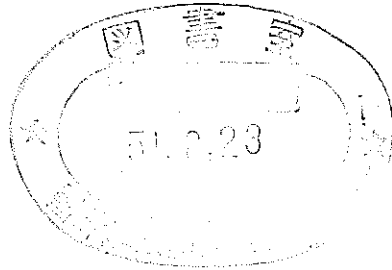


7N 241 70-45

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	N241 70-45
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

高速炉燃料の照射試験



昭和45年10月

区分変更	
変更後資料番号	716
決裁年月日	平成13年11月30日

動力炉・核燃料開発事業団

POWER REACTOR & NEUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CORPORATION

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

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

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

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

高速炉燃料の照射試験

高速増殖炉開発本部 植松邦彦

1. 高速炉用燃料照射の特徴

高速炉用燃料は、熱中性子炉用燃料に比較してその使用条件は次の点で異なっている。

高速炉用燃料の特色は

- (1) 高中性子束の高速中性子の照射をうける。
- (2) 燃焼度が高く約 10 万 MWD/T を目標にしている。
- (3) 燃料の平均使用温度が高い。
- (4) 核分裂性物質の濃度が高く、しかもプルトニウム燃料である。

等である。

上記特色の結果、照射した場合熱中性子炉とは異なった挙動を示す。

- (1) 比出力が高く、燃料内の半径方向出力分布が均一でしかも細径であるので、燃料は高い温度勾配を受ける。
- (2) 高燃焼度のため燃料および被覆管のスエリング量が大きい。
- (3) 高速中性子であるので、照射損傷が大きく、しかも高温使用のため被覆管強度の劣化が大きいと考えられる。

これらの特色のため、熱中性子炉用燃料の照射結果をそのまま高速炉燃料の設計に利用することはできない。

2. 高速炉用燃料照射の必要性

現在までにわが国でおこなわれた燃料の照射実験は、熱中性子束下において行なわれたものがほとんどで、上記のごとき高速炉用燃料の条件について照射した例はない。

世界各国においては米国、英国、フランス、ソ連等が自国の高速実験炉を使用して、高速炉用燃料の照射実験を大々的に行ないつつあるが、照射実験の結果について十分な発表がおこなわれておらず、高速炉燃料の照射下での安定性をわが国で入手できる海外データのみで証明するのは不可能である。また、照射される燃料および被覆管、その他部材は材質の規格が同じであってもその製造法は国々によって若干異なり、海外データをそのまま、わが国の材料にあてはめるといえることはできない。

わが国で設計・製造した燃料についての照射実験を行なうことは、どうしても必要なことであり、数量的不足は海外のデータを参考にして補うのが適切である。

もし、高速実験炉「常陽」、高速原型炉「もんじゅ」に使用する燃料の安定性を証明するために、燃料の照射実験を基礎的な研究から出発して納得のいくところまで照射を行なうとすれば

- (1) 非常に時間がかかりプロジェクトの要求を満足できない。
- (2) 莫大な費用がかかる。
- (3) 高速中性子束下での照射を行ない得る原子炉の数は世界的にかぎられており、日本の全要求を満足しえない。

等の問題がある。

したがって、われわれが「常陽」、「もんじゅ」にぜひとも実施すべき燃料照射実験は

- (1) 定常出力運転時における燃料の安定性を証明する照射実験
- (2) 出力運転開始当初と定常運転中に予測されるごときスクラムもしくは、過出力等に起因する非定常出力の場合の燃料の安定性を証明する照射実験
- (3) 原子炉の安全性に密接な関係のある燃料の破損・熔融事故を模擬し解析する安全性確認のための照射実験

が考えられる。

3. 高速炉開発における燃料照射計画概要

3.1 基本的な考え方

動燃が高速炉開発のために行なうべき照射実験に関する基本的な考え方は、上記 2. の必要性に述べられているように

- (1) 設計で予想される条件下における燃料の安定性を証明する確性照射実験
 - (a) 定常運転状態における燃料の安定性を証明する確性照射実験
 - (b) 出力上昇、スクラム、オーバーパワー等の非定常状態における燃料の安定性を証明する確性照射実験
- (2) 異常な条件下における燃料挙動を模擬する安全性照射実験
- (3) 設計データの入手、照射挙動の正確な把握のための基礎データを得る基礎照射実験

であると考えている。

この種の実験に利用できる原子炉は国内外を通じて非常にかぎられた数であり、動燃が利用したいと考え、利用できるであろう原子炉は

- (1) 高速中性子炉
英国のドンレイ炉、フランスのラブソディ炉、米国のエンリコ・フェルミ炉
- (2) 熱中性子炉
米国のGETR、わが国のJMTR等

である。

上記の高速中性子炉は、本来燃料照射炉として設計されているわけではないので、計装およびルー

ブ施設等を有していない。したがって、これらの高速中性子炉では定常運転時の燃料照射しか現在は行なえない。

熱中性子炉でも照射炉として設計されているものは、計装の点、ループ所有の点、非定常運転時の照射を行ない得る点、熱中性子束カトリグの使用によるエピサーマル以上の中性子束下での照射の行ない得る点等から高速中性子炉による燃料照射の補足的役割を果させるとともに、非定常運転時の燃料照射、安全性確認のための照射等を行なうことができる。

高速実験炉「常陽」が初期の目的を達して、燃料・材料の照射炉として使用されるようになった場合には、燃料照射では少なくとも定常運転時の照射を行なうのに使用でき、そのため照射用リグ（特殊燃料集合体）、温度計測法等の開発を実施している。さらに照射の可能性を高めるための照射用リグ（ループスル等）の開発も予定している。

3.2 計画概要

高速炉用燃料開発のために実施している照射計画、今後予定している照射計画のタイム・スケジュールを第1表に、計画内容を第2表に記した。

また、安全性照射に関して燃料破損の原因、その結果生ずる現象を図式化したものを第1図に示した。

No.	項目	44年度		45年度		46年度		47年度		48年度		49年度		50年度		51年度		52年度		53年度		54年度	
		4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10
	高速実験炉“常陽”	[Timeline: 44-54]																					
	高速原型炉“もんじゅ”	[Timeline: 47-54]																					
1	GETR-Fermi Type	[Timeline: 44-54]																					
2	高速定 DFR 332/2	[Timeline: 44-54]																					
3	高速定 DFR 332/3	[Timeline: 44-54]																					
4	高速常 DFR 332/5	[Timeline: 44-54]																					
5	高速常 Rapsadie	[Timeline: 44-54]																					
6	高速非定 GETR-IRT(B)	[Timeline: 44-54]																					
7	高速非定 GETR-T	[Timeline: 44-54]																					
8	高速定 DFR 332/6	[Timeline: 44-54]																					
9	高速定 DFR 332/7	[Timeline: 44-54]																					
10	高速常 海外照射 (10万)	[Timeline: 44-54]																					
11	高速常 “常陽” 照射	[Timeline: 44-54]																					
12	高速非定 JMTR-T 1	[Timeline: 44-54]																					
13	高速非定 JMTR-T 2	[Timeline: 44-54]																					
14	基礎 JMTR-TC	[Timeline: 44-54]																					
15	基礎 JMTR-PC	[Timeline: 44-54]																					
16	照射 JMTR-FP	[Timeline: 44-54]																					
17	照射 JMTR-CM	[Timeline: 44-54]																					
18	No. 両立性	[Timeline: 44-54]																					
19	破損 燃料の熱膨脹 (溶融)	[Timeline: 44-54]																					
20	安全 ビン接触	[Timeline: 44-54]																					
21	安全 ブレナム内圧	[Timeline: 44-54]																					
22	性 パワーサイクル	[Timeline: 44-54]																					
23	照射 冷却材喪失	[Timeline: 44-54]																					
24	照射 局所閉塞	[Timeline: 44-54]																					
25	照射 反応度挿入	[Timeline: 44-54]																					

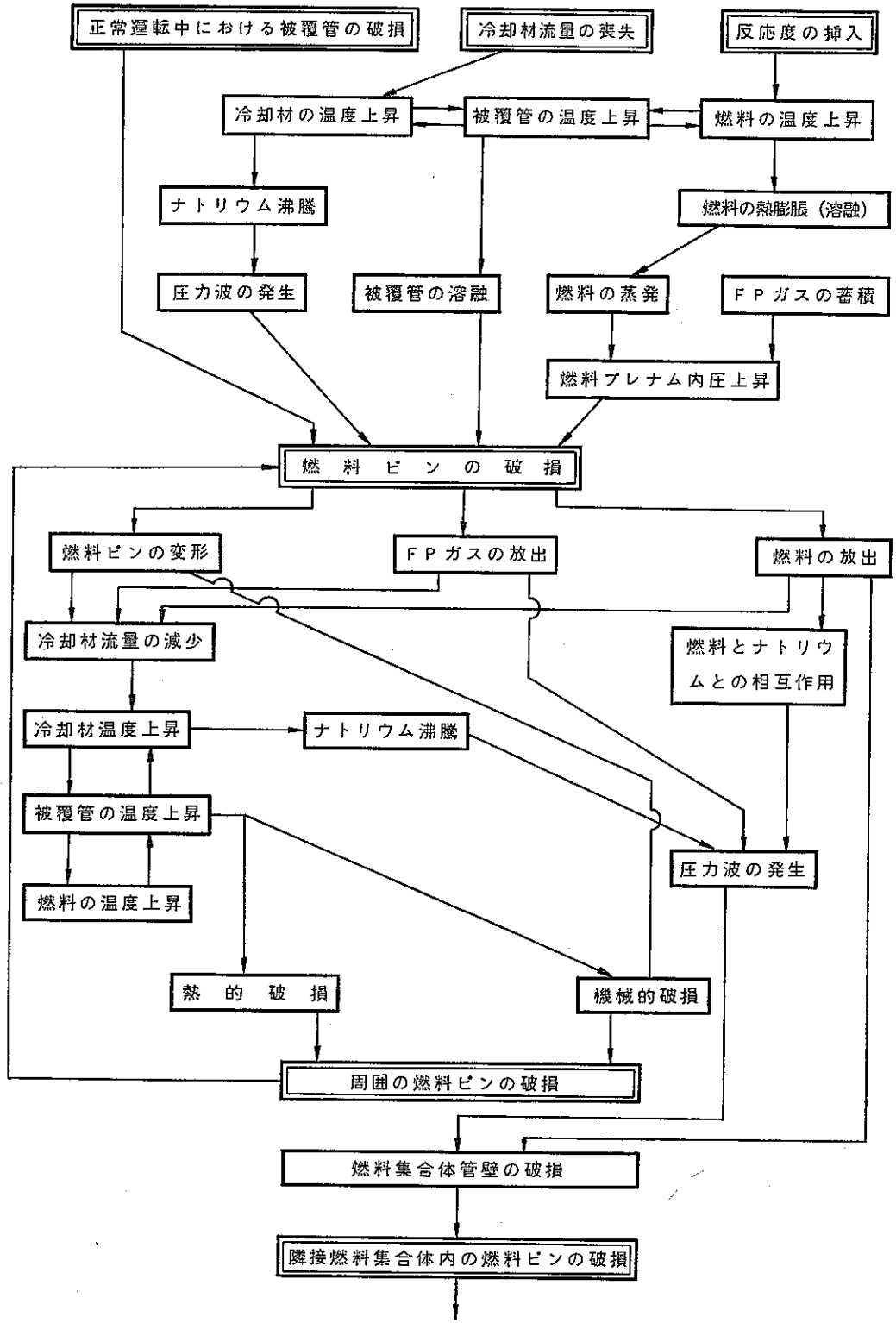
第1表 高速炉用燃料開発のための照射計画タイムスケジュール

第2表 高速炉用燃料開発のための照射計画概要

No.	照射実験名	目的	概要	試料						照射条件				備考	
				本数 (ピン数)	燃 料			被覆管	使用炉	被覆管温度 (°C)	最高出力 (watts/cm)	最高燃焼度 (MWD/T)			
					直 径 (mm)	長 さ (mm)	密 度 (% T.D)						組 成		
1	GETR-Fermi Type	「常陽」燃料の定常運転時の安定性証明	長尺燃料ピンをカドミウムで熱中性子除去した状態で照射。 NaK 二重キャプセルを使用。	1	5.5	773	91.3	20w/o PuO ₂ -UO ₂ (90% E.U.)	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	GETR (炉心H-7)	400~500	400	18,800	照射, 照射後試験共に終了。	
2	DFR 332/2	「常陽」燃料の定常運転時の安定性証明	短尺燃料ピンを高速中性子下で照射。 冷却材は NaK。	6	5.5	193	95.8	18w/o PuO ₂ -UO ₂ (90% E.U.)	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	DFR (Pitch 20)	230~620	510	12,000	照射, 照射後試験共に終了。	
3	DFR 332/3	「常陽」燃料の定常運転時の安定性証明	中尺燃料ピンを高速中性子下で照射。 冷却材は NaK。	3	5.5	370	94	18w/o PuO ₂ -UO ₂ (90% E.U.)	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	DFR (Pitch 20)	230~620	510	46,000	照射中	
4	DFR 332/5	「常陽」燃料の定常運転時の安定性証明 燃焼度からみた使用限界を求める	中尺燃料ピンを高速中性子下で照射。 冷却材は NaK。	3	5.5	380	94	18w/o PuO ₂ -UO ₂ (60% E.U.)	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	DFR (Pitch 6)	230~600	450	56,000	契約交渉中	
5	Rapsodie	「常陽」燃料集合体の定常運転時の安定性証明	燃料集合体を高速中性子束下で照射。 冷却材は NaK。	34	5.5	320	94	18w/o PuO ₂ -UO ₂ (60% E.U.)	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	Rapsodie	420~570	400	30,000	照射中	
6	GETR-IRT (B)	「常陽」燃料および各種燃料の運転開始出力上昇時の安定性照射	短尺燃料ピンを熱中性子束下で短時間照射。 冷却材は NaK。	2	5.5	55	91.3 84.3	20w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316	GETR (Z-9 Trail Cable)	450~500	520	300	照射, 照射後試験共に終了。	
				2	5.5	55	91.3 84.3	20w/o PuO ₂ -UO ₂	(OD: 6.3 ID: 5.6)						35
				2	5.5	55	91 90	40w/o PuO ₂ -UO ₂	〃						300
				2	振動充填	55	75 (SD) 75 (SD)	20w/o PuO ₂ -UO ₂ 40w/o PuO ₂ -UO ₂	〃						300
7	GETR-T	「常陽」燃料の過出力時の安定性証明	短尺燃料ピンを熱中性子束下で 30,000 MWD/T まで定常照射し, その後過出力で非定常照射。	12	5.5	80	91.3	20w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	GETR (H-7 Z-9)	400~500	500~700	30,000	契約交渉中	
8	DFR 332/6	「もんじゅ」燃料の定常運転時の安定性証明	中尺燃料ピンを高速中性子下で照射。 冷却材は NaK。	3	5.4	390	85	20w/o PuO ₂ -UO ₂ (90% E.U.)	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	DFR	230~620	440	60,000	契約交渉中	
9	DFR 332/7	「もんじゅ」燃料の定常運転時の安定性証明	中尺燃料ピンを高速中性子下で照射。 冷却材は NaK。	3	5.4	360	85	20w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	DFR	230~620	440	80,000	契約交渉中	
10	海外照射	「もんじゅ」燃料の定常運転時の安定性証明	中尺燃料ピンを高速中性子下で照射。 冷却材は NaK。	3	5.4	360	85	20w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.4 ID: 5.6)	DFR	230~620	440	105,000	予算要求中	

No.	照射実験名	目的	概要	試料						照射条件				備考
				本数 (ピン数)	燃料			被覆管	使用炉	被覆管温度 (°C)	最高出力 (watts/cm)	最高燃焼度 (MWD/T)		
					直径 (mm)	長さ (mm)	密度 (% T.D)						組成	
11	「常陽」照射	「常陽」が照射炉として使用可能になった時点で「もんじゅ」「将来炉」のための照射をおこなう	定常運転時のピン照射，集合体照射。											計画
12	JMTR-T1	「もんじゅ」燃料の運転開始出力上昇時の安定性証明	短尺燃料ピンを熱中性子下で短時間照射。	8	5.4	80	85	20w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.4 ID: 5.6)	JMTR	500~600	500~550	10~600	
13	JMTR-T2	「もんじゅ」燃料の過出力時の安定性証明	短尺燃料ピンを熱中性子下で50,000~80,000 MWD/Tまで定常照射し，その後過出力で非常照射。 海外高速炉で照射した燃料ピンを熱中性子下で過出力の非常照射する。	8	5.4	80	85	20w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.4 ID: 5.6)	JMTR	500~600	500~700	50,000~80,000	10. 海外照射の1本を使用予定。
				1	5.4	360	85	20w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.4 ID: 5.6)	JMTR	600~700	600~700	300	
14	JMTR-TC	照射中のギャップコンダクタンス，熱伝導率，融点等を測定して設計への反映をはかる	ギャップ雰囲気，ギャップ寸法，Pu 富化率，O/M 比，密度，製造法，固溶度，出力増加率等をパラメータにして計測照射をおこなう。	検討中	検討中	検討中	検討中	検討中	AISI 316	JMTR	検討中	検討中	検討中	
15	JMTR-PC	パワーサイクルをかけた時の燃料安定性の証明，挙動把握	熱中性子下での照射。サイクル数，出力変化率等の燃料挙動への影響を調べる。	検討中	検討中	検討中	検討中	検討中	AISI 316	JMTR	検討中	検討中	検討中	
16	JMTR-FP	照射中の燃料からのFBガス放出率，燃料スエリング率の測定を行ない設計への反映をはかる。 ペント型燃料の照射を行なう。	FPガス圧測定装置を使った照射。	検討中	検討中	検討中	検討中	検討中	AISI 316	JMTR	検討中	検討中	検討中	
17	JMTR-CM	被覆管と燃料の共存性を調べる	キャプセル照射。	検討中	検討中	検討中	検討中	検討中	AISI 316	JMTR	検討中	検討中	検討中	
18	Na 両立性	Na と燃料との両立性を調べる	キャプセル照射。	検討中	検討中	検討中	検討中	検討中	AISI 316	JMTR or GETR	検討中	検討中	検討中	

No.	照射実験名	目的	概要	試料						照射条件				備考
				本数 (ピン数)	燃料			被覆管	使用炉	被覆管温度 (°C)	最高出力 (watts/cm)	最高燃焼度 (MWD/T)		
					直径 (mm)	長さ (mm)	密度 (% T.D)						組成	
19	燃料の熱膨張 (「常陽」)	出力上昇時および過渡出力時に燃料の熱膨張によって被覆管が破損するかどうか調べる。	熱中性子下での NaK 二重キャプセルによる照射。	9	5.5	100	94	18w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	GETR (Trail Cable)	300~650	400~600	0	
20	ピン接触 (「もんじゅ」)	サーマルポーイング又は他の原因により燃料ピン同志が接触した場合被覆管に破損が起るかどうかを検討する。	燃料ピン3本をキャプセルに装荷し、最初から又は照射途中にピン接触をおこさせる。	6	5.5	300	85	20w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	GETR or JMTR	700(max)	650	75,000	
21	プレナム内圧 (「もんじゅ」)	燃料ピンが寿命の終り近くなって過出力になった場合、燃料ピンが破損するかどうかを検討する。	Na キャプセル照射。	3	5.5	300	85	20w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	GETR or JMTR	750(max)	650	75,000	
22	パワーサイクル	パワーサイクルによって燃料ピンが変形し破損に至るかどうかを検討する。	Cd フィルター付き NaK キャプセル照射。	3	5.5	300	94	18w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	GETR or JMTR	650	400↔550	5,000	
23	冷却材喪失	冷却材喪失時のピン挙動の把握。	flow stop, flow coast down 時を模擬する照射。	6	5.5	100	94	18w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	GETR (LMF)	500~700	600	5,000	
24	局所閉塞	冷却材が局所的に閉塞された時のピン挙動を把握。	冷却材流路を局所的に閉塞して照射する。	3	5.5	100	94	18w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	GETR (LMF)	500~600	400	100	
25	反応度挿入	急激な反応度挿入があった場合のピン挙動把握。	数 10m/sec. 程度の power transient が生じるような照射をおこなう。	3	5.5	100	94	18w/o PuO ₂ -UO ₂	AISI 316 (OD: 6.3 ID: 5.6)	GETR	650	500	1,000	



第1図 燃料ピン破損の原因結果

4. 照射結果概要

照射計画中すでに照射，および照射後試験を終了したものについての概要を記す。

第3表 すでに完了した照射試験

	照射試験名称	照射炉および照射施設	照射後試験施設	照射月日	照射後試験月日
1	GETR-Fermi Type	GETR core position H-7	GE-VNCのRML	1969. 9. 19 ~1970. 2. 4	1970. 3~1970. 7
2	DFR 332/2	DFR Outer Core の Pitch 20	DERE の Hot Lab.	1969. 9. 25 ~1969. 11. 26	1970. 1~1970. 7
6	GETR-IRT (B)	GETR Pool Position Z-9 (Trail Cable 使用)	GE-VNCのRML	1969. 10. 28 ~1969. 11. 5	1970. 2~1970. 3

第3表に示す照射計画に関して照射を終了し照射結果が得られた。

各照射結果を通じて国産の燃料，被覆管は健全な状態にあった。

(1) GETR-Fermi Type 照射

長尺の燃料ピン1本(1,095mm)をカドミウムで熱中性子を除去した状態で定常照射した。キャプセルは，NaK 二重キャプセルで，キャプセル内熱媒体は NaK の自然対流循環であった。

燃焼度は，最高 18,831 MWD/T，平均 16,310 MWD/T であり，出力は最高 410 w/cm，平均 300 w/cm で照射期間は 135 日であった。

全照射量は，Epithermal で， 1.53×10^{21} nvt，Fast で 6.54×10^{20} nvt であった。

(a) 寸法測定

直径，長さとも照射前後の変化なし。

(b) 中性子ラジオグラフィ

燃料ペレットの異常，被覆管の異常は見られずきわめて健全であった。

(c) ガンマー・スキャンニング

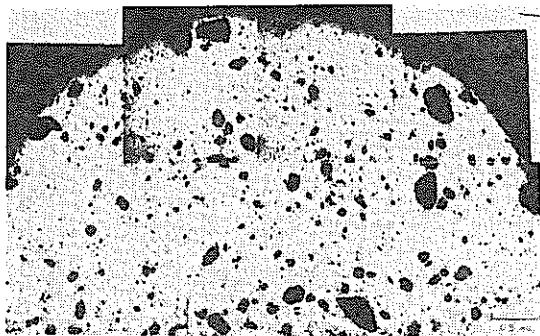
燃料ピンの下半分の方がよく燃焼していた。これは炉制御棒の影響である。

(d) 金相試験

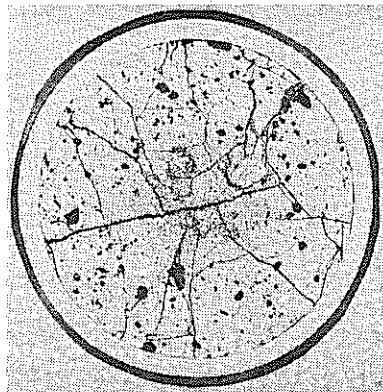
高燃焼度部分，中間，低燃焼度部分の3カ所の横断面と，高・中間部の間の縦断面1カ所の顕微鏡写真を撮った。

高出力でないため柱状晶の発達はいずれの断面にもみられなかった。

写真1に照射前，照射後の横断面顕微鏡写真を示す。



(照射前)



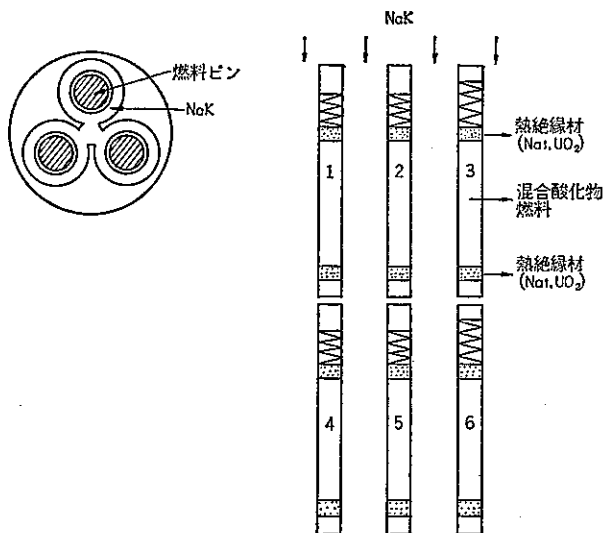
(照射後)

写真 1 GETR-Fermi Type 照射の燃料ピン横断面頭顕微鏡写真

(2) DFR 332/2 照射

短尺燃料ピン (266mm) 6本をDFR の Outer Core 部 Pitch 20で照射した。燃料ピンは照射リグにいれられ炉冷却材の NaK で冷却されるようになっている。リグ内での燃料ピン配列は三葉型に配置され上部に3本、下部に3本置かれた。

燃焼度は、最高12,000MWD/T, 平均11,000 MWD/T であり、出力は、最高510w/cm, 平均467w/cmで照射期間55日であった。全照射量は、 1×10^{22} nvt (全中性子束)であった。



第2図 DFR 332/2 照射の照射リグ内燃料配置

(a) 外観検査

被覆管表面には、クラック等の異常はみられなかった。下側の3本のピン表面は、若干暗色がみられたが、450°C以上の温度ではNaK 酸化物のフィルムが生成されるためである。

(b) X線ラジオグラフィ

上部燃料ピンの下部熱絶縁材と燃料間に、下部燃料ピンの上部熱絶縁材と燃料の間にギャップが生成されていた。

また、スプリング長が照射前より短かくなっていた。照射前のスプリング長は20mmと30mmであったが、上部ピンに関しては約1.5mm、下部ピンに対しては約2.3mm程短かくなっていた。これは、燃料長の“のび”(ペレット間ギャップの生成)によると考えられる。

(c) 寸法測定

直径の照射前後の変化は、ほとんどなく最大の変形量は0.2% (照射前6.3mm, 照射後変化量0.0127mm)であったが、これは測定精度と略同等であり、明確な寸法変化とは認めがたい。しかし、全体的傾向として、被覆管温度の高い下側燃料ピンの下部端径に向って変化量が大きくなっているようであった。

(d) ガンマー・スキャンニング

6本の燃料ピンすべてについて

Ba/La-140 (1.6 MeV, $T_{1/2}=12.8$ 日), Zr/Nb-95 (0.75 MeV, $T_{1/2}=65$ 日), Ru-103 (0.52 MeV, $T_{1/2}=40$ 日) について軸方向ガンマー・スキャンニングを実施した。

燃料ピン出力、中性子束パターンに比例した図形が得られている。

(e) FP ガス放出率

照射後のパンクチャ・テストの結果によると上側ピンに関しては19.7~23.2%、下側ピンに関しては26.5~29.0%という値が得られた。下側ピンが高いのは全体の温度分布が若干高いためと考えられる。(なおラプソディ照射情報では同様の出力で約55%の値が示されている。)

(f) マイクロ・ドリリング

下側ピンのNo.4の燃料下部、No.5の燃料上部の二断面についてマイクロ・ドリリングをおこない、1断面より半径方向に7カ所ずつ試料を採取した。7カ所のうち1カ所は被覆管である。

試料は、質量分析法によりPu, Uの同位体比測定、放射能分析によりMn-54, Ru-103, Ru-106, Cs-137, Ce-144, Zr-95, Nb-95, Ce-141, Co-58の計数をおこなった。

Cs-137は、ペレット周辺部の低温領域に移動しているのが認められた。

(g) 燃焼度分析

各ピンから一試料をとり出しCs-137, Ce-144, Nd-143, 145, 146, 148について燃焼度分析をおこなった。

データのばらつきは、Cs-137が一番大きく、Ce-144はかなり安定している。Ndは非常

第4表 燃焼度分析結果

ピン No.	a/o Burnup		
	Cs-137	Ce-144	Nd-148
1	1.3	1.4	1.3
2	1.1	1.4	1.3
3	1.4	1.4	1.3
4	0.8	1.3	1.3
5	1.7	1.2	1.2
6	1.3	1.6	1.3

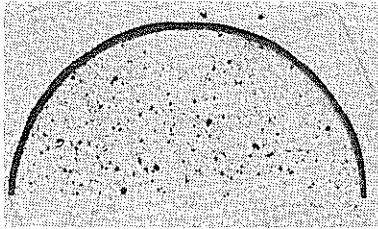
に安定したデータを提供している。

(h) 金相試験

各ピンについて2横断面、1縦断面の顕微鏡写真を撮った。それらの写真結果から共通して言えることは

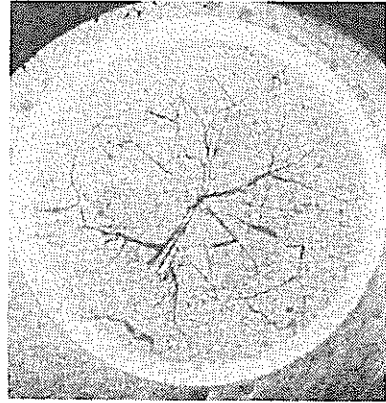
- ◎ 0.2~0.4mm 径程度の中心孔が形成され、そのまわりには2.2~3.3mm 径程度の柱状晶が発達している。柱状晶の外周は、50 μ m 程度の等軸晶、8 μ m 程度の等軸晶となっている。
 - ◎ 柱状晶領域の空孔は、半径方向に結晶粒界に沿っているのが多く、レンズ状空孔はみられない。
 - ◎ 高出力部の燃料端部では天然 UO_2 の熱絶縁ペレットと燃料端部との間にギャップができ、天然 UO_2 ペレット端面は燃料の熱により再焼結している。
 - ◎ 燃料の結晶粒界には輝いた金属状の析出物がみられることがある。また、プルトニウムの少なくなった第2相がみられることもある。
 - ◎ 天然 UO_2 ペレットと燃料ペレットではクラックの状況が異なる。
 - ◎ 被覆管内面に燃料との反応層(10 μ m~80 μ m)と思われるものがみられる。
- 写真2に代表的な顕微鏡写真を示す。

a. 照射前



as-polished

b. 照射後



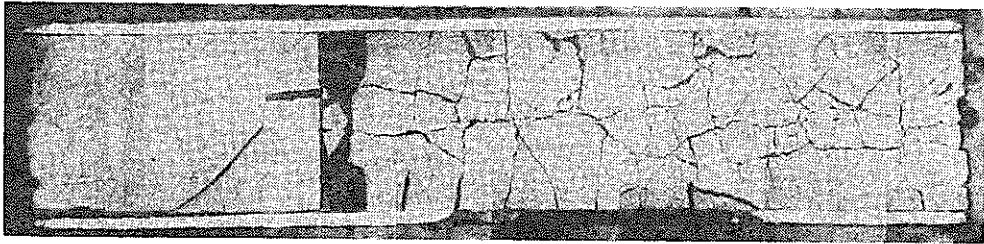
as-polished

Pin No. 5 (断面 554)

燃焼度 12,000 MWD/T

出力 510 w/cm

c.



熱絶縁材
(Nat. UO₂)

燃料
ap-polished

Pin No. 6 (断面 557)

d.



as-etched

Pin No. 2 (断面 544)

被覆管内面の反応層

写真 2 DFR 332/2 照射の代表的な顕微鏡写真

(3) GETR-IRT (B)

短尺燃料ピン (123mm) 2本を連結して1組にした連結ロッドを4組照射した。

照射は、GETR の Pool Position Z-9 で Radially Adjustable Trail Cable Facility(RATC) を使っておこなった。

初期出力上昇時の安定性を調べるため出力0の状態から定常出力までの時間が問題となるが30~45分程かかっている。定常出力到達後は、3時間、24時間定常出力 (520 w/cm) に保持した。

試料と照射条件の概要を第5表に示す。

第5表 GETR-IRT (B) 照射の試料および照射条件

連結燃料 ロッド No.	燃料 No.	試料							照射条件			
		燃料形態	PuO ₂ (wt%)	U-235 (%)	燃料長 (mm)	燃料径 (mm)	密度 (% T.D)	O/M 比	平均出力 (w/cm)	ピーク出力 (w/cm)	照射時間 (hrs.)	燃焼度 (MWD/T)
1	A	ペレット	20	90	55	5.5	91.3	1.987	520	535	24	297
	B	ペレット	20	90	55	5.5	84.3	1.986	520	542	24	327
2	C	ペレット	20	90	55	5.5	91.3	1.987	520	535	3	37
	D	ペレット	20	90	55	5.5	84.3	1.986	520	542	3	41
3	E	ペレット	40	20	55	5.5	91.0	1.982	520	535	24	294
	F	穴あきペレット	40	20	55	5.5 1.5	89.9	1.984	520	542	24	319
4	G	振動充填	20	天然	55	5.6	75 (SD)	1.991	520	541	24	284
	H	振動充填	40	天然	55	5.6	75 (SD)	1.989	520	560	24	298

(a) ガンマー・スキャンニング

ピン連結部がピークになるようなゆるやかな勾配の燃焼度パターンが得られている。この結果からも最高出力部と最低出力部との間には出力差は余りないことがわかった。

(b) 中性子ラジオグラフィ

ピンB、ピンF (穴あきペレット)、ピンG、ピンH に中心孔が形成されているのがわかった。振動充填燃料のピンG、ピンHは全体の温度が他のピンよりかなりあがり、組織変化の著しいことがわかった。

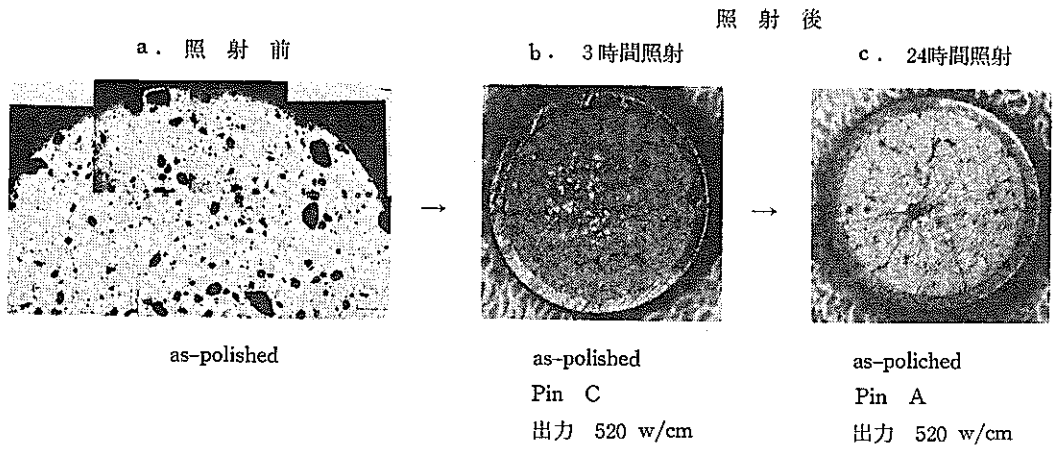
(c) 金相試験

各ピンから一横断面の顕微鏡写真を撮った。

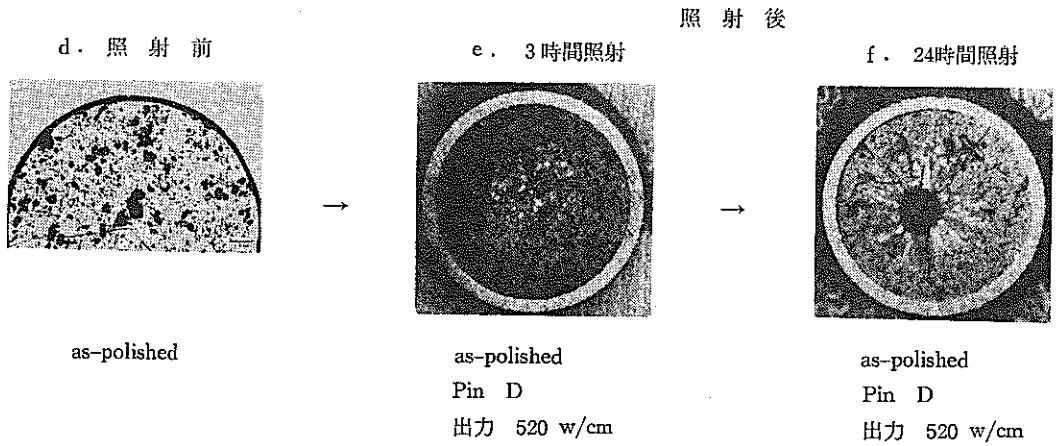
◎ 中心孔はピンA、B、E、F、G、Hに形成されていた。しかし、中心孔の位置は断面の幾何学的中心より少しずれて、炉心側になっていた。これは、熱中性子束勾配の結果、発熱分布がずれたためと思われる。

◎ レンズ状空孔は、ピンA、B、Fにみられ、中心孔の生成されていたピンE、G、Hにはみられなかった。

ピン A, C (同一燃料)



ピン B, D (同一燃料)



振動充填燃料

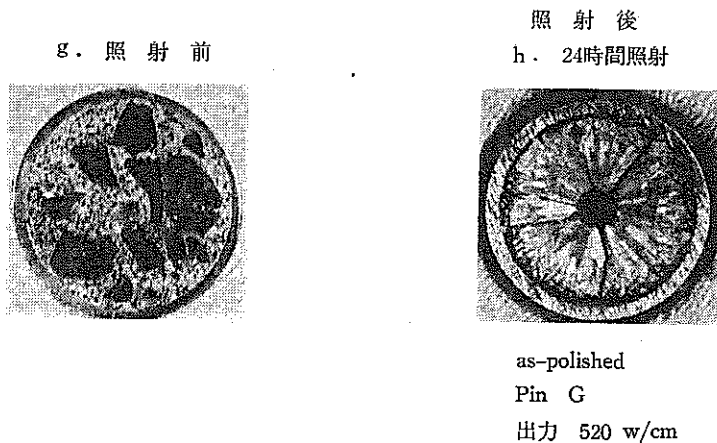


写真 3 GETR-IRT (B) 照射の代表的顕微鏡写真

- ◎ 輝いた金属状の折出物がみられたのはピンA, B, E, Hであった。
- ◎ 灰色の第二相がみられたのはピンB, D, E, Fであった。
- ◎ 燃料溶融はいずれのピンにもみられなかった。
- ◎ ピンF (穴あきペレット) の中心孔のうち高温側の組織は温度勾配が高くまた燃料蒸発のためくずれており、低温側には燃料が蒸着した相がみられた。
- ◎ 振動充填燃料のピンG, Hは、組織変化が激しく元の充填粒は燃料周辺部にわずかみられるだけで断面の大部分は柱状晶でしめられていた。

代表的な顕微鏡写真を写真3に示す。

高速中性子による高燃焼度照射例

1) 30,000 MWD/T

写真4は、ラプソディ炉燃料 (ペレット密度 95.8% TD, スミア密度 89.5% TD, 出力 435 w/cm) の照射後の断面組織で小さい中心空洞のまわりに柱状結晶粒が同心円状に発達し更にそれを囲んで等軸結晶粒の成長した領域が存在する。被覆管と燃料の間のギャップは、照射前の 0.1mm から 0.05 以下に減少している (なお上記照射結果は動燃がCEAより購入したラプソディ照射情報の一部である)。

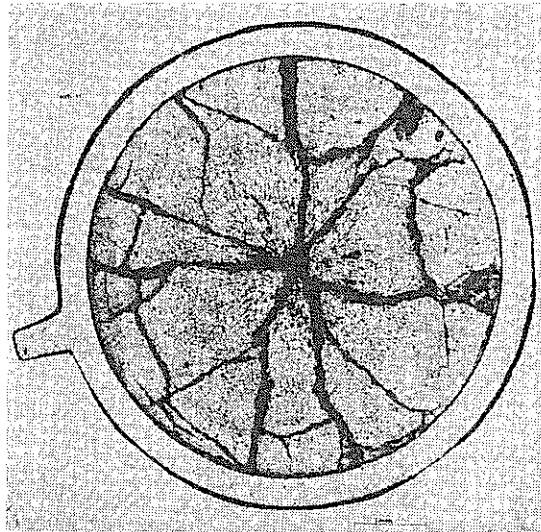


写真4 ラプソディ炉燃料の 30,000 MWD/T 燃焼度の例

(ペレット密度 : 95.8% TD)
 (スミア密度 : 89.5% TD)
 出力 : 435 w/cm

2) 60,000 MWD/T

写真5は、EBR II で照射した GE 燃料 (PuO_2 20% - UO_2 焼結ペレット, 密度 96.7% TD) の断面組織である。中心空洞を囲んで柱状結晶粒が発達している。クラックは径方向の他に、円周方向にはっきり存在する。被覆管と燃料の間のギャップはほとんど消滅している。

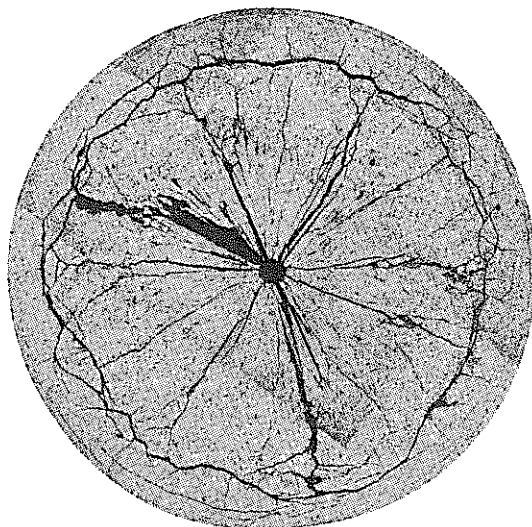


写真5 GE 燃料の 60,000 MWD/T 燃焼度の写真例
(スミア密度 : 96.7% T.D, 出力 : 567 w/cm)

5. 照射後試験施設について

わが国における高速増殖炉の開発プロジェクトの一環としての高速実験炉「常陽」は、昭和48年度末に臨界が予定されており、つづいて、昭和52年度末には高速原型炉「もんじゅ」の臨界が予定されている。

「常陽」の建設の主目的は

- (1) 高速増殖炉の建設および運転の経験の取得。
- (2) 高速炉用燃料および材料の開発のための照射施設の提供。

であり、特に第2の観点から照射施設としての「常陽」炉本体と燃料および材料の照射後試験施設とは不可分の関係がある。

海外の高速実験炉および照射試験炉においても、各々その目的に応じて照射後試験施設が設けられ、貴重なデータが収集されている。現在、実験炉は建設に着手し、原型炉は設計が進行中であるが、燃料および材料の照射挙動に関する十分なデータがないため、設計上の不確かさを増大させる原因となっている。その結果保守的な設計を採用せざるを得ないことになり、将来炉の経済性に大きな影響を与えることになる。

燃料および材料の照射挙動を把握するには、統計的なデータの処理が要求され、でき得る限り多量のデータを取る必要がある。

動燃では、これらの必要性にもとずき、現在大洗工学センターに3つの照射後試験施設を設けることにしている。

第1は

「常陽」から取出された燃料集合体等の照射後試験を行ない、集合体をピンに解体してピンの非破壊試験を主にする「燃料集合体検査施設 (FMF)」であり、

第2は

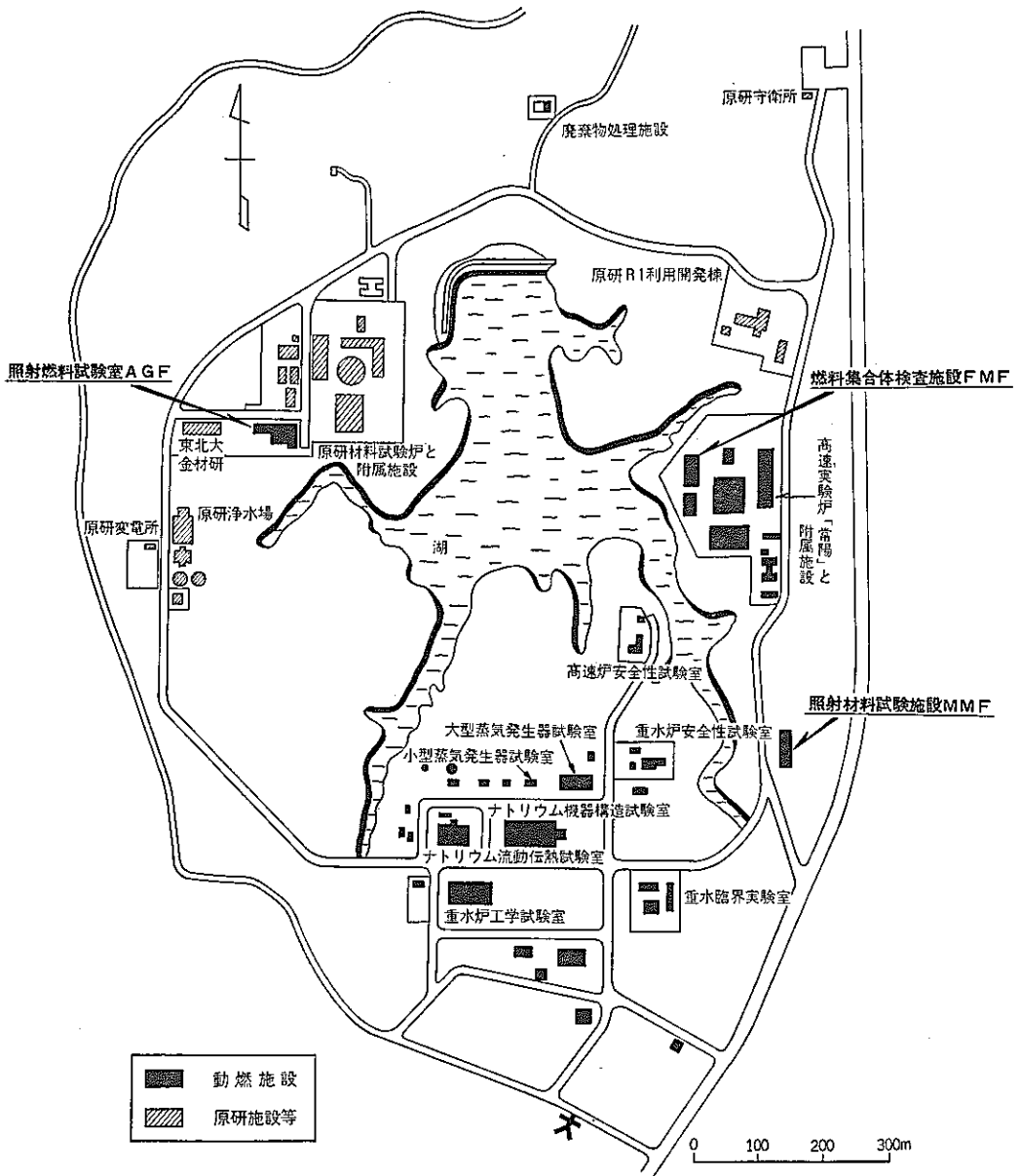
燃料ピンの非破壊、破壊照射後試験を行なう「照射燃料試験室 (AGF)」であり、

第3は

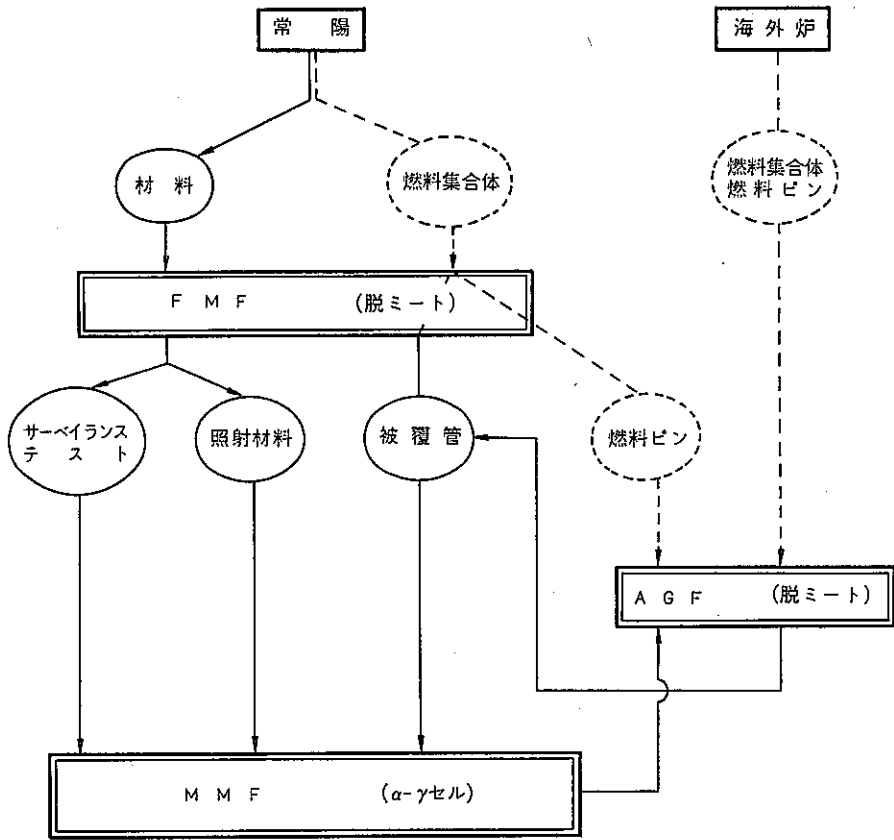
ピンを除いた集合体部材、被覆材、サーベイランス・テスト試料等のステンレス鋼、および制御棒材、遮蔽材等の照射後試験を行なう「照射材料試験室 (MMF)」である。

第3図に大洗工学センター内での3施設の配置図、第4図に3施設の機能的な関連図を示す。第5図から第7図に施設の1階平面図を示す。なお写真6にAGFの外観を示す。

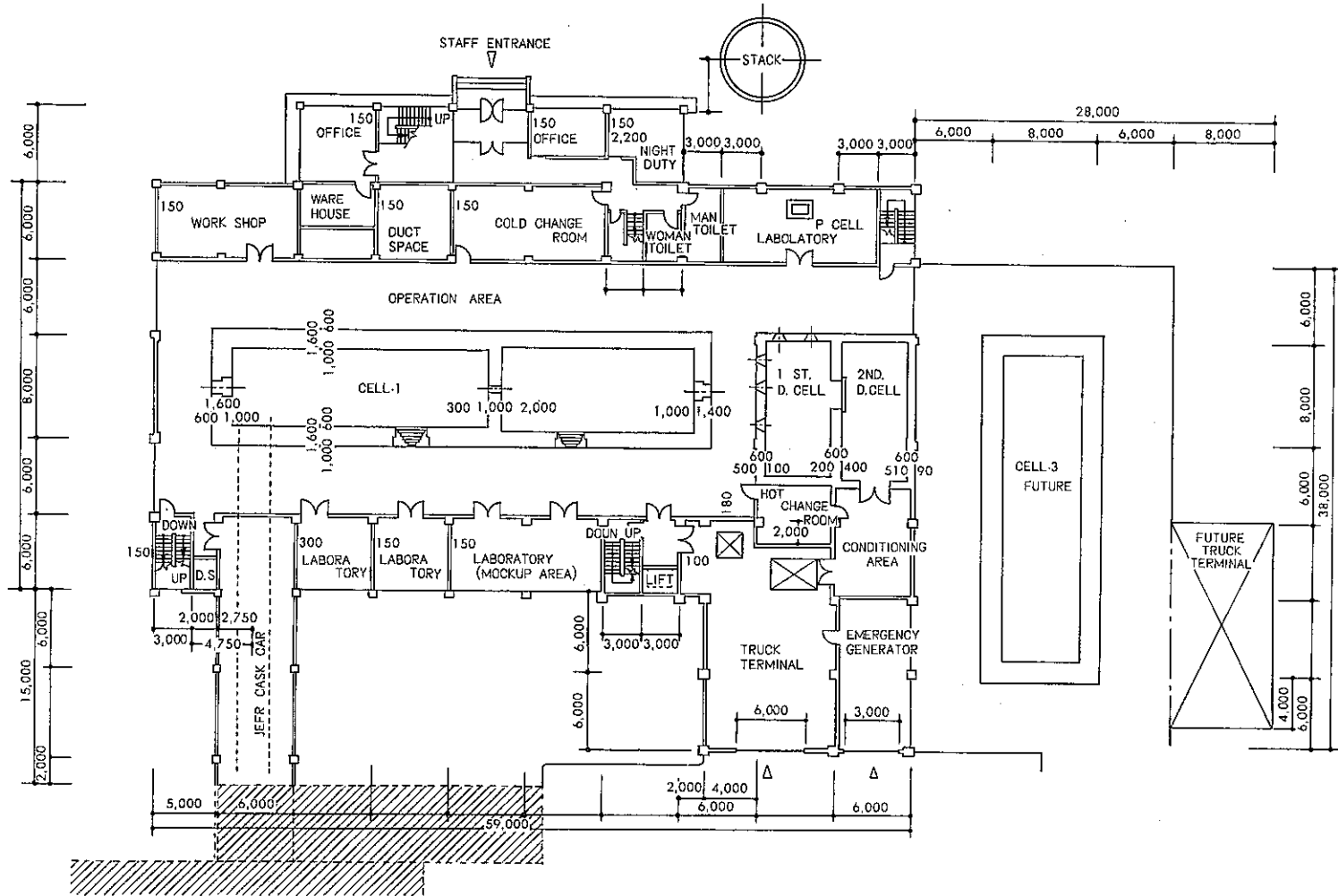
上記施設の建設運転スケジュールを第6表に示す。



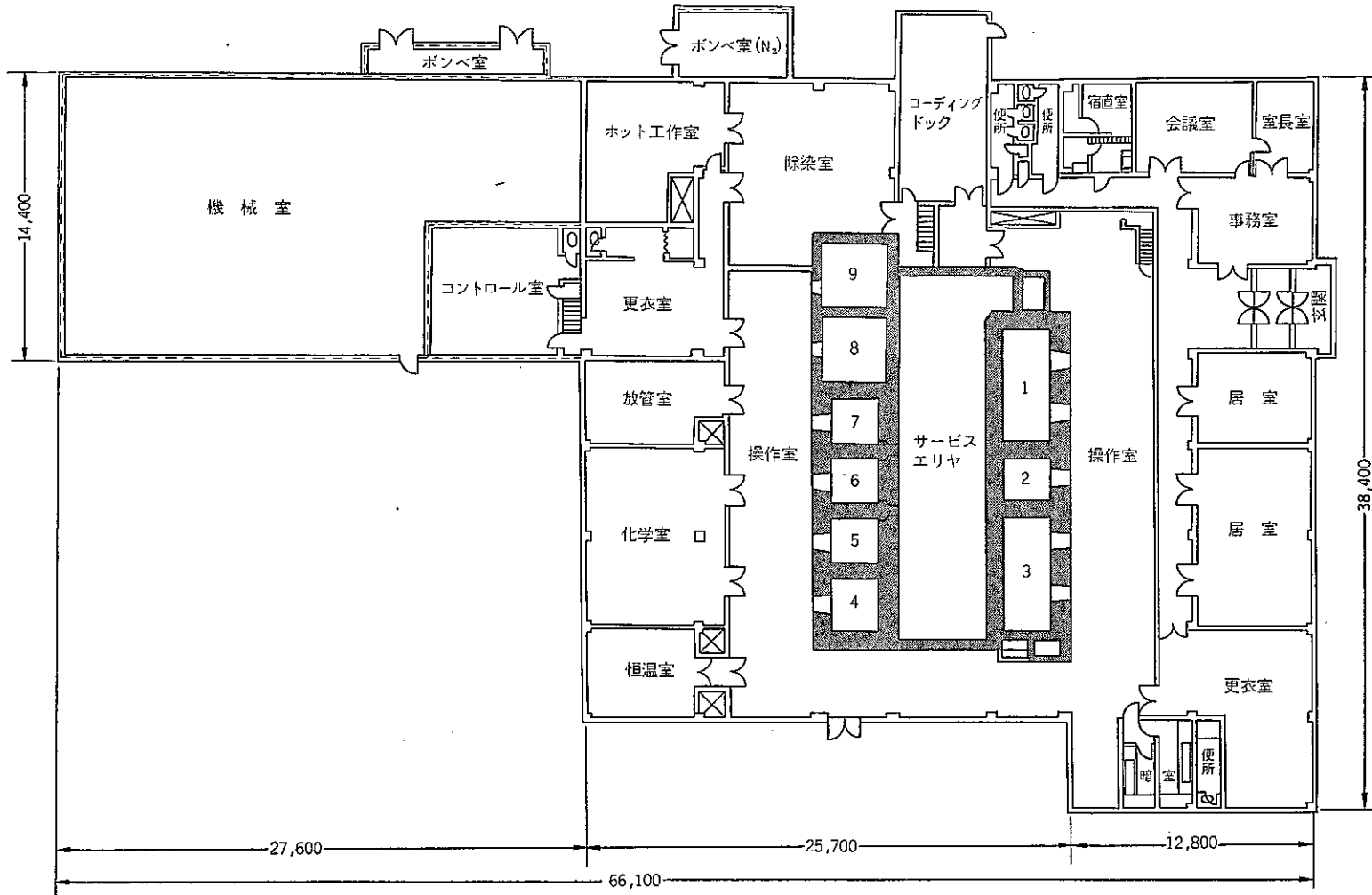
第3図 PNC照射後試験関連施設の大洗工学センター内配置



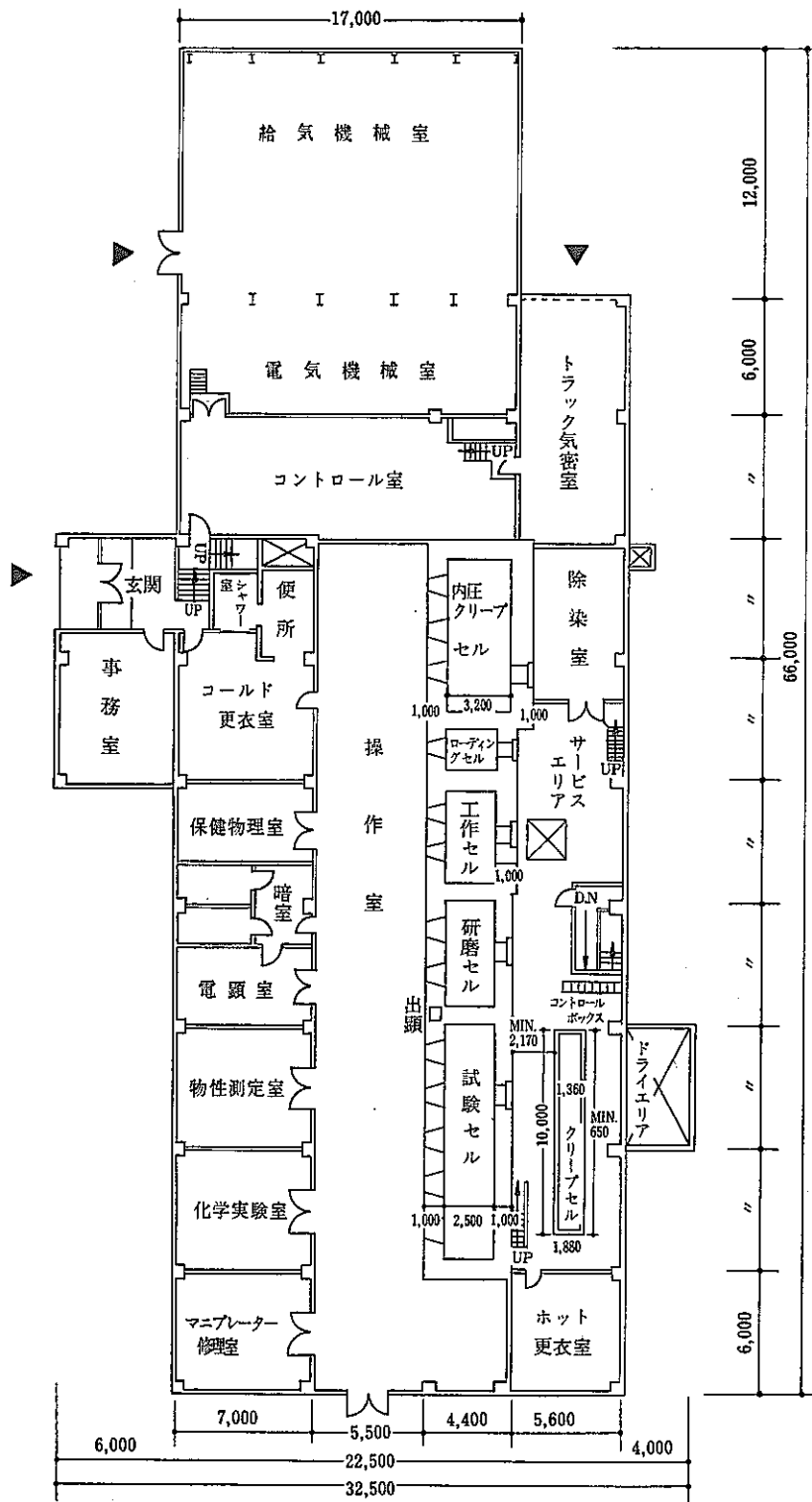
第4図 PNC 照射後試験施設関連図



第 5 圖 燃料集集体検査施設 1 階平面圖



第6図 照射燃料試験室 1階平面図



第7図 照射材料試験施設 1階平面図

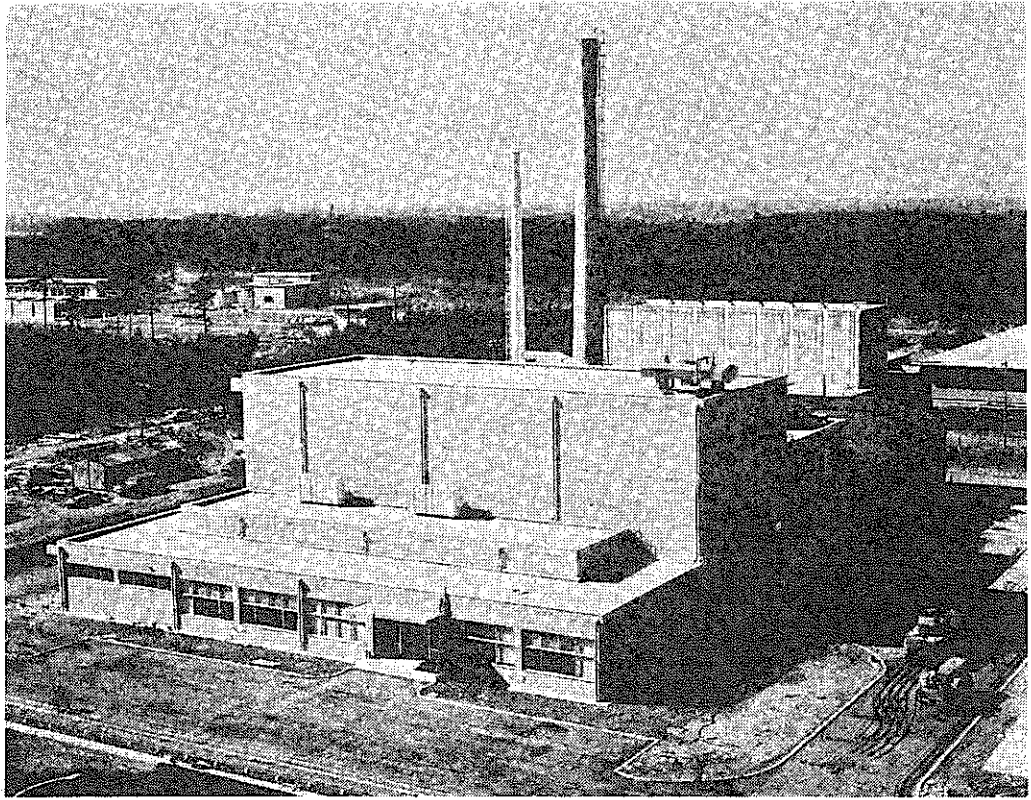


写真 6 照射燃料試験室建家外観

第 6 表 照射後試験関連施設の建設・運転スケジュール

項 目	43年度		44年度		45年度		46年度		47年度		48年度		49年度		50年度		
	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	
常 陽								建設					機能試験	臨界低出力・出力 上昇運転		50 MW 運転	
燃料集合体検査施設 (FMF)									建設				内装機器据付 掘付	機能 試験	試運転	運転	
照射燃料試験室 (AGF)			建設			内装機器据付 機能試験				試運転							
照射材料試験室 (MMF)											内装機器据付 建設					機能試験 試運転	運転

大洗工学センターナトリウム試験施設の運転

大洗工学センター
ナトリウム技術部長 稲垣 日出男

1. ま え が き

大洗工学センターには、現在 Na ループが4つ完成し、そのうち1つはすでに約1年間の運転経験をもち、他の3ループも完成後約半年間を経過している。このほか、建設中あるいは計画中の Na ループが約10基ある。

本日は、これらのループのうち、これまでに運転を行なった4ループについて、その特徴と運転経過を報告する。

2. Na 流動伝熱試験ループ (第1図参照)

(1) ループの説明

大洗工学センターで、最初に稼動した試験施設で、現存する日本最大の Na ループである。

このループは2つの目的を持っている。第1の目的は、「常陽」(将来は「もんじゅ」)の燃料体の Na 中での伝熱流動試験を行なうこと、第2の目的は、「常陽」の大型 Na ループの建設に先立ち、直径で $\frac{1}{2}$ のループを作り、製作と運転の経験を心得ておくことである。

ループは、日立製作所に製作を依頼し、44年3月据付着工、44年8月に完成した。総量17tの Na は、99本のドラム缶に詰めて現地に輸送し、3本ずつ溶解充填した。Na 充填後、44年11月から45年1月までの間調整試運転を行ない(ここまでの作業は日立製作所)、45年2月から動燃事業団の手に移り、ループの機能試験および構成機器の特性試験を行ないながら現在に至っている。

燃料体の試験部は、関連部分とともに、今年の暮から来年の春にかけて工事を行ない、ループに追加する予定で、現在のループには取付けられていない。

Na 量 17t (改造後 22t)、Na 温度 450°C (改造後 600°C)、配管径 8 インチの Na ループである。

(2) ループの運転

a. 運転の概況

運転は順調に推移している。Na 純度は、ドラム缶による Na 充填を行なったにもかかわらず、十分高純度(原子炉級)に維持できる。各機器の作動状況も、2、3の例を除き期待どおりの結果を得ている。

b. 主循環ポンプ