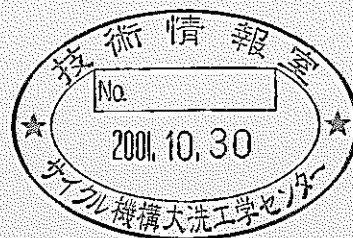


高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料ピンの
照射初期における伝熱特性評価

— 燃料溶融限界線出力評価試験データに基づく燃料熱伝導特性と
ギャップ部熱伝達挙動の評価 —

(研究報告)



2001年8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

Inquires 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)

2001

高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料ピンの 照射初期における伝熱特性評価

-燃料溶融限界線出力評価試験データに基づく燃料熱伝導特性と
ギャップ部熱伝達挙動の評価-

(研究報告)

井上賢紀*、浅賀健男*

要旨

高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料の熱伝導特性の解明は熱伝導度式の形で集大成されながら展開しており、2000年に新しい関係式 (PNC'98式**) が報告された。高速炉燃料は軽水炉燃料よりも使用温度レベルが高いため、2000°Cを超える高温領域まで信頼性の高い燃料熱伝導度式に対するニーズが強いが、高温領域における熱伝導度測定は技術的難易度が高いために実測データは非常に少ない。

最近取得された高速実験炉「常陽」におけるPTM試験データに基づき燃料ピン内伝熱特性評価を行い、ギャップ部温度上昇量計算値をギャップ部熱伝達挙動の観点から検討し、PNC'98式の燃料融点までの適用性を熱伝導積分法に基づき評価した。PTM試験データを用いた適用性評価は、燃料熱伝導特性に及ぼす気孔効果と照射効果の取扱い、燃料中心温度設定値等の燃料ピン内温度分布計算方法の妥当性に依存する。そこで、照射初期の燃料ピン内温度評価モデルを最新知見に基づき妥当性を検討しながら設定した。得られたギャップ部温度上昇量と燃料ペレット内温度上昇量の計算値は、ギャップ部熱伝達挙動の観点から適切な値に計算されており、PNC'98式は燃料融点まで十分な適用性を有していると考えられた。

* 大洗工学センター システム技術開発部 核燃料工学グループ

** Masaki Inoue, "Thermal Conductivity of Uranium-Plutonium Oxide Fuel for Fast Reactors", Journal of Nuclear Materials, Vol.282, P.186-195 (2000)

Thermal Performance of Fast Reactor Type Uranium-Plutonium Oxide Fuel Pins at Beginning-of-Life Conditions

Masaki INOUE*, Takeo ASAGA*

Abstract

A new thermal conductivity correlation**, named as "PNC'98 equation", of fast reactor type uranium-plutonium oxide (FR-MOX) fuel was proposed by one of the authors last year. Since maximum operating temperature of fast reactor fuel is generally much higher than that of light water reactor fuel, the predictability of the correlations for FR-MOX fuel at higher temperatures, especially, above 2300K, become more important in case of the fuel pin thermal performance analysis. Although the thermal conductivity measurements at higher temperatures are very scarce, power-to-melt (PTM) experiments at beginning-of-life conditions can compensate for the lack of the measurements and be preferable to verify the correlation up to melting point.

The PNC'98 equation was applied to the PTM test results irradiated in experimental fast reactor JOYO in order to examine its predictability up to melting point by integral method from a viewpoint of the heat transfer behavior across fuel-to-cladding gap through the fuel pin thermal analysis. Fuel pin irradiation behaviors, such as microstructure evolution and the porosity effect on the heat conduction in fuel pellet, were carefully modeled with some related physical properties based on the latest knowledge in order to minimize the uncertainty of the analysis.

The calculated heat transfer behavior across the gap derived from temperature increments in the fuel pin is reasonably consistent to the past studies. This implies that the combinations of the PNC'98 equation with the model are highly predictable for the temperature distribution in the PTM test fuel pins and that the applicability of the PNC'98 equation is verified up to melting point.

* Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Division, Oarai Engineering Center

** Masaki Inoue, "Thermal Conductivity of Uranium-Plutonium Oxide Fuel for Fast Reactors", Journal of Nuclear Materials, Vol.282, P.186-195 (2000)

<目次>

1.はじめに	1
1.1 背景	1
1.2 目的	2
2.評価用照射試験データ	3
3.照射初期燃料ピン内伝熱特性のモデル化	5
3.1 燃料ピン内熱伝導・熱伝達挙動に基づく温度評価モデルの設定	5
3.2 関連する燃料物性と照射挙動の取扱い	6
4.ギャップ部熱伝達挙動に基づく燃料熱伝導度式の適用性評価	8
4.1 燃料ピン内温度分布	8
4.2 ギャップ部熱伝達挙動の評価	8
4.3 燃料熱伝導度式の適用性評価	11
5.おわりに	13
6.付記	13
7.謝辞	13
8.参考資料・参考文献	14
付録A 照射開始直後を対象にした燃料溶融限界線出力評価試験 (PTM試験)	26
付録B 「常陽」B5D-2試験の燃料溶融限界線出力データの検討	43
付録C 高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料の燃料融点 (固相線温度) の検討	55
付録D EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験燃料ピンの伝熱特性に関する試評価	60

＜表図リスト：本文＞

表1	「常陽」B5D-2試験燃料ピンの製作仕様と照射条件	16
表2	「常陽」B5D-2試験で取得された燃料溶融限界線出力データ	17
図1	燃料ピン内温度分布評価フロー	18
図2	「常陽」B5D-2試験における燃料溶融限界線出力	19
図3	「常陽」B5D-2試験における横断面金相観察結果	20
図4	今回採用した照射初期燃料ピン内温度評価モデル	21
図5	「常陽」B5D-2試験に対する燃料ペレット内温度上昇量の計算結果	22
図6	「常陽」B5D-2試験に対するギャップ部温度上昇量とギャップコンダクタンスの計算結果	23
図7	「常陽」B5D-2試験に対する炉内実効ギャップ幅の計算結果	24
図8	「常陽」B5D-2試験の溶融開始位置近接横断面あるいは溶融開始位置を含む縦断面試料の金相観察写真において測定された柱状晶領域径	25

<表図リスト：付録>

表A1	試験燃料ピンの基本仕様	32
表A2	試験燃料ピンの製作仕様・照射条件 (P19・P20・P-E01・DEA-2)	33
表A3	照射開始直後を対象にした燃料溶融限界線出力評価試験データベース	34
表A4	試験燃料ピンの製作仕様・照射条件 (B5D-1・B5D-2)	35
図A1	燃料溶融限界線出力評価試験における出力履歴	36
図A2	燃料溶融限界線出力評価試験：P19・P20における軸方向燃料溶融範囲	37
図A3	燃料溶融限界線出力評価試験：P-E01における軸方向燃料溶融範囲	38
図A4	燃料溶融限界線出力評価試験：DEA-2における軸方向燃料溶融範囲	39
図A5	燃料溶融限界線出力評価試験：B5D-1・B5D-2における軸方向燃料溶融範囲	40
図A6	燃料溶融限界線出力の製造時ギャップ幅への依存性	41
図A7	FFTF Driver仕様の燃料溶融限界線出力に及ぼす燃料ピン製作仕様の影響	42
表B1	「常陽」B5D-2試験の燃料溶融開始位置データの信頼性検討結果	46
図B1	B5D-2試験燃料ピンの ⁹⁵ Zr放出γ線軸方向強度プロファイル：その1	47
図B2	B5D-2試験燃料ピンの ⁹⁵ Zr放出γ線軸方向強度プロファイル：その2	48
図B3	B5D-2試験燃料ピンの ⁹⁵ Zr放出γ線軸方向強度プロファイル：その3	49
図B4	B5D-2試験燃料ピンの ⁹⁵ Zr放出γ線軸方向強度プロファイル：その4	50
図B5	B5D-2試験燃料ピンの ⁹⁵ Zr放出γ線軸方向強度プロファイル：その5	51
図B6	B5D-2試験燃料ピンの ⁹⁵ Zr放出γ線軸方向強度プロファイル：その6	52
図B7	B5D-2試験燃料ピンの ⁹⁵ Zr放出γ線軸方向強度プロファイル：その7	53
図B8	B5D-1試験燃料ピンの ⁹⁵ Zr放出γ線軸方向強度プロファイル	54
表C1	燃料溶融限界線出力評価試験に使用された燃料ペレット仕様と燃料融点計算値	58
図C1	未照射状態の燃料融点（固相線温度）実測値と各種関係式との比較検討	59
表D1	EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データと各種設定値	67
図D1	EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データに基づく 燃料ペレット内温度上昇量計算値	68
図D2	EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データに基づく ギャップ部温度上昇量計算値	69
図D3	EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データに基づく 燃料外面温度計算値	70
図D4	EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データに基づく ギャップコンダクタンス計算値	71
図D5	EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データに基づく 炉内実効ギャップ幅計算値（半径値）	72
図D6	P-E01試験とDEA-2試験の線出力を1.14倍した場合の炉内実効ギャップ幅計算値（半径値）	73

1.はじめに

1.1 背景

(1) 燃料熱伝導特性に関する研究の進展

高速炉燃料の熱設計評価条件は照射初期が特に厳しく、直接的に利用可能な未照射状態の燃料熱伝導特性評価の重要度は高い。高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料 (MOX燃料) の熱伝導特性の解明は、熱伝導度式の形に集大成されながら進展してきた。例えば、Martin[1]は1982年に(1-1)式を作成した。Philipponneau[2]は(1-1)式を参考に1992年に(1-2)式を報告した。ちなみに、「常陽」と「もんじゅ」の現行の燃料設計評価用熱伝導度式はHilbert[3]が1973年に報告した(1-3)式である。

$$\lambda_0 = \frac{1}{0.037 + 3.33(2.0 - O/M) + 2.37 \times 10^{-4} T} + 78.9 \times 10^{-12} T^3 \quad (1-1)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{-0.0912 + 1.320\sqrt{2 - O/M} + 0.00931 + 2.493 \times 10^{-4} T} + 88.40 \times 10^{-12} T^3 \quad (1-2)$$

$$\lambda = 1.169 + \frac{100}{\left\{ 0.06717 + \frac{0.02226P}{O/M - 1.90} \right\} (T - 273.15)} + 7.214 \times 10^{-11} (T - 273.15)^3 \quad (1-3)$$

ここで、 λ_0 、 λ 、 T 、 O/M はそれぞれ下記のとおりである。

λ_0 : 気孔率ゼロの状態の熱伝導度 (W/mK)

λ : 熱伝導度 (W/mK)

T : 温度 (K)

OM : OM 比 (-)

P : 気孔率 (-)

最近、井上[4,5]は「PNC'98式」と呼称する(1-4)式を報告した。

$$\lambda_0 = \frac{1}{0.06059 + 0.2754\sqrt{2 - O/M} + 2.011 \times 10^{-4} T} + \frac{4.715 \times 10^9}{T^2} \exp\left(-\frac{16361}{T}\right) \quad (1-4)$$

PNC'98式は、フォノン伝導項 (右辺第1項) と電子伝導項 (右辺第2項) の和の形で表されている。電子伝導項の係数は UO_2 に対するHarding[6]の式の値がそのまま使用され、フォノン伝導項の係数は OM 比が2.00と1.98の試料に対する測定データをもとに決定されている。さらに、「常陽」計測線付照射試験 (INTA-2試験) データを使用し、低 OM 比領域 (1.95と1.96) への外挿の妥当性を熱伝導積分法によって約1600℃までの範囲で確認している。

(2) 燃料熱伝導特性評価に係わる課題

高速炉燃料は軽水炉燃料よりも使用温度レベルが高いため、2000℃を超える高温領域まで信頼性の高い燃料熱伝導度式へのニーズが強い。高温領域における熱伝導度測定は技術的難易度が高いために実測データ[7]は少なく、大幅な拡充は期待できないのが実状である。そこで、燃料溶融限界線出力評価試験 (PTM試験) を利用した既存の熱伝導度式の適用性評価あるいは改良、新規作成が期待される。高速炉におけるPTM試験は過去に海外炉でも実施 (P19試験・P20試験・P-E01試験・DEA-2試験: 付録A参照) されているが、照射条件の評価方法、燃料ペレットの気孔形態等に関する情報は限られていた。

(3) 「常陽」燃料溶融限界線出力データの整備

最近、高速実験炉「常陽」におけるPTM試験結果（B5D-2試験データ）[8,9]が利用可能になった。B5D-2試験データは線出力評価精度[10,11]がよいこと、燃料熱伝導特性（製造時ままの状態）に及ぼす気孔効果が実験的に定量[12,13]されていること、同一燃料ピン仕様に対して複数のデータ点が取得[8,9]されていることの3点に特長がある。さらに、B5D-2試験とINTA-2試験の燃料ペレットの製造仕様は同一であり、かつ、同一原子炉であるために線出力の系統誤差を考慮する必要がない点も大きな特長である。つまり、PNC'98式に対する熱伝導積分法を用いた一連の適用性評価という点で最適のデータベースである。

(4) 適切な温度評価用モデルとギャップ部熱伝達挙動評価の必要性

燃料ピン型の原子炉燃料の内部には、照射によって図1に模式的に示すような温度分布が生じる。燃料ペレットと被覆管とのギャップ部の伝熱は熱伝達であり、燃料ペレット内の伝熱は内部発熱をとともなう熱伝導である。燃料ピン内部における温度上昇は、「燃料と被覆管とのギャップ部： ΔT_{gap} 」と「燃料ペレット内： ΔT_{fuel} 」の2つの成分に分けられる。ギャップ部温度上昇量の方が予測の難易度は高いが、絶対値は小さいのが普通である。

熱伝導積分法を用いた燃料熱伝導度式の適用性評価は、燃料ピン内温度分布解析に使用する評価モデルの妥当性に強く依存する。特に、PTM試験データは燃料温度レベルが高く、燃料組織変化挙動等の照射効果を適切に考慮した温度評価モデルが必要である。

また、PTM試験データを用いた燃料熱伝導度式の適用性評価はギャップ部温度上昇量計算値の妥当性に基づき評価されるため、ギャップ部熱伝達挙動の評価が必要になる。ギャップ部熱伝達挙動については、軽水炉燃料分野において知見の蓄積が進んでおり、定量的な比較検討が可能である。

1.2 目的

(1) 評価範囲

今回の燃料ピン伝熱特性評価は現時点で燃料ピン熱設計の観点から評価ニーズのより大きな照射初期に限定する。

(2) 燃料ピン内伝熱特性に関する評価用モデルの設定

PTM試験に特徴的な照射挙動を考慮した照射初期用温度評価モデルを設定し、続く熱伝導積分法による燃料熱伝導度式（PNC'98式）の適用性評価に資する。

(3) 熱伝導積分法による燃料熱伝導度式（PNC'98式）の適用性評価

「常陽」燃料溶融限界線出力評価試験（B5D-2試験）データに基づき燃料ピン内伝熱特性評価を行い、ギャップ部温度上昇量計算値をギャップ部熱伝達挙動の観点から検討して燃料熱伝導度式（PNC'98式）の燃料融点までの適用性を評価する。

2. 評価用照射試験データ

(1) 「常陽」燃料溶融限界線出力評価試験（付録A参照）

高速実験炉「常陽」では1991年と1992年に計2回の燃料溶融限界線出力評価試験が行われ、それぞれB5D-1試験とB5D-2試験と呼ばれる。B5D-1試験はB5D-2試験の予備試験に位置づけられているため、評価用照射試験データには採用しない。

B5D-2試験の試験パラメータには、製造時ギャップ幅（3レベル）・相対密度（2レベル）・OM比（3レベル）・タグガスの有無が設定され、6ロット（B5D-201～B5D-206）の燃料ペレットが計24本の燃料ピンに装填されて照射された（表1参照）。

各燃料ペレットロットの製造仕様は、

B5D-201：中ギャップ幅（約180 μ m）・中密度（92%TD）・高OM比（1.98）、

B5D-202：狭ギャップ幅（約140 μ m）・中密度（92%TD）・高OM比（1.98）、

B5D-203：中ギャップ幅（約180 μ m）・中密度（92%TD）・低OM比（1.96）、

B5D-204：狭ギャップ幅（約140 μ m）・中密度（92%TD）・低OM比（1.96）、

B5D-205：中ギャップ幅（約180 μ m）・高密度（95%TD）・中OM比（1.97）、

B5D-206：広ギャップ幅（約240 μ m）・高密度（95%TD）・中OM比（1.97）

である。被覆管仕様は共通であり、外径7.5mm・肉厚0.4mm・PNC1520鋼製である。

(2) 溶融開始位置データ（PTM試験データ：表2参照）

燃料ピン伝熱特性評価には信頼性の高いデータ点が必要であるため、山本[8,9]が報告した溶融開始位置データに対して下記の3つの基準（(a)～(c)）を追加設定し、45箇所から31箇所に絞り込みを行った。絞り込み過程の詳細は、付録Bを参照されたい。

(a) 溶融開始位置が燃料ペレット2個以内の範囲で特定されていること

(b) 中心空孔が識別される縦断面試料に対して溶融開始位置が特定されていること

(c) 特定された溶融開始位置が⁹⁵Zr放出 γ 線軸方向強度プロファイルで観察される溶融燃料移動挙動と比較して明らかな矛盾がないこと

燃料組織領域用横断面金相試料の採取位置が溶融開始位置から離れ過ぎると燃料組織変化が大きく異なるため、基準(d)を設定し、燃料ピン伝熱特性評価用データとして計21箇所に絞り込みを行った（縦断面金相試料で代用する3箇所には適用されない）。

(d) 特定された溶融開始位置（範囲データは中央位置）の21mm以内で燃料組織領域径測定が行われていること（横断面金相試料の採取位置の溶融開始位置からの距離の実績値：平均13mm・標本標準偏差4mm）

(3) PTM試験データから見た燃料ピン内伝熱特性

基準(a)～(c)で絞り込んだ31箇所のPTM試験データについて、製造時ギャップ幅、OM比、相対密度、タグガスの有無への依存性を整理した結果を図2に示す。

図2から、製造時ギャップ幅が大きくなるほど燃料溶融限界線出力は低くなる傾向が認められる。また、製造時ギャップ幅が同レベルであれば、OM比と相対密度が大きくなるほど、燃料溶融限界線出力は高くなる傾向もある。さらに、タグガスの有無も試験パラメータに設定されているが、影響は認められない。ただし、全体に燃料溶融限界線出力に及ぼす試験パラメーターの影響は小さく、燃料ペレットと被覆管とのギャップ幅は接触が発生するレベルまで縮小していることを示唆している。

燃料ピン仕様毎の上部側と下部側に対して計12群に分類したときの燃料溶融限界線出力（範囲データは中央位置）の平均値とばらつき（標本標準偏差）をタグガスなしの燃料ピンに限定して整理すると、

B5D-201下部側：平均値642W/cm・標本標準偏差5W/cm（データ点数＝2点）、

B5D-201上部側：平均値621W/cm・標本標準偏差6W/cm（データ点数＝2点）、

B5D-202下部側：平均値653W/cm・標本標準偏差4W/cm（データ点数＝3点）、

B5D-202上部側：平均値629W/cm・標本標準偏差6W/cm（データ点数＝3点）、

B5D-203下部側：平均値616W/cm・標本標準偏差6W/cm（データ点数＝3点）、

B5D-203上部側：平均値598W/cm・標本標準偏差4W/cm（データ点数＝2点）、

B5D-204下部側：平均値646W/cm・標本標準偏差2W/cm（データ点数＝3点）、

B5D-204上部側：605W/cm（データ点数＝1点）、

B5D-205下部側：平均値655W/cm・標本標準偏差18W/cm（データ点数＝2点）、

B5D-205上部側：平均値632W/cm・標本標準偏差13W/cm（データ点数＝3点）、

B5D-206下部側：663W/cm（データ点数＝1点）、

B5D-206上部側：平均値633W/cm・標本標準偏差4W/cm（データ点数＝2点）、

となる。特に、製造時ギャップ幅の狭い仕様（B5D-202）における燃料溶融限界線出力（タグガスを装填した燃料ピンを除く）のばらつきは上部側と下部側ともに1%以内であり、線出力評価値のランダム誤差（1.5%または2.4%）[10,11]よりも小さいことがわかる。同様に、B5D-204の上部側（下部側は1点しかない）における燃料溶融限界線出力のばらつきも1%以内である。

燃料溶融限界線出力のばらつきは、燃料ピン内伝熱特性のばらつきを反映していると考えることができる。前出の基準(a)～(c)を適用して絞り込みを行ったPTM試験データをもとに燃料溶融限界線出力のばらつき（＝燃料ピン内伝熱特性のばらつき）を検討すると、特に製造時ギャップ幅の狭い仕様の燃料ピン内伝熱特性のばらつきは非常に小さく、燃料熱伝導度式の適用性評価に適していることがわかる。

なお、B5D-202とB5D-204を除く燃料ペレットロットを装填した燃料ピンに対しては十分な点数のデータがないため、燃料溶融限界線出力のばらつき（＝燃料ピン内伝熱特性のばらつき）に及ぼす製造時ギャップ幅と相対密度の影響を検討することは困難である。

3. 照射初期燃料ピン内伝熱特性のモデル化

3.1 燃料ピン内熱伝導・熱伝達挙動に基づく温度評価モデルの設定

(1) 熱伝導積分法の使用に必要な温度指標 (図1参照)

熱伝導積分法によって燃料熱伝導度式の適用性評価を行うためには、燃料ピンの横断面内に温度指標 (温度が既知の等温線) が2箇所以上必要である。

被覆管温度は熱流計算によって精度よく評価でき、被覆管内面位置=被覆管内面温度が第1の指標となる (B5D-2試験とINTA-2試験は $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 未満の誤差レベル (1σ) で評価されている)。

計測線付照射試験データの場合は、燃料ペレット中心位置 (中心空孔外周位置) = 燃料中心温度計測値が第2の指標となる。

PTM試験データは、溶融開始位置における線出力、被覆管温度、燃料組織領域径等によって構成される。したがって、試験データの定義からPTM試験データの場合は、燃料ペレット中心位置 (中心空孔外周位置) = 燃料融点 (固相線温度) が第2の指標となる。

(2) 燃料熱伝導度式の適用性評価方法

PTM試験データを用いた適用性評価 (伝熱特性評価) は、INTA-2試験データを用いた場合[5]とは異なる方法を用いる。INTA-2試験データの場合は、被覆管温度を出発点にギャップ部温度上昇量と燃料ペレット内温度上昇量を順次計算し、燃料中心温度計測値との整合性から良否を判定した。一方、今回のB5D-2試験データの場合は、燃料中心温度を出発点に燃料ペレット内温度上昇量を計算し、残るギャップ部温度上昇量=ギャップ部熱伝達挙動が妥当であることを根拠に良否を判定する。

(3) 燃料ピン内伝熱経路

図3は、B5D-2試験における典型的な横断面金相観察結果である。被覆管、燃料ペレットと被覆管とのギャップ部、燃料ペレット、中心空孔が観察される。燃料ペレットには組織変化が生じており、未変化組織領域と柱状晶領域に分割できる。未変化組織領域は、製造時ままの燃料組織状態を維持している領域である。柱状晶領域は、レンズ状ボイドが中心空孔に向けて移動した後の領域として判定される。照射初期のPTM試験は照射期間が短いため、等軸晶領域は識別されないのが普通である。

燃料ペレット内部で発生した熱は径方向外側に向かって伝導し、ギャップ部を介して被覆管に伝達される。実際には燃料ペレット内部は気孔とクラックが障害となるためにミクロ的には3次元に熱が流れるが、マクロ的には径方向1次元の伝導伝熱と考えてよい。また、ギャップ部熱伝達成分としては、ギャップガス・放射・固体接触の3成分に分類でき、燃料ペレットと被覆管との位置関係によってミクロ的には3次元に熱が流れるために熱伝達成分毎の寄与が異なるが、マクロ的には径方向1次元の熱伝達と考えてよい。

(4) 領域分割と発熱条件

(3)の検討結果から、照射初期の燃料ピン内温度評価モデルは径方向1次元伝熱体系とし、被覆管・燃料と被覆管とのギャップ部・未変化組織領域・柱状晶領域・中心空孔の5領域に分割する (図4)。具体的な計算は、「燃料被覆管径方向1次元温度分

布解析プログラム：FUTURE」[14,15]を使用する。未変化組織領域と柱状晶領域の発熱はマトリックスの発熱密度は均一とし、相対密度で補正する。

B5D-2試験においては有意な外径変化が認められないことから、被覆管外半径 (r_{co})・内半径 (r_{ci}) には製造時の値がそのまま使用できる。また、中心空孔半径 (r_{ca}) と柱状晶領域半径 (r_{cg}) については照射後試験における測定値を使用する。燃料ペレット外半径 (r_{fo}) については、クラッキング・リロケーション後も燃料ペレット片の未変化組織領域は製造時の形状を維持し、かつ、未変化組織領域における伝熱距離の変化は小さいため、製造時の値をそのまま使用しても問題はない。

未変化組織領域と柱状晶領域の相対密度の取扱いは、発熱分布だけでなく、燃料熱伝導特性にも影響する。特に、B5D-2試験は柱状晶領域の発達過程にあり、かつ、リロケーションによってギャップ空間が中心空孔に一部取り込まれている点に特徴がある。未変化組織領域の変化は光学顕微鏡では識別できないレベルであり、定義からも未変化組織領域の相対密度には製造時ままの値を使用するのが適切である。柱状晶領域の相対密度は実験的な定量が困難であるためにモデル的取扱いにせざるをえず、過去の評価事例[16,17]を踏襲し、質量保存則を採用する。

装填されている燃料ペレットは個々に相対密度が異なっているが、製造時の値としては燃料ピン平均の値を統一して使用する。理由は、熔融開始位置と燃料組織領域径測定用横断面金相観察位置の燃料ペレットが同一でないこと、線出力の評価計算には燃料ピン平均の値が使用[10,11]されていることの2点による。

3.2 関連する燃料物性と照射挙動の取扱い

(1) 燃料融点＝燃料中心温度設定値

PTM試験データを用いた燃料ピン伝熱特性評価を行う場合、燃料中心温度には燃料融点（固相線温度）を設定する。B5D-2試験ではOM比がパラメータになっているため、OM比に応じた燃料融点を設定する必要がある（厳密にはPu富化度が燃料ペレットロット毎にわずかに異なる）。石井[18]は、PTM試験データを用いた燃料ピン伝熱特性評価を行う場合の燃料融点としてはAdamson[19]の報告値をもとにAitken[20,21]の報告値を修正し、Pu富化度とOM比に応じて報告値間を直線内挿した値（修正A&E方式計算値）の使用を推奨している。現時点で利用可能な燃料融点実測値と修正A&E方式計算値との比較検討を行い、B5D-2試験に対しては修正A&E方式を採用することが適切であることを確認している（付録C参照）。使用した設定値を表1に付記する。

(2) 燃料熱伝導特性に及ぼす気孔効果の補正方法

気孔効果の補正方法には(3-1)式の修正Loeb式を採用し、Fを気孔率ゼロの場合の計算値に乗じて使用する。

$$F=1-\alpha P \quad (3-1)$$

ここで、F、 α 、Pはそれぞれ下記のとおりである。

- F： 気孔効果の補正式（値）（-）
- α ： 気孔効果の有効補正係数（-）
- P： 気孔率（-）

B5D-2試験用燃料ペレットの燃料熱伝導特性に及ぼす気孔効果は実験的に定量済であり、未変化組織領域用の α には既報[12,13]の値を使用する(表1参照)。

柱状晶領域では中心空孔形成、結晶粒成長等が進行しているため、適用すべき α は未変化組織領域に対する値とは厳密には異なるが、PTM試験で観察される柱状晶領域は発達段階にあるために熱伝導特性に及ぼす気孔効果の厳密な評価は困難である。しかし、柱状晶領域の相対密度は十分に高く、 α の不確かさの効果は小さくなるため、今回の評価では未変化組織領域と共通の値を設定すればよいと考えられる。

(3) 燃料熱伝導特性に及ぼす燃料組織変化以外の照射効果の取扱い

(1)と(2)では、燃料熱伝導特性に及ぼす照射効果のうちの燃料組織変化についてのみ言及した。燃料熱伝導特性に影響を及ぼす可能性のある現象としては、Pu再分布現象、OM比再分布現象、燃焼効果、クラッキングを挙げることができる。

B5D-2試験のPu再分布現象[8,9]は、溶融開始位置に近接した位置(21mm以内)から採取した横断面金相試料を対象に実験的に定量されており、2~3wt%の濃度上昇が観察されている。また、測定された濃度の不確かさ、同一仕様の燃料ペレットの試料同士を比較した場合のノミナル値のばらつき、周方向のPu濃度上昇量のばらつきはいずれも大きい。さらには、Pu濃度の増大が顕著なのは中心空孔縁から200 μ m以内の範囲(面積率で約2%以内)である。以上の特徴から、Pu再分布現象による発熱分布のゆがみが燃料ペレット内温度上昇量に及ぼす影響は無視してよいと考えられる。

B5D-2試験の出力パターンは急速な出力上昇と短時間の保持に特徴がある(付録A参照)。OM比再分布現象は酸素の拡散をとまなうため、定常状態に達してしまうとは考えにくい。しかも、OM比再分布現象が瞬時に発現する場合を仮定した場合でも燃料中心温度に及ぼす低減効果は数十 $^{\circ}$ Cのレベルであり、実際のOM比再分布現象の影響は無視できるレベルと考えられる。さらには、B5D-2試験で使用された燃料ペレットのOM比範囲は1.96~1.98と狭く、かつ、OM比再分布現象自体は常に燃料中心温度を低減する方向に働くため、燃料ピン伝熱特性(特に、燃料ペレット内温度上昇量)の相互比較を行う場合の影響は小さいと考えられる。

B5D-2試験は非常に短期間の照射試験(0.16EFPD)であるため、核分裂片による照射損傷の蓄積、FP生成の効果等の燃焼効果は考慮しなくてもよいと考えられる。

ちなみに、松元[16]、池田[17]、石井[18]、細川[22]が照射初期PTM試験データを利用した燃料ピン内伝熱特性評価を過去に実施しているが、いずれの評価においても燃料熱伝導特性に及ぼすPu再分布現象・OM比再分布現象・燃焼効果・クラッキングの影響を考慮しない評価体系を採用している。同様の理由で、INTA-2試験データを用いた適用性評価[5]においても考慮していない。

4. ギャップ部熱伝達挙動に基づく燃料熱伝導度式の適用性評価

4.1 燃料ピン内温度分布

(1) 評価計算結果

B5D-2試験に対する燃料ピン内温度分布の計算結果について、燃料ペレット内温度上昇量を図5、ギャップ部温度上昇量を図6(a)に示す。また、ギャップ部温度上昇量を(4-1)式を用いてギャップコンダクタンスに換算した結果を図6(b)に示す。図5と図6はいずれも製造時ギャップ幅を横軸に燃料ペレットロット毎に整理してある。

$$H_{gap} = \frac{Q}{2\pi r_{ci}(T_{fo} - T_{ci})} \quad (4-1)$$

ここで、 H_{gap} 、 Q 、 r_{ci} 、 T_{fo} 、 T_{ci} はそれぞれ下記のとおりである。

- H_{gap} : ギャップコンダクタンス (ギャップ部熱伝達率) (W/m²K)
- Q : 線出力 (W/m)
- r_{ci} : 被覆管内半径 (m)
- T_{fo} : 燃料外面温度 (K)
- T_{ci} : 被覆管内面温度 (K)

図5と図6(a)のように、燃料ペレット内温度上昇量は約1980~2170℃の範囲であるがギャップ部温度上昇量は約80~210℃の範囲にあり、約10~27倍の差がある。

図5と図6には伝熱特性に及ぼす製造時ギャップ幅の影響が明確に現われていることがわかる。具体的には、製造時ギャップ幅が大きくなると、燃料ペレット内温度上昇量は小さくなる傾向があり、逆にギャップ部温度上昇量は大きくなる傾向がある。また、製造時ギャップ幅が大きくなると、ギャップコンダクタンスは低下する傾向がある。

(2) ギャップ部温度上昇量とギャップコンダクタンスの比較検討

2章で述べたように、製造時ギャップ幅の狭い仕様 (B5D-202とB5D-204) の燃料ピン内伝熱特性のばらつきは非常に小さく、燃料熱伝導度式の適用性評価に適している。B5D-202 (O/M比=1.98) とB5D-204 (O/M比=1.96) のなかのタグガスなしのPTM試験データ5点に対するギャップコンダクタンス計算値は、平均値3.0W/cm²K (標本標準偏差0.5W/cm²K) を中心にばらついており、O/M比依存性は存在しないように見える。ギャップコンダクタンスの絶対値が妥当なレベルであれば、PNC'98式はO/M比依存性と温度依存性を適切に表しており、燃料融点までの適用性を確認できる。続く「4.2」でギャップ部熱伝達挙動の評価を行い、「4.3」で適用性を評価する。

4.2 ギャップ部熱伝達挙動の評価

(1) ギャップ部熱伝達モデル

ギャップ部の熱伝達挙動にはRoss[23]による先駆的な理論検討と実験があり、その成果は広く利用されている。以下に概要を紹介する。

照射初期はギャップ部への核分裂生成物の移行は無視できる (ほぼ製造時ままと仮定してよい) ので、照射初期ギャップコンダクタンス： H_{gp} はギャップガス成分、放射成分、固体接触成分の3成分にわけることができる ((4-2)式)。

$$H_{\text{gap}} = H_{\text{gas}} + H_{\text{rad}} + H_{\text{solid}} \quad (4-2)$$

ここで、 H_{gas} 、 H_{rad} 、 H_{solid} はそれぞれ下記のとおりである。

H_{gas} : ギャップガスによる熱伝達率 (ギャップガス成分) ($\text{W/m}^2\text{K}$)

H_{rad} : 放射による熱伝達率 (放射成分) ($\text{W/m}^2\text{K}$)

H_{solid} : 固体接触による熱伝達率 (固体接触成分) ($\text{W/m}^2\text{K}$)

最初に、ギャップガス成分は(4-3)式のように定式化されている。

$$H_{\text{gas}} = \frac{K_{\text{mix}}}{\text{GAPmin} + \text{TJD} + \text{GAP}} \quad (4-3)$$

ここで、 K_{mix} 、 X 、 TJD 、 GAP はそれぞれ下記のとおりである。

K_{mix} : ギャップガス熱伝導度 (W/mK)

GAPmin : 最小ギャップ幅 (実効表面粗さ) (m)

TJD : 温度ジャンプ距離 (m)

GAP : 炉内ギャップ幅 (半径値) (m)

最小ギャップ幅： GAPmin は実効表面粗さとも呼ばれる量であり、被覆管内面と燃料ペレット外面が密着した状態 ($\text{GAP}=0$) においてもなお残存する実効的なギャップガス熱伝達距離を指す。軽水炉燃料分野で得られた知見として、照射開始直後の燃料温度と機械的な相互作用には表面粗さは影響しないことも報告[24]されており、最小ギャップ幅と呼称する方がより適切である。具体的には、被覆管内面と燃料ペレット外面の粗さ (Roughness) とうねり (Waviness) に起因すると解釈されている。

次に、放射成分は(4-4)式のように定式化されている。放射成分のギャップコンダクタンス全体量への寄与は、通常は数%未満に留まることが知られている。

$$H_{\text{rad}} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} (T_{fo}^2 + T_{ci}^2)(T_{fo} + T_{ci}) \quad (4-4)$$

ここで、 σ 、 ϵ_f 、 ϵ_c はそれぞれ下記のとおりである。

σ : ステファン-ボルツマン定数 ($=5.66961 \times 10^{-8}$) ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)

ϵ_f : 燃料ペレットの輻射率 ($=0.8$) (-)

ϵ_c : 被覆管の輻射率 ($=0.9$) (-)

最後に、固体接触成分は、(4-5)式として定式化されている。固体接触成分の大きさは燃料ペレットと被覆管との接触圧によるところが大きいが、照射中の燃料ピンにおける接触圧の実測は現在の技術では不可能である。

$$H_{\text{solid}} = \frac{kP}{a_0 \sqrt{RH}} \quad (4-5)$$

ここで、 k : 実効固体熱伝導度 (W/mK)、 R : 自乗平均粗さ (mm) はそれぞれ

$$k = \frac{2k_c k_f}{k_c + k_f}, \quad R = \sqrt{\frac{R_c^2 + R_f^2}{2}}$$

と表され、 P 、 a_0 、 k_c 、 k_f 、 R_c 、 R_f はそれぞれ下記のとおりである。

a_0 : 定数 (-)

P : 接触圧 (Pa)

H : メイヤー硬さ (被覆管) (Pa)

- k_c : 被覆管（固体接触部）の熱伝導度 (W/mK)
 k_f : 燃料ペレット（固体接触部）の熱伝導度 (W/mK)
 R_c : 被覆管の表面粗さ (m)
 R_f : 燃料ペレットの表面粗さ (m)

(2) ギャップ部熱伝達成分の寄与

Ross[23]は、表面粗さの異なるジルカロイと酸化ウランの組合わせによる試料対を雰囲気（真空・不活性ガス）と圧縮条件を変えた測定を行い、熱伝達率に及ぼすギャップガス成分と固体接触成分の分離評価を行っている。B5D-2試験は、ダイヤモンド砥石研削仕上燃料ペレットと冷間加工仕上被覆管との組合せからなる。Rossの実験のなかでB5D-2試験に最も近い組合せのダイヤモンド砥石研削仕上酸化ウランと旋盤仕上ジルカロイの組合せの場合、全体量に及ぼす固体接触成分の寄与は10MPa(100atm)の条件で約6%、50MPa(500atm)の条件でも約20%と小さい。

Rossが実験で使用した試料対は、中実円柱端面同士（円形の盤面同士）の面接触がマクロ的に見て終始継続している点に特徴がある。一方、燃料ピンは円筒管内面と中実棒外面の接触であり、かつ、燃料ペレットのクラッキング・リロケーション現象が不可避免的に発生し、マクロ的には線接触からはじまり、面接触へ移行する。B5D-2試験は非常に短期間の試験であるが燃料温度レベルが高いため、燃料ペレットのクリープダウンによる接触圧力の緩和効果が大いいと推定される（B5D-2試験では被覆管外径に有意な変化はない）。以上のように、実際の燃料ピンにおける固体接触挙動を総合的に考慮すると、固体接触成分の寄与は無視してよいレベルと考えられる。

(3) ギャップコンダクタンス計算値に基づくギャップ部熱伝達挙動の検討

放射成分の寄与は通常は小さく、(2)で検討したように固体接触成分も無視できるレベルと推定されることから、(4-2)式はほぼ $H_{gap} \doteq H_{gas}$ と置くことができる。

(4-3)式を変形すると(4-6)式が得られ、炉内ギャップ幅（半径値）を解析的に評価することができる（(4-6)式の左辺を炉内実効ギャップ幅と呼ぶ）。

$$GAP + GAP_{min} = \left(\frac{K_{mix}}{H_{gas}} - TJD \right) \quad (4-6)$$

ここで、 H_{gas} 、 K_{mix} 、 TJD 、 GAP 、 GAP_{min} は(4-3)式の場合とそれぞれ同じである。ギャップコンダクタンス： H_{gap} は「4.1」で計算済みであり、 H_{solid} はゼロと置くことができ、 H_{rad} は(4-4)式から容易に計算できる。さらに、ギャップガス熱伝導度と温度ジャンプ距離についても既に定式化されている。ギャップガス熱伝導度： K_{mix} （Birdモデル）と温度ジャンプ距離： TJD （Kenardモデル）の計算方法は、浅賀[14]あるいは石井[15]の解説を参照されたい。なお、 K_{mix} を算出する場合に必要なギャップガスの温度は、燃料外面温度（ T_{fo} ）と被覆管内面温度（ T_{ci} ）の算術平均値を用いればよい。

B5D-2試験に対して炉内実効ギャップ幅を計算すると図7のようになる。B5D-202とB5D-204の場合、照射中はギャップ部は完全に閉塞した状態（ $GAP=0$ ）にあったと推定される。つまり、B5D-202とB5D-204における炉内実効ギャップ幅の計算値＝最小ギャップ幅と考えられる。データ点8点は平均値 $4.8 \mu m$ （標本標準偏差 $2.8 \mu m$ ）を中心にばらついており、明確なO/M比依存性は認められない。

B5D-201・B5D-203・B5D-205に対する炉内実効ギャップ幅の計算値に有意な差異は認められないが、前出の $GAP_{min}=4.8\pm 2.8\mu m$ と比較して明らかに大きい。B5D-206に対しては、B5D-202とB5D-204との差異は小さい。図8は、溶融開始位置の近接位置から採取した横断面金相試料の燃料組織領域径(表2参照)をプロットした結果である。柱状晶領域径の大小はそのまま燃料ペレットのクリープダウン量(吸収代)の大小に直結すると考えられる。燃料中心温度設定値の差異が小さいために柱状晶領域径の大小関係が炉内実効ギャップ幅計算値の大小関係とほぼ合致するが、相対密度によるギャップ部熱伝達挙動の違いは燃料ペレット内の温度分布に起因した燃料ペレットのクリープダウン挙動と関連している可能性が考えられる。

4.3 燃料熱伝導度式の適用性評価

(1) 炉外試験に基づく報告例

Ross[23]は、最小ギャップ幅は被覆管内面と燃料ペレット外面の両者の粗さの和と比例関係($GAP_{min}=C(R_c+R_p)$ 、 C は定数： 2.57 ± 1.1)にあることも報告している。

(2) 軽水炉燃料分野での知見との比較

ギャップコンダクタンスはあくまでモデル計算値である(物性値ではない)ため、最小ギャップ幅の値に関する報告は非常に少ないのが実際であるが、軽水炉燃料分野における燃料中心温度計測データを利用した解析評価の結果を以下に紹介する。

中島[26]の「軽水炉燃料棒の熱的及び力学的なふるまい解析コード：FEMAXI-III」の報告に記述がある(4-7式)。

$$H_{gas} = \frac{K_{mix}}{C(R_{eff} + R_c) + TJD + GAP} \quad (4-7)$$

ここで、 C と R_{eff} は下記のとおりである(K_{mix} 、 R_c 、 TJD 、 GAP は前出と同じ)。

C ： 定数 ($C=2.77-2.55\times 10^{-3}P$ 、 P は接触圧(Pa))

R_{eff} ： 燃料ペレット表面の実効粗さ= $4\mu m$

また、Charles[26]は「FURET」と呼ばれる燃料中心温度計測データを使用した評価の結果として、 $GAP_{min}=7\mu m$ を報告している。

(3) ギャップ部温度上昇量計算値の妥当性

細川[22]は同様の組合せの燃料ピンの解析にあたり、過去のプルサーマル用MOX燃料ペレットに対する測定実績と被覆管製作仕様を調査し、被覆管内面と燃料ペレット外面の両者の粗さの和として $2\mu m$ を採用した。B5D-2試験は、ダイヤモンド砥石研削仕上燃料ペレットと冷間加工仕上被覆管との組合せからなっており、被覆管内面と燃料ペレット外面の粗さの和も同様に $2\mu m$ 程度の値と推定される。Ross[23]が報告した $C=2.57$ の値と組み合わせると約 $5\mu m$ であり、「4.2(3)」で得られた $GAP_{min}=4.8\pm 2.8\mu m$ の値は妥当なレベルにあると考えられる。さらには、ギャップコンダクタンスとギャップ部温度上昇量は妥当なレベルの値に計算されており、PNC'98式による燃料融点までの熱伝導積分値は妥当なレベルで計算されていると考えられる。逆説的に、B5D-2試験データにPNC'98式を適用すると、ギャップ部熱伝達挙動はRoss[23]の報告したギャップコンダクタンスモデルとよく整合する結果になっている。

(4) INTA-2試験データへの適用

INTA-2試験データを使用した適用性評価[5]ではGAPmin=0を仮定していた。今回の評価で得られたGAPmin=4.8 μ mを考慮した場合、燃料中心温度の計測値と計算値との偏差平均値は-1℃から21℃に変化する。しかし、偏差の自乗平均値58℃とリロケーション現象の不確かさ44℃ (1 σ レベル) よりも小さく、PNC'98式が約1600℃まで十分な適用性があるとした結論は影響を受けないと考えられる。

5. おわりに

(1) 熱伝導積分法による燃料熱伝導度式 (PNC'98式) の適用性評価

「常陽」燃料溶融限界線出力評価試験 (B5D-2試験) データをもとに燃料ピン内温度分布解析を行い、燃料熱伝導度式 (PNC'98式) の燃料融点までの適用性を熱伝導積分法に基づき評価した。

(2) 照射初期燃料ピン内伝熱特性のモデル化

燃料溶融限界線出力評価試験データを用いた適用性評価は、燃料熱伝導特性に及ぼす気孔効果と照射効果の取り扱い、燃料中心温度設定値等の妥当性に依存することから、照射初期の燃料ピン内温度評価モデルを最新知見に基づき妥当性を検討しながら設定した。

(3) ギャップ部熱伝達挙動に基づく燃料熱伝導度式の適用性評価

燃料ピン内温度評価モデルをB5D-2試験データに適用して燃料ピン内温度分布解析を行った。解析の結果得られたギャップコンダクタンスとRoss[23]の報告したギャップコンダクタンスモデルとの整合性は良好であり、ギャップ部温度上昇量と燃料ペレット内温度上昇量の計算値は、ギャップ部熱伝達挙動の観点から適切な値に計算されていると考えられた。

設定した燃料ピン内温度評価モデルとPNC'98式との組合せは、B5D-2試験における燃料ピン内伝熱特性を従来の知見と矛盾することなく説明でき、PNC'98式は燃料融点まで十分な適用性を有することを示すと考えられた。

6. 付記

本文 (1～5章) における評価の結果、「常陽」B5D-2試験データをもとにPNC'98式の燃料融点までの適用性を確認すると同時にギャップ部熱伝達挙動を定量的に把握できた。EBR-IIとFFTFにおける照射試験データについては、照射条件の評価方法、使用された燃料ペレットの気孔形態等に関する情報が限られているため、本文では採用しなかった。そこで、試評価の位置づけではあるが、得られた知見をEBR-IIとFFTFにおけるPTM試験データに適用し、ギャップ部熱伝達挙動の観点から「常陽」照射試験データとの整合性を付録Dとして検討した。

7. 謝辞

燃料ピン内温度分布計算と評価用試験データの整理にあたっては、原子力システム株式会社の伊藤昌弘氏・根本潤一氏・石谷行生氏にご協力いただきました。

評価にあたっては、大洗工学センターシステム技術開発部炉心・燃料システムグループの水野朋保研究主幹、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の山本一也副主任研究員、大洗工学センター照射施設運転管理センター実験炉部技術課の関根隆研究員にご助言をいただきました。

この場を借りてお礼申し上げます。

8. 参考資料・参考文献

- (1) D.G.Martin, "A Re-appraisal of the Thermal Conductivity of UO_2 and Mixed (U,Pu) Oxide Fuels", Journal of Nuclear Materials, Vol.110, P.73-94 (1982)
- (2) Y.Philipponneau, "Thermal Conductivity of (U,Pu) O_{2-x} Mixed Oxide Fuel", Journal of Nuclear Materials, Vol.188, P.194-197 (1992)
- (3) R.F.Hilbert, D.A.Cantley, M.Kangilaski, J.D.Stephen, C.N.Craig, "Evaluation of Material Property Correlations Used in LIFE-II": GEAP-13967 (1973)
- (4) 井上賢紀、浅賀健男、「高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料の熱伝導特性評価 - 照射初期用熱伝導度式の作成: その2 -」: JNC TN9400 98-005 (1998)
- (5) Masaki Inoue, "Thermal Conductivity of Uranium-Plutonium Oxide Fuel for Fast Reactors", Journal of Nuclear Materials, Vol.282, P.186-195 (2000)
- (6) J.H.Harding, D.G.Martin, "A Recommendation for the Thermal Conductivity of UO_2 ", Journal of Nuclear Materials, Vol.166, P.223-226 (1989)
- (7) 例えば、C.R.Ronchi, in ITU Annual Report 1998, EUR18715, P.76-77
- (8) 山本一也、櫛田尚也、小泉敦裕、「高速炉用混合酸化物燃料の燃料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 -」: JNC TN9400 2000-029 (1999)
- (9) 山本一也、櫛田尚也、「「常陽」燃料溶融限界線出力試験の照射後試験による評価」、サイクル機構技報、No.11、2001.6、P.105-117 (2001)
- (10) 関根隆、北村了一、青山卓史、「MCNPによる高速炉用MOX燃料の線出力密度の解析精度向上」、JNC TN9400 2000-071 (2000)
- (11) 青山卓史、関根隆、逢坂正彦、「高速炉用MOX燃料の溶融限界線出力密度の高精度評価」、日本原子力学会「2001年春の年会」、K17 (2001)
- (12) 井上賢紀、浅賀健男、
「高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料の熱伝導特性評価 - 光学顕微鏡組織観察結果を利用した気孔効果の補正方法に関する検討 -」: JNC TN9400 99-005 (1998)
- (13) Masaki Inoue, Kazuyuki Abe, Isamu Sato, "A Method for Determining an Effective Porosity Correction Factor for Thermal Conductivity in Fast Reactor Uranium-Plutonium Oxide Fuel Pellets", Journal of Nuclear Materials, Vol.281, P.117-128 (2000)
- (14) 浅賀健男、水野朋保、櫛田尚也、井上賢紀、立辺和明、広沢孝志、小山真一、吉持宏、「「常陽」Mk-II炉心燃料挙動評価 - 燃料要素挙動 -」: PNC ZN9410 93-025 (1992)
- (15) 石井徹哉、水野朋保、浅賀健男、鹿倉栄、
「炉内照射中燃料温度評価手法の検討」: PNC ZN9410 94-103 (1994)
- (16) 松元慎一郎、河田東海夫、「高速増殖炉もんじゅ発電所燃料設計検討資料分冊4 - 補足資料編 -」: PNC ZN243 83-17 (1983)

- (17) 池田一生、「ギャップコンダクタンス評価手法の検討」：
PNC ZN9410 92-232 (1992)
- (18) 石井徹哉、根本潤一、浅賀健男、「照射初期燃料温度評価手法の検討」：
JNC TN9400 99-055 (1999)
- (19) M.G.Adamson, E.A.Aitken, R.W.Caputi,"Experimental and Thermodynamic
Evaluation of the Melting Behavior of Irradiated Oxide Fuels",
Journal of Nuclear Materials, Vol.130, P.349-365 (1985)
- (20) E.A.Aitken, S.K.Evans,"A Thermodynamic Data Program Involving Plutonia and Urania
at High Temperatures" : GEAP-5672 (1969)
- (21) E.A.Aitken, S.K.Evans,"A Thermodynamic Data Program Involving Plutonia and Urania
at High Temperatures" : GEAP-12229 (1971)
- (22) 細川隆徳、柴原格、榎戸裕二、「燃焼初期における燃料温度評価手法の検討」：
PNC ZN9410 88-125 (1988)
- (23) A.M.Ross, R.L.Stoute,"Heat Transfer Coefficient between UO_2 and Zircaloy-2" :
AECL-1552 (1962)
- (24) P.M.Chantoin, E.Satori, J.A.Turnbull,"The Compilation of a Publication Domain Database
on Nuclear Fuel Performance for the Purpose of Code Development and Validation",
International Seminar on "Thermal Performance of (High Burnup) LWR Fuel" held by
CEA, IAEA and OECD/NEA, Cadarache France on March 3-6 1998, (1998)
- (25) T.Nakajima et.al.,"FEMAXI-III: a Computer Code for the Analysis of Thermal and
Mechanical Behavior of Fuel Rods", JAERI-1298 (1985)
- (26) M.Charles, M.Brueet,"Gap Conductance in a Fuel Rod : Modelling of the FURET and
CONTACT Results", in Proceedings of the IAEA Specialists' Meeting on Water Reactor
Fuel Element Performance Computer Modelling, Bowness-on-Windermere England UK,
P.388-395 (1984)

表1 「常陽」 B5D-2試験燃料ピンの製作仕様と照射条件

試験名	ピン番号	被覆管外径 製造時	被覆管内径 製造時	ペレット ロット番号	ペレット外径 製造時	O/M 製造時	ペレット密度 製造時	Pu富化度 製造時	製造時直径 ギャップ幅	タグガス	線出力 炉心中心位置	気孔効果の 有効補正係数	燃料中心 温度設定値	
Test ID	No.	Pin ID	Cladding Outer Diameter As-Fab mm	Cladding Inner Diameter As-Fab mm	Pellet Lot ID	Pellet Outer Diameter As-Fab mm	O/M As-Fab -	Pellet Density As-Fab %TD	Pu Content As-Fab wt%	As-fab Diametral Gap micrometer	TagGas Y: 有 N: 無	Linear Heat Rate Core Midplane W/cm	Porosity Correction Factor α	修正A&E方式 計算値 degC
		PinAverage	PinAverage	PinAverage		Lot Mean	PinAverage	Lot Mean						
B5D-2	1	B5201	7.502	6.692	B5D-201	6.508	1.98	91.20	19.50	184	N	661	1.9	2760
B5D-2	2	B5202	7.503	6.695	B5D-201	6.507	1.98	91.30	19.50	188	N	655	1.9	2760
B5D-2	3	B5203	7.502	6.691	B5D-201	6.507	1.98	91.18	19.50	184	N	666	1.9	2760
B5D-2	4	B5204	7.501	6.694	B5D-201	6.507	1.98	91.29	19.50	187	N	653	1.9	2760
B5D-2	5	B5205	7.499	6.692	B5D-205	6.453	1.97	95.17	19.37	239	N	703	2.5	2758
B5D-2	6	B5206	7.500	6.692	B5D-205	6.452	1.97	95.29	19.37	240	N	702	2.5	2758
B5D-2	7	B5207	7.500	6.692	B5D-205	6.451	1.97	95.10	19.37	241	N	669	2.5	2758
B5D-2	8	B5208	7.502	6.691	B5D-202	6.560	1.98	91.35	19.50	131	N	675	1.9	2760
B5D-2	9	B5209	7.503	6.695	B5D-202	6.559	1.98	91.27	19.50	136	N	677	1.9	2760
B5D-2	10	B5210	7.503	6.694	B5D-202	6.559	1.98	91.41	19.50	135	N	670	1.9	2760
B5D-2	11	B5211	7.502	6.691	B5D-202	6.560	1.98	91.23	19.50	131	N	670	1.9	2760
B5D-2	12	B5212	7.501	6.692	B5D-202	6.560	1.98	91.38	19.50	132	N	670	1.9	2760
B5D-2	13	B5213	7.499	6.696	B5D-202	6.561	1.98	91.47	19.50	135	Y	676	1.9	2760
B5D-2	14	B5214	7.499	6.695	B5D-202	6.561	1.98	91.43	19.50	134	Y	686	1.9	2760
B5D-2	15	B5215	7.499	6.694	B5D-206	6.511	1.97	94.97	19.37	183	N	701	2.5	2758
B5D-2	16	B5216	7.499	6.694	B5D-206	6.511	1.97	94.96	19.37	183	N	690	2.5	2758
B5D-2	17	B5217	7.500	6.695	B5D-206	6.511	1.97	94.87	19.37	184	N	680	2.5	2758
B5D-2	18	B5218	7.500	6.695	B5D-206	6.511	1.97	94.83	19.37	184	Y	693	2.5	2758
B5D-2	19	B5219	7.498	6.694	B5D-203	6.501	1.96	91.28	19.46	193	N	656	1.9	2753
B5D-2	20	B5220	7.498	6.694	B5D-203	6.501	1.96	91.58	19.46	193	N	665	1.9	2753
B5D-2	21	B5221	7.500	6.696	B5D-203	6.501	1.96	91.54	19.46	195	N	675	1.9	2753
B5D-2	22	B5222	7.499	6.694	B5D-204	6.558	1.96	91.27	19.46	136	N	676	1.9	2753
B5D-2	23	B5223	7.500	6.693	B5D-204	6.558	1.96	91.16	19.46	135	N	681	1.9	2753
B5D-2	24	B5224	7.500	6.693	B5D-204	6.557	1.96	91.38	19.46	136	N	670	1.9	2753

表2 「常陽」B5D-2試験で取得された燃料溶融限界線出力データ（照射条件と燃料組織領域径）

燃料ピン番号 上下部識別	燃料ペレット ロット番号	溶融境界位置	採否 PTM 適用基準	採否 伝熱解析 適用基準	照射条件		燃料組織領域径 (近接位置横断面or縦断面)		
					線出力* LHR W/cm	被覆管肉厚 中心温度* Tcm ℃	中心空孔径 Rcv mm	柱状晶領域径 Rcg mm	
Pin ID /Bottom or Top	Lot ID	Melt Extent DFCB/mm	(a)-(c) ○:採用 ×:不採用	(a)-(d) ○:採用 ×:不採用					
1	B5201B	B5D-201	-	-	-	-	-	-	
3	B5202B	B5D-201	196.4	○	○	646	493	0.910	3.197
5	B5203B	B5D-201	165.0	○	○	639	479	0.812	3.163
7	B5204B	B5D-201	149.6-157.6	×	×	618	473	-	-
9	B5205B	B5D-205	157.4	○	○	668	479	0.689	2.994
11	B5206B	B5D-205	128.4-131.5	○	○	642	465	0.566	2.644
13	B5207B	B5D-205	134.5-151.0	×	×	624	468	-	-
15	B5208B	B5D-202	163.8-168.4	○	×	648	481	-	-
17	B5209B	B5D-202	194.4-207.4	×	×	670	498	-	-
19	B5210B	B5D-202	187.4	○	×	656	491	-	-
21	B5211B	B5D-202	176.0-189.8	○	×	654	489	-	-
23	B5212B	B5D-202	180.5	○	○	652	488	0.662	2.929
25	B5213B**	B5D-202	146.0-172.5	×	×	644	477	-	-
27	B5214B**	B5D-202	168.2	○	○	660	483	0.596	2.237
29	B5215B	B5D-206	161.1-182.6	×	×	677	486	-	-
31	B5216B	B5D-206	164.1-169.8	○	○	663	484	0.465	2.414
33	B5217B	B5D-206	158.1-184.6	×	×	656	484	-	-
35	B5218B**	B5D-206	159.2-168.7	×	×	664	483	-	-
37	B5219B	B5D-203	145.6	○	○	614	469	0.772	3.119
39	B5220B	B5D-203	127.9-137.7	○	×	611	464	-	-
41	B5221B	B5D-203	135.0	○	○	622	465	0.812	3.025
43	B5222B	B5D-204	162.1-165.3	○	○	647	480	0.724	3.000
45	B5223B	B5D-204	150.3-162.5	○	×	646	478	-	-
47	B5224B	B5D-204	165.9	○	○	643	482	0.730	3.090
2	B5201T	B5D-201	345.4	○	○	625	560	0.787***	3.382***
4	B5202T	B5D-201	348.7	○	×	616	559	-	-
6	B5203T	B5D-201	-	-	-	-	-	-	-
8	B5204T	B5D-201	313.1	×	×	639	546	-	-
10	B5205T	B5D-205	366.4-376.7	○	×	639	574	-	-
12	B5206T	B5D-205	369.0	○	○	641	573	0.742	2.761
14	B5207T	B5D-205	362.4	○	×	617	565	-	-
16	B5208T	B5D-202	362.3-364.1	○	×	622	568	-	-
18	B5209T	B5D-202	327.3-336.3	×	×	650	557	-	-
20	B5210T	B5D-202	343.3-344.4	○	×	635	561	-	-
22	B5211T	B5D-202	348.8	○	○	630	563	0.795***	3.477***
24	B5212T	B5D-202	352.3-354.9	×	×	626	565	-	-
26	B5213T**	B5D-202	366.6	○	○	620	568	0.728***	3.349***
28	B5214T**	B5D-202	359.1	○	○	636	567	0.673	2.604
30	B5215T	B5D-206	342.5	×	×	665	562	-	-
32	B5216T	B5D-206	357.9-369.1	×	×	635	573	-	-
34	B5217T	B5D-206	359.3	○	○	630	568	0.644	2.844
36	B5218T**	B5D-206	365.8	○	○	636	574	0.694	2.881
38	B5219T	B5D-203	366.4	○	○	601	565	0.919	3.531
40	B5220T	B5D-203	370.3-374.9	×	×	603	572	-	-
42	B5221T	B5D-203	388.0	○	○	596	575	0.848	2.923
44	B5222T	B5D-204	361.9-366.9	×	×	622	569	-	-
46	B5223T	B5D-204	-	-	-	-	-	-	-
48	B5224T	B5D-204	375.6	○	○	605	575	0.557	2.805

B: 下部側
T: 上部側*: 範囲で判定されている場合は中央位置の値
**: タグガスあり

***: 縦断面金相試料

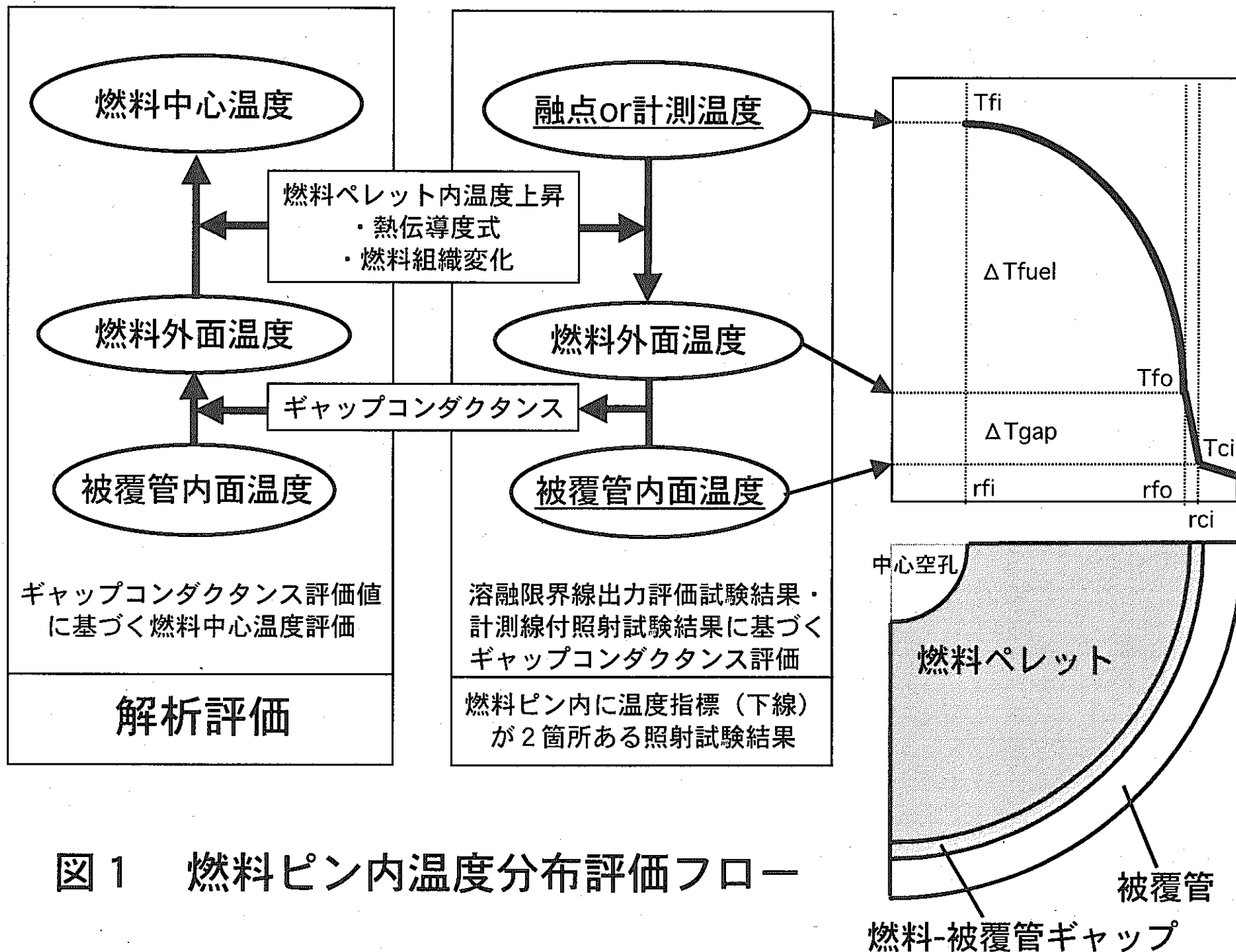


図1 燃料ピン内温度分布評価フロー

燃料ペレットロット平均値

B5D-201	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.98、相対密度91.36%TD、直径ギャップ幅195 μm^*
B5D-202	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.98、相対密度91.39%TD、直径ギャップ幅140 μm^*
B5D-203	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.96、相対密度91.56%TD、直径ギャップ幅201 μm^*
B5D-204	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.96、相対密度91.51%TD、直径ギャップ幅146 μm^*
B5D-205	Pu富化度19.4mass%、O/M比1.97、相対密度95.20%TD、直径ギャップ幅249 μm^*
B5D-206	Pu富化度19.4mass%、O/M比1.97、相対密度95.13%TD、直径ギャップ幅192 μm^*

(* : 被覆管内径ノミナル値=6.7mmに対する値)

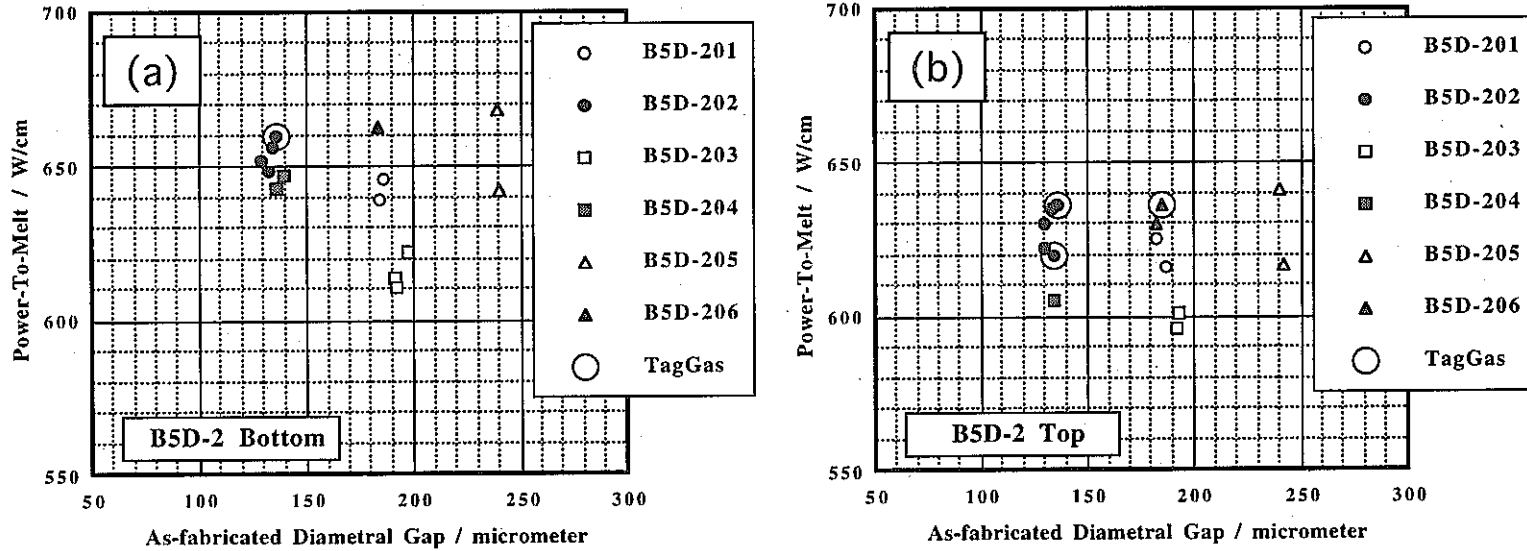


図2 「常陽」 B5D-2試験における燃料溶融限界線出力

((a) : 下部側、(b) : 上部側)

(縦軸 : 溶融開始位置が範囲で判定されている場合は中央位置の値)

(横軸 : 溶融開始位置の燃料ペレット外径に基づく製造時ギャップ直径幅)

Specimen No. G811641

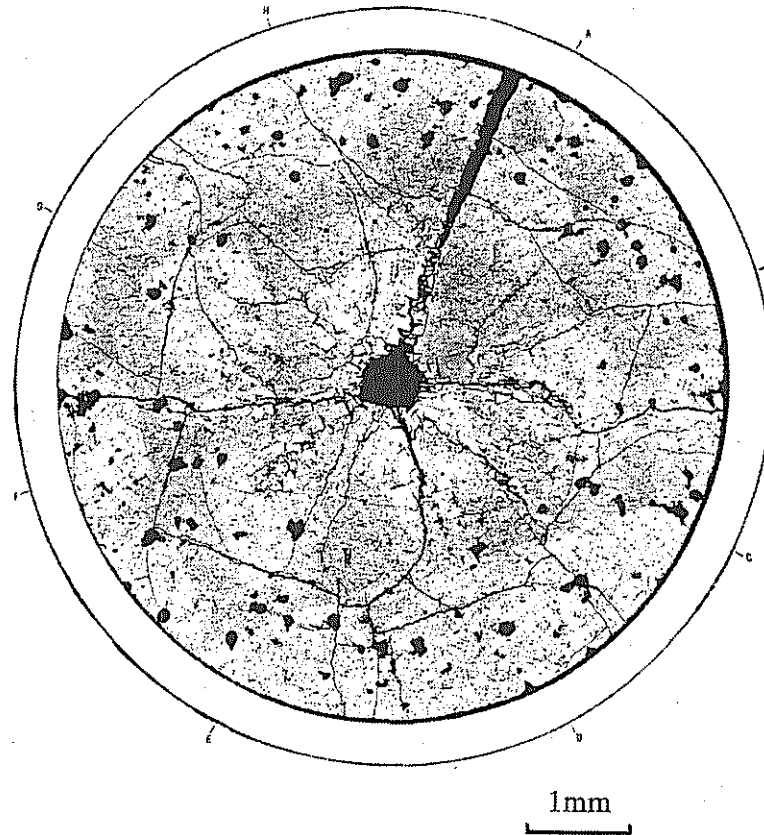


図3 「常陽」B5D-2試験における横断面金相観察結果
(照射初期燃料組織変化に関する典型例)

(観察位置：B5224の上部側溶融開始位置の直上)

(O/M比=1.96、相対密度=91.97%TD、製造時ギャップ幅(直径値)=142 μ m)

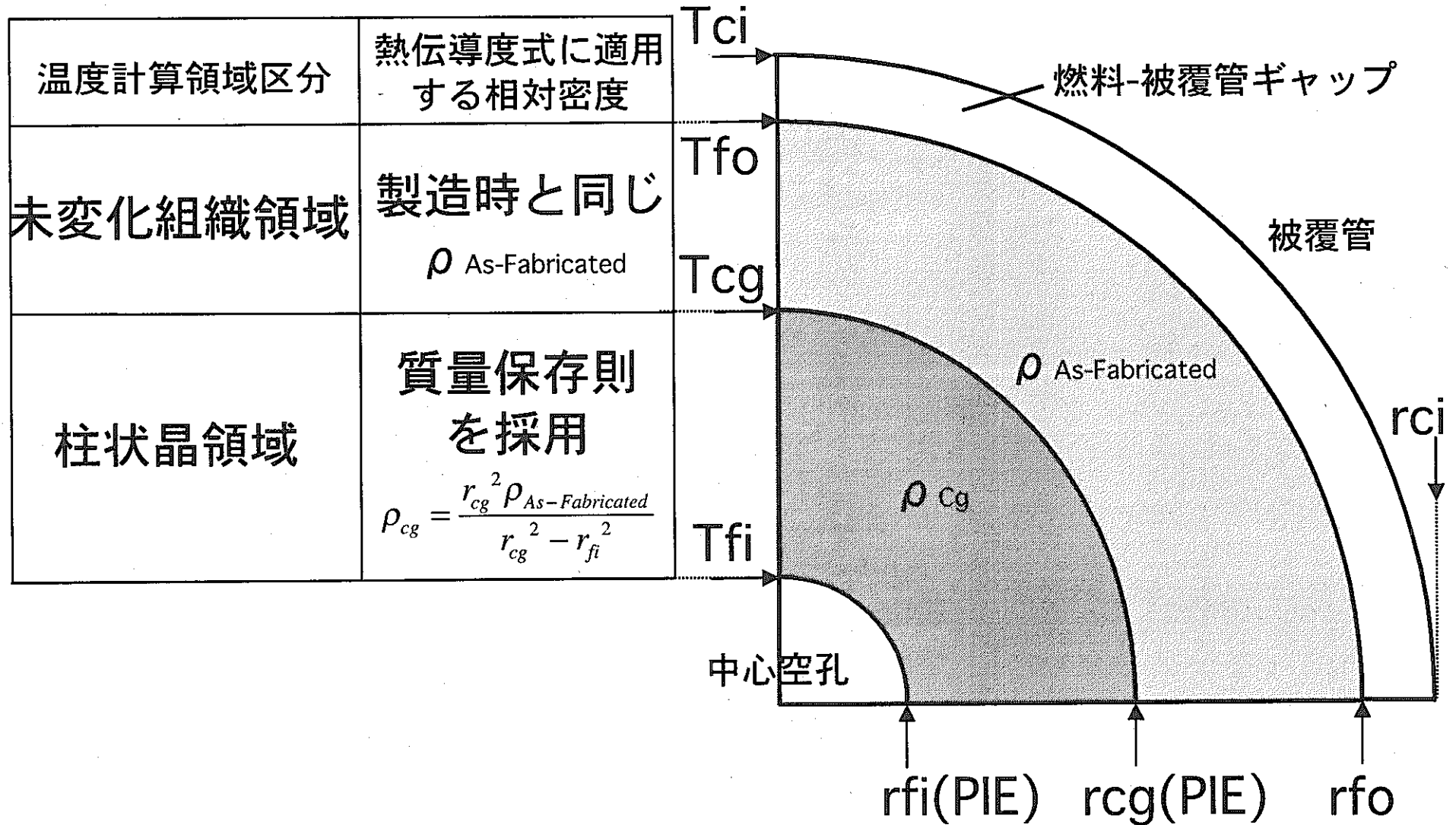


図4 今回採用した照射初期燃料ピン内温度評価モデル
(等軸晶領域は照射初期には通常は観察されない)

燃料ペレットロット平均値	
B5D-201	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.98、相対密度91.36%TD、直径ギャップ幅195 μm^*
B5D-202	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.98、相対密度91.39%TD、直径ギャップ幅140 μm^*
B5D-203	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.96、相対密度91.56%TD、直径ギャップ幅201 μm^*
B5D-204	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.96、相対密度91.51%TD、直径ギャップ幅146 μm^*
B5D-205	Pu富化度19.4mass%、O/M比1.97、相対密度95.20%TD、直径ギャップ幅249 μm^*
B5D-206	Pu富化度19.4mass%、O/M比1.97、相対密度95.13%TD、直径ギャップ幅192 μm^*

(* : 被覆管内径ノミナル値=6.7mmに対する値)

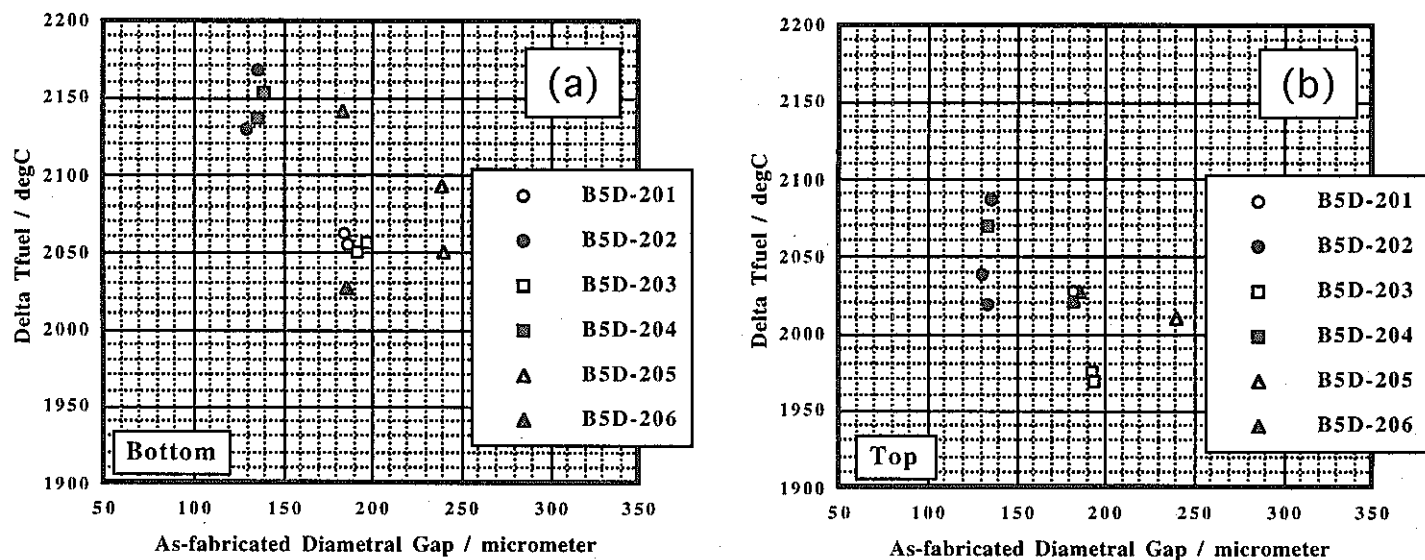


図5 「常陽」B5D-2試験に対する燃料ペレット内温度上昇量の計算結果
 ((a) : 下部側、(b) : 上部側)
 (横軸 : 溶融開始位置の燃料ペレット外径に基づく製造時ギャップ直径幅)

燃料ペレットロット平均値

B5D-201	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.98、相対密度91.36%TD、直径ギャップ幅195 μm^*
B5D-202	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.98、相対密度91.39%TD、直径ギャップ幅140 μm^*
B5D-203	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.96、相対密度91.56%TD、直径ギャップ幅201 μm^*
B5D-204	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.96、相対密度91.51%TD、直径ギャップ幅146 μm^*
B5D-205	Pu富化度19.4mass%、O/M比1.97、相対密度95.20%TD、直径ギャップ幅249 μm^*
B5D-206	Pu富化度19.4mass%、O/M比1.97、相対密度95.13%TD、直径ギャップ幅192 μm^*

(* : 被覆管内径ノミナル値=6.7mmに対する値)

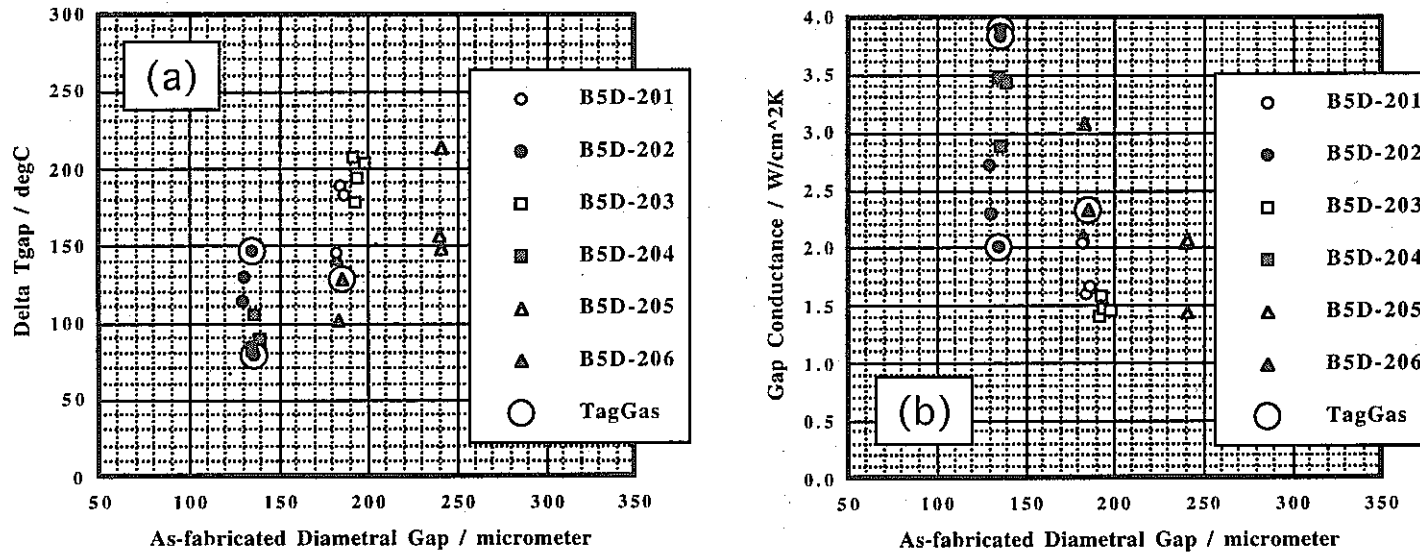


図6 「常陽」B5D-2試験に対するギャップ部温度上昇量と
ギャップコンダクタンスの計算結果

((a) : ギャップ部温度上昇量、(b) : ギャップコンダクタンス)
(横軸 : 溶融開始位置の燃料ペレット外径に基づく製造時ギャップ直径幅)

燃料ペレットロット平均値	
B5D-201	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.98、相対密度91.36%TD、直径ギャップ幅195 μm^*
B5D-202	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.98、相対密度91.39%TD、直径ギャップ幅140 μm^*
B5D-203	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.96、相対密度91.56%TD、直径ギャップ幅201 μm^*
B5D-204	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.96、相対密度91.51%TD、直径ギャップ幅146 μm^*
B5D-205	Pu富化度19.4mass%、O/M比1.97、相対密度95.20%TD、直径ギャップ幅249 μm^*
B5D-206	Pu富化度19.4mass%、O/M比1.97、相対密度95.13%TD、直径ギャップ幅192 μm^*

(* : 被覆管内径ノミナル値=6.7mmに対する値)

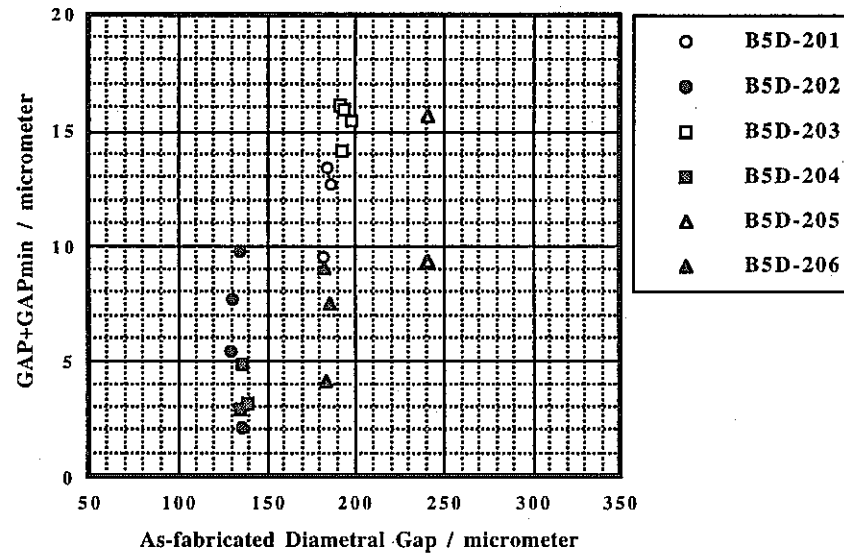


図7 「常陽」B5D-2試験に対する炉内実効ギャップ幅の計算結果
(横軸：溶融開始位置の燃料ペレット外径に基づく製造時ギャップ直径幅)

燃料ペレットロット平均値

B5D-201	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.98、相対密度91.36%TD、直径ギャップ幅195 μm^*
B5D-202	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.98、相対密度91.39%TD、直径ギャップ幅140 μm^*
B5D-203	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.96、相対密度91.56%TD、直径ギャップ幅201 μm^*
B5D-204	Pu富化度19.5mass%、O/M比1.96、相対密度91.51%TD、直径ギャップ幅146 μm^*
B5D-205	Pu富化度19.4mass%、O/M比1.97、相対密度95.20%TD、直径ギャップ幅249 μm^*
B5D-206	Pu富化度19.4mass%、O/M比1.97、相対密度95.13%TD、直径ギャップ幅192 μm^*

(* : 被覆管内径ノミナル値=6.7mmに対する値)

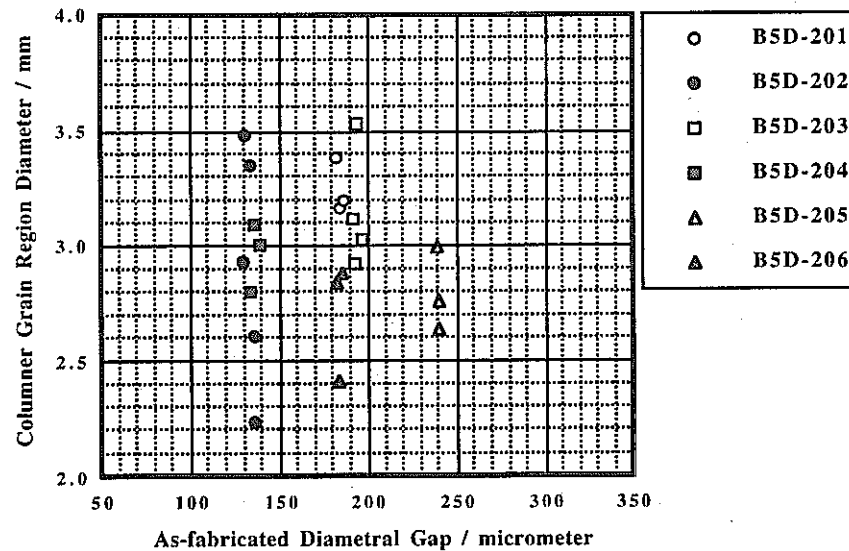


図8 「常陽」B5D-2試験の溶融開始位置近接横断面あるいは溶融開始位置を含む縦断面試料の金相観察写真において測定された柱状晶領域径
(横軸：溶融開始位置の燃料ペレット外径に基づく製造時ギャップ直径幅)

照射開始直後を対象にした燃料溶融限界線出力評価試験 (PTM 試験)

A 1 .EBR-II における P19 試験

(1) 試験データの報告

P19 試験は FFTFDriver 仕様の照射開始直後における燃料溶融限界線出力の評価を目的とした試験である。

P19 試験は 1979 年に Baker[A1] によって報告されている。P19 の燃料溶融限界線出力については、Etheridge[A2] が Baker[A1] の報告値を約 12% 低い値に訂正すべきであると 1986 年に報告している。

JNC においては松元 [A3] が 1982 年にまとめを行っている。Etheridge[A2] の報告を受け、池田 [A4] が照射データの修正と製造時データの拡充を 1992 年に行っている。

(2) 試験燃料ピン仕様

P19 試験では、FFTFDriver 仕様の試験燃料ピン 8 本と FFTFDriver の太径仕様 (P19 太径と略称) の試験燃料ピン 8 本が照射されている。試験燃料ピンの基本仕様を表 A 1 に、詳細仕様を表 A 2 に示す。

FFTFDriver 仕様は、被覆管は外径 5.84mm・内径 5.08mm・20%冷間加工 SUS316 鋼、燃料ペレットは相対密度 90.75%TD・O/M 比 1.962・Pu 富化度 25%・DishedEnd である。直径ギャップ幅を 183~246 μm の範囲で変えて試験パラメータとしている。封入ガスは He である。

FFTFDriver の太径化仕様 (P19 太径仕様と略称：図では Large Diameter と表記) は、被覆管は外径 6.35mm・内径 5.54mm・20%冷間加工 SUS316 鋼、燃料ペレットは相対密度 92.40%TD・O/M 比 1.966・Pu 富化度 25%・DishedEnd である。直径ギャップ幅を 86~254 μm の範囲で変えて試験パラメータとしている。なお、燃料ペレット研削の有無がパラメータに追加されている。封入ガスは He である。

(3) 照射条件

EBR-II 照射は 1971 年に行われている (表 A 3 参照)。図 A 1 の原子炉出力履歴のように、最大出力の約 87% で約 1 時間の保持を受けている。最大出力時の保持時間は約 10 分である。

(4) 燃料溶融限界線出力データ

図 A 2 に照射後試験による軸方向の溶融範囲を示す。P19 試験では上部と下部の全ての溶融開始位置 (近接位置) に対して燃料組織領域データ (中心空孔径・柱状晶領域径) が報告されている。

A 2 .EBR-II における P20 試験

(1) 試験データの報告

P20 試験は P19 試験とシリーズの試験であり、FFTFDriver 仕様の燃料溶融限界線出力に及ぼす燃焼効果の把握を目的としている。試験自体は Phase1 から Phase3 までの厳密には 3 つの照射試験に分けられる。今回の評価は、照射開始直後を評価スコープ

にしているため、P19 試験と類似の原子炉出力履歴で照射された Phase3 の新燃料ピン 5 本が対象になる。

P20 試験は P19 試験と同時に 1979 年に Baker[A1] によって報告されている。P20 試験の燃料溶融限界線出力については、P19 試験と同様に Etheridge[A2] が Baker[A1] の報告値を約 12% 低い値に訂正すべきであると 1986 年に報告している。

JNC においては松元[A3] が P19 試験と同時に 1982 年にまとめを行っている。さらに、Etheridge[A2] の報告を受け、池田[A4] が照射データの修正と製造時データの拡充を 1992 年に行っている。

(2) 試験燃料ピン仕様

P20 試験では、FFTFDriver 仕様の試験燃料ピンが照射されている。前述のように、今回の評価対象は Phase3 の新燃料ピン 5 本のみを対象とする。試験燃料ピンの基本仕様を表 A 1 に、詳細仕様を表 A 2 に示す。

被覆管は外径 5.84mm・内径 5.08mm・20% 冷間加工 SUS316 鋼、燃料ペレットは相対密度 91~92%TD・OM 比 1.96・Pu 富化度 25%・DishedEnd である。直径ギャップ幅は 140・180・190 μm の 3 レベルである。封入ガスは He である。

(3) 照射条件

EBR-II 照射 (Phase3) は 1973 年に行われている (表 A 3 参照)。図 A 1 の原子炉出力履歴のように、P19 試験と同じく最大出力の約 87% で約 1 時間の保持を受けている。最大出力時の保持時間も P19 試験と同じく約 10 分である。

(4) 燃料溶融限界線出力データ

図 A 2 に照射後試験による軸方向の溶融範囲を示す。P20 試験では上部と下部の全ての溶融開始位置 (近接位置) に対して燃料組織領域データが報告されている。

A 3 EBR-II における P-E01 試験

(1) 試験データの報告

P-E01 は JNC (当時は PNC) と米国エネルギー省 (HEDL) との国際協力で行われた照射試験であり、「もんじゅ」仕様燃料ピンの照射開始直後における燃料溶融限界線出力の評価を目的とした試験である。被覆管、燃料ペレット等の燃料ピン部材は JNC から供給し、試験燃料ピン 3 本への組立は HEDL が行った。

JNC においては小林[A5] が 1981 年にまとめを行っている。

(2) 試験燃料ピン仕様

P-E01 試験では「もんじゅ」仕様の試験燃料ピンが照射されている。試験燃料ピンの基本仕様を表 A 1 に、詳細仕様を表 A 2 に示す。被覆管内径が現行の「もんじゅ」仕様と異なっている。試験パラメータは、製造時ギャップ幅のみである。

被覆管は外径 6.50mm・内径 5.60mm・20% 冷間加工 SUS316 鋼、燃料ペレットは相対密度 85%TD・OM 比 1.99・Pu 富化度 30%・FlatEnd である。直径ギャップ幅は 160・220・260 μm の 3 レベルである。封入ガスは He であるが、タグガスキャプセル (Xe) が装填されている。

(3) 照射条件

EBR-II 照射は 1979 年に行われている（表 A 3 参照）。図 A 1 の原子炉出力履歴のように、P19 試験と同レベルの最大出力の約 85% で約 2 時間の保持を受けている。最大出力時の保持時間は P19 試験・P20 試験と同じく約 10 分である。

(4) 燃料溶融限界線出力データ

図 A 3 に照射後試験による軸方向の溶融範囲を示す。P-E01 試験では上部と下部の全ての溶融開始位置に対応した未溶融側近接位置において燃料組織領域データが取得されている。

A 4. FFTF における DEA-2 試験

(1) 試験データの報告

DEA-2 試験は、FFTF Driver 仕様の照射開始直後における燃料溶融限界線出力の評価を目的とした FFTF 実機における試験である。照射された試験燃料ピンは合計で 31 本であり、燃料ペレットは KerrMcGee・Babcock&Wilcox(B&W)・HEDL の 3 機関で製造されている。

DEA-2 試験の結果は、1986 年に Etheridge[A2] によって報告されている。

(2) 試験燃料ピン仕様

試験パラメータには相対密度、O/M 比、Pu 富化度、製造時ギャップ幅が設定されている。試験燃料ピンの基本仕様を表 A 1 に、詳細仕様を表 A 2 に示す。被覆管仕様は共通の外径 5.84mm・内径 5.08mm・20%冷間加工 SUS316 鋼である。燃料ペレットは相対密度 86~96.5%TD・O/M 比 1.94~1.97・Pu 富化度 22~29%の範囲で製造され、形状は全て DishedEnd である。直径ギャップ幅は 91~290 μ m の範囲にわたる。製造プロセスは、KerrMcGee は High Pressure Preslugging 法、B&W はポアフォーマー添加法、HEDL は Low Pressure Preslugging 法とそれぞれ異なり、燃料組織的な特徴となって現われている。封入ガスはタグガスを模擬した He-Kr-Xe の混合ガスである。

(3) 照射条件

FFTF 照射は 1981 年に行われている（表 A 3 参照）。図 A 1 の原子炉出力履歴のように、階段状の出力上昇パターンとなっており、最大出力時の保持時間は P19 試験・P20 試験・P-E01 試験と同じく約 10 分である。

(4) 燃料溶融限界線出力データ

図 A 4 に照射後試験による軸方向の溶融範囲を示す。DEA-2 試験では上部と下部の全ての溶融開始位置に対応した未溶融側近接位置において燃料組織領域データが取得されている。

A 5. 「常陽」における B5D-1 試験と B5D-2 試験

(1) 試験データの報告

B5D-1 試験と B5D-2 試験は、高速実験炉「常陽」における燃料溶融限界線出力評価試験である [A6-A9]。ちなみに、B5D-1 試験は予備試験として位置づけられている。また、B5D-1 試験の場合、B5D-2 試験と同様の照射条件の評価が行われていないこと

から、燃料ピン内伝熱特性の評価用データベースとしては採用しない。

B5D-1 試験と B5D-2 試験は、高速増殖実証炉設計研究で選定されていた仕様を基準とした燃料ピン仕様であり、試験燃料ピン本数はそれぞれ4本と24本である。

B5D-1 試験と B5D-2 試験の製造時データについては長井[A10,A11]の報告がある。B5D-1 試験と B5D-2 試験の照射条件（線出力と被覆管温度）については1994年の籠田[A12]の報告後も評価が継続されてきた。特に、B5D-2 試験については、2000年に横山[A13]と関根[A14]、2001年に青山[A15]によって順次見直しが行われている（今回の評価で使用したのは[A15]に基づく値である）。照射後試験データとしては1993年の浅賀[A16]、2000年と2001年の山本[A17,A18]の報告がある。

(2) 試験燃料ピン仕様

試験パラメータには、製造時ギャップ幅・相対密度・OM比・タグガスの有無が設定されている。試験燃料ピンの基本仕様を表A1に、詳細仕様を表A4に示す。

被覆管仕様は、共通の外径7.50mm・内径6.70mm・PNC1520鋼である。燃料ペレットは、B5D-1 試験は3ロット：B5D-101～B5D-103、B5D-2 試験は6ロット：B5D-201～B5D-206からなり、Pu富化度はいずれも約19%、研削加工によって燃料ペレット径が調整されている。燃料ペレットは相対密度92～95%TD・OM比1.94～1.97の範囲で製造され、形状は全てFlatEndである。封入ガスは基本的にHeであり、一部の燃料ピン（3本）にはタグガスカプセル（Kr-Xe混合ガス）が装填されている。

(3) 照射条件

B5D-1 試験と B5D-2 試験の照射は「常陽」照射はそれぞれ1991年と1992年に行われた（表A3参照）。図A1の原子炉出力履歴のように、急速な出力上昇に特徴がある。B5D-1 試験は通常の方式、B5D-2 試験は手動スクラムによる出力降下が行われている。最大出力時の保持時間はP19試験・P20試験・P-E01試験・DEA-2試験と同じく約10分である[A12]。

B5D-2 試験は線出力評価精度に優れ、系統誤差：1.2%が分離して評価されており、ランダム誤差も2.5%以内と小さい[A14]。

(4) 燃料溶融限界線出力データ（付録C参照）

図A5に照射後試験による軸方向の溶融範囲を示す。B5D-1 試験においては3本の燃料ピンに溶融が認められ（1本は未溶融）、上下2箇所ずつの溶融開始位置が特定された[A16]。

B5D-2 試験における溶融開始位置は、全48箇所の中の23箇所がピンポイント、22箇所が範囲で特定されている（3箇所は特定失敗）[A17,A18]。燃料組織領域径データについては、縦断面金相で代用しているケースもあり、未溶融側近接位置に対する横断面金相データは取得例に限りがある（本文表2参照）。

B5D-2 試験燃料ピンの線出力の軸方向分布曲線は、 ^{95}Zr 放出 γ 線軸方向強度プロファイルをもとに溶融燃料移動の影響を比較し、影響度が最小の燃料ピン（番号：B5212）の定点スペクトル測定値（軸方向5点）を4次式でフィッティングして作成された。

A 6. 燃料溶融限界線出力データに関する検討

(1) 燃料溶融限界線出力データの整理

燃料溶融限界線出力 (PTM) の製造時ギャップ幅、OM 比、相対密度、タグガスの有無への依存性を整理した結果を図 A 6 と図 A 7 に示す。なお、P19 試験と P20 試験については、Etheridge[A2] による訂正の有無の両方をプロットしてある。

(2) 製造時ギャップ幅・OM 比・相対密度・タグガスの効果

図 A 6 と図 A 7 から、全体的な傾向として、製造時ギャップ幅が大きくなるほど PTM は低くなる傾向があることがわかる。製造時ギャップ幅の影響が大きいため識別しにくいのが、OM 比と相対密度が大きくなるほど、PTM は高くなる傾向もある。

FFTFDriver 仕様の封入ガスは、P19 試験と P20 試験は He ガス、DEA-2 試験はタグガスを模擬した He-Kr-Xe の混合ガスであるが、製造時ギャップ幅・OM 比・相対密度・製造方法が同一の燃料ペレットがなく、PTM への影響を考察することは難しい。また、B5D-2 試験ではタグガスの有無も試験パラメータに設定されているが、PTM に及ぼす影響は識別できない。

Etheridge[A2] は製造時ギャップ幅 (直径値) が $140 \mu\text{m}$ 以下の FFTFDriver 仕様燃料ピンでは燃料ペレットと被覆管との接触が予測されることを指摘している (より被覆管径の大きな仕様についても同様と考えられる)。製造時ギャップ幅 (直径値) が $140 \mu\text{m}$ 以下のデータを比較すると、FFTFDriver 仕様と P19 太径仕様では燃料溶融限界線出力の製造時ギャップ幅への依存性がほとんどなくなっており、燃料ペレットと被覆管との接触の発生を示唆している。B5D-2 試験についても製造時ギャップ幅 (直径値) が $140 \mu\text{m}$ 以下の場合には燃料ペレットと被覆管との接触が発生していると推定される。FFTFDriver 仕様・P19 太径・P-E01 に比較して、PTM の製造時ギャップ幅依存性が小さいのが特徴である。また、B5D-2 試験の高密度仕様の燃料ペレットを装荷した燃料ピンの PTM は、図 A 6 に示すように製造時ギャップ幅への依存性がほとんど認められない。

A 7. 参考資料・参考文献

- (A1) R.B.Baker, R.D.Leggett, "Early in Life Thermal Performance of $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ Fast Reactor Fuel", Proceedings of International Conference on Fast Breeder Reactor Fuel, Monterey California USA, March 1979, P.258-267 (1979)
- (A2) J.L.Ethridge, R.B.Baker, "Thermal Performance of Fresh Mixed-Oxide Fuel in a Fast Flux LMR", Proceedings of Eighth International Conference on Heat Transfer, San Francisco California USA, August 1986, Vol.5, P.2485-2490 (1986)
- (A3) 松元慎一郎、河田東海夫、「高速増殖炉もんじゅ発電所燃料設計検討資料分冊 4 -補足資料編-」、PNC ZN243 83-17、1983 年 10 月
- (A4) 池田一生、「ギャップコンダクタンス評価手法の検討」：
PNC ZN9410 92-232 (1992)
- (A5) 小林善光、篠原正朝、千崎雅生、山口俊弘、檜原英千世、桂川正巳、
「PE-01 Power-to-melt 実験 報告書 (Phase1)」：PNC ZN941 81-117 (1981)

- (A6) 北村了一、青山卓史、浅賀健男、小林孝良、宮川俊一、溝尾宣辰、
「「常陽」燃料燃料溶融限界線出力試験」、
日本原子力学会「1992年春の年会」、J13 (1992)
- (A7) 籠田栄一、北村了一、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年秋の大会」、P4 (1994)
- (A8) Masami Katsuragawa, Hidechiyo Kashihara, Michio Akebi, "Status of Liquid Metal Fast
Breeder Reactor Fuel Development in Japan",
Journal of Nuclear Materials, Vol.204, P.14-22 (1993)
- (A9) 大洗工学センター実験炉部照射課、「特集「常陽」20周年VI.照射試験実績と
照射技術」、動燃技報、No.104、P.67-82 (1997) (PNC TN1340 97-004)
- (A10) 長井修一郎、上村勝一郎、飛田典幸、豊島光男、加藤直人、野上嘉能、井坂和彦、
石田忍、小沼勝弘、大津実、「高速実験炉「常陽」照射用炉心特殊燃料要素
高線出力試験用集合体試験用要素 (B5D-1) 製造報告」：
PNC TN8410 93-021 (1992)
- (A11) 長井修一郎、上村勝一郎、飛田典幸、豊島光男、加藤直人、野上嘉能、井坂和彦、
石田忍、小沼勝弘、大津実、「高速実験炉「常陽」照射用炉心特殊燃料要素
高線出力試験用集合体試験用要素 (B5D-2) 製造報告」：
PNC TN8410 93-030 (1992)
- (A12) 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」：
PNC ZN9410 94-100 (1994)
- (A13) 横山賢治、石川眞、「モンテカルロコードMVPを用いた「常陽」燃料溶融限界
線出力試験の線出力解析」、JNC TN9400 2000-061 (2000)
- (A14) 関根隆、北村了一、青山卓史、「MCNPによる高速炉用MOX燃料の線出力密度
の解析精度向上」、JNC TN9400 2000-071 (2000)
- (A15) 青山卓史、関根隆、逢坂正彦、「高速炉用MOX燃料の溶融限界線出力密度の
高精度評価」、日本原子力学会「2001年春の年会」、K17 (2001)
- (A16) 浅賀健男、櫛田尚也、畔野一郎、吉川勝則、廣沢孝志、阿部康弘、富永功、
鹿倉栄、「高速炉用混合酸化物燃料の燃料溶融限界線出力評価(中間報告)
-「常陽」燃料溶融限界線出力試験(PTM-1)試験結果-」：
PNC ZN9430 93-005 (1993)
- (A17) 山本一也、櫛田尚也、小泉敦裕、「高速炉用混合酸化物燃料の燃料溶融限界線出
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-」：
JNC TN9400 2000-029 (1999)
- (A18) 山本一也、櫛田尚也、「「常陽」燃料溶融限界線出力試験の照射後試験
による評価」、サイクル機構技報、No.11、2001.6、P.105-117 (2001)

表A1 試験燃料ピンの基本仕様

照射試験名	P19	P19	P20	DEA-2	DEA-2	DEA-2	P-E01	B5D-1 B5D-2
試験燃料ピンタイプ	FFTFDriver 基本仕様値	FFTFDriver改良型 P19太径 基本仕様値	FFTFDriver 基本仕様値	FFTFDriver HEDL 基本仕様値	FFTFDriver KerrMcGee 基本仕様値	FFTFDriver B&W 基本仕様値	もんじゅ 基本仕様値	大型炉設計研究 基本仕様値
被覆管 (寸法)								
・被覆管外径/mm	5.84	6.35	5.84	5.84	5.84	5.84	6.50	7.50
・被覆管内径/mm (CID)	5.08	5.54	5.08	5.08	5.08	5.08	5.60	6.70
・被覆管肉厚/mm	0.38	0.41	0.38	0.38	0.38	0.38	0.45	0.40
・直径ギャップ幅/ μm (G)	140	-	140	140	140	140	160	180
・相対ギャップ幅 : G/CID	27.6	-	27.6	27.6	27.6	27.6	28.6	26.9
燃料ペレット								
・基本形状	中実	中実	中実	中実	中実	中実	中実	中実
・端面形状	Dished End	Dished End	Dished End	Dished End	Dished End	Dished End	Flat End	Flat End
・外径/mm	4.94	-	4.94	4.94	4.94	4.94	5.44	6.52
・高さ/mm	5.3	6.4	5.3	6.4	6.4	6.4	8	9
・Pu富化度/wt%	~25	~25	~25	29	22&27	22~27	30	~19
・相対密度/%TD	91	91	91	86.5~96.5	90.4	90.4	85	92&95
・O/M比	1.96	1.96	1.96	1.94&1.97	1.96	1.96	1.97	1.94&1.97
・製造者	HEDL	HEDL	HEDL	HEDL	KerrMcGee	B&W	サイクル機構 (JNC)	サイクル機構 (JNC)
その他								
・燃料カラム長さ/mm	342.9	342.9	342.9	914.4	914.4	914.4	342.9	550
・タグガス	無	無	無	有	有	有	有	有&無

表A2 試験燃料ピンの製作仕様・照射条件 (P19・P20・P-E01・DEA-2)

試験名	ピン番号	被覆管外径 製造時	被覆管内径 製造時	ペレット外径 製造時	O/M 製造時	ペレット密度 製造時	Pu富化度 製造時	製造時直径 ギャップ幅	タグガス	線出力**	
Test No.	Pin ID	Cladding Outer Diameter As-Fab mm PinAverage	Cladding Inner Diameter As-Fab mm PinAverage	Pellet Outer Diameter As-Fab mm Lot Mean	O/M As-Fab - Lot Mean	Pellet Density As-Fab %TD Lot Mean	Pu Content As-Fab wt% Lot Mean	As-fab Diametral Gap micrometer	TagGas Y:有 N:無	Linear Heat Rate Peak W/cm	
P19	1	P19-02	5.85	5.08	4.88	1.962	90.75	24.8	198	N	499
P19	2	P19-03R	6.36	5.53	5.28	1.966	92.40	24.9	254	N	586
P19	3	P19-07R	6.36	5.53	5.38	1.966	92.40	24.9	157	N	610
P19	4	P19-08	5.85	5.08	4.83	1.962	90.75	24.8	244	N	493
P19	5	P19-13	5.85	5.08	4.88	1.962	90.75	24.8	198	N	499
P19	6	P19-20	5.85	5.08	4.83	1.962	90.75	24.8	246	N	495
P19	7	P19-24R	6.36	5.53	5.28	1.966	92.40	24.9	254	N	591
P19	8	P19-25R	6.35	5.53	5.33	1.966	92.40	24.9	203	N	604
P19	9	P19-26R	6.35	5.53	5.38	1.966	92.40	24.9	152	N	613
P19	10	P19-27R	6.36	5.53	5.43	1.966	92.40	24.9	102	N	613
P19	11	P19-28	6.36	5.54	5.45	1.966	92.40	24.9	86	N	622
P19	12	P19-30	6.35	5.53	5.36	1.966	92.40	24.9	178	N	601
P19	13	P19-35	5.84	5.06	4.88	1.962	90.75	24.8	183	N	495
P20	1	P20-07	Nominal 5.84	Nominal 5.08	Lot Mean 4.89	Lot Mean 1.960	Lot Mean 91.10	Lot Mean 24.8	193	N	541
P20	2	P20-30	5.84	5.08	4.94	1.960	91.00	24.8	140	N	533
P20	3	P20-39	5.84	5.08	4.89	1.960	91.50	24.8	193	N	541
P20	4	P20-1921	5.84	5.08	4.89	1.962	90.80	24.8	193	N	537
P20	5	P20-1934	5.84	5.08	4.90	1.962	90.80	24.8	183	N	541
P-E01	1	PE01-F1*	PinAverage 6.505	PinAverage 5.599	PinAverage 5.438	Lot Mean 1.99	PinAverage 85.96	Lot Mean 29.37	161	Y	482
P-E01	2	PE01-G1	6.505	5.599	5.375	1.99	86.28	29.37	224	Y	472
P-E01	3	PE01-H1	6.505	5.599	5.337	1.99	86.86	29.37	262	Y	469
DEA-2	1	HD8H21	Nominal 5.84	Nominal 5.08	Lot Mean 4.89	Lot Mean 1.971	Lot Mean 93.53	Lot Mean 29.34	193	Y	567
DEA-2	2	HD8L21	5.84	5.08	4.89	1.941	93.66	29.25	193	Y	563
DEA-2	3	HD1H21	5.84	5.08	4.80	1.967	96.26	29.26	282	Y	563
DEA-2	4	HD1L21	5.84	5.08	4.80	1.943	96.29	29.26	282	Y	559
DEA-2	5	HD1L22	5.84	5.08	4.80	1.943	96.29	29.26	279	Y	559
DEA-2	6	HC1H21	5.84	5.08	4.80	1.971	92.64	29.34	279	Y	547
DEA-2	7	HC1L22	5.84	5.08	4.79	1.941	93.91	29.25	292	Y	540
DEA-2	8	HB3L21	5.84	5.08	4.99	1.940	90.69	29.21	91	Y	572
DEA-2	9	HB5H21	5.84	5.08	4.94	1.969	91.12	29.32	137	Y	565
DEA-2	10	HB5L21	5.84	5.08	4.94	1.940	90.86	29.15	142	Y	559
DEA-2	11	HB5L22	5.84	5.08	4.94	1.940	90.86	29.21	142	Y	558
DEA-2	12	HA3H21	5.84	5.08	4.99	1.975	86.07	29.39	91	Y	551
DEA-2	13	HA3L21	5.84	5.08	4.99	1.944	86.52	29.39	89	Y	547
DEA-2	14	HA3L22	5.84	5.08	4.99	1.944	86.52	29.39	89	Y	546
DEA-2	15	HK1N611	5.84	5.08	4.94	1.959	91.19	26.87	142	Y	489
DEA-2	16	HK1N746	5.84	5.08	4.93	1.959	91.19	26.87	147	Y	488
DEA-2	17	HN1A019	5.84	5.08	4.92	1.942	91.59	27.41	165	Y	491
DEA-2	18	HN1A031	5.84	5.08	4.92	1.942	92.24	27.55	165	Y	494
DEA-2	19	HN1S495*	5.84	5.08	4.96	1.953	89.61	27.31	119	Y	490
DEA-2	20	HN1S520*	5.84	5.08	4.96	1.953	89.61	27.31	119	Y	490
DEA-2	21	HK2E294*	5.84	5.08	4.93	1.965	90.82	22.51	152	Y	421
DEA-2	22	HK2E305*	5.84	5.08	4.93	1.965	90.82	22.51	152	Y	420
DEA-2	23	HN2D627*	5.84	5.08	4.91	1.956	92.56	22.64	173	Y	424
DEA-2	24	HN2D752*	5.84	5.08	4.90	1.956	92.56	22.64	178	Y	420
DEA-2	25	HN4A002	5.84	5.08	4.93	1.955	90.88	29.54	152	Y	515
DEA-2	26	HN4A003	5.84	5.08	4.93	1.955	90.88	29.54	152	Y	516
DEA-2	27	HN4C054	5.84	5.08	4.95	1.950	89.61	29.47	127	Y	513
DEA-2	28	HN4C164	5.84	5.08	4.95	1.950	89.61	29.47	127	Y	513
DEA-2	29	HN3U107*	5.84	5.08	4.91	1.951	92.07	25.23	168	Y	456
DEA-2	30	HN3U296	5.84	5.08	4.92	1.951	92.07	25.23	165	Y	454

* : NoMelt

** : P19試験とP20試験の線出力はEthrigeによる修正後の値

表A3 照射開始直後を対象にした燃料溶融限界線出力評価試験データベース

試験名	照射時期	照射炉	運転サイクル	照射期間* EFPD	Experimenter
P19	1971年5月	EBR-II	RUN48E	0.19	米国DOE**-HEDL***
P20	1973年3月	EBR-II	RUN62E	0.26	米国DOE-HEDL
P-E01	1979年7月	EBR-II	RUN102B	0.14	JNC/米国DOE
DEA-2	1981年12月	FFTF	-	0.33	米国DOE-HEDL
B5D-1	1991年6月	「常陽」	23'	0.23	JNC
B5D-2	1992年6月	「常陽」	24'	0.16	JNC

* : 「常陽」の値は100MW相当値

** : エネルギー省 (Department Of Energy)

*** : Hanford Engineering Development Laboratory

表A4 試験燃料ピンの製作仕様・照射条件 (B5D-1・B5D-2)

試験名	ピン番号	被覆管外径 製造時	被覆管内径 製造時	ペレット ロット番号	ペレット外径 製造時	O/M 製造時	ペレット密度 製造時	Pu富化度 製造時	製造時直径 ギャップ幅	タグガス	線出力 炉心中心位置	
Test ID	No.	Pin ID	Cladding Outer Diameter As-Fab mm	Cladding Inner Diameter As-Fab mm	Pellet Lot ID	Pellet Outer Diameter As-Fab mm	O/M As-Fab	Pellet Density As-Fab %TD	Pu Content As-Fab wt%	As-fab Diametral Gap micrometer	TagGas Y:有 N:無	Linear Heat Rate Core Midplane W/cm
		* : NoMelt	PinAverage	PinAverage	PinAverage	Lot Mean	PinAverage	Lot Mean				
B5D-1	1	B5101	7.498	6.697	B5D-101	6.501	1.96	90.92	19.00	196	N	632
B5D-1	2	B5102	7.501	6.690	B5D-102	6.453	1.96	90.98	19.00	237	N	623
B5D-1	3	B5103*	7.502	6.695	B5D-102	6.453	1.96	90.93	19.00	242	N	621
B5D-1	4	B5104	7.503	6.694	B5D-103	6.456	1.96	94.20	18.80	238	N	639
B5D-2	1	B5201	7.502	6.692	B5D-201	6.508	1.98	91.20	19.50	184	N	661
B5D-2	2	B5202	7.503	6.695	B5D-201	6.507	1.98	91.30	19.50	188	N	655
B5D-2	3	B5203	7.502	6.691	B5D-201	6.507	1.98	91.18	19.50	184	N	666
B5D-2	4	B5204	7.501	6.694	B5D-201	6.507	1.98	91.29	19.50	187	N	653
B5D-2	5	B5205	7.499	6.692	B5D-205	6.453	1.97	95.17	19.37	239	N	703
B5D-2	6	B5206	7.500	6.692	B5D-205	6.452	1.97	95.29	19.37	240	N	702
B5D-2	7	B5207	7.500	6.692	B5D-205	6.451	1.97	95.10	19.37	241	N	669
B5D-2	8	B5208	7.502	6.691	B5D-202	6.560	1.98	91.35	19.50	131	N	675
B5D-2	9	B5209	7.503	6.695	B5D-202	6.559	1.98	91.27	19.50	136	N	677
B5D-2	10	B5210	7.503	6.694	B5D-202	6.559	1.98	91.41	19.50	135	N	670
B5D-2	11	B5211	7.502	6.691	B5D-202	6.560	1.98	91.23	19.50	131	N	670
B5D-2	12	B5212	7.501	6.692	B5D-202	6.560	1.98	91.38	19.50	132	N	670
B5D-2	13	B5213	7.499	6.696	B5D-202	6.561	1.98	91.47	19.50	135	Y	676
B5D-2	14	B5214	7.499	6.695	B5D-202	6.561	1.98	91.43	19.50	134	Y	686
B5D-2	15	B5215	7.499	6.694	B5D-206	6.511	1.97	94.97	19.37	183	N	701
B5D-2	16	B5216	7.499	6.694	B5D-206	6.511	1.97	94.96	19.37	183	N	690
B5D-2	17	B5217	7.500	6.695	B5D-206	6.511	1.97	94.87	19.37	184	N	680
B5D-2	18	B5218	7.500	6.695	B5D-206	6.511	1.97	94.83	19.37	184	Y	693
B5D-2	19	B5219	7.498	6.694	B5D-203	6.501	1.96	91.28	19.46	193	N	656
B5D-2	20	B5220	7.498	6.694	B5D-203	6.501	1.96	91.58	19.46	193	N	665
B5D-2	21	B5221	7.500	6.696	B5D-203	6.501	1.96	91.54	19.46	195	N	675
B5D-2	22	B5222	7.499	6.694	B5D-204	6.558	1.96	91.27	19.46	136	N	676
B5D-2	23	B5223	7.500	6.693	B5D-204	6.558	1.96	91.16	19.46	135	N	681
B5D-2	24	B5224	7.500	6.693	B5D-204	6.557	1.96	91.38	19.46	136	N	670

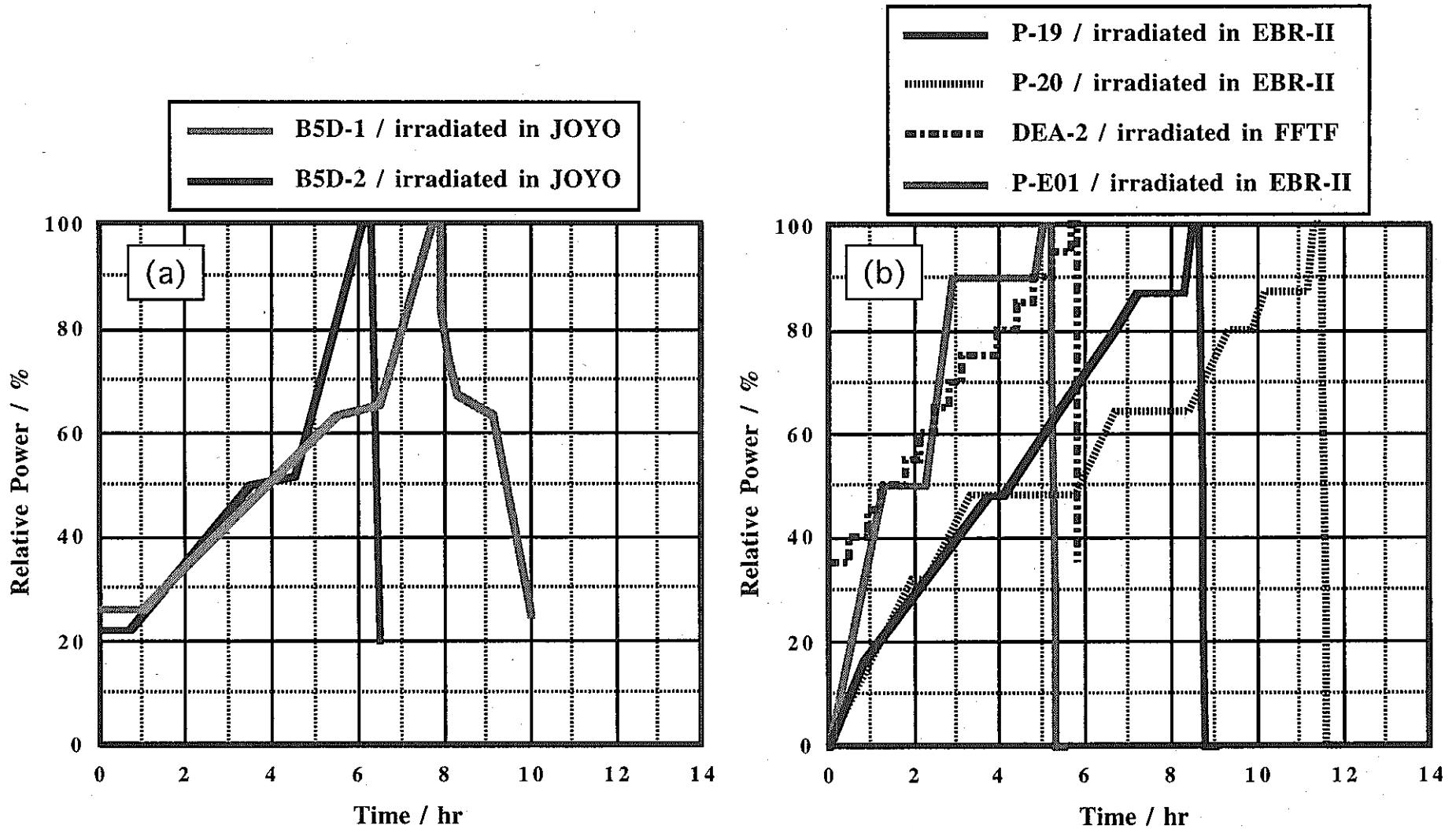
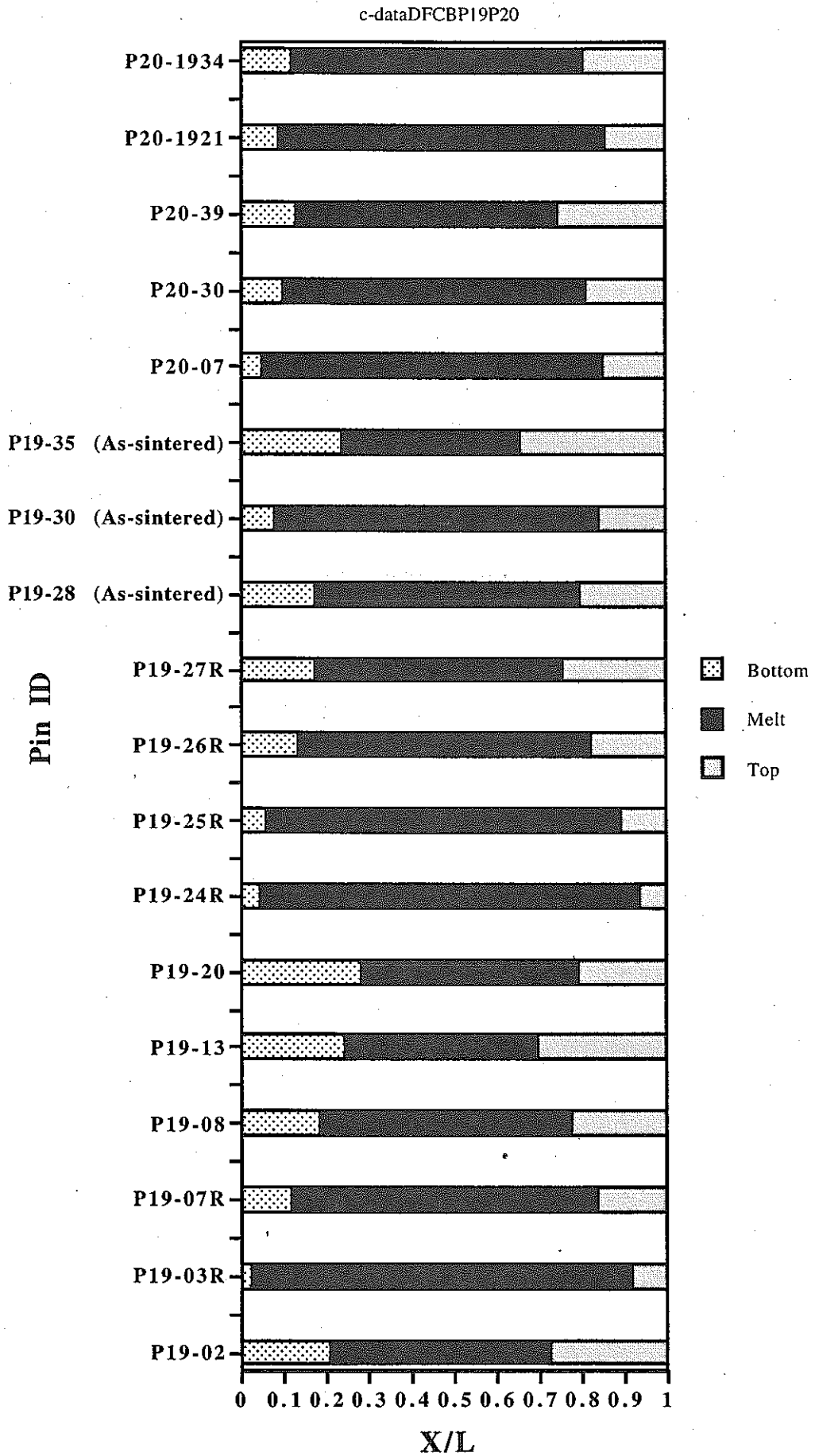
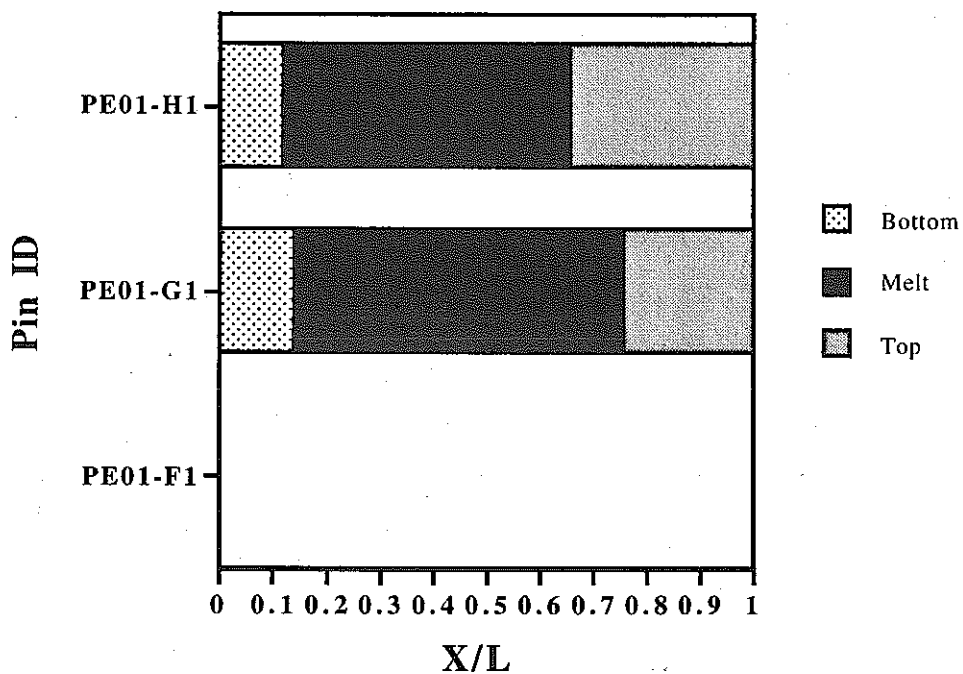


図 A 1 燃料溶融限界線出力評価試験における出力履歴
(最大出力を100%として規格化)



図A 2 燃料溶融限界線出力評価試験：P19・P20における軸方向燃料溶融範囲



図A 3 燃料溶融限界線出力評価試験：P-E01における軸方向燃料溶融範囲

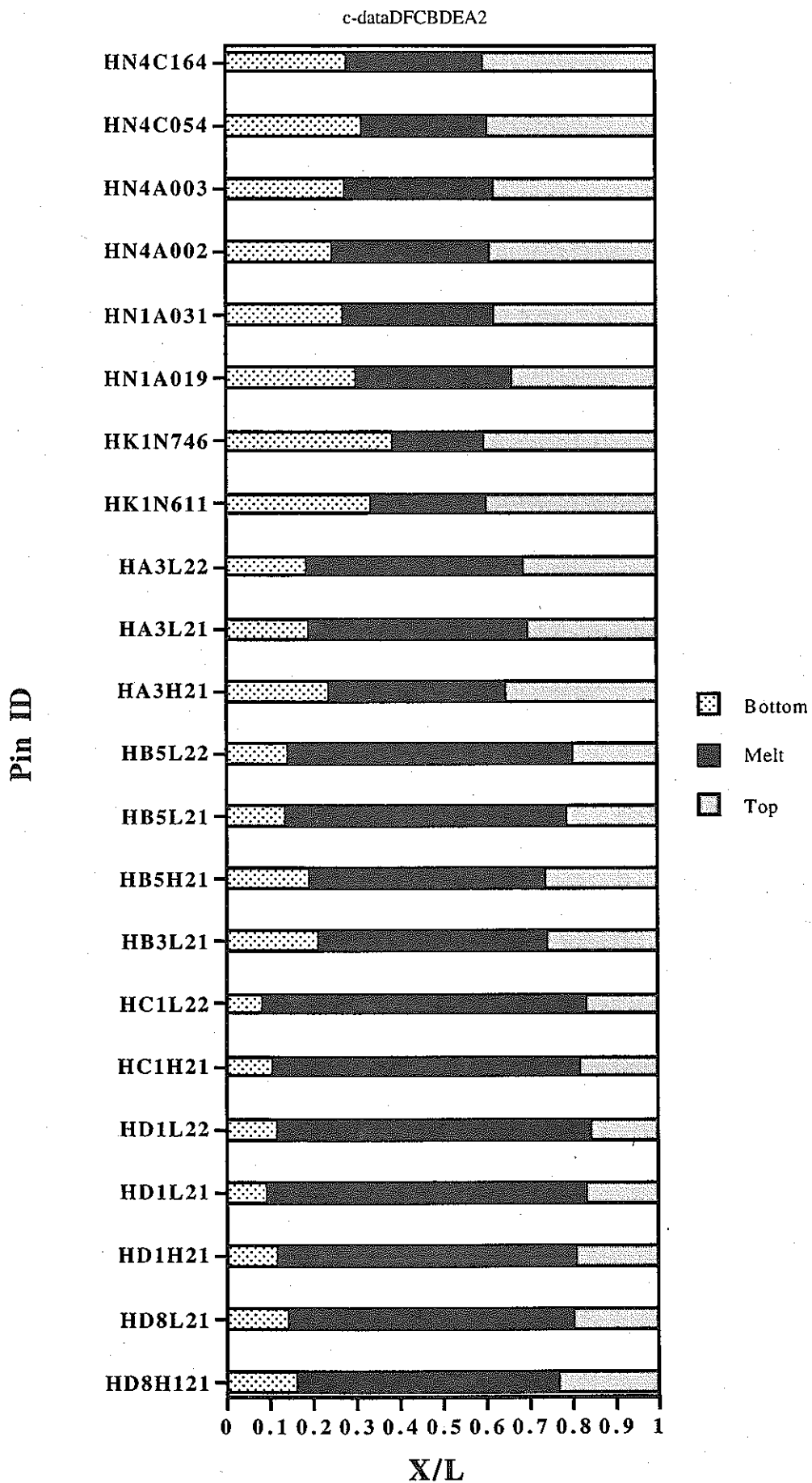


図 A 4 燃料溶融限界線出力評価試験 : DEA-2における軸方向燃料溶融範囲

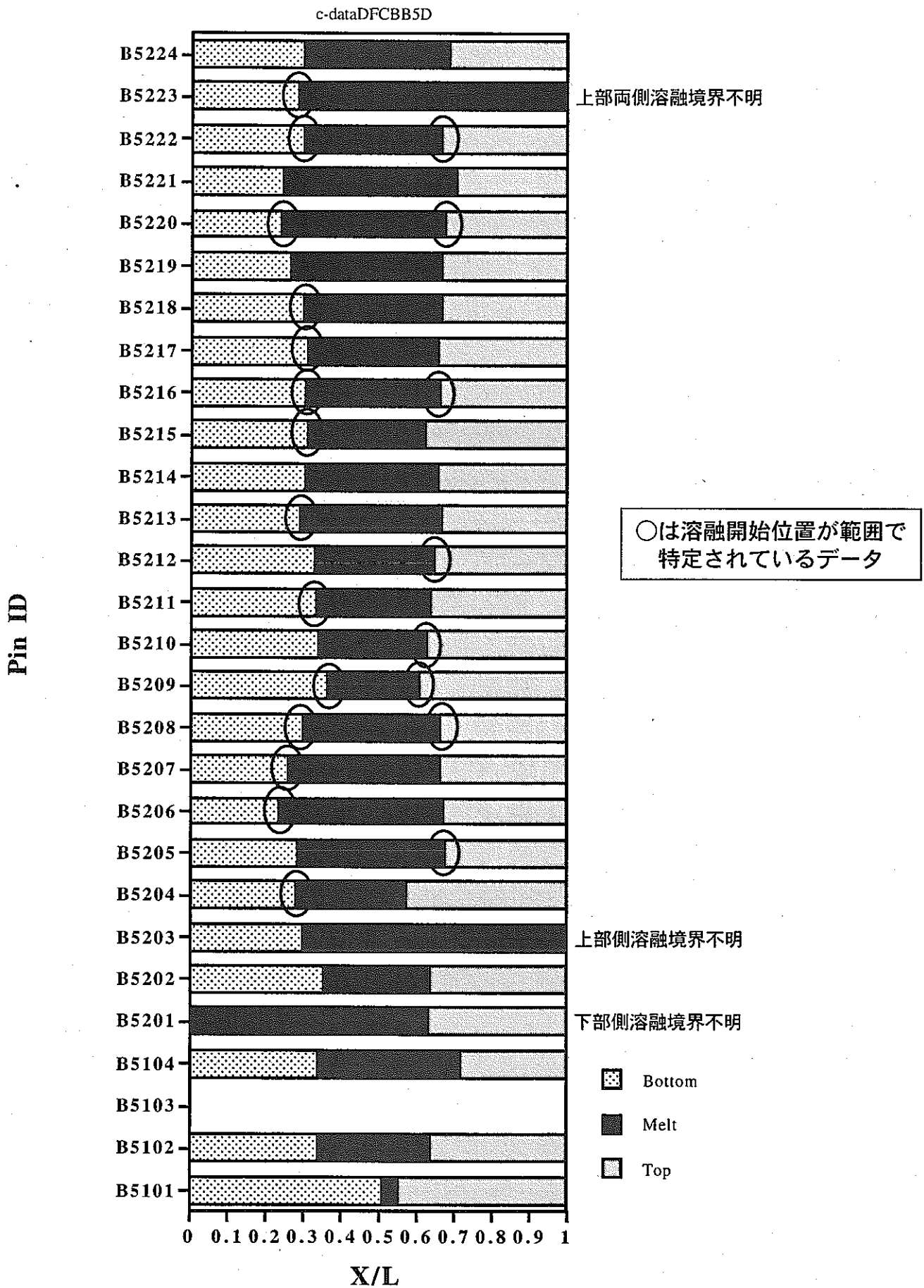
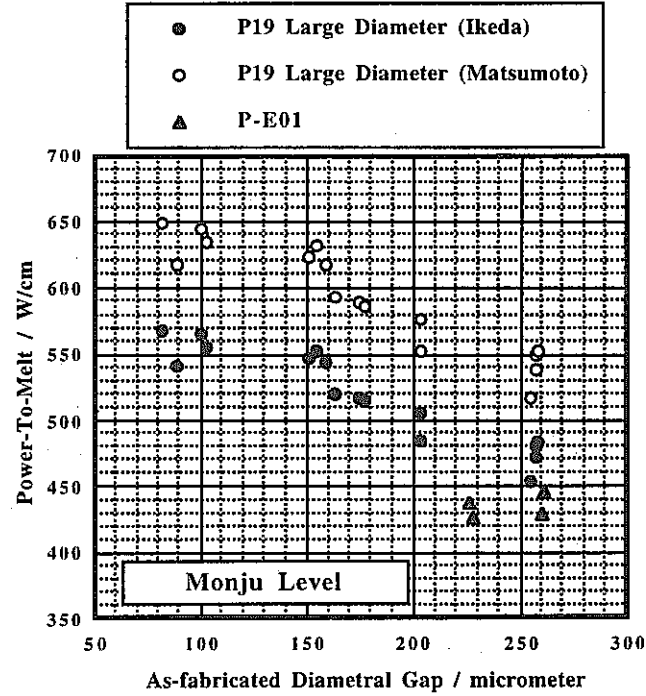
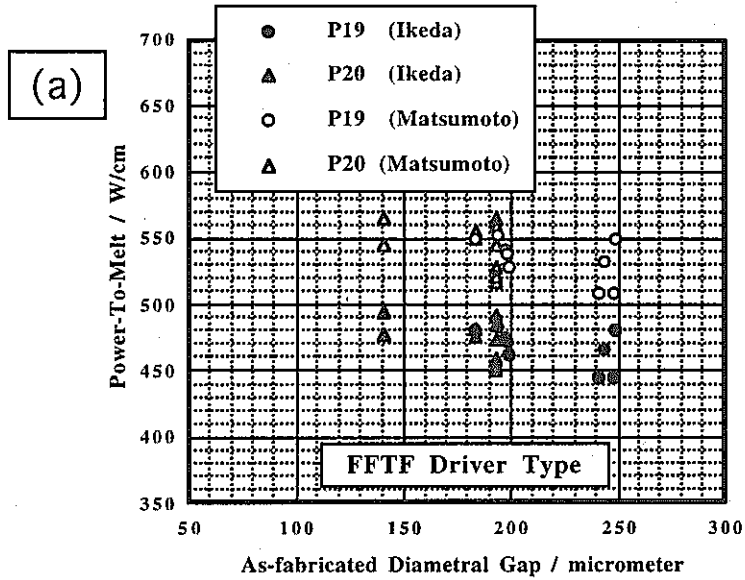
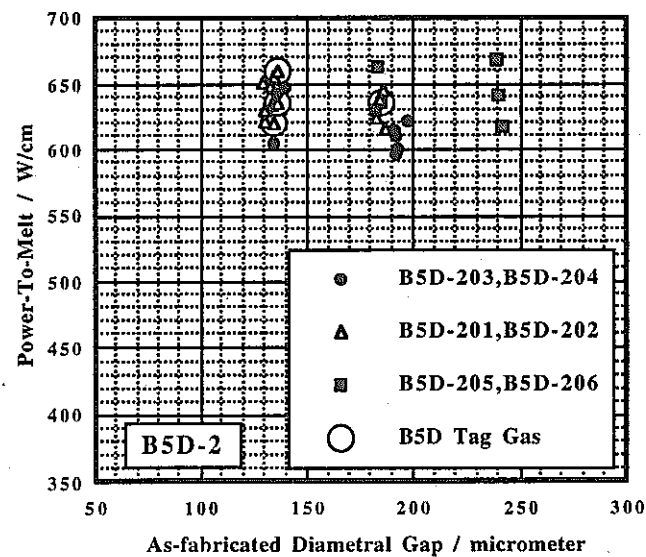
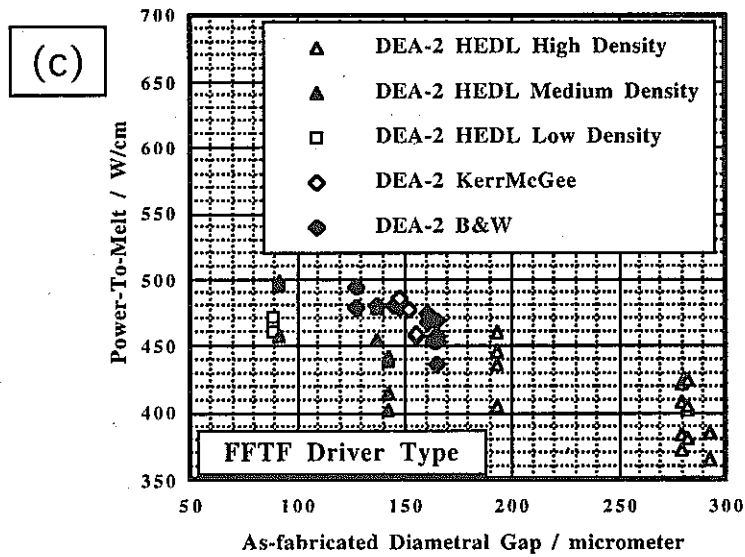


図 A 5 燃料溶融限界線出力評価試験 : B5D-1・B5D-2における軸方向燃料溶融範囲



(b)

- ・ P19 : タグガスなし
- ・ P20 : タグガスなし
- ・ DEA-2 : タグガスあり
- ・ P-E01 : タグガスあり



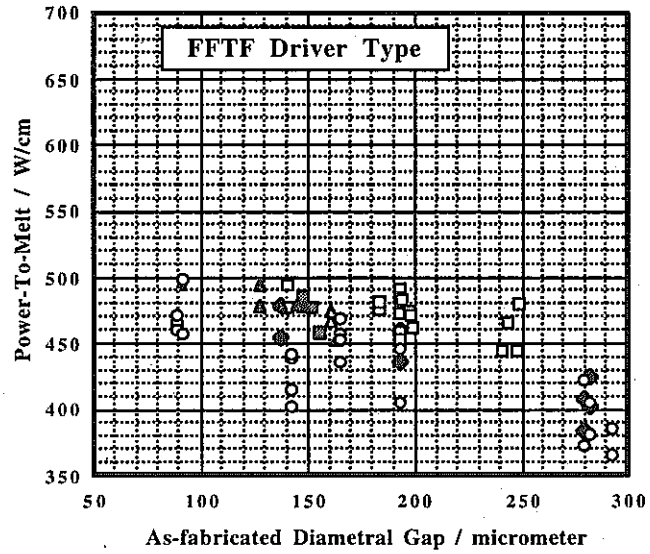
(d)

図 A 6 燃料溶融限界線出力の製造時ギャップ幅への依存性

- O/M=1.94, HEDL, w TagGas
- ▲ O/M=1.95, B&W, w TagGas
- O/M=1.96, P19&P20 (Ikeda), w/o TagGas
- O/M=1.96, KM, w TagGas
- ▲ O/M=1.96, B&W, w TagGas
- ◆ O/M=1.97, HEDL, w TagGas
- ▼ O/M=1.98, HEDL, w TagGas

- O/M=1.94, HEDL w TagGas
- ▲ O/M=1.95, B&W w TagGas
- O/M=1.96, P19&P20 (Ikeda), w/o TagGas
- O/M=1.96, KM, w TagGas
- ▲ O/M=1.96, B&W, w TagGas
- ◆ O/M=1.97, HEDL, w TagGas
- ▼ O/M=1.98, HEDL, w TagGas

(a)



(b)

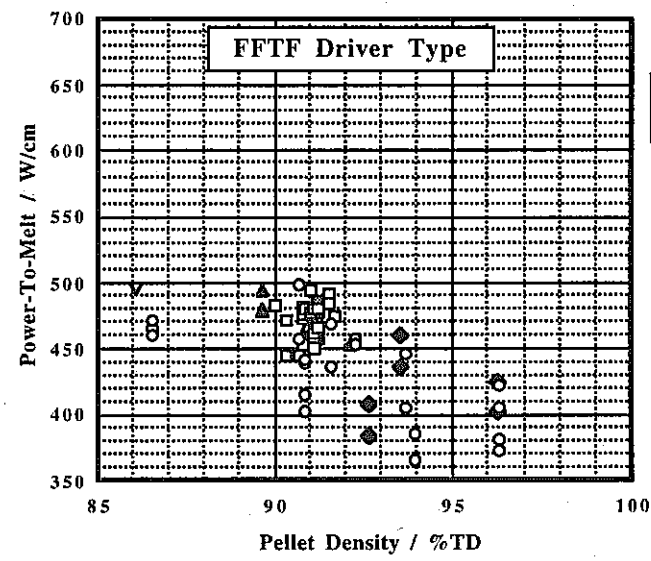


図 A 7 FFTF Driver仕様の燃料溶融限界線出力に及ぼす
燃料ピン製作仕様の影響

「常陽」B5D-2 試験の燃料溶融限界線出力データの検討

B 1. 序論

(1) 溶融開始位置の判定状況 [B1]

「常陽」B5D-2 試験においては、炉心中心位置を対象にした横断面金相観察の結果、全ての燃料ピンに燃料溶融が観察されている。燃料ピンにはそれぞれ上下2箇所の溶融開始位置が存在するので、理想的には48箇所のデータ点が得られる。実際には、23箇所はピンポイント、22箇所は範囲による判定であり、3箇所は判定できていない(表B1)。縦断面金相試料観察面は燃料ピン中心位置を含む面に調整する必要があるが、試料研磨不良、中心空孔の偏心、溶融燃料の軸方向移動等に起因して中心空孔が観察できない場合もあり、Pu再分布挙動を指標に追加する等の工夫をしてデータ点数の拡充が図られている。また、軸方向の被覆管温度分布に対応し、燃料溶融限界線出力は下部側の方が上部側よりも高いのが普通である。しかし、上部側の方が下部側より高いデータもあり、溶融開始位置の判定に問題がある可能性が考えられる。

(2) 目的

燃料ピン伝熱特性評価にあたっては、当然のことながら、信頼性の高いデータ点が必要である。そこで、溶融燃料の軸方向移動、縦断面金相試料の調整不良等の影響を排除するため、判定基準を追加設定してデータの絞り込み(取捨選択)を行う。

B 2. 溶融開始位置の判定基準

(1) 通常判定基準 [B1-B3]

X線あるいは中性子ラジオグラフィーによって中心空孔径の軸方向分布を観察し、溶融開始位置を含むと推定される部分から縦断面金相試料を採取して溶融の有無を判定する。続いて、中心空孔壁面を観察して溶融開始位置を判定する。溶融燃料の軸方向移動が生じている場合は、未溶融の領域の中心空孔径を基準とし、中心空孔径が変化し始める部位を溶融開始位置として判定する。

(2) 追加する判定基準

今回の評価では溶融開始位置の判定に起因した誤差要因を最小化するため、下記の3項目を取捨選択基準(棄却基準(a)~(c))として追加し、山本[B1,B2]が報告した溶融開始位置データの絞り込みを行う。基準(a)(b)に基づく判定は容易であるが、基準(c)については過去に検討例がないため、「B3」で検討する。

基準(a)：溶融開始位置が3個以上の燃料ペレットにまたがって判定されているデータは、信頼性が劣ると判断されるために棄却する。

基準(b)：中心空孔が観察されない縦断面金相試料で判定されているデータは、溶融燃料の軸方向移動と試料の調整不良の影響が著しいと判断されるため棄却する。

基準(c)：溶融燃料が落下喪失した領域には燃料溶融の痕跡が残らないことから、誤判定を誘起する可能性がある。判定された溶融開始位置が溶融燃料の軸方向移動挙動と矛盾するデータは、信頼性が劣ると判断されるために棄却する。

B 3. ^{95}Zr 放出 γ 線軸方向強度プロファイルに基づく溶融燃料移動挙動の検討

(1) 軸方向強度プロファイル

図 B 1 ~ 図 B 7 は、 ^{95}Zr を着目核種とした燃料ピン軸方向の強度プロファイルを整理した結果である。なお、測定データをそのままプロットするとばらつきの影響が大き過ぎて溶融燃料移動挙動が識別できないため、72 点単位（測定ピッチは 1mm 単位）による移動平均処理を施してある。また、溶融開始位置の判定結果 [B1, B2] も付記してある。さらに、B5D-1 試験 [B4] についても同様の図 B 8 を作成した。

単一の燃料ピンだけでは明確ではないが、複数本を比較すると溶融燃料移動による曲線形状の変化は十分識別可能である。特に、中段の図を基準に比較すると比較的容易に判別できる。図 B 8 の B5103 のように燃料溶融がない燃料ピンでは、溶融燃料の軸方向移動現象はなく、プロファイルは全長にわたって平滑な曲線となっている。また、未溶融領域は溶融領域に比較してプロファイルの乱れが小さい（平滑性が高い）傾向が認められる。ある特定の燃料ピン同士に着目した場合、プロファイルの大小関係の逆転と解離は、溶融燃料移動に対応していると推定できる（燃料ペレットロット毎に作図することでより明確に識別できる）。

(2) 溶融開始位置データの検討

B5204・B5209・B5215 の上部側の溶融開始位置は、溶融燃料落下に対応していると推定されるプロファイルの凹みよりも下部側で判定されている。同時にプロファイルの大小関係の逆転現象（図中の太い斜め向きの矢印）が観察されることから、溶融開始位置の判定結果の信頼性に疑問があると考えられる。前出の 3 箇所以外の溶融開始位置データについては、特に異常（矛盾点）は認められない。

ちなみに、B5204・B5209・B5215 の上部側の溶融開始位置（範囲データの場合は中央位置）の線出力は、同一燃料ペレット仕様の下部側で判定された溶融開始位置の線出力よりも高い傾向がある。

B 4. まとめ

山本 [B1, B2] が報告した B5D-2 試験の溶融開始位置データに対して下記の 3 つの基準 (a)~(c) を追加設定し、45 箇所から 31 箇所に絞り込みを行った。

- (a) 溶融開始位置が燃料ペレット 2 個以内の範囲で判定されていること
- (b) 中心空孔が識別される縦断面試料に対して溶融開始位置が判定されていること
- (c) 判定された溶融開始位置が ^{95}Zr γ 線軸方向スキャンプロファイルで観察される溶融燃料移動挙動と比較して明らかな矛盾がないこと

B 5. 参考資料・参考文献

- (B1) 山本一也、櫛田尚也、「「常陽」燃料燃料溶融限界線出力試験の照射後試験による評価」、サイクル機構技報、No.11、2001.6、P.105-117 (2001)
- (B2) 山本一也、櫛田尚也、小泉敦裕、「高速炉用混合酸化物燃料の燃料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—」：JNC TN9400 2000-029 (1999)

- (B3) J.L.Ethridge, R.B.Baker, "Thermal Performance of Fresh Mixed-Oxide Fuel in a Fast Flux LMR", Proceedings of Eighth International Conference on Heat Transfer, San Francisco California USA, August 1986, Vol.5, P.2485-2490 (1986)
- (B4) 浅賀健男、櫛田尚也、畔野一郎、吉川勝則、廣沢孝志、阿部康弘、富永功、鹿倉栄、「高速炉用混合酸化物燃料の燃料溶融限界線出力評価（中間報告）－「常陽」燃料溶融限界線出力試験（PTM-1）試験結果－」：
PNC ZN9430 93-005 (1993)

表B1 「常陽」 B5D-2試験の燃料溶融開始位置データの信頼性検討結果

		溶融境界位置	溶融境界位置	中心空孔	移動平均処理後	採否	燃料組織領域	採否
		特定状況	範囲データの	観測の有無	GScanProfileとの	PTM	データ	伝熱解析
		DFCB/mm	含むペレット数	基準(b)	整合性 (Zr95)		**：縦断面	
			基準(a)	Yes：有 No：無	基準(c)	○：採用 ×：不採用	基準(d)	○：採用 ×：不採用
					G：良好 NG：不良		Yes：有 No：無	
1	B5201B	-		-	-	-	-	-
3	B5202B	196.4		Yes	G	○	Yes	○
5	B5203B	165.0		Yes	G	○	Yes	○
7	B5204B	149.6-157.6	2	No	G	×	No	×
9	B5205B	157.4		Yes	G	○	Yes	○
11	B5206B	128.4-131.5	1	Yes	G	○	Yes	○
13	B5207B	134.5-151.0	3	Yes	G	×	No	×
15	B5208B	163.8-168.4	1	Yes	G	○	No	×
17	B5209B	194.4-207.4	2	No	G	×	No	×
19	B5210B	187.4		Yes	G	○	No	×
21	B5211B	176.0-189.8	2	Yes	G	○	No	×
23	B5212B	180.5		Yes	G	○	Yes	○
25	B5213B	146.0-172.5	3	No&No*	G	×	No	×
27	B5214B	168.2		Yes	G	○	Yes	○
29	B5215B	161.1-182.6	4	Yes&No*	G	×	No	×
31	B5216B	164.1-169.8	1	Yes	G	○	Yes	○
33	B5217B	158.1-184.6	4	No	G	×	No	×
35	B5218B	159.2-168.7	2	No	G	×	No	×
37	B5219B	145.6		Yes	G	○	Yes	○
39	B5220B	127.9-137.7	2	Yes	G	○	No	×
41	B5221B	135.0		Yes	G	○	Yes	○
43	B5222B	162.1-165.3	1	Yes	G	○	Yes	○
45	B5223B	150.3-162.5	2	Yes	G	○	No	×
47	B5224B	165.9		Yes	G	○	Yes	○
2	B5201T	345.4		Yes	G	○	Yes**	○
4	B5202T	348.7		Yes	G	○	No	×
6	B5203T	-		-	-	-	-	-
8	B5204T	313.1		Yes	NG	×	Yes	×
10	B5205T	366.4-376.7	2	Yes	G	○	No	×
12	B5206T	369.0		Yes	G	○	Yes	○
14	B5207T	362.4		Yes	G	○	No	×
16	B5208T	362.3-364.1	2	Yes	G	○	No	×
18	B5209T	327.3-336.3	1	Yes	NG	×	No	×
20	B5210T	343.3-344.4	1	Yes	G	○	No	×
22	B5211T	348.8		Yes	G	○	Yes**	○
24	B5212T	352.3-354.9	2	No	G	×	No	×
26	B5213T	366.6		Yes	G	○	Yes**	○
28	B5214T	359.1		Yes	G	○	Yes	○
30	B5215T	342.5		Yes	NG	×	Yes	×
32	B5216T	357.9-369.1	2	No	G	×	No	×
34	B5217T	359.3		Yes	G	○	Yes	○
36	B5218T	365.8		Yes	G	○	Yes	○
38	B5219T	366.4		Yes	G	○	Yes	○
40	B5220T	370.3-374.9	1	No	G	×	No	×
42	B5221T	388.0		Yes	G	○	Yes	○
44	B5222T	361.9-366.9	1	No	G	×	Yes	×
46	B5223T	-		-	-	-	-	-
48	B5224T	375.6		Yes	G	○	Yes	○

B：下部側
T：上部側

*：2個の縦断面金相試料にわたるため

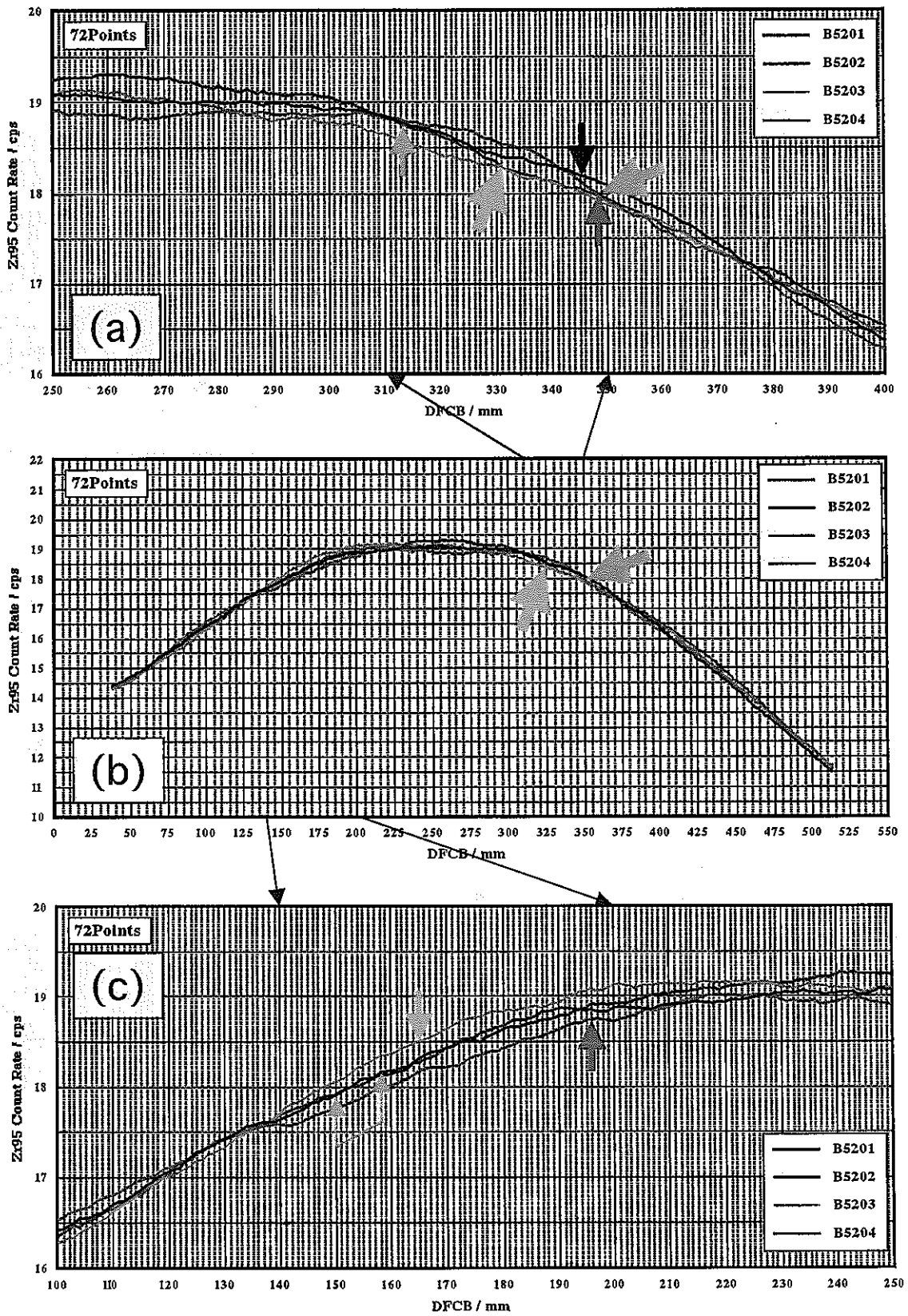


図 B 1 B5D-2試験燃料ピンの⁹⁵Zr放出 γ 線軸方向強度
 プロファイル：その1
 (燃料ペレットロット番号：B5D-201)

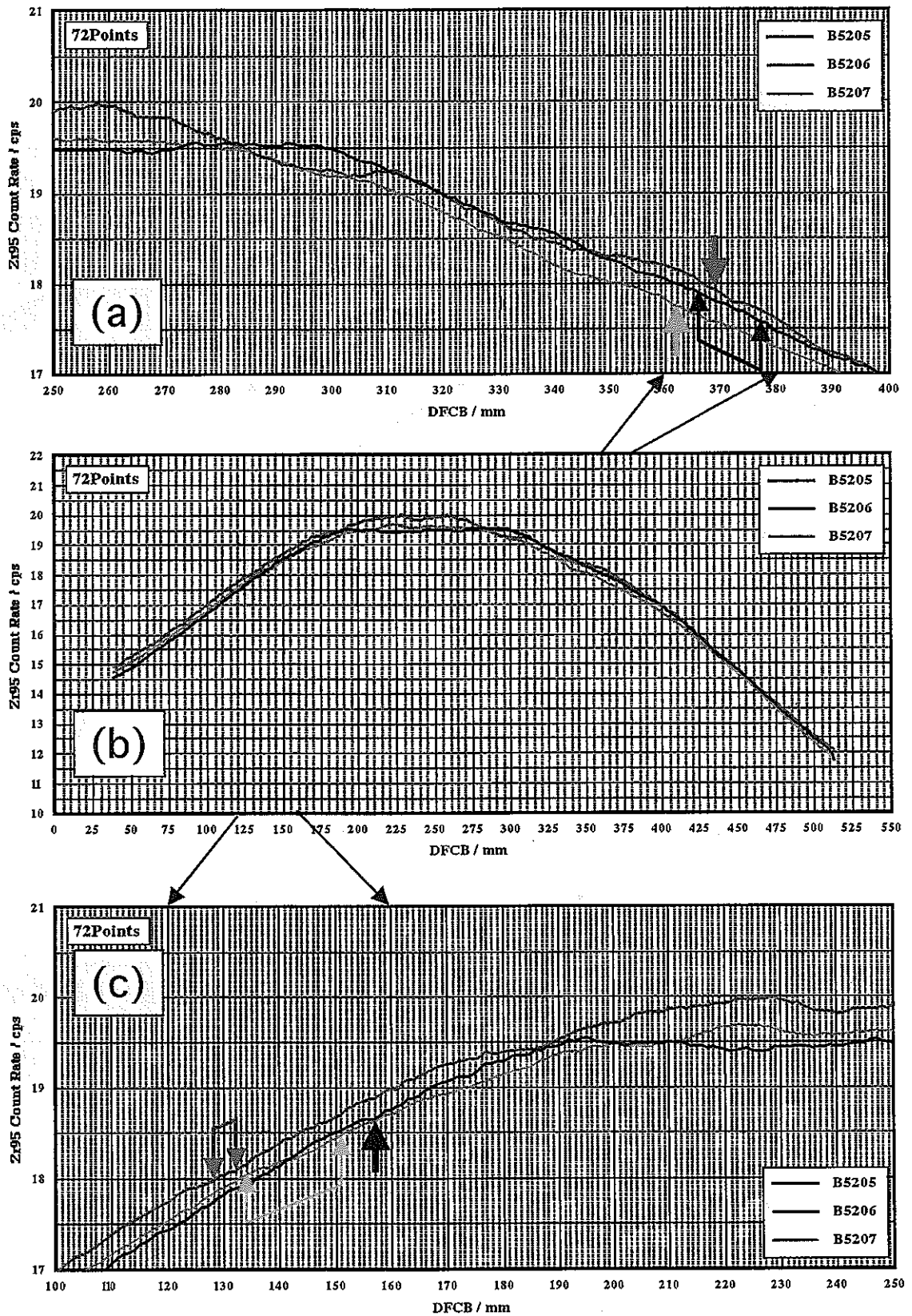


図 B 2 B5D-2試験燃料ピンの⁹⁵Zr放出 γ 線軸方向強度
 プロファイル：その2
 (燃料ペレットロット番号：B5D-205)

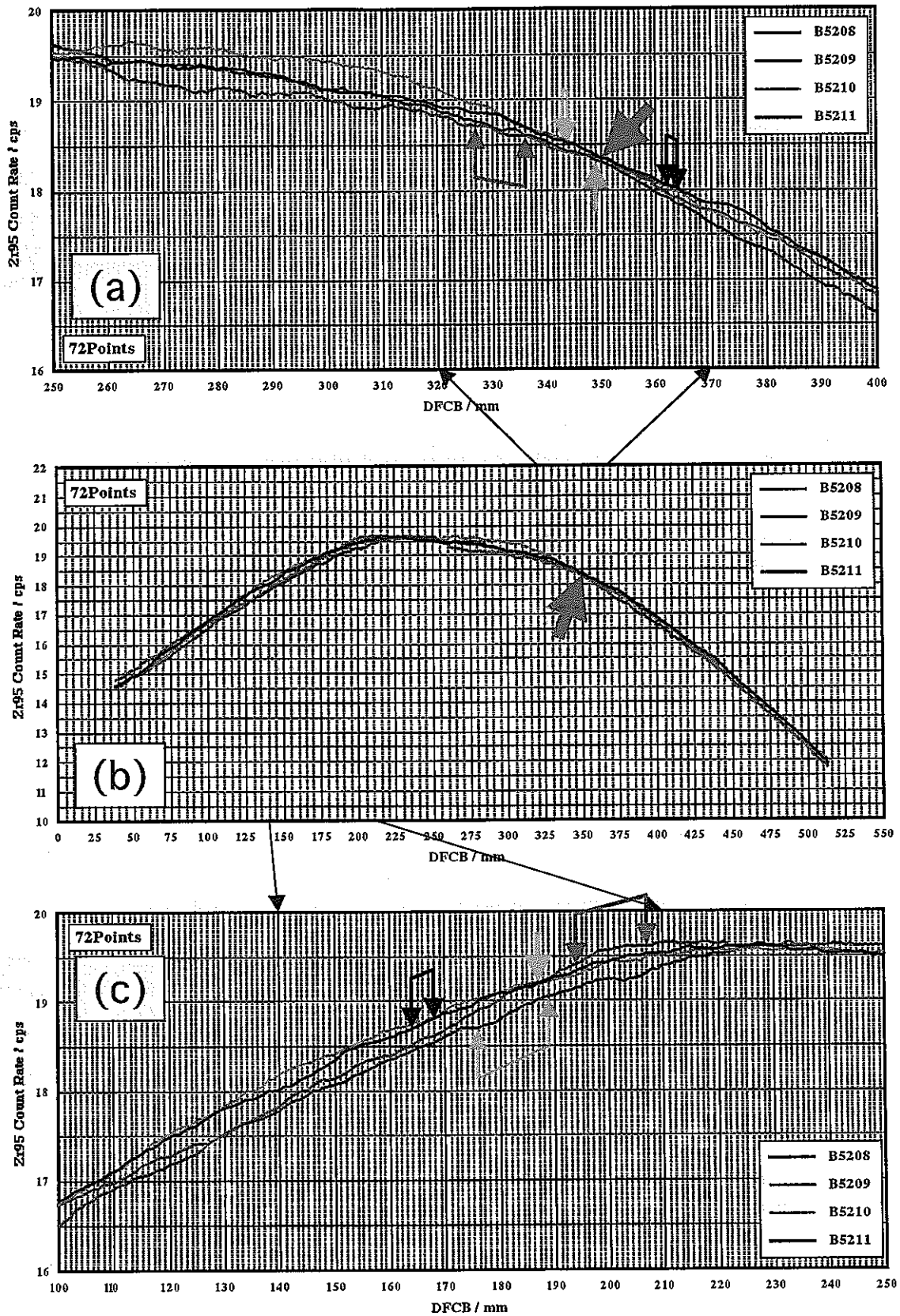
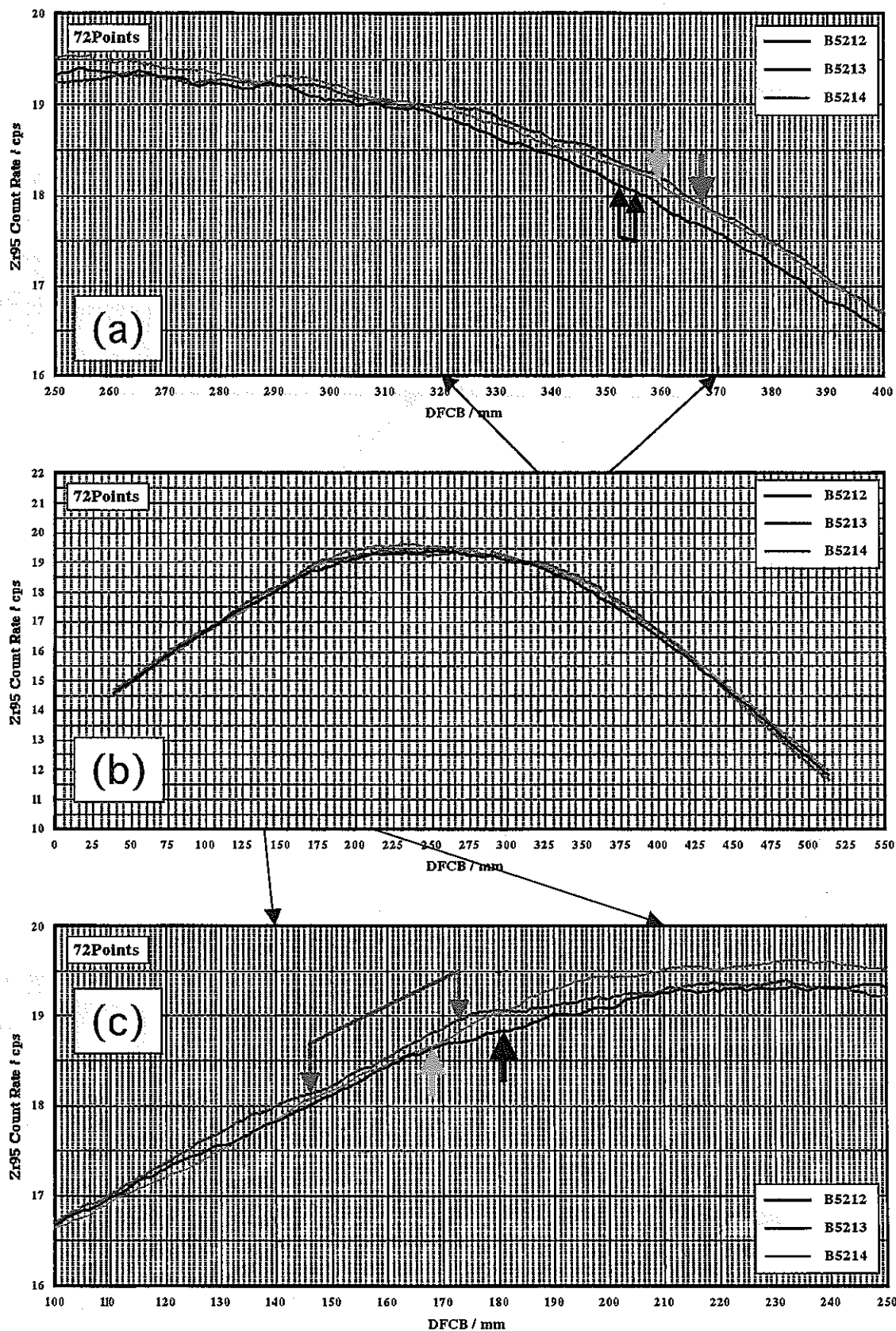


図 B 3 B5D-2試験燃料ピンの⁹⁵Zr放出 γ 線軸方向強度
 プロファイル：その3
 (燃料ペレットロット番号：B5D-202)



図B 4 B5D-2試験燃料ピンの⁹⁵Zr放出 γ 線軸方向強度
 プロファイル：その4
 (燃料ペレットロット番号：B5D-202)

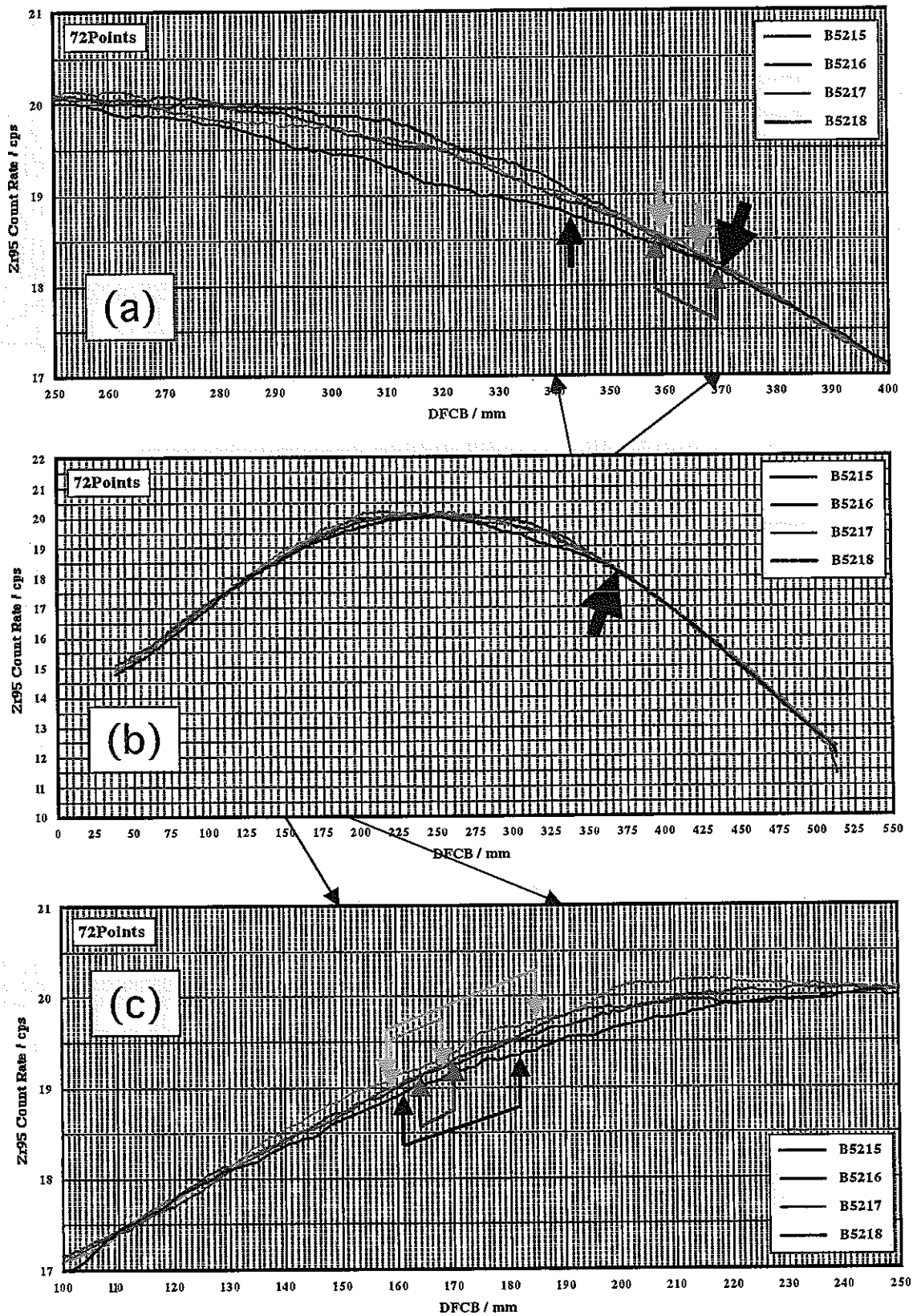


図 B 5 B5D-2試験燃料ピンの⁹⁵Zr放出 γ 線軸方向強度
 プロファイル：その5
 (燃料ペレットロット番号：B5D-206)

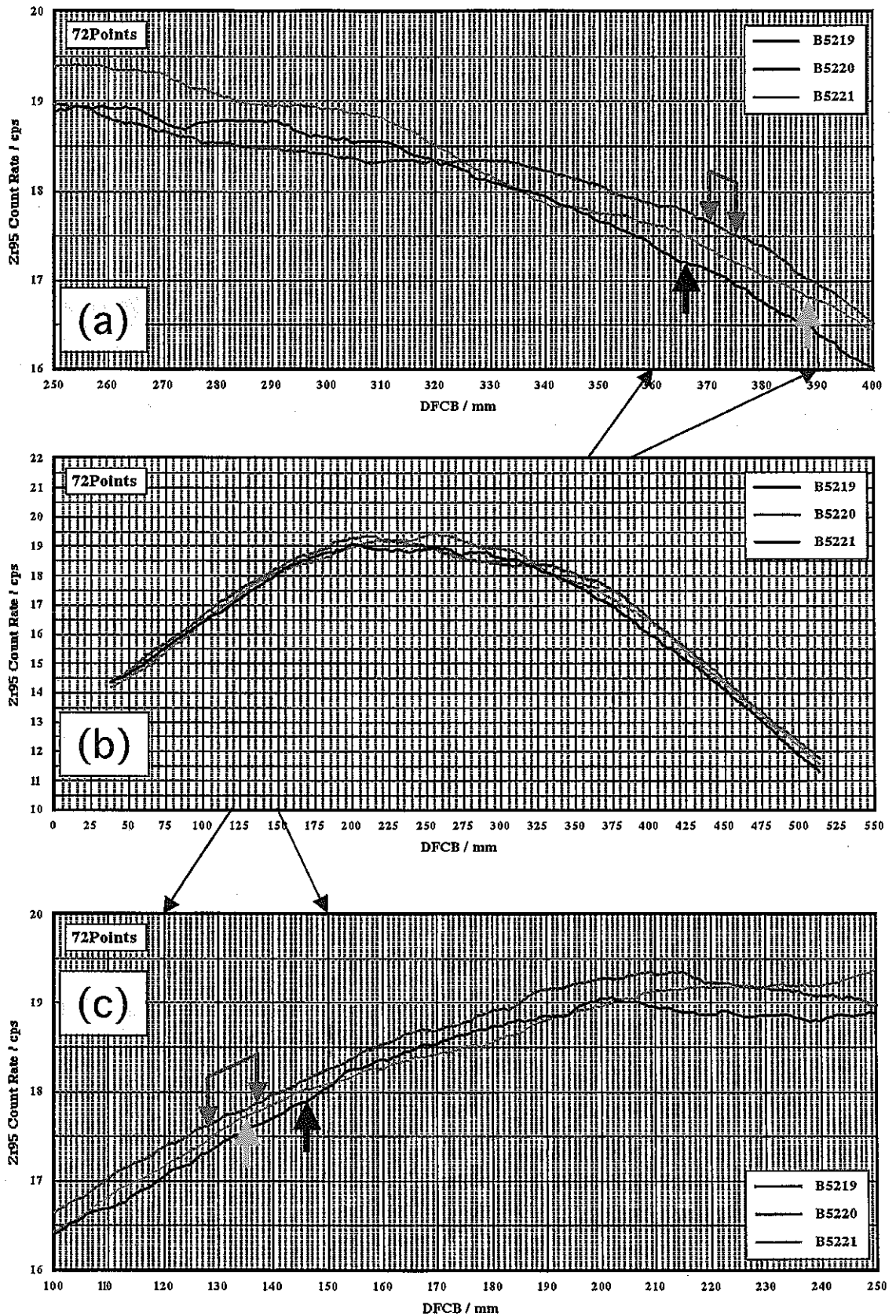


図 B 6 B5D-2試験燃料ピンの ^{95}Zr 放出 γ 線軸方向強度
 プロファイル：その6
 (燃料ペレットロット番号：B5D-203)

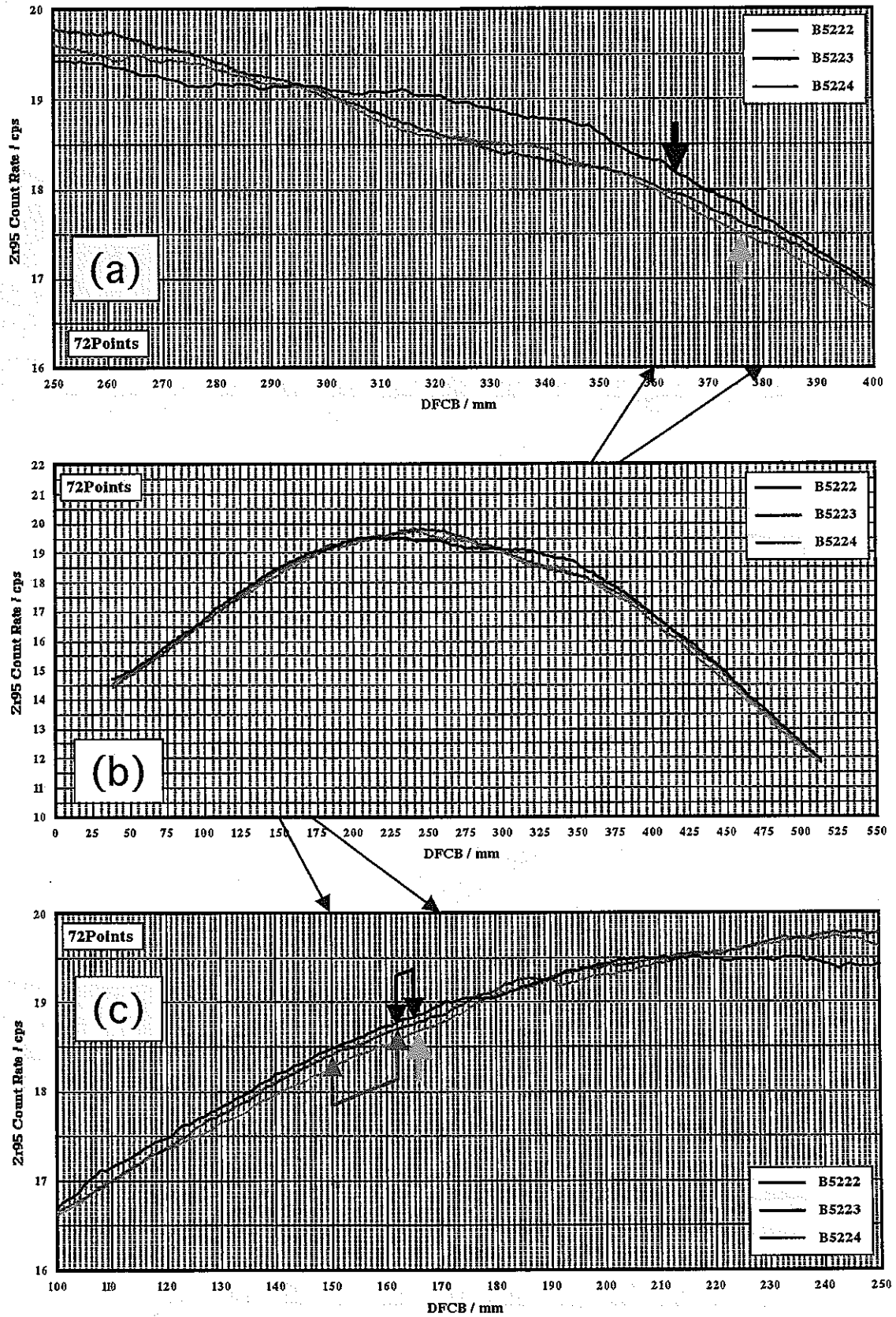


図 B 7 B5D-2試験燃料ピンの ^{95}Zr 放出 γ 線軸方向強度
 プロファイル：その7
 (燃料ペレットロット番号：B5D-204)

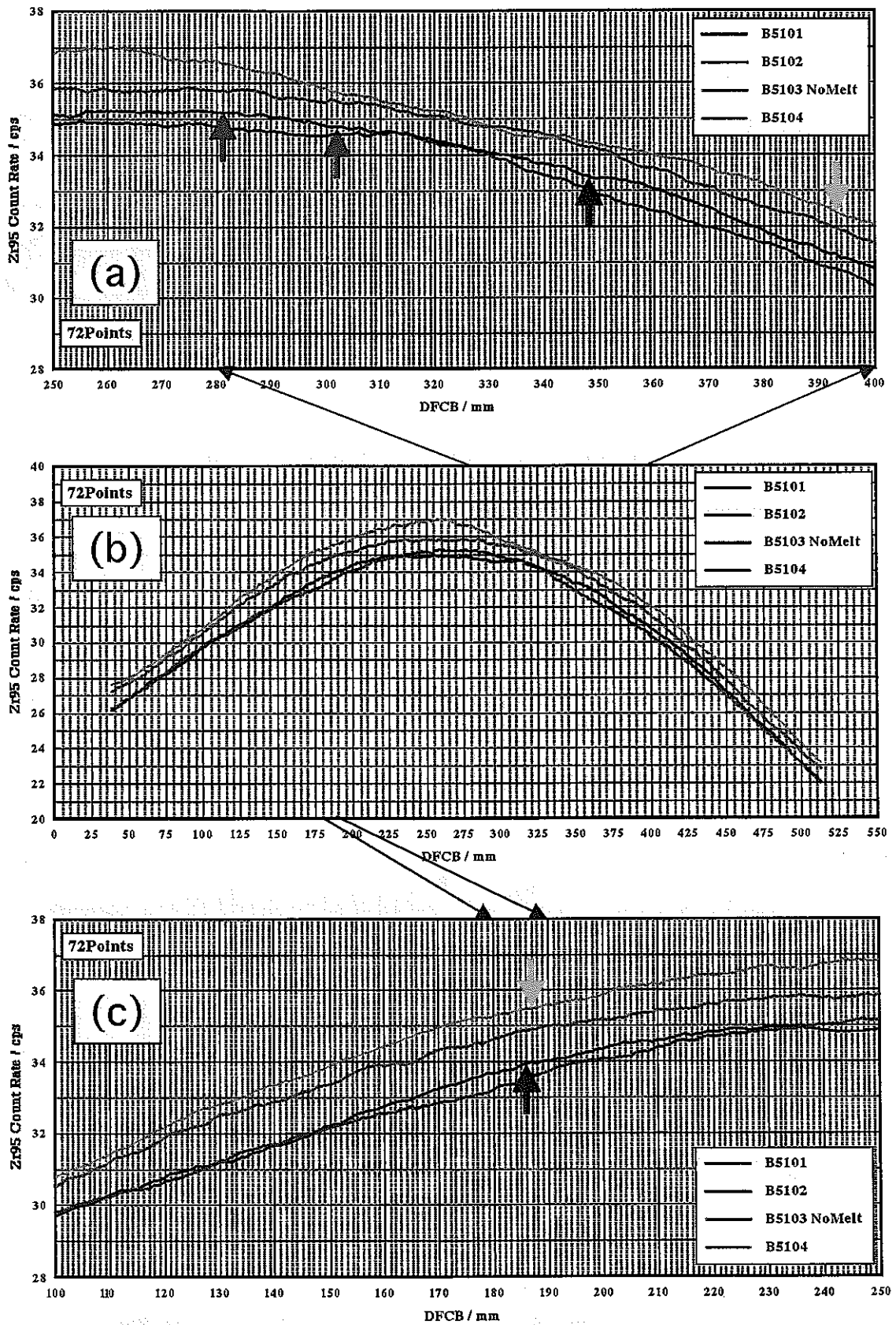


図 B 8 B5D-1 試験燃料ピンの⁹⁵Zr放出 γ 線軸方向強度
プロファイル

高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料の燃料融点（固相線温度）の検討

C 1. 序論

(1) 燃料融点に関する既報

ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料（MOX 燃料）の未照射状態の融点については、Lyon[C1]、Aitken[C2,C3]、Adamson[C4]、廣沢[C5]、Toplis[C6]、土井[C7]、高坂[C8]、森本[C9]の報告が代表的である。また、Pu 富化度、O/M 比、燃焼度等への依存性に関する定式化も行われている。例えば、石井[C10]と Freund[C11]の報告があり、それぞれ (C-1) 式と (C-2) 式である（燃焼度依存項を削除）。

$$T_m(\text{Freund}) = 3123 - 5Pu - 320(2 - O/M) \quad (\text{C-1})$$

$$T_m(\text{Ishii}) = 3120 - 5.7537Pu + 1.3631 \times 10^{-2} Pu^2 + 1.7952 \times 10^{-5} Pu^3 - 362(2 - O/M) \quad (\text{C-2})$$

ここで、 T_m 、 Pu 、 O/M は下記のとおりである。

T_m : 燃料融点（固相線温度）(K)

Pu : Pu 富化度 ($Pu/(Pu+U)$) (%)

O/M : O/M 比 (-)

石井式は保守性を重視しているため、計算値は過小に評価される傾向がある。そのため、石井[C12]は燃料溶融限界線出力評価試験データ（PTM 試験データ）を用いた燃料ピン内伝熱解析用燃料中心温度設定値に燃料融点（固相線温度）を計算する場合には、Adamson[C4]の報告値をもとに Aitken[C2,C3]の報告値を修正し、Pu 富化度と O/M 比に応じて報告値間を直線内挿した値（以下、修正 A&E 方式）を使用することを推奨している。

(2) 目的

修正 A&E 方式・Freund 式・石井式の 3 つの計算方式について燃料融点実測値との整合性を検討し、PTM 試験データを用いた燃料ピン内伝熱解析に使用する燃料中心温度設定値（=固相線温度）の設定に資する。

C 2. 燃料融点実測データに基づく検討

(1) 燃料融点実測値

大洗工学センター照射燃料試験施設と東海事業所プルトニウム燃料第 1 開発室では燃料融点（固相線温度）の実測が行われている。データとしては下記のような合計 6 種類があり、

- ・「常陽」Mk-I ドライバー仕様：JOYO-MkI ($2766 \pm 7^\circ\text{C}$)、
- ・「常陽」B5D-1 試験燃料：B5D-101 ($2754 \pm 7^\circ\text{C}$)、
- ・「常陽」Mk-II ドライバー仕様：TAJ-001 ($2715 \pm 3^\circ\text{C}$) [C5]、
- ・「もんじゅ」仕様試験燃料：B8HAM ($2721 \pm 5^\circ\text{C}$)・TIM-008 ($2721 \pm 4^\circ\text{C}$)、
- ・実験試料：Morimoto ($2712 \pm 20^\circ\text{C}$) [C9]

である。また、図 C 1 は実測データを Pu 富化度で分類し、修正 A&E 方式・Freund 式・石井式による計算値と比較してある。

(2) Pu 富化度 18~19% のレベル

JOYO-MkI と B5D-101 をみると修正 A&E 方式は誤差範囲内で一致しており、Freund 式はやや過小評価、石井式は過小評価の傾向がある。

B5D-2 試験 [C14] は B5D-1 試験 [C13] と酷似した燃料ペレット仕様 (表 C 1 参照) を使用しており、修正 A&E 方式を B5D-2 試験に適用することに問題はないと言える。つまり、石井 [C12] の推奨どおり、B5D-2 試験には修正 A&E 方式を適用するのが適切である。

(3) Pu 富化度 28~30% のレベル

TAJ-001 と Morimoto をみると修正 A&E 方式はよく一致し、Freund 式はやや過小評価傾向、石井式はかなり過小評価傾向がある。ただし、B8HAM ($Pu/(Pu+U)=0.287$) は高濃度の Am (1.13mass%) を含有しており、TIM-008 ($Pu/(Pu+U)=0.297$) は長期間空気雰囲気中で保管されていたため、参考データ扱いとする。実験値は高 O/M 比領域に対して取得されており、低 O/M 比領域における比較検討には難がある。

C 3. 燃料融点 (固相線温度) に関する新しい関係式の設定 (試評価)

表 C 1 のように、P19 試験・P20 試験・P-E01 試験・DEA-2 試験 (付録 A 参照) は Pu 富化度レベルが 22~30% と高く、かつ、低 O/M 比の燃料ペレット仕様が多いため、燃料融点計算値は計算方式による差異が大きく、最小でも 30°C、最大で 89°C に達する。

PTM 試験データを用いた燃料ピン内伝熱解析では、燃料中心温度設定値の変動量はほぼそのままギャップ部温度上昇量の変動量として伝播するため、伝熱特性評価 (特に、ギャップ部熱伝達挙動評価) に及ぼす影響が大きい。

修正 A&E 方式では、Pu 富化度 >20% の領域 (図 C 1 (c)(d) 参照) に Pu 富化度の増大とともに融点が上昇する現象あるいは O/M 比の減少とともに融点が上昇する現象が認められる。Freund 式と石井式は、Pu 富化度の増大と O/M 比の低下とともに単調に融点が低下する理想溶体モデルに立脚している。理想溶体モデルを正とするならば、非常に不可解な現象であり、早急な実験的確認が期待される。

そこで、燃料融点実測値 (JOYO-Mk-I・B5D-101・TAJ-001・Morimoto) をもとに燃料融点関係式の設定を試みる。MOX 燃料の熱物性は概ね理想溶体的な取扱いができる場合 (比熱、格子定数、熱膨張係数、熱伝導度等) が多く、理想溶体モデルに立脚した設定とする。既存の 2 つの評価式の O/M 比依存性はほぼ同じであるが、Pu 富化度依存性が異なっている。また、燃料融点実測値と比較からは 2 つの関係式ともに過小評価になる傾向が出ている。設定は Freund 式の第 1 項の定数 (3123) と第 3 項の O/M 比依存性の係数 (-320) は固定し、偏差の和がゼロに最も近くなるように第 2 項の Pu 富化度依存性の係数を定める方法とする。結果として第 2 項の係数は 4.61 となり、(C-3) 式が得られる (燃焼度依存性は取り扱わない)。

$$T_m(\text{This Work}) = 3123 - 4.61Pu - 320(2 - O/M) \quad (\text{C-3})$$

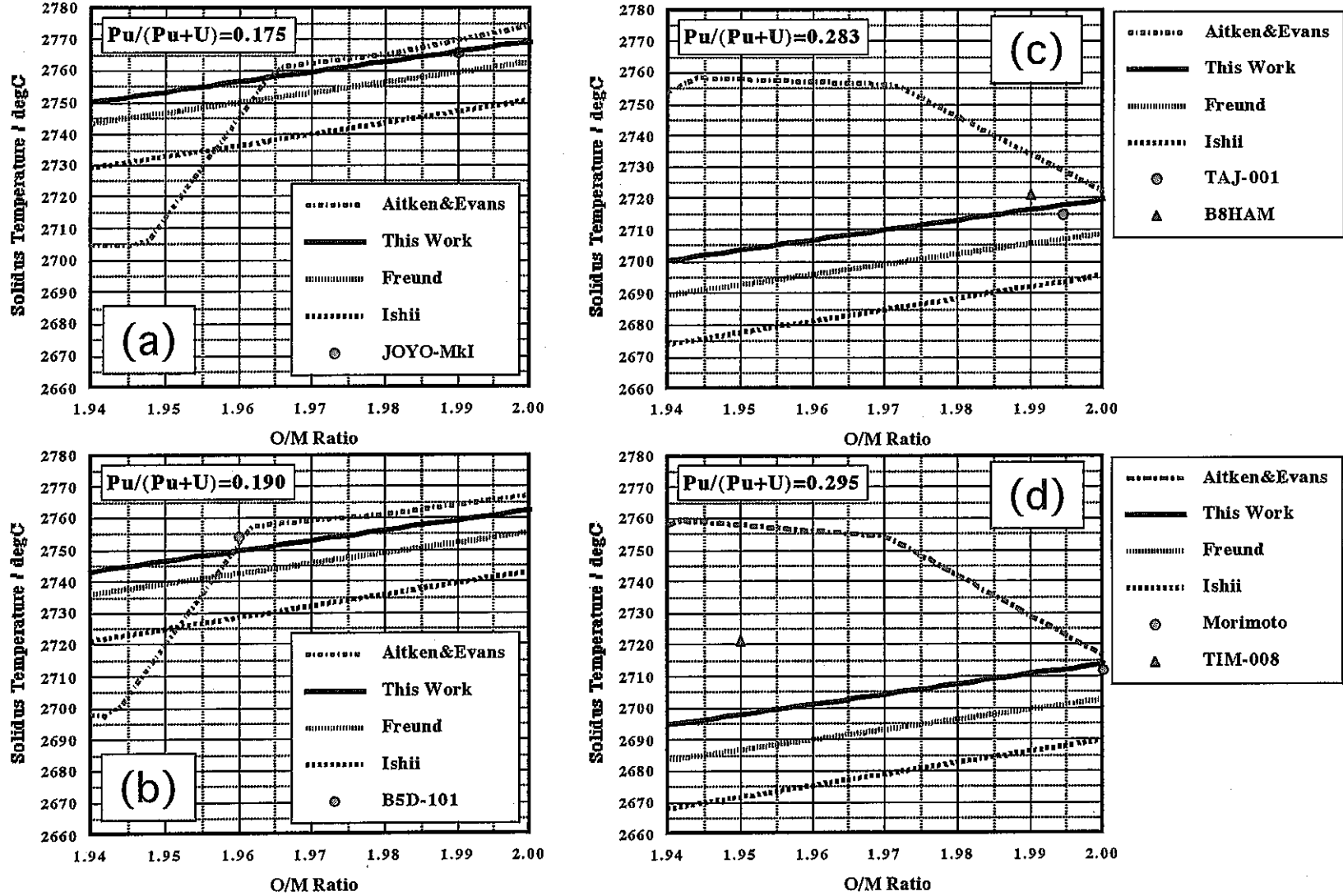
(C-3) 式による計算値は図 C 1 に「This Work」として付記してある (当然のことながら燃料融点実測値とよくあっている)。

C 4. 参考資料・参考文献

- (C1) W.L.Lyon, W.E.Baily, "The Solid-Liquid Phase Diagram for the UO_2 - PuO_2 System", Journal of Nuclear Materials, Vol.22, P.332-339 (1967)
- (C2) E.A.Aitken, S.K.Evans, "A Thermodynamic Data Program Involving Plutonia and Urania at High Temperatures" : GEAP-5672 (1969)
- (C3) E.A.Aitken, S.K.Evans, "A Thermodynamic Data Program Involving Plutonia and Urania at High Temperatures" : GEAP-12229 (1971)
- (C4) M.G.Adamson, E.A.Aitken, R.W.Caputi, "Experimental and Thermodynamic Evaluation of the Melting Behavior of Irradiated Oxide Fuels", Journal of Nuclear Materials, Vol.130, P.349-365 (1985)
- (C5) 廣沢孝志、勝山幸三、飛田剛志、両角勝文、野村茂雄、丸山忠司、
「「常陽」Mk-II 炉心燃料の照射挙動 (7) 燃料融点挙動」、
日本原子力学会「1992 年秋の大会」、D17 (1992)
- (C6) L.R.Topliss et al., "Measurement and Analysis of MOX Physical Properties", IAEA Technical Committee Meeting on Recycling of Plutonium and Uranium in Water Reactor Fuel, New Bridge Windermere UK, July 3-7 1995 (1995)
- (C7) 土井壮一ら、「軽水炉用 MOX 燃料の熱物性測定 (1)-融点測定」、
日本原子力学会「1995 年秋の大会」、H11 (1995)
- (C8) 高坂祐二ら、「MOX 燃料の熱物性測定 (1)-融点測定-」、
日本原子力学会「1997 秋の大会」、I53 (1997)
- (C9) 森本恭一、加藤正人、遠藤秀男、山口俊弘、宇野弘樹、「高富化 MOX 燃料の融点測定 (2) - $(\text{Pu}_x\text{U}_{1-x})\text{O}_{2.00}$ ($x=0.0, 0.30, 0.49, 1.0$) の融点測定-」、
日本原子力学会「2000 年春の年会」、J43 (2000)
- (C10) 石井徹哉、廣沢孝志、「ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料の融点評価」：
PNC TN9410 97-075 (1997)
- (C11) D.Freund, D.Geithoff, H.Steiner, "Evaluation of the Power-To-Melt Experiments POTOM", Journal of Nuclear Materials, Vol.204, P.228-237 (1993)
- (C12) 石井徹哉、根本潤一、浅賀健男、「照射初期燃料温度評価手法の検討」：
JNC TN9400 99-055 (1999)
- (C13) 長井修一郎、上村勝一郎、飛田典幸、豊島光男、加藤直人、野上嘉能、井坂和彦、
石田忍、小沼勝弘、大津実、「高速実験炉「常陽」照射用炉心特殊燃料要素
高線出力試験用集合体試験用要素 (B5D-1) 製造報告」：
PNC TN8410 93-021 (1992)
- (C14) 長井修一郎、上村勝一郎、飛田典幸、豊島光男、加藤直人、野上嘉能、井坂和彦、
石田忍、小沼勝弘、大津実、「高速実験炉「常陽」照射用炉心特殊燃料要素
高線出力試験用集合体試験用要素 (B5D-2) 製造報告」：
PNC TN8410 93-030 (1992)

表 C 1 燃料溶融限界線出力評価試験に使用された燃料ペレット仕様と燃料融点計算値

試験名	試験燃料ピン番号	燃料ペレットロット名	O/M比 実績値	Pu富化度 実績値	燃料融点 修正A&E方式 計算値	燃料融点 Freund式 計算値	燃料融点 石井式 計算値	燃料融点 試作式 計算値
Test ID	Pin ID	Lot ID	Oxygen-to- Metal Ratio	Pu Content Pu/(Pu+U) mass%	℃	℃	℃	℃
P19		HEDL-FFTF/Standard	1.962	24.80	2758	2714	2699	2724
P19		HEDL-LargeDiameter	1.966	24.86	2759	2715	2700	2725
P20	P20-07		1.960	24.80	2757	2713	2699	2723
P20	P20-30		1.960	24.80	2757	2713	2699	2723
P20	P20-39		1.960	24.77	2757	2713	2699	2723
P20	P20-1921		1.962	24.80	2758	2714	2699	2724
P20	P20-1934		1.962	24.80	2758	2714	2699	2724
P-E01			1.99	29.37	2730	2700	2687	2711
DEA-2	HEDL/HD8H21	A	1.971	29.34	2754	2694	2680	2705
DEA-2	HEDL/HD8L21	B	1.941	29.25	2758	2685	2669	2696
DEA-2	HEDL/HD1H21	C	1.967	29.26	2755	2693	2679	2705
DEA-2	HEDL/HD1L21	D	1.941	29.26	2759	2685	2669	2696
DEA-2	HEDL/HC1H21	E	1.971	29.34	2754	2694	2680	2705
DEA-2	HEDL/HC1L22	F	1.941	29.25	2758	2685	2669	2696
DEA-2	HEDL/HB3L21	H	1.940	29.21	2757	2685	2669	2696
DEA-2	HEDL/HB5H21	J	1.969	29.32	2755	2693	2679	2705
DEA-2	HEDL/HB5L21	K	1.940	29.15	2757	2685	2670	2696
DEA-2	HEDL/HB5L22	K	1.940	29.15	2757	2685	2670	2696
DEA-2	HEDL/HA3H21	L	1.975	29.39	2749	2695	2681	2707
DEA-2	HEDL/HA3L21,HA3L22	M	1.944	29.39	2759	2685	2670	2697
DEA-2	KerrMcGee/HK1N611	3.1LG/SG	1.959	26.87	2757	2703	2688	2713
DEA-2	KerrMcGee/HK1N746	3.1LG/SG	1.959	26.87	2757	2703	2688	2713
DEA-2	KerrMcGee/HK2E305	3.2LG/SG	1.965	22.51	2757	2726	2712	2735
DEA-2	KerrMcGee/HK2E294	3.2LG/SG	1.965	22.51	2757	2726	2712	2735
DEA-2	B&W/HN1A019	3.1LG/SG	1.942	27.41	2752	2694	2679	2705
DEA-2	B&W/HN1A031	3.1LG/SG	1.942	27.55	2753	2694	2678	2704
DEA-2	B&W/HN1S520	3.1LG/SG	1.953	27.31	2757	2698	2683	2709
DEA-2	B&W/HN1S495	3.1LG/SG	1.953	27.31	2757	2698	2683	2709
DEA-2	B&W/HN2D752	3.2LG/SG	1.956	22.64	2755	2723	2708	2732
DEA-2	B&W/HN2D627	3.2LG/SG	1.956	22.64	2755	2723	2708	2732
DEA-2	B&W/HN4A003	4.1LG/SG	1.955	29.54	2757	2688	2673	2699
DEA-2	B&W/HN4A002	4.1LG/SG	1.955	29.54	2757	2688	2673	2699
DEA-2	B&W/HN4C054	4.1LG/SG	1.950	29.47	2758	2687	2672	2698
DEA-2	B&W/HN4C164	4.1LG/SG	1.950	29.47	2758	2687	2672	2698
DEA-2	B&W/HN3U296	4.2LG/SG	1.951	25.23	2756	2708	2693	2718
DEA-2	B&W/HN3U107	4.2LG/SG	1.951	25.23	2756	2708	2693	2718
B5D-1		B5D-101	1.96	19.0	2751	2742	2728	2750
B5D-1		B5D-102	1.96	19.0	2751	2742	2728	2750
B5D-1		B5D-103	1.96	18.8	2750	2743	2729	2751
B5D-2		B5D-201	1.98	19.5	2760	2746	2733	2754
B5D-2		B5D-202	1.98	19.5	2760	2746	2733	2754
B5D-2		B5D-203	1.96	19.5	2753	2740	2726	2747
B5D-2		B5D-204	1.96	19.5	2753	2740	2726	2747
B5D-2		B5D-205	1.97	19.4	2758	2744	2730	2751
B5D-2		B5D-206	1.97	19.4	2758	2744	2730	2751



Aitken&Evans : 修正A&E方式計算値 (JNC TN9400 99-055 参照)
 Freund : Freund式 (J.Nucl.Mater., 204(1993)228参照)
 Ishii : 石井式 (PNC TN9410 97-075 参照)
 This Work : 今回試作した関係式

図 C 1 未照射状態の燃料融点 (固相線温度) 実測値と各種関係式との比較検討

EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験燃料ピンの伝熱特性に関する試評価

D1. 序論

(1) 海外炉における燃料溶融限界線出力評価試験

燃料溶融限界線出力評価試験 (PTM試験) については海外炉でも実施されており、EBR-IIにおけるP19試験[D1]・P20試験[D1]・F20試験[D2]・P-E01試験[D3]、FFTFにおけるDEA-2試験[D4]、HFRにおけるPOTOM試験[D5,D6]等がある。P19試験・P20試験・P-E01試験・DEA-2試験の内容については、付録Aを参照されたい。

本文で海外炉のPTM試験データを使用しなかったのは、下記の4つの理由による。

- (i) 照射条件の評価方法に関する情報が限られており、「常陽」B5D-2試験に比較して信頼度に劣ること
- (ii) 燃料ペレットの気孔形態に関する情報が限られており、燃料熱伝導特性に及ぼす気孔効果を十分な信頼度で予測評価できないこと
- (iii) F20試験は燃焼燃料が対象であること
- (iv) POTOM試験は水炉における試験であること

線出力は、 ^{149}Nd を指標核種とした燃焼率測定法をもとに評価されるのが一般的である。しかし、今回の評価で対象にしている極短期間の照射試験ではNd生成量が少ないために高度な分析技術を必要とし、B5D-2試験では線出力の確定作業に4箇年を要した。Etheridge[D4]がDEA-2試験の報告と同時にEBR-II照射試験データを修正している点にも困難さが現われている (P19試験とP20試験の修正前のデータは松元[D7]、修正後のデータは池田[D8]によってまとめられている)。さらに、「常陽」照射試験では線出力のランダム誤差と系統誤差 (原子炉熱出力誤差) が分離評価[D9-D11]されている点に特長がある。

燃料ペレットの気孔形態は燃料熱伝導特性に大きく影響し、相対密度93%TD未満の低密度あるいは中密度の場合に顕著である。例えば、低密度タイプの場合は、製造プロセスによって気孔形態は大きく異なり、燃料熱伝導度に20%近い差が生じる場合も想定される。B5D-2試験では燃料ペレットの熱伝導度を実測し、気孔効果を実験的に把握した[D12]。燃料熱伝導度に及ぼす気孔効果は光学顕微鏡写真を画像解析することで予測評価が可能[D12,D13]であるが、海外炉の場合はP-E01試験を除いて情報が不十分である (画像解析が可能なレベルの光学顕微鏡写真がない)。

(2) EBR-IIとFFTFにおける照射試験に対するギャップ部熱伝達挙動の報告例

Etheridge[D4]はP19試験・P20試験・DEA-2試験の3試験データを使用し、燃料ピン挙動解析コード：SIEX[D14]の校正と予測精度についても報告している。Etheridgeはギャップガス熱伝達成分を(D-1)式のように報告している。

$$H_{gas} = \frac{K_{mix}}{Be^{DP} + TJD + GAP} \quad (D-1)$$

ここで、 K_{mix} 、TJD、GAP、P、B、Dはそれぞれ下記のとおりである。

K_{mix} : ギャップガス熱伝導度 (W/cmK)

- TJD : 温度ジャンプ距離 (cm)
 GAP : 炉内ギャップ幅 (半径値) (cm)
 P : 接触圧 (dyne)
 B : 定数 ($5.118 \times 10^{-3} \text{cm}$)
 D : 定数 ($-4.191 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{dyne}$)

(D-1)式において燃料ペレットと被覆管との接触がない場合 (接触圧: $P=0 \text{dyne/cm}^2$) は、 $Be^{DP}=B=51.18 \mu\text{m}$ となり、本文「4.2(3)」でB5D-2試験に対して得た最小ギャップ幅 $4.8 \mu\text{m}$ よりも一桁近く大きい値になる。また、中島[D15]がFEMAXI-IIIで採用している条件 (本文「4.3(1)」の(4-6)式参照) で接触圧: $P=0 \text{dyne/cm}^2$ ・被覆管表面粗さ $Rc=1 \mu\text{m}$ を仮定すると $13.85 \mu\text{m}$ ($=2.77 \times (4+1)$) になり、約3倍の大きさである。なお、Etheridgeの原著では $D=4.191 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{dyne}$ とあるが、 $D=-4.191 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{dyne}$ の誤植と推定される (正の値では接触圧が大きくなると実効表面粗さが大きくなってしまいうというありえない現象になってしまう)。

B5D-2試験とDEA-2試験はともに外周研削をした燃料ペレットを使用し、軽水炉燃料も通常は外周研削仕上であり、被覆管の表面粗さには大きな差はないと考えてよい。ちなみに、高速炉用ステンレス鋼被覆管内面は冷間加工ままであり、ジルカロイ被覆管の内面仕上方法は酸洗 (ジルカロイ2) またはサンドブラスト (ジルカロイ4) である[D16]。

以上のように、Etheridgeの報告と本文の評価結果との間には、ギャップ部熱伝達挙動 (特に、実効表面粗さ) に大きな不整合があることがわかる。

(3) 目的

本文では燃料熱伝導度式 (PNC'98式[D17,D18]) の適用性評価としてB5D-2試験データをもとに燃料ピン内伝熱特性を検討した。結果として、PNC'98式の燃料融点までの適用性を確認すると同時にギャップ部熱伝達挙動を定量的に把握できた。

本文で得られた知見をEBR-IIとFFTFにおけるPTM試験データ (P19試験・P20試験・P-E01試験・DEA-2試験) に適用し、ギャップ部熱伝達挙動の観点から「常陽」照射試験データとの整合性を検討する。ただし、EBR-IIとFFTFにおける照射試験については、照射条件の評価方法、使用された燃料ペレットの熱伝導特性等に関する情報が限られているため、試評価の位置づけで実施する。

D 2. 評価方法と設定条件

(1) 燃料ピン内温度評価モデル

本文「3.1(4)」と同一とする (採用する燃料熱伝導度式は当然PNC'98式である)。

(2) 燃料融点 (燃料中心温度設定値) の取扱い

石井[D19]は、PTM試験データを用いた燃料ピン伝熱特性評価を行う場合の燃料融点としてはAdamson[D20]の報告値をもとにAitken[D21,D22]の報告値を修正し、Pu富化度とOM比に応じて報告値間を直線内挿した値 (修正A&E方式計算値) の使用を推奨している。付録Cで検討したように、米国炉照射試験のような比較的高Pu富化度の燃料ペレットの場合、修正A&E方式計算値の低OM比領域への外挿性に不明な点があ

る。そこで、今回の評価では燃料融点実測値をもとに試作した下記の(D-2)式を使用し、燃料中心温度設定値となる燃料融点（固相線温度）を計算する（表D 1 参照）。

$$T_m = 3123 - 4.61Pu - 320(2 - O/M) \quad (D-2)$$

ここで、 T_m 、 Pu 、 O/M は下記のとおりである。

- T_m : 燃料融点(K)
 Pu : Pu 富化度 ($Pu/(Pu+U)$) (%)
 O/M : O/M 比(-)

(3) 燃料熱伝導特性に及ぼす気孔効果の補正方法の取扱い

気孔効果の補正方法には本文(3-1)式の修正Loeb式を採用し、PNC'98式による計算値に乗じて使用する（本文「3.2(2)」と同一方法）。

未変化組織領域用の気孔効果の有効補正係数には、燃料ペレットの相対密度レベルをもとに、87～93%TDの中密度タイプには1.9、87%TD未満の低密度タイプには2.1を設定する（表D 1 参照）。設定は以下のような工学的判断に基づく。DEA-2試験のポアフォーマー添加方式によるHEDL製とB&W製の中密度タイプの気孔形態は、B5D-2試験の中密度タイプ ($\alpha=1.9$) に近い（ように見える）。DEA-2試験の低密度タイプの気孔形態は、INTA-1試験の低密度タイプ ($\alpha=2.1$) に近い（ように見える）。P19試験・P20試験・DEA-2試験のHigh-Pressure-Preslugging法によるHEDL製とKerrMcGee製の中密度タイプは、ポアフォーマー添加方式と同じ値とする。ただし、93%TD以上の高密度タイプには高密度タイプに一般的な $\alpha=2.5$ [D23]、P-E01試験には既報[D13]の値 ($\alpha=2.5$) を適用する。

柱状晶領域に適用すべき気孔効果の有効補正係数 α の値は、本文「3.2(2)」と同じ理由により、未変化組織領域と共通の値を設定する。

(4) 燃料熱伝導特性に及ぼす燃料組織変化以外の照射効果の取扱い

本文「3.2(3)」と同一とする。

D 3. 燃料ピン内伝熱特性の検討

(1) 燃料ピン内温度分布の評価計算結果

評価計算結果について、燃料ペレット内温度上昇量を図D 1、ギャップ部温度上昇量を図D 2、燃料外面温度を図D 3に示す。また、ギャップ部温度上昇量を本文(4-1)式を用いてギャップコンダクタンスに換算した結果を図D 4に示す。図D 1～図D 4は全て製造時ギャップ幅を被覆管内径で規格化した値に対して整理してある。

燃料外面温度レベルに着目すると、図D 3に示すように、B5D-2試験は600～950℃の範囲にあるのに対し、DEA-2試験HEDL製高密度タイプとP-E01試験は被覆管融点に近い1500℃前後の値である。P19試験とP20試験におけるEtheridgeによる修正[D4]の影響は大きく、例えば図D 2のギャップ部温度上昇量で150～300℃の差が生じている。

(2) 燃料ペレットと被覆管との接触が推定される条件に限定した検討

FFTFドライバー仕様では140 μ m未満の製造時ギャップ幅における燃料熔融限界線出力の変化がほとんどなく、燃料ペレットと被覆管との固体接触の発生を示唆している（付録A参照）。Etheridgeも挙動解析コードによる計算結果から同様の指摘[D4]を

している。FFTFドライバー仕様の製造時ギャップ幅直径値 $140\mu\text{m}$ は相対ギャップ幅で約0.028となる。つまり、図D 1～図D 4の相対ギャップ幅が約0.028未満のデータは、燃料ペレットと被覆管との固体接触が生じていると推定される。

B5D-2試験のギャップコンダクタンスは $1.3\text{W}/\text{cm}^2\text{K}$ を超えているが、米国炉試験の場合は $1.3\text{W}/\text{cm}^2\text{K}$ 未満と低い。ギャップ部温度上昇量で比較しても、米国炉試験の場合は 250°C を超え、B5D-2試験の場合は 250°C 未満と小さい。B5D-2試験とP19試験（タグガス添加なし）との間には明確な差異がある。タグガス添加（He-5%Kr-5%Xe）によるガス熱伝導度の劣化を最大40%見込んでもB5D-2試験とDEA-2試験との間の差異は明確である。ただし、Etheridgeによる修正前のデータは、B5D-2試験の場合と同レベルである。

(3) ギャップ部熱伝達挙動の比較検討

本文「4.2(3)」と同一方法を用いて炉内実効ギャップ幅を計算した結果を図D 5に示す。

DEA-2試験の場合に炉内実効ギャップ幅が製造時ギャップ幅よりも大きくなる現象が認められる。DEA-2試験燃料ピンにおける燃料ペレット・リロケーション量は、燃料ピン径の違いを考慮しても、B5D-2試験と比較して小さいことが既に報告[D24]されている。しかし、被覆管の熱膨張の方が燃料の熱膨張よりも大きいのは、非現実的な現象である。

また、P-E01試験とB5D-2試験の燃料ペレット・リロケーション挙動は酷似しているが、炉内実効ギャップ幅レベルはB5D-2試験に比較して顕著に大きい。

さらに、P19太径の製造時ギャップ幅半径値が $50\mu\text{m}$ のデータ（燃料ペレットと被覆管との接触が推定されるデータ）に着目すると、Etheridgeの修正前のデータを使用した場合はB5D-2試験に近いレベルの値を示すが、Etheridgeの修正後の場合は、P-E01試験の場合と同様、B5Dに比較して顕著に大きい。

D 4. 不整合現象の発生原因の検討

(1) 原因の推定

不整合現象の発生原因としては、発生状況から線出力評価値の系統差が最も有力と考えられる。具体的には、B5D-2試験の過大評価、米国炉照射試験の過小評価、両者の複合の3種類が考えられる。

B5D-2試験の線出力評価値の系統誤差は原子炉熱出力誤差に対応する1.2%[D7-D9]であり、B5D-2試験の過大評価が不整合現象（ $>5\% : 4\sigma$ 超）に起因する可能性はないと言ってよい。

次に、米国炉照射試験の過小評価の可能性については、「4.3(2)」で述べたようなEtheridgeによる修正前のP19試験がB5D-2試験と非常によく整合している点が注目される。つまり、EtheridgeのDEA-2試験（含むP19試験とP20の修正）とP-E01の照射条件が誤評価されている可能性が考えられる。特に、Etheridgeの報告ではP19試験・P20試験・F20試験の3つのEBR-II照射試験が言及されている。なお、P-E01試験の線出力は ^{148}Nd を指標核種とした燃焼率測定結果をもとに計算されている。

(2) Etheridgeの修正を否定した試評価

図D 6 (a)は、DEA-2試験のHEDL製高密度タイプを装荷した燃料ピンとP-E01試験のデータについて線出力値を1.14倍（EtheridgeはP19試験とP20試験を12.3%下方修正しており、0.877の逆数である1.14倍を採用）してギャップコンダクタンス、ギャップ部温度上昇量、炉内ギャップ幅等を計算した結果である（HEDL製高密度タイプとP-E01試験の燃料ペレットの気孔効果の有効補正係数はB5D-2試験と同レベルの信頼度と考えてよい）。なお、被覆管温度条件は温度モニターの測定データが存在するため、影響は無視できると仮定した。図D 6 (a)に示すように、線出力値を1.14倍すると不整合現象は解消され、B5D-2試験結果とよく整合するよう見える。

図D 6 (b)は、DEA-2試験のHEDL製の中密度タイプと低密度タイプを装荷した燃料ピンのPTMデータについて、線出力値を1.14倍してギャップコンダクタンスとギャップ部温度上昇を計算した結果である。燃料ペレットと被覆管との接触が生じていたと推定される製造時ギャップ幅の小さいデータ点のギャップコンダクタンスは、B5D-2試験と同レベルとなる。

以上のように、B5D-2試験と米国炉照射試験のギャップ熱伝達挙動における不整合現象は、Etheridgeの修正を否定すると解消されることがわかる。ただし、今回の試評価はあくまで可能性の検討であり、不整合現象の原因として特定できたわけではなく、B5D-2試験と米国炉照射試験との間の系統差の可能性（原因）についての詳細な調査と検討が必要である。

D 5.まとめ

(1) 米国炉照射試験に対する試解析

(1)で設定した燃料ピン内温度評価モデルとPNC'98式をEBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データに適用し、ギャップ部熱伝達挙動に関する「常陽」照射試験データとの整合性を検討した。ただし、米国炉照射試験については、使用された燃料ペレットの熱伝導特性、照射条件の評価方法等に関する情報が不足しているため、試解析の位置づけで実施した。

(2) 不整合現象の発生

「常陽」照射試験と米国炉照射試験のギャップ熱伝達挙動には、重大な不整合現象が認められた。具体的には、ギャップ部熱伝達挙動における実効表面粗さの絶対値レベルであり、FFTF照射試験（DEA-2試験）における報告値は(1)で得られた値よりも一桁近く大きい。不整合現象の原因としては、「常陽」照射試験と米国炉照射試験との間の照射条件の系統差に起因している可能性が考えられた。

(3) 今後の課題

「常陽」照射試験と米国炉照射試験との間の照射条件の系統差の可能性について、調査を継続していく必要がある。

D 6. 参考資料・参考文献

- (D1) R.B.Baker, R.D.Leggett, "Early in Life Thermal Performance of UO_2 - PuO_2 Fast Reactor Fuel", in Proceedings of International Conference on Fast Breeder Reactor Fuel, Monterey California USA, March 1979, P.258-267 (1979)
- (D2) W.H.McCarthy, D.R.Jedlovec, S.Vaidyanathan, R.F.Hilbert, "The Influence of Design and Operating Parameters on Mixed-Oxide Fuel Power-to-Melt", in Proceedings of International Conference on Fast Breeder Reactor Fuel, Monterey California USA, March 1979, P.268-278 (1979)
- (D3) 小林善光、篠原正朝、千崎雅生、山口俊弘、櫻原英千世、桂川正巳、
「PE-01 Power-to-melt実験 報告書 (Phase1)」 : PNC ZN941 81-117 (1981)
- (D4) J.L.Ethridge, R.B.Baker, "Thermal Performance of Fresh Mixed-Oxide Fuel in a Fast Flux LMR", in Proceedings of Eighth International Conference on Heat Transfer, San Francisco California USA, August 1986, Vol.5, P.2485-2490 (1986)
- (D5) D.Freund, D.Geithoff, H.Steiner, "Evaluation of the Power-To-Melt Experiments POTOM", Journal of Nuclear Materials, Vol.204, P.228-237 (1993)
- (D6) H.Kleykamp, "Phase Equilibria in the UO_2 - PuO_2 System under a Temperature Gradient", Journal of Nuclear Materials, Vol.294, P.8-12 (2001)
- (D7) 松元慎一郎、河田東海夫、 「高速増殖炉もんじゅ発電所燃料設計検討資料分冊 4 - 補足資料編 -」、PNC ZN243 83-17、1983年10月
- (D8) 池田一生、 「ギャップコンダクタンス評価手法の検討」 :
PNC ZN9410 92-232 (1992)
- (D9) 横山賢治、石川眞、 「モンテカルロコードMVPを用いた「常陽」燃料溶融限界線出力試験の線出力解析」、JNC TN9400 2000-061 (2000)
- (D10) 関根隆、北村了一、青山卓史、 「MCNPによる高速炉用MOX燃料の線出力密度の解析精度向上」、JNC TN9400 2000-071 (2000)
- (D11) 青山卓史、関根隆、逢坂正彦、 「高速炉用MOX燃料の溶融限界線出力密度の高精度評価」、日本原子力学会「2001年春の年会」、K17 (2001)
- (D12) Masaki Inoue, Kazuyuki Abe, Isamu Sato, "A Method for Determining an Effective Porosity Correction Factor for Thermal Conductivity in Fast Reactor Uranium-Plutonium Oxide Fuel Pellets", Journal of Nuclear Materials, Vol.281, P.117-128 (2000)
- (D13) 井上賢紀、浅賀健男、
「高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料の熱伝導特性評価
- 光学顕微鏡組織観察結果を利用した気孔効果の補正方法に関する検討 -」 :
JNC TN9400 99-005 (1998)
- (D14) R.B.Baker, D.R.Wilson, "SIEX3 - a Correlated Computer Code for Prediction of Fast Reactor Mixed-Oxide Fuel and Blanket Pin Performance", in Proceedings of American Nuclear Society International Conference on Reliable Fuels for Liquid Metal Reactors, Tucson Arizona USA, September 7-11 1986, P.5-40~5-50 (1986)

- (D15) T.Nakajima et.al., "FEMAXI-III: a Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods", JAERI-1298 (1985)
- (D16) 軽水炉燃料のふるまい編集委員会、「軽水炉燃料のふるまい」、実務テキストシリーズNo.3、財団法人原子力安全研究協会(1998)
- (D17) 井上賢紀、浅賀健男、「高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料の熱伝導特性評価 - 照射初期用熱伝導度式の作成：その2 -」：
JNC TN9400 98-005 (1998)
- (D18) Masaki Inoue, "Thermal Conductivity of Uranium-Plutonium Oxide Fuel for Fast Reactors", Journal of Nuclear Materials, Vol.282, P.186-195 (2000)
- (D19) 石井徹哉、根本潤一、浅賀健男、「照射初期燃料温度評価手法の検討」：
JNC TN9400 99-055 (1999)
- (D20) M.G.Adamson, E.A.Aitken, R.W.Caputi, "Experimental and Thermodynamic Evaluation of the Melting Behavior of Irradiated Oxide Fuels", Journal of Nuclear Materials, Vol.130, P.349-365 (1985)
- (D21) E.A.Aitken, S.K.Evans, "A Thermodynamic Data Program Involving Plutonia and Urania at High Temperatures" : GEAP-5672 (1969)
- (D22) E.A.Aitken, S.K.Evans, "A Thermodynamic Data Program Involving Plutonia and Urania at High Temperatures" : GEAP-12229 (1971)
- (D23) "Thermal Conductivity of Uranium Dioxide",
Report of the Panel on Thermal Conductivity of Uranium Dioxide held in Vienna, 1965, Technical Reports Series No.59, IAEA, Vienna, (1966)
- (D24) 井上賢紀、鶴飼重治、浅賀健男、「高速炉ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料ピンにおける照射初期燃料ペレットリロケーション挙動の評価」：
JNC TN9400 99-070 (1999)

表D1 EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データと各種設定値

試験名	ピン番号	被覆管外径 製造時	被覆管内径 製造時	ペレット外径 製造時	O/M 製造時	ペレット密度 製造時	Pu富化度 製造時	製造時直径 ギャップ幅	タグガス	線出力** ピーク	気孔効果の 有効補正係数 設定値	燃料中心 温度設定値 試作式 計算値 (付録C参照)	
Test	No.	Pin ID	Cladding Outer Diameter As-Fab mm PinAverage	Cladding Inner Diameter As-Fab mm PinAverage	Pellet Outer Diameter As-Fab mm Lot Mean	O/M As-Fab - Lot Mean	Pellet Density As-Fab %TD Lot Mean	Pu Content As-Fab wt% Lot Mean	As-fab Diametral Gap micrometer Y: 有 N: 無	TagGas	Linear Heat Rate Peak W/cm	Porosity Correction Factor α	degC
P19	1	P19-02	5.85	5.08	4.88	1.962	90.75	24.80	198	N	499	1.9	2724
P19	2	P19-03R	6.36	5.53	5.28	1.966	92.40	24.86	254	N	586	1.9	2725
P19	3	P19-07R	6.36	5.53	5.38	1.966	92.40	24.86	157	N	610	1.9	2725
P19	4	P19-08	5.85	5.08	4.83	1.962	90.75	24.80	244	N	493	1.9	2724
P19	5	P19-13	5.85	5.08	4.88	1.962	90.75	24.80	198	N	499	1.9	2724
P19	6	P19-20	5.85	5.08	4.83	1.962	90.75	24.80	246	N	495	1.9	2724
P19	7	P19-24R	6.36	5.53	5.28	1.966	92.40	24.86	254	N	591	1.9	2725
P19	8	P19-25R	6.35	5.53	5.33	1.966	92.40	24.86	203	N	604	1.9	2725
P19	9	P19-26R	6.35	5.53	5.38	1.966	92.40	24.86	152	N	613	1.9	2725
P19	10	P19-27R	6.36	5.53	5.43	1.966	92.40	24.86	102	N	613	1.9	2725
P19	11	P19-28	6.36	5.54	5.45	1.966	92.40	24.86	86	N	622	1.9	2725
P19	12	P19-30	6.35	5.53	5.36	1.966	92.40	24.86	178	N	601	1.9	2725
P19	13	P19-35	5.84	5.06	4.88	1.962	90.75	24.80	183	N	495	1.9	2724
			Nominal	Nominal	Lot Mean	Lot Mean	Lot Mean	Lot Mean					
P20	1	P20-07	5.84	5.08	4.89	1.960	91.10	24.80	193	N	541	1.9	2723
P20	2	P20-30	5.84	5.08	4.94	1.960	91.00	24.80	140	N	533	1.9	2723
P20	3	P20-39	5.84	5.08	4.89	1.960	91.50	24.77	193	N	541	1.9	2723
P20	4	P20-1921	5.84	5.08	4.89	1.962	90.80	24.80	193	N	537	1.9	2724
P20	5	P20-1934	5.84	5.08	4.90	1.962	90.80	24.80	183	N	541	1.9	2724
			PinAverage	PinAverage	PinAverage	Lot Mean	PinAverage	Lot Mean					
P-E01	1	PE01-F1*	6.505	5.599	5.438	1.99	85.96	29.37	161	Y	482	2.5	2711
P-E01	2	PE01-G1	6.505	5.599	5.375	1.99	86.28	29.37	224	Y	472	2.5	2711
P-E01	3	PE01-H1	6.505	5.599	5.337	1.99	86.86	29.37	262	Y	469	2.5	2711
			Nominal	Nominal	Lot Mean	Lot Mean	Lot Mean	Lot Mean					
DEA-2	1	HD8H21	5.84	5.08	4.89	1.971	93.53	29.34	193	Y	567	2.5	2705
DEA-2	2	HD8L21	5.84	5.08	4.89	1.941	93.66	29.25	193	Y	563	2.5	2696
DEA-2	3	HD1H21	5.84	5.08	4.80	1.967	96.26	29.26	282	Y	563	2.5	2705
DEA-2	4	HD1L21	5.84	5.08	4.80	1.943	96.29	29.26	282	Y	559	2.5	2697
DEA-2	5	HD1L22	5.84	5.08	4.80	1.943	96.29	29.26	279	Y	559	2.5	2697
DEA-2	6	HC1H21	5.84	5.08	4.80	1.971	92.64	29.34	279	Y	547	2.5	2705
DEA-2	7	HC1L22	5.84	5.08	4.79	1.941	93.91	29.25	292	Y	540	2.5	2696
DEA-2	8	HB3L21	5.84	5.08	4.99	1.940	90.69	29.21	91	Y	572	1.9	2696
DEA-2	9	HB5H21	5.84	5.08	4.94	1.969	91.12	29.32	137	Y	565	1.9	2705
DEA-2	10	HB5L21	5.84	5.08	4.94	1.940	90.86	29.15	142	Y	559	1.9	2696
DEA-2	11	HB5L22	5.84	5.08	4.94	1.940	90.86	29.21	142	Y	558	1.9	2696
DEA-2	12	HA3H21	5.84	5.08	4.99	1.975	86.07	29.39	91	Y	551	2.1	2707
DEA-2	13	HA3L21	5.84	5.08	4.99	1.944	86.52	29.39	89	Y	547	2.1	2697
DEA-2	14	HA3L22	5.84	5.08	4.99	1.944	86.52	29.39	89	Y	546	2.1	2697
DEA-2	15	HK1N611	5.84	5.08	4.94	1.959	91.19	26.87	142	Y	489	1.9	2713
DEA-2	16	HK1N746	5.84	5.08	4.93	1.959	91.19	26.87	147	Y	488	1.9	2713
DEA-2	17	HN1A019	5.84	5.08	4.92	1.942	91.59	27.41	165	Y	491	1.9	2705
DEA-2	18	HN1A031	5.84	5.08	4.92	1.942	92.24	27.55	165	Y	494	1.9	2704
DEA-2	19	HN1S495*	5.84	5.08	4.96	1.953	89.61	27.31	119	Y	490	1.9	2709
DEA-2	20	HN1S520*	5.84	5.08	4.96	1.953	89.61	27.31	119	Y	490	1.9	2709
DEA-2	21	HK2E294*	5.84	5.08	4.93	1.965	90.82	22.51	152	Y	421	1.9	2735
DEA-2	22	HK2E305*	5.84	5.08	4.93	1.965	90.82	22.51	152	Y	420	1.9	2735
DEA-2	23	HN2D627*	5.84	5.08	4.91	1.956	92.56	22.64	173	Y	424	1.9	2732
DEA-2	24	HN2D752*	5.84	5.08	4.90	1.956	92.56	22.64	178	Y	420	1.9	2732
DEA-2	25	HN4A002	5.84	5.08	4.93	1.955	90.88	29.54	152	Y	515	1.9	2699
DEA-2	26	HN4A003	5.84	5.08	4.93	1.955	90.88	29.54	152	Y	516	1.9	2699
DEA-2	27	HN4C054	5.84	5.08	4.95	1.950	89.61	29.47	127	Y	513	1.9	2698
DEA-2	28	HN4C164	5.84	5.08	4.95	1.950	89.61	29.47	127	Y	513	1.9	2698
DEA-2	29	HN3U107*	5.84	5.08	4.91	1.951	92.07	25.23	168	Y	456	1.9	2718
DEA-2	30	HN3U296	5.84	5.08	4.92	1.951	92.07	25.23	165	Y	454	1.9	2718

*: NoMelt

** : P19試験とP20試験の線出力はEthridgeによる修正後の値

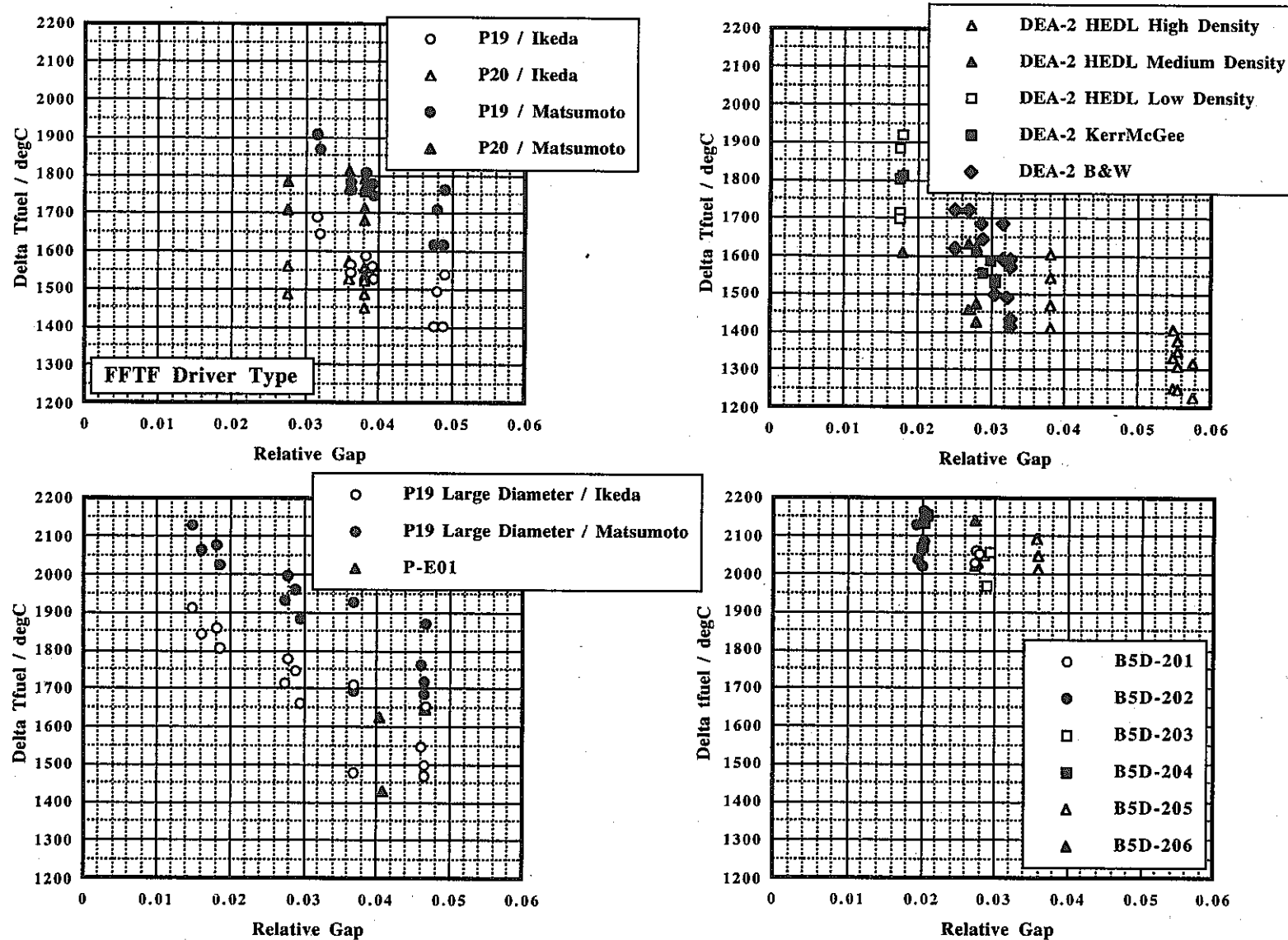
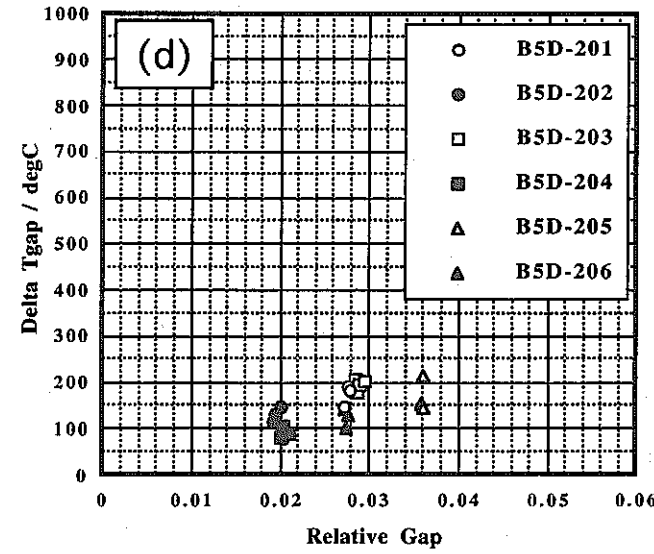
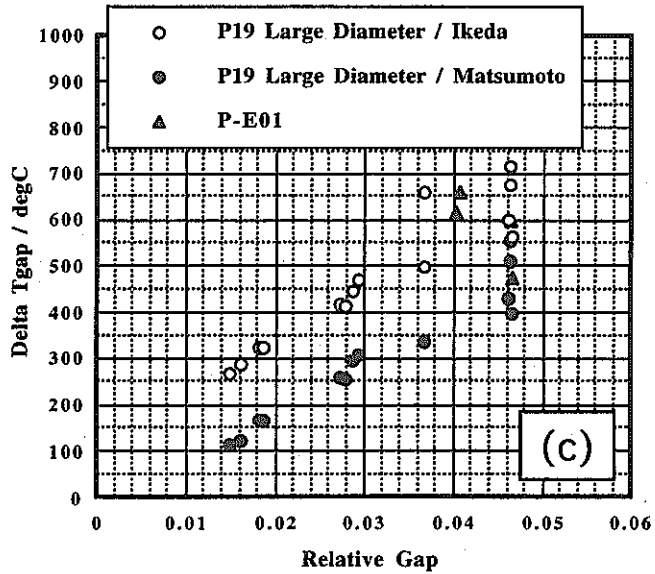
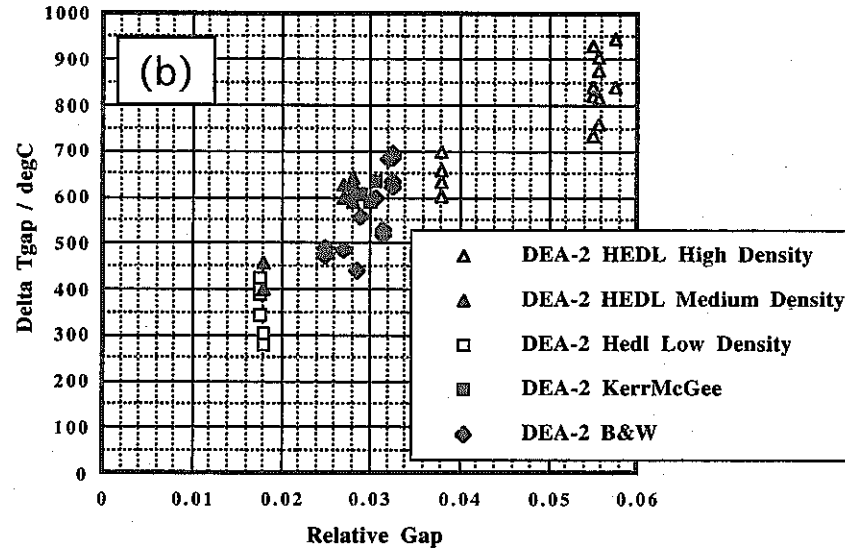
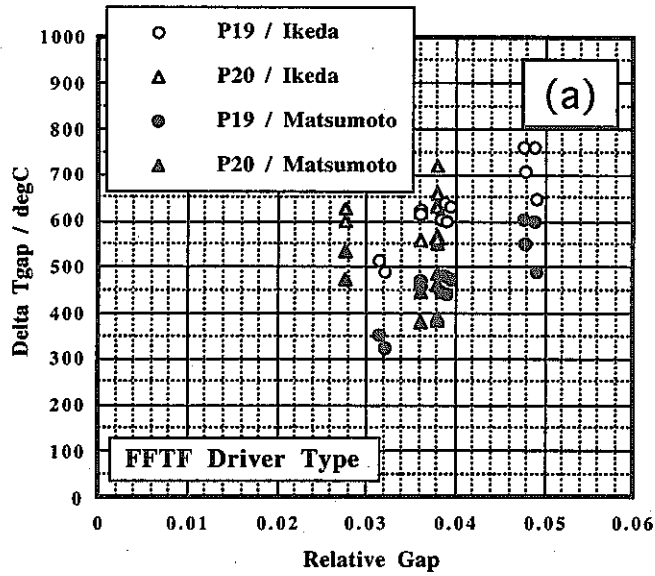


図 D 1 EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データに基づく
 燃料ペレット内温度上昇量計算値
 ((d)は本文図5と同じ：上部側と下部側を一括掲載)



図D 2 EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データに基づく
 ギャップ部温度上昇量計算値
 ((d)は本文図 6 (a)と同じ)

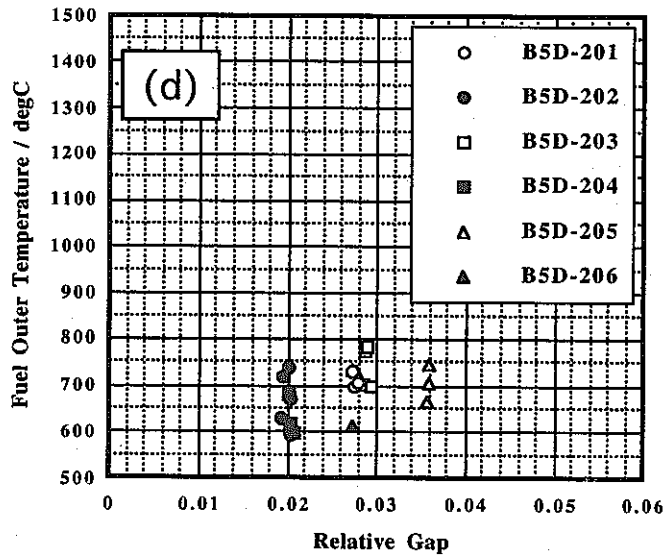
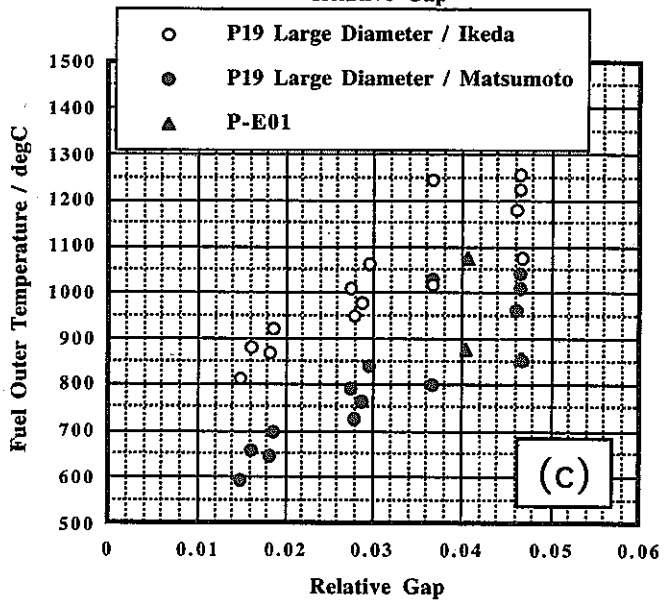
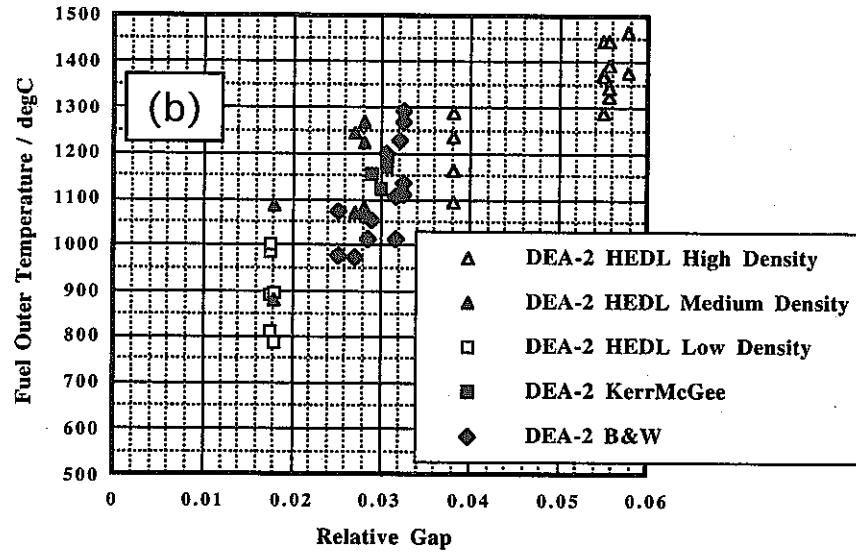
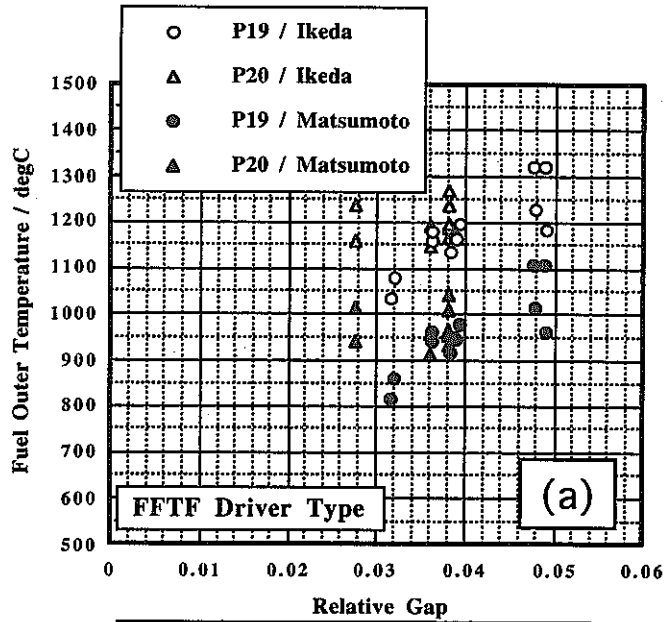
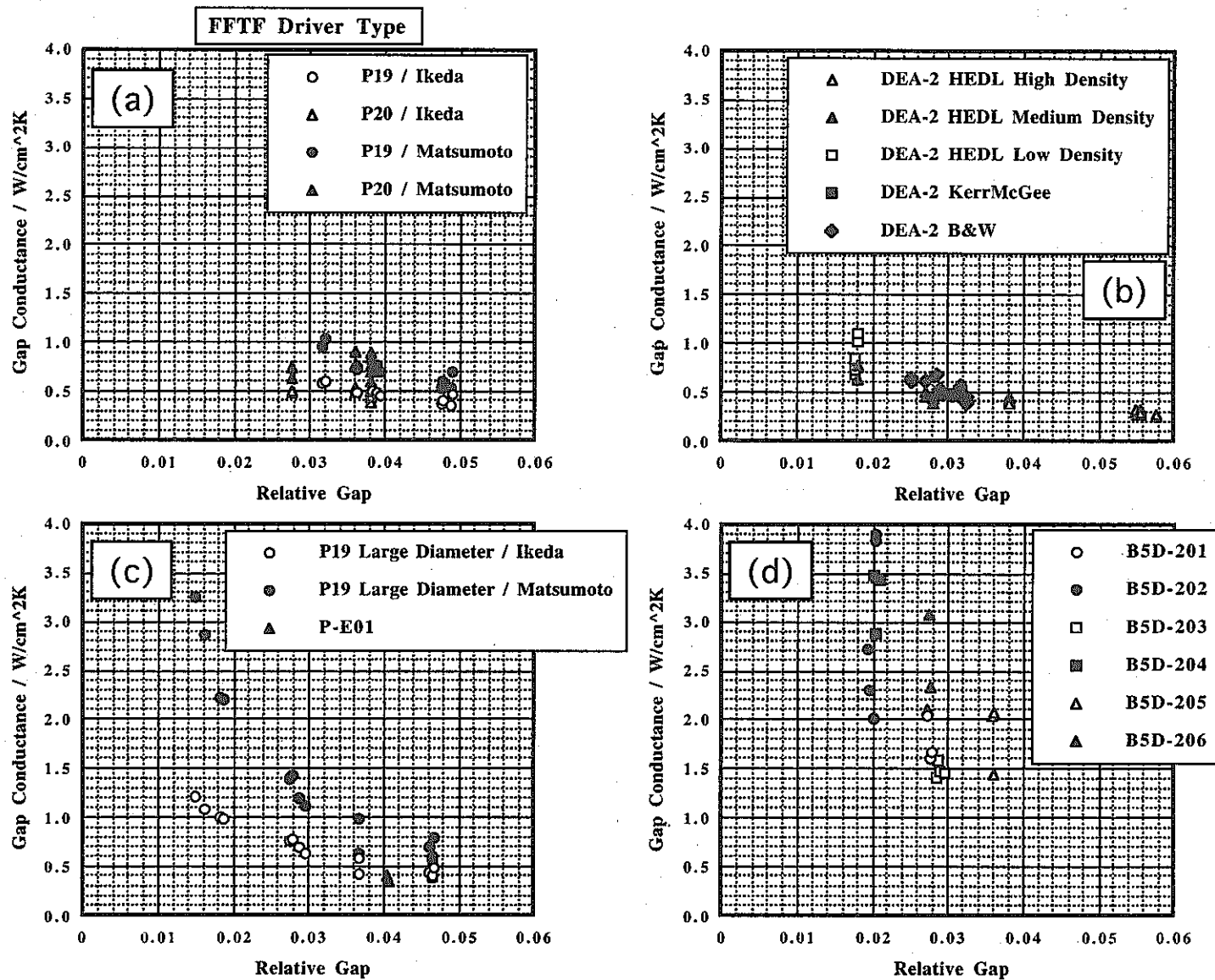


図 D 3 EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データに基づく燃料外面温度計算値



図D 4 EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データに基づく
 ギャップコンダクタンス計算値
 ((d)は本文図6(b)と同じ)

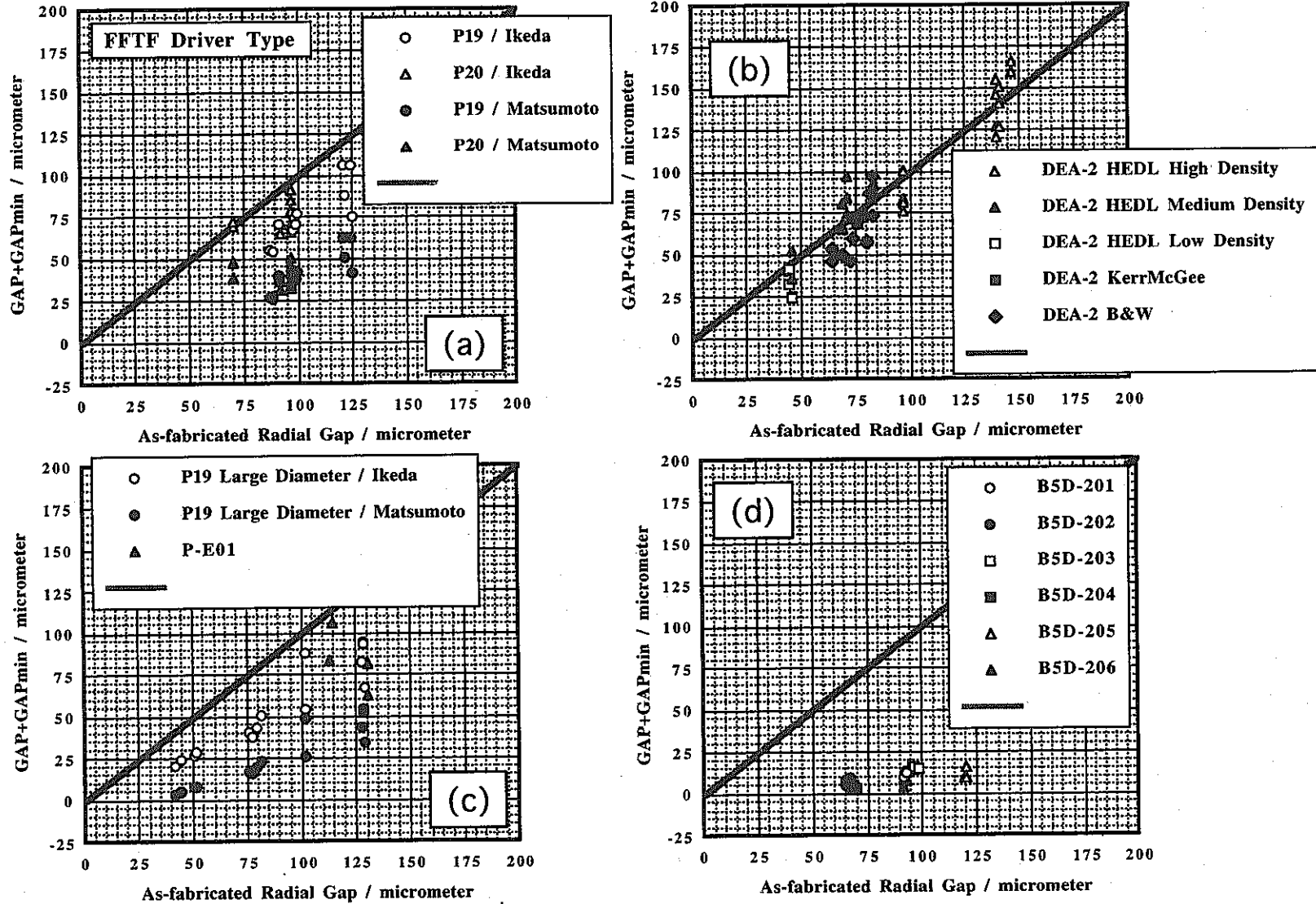


図 D 5 EBR-IIとFFTFにおける燃料溶融限界線出力評価試験データに基づく
 炉内実効ギャップ幅計算値（半径値）
 ((d)は本文図7と同じ)

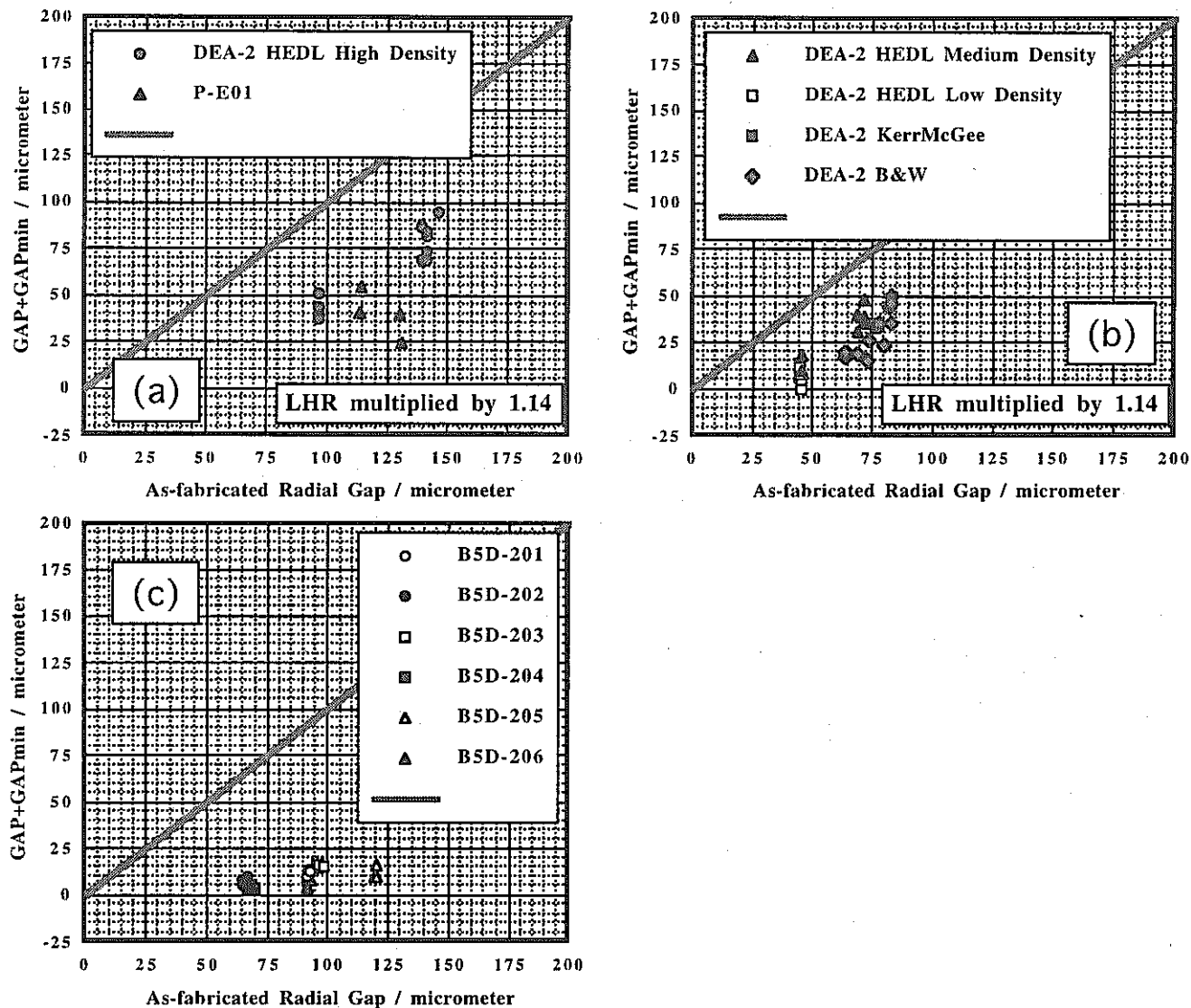


図 D 6 P-E01 試験とDEA-2試験の線出力を1.14倍した場合の
炉内実効ギャップ幅計算値 (半径値)
((c)は本文図 7 と同じ)