

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. - 6

[技術情報室]

GETR-1RT(B)照射後解析

Post-Irradiation Examination Analysis of GETR-1RT(B)

1972年7月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

この資
の関係者
およびそ
が解除に

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

GETR-1RT(B)照射後解析



実施責任者 小 泉 益 通
報 告 者 小 松 純 治
横 内 洋 二

期 間 1969年5月1日～1970年1月28日

目 的 高速炉燃料の初期照射挙動を明らかにするためにGETR で照射試験された
GETR-1RT(B)についての解析

要 旨 GETR-1RT(B)照射計画は高速炉用燃料の初期照射挙動の解明のために計画
され、照射内容は極めて豊富であった。この照射試験の特長は燃料密度、照射時間
プルトニウム濃度、中空ペレットと中実ペレット、また振動充填燃料とペレット燃
料の比較など照射燃料のパラメータが豊富であったことのほか、計装カプセル照
射であったこと、GETR-T rail Cableで照射されたこと、短時間照射であった
ことなどがあげられる。

したがって解析の重点もこういったパラメータの違いという点におかれたわけ
であるが、あくまでも照射初期挙動としての解析である。

各ピンについてのカプセル内温度分布より線出力を評価し、これに基づいて燃
料内温度分布を計算した。この過程において仮定、近似が多少入ったことはやむを
えないことである。金相変化のデータはDIRAD コードのフィッティングに大い
に役だった。DIRAD コード計算結果もあわせて掲載してある。照射挙動に及
ぼす各パラメータの影響として照射時間、密度、中実が中空ペレットか、振動充填
かペレット燃料か、プルトニウム富化率をとって考察した。また照射試験を行なう
にあたり、今後どういった計画あるいは方法により行なっていたらよいかという
情報が得られたことは意義深い。

目 次

1. ま え が き	1
2. キャプセルおよびピン外観検査	1
(1) キャプセル外観検査	1
(2) 燃料ピン外観検査	1
(3) 中性子透過写真	1
(4) γ -スキヤニング	2
(5) 金相用試料切断位置と熱電対位置	2
3. 計装キャプセルとしての記録	7
アルミ熱媒体内外温度記録	
4. 線出力履歴の評価	20
(1) キャプセル内温度分布	20
(2) 線出力評価	26
(3) 燃焼度	26
5. 燃料内温度分布および密度分布	41
(1) キャプセル内中性子束分布 (THERMOS CODE)	41
(2) DIRAD CODE 計算結果	41
6. 燃料の組織観察	42
(1) クラックパターン	42
(2) 燃料-被覆管コンパティビリティ	42
(3) インクルージョン	42
(4) プルトニウム偏析	42
(5) ボイドの形状と分布	42
7. 各照射ピンのパラメータによる比較	68
(1) 3時間照射と24時間照射の相違	68
A-C, B-D	68
(2) 燃料密度の相違	68
A-B, C-D	68
(3) 中実ペレットと中空ペレットの比較	68
E-F	68
(4) 振動充填燃料におけるプルトニウム富化度の相違	69
(5) ペレット燃料と振動充填燃料の比較	69

8. NaKの自然対流について	69
9. 偏心発熱について	83
10. 国内での照射後試験に対するコメント	83
11. 海外照射に対するコメント	84
12. 結 言	85

1. ま え が き

GETR-IRT(B)照射計画は高速炉用燃料の初期照射挙動の解明のために計画され、照射内容は極めて豊富であった。GETR-IRT(B)照射における特長は燃料密度、照射時間、プルトニウム濃度、中空ペレットの比較、また振動充填燃料とペレット燃料の比較など照射燃料のパラメータが豊富であったこと他に、計装キャプセルであったこと、GETR Trail Cableで照射されたこと、短時間照射であったことなどがあげられる。照射に使用された8本の燃料ピンはほぼ満足すべき線出力を経験し、またそれぞれに金相変化も起しており、初期の照射目的を十分に果し得たと思われる。

照射後解析において問題になったことは計装用として装着された熱電対温度記録の妥当性である。そもそもキャプセル内温度を測定するということは、これより線出力を求め、さらに燃料内温度を推定するのが目的である。しかしながら実際にはいろいろな原因によって直接線出力を求めるのにはまだ問題がのこるのが実状のようである。この点についてはキャプセル設計に際して充分考慮すべきであると思われる。本照射試験においても例外ではなかった。Al熱媒体はNaKなどに比して熱伝導率が大きくてAl内での温度変化は数十度しかない。ところがNaK中では数百度の温度変化があるため、Al表面温度測定は、はなはだ困難なものであった。

照射パラメータによる各金相写真の比較においてはレンズ状ボイドの挙動等について有益な情報が得られた。

2. キャプセルおよび外観検査

キャプセル数は、4本で各々2本の燃料ピンが入りAからHの合計8本の燃料ピンが照射されその内容を表-1に示した。

(1) キャプセル外観検査

これについてはGE側から何ら情報を得ていないが異常は無かったものと思われる。

(2) 燃料ピン外観検査

白黒写真ではわからないが、多少変色している部分がみられる程度である。GEからの報告ではすべてのピンは健全であったとしている。 Photo 1

ピン寸法変化については3~24時間照射のため照射後試験としておこなっていない。問題は無い。

(3) 中性子透過写真

A・B・C・D・E・Fの各ピンについては組織変化の状態はわからない。G・Hピンについては中心空孔のあいている状態がよく観察できる。

その他の中性子透過写真では燃料内部の状態はわからない。 Photo 2

(4) γ スキャンニング

長さ方向平均アクティビティを求めてみると次のようになる。

Pin	Activity (CPS)	
A.	2 5 4 5.7	各ピンの平均アクティビティ
B.	2 5 4 5.7	
C.	3 4 9.1	
D.	3 3 4.5	
E.	2 4 0 0.0	
F.	2 4 5 1.4	
G.	2 1 6 0.0	
H.	2 4 5 1.4	

γ スキャンニングの特長としてG試料以外のものについて、端部にアクティビティのす
るどいピークがみられる。H試料の γ スキャンニングの結果はきわめて特長的であり試料
中央部でスランピングがあったことを明瞭に示している。 図 1

また放射性核種の分析結果を表 2 に示す。

(5) 金相用試料切断位置と熱電対位置

この位置関係を図 2 に示す。

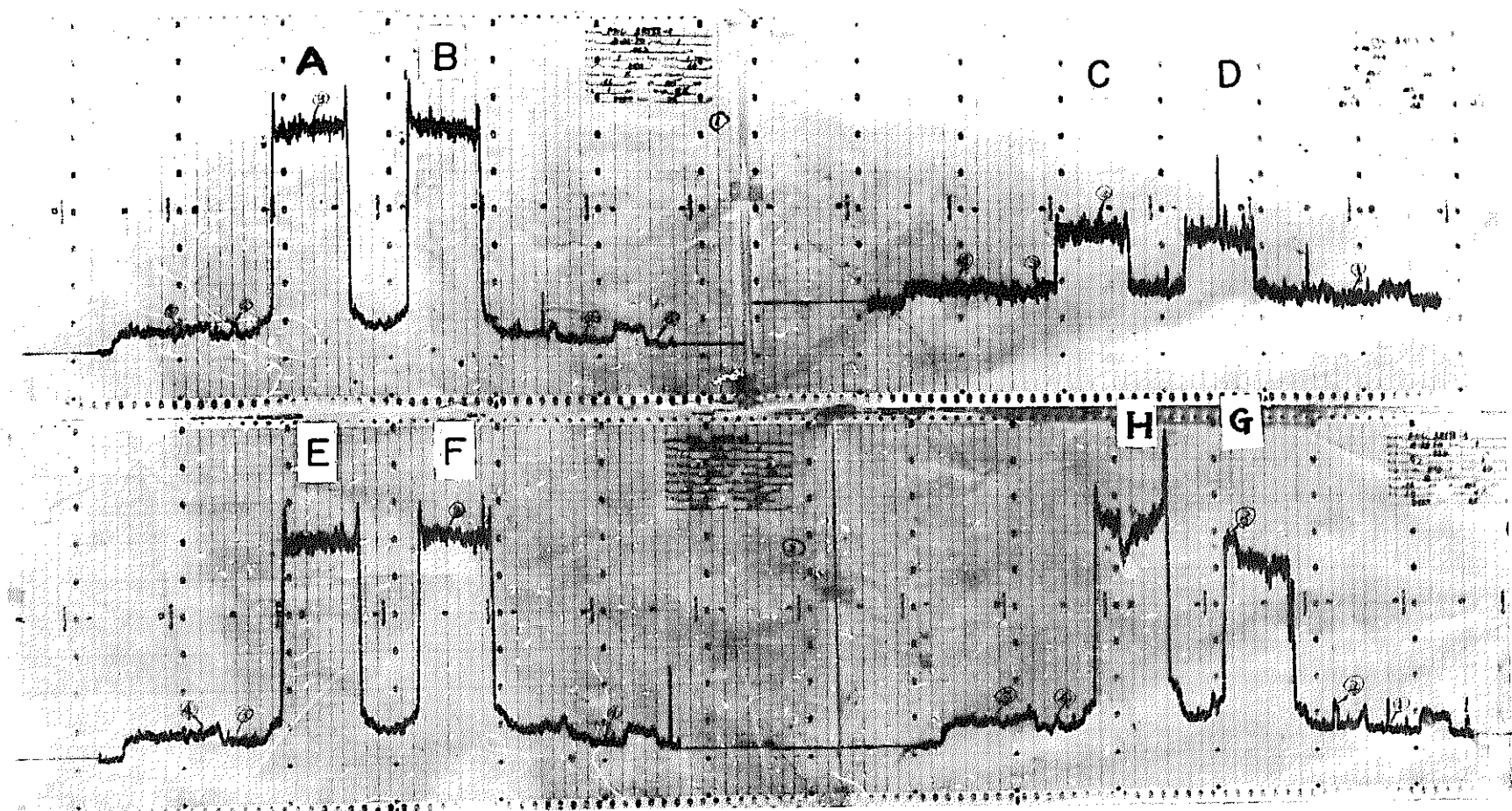


Figure. 1 IRT (B) γ - Scanning

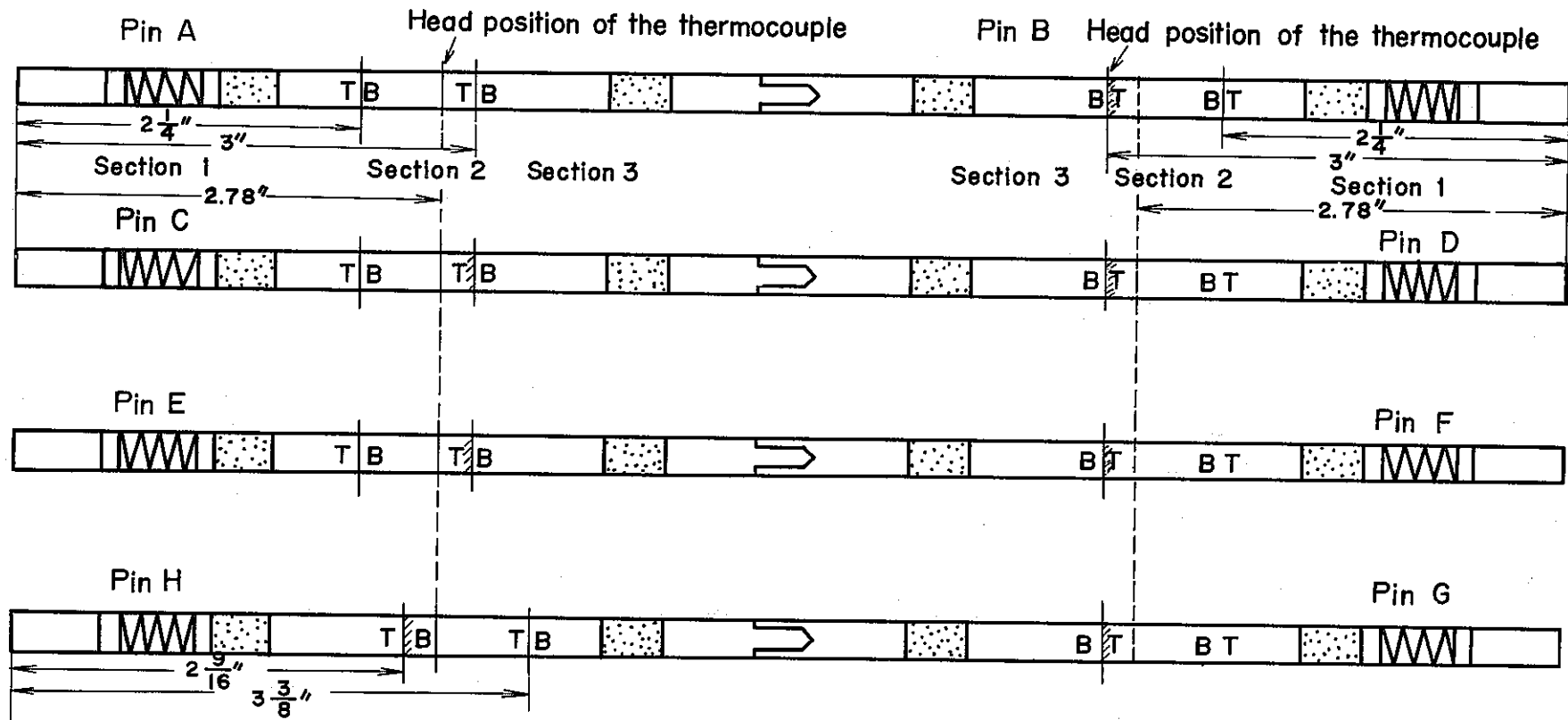


Figure 2 Positions of ceramographies

表1 試料および照射条件概要

キャプセル No	照 射 用 試 料							
	1		2		3		4	
燃料ピン No	A	B	C	D	E	F	G	H
燃料形態	ペレット	ペレット	ペレット	ペレット	ペレット	穴あきペレット	振動充填	振動充填
Pu 富化率 (%)	20.19	20.32	20.19	20.32	39.47	40.67	19.7	39.5
ウラン濃縮度 (%)	89.89	89.89	89.89	89.89	19.91	19.91	Nat	Nat
ペレット密度	10.09(g/cc) 91.31(%)	9.32(g/cc) 84.30(%)	10.09(g/cc) 91.31(%)	9.32(g/cc) 84.30(%)	10.05(g/cc) 90.97(%)	9.94(g/cc) 89.95(%)		
スメア密度 (%)	88.0	81.3	88.0	81.3	87.7	86.6	75.8	75.4
ペレット径 (mm)	55±0.01	55±0.01	55±0.01	55±0.01	55±0.01	OD55±0.01 ID1.5		
被覆管内径 (mm)	56±0.025	56±0.025	56±0.025	56±0.025	56±0.025	56±0.025	56±0.025	56±0.025
ダイアメトラル ギャップ (mm)	0.1±0.075	0.1±0.075	0.1±0.075	0.1±0.075	0.1±0.075	0.1±0.075		
燃料ピン全長 (mm)	122.0	123.75	122.20	123.80	122.00	123.75	122.15	123.80
燃料有効長 (mm)	54.3	55.0	55.2	55.1	55.1	55.6	55.3	55.6
プレナム長 (mm)	13.0	12.5	12.3	12.4	12.2	11.7	11.9	12.0
燃料ピン全重量 (g)	29.70	29.13	29.66	29.35	29.93	29.44	28.55	29.14
PuO ₂ -UO ₂ 重量 (g)	13.1	12.0	13.1	12.2	13.3	12.2	12.0	12.0
Pu 重量 (g)	2.33	2.15	2.33	2.18	4.63	4.37	2.09	4.18
E・U 重量 (g)	9.20	8.41	9.20	8.55	7.09	6.38	Nat・U 8.49	Nat・U 6.40
U-235 重量 (g)	8.27	7.56	8.27	7.69	1.41	1.27		
Nat-UO ₂ 重量 (g)	4.86	4.74	4.80	4.74	4.80	4.83	4.80	4.74
ZrO ₂ 重量 (g)	0.52	0.55	0.49	0.49	0.55	0.54	0.54	0.50
スプリング重量 (g)	0.30	0.31	0.30	0.30	0.30	0.30	0.27	0.30
ステンレス重量 (g)	10.92	11.53	10.97	11.62	10.98	11.57	10.94	11.60
燃料 O/M 比	1.987	1.986	1.987	1.986	1.982	1.984	1.991	1.989
被覆管材質	AIS316	"	"	"	"	"	"	"
被覆管内径 (mm)	56±0.025	"	"	"	"	"	"	"
被覆管外径 (mm)	63±0.03	"	"	"	"	"	"	"
被覆管供給元	K社	"	"	"	"	"	"	"
被覆管 No	No.506, 508, 510, 570, 581 から適当にきりだした。							
最大線出力 (w/cm)	520	520	520	520	520	520	520	520
平均線出力 (w/cm)								
目標燃燃度	297 MND/T	327	37	41	294	319	284	298
照射時間 (hrs)	24	24	3	3	24	24	24	24

Table 2 Radioactive isotopes observed
by gamma scanning

No of sample	Fission Product Observed	Other Isotopes Observed
Capsule-1		
Point #1*		Cr-51, Co-60
2		Cr-51, Co-60
3	Ru-103, ZrNb-95, La-140	- - -
4	Ru-103, ZrNb-95	Co-60
5	- - -	Cr-51, Co-60
Capsule-2		
Point 1	- - -	- - -
2	Ru-103, ZrNb-95	- - -
3	- - -	- - -
4	- - -	- - -
Capsule-3		
Point 1	- - -	Cr-51
2	Ru-103, ZrNb-95 La-140	- - -
3	- - -	Cr-51, Co-60
4	- - -	Cr-51, Co-60
Capsule		
Point #1	- - -	Cr-51, Co-60
2	- - -	Cr-51
3	Ru-103, ZrNb-95, La-140	- - -
4	Ru-103, ZrNb-95	Co-60
5	- - -	Cr-51, Co-60

The positions of samples are shown in Figure 1

3. 計装キャプセルとしての記録

照射の開始直後にレコーダのチャートスピードを変化させたらしく温度の時間的变化を読み取る上で非常に苦勞した。

照射初期の詳しいキャプセル内温度変化を図 3 ~ 10 に示す。また全照射時間における温度変化を図 11 ~ 14 に示す。

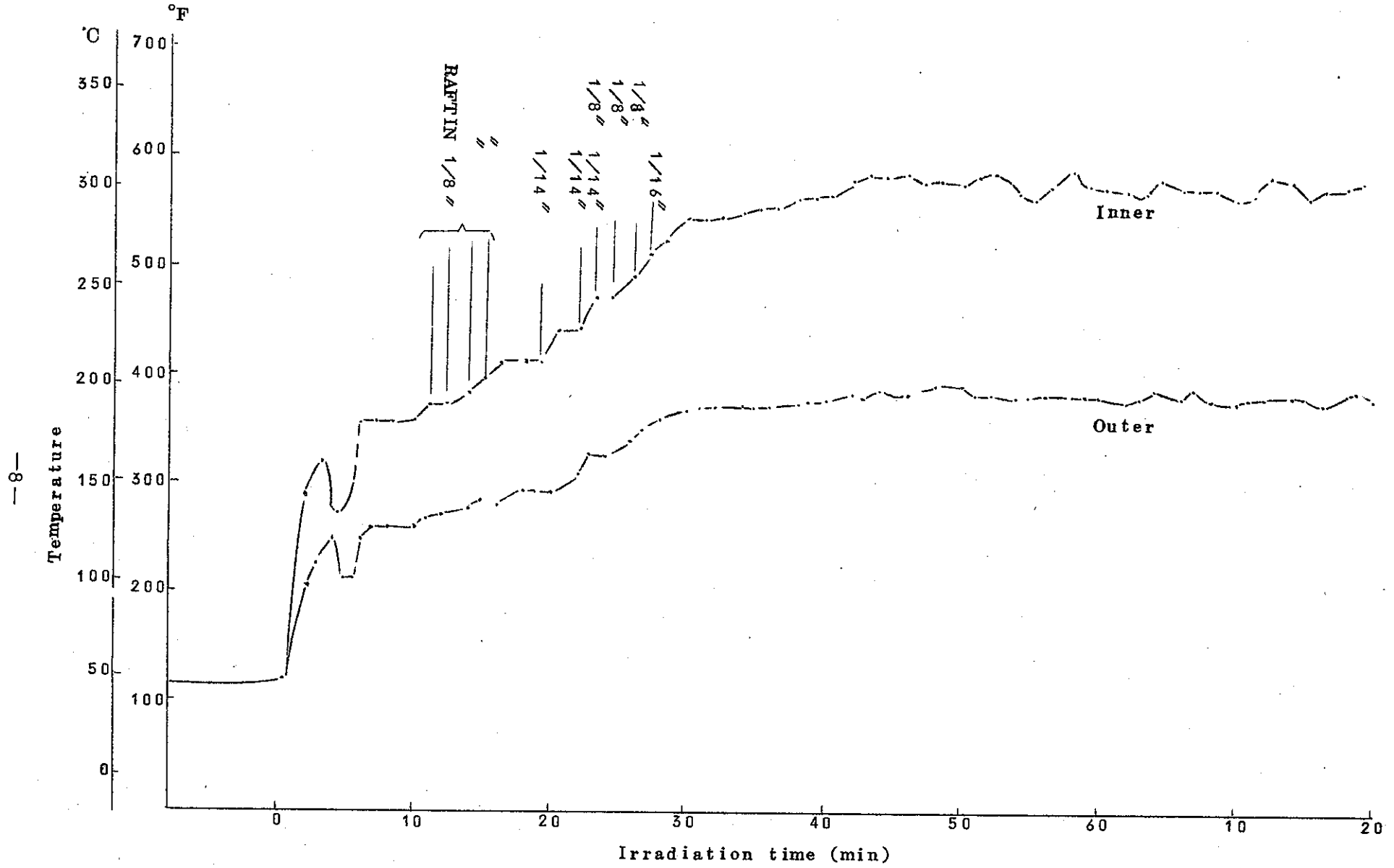


Figure 3 Temperature records of inner and outer surface of Al at the beginning of irradiation (Pin A)

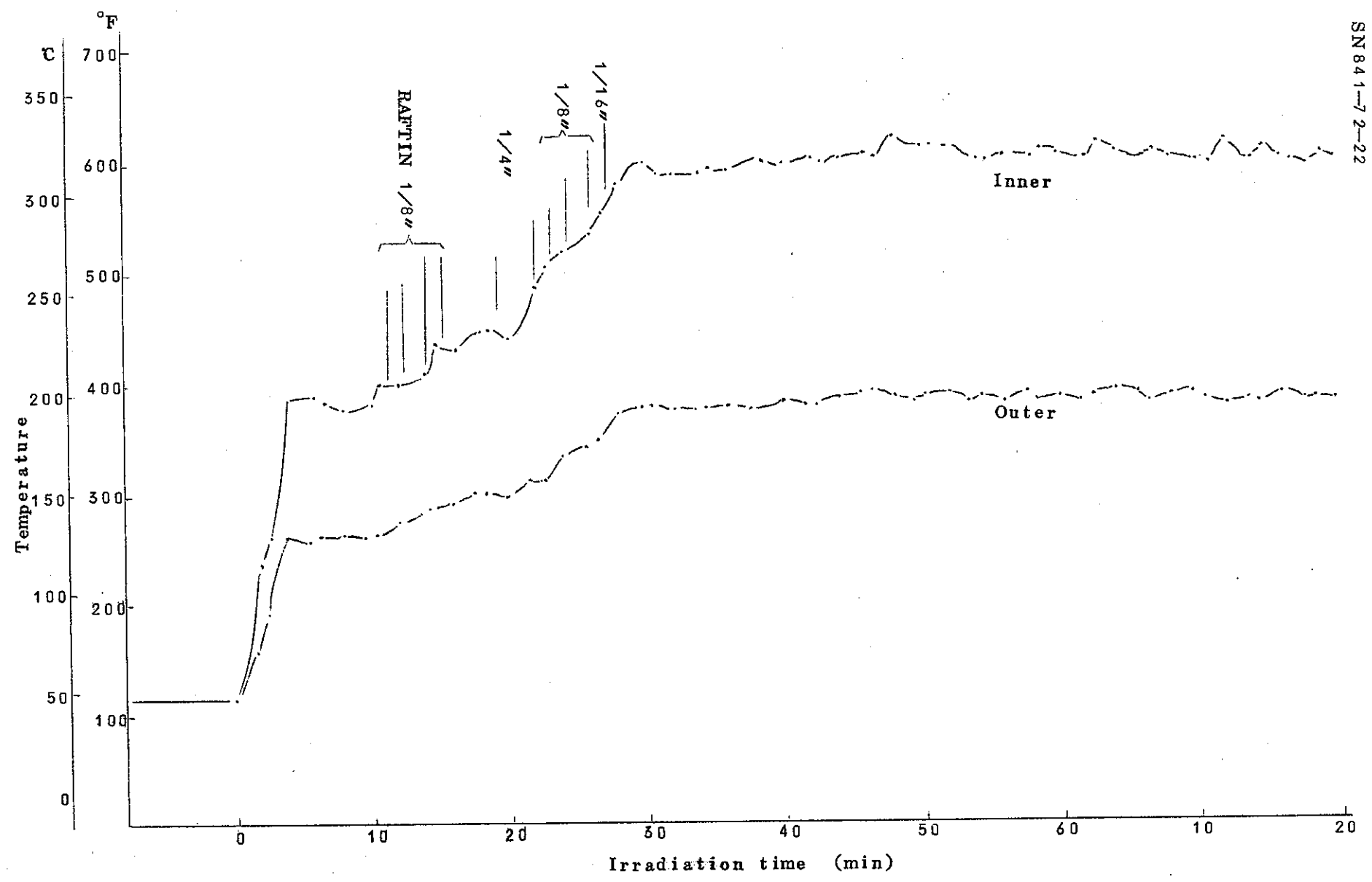


Figure 4 Temperature records of inner and outer surface of Al at the beginning of irradiation (Pin B)

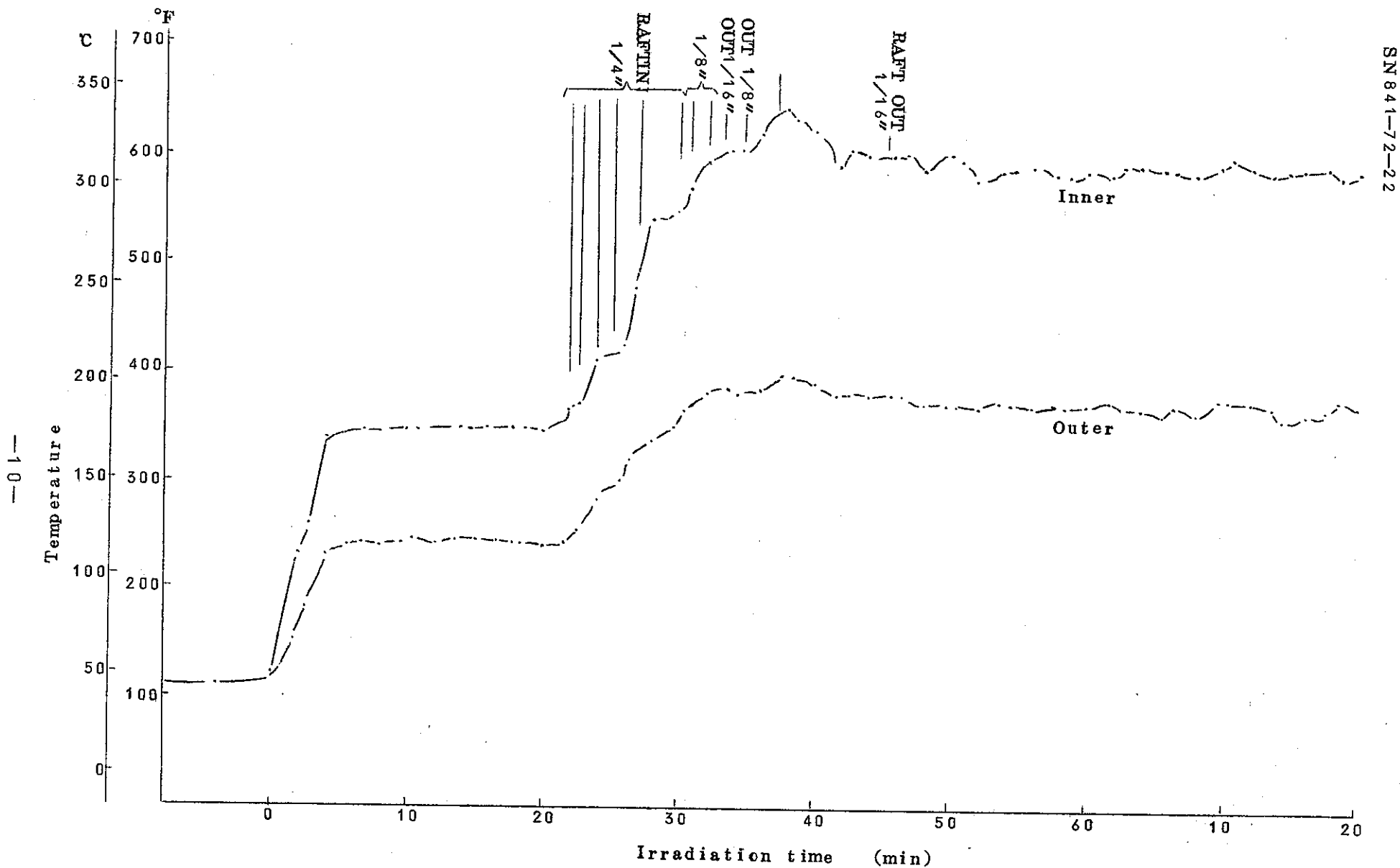


Figure 5 Temperature records of inner and outer surface of Al at the beginning of irradiation (Pin C)

SN 841-72-22

- 11 -

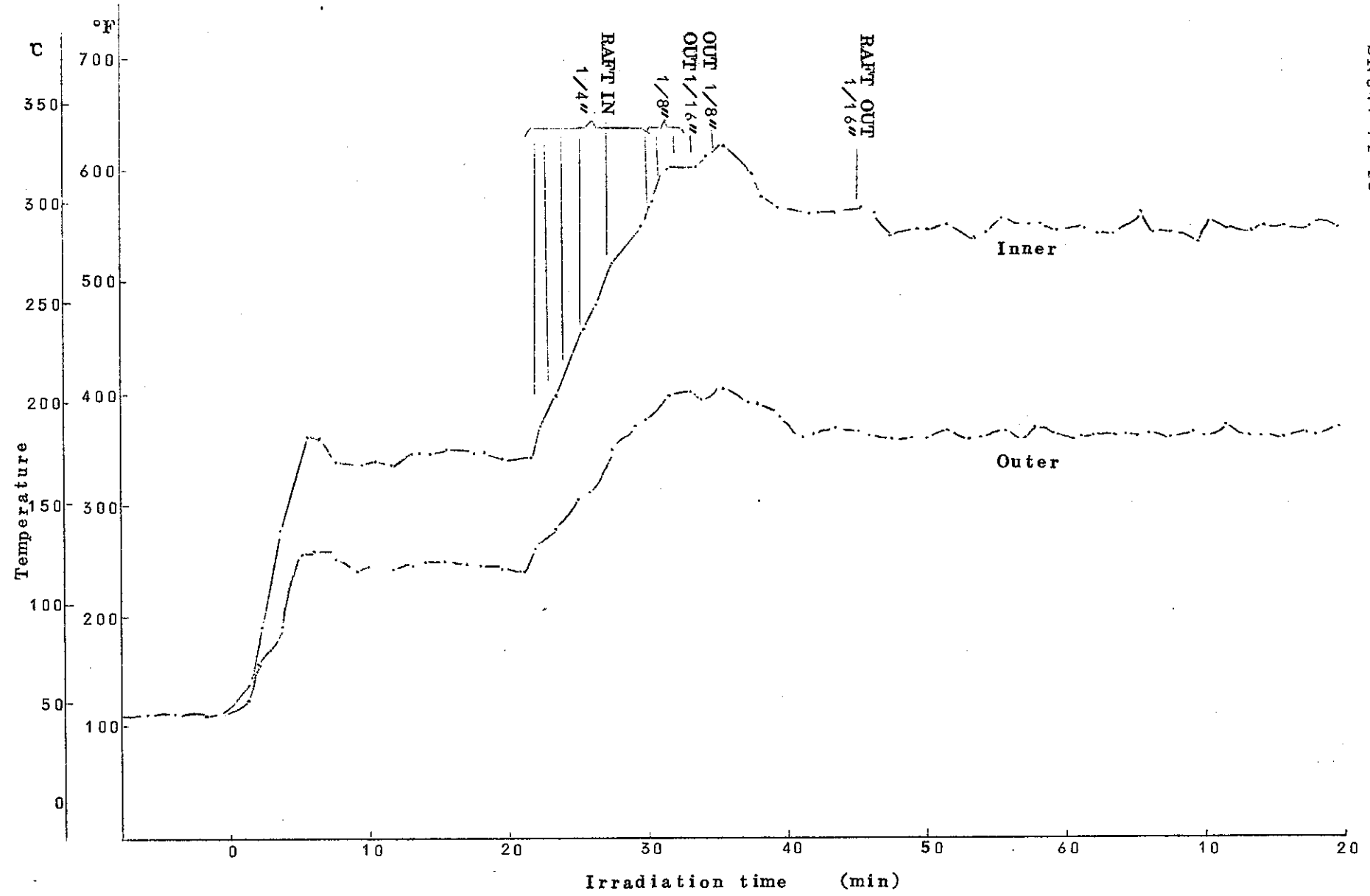


Figure 6 Temperature records of inner and outer surface of Al at the beginning of irradiation (Pin D)

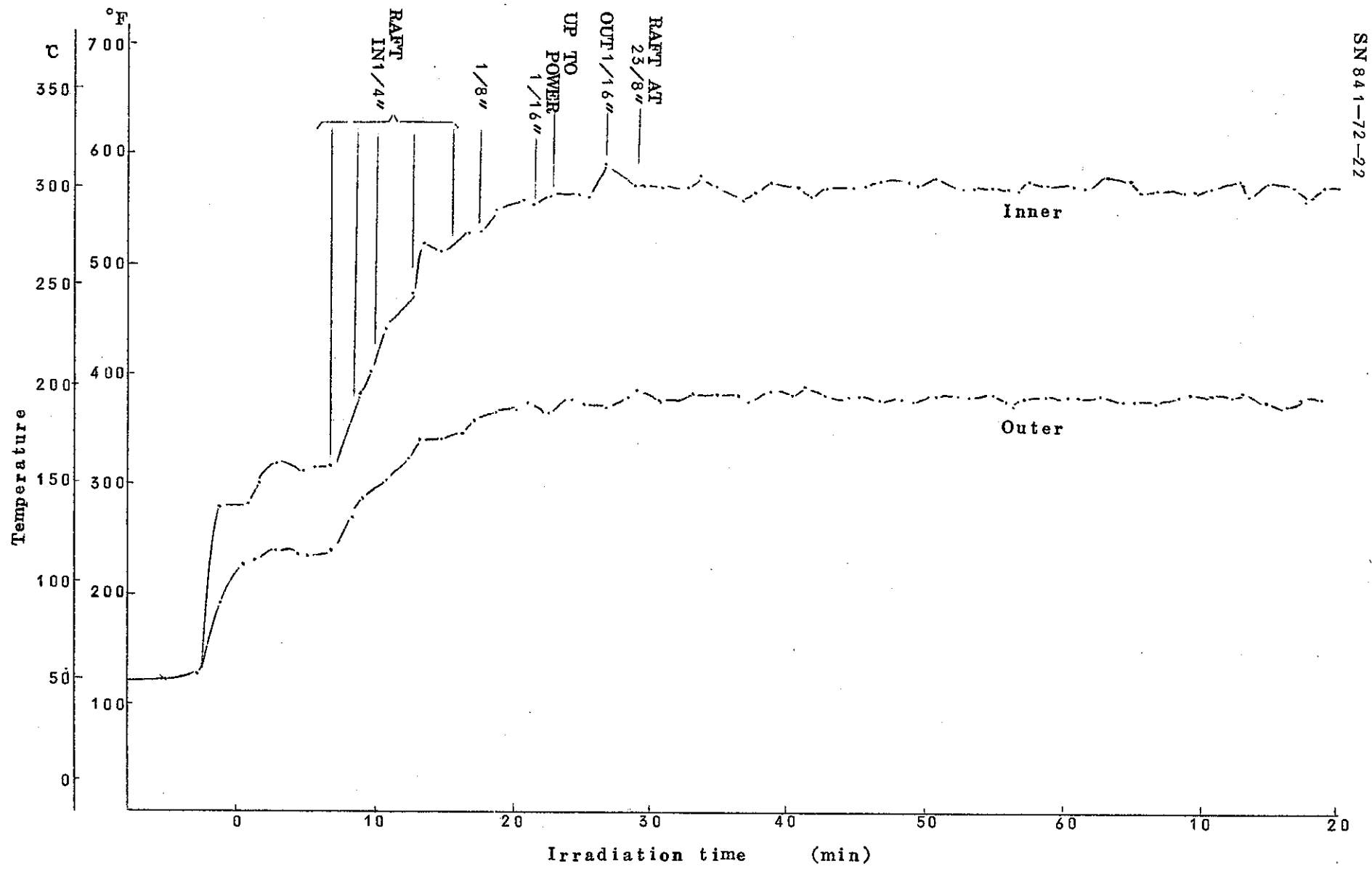


Figure 7 Temperature records of inner and outer surface of Al at the beginning of irradiation (Pin E)

SN 841-72-22

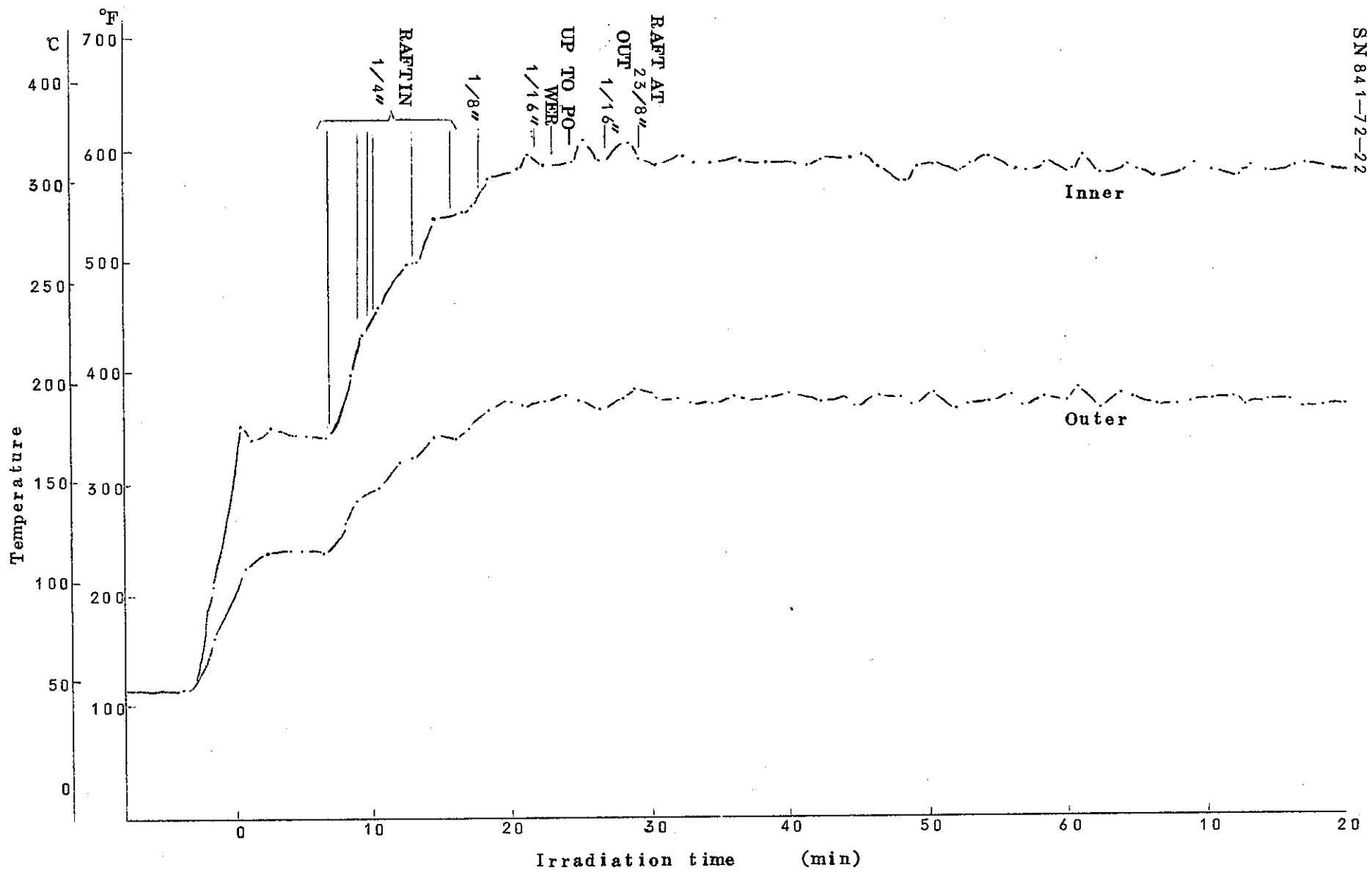


Figure 8 Temperature records of inner and outer surface of Al at the beginning of irradiation (Pin F)

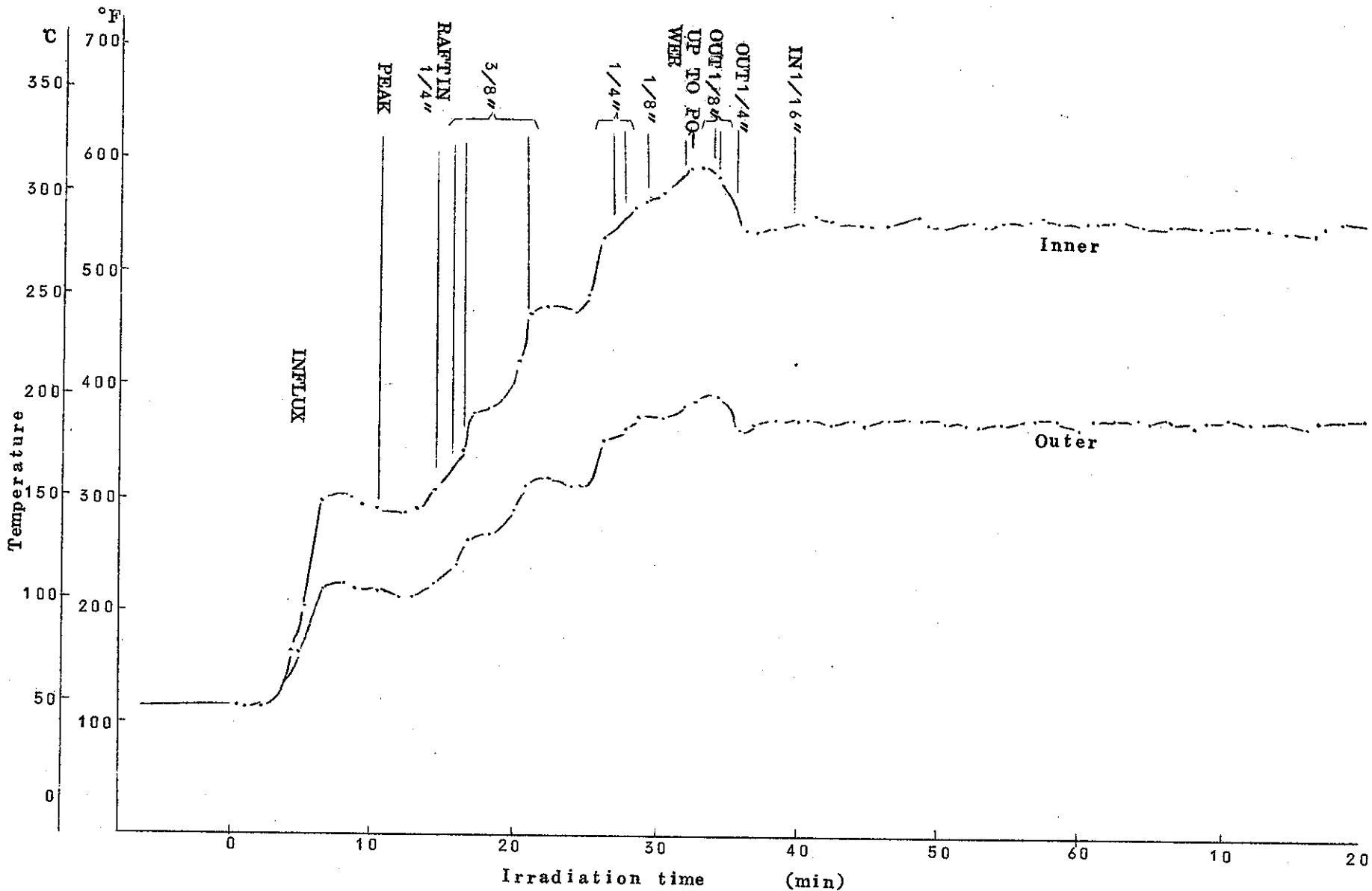


Figure 9 Temperature records of inner and outer surface of Al at the beginning of irradiation (pin G)

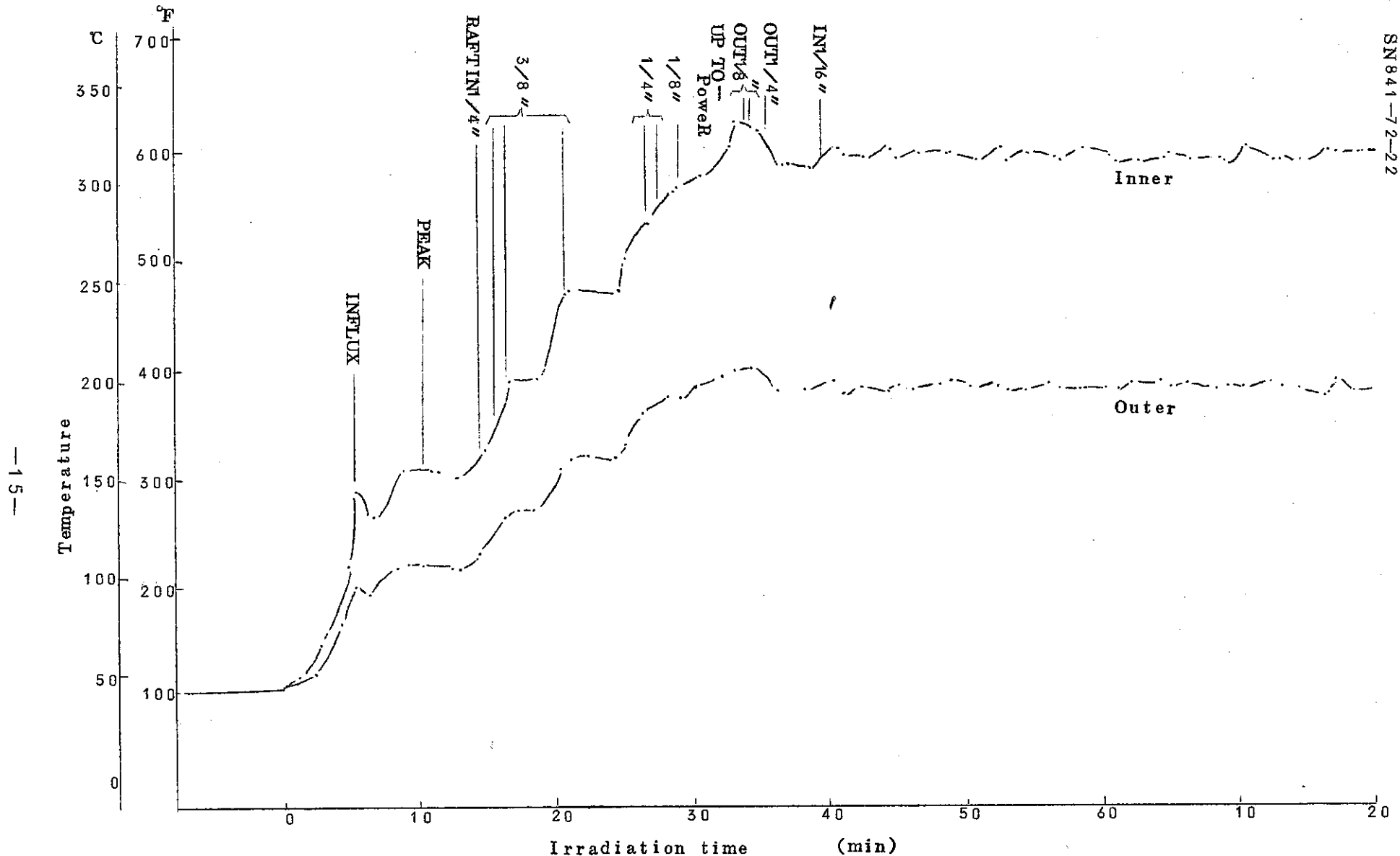


Figure 10 Temperature records of inner and outer surface of Al at the beginning of irradiation (Pin H)

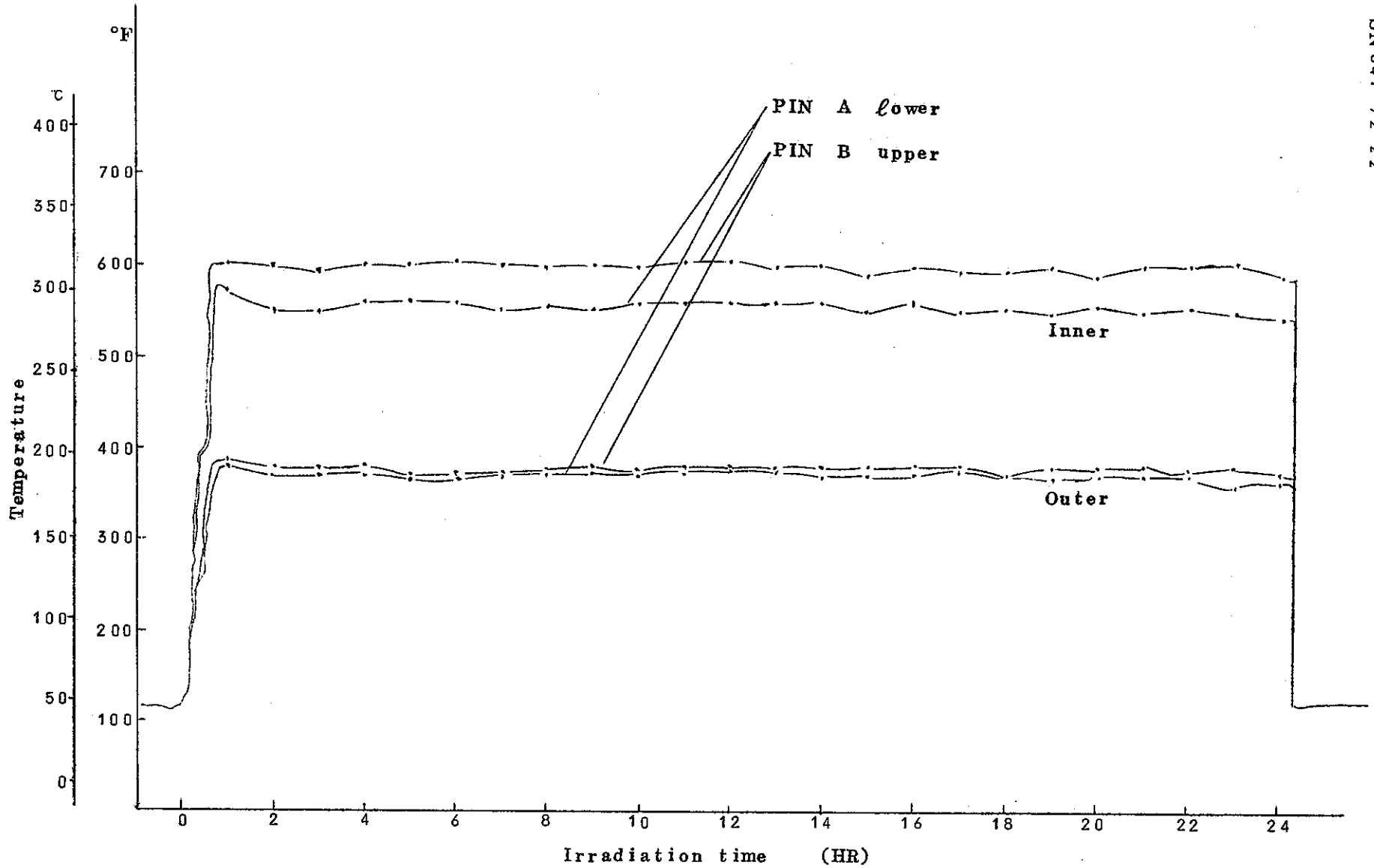


Figure 11 Temperature records of inner and outer surface of Al

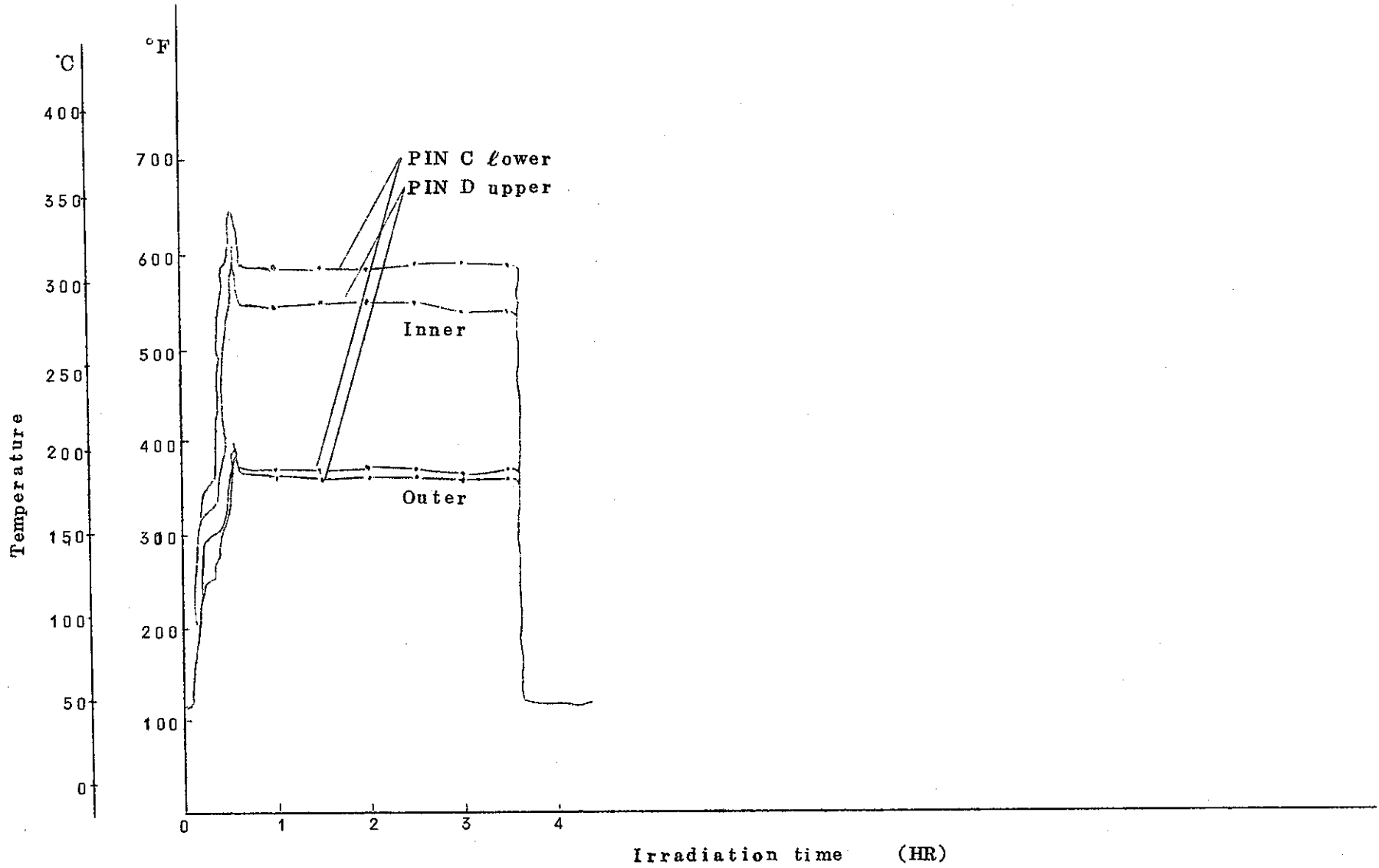


Figure 12 Temperature records of inner and outer surface of Al

-18-

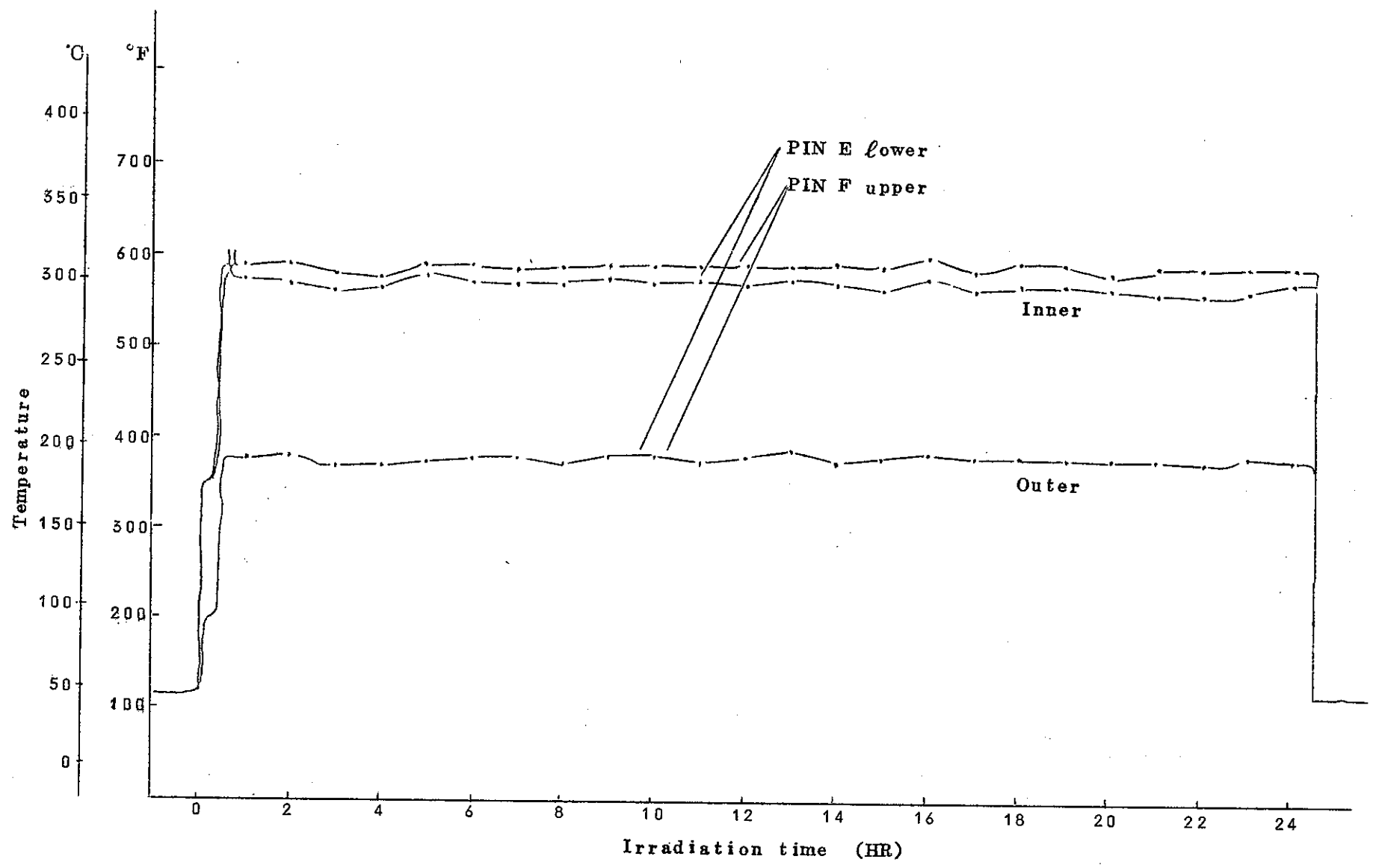


Figure 13 Temperature records of inner and outer surface of Al

-19-

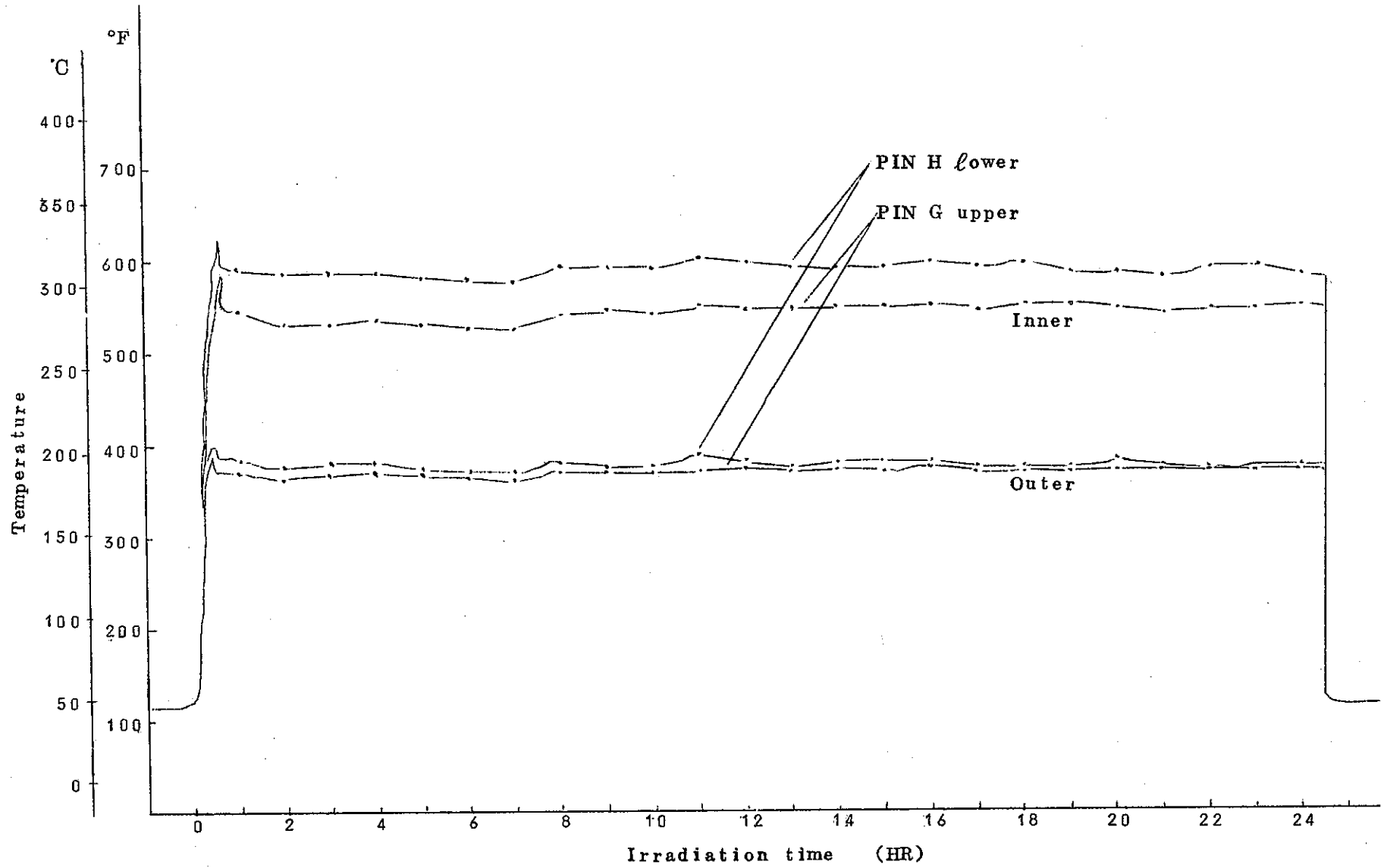


Figure 14 Temperature records of inner and outer surface of Al

4. 線出力履歴の評価

線出力は図 15 に示す熱電対先端を含む面について求めた。

Aℓ 熱媒体内外温度差 ΔT

熱電対温度記録より求めた ΔT そのままを使って線出力を求めると表 3 にピン A の例を示す如く線出力として明らかに大きくなりすぎてしまう。この計算で用いた Aℓ 熱伝導率は次のものである。

$$k = 1.32 + 0.0024 \cdot T \text{ (w/cm}^2\text{C)} \leftarrow 52 \text{ SAℓ}$$

しかし実際には、61 SAℓ であり

$$k = 1.4872 + 0.0024 \cdot T \text{ (w/cm}^2\text{C)} \leftarrow 61 \text{ SAℓ}$$

であるため、この求め方を使えば線出力はより大きくなってしまはずである。

(1) キャプセル内温度分布

温度記録の妥当性をみるためにキャプセル内温度分布を種々の線出力に対して計算をおこなった。これを図 16 ~ 17 に示す。この時のキャプセル形状・材質は図 18 に示す。

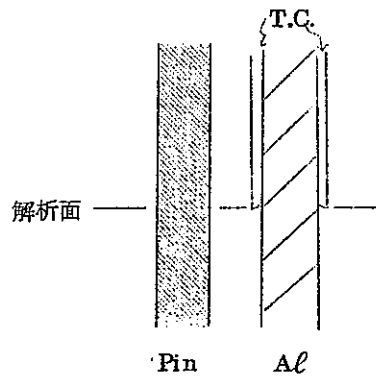


Figure 15 Analyzed plane of a fuel

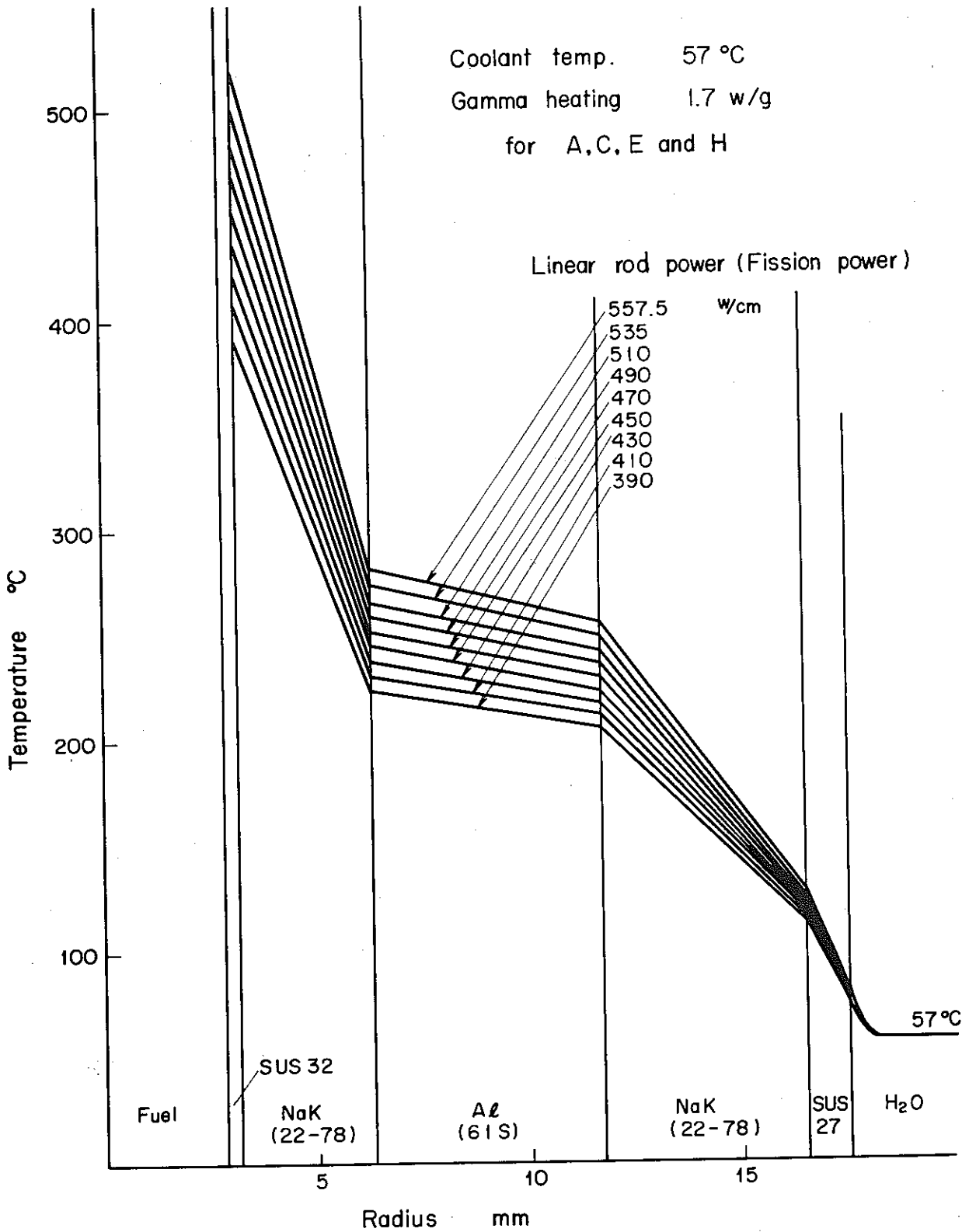


Figure 16 Temperature distribution in the capsule

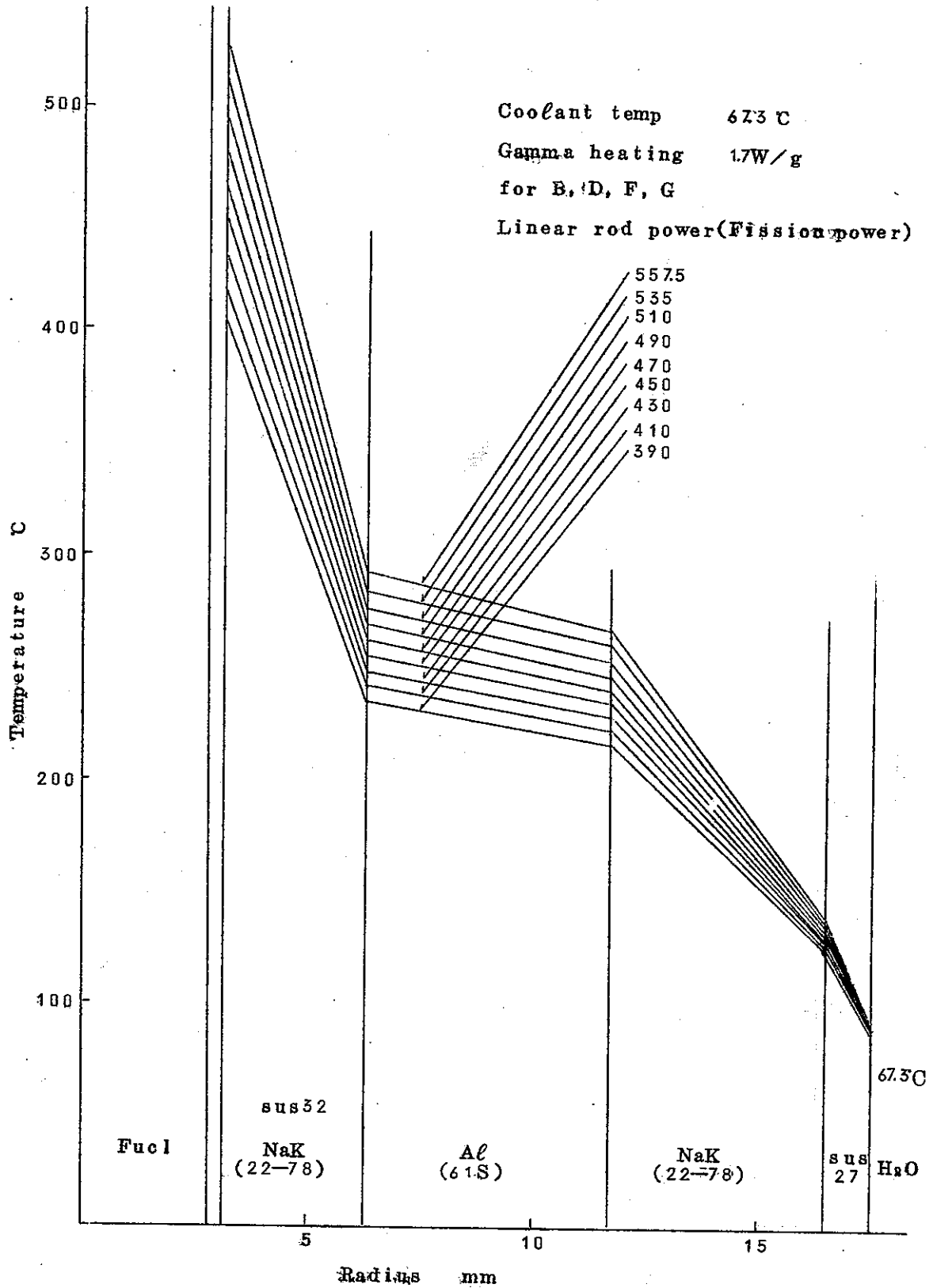


Figure 17 Temperature distribution in capsule as the function of linear heat rate

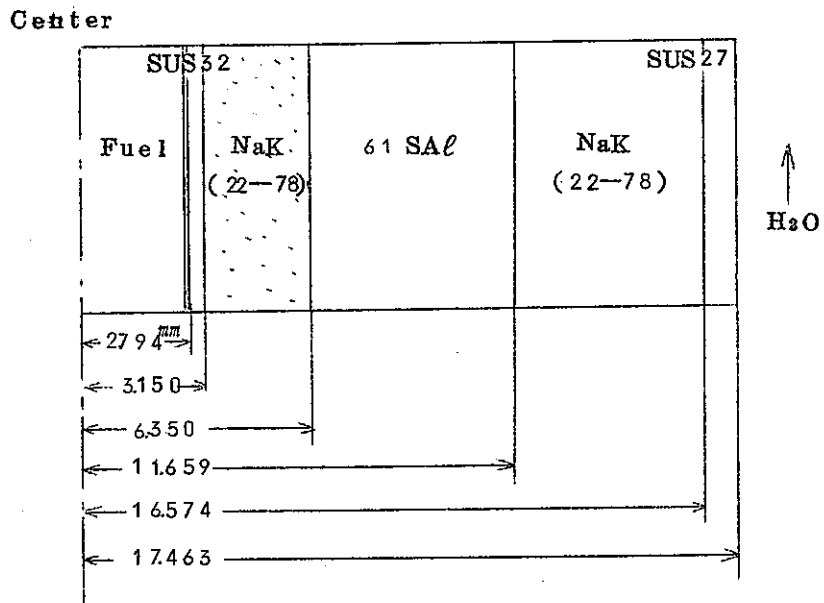


Figure18 Dimension and material of capsule

表3 熱電対温度記録より求めた ΔT そのままを使って求めた線出力の例(PinA)

10℃	11℃	11-10℃	ROD POWER w/cm
9.6.1	142.2	4.6.1	629.5
120.0	137.8	17.8	242.8
121.1	178.9	57.8	827.6
125.6	178.9	53.3	765.2
126.7	179.4	52.7	757.3
132.2	187.8	55.6	807.3
135.0	193.3	58.3	851.8
137.8	207.2	69.4	1027.2
145.0	210.0	65.0	968.3
143.0	218.3	75.0	1123.4
153.3	226.7	73.4	1113.2
162.3	242.2	79.4	1225.2
170.6	253.3	82.7	1292.5
181.7	258.3	76.6	1209.4
185.6	282.2	96.6	1554.4
187.8	282.2	94.4	1521.0
187.8	285.0	97.2	1569.1
187.8	287.8	100.0	1617.4
188.9	292.2	103.3	1676.9
190.6	293.3	102.7	1670.0
194.4	301.7	107.3	1758.6
196.1	304.4	108.3	1780.0
193.3	304.4	111.1	1823.0
198.9	301.7	102.8	1689.4
197.8	298.9	101.1	1657.3
194.4	304.4	110.0	1806.1
192.8	296.7	103.9	1895.6
194.4	296.1	101.7	1660.6
193.9	307.2	113.3	1863.2
192.6	298.9	106.1	1734.1

各領域で使用した熱伝導率は、つぎのとおりである。

SUS 27

$$k=0.150+1.55 \times 10^{-4} T$$

SUS 32

$$k=0.130+1.36 \times 10^{-4} T$$

NaK(22-78)

$$k=0.2377+7.10 \times 10^{-5} T$$

Al(61S)

$$k=1.4872+0.0024 T$$

またキャプセル内温度分布を計算するにあたって冷却材温度を求めなければならなかった。

金相解析面位置での冷却材温度評価

流 量 8 gpm

入口最高温度 5 1.67°C

線出力 500 w/cmとした時に燃料の上でどのくらいの温度差がつくかを計算した。

燃料有効長さ 5.5 cm

2本分で 1 1.0 cm

1 キャプセル全出力 1 1 × 5 0 0 = 5.5 kw

8 gpm = 6 3.1 ml/sec

冷却材全温度上昇 ΔT

$$\Delta T = 5500 / (4.18 \times 63.1)$$

$$= 20.86^\circ\text{C}$$

この ΔT を冷却材出入口温度差とすると

上部燃料ピン中央部までの温度上昇は $\frac{3}{4} \cdot \Delta T$

下部 " " " $\frac{1}{4}$

燃料ピンにより線出力が異なるので誤差が入るのはやむをえないが解析面での冷却材温度は次のようになる。

上部ピンに対して 6 7.33 °C

下部 " " 5 6.89 °C

r-熱によるキャプセル内温度上昇

GEの報告によるr-熱の大きさは 1.7 w/gm である。図 1 6. 1 7 は r-発熱を考慮した計算結果であり、計算式は、付録 1 に記す。GEの計算式と多少異なっている。

(2) 線出力評価

図19～26に各ピンの温度分布と線出力を示す。実線で示す温度分布はGEが計算して来たものであり、一点破線は前記熱伝導率を使用して計算したものである。図中にある測定値は照射開始後1時間経過した時のものであり、まずこの時点での線出力を求め線出力履歴は温度に正比例するものとして求めた。図19～26の実測値と計算値の比較をすれば熱電対による温度測定がNaK中の温度勾配の影響を受けて真にA熱媒体の表面温度を測定していなかったと思われる。内側熱電対が真の温度より高い温度を記録し、外側熱電対は低い温度を記録したことは明らかである。

図27で $\Delta T = T_i - T_o$ とし

$$T_M = T_o + \frac{1}{3} \Delta T \text{ なる } T_M \text{ を決める。}$$

図16.17で明らかなようにA熱媒体中の温度勾配はほとんど影響されない。これを利用して図27の点線上の T_M なる点を通る計算結果をもってその時の線出力とした。 T_M の定義は内外両NaK層中の温度勾配の比に根拠を置いている。すなわちA熱媒体の内側と外側のNaK層中の各平均温度勾配の比および内側と外側の熱電対巾1mmに相当するNaK層の各平均温度勾配の比は表4に示す通りである。この結果から内側熱電対は外側のそれより約2倍の大きさの差を含むものと思われる。よって上記のような方法を用いた。

図19～26にあるGE計算結果はA熱媒体の内側温度が実測値に合うものとして参考のためにのせた。線出力の履歴を図28～31に示す。

(3) 燃 焼 度

前項の線出力に基いて各ピンの燃焼度を計算した。

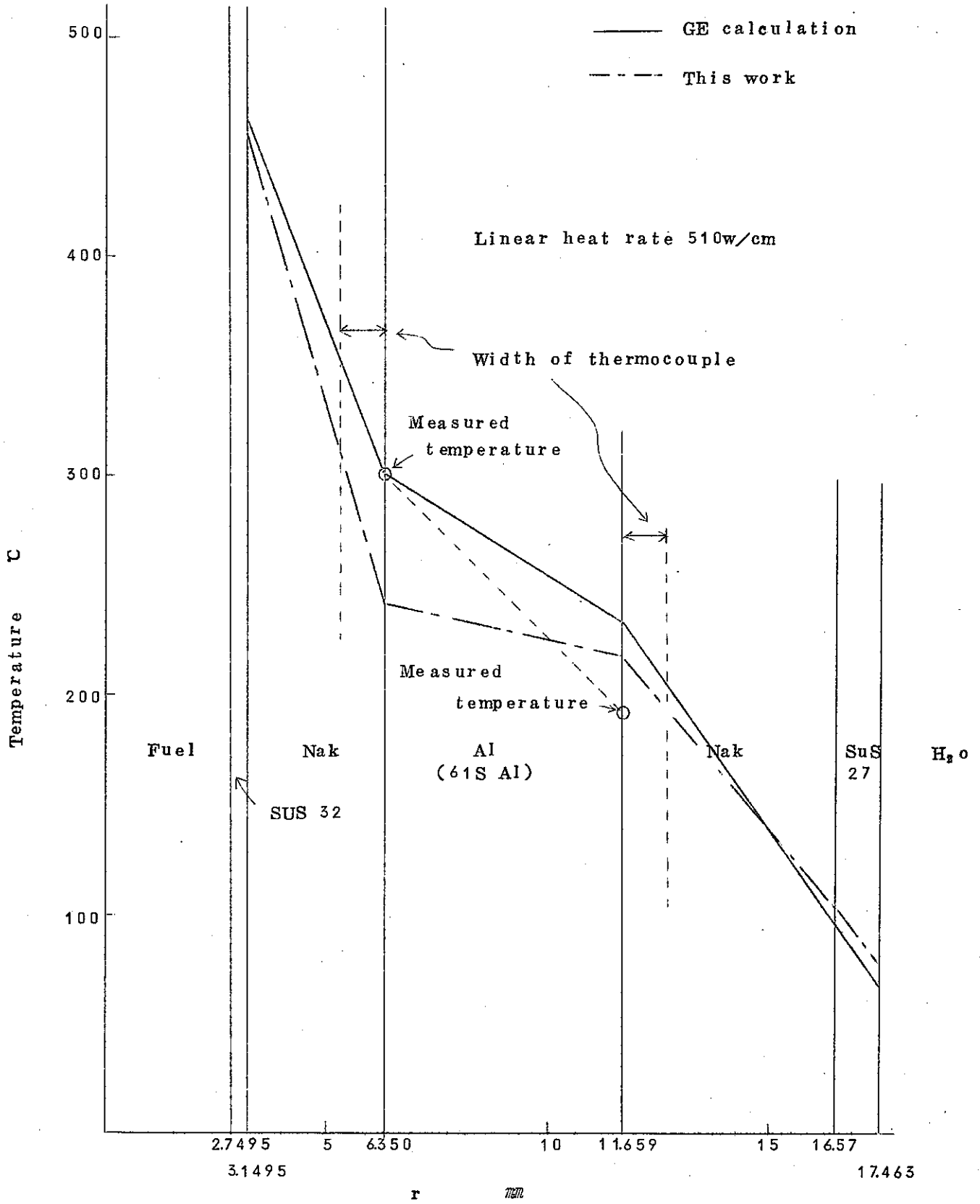
$$\text{Burnup} = Q \cdot D / \rho \text{ (MWD/T)}$$

Q : 線出力 (W/cm)

D : 照射日数

ρ : 燃料単位長当りの重量 (g/cm)

上式により計算した結果を表5に示す。



GETR-1RT(B)-A

Figure 19 Temperature distribution in capsule

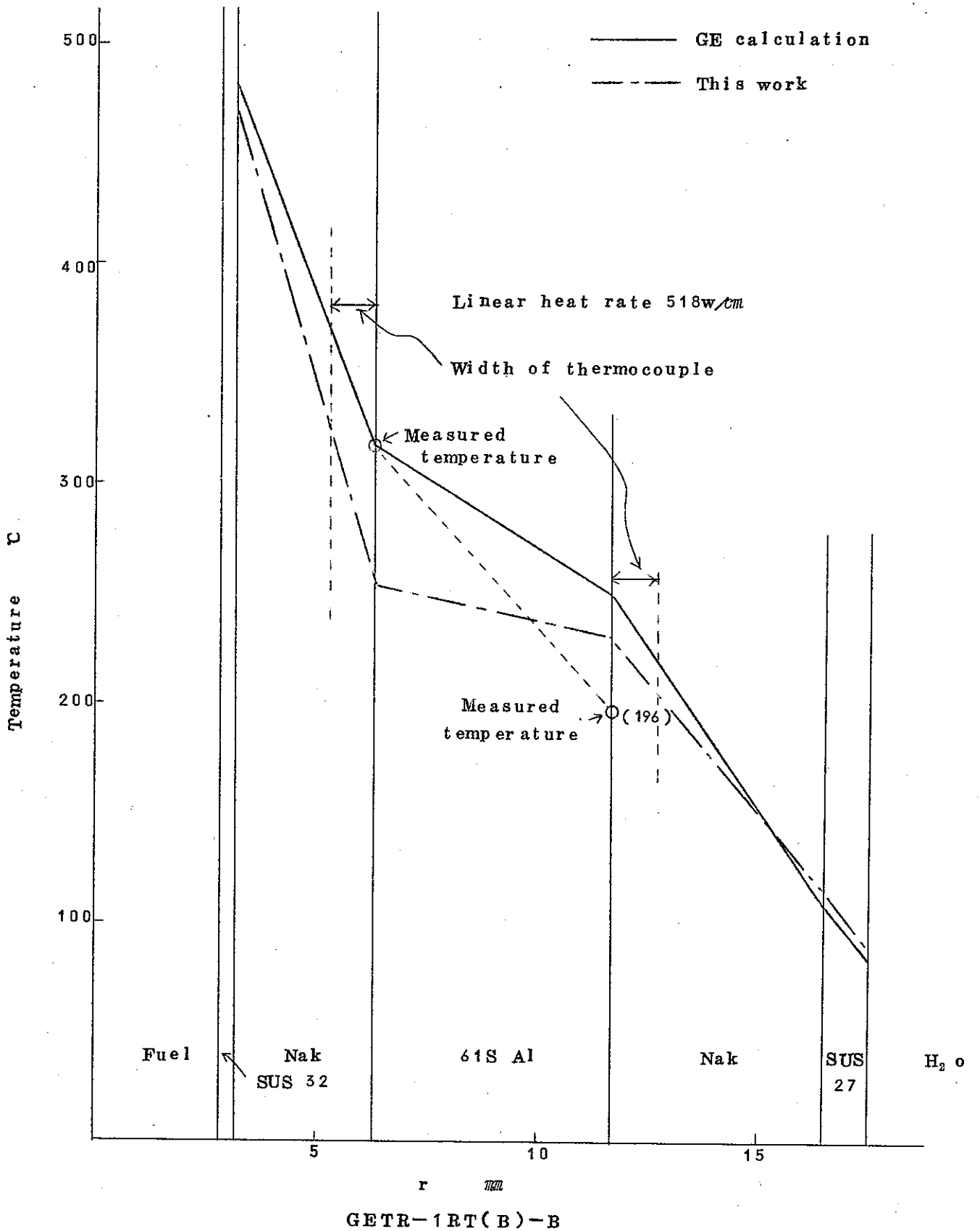
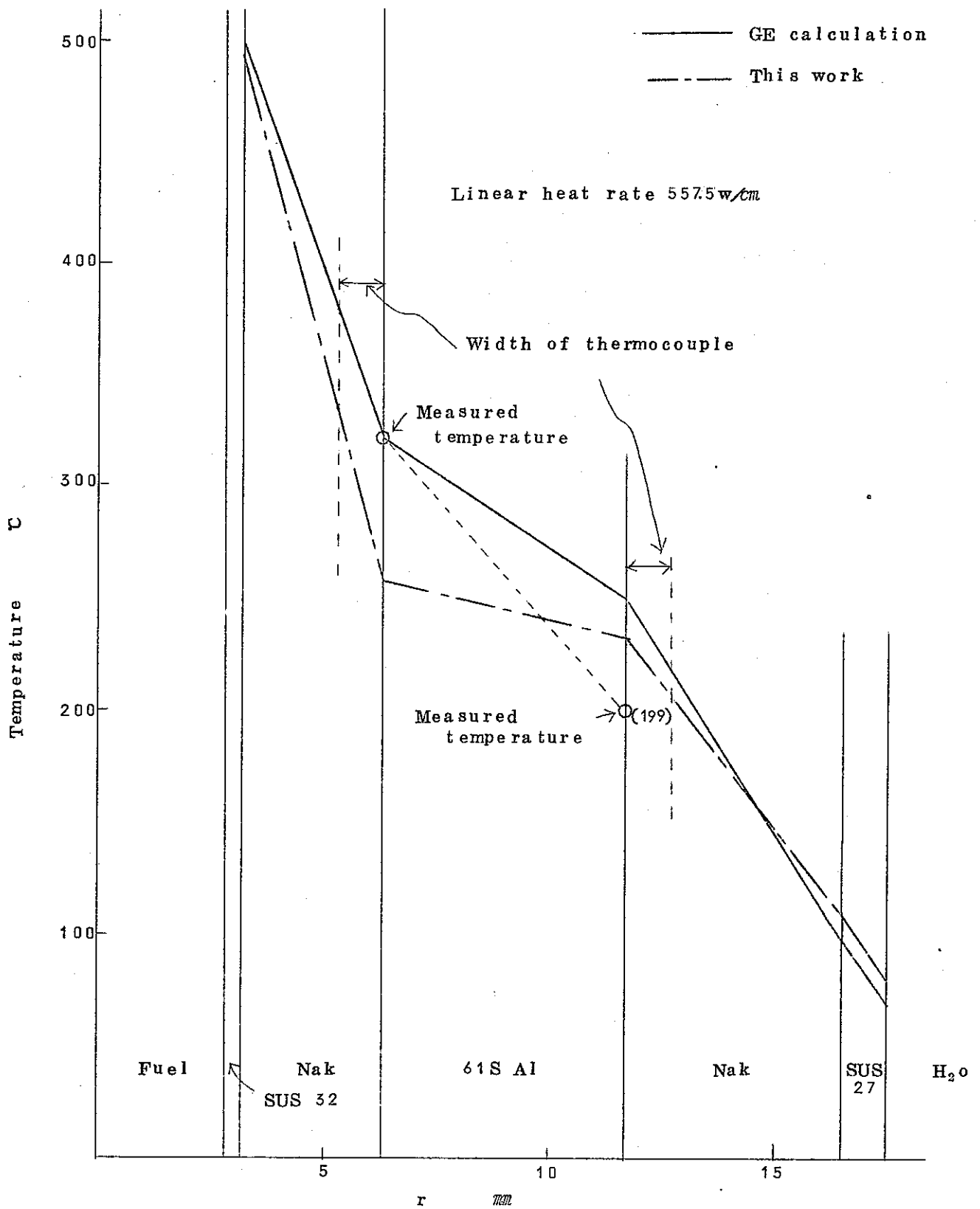


Figure 20 Temperature distribution in capsule



GETR-1RT(B)-C

Figure 21 Temperature distribution in capsule

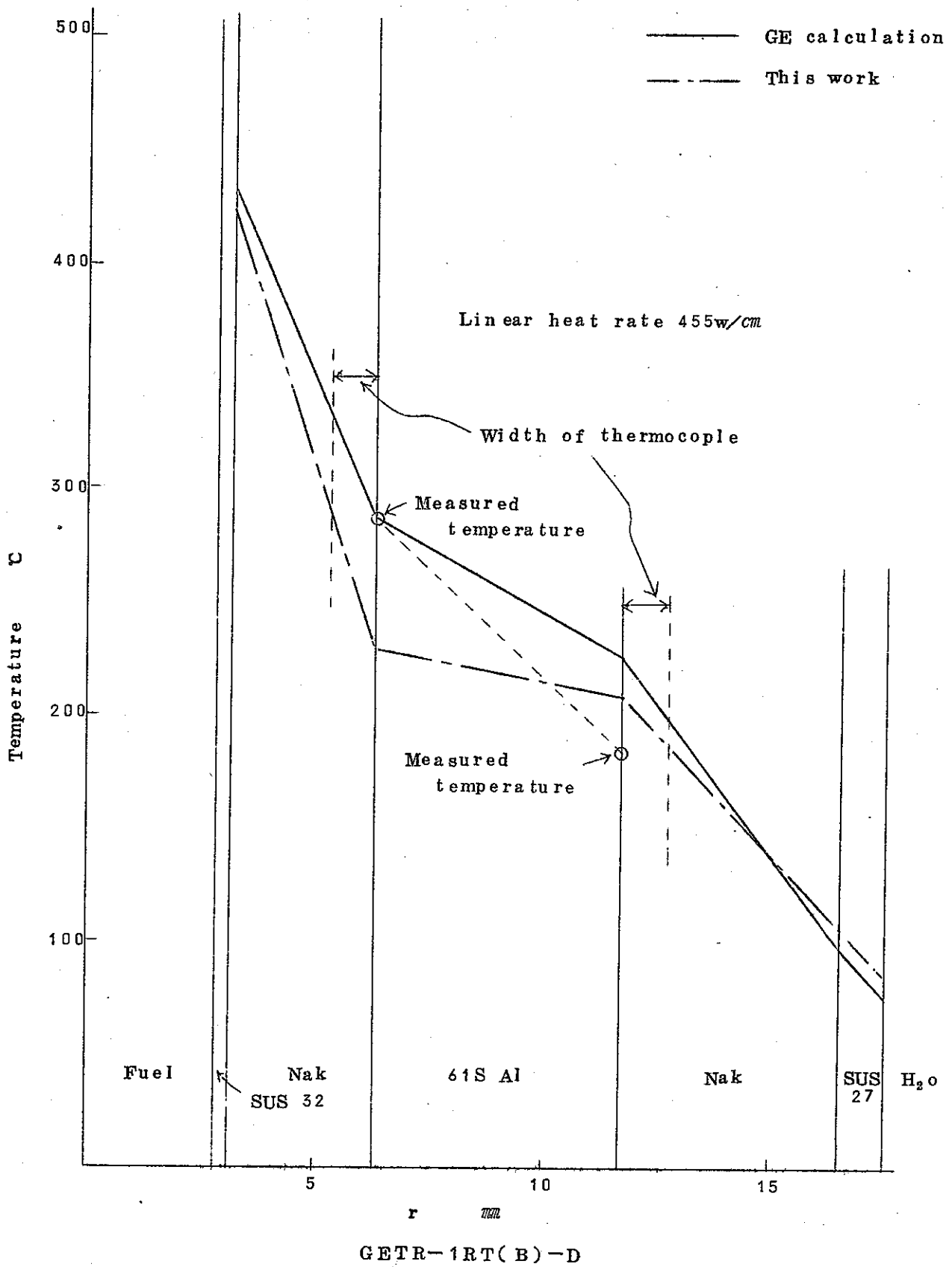
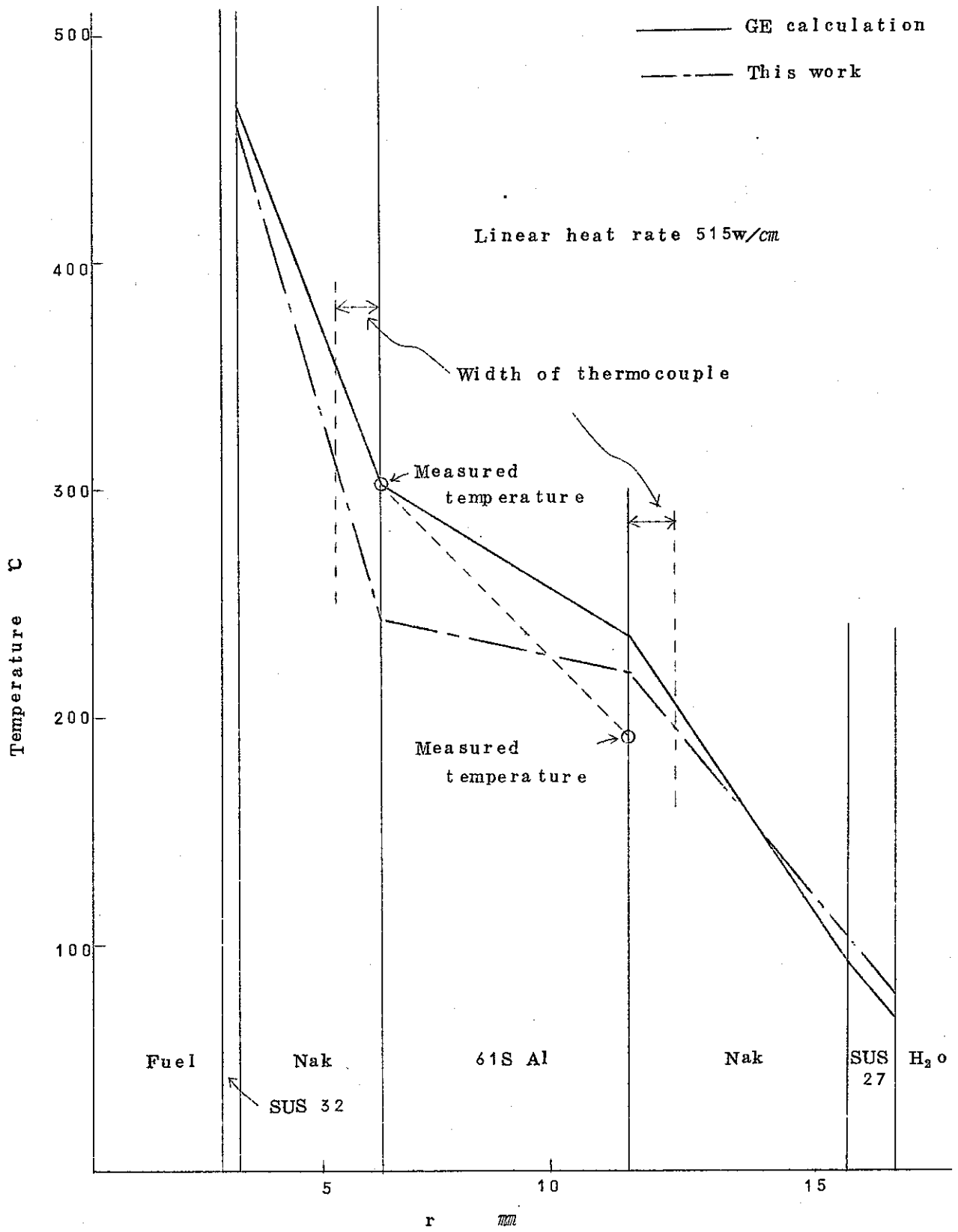


Figure 22 Temperature distribution in capsule



GETR-1RT(B)-E

Figure 23 Temperature distribution in capsule

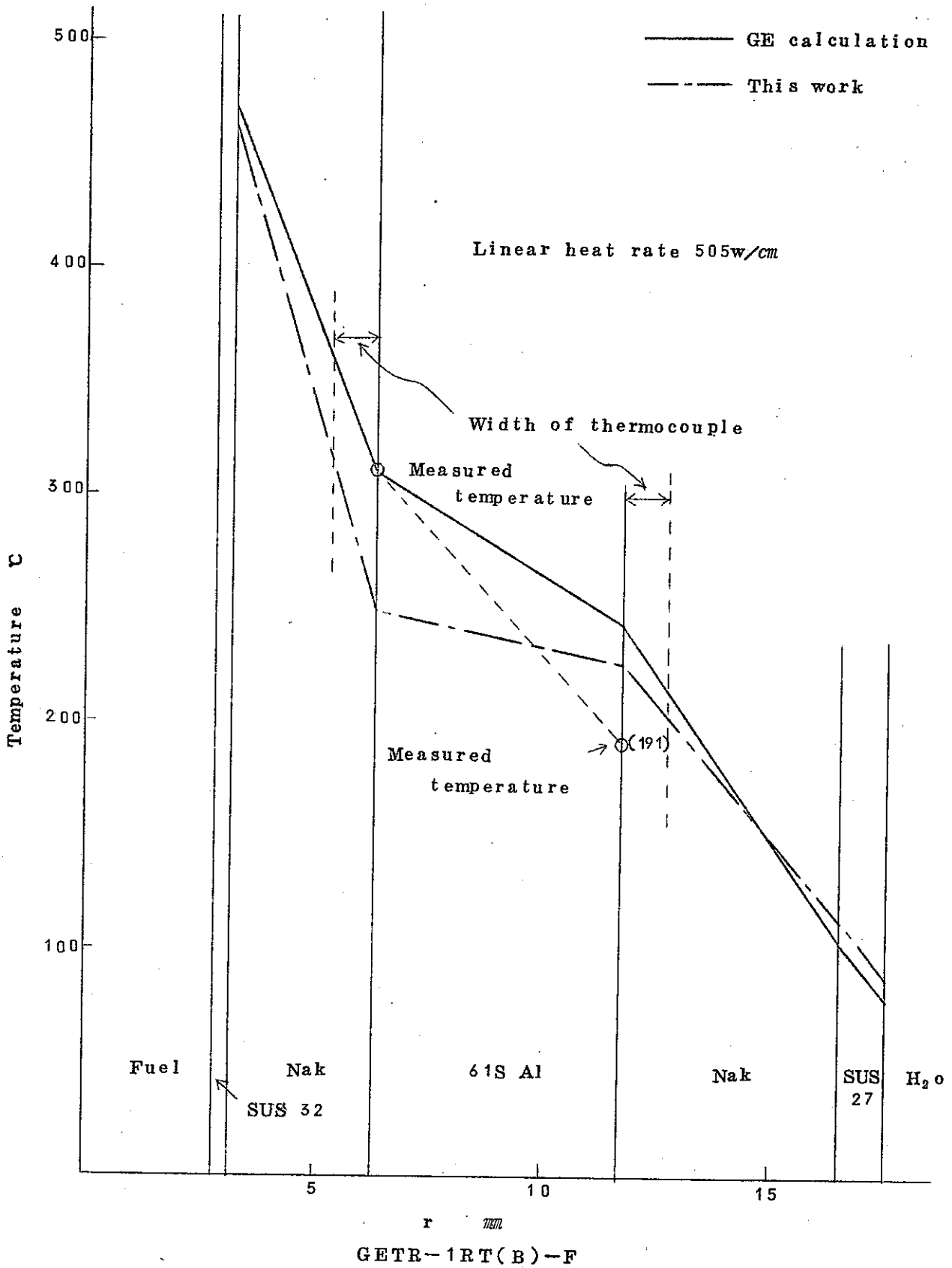
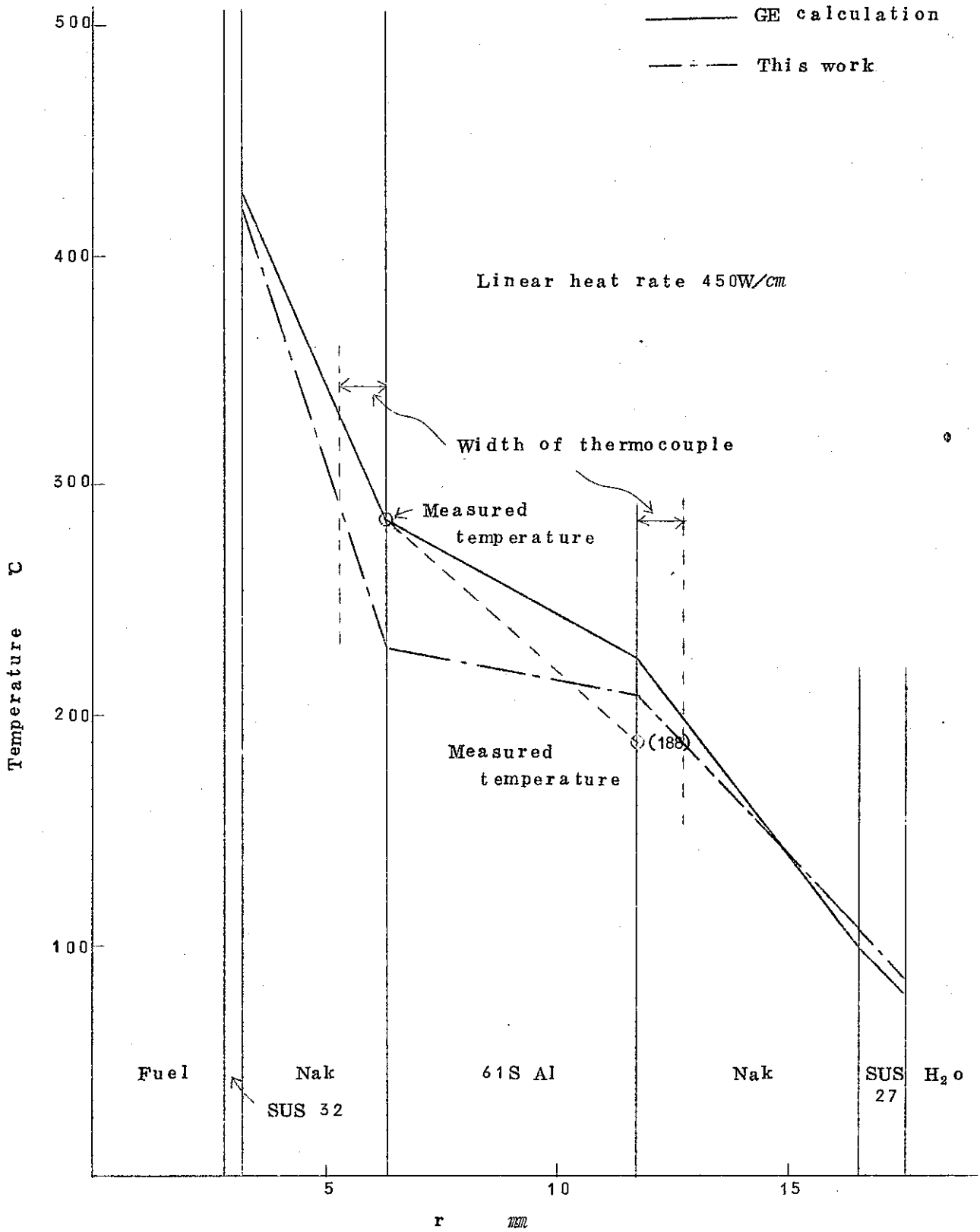


Figure 24 Temperature distribution in capsule



GETR-1 RT(B)-G

Figure 25 Temperature distribution in capsule

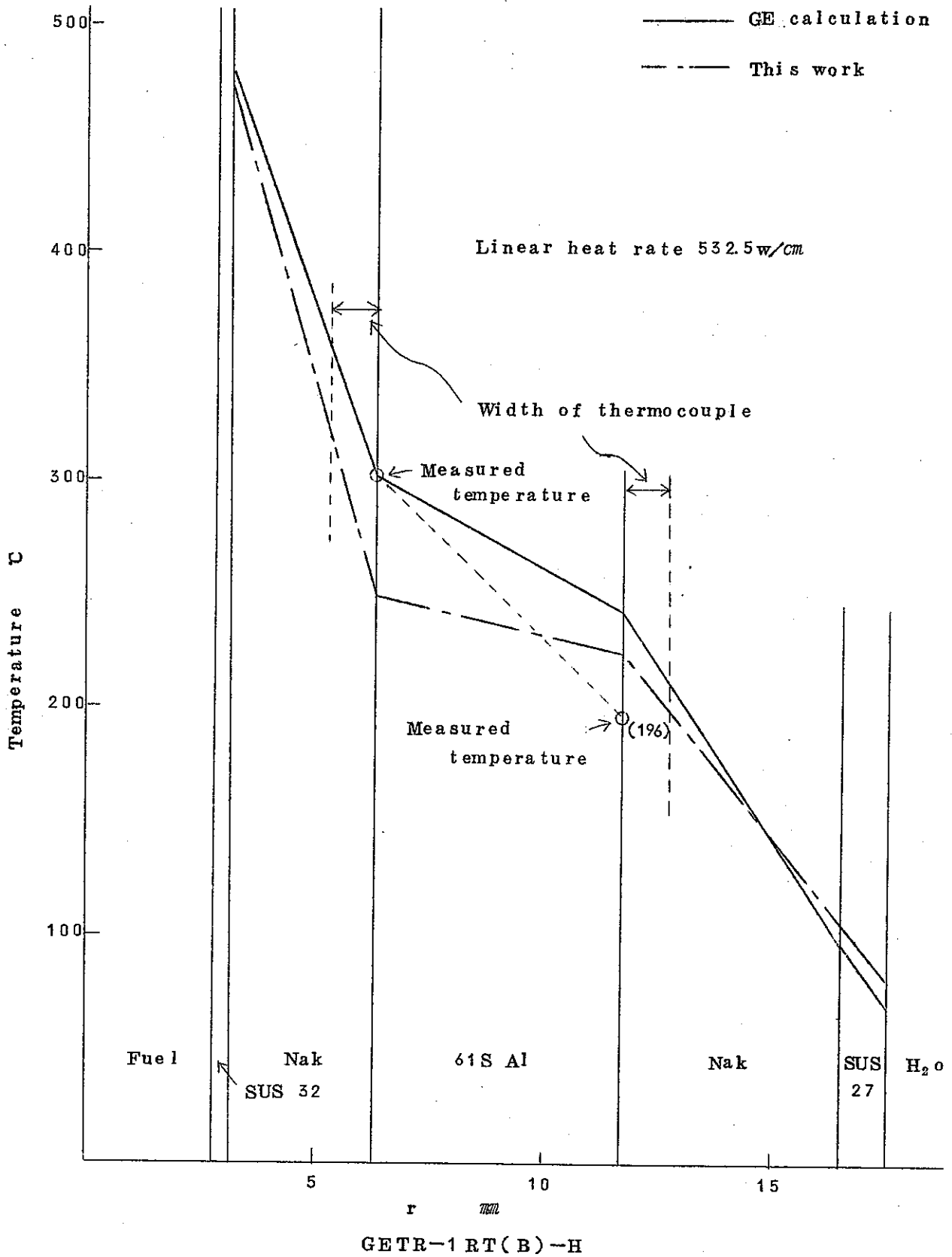


Figure 26 Temperature distribution in capsule

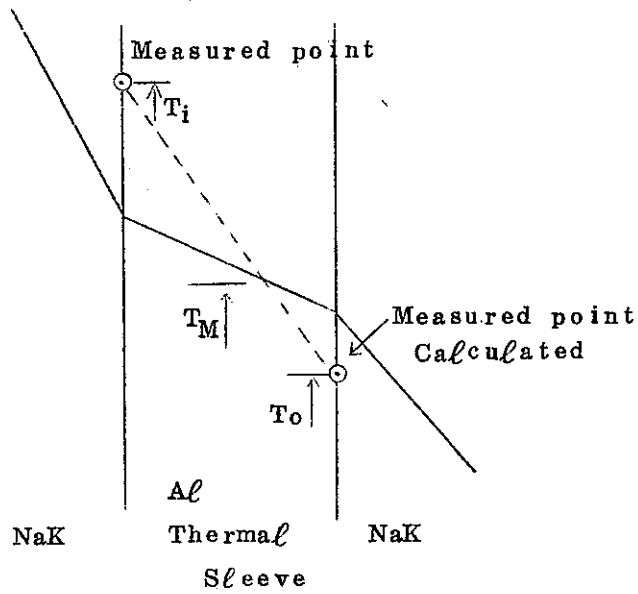
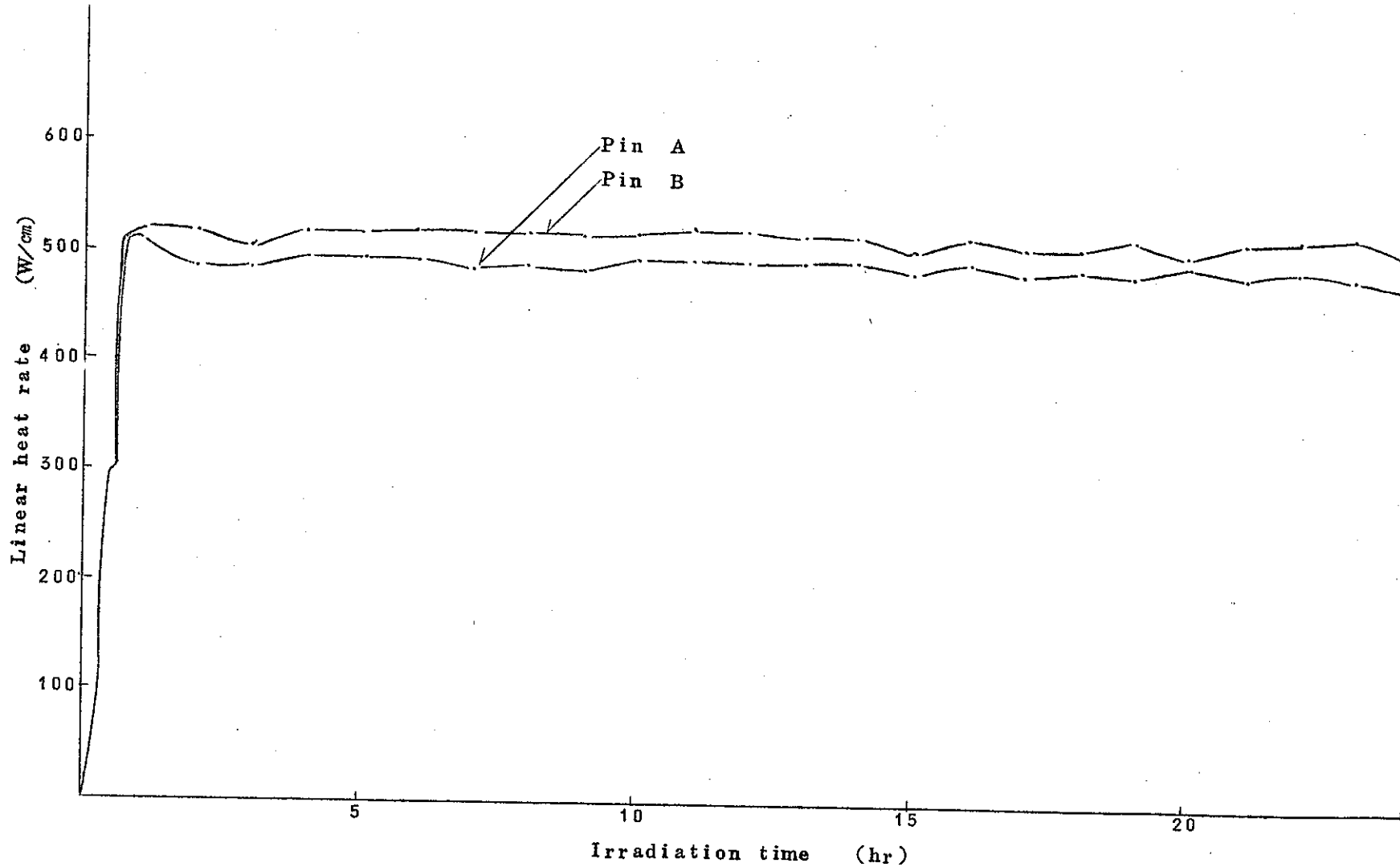


Figure 27 Calculation method of linear heat rate



-36-

Figure 28 History of linear heat rate

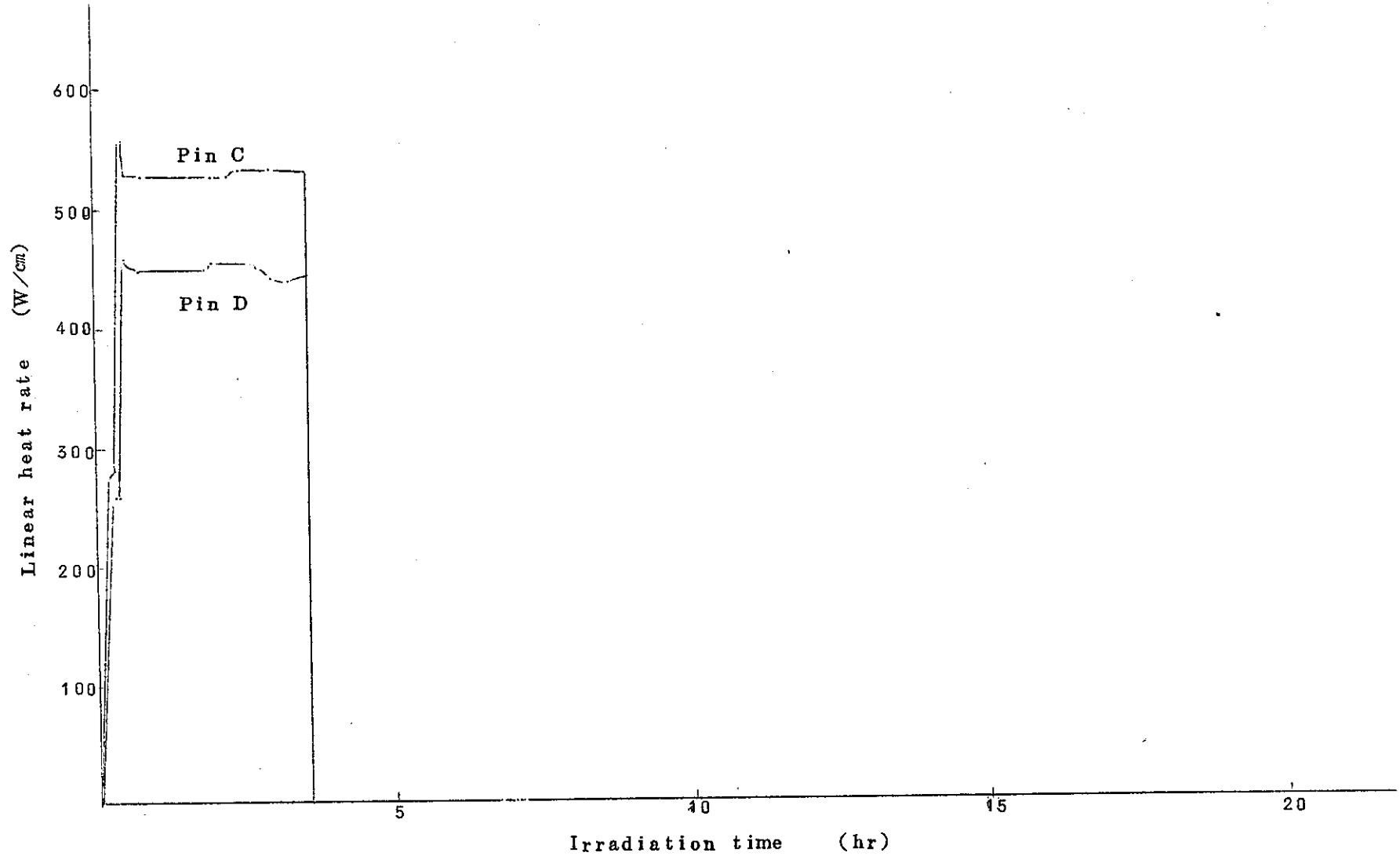
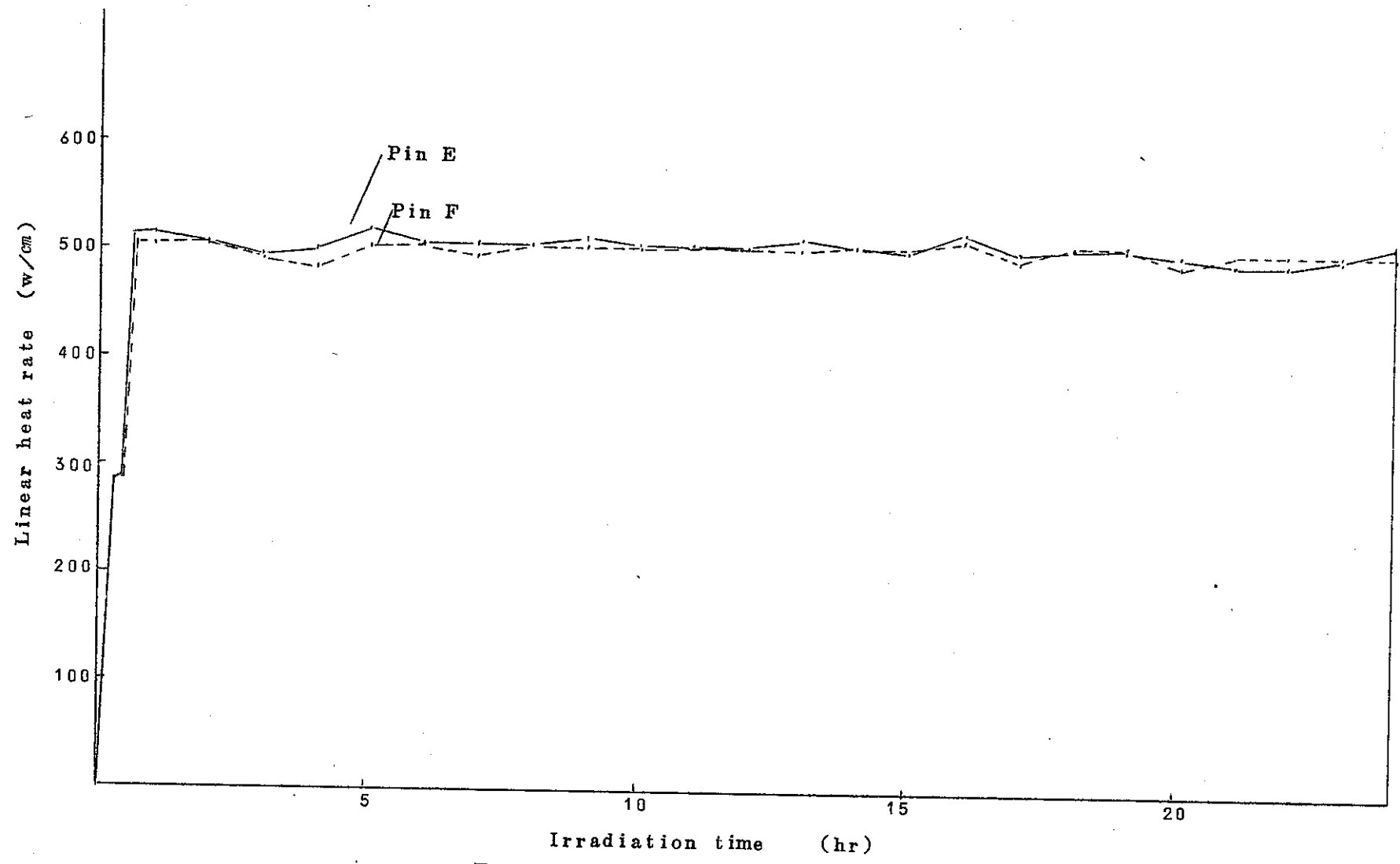
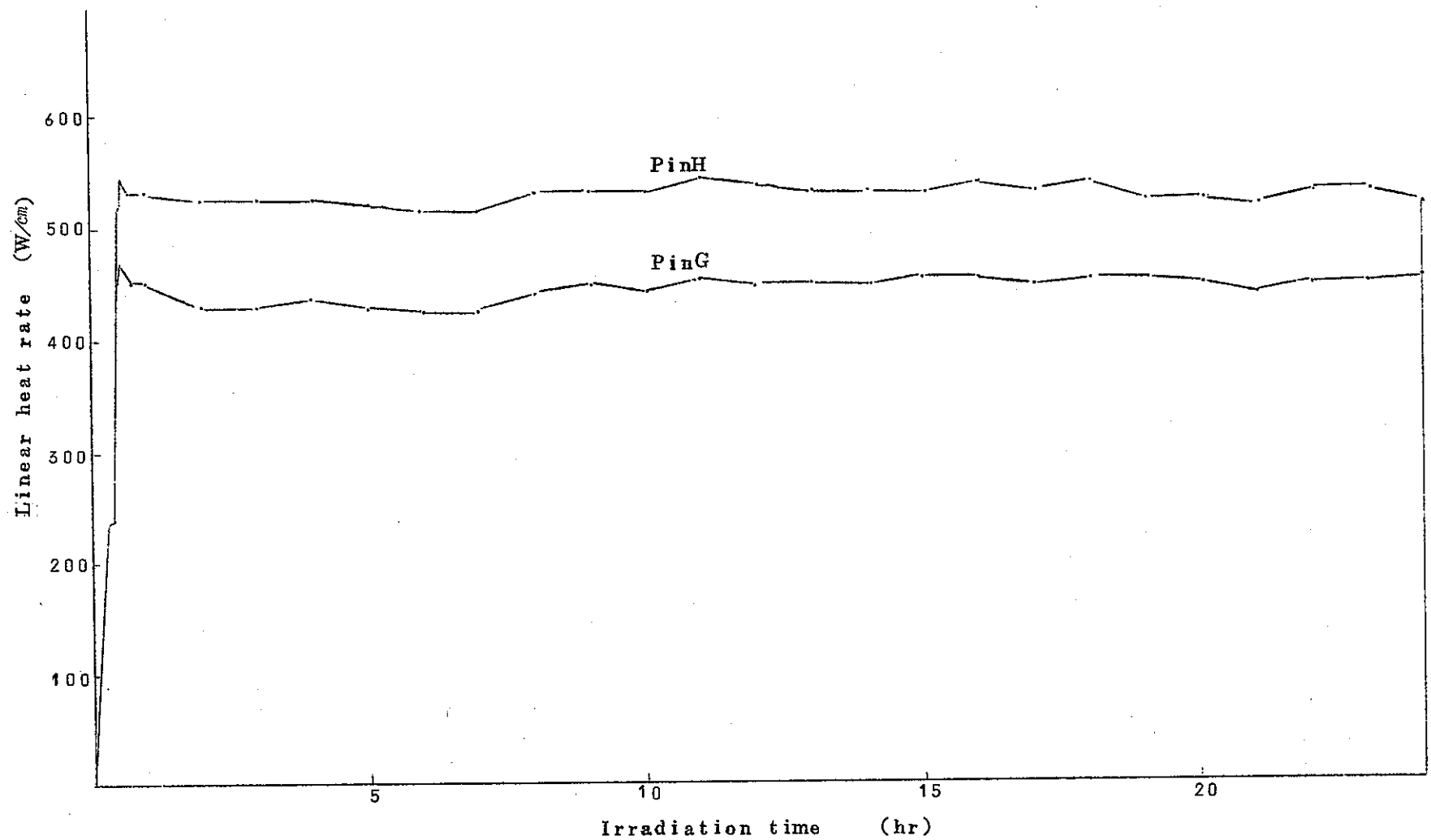


Figure 29 History of linear heat rate



—38—

Irradiation time (hr)
Figure 30 History of linear heat rate



—59—

Figure31 History of linear heat rate

表 4 内外NaK層中の温度勾配比

試 料	$\Delta K_i / \Delta K_o$	$\Delta K_{it} / \Delta K_{ot}$
A	2,875	1,767
B	2,680	1,733
C	2,769	1,636
D	2,857	1,741
E	2,916	1,800
F	2,680	1,767
G	2,727	1,846
H	2,730	1,774

ΔK_i : 内側NaK層中の平均温度勾配

ΔK_o : 外側

ΔK_{it} : 内側NaK層中で熱電対巾1mm間の平均温度勾配

ΔK_{ot} : 外側

Table 5 Irradiation data

Fuel pin	Average rod power w/cm	Maximum rod power w/cm	Irradiation time hours	Burn up MWD/T
A	490	510	24	204.4
B	515	520	24	232.6
C	530	560	3	27.6
D	450	460	3	25.4
E	505	520	24	211.1
F	505	515	24	231.0
G	450	470	24	218.0
H	532	545	24	250.0

5. 燃料内温度分布および密度分布

(1) キャプセル内中性子束分布および出力密度分布

燃料内温度分布を計算するにあたり燃料内中性子束分布を THERMOS CODE によりおこなった。この結果を図 32 ~ 36 に示す。燃料内半径方向出力密度を図 37 ~ 40 に示す。

(2) DIRAD CODE による燃料密度分布, 温度分布計算

照射することにより半径方向燃料密度が照射時間と共にどう変化していったか, またその時の温度条件はどうであったかについての計算が DIRAD CODE により可能である。すでに求めてある線出力履歴とその他の条件を用いて計算した燃料密度変化および燃料内最高温度の変化状態を図 41 ~ 48 に示す。また最終の密度分布, 温度分布を図 49 ~ 56 に示す。

これらの計算結果をまとめたのが表 6 である。ピン A・B・H については線出力評価が低めであったためか, 計算による中心空孔の径は小さめである。ピン A の計算結果からすれば中心空孔が出来ないのは当然であるから実際には平均線出力, 最高線出力共数%大きかったものと思われる。G についてはほぼよい一致と言えるが, H の不一致は, 中性子透過写真等を参考にしてみると照射中の或る時期に燃料のスランピング現象がおこり穴が大きくなったのではないかと思われる。

C・D の金相と計算の比較からレンズ状ボイドの発生から移動を開始するまでの機構を明らかにし計算コードに組み込む必要があるかもしれない。

しかしこれについては更にデータの積み上げと評価が必要である。

Table 6 Calculation results of fuel temperature and structure

Fuel pin	Max. center temp. ℃	Average center temp. ℃	Average fuel surface temp. ℃	Central void (calculated)	Central void (measured)
A	1850	1770	700	0.00	0.08
B	2200	2100	745	0.14	0.20
C	2140	1930	755	0.01	0.00
D	2100	1830	650	0.01	0.00
E	1985	1945	720	0.00	0.00
F	1760	1760	720	0.27 (original)	0.27 (original)
G	2450	2100	640	0.22	0.20
H	2590	2130	750	0.28	0.40

6. 燃料の組織観察

(1) クラックパターン

中心空孔が出来たり柱状晶が形成されているような組織においては、クラックは主に半径方向のものが多い。一方組織変化の起っていないような試料ではクラックは網目状である。

単時間照射のためと思われるが円周方向のクラックが全試料についてほとんどみられなかったのは特長的である。 Photo 3.4.5.6

(2) 燃料-被覆管の両立性

特に被覆管に問題があったのは試料Eである。管内壁は結晶粒の欠け落ちたような凹凸を示している。単時間照射でもあり両立性が悪かったというよりも、被覆管材質に欠陥があったのではないかと思われる。 Photo 7

(3) 不純物

A：周辺部にかすかな金属析出物が認められる。 Photo 3-№ 11.12

B：Gray phase が周辺部にみられる。 Photo 4-№ 11.

かなり大きな金属状物体がみられるが、場所からして研磨中の被覆管の切りくずが入り込んだと思われる。 Photo 4-№ 13

C：不純物相はみられない。

D：周辺部に Gray phase がみられる。 Photo 6-№ 5

E：金属析出物 Gray phase 共、周辺部にわずかにみられる。 Photo 7-№ 5

F：周辺部に Gray phase がみられる。 Photo 8-№ 11

G：周辺部にわずかに Gray phase がある。 Photo 9-№ 11

H：周辺附近の結晶粒界および粒内に金属状析出物がある。 Photo 10-№ 5.6

また Gray phase もみられる。 Photo 10-№ 11

(4) プルトニウムの偏析

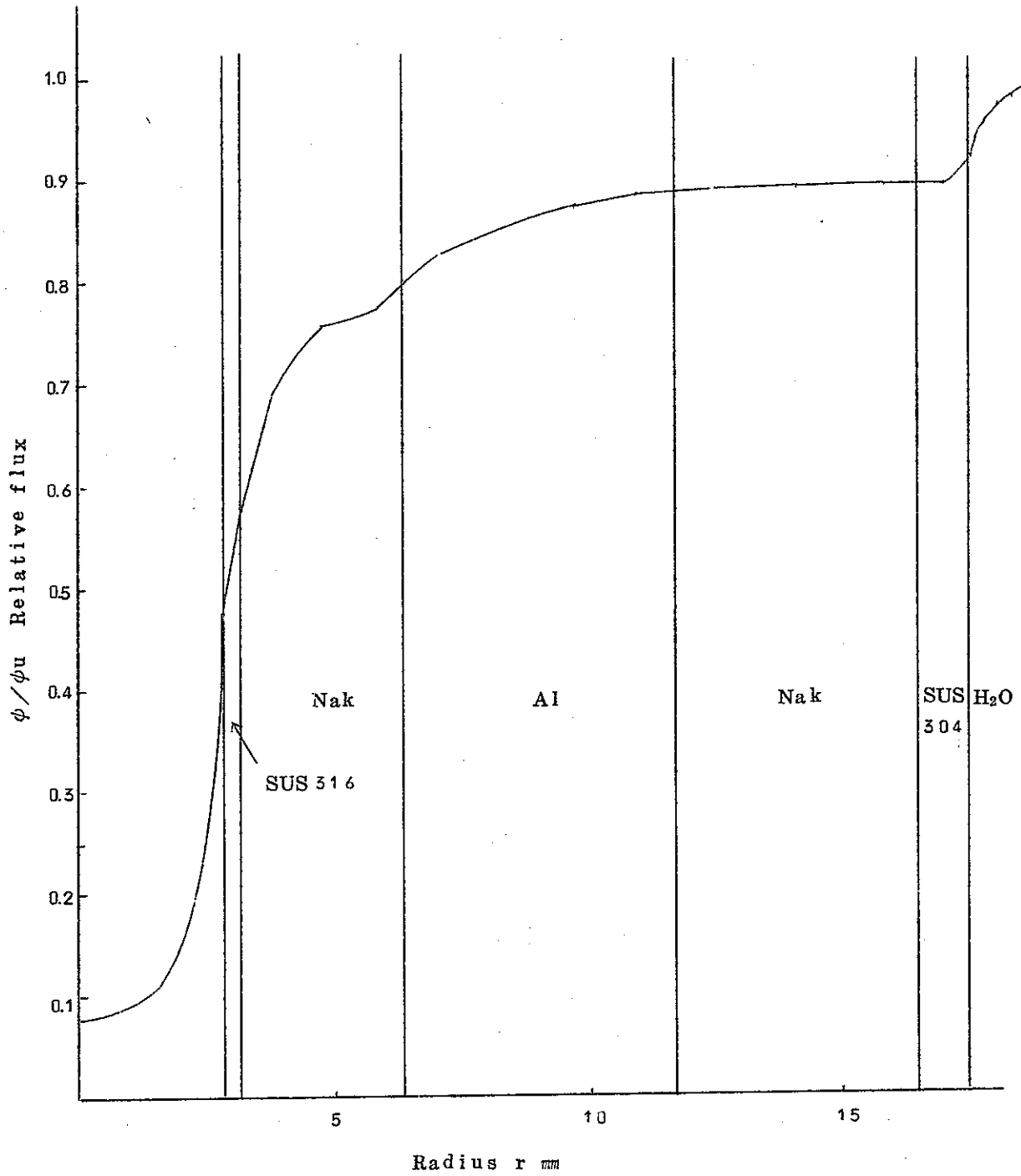
照射後の試料にプルトニウムの偏析があるかないかについては、 α -オートラジオグラフ写真の解像度が悪くて判然としないが、偏析は無いようである。照射前の写真でみると、G Hの振動充填燃料に使用した粒の中に0.1 mm ϕ 程度のスポットがみとめられる。

(5) ボイド形状と分布状態

全試料につき燃料周辺部には照射前より存在したボイドがそのまま存在している。レンズ状ボイドがみとめられるのはA・B・F試料であってG・Hにはレンズ状ボイドに類似の小さなボイドが柱状晶外部に存在する。

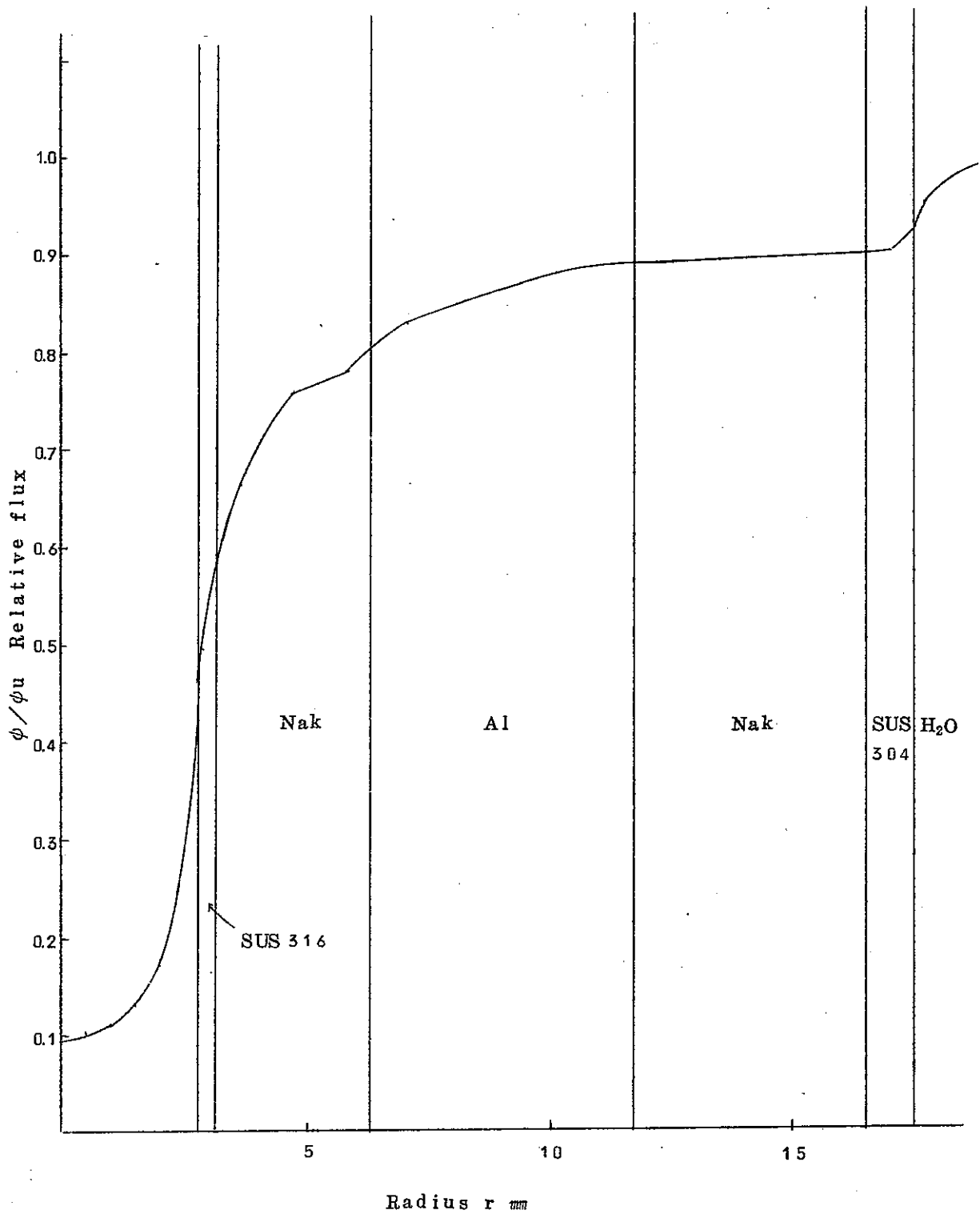
E試料のボイド分布は他に比して特異な様相を呈しているが、照射前試料のボイド分布も特異であり、このためかと思われる。

H試料で小さなレンズ状ボイドの外側に縦長のボイドが存在する。 Photo 3~10 参照



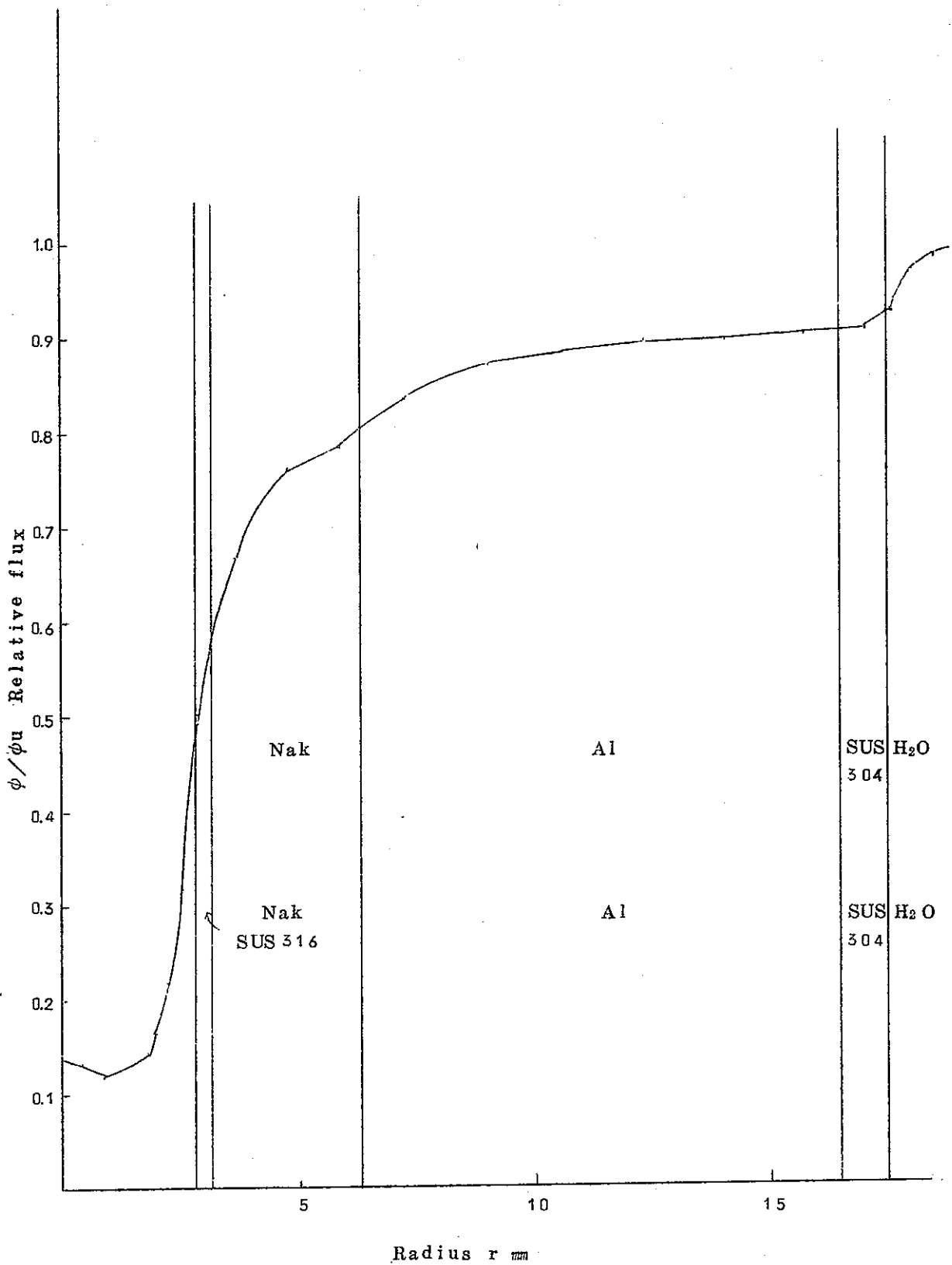
GETR-1RT(B)-A, B, C, D

Figure 32 Neutron flux distribution in capsule



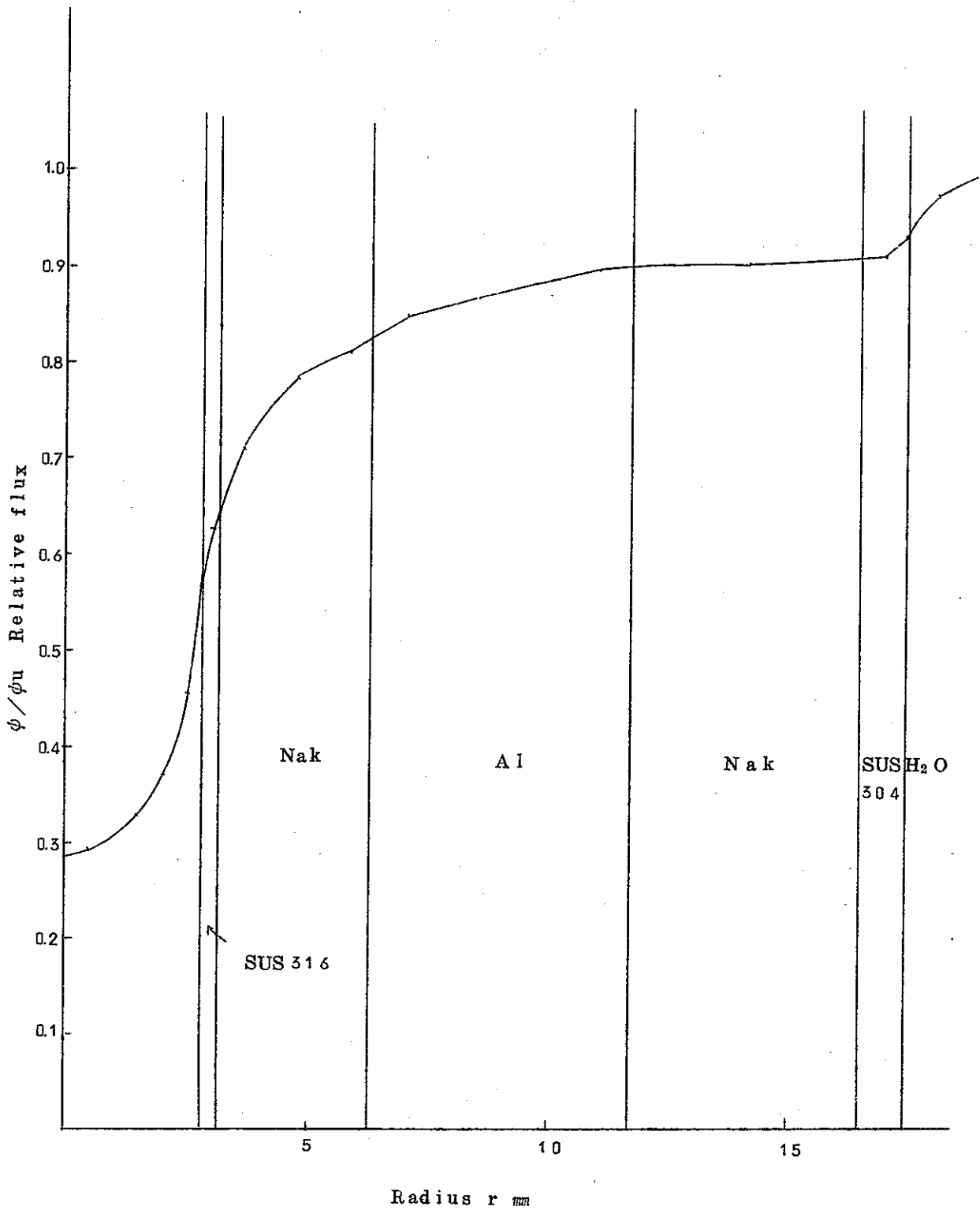
GETR-1RT(B)-E

Figure 33 Neutron flux distribution in capsule



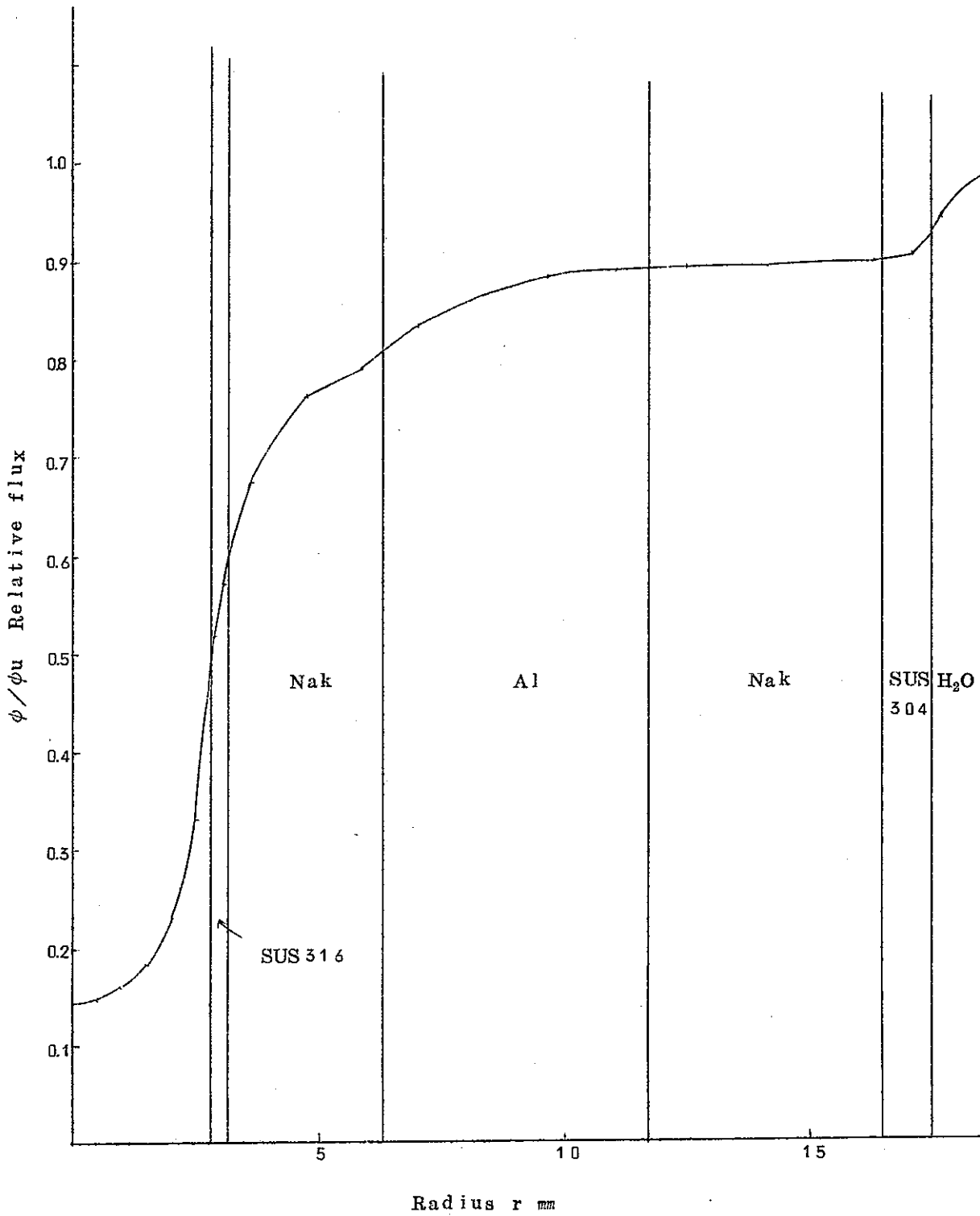
GETR-1RT(B)-F

Figure 34 Neutron flux distribution in capsule



GETR-1RT(B)-F

Figure 35 Neutron flux distribution in capsule



GETR-1RT(B)-H

Figure 36 Neutron flux distribution in capsule

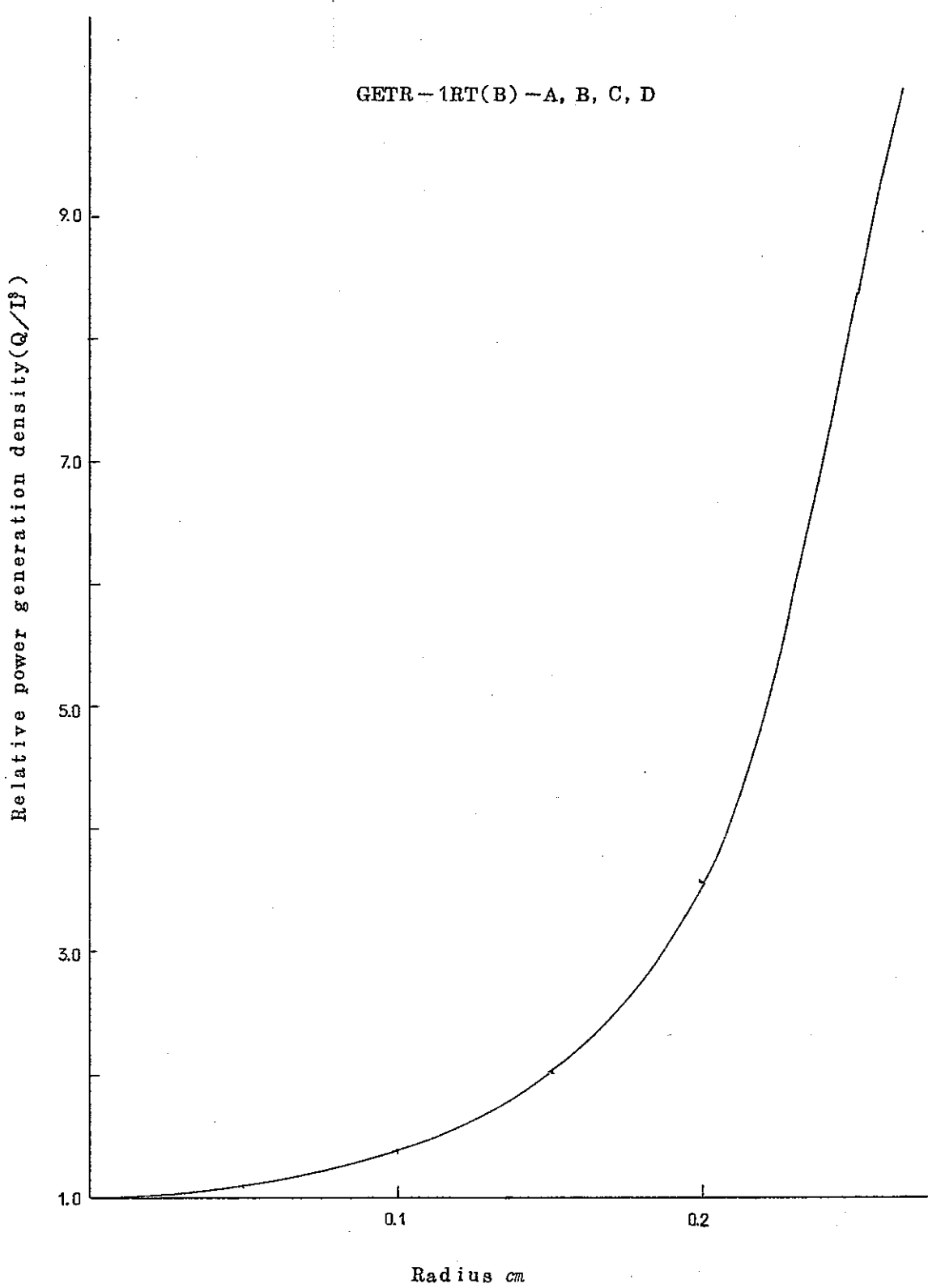


Figure 37 Power generation distribution in a fuel

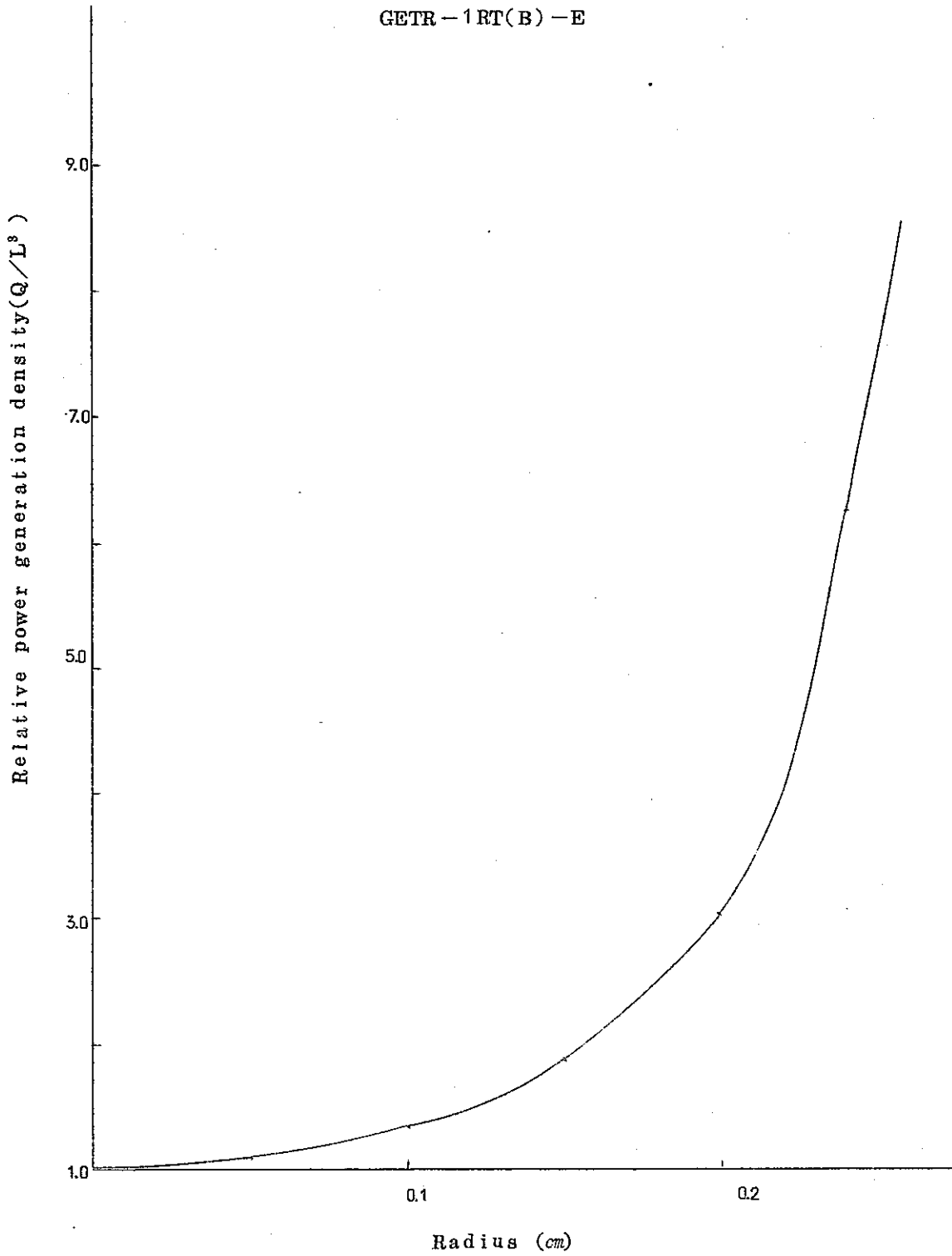


Figure 38 Power generation distribution in a fuel

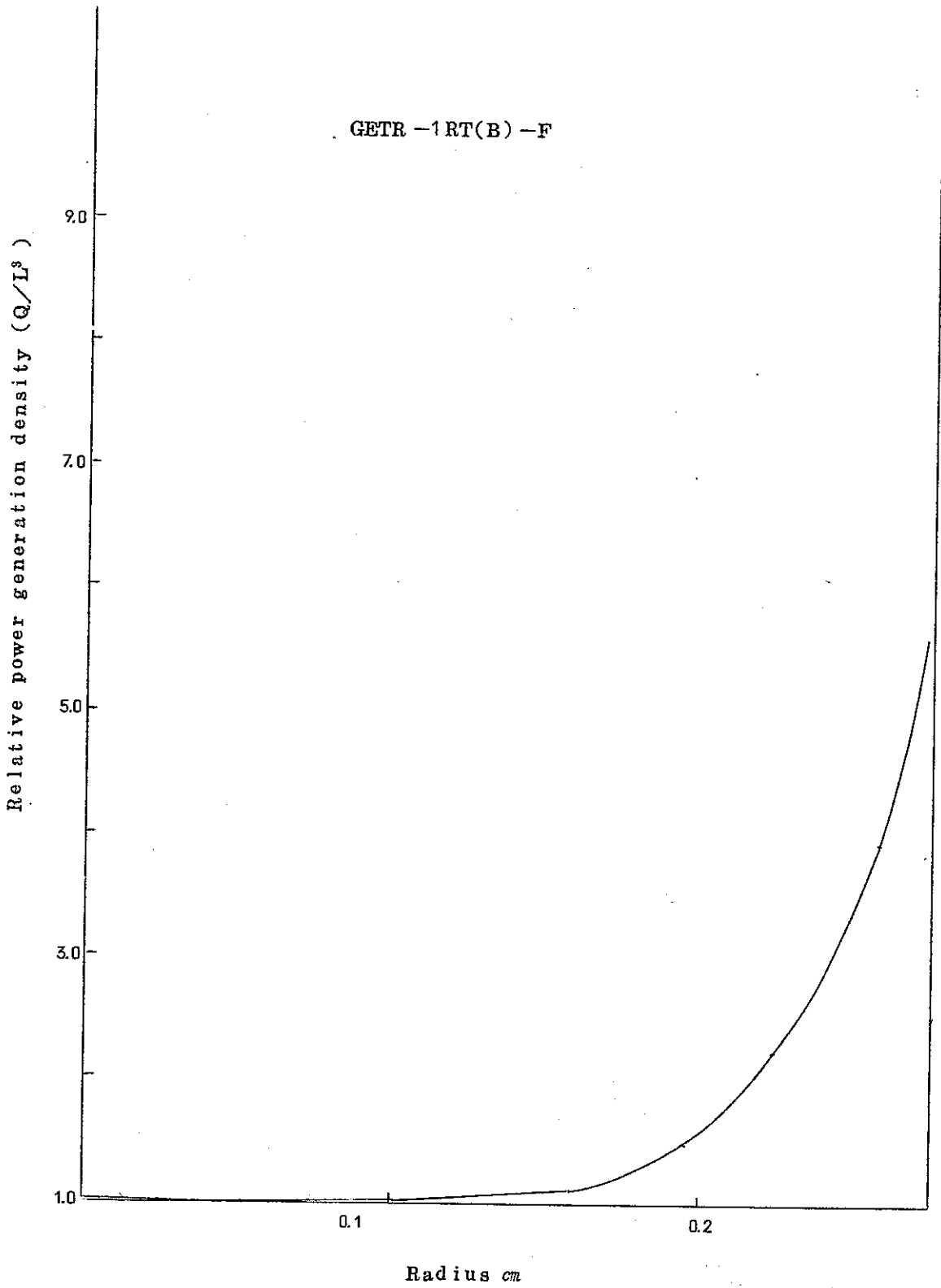


Figure 39 Power generation distribution in a fuel

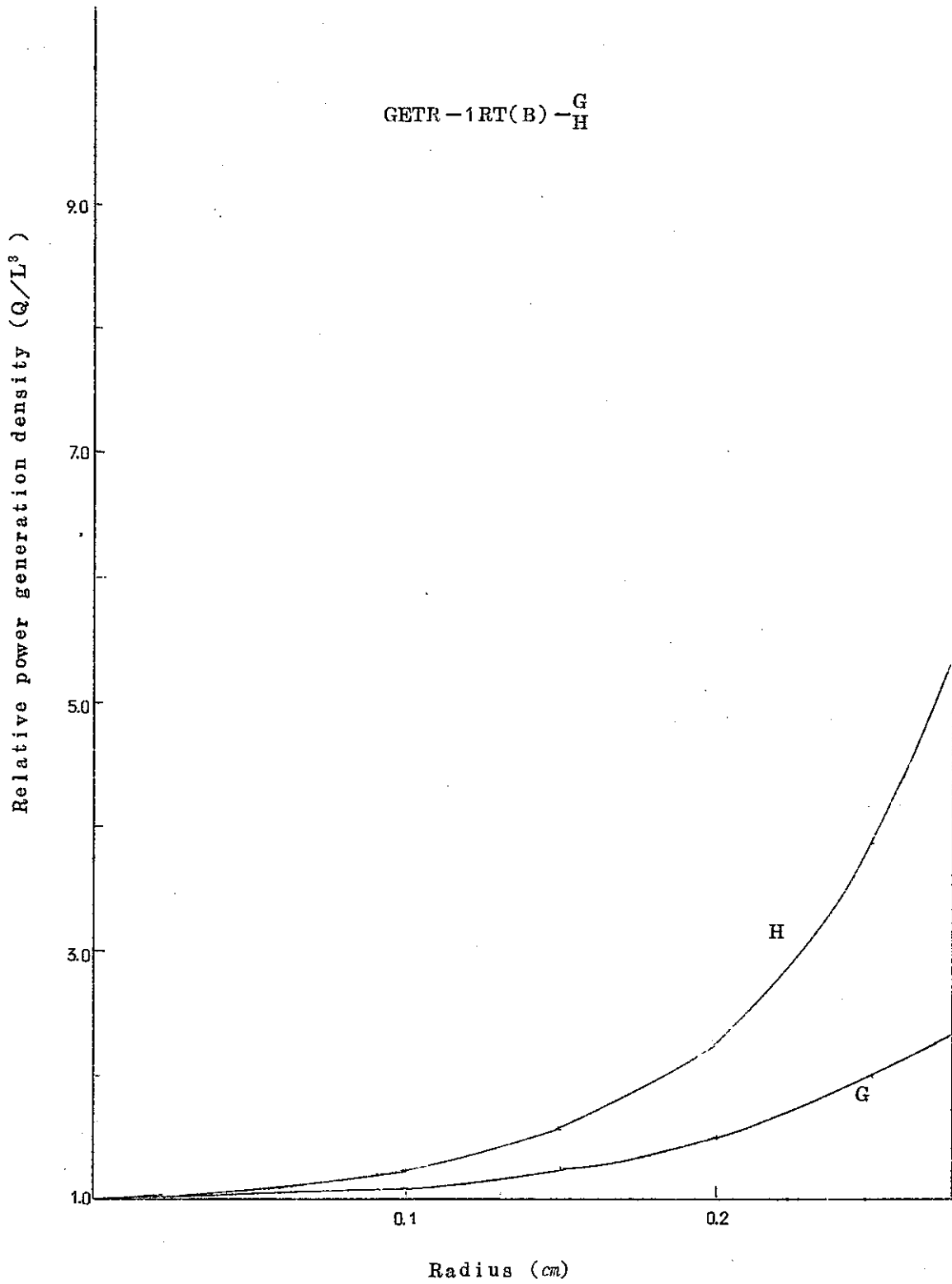


Figure 40 Power generation distribution in a fuel

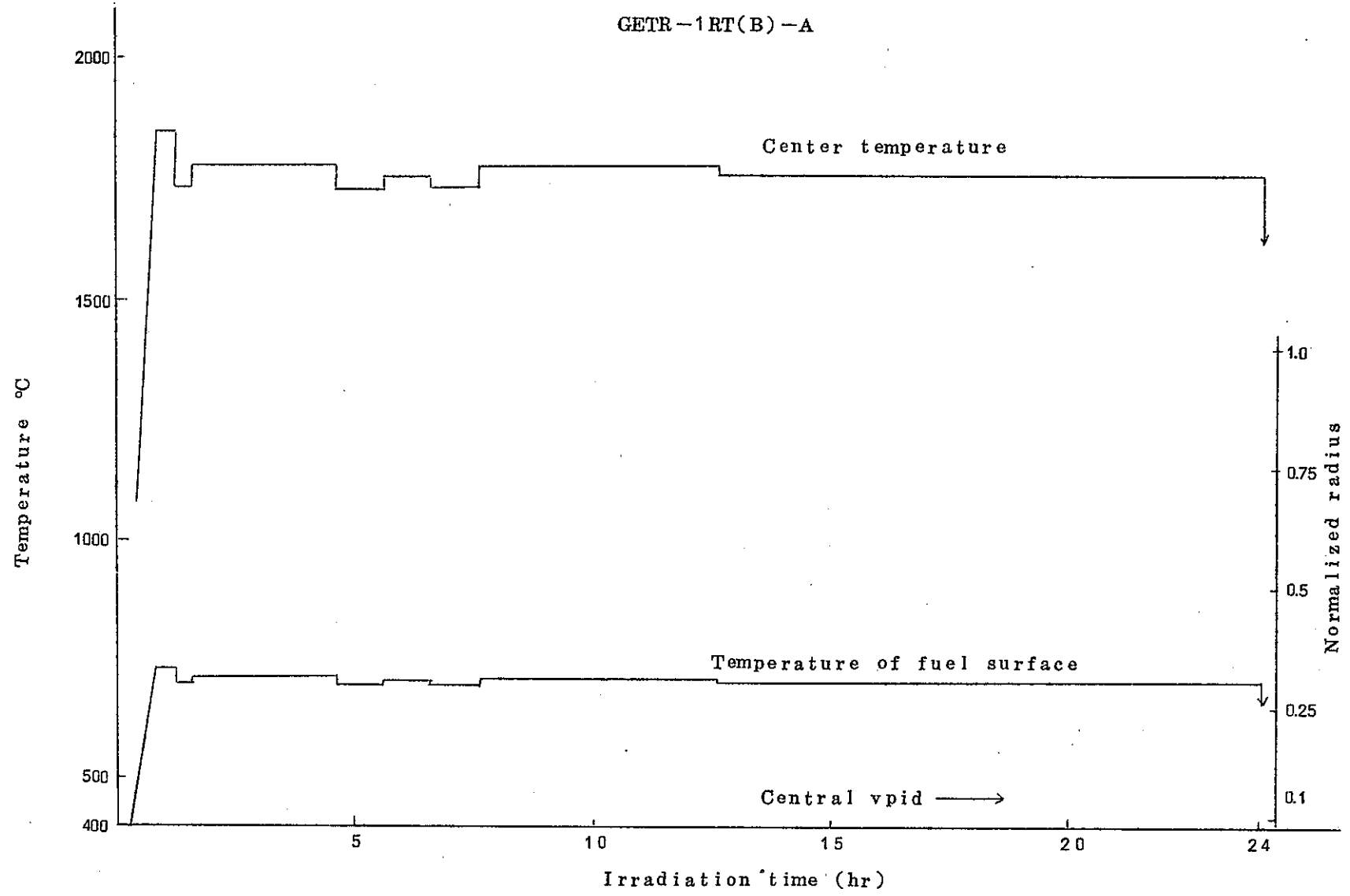


Figure 41 Calculation results of DIRAD CODE

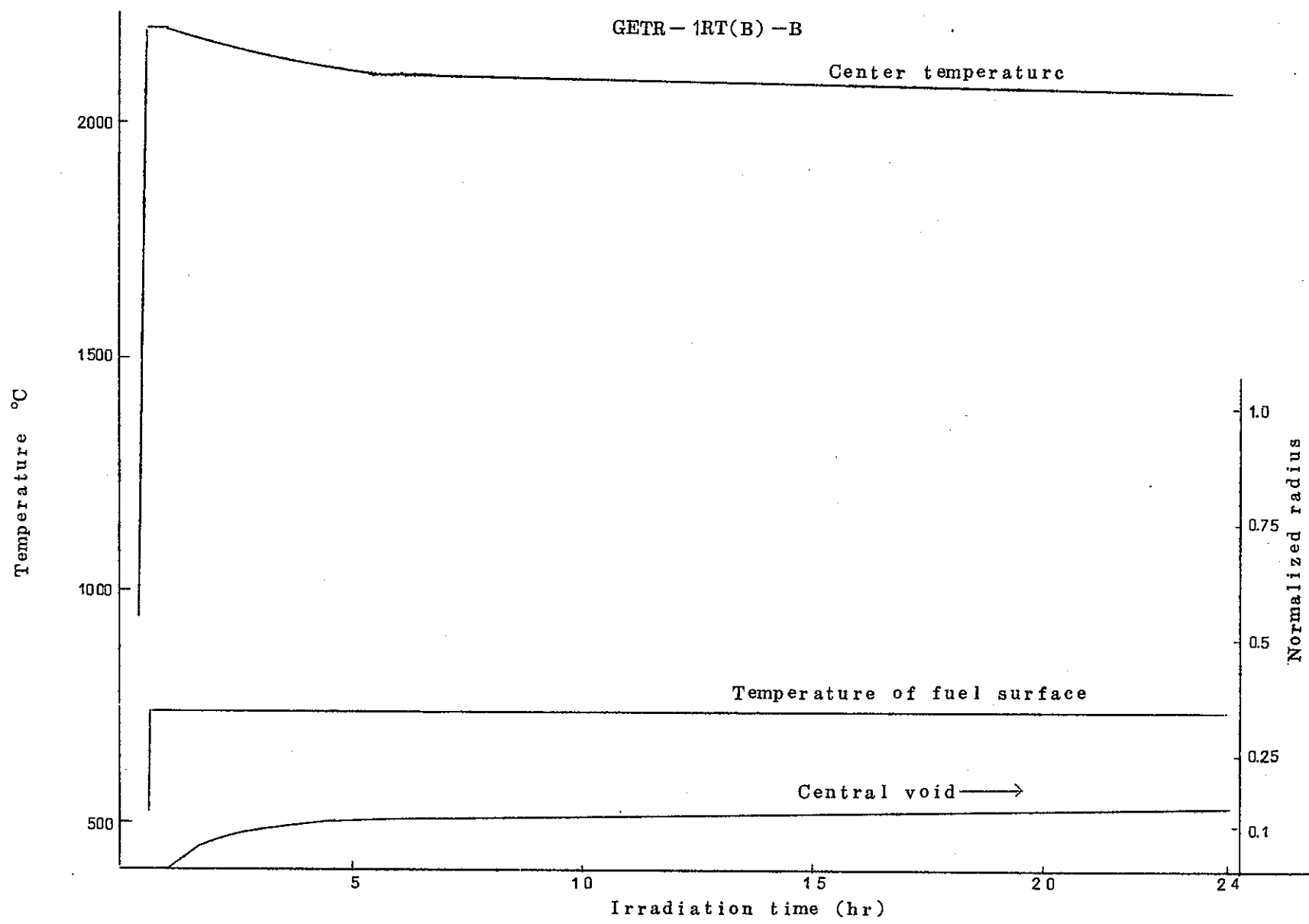


Figure 42 Calculation results of DIRAD CODE

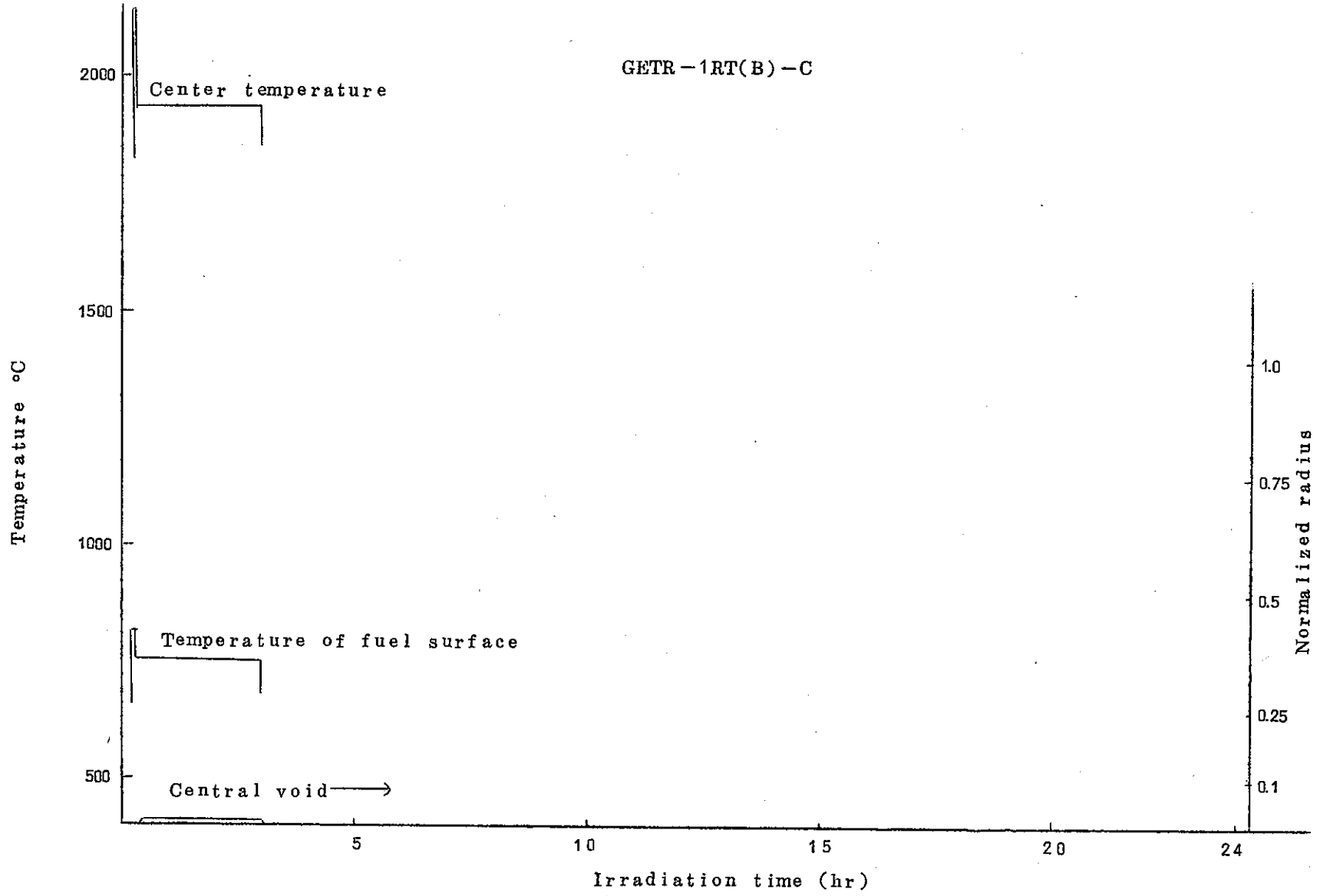


Figure 43 Calculation results of DIRAD CODE

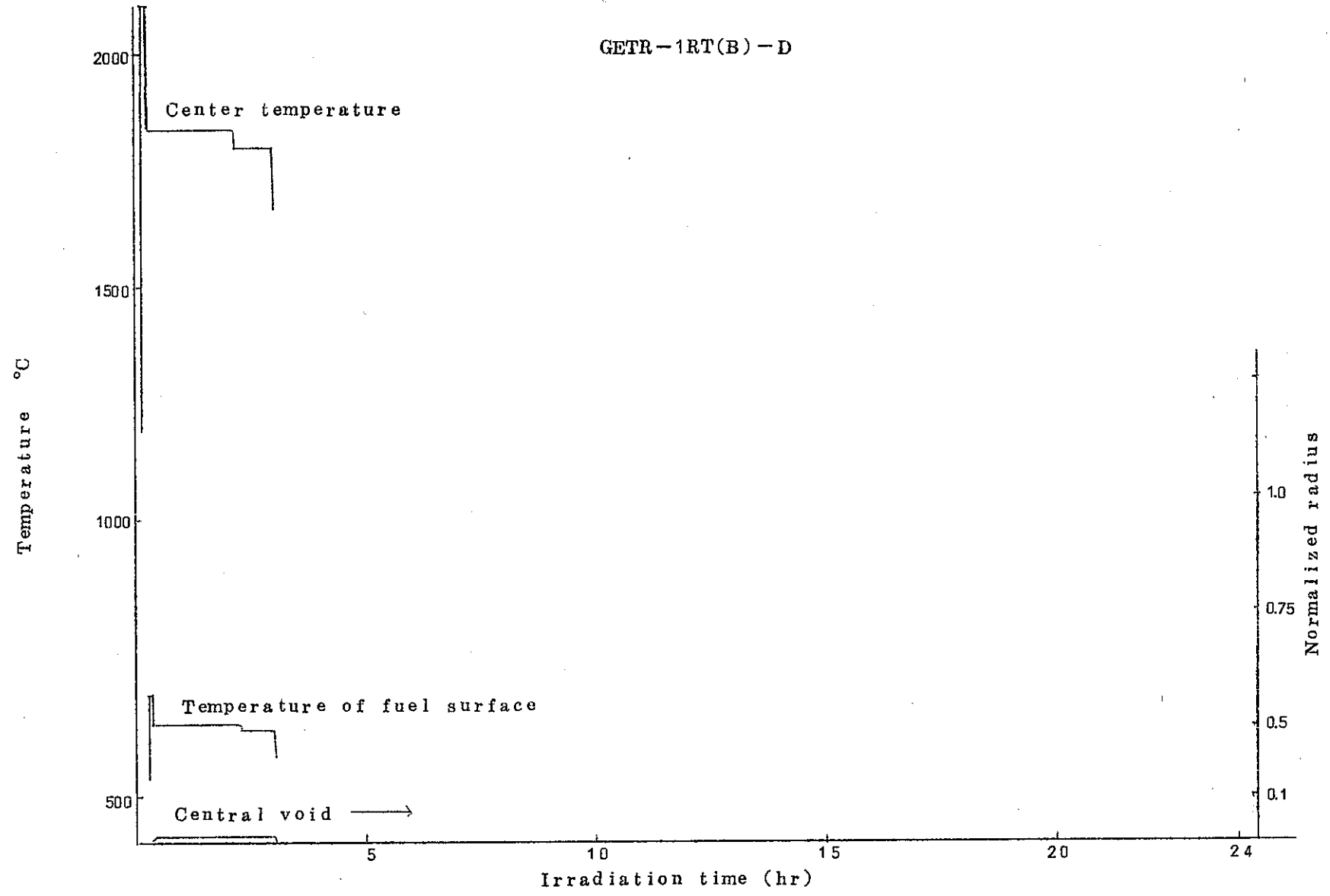


Figure 44 Calculation results of DIRAD CODE

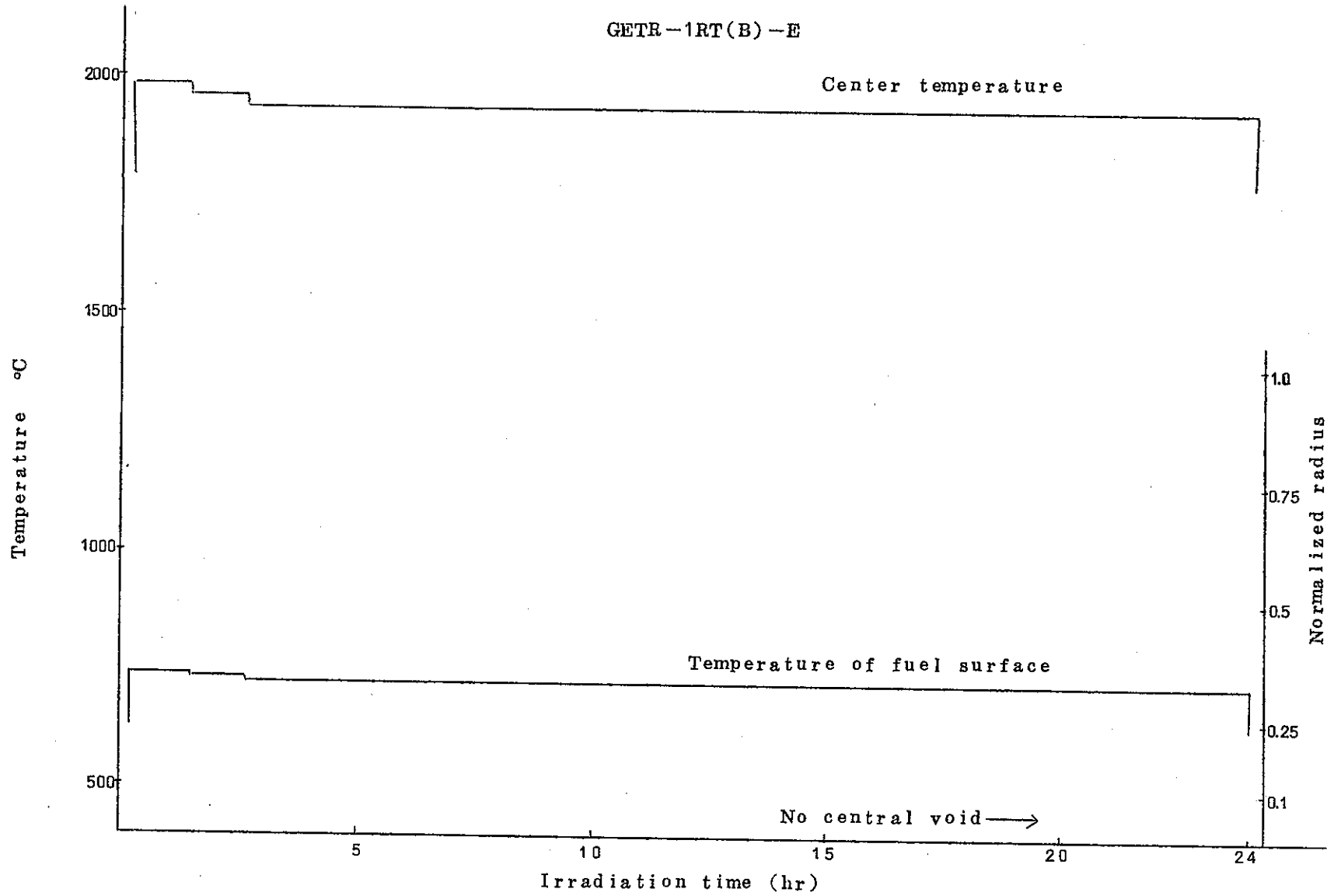


Figure 45 Calculation results of DIRAD CODE

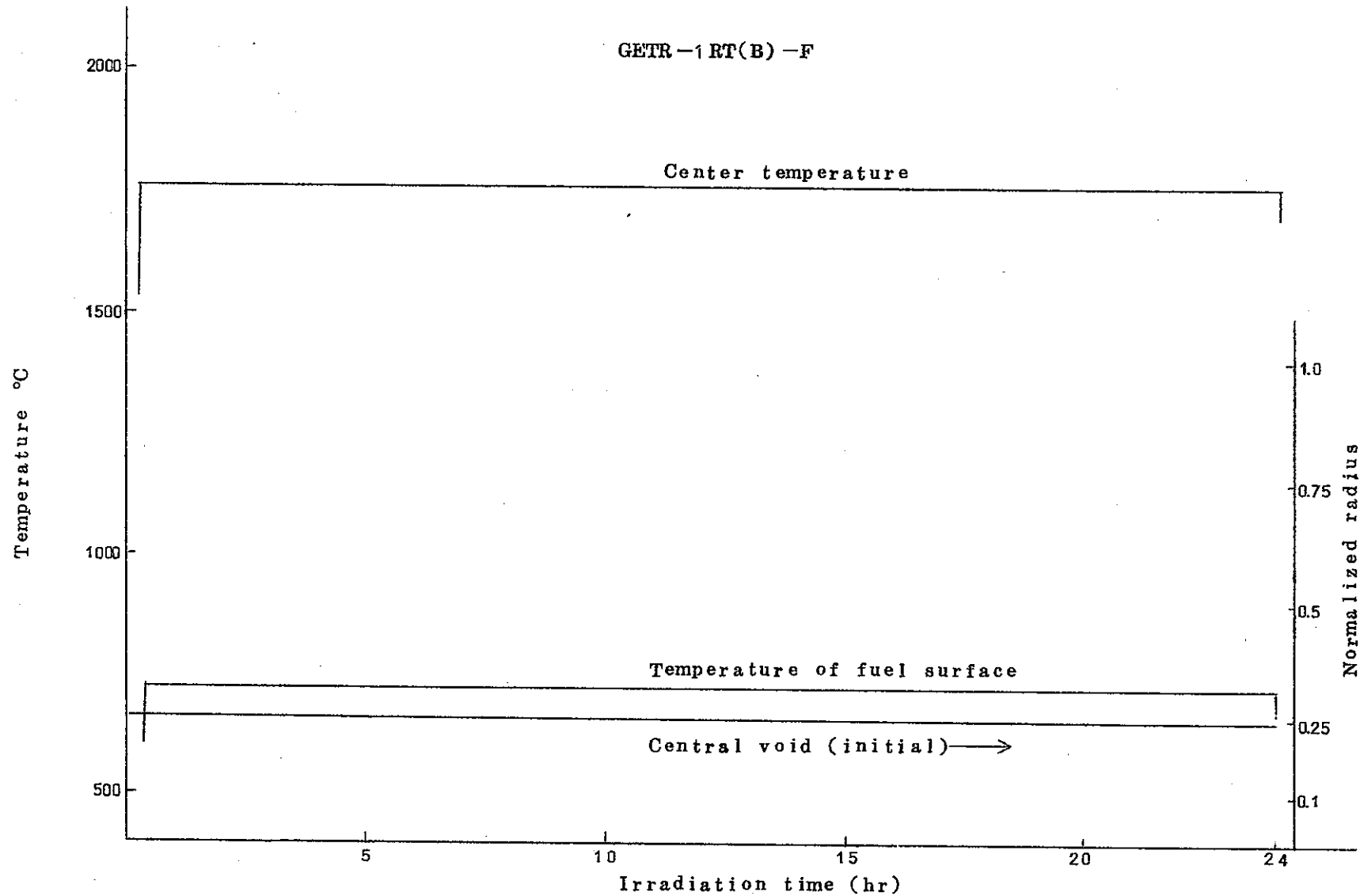


Figure 46 Calculation results of DIRAD CODE

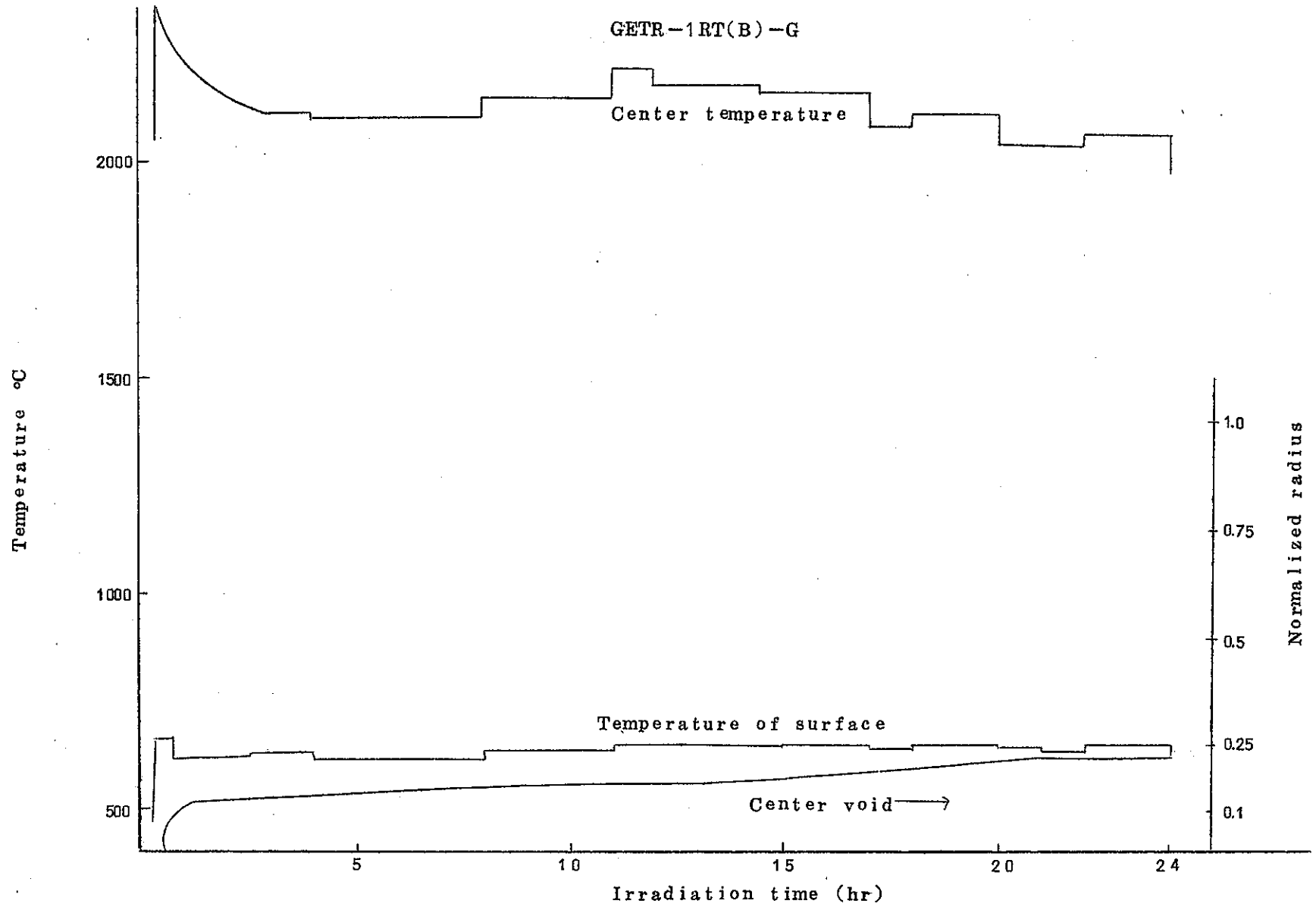


Figure 47 Calculation results of DIRAD CODE

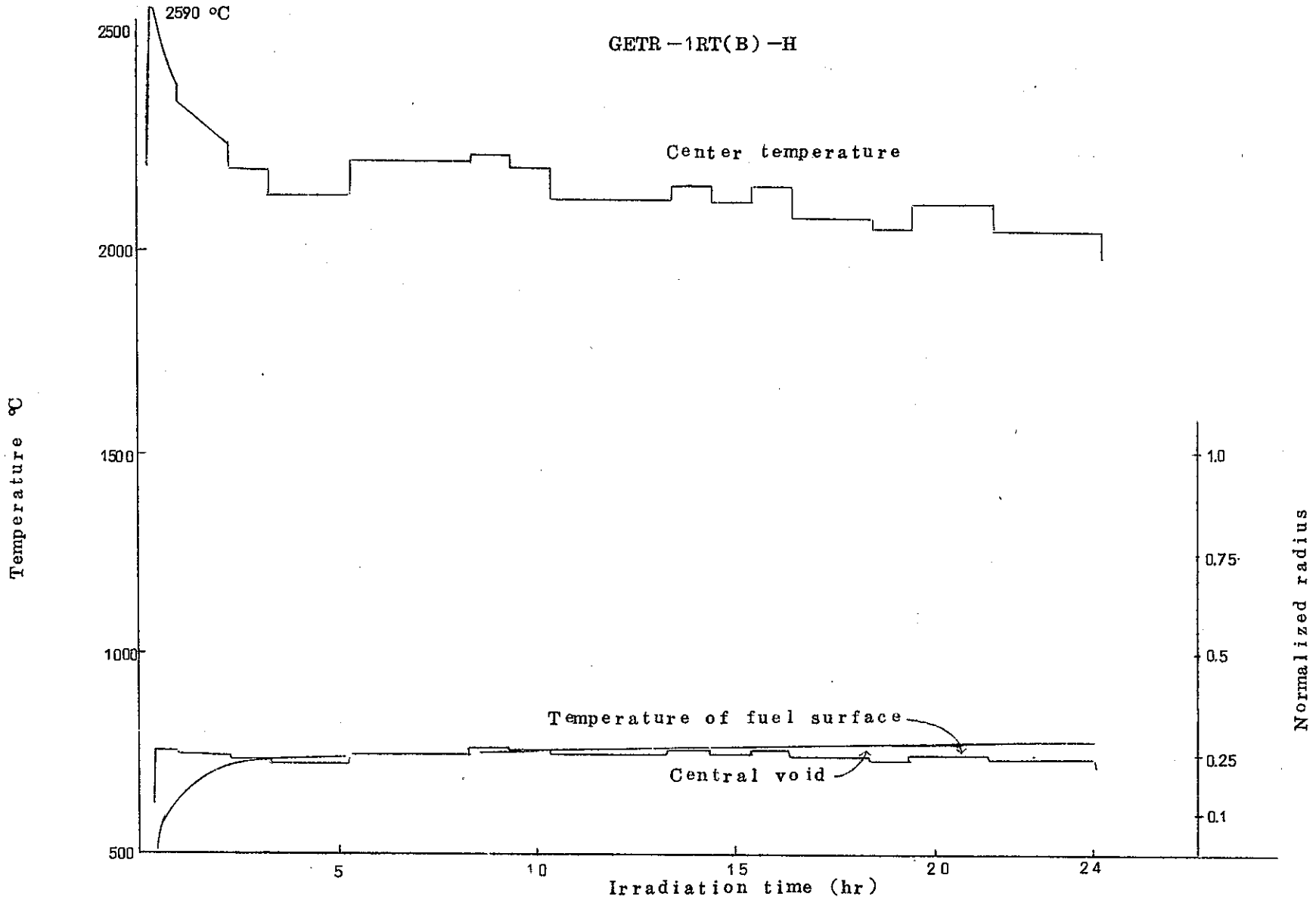


Figure 48 Calculation results of DIRAD CODE

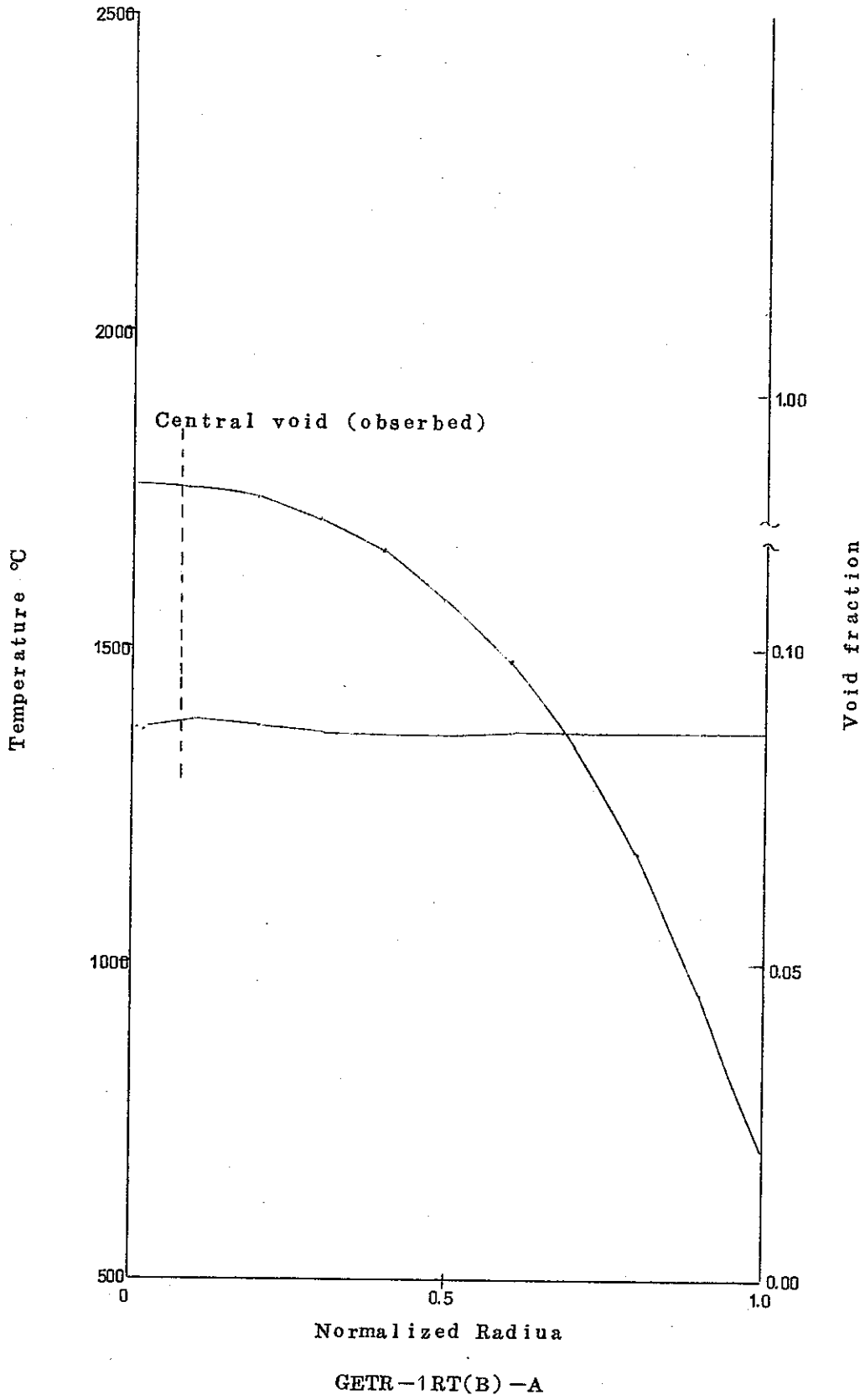


Figure 49 Final distribution of temperature and void density

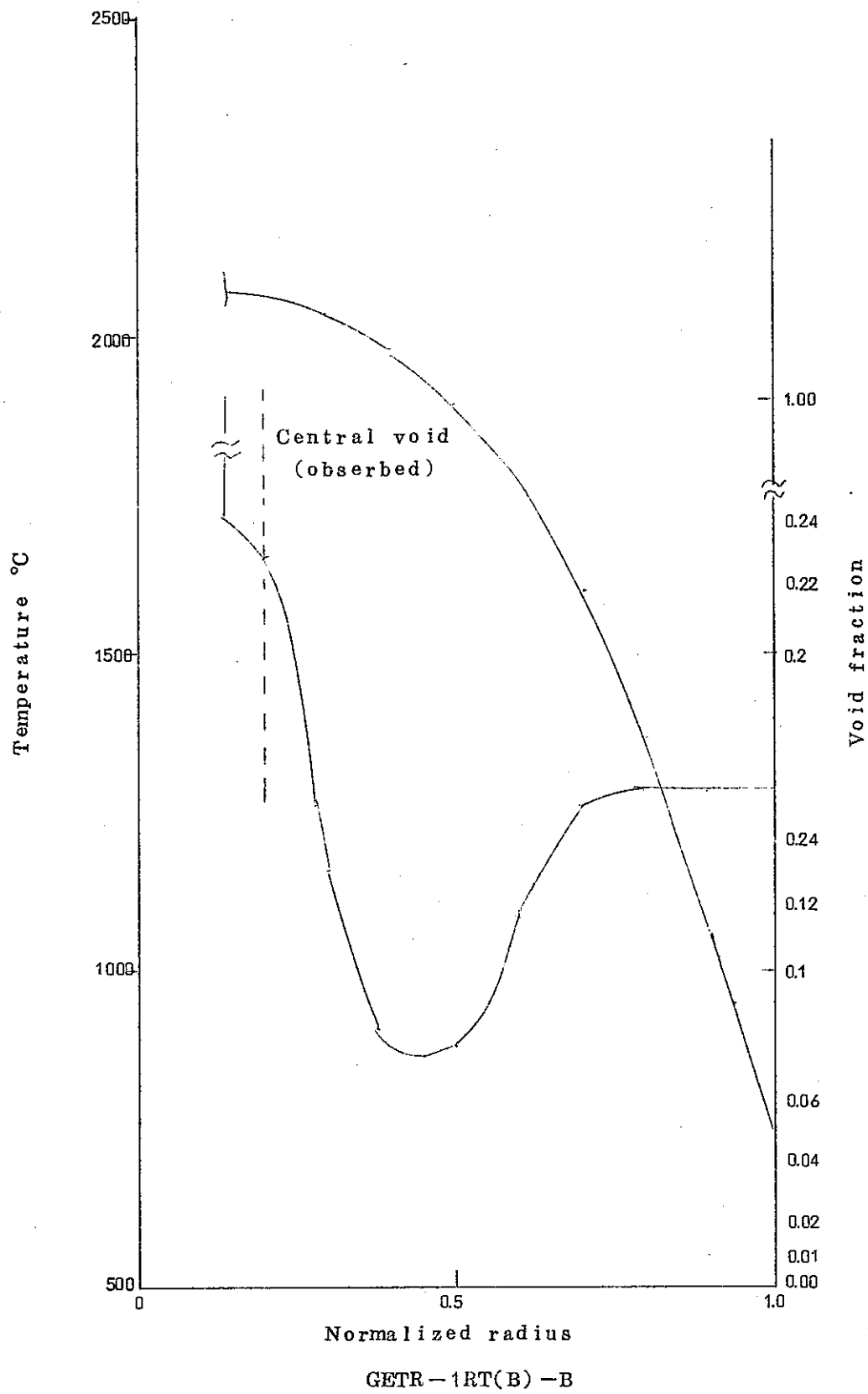


Figure 50 Final distributions of temperature and void density

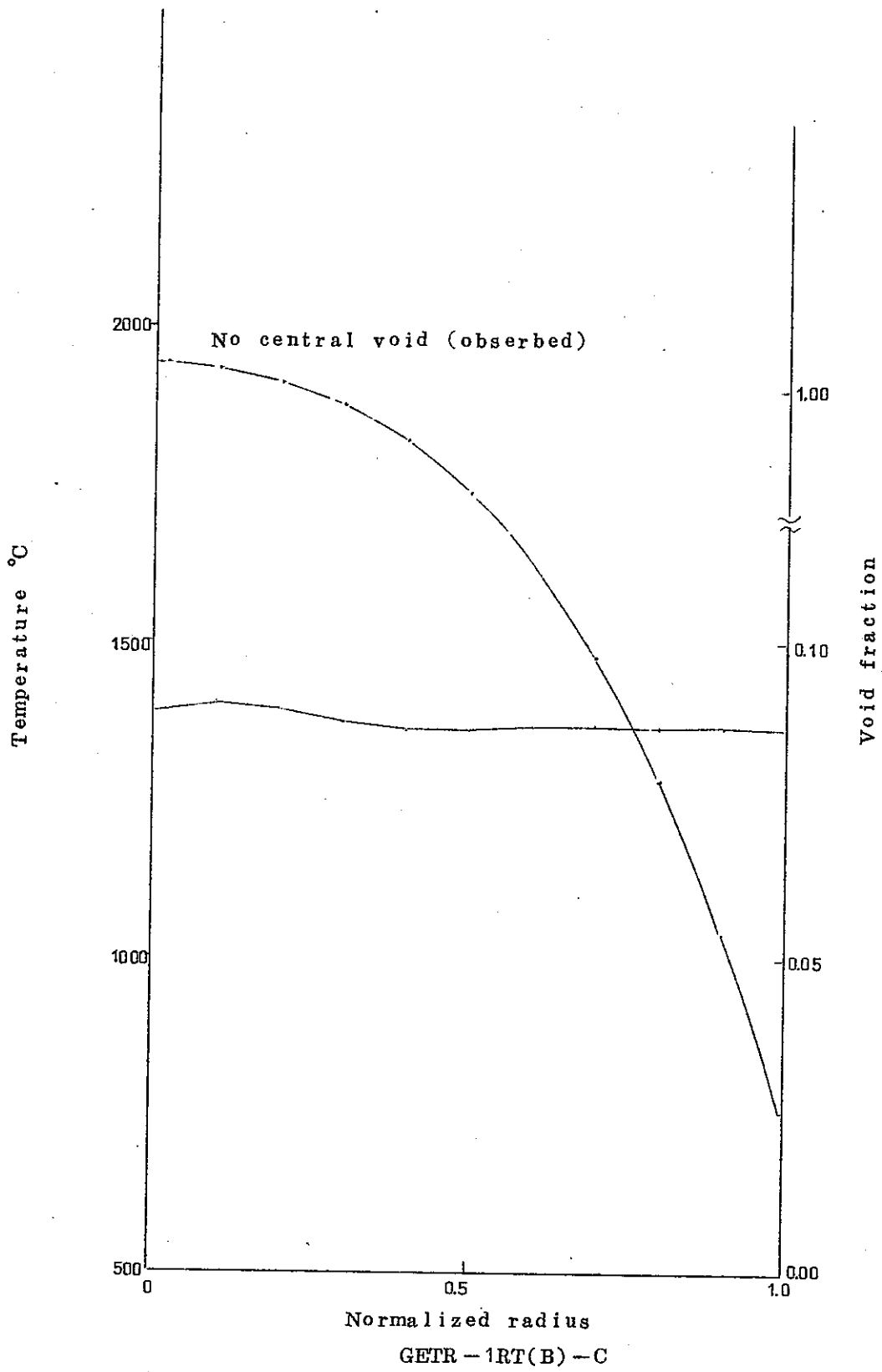


Figure 51 Final distributions of temperature and void density

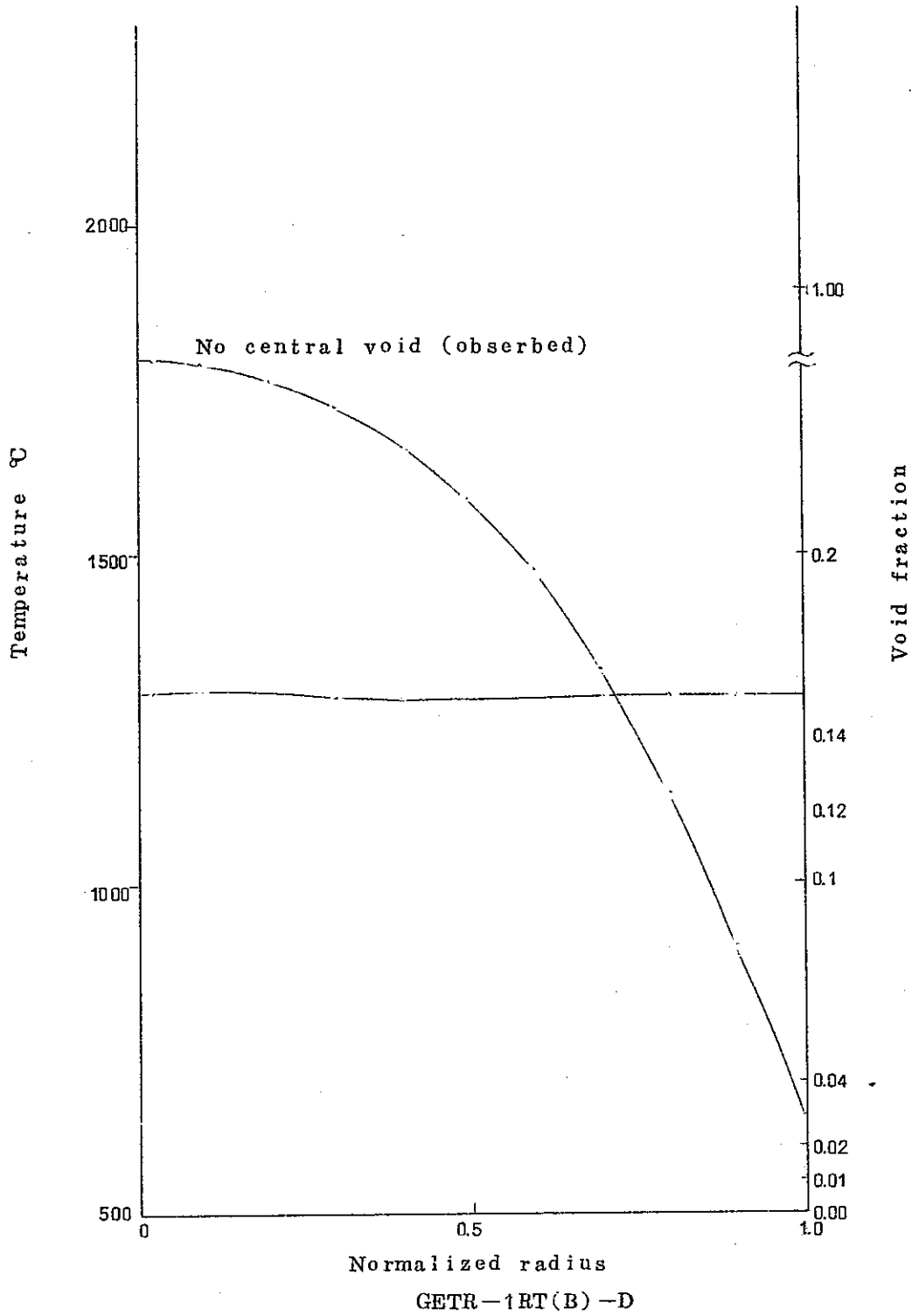


Figure 52 Final distributions of temperature and void density

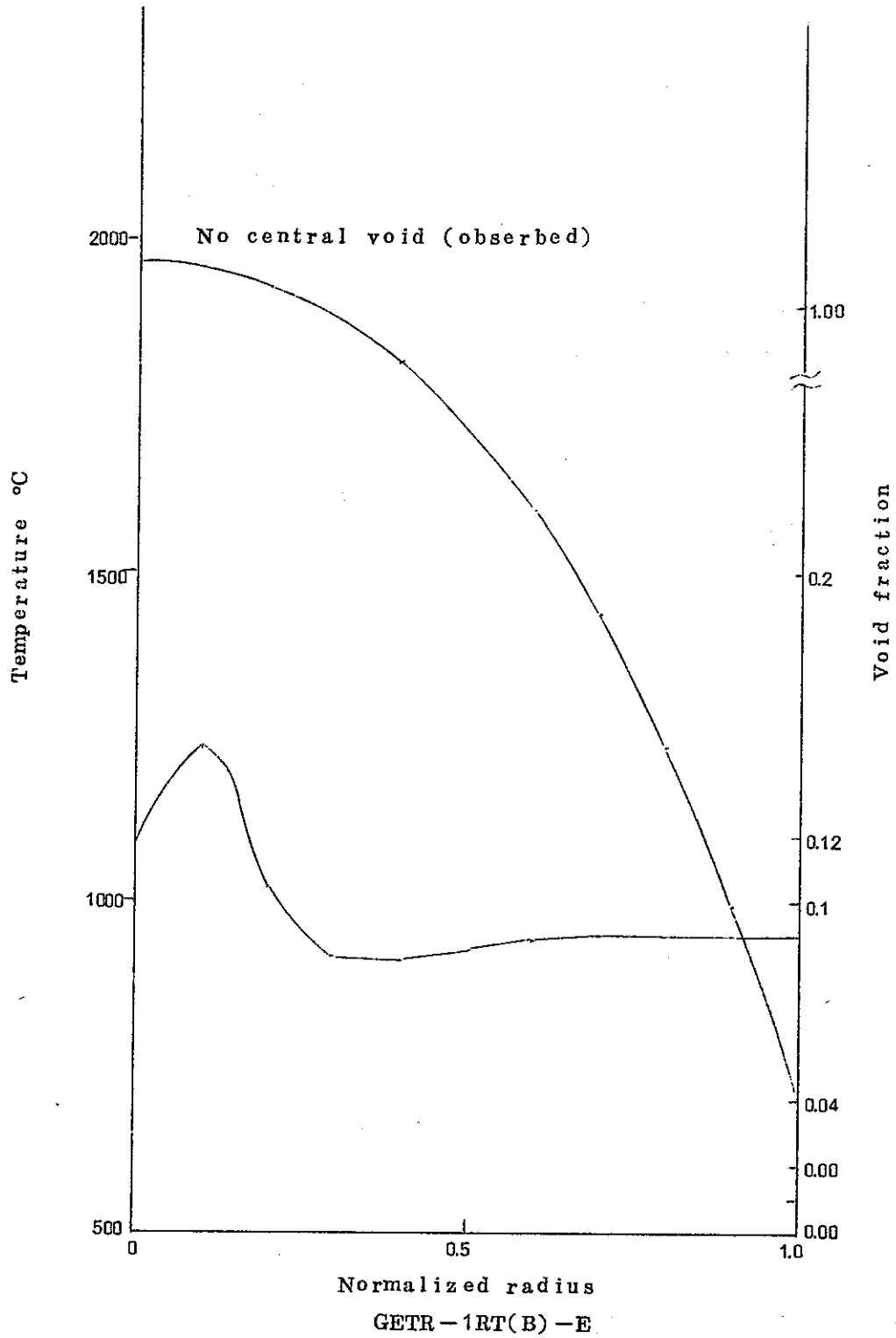


Figure 53 Final distributions of temperature and void density

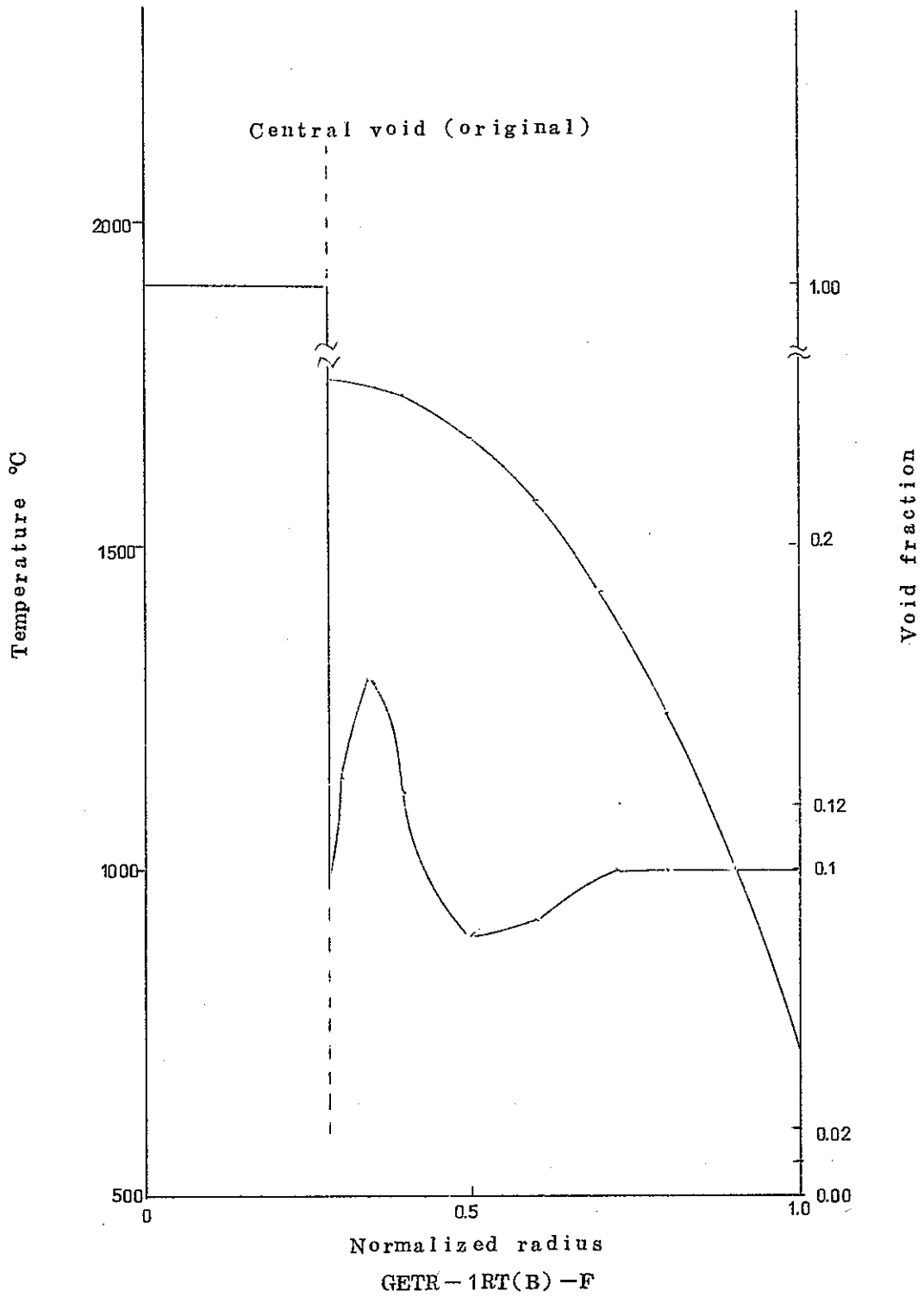


Figure 54 Final distributions of temperature and void density

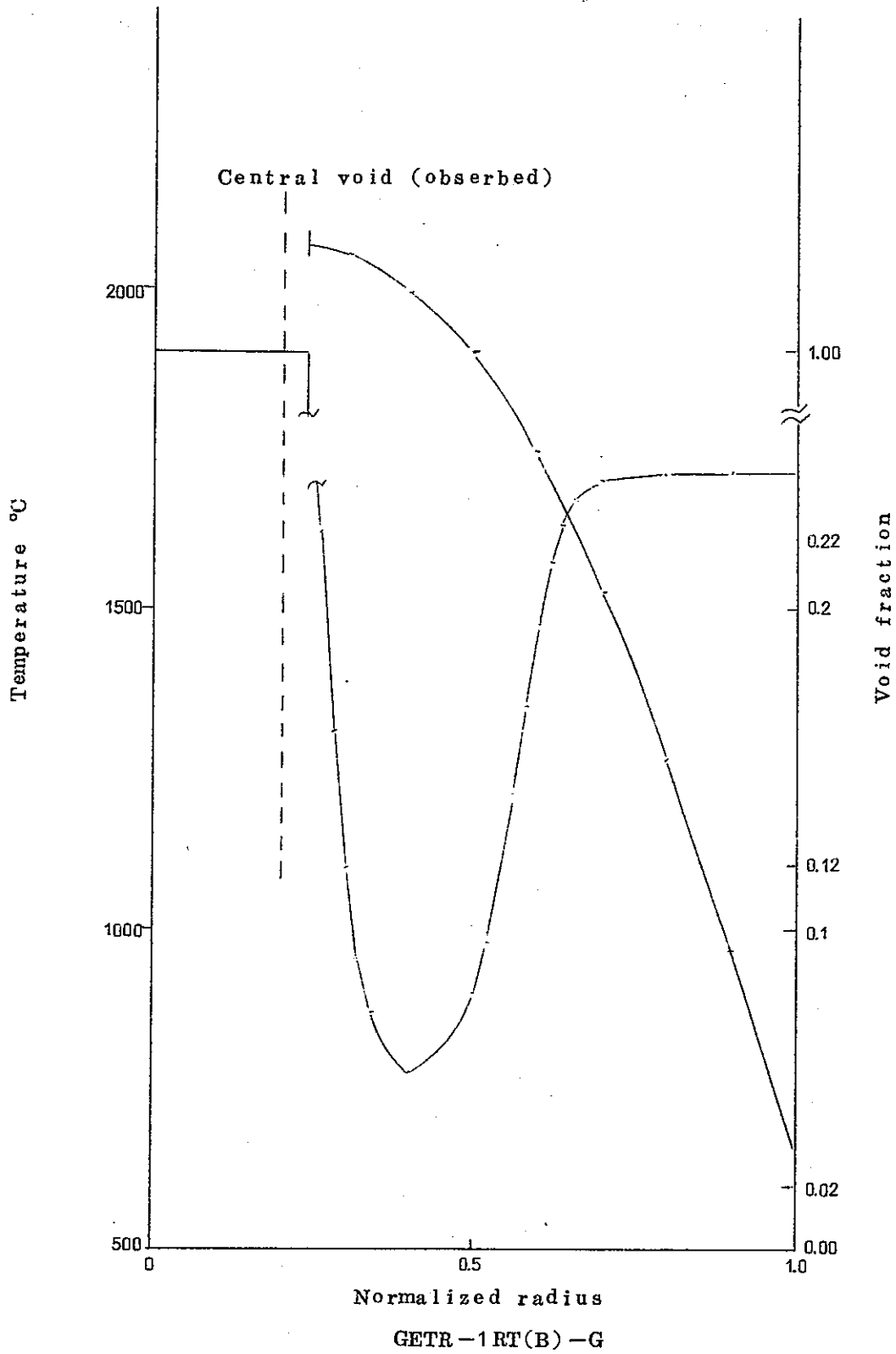


Figure 55 Final distributions of temperature and void density

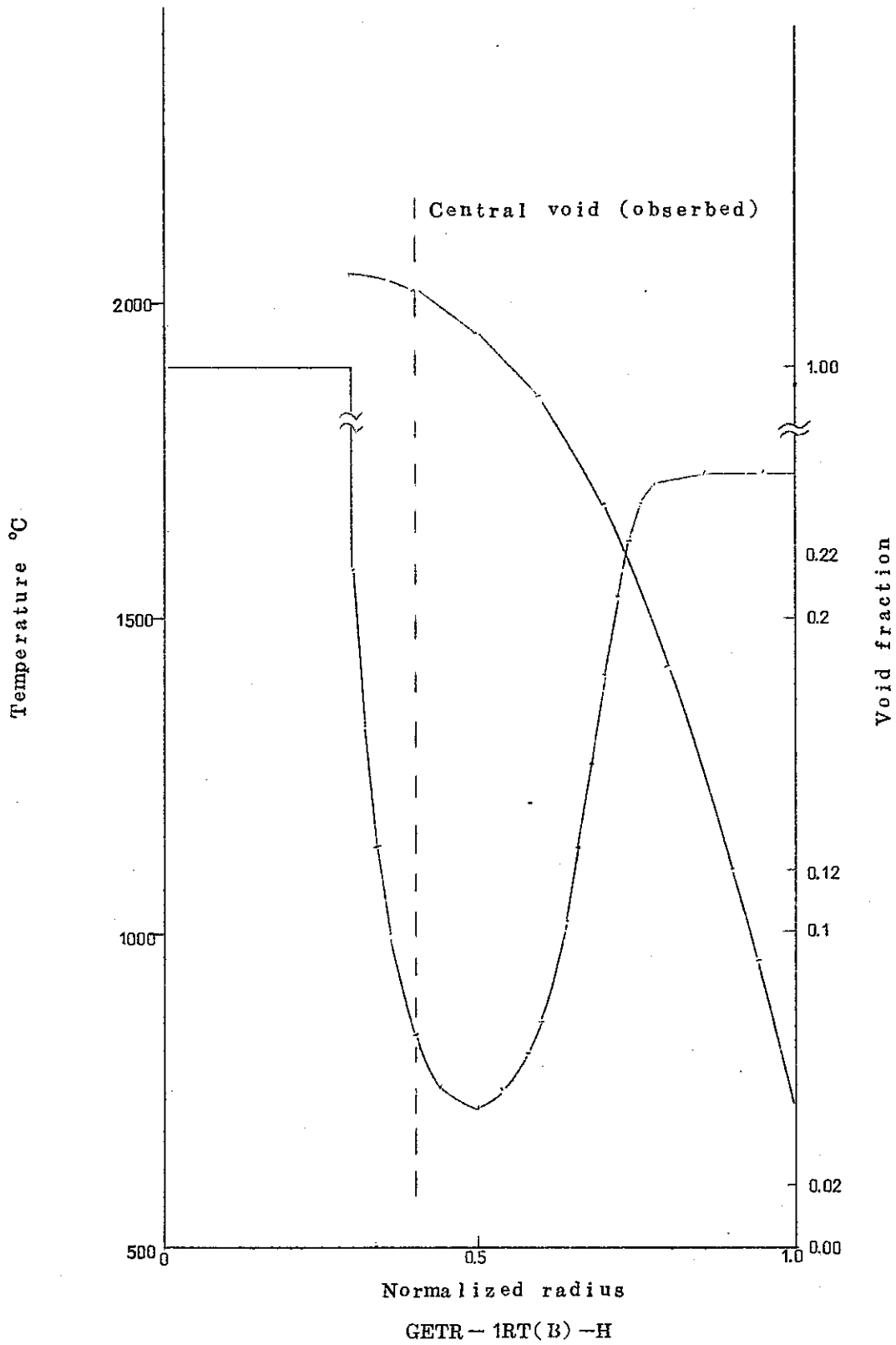


Figure 56 Final distributions of temperature and void density

7. 各照射ピンのパラメータによる比較

(1) 3時間照射と24時間照射の相違

A : 24時間照射 C : 3時間照射

線出力の評価によるとAよりCの方が大きな線出力を経験したことになるが、金相変化の状態をみると、照射時間の長いAの方が大きく組織変化している。A試料では中心空孔が出来始めており、レンズ状ポイドが中心附近にみられる。照射時間の短いC試料では中心附近で結晶粒の成長がみられる程度でありポイドの移動はみられない。

この比較から推論すると、燃料の温度がポイド移動に十分なほど高くなっても、或る条件の下ではポイドは、すぐに移動を始めず、移動を始める前に準備期間があるのではないかとと思われる。 Photo 3 Photo 5

B : 24時間照射 D : 3時間照射

BとDの関係についてもA、Cと同様のことが言える。但しBはDより照射時間が長いだけでなく線出力も5%ほど大きい。

Bでは大きな中心空孔が出来ておりレンズ状ポイドも多数みとめられる。これに対し照射時間の短いDでは、Cと同様に結晶成長とポイドの合体がみとめられるだけであって、レンズ状ポイドは全然みられない。 Photo 4 Photo 6

(2) 密度の相違による影響

AとB CとD

A, C : 91.31% T.D

B, D : 84.30% T.D

特に密度の違いによると思われるものとして、24時間照射のAとBでは密度の低いBの中心空孔が大きく、3時間照射のCとDではその差はみられない。時間の影響が大きいことがわかる。ただCとDではCの方が大きな線出力を経験したという結論であるが結晶粒の成長は密度の低いDの方が大きい。これはDの方が低密度であるため熱伝導度が小さく、このため温度の上昇が推測され、またAl等不純物が低密度ペレットに多かったための影響ではないかと思われる。

AとCのAl量 10 ppm

BとD " 135 ppm

Photo 3~Photo 6

(3) 中実ペレットと中空ペレットの比較

EとF

E試料の全相面について特長的なことは小さなポイドが合体して中心に行くにしたがって大きくなっている。しかもある程度組織変化を起しているにもかかわらずレンズ状ポイドは全然みあたらない。

F試料はもともとあった中心空孔の周辺の一部(熱的中心側)にレンズ状ボイドがみとめられる。この大きな相違について原因の一つと考えられるものは照射前の全相組織の違いである。 Photo 7, 8, 11, 12

しかしこのような違いが中空ペレットであるかないかによるものではないと考えられる。結果として中実と中空ペレットの差はこれらの試料ではあらわれられなかった。ただ一つ中空ペレットで中心空孔の壁面温度が均一でなかったため低温部に蒸発凝縮により、結晶成長したと思われる層が観察される。

β - γ オーラジオグラフの上で白い斑点が何箇所かみえているが、クラックや気泡のハレーションによるものか、プルトニウム濃度40%という高濃度の影響が明らかでない。検討を必要とする。

(4) 振動充填燃料におけるプルトニウム富化率の相違

GとH G: 20% PuO₂ H: 40% PuO₂

これら2つの試料は平均線出力450 W/cm(G)と532 W/cm(H)の十分な線出力を経験して大きな全相変化をおこしている。レンズ状ボイドは円周部分にわずかにみとめられる程度であり、柱状晶がよく発達している領域にあるボイドは球状をしており、特に粒界に多く存在する。レンズ状ボイドがみられないのは全部移動してしまって中心空孔に吸収されたものと思われる。

プルトニウム富化率の違いによる燃料内発熱分布の差は β - γ オーラジオグラフに明瞭にみとめられる。つまり20% PuO₂ G試料の方が中の方まで燃焼している。

その他でプルトニウム富化率が違うためと思われる金相変化の相違はみられない。

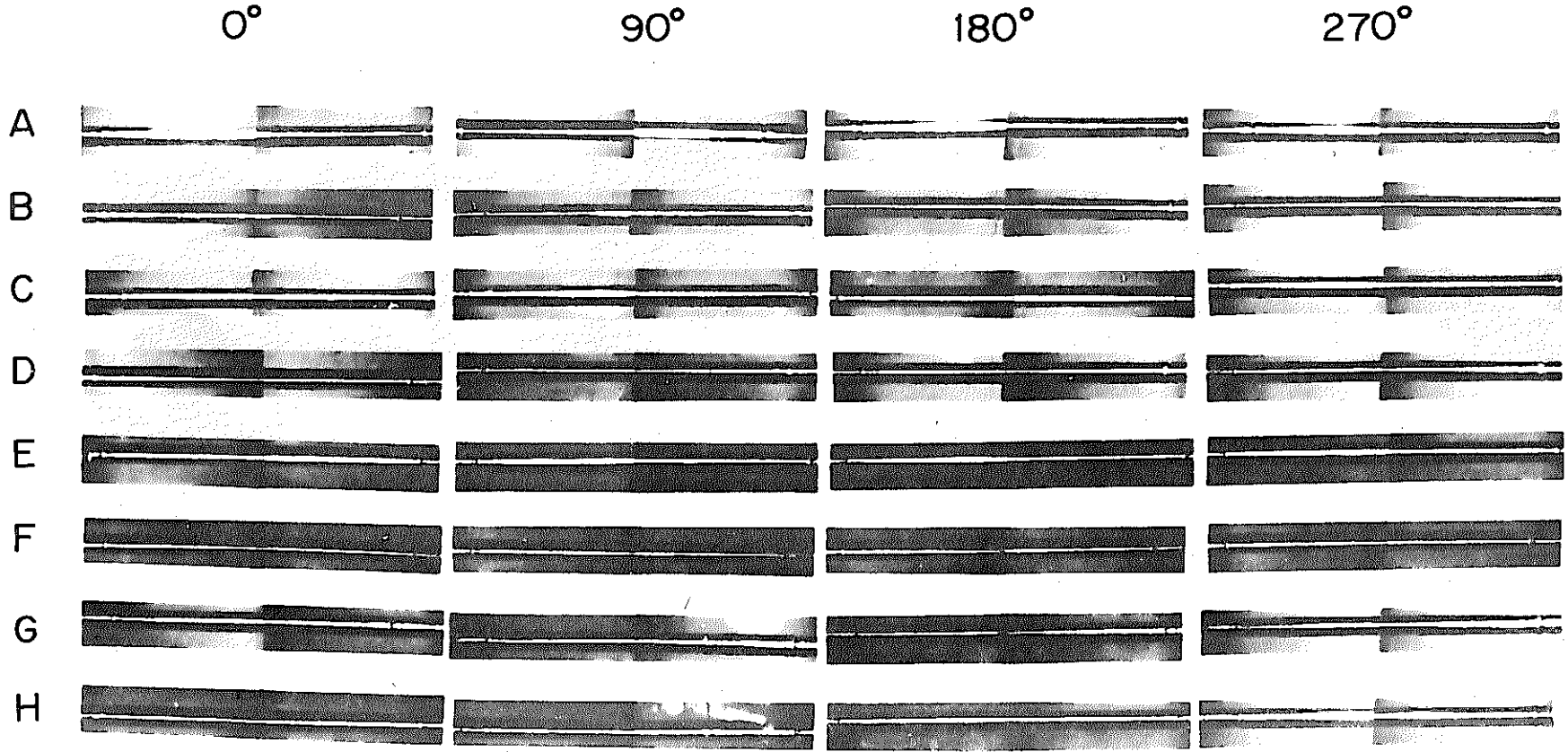
Photo 9, 10

(5) ペレット燃料と振動充填燃料の比較

燃料の組織変化は振動充填燃料の方が大きく熱的に高温の影響をうけたあとがみられる。また中心空孔周辺には振動充填燃料では小さな丸い気泡が集っている。また一般に照射後では被覆管と燃料のギャップは振動充填燃料の方が大きい。しかし被覆管の内壁に燃料が附着している部分もあり、金相試料切断時に未焼結部分がくずれおちたため、ギャップが大きくなったと考えられる。

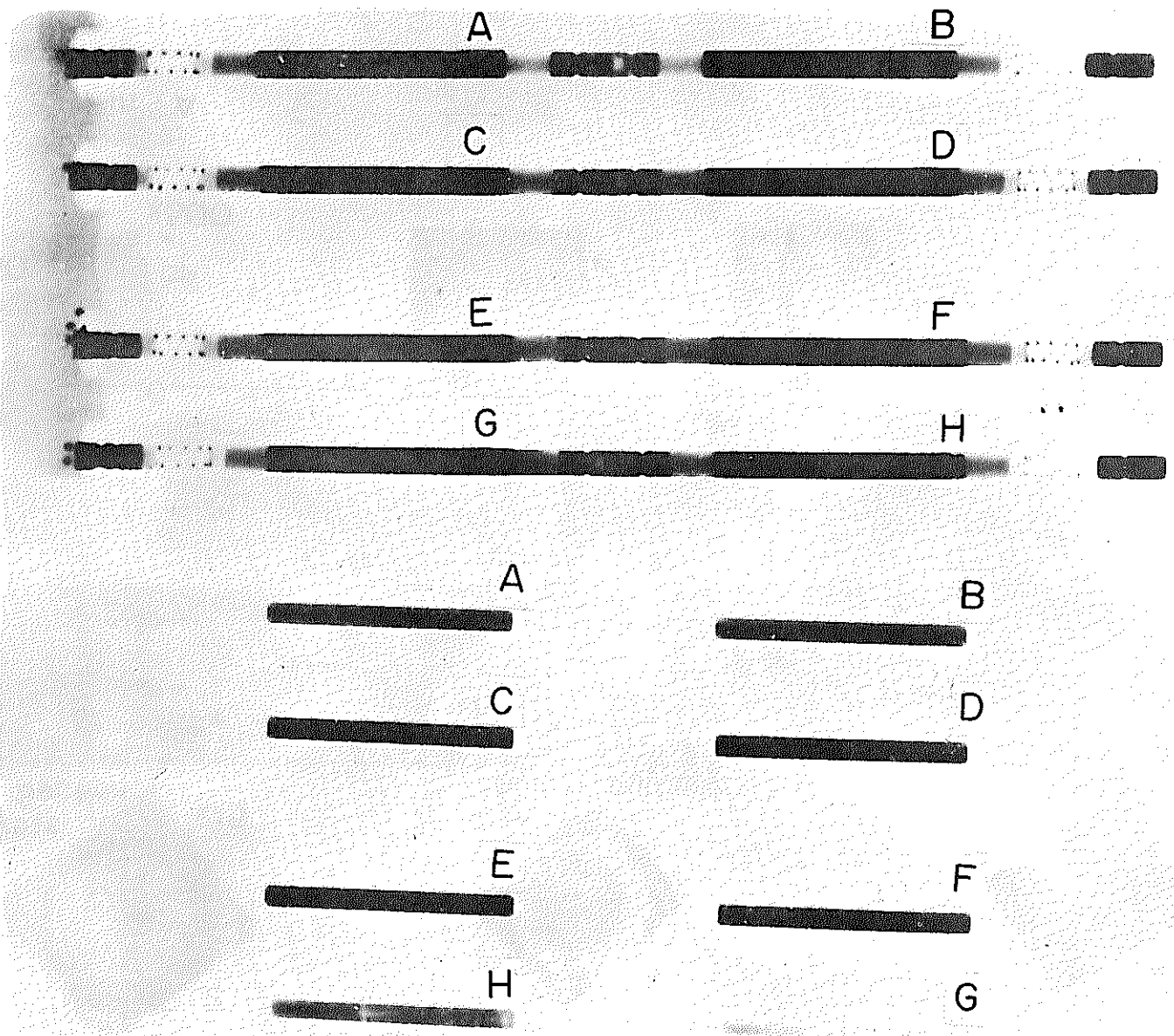
8. Na K 自然対流について

Na K 間隙がAl熱媒体内側で約3 mm, 外側で約5 mmという比較的狭いものであるため、自然対流効果は小さいものと思われる。しかも体系内の大きな自然対流は考えられず、局所対流



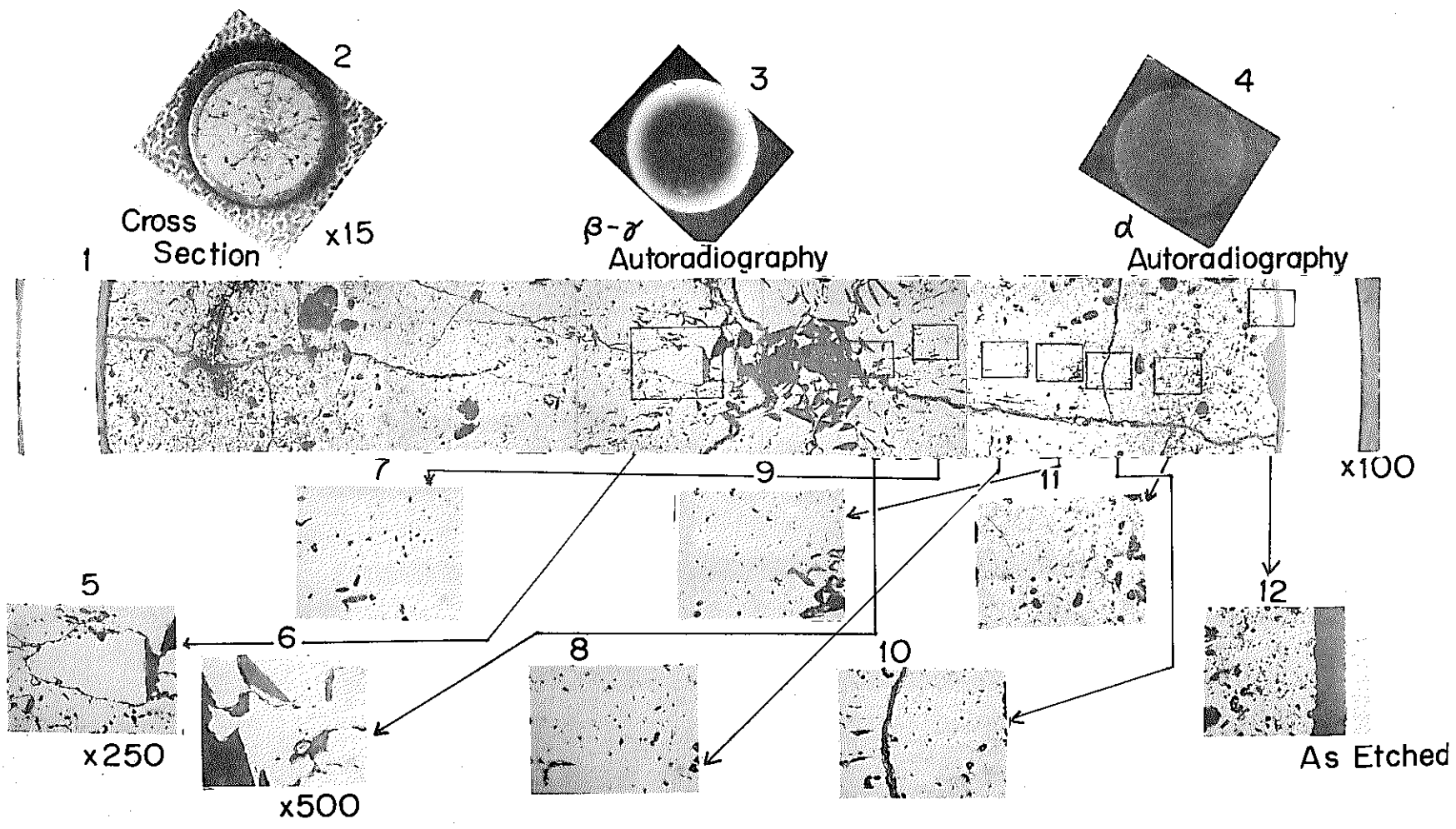
-70-

Photo. 1 Photographic inspection of IRT(B) fuel pins



-71-

Photo. 2 GETR - 1 RT (B) Neutron Radiography



-72-

Photo. 3 Pin A

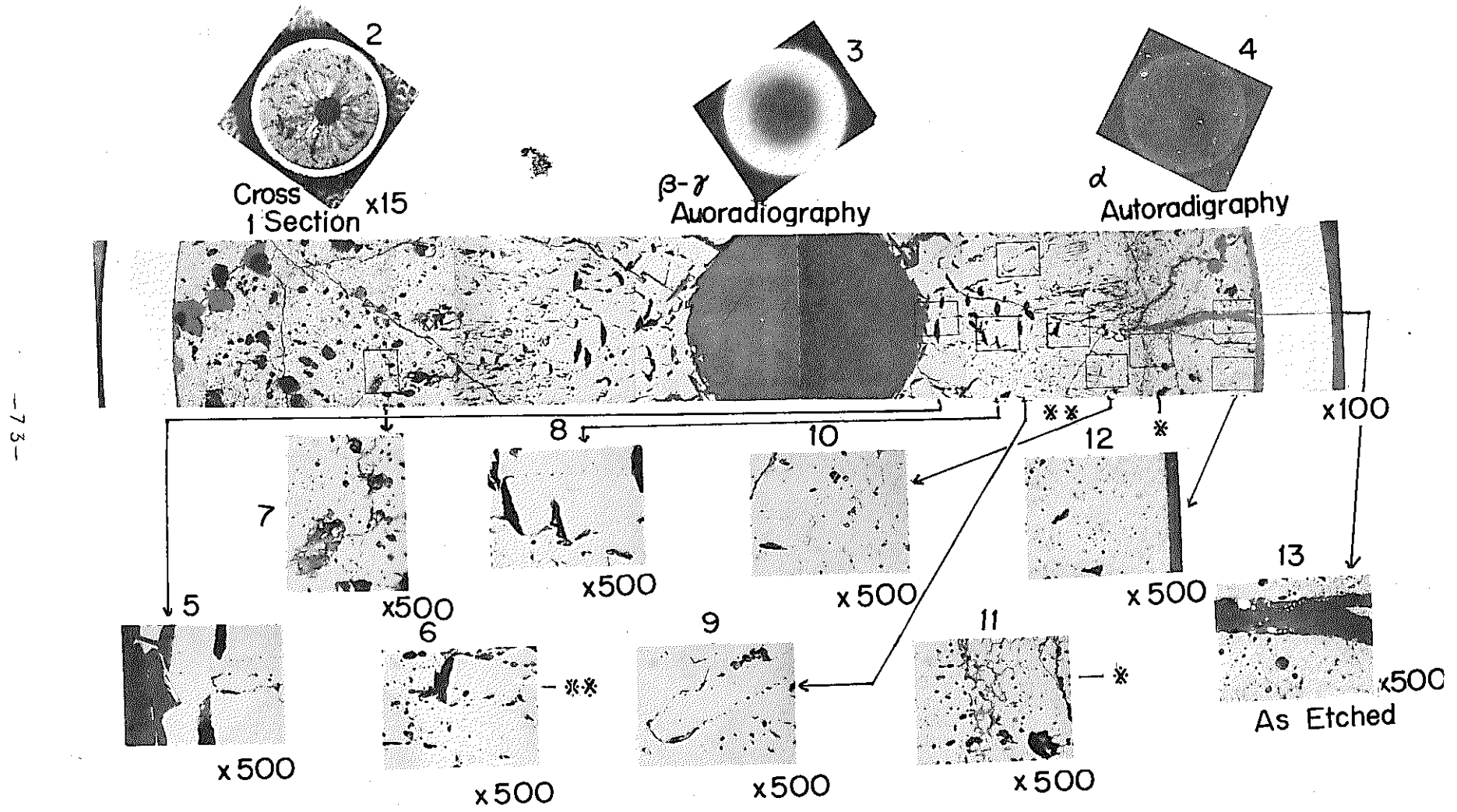


Photo. 4 Pin B

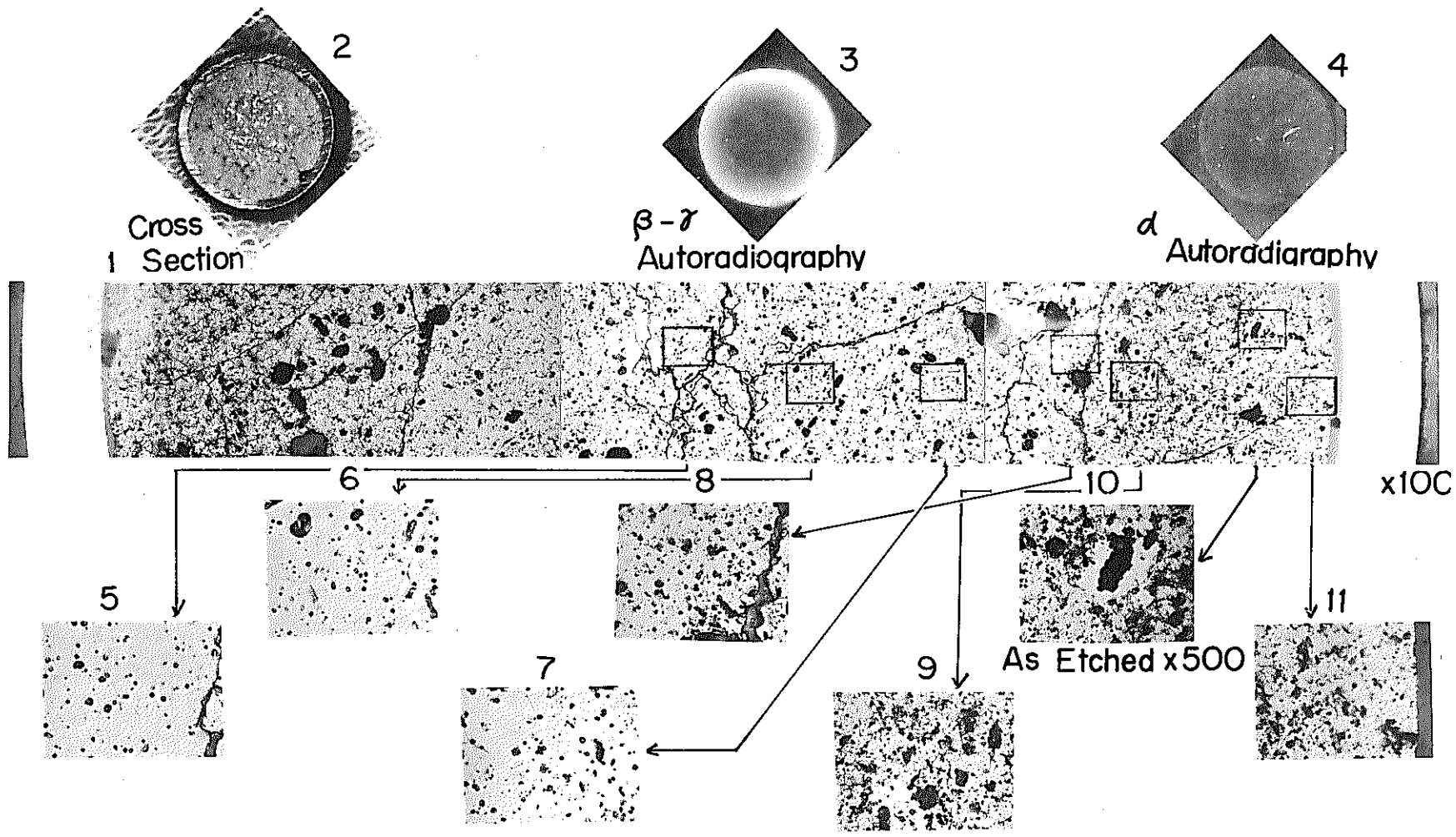


Photo. 5 Pin C

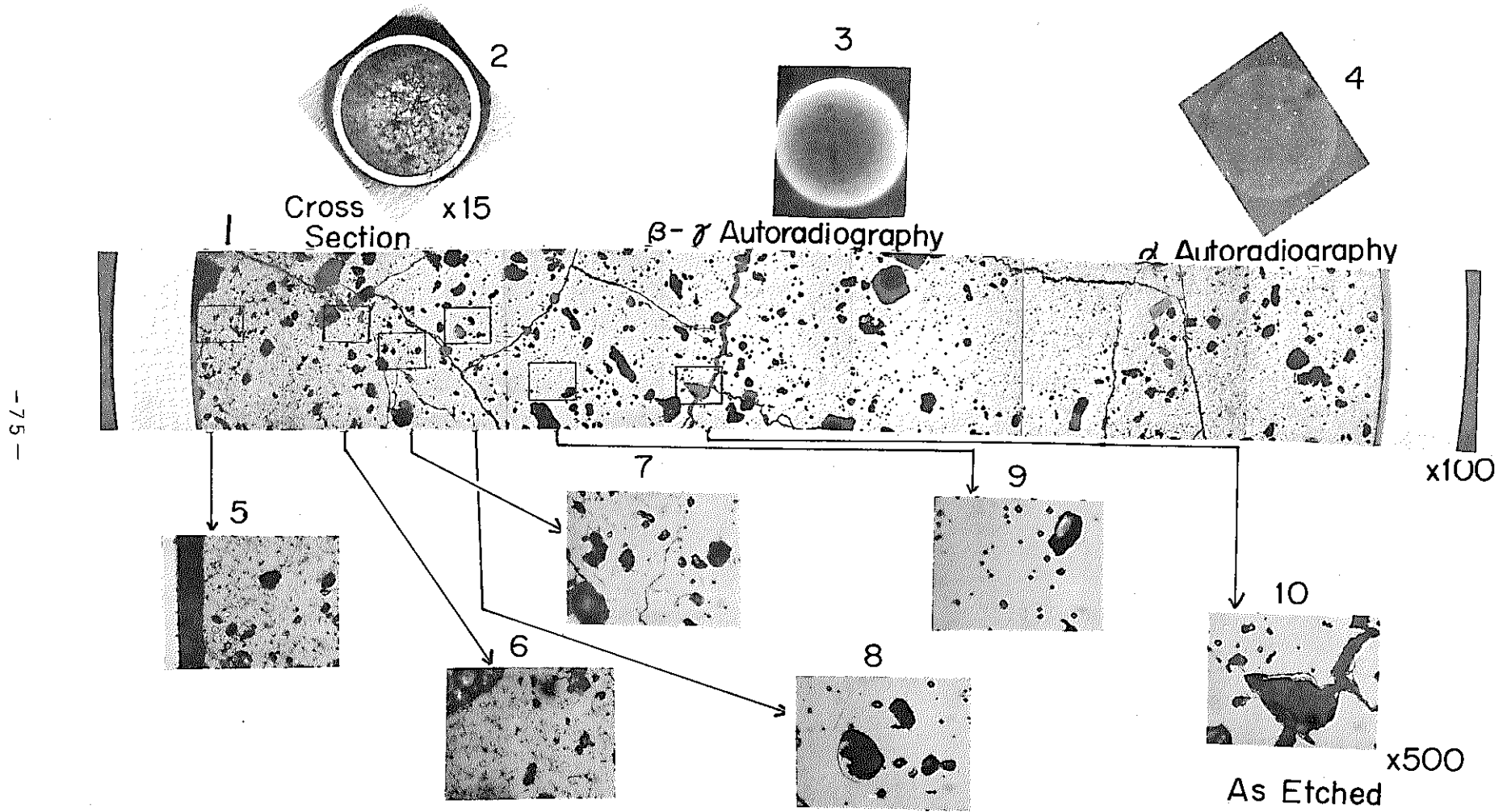


Photo. 6 Pin D

-76-

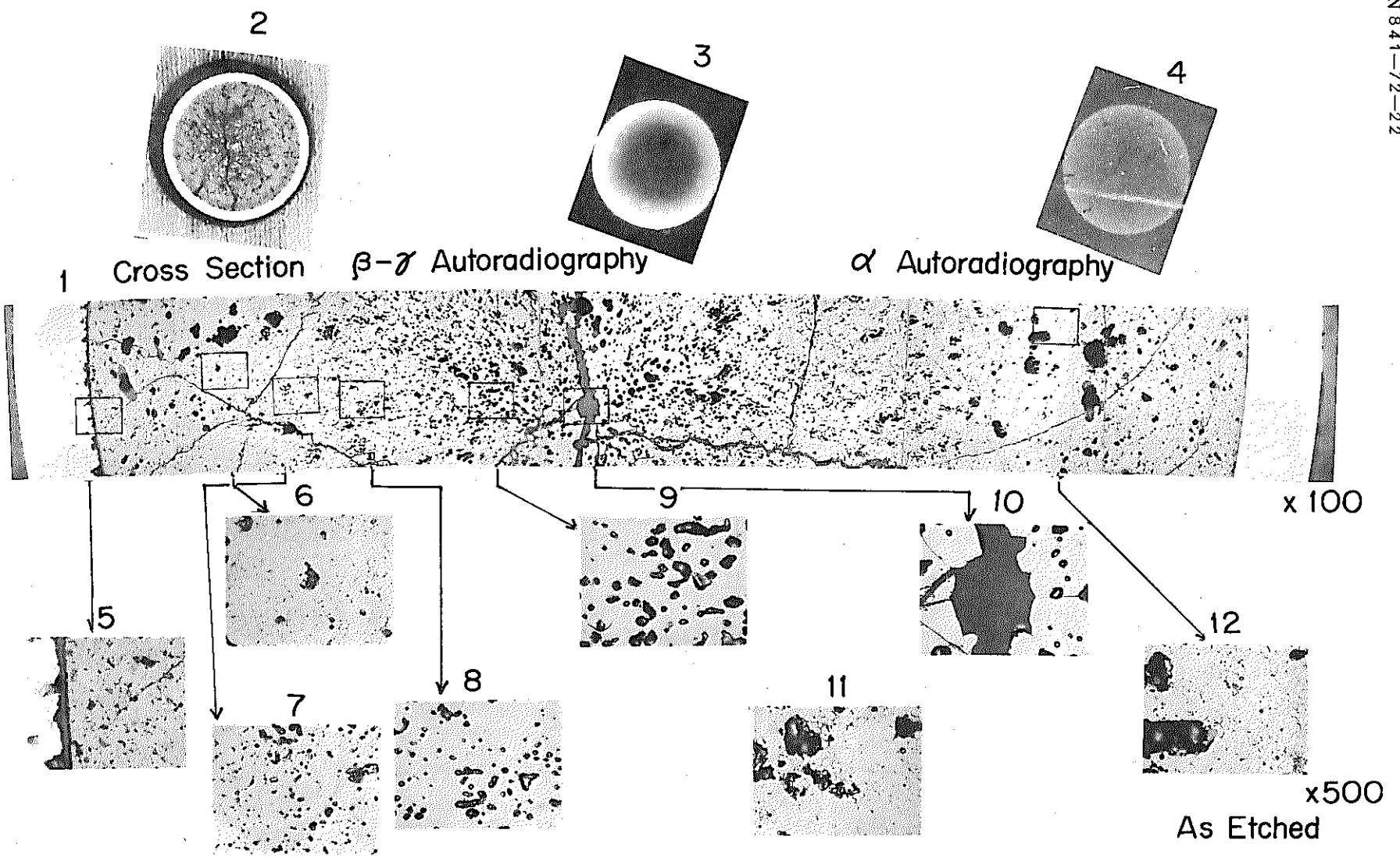


Photo. 7 Pin E

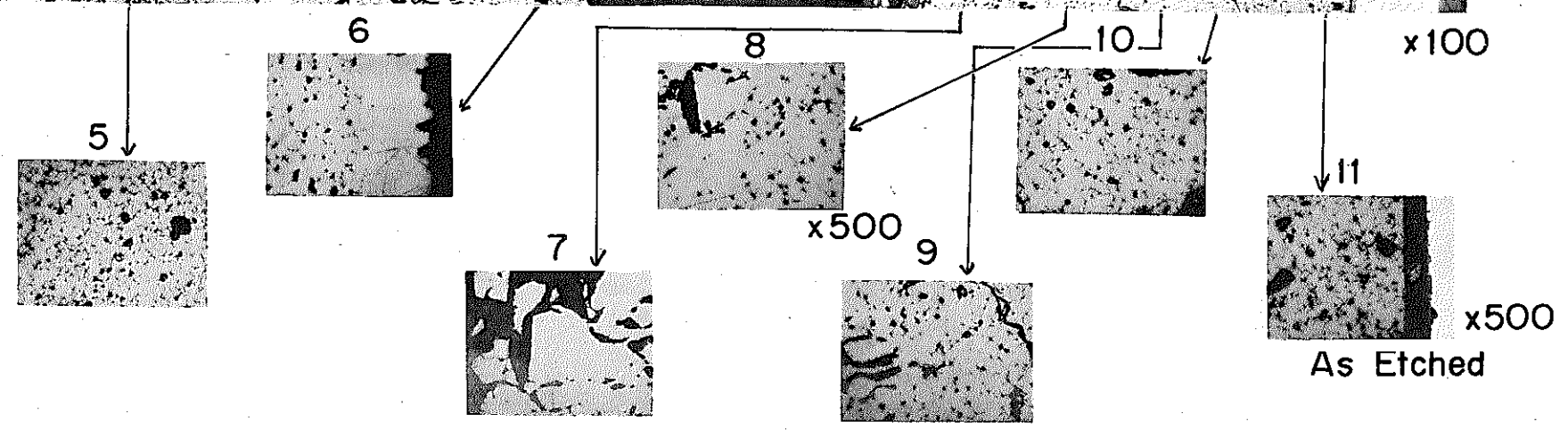
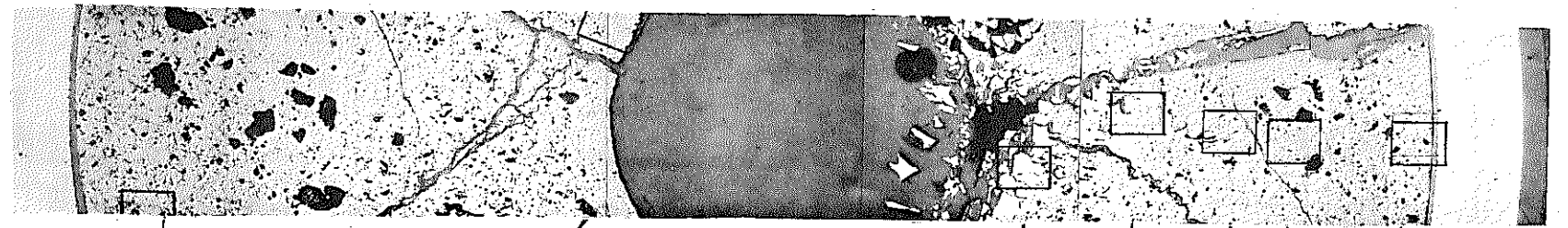
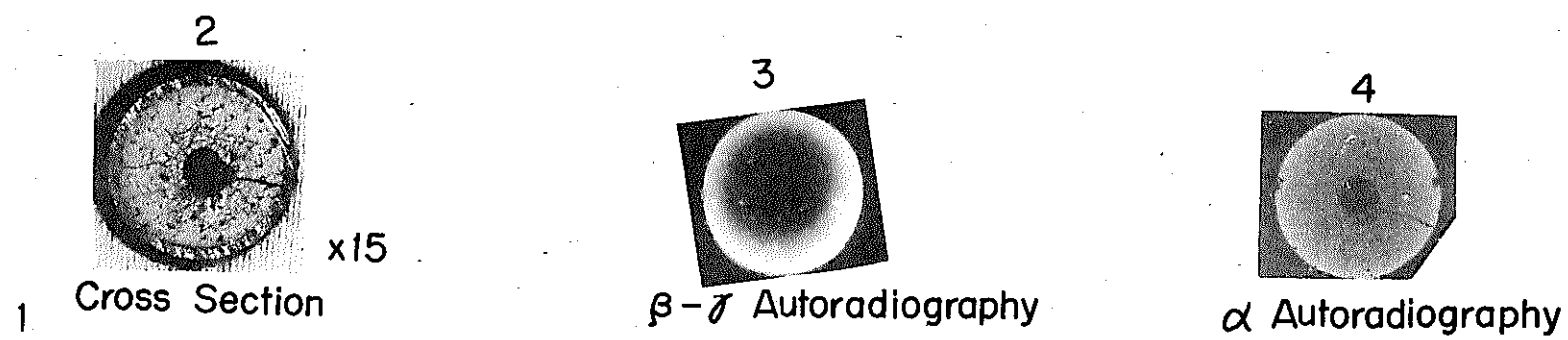


Photo. 8 PinF

-77-

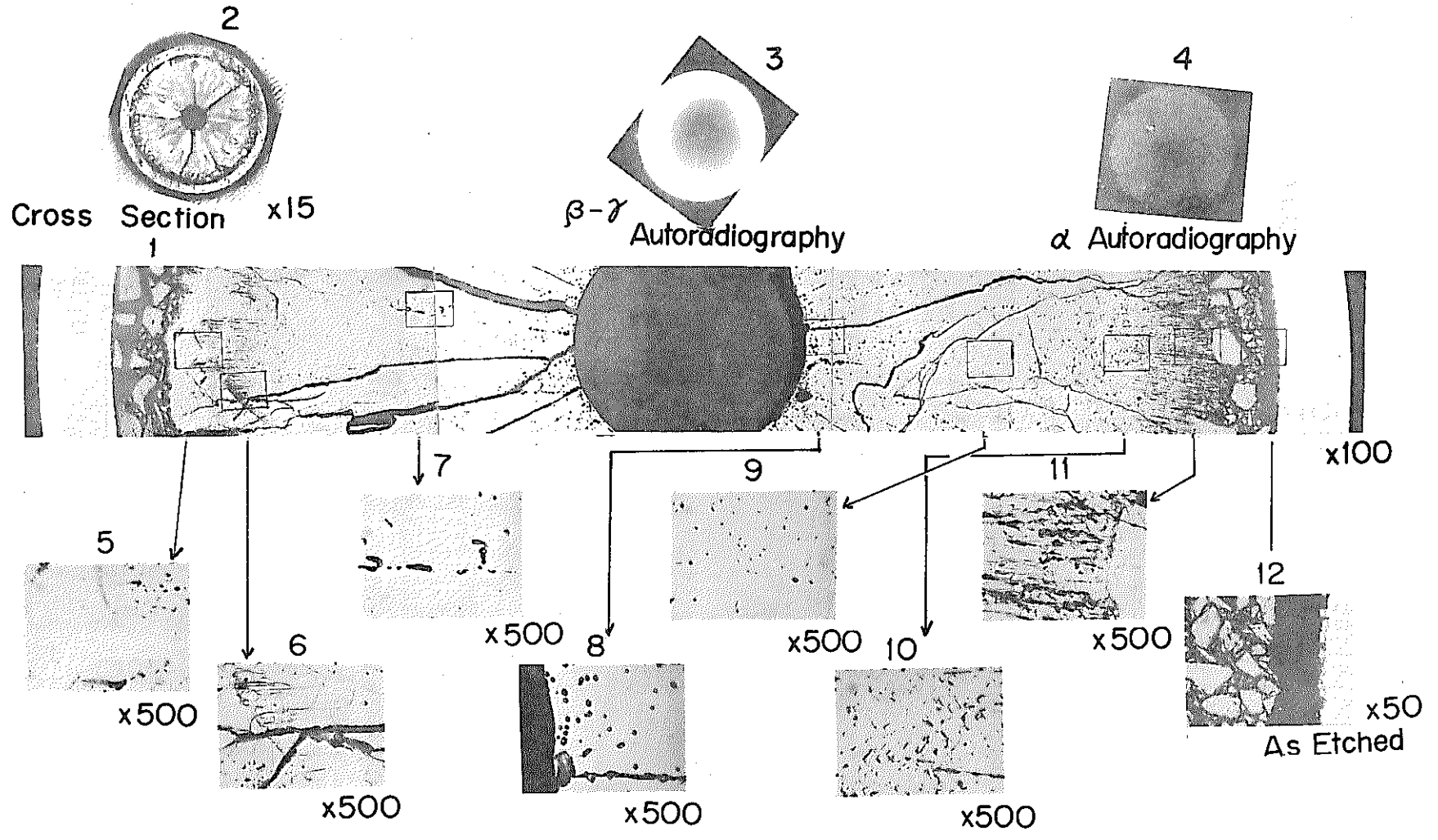


Photo. 9 Pin G

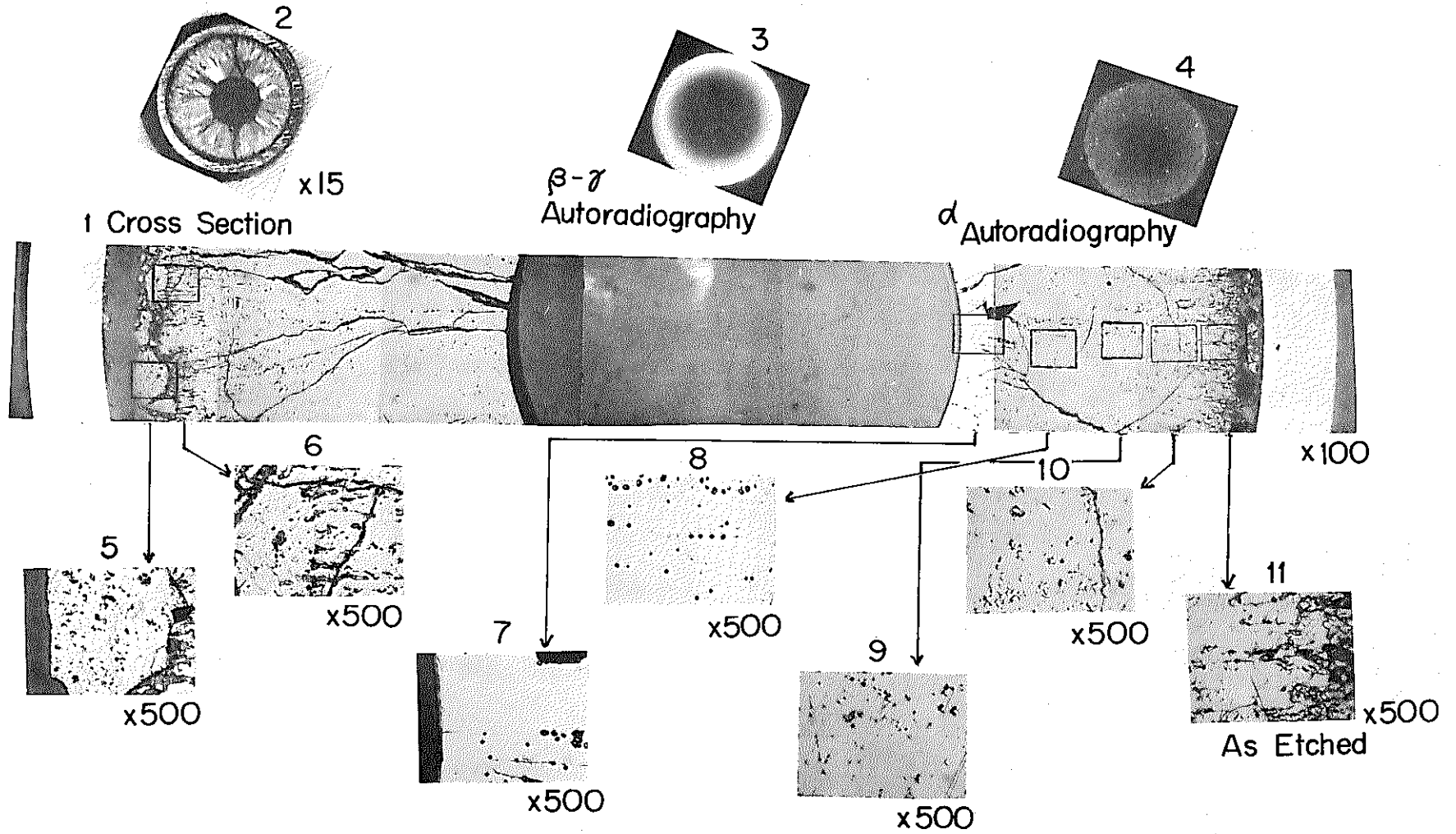
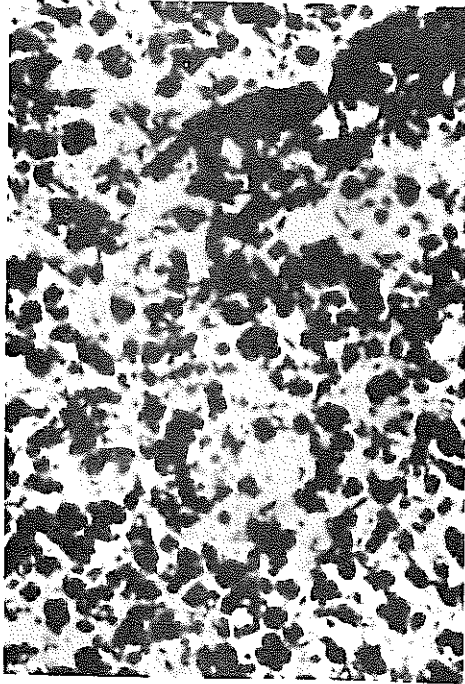
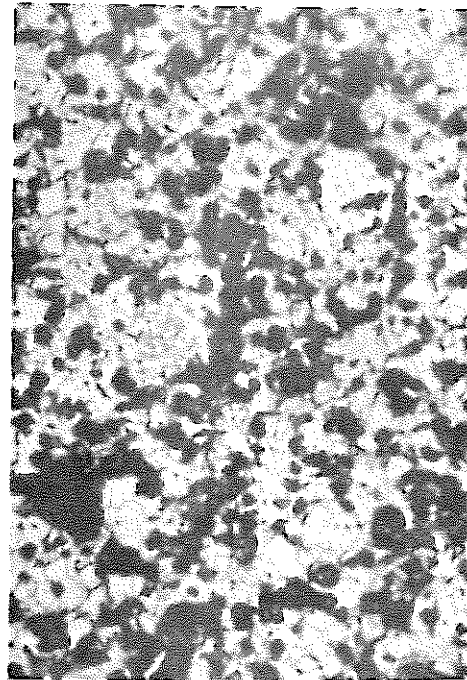


Photo. 10 Pin H

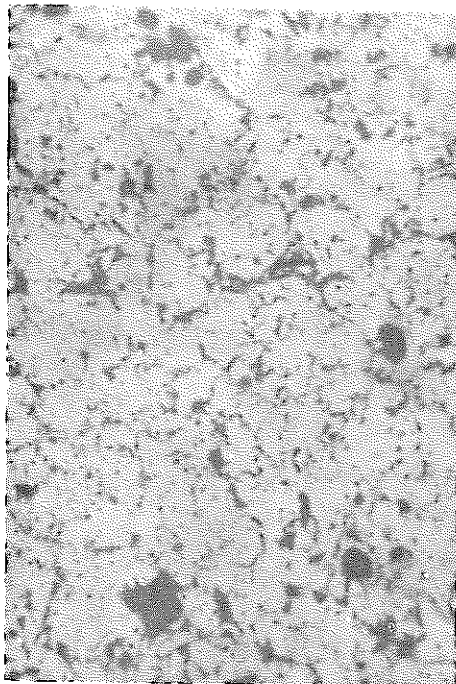


as-polished
x250 50 μ

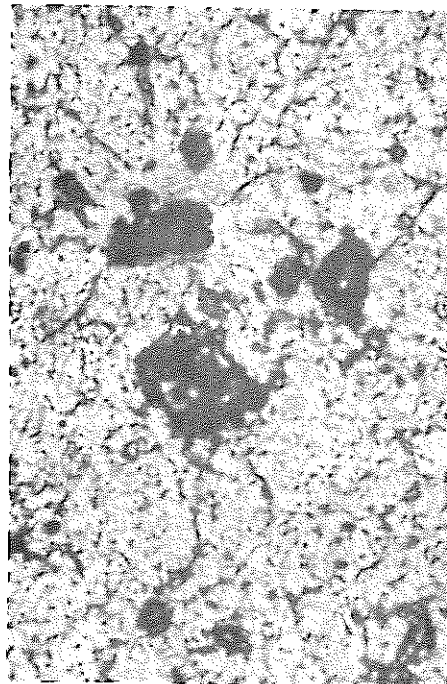


as-etched
x250 50 μ

Photo. 11 Pre-irradiation fuel pin E



as-polished
x250 50 μ



as-etched
x250 50 μ

Photo. 12 Pre-irradiation fuel pin F

がおこっているものと考えられ、特にAの熱媒体外側には、ツバ様のスペーサーがあり対流を抑制する働きをしている。

しかし自然対流がまったく無視出来るかどうかは、まだ疑問であり、熱電対記録が異常値を示した原因の1つであると思われる。

定量的に対流の効果を信頼出来る程度に出すのはむずかしく、この報告ではNa Kの対流については今回とくに考慮をしなかった。今後の問題としてほしい。

9. 偏心発熱について

各照射ピンについてその熱的中心と燃料中心の偏心度は、次のようである。

ピン	燃料半径に対する偏心距離
A	24.2%
B	16.9
C	9.5
D	16.6
E	14.3
F	21.4
G	～数%
H	9.5

以上のようにかなり偏心した発熱をしているが、GETR Trail Cable部分に大きな中性子束勾配があるものと思われる。

なお偏心発熱による温度記録への影響あるいは燃料を含んだキャプセル内の円周方向温度分布等については後の研究に待ちたい。

10. 国内での照射後試験に対するコメント

国内施設へ持ち帰ってからの照射後試験をおこなう上で参考にさせていただきたい諸点について列記しておく。

(1) γ -スキニングについて

燃料有効長さの両端においてアクティビティのピークがみられるが、この原因をさぐるため、 γ -線エネルギー・スペクトルの分析をおこなう必要がある。

(2) H試料のスランピング現象について

スランピングにより被覆管が何ら影響を受けていないかを調べるため被覆管寸法測定をおこなう必要がある。

スランピング状態を明確にするため、この部分の縦割りの金相試験をおこなう必要がある。

- (3) 熱電対先端を含む平面の金相試験をおこなう
- (4) Gray Phase の定性分析
- (5) 振動充填燃料におけるインシュレータ部分と燃料部分の縦割金相
- (6) E試料で被覆管がおかされているがこの部分の金相を調べる。燃料の方に特に両立性の悪い原因は考えられないし照射量も少ない点からみて被覆管自体に最初から問題があったのではないか。

EMXによる分析を必要とする。

- (7) A, E, G, H, 等についてEMX-ScanningによってPu濃度の半径方向の分布を調べたい。また2相が出ているかどうか調べられたらX線でも見てほしい。(酸素の分布)

1.1. 海外照射に対するコメント

GETR-1RT(B) 照射後解析を行って来て感じた照射試験に対する意見をフィードバックの意味で列記しておく。

- (1) 中性子透過写真について

G・H・両試料については燃料組織変化があらわれているが、他の試料については組織変化をしているにもかかわらず現われていない。これは中性子透過写真撮影失敗ではないかと思われる。

- (2) NaKカプセルについて

GEでカプセル設計をおこなっていることでもあるし照射後解析のことも考えNaK対流効果についてのデータも要求した方がよいのではないか、また根本的にはNaKの厚い層(ギャップボンディングに使用するのはさしつかえない)を設けるのは好ましくない。

- (3) 金相試験面位置について

今回の照射後試験では金相試験面位置と熱電対先端位置が縦方向にずれていた、これは温度記録と金相面の対応づけをする上で、はなはだ不都合であって望ましくない。両位置を一致させるような照射後試験が望ましい。

- (4) 熱電対出力記録について

これは本質にかかわる問題ではないが海外照射の場合のように記録を取る者と、これを解析する者が異なるときは、なるべくわかり易い記録にしないと、大きな誤りをおかすおそれがある。

12. 結 言

GETR-1 RT(B) 照射試験は照射初期特に出力上昇時の燃料挙動を明らかにすることを目的としていた。燃料挙動とはすなわち

- (1) 燃料が健全であったかどみか（被覆管に変形が無かったかどうかなど）
- (2) 金相組織変化はどうであったか
- (3) r -スキャンニングによる軸方向燃焼度分布はどうか
- (4) 中性子透過写真による軸方向組織変化はどうか
- (5) β - r オートラジオグラフによる半径方向燃焼度分布はどうであったか
- (6) 線出力はどの程度取れたか、またその履歴はどのようであったか
- (7) 燃料中心温度は何度になったか

等であるが、これらについては照射により十分なデータが得られた。照射初期燃料挙動として他の観点からの見方もあるのであろうが、このGETR-1 RT(B)照射試験では上記のような見方をした。

照射後解析という点からするとキャプセル計装法の不適さから線出力評価に多大の労力を要した。

線出力の履歴に対して燃料内温度分布変化、ポイド密度分布変化が計算され実際の組織変化と対比された。なかにはかならずしも一致していないものもあった。照射試料が多様でありいろいろな比較ができ種々の所見が得られた。

今後の問題として残されたものはNaKキャプセルにおける自然対流の効果と偏心発熱燃料の熱的解析である。

国内での照射後試験に対する要望と今後の海外（国内でも同じであるが）でおこなり照射試験に対してフィードバックとなる事柄が数件明らかになった。

付録 1 r 加熱のある場合の温度分布計算

条 件

- (1) 円筒の内側より円筒内に流れ込む熱量 Q (w/cm)
- (2) 円筒内での均一発熱量 (r 加熱) の総体 Q' (w/cm)
- (3) 熱は半径方向に流れるものとする。
- (4) 円筒物質の熱伝導率 R ($w/cm \cdot ^\circ C$)

半径 r を通って流れる熱量 q は次の二通りの方法で表わすことができる。

$$1. \quad q = -2\pi r k \frac{dT}{dr} \quad (1)$$

$$2. \quad q = Q + Q' \frac{r^2 - R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (2)$$

ここで R_o : 円筒外半径

R_i : 円筒内半径

①, ②より

$$-2\pi r k \frac{dT}{dr} = Q + Q' \frac{r^2 - R_i^2}{R_o^2 - R_i^2}$$

$$\therefore -2\pi k dT = \frac{Q}{r} dr + Q' \frac{1}{R_o^2 - R_i^2} \left(r - \frac{R_i^2}{r} \right) dr$$

両辺を定積分することにより

$$\int_{T_i}^{T_o} -2\pi k dT = \int_{R_i}^{R_o} \frac{Q}{r} dr + \int_{R_i}^{R_o} Q' \frac{1}{R_o^2 - R_i^2} \left(r - \frac{R_i^2}{r} \right) dr$$

ここで T_o : 円筒外表面温度

T_i : 円筒内表面温度

$$\begin{aligned} 2\pi k (T_i - T_o) &= Q \ell_n R_o/R_i + Q \frac{1}{R_o^2 - R_i^2} \left[\frac{1}{2} r^2 - R_i \ell_n r \right]_{R_i}^{R_o} \\ &= Q \ell_n R_o/R_i + Q' \frac{R_o^2}{2(R_o^2 - R_i^2)} \left\{ 1 - \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2 - \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2 \ell_n \left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2 \right\} \end{aligned}$$

よって

$$\Delta T = T_i - T_o = \frac{1}{2\pi k} \left[Q \ell_n R_o/R_i + Q' \frac{R_o^2}{2(R_o^2 - R_i^2)} \left\{ 1 - \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2 - \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2 \ell_n \left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2 \right\} \right]$$

上式によりキャプセル内温度分布を計算した。