PNC TN8410 92-187

公開資料

高速増殖炉用燃料の温度解析に用いる計算コード（DIRADコード）について

1992年5月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については，下記にお問い合わせ下さい。
〒319－11　茨城県那珂郡東海村大字村松４－３３
動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所　技術開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)1992

Ⓐ

公　開　資　料
PNC TN8410 92-187
1 9 9 2 年 5 月

高速増殖炉用燃料の温度解析に用いる計算コード（DIRADコード）について

田中健哉*，中島　弘*，山口俊弘**
上村勝一郎***，中江延男*，松本光雄*

要　旨

高速増殖炉用燃料の照射開始後の燃料温度解析用コードが整備されてきている。この種のコードでは，燃料組織変化や燃料ペレット－被覆管ギャップ熱伝達率等の解析モデルが重要である。これら解析モデルについては，海外高速炉及び高速実験炉「常陽」での燃料照射試験結果に基づいて設定されている。

本資料は，高速増殖原型炉「もんじゅ」など高速増殖炉用燃料の主として照射開始後の燃料温度評価用として使用される計算コード（DIRADコード）を対象としてその解析モデル及び機能に関する理解を助ける目的をもって作成されたものである。

＊　　動力炉・核燃料開発事業団　東海事業所　炉心・燃料設計室
＊＊　動力炉・核燃料開発事業団　東海事業所　プルトニウム燃料工場
＊＊＊　動力炉・核燃料開発事業団　東海事業所　プルトニウム燃料開発室

PNC TN8410 92-187
May, 1992

Computer Code (DIRAD) for fuel temperature evaluation of LMFBR at early burnup

K. Tanaka*, H. Nakajima*, T. Yamaguchi**,
K. Kamimura***, N. Nakae*, M. Matsumoto*

Abstract

Computer Code for fuel temperature evaluation of LMFBR at early burnup has been developed. On fule temperature evaluation, especially at early burnup, the fuel restructuring model and the gap conductance medel are important. These models which are installed in the temperature evaluation code, were verified based on the results of irradiation tests using the foreign fast reactor and "JOYO".

This paper describes the essential parts of the models and the functions of the code (DIRAD) which is used for the fuel temperature evaluation at early burnup of LMFBR such as the prototype fast breeder reactor "MONJU".

---

* Nuclear Fuel Design Section, Technology Development Co-ordination division, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

** Tokai Fuel Plant, Tokai Works, PNC

*** Plutonium Fuel Technology Development Section, Nuclear Fuel Technology Development Division, Tokai Works, PNC

目　次

1. 概　要 …… 1
2. 計算体系 …… 2
3. 計算手順 …… 3
4. 燃料温度計算 …… 4
5. 使用物性値 …… 8
6. 温度計算モデルの検証 …… 9
参考文献 …… 10

図表リスト

図２－１　燃料要素基本的幾何学モデル …… 11

図２－２　DIRADコードフロー図 …… 12

図６－１　燃料中心温度の比較

（EBR－Ⅱ　P－19，20，常陽INTA－１照射データ） …… 13

図６－２　組織変化領域の比較（EBR－Ⅱ　P－19，20照射データ） …… 14

図６－３　組織変化領域の比較（常陽　B4M　照射データ） …… 15

1. 概　　要

本挙動解析コード（DIRAD）は，任意の出力分布，出力履歴，被覆管温度履歴などを基に，燃料要素の熱的挙動を知るための燃料挙動解析コードである。

計算される内容は，

（ｉ）燃料の温度

（ii）燃料の組織変化

等であり，製造時のペレット－被覆管ギャップ巾及び燃料の線出力に基づくギャップコンダクタンス等の計算を含む。本コードで採用しているモデルの内容は，以下のとおりである。

2. 計 算 体 系

基本的幾何学モデルを図２－１に示す。

（ｉ）燃料温度計算は，定常熱伝導円筒一次元モデルを使用する。

（ii）燃料有効長を，任意の軸方向メッシュに分割し，個々の分割において，次のパラメータを入力データとして計算時間ステップごとに与える。

(a) 線出力

(b) 被覆管温度

3. 計　算　手　順

計算手順を図２－２のフローダイヤグラムで示す。

4. 燃料温度計算

4.－1 被覆管内面温度

被覆管内面温度の入力値は，熱流力解析結果に基づくものとする。なお，DIRADでは必要に応じ，被覆管外面温度を入力し解析することもできる。

4.－2 燃料ペレット表面温度

燃料ペレット表面温度は，燃料ペレットと被覆管の間のギャップ部の熱流束連続式より，

$$T_s = T_{ci} + \frac{q''}{2\pi r_{ci} \cdot h_g} \qquad (1-1)$$

ここに，T_s ：燃料ペレット表面温度（℃）

T_{ci}：被覆管内面温度（℃）

r_{ci}：被覆管内半径（cm）

q'' ：線出力（W／cm）

h_g ：ギャップコンダクタンス（W／cm²・℃）

で定義される。

本コードではギャップコンダクタンスは，修正GEAPモデルで記述し，製造時のペレット－被覆管ギャップ巾及び燃料の線出力の関数として取扱い，燃料ペレットの温度計算を行っている。

ギャップコンダクタンスモデルについては第4.－5節に示す。

4.－3 燃料ペレット内温度分布

燃料ペレット内の温度分布計算においては次の仮定及び手法を用いている。

（ｉ）軸方向及び周方向の熱流は生じない。

（ii）熱伝導度の温度依存性を考慮するため，繰り返し計算手法を用いる。

一次元熱伝導方程式及びその解を以下に示す。

$$\nabla \cdot (k \triangle T) = -q$$

T：温度

k：熱伝導度

q：発熱密度

軸対称円筒座標系に書き換えると

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot k \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = -q'''(r)$$

上式を半径方向ノード点（r_i, r_{i+1}）での差分に展開すると

$$\triangle T_i = \frac{q'''}{4k}(r_{i+1}^2 - r_i^2) - \left(\frac{q'''}{2k} r_i^2 - \frac{q'}{2\pi k} \right) \ell n \left(\frac{r_{i+1}}{r_i} \right)$$

ここに，q'''：ノード点r_iとr_{i+1}の間の領域の発熱密度（W／cm³）

q'：ノード点r_iを通過する単位長さ当たりの熱量（W／cm）

となる。

組織変化を考慮すると，q'''，q'は，各ノード毎に変化する。ここでkの温度依存性を考慮するため，$T_{i+1} = T_i + \triangle T_i$とし，ノード平均温度$T_i^{AV} = (T_i + T_{i+1}) / 2$を計算し，この$T_i^{AV}$が，収束するまで繰り返し計算を行う。

4.－4　燃料組織変化モデル（ボイド移動モデル）

照射による燃料組織変化とは，燃料ペレットの径方向温度勾配によりペレット中のボイドが高温側に移動し燃料ペレットの密度が径方向に変化するとともにペレット中心に空孔が生ずることである。この組織変化を決定するボイド移動モデルは，照射による燃料ペレット径方向の温度勾配により，ボイド内で燃料マトリックスが高温側で蒸発し，低温側で凝固する，蒸発－凝固機構によりボイドが高温（中心）側へ移動する現象を表したモデルである。

ボイド移動モデルとして，P.F.Sens[1]，F.A.Nichols[2]，D.R.DeHalas[3]らがそれぞれ提唱するボイド移動速度は，すべて，

（ボイド移動速度）

＝（分子体積）・（ガス拡散定数）・（濃度勾配）・（温度勾配）

という基本的考えに基づいている。

DIRADにおいては，DeHalas提唱する式を採用した。それを以下に示す。

$$V_{VOID} = \Omega \cdot D \cdot \frac{dn}{dT} \left(\frac{dT}{dr} \right)_{pore}$$

$$= \Omega \cdot D \cdot \left[\left(\frac{1}{kT} \cdot \frac{dP}{dT} \right) - \left(\frac{P}{kT^2} \right) \right] \cdot \left(\frac{dT}{dr} \right)_{pore}$$

ここで

V_{VOID} ：ボイド移動速度（cm／sec）

Ω ：分子の体積（cm³／mol）

D ：ガス拡散定数（cm²／sec）

n ：単位体積当りの蒸気分子の個数（1／cm³）

P ：（U，Pu）O_2蒸気圧（mmHg）

k ：ボルツマン定数（erg／deg）

T ：温度（K）

$\left(\frac{dT}{dr} \right)_{pore}$：ボイド内の温度勾配

またDIRADにおける径方向の燃料密度分布及び中心空孔の算出方法を以下に示す。

燃料径方向の等間隔にメッシュ切りされたうちの1つのメッシュに着目し，そのメッシュからある時間の間に高温側へ出ていくボイド移動速度に基づくボイドの量と，低温側から入ってくるボイドの量との差を取って，そのメッシュ中のボイドの量を求めることにより燃料密度の径方向分布を計算する。こうした燃料密度の分布に応じて燃料の質量バランスに基づき中心空孔を決定する。

4.－5　ギャップコンダクタンスモデル

ギャップコンダクタンスモデルは，修正GEAPモデルを用いている。この修正GEAPモデルは，次式で表される簡易モデルである。

$$h_{gap} = ho\,(GF) \cdot (PF)$$

ここで

h_{gap} ：ギャップコンダクタンス

ｈｏ　：経験定数

ＧＦ　：ギャップファクター

ＰＦ　：パワーファクター

ＧＦ及びＰＦは，いずれも照射データに基づき経験的に求めたファクターである。

5. 使 用 物 性 値

5.－1 ペレット熱伝導度[4]

$$K = 0.01169 + \frac{1}{\left[0.06717 + \frac{0.02226\,(1-\rho)}{O/M - 1.97}\right] T} + 7.21\times10^{-13}\ T^{3}$$

K　　：熱伝導度（W／cm℃）

ρ　　：理論密度比

T　　：温度（℃）

O／M：化学量論比

6. 温度計算モデルの検証

本コードの燃料温度計算モデルには，ギャップコンダクタンス，ボイド移動に基づく組織変化等が考慮されており，ギャップコンダクタンスモデル及びボイド移動速度モデルに組み込まれた係数については，EBR－ⅡＰ－19，20試験より得られた溶融限界線出力及び燃料組織状態が計算上，最も良く再現できるよう調整されている。

また常陽INTA－１試験より得られた燃料中心温度を最も良く再現できるよう調整されている。

図６－１にＰ－19，20試験及びINTA－１で得られた燃料中心温度の実測値と本コードによる計算結果の比較を示す。図６－２にＰ－19，20試験で得られた中心空孔半径及び柱状晶領域直径の実測値と本コードによる計算結果の比較を示す。いずれも良く一致しており，温度計算モデル全体として妥当なものであることが示されている。

さらに，Ｐ－19，20及びINTA－１の照射データで調整された本コードを用い，もんじゅ燃料の出力上昇時照射挙動の確認試験である常陽B4M試験より得られた燃料組織に対する予測計算を実施した。その結果を図６－３に示す。もんじゅ燃料出力上昇時における燃料組織状態を本コードは適切に予測できることが示されている。

参 考 文 献

(1) P.F.Sens, 'The Kinetiecs of Pore Movement in UO_2 Fuel Rods', J.Nucl.Mat.43 (1972) 293

(2) F.A.Nichols, 'Theory of columnar Grain Growth and Central Void Formation in Oxide Fuel Rods', J.Nucl.Mat.22 (1967) 214

(3) D.R.DeHalas and G.R.Horn, 'Evolution of Uranium Dioxide Structure During Irradiation of Fuel Rods', J.Nucl.Mat.8 (1963) 207

(4) Evaluation of Material Property Correlations Used in LIFE-Ⅱ, GEAP-13967 (1973)

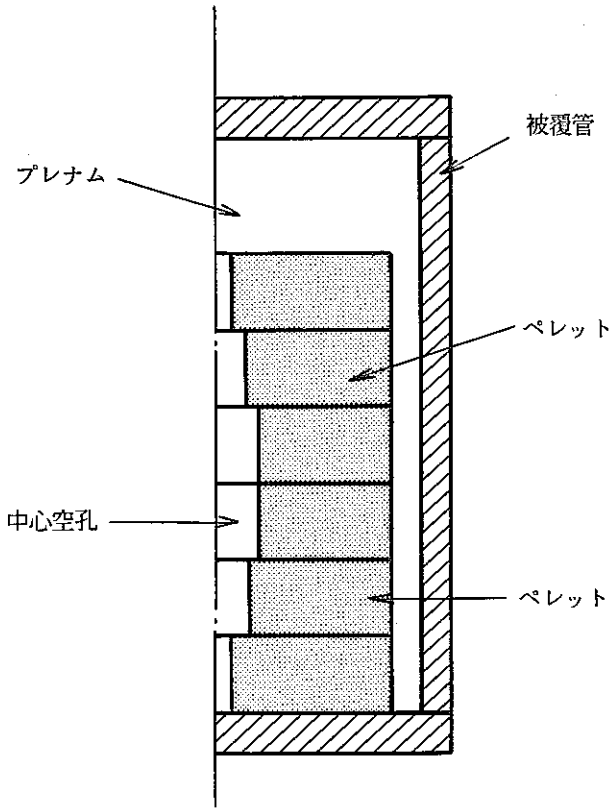

図２－１　燃料要素基本的幾何学モデル

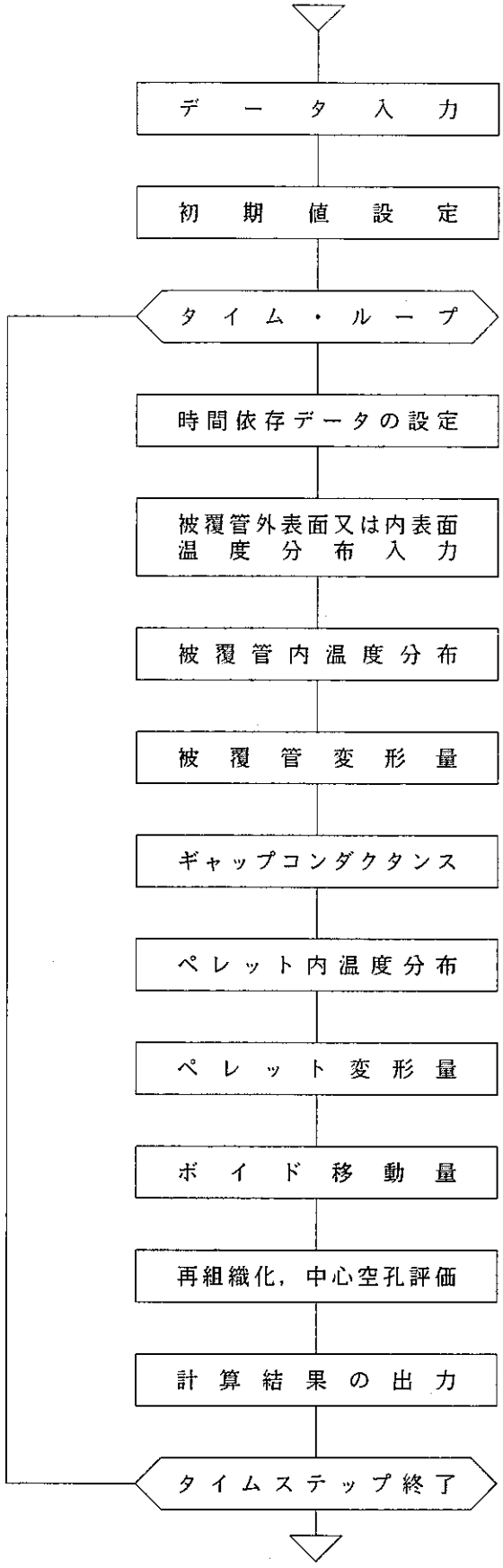

図２－２　DIRADコードフロー図

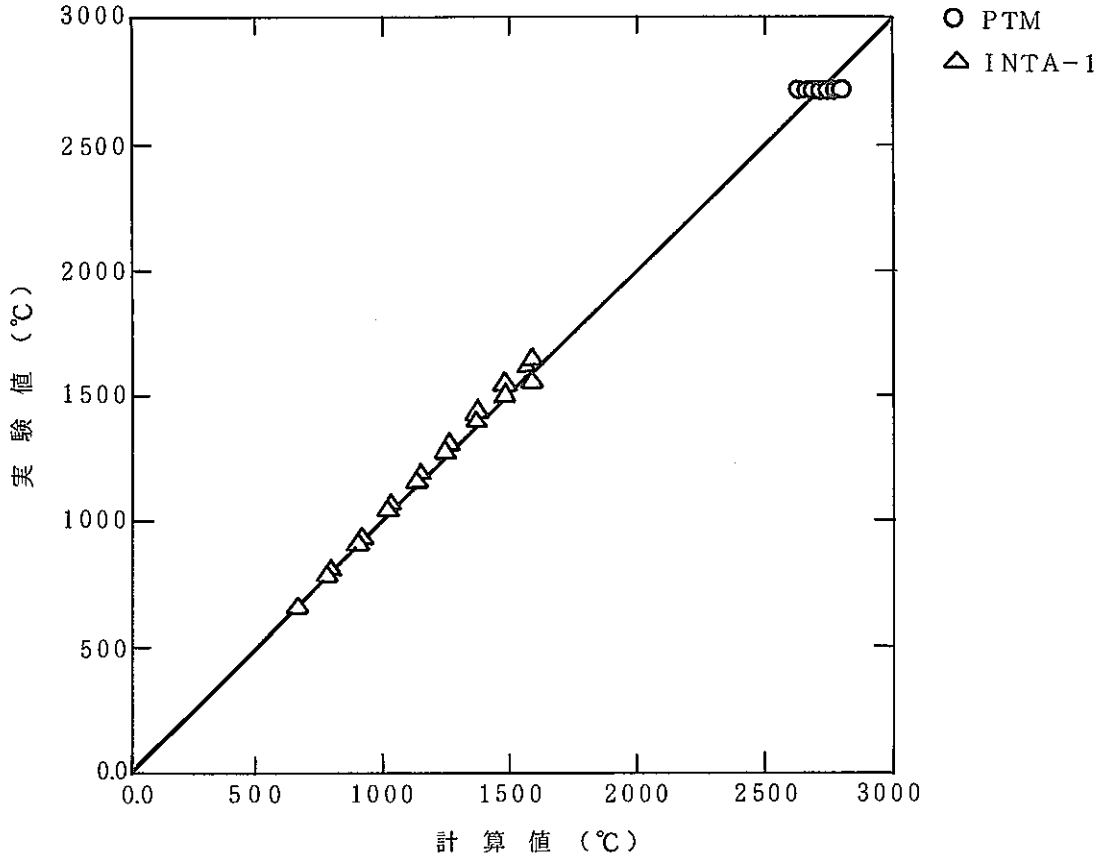

図６－１　燃料中心温度の比較
（EBR－Ⅱ　Ｐ－19，20，常陽INTA－１　照射データ）

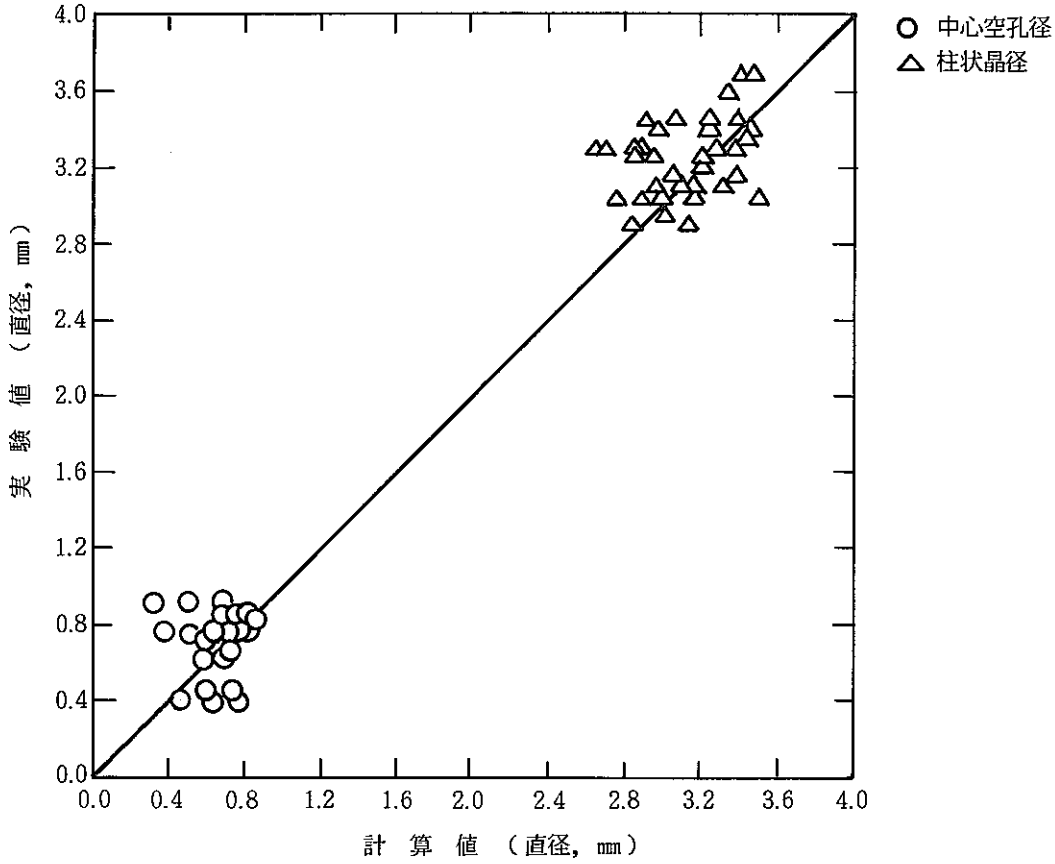

図６－２　組織変化領域の比較
（EBR－Ⅱ　Ｐ－19，20照射データ）

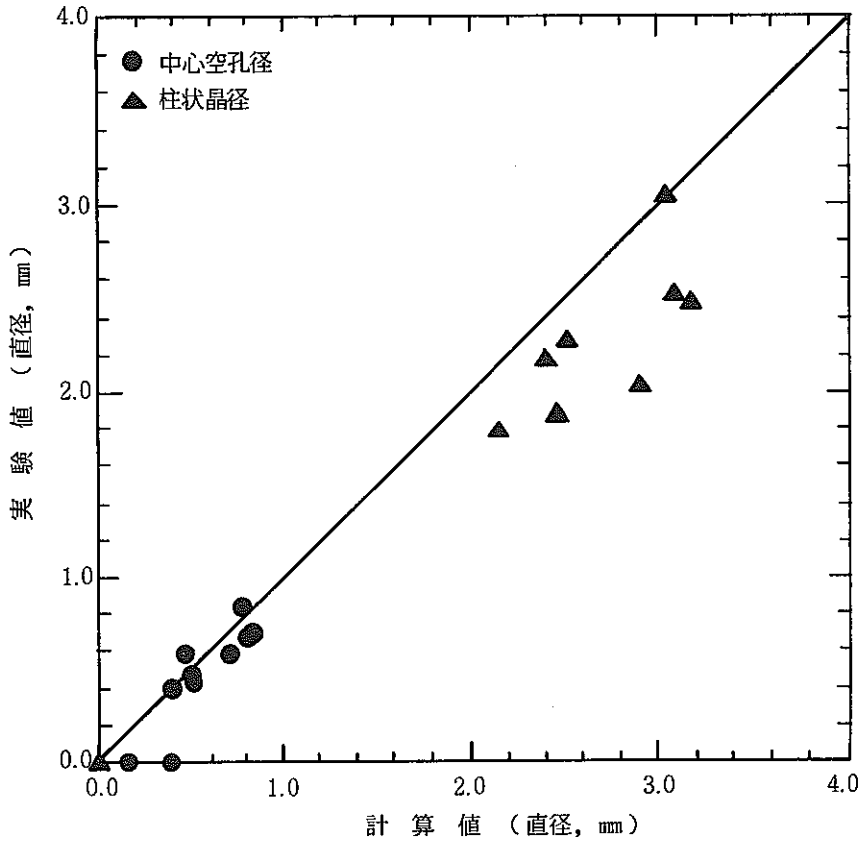

図６－３　組織変化領域の比較
（常陽　B4M　照射データ）