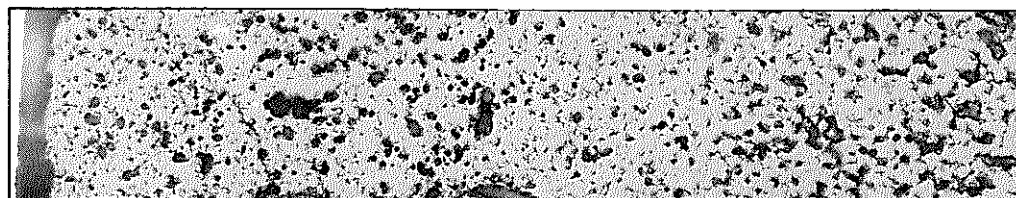
E03A501

“JOYO” MK-II PFI010
Specimen NO. A51822

PNC-TN9410 89-188



0.5mm



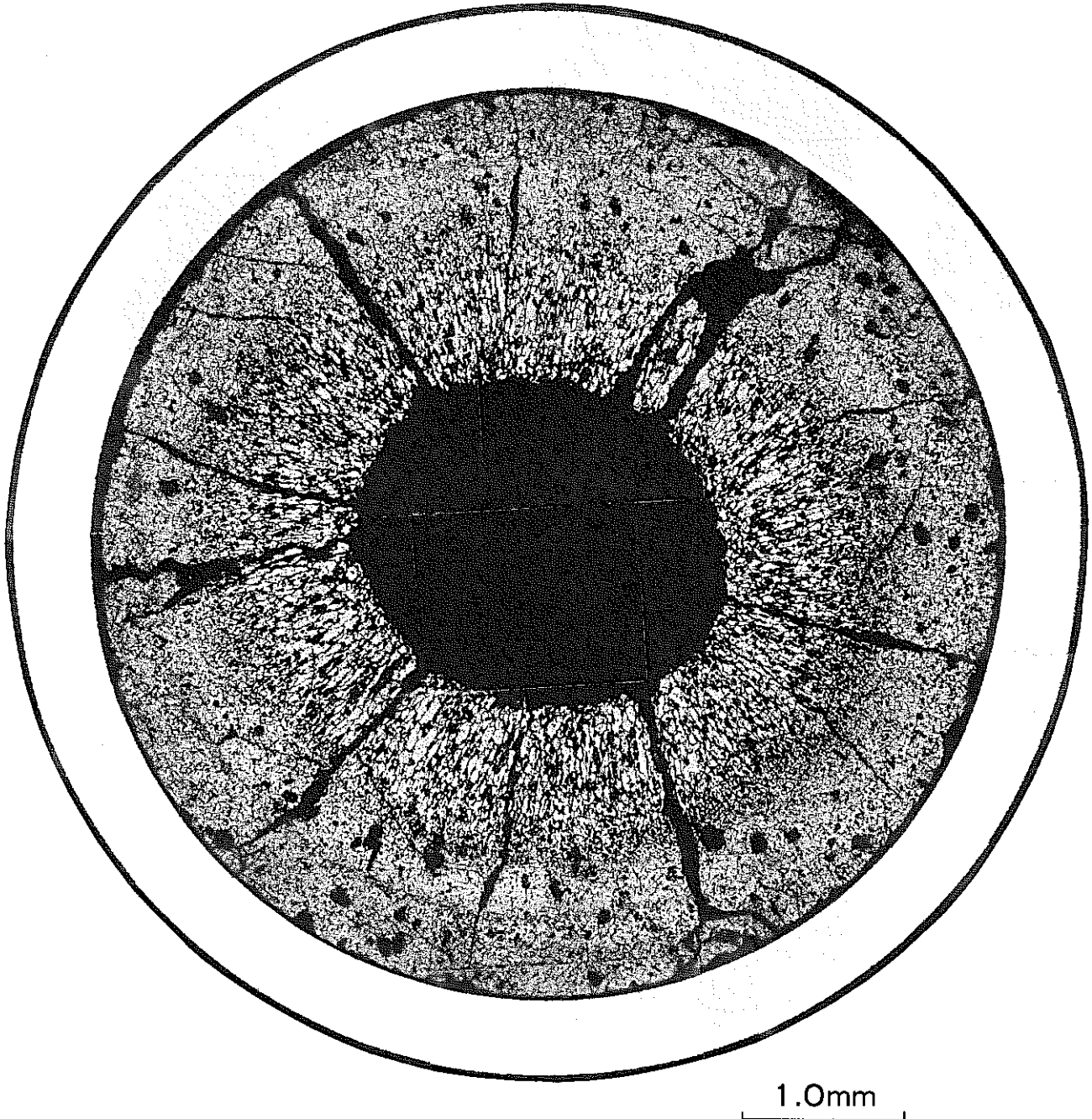
50 μ m

As-Polished

Photo.O-7 試料No.A51822の高倍写真(As-Polished)

E03A502

“JOYO” MK-II PFI010
Specimen NO.A51822

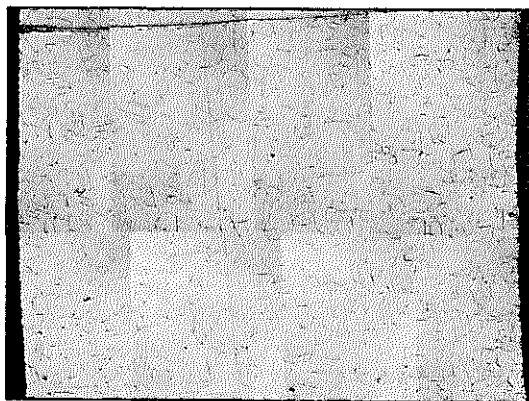


Etched

E03A505

Photo. O-8 試料No.A51822の横断面写真(Etched)

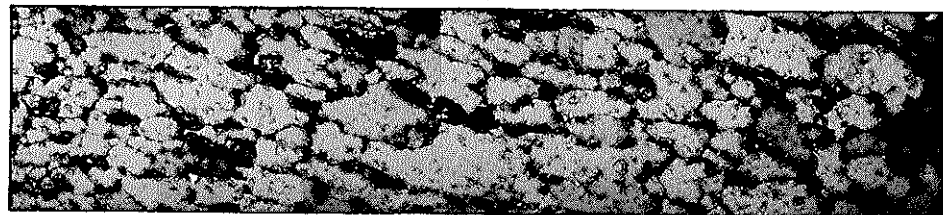
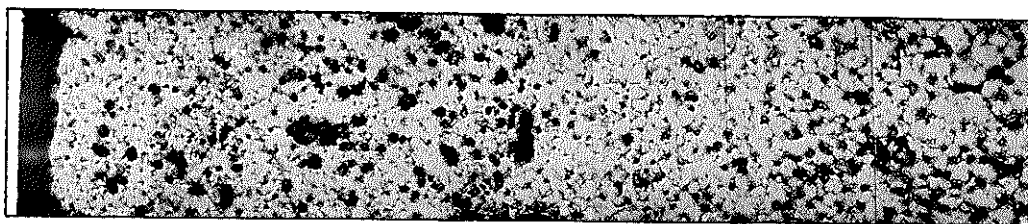
“JOYO” MK-II PFI010 Specimen NO.A51822



50 μm



0.5mm



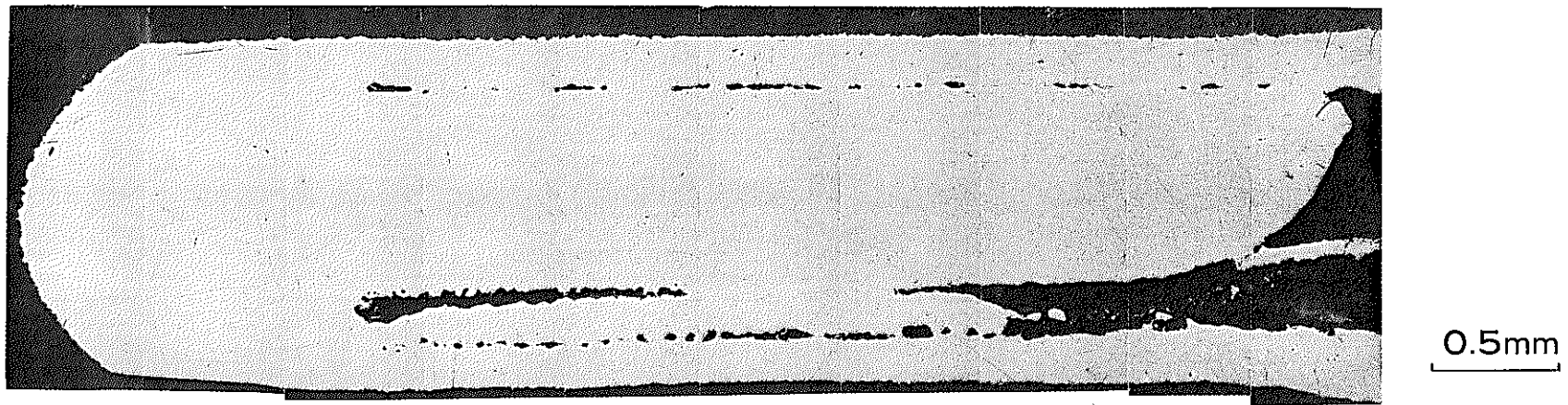
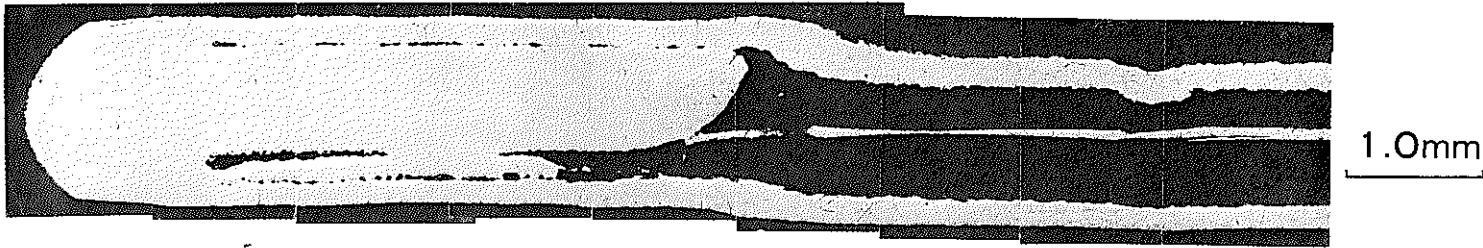
50 μm

E03A506

Etched

Photo. O-9 試料No.A51822の高倍写真(Etched)

“JOYO” MK-II PFI010 Specimen NO.A51822

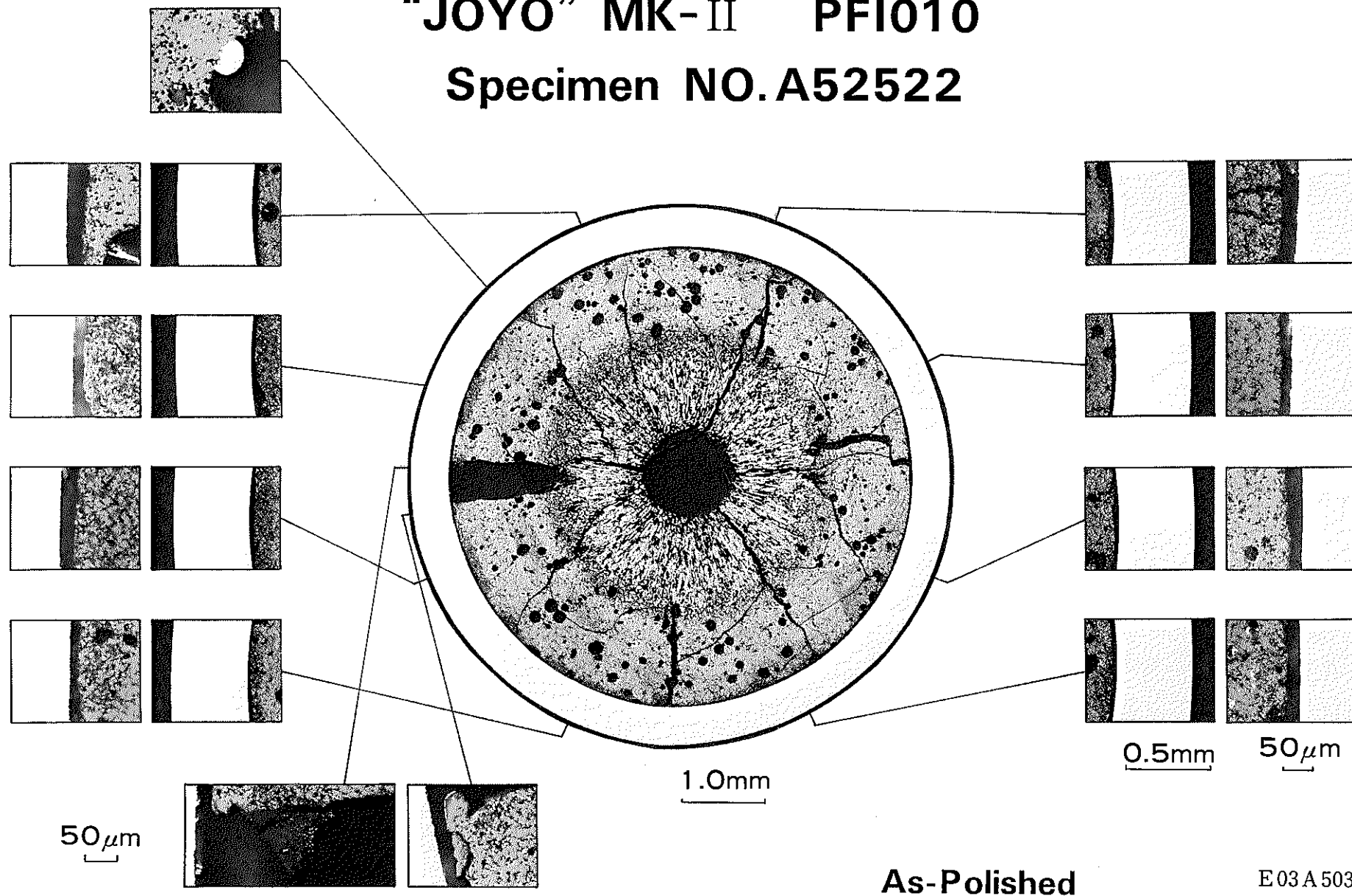


Etched

Photo. O-10 試料No.A51822 熱伝対の縦断面写真 (Etched)

“JOYO” MK-II PFI010
Specimen NO.A52522

- 54 -



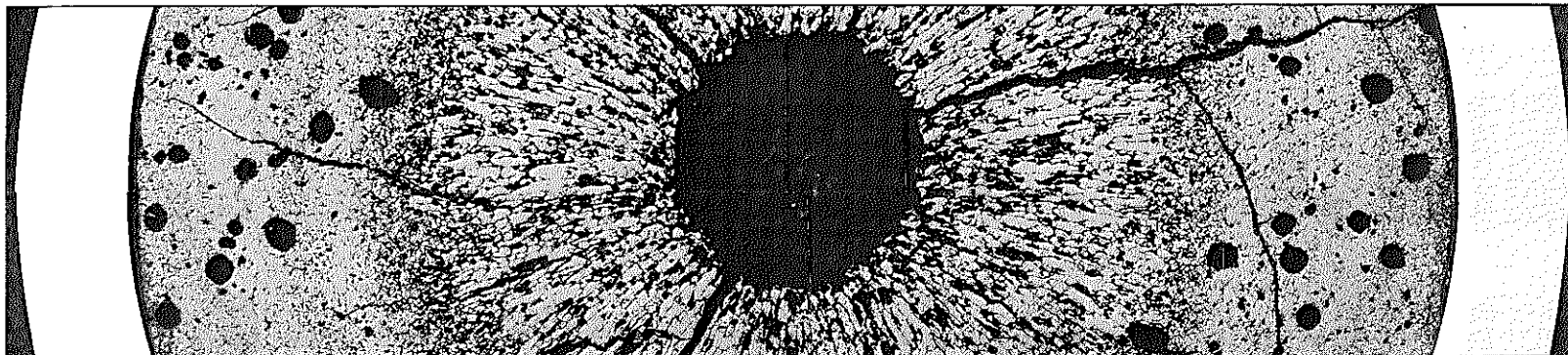
As-Polished

E03A503

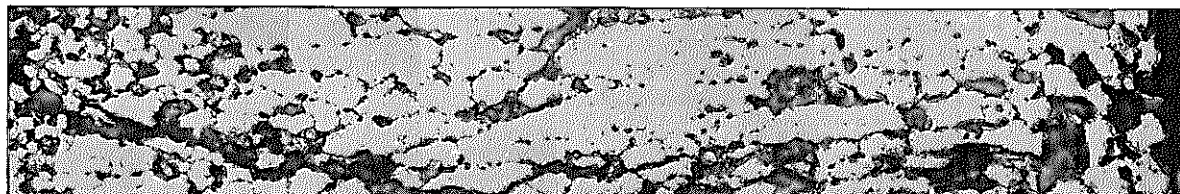
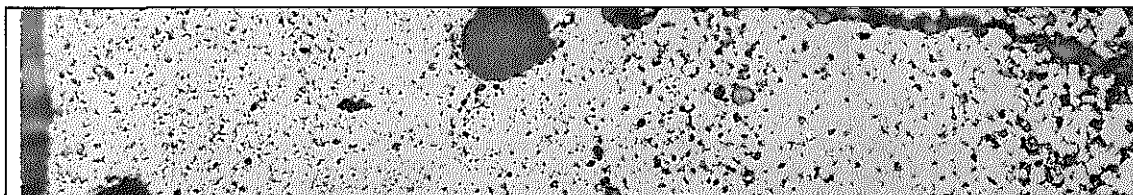
Photo. O - 1 1 試料No.A52522の横断面写真(As-Polished)

“JOYO” MK-II PFI010
Specimen NO.A52522

PNC-TN9410 89-188



0.5mm



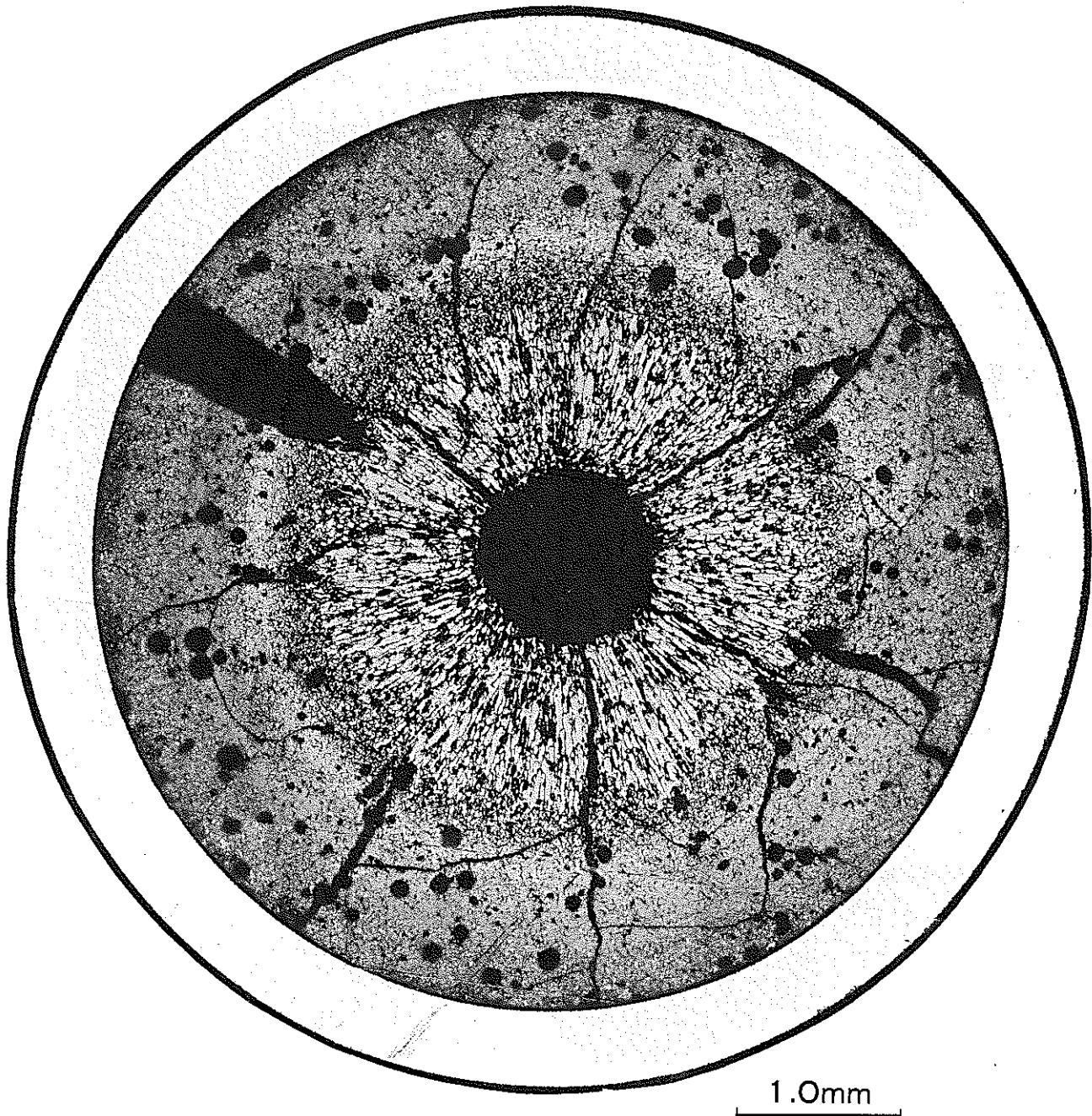
50μm

As-Polished

E03A504

Photo.O-12 試料No.A52522の高倍写真(As-Polished)

“JOYO” MK-II PFI010
Specimen NO. A52522



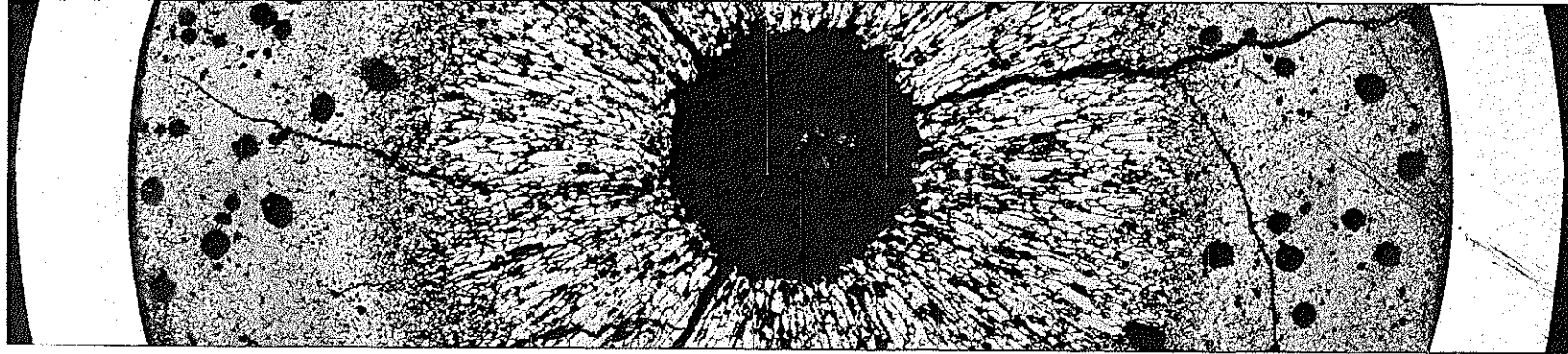
E03A507

Photo. O-13 試料No. A52522の横断面写真 (Etched)

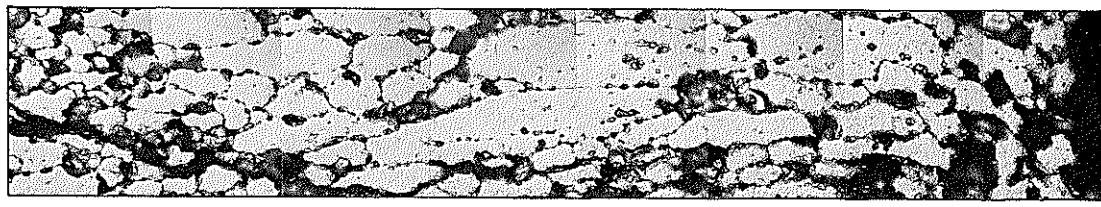
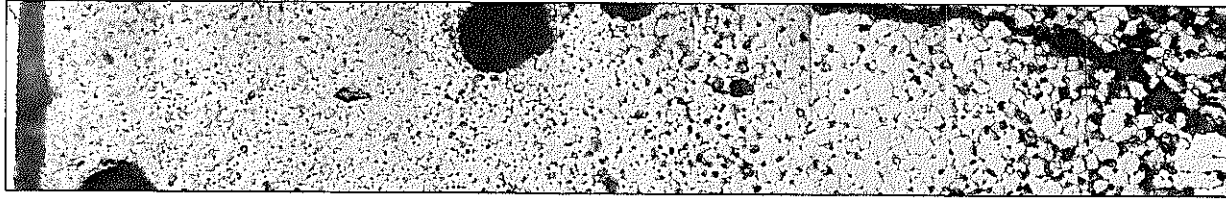
“JOYO” MK-II PFI010 Specimen NO.A52522



50 μ m



0.5mm



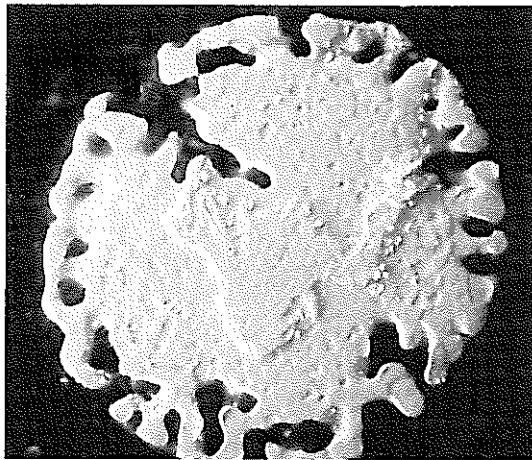
50 μ m

Photo.O-14 試料No.A52522の高倍写真(Etched)

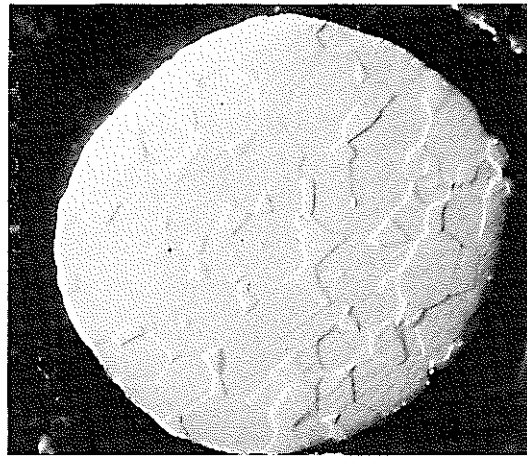
E03A508

(W-5Re素線)

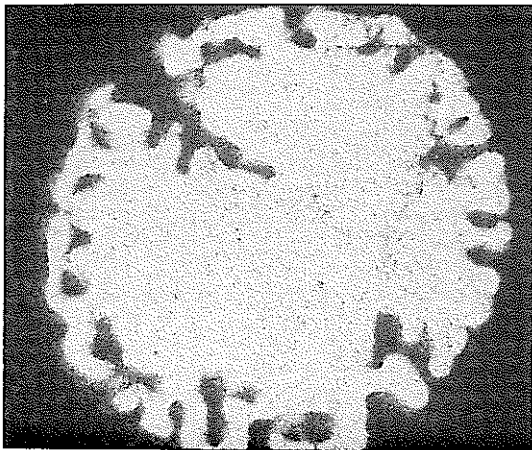
(W-26Re素線)



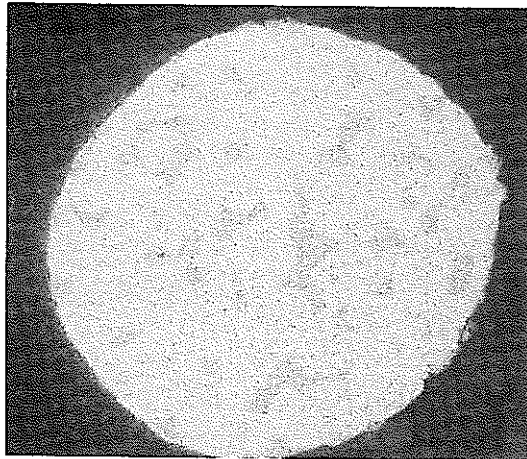
SEI



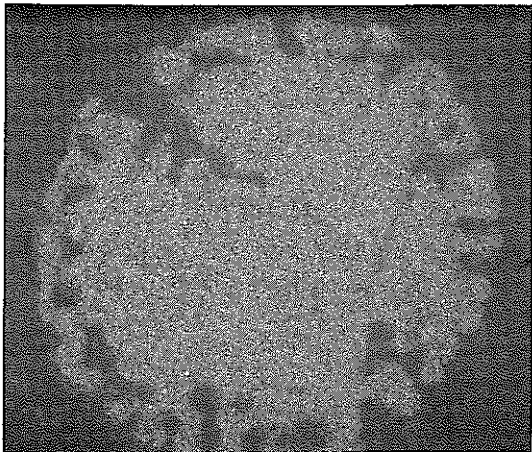
SEI



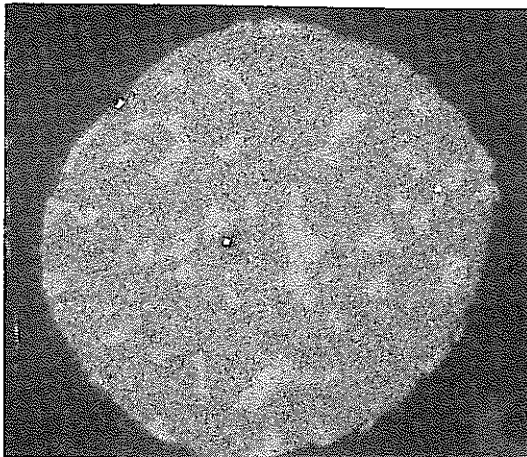
W



W



Re



Re

50 μm

50 μm

Photo.X-1 照射後の熱伝対素線の面分析結果