

JAERI-M

5537

JMTR試用期間報告書

第2部燃料照射試験

1974年3月

材料試験炉部

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JMTR 試用期間報告書・第2部(燃料照射試験)

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

(1973年12月27日受理)

昭和45年から約1年間にわたって実施されたJMTR 試用期間の照射試験結果のうち、核燃料照射関係について、照射データと各種参考資料および照射後試験データの解析などをまとめて第2分冊「燃料照射試験」としたものである。

照射データと参考資料としては照射計画、キャプセル設計条件、安全審査資料、キャプセル図面などのほか、キャプセル熱計算結果、温度記録および各種検討メモ等をキャプセル毎に分けて示してある。

照射後試験データの解析としては照射試料提供の各社より寄せられた解析報告に必要なと思われる照射後試験写真を添付してキャプセル毎に示してある。

上記に示された諸データから、その後のJMTR 実用照射の基礎となる有用な情報が得られた。

Trial Irradiation in JMTR
(Part 2, Fuel Irradiation)

Division of JMTR Project, Oarai, JAERI

(Received December 27, 1973)

For one year preceding its practical use, irradiation experiments with fuel were made in trial operation of the JMTR. Irradiation capsules, capsule temperature-profiles, irradiation experiments and analysis of the post-irradiation results are described. The temperature and the cracks were observed to be less in most samples by microphotography. These phenomena are due to the low linear heat rating on account of its large safety factor. Only the sample in capsule No.67F-33G had a center hole, which indicated its high linear heat rating during irradiation. In a UO_2 sample containing Gd, the eccentric profile of burn-up were observed by autoradiography. Through the trial irradiations, the techniques of making capsules were obtained, and irradiations and post-irradiation examinations proved to be successful.

目 次

まえがき	1
1. 照射データと参考資料	3
1.1 67F-1Gの照射データと参考資料	3
1.2 67F-2G	24
1.3 67F-3G	32
1.4 67F-4G	42
1.5 67F-5G	53
1.6 67F-7G	63
1.7 67F-8G	68
1.8 67F-10G	71
1.9 67F-13G	78
1.10 67F-14G	89
1.11 67F-16G	100
1.12 67F-18G	106
1.13 67F-23G	111
1.14 67F-24G	118
1.15 67F-25G	125
1.16 67F-28G	133
1.17 67F-31G	142
1.18 67F-33G	150
1.19 67F-35G	164
1.20 67F-36G	174
1.21 68F-3G	181
1.22 68F-4G	186
2. 照射後試験データの解析	191
2.1 67F-1Gの照射後試験データの解析	191
2.2 67F-2G	196
2.3 67F-3G	202
2.4 67F-7G	207
2.5 67F-16G	218
2.6 67F-18G	226
2.7 67F-24G	231
2.8 67F-28G	240
2.9 67F-31G	249
2.10 67F-33G	259

211	67F-35G	273
212	68F-4G	287
213	$^{157}\text{C}_s$ 分析測定データ	296
3.	あ と が き	298

第2分冊の図表番号一覧表

第1章 照射データと参考資料

項 目	キャプセル番号	図 面 番 号	表 番 号
1. 1	67F-1G	1.1 ~1.5	1.1
1. 2	67F-2G	1.6 ~1.10	1.2
1. 3	67F-3G	1.11 ~1.17	1.3~1.4
1. 4	67F-4G	1.18 ~1.25	1.5
1. 5	67F-5G	1.26 ~1.28	
1. 6	67F-7G	1.29 ~1.30	1.6
1. 7	67F-8G	1.31	
1. 8	67F-10G	1.32 ~1.35	1.7
1. 9	67F-13G	1.36 ~1.42	
1.10	67F-14G	1.43 ~1.49	
1.11	67F-16G	1.50 ~1.52	1.8
1.12	67F-18G	1.53 ~1.55	
1.13	67F-23G	1.56 ~1.59	1.9
1.14	67F-24G	1.60 ~1.63	1.10
1.15	67F-25G	1.64 ~1.68	1.11
1.16	67F-28G	1.69 ~1.72	1.12
1.17	67F-31G	1.73 ~1.77	1.13
1.18	67F-33G	1.78 ~1.88	1.14
1.19	67F-35G	1.89 ~1.95	1.15
1.20	67F-36G	1.96 ~1.99	1.16
1.21	68F-3G	1.100~1.102	
1.22	68F-4G	1.103~1.105	

第2章 照射後試験データの解析

項 目	キャプセル番号	図 面 番 号	表 番 号	写 真 番 号
2. 1	67F-1G	2.1		2.1 ~2.11
2. 2	67F-2G	2.2	2.1	2.12~2.14
2. 3	67F-3G			2.15~2.19
2. 4	67F-7G	2.3 ~2.5	2.2~2.4	2.20~2.28
2. 5	67F-16G	2.6		2.29~2.30
2. 6	67F-18G	2.7	2.5	2.31
2. 7	67F-24G	2.8 ~2.11		2.32~2.38
2. 8	67F-28G	2.12~2.13		2.39~2.48
2. 9	67F-31G	2.14~2.15	2.6	2.49~2.53
2.10	67F-33G	2.16~2.17		2.54~2.58
2.11	67F-35G	2.18~2.24	2.7~2.8	2.59~2.66
2.12	68F-4G	2.25~2.28	2.9	2.67~2.69

ま え が き

JMTR 試用期間の燃料照射計画は JMTR 運営委員会の利用小委員会の燃料グループにおいて立案された。当初の計画では、試用期間の前半においては照射挙動が比較的良く判っている UO_2 燃料を用い、しかも天然ウランを用いて安全に照射を行いうることを立証し、後半において当時わが国ではまだ照射例の少なかった UC 、ポイズン入り UO_2 、混合酸化物燃料 $PuO_2 \cdot UO_2$ などを照射するほか NaK 入りキャプセルのごとく使用例の少なかったキャプセルを用いて照射することを計画した。この計画は若干の変更はあったがおおむね計画通り実行され、とくに大きな事故等を生ずることなく完了したのは幸いであった。

試料は国内各メーカー、研究機関より提供をうけることとなり、東芝・日立・三菱・古河・住友各社のほか動燃及び原研東海研などより貴重な試料の提供があった。この間試料およびキャプセルの検査基準の作成については、上記各社の検査専門家の協力をうけた。

当時このように数多くのキャプセルを一時に設計・製作するようなことは初めてであり、燃料キャプセル各々について原子力局の工事認可をうけることは実務的ではないため、キャプセル設計基準を作成し、この基準内であれば原研大洗研究所内のキャプセル等安全審査委員会で審査ができるようになった。

キャプセルの製作は殆んどが試作・開発的なものであり、原研の工作工場およびメーカーに依頼して製作した。この間に開発されたキャプセルの温度制御方法とか高温熱電対の取付け方法などはその後広く用いられるようになって今日に至っている。

燃料キャプセルを安全にしかも所定の温度、発熱量または燃焼量で照射することは当時も今も懸案の一つである。このため発熱量の推定には核計算と JMTRC (臨界実験装置) 実験による測定値とを比較して行った。これは今でも同様なことが行われているが、試料期間においては、安全性を重視したため比較的低い側に発熱量が出るよう配置される傾向があり、このため温度・発熱量が期待値をはるかに下廻る傾向を有していたことは残念乍らやむをえなかったことである。

照射後燃料キャプセルの炉圧力容器よりの取出、切断、ホットラボへの輸送などのハンドリング及びホットラボでのキャプセルの解体などの経験をうけることも主要な試用期間の目的であった。

ホットラボにおける諸試験はほとんど東海研ホットラボにて行ったが、ホットラボのケーブルデイが少く、このため A ケーブ 360 . D (cave Day), C ケーブ 490 . D が割り当てられ、この範囲内に照射後試験を限定せざるをえなかった。燃料の燃焼度測定は 7 キャプセル行われた。

燃料キャプセルの照射および照射後試験の結果について本文では、第 1 章照射データと参考資料、第 2 章照射後試験データの解析にわけて報告する。

第 1 章には次のデータを表、図にて示す。

- (1) 照射計画 (試料提供者, 試料, 照射期間, 目的)
- (2) キャプセル設計条件 (照射孔, 線出力, 構造, 計測, 制御)

- (3) キャプセル安全審査資料
- (4) キャプセル組立図
- (5) キャプセル内温度分布(計算値)
- (6) 照射温度記録
- (7) キャプセル線出力
- (8) その他検討メモなど

第2章には次の内容についてまとめてある。

- (1) 外観検査, 寸法検査, リーク試験, FPガス捕集
- (2) 組織観察
- (3) まとめ

なお, 本報告に記載しきれなかった照射後試験データもあり, これらはJMFREに保管されているので利用されたい。

1. 照射データと参考資料

1.1 67F-1Gの照射データと参考資料

キャプセル名		67F-1G		
照射 計	試料提供者	東京芝浦電気株式会社(東芝中央研究所)		
	ペレット	材質	UO ₂ (2.945%濃縮)	
		形状	円柱状ペレット	
		寸法	直径15.03mmφ 高さ14.9mm	
		数量	7個	
	ペレット・スタック長	104.1mm		
	被覆管	材質	タンタル	
		形状	円筒型	
		寸法	内径15.19mmφ 肉厚1mmt	
	燃料ピン全長	251.9mm		
燃料ピン数量	1本			
照射期間	第5~第7サイクル			
照射試験の目的	1) 直接封入式によるペレットの中心温度測定と試料内状態の照射後観察 2) キャプセル熱特性の調査 3) 炉側挿入孔の照射特性の調査			
キャプセル設計条件	照射孔	J-3		
	線出力	380W/cm		
	ガンマ発熱	0.5W/g		
	キャプセル構造	Δ熱媒体		
	計測制御	CA熱電対 7本 W・Re 1本		
キャプセルの設計	キャプセル構造設計	図1.1にキャプセル組立図を示す		
	熱設計	図1.2にキャプセル内温度分布を示す		
	強度設計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い個所は 試料被覆管 で右欄にその計算値を示す	内圧による応力	5.4 kg/mm ²
			熱応力	2.3 kg/mm ²
			許容応力	8.2 kg/mm ²
			評価	$\sigma_p < \sigma_a$, $\sigma_p + \sigma_t = 7.7 \text{ kg/mm}^2$ で強度十分である。
設計において特に留意した事項	燃料試料内に熱電対を直接封入することに伴うF.P.ガスのシール。			
照射データ	照射温度	図1.3から図1.5に各サイクル毎の温度記録を示す。		
	F/M測定値			
	線出力	表1.1		
	その他	検討メモ1.1 F.P.ガスの漏出について		

キャプセル名称	67F-1G	キャプセル安全審査資料№																	
照射サイクル	第5, 第6, 第7																		
構造の詳細	MB-1890-2																		
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	設計基準第4条4, (1) 1孔反射体(42mmφ)																	
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p> <p>(注) γ加熱 0.5W/gr 燃焼 63日</p> <p>冷却水 外筒(SUS-27) ガスギャップ(He) 熱媒体(Al)</p>																		
	<p>UO₂ (2.95%) ガスギャップ(He) 被覆管(Ta) ガスギャップ(He)</p>																		
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	Q _{max} の値	620 W/cm	制限因子	UO ₂ 中心温度															
	<p>Q_{max} の分布</p> <table border="1"> <tr><td>T₈</td><td>50°C</td></tr> <tr><td>T₇</td><td>70</td></tr> <tr><td>T₆</td><td>137</td></tr> <tr><td>T₅</td><td>175</td></tr> <tr><td>T₄</td><td>210</td></tr> <tr><td>T₃</td><td>388</td></tr> <tr><td>T₂</td><td>410</td></tr> <tr><td>T₁</td><td>610</td></tr> <tr><td>T₀</td><td>2580</td></tr> </table>	T ₈	50°C	T ₇	70	T ₆	137	T ₅	175	T ₄	210	T ₃	388	T ₂	410	T ₁	610	T ₀	2580
T ₈	50°C																		
T ₇	70																		
T ₆	137																		
T ₅	175																		
T ₄	210																		
T ₃	388																		
T ₂	410																		
T ₁	610																		
T ₀	2580																		
キャプセル健全性の総合評価	<p>Q_{max} = 620 W/cm に対して 各部材の強度は十分である。</p>																		
照射条件ねらい	Qd の値	380 W/cm	Q _{max} /Qd	1.63															

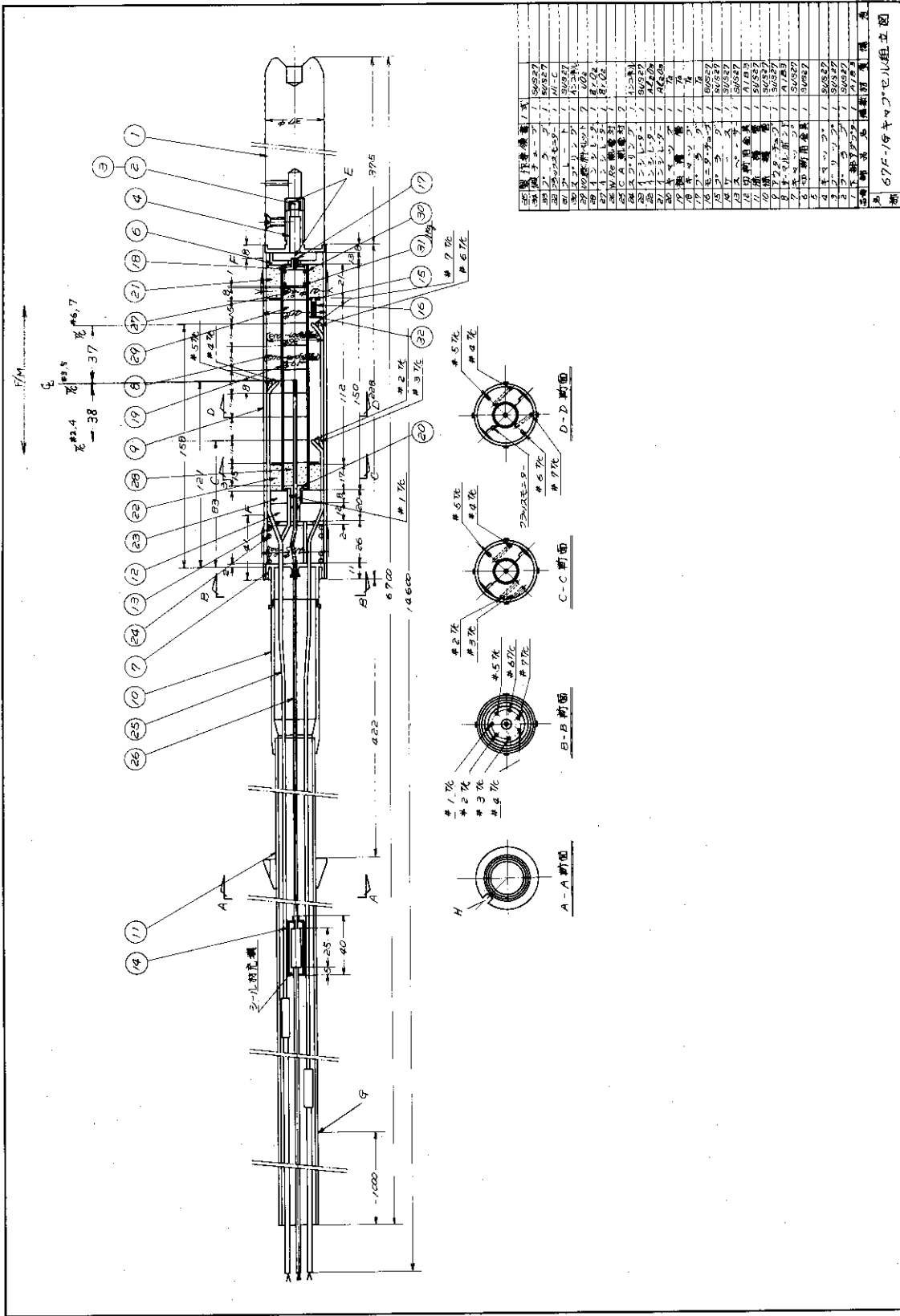


図 1.1 67F-1G キャプセル組立図

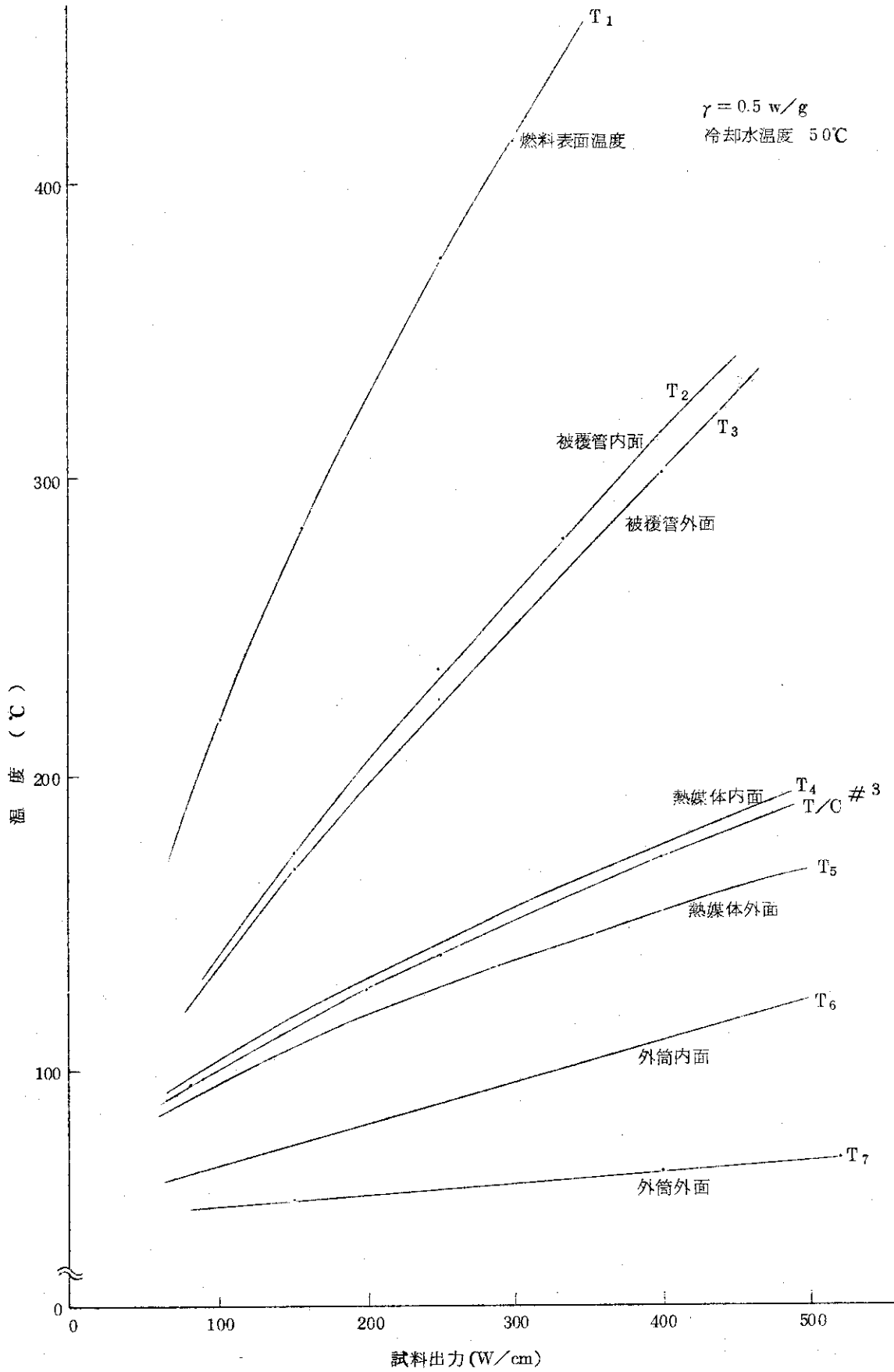


图 1.2 67F-1G 温度分布

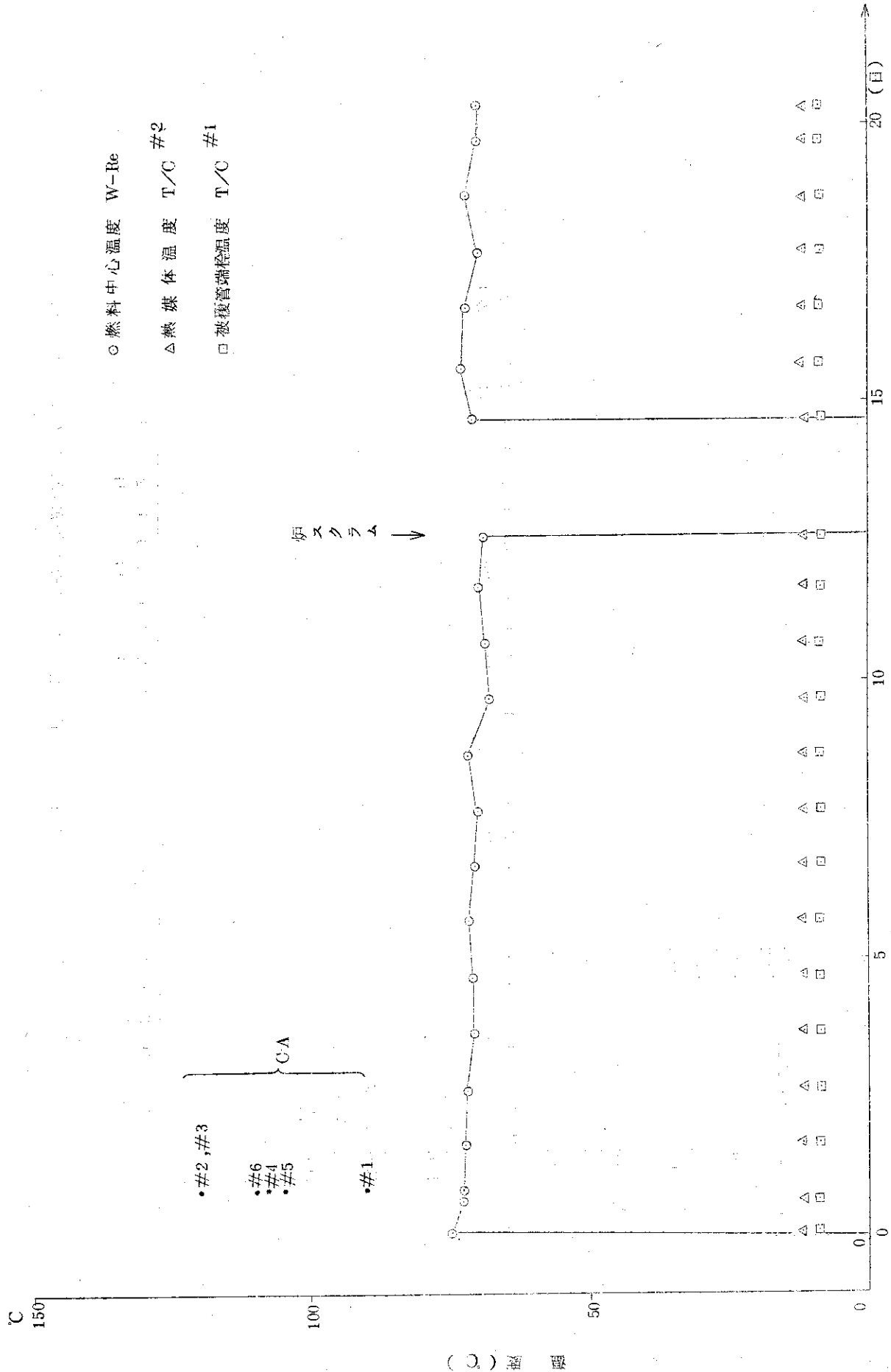


図1.3 67F-1Gキャプセル温度指示値 (第5サイクル)

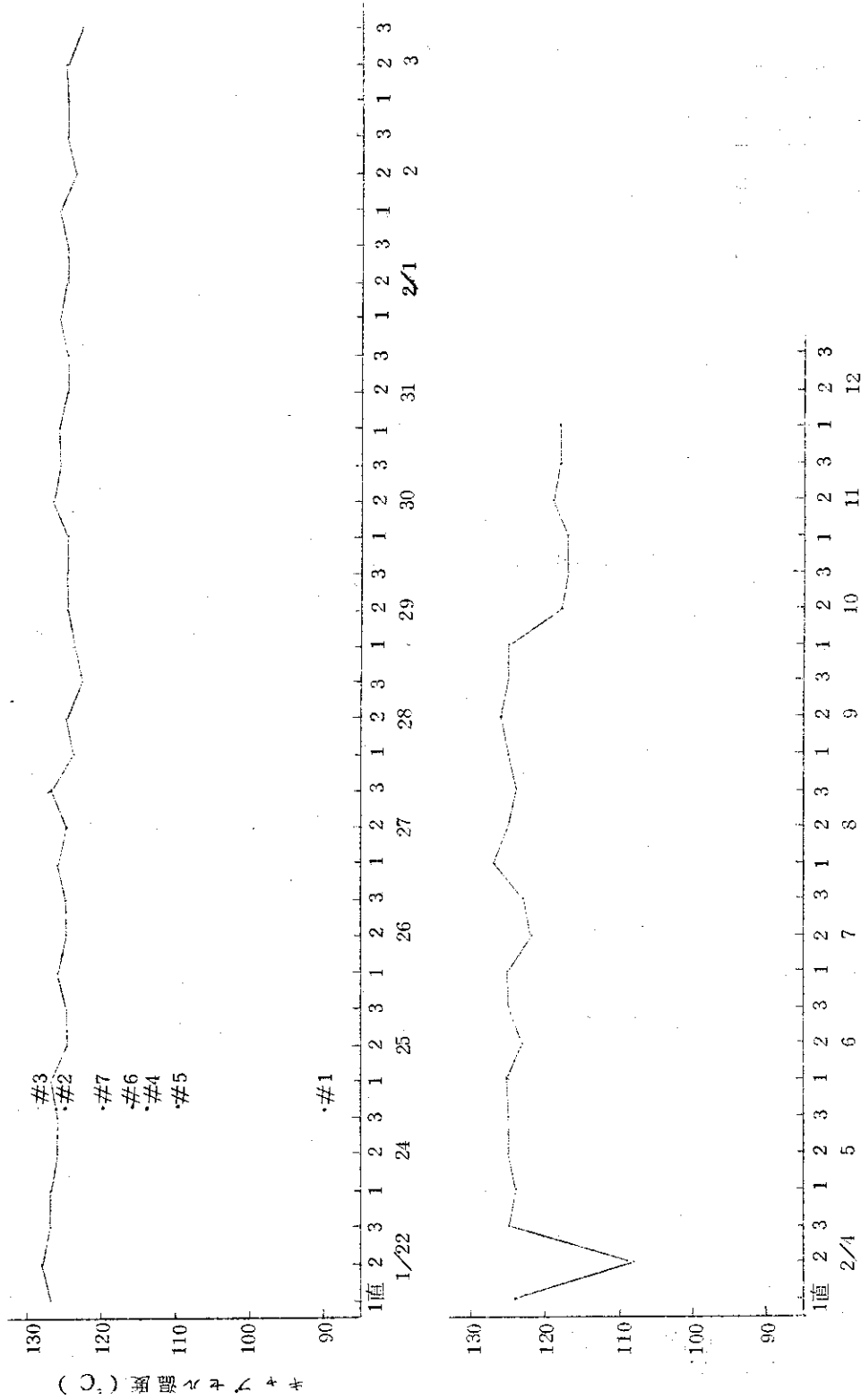


図 1.4 67F-1G キャプセル温度指示値 (第 6 サイクル)

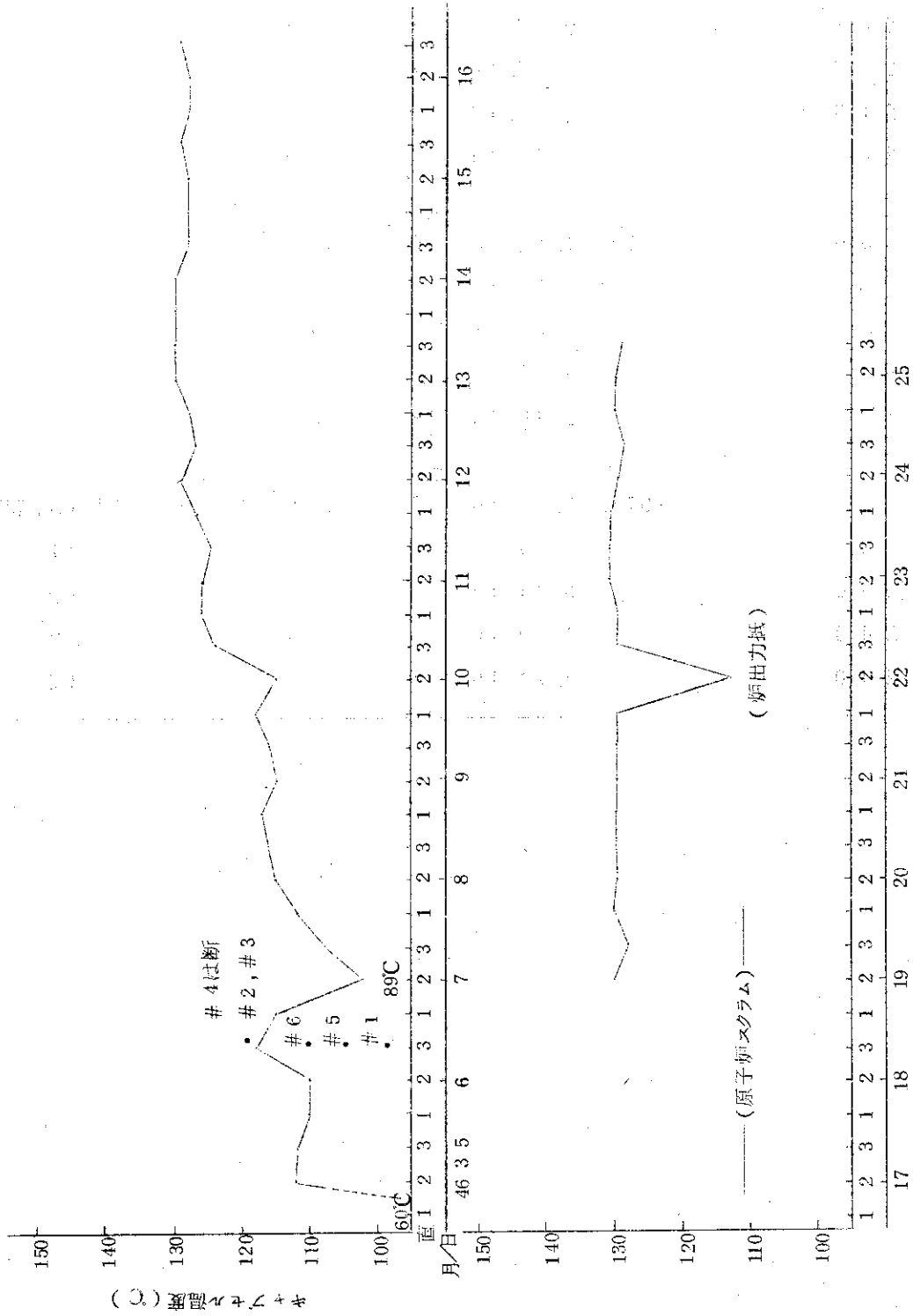


図 1.5 67F-1G キャプセル温度指示値 (第7サイクル) T/C #2

表 1.1 67F-1G キャプセル線出力

Q _G	日時/サイクル	T/Cの番号	備 考
210 W/cm	年月日時第 1970. 11. 28. 16 5	T/C#3	
205	12. 2. 16 "	"	
205	12. 7. 16 "	"	
215	12. 12. 16 "	"	
205	12. 17. 16 "	"	
	第		
230	1971. 1. 22. 18 6	T/C#3	
230	1. 26. 18 "	"	
230	1. 31. 18 "	"	
230	2. 5. 18 "	"	
232	2. 10. 18 "	"	
	第		
105	1971. 3. 5. 16 7	T/C#3	炉熱出力 15.3MW
205	3. 9. 16 "	"	27 "
240	3. 14. 16 "	"	32 "
240	3. 19. 16 "	"	32 "
240	3. 24. 16 "	"	32 "

検討メモ 1.1

燃料中心温度測定キャプセル(熱電対直接封入式)の
Fission Gas 漏洩に関する原因調査メモ
(1971年2月~1972年9月)

67F-1Gおよび67F-28Gは中心温度測定のためにタンタルシースの5/26W-WRの熱電対を燃料試料中に直接封入する設計とした。F.P. ガス封入に関しては炉外へは3重となっているが、1G, 28Gとも2重のシールが施こされている保護管にFPガスが漏洩した。

本メモは、大洗研・東海研・ホットラボ関係者の好意により、照射後試験の途中で、随時その原因調査を行った結果をまとめたものである。

最終的な決め手となる原因は握めなかったが、熱電対直接封入による燃料中心温度測定技術に関しては、安全面で問題があることがわかった。

以下では原因調査時に作成したメモを列挙する。

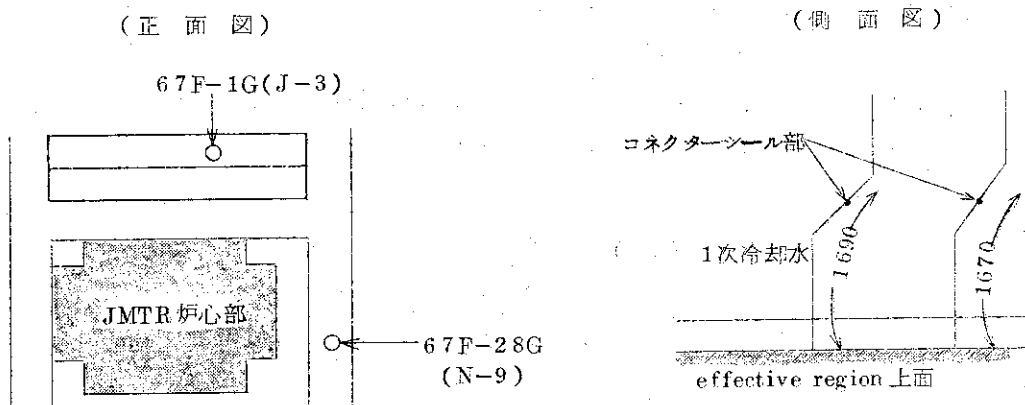
メモ一覧

- メモ 1 熱電対コネクターシール部のRadiation場の検討
- 2 67F-28Gの保護管内へのF.P. 漏洩
- 3 67F-28Gの保護管内へのF.P. 漏洩(中間報告)
- 4 W/WReコネクターシール部の樹脂、ホットラボでの観察結果
- 5 67F-28G燃料ピンF.P. リークテスト結果の検討
- 6 67F-1G, 67F-2Gキャプセル燃料ピンのリークテスト結果の検討
- 7 67F-1G熱電対(Taシース)のシース表面観察
- 8 F.P. 漏洩の原因推定

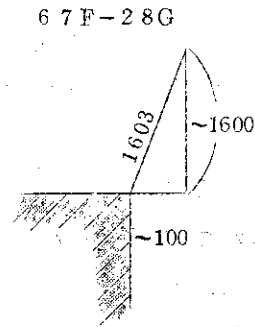
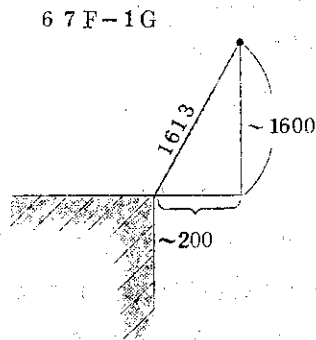
照1メモ1679
S. 46. 2. 19

メモ 1 熱電対コネクターシール部のRadiation場の検討
(JRR-4照射とJMTRの比較)

1. 炉心との相対位置



従って、ほぼ立方体の炉心から見た場合



(単位mm)

2. 使用した樹脂

67F-1G	ダイヤボンド	2200番(商品名)	エポキシ系
67F-28G	ダイヤボンド	5000番()	スチレン系

3. 中性子束, ガンマ線束

上記の位置で中性子束, ガンマ線量率がどの程度のものかを, JRR-4で同材質の樹脂を照射した際の条件と比較する。

3.1 JRR-4での樹脂照射試験

照射孔	JRR-4 Tパイプ(中心)
炉出力	2.5 MWt
照射時間	5hr, 10hr
ϕ_{th}	3×10^{13} nv
ϕ_f	5×10^{13} の v (Cd Cut off 以上)
γ	不明

以上の条件で スチレン系は 5hr 照射 O.K リークなし
 エポキシ系は 10hr " O.K "

3.2 JMTRでの樹脂照射試験

照射孔	スチレン系 N-9
	エポキシ系 J-3
炉出力	30 MW
照射時間	スチレン系 40日
	エポキシ系 61日

ϕ_{th} , ϕ_f , γ に関しては, キャプセル保護管内, および炉心上部について測定されており, JMTR特性試験報告書分冊-3にまとめられているので, それから引用すると(ϕ_{th} , ϕ_f は外挿)

ϕ_{th} (反射体上面より 1m)	$\frac{30}{50} \times 2 \times 10^8$ nv	(M-10)
ϕ_f (")	$\frac{30}{50} \times 1.5 \times 10^8$ nv	(M-10)
γ (")	1.5×10^4 γ /MW·h	(M-8)

3.3 JRR-4 先行試験と JMTR 使用条件の比較

	JRR-4	JMTR
スチレン系 (ϕ_{th}) nvt	1.5×10^{14} nvt (n/cm ² sec · hr)	1.15×10^{11} nvt (n/cm ² sec · hr)
(ϕ_f) nvt	2.5×10^{14}	8.64×10^{10}
(γ)		$4.4 \times 10^7 \gamma$
エポキシ系 (ϕ_{th}) nvt	3×10^{14} nvt (n/cm ² sec × hr)	1.76×10^{11}
(ϕ_f) nvt	5×10^{14} nvt	1.32×10^{11}
(γ)		$6.6 \times 10^7 \gamma$

4. 結論

4.1 不明確な点

- JRR-4 Tパイプ中の flux の出典が不明なため疑問は残る。しかし、JRR-4 の出力 (2.5 MW) から云ってさほど過小評価とは考えられない。
- 特性試験 (第1サイクル炉心) と第5, 6, 7サイクルの相異について疑問は残る。しかし order で疑わしいことはないと考えられる。
- 計測法・センサーの違いがある。

4.2 結論し得る点

JMTRの場合、コネクタシール部はここで比較した炉心上面1mよりさらに約50cm上部に離れているので

- (1) ϕ_{th} の nvt は約3桁以下
- (2) ϕ_f " 約 "
- (3) ϕ_f と γ の attenuation がほぼ似かよったものという仮定の下では、 γ は約3桁下であり、いずれも、JMTRでの使用条件はJRR-4での試験条件よりもゆるい。

以上

照1メモ-1680
S. 46.2.19

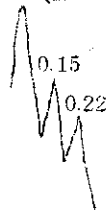
メモ-2 「67F-28G」の保護管内へのF.P.漏洩について

1. F.P. の検出 (安全管理課より)

1.1 核種の確認

安全管理課のパルハイにより、下図の如く ^{133}Xe , ^{133m}Xe と考えられるとのこと。

0.08 (MeV)



(0.15については核種不明)

	半減期	γ -ray エネルギー
Xe ¹³³	5.27 d	0.081 MeV
Xe ^{133m}	2.3 d	0.233 MeV

(放射線データブック)

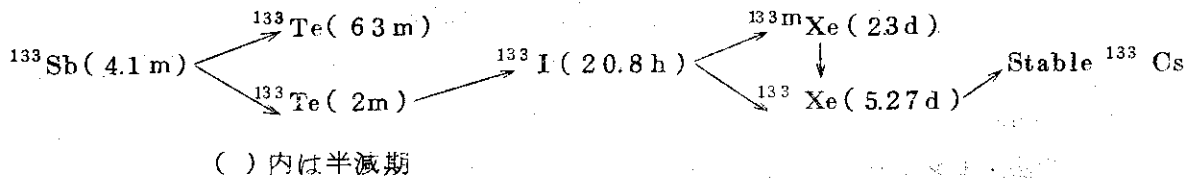
保護管内のガスをサンプリングし、現在半減期を追跡中とのこと。(半減期とエネルギーの両面から存在核種をつきとめようとしている)

1.2 濃度

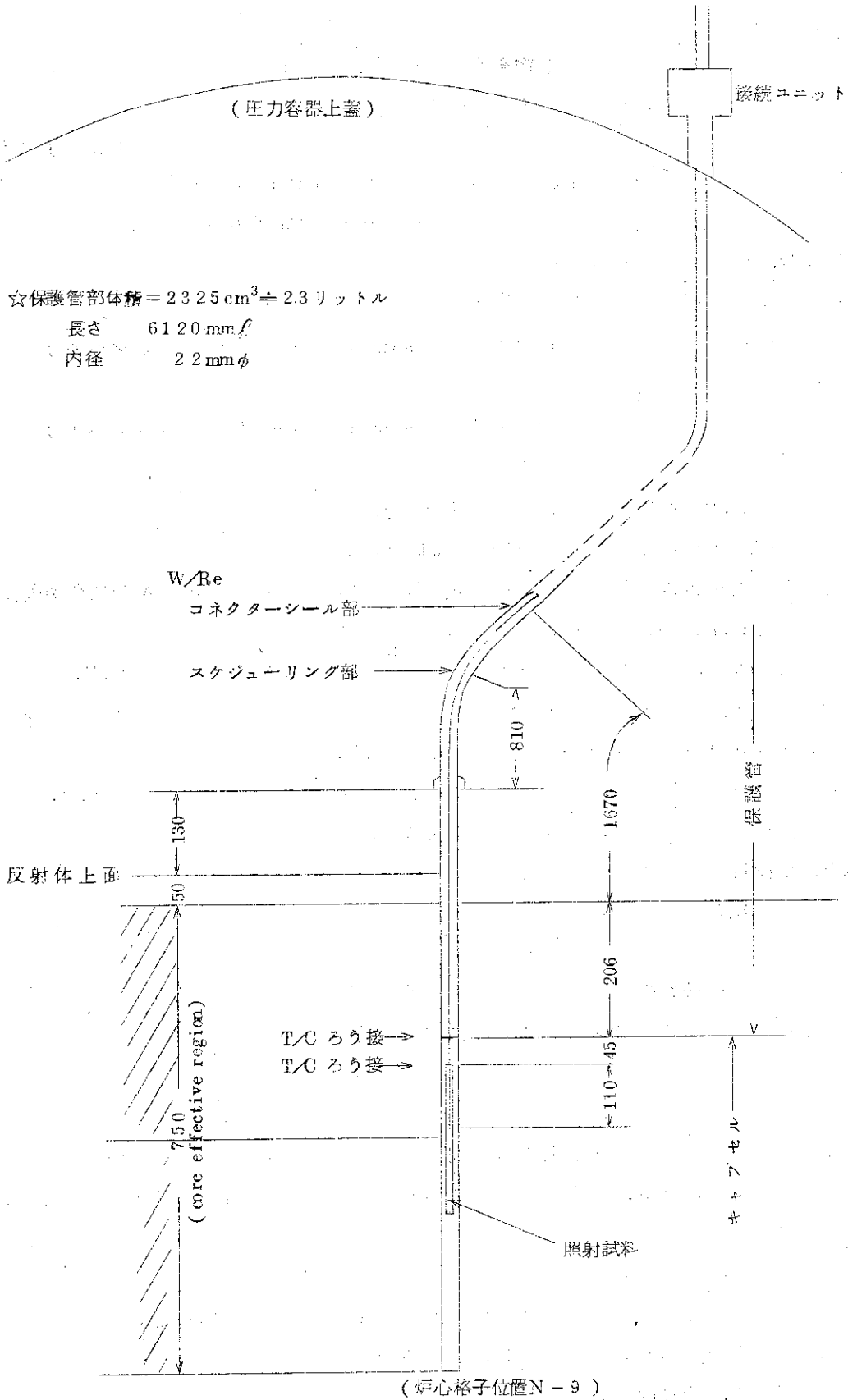
サンプリングしたガスを振動容量型電位計で半減期の追跡と同時に濃度を算出(全てXe¹³³として)したところ

2月18日 最大 $2.5 \times 10^{-3} \mu\text{c}/\text{cc}$ 。

なおXe¹³³に関する decay scheme は次の通り(ORNL-2127)



2. キャプセル保護管の構造・寸法等



キャプセル内詳細は図 1.1 参照

3. キャプセル検査結果(67F-28G検査成績表から)

3.1 表面汚染

燃料ピン (検査日時45年9月14日)

キャプセル完成後(保護管内をスミヤしたとは考えられない)外面

(検査日時45年10月5日)

いずれも α ray 検出感度以下(< 20 dPm/100 cm²)

β, γ ray " (< 200 dPm/100 cm²)

3.2 ろう接, 溶接部ヘリウムリーク検査

燃料試料(端栓溶接, 熱電対ろう接後)

検出リーク量 1.9×10^{-10} atm cc/sec (検出感度レベル)

キャプセル

検出リーク量 3.1×10^{-10} atm cc/sec (検出感度レベル)

(以上, 表面汚染, ヘリウムリーク共に問題なし)

4. 保護管内にF.P. が検出されることの考えられる原因

a 保護管内に最初から fissionable material があつた。

b 試料内に直接封入されたタングステン・レニウム熱電対のタンタル被覆管が破損し, 熱電対内部をF.P. が拡散浸透して, 保護管内に出てきた。

b-1) この場合, 保護管内のタンタル被覆管に穴があいて保護管内にF.P. が出た。

b-2) コネクターシールのシール(ダウエルアイゼンセメントの上をステレン系L.B. ボンド5000番でシール)部が破損してF.P. が保護管内に出た。

c 試料の被覆管が破損し, キャプセル上部端栓に孔があいて保護管内にF.P. が出てきた。

d 何の破損もなかったが, 長期照射に伴って被覆管ろう接部→キャプセル外筒ろう接部をF.P. が浸透して保護管内に出てきた。

5. 4の原因の検討

a について

保護管内に核分裂性物質があつたかどうかは不明。

製作工程で微細なウラン等がまぎれ込まないと断言はできないが可能性は薄いと思われる。

b について

照射中(第6サイクル; 2月10日)中心温度を測定しているW-Re 熱電対が急に断線したとの報告があり, 熱電対のタンタル被覆管(肉厚0.2mm)が破損した可能性はきわめて強い。

b-1) 現在のところ不明

b-2) 安全審査資料に記載した通りでボンドの radiation damage によるものとは, 今のところ考えられない。しかし, ホットラボでこの部分の健全性を見ることになっているので, その際明らかになる。

c について

キャプセル限界出力が500W/cm (安全審査資料)に対して, 第5サイクル出力

150W/cm (GENTEC), 第6サイクルも高々300W/cm以下と想定される(詳細には、記録紙を解析しなければならない)ので、被覆管の強度限界よりはるかに余裕を持っている。破損しているかどうかは、ホットラボで解体してみなければわからないが、現状では、被覆管の破損は考えられない。

キャプセル上部端栓に孔があくことは、全くあり得ないとは云えない。これもリークテストをやってみなければわからない。

dについて

もしdとすると、他の燃料キャプセルについても大同小異であるから、保護管からF.P.が検出されるはずである。

6. F.P.の生成量と ^{133}Xe の放出率

現在得られているデータを基に生成F.P.量を求める。

6.1 F.P.ガス生成量 $V_{\text{F.P.}}$

試料発熱量	200W/cm	(第5, 6サイクル平均)
燃料中心温度	800°C	(第6サイクル末期推定) < 1600°C
照射日数	40日	
試料長さ	20cm	
Yield Y	4.66×10^{-5} cc/wD	(ORNL-2127)

$$\therefore V_{\text{F.P.}} = 4.66 \times 10^{-5} \times 200 \times 20 \times 40 \text{ cc} \\ = 7.546 \text{ cc}$$

一方F.P.ガスのrelease rateを0.5% (GEAP 4572, 4596)とすると試料の外に出るF.P.ガス量 V_{out} は

$$V_{\text{out}} = 3.773 \times 10^{-2} \text{ cc}$$

6.2 ^{133}Xe の放出率

V_{out} 中の Xe^{133} については、その親核種である ^{133}Sb の生成率は6%/200%だから

$$3.773 \times 10^{-2} \times \frac{6}{200} = 1.13 \times 10^{-3} \text{ cc}$$

これが全て保護管中に出たとすると、保護管の内容積 2325 cm^3 だから

$$1.13 \times 10^{-3} \div 2325 = 4.87 \times 10^{-7} \text{ cc/cc}$$

これをキュリー数/cc C_i に換算すると(decay chainで全て ^{133}Xe になったとする)

$$C_i = \frac{1}{3.7 \times 10^{10}} \times \frac{dN}{dt} = \frac{1}{3.7 \times 10^{10}} \times \lambda N$$

$$^{133}\text{Xe} \text{ の } \lambda = 1.522 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$$

$$N = 1.309 \times 10^{13} \text{ atoms}$$

だから

$$C_i = 5.38 \times 10^{-4} \text{ キュリー/cc} \\ = 5.38 \times 10^2 \text{ } \mu\text{c/cc}$$

この計算結果と、安全管理課で測定された $2.5 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{c/cc}$ を比較すると、実測値は約5桁下である。

計算には種々の仮定が入っており、*over estimate* していると考えられるが、仮りに計算値を1桁下けてもなお実測値は4桁下の値である。

このことから生成量のうちの極く1部が保護管内で検出されたことになり、4で述べた諸原因のうちbの可能性が強いと考えられる。

照1メモ-1692

S. 46.3.4

メモ-3 67F-28Gキャプセル保護管内F.P. ガス漏洩

その後の調査(中間報告)

2月17日67F-28Gキャプセル保護管内のガス中に Xe^{133} , Xe^{133m} の両核種が検出された。その後原因を調べるため他の3本の燃料キャプセル保護管内ガスのサンプリング、核種確認を照射2課、安全管理課の協力を得て行なうことができ、結果が出たので概略報告する。なお、今回の調査でも決定的にこれが原因だと断定できなかったため、今後の作業(保護管切断、ホットラポワーク)の中で、熱電対破損か、表面汚染か、あるいは他の原因によるものか調べていきたい。

表-1 調査対象一覧

キャプセル名	サンプリング日時	濃 度 *1	Xe^{133}, Xe^{133m}	キャプセル型式	接続方式
67F-28G	46.2.17	$2.5 \times 10^{-3} (\mu Ci/cm^3)$	有	直接封入式 中心温度測定	ユニット
67F-1G	46.2.24		有	直接封入式 中心温度測定	ユニット
67F-2G	46.3.2	3.5×10^{-5}	認められず	ウエル式中心温度測定 混合ガス温度制御	接続箱
67F-14G	46.3.2	2.5×10^{-4}	不明	計測付	ユニット

(* 厳密な保護管内ガス濃度ではないが、67F-1G, 2G, 14Gは、保護管、案内管のガスを第6サイクルシャットダウン後初めて排気系へ流した時のほぼ最高値と認められる時点でサンプリングしたもの)

表-1の補足

- (1) Xe^{133} , Xe^{133m} の検出されたキャプセルはいずれも燃料試料中心にタンタル被覆 (unground type) 熱電対を直接封入したものである。

検出されなかったキャプセルは、ウエル方式および単なる計測付キャプセルである。

- (2) メモ-2 (照1メモ-1680) のうち、F.P. が検出されることの原因 a ~ d のうち
- (a) 「保護管内に最初から fissionable material があつた」ことの可能性が薄いとされたのは誤りで、製作過程で十分あり得るものである。
- (b) の熱電対断線と F.P. 漏洩が結びつき、熱電対被覆管が破損した可能性がきわめて強いとしたのは、今回の一連の調査結果から「きわめて」は強くないことになる。

(c)の被覆管破損は今回の結果から依然あり得ることである。

(d)2重(あるいは3重)事故でない限り、今回の結果からは自然に試料からのF.P.が浸透拡散して保護管内に出てくることはないと考えた方がよい。

以上

照1メモ-1837

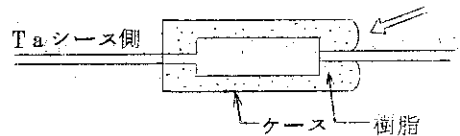
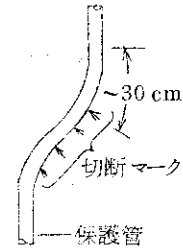
S. 46. 11. 17

メモ-4 - W/wReコネクターシール部の樹脂

ホットラボでの観察結果(S. 46.11.13)

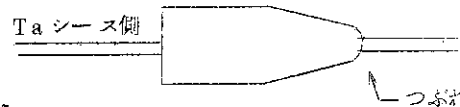
1. 保護管からの取り出し

右図の如く保護管外側のマークから約30 cm上方にコネクターが位置していたために、切断のため端部をプレスではさんだ際つぶれた。



(a)

(1G, 28G共)



(b)

なおコネクターに識別マークは施していなかったため、キャプセル毎の区別はつかない。

2. 観察結果

(b)樹脂の切断面 変色、形のくずれ等はない。

(a)の端面(上図矢印から) 表面は黄褐色。但し少し内面に入れば、半透明で製作時と変化はない。

X線写真

Taシース側に2箇所ほど「むら」が見られたがこれは製作時のものと考えられる。(照射前にこの部分のX線写真は撮影していないので比較はできない)

3. 検 討

外觀観察のみからは、キャプセル照射中にシールに使用した樹脂がneutron, gammaのために破損してボロボロになってはいないことがわかった。現状では、ホットラボでリークテスト不可能ということなので、この段階で樹脂の破損の有無については、調査を打ち切りたい。

(サンプルは廃棄)

追) 6.7F-1Gキャプセルの切断に東海H.L.で立合う。

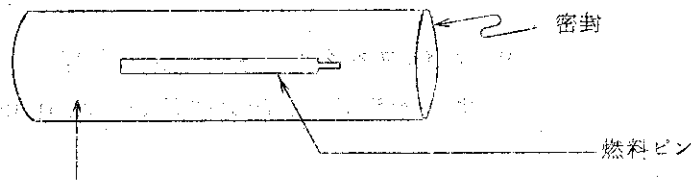
東海研H.L.では、リークテスト可能ということ。

予定 11月26日 縦割り

12月初旬 (縦割り後ピンを出して検査後可能ならリークテスト)

メモ-5 67F-28G燃料ピンF.P. リークテストの結果

(1) リークテストの方法 (H.L. 試験担当者より)



N₂O ガス, 10 kg/mm² G; 30 min 加圧



airで表面洗浄



N₂Oガスの濃度を測定 (サンプリング, 500cc/min)

(赤外線分析)



リークレート算出

リークレートの単位

CLUSEC ; 1 ℓの容器内を真空に引き1 sec 間に100 μHgの圧力差を生じるような孔の大きさ (リーク率)

L CLUSEC の場合はピンホール換算の直径D mm は

$$D \doteq L^{\frac{1}{4}} \times 10^{-2} \text{ mm}\phi \quad (a)$$

(2) リークテスト結果

プレナム Vol (H.L.) 2 cc → リークレート ; 173 CLUSEC

" (図面) 1.41 cc → " ; 123 "

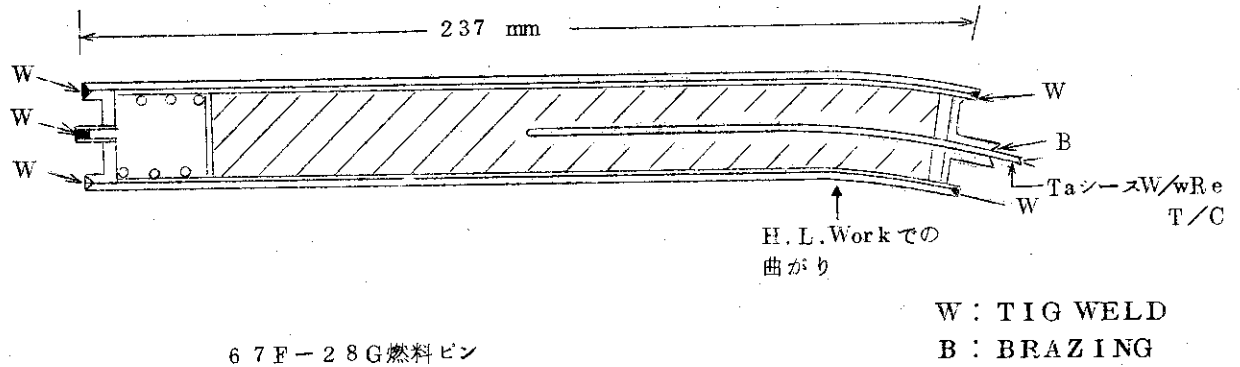
(a)式からプレナム 1.41 cc の場合は

$$D \doteq 123^{\frac{1}{4}} \times 10^{-2} \text{ mm}\phi = 3.3 \times 10^{-2} \text{ mm}\phi = 0.033 \text{ mm}\phi$$

(なお、リークのあったことは確実として、その位置がどこか、通常は、H.L.で次のステップで探すが、この試料の場合急いでいたためにそれはしなかったとのことである。-試験担当者)

(3) 検 討

キャプセルの切断時、燃料ピン端部を曲げてしまったためにリークテストを行った由であるが、試験担当者の考察にあるように次図の状態ではリークがあったことは確実で、その位置は不明のまま終わったことになる。



67F-28G燃料ピン

以上から次ぎのことが結論される。

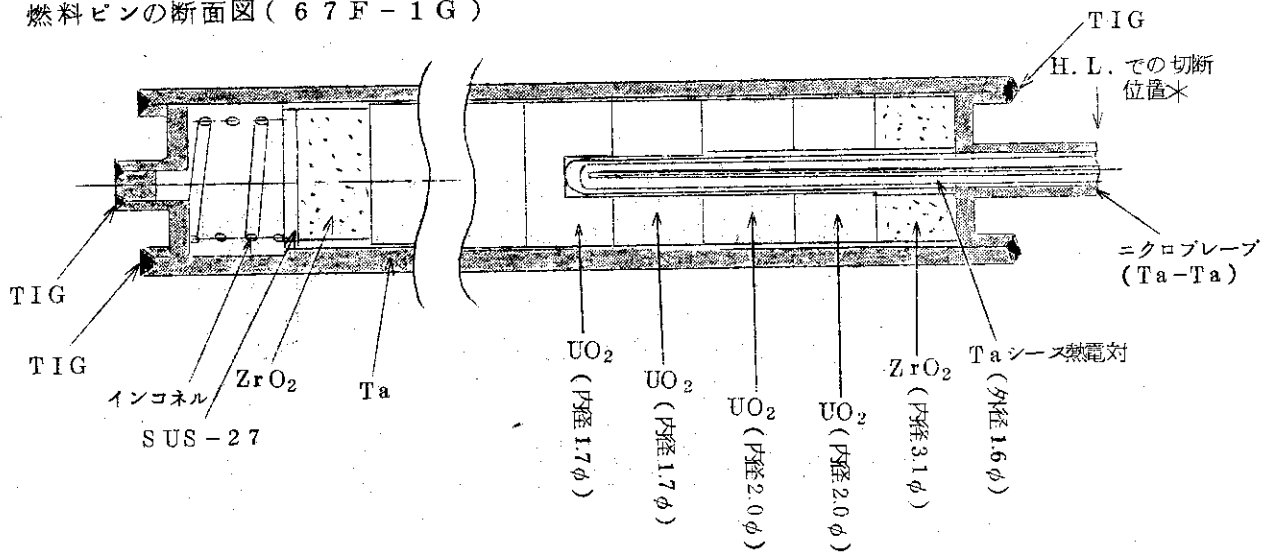
- a) H.L. で外観上明らかな割れ、ピンホールはなかった。(リークレートから1個のピンホールの大きさに換算すると直径約0.03 mmφ)
- b) 保護管内にF.P. がリークしたのであるから上図の如く燃料ピンのみにしてもリークがあるはずで、H.L.ワークではさらにリーク個所が増えたかも知れない。
- c) リーク位置を探すことは行なわれなかったため最終的にはF.P. 漏洩の経路は握めなかった。

照1メモ-1941
S. 47. 5. 26

メモ-6 67F-1G, 2Gキャプセル燃料ピンのリークテスト結果
(H.L.No.640, 641)の検討

1. 写真の補足

燃料ピンの断面図(67F-1G)



* Hot.Labでの切断位置がちょうど「ろう接材」の溶け込んでいる部分に相当する。
写真、矢印の「浅れ」箇所は、Hot.Lab 担当者の話によると「リーク試験装置の都合で横からは見えなかったが、熱電対からもれていたように見られた」とのことである。

2. 破損個所の推定

メモ-3 (照1メモ-1692) で推定したF.P. 漏洩系路 a~dのうち、67F-1Gについては、a, c, dがほぼ否定され、bの熱電対破損あるいはろう接部分の破損に原因がしぼられる。

東海研H.L.よりの報告書(リーク試験結果)

1. 試験対象キャプセル名

67F-1G

67F-2G

2. 使用測定器名

Leak Locator (東芝製)

最高到達真空度： 10^{-2} mmHg

使用検出液：White spirite

3. 試験目的

上記キャプセルの照射中キャプセル案内管内に若干の放射性ガスの放出が見られたので、その欠陥の有無を確認することを目的とする。

4. 試験結果

67F-1G 熱電対部にリーク有り(於 180 mmHg)

67F-2G リーク無し

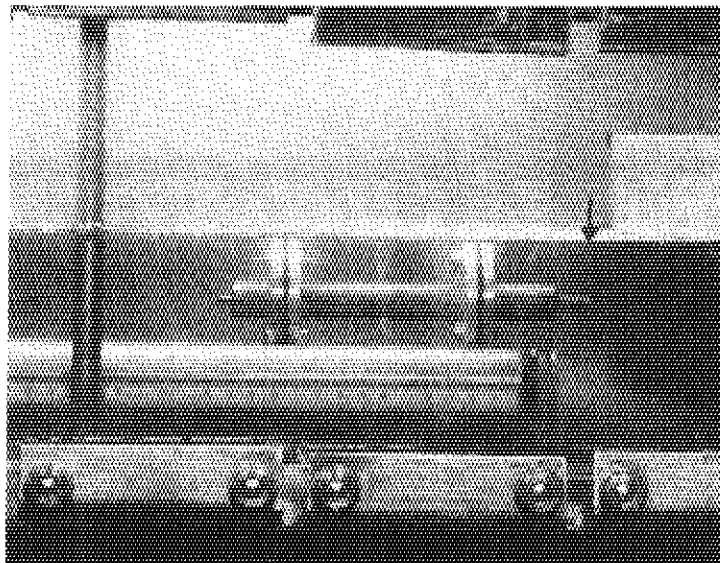
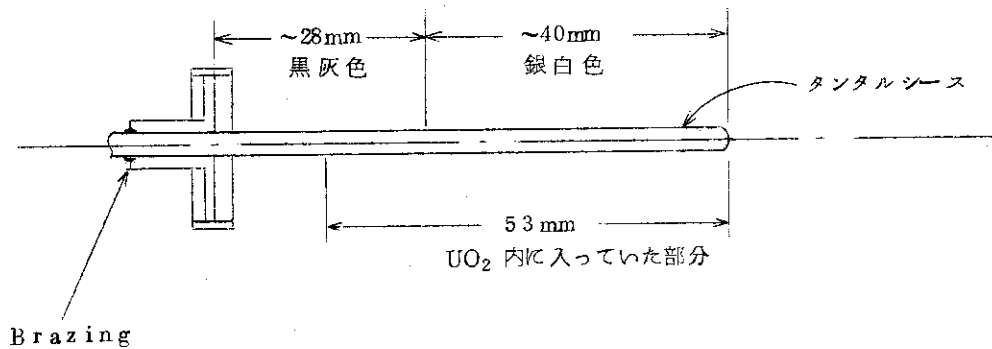


写真1 67F-1G熱電対部のリーク(180 mmHg)

以上

メモ-7 67F-1G熱電対(Ta シース)のシース表面観察

日時 1972年9月21日 15:30 ~
 場所 東海研ホットラボ Aケープ内
 観察方法 外観の望遠鏡による目視
 結果 肉眼で識別可能なピンホール、クラック等は見られなかった。



メモ-8 F.P. 漏洩の原因推定

メモ-1~メモ-7までの原因調査から次のことが結論される。

- (1) 漏洩量は生成ガス量の0.01%以下の極く微量であった。
- (2) 漏洩の原因は下記のいずれかである。
 - (a) キャプセル構成部品のウラン汚染があった。
 - (b) タンタルシースの燃料内部に入った部分が不可視のピンホール破損をしたか、タンタルステンレス、ろう接部分に破損を生じた。
 - (c) その他の考えられる漏洩原因については推定の域を出ない。

1.2 67F-2Gの照射データと参考資料

キャプセル名		67F-2G		
照射 計	試料提供者	株式会社日立製作所		
	試 料	ペレット	材 質	UO ₂ (1.49%濃縮)
			形 状	円柱状ペレット
			寸 法	直径15.04mmφ 高さ15mm
			数 量	7個
	ペレット・スタック長		104.7mm	
	被覆管	材 質	タンタル	
		形 状	円筒形	
		寸 法	内径15.16mmφ 肉厚1mm	
	燃料ピン全長		152mm	
燃料ピン数量		1本		
照射期間		第5～第7サイクル		
照射試験の目的	1) 照射中の混合ガスによる温度制御実験, キャプセル熱特性の調査 2) ウェル方式中心温度測定, 試料内状態の照射後観察 3) 炉側挿入孔の照射特性の調査 4) 質量分析計による各種分析による検討 5) UO ₂ ペレット製造過程での欠陥の照射に対する影響			
キャプセル 設計 条件	照射孔	K-13		
	線出力	300W/cm		
	ガンマ発熱	0.5W/gr		
	キャプセル構造	ベリリウム熱媒体, 内・外筒二重キャプセル		
	計 測	CA熱電対 7本, W/WR _e 熱電対 1本		
	制 御	混合ガスによる温度制御		
キャプセル の 設計	キャプセル構造設計		図1.6にキャプセル組立図を示す	
	熱 設 計		図1.7にキャプセル内温度分布を示す	
	強 度 設 計	キャプセル構造のうち	内圧による応力	$\sigma_p = 3.2 \text{ kg/mm}^2$
		最も強度の弱い個所 は 試料被覆管で	熱 応 力	$\sigma_t = 1.5 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 3.73 \text{ kg/mm}^2$
		右欄にその計算値を示す	評 価	$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 4.7$ で強度は十分である。
設計において特に留意した事項		熱媒体の耐高温性, タンタルとの両立性から金属ベリリウムを使用した。		
照射 デ ータ	照射温度	図1.8から図1.10に各サイクル毎の温度記録を示す。		
	F/M測定値			
	線出力	表1.2		

キャプセル名称	67F-2G	キャプセル安全審査資料 No.		
照射サイクル	第5, 第6, 第7			
構造の詳細	MB-1896			
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	設計基準第4条. 4. 1孔反射体 (42mmφ)		
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件				
	<p>注)</p> <p>r 加熱 0.5 W/gr</p> <p>燃焼 63日</p>			
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	Q_{max} の値	450 W/cm	制限因子	
	Q_{max} における最高熱負荷と制限因子	T_{10}	50°C	問題の箇所 被覆管の応力 被覆管の応力 膜 応力 $\sigma_p = 3.2 \text{ kg/mm}^2$ 熱 応力 $\sigma_t = 1.5 \text{ kg/mm}^2$ 評価 730°C におけるタンタルの強度 $\sigma_s = 3.73 \text{ kg/mm}^2$ * に対して (1) $\sigma_p = 3.2 \text{ kg/mm}^2 < \sigma_s = 3.73 \text{ kg/mm}^2$ (2) $\sigma_p + \sigma_t = 4.7 \text{ kg/mm}^2 < 1.5 \sigma_s = 5.6 \text{ kg/mm}^2$ (* Trans of ASM vol. 48 参照)
		T_9	68	
		T_8	117	
強度上の検討	T_7	425	強度上の検討 タンタルの許容応力には近い応力で制限されるとしたが、これで十分である。 他の構造部材については、強風的に問題はない。	
キャプセル健全性の総合評価	$Q_{max} = 450 \text{ W/cm}$ に対して被覆管の応力で制限される。 各部材の強度は十分である。			
照射条件ねらい	Qd の値	300 W/cm	Q_{max}/Qd 1.5	

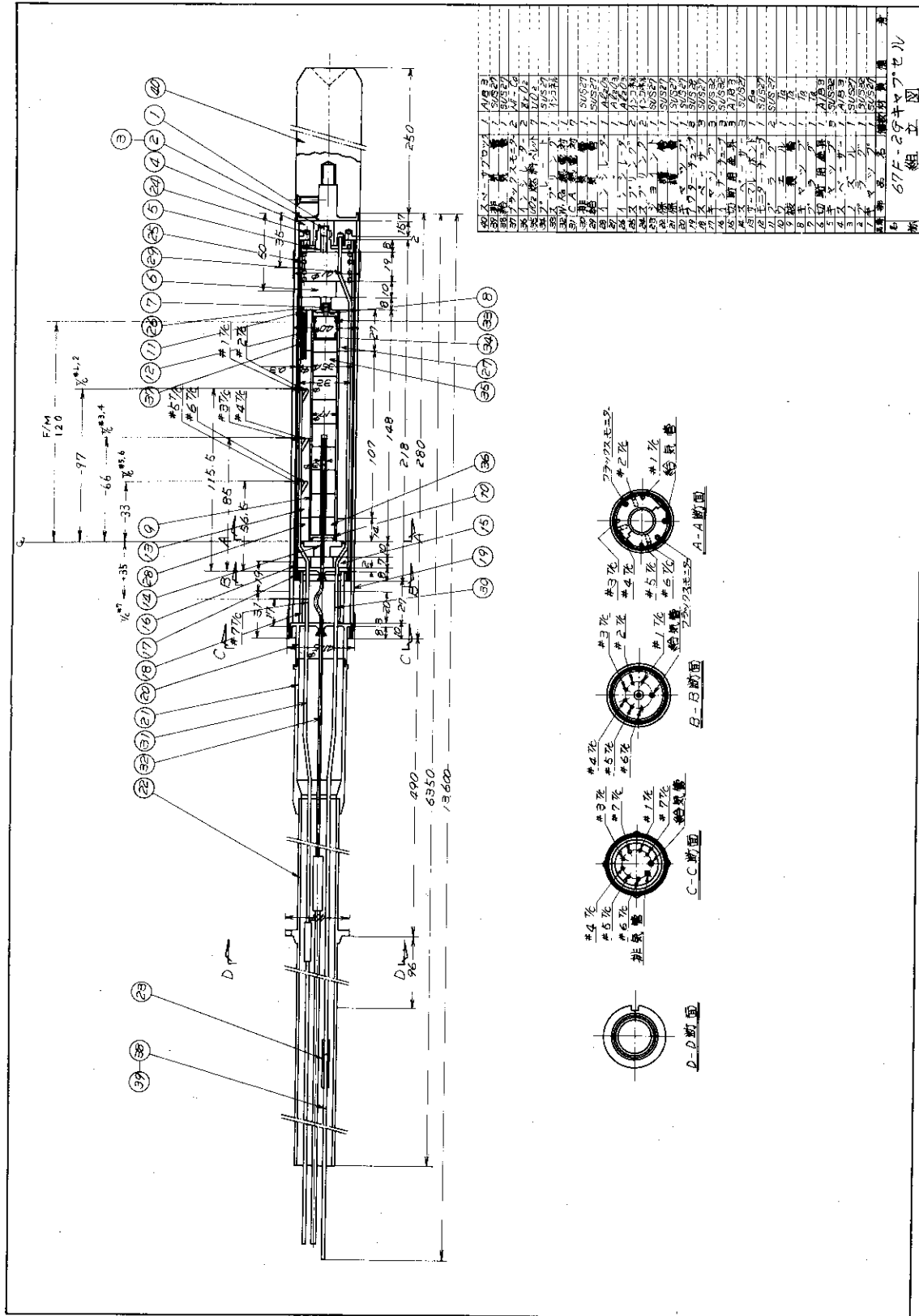


図 1.6 67F-2G キャプセル組立図

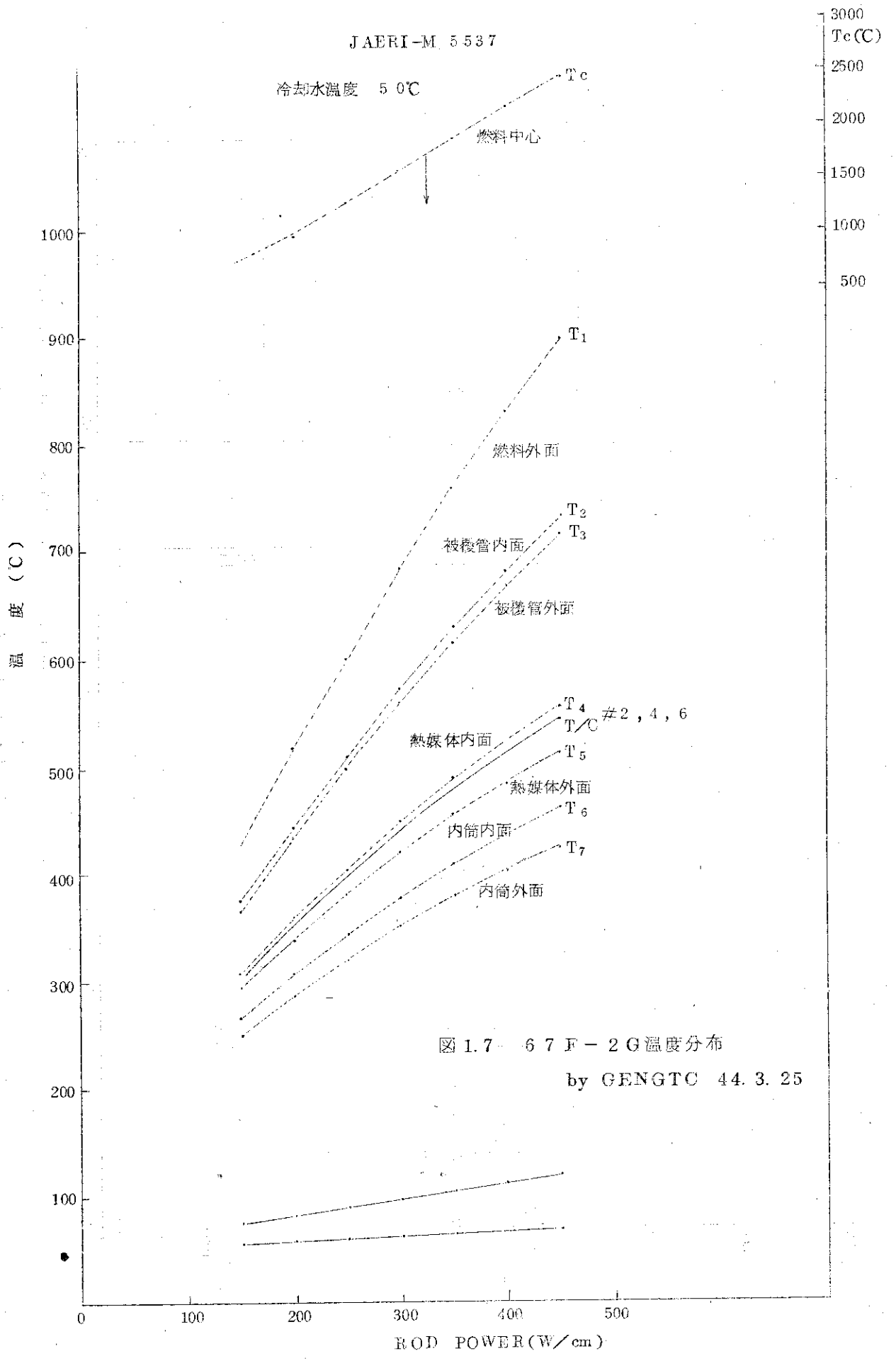
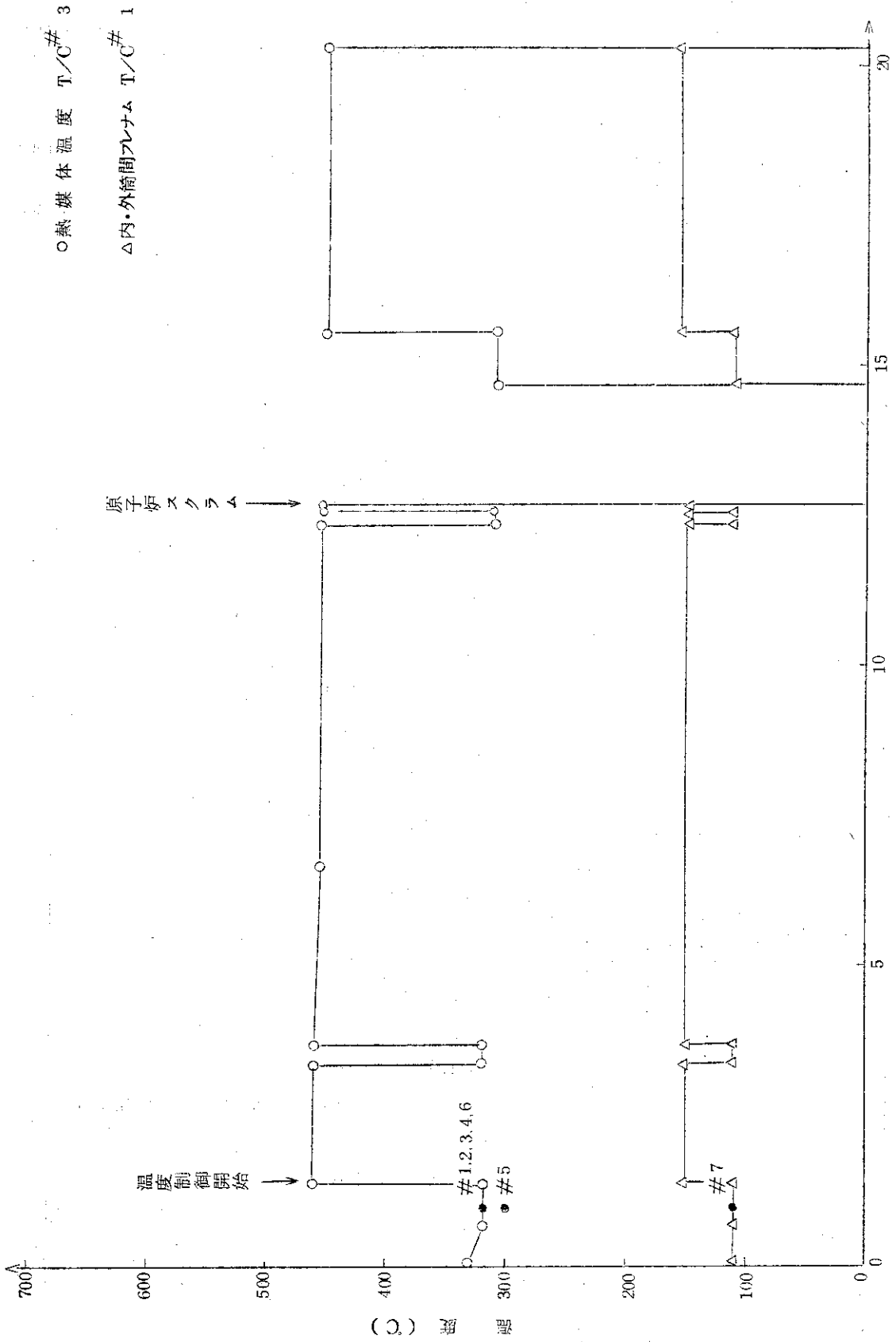


图 1.7 67F-2G 温度分布
by GENGTC 44.3.25



照射時間(45年11月18日午前零時標準)(day)

図1.8 67F-2Gキヤプセル温度指示値(第5サイクル)

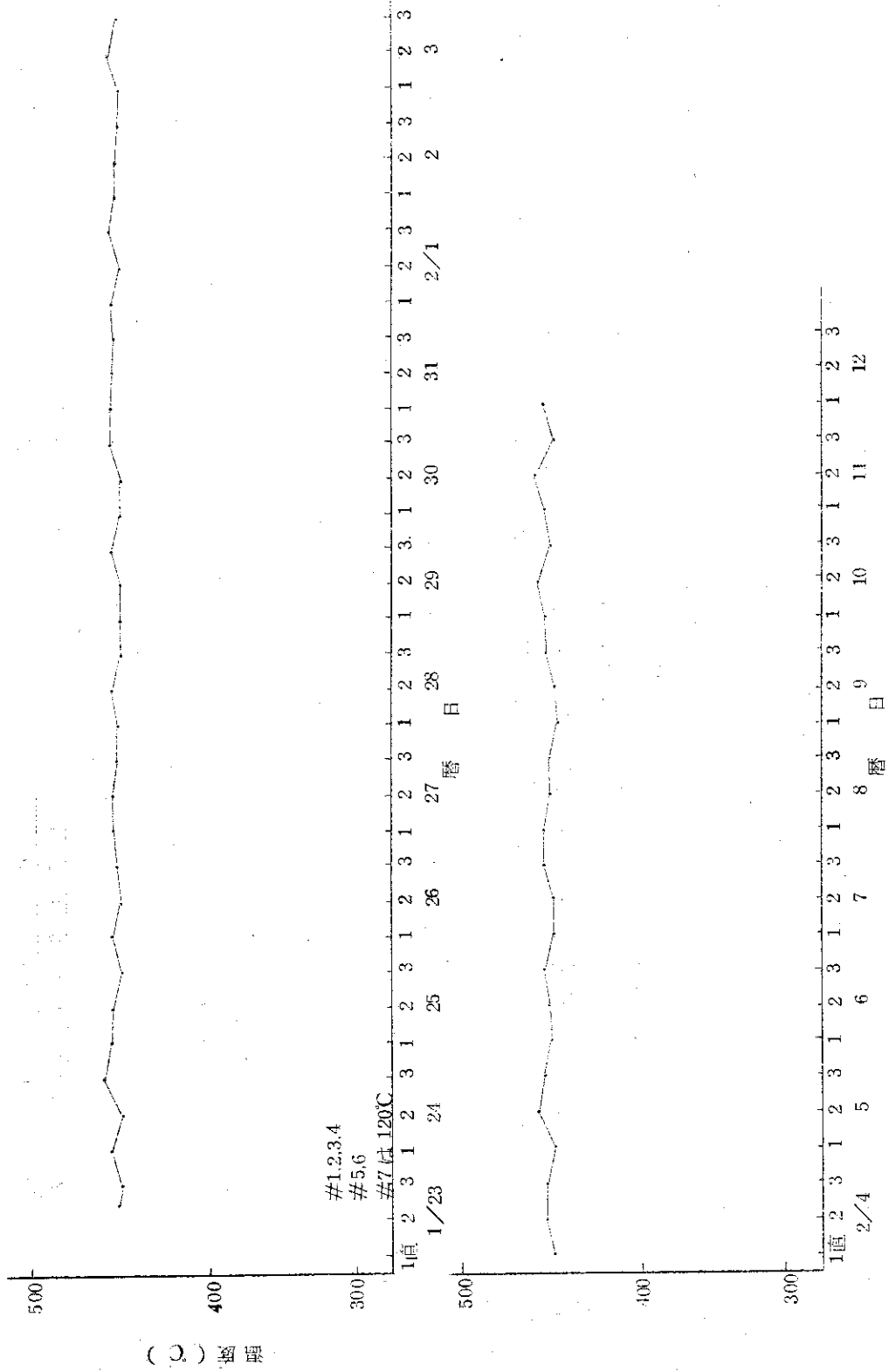


図1.9 67F-2G照射温度T/C #6 (第6サイクル)

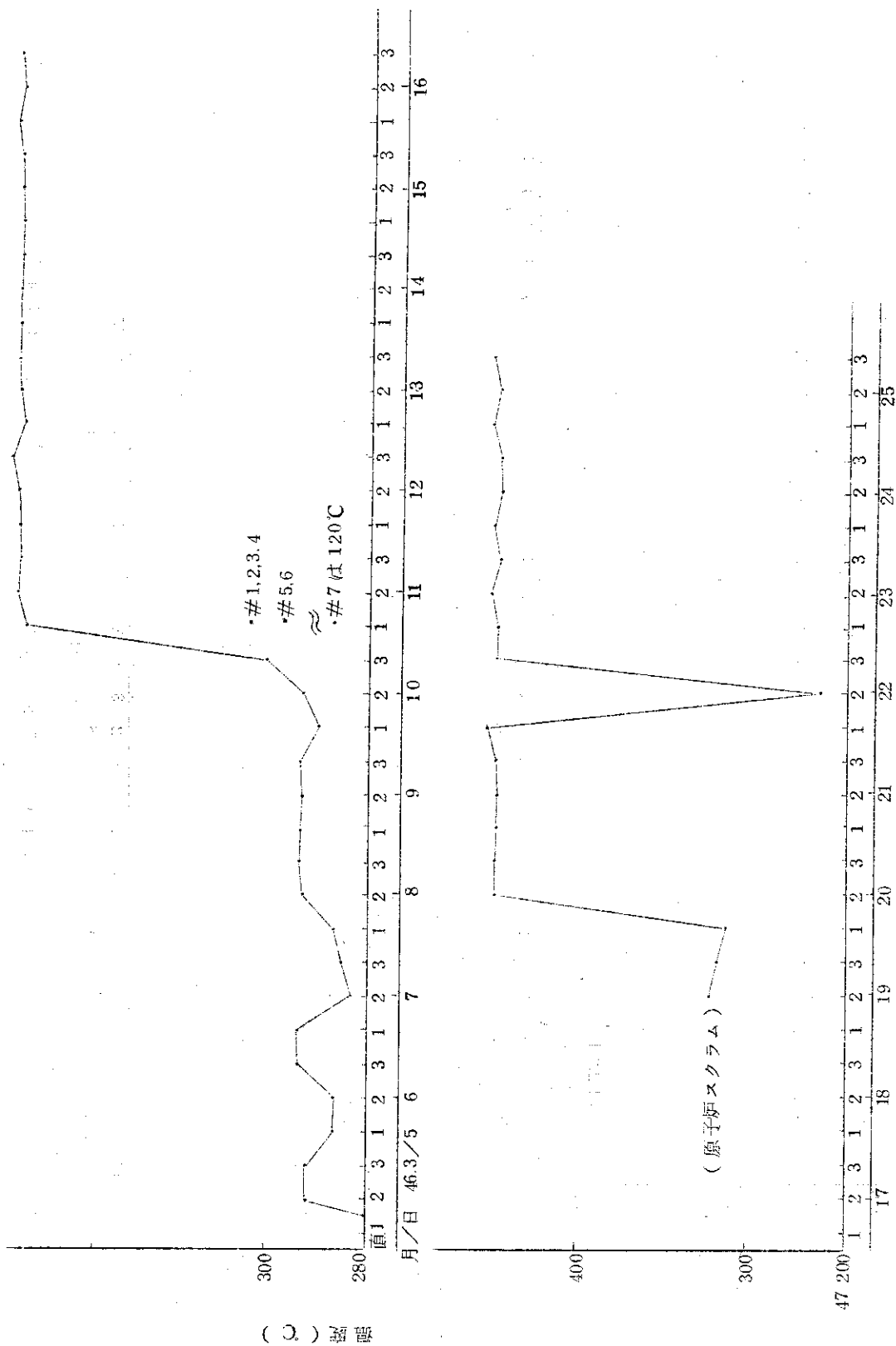


図 1.1 0 6 7 F - 2 G 照射温度 (第 7 サイクル)

表 1.2 67F-2Gキャプセル線出力

Q _G	日時 / サイクル	T/Cの番号	備 考
185 W/cm	1970. 11. 28. 16 / 第5	T/C # 6	
185	12. 1. 16 "	"	
175	12. 10. 16 "	"	
175	13. 13 "	"	
175	1971. 1. 22. 18 / 第6	T/C # 6	1月22日～2月12日の間 は温度制御中の為不明
160	2. 12. 10 "	"	
120	1971. 3. 5. 22 / 第7	T/C # 6	炉熱出力 25MW
130	3. 9. 16 "	"	" 27 "
150	3. 19. 16 "	"	" 32 "

1.3 67F-3G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-3G		
照射 計	試料提供者	古河電気工業株式会社		
	試 料	ペレット	材 質	天然ウランUO ₂ ペレット
			形 状	円柱状ペレット
			寸 法	直径15.0mmφ高さ15mm
			数 量	10個
	ペレット・スタック長		150mm	
	被覆管	材 質	SUS-304	
		形 状	円筒形	
		寸 法	内径15.12mmφ肉厚0.75mm	
	燃料ピン全長		211.7mm	
燃料ピン数量		1本		
照射期間		第8～第9サイクル		
画	照射試験の目的	1) 混合ガス温度制御・NaKキャプセルの特性調査 2) 照射孔の特性調査 3) 試料内外状態の照射後試験, 燃焼度測定		
キャプセル設計条件	照射孔	F-4		
	線出力	270w/cm		
	ガンマ発熱	0.5w/g		
	キャプセル構造	NaK熱媒体		
	計 測	C.A熱電対7本		
	制 御	混合ガス温度制御		
キャプセルの設計	キャプセル構造設計	図1.11にキャプセル組立図を示す。		
	熱 設 計	図1.12, 図1.13に内温度分布を示す。		
	強度設計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い個所は被覆管で右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 3.7 \text{ kg/mm}^2$
			熱 応 力	$\sigma_t = 5.2 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 11 \text{ kg/mm}^2$
評 価			$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 8.9 \text{ kg/mm}^2$ で強度十分である。	
設計において特に留意した事項	特殊ヒータ(テーバスウエージヒータ)の使用経験を得る。			
照射データ	照射温度	図1.14～図1.17に各サイクルの温度記録を示す。		
	F/M測定値			
	線出力	表1.3, 表1.4		

〔キャプセル審査委員会資料〕

キャプセル名称	67F-3G	キャプセル安全審査資料No.	F-1
照射サイクル	01~02(2サイクル)		
構造の詳細	図RM-2876, 67F-3Gキャプセル組立図		
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	設計基準第4条(1)42φmm孔用標準キャプセル	
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p> <p>ヒータ(2.5KW)</p> <p>(注) 燃焼 2サイクル 42days (γ熱は0.5w/g一定とした。)</p> <p>冷却水</p> <p>外筒SUS-27</p> <p>He</p> <p>内筒SUS-32</p> <p>NaK(56%K-44Na)熱媒体</p> <p>UO₂(Na+.75%TD)</p> <p>He</p> <p>被覆管SUS-32</p>		
	<p>Q_{max}の値</p> <p>490w/cm</p> <p>制限因子</p> <p>UO₂中心温度</p>	<p>問題の箇所</p> <p>被覆管</p> <p>被覆管応力, 膜応力 $\sigma_p = 3.7 \text{ kg/mm}^2$,</p> <p>熱応力 $\sigma_t = 5.2 \text{ kg/mm}^2$,</p> <p>評価 700°Cにおける許容応力 $\sigma_a = 11 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>(GEAP-4418) 従って強度上は問題はない。</p>	
<p>キャプセルの最高熱負荷と制限因子</p> <p>Q_{max}における温度分布</p> <p>T₈ 50°C</p> <p>T₇ 68°C</p> <p>T₆ 105°C</p> <p>T₅ 440°C</p> <p>T₄ 466°C</p> <p>T₃ 670°C</p> <p>T₂ 695°C</p> <p>T₁ 900°C</p> <p>T₀ 2570°C</p>	<p>強度上</p> <p>被覆管に対しても強度は十分。</p> <p>の評価</p> <p>内筒, 外筒については問題ない。</p>		
<p>キャプセル健全性の総合評価</p>	<p>Q=490w/cmに対し強度上の問題はないが, UO₂の中心温度が熔融温度以上となり, 熔融するおそれがあるので一応この値に定めた。</p>		
<p>照射条件ねらい</p>	<p>Qdの値 294w/cm Q_{max}/Qd 1.67</p>		

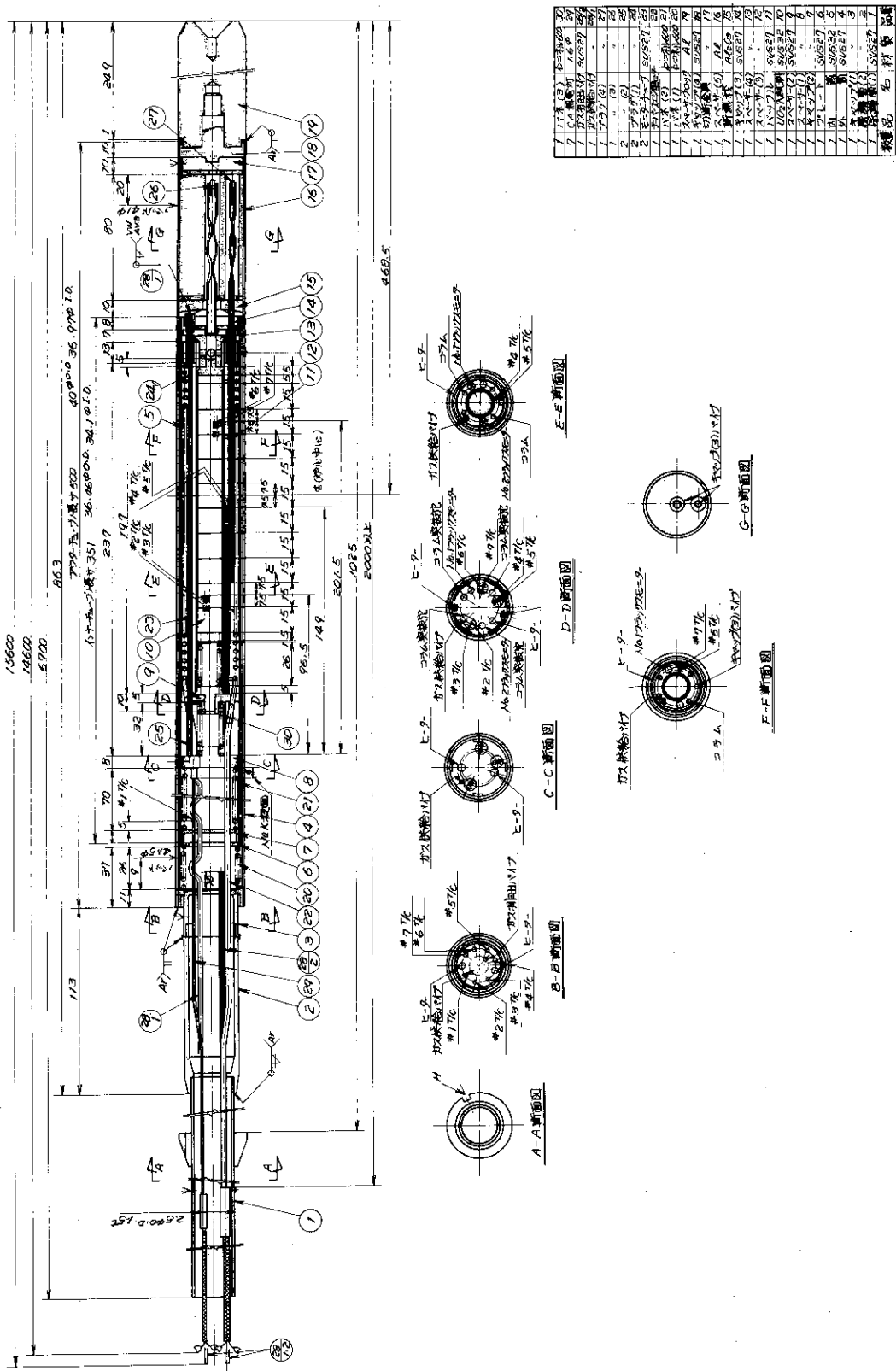


図 1.1.1 67F-3G キャプセル組立図

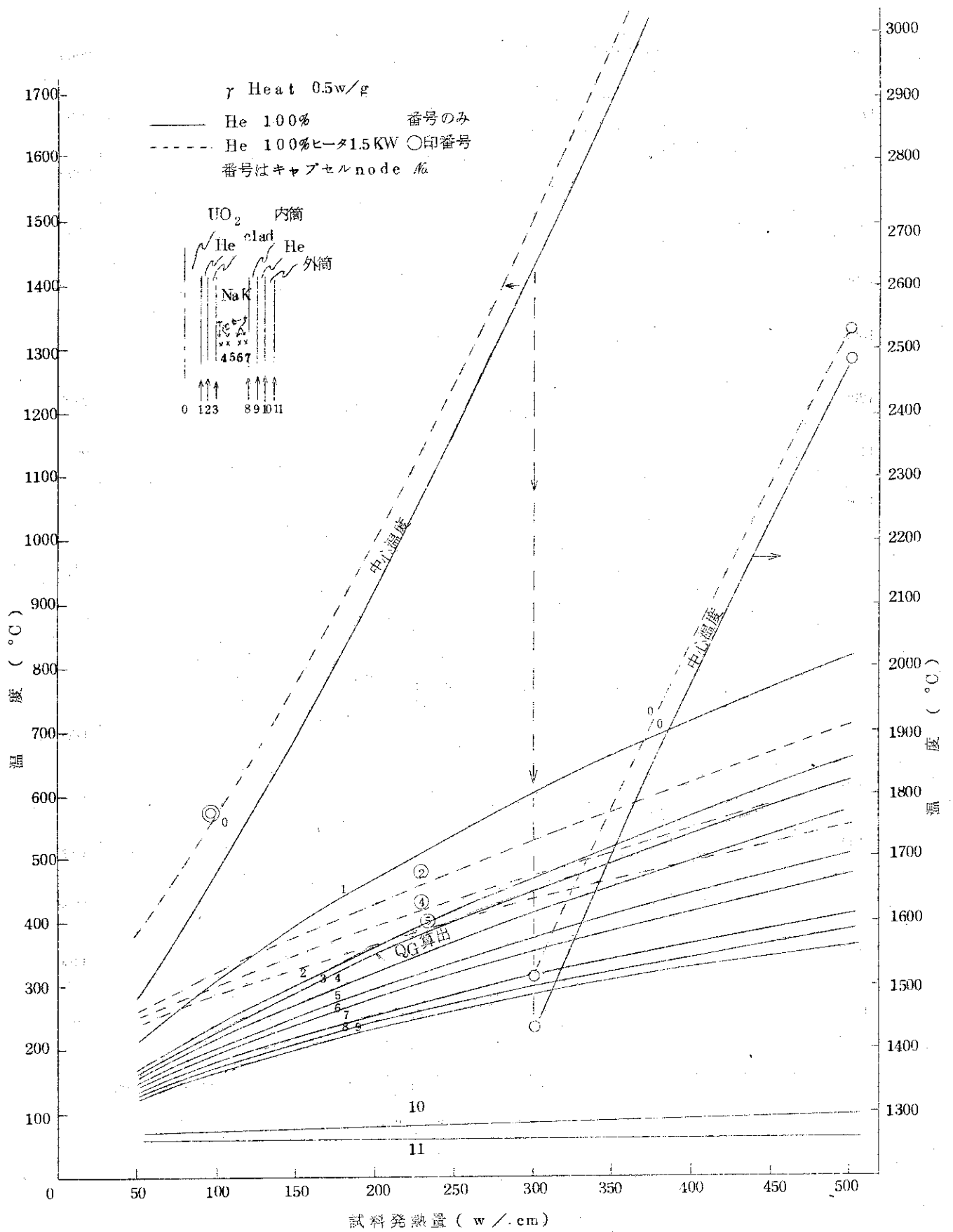


図 1.12 67F-3G 温度分布-1

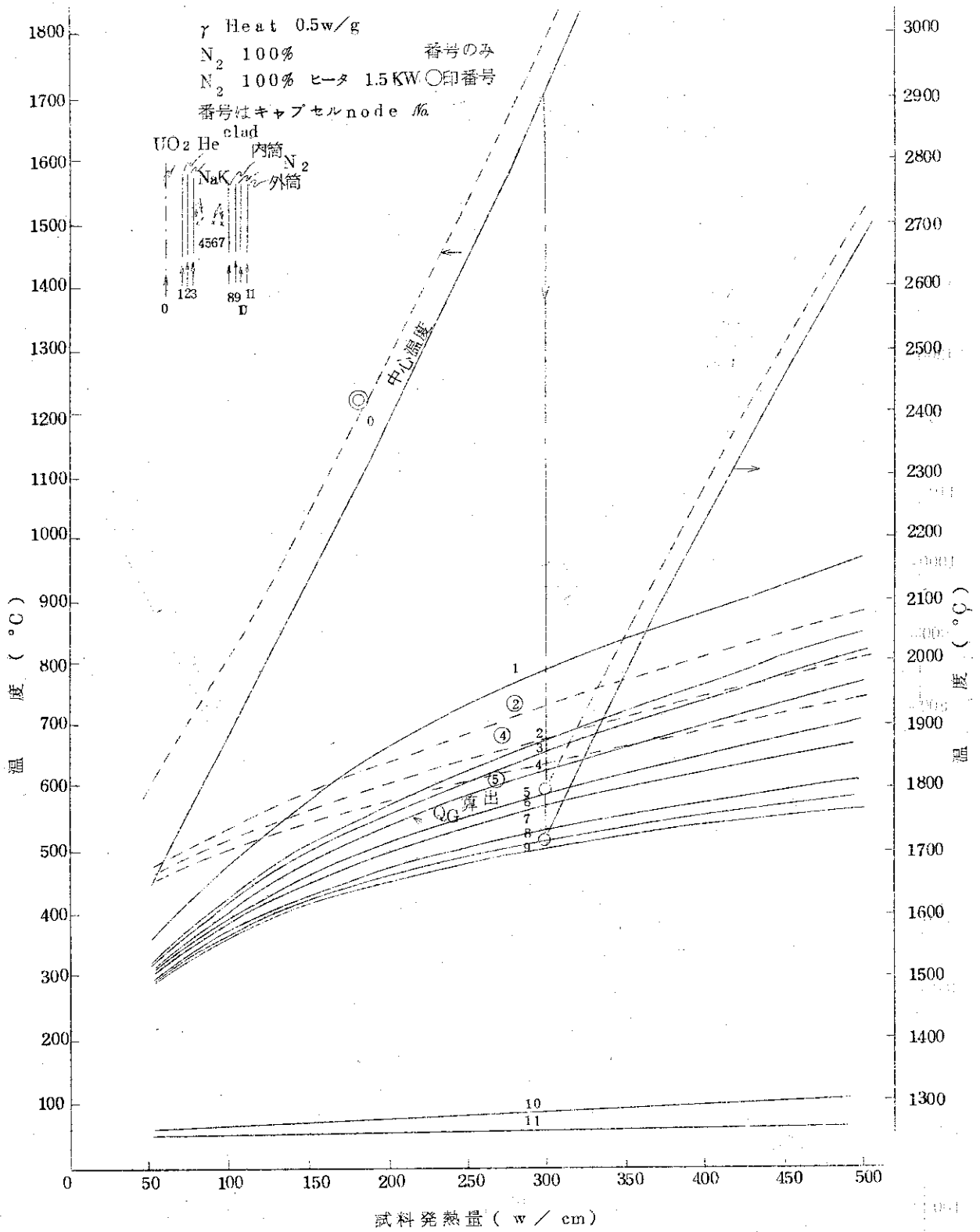


図 1.13 67F-3G温度分布-2

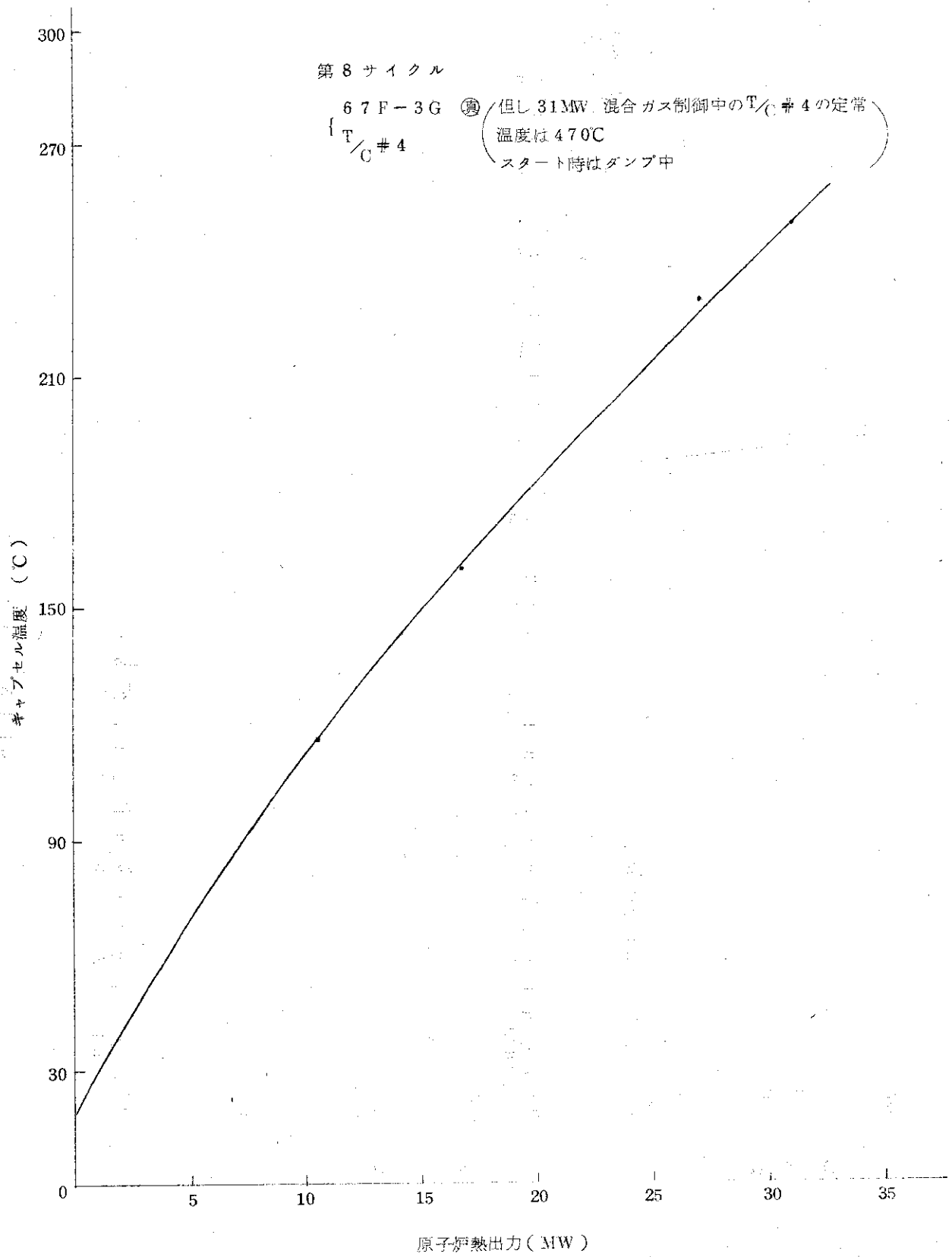


図 1.14 キャプセル温度変化

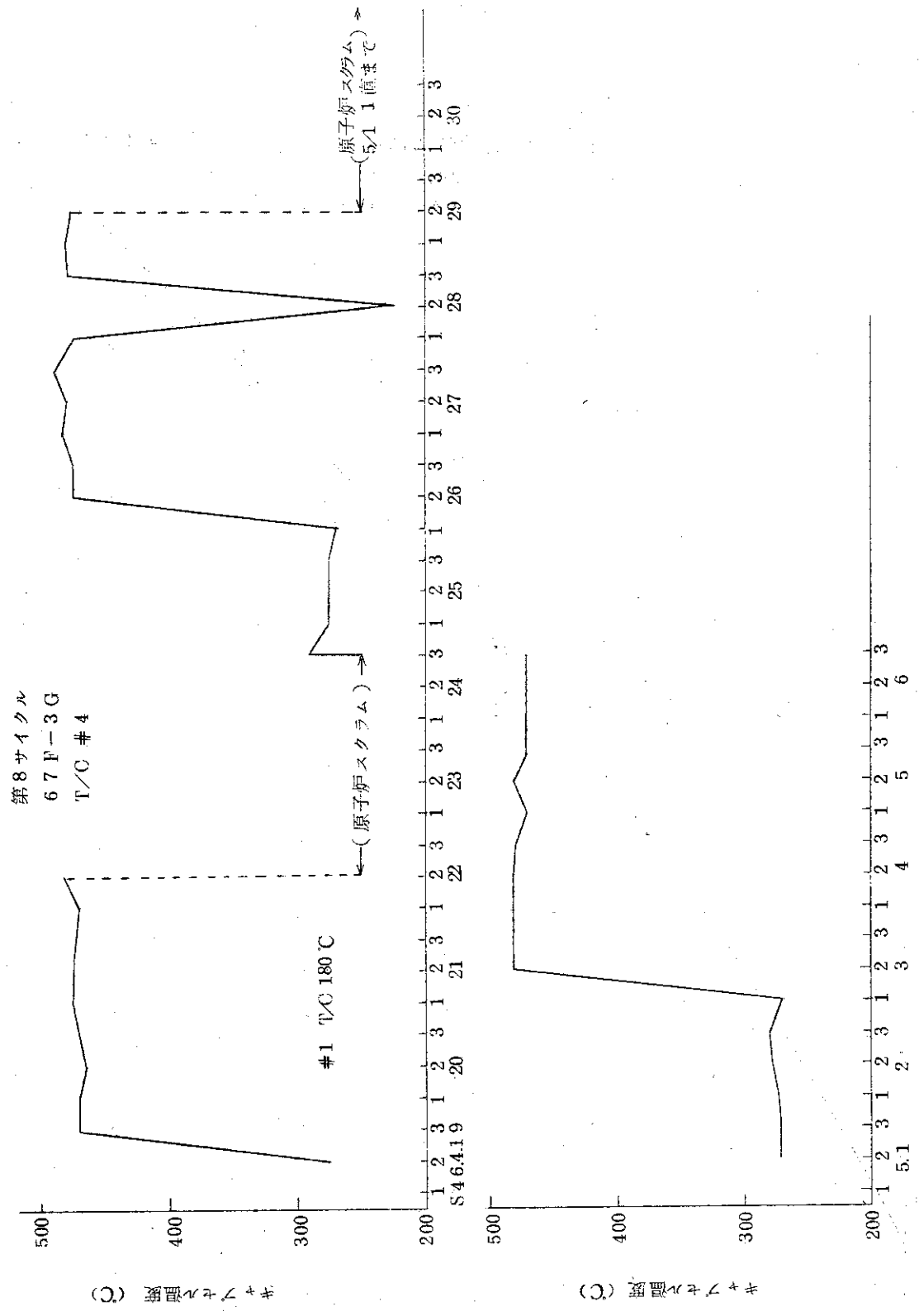


図1.1.5 キャプセル温度変化

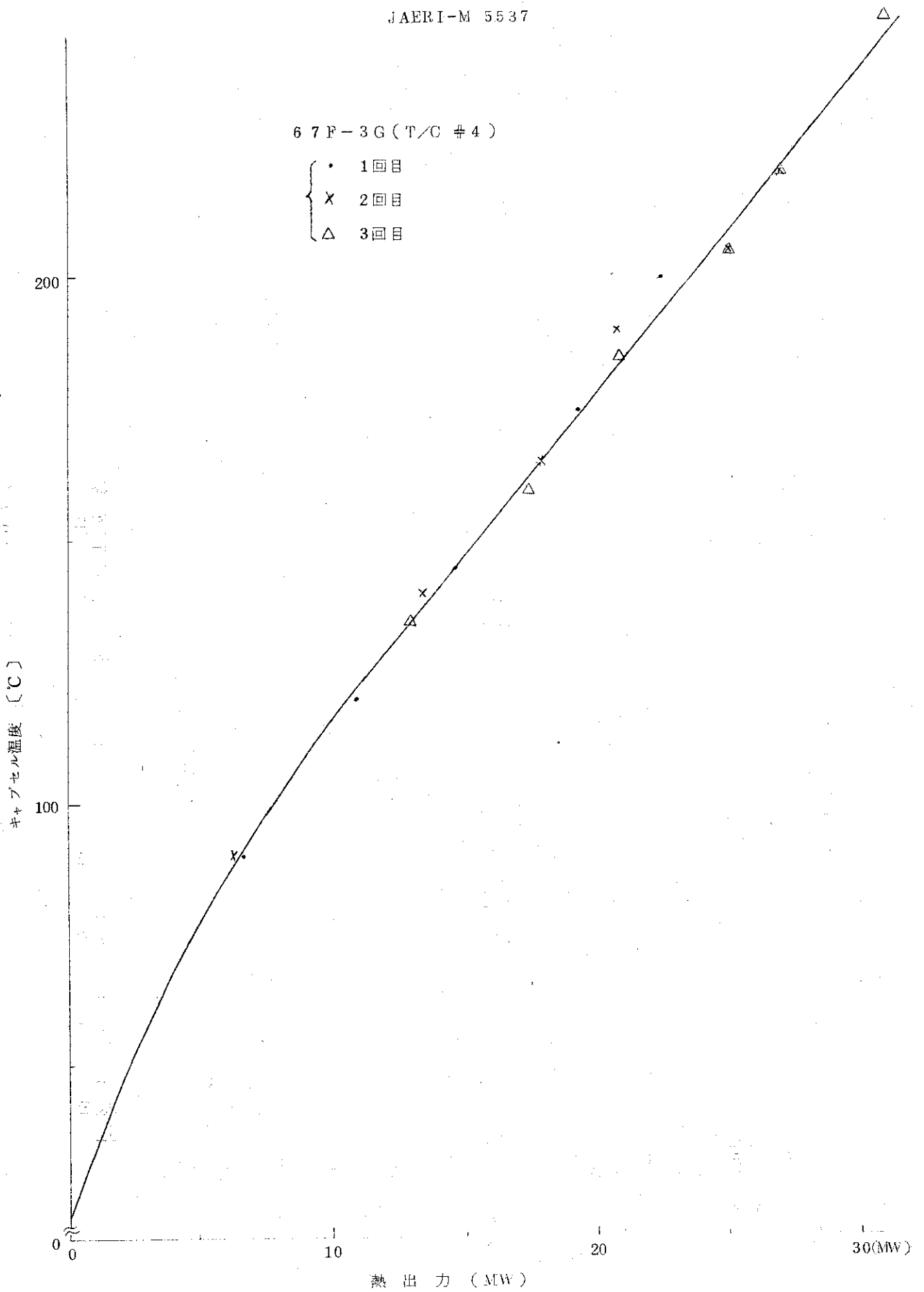


図 1.16 キャプセル温度曲線 (第9サイクル)

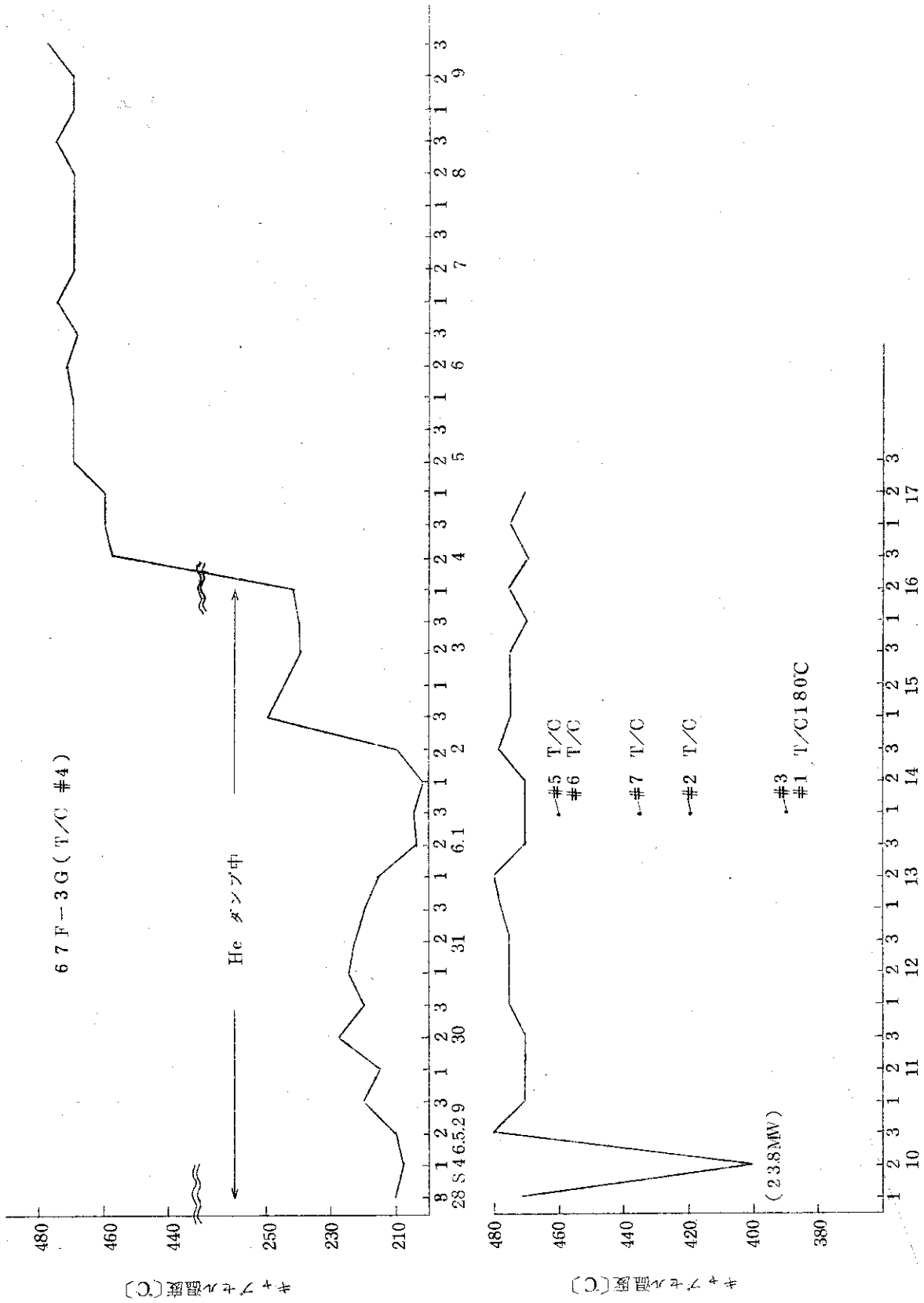


図 1.17 キャプセル温度変化 (第9サイクル)

表 1.3 67F-3G 第8サイクル推定線出力

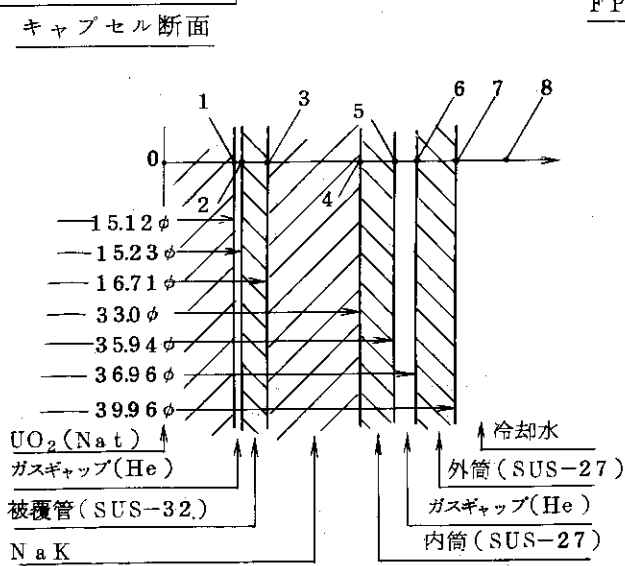
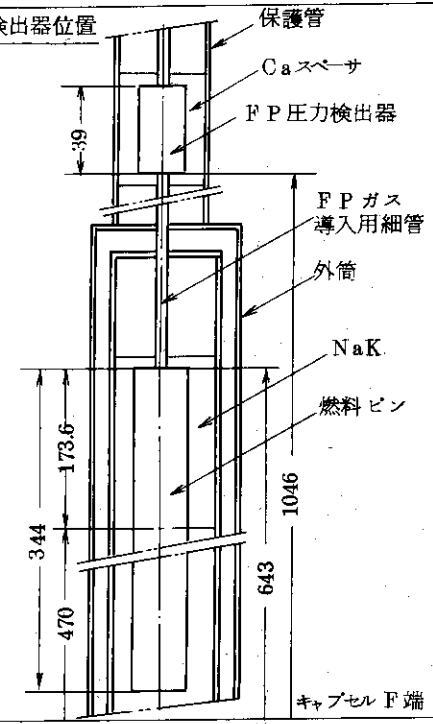
日付	原子炉熱出力	推定線出力 Q_G	備考
46.4.16	14.5MW	75w/cm	#4T/C 指示より算出
4.21	31.7 "	166 "	"
4.26	31.5 "	166 "	"
5.4	31.0 "	168 "	"
5.6	31.7 "	170 "	"

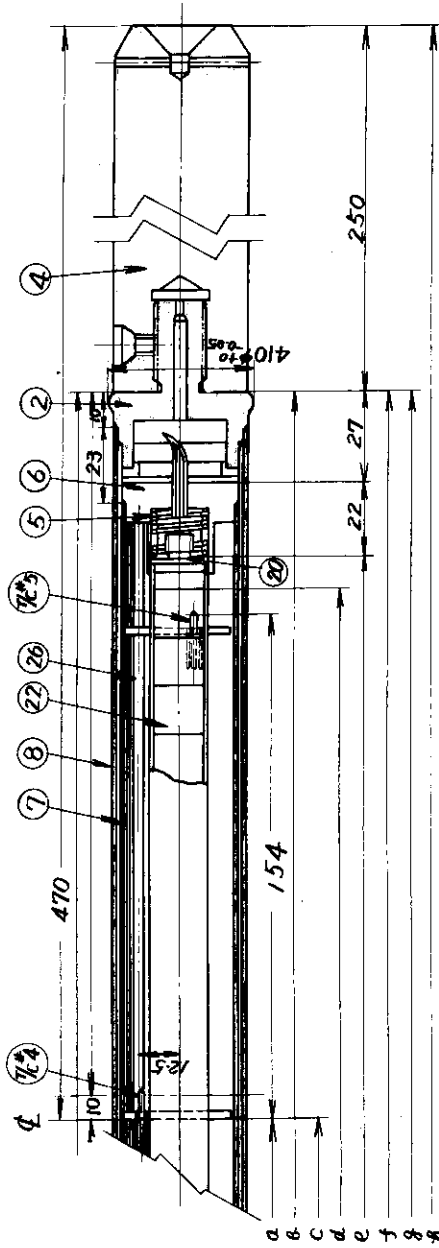
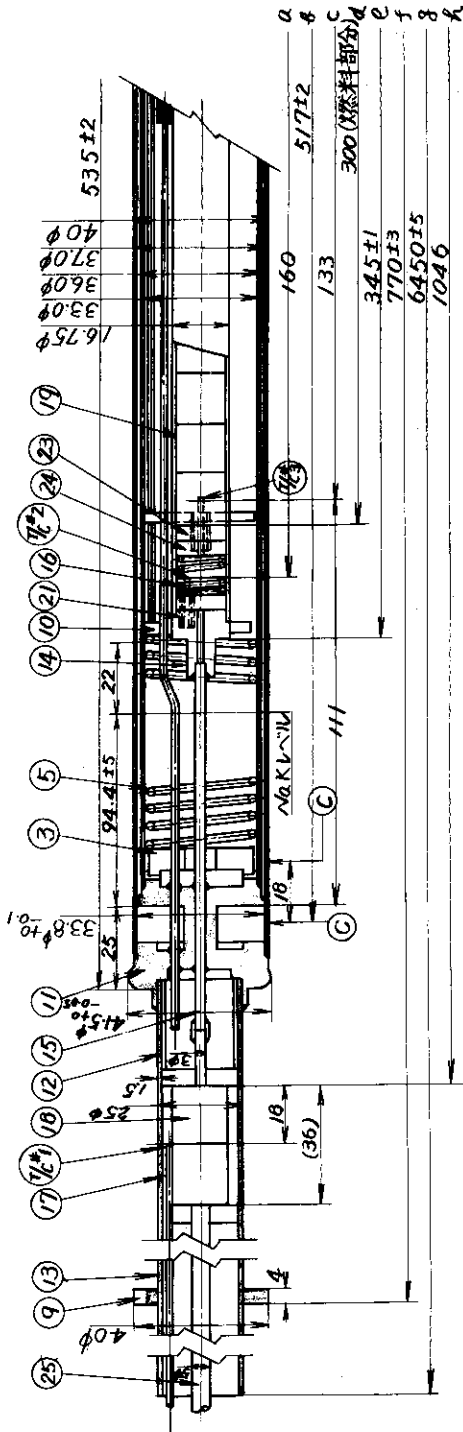
表 1.4 67F-3G 第9サイクル推定線出力

日付	原子炉熱出力	推定線出力 Q_G	備考
46.6.3	31.5MW	146w/cm	#4T/C 指示より算出
6.7	31.2 "	146 "	"
6.11	31.2 "	138 "	"

1.4 67F-4G照射データと参考資料

キャプセル名		67F-4G		
照射 計	試料提供者	日立製作所		
	試 料	ペレット	材 質	UO ₂ ペレット (天然ウラン)
			形 状	円筒形ペレット
			寸 法	15.12φ×15
			数 量	20
	ペレット・スタック長		300	
	被覆管	材 質	SUS-32	
		形 状	円筒管	
		寸 法	16.72φ (内径) × 0.75φ, 全長 337	
	燃料ピン全長		345	
燃料ピン数量		1		
照射期間	No. 9~11 サイクル			
照射試験の目的	1) FP圧力測定キャプセルの照射特性, 照射中のガス圧力 (FP分も含む) の測定 2) UO ₂ 状態の照射後観察 3) 照射孔の特性検討			
キャプセル 設計 条件	照射孔	F-10		
	線出力	270w/cm		
	ガンマ発熱	1 w/g		
	キャプセル構造	NaK 入り 2重キャプセル		
	計 測	T/C 5本		
	制 御	ナ シ		
キャプセル の 設計	キャプセル構造設計		図 1.18	
	熱 設 計		図 1.19	
	強度 設計	キャプセル構造のうち 最も強度の弱い箇所 は 被覆管 で 右欄にその計算値を示す	内圧による応力	3.9 kg/mm ²
			熱 応 力	6.5 kg/mm ²
			許 容 応 力	7.7 kg/mm ²
			評 価	強度条件を満足し安全である
設計において特 に留意した事項	FP圧力検出器を炉心より遠ざけるため, 保護管内に置いた。			
照射 デ ィ タ	照射温度	図 1.20 ~ 図 1.25		
	F/M 測定値			
	線出力	表 1.5		

キャプセル名称	67F-4G	キャプセル安全審査資料No	F-10		
照射サイクル	9-11サイクル				
構造の詳細	DJ-1285-6				
キャプセルの安全解析	キャプセル型式				
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p>  <p>FP圧力検出器位置</p> 				
	<p>(注)</p> <p>1. 燃焼; 3サイクル63days</p> <p>2. r発熱; 1w/g</p>				
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	Q_{max} の値	370w/cm	制限因子	被覆管強度	
	Q_{max} におけるおける温度分布	T_8	50°C	<p>Q_{max} におけるおける強度上の検討</p> <p>問題の箇所 被覆管, FP圧力検出器</p> <p>被覆管</p> <p>被覆管応力</p> <p>膜応力 $\sigma_p = 3.9 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>熱応力 $\sigma_t = 6.5 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>被覆管クリープラプチャー時間 10500hr (at 760°C)*</p> <p>評価</p> <p>765°CのSUS-32の強度 $\sigma_a = 7.7 \text{ kg/mm}^2$ * に対し</p> <p>(1) $\sigma_p < \sigma_a$</p> <p>(2) $\sigma_p + \sigma_t = 10.4 < 1.5 \sigma_a = 11.5$</p> <p>(3) クリープラプチャー時間 10500*hr \gg 3cyue (\sim1500hr)</p> <p>* GEAP-4418</p>	<p>FP圧力検出器</p> <p>検出器内圧 $P = 37.9 \text{ kg/cm}^2$</p> <p>検出器温度 $\sim 50^\circ\text{C}$</p> <p>(評価)</p> <p>(1) 検出器耐圧(差圧) 70 kg/cm^2</p> <p>(2) 検出器耐圧(等圧) 87.5 kg/cm^2</p> <p>(3) 検出器最大使用圧(差圧ならび等圧) 55 kg/cm^2</p> <p>(ただし、この圧は、FP圧力測定装置によって設定される。)</p> <p>よって、$p = 37.5 < 55 \text{ kg/cm}^2$ で、Q_{max} においても十分FP圧の測定ができる。</p>
		T_7	61°C		
		T_6	94°C		
T_5	582°C	強度上の検討	<p>強度上の検討</p> <p>(1) 被覆管は、Q_{max} に対し、強度条件を満足し安全である。</p> <p>(2) 圧力検出器強度は Q_{max} においてもFP圧の測定範囲内であり、問題ない。</p>		
T_4	607°C				
T_3	753°C				
T_2	776°C				
T_1	890°C				
T_0	2125°C				
キャプセル健全性の総合評価	<p>(1) Q_{max} においてキャプセルの強度上の問題はなく安全である。</p> <p>(2) FP圧力検出器自体では、強度上の問題は無い。圧力検出器のコンタクトリードの防湿シール材ガラス使用については、検出器を炉心領域外に位置せしめさらにCaスペースで囲み、ϕ_{in}をcutし、シール材の保全に留意している。万一シール破損し、コンタクトリードが破損してもFP漏出には無関係であり、圧力検出器内にバックアップガス(He)を一定圧流入せしめ、ホールドできるため安全である。</p>				
照射条件ねらい	Q_d の値	270w/cm	Q_{max}/Q_d	1.37	



部号	部品名称	材質	部号	部品名称	材質
27	フッ素樹脂管	SUS27	9	ハ	SUS27
26	ガス供給管	SUS32	8	外筒	SUS27
25	板	Er02	7	内筒	SUS27
24	押板	U02	6	端栓	SUS27
23	燃料	SUS32	5	スプリング	インコルX
22	燃料	SUS32	4	スパーブローワ	AlB3
21	端栓 B	SUS32	3	切断金具	SUS27
20	端栓 A	SUS32	2	溶接金具	SUS27
19	被覆管	SUS32	1	溶接金具	SUS27
部号	部品名称	材質	部号	部品名称	材質
18	熱媒体 A	AlB2	7	ハ	SUS27
17	熱媒体 B	Cd	8	外筒	SUS27
16	バネ	インコルX	7	内筒	SUS27
15	圧力検出用接続パイプ	SUS27	6	端栓	SUS27
14	圧力検出用接続パイプ	SUS27	5	スプリング	インコルX
13	保護管	SUS27	4	スパーブローワ	AlB3
12	サポート	SUS27	3	切断金具	SUS27
11	サポート	SUS27	2	溶接金具	SUS27
10	F/M サポート	SUS27	1	溶接金具	SUS27
部号	部品名称	材質	部号	部品名称	材質

図 1.1.18 67F-4G キャプセル組立図

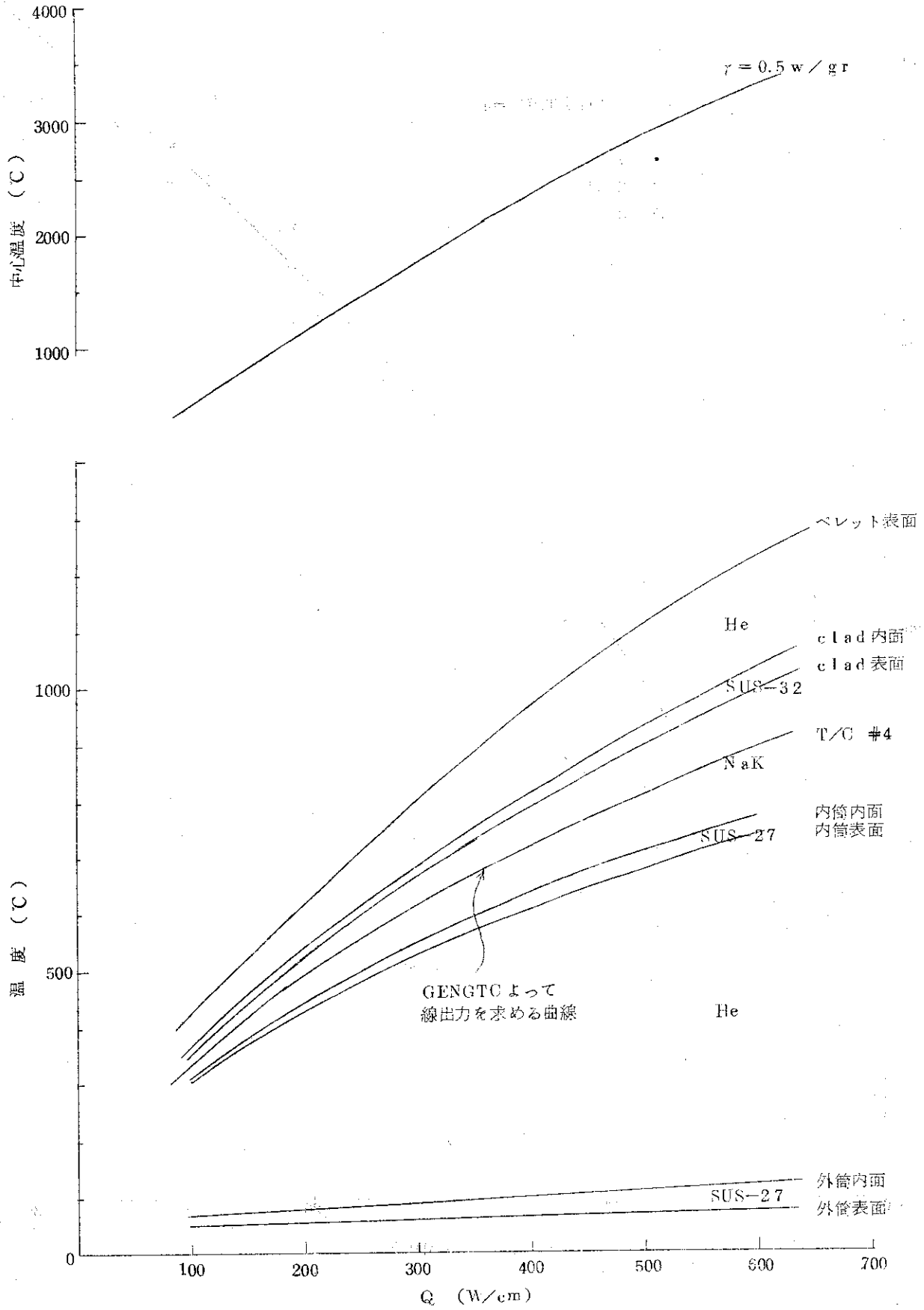


図 1.19 67F-4G 温度分布 (GENGTC)

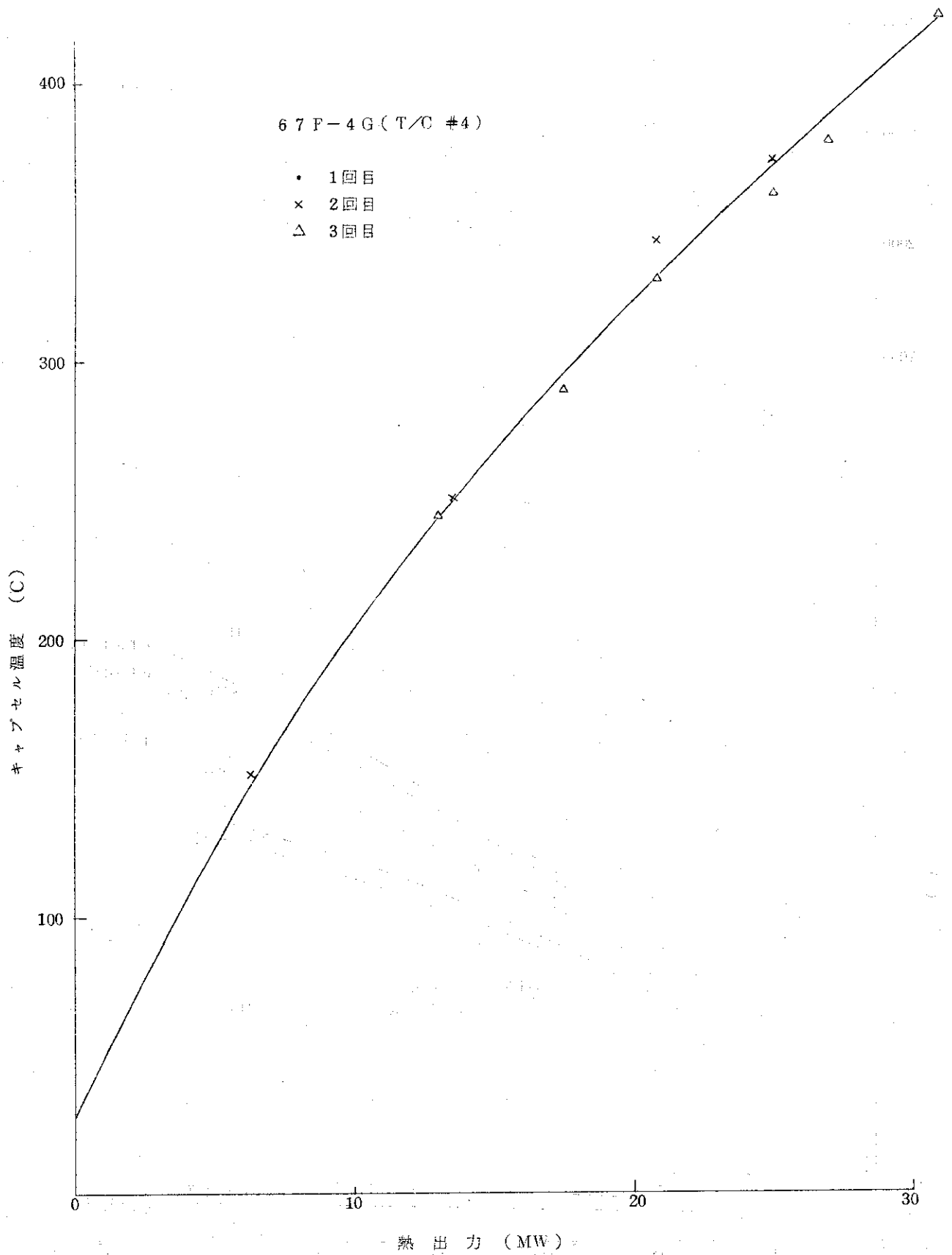


図 1.20 キャプセル温度曲線 (第9サイクル)

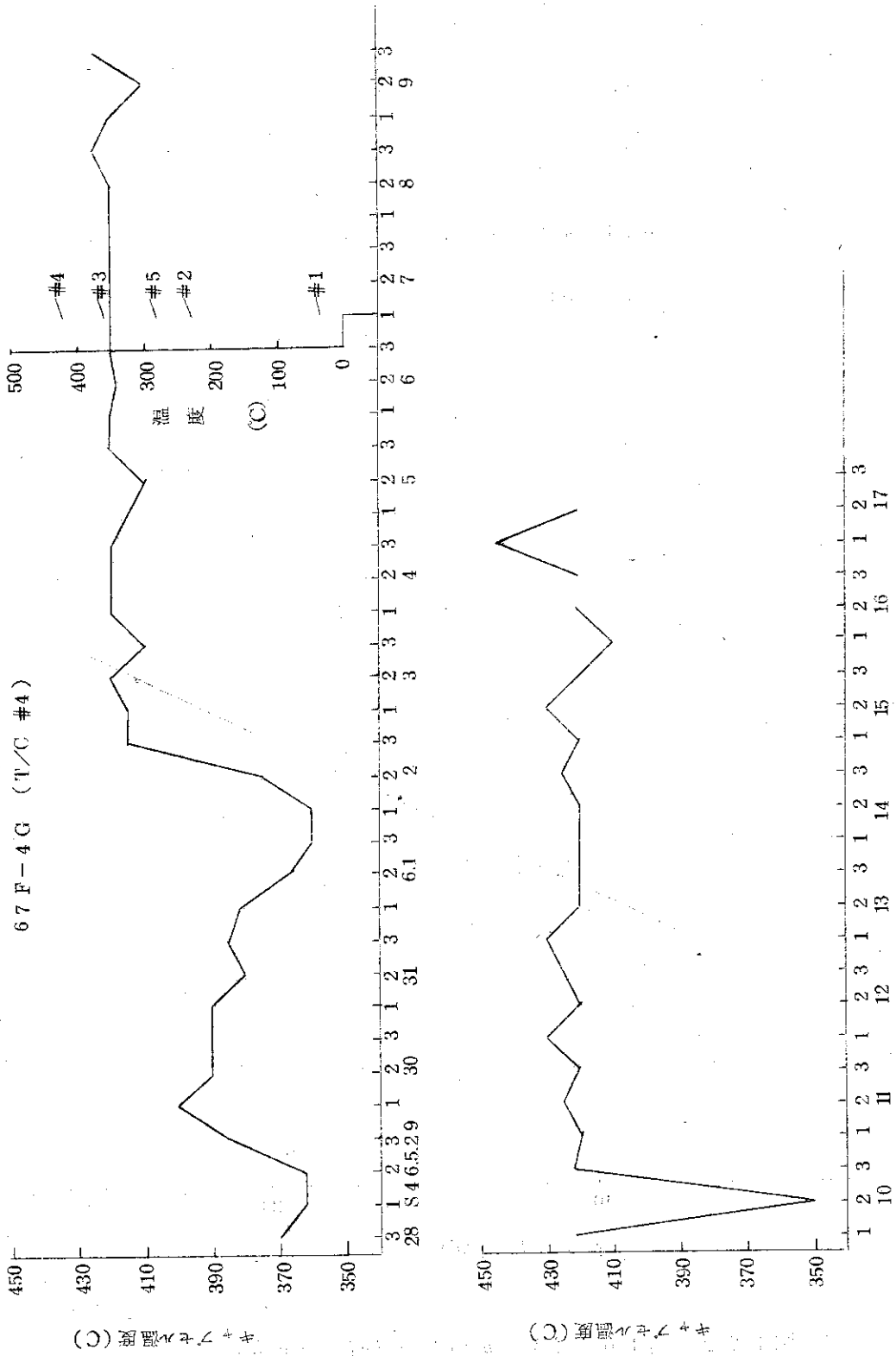


図 1.21 第9サイクルキヤンセル温度変化

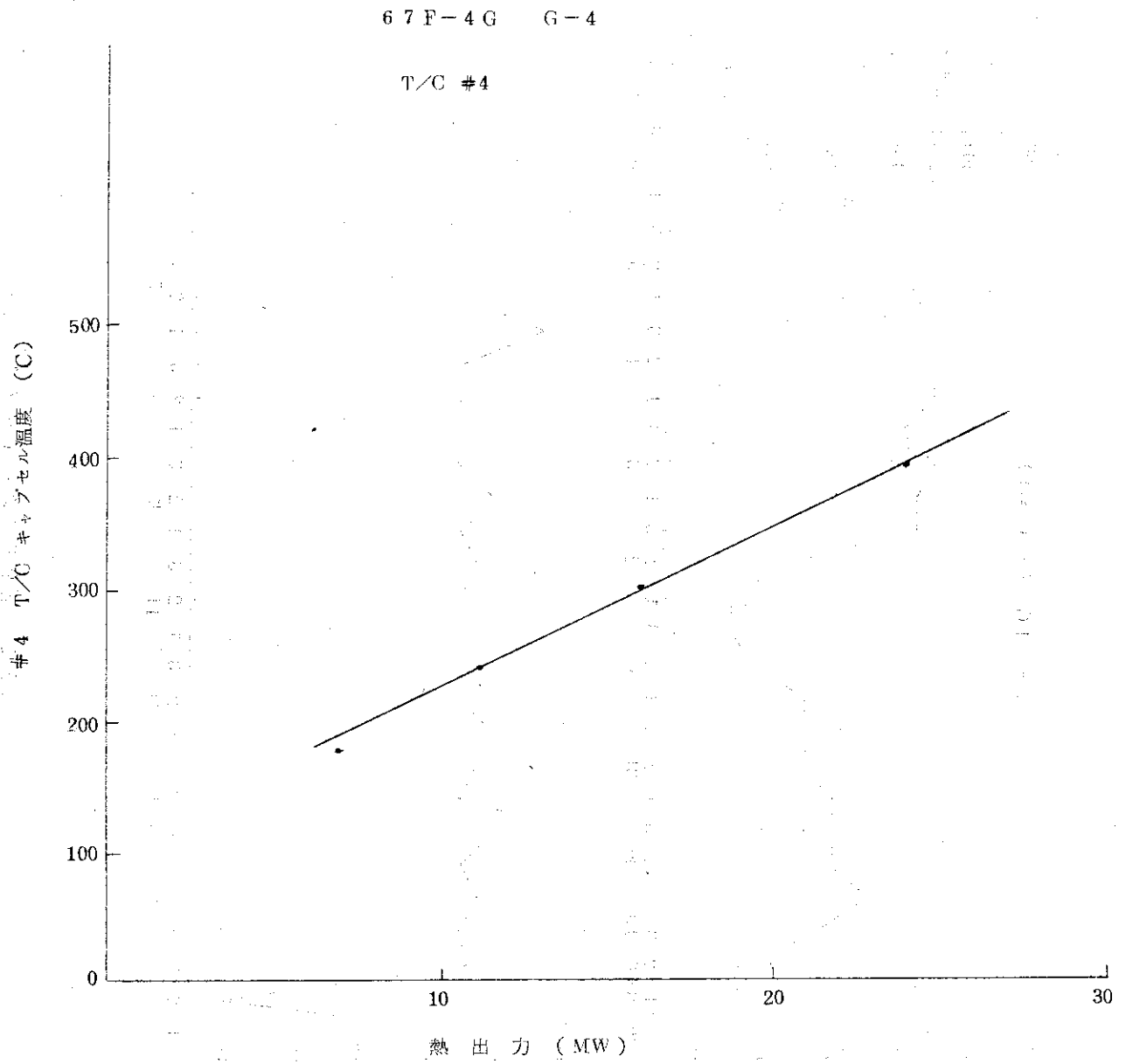


図 1.2.2 第 10 サイクル炉出力上昇時の温度変化

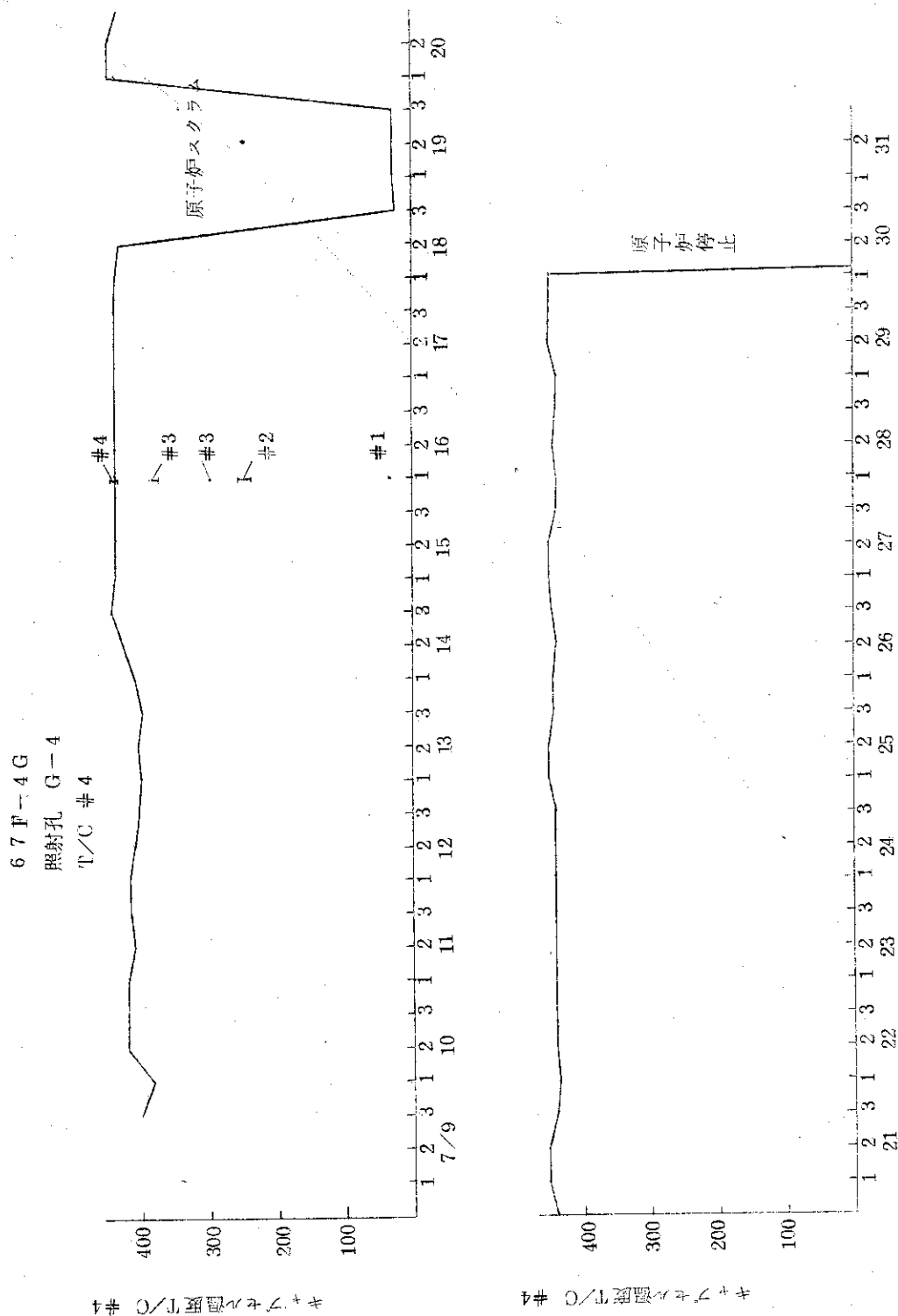


図1.2.3 第10サイクルキヤンセル温度変化

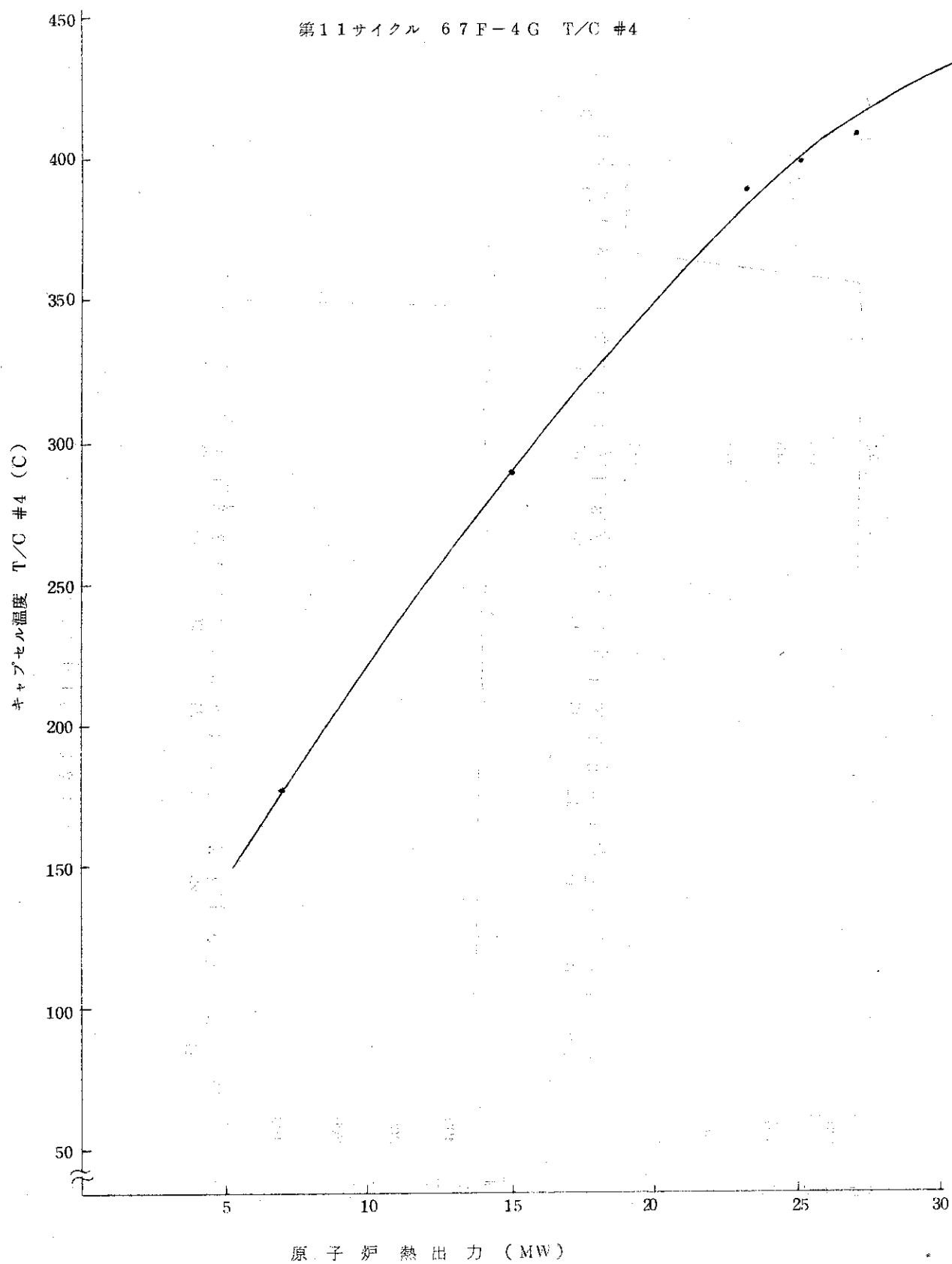


図 1.24 原子炉熱出力に対するキャプセル温度変化

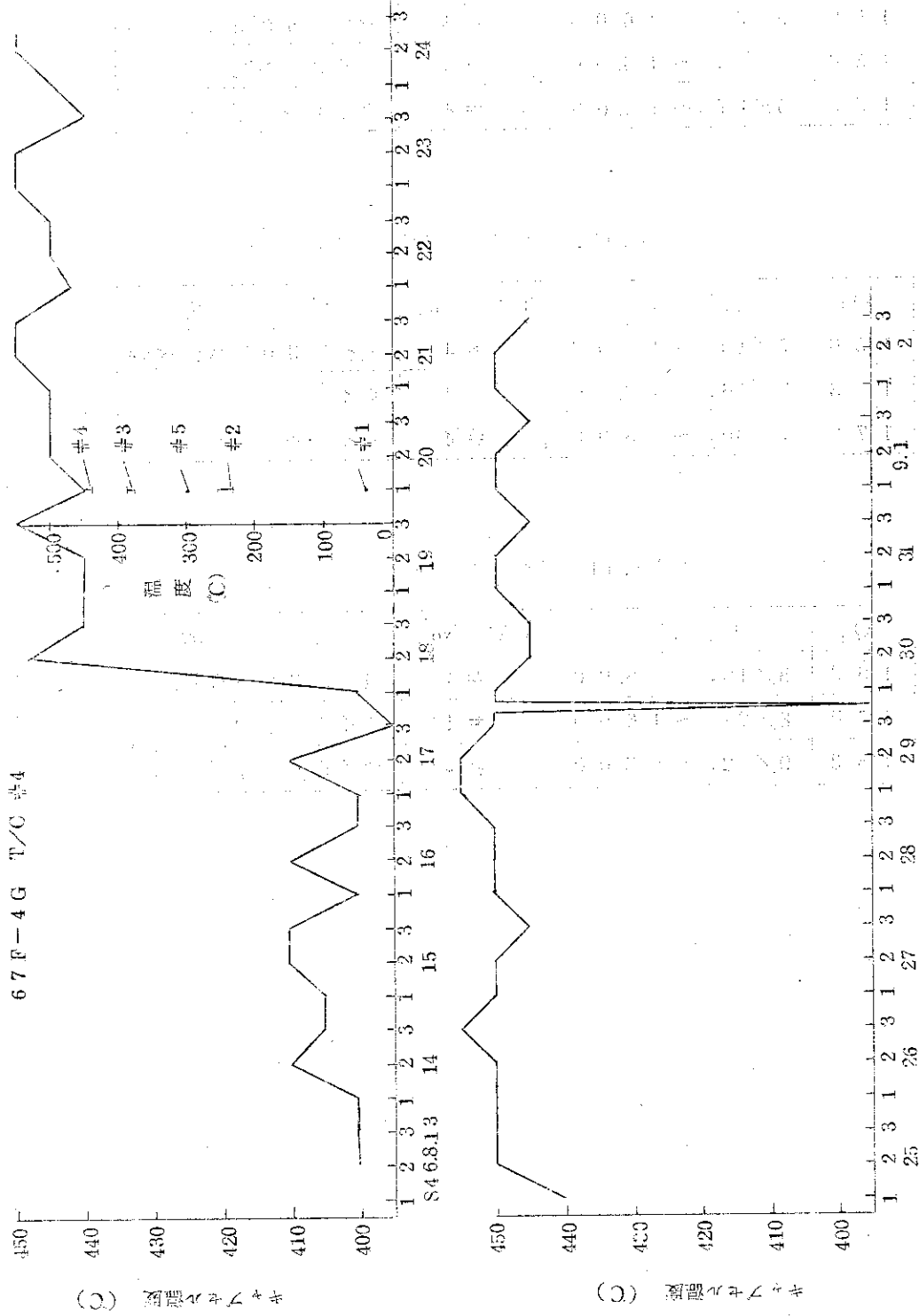


図 1.2.5 キャプセル温度変化 (第11サイクル)

表 1.5 67F-4Gの線出力
No. 9サイクルの線出力

Q_G	月 日, 時	T/C No.	備 考
150	5/3, ~16.00	#4	最初の30MW到達時
150	5/9, ~16.00	#4	サイクル中間
150	5/17, ~16.00	#4	サイクル終了直前

No. 10 サイクルの線出力

Q_G	月 日, 時	T/C No.	備 考
150	7/10, ~16.00	#4	最初の30MW到達時
163	7/16, ~16.00	#4	サイクル中間
170	7/30, ~ 8.00	#4	サイクル終了直前

No. 11 サイクルの線出力

Q_G	月 日, 時	T/C No.	備 考
163	8/19, ~ 8.00	#4	最初の30MW到達時
170	8/24, ~16.00	#4	サイクル中間
163	9/ 2, ~23.00	#4	サイクル終了直前

1.5 67F-5G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-5G		
照射 計	試料提供者	古河電気工業株式会社		
	ベレット	材質	天然ウラン UO ₂ ベレット	
		形状	円柱状ベレット	
		寸法	直径 9.9mmφ 高さ 10.0mm	
		数量	30個	
	ベレット・スタック長		300mm	
	被覆管	材質	SUS-304	
		形状	円筒形	
		寸法	内径 10.0mm 肉厚 0.7mm	
	燃料ピン全長		401	
燃料ピン数量		1本		
照射期間		第3～第6サイクル		
照射 試験 の 目的	1) 電気ヒータによる温度制御特性の調査			
	2) NaK キャプセル熱特性の調査			
3) 照射孔特性の調査				
キャプセル 設計 条件	照射孔	H-12(42φ孔)		
	線出力	220w/cm		
	ガンマ発熱	1 w/gr		
	キャプセル構造	NaK 熱媒体, ヒータ入り		
	計測	CA 熱電対 6本		
	制御	ヒータによる温度制御		
キャプセル の 設計	キャプセル構造設計	図 1.26 にキャプセル組立図を示す。		
	熱設計	図 1.27 にキャプセル内温度分布を示す。		
	強度設計 は 試料被覆管 で 右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 4.3 \text{ kg/mm}^2$	
		熱応力	$\sigma_t = 7.8 \text{ kg/mm}^2$	
		許容応力	$\sigma_a = 8.2 \text{ kg/mm}^2$	
評価	$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 12.1$ で強度十分である。			
設計において特に留意した事項	熱媒体として用いた NaK の対流がキャプセル温度分布に及ぼす影響を調べるために対流防止用バリヤを設けた。			
照射 データ	照射温度	図 1.28 に各サイクル毎の照射温度記録を示す。		
	F/M 測定値			
	その他	検討メモ-1.2 線出力について		

キャプセル名称	67F-5G	キャプセル安全審査資料№		
照射サイクル	01~04			
構造の詳細	DJ-1682-2(組立図面)参照			
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	設計基準第4条(1)4.2mmφ孔用標準キャプセル		
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p>			
	<p>キャプセルの最高熱負荷と制限因子</p>	<p>Q_{max} の値 400w/cm</p>	<p>制限因子</p>	<p>被覆管応力</p>
<p>Q_{max} における温度分布</p>	<p>T_8 50°C</p> <hr/> <p>T_7 64°C</p> <hr/> <p>T_6 97°C</p> <hr/> <p>T_5 413°C</p> <hr/> <p>T_4 437°C</p> <hr/> <p>T_3 679°C</p> <hr/> <p>T_2 715°C</p> <hr/> <p>T_1 937°C</p> <hr/> <p>T_0 2300°C</p> <p>(添字は場所を示す)</p>	<p>Q_{max} における強度上の検討</p>	<p>強度計算結果</p> <p>被覆管</p> <p>膜応力 4.3 kg/mm²</p> <p>熱応力 7.8 kg/mm²</p> <p>評価</p> <p>(1) 715°Cにおける SUS27強度 $\sigma_a = 8.2 \text{ kg/mm}^2$ に対して (i) $\sigma_p = 4.3 < 8.2 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>(ii) $\sigma_p + \sigma_t = 12.1 < 1.5 \sigma_a = 12.3 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>(2) $\sigma_p = 4.3 \text{ kg/mm}^2$ に対して $r_{up} \text{ re hr} = 4000\text{hr}$ (at 760°C) (照射時間 $21 \times 4 \times 24 = 2000\text{hr}$) であり充分である。</p>	<p>強度上の評価</p> <p>(i) 最も厳しい被覆管に対して強度充分</p> <p>(ii) 内外筒に対しては強度上問題殆どない</p>
<p>キャプセル健全性の総合評価</p>	<p>$Q_{max} = 400 \text{ w/cm}$ に対して、試用期間初期には $\sigma_p + \sigma_t < 3\sigma_a/2$ を採用するならば上限と値といえる。その他両立性、中心温度は問題なく、この Q_{max} までは総じて充分安全といえる。</p>			
<p>照射条件ねらい</p>	<p>Q_d の値 220w/cm</p>	<p>Q_{max}/Q_d</p>	<p>400/220=1.8</p>	
<p>(注1) 本キャプセルは下部アルミニウムスペーサブロックが取り付けられている。</p>				

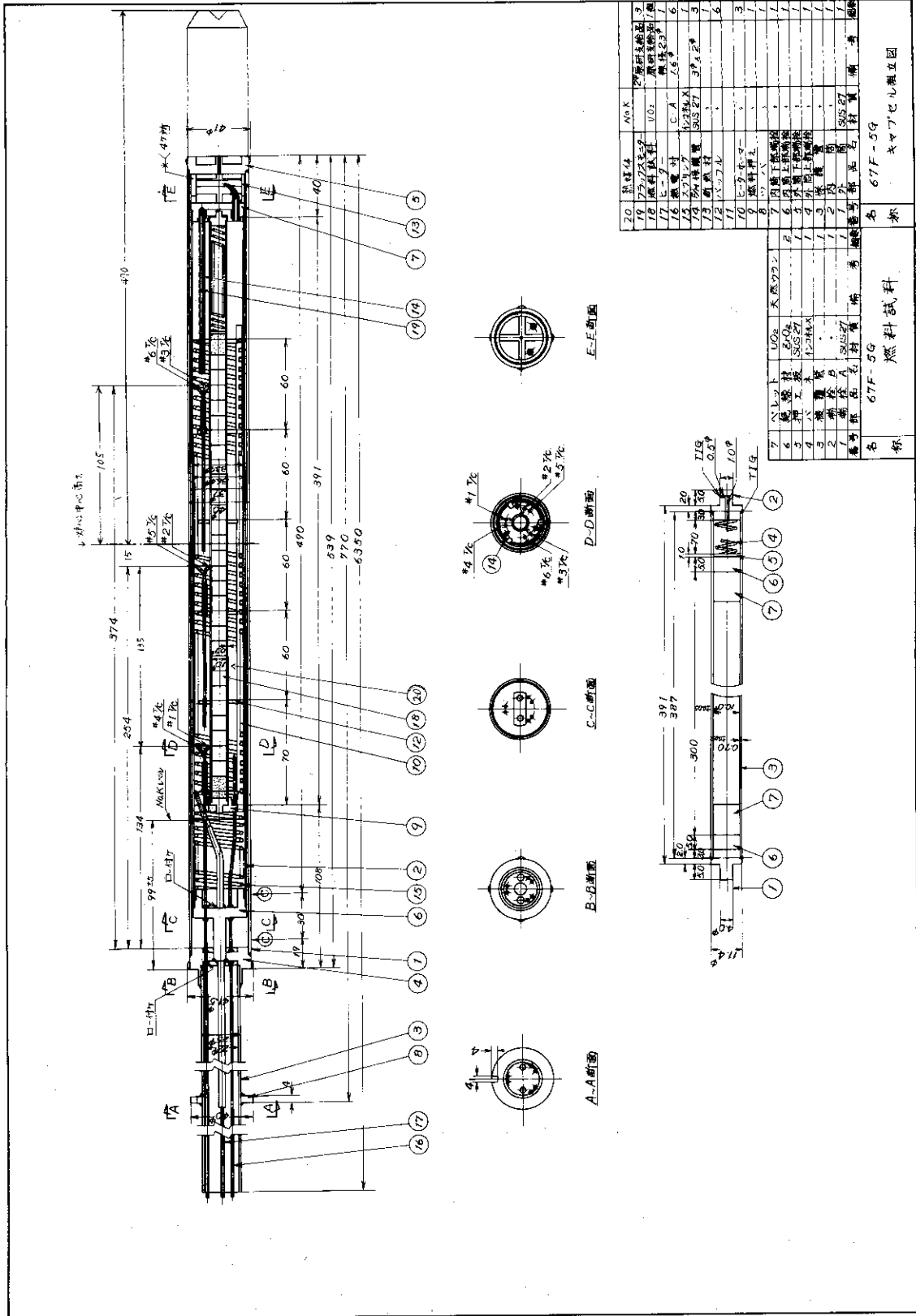


図1.2.6 67F-5G燃料試料，キャブセル組立図

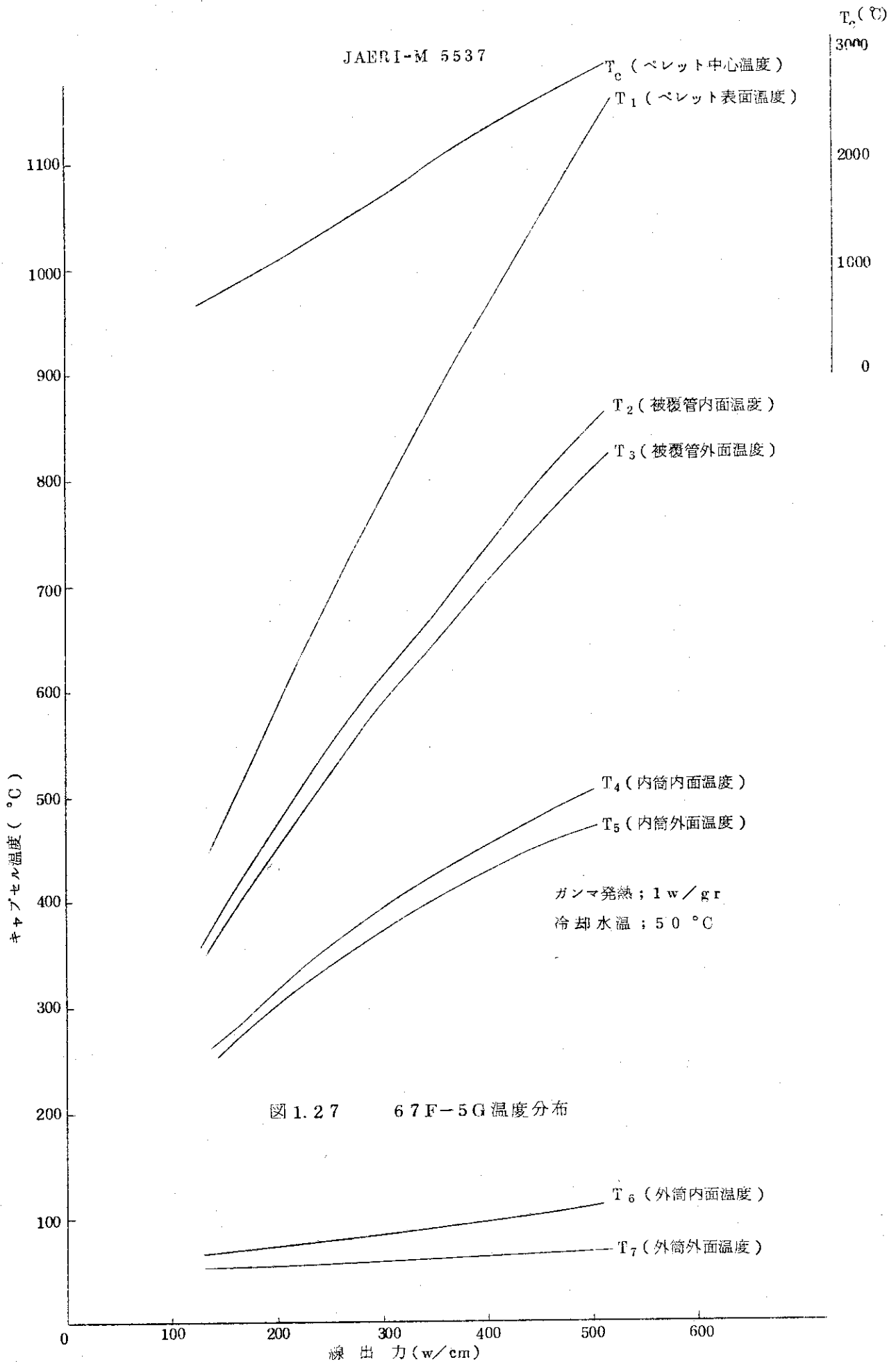


図 1.27 67F-5G 温度分布

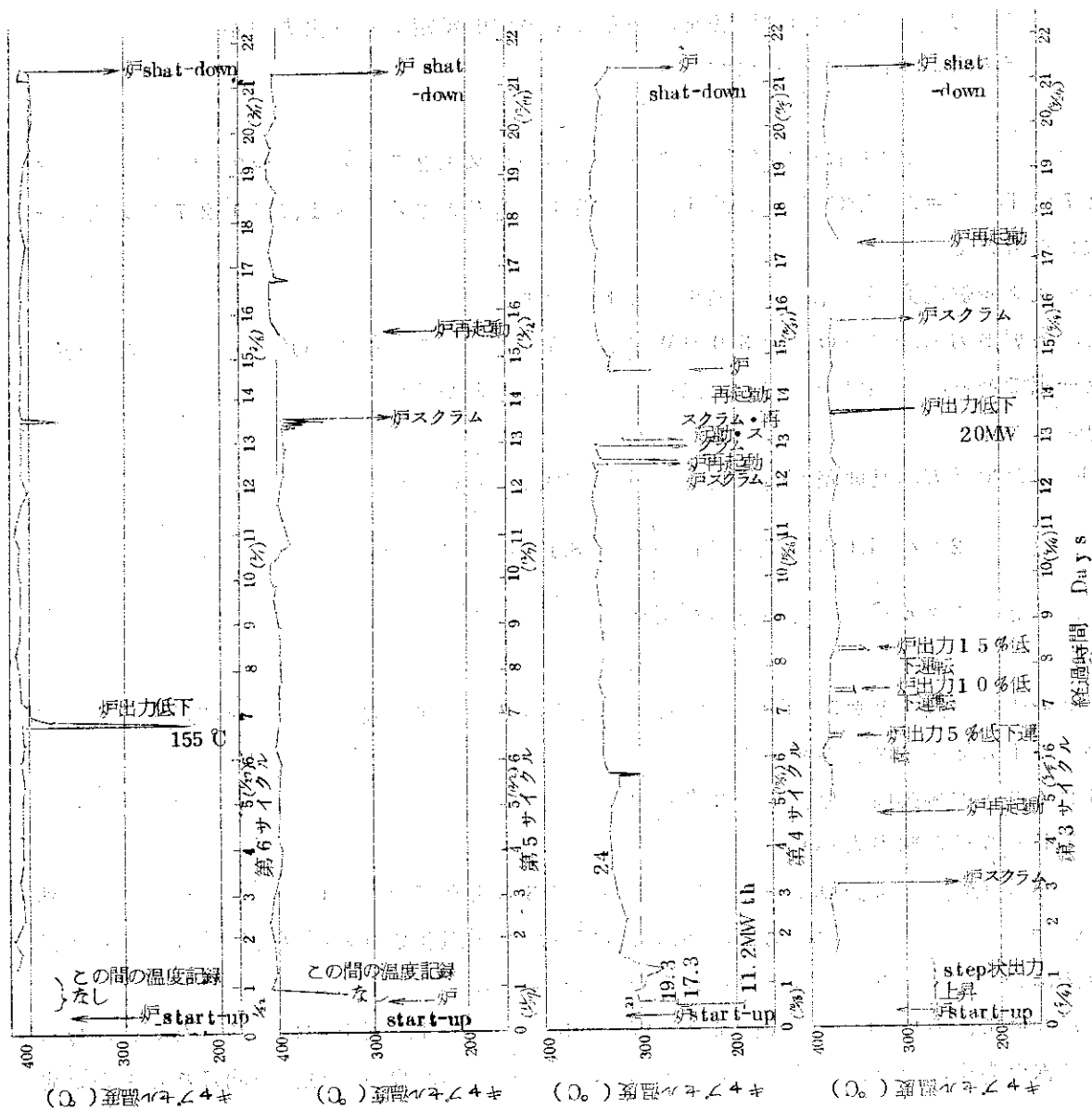


図 1.28 67F-5G 照射温度データ (#2) T/C指示値の記録

検討メモ 1.2

67F-5Gの線出力

照射中のキャプセル温度より67F-5Gの線出力を推定する場合、3つの手段が考えられる。すなわち、

- (1) 線出力と温度に関する計算と温度実測値より求める線出力〔 Q_G 〕
- (2) NaK中の半径方向温度実測値より計算で求める線出力〔 $Q_{\Delta T}$ 〕
- (3) ヒータ出力と温度指示値の関係を基準として実験的に定める線出力〔 Q_H 〕

以下、各方法により線出力を算出する。

1. Q_G

一次元熱計算コード“GENGTC”による計算結果を図1.27に示す。#2 T/Cの温度は図1.27の T_3 に#5 T/Cの温度は T_4 に該当するものとする。図1は図1.27の必要部分を拡大したものである。

第3サイクル炉起動時の Q_G 算出結果を表1に示す。

また、各炉出力における Q_G を30MW熱出力時に換算した線出力〔 Q'_G 〕を併記した。 Q'_G はほぼ一定であり、炉熱出力と線出力は比例していることが分かる。

2. $Q_{\Delta T}$

NaK中の半径方向温度差($T_2 - T_5$)を用い、(1)式より $Q_{\Delta T}$ を求める。

$$Q_{\Delta T} = 2\pi\lambda_N L(T_2 - T_5) / I_n \frac{r_2}{r_5} = 8.15\lambda_N (T_2 - T_5) \quad (1)$$

表2に第3サイクル炉起動時の $Q_{\Delta T}$ を示す。

3. Q_H

ヒータ発熱量〔 Q_E 〕と#5 T/C温度との関係を図2に示す。 Q_H の算出方法については本報告書・第1分冊・3.2項参照のこと。

第3サイクル炉起動時の Q_H を表3に示す。

4. 67F-5Gの線出力〔 Q_f 〕

上述の Q_G 、 $Q_{\Delta T}$ および Q_H を対比してみると図3のようになる。 $Q_{\Delta T}$ はピンで発生した熱がNaK熱媒体を通過する際に対流伝熱によって温度が平坦化される影響を直接受けるために、他の方法におけるよりも低い値が得られていると思われる。

Q_G については#2 T/Cが T_3 より外側、#5 T/Cが T_4 より内側にあるために、 Q_{G1} は低目の線出力を、 Q_{G2} は高目の線出力を示し、真の線出力は Q_{G1} と Q_{G2} の間にあるものと思われる。

Q_{H1} と Q_{H2} については伝熱長さをどうとるか判断に苦しむところである。

結論としては、伝熱長さをNaK深さ(40cm)としたときの Q_{H2} が Q_{G1} と Q_{G2} の間にあり最も Q_f に近い値を示しているものと判定する。

表1. Q_G (データ採取日: S.46.9.5)

(a) Q_{G1}

炉熱出力	冷却水温	#2 T/C 温度	水温補正值	$[Q_G]_2$	30MW 換算値 $[Q'_G]_2$
7.5 MW	140°C	24°C	166°C	40w/cm	160w/cm
14.2	225	26	249	77	163
21.0	288	29	309	109	158
27.5	350	32	368	145	158
30.0	374	33	391	159	159

$Q'_G = Q_G \cdot (30 / \text{炉熱出力})$ とした。

(b) Q_{G2}

炉熱出力	冷却水温	#5 T/C 温度	水温補正值	$[Q_G]_5$	30MW 換算値 $[Q'_G]_5$
7.5MW	126°C	24°C	152°C	w/cm	w/cm
14.2	202	26	226	128	270
21.0	260	29	281	187	267
27.5	309	32	327	241	263
30.0	323	33	340	257	257

表2. $Q_{\Delta T}$

炉熱出力	$T_2 - T_5$	λ_N	$Q_{\Delta T}$	λ_N 算出温度
7.5MW	14°C	22.2 $\frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{hr} \cdot \text{°C}}$	29.4w/cm	133°C
14.2	23	22.7	49.7	214
27.5	40.8	23.4	90.5	330
30.0	51.8	23.5	116.0	348

表3. Q_H

炉熱出力	Q_E	#5 T/C 温度	Q_{H1}	Q_{H2}
7.5MW	2.17 KW	126°C	72.3w/cm	54.3w/cm
14.2	4.14	202	139	104
21.0	6.14	260	209	154
27.5	8.03	309	268	201
30.0	8.54	320	284	214

Q_E は全発熱量 = $Q_H \cdot L$
 Q_{H1} は $L=30\text{ cm}$ のとき
 の Q_H
 Q_{H2} は $L=40\text{ cm}$ のとき
 の Q_H

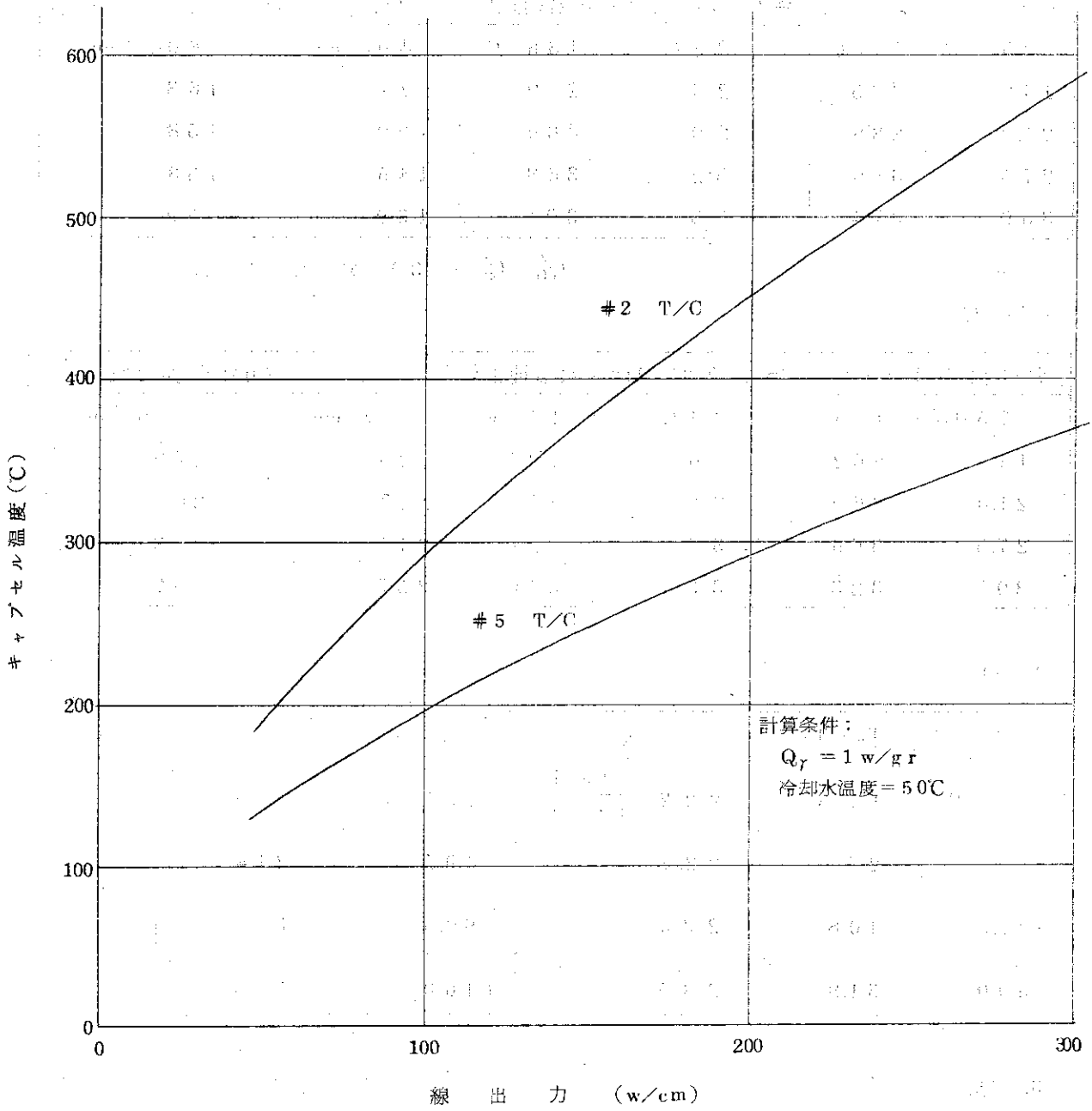


図1 67F-5Gの熱計算結果

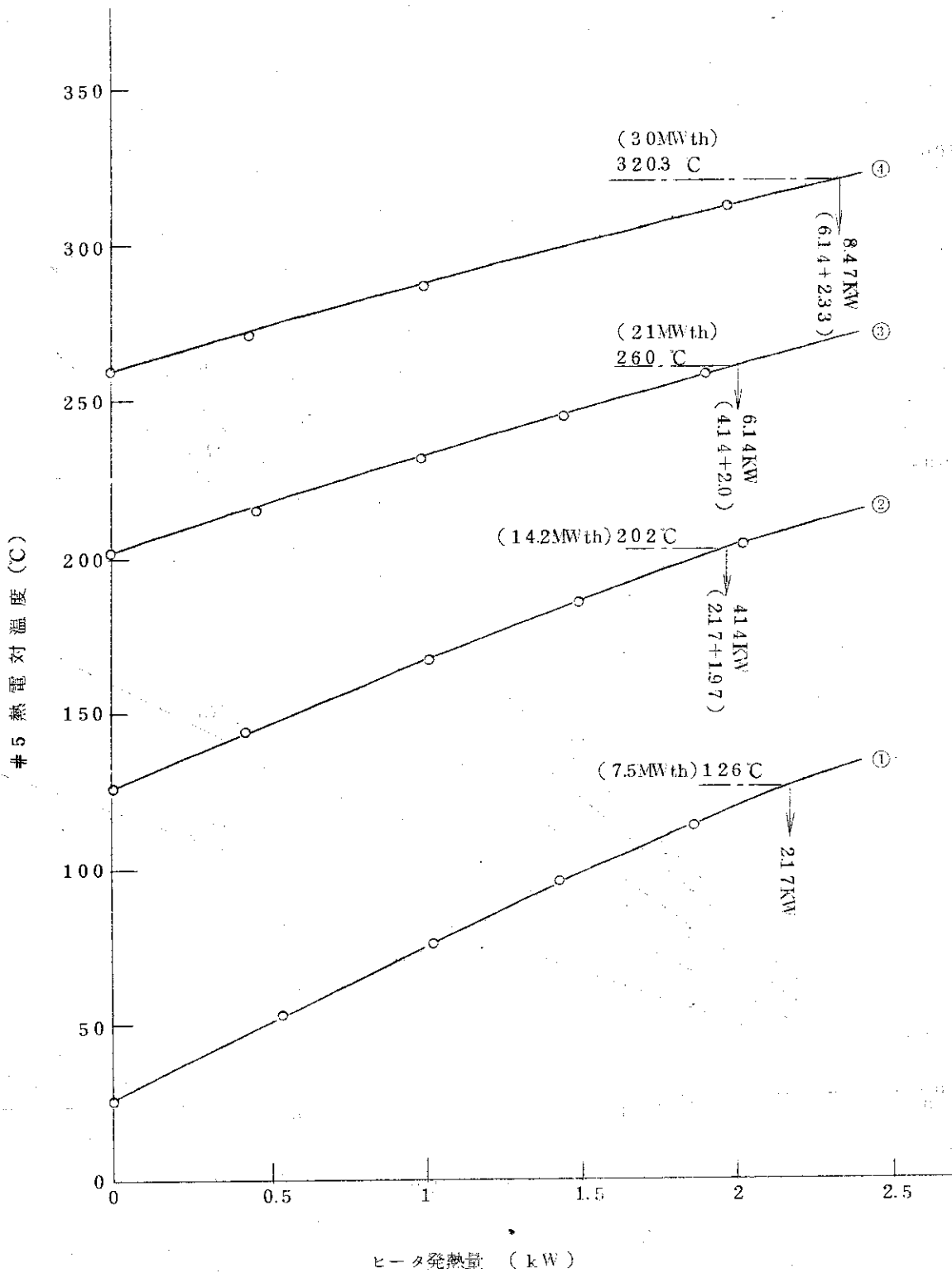


図2 67F-5Gにおける Q_E と#5熱電対温度の関係

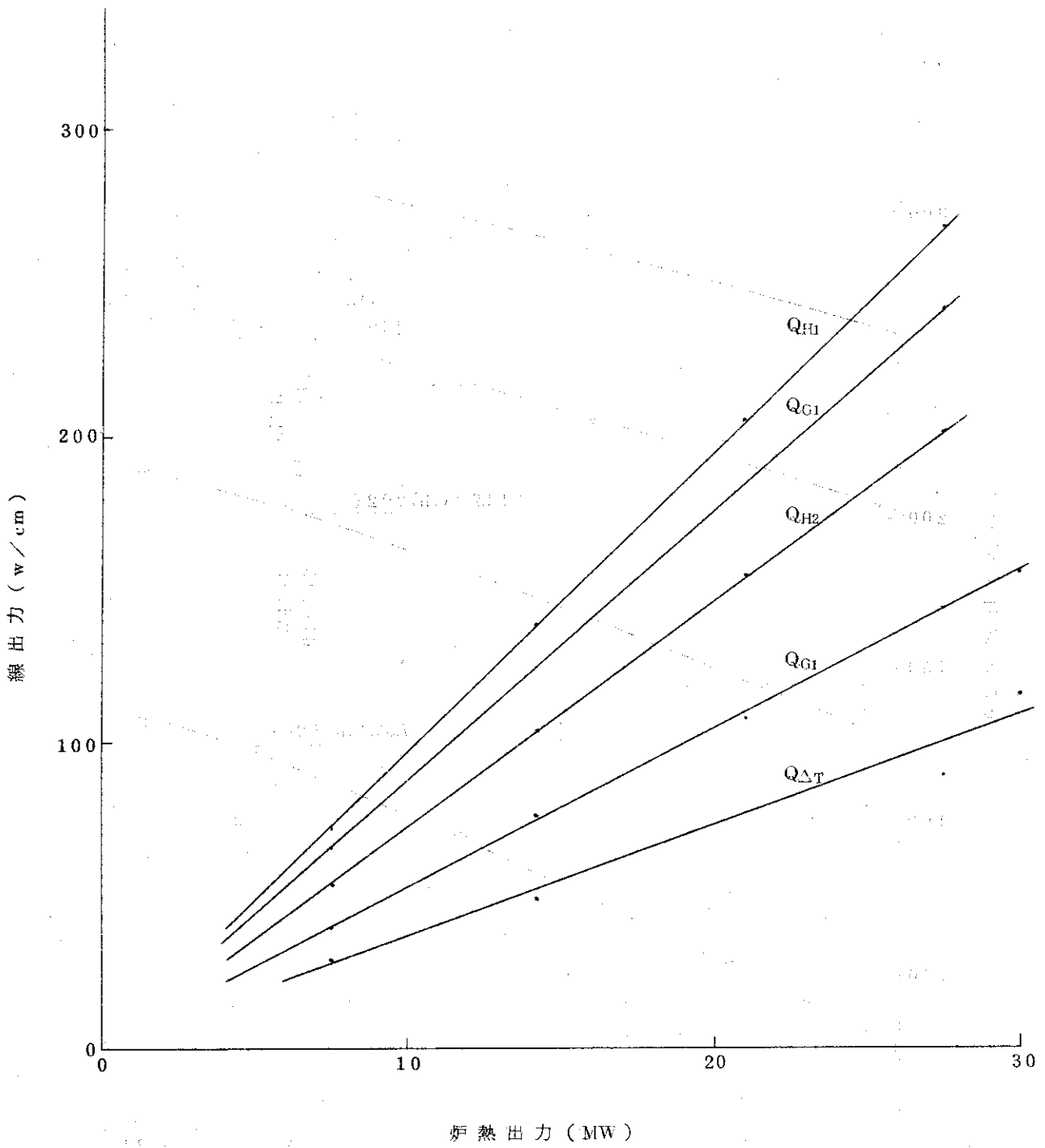


図3 線出力比較図

1.6 67F-7G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-7G		
照射 計	試料提供者	住友電工熊取研究所		
	ベレット	材 質	天然UO ₂	
		形 状	円柱状ベレット	
		寸 法	直径10mmφ 高さ10mm	
		数 量	30個	
	ベレット・スタック長	100mm×3本		
	被覆管	材 質	SUS-32	
		形 状	円筒形	
		寸 法	外径11.62mmφ 内径10.12mmφ	
	燃料ピン全長	136mm		
燃料ピン数量	3本			
照射期間	第3サイクル			
照射 画	照射試験の目的	1) キャプセルの熱特性および照射孔の特性の調査 2) UO ₂ ベレットの照射後の状態観察 3) 燃料試料のガス圧測定およびガス採取		
	照射孔	H-5		
キャプセル 設計 条件	線出力	300w/cm		
	ガンマ発熱			
	キャプセル構造	アルミ熱媒体1重キャプセル		
	計 測	熱電対6本		
	制 御	無し		
		キャプセル構造設計	図1.29に組立図を示す。	
キャプセル の 設計	熱 設 計	図1.30にキャプセル内温度分布を示す。		
	強度 設計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い個所は燃料被覆管で右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 1.5 \text{ kg/mm}^2$
			熱 応 力	$\sigma_t = 8 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 11 \text{ kg/mm}^2 \text{ at } 700^\circ\text{C}$
			評 価	$\sigma_p + \sigma_t = 9.5 < \sigma_a = 11 \text{ kg/mm}^2$
設計において特に留意した事項				
照射 データ	照射温度	表1.6		
	F/M測定値			

キャプセル名称	67F-7G	キャプセル安全審査資料№	F-3	
照射サイクル	01(1サイクル)			
構造の詳細	図DJ-1287-2, 67F-7Gキャプセル組立図			
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	設計基準第4条(3) 38mm孔用標準キャプセル		
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p> <p>(注) $h_1 = h_7 = 20000 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$ γ 加熱こみとし, 40γ ($\gamma\text{N/gr}$) で計算。 燃焼 21 days</p>			
	<p>Q_{\max} の値</p> <p>400 w/cm</p>	制限因子	被覆管温度	
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	Q_{\max} における温度分布	T_8	50°C	<p>Q_{\max} における強度上の検討</p> <p>問題の箇所 被覆管</p> <p>被覆管応力</p> <p>膜応力 $\sigma_p = 1.5 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>熱応力 $\sigma_t = 8 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>評価</p> <p>700°Cにおける許容応力 $\sigma_a = 11 \text{ kg/mm}^2$ ※1</p> <p>従って、強度上は殆ど問題がない。</p> <p>イ) $\sigma_p = 1.5 < 11 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>ロ) $\sigma_p + \sigma_t = 9.5 < 1.5 \sigma_a = 16.5 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>(※1. GEAP 4418)</p>
		T_7	66°C	
T_6	96°C	T_5	288°C	
T_4	317°C	T_3	651°C	
T_2	689°C	T_1	855°C	
T_0	2190°C			
キャプセル健全性の総合評価	<p>$Q = 400 \text{ w/cm}$ に対し、強度上の問題はない。しかし計算上被覆管表面が高温になり、両立性の問題が出てくる。実際に接触するとこの温度は、実質的に下と考えられ、制限値としてこの値に定めた。</p>			
照射条件ねらい	Q_d の値	300 w/cm	Q_{\max}/Q_d	1.33

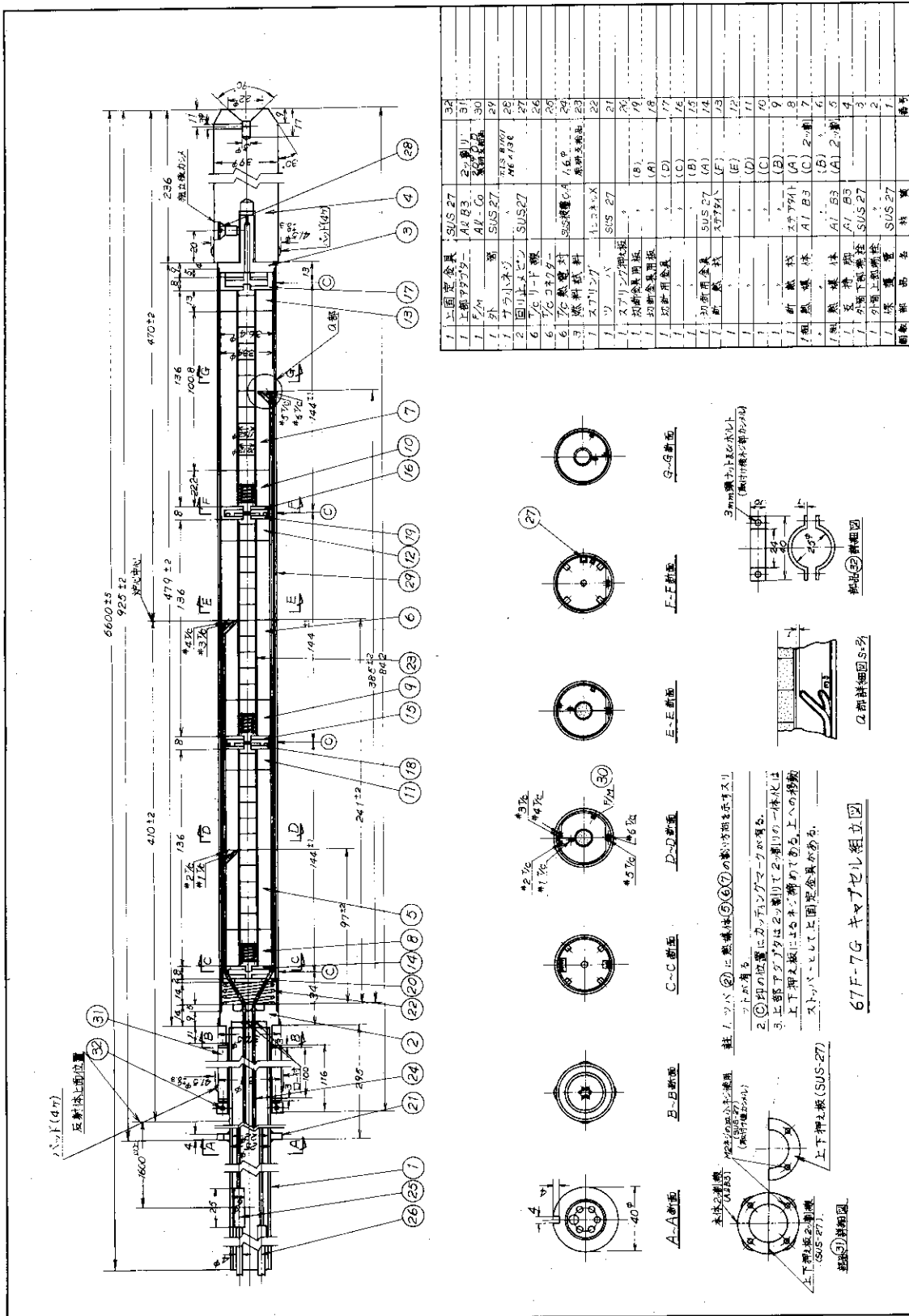


図 1.29 67F-7G キャプセル組立図

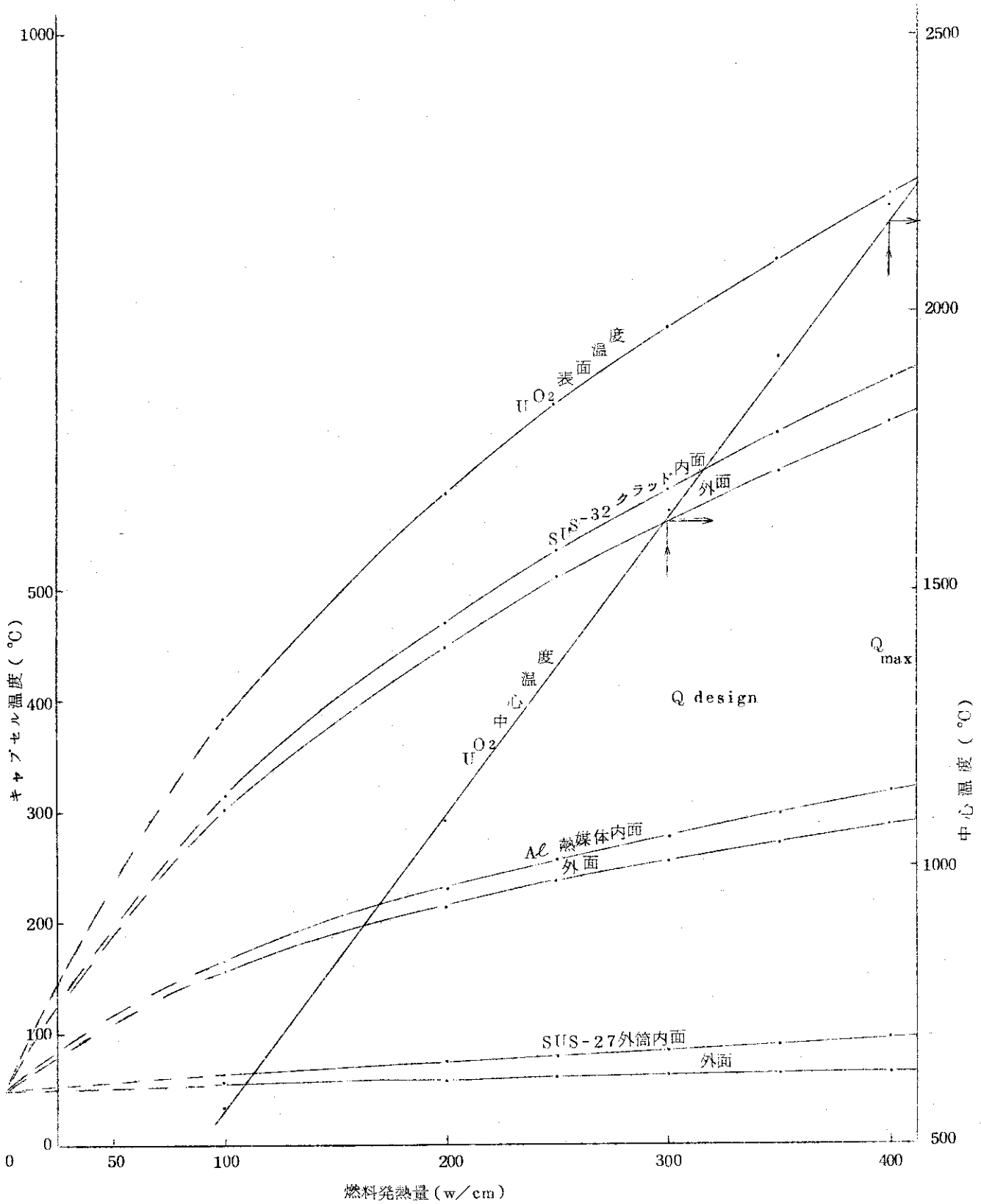


図 1.30 67F-7G 資料 2-1 キャプセル内温度分布

表 1.6 67F-7G 温度データ

測定日	炉出力	#1T/C	#2T/C	#3T/C	#4T/C	#5T/C	#6T/C	炉心一次冷却 出入口温度
45.9.4 22:45	核 20KW	19 °C	19	19	19	19	19	20.5°C
23:12	500	21.5°C	22	21.5	21.5	22.5	23.5	20.5°C
9.5 9:35	5MW	46 °C	48	52	52	59	64.5	
11:48	10MW	69 °C	74	82.5	82.5	91	99	
13:30	15MW	91 °C	99	112	112	118.5	128	
15:47	熱 24MW	99.5°C	108	119.5	119.5	127.5	137	
9.12 9:10	熱 30MW	122 °C	132	138	137	138.5	150	入口 32.1°C 出口 36.1°C

各熱電対の相関関係は、各熱電対の取付け位置が図面通りかどうかについて疑問が生じるような値を示している。

すなわち、1) #1T/C と #2T/C の指示値を比べると #1T/C 温度は #2T/C 温度より小さく、予想として #1T/C > #2T/C の方が正しい。

2) #5T/C , #6T/C についても同様。

3) #3T/C , #4T/C の間の温度差が小さすぎる。

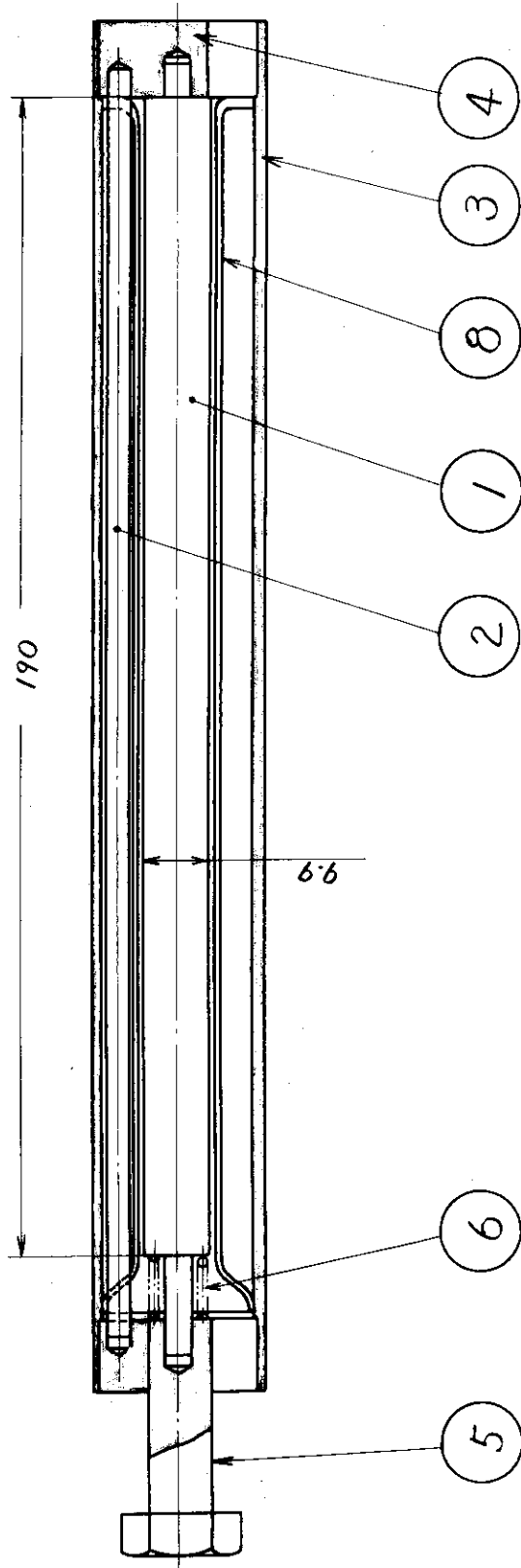
熱電対取付け位置と、熱電対端子番号の対応が明らかにおかしくなっていると思われる。

照射ずみのキャプセルにおいて熱電対番号と先端位置の対応を調べることは非常に困難である。このため本報告書には正確な温度データおよび総出力を示すことができない。

1.7 67F-8G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-8G		
照射 計	試料提供者	動力炉・核燃料開発事業団		
	試	ペレット	材 質	UO ₂
			形 状	円柱状焼結ペレット
			寸 法	9.9φ×11.5L
			数 量	13個
	ペレット・スタック長		150L	
	料	被覆管	材 質	SUS28
			形 状	継目無管
			寸 法	10.0φ I.D × 11.0φ O.D
	燃料ピン全長		212L	
燃料ピン数量		1本		
照射期間		2サイクル(第10~11)		
画	照射試験の目的	燃料試料(被覆材付)をキャプセルに入れず、直接炉冷却材で照射するリーキキャプセル照射の経験をうる。		
キャプセル設計条件	照射孔	L-5		
	線出力	428w/cm		
	ガンマ発熱			
	キャプセル構造	リーキキャプセル		
	計 測	なし		
	制 御	なし		
キャプセルの設計	キャプセル構造設計	図1.31		
	熱 設 計	Q _{max} の条件で設計		
	強度設計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い個所は被覆管で右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 1.03 \text{ kg/mm}^2$ 外圧による応力 $\sigma_o = -1.69$
			熱 応 力	$\sigma_t = 11.2 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 15 \text{ kg/mm}^2$
評 価			$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t + \sigma_o < 3\sigma_o = 45$	
設計において特に留意した事項	燃料照射リーキキャプセルのため、冷却水流量を適切にとること。			
照射データ	照射温度	なし		
	F/M 測定値			

キャプセル名称	67F-8G	キャプセル安全審査資料No.	
照射サイクル	10~11(2サイクル)		
構造の詳細	リーキ型燃料キャプセル 38φ照射孔用		
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	リーキ型無計測燃料キャプセル	
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p> <p>計算条件</p> <p>① 表面流速 1 m/s → 修正コルバーンの式を用いて 表面熱伝達率 7000 kcal/m²hr°C</p> <p>② ギャップコンダクタンス =1000 Btu/ft²hr °F</p>		
	<p>Q_{max} の値 500 w/cm</p> <p>制限因子 被覆管表面冷却水温度</p>	<p>問題の箇所 被覆管</p> <p>熱応力 $\sigma_t = 11.2 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>内圧による応力 $\sigma_p = 1.03 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>外圧による応力 $\sigma_o = -1.69 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>$\sigma_t + \sigma_p + \sigma_o = 10.5 \text{ kg/mm}^2 < 3\sigma_a = 45 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>$\sigma_p + \sigma_o = 0.66 \text{ kg/mm}^2 < \sigma_a = 15 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>$\sigma_a$: 許容応力</p> <p>となるので問題なし</p>	
<p>Q_{max} における最高熱負荷と制限因子</p> <p>冷却水温度 T₄ = 50°C</p> <p>被覆管表面温度 T₃ = 183°C*</p> <p>被覆管内面温度 T₂ = 229.5°C</p> <p>ペレット表面温度 T₁ = 283°C</p> <p>ペレット中心温度 T₀ = 2000°C</p> <p>* 12 kg/cm H₂O の沸点は 187°C</p>	<p>強度上の評価</p> <p>被覆管については Q_{max} において充分の強度を有する。</p>		
<p>キャプセル健全性の総合評価</p> <p>Q_{max} (= 500 w/cm) 以下においては、熱的問題もなく強度も充分である。</p>			
照射条件ねらい	Q _d の値 300 w/cm	Q _{max} /Q _d	1.67



品番	団番	番	部品名	数量 (台数)	材質
8	MD-4430		バッフル	1	SUS27
7	ME-11006		スペーサーブロック	1	Al
6	ME-11005		スプリング	2	イコナルX
5	ME-11004		上部端栓	1	SUS27
4	ME-11003		下部端栓	1	SUS27
3	MD-4429		外筒	1	SUS27
2	ME-11002		フラックスモーター	1	SUS27
1	ME-11001		燃料試料	1	

図1.31 67F-8Qキャプセル組立図

1.8 67F-10G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-10G		
照射計	試料提供者	住友電工熊取研究所(責任者 笠松利夫, 担当者 勝矢寛雄)		
	試	ペレット	材質	UO ₂ (1%濃縮ウラン)
			形状	円柱状ペレット
			寸法	15mmφ×15mm
			数量	10個
	ペレット・スタック長		150mm	
	料	被覆管	材質	SUS32
			形状	円筒状
			寸法	16.62mmφO.D×15.12mmφI.D.×188mmℓ
	燃料ピン全長		196mm	
燃料ピン数量		1個		
照射期間		第3サイクル~第4サイクル		
画	照射試験の目的	1. Aℓ充填1重計測付キャプセルの照射特性		
		2. 炉側挿入孔の照射特性 (特に effective region 上部— 炉心中心より203mm上— の照射特性)		
キャプセル設計条件	照射孔	D-11		
	線出力	355w/cm		
	ガンマ発熱	0.116w/g		
	キャプセル構造	Aℓ充填1重計測付キャプセル		
	計測	熱電対6本		
	制御	なし		
キャプセルの設計	キャプセル構造設計	図1.32に詳細を示す。		
	熱設計	図1.33に温度分布を示す。		
	強度設計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い個所は 被覆管 で右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 9.2 \text{ kg/mm}^2$
			熱応力	$\sigma_t = 10.1 \text{ kg/mm}^2$
			許容応力	$\sigma_a = 13.9 \text{ kg/mm}^2$
評価			$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 19.3 \text{ kg/mm}^2$ で十分安全	
設計において特に留意した事項				
照射データ	照射温度	図1.34, 図1.35に示す。		
	F/M測定値			
	線出力ほか	表1.7		

キャプセル名称	67F-10G	キャプセル安全審査資料No	F-4
照射サイクル	01		
構造の詳細	DJ-1288-4; 67F-10Gキャプセル組立図		
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	設計基準第4条(1)42mmφ孔用標準キャプセルに準じ、アダプタ要	
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p> <p>(注) r加熱 0.12w/gr 燃焼 21days</p> <p>冷却水 外筒(SUS2) ガスギャップ(He) 熱媒体(AL) ガスギャップ(He)</p> <p>UO₂ (Nat.15%E) ガスギャップ(He) 被覆管(SUS32)</p>		
	<p>Q_{max}の値</p> <p>500w/cm</p> <p>制限因子</p> <p>被覆管応力</p>		
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	Q _{max} における温度分布	T ₈	50℃
		T ₇	63℃
		T ₆	102℃
		T ₅	185℃
		T ₄	214℃
		T ₃	448℃
		T ₂	484℃ (被覆管内側)
		T ₁	664℃ (UO ₂ 表面)
		T ₀	2259℃
		強度上の評価	<p>問題の箇所</p> <p>被覆管</p> <p>被覆管応力</p> <p>膜応力 $\sigma_p = 9.2 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>熱応力 $\sigma_t = 10.1 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>評価</p> <p>490℃に対する SUS32 強度 $\sigma_a = 13.9 \text{ kg/mm}^2$ に対し</p> <p>て,</p> <p>(1) $\sigma_p = 9.2 \text{ kg/mm}^2 < \sigma_a$</p> <p>(2) $\sigma_p + \sigma_t = 19.3 \text{ kg/mm}^2 < 1.5 \sigma_a = 20.8 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>(※ GEAP4418 参照)</p> <p>許容応力 σ_a の係数 1.5 は安全率が高く、これを越えなければ十分安全である。</p> <p>他の構造部については問題ない。</p>
キャプセル健全性の総合評価	<p>Q_{max} = 500w/cm に対して問題となる被覆管は上記のように、1.5 × (許容応力) で制限される。</p> <p>各部材、UO₂ 中心とも許容値に対して十分安全である。</p>		
照射条件ねらい	Q _d の値	355w/cm	<p>Q_{max}/Q_d = $\frac{500}{355} = 1.4$</p>

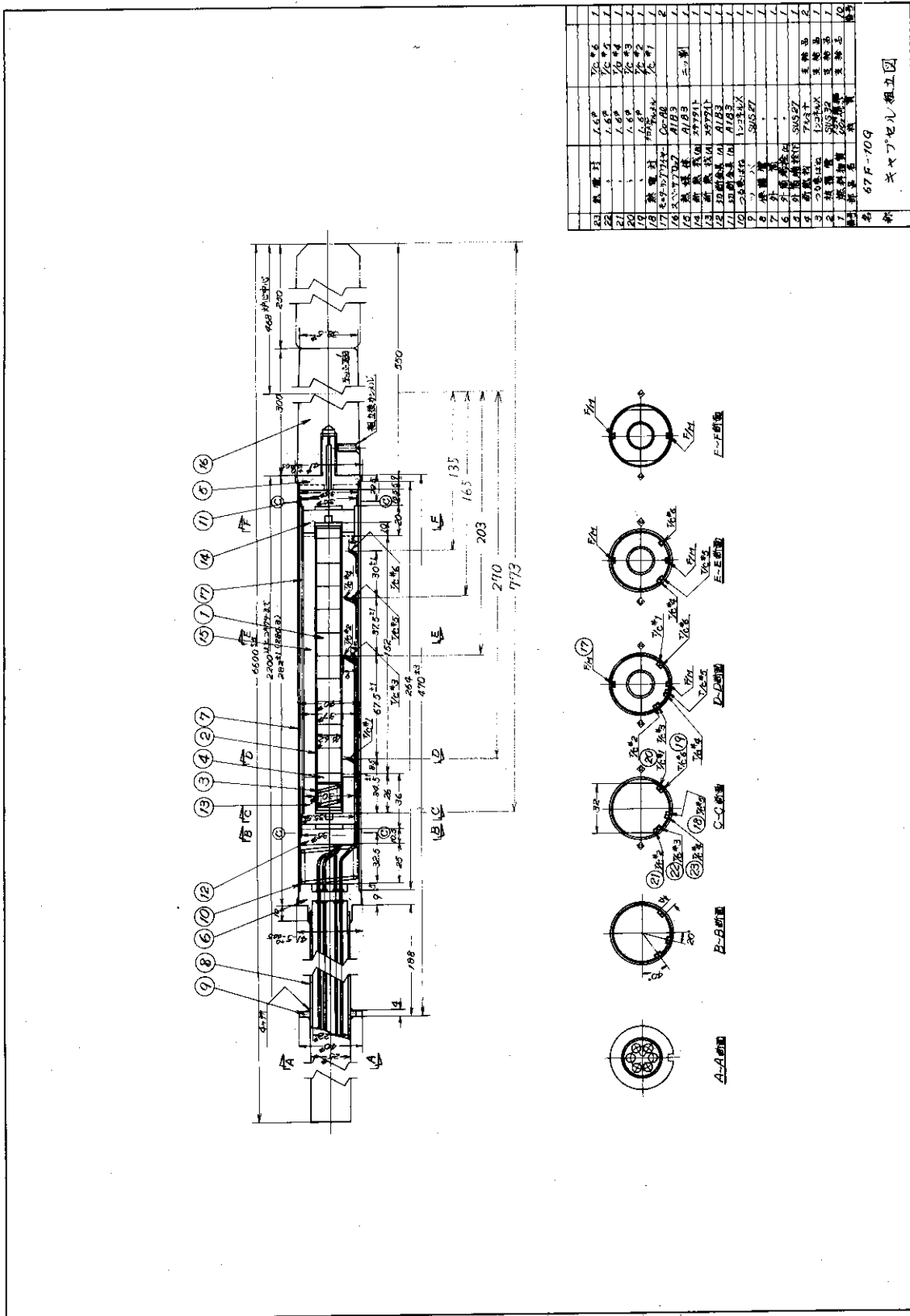


図 1.3.2 67F-10G キャプセル組立図

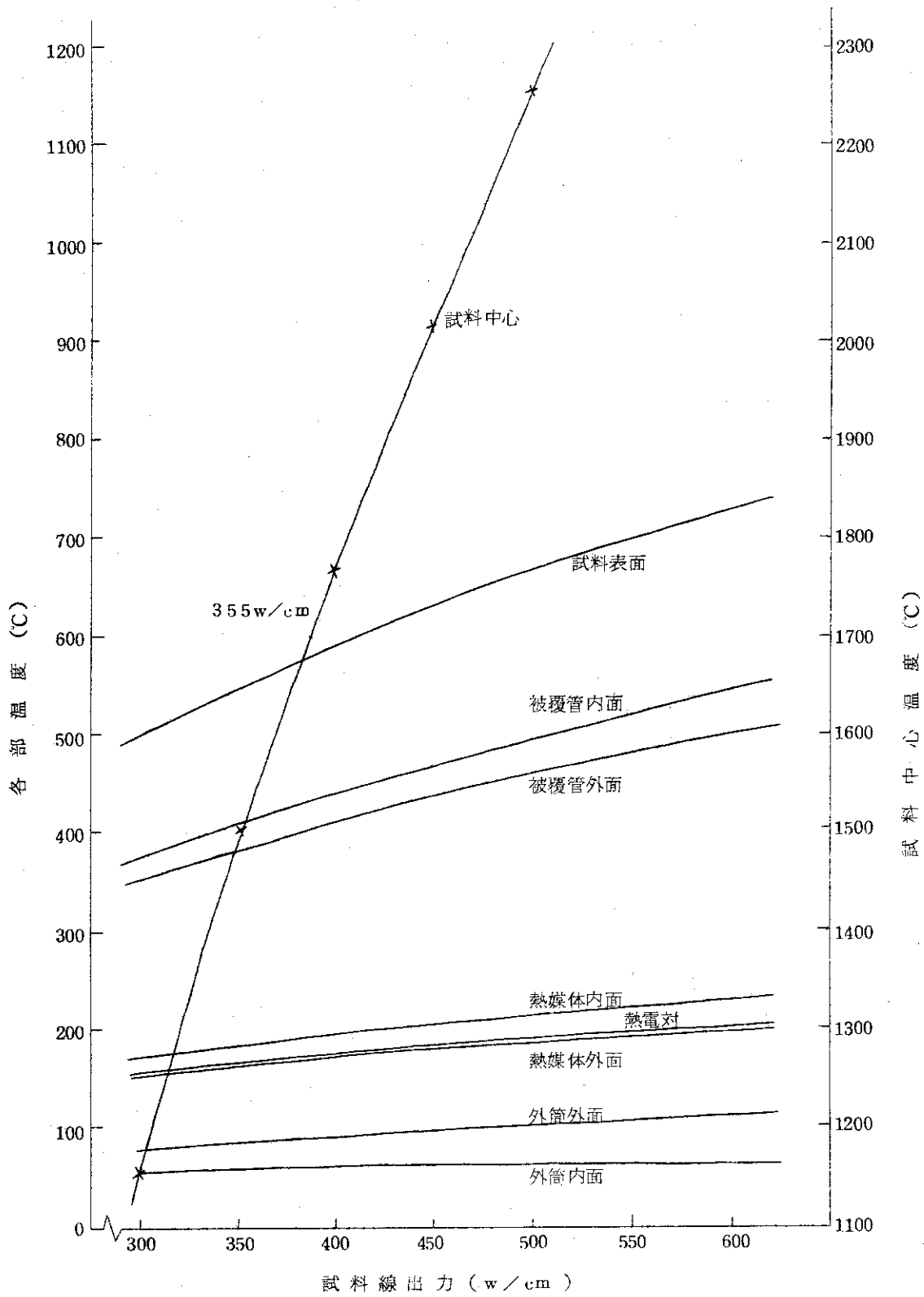
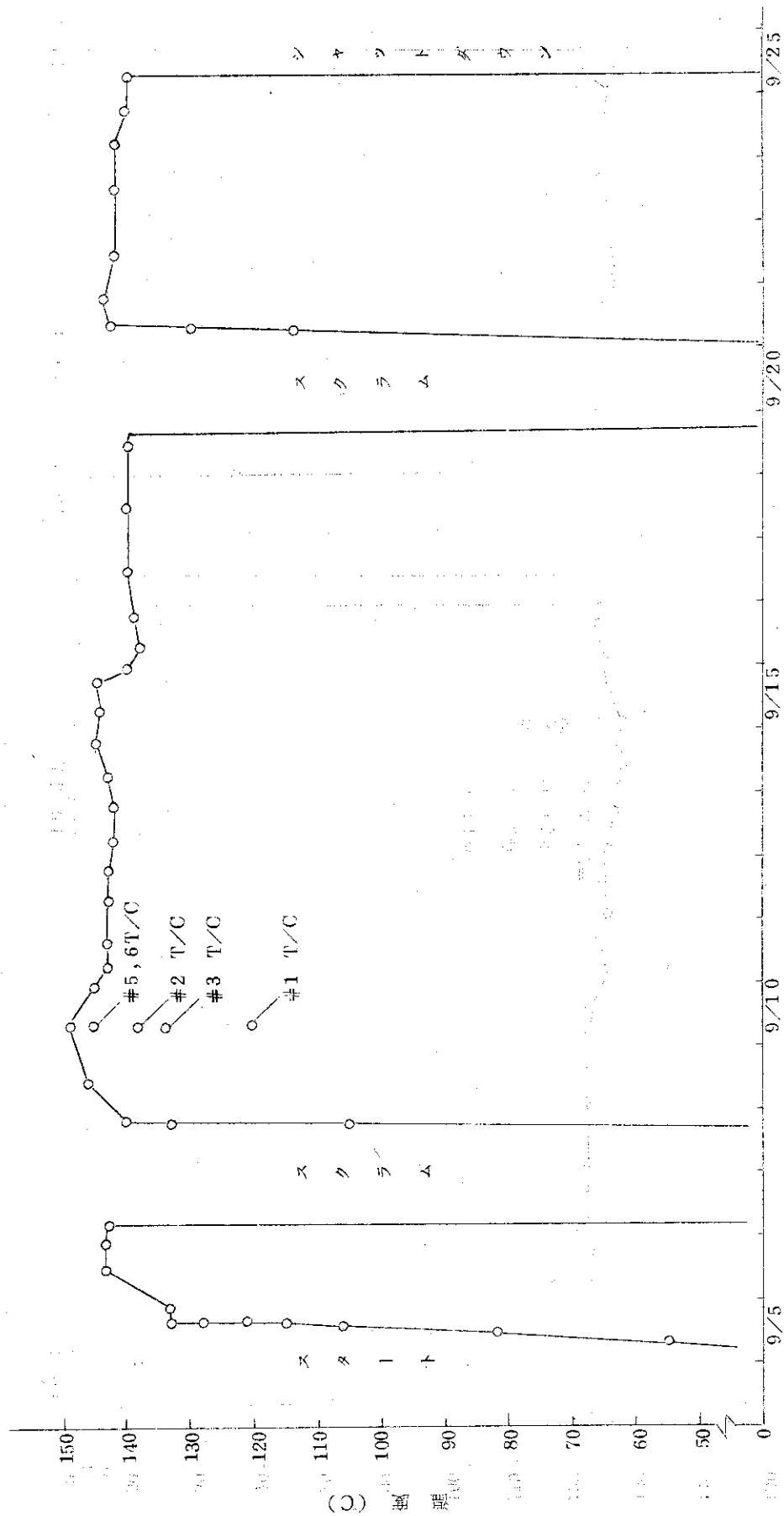


図 1.33 線出力とキャプセル内温度分布

第3サイクル (S.45.9.5~9.25)

熱電対 #4 T/C



月日

図 1.34 67F-10G照射温度

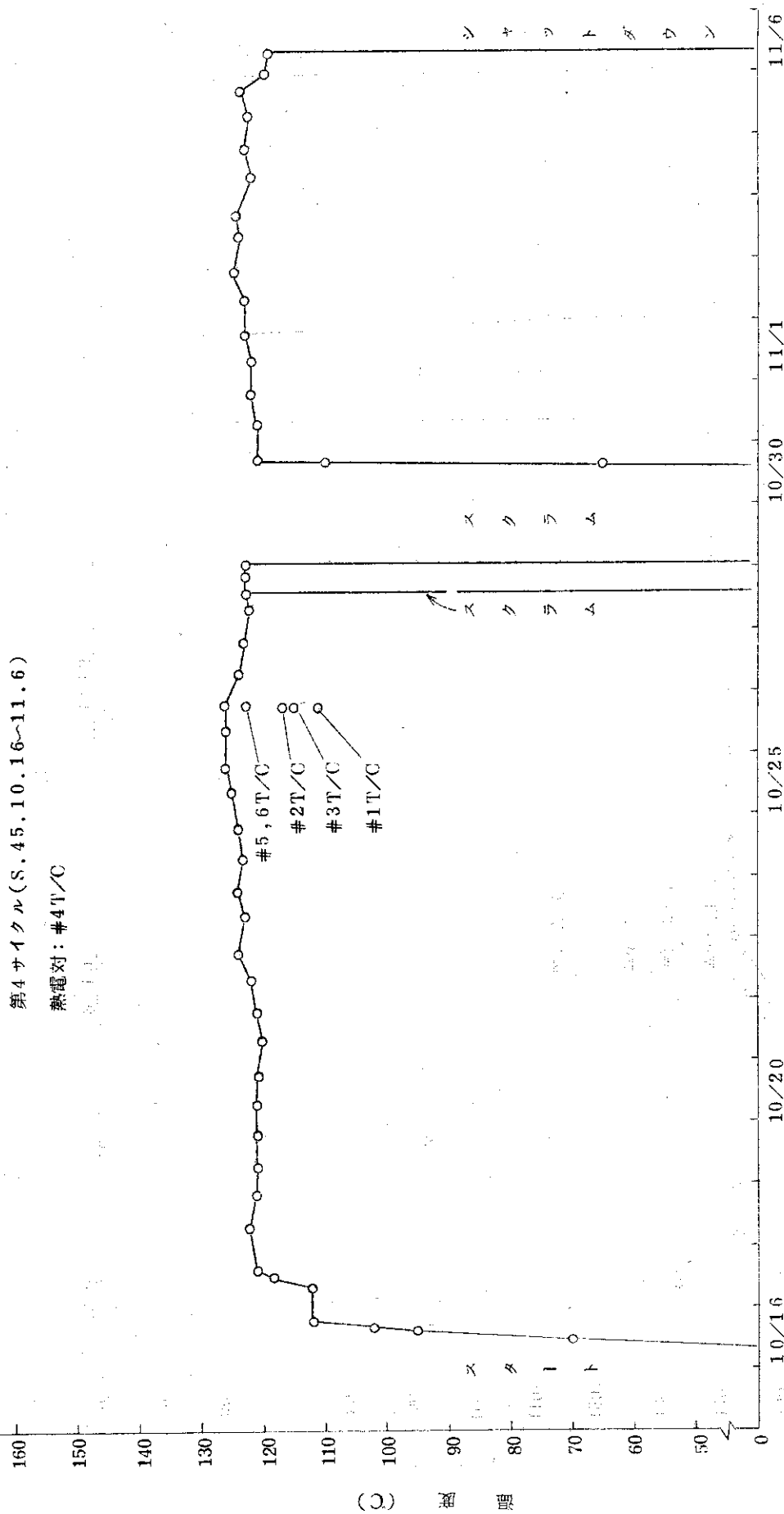


図 1.35 6.7 F - 1.0 G 照射温度

キャプセルの線出力係数

表 1.7 (1) 線出力

Q _G (w/cm)	日 時 / サイクル	熱電対番号	備 考
3 4 5	9月10日 9:00 / 3	#4	原子炉熱出力30MW
2 6 5	10月27日 9:30 / 4	#4	原子炉熱出力26.5MW

表 1.7 (2) 熱電対の導通・絶縁抵抗

測定時期	#1T/C	#2T/C	#3T/C	#4T/C	#5T/C	#6T/C	測定端場所
第3サイクル炉運転前	91	93	92	92	93	94	照射制御室接続盤
(9月3日)	85	105	88	105	95	105	"
第3サイクル炉運転後	78	79	79	78	79	79	"
(9月30日)	150	160	150	150	150	150	"
第4サイクル炉運転前	89	89	89	89	90	89	計測盤端子
(10月15日)	-	-	-	-	-	-	
第4サイクル炉運転後	78	79	78	78	79	79	照射制御室接続盤
(11月10日)	100	140	125	150	130	150	"

上段：導通抵抗(Ω) (テスターによる)

下段：絶縁抵抗(MΩ) (500VDCメガーによる)

1.9 67F-13G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-13G		
照射 計	試料提供者	三菱原子力工業(株) (責任者 関 義辰, 担当者 高田義彦)		
	ペレット	材 質	天然UO ₂	
		形 状	円柱状ペレット	
		寸 法	8mmφ×8mm	
		数 量	15個	
	ペレット・スタック長	120mm		
	被覆管	材 質	SUS32	
		形 状	円筒状	
		寸 法	9.13mmφ O.D. × 8.10mmφ I.D.	
	燃料ピン全長	153mm		
燃料ピン数量	1			
照射期間	第4～5サイクル			
照射試験の目的	1. キャプセル熱特性 2. 炉側照射孔の照射特性, とくは S.P.D. による中性子束測定			
キャプセル設計条件	照射孔	J-5		
	線出力	330w/cm		
	ガンマ発熱	3w/g		
	キャプセル構造	Aφ 充填1重計測付キャプセル		
	計 測	熱電対 6本, S.P.D. 2本		
	制 御	なし		
キャプセルの設計	キャプセル構造設計	図 1.36 に詳細を示す。		
	熱 設 計	図 1.37 にキャプセル各部温度分布を示す。		
	強度設計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い個所は 被 覆 管 で右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 5.1 \text{ kg/mm}^2$
			熱 応 力	$\sigma_t = 6.9 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 8.4 \text{ kg/mm}^2$
評 価			$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_a = 12.0 \text{ kg/mm}^2$ で十分安全	
設計において特に留意した事項				
照射データ	照射温度	図 1.38, 図 1.39 に示す。		
	F/M 測定値			
	S.P.D. 測定値	図 1.40, 図 1.41, 図 1.42 に示す。		
	そ の 他	検討メモ 1.3, 線出力ほか		

キャプセル名称	67F-13G	キャプセル安全審査資料№																	
照射サイクル	02~03																		
構造の詳細	DJ-1289-4																		
キャプセルの安全解析	キャプセル型式																		
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p> <p>(注) γ加熱 1.34w/gr 燃焼 42days</p>																		
	<p>UO₂(Nat.)</p> <p>ガスギャップ(He)</p> <p>被覆管(SUS32)</p> <p>ガスギャップ(He)</p> <p>冷却水</p> <p>外管(SUS27)</p> <p>He</p> <p>熱媒体(AL)</p>																		
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	Q _{max} の値	420w/cm	制限因子 試料中心温度																
	<table border="1"> <tr><td>T₈</td><td>50℃</td></tr> <tr><td>T₇</td><td>63℃</td></tr> <tr><td>T₆</td><td>132℃</td></tr> <tr><td>T₅</td><td>217℃</td></tr> <tr><td>T₄</td><td>253℃</td></tr> <tr><td>T₃</td><td>710℃</td></tr> <tr><td>T₂</td><td>746℃</td></tr> <tr><td>T₁</td><td>1042℃</td></tr> <tr><td>T₀</td><td>2525℃</td></tr> </table>	T ₈	50℃	T ₇	63℃	T ₆	132℃	T ₅	217℃	T ₄	253℃	T ₃	710℃	T ₂	746℃	T ₁	1042℃	T ₀	2525℃
T ₈	50℃																		
T ₇	63℃																		
T ₆	132℃																		
T ₅	217℃																		
T ₄	253℃																		
T ₃	710℃																		
T ₂	746℃																		
T ₁	1042℃																		
T ₀	2525℃																		
キャプセル健全性の総合評価	<p>Q_{max} = 420w/cm に対して試料中心温度で制限される。</p> <p>各部材の強度は十分である。</p>																		
照射条件ねらい	Q _d の値	322w/cm	Q _{max} /Q _d $\frac{420}{322} = 1.31$																

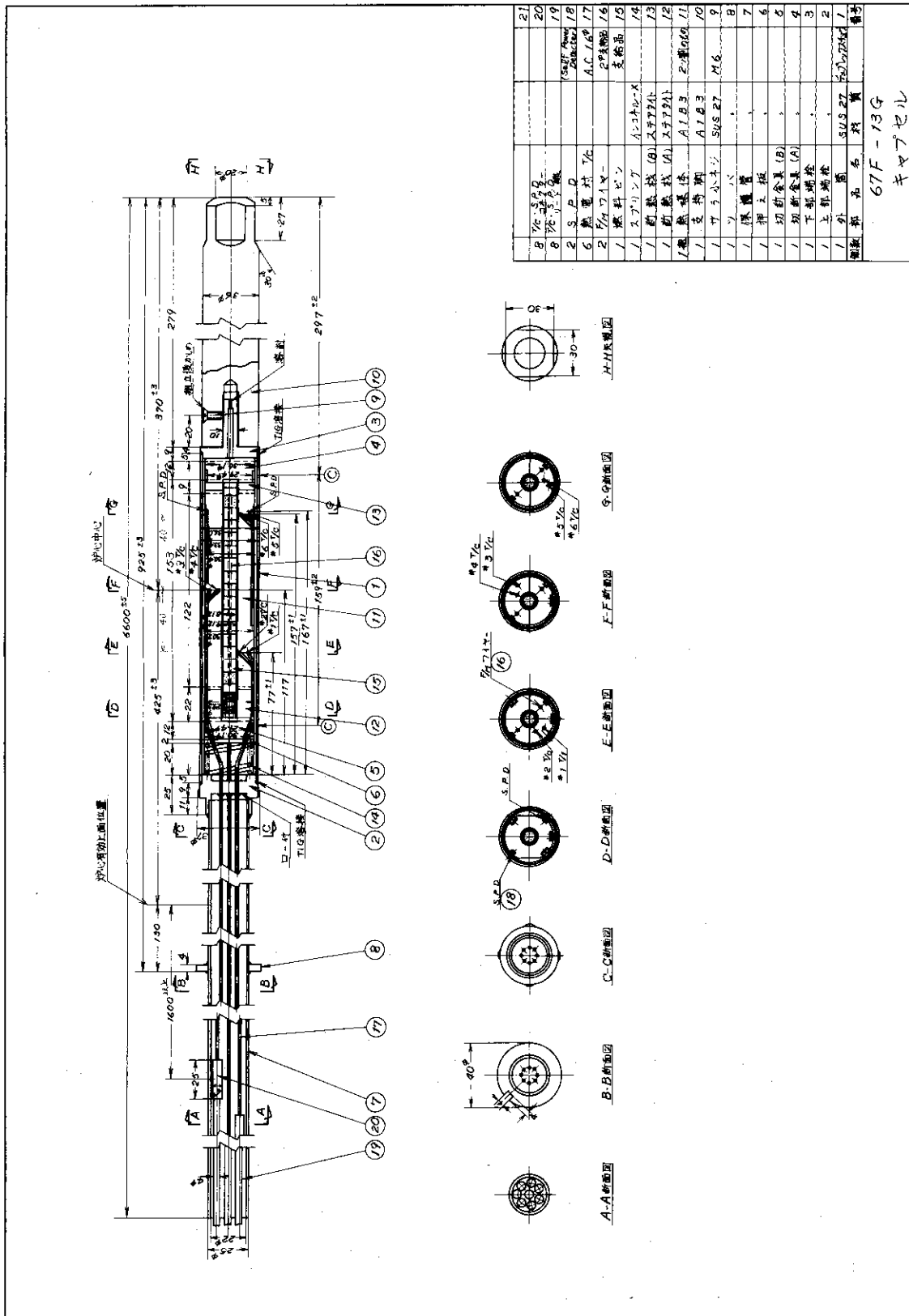


図 1.3.6 67F-13G キャブセル組立図

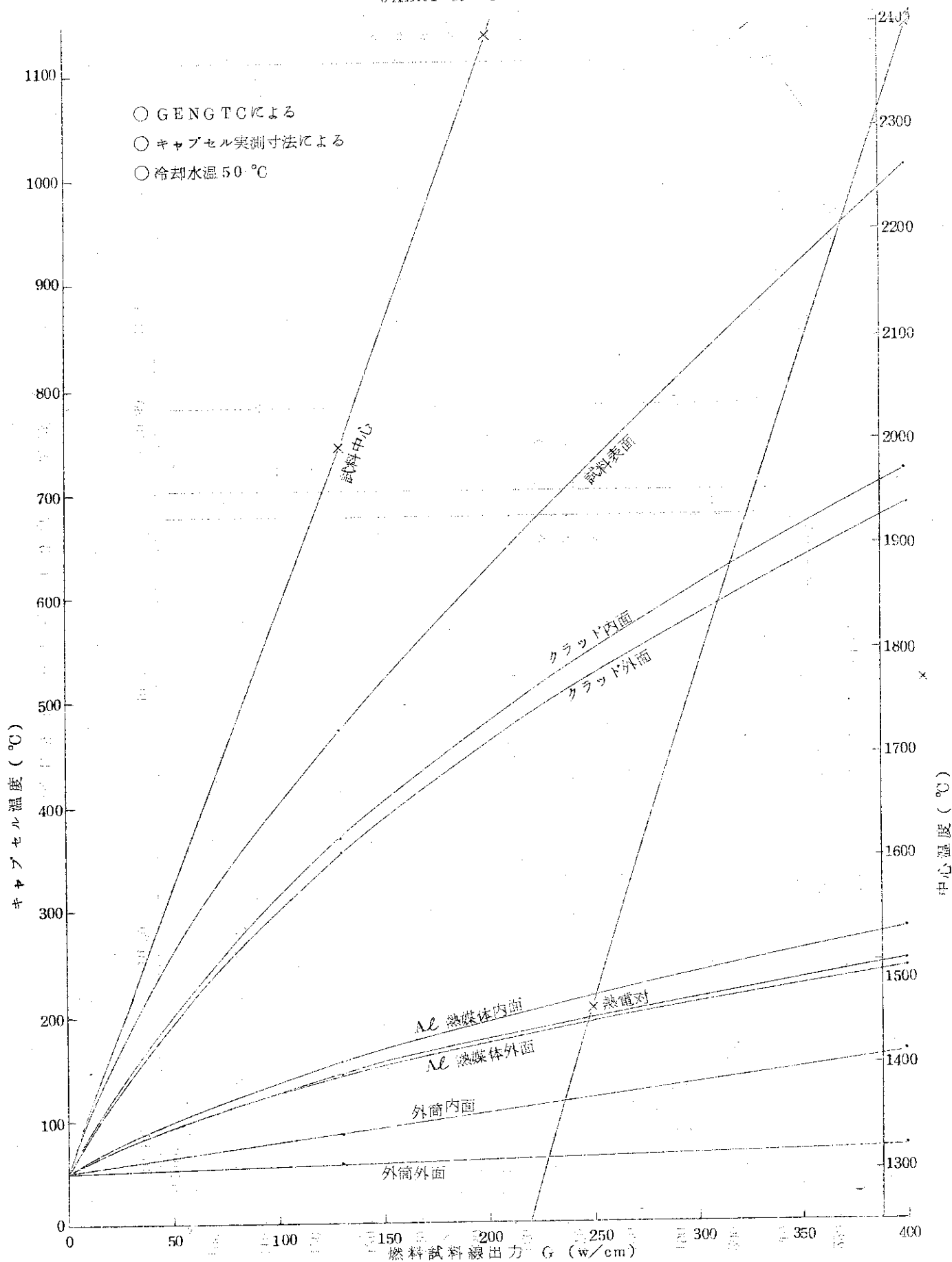
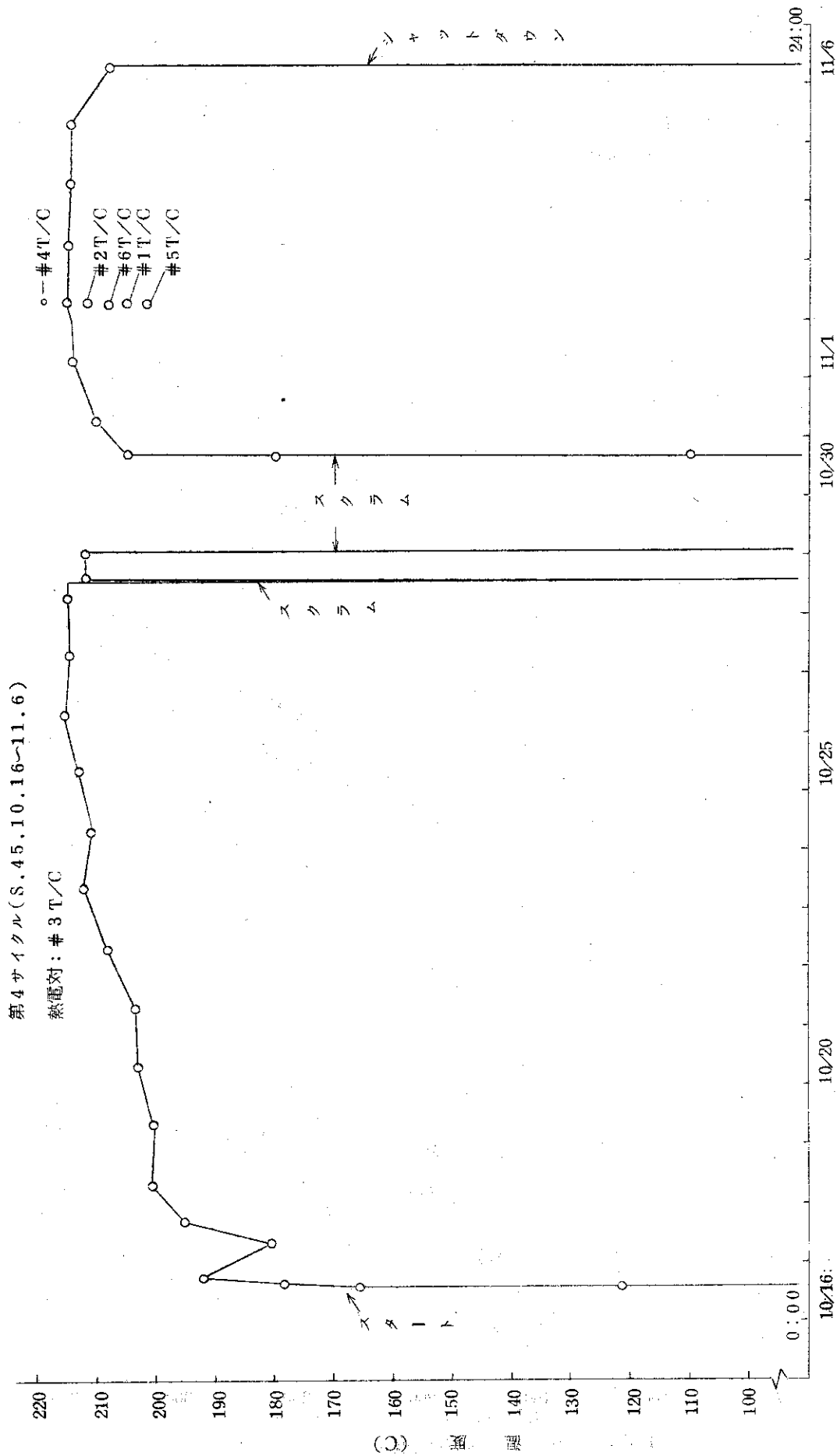


図 1.37 キャプセル内温度分布

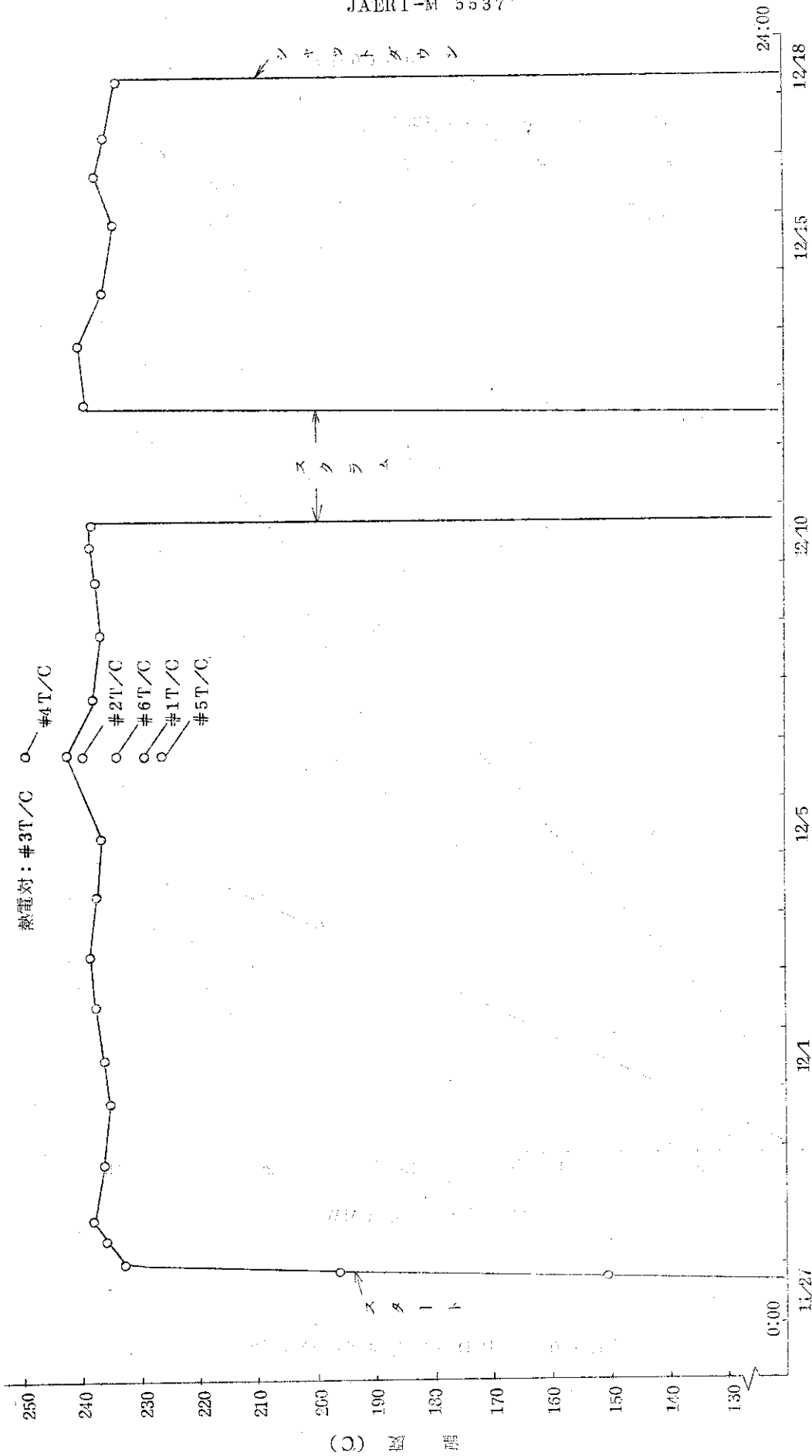


月 日

図 1.38 67F-13G 照射温度

第5サイクル(S.45.11.27~12.18)

熱電対: #3T/C
#4T/C
#2T/C
#6T/C
#1T/C
#5T/C



月日

図 1.3.9.67F-1.3.G 照射温度

(C) 図 冊

第4サイクル開始時(10月16日)

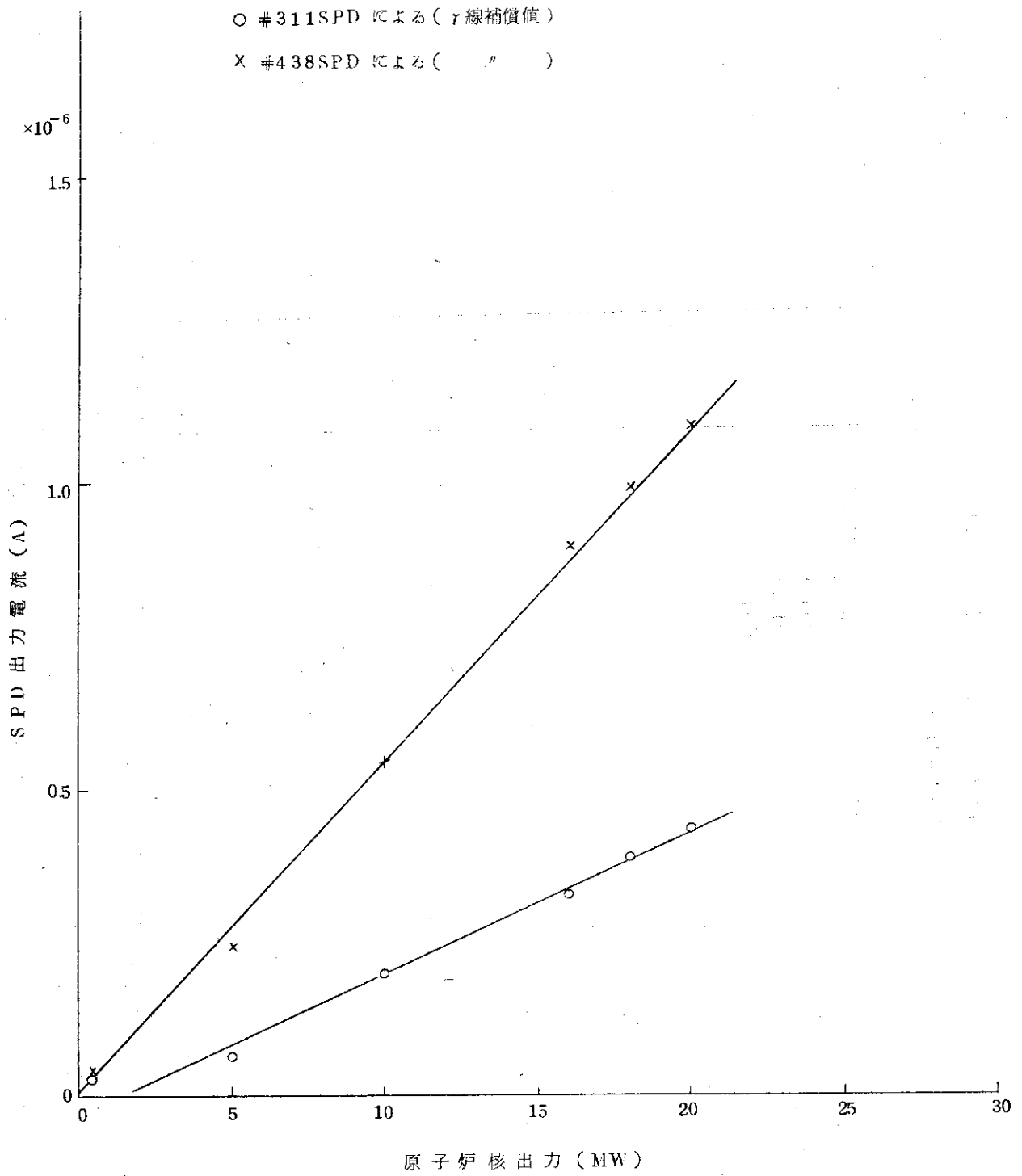


図 1.40 SPD出力と原子炉核出力

第4サイクルスクラム再起動時

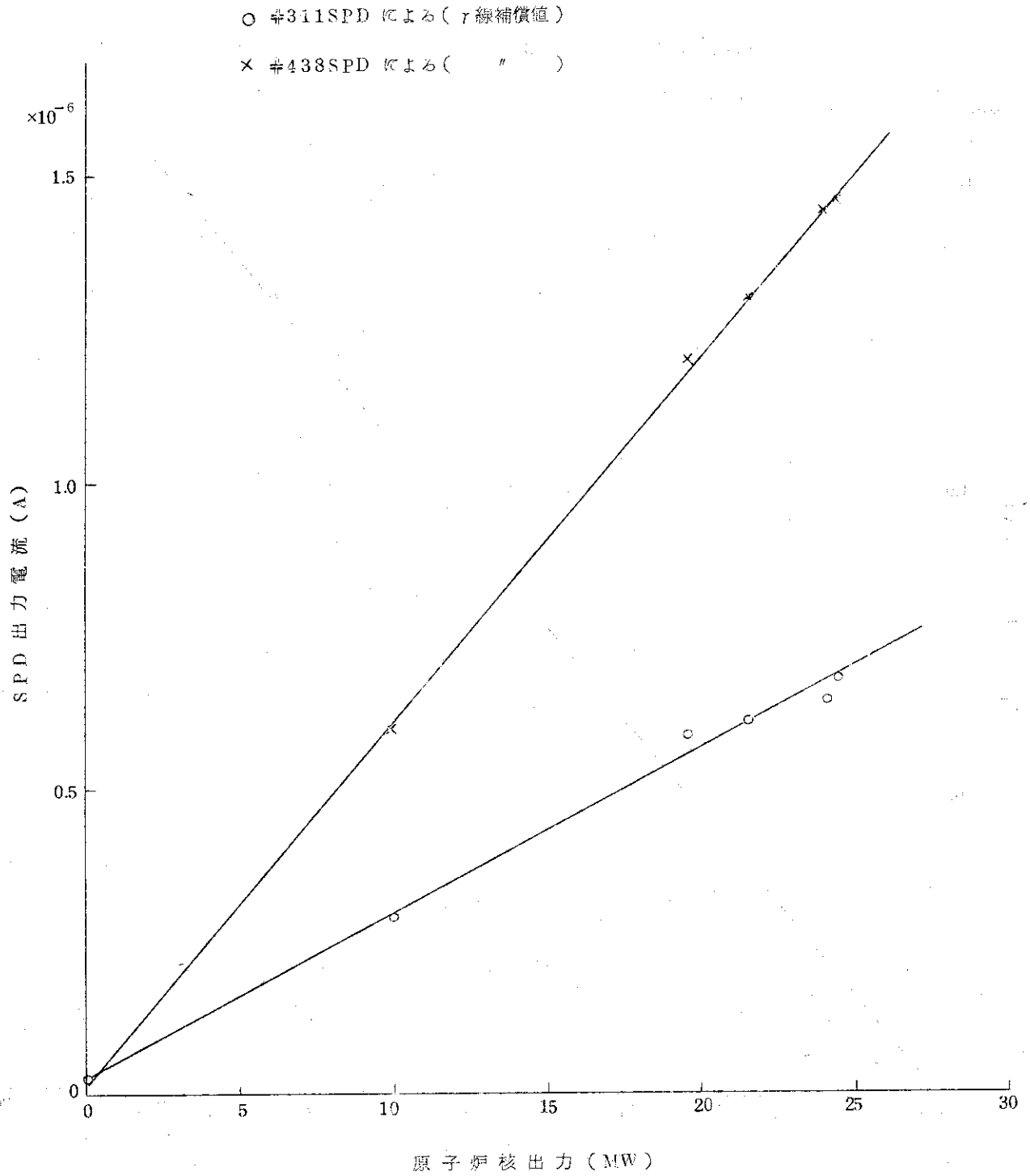


図1.4.1 SPD出力と原子炉核出力

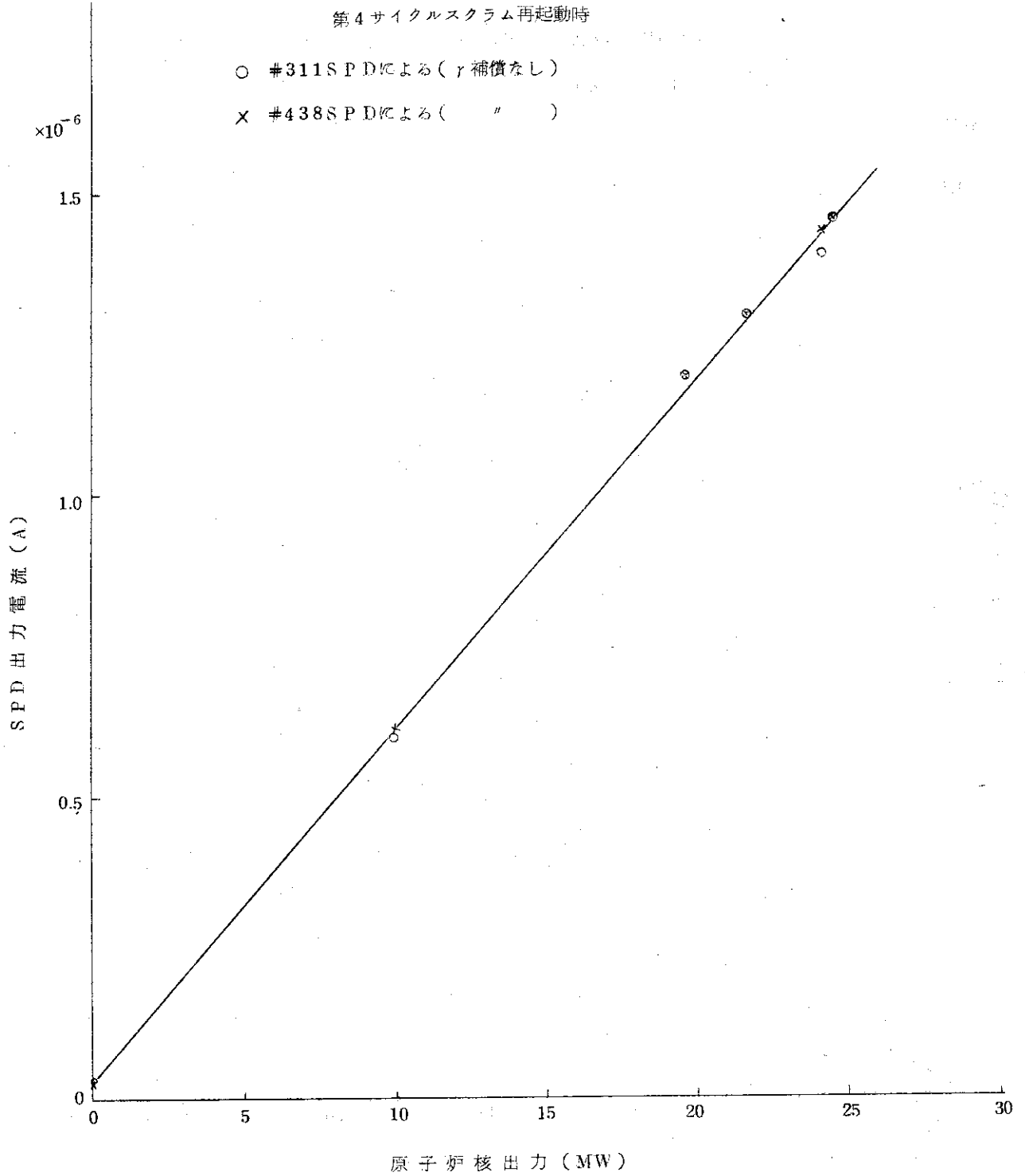


図 1.4 2 SPD出力と原子炉核出力

検討メモ 1.3

○キャプセル線出力

表 1.

Q _G (w/cm)	日時/サイクル	熱電対番号	備考
348	11月2日 9:20 / 4	#3	原子炉熱出力
406	12月6日 17:17 / 5	#3	原子炉熱出力 30.8MW

○その他のデータ

① S.P.D. による測定結果

本キャプセルには2本のS.P.D. (γ線補償型:仏SODERN社製)を軸対称位置に装着して測定を行った。

図1.40に第4サイクル開始時の原子炉核出力とS.P.D.出力との関係, 図1.41, 図1.42には炉スクラム後再起動時の関係を示す。いずれも直線関係となり核出力と比例関係にあることを示す。しかし中性子束との対応をつけて測定するには, 精度よく較正する必要があり, それは今後の問題となる。

② 計測線の導通・絶縁抵抗

第4, 5サイクル炉運転前後に熱電対の導通・絶縁抵抗, S.P.D.の絶縁抵抗を測定した。その結果を下表に示す。

熱電対については測定に支障ある変化はなかったが, S.P.D.については測定電流値からみると, 多少小さいと考えられる。

熱電対の導通・絶縁抵抗

測定時期	#1T/C	#2T/C	#3T/C	#4T/C	#5T/C	#6T/C	測定場所
第4サイクル炉運転前	90	90	89	89	89	89	計測盤端子
	—	—	—	—	—	—	〃
第4サイクル炉運転後	84	84	84	84	83	84	照射制御室接続盤
	1.5	1.1	1.9	1.2	1.8	2.2	〃
第5サイクル炉運転前	82	82	82	82	81	82	〃
	0.3	0.1	0.25	0.1	2.5	0.4	〃
第5サイクル炉運転後	84	84	84	84	83	83	〃
	0.3	0.05	0.1	0.05	0.3	0.1	〃

上段: 導通抵抗(Ω) (テスターによる)

下段: 絶縁抵抗(MΩ) (500VDCメガーによる)

S.P.D. の絶縁抵抗〔M Ω 〕

測定時期	#1 (No. 438)		#2 (No. 311)		測定場所
	A	B	A	B	
第4サイクル炉運転前	—	—	—	—	S.P.D. 計測装置入力端子
第4サイクル炉運転後	1.5	1.7	1.8	5.0	"
第5サイクル炉運転前	—	—	—	1.0	"
第5サイクル炉運転後	0.6	0.25	∞	0.8	"

A : Hh と接続している芯線

B : r 線補償用芯線

1.10 67F-14G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-14G		
照射計	試料提供者	東芝中央研究所 (責任者 富島 広, 担当者 津久井一茂)		
	試料	ペレット	材 質	天然 UO_2 ペレット
			形 状	円柱状ペレット
			寸 法	12.5mm ϕ ×15mm
			数 量	20個
	ペレット・スタック長		300mm	
	被覆管	材 質	SUS27	
		形 状	円筒状	
		寸 法	14.14mm ϕ O.D. × 12.62mm ϕ I.D.	
	燃料ピン全長		380mm	
燃料ピン数量		1個		
照射期間		第5～第7サイクル		
照射試験の目的	1. ヒーターのみによるキャプセルの温度制御特性 2. NaK キャプセルの熱特性 3. 炉側挿入孔の照射特性			
キャプセル設計条件	照射孔	J-12		
	線出力	200w/cm		
	ガンマ発熱	1.5w/g		
	キャプセル構造	NaK 充填 2重計測付キャプセル		
	計 測	熱電対 6本		
	制 御	ヒーター温度制御		
キャプセルの設計	キャプセル構造設計	図 1.4 3 に詳細を示す。		
	熱 設 計	図 1.4 4 に各部温度計算図を示す。		
	強度設計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い個所は 内筒 で	内圧による応力	$\sigma_p = 11.9 \text{ kg/mm}^2$
			熱 応 力	$\sigma_t = 6.3 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 13.5 \text{ kg/mm}^2$
右欄にその計算値を示す	評 価	$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 18.2 \text{ kg/mm}^2$ で十分安全。		
設計において特に留意した事項				
照射データ	照射温度	図 1.4 5, 図 1.4 6, 図 1.4 7 に示す。		
	F/M 測定値			
	ヒーター法による線出力	図 1.4 8, 図 1.4 9 および検討メモ-1.4		

キャプセル名称	67F-14G	キャプセル安全審査資料No		
照射サイクル	5~7			
構造の詳細	DJ-1290-3			
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	設計基準第4条(1) 4.2mmφ孔用標準キャプセル		
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p>			
	<p>制限因子</p> <p>内筒</p>	<p>Q_{max} の値</p> <p>440w/cm</p>	<p>問題の箇所</p> <p>内筒</p>	
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	<p>Q_{max} における温度分布</p> <p>T_8 50°C</p> <p>T_7 65°C</p> <p>T_6 100°C</p> <p>T_5 406°C</p> <p>T_4 433°C</p> <p>T_3 635°C</p> <p>T_2 656°C</p> <p>T_1 818°C</p> <p>T_0 1880°C</p>	<p>強度上の検討</p>	<p>強度上の評価</p> <p>内筒応力</p> <p>膜応力 $\sigma_p = 11.9 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>熱応力 $\sigma_t = 6.3 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>評価</p> <p>430°C に対する SUS27 許容応力 $\sigma_a = 13.5 \text{ kg/mm}^2$ に対して,</p> <p>(1) $\sigma_p = 11.9 \text{ kg/mm}^2 < \sigma_a$</p> <p>(2) $\sigma_p + \sigma_t = 18.2 \text{ kg/mm}^2 < 1.5 \sigma_a = 20.2 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>(※ GEAP4418 参照)</p>	
			<p>強度上の評価</p> <p>許容応力 σ_a の係数 1.5 は安全率が高く、これを越えなければ十分安全である。</p> <p>他の構造部については問題ない。</p>	
キャプセル健全性の総合評価	<p>$Q_{max}/Q_d = 2.2$ でかなり余裕がある。</p>			
照射条件ねらい	<p>Q_d の値</p> <p>200w/cm</p>	<p>Q_{max}/Q_d</p> <p>$\frac{440}{200} = 2.2$</p>		

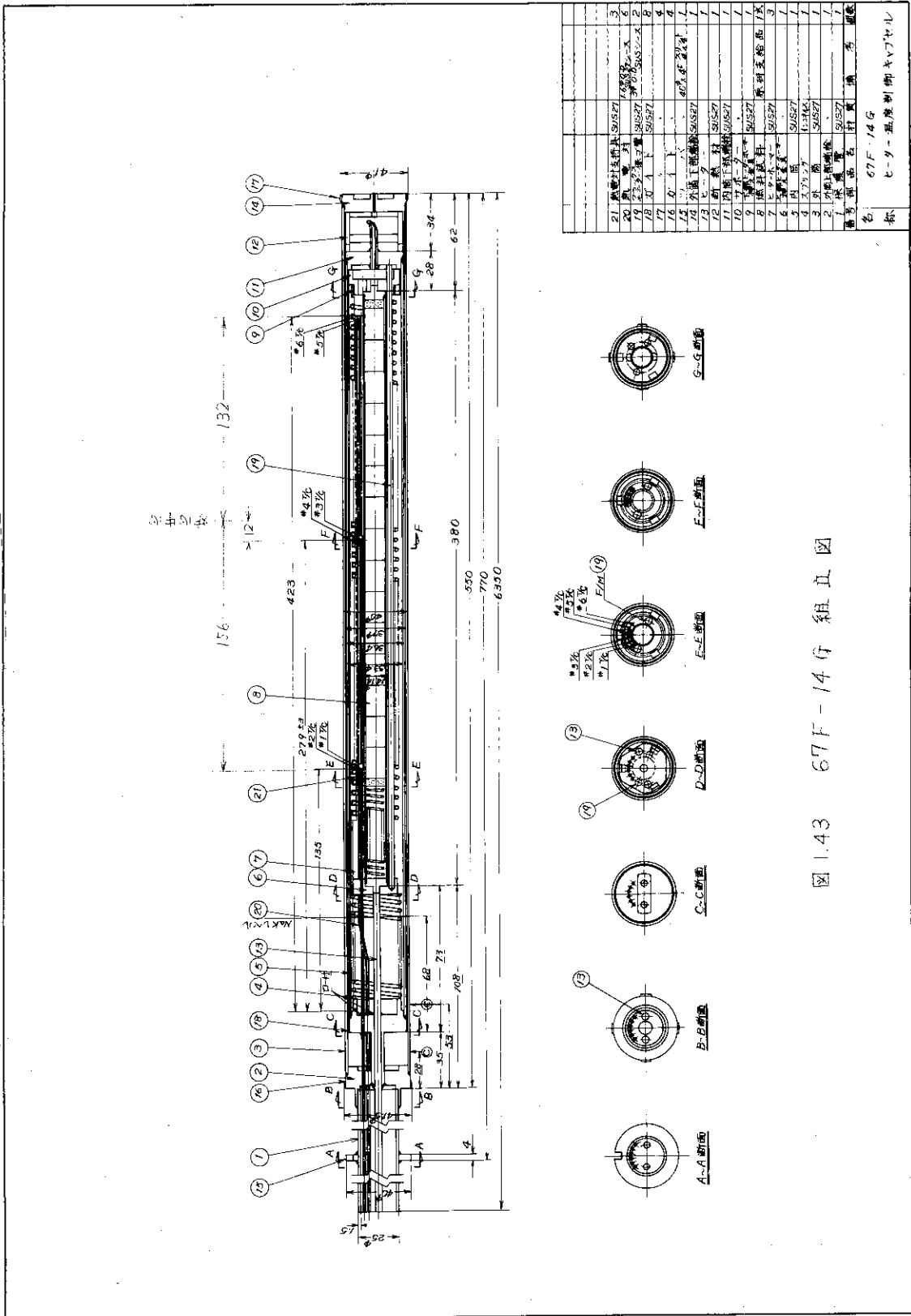


図 1.43 67F-14G 組立図

図 1.43 67F-14G キャパセル組立図

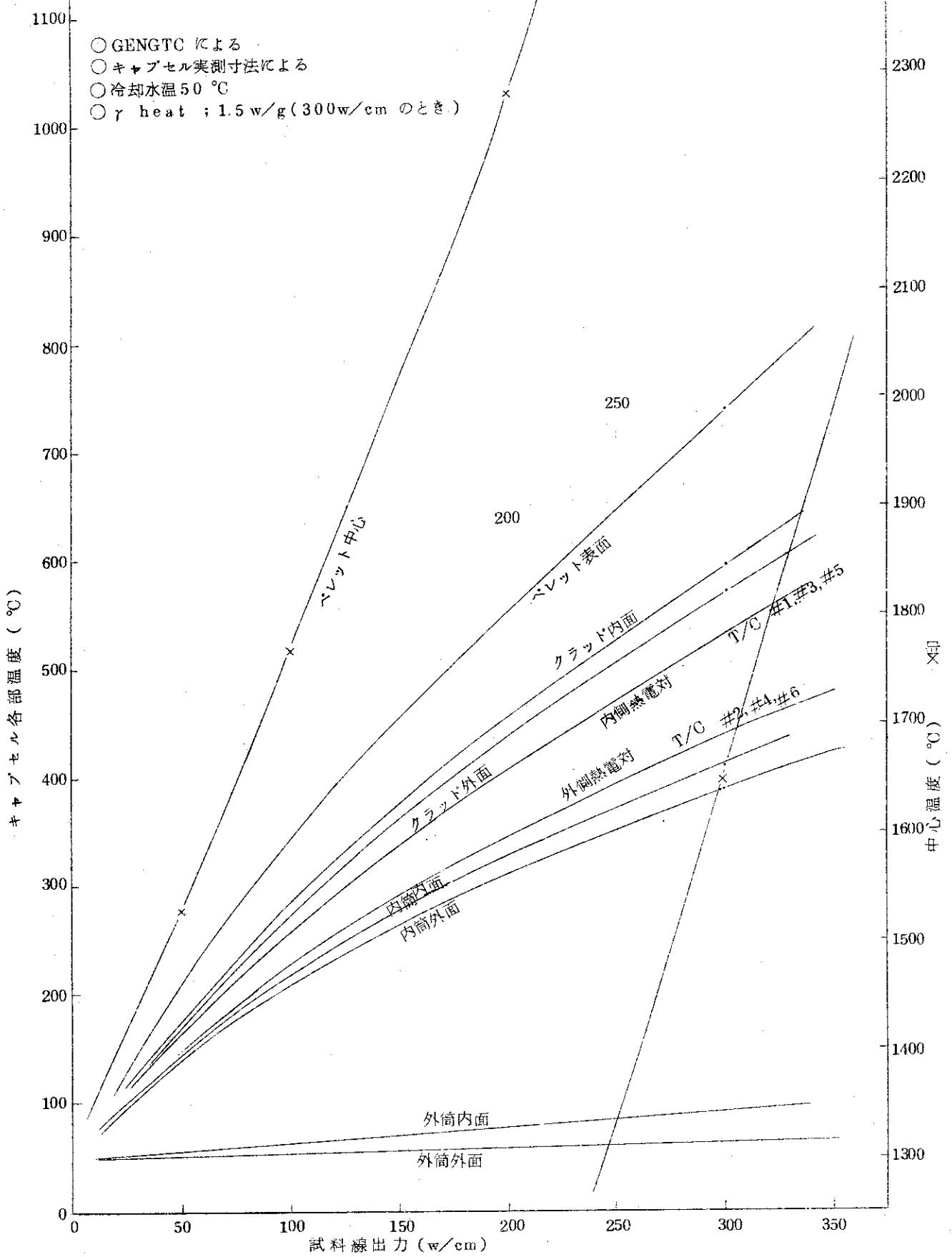
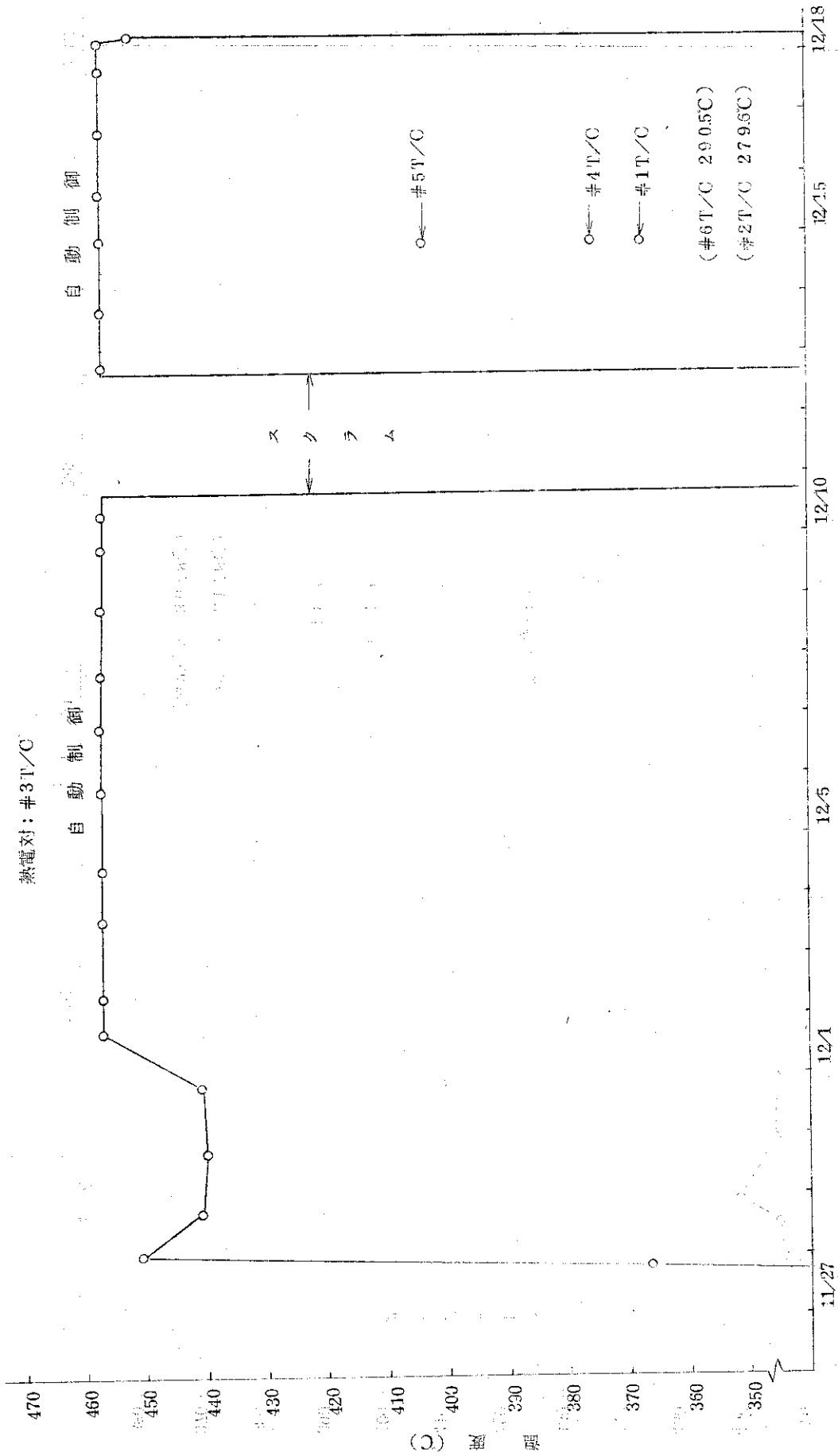


図 1.44 67F-14G 温度分布

第5サイクル(S.45.11.27~12.18)

熱電対: #3T/C



月 日

図 1.4.5 67F-14G 照射温度

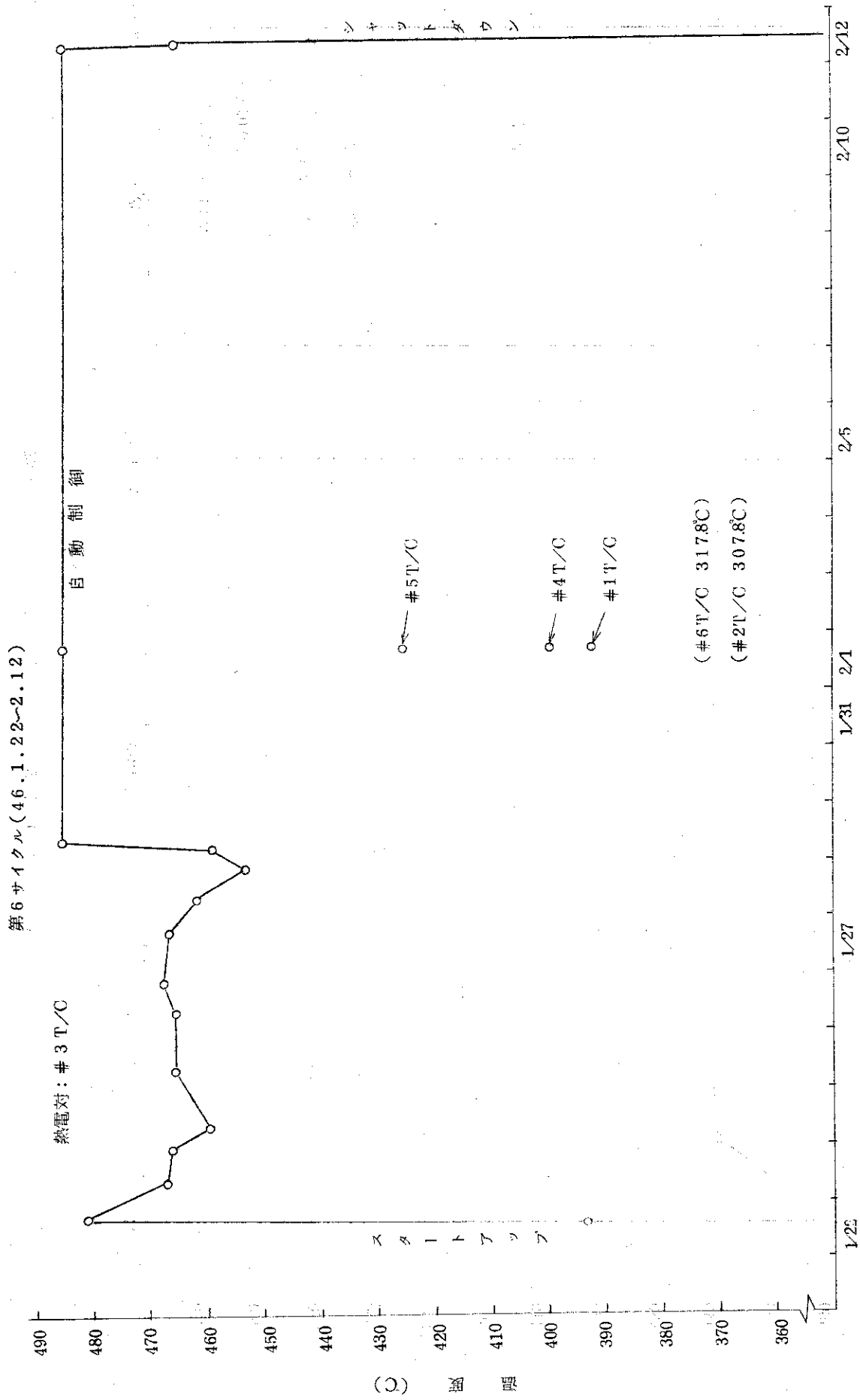


図 1.46.67F-14G 照射温度

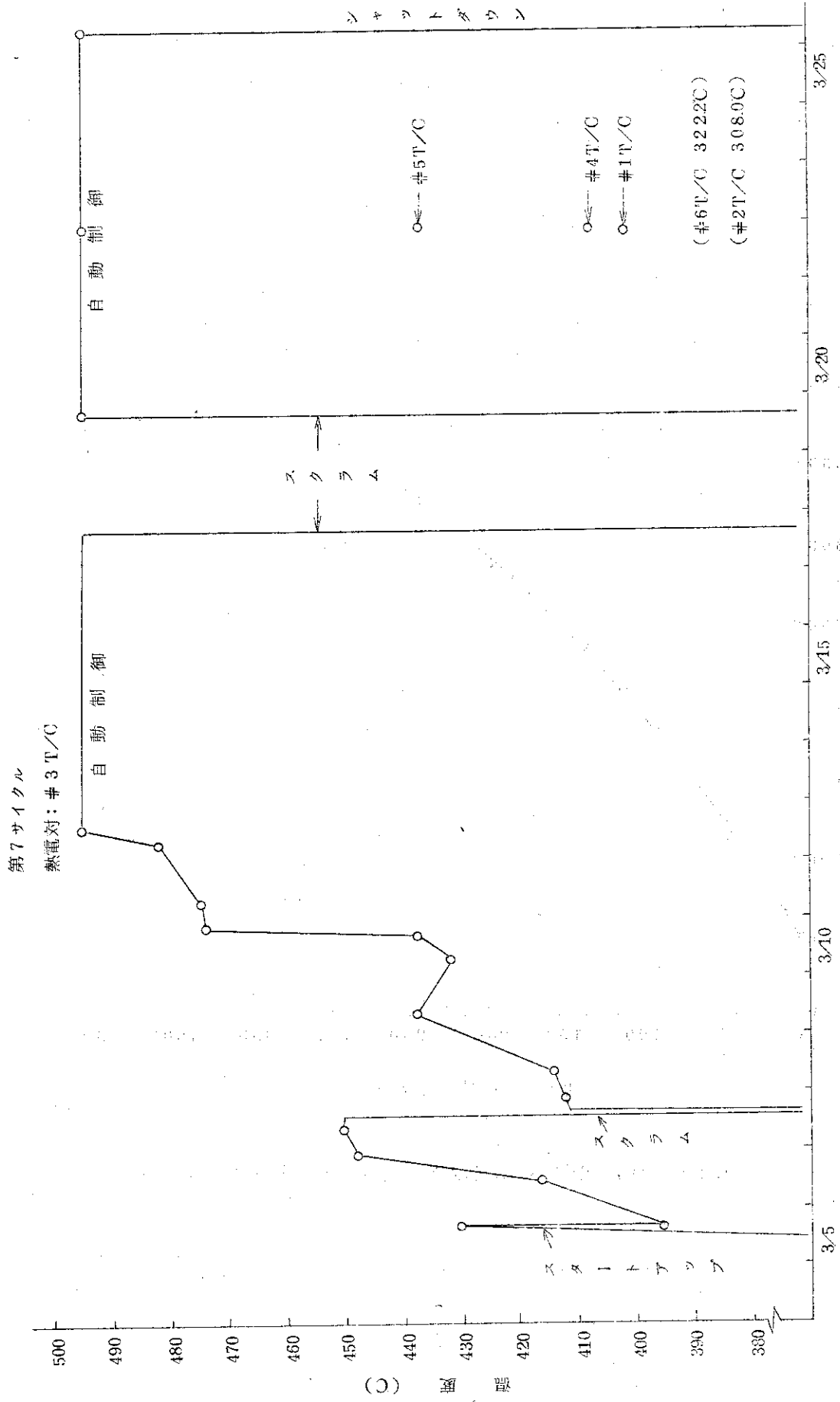


図 1.4.7 67F-14G 照射温度

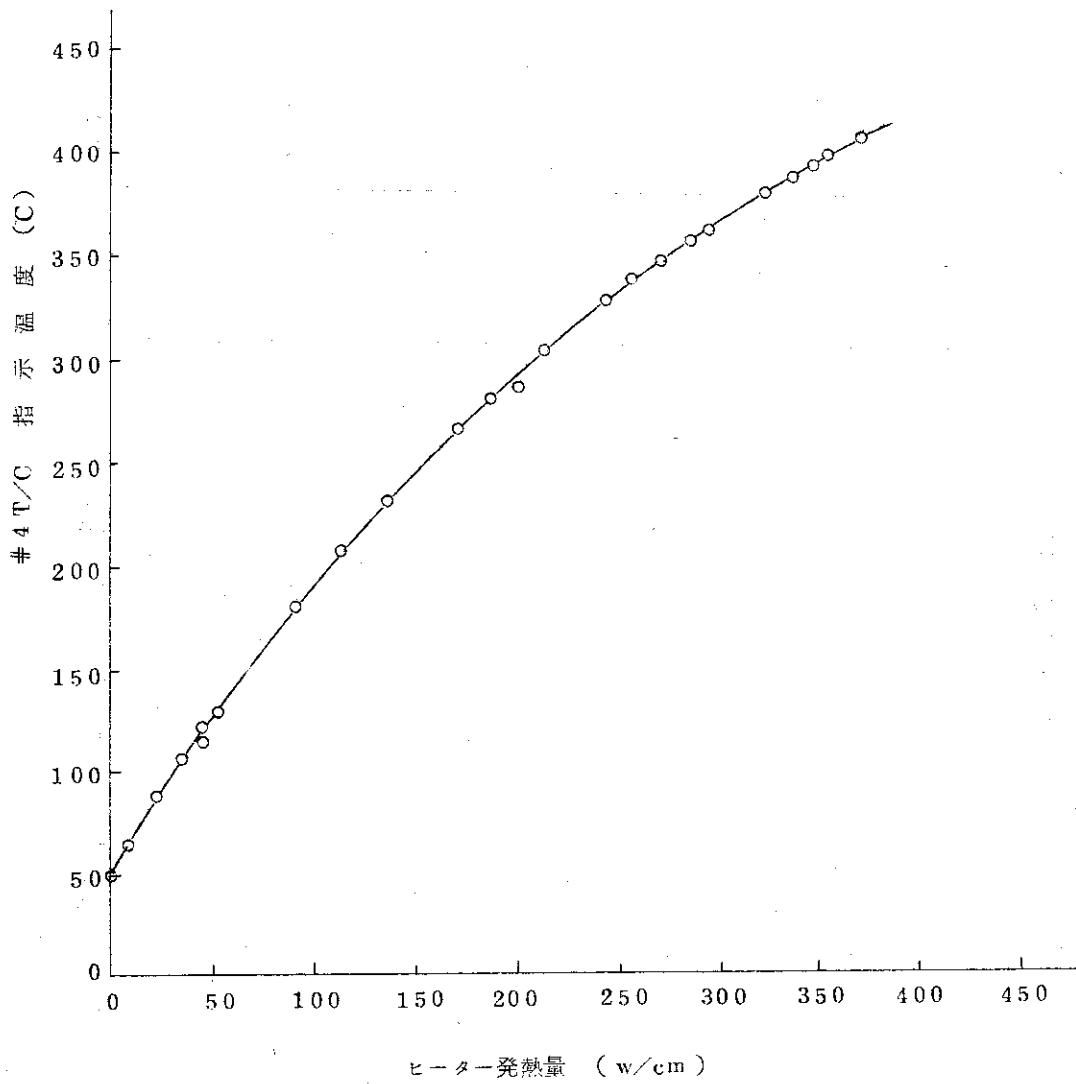


図 1.48 #4 T/C 指示温度と単位長さ当りヒーター発熱量

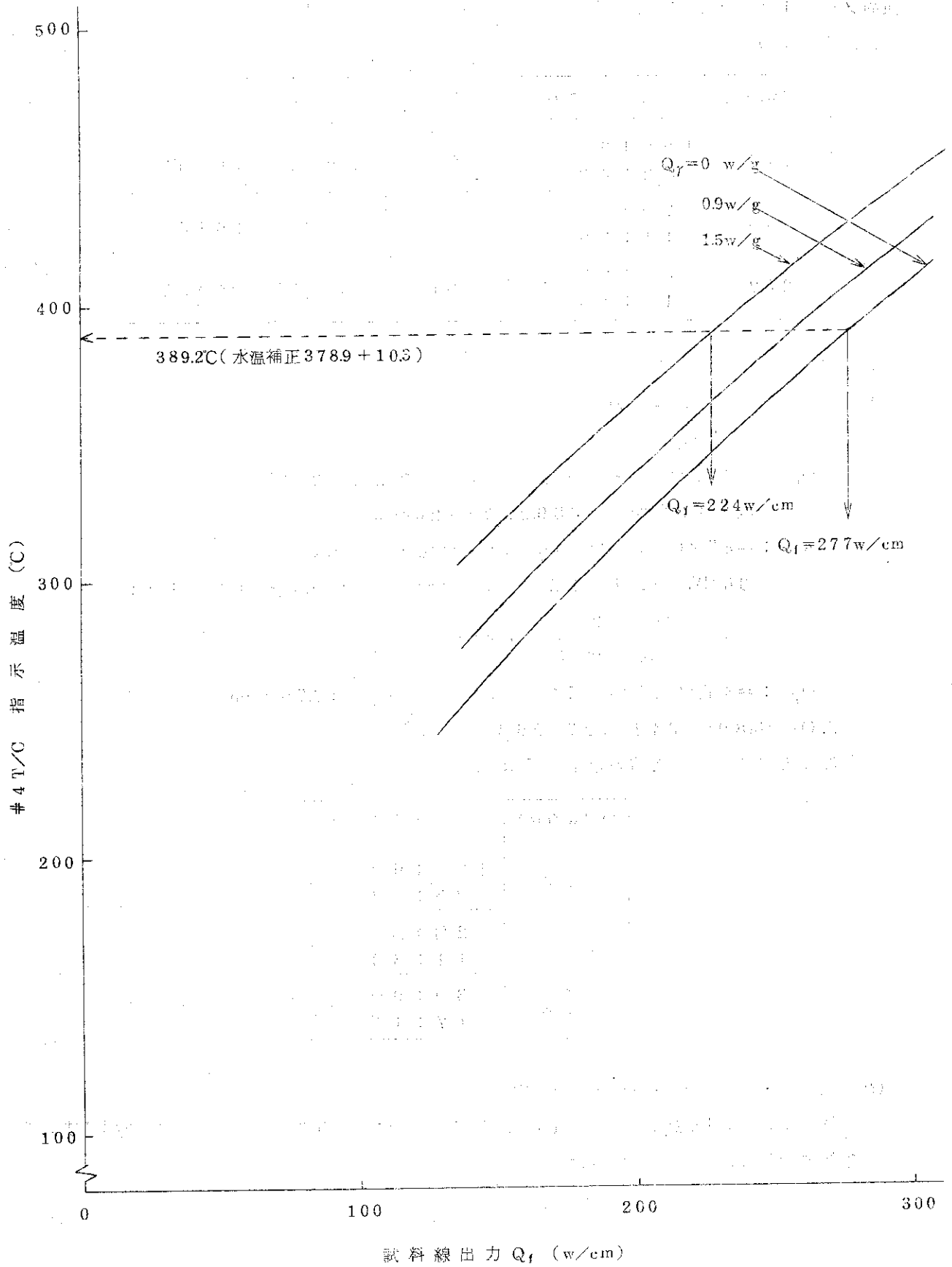


図 1.4 9 ガンマ発熱補正用計算図

検討メモ-1.4 線出力ほか

○線出力 (Q_G)

Q_G (w/cm)	日時/サイクル	熱電対番号	備 考
246	12月16日 23:43 / 5	#4	原子炉熱出力30.7MW
255	2月4日 11:30 / 6	#4	原子炉熱出力30.4MW
272	3月19日 17:15 / 7	#4	原子炉熱出力32.0MW

○その他のデータ

(1) ヒーター法による線出力

$$Q_f = \alpha Q_H - Q_{\gamma i}$$

Q_H : #4 T/Cとヒーター発熱量から求めた発熱量較正值

図1.48参照 389.2°Cで342w/cm

α : #4 T/Cより外側におけるガンマ発熱補正係数

30MW 時の J-12 孔のガンマ発熱量を1.5w/gとして図1.49より

$$\alpha = \frac{Q_{f0}}{Q_{f15}} = \frac{224}{277} = 0.809$$

$Q_{\gamma i}$: #4 T/Cより内側における γ 発熱量 $Q_{\gamma i} = 12.7 \text{ w/cm}$

$$\therefore Q_f = 0.809 \times 342 - 12.7 = 263.9 \text{ w/cm}$$

この方法で得られた結果を下表に示す。

Q_f (w/cm)	日時/サイクル
264	12月16日 23:43 / 5
275	2月4日 11:30 / 6
298	3月19日 17:15 / 7

(2) 熱電対・ヒーターの導通・絶縁抵抗

各サイクルの炉運転前後に測定した結果を次に示す。3サイクルを通じて使用に支障をきたす変化は認められなかった。

測定時期		#1T/C	#2T/C	#3T/C	#4T/C	#5T/C	#6T/C	ヒーター
第5サイクル炉運転前	11/26	108	109	110	108	110	106	8.6
		8.1	19	2.9	24	32	14	∞
" 後	12/22	110	110	110	110	110	108	8.7
		9.0	13	5.0	14	11	10	∞
第6サイクル炉運転前	1/21	108	109	112	109	112	108	9.0
		23	41	16	44	32	27	∞
" 後	2/15	108	110	112	109	112	108	8.9
		18	38	15	42	31	25	∞
第7サイクル炉運転前	3/4	107	109	111	108	111	108	8.9
		14	19	13	21	17	18	∞
" 後	3/29	108	110	112	109	112	108	8.8
		12	16	13	17	15	1.6	∞

上段は導通抵抗 (Ω) テスター

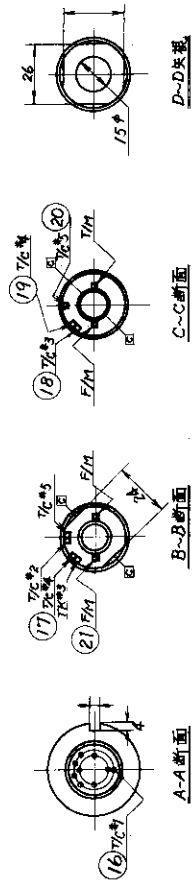
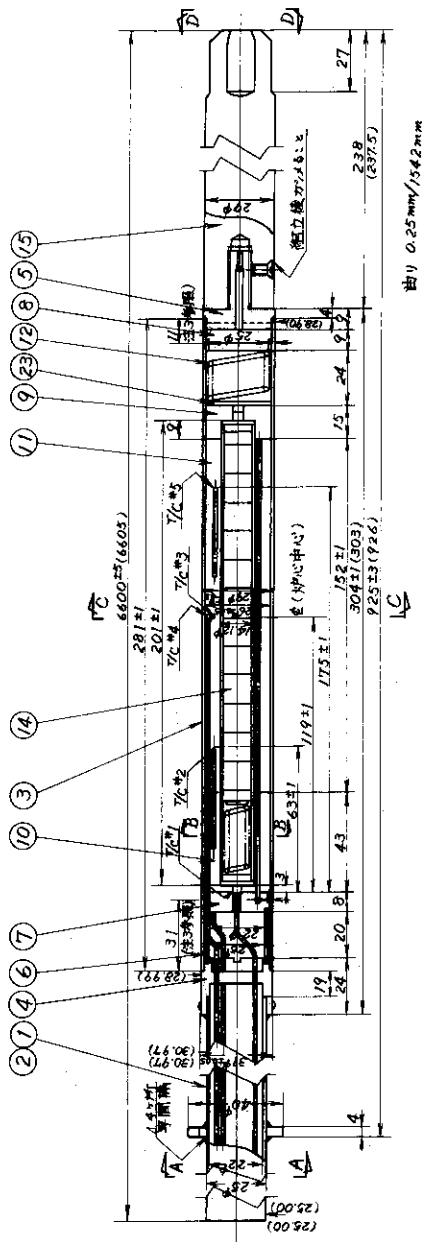
下段は絶縁抵抗 ($M\Omega$) 500VDC メガ

∞ は1000M Ω 以上

1.11 67F-16G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-16G		
照射 計	試料提供者	動力炉・核燃料開発事業団		
	試 料	ペレット	材 質	天然ウランUO ₂ ペレット
			形 状	円柱状ペレット
			寸 法	直径12.5mmφ高さ12.5mm
			数 量	12個
		ペレット・スタック長	150mm	
	被覆管	材 質	SUS-28	
		形 状	円筒形	
		寸 法	内径12.6mmφ肉厚0.75mm	
	燃料ピン全長	200mm		
燃料ピン数量	1本			
照射期間	第4サイクル			
照射試験の目的	1) Aφ 充填1重キャプセルの熱特性調査 2) 照射孔の特性調査 3) 照射試料の照射後観察とF.P. ガス採集			
キャプセル 設計 条件	照射孔	N-9		
	線出力	390w/cm		
	ガンマ発熱	2w/g		
	キャプセル構造	Aφ 熱媒体		
	計 測	C.A. 熱電対 5本		
制 御	なし			
キャプセル の設計	キャプセル構造設計	図1.50にキャプセル組立図を示す。		
	熱 設 計	図1.51に内温度分布を示す。		
	強度設計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い個所は被覆管で右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 2.2 \text{ kg/mm}^2$
			熱 応 力	$\sigma_t = 8.3 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 10.5 \text{ kg/mm}^2$
評 価			$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 10.5$ で強度十分である。	
設計において特に留意した事項	なし			
照射 データ	照射温度	図1.52にサイクル中の温度記録を示す。		
	F/M 測定値			
	線出力	表1.8		

キャプセル名称	67F-16G	キャプセル安全審査資料No.																			
照射サイクル	第4サイクル(02)																				
構造の詳細	図DJ-1291-4 67F-16Gキャプセル承認図																				
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	設計基準第4条(3) 32φベリリウム枠用標準キャプセル																			
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p> <p>燃焼 1サイクル 21 days Qはγ熱を含む。</p>																				
	<p>キャプセルの最高熱負荷と制限因子</p>	<p>Q_{max} の値 510w/cm</p>	<p>制限因子</p>	<p>UO_2 中心温度</p>																	
<p>Q_{max} における温度分布</p>	<table border="1"> <tr><td>T_8</td><td>50°C</td></tr> <tr><td>T_7</td><td>60°C</td></tr> <tr><td>T_6</td><td>126°C</td></tr> <tr><td>T_5</td><td>249°C</td></tr> <tr><td>T_4</td><td>268°C</td></tr> <tr><td>T_3</td><td>588°C</td></tr> <tr><td>T_2</td><td>626°C</td></tr> <tr><td>T_1</td><td>837°C</td></tr> <tr><td>T_0</td><td>2555°C</td></tr> </table>	T_8	50°C	T_7	60°C	T_6	126°C	T_5	249°C	T_4	268°C	T_3	588°C	T_2	626°C	T_1	837°C	T_0	2555°C	<p>Q_{max} における強度上の検討</p> <p>問題の箇所 被覆管</p> <p>被覆管応力</p> <p>膜応力 $\sigma_p = 2.2 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>熱応力 $\sigma_t = 8.26 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>評価</p> <p>650°CにおけるSUS-27の許容応力 $\sigma_a = 10.5 \text{ kg/cm}^2$ (GEAP-4418)</p> <p>イ) $\sigma_p = 2.2 \text{ kg/mm}^2 < 10.5 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>ロ) $\sigma_p + \sigma_t = 10.5 \text{ kg/mm}^2 < 1.5 \sigma_a = 15.7 \text{ kg/mm}^2$</p>	<p>強度上の評価</p> <p>GEAP-4418にSUS-28の許容応力はないが、TRG Report 840(R)によればSUS-27の強度と大差ないので、強度上の検討としてはGEAP-4418のSUS-27の許容応力を用いた。</p>
T_8	50°C																				
T_7	60°C																				
T_6	126°C																				
T_5	249°C																				
T_4	268°C																				
T_3	588°C																				
T_2	626°C																				
T_1	837°C																				
T_0	2555°C																				
キャプセル健全性の総合評価	510w/cmで強度上の問題はないが UO_2 の中心温度が熔融温度を越える恐れがあるので一応この値に決めた。																				
照射条件ねらい	Q_d の値 390w/cm	Q_{max}/Q_d	1.31																		



1	押入板	SUS27	23
2	止のネジ	SUS27	22
3	ワッシャー	7C*5	20
4	ネジ	7C*5	19
5	ワッシャー	7C*5	18
6	ネジ	7C*5	17
7	ワッシャー	7C*5	16
8	ネジ	7C*5	15
9	ワッシャー	7C*5	14
10	ネジ	7C*5	13
11	ワッシャー	7C*5	12
12	ネジ	7C*5	11
13	ワッシャー	7C*5	10
14	ネジ	7C*5	9
15	ワッシャー	7C*5	8
16	ネジ	7C*5	7
17	ワッシャー	7C*5	6
18	ネジ	7C*5	5
19	ワッシャー	7C*5	4
20	ネジ	7C*5	3
21	ワッシャー	7C*5	2
22	ネジ	7C*5	1
23	ワッシャー	7C*5	1

図 1.50 67F-16G キャプセル組立図

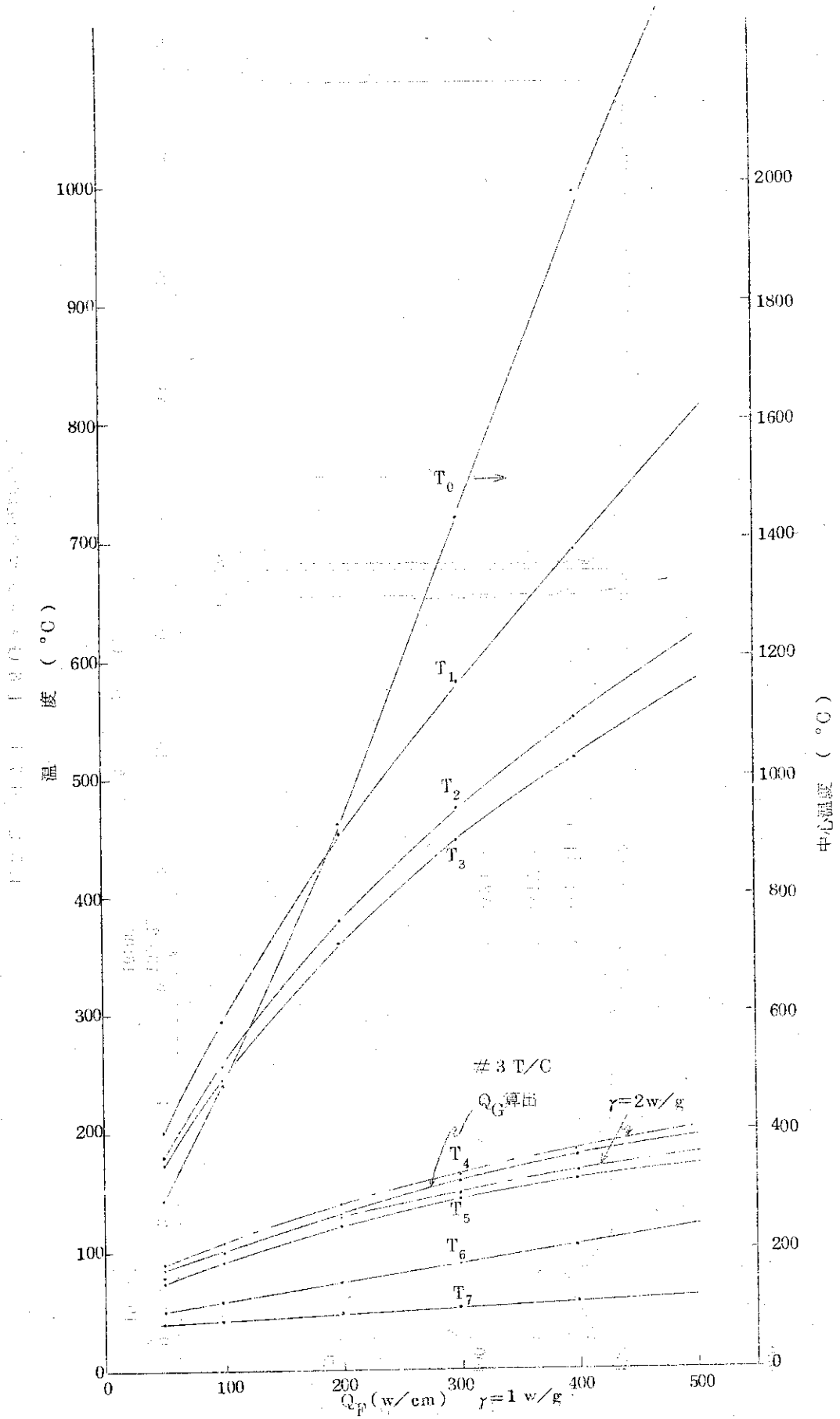


图 1.51 67F-16G 温度分布

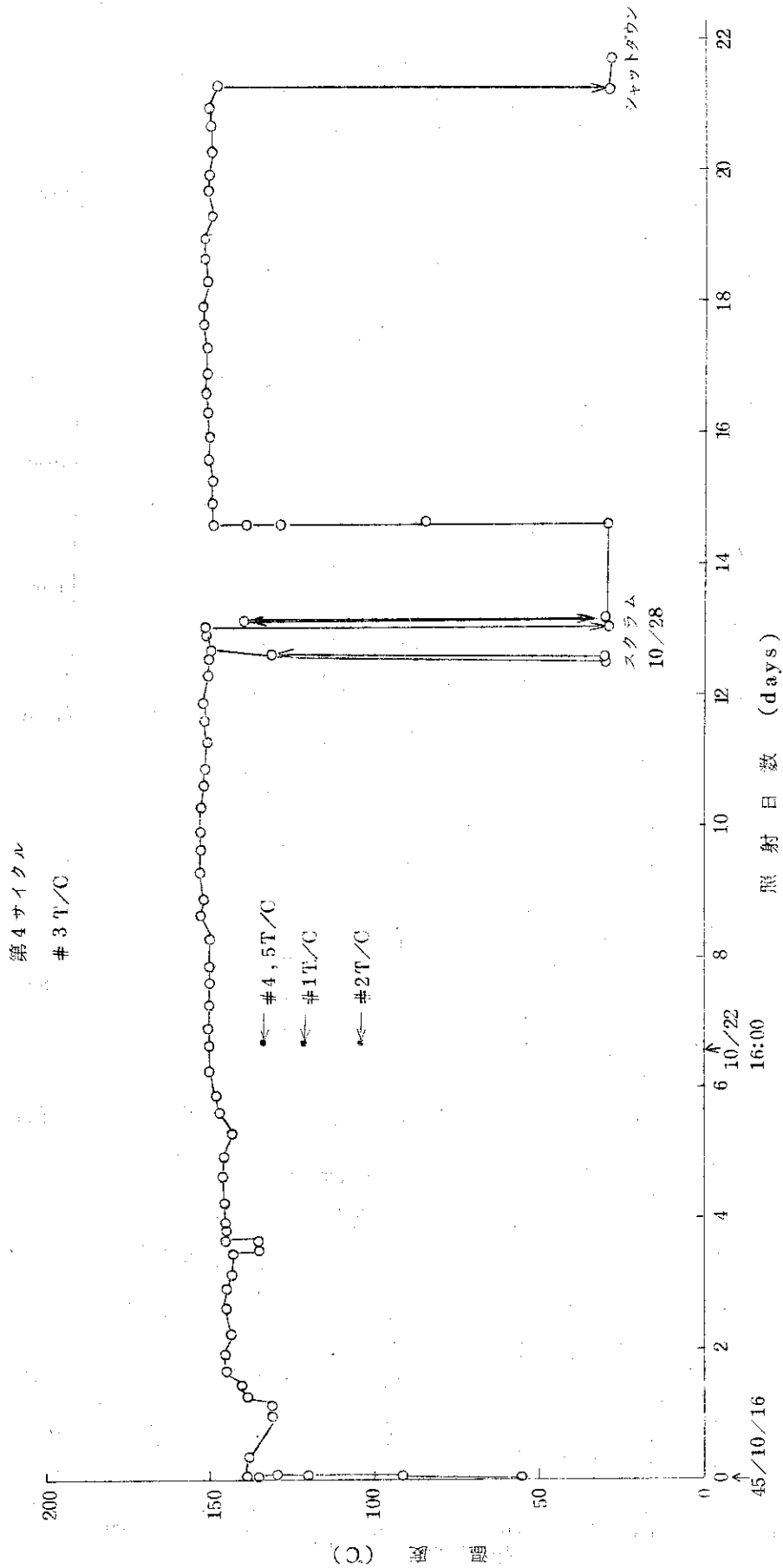


図 1.52 67F-16G キャンプセル温度変化

表 1.8 67F-16G 第4サイクル推定線出力

日付	原子炉熱出力	推定線出力 Q_G	備考
45.10.19 第4日目	24.0MW	282	#3T/C 指示 より算出
10.24 第9日目	25.7 "	310	"
11. 4 第20日目	26.2 "	310	"

1.12 67F-18G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-18G		
照射 計	試料提供者	三菱原子力工業(株)		
	ペレット	材質	UO ₂	
		形状	円柱状 焼結ペレット	
		寸法	10φ×10ℓ	
		数量	12個	
	ペレット・スタック長		120mm	
	被覆管	材質	SUS316	
		形状	継目無管	
		寸法	10.3φ I.D.×11.3φ O.D.	
	燃料ピン全長		161L	
燃料ピン数量		1本		
照射期間		1サイクル(第3サイクル)		
照射試験の目的	1) NaK,ヒータ入り真空温度制御キャプセルの熱特性 2) 炉側挿入孔の照射特性 3) 照射試料の照射後観察 4) 燃焼度の測定			
キャプセル 設計 条件	照射孔	N-9		
	線出力	220w/cm		
	ガンマ発熱			
	キャプセル構造	NaK 熱媒体, 二重キャプセル		
	計測	C-A T/C 4本		
制御	真空温度制御装置			
キャプセル の 設計	キャプセル構造設計	図 1.5 3		
	熱設計	図 1.5 4		
	強度設計 最も強度の弱い個所 は 被覆管 で 右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 3.2 \text{ kg/mm}^2$	
		熱応力	$\sigma_t = 4.8 \text{ kg/mm}^2$	
		許容応力	$\sigma_a = 6.7 \text{ kg/mm}^2$	
		評価	$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_a = 8.0 < 1.5 \sigma_a = 10.1$	
設計において特に留意した事項	・熱出力算出のため, NaK 対流防止のバリアを設けた。 ・熱電対取付方法。			
照射 データ	照射温度	図 1.5 5		
	F/M 測定値			

安全審査（安全審査書類から抜粋）

試験検査結果を反映して、本キャプセルの安全余裕を求めた。その結果は次記の通りである。

(1) 最大熱負荷 $Q_{\max} = 440 \text{ w/cm}$

- (2) 制限条件 (i) UO_2 表面と被覆管内面の両立性
(ii) NaKの温度

- (3) Q_{\max} 時の各部の温度分布

冷却水温度	$T_8 = 50^\circ\text{C}$
外筒外面温度	$T_7 = 72^\circ\text{C}$
外筒内面温度	$T_6 = 121^\circ\text{C}$
内筒外面温度	$T_5 = 575^\circ\text{C}$
内筒内面温度	$T_4 = 604^\circ\text{C}$
被覆管表面温度	$T_3 = 780^\circ\text{C}$
被覆管内面温度	$T_2 = 806^\circ\text{C}$
ペレット表面温度	$T_1 = 1043^\circ\text{C}$
ペレット中心温度	$T_0 = 2580^\circ\text{C}$

- (4) Q_{\max} 時の被覆管強度

- (i) 内圧による応力 $\sigma_p = 320 \text{ kg/cm}^2$
熱応力 $\sigma_t = 480 \text{ kg/cm}^2$
許容応力 $\sigma_a = 670 \text{ kg/cm}^2$

したがって $\sigma_p = 320 < 670 \text{ kg/cm}^2$

$$\sigma_p + \sigma_t = 800 < 1.5 \sigma_a = 1010 \text{ kg/cm}^2$$

- (ii) 膜応力 $\sigma_p = 320 \text{ kg/cm}^2$ に対するクリープ破壊時間は、80000hrであるから十分な余裕がある。

(iii) 評価

- (イ) 最もきびしい条件にある被覆管に対して強度は十分である。
(ロ) 内筒、外筒に対しては強度上問題はない。

- (5) キャプセル健全性の総合評価

$Q_{\max} = 440 \text{ w/cm}$ に対して、最もきびしい被覆管に対して、強度上はなお十分の強度がある。

しかし、 UO_2 表面で 1000°C を越え、両立性に疑問が生ずる。またNaK温度も、沸点に近くなり、一応この点 $Q = 440 \text{ w/cm}$ を最高熱負荷条件とした。

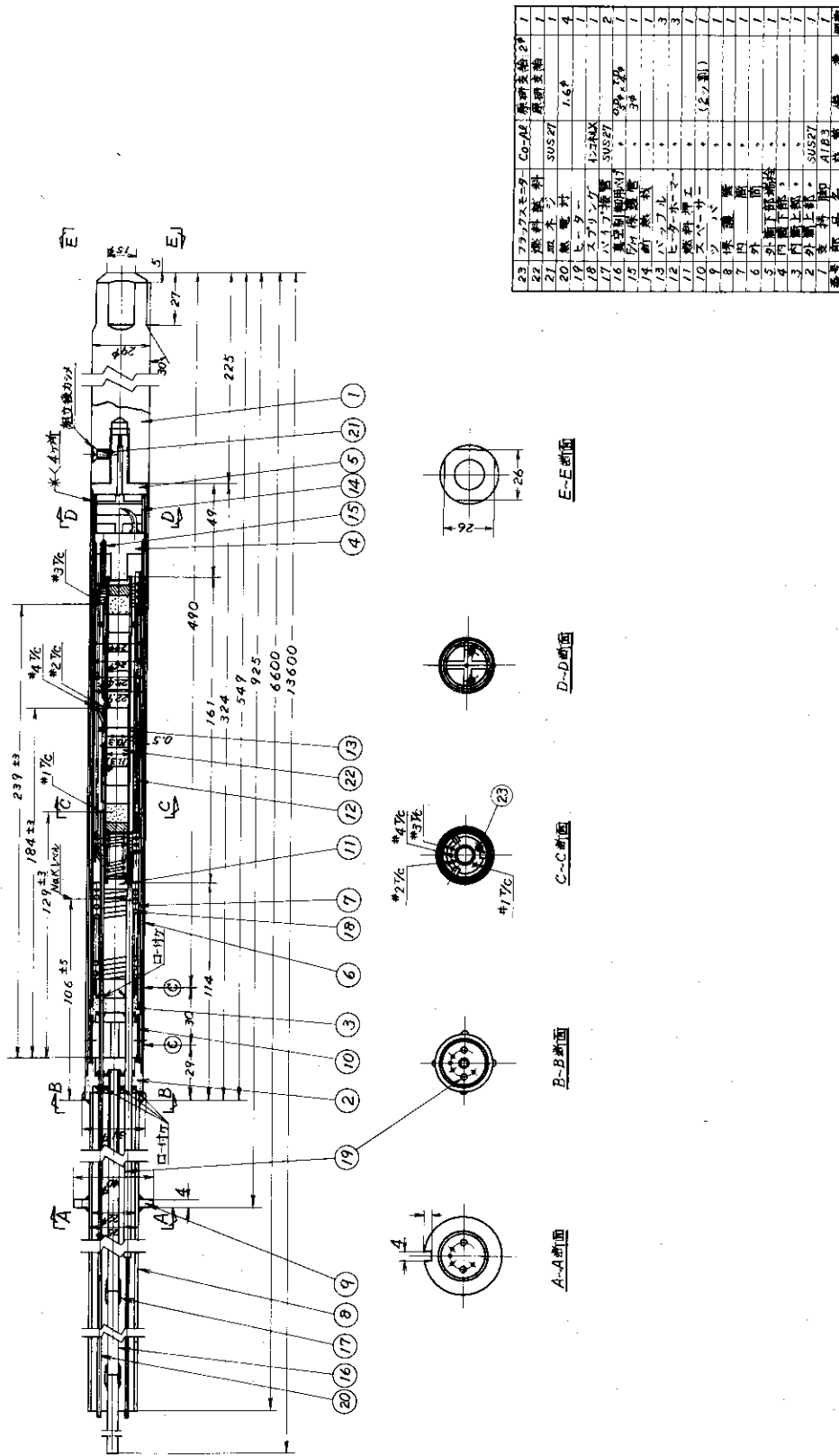
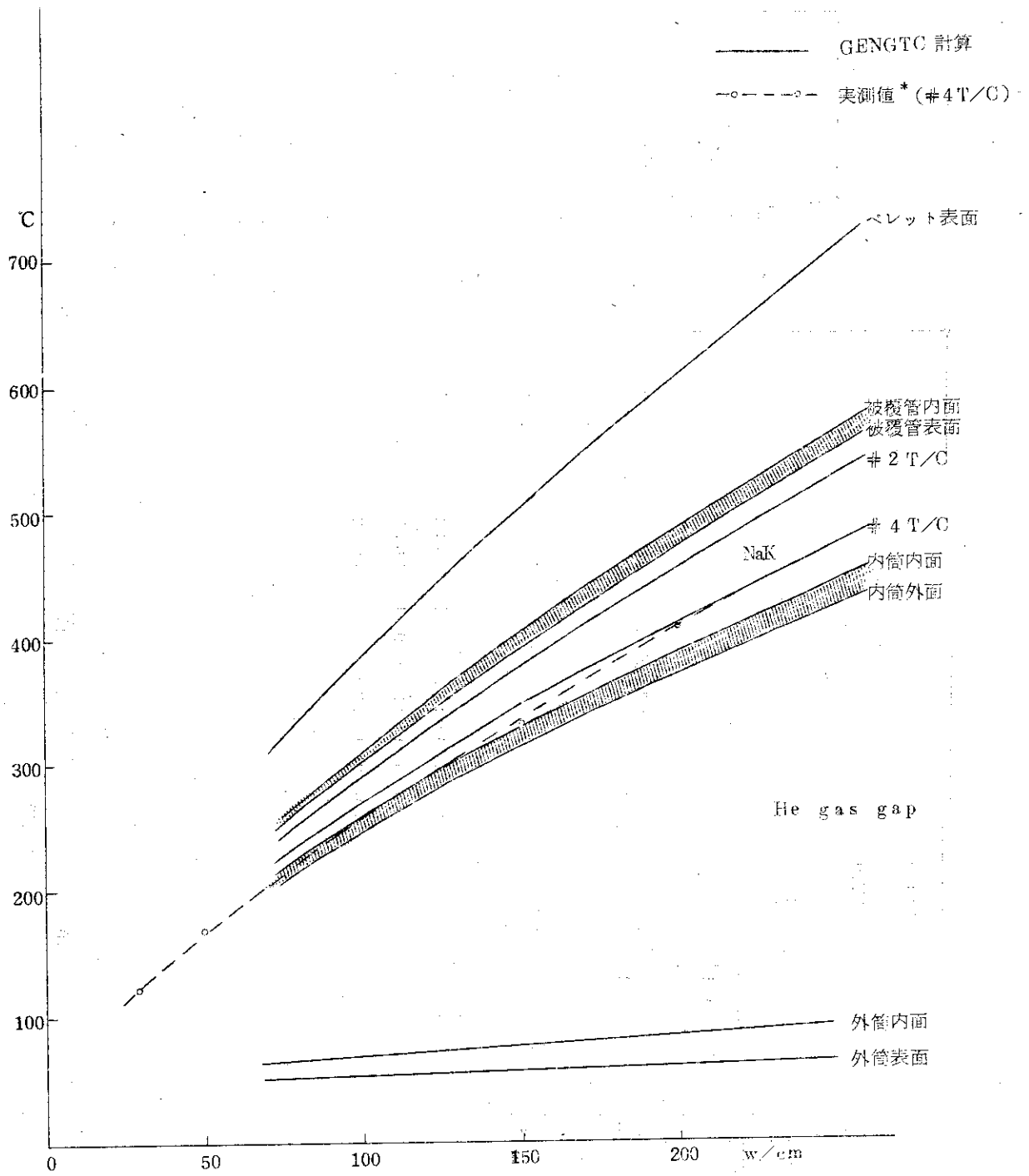


図 1.53 67F-18G キャプセル組立図



*実測値は、ヒータ部分で熱流束が密となり、計算値より温度上昇している条件であることを注意しなければならぬ。

図 1.5 4 67 F - 18 G 温度分布

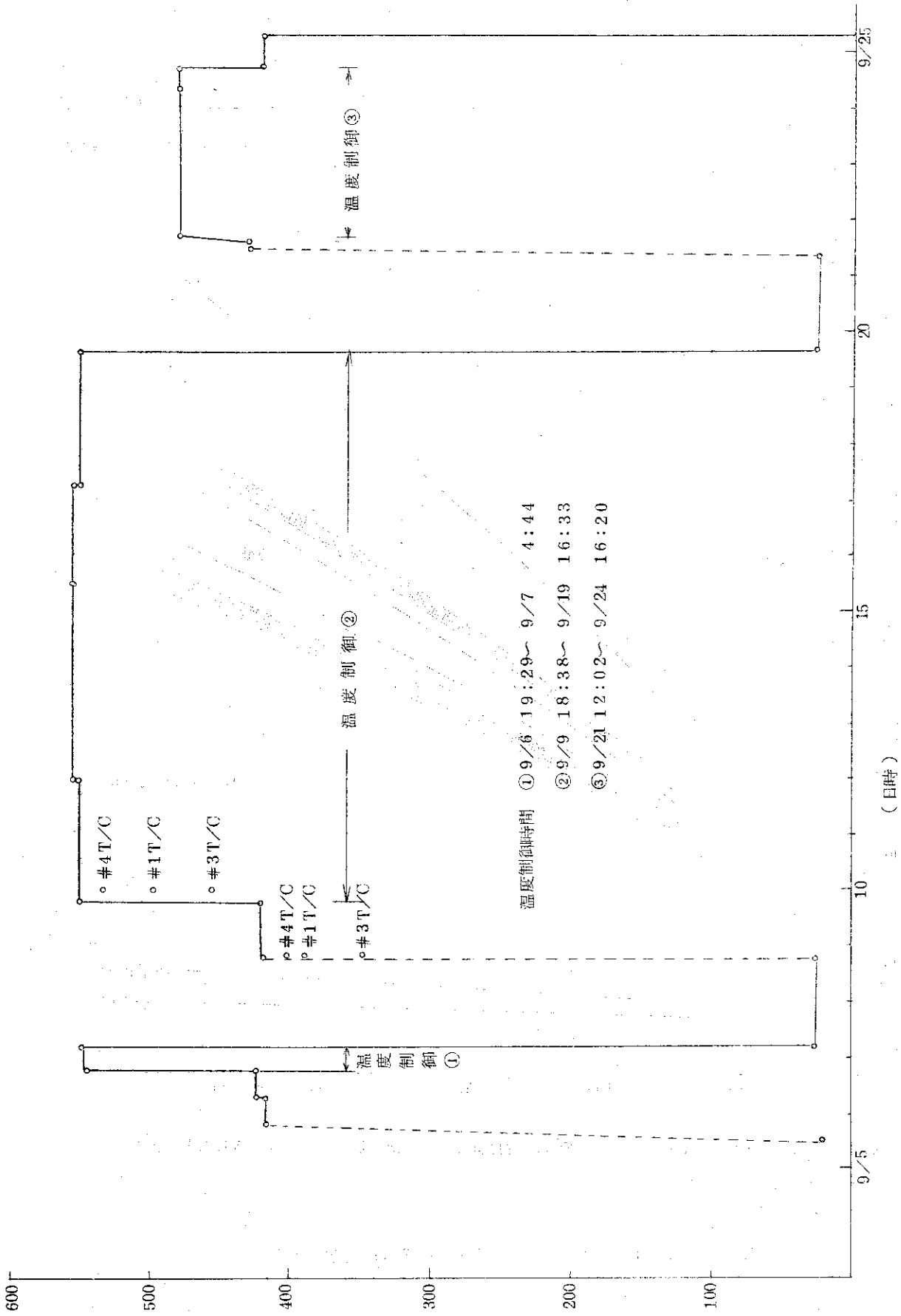


図 1.55 67F-18G 第3サイクル#2T/C 温度記録

1.13 67F-23G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-23G		
照射 計	試料提供者	動力炉・核燃料開発事業団(責任者 天沼 倭)		
	試 料	ペレット	材 質	2.5%PuO ₂ -UO ₂ (Nat)
			形 状	円柱状ペレット
			寸 法	10mmφ×14mm
			数 量	7個
	ペレット・スタック長		98mm	
	被覆管	材 質	z _{ry} -2	
		形 状	円筒状	
		寸 法	10.2mmφ I.D.×0.75mm t	
	燃 料 ピ ン 全 長		150mm	
燃 料 ピ ン 数 量		1個		
照射期間		第10～11サイクル		
画	照射試験の目的	1) ATR用Pu 燃料照射のための経験を得る。		
		2) ATR用Pu 燃料の照射挙動		
キャプセル設計条件	照射孔	D-11		
	線出力	300w/cm		
	ガンマ発熱	0.6w/g		
	キャプセル構造	NaK 充填, Aφ-SUS共引熱媒体二重計測付キャプセル		
	計 測	熱電対 9本		
	制 御	なし		
キャプセルの設計	キャプセル構造設計	図1.56に詳細を示す。		
	熱 設 計	図1.57に各部温度分布計算結果を示す。		
	強 度 設 計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い個所は 被覆管 で右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 2.8 \text{ kg/mm}^2$
			熱 応 力	$\sigma_t = 4.1 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 4.8 \text{ kg/mm}^2$
評 価			$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_a = 6.9 \text{ kg/mm}^2$ で十分安全	
設計において特に留意した事項	熱伝導のよい熱媒体を使用し, z _{ry} -2 被覆管で目標の線出力を達成すること。			
照射データ	照射温度	図1.58, 図1.59に示す。		
	F/M 測定値			
	線出力	表1.9		

キャプセル名称	67F-23G	キャプセル安全審査資料№																				
照射サイクル	10~11																					
構造の詳細	DJ-1396-4																					
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	設計基準第4条4(1)42mmφ孔用標準キャプセル																				
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p> <p>計算の条件</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 冷却水温度 50℃ 2. キャプセル表面熱伝達率 20000kcal/m²h℃ 3. 設計マニュアルによる。 																					
	<p>燃料ペレット (2.5%PuO₂-Nat.UO₂)</p> <p>ガスギャップ(He)</p> <p>被覆管(z_y-2)</p> <p>熱媒体(56/44NaK)</p> <p>内筒(SUS-27)</p> <p>冷却水</p> <p>外筒(SUS27)</p> <p>ガスギャップ(He)</p> <p>熱媒体(AL)</p>																					
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	Q _{max} の値	520w/cm	制限因子	被覆管																		
	<p>Q_{max} における温度分布</p> <table border="1"> <tr><td>T₉</td><td>50℃</td></tr> <tr><td>T₈</td><td>59℃</td></tr> <tr><td>T₇</td><td>116℃</td></tr> <tr><td>T₆</td><td>165℃</td></tr> <tr><td>T₅</td><td>188℃</td></tr> <tr><td>T₄</td><td>237℃</td></tr> <tr><td>T₃</td><td>362℃</td></tr> <tr><td>T₂</td><td>435℃</td></tr> <tr><td>T₁</td><td>714℃</td></tr> <tr><td>T₀</td><td>2552℃</td></tr> </table>	T ₉	50℃	T ₈	59℃	T ₇	116℃	T ₆	165℃	T ₅	188℃	T ₄	237℃	T ₃	362℃	T ₂	435℃	T ₁	714℃	T ₀	2552℃	<p>Q_{max} における強度上の検討</p> <p>問題の箇所</p> <p>被覆管</p> <p>膜応力 $\sigma_p = 2.8 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>熱応力 $\sigma_t = 4.1 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>435℃に対する z_y-2 の許容応力 $\sigma_a = 4.8 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>$\sigma_p = 2.8 \text{ kg/mm}^2 < \sigma_a = 4.8 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>$\sigma_p + \sigma_t = 6.9 \text{ kg/mm}^2 < 1.5 \sigma_a = 7.2 \text{ kg/mm}^2$</p>
T ₉	50℃																					
T ₈	59℃																					
T ₇	116℃																					
T ₆	165℃																					
T ₅	188℃																					
T ₄	237℃																					
T ₃	362℃																					
T ₂	435℃																					
T ₁	714℃																					
T ₀	2552℃																					
キャプセル健全性の総合評価																						
照射条件ねらい	Q _d の値	300w/cm	Q _{max} /Q _d	$\frac{520}{300} = 1.73$																		

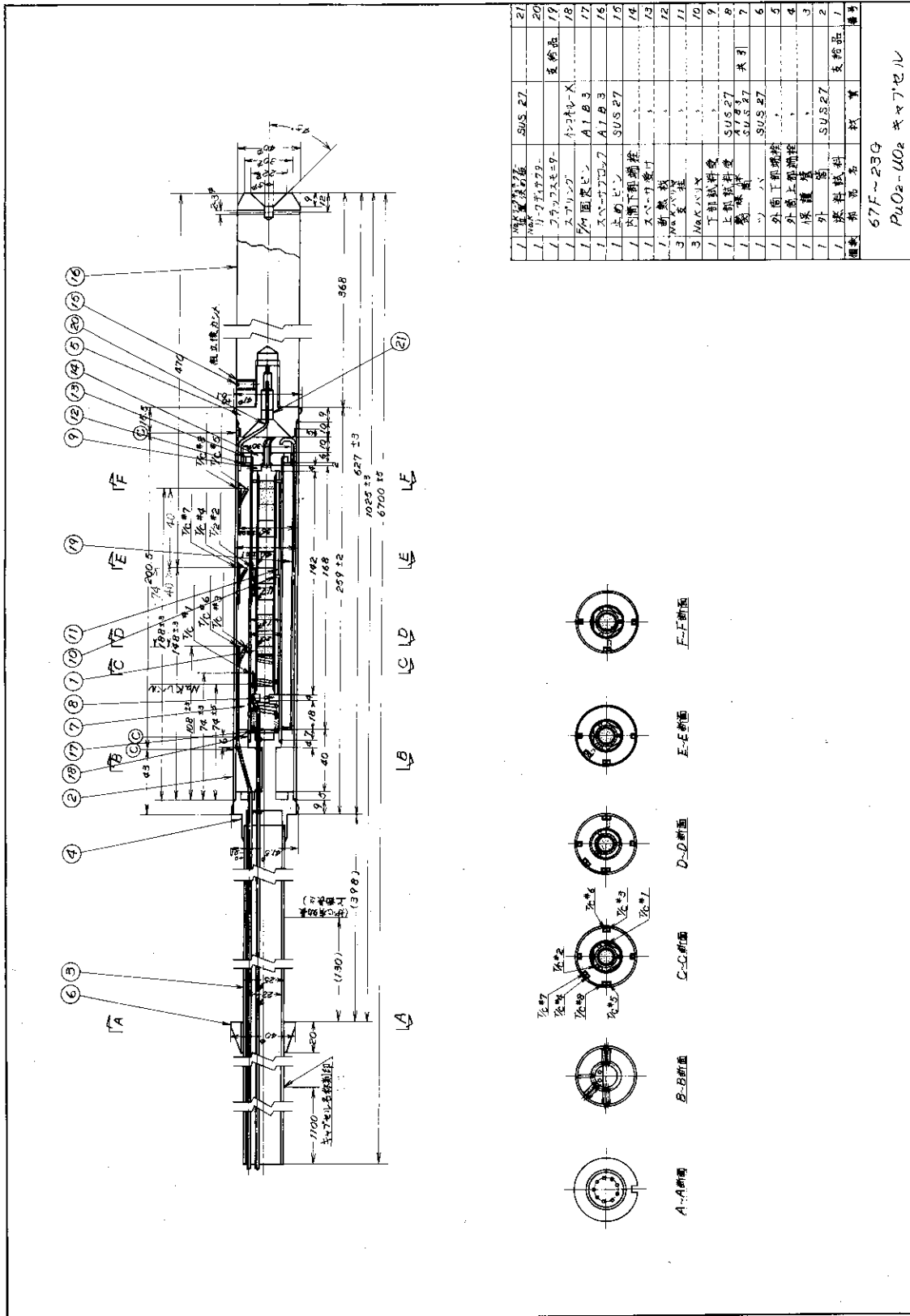


図 1.5.6 67F-23Q キヤドセル組立図

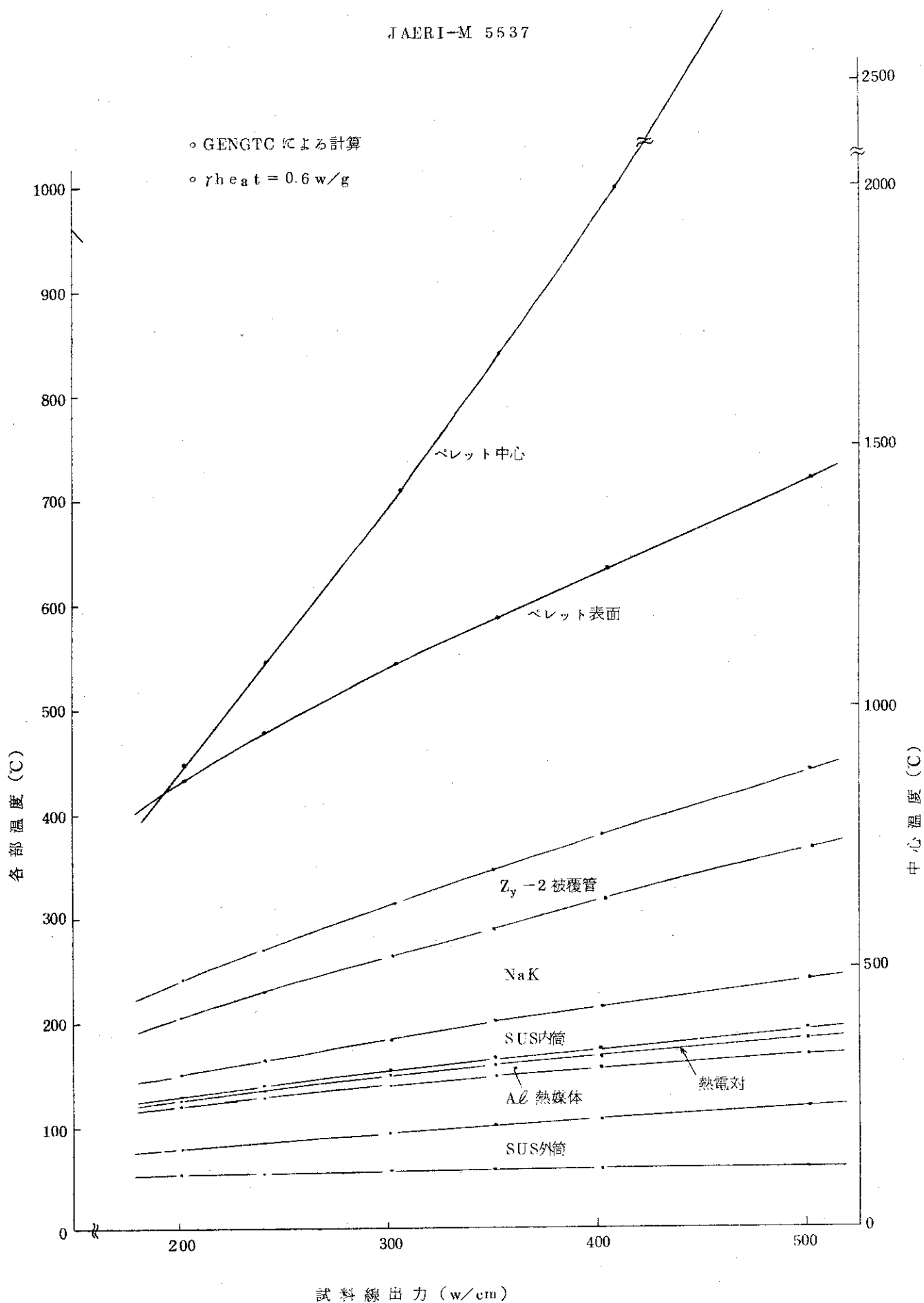


図 1.57 67F-23G 温度分布

第10サイクル (S.46.7.9-7.30) (熱電対: #4 T/C) (#2 T/C 237.9°C)

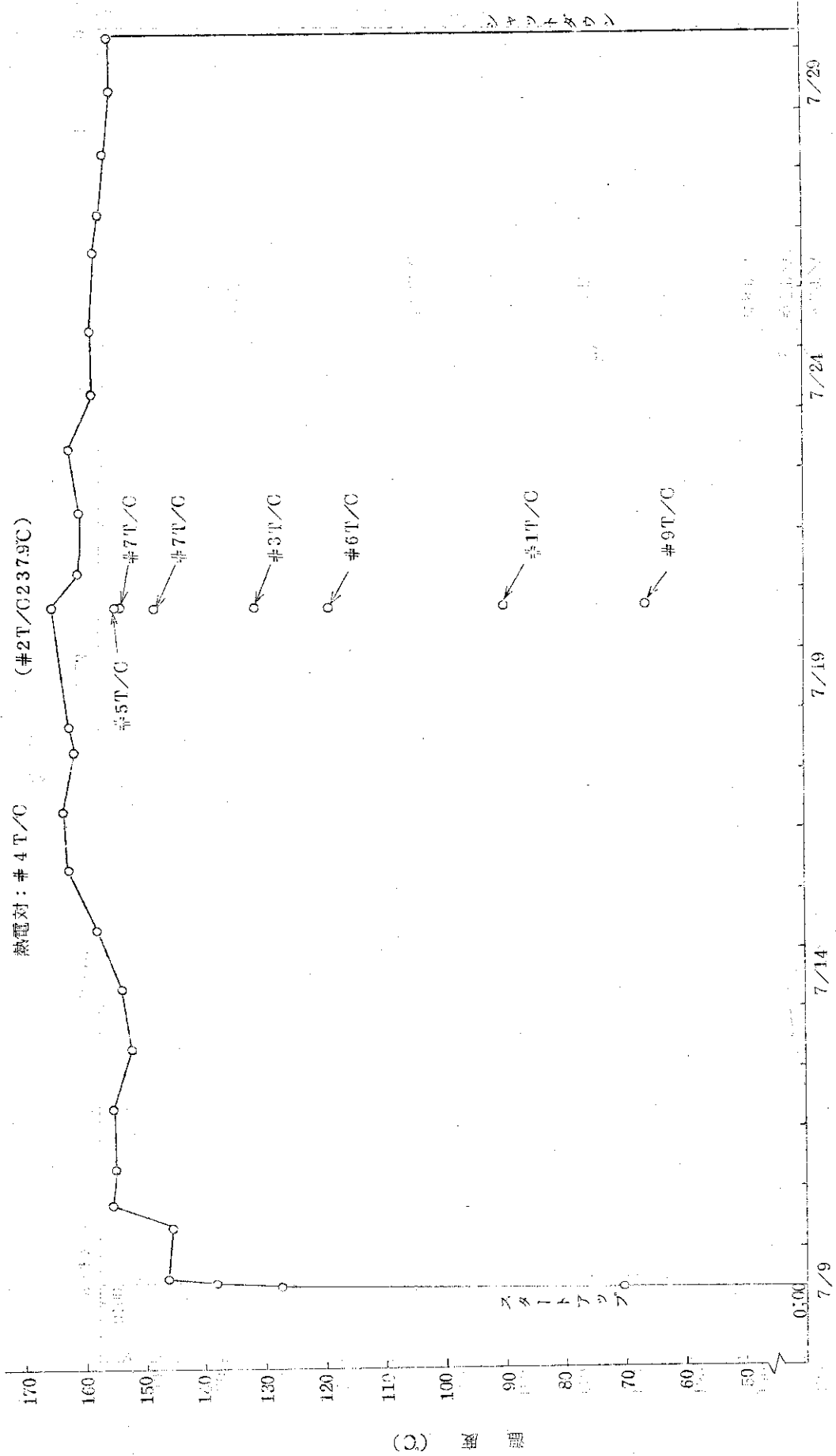
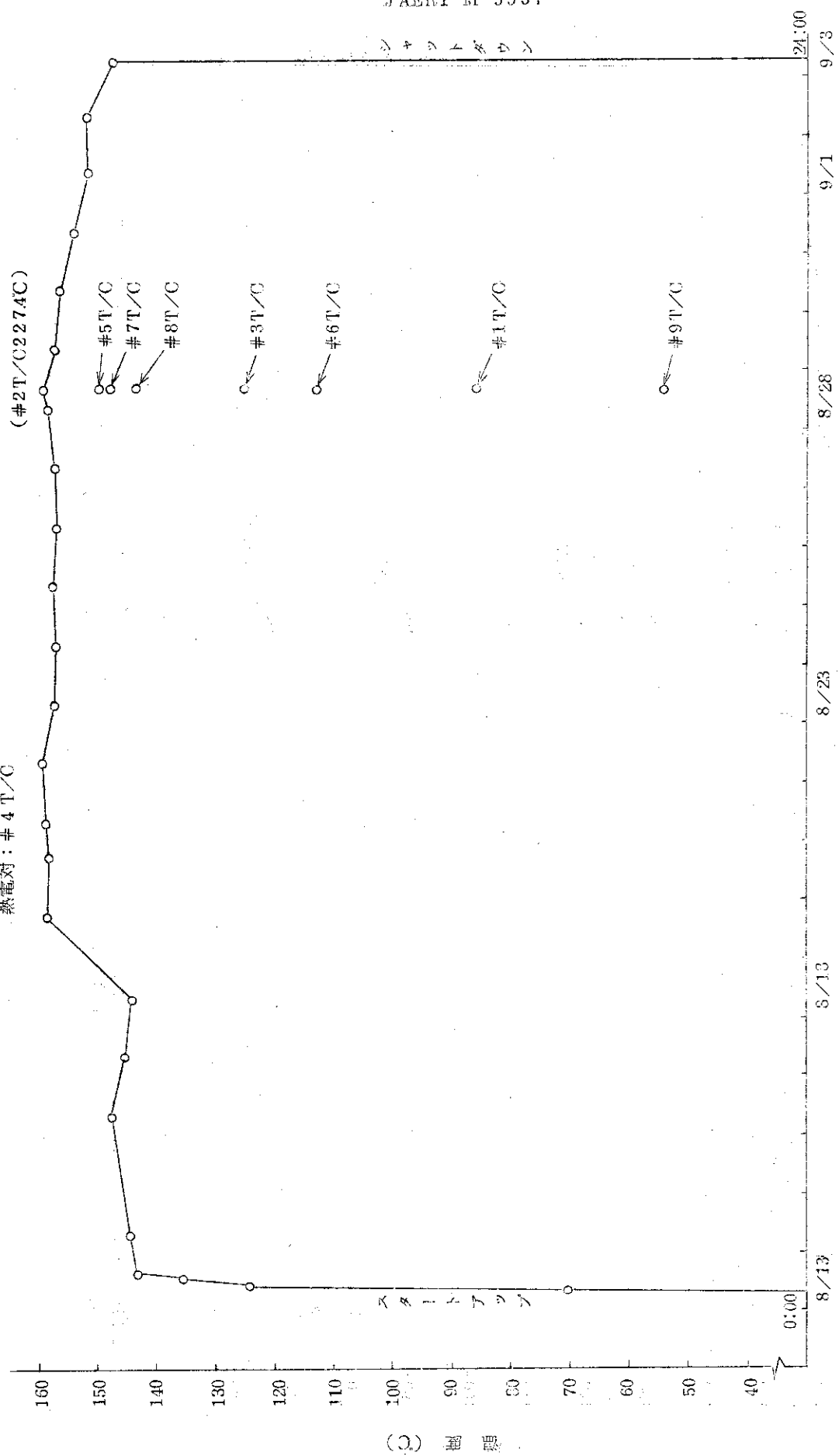


図 1.58 57 T-23 G 照射温度

第11サイクル(S.46.8.13~9.3)
熱電対: #4 T/C



月日
図1.59 67F-230照射温度

(C) 温度

表 1.9 67F-23Gの線出力

Q _G (w/cm)	日時/サイクル	熱電対番号	備 考
410	7月16日 16:14 / 10	#4	原子炉熱出力31.0MW
403	8月28日 9:00 / 11	#4	原子炉熱出力31.9MW

1.14 67F-24G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-24G		
照射 計 画	試料提供者	三菱原子力工業(株)研究所		
	ベレット	材 質	UC	
		形 状	円柱状 焼結ベレット	
		寸 法	12.1φ×	
		数 量		
	ベレット・スタック長	150mm		
	被覆管	材 質	SUS316	
		形 状	継目無管	
		寸 法	12.64mmφ I.D.×0.75t	
	燃料ピン全長			
燃料ピン数量	1本			
照射期間	2サイクル(第10~11)			
照射試験の目的	1) UC 燃料の照射経験をうる。 2) UC 燃料の照射挙動試験。			
キャプセル 設計 条件	照射孔	G-12		
	線出力	500w/cm		
	ガンマ発熱			
	キャプセル構造	NaK, Aφ 熱媒体, 二重キャプセル真空温度制御, 中心温度測定キャプセル		
	計 測	W-WRe T/C 1本 C-A T/C 7本		
制 御	真空温度制御			
キャプセル の 設 計	キャプセル構造設計	図 1.6 0		
	熱 設 計	図 1.6 1		
	強 度 設 計	キャプセル構造のうち 最も強度の弱い個所 は 被覆管で 右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 2.89 \text{ kg/mm}^2$
			熱 応 力	$\sigma_t = 9.62 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 13 \text{ kg/mm}^2$
			評 価	$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 12.51 < 3\sigma_a = 39$
設計において特 に留意した事項	UC 燃料を空気に触れさせず, 中心温度測定用熱電対を封入すること。 温度制御を可能とし, しかも熱出力を大きくするため, Aφ 熱媒体の精度 向上。			
照射 デ ー タ	照射温度	図 1.6 2, 図 1.6 3		
	F/M 測定値			
	線出力	表 1.1 0		

キャプセル名称	67F-24G	キャプセル安全審査資料No.	
照射サイクル	10~11		
構造の詳細	Al-NaK熱媒体, 中心温度測定真空温度制御, 二重キャプセル		
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	NaK, Al熱媒体中心温度測定真空温度制御	
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件			
	<p>計算条件 冷却水温度 50℃ 表面熱伝達率 20000 kcal/m²hr℃ その他は設計マニュアルによった。 計算は GENGTC コード</p>		
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	Q_{max} の値	600 w/cm	制限因子 UCとSUS被覆管との両立性 ^{注1)}
	Q_{max} の分布	冷却水温度 $T_0 = 50℃$ 外筒表面温度 $T_9 = 70.5℃$ 外筒内面温度 $T_8 = 118.9℃$ Al ^T /B外面温度 $T_7 = 311.7℃$ Al ^T /B内面温度 $T_6 = 334℃$ 内筒表面温度 $T_5 = 349℃$ 内筒内面温度 $T_4 = 486℃$ 被覆表面温度 $T_3 = 584℃$ 被覆内面温度 $T_2 = 631℃$ 燃料表面温度 $T_1 = 896℃$ 燃料中心温度 $T_0 = 1214℃$	問題の箇所 被覆管 内圧による応力 $\sigma_p = 2.89 \text{ kg/mm}^2$ 熱応力 $\sigma_t = 9.62 \text{ kg/mm}^2$ 従って $\sigma_p + \sigma_t = 12.51 \text{ kg/mm}^2 < 3\sigma_a = 39 \text{ kg/mm}^2$ $\sigma_p = 2.89 \text{ kg/mm}^2 < \sigma_a = 13 \text{ kg/mm}^2$
キャプセル健全性の総合評価	Q_{max} (=600 w/cm) に対して, 強度および熱的問題はない。しかし, UC と SUS との両立性が 760℃ を限度として問題があるので, 600 w/cm と Q_{max} とし, これ以下では問題がない。		
照射条件ねらい	Q_d の値	500 w/cm	Q_{max}/Q_d 1.20
注1) WAPD のデータ W, chubb Nucl Sci. Eng. 29 176(1967)			

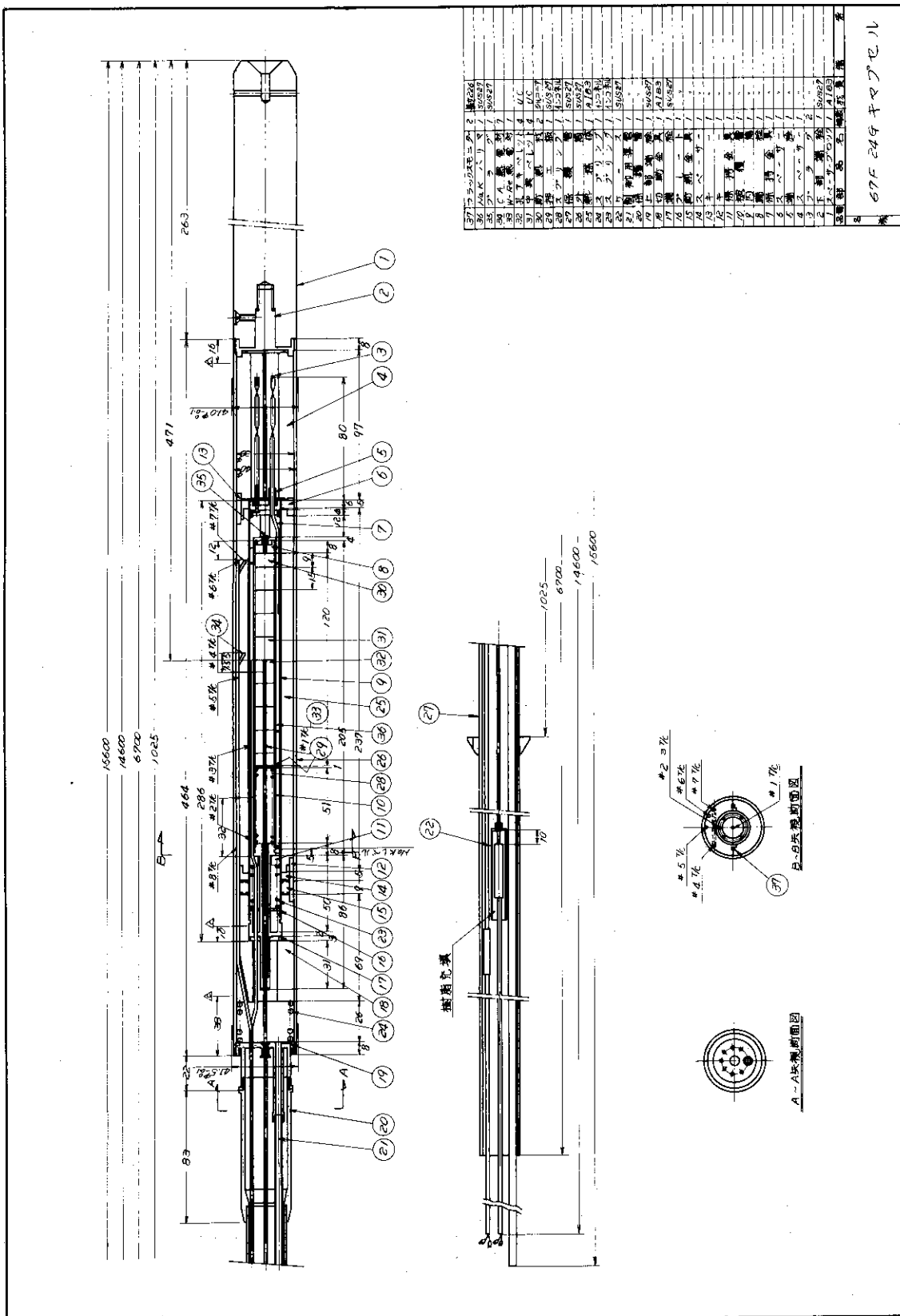


図 1.60 67F-24G キャパシタの組立図

JAERI-M 5537

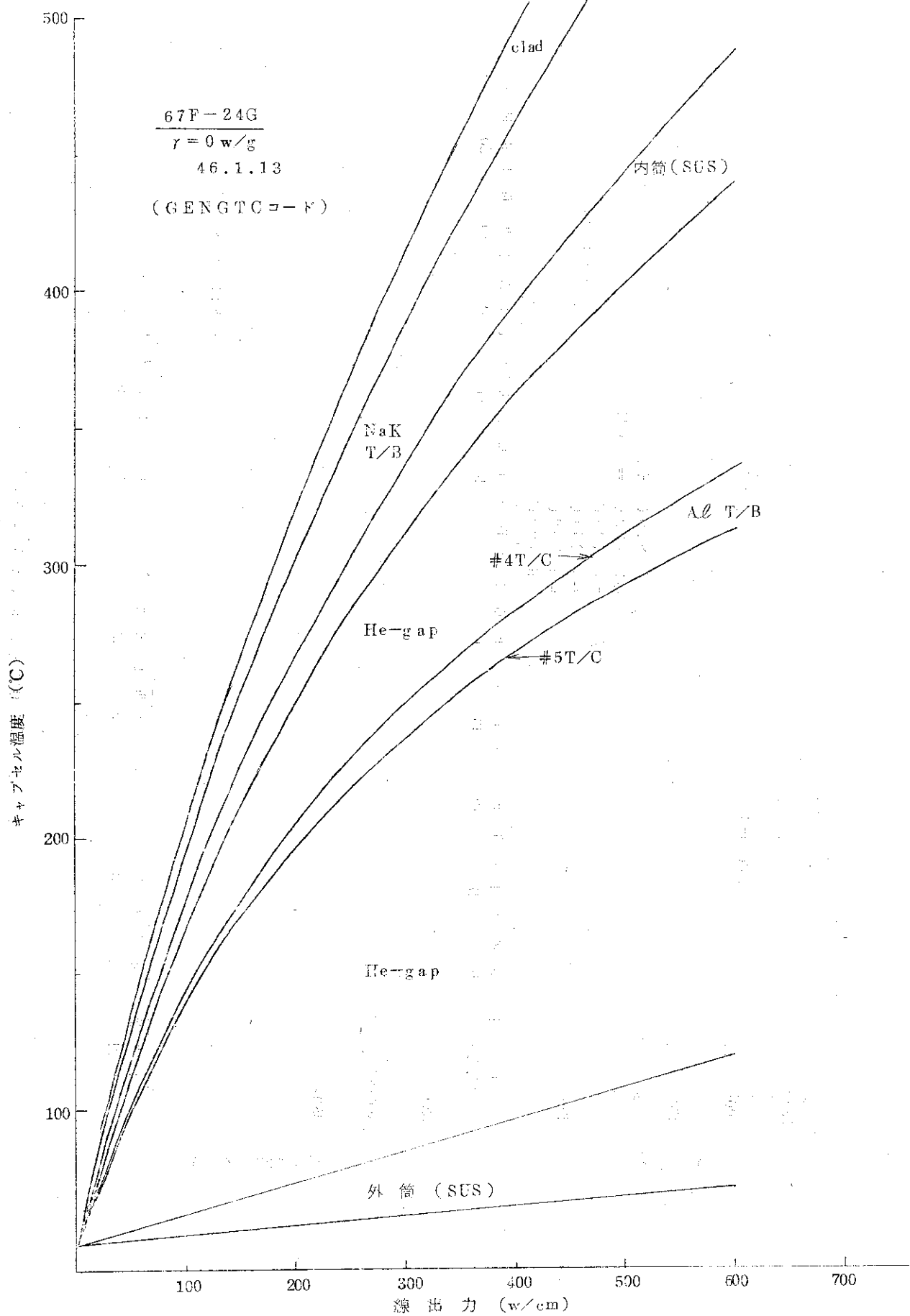


図 1. G 1 67F-24G

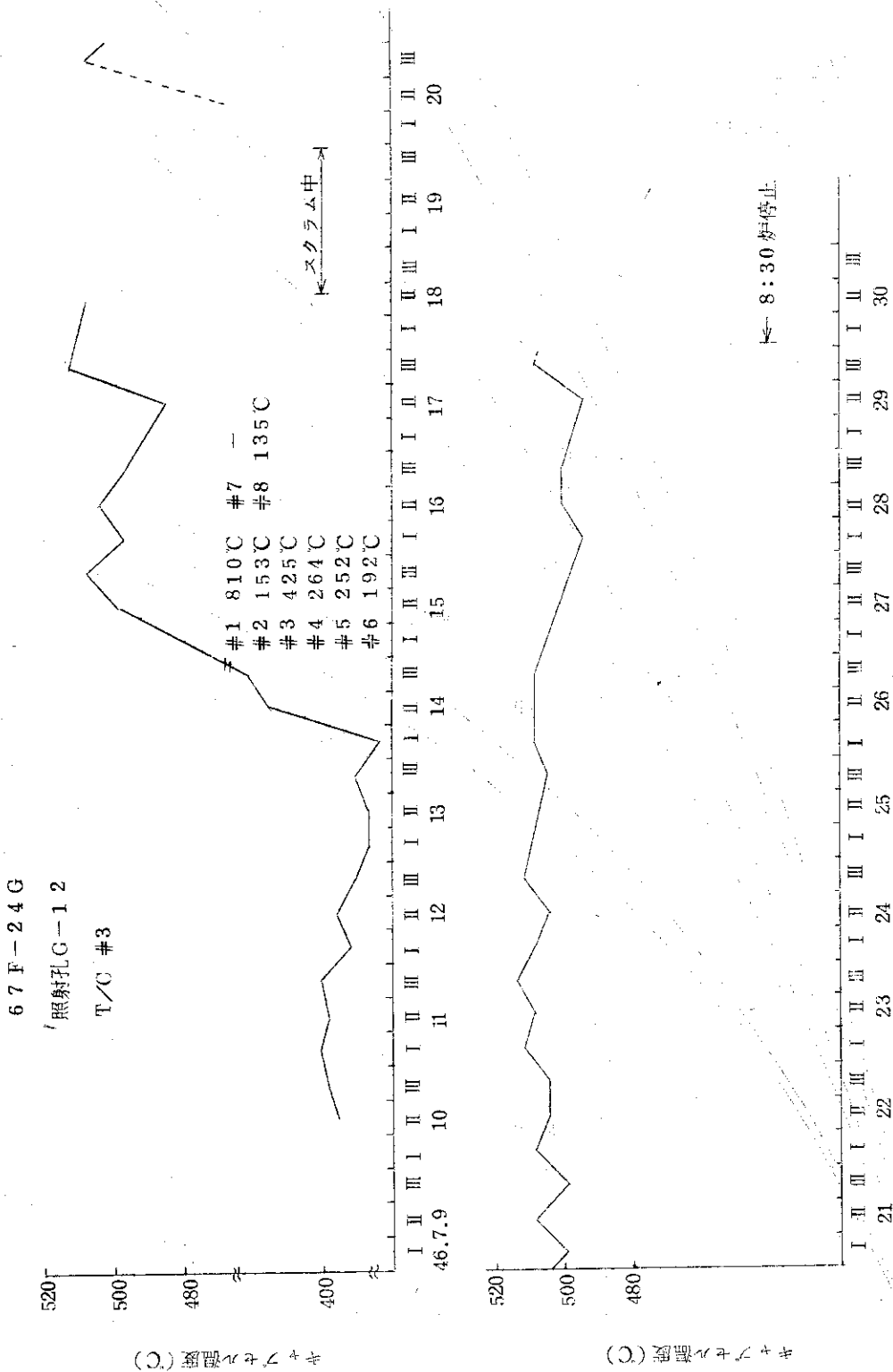


図 1.6 2 第 10 サイクル キャプセル温度変化

67F-24G T/C #3 照射孔G-12

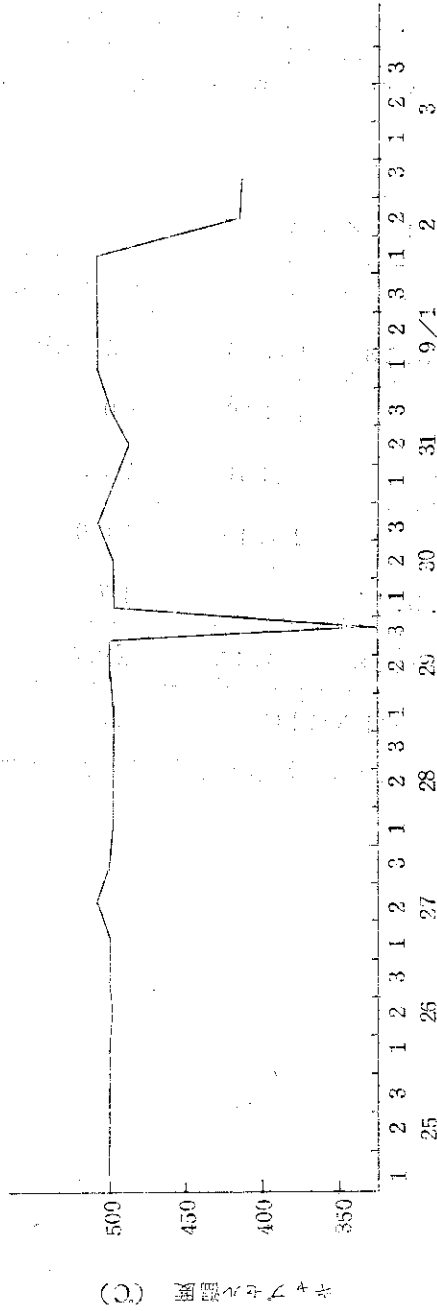
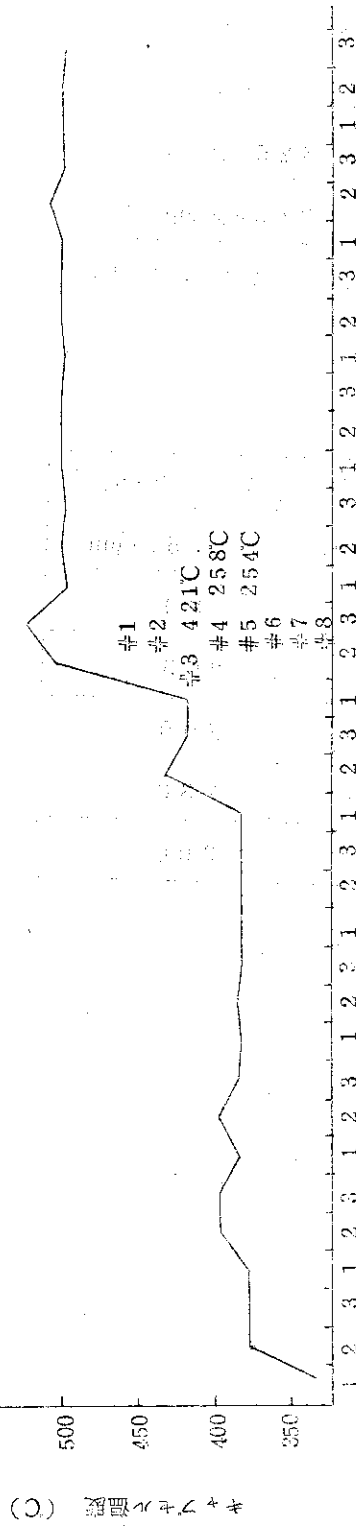


図 1.63 第 11 サイクル キャプセル温度変化

表 1.1.0 67F-24G キャプセル熱出力

第 10 サイクル

測定日時	炉出力(液)	炉出力(熱)	キャプセル出力
S.46.7.9	10MW	16 MW	210w/cm
S.46.7.13	21MW	26.4MW	325w/cm
S.46.7.14	25MW	31 MW	375w/cm

(注) 上記以後の測定に関しては真空引きを行ったため、Qは求め得ず。

第 11 サイクル

測定日時	原子炉核出力	原子炉熱出力	キャプセル出力
S.46.8.13 10:45	5 MW	7.1MW	75w/cm
" 11:40	10	15.3	180
" 13:50	14.9	23.5	265
" 15:14	16.0	25.0	290
S.46.8.14	17.7	25.4	280
S.46.8.18 9:15	20.7	26.8	300

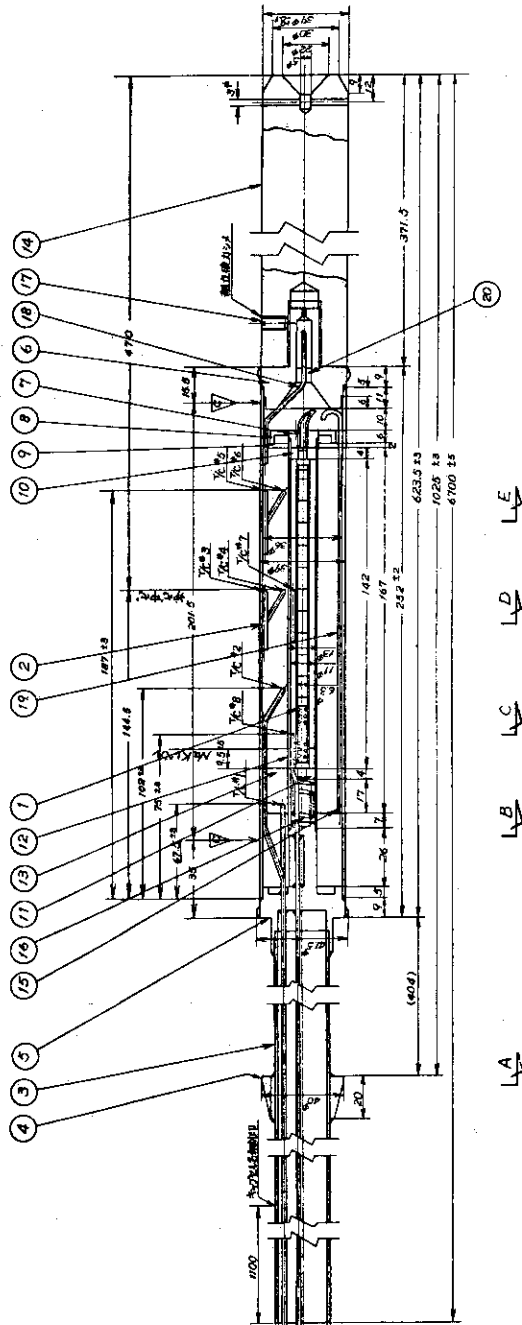
* GENGTCより求めた。

* これ以降は温度制御を行ったため求め得ず。

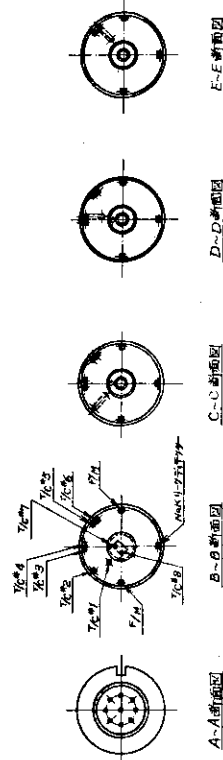
1.15 67F-25G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-25G		
照射 計	試料提供者	日本原子力研究所, 動力炉・核燃料開発事業団		
	ベレット	材 質	(Pu-U)O ₂	
		形 状	円柱状 焼結ベレット	
		寸 法	5.5φ×10L	
		数 量	10個	
	ベレット・スタック長	100L		
	被覆管	材 質	SUS316	
		形 状	継目無管	
		寸 法	6.3φO.D.×5.6φI.D.	
	燃料ピン全長	148L		
燃料ピン数量	1本			
照射期間	2サイクル(第10~11)			
照射試験の目的	1) JFER 仕様に基づいた高出力照射 2) 急温度勾配, 高温, 高バーンアップ下におけるPuO ₂ -UO ₂ の照射挙動, 組織観察			
キャプセル設計条件	照射孔	M-4		
	線出力	500w/cm		
	ガンマ発熱			
	キャプセル構造	NaK Al 熱媒体二重キャプセル		
	計 測	C-A T/C 9本		
制 御	なし			
キャプセルの設計	キャプセル構造設計	図 1.6 4		
	熱 設 計	図 1.6 5		
	強度設計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い個所は 被覆管で 右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 7.88 \text{ kg/mm}^2$
			熱 応 力	$\sigma_t = 8.83 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 13.5 \text{ kg/mm}^2$
評 価			$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 16.71 < 3\sigma_a = 40.5$	
設計において特に留意した事項	Q _{max} を大きくするため, 内筒(SUS)とAl熱媒体とを共引き管とした。			
照射データ	照射温度	図 1.6 6, 図 1.6 7, 図 1.6 8		
	F/M 測定値			
	線出力	表 1.1 1		

キャプセル名称	67F-25G	キャプセル安全審査資料No.	
照射サイクル	10-11		
構造の詳細	Al-NaK熱媒体計測付二重キャプセル		
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	計測付キャプセル	
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p> <p>計算の条件</p> <p>冷却水温度 $T_{10} = 50^{\circ}\text{C}$ キャプセル表面熱伝達率 $20000 \text{ kcal}/\text{m}^2 \text{ hr } ^{\circ}\text{C}$ 設計マニュアルによった。 γ-heating rate $0.5 \text{ w}/\text{gr}$ [ペレット表面より他の部分の温度計算はGENGTCによった。]</p> <p>燃料中心温度の算出</p> <p>熱伝導率: AS Amoto-Baily's eq. ペレット表面と中心の出力密度の比: 0.515 出力分布は2次曲線とした。 (出力分布に関しては計画課より与えられた値を用いた。)</p> <p>燃料ベレット (20%PuO₂-nat.UO₂) He gas 被覆管 SUS-32 熱媒体 56/44NaK 内筒 SUS-27</p> <p>冷却水 外筒 SUS-27 He gas Al 熱媒体</p>		
	<p>Q_{\max} の値 $500 \text{ w}/\text{cm}$</p> <p>制限因子</p> <p>燃料中心温度</p>	<p>問題の箇所 燃料被覆管</p> <p>内圧による応力 $\sigma_p = 7.88 \text{ kg}/\text{mm}^2$ 熱応力 $\sigma_t = 8.83 \text{ kg}/\text{mm}^2$ $\sigma_t + \sigma_p = 16.71 \text{ kg}/\text{mm}^2 < 3\sigma_a = 40.5 \text{ kg}/\text{mm}^2$ $\sigma_p = 8.83 \text{ kg}/\text{mm}^2 < \sigma_a = 13.5 \text{ kg}/\text{mm}^2$ ($\sigma_a = 13.5 \text{ kg}/\text{mm}^2$ at 516°C) Creep-rupture strength $> 100,000 \text{ hr}$ (at 649°C GEAP-4418) Creep rate $< 10^{-6} \text{ mm}/\text{mm hr}$</p> <p>強度上の検討</p> <p>最も厳しい条件にある被覆管についても充分の強度を有する。</p>	
<p>キャプセル健全性の総合評価</p>	<p>設計マニュアルによると、$\sim 20\% \text{ PuO}_2\text{-UO}_2$ の m, p は 2670°C である。計算値による 2680°C はこの m, p と同じと考え、Q_{\max} を $500 \text{ w}/\text{cm}$ ($\gamma = 0.5 \text{ w}/\text{gr}$) とした。その他強度上問題はない。</p>		
照射条件ねらい	Q_d の値 $450 \text{ w}/\text{cm}$	Q_{\max}/Q_d	1.11



★ 燃料試料
67F-25G
UO₂-20%P₂O₅



21	燃料	C-A	18 ϕ (O.D.)	1
20	燃料	SUS 27		1
19	燃料	20 ϕ (O.D.)	18 ϕ (O.D.)	2
18	燃料	18 ϕ (O.D.)	18 ϕ (O.D.)	1
17	燃料	SUS 27		1
16	燃料	12 ϕ (O.D.)		1
15	燃料	ALB3		2
14	燃料	ALB3		1
13	燃料	SUS 27		1
12	燃料	SUS 27		1
11	燃料	SUS 27		1
10	燃料	SUS 27		1
9	燃料	SUS 27		1
8	燃料	SUS 27		1
7	燃料	SUS 27		1
6	燃料	SUS 27		1
5	燃料	SUS 27		1
4	燃料	SUS 27		1
3	燃料	SUS 27		1
2	燃料	SUS 27		1
1	燃料	SUS 27		1

67F-25G
キャプセル組立図

図 1.6.4 67F-25G キャプセル組立図

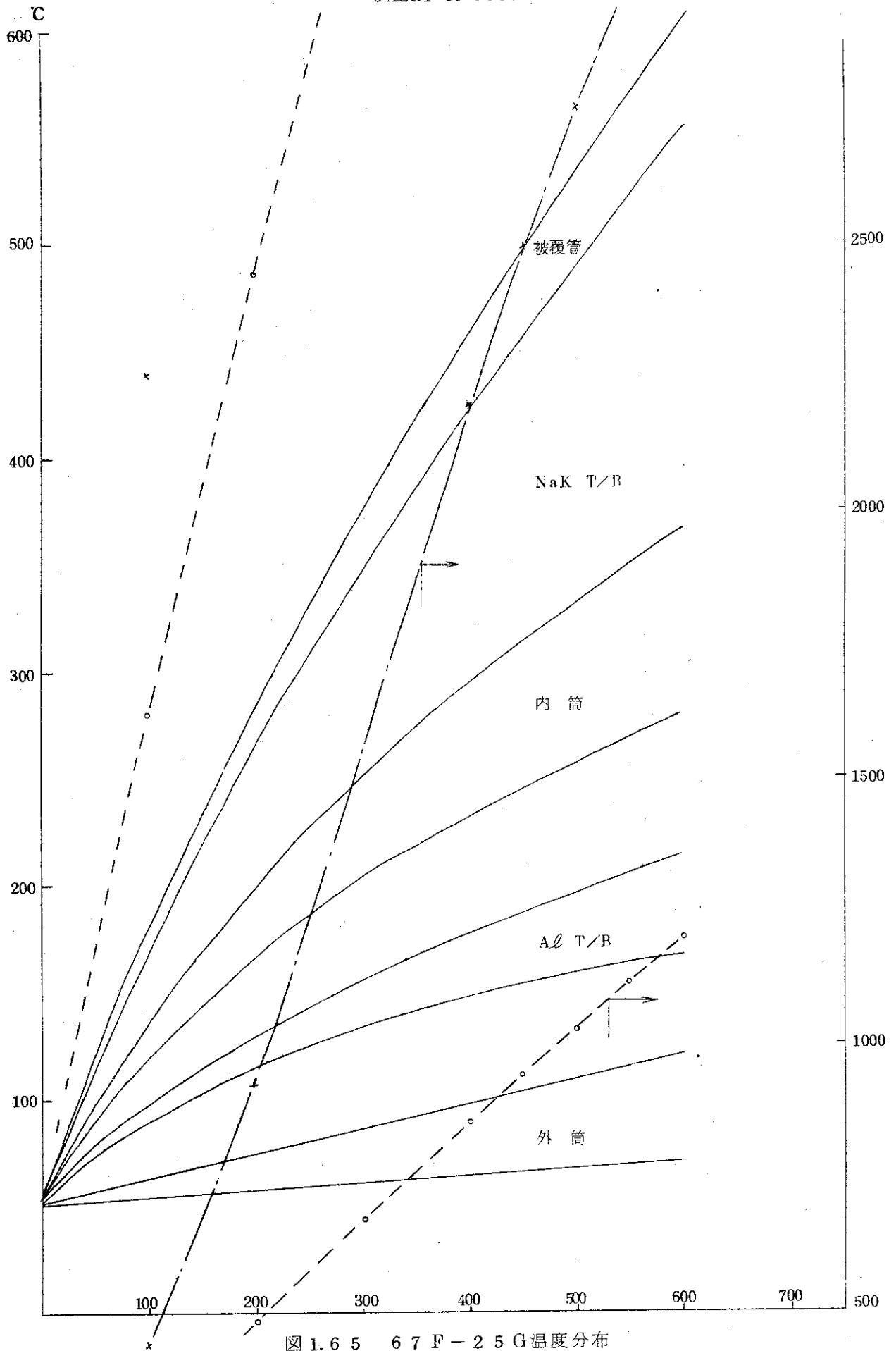
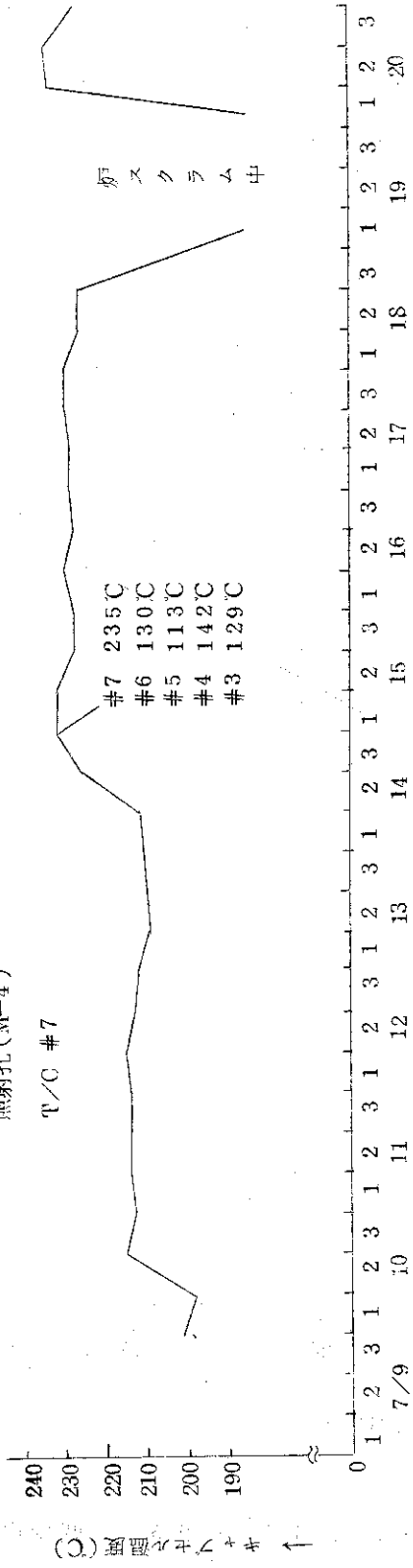


图 1.65 6.7 F - 2.5 G 温度分布

67F-25G

照射孔(M-4)

T/C #7



#7 235°C
 #6 130°C
 #5 113°C
 #4 142°C
 #3 129°C

炉スクラム中

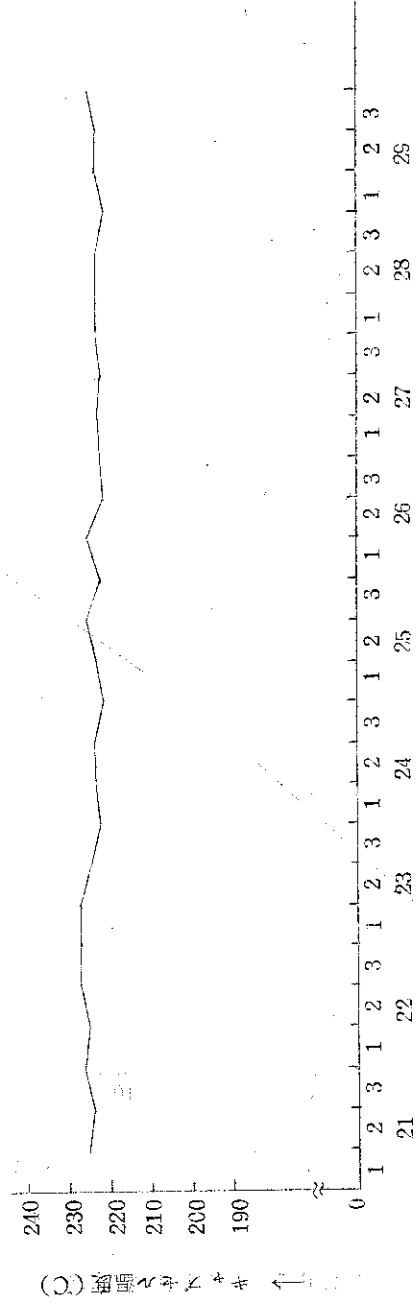


図1.56 第10サイクルルキャプセル温度変化

T/C #7 照射孔M-4

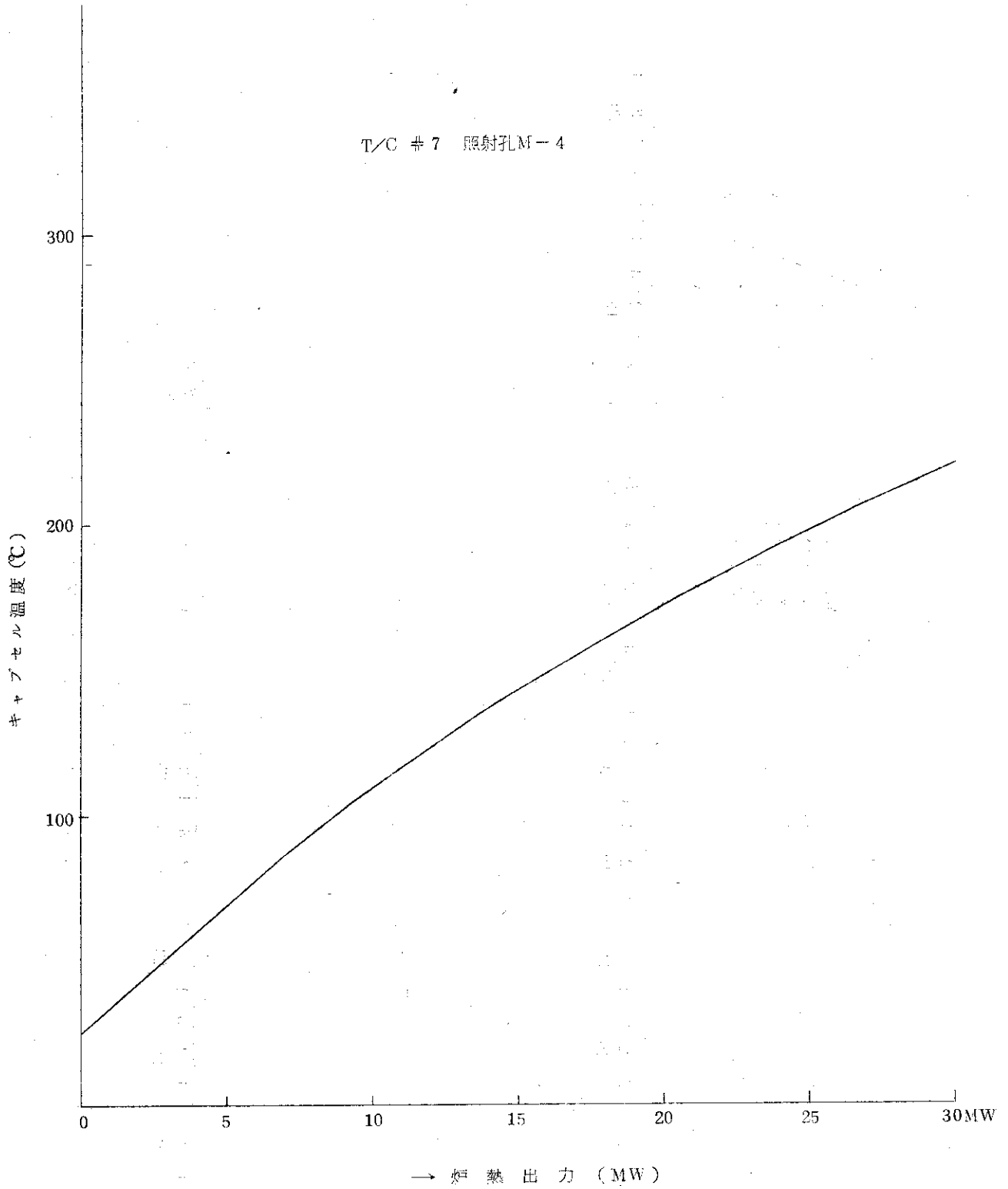


図 1.67 第 11 サイクルキャプセル炉上昇時の 67 F-25 G 温度変化

67F→25G T/C #7 照射孔M-4

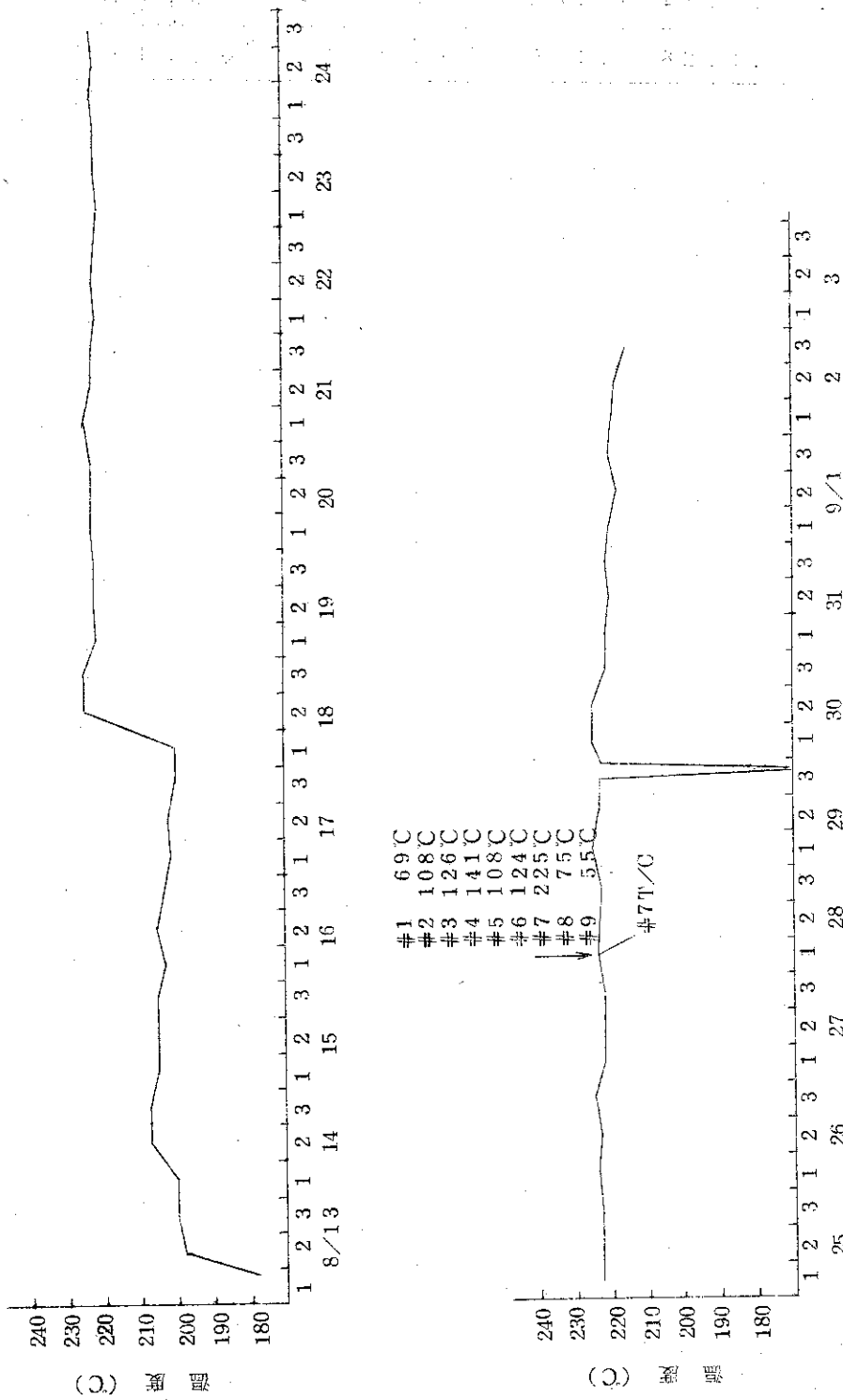


図1.68 第11サイクルルキヤブセル温度変化

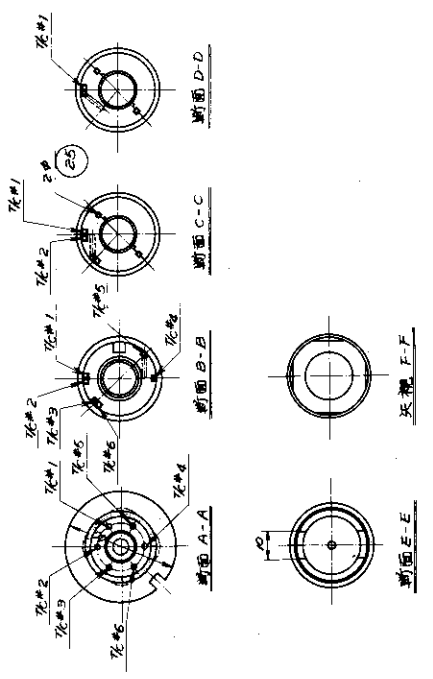
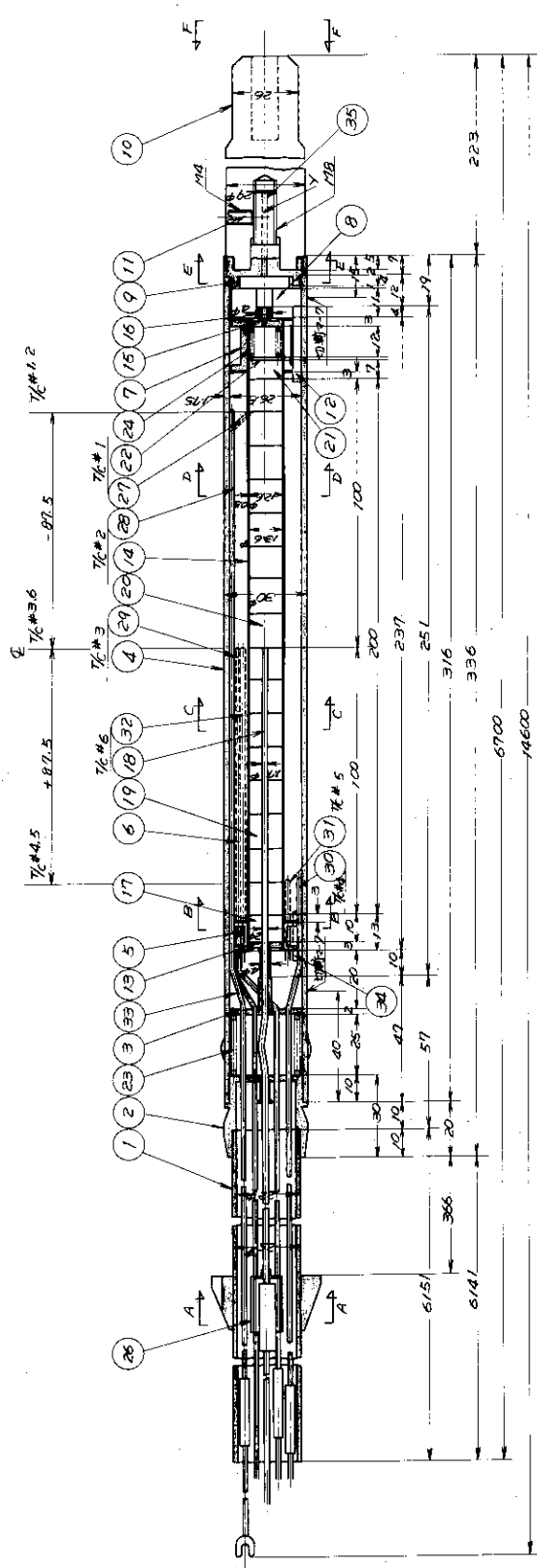
表1.11 67F-25Gキャプセル線出力

Q_G (w/cm)	日 時	サイクル	熱電対番号
290w/cm	S.46.7.14 18:45	第10サイクル	※3,4 T/C
285w/cm	S.46.8.28 9:09	第11サイクル	※3,4 T/C

1.16 67F-28G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-28G		
照射 計	試料提供者	東京芝浦電気株式会社(東芝中央研究所)		
	試 料	ペレット	材 質	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ (濃縮度天然)
			形 状	円柱状ペレット
			寸 法	直径 12.4 mmφ 高さ 10 mm
			数 量	16 個
	ペレット・スタック長		200 mm	
	被覆管	材 質	SUS-304	
		形 状	円筒型	
		寸 法	内径 12.6 mmφ 肉厚 0.5 mm	
	燃料ピン全長		251 mm	
燃料ピン数量		1 本		
照射期間		第5~第6サイクル		
照射試験の目的	1) バーナブルポイズン入り UO ₂ の照射経験を得る。 2) バーナブルポイズンとしての希土酸化物の挙動解析。 3) 希土酸化物を含む UO ₂ 燃料の挙動解析。			
キャプセル 設計 条件	照射孔	N-9		
	線出力	—— (Gd ₂ O ₃ の燃焼目標 50%)		
	ガンマ発熱	5 w/gr		
	キャプセル構造	Aφ 熱媒体		
	計 測	CA 6 本, w/WRe 1 本		
制 御	なし			
キャプセル の 設計	キャプセル構造設計	図 1.6 9 にキャプセル組立図を示す。		
	熱 設 計	図 1.7 0 にキャプセル内温度分布を示す。		
	強 度 設 計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い個所は 試料被覆管 で右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 10.2 \text{ kg/mm}^2$
			熱 応 力	$\sigma_t = 7.8 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 12.3 \text{ kg/mm}^2$
評 価			$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 18.0$ で強度は十分である。	
設計において特に留意した事項	燃料試料内に熱電対を直接封入することに伴う F.P. ガスのシール。			
照射 デ ー タ	照射温度	図 1.7 1 から図 1.7 2 に各サイクルの温度記録を示す。		
	F/M 測定値			
	線出力	表 1.1 2		
	その他	検討メモ-1 FPリークテスト結果		

キャプセル名称	67F-28G	キャプセル安全審査資料No.																		
照射サイクル	第5, 第6																			
構造の詳細	図1.69参照																			
キャプセルの安全解析	キャプセル型式 設計基準第4条4(3)ベリリウム碎照射孔(32mmφ)																			
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件																				
	<p>(注)</p> <p>γ加熱 5w/gr</p> <p>燃焼 42</p>																			
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	Q_{max} の値	500w/cm	制限因子 被覆管の応力																	
	Q_{max} における温度分布	<table border="1"> <tr><td>T_8</td><td>50°C</td></tr> <tr><td>T_7</td><td>81°C</td></tr> <tr><td>T_6</td><td>163°C</td></tr> <tr><td>T_5</td><td>211°C</td></tr> <tr><td>T_4</td><td>240°C</td></tr> <tr><td>T_3</td><td>472°C</td></tr> <tr><td>T_2</td><td>505°C</td></tr> <tr><td>T_1</td><td>759°C</td></tr> <tr><td>T_0</td><td>2405°C</td></tr> </table>	T_8	50°C	T_7	81°C	T_6	163°C	T_5	211°C	T_4	240°C	T_3	472°C	T_2	505°C	T_1	759°C	T_0	2405°C
T_8	50°C																			
T_7	81°C																			
T_6	163°C																			
T_5	211°C																			
T_4	240°C																			
T_3	472°C																			
T_2	505°C																			
T_1	759°C																			
T_0	2405°C																			
キャプセル健全性の総合評価	$Q_{max} = 500 \text{ w/cm}$ に対して被覆管の応力で制限される。各部材の強度は十分である。																			
照射条件ねらい	Q_d *は本試料がB.P.であるため特でない。ポイズン燃焼量はR=2~4mmがねらいである。																			



37	鋼板	1	50527
36	鋼板	1	50527
35	鋼板	1	50527
34	鋼板	1	50527
33	鋼板	1	50527
32	鋼板	1	50527
31	鋼板	1	50527
30	鋼板	1	50527
29	鋼板	1	50527
28	鋼板	1	50527
27	鋼板	1	50527
26	鋼板	1	50527
25	鋼板	1	50527
24	鋼板	1	50527
23	鋼板	1	50527
22	鋼板	1	50527
21	鋼板	1	50527
20	鋼板	1	50527
19	鋼板	1	50527
18	鋼板	1	50527
17	鋼板	1	50527
16	鋼板	1	50527
15	鋼板	1	50527
14	鋼板	1	50527
13	鋼板	1	50527
12	鋼板	1	50527
11	鋼板	1	50527
10	鋼板	1	50527
9	鋼板	1	50527
8	鋼板	1	50527
7	鋼板	1	50527
6	鋼板	1	50527
5	鋼板	1	50527
4	鋼板	1	50527
3	鋼板	1	50527
2	鋼板	1	50527
1	鋼板	1	50527

図 1.69 67F-28G キャプセル組立図

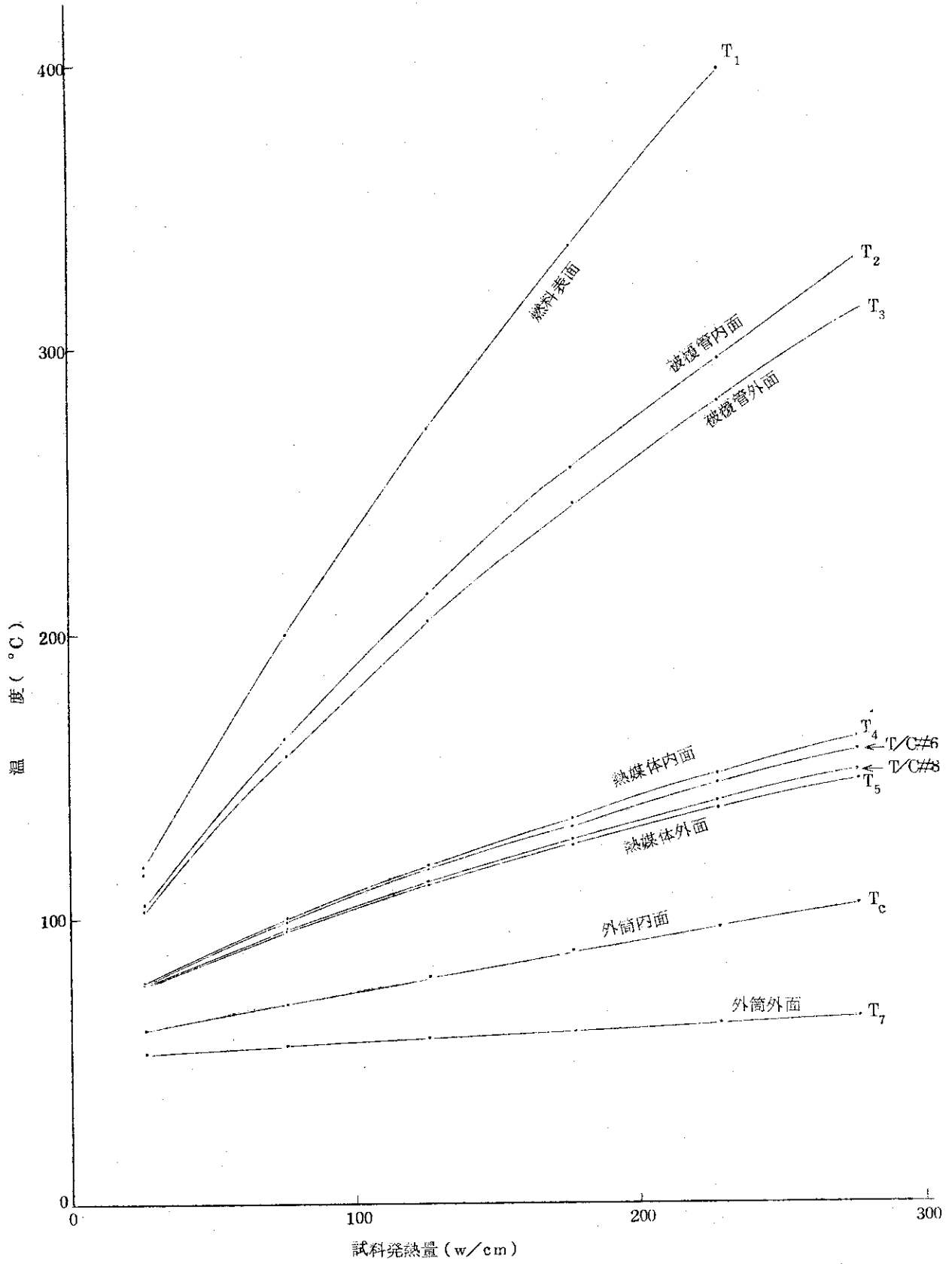
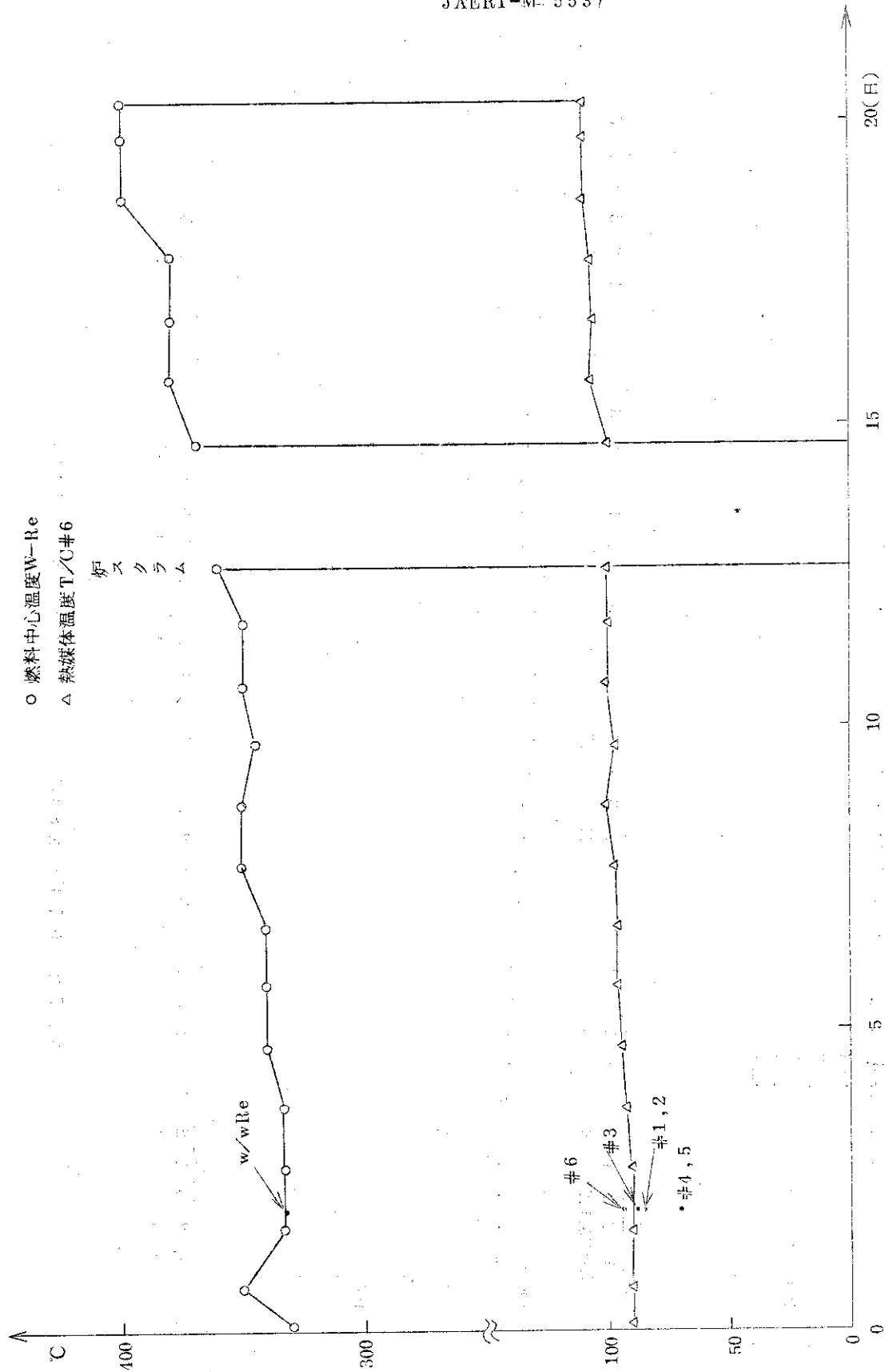


図 1.70 67F-28G 温度分布 (計算値)



照射日数 (45年11月28日午前零時標準)

図1.7.1 67F-28 (キャプセル温度指示値 (第5サイクル))

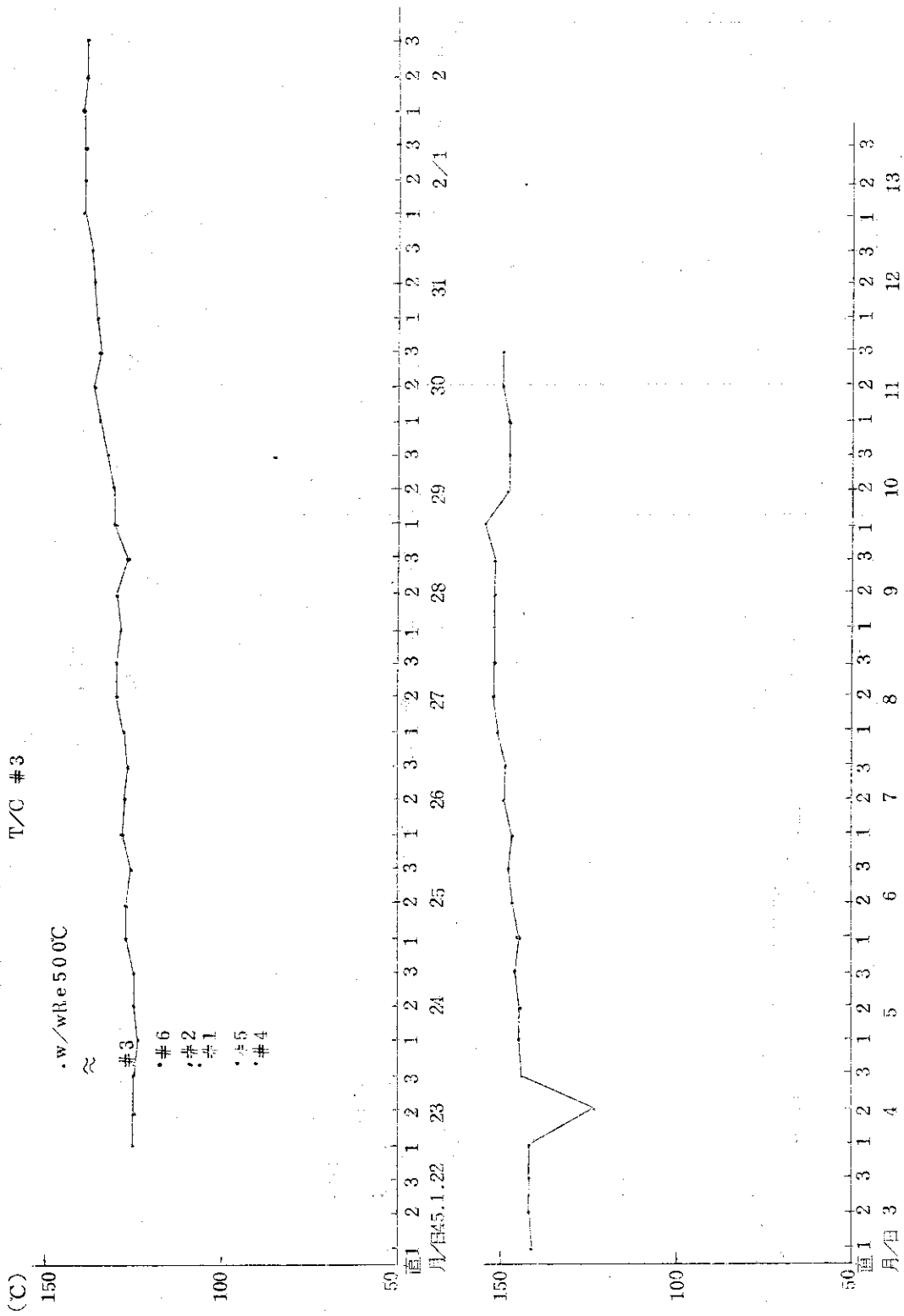


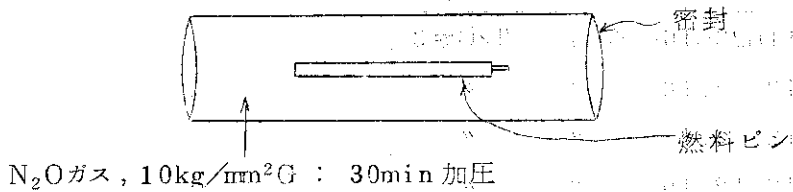
図 1.7.2 67F-28G キャプセル温度指示値 (第 6 サイクル)

表 1.1.2 67F-28G キャプセル線出力

Q _G	日時/サイクル	T/Cの番号	備 考
86	1970年11月28日16時/第5	T/C#3	
102	12. 2.16 "	"	
108	12. 7.16 "	"	
116	12.12.16 "	"	
150	12.17.16 "	"	
185	1971. 1.22.16 /第6	"	
200	1.26.18 "	"	
230	1.31.18 "	"	
263	2. 5.18 "	"	
308	2.10.18 "	"	

検討メモ-1. 67F-28G F.P.リークテスト結果の検討

(1) リークテストの方法



↓
air で表面洗浄

↓
N₂Oガスの濃度を測定 (サンプリング 500cc/min)
(赤外線分析)

↓
リークレート算出

リークレートの単位

CLUSEC ; 1 ℓ の容器内を真空に引き, 1 sec間に 100μHg の圧力差を生じるような孔の大きさ (リーク率)

L CLUSEC の場合はピンホール換算の直径 D mm は

$$D \approx L^{\frac{1}{4}} \times 10^{-2} \text{ mm}\phi \quad (a)$$

(2) リークテスト結果

(プレナム vol(H.L.) 2 cc → リークレート ; 173 CLUSEC)
(" (図面) 1.41 cc → " ; 123 ")

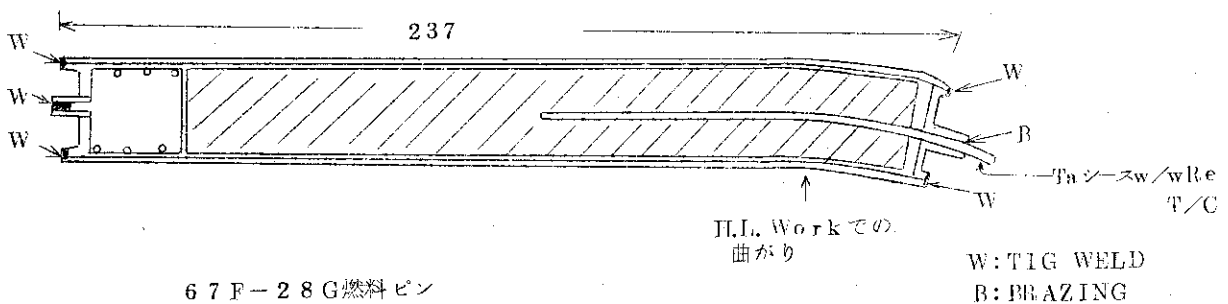
(a)式からプレナム 1.41 cc の場合は

$$D \approx 123^{0.25} \times 10^{-2} \text{ mm}\phi = 3.3 \times 10^{-2} \text{ mm}\phi = 0.033 \text{ mm}\phi$$

(なお, リークのあったことは確実として, その位置かがどこか, 通常は H.L. で次のステップで探すが, この試料の場合急いでいたためにそれはしなかったとのことである。 — 試験担当者)

(3) 検討

キャプセルの切断時, 燃料ピン端部を曲げてしまったためにリークテストを行った由であるが, 試験担当者の考察にあるように次図の状態ではリークがあったことは確実で, その位置は不明のまま終わったことになる。



以上から次のことが結論される。

- a) H.L. で外観上明らかな割れ、ピンホールはなかった。(リークレートから1個のピンホールの大きさに換算すると直径約0.03mmφ)
- b) 保護管内にF.P. がリークしたのであるから上図の如く燃料ビンのみにしてもリークがあるはずで、H.L. ワークでは、さらにリーク箇所が増えたかも知れない。
- c) リーク位置を探すことは行なわれなかったため最終的にはF.P. 漏洩の経路は握めなかった。

1.17 67F-31G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-31G		
照射 計	試料提供者	古河電気工業株式会社		
	ベレット	材質	2.5%ε UC	
		形状	円柱状 焼結ベレット	
		寸法	10φ×10ℓ	
		数量	15ヶ	
	ベレット・スタック長	150L		
	被覆管	材質	SUS316	
		形状	継目無管	
		寸法	10φ I.D.×11.0φ O.D.	
	燃料ピン全長	285L		
燃料ピン数量	1本			
照射期間	3サイクル(第9~11)			
照射試験の目的	<p>炭化物は高速炉燃料として性能的にすぐれているが、諸性質の変化に関する研究は必ずしも充分でない。特に日本では照射経験が極めて少ないので、できるだけ速かに照射挙動を解明するための資料を蓄積すること。</p> <p>本照射計画は、高速炉ピンの出力を模擬することを第1の目的として行なり。</p>			
キャプセル 設計条件	照射孔	K-4		
	線出力	600w/cm		
	ガンマ発熱			
	キャプセル構造	Na-A熱媒体二重キャプセル, 計測付キャプセル		
	計測制御	C-A熱電対 8本 なし		
キャプセル の設計	キャプセル構造設計	図1.73		
	熱設計	図1.74		
	強度設計 は 被覆管 で 右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 8.04 \text{ kg/mm}^2$	
		熱応力	$\sigma_t = 9.93 \text{ kg/mm}^2$	
		許容応力	$\sigma_a = 12 \text{ kg/mm}^2$	
評価		$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 17.97 < 1.5 \sigma_a = 18$		
設計において特に留意した事項	UCの照射データがないため、内圧(蒸発性物質等による)の評価を、かなり安全側にとった。スウェリング対策としてUCベレットの寸法精度をあげること。NaK封入方法。			
照射データ	照射温度	図1.75, 図1.76, 図1.77		
	F/M測定値			
	線出力	表1.13		

キャプセル名称	67F-31G	キャプセル安全審査資料№	
照射サイクル	9-10		
構造の詳細	Al-NaK熱媒体, 内外筒二重キャプセル	計測付キャプセル(C-A ^{T/C} 8本)	
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	Al-NaK熱媒体 二重計測付キャプセル	
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件			
	<p>(注) 計算条件 設計マニュアルによった。 表面熱伝達率 20,000 Kcal/mhr °C 寸法は検査成績書によった。 冷却水温度 50°C</p>		
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	Q_{max} の値 750 w/cm	制限因子	被覆管強度
	Q_{max} における温度分布 冷却水温度 50°C 外筒表面温度 75.6°C 外筒内面温度 136°C Al T/B 表面温度 193°C Al T/B 内面温度 230°C 内筒表面温度 379°C 内筒内面温度 446°C 被覆管表面温度 628°C 被覆管内面温度 677°C ペレット表面温度 998°C ペレット中心温度 1710°C	Q_{max} における強度上の検討 問題の箇所 被覆管 被覆管内圧 P_1 含有酸素がCOガスとして100%放出されるものと計算する。(FPガスも100%放出) $P_1 = 76.7 \text{ kg/cm}^2$ 内圧 P_1 による応力 $\sigma_p = 8.04 \text{ kg/mm}^2$ 熱応力 $\sigma_t = 9.93 \text{ kg/mm}^2$ $\sigma_p = 8.04 < \sigma_a = 12.0$ $\sigma_p + \sigma_t = 17.97 < 1.5 \sigma_a = 18.0 \text{ kg/mm}^2$ cf. B. U = 3300 MWD/T	強度上の評価 最も厳しい条件にある被覆管について $Q_{max} = 750 \text{ w/cm}$ まで強度上問題がない。
キャプセル健全性の総合評価	スウェリングによるUCの体積増加は(PNCT-6005p.224図7.35)によると3300MWD/T程度~1.2%であるので問題はない。また両立性も特に問題はない。被覆管強度も、温度条件も、 $Q = 750 \text{ w/cm}$ までは十分に安全である。		
照射条件ねらい	Q_d の値 600 w/cm	Q_{max}/Q_d	1.25

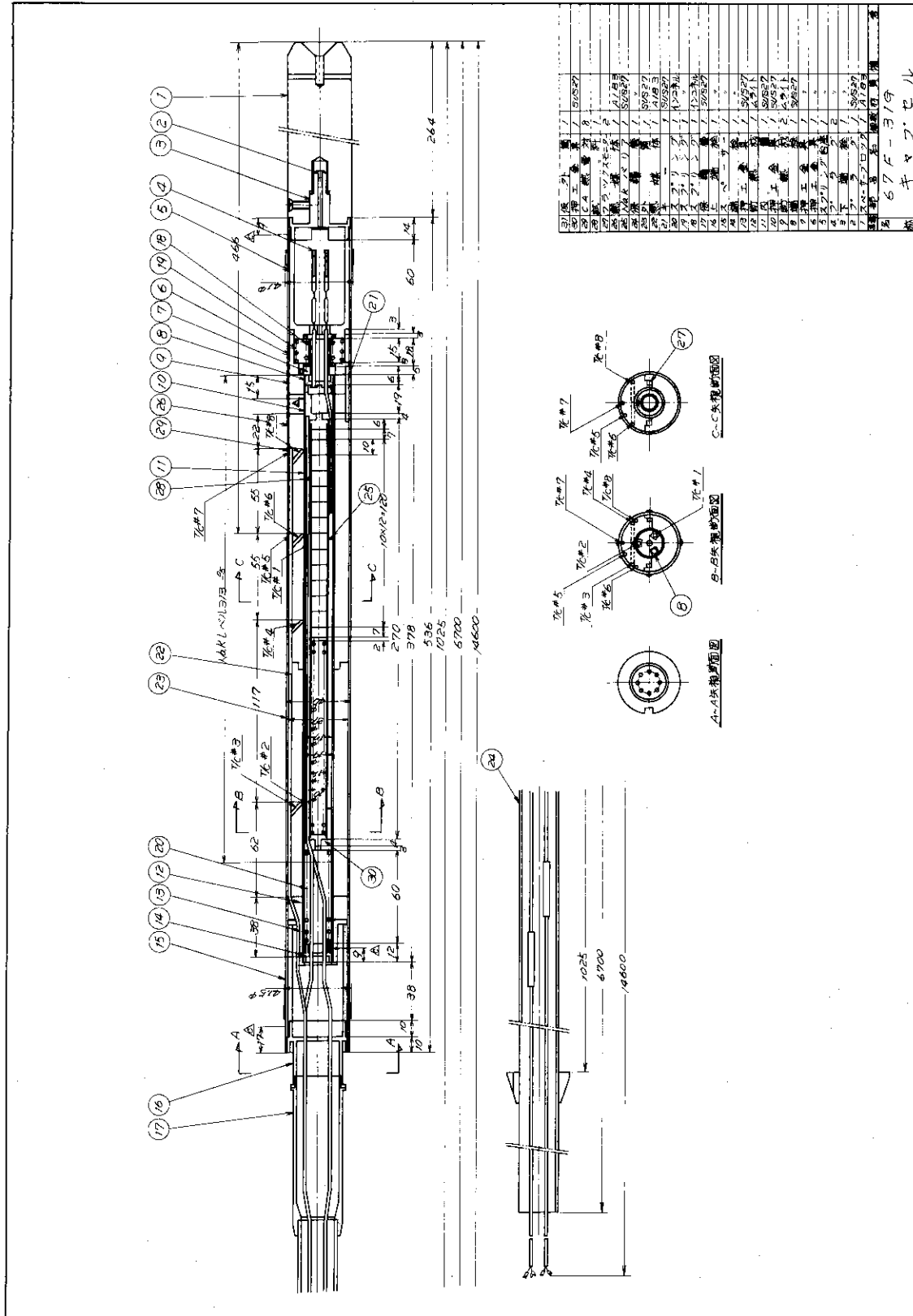


図1.73 67F-31Gガンマセル組立図

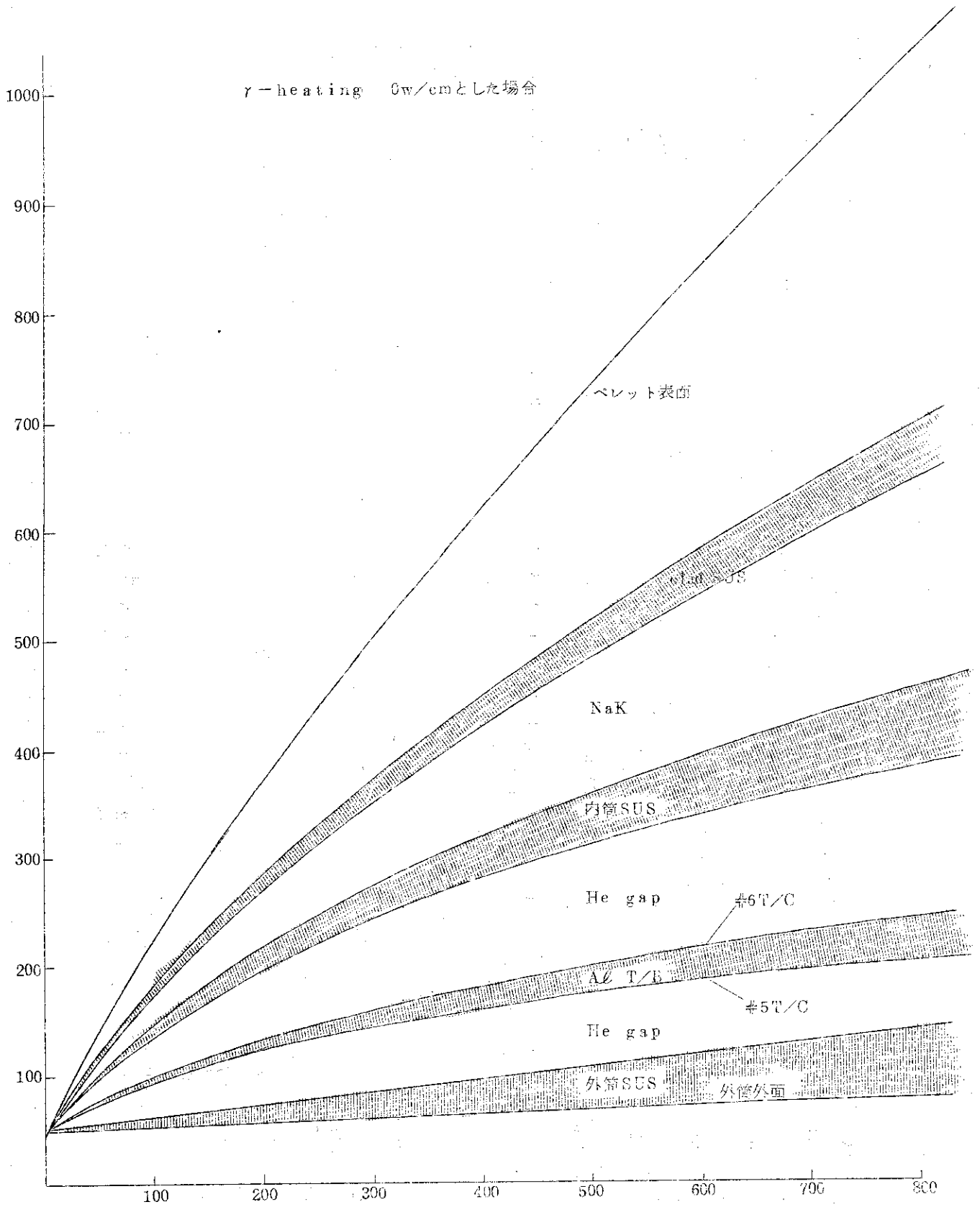


図 1.7 4 67F-31G キャプセル内温度分布

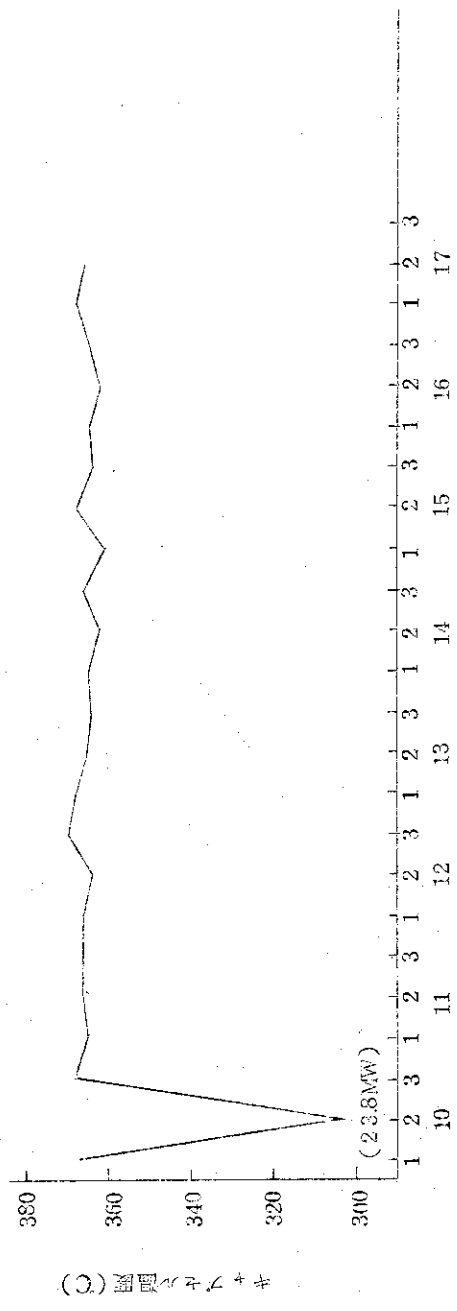
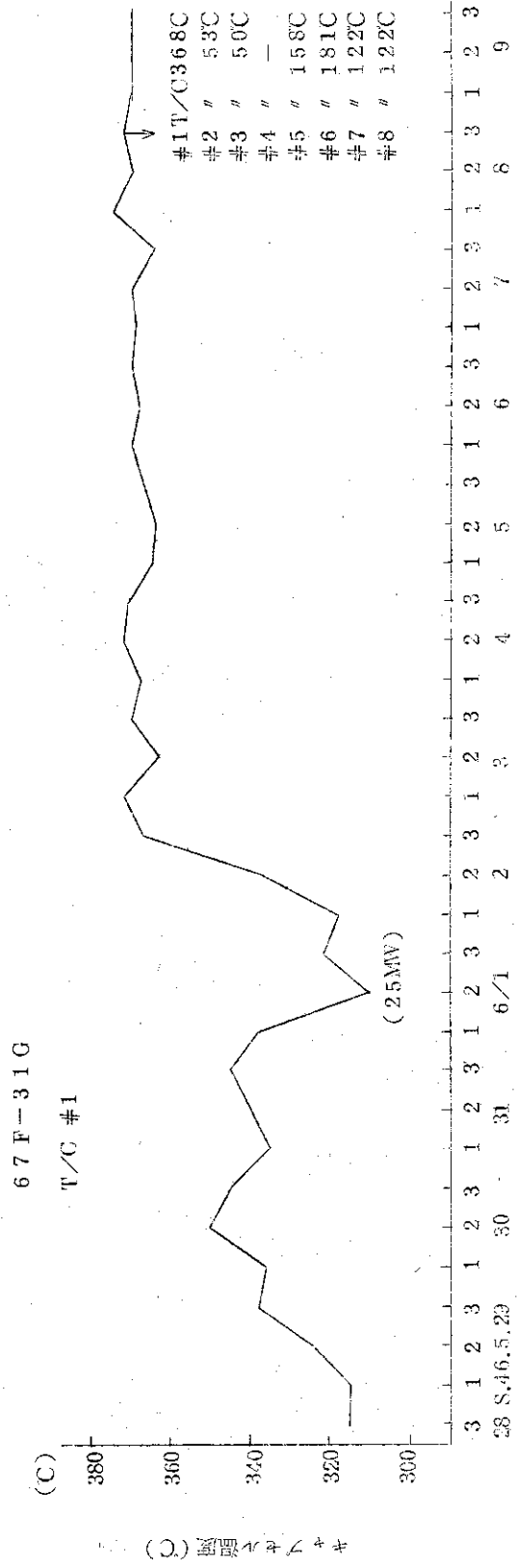


図1.75 キャプセル温度変化(第9サイクル)

67F-31G
照射孔K-4
T/C #1

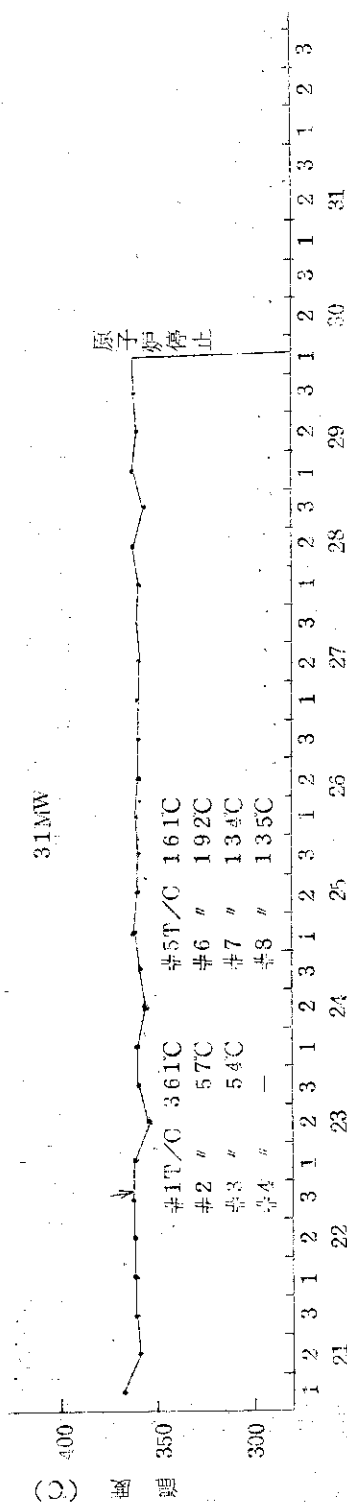
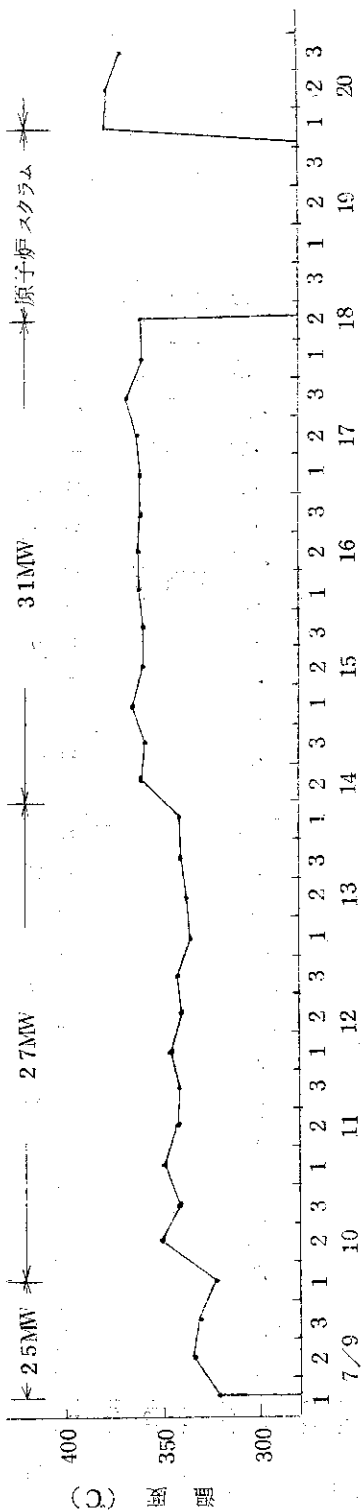


図 1.76 第10サイクルキャプセル温度変化

67P-31GT/C #1

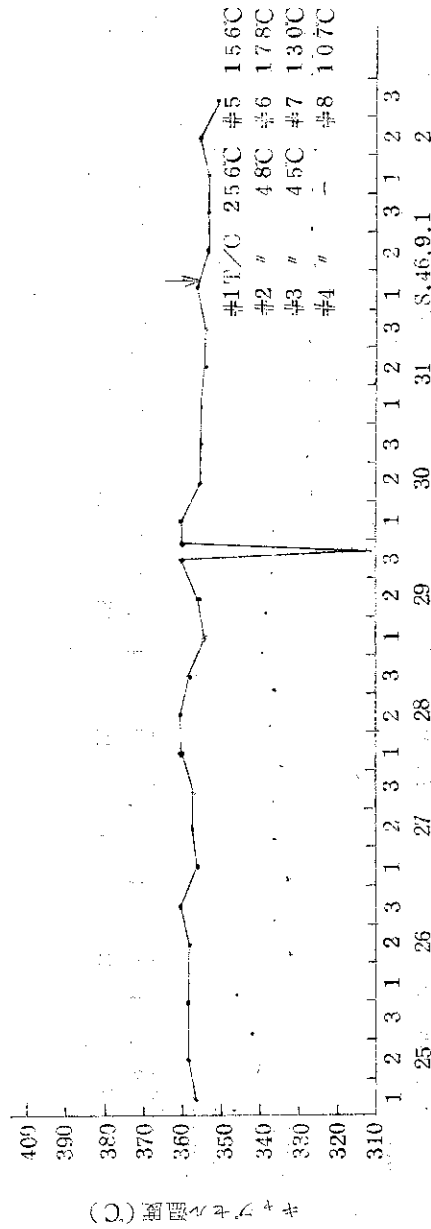
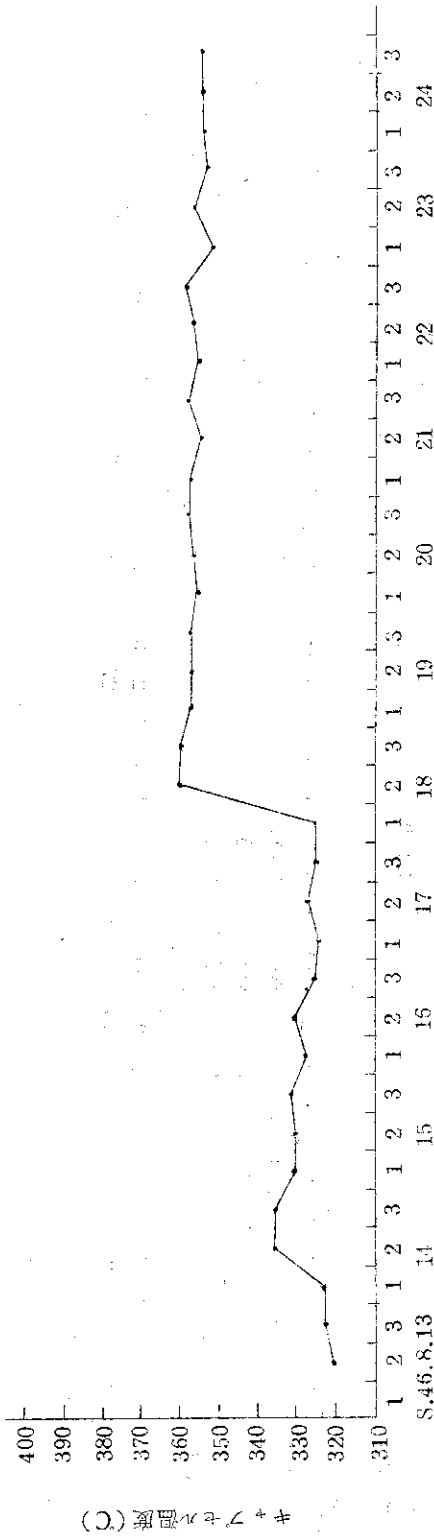


図 1.77 キャプセル温度変化 (第11サイクル)

表1.13 67F-31Gキャプセル線出力

Q_G (w/cm)	日 時	サイクル	熱電対番号
450 w/cm	S.46.6.16 9:13	第9サイクル	#5,6 T/C
460	S.46.7.22 10:22	第10サイクル	"
450	S.46.9.1 9:10	第11サイクル	"

1.18 67F-33G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-33G		
照射 計	試料提供者	日立製作所		
	ペレット	材質	UO ₂ ペレット (天然ウラン)	
		形状	円筒形 (片面および両面)	
		寸法	12.4φ×20	
		数量	6	
	ペレット・スタック長	120		
	被覆管	材質	SUS-32	
		形状	円筒管	
		寸法	12.6φ (内径) × 0.75t, 全長 = 150	
	燃料ピン全長	158		
燃料ピン数量	1			
照射期間	No. 7 ~ 9			
照射試験の目的	1) 照射中のガス圧力 (FP分も含む) の測定 2) 圧力測定結果を UO ₂ 状態の照射後観察結果との対応 3) 質量分析計による各種分析による検討			
キャプセル設計条件	照射孔	E-10		
	線出力	500 w/cm		
	ガンマ発熱	1.5 w/g		
	キャプセル構造	アルミ熱媒体, 一重キャプセル		
	計測	T/C 7本		
制御	なし			
キャプセルの設計	キャプセル構造設計	図 1.78		
	熱設計	図 1.79		
	強度設計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い箇所	内圧による応力	3.1 kg/mm ²
			熱応力	11.3 kg/mm ²
		は被覆管で	許容応力	13.5 kg/mm ²
			右欄にその計算値を示す	評価
設計において特に留意した事項	FP 圧力検出器をできるだけ燃料ピンの近傍においた。			
照射データ	照射温度	図 1.80 ~ 図 1.85		
	F/M 測定値			
	ガス圧	図 1.86, 図 1.87, 図 1.88		
	線出力	表 1.14		

キャプセル名称	67F-33G	キャプセル安全審査資料№																				
照射サイクル	7-9サイクル																					
構造の詳細	DJ-1394-4																					
キャプセルの安全解析	キャプセル型式																					
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件																						
	<table border="1"> <tr> <td>Q_{max} の値</td> <td>550w/cm</td> <td>制限因子</td> <td>燃料中心温度</td> </tr> <tr> <td rowspan="9">キャプセルの最高熱負荷と制限因子</td> <td>T_8</td> <td>50°C</td> <td rowspan="9"> <table border="1"> <tr> <td>Q_{max} における強度上の検討</td> <td> 問題の箇所 被覆管強度, F P 圧力検出器 被覆管 被覆管応力 膜応力 $\sigma_p = 3.1 \text{ kg/mm}^2$ 熱応力 $\sigma_t = 1.13 \text{ kg/mm}^2$ 評価 536°CのSUS-32の強度 $\sigma_a = 135 \text{ kg/mm}^2$ * に対し (1) $\sigma_p < \sigma_a$ (2) $\sigma_p + \sigma_t = 1.44 < 1.5 \sigma_a = 2.02$ * GEAP-4418 </td> <td> F P 圧力検出器 検出器内圧 $P = 34.9 \text{ kg/cm}^2$ 検出器温度 $\approx 150^\circ\text{C}$ 評価 (1) 検出器耐圧 (差圧) 70 kg/cm^2 (2) 検出器耐圧 (等圧) 87.5 kg/cm^2 (3) 検出器最大使用圧 (等圧) 70 kg/cm^2 (ただし、この圧は F P 圧力測定装置によって設定される。) によって、 $P = 34.9 \text{ kg/cm}^2 < 70 \text{ kg/cm}^2$ で Q_{max} においても十分 F P 圧の測定ができる。 </td> </tr> <tr> <td>強度上の評価</td> <td> (1) 被覆管は、Q_{max} に対し、強度条件を満足し安全である。 (2) 圧力検出器強度は、Q_{max} においても F P 圧の測定範囲内であり問題ない。 </td> <td></td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td>キャプセル健全性の総合評価</td> <td colspan="3"> (1) Q_{max} において、キャプセルの強度上の問題はなく安全である。 (2) F P 圧力検出器自体では強度上の問題は無い。 圧力検出器コンタクトリード防湿シールは、セラミックシールのため放射線損傷その他の問題は無い。 </td> </tr> <tr> <td>照射条件ねらい</td> <td>Q_d の値</td> <td>500w/cm</td> <td>Q_{max}/Q_d 1.1</td> </tr> </table>	Q_{max} の値	550w/cm	制限因子	燃料中心温度	キャプセルの最高熱負荷と制限因子	T_8	50°C	<table border="1"> <tr> <td>Q_{max} における強度上の検討</td> <td> 問題の箇所 被覆管強度, F P 圧力検出器 被覆管 被覆管応力 膜応力 $\sigma_p = 3.1 \text{ kg/mm}^2$ 熱応力 $\sigma_t = 1.13 \text{ kg/mm}^2$ 評価 536°CのSUS-32の強度 $\sigma_a = 135 \text{ kg/mm}^2$ * に対し (1) $\sigma_p < \sigma_a$ (2) $\sigma_p + \sigma_t = 1.44 < 1.5 \sigma_a = 2.02$ * GEAP-4418 </td> <td> F P 圧力検出器 検出器内圧 $P = 34.9 \text{ kg/cm}^2$ 検出器温度 $\approx 150^\circ\text{C}$ 評価 (1) 検出器耐圧 (差圧) 70 kg/cm^2 (2) 検出器耐圧 (等圧) 87.5 kg/cm^2 (3) 検出器最大使用圧 (等圧) 70 kg/cm^2 (ただし、この圧は F P 圧力測定装置によって設定される。) によって、 $P = 34.9 \text{ kg/cm}^2 < 70 \text{ kg/cm}^2$ で Q_{max} においても十分 F P 圧の測定ができる。 </td> </tr> <tr> <td>強度上の評価</td> <td> (1) 被覆管は、Q_{max} に対し、強度条件を満足し安全である。 (2) 圧力検出器強度は、Q_{max} においても F P 圧の測定範囲内であり問題ない。 </td> <td></td> </tr> </table>	Q_{max} における強度上の検討	問題の箇所 被覆管強度, F P 圧力検出器 被覆管 被覆管応力 膜応力 $\sigma_p = 3.1 \text{ kg/mm}^2$ 熱応力 $\sigma_t = 1.13 \text{ kg/mm}^2$ 評価 536°CのSUS-32の強度 $\sigma_a = 135 \text{ kg/mm}^2$ * に対し (1) $\sigma_p < \sigma_a$ (2) $\sigma_p + \sigma_t = 1.44 < 1.5 \sigma_a = 2.02$ * GEAP-4418	F P 圧力検出器 検出器内圧 $P = 34.9 \text{ kg/cm}^2$ 検出器温度 $\approx 150^\circ\text{C}$ 評価 (1) 検出器耐圧 (差圧) 70 kg/cm^2 (2) 検出器耐圧 (等圧) 87.5 kg/cm^2 (3) 検出器最大使用圧 (等圧) 70 kg/cm^2 (ただし、この圧は F P 圧力測定装置によって設定される。) によって、 $P = 34.9 \text{ kg/cm}^2 < 70 \text{ kg/cm}^2$ で Q_{max} においても十分 F P 圧の測定ができる。	強度上の評価	(1) 被覆管は、 Q_{max} に対し、強度条件を満足し安全である。 (2) 圧力検出器強度は、 Q_{max} においても F P 圧の測定範囲内であり問題ない。		キャプセル健全性の総合評価	(1) Q_{max} において、キャプセルの強度上の問題はなく安全である。 (2) F P 圧力検出器自体では強度上の問題は無い。 圧力検出器コンタクトリード防湿シールは、セラミックシールのため放射線損傷その他の問題は無い。			照射条件ねらい	Q_d の値	500w/cm
Q_{max} の値	550w/cm	制限因子	燃料中心温度																			
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	T_8	50°C	<table border="1"> <tr> <td>Q_{max} における強度上の検討</td> <td> 問題の箇所 被覆管強度, F P 圧力検出器 被覆管 被覆管応力 膜応力 $\sigma_p = 3.1 \text{ kg/mm}^2$ 熱応力 $\sigma_t = 1.13 \text{ kg/mm}^2$ 評価 536°CのSUS-32の強度 $\sigma_a = 135 \text{ kg/mm}^2$ * に対し (1) $\sigma_p < \sigma_a$ (2) $\sigma_p + \sigma_t = 1.44 < 1.5 \sigma_a = 2.02$ * GEAP-4418 </td> <td> F P 圧力検出器 検出器内圧 $P = 34.9 \text{ kg/cm}^2$ 検出器温度 $\approx 150^\circ\text{C}$ 評価 (1) 検出器耐圧 (差圧) 70 kg/cm^2 (2) 検出器耐圧 (等圧) 87.5 kg/cm^2 (3) 検出器最大使用圧 (等圧) 70 kg/cm^2 (ただし、この圧は F P 圧力測定装置によって設定される。) によって、 $P = 34.9 \text{ kg/cm}^2 < 70 \text{ kg/cm}^2$ で Q_{max} においても十分 F P 圧の測定ができる。 </td> </tr> <tr> <td>強度上の評価</td> <td> (1) 被覆管は、Q_{max} に対し、強度条件を満足し安全である。 (2) 圧力検出器強度は、Q_{max} においても F P 圧の測定範囲内であり問題ない。 </td> <td></td> </tr> </table>	Q_{max} における強度上の検討	問題の箇所 被覆管強度, F P 圧力検出器 被覆管 被覆管応力 膜応力 $\sigma_p = 3.1 \text{ kg/mm}^2$ 熱応力 $\sigma_t = 1.13 \text{ kg/mm}^2$ 評価 536°CのSUS-32の強度 $\sigma_a = 135 \text{ kg/mm}^2$ * に対し (1) $\sigma_p < \sigma_a$ (2) $\sigma_p + \sigma_t = 1.44 < 1.5 \sigma_a = 2.02$ * GEAP-4418		F P 圧力検出器 検出器内圧 $P = 34.9 \text{ kg/cm}^2$ 検出器温度 $\approx 150^\circ\text{C}$ 評価 (1) 検出器耐圧 (差圧) 70 kg/cm^2 (2) 検出器耐圧 (等圧) 87.5 kg/cm^2 (3) 検出器最大使用圧 (等圧) 70 kg/cm^2 (ただし、この圧は F P 圧力測定装置によって設定される。) によって、 $P = 34.9 \text{ kg/cm}^2 < 70 \text{ kg/cm}^2$ で Q_{max} においても十分 F P 圧の測定ができる。	強度上の評価		(1) 被覆管は、 Q_{max} に対し、強度条件を満足し安全である。 (2) 圧力検出器強度は、 Q_{max} においても F P 圧の測定範囲内であり問題ない。												
	Q_{max} における強度上の検討	問題の箇所 被覆管強度, F P 圧力検出器 被覆管 被覆管応力 膜応力 $\sigma_p = 3.1 \text{ kg/mm}^2$ 熱応力 $\sigma_t = 1.13 \text{ kg/mm}^2$ 評価 536°CのSUS-32の強度 $\sigma_a = 135 \text{ kg/mm}^2$ * に対し (1) $\sigma_p < \sigma_a$ (2) $\sigma_p + \sigma_t = 1.44 < 1.5 \sigma_a = 2.02$ * GEAP-4418		F P 圧力検出器 検出器内圧 $P = 34.9 \text{ kg/cm}^2$ 検出器温度 $\approx 150^\circ\text{C}$ 評価 (1) 検出器耐圧 (差圧) 70 kg/cm^2 (2) 検出器耐圧 (等圧) 87.5 kg/cm^2 (3) 検出器最大使用圧 (等圧) 70 kg/cm^2 (ただし、この圧は F P 圧力測定装置によって設定される。) によって、 $P = 34.9 \text{ kg/cm}^2 < 70 \text{ kg/cm}^2$ で Q_{max} においても十分 F P 圧の測定ができる。																		
	強度上の評価	(1) 被覆管は、 Q_{max} に対し、強度条件を満足し安全である。 (2) 圧力検出器強度は、 Q_{max} においても F P 圧の測定範囲内であり問題ない。																				
	キャプセル健全性の総合評価	(1) Q_{max} において、キャプセルの強度上の問題はなく安全である。 (2) F P 圧力検出器自体では強度上の問題は無い。 圧力検出器コンタクトリード防湿シールは、セラミックシールのため放射線損傷その他の問題は無い。																				
	照射条件ねらい	Q_d の値		500w/cm	Q_{max}/Q_d 1.1																	

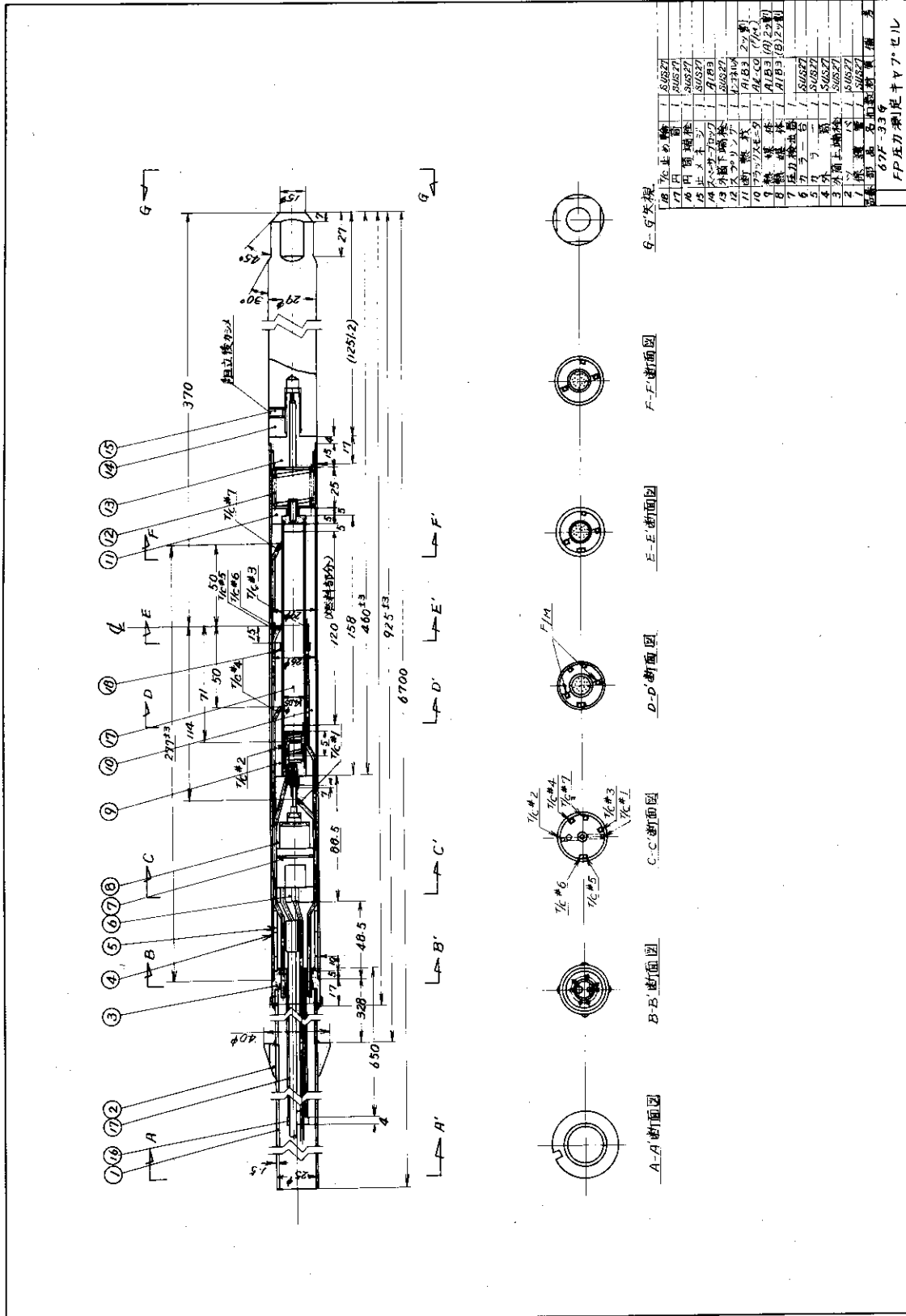


図 1.78 67F-33G FFP 圧力測定キャパセル組立図

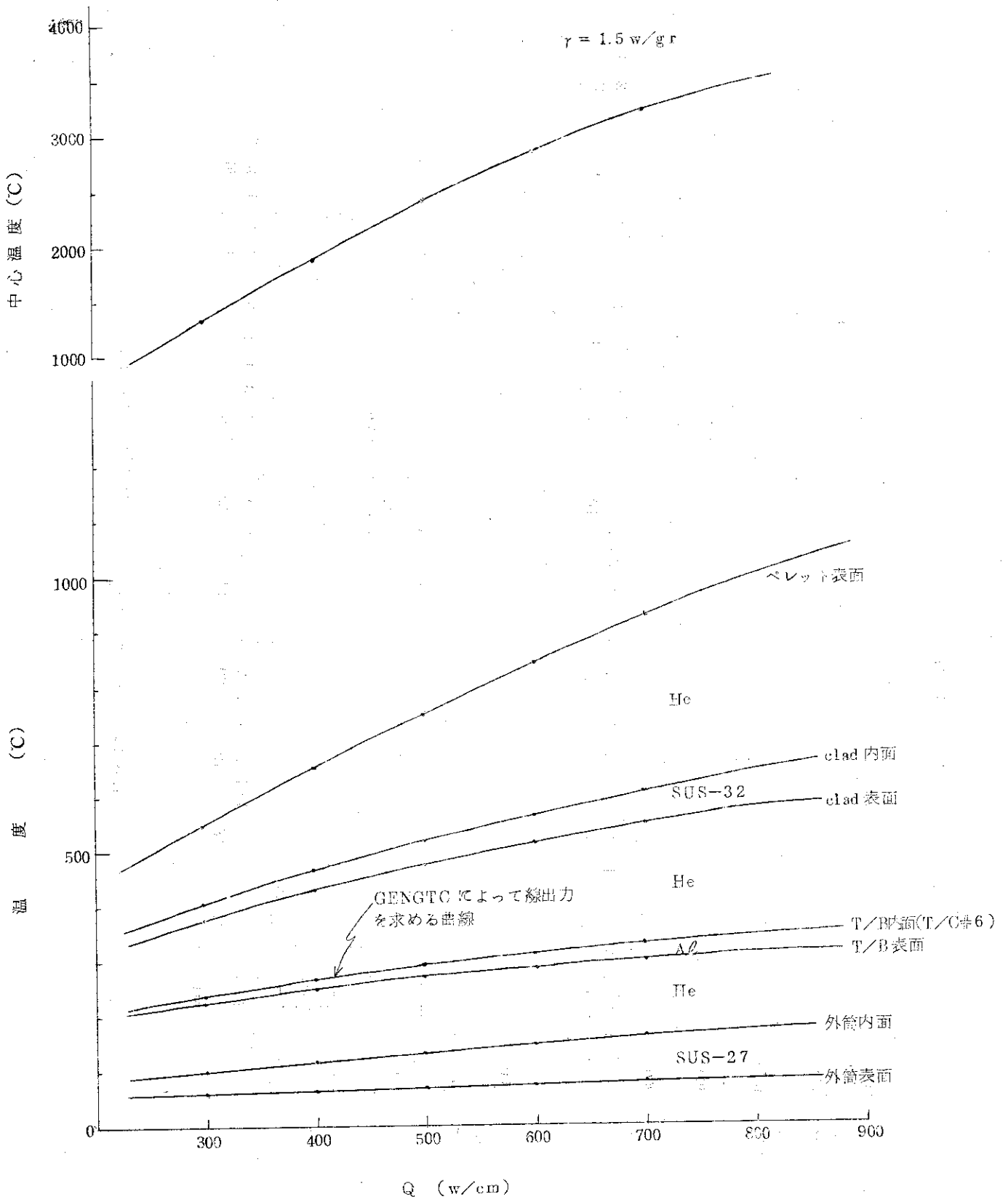
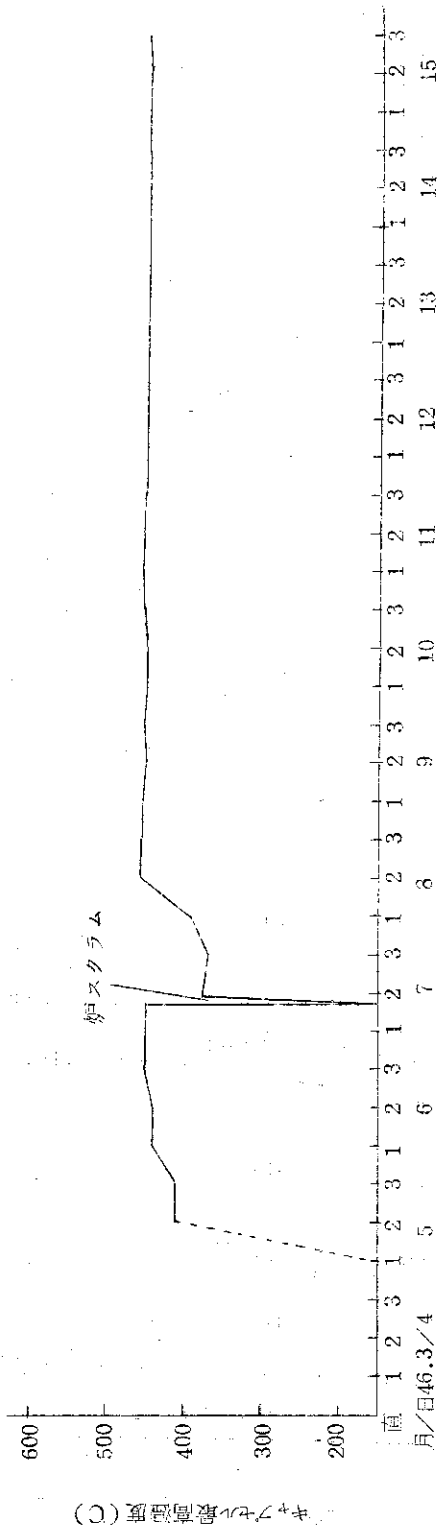


図 1.7 9 6 7 F - 3 3 G 温度分布 (GENGTC)

67F-33G

T/C #3

炉スクラム



原子炉停止中

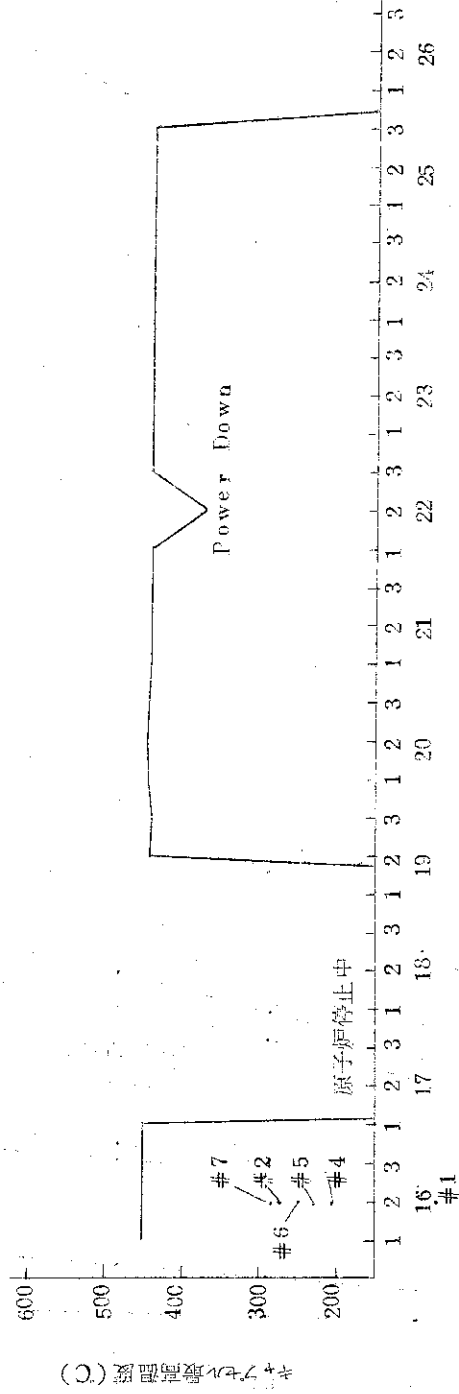


図1.30 キャプセル温度変化(第7サイクル)

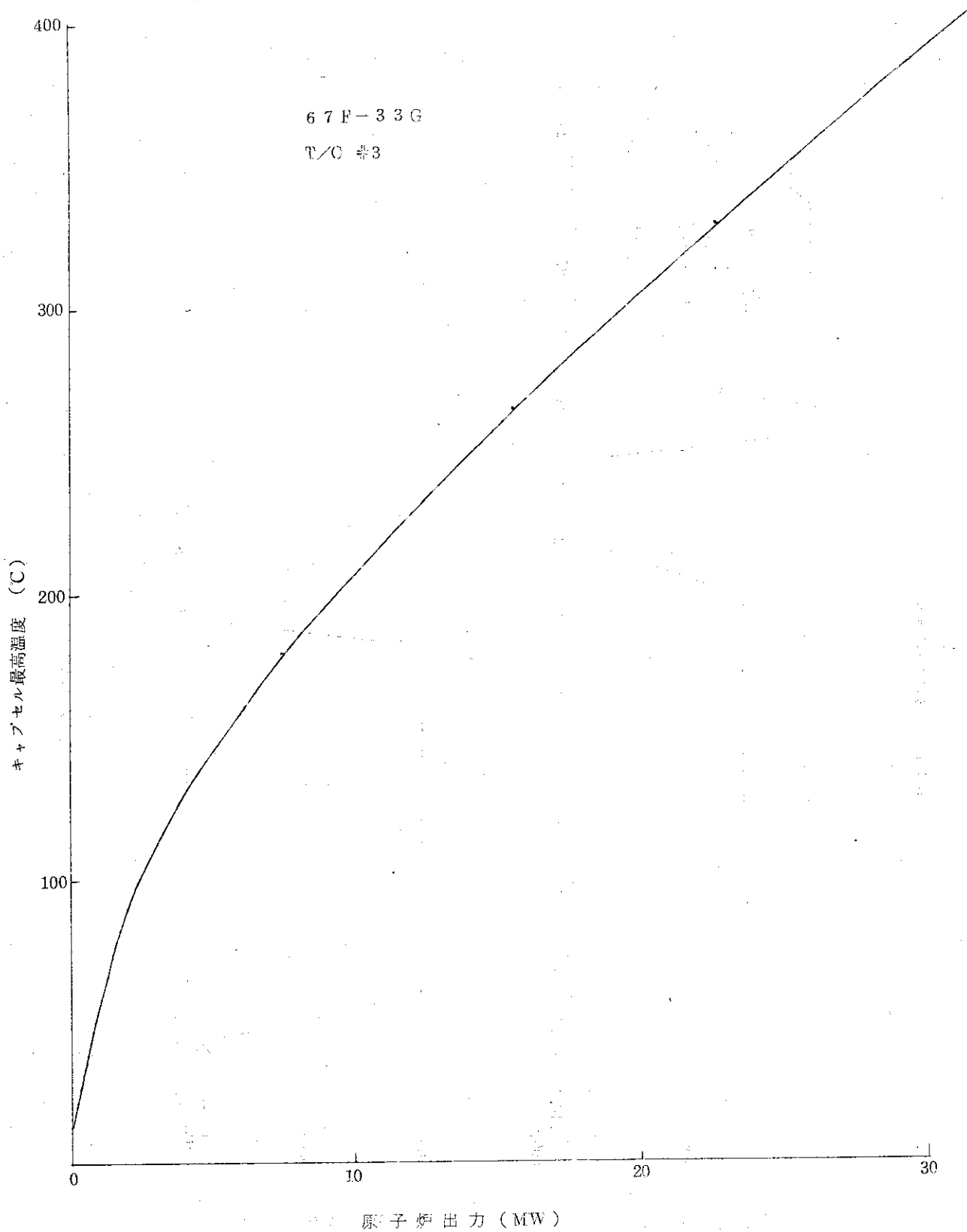


図 1.8 1 原子炉出力対キャプセル最高温度 (第7サイクル)

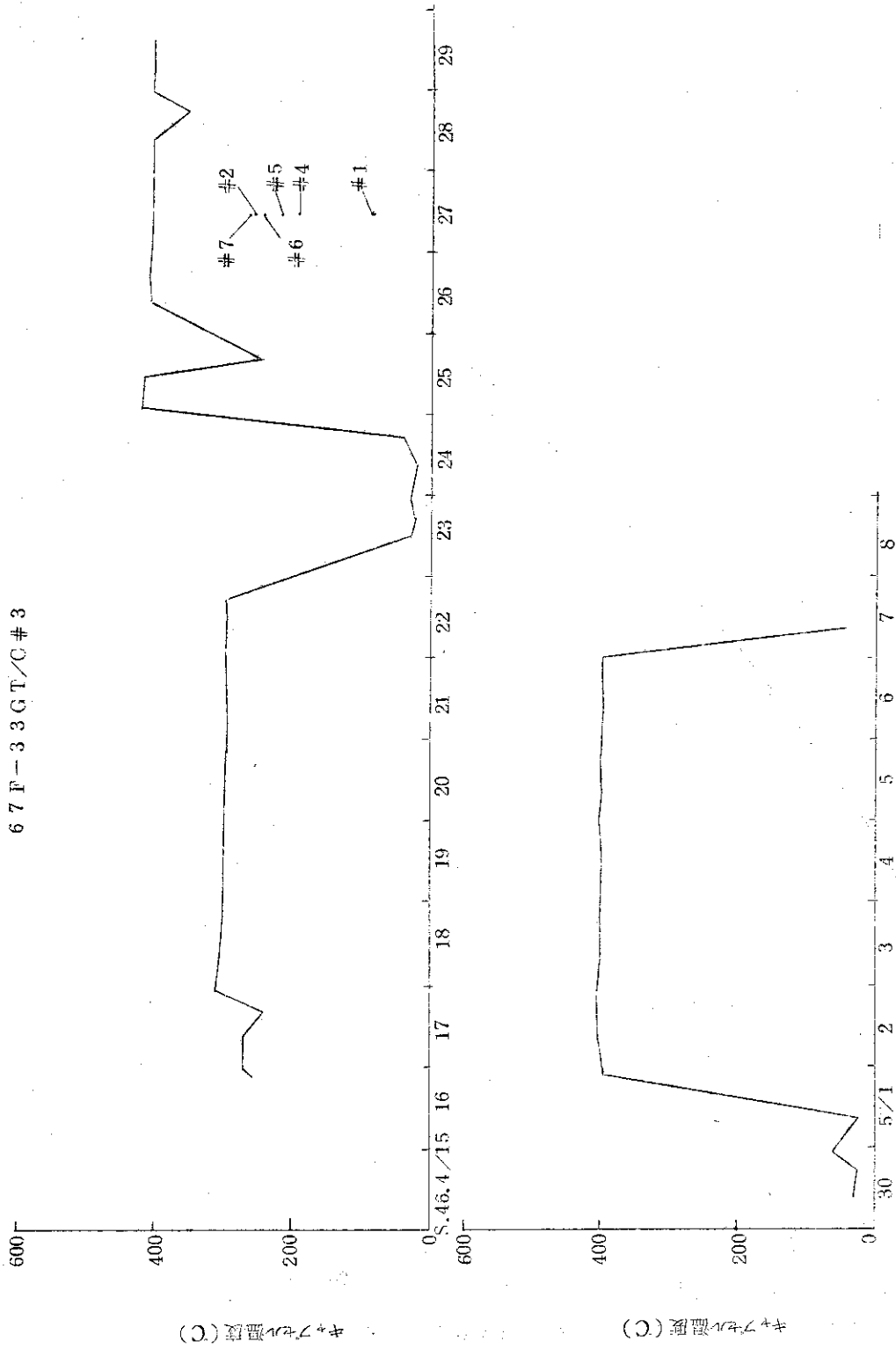


図 1.8.2 キヤプセル温度変化 (第 8 サイクル)

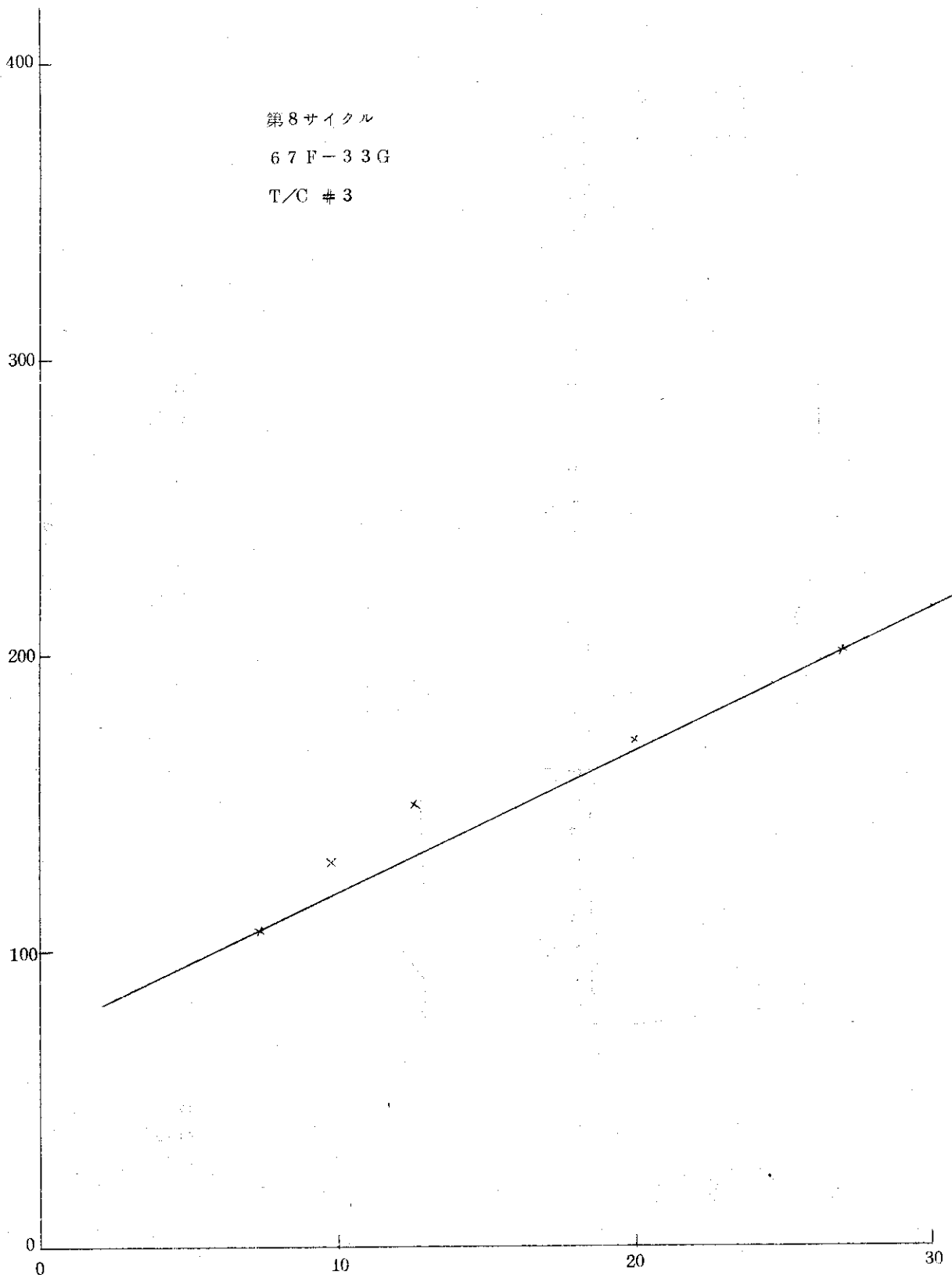


図 1.8 3 原子炉出力上昇時におけるキャプセル温度

67F-33G
T/C #3

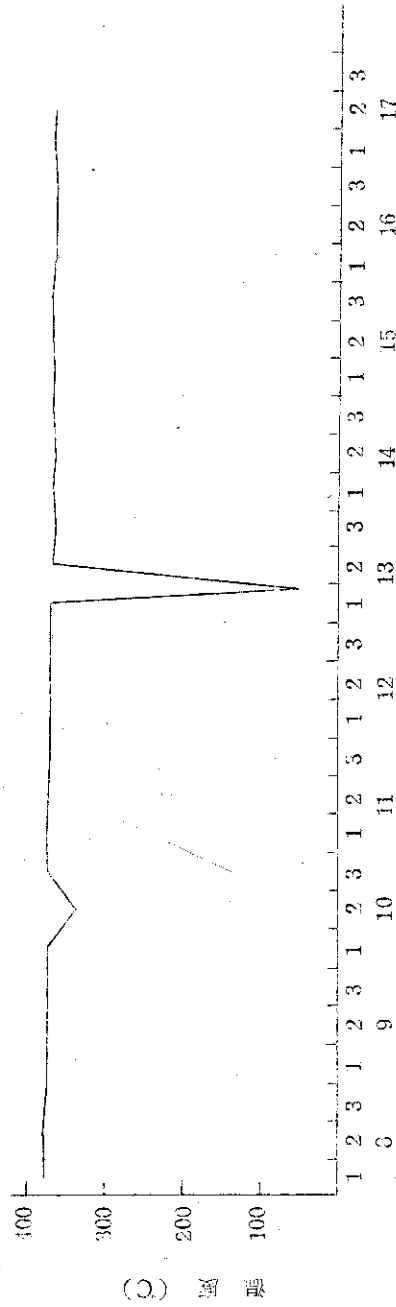
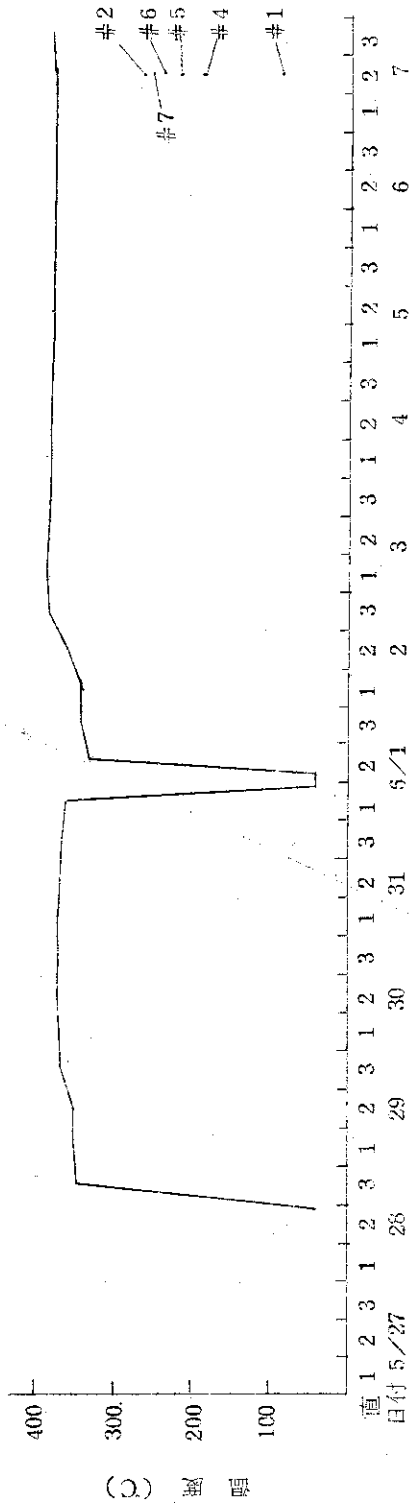


図 1.8.4. キャプセル温度変化 (第9サイクル)

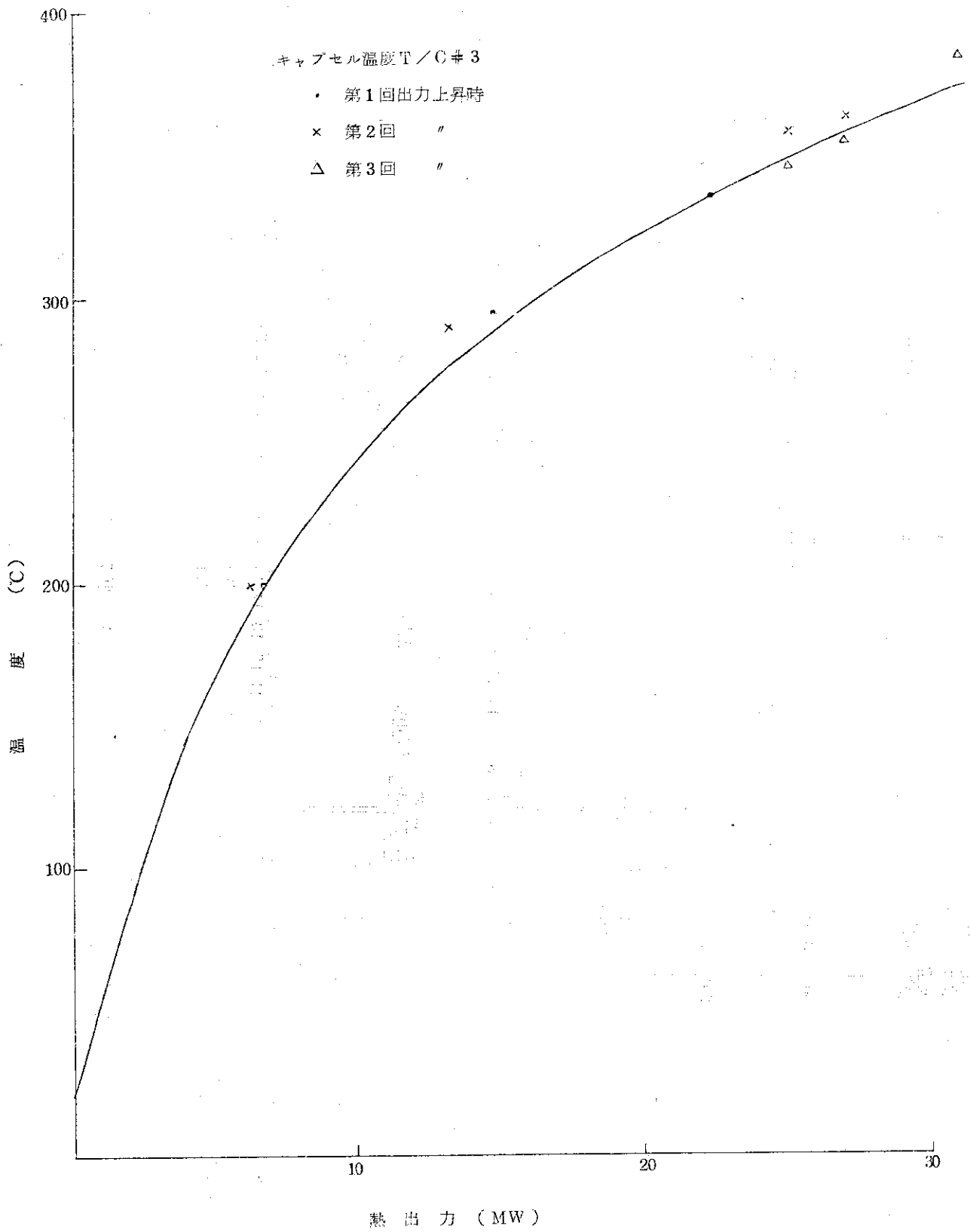


図1.85 67F-33G第9サイクル

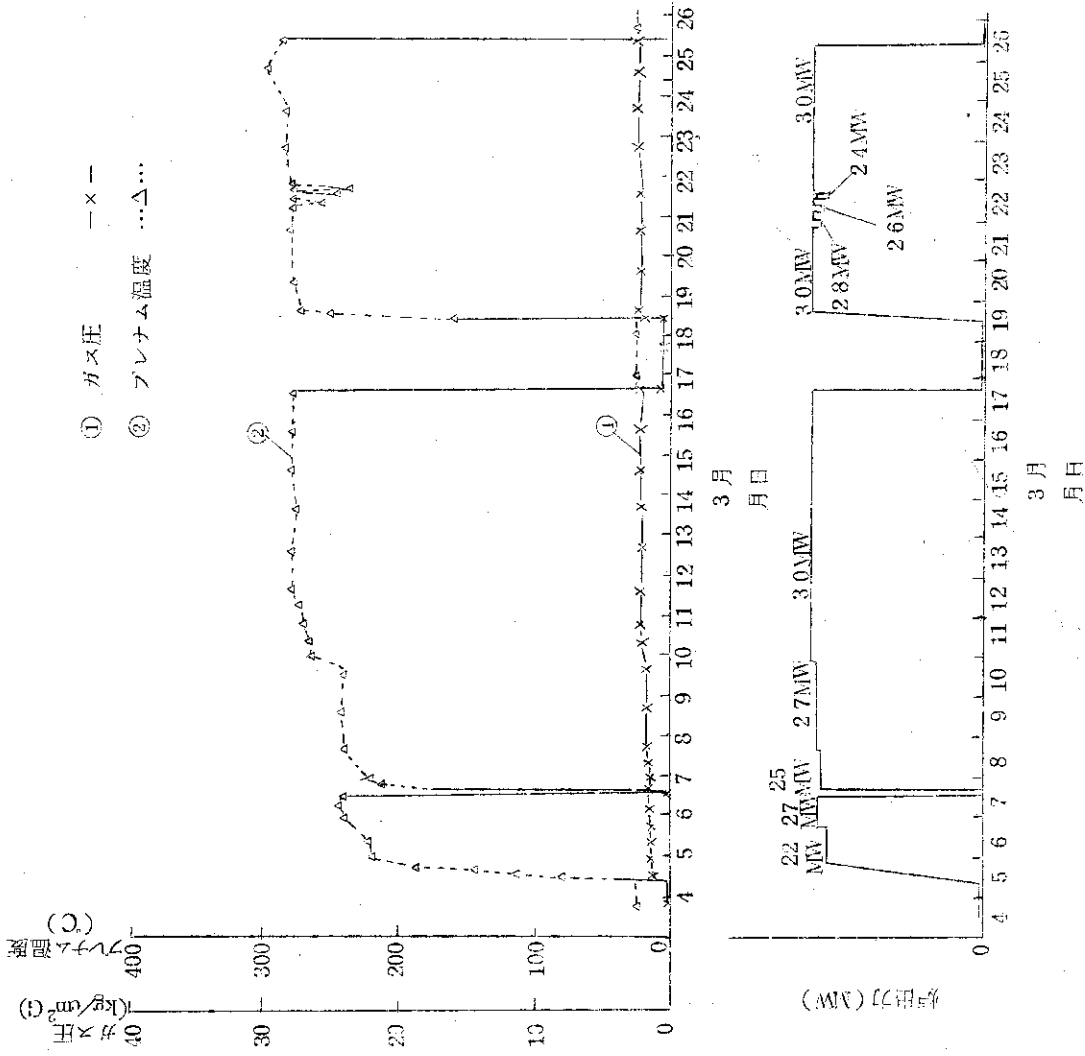


図 1.8.6 第7サイクル

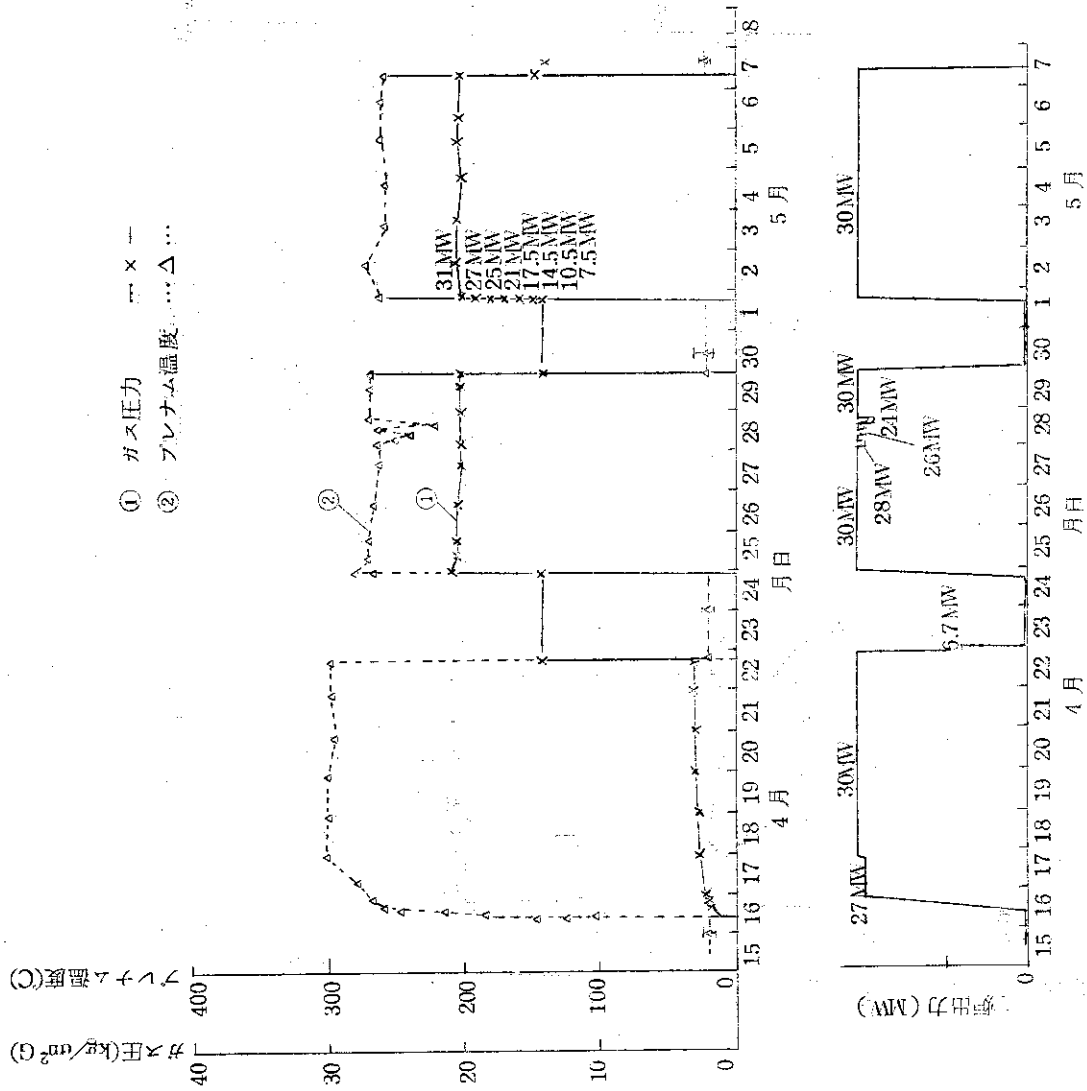


図 1.87 第 8 サイクル

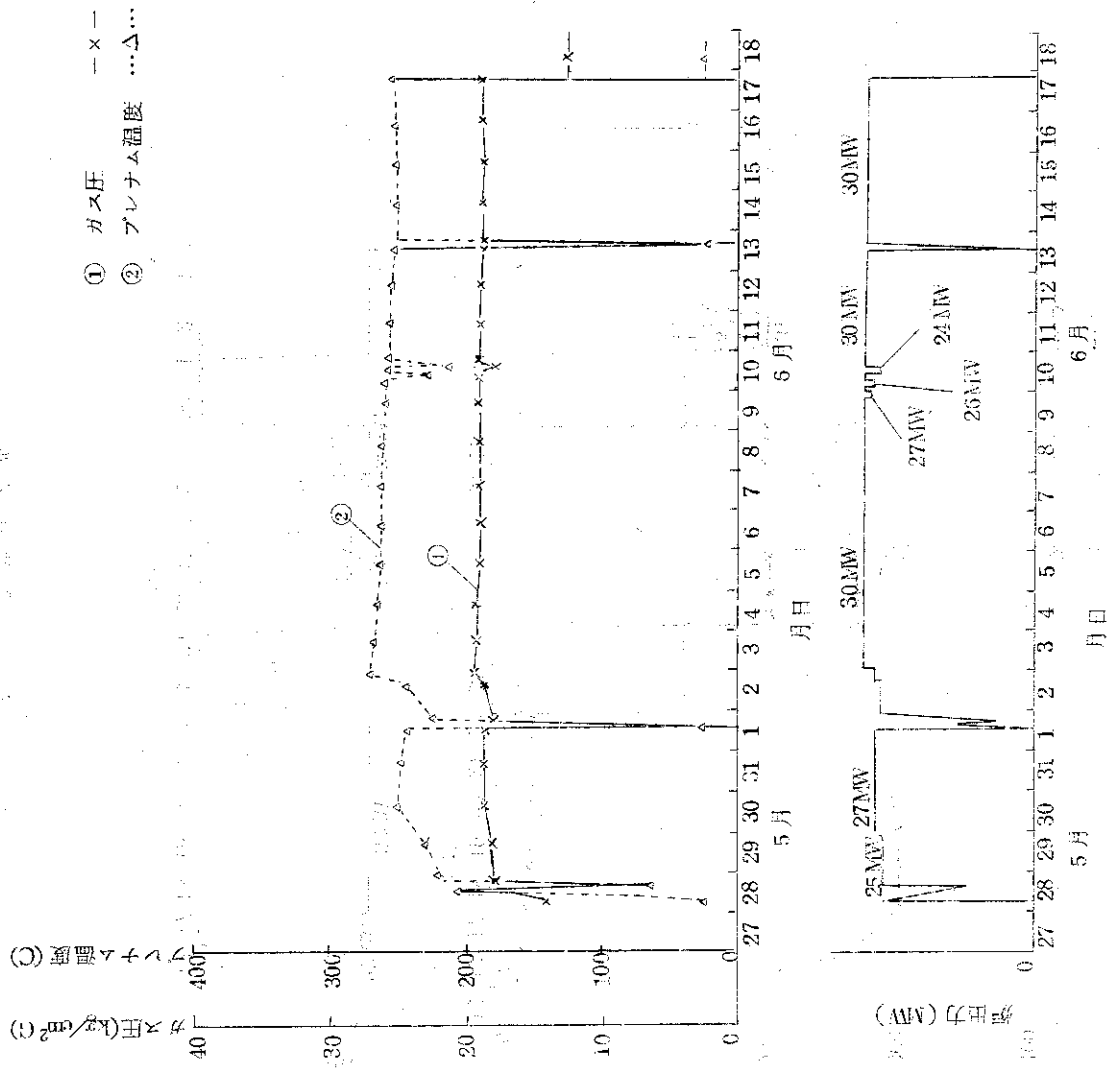


図 1.8.8 第 9 サイクル

表 1.14 67F-33Gの線出力

No. 7 サイクルの線出力

Q _G	月日, 時	T/C No.	備 考
330	3/11, 8:30	#6	最初の30MW 到達時
365	3/20, 16:25	"	サイクル中間
350	3/26, 5:30	"	サイクル終了直前

No. 8 サイクルの線出力

Q _G	月日, 時	T/C No.	備 考
380	4/17, 23:03	#6	最初の30MW 到達時
330	4/27, 17:09	"	サイクル中間
310	5/6, 16:28	"	サイクル終了直前

No. 9 サイクルの線出力

Q _G	月日, 時	T/C No.	備 考
310	6/2, 22:51	#6	最初の30MW 到達時
290	6/12, 16:15	"	サイクル中間
290	6/17, 18:55	"	サイクル終了直前

1.19 67F-35G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-35G		
照射 計	試料提供者	住友電気工業株式会社		
	試料	ペレット	材質	酸化ガドリ入り天然ウランUO ₂ ペレット
			形状	円柱状ペレット
			寸法	直径12.57mmφ 高さ12.5mm
			数量	16個
	ペレット・スタック長		200mm	
	被覆管	材質	zry-2	
		形状	円筒形	
		寸法	内径12.64mmφ 肉厚0.74mm	
	燃料ピン全長		261mm	
燃料ピン数量		1本		
照射期間		第5～第6サイクル		
照射試験の目的	1) 稀土類元素入りUO ₂ の照射経験をうる。 2) 添加元素の照射挙動及び発生ボイドの状況調査 3) Aφ熱媒体キャプセルの熱特性の調査			
キャプセル設計条件	照射孔	N-10		
	線出力	300w/cm		
	ガンマ発熱	2.5w/g		
	キャプセル構造	Aφ熱媒体		
	計測	CA熱電対 6本		
	制御	なし		
キャプセルの設計	キャプセル構造設計	図1.89にキャプセル組立図を示す。		
	熱設計	図1.90に内温度分布を示す。		
	強度設計	キャプセル構造のうち最も強度の弱い個所は被覆管で右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 2.7 \text{ kg/mm}^2$
			熱応力	$\sigma_t = 2.9 \text{ kg/mm}^2$
			許容応力	$\sigma_a = 4.7 \text{ kg/mm}^2$
評価	$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 5.6 \text{ kg/mm}^2$ で強度十分である。			
設計において特に留意した事項	熱設計は酸化ガドリが添加されていないものとして行った。			
照射データ	照射温度	図1.91～図1.93に各サイクル毎の温度記録を示す。		
	F/M測定値			
	線出力	表1.15		
	その他	図1.94および図1.95(照射日数と線出力)		

キャプセル名称	67F-35G	キャプセル安全審査資料№																								
照射サイクル	第5～第6	2サイクル																								
構造の詳細	RM-1833, 67F-35Gキャプセル承認図																									
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	設計基準第4条(3)2φベリリウム枠用標準キャプセル																								
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p> <p>燃焼 2サイクル 42days</p> <p>冷却水 外筒SUS-27 ガスギャップHe Aℓ (2S)</p> <p>被覆管zry-2 ガスギャップHe</p> <p>ガスギャップHe</p> <p>UO₂(Nat.) Gd₂O₃入り(1.4%)</p>																									
	<table border="1"> <tr> <td>Q_{max}の値</td> <td>420w/cm</td> <td>制限因子</td> <td>被覆管応力</td> </tr> <tr> <td rowspan="8">キャプセルの最高熱負荷と制限因子分布</td> <td>T₈</td> <td>50℃</td> <td rowspan="8"> 問題の箇所 被覆管の応力 一次膜応力 $\sigma = 2.7 \text{ kg/mm}^2$ 熱応力 $\tau = 2.9 \text{ kg/mm}^2$ に対し 許容応力 zry-2 at 500℃ $\sigma_a = 4.7 \text{ kg/mm}^2$ (BMI-1168 参照, 許容応力は引張強さの$\frac{1}{3}$の値をとった。) $\sigma < \sigma_a$ $\sigma + \tau < 1.5 \sigma_a$ </td> </tr> <tr> <td>T₇</td> <td>65℃</td> </tr> <tr> <td>T₆</td> <td>115℃</td> </tr> <tr> <td>T₅</td> <td>267℃</td> </tr> <tr> <td>T₄</td> <td>284℃</td> </tr> <tr> <td>T₃</td> <td>443℃</td> </tr> <tr> <td>T₂</td> <td>483℃</td> </tr> <tr> <td>T₁</td> <td>675℃</td> </tr> <tr> <td>T₀</td> <td>1995℃</td> <td>強度上の評価</td> <td>Q_{max}は被覆管応力で制限される。</td> </tr> </table>	Q _{max} の値	420w/cm	制限因子	被覆管応力	キャプセルの最高熱負荷と制限因子分布	T ₈	50℃	問題の箇所 被覆管の応力 一次膜応力 $\sigma = 2.7 \text{ kg/mm}^2$ 熱応力 $\tau = 2.9 \text{ kg/mm}^2$ に対し 許容応力 zry-2 at 500℃ $\sigma_a = 4.7 \text{ kg/mm}^2$ (BMI-1168 参照, 許容応力は引張強さの $\frac{1}{3}$ の値をとった。) $\sigma < \sigma_a$ $\sigma + \tau < 1.5 \sigma_a$	T ₇	65℃	T ₆	115℃	T ₅	267℃	T ₄	284℃	T ₃	443℃	T ₂	483℃	T ₁	675℃	T ₀	1995℃	強度上の評価
Q _{max} の値	420w/cm	制限因子	被覆管応力																							
キャプセルの最高熱負荷と制限因子分布	T ₈	50℃	問題の箇所 被覆管の応力 一次膜応力 $\sigma = 2.7 \text{ kg/mm}^2$ 熱応力 $\tau = 2.9 \text{ kg/mm}^2$ に対し 許容応力 zry-2 at 500℃ $\sigma_a = 4.7 \text{ kg/mm}^2$ (BMI-1168 参照, 許容応力は引張強さの $\frac{1}{3}$ の値をとった。) $\sigma < \sigma_a$ $\sigma + \tau < 1.5 \sigma_a$																							
	T ₇	65℃																								
	T ₆	115℃																								
	T ₅	267℃																								
	T ₄	284℃																								
	T ₃	443℃																								
	T ₂	483℃																								
	T ₁	675℃																								
T ₀	1995℃	強度上の評価	Q _{max} は被覆管応力で制限される。																							
キャプセル健全性の総合評価																										
照射条件ねらい	Q _d の値	300w/cm	Q _{max} /Q _d 1.4																							
外筒外径は設計基準では29φとなっているが、本キャプセルは設計基準確立前に製作されたので、外径は30φとなっている。																										

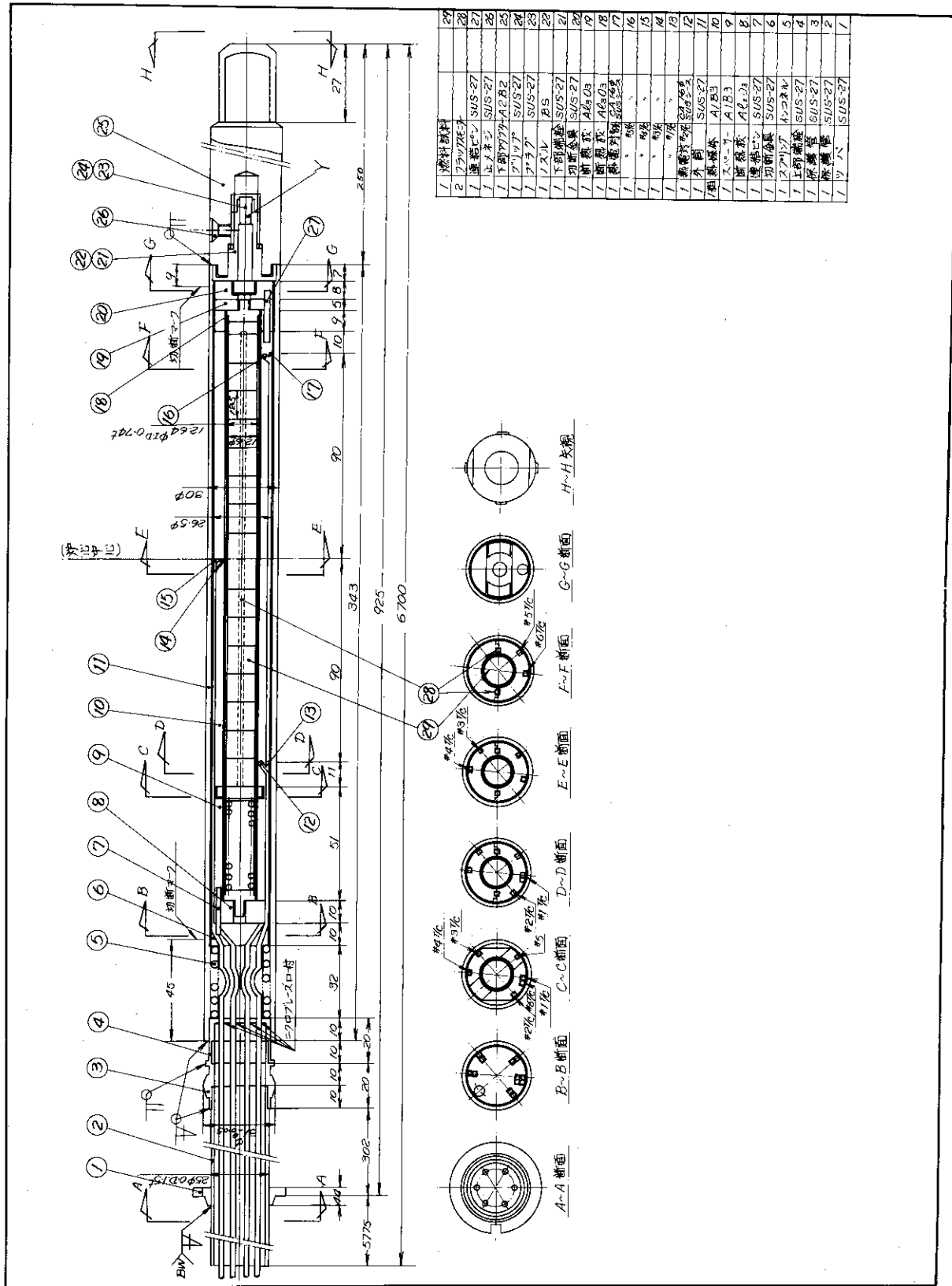


図 1.89 67F-35G キャプセル組立図

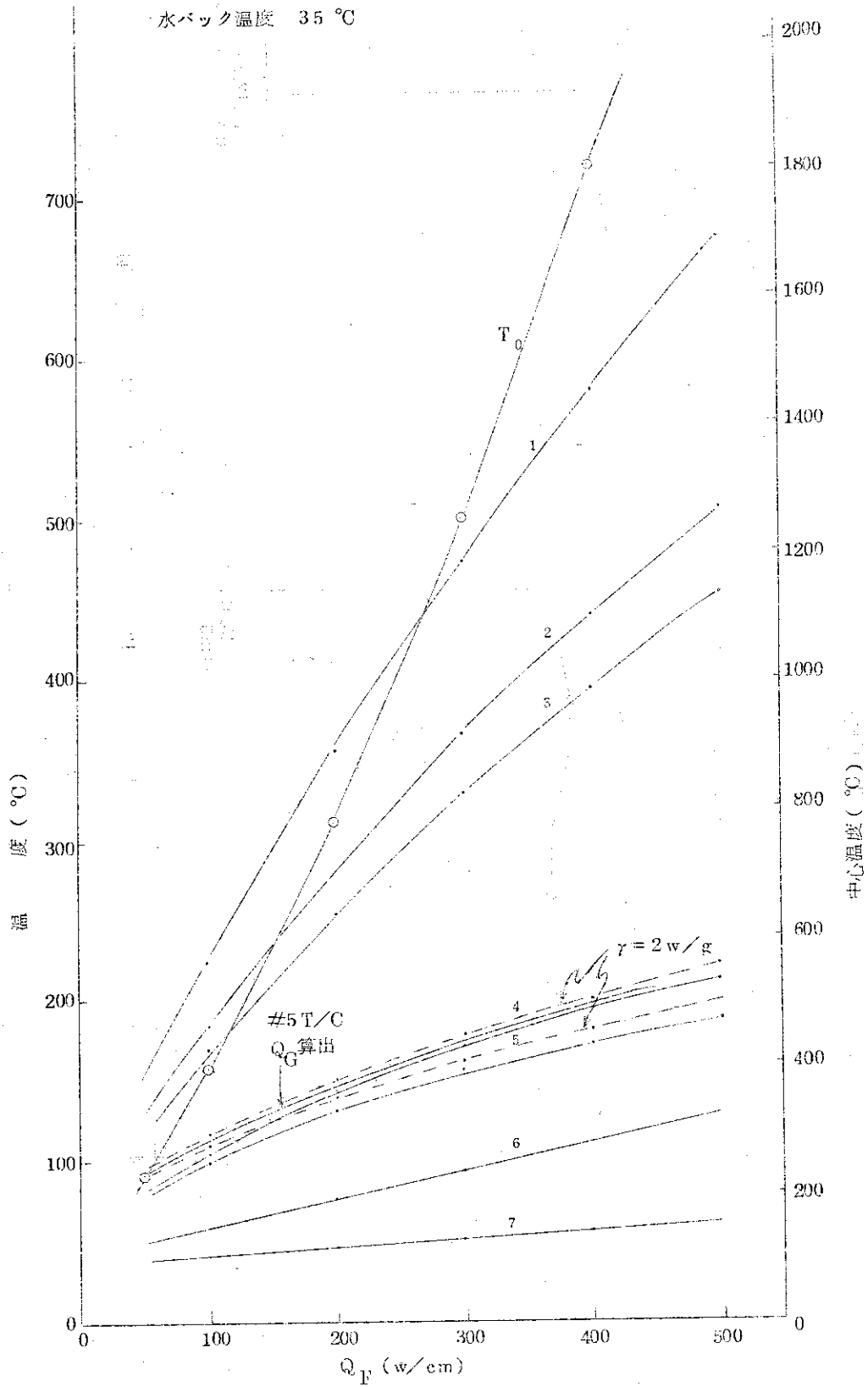


図 1.90 67F-35G キャプセル温度分布 ($\gamma = 1 w/g$)

第5 サイクル
T/C#5

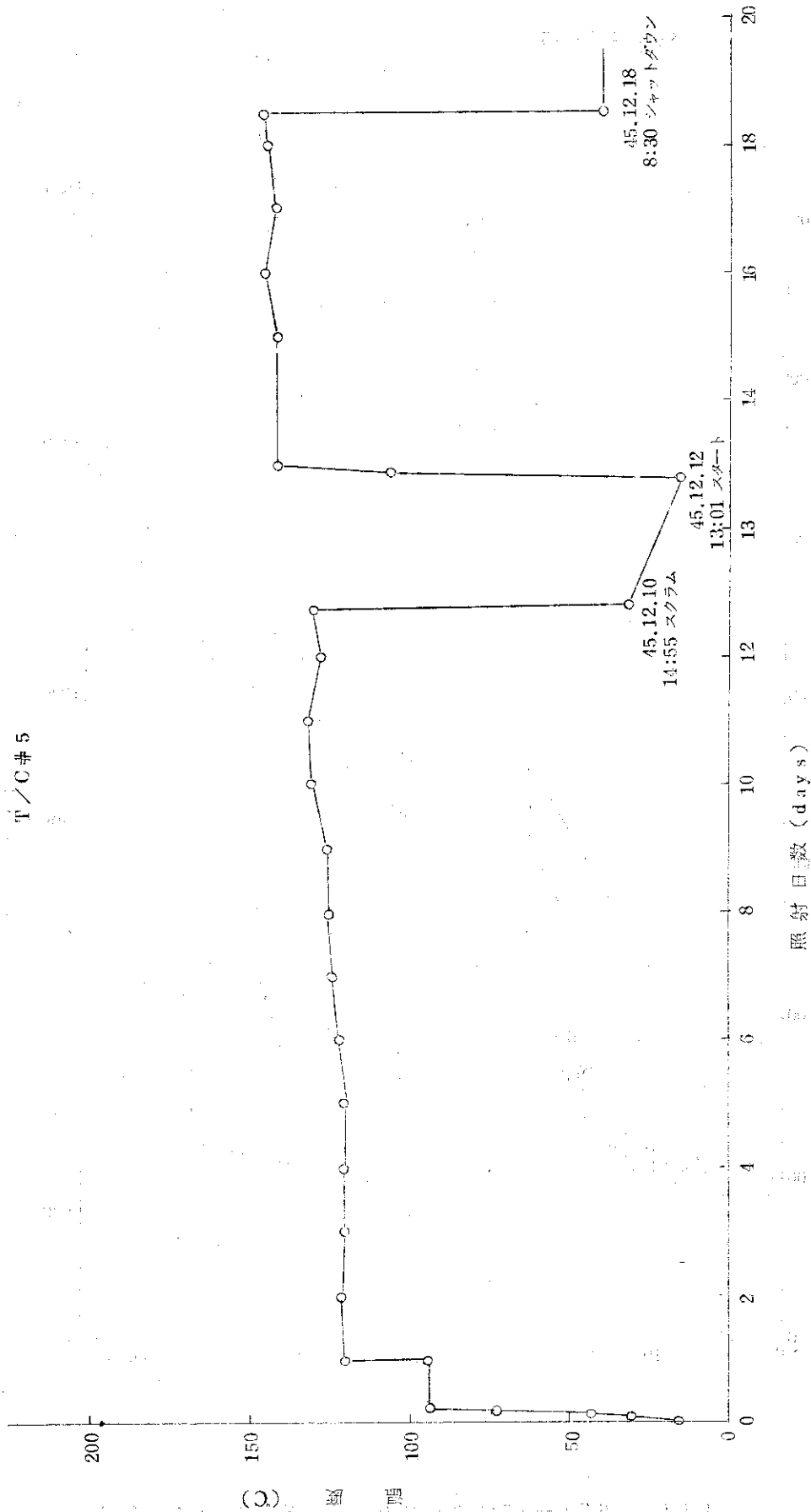


図1.9-1 67F-35Gキャプセル温度変化

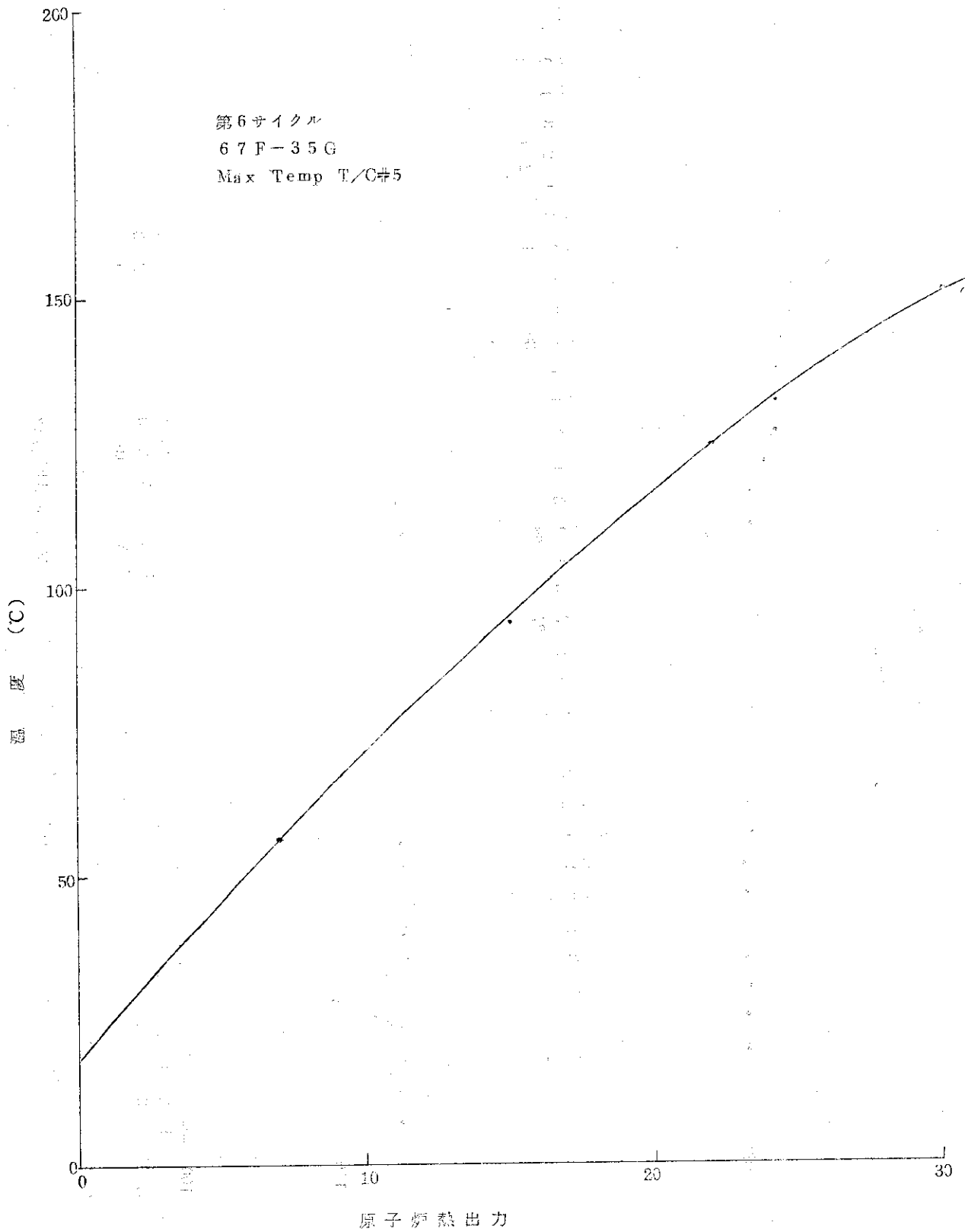


図 1.9 2 67F-35G キャプセル温度変化

第6サイクル

T/C#5

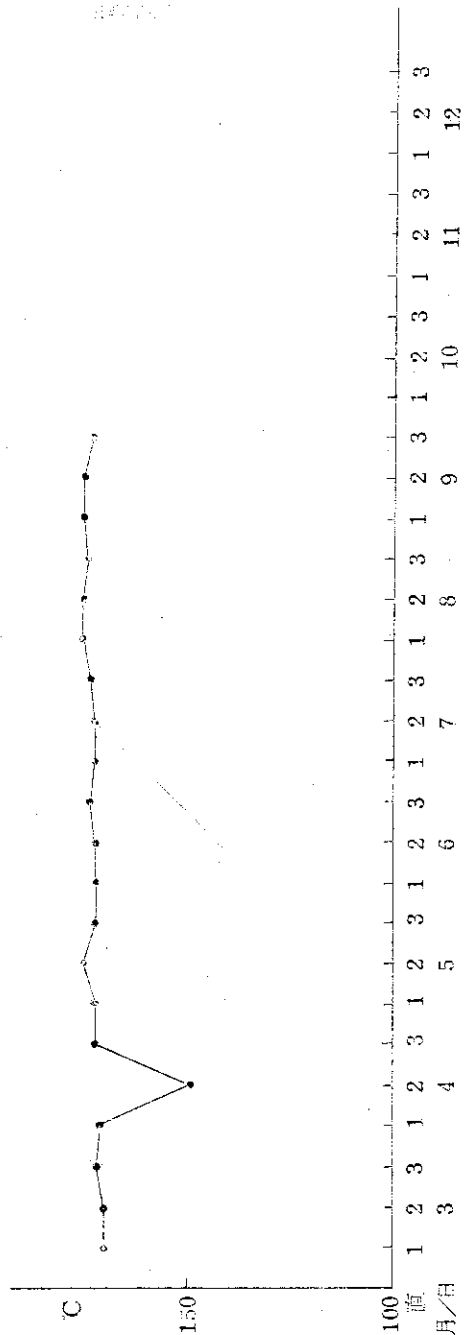
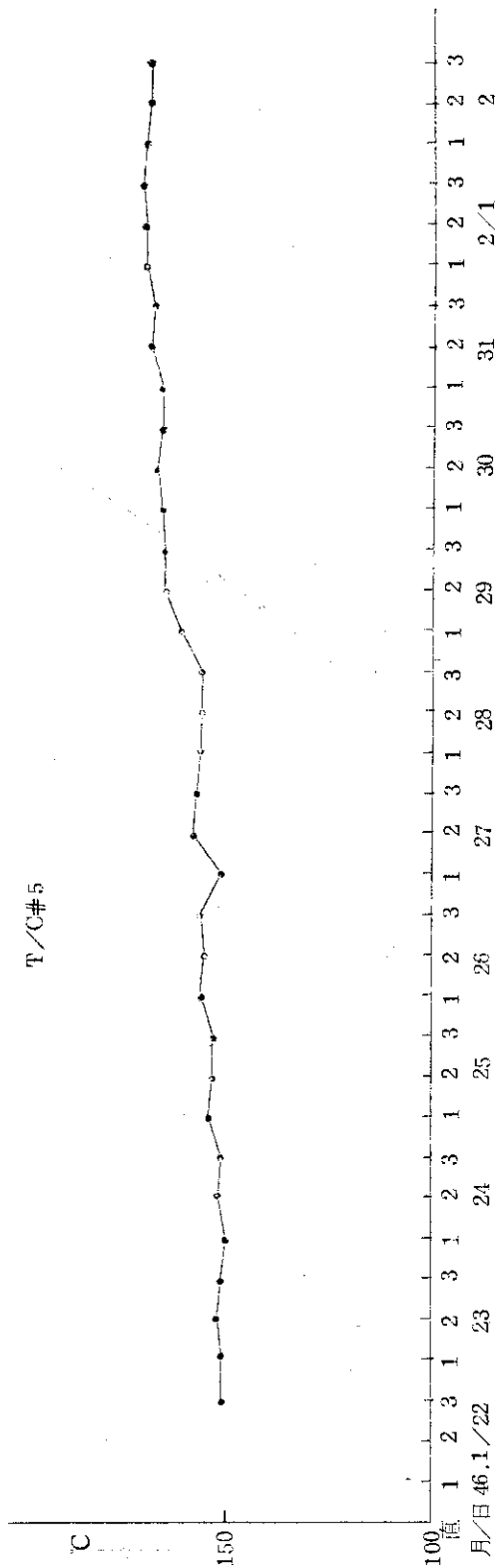


図 1.93 67P-35Qキヤプセル温度変化

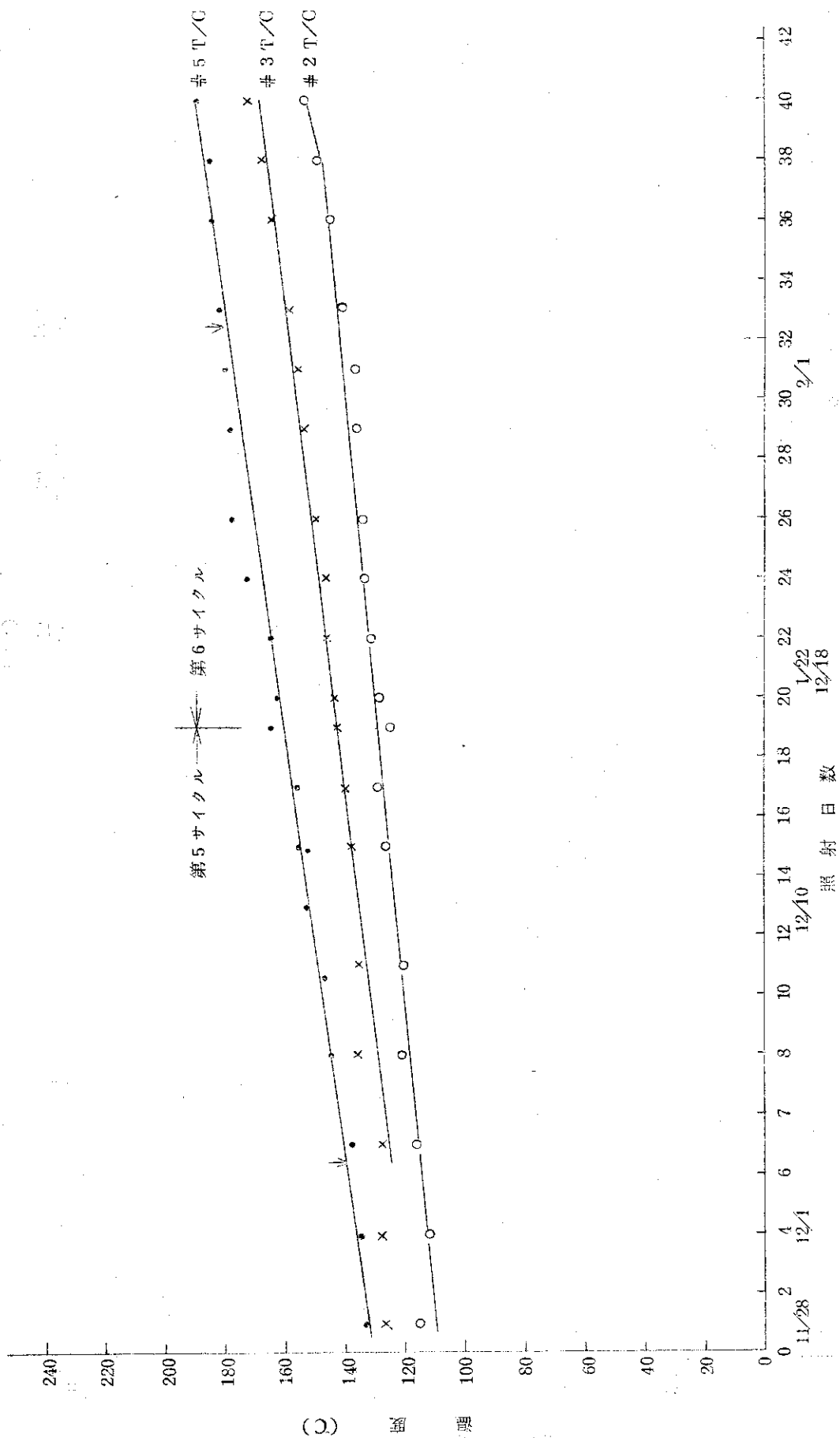
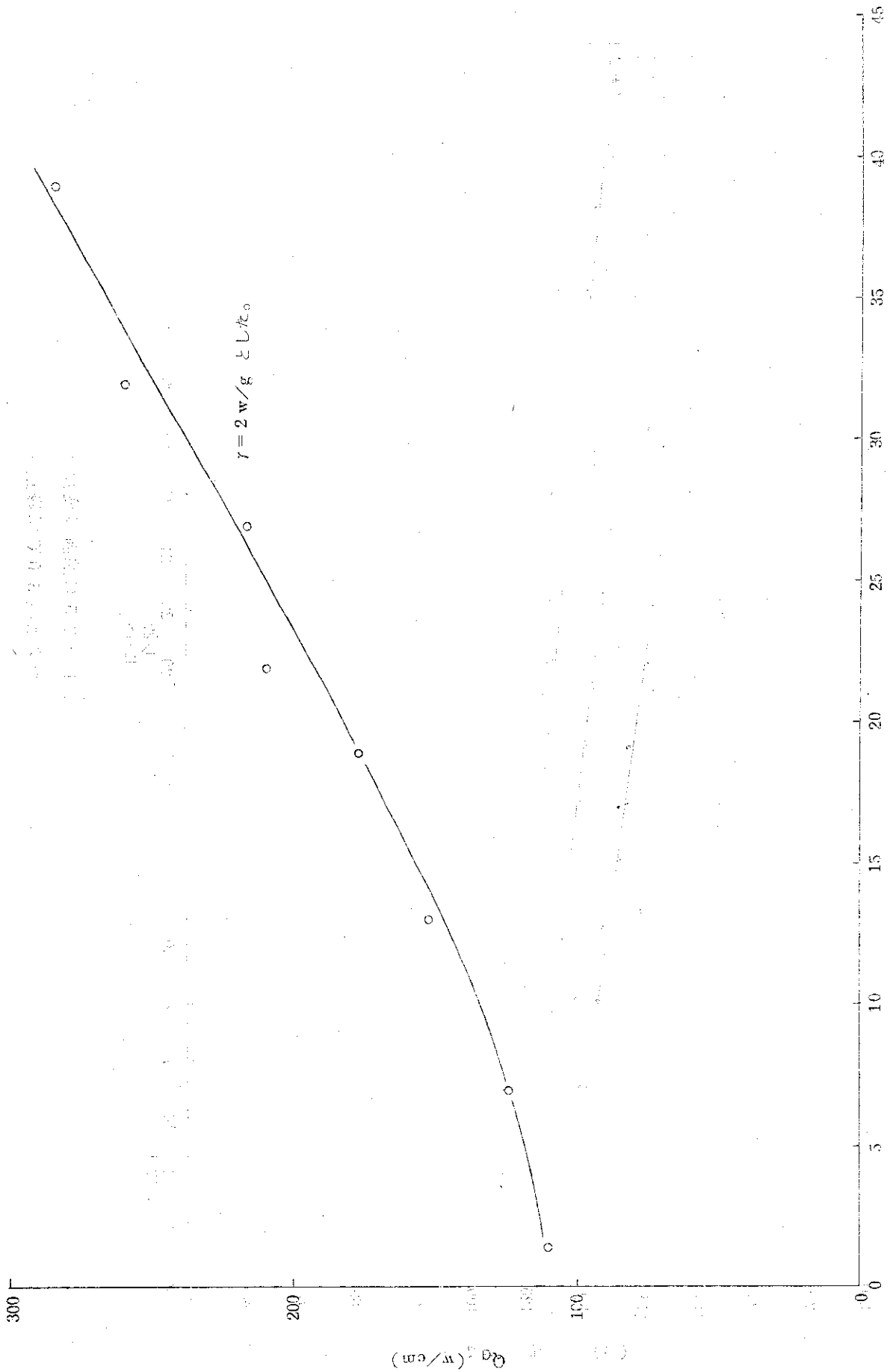


図 1.94 67 F - 35 G 照射温度変化
(バルク水温 50°C に修正)



照射日数 (days)

図 1.9 5 6 7 F-3 5 G Qd の変化

表1.15 67F-35G推定線出力

第5サイクル

日付	原子炉熱出力	推定線出力 Q_G	備考
46.11.28 第1日目	31.0MW	110w/cm	
12.4 第7日目	30.8MW	123w/cm	
12.10 第13日目	29.5MW	152w/cm	
12.16 第19日目	30.0MW	177w/cm	

第6サイクル

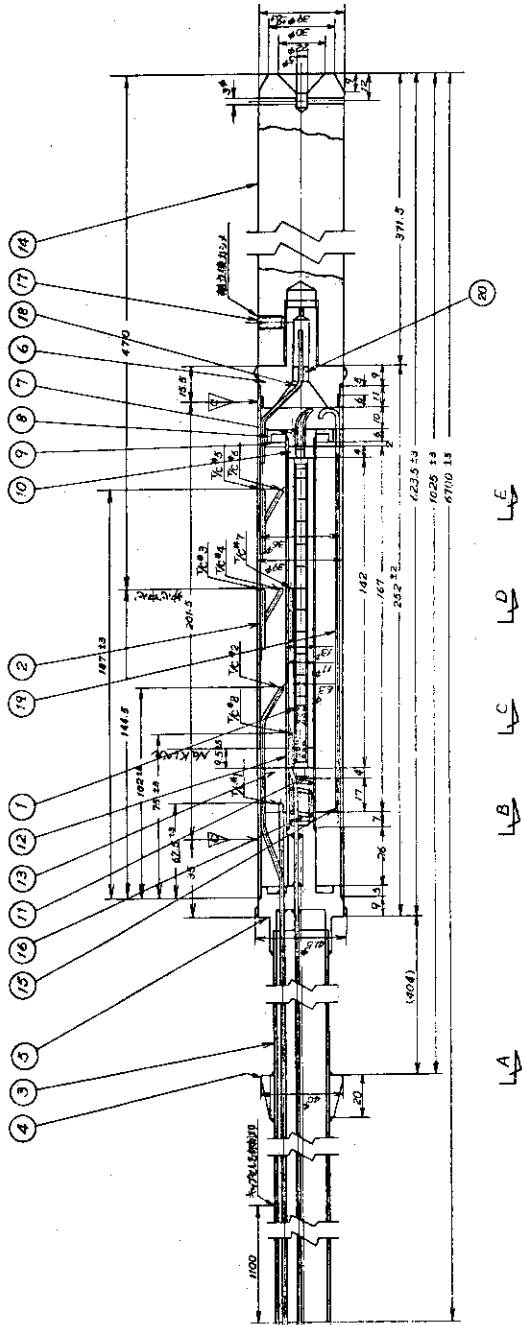
日付	原子炉熱出力	推定線出力 Q_G	備考
47.1.22 第1日目	30.7MW	210w/cm	
1.27 第6日目	31.0MW	217w/cm	
2.1 第11日目	30.5MW	260w/cm	
2.8 第18日目	30.5MW	285w/cm	

$\gamma = 2w/g$ とした。

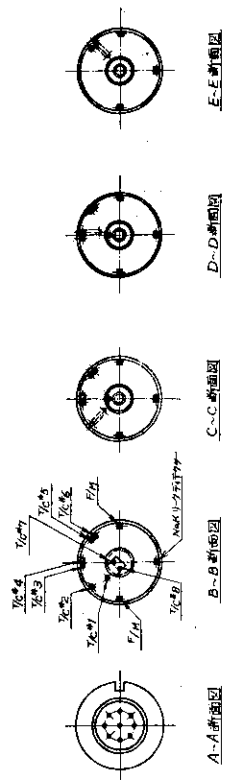
1.20 67F-36G 照射データと参考資料

キャプセル名		67F-36G		
照射 計	試料提供者	日本原子力研究所, 動力炉・核燃料開発事業団		
	試	ペレット	材 質	(Pu-U)O ₂
			形 状	円柱状 焼結ペレット
			寸 法	5.5φ×10L
			数 量	10個
	ペレット・スタック長		100L	
	料	被覆管	材 質	SUS-316
			形 状	継目無管
			寸 法	6.3φO.D.×5.6φI.D.
	燃料ピン全長		148L	
燃料ピン数量		1本		
照射期間		2サイクル(第10~11)		
画	照射試験の目的	1) JFER仕様に基づいた高出力照射。 2) 急温度勾配, 高温, 高バーンアップ下におけるPuO ₂ -UO ₂ の照射挙動組織観察。		
キャプセル 設計条件	照射孔	O-9		
	線出力	300w/cm		
	ガンマ発熱			
	キャプセル構造	NaK Aφ熱媒体二重キャプセル		
	計 測	C-A TC		
	制 御	なし		
キャプセル の設計	キャプセル構造設計	図1.96		
	熱 設 計	図1.97		
	強度設計 は 被覆管 で 右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 7.88 \text{ kg/mm}^2$	
		熱 応 力	$\sigma_t = 8.83 \text{ kg/mm}^2$	
		許 容 応 力	$\sigma_a = 13.5 \text{ kg/mm}^2$	
評 価		$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 16.71 < 3\sigma_a = 40.5$		
設計において特に留意した事項	Q _{max} を大きくするため, 内筒(SUS)とAφ熱媒体を共引管とした。			
照射 データ	照射温度	図1.98, 図1.99		
	F/M測定値			
	線出力	表1.16		

キャプセル名称	67F-36G	キャプセル安全審査資料No.		
照射サイクル	10-11			
構造の詳細	Al-NaK熱媒体計測付二重キャプセル			
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	計測付キャプセル		
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p>		<p>計算の条件</p> <p>冷却水温度 $T_{10} = 5.0^{\circ}\text{C}$</p> <p>キャプセル表面熱伝達率 $20,000 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^{\circ}\text{C}$</p> <p>設計マニュアルによった。</p> <p>γ-heating rate 0.5 w/gr</p> <p>[ベレット表面より他の部分の温度計算はGENGTCによった。]</p> <p>燃料中心温度の算出</p> <p>熱伝導率: ASAmots-Bailey's eq</p> <p>ベレット表面と中心の出力密度の比 0.515</p> <p>出力分布は2次曲線とした。</p> <p>(出力分布に関しては計画課より与えられた値を用いた。)</p>	
	<p>燃料ベレット (20%PuO₂-nat.UO₂)</p> <p>He gas</p> <p>被覆管SUS-32</p> <p>熱媒体56/44NaK</p> <p>内筒SUS-27</p> <p>冷却水</p> <p>外筒SUS-27</p> <p>He gas</p> <p>Al熱媒体</p>			
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	Q_{max} の値	500 w/cm	制限因子	燃料中心温度
	Q_{max} の分布	<p>冷却水温度 $T_{10} = 5.0^{\circ}\text{C}$</p> <p>外筒外面温度 $T_9 = 6.8^{\circ}\text{C}$</p> <p>外筒内面温度 $T_8 = 11.2^{\circ}\text{C}$</p> <p>Al T_B 外面温度 $T_7 = 16.1^{\circ}\text{C}$</p> <p>Al T_B 内面温度 $T_6 = 19.9^{\circ}\text{C}$</p> <p>内筒外面温度 $T_5 = 26.2^{\circ}\text{C}$</p> <p>内筒内面温度 $T_4 = 33.6^{\circ}\text{C}$</p> <p>被覆管外面温度 $T_3 = 49.4^{\circ}\text{C}$</p> <p>被覆管内面温度 $T_2 = 53.7^{\circ}\text{C}$</p> <p>燃料表面温度 $T_1 = 103.8^{\circ}\text{C}$</p> <p>燃料中心温度 $T_0 = 268.0^{\circ}\text{C}$</p> <p>* 計算はGENGTCおよびCETUSコード</p>	<p>Q_{max} の問題の箇所</p> <p>燃料被覆管</p> <p>内圧による応力 $\sigma_p = 7.88 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>熱応力 $\sigma_t = 8.83 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>$\sigma_t + \sigma_p = 16.71 \text{ kg/mm}^2 < 3\sigma_a = 40.5 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>$\sigma_p = 8.83 \text{ kg/mm}^2 < \sigma_a = 13.5 \text{ kg/mm}^2$</p> <p>($\sigma_a = 13.5 \text{ kg/mm}^2$ at 516°C)</p> <p>Creep-rupture strength $> 100,000 \text{ hr}$ (at 649°C)</p> <p>Creep rate $< 10^{-6} \text{ mm/mm hr}$. GEAP-4418)</p> <p>強度上の検討</p> <p>最も厳しい条件にある被覆管についても充分の強度の評価を有する。</p>	
キャプセル健全性の総合評価	設計マニュアルによると、~20%PuO ₂ -UO ₂ のm.pは2670°Cである。計算値による2680°Cはこのm.p.と同じと考え、 Q_{max} を500w/cm ($\gamma=0.5 \text{ w/gr}$)とした。その他強度上問題はない。			
照射条件ねらい	Q_d の値	300 w/cm	Q_{max}/Q_d	1.67



★ 燃料材料 770x-20% Bz O₂
67F-36G



番号	名称	材料	寸法 (O.D.)	枚数
21	燃止機構	C-A	180 (O.D.)	1
20	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
19	燃止機構	SUS27	200 (O.D.)	2
18	燃止機構	NAK1-75A177	180 (O.D.)	1
17	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
16	燃止機構	A1B3	180 (O.D.)	1
15	燃止機構	A1B3	180 (O.D.)	1
14	燃止機構	A1B3	180 (O.D.)	1
13	燃止機構	A1B3	180 (O.D.)	1
12	燃止機構	A1B3	180 (O.D.)	1
11	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
10	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
9	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
8	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
7	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
6	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
5	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
4	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
3	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
2	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
1	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1
0	燃止機構	SUS27	180 (O.D.)	1

図 1.9.6 67F-36G キャプセル組立図

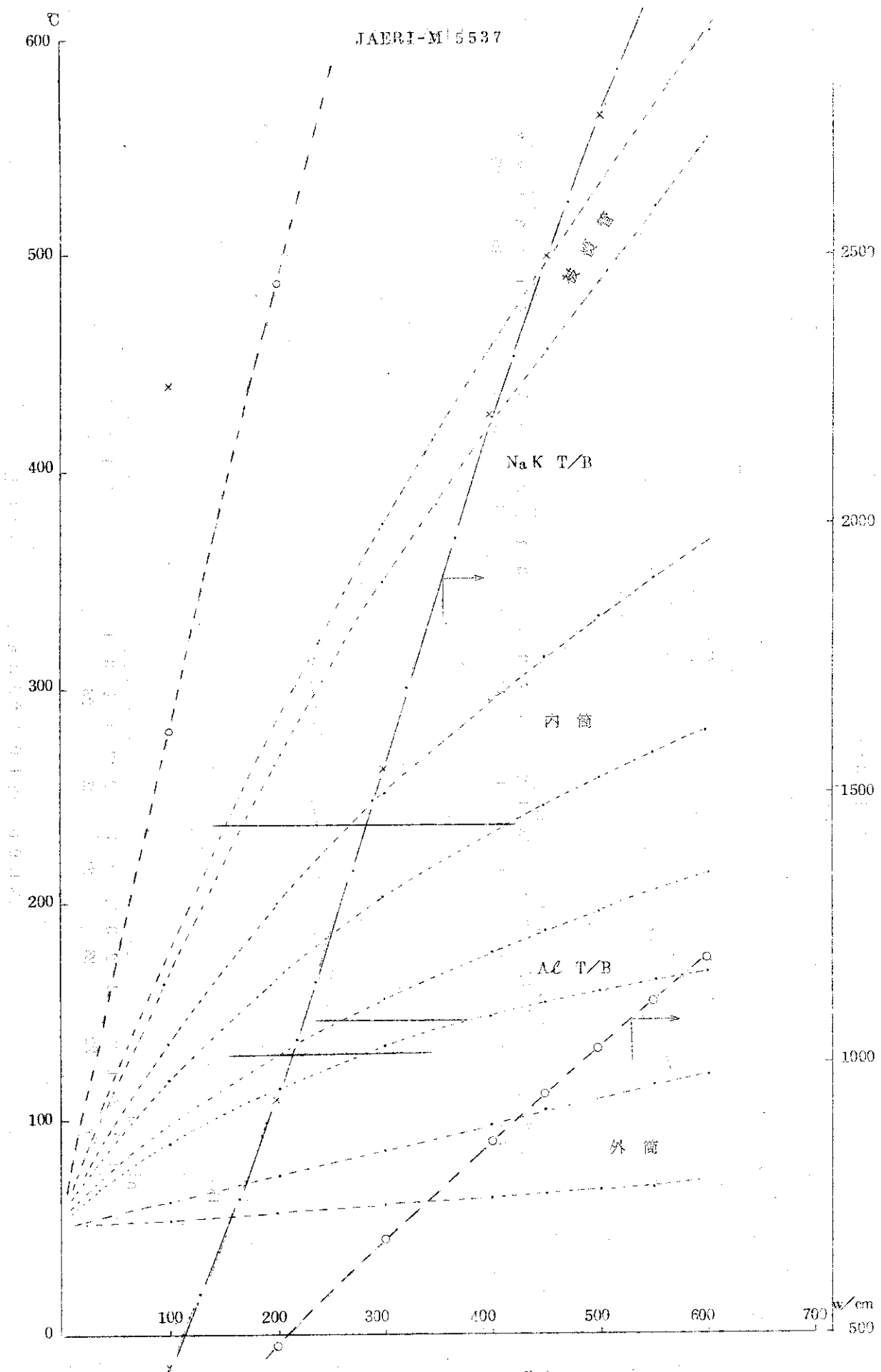


图 1.97 67F-36G 温度分布

67F-36G

照射孔(0-9)

T/C#7

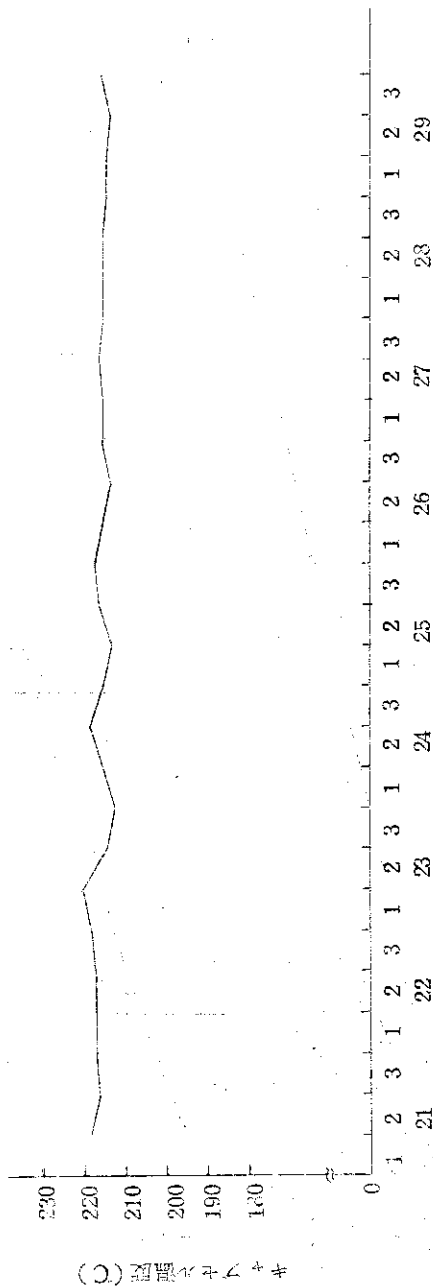
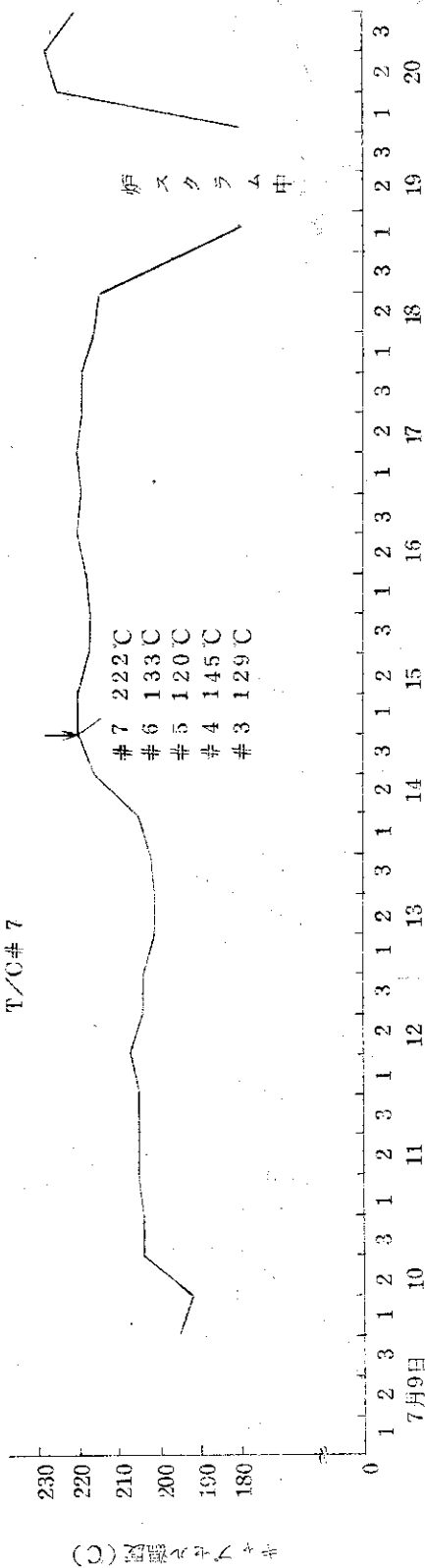


図1.98 第10サイクルキヤプセル温度変化

67F-36G
T/C #7
照射孔0-9

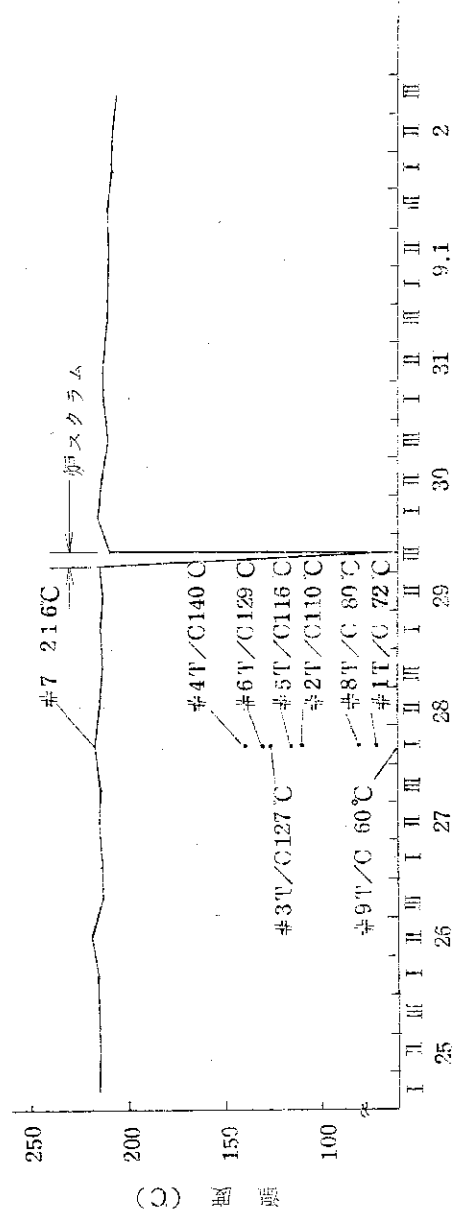
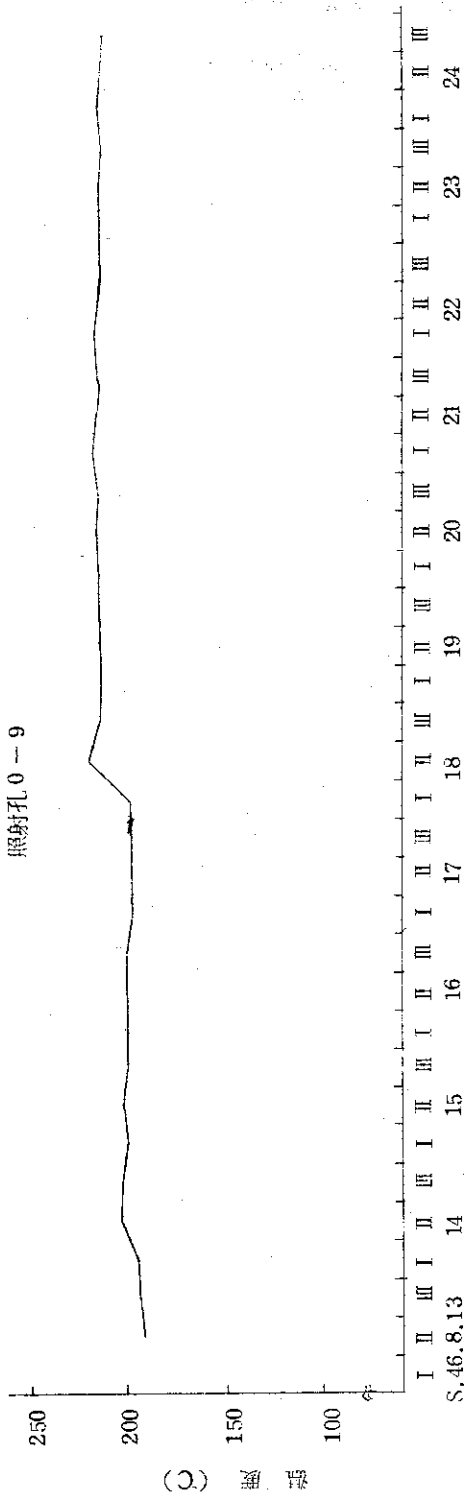


図1.9.9 第11サイクルルキャプセル温度変化

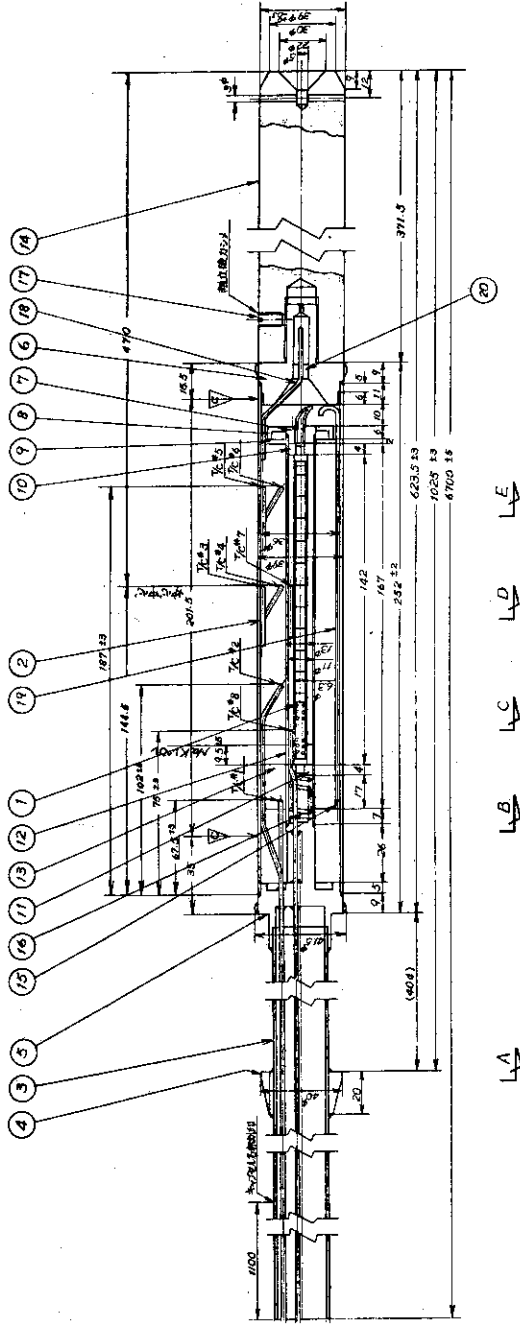
表 1.16 67F-36G キャプセル線出力

Q _G	月日, 時	サイクル	T/C No.
295 w/cm	S.46.7.14 18:56	第10サイクル	#3,4 T/O
285 w/cm	S.46.8.28 9:14	第11サイクル	#3,4 T/O

1.21 68F-3G 照射データと参考資料

キャプセル名		68F-3G		
照射 計	試料提供者	日本原子力研究所		
	試 料	ペレット	材 質	20%enrich UO ₂ 94%T.D.
			形 状	円柱状 焼結ペレット
			寸 法	5.5φ×10.0 L
			数 量	10個
	ペレット・スタック長		100 L	
	被 覆 管	材 質	SUS-316	
		形 状	継目無管	
		寸 法	6.3φO.D.×5.6φI.D.	
	燃 料 ビ ン 全 長		148 L	
燃 料 ビ ン 数 量		1本		
照射期間		1サイクル(# 8サイクル)		
照 射 試 験 の 目 的	1) J F E R用混合酸化物燃料(67F-36G)の先行試験			
	2) 照射孔の特性および発熱量			
キャプセル 設計 条件	照 射 孔	0-9		
	線 出 力	300w/cm		
	ガンマ発熱			
	キャプセル構造	NaK, A ₀ 熱媒体二重キャプセル		
	計 測	C-A T/C 9本		
	制 御	真空温度制御		
キャプセル の 設 計	キャプセル構造設計	図 1.100		
	熱 設 計	図 1.101		
	強 度 設 計	キャプセル構造のうち 最も強度の弱い個所 は 被 覆 管 で 右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 2.50 \text{ kg/mm}^2$
			熱 応 力	$\sigma_t = 10.75 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 14.2 \text{ kg/mm}^2$
評 価			$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_p + \sigma_t = 13.25 < 1.5 \sigma_a = 21.3$	
設計において特 に留意した事項	Q _{max} を大きくするため、内筒(SUS)とA ₀ 熱媒体と共引き管とした。 Pu 照射キャプセル(67F-36G)の先行として精度的にも同一となるようにした。			
照 射 デ ー タ	照 射 温 度	図 1.102		
	F/M 測定値			
	線 出 力	260w/cm, S.46.417, 2330, 第8サイクル #3, 4 T/C		

キャプセル名称	68F-3G	キャプセル安全審査資料№	
照射サイクル	8		
構造の詳細	NaK, Al 熱媒体, 二重キャプセル, 真空引パイプ		
キャプセルの安全解析	キャプセル型式	計測付キャプセル(真空引パイプ配管)	
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p> <p>計算の条件 冷却水温度 $T_{10} = 50^{\circ}\text{C}$ キャプセル表面熱伝達率 $20,000 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^{\circ}\text{C}$ 燃料ギャップコンダクタンス $1000 \text{ Btu/Ft}^2 \text{ hr } ^{\circ}\text{F}$</p>		
	<p>Q_{max} の値</p> <p>Q_{max} におけるおける最高熱負荷温度分布</p>	<p>500 w/cm</p> <p>冷却水温度 $T_{10} = 50^{\circ}\text{C}$ 外筒外面温度 $T_9 = 68^{\circ}\text{C}$ 外筒内面温度 $T_8 = 109^{\circ}\text{C}$ Al T_B 外面温度 $T_7 = 158^{\circ}\text{C}$ Al T_B 内面温度 $T_6 = 203^{\circ}\text{C}$ 内筒外面温度 $T_5 = 259^{\circ}\text{C}$ 内筒内面温度 $T_4 = 286^{\circ}\text{C}$ 被覆外面温度 $T_3 = 437^{\circ}\text{C}$ 被覆内面温度 $T_2 = 485^{\circ}\text{C}$ 燃料表面温度 $T_1 = 995^{\circ}\text{C}$ 燃料中心温度 $T_0 = 2580^{\circ}\text{C}$ (Lyons)</p>	<p>制限因子</p> <p>燃料中心温度</p>
キャプセル健全性の総合評価	<p>(1) Q_{max} に対して充分の強度を有する。 (2) 構成材相互の両立性も問題がない。 従ってキャプセルは充分に安全である。</p>		
照射条件ねらい	Q_d の値	300 w/cm	Q_{max}/Q_d 1.7



* 燃料材料

68F-3G 20% Enrich UO₂

番号	材料名	規格	数量
21	燃料	C-A 1.8" (O.D.)	1
20	燃料	SUS27	1
19	燃料	3.0" (O.D.) 規格	2
18	燃料	1.8" (O.D.)	1
17	燃料	SUS27	1
16	燃料	4.2" 規格	1
15	燃料	ALB3	2
14	燃料	ALB3	1
13	燃料	ALB3	1
12	燃料	SUS27	1
11	燃料	SUS27	1
10	燃料	SUS27	1
9	燃料	SUS27	1
8	燃料	SUS27	1
7	燃料	SUS27	1
6	燃料	SUS27	1
5	燃料	SUS27	1
4	燃料	SUS27	1
3	燃料	SUS27	1
2	燃料	SUS27	1

名 68F-3G
燃料組立

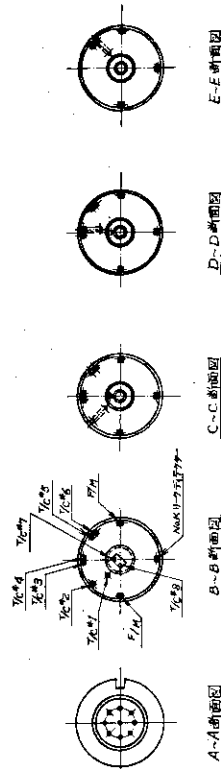


図 1.100 68F-3G キャプセル組立図

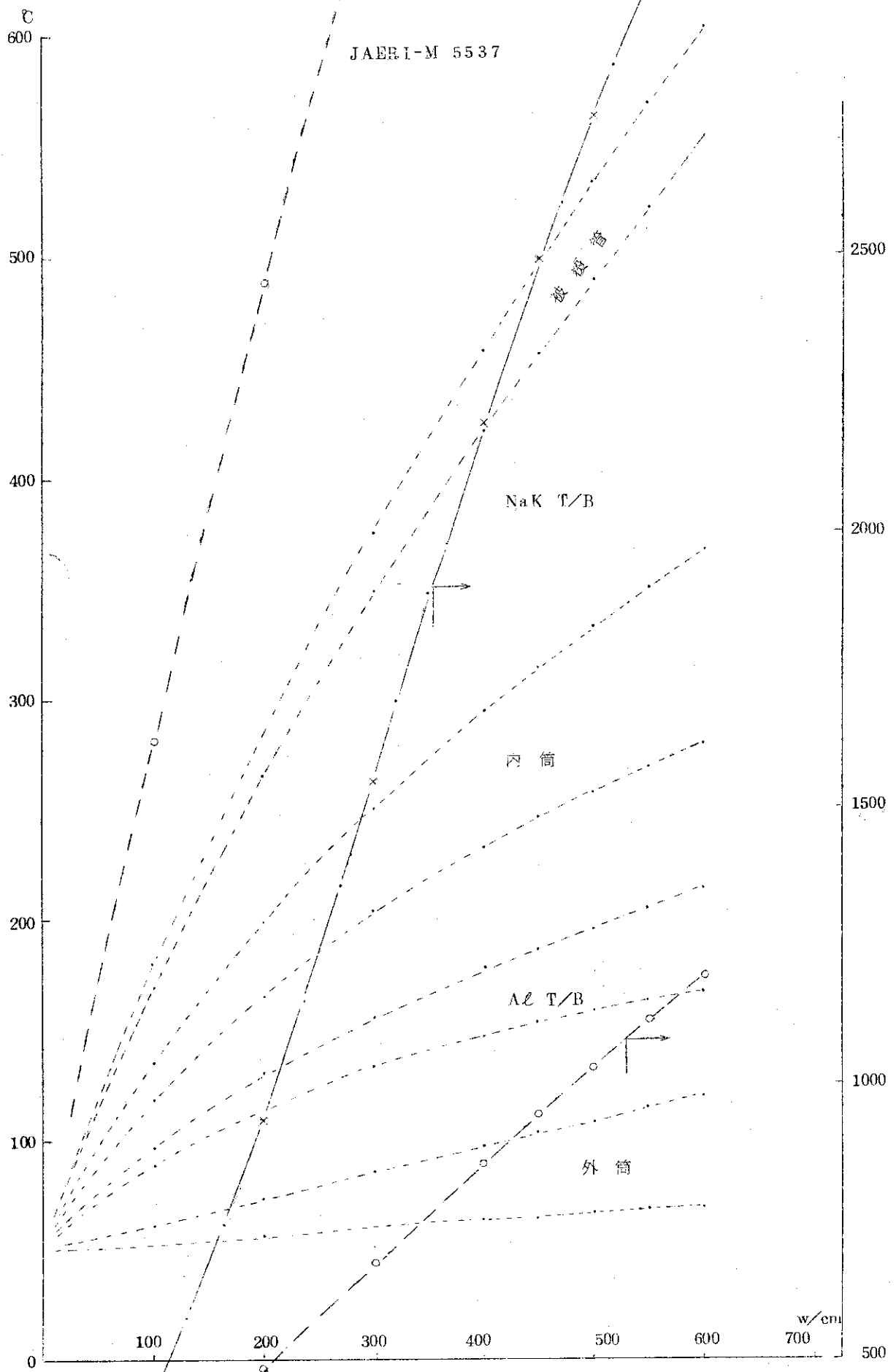


図 1.101 68F-3G キャプセル温度分布

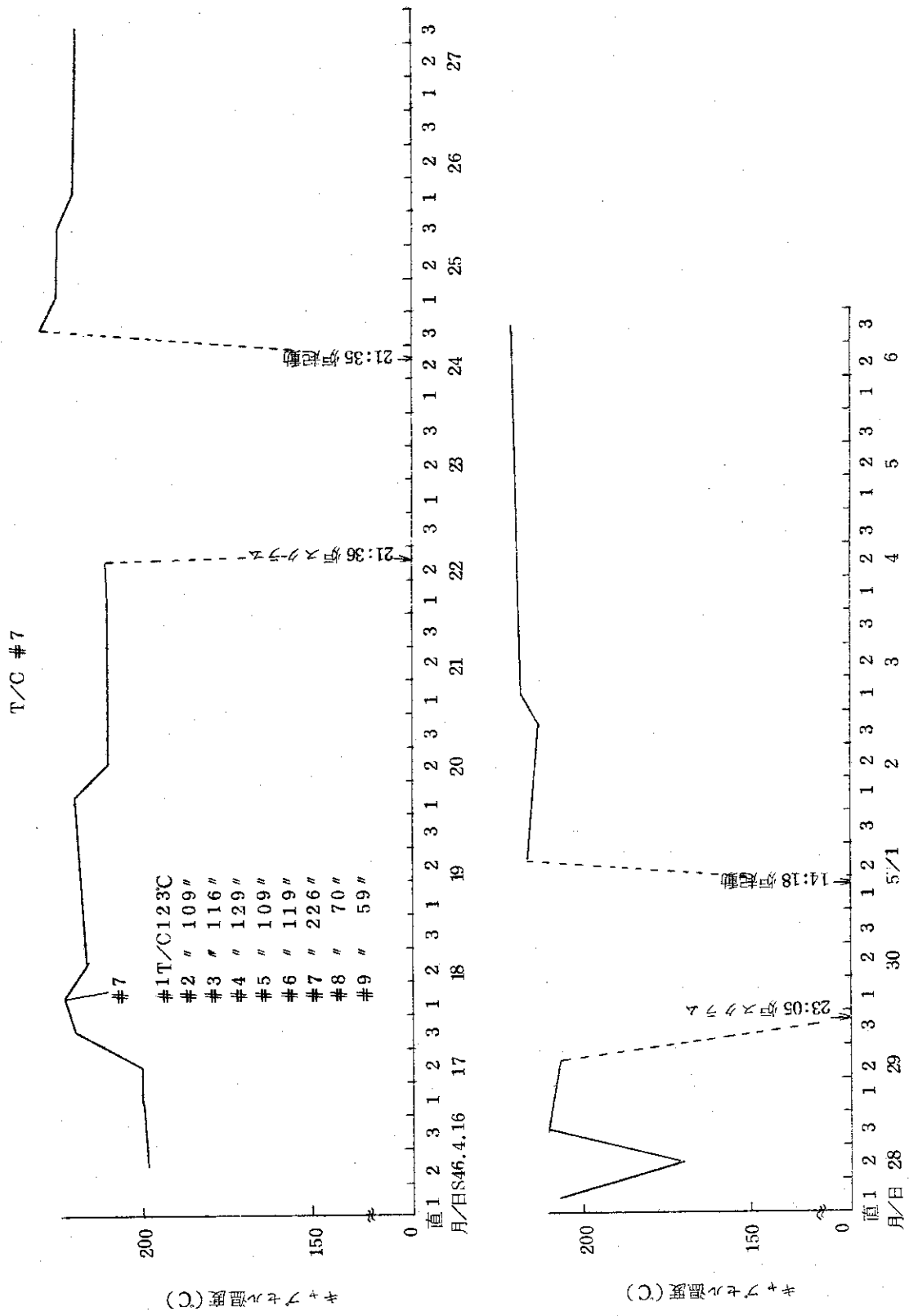
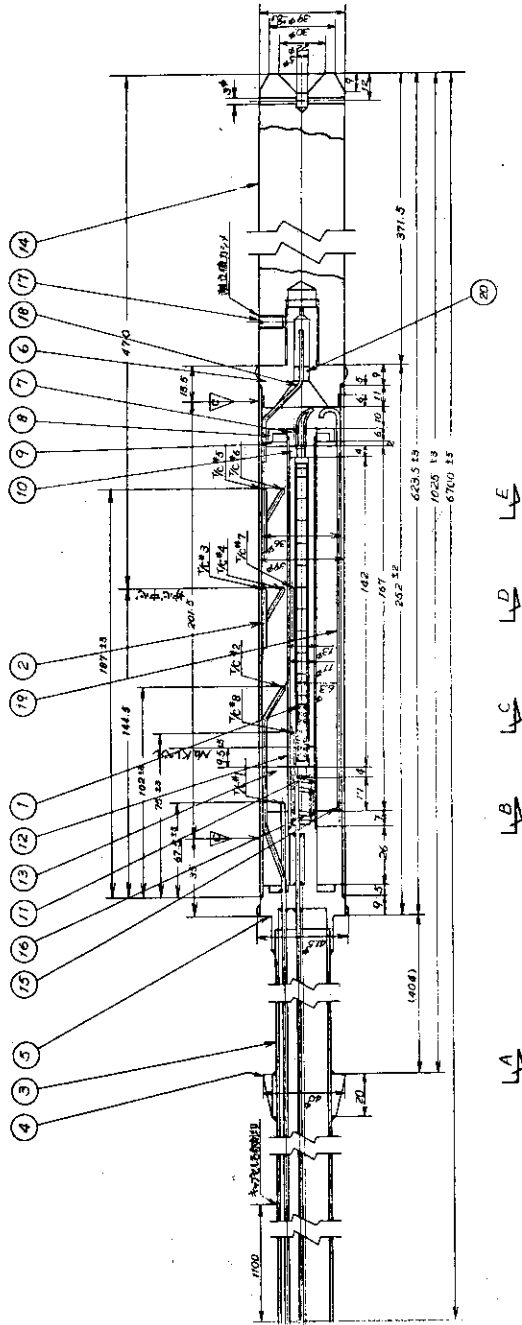


図1.102 68F-3Gキャプセル温度変化(第8サイクル)

1.22 68F-4G照射データと参考資料

キャプセル名		68F-4G		
照射 計	試料提供者	日本原子力研究所		
	試 料	ペレット	材 質	94%TD UO ₂
			形 状	円柱状 焼結ペレット
			寸 法	5.5φ×10.0L
			数 量	10個
	ペレット・スタック長		100L	
	被覆管	材 質	SUS-316	
		形 状	継目無管	
		寸 法	6.3φO.D.×5.6φI.D.	
	燃料ピン全長		148L	
燃料ピン数量		1本		
照射期間		1サイクル(≒8サイクル)		
面	照射試験の目的	1) JFER用混合酸化物燃料(67F-25G)の先行試験 2) 照射孔の特性および発熱量		
	照射孔	J-9		
キャプセル 設計 条件	線出力	500w/cm		
	ガンマ発熱			
	キャプセル構造	NaK-A熱媒体二重キャプセル		
	計 測	C-A T/C 9本		
	制 御	なし		
キャプセル の 設計	キャプセル構造設計	図1.103		
	熱 設 計	図1.104		
	強 度 設 計	キャプセル構造のうち 最も強度の弱い個所 は 被覆管で 右欄にその計算値を示す	内圧による応力	$\sigma_p = 2.5 \text{ kg/mm}^2$
			熱 応 力	$\sigma_t = 10.75 \text{ kg/mm}^2$
			許 容 応 力	$\sigma_a = 14.2 \text{ kg/mm}^2$
			評 価	$\sigma_p < \sigma_a, \sigma_t + \sigma_p = 13.25 < 1.5 \sigma_a = 21.3$
設計において特 に留意した事項	Q _{max} を大きくするため内筒(SUS)とA熱媒体を共引き管とした。 Pu 照射キャプセル(67F-25G)の先行として、精度的にも同一となるようにした。			
照射 デ ータ	照射温度	図1.105		
	F/M測定値			
	線出力	200w/cm, S.46.4.17, 23.30 第8サイクル #3, #4 T/C		

キャプセル名称	68F-4G	キャプセル安全審査資料№	
照射サイクル	8		
構造の詳細	NaK, Al熱媒体, 二重キャプセル		
キャプセルの安全解析	キャプセル型式		
キャプセル断面形状・寸法・材質・計算の条件	<p>キャプセル断面</p> <p>計算の条件 冷却水温度 $T_{10} = 50^{\circ}\text{C}$ キャプセル表面熱伝達率 $20,000 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^{\circ}\text{C}$ 燃料ギャップコンダクタンス $1000 \text{ Btu/Ft}^2 \text{ hr}^{\circ}\text{F}$</p>		
	<p>燃料ペレット (20% UO_2) He gas 被覆管 SUS-32 熱媒体 56/44 NaK 内筒 SUS-27</p>		
キャプセルの最高熱負荷と制限因子	<p>Q_{max} の値 500 w/cm</p> <p>制限因子 燃料中心温度</p>	<p>Q_{max} 問題の箇所 被覆管</p> <p>に お け る 強 度 上 の 検 討</p> <p>強度上の評価</p>	
	<p>冷却水温度 $T_{10} = 50^{\circ}\text{C}$ 外筒外面温度 $T_9 = 68^{\circ}\text{C}$ 外筒内面温度 $T_8 = 109^{\circ}\text{C}$ Al T_B 外面温度 $T_7 = 168^{\circ}\text{C}$ Al T_B 内面温度 $T_6 = 203^{\circ}\text{C}$ 内筒外面温度 $T_5 = 259^{\circ}\text{C}$ 内筒内面温度 $T_4 = 286^{\circ}\text{C}$ 被覆外面温度 $T_3 = 437^{\circ}\text{C}$ 被覆内面温度 $T_2 = 485^{\circ}\text{C}$ 燃料表面温度 $T_1 = 995^{\circ}\text{C}$ 燃料中心温度 $T_0 = 2580^{\circ}\text{C}$ (Lyons)</p>	<p>に お け る 強 度 上 の 検 討</p> <p>被覆の内圧による応力 $\sigma_p = 2.50 \text{ kg/mm}^2$ 被覆の熱応力 $\sigma_t = 10.75 \text{ kg/mm}^2$ (at 460°C) $\therefore \sigma_p + \sigma_t = 13.25 \text{ kg/mm}^2$ $< 1.5 \sigma_a = 21.3 \text{ kg/mm}^2$ $\sigma_p < \sigma_a$ ($\because \sigma_a = 14.2 \text{ kg/mm}^2$)</p> <p>最も厳しい条件にある被覆管に対しても安全である。</p>	
キャプセル健全性の総合評価	<p>(1) Q_{max} に対して充分の強度を有する。 (2) 構成材相互の両立性も問題がない。 従ってキャプセルは充分に安全である。</p>		
照射条件ねらい	Q_d の値 500 w/cm	Q_{max}/Q_d	1.0

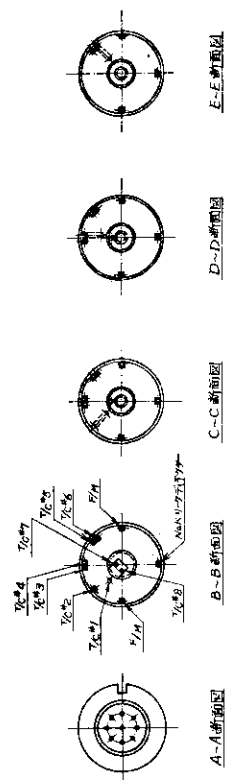


4 燃料材料

68F-4G 20% Enrich⁰⁰²

部名	材料	C-A / 8" (O.D.)	B
21 燃料棒束	SUS27	1	1
20 燃料棒束	SUS27	20 (O.D.) 8筋	2
19 燃料棒	ANAL-211779	1.8" (O.D.)	1
18 燃料棒	SUS27	1.8" (O.D.)	1
17 燃料棒	312300X		1
16 燃料棒	AL83		2
15 燃料棒	AL83		1
14 燃料棒	AL83		1
13 燃料棒	AL83		1
12 燃料棒	AL83		1
11 燃料棒	AL83		1
10 燃料棒	SUS27		1
9 燃料棒			1
8 燃料棒			1
7 燃料棒			1
6 燃料棒			1
5 燃料棒			1
4 燃料棒			1
3 燃料棒			1
2 燃料棒	SUS27		1
1 燃料棒	材料		1

名称 68F-4G キヤプセル組立図



図I.103 68F-4Gキヤプセル組立図

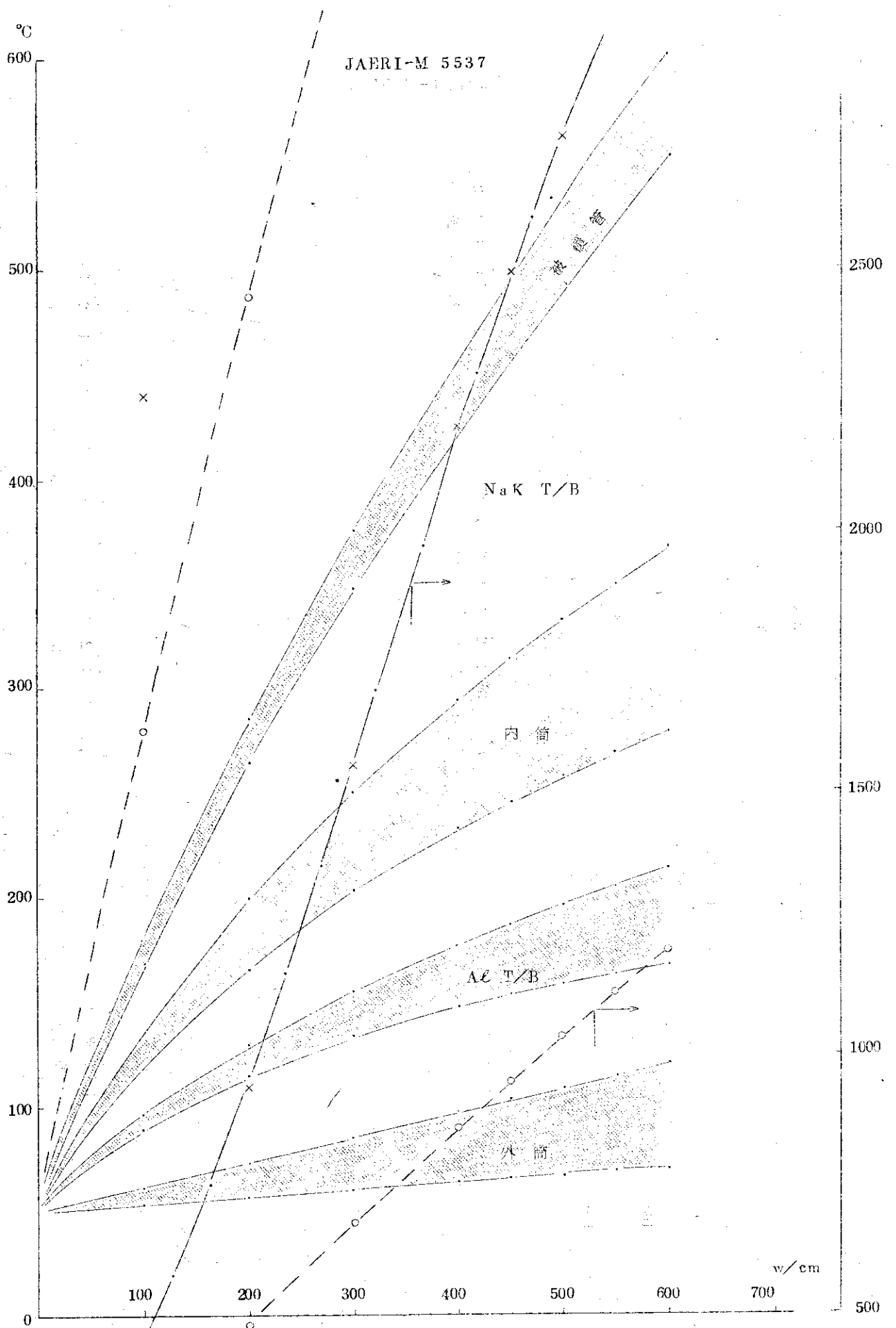


図 1.104 68F-4G キャプセル温度分布

68F-4G

T/C #7

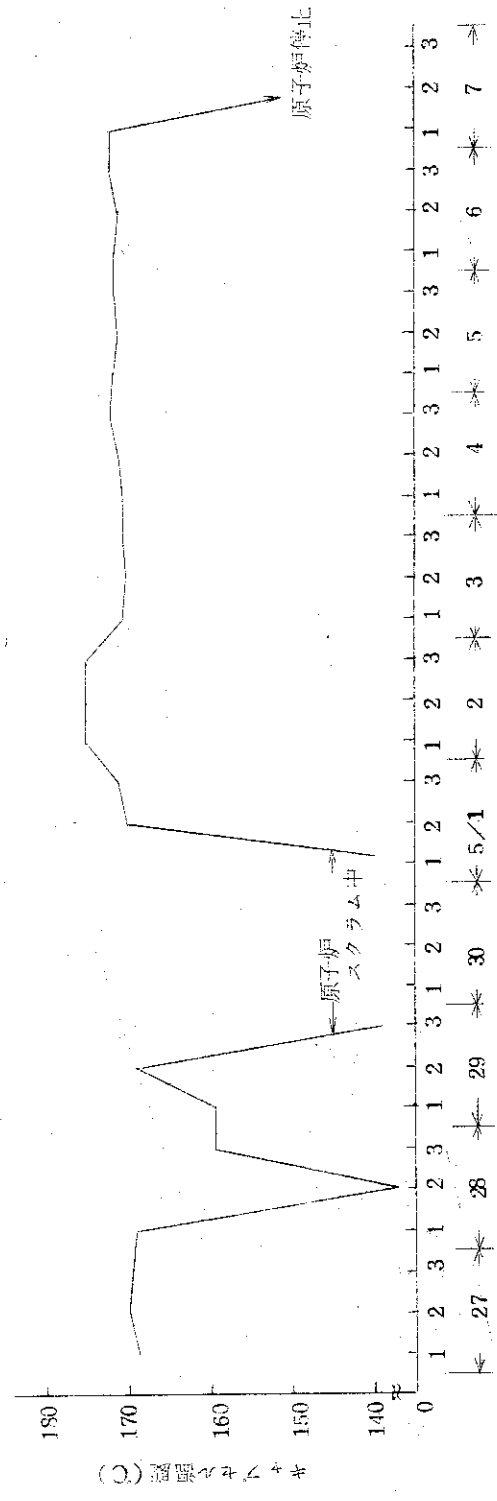
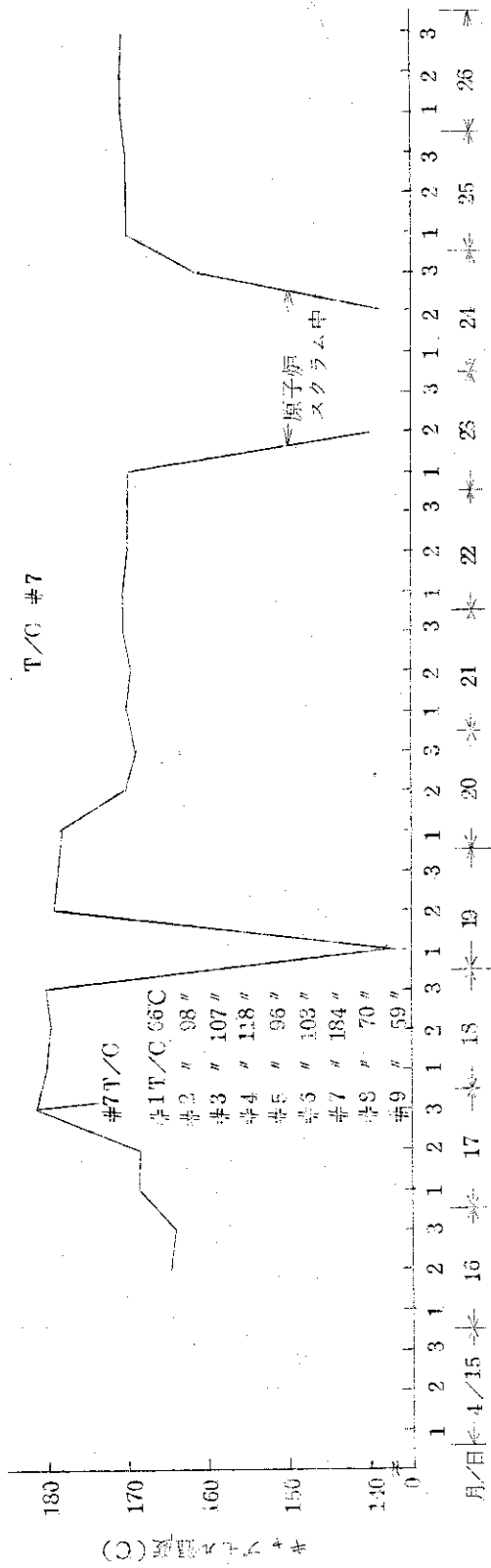


図1.105 キャプセル温度変化(第8サイクル)

2. 照射後試験データの解析

2.1 67F-1G照射後試験結果の解析

外観検査

写真2.1～2.3をみてわかるように燃料棒は表面全体に淡い黒色光沢をしており、こまかいすり傷があったが亀裂、変形、腐蝕等の異常はなく健全な状態で照射された。

被覆管としてタンタルを使用したので材質的な脆性があり取扱上破損が懸念されたが、特段の支障もなく無事に終了した。

寸法検査

燃料試料の外径寸法の照射による変化をしらべ異常のないことを確認した。照射前試料の外径は17.29mm、照射後は17.32mmであるが有意差とは考えられない。

FPリークローケイション

この試料は本来リークテストは行なわれないことになっていたが、照射中にキャプセル案内管内に若干の放射性ガスが検出されたので、その欠陥の有無を確認するためリークローケータによる試験を実施した。その結果中心温度計測用熱電対の端栓とのろう付け部に欠陥が発見された。タンタル部のニクロブレイズによるろう付について検討を要する。

組織観察

図2.1, 写真2.4, 2.5の断面マクロ組織写真はそれぞれ燃料体中央部の組織を示すものである。また写真2.6～写真2.11は上記マクロ組織写真でみられる断面の燃料中心部, 中間部, 外周部のミクロ組織を示している。前章で本試料の照射記録を述べたが、この試料の燃料中心温度は図1.3でみるとおり700℃～800℃にとどまっているのがわかる。照射後の金相写真でみる組織もこれに対応してほとんど変化がみられない。したがって結晶組織の変化からとくに興味ある結論は得られない。マクロ写真でわかるように本試料にはかなりのクラックが発生しているが、3サイクルの照射中に6回のスクラムを経験しており、そのほかとくに第7サイクルでは中心温度が800℃から600℃に急変するような炉出力の変動がサイクル中に3回起きていることから考えて、さらに最高中心温度も800℃程度であるから組織の再焼結も行なわれないことなどをあわせ考えると、照射サイクル数がさほど多くないにもかかわらずクラック発生数の多いことはスクラムを含む炉出力変動に原因の一端があると考えることができよう。

クラックの発生数は炉停止やスクラム回数によってのみ決まるものではなく、熱発生率(燃料の線出力)や燃焼度によっても影響をうけ発生数だけでなくクラックのパターンにも一定の関係を持つことが考えられるので、他試料についての解析も行ない統計的整理を行なうと興味ある結論が引き出せるであろう。

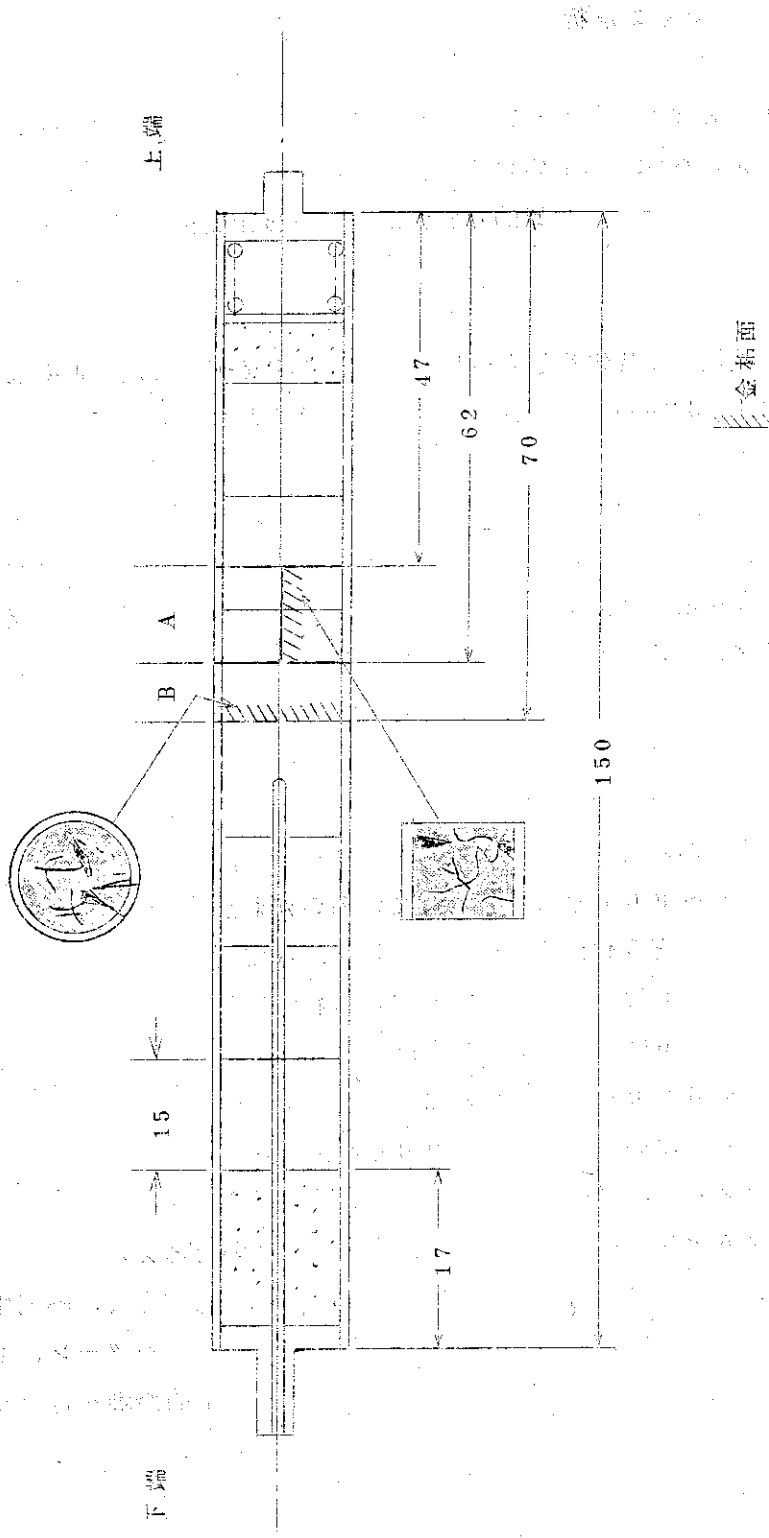


图2.1 67F-1G 切斷位置

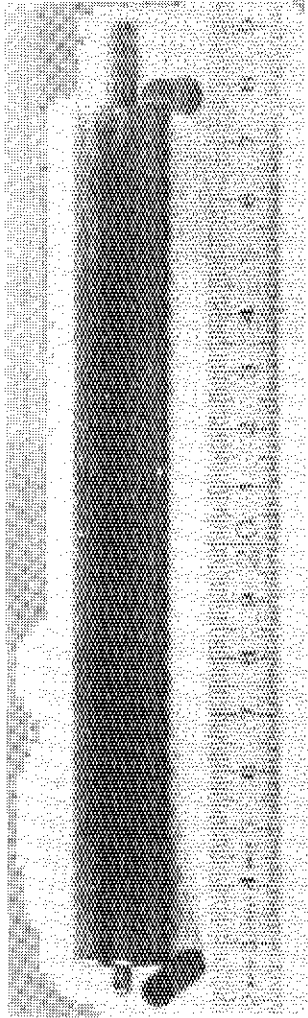


写真 2.1



写真 2.3

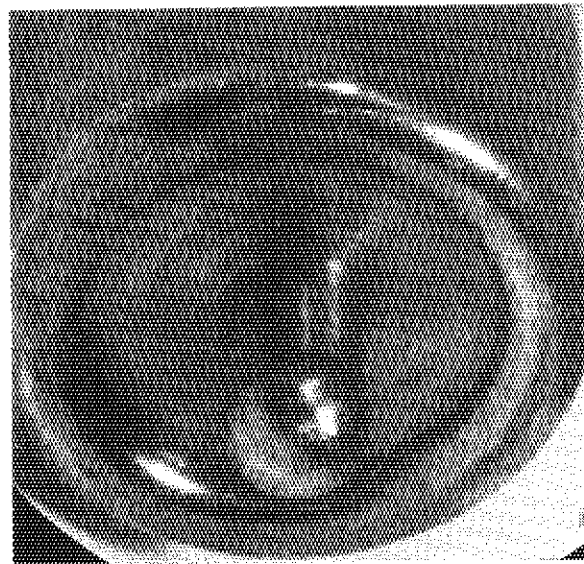


写真 2.2

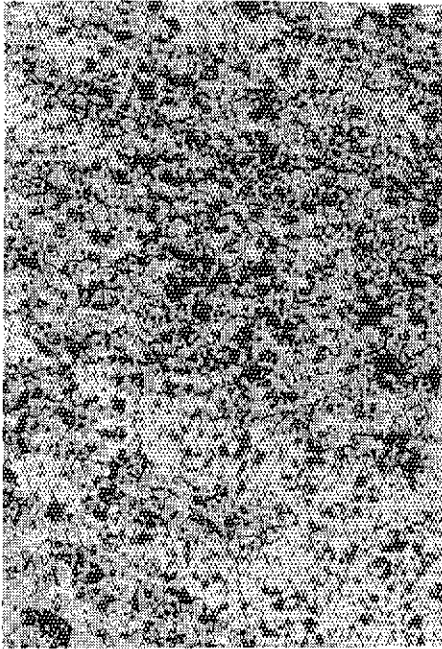


写真 2.6 中心部組織 ×180

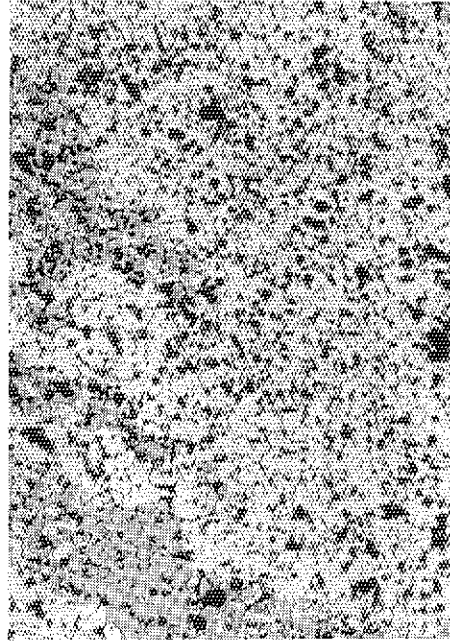


写真 2.7 中間部組織 ×180

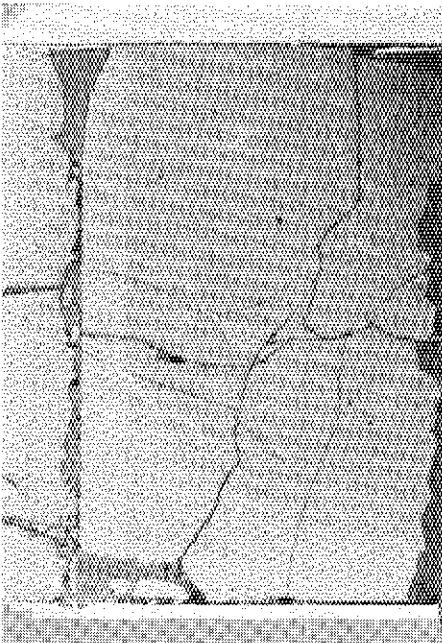


写真 2.4 ×4.5

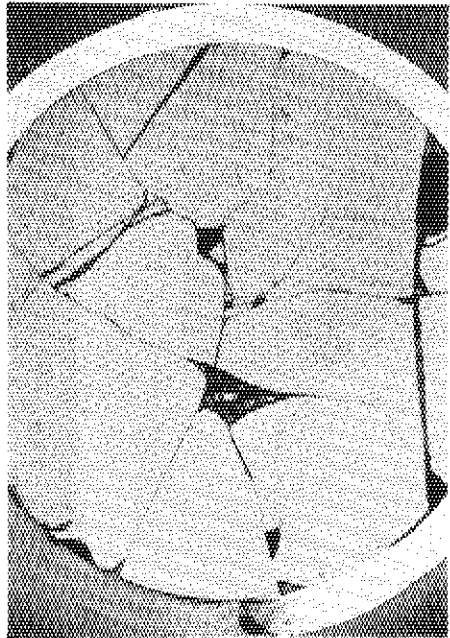


写真 2.5 ×4.5

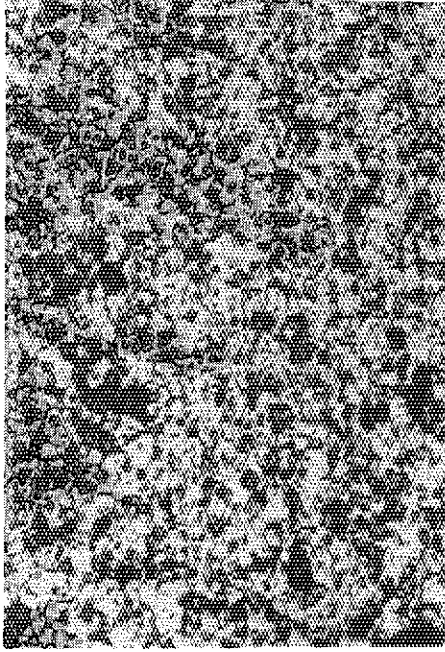


写真 2.10 中間部組織 × 360

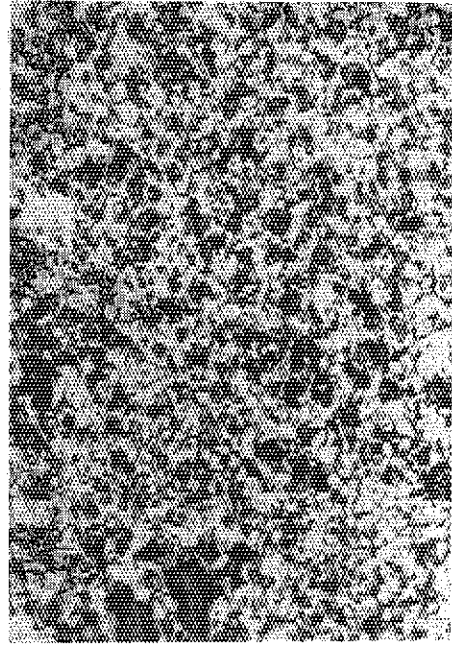


写真 2.11 外周部組織 × 360

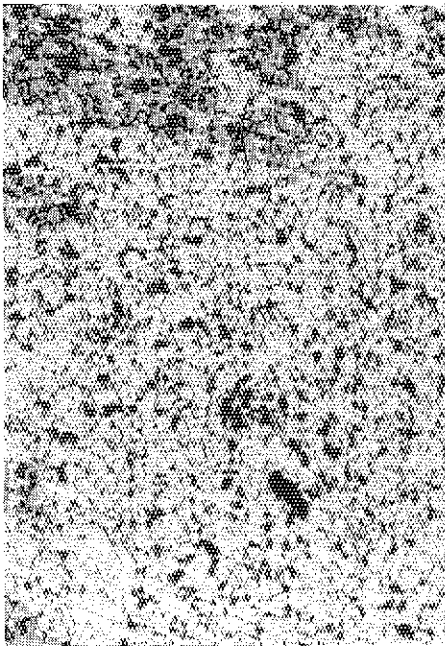


写真 2.8 外周部組織 × 180

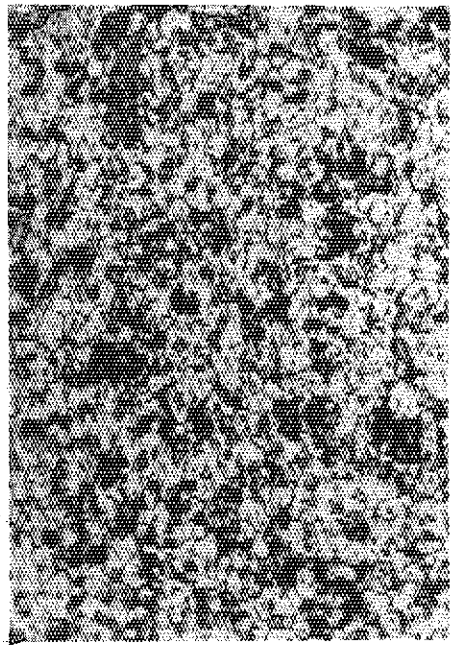


写真 2.9 中心部組織 × 360

2.2 67F-2G 照射後試験結果の解析

2.2.1 67F-2G の照射概要

本キャプセル(図 1.6)は前記した各種の試験目的を達成するよう計装がなされ、K-13 照射孔に装荷された。燃料試料は炉心の軸方向中心より下側に位置して、第5~第7サイクル(昭和45年11月28日より約3ヶ月間)において照射された。照射中は混合ガスによる温度制御がなされた。キャプセル各部の温度は図 1.7 に線出力との対応が得られるように示されている。そのうち熱媒体温度についてみると、第5サイクルでは $455 \pm 5^\circ\text{C}$ (図 1.8), 第6サイクルでは $455 \pm 5^\circ\text{C}$ (図 1.9), 第7サイクルでは $445 \pm 5^\circ\text{C}$ (図 1.10) 以内となっており、照射中はほぼ一定温度に保持されたと見なせる。

本キャプセルの線出力は GENGTC コードによる計算結果(図 1.7)からの推定によると、第5サイクルでは $175 \sim 185 \text{ W/cm}$, 第6サイクルでは $160 \sim 175 \text{ W/cm}$, 第7サイクルでは $120 \sim 150 \text{ W/cm}$ である。これから中心温度は各サイクルについてそれぞれ $850 \sim 900^\circ\text{C}$, $780 \sim 850^\circ\text{C}$, $550 \sim 720^\circ\text{C}$ 程度であったと推測される。第5サイクルでは、中心温度は $835 \sim 865^\circ\text{C}$ と実測^(注1)されており、本燃料試料については計算結果との比較で推定した程度の線出力が発生していたものとして、照射後データを解析して良いと考えられる。

2.2.2 リーク試験

本キャプセルの照射中にキャプセル案内管内に若干の放射性ガスの放出があるという情報があり、燃料ピンにおける欠陥の有無を確認する目的でリーク試験を行なった。その結果リークなしと判断されたのでキャプセルの解体に移行した。

2.2.3 燃料ピンの外観検査

写真 2.1 2 に外観写真を示したが、検査の結果傷の大きさや種類、色調、光沢などにおいて異常は認められなかった。これは燃料ピンの健全性を示すものである。

2.2.4 燃料ピンの寸法測定

寸法は外径のみ測定した。表 2.1 に示されたように、ピン外径の変化は全く認められなかった。

2.2.5 金相試験

燃料ピンの切断位置は図 2.2 に示してある。写真 2.1 3 は縦断面のマクロおよびミクロ写真を示したもので、この写真から判断すると燃料の中心領域では中間部や外周部に比較して明らかに粒径が大きく、中心温度が高々 900°C 位でも焼結(UO_2 ペレットの初期密度 95%TD)が進行することを示すものである。写真 2.1 4 は横断面の写真を示している。横断面では中心部と中間部、外周部との粒径に有意な差はないと判断できる。切断位置から考えて、両者の組織的な差異はないものと思われるが、しいて言えば図 2.2 における A 面の方が B 面よりフラックスのピーク位置に近かったこと、B 面に隣接して中空ペレットがあり、 1.6ϕ の熱電対が挿入されていたことなどが原因して何らかの影響をおよぼしたものと思われる。

縦断面および横断面マクロ写真におけるクラックは、ほぼ照射初期に発生したままのパターンを示していると考えられるので興味深い。クラックの発生するメカニズムは別として、写真

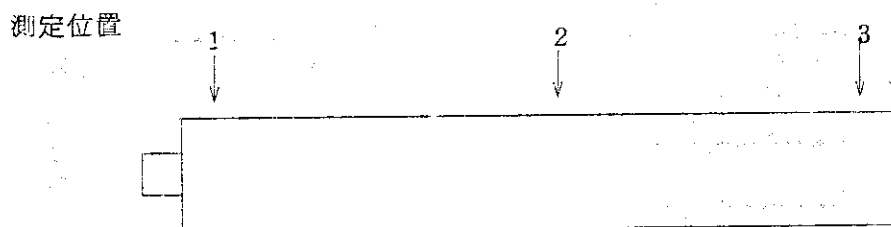
(注1) 中心温度測定用熱電対は絶縁劣化を生じていたが、本実測値は劣化した状態での温度指示値に基づいている。

からはまず中心を通る長いクラックが見られ、ちょうど縦方向に2つ割にしたペレットを合せた状態を呈していることがわかる。そのクラックに対して30°~90°の角度で別のクラックが発生しており、ある所ではクサビ形の部分を形成し、他の所では角形のブロックを形成している。そして、縦断面にみられるようにクラックが被覆管内面と向い合っているところでは、必ず微細な破片の欠け落ちがみられる。もちろん、欠け落ちは照射後試験の過程で生じたものなのか、照射中の振動などで生じたものなのかは不明であるが、ミクロ的にみればPCIによって微細な破片が生じ、もしギャップが存在すれば破片の落ち込みが可能なことを示すデータになるのではないかと思われる。

8.2.6 結 論

本キャプセルの照射後試験結果の解析から、各照射サイクルを通じて本キャプセルはきわめて正常な性能を発揮し、何らの異常もなく照射が行なわれ、かつ試用期間における各種試験を経験し、所期の目的が達成されたものといえる。

表 2.1 燃料ピンの寸法測定



外 径 測 定 値

[単位 m/m]

測定方向	位置 回数	1	2	3
	X	1	1 7.3 3	1 7.3 0
2		1 7.3 3	1 7.3 0	1 7.3 1
3		1 7.3 3	1 7.3 0	1 7.3 0
平均		1 7.3 3	1 7.3 0	1 7.3 1
Y	1	1 7.3 1	1 7.3 1	1 7.3 7
	2	1 7.3 1	1 7.3 1	1 7.3 6
	3	1 7.3 1	1 7.3 1	1 7.3 6
	平均	1 7.3 1	1 7.3 1	1 7.3 6

長さ方向の寸法測定は測定器がないためできない。

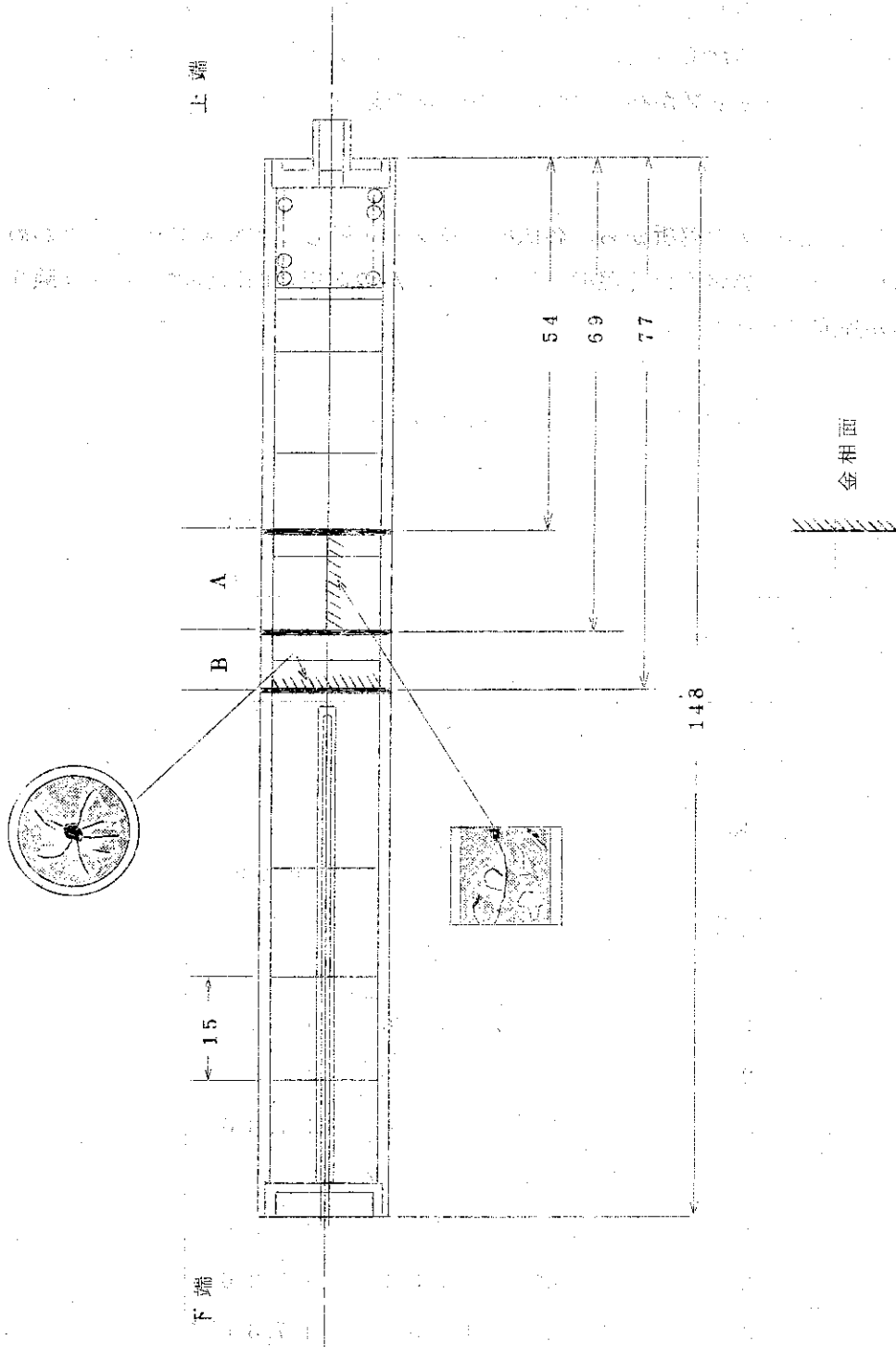


图 2.2 67F-2G 切断位置

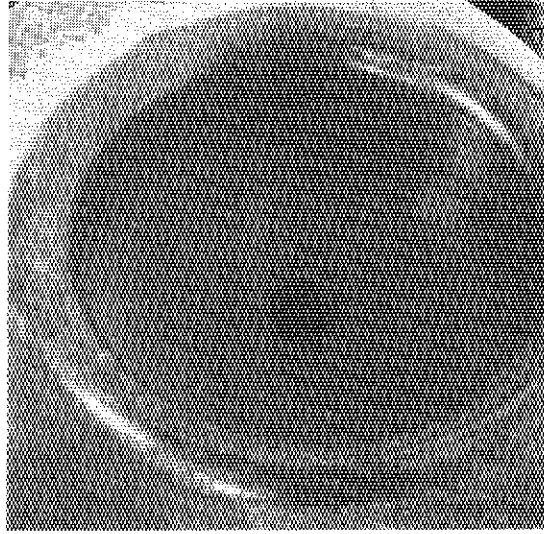
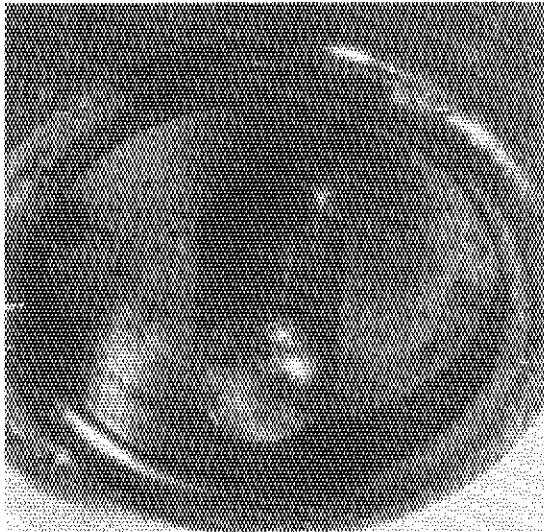
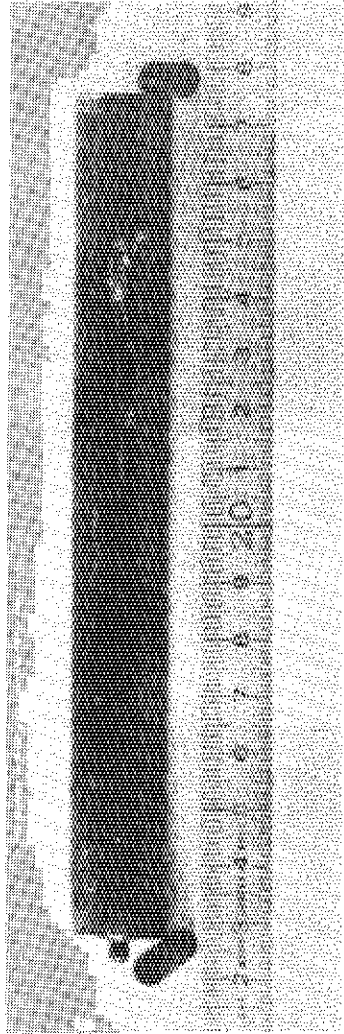
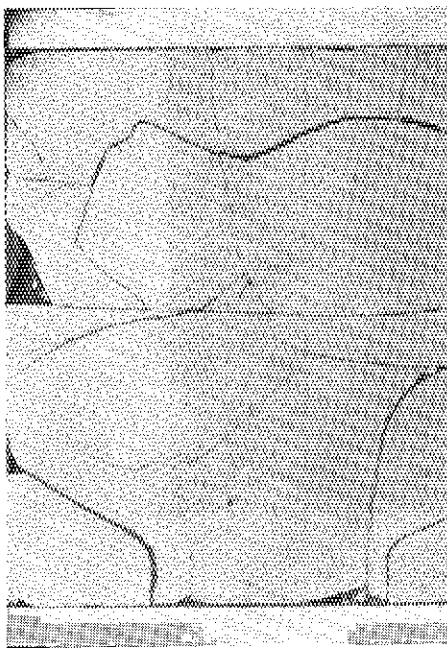
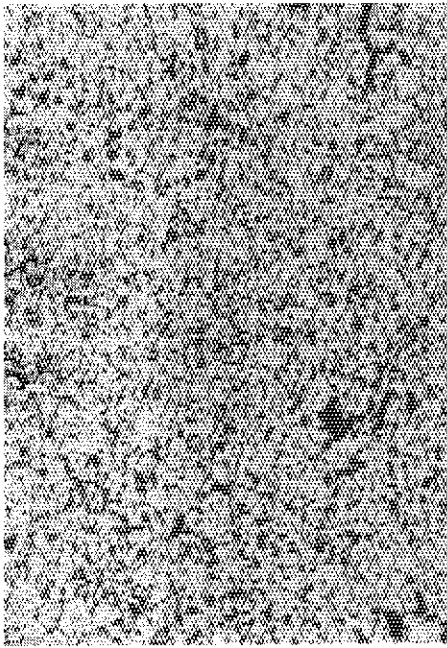


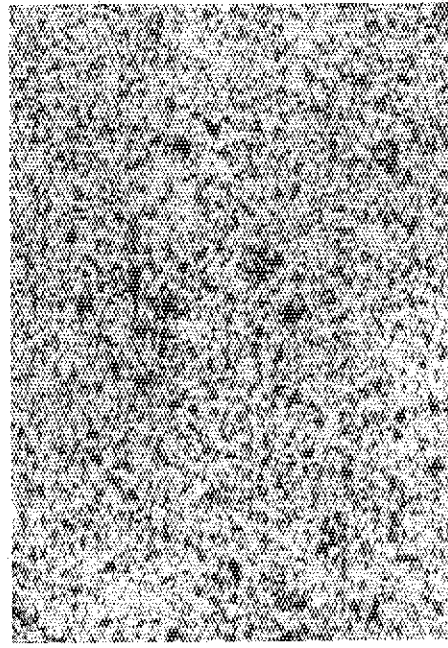
写真 2.1.2 67F-2G 被覆管 外觀



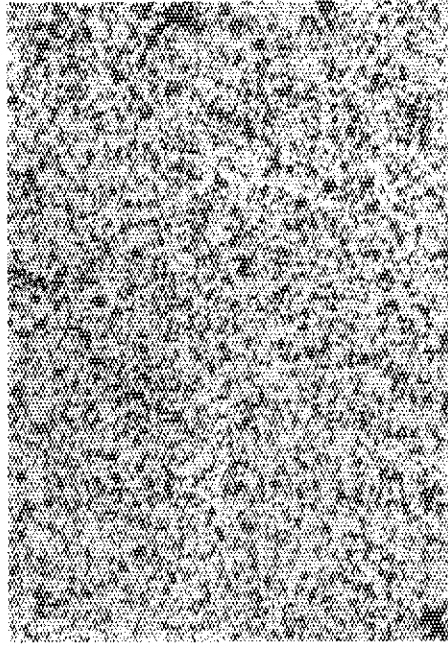
(A) マクロ写真 ×4.5



(C) 中心部組織 ×180



(B) 中間部組織 ×180

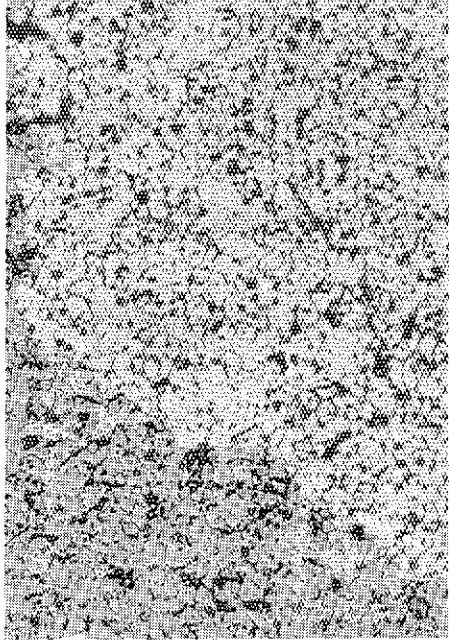


(D) 外周部組織 ×180

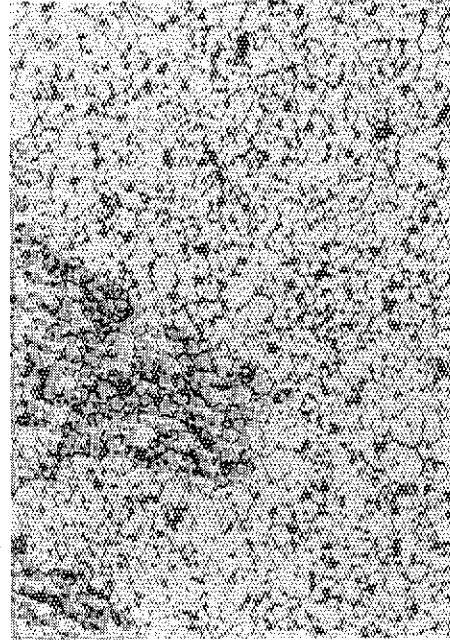
写真2.13 金相写真



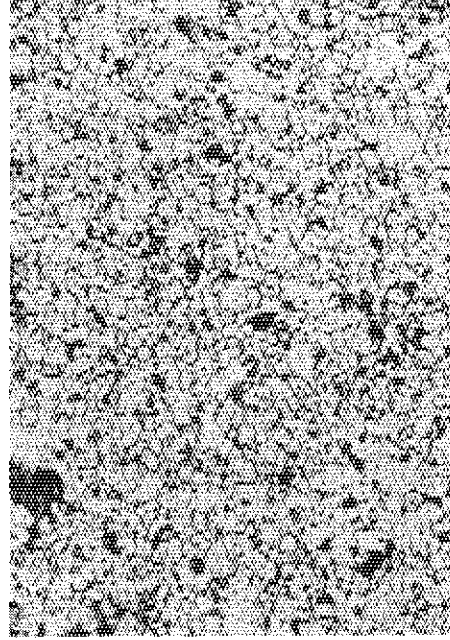
(A) マクロ写真 × 4.5



(C) 中心部組織 × 360



(B) 中間部組織 × 360



(D) 外周部組織 × 360

写真2.14 金相写真

2.3 67F-3G 照射後試験結果の解析

2.3.1 外観検査

燃料ピンの外観写真を写真2.15(1)および(2)に示す。燃料ピンは健全であり、照射前に比べて顕著な変化は認められなかった。

2.3.2 金相組織観察

照射後の燃料ピンを切断し、横断面の金相観察を行った。写真2.16に4.5倍で撮影されたマクロ写真を示す。クラックは主として径方向に伸びている。

写真2.17(1)、(2)および(3)にそれぞれペレット中心部、中間部および外周部のマイクロ写真を示す。中心部でのポイドは外周部に比べてやや大きいように見える。

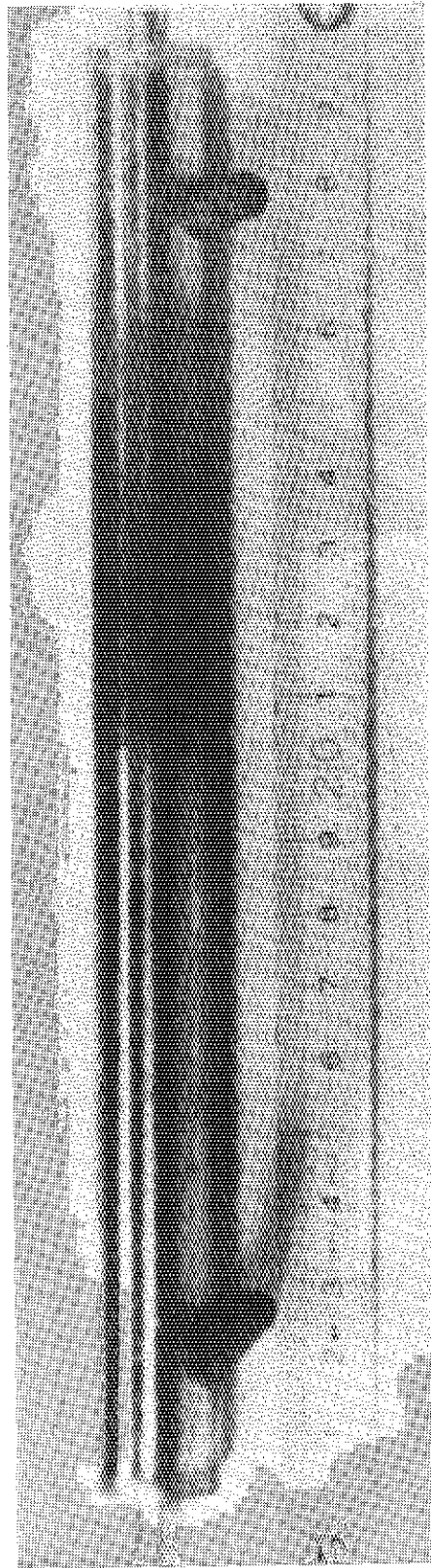
これらを $H_2SO_4:H_2O_2=1:8$ 溶液で100秒間エッチングした組織がそれぞれ写真2.18(1)、(2)および(3)である。

中心部でも結晶粒の粗大化は見られず、このほか、組織上の変化はほとんど認められなかった。写真2.19は被覆管のマイクロ組織である、照射前のものとほぼ同様であった。

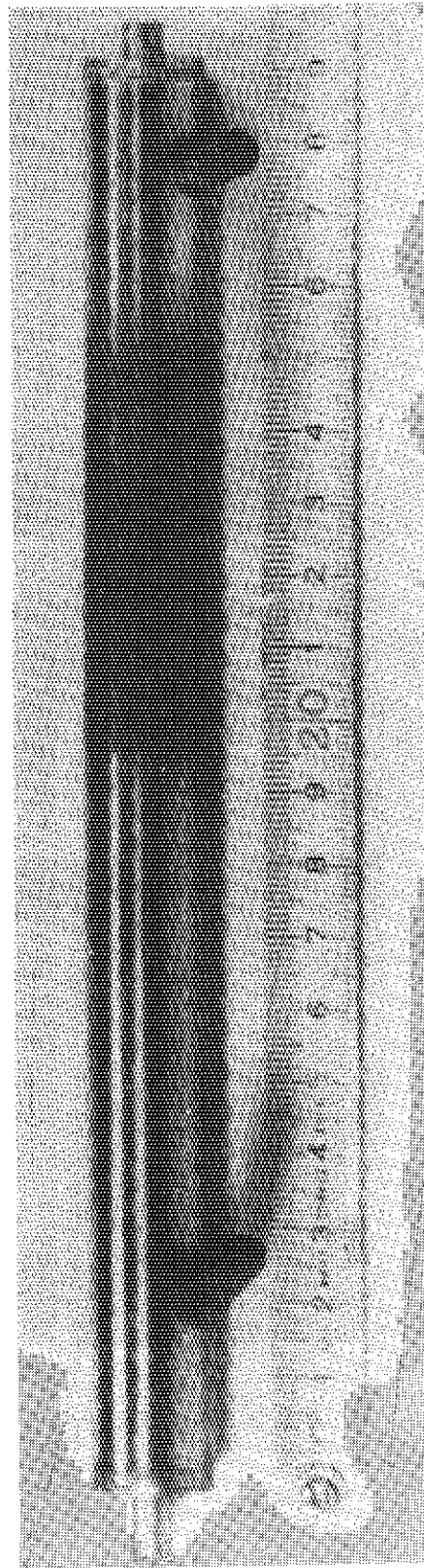
2.3.3 まとめ

混合ガス温度制御・NaKカプセルの特性調査を主な目的として、天然ウラン UO_2 ペレットがJMTR 第8～第9の計2サイクル40日間照射された。原子炉出力は31～32MWで、上記照射期間中2日間のスクラムと6日間のHe ダンプを経験した。

カプセル内の温度分布ならびに温度変化が計測されて初期の目的を一応達成したが、カプセルの平均線出力は168W/cmで目標の270W/cmを下まわり、燃料中心温度は990℃、ペレット表面温度は650℃、また、カプセルの定常温度は470℃であり、照射量が少いため、燃料およびカプセルとも照射後試験において何ら異常が認められなかった。



(1) 0° 方向



(2) 90° 方向

写真 2.15 67F-3G 燃料ピンの照射後の外観写真

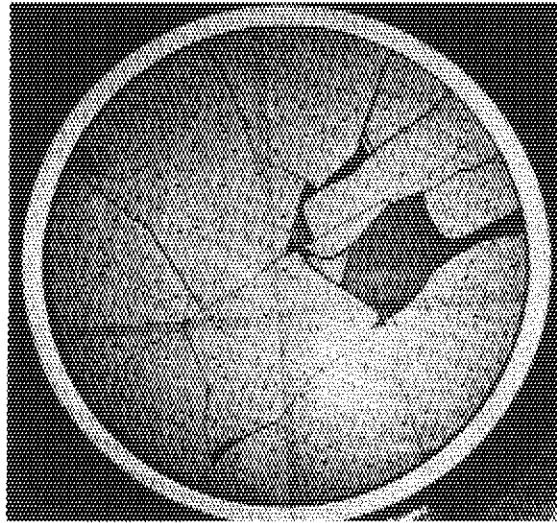


写真 2.16 67F-3G ピン断面マクロ写真 ×4.1

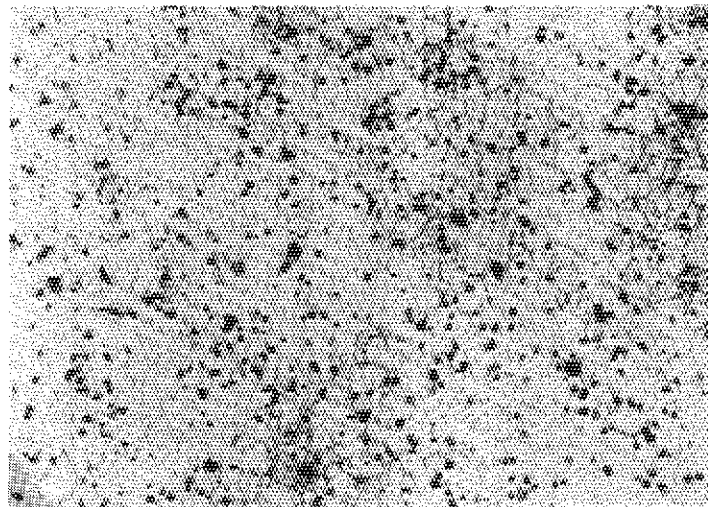
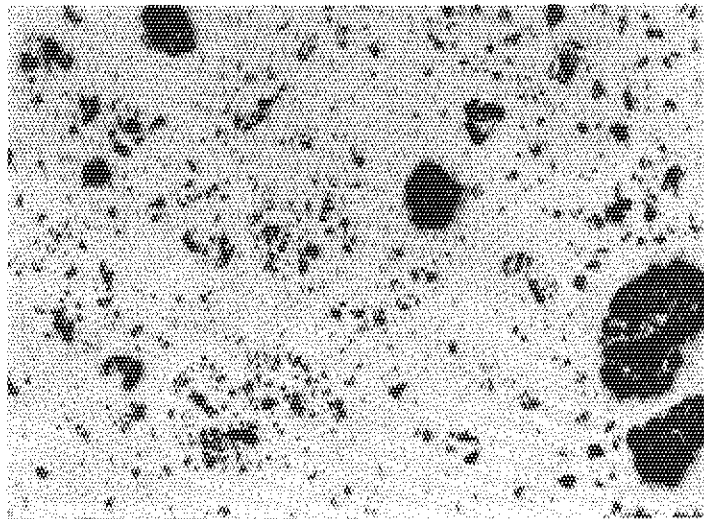
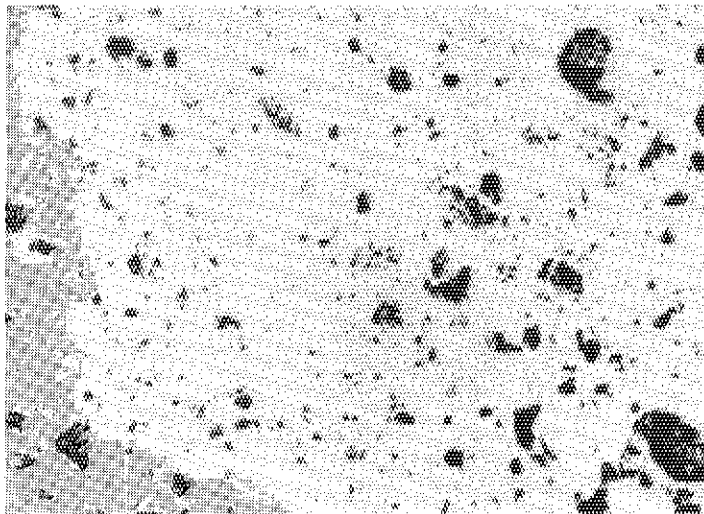


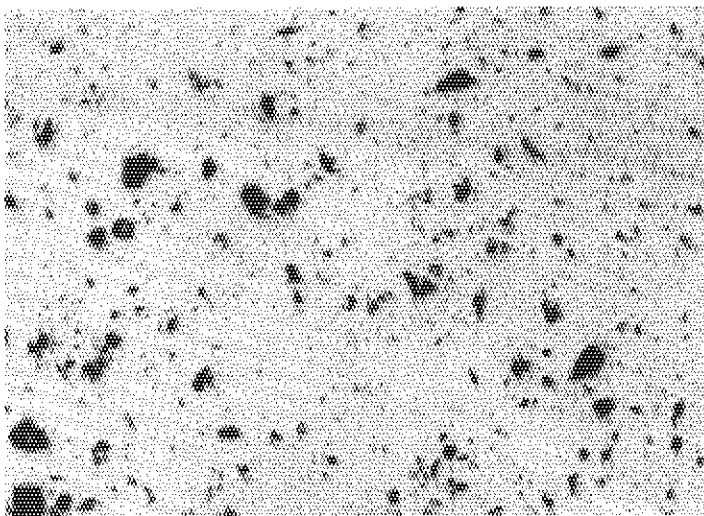
写真 2.19 被覆管のマイクロ組織 ×225



(1) ペレット中心部

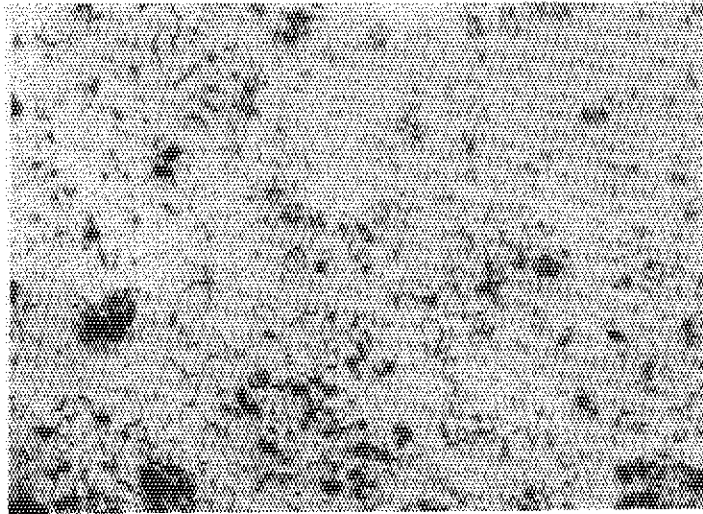


(2) 中間部

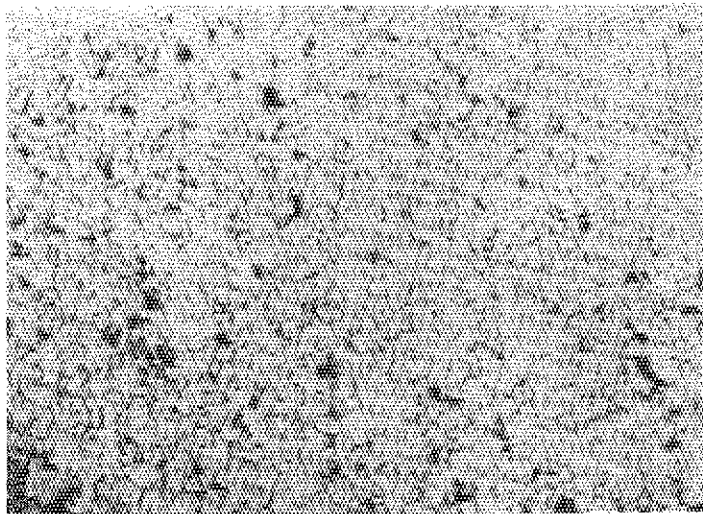


(3) 外周部

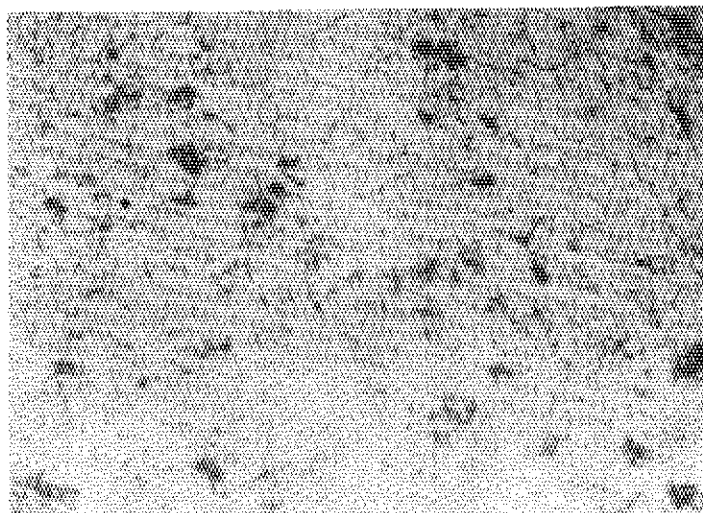
写真 2.17 ペレット断面のマイクロ写真(エッチング前) ×225



(1) ペレット中心部



(2) 中間部



(3) 外周部

写真 2.18 ミクロ組織 (エッチング後) $\times 225$

2.4 67F-7Gキャプセル

2.4.1 外観検査

67F-7Gキャプセル中の3本の燃料ピン(No.1~3)について、それぞれ全体と両端の端栓溶接部の写真を0°と180°の2方向からペリスコープにて撮影した。

写真2.20(a)(b)(c)~写真2.25(a)(b)(c)に外観写真を示す。何れの場合にも表面の欠損や変色はほとんど認められなかった。

2.4.2 寸法測定

図2.3に示すように、各燃料ピンの直径4ヶ所(A~D)についてそれぞれ0°と180°の2方向から各3回、マイクロメーターにより測定を行った。測定値を表2.2に示す。比較のため、図2.4および表2.3に照射前の寸法測定結果を示す。照射前の測定値と比較して、各ピンとも0.02~0.05mm程度の直径増が示されている。しかし、これが燃料ミートのスエリングによるものかどうかは明らかでない。

2.4.3 金相組織

写真2.26(a)~(g)にNo.1燃料ピンのマイクロ組織を示す。(a)および(b)はそれぞれ被覆管部および被覆管~UO₂部境界で、王水で8秒間エッチングの後×200で撮影された。(c)~(g)はUO₂部の端(c)から中央(g)に向けて等間隔に観察されたもので、H₂SO₄:H₂O₂=1:8を用いて6.0秒間エッチングされたあと×500で撮影された。

No.2およびNo.3燃料ピンについても、同様に写真2.27(a)~(g)および写真2.28(a)~(g)に示されている。

照射後のペレットにはクラックが入っていたが、マイクロ組織は照射前とほとんど変わらず、場所による違いも観察されなかった。

2.4.4 FPガス捕集

FPガスの捕集には図2.5に示す捕集装置が用いられた。装置は、放出ガスを真空系内に導く装置と、放出したガス量を測定してその一定量を捕集する装置とに大別される。燃料ピンの挿孔位置はプレナム側である。

測定結果を表2.4に示す。なお、全放出ガス圧が不足のため、分取量は定量できなかった。

2.4.5 まとめ

67F-7Gキャプセル照射実験の成果として、3段組燃料試料からの熱的特性が得られたこと、照射後燃料試料のガス圧が測定され、ガス採集が行われたことなどがあげられる。しかし、外観、寸法、金相組織などの照射後試験において、照射前からの変化はほとんど認められず、この程度の照射では燃料および被覆管の健全性が保たれることがわかった。

表2.2 寸法測定結果

試料名	個 数		A	B	C	D
	回 数					
No. 1	0°	1	11.608	11.619	11.628	11.628
		2	11.608	11.619	11.628	11.629
		3	11.608	11.620	11.632	11.621
		平均	11.61	11.12	11.63	11.63
No. 1	180°	1	11.581	11.593	11.629	11.625
		2	11.582	11.611	11.630	11.631
		3	11.585	11.593	11.628	11.633
		平均	11.58	11.60	11.63	11.63
No. 2	0°	1	11.611	11.621	11.630	11.627
		2	11.609	11.621	11.628	11.631
		3	11.613	11.621	11.623	11.631
		平均	11.61	11.62	11.63	11.63
No. 2	180°	1	11.608	11.621	11.613	11.625
		2	11.609	11.623	11.620	11.621
		3	11.612	11.625	11.622	11.624
		平均	11.61	11.62	11.62	11.62
No. 3	0°	1	11.624	11.623	11.615	11.609
		2	11.624	11.623	11.619	11.604
		3	11.623	11.612	11.621	11.610
		平均	11.62	11.62	11.62	11.61
No. 3	180°	1	11.622	11.612	11.615	11.617
		2	11.621	11.615	11.619	11.623
		3	11.619	11.615	11.623	11.618
		平均	11.62	11.62	11.62	11.62

表 2.3 照射前の寸法測定結果

試料番号		67F-7G.1		67F-7G.2		67F-7G.3	
全長 (mm) ^A		143.0		143.2		142.8	
全長 (mm) ^B		136.2		136.4		136.2	
直 径 (mm)	1	11.67	11.66	11.63	11.63	11.63	11.63
	2	11.67	11.67	11.63	11.63	11.64	11.65
	3	11.68	11.67	11.64	11.63	11.64	11.64
	4	11.68	11.67	11.64	11.64	11.64	11.64
	5	11.68	11.68	11.64	11.64	11.64	11.64
	6	11.68	11.67	11.64	11.64	11.64	11.64
	7	11.68	11.65	11.64	11.64	11.64	11.64
	8	11.68	11.64	11.63	11.64	11.63	11.64
	9	11.68	11.64	11.64	11.64	11.63	11.63
	10	11.67	11.64	11.65	11.65	11.63	11.63
	11	11.67	11.65	11.65	11.65	11.63	11.63
	12	11.67	11.66	11.65	11.65	11.62	11.63
	13	11.67	11.66	11.64	11.64	11.63	11.63
	14	11.67	11.66	11.64	11.64	11.63	11.63

表 2.4 FPガス捕集量

capsule名	到達真空度 (mmHg)		全放出GAS量 (cc)		Date
	挿孔装置	測定装置	測定値		
67F-16G	4.3×10^{-5}	2.8×10^{-5}	4.90		S46.5.24
67F-7G	4.8×10^{-5}	4.3×10^{-5}	1.33		S46.5.26

※ 到達真空度は捕集容器を取り付けない状態である。

※ 全放出GAS量は at N.T.P.である。

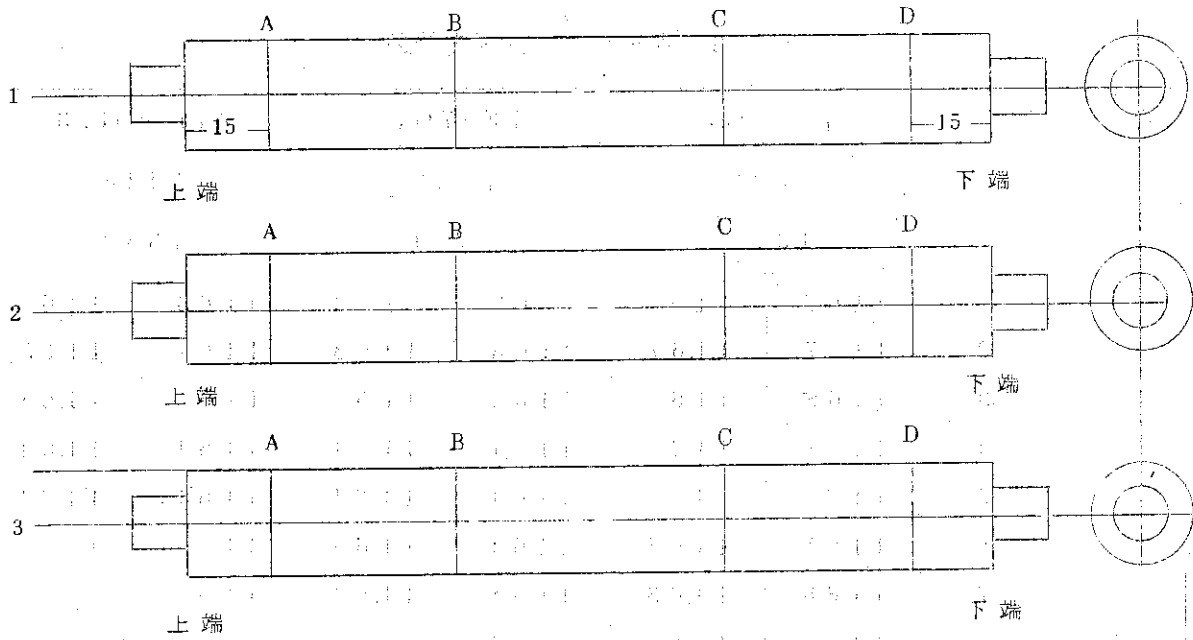


図 2.3 6.7 F - 7 G 寸法測定位置

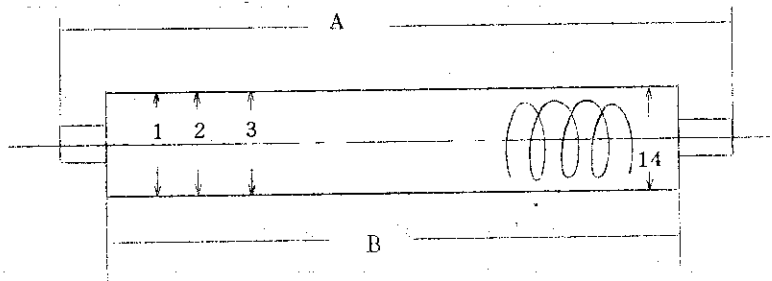


図 2.4 照射前の寸法測定位置

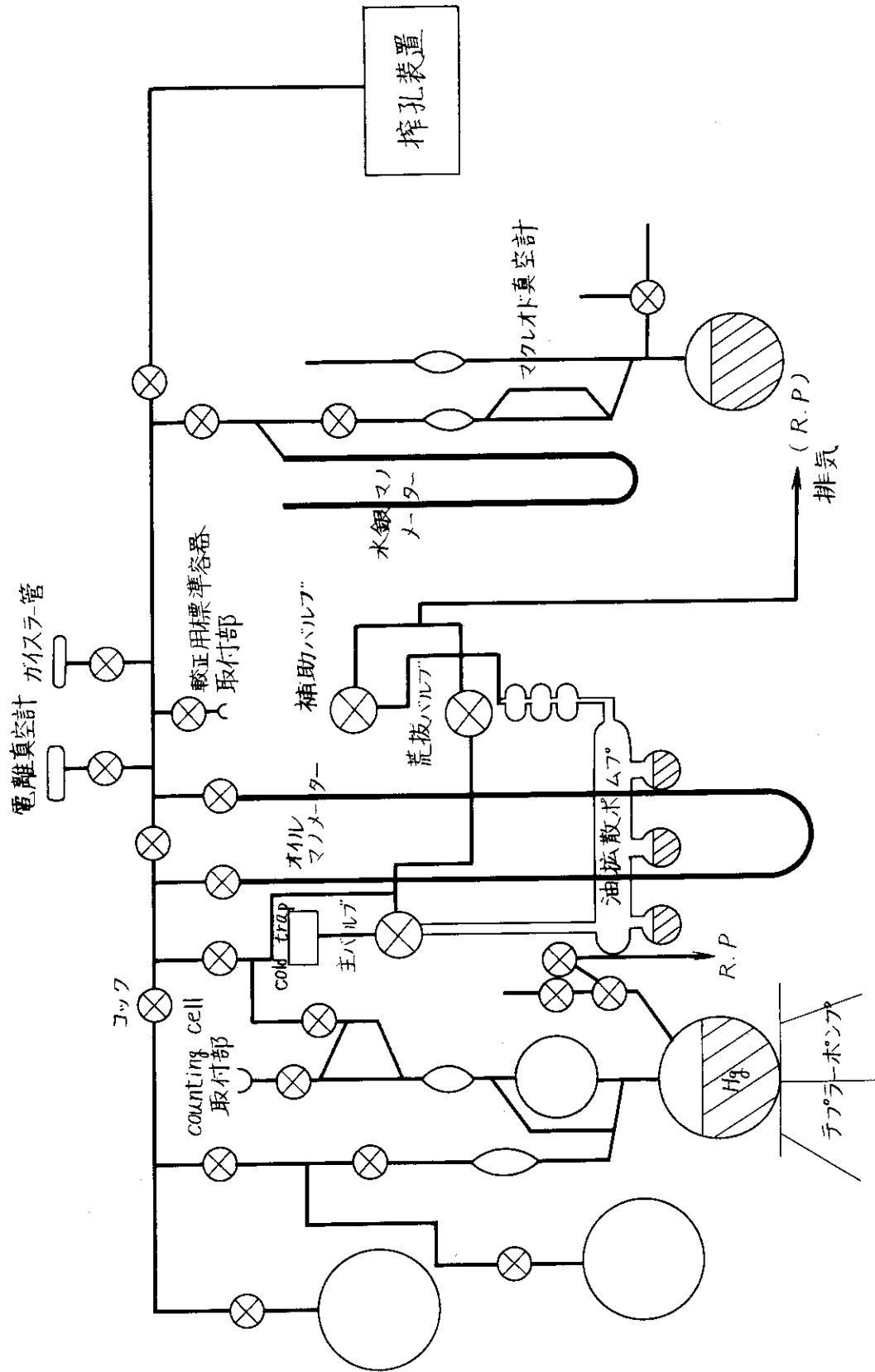


図 2.5 F.P.G.A.S 捕集装置

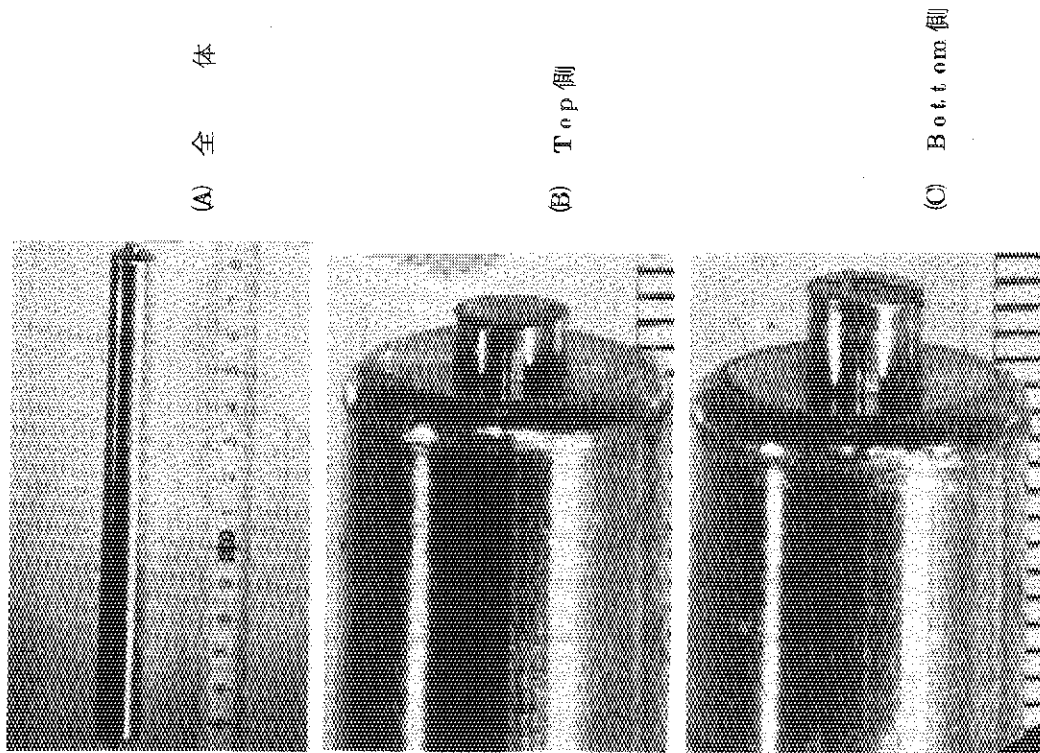


写真2.21 67F-7G No.1燃料ピンの外観(180°)

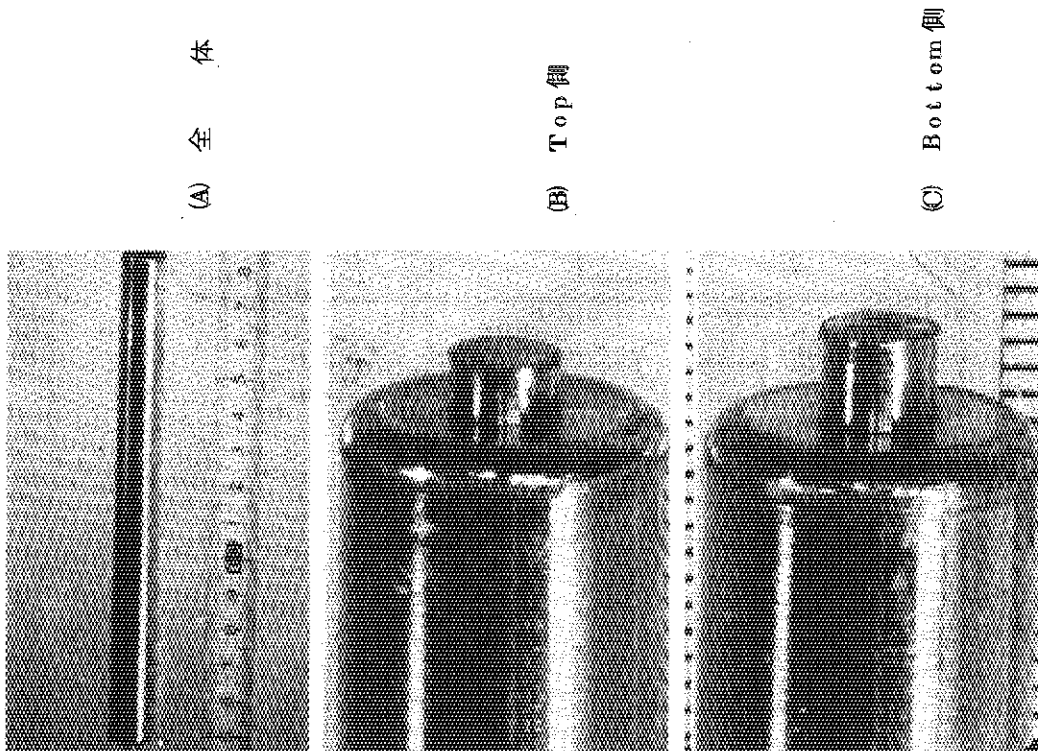
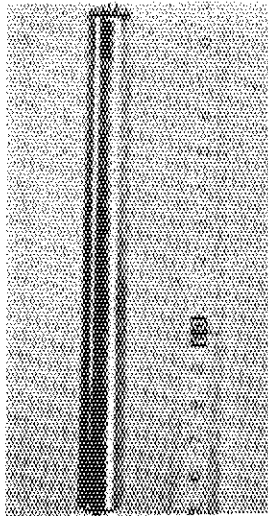
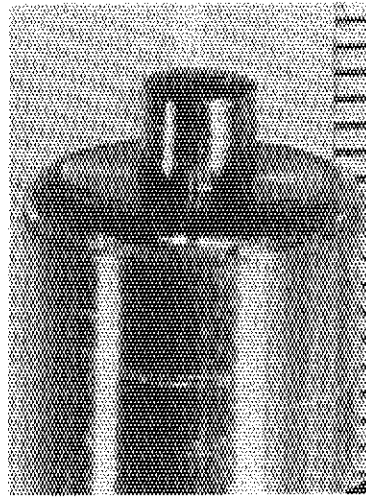


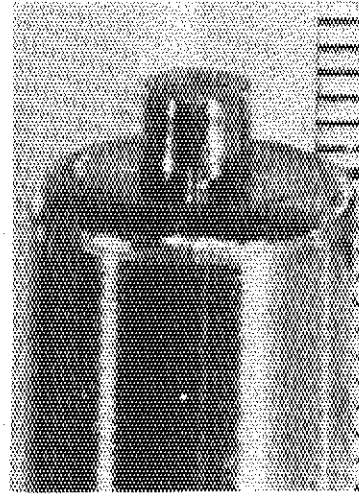
写真2.20 67F-7G No.1燃料ピンの外観



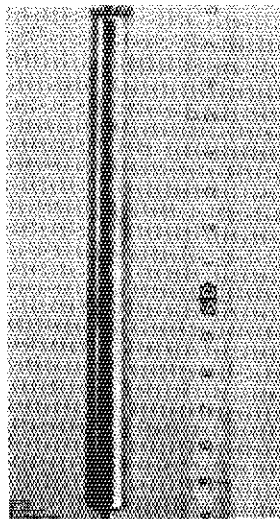
(A) 全体



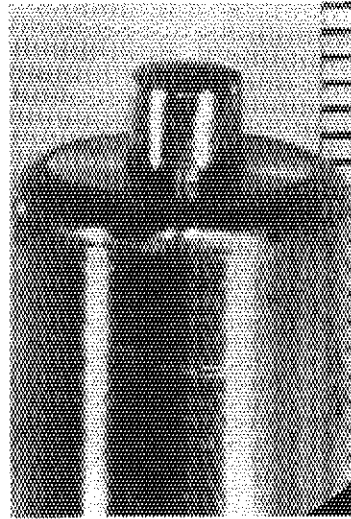
(B) Top側



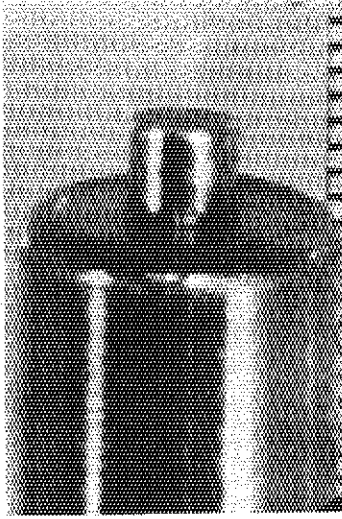
(C) Bottom側



(A) 全体



(B) Top側

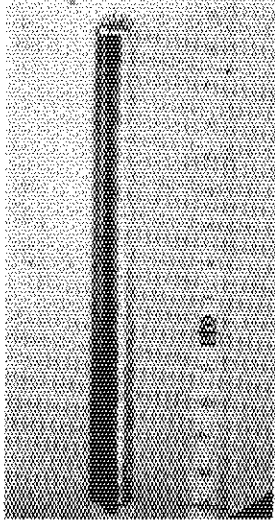


(C) Bottom側

写真 2.2.3 67F-7G 炉2燃料ピンの外観 (180°)

写真 2.2.2 67F-7G 炉2燃料ピンの外観

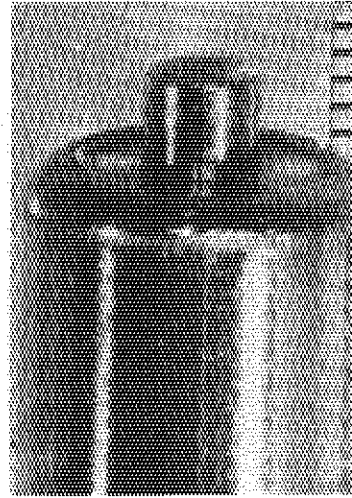
(A) 全体



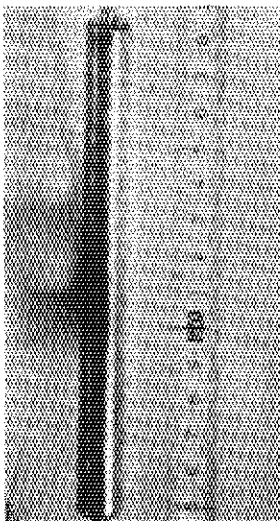
(B) Top側



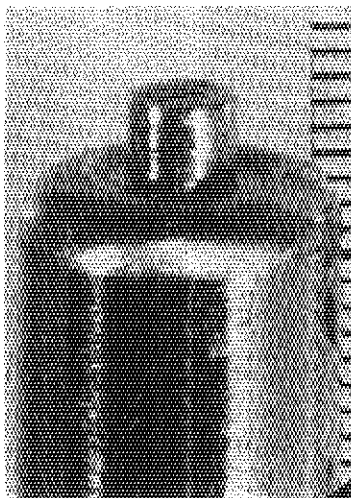
(C) Bottom側



(A) 全体



(B) Top側



(C) Bottom側

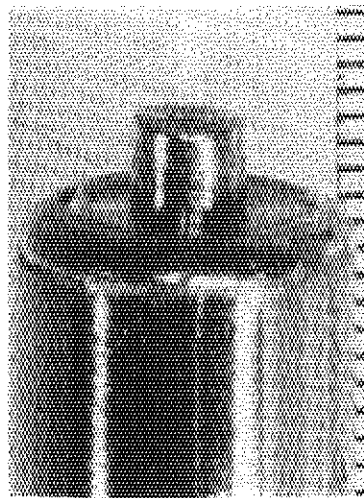
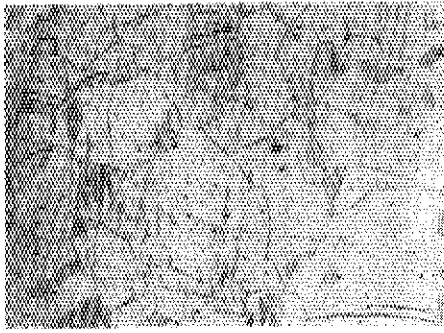
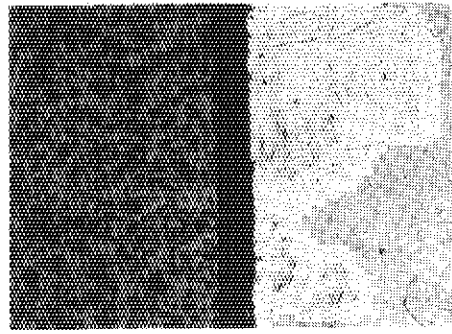


写真 2.2.5 67F-7G 炉 3 燃料ピンの外観 (180°)

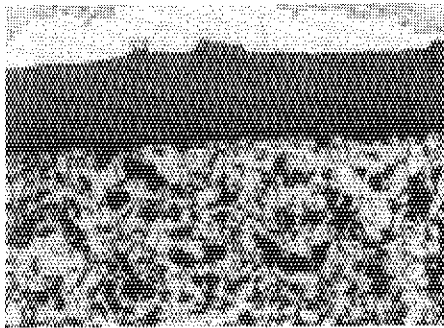
写真 2.2.4 67F-7G 炉 3 燃料ピンの外観



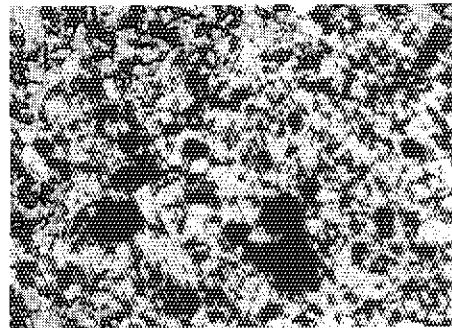
(A) 被覆管部 ×180



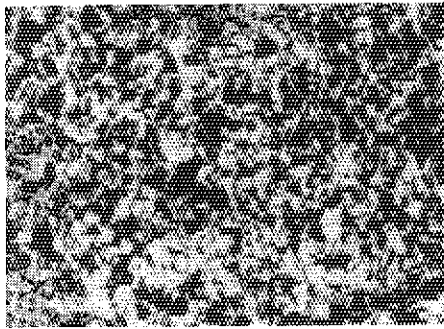
(B) 境界 ×180



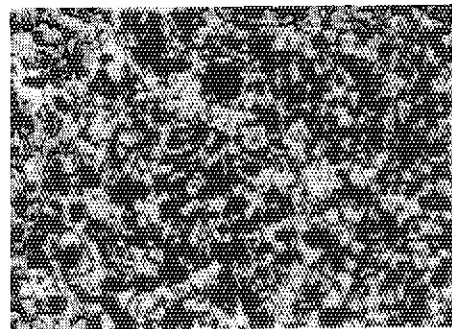
(C) 境界 ×450



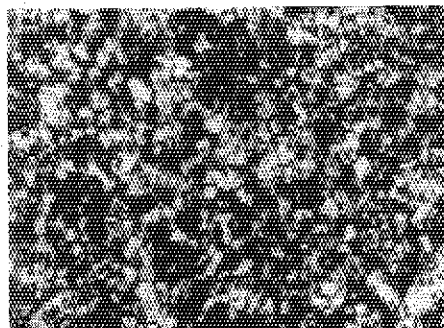
(D) UO₂部 ×450



(E) UO₂部 ×450

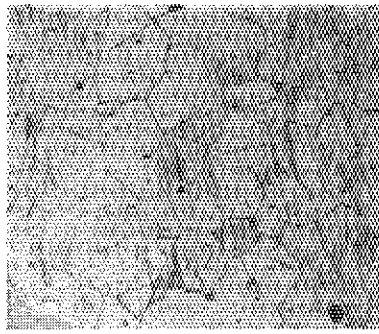


(F) UO₂部 ×450

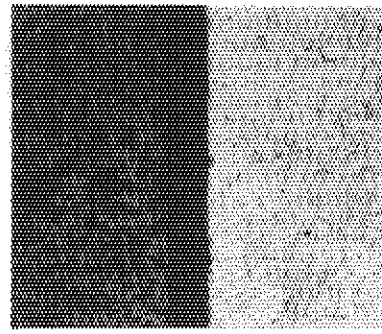


(G) UO₂部中心 ×450

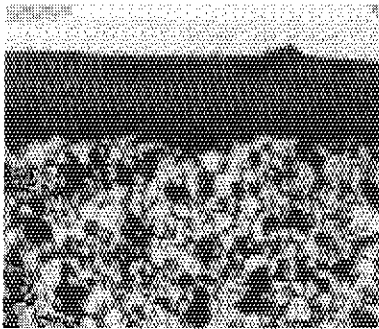
写真 2.26 No.1 燃料ピンのマイクロ組織



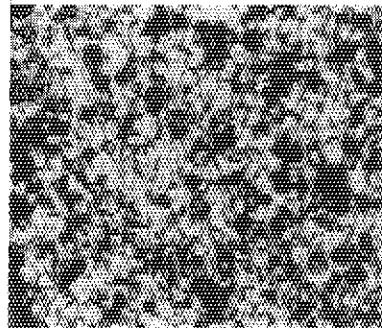
(A) 被覆管部 ×180



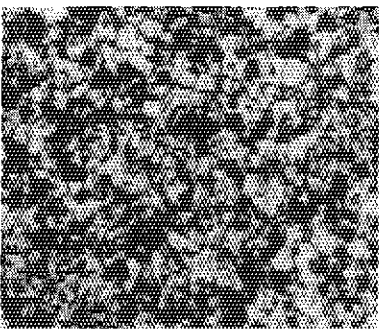
(B) 境界 ×180



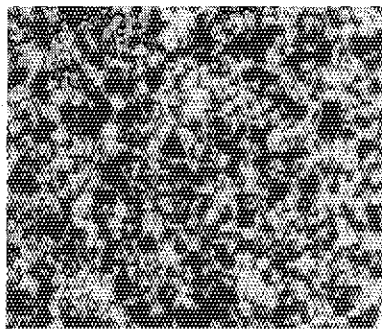
(C) 境界 ×450



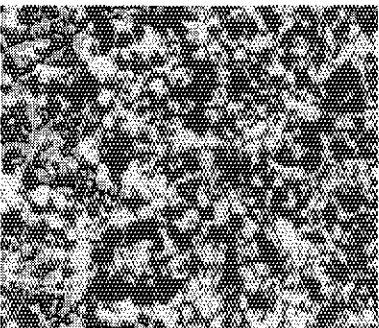
(D) UO₂部 ×450



(E) UO₂部 ×450



(F) UO₂部 ×450

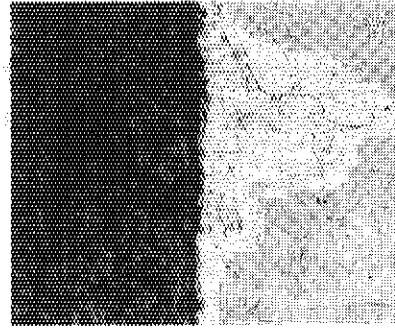


(G) UO₂部中心 ×450

写真 2.27 No.2 燃料ピンのマイクロ組織



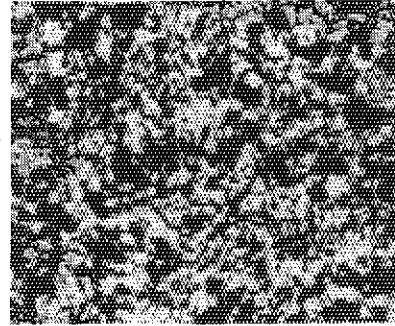
(A) 被覆管部 ×180



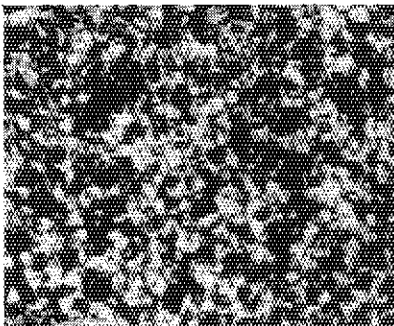
(B) 境界 ×180



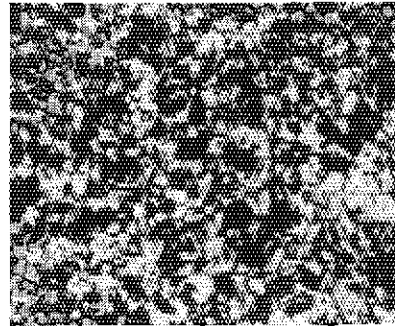
(C) 境界 ×450



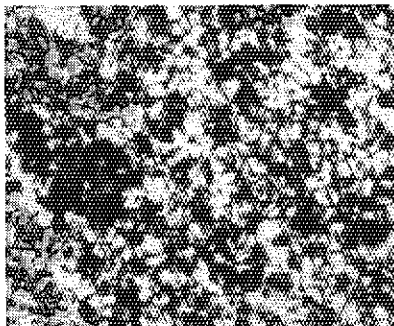
(D) UO₂部 ×450



(E) UO₂部 ×450



(F) UO₂部 ×450



(G) UO₂部中心 ×450

写真 2.28 №3 燃料ピンのマイクロ組織

2.5 67F-16G 照射後試験結果の解析

2.5.1 照射目的

JMTR 試用期間において二酸化ウラン燃料ペレットを照射し、Al 充填-重カプセルの熱特性、挿入照射孔の照射特性等の照射技術の開発と燃料の照射性能をしらべる。

2.5.2 カプセル概要

図 1.5 0 にカプセル概要を示した。

外筒と燃料ピンの間にアルミニウムブロックによる熱媒体を入れ、照射中温度変化を測定できるように5対のアロメル-クロメル熱電対を封入した。また燃料ピン表面には中性子束測定用モニターワイヤーを180度の間隔で2本取付けた。

カプセル外筒は全長6,600mm、直径29mmで内部に照射用燃料ピン1本を組込んである。

2.5.3 燃料ピン

燃料ピンは、外径約14.1mm、内径約12.6mmのSUS27よりなるステンレス被覆管の内部に、焼結密度約97%、T.D.、直径約12.5mmの天然ウランよりなる焼結UO₂ペレットが入っている。燃料スタック全長は約150mmである。

試料ペレットは、全部で13ヶよりなり両端には断熱材が入れている。

ペレットの寸法、密度、不純物等の測定結果を下表に示した。

表-(1) UO₂ペレット寸法と密度

試料No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
直径 mm	X	12.520	12.520	12.520	12.525	12.520	12.520	12.520	12.520	12.520	12.520	12.520	12.520
	Y	12.520	12.520	12.520	12.525	12.520	12.520	12.520	12.520	12.520	12.520	12.520	12.520
高さ mm		11.85	11.52	11.27	11.38	11.98	11.46	11.35	11.40	11.52	11.55	11.58	11.53
密度 %T.D.		97.4	97.4	97.4	97.4	97.3	97.4	97.4	97.4	97.4	97.4	97.3	97.4

表-(2) UO₂ペレット不純物分析

Al	Ag	B	C	Ca	Cd	Cl	Cr	Cu	Co	F	Fe	Mo	Mn	Mg	N	Ni	Pb	Si	Sn	V	Zn
106	<	0.20	36	25	<	<	15	5	5	3	124	5	6	18	5	13	5	102	5	10	50

単位 p.p.m.

表-(3) UO₂ ペレット 蒸発性不純物

蒸発性不純物	18.7 $\mu\text{l/g}$
水分	24 "

被覆管はステンレス鋼よりなり寸法測定結果を下に示す。

表-(4) SUS-27 被覆管寸法測定

		最 高	最 小
内 径 mm	α 方向	1 2.6 1 9	1 2.6 1 6
	β 方向	1 2.6 2 5	1 2.6 1 7
肉 厚 mm	A 端	0.7 5	0.7 2
	B 端	0.7 4	0.7 2

完成した燃料ピンの寸法測定結果を表-(5), (6)に示す。

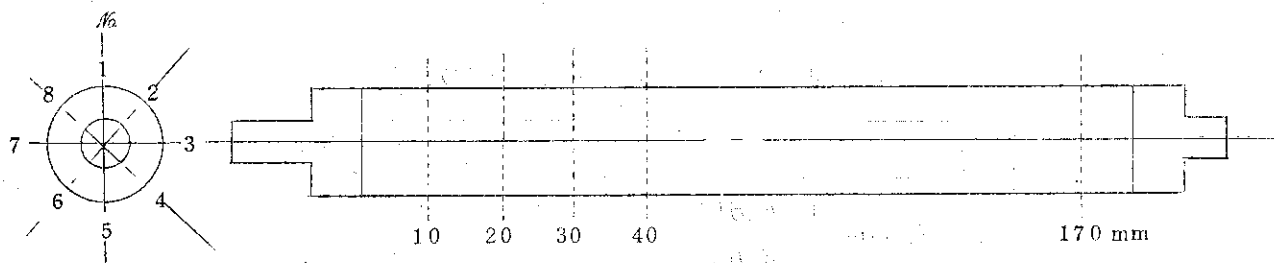
表-(5) 燃料ピン外径寸法

測定位置 測定方向	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1 - 5	14075	14075	14080	14080	14080	14075	14075	14080	14080	14080
3 - 7	14075	14070	14070	14070	14070	14070	14070	14070	14070	14070

110	120	130	140	150	160	170	180
14075	14080	14080	14080	14080	14080	14080	14080
14070	14065	14070	14070	14065	14065	14065	14070

表-(6) 燃料ピン長さ

全長	ボスを含め全長 (mm)				ボス長さ (mm)	
	1	3	5	7	長ボス	短ボス
214.10	201.0	201.0	201.0	201.0	9.0	4.0



2.5.4 照射試験

照射条件

燃料ピンは JMTR 第4サイクル (4.5.10.6 ~ 1.1.6) で約21日間、照射孔 N-9 において照射された。照射条件は、試用期間のため、炉特性等の把握も充分でないため目標程度のものであった。

温度変化

照射中の温度変化を測定するため、アルミニウム熱媒体内に取り付けた5対の熱電対温度記録を図1.5.2に示す。

2.5.5 照射後試験

概要

照射後試験は試用期間標準作業にもとずいておこない試験項目はつぎのようである。

- 1) 燃料ピン外観検査
- 2) 寸法測定
- 3) FPガス捕集
- 4) 金相試験

外観検査

写真2.2.9に燃料ピン外観写真を示した。

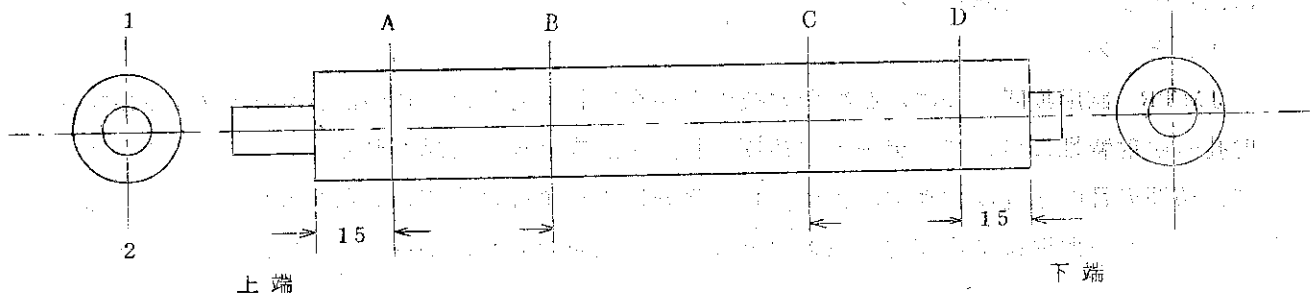
肉眼観察では、表面全体が赤みがかった色をしていた。

寸法測定

照射後燃料ピンの外径寸法変化を表-10に示した。

表-(10) 燃料ピン寸法測定

測定方向	測定位置	A	B	C	D
	測定回数				
0°	1	14.069	14.056	14.055	14.061
	2	14.069	14.054	14.060	14.053
	3	14.069	14.061	14.055	14.059
	平均	14.07	14.06	14.06	14.06
180°	1	14.061	14.061	14.059	14.062
	2	14.063	14.063	14.059	14.061
	3	14.060	14.062	14.059	14.061
	平均	14.06	14.06	14.06	14.06



測定はマイクロメータでA, B, C, D, 4箇所を時計方向の番号1 2順に1個所につき3回測定を行ない平均値をとった。

この値と表-(5)を比較すると外径寸法は、使用したマイクロメータのちがひも考慮して、殆んど変化していないと考えられる。

FPガス捕集

燃料ピンからのFPガス捕集は、図2.25に示す捕集装置を用いて行なった。装置は大別して燃料棒挿孔装置と放出ガス量測定装置より構成されている。前者は真空系内に試料を挿入し、被覆管に孔を開けて放出ガスを真空系内に導く装置であり、後者はその放出されたガス量をオイルマンオメータで測定し、その内の一定量を計測セルに捕集する系である。なお、燃料ピンの挿孔位置はプレナム側である。

測定は全放出ガス量のみで核種の測定は行っていない。結果を表-(11)に示す。

表-(11) FPガス捕集量

カプセル名	到達真空度 mmHg		全放出 ガス量* (cc)	G.M.サーベータ 放射線量 (465.24)
	搾孔装置	測定装置		
67F-16G	4.3×10^{-5}	2.8×10^{-5}	4.90	バック・グラウンド

* N. T. P.

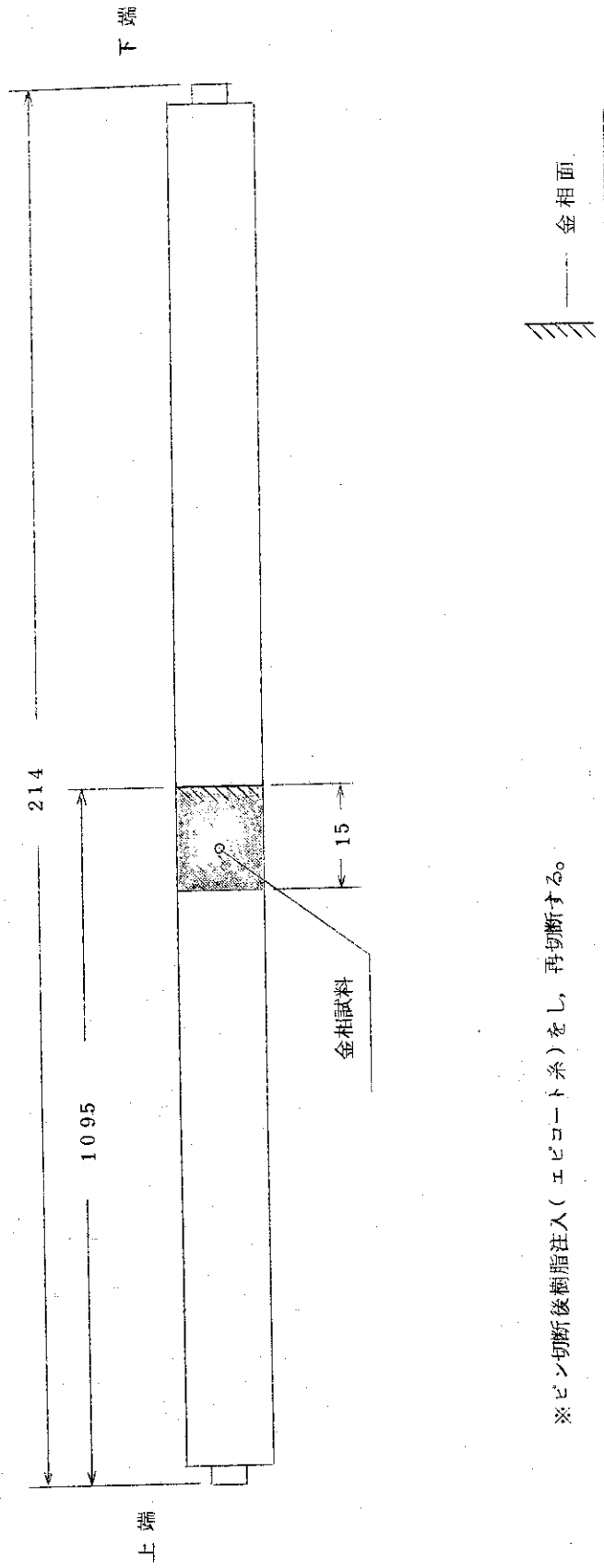
金相試験

照射後燃料の組織変化を観察するため、一つの横断面についてしらべた。切断位置を図 2.6 に示した。また、1) 燃料中心部 2) 中心より半径の 1/4 の部分 3) 中心より半径 2/4 の部分 4) 中心より半径 3/4 の部分 5) 被覆管と燃料接触部 6) 被覆管内部、の部分写真を写真 2.30 に示した。

これから判るように燃料の組織変化はあまり認められず、線出力は当初設計した 390W/cm には到達してないと思われる。

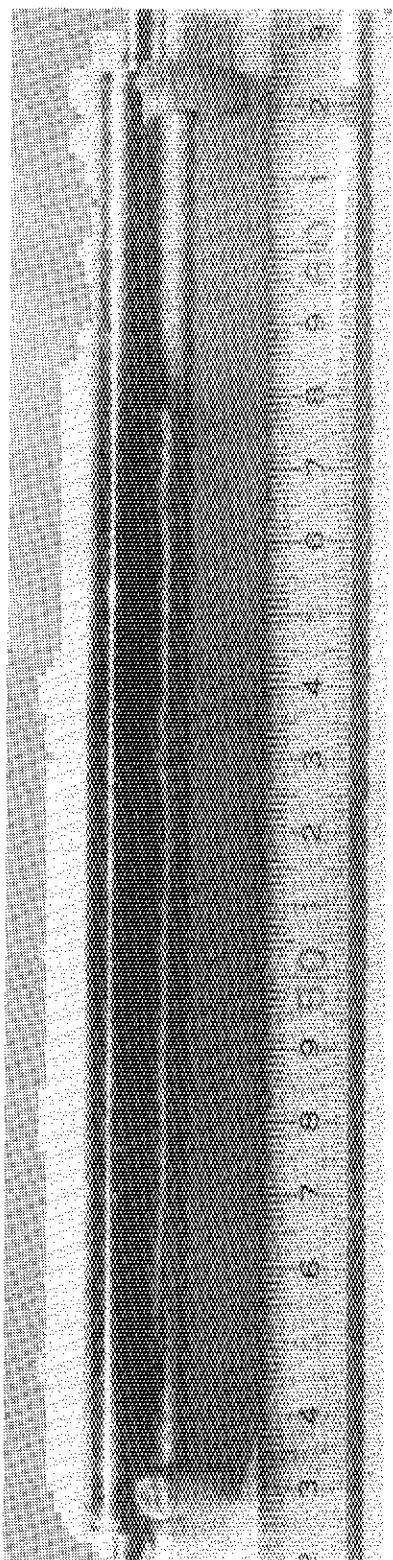
まとめ

JMTR 試用期間における燃料照射技術の開発を目的とした一連の計装カプセルの設計、照射孔の照射特性についてのデータは初期の目的を達成できたと思われる。しかし線出力については初期の目的を達成できず、組織変化を充分におこす温度までにはいたらなかった。したがって燃料ピンの照射による変化は照射前と大きな差は認められなかった。

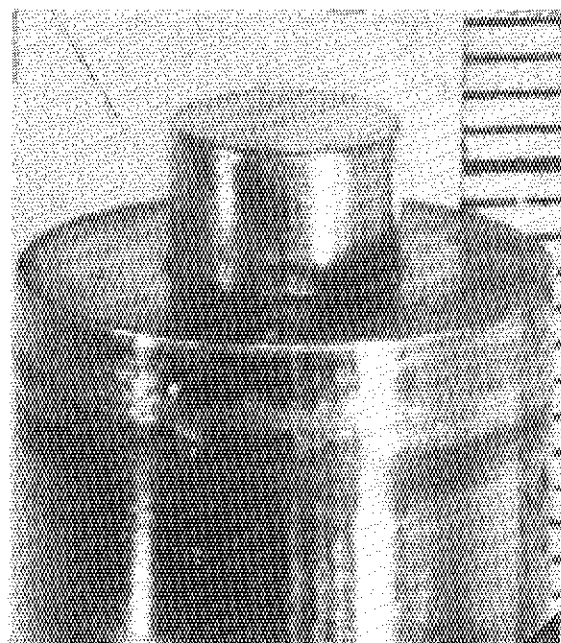


※ピン切断後樹脂注入(エポキシ系)をし、再切断する。

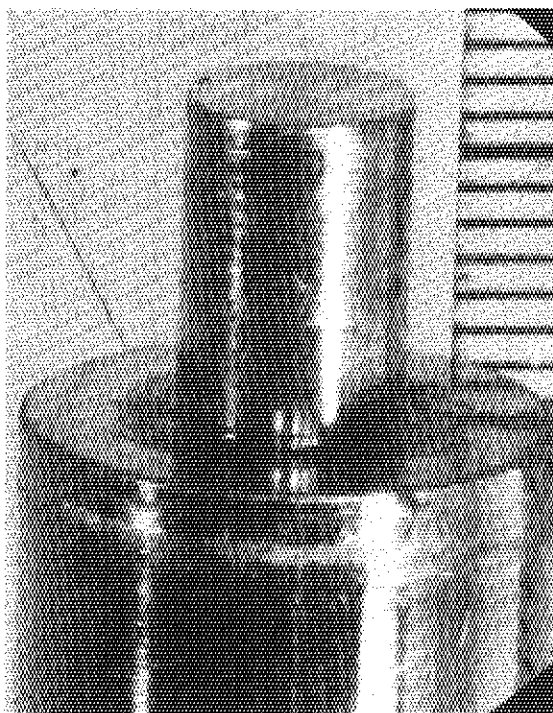
図2.6 67F-16G 燃料ピン切断位置



(A)

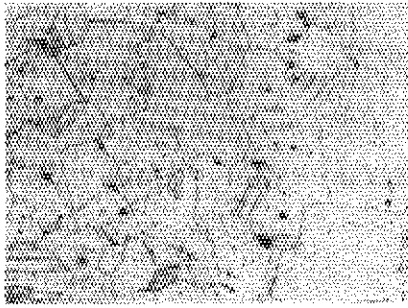


(C)

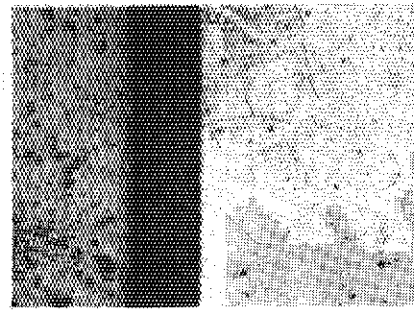


(B)

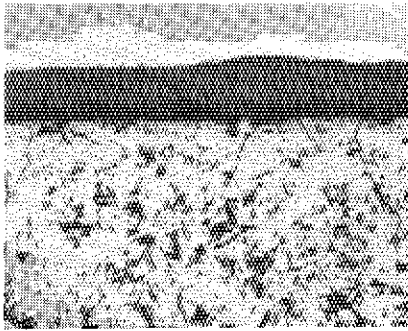
写真 2.29 被覆管外觀



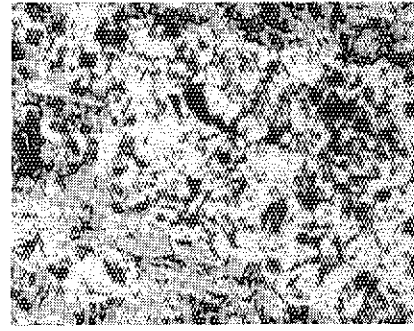
(A) 被覆管 ×180



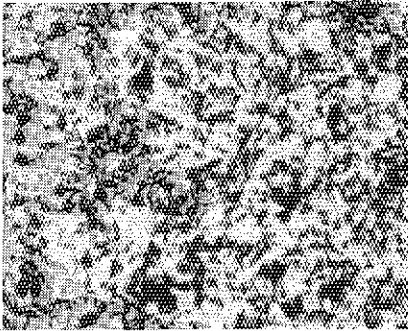
(B) 被覆管 ×180



(C) 被覆管 UO_2 接触部 ×450



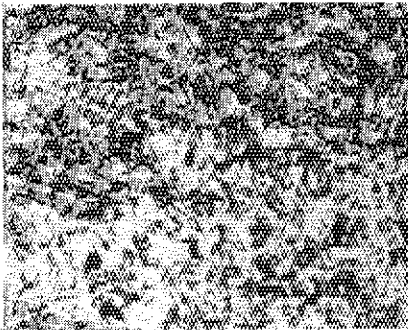
(D) UO_2 $3/4$ 部 ×450



(E) UO_2 $2/4$ 部 ×450



(F) UO_2 $1/4$ 部 ×450



(G) UO_2 中心部 ×450

写真 2.30

2.6 67F-18G の照射後試験結果

2.6.1 概 要

昭和43年に完成した材料試験炉(JMTR)の炉運転技術の習熟, 炉特性試験及び照射特性試験の実施にあたり, MAPI より提供した照射試料が昭和45年9月からJMTR の第3サイクルで照射された。照射後原研ホットラボにおいて照射後試験が行われ, 46年10月に試験はすべて完了した。

2.6.2 目 的

- 1) NaKヒーター入り真空温度制御キャプセルの熱特性
- 2) 炉側挿入孔の照射特性
- 3) 照射試料の照射後観察
- 4) 燃焼度測定

2.6.3 照射キャプセル

(1) 照射キャプセルの構造

照射キャプセルは図1.53に示すように, 照射試料を筒中に組み込み, これらの間にNaKを封入した構造である。

(2) 照射試料主要構成部品の照射前検査

1) ベレット

a. 種 類	天然UO ₂ ベレット				
b. 加 工 法	焼結後センタレスグラインダー仕上げ				
c. 寸 法	外径 10.20φmm	高さ 10.03mm	スタック長さ 120.39mm		
d. 重 量	8.4982g/個	スタック重量 101.9780g			
e. 密 度	10.37g/cm ³	理論密度の94.6%			
f. 濃 縮 度	天然UO ₂				
g. O/U	2.00				
h. 不純物成分	Al	14	Cu	1	Si 16
	B	0.2	Pb	1	Ag <0.1
	Cd	0.3	Mg	<2	Sn 1
	Ca	<0.25	Mo	<3	(ppm)
	Cr	8	Ni	4	
蒸発不純物	Cl	<10	F	<5	N 17
	C	23	Fe	203	(ppm)

2) 被 覆 管

a. 材 質 SUS 32

b. 化学成分

C	0.04	S	0.016
Si	0.45	Ni	13.33
Mn	1.58	Cr	16.42
P	0.28	Mo	2.99 (W/O)

c. 寸法

長さ 161.0mm 外径 11.31ϕ mm 内径 10.31ϕ mm

d. 強度

引張強さ 63.5Kg/mm^2 伸び 54.2%

e. 欠陥検査

渦電流探傷にて検査し合格の管を使用

(肉厚の10%深さの傷を合否の基準とする。)

3) 燃料ピン

a. 寸法

全長 161.0mm 外径 11.31ϕ mm 溶接部外径 11.47ϕ mm

b. Heリークテスト

試験時間5分でHeの洩れは 1.6×10^{-10} atm. cc/sec 以下であり合格

c. 表面汚染

スミヤ法で検出し、 2π ガスフローカウンタで測定を行なったが表面の汚染は認められなかった。

d. 溶接部X線検査

異常なし

4) その他の部品構成材

a. プラッグ SUS 32

b. 断熱材 Al_2O_3

c. パッケージ インコネル X

2.6.4 照射履歴

照射試料はJ.M.T.R第3サイクルにて昭和45年9月3日より9月26日まで約1ヶ月間照射された。炉の最大熱出力は30.6MW、運転出力時間は488.5MWDである。照射キャプセル内の温度分布は4本の熱電対により試料中央部被覆管表面温度(#2T/C)、試料両端部被覆管表面温度(#1T/C、#3T/C)及びNaKの温度(#4T/C)が測定されている。この実測の温度を図1.55に、またGENGTICにより計算した温度分布を燃料の線出力に対して求めた結果を図1.54に示す。

2.6.5 照射後試験

1) 外観検査

燃料ピン全体及び両端部の外観を2方向より観察した様子を写真2.31に示す。ピンの表面には傷や色の変化等は無く健全である。

2) 寸法測定

マイクロメータによる測定結果を表2.5に示す。この結果を照射前の寸法と比較しても変化はなく異常は認められない。

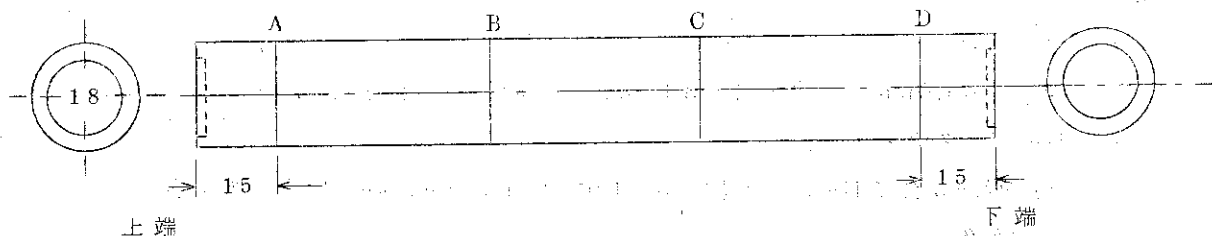
3) 金相試験

被覆管及び UO_2 中心部の顕微鏡写真を図2.7に示す。燃料の線出力は200W/cm程度であり、写真でも判かるように UO_2 の結晶粒の粗大化は起っていない。

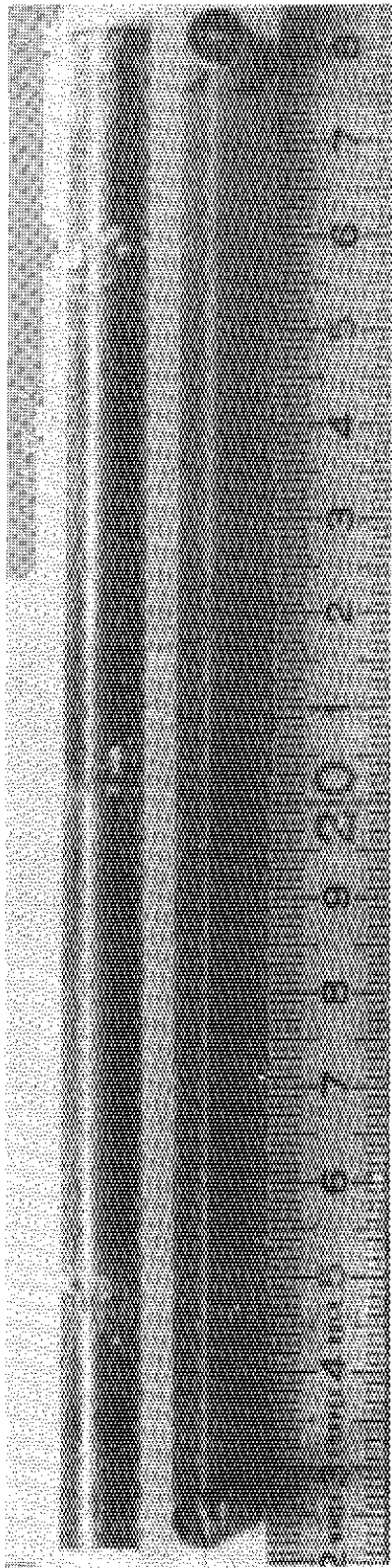
2.6.6 結 論

照射試料は線出力も小さく(約200W/cm), UO₂の中心温度も高温に達していないこと, 照射期間も短時間であり燃焼度も低いこと等により, 試料の寸法, 被覆管やペレットの組織等の変化もなく異常は認められなかった。

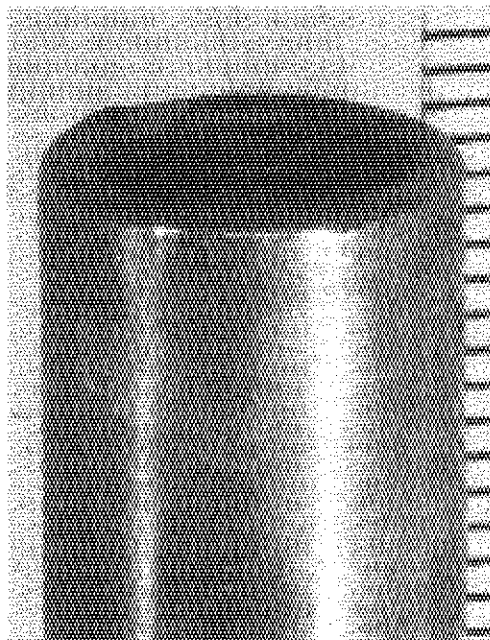
表2.5 寸 法 測 定 結 果



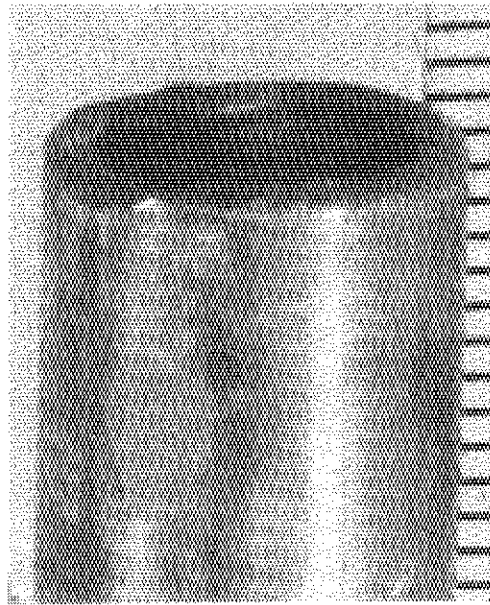
個 所		A	B	C	D
0°	1	11.298	11.301	11.301	11.298
	2	11.300	11.298	11.301	11.301
	3	11.301	11.300	11.300	11.301
	平均	11.30	11.30	11.30	11.30
180°	1	11.300	11.309	11.302	11.301
	2	11.301	11.307	11.305	11.302
	3	11.306	11.307	11.308	11.298
	平均	11.30	11.31	11.31	11.30



(A)

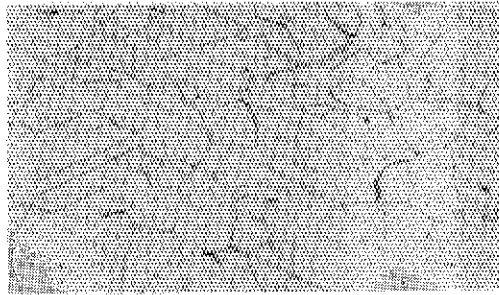


(B)

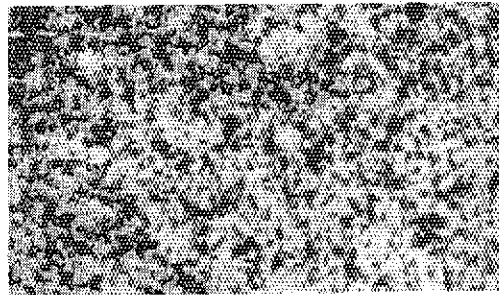


(C)

写真2.31 被覆管外觀



(A) 被覆管 ×180



(B) UO₂ 中心部 ×450

写真 2.7 被覆管およびUO₂ ペレットの照射後組織

2.7 67F-24G の照射後試験結果 (U-C の照射)

(1) 目的

U-C系燃料の照射経験は、既に海外では非常に多く行なわれているが、国内では皆無といつてよい。その主なる理由は、U-C系特有の性質として酸化物燃料ではみられないほど化学的に活性であり、水、酸素とは容易に反応するからである。しかし今後FBRやガス炉の燃料として酸化物燃料にとって替る可能性の大きいU-C系燃料について単に炉外だけでなく、炉内挙動を把握しておくことは重要なことである。本研究では、U-C系燃料の初めての照射試験をJMTRで実施し、その経験から今後の照射試験に資する種々の技術的問題点ならびにU-C系燃料の照射挙動を知ることが目的とした。

(2) 照射試験

Carbo-thermic法で製造した天然(濃縮度)UC粉末を冷間圧縮-高温焼結により92%T.D. 直径1.21mmφ、高さ15mmのペレットを製造した。これをスタック長150mmに調整し、インコネル製スプリングとともに、SUS316の燃料被覆管内に挿入し、端栓により密封溶接を行なった。このようにして得られた燃料ピンをNaK、Alを熱媒体とし、外径21mmφ肉厚1mm、外径40mmφ肉厚2mmのSUS304被覆管内に挿入し、照射キャプセルに組立てた。また照射中の温度分布を知るために一部のペレットには中心孔を開け、中心温度測定用熱電対を挿入し、さらにAl熱媒体中にも燃料シート対応位置に熱電対を挿入した。

図1.60にキャプセルの構造を示す。

(3) 照射条件と照射

67F-24Gキャプセルは、昭和46年度#10~#11RC-G-12照射孔で42日間照射された。この間、炉の出力は最高31MWに対し、キャプセルに取り付けた熱電対の測定値から、最高線出力37.5W/cm、ペレット中心温度900°Cに達した。

図2.8に炉出力とキャプセルの熱出力との関係を、また図2.9にSUS内筒内面温度の結果を示す。また、ペレット中心温度結果を図2.10に示す。2RCの照射期間を通してF.P.の漏洩は認められなかった。

また、この間の燃焼度は、熱出力から換算して約850MWD/tと推定された。

炉の#11RCでの照射終了後、約1年間ホットラボで保管されたのち、照射後試験が行なわれた。

(4) 照射後試験結果

67F-24Gキャプセルの照射後試験は東海のホットラボで行なわれ、試験項目として燃料ピンの寸法測定、γ-scan金相試験、Burn-up測定が選ばれた。

外径寸法

マイクロメーターを用いて測定した照射前後の外径を次表に示す。

ここで照射前の外径は、内径と肉厚の実測値から算出したものである。次表では照射前後の測定位置が必ずしも一致していないため、位置をずらして示したが、製作時の寸法公差を考慮すると被覆管の変形は認められない。

寸法測定値

位置	照射前			照射後
	内径 (mm)	肉厚 (mm)	外径 (mm)	外径 (mm)
1	{ 12.67 12.68	{ 0.76 0.77	{ 14.19 14.22	
2	{ 12.68 12.68	{ 0.76 0.74	{ 14.20 14.16	
3				{ 14.16 14.18
4				{ 14.18 14.18
5				{ 14.18 14.18
6				{ 14.18 14.17

γ-スキニング

燃料ピンのγ-スキニングは、NaI(Tl) 3"×3" を検クターとし、スリット巾 0.3×2.0 mm、ピンの送り速度 20^m/m/min、40.0 チャンネルの P.H.A. で行なわれた。また核種として ⁹⁵Zr-⁹⁵Nb が選ばれた。

図 2.11 に燃料ピン軸方向のスキニング結果を示す。図 2.11 の結果では、燃料シート部の Activity がほぼ一様な強度となっていることから燃料スタック 150 mm に亘ってかなり一様な中性子束分布であったと推定された。

検鏡試験

ペレット中心温度測定用熱電対を挿入した位置の近傍でのペレットを切断し、これを研磨したのち、1HNO₃:1CH₃COOH:1H₂O 溶液で腐食し検鏡試験を実施した。

写真 2.31~2.33 に腐食前のペレット研磨面を、また写真 2.34~2.36 に腐食後の金相写真を示す。本来 UC は m. p. 2300°C まで単相で変態点をもたず、UC 単体では安定な物質であるので、照射温度最高 900°C 程度では金相的な変化は起らない。しかし写真 2.37 のマクロ写真で見られるように熱伝導度が UO₂ の 3 倍も大きいにも拘わらず、クラックが発生しているのは、一般には考えられない現象である。また写真 2.38 には、UC 研磨面のオートラジオグラフを示す。

ペレットクラック部に F.P. が析出しているのは、照射中に蒸発しやすい F.P. がペレットから放出されクラック部に析出したものと考えられる。

まとめ

UC は化学的に極めて活性であり、炉外で取扱う場合でも十分な注意を払わないと雰囲気中の酸素や H₂O と反応して酸化物を形成する。そのために、これをキャプセルに組立て照射し、

JAERI-M 5537

さらに照射後試験を実施するためには、その取扱いは極めて困難なものである。

今回のUCの照射試験は、天然のウランを用いて照射温度を抑制したが、UCの照射技術を修得する上で貴重な経験を多数学ぶことができた。

67F-24G (7/9のデータより)

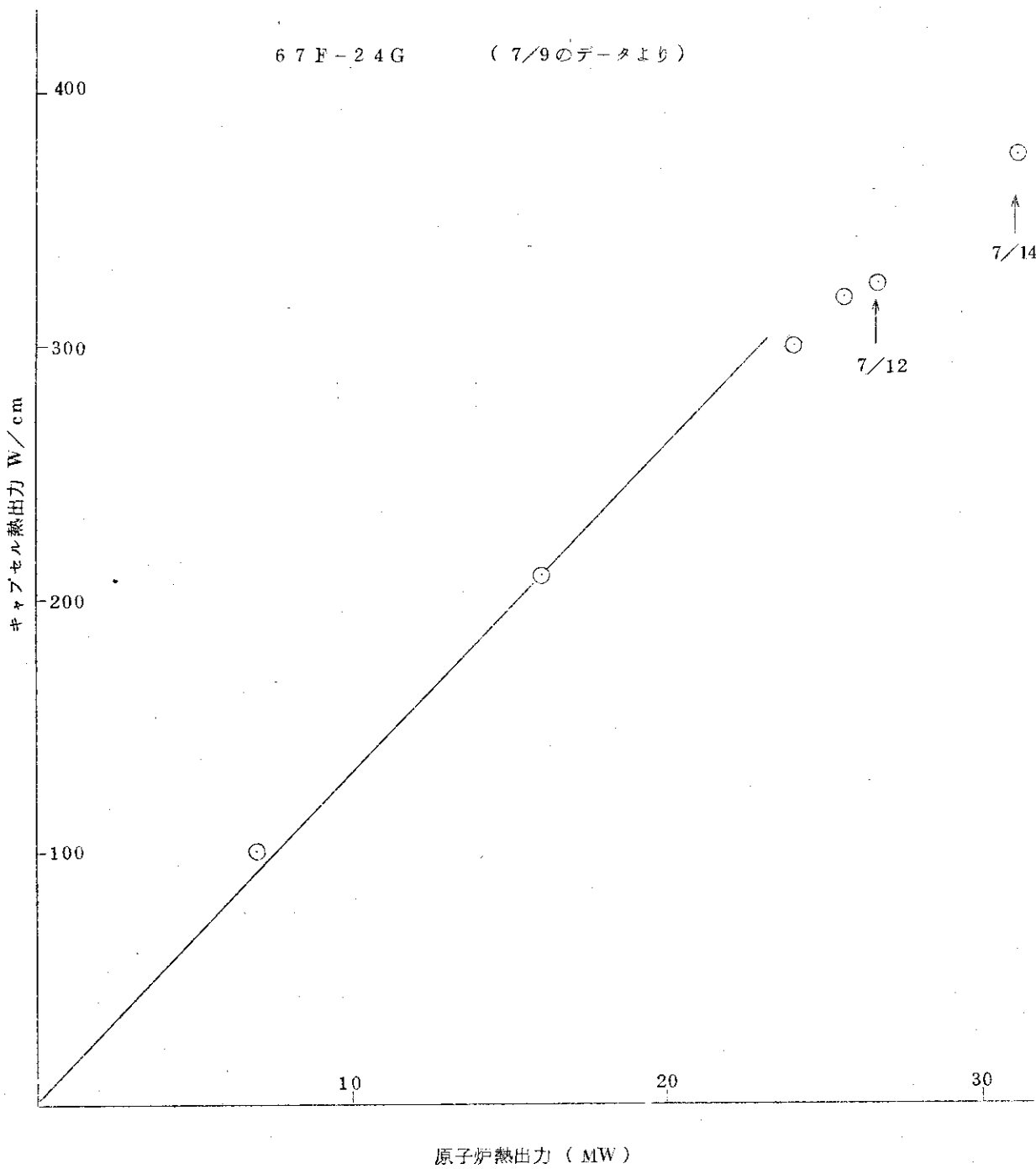


図 2.8 原子炉出力-キャプセル熱出力

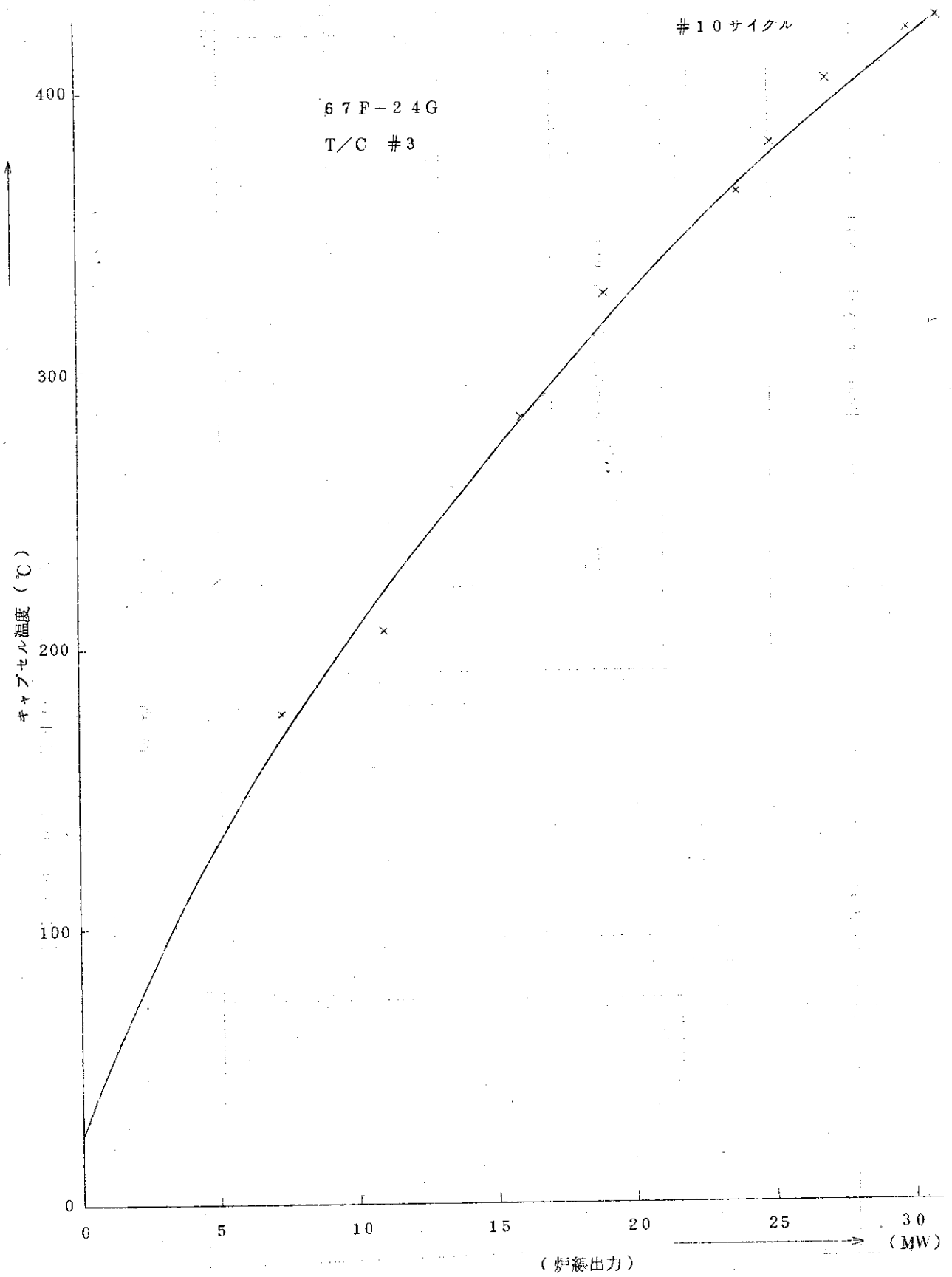


図 2.9 第 10 サイクル 炉出力上昇時のキャプセル温度変化

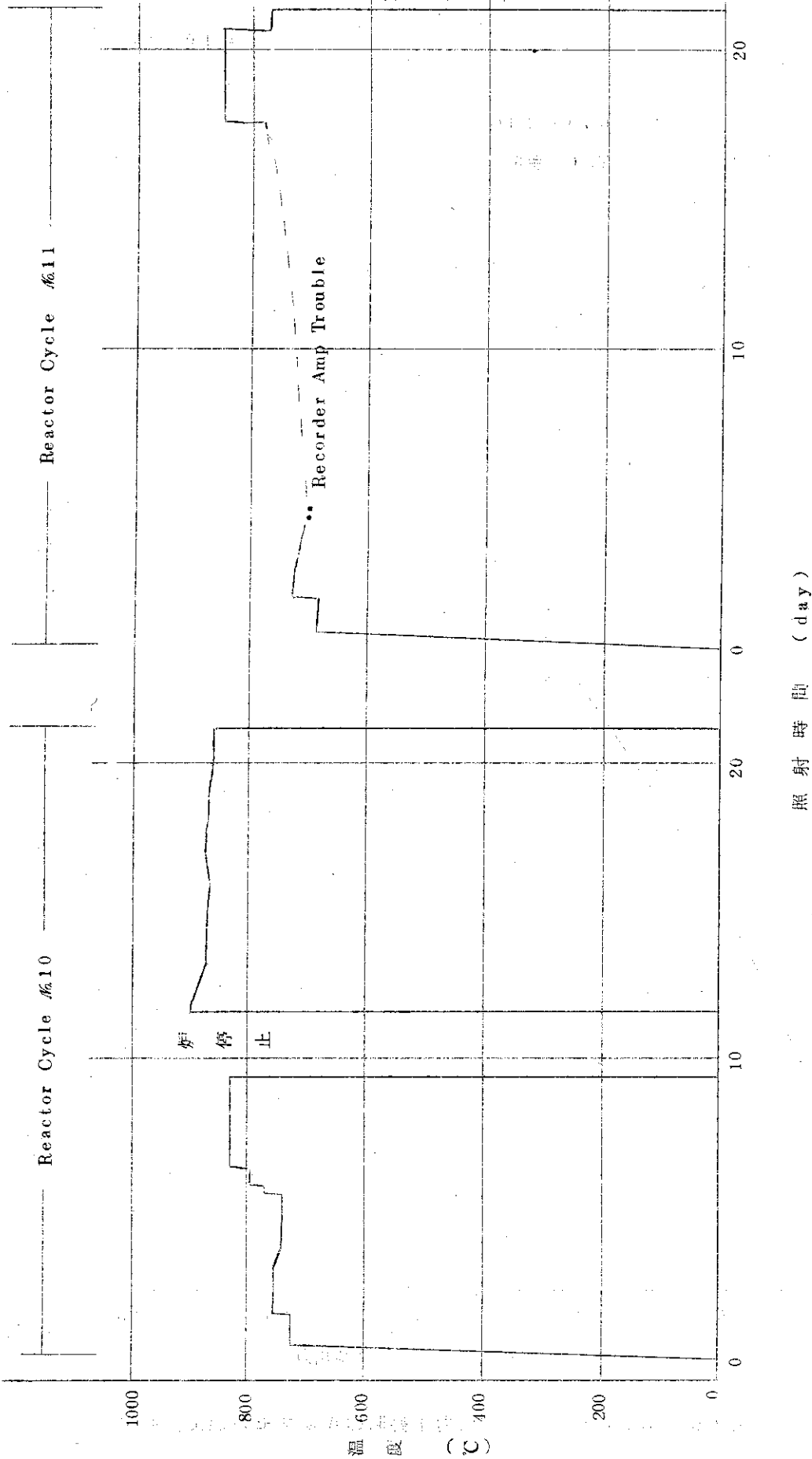


图2.10 67F-24G 中心温度测定值

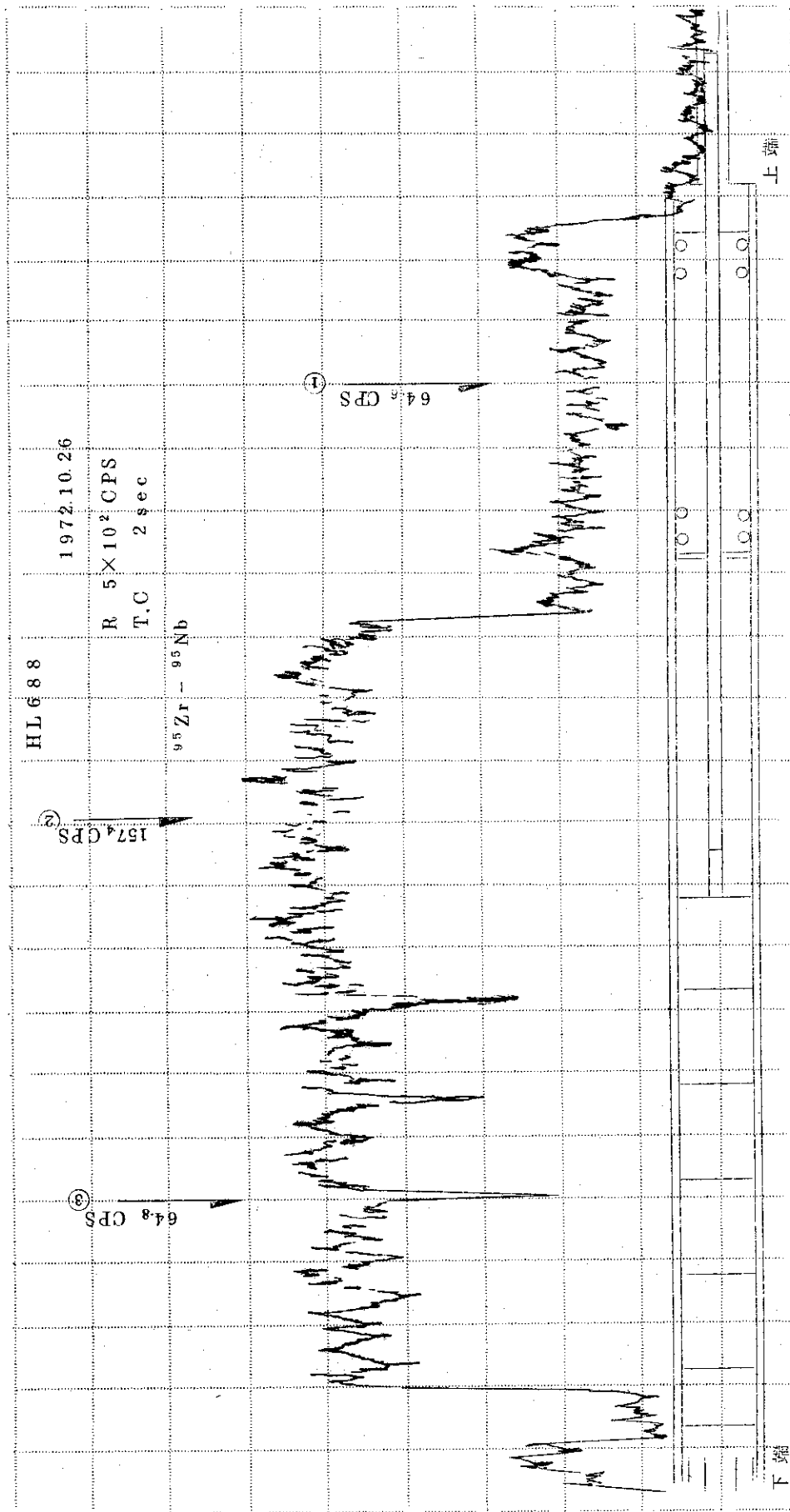


図 2.11 67F-24Gγ スキャンニング

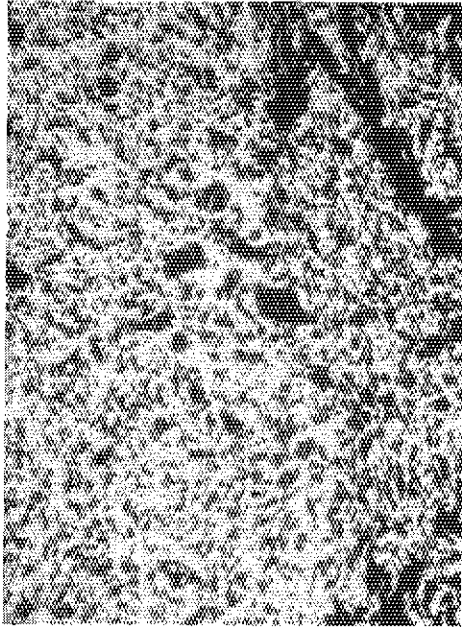


写真 2.32 中間部エッチ前 ×90

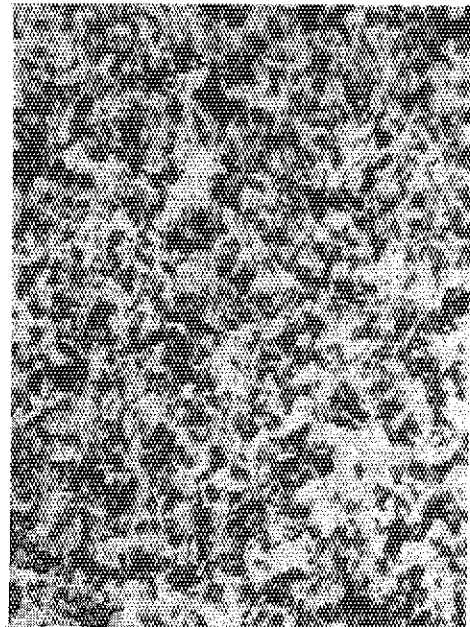


写真 2.34 外周部 ×225

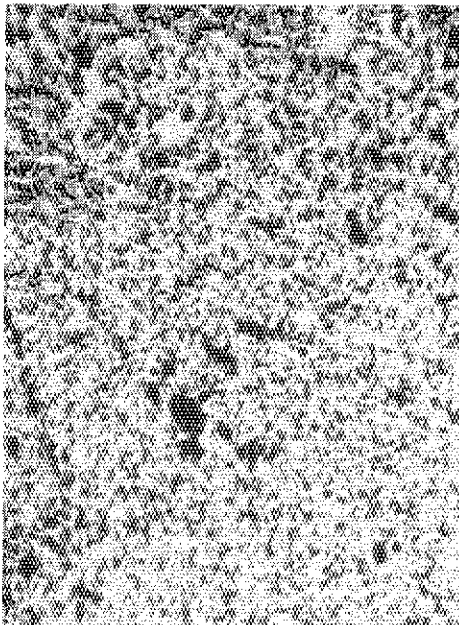


写真 2.31 外周エッチ前 ×90

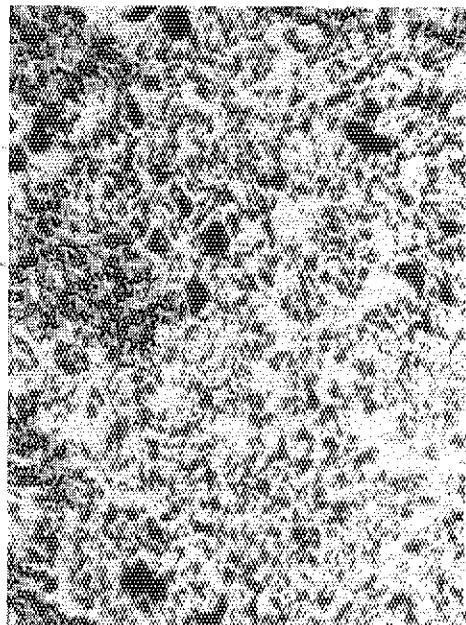


写真 2.33 中心部エッチ前 ×90

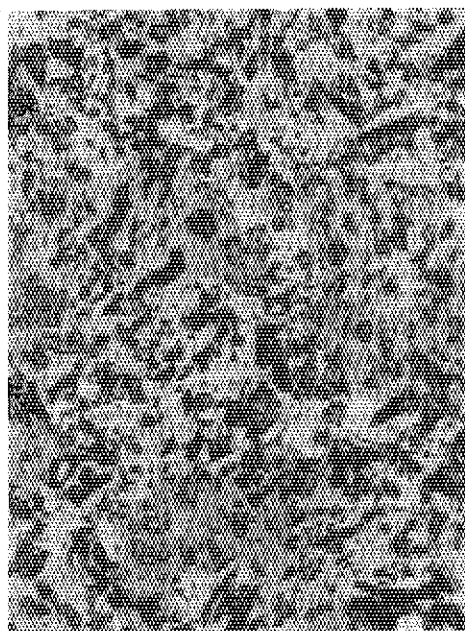


写真 2.36 中心部 × 225

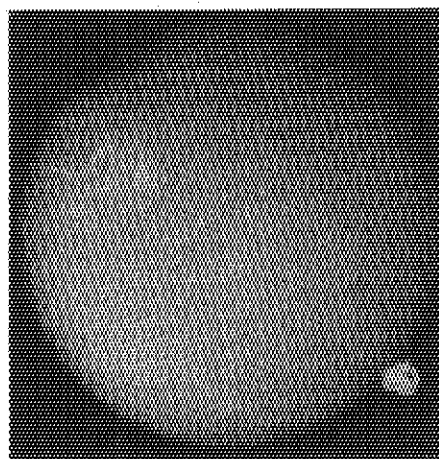


写真 2.38 オートラジグラフ

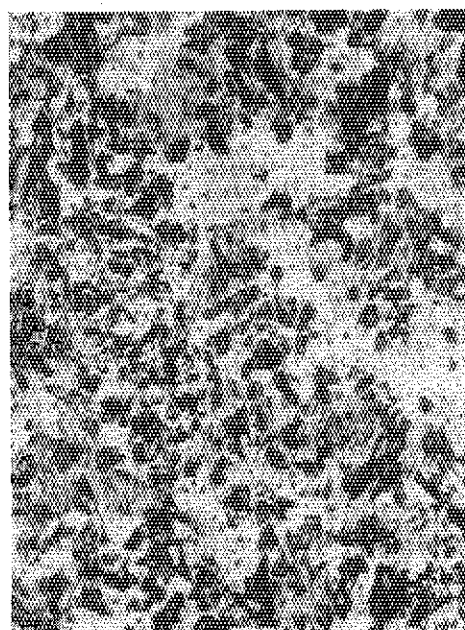


写真 2.35 中間部 × 225

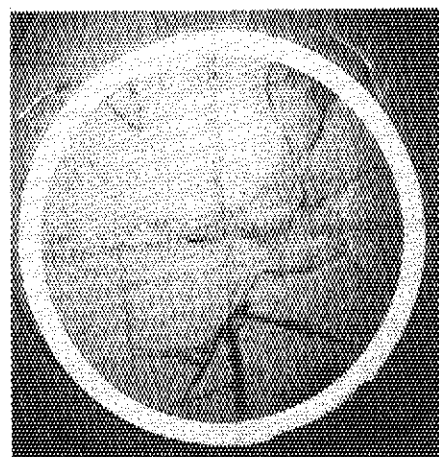


写真 2.37 マクロ

2.8 67F-28G 照射後試験データの解析

寸法検査

67F-28G 燃料試料は文末に示した寸法検査データに付記してある試料形状をみてわかるようにTop側部に著るしい曲りを生じている。これは照射によって起ったものではなく、照射後のキャプセル解体の際に熱媒体として用いたアルミニウムの二つ割部が熱影響のため噛み合わさって変形し外筒管から容易に抜け出せなかったのでキャプセルをプレスで押さえたり、ミーリングで外筒を切削して燃料試料を取り出したが、この際の取扱い上生じた曲りである。したがって寸法検査は試料の直径のみ0°および90°の2方向4ヶ所測定した。

実測値は前出のとおり平均で1.362mmであるが、この値は照射前の試料の平均直径1.361mmと同程度であり、照射による寸法変化はなかったといえる。

γスキニング

照射した燃料試料のγスキニングは切断面金相観察用試料や同位元素分析用試料の採取位置を決めるための一つの基礎データとして重要である。また核分裂生成物の放射能は燃焼度に比例するので、γスキニングのデータからその試料の全照射期間を積算した長さ方向の熱出力分布を知ることにもできる。また本試料の場合にはガドリニウム入りUO₂燃料であることから、ガドリニウムの燃焼が中性子束強度によって左右されることによる燃料試料長手方向のウランの燃焼度合が通常のUO₂燃料に較らべ顕著に表われることが期待できる。

図2.12に示したγスキニングプロファイルをみてわかるように、測定核種を熱的に安定な⁹⁵Zr-⁹⁵Nbを選定して測定した放射能強度が燃料試料中央部で強く、上下両端に近づくほど弱くなっているが、これはJMTRN-9照射孔の縦方向中性子束分布にほぼ対応した傾向とみられる。さらに燃料半径方向のガドリニウムの中性子による燃焼は照射時間が一定の場合には図2.13に示すように中性子束に依存している。従って中性子束密度が小さい場所ほどガドリニウムが燃焼せず燃料半径に対しガドリニウムを含む領域が大きいことになり、つまり²³⁵Uの核分裂領域が逆に減少し放射能強度が弱くなることとよく対応したγスキニングの結果になっている。

さらにこのことは、キャプセル熱媒体部の温度計測データから得られる上端部、中央部、下端部の記録温度、熱媒体中の温度差(ΔT)のひらきからも裏づけられる。

FPリークテスト

この試料は本来リークテストは行なわなかったことになっていたが、前述したようにキャプセル解体の際に試料上端部に著るしい曲りを生じたので、バンクチャーテストに先立って実施することになったものである。1.16の検討メモ-1にみられるようにリークの個所は不明であるがリークパスのあることは確実となったので、FPガス捕集(バンクチャーテスト)は行なわれないことにした。このリークパスは照射中に生じたものではなく、キャプセル解体の際に生じたものであるとみて間違いはない。

組織観察およびオートラジオグラフィ

写真2.39のマクロ写真は前出のγスキニングプロファイルで最も放射能強度の高いつまりガドリニウムの燃焼が最も進んだ位置の切断面組織である。また写真2.40マクロ写真も同様に燃焼度の高い位置の縦断面マクロ組織を示している。写真2.41～写真2.46までのマイクロ組織写真とともに観察するとよくわかるように、燃料体の結晶組織変化は中心部、外周部を問わずほ

とんど認められない。

温度計測データから中心温度は750℃に達したことを確認しているが、燃料中心寄の結晶粒径がわずかに成長しているのがわかる程度である。詳細に結晶粒径を測定すると外周部（ほとんど製造時のままの結晶粒径と考えてよい低温部）の平均結晶粒径は8.0 μ であるのに対して中間部では平均11.0 μ 、中心部では9.5 μ となっている。

ごくわずかの結晶成長の差であるので正確な判断は無理であるが、この燃料半径方向の結晶粒度分布変化から推論すると、燃料体中のガドリニウムは予期どおり外周から燃焼してゆき、ガドリニウムの燃焼が未達成の中心部に近づくほど結晶粒径は小さくなりますなわち温度上昇が小さいことが考えられる。中間部の粒径が中心部より大きいのはガドリニウムの燃焼が徐々に進行している部分であるので温度上昇も中心部よりは大きいためと考えられる。

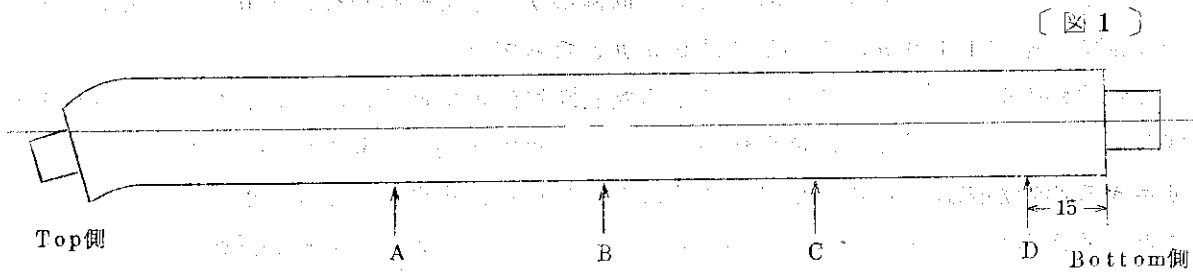
一方、オートラジオグラフィからも興味ある観察ができた。写真2.47と写真2.48は上記の金相観察断面の β - γ オートラジオグラフを示す。前述のように両試料ともガドリニウムの燃焼が最もよく進行した個所であるが、この写真をみてまずわかることは、ガドリニウムの燃焼が進んでいない燃料体中心部が、放射能強度が弱く黒色を呈しており、この黒色が外周に向うにしたがって徐々に淡くなりガドリニウムの燃焼した外周領域では放射能強度が強くなり白色に感光している様子が一目で明らかである。

1.16および図2.13でも示したように、この照射試験ではガドリニウムの燃焼を燃料半径の50%を目標として中性子束を定めたが、オートラジオグラフから明らかなように燃焼領域は半径の55%程度であり十分に目的を達成したといえる。なお、 γ スキャンプロファイルで放射能強度の弱い位置の切断面のオートラジオグラフを撮りガドリニウムの燃焼領域の比較を行えば、中性子束密度とガドリニウムの燃焼度合、軸方向の γ スキャン放射能強度など相互の関連性が明確となるであろう。

写真2.48で本来中心となるべき黒色のガドリニウム未燃焼部がやや片寄った位置にあることがわかる。これはJMTRのN-9孔の第5～第6サイクルにおける炉心構成からくる、照射孔の径方向の中性子束密度のゆがみによるものと考えられる。同じような傾向が別にJMTRのE-13孔で照射した UO_2 燃料（中心空孔が片寄りをしていた）にもみられた。

67F-28G 試料寸法検査データ

1. 試料形状



2. 使用測定器

(I) マイクロメーター

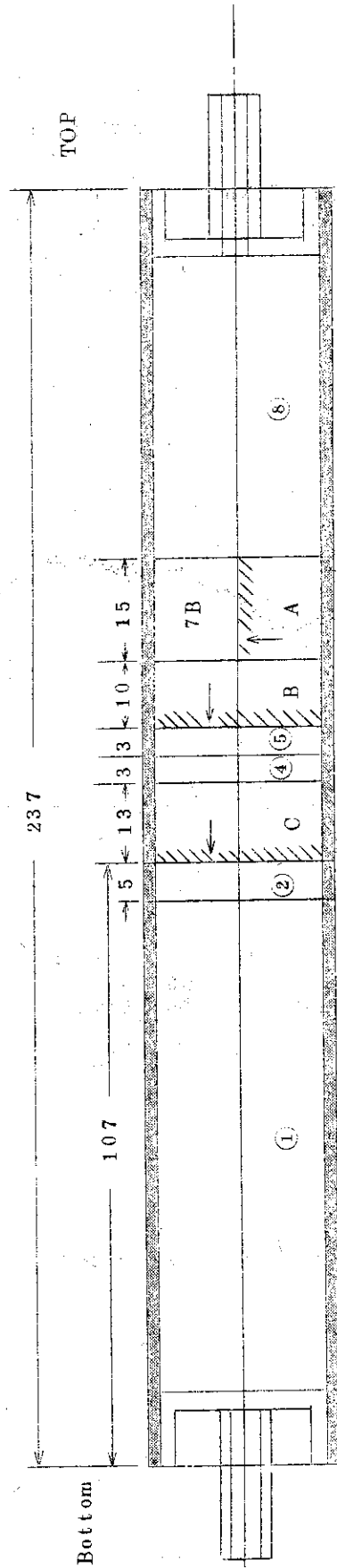
3. 測定箇所

上記(図1)に示す試料について長さは測定不可のため、直径のみ中央部、Bottom側端部及びその中間2箇所の計4ヶ所(0°, 90°の2方向)1ヶ所に付き3回測定した。

4. 実測値

(直径)

箇所 方向	回数	A	B	C	D
0°	1	13.612	13.640	13.618	13.613
	2	13.612	13.638	13.622	13.620
	3	13.618	13.640	13.620	13.616
	平均	13.614	13.639	13.620	13.616
90°	1	13.626	13.638	13.627	13.615
	2	13.620	13.635	13.620	13.620
	3	13.625	13.632	13.625	13.620
	平均	13.624	13.635	13.624	13.628



※ 矢印は金相面を示す

- ① 7B ⑧ 廃棄
- ② 燃焼産分析用試料
- A, B, C 金相及びオートラジオグラフィ
- ④⑤及 A, B 東芝へ持ち帰り

67F-28G 切斷位置

HL-618

47-2-14

測定核種 $^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$

R 5.0×10^3 CPS

T.C 2

①②③④は別表①②③④を参照

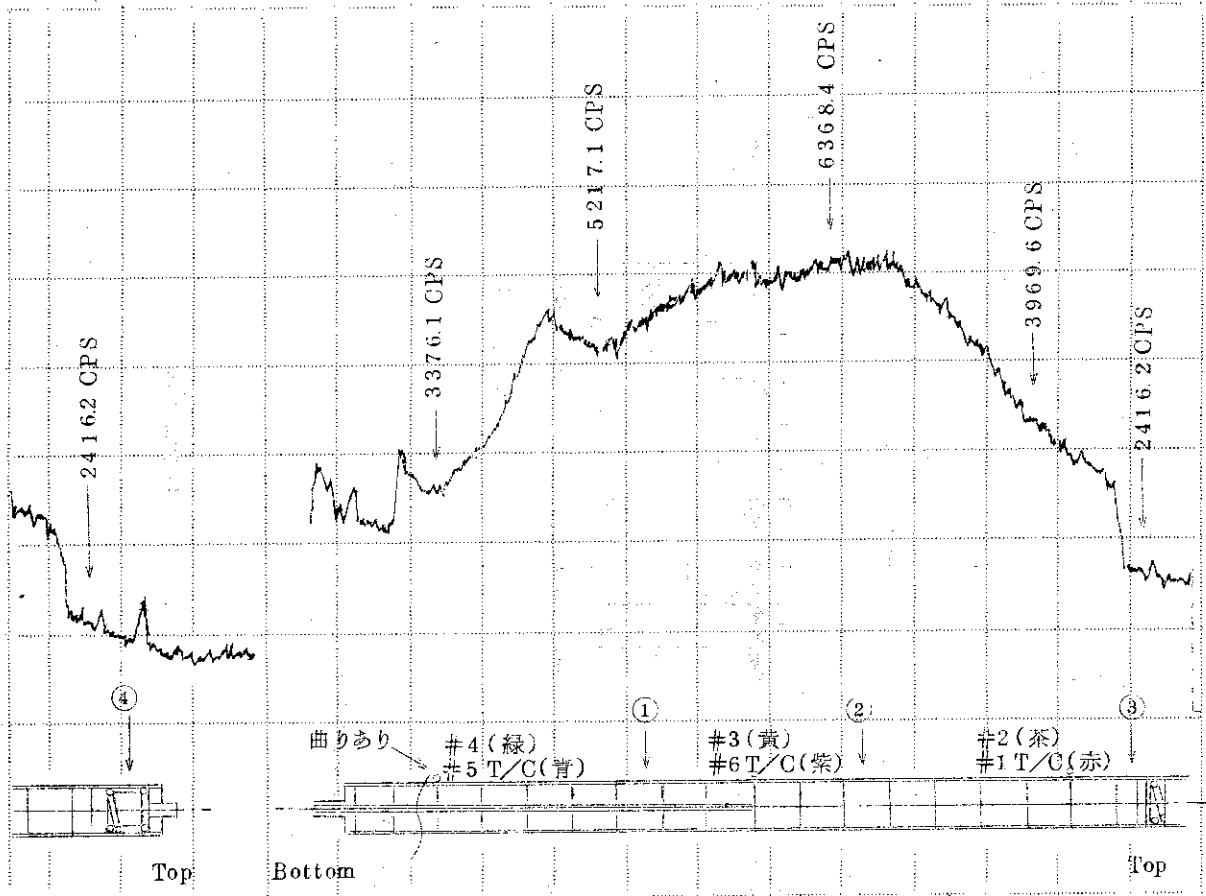
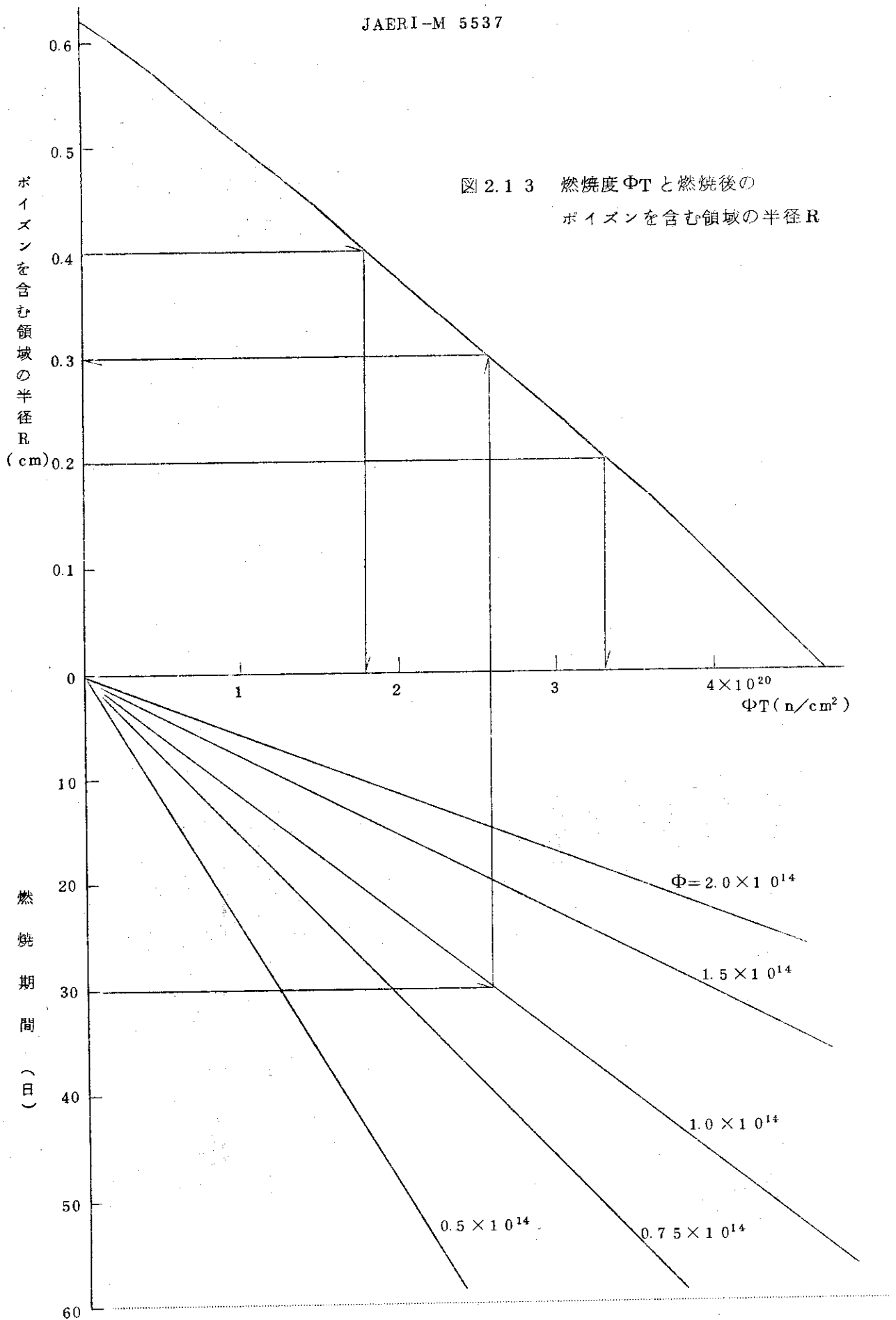


図 2.1 2 67F-28G γ スキャンニング



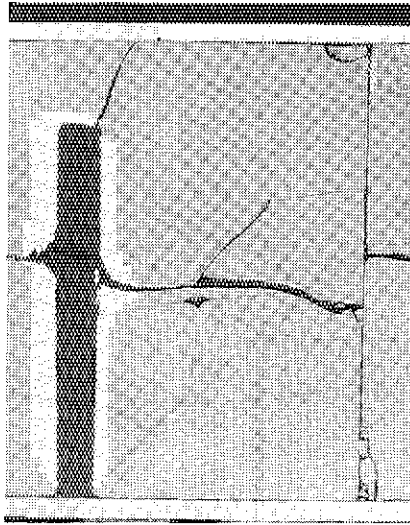


写真 2.40 マクロ × 4.5

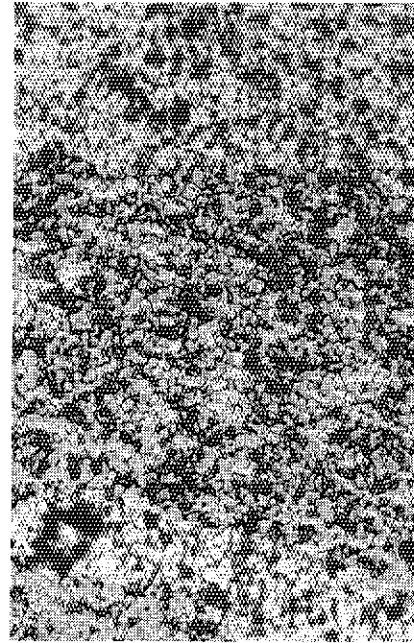


写真 2.42 中間部 × 360

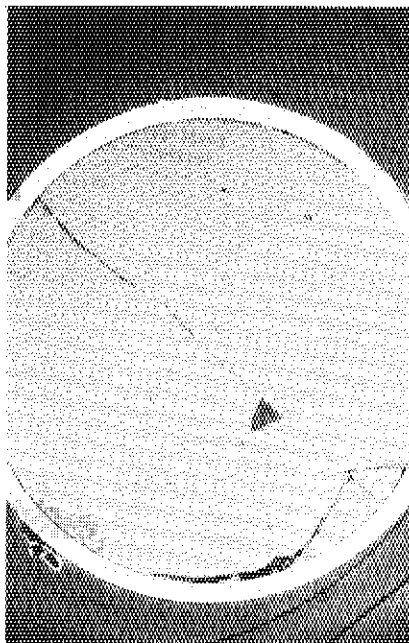


写真 2.39 マクロ × 4.5

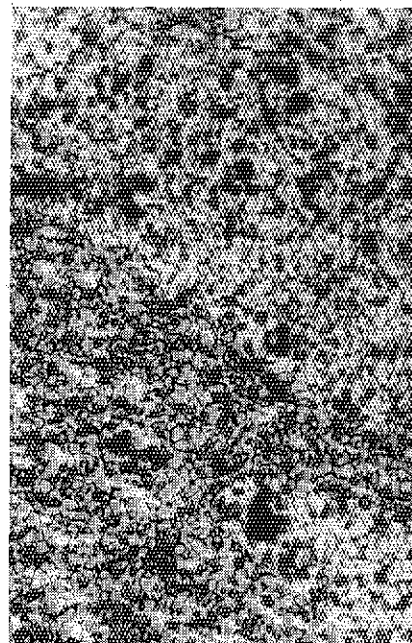


写真 2.41 中心部 × 360

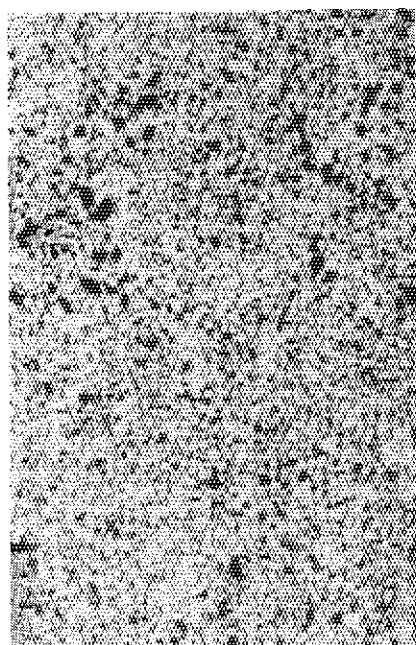


写真2.44 中心部 ×360

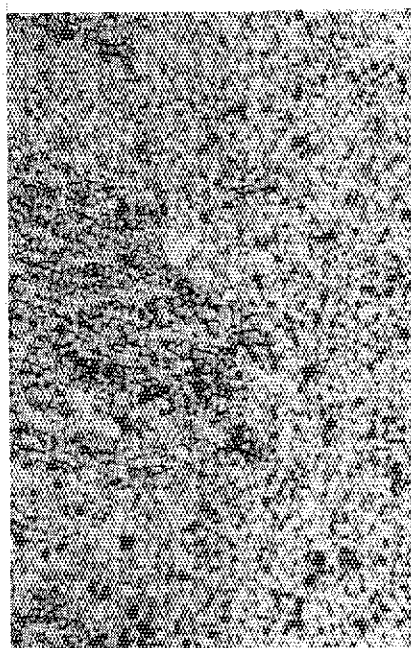


写真2.46 外周部 ×180

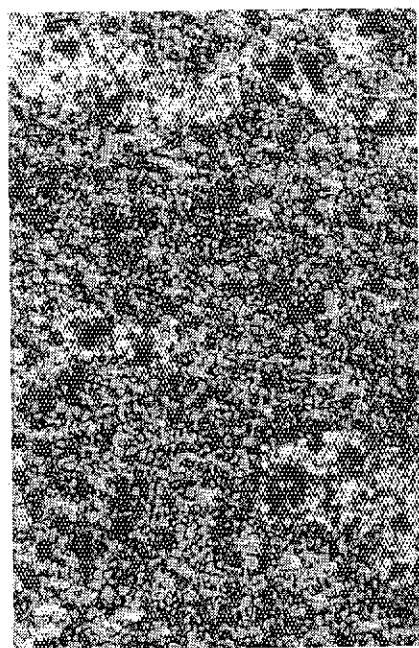


写真2.43 外周部 ×360

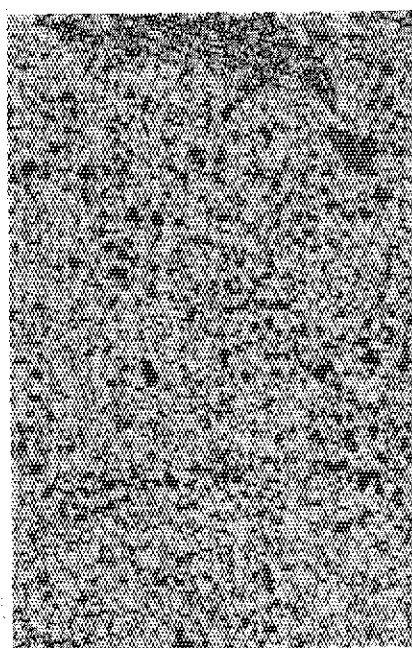


写真2.45 中間部 ×360

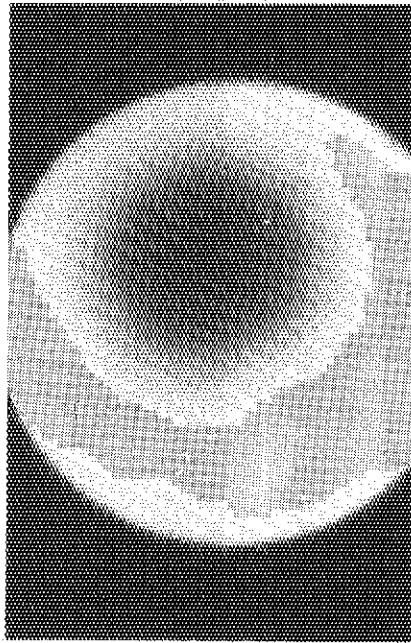


写真 2.48 ホートラジオグラフ × 4.5

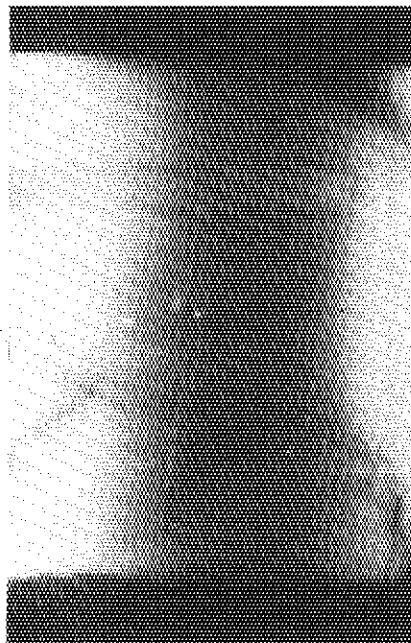


写真 2.47 マクロ × 4.5

2.9 67F-31G 照射後試験結果の解析

1. 外観検査

照射後の燃料ピンの外観を写真 2.4.9(1)および(2)に示す。写真からは特に異状は認められず、燃料棒は健全に保たれた。

2. 寸法検査

燃料ピンの上端溶接部、中央部および下端溶接部の3ヶ所の外径を0°、90°の2方向からそれぞれ3回づつマイクロメーターで測定し、数値をCケーブのペリスコープで読んだ。結果を照射前の測定結果と比較して下表に示す。

寸法測定結果

方向		上 端 部		中 央 部		下 端 部	
		照射前	照射後	前	後	前	後
0°	1		11.21		11.03		11.23
	2	11.18	11.20	11.02	11.03	11.21	11.23
	3	(min)	11.20	(min)	11.03	(min)	11.23
	平均		11.20		11.03		11.23
90°	1		11.16		11.03		11.20
	2	11.22	11.16	11.03	11.03	11.31	11.20
	3	(max)	11.16	(max)	11.03	(max)	11.20
	平均		11.16		11.03		11.20

照射前後での寸法変化はほとんど認められなかった。

3. 金相試験

照射後の燃料ピンを切断し、横断面を研磨して金相試験に供した。

1) オートラジオグラフィ

Kodak ハイレゾリューションプレートを試料面に密着し、10分間露出して得られたオートラジオグラフィを写真 2.5.0 に示す。燃焼は試料面にわたって一様であり特に異状は認められなかった。

2) マクロおよびマイクロ写真

写真 2.5.1 に 4.5 倍で得られたマクロ写真を示す。主として径方向に細かいクラックが走っているほか、顕著な異常は認められなかった。

写真 2.5.2(1)、(2)および(3)にそれぞれベレット中心部、中間部および周辺部の拡大写真を示す。顕著ではないが、ポイドは幾分周辺部で多く、かつ大きいよりである。撮影装置は全自動操作型金属顕微鏡(RCM)を用いた。

3) ミクロ組織

試料は CH_3COOH 、 HNO_3 および H_2O 各1容で11.0秒間エッチングして金相組織観察

に供した。

写真 2.5 3(1), (2)および(3)は, それぞれペレット中心部, 中間部および周辺部の組織写真である。結晶粒径はそれぞれ $5.0\ \mu$, $3.0\ \mu$ および $1.0\ \mu$ 程度で, 中心部および中間部での粒成長が認められる。中心温度は約 $1,100^\circ\text{C}$ と推定されるので, $900^\circ\text{C}\sim 1,000^\circ\text{C}$ 程度で粒成長が起るものと思われる。

4. ガンマスキャンニング

軸方向の燃焼度分布を観察するため, ガンマスキャンニングを行った。測定には化学コンタリートケーブルを使用し, ケーブル内は測定試料だけの状態とした。検出器の周囲は鋼材により遮へいし, ケーブル内のバックグラウンドは数cpsで測定に影響しないことを確認した。試料はスキャナーの試料指示箱にセットし, $0.3\times 2.0\ \text{mm}$ のスリット付きコリメーターを通して操作室より計測した。コリメーターと試料との間隔は $1\sim 2\ \text{mm}$ 以内に保った。

4.1 測定条件の決定

測定核種を決めるため, 4.0.0チャンネルPHAを用いて燃料部の γ -スペクトルを測定した結果, FPとして ^{103}Ru , ^{137}Cs , および $^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$ が検出された。このうち, 存在量が最も大きく, 他のFPからの影響が少なく, かつ, 温度による挙動が安定な $^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$ をスキャンニング時の測定核種に決定した。

さらにシングル・チャンネルPHAを用いて $^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$ のディスクリミネータ・レベルを検討した結果, 図 2.1 4 に示すように $E=4.2\ \text{V}$, $\Delta E=0.6\ \text{V}$ と, $^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$ のほぼ全域を測定範囲とした。

4.2 γ -スキャンニング結果

測定は燃料ピンのtop側端をコリメータースリットに合わせた点をきより0として, bottom方向に $20\ \text{mm}/\text{min}$ でスキャンニングを行い, $20\ \text{mm}/\text{min}$ で記録した。

検出器はNaIで, シングル・チャンネルP.H.A.を使用した。測定結果を図 2.1 5 に示す。

中性子吸収積分量はbottom側でこくわずか高くなる傾向があるが異常は認められなかった。

なお, スキャン終了後, 測定チャートの強弱2点について定点放射能測定を行った結果をチャートに記入した。

5. FPガス捕集

試料燃料ピンを真空系内にセットし, プレナム部を穿孔して系内に導かれたFP放出ガス量を測定するとともに, 放出ガス中の ^{85}Kr 量を測定した。測定結果を表 2.6 に示す。

5.1 試料中の全放出ガス量の測定

系内の圧力が平衡になったのちオイルマンノメーターで平衡圧を測定し, NTP状態に換算した全放出ガス量は $1.055\ \text{cc}$ であり, これを標準アンブルを用いて較正した値は $1.082\ \text{cc}$ であった。

5.2 ^{85}Kr の定量

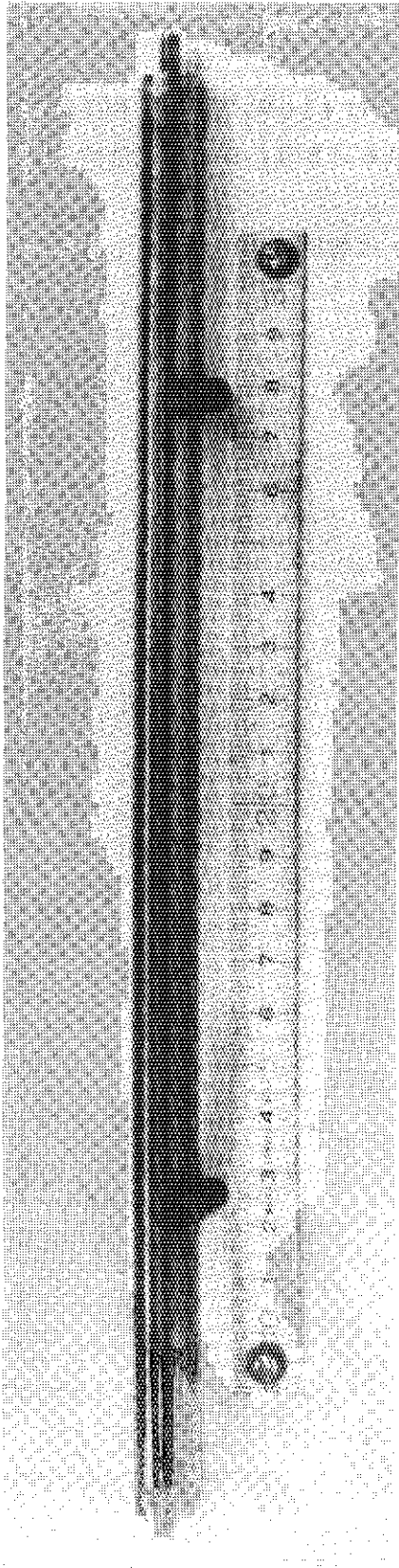
全放出ガス量のうち, $2.46\ \text{cc}$ をテプラーポンプにより計数セル内に捕集し, 4.0.0チャンネルP.H.A.を用いて ^{85}Kr の定量を行った。標準線源として ^{22}Na を用い, そのアネヒレーション放射線の $0.511\ \text{MeV}$ を ^{85}Kr の $0.514\ \text{MeV}$ の γ -線エネルギーに近似させ, 計数効率を求めて定量した。その結果, $6.887\ \mu\text{Ci}$ の ^{85}Kr が検出された。

6. ま と め

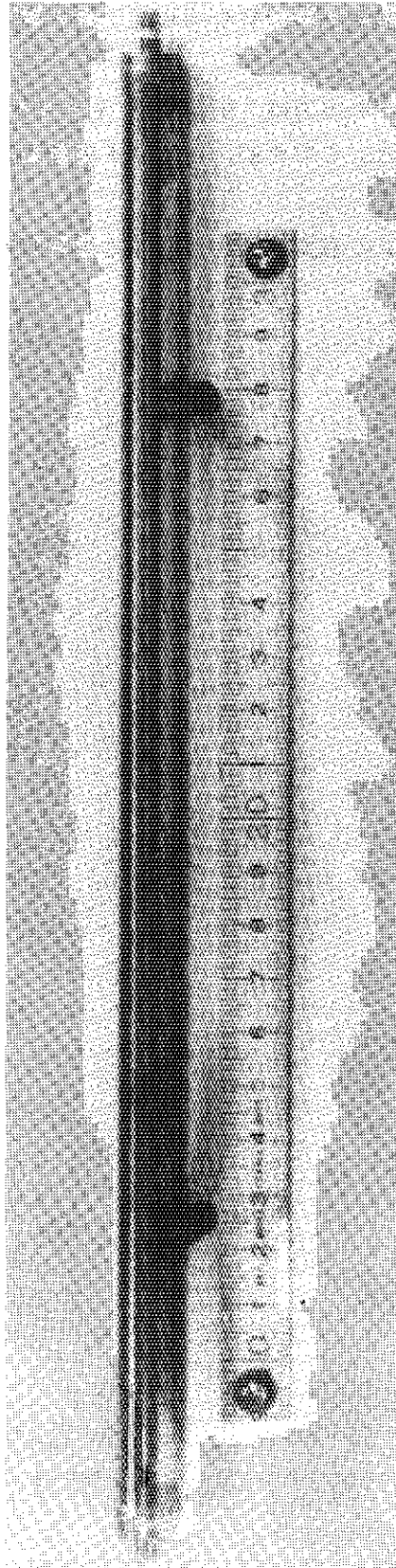
高速炉用燃料として高く評価されながら照射経験が比較的少い炭化ウランの照射挙動を得るため、濃縮度2.5%のUCペレットがJMTR第9～第11の計3サイクル60日間の照射に供された。

原子炉平均熱出力は30MW、キャプセル平均線出力は410W/cmで、目標の600W/cmを下まわった。このため、ペレット表面温度は660℃となり、中心温度は約1,100℃と推定された。

従って、この程度の照射条件では燃料UCペレットは特に大きな変化を示さないことがわかった。



(1) 0° 方向



(2) 90° 方向

写真 2.49 67F-31G 燃料ピンの照射後の外觀写真

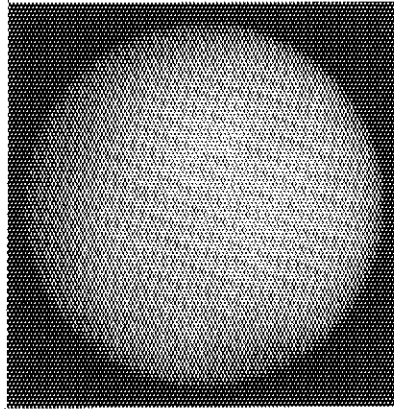


写真 2.50 オートラジオグラフ × 3.6

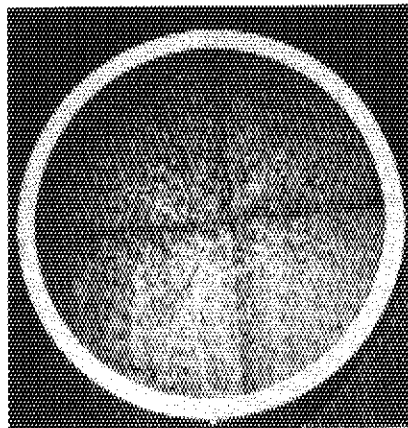
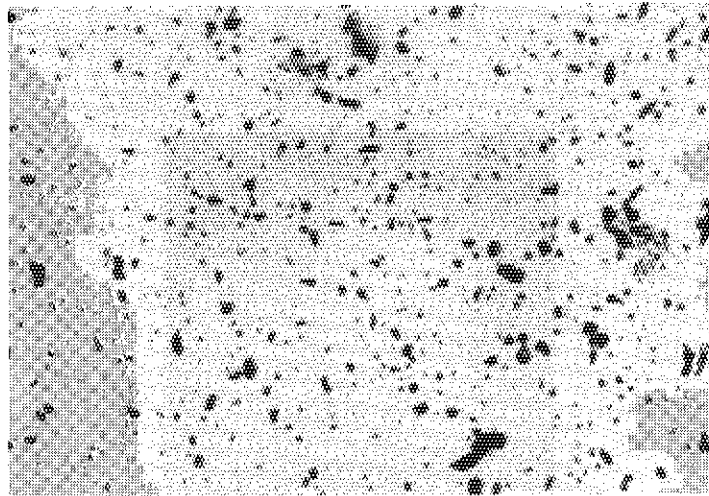
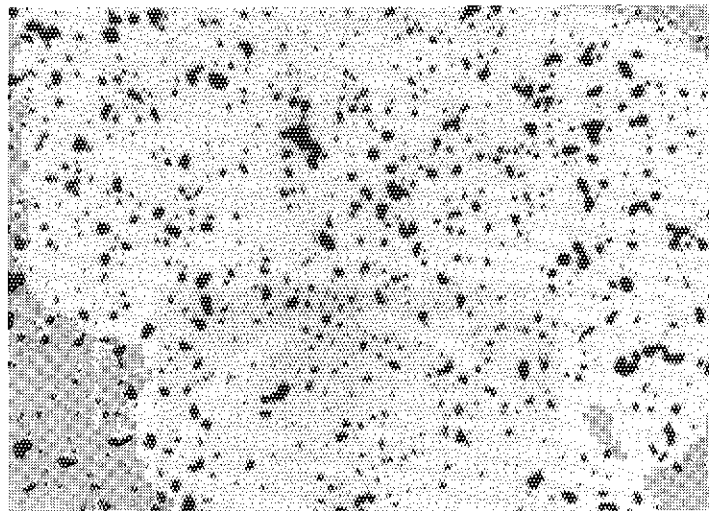


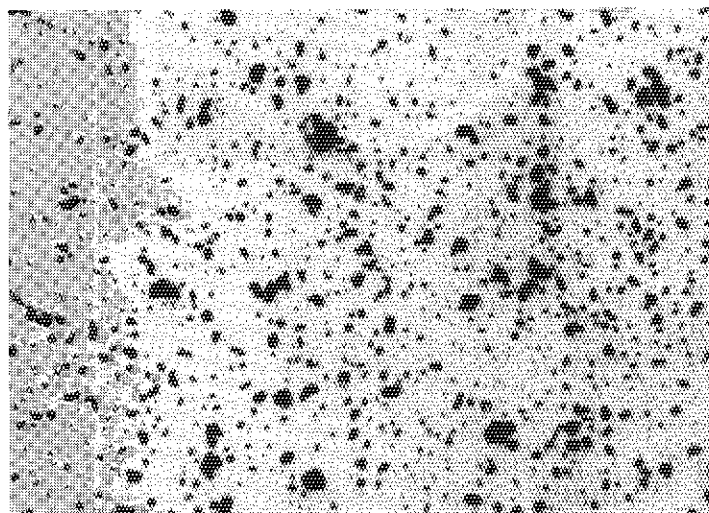
写真 2.51 マクロ写真 × 3.6



(1) 中心部

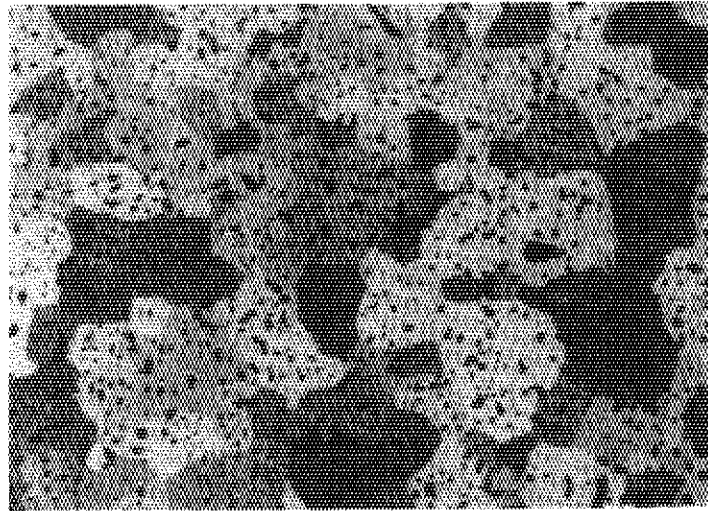


(2) 中間部

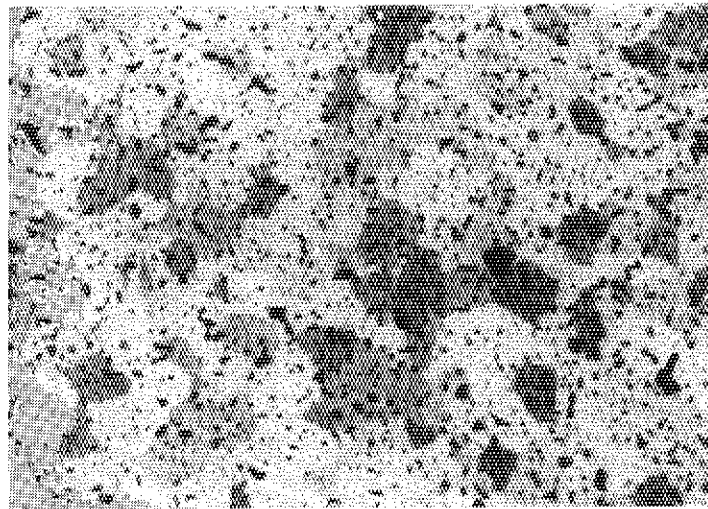


(3) 外周部

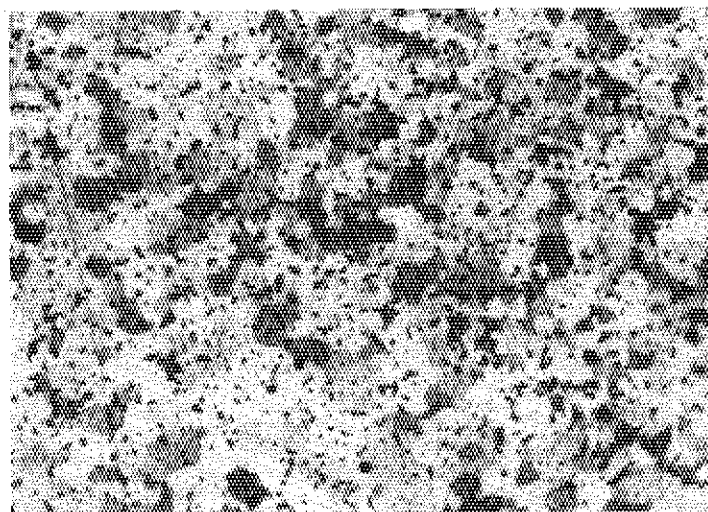
写真 2.52 67F-31Gマイクロ写真(エッチング前) ×225



(1) 中心部



(2) 中間部



(3) 外周部

写真 2.53 67F-31G ミクロ組織 (エッチング後) ×225

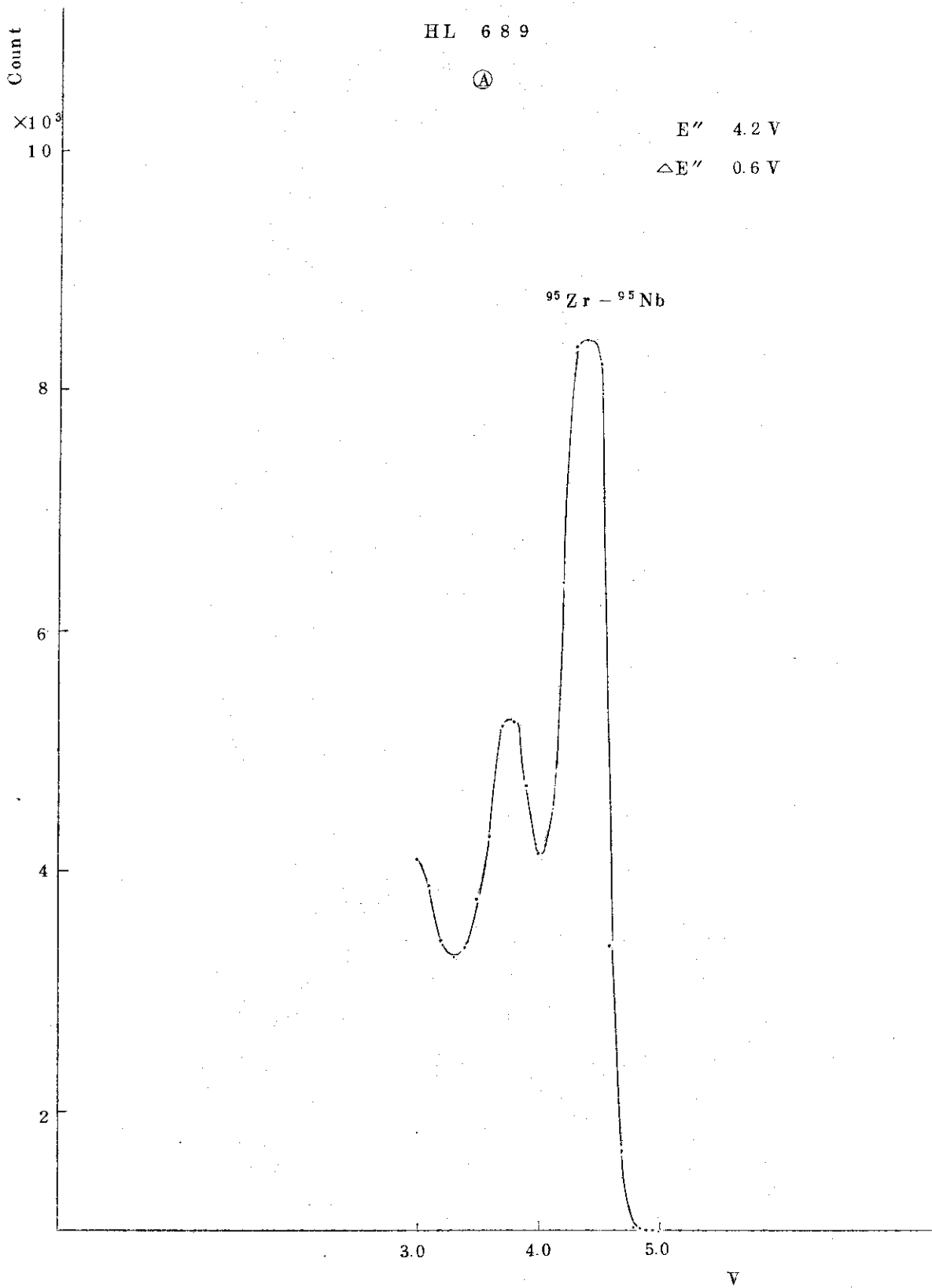


図 2.1 4 ディスクリミネータ・レベルの検討

放射線測定システム

HL 689
1972.10.24
(67F-31G)

R 5×10^2 cps

T.C 2 sec

$^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$

2.8 cps (2)

204.5 cps (1)

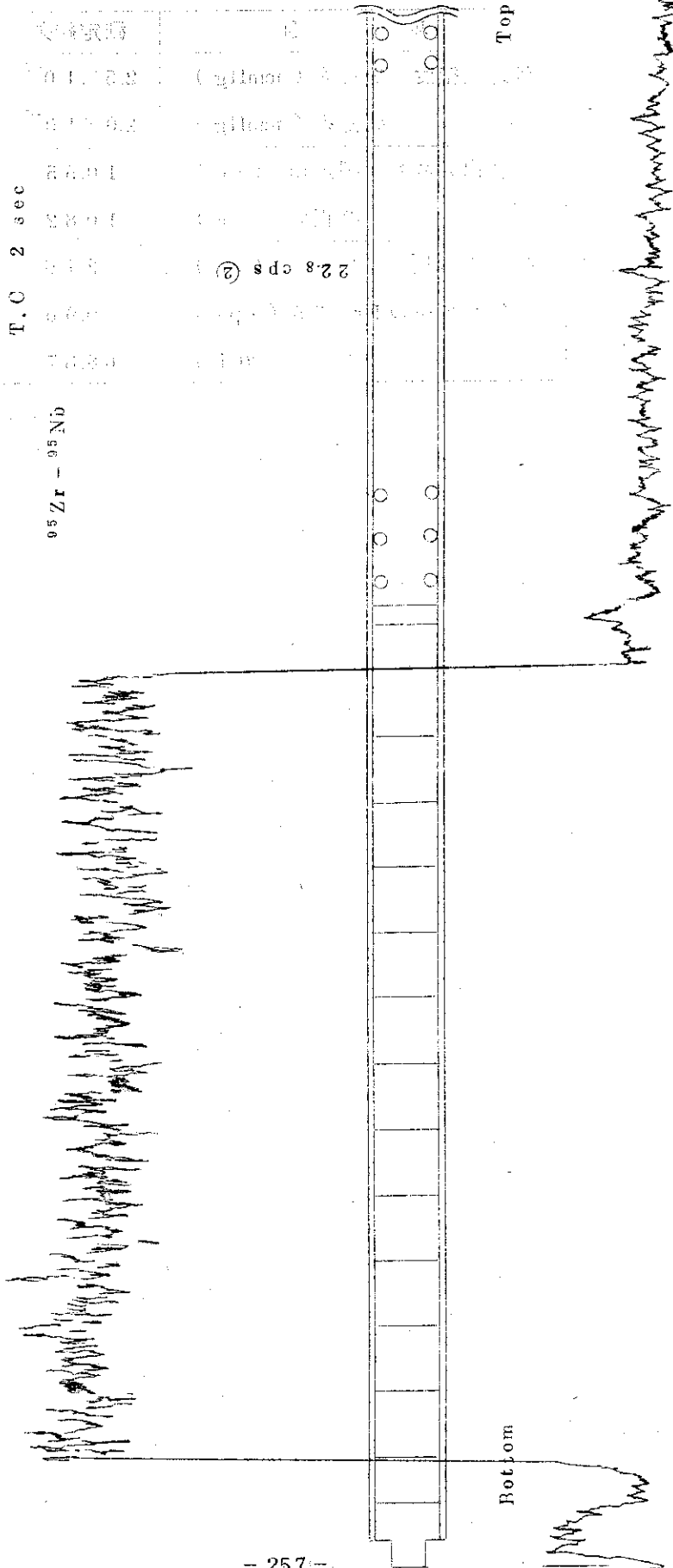


図 2.15 γ スキャンニング結果

表 2.6 R P ガス捕集測定結果

項 目	測定結果
到達真空度 穿孔系 (mmHg)	2.5×10^{-5}
測定系 (mmHg)	2.0×10^{-5}
全放出ガス量 測定値 (cc)	10.55
補正值 (cc)	10.82
捕集ガス量 (cc)	2.46
捕集ガス中の Kr-35 (cps)	9.96
同 (μCi)	68.87

2.10 67F-33G 照射後試験結果の解析

1. 67F-33Gの照射概要

本キャプセル(図1.7.8)は照射中の燃料ビン内ガス圧力(FPガスも含む)を測定し、その結果と燃料ビンの照射後試験の結果とを対応させて検討することを目的に計装され、E-10照射孔に装荷された。燃料ビンのスタック中心は炉の中心と一致している。

照射は第7サイクルから第9サイクル(昭和46年3月4日より約3ヶ月間)において行われた。図1.8.1, 図1.8.3, 図1.8.5に各サイクルの出力上昇時のキャプセル最高温度を示し、また図1.8.0, 図1.8.2, 図1.8.4に各サイクル中のキャプセルの温度変化を示す。Al熱媒体の温度(T/C#3)は第7サイクルのとき450°C(炉出力30MW)、第8サイクルでは前半が300°C、後半が400°C、第9サイクルの場合約370°Cであった。

本キャプセルの線出力は図1.7.9によって求めると、表1.1.4に示すようになる。最大線出力は約380W/cm、このときの燃料中心温度は約1750°Cになると推定された(実際には後述するようにペレット表面で約1500°C、中心では融点に達していたものと思われる)。

2. 金相観察結果

資料・1に試料の採取位置と金相観察面との関係を示す。横断面は燃料ビンの中央部に相当する位置であり、縦断面は中央部に隣接した下方約1.3mmまでの断面を示している。

写真2.5.4に横断面の観察結果を示す。マクロ写真(A)から明らかなように直径約3.7mm(ペレット直径の約30%に相当)の中心空孔が形成されており、また写真(B)で明らかなように半径の約80%の領域にわたって柱状晶が形成されている。(C)、(D)および(E)にミクロ写真を示すが、(C)でもかなり粒成長がおきており高密度化が進んでいるのがわかる。このように本燃料ピンは、かなり高温で照射されたことが推測される。写真2.5.5は、この推測を裏づけるものである。SUS 32を約3ヶ月間何度か保持したら、写真2.5.7のような組織が写真2.5.5(A)、(B)のように変化するかを調べた。その結果(A)の内側では約900°C、中央部は δ 相の析出が見られることから約850°C程度と考えられる。(B)の内側では1000°C以上、外側でも900°C以上と思われる。外側に見られる黒い斑点は酸化物である。

写真2.5.6に縦断面の観察結果を示す。マクロ写真から中心空孔は燃料ピンの一部にしか生じていないことがわかる。連続写真(B)は中心空孔の下端近くの組織を示すが、ミクロ写真(E)は熔融後の組織に似ていると思われる。写真2.5.7に被覆管の組織を示す。(A)はほぼ照射前の組織を示すものと考えられるが、700°C程度かそれ以上の温度であり、(B)は800°C前後の温度であったと思われる。

このように金相写真だけから判断しても、燃料ピン全体が非常に高温状態にあったものと思われる。しかも局部的には異常に高温となり、出力が低いにもかかわらず中心部は熔融した可能性が非常に強い。

3. 燃料ビン内温度分布の検討

写真2.5.4に示した断面についての温度分布を検討した。図2.1.6にマクロ写真から実測した直径をもとに、断面の模式図を作成して示した。そして温度分布の検討に当たっては、次のようないくつかの仮定をおいた。

(1) 中心空孔の壁面温度を2850°Cとする。

- (2) 柱状晶と等軸晶の境界を 1800℃とする。
- (3) 柱状晶領域の密度を 99% T.D. とする。
- (4) UO₂ の熱伝導率として、Bailey-Asamoto の式¹⁾を適用する。
- (5) 等軸晶から外側の領域を 97% T.D. とする。
- (6) 発熱分布はなく均一発熱とする。

これらの仮定をおいてペレットの表面温度を計算した。計算に当っては中空ペレットの式を適用した²⁾。

$$\int_{T_3}^{1800} k(T) dT = \int_{T_3}^{2850} k(T) dT - \int_{1800}^{2850} k(T) dT \quad \text{..... (1)}$$

ここで $k(T) = 0.013 + \frac{1}{(0.4848 - 0.4465\rho)T}$ (W/cm°C)

ただし、 ρ : 密度, T : 温度 (°C)

右辺第 2 項から柱状晶領域における出力を計算し、均一発熱という仮定から等軸晶およびその外側の領域における出力を求めた。その結果線出力として合計約 390 W/cm が得られた。この値と図 2.16 とから次式が求まる。すなわち

$$\int_{T_3}^{1800} k(T) dT = 7.2 \quad \text{..... (2)}$$

これを解いて、 $T_3 = 1,500^\circ\text{C}$ が得られた。

つぎに UO₂ ペレットの体積平均温度を 2,000℃、被覆管の平均温度を 1,000℃として、照射中の熱膨張差をみると、ソフトタッチの状態か、やや P.C.I を生じている程度であることが計算された。このためペレットと被覆管とのギャップコンダクタンスを 750 および 1,000 Btu/ft²h°F として被覆管の内面温度を求めると、それぞれ 1,050℃、1,160℃となった。そして、被覆管の外表面温度は、1,000℃および 1,120℃と計算された。これは前述した被覆管の組織から推測された温度と大体一致している。

一方、Al 熱媒体の温度は T/C#6 および #4 で実測されており、250℃および 200℃程度となっている。そして、被覆管と Al 熱媒体とのギャップは 5.5 μ (公称値) であり、熱膨張差を考慮したホットギャップ (70 μ 程度) でも 350℃程度の温度差にしかならないと考えられる。しかし、実際には 700~800℃の温度差を生じている。これはおそらく連続写真を撮影した方向が、たまたま図 1.78 の E~E' 断面で熱電対を挿入するための溝が重なった方向と一致しており、そのため実効的なギャップがかなり大きかったのではないかと考えることもできる。いずれにしても SUS32 被覆管と Al 熱媒体との間には大きな温度差が生じており、燃料ピンは異常な高温状態にあったものと言える。そして、ペレットの中心は一部分溶融したと考えるのが妥当と思われる。

4. 燃料ピン外観検査

写真 2.58 に外観写真を示す。写真から判断して燃料棒は異常な高温で照射されたと思われるにもかかわらず、全く健全な状態であった。しかし、表面は光沢がなく中央部は黒色を帯び、

両端付近は光沢を失った灰色を呈しており、ステンレス鋼製の被覆管が通常の照射試験後に観察される表面状態よりもかなり荒れた感じである。

5. 燃料ピンの寸法測定

資料 2 に燃料ピンの直径測定位置および測定結果を示す。照射前の公称直径は 14.1 mm であるが、これに比較して測定位置 No. 2 では、他の部分に比べ 0.1 mm 大きくなっている。これは 0.7% の直径増加に相当する。そして、この位置は金相試料の採取位置に近く、大きな中心空孔が形成された領域に相当していることがわかる。

6. ガンマ・スキャンニング

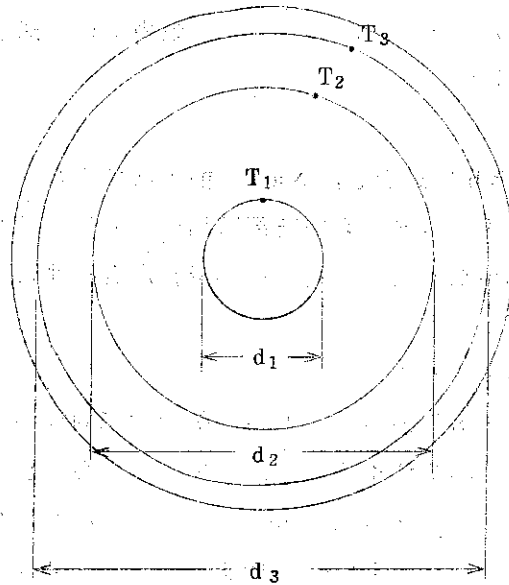
測定核種として ^{95}Zr - ^{95}Nb を選定し、NaI 検出器でガンマ・スキャンニングを行なった。その結果を図 2.17 に示す。スタック中央部に相当する位置に 2 つの放射能強度のピークが見られるが、これは前述の金相写真で示した中心空孔が存在することに起因しているものと思われる。

7. 燃料ピン内ガス圧測定結果の検討

図 1.86, 図 1.87, 図 1.88 に各サイクル毎の炉出力に対するプレナム温度および燃料ピン内ガス圧の測定結果を示す。第 7 サイクルではベレットからの放出ガスおよび He ガスによる圧力上昇がみられるが、サイクル末期で 2 kg/cm^2 程度と小さい値を示している。この値は UO_2 からの蒸発性不純物量、被覆管と UO_2 の膨張差、プレナム温度などを考慮すると、少し低すぎるように思われる。炉を停止した場合には 1 kg/cm^2 以下であった。第 8 サイクルのはじめは照射開始とともに徐々に圧力が上り、約 3 kg/cm^2 まで行ったとき最初のスクラムがあった。このときガスプレナム温度が 20°C 程度に下がったにもかかわらず、内圧は突如として約 14 kg/cm^2 になった。これはおそらく第 7 サイクル中に UO_2 ベレットの中心空孔内に溜っていた FP ガスが、スクラムによるクラック発生によって急激に放出されたものと考えられる。しかも UO_2 の平均温度が高いため生成する FP ガスはほとんどベレット外に放出されるものと考えられる。FP ガスの生成量と放出ガス量とから、第 8 サイクルの最初のスクラム時における内圧を推定すると、 20°C で約 13 kg/cm^2 、 300°C で 25 kg/cm^2 となる(ただし、プレナム体積を 1.4 cc と仮定)。この時点以降は運転時に約 21 kg/cm^2 、炉停止時に約 14 kg/cm^2 という値を示し、第 9 サイクルでも全く同じ傾向を示した。

8. 結 論

本キャプセルに組込まれた燃料ピンの照射後試験結果を解析し、予想外に高い温度で照射が行なわれたこと、それにもかかわらず破損が生じなかったこと、圧力測定が可能であること、などの知見が得られた。とくに金相変化は独特の条件下で起きたもので、今後役に立つデータの一つになると思われる。SUS32 被覆管の組織写真は解析上非常に役立ったが、照射前の組織があると更に良かったと思う。



仮定 T_1 : 2850°C

T_2 : 1800

T_3 : ペレット表面温度

d_1 : 0.372 cm

d_2 : 0.996

d_3 : 1.21 (実際のペレット直径公称1.24 cm)

図 2.1 6 燃料ピン断面の模式図

参考資料 1

67F-33G キャプセル被覆管温度の推定

(1) 金属組織からの温度の推定

被覆材の金属組織から温度を推定するに当たっての前提条件は、加熱期間中の大部分が一定の熱流条件、すなわち定常状態におかれたということではなければならない。しかし現実には、おそらく温度の変動があるであろう。その場合は、例えば炭化物や σ 相の析出や溶解は場合によっては、半ば可逆的に行なわれるのに対して粒界移動など、結晶粒成長は非可逆的であるために、最終結果による温度の推定はかなりの誤りを導入してくる。

(2) ホットスポットとみられる部分の解釈

照射後試料の横断面マクロ写真 2.5 4 (A)において、燃料と被覆管の間に反応があったと思われる部分の被覆管組織写真 2.5 5 (B)についてまず温度を推定する。この写真において左側は燃料(UO₂ペレット)に対向する被覆管内面に相当し、右側はその外面に相当する。被覆管内面から約4分の3の部分はかなり明瞭な結晶粒成長が起っており、粒界炭化物は基地に溶解したために残留していない。したがって、この部分の温度は炭化物溶解温度に相当し、少なくとも1,000℃にはなつたと推定される。残る約4分の1は、若干の結晶粒成長があり、粒界炭化物も認められるので温度はおそらく850~950℃と推定される。なお外面部の組織内の黒点は内部酸化によるものと思われるが、この点からも上記の推定温度は妥当であろう。

(3) 平均的加熱部分の解釈

再び試料断面マクロ写真 2.5 4 (A)に戻り、燃料との反応が比較的少い平均的な場所と考えられる部分の組織写真 2.5 5 (A)について検討してみる。写真左側は同様に燃料に対向する被覆管内面に相当し、右側はその外面に相当する。

これについては、まず、肉厚の中心部を除くと両側で結晶粒界のエッチングがみられない。ペレットに接する側を溶体化組織と仮定すると、少なくとも950℃より上だということになるが、そうすると粒界炭化物の少い外側の組織の解釈が不可能になる。何故ならば、これだけの肉厚の中に400℃以上の温度勾配を生ずることは考えられないからである。むしろ内側には、ほとんど結晶粒成長がみられない点からみて、それほど高温になつたのではなく、研磨かエッチングの何らかの因子で粒界が見えにくくなつてゐるものと判断する方が妥当であろう。一方、粒界炭化物の析出が最も顕著に出ている肉厚中央部は、粒界三重点に若干の σ 相もみられるので、650~850℃付近の温度におかれたものであることを示している。こうしてみると、肉厚方向の温度勾配を考えた変動巾の上限は、内側で高々900℃、外側は炭化物が部分的に析出して、場所により σ 相がみられるところから、下限で、500~600℃程度と考えられる。

(4) ま と め

以上の推定から、この被覆管は一部にホットスポットのような部分ができ、明らかに1,000℃以上になつたところがあるが、全体としてはおよそ750℃を中心に変動したものと考えることができる。最外層は結晶粒のエッチングの状態からみて恐らく500℃程度とみられる。仮りに一時的に炭化物析出温度(600~900℃)にふみ込んだことがあるとすると、定常状態が外側で400~500℃の比較的低い温度におかれた場合でも炭化物の部分的析出

があってもおかしくはない。

ただし、被覆管表面の酸化状態をみると、かなりむらがあり、またペレットと被覆管の接触状態も均一とはいえないと思われる。したがって、高温部は局所化していたと考えられるので、熱電対の指示した温度がそれなりに正しくても、検査面の示す事実から推定される誤差と若干かけ離れる可能性は十分ある。

(なおこの稿は、原研 燃料工学部 材料工学研究室の見解に基づいて書かれたものである。)

参 考 文 献

- 1) W.E. Baily, R.R. Asamoto et al ; Thermal Conductivity of Uranium-Plutonium Oxide Fuels. A Paper Prepared for Nuclear Metallurgy Symposium American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers. (1967)
- 2) J.A.L. Robertson ; $\int Kdo$ in Fuel Irradiations. AECL-807 (1959)

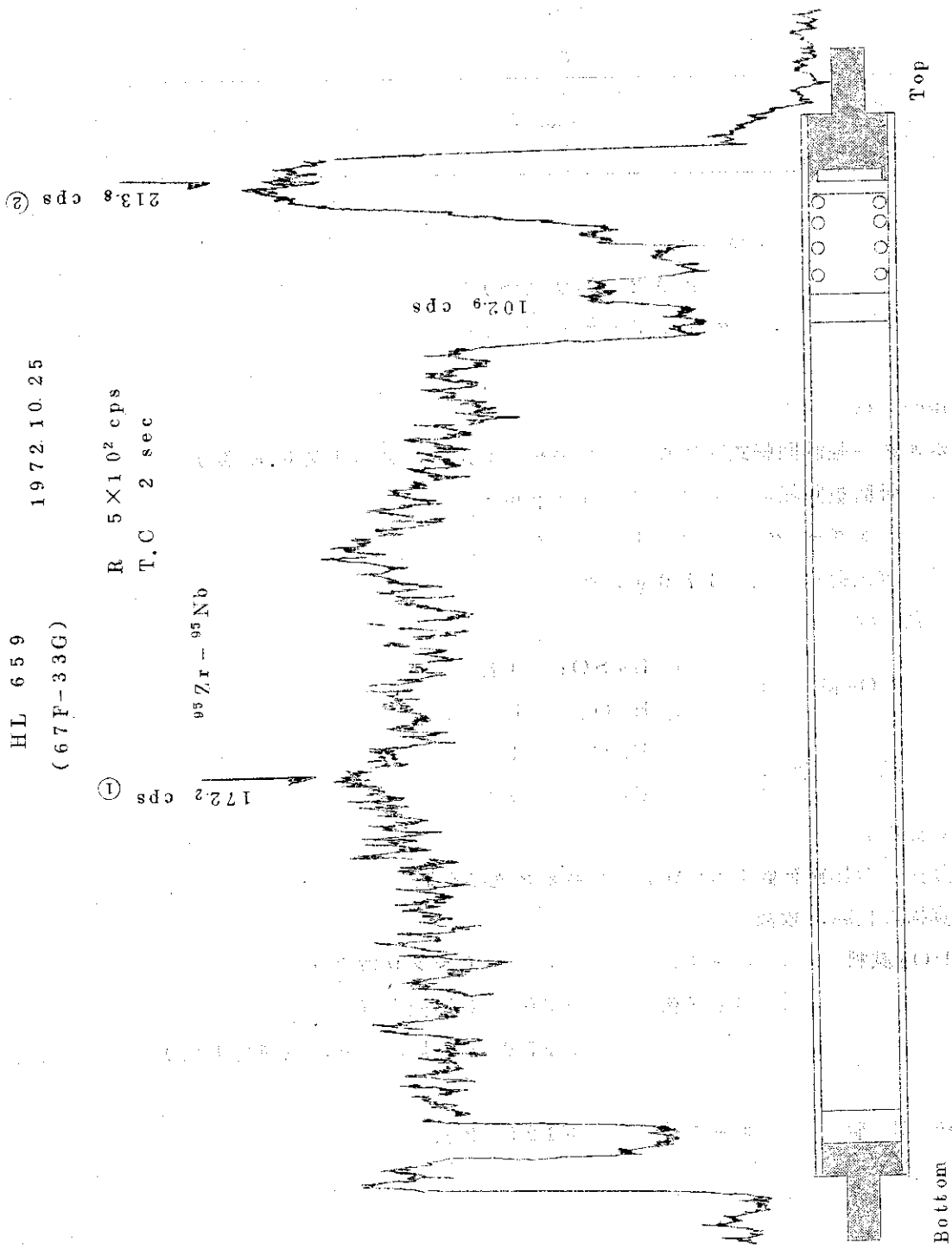
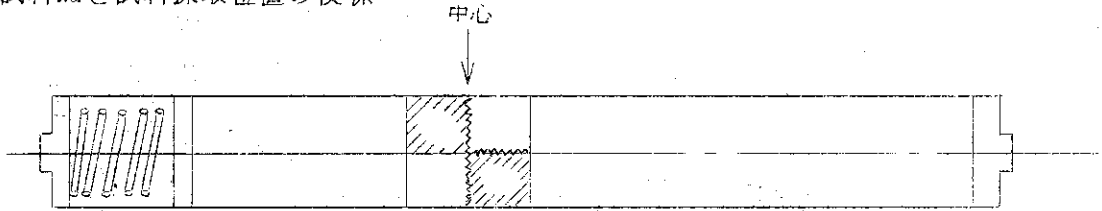


図 2.17

資料 2

67F-33G UO₂ 試料金相試験

1. 試料Noと試料採取位置の関係



印 ; 金相面

- ① ; 試料No 9 2 (輪切試料)
- ② ; " " 9 3 (縦割 ")

2. 使用研磨機

試料ホルダー強制回転式複数個磨き研磨機 (東京, 丸本工業K.K.製)

研磨板回転数	60~300 rpm
ホルダー "	2~10 "
重錘荷重	370g/ヶ

3. 腐食液

UO ₂ 試料 ;	H ₂ SO ₄	1容
	H ₂ O ₂	8容
被覆管 ;	HNO ₃	1容
	HCl	3容

4. 写真撮影装置

全自動操作金属顕微鏡 (RCM) ユニオン光学社製

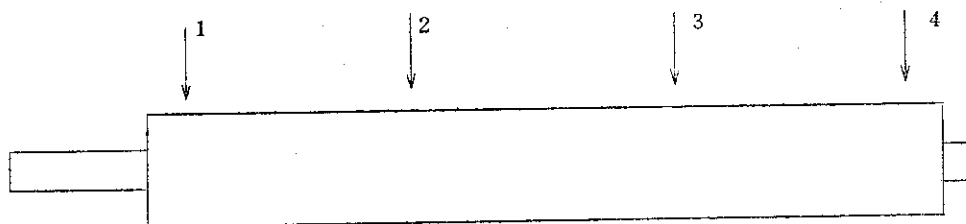
5. 写真撮影倍率, 枚数

UO ₂ 試料	エッチ前	×4	(マクロ写真)
	エッチ後	×30	(連続写真)
		×250	(外周, 中間, 内周各1枚)
被覆管	エッチ後	×125	2枚

資料 3

燃料ピンの寸法測定

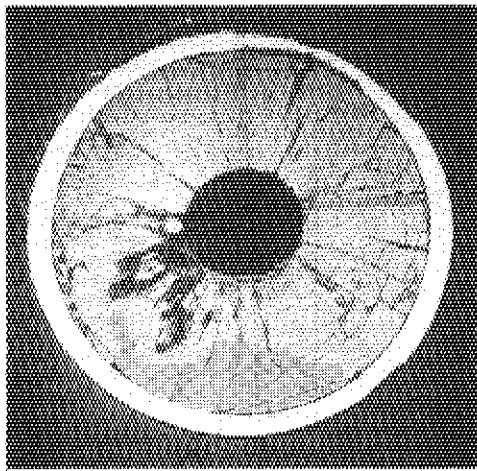
測定位置



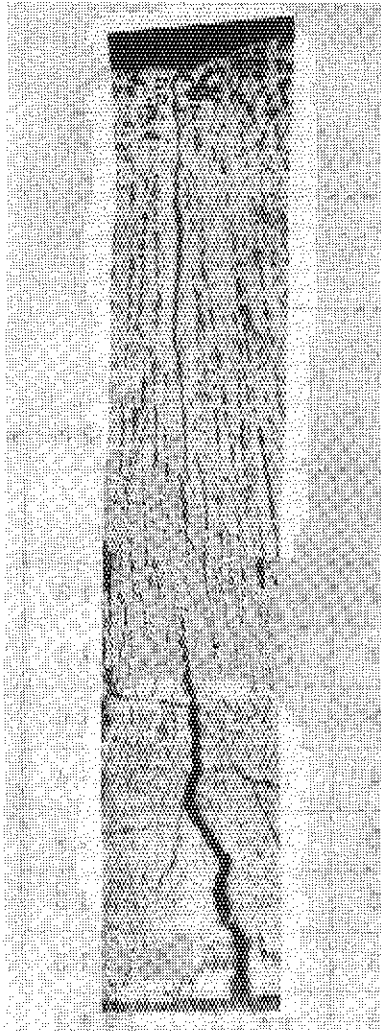
[単位 m/m]

測定方向	位置	1	2	3	4
	回数				
X	1	14.12	14.24	14.13	14.13
	2	14.12	14.24	14.12	14.15
	3	14.12	14.23	14.12	14.16
	平均	14.12	14.24	14.12	14.14
Y	1	14.12	14.23	14.13	14.14
	2	14.12	14.23	14.13	14.13
	3	14.12	14.23	14.13	14.13
	平均	14.12	14.23	14.13	14.13

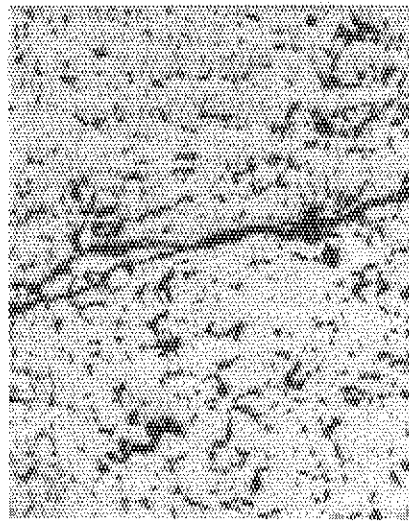
燃料ピン表面が全体に白く腐蝕していた。
長さ方向の測定は測定器がないためできない。



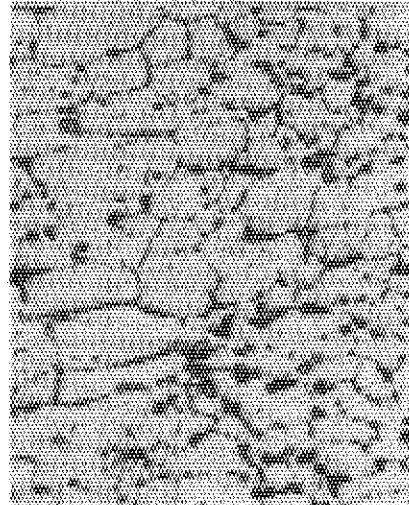
(A) マク □ × 4.1



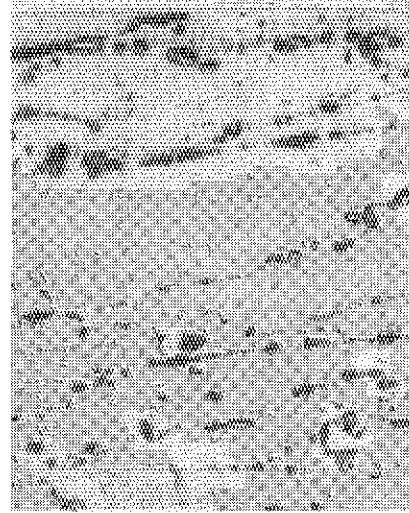
(B) 組織連続写真 × 27



(C) 外周部 × 22.5

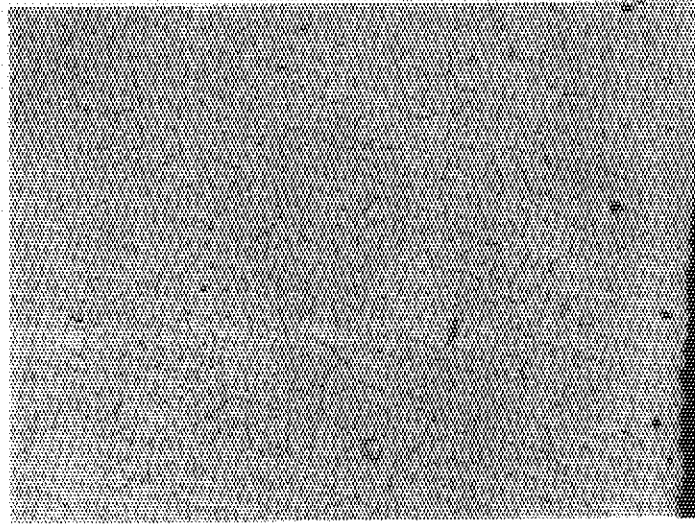


(D) 中間部

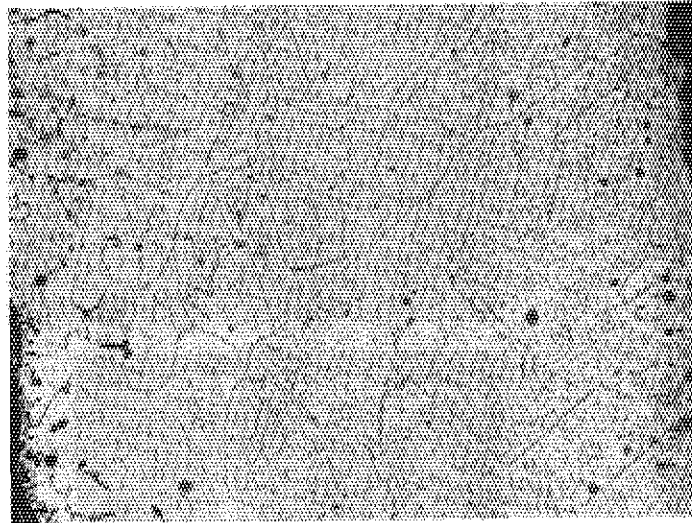


(E) 内周部

写真 2.54



(A) 被覆管 ×113



(B) 被覆管 ×113

写真 2.55

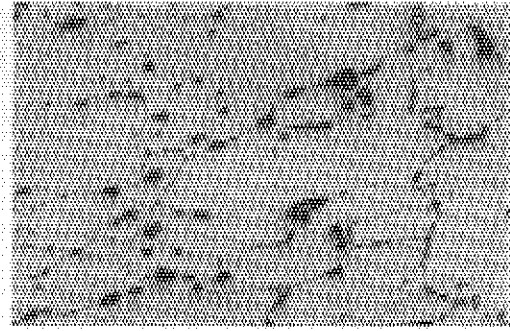
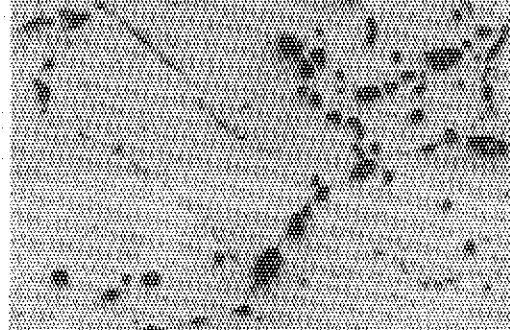
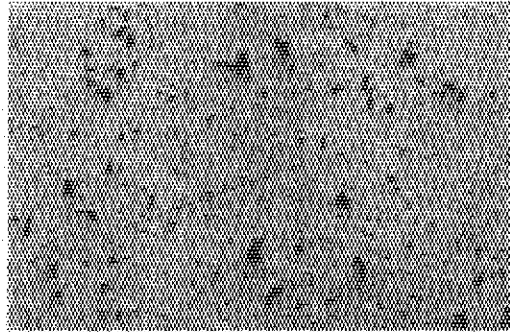
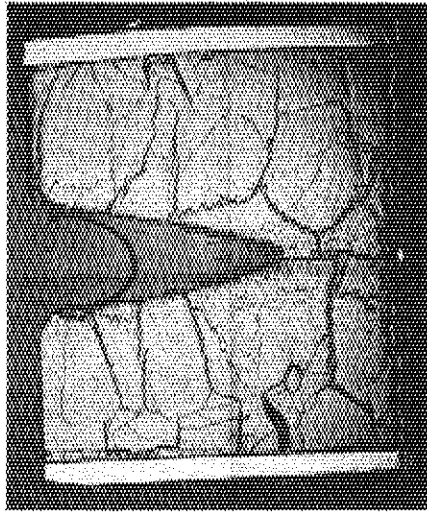
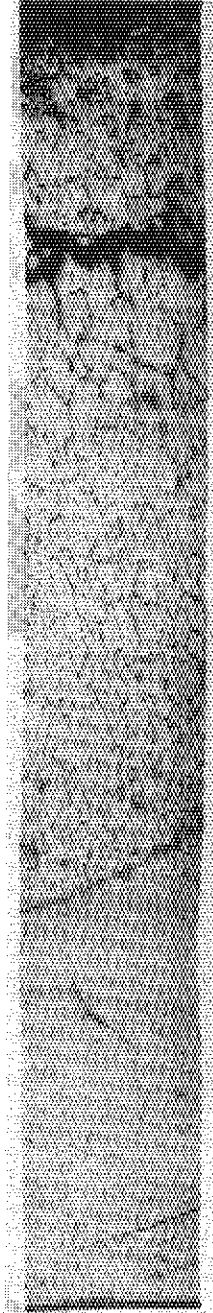
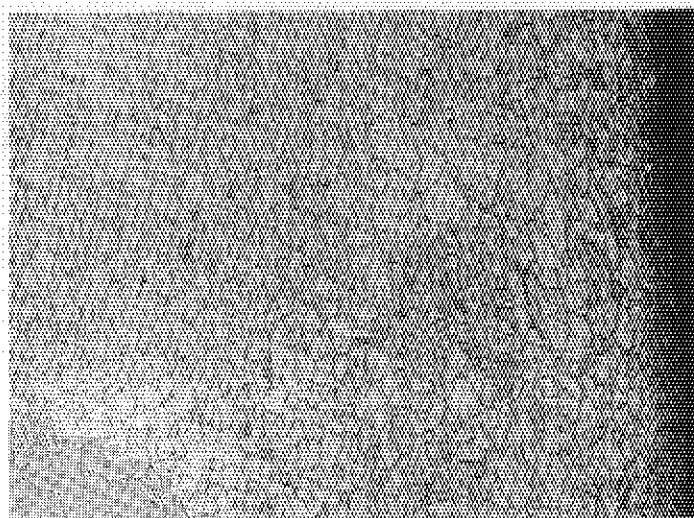
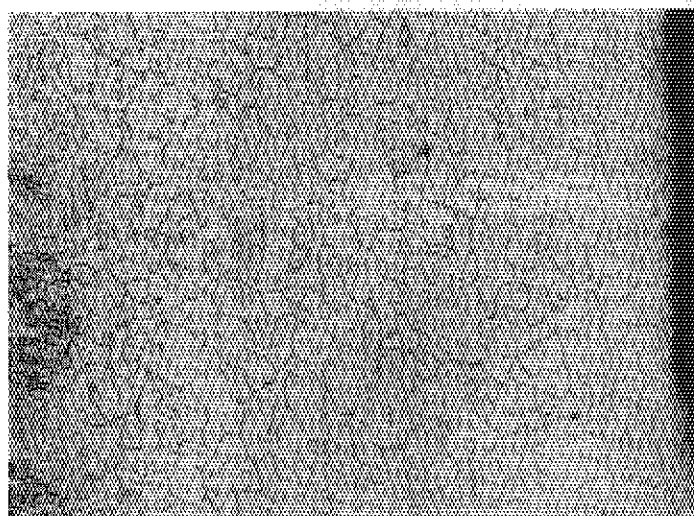


写真 2.56



(A) 被覆管 ×113

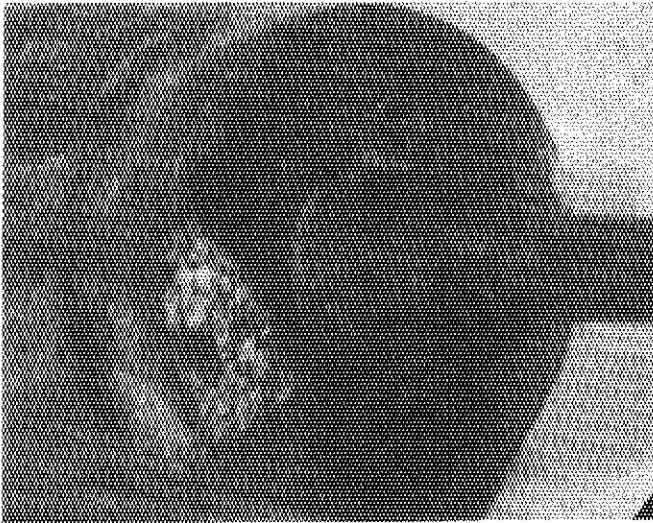


(B) 被覆管 ×113

写真 2.57



(A)



(B)



(C)

写真 2.58 被覆管 外 観

2.1 1. 67F-35G 照射後試験データの解析

1. 外観検査

燃料ピンの全体および両端部の外観を写真 2.5 9 および写真 2.6 0 (A), (B) に示す。両端の溶接部は特にベリスコープにて拡大観察したが、ところどころに接触斑や付着物が見えるほかは照射による表面の欠損や変色は認められなかった。

2. 寸法測定

図 2.1 8 に示すように、燃料ピンの直径 5 ヶ所 (A ~ E)、全長 (L)、肩部間 (ℓ_1) について、それぞれ 0° および 90° 回転した 2 方向から各 3 回、マイクロメーターおよびノギスにて寸法測定を行った。実測値を表 2.7 (A) および (B) に示す。比較のために、図 2.1 9 および表 2.8 に照射前の寸法測定結果を示す。

照射前の測定値と比較して、中央部での直径はほとんど変わらないが、両端部において $0.01 \sim 0.02 \text{ mm}$ のわずかな直径増が測定された。しかし、マイクロメーターの測定精度からみて特に意味のある変化とは思えない。

全長および肩部間きよりの変化は認められなかった。

1 および 2 の結果より、照射前期間を道じて被覆管および溶接部の健全性が保たれたことがわかった。

3. 金相組織

外観検査ならびに寸法測定を終えた照射後の燃料ピンから、図 2.2 0 のように金相試料 A, B および燃焼度測定試料 BU が切断された。金相観察面は図中に斜線で示してある。写真 2.6 1 および写真 2.6 2 は、それぞれ試料 A のマクロ写真およびオートラジオグラフィである。

写真 2.6 3 (A) ~ (C) は試料 A のミクロ組織で、それぞれ中心部、中央部、外周部に対応している。写真 2.6 4、写真 2.6 5 および写真 2.6 6 (A) ~ (D) はそれぞれ試料 B のマクロ写真、オートラジオグラフィおよびミクロ組織である。

マクロ写真から、試料 A, B ともペレット中のクラックが観察される。また、ペレット〜クランプ間の間隔は当初の 0.04 mm より小さく、ほとんど密接しており、スエリングの効果かと思われる。

オートラジオグラフィの結果は、ペレット周辺部での反応度が中央部より高いことを示している。

ミクロ組織からは、特に酸化ガドリニウムの挙動に注目するとともに、 UO_2 結晶粒度、粒形およびボイド分布を観察したが、中心部から外周部にわたってほぼ同様で、照射前後の変化も特に観察されなかった。照射中に熱電対により測定された被覆管表面温度から算出される燃料中心温度は約 $1,100^\circ\text{C}$ であったが、ペレット製造時の焼結温度は $1,600^\circ\text{C}$ なので、この程度では組織変化が起らなかったものと考えられる。

4. γ -スキニング

燃料ピン軸方向における中性子吸収積分の変化を観察するため、Single Channel P.H.A. を用いて γ -スキニングを行った。結果を図 2.2 1 に示す。

測定に先立って、測定核種を決めるために、図 2.2 1 中 (1)(2)(3) の位置で γ -スペクトルを測定した。図 2.2 2 ~ 2.2 4 に示す結果からわかるように、燃料部では $^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$ の存在量

が最も大きく、他のFPからの影響が小さく、また、 ^{137}Cs と比較して温度による挙動が安定であって、ミートからの拡散が無いと考えられたので ^{95}Zr - ^{95}Nb が測定核種に選ばれた。DefectorはNaI, Discriminator levelはE" 6.1 V, ΔE " 1.5 Vに設定された。

燃料ピンはスキャナーにセットされ、Top側端をコリメータースリットに合わせた点をきより0とし、Bottom方向に20mm/minでスキャンニングを行った。

図2.21の測定結果より、中性子吸収積分量は燃料部の中央よりいくらかTop側にシフトした位置で最高であり、両端に向けて低下している。この図より、金相組織を観察した試料AとBとはほぼ同程度の照射を受けたものと推定される。

ま と め

67F-35Gキャプセルの照射目的であった希土類元素入り UO_2 の照射経験を得たこと、およびA熱媒体キャプセルとしての熱特性を調査できたこと、など一応の成果を得ることができた。しかし、線出力300W/cmは材料の変化を調べるには不十分で、目的の1つであった酸化ガドリニウムの挙動は金相組織からは判明できなかった。また、外觀、寸法、金相組織についての照射前後の変化もほとんど認められなかった。

1. 試料形状

2. 使用測定器

(1) マイクロメーター

(2) ノギス

3. 測定箇所

下図〔図 2.1 8〕に示す試料について、長さ、全長(L)及び肩部間(0°, 90°の2方向)直径、中央、両端部及びその中間2箇所の計5ヶ所(0°, 90°の2方向)長さ、直径とも1ヶ所に付き、3回測定を行った。

4. 実測値

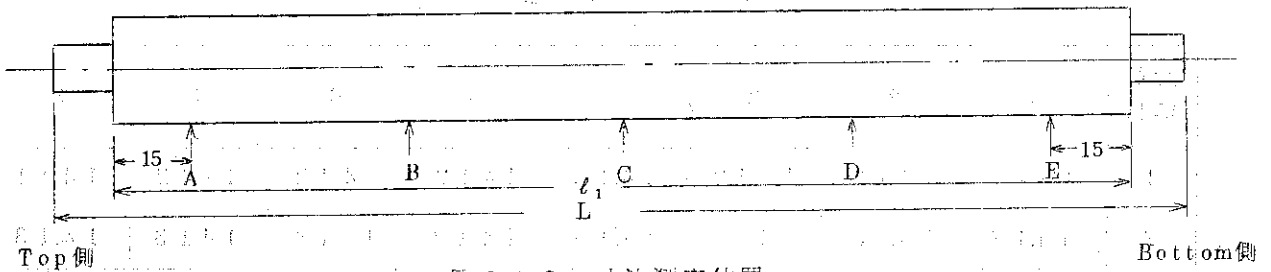


図 2.1 8 寸法測定位置

表 2.7 寸法測定結果

表 2.7 (a) 直 径

方向 \ 箇所	回数	A	B	C	D	E
0°	1	14.136	14.135	14.130	14.140	14.140
	2	14.138	14.135	14.128	14.135	14.140
	3	14.136	14.130	14.130	14.130	14.138
	平均	14.137	14.133	14.129	14.135	14.139
90°	1	14.130	14.140	14.132	14.122	14.138
	2	14.128	14.150	14.132	14.120	14.140
	3	14.127	14.148	14.129	14.120	14.138
	平均	14.128	14.146	14.131	14.121	14.139

表 2.7 (b) 長 さ

方向 \ 回数	全 長 (L)				肩 部 間 (l_1)			
	1	2	3	平均	1	2	3	平均
0°	272.4	272.4	272.4	272.4	260.5	260.5	260.5	260.5
90°	272.4	272.4	272.4	272.4	260.5	260.5	260.4	260.5

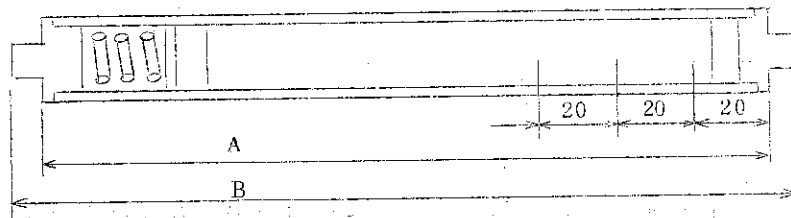


図 2.1 9 照射前の寸法測定位置

表 2.3 照射前の寸法測定結果

試料 番号	1	2	3	4	5	6	7	8
1	14.11	14.12	14.12	14.12	14.12	14.12	14.12	14.11
2	14.12	14.13	14.13	14.13	14.12	14.13	14.13	14.13
	9	10	11	12	13	全 長		
						A	B	
1	14.11	14.12	14.12	14.12	14.12	260.7	272.7	
2	14.12	14.12	14.13	14.12	14.12	260.9	273.0	

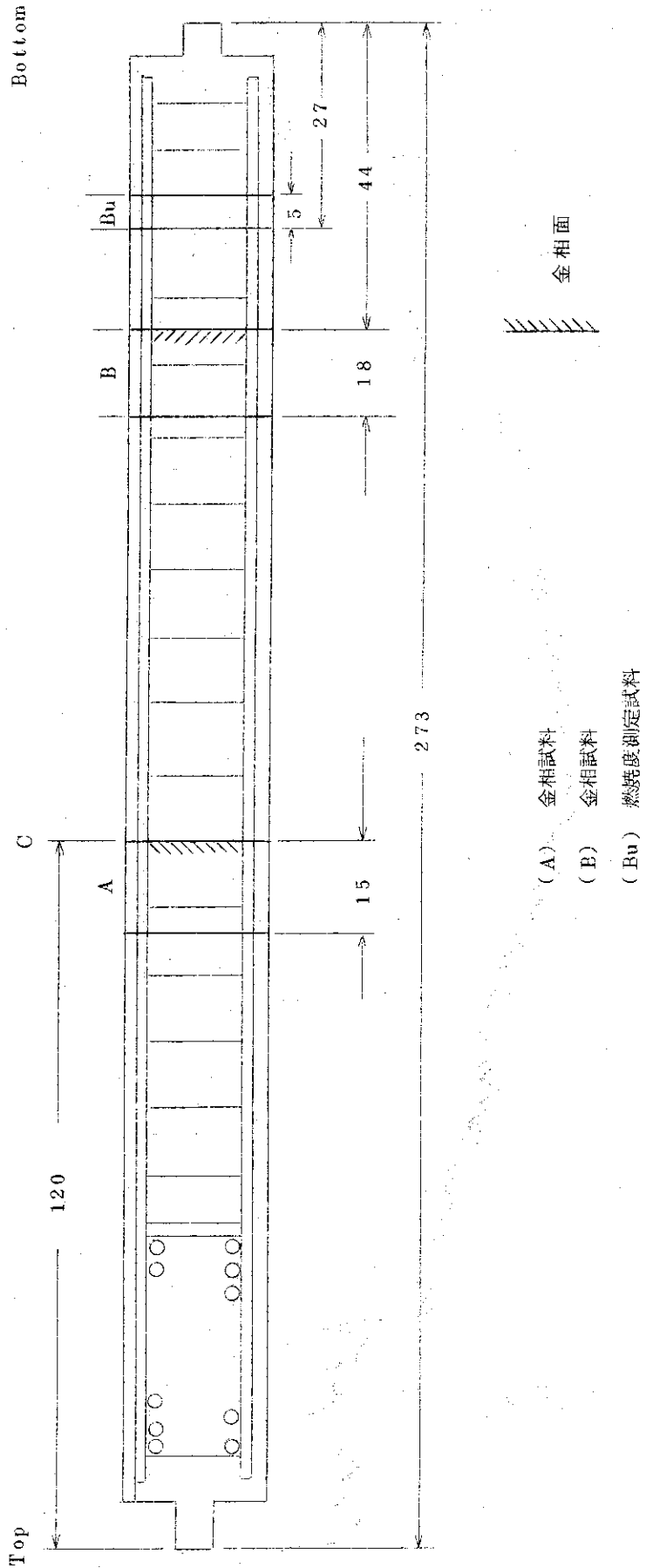


図 2.20 67F-35G の切断位置

HL 619 (67F-35G)

47-2-14

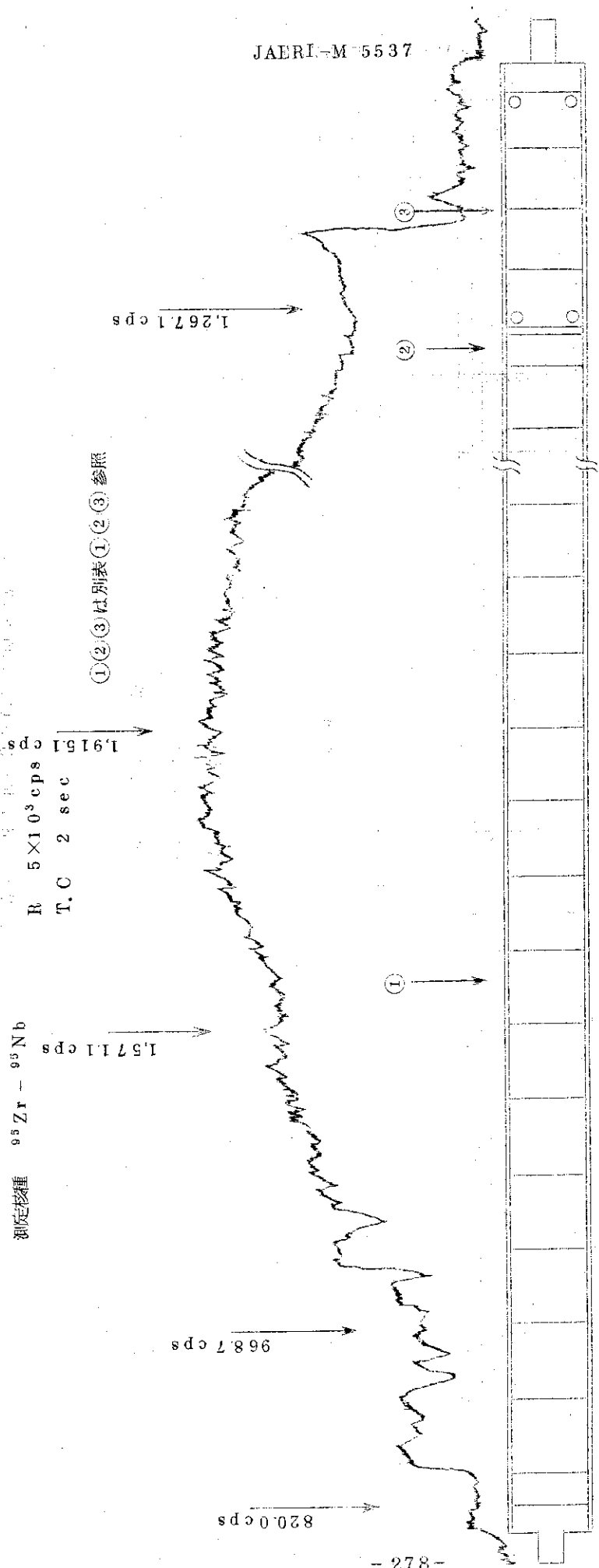
測定核種 $^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$

R 5×10^3 cps

T.C 2 sec

①②③は別表①②③参照

JAERI-M 5537



Top

Bottom

図 2.21 67F-35Gキャプセル中燃料ピンのγ-スキャンニング

HL 619 47-2-8
別表① 燃料部 測定点 Top side 164m/m
HV 1.000 V
C.G 1.5
F.G 0.5
Time 30 min

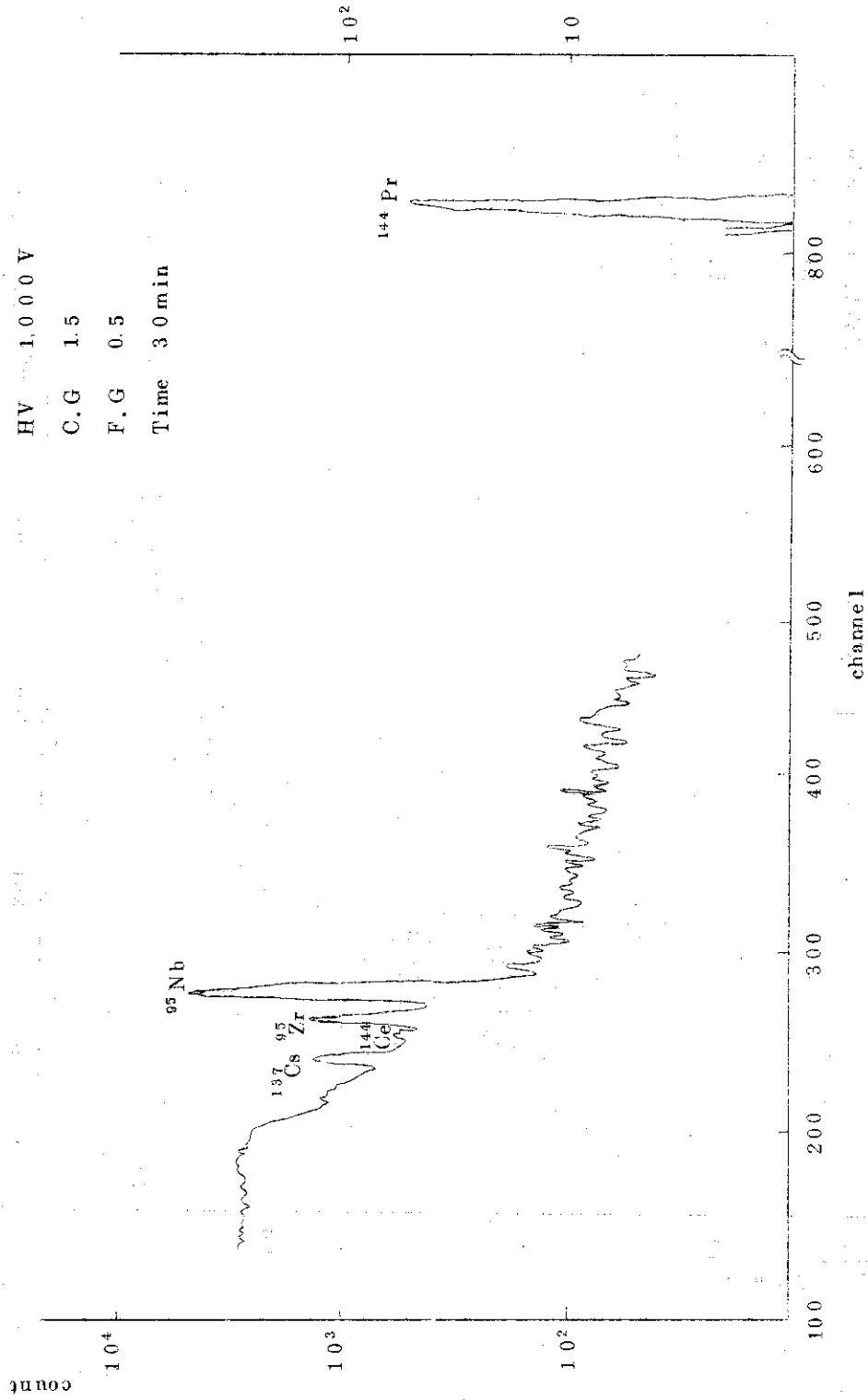


図2.2.2 燃料部におけるγ-スペクトル

47-2-8

HL 619

別表(2) 断熱材

測定点 Top - Side より 55.5 m/m

HV 1.000 V

C.G 1.5

F.G 0.5

Time 30 min

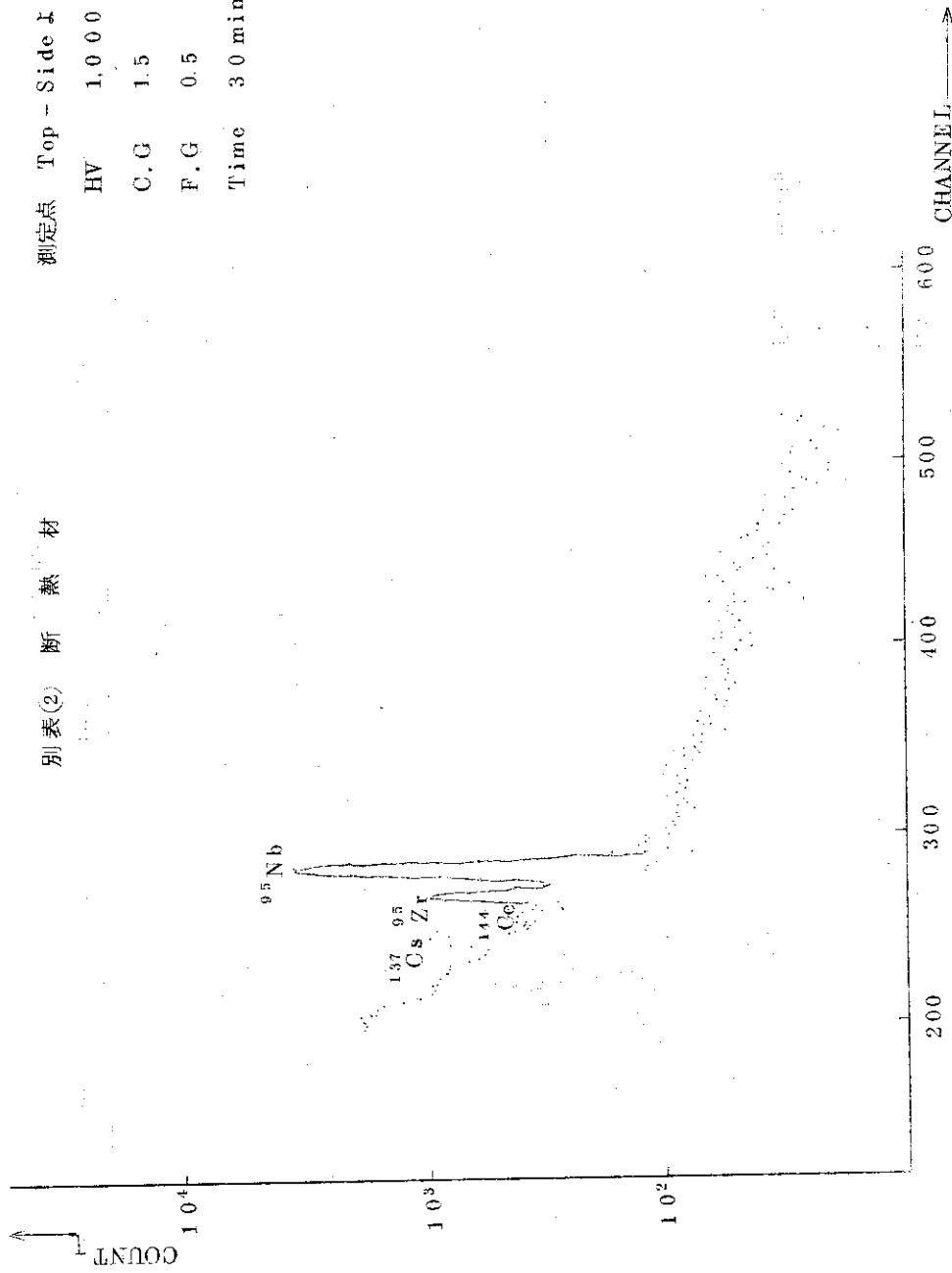


図 2.2.3 断熱材における γ -スペクトル

HL 619

47-2-8

別表③ プレナム部

測定点 Top-Side より 3.2 m/m

HV 1,000 V

C.G 1.5

F.G 0.5

Time 30 min

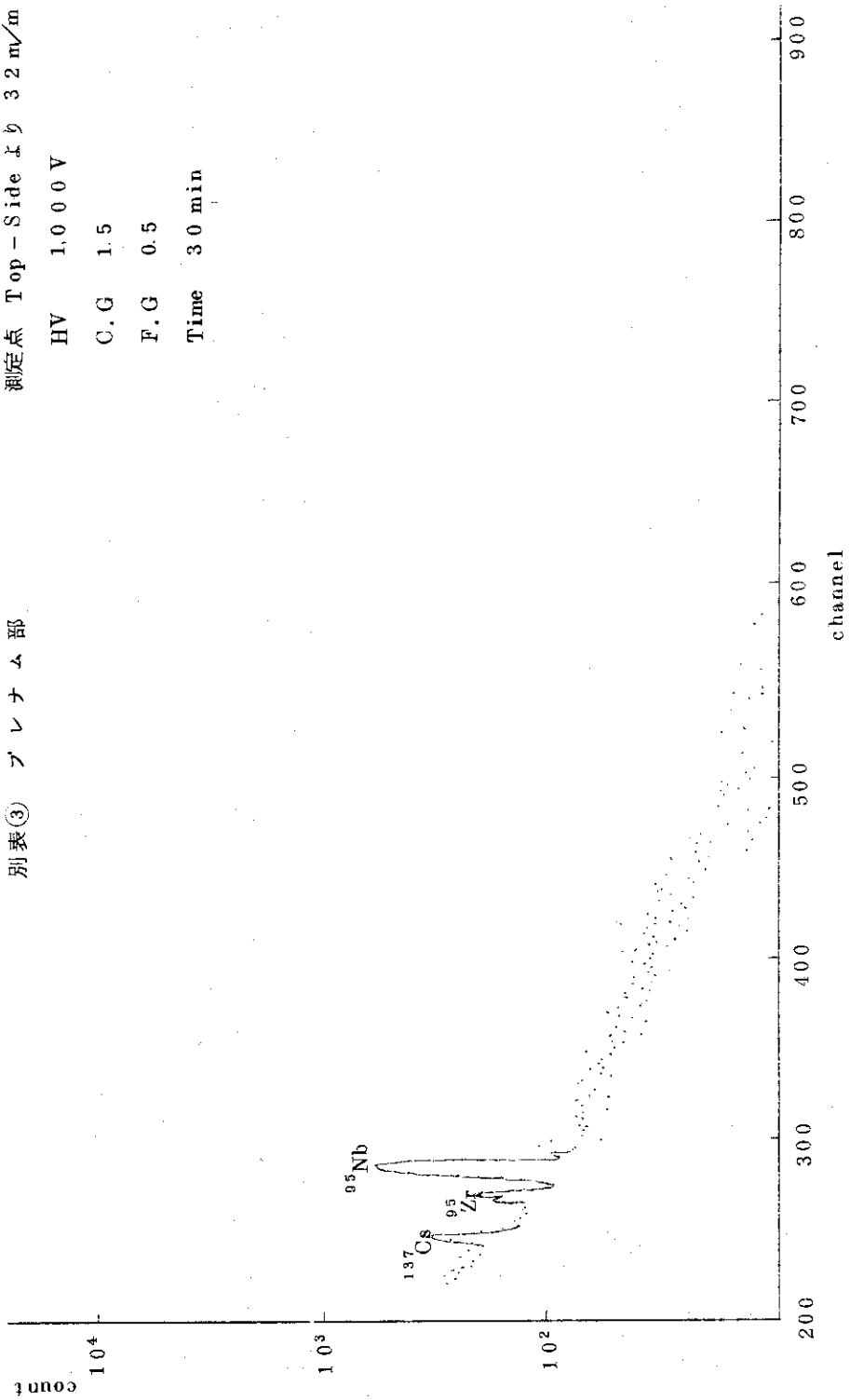


図 2.2.4 プレナム部におけるγスペクトル

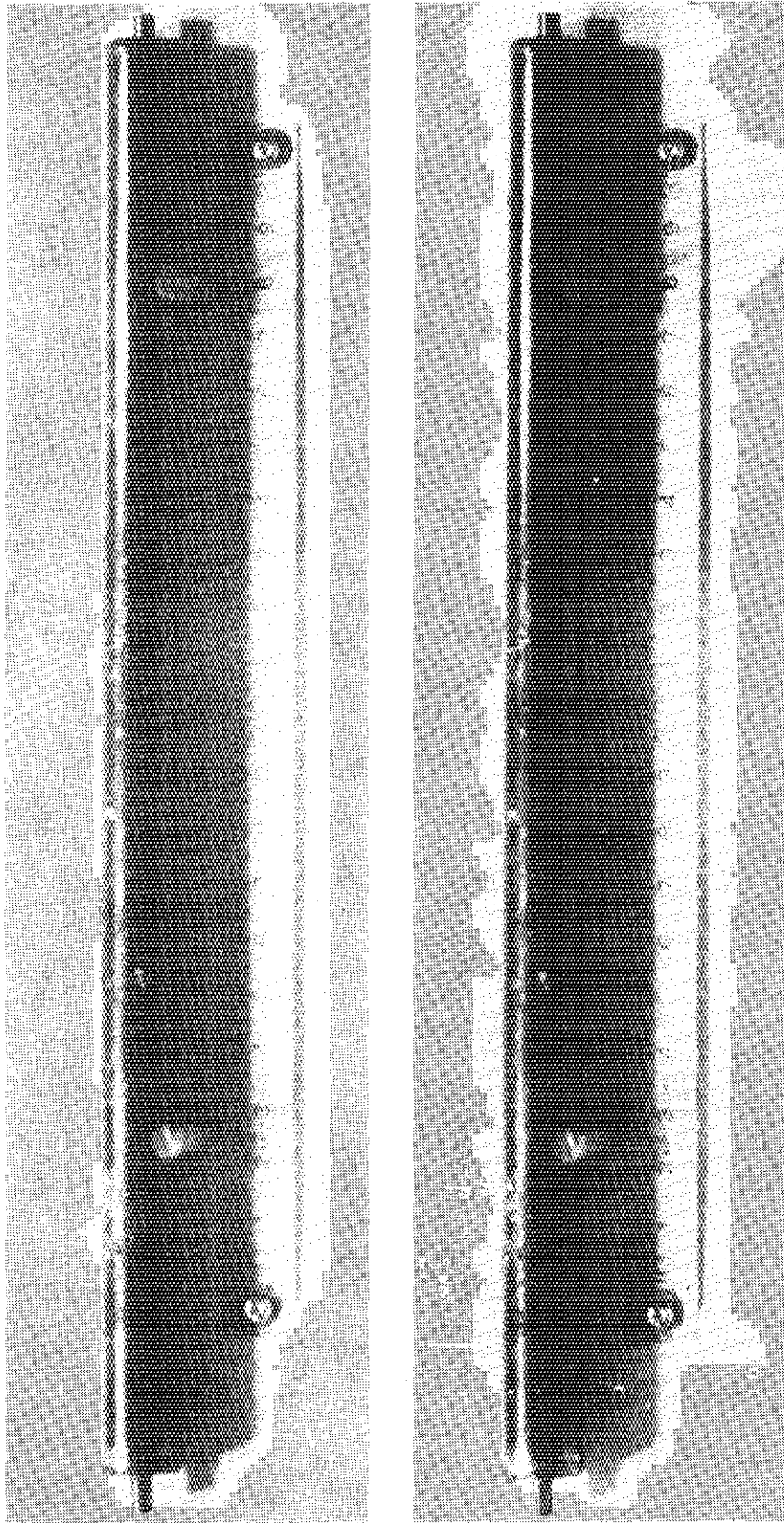


写真2.59 被覆管外觀

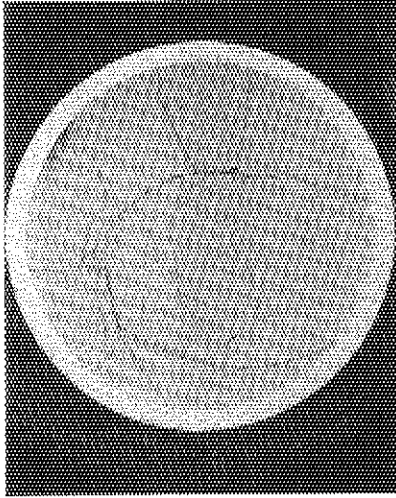


写真 2.61 67F-35G 試料 A マクロ写真

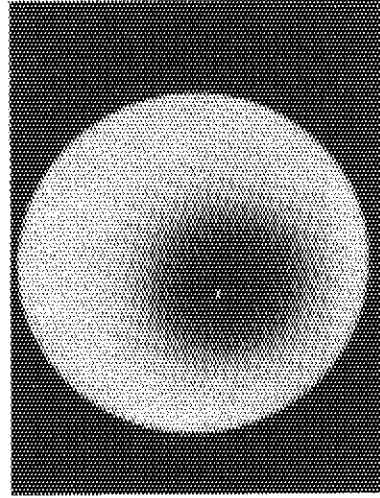
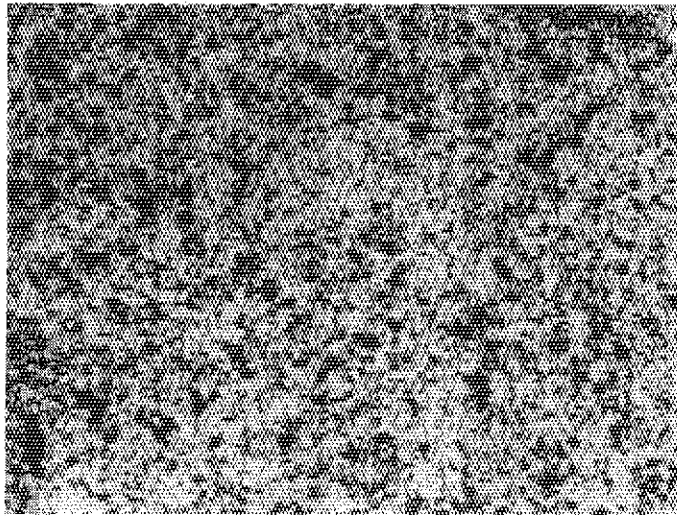


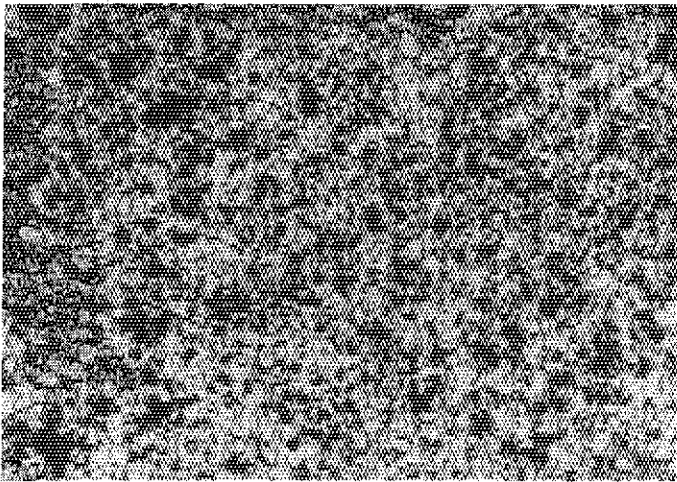
写真 2.62 67F-35G 試料 A のオートラジオグラフ



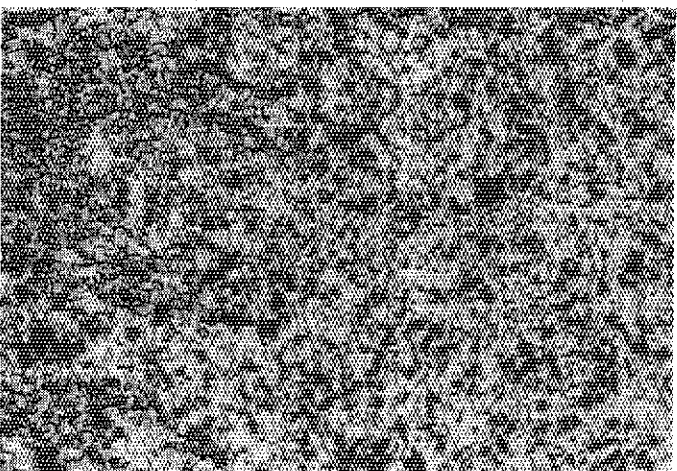
写真 2.60 被覆管 外観



(A)



(B)



(C)

写真 2.63 67F-35G 試料 A のマイクロ写真

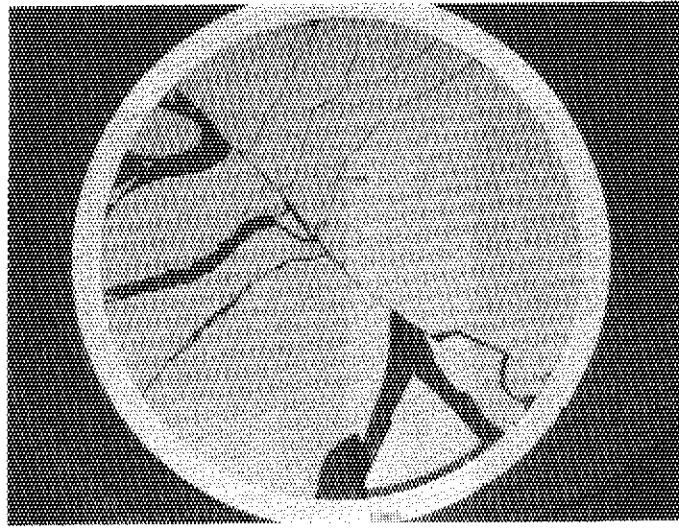


写真 2.64 67F-35G 試料 B のマクロ写真

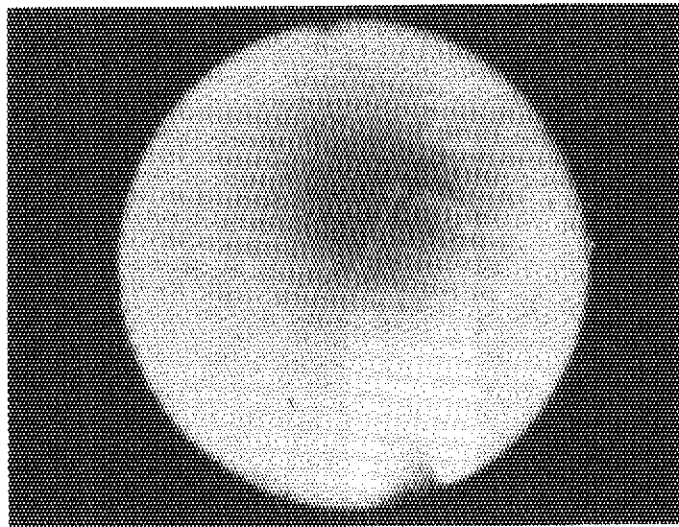
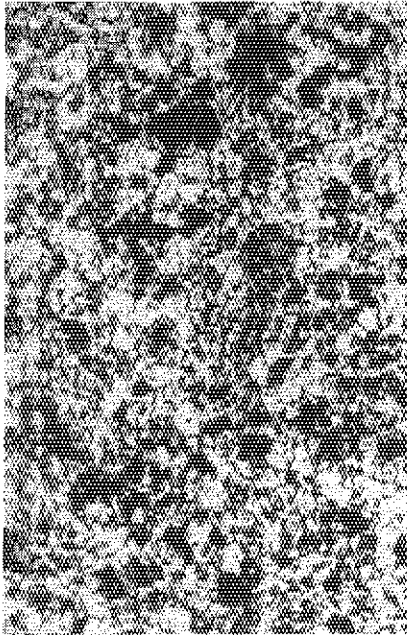
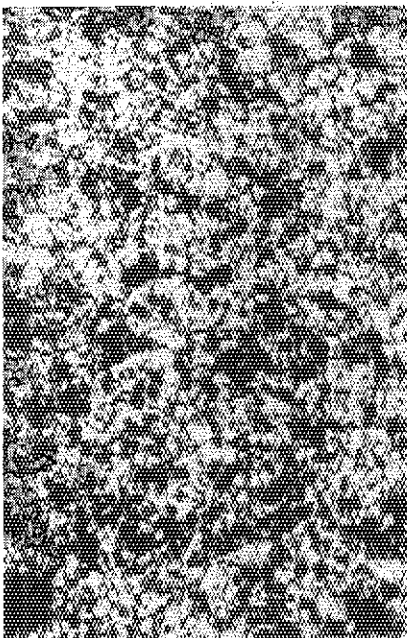


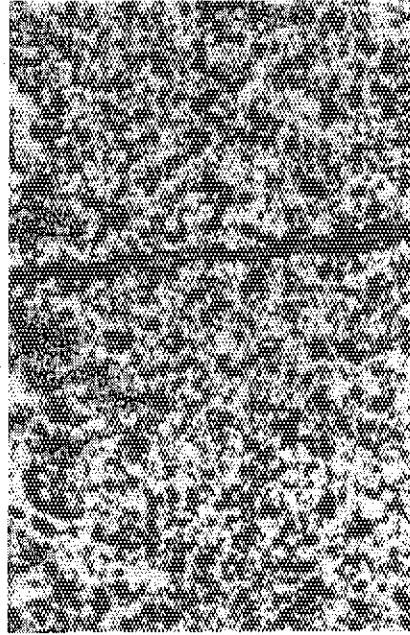
写真 2.65 67F-35G 試料 B のオートラジオグラフ



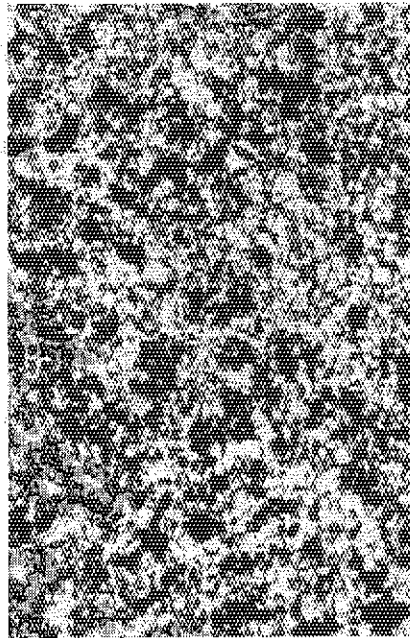
(A)



(B)



(C)



(D)

写真 2.66 67F-35G 試料 B の ミクロ写真

2.12 68F-4G の照射後試験

1. 概要

照射後試験項目は照射前には種々のものを予定していたが、熱出力が予定の 5.00W/cm^2 に比して実際は 2.00W/cm^2 と小さかったために、次の項目で行なった。

- (1) 燃料ピンの外観検査
- (2) " " 寸法測定
- (3) " " ガンマスキュニング
- (4) UO_2 ペレットセラモグラフおよび被覆管金相

なお燃焼度測定は JMTR の担当者が行なうことになっている。

2. 照射後試験

(1) 燃料ピン外観検査

燃料ピンをキャプセルから取出し、洗浄後、外観検査を行なった結果は管部、溶接部とも異常はみとめられなかった。この例を写真 2.67 に示す。

(2) 燃料ピン寸法測定

燃料ピン直径は端栓ビード部および管部 2 点 (長さ方向 3 分割点) で $0^\circ, 90^\circ$ の 2 方向で測定された。

その結果は表 2.9 に示されている。照射前の外径 (公称 6.30mm) にくらべ変化はなかったといえよう。

(3) ガンマスキュニング

東海ホットラボガンマスキュニング装置により測定が行なわれた。なお検出器は $3" \times 3"$ $\text{NaI}(\text{Tl})$ であった。スキュニングに用いた核種は $^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$ であった。スキュニングの結果は図 2.25 に示されている。

最下部ペレットの $1/2$ 部で放射能が下っており、見掛け上スタックがちぢんだ如くなっている。これはスキュニング曲線の横軸の精度の問題および製造時のペレットスタック長が正確に報告されていないため、明確なる判断は下せないが、金相試料を最下部ペレット $1/2$ の部分から採取しておりこれは異常がないため、スキュニング横軸の精度に問題があって見掛け上スタックがちぢんだようになったのではないかと考えられる。

この図の①および②においてガンマ線スペクトルを測定した結果は図 2.26 および図 2.27 に示される。①の部分の $\text{Zr}-\text{Nb}$ は UO_2 ペレットスタック部からの粉末がプレナム部に入った結果、あるいはスタック部からのバックグラウンドを受けたものと考えられるが ^{137}Cs のピークが $\text{Zr}-\text{Nb}$ にくらべ著るしく大きいことは、図 2.27 との比較により明瞭となる。すなわちプレナム部には ^{137}Cs がスタック部より偏析しているといえよう。最近 $\text{Ge}(\text{Li})$ 検出器を用いたガンマスキュニングでペレット接面間およびプレナム部に ^{137}Cs ^{134}Cs が偏在していること^{*,**} が最近報告されているが、これらのことから被覆管との反応あるいは応力腐食破損を解析する上で重要となるので、今後さらによくわしい研究を行なわねばならぬ分野である

* HPR-157 p. 26 (1973)

** R. S. Forsyth, Post Irradiation Examination Techniques vol. © B.N.E.S. 1972

う。

(4) UO₂ ペレットセラモグラフ, 被覆管メタログラフ

試料の採取位置は図 2.2.8 に示されている。いずれの断面においてもペレット中のクラックがみとめられる程度で結晶粒成長はみられず、また気泡分布にも全く変化はみとめられなかった。ピン中央部試料(板 8.8)を写真 2.6.8 および 2.6.9 に示す。写真 2.6.8 (A)(B)(C)はそれぞれペレット周辺部, 中間部, 中央部の結晶粒分布を示す。結晶粒分布は同じ場所でも多少変動があり、これを考慮すると、全く変化なしとしてよい。また気泡分布は中央部においても周辺部のものと殆んど変わらず、粒内にも多く存在している。さらに写真 2.6.9 (A)(B)にエッチング前の試料による周辺部, 中央部の気泡分布が示されているが、変化なしとしてよい。写真 2.6.8 (D)にステンレス鋼被覆管の金相を示すが、炭化物析出その他異常は見られない。さらに内面(写真左側端)にも FP との反応を示すような部分も全くみとめられない。

以上のことは熱出力が 200W/cm と低く、燃焼度も約 1,500MWD/T と低いことを考えると従来の知見と矛盾するところはないと思われる。

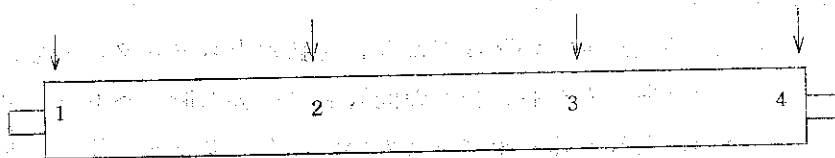
表 2.9 燃料ピンの寸法測定

測定方法

0°, 90° の 2 方向を各 4 ケ所, それぞれ 3 回ずつ測定する。

測定器はマイクロメータ(精度 1/100m/m)で数値は C ケーブベリスコープで読む。

測定位置



測定結果

[単位 m/m]

位置 方向	回数	1	2	3	4
X	1	6.36	6.28	6.28	6.31
	2	6.36	6.28	6.28	6.31
	3	6.36	6.28	6.28	6.30
	平均	6.36	6.28	6.28	6.31
Y	1	6.37	6.27	6.27	6.31
	2	6.37	6.27	6.27	6.31
	3	6.37	6.27	6.27	6.31
	平均	6.37	6.27	6.27	6.31

JAERI-M 5537

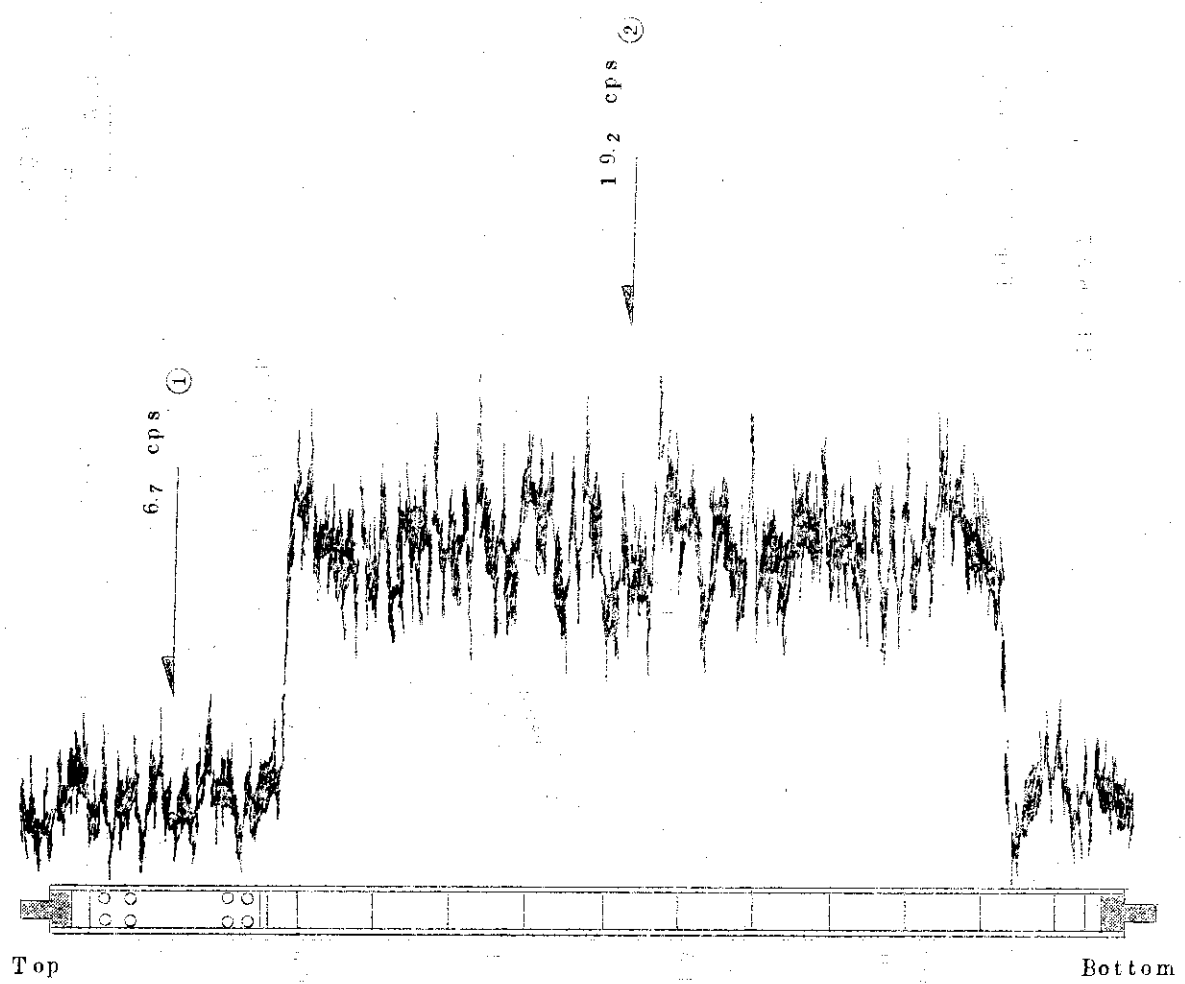
HL 657
(68F-4G)

1972.10.27

R 10^2 cps

T.C 2 sec

$^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$



☒ 2.2 5

HL-657

Top 1 by 20 mm ①

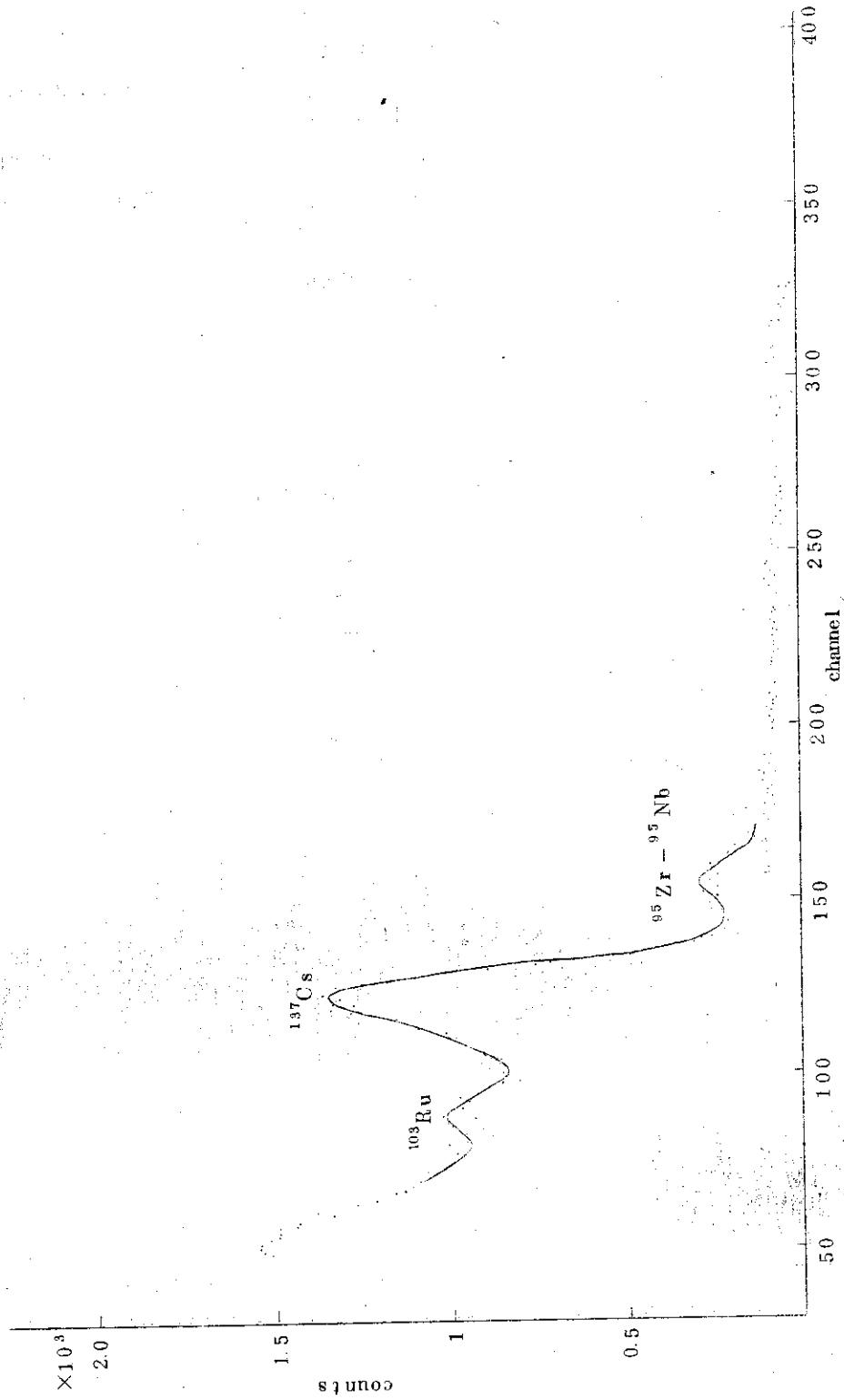
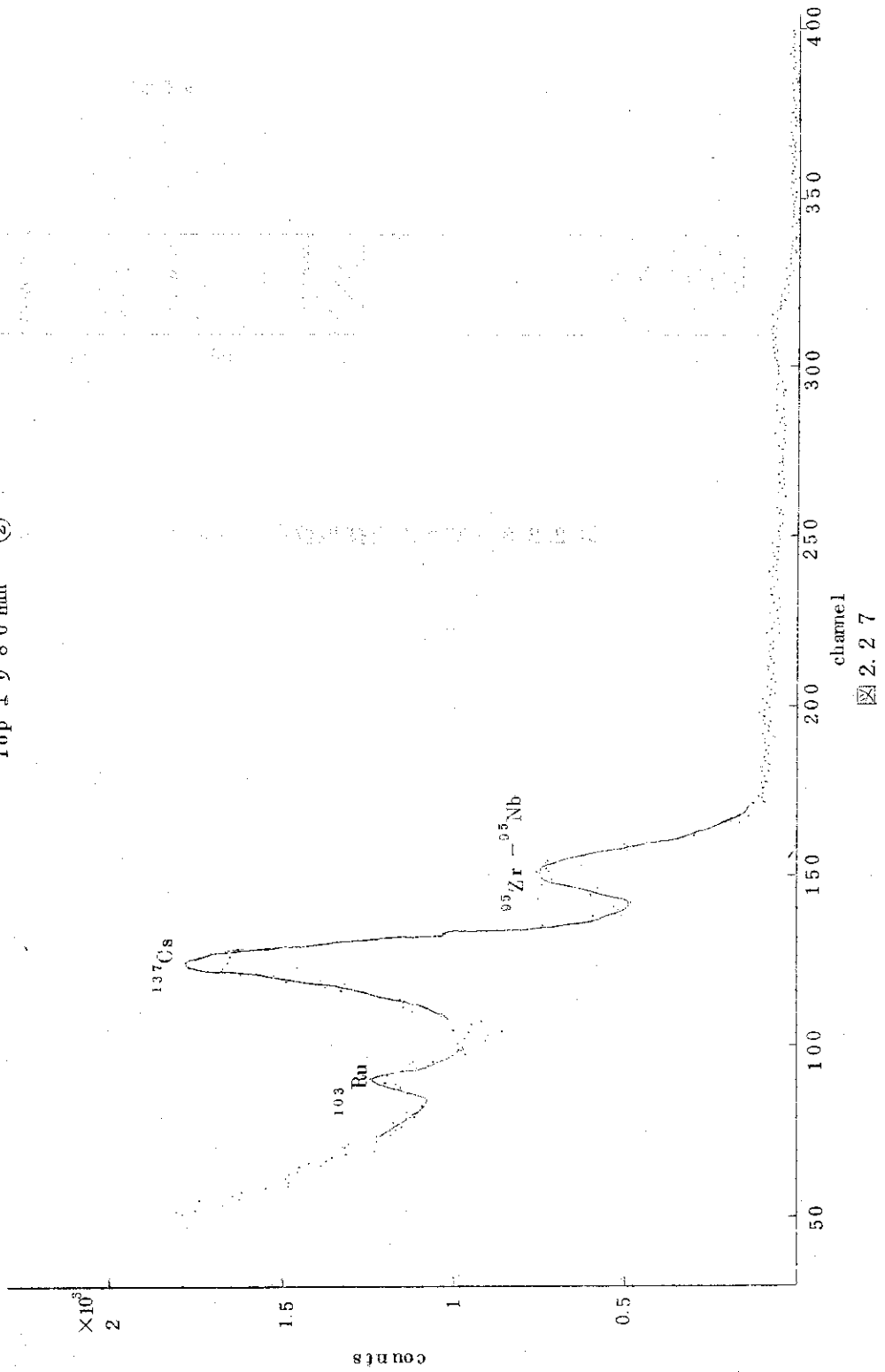


図 2.2 6

HL-657

Top 1980 mm (2)



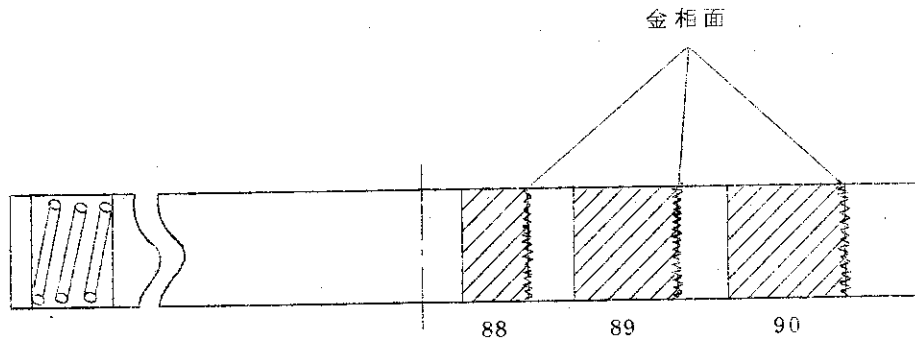


図 2.2 8 試料 No. と採取位置の関係

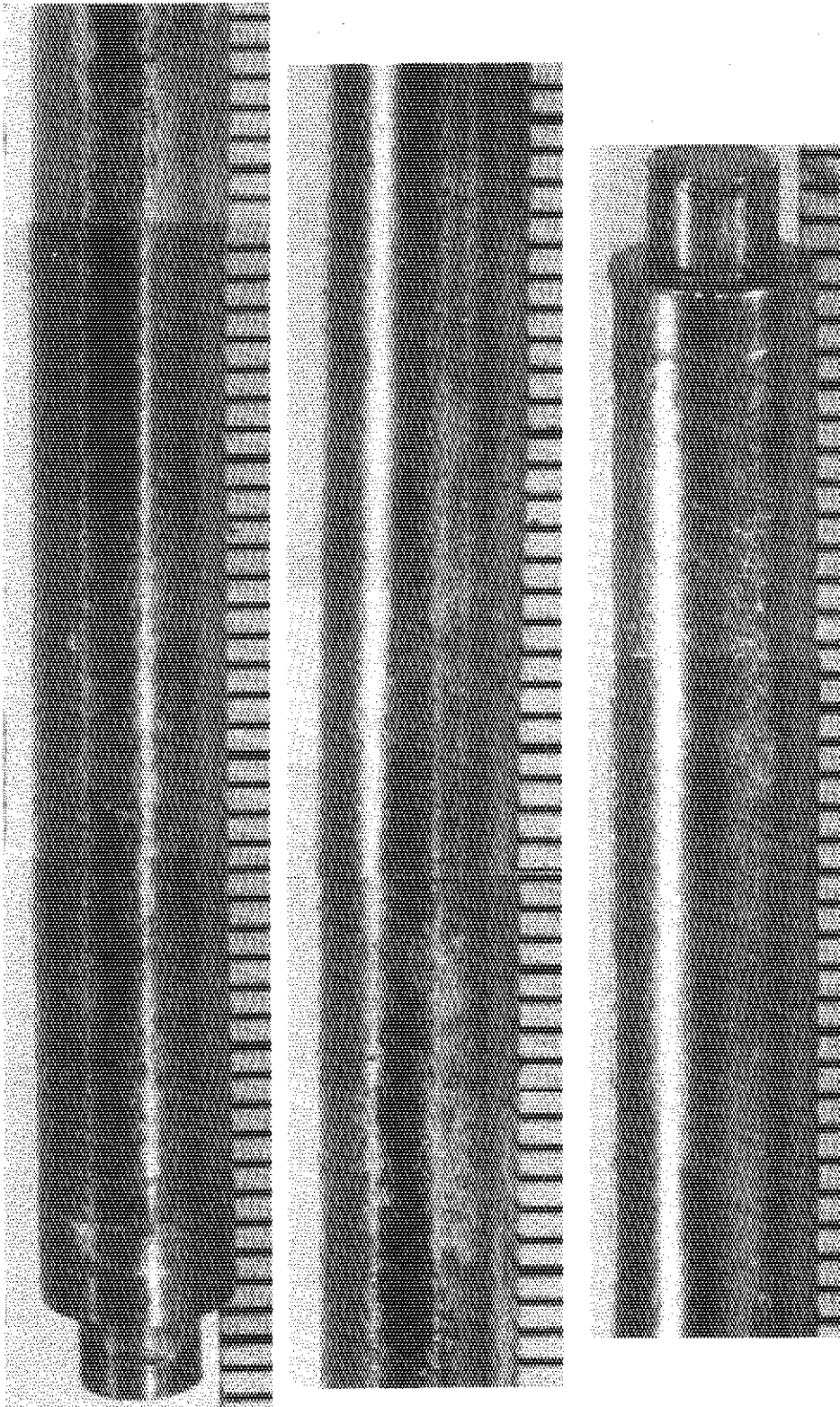
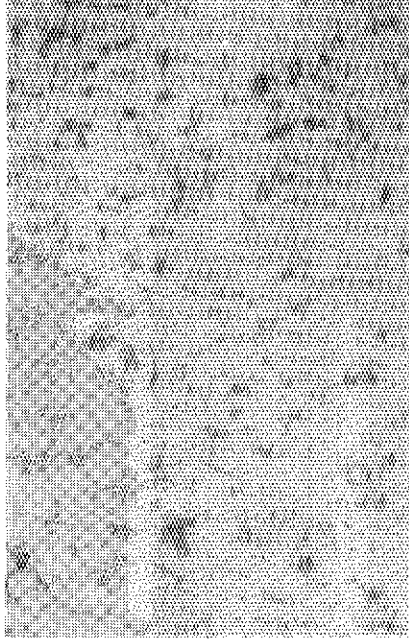


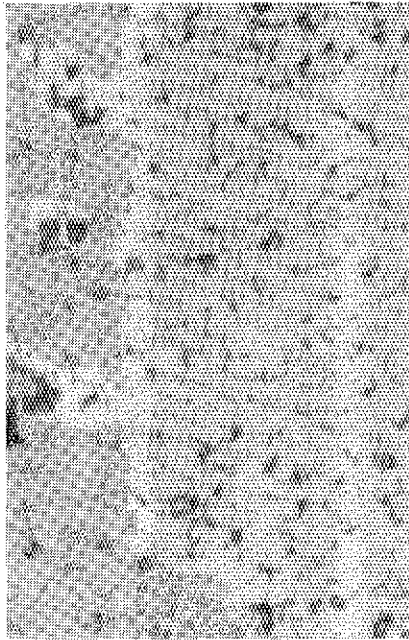
写真 2.67 被覆管 外觀



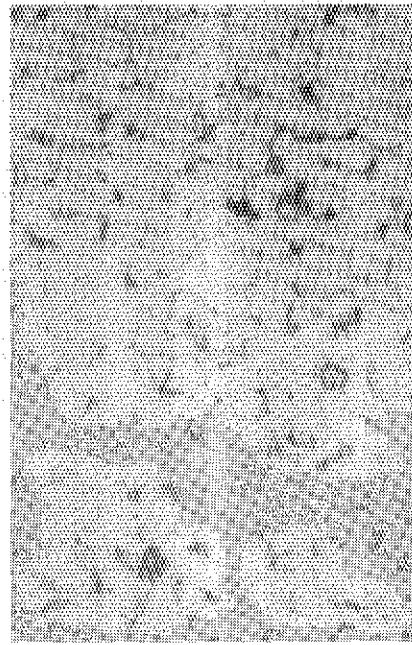
(B) UO_2 中間部 $\times 450$



(D) 被覆管 $\times 225$

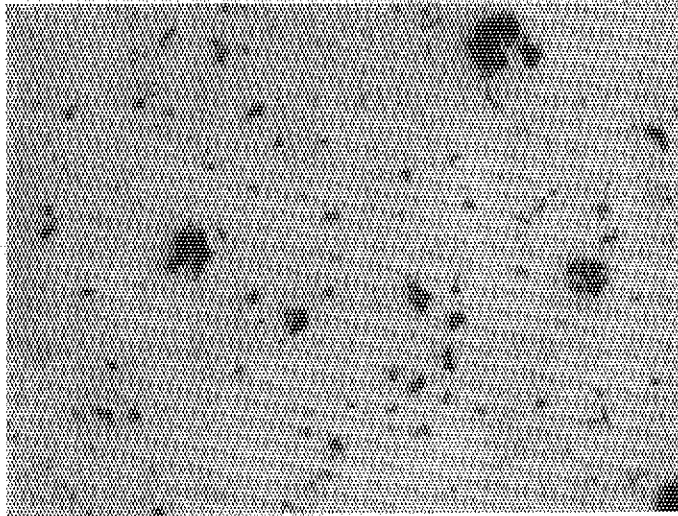


(A) UO_2 外周部 $\times 450$

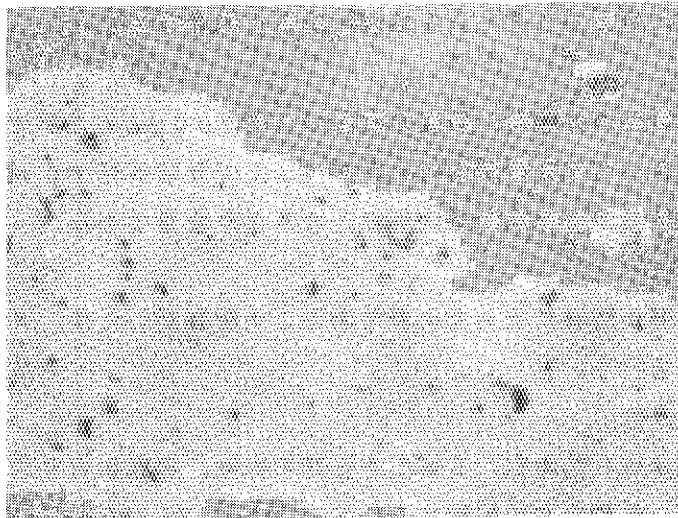


(C) UO_2 中心部 $\times 450$

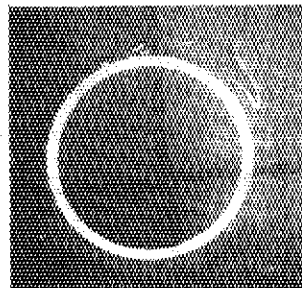
写真 2.68 68F-4G ミクロ写真



(A) 外周部(エッチ前) ×450



(B) 中心部(エッチ前) ×450



(C) マクロ ×3.6

写真2.69 68F-4Gエッチング前マイクロ写真

2.1.3 ^{137}Cs 分析測定データ

J M T R 試用期間照射後試験において下記のキャプセル試料について ^{137}Cs の定量分析を行った。

67F-3G, 67F-18G, 67F-24G, 67F-28G
67F-31G, 67F-35G, 68F-4G

Cs-137 定量分析の概要

試料ビンから切り出された数m/m の試験片をコンクリートケーブ内で、硝酸による溶解処理を行い、その少量を分取、実験室でウランの定量をアルセナゾⅢを用い光度法により測定。同時にセシウム-137を塩化白金酸セシウムとして化学分離を行い、標準線源との比較によりCs-137の定量を行った。

(1) 試料の溶解

数m/m 程度に切り出された試料片は、切削油や他の付着物を取り除くためにアセトンで洗浄する。一夜風乾後、試料片を200mlメスフラスコに採取、1:1硝酸約100mlを加え、ガラス冷却器を接続110~120℃で砂浴上で加熱溶解を行う。10時間後、ペリスコープで観察を行い、残渣や被覆管に付着がないことを確認し溶解を終了する。

(2) 希釈、分取

溶解終了後、室温まで冷却、分取時の濃度の調整のため200mlに希釈する。これを原液とする。マグネチックスタラーで充分攪拌を行い、ピペットで分取試料10ヶ分を分取する。1ヶ分の分取量はCs-137量が標準線源と同程度となるような量である。

(3) ウランの定量

試料中の共存元素の影響が妨害にならない量であることを確認した後、アルセナゾⅢ光度法によって、ウランの定量を行う。

(4) Cs-137の定量分析

分取した試料溶液を50mlに希釈、5mlを正確に採取、過塩素酸を加え、加熱過塩素酸塩とし、遠沈分離を行い、沈殿を水に溶解する。Fe, Ce, ZrのCarrierを加え、Zrなどの共存元素を分離する。

遠沈を行った後、上澄液に塩化白金酸を加えセシウムを塩化白金酸セシウムとして沈殿させ、吸引ろ過を行い円板状線源とする。

標準線源と比較測定を行い、化学収率の補正を行ないCs-137の定量を行った。

尚、Cs-134については、Cs-134標準線源を用い、差し引き除去を行なり。又、分析は、1試料につき4個所行い、上下値ふたつを削除し2個所の値を採用する。

(5) 測定結果

別添の通り。

Sample HL No.	U Quantitative		
	Absorbance U(10^{-6} g)	Dilution	Extraction Density (10^{-6} g/ml)
618(67F-28G)	0.292	5/50	235
619(67F-35G)	0.280	5/50	225
657(67F-4 G)	0.209	5/50	33.6
658(67F-3 G)	0.396	5/50	160
688(67F-24G)	0.270	5/50	109
689(67F-31G)	0.344	5/50	92.3

Sample HL No.	Cs-137 Quantitative			Cs-137/U (10^{-6} Ci/ 10^{-3} g)
	Average Cs-137(10^{-6} Ci)	Extraction Density (10^{-6} Ci/ml)	(of Cs-137 analysis)	
618	1.378 ₈ , 1.350 ₀	1.364 ₄	0.272 ₉	1.161 ₂
619	1.912 ₂ , 1.898 ₆	1.905 ₄	0.381 ₁	1.693 ₇
657	1.003 ₀ , 1.016 ₀	1.009 ₅	0.201 ₉	6.008 ₉
658	1.047 ₃ , 1.048 ₅	1.047 ₉	0.209 ₆	1.310 ₀
688	1.776 ₁ , 1.789 ₃	1.782 ₇	0.356 ₅	3.270 ₆
689	3.937 ₄ , 3.943 ₂	3.940 ₃	0.788 ₁	8.538 ₅
585(67F-18G)	2.115 ₀ , 2.098 ₂	2.106 ₅		1.135 ₅

- 1973.2.10 -

別 添

あ と が き

照射41年3月から始った燃料照射計画が昭和48年に照射後試験を終了するまで7年の才月が流れた。この間、計画、試料提供、キャプセル製作、照射後試験、解析の各々について実に多くの会社及び研究者の方々に御協力いただいたことを感謝するとともに、今後この貴重な経験を生かす努力をいたしたいと存する次第であります。

以下に本燃料照射計画に御参加いただいた方々並に分冊執筆者名を記します。

第2部 燃料照射の執筆者一覧表

まえがき	総論のまえがき	野村末雄
	燃料関係のまえがき	大内信平
1. 照射データと参考資料		
1.1	67F-1Gの照射データと参考資料	竹下 功
1.2	67F-2G	竹下 功
1.3	67F-3G	石井 忠彦
1.4	67F-4G	田中 勲
1.5	67F-5G	宮尾 次郎
1.6	67F-7G	宮尾 次郎
1.7	67F-8G	高橋 秀武
1.8	67F-10G	清水 正亜
1.9	67F-13G	清水 正亜
1.10	67F-14G	清水 正亜
1.11	67F-16G	石井 忠彦
1.12	67F-18G	高橋 秀武
1.13	67F-23G	清水 正亜
1.14	67F-24G	高橋 秀武
1.15	67F-25G	高橋 秀武
1.16	67F-28G	竹下 功
1.17	67F-31G	高橋 秀武
1.18	67F-33G	田中 勲
1.19	67F-35G	石井 忠彦
1.20	67F-36G	高橋 秀武
1.21	68F-3G	高橋 秀武
1.22	68F-4G	"

2. 照射後試験データの解析

2.1	67F-1Gの照射後試験データの解析	津久井 一 茂(東芝)
2.2	67F-2G	新保 勝利(日立)
2.3	67F-3G	鉄谷 輝生(原燃工)
2.4	67F-7G	鉄谷 輝生(原燃工)
2.5	67F-16G	小松 経治(PNC)
2.6	67F-18G	高田 義彦(三菱)
2.7	67F-24G	高田 義彦(三菱)
2.8	67F-28G	津久井 一 茂(東芝)