



JAEA-Technology

2007-013



JP0750134

中空燃料設計コード「CEPTAR」の検証

—常陽Mk-II炉心燃料照射データを用いた検証—

Verification of Annular Fuel Design Code "CEPTAR"

-Verification with the Irradiation Data of JOYO Mk-II Driver Fuel -

生澤 佳久 小澤 隆之

Yoshihisa IKUSAWA and Takayuki OZAWA

東海研究開発センター

核燃料サイクル工学研究所

プルトニウム燃料技術開発センター

燃料技術部

Fuel Technology Department

Plutonium Fuel Development Center

Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories

Tokai Research and Development Center

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

中空燃料設計コード「CEPTAR」の検証
-常陽 Mk-II 炉心燃料照射データを用いた検証-

日本原子力研究開発機構東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所
プルトニウム燃料技術開発センター燃料技術部
生澤 佳久、小澤 隆之

(2007年1月18日受理)

中空燃料設計コード「CEPTAR コード」の高燃焼度燃料解析及び常陽の照射データ活用の一環として、照射実績及び照射後試験データの豊富な常陽 Mk-II 炉心燃料の照射燃料データを用いた検証を行った。

検証作業を行うにあたり、PNC316 鋼について新たに報告されている被覆管物性式(スエリング式及びクリープ式)を解析オプションとして追加した。また、ペレット-被覆管ギャップの閉塞時期及び被覆管に発生する応力の解析できるようにするため、常陽 Mk-II 炉心燃料の PIE 結果を用いて新たなペレットスエリング式を作成した。

新たに追加した被覆管物性式とペレットスエリング式を用いる事により、高密度中実ペレットを用いた常陽 Mk-II 炉心燃料の挙動を再現することができ、CEPTAR コードがピーク燃焼度約 76,000MWd/t まで従来の精度で解析できることを確認できた。

Verification of Annular Fuel Design Code “CEPTAR”
-Verification with the Irradiation Data of JOYO Mk-II Driver Fuel-

Yoshihisa IKUSAWA and Takayuki OZAWA

Fuel Technology Department
Plutonium Fuel Development Center, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 18,2007)

Annular fuel design code “CEPTAR” was verified with irradiation data of JOYO Mk-II driver fuel as part of high burn-up MOX fuel development.

To estimate irradiation behavior of JOYO Mk-II driver fuel, the pellet swelling equation evaluated with the PIE data of JOYO Mk-II driver fuel and the PNC316 property equations (swelling and irradiation creep) were added to CEPTAR code.

As a result of verification by using the irradiation data of JOYO Mk-II driver fuel, the calculated values with CEPTAR code were in agreement with the observed values from the result of PIEs up to pellet peak burn-up ~ 76,000MWd/t.

Keywords: Fast Breeder Reactor, MOX, Fuel Design Code, Annular Fuel

目次

1. 緒言	1
2. 解析対象燃料集合体	2
3. 解析モデル	2
3.1 PNC316 鋼スエリング式	2
3.2 PNC316 鋼クリープひずみ速度式	2
3.3 燃料ペレットスエリング式	3
4. 解析結果	6
4.1 被覆管外径変化率	6
4.2 FP ガス放出率	6
4.3 ペレット組織変化	7
4.4 Pu 再分布量	7
5. 結言	8
謝辞	9
参考文献	9
別添 INPUT Namelist/&OPTDAT in CEPTAR Code	38

Contents

1. Introduction	1
2. Analysis Object	2
3. Analytical Models	2
3.1 PNC316 Swelling Equation	2
3.2 PNC316 Creep Equation	2
3.3 MOX Pellet Swelling Equation	3
4. Results and Discussion	6
4.1 Diameter Change of Fuel Rod	6
4.2 Fission Gas Release	6
4.3 Restructuring	7
4.4 Radial Pu Distribution	7
5. Conclusions	8
Acknowledgment	9
References	9
Appendix INPUT Namelist/ &OPTDAT in CEPTAR Code	38

表リスト

表 1-1	CEPTAR コード検証に使用された照射データの主要仕様	10
表 2-1	常陽 Mk-II 炉心燃料集合体の仕様	11
表 2-2	解析対象燃料集合体と PIE 実施状況	12

図リスト

図 2-1	常陽 Mk-II 炉心燃料集合体の構造	16
図 2-2	検証対象燃料の燃焼度と線出力	17
図 3-3-1	被覆管外径変化の実測値と解析値の比較(PFD153 Pin No.64)	18
図 3-3-2	被覆管外径変化の実測値と解析値の比較(最大値)	18
図 3-3-3	ペレット-被覆管ホットギャップの燃焼度依存性(PFD153 No.64)	19
図 3-3-4	常陽 Mk-II 炉心燃料の残留ギャップの実測値とマトリックススエリング率	19
図 3-3-5	常陽 Mk-II 炉心燃料の残留ギャップの実測値と解析値の比較	20
図 3-3-6	ペレット-被覆管ホットギャップの燃焼度依存性	20
図 3-3-7	クラック数と外径変化率(PFD153 PIN No.63)	21
図 3-3-8	クラック数と外径変化率(PFD153 PIN No.64)	21
図 4-1-1	被覆管外径変化率の解析値と実測値の比較	22
図 4-1-2	CEPTAR コードによる被覆管外径変化率の実測値と解析値の比較	27
図 4-1-3	ホットギャップの燃焼度依存性(5 ノード)	27
図 4-2-1	FP ガス放出率の実測値と解析値の比較(常陽 Mk-II 炉心燃料)	28
図 4-3-1	燃料組織変化の実測値と解析値の比較(中心空孔径、柱状晶径)	29
図 4-3-2	燃料組織変化の実測値と解析値の比較(中心空孔径、柱状晶径) (中心空孔形成試料のみ)	29
図 4-4-1	Pu 再分布挙動の解析値と実測値の比較	30

This is a blank page.

1.緒言

将来的な高速炉の経済性向上に対する方策の一つとして、製造性に優れ高燃焼度化や高線出力化が可能な中空ペレットの採用が考えられている¹⁾。中空燃料設計コード「CEPTAR コード」²⁾は中空燃料設計開発に資するために、高速炉燃料挙動解析コード「CEDAR コード」の応力・歪解析の考えに基づき開発されたコードである。表 1-1 にはこれまで CEPTAR コードの開発において検証に用いられてきた照射データの一覧を示す。表 1-1 に示すように、短期照射については中空ペレット以外にも、B5D-2³⁾など常陽で照射された高密度中実ペレットの PTM 試験などにより熱解析機能が検証されているが、長期にわたり照射された高燃焼度燃料については、英国の高速増殖原型炉 PFR の中空ペレットの照射データのみを検証である。一方、高速実験炉常陽 Mk-III 炉心では、資源有効利用及び環境負荷低減の観点から開発が進められている TRU 含有 MOX 燃料の高燃焼度 (250GWd/t) までの照射試験や、長寿命燃料開発のための被覆管として開発されている ODS フェライト鋼被覆管の照射試験が計画されており⁴⁾、今後の高速炉開発における有用なデータが取得されると期待されている。

そこで、これらの高燃焼度燃料解析や常陽の照射データ活用の一環として、照射実績と照射後試験結果の蓄積がなされている常陽 Mk-II 炉心燃料を対象に、CEPTAR コードの解析機能の検証作業を行った。本報告書では、常陽 Mk-II 炉心燃料で使用されている PNC316 鋼の物性式及び高密度中実ペレットのペレットスエリング物性式の整備及び CEPTAR コードの検証結果について報告する。

2. 解析対象燃料集合体

表 2-1 及び図 2-1 に解析対象の常陽 Mk-II 炉心燃料の主な仕様と構造を示す。表 2-1 に示すように常陽 Mk-II 炉心燃料のペレットは、これまでの長期照射の検証で用いてきた PFR の高密度中空ペレットと異なり、高密度中実ペレットを用いている。また、表 2-2 に解析対象とした燃料集合体の一覧と PIE の実施項目を、図 2-2 にはピーク燃焼度とピーク線出力の関係を示すが、解析対象燃料集合体は 17 体であり、最高燃焼度はピーク燃焼度で約 76,000MWd/t (PFD153) に達している。今回は、FCMI 挙動、燃料要素内圧、燃料温度及び Pu 再分布挙動に対する解析機能を検証するため、被覆管外径測定、パンクチャ試験、金相試験及び Pu-U 径方向分布測定結果を用いた。

3. 解析モデル

検証作業を行うにあたり、PNC316 鋼について報告されている被覆管物性式(スエリング式⁵⁾及びクリープ式⁶⁾を解析オプションに追加した。また、FCMI による被覆管外径変化を解析できるようにするため、常陽 Mk-II 炉心燃料の PIE 結果より高密度中実ペレットのスエリング式を作成し CEPTAR コードに組み込んだ。以下に新たに組み込んだ解析モデルを示す。

3.1 PNC316 鋼スエリング式

上羽ら⁵⁾によって報告された以下の PNC316 鋼スエリング式を CEPTAR コードに組み込んだ。

$$\Delta V/V = m_1 \cdot (5 \cdot \phi_1 - m_2)^{1.6}$$

$$m_i = A_i / \exp\left[\left\{\frac{(T - B_i)}{C_i}\right\}^2\right] + D_i, \quad m_i \geq 0, \quad i=1,2$$

$$A_1 = 0.036, B_1 = 480.0, C_1 = 35.0, D_1 = 0.0$$

$$A_2 = 83.1, B_2 = 469.0, C_2 = 105.5,$$

$$\text{NOMINAL式: } D_2 = 0.0, \text{ UPPER式: } D_2 = -10, \text{ LOWER式: } D_2 = +10$$

ここで、 $\Delta V/V$: スエリング率 (vol.%)

ϕ_1 : 中性子照射量 ($10^{26} \text{ n/m}^2, E > 0.1 \text{ Mev}$) 適用範囲: $0 - 23 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$

T: 照射温度 ($^{\circ}\text{C}$) 適用範囲: $350^{\circ}\text{C} - 700^{\circ}\text{C}$

上記の式では、照射期間中の温度や応力変化によるスエリングの不確かさを、 m_2 のスエリング潜伏期間に幅を持たすことで包絡させている。

3.2 PNC316 鋼クリープひずみ速度式

水田ら⁶⁾によって報告された以下のクリープひずみ式を CEPTAR コードに組み込んだ。

$$\varepsilon = B_0 \cdot \phi t \cdot \sigma + K \cdot t^{1.9} \cdot \sigma^{2.4} + D \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma$$

($B_0 \cdot \phi t \cdot \sigma$: 照射量依存項, $K \cdot t^{1.9} \cdot \sigma^{2.4}$: 熱クリープ項, $D \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma$: スエリング依存項)

NOMINAL式: $B_0 = 3.98 \times 10^{-6}$, $D = 5.5 \times 10^{-3}$, $K = 2.20 \times 10^{-3} \exp(-23900/T)$

UPPER式: $B_0 = 6.36 \times 10^{-6}$, $D = 8.2 \times 10^{-3}$, $K = 2.88 \times 10^{-3} \exp(-23900/T)$

LOWER式: $B_0 = 2.17 \times 10^{-6}$, $D = 3.8 \times 10^{-3}$, $K = 1.76 \times 10^{-3} \exp(-23900/T)$

ここで、 ε : 炉内クリープひずみ (相当ひずみ, -)

ε_s : スエリングひずみ (ひずみ, -), ϕt : 中性子照射量 ($\times 10^{26} \text{ n/m}^2, E > 0.1 \text{ Mev}$),

σ : 応力 (相当応力, MPa), t: 照射時間 (h), T: 照射温度 (K)

B_0 : 照射クリープ係数 ($(\times 10^{26} \text{ n/m}^2)^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$), K: 熱クリープ係数 ($\text{h}^{-1.9} \cdot \text{MPa}^{-2.4}$)

D: スエリングとの相互作用係数 (MPa^{-1})

上記の PNC316 鋼クリープひずみ速度式は、照射量依存項、熱クリープ依存項及びスエリング依存項の和で表される。

3.3 燃料ペレットスエリング式

これまでの CEPTAR コードの FCMI 挙動解析については、英国の高速増殖原型炉 PFR の中空ペレットの照射データを基に検証がなされており、被覆管外径変化の実測値と解析値が一致していることが報告されている²⁾。ここでは、常陽 Mk-II 炉心燃料のうち最も燃焼の進んだ集合体 (PFD153) を対象に、上述の被覆管物性式と CEPTAR コードの燃料ペレットスエリングのデフォルトオプションである板状燃料の照射試験より求められた燃料ペレットスエリング式⁷⁾を用いて被覆管外径変化について解析した。この板状燃料の照射試験より求められた燃料ペレットスエリング式は、燃料が枠にはめられ上下方向のみに膨張できるようにされた UO_2 燃料のデータを用いたものであり、燃料ペレットスエリング率は密度測定から評価されている。

図 3-3-1 に軸方向被覆管外径変化率の解析値と実測値の比較の一例を、図 3-3-2 に解析値と実測値の最大値の比較をそれぞれ示すが、実測値では被覆管外径が明らかに増加しているのに対し、解析では被覆管外径が増加していないことが分かる。被覆管外径増加の原因として、被覆管スエリング、FP ガス内圧及び FCMI が考えられる。後述するが、FP ガス内圧については FP ガス放出率の解析値と実測値がおおむね一致しており、FP ガス内圧についても同様に再現できているものと思われる (図 4-2-1 参照)。また、常陽 Mk-II 炉心燃料では PIE 結果より被覆管スエリングが生じていないことが報告されており⁸⁾、上述の被覆管スエリング式においても、被覆管スエリングの潜伏期間内であることから解析においても被覆管スエリングが生じていない。

一方、図 3-3-3 にはペレット-被覆管ホットギャップの解析の一例を示すが、照射初期から照射末期までペレットと被覆管は接触しておらず、FCMI が発生していないことが分かる。常陽 Mk-II 炉心燃料の PIE 結果によると、被覆管外径増加は FP ガス内圧と FCMI によって生じており⁸⁾、本解析で被覆管外径変化を再現出来ていないのは、ペレット-被覆管ギャップを過大評価しているためであることが分かる。ペレット-被覆管ギャップ幅は燃料ペレットのスエリングによって燃焼とともに減少していくため、ペレット-被覆管ギャップの過大評価の原因として板状燃料のスエリングを用いていることが考えられる。そこで常陽 Mk-II 炉心燃料で得られている PIE 結果を用いて、燃料ペレットスエリング挙動について評価し、ペレット-被覆管ギャップの燃焼による変化について評価した。

常陽 Mk-II 炉心燃料では、金相写真より求められたペレット面積を用いて以下の式よりペレットのスエリング率 (以下マトリックススエリング率) が求められている⁸⁾。

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{3}{2} \cdot \frac{S - S_0}{S_0} \cdot 100$$

$\Delta V/V$: マトリックススエリング率 ($\Delta V/V$ %)

S_0 : 製造時のペレット面積

S : クラックを除いた照射後のペレット面積

常陽 Mk-II 炉心燃料では上記の式によりマトリックススエリング率は、10,000MWd/t 当り約 1.3%と評価されている。図 3-3-4 にはペレット金相試験から得られたペレット-被覆管ギャップ幅と、上記のマトリックススエリング率から評価されるペレット-被覆管ギャップ幅の燃焼度依存性を示すが、両者を比較するとマトリックススエリング率から評価されるペレット-被覆管ギャップ幅はペレット金相試験で取得された値よりも過大評価となっている事が分かる。これは、リロケーションの効果により、ペレット-被覆管ギャップ幅が縮小したためと考えられる。

CEPTAR コードでは、これまでリロケーションによるペレット-被覆管ギャップ幅の変化を扱っていないため、マトリックススエリングのみでペレット-被覆管ギャップ幅を評価すると、ギャップ閉塞時期を精度良く解

析することができず、被覆管外径変化率を過小評価する結果となる。FCMI による被覆管外径変化は、ギャップ閉塞時期とギャップ閉塞後に被覆管に発生する応力の両者を評価する必要があることから、リロケーションは主にクラックによって発生すると考え、リロケーションを含めたペレットスエリング式を作成し、ギャップ閉塞時期を解析出来るか検討を行った。

リロケーションを含めたペレットスエリング率は、照射後のクラックを含めた面積より評価できることから以下の式より求めた。

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{3}{2} \cdot \frac{S' \cdot S_0}{S_0} \cdot 100$$

$\Delta V/V$: マトリックススエリング率+リロケーション ($\Delta V/V$ %)

S_0 : 製造時のペレット面積

S' : 照射後のペレット面積

この式よりリロケーションを含めたペレットスエリング式は以下のように評価される。

$$\frac{\Delta V}{V} = 1.77 \cdot Bu \text{ (ノミナル式)}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = 1.65 \cdot Bu \text{ (95\%信頼下限)}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = 1.90 \cdot Bu \text{ (95\%信頼上限)}$$

$\Delta V/V$: ペレットスエリング率 (%TD), Bu : 燃焼度 (10GWd/t)

図 3-3-5 には金相試験より求められた常陽 Mk-II 炉心燃料の残留ギャップと、上記のペレットスエリング式 ($\Delta V/V = 1.77Bu$ (ノミナル式)) により解析した残留ギャップの値を示すが、照射中にペレットと被覆管が接触していると思われる燃焼中期以降 (約 40,000MWd/t) で両者は一致する傾向になった。また、図 3-3-6 には、外径変化の最も進んだ PFD153 の Pin.No63 と Pin.No64 の 2 本について、ペレット-被覆管ホットギャップの解析例を示すが、約 45000MWd/t でホットギャップが閉塞している事が分かる。これより、リロケーションを含めたペレットスエリング式を用いる事により、ペレットと被覆管が接触し FCMI によって被覆管外径が増加する燃焼中期以降のペレット-被覆管ギャップを再現できることが分かった。

一方、クラックを含めたペレットスエリング式は、ギャップ閉塞後に被覆管に発生する応力が過大となり、被覆管外径を過大評価する事が予想される。そこで、CEPTAR コードに既に組み込まれている、クラックによる応力緩和を考慮するペレットクラッキングモデルを用いる事で、被覆管外径変化を再現できるか検討を行った。CEPTAR コードのペレットクラッキングモデルは以下に示すように、ペレットに発生したクラック数によりペレットの縦弾性係数とポアソン比を低下させ応力緩和を考慮するモデルである。

$$E^c = E \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^n, \nu^c = \nu \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

E : 縦弾性係数、 E^c : クラック数 n での縦弾性係数

ν : ポアソン比、 ν^c : クラック数 n でのポアソン比

n : クラック数

上記のペレットクラッキングモデルを用いる事で、被覆管外径変化を再現できるか検討するため外径変化の最も進んだ PFD153 の Pin.No63 と Pin.No64 の 2 本を対象に、ペレットスエリング式 ($\Delta V/V = 1.77Bu$ (ノミナル式)) を用いて、クラック数 0、3、5 及び 8 の 4 条件による感度解析を行った。図 3-3-7 及び図 3-3-8 に被覆管外径変化率の解析結果を示すが、被覆管外径変化率はクラック数 0 では過大評価であった。これはクラックによる応力緩和を考慮していないため、ギャップ閉塞後に被覆管に発生する応力を過大評価したためと思われる。一方、クラック数が増えるに従い被覆管外径変化率の解析値の値が低下し、5 個以上では被覆管外径変化率の値に差は無く、実測値とほぼ一致する結果が得られた。これまでの CEPTAR コードの検証において、クラックによる応力緩和は、クラック数 5 個で FCMI 応力が飽和する結果が得られており、今回の解析においても同様の結果が得られた。このことから、クラックを含めたスエ

リング式及びペレットクラッキングモデルを組み合わせる事で、常陽 Mk-II 炉心燃料の FCMI 挙動を評価できる可能性があることが分かった。

上記の解析オプションを追加した INPUT Namelist/&OPTDAT を別添に示す。PNC 316 鋼スエリング式は ICSWL=13~15、PNC316 鋼クリープひずみ速度式は ICCRP=18~20、燃料ペレットスエリング式は IFSWL=5~7 を選択する事で解析できるようにした。また、燃料ペレットスエリング式については、IFSWL=5~7 を選択した場合、自動的にペレットクラッキングモデル(ICRACK=5)が選択されるようにしている。

4. 解析結果

以下にはPIEで得られた被覆管外径変化率、FPガス放出率、ペレット組織変化及びPu再分布量と解析値を比較し、CEPTARコードが高密度中実ペレットを用いた常陽MK-II炉心燃料の照射挙動を解析できるか検討を行った。

4.1 被覆管外径変化率

3章で述べたPNC 316鋼スエリング式(ICSWL=13)、PNC316鋼クリープひずみ速度式(ICCRP=18)及び、燃料ペレットスエリング式(IFSWL=5)を用いて被覆管の外径変化について解析を行った。図4-1-1に被覆管外径変化率の実測値と解析値の代表例を示す。製造時の被覆管外径プロファイルがないため、今回は外径変化率をプレナム部の外径平均値との比として求めている。図4-1-1に示すように、常陽MK-II炉心燃料の被覆管外径は最大でも0.3%程度の増加であったが、被覆管外径変化率の解析値は実測値とほぼ一致する結果が得られた。図4-1-2には最大外径変化率の解析値と実測値を示すが、両者はほぼ一致している事が分かる。

3.3章でも述べたように、常陽Mk-II炉心燃料での被覆管外径増加はFPガス内圧とFCMIによるものである。図4-1-3には、PIEにおいて被覆管外径が増加していた燃料要素のホットギャップの解析値を示すが、ペレットと被覆管が接触しており、本解析でもFCMIによって被覆管外径が生じたことが確認できた。このことから、3.3章で求めたクラックを含めたスエリング式及びペレットクラッキングモデルを組み合わせて解析することで、常陽Mk-II炉心燃料の被覆管外径変化を評価することができる事が分かった。

これまでの英国の高速増殖原型炉PFRの中実ペレットの照射データを用いた検証でリロケーションを有意に考慮しなくても、被覆管外径変化の解析値が一致していた主な理由として、PFR燃料と今回の解析対象燃料である常陽Mk-II炉心燃料の燃焼度の違いが考えられる。PFR燃料の燃焼度は200,000MWd/tを超える高燃焼度まで照射された燃料であり、常陽Mk-II炉心燃料のようにペレット-被覆管ギャップが閉塞し被覆管外径が増加し始めた燃焼度よりもはるかに高い燃焼度であった。そのため、ペレットと被覆管の接触期間が今回の解析対象燃料よりもはるかに長かったことから、必ずしもリロケーションを有意に考慮しなくても、被覆管外径変化の解析値と実測値が一致していたことが考えられる。これについては、今回の解析対象燃料よりも高燃焼度まで照射された常陽特殊燃料のデータなどを用いて検討を行う必要がある。

また、高速炉燃料では燃料温度が高いため、燃料の自重やプレナムスプリングのばね力によって軸方向にクリープ変形が生じ、燃料の中央から外側へせり出す現象がリロケーションに寄与していると考えられている⁹⁾。一般に中空ペレットは中実ペレットと比較して燃料中心温度が高温にならず、また自重が軽いため軸方向のクリープ変形が少なくなることが予想されることから、中空ペレットと中実ペレットではリロケーション量が異なることが考えられる。今後、高燃焼度燃料の解析や中空燃料と中実燃料のペレット-被覆管ギャップの燃焼度変化などを評価し、中実及び中空ペレットのリロケーションに差異があるか検討する必要があると思われる。

4.2 FPガス放出率

FPガス放出については、常陽Mk-II炉心燃料の照射データベースを基に策定されたFPガス放出モデルを用いて解析を行った。図4-2-1には、FPガス放出率の実測値と解析値を示す。図に示すように、FPガス放出率の実測値が低いものは過大評価する傾向にあるが、おおむねFPガス放出率は一致しており、燃料要素内圧についても同様に再現できているものと思われる。

4.3 ペレット組織変化

CEPTAR コードのペレット組織変化解析は、ボイド移動を解くことによりペレット内の径方向密度を計算し、質量保存則に従って中心空孔径を決定している³⁾。また、このボイド移動モデルは燃料温度解析コードである DIRAD コード¹⁰⁾と同一のモデルである。

図 4-3-1 に燃料組織変化(中心空孔径、柱状晶径)の実測値と解析値の比較を示す。図 4-3-1 に示すように、柱状晶径が形成されておらず組織変化が十分に進んでいない試料の解析値については、柱状晶径を過大評価するものが見られた。そこで中心空孔が形成されている試料に着目し、組織変化の実測値と解析値の比較した結果を図 4-3-2 に示す。図 4-3-2 に示すように、中心空孔が形成されている試料については、従来のばらつきの範囲内で実測値とおおむね一致する解析結果となり、ペレット内の温度分布についても再現できているものと思われる。

今回の解析で、ペレット組織変化の実測値と解析値がおおむね一致していたのは、B5D-2 などの中実ペレット燃料の照射データにより、熱解析機能が検証されていたためと思われる。

4.4 Pu 再分布量

Pu 再分布の解析には、ペレット内の径方向温度勾配及び濃度勾配による拡散によって Pu が移動するモデルを用いて解析しており、これは DIRAD コードと同一のモデルである。図 4-4-1 に Pu 再分布の実測値と解析値を示す。図に示すように、ほとんどの試料で Pu 濃度はペレット径方向で一様であったが、一部の試料(815226、A06042、E96342、E96362、E96452)では、ペレット中心部でわずかに Pu 濃度が増加していた。また Pu 再分布の有無に係らず、解析値は実測値とほぼ一致する結果となった。これは、ペレット組織変化の解析結果からペレット内の温度分布を再現できていたことに起因するものと思われる。

5. 結言

CEPTAR コードの高燃焼度燃料解析及び常陽の照射データの活用一環として、照射実績及び照射後試験データの豊富な常陽 Mk-II 炉心燃料の照射データを用いた検証を行った。

検証作業を行うにあたり、PNC316 鋼について新たに報告されている被覆管物性式(スエリング式及びクリープ式)を解析オプションに追加した。また、常陽 Mk-II 炉心燃料の PIE 結果よりリロケーションを含めたペレットスエリング式を作成し、クラックによる応力緩和を考慮するペレットクラッキングモデルと組み合わせることで、ギャップ閉塞時期と被覆管に発生する応力を解析出来るようにした。

これら新たに組み込んだ被覆管物性式とペレットスエリング式を用いる事により、高密度中実ペレットを用いた常陽 Mk-II 炉心燃料の照射挙動を再現することができ、CEPTAR コードがピーク燃焼度約 76,000MWd/t までの高密度中実燃料を従来の精度で解析できることを確認した。

これまでの CEPTAR コードの検証では、リロケーションを考慮しなくても被覆管外径変化の解析値と実測値が一致していたが、今回の常陽 Mk-II 炉心燃料を用いた検証では、被覆管外径変化率を再現するためにはリロケーションの効果によりペレット-被覆管ギャップの変化を考慮する必要性が生じた。これは、これまで解析対象としてきた PFR 燃料と常陽 Mk-II 炉心燃料の燃焼度の違いや、ペレットの形状の違いに起因しているものと思われる。これらについては、今回の対象とした燃料よりも燃焼の進んだ燃料の解析や、中空燃料と中実燃料のペレット-被覆管ギャップの燃焼度変化などを評価し、中実及び中空のリロケーションに差異があるか検討する必要があると思われる。

謝辞

本検証作業を実施するにあたり、燃料製造データをプルトニウム燃料技術開発センター技術部品質管理課の千葉課長代理、松崎課長代理より提供いただき、照射データを大洗研究開発センター高速実験炉部高速炉技術課の北村課長代理より提供いただいた。また、大洗研究開発センター燃料材料試験部集合体試験課の前田 TL、佐々木技術員には PIE データの提供していただくと共に、燃料照射挙動について教示いただいた。ここに感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 前田誠一郎、他：“太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念の設計研究”,JNC TN8400 2003-19 (2003)
- 2) T.Ozawa, et al., “Development and Verifications of Fast Reactor Fuel Design Code “CEPTAR””, Nucl. Technol.,156,39(2006)
- 3) M.Inoue,et al., “Power-to-melts of uranium-plutonium oxide fuel pins at begining-of-life condision in the experimental fast reactor JOYO” J.Nucl.Mater. 323(2003)108-122
- 4) 三次 岳志、他：“MK-III 利用計画と将来展望” サイクル機構技報 No.21 別冊,p.139(2003)
- 5) 上羽智之、他：“PNC316 スエリング式の策定”,JNC TN9400 2003-007(2003)
- 6) 水田俊治、他：“改良オーステナイト綱の炉内クリープひずみ挙動評価式の策定”,JNC TN9400 99-082(1999)
- 7) Daniel,R.C.:WAPD-263,(1962)
- 8) 鹿倉栄、他：“「常陽」MK-II 炉心燃料の照射挙動” 動燃技報 No.85 p.20(1993)
- 9) 最新核燃料工学-高度化の現状と展望-p181
- 10) N.Nakae et al.,”Devlopment of the thermal behavior analysis code DIRAD and the fuel desing procedure for LMFBR”, J.Nucl.Mater. 188(1992)331-336.

表 1-1 CEPTARコード検証に使用された照射データの主要仕様²⁾

試験名 (照射炉)	中空/中実	ペレット内径 (mm)	ペレット外径 (mm)	ペレット密度 (%TD)	O/M (-)	Pu富化度 (wt.%)	燃料要素外径 (mm)	短期照射/長期照射
INTA-1 (常陽)	中空	2	5.4	85	1.94	30	6.5	短期照射
INTA-2 (常陽)	中空	2	6.49	92	1.94	19	7.5	
			6.54	95	1.97			
			6.59					
B5D-2 (常陽)	中実	-	6.5	90 ~ 95	1.96 ~ 1.98	19	7.5	
P-19/20 (EBR-II)	中実	-	5.1	90 ~ 93	1.96 ~ 1.97	25	6.1	
			5.4	86 ~ 87	1.99	6.5		
DEA-II (EBR-II)	中実	-	4.9	86 ~ 96	1.94 ~ 1.98	25 ~ 30	5.8	
1112 (MTR)	中空	1.5 ~ 1.7	5.00 ~ 5.57	95 ~ 97	1.97 ~ 1.98	32	5.8, 6.6	
			4.74 ~ 4.95	90 ~ 97	1.91 ~ 1.98	5.8		
M316 (PFR)	中空	1.8	4.95 ~ 4.98	94 ~ 98	1.92 ~ 2.00	24 ~ 32	5.84 ~ 5.86	長期照射
PE16 (PFR)	中空	1.8	4.93 ~ 4.95 5.53 ~ 5.56	94 ~ 99	1.97 ~ 1.99	25 ~ 33	5.84 6.58	

表 2-1 常陽Mk-II炉心燃料集合体の仕様

		JOYO Mk-II		
		J1	J2	
集合体	燃料要素本数	127		
	全長(mm)	2970		
	重量(kg)	57		
	ラッパ管	外径(mm)	78.5	
		内径(mm)	74.7	
		肉厚(mm)	1.9	
		材質	PNC316鋼	
	燃料要素間ピッチ(mm)	6.47		
燃料要素	全長(mm)	1533		
	被覆管	外径(mm)	5.5	
		内径(mm)	4.8	
		肉厚(mm)	0.35	
		材質	PNC316	
	ワイヤ	外径(mm)	0.9	
		ピッチ(mm)	209	
		材質	PNC316	
	燃料ペレット	材質	PuO ₂ -UO ₂	
		外径(mm)	4.63	
Pu富化度(wt%)		30		
U濃縮度(wt%)		12	18	
ペレット密度(%TD)		93	94	

表 2-2 解析対象燃料集合体とPIE実施状況(1/4)

集合体名	ピンNo	PIE項目			
		被覆管外径測定	パンクチャ	金相試験	Pu-U径方向分布
PFD001	05				
	06				
	07	○	○		
	12				
	14				
	22	○			
	41	○			
	52	○		○	○
	64	○	○	○	
	87	○			
	88	○			
	89	○			
	90	○			
	97	○		○	
	98	○			
	99	○			
C1	○		○		
PFD003	01		○		
	07	○	○		
	22				
	41				
	50	○			
	51				
	52				
	58				
	62	○			
	63				
	64		○	○	
	65				
	70			○	
	75	○			
	76	○			
	77	○			
	83				
	87			○	
	A0				
A6			○		
B4					
C1			○		
C7					
PFD010	1		○		
	7	○	○		
	22	○			
	41	○			
	51	○			
	52	○			
	58		○		
	63	○			
	64	○	○	○	
	65	○			
70			○		

表 2-2 解析対象燃料集合体とPIE実施状況(2/4)

集合体名	ピンNo	PIE項目			
		被覆管外径測定	パンクチャ	金相試験	Pu-U径方向分布
PFD010	76	○			
	77	○			
	87		○		
	97	○			
	A6	○			
	C1	○	○		
	C7		○		
PFD018	7		○		
	31		○		
	51	○			
	52	○			
	63	○			
	64	○	○		
	65	○			
	76	○			
	77	○			
	97		○		
C1		○			
PFD029	51	○			
	52				
	58	○	○		
	60	○	○	○	
	62	○			
	64	○	○	○	
	65	○			
	66	○			
	68	○			
	70	○	○		
	76	○			
	77				
86					
A8					
PFD036	51	○			
	52	○			
	58		○	○	
	61				
	63	○			
	64	○	○	○	
	65	○			
	67				
	70		○	○	
	76	○			
77	○				
PFD105	52	○			
	58		○		
	60		○	○	○
	63	○	○		
	64	○	○	○	
	65	○	○		
	70		○		
76	○				

表 2-2 解析対象燃料集合体とPIE実施状況(3/4)

集合体名	ピンNo	PIE項目			
		被覆管外径測定	パンクチャ	金相試験	Pu-U径方向分布
PFD115	52	○			
	63	○			
	64	○			
	65	○			
	76	○			
PFD153	51		○		
	52	○	○		
	58		○	○	
	59				
	60		○	○	○
	63	○	○		
	64	○	○	○	
	65	○	○		
	70		○	○	
76	○	○			
PFD209	7		○		
	51	○			
	52	○			
	63		○		
	64	○	○	○	
	76	○	○		
	77	○	○		
	A6		○	○	○
C1		○			
PFD210	1	○			
	18	○			
	39	○			
	52	○			
	58		○		
	60		○		
	63	○			
	64	○	○		
	65	○			
	76	○			
PFD254	58			○	
	60			○	○
	64			○	
	70			○	
PFD304	7	○			
	52	○			
	58	○			
	63	○			
	64	○			
	65	○			
	76	○			
	B3	○		○	○
C1	○		○	○	
PFD306	1	○			
	4	○			
	7	○			
	25	○			

表 2-2 解析対象燃料集合体とPIE実施状況(4/4)

集合体名	ピンNo	PIE項目			
		被覆管外径測定	パンクチャ	金相試験	Pu-U径方向分布
PFD306	34	○			
	52	○			
	58	○			
	63	○		○	○
	64	○		○	○
	65	○			
	70	○			
	76	○			
	94	○			
	A3	○			
	C1	○			
	C4	○			
	C7	○			
PFD405	51	○			
	52	○			
	63	○			
	64	○			
	65	○			
	76	○			
	77	○			
PFD406	52	○			
	63	○			
	64	○			
	65	○			
	76	○			
PFD538	52	○			
	58	○			
	59	○			
	60	○			
	61	○			
	62	○			
	63	○			
	64	○			
	65	○			
	76	○			
17体	188本	104本	56本	26本	9本

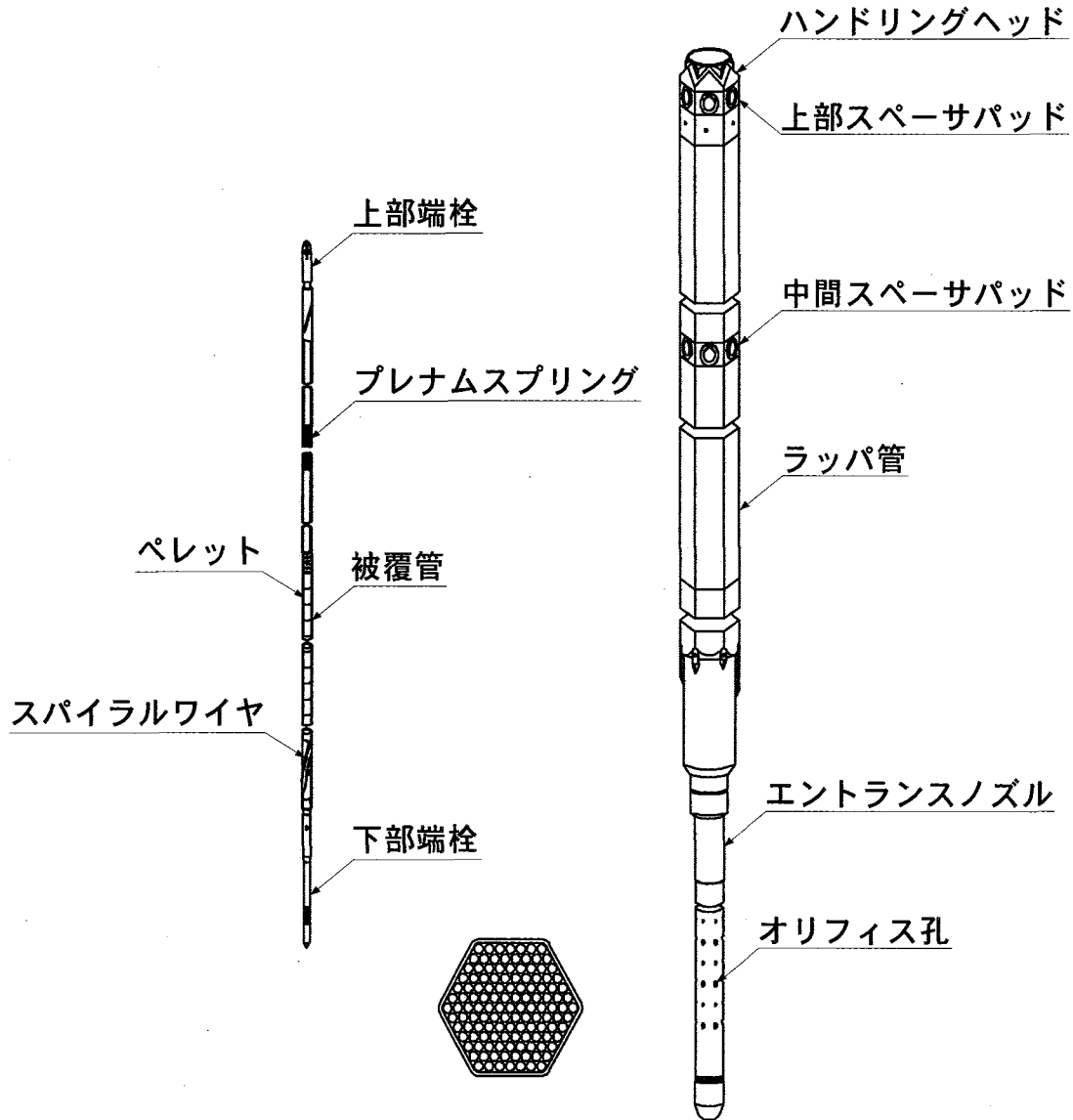
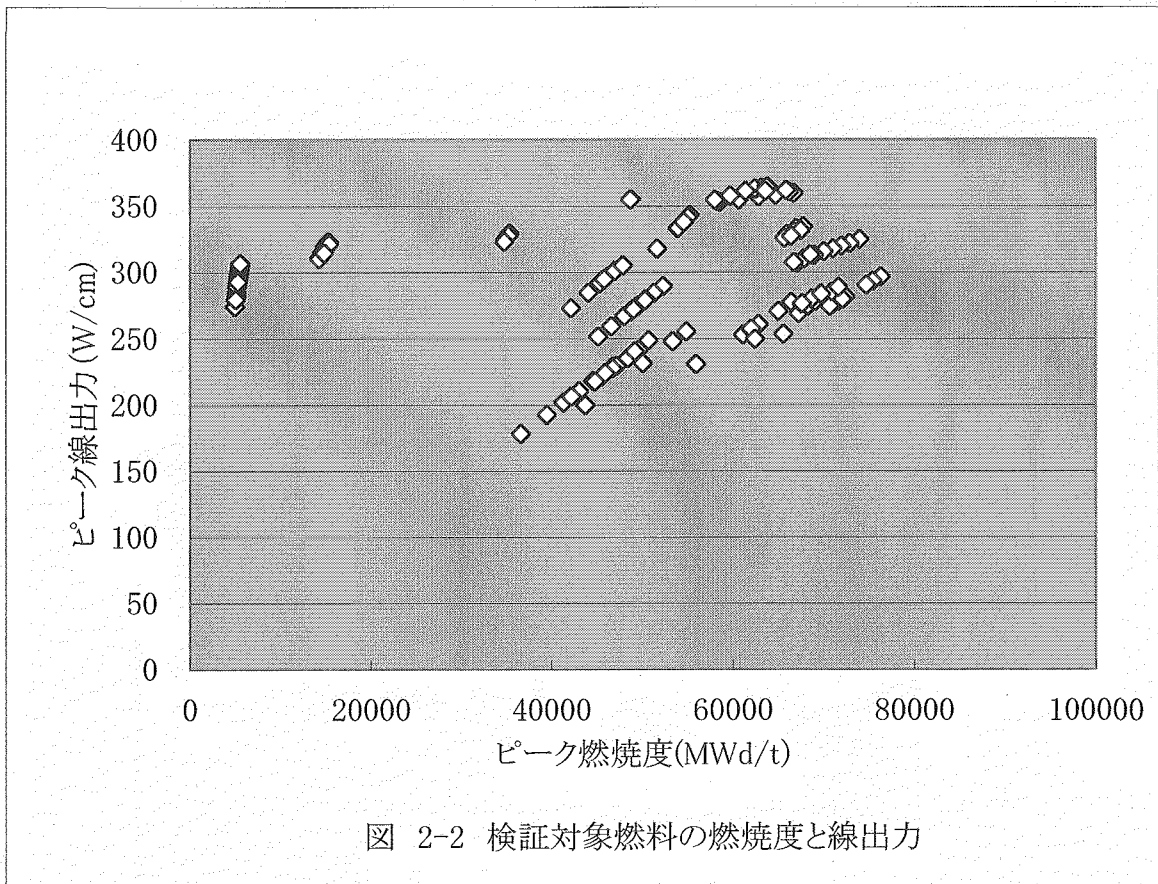


図 2-1 常陽Mk-II炉心燃料集合体の構造



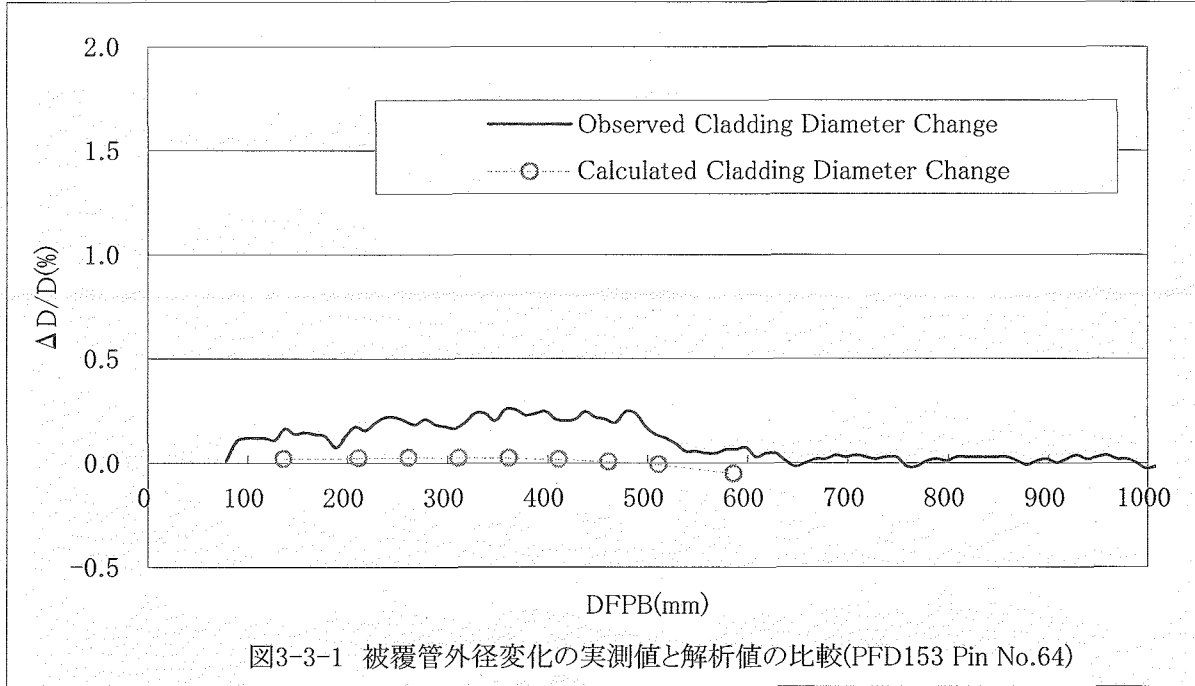


図3-3-1 被覆管外径変化の実測値と解析値の比較(PFD153 Pin No.64)

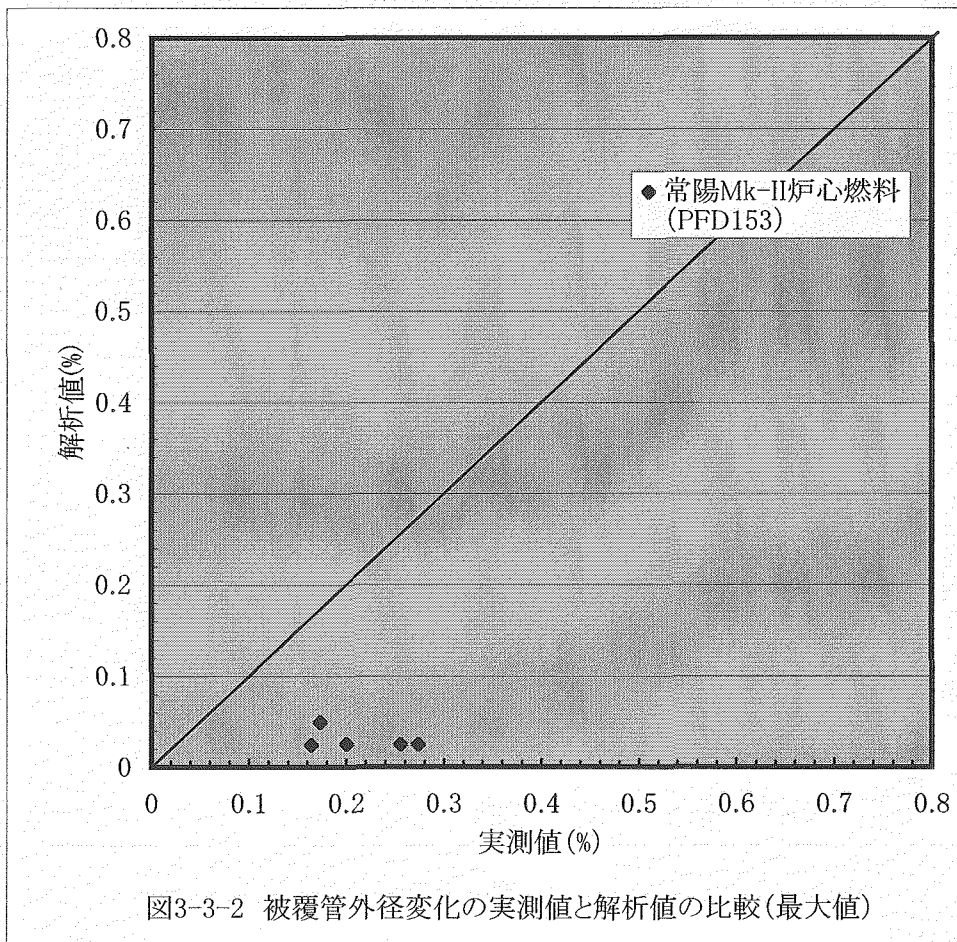
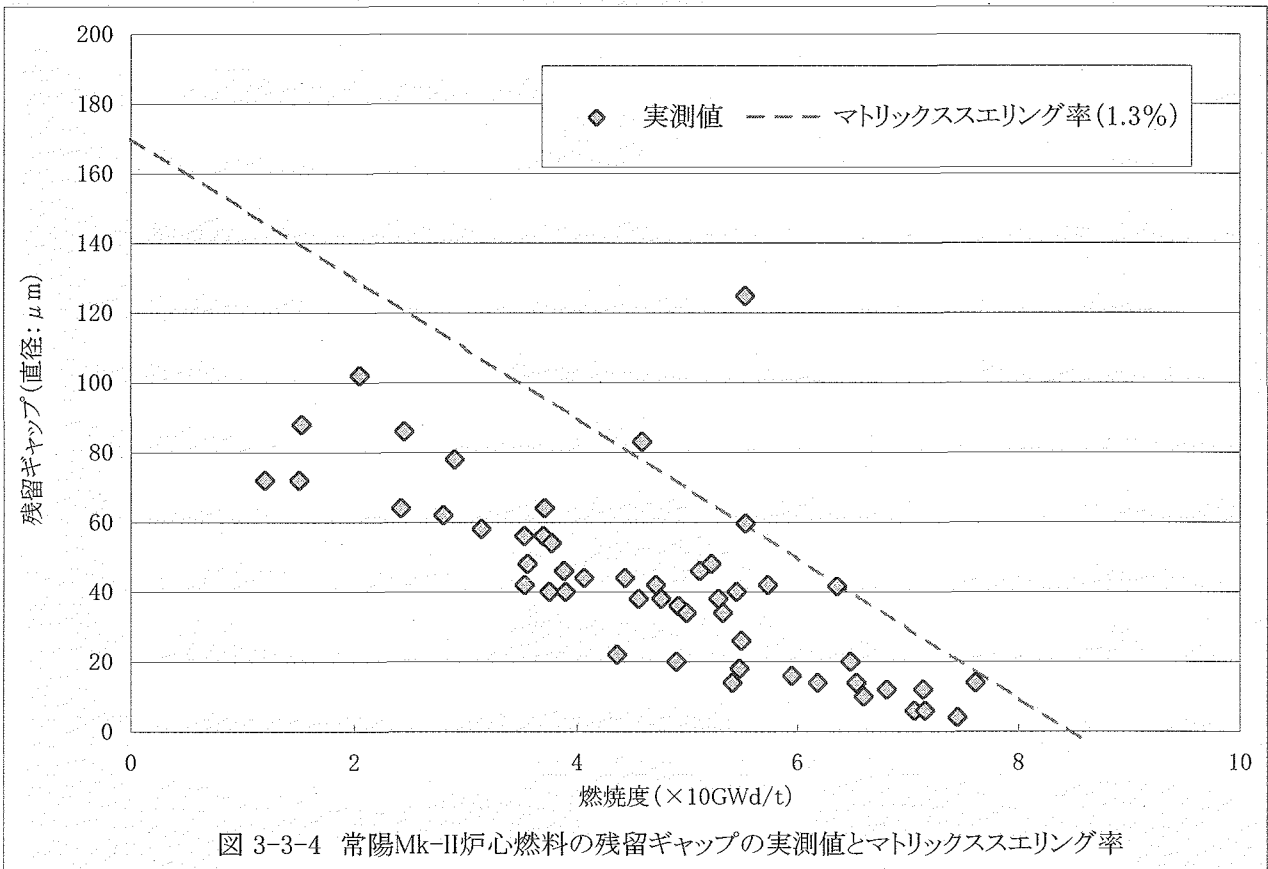
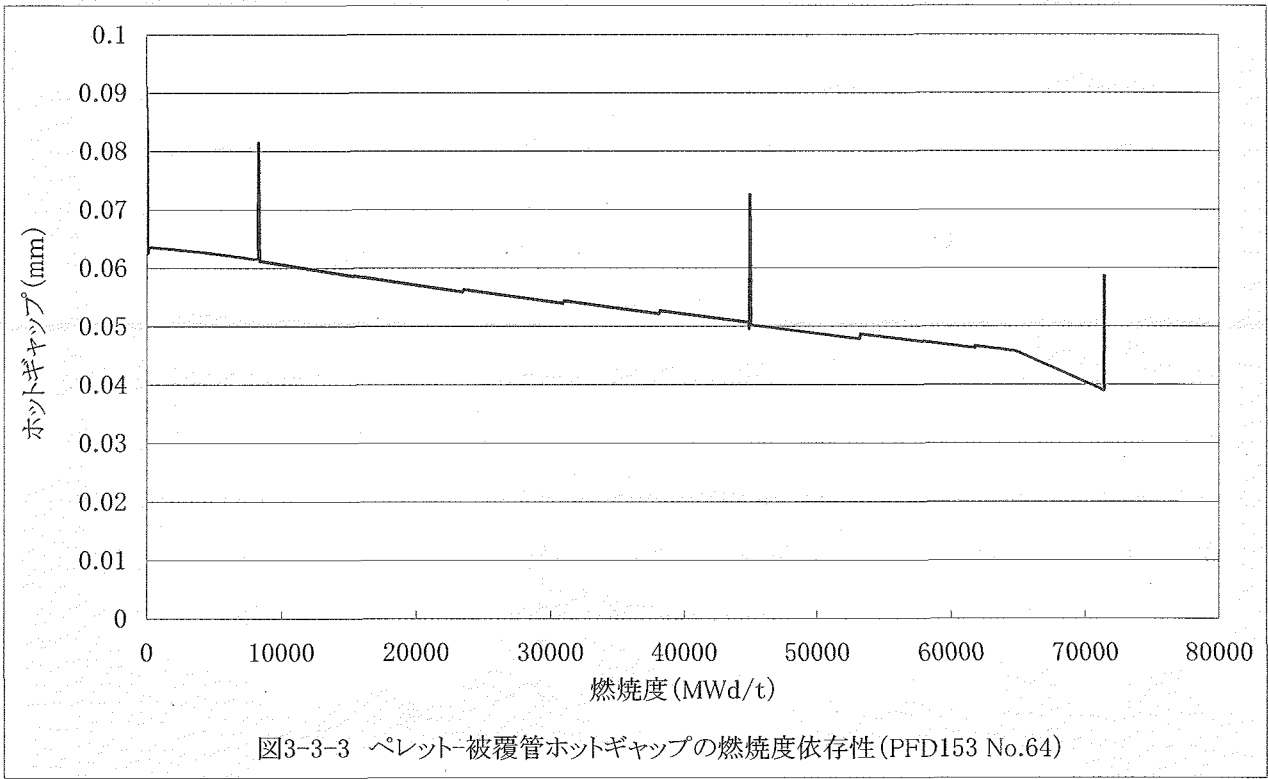
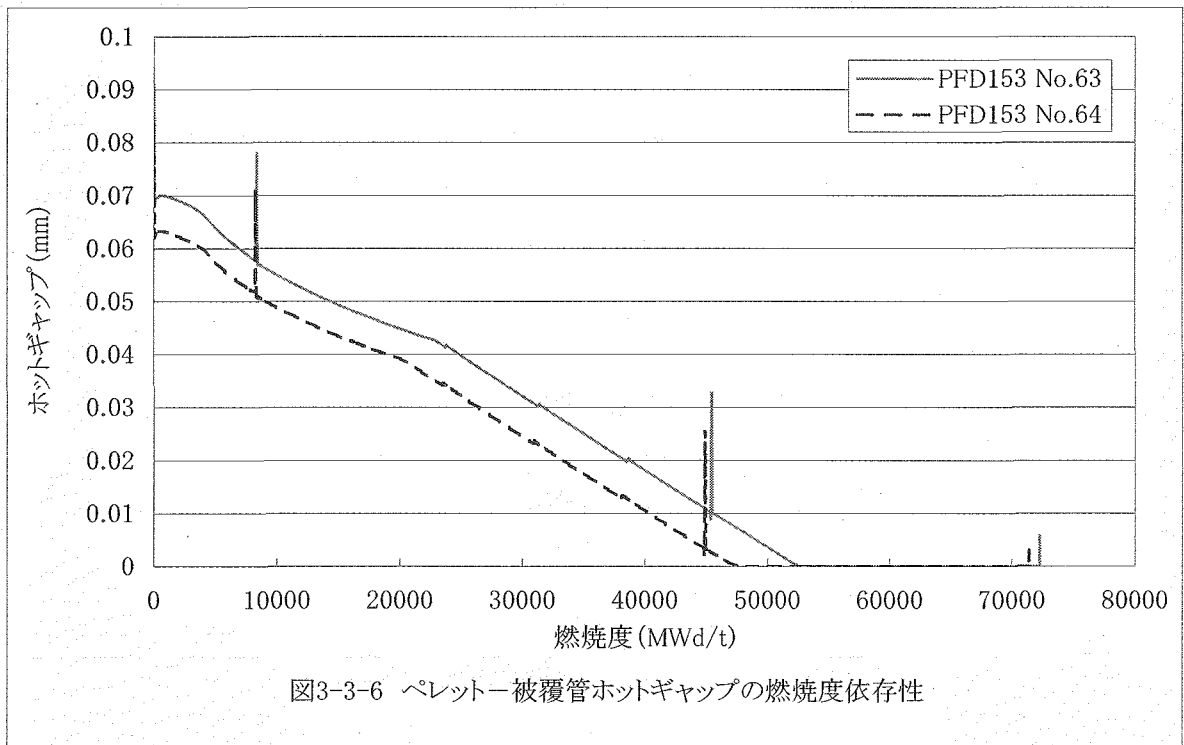
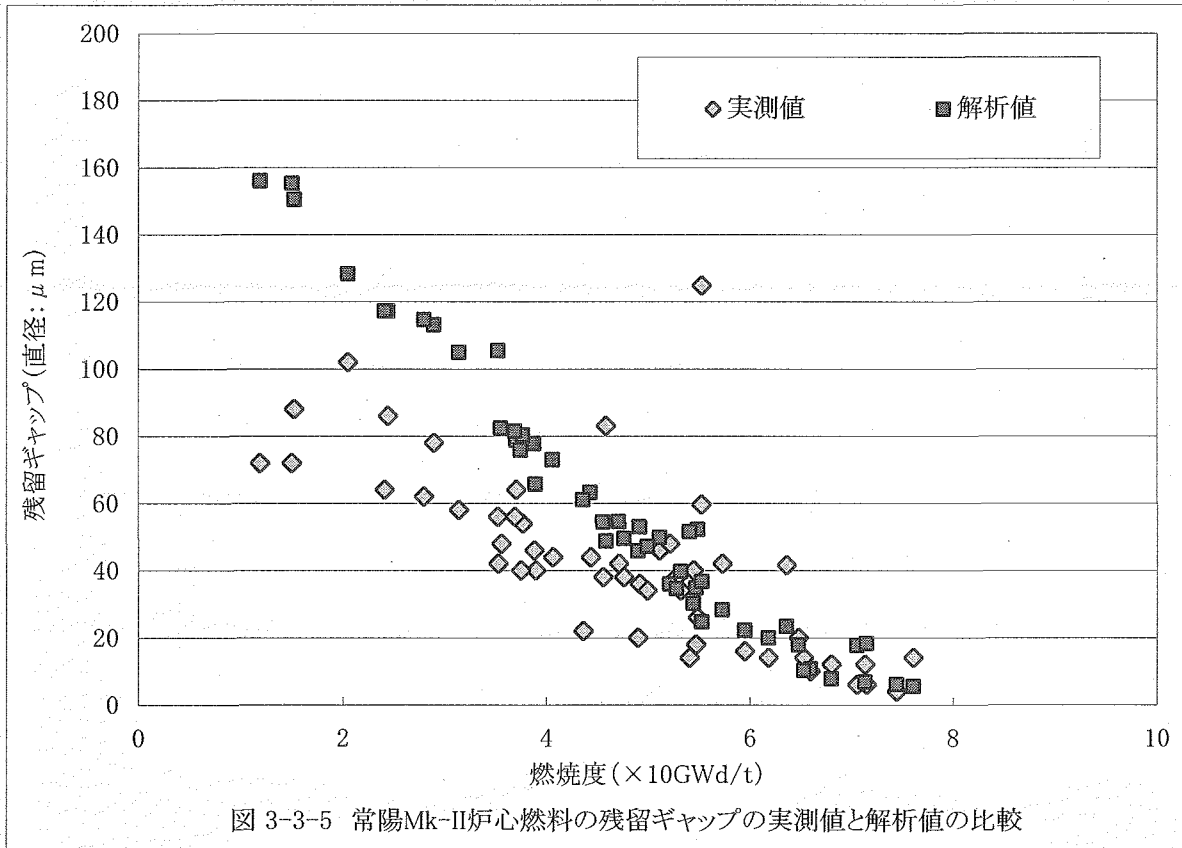


図3-3-2 被覆管外径変化の実測値と解析値の比較(最大値)





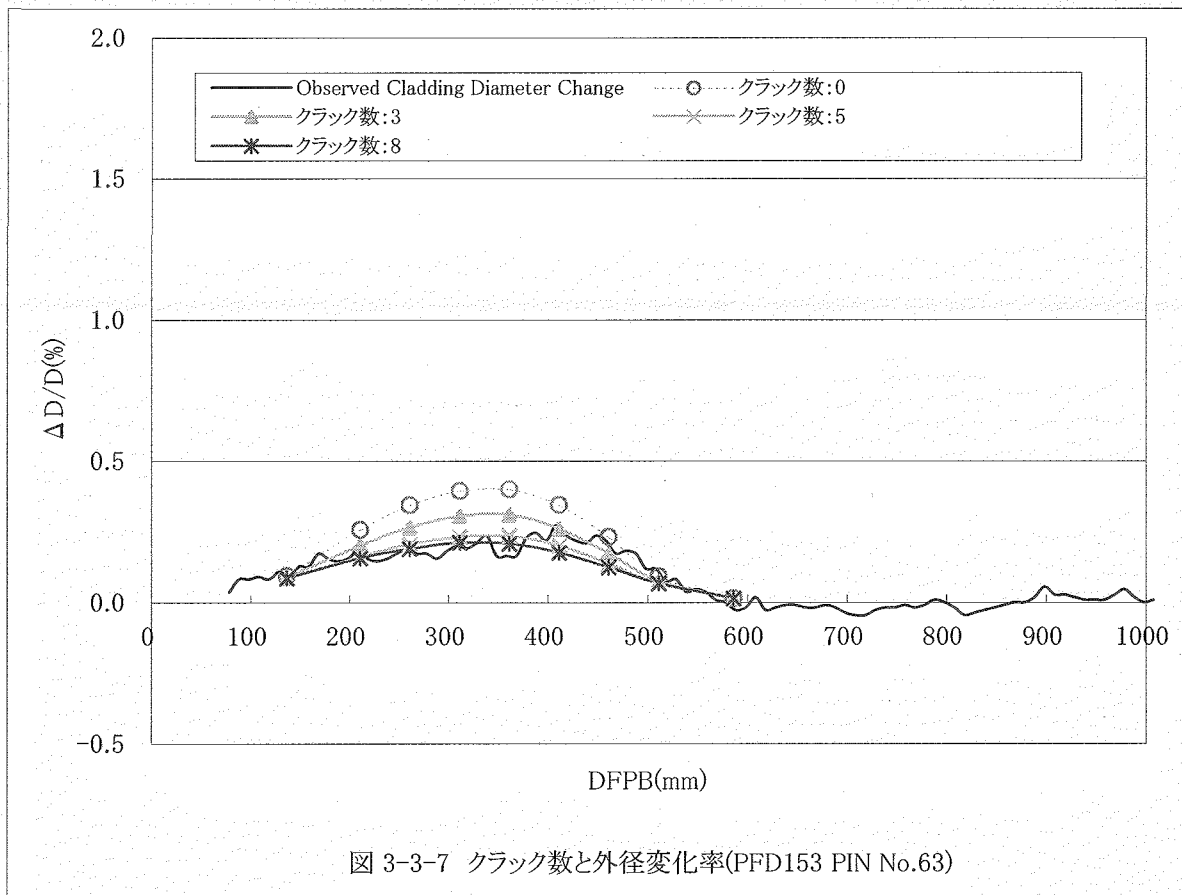


図 3-3-7 クラック数と外径変化率(PFD153 PIN No.63)

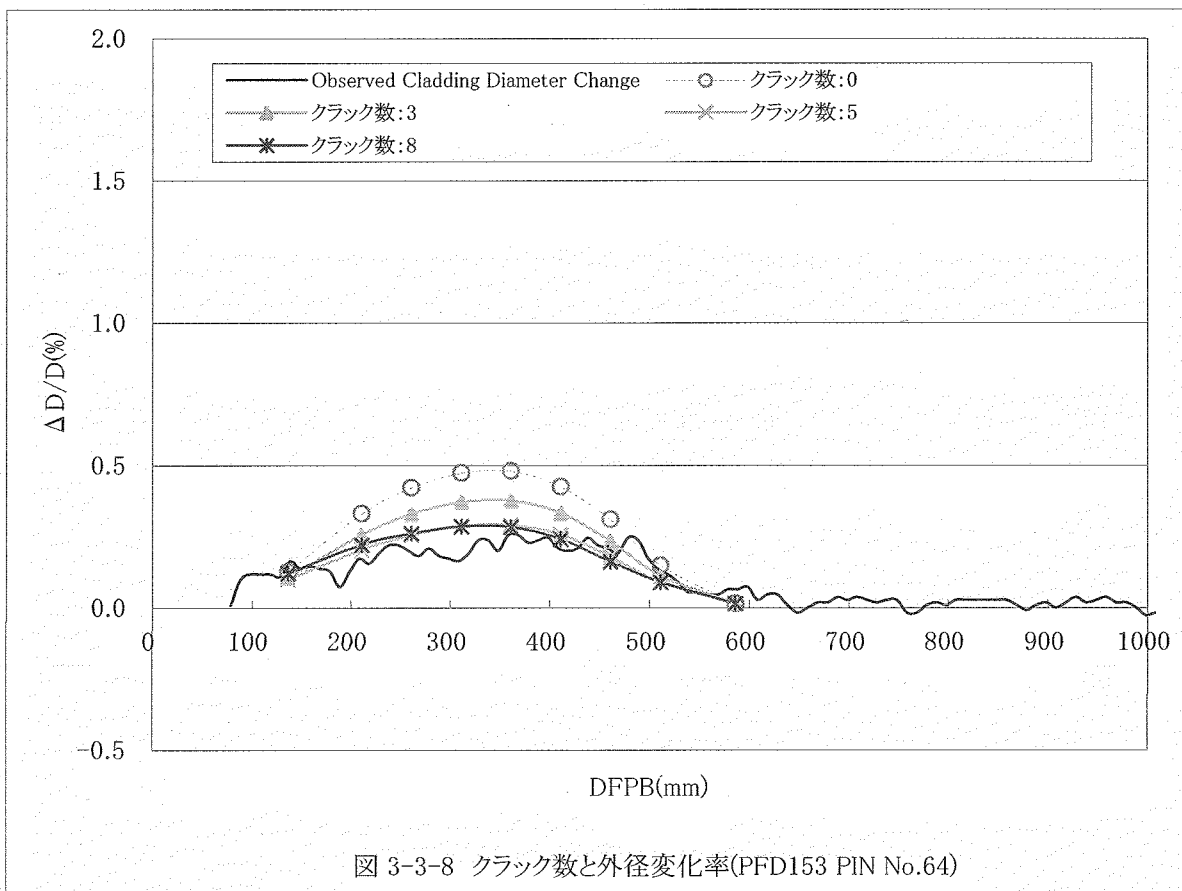


図 3-3-8 クラック数と外径変化率(PFD153 PIN No.64)

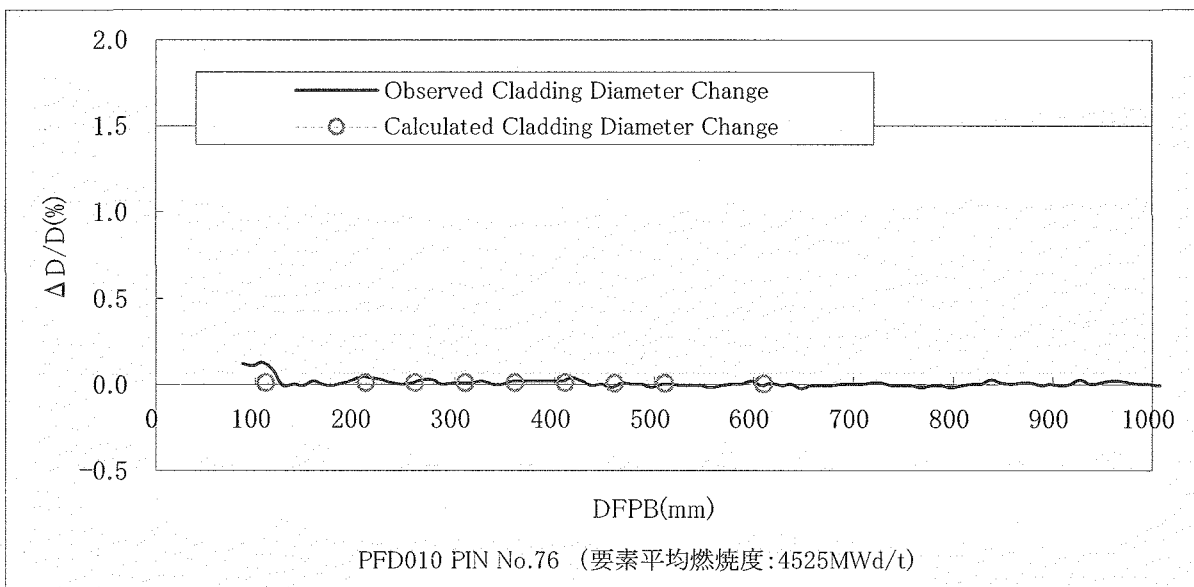
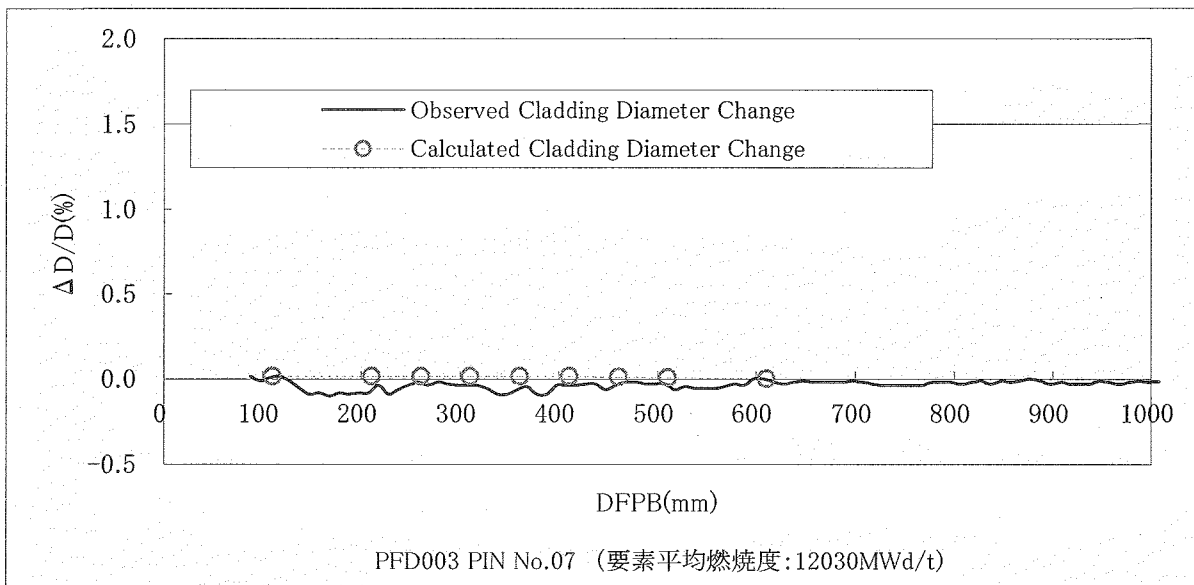
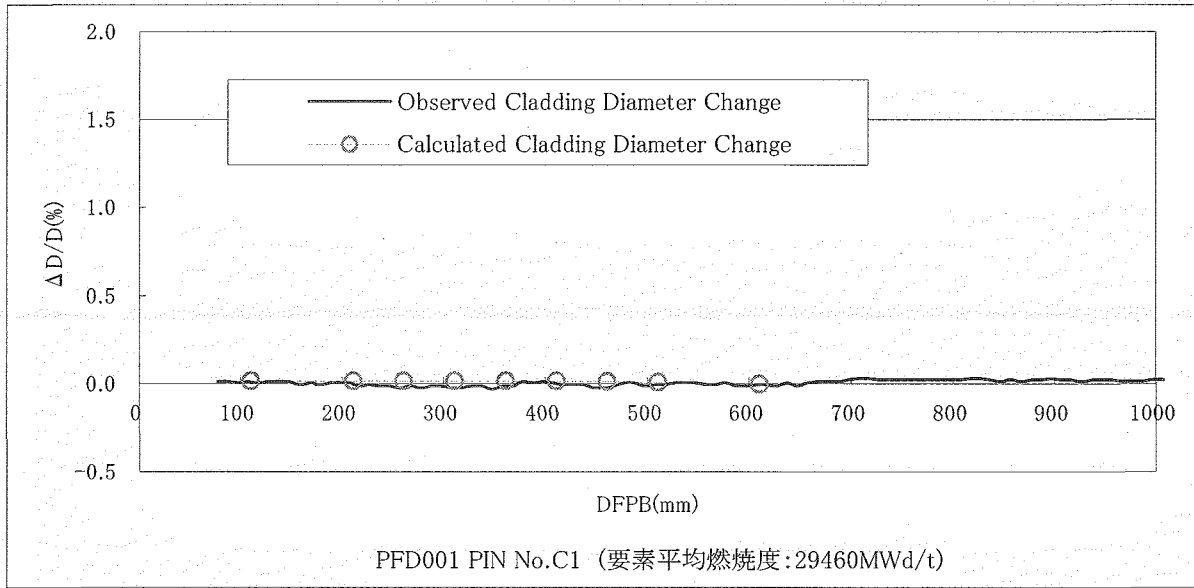


図 4-1-1 被覆管外径変化率の解析値と実測値の比較(1/5)

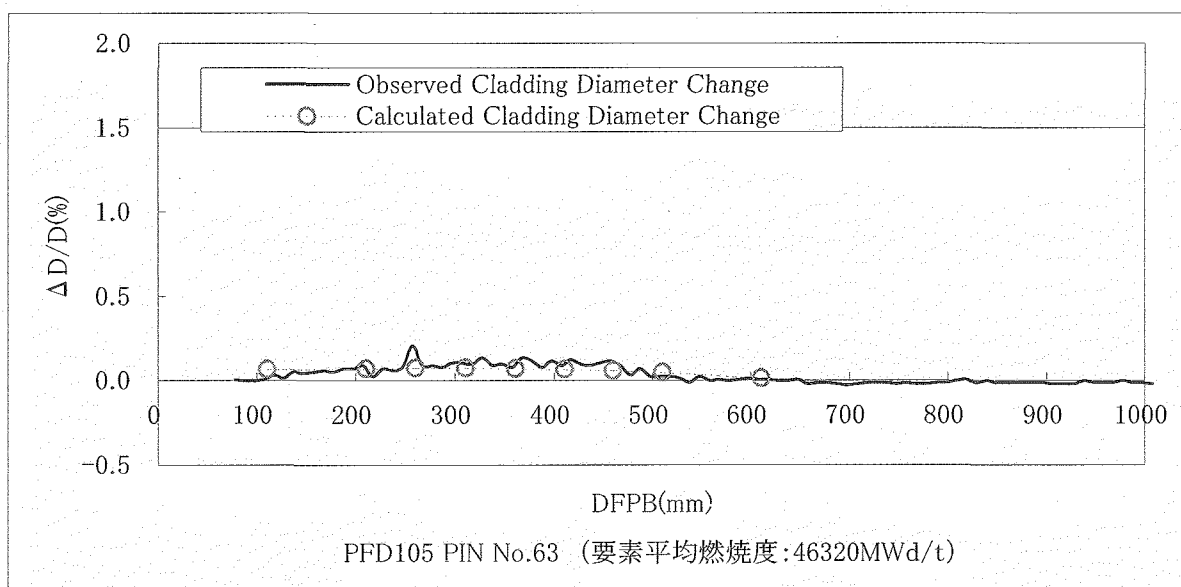
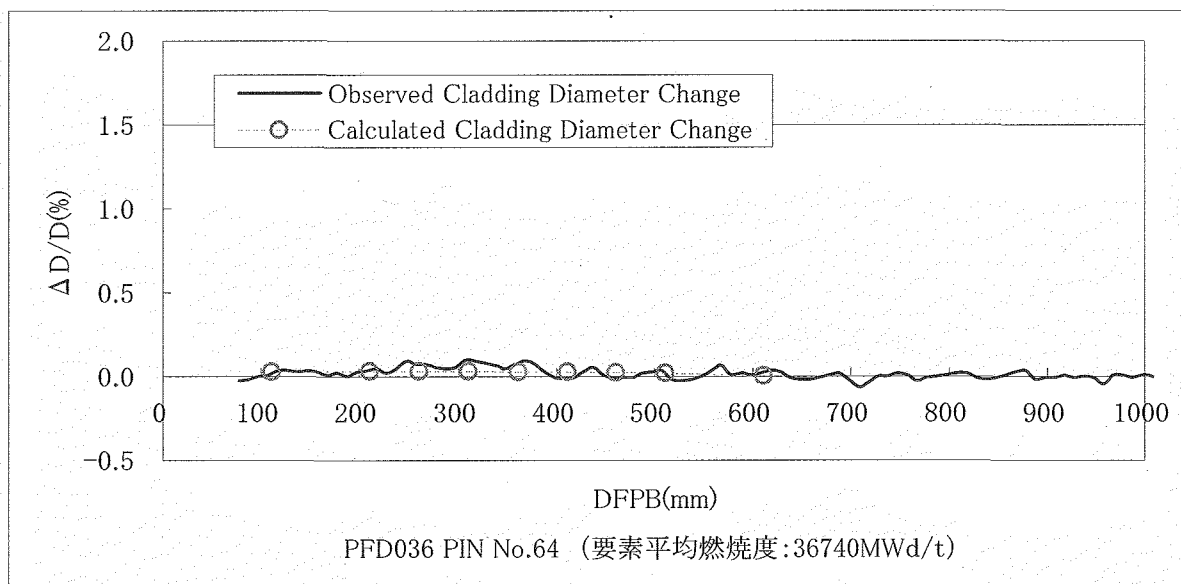
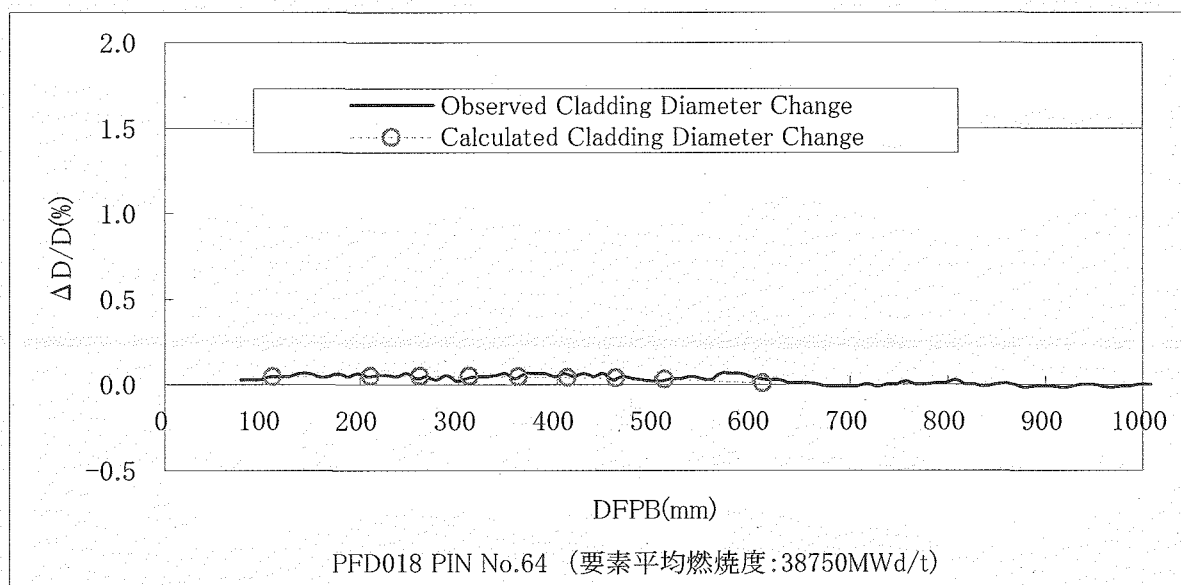


図 4-1-1 被覆管外径変化率の解析値と実測値の比較(2/5)

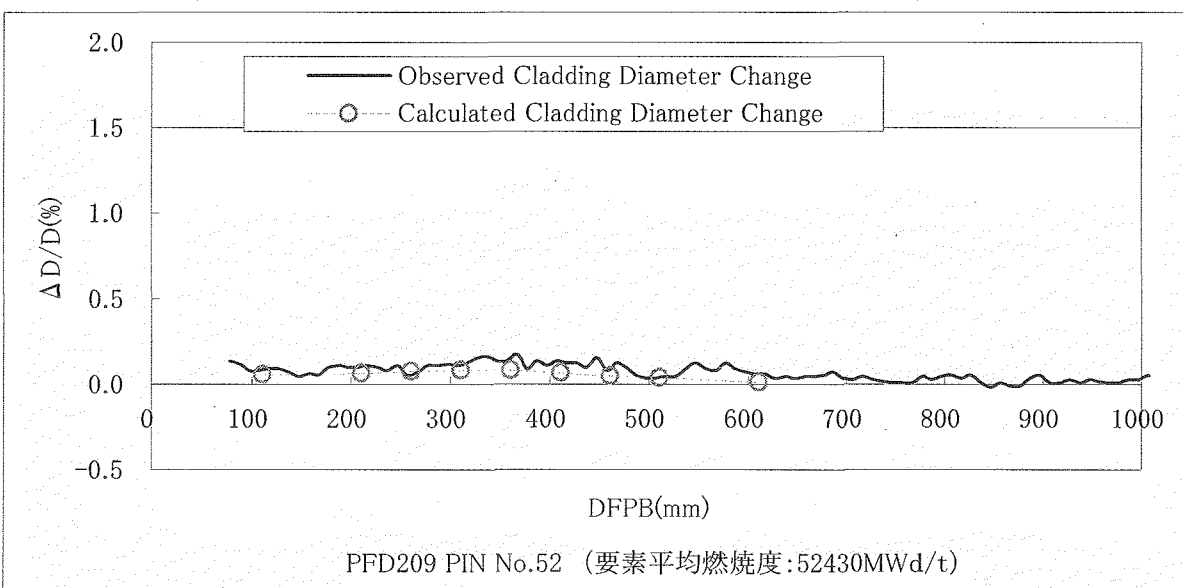
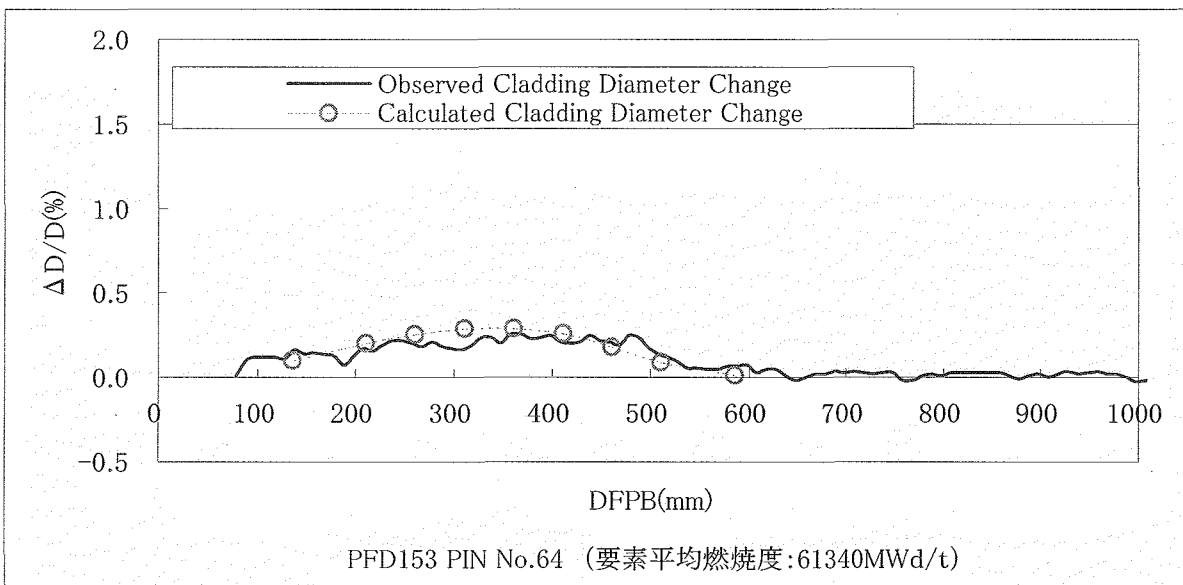
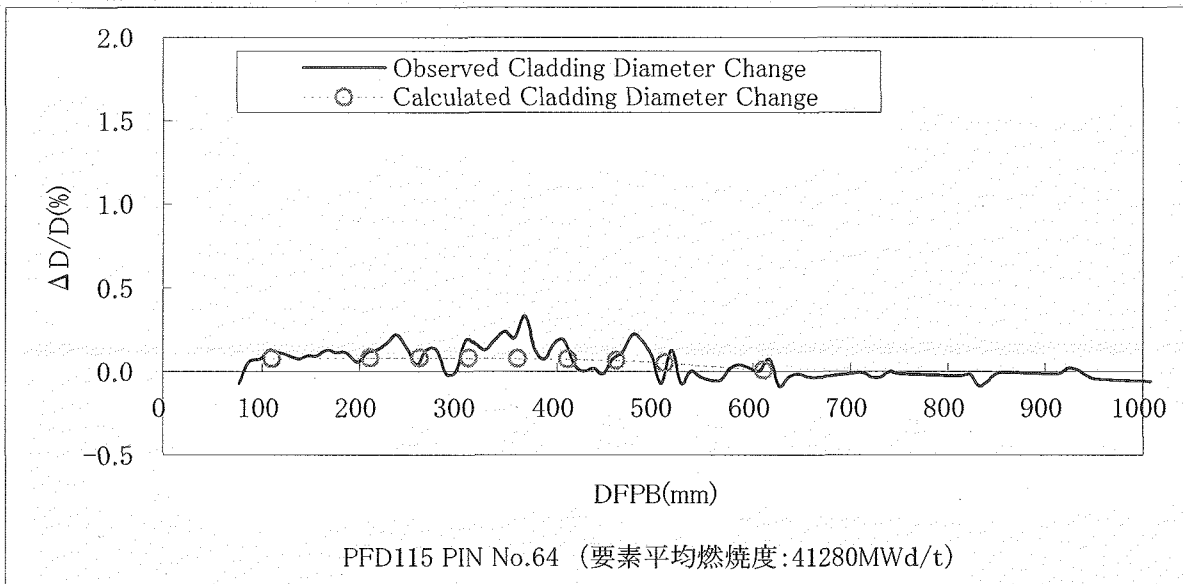


図 4-1-1 被覆管外径変化率の解析値と実測値の比較 (3/5)

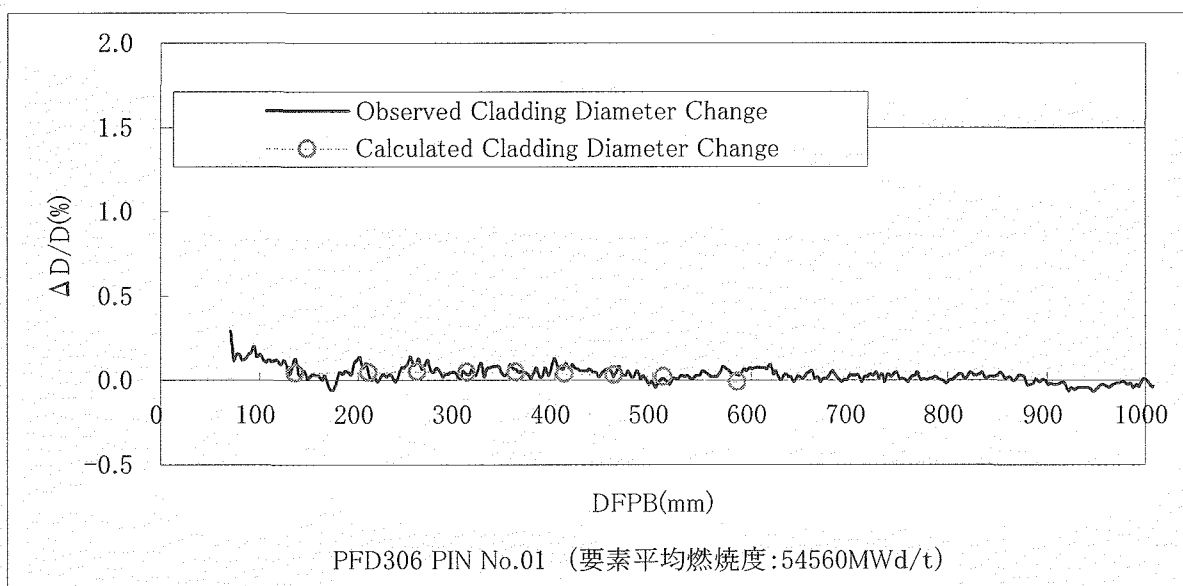
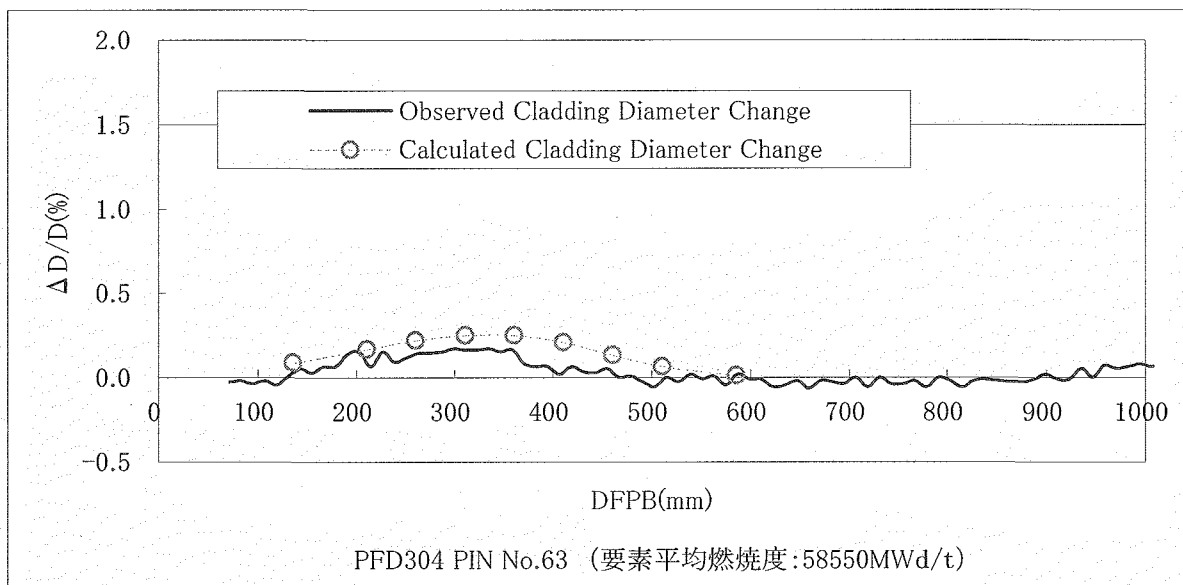
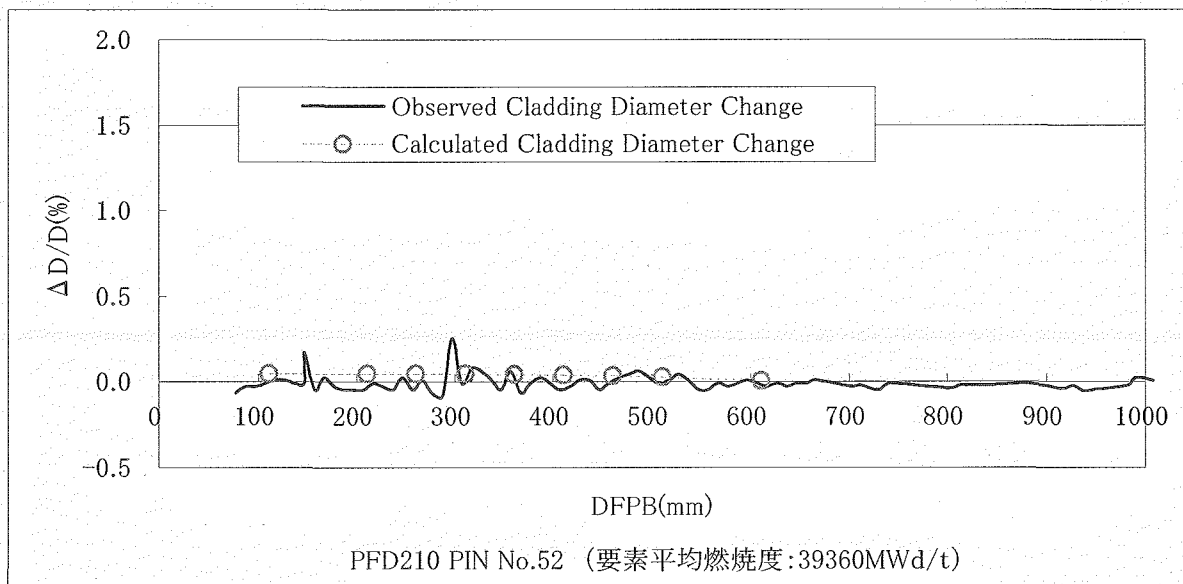


図 4-1-1 被覆管外径変化率の解析値と実測値の比較 (4/5)

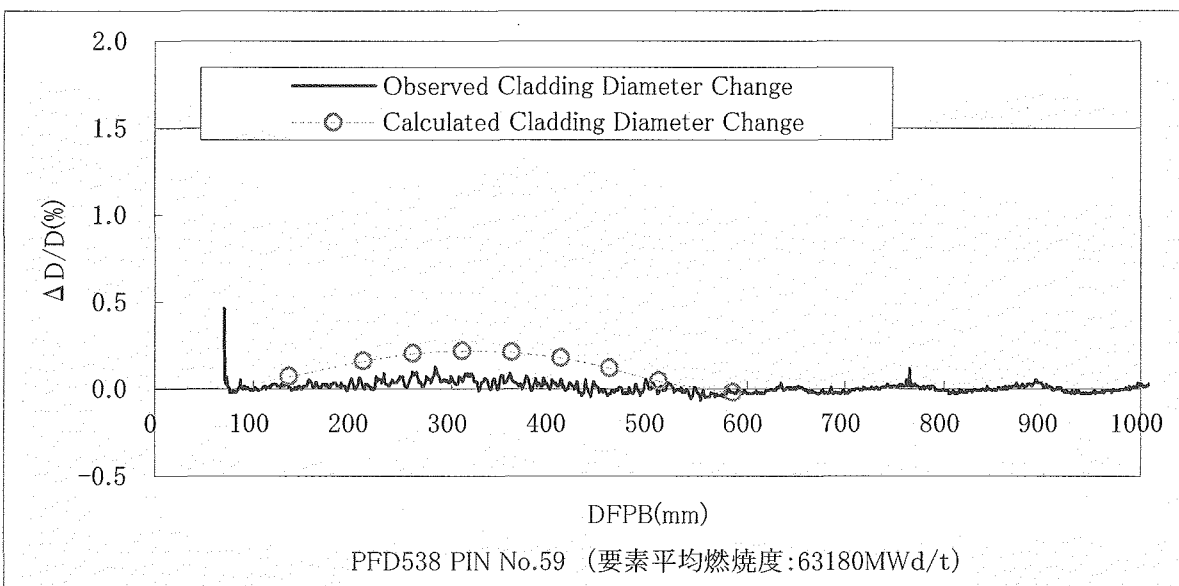
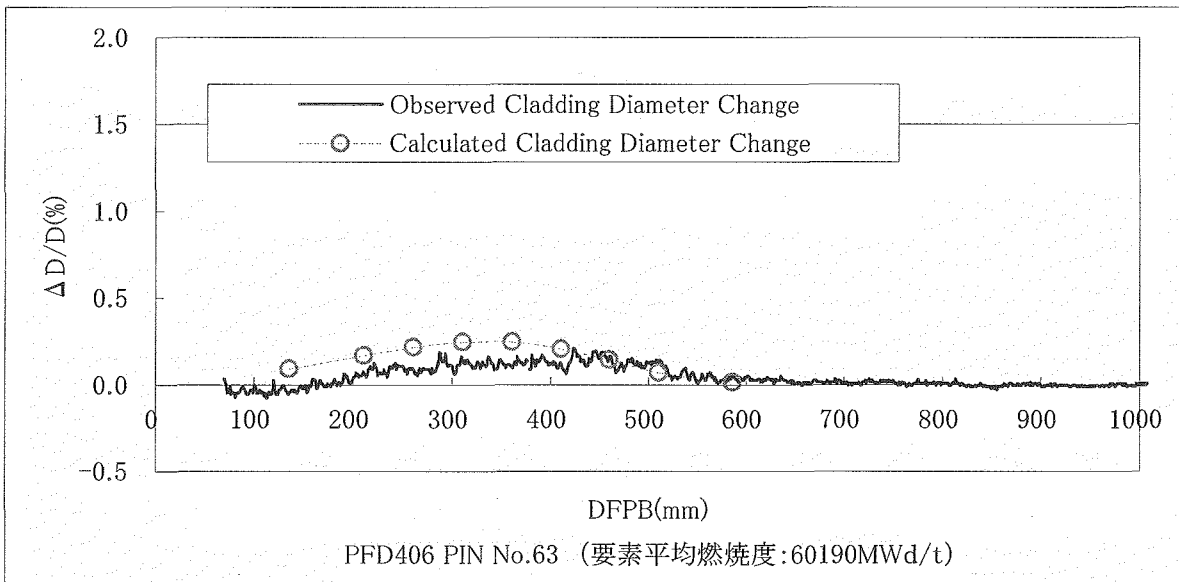
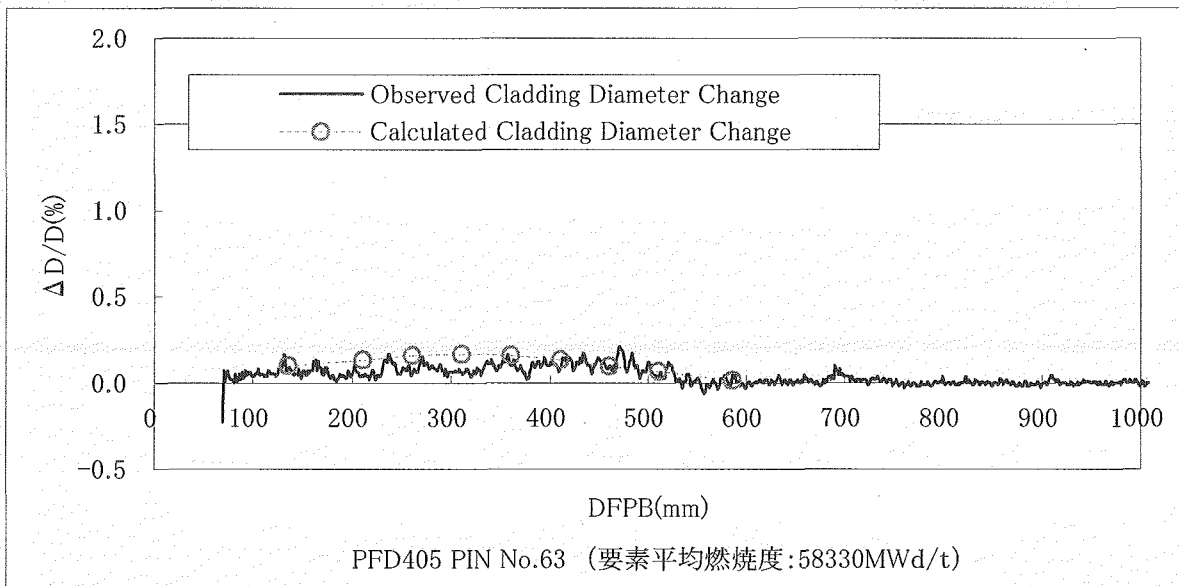
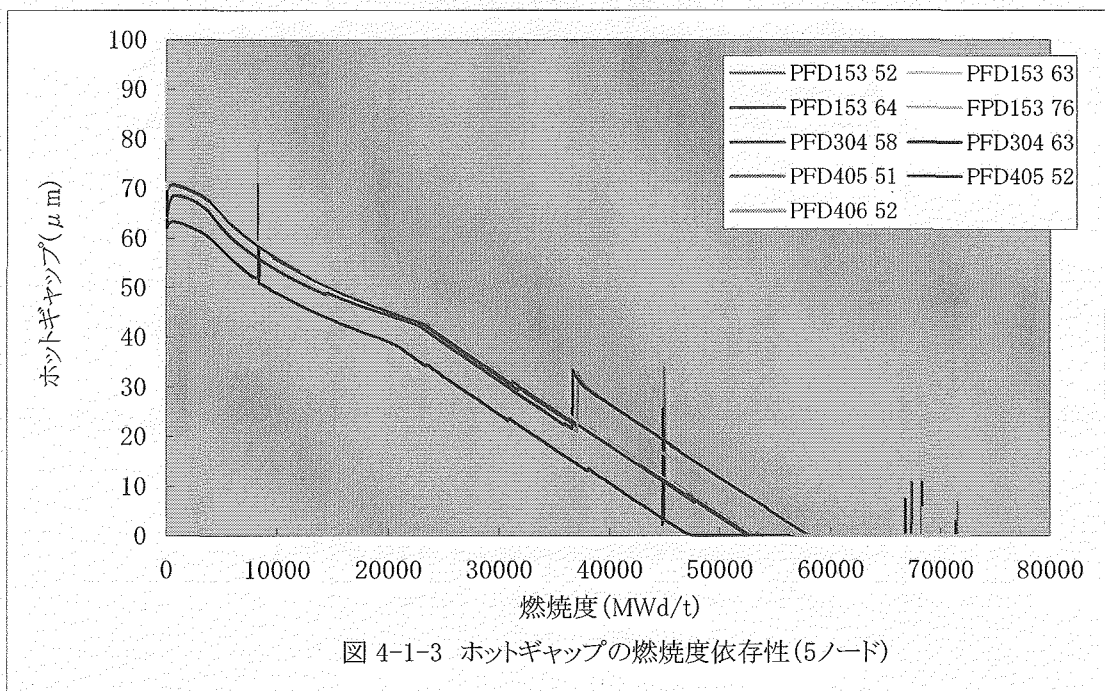
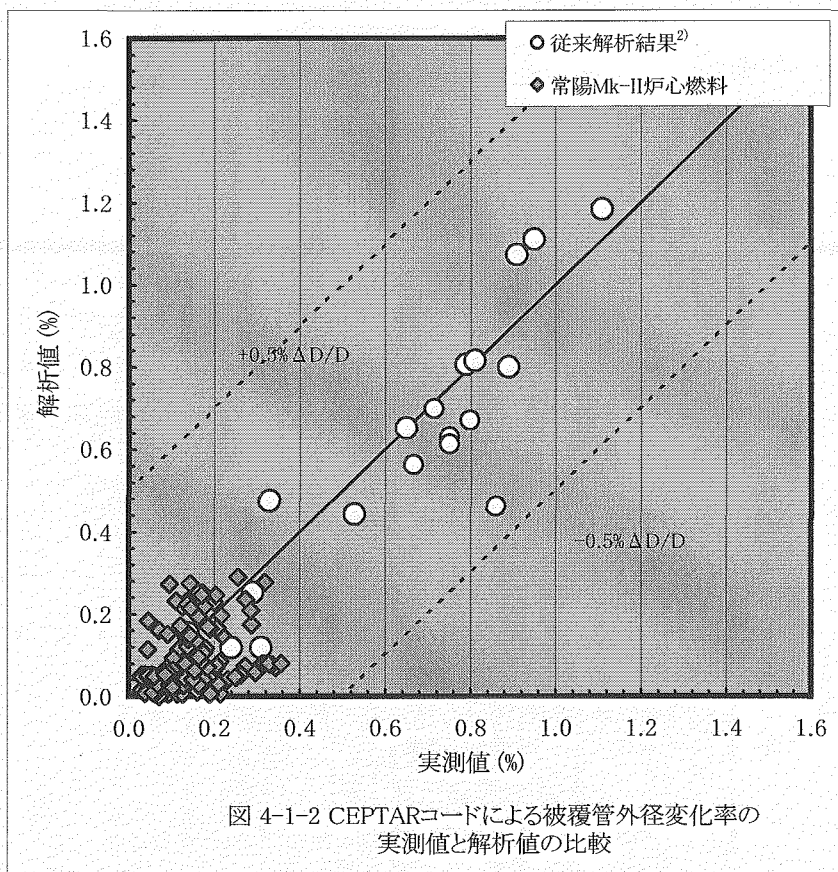
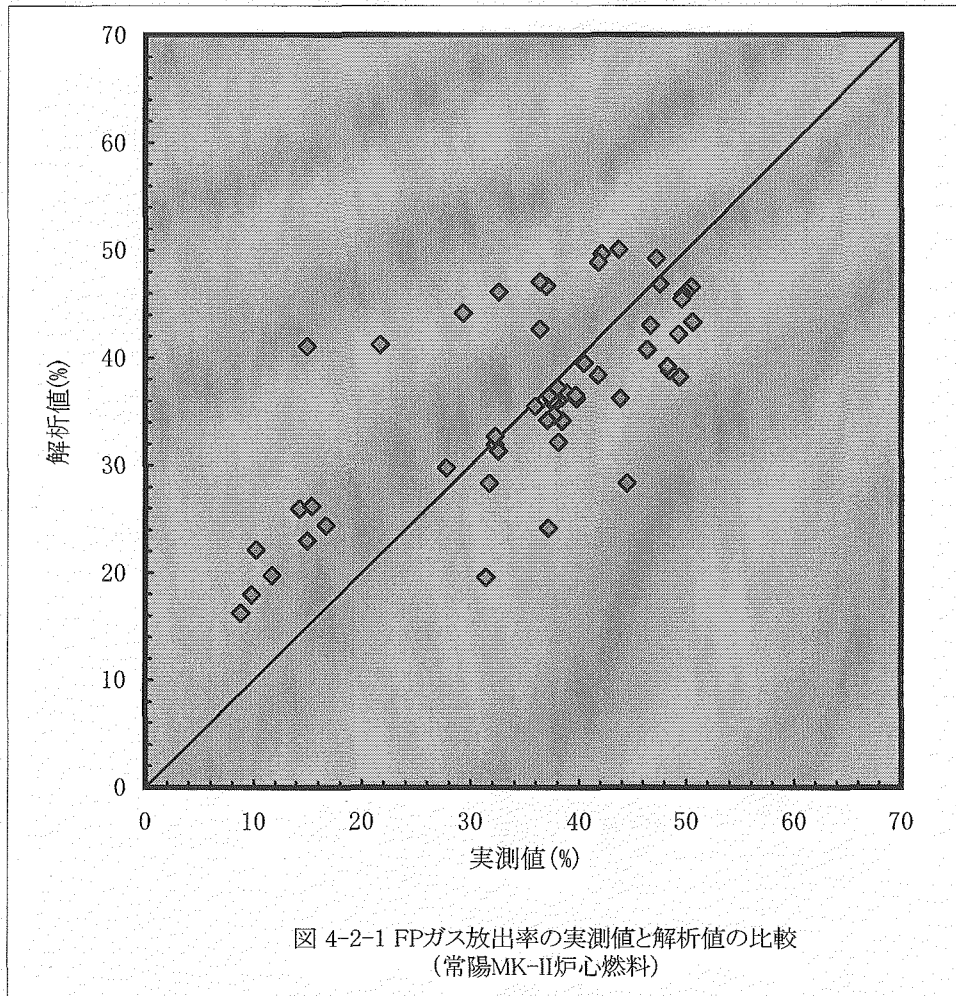
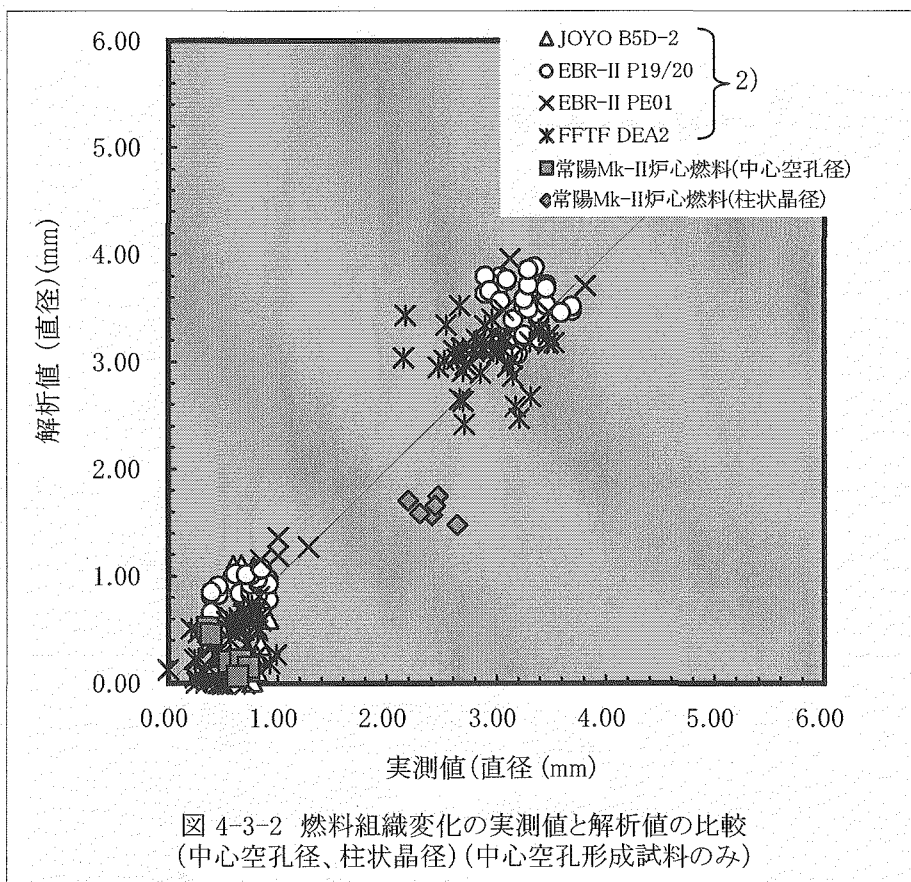
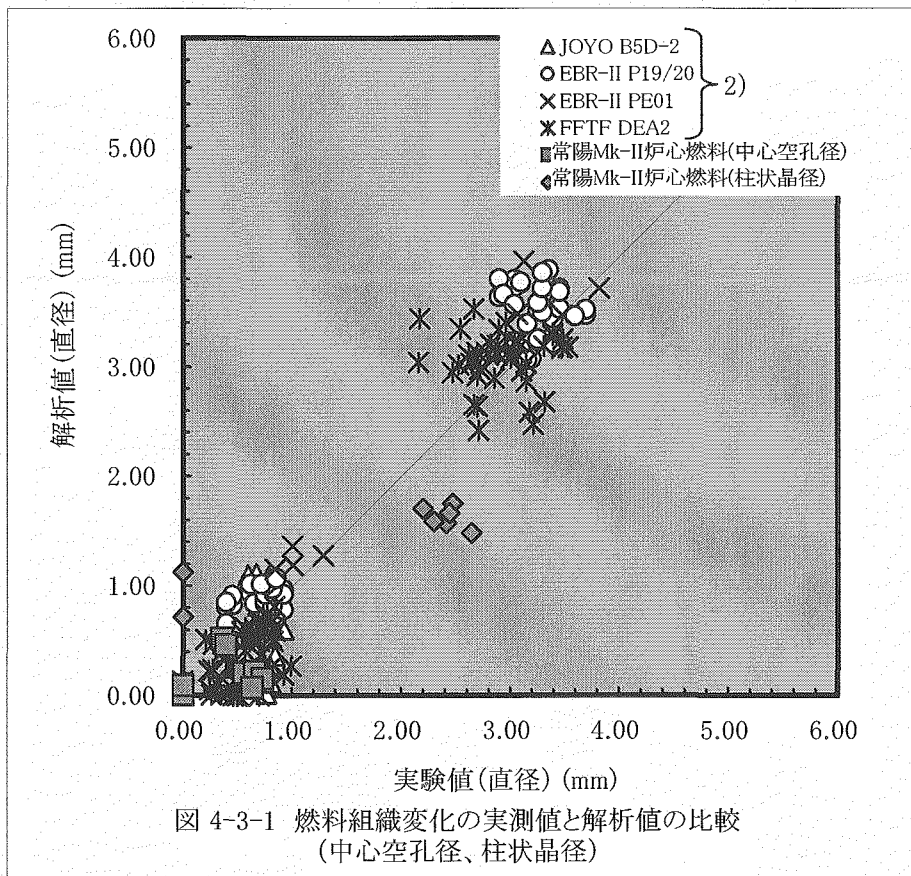


図 4-1-1 被覆管外径変化率の解析値と実測値の比較(5/5)







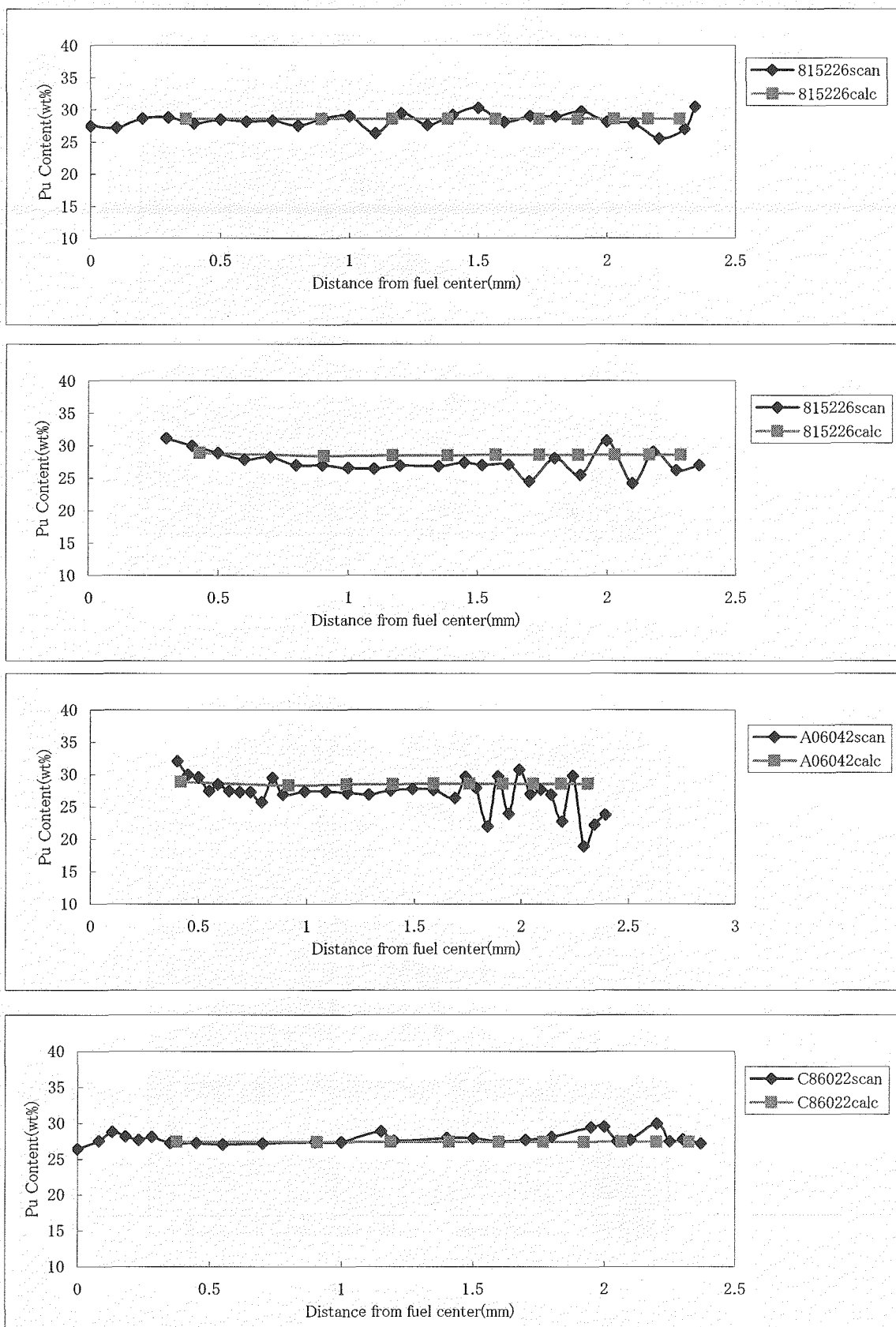


図 4-4-1 Pu再分布挙動の解析値と実測値の比較(1/8)

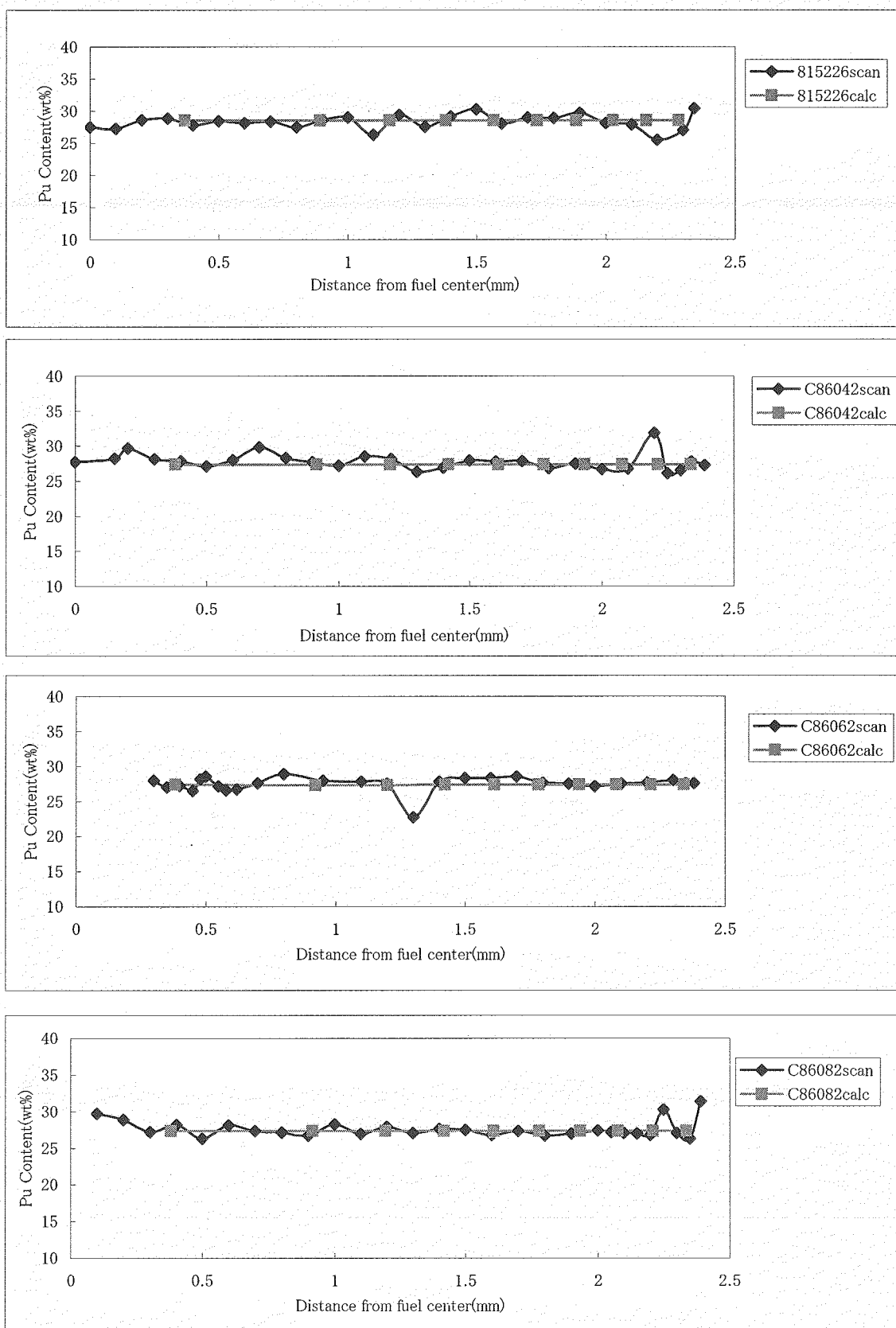


図4-4-1 Pu再分布挙動の解析値と実測値の比較(2/8)

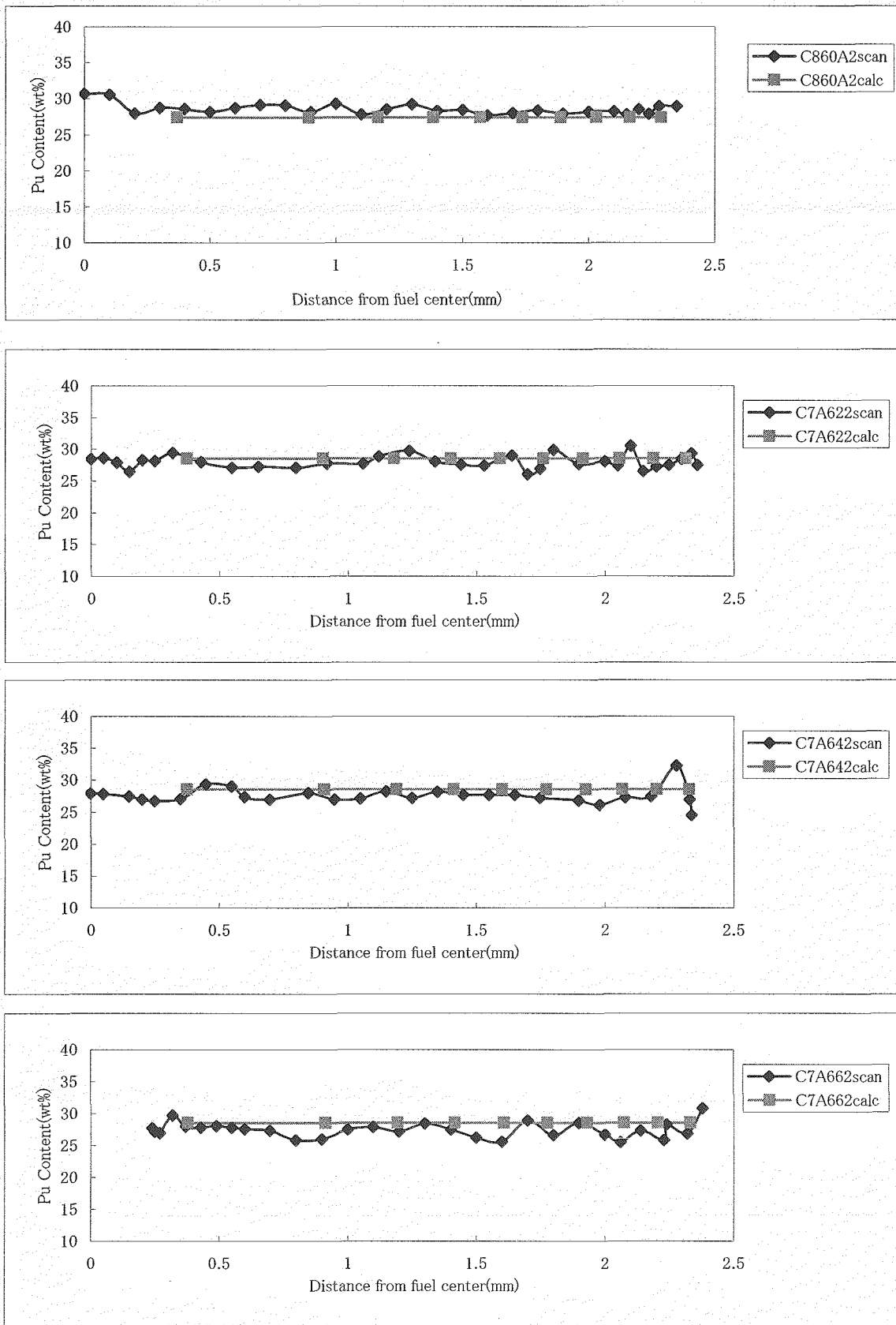


図4-4-1 Pu再分布挙動の解析値と実測値の比較(3/8)

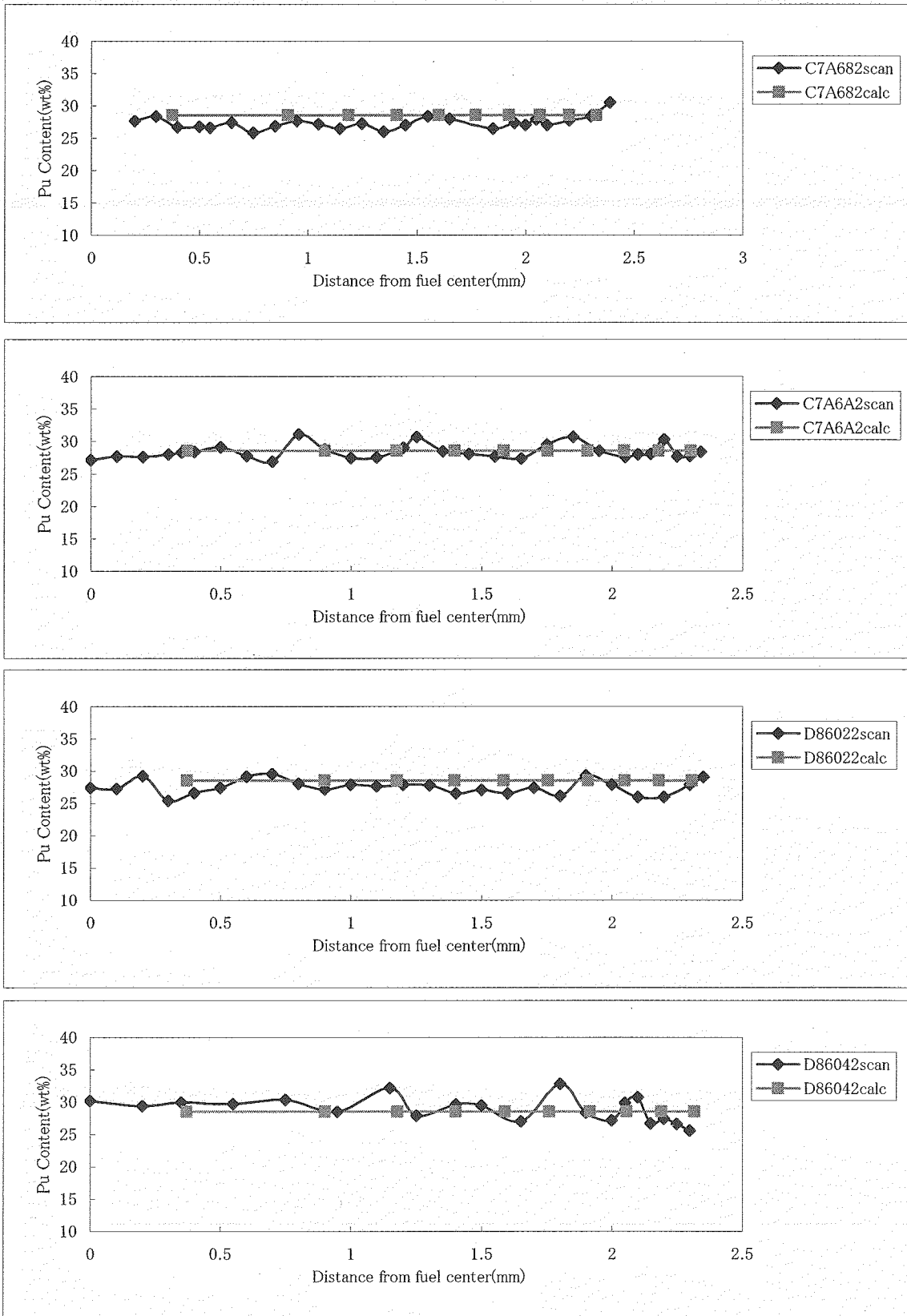


図 4-4-1 Pu再分布挙動の解析値と実測値の比較(4/8)

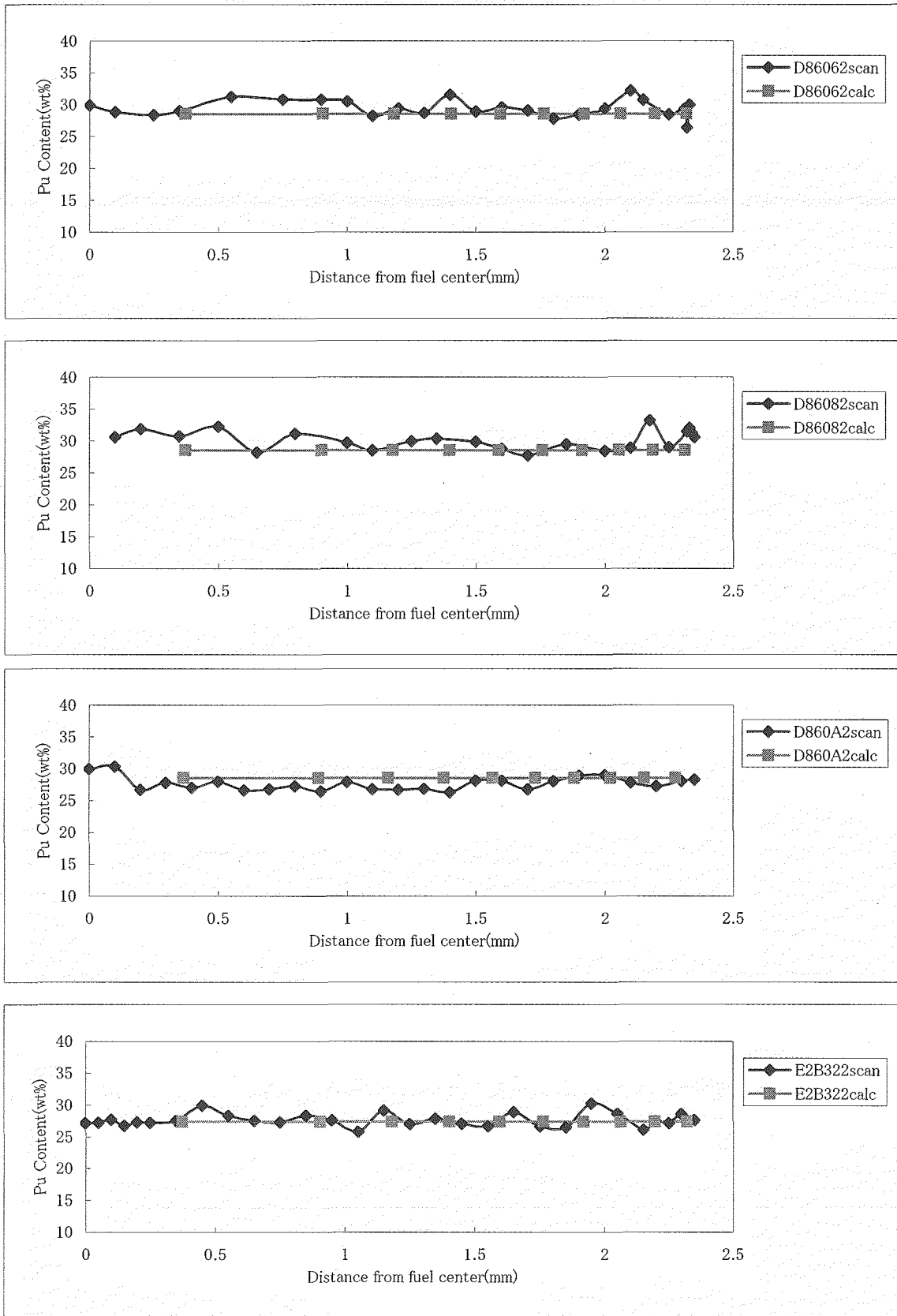


図 4-4-1 Pu再分布挙動の解析値と実測値の比較(5/8)

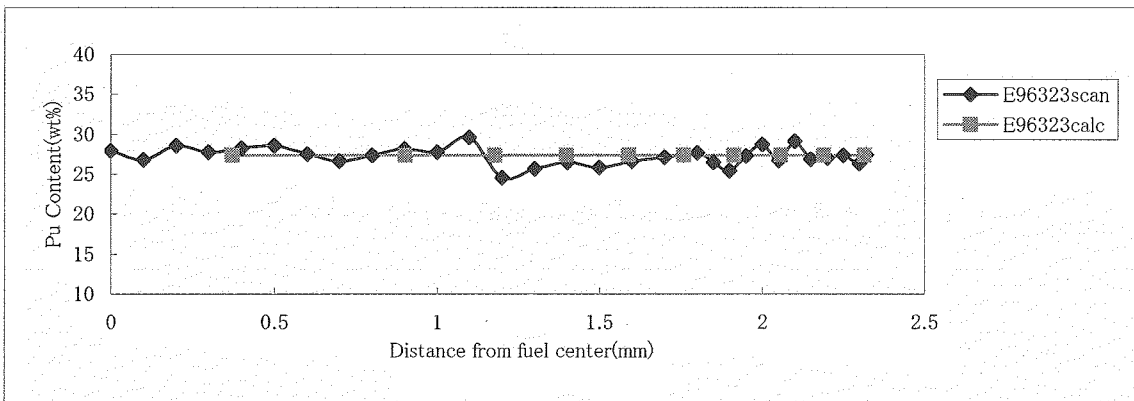
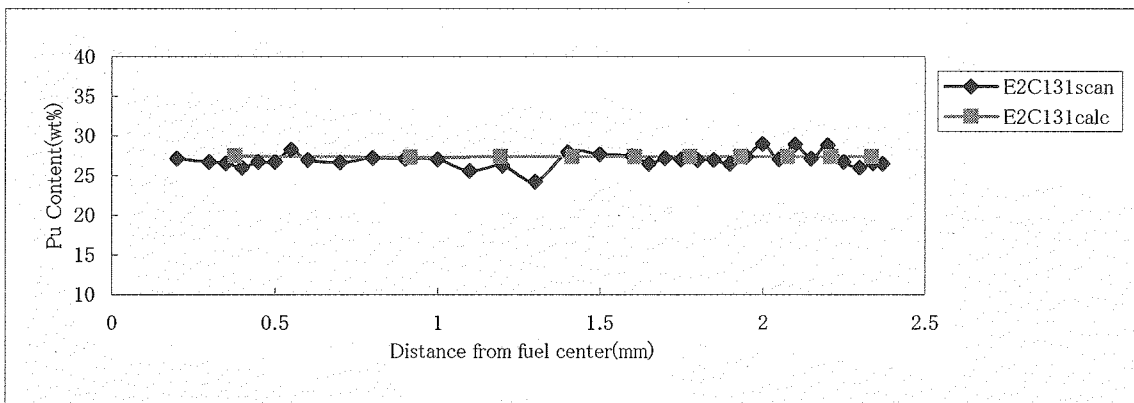
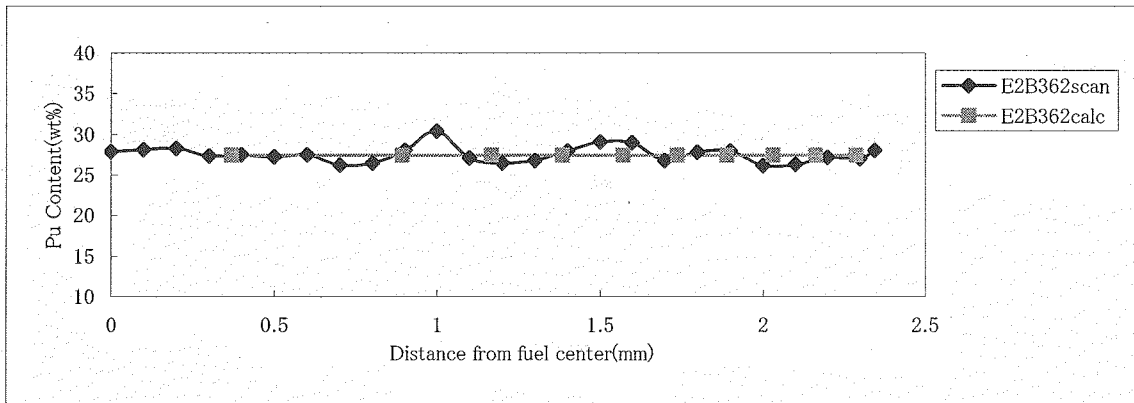
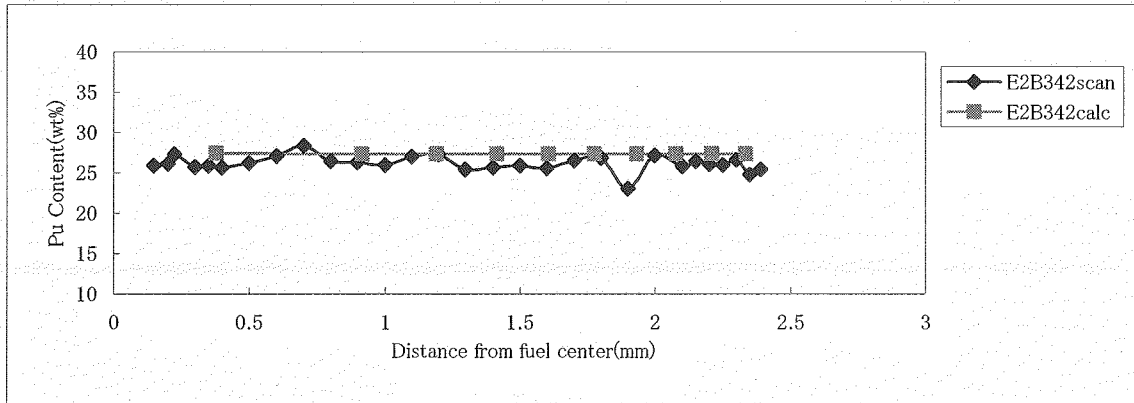


図 4-4-1 Pu再分布挙動の解析値と実測値の比較(6/8)

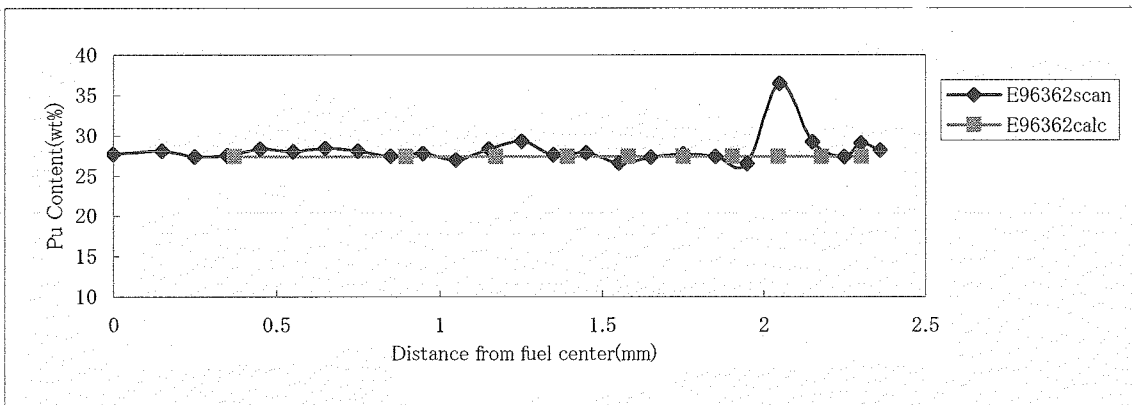
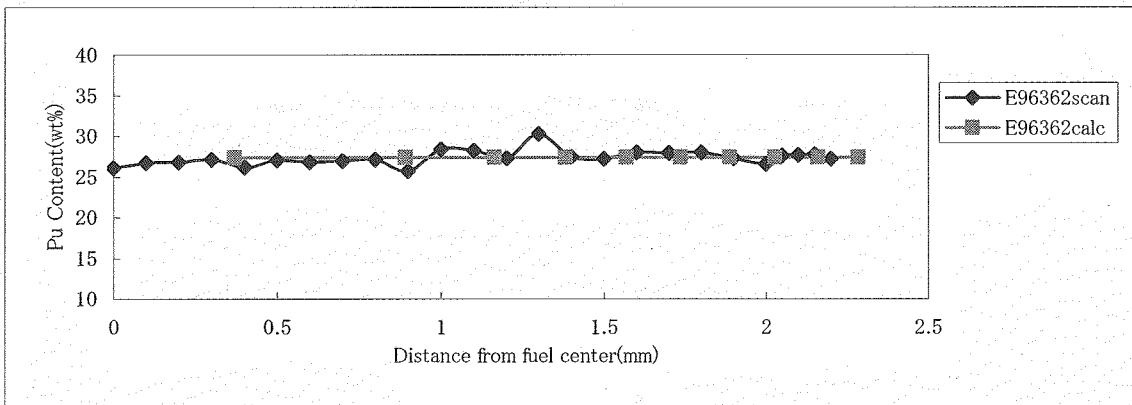
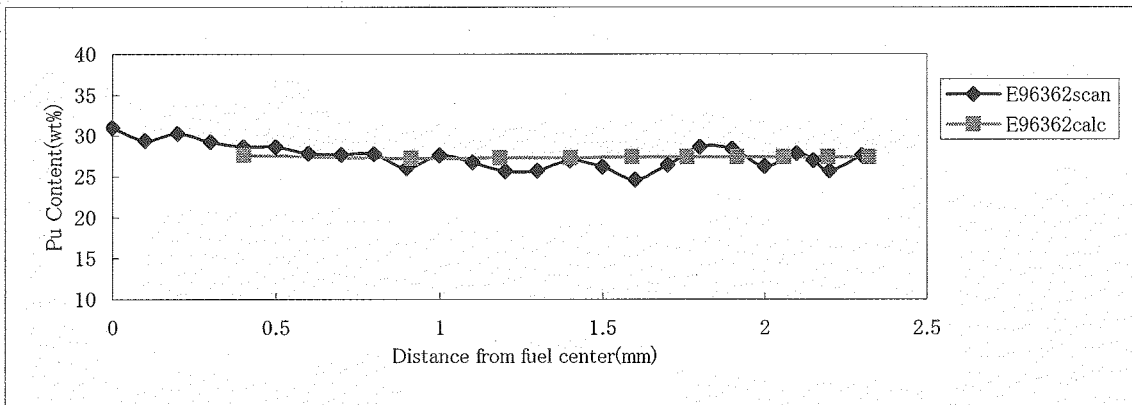
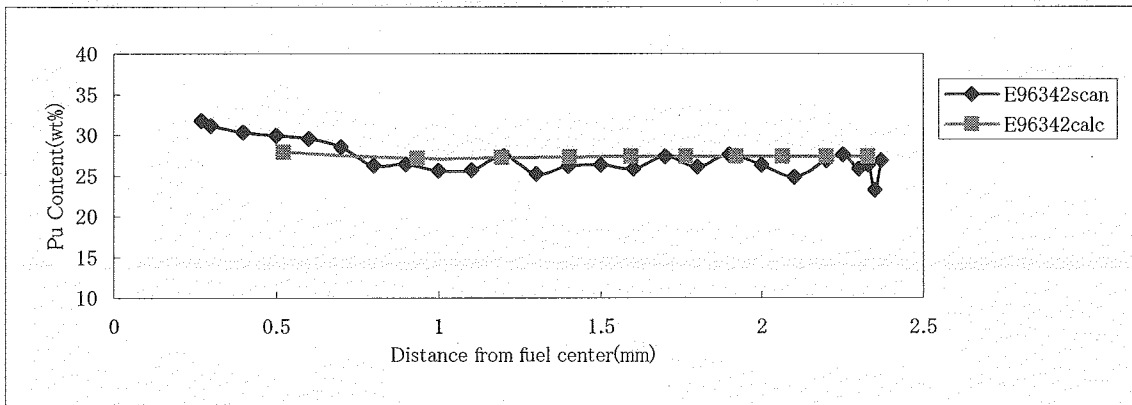


図 4-4-1 Pu再分布挙動の解析値と実測値の比較(7/8)

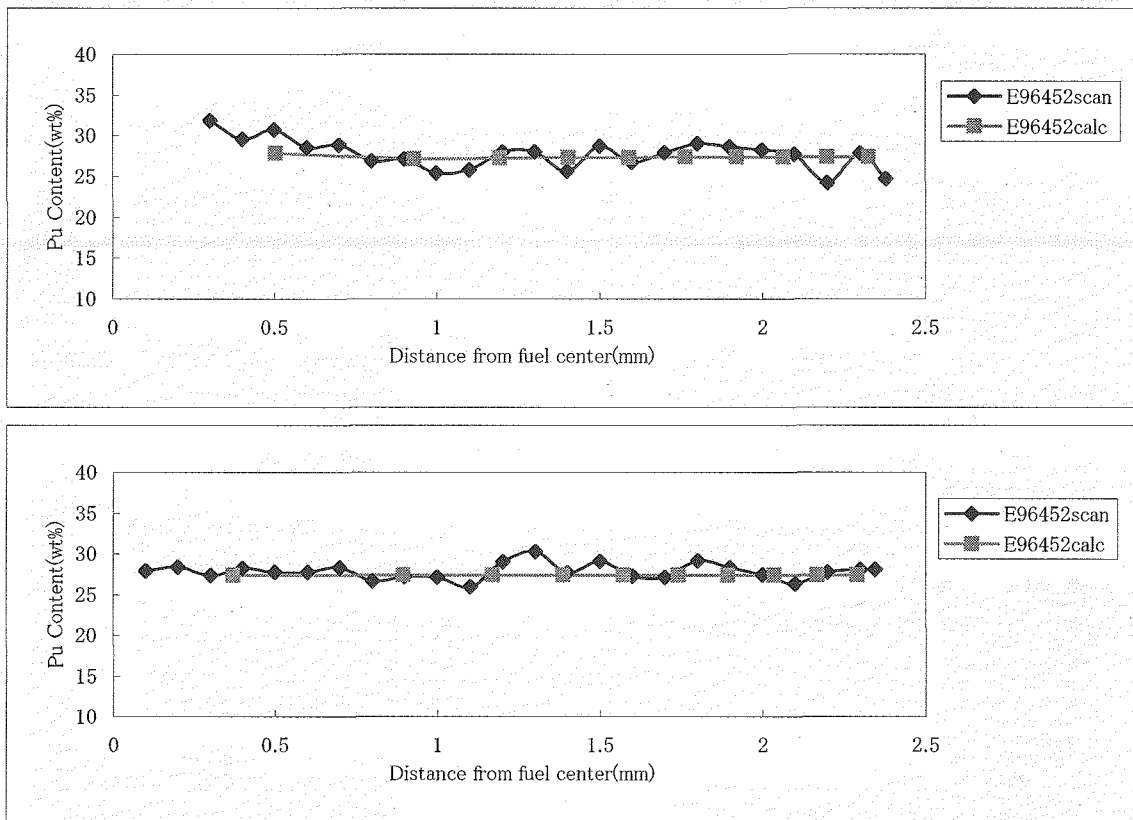


図 4-4-1 Pu再分布挙動の解析値と実測値の比較(8/8)

INPUT Namelist/&OPTDAT in CEPTAR Code

OPTDAT : オプション選択			
ISHORT	=0	"SHORT OUTPUT" を出力しない。	
	=0*	全ノードの"SHORT OUTPUT" を出力する。	
	=n	n番目のノードのみ"SHORT OUTPUT" を出力する。	
IFPGAS	=0	FPガス及びHeガス放出を考慮しない。	
	=1	FPガス放出率: もんじゅ設計式/ミナルベース	
	=2	FPガス放出率: もんじゅ設計式	
	=3	FPガス放出率: 常陽Mk-II 新評価式	
	=4*	FPガス放出率: PFR照射データ評価式	
ICPNA	=1	Na比熱一定値	
	=2*	Na比熱ANL-7327式(もんじゅ設計式)	
	=3	Na比熱CEDAR-III内蔵式	
IGAPCON	=0	ギャップコンダクタンスの値を ∞ (1.0×10^{10} W/cm ² ・°C) とする。	
	=1	ギャップコンダクタンス一定値 (1,000 BTU/hr・ft ² ・°F)	
	=2	ギャップコンダクタンス一定値 (1,500 BTU/hr・ft ² ・°F)	
	=3*	Ross & Stoute Model (FSWL ≥ 2 のとき、JOG部熱伝達考慮)	
	=4	"もんじゅ" 設計新モデル (常陽照射試験ベース)	
ITER	=0*	応力・歪率計算において被覆管スエリング率を含めて収束計算しない。	
	=0	応力・歪率計算において被覆管スエリング率を含めて収束計算する。	
ICSWL	=0	被覆管スエリング率を計算しない。	
	=1*	"もんじゅ" 設計式 (Ward Gilbert式) で被覆管スエリング率を計算する。	
	=2	"もんじゅ" 設計式 (Back up式) で被覆管スエリング率を計算する。	
	=3	PNC1520/ミナル式で被覆管スエリング率を計算する。	
	=4	PNC1520上限式で被覆管スエリング率を計算する。	
	=5	PNC1520下限式 (D=0) で被覆管スエリング率を計算する。	
	=6	PE16式で被覆管スエリング率を計算する。	
	=7	M316式で被覆管スエリング率を計算する。	
	=8	PNC-FMS式で被覆管スエリング率を計算する。	
	=9	316Ti式で被覆管スエリング率を計算する。	
	=10	MARTENSITE/FERRITE ODSノミナル式で被覆管スエリング率を計算する。	
	=11	MARTENSITE/FERRITE ODS上限式で被覆管スエリング率を計算する。	
	=12	MARTENSITE/FERRITE ODS下限式で被覆管スエリング率を計算する。	
	=13	PNC316ノミナル式で被覆管スエリング率を計算する。	
	=14	PNC316上限式で被覆管スエリング率を計算する。	
ICTHEX	=1	被覆管熱膨張係数 (SIEXモデル)	
	=2*	被覆管熱膨張係数 (瞬間: もんじゅ設計式)	
	=3	被覆管熱膨張係数 (平均: もんじゅ設計式)	
	=4	被覆管熱膨張係数 (PNC1520式)	
	=5	被覆管熱膨張係数 (PE16式)	
	=6	被覆管熱膨張係数 (M316式)	
	=7	被覆管熱膨張係数 (PNC-FMS式)	
	=8	被覆管熱膨張係数 (PNC-ODS式)	
	=9	被覆管熱膨張係数 (316Ti式)	
	=10	被覆管熱膨張係数 (Zircaloy-2式: ATFUEL内蔵式)	
	=11	被覆管熱膨張係数 (MARTENSITE ODS式)	
	=12	被覆管熱膨張係数 (FERRITE ODS式)	
	IGRNGR	=0	燃料結晶成長を考慮しない。
		=1*	燃料結晶成長を考慮する。
	ICCRP	=0	被覆管クリープ歪速度を計算しない。
=1		被覆管クリープ歪速度をもんじゅ設計式 (Backup式) で計算する。	
=2*		被覆管クリープ歪速度をもんじゅ設計式 (Ward Gilbert式) で計算する。	
=3		被覆管クリープ歪速度をPNC1520ノミナル式で計算する。	
=4		被覆管クリープ歪速度をPNC1520上限式で計算する。	
=5		被覆管クリープ歪速度をPNC1520下限式で計算する。	
=6		被覆管クリープ歪速度をPE16式で計算する。	
=7		被覆管クリープ歪速度をM316式で計算する。	
=8		被覆管クリープ歪速度をPNC-FMSノミナル式で計算する。	
=9		被覆管クリープ歪速度をPNC-FMS上限式で計算する。	
=10		被覆管クリープ歪速度をPNC-FMS下限式で計算する。	
=11		被覆管クリープ歪速度を316Ti式で計算する。	
=12		被覆管クリープ歪速度をMARTENSITE ODSノミナル式で計算する。	
=13		被覆管クリープ歪速度をMARTENSITE ODS上限式で計算する。	
=14		被覆管クリープ歪速度をMARTENSITE ODS下限式で計算する。	
=15		被覆管クリープ歪速度をFERRITE ODSノミナル式で計算する。	
=16		被覆管クリープ歪速度をFERRITE ODS上限式で計算する。	
=17		被覆管クリープ歪速度をFERRITE ODS下限式で計算する。	
=18		被覆管クリープ歪速度をPNC316ノミナル式で計算する。	
=19		被覆管クリープ歪速度をPNC316上限式で計算する。	
=20	被覆管クリープ歪速度をPNC316下限式で計算する。		
ICYNIG	=1	被覆管線弾性係数 (SIEXモデル)	
	=2	被覆管線弾性係数 (GRO-2モデル)	
	=3*	被覆管線弾性係数 (もんじゅ設計式)	
	=4	被覆管線弾性係数 (PNC1520式)	
	=5	被覆管線弾性係数 (PE16式)	
	=6	被覆管線弾性係数 (M316式)	
	=7	被覆管線弾性係数 (PNC-FMS式)	
	=8	被覆管線弾性係数 (PNC-ODS式)	
	=9	被覆管線弾性係数 (Zircaloy-2式: FEMAXI内蔵式)	
	=10	被覆管線弾性係数 (MARTENSITE ODS式)	
	=11	被覆管線弾性係数 (FERRITE ODS式)	
ICPOIS	=1	被覆管ポアソン比 (SIEXモデル)	
	=2	被覆管ポアソン比 (GRO-2モデル)	
	=3*	被覆管ポアソン比 (もんじゅ設計式)	
	=4	被覆管ポアソン比 (CEDAR-III内蔵式)	
	=5	被覆管ポアソン比 (PNC1520式)	
	=6	被覆管ポアソン比 (PE16式)	
	=7	被覆管ポアソン比 (M316式)	
	=8	被覆管ポアソン比 (PNC-FMS式)	
	=9	被覆管ポアソン比 (Zircaloy-2式: FEMAXI内蔵式)	
	=10	被覆管ポアソン比 (MARTENSITE/FERRITE式)	
	IFTHCN	=1	燃料熱伝導度式 (SIEX式 (1))
=2		燃料熱伝導度式 (SIEX式 (2))	
=3*		燃料熱伝導度式 (もんじゅ設計式)	
=4		燃料熱伝導度式 (Philipponneau式)	
=5		燃料熱伝導度式 (PNC式)	
=6		燃料熱伝導度式 (JNC式)	
=7		燃料熱伝導度式 (CEDAR-III内蔵式)	
=8		燃料熱伝導度式 (MATPRO VERSION1)	
=9		燃料熱伝導度式 (PSI共研Sphere-pac用)	
=10		燃料熱伝導度式 (Luca's equation)	
IFMELT	=1	燃料融点 (CEDAR-III内蔵式)	
	=2	燃料融点 (もんじゅ設計式: 2650°C)	
	=3	燃料融点 (もんじゅ設計式: 2610°C)	
	=4	燃料融点 (JNCノミナル式)	
	=5	燃料融点 (JNC設計用)	
	=6*	燃料融点 (Allken&Evans新データ)	
IDNSFI	=0*	燃料ベレット焼きしまりを計算しない。	
	=1	燃料ベレット焼きしまりを計算する (NUREGモデル: ノミナル)	
	=2	燃料ベレット焼きしまりを計算する (NUREGモデル: 上限)	
	=3	燃料ベレット焼きしまりを計算する (CEBR-II P19/20解析ベース)	
ICOR	=2*	被覆管内外面腐食を計算する。	
	=2	被覆管内外面腐食を計算しない。	
	IFCCI	=1*	被覆管内外面腐食モデル選択 (内面: もんじゅ設計式/外面: PNC316上限式)
		=2	被覆管内外面腐食モデル選択 (内面: PNC316/ミナル式/外面: PNC316/ミナル式)
=3		被覆管内外面腐食モデル選択 (内面: MK-II 燃料評価式/外面: PNC316/ミナル式)	
=4		被覆管内外面腐食モデル選択 (内面: HEDL式-95%信頼上限ベース/外面: PNC316上限式)	
=5		被覆管内外面腐食モデル選択 (内面: HEDL式/ミナル/外面: PNC316/ミナル式)	
=6		被覆管内外面腐食モデル選択 (内面: PNC1520式/外面: PNC1520式)	
=7		被覆管内外面腐食モデル選択 (内面: PNC1520/ミナル式/外面: PNC1520式)	
=8		被覆管内外面腐食モデル選択 (内外面: PNC-FMS式)	
=9		被覆管内外面腐食モデル選択 (内外面: MARTENSITE/FERRITE ODS式)	
ICLDSY	=1*	PNC316CW材の設計降伏点Syを用いる。	
	=2	PNC1520CW材の設計降伏点Syを用いる。	
	=3	PNC-FMS材の設計降伏点Syを用いる。	
	=4	MARTENSITE ODS材の設計降伏点Syを用いる。	
	=5	FERRITE ODS材の設計降伏点Syを用いる。	
IMESH	=0	被覆管再メッシュにより応力・歪等の再計算を実施しない。	
	=1*	被覆管再メッシュにより応力・歪等の再計算を実施する。	
ILPLM	=0*	下部プレナムなし。	
	=0	下部プレナムあり (内圧計算に下部プレナムを追加する)。	
IOXMIG	=0	O/M再分布を計算しない。	
	=1	O/M再分布 (Heat Transport) をCEDAR-III内蔵モデルとする。	
	=2	O/M再分布 (Heat Transport) をAllkenモデルとする。	
	=3*	O/M再分布 (Heat Transport) をSari&Schumacherモデルとする。	
IPUMIG	=0	Pu再分布を計算しない。	
	=1	Pu拡散係数にO/M依存性を考慮する (DIRADモデル)。	
IRADGR	=2*	Pu拡散係数にO/M依存性を考慮しない。	
	=1	燃料組織変化をCEDAR-III内蔵モデルIで評価する。	
	=2	燃料組織変化をCEDAR-III内蔵モデルIIで評価する。	
	=3	燃料組織変化をMK-II燃料評価モデルで評価する。	
	=4*	燃料組織変化を"もんじゅ"設計モデルで評価する。	
	=5	燃料組織変化をSIMPLE-II内蔵モデル (燃焼度依存) で評価する。	
ICRACK	=0*	ベレットクラッキングを計算しない。	
	=n	最大クラック数をn個としたベレットクラッキングの計算を行う。	
IMJCRP	=1	もんじゅ設計式を用いた被覆管熱クリープ歪を下限式で計算する。	
	=0	もんじゅ設計式を用いた被覆管熱クリープ歪をノミナル式で計算する。	
	=1*	もんじゅ設計式を用いた被覆管熱クリープ歪を上限式で計算する。	
ICTHCON	=1*	被覆管熱伝導度式にPNC316式 (もんじゅ設計式) を用いる。	
	=2	被覆管熱伝導度式にPNC1520式を用いる。	
	=3	被覆管熱伝導度式にPE16式を用いる。	
	=4	被覆管熱伝導度式にM316式を用いる。	
	=5	被覆管熱伝導度式にPNC-FMS式を用いる。	
	=6	被覆管熱伝導度式にPNC-ODS式を用いる。	
	=7	被覆管熱伝導度式に316Ti式を用いる。	
	=8	被覆管熱伝導度式にZircaloy-2式 (FEMAXI内蔵式) を用いる。	
	=9	被覆管熱伝導度式にMARTENSITE ODS式を用いる。	
	=10	被覆管熱伝導度式にFERRITE ODS式を用いる。	
ICDFLD	=1*	CDF評価において、被覆管材をPNC316CW材とする。	
	=2	CDF評価において、被覆管材をPNC1520CW材とする。	
	=3	CDF評価において、被覆管材をPNC-FMS材とする。	
	=4	CDF評価において、被覆管材をMARTENSITE ODS材とする。	
	=5	CDF評価において、被覆管材をFERRITE ODS材とする。	
ITRFAC	=1	t ₀ の時間係数を3とする。	
	=2	t ₀ の時間係数を1とする。	
	=3*	t ₀ の時間係数を3とする (S ₀ =σ ₀ /0.8)。	
ISMOUT	=0	全燃料領域軸方向ノードの時刻歴OUTPUTを出力する (fort.90+n)。	
	=0*	時刻歴OUTPUTを出力しない。	
	=1	n番目の燃料軸方向ノードの時刻歴OUTPUTを出力する (fort.90+n)。	
	=0	燃料ベレットのホットプレスを計算しない。	
IFSWL	=1*	燃料ベレットのホットプレスを計算する。	
	=0	燃料スエリングを計算しない。	
	=1	燃料スエリングをもんじゅ設計式で計算する。	
	=2	燃料スエリングを高燃焼度PFR燃料評価式で計算する。	
	=3*	(JOG部熱解析機能とリンクしている) 燃料スエリングをOs径方向移動考慮のJOGモデルベースで計算する。	
	=4	(JOG部熱解析機能とリンクしている) FEMAXI-ATR内蔵モデル	
	=5	常陽Mk-II炉心燃料PFRデータベースに基づくスエリング式で計算する。(ノミナル式)	
=6	常陽Mk-II炉心燃料PFRデータベースに基づくスエリング式で計算する。(95%信頼上限式)		
=7	常陽Mk-II炉心燃料PFRデータベースに基づくスエリング式で計算する。(95%信頼下限式)		
IDTAIL	=0*	Plenum燃料及び被覆管の径方向歪分布を出力しない。	
	=n	軸方向ノードnにおけるPlenum体積、燃料及び被覆管の径方向歪分布を出力する。(ISMOUT=10のとき)	
IJOG	=0*	※Plenum体積: fort.11,燃料歪: fort.71-80,被覆管歪: fort.61-66	
	=1	JOG層の厚さを出力しない。	
IFPCOM	=0	JOG層の厚さを出力する (ISMOUT=1&IFSWL ≥ 2のとき, fort.81-89)。	
	=0	FPガス生成取率を一定値とする。	
ISTS	=0*	核データに基づくFPガス生成取率を用いる。	
	=0*	摩耗力、PGMIIによる被覆管応力成分を出力しない。	
IELONG	=0*	摩耗力、PGMIIによる被覆管応力成分を軸方向ノード毎に出力する。(fort.51-59)	
	=0	AXIAL ELONGATIONの時刻歴を出力しない。	
IFTDEP	=1	AXIAL ELONGATIONの時刻歴を出力する。(fort.100)	
	=0*	燃料熱伝導度の燃焼度依存性を考慮しない。	
IRTD	=1	燃料熱伝導度の燃焼度依存性にPhilipponneau式の依存性を適用する (IFSWL ≥ 2のとき)。	
	=2	燃料熱伝導度の燃焼度依存性にLuca式式の依存性を適用する (IFSWL ≥ 2のとき)。	
	=0*	径方向燃料温度分布履歴を出力しない。	
	=1	軸方向ノードnにおける径方向燃料温度分布履歴を出力する。(ISMOUT=10のとき, fort.41-49に出力)	

注) *OPTIONは各オプションに対するCEPTARコード内でのデフォルト値を表す。
 ・fort.31*39には、各軸方向ノード毎の径方向Os移動履歴が出力される。

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 (数の)	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テトラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ⁻¹ ・m ¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C	s・A	s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束	テスラ	T	Wb/m ²	kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
(放射性核種の)放射能吸収線量, 質量エネルギー一分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量で区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ¹ ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ¹ ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ¹ ・A
吸収線量	グレイ 毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =kg ¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1海里=1852m
ノット	ノット	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バ	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	IX unit	1 IX unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カリ	cal	1 cal=4.184 J
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m