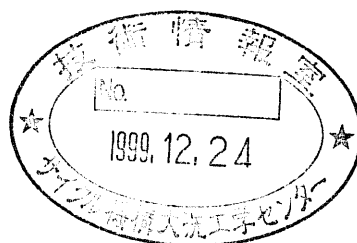


高速炉ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料ピンにおける 照射初期燃料ペレットリロケーション挙動の評価

(研究報告)

1999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
してください。

〒319-1194 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 319-1194,

Japan

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

1999

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
(研究報告書)

井上賢紀*、鵜飼重治*、浅賀健男*

要旨

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燃料ペレットのリロケーション挙動について、燃料ピン製作仕様・照射条件・燃料組織変化の影響を評価した。評価は、燃料ピン内温度評価に最も影響が大きい照射初期（照射開始後数日以内）に限定した。

「常陽」Mk-IIドライバー仕様についてはデータ点数が少なく、単独でのリロケーション挙動の評価は困難であった。また、FFTFドライバー仕様とFFTFドライバー改良（太径）型についてもリロケーション挙動を単独で評価することは困難であった。

「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM（溶融限界線出力評価試験）仕様のリロケーション挙動は酷似しており、リロケーション量は製造時ギャップ幅に支配され、線出力の影響は無視できるほど小さいことがわかった。また、燃料組織変化量の影響も無視できるほど小さい。燃料ペレット中心部で燃料溶融が生じた試料の場合には、あまり明確ではないが燃料溶融がリロケーション挙動に影響を及ぼしていると考えられた。

「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM仕様のデータをもとに作成した相関式を外挿することで、「常陽」Mk-IIドライバー仕様・FFTFドライバー仕様・FFTFドライバー改良型のリロケーション挙動を比較検討した。その結果、「常陽」Mk-IIドライバー仕様のリロケーション挙動は「もんじゅ」仕様とPTM仕様の外挿範囲内にあると考えられた。一方、米国製燃料ピン（FFTFドライバー仕様とFFTFドライバー改良型）のリロケーション挙動は、サイクル機構製燃料ピンの外挿範囲内にあるケースとないケースが混在していた。

* 大洗工学センター システム技術開発部 燃料材料技術開発グループ

Fuel Pellet Relocation Behavior in Fast Reactor Uranium-Plutonium Mixed Oxide Fuel Pin at Beginning-Of-Life

Masaki INOUE*, Shigeharu UKAI*, Takeo ASAGA*

Abstract

The effects of fabrication parameters, irradiation conditions and fuel microstructural feature on fuel pellet relocation behavior in fast reactor fuel pins were investigated. This work focused only on beginning-of-life conditions, when fuel centerline temperature depends largely on the behavior.

Fuel pellet relocation behavior in Joyo Mk-II driver could not be characterized because of the lack of data. And the behavior in FFTF driver and its larger diameter type fuel pins could not be characterized because of the extensive lot-by-lot scatters.

The behavior both in Monju type and in Joyo power-to-melt type fuel pins were similar to each other, and depends largely on the as-fabricated gap width while the effects of linear heat rate and the extent of microstructural evolution were negligible. And fuel pellet centerline melting seems to affect slightly the behavior.

The correlation, which describes the extent of relocation both in Monju type and in Joyo power-to-melt type fuel pins, were newly formulated and extrapolated for Joyo Mk-II driver, FFTF driver and its larger diameter type fuel pins. And the behavior in Joyo Mk-II driver seemed to be similar. On the contrary, the similarity with JNC fuel pins was observed case-by-case in FFTF driver and its larger diameter type fuel pins.

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

< 目 次 >

1.序論	1
1.1 背景	1
1.2 目的と範囲	1
2.評価用データベース	2
3.燃料ピン仕様毎の照射初期リロケーション挙動の評価	3
3.1 予想される影響因子と評価の進め方	3
3.2 「常陽」Mk-IIドライバー仕様	3
3.3 FFTFドライバー仕様	4
3.4 FFTFドライバー改良型	4
3.5 「もんじゅ」仕様	4
3.6 「常陽」PTM仕様	5
3.7 多変量解析による影響因子の分離評価	5
4.複数の燃料ピン仕様を総合したリロケーション挙動評価	8
4.1 異なる燃料ピン径に対する比較検討の必要性	8
4.2 評価モデルの設定と適用	9
4.3 サイクル機構製燃料ピンと米国製燃料ピンによる相違の原因	11
5.まとめと今後の課題	14
5.1 まとめ	14
5.2 今後の課題	14
6.謝辞	15
7.参考資料・参考文献	15

< 表 リ ス ト >

表1	評価用データベース（照射試験概要とデータ取得状況）-----	17
表2	試験燃料ピンの基本仕様-----	18
表3	燃料ペレット製造仕様（概略）-----	19
表4	製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量としたFFTFドライバー仕様 燃料ピンに対する多変量解析結果（P19細径とP20を一括）-----	20
表5	製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量としたFFTFドライバー改良型 燃料ピンに対する多変量解析結果-----	21
表6	製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「もんじゅ」仕様燃料ピンに 対する多変量解析結果：その1-----	22
表7	製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「もんじゅ」仕様燃料ピンに 対する多変量解析結果：その2-----	23
表8	製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「もんじゅ」仕様燃料ピンに 対する多変量解析結果：その3-----	24
表9	製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「もんじゅ」仕様燃料ピンに 対する多変量解析結果：その4-----	25
表10	製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「常陽」PTM仕様燃料ピン に対する多変量解析結果：その1-----	26
表11	製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「常陽」PTM仕様燃料ピン に対する多変量解析結果：その2-----	27
表12	製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「常陽」PTM仕様燃料ピン に対する多変量解析結果：その3-----	28
表13	燃料ペレット外径と線出力との相関による多変量解析結果への影響-----	29
表14	2次元モデルに線出力・柱状晶領域径を追加した多変量解析結果：その1 （B4M Monju,P-E01,B5D-1,B5D-2の組合せ：未溶融かつ柱状晶形成の試料に限定）-----	30
表15	2次元モデルに線出力・柱状晶領域径を追加した多変量解析結果：その2 （B4M Monju,P-E01,B5D-1,B5D-2の組合せ：未溶融かつ柱状晶形成の試料に限定）-----	31
表16	「もんじゅ」仕様とPTM仕様を基準としたリロケーション挙動の外挿性評価 （未溶融かつ柱状晶形成の試料に限定）-----	32

< 図 リ ス ト >

図1	「常陽」Mk-IIドライバー仕様燃料ピンにおける残留ギャップ幅・リロケーション量・製造時ギャップ幅依存性	33
図2	「常陽」Mk-IIドライバー仕様燃料ピンにおけるリロケーション量の線出力への依存性	34
図3	FFTFドライバー仕様燃料ピンにおける残留ギャップ幅・リロケーション量・製造時ギャップ幅：その1	35
図4	FFTFドライバー仕様燃料ピンにおける残留ギャップ幅・リロケーション量・製造時ギャップ幅：その2	36
図5	FFTFドライバー仕様燃料ピンにおけるリロケーション量のO/M比と相対密度への依存性	37
図6	FFTFドライバー仕様燃料ピンにおけるリロケーション量の線出力への依存性	38
図7	FFTFドライバー仕様燃料ピンにおけるリロケーション量と中心空孔半径との相関	39
図8	FFTFドライバー仕様燃料ピンにおけるリロケーション量と柱状晶領域半径との相関	40
図9	FFTFドライバー改良型燃料ピンと「もんじゅ」仕様燃料ピンにおける残留ギャップ幅・リロケーション量・製造時ギャップ幅	41
図10	FFTFドライバー改良型燃料ピンと「もんじゅ」仕様燃料ピンにおけるリロケーション量の線出力への依存性	42
図11	FFTFドライバー改良型燃料ピンと「もんじゅ」仕様燃料ピンにおけるリロケーション量の中心空孔半径と柱状晶領域半径との相関	43
図12	「常陽」PTM仕様燃料ピンにおける製造時ギャップ幅と残留ギャップ幅との関係	44
図13	「常陽」PTM仕様燃料ピンにおけるリロケーション量の製造時ギャップ幅依存性	45
図14	「常陽」PTM仕様燃料ピンにおけるリロケーション量の相対密度への依存性	46
図15	「常陽」PTM仕様燃料ピンにおけるリロケーション量の線出力依存性	47
図16	「常陽」PTM仕様燃料ピンにおけるリロケーション量と中心空孔半径との相関	48
図17	「常陽」PTM仕様燃料ピンにおけるリロケーション量と柱状晶領域半径との相関	49
図18	P19・P20で照射されたFFTFドライバー仕様燃料ピンに対するデータ取得条件	50
図19	FFTFドライバー改良型燃料ピンと「もんじゅ」仕様燃料ピンに対するデータ取得条件	51
図20	「常陽」PTM仕様燃料ピンに対するデータ取得条件	52
図21	リロケーション量に対する燃料ピン径の効果	53
図22	「もんじゅ」仕様燃料ピンと「常陽」PTM仕様燃料ピンに対するデータ取得条件	54
図23	1次元モデルによる異なる燃料ピン径間のリロケーション挙動の検討	55
図24	2次元モデルによる異なる燃料ピン径間のリロケーション挙動の検討	56
図25	2次元モデル式による計算値と実験値との比較	57
図26	作成した2次元モデル式の外挿性の検討：その1	58
図27	作成した2次元モデル式の外挿性の検討：その2	59
図28	2次元モデル式計算値からの偏差と製造時ギャップ幅との関係	60
図29	2次元モデル式計算値からの偏差と製造時燃料ペレット相対密度との関係	61
図30	2次元モデル式計算値からの偏差と線出力との関係	62
図31	各照射試験の出力履歴	63
図32	軽水炉燃料棒伸びに及ぼす燃料ペレット形状の効果	64
図33	「常陽」PTM仕様燃料ピンの縦断面金相観察例	65
図34	FFTFドライバー仕様燃料ピンの縦断面金相観察例	66
図35	柱状晶領域径／被覆管内径比（Rcg/Rci）を指標にしたデータ取得状況の整理	67
図36	残留ギャップ幅測定試料の中間保持出力時・最大出力時の線出力と熔融限界線出力データとの比較	68

1. 序論

1.1 背景

(1) 燃料ペレットリロケーション挙動

高速炉のウラン-プルトニウム混合酸化物燃料ピン (MOX燃料ピン) の燃料ペレットは照射によって割れ、径方向・周方向に移動するとともに、焼きしまり、クリープ変形等も発生して、被覆管とのギャップ幅は製造時の値から変化する。照射後に観察される残留ギャップ幅は、特別な場合を除き、製造時ギャップ幅とは一致しないのが普通である。なお、製造時ギャップ幅と残留ギャップ幅との差は前述のような複数の現象が重複した結果であるが、今回の評価では総称して「リロケーション」と呼ぶ。

ギャップ幅の変化は、熱伝達、燃料ペレットと被覆管との接触等の熱的・機械的挙動に影響を与えるため、リロケーション挙動を解明・把握することは重要な研究課題である⁽¹⁾。軽水炉燃料のリロケーション挙動については多くの定式化例⁽²⁻⁷⁾があり、最近では「燃料組織や燃焼度には依存せず、主に照射初期に発生する」ことで研究者間の理解がほぼ一致している⁽⁸⁾。高速炉燃料のリロケーション挙動については、軽水炉燃料と同様に照射初期における発生量が大きいと推定される。しかし、実際のリロケーション挙動について、燃焼度依存性に着目した報告はあるが、照射開始直後(数日以内)に関する報告例はみあたらない。

(2) 燃料ピン内温度評価手法との関係

リロケーションはギャップ幅を縮小する方向に発生する傾向があるため、ギャップ部熱伝達を改善する効果があり、ギャップ熱伝達挙動に対する最も重要な影響因子の一つである。

燃料ピン内温度を予測解析する場合は、残留ギャップ幅をもとにリロケーション挙動をモデル化し、ギャップコンダクタンスを解析的に算出するのが一般的である⁽⁹⁾。また、ギャップコンダクタンスを実験的に評価する場合、熔融限界線出力評価試験結果と計測線付照射試験結果を使用するのが一般的であるが、得られる実験的評価値にはリロケーション挙動の効果が含まれているため、リロケーション挙動に関する知見が必要になる。

以上のように、燃料ピン内温度評価を行う場合、リロケーション挙動を定量的に把握し、評価に適切に組み入れることが必要である。

1.2 目的と範囲

(1) リロケーション挙動の評価

高速炉MOX燃料ピンにおけるリロケーション挙動を実験データに基づき解明する。具体的には、リロケーション挙動に及ぼす影響因子(燃料ピン製作仕様、照射条件、燃料組織変化等)の効果を定量的に評価する。

(2) 評価の範囲

「常陽」と「もんじゅ」の炉心燃料の熱設計評価においては、燃料最高温度条件が最も厳しくなる照射初期段階の評価が重要であり、今回の評価は照射初期段階(照射開始後数日以内)に限定して行う。

2. 評価用データベース

(1) 「常陽」における照射試験データ

「常陽」照射試験⁽¹⁰⁾のうちの溶融限界線出力評価試験：B5D-1・B5D-2、短期間照射試験：B4M・F3Bの計4試験を採用する。なお、短期間照射試験：B0Jは照射日数が28EFPDと長い、「常陽」Mk-IIドライバー仕様の照射初期段階のデータ点数が極端に少ないため、参考値扱いで利用する。照射試験概要を表1に、燃料ピン基本仕様を表2にまとめて示す。なお、試験燃料ピンは全てサイクル機構製である。

B0J・F3B⁽¹¹⁾は「常陽」Mk-IIドライバー仕様、B4Mは「常陽」Mk-IIドライバー仕様と「もんじゅ」仕様の試験燃料ピンに対する照射試験である。B5D-1とB5D-2で照射された試験燃料ピンは、大型炉を想定した太径仕様（以後、PTM仕様と称する）である。燃料ペレット仕様が主要な試験パラメータであるため、表3のように燃料密度、製造時ギャップ幅、OM比、Pu富化度の異なる複数ロットが製造されている。

B4M・B5D-1・B5D-2の照射条件にはMCNPコード解析値を採用する。ただし、B0JとF3Bについては、現時点で利用可能な「照射情報システム」のデータを採用する。

照射後試験データは、F3Bは門藤⁽¹²⁾、B4Mは吽野⁽¹³⁾、B5D-1・B5D-2は山本⁽¹⁴⁾の報告データを利用する。なお、「常陽」照射試験燃料ピンに対して測定される残留ギャップ幅は「照射後の横断面写真における被覆管内面と燃料ペレット外面の平均距離」として定義される値であり、被覆管内面と燃料ペレット外面を含む高倍率（400倍）の光学顕微鏡写真を対象に測定されている。

(2) 海外炉における照射試験データ

EBR-IIとFFTFにおける溶融限界線出力評価試験：P19⁽¹⁵⁾・P20⁽¹⁵⁾・P-E01・DEA-2⁽¹⁶⁾の計4試験を採用する。P19・P20・DEA-2で照射された燃料ピンは米国製であり、燃料ペレットはHEDL・KerrMcGee・Babcock&Wilcox/Nuclear Materials Division（B&W）の3機関で製造された。P-E01の試験燃料ピンは組み立ては米国で行われたが、燃料ペレットと被覆管はサイクル機構が製造しており、サイクル機構製に分類できる。照射試験の概要を表1に、燃料ピン基本仕様を表2にまとめて示す。

P19の試験燃料ピンには、FFTFドライバー仕様（P19細径）とFFTFドライバー改良型（P19太径）の2種類が含まれる。FFTFドライバー改良型はFFTFドライバー仕様を太径化したもので、被覆管内径は「もんじゅ」仕様に近い5.54mmである。P20とDEA-2の試験燃料ピンはFFTFドライバー仕様である。P-E01は「もんじゅ」仕様であるが、被覆管内径が5.60mmと現行仕様（5.56mm）に比較してわずかに大きい。「常陽」照射試験と同様に表3に示すような複数ロットの燃料ペレットが製造されている。

P-E01の残留ギャップ幅データには、観察倍率250倍の光学顕微鏡写真を対象に測定したデータを用いる（(1)で述べた「常陽」照射試験の場合と同じ測定方法）。

P19・P20・DEA-2の3試験については、FFTFドライバー燃料の照射挙動に関するHalse⁽¹⁷⁾と照射挙動解析コード開発に関するBaker⁽⁹⁾の報告を総合すると、「照射後の横断面写真（観察倍率は75倍）における被覆管内面と燃料ペレット外面の平均距離」と定義されていると判断できる。つまり、P19・P20・DEA-2の3試験のデータは、サイクル機構による測定データと定義は同じであり、直接の相互比較が可能である。

3. 燃料ピン仕様毎の照射初期リロケーション挙動の評価

3.1 予想される影響因子と評価の進め方

(1) 予想される影響因子

リロケーション現象は、狭義には、起動時の熱応力によって割れた燃料ペレット片が周方向・径方向に移動する現象を指す。周方向と径方向の移動量は燃料ピン内の自由空間の大きさに依存し、製造時ギャップ幅と被覆管内径が主要な影響因子になると考えられる。また、燃料ペレットの割れは破壊特性と関係があるため、製造仕様（OM比、相対密度、基本形状）と製造プロセスにも影響されると考えられる。

リロケーション現象は燃料温度とも関連すると予想され、燃料ペレット片同士の固着（ヒーリング）、クリープ変形（被覆管との機械的相互作用・自己拘束・軸方向拘束に起因）、焼きしまり、焼き膨れ等が影響因子として考えられる。また、燃料ペレットの割れの原因となる熱応力とも密接な関係がある。燃料温度に関連した現象を残留ギャップ幅測定値をもとに定量評価することは困難であるが、線出力と燃料組織変化量（中心空孔径と柱状晶領域径）を指標に評価が可能と考えられる。

燃料中心部が溶融した領域のリロケーション挙動には、溶融による体積変化効果、ガスボトル効果等の未溶融試料とは異なる影響因子が含まれる可能性が考えられる。

(2) 評価の進め方

続く3.2～3.6では、(1)で抽出した影響因子をパラメータとし、燃料ピン仕様毎（「常陽」Mk-IIドライバー仕様、FFTFドライバー仕様、FFTFドライバー改良型、「もんじゅ」仕様、PTM仕様）にリロケーション挙動を把握するとともに、影響因子の絞り込みを行う。なお、燃料ピン仕様毎の評価では、燃料ペレットの基本形状と製造プロセス（DEA-2を除く）は同じなので、とりあえずは考慮すべき影響因子から除外することができる。3.7では絞り込まれた影響因子をもとに多変量解析を行い、影響因子の効果の大小を把握するとともに、異なる燃料ピン仕様間の挙動の相違を検討する。

3.2 「常陽」Mk-IIドライバー仕様（B4M・F3B・B0J）

(1) 製造時ギャップ幅・OM比・相対密度への依存性（図1）

B4MとF3Bはデータ点数が合計で5点と少なく、リロケーション量の製造時ギャップ幅への依存性は検討できない。なお、B0Jのリロケーション量には製造時ギャップ幅への依存性が認められるが、照射期間が27.8EFPDと長く、参考データ扱いである。

B4MとF3BはOM比（1.97）が等しく、相対密度も近い（93～95%TD）ため、リロケーション量に及ぼすOM比と相対密度の影響は検討できない。

(2) 線出力への依存性（図2）

B4MとF3Bはデータ点数が少なく、参考データ扱いのB0Jを加えても、線出力依存性はないように見える。

(3) 燃料組織変化量への依存性と溶融効果

F3BとB4Mでは中心空孔と柱状晶の形成がなく、リロケーション量の燃料組織変化量への依存性は検討できない。

B4MとF3Bは全て未溶融試料であるため、溶融の効果は比較検討できない。

3.3 FFTFドライバー仕様 (P19細径・P20・DEA-2)

(1) 製造時ギャップ幅・OM比・相対密度への依存性 (図3・図4)

P19細径とP20 (全て溶融試料) は個々に見た場合の依存性は明確ではないが、一括して比較すると、製造時ギャップ幅が大きいほどリロケーション量も大きくなる傾向を示す。一方、DEA-2では燃料ペレットロット毎に製造時ギャップ幅の範囲が固まっている影響が大きく、製造時ギャップ幅への依存性は明確ではない。

Ethridgeは製造時ギャップ幅が $140\mu\text{m}$ 未満の場合は燃料ペレットと被覆管が接触していた可能性を指摘している⁽¹⁵⁾。特に、製造時ギャップ幅が $100\mu\text{m}$ 未満のHEDL製低密度仕様のデータ点がマイナス値を示す現象は燃料ペレットと被覆管との機械的相互作用に起因している可能性がある。ただし、P20のうちのマイナス値のデータ点 (1点:P20-1934) は、残留ギャップ幅測定値が直径値と半径値を取り違えて報告されていたためと推定される。

DEA-2で使用された燃料ペレットは広範囲のOM比と相対密度に製造されているが、図5からはリロケーション量に及ぼすOM比・相対密度の影響は識別できない。

(2) 線出力への依存性 (図6)

P19細径には線出力依存性はないように見える。P20はデータ点の線出力範囲が狭くかつデータ点数も少ないため、線出力依存性は識別できない。

DEA-2の線出力依存性については、HEDL製にはないように見えるが、KerrMcGee製とB&W製の一部にわずかにあるようにも見える。

(3) 燃料組織変化量への依存性 (図7・図8) と溶融の効果

全体として、燃料組織変化量への依存性は識別できない。

溶融の効果については、DEA-2HEDL製高密度仕様において明瞭に認められ、未溶融試料よりも若干大きくなっている (図4(c)(d))。

3.4 FFTFドライバー改良型 (P19太径)

(1) 製造時ギャップ幅・OM比・相対密度への依存性 (図9)

P19太径 (全て溶融試料) では、製造時ギャップ幅が大きいほどリロケーション量も大きくなる傾向を示す。なお、燃料ペレットロットが同一であるため、リロケーション量に及ぼすOM比と相対密度の影響は考察できない。

(2) 線出力への依存性 (図10)

P19太径はデータ点の線出力範囲が狭すぎるため、線出力依存性は識別できない。

(3) 燃料組織変化量への依存性 (図11) と溶融効果

P19太径では中心空孔半径への依存性は認められないが、柱状晶領域半径が大きくなるほどリロケーション量も大きくなる傾向があるようにも見える。

P19太径は全て溶融試料であるため、溶融の効果は比較検討できない。

3.5 「もんじゅ」仕様 (B4M・P-E01)

(1) 製造時ギャップ幅・OM比・相対密度への依存性 (図9)

B4M・P-E01では、製造時ギャップ幅が大きいほどリロケーション量も大きくなる

傾向を示す。B4M (1.95-1.96)とP-E01 (1.99) はO/M比レベルが異なるが、リロケーション量に及ぼすO/M比の影響はないように見える。

(2) 線出力への依存性 (図 1 0)

B4M・P-E01では、照射試験で区別した図 1 0(a)をみると線出力依存性があるように見えるが、図 1 0(b)のように、製造時ギャップ幅依存性がデータ取得条件の関係で見かけ上現われた現象と考えられ、多変量解析による分離評価が必要である。

(3) 燃料組織変化量への依存性 (図 1 1) と溶融効果

図 1 1 からは見かけ上は中心空孔半径・柱状晶領域半径が大きくなるほどリロケーション量も大きくなる傾向を示すが、線出力依存性と同様に、製造時ギャップ幅依存性がデータ取得条件の関係で見かけ上現われた現象と考えられ、多変量解析による分離評価が必要である。また、中心空孔と柱状晶領域が形成された試料では例外なく正のリロケーション量 (ギャップ幅の縮小) が生じている。

P-E01には 2 点の溶融試料のデータが含まれるが、未溶融試料のばらつきの範囲内に収まっている。B4Mは全て未溶融試料であり、溶融の効果は比較検討できない。

3.6 PTM仕様 (B5D-1・B5D-2)

(1) 製造時ギャップ幅・O/M比・相対密度への依存性 (図 1 2 ~ 図 1 4)

B5D-1とB5D-2では、「もんじゅ」仕様と同様、製造時ギャップ幅が大きいほどリロケーション量も大きくなる傾向を示す。O/M比は1.96~1.98の範囲にあるが、リロケーション量に及ぼすO/M比の影響は認められない。また、図 1 4 に示すように、リロケーション量に及ぼす相対密度の影響は認められない。

(2) 線出力への依存性 (図 1 5)

B5D-1とB5D-2の中密度燃料ペレットでは線出力依存性はないように見える。一方、高密度燃料ペレットについてはB5D-205のみに着目すると線出力依存性があるように見えるが、B5D-203とB5D-206には線出力依存性はないように見える。

(3) 燃料組織変化量への依存性と溶融効果

図 1 6 と図 1 7 は、「もんじゅ」仕様の場合と同様に、燃料組織変化量との関係を製造時ギャップ幅レベルで区別している。図 1 6 と図 1 7 に認められるリロケーション量の燃料組織変化量への依存性は、製造時ギャップ幅依存性とデータ取得条件の関係で見かけ上現われていると考えられ、多変量解析による分離評価が必要である。また、中心空孔と柱状晶が形成された試料では例外なくギャップ幅の縮小が生じている。

溶融試料と未溶融試料のデータがほぼ同数含まれるが、各々のばらつきの範囲内に収まっている。

3.7 多変量解析による影響因子の分離評価

(1) 絞り込まれた影響因子と多変量解析の必要性

3.2~3.6で述べたように、リロケーション挙動への主要な影響因子として製造時ギャップ幅、線出力、燃料組織変化量 (中心空孔径・柱状晶領域径)、溶融の 4 種類が認められる。3.2~3.6の範囲では、O/M比と相対密度の影響は判別できなかった。

実際には4種類全てが有意な効果を示すわけではなく、データ取得条件に起因した見かけ上の現象（例えば、3.5(2)、3.6(3)）が存在するケース、データ点数が少ないために効果の有無が結論できないケース（例えば、3.6(2)）、特定の燃料ピン仕様で顕著な影響が認められるケース（3.3(3)）等があり、リロケーション量に及ぼす影響因子の効果を定量的に検討するためには、多変量解析を行って分離評価を行う必要がある。

(2) 多変量解析方法

リロケーション量を目的変数、製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径（中心空孔径は溶融燃料の軸方向移動の影響を受けているデータ点が多いため不適切である）の3つを説明変数とし、(3-1)～(3-4)の4式を設定する。また、標準偏回帰係数と偏回帰係数のF分布検定値を算出する。なお、F分布検定値の有意水準としては $\alpha=0.05$ を設定する（F分布検定値が3以下の場合、その説明変数の影響は無視できることを意味する）。

$$\text{Case-1} \quad \Delta G = b_0 + b_1 G_0 \quad (3-1)$$

$$\text{Case-2} \quad \Delta G = b_0 + b_1 G_0 + b_3 Q \quad (3-2)$$

$$\text{Case-3} \quad \Delta G = b_0 + b_1 G_0 + b_4 R_{cg} \quad (3-3)$$

$$\text{Case-4} \quad \Delta G = b_0 + b_1 G_0 + b_3 Q + b_4 R_{cg} \quad (3-4)$$

ここで、 ΔG 、 G_0 、 Q 、 R_{cg} 、 b_0 、 b_1 、 b_3 、 b_4 はそれぞれ下記のとおりである。

ΔG :	リロケーション量（目的変数）
G_0 :	製造時ギャップ幅（説明変数）
Q :	線出力（説明変数）
R_{cg} :	柱状晶領域径（説明変数）
b_0 :	定数
b_1, b_3, b_4 :	偏回帰係数

(3) 「常陽」Mk-IIドライバー仕様に対する多変量解析結果

B4MとF3Bについては、データ点数が少な過ぎるため、多変量解析を行っても3.2で述べた以上の検討は行えない。つまり、「常陽」Mk-IIドライバー仕様はデータ点が少な過ぎ、単独でのリロケーション挙動の把握は困難である。

(4) FFTFドライバー仕様に対する多変量解析結果

P19細径、P20、DEA-2HEDL製高密度仕様、DEA-2HEDL製中密度仕様、DEA-2HEDL製低密度仕様、DEA-2KerrMcGee製、DEA-2B&W製に対してそれぞれ多変量解析を試みたが、有意な結果は得られず、3.3の(1)～(3)で述べた以上の評価結果は得られない。つまり、FFTFドライバー仕様の単独でのリロケーション挙動の把握は困難である。

ちなみに、P19細径とP20を一括すると、Case-2式とCase-3式は、リロケーション量は製造時ギャップ幅と線出力に依存し、柱状晶領域半径との相関は無視できる結果になる（表4）。Case-4式はリロケーション量は製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域半径に依存する結果になるが、データ取得範囲（図18）をみると、製造時ギャップ幅と線出力あるいは柱状晶領域半径との間に相関が認められ、P19細径とP20のデータ点同士を比較した場合、線出力と柱状晶領域半径の影響は小さいと考えられる。

(5) FFTFドライバー改良型に対する多変量解析結果

多変量解析結果は、FFTFドライバー仕様でP19細径とP20を一括した場合と似ている。Case-2式とCase-3式はリロケーション量は製造時ギャップ幅のみに依存して線出力と柱状晶領域半径との相関は無視できる結果になり、Case-4式はリロケーション量は製造時ギャップ幅と柱状晶領域半径に依存する結果になる。図19に示すデータ取得範囲に着目すると、製造時ギャップ幅と線出力あるいは柱状晶領域半径との間に相関が認められる。さらに、線出力が負の効果を持つメカニズムは考えにくく、P19太径のデータ点同士を比較した場合、線出力と柱状晶領域半径の影響は小さいと考えられる。

(6) 「もんじゅ」仕様に対する多変量解析結果

B4M MonjuとP-E01に対してそれぞれ多変量解析を行うと、表6と表7に示すような結果が得られる。いずれもリロケーション量は製造時ギャップ幅のみに依存性を示し、線出力と柱状晶領域径との相関は無視できることがわかる。また、柱状晶が形成した試料に限定すると自由度補正済決定係数と予測誤差が良好な値を示す傾向がある。溶融の効果については、P-E01の未溶融試料に限定して多変量解析を行うと、自由度補正済決定係数と予測誤差は良好な値を示す傾向がある。

B4M MonjuとP-E01を一括して多変量解析を行った結果（表8・表9）も同様であり、リロケーション量は製造時ギャップ幅のみに依存し、線出力と柱状晶領域径との相関は無視できる。また、柱状晶が形成した試料と未溶融試料に限定した方が自由度補正済決定係数と予測誤差が良好な値を示す傾向がある。

以上のように、「もんじゅ」仕様のリロケーション挙動は製造時ギャップ幅に支配されており、線出力の影響は無視できるほど小さい。ただし、燃料組織変化量の影響は無視できるほど小さいが、柱状晶形成と溶融の有無は、定量的には明確ではないが、リロケーション挙動と定性的には関係があると考えられる。

(7) 「常陽」PTM仕様に対する多変量解析結果

未溶融試料と溶融試料に対してそれぞれ多変量解析を行うと、表10と表11に示すような結果が得られる。未溶融試料の場合、リロケーション量は製造時ギャップ幅のみに依存性し、線出力と柱状晶領域径との相関は無視できることがわかる。溶融試料の場合は柱状晶領域径との相関は無視できるが、Case-2式の場合に線出力依存性が認められる。溶融試料のCase-4式の場合に線出力依存性が消失しているのは、図20に示すように溶融試料は未溶融試料よりも製造時ギャップ幅と線出力あるいは柱状晶領域径との相関がより明確になっているためと考えられる。

また、未溶融試料と溶融試料を一括して多変量解析を行った場合、表12に示すように、リロケーション量は製造時ギャップ幅のみに依存性し、線出力と柱状晶領域径との相関は無視できる結果になり、溶融試料に認められる線出力の効果は実際には小さいと考えられる。

以上のように、「常陽」PTM仕様のリロケーション挙動は製造時ギャップ幅に支配されており、線出力と燃料組織変化量の影響は無視できるほど小さい。また、「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM仕様のリロケーション挙動は酷似していると言える。

4.複数の燃料ピン仕様を総合したリロケーション挙動評価

4.1 異なる燃料ピン径に対する比較検討の必要性

(1) 検討課題

F3B・B4M・P-E01・B5D-1・B5D-2・P19・P20・DEA-2の全てのデータについて、リロケーション量を製造時ギャップ幅に対してプロットした結果を図21に示す。図21のように、全体的な傾向として、リロケーション量は製造時ギャップ幅だけでなく、燃料ピン径にも依存している。具体的には、「もんじゅ」仕様はPTM仕様のよりも小さく、「常陽」Mk-IIドライバー仕様は「もんじゅ」仕様よりも小さい傾向があり、米国製燃料ピン（FFTFドライバー仕様とFFTFドライバー改良型）とサイクル機構製燃料ピン（「もんじゅ」仕様とPTM仕様）の傾向は大きく異なっている。

また、「常陽」Mk-IIドライバー仕様についてはデータ点数が少なく、リロケーション挙動の評価は困難であった。さらに、FFTFドライバー仕様とFFTFドライバー改良型についてもリロケーション挙動を単独で評価することは困難であった。

そこで、「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM仕様のリロケーション挙動が酷似していることが明らかにできたので、「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM仕様のデータをもとに製造時ギャップ幅と燃料ピン径効果を合わせた関係式を作成し、得られた関係式を外挿して「常陽」Mk-IIドライバー仕様・FFTFドライバー仕様・FFTFドライバー改良型のリロケーション挙動を比較検討する。

(2) 評価モデル設定の必要性

異なる燃料ピン径のリロケーション挙動を評価する場合、3章と同様、多変量解析を行う方法が有効と考えられる。また、燃料ピン径が異なると、データ取得範囲（線出力レベル・燃料組織変化量レベル）が異なるため、あらためて影響因子の効果を検討しておくことが望ましい。具体的には、リロケーション量を目的変量とし、製造時ギャップ幅・燃料ペレット径・線出力・柱状晶領域径の4つを説明変量とする(4-1)式がまず考えられる。

$$\Delta G = b_0 + b_1 G_0 + b_2 R_{fo} + b_3 Q + b_4 R_{cg} \quad (4-1)$$

ここで、 ΔG 、 G_0 、 R_{fo} 、 Q 、 R_{cg} 、 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 はそれぞれ下記のとおりである。

ΔG :	リロケーション量 (目的変量)
G_0 :	製造時ギャップ幅 (説明変量)
R_{fo} :	燃料ペレット径 (説明変量)
Q :	線出力 (説明変量)
R_{cg} :	柱状晶領域径 (説明変量)
b_0 :	定数
b_1, b_2, b_3, b_4 :	偏回帰係数

図22はデータ取得範囲（説明変量間の相関）をみたものであり、燃料ペレット径と線出力との間に強い相関が認められる。(4-1)式を簡略化した(4-2)式と(4-3)式を設定し、B4M Monju、P-E01、PTM (B5D-1+B5D-2)の組合せ (A~D set) をパラメータにした多変量解析を行うと表13のような結果が得られる。

$$\Delta G = b_0 + b_1 G_0 + b_2 R_{fo} \quad (4-2)$$

$$\Delta G = b_0 + b_1 G_0 + b_3 Q \quad (4-3)$$

表13に示すように、製造時ギャップ幅の偏回帰係数とそれぞれのF分布検定値は同等であり、リロケーション量の燃料ペレット外径と線出力への依存性が同時に現れてしまう（分離できない）ことがわかる。つまり、今回採用する評価用データベースでは、製造時ギャップ幅・燃料ペレット径・線出力を並列して多変量解析を行うと、データ点の取得範囲の相関が多変量解析結果に影響してしまう。したがって、多変量解析を行う場合は、製造時ギャップ幅と燃料ペレット外径の効果を一括できる評価モデルを利用する必要がある。

4.2 評価モデルの設定と適用

(1) 1次元モデルと2次元モデル

現時点ではリロケーション挙動に関するメカニズムの解明が十分でなく、製造時ギャップ幅と燃料ペレット外径の効果を規格化する現象論的評価モデルを設定する。

リロケーション現象は主に燃料ペレット片の径方向と周方向への移動に起因することから、リロケーション量が製造時ギャップ幅の大きさに依存する1次元モデル（径方向移動）、リロケーション量が燃料と被覆管とのギャップ空間の大きさに依存する2次元モデル（径方向+周方向）の2種類が考えられる。1次元モデルと2次元モデルともにリロケーション量との間に一次関係式が成立すると仮定し、リロケーション量： ΔG 、被覆管内径： R_{ci} 、製造時ギャップ幅： G_0 、定数： $f \cdot A \cdot B$ を用いると、1次元モデルは(4-4)式、2次元モデルは(4-5)式で表わすことができる。

$$\Delta G = B_1 \frac{G_0}{R_{ci}} + A_1 \quad (4-4)$$

$$\Delta G = f \{ \pi R_{ci}^2 - \pi (R_{ci} - G_0)^2 \} + A_2 = f \pi (2G_0 R_{ci} - G_0^2) + A_2 \quad (4-5)$$

(4-5)式においては物理的な大きさから $2R_{ci}G_0 - G_0^2 \doteq 2R_{ci}G_0$ なので、 $2f\pi = B_2$ と置くと、(4-5)式は(4-6)式のように整理できる。

$$\Delta G = B_2 R_{ci} G_0 + A_2 \quad (4-6)$$

ここで、 ΔG 、 G_0 、 R_{ci} 、 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 はそれぞれ下記のとおりである。

ΔG :	リロケーション量 (直径幅) (μm)
G_0 :	製造時ギャップ幅 (直径幅) (μm)
R_{ci} :	被覆管内径 (mm)
A_1, A_2 :	定数 (μm)
B_1 :	定数 (-)
B_2 :	定数 (mm^{-1})

(2) 1次元モデルによる検討

図23(a)は1次元モデルを適用し、「常陽」Mk-IIドライバー仕様・FFTFドライバー改良型・「もんじゅ」仕様・「常陽」PTM仕様におけるリロケーション量との相関をみた結果である。なお、線出力・柱状晶領域半径との関係を図23(b)(c)に整理した。

図23に示すように、1次元モデルの場合は燃料ピン径の違いが規格化できていな

い。(4-4)式に線出力依存項を追加した回帰式を設定し、「もんじゅ」仕様とPTM仕様を一括 (C set) して多変量解析を行うと、線出力に対する偏回帰係数は100W/cmあたり約25 μ mのリロケーション量変化を意味するが、DEA-2のKerrMcGee製とB&W製に認められた線出力依存性でも100W/cmあたり約10 μ m程度に過ぎず (図6(c)(d))、明らかに過大評価になる (実際の現象と矛盾する)。つまり、1次元モデルは燃料ピン径と線出力への依存性を分離評価できず、評価モデルとしては不適切であると判断できる。

(3) 2次元モデルによる検討

図24(a)は2次元モデルを適用し、「常陽」Mk-IIドライバー仕様・FFTFドライバー改良型・「もんじゅ」仕様・「常陽」PTM仕様におけるリロケーション量との相関をみた結果である。なお、線出力・柱状晶領域半径との関係を図24(b)(c)に整理した。

図24の2次元モデルの場合は、燃料ピン径の違いを規格化できている。「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM仕様のうちの未溶融かつ柱状晶が形成した試料合計49点をもとに(4-6)式の定数を最小自乗法によってもとめると、(4-7)式が得られる。

$$\Delta G = 0.111 R_{ci} G_0 - 45 \quad (4-7)$$

ここで、 ΔG 、 G_0 、 R_{ci} はそれぞれ下記のとおりである。

ΔG : リロケーション量 (直径幅) (μ m)

G_0 : 製造時ギャップ幅 (直径幅) (μ m)

R_{ci} : 被覆管内径 (mm)

(4-7)式による計算値を図9(b)・図13(b)(d)に対してオーバープロットしたのが図25であり、異なる燃料ピン径間のリロケーション挙動を統一して表わすことができている。

(4-7)式をModel-1式 ((4-8)式) と定義し直し、線出力と柱状晶領域径を説明変数に加えたModel-2~Model-4式 ((4-9)~(4-11)式) を設定して「もんじゅ」仕様とPTM仕様に対して多変量解析を行うと、表14と表15のような結果が得られる。

$$\text{Model-1} \quad \Delta G = b_0 + b_5 G_0 R_{ci} \quad (4-8)$$

$$\text{Model-2} \quad \Delta G = b_0 + b_5 G_0 R_{ci} + b_3 Q \quad (4-9)$$

$$\text{Model-3} \quad \Delta G = b_0 + b_5 G_0 R_{ci} + b_4 R_{cg} \quad (4-10)$$

$$\text{Model-4} \quad \Delta G = b_0 + b_5 G_0 R_{ci} + b_3 Q + b_4 R_{cg} \quad (4-11)$$

ここで、 ΔG 、 $G_0 R_{ci}$ 、 Q 、 R_{cg} 、 b_0 、 b_3 、 b_4 、 b_5 はそれぞれ下記のとおりである。

ΔG : リロケーション量 (目的変数)

$G_0 R_{ci}$: 2次元モデル値 (説明変数)

Q : 線出力 (説明変数)

R_{cg} : 柱状晶領域径 (説明変数)

b_0 : 定数

b_3, b_4, b_5 : 偏回帰係数

表14と表15ではB4M Monju、P-E01、PTM (B5D-1+B5D-2) の組合せ (A~D set) をパラメータにしているが、いずれの場合についても線出力と柱状晶領域径への依存性は無視できることを示しており、2次元モデルは実際の現象をよく表わしている。

また、自由度補正済決定係数と予測誤差は、「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM仕様を全て含めた場合に最も良好な値を示しており、「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM仕様に対する(4-7)式の有効性を追認する結果となる。

(4) 2次元モデル式の計算値との比較

2次元モデル式((4-7)式)を「常陽」Mk-IIドライバー仕様・FFTFドライバー仕様・FFTFドライバー改良型に外挿した結果を図26と図27に、偏差平均値をB4M Monju、P-E01、PTM(B5D-1+B5D-2)の組合せ(A~D set)をパラメータに整理した結果を表16に示す。

「常陽」Mk-IIドライバー仕様については、F3Bにはよく合致し、B4M Joyoには過大評価になる傾向がある。

FFTFドライバー仕様のP19細径とP20(全て熔融試料)については、偏差平均値は $10\mu\text{m}$ 未満に収まっており、サイクル機構製燃料ピンに類似した挙動を示す。DEA-2については、全体に実験値の方が計算値よりも小さい傾向を示す。また、FFTFドライバー改良型に対しては傾向は類似しているが、過小評価(偏差平均値が大きなプラス値)する傾向がある。ただし、FFTFドライバー改良型のデータは熔融試料のみである。以上のように、米国製燃料ピン(FFTFドライバー仕様とFFTFドライバー改良型)のリロケーション挙動は、サイクル機構製燃料ピンの外挿範囲内(類似した挙動)にあるケースとないケースが混在している。

4.3 サイクル機構製燃料ピンと米国製燃料ピンによる相違の原因

(1) 試験データの再整理

図28~図30は、米国製燃料ピンのリロケーション量と2次元モデル式計算値との偏差を製造時ギャップ幅・相対密度・線出力に着目して整理した結果である。製造時ギャップ幅との相関は認められないが、相対密度との間には明確な相関があり、線出力との間にもわずかに相関が認められる。2次元モデル式は相対密度と線出力への依存性を考慮していないことから、米国製燃料ピンにはサイクル機構製燃料ピンとは異なり、リロケーション挙動には相対密度と線出力が影響因子として含まれていることを示唆する。つまり、サイクル機構製燃料ピンの場合はリロケーション挙動に及ぼす相対密度と線出力の影響は無視できるが、米国製燃料ピンは有意な影響を及ぼしていると考えられる。また、米国製燃料ピンの場合、熔融試料と未熔融試料の挙動(傾向)が異なるのは、線出力の影響と考えることもできる。

(2) 燃料ペレット製造仕様と照射条件の相違

表3の燃料ペレット製造仕様を比較すると、サイクル機構製燃料ペレットは高アスペクト比かつFlatEnd、米国製燃料ペレットは低アスペクト比かつDishedEndである。また、図31に示すように、各照射試験の出力履歴(パターン)は異なっている。燃料ペレット形状と出力履歴の違いがリロケーション挙動に影響している可能性がある。

(3) 燃料ペレット形状の効果に基づく検討

燃料ペレット形状(端面形状・アスペクト比)の効果については、軽水炉燃料棒伸びとの関係をから実験的に明らかにした報告例がある⁽¹⁸⁾。図32は、燃料棒伸びに及

ばすアスペクト比、Dish加工の有無、Chamfer加工の有無の影響をみたものである。図32から明らかなように、アスペクト比が大きくなるほど燃料棒伸びは大きく、Dish加工とChamfer加工は燃料棒伸びを抑える効果があることがわかる。

燃料棒伸びの大小は、燃料ペレット間の機械的相互作用の大小を反映していると考えてよい。燃料ペレット間の機械的相互作用によって発生した応力は、燃料ペレット片を径方向に押し出すとともに燃料ペレット内部にクリープ流動を発生させる。クリープ流動は燃料ペレットを径方向に押し出す効果を生じ、リロケーションを促進すると推定される。つまり、DishedEnd型はFlatEnd型よりも燃料ペレット間の機械的相互作用によるリロケーションの促進効果が小さくなると考えられる。特に、DishedEnd型の場合、クリープ流動がDish空間を埋める方向に進行するため、リロケーションの促進効果はさらに小さくなると予想される。図33はサイクル機構製のFlatEnd型燃料ペレットにおける縦断面金相、図34は米国製のDishedEnd型燃料ペレットにおける縦断面金相である。いずれの場合も燃料ペレット中心部では燃料ペレット間ギャップの消失と固着が発生している。また、図34をみると製造時には存在したDish空間が消失しており、Dish空間を埋めるクリープ流動が実際に発生していた可能性を示唆している。さらに、米国製燃料ピンで認められた相対密度と線出力への依存性はクリープ流動の起こりやすさとも対応している。

以上のように、DEA-2のDishedEnd型燃料ペレットを使用した米国製燃料ピンではクリープ流動が最初にDish空間を埋める方向に進行するためにリロケーションの促進効果を発揮するまでに時間がかかり、全体的な傾向としてFlatEnd型燃料ペレットを使用したサイクル機構製燃料ピンよりもリロケーション量が小さくなる傾向を示したと考えられる。図6(b)に示すようにHEDL製高密度仕様は熔融試料と未熔融試料の線出力レベルが顕著に異なる試料が多く、熔融試料はクリープ流動と粘性流動がより顕著であるため、サイクル機構製燃料ピンに近い傾向を示したと考えられる。さらには、サイクル機構製の燃料ペレットは米国製の燃料ペレットよりもアスペクト比が大きい点も相乗していると考えられる。

また、「常陽」Mk-IIドライバー仕様はFlatEnd型燃料ペレットを使用している。図26にプロットされたF3BとB4M Joyoのデータは低線出力のデータ点が支配的で柱状晶の形成がないデータではあるが、「常陽」Mk-IIドライバー仕様のリロケーション挙動は「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM仕様と類似していることを示すと考えられる。なお、「常陽」Mk-IIIドライバー仕様も被覆管寸法と燃料ペレット寸法は同じであり、「常陽」Mk-IIドライバー仕様を対象に短期間照射データを今後拡充していくことが望まれる。

(4) 出力履歴に基づく検討

P19細径・P19太径・P20で使用された燃料ペレットはHEDL製（しかもDishedEnd型）であるが、リロケーション量は同じHEDL製のDEA-2の場合よりも大きく、2次元モデル式（(4-7)式）に近い傾向を示す。

図31から明らかなように、P19・P20・P-E01の3試験は最大線出力に対して87～90%の段階で比較的長時間の中間保持を行っている点に特徴がある。DEA-2の出力履

歴はステップ状ではあるが、比較的長時間の中間保持がないのが特徴である。

図35は柱状晶領域の発達度合（被覆管内径で規格化）を示している。また、同じFFTFドライバー仕様でもP19とP20の柱状晶領域の発達度合は大きく、P19太径における柱状晶領域の発達度合は被覆管内径がほぼ同等のP-E01よりもかなり大きい。

図36はP19・P20・P-E01の3試験に特徴的な出力の中間保持を考慮し、最大線出力と中間保持時線出力を熔融限界線出力と比較してプロットした結果である。P19太径とP20の試料は、図36(b)(c)をみると中間出力段階で熔融状態か融点直下の高い燃料温度条件にあることを示しており、DEA-2にない中間出力段階でクリープ流動が進行できる状況にあり、リロケーション量を大きくし、サイクル機構製燃料ピンに近い傾向を示したと考えられる。特に、P19太径では中間出力段階の線出力レベルがかなり高く、サイクル機構製燃料ピンよりも大きなリロケーション量を示す原因になったと考えられる。

5.まとめと今後の課題

5.1 まとめ

(1) 照射初期リロケーション挙動

高速炉MOX燃料ピン仕様毎に照射初期リロケーション挙動の評価を行った。

「常陽」Mk-IIドライバー仕様についてはデータ点数が少なく、リロケーション挙動の評価は困難であった。また、FFTFドライバー仕様とFFTFドライバー改良型についてもリロケーション挙動を単独で評価することは困難であった。

「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM仕様のリロケーション挙動は酷似しており、リロケーション量は製造時ギャップ幅に支配され、線出力の影響は無視できるほど小さく、燃料組織変化量の影響は無視できるほど小さい。燃料ペレット中心部で燃料溶融が生じた試料の場合にも定量的には明確ではないが燃料溶融がリロケーション挙動に影響を及ぼしていると考えられた。また、柱状晶形成の有無は、定量的には明確ではないが、リロケーション挙動と定性的に影響を及ぼしていると考えられた。

(2) リロケーション挙動に関するモデル式の作成

「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM仕様の燃料ピンにおけるリロケーション挙動について、リロケーション量がギャップ空間の大きさに比例すると仮定した2次元モデルによる相関式を作成した。

$$\Delta G = 0.111 R_{ci} G_0 - 45$$

ここで、 ΔG 、 G_0 、 R_{ci} はそれぞれ下記のとおりである。

ΔG ： リロケーション量（直径幅）（ μm ）

G_0 ： 製造時ギャップ幅（直径幅）（ μm ）

R_{ci} ： 被覆管内径（mm）

(3) 「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM仕様のリロケーション挙動に基づく外挿評価

2次元モデルによる相関式を外挿したところ、「常陽」Mk-IIドライバー仕様のリロケーション挙動は「もんじゅ」仕様と「常陽」PTM仕様と類似していると考えられたが、FFTFドライバー仕様とFFTFドライバー改良型のリロケーション挙動はサイクル機構製燃料ピンよりも小さいケース（DEA-2）と近いケース（P19・P20）に分けられた。サイクル機構製燃料ピンと米国製燃料ピンとの傾向の違いは、燃料ペレット形状効果と出力履歴に起因していると考えられた。

5.2 今後の課題

(1) リロケーションメカニズムの検討

リロケーション量を定めるメカニズムは未だ明確ではなく、特にクラックパターンに着目した定量的な解明を行う必要がある。

(2) 試験データの拡充

「常陽」Mk-IIドライバー仕様に対する実験データの不足が顕著であり、実験データを拡充して(1)のメカニズムの解明に資するとともに、今回作成したモデル式の外挿性を実験的に確認することが望ましい。

6. 謝辞

評価と考察にあたっては、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の伊藤正彦次長、大洗工学センター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に貴重なコメントをいただきました。

また、「常陽」照射試験燃料ピンの残留ギャップ幅測定方法の調査およびデータ収集にあたっては、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と原子力技術株式会社の額賀貞芳氏にご協力いただきました。

この場を借りてお礼申し上げます。

7. 参考資料・参考文献

- (1) 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（改定新版）」、財団法人原子力安全協会（1990）
- (2) K.Lassmann and H.Blank., "Modelling of Fuel Rod Behaviour and Recent Advances of the TRANSURANUS Code", Nuclear Engineering and Design, Vol.106, P.291-313 (1988)
- (3) D.D.Lanning et.al., "GAPCON-THERMAL-3 Code Description", PNL-2434 NRC-1,3, January 1978
- (4) B.Brzoska et.al., "Weiterentwicklung der Analytischen Methoden zur Beschreibung des Brennstabverhaltens", BMFT-FB K 79-23, Dezember (1979)
- (5) L.J.Siefken et.al., "FRAP-T5 : A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods", NUREG/CR-0840 TREE-1281, June 1979
- (6) C.R.Kennedy et.al., "UO₂ Pellet Fragment Relocation : Kinetics and Mechanics", EPRI NP-1106, Project 508-1 and 508-2, Final Report, November 1979
- (7) K.Ito et.al., "FEMAXI-III, a Computer Code for Fuel Rod Performance Analysis", Nuclear Engineering and Design, Vol.76, P.3-11 (1983)
- (8) "Summary of Panel 2 : Gap Evolution and Heat Transfer", 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)
- (9) R.B.Baker and D.R.Wilson, "SIEX3 - a Correlated Computer Code for Prediction of Fast Reactor Mixed-Oxide Fuel and Blanket Pin Performance", 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)
- (10) 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)
- (11) 野上嘉能、飛田典幸、関正之、豊島光男、加藤直人、深川節男、梶谷幹男、今野広一、石田忍、井坂和彦、小沼勝弘：「高速実験炉「常陽」試験用要素FFDL試験用集合体試験用要素（F3B）製造報告」、PNC TN8410 93-190 (1993)
- (12) 門藤健司（他）、（技術資料作成中）

- (13) 畔野一朗、熊倉忠夫、櫛田尚也、鵜飼重治、吉持宏、鹿倉栄、「照射初期における高速炉燃料の照射挙動」：日本原子力学会「1992年春の年会」、J14 (1992)
- (14) 山本一也 (他)、(技術資料作成中)
- (15) R.B.Baker and R.D.Leggett, "Early in Life Thermal Performance of UO_2 - PuO_2 Fast Reactor Fuel", Proceedings of International Conference on Fast Breeder Reactor Fuel, Monterey California USA, P.258-267, March 1979
- (16) J.L.Ethridge and 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, Vol.5, P.2485-2490, August 1986
- (17) J.W.Hales and R.B.Baker, "Evaluation of FFTF Reference Driver Fuel to 100MWd/kgM Burnup", Proceedings of American Nuclear Society International Conference on Reliable Fuels for Liquid Metal Reactors, Tucson Arizona USA, September 7-11 1986, P.2-12~2-25 (1986)
- (18) E.Rolstad and K.D.Knudsen, "Studies of Fuel-Clad Mechanical Interaction and the Resulting Interaction Failure Mechanism", Nuclear Technology, Vol.13, P.168-176 (1972)

表1 評価用データベース（照射試験概要とデータ取得状況）

試験名	試験種別	照射炉	運転サイクル 照射時期	照射期間 EFPD	試験燃料ピン タイプ	試験燃料ピン 本数 (評価対象)	データ数 未溶融	データ数 溶融
P19	溶融限界線出力評価試験	EBR-II	RUN48E 1971年5月	0.19	FFTFDriver FFTFDriver改良型	6 6	15 0	6 20
P20	溶融限界線出力評価試験 (Phase-IIIのみ)	EBR-II	RUN62E 1973年3月	0.26	FFTFDriver	6	0	6
P-E01	溶融限界線出力評価試験	EBR-II	RUN102B 1979年7月	0.14	「もんじゅ」	3	10	2
DEA-2	溶融限界線出力評価試験	FFTF	- 1981年12月	0.33	FFTFDriver	30	64	25
B0J	短期間照射試験	「常陽」	0 1982年11月～1983年7月	27.9*	「常陽」 Mk-II Driver	4	6	0
B4M	短期間照射試験	「常陽」	12' 1986年11月	0.37*	「常陽」 Mk-II Driver 「もんじゅ」	2 4	2 11	0 0
B5D-1	溶融限界線出力評価試験	「常陽」	23' 1991年6月	0.24*	大型炉想定仕様 (PTM型)	4	10	7
B5D-2	溶融限界線出力評価試験	「常陽」	24' 1992年6月	0.17*	大型炉想定仕様 (PTM型)	24	18	24
F3B	短期間照射試験	「常陽」	25' 1992年11月	3.3*	「常陽」 Mk-II Driver	1	3	0

* : 「常陽」 100MW相当値

表2 試験燃料ピンの基本仕様

	「常陽」Mk-II Driver ノミナル値	「もんじゅ」 (B4M Monju) ノミナル値	「もんじゅ」 (P-E01) 代表値	PTM (大型炉想定仕様) 代表値	FFTF Driver ノミナル値	FFTF Driver 改良型 (P19太径) 代表値
被覆管						
・外径：Rco (mm)	5.50	6.50	6.50	7.50	5.84	6.35
・内径：Rci (mm)	4.80	5.56	5.60	6.70	5.08	5.54
燃料ペレット						
・外径：Rfo (mm)	4.63	5.40	5.44	6.52	4.94	5.36
・高さ：L (mm)	9	8	11	9	6.4	6.4
・O/M比 (-)	1.97	1.97	1.97	1.94or1.97	1.96	1.96
・相対密度 (%TD)	93 (B0J,B4M) 94 (F3B)	85	85	92 95	90.4	90.4
・形状	中実 Flat End	中実 Flat End	中実 Flat End	中実 Flat End	中実 Dished End	中実 Dished End
・製造者	サイクル機構 (JNC*1)	サイクル機構 (JNC*1)	サイクル機構 (JNC*1)	サイクル機構 (JNC*1)	米国 (HEDL*2) (KerrMcGee) (B&W*3)	米国 (HEDL*2)
ギャップ条件						
・直径ギャップ幅：G0 (μ m)	170	160	160	180	140	180
・相対ギャップ幅：G0/Rci	35.4	28.8	28.6	26.9	27.6	32.5

*1 : Japan Nuclear Cycle Development Institute

*2 : Hanford Engineering Development Laboratory

*3 : Babcock&Wilcox/Nuclear Materials Division

表3 燃料ペレット製造仕様（概略）

試験燃料ピンの種類 ・報告書中の呼称 Fuel Pin Type (製造時ギャップ幅) LG: Large Gap、MG: Medium Gap SG: Small Gap	燃料密度 製造仕様値 Density Level	O/M比 Oxygen-to- Metal Ratio	Pu富化度 Pu Content Pu/(Pu+U) wt%	基本形状 Shape	端面 Pellet End	製造者 Vender	高さ/外径 アスペクト比 (L/Rfo) **実績 ***ノミナル値	ポアフォーマー 添加 Pore Fomer Addition Y: 有 N: 無	製造方法 Process *1: High Pressure *2: Low Pressure
「常陽」 Mk-II Driver									
・ B0J (LG/MG/SG)	93%TD	1.97	29	中実	Flat	JNC	2.0**	N	-
・ B4M Joyo (MG)	93%TD	1.97	29	中実	Flat	JNC	2.0**	N	-
・ F3B (SG)	94%TD	1.97	29	中実	Flat	JNC	2.1**	N	-
「もんじゅ」									
・ P-E01 (LG/MG/SG)	85%TD	1.97	30	中実	Flat	JNC	1.8**	Y	-
・ B4M Monju (MG/SG)	85%TD	1.97	30	中実	Flat	JNC	1.5**	Y	-
PTM									
・ B5D高密度仕様 (LG/MG)	95%TD	1.97	20	中実	Flat	JNC	1.4**	N	-
・ B5D中密度仕様 (LG/MG/SG)	92%TD	1.94or1.97	20	中実	Flat	JNC	1.4**	Y	-
FFTFDriver									
・ P19細径 (LG/MG/SG)	90%TD	1.96	25	中実	Dished	HEDL	1.1***	N	Preslugging*1
・ P20 (LG/MG)	90%TD	1.96	25	中実	Dished	HEDL	1.1***	N	Preslugging*1
・ DEA-2HEDL製高密度仕様									
・ A (193 μm)	93.5%TD	1.97	29	中実	Dished	HEDL	1.3***	N*	Preslugging*2
・ B (193 μm)	93.5%TD	1.94	29	中実	Dished	HEDL	1.3***	N*	Preslugging*2
・ C (282 μm)	96.5%TD	1.97	29	中実	Dished	HEDL	1.3***	N*	Preslugging*2
・ D (282 μm)	96.5%TD	1.94	29	中実	Dished	HEDL	1.3***	N*	Preslugging*2
・ E (279 μm)	93.5%TD	1.97	29	中実	Dished	HEDL	1.3***	N*	Preslugging*2
・ F (292 μm)	93.5%TD	1.94	29	中実	Dished	HEDL	1.3***	N*	Preslugging*2
・ DEA-2HEDL製中密度仕様									
・ H (91 μm)	90.6%TD	1.94	29	中実	Dished	HEDL	1.3***	Y*	Preslugging*2
・ J (137 μm)	90.6%TD	1.97	29	中実	Dished	HEDL	1.3***	Y*	Preslugging*2
・ K (142 μm)	90.6%TD	1.94	29	中実	Dished	HEDL	1.3***	Y*	Preslugging*2
・ DEA-2HEDL製低密度仕様									
・ L (91 μm)	86.5%TD	1.97	29	中実	Dished	HEDL	1.3***	Y*	Preslugging*2
・ M (89 μm)	86.5%TD	1.94	29	中実	Dished	HEDL	1.3***	Y*	Preslugging*2
・ DEA-2KerrMcGee製									
・ 3.1LG/SG	90.4%TD	1.96	27	中実	Dished	KerrMcGee	1.3***	N	Preslugging*1
・ 3.2LG/SG	90.4%TD	1.96	22	中実	Dished	KerrMcGee	1.3***	N	Preslugging*1
・ DEA-2B&W製									
・ 3.1LG/SG	90.4%TD	1.96	27	中実	Dished	B&W	1.3***	Y	-
・ 3.2LG/SG	90.4%TD	1.96	22	中実	Dished	B&W	1.3***	Y	-
・ 4.1LG/SG	90.4%TD	1.96	29	中実	Dished	B&W	1.3***	Y	-
・ 4.2LG/SG	90.4%TD	1.96	29	中実	Dished	B&W	1.3***	Y	-
FFTFDriver改良型									
・ P19太径 (LG/MG/SG)	中密度 (90%TD)	1.96	25	中実	Dished	HEDL	1.2***	N	Preslugging*1

表4 製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量としたFFTFドライバー仕様燃料ピン
に対する多変量解析結果 (P19細径とP20を一括)

		P19細径 P20	P19細径 P20	P19細径 P20	P19細径 P20
		説明変量 G0	説明変量 G0,Q	説明変量 G0,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg
式形		↓ Case-1式	↓ Case-2式	↓ Case-3式	↓ Case-4式
定数	: b0	-17	-238	-27	-336
偏回帰係数	: b1 (G0)	0.325	0.272	0.295	0.649
偏回帰係数	: b2 (Rfo)	-	-	-	-
偏回帰係数	: b3 (Q)	-	0.452	-	0.945
偏回帰係数	: b4 (Rcg)	-	-	4.306	-61.623
自由度補正済決定係数		0.313	0.418	0.285	0.525
予測誤差 (micrometer) (1σ)		19	17	19	15
標準偏回帰係数	: b1* (G0)	-	0.489	0.529	1.167
標準偏回帰係数	: b2* (Rfo)	-	-	-	-
標準偏回帰係数	: b3* (Q)	-	0.365	-	0.763
標準偏回帰係数	: b4* (Rcg)	-	-	0.065	-0.935
偏回帰係数のF分布検定値	: F1* (G0)	-	10	3	14
偏回帰係数のF分布検定値	: F2* (Rfo)	-	-	-	-
偏回帰係数のF分布検定値	: F3* (Q)	-	5	-	13
偏回帰係数のF分布検定値	: F4* (Rcg)	-	-	0	6

G0: 製造時直径ギャップ幅 (micrometer)、Rci: 製造時被覆管内径 (mm)

Rfo: 製造時燃料ペレット外径 (mm)

Q: 線出力 (W/cm)、Rcg: 柱状晶領域径 (mm)

リロケーション量 (micrometer): ΔG

(標準偏回帰係数の大小は、それぞれの説明変量の影響の大小を意味する)
(有意水準としてα=0.05を設定すると、F分布検定値≤3の場合、その説明変量は不要であることを意味する)

表5 製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量としたFFTFドライバー改良型燃料ピンに対する多変量解析結果

		FFTFDriver 改良型	FFTFDriver 改良型	FFTFDriver 改良型	FFTFDriver 改良型
FFTFドライバー改良型 (P19太径) : 20点		P19太径 説明変量 G0	P19太径 説明変量 G0,Q	P19太径 説明変量 G0,Rcg	P19太径 説明変量 G0,Q,Rcg
式形		↓ Case-1式	↓ Case-2式	↓ Case-3式	↓ Case-4式
定数	: b0	-49	246	-251	108
偏回帰係数	: b1 (G0)	0.758	0.724	0.515	0.426
偏回帰係数	: b2 (Rfo)	-	-	-	-
偏回帰係数	: b3 (Q)	-	-0.483	-	-0.645
偏回帰係数	: b4 (Rcg)	-	-	61.220	72.087
自由度補正済決定係数		0.879	0.882	0.893	0.905
予測誤差 (micrometer)	(1σ)	13	13	12	11
標準偏回帰係数	: b1* (G0)	-	0.898	0.639	0.529
標準偏回帰係数	: b2* (Rfo)	-	-	-	-
標準偏回帰係数	: b3* (Q)	-	-0.104	-	-0.139
標準偏回帰係数	: b4* (Rcg)	-	-	0.332	0.391
偏回帰係数のF分布検定値	: F1* (G0)	-	108	13	9
偏回帰係数のF分布検定値	: F2* (Rfo)	-	-	-	-
偏回帰係数のF分布検定値	: F3* (Q)	-	1	-	3
偏回帰係数のF分布検定値	: F4* (Rcg)	-	-	3	5

G0: 製造時直径ギャップ幅 (micrometer)、Rci: 製造時被覆管内径 (mm)
Rfo: 製造時燃料ペレット外径 (mm)
Q: 線出力 (W/cm)、Rcg: 柱状晶領域径 (mm)
リロケーション量 (micrometer): ΔG

(標準偏回帰係数の大小は、それぞれの説明変量の影響の大小を意味する)
(有意水準として $\alpha=0.05$ を設定すると、F分布検定値 ≤ 3 の場合、その説明変量は不要であることを意味する)

表6 製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「もんじゅ」仕様燃料ピンに対する多変量解析結果：その1

		「もんじゅ」	「もんじゅ」	「もんじゅ」	「もんじゅ」	「もんじゅ」	「もんじゅ」	「もんじゅ」	「もんじゅ」
		B4M Monju	B4M Monju	B4M Monju	B4M Monju	B4M Monju 柱状晶形成 試料に限定 説明変量 G0	B4M Monju 柱状晶形成 試料に限定 説明変量 G0,Q	B4M Monju 柱状晶形成 試料に限定 説明変量 G0,Rcg	B4M Monju 柱状晶形成 試料に限定 説明変量 G0,Q,Rcg
		説明変量 G0	説明変量 G0,Q	説明変量 G0,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg	↓ Case-1式	↓ Case-2式	↓ Case-3式	↓ Case-4式
B4M Monju：11点									
P-E01：12点									
B4M Monju（柱状晶形成あり）：9点									
P-E01（未熔融）：10点									
	式形	Case-1式	Case-2式	Case-3式	Case-4式	Case-1式	Case-2式	Case-3式	Case-4式
定数	: b0	-59	-290	-53	-457	-67	-165	-65	-266
偏回帰係数	: b1 (G0)	0.651	0.747	0.555	0.987	0.721	0.784	0.735	0.944
偏回帰係数	: b2 (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数	: b3 (Q)	-	0.585	-	0.982	-	0.233	-	0.517
偏回帰係数	: b4 (Rcg)	-	-	5.133	-9.369	-	-	-2.216	-13.323
自由度補正済決定係数		0.230	0.353	0.183	0.330	0.455	0.391	0.367	0.324
予測誤差 (micrometer) (1σ)		19	16	18	15	14	13	14	13
標準偏回帰係数	: b1* (G0)	-	0.636	0.472	0.841	-	0.787	0.737	0.948
標準偏回帰係数	: b2* (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
標準偏回帰係数	: b3* (Q)	-	0.427	-	0.715	-	0.154	-	0.342
標準偏回帰係数	: b4* (Rcg)	-	-	0.213	-0.389	-	-	-0.044	-0.266
偏回帰係数のF分布検定値	: F1* (G0)	-	6	2	6	-	7	6	5
偏回帰係数のF分布検定値	: F2* (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数のF分布検定値	: F3* (Q)	-	3	-	3	-	0	-	1
偏回帰係数のF分布検定値	: F4* (Rcg)	-	-	0	1	-	-	0	0

G0：製造時直径ギャップ幅 (micrometer)、Rci：製造時被覆管内径 (mm)
Rfo：製造時燃料ペレット外径 (mm)
Q：線出力 (W/cm)、Rcg：柱状晶領域径 (mm)
リロケーション量 (micrometer)：ΔG

(標準偏回帰係数の大小は、それぞれの説明変量の影響の大小を意味する)
(有意水準としてα=0.05を設定すると、F分布検定値≤3の場合、その説明変量は不要であることを意味する)

表7 製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「もんじゅ」仕様燃料ピンに対する多変量解析結果：その2

		「もんじゅ」	「もんじゅ」	「もんじゅ」	「もんじゅ」	「もんじゅ」	「もんじゅ」	「もんじゅ」	「もんじゅ」
B4M Monju : 11点		P-E01	P-E01	P-E01	P-E01	P-E01	P-E01	P-E01	P-E01
P-E01 : 12点									
B4M Monju (柱状晶形成あり) : 9点						未熔融試料 に限定	未熔融試料 に限定	未熔融試料 に限定	未熔融試料 に限定
P-E01 (未熔融) : 10点						説明変量 G0	説明変量 G0,Q	説明変量 G0,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg
	説明変量 G0	説明変量 G0,Q	説明変量 G0,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg	説明変量 G0	説明変量 G0,Q	説明変量 G0,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg
	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	式形	Case-1式	Case-2式	Case-3式	Case-4式	Case-1式	Case-2式	Case-3式	Case-4式
定数 : b0		-42	-5	-54	104	-51	-19	-64	93
偏回帰係数 : b1 (G0)		0.625	0.608	0.593	0.399	0.668	0.644	0.644	0.442
偏回帰係数 : b2 (Rfo)		-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数 : b3 (Q)		-	-0.073	-	-4.081	-	-0.063	-	-0.372
偏回帰係数 : b4 (Rcg)		-	-	6.008	25.376	-	-	6.034	20.936
自由度補正済決定係数		0.681	0.653	0.658	0.706	0.726	0.690	0.698	0.704
予測誤差 (micrometer) (1σ)		17	17	16	14	16	16	16	15
標準偏回帰係数 : b1* (G0)		-	0.819	0.800	0.538	-	0.838	0.839	0.575
標準偏回帰係数 : b2* (Rfo)		-	-	-	-	-	-	-	-
標準偏回帰係数 : b3* (Q)		-	-0.081	-	-0.435	-	-0.061	-	-0.357
標準偏回帰係数 : b4* (Rcg)		-	-	0.111	0.467	-	-	0.099	0.345
偏回帰係数のF分布検定値 : F1* (G0)		-	20	18	5	-	15	19	3
偏回帰係数のF分布検定値 : F2* (Rfo)		-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数のF分布検定値 : F3* (Q)		-	0	-	2	-	0	-	1
偏回帰係数のF分布検定値 : F4* (Rcg)		-	-	0	3	-	-	0	1

G0 : 製造時直径ギャップ幅 (micrometer)、Rci : 製造時被覆管内径 (mm)

Rfo : 製造時燃料ペレット外径 (mm)

Q : 線出力 (W/cm)、Rcg : 柱状晶領域径 (mm)

リロケーション量 (micrometer) : ΔG

(標準偏回帰係数の大小は、それぞれの説明変量の影響の大小を意味する)
(有意水準として $\alpha = 0.05$ を設定すると、F分布検定値 ≤ 3 の場合、その説明変量は不要であることを意味する)

表8 製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「もんじゅ」仕様燃料ピンに対する多変量解析結果：その3

		「もんじゅ」 B4M Monju+ P-E01	「もんじゅ」 B4M Monju+ P-E01	「もんじゅ」 B4M Monju+ P-E01	「もんじゅ」 B4M Monju+ P-E01
		説明変量 G0	説明変量 G0,Q	説明変量 G0,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg
		↓ 式形	↓ Case-2式	↓ Case-3式	↓ Case-4式
B4M Monju : 11点 P-E01 : 12点 B4M Monju (柱状晶形成あり) : 9点 P-E01 (未溶融) : 10点					
定数	: b0	-66	-102	-65	-73
偏回帰係数	: b1 (G0)	0.720	0.680	0.627	0.630
偏回帰係数	: b2 (Rfo)	-	-	-	-
偏回帰係数	: b3 (Q)	-	0.108	-	0.024
偏回帰係数	: b4 (Rcg)	-	-	6.634	5.824
自由度補正済決定係数		0.748	0.750	0.758	0.745
予測誤差 (micrometer) (1σ)		18	18	17	17
標準偏回帰係数	: b1* (G0)	-	0.822	0.759	0.762
標準偏回帰係数	: b2* (Rfo)	-	-	-	-
標準偏回帰係数	: b3* (Q)	-	0.122	-	0.027
標準偏回帰係数	: b4* (Rcg)	-	-	0.181	0.159
偏回帰係数のF分布検定値	: F1* (G0)	-	50	32	30
偏回帰係数のF分布検定値	: F2* (Rfo)	-	-	-	-
偏回帰係数のF分布検定値	: F3* (Q)	-	1	-	0
偏回帰係数のF分布検定値	: F4* (Rcg)	-	-	2	1

G0 : 製造時直径ギャップ幅 (micrometer) 、 Rci : 製造时被覆管内径 (mm)
 Rfo : 製造時燃料ペレット外径 (mm)
 Q : 線出力 (W/cm) 、 Rcg : 柱状晶領域径 (mm)
 リロケーション量 (micrometer) : ΔG

(標準偏回帰係数の大小は、それぞれの説明変量の影響の大小を意味する)
 (有意水準として $\alpha=0.05$ を設定すると、F分布検定値 ≤ 3 の場合、その説明変量は不要であることを意味する)

表9 製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「もんじゅ」仕様燃料ピンに対する多変量解析結果：その4

		「もんじゅ」 B4M Monju+ P-E01 柱状晶形成 試料に限定	「もんじゅ」 B4M Monju+ P-E01 柱状晶形成 試料に限定	「もんじゅ」 B4M Monju+ P-E01 柱状晶形成 試料に限定	「もんじゅ」 B4M Monju+ P-E01 柱状晶形成 試料に限定	「もんじゅ」 B4M Monju+ P-E01 柱状晶形成 かつ未溶融の 試料に限定	「もんじゅ」 B4M Monju+ P-E01 柱状晶形成 かつ未溶融の 試料に限定	「もんじゅ」 B4M Monju+ P-E01 柱状晶形成 かつ未溶融の 試料に限定	「もんじゅ」 B4M Monju+ P-E01 柱状晶形成 かつ未溶融の 試料に限定
		説明変量 G0	説明変量 G0,Q	説明変量 G0,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg	説明変量 G0	説明変量 G0,Q	説明変量 G0,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg
		↓ 式形	↓ Case-2式	↓ Case-3式	↓ Case-4式	↓ Case-1式	↓ Case-2式	↓ Case-3式	↓ Case-4式
B4M Monju : 11点 P-E01 : 12点 B4M Monju (柱状晶形成あり) : 9点 P-E01 (未溶融) : 10点									
定数	: b0	-62	-79	-67	-55	-67	-91	-73	-77
偏回帰係数	: b1 (G0)	0.705	0.691	0.646	0.635	0.732	0.723	0.686	0.689
偏回帰係数	: b2 (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数	: b3 (Q)	-	0.048	-	-0.042	-	0.064	-	0.012
偏回帰係数	: b4 (Rcg)	-	-	6.078	8.442	-	-	5.519	4.886
自由度補正済決定係数 予測誤差 (micrometer) (1σ)		0.787 16	0.779 16	0.785 16	0.773 16	0.796 15	0.788 15	0.791 15	0.777 15
標準偏回帰係数	: b1* (G0)	-	0.875	0.818	0.805	-	0.887	0.842	0.846
標準偏回帰係数	: b2* (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
標準偏回帰係数	: b3* (Q)	-	0.055	-	-0.048	-	0.066	-	0.012
標準偏回帰係数	: b4* (Rcg)	-	-	0.117	0.103	-	-	0.098	0.087
偏回帰係数のF分布検定値	: F1* (G0)	-	61	36	30	-	65	40	32
偏回帰係数のF分布検定値	: F2* (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数のF分布検定値	: F3* (Q)	-	0	-	0	-	0	-	0
偏回帰係数のF分布検定値	: F4* (Rcg)	-	-	1	1	-	-	1	0

G0 : 製造時直径ギャップ幅 (micrometer) 、 Rci : 製造時被覆管内径 (mm)
 Rfo : 製造時燃料ペレット外径 (mm)
 Q : 線出力 (W/cm) 、 Rcg : 柱状晶領域径 (mm)
 リロケーション量 (micrometer) : ΔG

(標準偏回帰係数の大小は、それぞれの説明変量の影響の大小を意味する)
 (有意水準として α=0.05を設定すると、F分布検定値 ≤ 3の場合、その説明変量は不要であることを意味する)

表10 製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「常陽」PTM仕様燃料ピンに対する多変量解析結果：その1

PTM (未溶融) : 28点 PTM (溶融) : 31点 PTM (未溶融・柱状晶形成なし) : 26点 PTM (柱状晶形成なし) : 57点		PTM 未溶融のみ	PTM 未溶融のみ	PTM 未溶融のみ	PTM 未溶融のみ	PTM 未溶融かつ 柱状晶形成 の試料に限定 説明変量 G0	PTM 未溶融かつ 柱状晶形成 の試料に限定 説明変量 G0,Q	PTM 未溶融かつ 柱状晶形成 の試料に限定 説明変量 G0,Rcg	PTM 未溶融かつ 柱状晶形成 の試料に限定 説明変量 G0,Q,Rcg	
		説明変量 G0	説明変量 G0,Q	説明変量 G0,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg	説明変量 G0	説明変量 G0,Q	説明変量 G0,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg	
		↓ 式形	↓ Case-1式	↓ Case-2式	↓ Case-3式	↓ Case-4式	↓ Case-1式	↓ Case-2式	↓ Case-3式	↓ Case-4式
定数	: b0	-30	-24	-31	-15	-28	-55	-52	-106	
偏回帰係数	: b1 (G0)	0.668	0.665	0.667	0.657	0.654	0.657	0.525	0.522	
偏回帰係数	: b2 (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-	
偏回帰係数	: b3 (Q)	-	-0.009	-	-0.029	-	0.046	-	0.089	
偏回帰係数	: b4 (Rcg)	-	-	0.473	1.289	-	-	15.273	16.411	
自由度補正済決定係数		0.647	0.633	0.633	0.619	0.615	0.599	0.631	0.620	
予測誤差 (micrometer)	(1σ)	20	20	17	20	20	20	19	19	
標準偏回帰係数	: b1* (G0)	-	0.809	0.512	0.799	-	0.798	0.638	0.634	
標準偏回帰係数	: b2* (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-	
標準偏回帰係数	: b3* (Q)	-	-0.012	-	-0.037	-	0.037	-	0.072	
標準偏回帰係数	: b4* (Rcg)	-	-	0.014	0.037	-	-	0.234	0.251	
偏回帰係数のF分布検定値	: F1* (G0)	-	44	48	37	-	39	15	15	
偏回帰係数のF分布検定値	: F2* (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-	
偏回帰係数のF分布検定値	: F3* (Q)	-	0	-	0	-	0	-	0	
偏回帰係数のF分布検定値	: F4* (Rcg)	-	-	0	0	-	-	2	2	

G0: 製造時直径ギャップ幅 (micrometer)、Rci: 製造时被覆管内径 (mm)
Rfo: 製造時燃料ペレット外径 (mm)
Q: 線出力 (W/cm)、Rcg: 柱状晶領域径 (mm)
リロケーション量 (micrometer) : ΔG

(標準偏回帰係数の大小は、それぞれの説明変量の影響の大小を意味する)
(有意水準として $\alpha=0.05$ を設定すると、F分布検定値 ≤ 3 の場合、その説明変量は不要であることを意味する)

表 1 1 製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「常陽」PTM仕様燃料ピンに対する多変量解析結果：その2

	PTM 説明変量 G0 ↓ 式形	PTM 説明変量 G0,Q ↓ Case-2式	PTM 説明変量 G0,Rcg ↓ Case-3式	PTM 説明変量 G0,Q,Rcg ↓ Case-4式
PTM (未熔融) : 28点 PTM (熔融) : 31点 PTM (未熔融・柱状晶形成なし) : 26点 PTM (柱状晶形成なし) : 57点	溶解のみ	溶解のみ	溶解のみ	溶解のみ
定数 : b0	-51	-249	4	-242
偏回帰係数 : b1 (G0)	0.767	0.804	0.840	0.806
偏回帰係数 : b2 (Rfo)	-	-	-	-
偏回帰係数 : b3 (Q)	-	0.307	-	0.300
偏回帰係数 : b4 (Rcg)	-	-	-18.259	-0.748
自由度補正済決定係数	0.693	0.732	0.712	0.722
予測誤差 (micrometer) (1σ)	20	19	19	19
標準偏回帰係数 : b1* (G0)	-	0.879	0.918	0.881
標準偏回帰係数 : b2* (Rfo)	-	-	-	-
標準偏回帰係数 : b3* (Q)	-	0.221	-	0.215
標準偏回帰係数 : b4* (Rcg)	-	-	-0.187	-0.008
偏回帰係数のF分布検定値 : F1* (G0)	-	84	72	65
偏回帰係数のF分布検定値 : F2* (Rfo)	-	-	-	-
偏回帰係数のF分布検定値 : F3* (Q)	-	5	-	2
偏回帰係数のF分布検定値 : F4* (Rcg)	-	-	3	0

G0 : 製造時直径ギャップ幅 (micrometer)、Rci : 製造时被覆管内径 (mm)
Rfo : 製造時燃料ペレット外径 (mm)
Q : 線出力 (W/cm)、Rcg : 柱状晶領域径 (mm)
リロケーション量 (micrometer) : ΔG

(標準偏回帰係数の大小は、それぞれの説明変量の影響の大きさを意味する)
(有意水準として $\alpha=0.05$ を設定すると、F分布検定値 ≤ 3 の場合、その説明変量は不要であることを意味する)

表12 製造時ギャップ幅・線出力・柱状晶領域径を説明変量とした「常陽」PTM仕様燃料ピンに対する多変量解析結果：その3

PTM (未熔融) : 28点 PTM (熔融) : 31点 PTM (未熔融・柱状晶形成なし) : 26点 PTM (柱状晶形成なし) : 57点	PTM 未熔融+ 熔融	PTM 未熔融+ 熔融	PTM 未熔融+ 熔融	PTM 未熔融+ 熔融	PTM 未熔融+ 熔融 柱状晶形成 の試料に限定 説明変量 G0	PTM 未熔融+ 熔融 柱状晶形成 の試料に限定 説明変量 G0,Q	PTM 未熔融+ 熔融 柱状晶形成 の試料に限定 説明変量 G0,Rcg	PTM 未熔融+ 熔融 柱状晶形成 の試料に限定 説明変量 G0,Q,Rcg
	説明変量 G0	説明変量 G0,Q	説明変量 G0,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg	説明変量 G0	説明変量 G0,Q	説明変量 G0,Rcg	説明変量 G0,Q,Rcg
	↓ 式形	↓ Case-1式	↓ Case-2式	↓ Case-3式	↓ Case-4式	↓ Case-1式	↓ Case-2式	↓ Case-3式
定数 : b0	-42	-71	-36	-86	-41	-96	-34	-90
偏回帰係数 : b1 (G0)	0.722	0.736	0.725	0.756	0.718	0.730	0.732	0.751
偏回帰係数 : b2 (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数 : b3 (Q)	-	0.046	-	0.090	-	0.088	-2.744	0.093
偏回帰係数 : b4 (Rcg)	-	-	-1.759	-4.453	-	-	-	-3.620
自由度補正済決定係数	0.681	0.678	0.676	0.680	0.666	0.668	0.661	0.664
予測誤差 (micrometer) (1σ)	20	20	20	20	20	20	20	20
標準偏回帰係数 : b1* (G0)	-	0.844	0.832	0.867	-	0.834	0.837	0.858
標準偏回帰係数 : b2* (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
標準偏回帰係数 : b3* (Q)	-	0.059	-	0.115	-	0.089	-	0.095
標準偏回帰係数 : b4* (Rcg)	-	-	-0.040	-0.100	-	-	-0.039	-0.052
偏回帰係数のF分布検定値 : F1* (G0)	-	119	123	118	-	114	94	95
偏回帰係数のF分布検定値 : F2* (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数のF分布検定値 : F3* (Q)	-	1	-	2	-	1	-	1
偏回帰係数のF分布検定値 : F4* (Rcg)	-	-	0	1	-	-	0	0

G0 : 製造時直径ギャップ幅 (micrometer) 、Rci : 製造時被覆管内径 (mm)
Rfo : 製造時燃料ペレット外径 (mm)
Q : 線出力 (W/cm) 、Rcg : 柱状晶領域径 (mm)
リロケーション量 (micrometer) : ΔG

(標準偏回帰係数の大小は、それぞれの説明変量の影響の大小を意味する)
(有意水準として $\alpha = 0.05$ を設定すると、F分布検定値 ≤ 3 の場合、その説明変量は不要であることを意味する)

表 1 3 燃料ペレット外径と線出力との相関による多変量解析結果への影響

	A Set B4M Monju+	B Set	C Set B4M Monju+	D Set B4M Monju+
	B5D-1+ B5D-2	P-E01+ B5D-1+ B5D-2	P-E01+ B5D-1+ B5D-2	P-E01+
＜製造時ギャップ幅と燃料ペレット外径との組合せ＞ ($\Delta G=b_0+b_1G_0+b_2R_{fo}$)				
・定数：b0	-199	-151	-179	-1202
・製造時ギャップ幅の偏回帰係数	: b1 0.684	0.676	0.708	0.881
・燃料ペレット外径の偏回帰係数	: b2 25.504	18.317	21.713	205.285
・自由度補正済決定係数	0.738	0.894	0.793	0.793
・予測誤差 (micrometer)	19	19	18	15
・製造時ギャップ幅の標準偏回帰係数	: b1* 0.709	0.851	0.801	1.081
・燃料ペレット外径の標準偏回帰係数	: b2* 0.326	0.275	0.323	0.203
・製造時ギャップ幅の偏回帰係数のF分布検定値：F1*	59	66	108	20
・燃料ペレット外径の偏回帰係数のF分布検定値：F2*	12	7	18	1

＜製造時ギャップ幅と線出力との組合せ＞

($\Delta G=b_0+b_1G_0+b_3Q$)

・定数：b0	-111	-101	-110	-91
・製造時ギャップ幅の偏回帰係数	: b1 0.676	0.672	0.687	0.723
・線出力の偏回帰係数	: b3 0.136	0.120	0.131	0.064
・自由度補正済決定係数	0.737	0.639	0.737	0.788
・予測誤差 (micrometer)	19	19	18	15
・製造時ギャップ幅の標準偏回帰係数	: b1* 0.762	0.845	0.777	0.887
・線出力の標準偏回帰係数	: b3* 0.326	0.256	0.321	0.066
・製造時ギャップ幅の偏回帰係数のF分布検定値：F1*	56	64	100	65
・線出力の偏回帰係数のF分布検定値	: F3* 12	6	17	0

G0：製造時直径ギャップ幅 (micrometer)

Rfo：製造時燃料ペレット外径 (mm)

Q：線出力 (W/cm)

リロケーション量 (micrometer)： ΔG

(標準偏回帰係数の大小は、それぞれの説明変数の影響の大小を意味する)
(有意水準として $\alpha=0.05$ を設定すると、F分布検定値 ≤ 3 の場合、その説明変数は不要であることを意味する)

表1-4 2次元モデルに線出力・柱状晶領域径を追加した多変量解析結果：その1
(B4M Monju, P-E01, B5D-1, B5D-2の組合せ：未熔融かつ柱状晶形成の試料に限定)

B4M Monju：9点 P-E01：10点 B5D-1,B5D-2：26点		B4M Monju+	B4M Monju+	B4M Monju+	B4M Monju+	P-E01+	P-E01+	P-E01+	P-E01+
		B5D-1+B5D-2	B5D-1+B5D-2	B5D-1+B5D-2	B5D-1+B5D-2	B5D-1+B5D-2	B5D-1+B5D-2	B5D-1+B5D-2	B5D-1+B5D-2
		2次元モデル式 説明変量 G0Rci	2次元モデル式 説明変量 G0Rci,Q	2次元モデル式 説明変量 G0Rci,Rcg	2次元モデル式 説明変量 G0Rci,Q,Rcg	2次元モデル式 説明変量 G0Rci	2次元モデル式 説明変量 G0Rci,Q	2次元モデル式 説明変量 G0Rci,Rcg	2次元モデル式 説明変量 G0Rci,Q,Rcg
式形		↓ Model-1式 A Set	↓ Model-2式 A Set	↓ Model-3式 A Set	↓ Model-4式 A Set	↓ Model-1式 B Set	↓ Model-2式 B Set	↓ Model-3式 B Set	↓ Model-4式 B Set
定数	: b0	-44	-62	-57	-65	-32	-23	-50	-37
偏回帰係数	: b1 (G0)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数	: b2 (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数	: b3 (Q)	-	0.053	-	0.032	-	-0.018	-	-0.026
偏回帰係数	: b4 (Rcg)	-	-	12.749	10.584	-	-	10.101	10.643
偏回帰係数	: b5 (G0Rci)	0.109	0.100	0.088	0.086	0.102	0.102	0.090	0.090
自由度補正済決定係数		0.734	0.738	0.746	0.742	0.652	0.643	0.659	0.652
予測誤差 (micrometer)	(1σ)	19	19	18	18	19	19	19	19
標準偏回帰係数	: b1* (G0)	-	-	-	-	-	-	-	-
標準偏回帰係数	: b2* (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
標準偏回帰係数	: b3* (Q)	-	0.128	-	0.077	-	-0.039	-	-0.056
標準偏回帰係数	: b4* (Rcg)	-	-	0.218	0.181	-	-	0.159	0.167
標準偏回帰係数	: b5* (G0Rci)	-	0.791	0.694	0.680	-	0.816	0.721	0.720
偏回帰係数のF分布検定値	: F1* (G0)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数のF分布検定値	: F2* (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数のF分布検定値	: F3* (Q)	-	1	-	0	-	0	-	0
偏回帰係数のF分布検定値	: F4* (Rcg)	-	-	3	2	-	-	2	2
偏回帰係数のF分布検定値	: F5* (G0Rci)	-	57	26	24	-	65	35	35

G0：製造時直径ギャップ幅 (micrometer)、Rci：製造时被覆管内径 (mm)
Rfo：製造時燃料ペレット外径 (mm)
Q：線出力 (W/cm)、Rcg：柱状晶領域径 (mm)
リロケーション量 (micrometer)：ΔG

(標準偏回帰係数の大小は、それぞれの説明変量の影響の大小を意味する)
(有意水準としてα=0.05を設定すると、F分布検定値≤3の場合、その説明変量は不要であることを意味する)

表15 2次元モデルに線出力・柱状晶領域径を追加した多変量解析結果：その2
(B4M Monju, P-E01, B5D-1, B5D-2の組合せ：未熔融かつ柱状晶形成の試料に限定)

B4M Monju：9点 P-E01：10点 B5D-1,B5D-2：26点		B4M Monju+ P-E01+ B5D-1+B5D-2	B4M Monju+ P-E01+ B5D-1+B5D-2	B4M Monju+ P-E01+ B5D-1+B5D-2	B4M Monju+ P-E01+ B5D-1+B5D-2	B4M Monju+ P-E01	B4M Monju+ P-E01	B4M Monju+ P-E01	B4M Monju+ P-E01
		2次元モデル式 説明変量 GORci ↓ Model-1式 C Set	2次元モデル式 説明変量 GORci,Q ↓ Model-2式 C Set	2次元モデル式 説明変量 GORci,Rcg ↓ Model-3式 C Set	2次元モデル式 説明変量 GORci,Q,Rcg ↓ Model-4式 C Set	2次元モデル式 説明変量 GORci ↓ Model-1式 D Set	2次元モデル式 説明変量 GORci,Q ↓ Model-2式 D Set	2次元モデル式 説明変量 GORci,Rcg ↓ Model-3式 D Set	2次元モデル式 説明変量 GORci,Q,Rcg ↓ Model-4式 D Set
定数	: b0	-45	-51	-57	-56	-65	87	-71	-72
偏回帰係数	: b1 (G0)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数	: b2 (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数	: b3 (Q)	-	0.016	-	-0.002	-	0.056	-	0.003
偏回帰係数	: b4 (Rcg)	-	-	9.905	10.034	-	-	5.227	5.071
偏回帰係数	: b5 (GORci)	0.111	0.108	0.096	0.096	0.130	0.128	0.122	0.122
自由度補正済決定係数		0.735	0.730	0.744	0.737	0.798	0.789	0.792	0.778
予測誤差 (micrometer)	(1σ)	19	19	18	18	15	15	15	15
標準偏回帰係数	: b1* (G0)	-	-	-	-	-	-	-	-
標準偏回帰係数	: b2* (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
標準偏回帰係数	: b3* (Q)	-	0.040	-	-0.005	-	0.059	-	0.003
標準偏回帰係数	: b4* (Rcg)	-	-	0.168	0.170	-	-	0.093	0.090
標準偏回帰係数	: b5* (GORci)	-	0.844	0.744	0.745	-	0.888	0.845	0.846
偏回帰係数のF分布検定値	: F1* (G0)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数のF分布検定値	: F2* (Rfo)	-	-	-	-	-	-	-	-
偏回帰係数のF分布検定値	: F3* (Q)	-	0	-	0	-	0	-	0
偏回帰係数のF分布検定値	: F4* (Rcg)	-	-	3	2	-	-	0	0
偏回帰係数のF分布検定値	: F5* (GORci)	-	96	49	48	-	65	41	33

G0：製造時直径ギャップ幅 (micrometer)、Rci：製造时被覆管内径 (mm)
Rfo：製造時燃料ペレット外径 (mm)
Q：線出力 (W/cm)、Rcg：柱状晶領域径 (mm)
リロケーション量 (micrometer)：ΔG

(標準偏回帰係数の大小は、それぞれの説明変量の影響の大小を意味する)
(有意水準としてα=0.05を設定すると、F分布検定値≤3の場合、その説明変量は不要であることを意味する)

表 1 6 「もんじゅ」仕様とPTM仕様を基準にしたリロケーション挙動
の外挿性評価（未熔融かつ柱状晶形成の試料に限定）

	A Set Model-1式 B4M Monju+	B Set Model-1式 P-E01+ B5D-1+B5D-2	C Set Model-1式 B4M Monju+ P-E01+ B5D-1+B5D-2	D Set Model-1式 B4M Monju+ P-E01
	偏差平均値	偏差平均値	偏差平均値	偏差平均値
＜基準試料群＞				
「もんじゅ」仕様				
・ B4M Monju：9点	-5	-11	-6	-2
・ P-E01：10点	6	2	4	2
PTM仕様				
・ B5D-1, B5D-2：28点	2	-1	0	-3
＜外挿比較試料群＞				
常陽 Mk-IIドライバー				
・ F3B：3点（柱状晶形成なし）	-4	-11	-4	4
・ B4M Joyo：2点（柱状晶形成なし）	-26	-31	-27	-24
・ B0J：6点	14	8	13	17
FFTFDriver				
・ P19細径：15点	-2	-10	-3	6
・ P20（P20-1934を除く）：5点（全て熔融試料）	-4	-9	-5	-3
・ DEA-2HEDL製高密度仕様：13点				
・ A（93.5%TD、193 μ m、1.97）：2点	-35	-40	-36	-34
・ B（93.5%TD、193 μ m、1.94）：2点	-46	-51	-47	-46
・ C（96.5%TD、282 μ m、1.97）：4点	-117	-118	-118	-125
・ D（96.5%TD、282 μ m、1.94）：1点	-55	-56	-56	-63
・ E（93.5%TD、279 μ m、1.97）：2点	-94	-96	-96	-103
・ F（93.5%TD、292 μ m、1.94）：2点	-106	-107	-108	-116
・ DEA-2HEDL製中密度仕様：7点				
・ H（90.6%TD、91 μ m、1.94）：2点	-7	-16	-7	4
・ J（90.6%TD、137 μ m、1.97）：2点	-23	-30	-23	-16
・ K（90.6%TD、142 μ m、1.94）：3点	-21	-28	-21	-19
・ DEA-2HEDL製低密度仕様：6点				
・ L（86.5%TD、91 μ m、1.97）：2点	-27	-36	-27	-16
・ M（86.5%TD、89 μ m、1.94）：3点	-36	-44	-36	-24
・ DEA-2KerrMcGee製：11点				
・ 3.1SG（90.4%TD、27wt%Pu、1.96）：5点	-14	-21	-15	-8
・ 3.2SG（90.4%TD、22wt%Pu、1.96）：6点	-25	-31	-25	-20
・ DEA-2B&W製：26点				
・ 3.1LG（90.4%TD、27wt%Pu、1.96）：4点	-13	-19	-14	-10
・ 3.1SG（90.4%TD、27wt%Pu、1.96）：4点	15	8	15	24
・ 3.2LG（90.4%TD、22wt%Pu、1.96）：5点	-28	-34	-29	-26
・ 4.1LG（90.4%TD、29wt%Pu、1.96）：4点	15	9	15	20
・ 4.1SG（90.4%TD、29wt%Pu、1.96）：4点	-2	-9	-2	6
・ 4.2LG（90.4%TD、25wt%Pu、1.96）：6点	-27	-32	-27	-23
FFTFDriver改良型				
・ P19太径：20点（全て熔融試料）	16	10	16	22

	「常陽」	「もんじゅ」	PTM	FFTFDriver
被覆管外径：Rco (mm)	5.50	6.50	7.50	5.84
被覆管内径：Rci (mm)	4.80	5.56	6.70	5.08
燃料ペレット外径：Rfo (mm)	4.63	5.40	6.52	4.94
直径ギャップ幅：G0 (μm)	170	160	180	140
相対ギャップ幅：G0/Rci	35.4	28.8	26.9	27.6

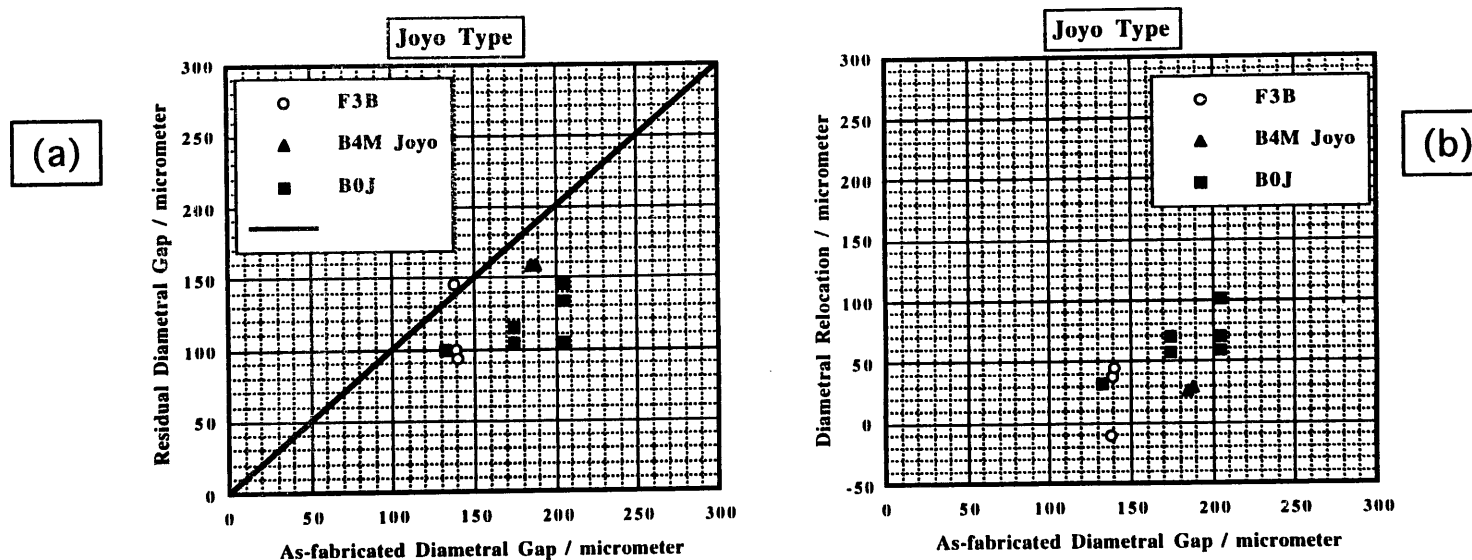


図1 「常陽」 Mk-IIドライバー仕様燃料ピンにおける残留ギャップ幅・リロケーション量・製造時ギャップ幅依存性
(短期照射試験結果：B4M Joyo・F3B・B0J)
(溶融試料なし) (表中の値はノミナル値あるいは基本条件)

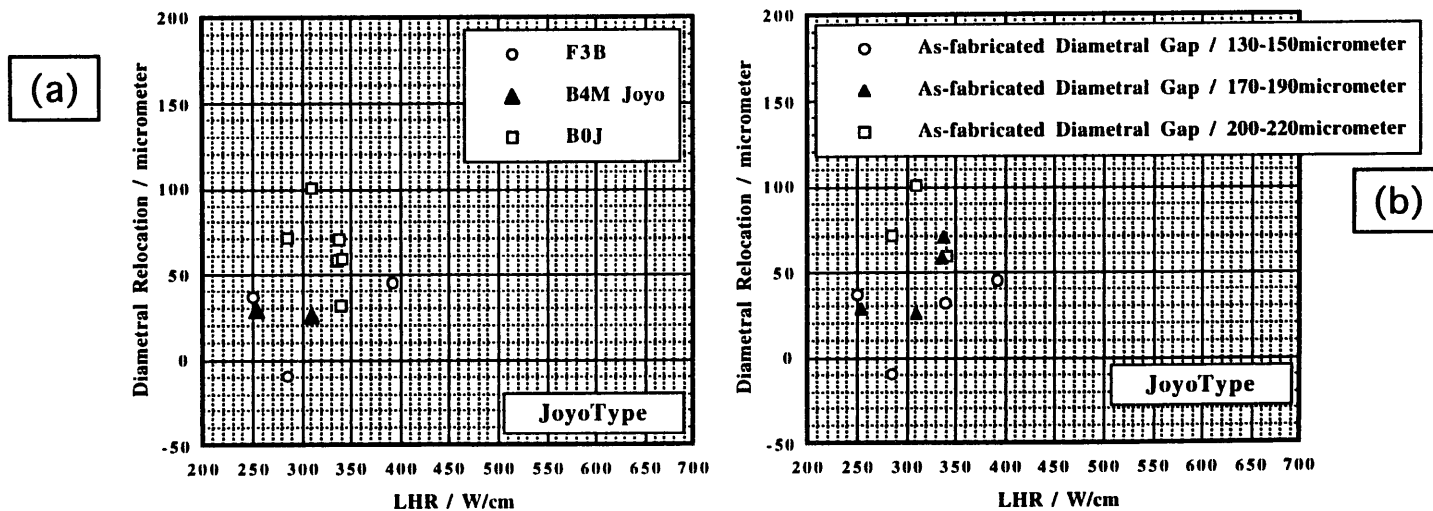


図2 「常陽」 Mk-IIドライバー仕様燃料ピンにおけるリロケーション量の線出力への依存性
(短期間照射試験結果： B4M・F3B・B0J)

	「常陽」	「もんじゅ」	PTM	FFTFDriver
被覆管外径: Rco (mm)	5.50	6.50	7.50	5.84
被覆管内径: Rci (mm)	4.80	5.56	6.70	5.08
燃料ペレット外径: Rfo (mm)	4.63	5.40	6.52	4.94
直径ギャップ幅: G0 (μm)	170	160	180	140
相対ギャップ幅: G0/Rci	35.4	28.8	26.9	27.6

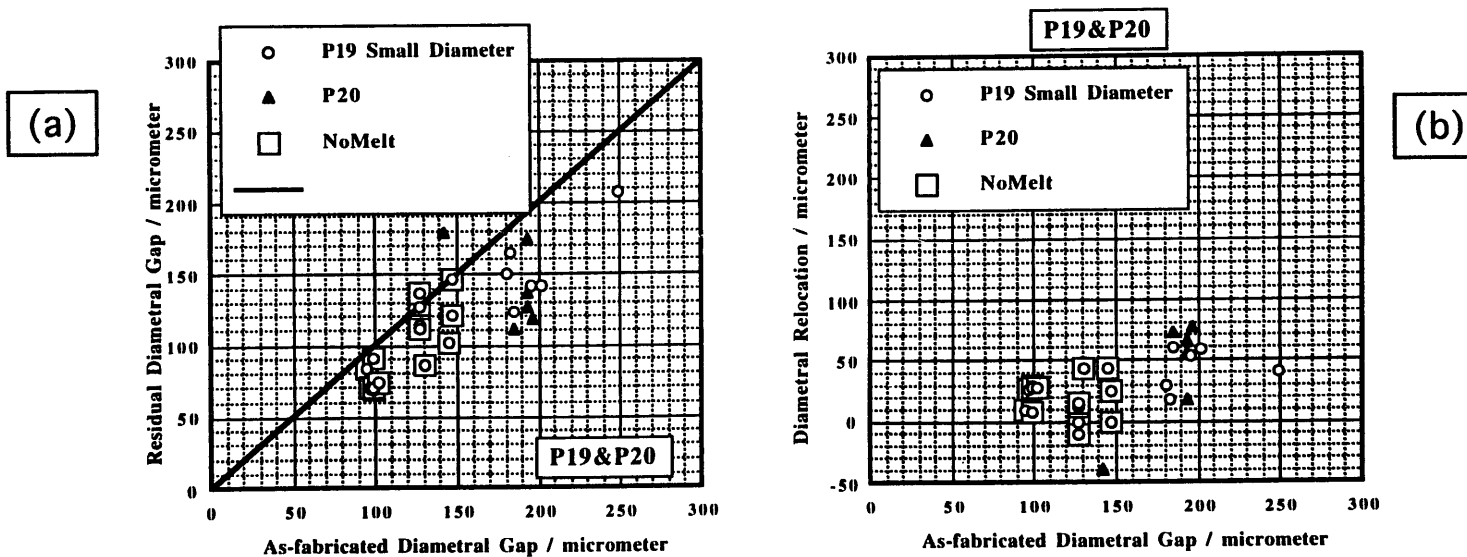


図3 FFTFドライバー仕様燃料ピンにおける残留ギャップ幅・リロケーション量・製造時ギャップ幅：その1
(溶融限界線出力評価試験結果：P19・P20) (P20は全て溶融試料)
(表中の値はノミナル値あるいは基本条件)

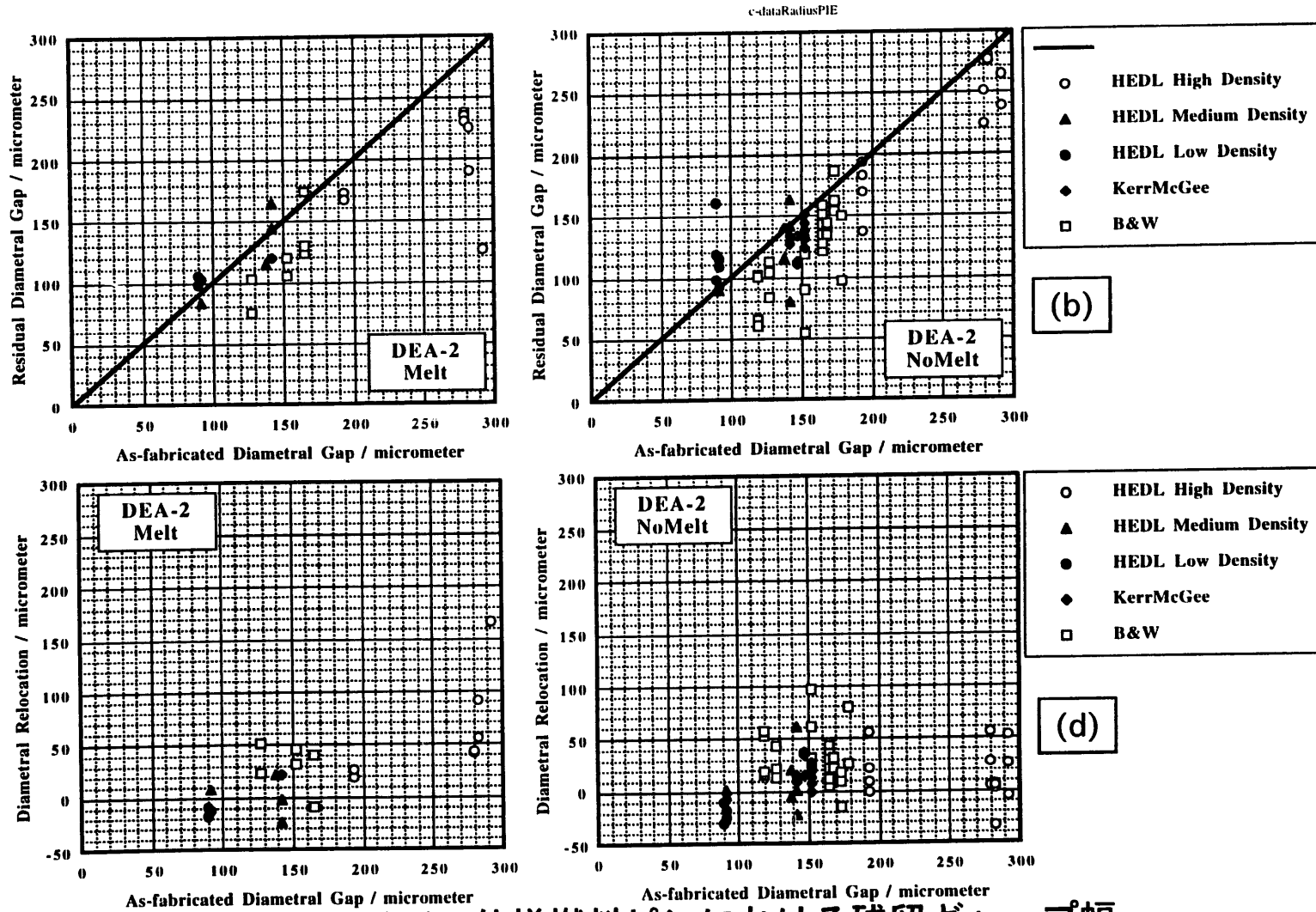


図4 FFTFドライバ仕様燃料ピンにおける残留ギャップ幅・リロケーション量・製造時ギャップ幅：その2

(溶融限界線出力評価試験結果：DEA-2) (被覆管内径：5.08mm)

(図(b)でHEDL High Densityの1点は残留ギャップ幅が300 μ mを超えており、図からはみだしている)
 (図(d)でHEDL Low Densityの1点はリロケーション量が-50 μ mを下回っており、図からはみだしている)

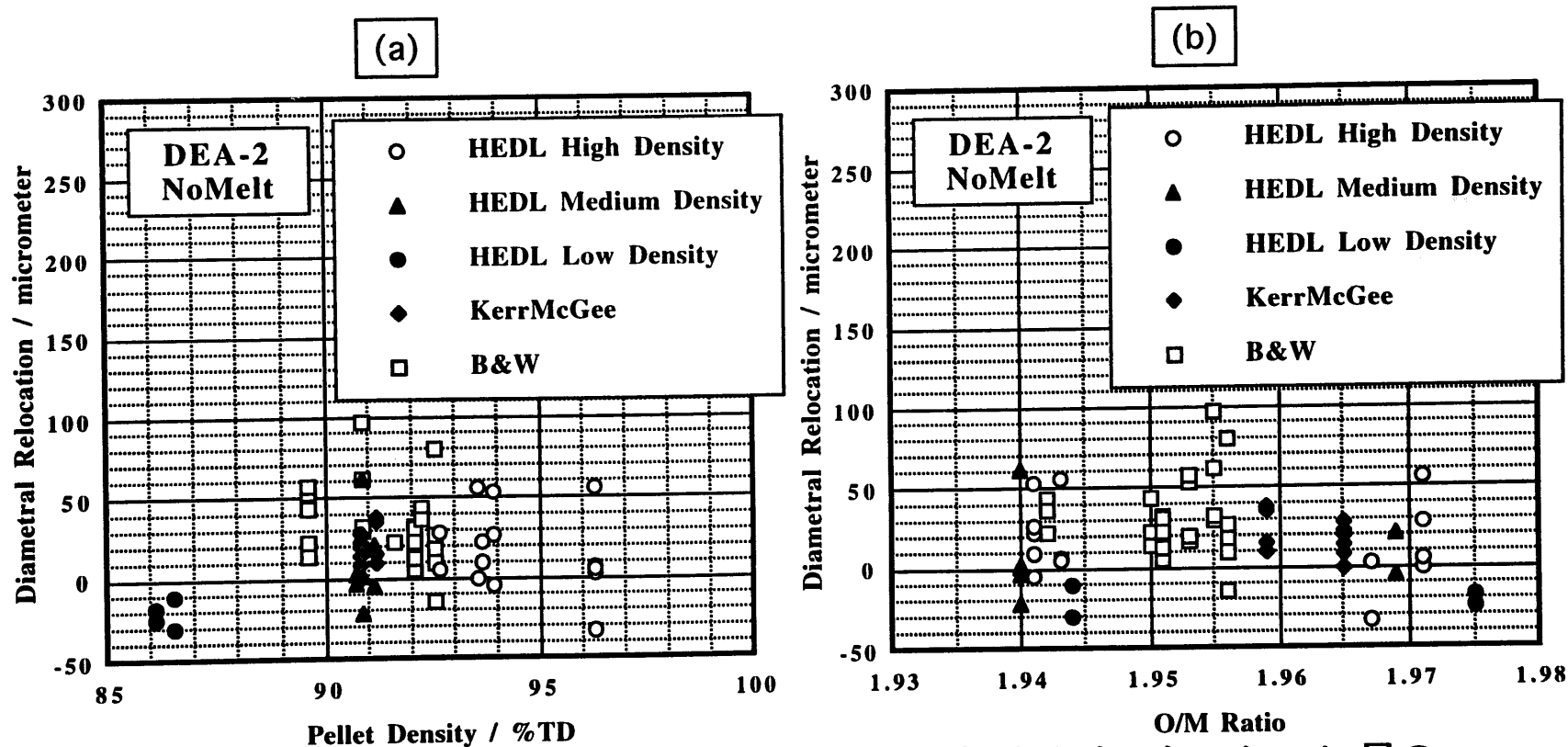


図5 FFTFドライバ仕様燃料ピンにおけるリロケーション量のO/M比と相対密度への依存性

(溶融限界線出力評価試験結果：DEA-2) (被覆管内径：5.08mm)

(HEDL High Densityの1点は残留ギャップ幅が300 μ mを超えており、図からはみだしている)

(HEDL Low Densityの1点はリロケーション量が-50 μ mを下回っており、図からはみだしている)

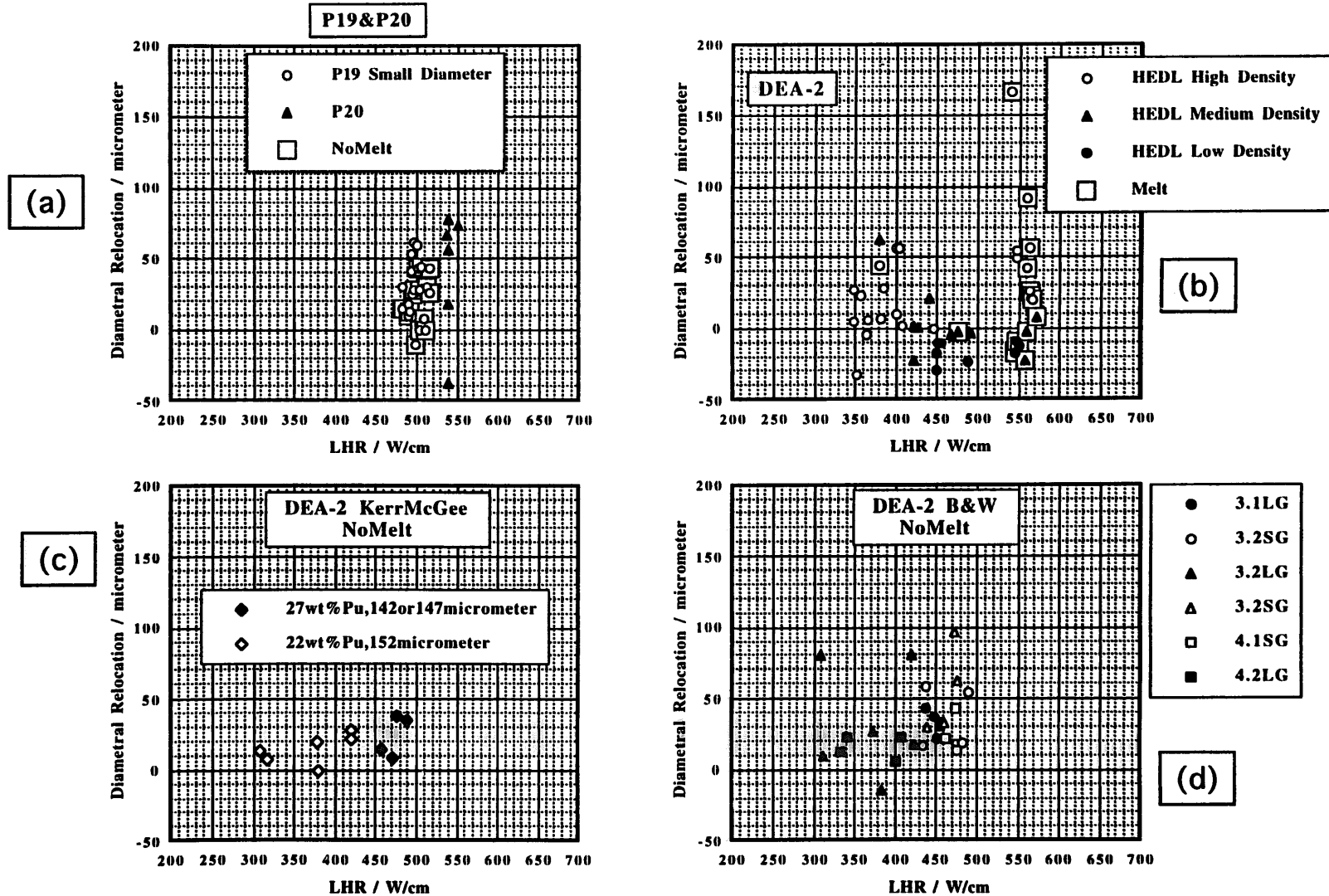


図6 FFTFドライバ仕様燃料ピンにおけるリロケーション量の線出力への依存性
 (溶融限界線出力評価試験結果：P19細径・P20・DEA-2)
 (図(b)でHEDL Low Densityの1点はリロケーション量が-50μmを下回っており、図からはみだしている)

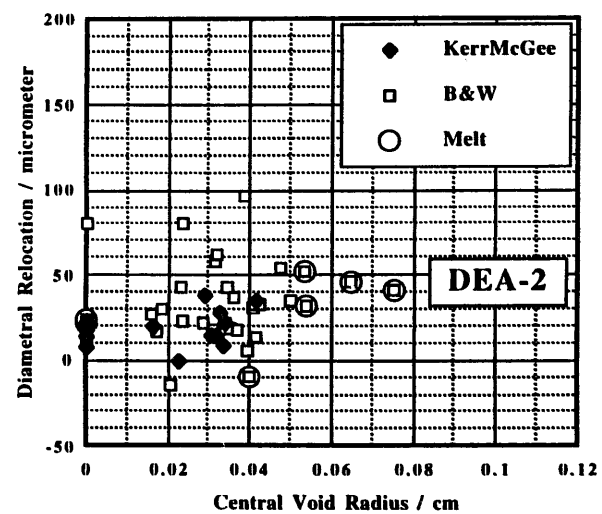
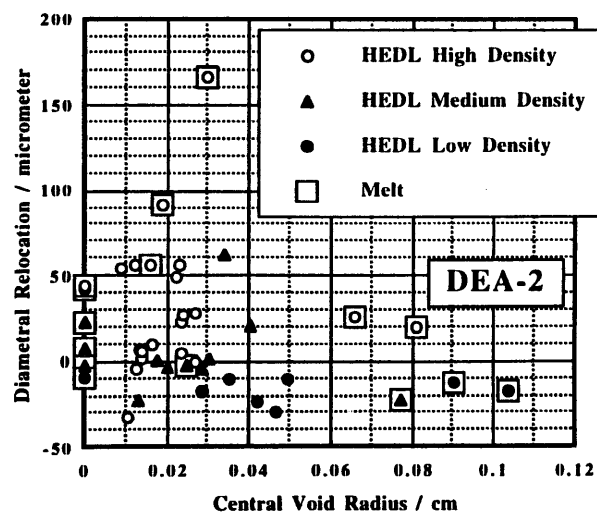
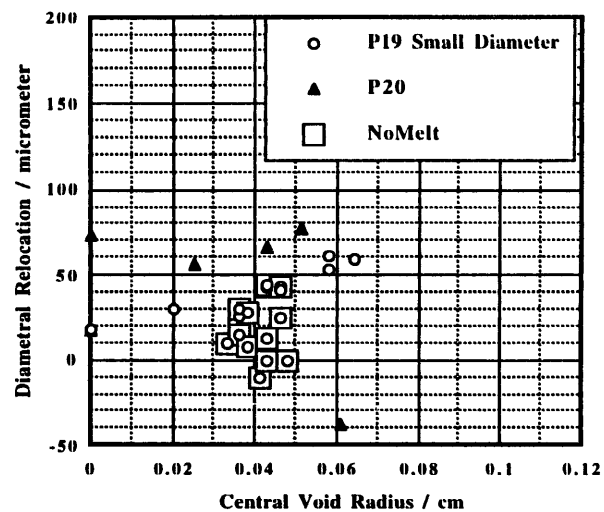


図7 FFTFドライバー仕様燃料ピンにおけるリロケーション量と中心空孔半径との相関

(溶融限界線出力評価試験結果：P19・P20・DEA-2) (P20は全て溶融試料)

(図(b)でHEDL Low Densityの1点はリロケーション量が $-50\mu\text{m}$ を下回っており、図からはみだしている)

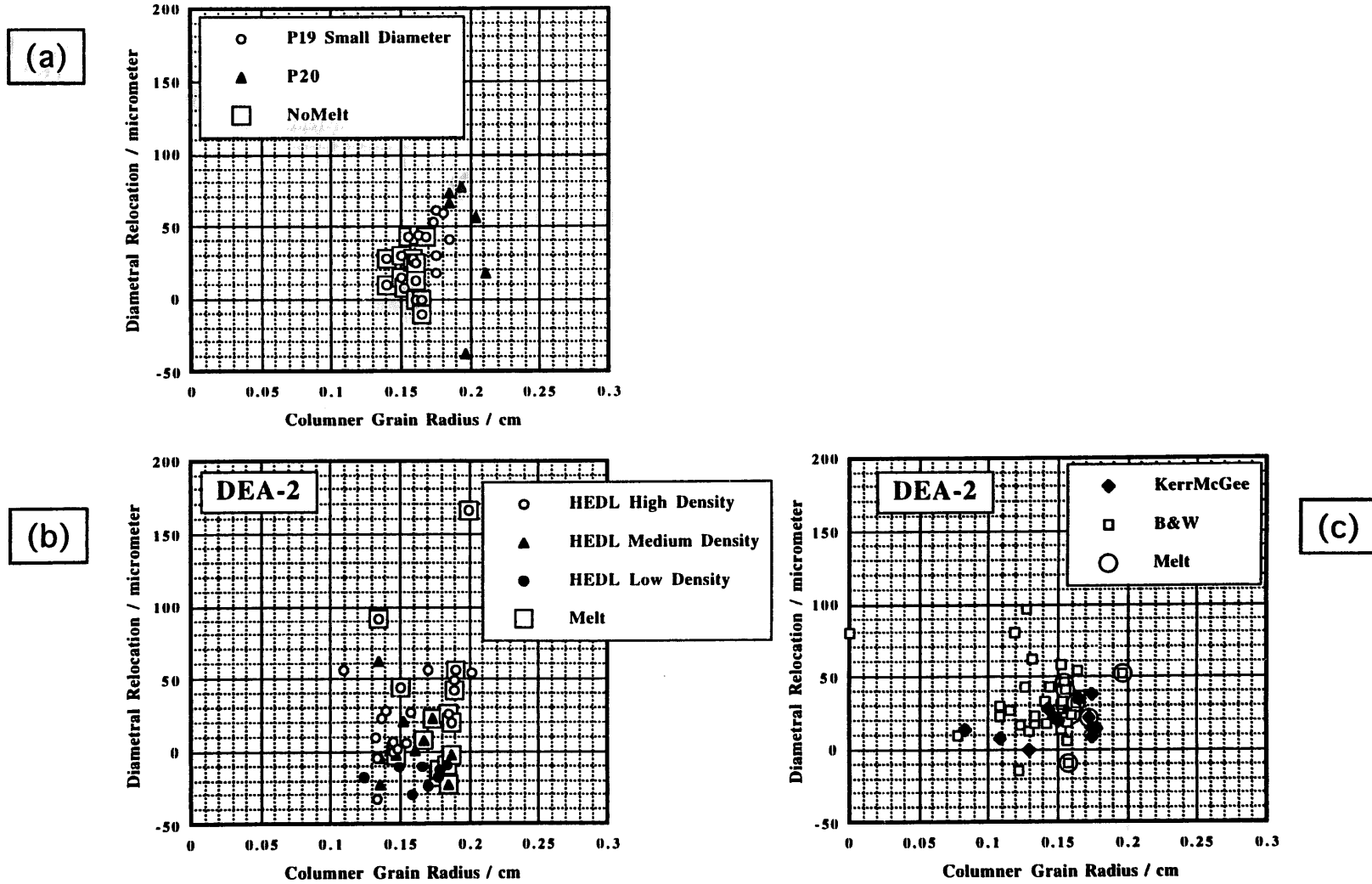


図8 FFTFドライバー仕様燃料ピンにおけるリロケーション量と柱状晶領域半径との相関

(溶融限界線出力評価試験結果：P19・P20・DEA-2) (P20は全て溶融試料)

(図(b)でHEDL Low Densityの1点はリロケーション量が-50 μ mを下回っており、図からはみだしている)

	「もんじゅ」	P-E01	P19太径
被覆管外径：Rco (mm)	6.50	6.50	6.35
被覆管内径：Rci (mm)	5.56	5.60	5.54
燃料ペレット外径：Rfo (mm)	5.40	5.44	5.36
直径ギャップ幅：G0 (μm)	160	160	180
相対ギャップ幅：G0/Rci	28.8	28.6	32.5

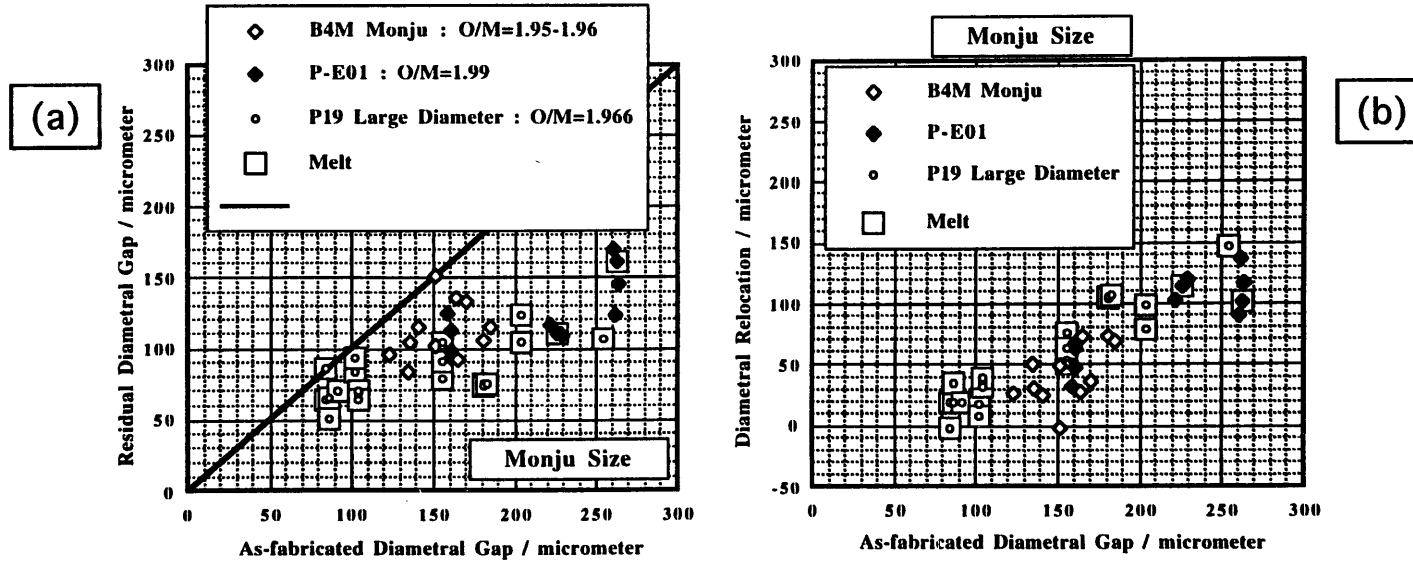


図9 FFTFドライバー改良型燃料ピンと「もんじゅ」仕様燃料ピン
 における残留ギャップ幅・リロケーション量・製造時ギャップ幅
 (溶融限界線出力評価試験結果：P-E01・P19太径、短期間照射試験結果：B4M Monju)
 (P19太径は全て溶融試料、B4Mは全て未溶融試料)

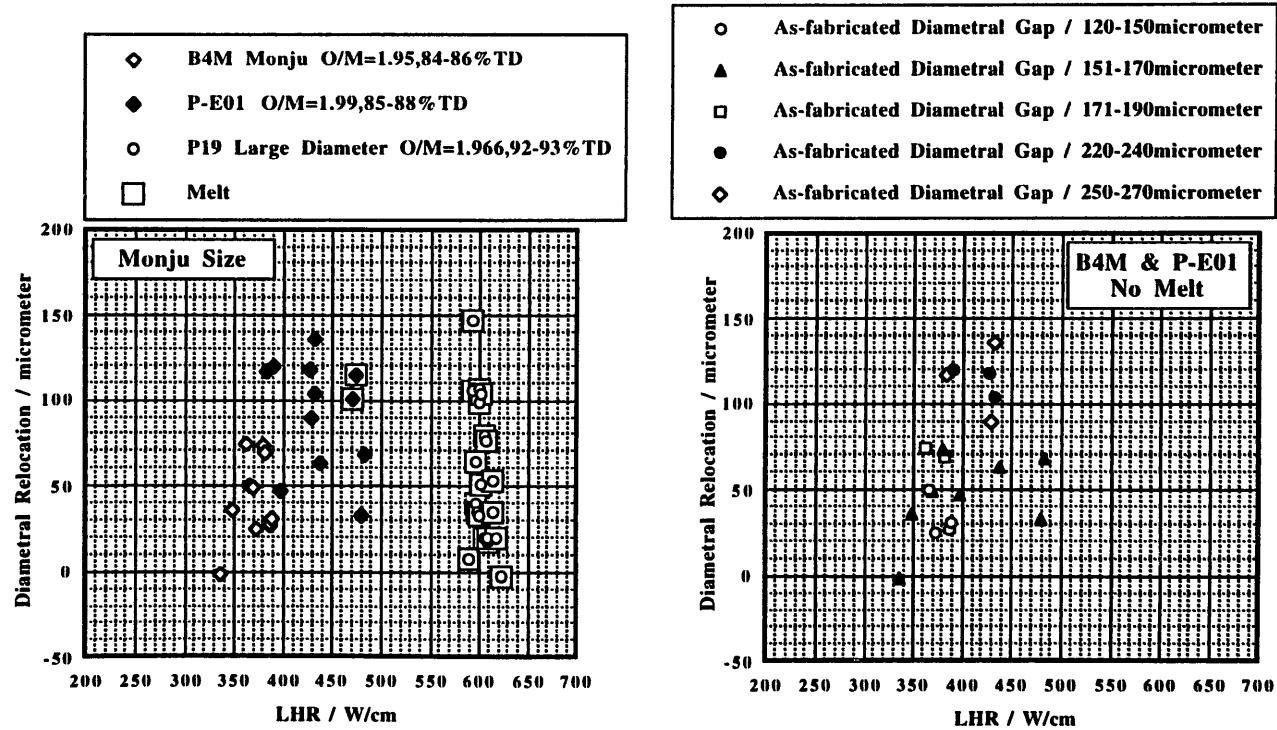


図 10 FFTFドライバー改良型燃料ピンと「もんじゅ」仕様燃料ピン
 におけるリロケーション量の線出力への依存性

(溶融限界線出力評価試験結果：P19太径・P-E01、短期間照射試験結果：B4M Monju)
 (P19太径は全試料溶融、B4Mは全試料未溶融)

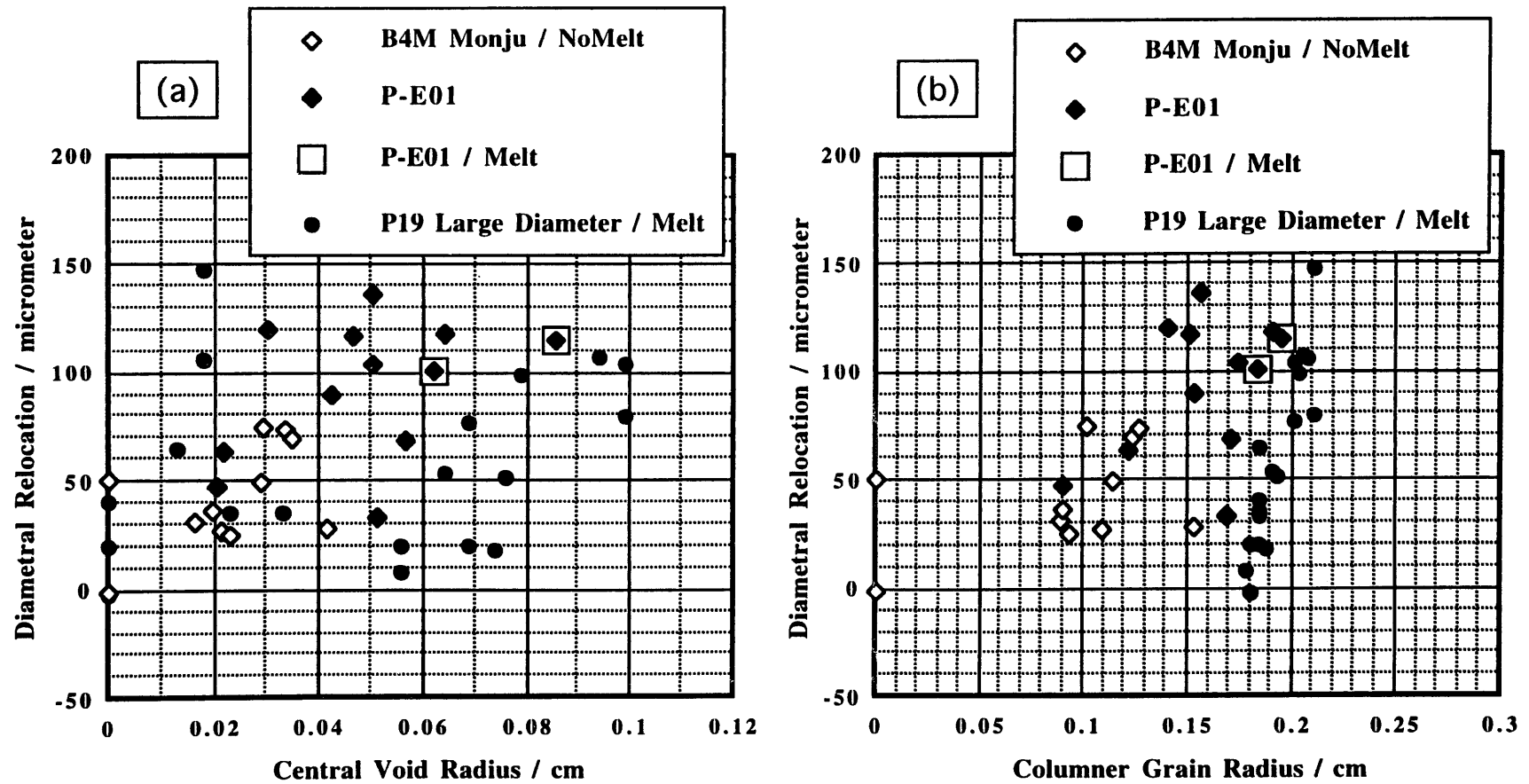


図 1.1 FFTFドライバー改良型燃料ピンと「もんじゅ」仕様燃料ピン
 におけるリロケーション量の中心空孔半径と柱状晶領域半径との相関
 (熔融限界線出力評価試験結果：P19・P-E01、短期間照射試験結果：B4M Monju)
 (B4Mは全試料未熔融、P19太径は全試料熔融)

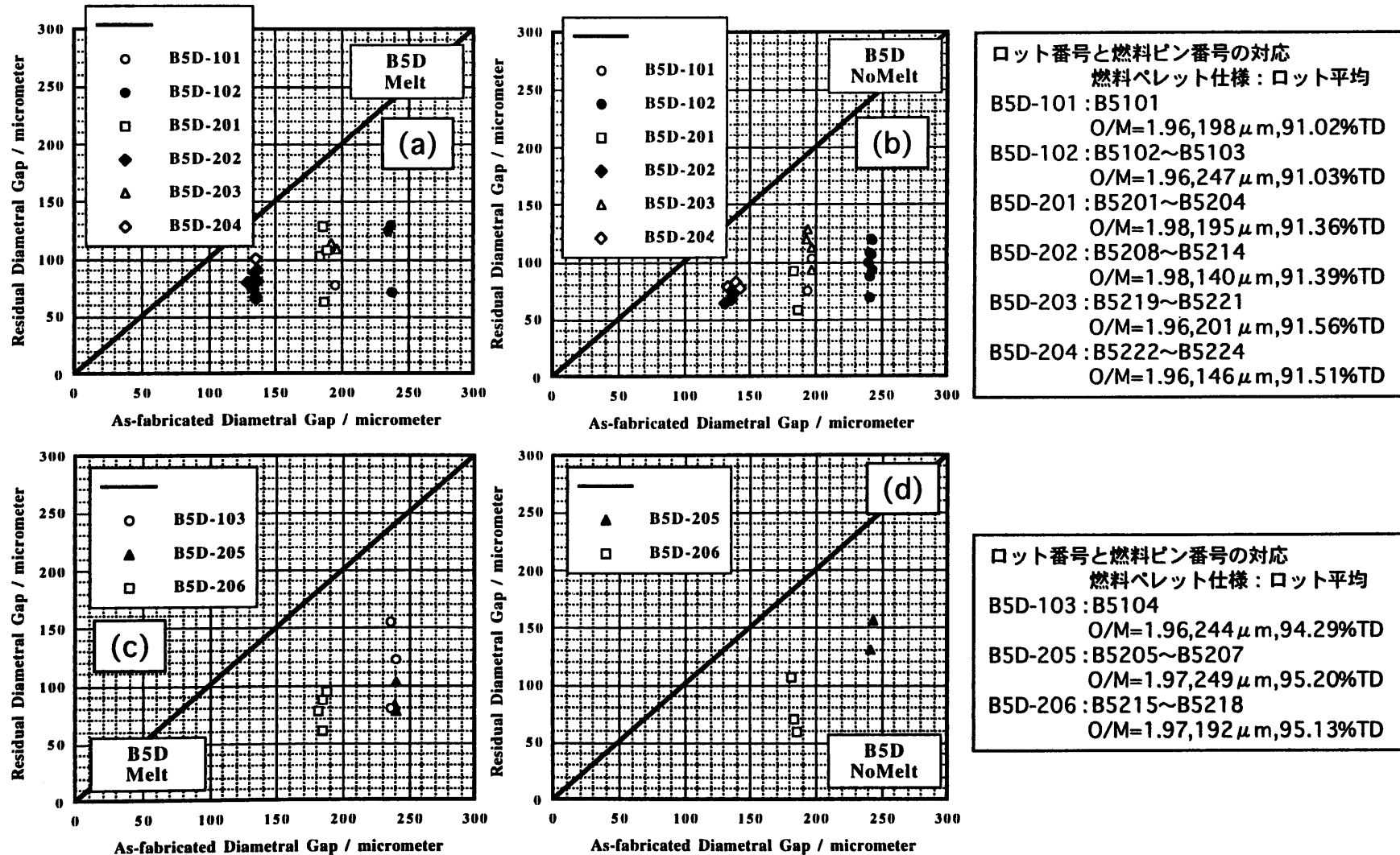
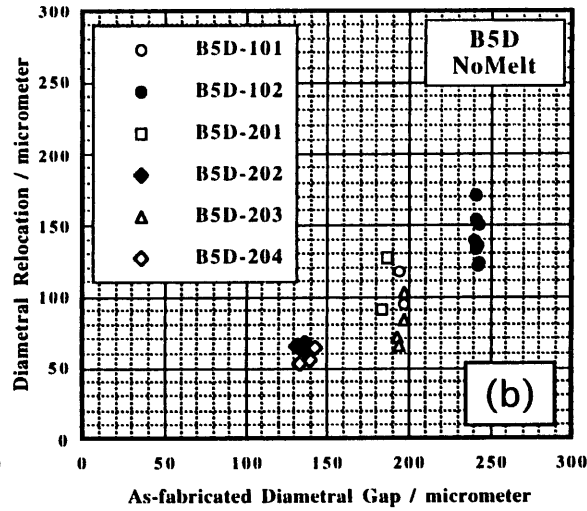
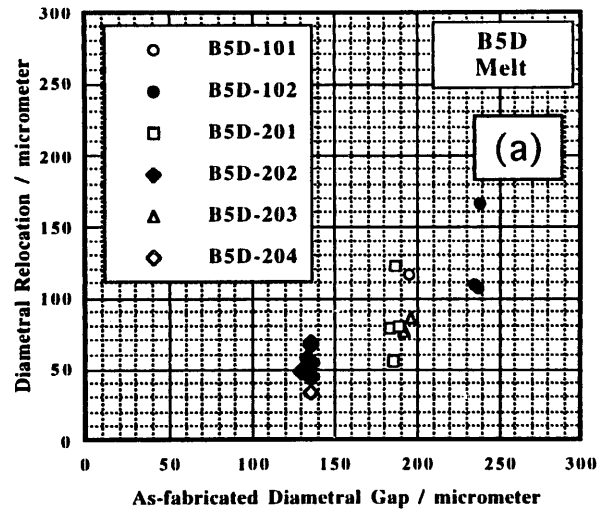


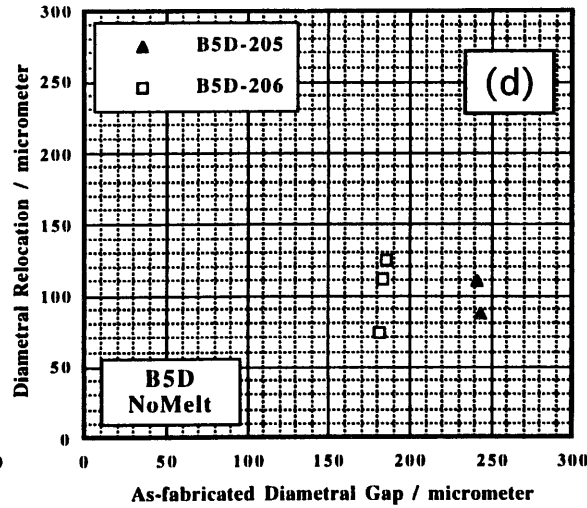
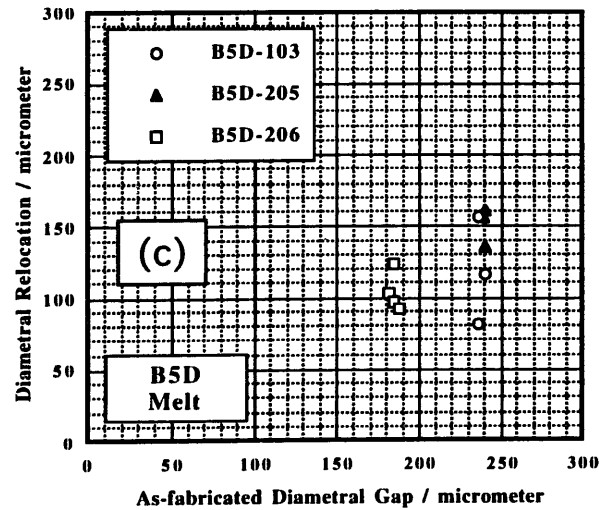
図 1 2 「常陽」 PTM仕様燃料ピンにおける製造時ギャップ幅と残留ギャップ幅との関係

(熔融限界線出力評価試験結果：B5D-1・B5D-2) (被覆管内径：6.7mm)
 (パラメータが多いため、燃料ペレットロット単位で整理した)



ロット番号と燃料ピン番号の対応
燃料ペレット仕様：ロット平均

B5D-101	: B5101	O/M=1.96,198 μm ,91.02%TD
B5D-102	: B5102~B5103	O/M=1.96,247 μm ,91.03%TD
B5D-201	: B5201~B5204	O/M=1.98,195 μm ,91.36%TD
B5D-202	: B5208~B5214	O/M=1.98,140 μm ,91.39%TD
B5D-203	: B5219~B5221	O/M=1.96,201 μm ,91.56%TD
B5D-204	: B5222~B5224	O/M=1.96,146 μm ,91.51%TD



ロット番号と燃料ピン番号の対応
燃料ペレット仕様：ロット平均

B5D-103	: B5104	O/M=1.96,244 μm ,94.29%TD
B5D-205	: B5205~B5207	O/M=1.97,249 μm ,95.20%TD
B5D-206	: B5215~B5218	O/M=1.97,192 μm ,95.13%TD

図 1 3 「常陽」 PTM仕様燃料ピンにおけるリロケーション量の製造時ギャップ幅依存性

(溶融限界線出力評価試験結果：B5D-1・B5D-2) (被覆管内径：6.7mm)
(パラメータが多いため、燃料ペレットロット単位で整理した)

ロット番号：燃料ペレット仕様（ロット平均値）
 B5D-101 : O/M=1.96,198 μm,91.02%TD
 B5D-102 : O/M=1.96,247 μm,91.03%TD
 B5D-103 : O/M=1.96,244 μm,94.29%TD
 B5D-201 : O/M=1.98,195 μm,91.36%TD
 B5D-202 : O/M=1.98,140 μm,91.39%TD
 B5D-203 : O/M=1.96,201 μm,91.56%TD
 B5D-204 : O/M=1.96,146 μm,91.51%TD
 B5D-205 : O/M=1.97,249 μm,95.20%TD
 B5D-206 : O/M=1.97,192 μm,95.13%TD

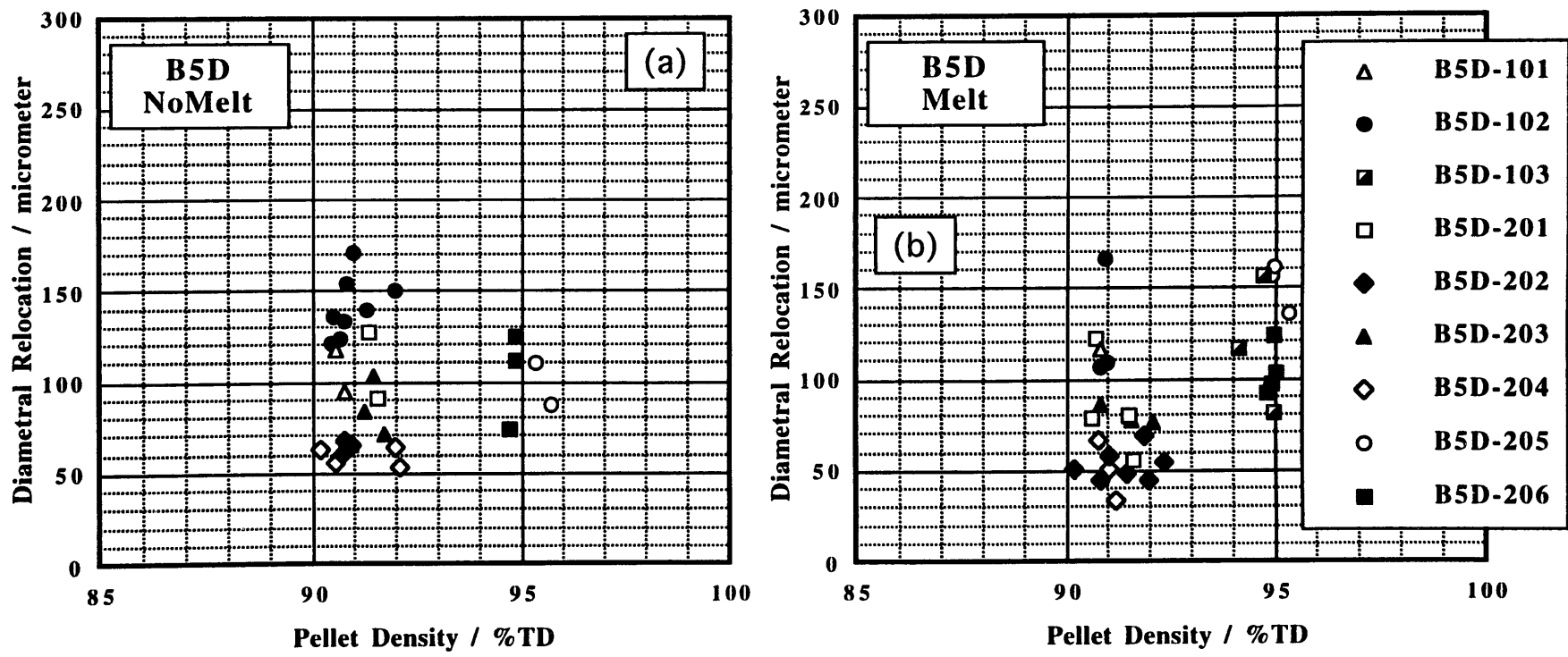
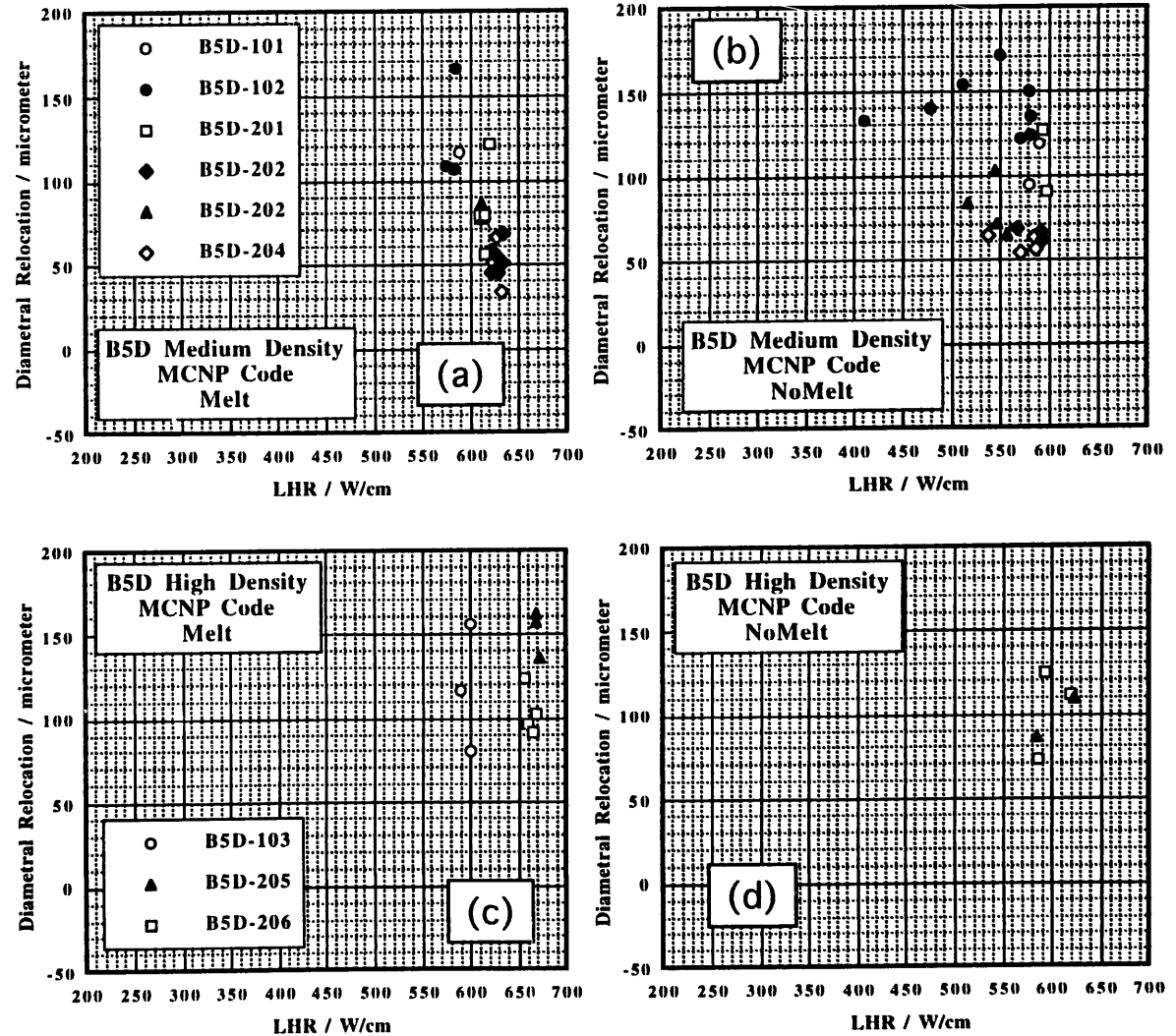


図 1 4 「常陽」 PTM仕様燃料ピンにおけるリロケーション量の相対密度への依存性
 (溶融限界線出力評価試験結果：B5D-1・B5D-2) (被覆管内径：6.7mm)



ロット番号：燃料ペレット仕様 (ロット平均値)

B5D-101	O/M=1.96, 198 μ m, 91.02%TD
B5D-102	O/M=1.96, 247 μ m, 91.03%TD
B5D-103	O/M=1.96, 244 μ m, 94.29%TD
B5D-201	O/M=1.98, 195 μ m, 91.36%TD
B5D-202	O/M=1.98, 140 μ m, 91.39%TD
B5D-203	O/M=1.96, 201 μ m, 91.56%TD
B5D-204	O/M=1.96, 146 μ m, 91.51%TD
B5D-205	O/M=1.97, 249 μ m, 95.20%TD
B5D-206	O/M=1.97, 192 μ m, 95.13%TD

図 15 「常陽」PTM仕様燃料ピンにおけるリロケーション量の線出力依存性
 (溶融限界線出力評価試験結果：B5D-1・B5D-2) (*：ロット平均値)
 (照射条件にはMCNPコード解析値を使用)

ロット番号 (燃料ピン番号) : 燃料ペレット仕様 (ロット平均値)	
B5D-101 (B5101)	: O/M=1.96, 198 μm , 91.02%TD
B5D-102 (B5102~B5103)	: O/M=1.96, 247 μm , 91.03%TD
B5D-201 (B5201~B5204)	: O/M=1.98, 195 μm , 91.36%TD
B5D-202 (B5208~B5214)	: O/M=1.98, 140 μm , 91.39%TD
B5D-203 (B5219~B5221)	: O/M=1.96, 201 μm , 91.56%TD
B5D-204 (B5222~B5224)	: O/M=1.96, 146 μm , 91.51%TD
B5D-205 (B5205~B5207)	: O/M=1.97, 249 μm , 95.20%TD
B5D-206 (B5215~B5218)	: O/M=1.97, 192 μm , 95.13%TD

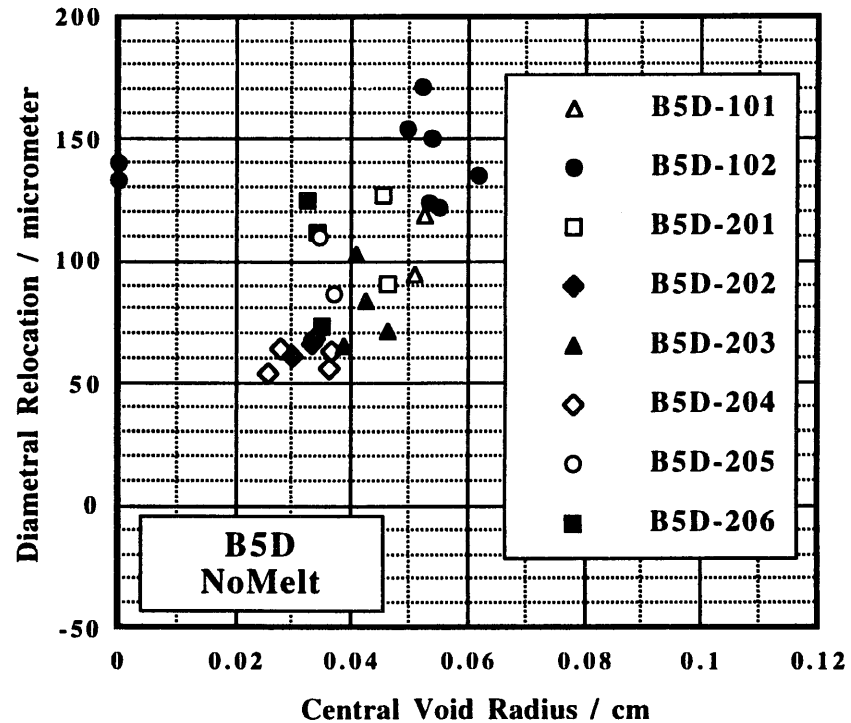


図 1 6 「常陽」 PTM仕様燃料ピンにおけるリロケーション量と中心空孔半径との相関

(溶融限界線出力評価試験結果: B5D-1・B5D-2) (*:ロット平均値)

ロット番号 (燃料ピン番号) : 燃料ペレット仕様 (ロット平均値)

B5D-101 (B5101)	: O/M=1.96, 198 μ m, 91.02%TD
B5D-102 (B5102~B5103)	: O/M=1.96, 247 μ m, 91.03%TD
B5D-103 (B5104)	: O/M=1.96, 244 μ m, 94.29%TD
B5D-201 (B5201~B5204)	: O/M=1.98, 195 μ m, 91.36%TD
B5D-202 (B5208~B5214)	: O/M=1.98, 140 μ m, 91.39%TD
B5D-203 (B5219~B5221)	: O/M=1.96, 201 μ m, 91.56%TD
B5D-204 (B5222~B5224)	: O/M=1.96, 146 μ m, 91.51%TD
B5D-205 (B5205~B5207)	: O/M=1.97, 249 μ m, 95.20%TD
B5D-206 (B5215~B5218)	: O/M=1.97, 192 μ m, 95.13%TD

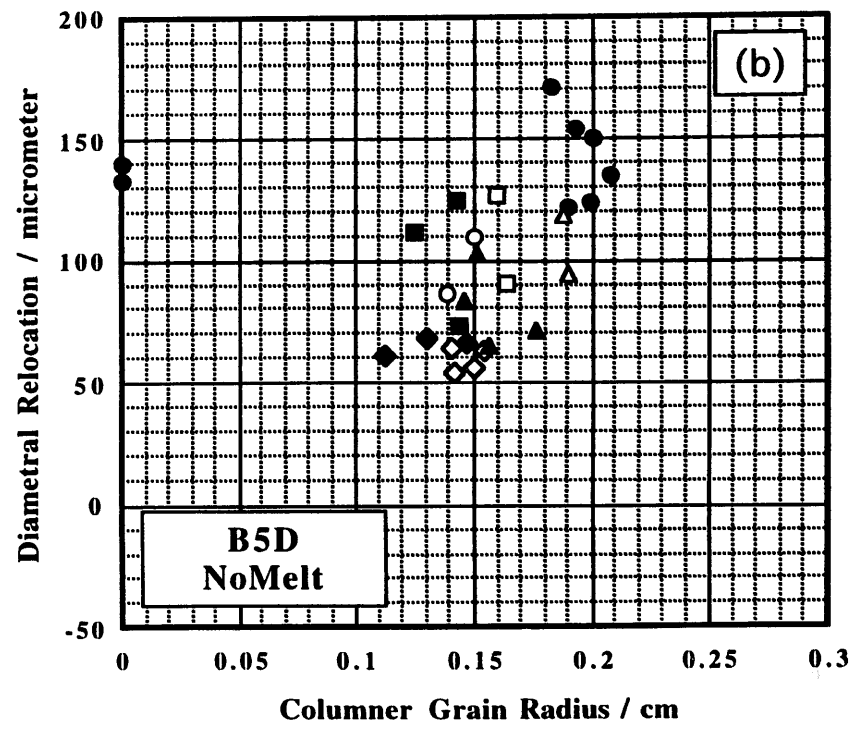
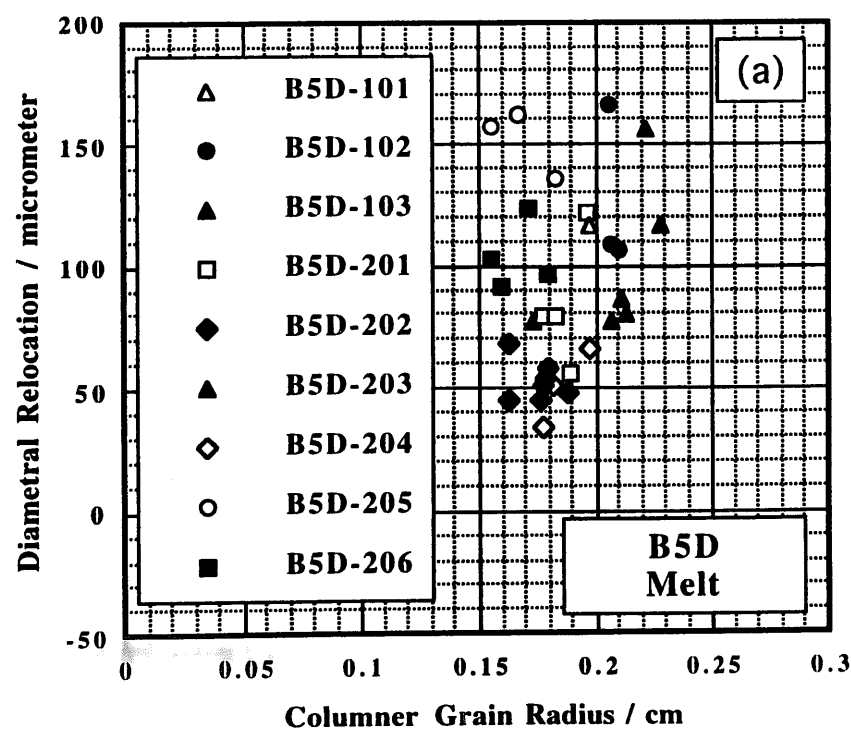


図 1 7 「常陽」 PTM仕様燃料ピンにおけるリロケーション量と柱状晶領域半径との相関
(溶融限界線出力評価試験結果 : B5D-1・B5D-2)

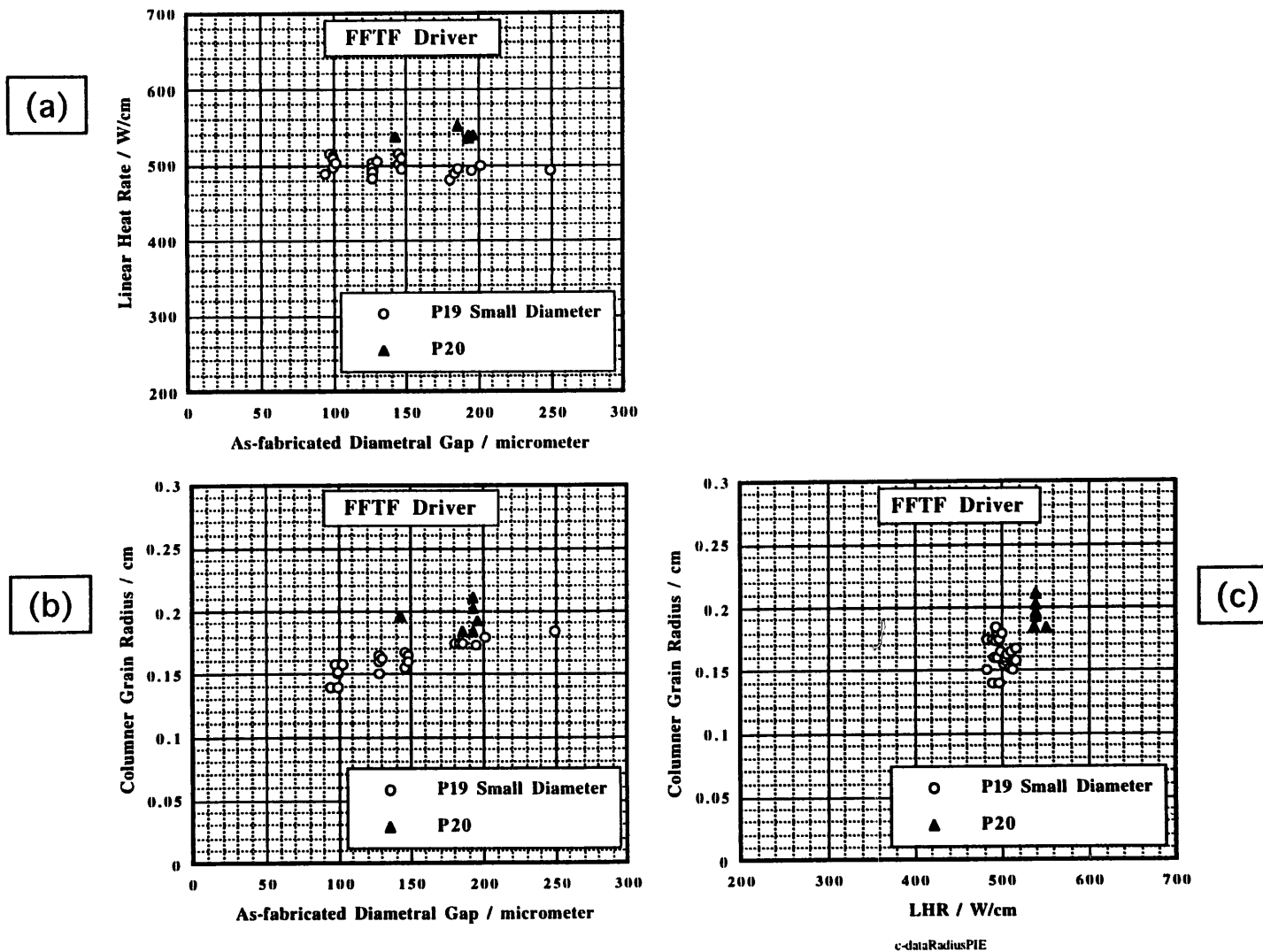


図 1 8 P19・P20で照射されたFFTFドライバー仕様燃料ピン
 に対するデータ取得条件
 (溶融限界線出力評価試験結果：P19・P20) (P20は全て溶融試料)

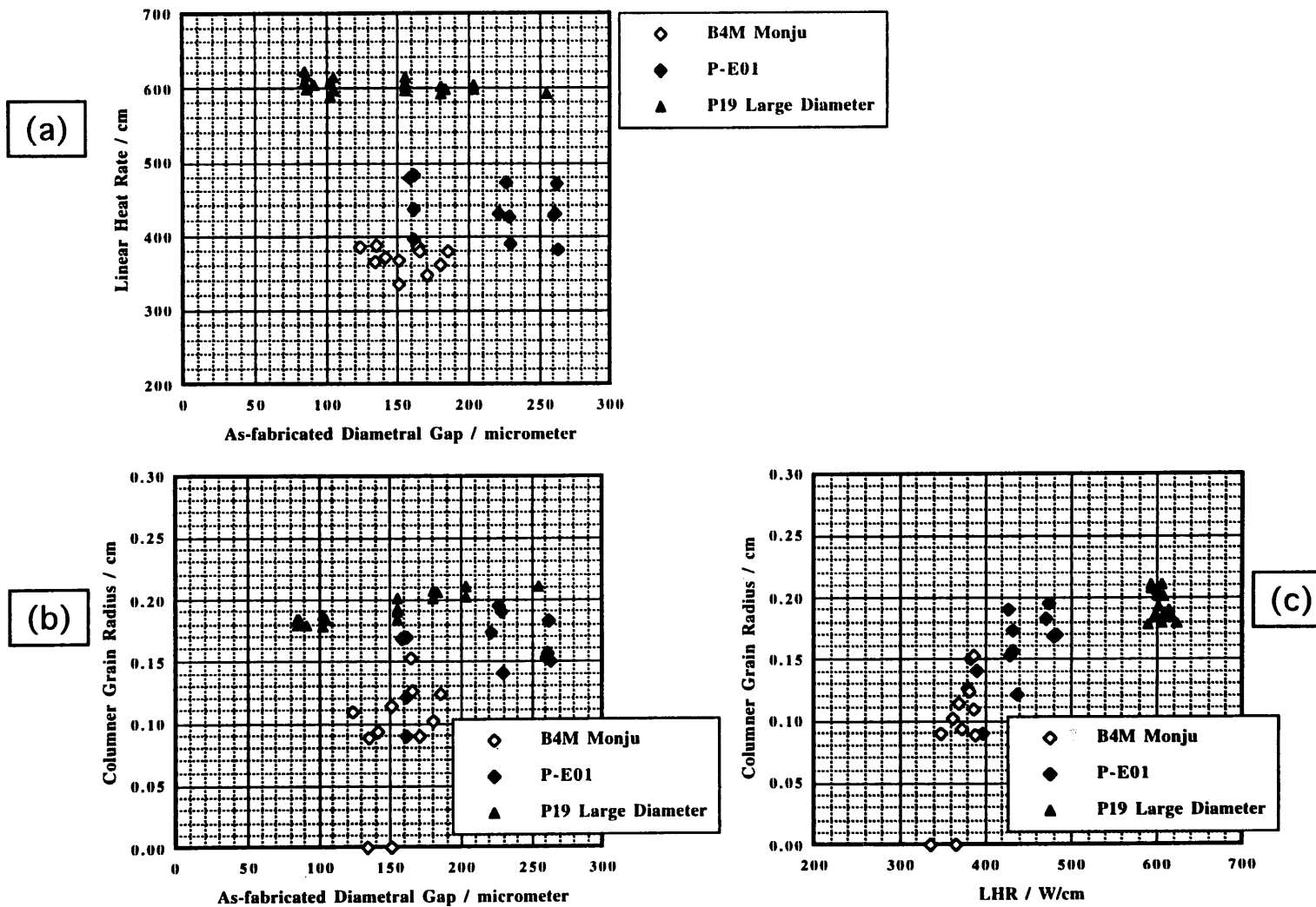
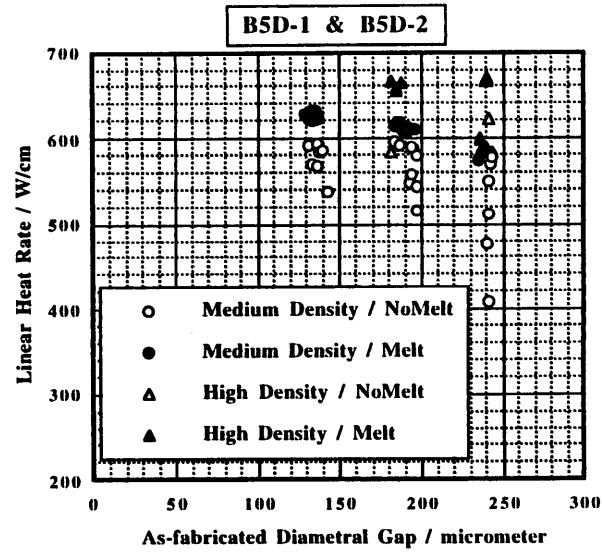


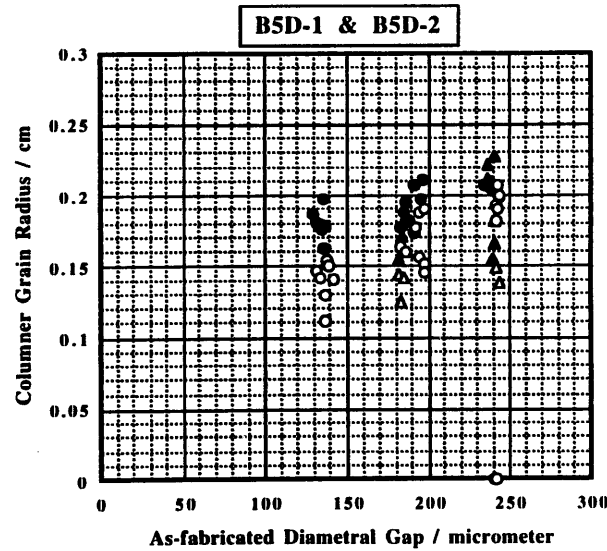
図 1 9 FFTF ドライバー 改良型 燃料ピン と 「もんじゅ」 仕様 燃料ピン に対する データ 取得 条件

(溶融 限界線 出力 評価 試験 結果 : P19・P-E01、短期 間照射 試験 結果 : B4M Monju)
 (B4M は 全試料 未溶融、P19 太径 は 全試料 溶融)

(a)



(b)



(c)

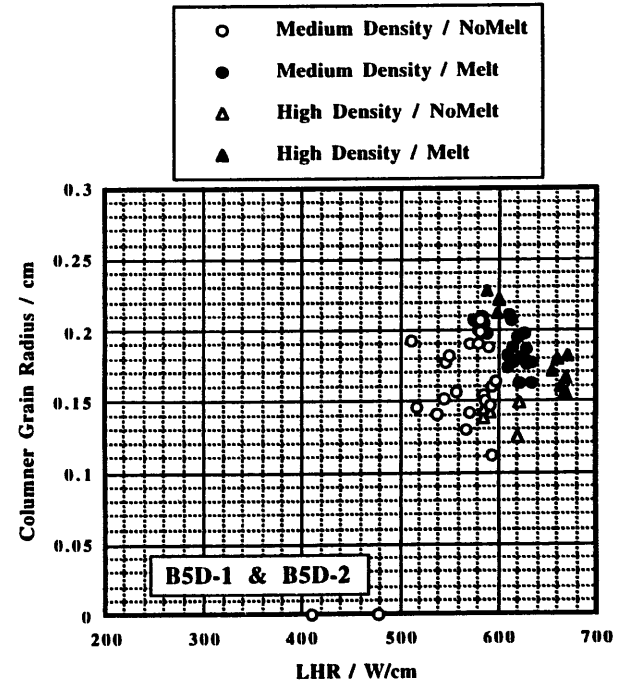


図 2 0 「常陽」 PTM仕様燃料ピンに対するデータ取得条件
(溶融限界線出力評価試験結果： B5D-1・ B5D-2)

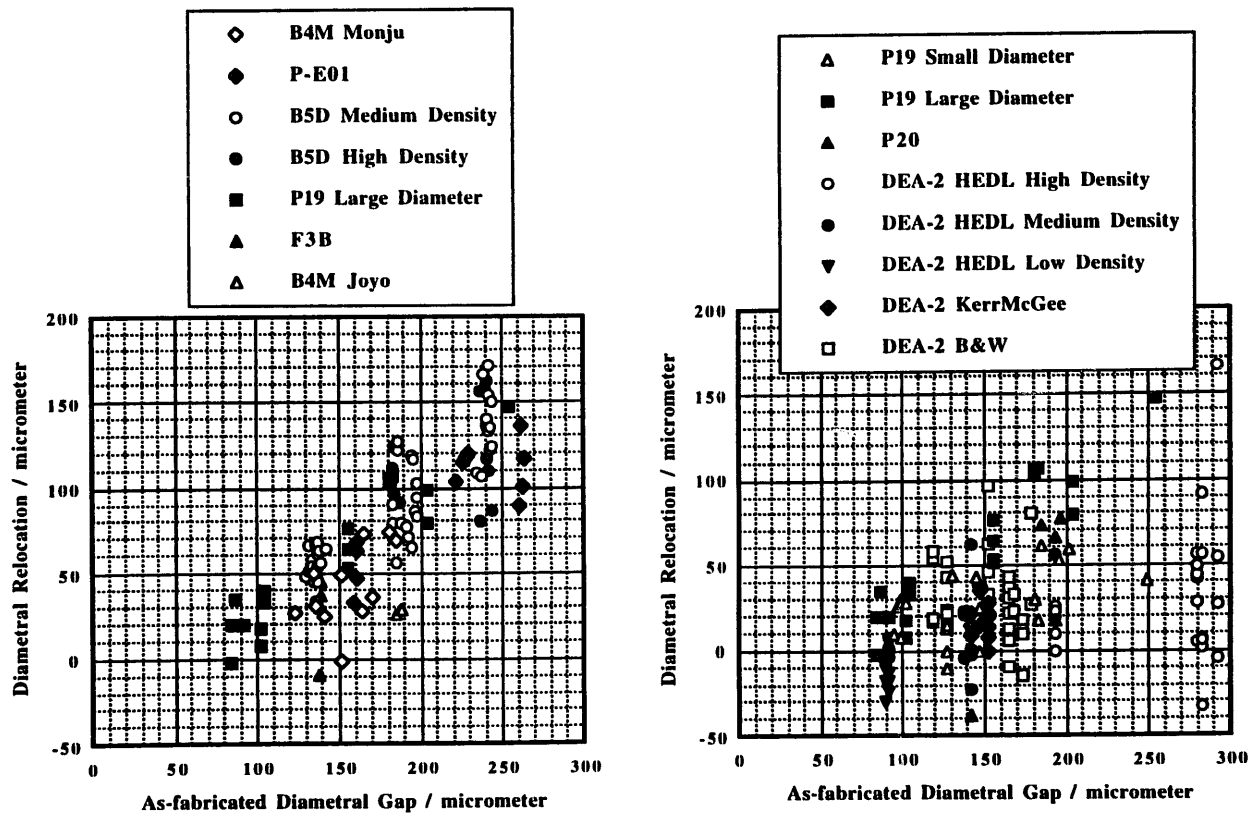


図 2 1 リロケーション量に対する燃料ピン径の効果

(溶融限界線出力評価試験結果：P19・P20・DEA-2・P-E01・B5D-1・B5D-2、短期間照射試験結果：F3B・B4M)

(図(b)でDEA-2の1点はリロケーション量が $-50\mu\text{m}$ を下回っており、図からはみだしている)

(比較のためP19太径を両方の図にプロットしてある)

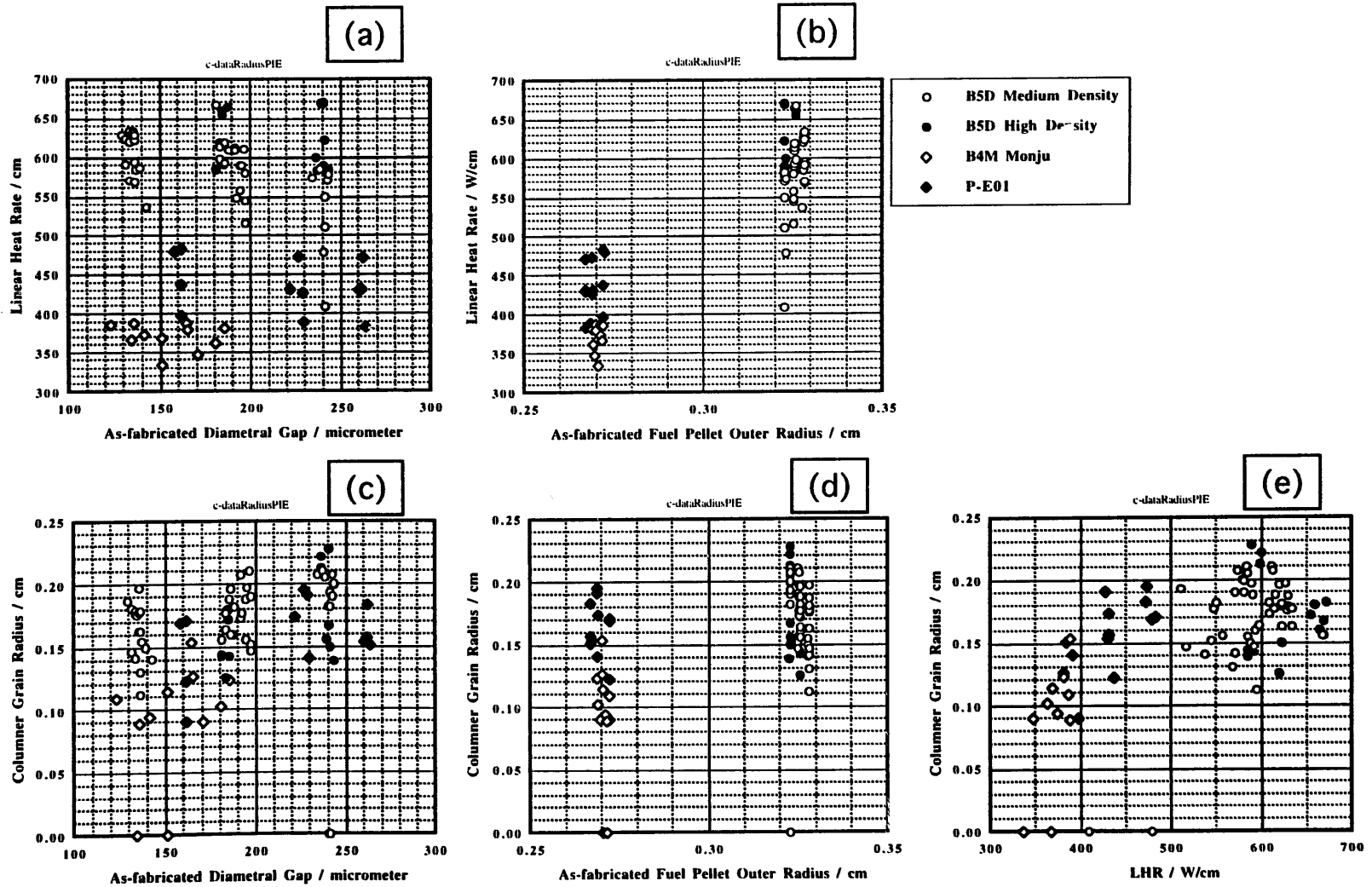


図 2 2 「もんじゅ」仕様燃料ピンと「常陽」PTM仕様燃料ピン
に対するデータ取得条件

(説明変量：製造時ギャップ幅、製造時燃料ペレット外半径、線出力、柱状晶領域半径)
(溶融限界線出力評価試験結果：P-E01・B5D-1・B5D-2、短期間照射試験結果：B4M Monju)

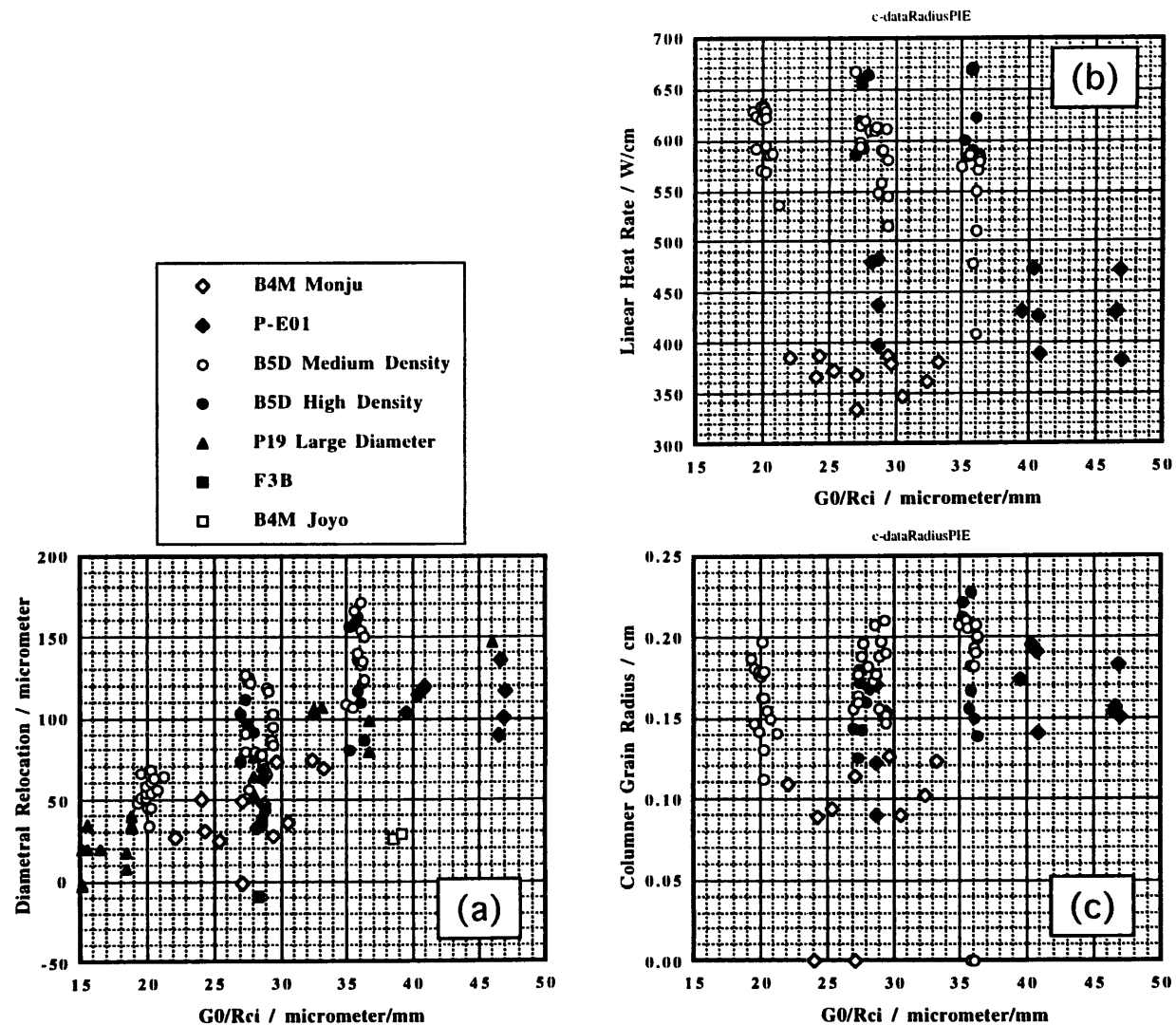


図 2 3 1次元モデルによる異なる燃料ピン径間のリロケーション挙動の検討
 (溶融限界線出力評価試験結果：P-E01・B5D-1・B5D-2、短期間照射試験結果：B4M Monju)
 (G0：製造時ギャップ幅、Rci：被覆管内径)

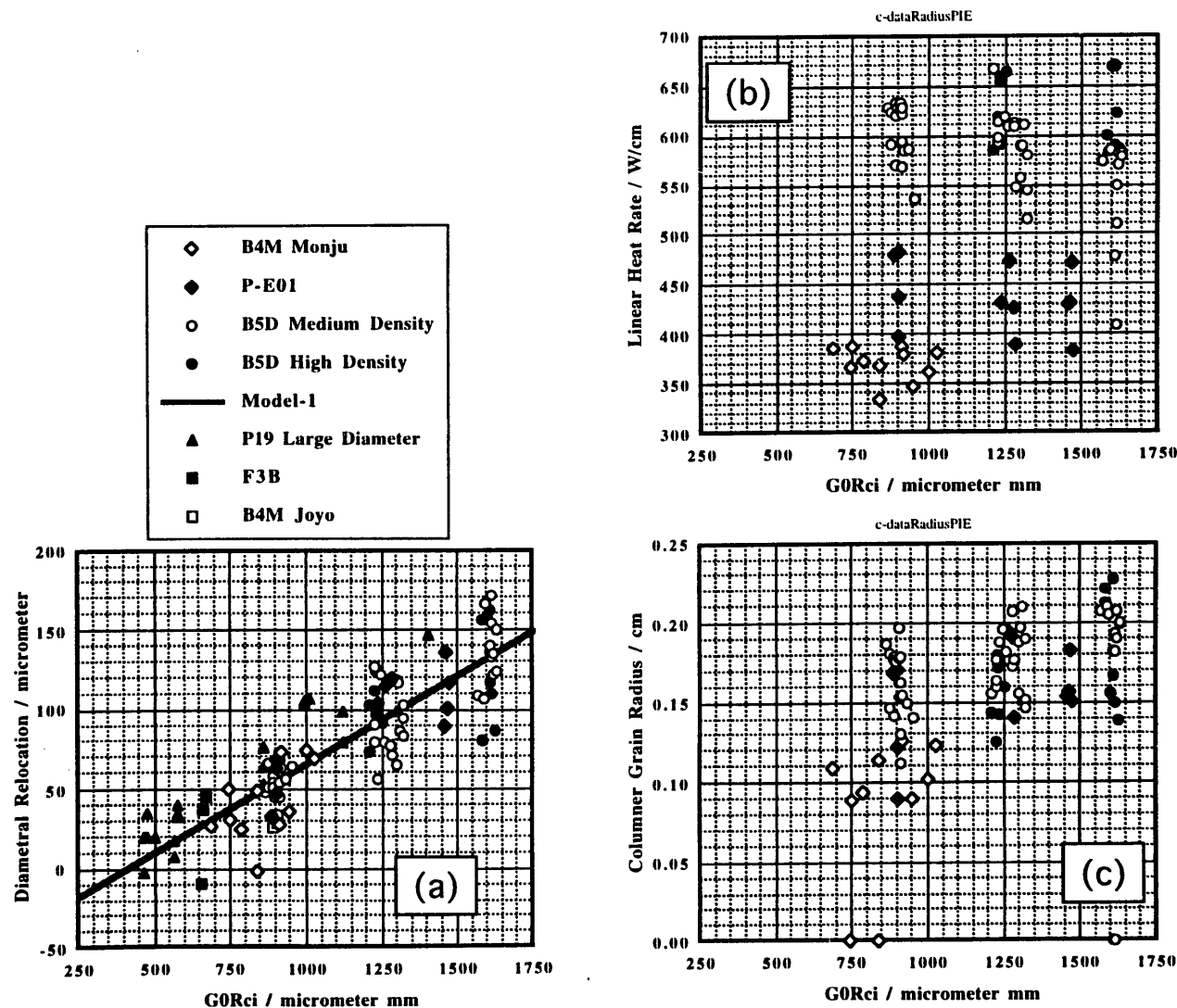


図 2 4 2次元モデルによる異なる燃料ピン径間のリロケーション挙動の検討

(溶融限界線出力評価試験結果：P19・P-E01・B5D-1・B5D-2、短期間照射試験結果：F3B・B4M)

(図中のModel-1式： $\Delta G=0.111GORci-45$ 、 ΔG ：リロケーション量、 GO ：製造時ギャップ幅、 Rci ：被覆管内径)

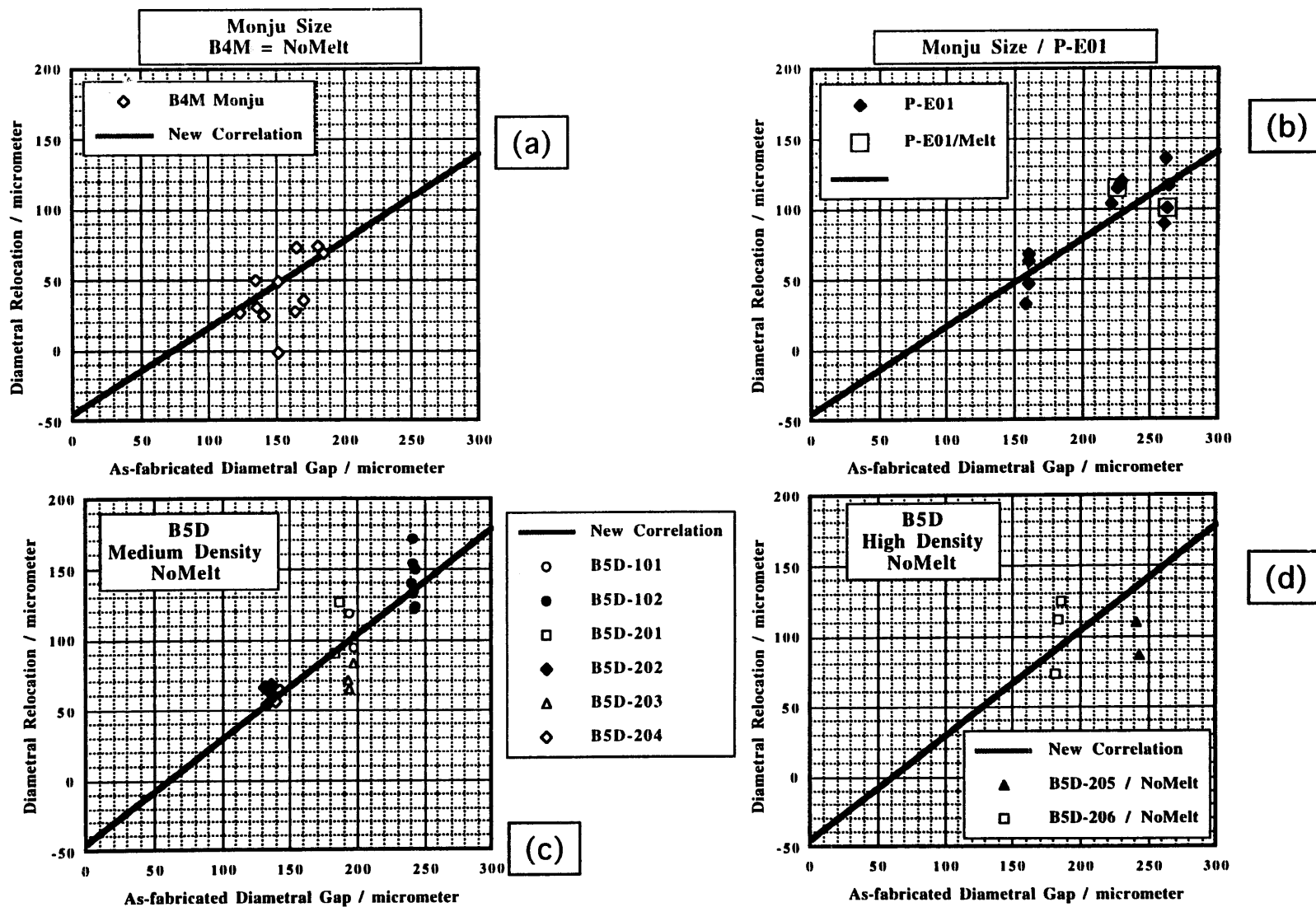


図 25 2次元モデル式による計算値と実験値との比較

(溶融限界線出力評価試験結果：P-E01・B5D-1・B5D-2) (短期照射試験結果：F3B・B4M)

(図中のNew Correlation： $\Delta G=0.111G0Rci-45$ 、 ΔG ：リロケーション量、 $G0$ ：製造時ギャップ幅、 Rci ：被覆管内径)

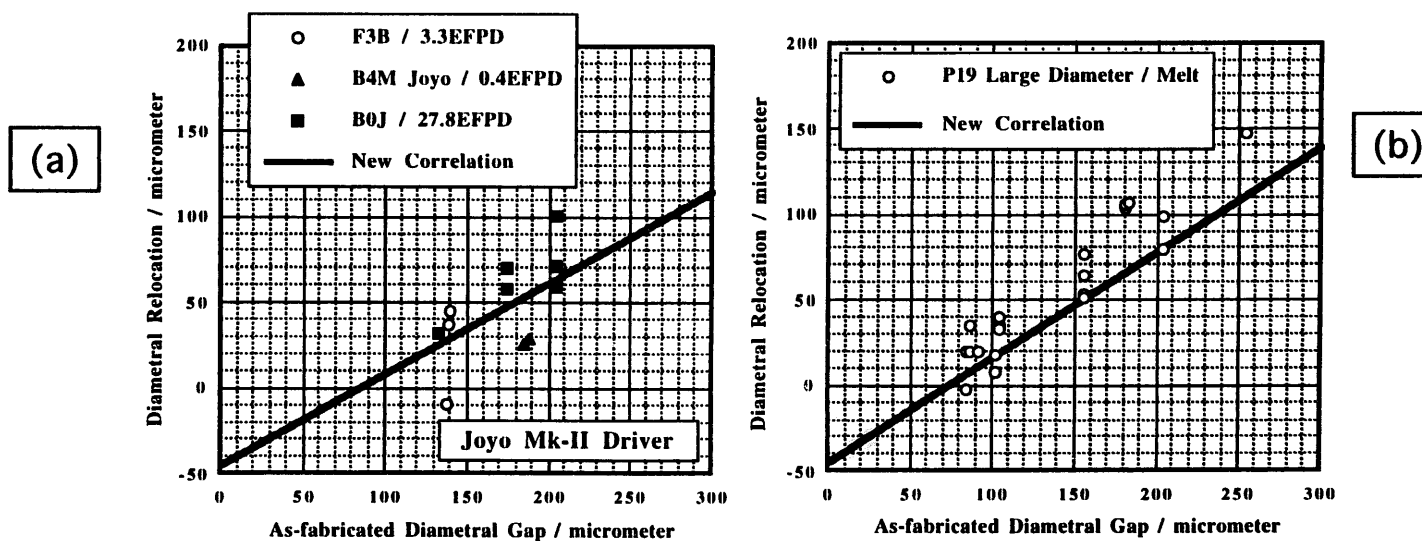


図 2 6 作成した 2 次元モデル式の外挿性の検討：その 1

(溶融限界線出力評価試験結果：P19) (短期間照射試験結果：B0J・B4M Joyo・F3B)

(図中の New Correlation： $\Delta G=0.111G0Rci-45$ 、 ΔG ：リロケーション量、 $G0$ ：製造時ギャップ幅、 Rci ：被覆管内径)

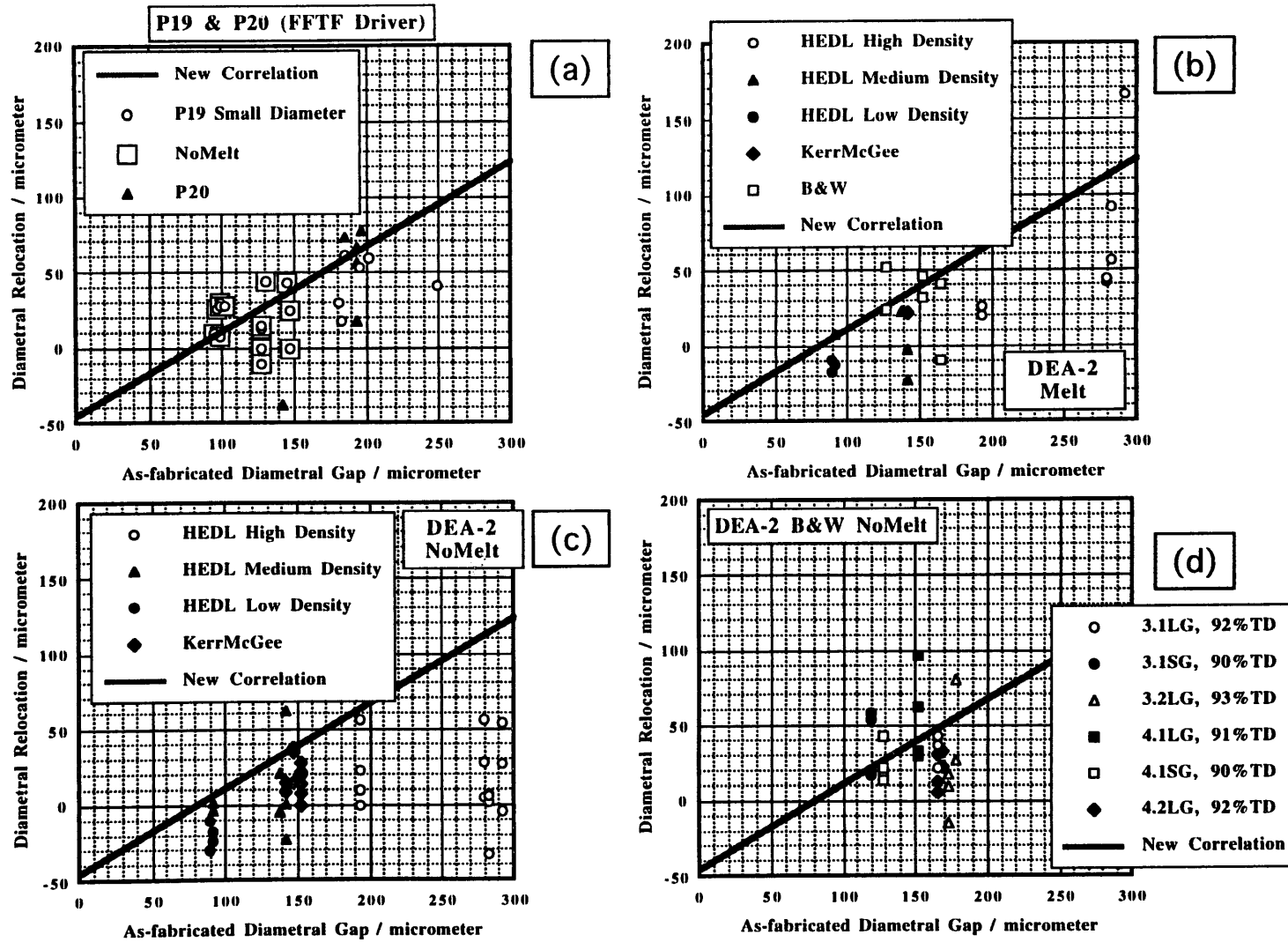


図 2 7 作成した 2 次元モデル式の外挿性の検討：その 2

(溶融限界線出力評価試験結果：P19・P20・DEA-2)

(図中の New Correlation : $\Delta G = 0.111 GORci - 45$, ΔG : リロケーション量, GO : 製造時ギャップ幅, Rci : 被覆管内径)

(図(c)で HEDL High Density の 1 点は残留ギャップ幅が $300 \mu m$ を超えており、図からはみだしている)

(図(c)で HEDL Low Density の 1 点はリロケーション量が $-50 \mu m$ を下回っており、図からはみだしている)

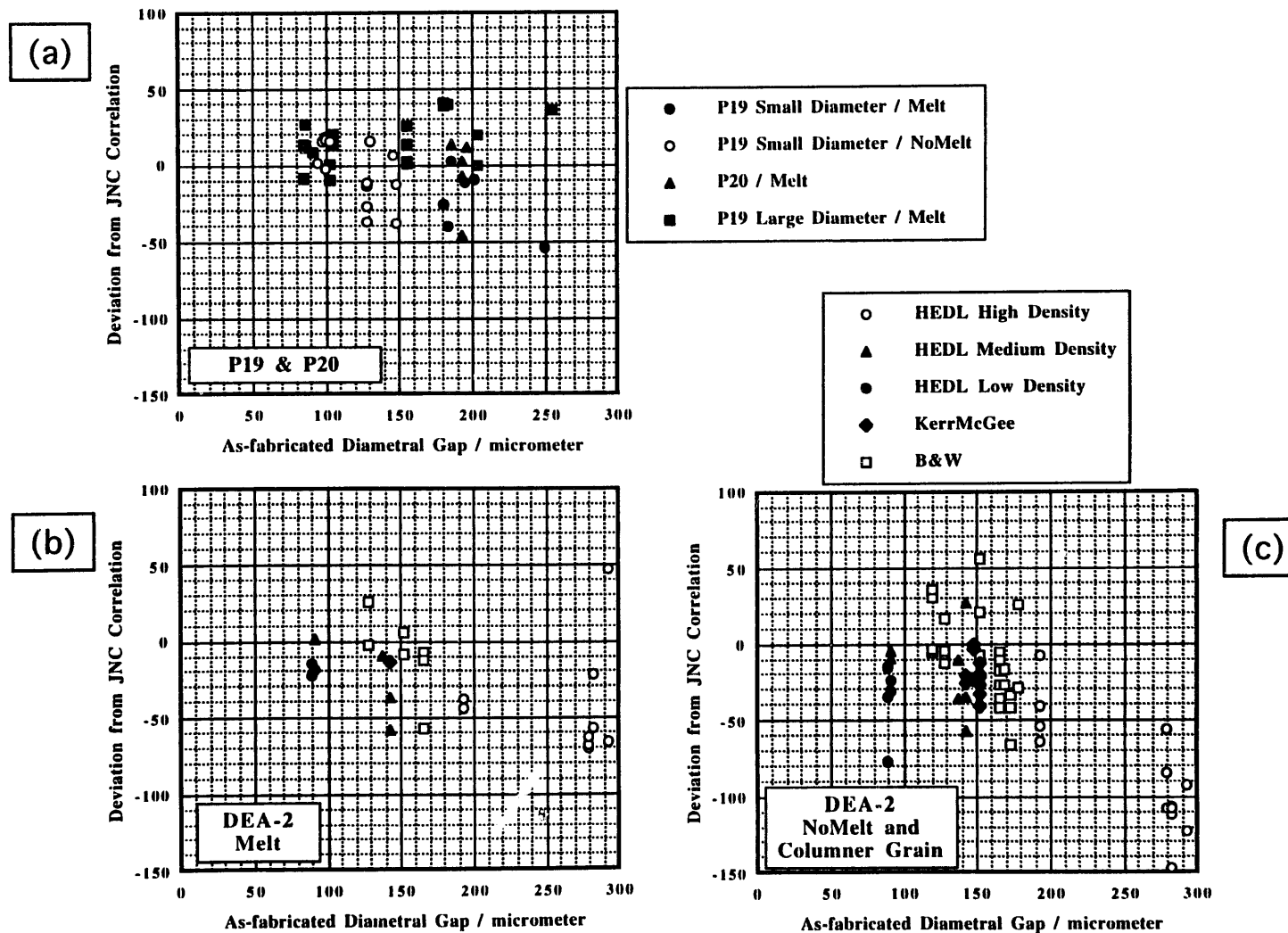


図 2 8 2次元モデル式計算値からの偏差と製造時ギャップ幅との関係

(溶融限界線出力評価試験結果：P19・P20・DEA-2)

(図中のJNC Correlation： $\Delta G=0.111GORci-45$ 、 ΔG ：リロケーション量、 $G0$ ：製造時ギャップ幅、 Rci ：被覆管内径)

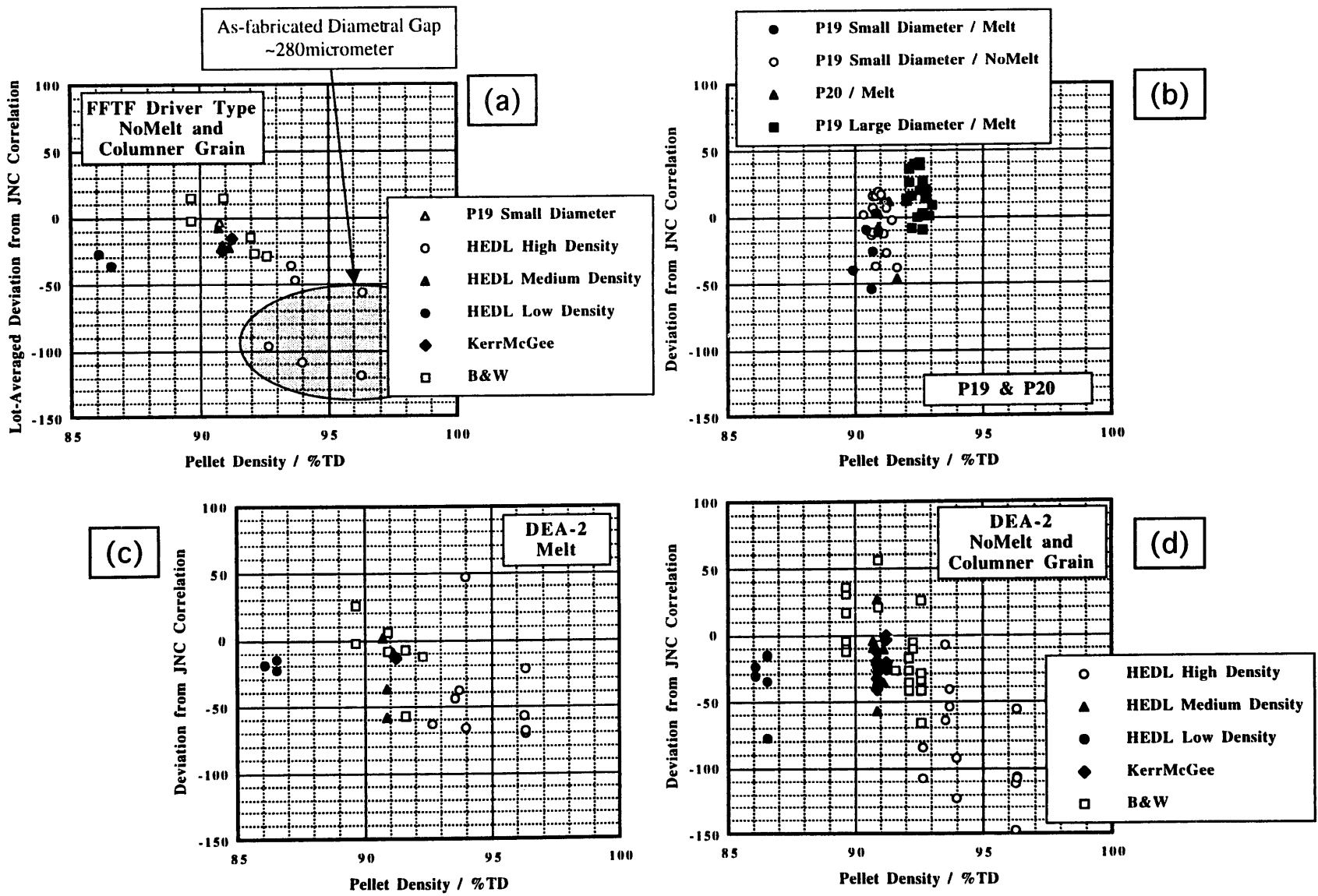


図 2 9 2次元モデル式計算値からの偏差と製造時燃料ペレット相対密度との関係

(溶融限界線出力評価試験結果：P19・P20・DEA-2)

(図中のJNC Correlation： $\Delta G=0.111G0Rci-45$ 、 ΔG ：リロケーション量、 $G0$ ：製造時ギャップ幅、 Rci ：被覆管内径)

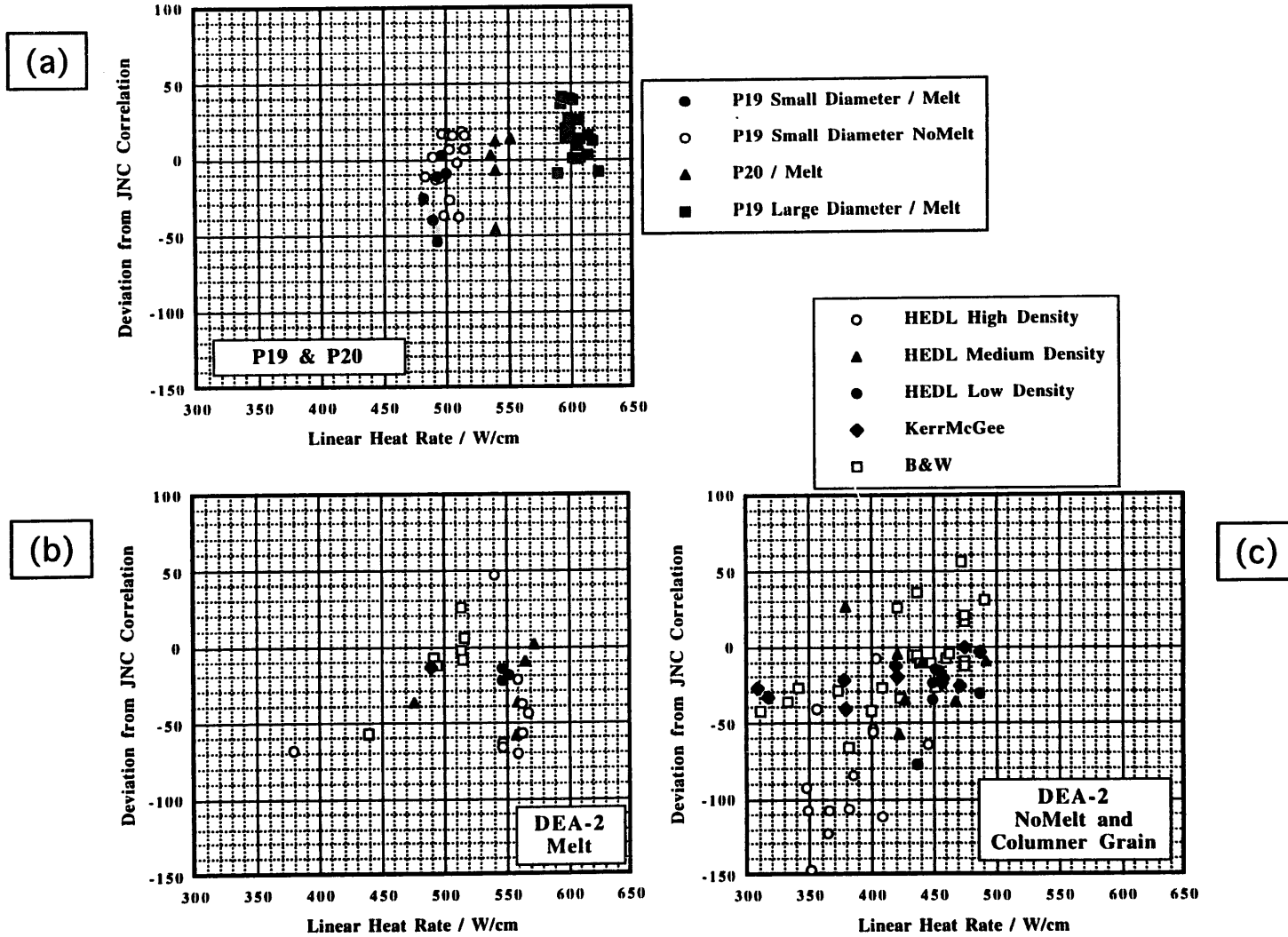


図 3 0 2次元モデル式計算値からの偏差と線出力との関係

(溶融限界線出力評価試験結果：P19・P20・DEA-2)

(図中のJNC Correlation： $\Delta G=0.111GORci-45$ 、 ΔG ：リロケーション量、GO：製造時ギャップ幅、Rci：被覆管内径)

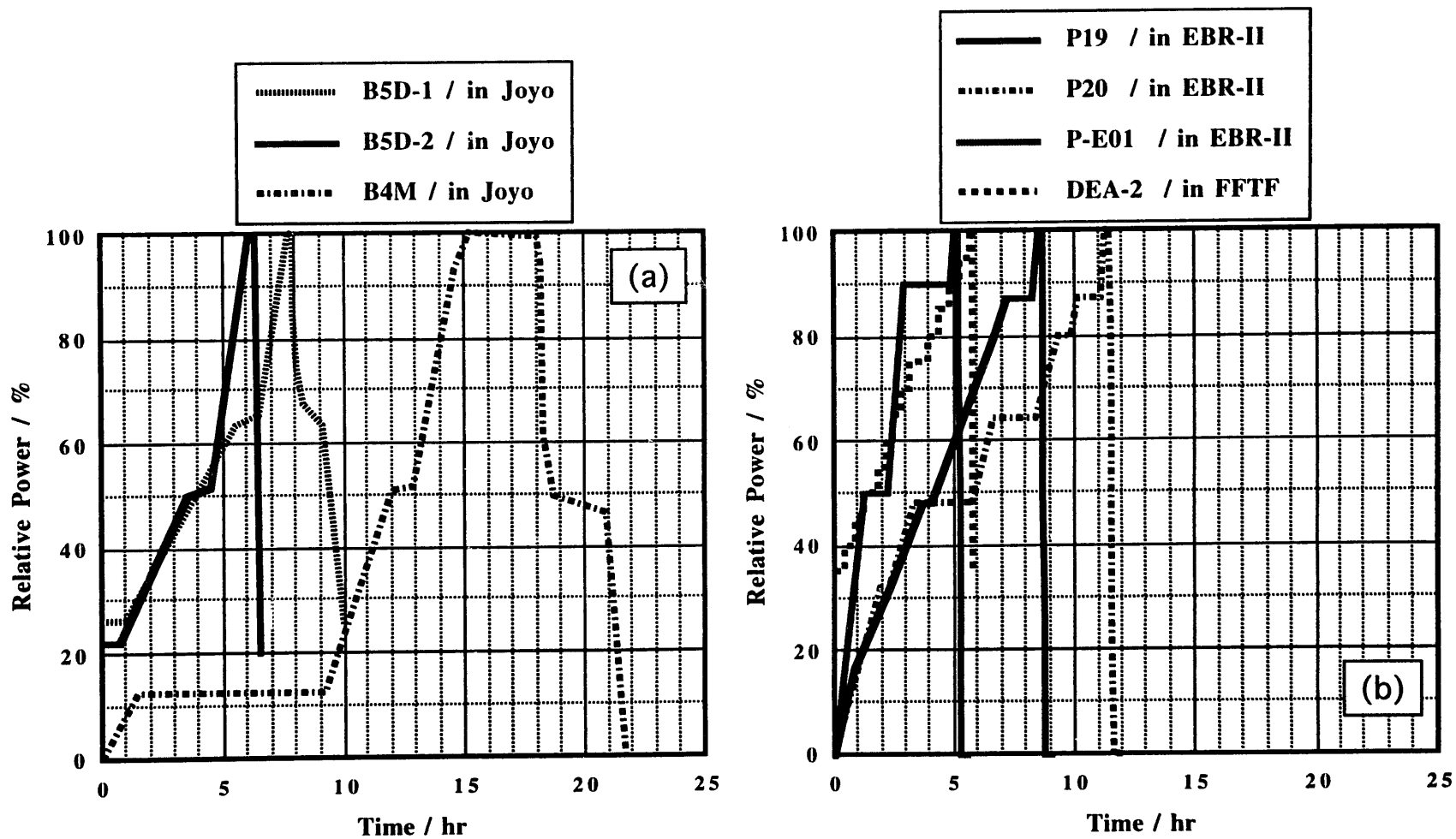


図 3 1 各照射試験の出力履歴

(最大線出力を100%として規格化)

(中間保持出力レベル: B5D-1→63%、B5D-2→51%、B4M→51%、
P19・P20→87%、P-E01→90%、DEA-2→なし)

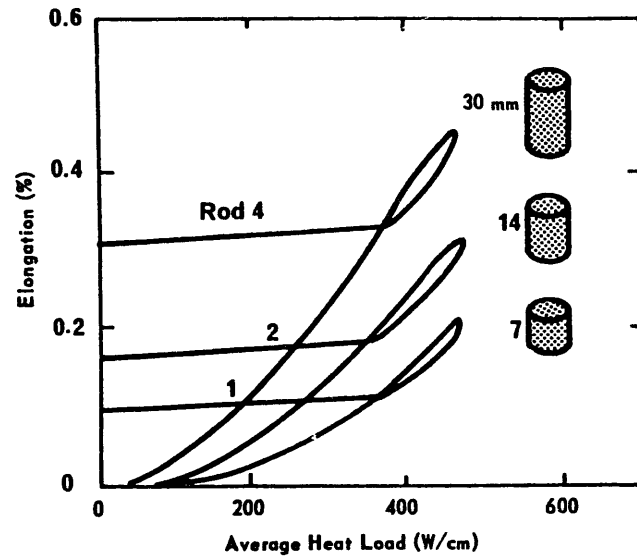


Fig. 2. Influence of pellet length on rod elongation.

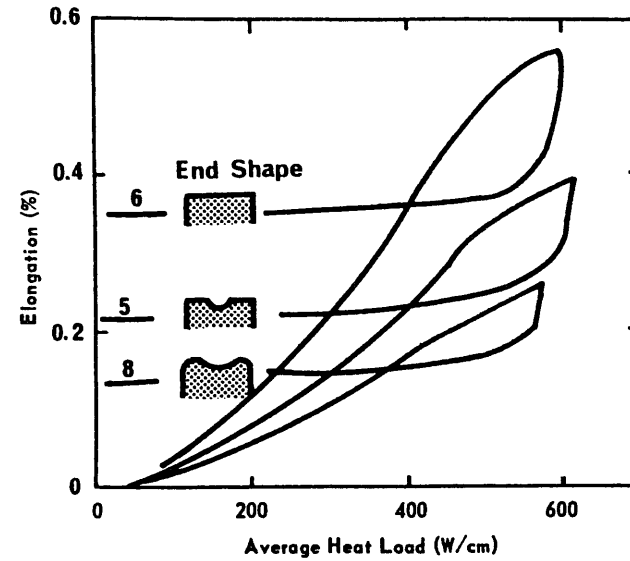


Fig. 3. Influence of pellet end shape on rod elongation.

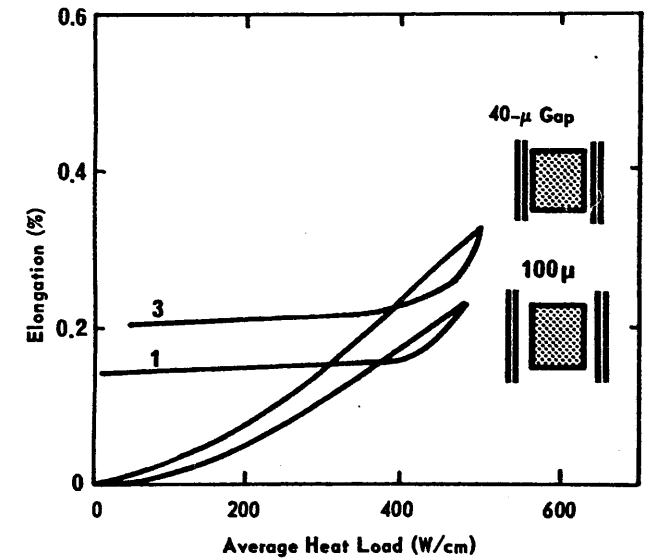


Fig. 4. Influence of gap size on rod elongation.

図 3 2 軽水炉燃料棒伸びに及ぼす燃料ペレット形状の効果

出典 : E.Rolstad and K.D.Knudsen, "Studies of Fuel-Clad Mechanical Interaction and the Resulting Interaction Failure Mechanism", Nuclear Technology, Vol.13, P.168-176 (1972)

"JOYO" MK-II PFB052

Specimen NO. G817123



Specimen NO. G817322



As-Polished

図 3 3 「常陽」PTM仕様燃料ピンの縦断面金相観察例

(B5D-2試験B521/G817 DFCB：377～402mm)

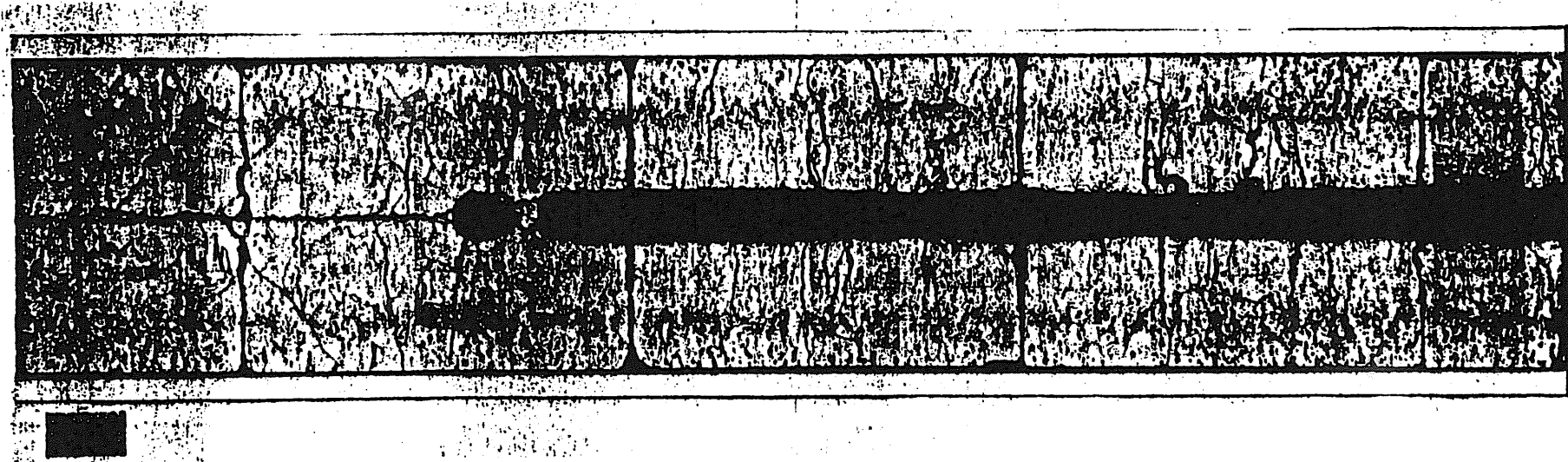


図 3 4 FFTFドライバー仕様燃料ピンの縦断面金相観察例

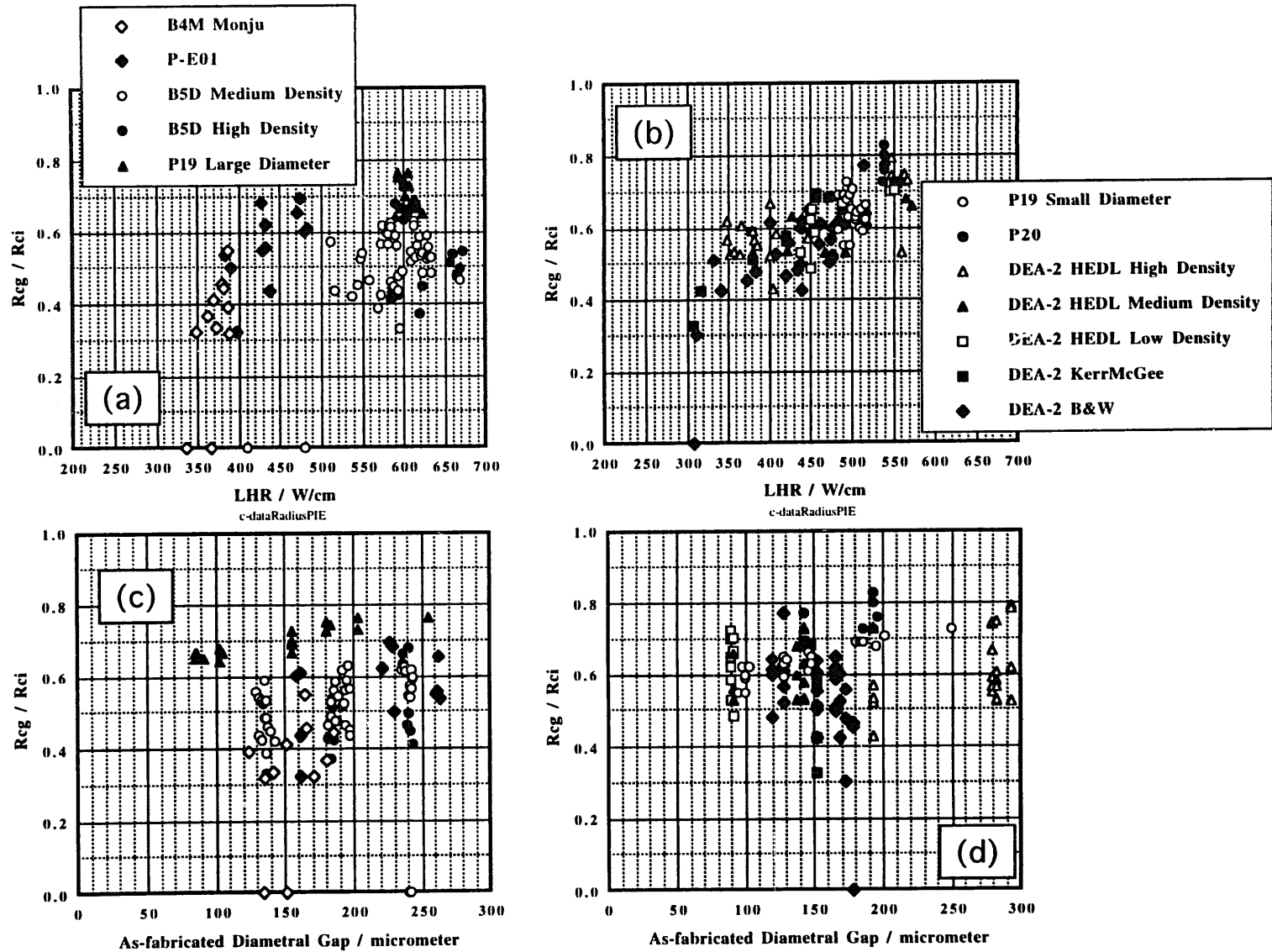


図 3 5 柱状晶領域径／被覆管内径比 (R_{cg}/R_{ci}) を指標にした
データ取得状況の整理

(図(a) (c) : B4M・P-E01・B5D-1・B5D-2・P19太径)

(図(b) (d) : P19細径・P20・DEA-2)

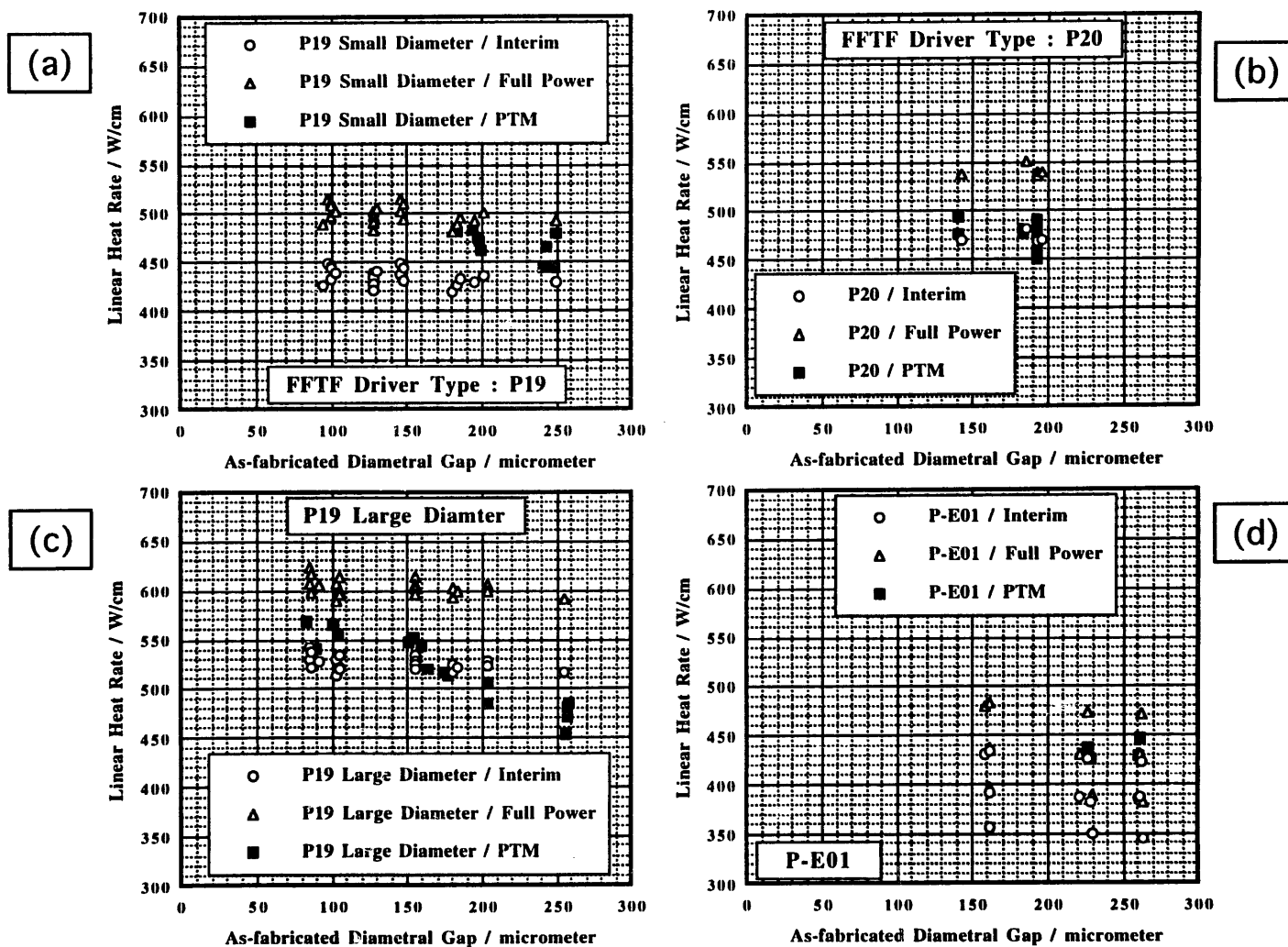


図 3 6 残留ギャップ幅測定試料の中間保持出力時・最大出力時の線出力と
溶融限界線出力データとの比較

(中間保持出力レベル：P19・P20→87%、P-E01→90%) (最大線出力=100%)

(Interim：中間出力保持時、Full Power：最大出力時、PTM：溶融限界線出力)