

JNC TN9400 2000-029



# 高速炉用混合酸化物燃料の溶融限界線出力評価

—「常陽」PTM-2試験に関する照射後試験技術開発と試験結果の評価 —

(研究報告)

1999年11月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1999

## 高速炉用混合酸化物燃料の溶融限界線出力評価

- 「常陽」 PTM-2 試験に関する照射後試験技術開発と試験結果の評価 -

(研究報告)

山本 一也\*, 櫛田 尚也\*\*, 小泉 敦裕\*

### 要　　旨

「常陽」における燃料溶融限界線出力試験（PTM：Power-To-Melt 試験）である PTM-2 試験に供せられた試験体 B5D-2 の試験燃料ピン 24 本について、燃料溶融限界線出力評価に資するために照射後燃料の試験方法を確立し、その試験結果の妥当性評価を実施した。本研究により、以下の結果が得られた。

- ・ 試験によって確認された B5D-2 の線出力ピーク部位における最大燃料溶融割合は 10.7% で、「常陽」 PTM 試験の最大燃料溶融割合制限値 20% の約半分であった。線出力ピーク部位以外の部位において最大の燃料溶融割合が認められ、11.8% に達していたが、これは溶融燃料が移動し、二次溶融が発生したものと考えられる。
- ・ PTM 試験評価において決め手となる燃料溶融境界の判定は、基本的に金相組織観察によつて可能であるが、金相組織だけでは判別の困難なケースでは、X 線マイクロアナライザーによる Pu 分布分析を組合せて評価することが非常に有効である。
- ・ 燃料溶融境界における線出力値に与える燃料ペレット密度の効果は過去の報告よりも大きいことが示唆されたが、燃料ペレット-被覆管ギャップや O/M 比の依存性については明確には認められなかった。さらに、被覆管内面温度の影響やタグガスの影響についても本試験では認められなかった。

---

\* : 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射燃料試験室

\*\* : 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射燃料集合体試験室

Power-to-melt evaluation of fresh mixed-oxide fast reactor fuel

- Technical improvements of the post-irradiation-experiment and the evaluation of the results  
for the power-to-melt test PTM-2 in “JOYO” —

Kazuya Yamamoto\*, Naoya Kushida\*\*, Atsuhiro Koizumi\*

ABSTRACT

The second Power-To-Melt (PTM) test, PTM-2, was performed in the experimental fast reactor “JOYO”. All of the twenty-four fuel pins of the irradiation vehicle, B5D-2, for the PTM-2 test, were provided for post-irradiation-experiment (PIE) to evaluate the PTM values. In this study, the PIE technique for PTM test was established and the PTM results were evaluated. The findings are as follows:

- The maximum fuel-melting ratio on the transverse section was 10.7%, and was within the limit of fuel-melting in this PTM test enough. Unexpected fuel-melting amount to a ratio of 11.8% was found at ~24 mm below the peak power elevation in a test fuel pin. It is possible that this arose from secondary fuel-melting.
- Combination of metallographical observation with X-ray microanalysis of plutonium distribution was very effective for the identification of once-molten fuel zone.
- The PTM evaluation suggested that dependence of the PTM on the fuel pellet density was stronger than that of previous foreign PTM tests, while the dependence on the pellet-cladding gap and the oxygen-to-metal ratio was indistinctly. The dependence on the cladding temperature and the fill gas composition was not shown as well.

---

\* O-arai Engineering Center, Fuels and Materials Division, Alpha-Gamma Section  
\*\* O-arai Engineering Center, Fuels and Materials Division, Fuels Monitoring Section

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. PTM-2 照射試験概要 .....	2
2.1 照射リグ構造 .....	2
2.2 試験パラメータ .....	2
2.3 照射試験 .....	3
3. 照射後試験方法 .....	13
3.1 燃料溶融割合に関する試験 .....	13
3.2 軸方向燃料溶融範囲に関する試験 .....	13
4. 照射後試験結果及び評価 .....	18
4.1 横断面金相観察と既溶融燃料組織の判定 .....	18
4.2 燃料溶融割合の評価 .....	22
4.3 軸方向燃料溶融範囲の評価 .....	24
4.3.1 縦断面金相観察結果と溶融燃料の移動に関する考察 .....	24
4.3.2 軸方向燃料溶融境界位置の評価方法 .....	26
4.3.3 軸方向燃料溶融範囲の評価結果と不確かさ .....	27
4.3.4 燃料溶融境界位置の試験結果に関する妥当性の確認 .....	34
5. まとめ .....	81
6. 謝辞 .....	82
7. 参考文献 .....	83
付録 B5D-2 燃料ペレットの製造時データ .....	84

## 表リスト

表 2.1 B5D-2 燃料ピン主要仕様	4
表 2.2 B5D-2 の試験パラメータに係る燃料ピン製造仕様	5
表 2.3 B5D-2 の試験燃料ピンと製造パラメータ	6
表 2.4 B5D-2 の試験要素用被覆管の内径評価結果	7
表 2.5 B5D-2 に装荷されたタグガスカプセル	8
表 4.1 B5D-2 試験燃料ピンの燃料溶融割合評価結果	38
表 4.2 660W/cm 到達時の燃料溶融割合予測値と照射後試験結果	40
表 4.3 B5D-2 における燃料溶融軸方向範囲の評価結果	41
表 4.4 B5D-2 における燃料溶融境界線出力	43
表 4.5 国内外の PTM 試験の原子炉出力 60%から 100%に到達するまでの時間	44

## 図リスト

図 2.1 B5D-2 照射リグ構造	9
図 2.2 B5D-2 の燃料ピン配置	10
図 2.3 B5D-1, B5D-2 照射原子炉出力履歴	11
図 2.4 PTM 試験の出力上昇パターンの比較	12
 図 3.1 照射後試験による PTM 値評価の方法	16
 図 4.1 B5D-2 の金相試料採取位置	45
図 4.2 粗粒化した組織付近の Pu 分布の例 (試料 No. G82142)	48
図 4.3 デンドライト組織の Pu 分布 (試料 No. G80922)	49
図 4.4 燃料溶融のない試料の中心空孔周辺 Pu 分布 (試料 No. G801323)	50
図 4.5 試料 G80852 の径方向 Pu 分布	51
図 4.6 試料 G81352 の中心空孔付近の Pu 分布	52
図 4.7 試料 G82252 の中心空孔周辺の Pu 分布	53
図 4.8 典型的な溶融燃料の軸方向移動の形態	54
図 4.9 溶融燃料が完全に落下したケースにおける Pu 分布 (ピン上部側: 試料 No. G804312)	55
図 4.10 試料 No. G823321 のプラギング下端付近の Pu 分布	56
図 4.11 燃料軸方向の燃料溶融発生範囲の判定	57
図 4.12 溶融燃料がプラギングを形成したケースにおける燃料溶融境界の判定方法 (ピン下部側: 試料 No. G823321 の例)	58
図 4.13 燃料溶融限界線出力値の評価プロセス	59
図 4.14 隣り合う燃料ペレットの密度の差異によって中心空孔径が変化したと考えられる例 (Etched: 試料 No. G814341)	60
図 4.15 中心空孔の偏心と金相観察面のずれによって燃料溶融範囲を確定できない例 (Etched: 試料 No. G80833)	61
図 4.16 切断代に燃料溶融の境界があると考えられる例 (Etched: 試料 No. G80763, G807711, G80773)	62
図 4.17 G809 ピン上部側のプラギング上端付近の縦断面金相組織 (Etched: 試料 No. G809322)	63
図 4.18 燃料溶融境界位置を確認できなかった例 (G822 ピンの X 線ラジオグラフィー及び金相組織: 試料 No. G82233, G82235)	64
図 4.19 B5D-2 における燃料溶融境界線出力と燃料パラメータの関係	65

図 4.20 DEA-2 試験における燃料溶融境界線出力の O/M 比効果に対するギャップ依存性	66
図 4.21 燃料溶融境界線出力の燃料ピン上下位置の影響	67
図 4.22 燃料溶融境界線出力に対するタグガスの影響	68

## 写真リスト

写真 3.1 B5D-2 に用いた改良試料ホルダー	17
写真 4.1 As-Polished の横断面金相組織の例(試料 No. G80922)	69
写真 4.2 腐食後の横断面金相組織の例(試料 No. G80922)	70
写真 4.3 既溶融燃料の境界近傍の金相組織(試料 No. G80922)	71
写真 4.4 G808 ピンのピーク線出力位置における 横断面金相組織(Etched: 試料 No. G80852)	72
写真 4.5 G808 ピンの中心空孔径拡大部の 横断面金相組織(Etched: 試料 No. G80854)	73
写真 4.6 溶融燃料が完全に落下したケースの縦断面金相組織の例 (Etched: 試料 No. G804312)	74
写真 4.7 ピン上部側でプラギングを形成したケースの縦断面金相組織の例(1) (Etched: 試料 No. G814621)	75
写真 4.8 ピン上部側でプラギングを形成したケースの縦断面金相組織の例(2) (Etched: 試料 No. G82263, G82265)	76
写真 4.9 ピン下部側でプラギングを形成したケースの縦断面金相組織の例 (Etched: 試料 No. G823321)	77
写真 4.10 ピン下部側のプラギング下端付近の金相組織例 (Etched: 試料 No. G823321)	78
写真 4.11 中心空孔径が大きく変化して燃料溶融範囲を確定できない例 (Etched: 試料 No. G802122)	79
写真 4.12 燃料ペレットのクラック等により燃料溶融範囲に不確かさを生じている例 (Etched: 試料 No. G806621)	80

## 1. はじめに

高速炉燃料の設計において、制御棒誤引抜きのような反応度投入型事象時に対する燃料ピンの健全性判断基準は「燃料中心温度が融点未満であること」としている。従って、燃料中心温度の評価手法について、その妥当性を示すための検証データが必要である。このような検証データの取得方法としては、計測線付き燃料照射試験のように炉内の燃料温度を直接計測する方法があるが、計測線に関する技術的な制約等から、反応度投入型事象に相当するような高線出力では照射試験が非常に困難である。これに対して、実際に炉内において燃料溶融が発生するような線出力で照射し、照射後試験によって燃料ピン軸方向の燃料溶融発生範囲を調べ、燃料溶融発生の限界線出力を評価する方法がより確実な方法である。このような照射試験が燃料溶融限界線出力試験(PTM:Power-To-Melt 試験)であり、米国の EBR-II 炉や FFTF 炉等に先例がある<sup>1), 2), 3)</sup>。

「常陽」における PTM 試験は、予備試験的な PTM-1 試験(1991 年 6 月照射実施)と本試験である PTM-2 試験(1992 年 6 月照射実施)の 2 段階で実施した<sup>13), 14)</sup>。すなわち、PTM-1 試験(試験体名 B5D-1)では、燃料ペレット密度と燃料ペレット-被覆管ギャップだけをパラメータとした 3 種類の試験燃料ピン(試験用要素)4 本で構成し、その内温度が厳しくなるパラメータの組合せを持った燃料ピンで確実に燃料溶融が発生することを目的として照射している。それに対して PTM-2 試験(試験体名 B5D-2)では、燃料ペレット密度と燃料ペレット-被覆管ギャップ、O/M 比、タグガスの有無をパラメータとし、8 種類 24 本の試験燃料ピンで構成し、全燃料ピンで燃料溶融発生を目指して、PTM-1 試験の照射後試験結果から燃料中心温度計算法を確認・校正した上で、プラント条件、照射条件を決定した。

本研究は、この PTM-2 試験に供せられた試験体 B5D-2 の試験燃料ピン 24 本について、照射後燃料の金相試験と機器分析を組み合わせた試験方法を確立し、その試験結果の評価を行ったものである。

## 2. PTM-2 照射試験概要

### 2.1 照射リグ構造

本 PTM-2 試験に供した試験体 B5D-2 は「常陽」の B 型特殊燃料集合体であり、照射リグ内に 6 個のコンパートメントを有しており、各コンパートメントには 4 本づつ試験燃料ピンが収納されている。図 2.1 に本試験体 B5D-2 の照射リグ構造の模式図を示す<sup>13)</sup>。

後述するように、試験燃料ピンは燃料仕様を試験パラメータとして 8 種類 24 本である。図 2.2 に試験燃料ピン 24 本の照射リグ内配置を示す。試験燃料ピンの番号には、製造時に付けられた燃料ピン番号と照射後試験において照射リグ内の配置に基づいて付けた PIE 番号の 2 種類がある。本報告書では、照射後試験を中心に述べるので、特に断らないかぎり PIE 番号を使用する。

リグ中心には軸心管が設置されているが、B5D-2 では、この軸心管内にドジメータカプセル 3 個を装填したフランクスモニタ管が収納されており、照射後に集合体中心の中性子フランクスを評価し、線出力値の校正に用いられた。また、各コンパートメントの上部キャップには TED 温度モニタ管が収納され、各コンパートメント出口冷却材温度を測定し、被覆管温度計算値の補正に用いられた。

### 2.2 試験パラメータ

本試験は、高速実証炉燃料を想定した PTM 試験である。そのため、Pu 富化度を 20wt%，20%冷間加工 PNC1520 被覆管 (7.5mm φ)<sup>4)</sup>，高密度ペレット (90%TD.以上) を基本的な仕様としている。表 2.1 に本試験の試験体 B5D-2 の燃料ピンの主要仕様を示す。本試験体では試験パラメータとして、燃料ペレット密度と燃料ペレット-被覆管ギャップ、O/M 比、タゲガスの有無を設定し 8 種類 24 本の燃料ピンで構成されている。表 2.2 に試験パラメータに係る試験燃料ピンの製造仕様を、表 2.3 に製造実績としての試験パラメータを示す。Pu 富化度は試験パラメータとはしていないが、燃料の物性や照射挙動に重要な量であることから、表 2.3 に製造実績値を示した。なお、同表において燃料ペレット-被覆管ギャップは、ピン内に充填された燃料ペレットの平均外径と、被覆管平均内径値から計算した値である。被覆管平均内径は、燃料ピン製造時に超音波により測定されたチャートから、被覆管全長の任意の 15 点について読み取った値を平均して得た。表 2.4 にこの被覆管平均内径の評価結果を示す。

試験燃料ピン間の Pu 富化度の製造実績は、19.37wt%から 19.50wt%の範囲にあり、燃料中心温度を決定する燃料融点等の物性値の観点からは同一と見なすことができる。

燃料ペレット密度については、燃料ピン平均では 91%TD.のグループと 95%TD.のグループの 2 つに別れ、91%TD.のグループでは平均 91.3%TD., 95%TD.のグループでは平均 94.6%TD.であるが、両者の分散は、91%TD.のグループでは  $1\sigma=0.72\%$ TD., 95%TD.のグループでは  $1\sigma=0.29\%$ TD.と大きな違いがある。そのため、燃料ペレット個々で見ると、91%TD.のグループでは最大と最小で同一ピン内に 2.7~3.5% の密度の差異があり、95%TD.のグループではこれは 1.8~1.7% に留まっている。これらのペレット密度の差異は製造公差内ではあるが、91%TD.のグループでは隣り合う燃料ペレットの密度が 2% 以上違っているケースがある。

被覆管内径の変化は、 $1\sigma$  で最大  $1.3 \mu\text{m}$  であり、最大値と最小値の差でも平均で約  $3 \mu\text{m}$ 、最大で約  $5 \mu\text{m}$  である。一方、燃料ペレット外径の変化は、2 つの密度グループ間で明確な違い

はなく、最大値と最小値の差は平均で約  $8 \mu\text{m}$ 、最大で約  $15 \mu\text{m}$  である。

O/M 比は、製造上の制約から、表 2.3 に示すように、91%TD のグループでは 1.96 と 1.98、95%TD のグループでは 1.97 のみの設定となった。

タグガスは、G801, G812, G812（すなわち B5213, B5214, B5218 ピン）の 3 本の燃料ピンに装填されている。これらの燃料ピンに装填されたタグガスのガス量とガス組成を表 2.5 に示す。

### 2.3 照射試験

本試験は、平成 4 年 6 月 17 日に実施された。後述するように、燃料熱設計上保守的な PTM 値を求めるため、燃料組織変化が十分進行しない段階で燃料溶融を発生させる出力上昇パターンを設定し、また本試験より約 1 年前に先行して実施された PTM-1 試験の経験を踏まえ、原子炉の運転パターンは、出力上昇時に熱出力校正を行なう中間出力保持を約 50% 炉出力とし、出力降下方法を手動スクラムとした<sup>13)</sup>。100% 炉出力の保持時間は、Baker らや McCarthy らが報告している EBR-II の PTM 試験<sup>1), 2)</sup>、Ethridge らが報告している FFTF の DEA-2 試験<sup>3)</sup>等、海外で実施された PTM 試験と同様、10 分とした。図 2.3 に本試験と PTM-1 試験の両照射試験の原子炉出力履歴を比較して示す。

本試験と海外の PTM 試験との大きな違いは、中間保持出力であり、EBR-II の PTM 試験では炉出力の 90% 付近で 1 時間ほど保持し、FFTF の DEA-2 試験では階段状に 100% 炉出力まで上昇させているのに対して、本試験では炉出力の 50% 付近で保持し、その後直線的に 100% 炉出力まで上昇させているところに特徴がある。図 2.4 に海外で実施された過去の PTM 試験と PTM-1, -2 両照射試験の出力上昇パターンの比較を示す。

また、PTM-1 試験の場合は、出力降下時に約 65% 出力、約 1 時間の中間出力保持状態を設けたことによって、一度燃料溶融した組織が変化し、結果として照射後試験において燃料溶融の発生範囲を判別することが難しくなったが、本試験ではこれを避けるために、手動スクラムによる出力降下を採用し、原子炉出力は約 20 秒でほぼ 0 出力となり、冷却材出口温度は約 8 分で定常的な温度まで低下させることができた。

表2.1 B5D-2燃料ピン主要仕様

項 目	仕 様
1. 燃料ペレット (1) 材質 (2) Pu富化度 (W/O) (3) ウラン濃縮度 (W/O) (4) ペレット形状 (5) ペレット外径 (mm) (6) ペレット高さ (mm) (7) ペレット密度 (%TD.) (8) O/M比 (9) 燃料スタック長さ (mm)	U・Pu混合酸化物 $20 \pm 1$ 21 中実／フラットエンド $6.44, 6.49, 6.54 \pm 0.05$ $9 \pm 1$ $92, 95 \pm 2$ $1.94, 1.97 +0.02, -0.03$ $550 \pm 5$
2. インシュレータペレット (1) 材質 (2) ウラン235含有率 (W/O) (3) ペレット形状 (4) ペレット外径 (mm) (5) ペレット高さ (mm) (6) ペレット密度 (%TD.) (7) O/U比 (8) 上下インシュレータ部長さ (mm)	劣化ウラン酸化物 $0.2 \pm 0.1$ 中実／フラットエンド $6.49 \pm 0.05$ $12 \pm 1$ $95 \pm 2$ $2.00 \sim 2.02$ $12 \pm 1$
3. 被覆管 (1) 材質 (2) 外径 (mm) (3) 肉厚 (mm) (4) 燃料-被覆管ギャップ ( $\mu m$ )	PNC1520 (61AK) $7.5 \pm 0.035$ $0.400 \pm 0.030$ $160, 210, 260$
4. 燃料ピン (1) 形式 (2) 全長 (mm) (3) スペーサーウイヤ材質 (4) スペーサーウイヤ径 (mm) (5) ワイヤ巻付ピッチ (mm) (6) 端栓材質 (7) 反射体材質 (8) プレナムスプリング材質 (9) プレナムスリーブ材質 (10) プレナム部長さ (mm) (11) 充填ガス	上部プレナム $1698 \pm 2$ PNC1520 $1.3 \pm 0.01$ $203 \pm 20$ PNC1520 高Niオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304WPB 高Niオーステナイト系ステンレス鋼 $865 \pm 15$ Heガス : $1 \text{ kgf/cm}^2$

表2.2 B5D-2の試験パラメータに係る燃料ピン製造仕様

仕様番号	ペレット密度 (%TD)	ペレット-被覆管 直徑ギャップ(μm)	O/M比	タグガス	B5D-1における 燃料ピン数	B5D-2における 燃料ピン数
燃料ピン(1)	92	210	1.97		1本	4本
燃料ピン(2)	92	260	1.97		2本	
燃料ピン(3)	95	260	1.97		1本	3本
燃料ピン(4)	92	160	1.97			5本
燃料ピン(5)	95	210	1.97			3本
燃料ピン(6)	92	210	1.94			3本
燃料ピン(7)	92	160	1.94			3本
燃料ピン(8)	92	160	1.97	○		2本
燃料ピン(9)	95	210	1.97	○		1本

表2.3 B5D-2の試験燃料ピンと製造パラメータ

ピン番号	PIE番号	ペレット ロット番号	Pu富化度 (wt%)	ペレット密度 (%TD)*	直径ギャップ幅 (μm)*	O/M比	タグガス
B5201	G822	B5D-201	19.50	91.2	187	1.98	
B5202	G820			91.3	188		
B5203	G818			91.2	186		
B5204	G804			91.3	189		
B5205	G823	B5D-205	19.37	95.2	244	1.97	
B5206	G815			95.3	245		
B5207	G819			95.1	246		
B5208	G802	B5D-202	19.50	91.4	133	1.98	
B5209	G805			91.3	137		
B5210	G807			91.4	137		
B5211	G814			91.2	132		
B5212	G824			91.4	133		
B5213	G813	B5D-202	19.50	91.5	136	1.98	○
B5214	G801			91.4	139		○
B5215	G803	B5D-206	19.37	95.0	187	1.97	
B5216	G810			95.0	188		
B5217	G806			94.9	188		
B5218	G812	B5D-206	19.37	94.8	186	1.97	○
B5219	G821	B5D-203	19.46	91.3	197	1.96	
B5220	G816			91.6	199		
B5221	G817			91.5	202		
B5222	G808	B5D-204	19.46	91.3	139	1.96	
B5223	G809			91.2	139		
B5224	G811			91.4	139		

\* ピン装荷ペレットの平均値

表2.4 B5D-2試験要素用被覆管の内径評価結果

ピン番号	PIE番号	被覆管番号	平均* (mm)	分散** (mm)
B5214	G801	AK1109	6.697	0.0006
B5208	G802	AK1103	6.702	0.0006
B5215	G803	AK1117	6.698	0.0007
B5204	G804	AK1102	6.700	0.0011
B5209	G805	AK1104	6.699	0.0010
B5217	G806	AK1119	6.697	0.0007
B5210	G807	AK1105	6.700	0.0013
B5222	G808	AK1121	6.700	0.0007
B5223	G809	AK1123	6.701	0.0005
B5216	G810	AK1118	6.697	0.0004
B5224	G811	AK1124	6.702	0.0007
B5218	G812	AK1120	6.699	0.0009
B5213	G813	AK1108	6.698	0.0007
B5211	G814	AK1106	6.705	0.0008
B5206	G815	AK1115	6.701	0.0007
B5220	G816	AK1111	6.696	0.0007
B5221	G817	AK1112	6.695	0.0005
B5203	G818	AK1100	6.702	0.0008
B5207	G819	AK1116	6.700	0.0006
B5202	G820	AK1098	6.698	0.0013
B5219	G821	AK1110	6.698	0.0008
B5201	G822	AK1097	6.701	0.0007
B5205	G823	AK1114	6.699	0.0006
B5212	G824	AK1107	6.702	0.0007
予備	—	AK1125	6.699	0.0007
予備	—	AK1126	6.701	0.0005
予備	—	AK1127	6.700	0.0007
予備	—	AK1128	6.700	0.0009
予備	—	AK1129	6.703	0.0008

\* 超音波測定によるチャートから、被覆管全長に渡り任意の15点において計測した結果の平均値

\*\* 分散は1σ

表2.5 B5D-2に装荷されたタグガスカプセル

ピン番号	PIE番号	カプセル番号	封入ガス量 (mg)	ガス組成(%) 及び同位体組成比					
				78Kr	80Kr	Kr同位体比	126Xe	129Xe	Xe同位体比
B5213	G813	860403	10.43	8.9	34.8	0.254	0.8	37.1	0.0208
B5214	G801	860402	10.30	8.9	34.8	0.254	0.8	37.1	0.0208
B5218	G812	860401	10.39	8.9	34.8	0.254	0.8	37.1	0.0208

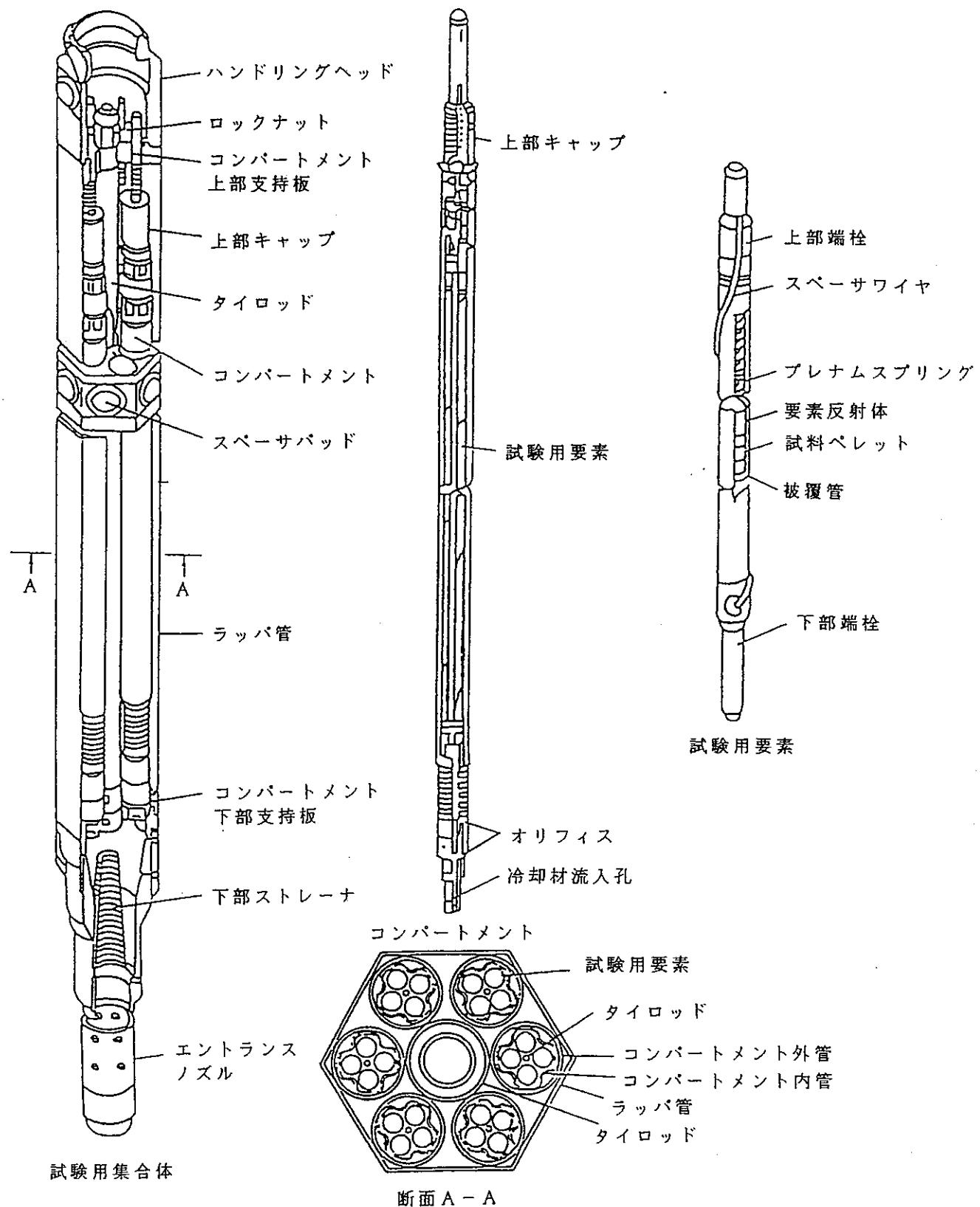
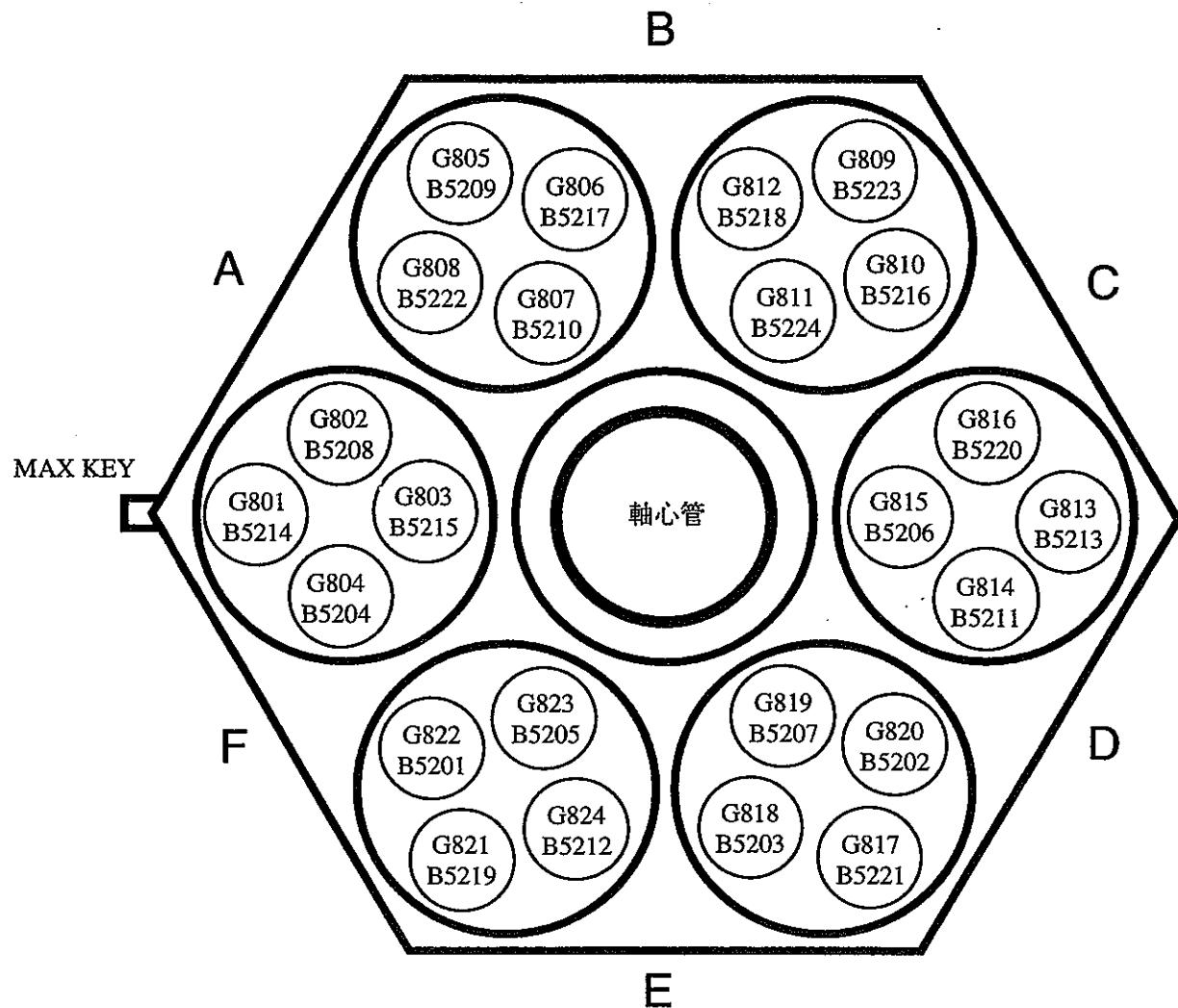


図 2.1 B5D-2 照射リグ構造



上段：PIE番号  
下段：燃料ピン（製造）番号

\*MAX KEYを左にリグの上部側から  
見た配置

図2.2 B5D-2の燃料ピン配置

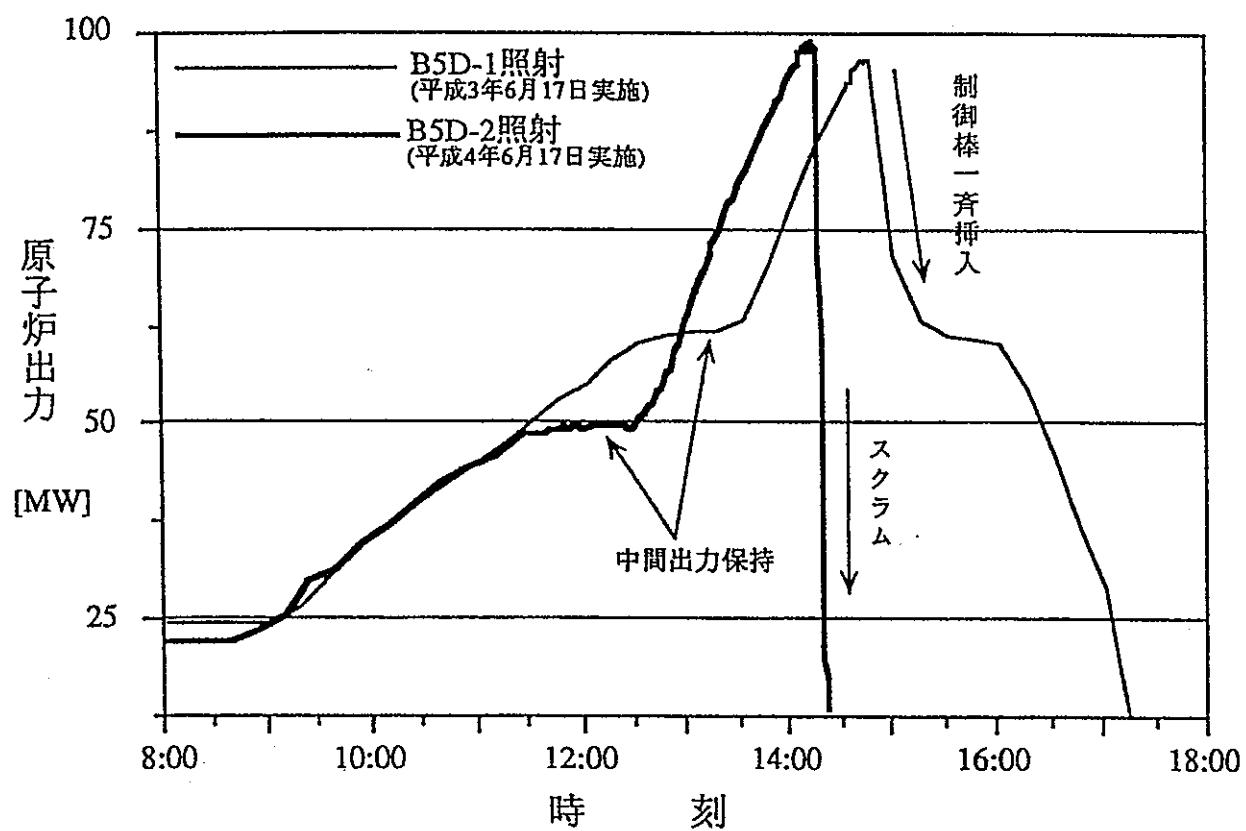


図 2.3 B5D-1, B5D-2 照射原子炉出力履歴

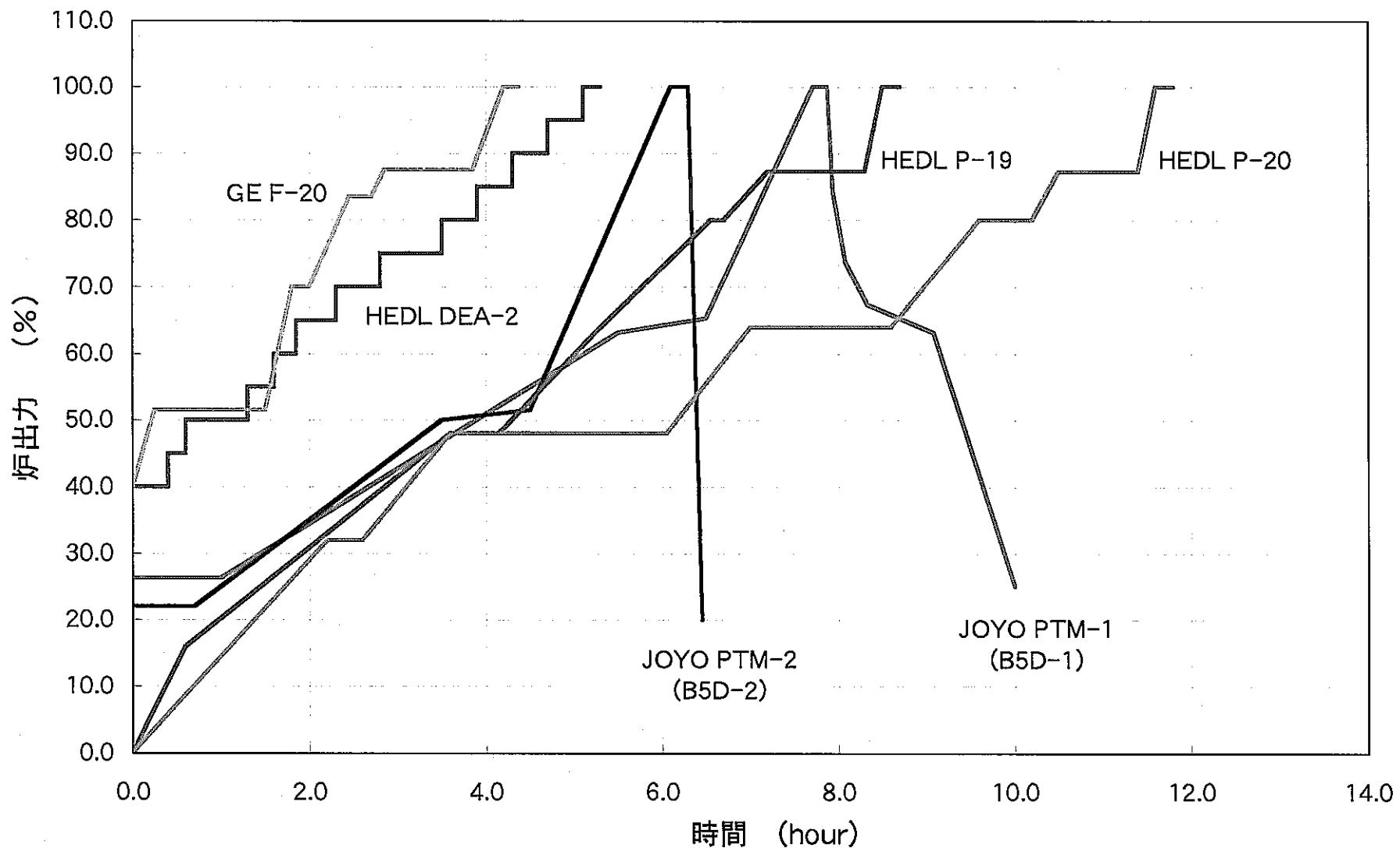


図2.4 PTM試験の出力上昇パターンの比較

### 3. 照射後試験方法

#### 3.1 燃料溶融割合に関する試験

本 PTM 試験は、最大燃料溶融割合 20%という制限で実施されている。ここで燃料溶融割合は、燃料ピンの横断面において、中心空孔を含む燃料溶融領域と燃料ペレットの面積比であり、燃料の固相線温度を超えた領域を溶融としている。この最大燃料溶融割合の制限は、燃料溶融に伴う燃料ペレットの膨張によって発生する被覆管の機械的破損を防止するために設定された燃料溶融割合 30%（被覆管歪の制限値 3%に相当する）に対して、過出力因子を考慮して設定されたものである。本研究でも、上記に合わせて、燃料溶融を燃料の固相線温度を超えた領域と定義する。

照射後試験は、まず燃料溶融割合を評価するため、光学顕微鏡によって一度溶融して凝固した燃料（ここでは「既溶融燃料」と呼ぶ）の組織観察を実施した。実施場所は、主に大洗工学センターの照射燃料集合体試験施設にある金相セルである。

試料は、燃料ピン軸方向中心近くの燃料温度が最も高くなると考えられる線出力ピーク部位から横断面試料を採取し、研磨の後、光学顕微鏡によって燃料組織の観察を行なった。観察倍率 50 倍で撮影した燃料断面の組写真から燃料横断面の 8 方位について燃料溶融領域と燃料ペレットの直径をそれぞれ計測し、燃料溶融割合を算出した。また、同時に柱状晶領域径及び残留ギャップの計測も 8 方位について実施した。組写真の構成によって生じる歪に対する補正は、光学顕微鏡に付属したデジタルスケーラーで被覆管外径を 2 方向について測定して行なった。なお、デジタルスケーラーはあらかじめ顕微鏡用基準スケール（精度  $\pm 1.0 \mu\text{m}$ ）によって顕微鏡倍率と同時に校正を行なっている。

燃料組織の観察は、研磨後 (As-Polished) の金相観察の後、いくつかの試料について化学腐食後 (Etched) の金相観察を行い、これを確認した。化学腐食は、研磨済の金相試料の研磨面を化学腐食液に浸漬して行った。使用した化学腐食液はコールド試験ならびに実際の燃料試料で試験を実施して選定した。硫酸系あるいは少量のフッ酸を含む腐食液は被覆管も腐食させてしまうため適さず、また強すぎる腐食液は腐食量のコントロールが困難であった。最終的に選定した腐食液は比較的弱い、以下の混合液である。



また、化学腐食においては温度が非常に重要である。この腐食液の場合、セル内温度が 24 ~ 25°C (液温で 20°C 程度と予想される) が良い結果となった。冬季、セル内温度が 20°C 以下となるような場合、この腐食液では十分に腐食が進行しなかった。

#### 3.2 軸方向燃料溶融範囲に関する試験

PTM 試験によって燃料溶融限界線出力値 (PTM 値) を評価するアイデアは、原子炉内にお

いて燃料ピン軸方向線出力分布がピーキングを持つことをを利用して、燃料溶融が、線出力密度がピークとなる中央付近の限られた領域で発生するよう照射時の出力を調整し、照射後試験によって燃料溶融のピン軸方向範囲を求め、その軸方向の燃料溶融境界位置に対応した局所線出力値が PTM 値であるということに基づいている。燃料ピン径方向の燃料溶融範囲から PTM 値を評価することも不可能ではないが、燃料ピン径方向の正確な燃料温度分布が必要となるため、不確かさが非常に大きく、このピン軸方向の燃料溶融範囲を用いる方法が一般的に利用されている<sup>1),3)</sup>。

ここで、燃料溶融境界位置に対応した局所線出力値は、照射後試験の中で PTM 値と称されるので、(上述のように) 燃料溶融限界線出力値と呼ばれることが多いが、燃料設計では照射後試験で評価された燃料溶融境界位置の線出力に対して不確かさを見込んで設定したものと燃料溶融限界線出力 (PTM) としているので混同されやすい。本研究では、照射後試験の慣例に従って“燃料溶融境界線出力”を PTM としている。

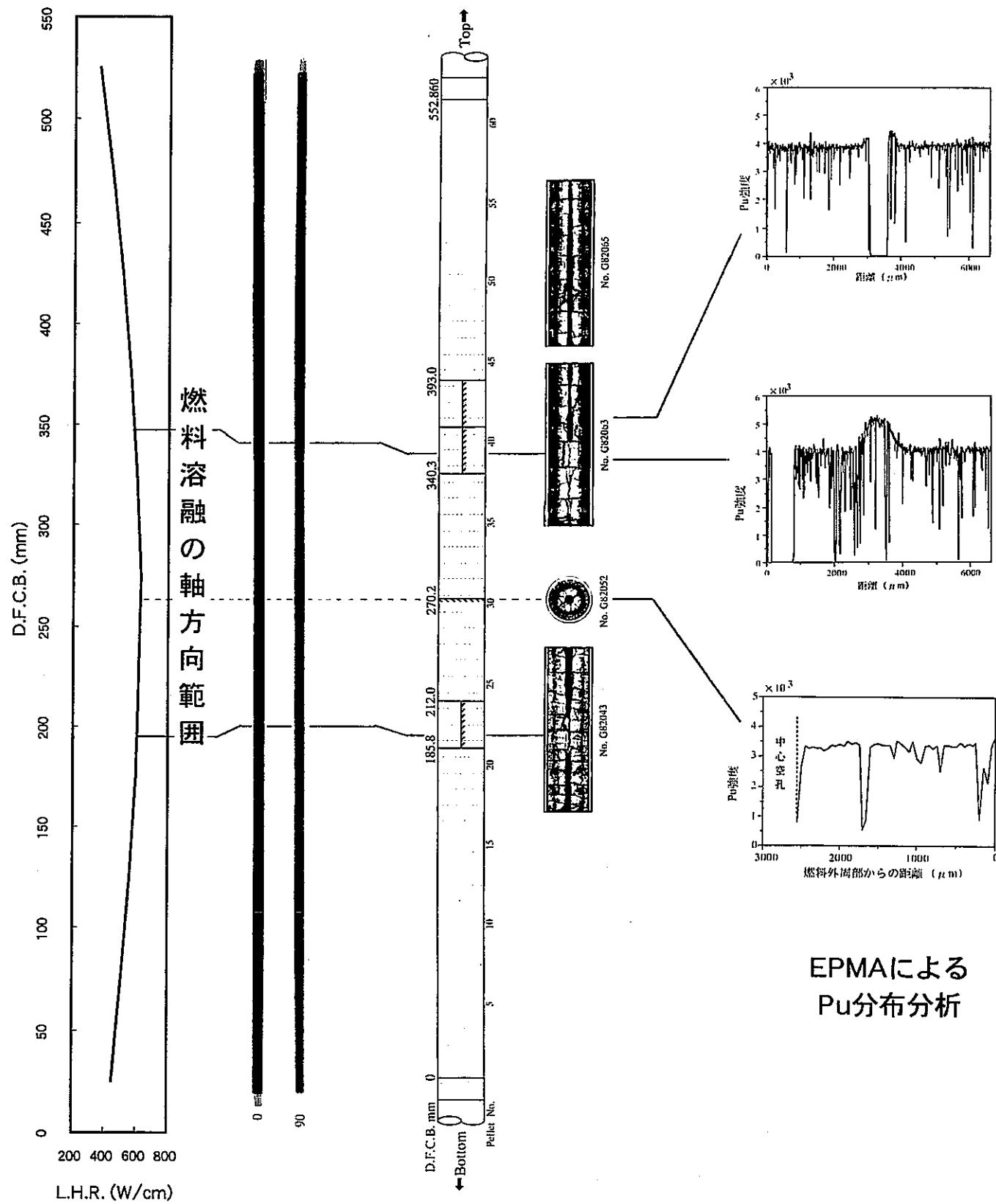
燃料ピン軸方向の燃料溶融発生範囲を正確に評価する試験技術上の課題は、①金相観察の試料を切断・採取する位置を決めるため非破壊試験で軸方向の燃料溶融範囲を大まかに推定すること、②既溶融燃料と未溶融燃料を判別すること、③既溶融燃料の存在範囲を基に炉内において最初に発生した燃料溶融の範囲（軸方向境界の位置）を推定評価することである。そこで本研究では、照射後の燃料ピンの X 線ラジオグラフィーから、燃料中心に形成されている中心空孔の変化に着目して燃料ピン軸方向の燃料溶融の範囲を推定した。次に、その近傍の燃料を切断、縦断面の金相試料を作製し、前述の燃料溶融割合に関する試験と同様に燃料の金相組織観察から既溶融燃料を判別した。採取した試料中に既溶融燃料組織の境界が確認できない場合は、さらにその上部あるいは下部から試料採取して確認した。観察倍率は 30 倍を基本とし、必要に応じてさらに高倍率での詳細観察を行い確認した。燃料溶融の発生範囲は、次章に述べるように、既溶融燃料の形状と範囲を基にして評価した。図 3.1 にこの照射後試験による PTM 値評価の方法を模式図で示した。

縦断面金相試料の作製については、観察範囲が短いと既溶融燃料組織と未溶融燃料組織の境界の判定が難しくなること、また試料を水平に切断・研磨する必要があることから、本研究では、試料長 26mm を可能とし、さらに試料の切断・研磨時に完全な縦断面の水平を出せるよう試料保持部に V 溝を有する試料ホルダを用意した。その後、試料長が長くなったことによって研磨ダレが発生し、試料の両端部が暗くなることが判明し、これを防止するため、試料ホルダ外周部にダレ防止リングを有する構造に改良した。また、縦断面金相観察後、任意の位置で横断面の金相観察等を行なうため、V 溝と試料保持壁を有する試料保持部を試料ホルダ本体から取り外しできる構造に変更した。この改良試料ホルダーを写真 3.1 に示す。

次に、燃焼度が小さくマイクロクラック等がほとんどない燃料試料は樹脂が浸透しにくく、

研磨面の傷、欠け落ち、試料の剥離が多く発生することから、粘性の低い新しい樹脂（リファインテック製低粘性エポキシ樹脂）を採用した。この低粘性樹脂により燃料の欠け落ちは非常に改善されたが、化学腐食すると縦断面試料では被覆管から燃料ペレット全体が剥離しやすくなることが判り、試料がいくつか損傷した。従って、この試料の剥離については今後解決すべき課題として残った。

縦断面金相試料の試料調製方法は、上述の改良試料ホルダーと低粘性樹脂の使用を除けば、前節で述べた横断面金相観察と全く同じである。ただし、この縦断面金相観察では、横断面金相の場合と比較してさらに溶融、未溶融の区別が困難であり、全試料について化学腐食を行ない、腐食後の金相観察で既溶融燃料組織を確認した。



線出力分布

X線ラジオ  
グラフィー金相組織  
の観察

図 3.1 照射後試験による PTM 値評価の方法

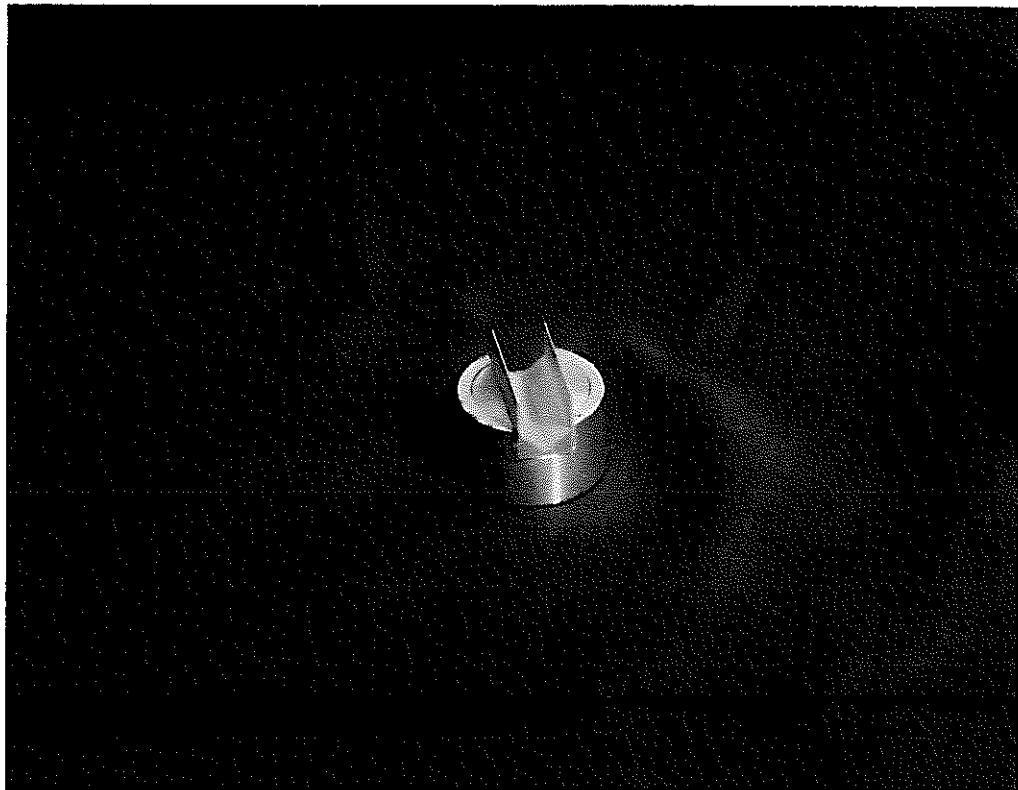


写真 3.1 B5D-2 に用いた改良試料ホルダー

#### 4. 照射後試験結果及び評価

##### 4.1 横断面金相観察と既溶融燃料組織の判定

図 4.1 に本研究で採取した、横断面及び縦断面金相試料の試料採取位置を示す。

燃料溶融割合を評価するため、線出力ピーク部位から横断面試料を採取し、光学顕微鏡による金相組織観察を行なった。研磨後 (As-Polished) の横断面試料の金相組織の例（試料番号 G80922）を写真 4.1 に示す。この例の場合、通常燃料中心に形成されている中心空孔が、ポアや小さなボイドが消失して、白く光った均一な組織（ポアフリー組織）によって完全に埋められているように見える。米国の Ethridge と Baker は、これをプラギング (plugging) と呼び、溶融した燃料が中心空孔内で凝固したものと考えている<sup>3)</sup>。本研究では、ポアフリー組織が一度溶融して（すなわち温度が固相線を超えて）再び凝固した燃料（ここでは「既溶融燃料」と呼ぶ）の組織であることを確認しておく必要があると判断したこと、As-Polished の金相面では試料によってポアフリー組織の境界を判別することが困難なものがあることから、いくつかの試料について化学腐食後 (Etched) の金相観察を行った。上述の写真 4.1 と同じ横断面試料の Etched の金相組織を例として写真 4.2 に示す。また、写真 4.3 には、同試料の既溶融燃料境界近傍と考えられる部位の高倍率金相写真を、As-Polished と Etched を比較して示す。As-Polished では白く均一なポアフリー組織として見えたプラギング部が、一度溶融したことを示す典型的な組織、いわゆる柱状組織あるいはデンドライト組織<sup>5)</sup>と、その周りを囲む結晶粒が著しく粗大化した組織の 2 領域からなることが分かる。ここでは前者を簡単にデンドライト組織、後者を粗粒化組織と呼ぶことにする。

Etched の低倍率の観察では、粗粒化組織において通常の未溶融燃料組織との境界付近に円状のラインが観察された。（写真 3.2 参照）Ethridge らは FFTF における DEA-2 試験において、このラインを既溶融燃料範囲の指標としているようである。<sup>3)</sup> 高倍率観察ではこのラインは見ることができないことから（写真 3.3 参照）、試料面上に緩いわずかな段差があり、低倍率の観察ではこれがラインとして見えるものと考えられる。また、円状のラインが見られる粗粒化組織については、結晶の形状・サイズ等から、鋳型の中で金属溶湯が凝固するときに鋳壁に形成されるチル晶<sup>5)</sup>とは考えにくいこと、MOX の熱容量が大きく、熱伝導率が小さいため、出力降下に対して燃料中心温度の降下はわずかながら遅れ、出力降下開始直後の極く短時間は冷却（凝固）速度が比較的小さかった可能性があることを考えると、セル状組織と呼ばれるものに近いと思われる。<sup>5)</sup> ただし、チル晶とセル状組織は形成される部位や形成過程の違いに着目して区別されていると考えられ、組織の違いはあまり明確ではない。ここでは、この粗粒化組織がどちらに属するかということは本質的に重要ではなく、一度溶融した、すなわち固相線温度を超えた、燃料の組織であるか否かという点が重要である。

そこで、この粗粒化組織が一度溶融して凝固した燃料の組織かどうかを確認するため、セル状組織に生ずるであろう組成の変化、すなわち偏析に着目した。Baker らや Ethridge らは、

金相試験による燃料組織観察に加えて、オートラジオグラフィーを補助的に用いている<sup>1), 3)</sup>。これは、試験燃料ピンはピン外周を流れる冷却材によって除熱されているから、炉停止後溶融した燃料の凝固はピン外周側から燃料中心に向かって進行するため、凝固時に燃料中に含まれる成分が偏析することを利用している。主に Pu の分布を知ることができる  $\alpha$ -オートラジオグラフィーの場合、元々の燃料マトリックスの Pu 濃度が 30 wt% 前後あるのに対し、偏析による変化は高々 2~3 wt % であるから、フィルム上の黒化度の違いを利用するオートラジオグラフィー法は不鮮明で利用できない。 $\beta$ - $\gamma$  オートラジオグラフィーの場合、照射で生成された Ru の分布像を示すといわれているが、本試験のような未照射燃料の PTM 試験のように生成量が極く微量であっても濃度変化の様子が鮮明であることから、Baker らや Ethridge らはこちらを既溶融燃料範囲の確認に用いている。

しかしながら、オートラジオグラフィーは、拡大倍率の限界のため、評価に必要な精度で位置を金相写真と照合することが困難であり、また現在照射済燃料のオートラジオグラフィーを実施できる設備が無いことから、本研究では照射燃料集合体試験施設の遮へい型 X 線マイクロアナライザー (SXMA) を利用し、Pu の分布から既溶融燃料範囲を調べる手法を用いた。すなわち、SXMA の場合、生成量の微量な Ru は検出できないが、マトリックス濃度が 20 wt% 程度ある Pu であれば、2~3 wt % の偏析による変化を検出することは容易であり、また金相写真との照合もオートラジオグラフィーよりも容易に、かつ精密に行なうことができる。使用した SXMA は、仏国 CAMECA 社製の CAMEBAX-R を金相セル用に改造したもので、分析条件は、ビーム電圧 20 kV、ビーム電流 50 nA、ビーム径 1  $\mu$ m で、Pu の検出には  $M_\beta$  線を用いた。図 4.2 に粗粒化組織を中心に分析した Pu 分布の例 (G821 ピン) を示す。この分析は、未溶融燃料組織から、中心空孔の周囲のデンドライト組織まで Pu 強度をスキャンしたものであるが、途中 4 点において定量分析により Pu 濃度を確認している。同様な分析をいくつかの試料について実施し、未溶融燃料組織の Pu 濃度に対し、粗粒化組織で一度 2% 程低下し、デンドライト組織で数% 上昇するという傾向を確認した。また、未溶融燃料組織から粗粒化組織にかけて Pu 濃度の低下の始まる位置は前述の円状ラインよりわずかに外周側となる。

このような Pu 濃度の変化と溶融燃料の凝固過程の関係を考察するため、デンドライト組織の結晶粒内の Pu 分布を調べた結果を図 4.3 に示す。(金属凝固学的には、図 4.3 の組織はデンドライト組織というより柱状組織に近い。) 図 4.3 から、結晶の中程から燃料中心側で Pu 濃度が上昇していることが分かる。このような偏析は(金属凝固学でいう) 柱状組織では一般的に見られる現象であり、溶融した燃料が燃料中心に向かって凝固する時に溶質である Pu を排出しながら進行するため、最後に凝固する燃料中心側で Pu 濃度が上昇すると考えられる。

このことを図 4.2 の例に当てはめて考えると、次のようなモデルが考えられる。すなわち、粗粒化組織の範囲まで溶融していた燃料が、シャットダウン直後の短時間では小さな冷却速度で燃料中心に向かって凝固し始めるが、温度が固相線の近傍であり、固相と液相の二相状態の

中で、固相は液相中に含まれる Pu を排出しながら燃料中心に向かって成長し粗大化した結晶粒を形成する。やがて冷却速度が大きくなると、結晶が十分に成長せずに凝固するようになり、デンドライト組織が形成される。そのため、粗粒化組織領域では Pu 濃度が低下し、排出されたPuが集積されたデンドライト組織で高濃度となったと考えられる。

高速炉燃料では通常の定常照射燃料でも、燃料温度勾配やいわゆるレンズ状ボイドの移動に起因する Pu 再分布が発生する。図 4.4 は燃料溶融の発生していない部位の中心空孔周辺の Pu 分布の分析例である。このような、定常照射の Pu 再分布は、粗粒化組織ほど Pu 濃度の低下は著しくなく、中心空孔周辺に生じた Pu 濃度の上昇は  $200\sim300 \mu\text{m}$  の範囲で緩慢に発生する。特に明瞭な Pu 再分布は、中心空孔が同時に形成されているところに特徴がある。このような特徴から、図 4.2 の例に示したような Pu 濃度の変化は定常照射の Pu 再分布とは異なるものである。

以上から、金相観察で確認できる粗粒化組織までが既溶融燃料組織であると考えることができ、As-Polished で観察されるポアフリー組織がこれに対応することを確認し、一部の組織の明瞭な試料については As-Polished の観察のみで既溶融燃料範囲を判定した。

また、Etched の金相観察で見られる円状のラインは、粗粒化組織と燃料溶融の発生していない組織との境界よりわずかに内側となるが、その差は小さく、燃料溶融割合を評価するための既溶融燃料範囲の判定という観点では、ほぼ一致すると見なしても評価精度上影響はほとんどないと考えられる。従って、Ethridge らがこの円状のラインを既溶融燃料範囲の指標としたことは妥当であったと考えられる。しかし、この円状ラインの領域には析出相は見られず、SXMA でも組成の変化は確認することができなかったことから、ラインとして観察される燃料面上の段差が化学腐食によってできる原因は明らかではない。

本試験の多くの燃料ピンについては、上述のように金相組織観察によって線出力ピーク部位における既溶融燃料組織の範囲を確認することができたが、7 本の試験燃料ピン、G805, G808, G813, G814, G816, G818, G822 では、化学腐食後の金相観察でも既溶融燃料組織を確認することができないか、極めて疑わしい組織であり、通常の定常照射後の燃料組織のようであった。後述するように、軸方向燃料溶融範囲を調べるために採取した縦断面金相試料によって、これらの全ての試験燃料ピンについては燃料溶融が発生したことを確認している。またこれら 7 本の試験燃料ピンのピン切断前に実施された X 線ラジオグラフィーでは、G822 ピンを除き、線出力ピーク部位の数 cm 下方で中心空孔が閉じており、プラギングが形成されているのが確認できた。従って、これらの試験燃料ピンでも燃料溶融が発生した可能性が高い。さらに、以下のことが金相観察から判った。

- これら 7 本の燃料ピンに共通した特徴は、燃料パラメータがいずれも 91%TD. のグループであること、中心空孔内面形状が通常の定常照射燃料に比べて非常に滑らかなことである。例として、写真 4.4 に G808 の線出力ピーク部位における腐食後の金相組織を示

す。定常照射燃料の場合、前出の図 4.4 中の金相組織を見ると分かるように、中心空孔の周囲でもポアや結晶粒界のマイクロクラックがあり、中心空孔内面形状は不規則に凹凸が存在する。

- これら 7 本の燃料ピンの内、G805, G808, G816 の 3 燃料ピンでは、線出力ピーク部位の上部あるいは下部で中心空孔径が局所的に拡大する部位が X 線ラジオグラフィーで確認でき、このような部位についても横断面試料を採取し、燃料中心部の溶融を確認した。その例として、前出の G808 の線出力ピーク部位（写真 4.4：試料 No. G80852）に対し、約 35mm 上方の位置から採取した横断面金相組織（試料 No. G80854）を写真 4.5 に示す。G80854（写真 4.5）の中心空孔は、より線出力の高い G80852（写真 4.4）の中心空孔よりも大きく、また中心空孔の周囲に既溶融燃料組織が存在している。

これら金相組織だけでは既溶融燃料組織の判定が難しい場合について、SXMA を利用し、Pu 濃度の分布からこれを確認した。前述の写真 4.4 に示した G80852 の径方向の Pu 分布を図 4.5 に示す。この G80852 の組織は、中心空孔が形成された通常の照射燃料の金相組織と酷似しているが、Pu 分布は平坦であり、前出の図 4.4 に示したような定常照射燃料で見られる Pu 再分布は認められない。このような特徴は、線出力ピーク部位で既溶融燃料組織の確認ができなかった 7 本の燃料ピンの内、5 本について確認された。これらの形成メカニズムとしては、燃料溶融する前に中心空孔が形成され、通常の Pu 再分布を生じたが、その後再分布による高 Pu 濃度領域を含む燃料中心部に溶融が発生し、さらにその溶融燃料が重力等によって完全に下方に移動した結果、Pu 再分布の生じていない未溶融燃料部分だけが残ったものと推定される。しかし、もしこの推定されるメカニズムが正しいならば、これは同時に溶融燃料の粘性が非常に小さいことを示唆するものである。

既溶融燃料組織の確認できなかった 7 本の燃料ピンの内、G813 と G822 ピンは上述のような特徴はなかった。金相組織の詳細観察では、G813 ピンは中心空孔周囲の限られた部分に粗粒化組織と考えられる組織が認められるが、デンドライト組織はない。Pu 分布を調べると、粗粒化組織で見られる明確な濃度低下と同時に中心空孔の周囲でデンドライト組織で認められる Pu 濃度の上昇が見られた。図 4.6 に試料 G81352 の中心空孔付近の Pu 分布を示す。G813 ピンでは、この部位より数 cm 下方でプラギングが形成されていることが X 線ラジオグラフィーで確認できるので、粗粒化組織が形成された直後に何らかの原因により（デンドライト組織となるはずの）溶融燃料が下方に移動した可能性は考えられるが、このような例は G813 ピンのみに限られているため、このようなふるまいを説明することは困難である。

G822 ピンでは、線出力ピーク部位で既溶融燃料組織が認められないばかりか、通常の照射燃料の Pu 再分布に酷似した Pu 分布を示している。G822 ピンの線出力ピーク部位の試料 G82252 の径方向の Pu 分布を図 4.7 に示す。前述したように、中心空孔内面が非常に滑らかであることや、それより 50mm 余り上方の、より線出力の低い位置から採取した縦断面金相試

料でも燃料溶融したことが確認できたことから、この G82252 の位置でも燃料溶融が発生したと推定されるが、X線ラジオグラフィーではこれより下方でプラギング等は確認できないため、いつどのように溶融燃料が移動したのか、なぜ G80852 と異なり中心空孔付近で Pu 濃度が上昇しているのか、この Pu 濃度上昇が再分布によるものか否か等、本燃料ピンには不明な点が多い。

G813 と G822 ピンは、上述のように燃料溶融を直接示す試験結果は得られなかつたが、同一の燃料パラメータを持ち、同程度の線出力であった他の燃料ピンで燃料溶融が確認できていることから、線出力ピーク部位において燃料溶融が発生し、その溶融燃料が何らかの原因により完全に他の部位に移動したと考え、燃料溶融割合の評価を行うこととした。

#### 4.2 燃料溶融割合の評価

前節で述べたように、燃料溶融割合は、燃料ピンの線出力ピーク部位から採取した横断面金相試料について、一度溶融して凝固した燃料組織、既溶融燃料組織、の領域径を測定し、燃料ペレットの面積比として算出した。本試験の全試験燃料ピン 24 本についての燃料溶融割合の評価結果を、同一試料で評価した柱状晶領域径及び残留ギャップと共に表 4.1 に示す。評価した試料採取位置に対応する局所線出力は、第 4.3.4 節で述べるように中性子輸送モンテカルロコード MCNP-4A<sup>10)</sup>による線出力分布計算結果（98 年 1 月 23 日版）を基に、試料採取位置の燃料ペレットの製造時における密度及び外径の測定値で補正した値である。線出力ピーク部位で既溶融燃料組織の確認できなかった 7 本の試験燃料ピンのうちで、その上部あるいは下部で中心空孔径が局所的に拡大していた、G805, G808, G816 の 3 燃料ピンについては、当該部位で同じ評価を行ったので、“Add.” として表 4.1 に示した。また、既溶融燃料組織の確認できなかった 2 本の燃料ピン、G813 と G822 ピンについては、前節で述べたように不明な点が多いが、溶融燃料が完全に移動したものと考え、中心空孔径から燃料溶融割合を算出した。

試験によって確認した最大燃料溶融割合は、G816 ピンの “Add.” 試料、11.8% であり、「常陽」の PTM 試験の最大燃料溶融割合制限 20% を十分に下回っている。ただしこの最大値は、線出力ピーク部位ではなく、ピーク部位に限ると最大値は G809 ピンの 10.7% で、制限値の約半分である。燃料溶融割合は、製造時の各燃料パラメータと局所線出力値に依存するため、各試験燃料ピン同士の単純な比較は難しい。そこで、照射初期燃料温度評価コード “FEVER” に本試験燃料の製造実績を入力して実施した 660W/cm 到達時の燃料溶融割合予測解析の結果と上述の照射後試験結果を比較した。これを表 4.2 に示す。表 4.1 と表 4.2 から、95%TD. のグループは照射試験前予測で仮定していた線出力 660 W/cm にほぼ近い照射実績（線出力）に対して、燃料溶融割合は予測解析値の約半分という傾向を持っている。一方、91%TD. のグループは、照射実績としての線出力は 620~630 W/cm が多く、線出力が少し低いため比較は難しいが、燃料溶融割合測定結果は予測解析値に対してさらに小さく、95%TD. のグループに比べて

大きくばらついている。また，“Add.”を表示した試料を含め，91%TD.のグループには燃料溶融割合が10%を超えるか，あるいはそれに近く，予測解析値にはほぼ同等な結果もいくつか存在している。これらは中心空孔の周囲に著しい既溶融燃料組織が観察される等，単に燃料溶融がそこで発生しただけではなく，その上方，あるいは下方から溶融燃料が移動し，局所的に燃料スミヤ密度を上昇させ，その結果局所線出力が高くなつて，燃料溶融割合がさらに増加するという，いわゆる二次溶融が発生した可能性も否定できない。実際，既溶融燃料組織が確認できず，溶融燃料が完全に移動したと考えられた7本の燃料ピンの線出力ピーク部位の燃料溶融割合はいずれも3%前後であつて，どれも小さめであり，中心空孔周囲の既溶融燃料組織が余り多くない他の試料もこの溶融割合と同程度と見なせることから，二次溶融が発生しなければ91%TD.のグループの溶融割合はこの程度であったものと推定される。

### 4.3 軸方向燃料溶融範囲の評価

第 3.2 節で述べたように、PTM 値を得るために実施する PTM 試験の照射後試験においては、既溶融燃料の存在範囲から炉内において最初に発生した燃料溶融の軸方向範囲、すなわち燃料溶融境界の位置、を推定評価することが中心課題である。後述するように、炉内において中心空孔を通じた溶融燃料の移動が生じるため、最初に発生した燃料溶融の境界位置はこの溶融燃料の移動挙動を考慮して評価しなければならない。ここでは、まず金相観察に基づいて溶融燃料の移動挙動を整理し、次に軸方向燃料溶融境界位置の評価方法と結果及びその不確かさについて述べる。

#### 4.3.1 縦断面金相観察結果と溶融燃料の移動に関する考察

試験燃料ピン軸方向の上部側及び下部側両方の燃料溶融範囲を確認するため、全試験燃料ピン 24 本について、最終的に 85 個の縦断面金相試料を採取・作製し、光学顕微鏡によって金相組織を観察した。採取した縦断面金相試料の採取位置を図 4.1 に示した。

前 4.1 節では燃料ピン中央付近での溶融燃料の上下移動について述べたが、X 線ラジオグラフィーと上記縦断面金相試料の観察から、ピン軸方向燃料溶融範囲境界付近においても溶融燃料が中心空孔を通じて上下に移動することを確認し、その溶融燃料の移動の形態を、ピン上部側の燃料溶融範囲境界で 2 種類、ピン下部側の溶融範囲境界で 1 種類に分類した。すなわち、図 4.8 に示すように、ピン上部側の燃料溶融範囲境界では、溶融燃料が完全に落下し、既溶融の燃料組織を持つ領域がほとんど観察できないケース（図中 1-(1)）と、溶融燃料が中心空孔内に閉じ込められたガスの圧力等によって押し上げられ、プラギングを形成したケース（図中 1-(2)）があり、ピン下部側の燃料溶融範囲境界では、溶融燃料が落下し、中心空孔内にプラギングを形成したケース（図中 2）である。以下に、各ケース別に例を示し、溶融燃料の移動の仕方について観察した結果を述べる。

ピン上部側の溶融燃料が完全に落下したケースの縦断面金相組織の観察例（試料 G804312）を写真 4.6 に示す。写真 4.6 の右には燃料溶融の境界と予想される部位（同写真中 A-B）の高倍率写真（100 倍）を示した。この例では、既溶融燃料組織はまったく観察できない。しかし、高倍率観察を実施した部位より下部側では、中心空孔径が次第に拡大し、またその内面もその上部と違って滑らかであり、さらにこの試料の下方では燃料プラギングが形成されていることが X 線ラジオグラフィーで確認できることから、この部位から下方の範囲で燃料溶融が発生したことが示唆される。このような組織は、第 4.1 節で述べた、線出力ピーク部位で既溶融燃料組織が確認できなかった燃料ピンの横断面組織（G80852：写真 4.4 参照）とよく似ており、燃料溶融は発生したが、溶融燃料の粘性が非常に小さく、溶融燃料が完全に落下し、既溶融燃料組織が残らなかつたものと推測される。それを確認するために、横断面金相試料で実施したように SXMA を利用し Pu の分布を調べた。図 4.9 に G804312 の中心空孔周辺の Pu 分布の例を示す。高倍率観察を実施した部位（写真 4.5 中の A-B）より上方では通常の定常照射燃料で見られる Pu 再分布が認められるが、下方では、Pu 分布は平坦である。従って、この縦断面金相組織のケースも、横断面試料 G80852 と同様に、溶融燃料が完全に落下し、既溶融燃料組織及び Pu 濃度の上昇が認められなかつたものと考えることができる。

Baker と Leggett は、米国 EBR-II 炉の PTM 試験で、溶融燃料が完全に落下し、中心空孔径が拡大する同様なケースがあることを報告しているが<sup>1)</sup>、EBR-II のケースでは中心空孔径拡大

が非常に明瞭であり、金相観察だけで燃料溶融範囲の境界がはっきり確認できる。これに対して、本試験では写真 4.6 の様に中心空孔径の拡大は徐々に生じており、主要なポイントにおいて SXMA を利用して Pu の分布を確認しておかないと既溶融燃料範囲を確定することは難しいと思われる。

次に、ピン上部側の溶融燃料がプラギングを形成したケースの縦断面金相組織の観察例（試料 G814621）を写真 4.7 に示す。写真 4.7 でも、第 4.1 節で述べた横断面組織観察と同様に、デンドライト組織の周囲には結晶粒の粗粒化組織が形成され、その粗粒化組織と通常の未溶融燃料組織の境界付近に、写真 4.2 で円状に見えたラインと同じ様なラインが観察された。この写真 4.7 の縦断面金相組織は、後述するピン下部側でプラギングを形成したケースと似ているが、プラギングしている既溶融燃料の上方に通常の定常照射燃料と同じ中心空孔が存在していることから、この部位から下方で燃料溶融が発生し、溶融燃料が下方から上昇してプラギングを形成した可能性を示している。このケースに分類されると考えられる別の縦断面金相組織の観察例（試料 G82263 及び G82265）を写真 4.8 に示す。試料 G82263 と G82265 は G822 ピンから連続して採取した試料で、G82263 の上方に G82265 が位置する。この上部試料 G82265 の中心空孔は通常の定常照射燃料と同じであり、燃料溶融の形跡は全く認められないが、G82263 では、粗粒化組織と考えられるプラギング上端の突起部のすぐ下部に空孔（空洞）が有り、その下方に中心部がテーパー状に抜けた形でデンドライト組織が形成されている。さらにデンドライト組織の下方には丸みを持った中心空孔があり、そこには中心空孔内壁から突起が出ている。プラギング上端のすぐ下部に空孔が有り、その下方に中心部が抜けた既溶融燃料組織があることは、溶融燃料が一度プラギング上端の位置まで上昇し、その後下降したため、一部の溶融燃料が中心空孔内壁に残されたことを示唆している。また、デンドライト組織下方の丸みを持った中心空孔と中心空孔内壁の突起は溶融燃料中にガスが泡となって存在していたことを示唆している。

本試験は未照射燃料の PTM 試験であり、燃料ペレット内に包蔵されていたガスは少ないと考えられるが、製造段階でボアに閉じ込められていたガスが存在する。このガスが燃料溶融と一緒に放出され、ピン上部側の燃料溶融範囲境界付近から落下してきた溶融燃料を押し上げ、その位置で凝固すると G814621（写真 4.7）の様な形態となり、一方、比較的溶融量が多く、シャットダウン後、温度が下がりガスが収縮してから凝固すると G82263（写真 4.8）の様な形態となるものと想像できる。

以上の様な溶融燃料の押し上げ現象は、EBR-II においては過渡過出力照射試験で認められているが<sup>2)</sup>、PTM 試験ではそのような現象についての報告はない。Ethridge と Baker による HEDL の DEA-2 試験の公開文献に掲載されている写真は明らかにこれと同じケースと考えられるが、その説明はない<sup>3)</sup>。「常陽」で実施された本試験と FFTF で実施された DEA-2 試験は、その燃料スタック長さがそれぞれ 550mm と 910 mm であるのに対して、EBR-II では 345mm 余りしかない。このことから、この押し上げ現象は試験燃料ピンの燃料スタック長さに関係し、ある程度燃料スタックが長いと発生しやすくなるという傾向があるものと予想される。

ピン下部側の燃料溶融範囲境界では、いずれも、溶融燃料が落下し、中心空孔内にプラギングを形成している。この縦断面金相組織の観察例（試料 G823321）を写真 4.9 に示す。なお、写真 4.9 の燃料ペレット外周側に 2箇所ペレットが欠損している部位があるが、これは欠け落ちではなく、ペレットに生じたクラックを偶然縦に切断したために黒く抜けて撮影されたもので、

この面の直下では燃料ペレットが存在している。また、このピン下部側の溶融燃料プラギングの下端付近の詳細金相組織を写真 4.10 に示す。このピン下部側の溶融燃料プラギングのケースでも、デンドライト組織の周囲に結晶粒の粗粒化組織が形成され、その粗粒化組織と通常の未溶融燃料組織の境界付近にラインが観察された。この試料 G823321 の金相組織は、デンドライト組織及び粗粒化組織を持った既溶融燃料のプラギングの下方に通常の定常照射燃料と同様な中心空孔が認められることから、この部位から上方で燃料溶融が発生し、重力によって溶融燃料が落下し、プラギングを形成したと考えられる。

ピン上部側、ピン下部側いずれの溶融燃料プラギングも、組織観察上は横断面組織観察の場合と同じ特徴を有しているが、粗粒化組織の SXMA による Pu 分布の詳細分析では、デンドライト組織の半径方向の周囲に形成されるものと中心空孔に面したプラギングの上端あるいは下端に形成されるものとでは違いが認められた。例として、写真 4.8 に示した試料 No. G823321 のプラギング下端付近の Pu 分布を図 4.10 に示す。この図の例に見られるように、溶融燃料プラギングの Pu 分布には、次のような傾向が認められた。すなわち、

- ・ デンドライト組織内の Pu 濃度は未溶融燃料組織の Pu 濃度より高く、濃度の変化はほぼ平坦に近い。よりミクロな分析を実施すると、前出の図 4.3 に示したように結晶粒内で Pu 濃度小さな上下が認められる。
- ・ 燃料ピンの径方向にプラギングの Pu 分布を分析すると、第 4.1 節で述べた横断面試料の場合と同様に、未溶融燃料組織の Pu 濃度に対し、粗粒化組織で一度低下し、デンドライト組織で上昇することが確認できた（図 4.10 中 a, b 参照）。また未溶融燃料組織から Pu 濃度の低下が始まる位置は前述のラインより  $100 \mu\text{m}$  ほど外側である。しかし、プラギングの端部に近くなると、デンドライト組織は無くなり、粗粒化組織のみとなるが、ここでは粗粒化組織の中心部で Pu 濃度の低下が認められる（図 4.10 中 b, c, d 参照）。さらに、プラギングの外側の未溶融燃料組織では Pu 再分布によると考えられる濃度上昇がある。さらに、プラギング端部近くでは、粗粒化組織部の Pu 濃度はほぼ平坦であり、Pu 再分布によると考えられる未溶融燃料組織の上昇した Pu 濃度と同等な濃度となっている。（図 4.4 中 e, f 参照）
- ・ 燃料ピンの軸方向にプラギングの Pu 分布を分析すると（図 4.10 中 g 参照），デンドライト組織から粗粒化組織に変わると Pu 濃度がわずかに低下し、プラギング端部に近づくに従って Pu 濃度は徐々に上昇している。

金相組織観察において、特にデンドライト組織先端からプラギングの終端までの粗粒化組織をなしている領域の長さが大きいと、未溶融燃料組織と区別することが非常に困難なケースが多くなる。しかし、燃料中心部がプラギングである場合には、上述のように、その外側の未溶融燃料組織に（中心空孔が認められなくても）Pu 再分布による Pu 濃度上昇があり、粗粒化組織特有の Pu 濃度分布があることから、Pu 分布の分析によってプラギングであるか否かを確認することが可能である。

#### 4.3.2 軸方向燃料溶融境界位置の評価方法

前節で述べたように、溶融燃料の中心空孔を通じた移動の形態は、図 4.8 に示した 3 種類に分類できる。この移動形態に対して、最大出力時の燃料溶融発生範囲を推定評価する手法をそれ

ぞれ図 4.11 に模式図として示す。また、本図に基づいて、各移動形態についての燃料溶融発生範囲の判定方法を以下に述べる。

ピン上部側において、溶融燃料が完全に落下し、中心空孔が拡大したケース（図 4.11 中の 1-(1)）では、その上方の中心空孔の径を基にして中心空孔の拡大が始まる起点を決定し、燃料溶融範囲の上部境界とした。さらに、これを前節で述べたように、この部位において中心空孔周囲の Pu 再分布が消失し、分布が平坦に変わることを確認した。ピン上部側の溶融燃料がプラギングを形成したケース（同図中の 1-(2)）あるいはピン下部側の溶融燃料がプラギングを形成したケース（同図中の 2）では、プラギング部に最も近い未溶融部の中心空孔径を基準に、それをプラギング部に外挿し、これが既溶融燃料組織／未溶融燃料組織の境界と交わる点を燃料溶融範囲の上部あるいは下部境界とした。この方法は、Baker や Ethridge が PTM 試験の評価を行なった時に採用した手法と同じである。<sup>10,3)</sup> 図 4.12 に、ピン下部側の溶融燃料がプラギングを形成したケース（試料 G823321）を例に、燃料溶融範囲の下部境界位置の判定方法を図示した。第 4.1 節で述べたように、既溶融燃料組織と未溶融燃料組織の境界は、粗粒化組織と通常の未溶融燃料組織の境界付近で観察されるラインを指標とした。ラインが判別できない場合は、Pu の分布に基づいて既溶融燃料の範囲を確認した上で上記の方法を適用した。

以上に述べた方法により決定した縦断面金相試料上の燃料溶融境界の位置に対して、燃料カラム（炉心）下端からの距離 (DFCB) は、この溶融境界を含む燃料ペレットを基準にして次の 2 段階の計測によって算出した。すなわち、燃料溶融境界からこの溶融境界を含む燃料ペレットのピン下部側端面までの長さ (A とする) と、この燃料ペレット下部端面から燃料カラム下端までの長さ (B とする) の和 (A+B) によって求めた。図 4.13 にこの評価方法のプロセスを模式図で示した。

燃料溶融境界から溶融境界を含む燃料ペレットの下部端面までの長さ (A) は、縦断面金相試料を約 30 倍でモザイク状に撮影し、貼り合わせた組写真をベースに、上述の方法により燃料溶融の境界を決定し、それが存在する燃料ペレットの下部端面までの長さをノギスで計測した（写真上の長さ A）。この組写真は、レンズの収差に加えて、写真組上げによる歪が生じる。そこで、第 3.1 節に述べた方法と同様に、縦断面金相試料の長さと直径（被覆管の長さと直径）の 2 方位について、写真上で計測した値とデジタルスケーラーを使って実寸法を測定した値から組写真の歪補正係数を求めた。写真上の A の計測値とこの組写真の歪補正係数、及び顕微鏡倍率を用いて実際の A の長さを算出した。

次に、燃料カラム下端から燃料溶融境界ペレット下部端面までの長さ (B) は、縦断面金相試料と試料切断位置に関する記録及び X 線ラジオグラフィーから、当該燃料ペレットを特定し、製造時のペレット高さ測定値を基に、燃料カラム下端から当該燃料ペレットまで、個々のペレット高さを積算して求めた。

#### 4.3.3 軸方向燃料溶融範囲の評価結果と不確かさ

前節に述べた方法により、軸方向燃料溶融範囲、すなわち燃料溶融のピン上部側及び下部側の境界の燃料カラム（炉心）下端からの距離 (DFCB) を評価した結果を表 4.3 に示す。表 4.3 には、結果とともに、燃料溶融境界からこの溶融境界を含む燃料ペレットのピン下部側端面までの長さ (A) とこの燃料ペレット下部端面から燃料カラム下端までの長さ (B) をそれぞれの不

確かさ ( $\delta A$ ,  $\delta B$ ) とともに示した。燃料溶融境界の燃料カラム下端からの距離 (A+B) の不確かさは、 $\delta A$  と  $\delta B$  の平均誤差 ( $\sqrt{(\delta A)^2 + (\delta B)^2}$ ) として評価した。

燃料溶融境界の位置は、各燃料ピンの製造パラメータと同時にそのピーク線出力値にも依存している。そのため、表 4.3 に示した軸方向燃料溶融範囲の妥当性については、溶融境界の位置だけでは確認することはできず、これを PTM 値に変換して確認する必要がある。PTM 値については次節 4.4 で議論するので、ここでは、計測値 A 及び B の不確かさについて議論し、続いて、燃料溶融境界の位置を確定することができなかったケース（表 4.3 で溶融境界の位置をそれが存在すると推定される範囲で示したもの）について説明する。

### (1) 計測値 A 及び B の不確かさ

A の計測においては、次のような不確かさの要因が考えられる。

- ①中心空孔をプラギング部に外挿する際の中心空孔径の不均一さ
- ②光学顕微鏡の倍率誤差及びモザイク状の組写真の歪みに起因する誤差

①の不確かさについては、基準とする未溶融部の中心空孔は通常でも径のわずかな変化や偏りがあるため、その平均的な部位を求め、その不確かさに対応する溶融境界位置のずれ幅を不確かさ幅として評価した。しかし、30 倍の写真上で計測するため、実寸法での不確かさ幅は典型的なケースである限り 0.1 mm~0.4 mm であった。（例：図 4.12 参照）ところが、本試験燃料では、後の(2)述べるように、その基準とすべき中心空孔径が著しく変化していたケース、溶融燃料の複雑な移動があったと推定されるケース、金相試料作製において問題が生じていたケース等、評価の困難なケースが約半数程度発生した。これらは計測値の不確かさというより、燃料溶融境界の位置を確定することができないケースであるため、これらについては、後述するように溶融境界が存在すると推定される範囲で示すこととした。

②の不確かさは、前節 4.3.2 で述べたように、光学顕微鏡観察とモザイク上の組写真に起因するものであるため、顕微鏡で撮影した縦断面金相写真を用いて計測するかぎり避けることはできない。この不確かさの平均は写真上で約 2.5 mm であり、実寸法では約 0.1 mm に相当している。

以上より、燃料溶融境界から溶融境界を含む燃料ペレットの下部端面までの長さ (A) の計測における不確かさ  $\delta A$  は、①と②の不確かさについて、誤差の伝播を考慮した平均誤差として評価した。

B の不確かさについては、次のような要因が考えられる。

製造時のペレット高さ測定はレーザーマイクロメータを用いているため非常に精度が良く、燃料カラム全長（燃料ペレット約 60 個）の累積誤差でも高々数  $10 \mu\text{m}$  である。燃料カラム下端から燃料溶融境界ペレット下部端面までの高さを製造時のペレット高さを使って求めるならば、その不確かさは他に比べて無視できるほど小さい。しかし、この数値は照射前の高さであって照射による変化は考慮されていない。X 線ラジオグラフィーは、照射後のピン全体を 10 枚に分割撮影しており、このネガを基に積算した結果、燃料カラム長に若干の伸びあるいは縮みが見られた。X 線ラジオグラフィーから伸びが見られるものについては、平均 0.48 mm, 最大 0.8 mm であり、ペレット間にわずかな隙間（浮き上がり）が見られる傾向があり、シャットダウンの熱収縮時にステイックしたか、照射後のピン取り扱いによって生じた可能性が考えられる。燃焼度

が非常に低いので、燃料ペレットのスエリング等による伸びはないと考えられる。縮みが見られるものについては、平均 0.25 mm、最大 0.8 mm であり、これまでの経験から特定の燃料ピンだけ焼きしまりが生じたとは考えにくく、X線ラジオグラフィーの像があまり明瞭でないために生じた計測上の測定誤差による可能性もある。

原子炉内における燃料カラム長の変化挙動はまだ明らかでない点も多く、X線ラジオグラフィーによる照射後の燃料カラム長測定値は、原子炉内における燃料カラム長の変化（膨張等）をある程度反映していることも否定できない。PTM 値の評価は、燃料溶融境界位置と原子炉内における軸方向線出力分布を照合して行なうことを考えると、燃料カラム長の変化等の不確かさ要因は重要である。そのため、本評価では、製造時の燃料カラム長と X 線ラジオグラフィーによる照射後の燃料カラム長の差異をそのまま B 値の不確かさと見なすこととした。従って、この不確かさは過大評価となっている可能性が高いが、最大でも 0.8 mm であり、PTM 評価の不確かさ要因としては特に大きいものではない。

## (2) 燃料溶融境界の位置を確定することができなかったケース

本試験では、結果として燃料溶融境界からその燃料ペレット下部端面までの長さについて、確定することができない以下のようなケースが約半数近く存在した。

- ① 基準とする未溶融部の中心空孔径が大きく変化しており、燃料溶融開始時の中心空孔径が推定できない場合、
- ② 中心空孔径の外挿と溶融範囲の判定の指標としているラインの交点付近に燃料ペレットのクラックや欠けが発生し、燃料溶融境界の位置が読み取り不可能な場合、
- ③ 中心空孔が比較的小さく、かつ偏心しているケースにおいて、縦断面金相観察面がその中心軸よりずれてしまい、正確な溶融範囲や中心空孔径が推定できない場合、
- ④ 燃料ピン切断機の約 0.4 mm あるいは約 1 mm の切断代の間に、燃料溶融範囲の境界が偶然に含まれていたと考えられる場合。
- ⑤ 溶融燃料の上下移動が大きく、基準とすべき中心空孔径が変化してしまったと考えられる場合、あるいは照射後試験の結果において既溶融燃料組織の境界を確認することができなかつた場合。

表 4.3 では、以上のようなケースについて、⑤を除き、燃料溶融境界の位置の確定値ではなく、その推定される存在範囲を評価し、参考値として示している。⑤のケースは、境界の位置を推定することは不可能と結論し、記載していない。上記各ケース毎に、溶融境界位置推定の考え方等を含めて以下に説明する。また、図 4.14～4.16 及び写真 4.11～4.14 に、これらの典型的な金相組織を例として示した。

### (2)-① 基準とする未溶融部の中心空孔径が変化しているケース

図 4.14 に示した G814 ピンのピン下部側燃料溶融境界は、この典型的と考えられるケースで、ピン下端から 20 番目の燃料ペレットで急激に中心空孔径が縮小し、消失している。中心空孔がここで消失することは X 線ラジオグラフィーでも確認できることから、後述するような観察面の中心軸ずれによる見掛けの中心空孔縮小ではない。燃料組織上は、既溶融燃料組織がペレット全長に渡って確認できるのは 21 番目の燃料ペレットまでで、20 番目のペレットはほとんど

未溶融燃料組織であり、中心軸のクラックに沿って、その極く近傍に粗粒化組織を疑わせる組織が観察される。粗粒化組織の判別は SXMA により Pu 分布の詳細分析を行なえば可能であるが、この試料は分析のための試料調製中に、被覆管から燃料ペレット全体が剥離し、分析できなくなってしまった。金相組織観察だけからの推測ではあるが、20~21 番目のペレットでは比較的小さな中心空孔が形成され、そこにプラギングが形成され、中心空孔が消失した可能性が考えられる。このような小さな中心空孔に、ペレット 1.5 個分という比較的長い範囲に渡って溶融燃料が浸入し得るかどうか確かではない。しかし、G814 ピンのピン上部側燃料溶融境界はプラギングが形成されており、ガス圧による押し上げ力が働いた可能性が示唆されている。従って、下部側においてもガス圧によって溶融燃料が小さな中心空孔に押し込まれた可能性は否定できない。このようなことから、燃料溶融境界は 20~21 番目のペレットの範囲にあったと推定できる。

中心空孔径が局所的に大きく変化してしまう原因として最も考え易いのは、2.2 節「試験パラメータ」で述べたように、燃料ピン内のペレット個差の影響である。上述の G814 ピンの例では、19 番から 20 番にかけて燃料ペレット外径はほぼ同等であり、ペレット-被覆管ギャップに有意な違いはなく、また両ペレットの線出力は同等と考えられる。しかし、製造時の記録では、19 番目と 20 番目の燃料ペレット密度は 90.86 %TD. と 92.22%TD. である。これまで定常照射試験で得られてきた知見からは、1~2% 程度のペレット密度の差異がこのような中心空孔径の差の原因となり得るとは言い難いが、本試験の場合、定常照射試験の経験が必ずしも適用できるとは限らない可能性がある。それは第 2.3 節で述べたように、本試験では燃料組織変化があまり進行しない段階で燃料溶融を発生させる出力上昇パターンを設定しているため、一部の燃料ピンについては、中心空孔が十分に発達する前に燃料溶融が発生した可能性が考えられるからである。このような準過渡状態における種々の燃料パラメータに対する燃料中心温度の感度は、現状ではまだ十分に分かっているとはいえない。今後、過渡解析の可能な燃料温度解析コード等により検討していく必要があると思われる。

上述のように、G814 ピンのような例ではペレット個差が原因の可能性があるとして考えられたが、本試験では、写真 4.11 に示すように、ひとつの燃料ペレット内で中心空孔径が大きく変化しているケースや、隣り合う燃料ペレットに有意な違いが無いにもかかわらず中心空孔径が大きく変化しているケース、中心空孔が蛇行して形成されているケースが確認されており、燃料-被覆管機械的相互作用 (FCMI) の発生による燃料ペレット変形の可能性を含め、必ずしもペレット個差の影響だけで説明できるものではないという点も重要である。

## (2)-② 燃料溶融境界の付近にクラックや欠けがあるケース

未溶融部の中心空孔径を外挿し、溶融範囲の指標としているプラギング部のラインとの交点を決める時に、この付近に燃料ペレットのクラックや欠けが発生しており、燃料溶融境界の位置が評価できなかったケースがあった。その金相組織の例を写真 4.12 に示す。このようにクラック等が燃料溶融境界付近に発生している場合には、それにより交点（燃料溶融境界）が読み取り不可能となっている範囲をそのまま燃料溶融境界の存在する可能性のある範囲と見なした。あるいは、それが十分小さい範囲であれば、その中央を燃料溶融境界位置、読み取り不可能な範囲を不確定幅と見なした。

## (2)-③ 中心空孔が偏心し、かつ縦断面金相観察面が燃料ピン中心軸よりずれているケース

中心空孔は燃料ペレットの中心部に形成されるが、通常燃料ピンに対してわずかに偏心している。照射後の金相観察の経験からは、燃料ペレットの中心軸に対して中心空孔が偏心していることはあまり多くなく、むしろ被覆管内で燃料ペレットが片寄っていることが多い。本試験の場合、金相観察で確認している限りでは、中心空孔径約 0.2 mm に対して、0.06 mm 前後の偏心があり、燃料溶融境界付近では中心空孔径の小さいものが多く、蛇行するような例も認められた。

一方、軸方向燃料溶融範囲判定のための金相試料は、燃料ピンを軸方向に沿って縦に切断、研磨したものである。第 3.2 節で述べたように、観察すべき断面が燃料の中心軸を通ることが要求されるために、新たに改良した試料ホルダを採用している。しかし、試料の研磨状態は試料によって異なり、研磨後に観察面の測定を行った結果、大半の試料については中心軸に対し 0.1 mm 前後のずれがあることが分かった。また、0.2 mm を越えるずれがある試料が 7 個、0.45 mm に達するものが 2 個あった。このような、0.2 mm を越える観察面のずれは、研磨段階において再研磨を行ったものである。

このように、中心空孔の偏心や観察面のずれによって、見掛けの中心空孔縮小、消失が認められ、正確な溶融範囲や中心空孔径が推定できないケースが数例発生した。このようなケースの金相組織の例を図 4.15 に示す。この試料 No.G80833 では、プラギングを示唆するデンドライト組織の下方に粗粒化組織が 2 mm 程度あるだけで、中心空孔は認められない。また、下部に隣接した燃料ペレットには不連続な中心空孔が 2箇所に見られる。しかし、柱状晶は連続的に形成されており、中心空孔が不連続ではないことが示唆されている。実際 X 線ラジオグラフィーでは、下部に隣接した燃料ペレットから下方に連続した中心空孔が確認できる。このことから、この試料では蛇行した小さな中心空孔が連続して形成されていると考えられる。一方、この試料の観察面の中心軸に対するずれは 0.20 mm であり、予想される中心空孔の径と同等か少し大きいと考えられる。そのため、この試料では中心空孔の蛇行による偏心と観察面のずれによって中心空孔が消失してしまったものと考えられる。

このように中心空孔の偏心と観察面のずれによって中心空孔を基準にできないケースにおいては、X 線ラジオグラフィーで観察されるプラギングの先端から金相観察で認められたデンドライト組織の先端までの範囲を燃料溶融境界の存在する可能性がある範囲とした。

中心空孔の蛇行は、「常陽」の定常照射燃料ではこれまで観察されていない。しかし、非常に短時間照射された高出力照射試験や出力が低く、中心空孔が完全に形成されていない照射試験燃料では、中心空孔が歪んだ円形であったり、偏心していた例があることから、本試験における中心空孔のこのような挙動は、燃料組織変化が十分進行しない状態で燃料溶融を発生させた本試験特有の現象である可能性がある。照射後試験技術上、また試験評価上の観点からは、中心空孔が十分に発達していた方が、上述のような問題を防止する上で望ましい。また、観察面の中心軸に対するずれは 0.1 mm 以下であることが望ましく、金相観察試料作製方法をさらに改良することが必要である。

## (2)-④ 試料の切断代に燃料溶融範囲の境界があったと考えられるケース

金相観察試料の製作時に、燃料ピンを切断するが、このとき粗切断時に約 1 mm、詳細切断時に約 0.4 mm の切断代が生ずる。切断位置は、燃料ピンの X 線ラジオグラフィーにより中心

空孔の局所的な変化に着目して燃料溶融の範囲を推定した上で実施しているが、X線ラジオグラフィーフィルムにおいて中心空孔は、直径が 0.8 mm 以上であれば明瞭であり、少なくとも 0.5 mm 程度あれば中心空孔であることを確認することができる。しかしながら、約 0.4 mm 以下の中心空孔径では燃料中心を通るクラックとの区別が難しく、実際に切断し金相観察しなければ確認することは困難である。本試験では、燃料溶融境界付近の中心空孔径の小さいものが多く、X線ラジオグラフィーに基づく予測により燃料溶融境界を避けて切断したが、金相観察の結果、真的燃料溶融境界が試料の切断代に偶然含まれていたと考えられるケースが二、三あった。

図 4.16 にこのようなケースの例を示す。この図 4.16 の例では、G807 の上部側燃料溶融境界近傍から連続して 3 つの試料、No. G80763, G80771, G80773 を採取し、その間に 2ヶ所の切断がある。最下部の試料 G80763 では試料の上端部まで既溶融燃料領域であるデンドライト組織が見られる。しかし、その上方の 2 試料、G80771, G80773 では、中心空孔の偏心と観察面のずれのため中心空孔が不連続となっているが、中心空孔内面は滑らかではなく、既溶融燃料組織も全く観察されないことから、燃料溶融は発生していないと考えられる。中間の試料 G80771 の下部側で急激に中心空孔が縮小しているが、これはプラギングによるものではない。従って、既溶融燃料組織の境界は、試料 G80763 と G80771 の間、343.3 mm(D.F.C.B)から 344.4 mm の間の切断代にあったものと考えられる。

このように試料の切断代に燃料溶融範囲の境界があったと考えられるケースにおいては、その切断代の範囲全体を燃料溶融境界の存在する可能性がある範囲とした。

#### (2)-⑤ 燃料溶融境界位置を確認できなかったケース

本試験において燃料溶融境界位置が全く確認できなかったのは、以下の 3 ケースである。

図 4.17 に示した G809 ピンのピン上部側（試料 No. G809322）は、プラギングしている既溶融燃料の上方に存在している中心空孔の径が 2 段になっている。溶融燃料の直上にある径が拡大した中心空孔の様子は、第 4.3.1 節で述べたピン上部側の溶融燃料が完全に落下したケース（写真 4.6 参照）に似ているが、そのわずか 3 mm 程度下方は溶融燃料が完全に占めていることから、体積の点から溶融燃料の落下では説明できない。溶融燃料の直上の中心空孔付近の Pu 分布の分析を行なえば未溶融の中心空孔か溶融燃料の落下による空孔か判別可能であるが、この試料は被覆管から燃料ペレット全体が剥離したため分析できなかった。金相組織観察だけから想像すると、一端溶融燃料が押し上げられた後、溶融燃料が降下し、そこでプラギングを形成した可能性が高いと思われる。そのため、溶融燃料の直上の中心空孔は、二次溶融によって中心空孔径が拡張した可能性があり、本来形成されていた中心空孔の径はそれよりさらに上方にある中心空孔と同程度であったと思われる。しかし、この上方にある中心空孔を基準とすると、プラギング部の直径がそれより大きいため、燃料溶融境界位置を推定することは全く不可能であった。燃料溶融量が大きく、上下移動が著しい場合に、このようなケースが起こり得るものと考えられる。

G818 ピンのピン上部側および G822 ピンのピン下部側は、X線ラジオグラフィーにおいて溶融燃料プラギングと考えられる部位において金相観察を行った結果、全く既溶融燃料が確認できなかったもので、その後試料の脱落が発生したため、Pu 濃度分布から確認することができなくなってしまったケースである。そのため、これらも燃料溶融境界位置を評価することは全く不可能であった。図 4.18 に例として、G822 ピンの X線ラジオグラフィーとピン下部側の金相組

織を示した。

X線ラジオグラフィーでは、ピン下部側の中心空孔の閉塞が約150~160 mm(D.F.C.B)の範囲で認められた。縦断面の金相試料G82233及びG82235はこの領域を連続して採取し、組織を観察したものである。X線ラジオグラフィーの観察通り、G82233で中心空孔の閉塞が認められるが、ボイドや間隙の多い極めて低密度な組織であり、デンドライト組織は無い。結晶粒の粗大化はボイド等によって判別できず、金相組織観察だけでは燃料溶融の有無は判断できなかつた。また、その直上のG82235では通常の未溶融の燃料組織であり、燃料溶融の形跡は無い。G82233の中心空孔の閉塞がプラギングで閉塞されたものであれば、一部分でもデンドライト組織が認められるので、この局部的な閉塞が溶融燃料のプラギングであるとは考え難い。X線ラジオグラフィーでは、ピン下部側でこの部位以外に中心空孔の閉塞は認められず、またその近傍においてはっきりした中心空孔径の変化もない。中心空孔の局部的な閉塞はプラギングであることが多いが、その場合はその近辺にも閉塞した部位が見られ、またその直上でプラギングを形成した溶融燃料の移動元の部位で中心空孔の拡張等が認められるので、この局部的な閉塞はプラギングによるものではないと考えられる。柱状晶は明瞭に形成されていないが、レンズ状ボイドが認められるため、中心空孔形成の極初期か、形成後何らかの原因により局部的に閉塞された可能性が考えられる。

本G822試験ピンと同等な燃料パラメータ、ピーク線出力で照射されたG804ピンのピン下部側燃料溶融境界位置はやはり約150~160 mm(D.F.C.B)の範囲と考えられ、上述した中心空孔の閉塞がプラギングであることが期待されたが、照射後試験の結果、本試験ピンの下部側燃料溶融を確認することはできなかった。その原因についても、隣り合う燃料ペレットの製造パラメータを比較してもほぼ同等であり、現在分かっている範囲ではペレット個差の影響として説明することは難しいと思われる。結果的に、Pu濃度分布による確認ができなかつたことから、決定的な判断材料が無く、燃料溶融境界位置を推定することは不可能とした。

#### 4.3.4 燃料溶融境界位置の試験結果に関する妥当性の確認

前節 4.3.3 で評価した燃料溶融境界の燃料ピン軸方向位置（表 4.3 参照）について、以下に述べるように、試験結果の妥当性を確認した。各試験燃料ピンの燃料溶融境界位置は、製造時の各燃料パラメータだけでなく、その線出力分布に依存するため、燃料溶融境界位置に対応した局所線出力値に変換し、燃料パラメータの依存性等について比較評価した。

第 2.1 節「照射リグ構造」で述べたように、本 B5D-2 試験体は「常陽」の B 型特殊燃料集合体であり、リグ中心に軸心管が設置されている（図 2.1 参照）。そのため、特にリグ中心付近での中性子束の低下が考えられるなど、通常の炉心燃料集合体よりも複雑な出力分布を持つことが予想された。このことから、PTM 値を算出する上で基となる軸方向線出力分布は、「常陽」の炉心構成に基づいて<sup>13)</sup>、中性子輸送モンテカルロコード MCNP-4A<sup>10)</sup>で計算された結果（98 年 1 月 23 日版）を用いた。

燃料溶融境界位置から PTM 値を評価するプロセスは前出の図 4.13 の模式図の下部に示した。PTM 値は、軸方向線出力分布を 4 次のフィッティング式を最小二乗法で作成し、前節 4.3.3 で評価した燃料溶融境界の燃料ピン軸方向位置に対応する局所線出力密度を内挿して求めた。ここで発生する誤差は、基にしている MCNP 解析値の線出力分布自身が持っている誤差と最小二乗法のフィッティング誤差であるが、前者はこれまでの「常陽」における照射試験や Baker らの EBR-II の PTM 試験<sup>11)</sup>、Ethridge らの DEA-2 試験<sup>3)</sup>の実績から 2 ~ 5 % 程度と予想している。後者は 24 本の試験燃料ピンについていずれも約 0.6W/cm (1 σ) である。なお、本研究で使用した MCNP コードによる線出力分布の計算値は試験等によって校正されておらず、照射リグ軸心管内に装荷されたドジメータ及び照射後に実施された燃焼率測定結果に基づいた検証、誤差評価が現在進められている。そのため、以下で算出評価する PTM 値は、線出力分布の校正、検証が完了した後、見直す予定である。

次に、MCNP 解析値は、各燃料ピンに装荷された燃料ペレットの平均値を入力値としているため、燃料溶融境界位置に当たる燃料ペレットの実際の直径及び密度で補正する必要がある。補正係数 C は以下の式で与えられる。

$$C = \frac{\rho D^2}{\bar{\rho} \bar{D}^2} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  及び  $D$  はそれぞれ局所燃料ペレットの直径及び密度、 $\bar{\rho}$  及び  $\bar{D}$  はそれぞれ燃料ピンに装荷された全燃料ペレットの直径及び密度の平均値である。

この補正自体には、製造時における測定誤差が非常に小さいため、有意な誤差は生じない。しかし、局所線出力という点では、燃料のプラギングなど溶融燃料のリロケーションによる局所的な燃料の増加が生じ、線出力が局所的に上昇するとともに、いわゆる二次溶融が発生することが考えられる。本試験では、燃料ピンによって二次溶融等が発生している可能性が示唆されている。Baker ら<sup>11)</sup>や Ethridge ら<sup>3)</sup>が彼等の PTM 試験評価において、この効果を考慮しているかどうか確認できないが、この効果の補正を行うためにはプラギングしている溶融燃料体積や密度を正確に評価することが重要であり、これは実際には困難であり、大きな不確かさを見込む必要がある。更に、この溶融燃料リロケーションによる線出力增加の補正は、過大に評価されてしまった場合、非安全側の結果、すなわち PTM 値を過大評価する結果となる。このようなことを考慮し、本研究においてはこの補正是行っていない。

以上に基づき評価した燃料溶融境界線出力を表 4.4 に示す。前節 4.3.3 で述べたように、PTM

値を確定することができないケースが約半数あり、同表では、このようなケースについて、燃料溶融境界が存在すると推定される範囲に対応した線出力範囲を評価し、参考値として示している。

図 4.19 に燃料溶融境界線出力と燃料パラメータの関係を示す。図 4.19 では、表 4.3 の燃料溶融境界線出力が確定できたデータとともに、燃料溶融境界の推定される線出力範囲については下限値のみをプロットした。また同図に示したデータは、燃料溶融境界の上部側、下部側の違いやタグガスの有無の違いを、後述する理由により、区別せずに示している。本図に基づいて、燃料溶融境界線出力と燃料ペレット-被覆管ギャップ、燃料密度、O/M 比の各燃料パラメータの関係について、Baker らや Ethridge らの PTM 試験結果と比較しながら以下に述べる。

図 4.19 から、高密度の 94.5~95.5%TD のグループ（以下 95%TD のグループとする）と低密度の 90~93%TD のグループ（以下 91%TD のグループとする）のいづれも燃料溶融境界線出力は燃料ペレット-被覆管ギャップの依存性は明確には認められない。特に、95%TD のグループではギャップの依存性はほとんど見られない。91%TD のグループでも、ギャップの増加とともに燃料溶融境界線出力が低下するような傾向が見られるが、データのばらつきを考えると有意なものとはいえない可能性がある。原理的には、燃料ペレット-被覆管ギャップの増加により、ギャップコンダクタンスが低下し、燃料中心温度が上昇するため、燃料溶融境界線出力は低下する。実際、米国 EBR-II 炉で行われた Baker らの PTM 試験、P-19 及び P-20 の結果では、O/M 比が約 1.96、燃料ペレット密度が 90~92%TD の範囲で、燃料ペレット-被覆管直径ギャップが  $150 \mu\text{m}$  から  $200 \mu\text{m}$  に増加すると約  $50\text{W/cm}$  燃料溶融境界線出力が低下している<sup>1)</sup>。一方、Ethridge らの DEA-2 試験結果では、燃料溶融境界線出力について以下のよう相関式が得られている<sup>3)</sup>。

$$Q'_m = 242.520 - (630.315)G + (4.823)D - (0.157)T - (820.817)M \quad (2)$$

ここで、 $Q'_m$  は燃料溶融境界線出力 ( $\text{W/cm}$ )、 $G$  は燃料ペレット-被覆管ギャップ ( $\text{mm}$ )、 $D$  は燃料ペレット密度 (%T.D.)、 $T$  は被覆管内面温度 ( $^\circ\text{C}$ )、 $M$  は化学量論比からのずれ ( $M=2.0 - \text{O/M}$ ) である。この式から、ギャップが  $50 \mu\text{m}$  増加すると約  $30\text{W/cm}$  の燃料溶融境界線出力の低下が予測される。

燃料溶融境界線出力のギャップ依存性を緩和する効果として、燃料ペレットにクラックが発生することによりペレット片がギャップ側に移動するリロケーションがある。リロケーションの効果についてはいろいろな考え方（モデル）があり、ギャップ幅に対して一定の割合で影響する考えるもの、燃料ペレット外径の関数として考えるもの、線出力に依存していると考えるもの等がある<sup>9)</sup>。また、燃料ペレットは照射初期に焼きしまることが一般的に知られている。本試験では照射時間が非常に短いことから焼きしまりはあまり影響していないと考えられるが、Baker らや Ethridge らが報告している試験では、その可能性は否定できない。さらにこれらの挙動は、燃料ペレットの製造時の条件の違いにも依存している可能性があり、同じ仕様でも製造者の違いによって燃料溶融境界線出力が異なる傾向が Ethridge らの試験結果では示唆されているように思われる<sup>3)</sup>。また、前節 4.3.3 で述べたように、B5D-2 では中心空孔径が局所的に変化しているケース等があり、燃料-被覆管機械的相互作用 (FCMI) 発生の可能性もあることから、必ずしも炉内においてギャップが開いていたとは限らない。もし炉内でギャップが閉じていれば、燃料

溶融境界線出力の製造時ギャップの依存性は非常に小さくなると考えられる。従って、ギャップ閉塞の挙動を調べるために、今後本 B5D-2 試験体の残留ギャップ幅について測定、評価することが必要である。

燃料ペレット密度については、図 4.19において、ギャップ幅約  $190\mu\text{m}$  の 95%TD のグループ ( $\text{O}/\text{M}$  比 1.97) と 91%TD の  $\text{O}/\text{M}$  比 1.98 のグループのデータを比較すると、データのばらつきはあるが、高密度の 95%TD のグループの方が燃料溶融境界線出力が  $20\sim30\text{ W/cm}$  程高くなっている。燃料ペレット密度の上昇に対して燃料溶融境界線出力は一般的に上昇する。それは、密度の上昇によって燃料ペレットの熱伝導率が向上し、燃料中心温度が低下するためである。式(2)の相関式からは、 $\text{O}/\text{M}$  比の違いを考慮すると  $10\text{ W/cm}$  程高くなることが予測されることから、本試験では DEA-2 よりも燃料ペレット密度の効果が大きく現れているといえる。

第 2.3 節及び第 4.3.3 節で述べたように、本試験では燃料組織変化があまり進行しない段階で燃料溶融を発生させる出力上昇パターンを設定している。燃料組織変化が十分に発達しているならば、大きな中心空孔が形成され、その周辺の柱状晶領域の燃料ペレット密度は上昇する。本試験と海外で実施された過去の PTM 試験の出力上昇パターンの比較は前出の図 2.4 に示したが、これらの PTM 試験について原子炉出力 60% から 100% に到達するまでの時間を比較して見ると表 4.5 のようになる。EBR-II で行われた PTM 試験では 2.5 時間から 5 時間掛かっており、上述の DEA-2 試験でも 3.5 時間である。これに対し、本 PTM-2 試験では 1.3 時間と他の試験に比べて極端に短くなっている。燃料組織変化が十分進行していない本試験では、中心空孔周辺の燃料ペレット密度の上昇は、燃料組織変化が発達した後に燃料溶融を発生させている DEA-2 試験よりも小さく、燃料中心温度はより製造時の燃料ペレット密度を反映したものとなっていた可能性がある。

ただし、試験パラメータとして、燃料ペレット密度の 2 つのグループに対して、各々のグループ内での密度のばらつきは決して小さいものではないこと、また  $\text{O}/\text{M}$  比が皆異なっているため  $\text{O}/\text{M}$  比依存性に関わる不確かさがあること、ギャップ幅  $190\mu\text{m}$  の一点での比較しかできないことから、現状においては定性的に試験データに異常な傾向が無いことを確認するに止めるべきと思われる。

燃料ペレットの  $\text{O}/\text{M}$  比については、図 4.19 に 91%TD のグループについて 1.96 と 1.98 の 2 水準が示されている。さらにこれらのデータは、ギャップ幅約  $140\mu\text{m}$  と約  $190\mu\text{m}$  の 2 水準に分けられる。ギャップ幅約  $140\mu\text{m}$  における  $\text{O}/\text{M}$  比依存性については、 $\text{O}/\text{M}$  比 1.96 のデータ点数が限られている上にばらつきが大きく、明らかではない。ギャップ幅約  $190\mu\text{m}$  においては、 $\text{O}/\text{M}$  比 1.98 の燃料溶融境界線出力に対して 1.96 の溶融境界線出力が  $30\text{ W/cm}$  程低い。 $\text{O}/\text{M}$  比の低下によって、燃料ペレットの熱伝導率は低下するが<sup>10)</sup>、一方燃料ペレットの熱膨張率は大きくなりペレット-被覆管ギャップを小さくするので<sup>11)</sup>、燃料溶融境界線出力の  $\text{O}/\text{M}$  比依存性はギャップや燃料密度よりも複雑なものとなる。図 4.20 に Ethridge らによる DEA-2 試験で得られた燃料溶融境界線出力の  $\text{O}/\text{M}$  比とギャップ幅の相関を示す<sup>3)</sup>。本図は、 $\text{O}/\text{M}$  比が 1.94 の燃料に対する 1.97 の燃料の溶融境界線出力の上昇幅とペレット-被覆管ギャップの関係を示したものであるが、 $\text{O}/\text{M}$  比の差に対して燃料溶融境界線出力の差は一定ではなく、ギャップ幅に依存した上昇幅を示している。これは、 $\text{O}/\text{M}$  比が燃料ペレットの熱膨張率を介してペレット-被覆管ギャップに影響しているためであると Ethridge らは考えている。式(2)

の相関式からは、O/M 比 1.98 と 1.96 の差に対する燃料溶融境界線出力の違いは 16 W/cm 程であり、本試験結果の方がその違いは大きい。前述のように、ギャップ閉塞に関する挙動が DEA-2 試験燃料と異なっている可能性があり、ここでも本試験燃料の残留ギャップ幅について検討することが必要である。

次に、燃料溶融境界線出力が燃料溶融範囲の上部側境界と下部側境界で違いを生じているか調査した。燃料溶融境界位置の上部側、下部側の違いは、燃料溶融境界線出力が上述の通り燃料パラメータや線出力についての局所的な違いを考慮しているので、被覆管温度の違いに帰着すると考えることができる。本試験における燃料溶融境界上下間の被覆管内面温度差は、前出の軸方向線出力分布計算結果を基にすると、60~80°C 程と予想される。一般に上部側の燃料溶融境界線出力は、被覆管温度が高いことによって下部側より燃料中心温度が上昇するため、低下すると考えられる。式(2)の相関式からは、60~80°C の被覆管内面温度の上昇によって燃料溶融境界線出力は 10 W/cm 前後低下すると予測される。図 4.21 に、燃料ピン軸方向位置を区別して図 4.19 で示した燃料溶融境界線出力を示した。この図 4.21 と図 4.19 を比較すると、本試験では燃料溶融境界の上下間で燃料溶融境界線出力の違いは特に認められず、Ethridge らの相関式のように被覆管内面温度の影響は出ていない。被覆管内面温度の影響が相関式が示すように 10 W/cm 程度とすれば、線出力分布の誤差や試験結果のばらつきによって明確な依存性は現れない可能性が考えられる。

最後に燃料溶融境界線出力に対するタグガスの影響について述べる。通常燃料ピン内ガス組成は熱伝導率の大きな He を主成分としており、He より大きな質量を持ち、熱伝導率の小さい Xe や Kr が FP ガスあるいはタグガスとして混合すると、わずかな混合濃度で急激に熱伝導率が低下する<sup>12)</sup>。これによって、ギャップコンダクタンスが低下し、燃料中心温度が上昇するため、燃料溶融境界線出力は低下する。Baker らの EBR-II 炉における P-19 試験及び P-20 試験では 82%He-18%Xe のガス組成を持つ燃料ピンの試験が行われており、彼等はそのガス組成の効果として燃料溶融境界線出力が約 50 W/cm 低下するという結果を報告している<sup>13)</sup>。それに対して、Ethridge らの DEA-2 試験では 90%He-10%(Xe+Kr) のガス組成を持つ燃料ピンの試験が行われているが、燃料溶融境界線出力に対するタグガスの影響については明らかではない<sup>3)</sup>。本試験では、第 2.2 節で述べたようにタグガスが G801, G812, G812 の 3 本の燃料ピンに装填されており、その燃料ピン内ガス組成は 92%He-4%Xe-4%Kr で、DEA-2 試験とほぼ同等なガス組成と考えられる。図 4.22 に、図 4.19 で示した燃料溶融境界線出力をタグガスについて整理して示した。タグガス封入燃料ピンのデータ点数が限られていることと、全体にデータのばらつきが大きいために、燃料溶融境界線出力に対するタグガスの影響は本結果からは明らかではない。

以上をまとめると、本試験で評価した燃料溶融境界線出力は、製造時の各燃料パラメータ、すなわち燃料ペレット-被覆管ギャップ、燃料ペレット密度、O/M 比、さらに被覆管内面温度差、タグガス、に対する依存性が、過去に報告されている PTM 試験に比べていずれも小さい傾向を示した。しかし、定性的には異常な挙動は見られず、本試験結果は妥当なものと考えられる。過去の PTM 試験との相違については、本試験が燃料組織変化があまり進行しない段階で燃料溶融を発生させる特徴的な出力上昇パターンで行われていること、ギャップ閉塞が炉内において発生した可能性があること、が主な原因と予想されるが、今後これらについて試験・評価することが必要である。

表4.1 B5D-2試験燃料ピンの燃料溶融割合評価結果 (1)

PIE番号	軸方向位置*	試料番号	D.F.C.B.	製造時燃料パラメータ**				照射後試験結果#		
				(mm)	O/M比	タガガス	ペレット密度 (%TD)	直径ギャップ幅 (μm)	局所線出力 (W/cm) ***	溶融面積割合 (%)
G801	Peak	G80122	270.2	1.98	○	91.86	146	636	8.5	3.3
G802	Peak	G80222	270.8	1.98		91.42	138	632	3.6	3.7
G803	Peak	G80322	270.6	1.97		95.01	191	668	5.1	3.1
G804	Peak	G80422	271.6	1.98		90.71	197	622	10.5	3.9
G805	Peak	G80552	270.3	1.98		90.19	134	628	3.1	3.5
	Add.	G80554	312.7	1.98		92.30	138	629	5.3	-
G806	Peak	G80642	271.6	1.97		94.95	187	657	7.7	3.4
G807	Peak	G80752	270.4	1.98		90.80	132	627	4.5	3.5
G808	Peak	G80852	270.3	1.96		91.18	133	632	2.7	3.6
	Add.	G80854	305.9	1.96		90.28	138	625	8.1	-
G809	Peak	G80922	270.8	1.96		90.75	144	627	10.7	3.9
G810	Peak	G81062	270.2	1.97		94.77	186	665	6.7	3.2
G811	Peak	G81142	271.0	1.96		90.98	140	625	8.5	3.6
G812	Peak	G81222	270.2	1.97	○	94.88	198	660	6.7	3.6
										87

\* Peakはピーク線出力位置で採取した試料、Add.はそれ以外の位置で追加採取した試料を表す。 \*\* 燃料パラメータは局所ペレットの製造時測定値

\*\*\* MCNP解析値(1/23/98版)の線出力分布を基に、局所燃料ペレットの密度と外径により補正した値。

# 燃料溶融面積割合は中心空孔を含む、残留ギャップは8方位の平均直径ギャップ、-は未計測であることを表す。

表4.1 B5D-2試験燃料ピンの燃料溶融割合評価結果 (2)

PIE番号	軸方向位置*	試料番号	D.F.C.B. (mm)	製造時燃料パラメータ**				照射後試験結果#			
				O/M比	タグガス ペレット密度 (%TD)	直径ギャップ幅 (μm)	局所線出力 (W/cm) ***	溶融面積割合 (%)	柱状晶径 (mm)	残留ギャップ (μm)	
G813	Peak	G81352	270.8	1.98	○	92.32	132	639	2.3	3.573	81.4
G814	Peak	G81444	270.6	1.98		91.01	129	625	3.4	3.585	74.4
G815	Peak	G81552	270.2	1.97		95.33	235	678	10.0	3.644	103.6
G816	Add.	G81651	246.1	1.96		90.43	197	608	11.8	-	-
G816	Peak	G81653	270.5	1.96		91.54	190	617	4.3	4.139	113.6
G817	Peak	G81722	271.3	1.96		92.05	201	614	7.2	3.46	114
G818	Peak	G81842	271.4	1.98		90.58	180	616	3.4	3.537	103.6
G819	Peak	G81922	271.5	1.97		94.89	247	670	7.4	3.11	82.2
G820	Peak	G82052	270.2	1.98		91.48	185	615	4.7	3.646	108.2
G821	Peak	G82142	271.1	1.96		90.82	196	611	6.6	4.212	109.6
G822	Peak	G82252	271.5	1.98		91.59	183	623	3.0	3.766	128.8
G823	Peak	G82342	271.1	1.97		94.95	237	672	9.2	3.336	78
G824	Peak	G82452	270.2	1.98		91.94	133	632	3.0	3.251	90.6

\* Peakはピーク線出力位置で採取した試料、Add.はそれ以外の位置で追加採取した試料を表す。 \*\* 燃料パラメータは局所ペレットの製造時測定値

\*\*\* MCNP解析値(1/23/98版)の線出力分布を基に、局所燃料ペレットの密度と外径により補正した値。

# 燃料溶融面積割合は中心空孔を含む、残留ギャップは8方位の平均直径ギャップ、-は未計測であることを表す。

表4.2 660W/cm到達時の燃料溶融割合予測値と照射後試験結果

ピン番号	PIE番号	Pu富化度 (wt%)	ペレット密度 (%TD)*	直径ギャップ幅 (μm)*	O/M比	タグガス	燃料溶融割合 (%) 660W/cm予測値	金相観察結果**
B5201	G822	19.50	91.2	187	1.98		17.1	3.0
B5202	G820		91.3	188			17.2	4.7
B5203	G818		91.2	186			16.9	3.4
B5204	G804		91.3	189			17.2	10.5
B5205	G823	19.37	95.2	244	1.97		20.4	9.2
B5206	G815		95.3	245			20.3	10.0
B5207	G819		95.1	246			20.5	7.4
B5208	G802	19.50	91.4	133	1.98		9.6	3.6
B5209	G805		91.3	137			10.3	3.1
B5210	G807		91.4	137			10.1	4.5
B5211	G814		91.2	132			9.8	3.4
B5212	G824		91.4	133			9.9	3.0
B5213	G813	19.50	91.5	136	1.98	○	11.5	2.3
B5214	G801		91.4	139		○	12.3	8.5
B5215	G803	19.37	95.0	187	1.97		13.5	5.1
B5216	G810		95.0	188			13.5	6.7
B5217	G806		94.9	188			13.8	7.7
B5218	G812		94.8	186		○	16.8	6.7
B5219	G821	19.46	91.3	197	1.96		17.6	6.6
B5220	G816		91.6	199			17.6	4.3
B5221	G817		91.5	202			17.8	7.2
B5222	G808	19.46	91.3	139	1.96		10.4	2.7
B5223	G809		91.2	139			10.6	10.7
B5224	G811		91.4	139			10.2	8.5

\* ピン装荷ペレットの平均値 \*\* 最大線出力位置（約271mmDFCB）

表4.3 B5D-2における燃料溶融軸方向範囲の評価結果 (1)

ピン番号	PIE番号	溶融境界位置	試料番号	直下のペレット端面 (mm)		ペレット端面から溶融境界までの長さ (mm)			溶融境界位置 (mm)	
				位置*	不確かさ幅**	写真上読み***	実長さ***	不確かさ幅	DFCB*	不確かさ幅
B5214	G801	Bottom	G801123	162.5	0.8	167.2	5.71	0.2	168.2	1.0
			Top	G801322	353.1	0.8	175.7	6.00	0.2	359.1
B5208	G802	Bottom	G802122	163.4	-0.1	10.8 - 145.5	0.37 - 4.97	-	163.8 - 168.4	-
			Top	G80232-2/B	354.2 - 363.27	-0.1	238.3 / 23.4	8.14 / 0.80	-	362.3 - 364.1
B5215	G803	Bottom	G80312-3/B	155.2 - 182.4	0.6	172.6 / 5.4	5.89 / 0.18	-	161.1 - 182.6	-
			Top	G803322	337.0	0.6	162.7	5.55	0.25	342.5
B5204	G804	Bottom	G80412C	154.2	0.5	-134.2 - 98.7	-4.58 - 3.37	-	149.6 - 157.6	-
			Top	G804312	308.5	0.5	135.0	4.61	1.2	313.1
B5209	G805	Bottom	G80545	190.8 - 209.07	-0.1	103.5 / -50.0	3.53 / -1.71	-	194.4 - 207.4	-
			Top	G805611	327.1 - 336.26	-0.1	3.8 / 0.0	0.13 / 0.00	-	327.3 - 336.3
B5217	G806	Bottom	G8063-11/31	155.3 - 182.71	-0.2	82.2 / 55.4	2.81 / 1.89	-	158.1 - 184.6	-
			Top	G806621	356.3	-0.2	87.0	2.97	2.2	359.3
B5210	G807	Bottom	G80745	182.1	-0.1	155.8	5.32	1.6	187.4	1.7
			Top	G807-63/711	336.5	-0.1	198.6 / 230.8	6.78 / 7.88	-	343.3 - 344.4
B5222	G808	Bottom	G80833	162.1	0.2	0.0 - 94.6	0.00 - 3.23	-	162.1 - 165.3	-
			Top	G80863	361.9	0.2	0.0 - 147.1	0.00 - 5.02	-	361.9 - 366.9
B5223	G809	Bottom	G809123	145.3 - 154.37	-0.8	146.5 / 237.0	5.00 / 8.09	-	150.3 - 162.5	-
			Top	G809322#	-	-	-	-	-	-
B5216	G810	Bottom	G81043	164.1	-0.6	0.0 168.4	0.00 / 5.75	-	164.1 - 169.8	-
			Top	G8107-3/5	354.6 - 363.7	-0.6	96.0 / 158.2	3.28 / 5.40	-	357.9 - 369.1
B5224	G811	Bottom	G811321	162.9	0.2	87.9	3.00	0.3	165.9	0.5
			Top	G811631	370.9	0.2	135.3	4.62	0.15	375.6
B5218	G812	Bottom	G81212-2/C	155.2 - 164.19	0.3	116.5 / 132.5	3.98 / 4.52	-	159.2 - 168.7	-
			Top	G812322	363.4	0.3	72.3	2.47	0.15	365.8

\* -で結ばれた数値は、溶融境界が確定できず、その推定範囲で示したもの。\*\* 直下のペレット境界位置の不確かさ幅は、製造時ペレット高さの積算値とX線ラジオグラフィーの燃料スタック長測定値の差とした。 \*\*\* -は溶融境界が確定できず、その推定範囲で示したもの、／は\*の推定範囲それぞれに対応する測定結果。下線で示した数値は、溶融境界が切断代にある可能性があり、試料端部の位置としたものを示す。

#は採取した試料の前後で燃料溶融境界が確認できず、溶融範囲を不明としたもの。

表4.3 B5D-2における燃料溶融軸方向範囲の評価結果 (2)

ピン番号	PIE番号	溶融境界位置	試料番号	直下のペレット端面 (mm)		ペレット端面から溶融境界までの長さ (mm)			溶融境界 (mm)	
				位置*	不確かさ幅**	写真上読み***	実長さ***	不確かさ幅	DFCB*	不確かさ幅
B5213	G813	Bottom	G8133・3/5	145.2 – 172.53	-0.6	21.6 / 0.0	0.74 / 0.00	-	146.0 – 172.5	-
		Top	G81365	363.3	-0.6	97.8	3.34	2.4	366.6	3.0
B5211	G814	Bottom	G814341	172.7 – 181.75	-0.2	96.6 / 235.3	3.30 / 8.03	-	176.0 – 189.8	-
		Top	G814621	345.3	-0.2	102.5	3.50	0.5	348.8	0.7
B5206	G815	Bottom	G81533	127.1	0.3	37.8 – 127.5	1.29 – 4.35	-	128.4 – 131.5	-
		Top	G81565	363.6	0.3	157.6	5.38	1.2	369.0	1.5
B5220	G816	Bottom	G81633	126.2 – 135.29	0.7	51.3 / 71.2	1.75 / 2.43	-	127.9 – 137.7	-
		Top	G81663	370.3	0.7	0.0 – 134.7	0.00 – 4.60	-	370.3 – 374.9	-
B5221	G817	Bottom	G817123	127.3	0.6	226.7	7.74	2.5	135.0	3.1
		Top	G817322	381.4	0.6	193.9	6.62	2.3	388.0	2.9
B5203	G818	Bottom	G818321	164.0	-0.2	31.3	1.07	0.55	165.0	0.8
		Top	G818611#	—	—	—	—	—	—	—
B5207	G819	Bottom	G81912・2/C	127.2 – 145.53	-0.1	212.7 / 160.2	7.26 / 5.47	-	134.5 – 151.0	-
		Top	G81931B	363.4	-0.1	-31.0	-1.06	0.8	362.4	0.9
B5202	G820	Bottom	G82043	190.0	-0.1	188.0	6.42	0.1	196.4	0.2
		Top	G82063	344.6	-0.1	119.5	4.08	0.75	348.7	0.9
B5219	G821	Bottom	G821321	145.5	0.6	3.8	0.13	1	145.6	1.6
		Top	G821621	362.8	0.6	106.0	3.62	0.2	366.4	0.8
B5201	G822	Bottom	G82233#	—	—	—	—	—	—	—
		Top	G82263	344.4	0.3	26.7	0.91	0.15	345.4	0.5
B5205	G823	Bottom	G823321	154.4	0.6	87.8	3.00	0.4	157.4	1.0
		Top	G823621	364.5 – 373.66	0.6	53.8 / 89.0	1.84 / 3.04	-	366.4 – 376.7	-
B5212	G824	Bottom	G82443	172.5	0.5	234.9	8.02	0.4	180.5	0.9
		Top	G82463	345.5 – 354.65	0.5	199.9 / 6.7	6.82 / 0.23	-	352.3 – 354.9	-

\* – で結ばれた数値は、溶融境界が確定できず、その推定範囲で示したもの。\*\* 直下のペレット境界位置の不確かさ幅は、製造時ペレット高さの積算値とX線ラジオグラフィーの燃料スタッフ長測定値の差とした。 \*\*\* – は溶融境界が確定できず、その推定範囲で示したもの、／は\* の推定範囲

それぞれに対応する測定結果。下線で示した数値は、溶融境界が切断代にある可能性があり、試料端部の位置としたものを示す。

# は採取した試料の前後で燃料溶融境界が確認できず、溶融範囲を不明としたもの。

表4.4 B5D-2における燃料溶融境界線出力

PIE番号 ピン番号	溶融境界 位置	O/M比	タガガス	ペレット密度 (%TD)	ギャップ幅 (μm)*	溶融境界線出力** (W/cm)
G801	Bottom	1.98	○	90.3	138	595
B5214	Top			91.8	138	591
G802	Bottom	1.98		90.8	143	592 - 595
B5208	Top			92.0	141	587 - 585
G803	Bottom	1.97		95.1	187	631 - 646
B5215	Top			94.7	185	633
G804	Bottom	1.98		90.8	193	573 - 579
B5204	Top			90.2	193	600
G805	Bottom	1.98		91.2	138	618 - 625
B5209	Top			91.3	139	613 - 607
G806	Bottom	1.97		95.0	187	616 - 635
B5217	Top			94.9	184	610
G807	Bottom	1.98		90.7	140	605
B5210	Top			91.2	139	595 - 595
G808	Bottom	1.96		90.8	145	591 - 593
B5222	Top			91.8	142	587 - 582
G809	Bottom	1.96		91.4	144	586 - 595
B5223	Top			-	-	-
G810	Bottom	1.97		95.0	186	631 - 635
B5216	Top			95.0	187	620 - 609
G811	Bottom	1.96		91.5	145	594
B5224	Top			90.2	143	559
G812	Bottom	1.97	○	94.9	188	622 - 630
B5218	Top			95.2	189	610
G813	Bottom	1.98	○	91.6	137	585 - 605
B5213	Top			91.2	136	578
G814	Bottom	1.98		92.1	143	605 - 613
B5211	Top			90.3	144	581
G815	Bottom	1.97		95.5	249	608 - 611
B5206	Top			95.1	249	615
G816	Bottom	1.96		91.4	194	552 - 561
B5220	Top			90.3	195	553 - 549
G817	Bottom	1.96		91.8	196	558
B5221	Top			93.1	191	549
G818	Bottom	1.98		92.1	195	591
B5203	Top			-	-	-
G819	Bottom	1.97		95.1	249	610 - 625
B5207	Top			95.1	250	619
G820	Bottom	1.98		91.2	189	598
B5202	Top			92.2	190	582
G821	Bottom	1.96		90.5	195	563
B5219	Top			91.4	197	564
G822	Bottom	1.98		-	-	-
B5201	Top			90.5	191	581
G823	Bottom	1.97		95.0	246	630
B5205	Top			95.1	248	615 - 604
G824	Bottom	1.98		91.1	139	602
B5212	Top			91.4	141	587 - 585

\* 直径ギャップ \*\* MCNP解析値(1/23/98版)の線出力分布を基に、局所燃料ペレットの密度と外径により補正した値。 -で結んだ値は溶融境界位置を範囲で評価したもの。 -は溶融境界位置が不明なものを示す。

表4.5 国内外のPTM試験の原子炉出力60%から100%に到達するまでの時間

試験名	試験炉	時間 (hour)
GE F-20 <sup>2)</sup>	米国 EBR-II	2.6
HEDL P-19 <sup>1)</sup>	米国 EBR-II	3.3
HEDL P-20 <sup>1)</sup>	米国 EBR-II	4.8
HEDL DEA-2 <sup>3)</sup>	米国 FFTF	3.5
PTM-1(B5D-1)	常陽	2.6
PTM-2(B5D-2)	常陽	1.3

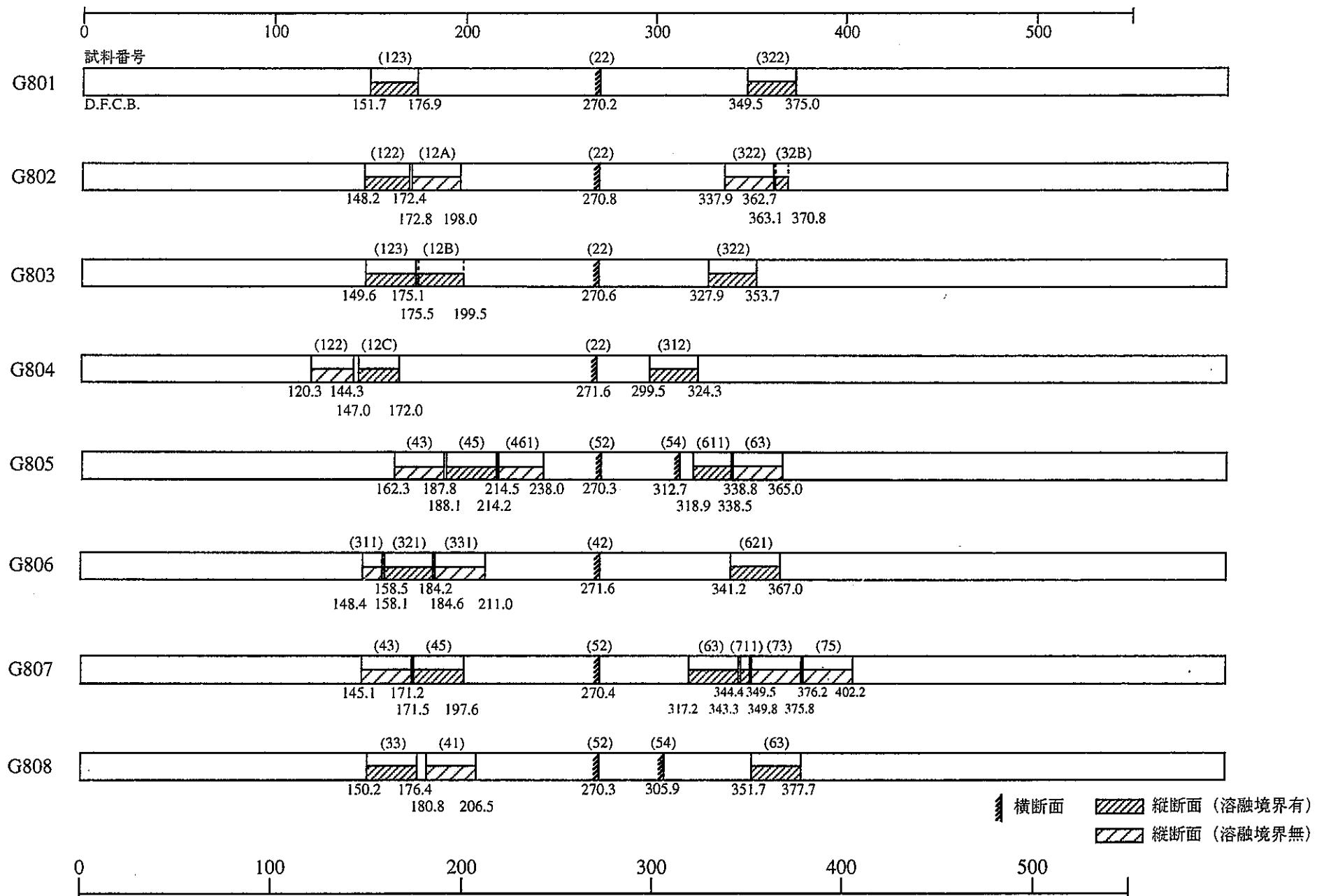


図4.1 B5D-2の金相試料採取位置（1）

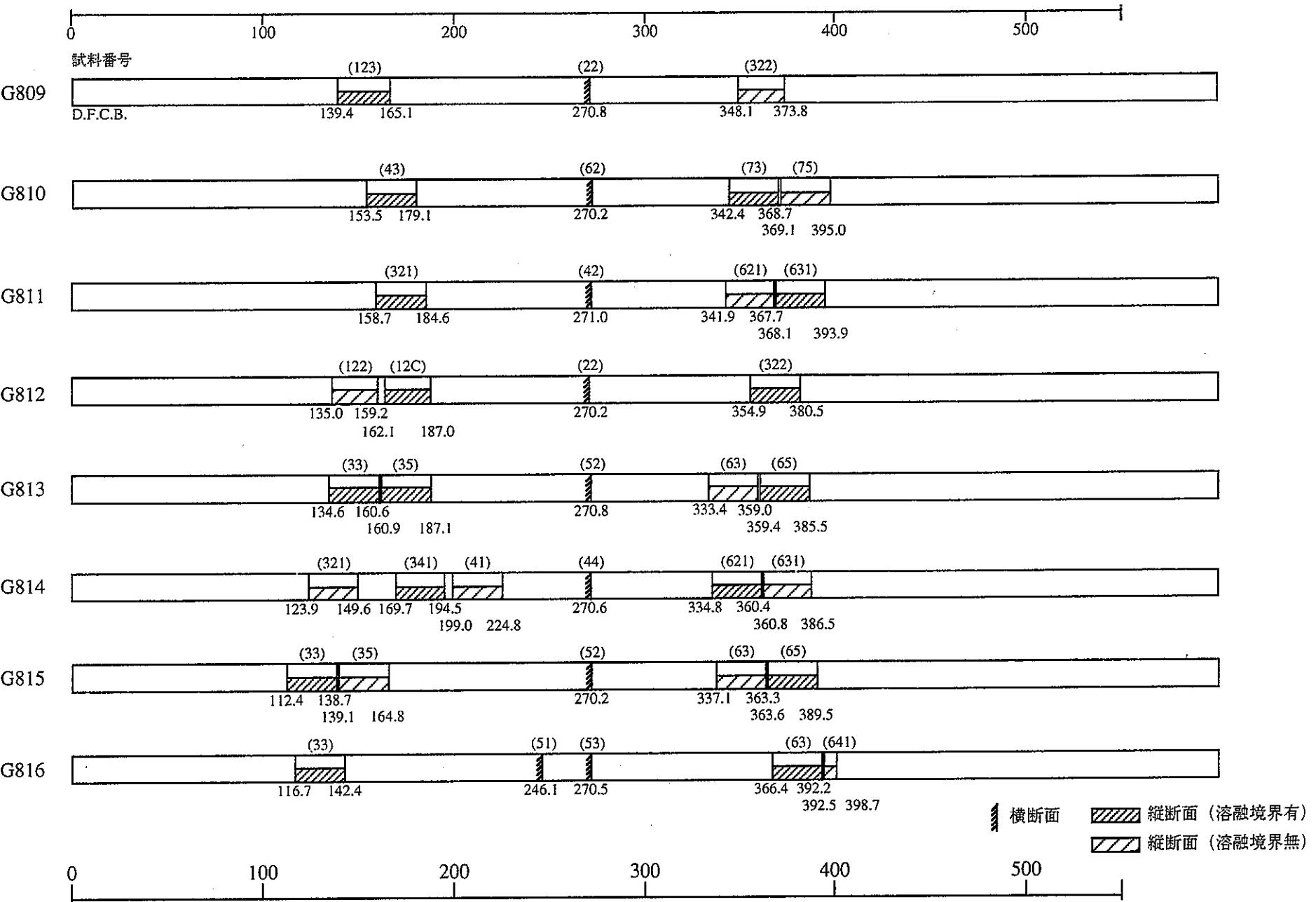


図4.1 B5D-2の金相試料採取位置 (2)

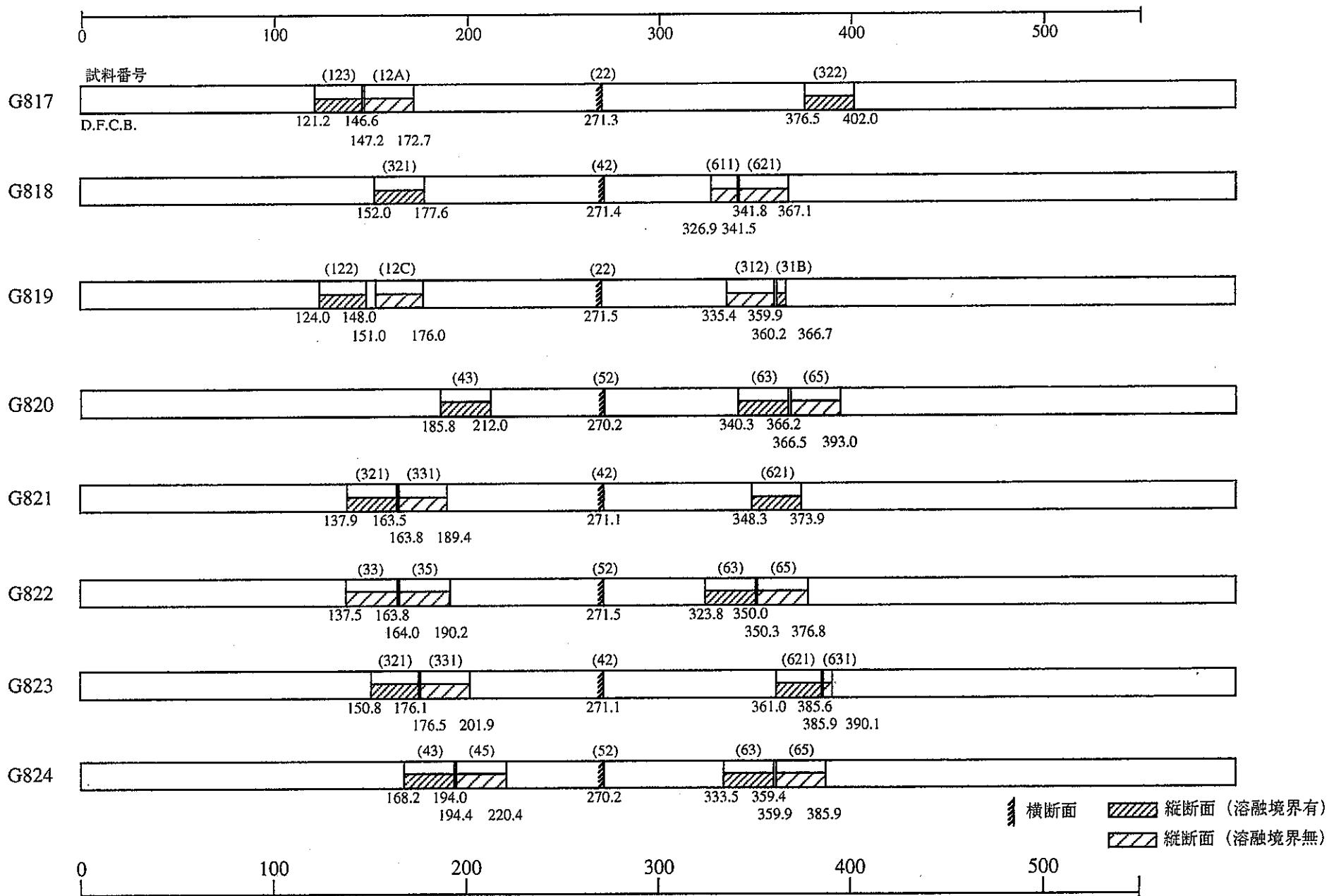


図4.1 B5D-2の金相試料採取位置 (3)

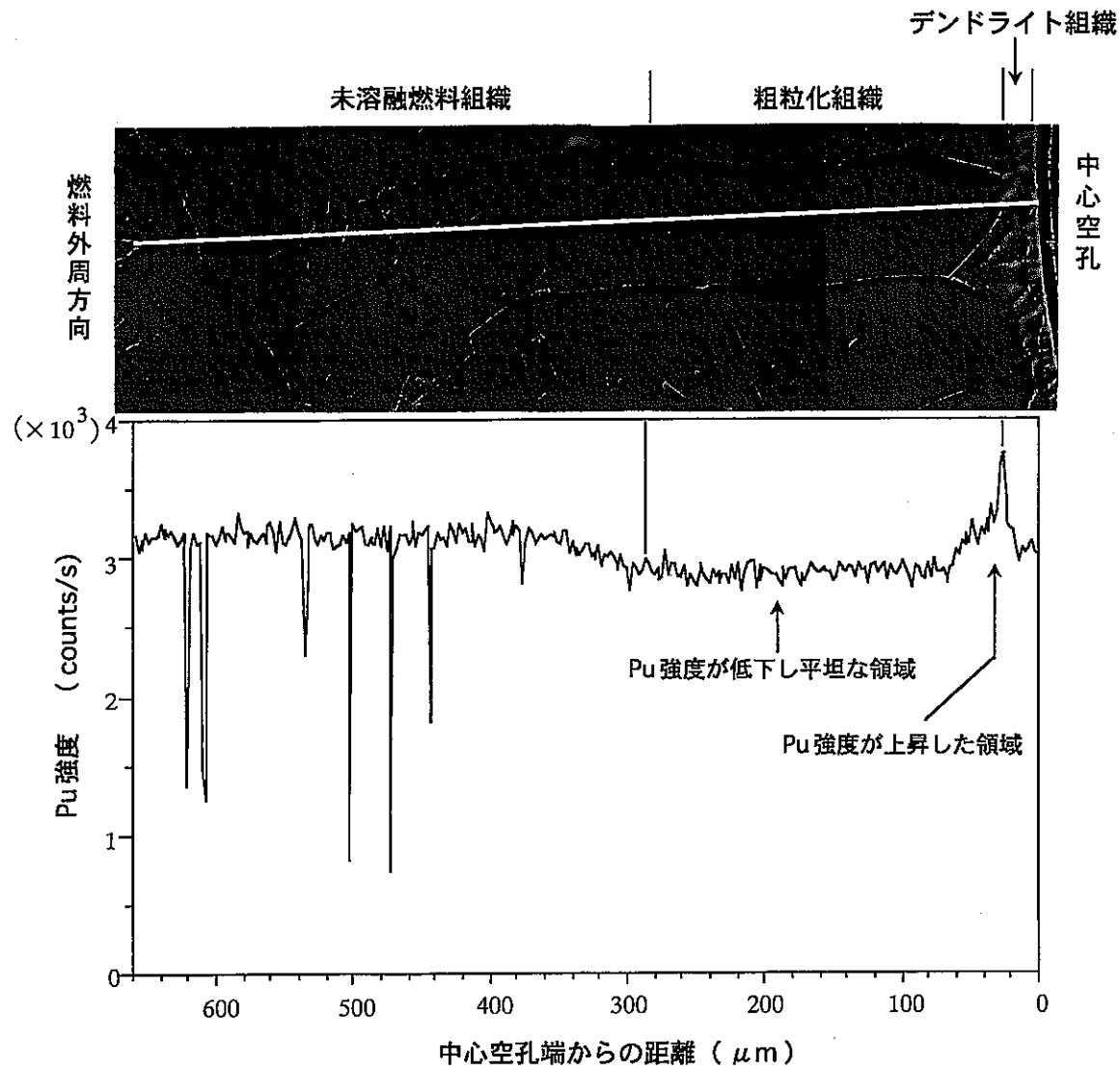


図 4.2 粗粒化した組織付近の Pu 分布の例 (試料 No.G82142)  
\*写真中の白線は分析ラインを示す。

## 分析位置

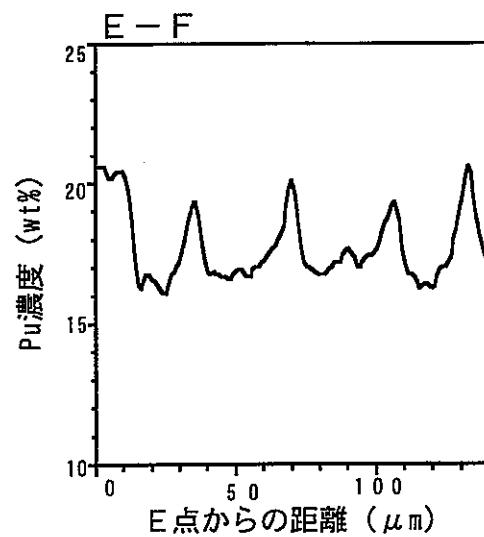
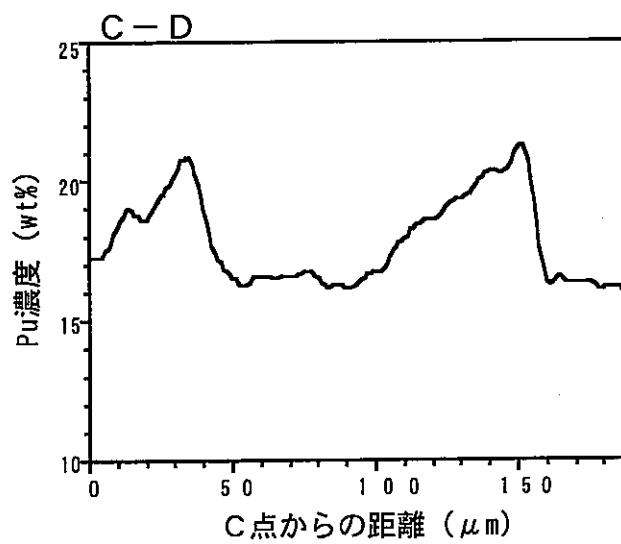
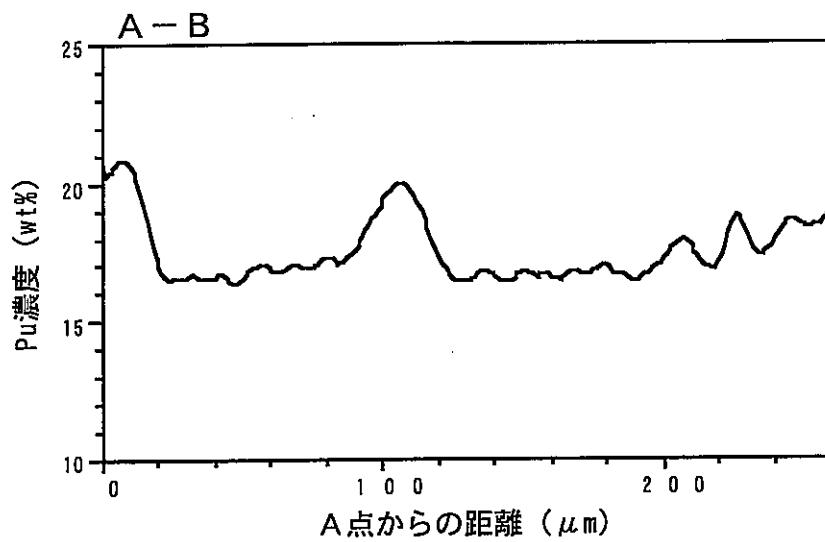
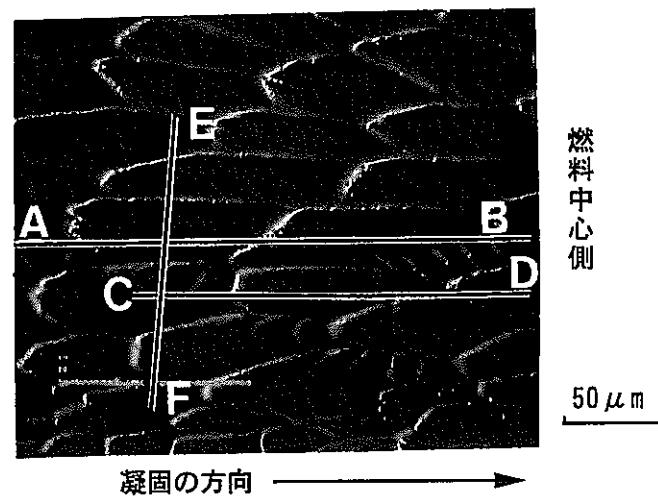


図 4.3 デンドライト組織のPu分布（試料 No.G80922）

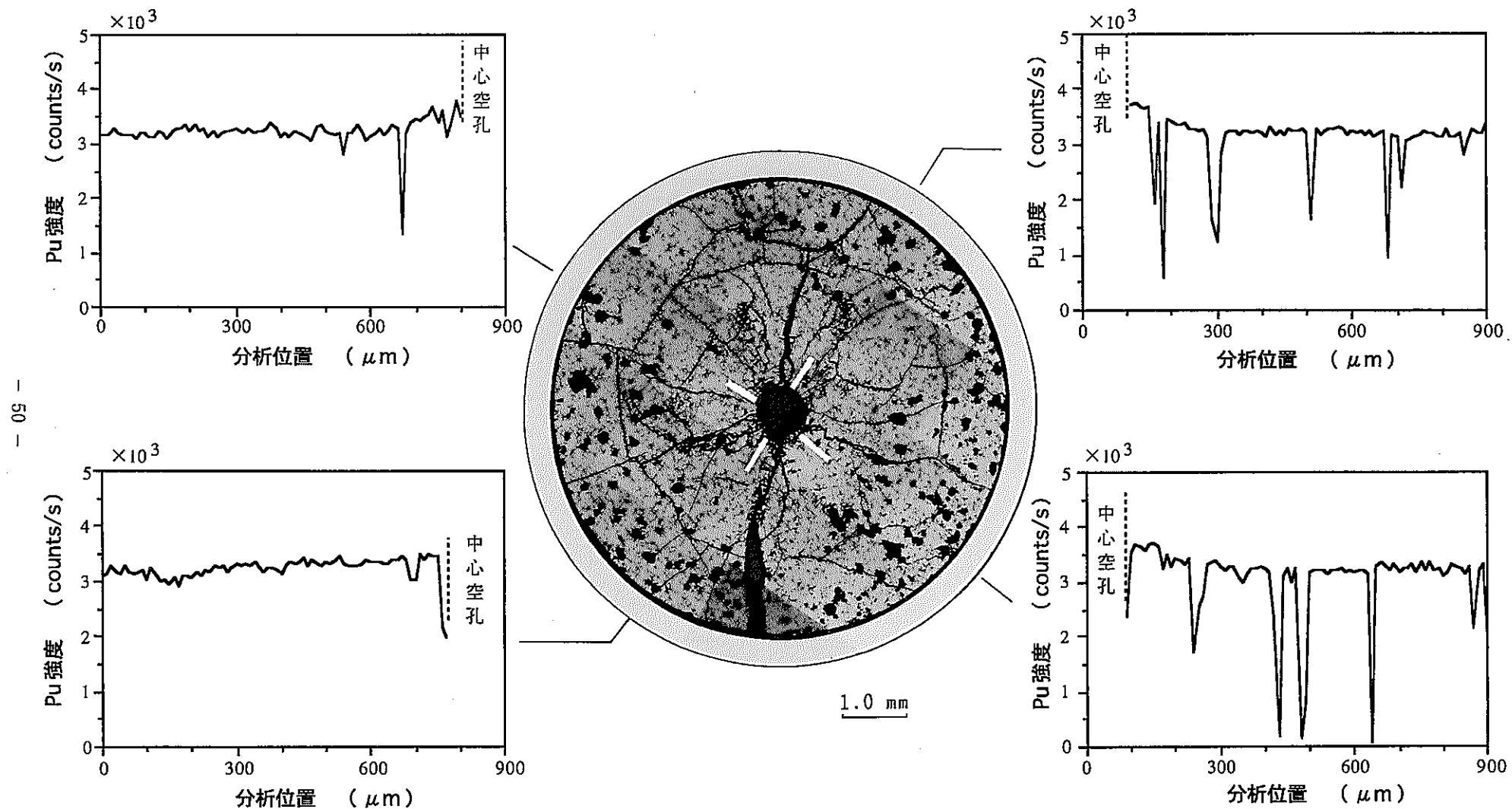


図 4.4 燃料溶融のない試料の中心空孔周辺 Pu 分布（試料 No.G801323）

\*写真中の白線は分析部位を示す。

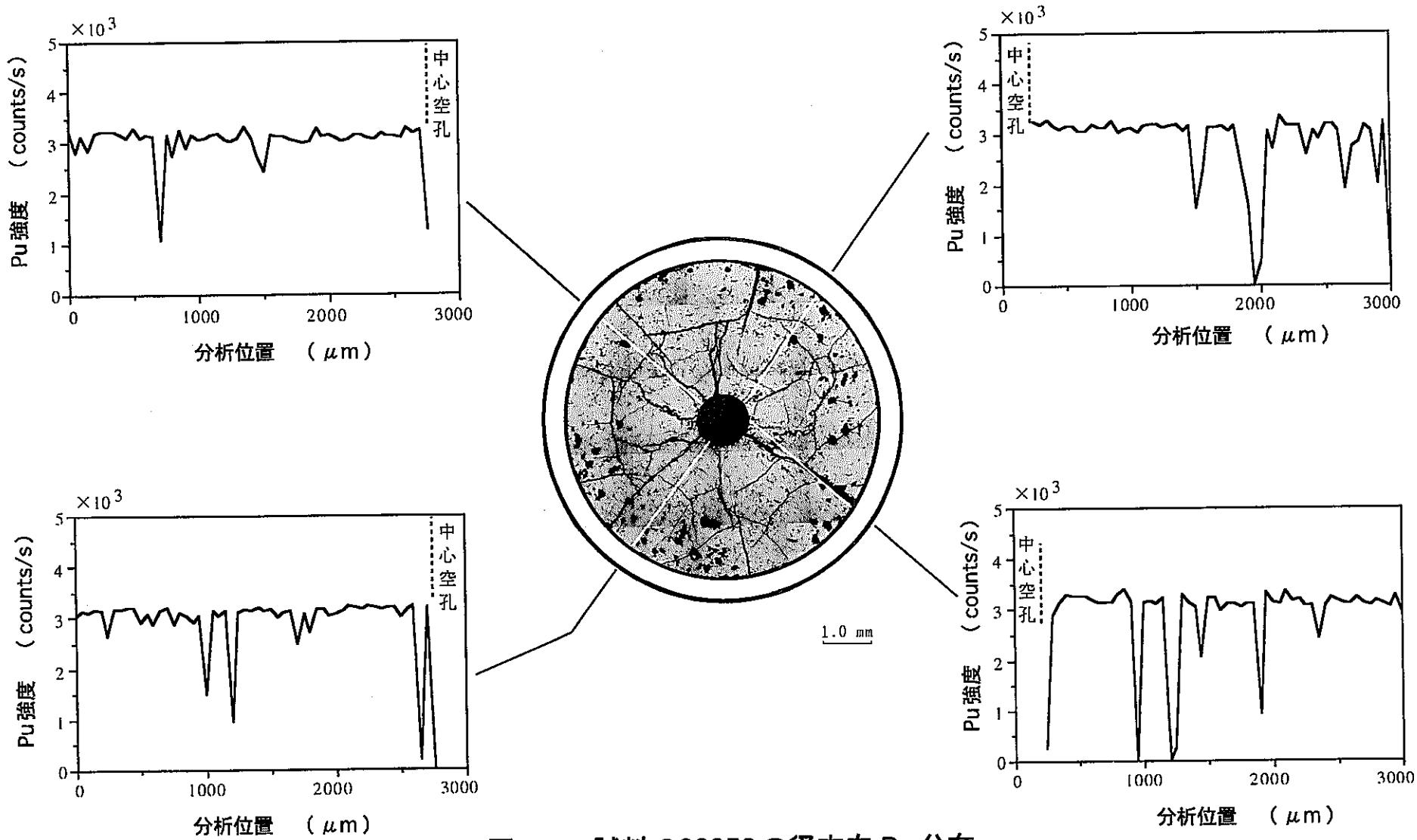


図 4.5 試料 G80852 の径方向 Pu 分布

\*写真中の白線は分析ラインを示す。

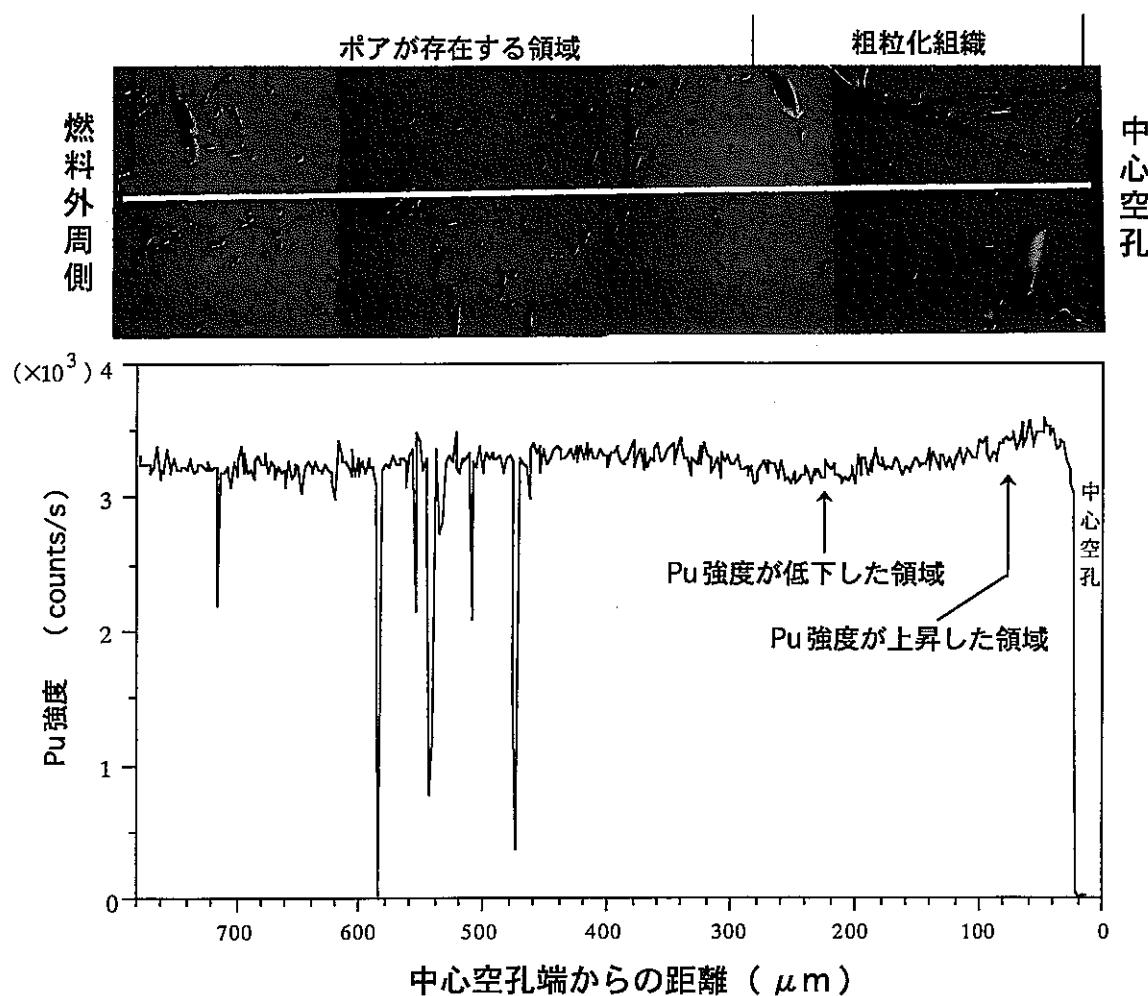


図 4.6 試料 G81352 の中心空孔付近の Pu 分布

\*写真中の横の白線は分析ラインを示す。

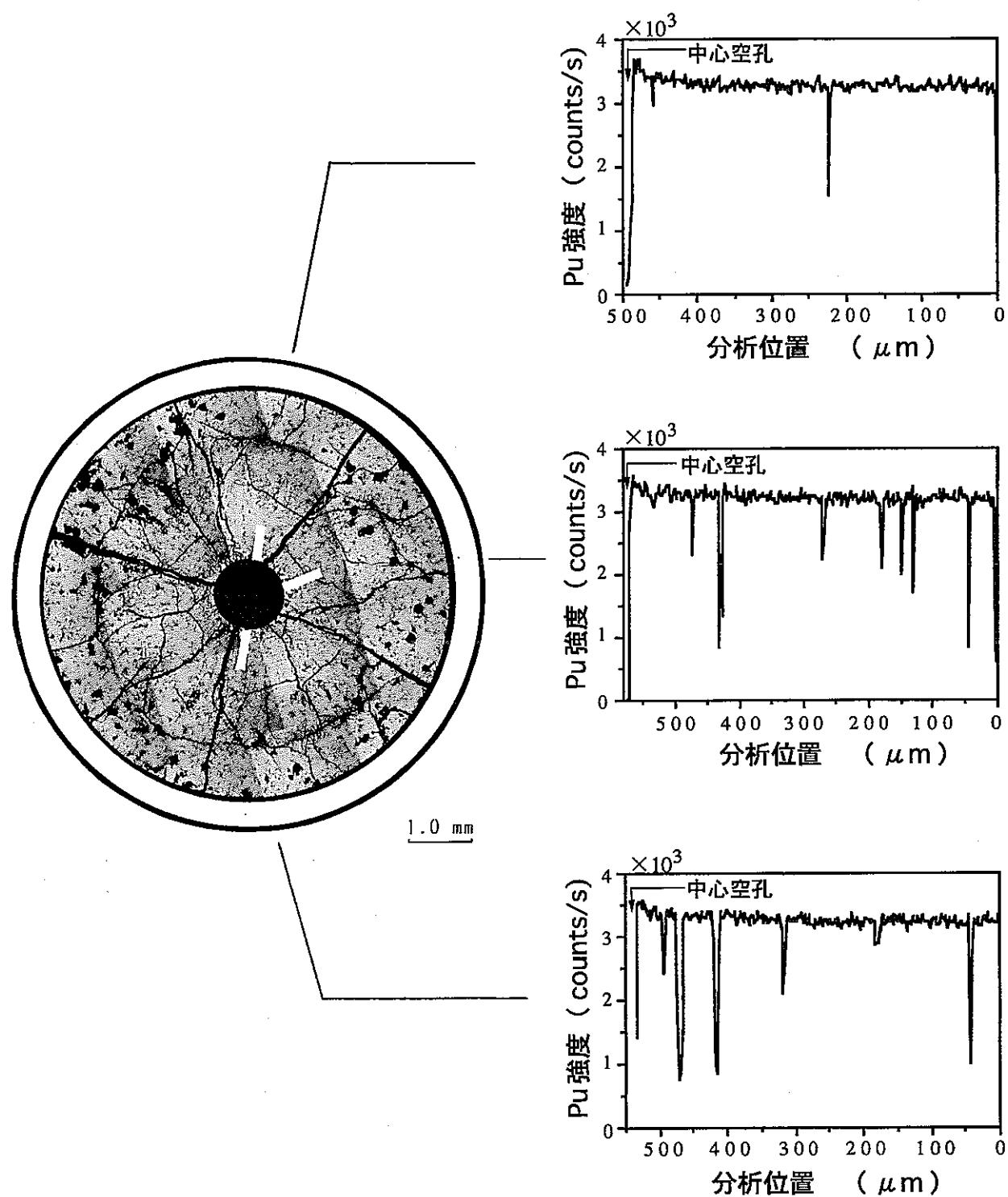
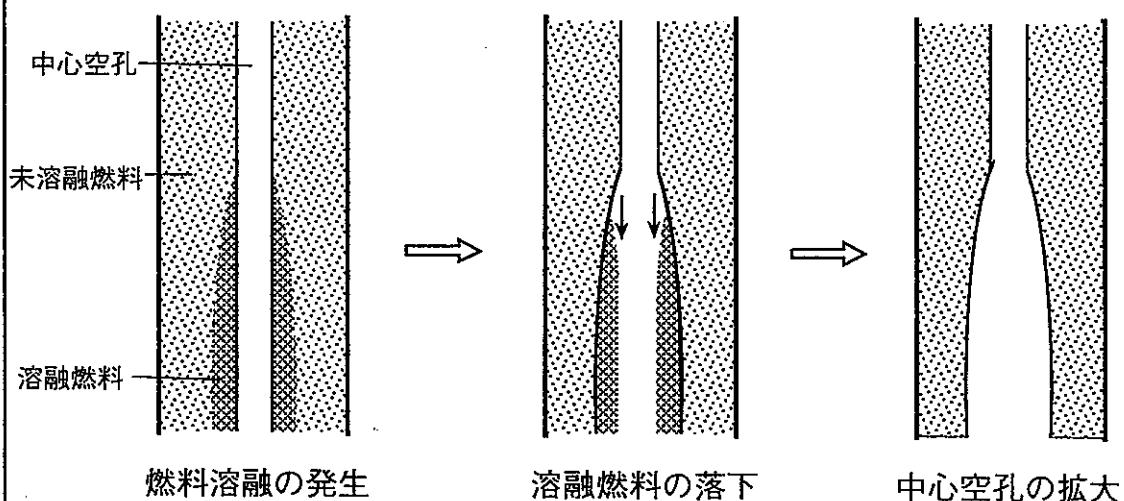


図 4.7 試料 G82252 の中心空孔周辺の Pu 分布

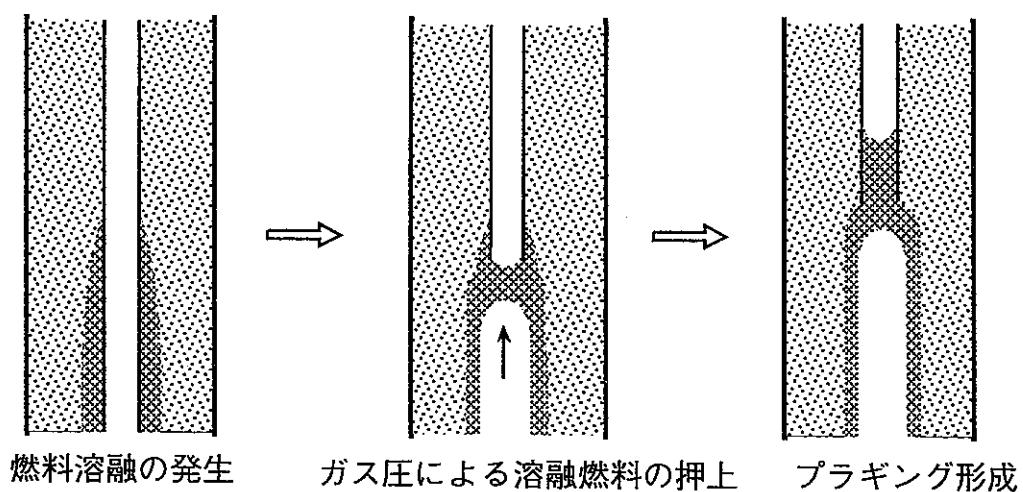
\*写真中の白線は分析部位を示す。

## 1. 燃料ピン上部側

(1) 溶融燃料が下方に移動したケース



(2) プラギングを形成するケース



## 2. 燃料ピン下部側

プラギングを形成するケース

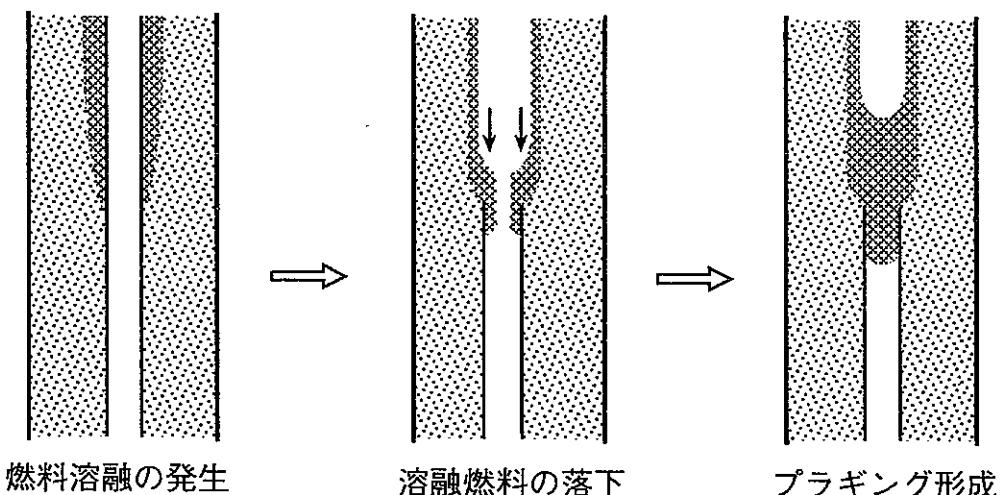


図4.8 典型的な溶融燃料の軸方向移動の形態

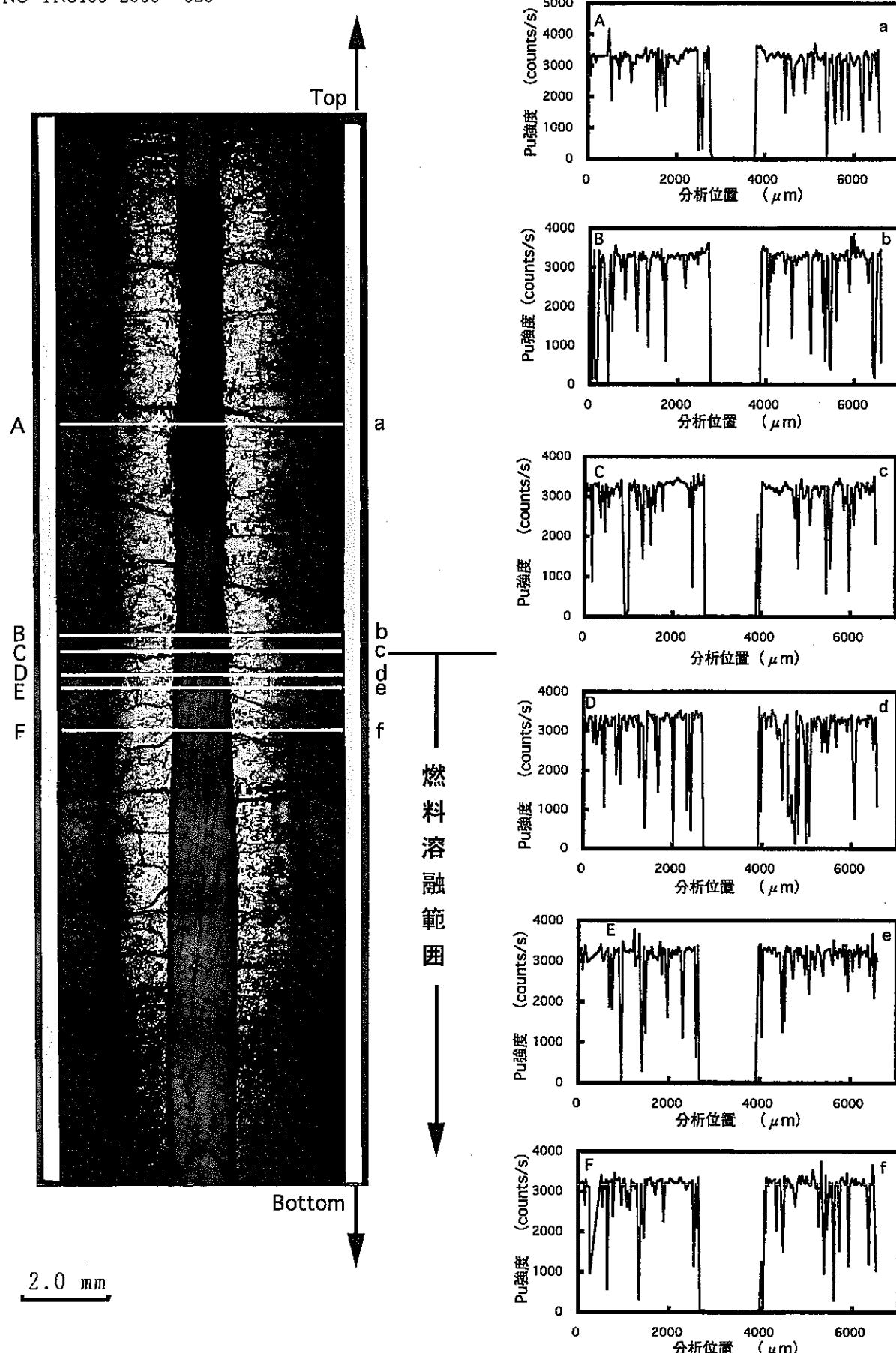


図 4.9 溶融燃料が完全に落下したケースにおける Pu 分布  
(ピン上部側 : 試料 No.G804312)

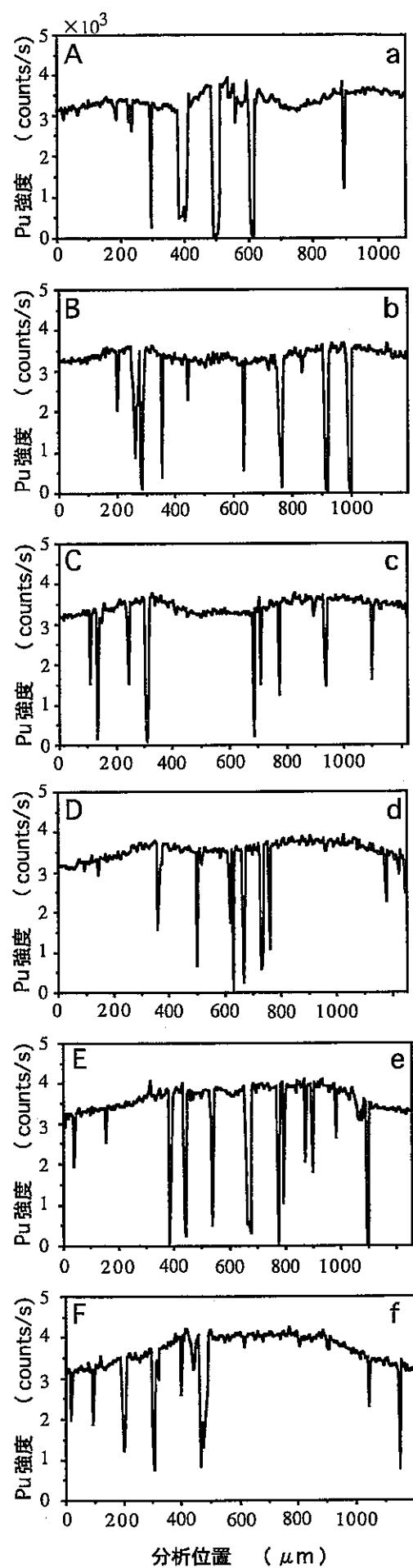
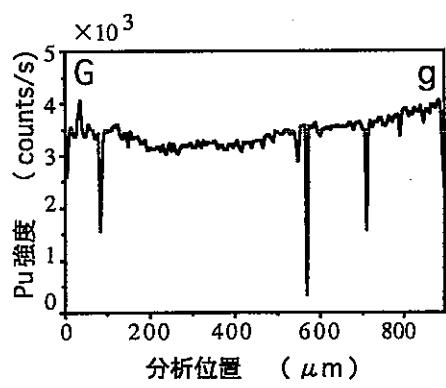
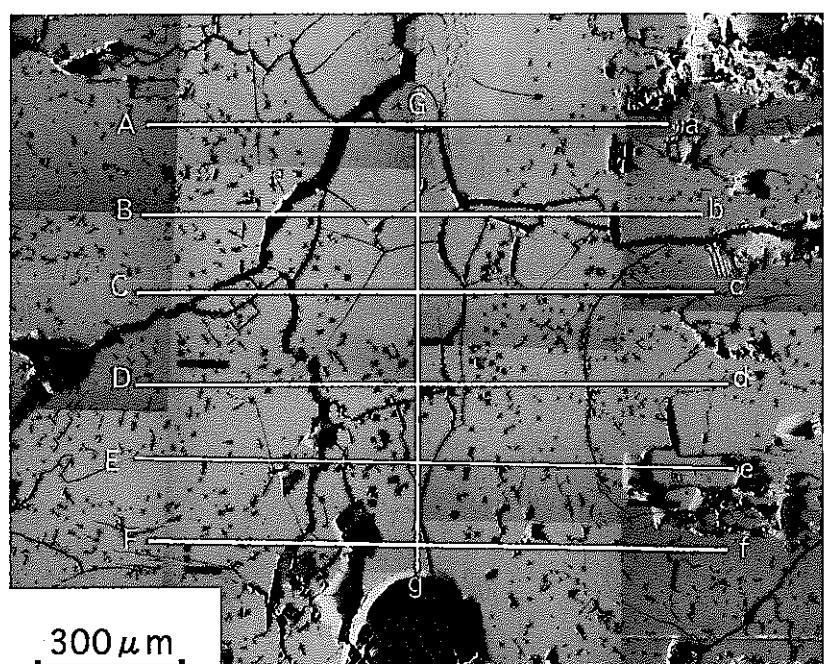
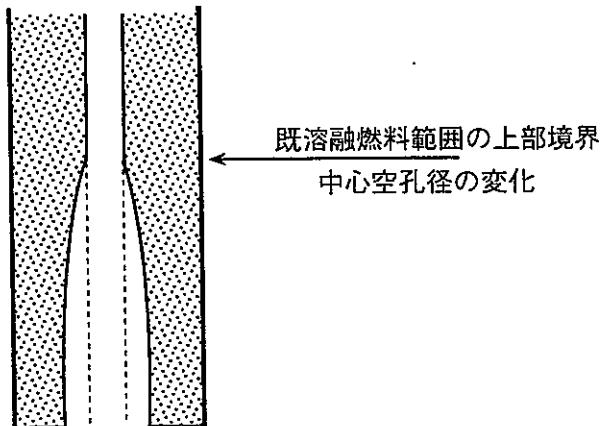


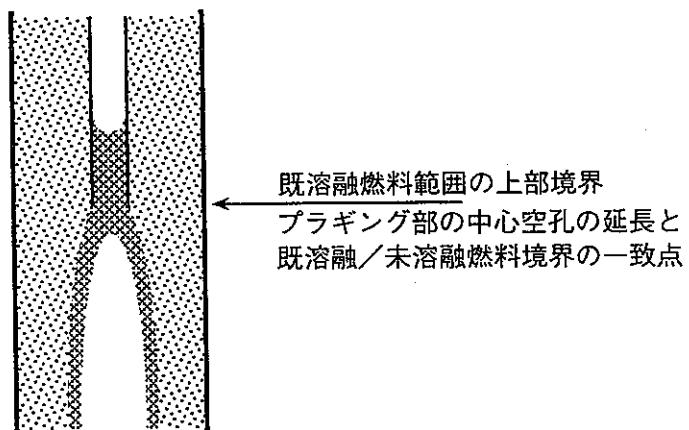
図 4.10 試料 No.G823321 のプラギング下端付近の Pu 分布

## 1. 燃料ピン上部側

(1) 溶融燃料が下方に移動したケース



(2) プラギングを形成するケース



## 2. 燃料ピン下部側

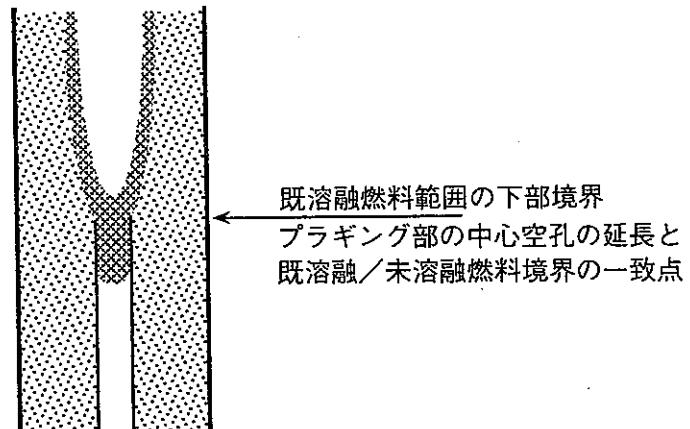


図4.11 燃料軸方向の燃料溶融発生範囲の判定

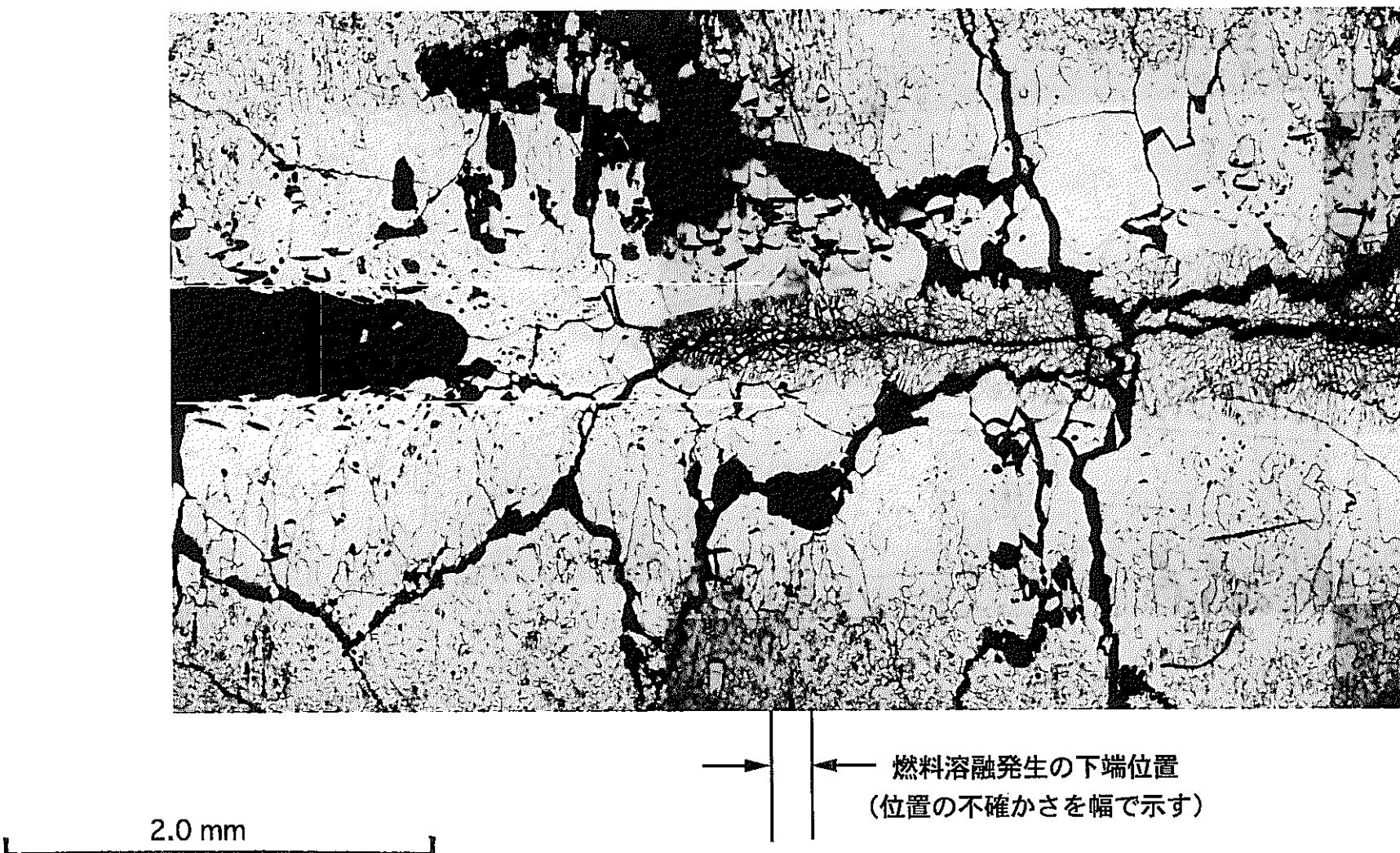


図 4.12 溶融燃料がプラギングを形成したケースにおける燃料溶融境界の判定方法  
(ピン下部側：試料 No.G823321 の例)

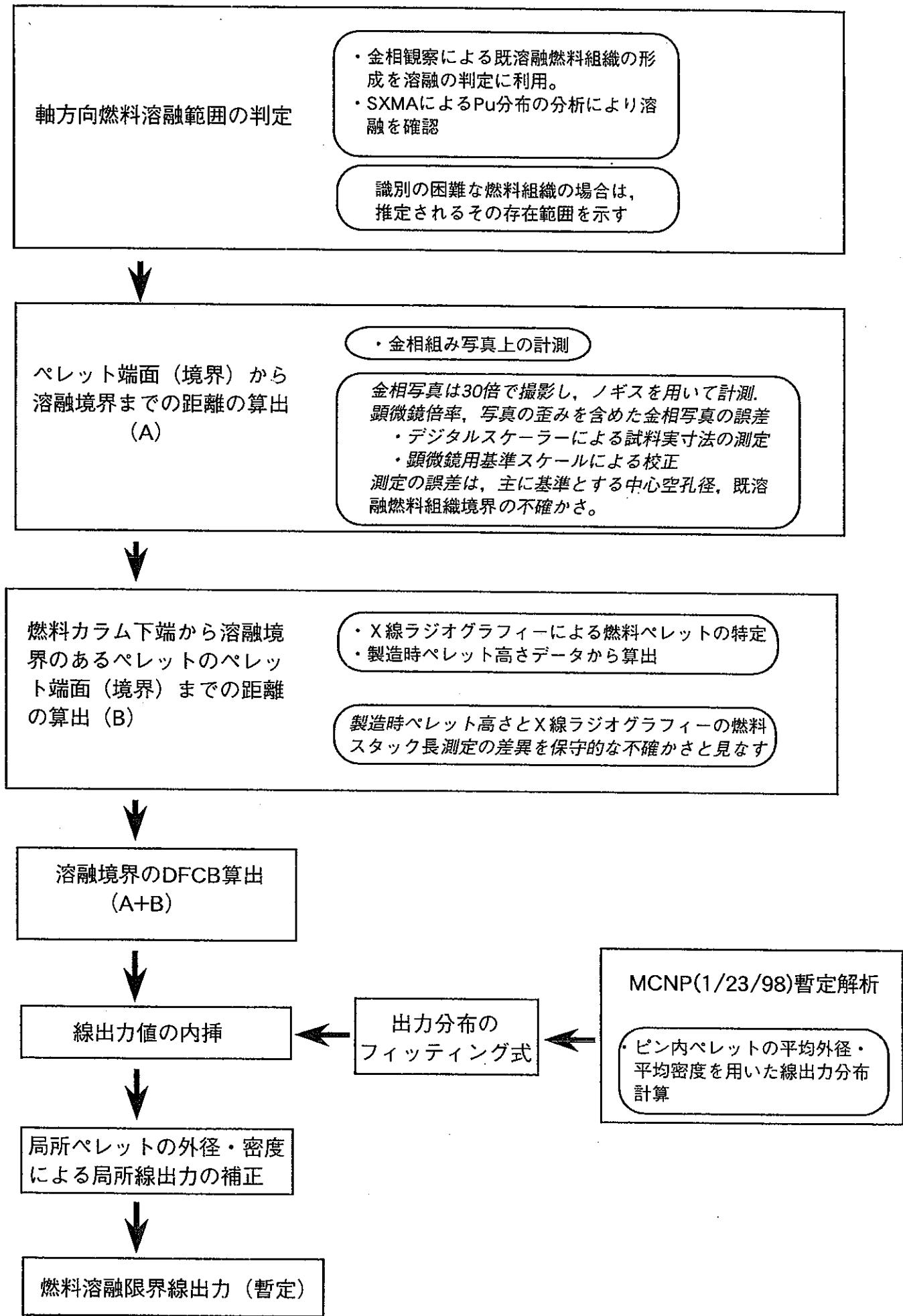


図4.13 燃料溶融限界線出力値の評価プロセス

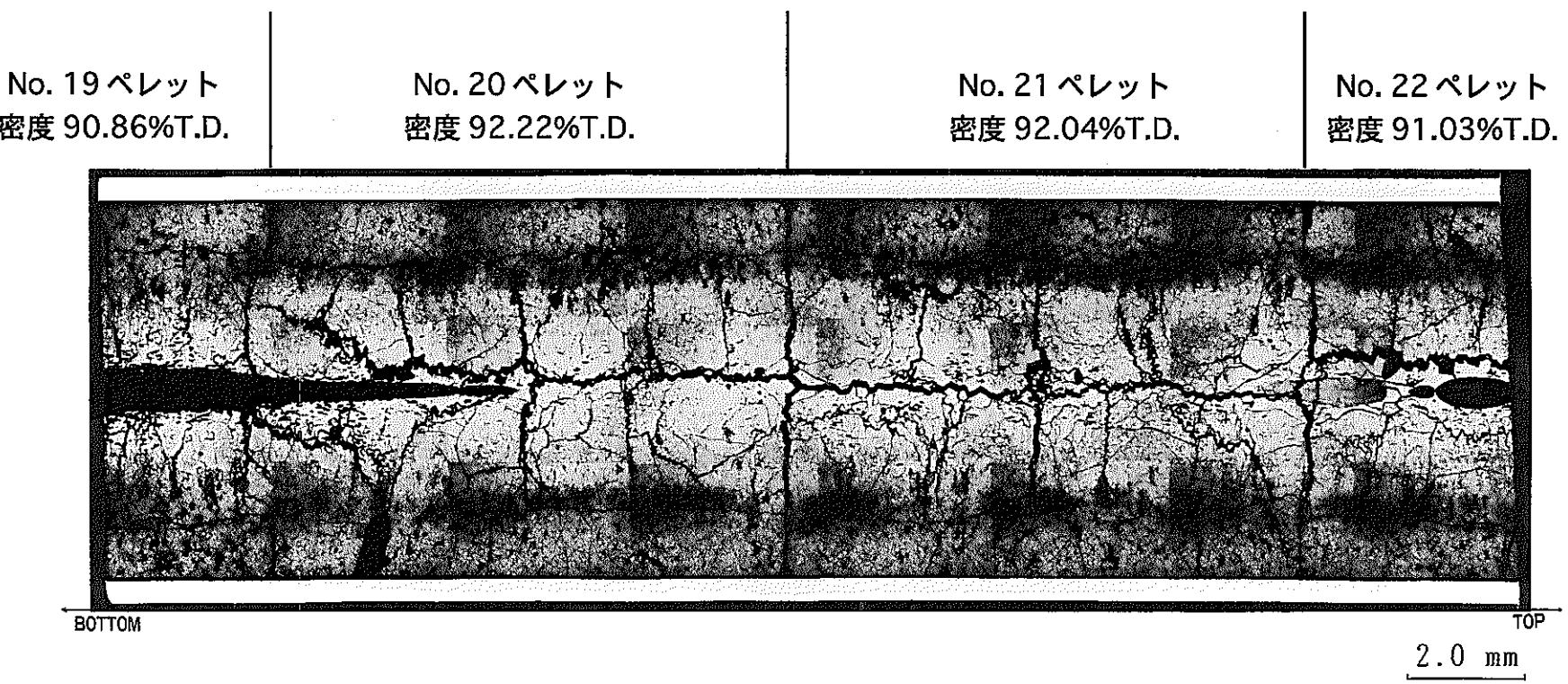


図 4.14 隣り合う燃料ペレットの密度の差異によって中心空孔径が変化したと考えられる例  
( Etched : 試料 No.G814341 )

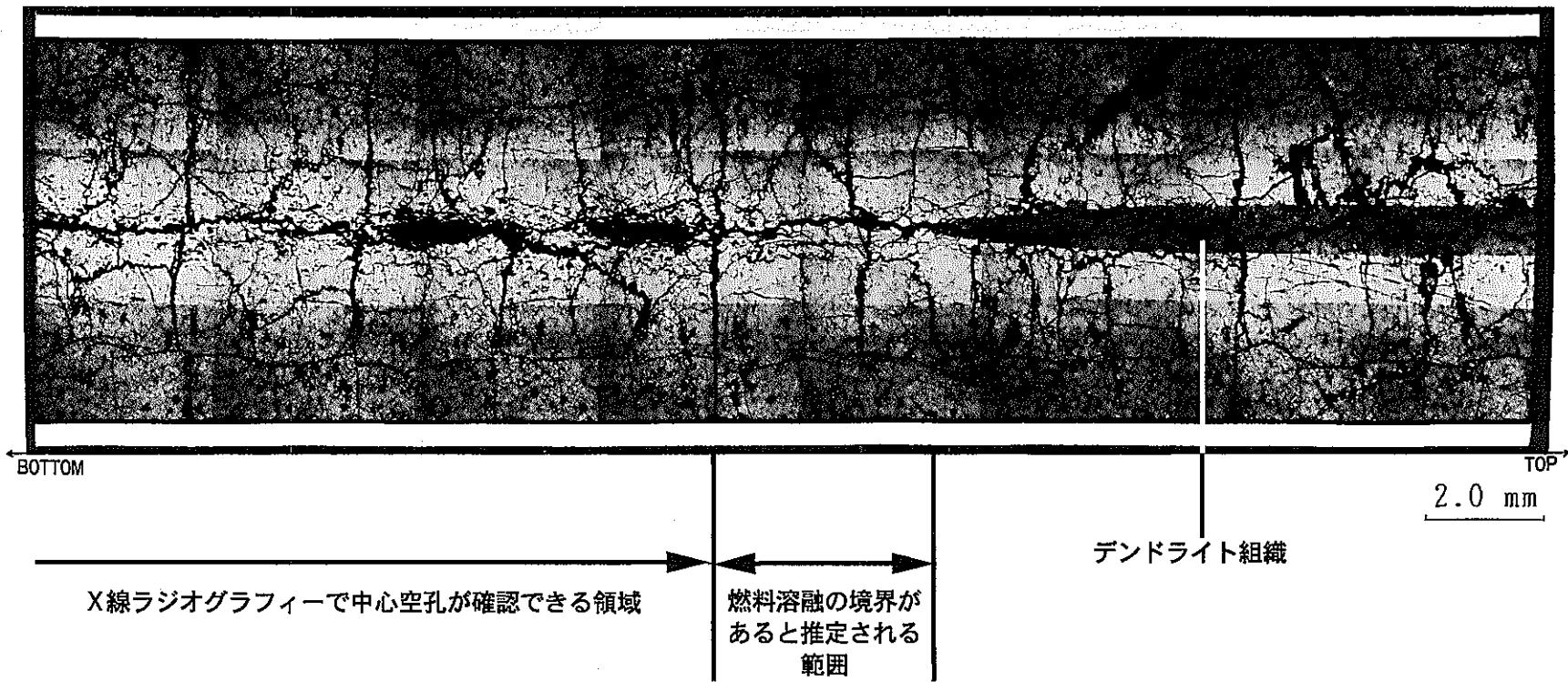


図 4.15 中心空孔の偏心と金相観察面のずれによって燃料溶融範囲を確定できない例  
( Etched : 試料 No.G80833 )

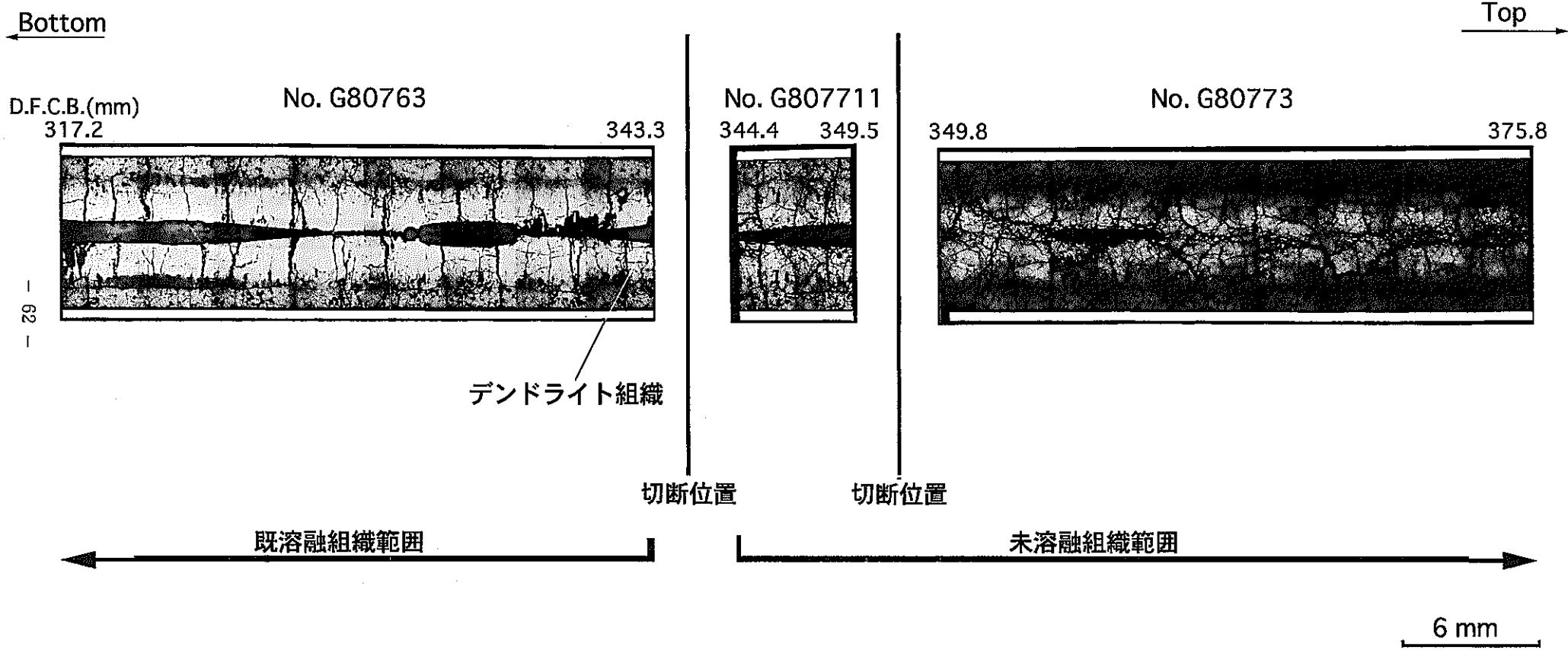


図 4.16 切断代に燃料溶融の境界があると考えられる例  
( Etched : 試料 No.G80763, G807711, G80773 )

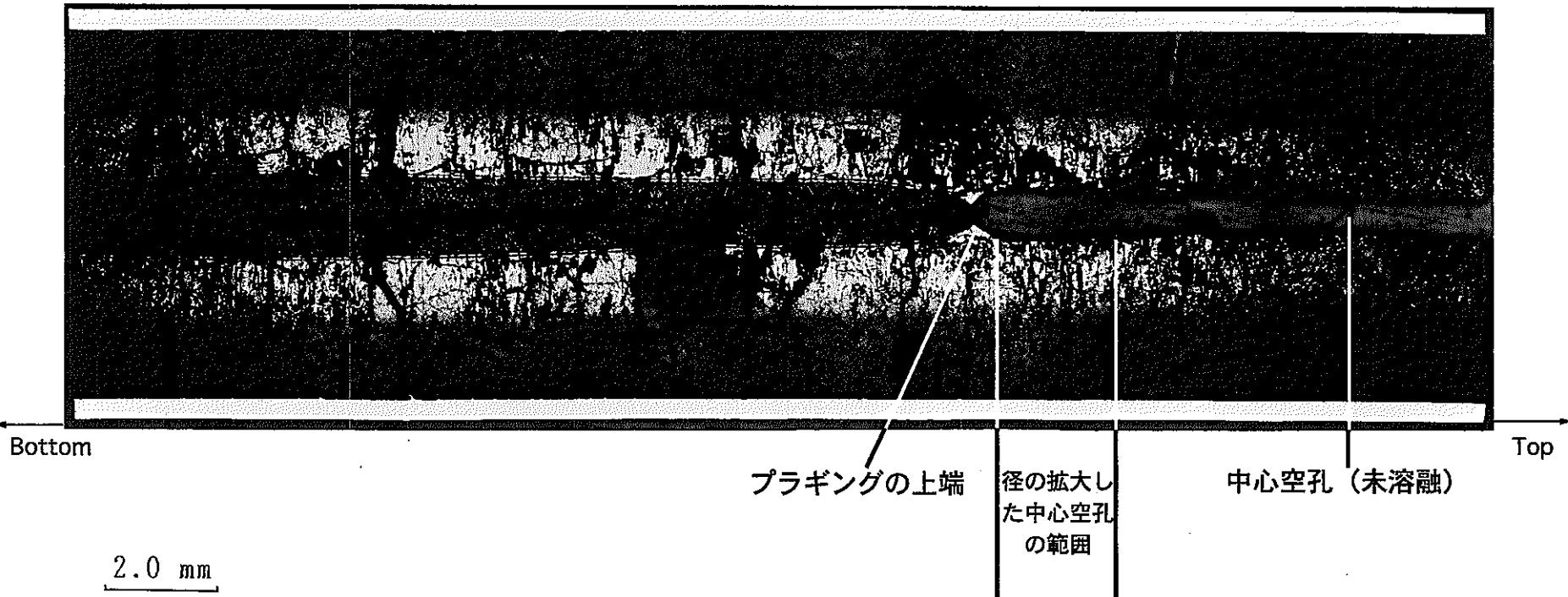


図 4.17 G809 ピン上部側のプラギング上端付近の縦断面金相組織  
( Etched : 試料 No.G809322 )

## X線ラジオグラフィー

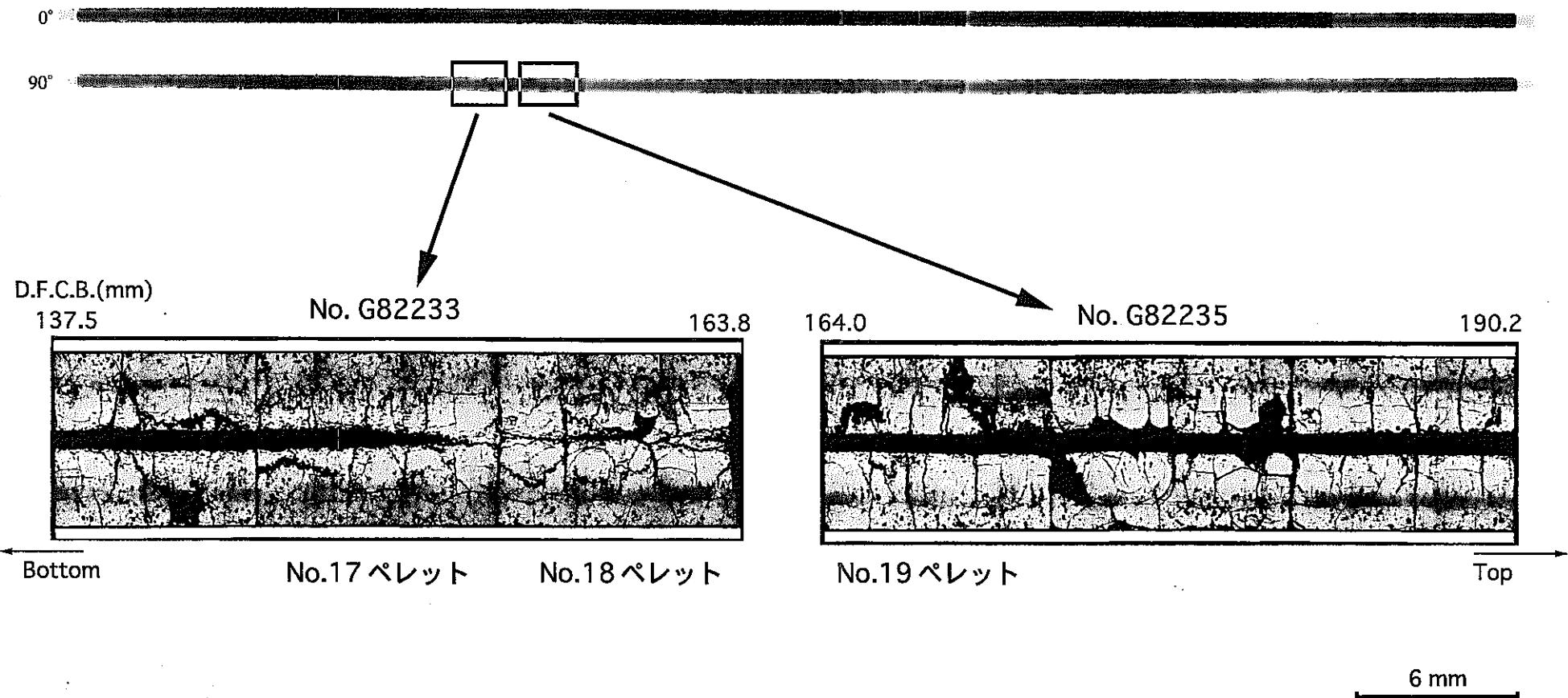


図 4.18 燃料溶融境界位置を確認できなかった例  
(G822 ピンの X 線ラジオグラフィー及び金相組織 : 試料 No.G82233, G82235)

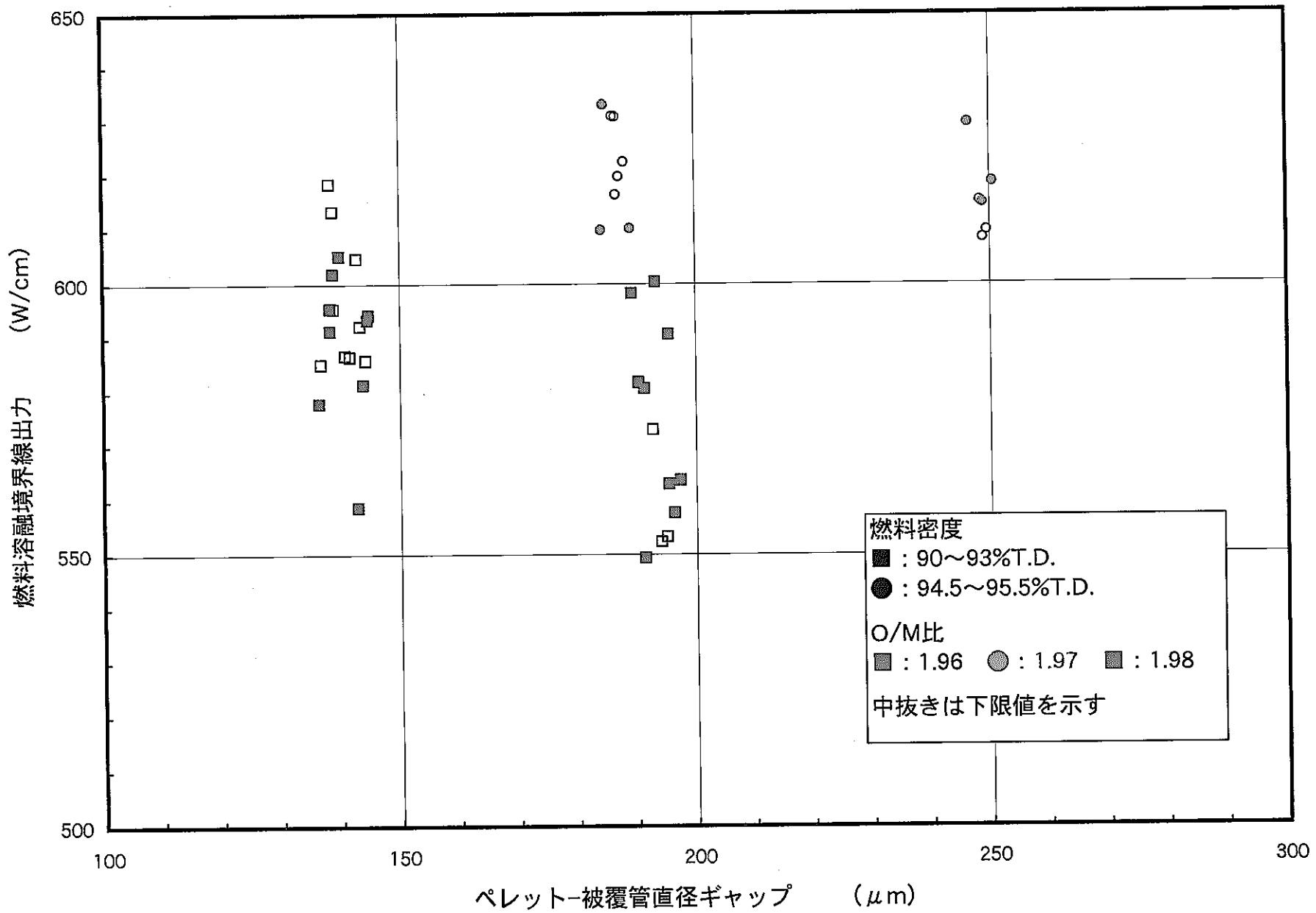


図4.19 B5D-2における燃料溶融境界線出力と燃料パラメータの関係

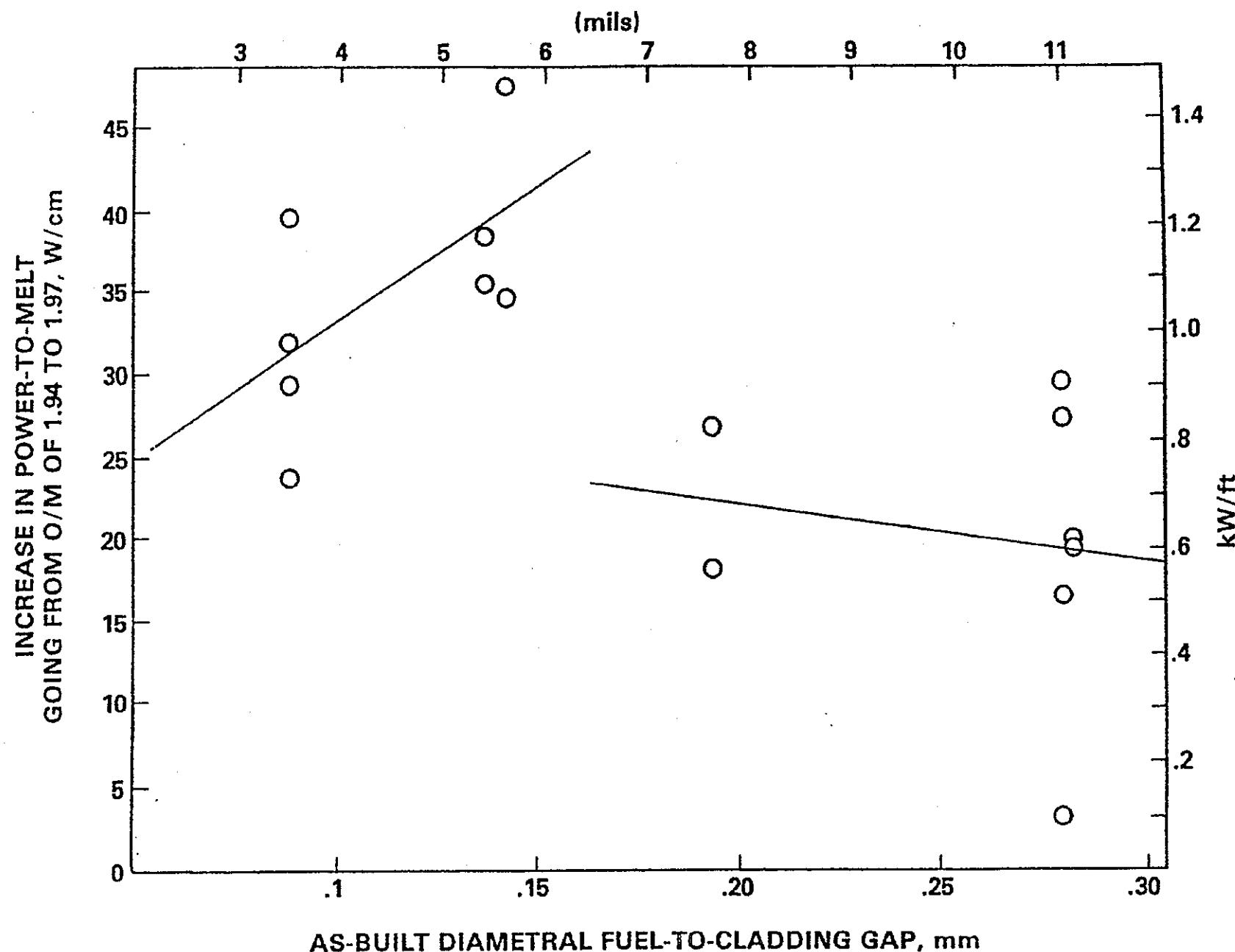


図 4.20 DEA-2 試験における燃料溶融境界線出力の O/M 比効果に対するギャップ依存性  
( J. L. Ethridge and R. B. Baker, 参考文献 3 )

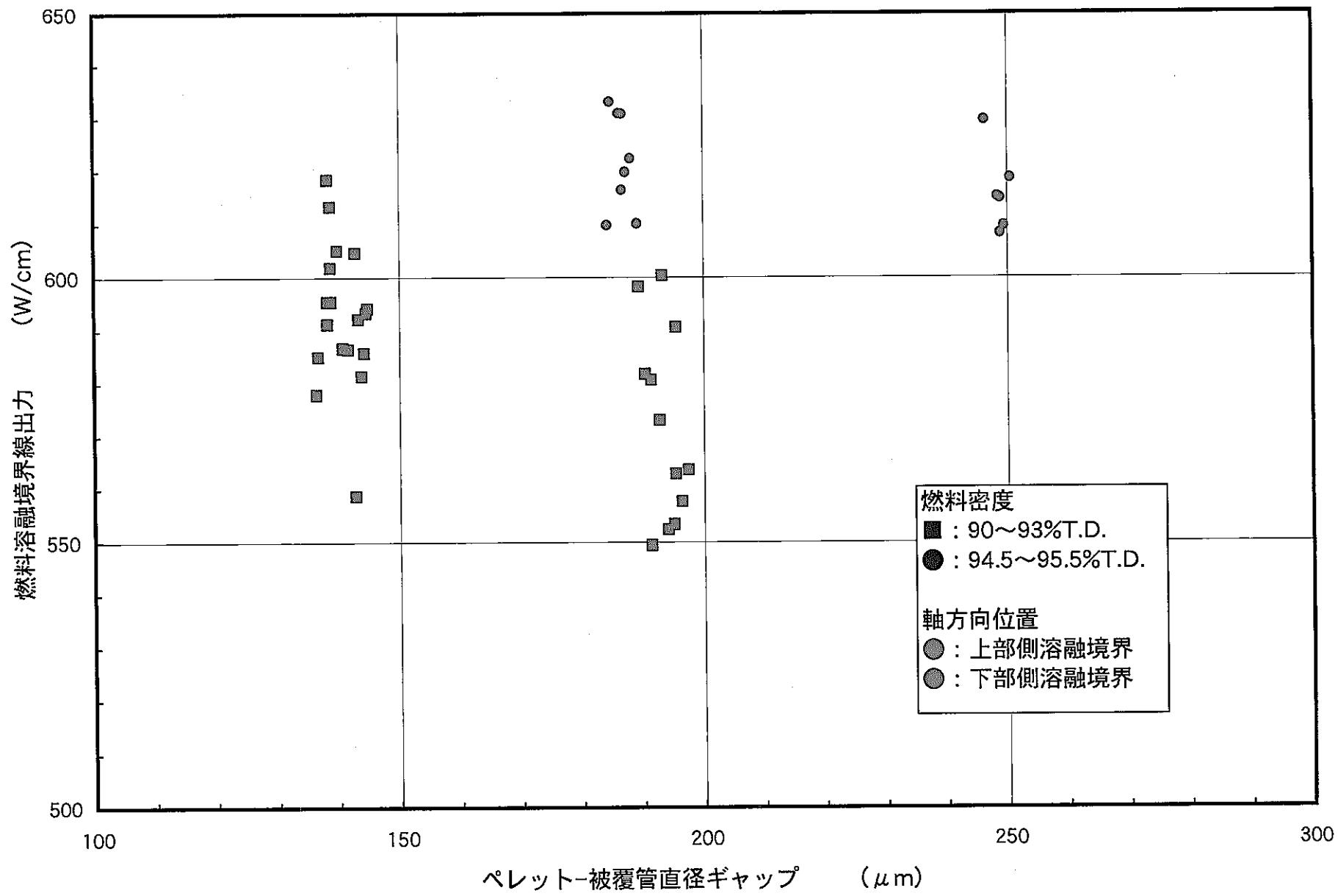


図4.21 燃料溶融境界線出力の燃料ピン上下位置の影響

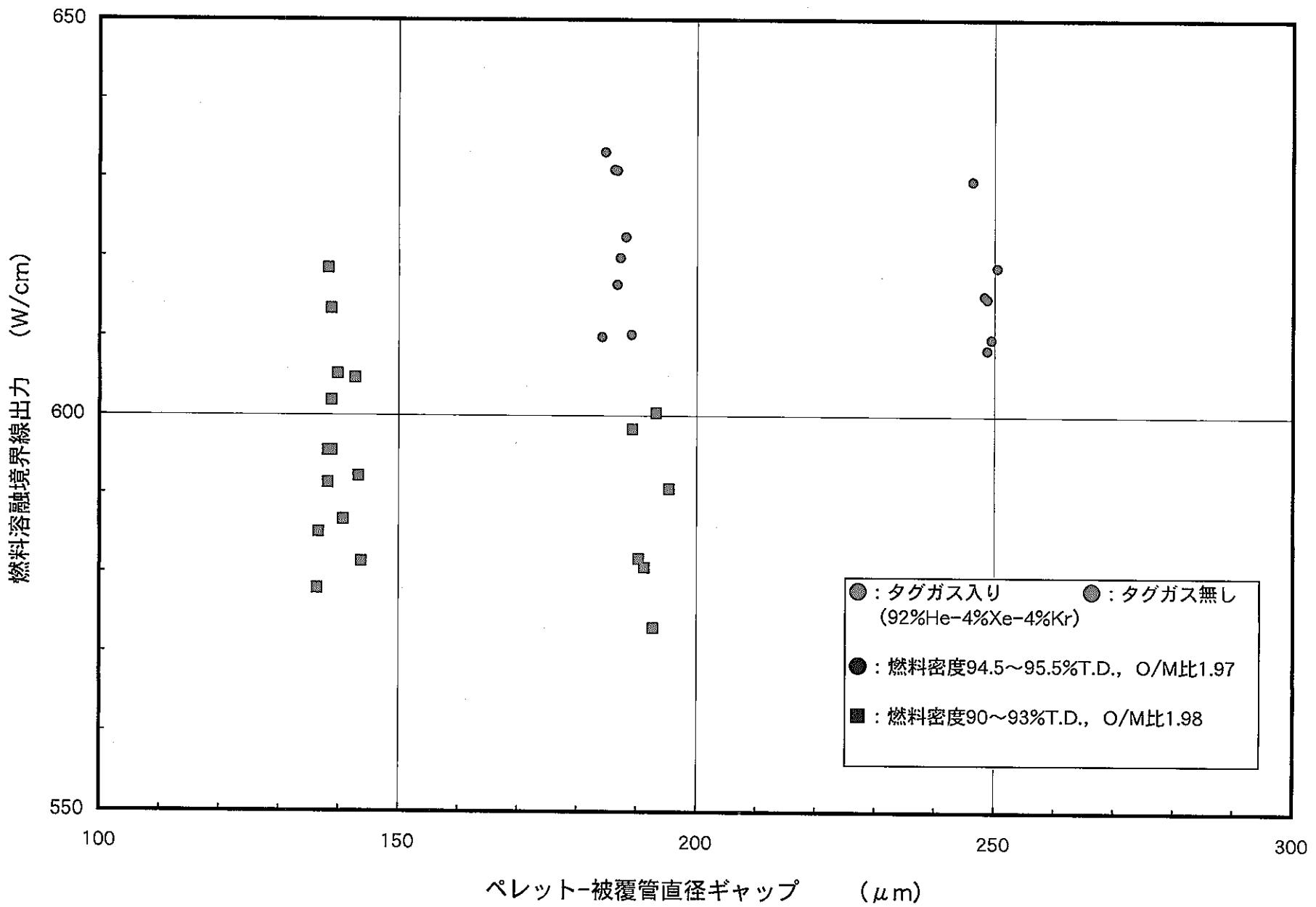
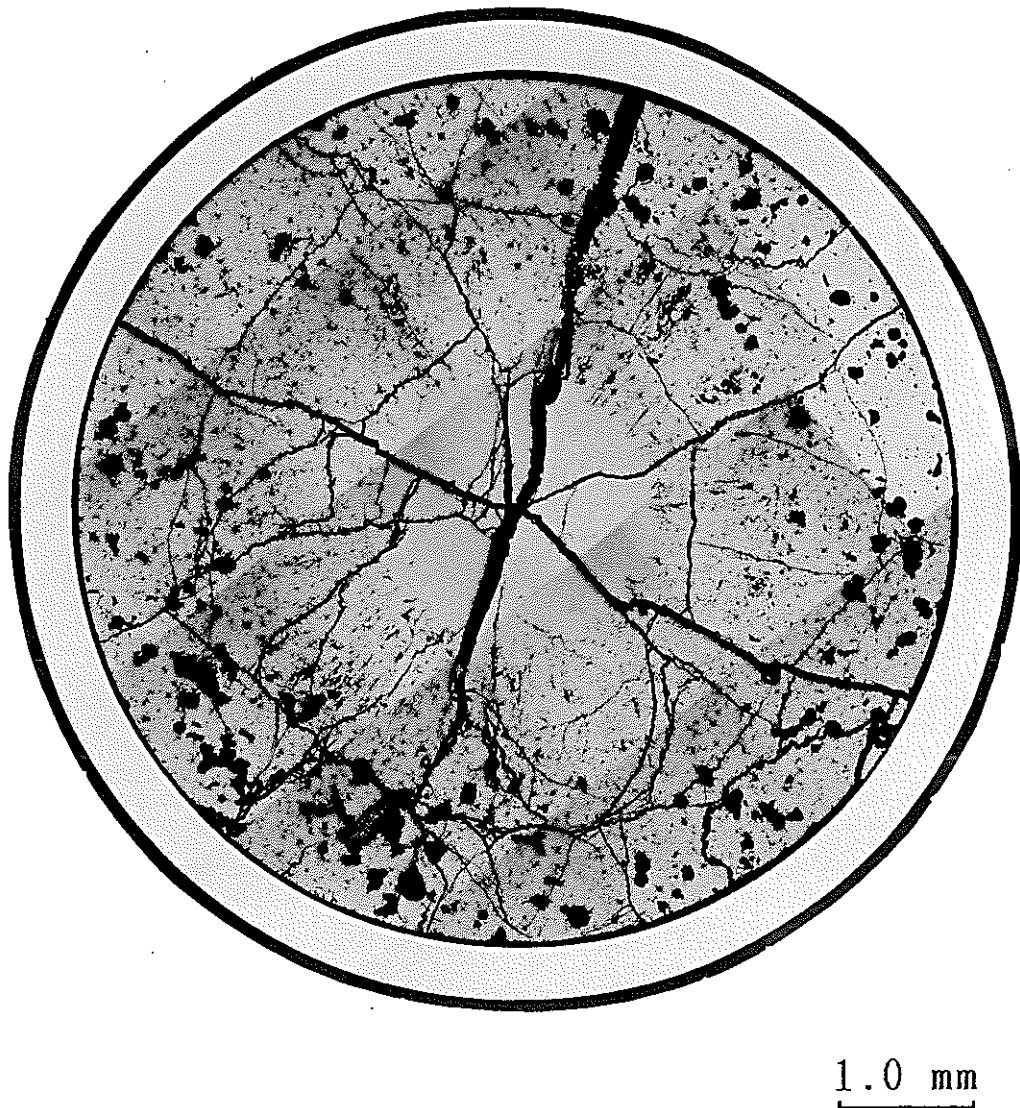


図4.22 燃料溶融境界線出力に対するタグガスの影響



1.0 mm

写真 4.1 As-Polished の横断面金相組織の例 (試料 No.G80922)

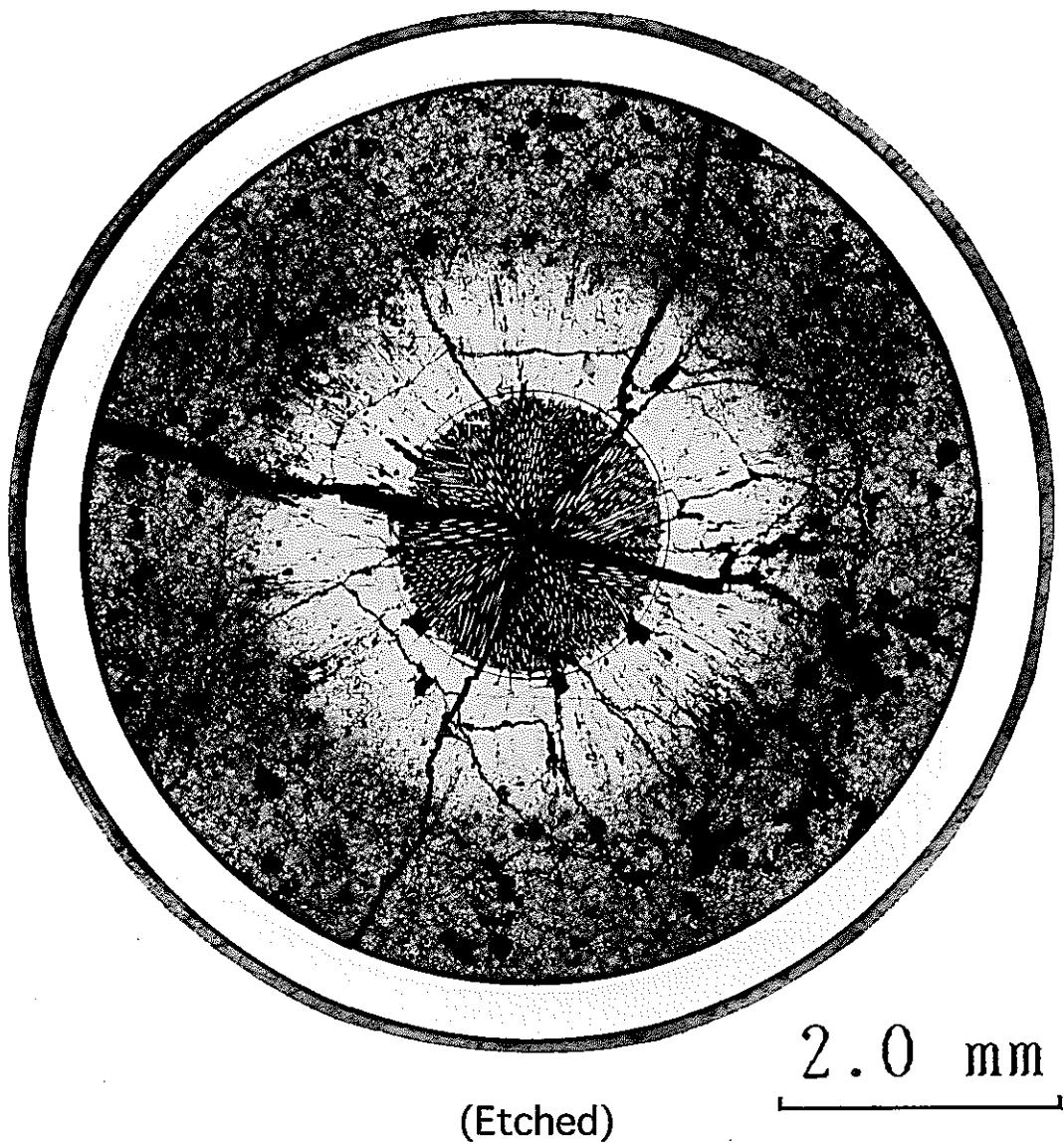


写真 4.2 腐食後の横断面金相組織の例（試料 No.G80922）

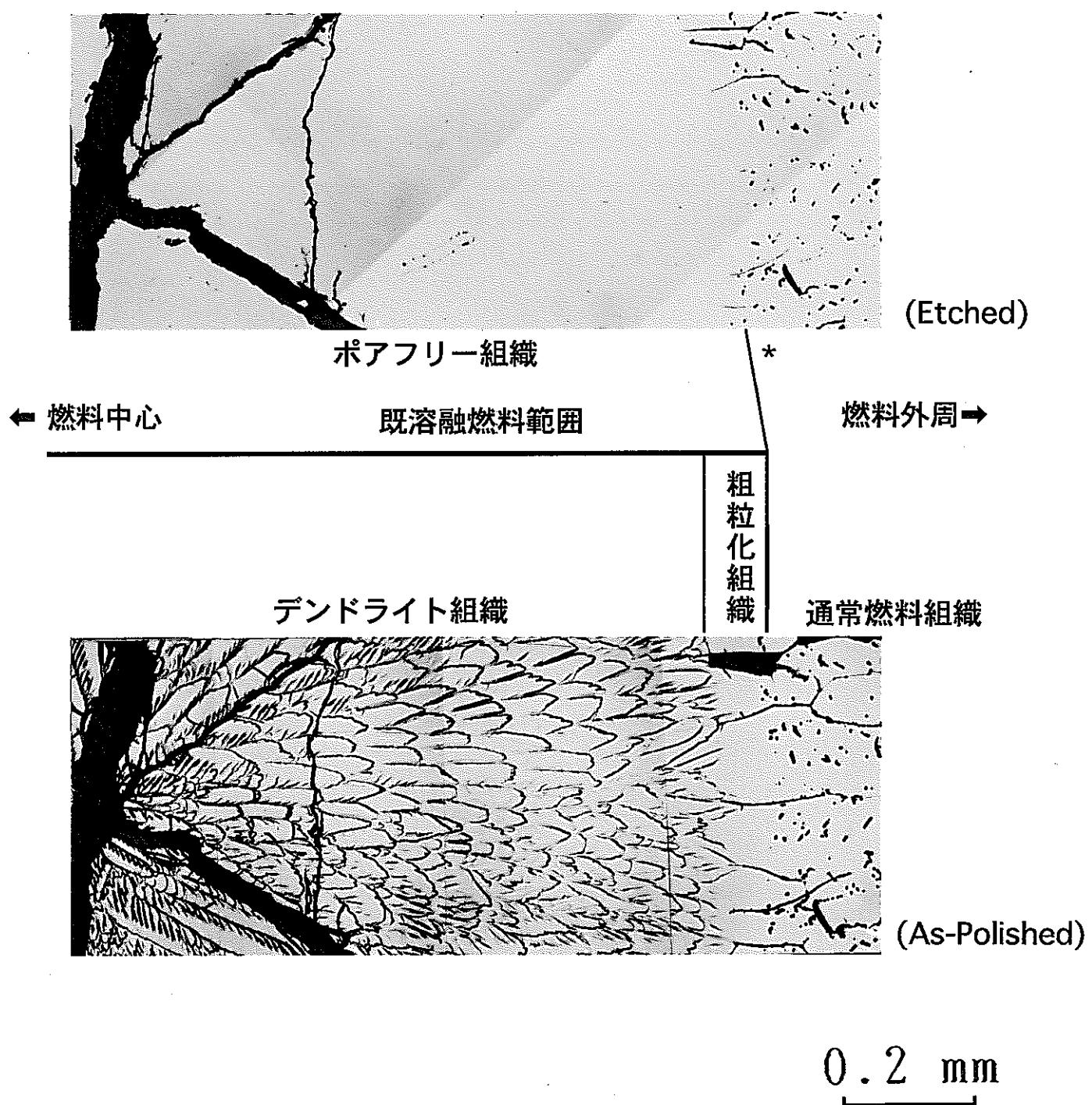
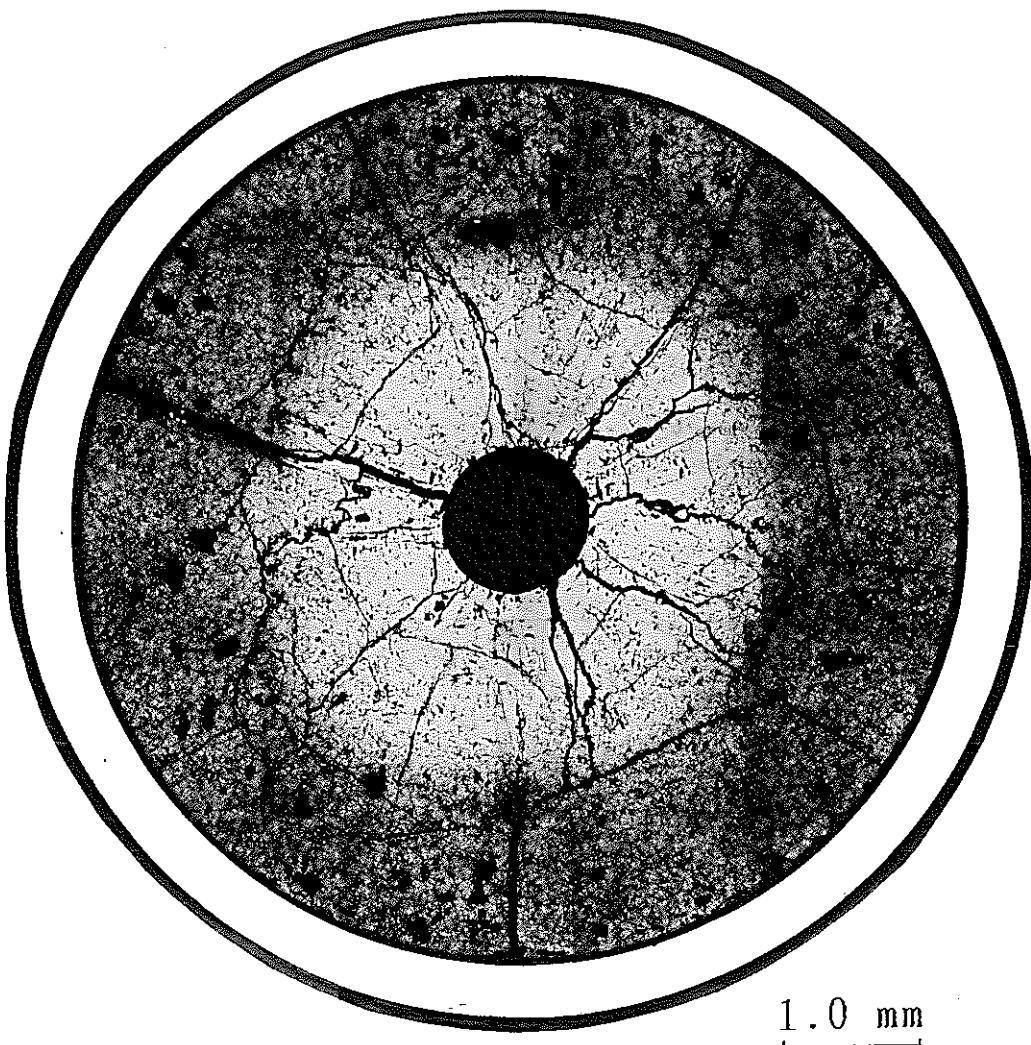


写真 4.3 既溶融燃料の境界近傍の金相組織（試料 No.G80922）

\*各写真の撮影倍率・方向が異なるために生じた像のずれ



1.0 mm

写真 4.4 G808 ピンのピーク線出力位置における横断面金相組織  
( Etched : 試料 No.G80852 )

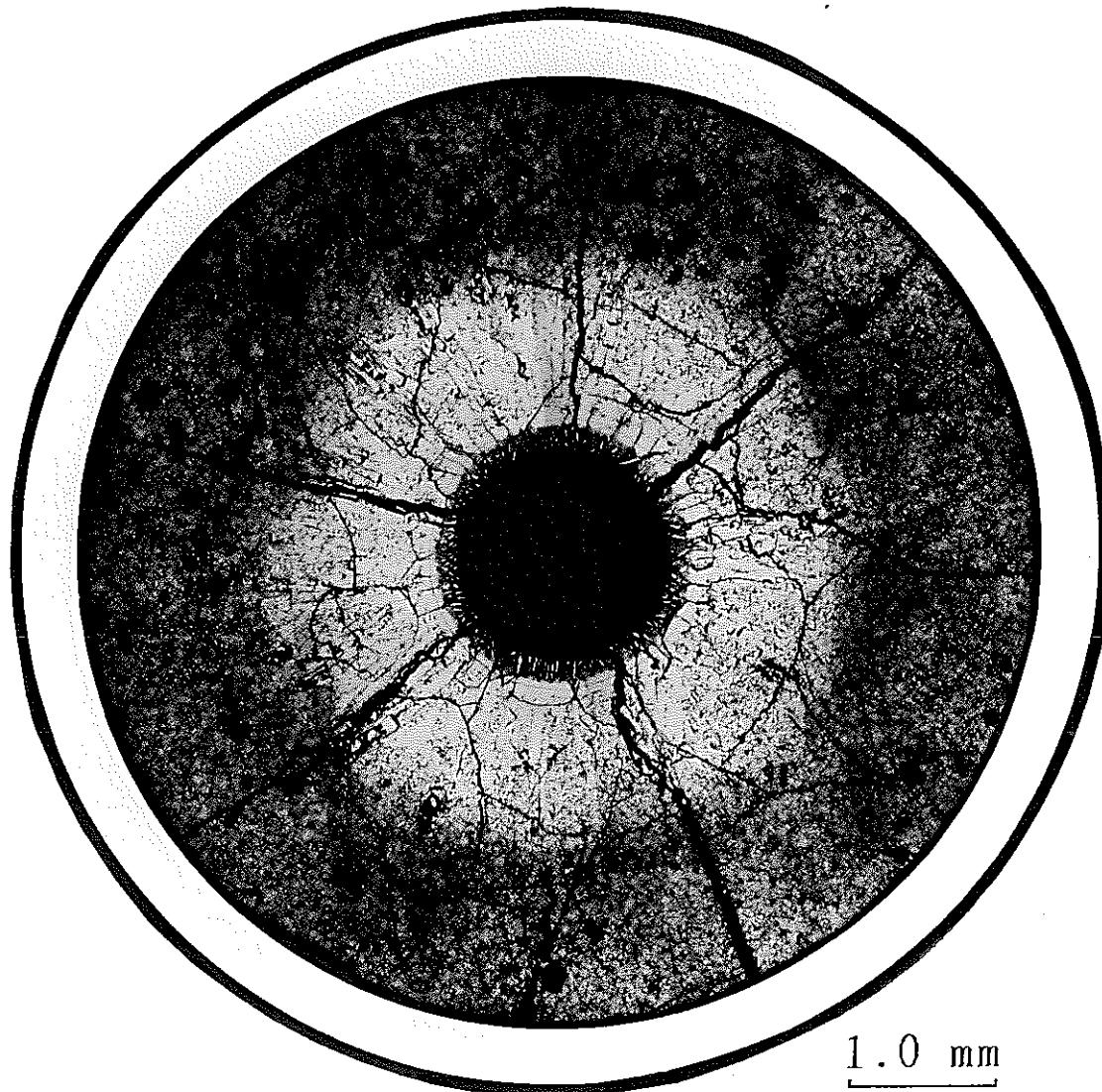


写真 4.5 G808 ピンの中心空孔径拡大部の横断面金相組織  
( Etched : 試料 No.G80854 )

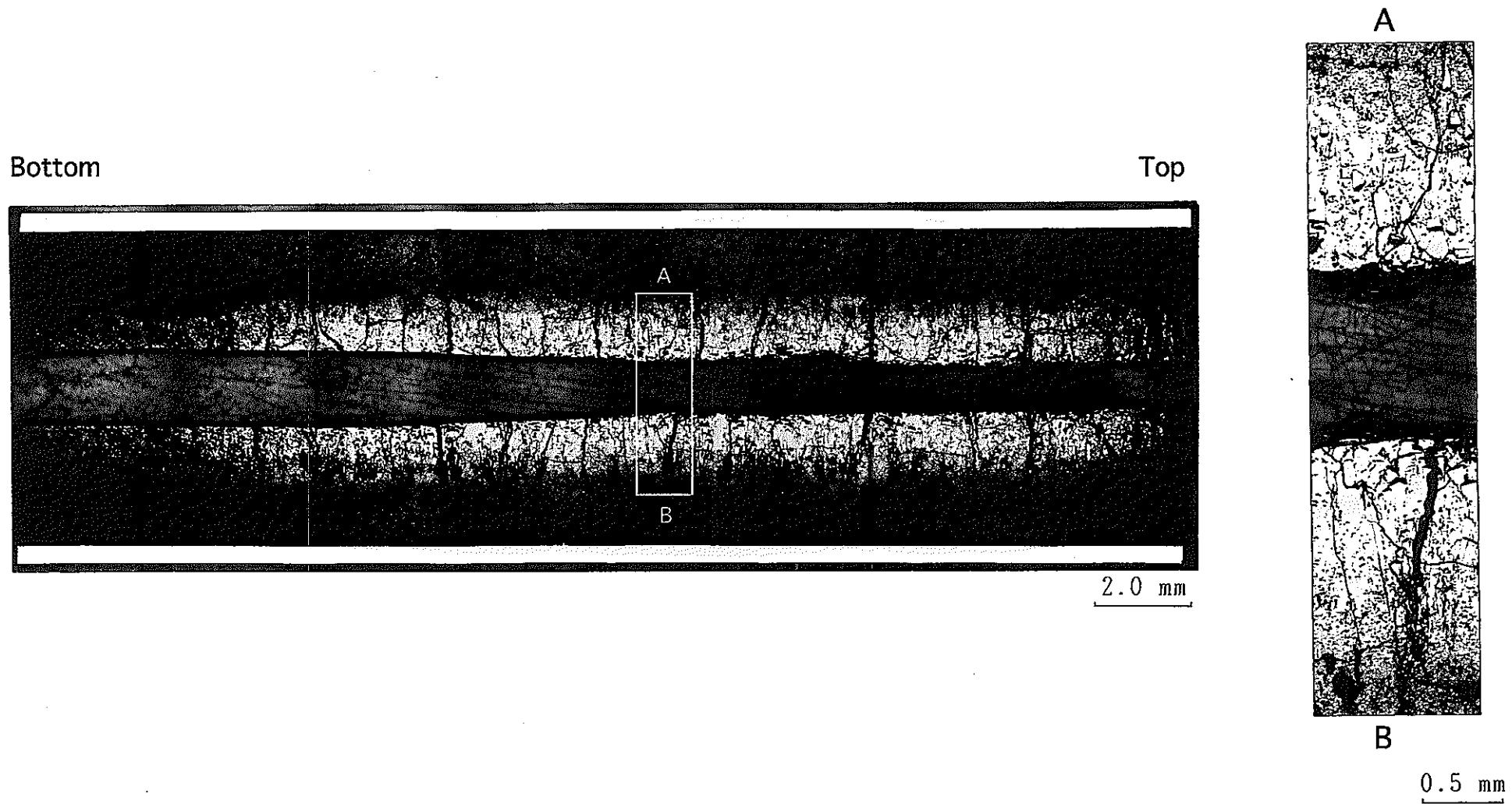


写真 4.6 溶融燃料が完全に落下したケースの縦断面金相組織の例  
( Etched : 試料 No.G804312 )

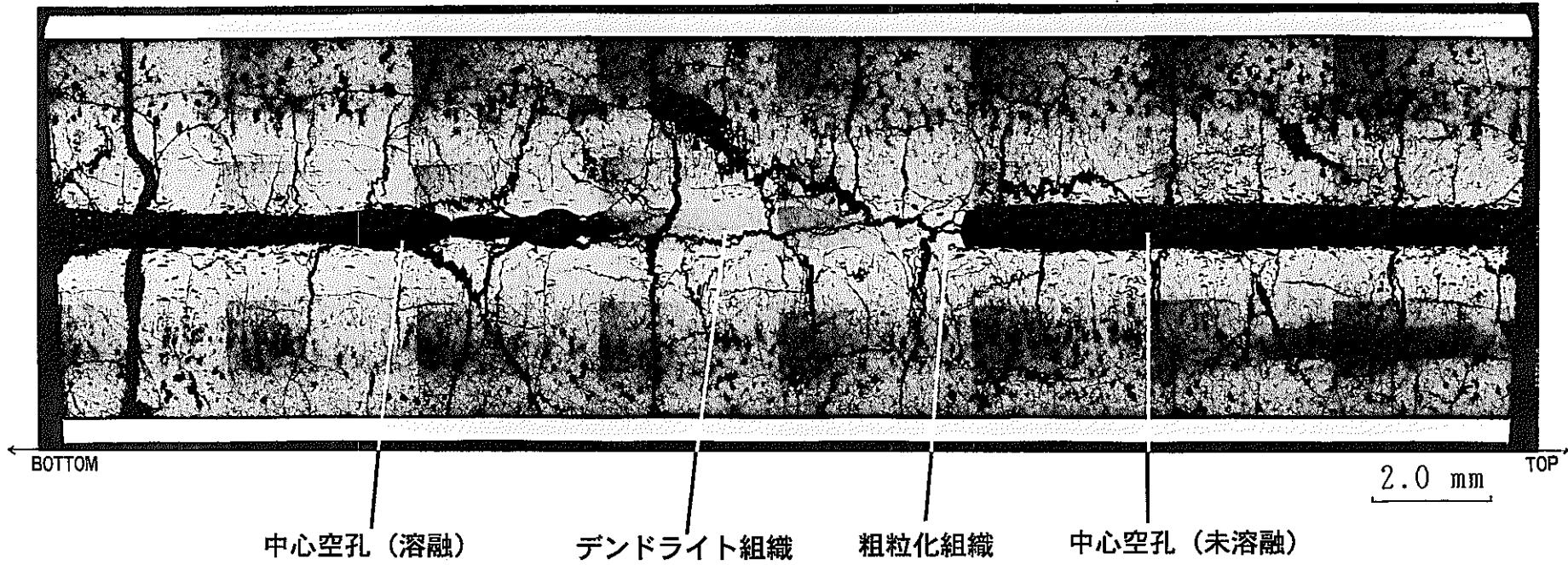


写真 4.7 ピン上部側でプラギングを形成したケースの縦断面金相組織の例（1）  
(Etched : 試料 No.G814621)

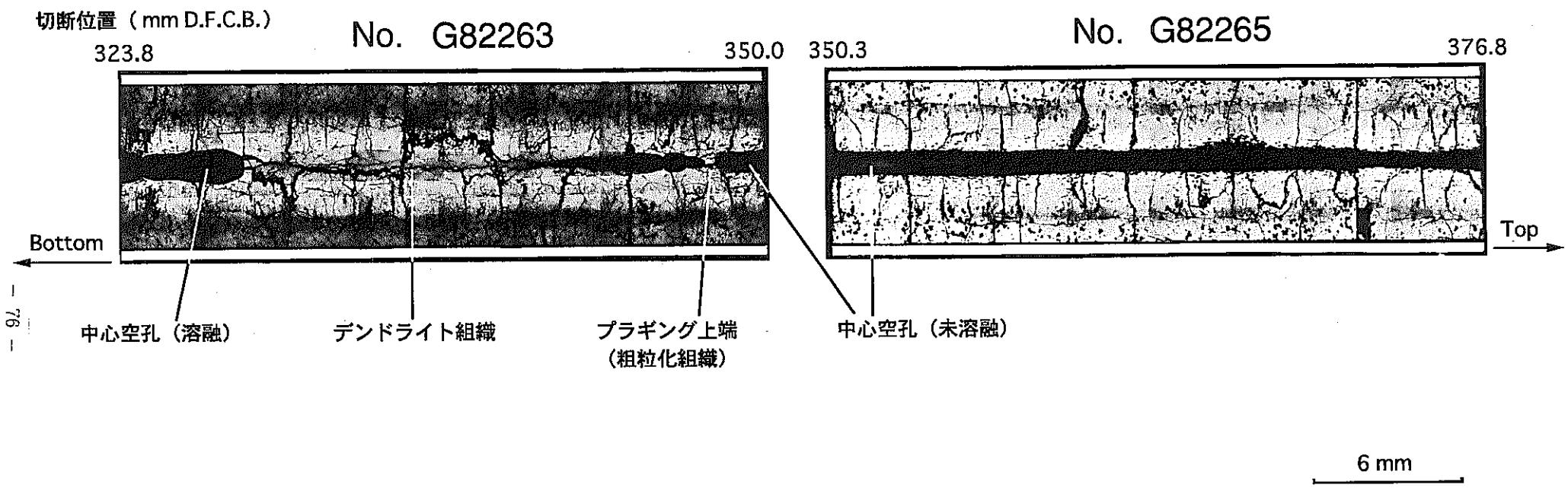


写真 4.8 ピン上部側でプラギングを形成したケースの縦断面金相組織の例 (2)  
(Etched : 試料 No.G82263, G82265)

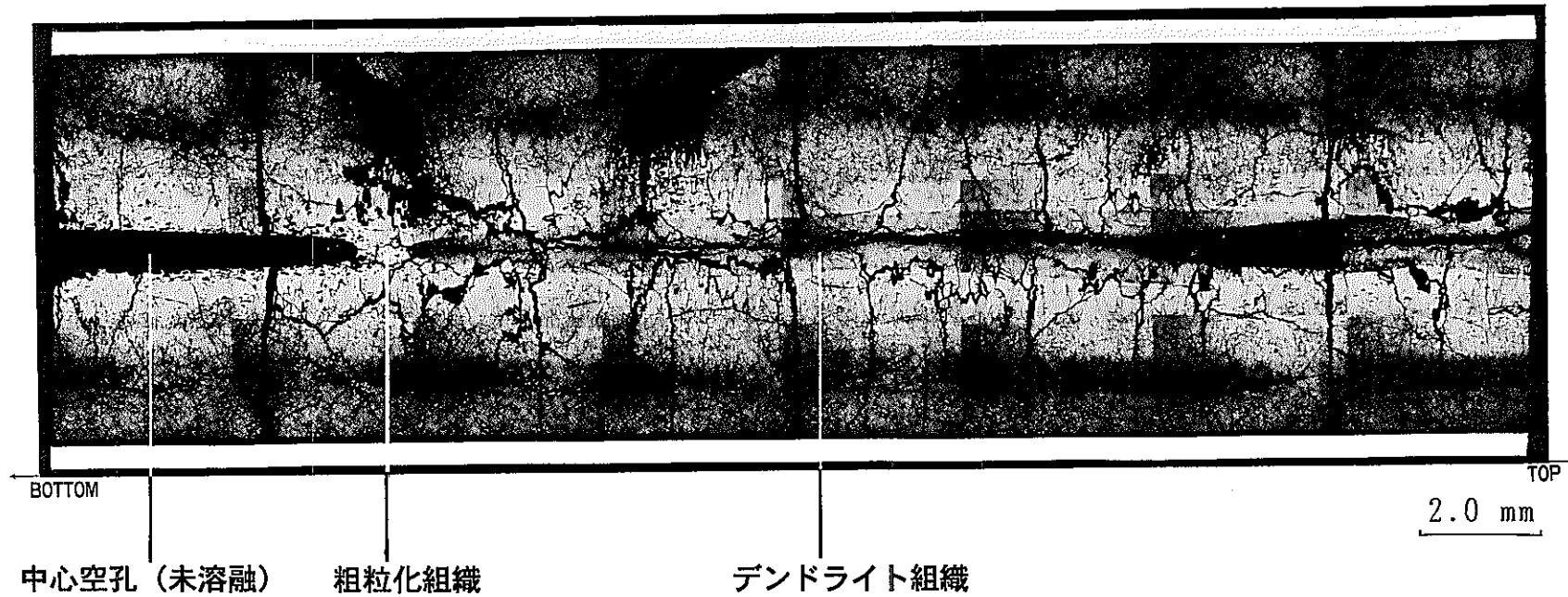
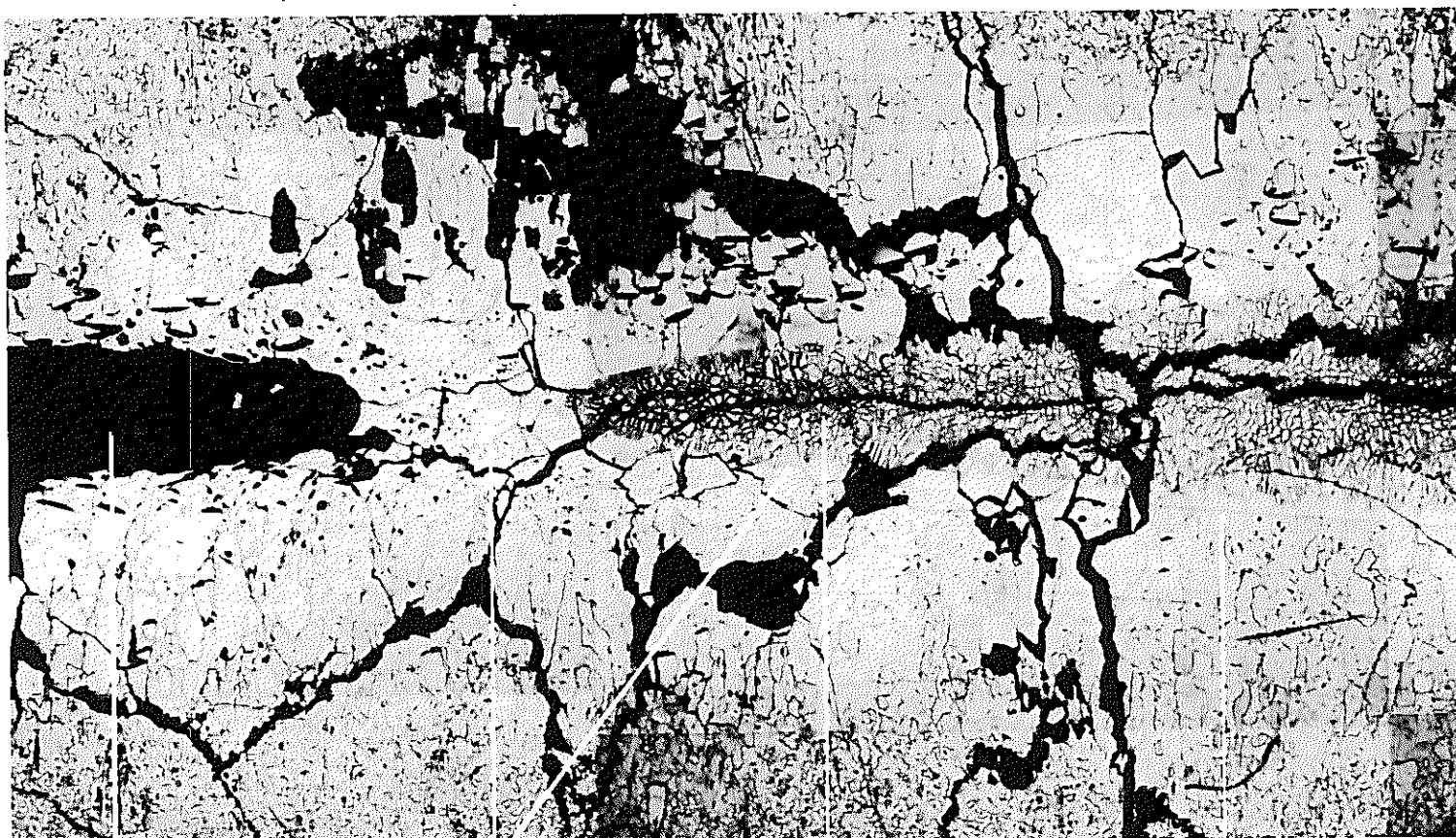


写真 4.9 ピン下部側でプラギングを形成したケースの縦断面金相組織の例  
( Etched : 試料 No.G823321 )



2.0 mm

写真 4.10 ピン下部側のプラギング下端付近の金相組織例  
( Etched : 試料 No.G823321)

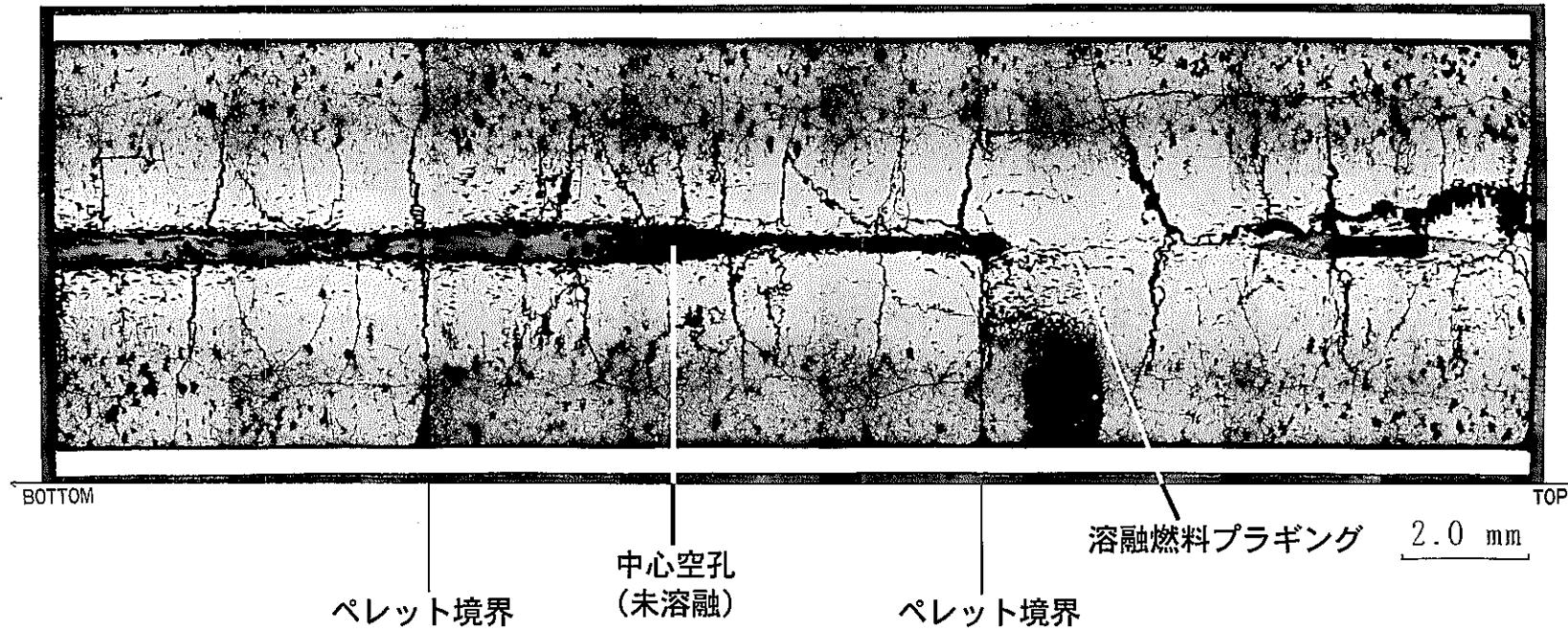


写真 4.11 中心空孔径が大きく変化して燃料溶融範囲を確定できない例  
( Etched : 試料 No.G802122 )

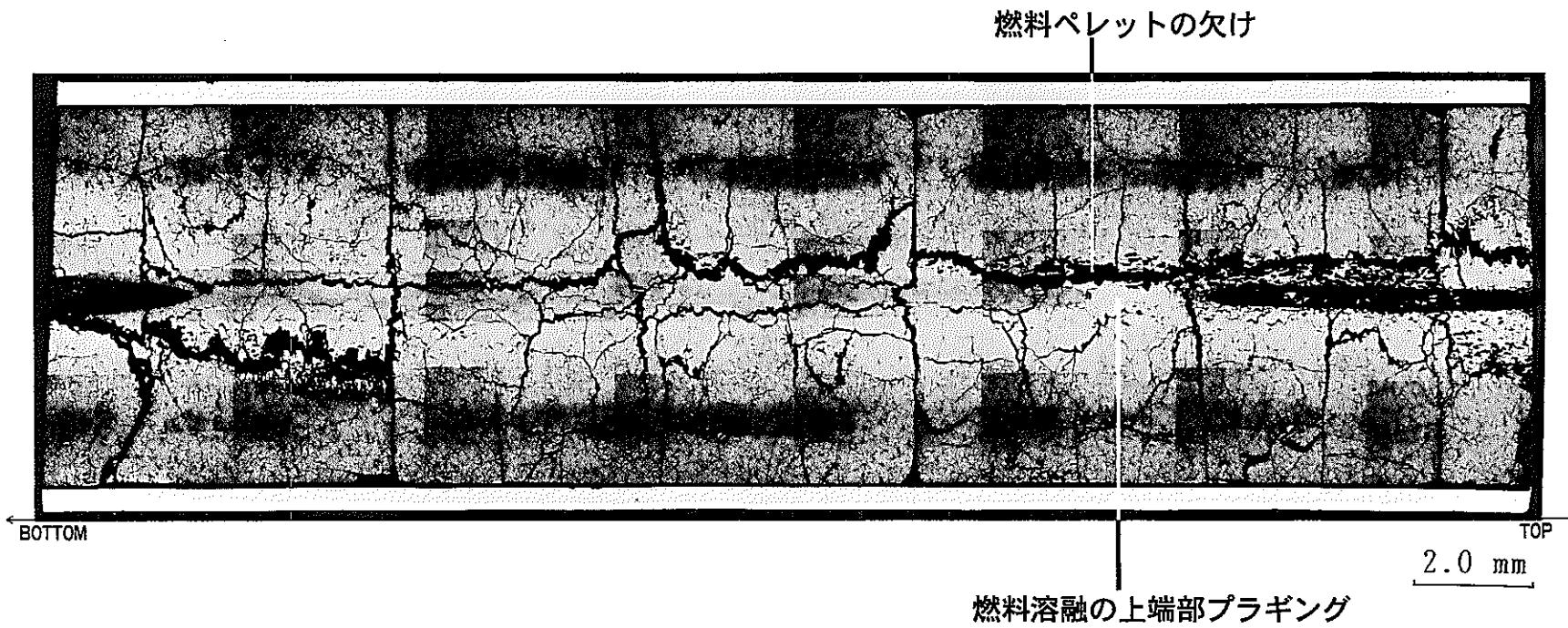


写真 4.12 燃料ペレットのクラック等により燃料溶融範囲に不確かさを生じた例  
(Etched : 試料 No.G806621)

## 5. まとめ

- ・ 「常陽」で実施された PTM-2 試験（試験体名 B5D-2）について、照射後試験を実施し、Pu 富化度 20wt%，高密度ペレット（90%TD.以上），7.5mm φ 太径燃料ピンを基本仕様とする高速炉燃料について、線出力ピーク部位における燃料溶融割合及び燃料軸方向溶融境界位置における線出力値を評価した。
- ・ 試験によって確認したピーク部位における最大燃料溶融割合は、G809 ピンの 10.7% で、「常陽」の PTM 試験の最大燃料溶融割合制限値 20% の約半分である。最大の燃料溶融割合は G816 ピンの 11.8% であり、制限値 20% を十分に下回っていた。ただしこの最大値は、線出力ピーク部位ではなく、溶融燃料が移動し、二次溶融が発生した可能性が考えられる。
- ・ PTM 試験評価において決め手となる燃料溶融境界の判定については、金相組織観察と SXMA による Pu 分布分析を組合せて評価することが非常に有効であることを確認し、PTM 試験における PIE の手法（燃料溶融境界線出力の評価方法）をほぼ確立することができた。
- ・ 燃料溶融境界線出力を評価した結果、燃料ペレット-被覆管ギャップの依存性は明確には認められなかった。燃料ペレット密度の効果や O/M 比依存性については、密度の効果が DEA-2 よりも大きく現れたが、データ点数が限られている上にはらつきが大きく、定量的な違いについては、本試験データだけでは評価できない。燃料溶融境界の上下間で燃料溶融境界線出力の違いは特に認められず、被覆管内面温度の影響は明らかではない。タゲガスの影響についても本試験では認められなかった。これまでの PTM 試験との相違については、出力上昇パターン違いや炉内におけるギャップ閉塞の可能性が考えられるが、今後これらについて試験し、確認することが必要である。
- ・ 燃料溶融境界線出力を確定することができなかったケースが多数見られたが、これを回避する照射試験技術上の改善策として、中心空孔が十分に発達していた方が照射後試験において評価上有利であり、出力上昇の途中で出力保持を行ない燃料組織変化を安定させること、溶融燃料の過剰な移動を防止するため、燃料溶融割合を抑制すること、また縦断面金相観察試料作製において、観察面と試料中心軸とのずれは 0.1 mm 以下とすること、が考えられる。

## 6 謝辞

システム技術開発部 炉心燃料工学グループの水野朋保研究主幹, 燃料材料技術開発グループの浅賀健男グループリーダーならびに井上賢紀副主任研究員には, 本研究の評価を行なう上で多くの情報, 助言をいただきましたことを心から感謝いたします。また, 原子力技術株式会社の大里行弘氏, 小沼康博氏, 額賀貞芳, 山崎美彦氏の 4 氏には, 照射後試験における金相試験, 機器分析, X 線ラジオグラフィーの実施について心から感謝いたします。特に, 大里, 小沼, 額賀の 3 氏には, 国内初の特殊な試験対象であったために, 試験技術上の困難と相当の手間にもかかわらず, 金相観察試料作製に関わる調査・工夫, 膨大な金相試料の作製と写真の撮影・整理, SXMA による入念な分析等を辛抱強く取り組んでいただいたことによって, 本研究が遂行できたということをここに記して, 感謝の意を表したいと思います。

## 7. 参考文献

- 1) R. B. Baker and R. D. Leggett, "Early in Life Thermal Performance of  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$  Fast Reactor Fuel", International Conference on Fast Breeder Reactor Fuel Performance, Monterey, CA, U.S.A., 1979, p. 258.
- 2) W. H. McCarthy, D. R. Jedlovec, S. Vaidyanathan and R. F. Hilbert, "The Influence of Design and Operating Parameters on Mixed-Oxide Fuel Power-To-Melt", International Conference on Fast Breeder Reactor Fuel Performance, Monterey, CA, U.S.A., 1979, p. 268.
- 3) J. L. Ethridge and R. B. Baker, "Thermal Performance of Fresh Mixed-Oxide Fuel in a Fast Flux LMR", The 8th. International Heat Transfer Conference, San Francisco, CA, U.S.A., 1986, p. 2485.
- 4) S. Nomura et al., "Development of Long Life FBR Core Materials", International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Kyoto, Japan, 1991, 7.4.
- 5) 大野篤美, “新訂金属凝固学”, 地人書館, (1982).
- 6) D. R. Olander, "Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements", NTIS TID26711P1 (1976), p. 166.
- 7) H. Tsai et al., "Behavior of mixed-oxide fuel elements during an overpower transient", J. Nucl. Mater. 204 (1993) 217.
- 8) J. F. Brismeister Ed., "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A", LA-12625-M (1993).
- 9) 例えば, K. Lassmann and H. Blank, "Modelling of Fuel Rod Behaviour and Recent Advances of the Transuranus Code", Nucl. Engrg. Des. 106 (1988) 291.
- 10) R. F. Hilbert et al., "Evaluation of Material Property Correlations Used in LIFE-II", GEAP-13967, 1973.
- 11) R. Lorenzelli and M. El Sayed Ali, "Dilatation Thermique D'oxydes Mixtes  $(\text{U},\text{Pu})\text{O}_{2-x}$  en Fonction de L'écart à la Stoechiometrie", J. Nucl. Mater. 68 (1977) 100.
- 12) D. L. Hagrman et al. Ed., "MATPRO-Version 11 (Revision 1), A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior", NUREG/CR-0497, TREE-1280, Rev. 1, R3 and R4, 1980.
- 13) 籠田栄一, 北村了一, 飛田公一, 前田幸基, 宮川俊一, "高速実験炉「常陽」高線出力試験用集合体(B5D-1, B5D-2) 照射総合報告書", JNC ZN9410 94-100 (1994).
- 14) 籠田栄一, 北村了一, 飛田公一, 前田幸基, "「常陽」における照射技術(4) 燃料設計限界に係わる限界照射技術", 日本原子力学会「1994年秋の年会」, P4, (1994).

## 付録 B5D-2 燃料ペレットの製造時データ

付録表 1 燃料ペレットの化学分析・物性測定結果	85
付録表 2 燃料ペレットのプルトニウム同位体組成	86
付録図 1 B5D-2 燃料ペレットの製造フロー	87

付録表1 燃料ペレットの化学分析・物性測定結果

ロット番号	B5D-201	B5D-202	B5D-203	B5D-204	B5D-205	B5D-206
プルトニウム混合比 (wt%)	19.50	19.50	19.46	19.46	19.37	19.37
核分裂性物質含有率 (wt%)	30.45	30.45	30.50	30.50	31.40	31.40
ウラン濃縮度 (wt%)	20.32	20.32	20.32	20.32	21.68	21.68
蒸発性不純物含有率* ( $\mu l/g$ )	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
水分 (ppm)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
O/M比	1.98	1.98	1.96	1.96	1.97	1.97
不純物 (ppm)	Al	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
	B	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
	C	30	30	30	40	40
	Ca	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Cd	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
	Cl	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
	Cr	85	85	< 50	< 50	85
	F	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
	Mg	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
	N	60	60	< 50	< 50	< 50
	Fe	< 100	< 100	120	120	120
	Ni	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
	V	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
	Cu+Zn+Si	< 320	< 320	< 210	< 210	< 290
	Ag+Mn+Mo+Pb+Sn	< 135	< 135	< 135	< 135	< 135
全不純物量	< 1005	< 1005	< 870	< 870	< 995	< 995
Puスポット径 ( $\mu m$ )	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
平均結晶粒径 ( $\mu m$ )	11	11	11	11	10	10

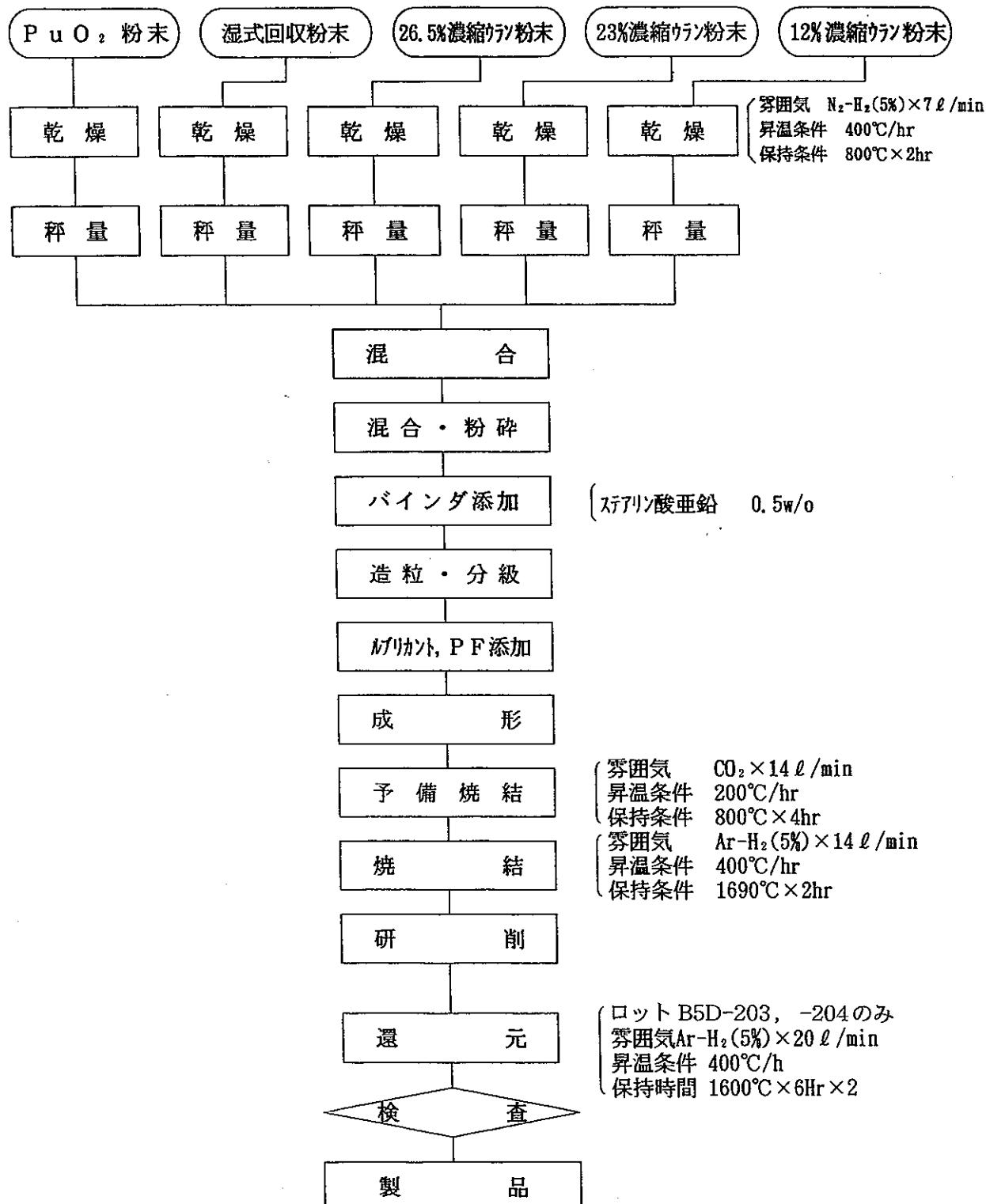
\* 水分除く

付録表2 燃料ペレットのプルトニウム同位体組成

ロット番号	B5D-201	B5D-202	B5D-203	B5D-204	B5D-205	B5D-206
$^{238}\text{Pu}$		1.06			1.14	
$^{239}\text{Pu}$		66.08			65.49	
$^{240}\text{Pu}$		22.77			22.96	
$^{241}\text{Pu}$		6.28			6.43	
$^{242}\text{Pu}$		3.81			3.98	
核分裂性Pu同位体* (分析日)		72.36 (1991.5.21)			71.72 (1991.5.28)	
$^{241}\text{Am}$ (分析日)		3.10 (1991.5.21)			3.13 (1991.5.28)	

\*  $^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$ 

(単位は%)



付録図1 B5D-2燃料ペレットの製造フロー