

高速炉燃料の照射実績と諸データの概要

—「常陽」炉心燃料集合体の高燃焼度化に向けて—

1985年12月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

計画管理部技術情報室

Enquires about copyright and reproduction should be adressed to:

Technical Information Service

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo, Japan

©動力炉・核燃料開発事業団 1985

高速炉燃料の照射実績と諸データの概要

—「常陽」炉心燃料集合体の高燃焼度化に向けて—

柴原 格* 宮川俊一** 有井祥夫***

要 旨

高速実験炉「常陽」では、照射試験の効率化等を目的として、炉心燃料集合体の最高燃焼度を50,000MWd/tから75,000MWd/tに上昇させる計画が進行中である。動燃事業団では、従来の設計以降、「常陽」MK-I炉心並びにMK-II炉心での照射実績とともに、高燃焼度に及ぶ燃料の照射データを蓄積してきているが、本報では「常陽」燃料の高燃焼度化に向けて、関連する照射実績データ、燃料ペレットの融点、燃料ピンの外径増加、核分裂生成ガス放出率、被覆管の内圧クリープ破断強度データ等について概要を示した。

* 燃料材料開発部 技術解析室

** 実験炉部 技術課

*** 実験炉部 照射課

目 次

1. 概 要	1
2. 照射実績	2
3. 燃料ペレットの融点	11
4. 被覆管の外径増加	14
5. 被覆管の内圧クリープ破断強度	16
6. 燃料ペレットのFPガス放出率	18
7. 過渡時の被覆管最高温度	20
8. 炉心燃料集合体のNa中耐久試験	23

1. 概 要

高速実験炉では、照射試験の効率化等の観点から、炉心燃料集合体の最高燃焼度（燃料要素平均）を50,000MWd/tから75,000MWd/tに上昇させる計画が進行中である。

動燃事業団では、従来設計以降「常陽」増殖炉心（MK-I）並びに照射炉心（MK-II）における全炉心規模での照射実績とともに、高燃焼度に及ぶ燃料の照射データを着実に蓄積しているが、本報では「常陽」炉心燃料集合体の高燃焼度変化に向けて、関連する諸データの概要を示すものである。

2. 照射実績

当事業団が製造した高速増殖炉用燃料要素については、英国のDFR、仏国のラブソディー等の海外炉及び高速実験炉「常陽」を使用しての多くの照射実績を有している。第1表に照射実績を、第2表に照射条件等の概要を示す。また、第1図には最高燃焼度と最大線出力密度について照射実績を整理して示した。

以下各照射実績のうち、昭和53年以降の概略を示す。

2.1 Phenix PNC-3

(1) 照射条件

- (a) 燃料要素本数 : 19本
- (b) 照射施設 : Phenix Pos.22-22
- (c) 照射雰囲気 : Flowing Na, 高速中性子
- (d) 照射日数 : 566日
- (e) 中性子束 : (最高) $5.74 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}(\text{Total})$
(最高) $3.85 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}(E \geq 0.1 \text{ MeV})$
- (f) フルエンス : (最高) $1.9 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2 (E \geq 0.1 \text{ MeV})$
- (g) ペレット燃焼度 : (最高) 107,300 MWd/t
- (h) 線出力密度 : (最高) 448 W/cm
- (i) 燃料要素表面温度 : $\sim 650^\circ\text{C}$
- (j) 燃料ペレット温度 : $\sim 2,550^\circ\text{C}$

(2) 照射後試験

現在照射後試験中であるが、破損なく照射されたことが確認されている。燃料要素の最大外径増加率は約4%であった。

2.2 Rapsodie PNC-10

(1) 照射条件

- (a) 燃料要素本数 : 37本
- (b) 照射施設 : Rapsodie(Fortissimo炉心) Pos. 03-10
- (c) 照射雰囲気 : Flowing Na, 高速中性子
- (d) 照射日数 : 191日
- (e) 中性子束 : (最高) $2.8 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}(\text{Total})$
- (f) フルエンス : (最高) $2.2 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2 (E \geq 0.1 \text{ MeV})$
- (g) ペレット燃焼度 : (最高) 35,310 MWd/t

- (h) 線出力密度 : (最高) 260W/cm
- (i) 燃料要素表面温度 : ~650℃
- (j) 燃料ペレット温度 : ~1,650℃

(2) 照射後試験結果

現在照射後試験中であるが、破損なく照射されたことが確認されている。

2.3 高速実験炉 P P J X 1 3 (炉心燃料集合体)

当炉心燃料集合体は、高速実験炉増殖炉心で最も燃焼度が高い燃料集合体である。増殖炉心の燃料要素の照射実績ヒストグラムを第2図に示す。増殖炉心では合計30体の炉心燃料集合体が照射後試験に供された。

(1) 照射条件

- (a) 燃料要素本数 : 91本
- (b) 照射施設 : 高速実験炉増殖炉心(000)
- (c) 照射雰囲気 : Flowing Na, 高速中性子
- (d) 照射日数 : 545日
- (e) 中性子束 : (最高) $3.2 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ (Total)
- (f) フルエンス : (最高) $6.4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 0.1 \text{ MeV}$)
- (g) ペレット燃焼度 : (最高) 48,000MWd/t
- (h) 線出力密度 : (最高) 280W/cm
- (i) 燃料要素表面温度 : ~540℃
- (j) 燃料ペレット温度 : ~1,700℃

(2) 照射後試験結果

(a) 外 観

燃料要素は炉心燃料部が黒色に変色していた。燃料要素に曲りが生じていたが、破損は生じていなかった。

(b) 寸 法

燃料要素全長は0.5~2.8mm増加し、日本製の被覆管を用いた国産燃料要素の外径増加はほとんどなかったが、米国製の被覆管を用いた燃料要素については最大0.6%の外径増加が認められた。

(c) ガンマ・スキャン

軸方向プロファイルに異常は認められなかった。

(d) F P ガス放出

F P ガス放出率は44~52%であった。

(e) 金相試験

各試料とも燃料ペレットに溶融の跡は認められなかった。燃料ペレットの中央部に中心孔が生じ始めていた。

2.4 高速実験炉PFD003(炉心燃料集合体)

(1) 照射条件

- (a) 燃料要素本数 : 127本
- (b) 照射施設 : 高速実験炉照射用炉心(1B1)
- (c) 照射雰囲気 : Flowing Na, 高速中性子
- (d) 照射日数 : 117日
- (e) 中性子束 : (最高) $3.7 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}(\text{Total})$
- (f) フルエンス : (最高) $2.2 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2 (E \geq 0.1 \text{ MeV})$
- (g) ペレット燃焼度 : (最高) 16,300MWd/t
- (h) 線出力密度 : (最高) 370W/cm
- (i) 燃料要素表面温度 : $\sim 600^\circ\text{C}$
- (j) 燃料ペレット温度 : $\sim 2,150^\circ\text{C}$

(2) 照射後試験結果

現在照射後試験中であるが、破損なく照射されたことが確認されている。燃料ペレットに中心空孔(直径割合約10%)が観察された。燃料ペレットの溶融は各試料とも認められなかった。燃料要素の外径増加率は検出限界(0.18%)以下であった。

2.5 高速実験炉PFD001(炉心燃料集合体)

(1) 照射条件

- (a) 燃料要素本数 : 127本
- (b) 照射施設 : 高速実験炉照射用炉心(000)
- (c) 照射雰囲気 : Flowing Na, 高速中性子
- (d) 照射日数 : 203日
- (e) 中性子束 : (最高) $3.8 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}(\text{Total})$
- (f) フルエンス : (最高) $5.0 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2 (E \geq 0.1 \text{ MeV})$
- (g) ペレット燃焼度 : (最高) 38,400MWd/t
- (h) 線出力密度 : (最高) 380W/cm
- (i) 燃料要素表面温度 : $\sim 610^\circ\text{C}$
- (j) 燃料ペレット温度 : $\sim 2,190^\circ\text{C}$

(2) 照射後試験結果

現在照射後試験中であるが、健全に照射されたことが確認されている。燃料要素の外径増加率は検出限界(0.18%)以下であった。

2.6 高速実験炉PF018(炉心燃料集合体)

当炉心燃料集合体は、照射用炉心の第7サイクル終了時において最も燃焼度が高い燃料集合体である。これまでの照射用炉心の炉心燃料集合体の燃料要素の照射実績ヒストグラムを第3図に示す。

(1) 照射条件

- (a) 燃料要素本数 : 127本
- (b) 照射施設 : 高速実験炉照射用炉心(2F1)
- (c) 照射雰囲気 : Flowing Na, 高速中性子
- (d) 照射日数 : 248日
- (e) 中性子束 : (最高) $3.6 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ (Total)
- (f) フルエンス : (最高) $7.5 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 0.1 \text{ MeV}$)
- (g) ペレット燃焼度 : (最高) 48,000MWd/t
- (h) 線出力密度 : (最高) 330W/cm
- (i) 燃料要素表面温度 : $\sim 590^\circ\text{C}$
- (j) 燃料ペレット温度 : $\sim 1,990^\circ\text{C}$

(2) 照射後試験

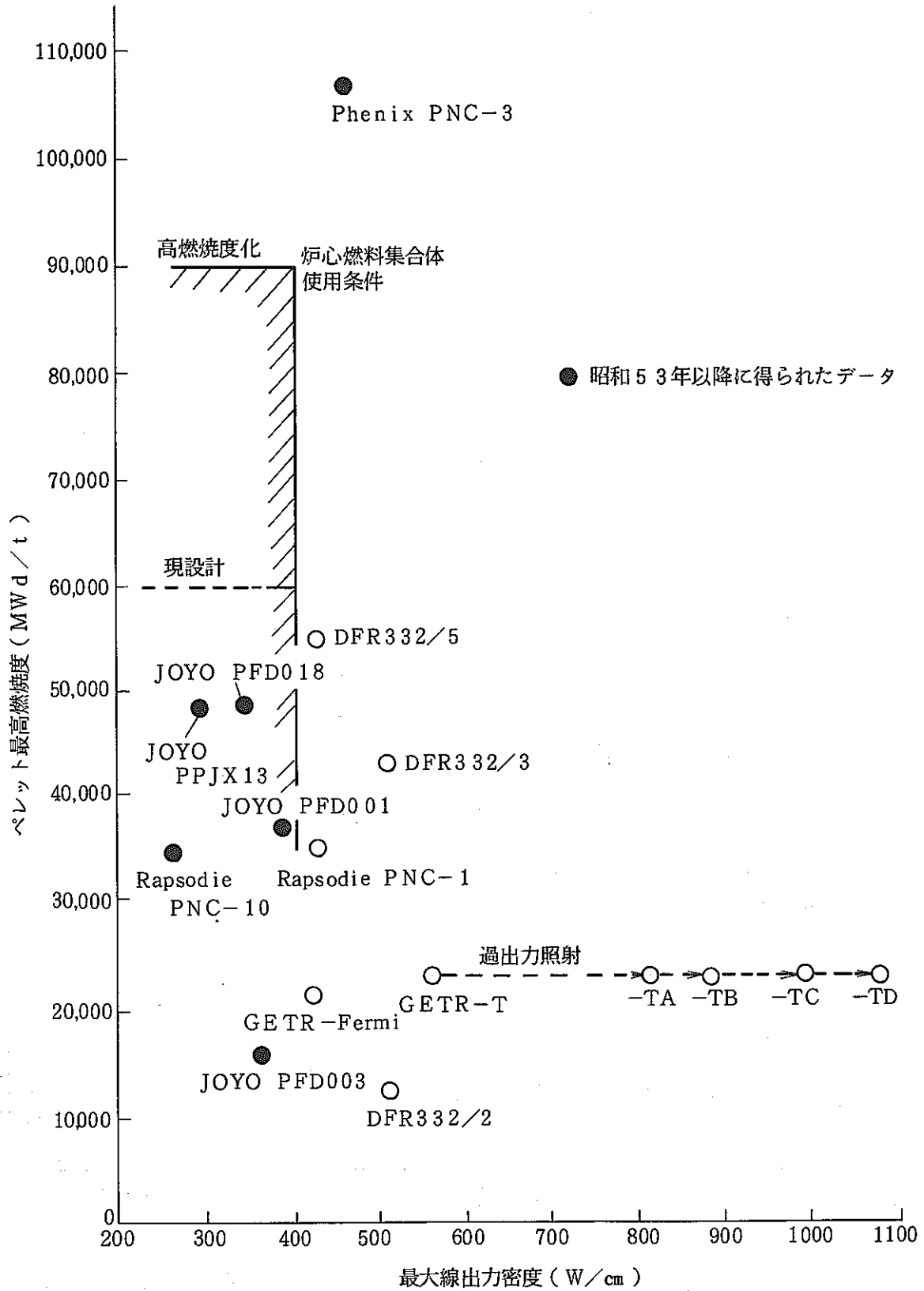
現在照射後試験中であるが、健全に照射されたことが確認されている。燃料要素の外径増加率は検出限界(0.18%)以下であった。

表1表 高速実験炉の燃料要素に係わる照射実績

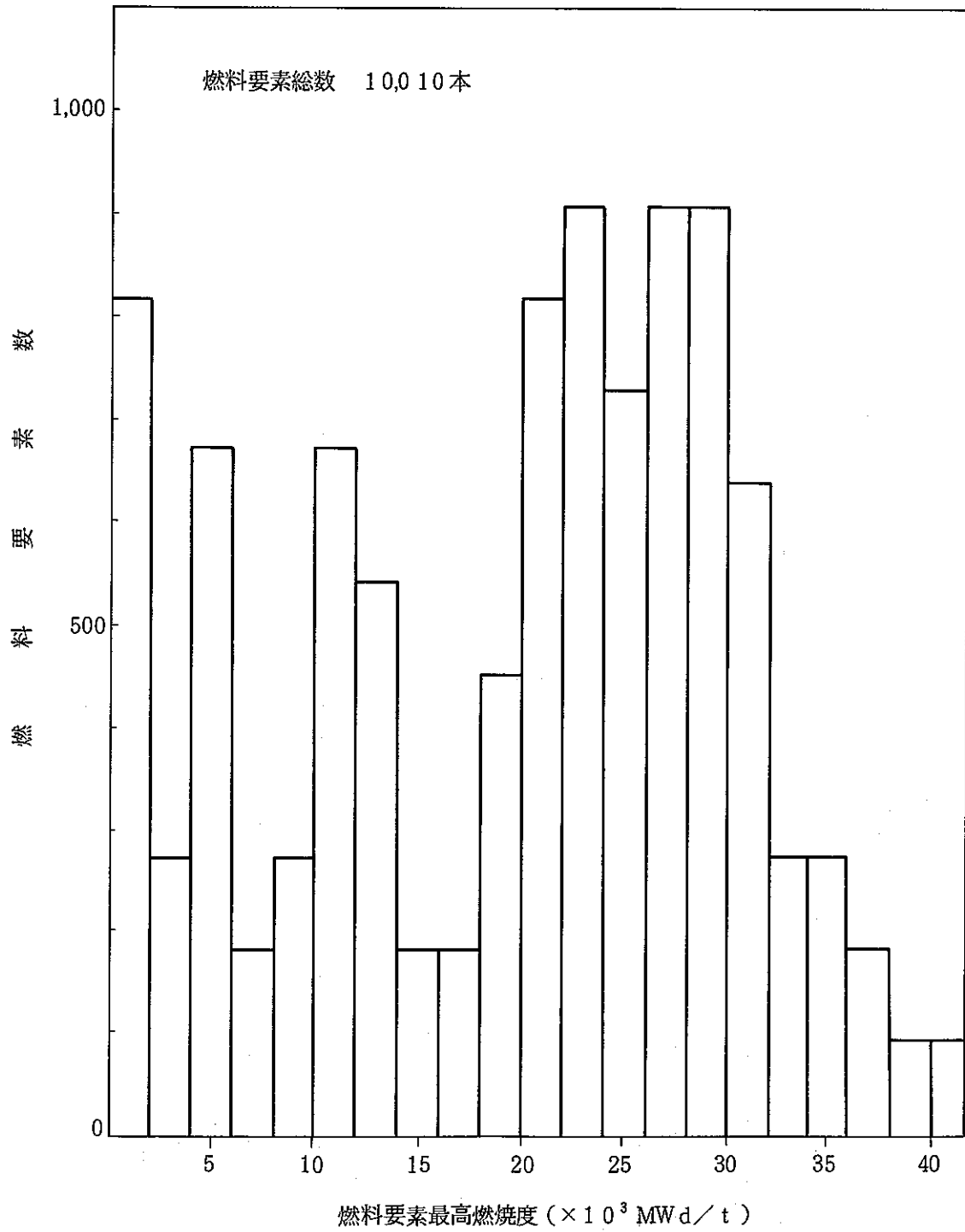
昭和年度	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
高速実験炉工程					建設						増殖炉心(MK-I)					照射炉心(MK-II)	
														炉心改造			
GETR-Fermi Type		照射	照射後試験	照射後試験	照射後試験												
GETR-IRT(B)		照射	照射後試験	照射後試験	照射後試験												
GETR-T					照射	照射後試験											
DFR332/2		照射	照射後試験														
DFR332/3				照射	照射後試験												
DFR332/5				照射	照射後試験	照射	照射後試験	照射後試験									
Rapsodie PNC-1			照射	照射後試験	照射後試験												
Rapsodie PNC-10														照射	照射後試験	照射後試験	照射後試験
Phenix PNC-3													照射	照射	照射	照射	照射後試験
高速実験炉PPJX13										照射	照射	照射	照射	照射	照射	照射	照射後試験
高速実験炉PFD003																照射	照射後試験
高速実験炉PFD001																照射	照射後試験
高速実験炉PFD018																照射	照射後試験
凡例:	 照射 照射後試験																

第2表 高速実験炉仕様の燃料要素の照射概要

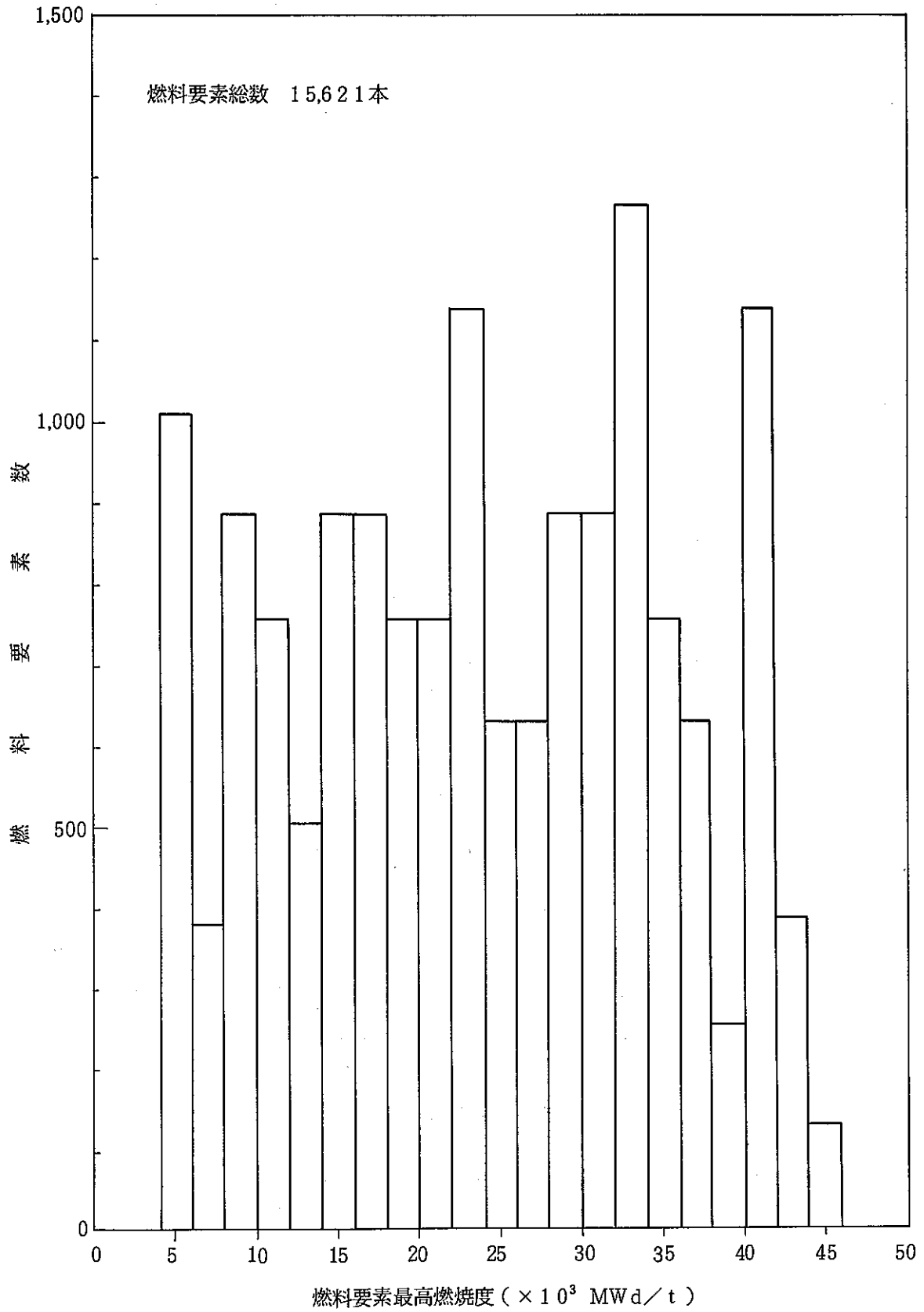
	目的	概要	試料				照射条件					
			本数 (燃料要素数)	燃料ペレット			被覆管	使用炉	燃料要素表面温度 (℃)	最大線出力 密度 (W/cm)	ペレット 最高燃焼度 (MWd/t)	
				直径 (mm)	有効長 (mm)	密度 (%理論密度)						組成
GETR-Fermi Type	定格出力運転時の安定性	Cdによる熱中性子カットオフ, NaK2重キャプセル	1	5.5	773	91.3	20wt% PuO ₂ -UO ₂ (90%EU)	SUS316	GETR (H-7)	~370	417	21,452
DFR-332/2	定格出力運転時の安定性	NaK冷却	6	5.5	193	95.8	18wt% PuO ₂ -UO ₂ (90%EU)	SUS316	DFR (Pitch20)	230~618	510	12,455
DFR-332/3	定格出力運転時の安定性	NaK冷却	3	5.5	370	94	18wt% PuO ₂ -UO ₂ (90%EU)	SUS316	DFR (Pitch20)	230~617	506	43,474
DFR-332/5	定格出力運転時の安定性	NaK冷却	3	5.5	380	94	18wt% PuO ₂ -UO ₂ (60%EU)	SUS316	DFR (Pitch6)	230~622	425	55,049
Rapsodie PNC-1	定格出力運転時の安定性	燃料集合体に組んで照射 Na冷却	34	5.5	320	94	18wt% PuO ₂ -UO ₂ (60%EU)	SUS316	RAPSODIE (04, 03)	400~565	426	35,130
GETR-IRT(B)	運転開始出力上昇時の安定性	熱中性子炉で短時間照射 NaK冷却	2	5.5	55	91.3/84.3	20wt% PuO ₂ -UO ₂	SUS316	GETR E-9 (Trail Cable)	445~520	520	267
			2	5.5	55	91.3/84.3	20wt% PuO ₂ -UO ₂					32
			2	5.5	55	91/90	40wt% PuO ₂ -UO ₂					262
			2	VIPAC	55	75/75	20wt% PuO ₂ -UO ₂ 40wt% PuO ₂ -UO ₂					284
GETR-T	過出力時の安定性	23,459 MWd/tまで定常照射後過出力状態で非定常照射	12	5.5	80	91.3	20wt% PuO ₂ -UO ₂	SUS316	GETR H-7 Z-9	~550	560	23,459
Rapsodie PNC-10	定格出力運転時の安定性	燃料集合体に組んで照射 Na冷却	37	4.6	320	93	30wt% PuO ₂ -UO ₂ (87.26%EU)	SUS316	RAPSODIE (03, 01)	~650	260	35,310
Phenix PNC-3	定格出力運転時の安定性と高燃焼度	Na冷却	4	5.44	720	93	30wt% PuO ₂ -UO ₂ 27wt% PuO ₂ -UO ₂	SUS316	PHENIX (22-22)	~650	448	107,300
高速実験炉 PPJX13	定格出力運転時の安定性	増殖炉心における燃焼度が最大の燃料集合体	91	5.4	600	93.5	17.7wt% PuO ₂ -UO ₂ (23%EU)	SUS316	高速実験炉 (000)	~540	280	48,000
高速実験炉 PFD001	定格出力運転時の安定性	照射用炉心 炉心燃料集合体	127	4.63	550	93	29wt% PuO ₂ -UO ₂ (12%EU)	SUS316	高速実験炉 (000)	~610	380	38,400
高速実験炉 PFD018	定格出力運転時の安定性	照射用炉心 炉心燃料集合体	127	4.63	550	93	29wt% PuO ₂ -UO ₂ (12%EU)	SUS316	高速実験炉 (2F1)	~590	330	48,000



第1図 国産燃料要素の照射実績



第2図 増殖炉心(MK-I)での炉心燃料集合体の燃料要素の全照射実績



第3図 照射用炉心(MK-II)の炉心燃料集合体の燃料要素の全照射実績
(第7サイクル終了時点)

3. 燃料ペレットの融点

未照射の燃料ペレットの融点に関しては、E. A. AitkenとS. K. Evans⁽¹⁾によってプルトニウム混合比及び酸素対金属比（以下「O/M」という。）を変えた系統的な測定が行われており、その結果を整理して第4図に示す。この図から「常陽」の燃料ペレットの仕様範囲（プルトニウム混合比：約18～30%，O/M：1.94～1.99）で融点（固相点）が最も低くなるのは、プルトニウム混合比については最大の30 wt%，O/Mについては最大の1.99の場合であり、約2,740℃となる。

燃料ペレットが照射された場合の融点の変化要因としては、燃料ペレット内でのプルトニウム混合比再分布、O/M再分布及び核分裂生成物の蓄積の影響が考えられる。

燃焼の比較的初期段階での燃料ペレットの融点降下は、主にプルトニウム混合比及びO/Mの再分布に支配され、照射試験結果等から判断すると、燃料ペレット中心部でのプルトニウム混合比の変化は最大10 wt%の増加、O/Mの変化は1.90までの低下と評価される。

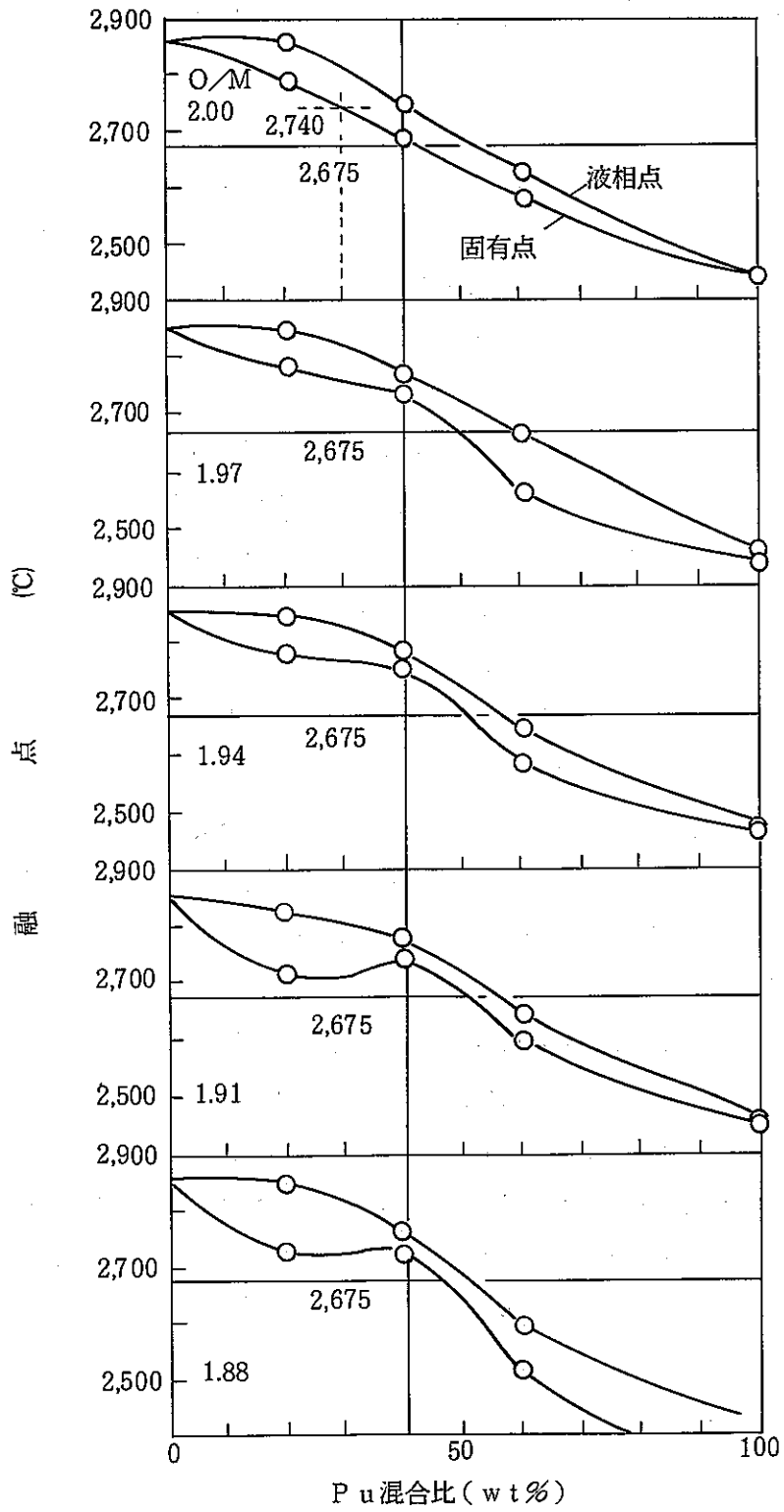
こうしたプルトニウム混合比、O/Mの変化を考慮しても、「常陽」の燃料ペレットの燃焼初期段階の融点は、第4図から判断して2,675℃を下回ることはない。

核分裂生成物の蓄積の影響については、当事業団の小泉等が混合酸化物燃料に170,000 MWd/t相当量までの模擬核分裂生成物を添加して融点の変化を測定しており、その結果によれば、約50,000 MWd/tまでは融点はほとんど変わらず、その後燃焼とともに約7℃/10,000 MWd/tの割合で降下することが示されている。

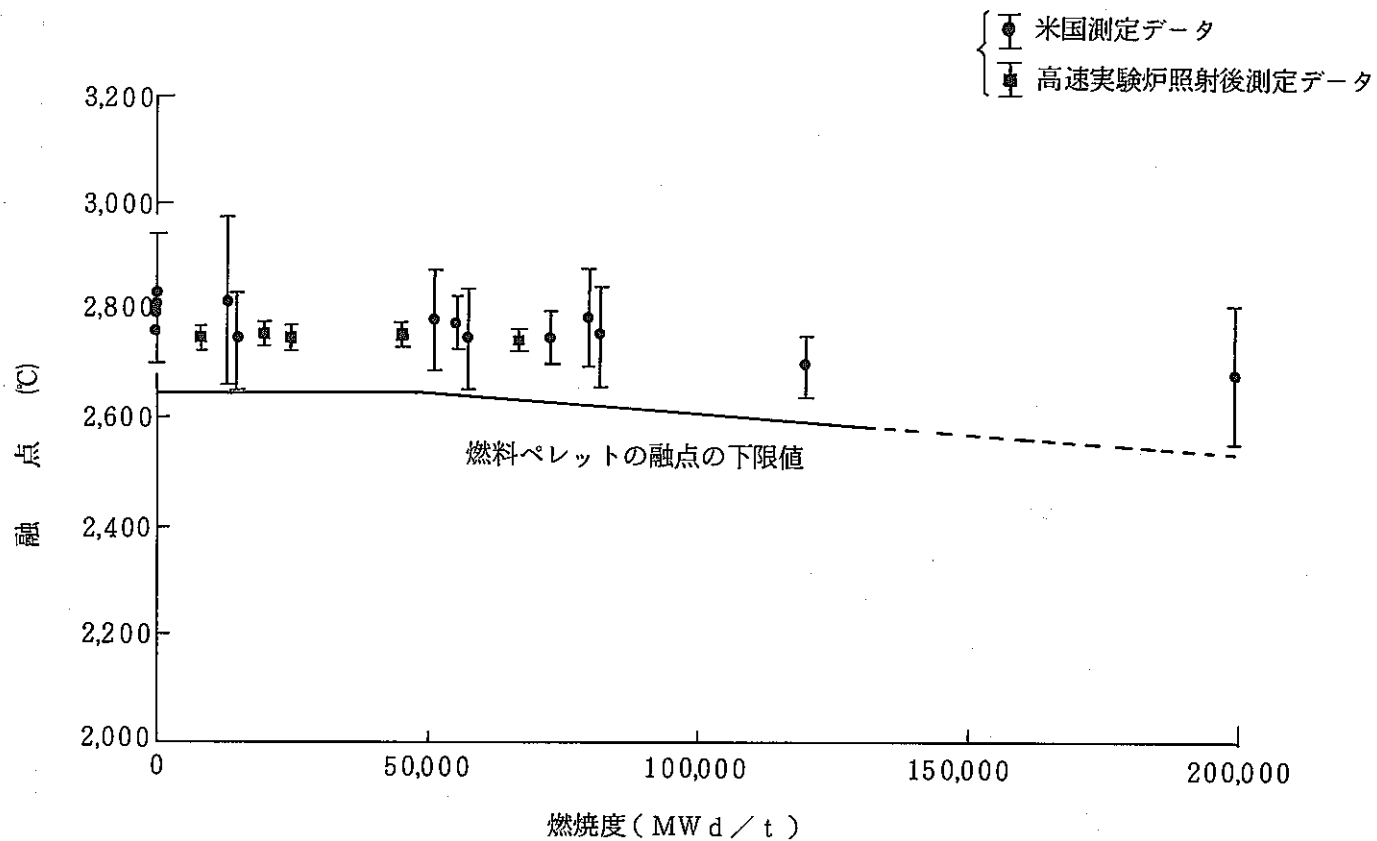
燃料ペレットの溶融防止の観点から燃料ペレットの融点の下限値としては、以上の融点検討結果をもとに測定精度±25℃を考慮して、燃焼開始後50,000 MWd/tまでは2,650℃とし、50,000 MWd/t以上では、この値から7℃/10,000 MWd/tの割合で降下するものと考えられる。

この下限値を実際に照射された燃料要素（燃料ペレット最高燃焼度約20,000 MWd/t）について米国で測定された融点データ及び高速実験炉燃料での照射後測定データと対比して第5図に示すが、当該下限値が保守側であることがわかる。

(1) E. A. Aitken, S. K. Evance, GEAP-5672 (1969)



第4図 燃料ペレットの融点のPu混合比及びO/Mによる変化



第5図 燃料ペレットの融点の燃焼による変化

4. 被覆管の外径増加

炉心燃料集合体の燃料要素の被覆管の外径は、核分裂生成ガスの蓄積による内圧に起因するクリープ変形、高速中性子照射による被覆管のスエリング及び燃料ペレットのスエリングによる燃料ペレットと被覆管の相互作用等の要因により原子炉内における使用期間中徐々に増加することが考えられる。各種照射試験の結果から外径増加の大半はスエリングと照射クリープで決定されることがわかっている。

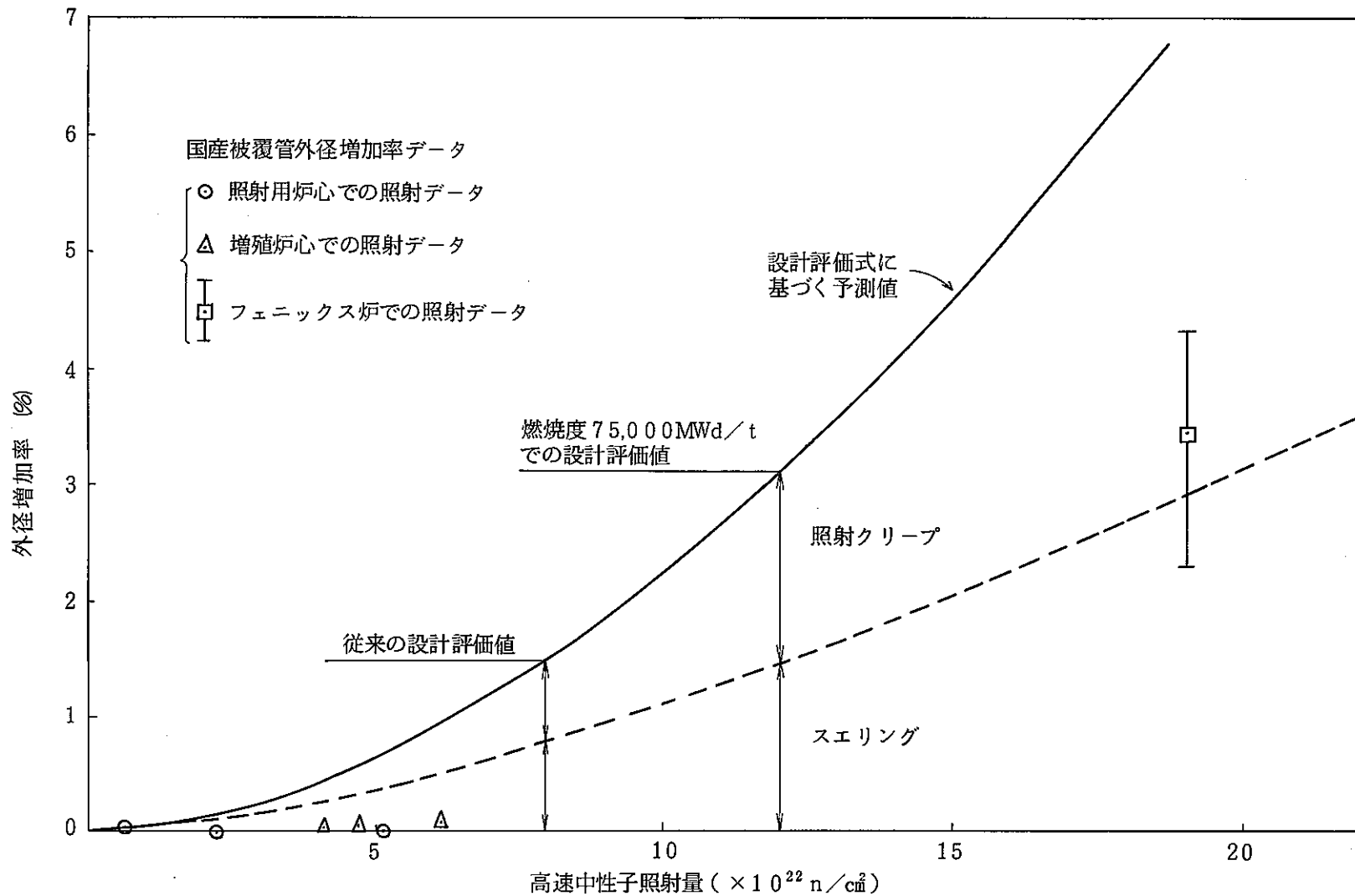
スエリングと照射クリープの評価式は種々のものが提案されているが、「常陽」での設計では、保守的な第6図の結果を与える評価式⁽²⁾⁽³⁾を採用して評価している。第6図には、本原子炉で使用する被覆管の照射試験データを合わせて示してあるが、評価値は十分保守側で妥当なものである。

「常陽」の照射用炉心の炉心燃料集合体の燃料要素最高燃焼度75,000MWd/tの場合の最大外径増加率を与える照射条件は、照射温度約550℃、高速中性子照射量約 1.2×10^{22} n/cm²、内圧による応力約10 kg/mm²である。

炉心燃料集合体の燃料要素の被覆管の外径増加率は、第6図から燃焼度75,000MWd/tの条件でも約3%であり、外国炉における照射において健全性の確認されている約7%と比較して十分小さい。

(2) A. Boltax "Oxide Fuel Development Quarterly Progress Report for the Period June 30", WARD-4135-11(1970)

(3) E. R. Gilbert et al., "Dependance of Irradiation Creep on Temperature and Atom Displacement in 20% Cold Worked Type 316 Stainless Steel", J. Nucl. Mat 65(1977)

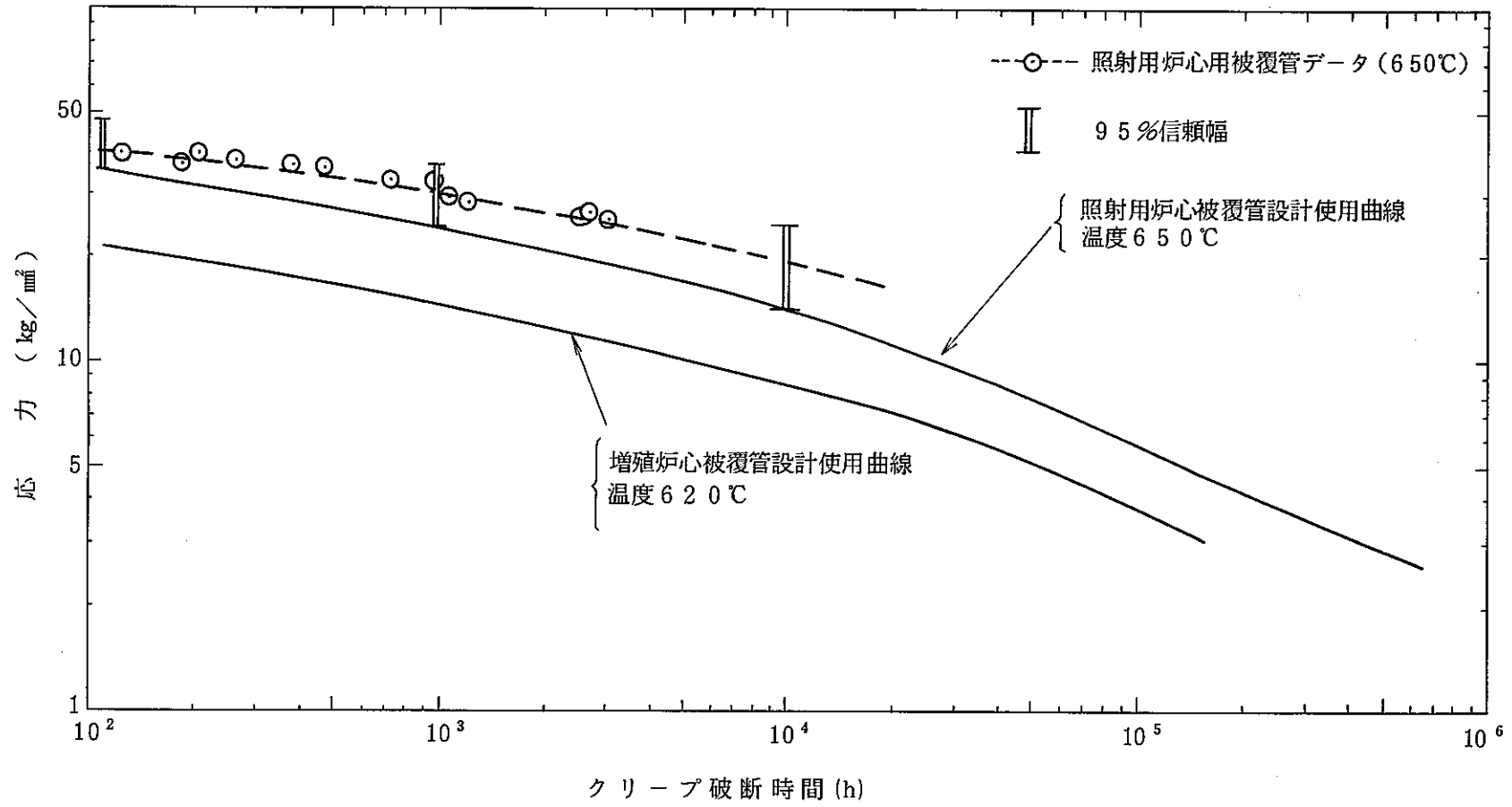


第6図 被覆管の外径増加率

5. 被覆管の内圧クリープ破断強度

高速実験炉の燃料要素の被覆管（SUS316相当ステンレス鋼）を使用して当事業団が実施したクリープ破断寿命試験のデータをラーソンミラーパラメータを用いて回帰解析し、安全側にその信頼下限値を設計曲線として使用する。これらを増殖炉心と照射用炉心の両方について第7図に示す。

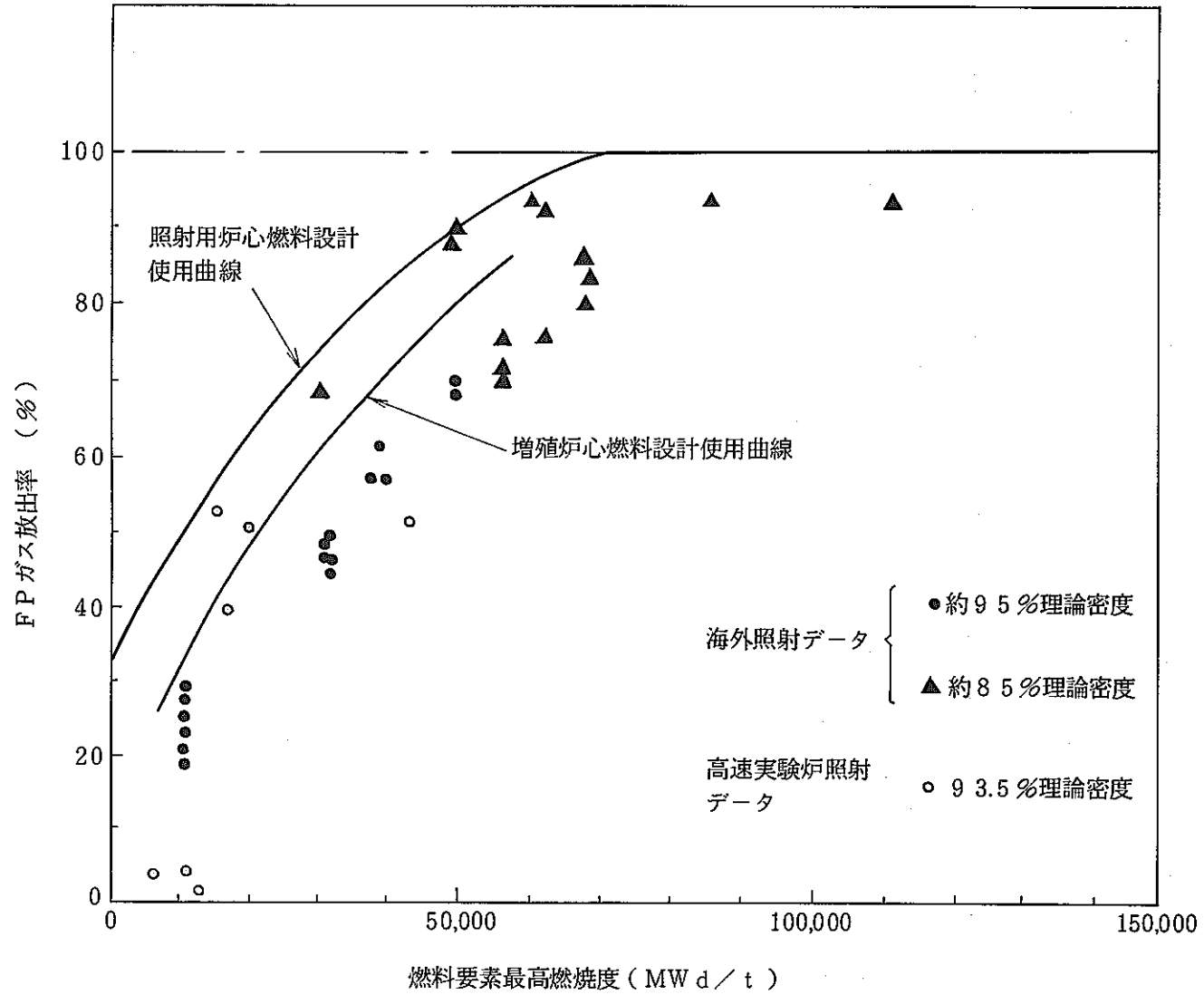
なお、これらは空気中の試験結果であるが、高速実験炉の燃料要素の使用温度範囲ではナトリウム中においても変化のないことが、当事業団のナトリウム中におけるクリープ破断試験により確認されている。



第7図 被覆管クリープ破断強度

6. 燃料ペレットの核分裂生成ガス（FPガス）放出率

燃焼の進行に伴って放出されるFPガスの放出率は、当事業団製造の燃料要素の照射試験データにより得られている。これらのデータを第8図に示す。設計においては、図中の実線を設計曲線として使用する。照射実績に対して、十分な余裕を有することがわかる。



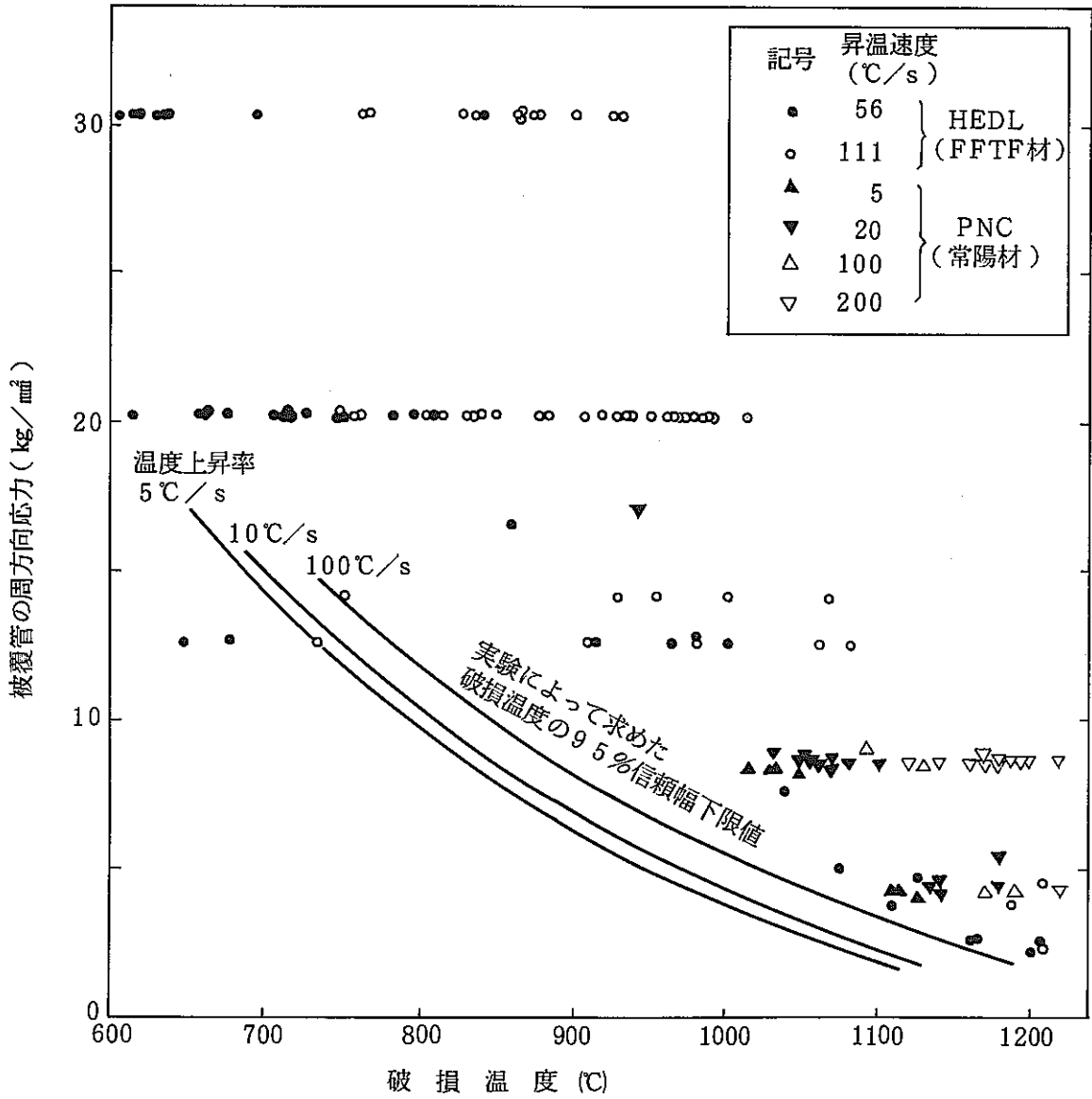
第8図 当事業団製造の混合酸化物燃料のF P ガス放出率

7. 過渡時の被覆管最高温度

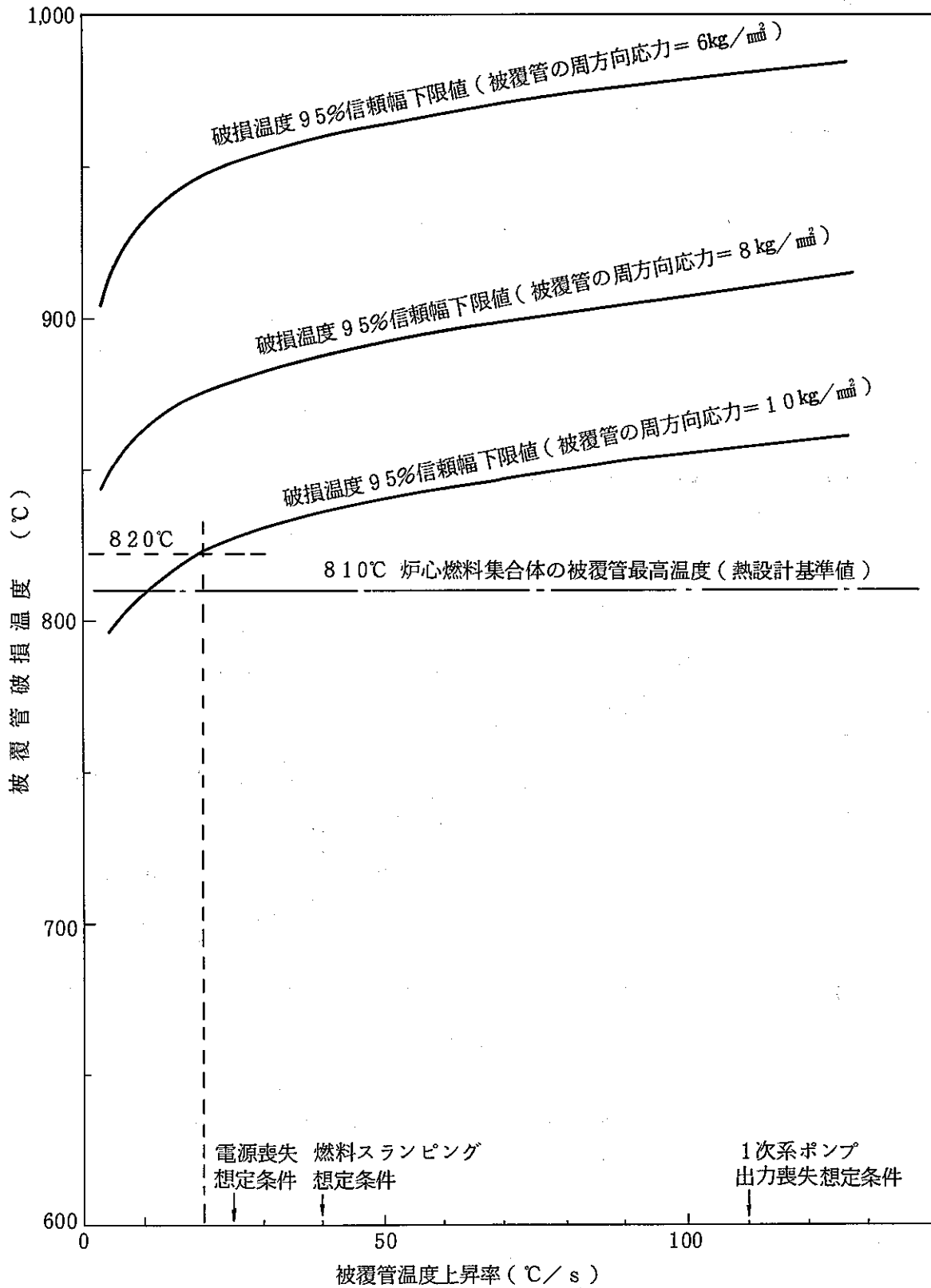
照射用炉心の炉心燃料集合体の被覆管最高温度は、被覆管が運転時の異常な過渡変化時の急速な温度上昇により破損することを防止するため、被覆管の過渡温度上昇下での破損温度に適切な安全余裕を考慮して定められる。

照射済燃料要素の被覆管材料の炉外急速加熱試験（第9図参照）に基づき得られた炉心燃料集合体の被覆管の周方向応力をパラメータとした破損温度の温度上昇率に対する変化を第10図に示す。同図より、当該破損温度は、被覆管の周方向応力の増大に伴って低下するとともに、温度上昇率の低下に伴って低下することがわかる。

熱設計基準値の被覆管最高温度は、炉心燃料集合体の燃料最高燃焼度約75,000MWd/tでの被覆管の周方向応力約10 kg/mm²における温度上昇率20℃/s（各種事故想定条件での解析結果のうち被覆管温度が700℃を超える事象の温度上昇率を包絡する。）の被覆管の破損温度820℃に安全余裕を考慮して、約810℃としている。



第9図 照射済燃料被覆管の炉外急速加熱試験での内圧破損温度

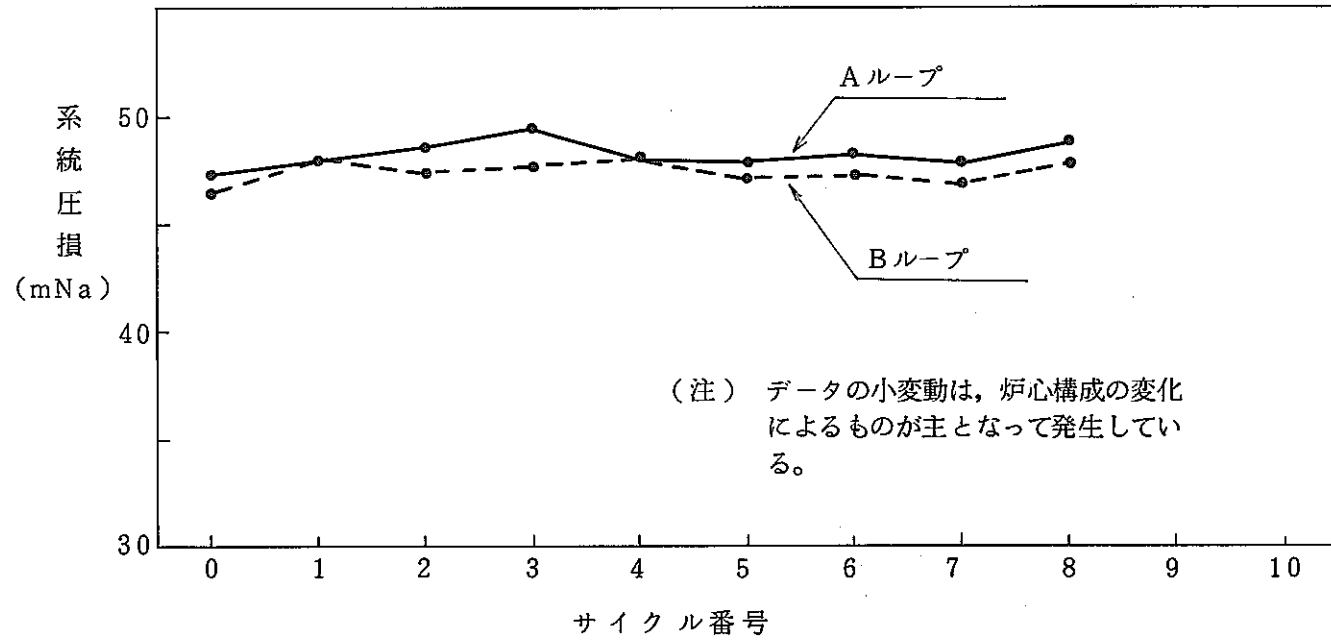


第10図 照射済被覆管材料の炉外急速加熱試験に基づく破損温度の温度上昇率に対する変化

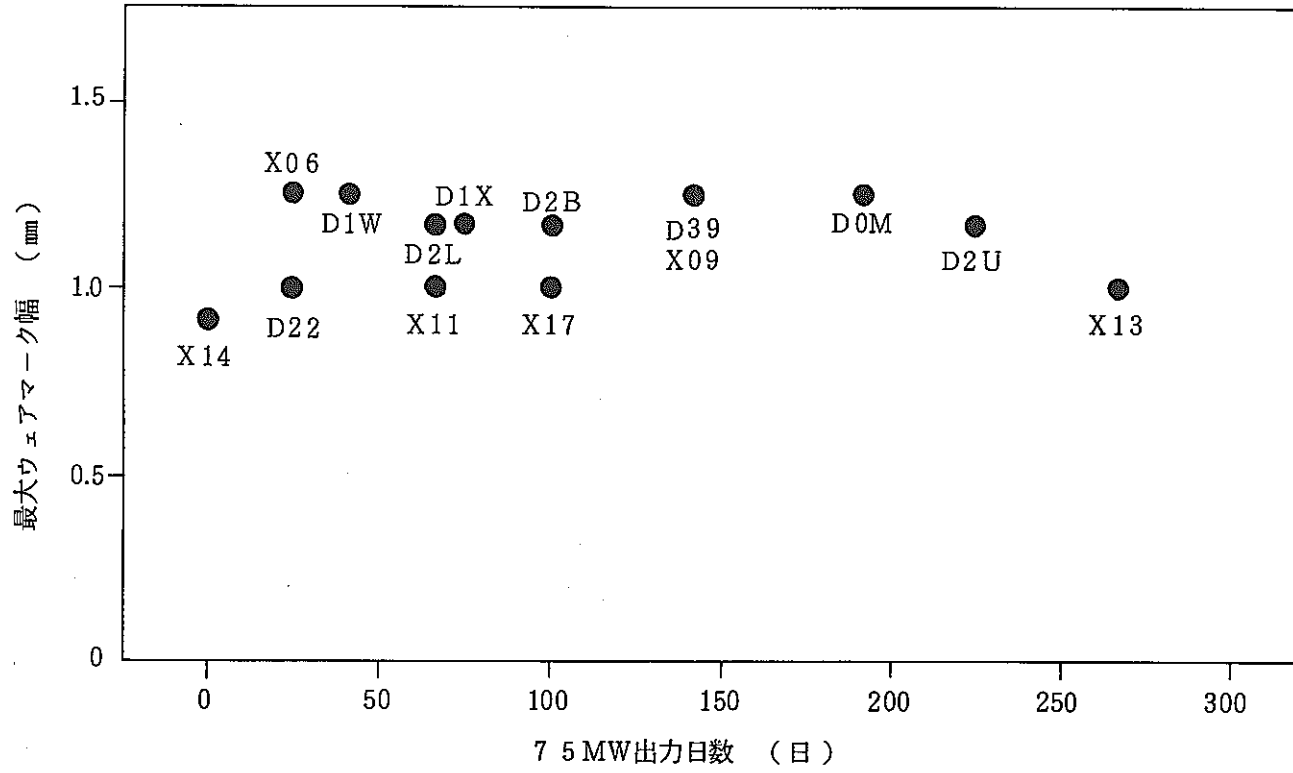
8. 炉心燃料集合体のNa中耐久試験

炉心燃料集合体のNa中耐久試験は、燃料集合体の流動特性の変化及び機械的健全性（磨耗、材料強度の劣化等）の炉外での確認を目的として行われ、何ら異常のないことが確かめられている。この試験目的に対し、重要な試験パラメータである試験時間は、Na流動による燃料集合体各部の異常な振動や磨耗等による健全性上の問題点がないことを確認するのに十分な時間として、技術的経験から1,500時間程度が選定されている。

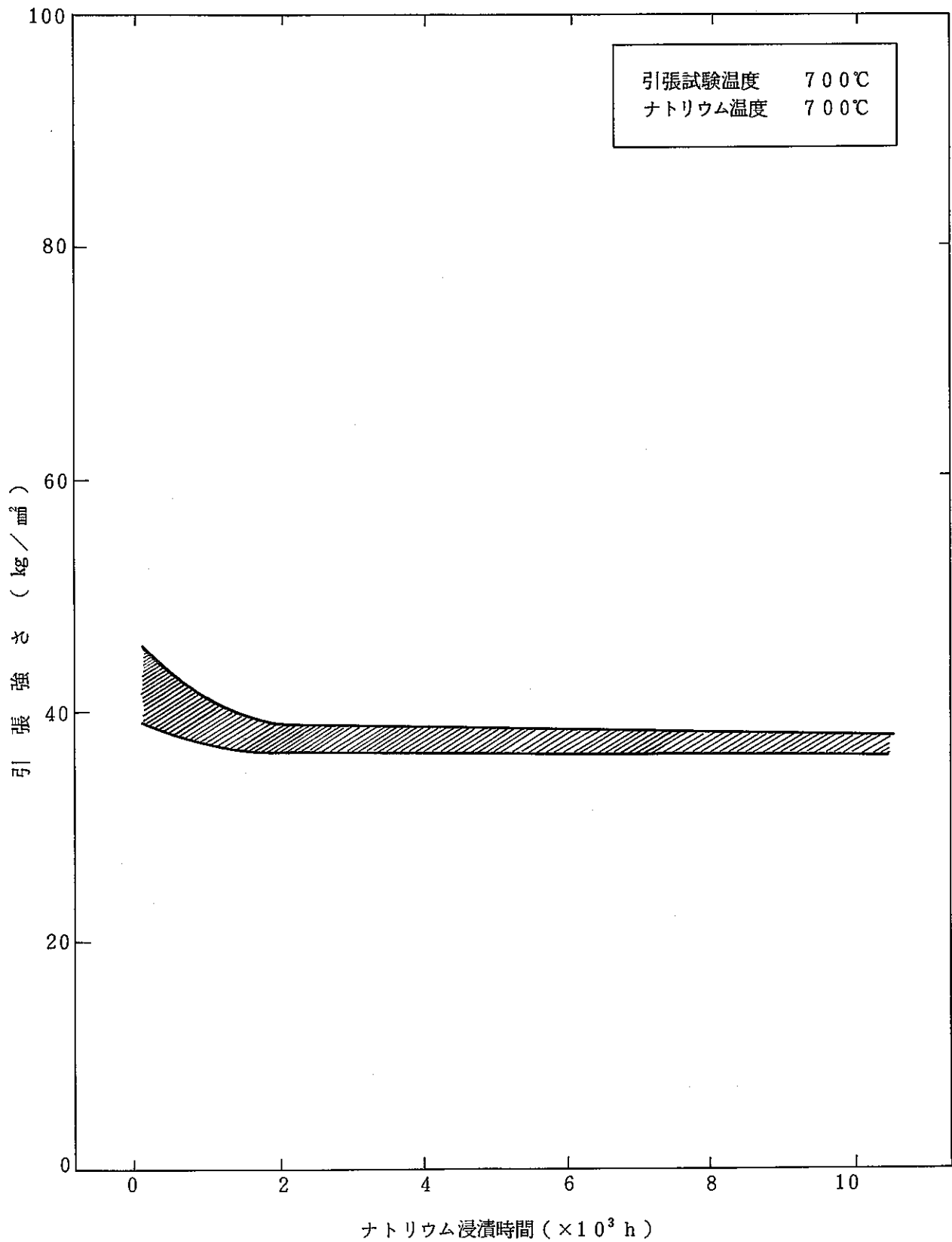
この試験時間について最近の知見から再検討を加えると、流動特性の変化については第11図に示す高速実験炉の系統圧損に変化がないこと、また、機械的健全性については第12図に示すウェアマーク（擦り痕；WM）が運転後直ちに飽和すること、及び第13図に示す集合体を構成する材料（SUS316相当）の引張強度の高温Na浸漬による変化が約1,500時間程度で飽和することなどからこの試験時間の妥当性が確認される。また、加えて、「常陽」実機（照射用炉心）の炉心燃料集合体のうち、最大で約6,000時間炉心で運転されたものが照射後試験に供され、何らウェアマーク等の異常がないことが確認されている。



第11図 「常陽」系統圧損の変化



第12図 7.5MW出力照射日数と最大ウェアマーク幅



第13図 高温ナトリウム中浸漬後のSUS316相当鋼の引張強さ