

本資料は 年 月 日付けて登録区分、  
変更する。  
2001. 6. 6

[技術情報室]



## 軽水炉用MOX燃料ピンのJRR-2を用いた照射試験解析評価

Analysis of Irradiation Test on LWR Type Mixed Oxide  
Fuel Pin Irradiated by JRR-2

1988年4月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

## 目 次

1. 概 要 .....	1
1.1 経 緯 .....	1
1.2 解析・評価の目的 .....	1
2. 照射試験条件 .....	2
2.1 照射試験 .....	2
2.1.1 中空ペレット照射試験 (ICF - 10 H) .....	2
2.1.2 焼きしまり照射試験 (ICF - 11 H ~ 14 H) .....	2
2.2 照射試料 .....	2
2.3 照射条件 .....	2
3. 照射後試験結果 .....	3
3.1 燃料組織 .....	3
3.1.1 ICF - 10 H .....	3
3.1.2 ICF - 11 H, - 12 H, - 13 H .....	3
3.1.3 ICF - 14 H .....	3
3.2 燃料 — 被覆管ギャップ .....	3
3.3 中心溶融 .....	3
3.4 焼きしまり .....	3
3.4.1 ICF - 11 H, - 12 H, - 13 H .....	4
3.4.2 ICF - 14 H .....	4
4. 燃料挙動解析コードによる解析 .....	5
4.1 解析方法 .....	5
4.2 解析結果 .....	5
4.2.1 燃料組織 .....	5
4.2.2 燃料温度 .....	6
4.2.3 焼きしまり .....	6
5. 結 論 .....	7
6. 謝 辞 .....	8
7. 参考文献 .....	9

## 付 錄

A 温度時刻歴 .....	61
B 線出力密度評価式 .....	89
C 出力上昇パターン .....	92
D 焼きしまりモデル .....	98

## 1. 概 要

### 1.1 経 緯

JRR-2 第1次照射試験は、混合酸化物を利用するに当たり、燃料の製造技術及び焼きしまりの挙動を調査することを目的として動燃と日本原子力研究所（以下「原研」という）との共同研究契約<sup>7)</sup>に基づき行われた。

本試験は、昭和51～52年度に動燃プルトニウム燃料部において燃料製造及び燃料ピン加工を行い、昭和52年度から昭和54年度に原研のJRR-2において照射し、その後冷却をし、動燃大洗工学センターへ昭和58年度に輸送した。輸送した照射後燃料は、燃料材料開発部AGSにて照射後試験を昭和58年度から昭和60年度にかけて行い、これらのデータ及び照射データを用い、プルトニウム燃料部において燃料挙動解析コードにて昭和61年度から昭和62年度にかけて解析・評価を行った。

本照射試験では、5本の燃料ピンを用い、中空ペレット照射挙動調査（1本）及び焼きしまり照射挙動調査（4本）を目的としたものである。中空ペレットの照射試験ではペレット外径10.55mmφ、ペレット内径3.5mmφ、ペレット密度94%T.D、U濃縮度6%の燃料ペレットをSUS316の被覆管に挿入した燃料要素いわゆる原電敦賀1号炉型燃料（ICF-10Hと呼ぶ）を使用した。また焼きしまりの照射試験ではペレット外径9.25mmφ、ペレット密度94%T.D、Pu富化度6.0w/oの燃料ペレットをZry-4の被覆管に挿入した燃料要素いわゆるEPRI型燃料（ICE-11H, 12H, 13Hと呼ぶ）とペレット外径9.29mmφ、ペレット密度95%T.D、Pu富化度4.0w/oの燃料をSUS316の被覆管に挿入した燃料要素いわゆる美浜炉型燃料（ICF-14Hと呼ぶ）を使用した。

本報告書では、プルトニウム燃料部で実施した上記5本の燃料要素の照射挙動について燃料挙動解析コードによる解析評価結果について報告する。

なお、照射試験用の燃料要素の製造及び照射後試験結果に関しては、それぞれ参考文献1), 2), 3)で報告してあるのでそちらを参照していただきたい。

### 1.2 解析評価の目的

JRR-2 第1次照射試験においては、プルトニウム・ウラン混合酸化物ペレットを、高線出力で最大燃焼度約5500MWd/tまで照射を行った。

本解析においては、その熱的ふるまいについて特に中心溶融、燃料組織変化及び焼きしまり挙動をPIE結果と比較評価し、解析コードの信頼性を確認した。

## 2. 照射試験条件

### 2.1 照射試験<sup>4), 5)</sup>

照射試験は5つのシリーズ( ICF-10H, 11H, 12H, 13H, 14H)からなり、原研のJRR-2において照射された。各照射試験の目的は以下の通りである。

#### 2.1.1 中空ペレット照射試験( ICF-10H)

混合酸化物燃料の先行試験として、UO<sub>2</sub>燃料を用いた中空ペレット(チャンファー付)(敦賀型)の高出力時に於ける照射挙動を調べる。

#### 2.1.2 焼きしまり照射試験( ICF-11H ~ ICF-14H)

6.0%PuO<sub>2</sub>富化度の燃料(EPRI型, ICF-11H ~ 13H)を用い、燃料中心温度を1400°C近辺とし、燃料組織変化をさけ燃料不変化領域での焼きしまり挙動把握に主眼を置き、照射試験を行う。

また、4%PuO<sub>2</sub>富化度の燃料(美浜型, ICF-14H)を用い、組織変化の効果をも含め実際の原子炉運転出力での焼きしまり挙動を調べる。

### 2.2 照射試料<sup>1), 2)</sup>

本試験に供した試料は、二酸化ウランペレットをステンレス鋼製被覆管に封入したもの及びMOXペレットをZry-4被覆管に封入したものである。

詳細を表1に示す。また、図1～図3にこれら燃料要素の図面を示す。

### 2.3 照射条件

燃料スタック軸方向中心位置での被覆管表面温度履歴を、図4～8に示す。これは、付録Aに示す熱電対#1 T/Cの温度測定値よりもとめたものである。燃料スタック軸方向中心位置での線出力履歴を、図9～13に示す。これは、付録Bに示す方法により算出したものである。この際には付録Aでの温度測定値を使用した。また出力上昇パターンを付録Cに示す。軸方向中性子束分布を図14に、径方向中性子束分布を図15～18に示す。各照射試験用燃料要素の照射孔及び軸方向装荷位置を表2に示す。

### 3. 照射後試験結果

ICF-10H～14Hの代表的な金相写真をPhoto 1～9に示す。また、代表的な試験結果を表3に示す。

#### 3.1 燃料組織<sup>3)</sup>

##### 3.1.1 ICF-10H

中心空孔は、照射によって橢円形となり長径で28%増加し、短径で17%増加した。また、燃料の溶融した形跡はない。

燃料中ボイドは、柱状晶領域の結晶粒内及び粒界に約3μm前後の大きさのボイドが多数分布しており中空側ではレンズ状ボイドや約20μmの大きさのボイドが顕著に観察された。また、不変化領域には製造時のものと考えられる30μm前後のボイドが多くみられた。

不変化領域における結晶粒径は輪切試料において平均12μmであり、縦断面試料においては平均14μmであった。

##### 3.1.2 ICF-11H, -12H, -13H

中心空孔は約1.4mmφであり、燃料組織変化は直径約6.0mmの範囲でみられた。燃料中ボイドは、製造時のものと考えられる約120μmの大きなものが一様に分布しているのがみられた。

##### 3.1.3 ICF-14H

中心空孔は約1.2mmφである。不変化領域における結晶粒径は、ICF-11H～14Hのうちで最小であった。

#### 3.2 燃料—被覆管ギャップ<sup>3)</sup>

ICF-10Hにおいては、ギャップ寸法は製造時に比較して約84～88%減少した。ICF-11H～13Hでは残留ギャップ寸法はICF-13Hが最大であったが、製造時に比較して約40%減少している。また、残留ギャップ寸法が最小であったICF-12Hでは、製造時に比較して約70%減少している。ICF-14Hにおいてはギャップ寸法は製造時に比較して約70%減少した。

#### 3.3 中心溶融<sup>3)</sup>

照射後の金相観察(Photo 1～9参照)によると、いずれの試料においても高線出力にもかかわらず中心溶融は観察されなかった。

#### 3.4 焼きしまり<sup>3)</sup>

照射に伴う組織変化を生じないいわゆる不変化領域において気孔径分布を観察することにより、焼きしまりを評価した。

気孔径分布を図19～23に示す。

### 3.4.1 ICF-11H, -12H, -13H

ポア径が  $3 \mu m$  以下の領域では、どの試料においてもポアの数は燃焼により照射前に比べ増加するが、燃焼度のちがいによるポア数を比較すると燃焼度の高い試料ほどポア数が減少している。ポア径が  $20 \mu m$  以上の領域ではどの試料においてもポアの数は燃焼により照射前に比べ減少している。また、燃焼度のちがいによるポア分布の様子には変化がない。ポア径が  $3 \mu m$  以上  $20 \mu m$  以下の領域ではどの試料においてもポアの数は燃焼により照射前に比べ増加するがその数は燃焼度の高い試料ほど若干の減少傾向がみられる。

### 3.4.2 ICF-14H

ポア径が  $2 \mu m$  以下の領域では、燃焼によりポアの数は増加するが、 $2 \mu m$  以上の領域では、逆にポアの数は燃焼により減少している。従って、全体として見ればポアは減少し焼きしまりを生じている。

## 4. 燃料挙動解析コードによる解析

### 4.1 解析方法

照射試験条件を入力条件とし、燃料挙動解析コード CEDAR-II Thermal（準定常計算）を使用し、燃料組織変化、燃料温度分布、燃焼度を計算し、照射後試験結果と比較する。

さらに、その燃料温度分布、燃焼度を用いて付録Dに示す各種焼きしまりモデルにより焼きしまりを計算し、照射後試験結果と比較する。

### 4.2 解析結果

#### 4.2.1 燃料組織

燃料挙動解析コード（組織変化モデルとしては、製造時の気孔の蒸発凝縮を考慮した準理論的なモデルである）による組織変化の計算値を表4に示す。また、それと照射後の金相観察による実測値との比較図を図24に示す。

この結果、燃料挙動解析コードの計算値とPIE結果の比較は中心空孔径では最大で4倍PIEが大きく、柱状晶領域では60%の範囲で計算結果が大きい。また、等軸晶領域では50%の範囲で計算結果が大きい。

計算コード内における柱状晶領域及び等軸晶領域判定条件は以下の通りとする。

##### (1) 柱状晶領域<sup>8)</sup>

密度が以下の下限値を超えたら柱状晶になることとする。

Doi-Katsuragawaの式による。

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_{\text{col}} / \rho_{\text{th}} \\ \rho_{\text{col}} &= \rho_{\text{col}}^0 + (0.99 \rho_{\text{th}} - \rho_{\text{col}}^0) \\ \rho_{\text{col}}^0 &= 0.767 \rho_0 + 0.233 \rho_{\text{th}}\end{aligned}$$

ここで、

$\rho_{\text{col}}$  ; 柱状晶領域下限密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$\rho_0$  ; as-fabricatedでのペレット密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$\rho_{\text{th}}$  ; 理論密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

B ; 燃焼度 [atomic% burnup]

$B_0$  ; 定数 [= 20.0 atomic% burnup]

##### (2) 等軸晶領域の決定粒径<sup>8)</sup>

等軸晶領域外径を決定する結晶粒径は次のように決める。

$$D = 1.5 D_0 \quad (D_0 ; \text{初期結晶粒径})$$

(上記式は、PIE結果からの経験式である。)

#### 4.2.2 燃料温度

燃料挙動解析コードを用いた燃料中心温度計算値は表4に示すように、2567～2698 °Cであり融点未満であり照射後試験結果と一致していた。また、燃料温度分布は図25～29に示した通りである。

このように、約800 w/cmという高線出力にもかかわらず中心溶融しないのは、JCF-10Hでは中空ペレットの採用による影響やICF-11H～14Hでは、照射によって形成される組織変化により燃料の熱伝導度の向上及び中心空孔形成のためと考えられる。なお、ギャップコンダクタンスについては本解析ではRoss & Stouteモデル<sup>8)</sup>を用いている。各ケースにおけるギャップコンダクタンスの値を表4に示した。

#### 4.2.3 焼きしまり

燃料挙動解析コードを用いて照射後試験と同様の部位において、表5,6のようなデータを出力し、これにより付録Dに示した焼きしまりモデル<sup>6)</sup>により焼きしまりを評価した。その結果を表7、図30～35に示す。図中のPIE結果のうち照射後に気孔率が増大したものは焼きしまりなし（気孔率変化0）としてある。

図30～35に各モデルとPIE結果の比較を示した。モデル1(Marlowe)においては、PIE結果よりも60%の範囲で大きな値を示している。モデル2(Lindmann), モデル3(Stehl & Assmann)においてはPIE結果で観察されたが、計算値はほとんどゼロであった。モデル4(Carlson)においてはPIE結果の5分の1と小さな値になった。モデル5(Collins & Hargreaves)においてはPIE結果よりも40%の範囲で大きな値となった。また、PIEで観察されていないピンでは計算値で2%焼きしまる結果となった。モデル6(Rolstad et, al.)においては、PIE結果よりも75%の範囲で大きな値となった。

本来焼きしまりについては、特に未変化領域における製造時ポアの消失により生ずるものである。本照射試験では、ICF-11H, 12H, 13Hについては照射時の線出力を低くし燃料ペレットに組織変化を生じさせない様にして焼きしまり挙動を調べる計画であったが、線出力が予想以上に高くなつたため、燃料ペレットは組織変化してしまつた。一方、焼きしまりの解析においては、燃料ペレット全体（ペレット中央部から周辺部）をみて実施したものであり、焼きしまりをPIEの結果と直接比較検討し細部にわたる議論をすることはできなかつた。

## 5. 結 論

- 1) 燃料温度については、線出力が約  $800 \text{ w/cm}$  というような高線出力であるにもかかわらず、PIE 結果においても、解析結果においても、燃料中心溶融をおこしていないことは一致している。
- 2) 燃料組織変化については、PIE 結果と解析結果とでは中心空孔径が最大で 4 倍 PIE が大きく、柱状晶領域では 60 % の範囲で、等軸晶領域では 50 % の範囲で計算結果が大きい。
- 3) 焼きしまりについては、6 つの焼きしまりモデルによる計算値と実験値の比較を行ったところ、いずれもその予測精度に大差は見い出せなかった。なお、今回の照射後試験においては密度測定を実施できなかったため、詳細の評価ができなかった。よって、今回の実験にてベストフィットモデルを見い出すことは難しいと思われる。

## 6. 謝 辞

本報告書のとりまとめに際し、貴重な照射データをまとめて頂いた原研の青山課長、相沢氏の両氏および解析評価に必要な照射後試験データを取得していただいた大洗工学センター燃料材料開発部照射燃料試験室の方々に感謝の意を表します。

## 7. 参考文献

- (1) 「軽水炉用 PuO<sub>2</sub> - UO<sub>2</sub> 燃料の JRR-2 照射試験」  
PNC SN843 78-02                            1978年3月
- (2) 「JRR-2 照射試験用ペレットの製造」  
PNC N843 79-07                            1979年7月
- (3) 「JRR-2 照射試験ピンの照射後試験」  
PNC SN9410 86-068                            1986年6月
- (4) 「軽水炉用混合酸化物燃料の照射挙動に関する照射前業務（キャップセル製造）」  
JAERI memo 7422                            1977年11月
- (5) 「軽水炉用混合酸化物燃料の照射挙動に関する照射前業務-2（キャップセル製造）」  
JAERI memo 8029                            1978年12月
- (6) 「焼きしまりモデルのレビュー」  
PNC T842 79-02                            1979年4月
- (7) 「共同研究計画書」  
原研・動燃共同研究委員会                    昭和52年4月
- (8) 「燃料挙動解析コード CEDAR マニュアル」  
PNC SN841 80-19                            1980年4月

表 1 照射試料(図1~3参照)

燃料ピン 仕様項目	ICF-10H	ICF-11H	ICF-12H	ICF-13H	ICF-14H
試験目的	中空ペレット	焼きしまり	焼きしまり	焼きしまり	焼きしまり
ペレット直径( mm )	10.56	9.275	9.257	9.26	9.295
" 内径( mm )	3.63	—	—	—	—
" 密度(%TD)	94.55	95.06	95.37	95.04	95.37
燃料有効長( mm )	120	120	120	120	290
PuO <sub>2</sub> 富化度(%)	—	6.0	6.0	6.0	4.0
燃料ピン全長( mm )	170	170	170	170	340
被覆管の材質	SUS-316	Zry-4	Zry-4	Zry-4	SUS-316
被覆管-燃料間の Dia・Gap ( mm )	0.24	0.195	0.203	0.23	0.215
Pu-239, Pu-241 含有率 (%)	—	80	80	80	80
U-235濃縮度	5.92%	天然	天然	天然	天然
O/M比	2.00	1.99	1.99	1.99	1.98
ペレット高さ( mm )	10.0	10.0	10.0	10.0	11.25~13.75
被覆管外径( mm )	12.53	10.695	10.69	10.72	10.69
" 内径( mm )	10.80	9.47	9.46	9.49	9.51
" 肉厚( mm )	0.865	0.613	0.615	0.615	0.59
" 有効長( mm )	150	150	150	150	320
スタック重量( g )	72.4	61.7	61.3	60.8	167.0
プレナム容積( cc )	2.75	2.11	2.11	2.11	3.52
初期封入ガス圧( He )	1気圧	1気圧	1気圧	1気圧	1気圧
蒸発性不純物(水分) (mole)	$4.43 \times 10^{-4}$ ( $3.23 \times 10^{-5}$ )	$6.61 \times 10^{-5}$ ( $2.75 \times 10^{-5}$ )	$6.57 \times 10^{-5}$ ( $2.74 \times 10^{-5}$ )	$6.51 \times 10^{-5}$ ( $2.71 \times 10^{-5}$ )	$3.65 \times 10^{-4}$ ( $2.09 \times 10^{-5}$ )
初期結晶粒径 <sup>*</sup> ( μm )	15	20	20	20	15

\* 金相写真より推定

表2 照射孔及び軸方向装荷位置(試料中心位置)

燃料ピン 項目	I C F - 10 H	I C F - 11 H	I C F - 12 H	I C F - 13 H	I C F - 14 H
照 射 孔	6 B	6 D	6 C	6 C	6 D
試 料 中 心 位 置	炉 中 心	炉中心の 約18cm上方	炉中心の 約18cm上方	炉中心の 約18cm上方	炉 中 心

表 3 JRR-2 第一次照射試験結果

ピン番号	セクション 番号	炉心下端 からの距離 (mm)	燃料組織変化 (mm)			ペレット 一被覆管 残留ギャップ (μm)	燃料外半径 (mm)	ピン平均 燃焼度 (MWD/MTM)	気孔率変化 (%)
			中心空孔 半径	柱状晶 領域半径	等軸晶 領域半径				
ICF-10H	YK016	39.	2.15	4.6	5.1	30.	5.4	5210.	—
ICF-11H	YK023	37.	0.7	2.25	2.25	120.	4.7	1800.	-0.114
ICF-12H	YK033	38.	0.65	2.5	2.7	66.	4.7	3480.	0.
ICF-13H	YK043	38.	0.7	2.45	2.8	140.	4.7	5490.	1.235
ICF-14H	YK054	118.	0.6	2.3	2.7	56.	4.75	5330.	0.469

表 4 CEDAR コードによる解析結果

ピン番号	セクション 番号	炉心下端 からの距離 (mm)	燃料組織変化 (mm)			ペレット —被覆管ギャップ ( $\mu m$ ) 〔ギャップコン値 (W/cm <sup>2</sup> ・°C)〕	燃料外半径 (mm)	ピン平均 燃焼度 (MWD/MTM)	燃料中心 温度 (°C)
			中心空孔 半径	柱状晶 領域半径	等軸晶 領域半径				
ICF-10 H	—	45.	2.11	4.66	4.91	152. 〔 0.276 〕	5.25	4572.	2698.
ICF-11 H	—	45.	0.13	3.04	3.25	125. 〔 0.680 〕	4.62	1368.	2567.
ICF-12 H	—	45.	0.34	3.23	3.44	113. 〔 0.488 〕	4.63	4484.	2567.
ICF-13 H	—	45.	0.54	3.58	3.77	128. 〔 0.387 〕	4.63	6825.	2579.
ICF-14 H	—	45.	0.62	3.82	4.07	103. 〔 0.347 〕	4.66	7155.	2664.

表 5 焼きしまり評価モデル入力条件

項目 ピン番号	ICF - 11 H	ICF - 12 H	ICF - 13 H	ICF - 14 H
核分裂速度 (fission/cm <sup>3</sup> ·sec)	$4.1464 \times 10^{13}$	$2.3266 \times 10^{13}$	$2.3798 \times 10^{13}$	$2.3129 \times 10^{13}$
照射期間 (sec)	$1.0775 \times 10^6$	$3.7246 \times 10^6$	$5.7248 \times 10^6$	$5.7237 \times 10^6$
燃料温度 (°K)	表 6 参照	表 6 参照	表 6 参照	表 6 参照
初期結晶粒半径 (cm)	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$0.75 \times 10^{-3}$
初期気孔半径 (cm)	$0.1 \sim 5.0 \times 10^{-3}$	$0.1 \sim 5.0 \times 10^{-3}$	$0.1 \sim 5.0 \times 10^{-3}$	$0.1 \sim 5.0 \times 10^{-3}$
初期理論密度計 (%T.D.)	95.06	95.37	95.04	95.37
燃焼度	(MWD/MTM)	1800	3480	5490
	(MWD/T)	1590	3070	4840
	(fission/cm <sup>3</sup> ·sec)	$4.47 \times 10^{19}$	$8.67 \times 10^{19}$	$1.36 \times 10^{20}$

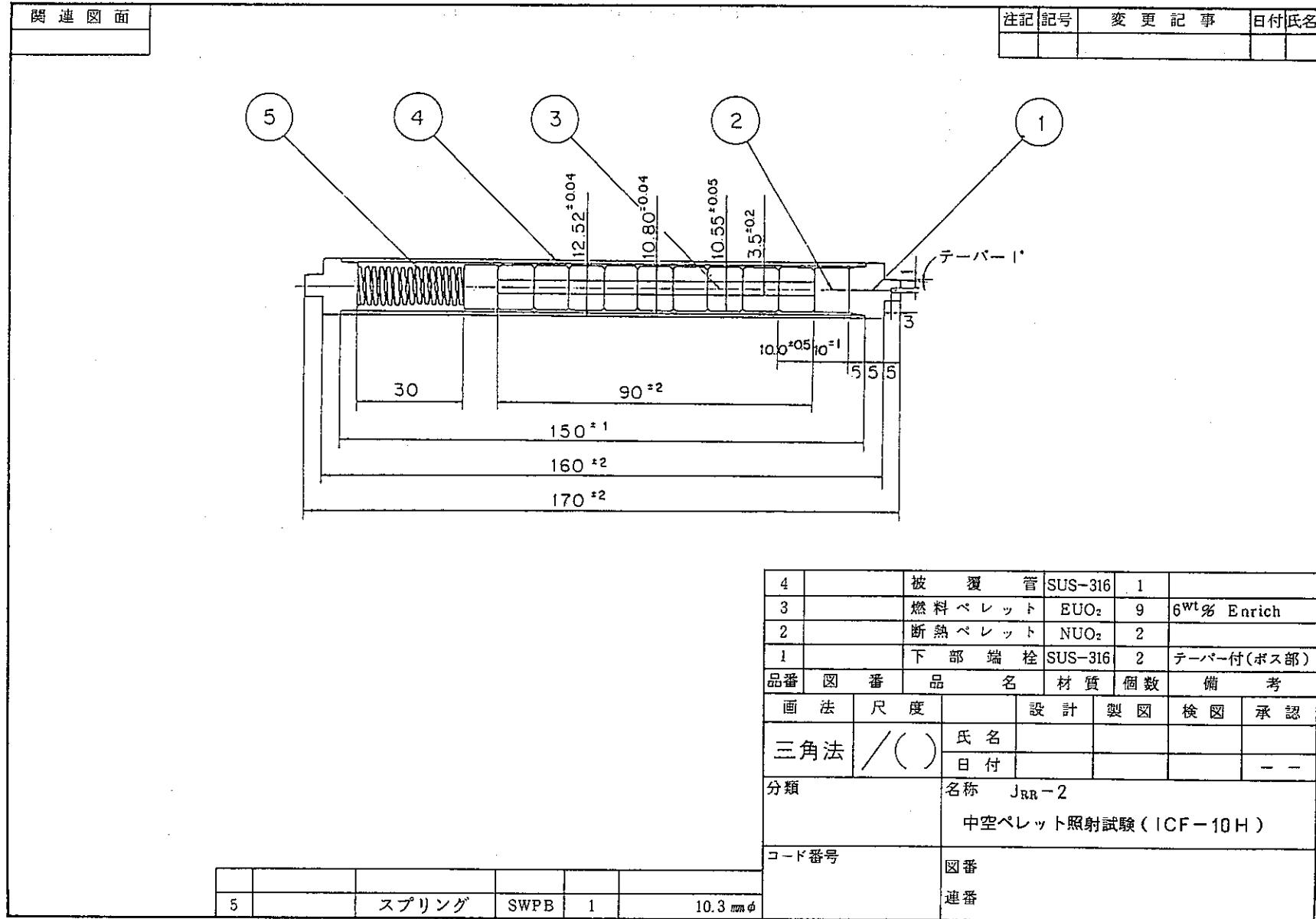
表 6 焼きしまり評価モデル入力条件(燃料不変化領域平均温度時刻歴)

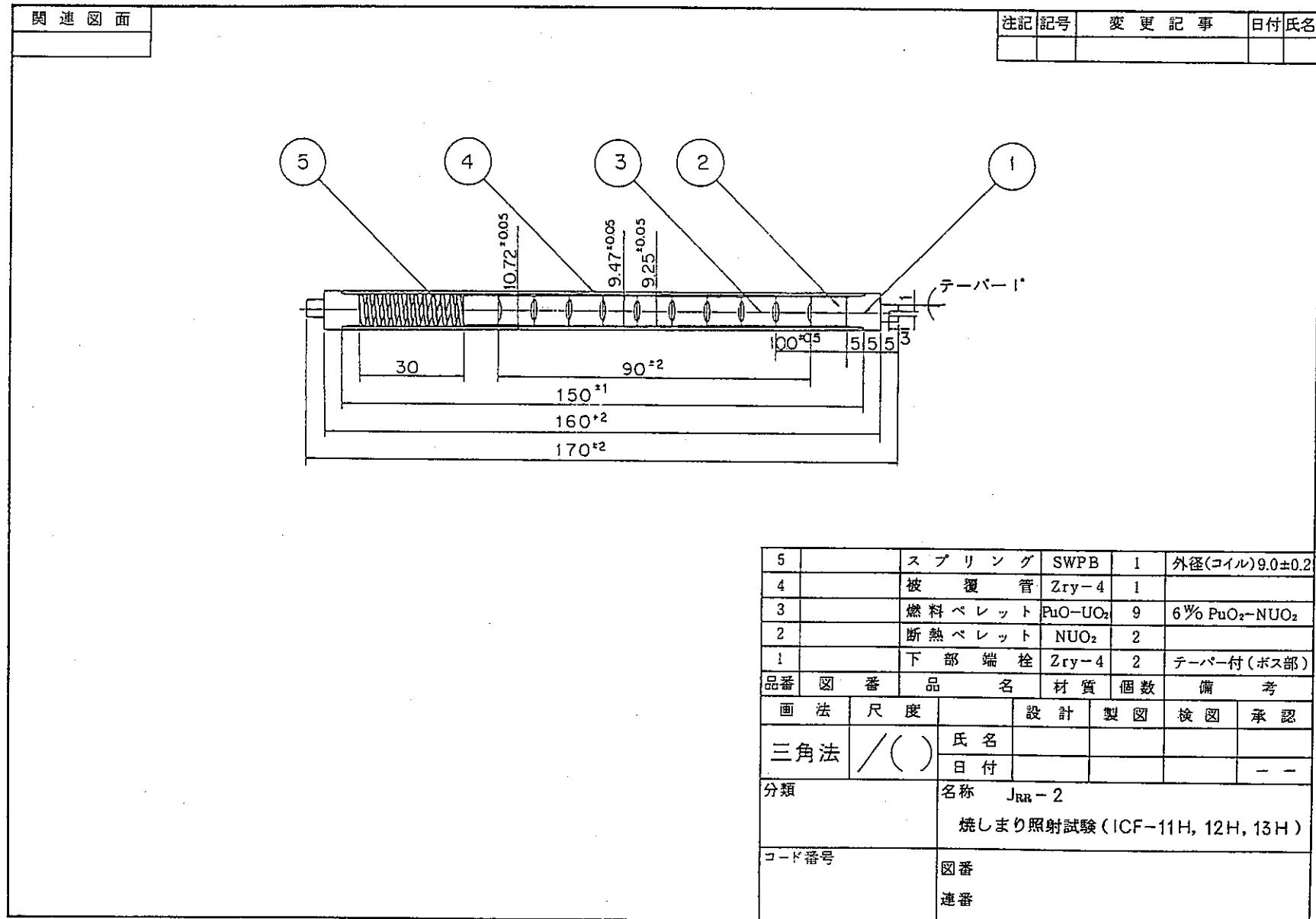
I C F - 11 H		I C F - 12 H		I C F - 13 H		I C F - 14 H	
時 間 (sec)	温 度 (°K)						
$1.740 \times 10^4$	1344.	$1.566 \times 10^4$	1250.	$1.776 \times 10^4$	1246.	$1.560 \times 10^4$	1185.
$9.489 \times 10^5$	1446.	$1.867 \times 10^5$	1281.	$3.934 \times 10^5$	1291.	$8.220 \times 10^4$	1205.
$1.040 \times 10^6$	1455.	$8.591 \times 10^5$	1357.	$9.488 \times 10^5$	1339.	$9.480 \times 10^5$	1214.
$1.078 \times 10^6$	1456.	$8.603 \times 10^5$	1362.	$9.713 \times 10^5$	1334.	$1.905 \times 10^6$	1349.
		$1.805 \times 10^6$	1424.	$1.903 \times 10^6$	1419.	$1.942 \times 10^6$	1350.
		$1.821 \times 10^6$	1413.	$2.860 \times 10^6$	1479.	$3.815 \times 10^6$	1518.
		$2.751 \times 10^6$	1422.	$3.811 \times 10^6$	1499.	$4.770 \times 10^6$	1547.
		$2.869 \times 10^6$	1422.	$4.770 \times 10^6$	1514.	$4.795 \times 10^6$	1502.
		$3.725 \times 10^6$	1448.	$5.725 \times 10^6$	1523.	$5.724 \times 10^6$	1498.

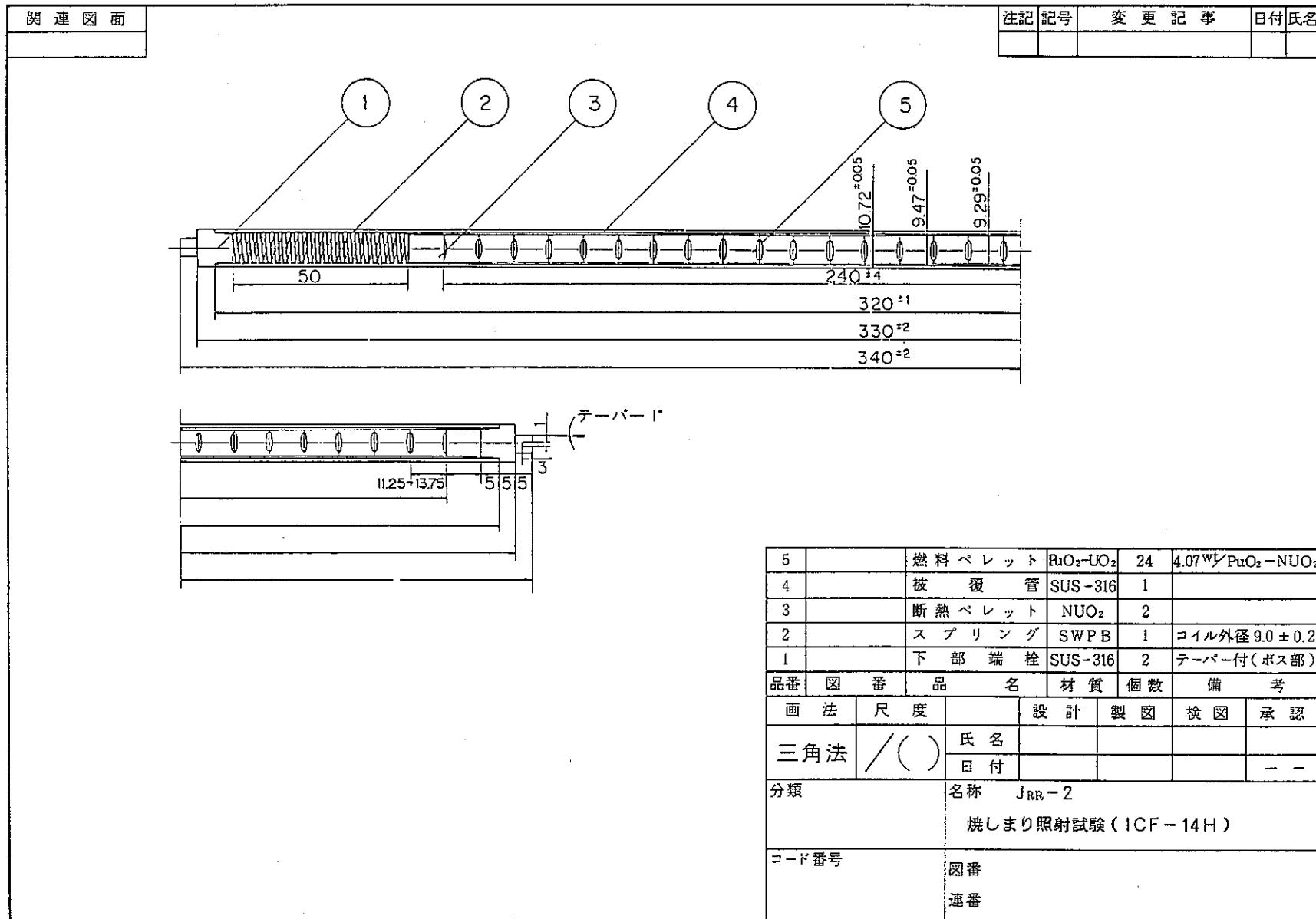
表 7 気孔率変化量(計算結果及びPIE結果)

ピン番号	PIE結果	計算結果					
		① Marlowe	② Lindman	③ Stehle & Assmann	④ Carlson	⑤ Collins & Horgreaves	⑥ Rolstad et. al.
ICF - 11 H	$-1.14 \times 10^{-1}$	$2.932 \times 10^{-1}$	$2.420 \times 10^{-3}$	$4.516 \times 10^{-3}$	$1.026 \times 10^{-1}$	2.111	0.
ICF - 12 H	0.	$5.354 \times 10^{-1}$	$2.819 \times 10^{-3}$	$7.933 \times 10^{-3}$	$1.827 \times 10^{-1}$	2.154	0.
ICF - 13 H	1.235	$7.892 \times 10^{-1}$	$4.545 \times 10^{-3}$	$9.354 \times 10^{-3}$	$2.666 \times 10^{-1}$	2.070	2.293
ICF - 14 H	0.469	1.506	$8.430 \times 10^{-3}$	$1.800 \times 10^{-2}$	$3.421 \times 10^{-1}$	1.264	1.820

(注) ⑩は焼きしまりモデル番号

図 1 ICF-10H 燃料要素<sup>(1)</sup>

図 2 ICF-11H, 12H, 13H 燃料要素<sup>(1)</sup>

図 3 ICF-14 H 燃料要素<sup>(1)</sup>

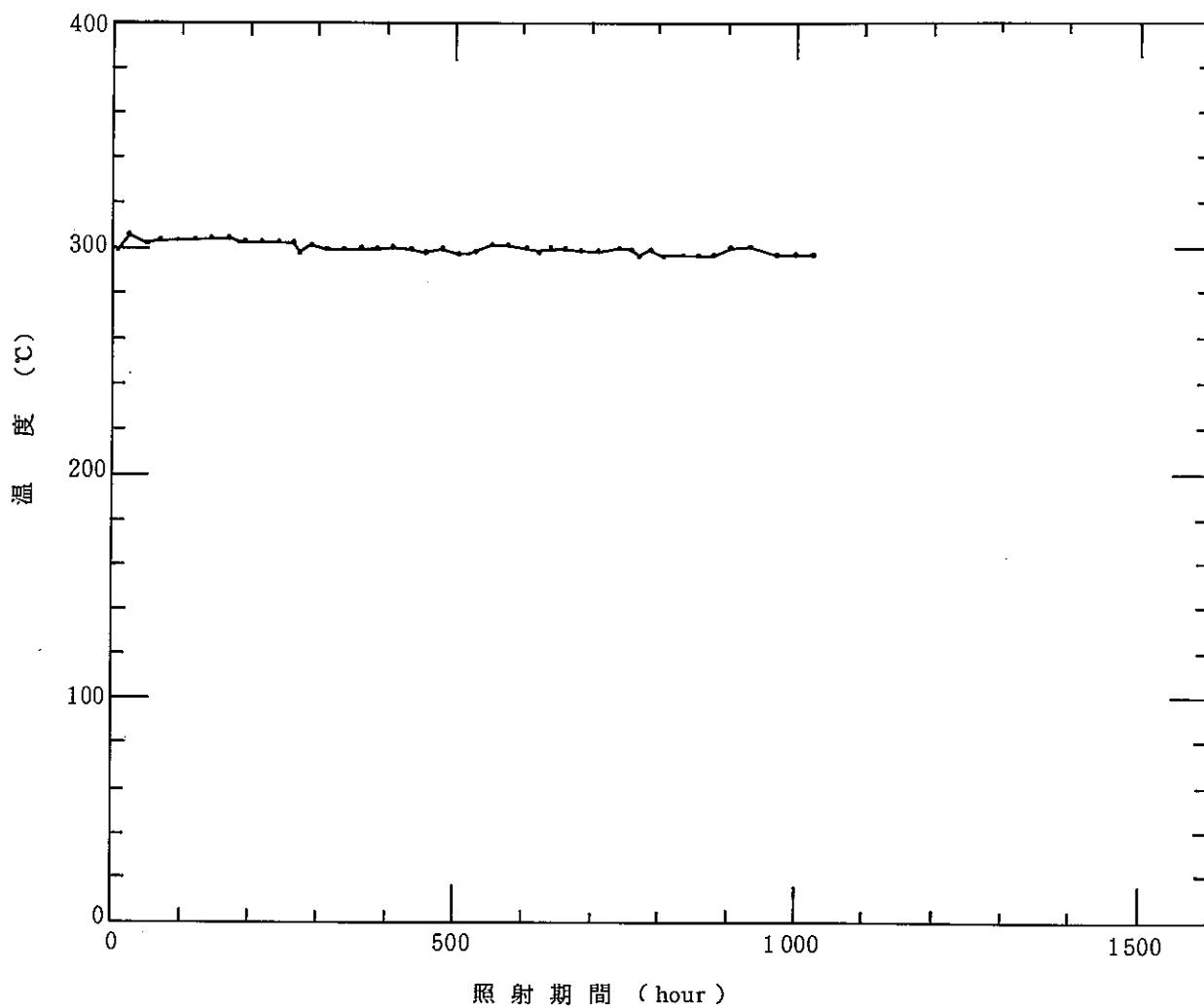


図4 被覆管表面温度時刻歴 (ICF - 10H)

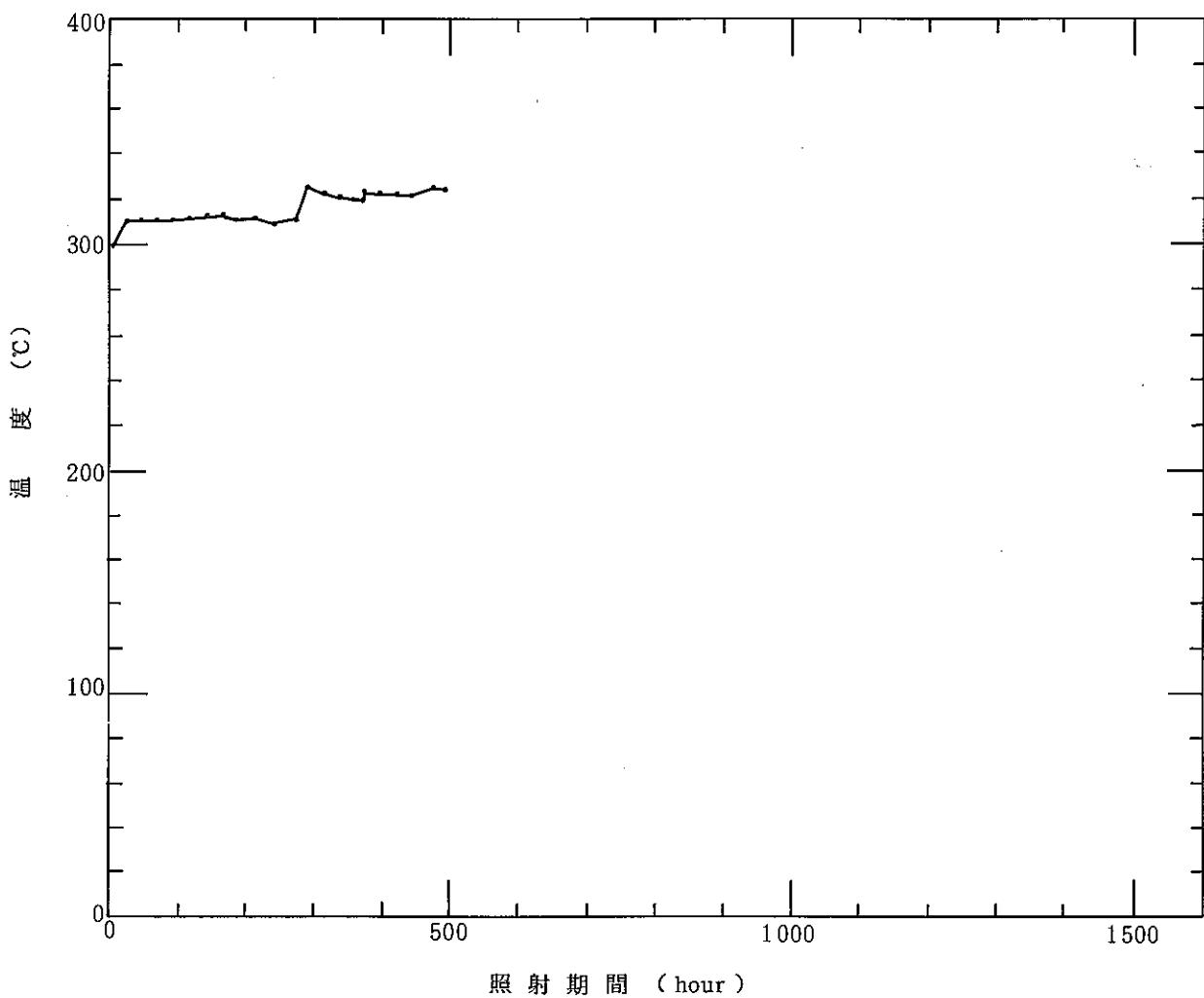


図 5 被覆管表面温度時刻歴 (ICF - 11H)

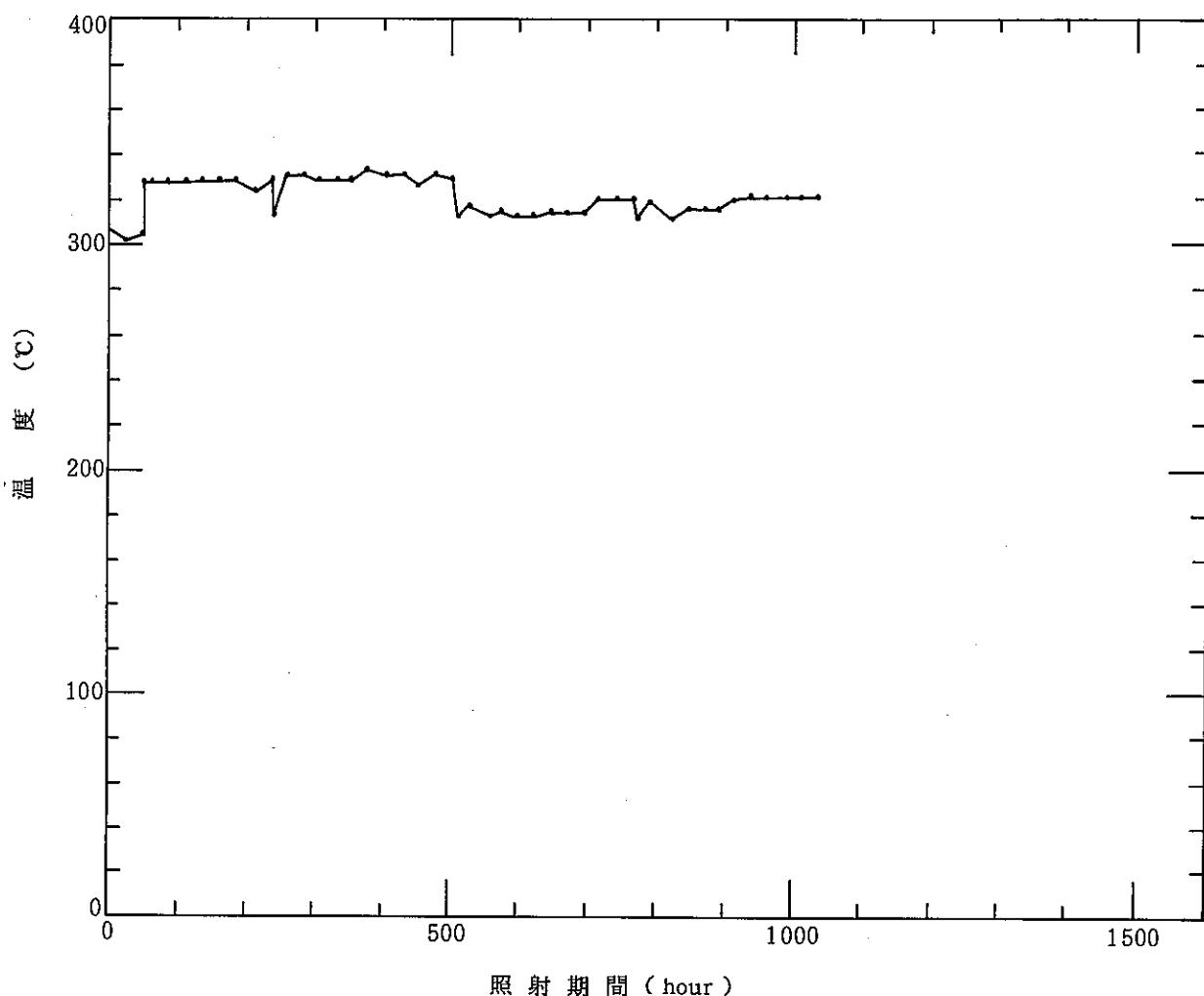


図 6 被覆管表面温度時刻歴 ( ICF - 12 H )

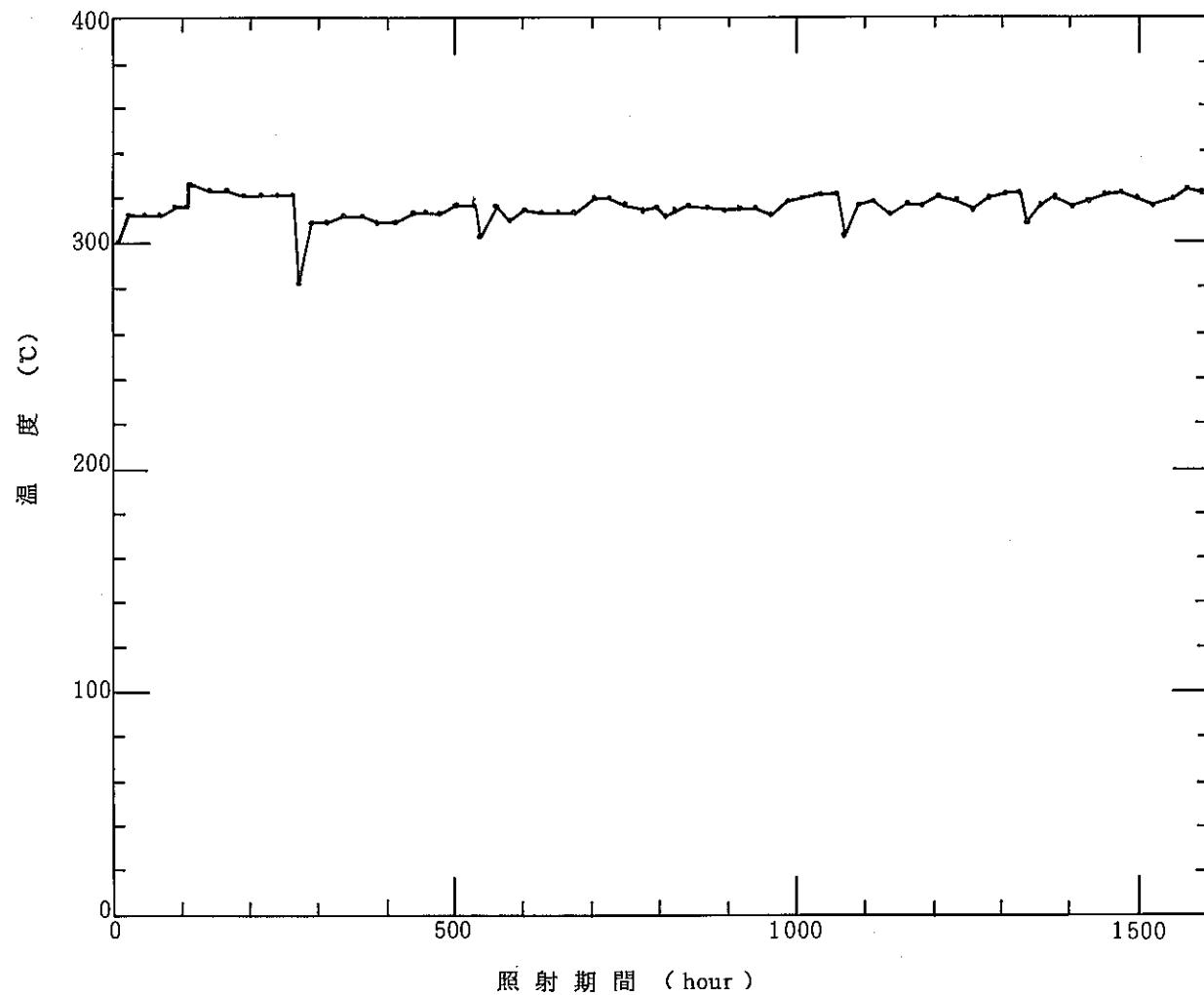


図 7 被覆管表面温度時刻歴 ( ICF - 13H )

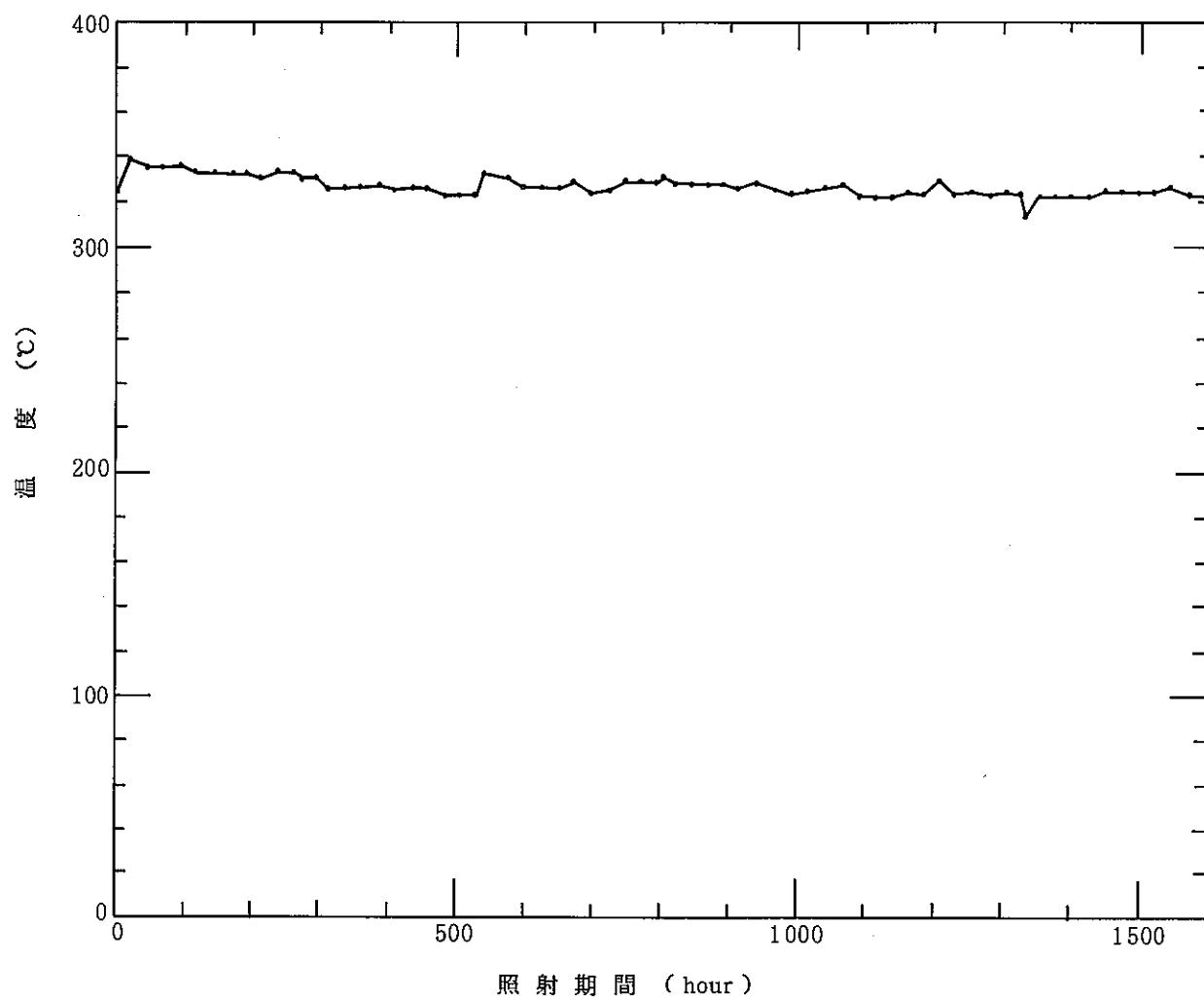


図 8 被覆管表面温度時刻歴 (ICF - 14H)

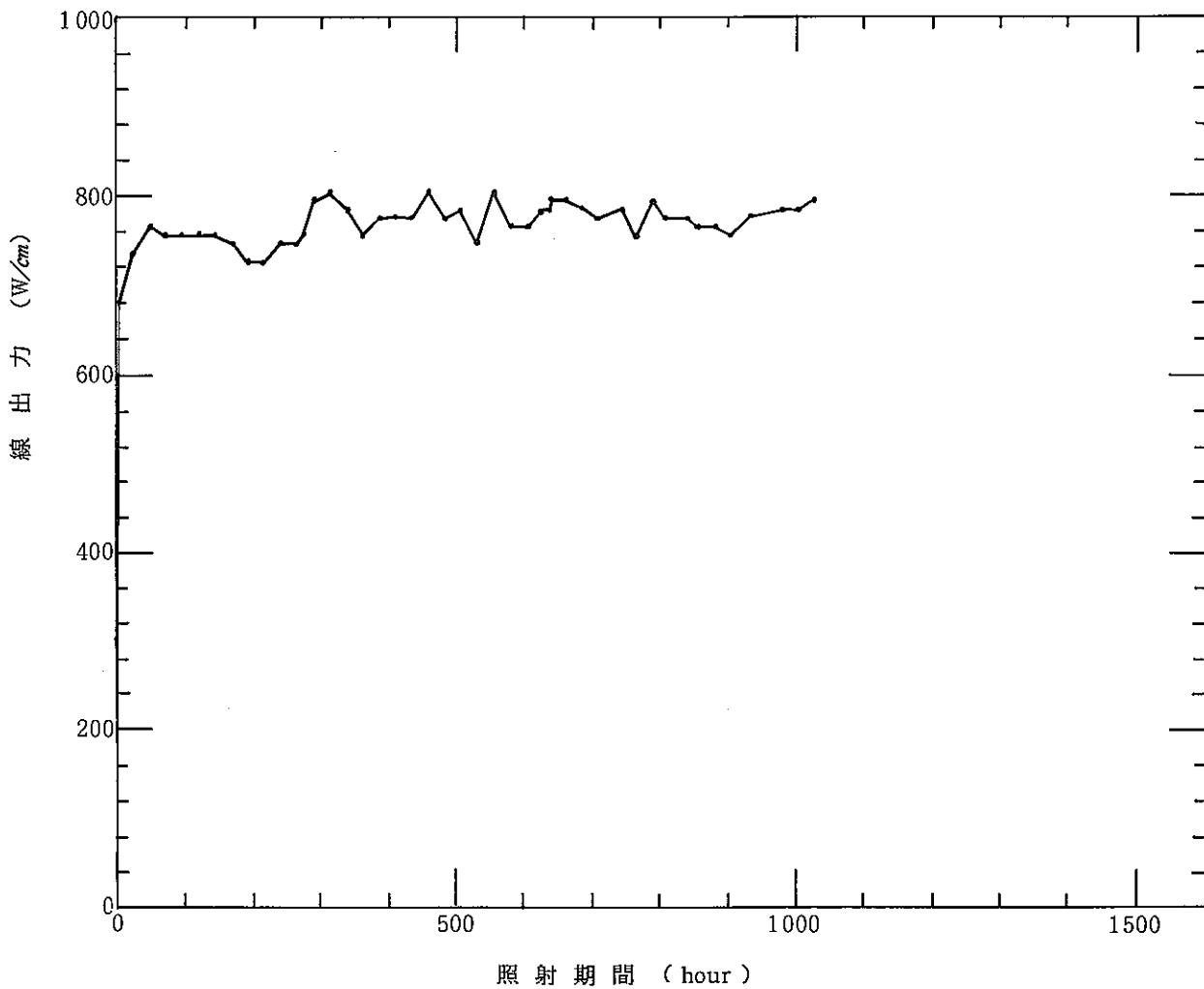


図9 予測線出力時刻歴 (ICF-10H)

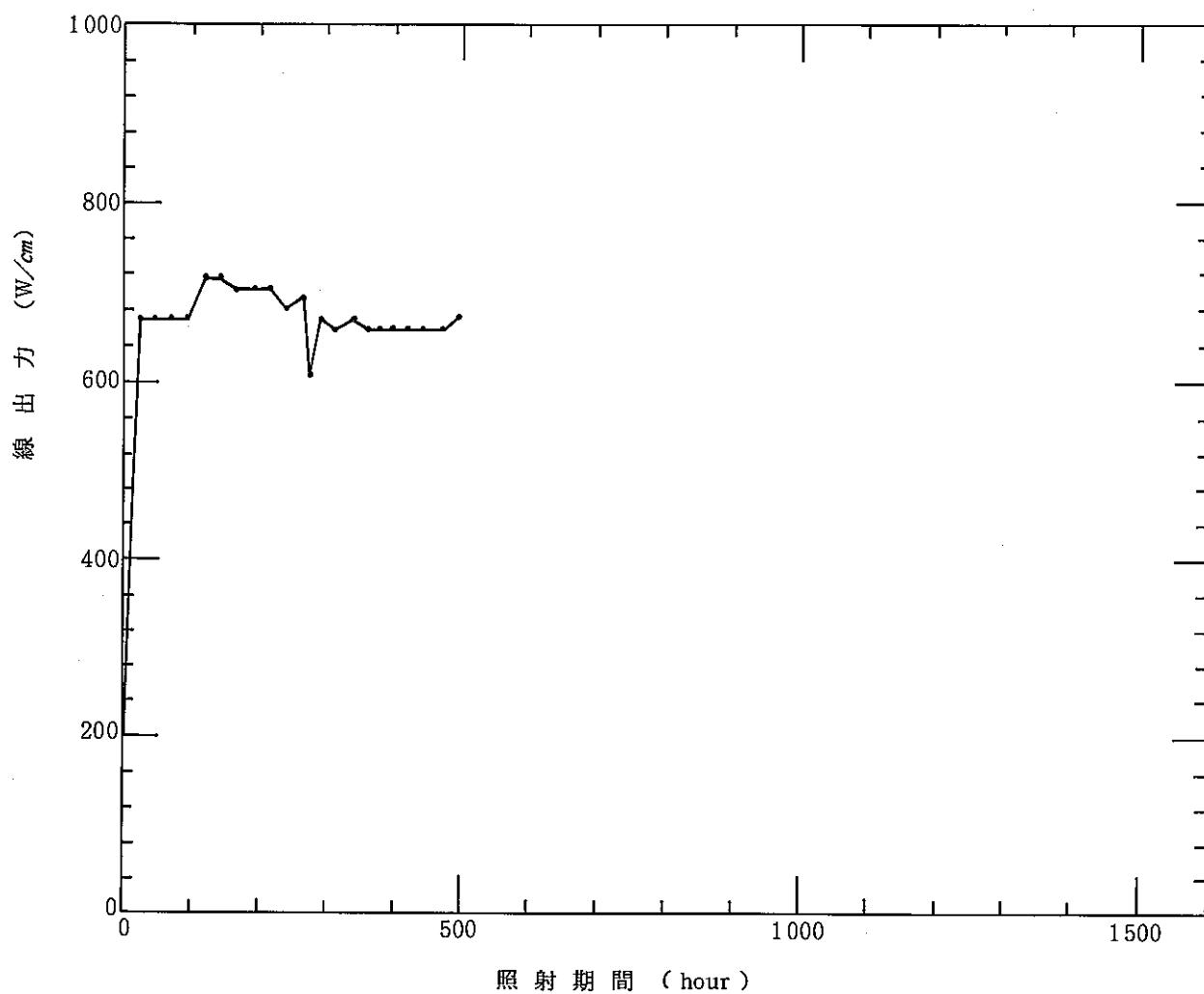


図10 予測線出力時刻歴 (ICF-11H)

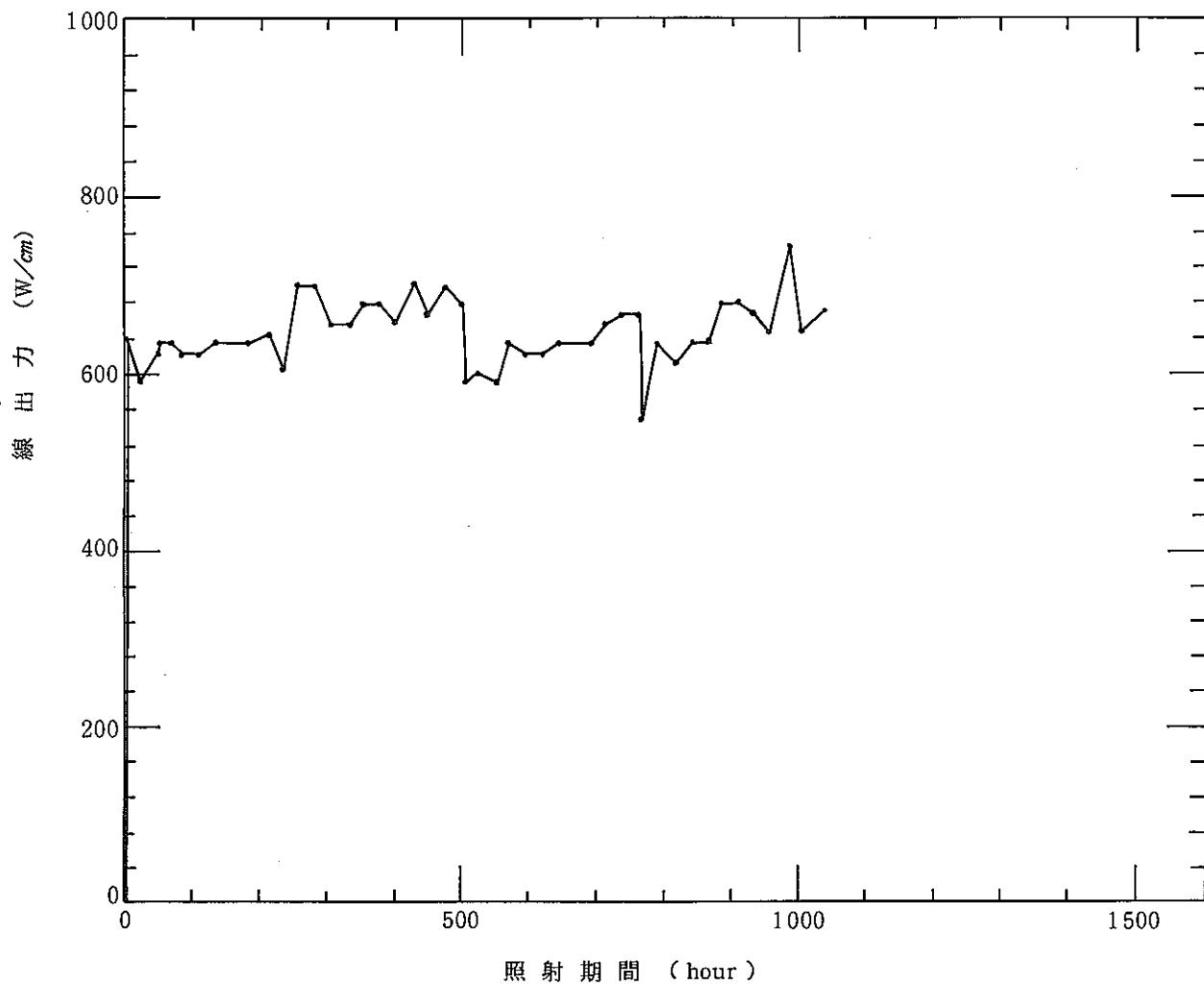


図11 予測線出力時刻歴 (ICF - 12H)

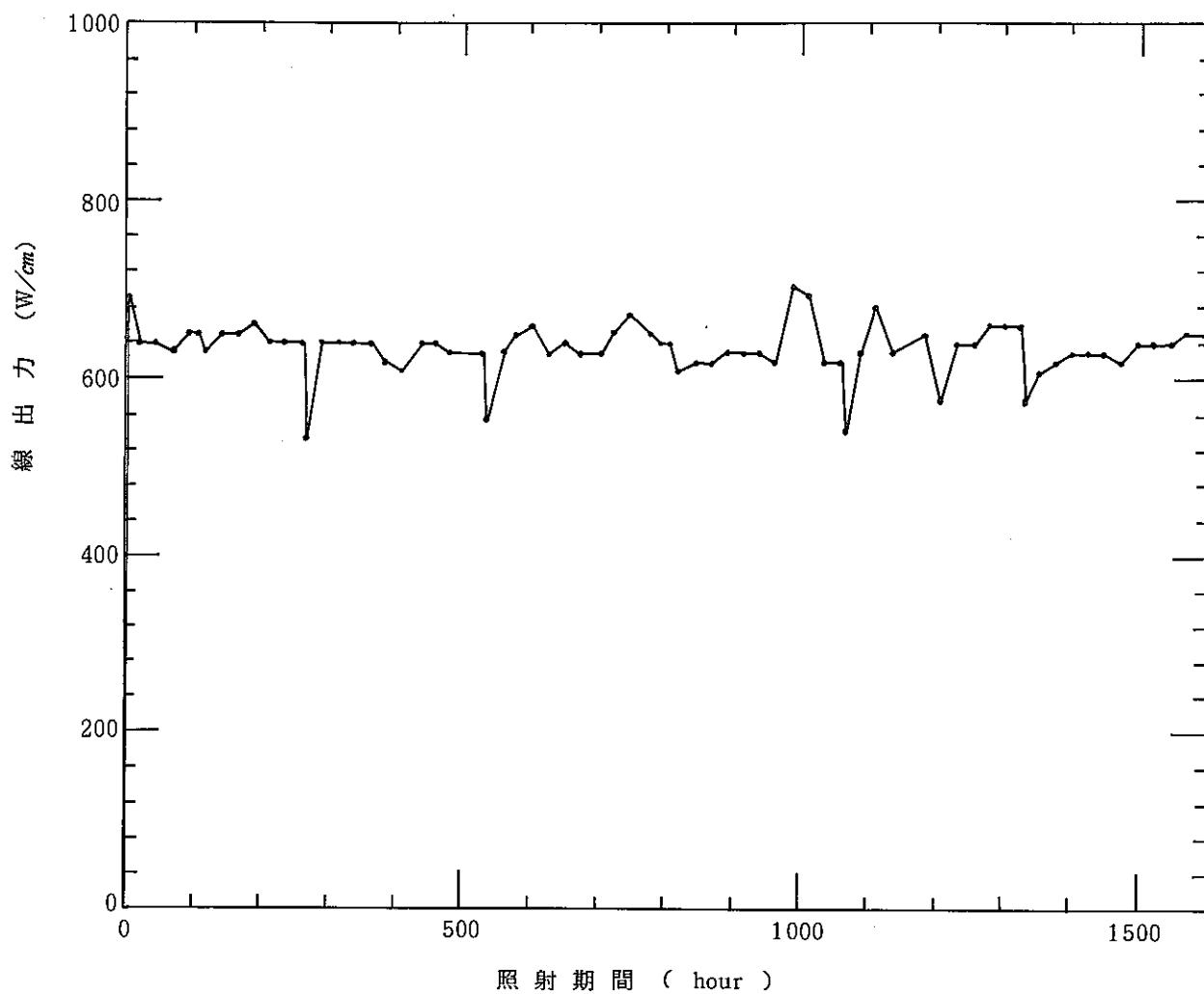


図12 予測線出力時刻歴 ( ICF - 13H )

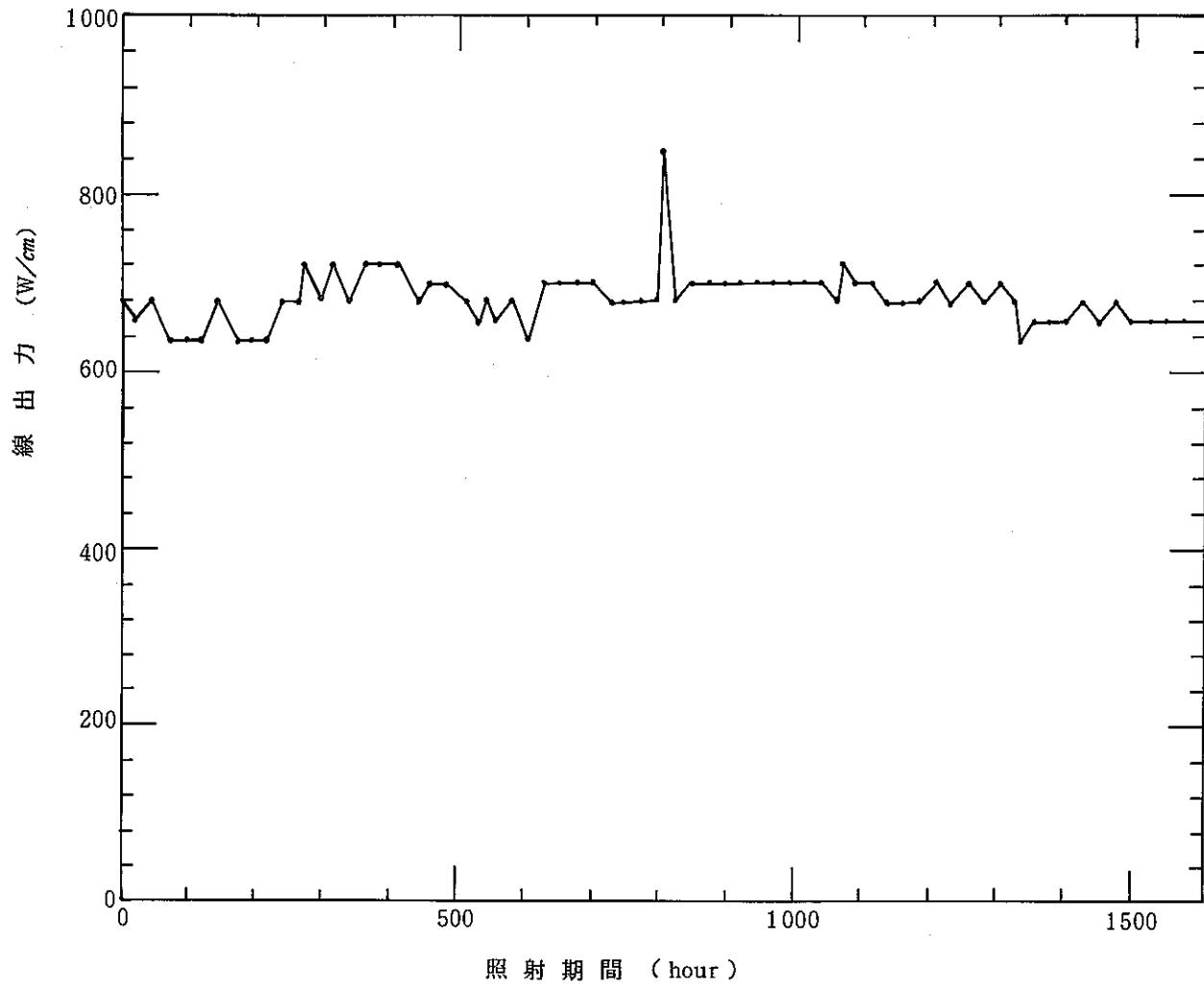


図13 予測線出力時刻歴 (ICF-14H)

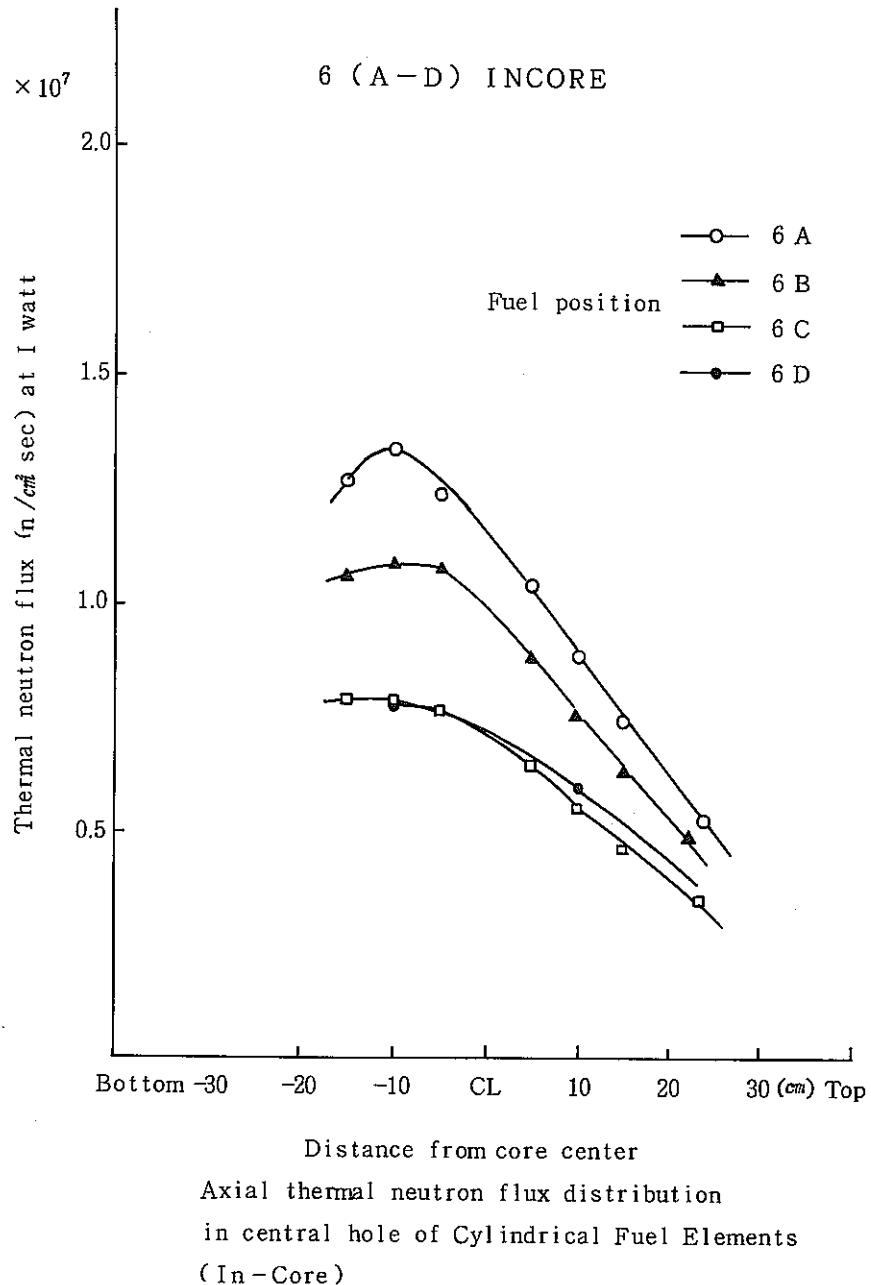


図14 JRR-2 インコア照射孔の中性子束分布<sup>(4), (5)</sup>

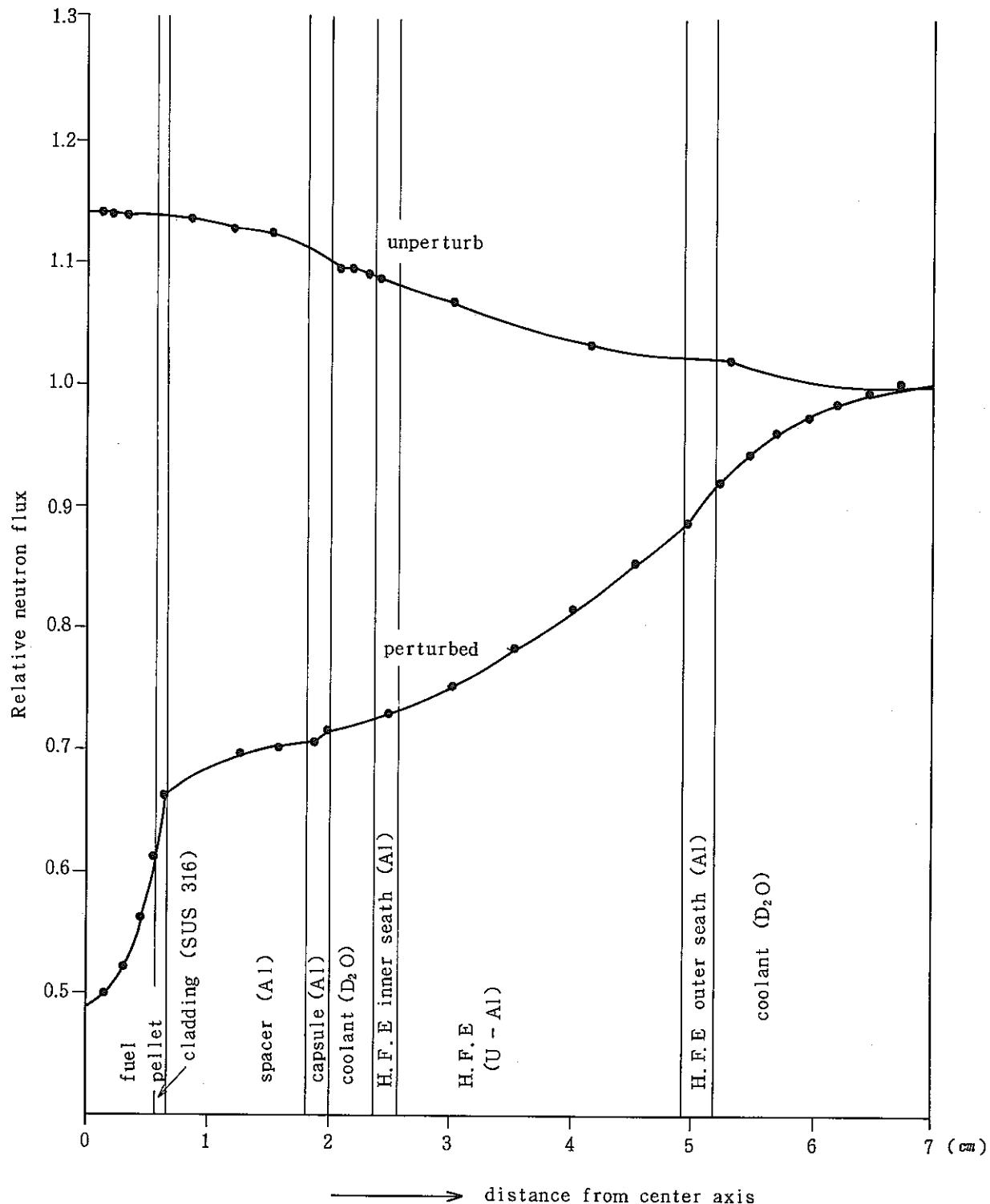


FIG. 15 Perturbed neutron flux distribution in ICF-10H capsule (4)

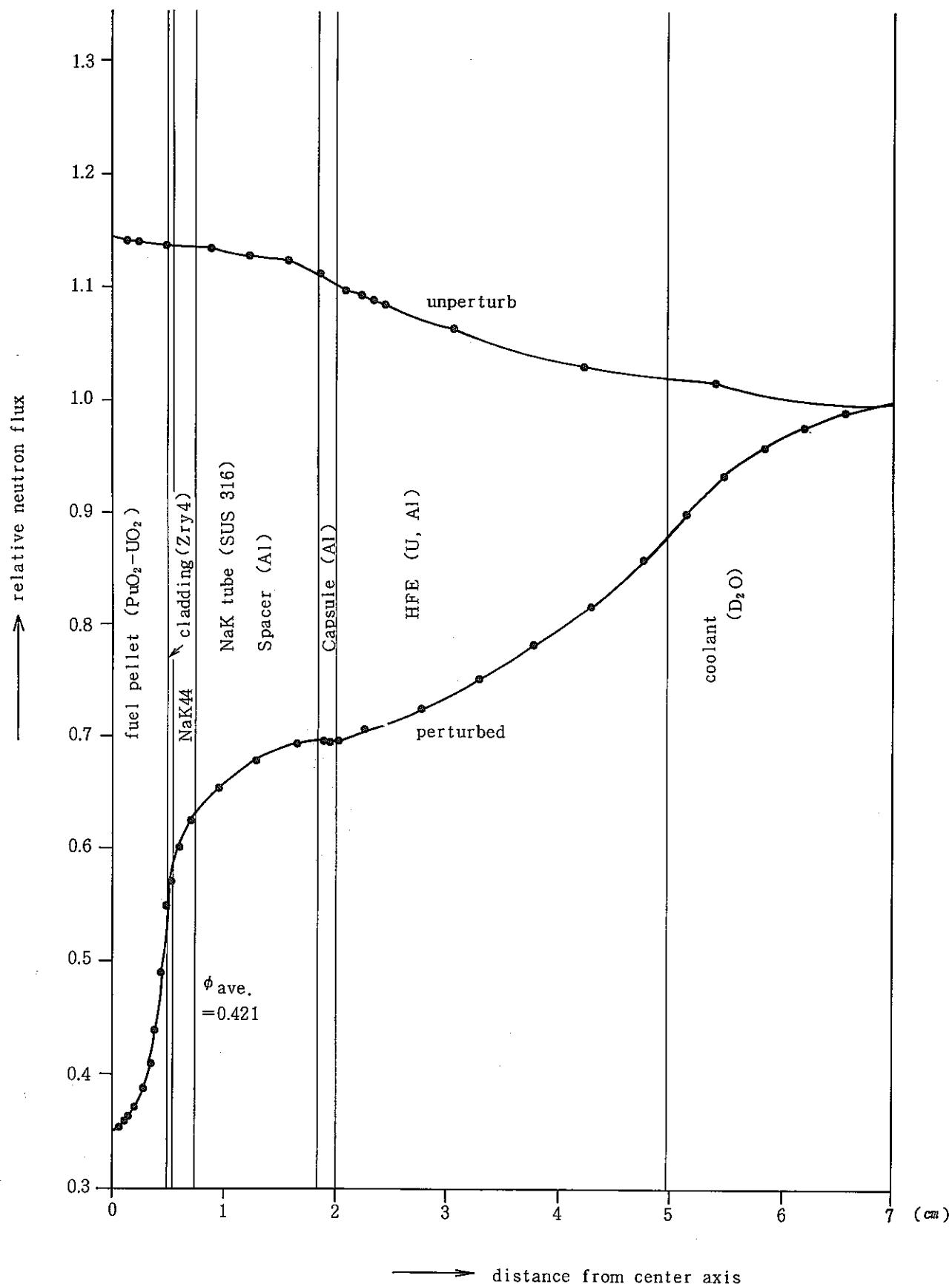


図16 Perturbed neutron flux distribution in ICF-11H capsule (4)

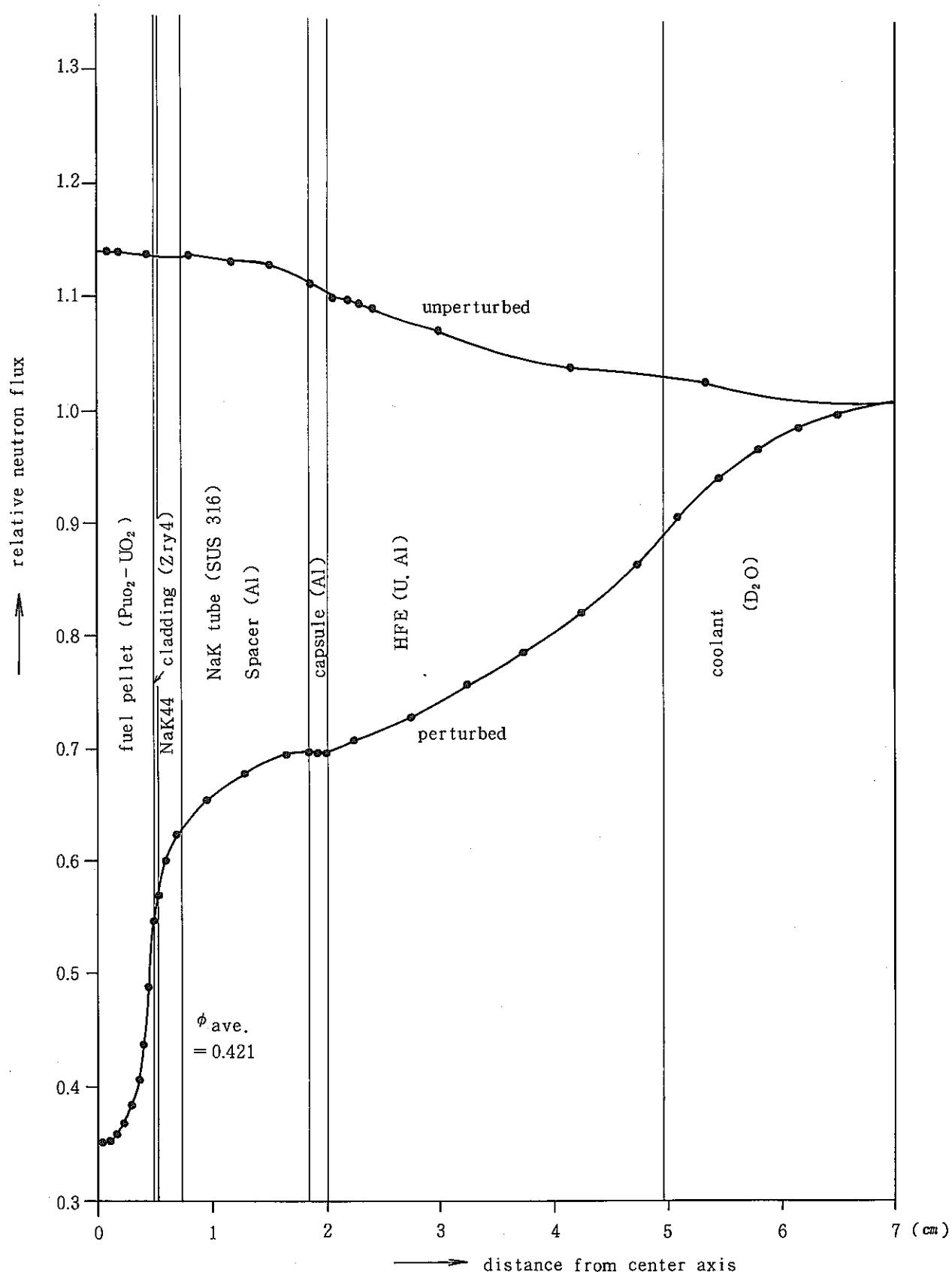


図17 Perturbed neutron flux distribution in  
ICF - 12H, 13H capsules<sup>(5)</sup>

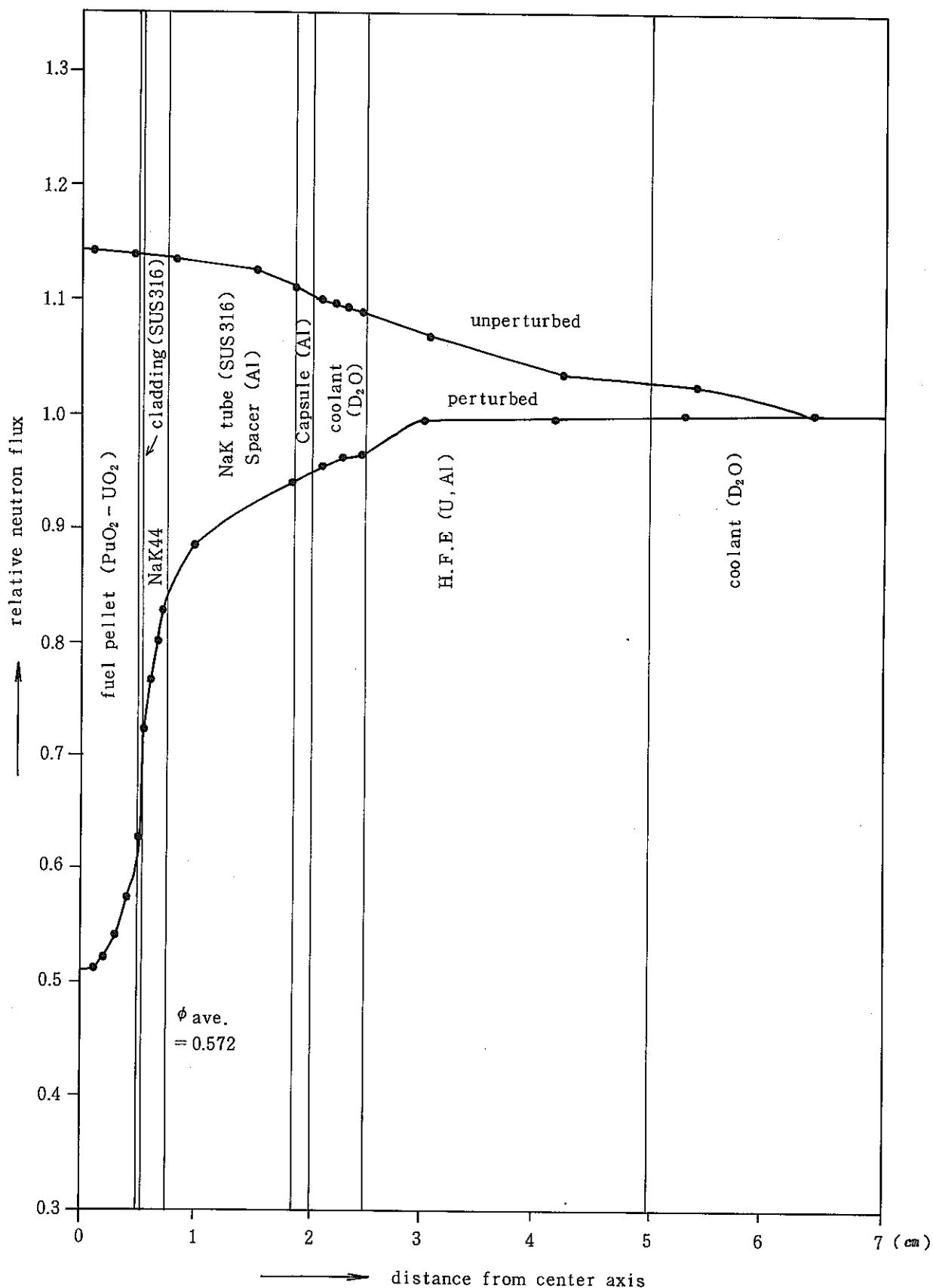


図18 Perturbed neutron flux distribution in  
ICF-14H capsule (5)

<b>Pin No.</b>	<b>JRR-2 ICF-10H</b>	
<b>Section No.</b>	<b>YK016</b>	
<b>Distance from bottom of pin</b>		<b>64mm</b>
<b>Distance from bottom of fuel column</b>		<b>39mm</b>

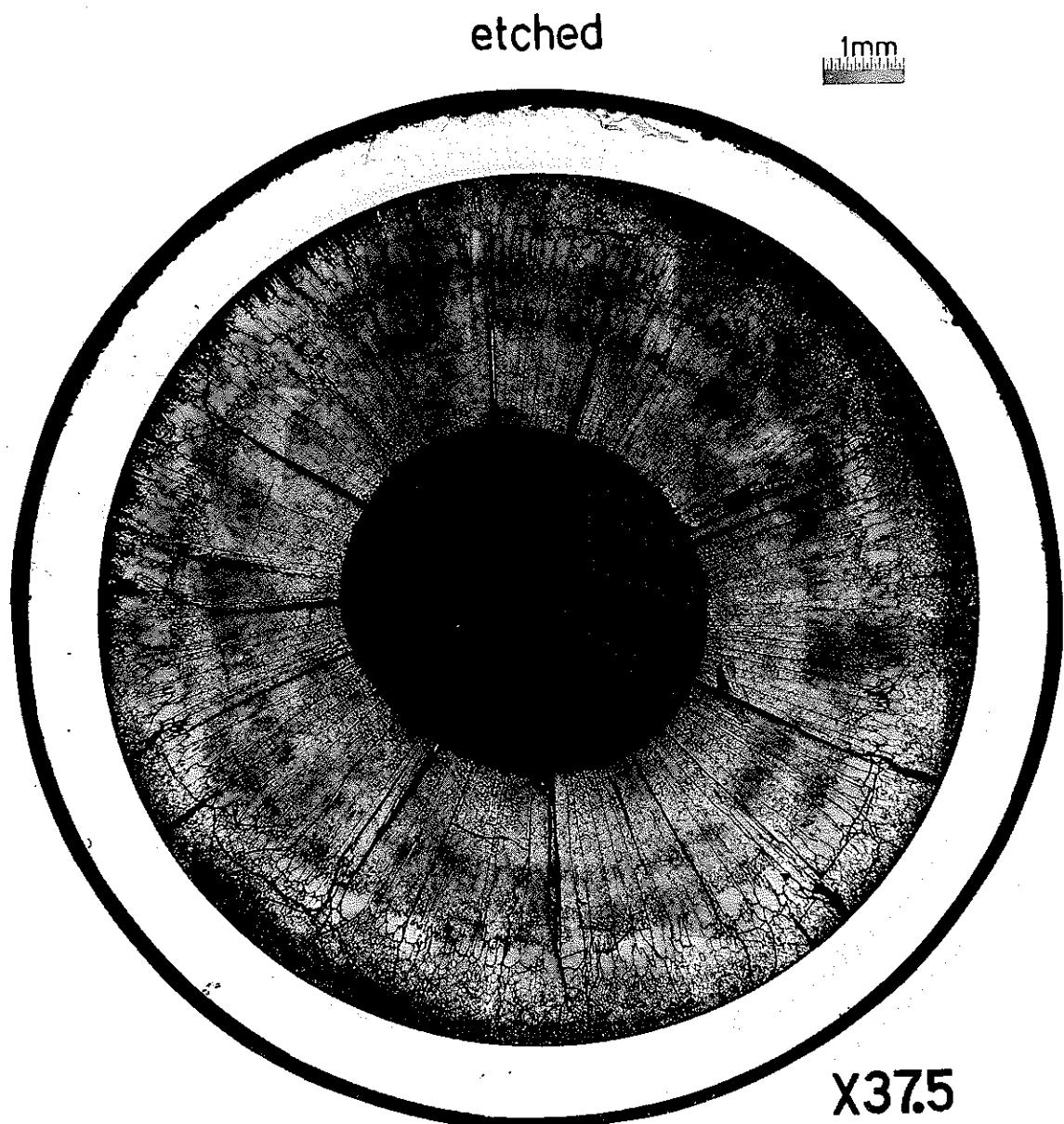


Photo 1 Postirradiation ceramography of JRR-2 pin fuel<sup>(3)</sup>  
(YK016 sample, etched)

<b>Pin No.</b>	<b>JRR-2 ICF-11H</b>
<b>Section No.</b>	<b>YK023</b>
<b>Distance from bottom of pin</b>	<b>62mm</b>
<b>Distance from bottom of fuel column</b>	<b>37mm</b>

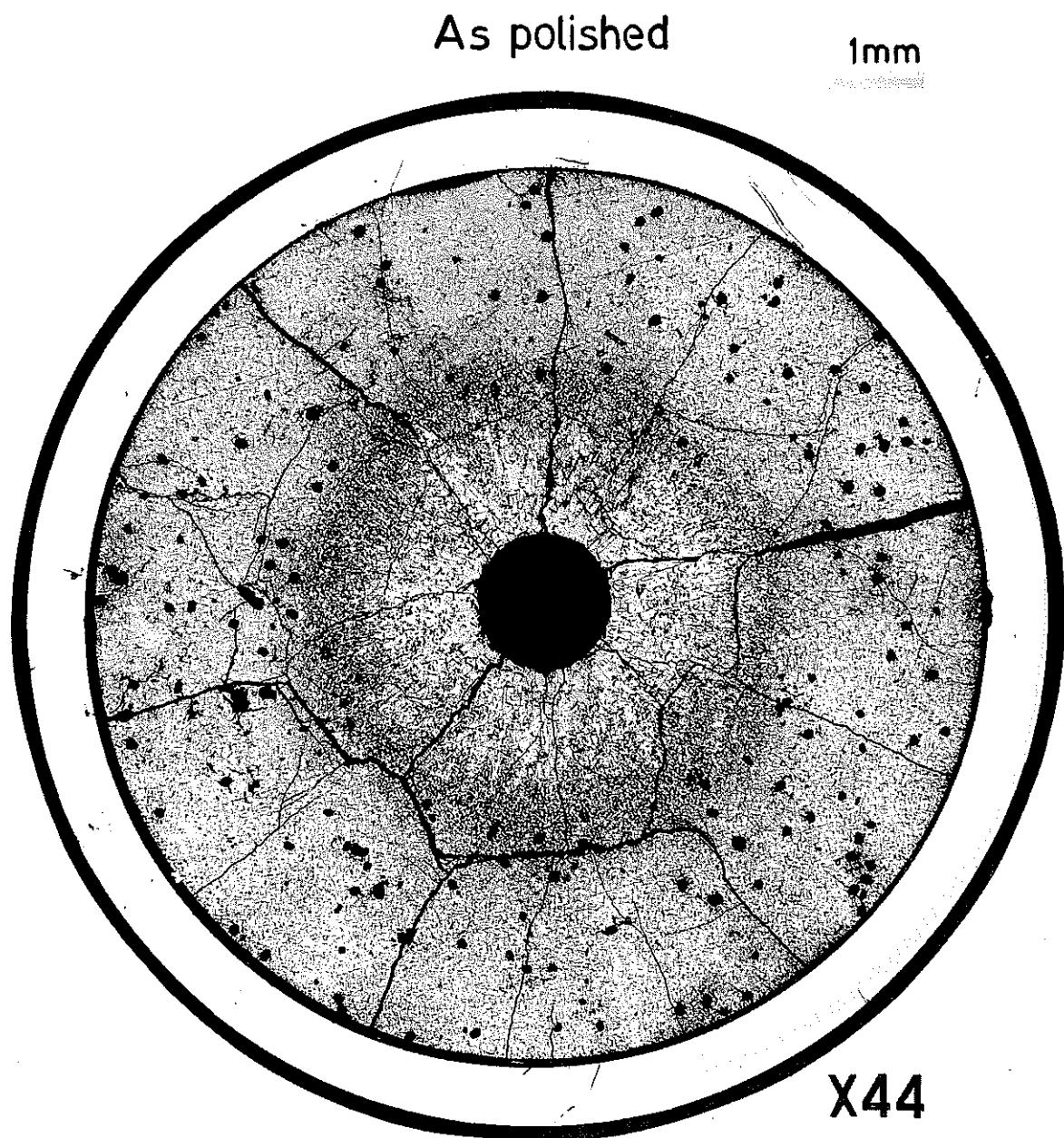


Photo 2 Postirradiation ceramography of JRR-2 pin fuel <sup>(3)</sup>  
( YK023 sample, as polished )

Pin No.	JRR-2 ICF-12H
Section No.	YK033
Distance from bottom of pin	63mm
Distance from bottom of fuel column	38mm

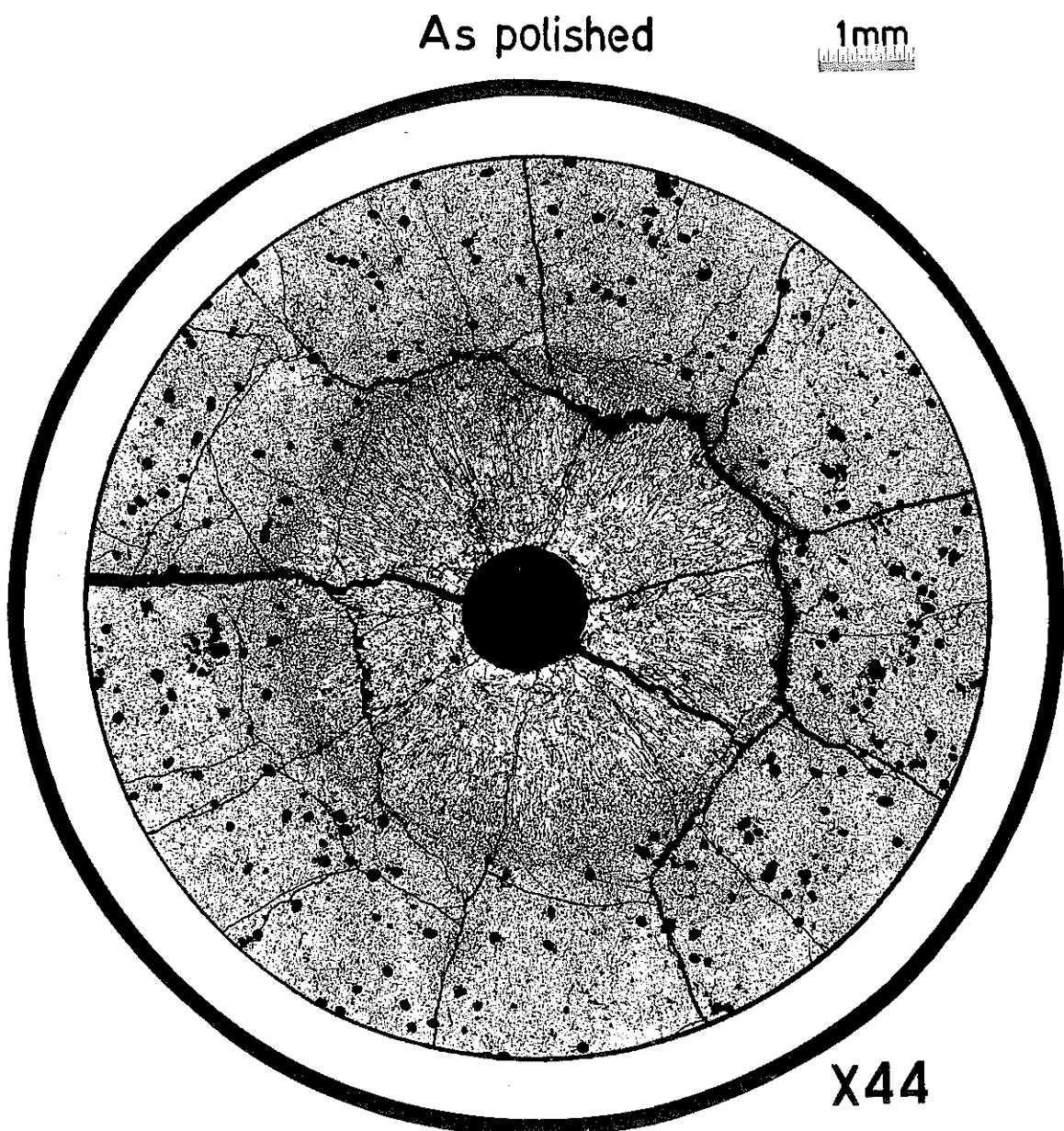


Photo 3 Postirradiation ceramography of JRR-2 pin fuel<sup>(3)</sup>  
( YK033 sample, as polished )

<b>Pin No.</b>	<b>JRR-2 ICF-13H</b>
<b>Section No.</b>	<b>YK043</b>
<b>Distance from bottom of pin</b>	<b>63mm</b>
<b>Distance from bottom of fuel column</b>	<b>38mm</b>

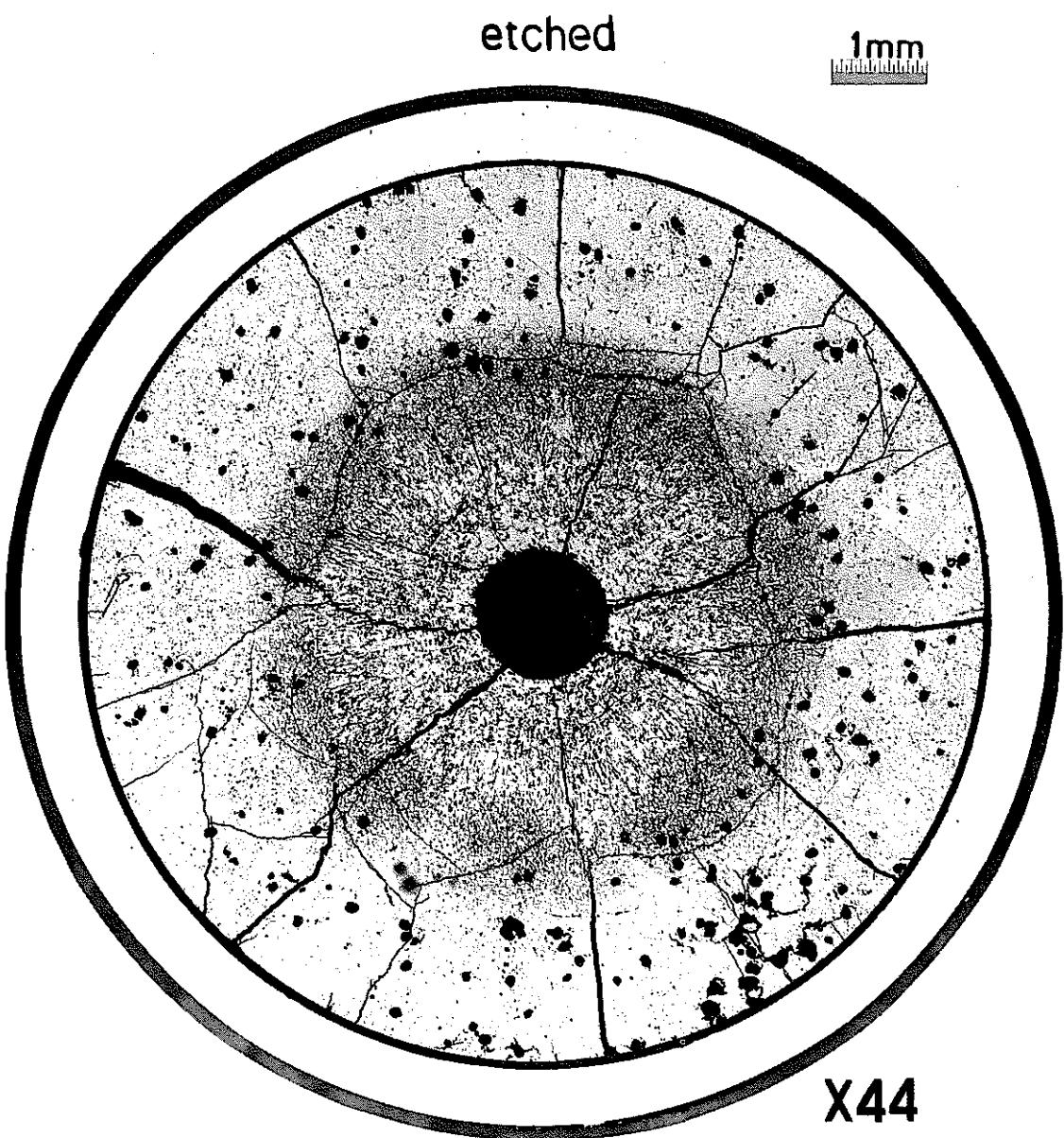


Photo 4 Postirradiation ceramography of JRR-2 pin fuel<sup>(3)</sup>  
( YK043 sample, etched )

Pin No.	JRR-2 ICF-14H
Section No.	YK054
Distance from bottom of pin	143mm
Distance from bottom of fuel column	118mm

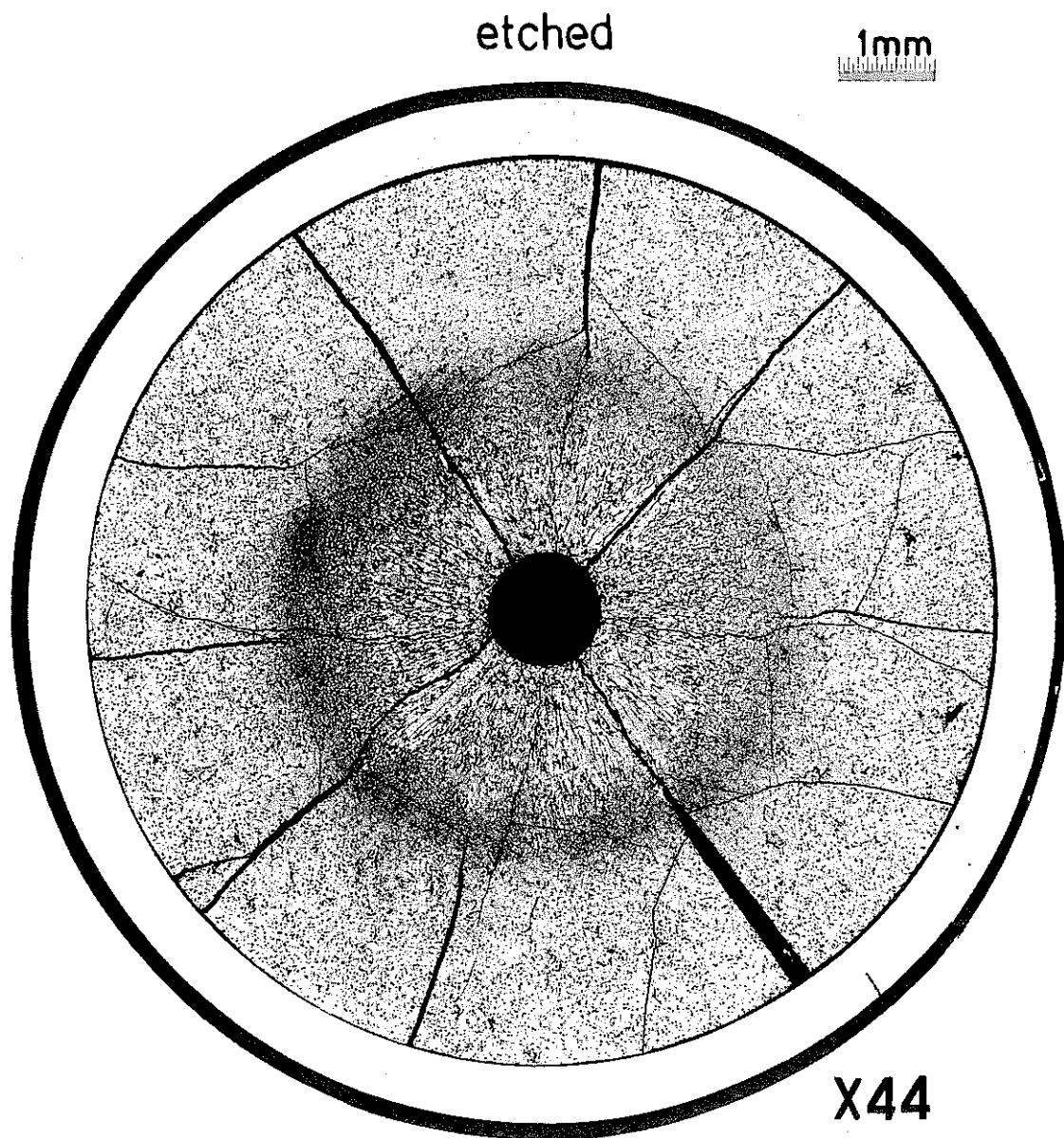


Photo 5 Postirradiation ceramography of JRR-2 pin fuel<sup>(3)</sup>  
( YK054 sample, etched )

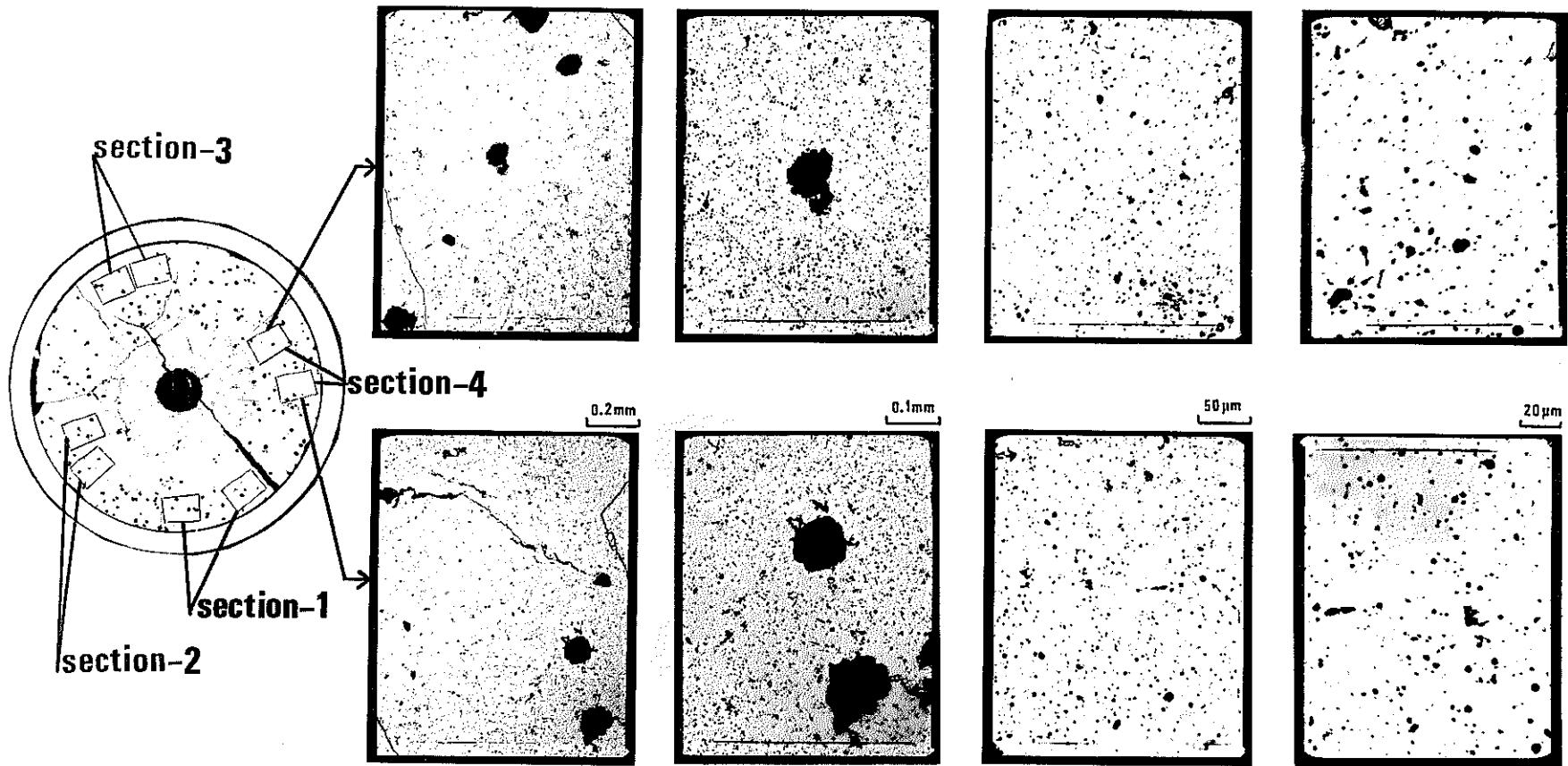


Photo 6 Photomicrographs of JRR-2 ICF-11H YK023 sample (D.F.C.B = 37 mm)<sup>(3)</sup>

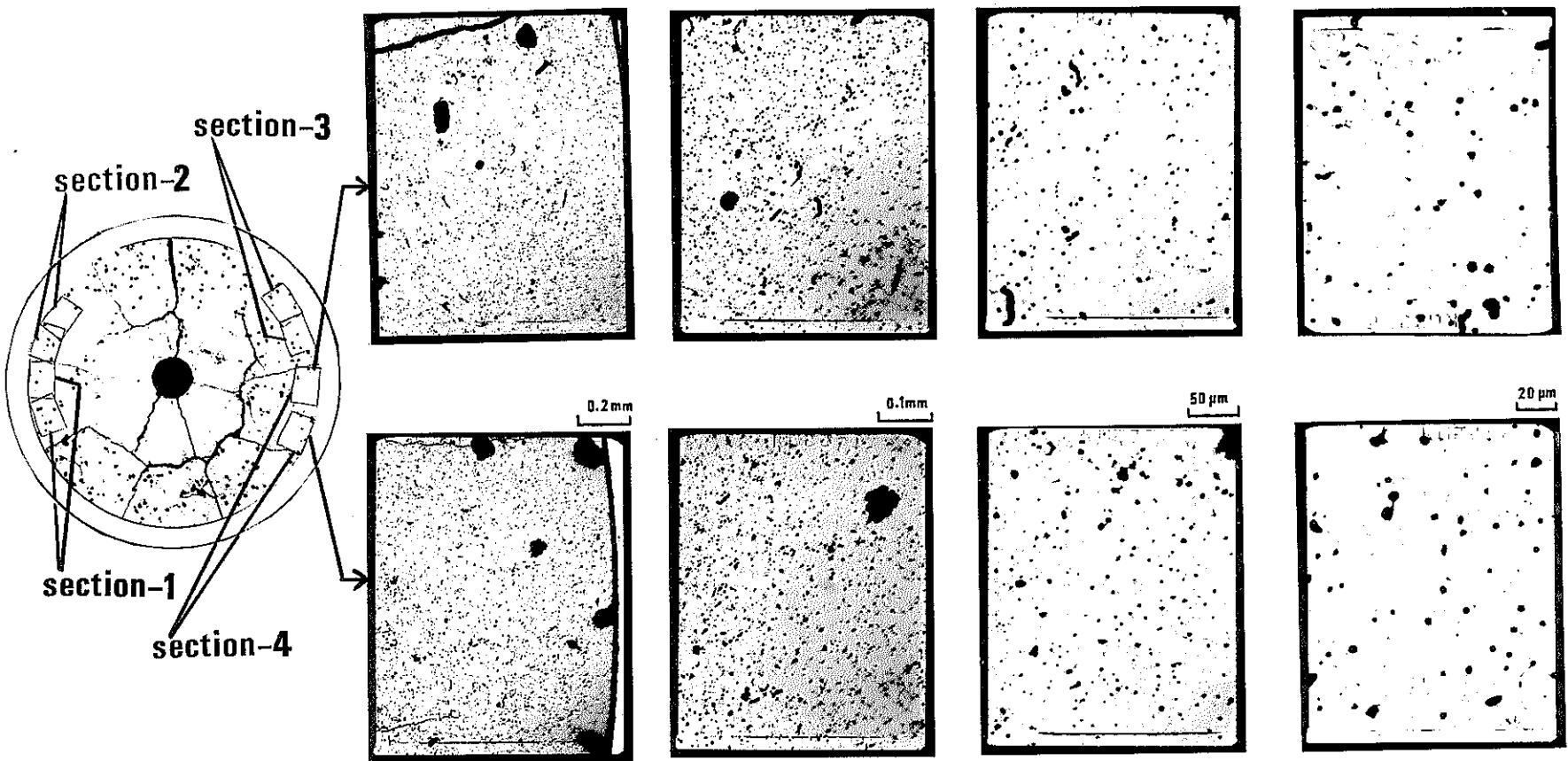


Photo 7 Photomicrographs of JRR-2 ICF-12H YK033 sample (D.F.C.B = 38 mm)<sup>(3)</sup>

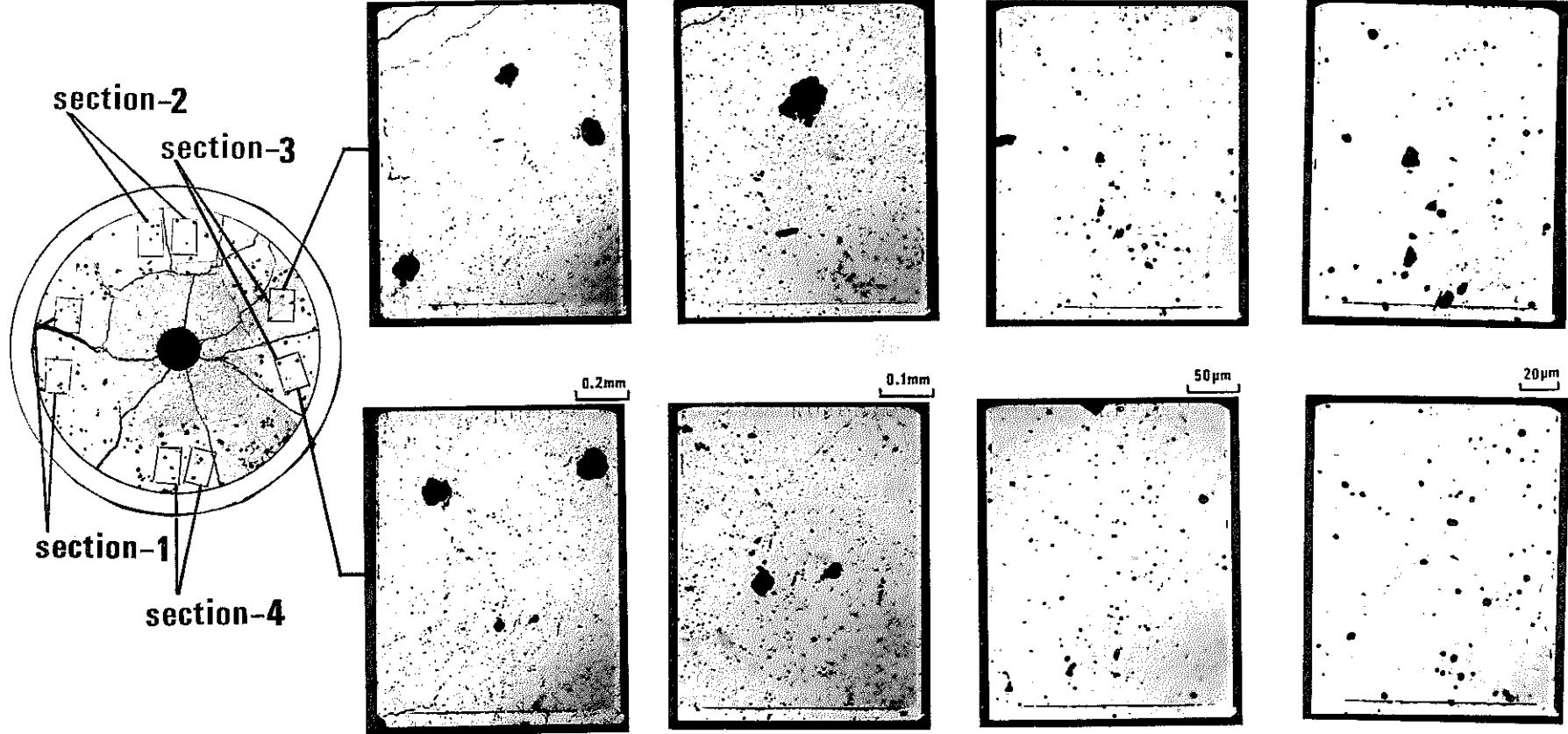


Photo 8 Photomicrographs of JRR-2 ICF-13H YK043 sample (D.F.C.B = 38 mm)<sup>(3)</sup>

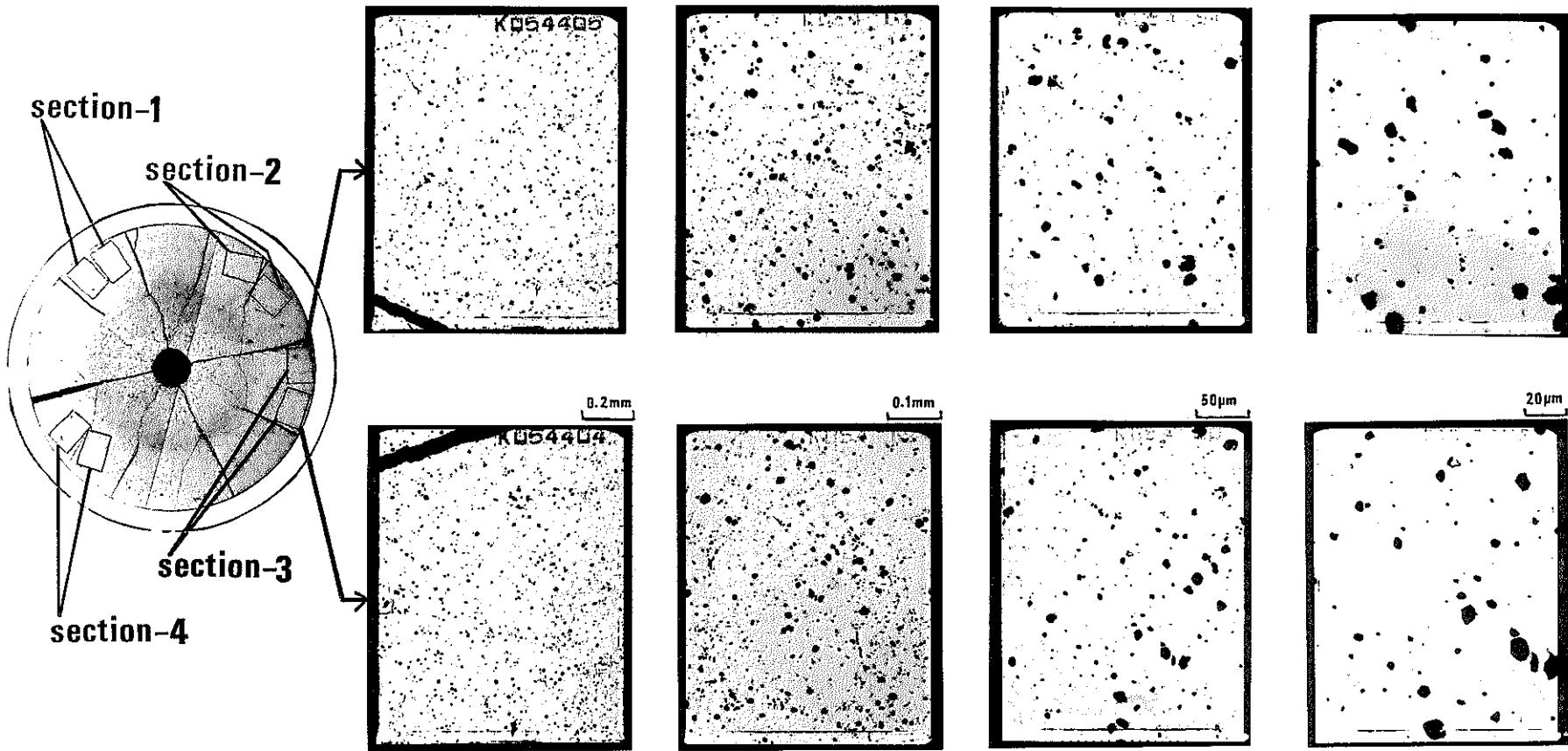


Photo 9 Photomicrographs of JRR-2 ICF-14H YK054 sample (D.F.C.B = 118 mm)<sup>(3)</sup>

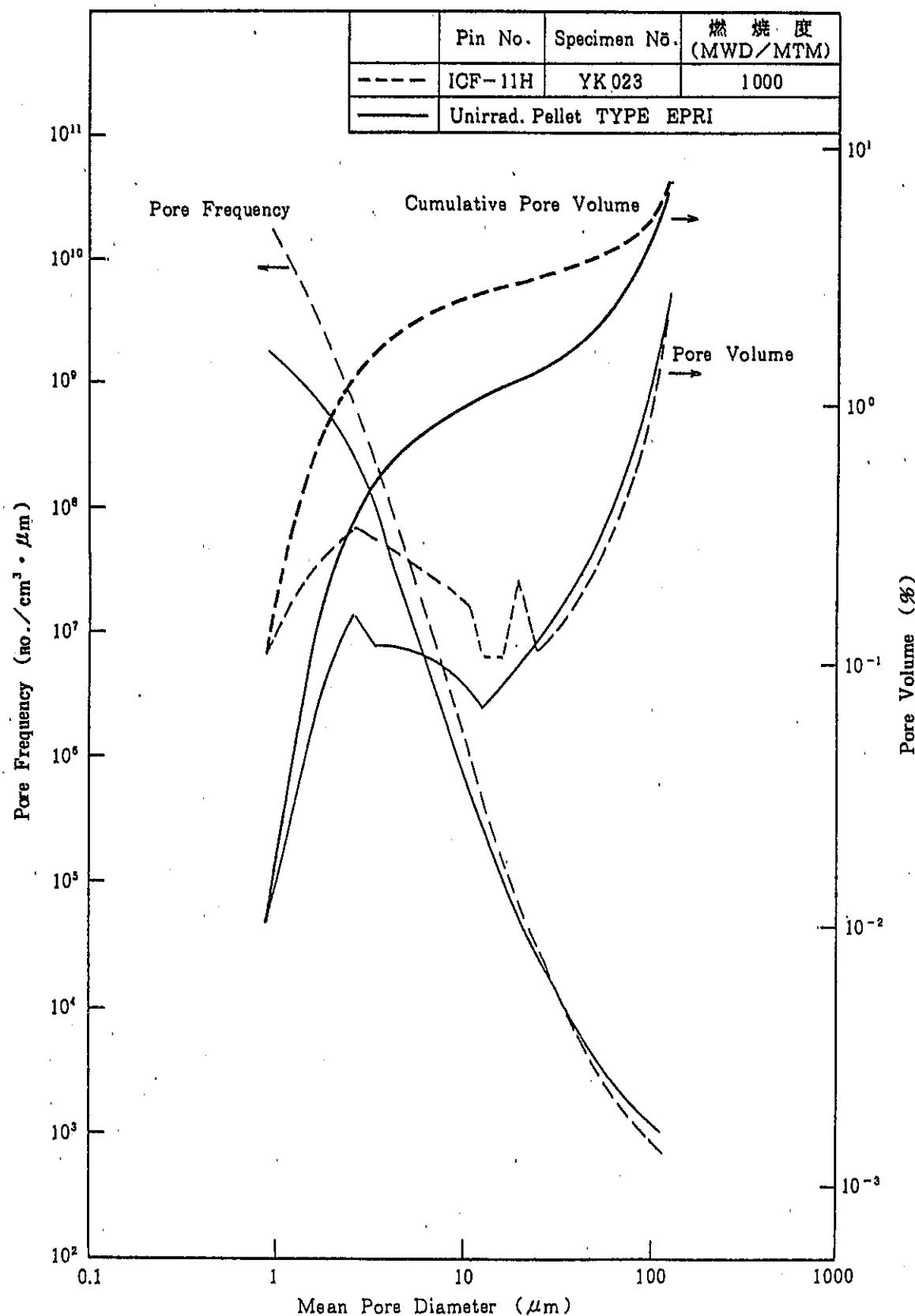


図 19 Pore Distribution of JRR-2 ICF-11H YK023 and unirradiated pellet<sup>(3)</sup>

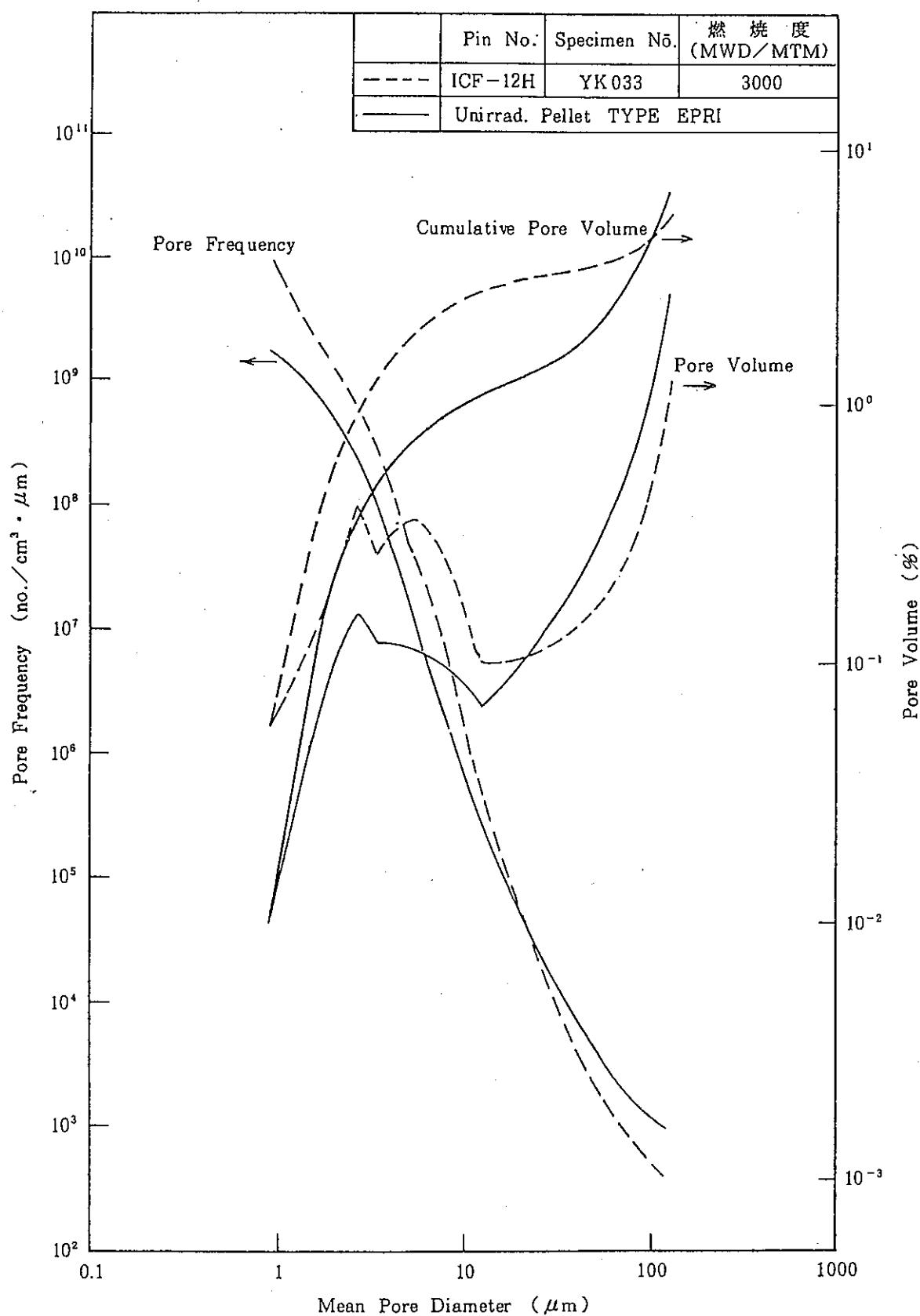


図 20 Pore Distribution of JRR-2 ICF-12 H YK033 and  
unirradiated pellet<sup>(3)</sup>

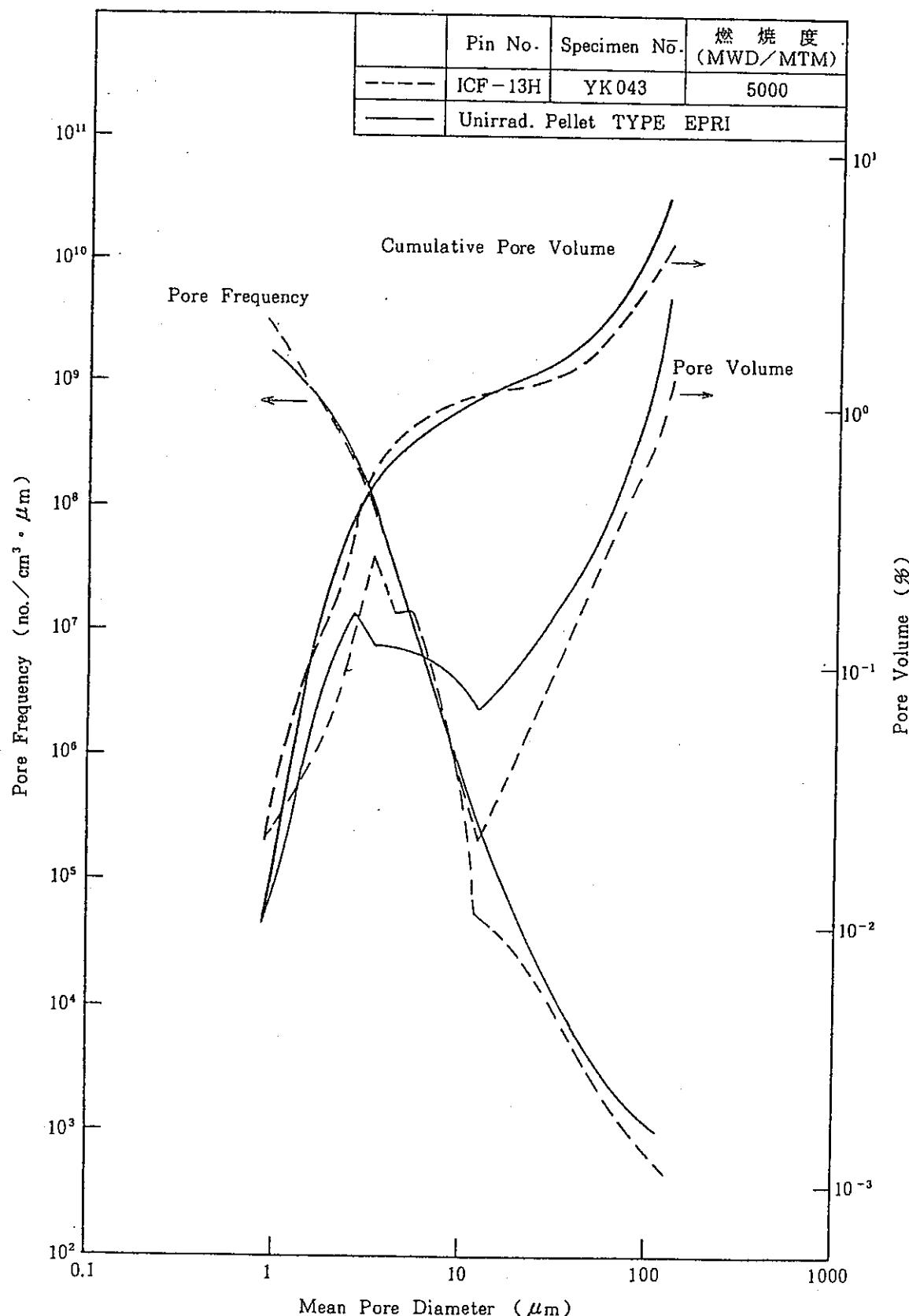


図 21 Pore Distribution of JRR-2 ICF-13H YK043 and unirradiated pellet<sup>(3)</sup>

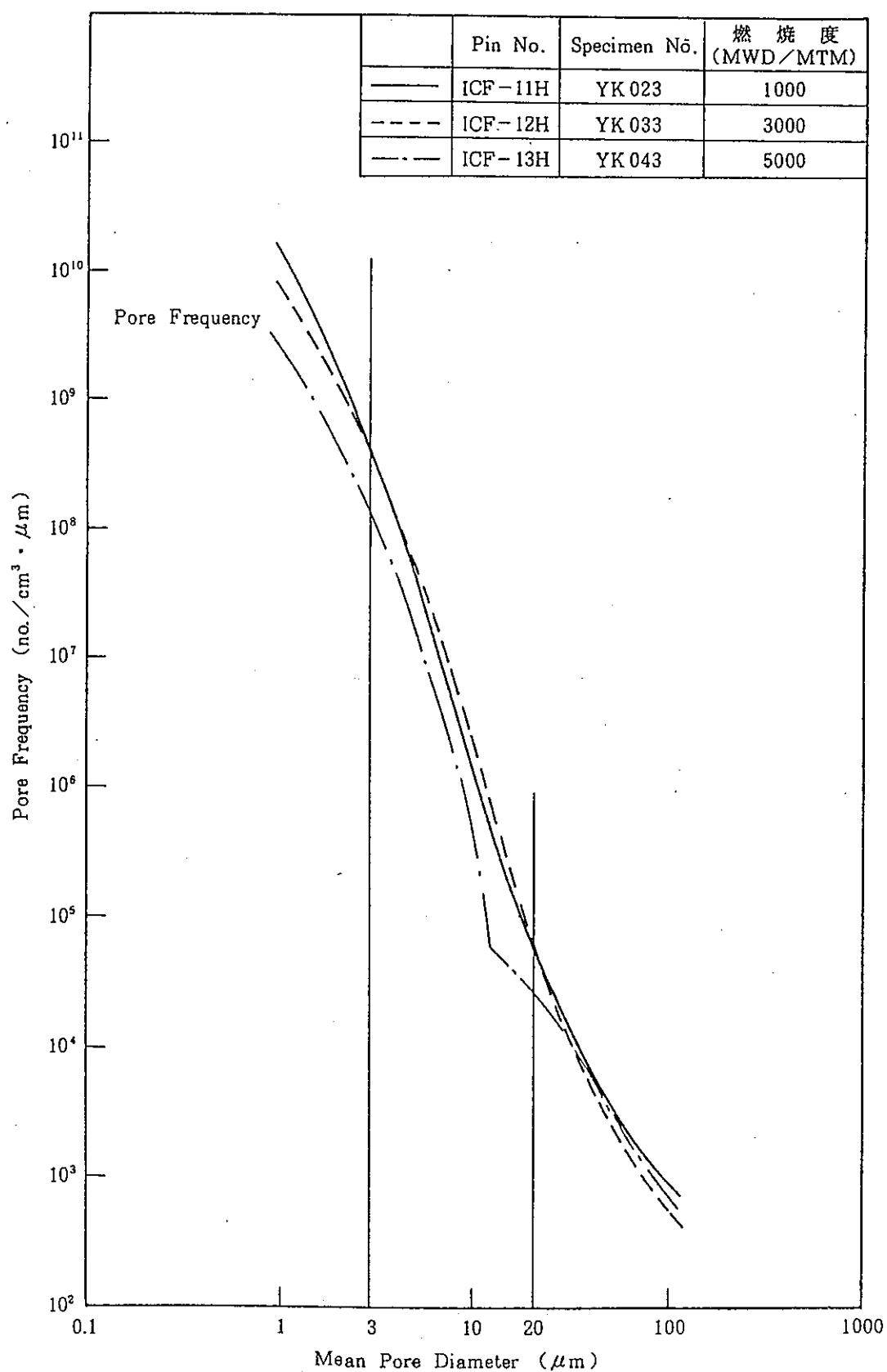


図 22 Pore Distribution of JRR-2 ICF-11 H, -12 H and -13 H<sup>(3)</sup>

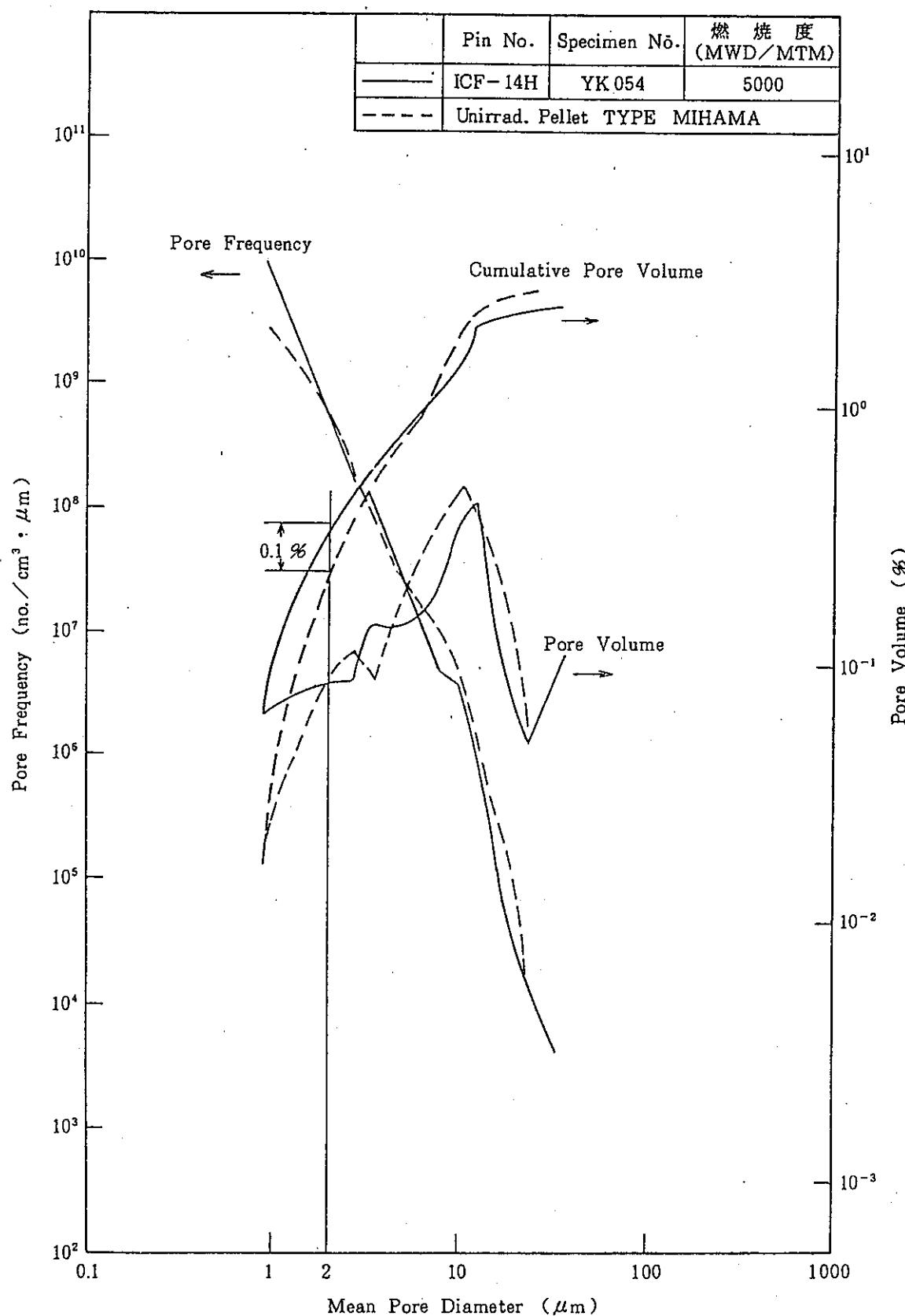


図 23 Pore Distribution of JRR-2 ICF-14H YK054 sample and unirradiated pellet<sup>(3)</sup>

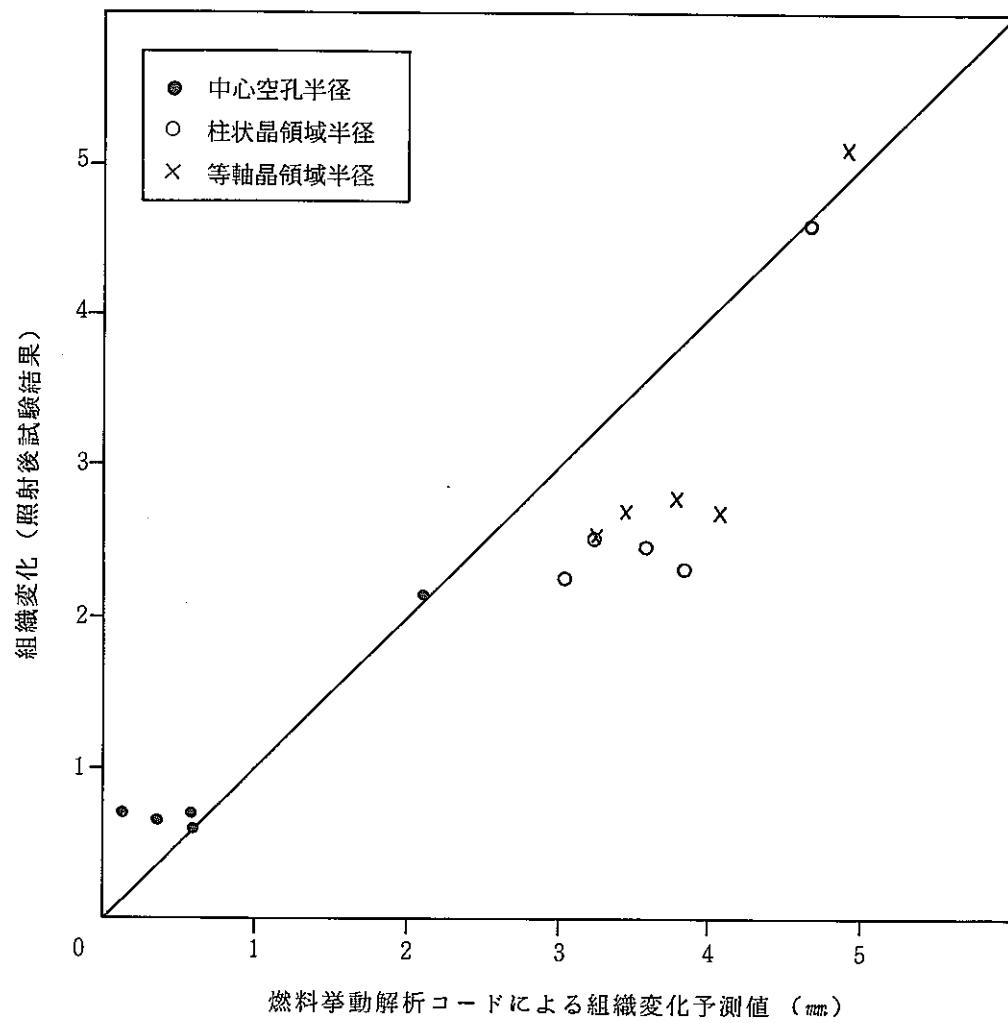


図24 組織変化予測結果

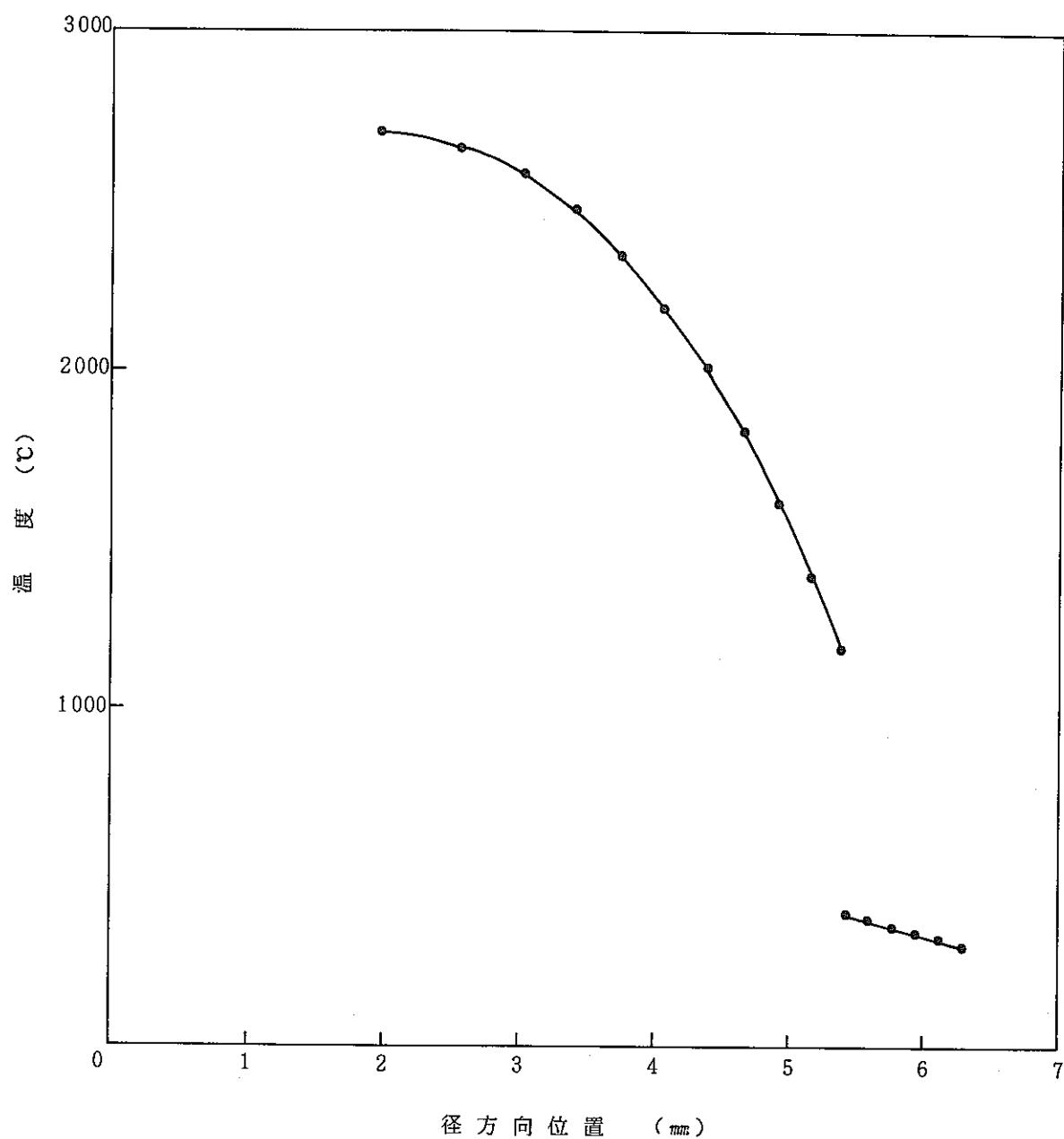


図25 燃料、被覆管径方向温度分布 (ICF - 10H)

(中心温度最高時 22日 0時間50分)

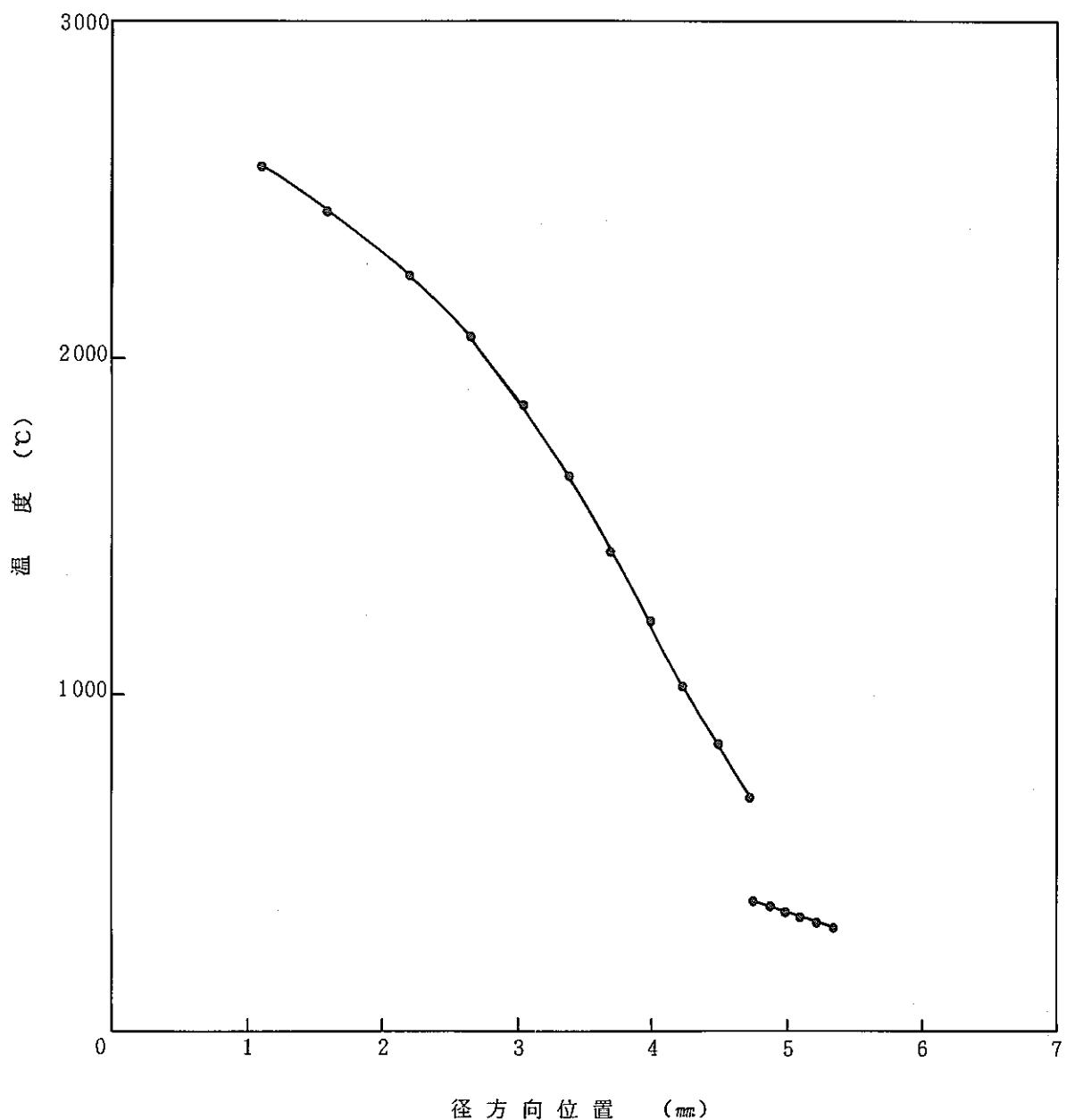


図26 燃料、被覆管径方向温度分布 ( ICF - 11 H )

(中心温度最高時 10日 23時間35分)

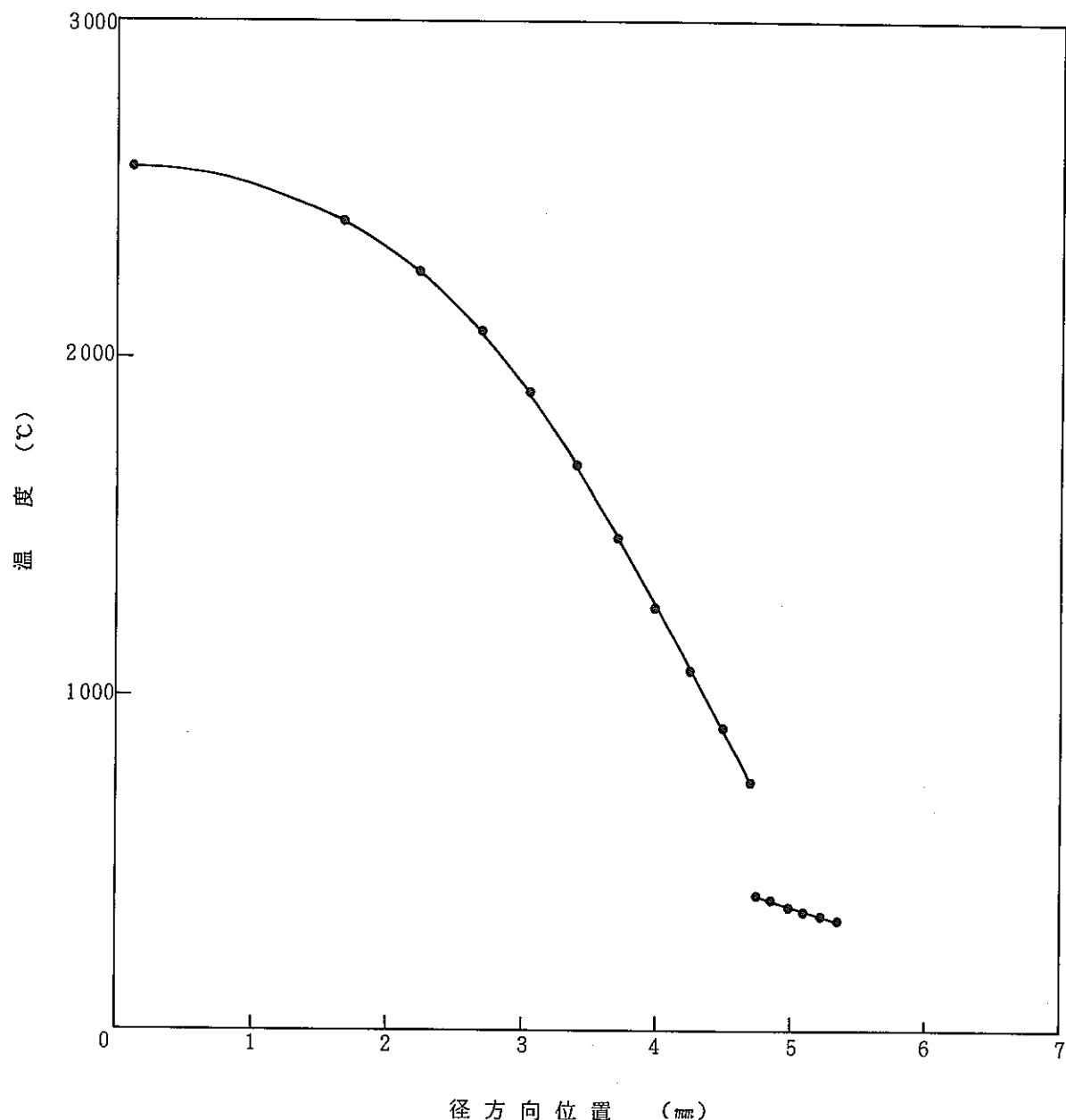


図27 燃料、被覆管径方向温度分布 ( ICF - 12H )

(中心温度最高時 20日 21時間18分2秒)

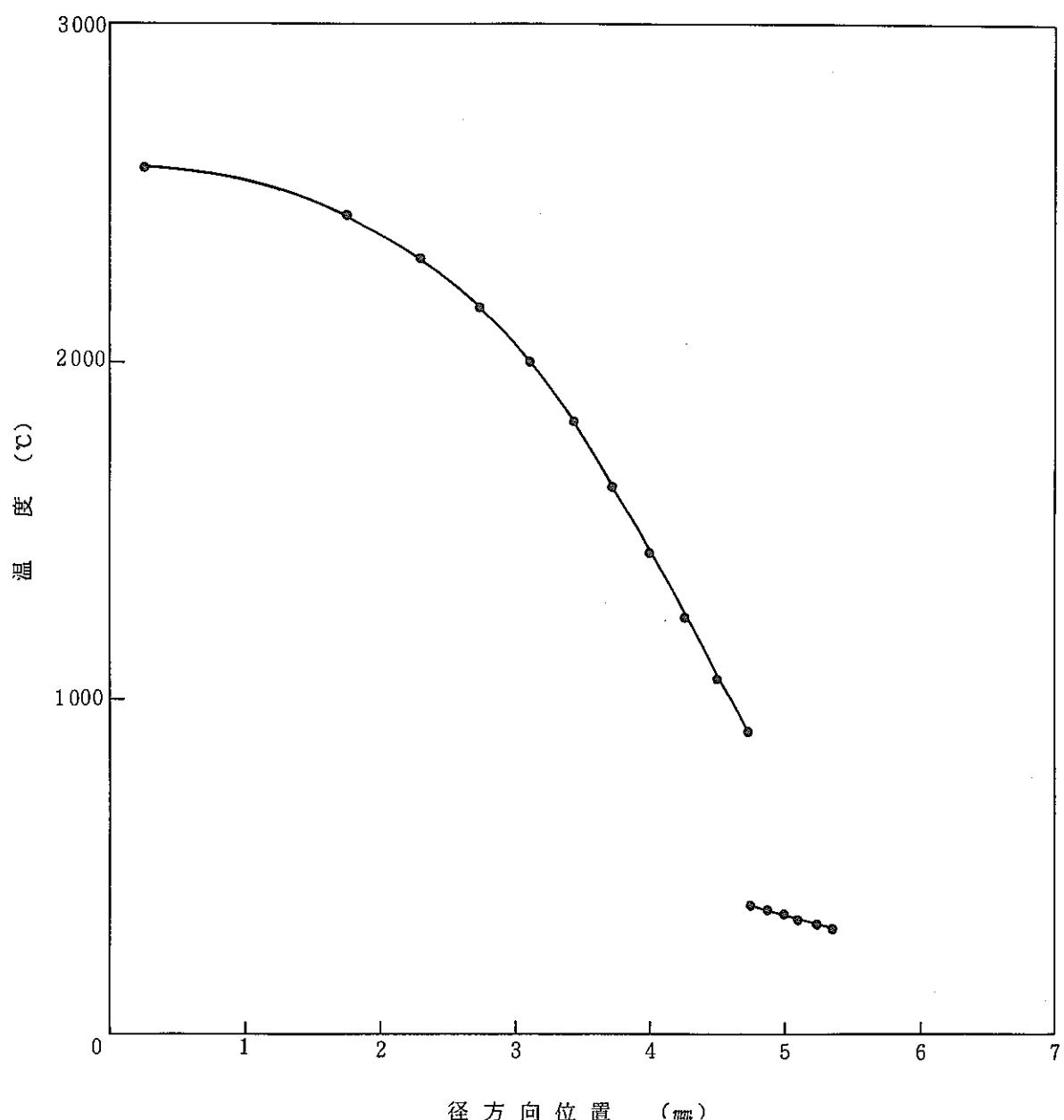


図28 燃料、被覆管径方向温度分布 ( ICF - 13H )

(中心温度最高時 33日 2時間24分1秒)

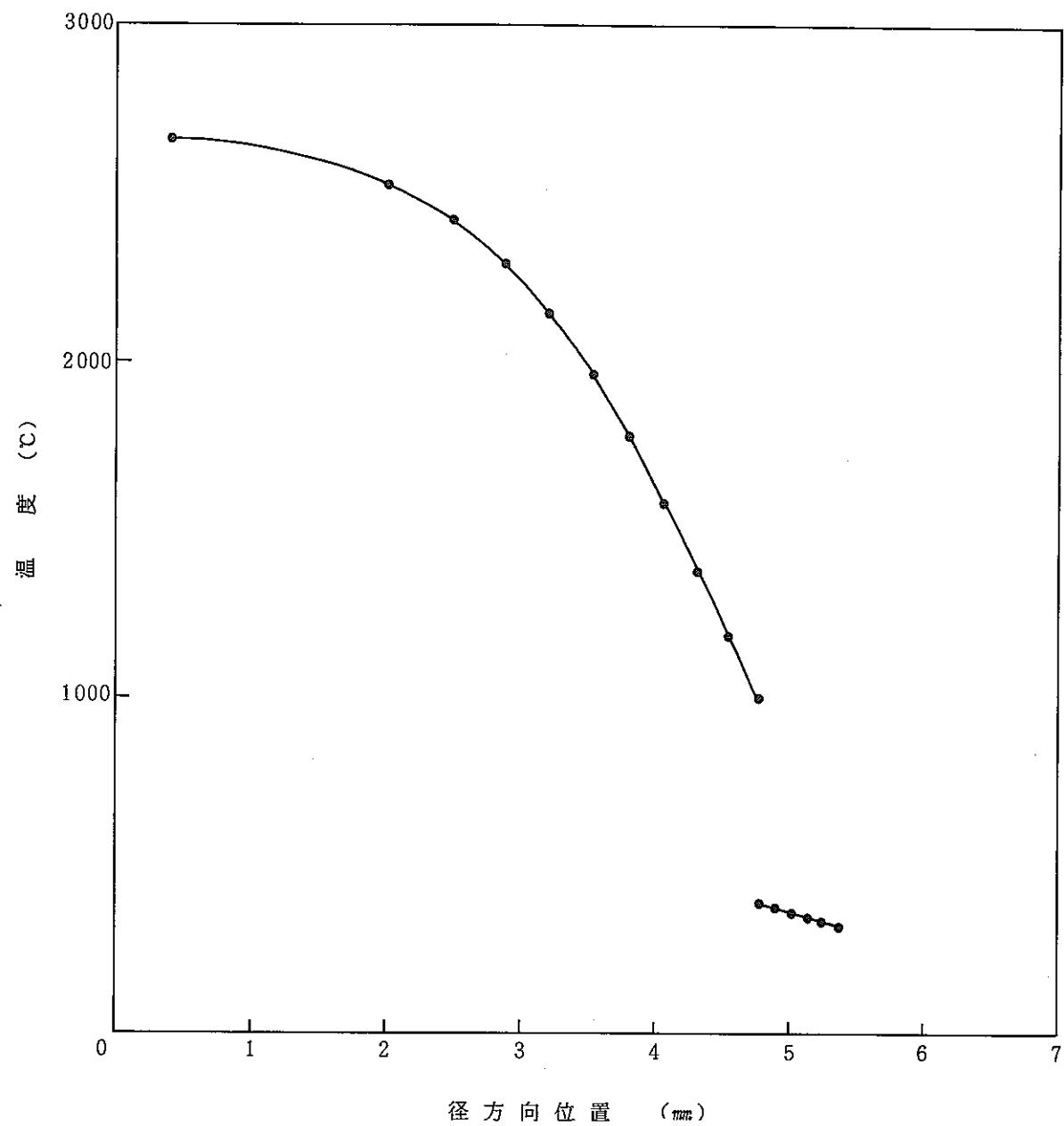


図29 燃料、被覆管径方向温度分布 (ICF - 14 H)

(中心温度最高時 44日 3時間50分)

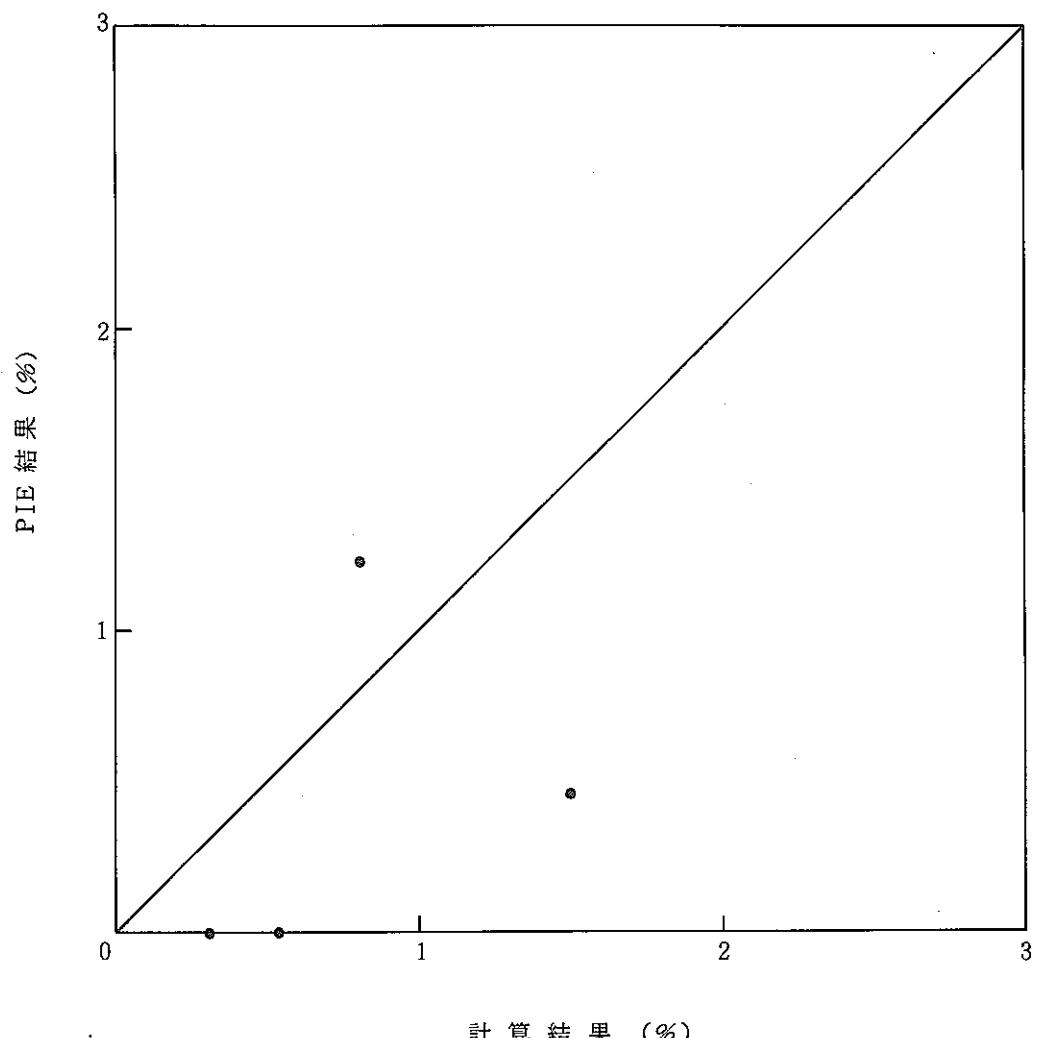


図30 気孔率変化の計算結果とPIE結果の比較  
(モデル1)

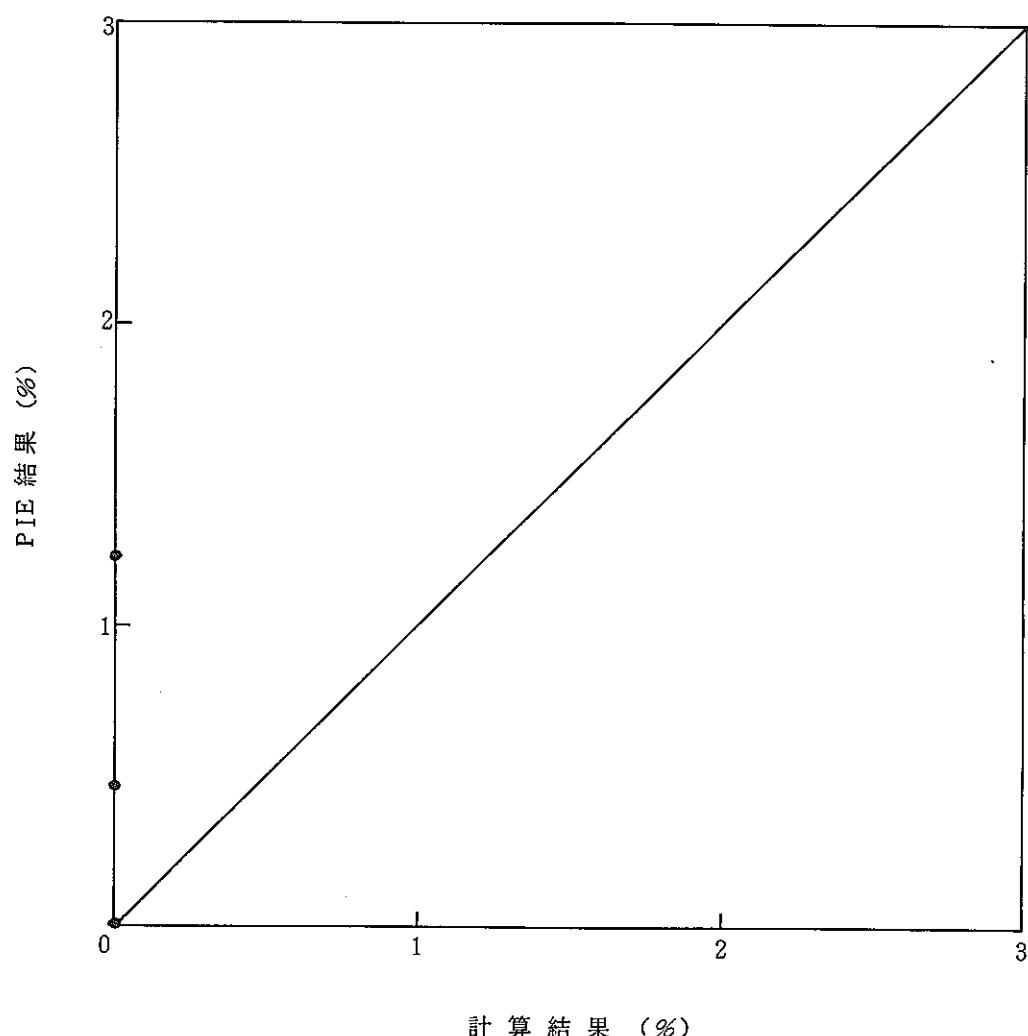


図31 気孔率変化の計算結果と PIE 結果の比較  
(モデル 2)

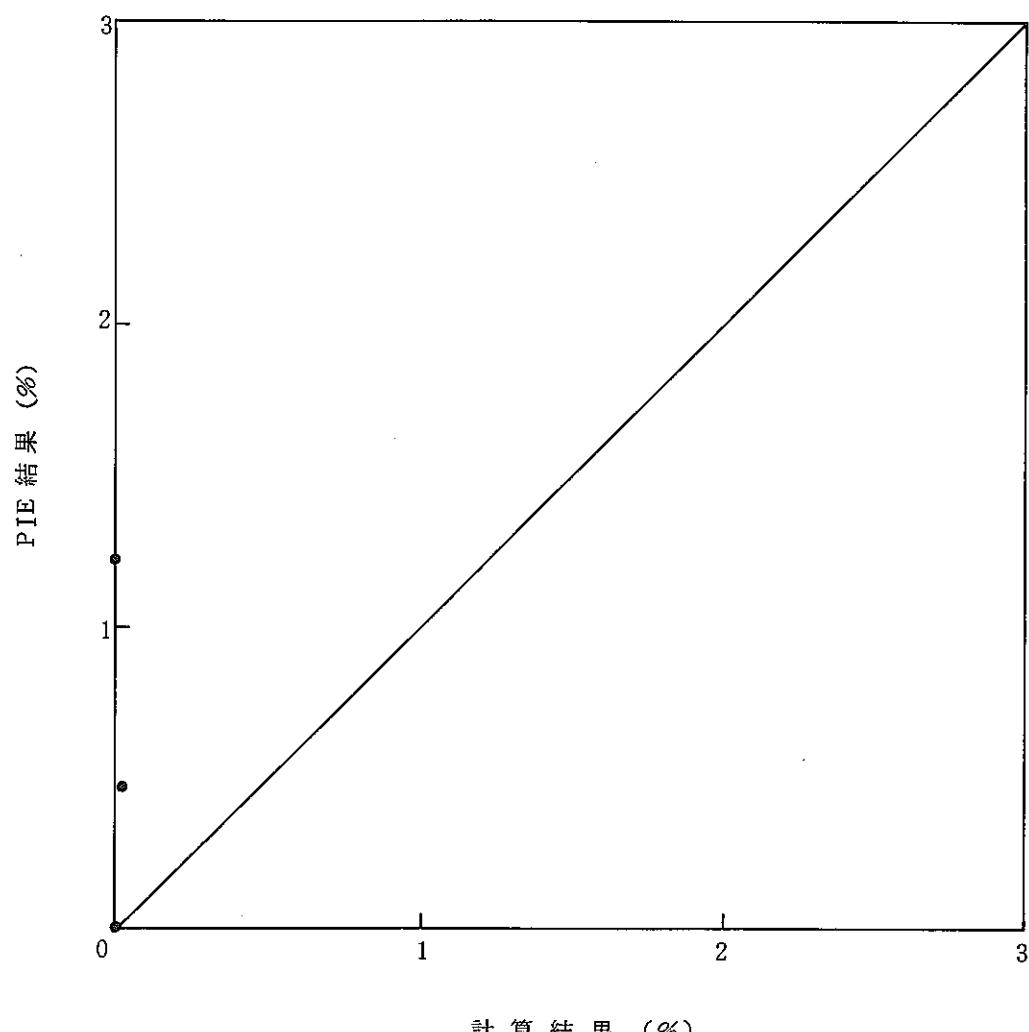


図32 気孔率変化の計算結果とPIE結果の比較  
(モデル3)

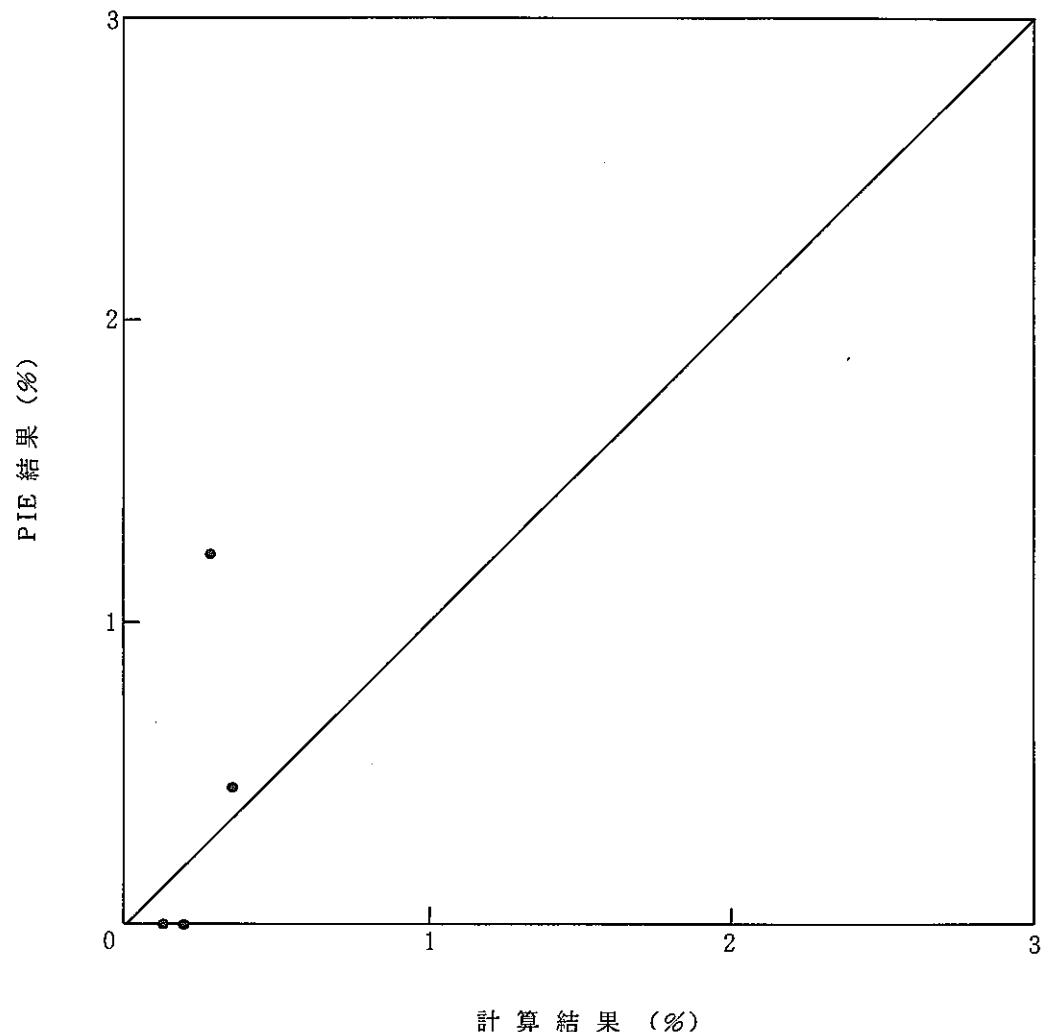


図33 気孔率変化の計算結果と PIE 結果の比較  
(モデル 4)

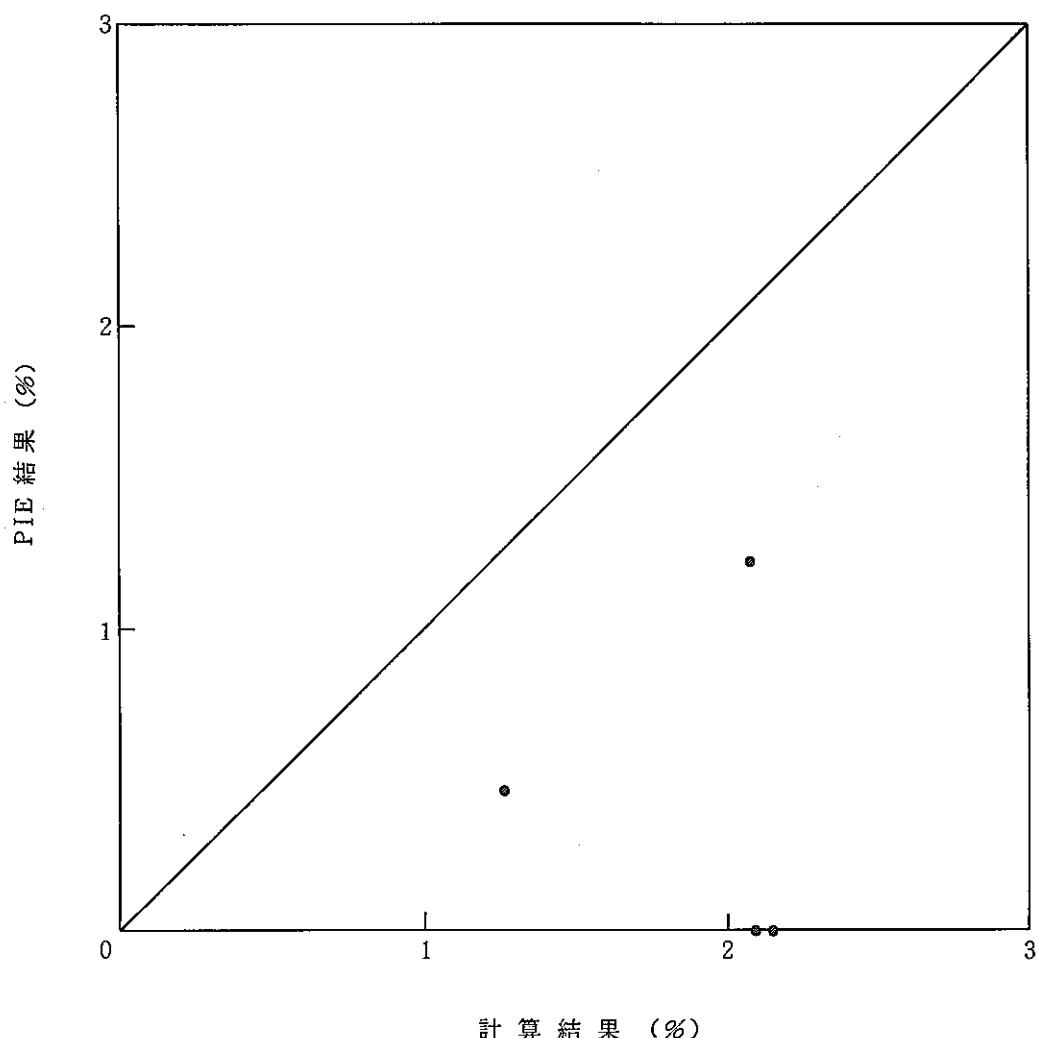


図34 気孔率変化の計算結果とPIE結果の比較  
(モデル5)

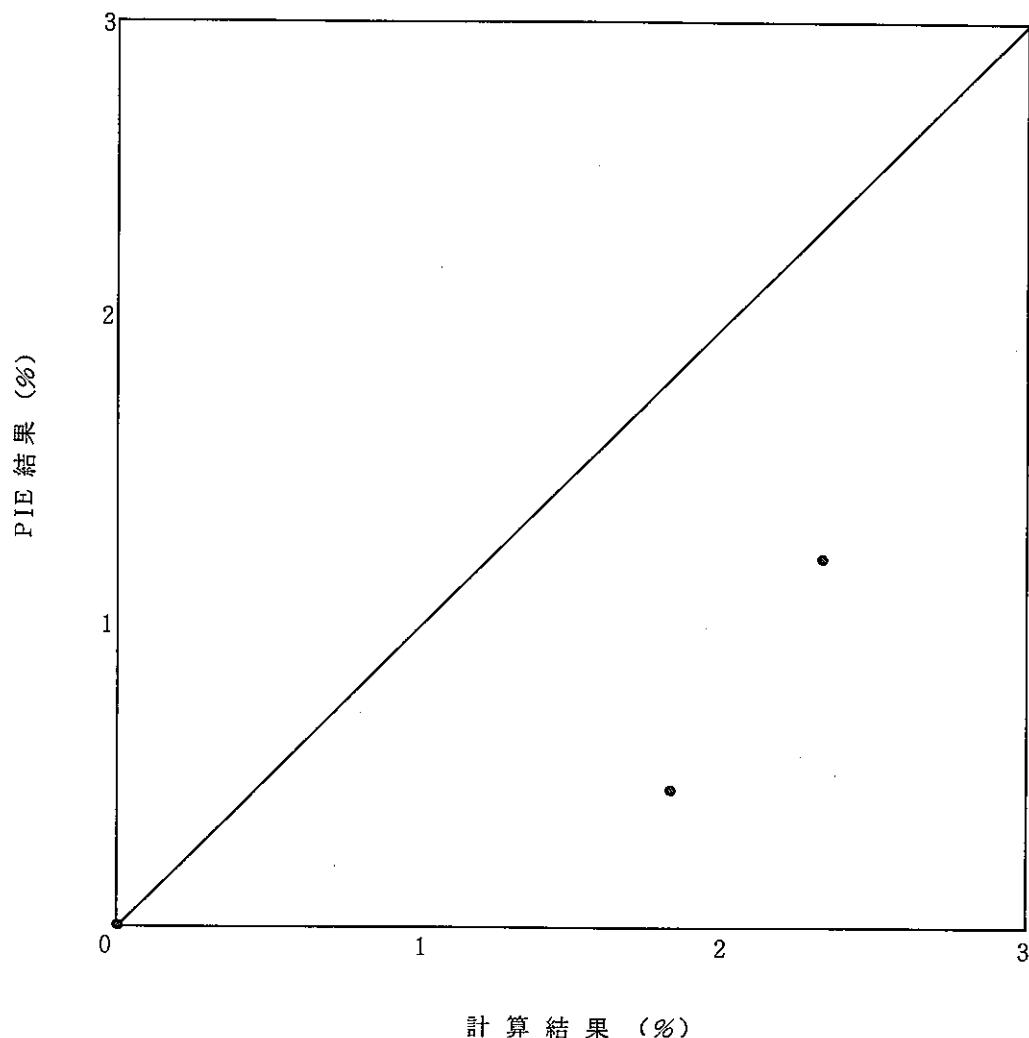


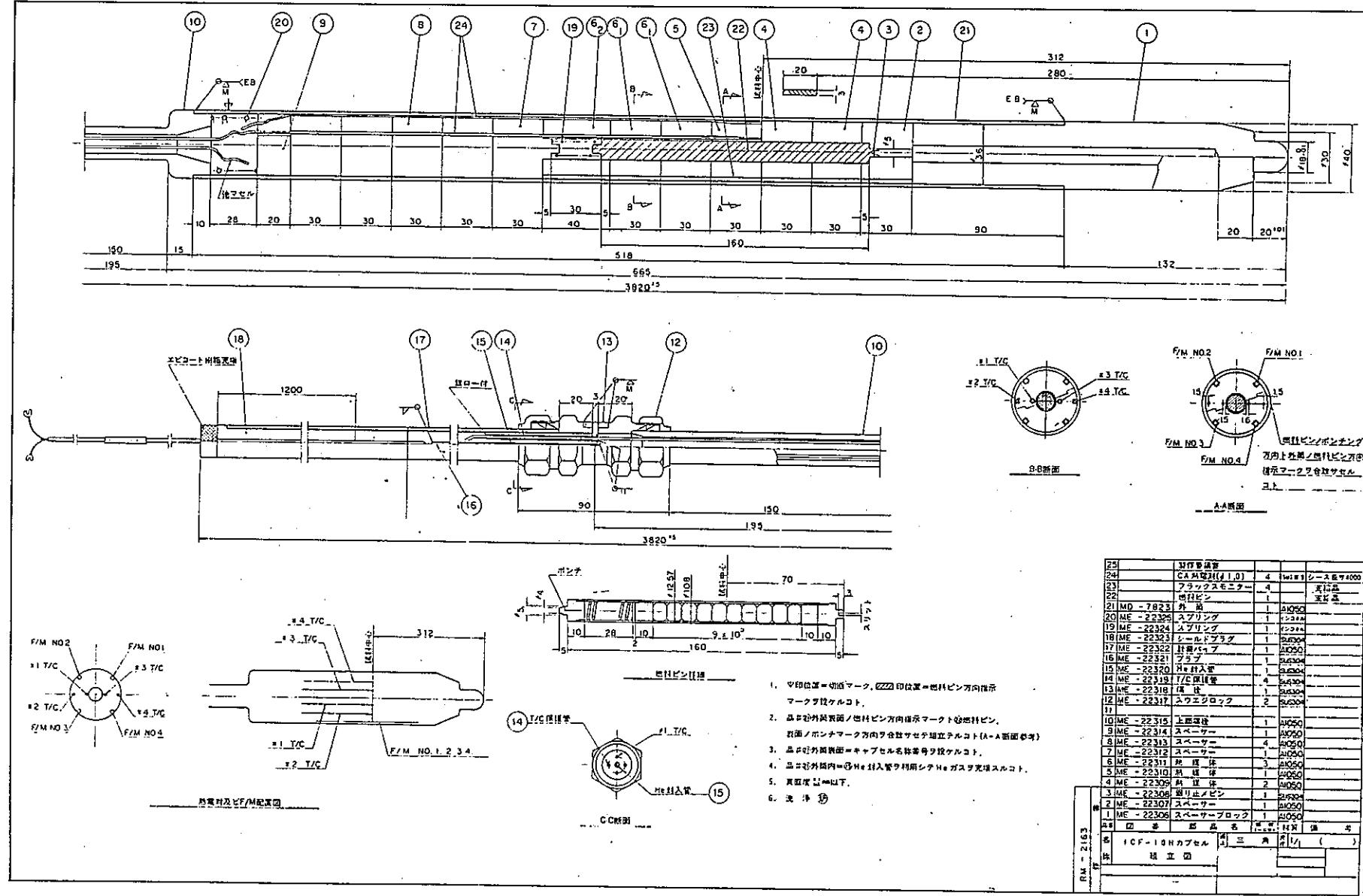
図35 気孔率変化の計算結果とPIE結果の比較  
(モデル6)

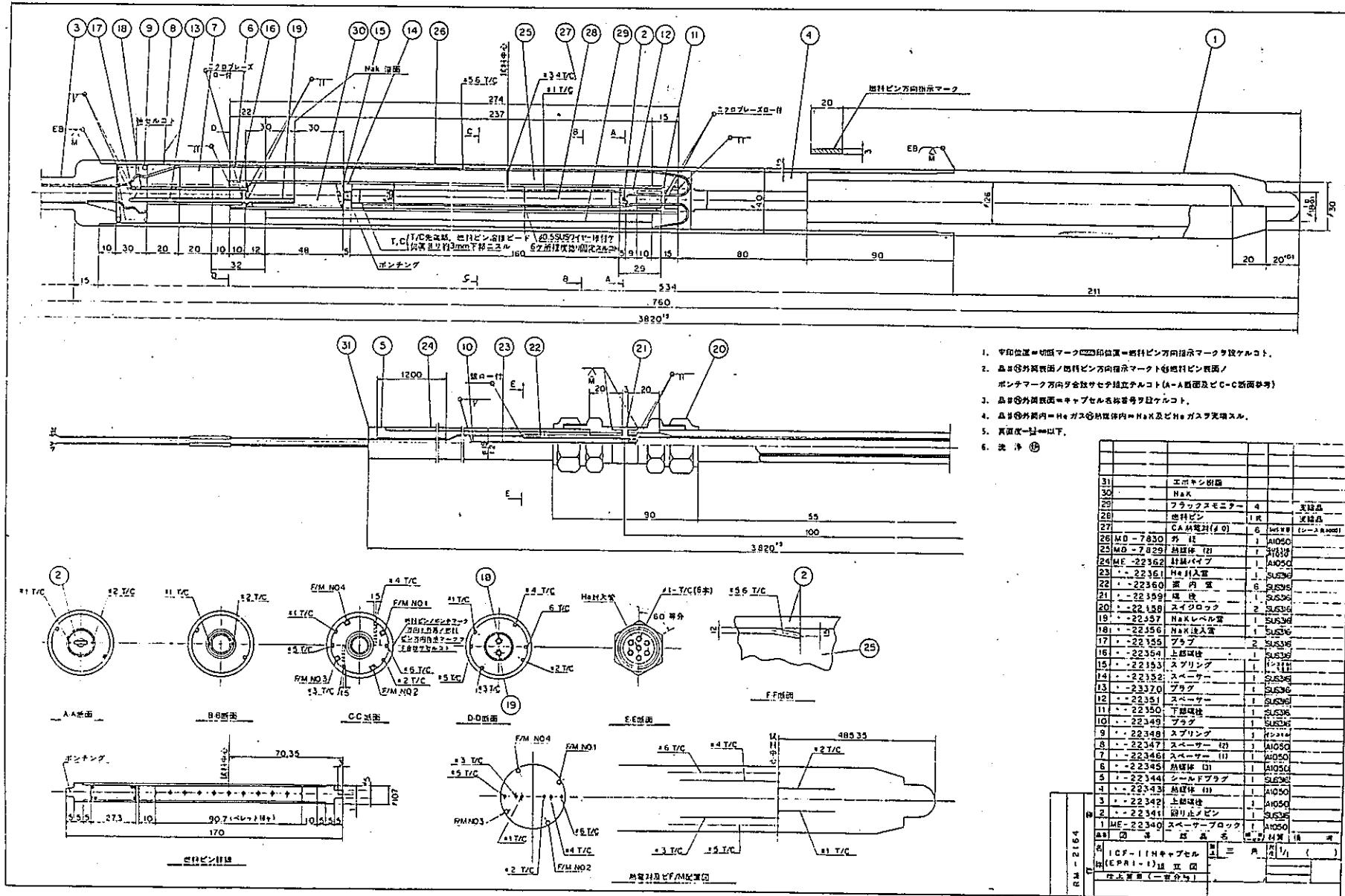
PNC SN8410 88-024

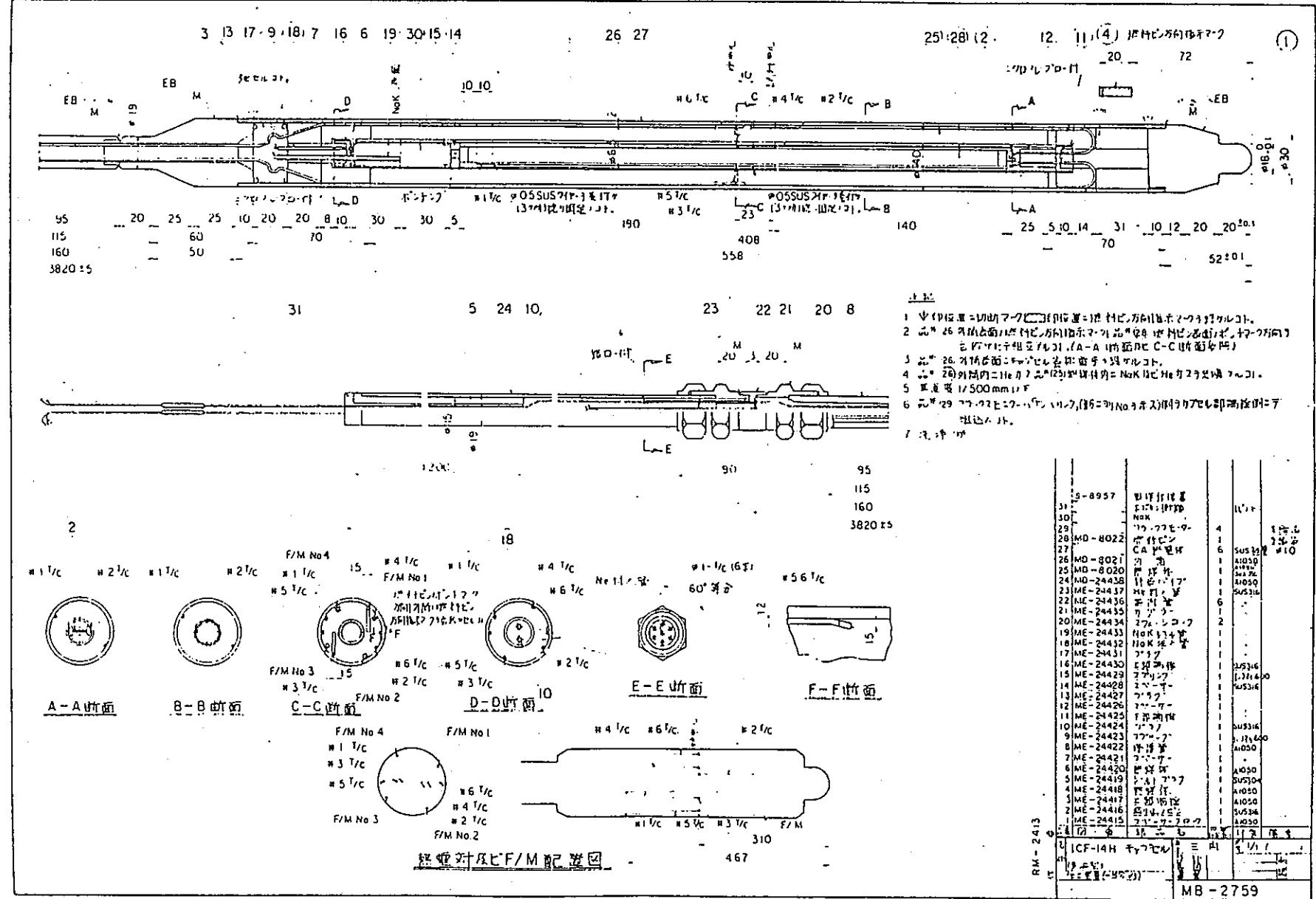
付 錄

## 付録A 溫 度 時 刻 歴

図A-1～3に示す熱電対により照射中に測定された温度を表A-1～5に示す。

図 A-1 ICF-10H キャップセルの概要 (熱電対配置)<sup>(4)</sup>

図 A-2 ICF-11H 12H, 13H キャプセルの概要 (熱電対配置)<sup>(4)(5)</sup>

図 A-3 ICF-14H キャプセルの概要 (熱電対配置)<sup>(5)</sup>

表A-1 溫度時刻歴 (ICF-10H) (1/4)

\* R2-52-06 CYCLE

1977. 9/26 15: 0: 0 10 MW CRITICAL  
 10/ 7 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10MW) 265.5 HRS.

	DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4
	1977 9/26	15:10: 0	330.0	298.0	338.0	298.0
	1977 9/27	10: 0: 0	340.0	303.0	348.0	308.0
	1977 9/28	11: 0: 0	340.0	300.0	345.0	305.0
	1977 9/29	10: 0: 0	340.0	300.0	345.0	306.0
	1977 9/30	9: 0: 0	340.0	300.0	345.0	306.0
	1977 10/ 1	10: 0: 0	340.0	300.0	345.0	306.0
	1977 10/ 2	10: 0: 0	340.0	300.0	347.0	308.0
	1977 10/ 3	13: 0: 0	340.0	300.0	345.0	307.0
	1977 10/ 4	10:20: 0	338.0	300.0	343.0	305.0
	1977 10/ 5	10: 0: 0	338.0	300.0	343.0	305.0
	1977 10/ 6	11: 0: 0	338.0	300.0	345.0	305.0
	1977 10/ 7	10: 0: 0	338.0	300.0	345.0	305.0
	1977 10/ 7	16:30: 0		SHUTDOWN		

表A-1 溫度時刻歴 (ICF-10H) (2/4)

\* R2-52-07 CYCLE

1977. 10/17 15: 0: 0 10 MW CRITICAL  
 10/28 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10 MW) 531.0 HRS.

	DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4
	1977 10/17	15:30: 0	333.0	296.0	342.0	300.0
	1977 10/18	9:50: 0	337.0	298.0	347.0	303.0
	1977 10/19	9:30: 0	336.0	298.0	346.0	300.0
	1977 10/20	9:30: 0	335.0	298.0	345.0	300.0
	1977 10/21	9:30: 0	334.0	298.0	343.0	300.0
	1977 10/22	9:30: 0	334.0	298.0	345.0	300.0
	1977 10/23	9:30: 0	335.0	298.0	346.0	302.0
	1977 10/24	10: 0: 0	334.0	298.0	345.0	300.0
	1977 10/25	9:35: 0	335.0	296.0	345.0	300.0
	1977 10/26	10:10: 0	335.0	298.0	345.0	301.0
	1977 10/27	9:30: 0	333.0	296.0	343.0	298.0
	1977 10/28	9:40: 0	332.0	296.0	342.0	300.0
	1977 10/28	16:30: 0	SHUTDOWN			

表A-1 溫度時刻歴 (ICF-10H) (3/4)

\* R2-52-08 CYCLE

1977. 11/ 7 15: 0: 0 10MW CRITICAL  
 11/18 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10 MW) 758.6 HRS.

DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4
1977 11/ 7	16:40: 0	334.0	298.0	344.0	300.0
1977 11/ 8	9:40: 0	338.0	300.0	348.0	302.0
1977 11/ 9	10: 0: 0	334.0	300.0	348.0	302.0
1977 11/10	10: 0: 0	334.0	298.0	344.0	300.0
1977 11/11	10:10: 0	334.0	298.0	345.0	299.0
1977 11/11	21:35: 0	334.0	298.0	345.0	299.0
1977 11/11	21:35: 1	SCRAM			
1977 11/13	11:30:59	10 MW CRITICAL			
1977 11/13	11:31: 0	335.0	298.0	346.0	300.0
1977 11/14	9:45: 0	335.0	298.0	346.0	300.0
1977 11/15	10:10: 0	333.0	297.0	346.0	300.0
1977 11/16	9:35: 0	332.0	297.0	345.0	299.0
1977 11/17	16:45: 0	332.0	298.0	348.0	300.0
1977 11/18	9:55: 0	332.0	298.0	345.0	300.0
1977 11/18	16:30: 0	SHUTDOWN			

表A-1 溫度時刻歴 (ICF-10H) (4/4)

\* R2-52-09 CYCLE

1977. 11/28 15: 0: 0 10 MW CRITICAL  
 12/ 9 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10 MW) 1024.1 HRS.

	DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4
	1977 11/28	16: 0: 0	330.0	295.0	342.0	298.0
	1977 11/29	13:55: 0	334.0	298.0	345.0	298.0
	1977 11/30	9:30: 0	331.0	294.0	342.0	298.0
	1977 12/ 1	17: 0: 0	331.0	294.0	342.0	298.0
	1977 12/ 2	10: 0: 0	330.0	294.0	342.0	298.0
	1977 12/ 3	9:40: 0	331.0	295.0	342.0	298.0
	1977 12/ 4	10:10: 0	332.0	298.0	345.0	300.0
	1977 12/ 5	15: 0: 0	333.0	298.0	348.0	302.0
	1977 12/ 7	13: 0: 0	332.0	295.0	343.0	298.0
	1977 12/ 8	10:20: 0	331.0	295.0	344.0	298.0
	1977 12/ 9	9:40: 0	332.0	295.0	344.0	298.0
	1977 12/ 9	16:30: 0	SHUTDOWN			

表A-2 溫度時刻歴 (ICF-11H) (1/2)

\* R2-52-07 CYCLE

1977. 10/17 15: 0: 0 10 MW CRITICAL  
10/28 16:30: 0 SHUT DOWN  
TOTAL IRRADIATION (10 MW) 265.5 HRS.

DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
1977 10/17	15:30: 0	300.0	75.0	180.0	174.0	171.0	163.0
1977 10/18	9:50: 0	310.0	80.0	188.0	183.0	158.0	150.0
1977 10/19	9:30: 0	310.0	78.0	188.0	183.0	158.0	150.0
1977 10/20	9:30: 0	310.0	78.0	188.0	183.0	158.0	150.0
1977 10/21	9:30: 0	310.0	78.0	188.0	184.0	158.0	151.0
1977 10/22	9:30: 0	311.0	78.0	190.0	186.0	158.0	151.0
1977 10/23	9:30: 0	312.0	80.0	191.0	188.0	160.0	152.0
1977 10/24	10: 0: 0	312.0	80.0	190.0	186.0	160.0	150.0
1977 10/25	9:35: 0	310.0	79.0	190.0	185.0	159.0	150.0
1977 10/26	10:10: 0	311.0	79.0	190.0	185.0	158.0	151.0
1977 10/27	9:30: 0	309.0	78.0	188.0	183.0	157.0	150.0
1977 10/28	9:45: 0	310.0	79.0	189.0	184.0	158.0	150.0
1977 10/28	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-2 溫度時刻歴 (ICF-11H) (2/2)

\* R2-52-08 CYCLE

1977. 11/ 7 15: 0: 0 10 MW CRITICAL  
                  11/18 16:30: 0 SHUT DOWN  
                  TOTAL IRRADIATION (10 MW) 493.1 HRS.

DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
1977 11/ 7	16:40: 0	311.0	75.0	180.0	175.0	152.0	146.0
1977 11/ 8	9:40: 0	325.0	78.0	188.0	182.0	157.0	150.0
1977 11/ 9	10: 0: 0	322.0	76.0	184.0	180.0	154.0	148.0
1977 11/10	10: 0: 0	320.0	76.0	184.0	180.0	153.0	148.0
1977 11/11	10:10: 0	319.0	75.0	183.0	179.0	153.0	147.0
1977 11/11	21:35: 0	319.0	75.0	183.0	179.0	153.0	147.0
1977 11/11	21:35: 1	SCRAM					
1977 11/13	11:31: 0	10 MW CRITICAL					
1977 11/13	11:31: 1	322.0	78.0	188.0	182.0	158.0	150.0
1977 11/14	9:45: 0	322.0	78.0	188.0	182.0	158.0	150.0
1977 11/15	10:10: 0	321.0	77.0	185.0	180.0	154.0	149.0
1977 11/16	9:35: 0	321.0	78.0	185.0	180.0	154.0	149.0
1977 11/17	16:45: 0	324.0	80.0	190.0	182.0	160.0	150.0
1977 11/18	9:55: 0	323.0	79.0	188.0	182.0	157.0	150.0
1977 11/18	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-3 溫度時刻歷 (ICF-12H) (1/4)

\* R 2-53-02 CYCLE

1978. 5/29 15: 0: 0 10 MW CRITICAL  
 6/ 9 16:30: 1 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10 MW) 234.3 HRS.

	DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
1978	5/29	19: 0: 0	305.0	70.0	170.0	168.0	136.0	142.0
1978	5/30	10: 0: 0	302.0	72.0	172.0	170.0	140.0	146.0
1978	5/31	9:20: 0	304.0	72.0	178.0	172.0	142.0	149.0
1978	5/31	14:30: 0	304.0	72.0	178.0	172.0	142.0	149.0
1978	5/31	14:30: 1	SCRAM					
1978	6/ 1	21:43: 0	10 MW CRITICAL					
1978	6/ 1	21:43: 1	327.0	72.0	178.0	172.0	141.0	149.0
1978	6/ 2	10:35: 0	327.0	72.0	178.0	172.0	141.0	149.0
1978	6/ 3	9:30: 0	327.0	72.0	178.0	172.0	141.0	150.0
1978	6/ 4	12:20: 0	327.0	72.0	177.0	172.0	141.0	149.0
1978	6/ 5	9:30: 0	328.0	72.0	178.0	173.0	141.0	150.0
1978	6/ 6	9:30: 0	328.0	72.0	178.0	173.0	141.0	150.0
1978	6/ 7	10: 0: 0	328.0	71.0	178.0	173.0	141.0	150.0
1978	6/ 8	17:50: 0	323.0	72.0	178.0	174.0	141.0	150.0
1978	6/ 9	16:30: 0	328.0	71.0	174.0	174.0	141.0	150.0
1978	6/ 9	16:30: 1	SHUTDOWN					

表A-3 溫度時刻歴 (ICF-12H) (2/4)

\* R 2-53-03 CYCLE

1978. 6/19 15: 0: 0 10 MW CRITICAL  
 6/30 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10 MW) 499.8 HRS.

	DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
-72-	1978 6/19	15:20: 0	312.0	70.0	172.0	168.0	138.0	144.0
	1978 6/20	9:20: 0	330.0	73.0	180.0	178.0	142.0	150.0
	1978 6/21	10:20: 0	330.0	75.0	180.0	178.0	142.0	150.0
	1978 6/22	10: 0: 0	328.0	74.0	178.0	176.0	142.0	150.0
	1978 6/23	13:20: 0	328.0	72.0	178.0	176.0	142.0	150.0
	1978 6/24	9:30: 0	328.0	74.0	180.0	176.0	142.0	150.0
	1978 6/25	10:30: 0	332.0	74.0	182.0	180.0	146.0	152.0
	1978 6/26	11:20: 0	330.0	78.0	180.0	178.0	144.0	152.0
	1978 6/27	13:10: 0	330.0	74.0	180.0	178.0	142.0	150.0
	1978 6/28	10:40: 0	326.0	70.0	178.0	175.0	140.0	150.0
	1978 6/29	13:30: 0	330.0	72.0	180.0	176.0	140.0	150.0
	1978 6/30	13:40: 0	328.0	72.0	180.0	176.0	142.0	150.0
	1978 6/30	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-3 溫度時刻歴 (ICF-12H) (3/4)

\* R 2-53-04 CYCLE

1978. 7/10 15: 0: 0 10MW CRITICAL  
 7/21 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10MW) 765.3 HRS.

	DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
-73-	1978 7/10	16:50: 0	312.0	74.0	173.0	175.0	140.0	152.0
	1978 7/11	11:30: 0	316.0	74.0	175.0	176.0	141.0	153.0
	1978 7/12	17: 0: 0	312.0	74.0	174.0	176.0	141.0	153.0
	1978 7/13	9:30: 0	313.0	76.0	175.0	177.0	140.0	152.0
	1978 7/14	9:47: 0	312.0	74.0	174.0	175.0	138.0	152.0
	1978 7/15	8:50: 0	312.0	74.0	174.0	175.0	138.0	152.0
	1978 7/16	10:20: 0	313.0	74.0	175.0	176.0	139.0	152.0
	1978 7/17	9:26: 0	313.0	74.0	175.0	177.0	139.0	153.0
	1978 7/18	9:33: 0	313.0	74.0	175.0	178.0	140.0	153.0
	1978 7/19	9:37: 0	319.0	74.0	177.0	179.0	140.0	154.0
	1978 7/20	10:30: 0	319.0	75.0	178.0	179.0	140.0	154.0
	1978 7/21	11: 0: 0	319.0	75.0	178.0	179.0	140.0	154.0
	1978 7/21	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-3 溫度時刻歴 (ICF-12H) (4/4)

\* R 2-53-05 CYCLE

1978. 9/ 4 15: 0: 0 10MW CRITICAL

9/15 16:30: 0 SHUT DOWN

TOTAL IRRADIATION (10MW) 1030.8 HRS.

DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
1978 9/ 4	15:20: 0	310.0	70.0	170.0	170.0	140.0	148.0
1978 9/ 5	9:30: 0	318.0	72.0	175.0	175.0	140.0	150.0
1978 9/ 6	16:30: 0	310.0	70.0	173.0	175.0	140.0	150.0
1978 9/ 7	17: 0: 0	315.0	72.0	175.0	175.0	140.0	150.0
1978 9/ 8	16: 0: 0	315.0	72.0	175.0	175.0	140.0	150.0
1978 9/ 9	10:15: 0	315.0	70.0	177.0	177.0	140.0	150.0
1978 9/10	12: 0: 0	318.0	78.0	179.0	179.0	142.0	152.0
1978 9/11	11:10: 0	320.0	75.0	180.0	180.0	142.0	155.0
1978 9/12	10:50: 0	320.0	77.0	180.0	178.0	142.0	155.0
1978 9/13	15: 0: 0	320.0	77.0	180.0	180.0	140.0	150.0
1978 9/14	9:30: 0	320.0	72.0	178.0	180.0	142.0	155.0
1978 9/15	16: 0: 0	320.0	75.0	180.0	180.0	142.0	155.0
1978 9/15	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-4 溫度時刻歴 (ICF - 13H) (1/6)

\* R 2-53-07 CYCLE

1978. 10/16 15: 0: 0 10MW CRITICAL

10/27 16:30: 0 SHUT DOWN

TOTAL IRRADIATION (10MW) 264.6 HRS.

DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
1978 10/16	17:52: 0	300.0	60.0	143.0	152.0	117.0	112.0
1978 10/17	11: 0: 0	312.0	62.0	147.0	157.0	118.0	125.0
1978 10/18	9:30: 0	312.0	62.0	147.0	157.0	118.0	125.0
1978 10/19	9:30: 0	312.0	65.0	150.0	158.0	120.0	128.0
1978 10/20	10: 0: 0	316.0	66.0	150.0	160.0	120.0	128.0
1978 10/20	23:21: 0	316.0	66.0	150.0	160.0	120.0	128.0
1978 10/20	23:21: 1	SCRAM					
1978 10/21	0:13: 0	10MW CRITICAL					
1978 10/21	0:13: 1	325.0	63.0	150.0	160.0	120.0	128.0
1978 10/21	9:30: 0	325.0	63.0	150.0	160.0	120.0	130.0
1978 10/22	10:30: 0	322.0	63.0	150.0	160.0	120.0	128.0
1978 10/23	9:30: 0	322.0	62.0	150.0	160.0	120.0	128.0
1978 10/24	10:50: 0	320.0	66.0	152.0	161.0	120.0	130.0
1978 10/25	9:30: 0	320.0	65.0	152.0	161.0	122.0	130.0
1978 10/26	9:30: 0	320.0	65.0	152.0	161.0	122.0	130.0
1978 10/27	10:30: 0	320.0	65.0	152.0	161.0	122.0	130.0
1978 10/27	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-4 溫度時刻歴 (ICF-13H) (2/6)

\* R 2-53-08 CYCLE

1978. 11/ 6 15: 0: 0 10MW CRITICAL  
 11/17 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10MW) 530.1 HRS.

DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
1978 11/ 6	15:15: 0	280.0	60.0	138.0	145.0	112.0	120.0
1978 11/ 7	9:30: 0	308.0	65.0	148.0	158.0	120.0	125.0
1978 11/ 8	9:30: 0	308.0	62.0	148.0	158.0	120.0	125.0
1978 11/ 9	9:30: 0	310.0	63.0	148.0	158.0	120.0	125.0
1978 11/10	13:20: 0	310.0	62.0	148.0	158.0	120.0	125.0
1978 11/11	10: 0: 0	308.0	61.0	148.0	155.0	119.0	125.0
1978 11/12	11: 0: 0	308.0	62.0	148.0	155.0	120.0	125.0
1978 11/13	16: 0: 0	312.0	62.0	148.0	158.0	120.0	125.0
1978 11/14	10:23: 0	312.0	62.0	148.0	158.0	120.0	125.0
1978 11/15	10:10: 0	312.0	62.0	150.0	158.0	120.0	128.0
1978 11/16	10: 0: 0	315.0	65.0	150.0	160.0	120.0	130.0
1978 11/17	10: 0: 0	315.0	65.0	150.0	160.0	120.0	130.0
1978 11/17	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-4 溫度時刻歴 (ICF-13H) (3/6)

\* R 2-53-09 CYCLE

1978. 11/27 15: 0: 0 10MW CRITICAL  
 12/ 8 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10MW) 795.6 HRS.

DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
1978 11/27	15:10: 0	300.0	60.0	142.0	150.0	118.0	121.0
1978 11/28	16: 0: 0	315.0	66.0	152.0	160.0	122.0	130.0
1978 11/29	9:50: 0	308.0	62.0	150.0	158.0	120.0	126.0
1978 11/30	9:20: 0	313.0	62.0	150.0	158.0	120.0	125.0
1978 12/ 1	9:40: 0	312.0	61.0	148.0	157.0	120.0	125.0
1978 12/ 2	9:30: 0	312.0	62.0	149.0	158.0	120.0	126.0
1978 12/ 3	10: 0: 0	312.0	62.0	148.0	156.0	119.0	125.0
1978 12/ 4	16:30: 0	318.0	62.0	150.0	159.0	121.0	128.0
1978 12/ 5	9:30: 0	318.0	62.0	150.0	158.0	120.0	126.0
1978 12/ 6	10:10: 0	315.0	60.0	148.0	158.0	118.0	124.0
1978 12/ 7	17: 0: 0	313.0	62.0	149.0	158.0	120.0	125.0
1978 12/ 8	10:20: 0	314.0	62.0	148.0	158.0	120.0	125.0
1978 12/ 8	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-4 溫度時刻歴 (ICF-13H) (4/6)

\* R2-53-10 CYCLE

1979. 1/22 15: 0: 0 10MW CRITICAL  
 2/ 2 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10MW) 1061.1 HRS.

	DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
1979	1/22	19: 0: 0	310.0	63.0	150.0	160.0	121.0	128.0
1979	1/23	8:25: 0	312.0	64.0	150.0	158.0	121.0	129.0
1979	1/24	9:30: 0	315.0	68.0	151.0	160.0	122.0	130.0
1979	1/25	9: 0: 0	314.0	62.0	151.0	160.0	122.0	130.0
1979	1/26	9:15: 0	313.0	63.0	151.0	159.0	122.0	128.0
1979	1/27	8:45: 0	313.0	62.0	151.0	159.0	122.0	128.0
1979	1/28	9:40: 0	313.0	60.0	149.0	158.0	120.0	127.0
1979	1/29	9:10: 0	311.0	60.0	148.0	156.0	120.0	125.0
1979	1/30	9:30: 0	317.0	63.0	152.0	160.0	121.0	124.0
1979	1/31	9: 3: 0	319.0	63.0	152.0	160.0	122.0	124.0
1979	2/ 1	9: 4: 0	320.0	68.0	153.0	162.0	125.0	131.0
1979	2/ 2	9: 8: 0	320.0	67.0	153.0	162.0	125.0	131.0
1979	2/ 2	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-4 溫度時刻歴 (ICF-13H) (5/6)

\* R2-53-11 CYCLE

1979. 2/12 15: 0: 0 10MW CRITICAL  
 2/23 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10MW) 1326.6 HRS.

	DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
-79-	1979 2/12	16: 0: 0	300.0	60.0	142.0	150.0	118.0	122.0
	1979 2/13	10: 0: 0	315.0	63.0	150.0	160.0	122.0	128.0
	1979 2/14	9: 0: 0	317.0	62.0	149.0	162.0	120.0	126.0
	1979 2/15	9: 0: 0	310.0	62.0	149.0	157.0	120.0	126.0
	1979 2/16	9:50: 0	315.0	62.0	149.0	157.0	119.0	126.0
	1979 2/17	9:30: 0	315.0	61.0	149.0	157.0	119.0	125.0
	1979 2/18	9:27: 0	318.0	60.0	150.0	160.0	125.0	130.0
	1979 2/19	9:30: 0	317.0	62.0	150.0	158.0	120.0	127.0
	1979 2/20	11:30: 0	313.0	61.0	148.0	157.0	119.0	125.0
	1979 2/21	10: 0: 0	318.0	62.0	150.0	159.0	120.0	126.0
	1979 2/22	10: 0: 0	320.0	63.0	151.0	160.0	121.0	127.0
	1979 2/23	10: 0: 0	320.0	62.0	151.0	160.0	121.0	127.0
	1979 2/23	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-4 溫度時刻歴 (ICF - 13H) (6/6)

\* R 2-53-12 CYCLE

1979. 3/5 15:0:0 10MW CRITICAL

3/16 16:30:0 SHUT DOWN

TOTAL IRRADIATION (10MW) 1592.1 HRS.

	DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
180	1979 3/5	15:30:0	306.0	61.0	147.0	154.0	121.0	125.0
	1979 3/6	9:55:0	314.0	61.0	151.0	157.0	123.0	127.0
	1979 3/7	9:30:0	318.0	64.0	153.0	158.0	124.0	128.0
	1979 3/8	9:30:0	314.0	64.0	150.0	158.0	120.0	128.0
	1979 3/9	9:30:0	316.0	64.0	150.0	158.0	121.0	127.0
	1979 3/10	9:30:0	319.0	64.0	154.0	160.0	125.0	129.0
	1979 3/11	10:5:0	320.0	65.0	153.0	160.0	124.0	130.0
	1979 3/12	9:30:0	317.0	62.0	150.0	158.0	120.0	127.0
	1979 3/13	9:30:0	315.0	63.0	151.0	159.0	121.0	128.0
	1979 3/14	11:0:0	317.0	63.0	151.0	159.0	121.0	128.0
	1979 3/15	9:30:0	321.0	65.0	152.0	161.0	123.0	128.0
	1979 3/16	9:40:0	320.0	64.0	152.0	160.0	122.0	128.0
	1979 3/16	16:30:0	SHUTDOWN					

表A-5 溫度時刻歴 (ICF-14H) (1/6)

\* R2-53-08CYCLE

1978.11/6 15:0:0 10MW CRITICAL  
 11/17 16:30:0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10MW) 265.5 HRS.

DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
1978 11/ 6	15:15: 0	325.0	328.0	176.0	180.0	0.0	148.0
1978 11/ 7	9:30: 0	338.0	338.0	180.0	183.0	0.0	152.0
1978 11/ 8	9:30: 0	335.0	335.0	180.0	182.0	0.0	150.0
1978 11/ 9	9:30: 0	335.0	335.0	180.0	180.0	0.0	150.0
1978 11/10	13:20: 0	335.0	335.0	180.0	180.0	0.0	150.0
1978 11/11	10: 0: 0	332.0	333.0	179.0	180.0	0.0	150.0
1978 11/12	11: 0: 0	332.0	333.0	178.0	180.0	0.0	148.0
1978 11/13	16: 0: 0	330.0	333.0	178.0	178.0	0.0	148.0
1978 11/14	10:23: 0	330.0	333.0	178.0	178.0	0.0	148.0
1978 11/15	10:10: 0	330.0	330.0	178.0	178.0	0.0	148.0
1978 11/16	10: 0: 0	332.0	332.0	178.0	180.0	0.0	148.0
1978 11/17	10: 0: 0	332.0	332.0	178.0	180.0	0.0	148.0
1978 11/17	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-5 溫度時刻歴 (ICF - 14H) (2/6)

## \* R 2-53-09 CYCLE

1978. 11/27 15: 0: 0 10MW CRITICAL  
12/ 8 16:30: 0 SHUT DOWN  
TOTAL IRRADIATION (10MW) 531.0 HRS.

DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
1978 11/27	15:10: 0	330.0	330.0	176.0	178.0	0.0	144.0
1978 11/28	16: 0: 0	330.0	330.0	178.0	180.0	0.0	148.0
1978 11/29	9:50: 0	326.0	324.0	173.0	178.0	0.0	144.0
1978 11/30	9:20: 0	326.0	326.0	176.0	178.0	0.0	146.0
1978 12/ 1	9:40: 0	326.0	325.0	174.0	178.0	0.0	144.0
1978 12/ 2	9:30: 0	326.0	327.0	174.0	178.0	0.0	144.0
1978 12/ 3	10: 0: 0	325.0	325.0	174.0	178.0	0.0	144.0
1978 12/ 4	16:30: 0	325.0	327.0	175.0	176.0	0.0	144.0
1978 12/ 5	9:30: 0	325.0	326.0	174.0	176.0	0.0	143.0
1978 12/ 6	10:10: 0	322.0	323.0	172.0	173.0	0.0	140.0
1978 12/ 7	17: 0: 0	322.0	324.0	172.0	175.0	0.0	143.0
1978 12/ 8	10:20: 0	322.0	324.0	172.0	174.0	0.0	143.0
1978 12/ 8	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-5 溫度時刻歴 (ICF-14H) (3/6)

\* R 2-53-10 CYCLE

1979. 1/22 15: 0: 0 10MW CRITICAL  
 2/ 2 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10MW) 796.5 HRS.

	DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
183	1979 1/22	19: 0: 0	330.0	335.0	177.0	180.0	0.0	148.0
1	1979 1/23	8:25: 0	330.0	331.0	177.0	180.0	0.0	149.0
	1979 1/24	9:30: 0	328.0	331.0	178.0	180.0	0.0	148.0
	1979 1/25	9: 0: 0	324.0	328.0	178.0	178.0	0.0	148.0
	1979 1/26	9:15: 0	324.0	328.0	174.0	178.0	0.0	145.0
	1979 1/27	8:45: 0	324.0	328.0	173.0	178.0	0.0	145.0
	1979 1/28	9:40: 0	326.0	329.0	174.0	176.0	0.0	143.0
	1979 1/29	9:10: 0	322.0	325.0	172.0	176.0	0.0	143.0
	1979 1/30	9:30: 0	322.0	328.0	174.0	176.0	0.0	144.0
	1979 1/31	9: 3: 0	327.0	329.0	177.0	178.0	0.0	146.0
	1979 2/ 1	9: 4: 0	327.0	330.0	178.0	180.0	0.0	148.0
	1979 2/ 2	9: 8: 0	327.0	330.0	178.0	180.0	0.0	148.0
	1979 2/ 2	16:30: 0	SHUTDOWN					

表 A-5 溫度時刻歴 (ICF-14H)(4/6)

\* R 2-53-11 CYCLE

1979. 2/12 15: 0: 0 10MW CRITICAL  
 2/23 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10MW) 1062.0 HRS.

DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
1979 2/12	16: 0: 0	330.0	330.0	178.0	180.0	0.0	140.0
1979 2/13	10: 0: 0	326.0	330.0	178.0	180.0	0.0	148.0
1979 2/14	9: 0: 0	326.0	328.0	174.0	176.0	0.0	143.0
1979 2/15	9: 0: 0	326.0	328.0	174.0	176.0	0.0	143.0
1979 2/16	9:50: 0	325.0	329.0	175.0	177.0	0.0	144.0
1979 2/17	9:30: 0	324.0	328.0	174.0	176.0	0.0	143.0
1979 2/18	9:27: 0	325.0	330.0	175.0	180.0	0.0	147.0
1979 2/19	9:30: 0	323.0	327.0	174.0	176.0	0.0	143.0
1979 2/20	11:30: 0	321.0	325.0	173.0	175.0	0.0	142.0
1979 2/21	10: 0: 0	322.0	326.0	173.0	176.0	0.0	143.0
1979 2/22	10: 0: 0	324.0	328.0	175.0	177.0	0.0	144.0
1979 2/23	10: 0: 0	324.0	328.0	175.0	176.0	0.0	144.0
1979 2/23	16:30: 0	SHUTDOWN					

表A-5 溫度時刻歴 (ICF-14H) (5/6)

\* R 2-53-12CYCLE

1979. 3/5 15: 0: 0 10MW CRITICAL  
 3/16 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10MW) 1327.5 HRS.

	DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
185	1979 3/5	15:30: 0	325.0	331.0	175.0	177.0	0.0	143.0
	1979 3/6	9:55: 0	321.0	325.0	173.0	175.0	0.0	142.0
	1979 3/7	9:55: 0	319.0	324.0	173.0	176.0	0.0	143.0
	1979 3/8	9:30: 0	319.0	324.0	174.0	176.0	0.0	144.0
	1979 3/9	9:30: 0	321.0	326.0	174.0	176.0	0.0	144.0
	1979 3/10	9:30: 0	321.0	325.0	173.0	176.0	0.0	144.0
	1979 3/11	10: 5: 0	322.0	328.0	178.0	179.0	0.0	146.0
	1979 3/12	9:30: 0	321.0	325.0	173.0	175.0	0.0	143.0
	1979 3/13	9:30: 0	322.0	326.0	176.0	177.0	0.0	144.0
	1979 3/14	11: 0: 0	320.0	325.0	174.0	176.0	0.0	144.0
	1979 3/15	9:30: 0	321.0	326.0	174.0	177.0	0.0	144.0
	1979 3/16	9:40: 0	321.0	325.0	174.0	176.0	0.0	144.0
	1979 3/16	16:30: 0	SHUTDOWN					

表 A-5 溫度時刻歴 (ICF-14H) (6/6)

\* R 2-53-13 CYCLE

1979. 3/26 15: 0: 0 10MW CRITICAL  
 4/ 6 16:30: 0 SHUT DOWN  
 TOTAL IRRADIATION (10MW) 1593.0 HRS.

	DATE	TIME	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5	T/C 6
186 -	1979 3/26	15: 5: 0	310.0	316.0	169.0	170.0	0.0	140.0
	1979 3/27	9:41: 0	319.0	323.0	174.0	176.0	0.0	145.0
	1979 3/28	9:30: 0	320.0	324.0	175.0	177.0	0.0	146.0
	1979 3/29	9:30: 0	320.0	324.0	175.0	177.0	0.0	146.0
	1979 3/30	9:30: 0	320.0	324.0	175.0	177.0	0.0	145.0
	1979 3/31	9:30: 0	322.0	327.0	174.0	176.0	0.0	145.0
	1979 4/ 1	9:30: 0	322.0	327.0	175.0	177.0	0.0	145.0
	1979 4/ 2	9:30: 0	322.0	326.0	175.0	177.0	0.0	146.0
	1979 4/ 3	9:12: 0	322.0	327.0	176.0	178.0	0.0	147.0
	1979 4/ 4	9:22: 0	323.0	328.0	175.0	177.0	0.0	146.0
	1979 4/ 5	9: 5: 0	321.0	325.0	174.0	176.0	0.0	145.0
	1979 4/ 6	9: 5: 0	321.0	325.0	175.0	177.0	0.0	146.0
	1979 4/ 6	16:30: 0		SHUTDOWN				

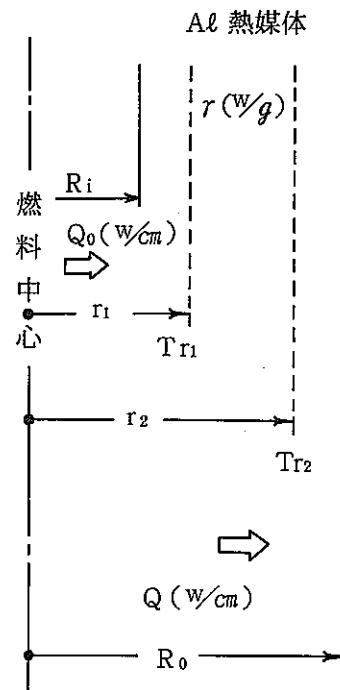
付録B 線出力密度評価式<sup>(4),(5)</sup>

アルミニウム熱媒体温度差により線出力密度の評価を行う。評価体系はアルミニウム媒質内だけを考える。

## (1) 計算体系及び記号

## 記号

- $Q_0$  : 燃料ペレットの線出力密度 ( $\text{W/cm}$ )  
 $Q_r$  : ガンマ発熱による " ( $\text{W/cm}$ )  
 $Q$  : キャップセル体系の " ( $\text{W/cm}$ )  
 $r$  : ガンマ-発熱量 ( $\text{W/g}$ ) ( $\approx 1.5 \text{ W/g}$ )  
 $R_i$  : アルミニウム熱媒体内半径 ( $\text{cm}$ )  
 $R_o$  : アルミニウム熱媒体外半径 ( $\text{cm}$ )  
 $r_1$  : 内側熱電対取付半径 ( $\text{cm}$ )  
 $r_2$  : 外側熱電対取付半径 ( $\text{cm}$ )  
 $T_{r1}$  : 内側熱電対指示温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{r2}$  : 外側熱電対指示温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $\lambda$  : アルミニウムの熱伝導度 ( $\text{kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ )  
 $\rho$  : アルミニウムの密度 = 2.7 ( $\text{g/cm}^3$ )



(a) 計算体系

## (2) 計算式の導出

計算体系において、アルミ熱媒体内の半径  $r$  の場所での線出力密度  $Q$  ( $w/cm$ ) は、次式で求められる。

$$Q = Q_0 + Qr = Q_0 + \rho \cdot r \cdot \pi (r^2 - R_i^2) \quad (1)$$

また円筒熱媒体内の熱伝導は、次式で表わされる。

$$Q = -2\pi r \lambda \frac{dT}{dr} \quad (2)$$

(1)式と(2)式より、

$$-2\pi r \lambda \frac{dT}{dr} = Q_0 + \rho \cdot r \cdot \pi (r^2 - R_i^2) \quad (3)$$

$$\therefore -2\pi \lambda dT = \{ Q_0 + \rho \cdot r \cdot \pi (r^2 - R_i^2) \} \frac{dr}{r} \quad (4)$$

(4)式を  $r$  について  $r_1$  から  $r_2$ ,  $T$  について  $T_{r_1}$  から  $T_{r_2}$  の範囲で積分する。

$$\int_{T_{r_1}}^{T_{r_2}} -2\pi \lambda dT = \int_{r_1}^{r_2} \{ Q_0 + \rho \cdot r \cdot \pi (r^2 - R_i^2) \} \frac{dr}{r} \quad (5)$$

(5)式の右辺については、

$$\text{右辺} = Q_0 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot r \cdot \pi (r_2^2 - r_1^2) - \rho \cdot r \cdot \pi R_i^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (6)$$

となり、左辺  $\int_{T_{r_1}}^{T_{r_2}} -2\pi \lambda dT$  については、熱媒体のアルミ A 1050 の熱伝導率  $\lambda$  を温度  $T$  (°C) に関する 1 次式近似  $\lambda = 2.022 + 0.0009286 \times T$  と表わすことができるところから

$$\begin{aligned} \text{左辺} &= -2\pi \int_{T_{r_1}}^{T_{r_2}} \lambda dT \\ &= -2\pi \int_{T_{r_1}}^{T_{r_2}} (2.022 + 0.0009286 \times T) dT \\ &= 2\pi \left[ 2.022 (T_{r_1} - T_{r_2}) + \frac{1}{2} \times 0.0009286 (T_{r_1}^2 - T_{r_2}^2) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

(6)式と(7)式より  $Q$  ( $w/cm$ ) について整理すると、次式が導かれる。

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\{ 2\pi \times 2.022 (T_{r_1} - T_{r_2}) + 0.0009286 \pi (T_{r_1}^2 - T_{r_2}^2) \}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \\ &\quad - \frac{\rho \cdot r \cdot \pi (r_2^2 - r_1^2)}{2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} + \rho \cdot r \cdot \pi \cdot R_i^2 \end{aligned} \quad (8)$$

## (3) キャプセル寸法

(単位:mm)

燃料ピン 仕様項目	ICF - 10 H	ICF - 11 H	ICF - 12 H	ICF - 13 H	ICF - 14 H
r <sub>1</sub>	0.7785	0.875	→	→	→
r <sub>2</sub>	1.65	1.65	→	→	→
R <sub>2</sub>	0.6285	0.825	→	→	→

## 付録 C 出力上昇パターン

## (1) 各キャプセルの照射サイクル

サイクルNo	照射キャプセル
52 - 06	
07	↑
08	ICF - 10 H
09	↓
	ICF - 11 H
53 - 02	
03	↑
04	ICF - 12 H
05	↓
07	↑
08	ICF - 13 H
09	↓
10	
11	↑
12	ICF - 14 H
13	↓

## (2) 各サイクル原子炉出力上昇時の各出力ステップ到達時刻、炉停止時刻

照射サイクル	照 射 時 刻	炉 出 力	備 考
52-06 cy.	'52 9/26	10:25 11:02 12:01 15:00 ↓ '52 10/7	0.8 MW 5 MW 7.5 MW 9.9 MW ↓ 9.9 MW → 炉停止
52-07 cy.	'52 10/17	10:10 10:42 11:51 15:00 ↓ '52 10/28	1.26 MW 5.02 MW 7.79 MW 9.92 MW ↓ 9.92 MW → 炉停止
52-08 cy.	'52 11/7	10:20 11:01 12:00 15:00 ↓ '52 11/11	1 MW 5 MW 8 MW 10 MW ↓ 10 MW → 炉停止
	'52 11/13	10:06 10:40 10:58 11:31 ↓ '52 11/18	1 MW 5 MW 8 MW 10 MW ↓ 10 MW → 炉停止
52-09 cy.	'52 11/28	10:17 11:00 12:00 14:59 ↓ '52 12/9	1 MW 5 MW 8 MW 10 MW ↓ 10 MW → 炉停止

照射サイクル	照 射 時 刻	炉 出 力	備 考
53-02 cy.	'53 5/29	10:39	1.3 MW
		11:01	5.4 MW
		12:03	8.5 MW
		15:01	9.9 MW
	'53 5/31	14:30	9.9 MW → 炉停止
		20:40	9.9 MW (一気に上げた)
		20:53	9.9 MW → 炉スクラム
	'53 6/1	21:16	5.4 MW
		21:28	8.5 MW
		21:43	9.9 MW
		16:30	9.9 MW → 炉停止
53-03 cy.	'53 6/19	10:58	1.278 MW
		11:00	1.278 MW → 炉スクラム
	'53 6/19	11:40	1.278 MW
		11:50	5.364 MW
		12:05	8.412 MW
		15:03	9.9279 MW
	'53 6/30	16:30	9.9279 MW → 炉停止
		10:31	1.32 MW
53-04 cy.	'53 7/10	11:00	5.3 MW
		12:00	8.346 MW
		15:00	9.902 MW
		16:30	9.902 MW → 炉停止

照射サイクル	照 射 時 刻	炉 出 力	備 考
53-05 cy.	'53 9/4 10:06 10:32 11:32 15:01  '53 9/15 16:30	1 MW 5 MW 8 MW 9.9 MW  9.9 MW	
		{	
53-07 cy.	'53 10/16 10:04 10:59 12:00 15:00  '53 10/20 23:21	1.072 MW 4.649 MW 7.865 MW 9.885 MW  9.885 MW	→ 炉停止
		{	
	'53 10/21 0:14	9.885 MW	
		{	
	'53 10/27 16:30	9.885 MW	→ 炉停止
53-08 cy.	'53 11/6 10:40 11:00 11:58 15:00  '53 11/17 16:30	1.262 MW 4.591 MW 7.513 MW 9.902 MW  9.902 MW	
		{	
			→ 炉停止
53-09 cy.	'53 11/27 10:14 11:00 12:00 15:02  '53 12/8 16:30	1 MW 5 MW 8 MW 9.9 MW  9.9 MW	
		{	
			→ 炉停止

照射サイクル	照 射 時 刻	炉 出 力	備 考
53-10 cy.	'54 1/17	11:48	1 MW
		12:02	5 MW
		12:31	8 MW
		13:00	10 MW
		13:10	10 MW → 炉停止
	'54 1/22	10:33	0.97 MW
		11:00	4.6 MW
		12:00	7.22 MW
		15:00	9.9 MW
		16:30	9.9 MW → 炉停止
53-11 cy.	'54 2/12	9:59	1 MW
		10:58	5 MW
		11:59	8 MW
		15:00	9.93 MW
		16:30	9.93 MW → 炉停止
	'54 2/23	10:30	1.06 MW
		11:00	4.65 MW
		12:00	7.5 MW
		12:15	7.5 MW → 炉出力低下
		13:00	1.06 MW
53-12 cy.	'54 3/5	13:14	4.65 MW
		13:27	7.50 MW
		15:00	9.905 MW
		16:30	9.905 MW → 炉停止
	'54 3/16		

照射サイクル	照 射 時 刻	炉 出 力	備 考
53-13 cy.	'54 3/26	10:07 11:02 11:58 15:00	1 MW 5 MW 8 MW 9.9 MW
			↓
	'54 4/ 6	16:30	9.9 MW → 炉停止

付録D 焼きしまりモデル<sup>(6)</sup>

## 1. Marloweのモデル

$$\Delta P = -\frac{M}{A} \ln \left( 1 + \frac{A \cdot D_{irr} \cdot t}{G_{10}^3} \right)$$

$$D_{irr} = D_{irr}^0 \cdot F$$

$F$	； 核分裂速度	$(fission/cm^3 \cdot sec)$
$t$	； 热焼結時間	$(sec)$
$G_0$	； 初期結晶粒径	$(cm)$
$D_{irr}$	； 照射促進拡散定数	$(cm^2/sec)$
$D_{irr}^0$	； 低温における照射焼きしまり実験より	$1.27 \times 10^{-29} (cm^5/fission)$
$M$	； 炉外焼結実験より	4.44 $(\% cm)$
$A$	； Lyons 等の $UO_2$ 結晶成長実験及び Marin & Contain の拡散定数測定より	2.14 $(cm)$
$\Delta P$	； 気孔率変化	$(\%)$

## 2. Lindman のモデル

$$\Delta P = \frac{M_0 D}{G_0^3 \cdot \dot{F} \cdot B} \left\{ \exp(-B \cdot \dot{F} \cdot t) - 1 \right\}$$

$$D = D_{irr} + D_{th}$$

$$D_{irr} = D_{irr}^0 \cdot \dot{F}$$

$$D_{th} = D_{th}^0 \cdot \exp(-E_b/RT)$$

$\dot{F}$	； 核分裂速度	( fission/cm <sup>3</sup> ·sec )
t	； 照射時間	( sec )
$G_0$	； 初期結晶粒径	( cm )
T	； 温度	( °K )
D	； 拡散定数	( cm <sup>2</sup> /sec )
$D_{irr}$	； 照射促進拡散定数	( cm <sup>2</sup> /sec )
$D_{th}$	； 熱拡散定数	( cm <sup>2</sup> /sec )
$D_{irr}^0$	； 低温における照射焼きしまり実験より	$1.27 \times 10^{-29}$ ( cm <sup>5</sup> /fission )
$D_{th}^0$	； $\exp(-21.2 \pm 1.8)$	( cm <sup>2</sup> /sec )
$M_0$	； $\exp(-5.32 \pm 0.20)$	( cm·%T.D.)
B	； $(3.99 \pm 1.30) \times 10^{-20}$	( per fission/cm <sup>3</sup> )
$E_b$	； $136.3 \pm 19.2$	( KJ/mole )
R	； 気体定数	8.31434 ( J/g mole °K )
$\Delta P$	； 気孔率変化	( % )

## 3. Stehle &amp; Assmann のモデル

粗大気孔縮小速度（気孔直径  $\geq 0.1 \mu m$ ）

$$\frac{dr}{dt} = - \frac{(D_v^{th} + D_v^{irr})R}{r(R-r)} \frac{\frac{2\gamma\Omega D}{rKT} \frac{1}{2ag} + \frac{\lambda F\omega}{3}(C_s - C_r)}{D_v^{th} \frac{1}{2ag} + \frac{(D_v^{th} + D_v^{irr})R}{r(R-r)} + \frac{\lambda F\omega}{3}}$$

$$D_v^{th} = 0.125 \exp(-53000/RT)$$

$$D_v^{irr} = 10^{-30} F$$

$$D = 0.09 \exp(-10600/RT)$$

$$R = r + r_g$$

$$C_r = \exp(-Q_F/RT)$$

F ; 核分裂速度	( fission/cm <sup>3</sup> ·sec )
T ; 温度	( °K )
r ; 気孔半径	( cm )
r <sub>g</sub> ; 結晶粒半径	( cm )
D <sub>v</sub> <sup>th</sup> ; 热的空格子拡散定数	( cm <sup>2</sup> /sec )
D <sub>v</sub> <sup>irr</sup> ; 照射促進空格子拡散定数	( cm <sup>2</sup> /sec )
D ; UO <sub>2</sub> 自己拡散定数	( cm <sup>2</sup> /sec )
C <sub>r</sub> ; 热的空格子濃度	( - )
Q <sub>F</sub> ; 空格子生成エネルギー	$3.6848 \times 10^{-19}$ ( J )
g ; 定数	100 ( - )
r ; UO <sub>2</sub> 表面張力	$6.5 \times 10^{-5}$ ( J/cm <sup>2</sup> )
$\Omega$ ; 原子容	$4 \times 10^{-23}$ ( cm <sup>3</sup> )
K ; ボルツマン定数	$1.38054 \times 10^{-23}$ ( J/K° )
a ; UO <sub>2</sub> 格子定数	$5.47 \times 10^{-8}$ ( cm )
$\lambda$ ; 核分裂片長さ	$6 \times 10^{-4}$ ( cm )
$\omega$ ; UO <sub>2</sub> 体積	$5 \times 10^{-19}$ ( cm <sup>3</sup> )
C <sub>s</sub> ; UO <sub>2</sub> 空格子飽和濃度	0.002 ( - )

## 4. Carlson のモデル

$$\Delta D = -(4.37 \pm 0.49) \times 10^{-5} I + (9.45 \pm 0.62) \times 10^{-13} I^2 T$$

I ; 燃焼度 (MWd/M TM)

T ; 温度 (°K)

 $\Delta D$  ; 気孔径変化 ( $\mu m$ )

## 5. Collins &amp; Hargreaves のモデル

$$\Delta P = A (1 - \exp(-S \cdot I)) \times 100$$

I ; 燃焼度 (MWd/teU)

S ; 定数 (-)

A ; 定数 (-)

 $\Delta P$  ; 気孔率変化 (%)

## 6. Rolstad et. al. のモデル

最大スタック長減少率

$$\Delta L = 22.2 \frac{100 - TD}{T_s - 1180}$$

照射中のスタック長減少率

$$\Delta L = 3.0 - 0.93 \exp(-BU) - 2.07 \exp(-35BU)$$

TD ; 初期理論密度比 (%T.D)

T<sub>s</sub> ; ペレット焼結温度 (°C)BU ; 燃焼度 (GWD/t UO<sub>2</sub>) $\Delta L$  ; スタック長減少率 (%)