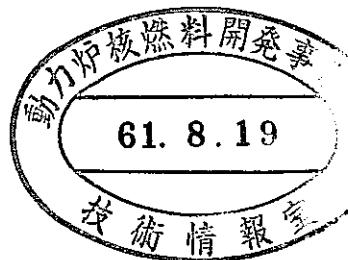


A T R 燃 料 の 開 発

昭和 61 年 8 月



動力炉・核燃料開発事業団

目 次

1. はじめに	1
2. ATRにおけるプルトニウム利用特性	3
2.1 熱中性子炉におけるプルトニウムの核特性	3
2.2 ATRにおけるプルトニウム利用の特徴	3
3. ATR MOX燃料の開発	9
3.1 燃料集合体の主要仕様及び構造	9
3.2 燃料の開発試験	10
3.3 MOX燃料の挙動解明	19
4. MOX燃料の製造実績	49
4.1 MOX燃料製造上の特徴	49
4.2 MOX燃料の製造実績	50
5. ATR高燃焼度MOX燃料の開発	56
5.1 ATR MOX燃料の高燃焼度化	56
5.2 高燃焼度MOX燃料(ペレット50,000MWd/t程度)の挙動	57

1. はじめに

新型転換炉（ATR）は、圧力管型の重水減速沸騰軽水冷却炉で、プルトニウム燃料を主体とした熱中性子炉の発電炉である。ATR原型炉「ふげん」（165 MWe）は、昭和54年3月に運開して以来、順調に稼動し、昭和58年度は、80.6%の設備利用率を収め、昭和59年6月から昭和60年7月には12ヶ月運転を達成した。現在、第9運転サイクルを終了し、計画停止に入っている（図1）。61年8月現在、燃料の使用実績は、「ふげん」にウラン・プルトニウム混合酸化物（MOX）燃料を316体装荷し、196体取出しており、また、UO₂燃料については、324体装荷し、220体取出しているが、燃料破損の徵候は全く認められていない。

以下にATRにおけるプルトニウムの利用特性、MOX燃料の開発と実証試験、MOX燃料の製造実績及び高燃焼度MOX燃料の開発について報告する。

(1) 運転実績

(電気出力 165MW)

(2) 発電実績

年 度	5 3	5 4	5 5	5 6	5 7	5 8	5 9	6 0	61 (~7月まで)	合 計
運転時間 (h)	288	6,534	3,776	3,812	5,353	7,201	6,566	3,774	2,699	40,003
発電電力量 (MWh)	47,473	1,048,667	581,568	589,178	845,566	1,168,523	1,035,912	595,236	436,692	6,348,815
時間稼動率 (%)	100	74.4	43.1	43.5	61.1	82.0	75.0	43.1	92.2	61.9
設備利用率 (%)	99.9	72.4	40.2	40.8	58.5	80.6	71.7	41.2	90.4	59.6

(3) 燃料交換実績

取替炉心 期間	(初荷)	(1) 53.3~55.2	(2) 55.4~55.6	(3) 55.7~55.11	(4) 56.10~57.5	(5) 57.6~57.9	(6) 58.1~58.8	(7) 58.9~59.2	(8) 59.6~60.7	(9) 60.12~61.7	(初荷)~(9) 合計
MOX	+ 96	+ 16(-20)	+ 12(-24)	+ 44(-48)	+ 12(- 0)	+ 24(-20)	+ 24(- 8)	+ 56(-36)	+ 24(-20)	+ 8(-20)	+ 316(-196)
UO ₂	+128	+ 20(-16)	+ 24(-12)	+ 32(-28)	+ 24(-36)	+ 32(-36)	+ 16(-32)	+ 20(-40)	+ 8(-12)	+20(- 8)	+ 324(-220)
取替体数	-	36	36	76	36	56	40	76	32	+ 28	+ 640(-416)

(注) 1. ()内の数字は取替炉心番号を表わす。
2. ()外の+は装荷、()内の-は取出を表わす。

図1 新型転換炉ふげん発電所運転実績(昭和53年度~61年度前期)

2. ATRにおけるプルトニウム利用特性⁽¹⁾

2.1 熱中性子炉におけるプルトニウムの核特性

- (1) 核分裂性 ^{239}Pu , ^{241}Pu および ^{235}U が熱中性子領域から共鳴吸収領域にかけての中性子を吸収した場合の η (核分裂性物質に吸収された中性子 1 個当たりの核分裂して放出する中性子数) は図 2.1 に示すとおりである。この図から ^{239}Pu は 0.3 eV 近傍の共鳴吸収領域の中性子を吸収すると η は小さいが、よく減速された中性子を吸収すると η は大きくなり ^{235}U および ^{241}Pu の η に近くなることがわかる。これにより核分裂性プルトニウムと ^{235}U の核的価値 (η の値) がほぼ同等になる。
- (2) プルトニウムを熱中性子炉で利用する場合、次に考慮する事項は、プルトニウムの共鳴吸収である。図 2.2 に ^{239}Pu , ^{241}Pu および ^{235}U の核分裂断面積と ^{240}Pu の中性子吸収断面積を示す。 ^{239}Pu と ^{241}Pu は中性子エネルギーが約 0.3 eV のところに共鳴吸収があり、 ^{240}Pu は約 1 eV に共鳴吸収がある。そして、それぞれの山の高さ、位置、形が異なっているが、熱中性子領域では $1/v$ 法則に従っている。中性子をよく減速して、共鳴吸収の影響を小さくすることによって、熱中性子炉に回収プルトニウムをその同位体組成比に余り影響されずに利用できる。また、 ^{241}Pu は半減期 14.4 年で ^{241}Am に変換する。 ^{241}Am は図 2.3 に示すように、中性子エネルギーが約 0.3, 0.6 及び 1.3 eV と比較的エネルギーの高いところに共鳴吸収があるので、中性子をよく減速することによって ^{241}Am の吸収の影響を小さくすることができる。
- (3) 図 2.4 は、 ^{235}U , ^{239}Pu 及び ^{241}Pu が核分裂した場合の核分裂生成物の収量 (%) を示したものである。^{(2),(3)} 核分裂の質量分布は、中性子エネルギーによって異なるが、熱中性子での核分裂の場合、質量分布は ^{239}Pu , ^{241}Pu とも大きく変わらない。

2.2 ATRにおけるプルトニウム利用の特徴

ATR の燃料集合体は、内径約 12 cm の Zr-2.5 Nb 圧力管に収められ、圧力管は約 24 cm ピッチで約 60°C の重水を収めたカランドリアタンク内に配置されている（図 2.5）。この炉心で重水は燃料体積の 8 倍以上あり、中性子は主に重水中で減速されている。

ATRでプルトニウムを利用する場合、次の特徴をもっている。

- (1) MOX燃料の核分裂性物質量を $Pu_f + ^{235}U = \text{一定}$ と規定すれば、ほぼ同一の燃焼度が得られる。

ATRにおいては、中性子は約60°Cの重水中で減速されるので、プルトニウムを利用する場合、核分裂性プルトニウムと ^{235}U の和を一定にすれば、プルトニウムの同位体組成に余り影響されずにはほぼ同一の燃焼度が得られると考えられる。このように規定したMOX燃料（基準設計燃焼度30,000MWd/t）をATRに装荷した場合、プルトニウムの同位体組成が燃焼度に及ぼす影響を図2.6に示す。これから、軽水炉の使用済燃料から回収されたプルトニウムを利用する場合は燃焼度の差は、±200MWd/t程度以内に収まる。

現在、「ふげん」に使用するMOX燃料は、 $Pu_f + ^{235}U = \text{一定} = 2.0\%$ で設置許可されている。

- (2) 燃料の寸法および制御棒の仕様と配置を変更せずにMOX燃料を使用できる。

ATRでは、制御棒は燃料から離れた重水中に挿入され、中性子は重水中で比較的長い距離を動いて減速されるので、何れの燃料を使用しても制御棒価値が余り変わらない。

- (3) 燃料集合体の内層及び中間層の燃料棒の核分裂性物質量を外側の燃料棒より高めて、燃料棒の出力と燃焼度を平均化する。

ATRにおいて、中性子は主に重水中で減速されて燃料集合体に戻ってくるので、燃料集合体内の熱中性子束分布はすり鉢状を中心に向って低くなる。このため、外層燃料のみ富化度を低くして中性子吸収を小さくし、局所出力ピーキングを小さくする対策をとっている。

- (4) MOX燃料を全炉心に装荷できる。

実証炉取替燃料に富化する核分裂性プルトニウムは約2.4%で、軽水炉の使用済燃料は約0.6%の核分裂プルトニウムを含むので、実証炉取替燃料に必要なプルトニウムは、4基程度の同出力軽水炉の使用済燃料から回収されるプルトニウム量に相当する。

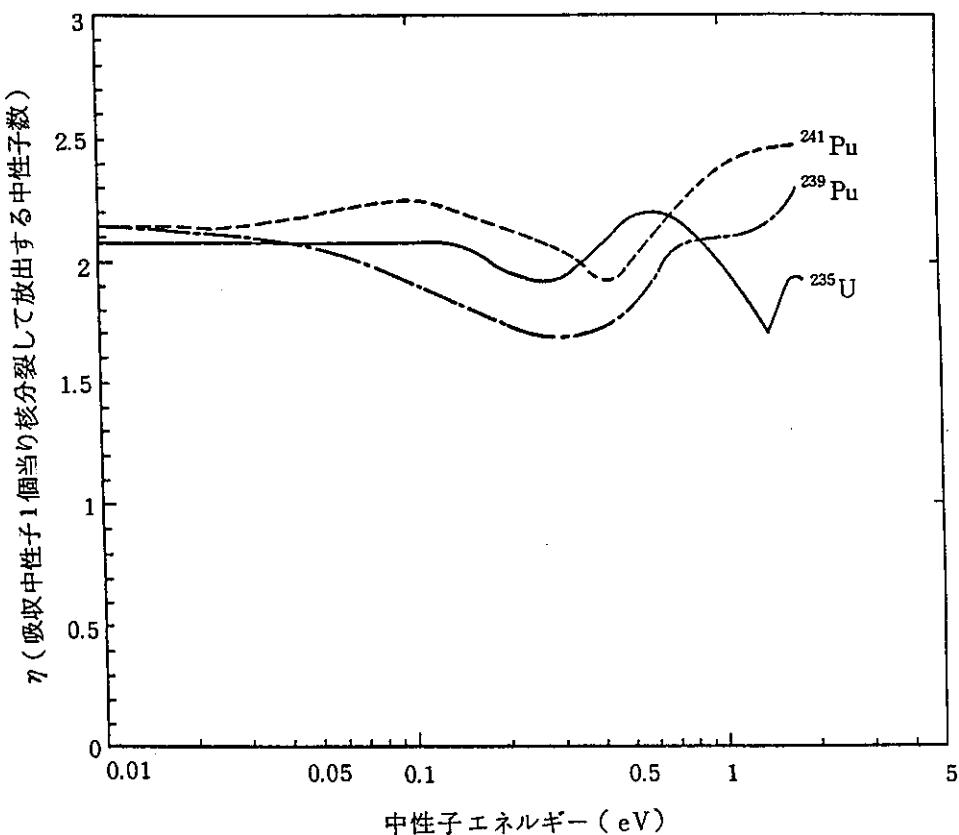


図 2.1 ^{235}U , ^{239}Pu 及び ^{241}Pu の η

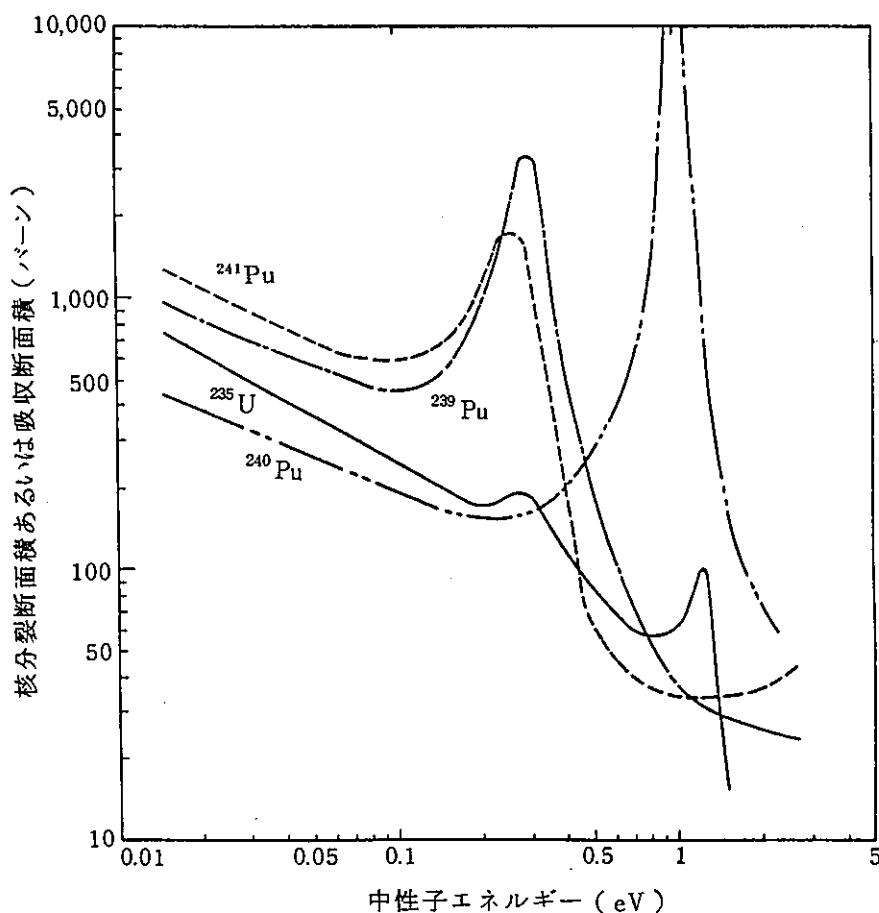


図 2.2 ^{235}U , ^{239}Pu 及び ^{241}Pu の核分裂断面積並びに ^{240}Pu の吸収断面積

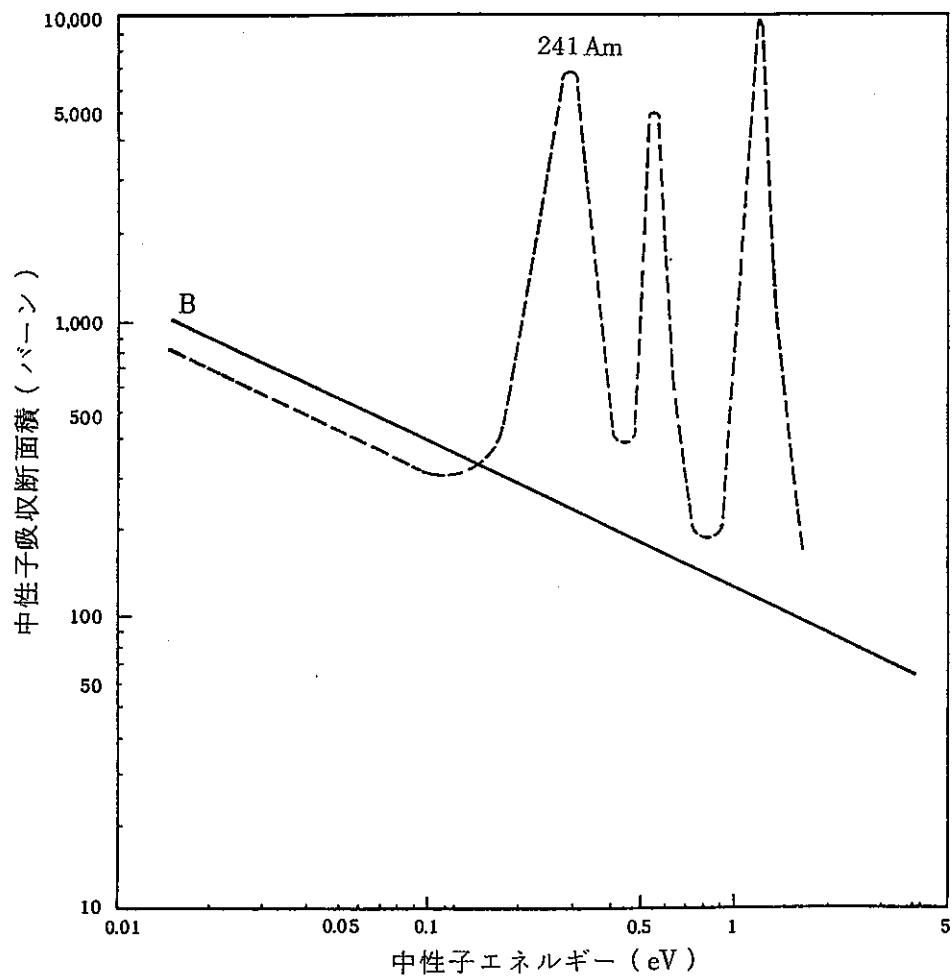


図 2.3 ^{241}Am 及び B の中性子吸収断面積

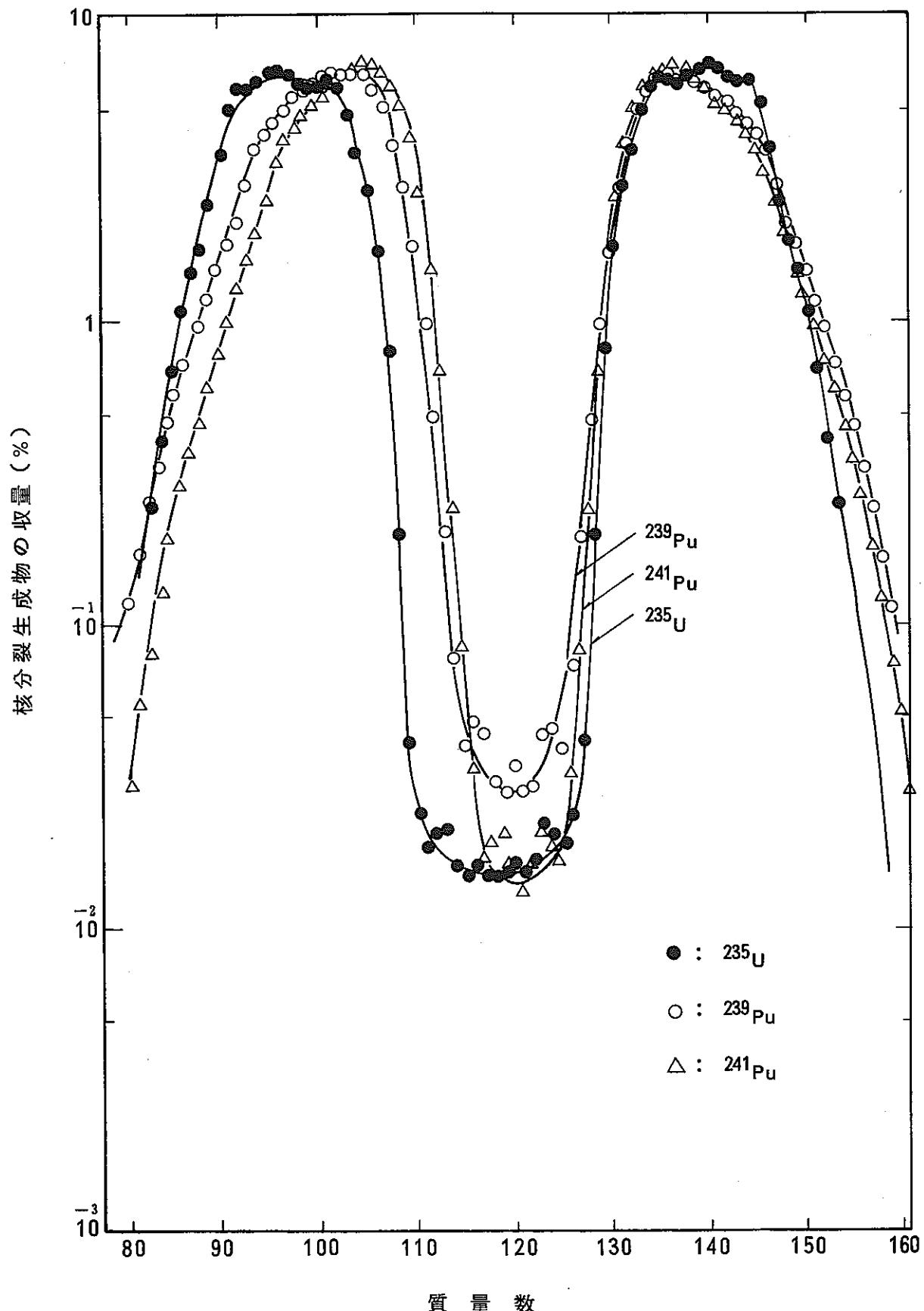


図 2.4 ^{235}U , ^{239}Pu 及び ^{241}Pu の熱中性子による核分裂収量曲線

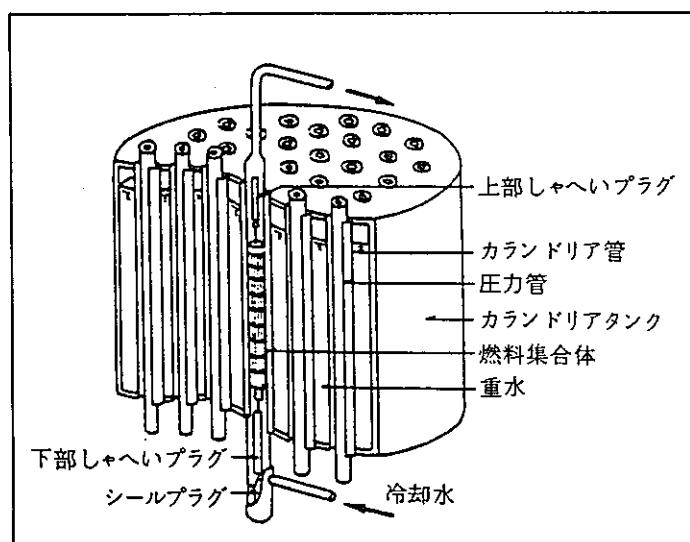


図 2.5 ATR 廉心断面図

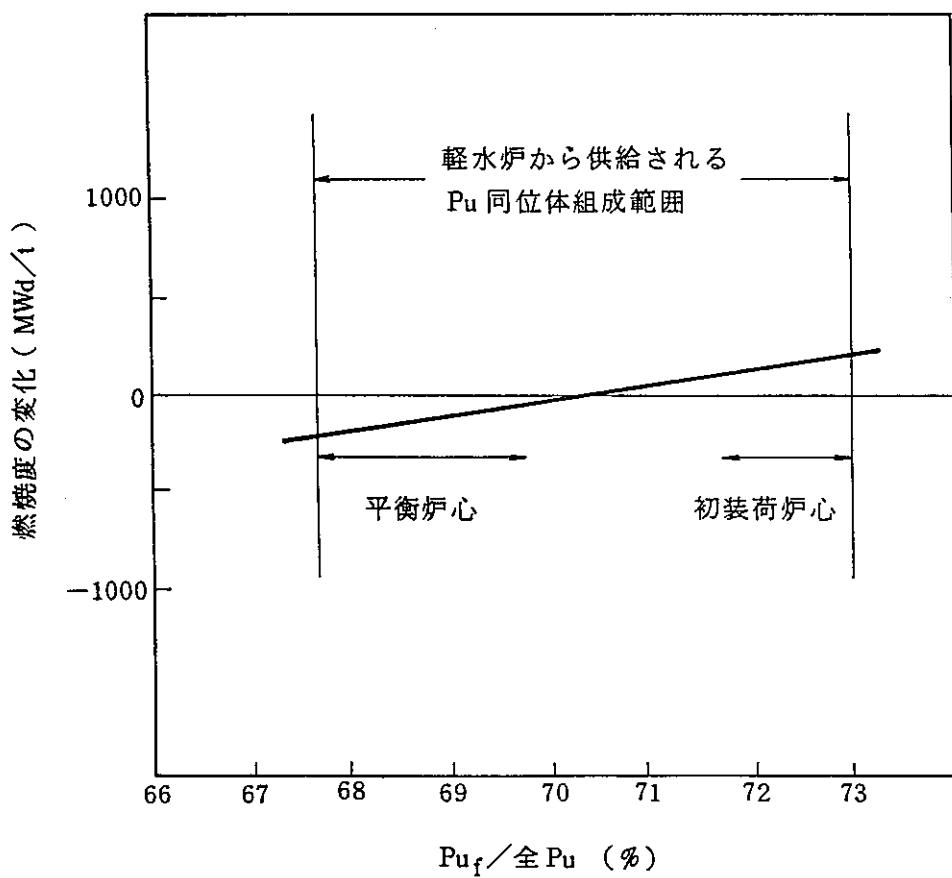


図 2.6 ATR の Pu 同位体組成による燃焼度変化

3. ATR MOX 燃料の開発

3.1 燃料集合体の主要仕様及び構造

ATR燃料は、軽水炉燃料と比較して次のような主な特徴がある。

- ① 軽水炉では、燃料として濃縮ウランを使用しているのに対して、ATR燃料は、MOX及び濃縮ウランを使用する。
- ② 燃料集合体形状は、軽水炉で集合体断面形状が正方形であるのに対して、ATRでは円形である。

また、実証炉燃料と「ふげん」燃料を比較すると、主な相違点は次のとおりである。

- ① 表3.1に示すように、実証炉燃料は、「ふげん」から実証炉への大型化に伴い、燃料集合体の平均出力を20%増加させるため、燃料棒径を細くし、集合体当りの燃料棒本数を28本から36本に増している。
- ② 平均燃焼度（取替）は、「ふげん」の $17,000 \text{ MWd/t}$ に対し、 $30,000 \text{ MWd/t}$ に増加し、ペレットの平均核分裂性物質量($P_{uf} + {}^{235}\text{U}$)を「ふげん」の1.4～2.0 w/oに対し3.0～3.2 w/oとしている。
- ③ 定格時の最大線出力密度の設計値は「ふげん」の 57.4 kW/m (17.5 kW/ft)に対し、 49.2 kW/m (15 kW/ft)にしている。
- ④ ペレットと被覆管のギャップ熱伝達率を改善し、ペレット温度を低下させるため、燃料棒のヘリウム加圧量を「ふげん」の $1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{a}$ に対し、 $3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{a}$ としている。
- ⑤ 「ふげん」燃料と比較して、燃焼度の増加等のより優れた燃料性能の達成及び信頼性向上のため、集合体構造上で、燃料棒のプレナム長さの増加、被覆管肉厚対直径比及びペレット被覆管ギャップ対ペレット径の増加等の対策をとっている。

「ふげん」燃料集合体及び実証炉燃料集合体の概念図を図3.1、3.2に示す。

スペーサーの支持方法は、「ふげん」の場合の細径の4本の支持棒に替えて、太径の1本の中央の支持管によって行う。燃料集合体は、1本のスペーサ支持管を中心として、同心円上に配置した内層燃料棒6本、中間層燃料棒12本、外層燃料棒18本の計36本の燃料棒から構成されており、燃料集合体としての全体構造は「ふげん」とほぼ同様である。

3.2 燃料の開発試験

3.2.1 「ふげん」燃料の開発試験⁽⁴⁾

「ふげん」燃料は、燃料集合体が燃料棒間ギャップの狭い円形クラスタである点及びMOX燃料を使用している点で軽水炉燃料と異なっており、従って燃料の開発は主に次の事項について行われた。

- ① 燃料集合体の試作開発と炉外評価試験
- ② 燃料集合体の伝熱流動特性試験
- ③ 燃料集合体の照射試験

(1) 燃料集合体の試作開発と炉外評価試験

燃料集合体の開発試験は、核・熱特性の各種実験を行うと共に、スペーサ構造に重点をおいて燃料集合体を試作し、部品機器試験ループ(CTL)における構造耐久試験、振動試験等の炉外評価試験により、フレッティング腐食特性、構造耐久性、振動特性などを確認し、その結果を設計・試作に反映した。

(2) 燃料集合体の伝熱流動特性試験

14MW大型熱ループ(HTL)で、実物大模擬燃料集合体を用いて、燃料棒間隙、スペーサ間隔、燃料棒の曲り等の影響、冷却材圧力、流速、蒸気クオリティ等の影響について実験を行い、バーンアウト評価式を開発した。また、燃料スペーサ間隔を狭めると熱的性能が著しく改善できることも判明し、これを燃料設計に取り入れて「ふげん」燃料スペーサ間隔は、集合体中央部で狭くして、上・下部で広い配置とした。

(3) 照射試験

「ふげん」燃料の照射試験は、MOX燃料を使用した円形クラスタ燃料集合体の照射挙動を確認するために、原研のJMTR、ノルウェーのハルデンにあるHBWR、英国のSGHWRを用いて実施した。

これらの照射及び照射後試験から得られたデータは、逐次、燃料設計コード及び挙動解析コードによる解析と対比し、挙動特性の解明と健全性の確認を行うと共に設計手法の確立等に反映させている。

3.2.2 実証炉燃料の開発試験

実証炉燃料は、

- ① 「ふげん」燃料の開発成果と使用実績
- ② 実証炉燃料の開発試験
- ③ 軽水炉燃料の知見

に基づき、設計を行っている。

実証炉燃料の設計で示された性能と健全性を実証するため、以下に示す照射試験と炉外試験等を進めている。

(1) 照射試験

- (イ) 「ふげん」燃料の照射後試験
- (ロ) 実証炉燃料の照射試験
 - (a) 実物大実証炉燃料の照射試験
 - (b) 短尺燃料集合体の照射試験
- (2) 実証炉燃料の設計・試作と炉外試験
 - (イ) 実証炉燃料の試作と炉外試験
 - (ロ) HTLにおける伝熱流動試験
 - (ハ) CTLにおける流動・振動・耐久試験

主な工程を表3.2に示す。

(1) 照射試験

① 「ふげん」燃料の照射後試験

(イ) 目的及び実証すべき性能

「ふげん」燃料の照射後試験を実施して、設置許可で示された下記性能仕様を実証するとともに、「ふげん」燃料設計の安全裕度を確認する。

主要性能仕様	(a) 燃燒度	20,000 MWd/t
	(b) 延滞在期間	4年

(ロ) 照射後試験基本計画

「ふげん」燃料の性能を実証し、安全裕度の確認を行うため次に示す照射後試験を行う。

- ・燃料棒の軸方向伸び及び周方向伸び
- ・被覆管の変形（曲がり、リッジング等）
- ・被覆管材料強度
- ・被覆管の腐食、フレッティング腐食
- ・FP放出量
- ・U, Pu 同位体組成等

照射後試験の詳細な流れを図 3.3 に示す。

この照射後試験を行うに当っての基本計画は次のとおりである。

- (i) 照射後試験の対象燃料は MOX 燃料とし、初装荷燃料集合体 1 体、取替燃料集合体 2 体である。
- (ii) 試験に供する燃料集合体の燃焼度は、第 1 回目の初装荷燃料が約 $14,000 \text{ MWd/t}$ （炉内滞在期間約 4 年）、第 2 回目の取替燃料が約 $18,000 \text{ MWd/t}$ （炉内滞在期間約 4 年）である。第 3 回目については、これまでの照射後試験結果をみて、試験対象集合体の照射条件を決定するものとする。
- (iii) 燃料製造データ及び運転データと上記照射後試験結果を基に、「ふげん」燃料の設計性能の達成を実証するとともに、燃料設計安全裕度を確認し、実証炉燃料設計に反映する。

④ 燃焼度 $30,000 \text{ MWd/t}$ 達成の評価法

実証炉燃料の燃焼度 $30,000 \text{ MWd/t}$ が達成できることを、下記の照射データを解析コードによる計算結果と照合して評価する。

- (a) 「ふげん」燃料の照射後試験データ
- (b) SGHWR 照射試験データ
- (c) HBWR 照射試験データ
- (d) 高燃焼度 UO_2 燃料照射試験データ

⑤ 現在までの成果

第 1 回目 ($13,600 \text{ MWd/t}$ に達したもの) の照射後試験を 58 年 10 月から 60 年 12 月にかけて実施した。また、第 2 回目 ($18,000 \text{ MWd/t}$ に達したもの) の照射後試験を 61 年 6 月から開始した。

② SGHWR における照射試験

(イ) 目的及び実証すべき性能

実証炉燃料を SGHWR に装荷して約 15,000 MWd/t の照射を行い、照射後試験を実施して実証炉燃料設計の安全裕度の確認を行う。この実測データを基に、実証炉燃料に要求される下記設計性能が達成できる見通しを確認する。

主要性能仕様	(a) 燃 焼 度	30,000 MWd/t
	(b) 廉内滞在期間	6.5 年

(ロ) 照射試験基本計画

実証炉燃料と同仕様の燃料集合体 1 体を英國 SGHWR に装荷して照射試験を実施する。主な照射条件は次のとおりである。

- (a) 目標燃焼度：約 15,000 MWd/t
- (b) 最大線出力密度：約 44.5 kW/m
- (c) 照射期間：約 3.5 年
- (d) 試験体：実規模大 36 本バンドル 1 体

燃料製造データ及び運転データと照射後試験結果を基に、実証炉燃料に要求されている性能が達成できる見通しを確認する。

(ハ) 現在までの成果

照射用燃料集合体は SGHWR の炉心に装荷され、照射試験を 59 年 8 月より開始した。61 年 3 月現在、集合体平均燃焼度約 8,060 MWd/t に達した。

③ 「ふげん」における照射試験

(イ) 目的及び実証すべき性能

実証炉燃料と同一仕様の標準燃料集合体とセグメント燃料集合体を「ふげん」に装荷して、下記設計性能を実証するとともに、燃料設計の安全裕度の確認を行う。

主要性能仕様	(a) 燃 焼 度	30,000 MWd/t
	(b) 廉内滞在期間	6.5 年
	(c) 負荷変動下での燃料の健全性	

(ロ) 照射試験基本計画

実証炉燃料と同一仕様の燃料集合体 3 体とセグメント燃料棒を組込んだセグメント燃料集合体 2 体を「ふげん」に装荷して照射試験を実施する。目標照射条件は次のとおりである。

- (a) 目標燃焼度 最大 $32,000 \text{ MWd/t}$
- (b) 最大線出力密度 約 49.2 kW/m
- (c) 照射期間 標準燃料集合体 約4年(1体取り出し), 約6年(2体取り出し)
セグメント燃料集合体, 約3年, 約5年(各1体ずつ取出す)
- (d) 試験体 実規模大 36本バンドル3体
セグメント燃料棒入り 36本バンドル2体
- (e) 集合体内の出力比 外, 中, 内層の燃料の出力比は実証炉燃料に準ずる。

この照射試験を行うに当っての基本計画は次のとおりである。

(i) 標準燃料集合体

「ふげん」に装荷された実証炉燃料集合体3体を約4年及び約6年毎にそれぞれ1体及び2体ずつ取出す。取出した燃料体をサイトで検査した後、それぞれ1体をホットラボにおいて照射後試験を実施する。照射後試験の評価・解析を基に次に取出される燃料の挙動予測を行い、試験結果と照合して実証炉燃料の性能及び設計安全裕度を確認する。

照射後試験により確認する主な項目は下記のとおりである。

- 燃料棒ギャップ, 曲がり, クラッド付着量の変化
- 外観
- 燃料棒の軸方向及び周方向伸び
- 被覆管の変形(曲がり, リッジング等)
- FPガス放出量, 燃料棒内圧
- 被覆管材料強度
- 腐食, フレッティング腐食, スペーサ保持力
- U, Pu同位体組成等
- 燃焼度分布

(ii) セグメント燃料集合体

「ふげん」に装荷されたセグメント燃料集合体2体を3年目及び5年目に1体ずつ取出す。取出した燃料体をサイトで検査(水中)した後、ホットラボで解体し、非破壊検査した後、一部をJMTRへ輸送し再組立をしてテストチャンネルで出力急昇試験を実施する。試験後は再びホットラボにおいて照射後試験を実施し

負荷変動に対する下記の項目について評価する。

- 被覆管の変形（曲がり、リッジング等）
- 被覆管材料強度
- FPガス放出量、燃料棒内圧（非破損燃料）
- 破損しきい値

上記照射後試験結果を基に、実証炉燃料の設計性能を実証するとともに、設計安全裕度を確認する。

なお、製造時検査、照射後試験等の各検査時の検査対象及び測定項目については表3.3に示す。

(a) 現在までの成果

- (i) 標準燃料集合体3体を60年11月に「ふげん」に装荷し、12月より照射を開始した。
- (ii) セグメント燃料集合体に関する設置変更許可申請は60年11月に認可され、燃料製造を61年4月より開始した。

④ 短尺燃料集合体の照射試験

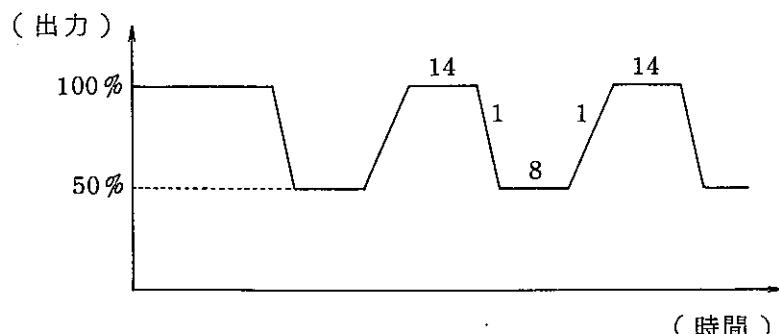
(1) 目的及び実証すべき性能

短尺燃料集合体をハルデンのHBWRに装荷し、負荷変動下での燃料のふるまいオンラインで計測し、実証炉燃料設計の安全裕度を確認する。

(2) 照射試験条件

- (a) 最大線出力密度：約49.2kW/m
- (b) 燃焼度：約20,000MWd/t
- (c) 照射条件：

負荷変動パターン（約2週間/回）



- (d) 照射期間：約4年

(e) 試 料 : 標準燃料, 改良燃料 (Zr ライナ管等)
燃料要素本数 7 本

④ 現在までの成果

60年11月から照射を開始した。これまで負荷変動試験を60年12月, 61年1月, 4月, 6月の合計4回実施した。

表 3.4 に ATR MOX 燃料の照射試験計画をまとめて示す。

(2) 実証炉燃料の設計・試作と炉外試験

実証炉燃料の設計・試作と炉外試験を行って、実証炉燃料の設計を固めるとともに、伝熱流動特性と耐久性を実証する。

(イ) 実証炉燃料の設計・試作・改良を繰り返し、設計を固める。

(ロ) 14 MW大型熱ループ (HTL) における伝熱流動試験

(ハ) 部品機器試験ループ (CTL) における炉外耐久試験

試作燃料集合体を CTL に装荷して、流動特性、振動特性及び耐フレッティング特性を試験し、「ふげん」燃料の炉外試験結果と比較評価して、実証炉燃料設計に反映する。さらに、実証炉燃料の耐久性を実証する。

① 設計・試作・改良

「ふげん」燃料は、53年3月に装荷以来今日まで1本も破損せず、良好な使用実績を示している。

この「ふげん」燃料の設計を基本に、実証炉燃料の設計・試作・試験を繰りし、60年10月に第5次試作を終了した。

これまでに実施した主な内容は、次のとおりである。

試 作	試 作 内 容	実 施 期 間
第 1 次	集合体の基本構造の確認	55. 4 ~ 56. 12
第 2 次	組立方法の検討及び部品、集合体の製作性、検査性確認	56. 10 ~ 58. 3
第 3 次	(イ) スペーサとスペーサ支持管固定部の組立性、 検査性及び機能性の確認 (ロ) 各部寸法公差の確認 (ハ) 上下タイププレートの鋳物による加工性確認	58. 3 ~ 58. 12
第 4 次	(イ) 燃料基本設計に基づく試作 (ロ) 集合体の強度、流動特性等の確認	58. 10 ~ 59. 10
第 5 次	(イ) 燃料設計最終仕様に基づく試作 (ロ) 集合体の耐久性の確認	60. 3 ~ 60. 10

図 3.4 に、実証炉試作燃料集合体を、図 3.5 に燃料スペーサを、図 3.6 に燃料集合体の組立工程を示す。

② 伝熱流動試験

実証炉のバーンアウト限界を調べるために、HTL で実物大模擬燃料集合体を用いて、スペーサ間隔、ロッド出力分布、流量及び蒸気クオリティの影響等について実験を行っている。図 3.7、3.8 にバーンアウト試験結果の例を示す。図 3.7 は、スペーサ間隔のバーンアウト熱流束に及ぼす影響を測定したもので、スペーサ間隔が狭くなるとともにバーンアウト熱流束が増大している。これまでの「ふげん」燃料の実験結果からスペーサ間隔を狭くする程限界熱流束が増大することが明らかになっているが、⁽⁵⁾ 実証炉燃料についても同様な傾向があり、420mm から 260mm に間隔を狭くすると限界熱流束は約 20 ~ 30% 増加する。図 3.8 は、「ふげん」28 本クラスタと実証炉 36 本クラスタのバーンアウト熱流束を比較したもので、実証炉燃料についても「ふげん」燃料と同様な傾向がみられる。

③ 炉外耐久試験^{(6)~(8)}

燃料の耐久性を実証するため、CTL で振動・耐久試験を試作燃料集合体を用いて行つ

ている。耐久性の実証で重要なポイントであるフレッティング腐食量は、「ふげん」燃料の約30,000時間の耐久性試験の結果では、図3.9に示すように時間とともに飽和する傾向にある。また、フレッティング腐食深さは図3.10に示すように引抜き力が約0.04kg以上であれば、フレッティング腐食深さはほとんど変わらない。

この知見により、フレッティングで構造上最も重要なポイントになるスペーサリング素子は、構造、材質とも「ふげん」燃料と実証炉燃料を基本的に同一の設計にしている。現在、試作実証炉燃料集合体を用いて、耐久性に関する試験を進めており、今まで得られた結果の概要は次のとおりである。

(1) 流力振動特性

実証炉燃料棒の流力振動特性は、「ふげん」燃料棒と比較して振幅で約0.6倍、固有振動数ではほぼ同等である。図3.11に流力振動試験結果を示す。

(2) スペーサばね弛緩特性

試験で得られた流力振動振幅値を上回る設計値の2倍の振幅($20\mu\text{m}$)で燃料要素を加振した。スペーサ素子の引抜き力は、 5×10^9 サイクルまで低下していない(設計炉内滞在年数6.5年～ 1.5×10^{10} サイクル)。図3.12にスペーサ引抜き力の試験結果を示す。

(3) フレッティング腐食特性

約4,100時間のフレッティング腐食量は、「ふげん」燃料の値と同等である。

3.3 MOX燃料の挙動解明^{(9)～(12)}

動燃事業団におけるMOX燃料（熱中性子炉用）の照射試験実績は、表3.5に示す通りである。

MOX燃料の照射挙動は、表3.5に示す照射試験と実証炉燃料の照射試験（表3.4）及び「ふげん」における実績を基にUO₂燃料の照射挙動と比較・評価し、設計コードの改良・整備を行なっている。

(1) 「ふげん」MOX燃料の挙動

「ふげん」MOX燃料の第1回目の照射後試験は、58年10月に開始し、60年12月に終了した。対象とした燃料集合体は54年3月の運転開始以来使用されたP06燃料集合体で、図3.13に示す線出力密度履歴を経験して57年10月に取出した。

燃料集合体平均燃焼度は13,600MWd/t、最大線出密度は41.5kW/m、炉内滞在日数は944日であった。表3.6に「ふげん」燃料及び挙動評価に使用したSGHWR照射のATR燃料の主要仕様を示す。

照射後試験の主な結果は次の通りである。

① 燃料棒の寸法変化

- (i) 燃料棒の軸方向伸びは、図3.14に示すように燃焼度に依存して増加する。MOX燃料とUO₂燃料の間に差は認められない。
- (ii) 燃料棒の外径プロファイルは、図3.15に示すように設計コードにより予測することができる。この図から分かるように、燃料棒外径は外圧クリープ変形を示している。

② FPガス放出率

燃料ペレット中に生成するFPガスの内、プレナム内に放出される割合は、外層燃料で約3%，中間層燃料で約1%，内層燃料で約0.2%である。FPガス放出率を燃焼度と照射中の最高線出力密度で整理した結果を図3.16、3.17に示す。図からFPガス放出率は線出力密度の関数として示すと良い相関がみられる。また、MOX燃料とUO₂燃料との間のFPガス放出率には有意な差が認められない。

③ FP分布

燃料棒の軸方向ガンマスキャニング（全ガンマ）の測定結果を図3.18に示す。図より、FP分布は軸方向の相対燃焼度分布に依存する傾向がみられる。また、スペーサ

付近及び炉心部にある防振板付近での歪み効果が観察できる。

④ 燃料ペレットの組織変化

燃料ペレットの組織は、図3.19に示すように使用期間中最大線出力密度 41.5 kW/m を経験した外層燃料棒において、ペレット中心部が等軸晶の成長がみられる。最大線出力密度が 35.8 kW/m 以下の中間層及び内層燃料棒では結晶成長はみられず、低線出力密度の場合に典型的な半径方向クラックがみられる。

(2) MOX燃料のハルデン炉による照射試験

現在、ハルデン炉で表3.7に示すような燃料仕様のプルサーマル燃料棒IFA-514, 529が計装付で照射されている。燃料計装としては、中心温度、燃料棒内圧、燃料棒伸び及び燃料スタック伸びである。

- ① 図3.20に中実ペレットと中空ペレットの燃料棒内圧の燃焼に伴う変化を示す。中空ペレットの内圧は中実ペレットの内圧より低くなっている。
- ② 図3.21と3.22は、燃料棒内圧及び燃料温度（実測）と燃焼度との関係を示す。図から、MOX燃料のFPガス放出開始点が、 UO_2 燃料に対するVitanzaモデルの値と一致しており UO_2 燃料のFPガス放出挙動と同様であることが分かる。
- ③ 図3.23は、混合転換法と通常のボールミル混合法により製造されたペレットのFPガス放出挙動を示したものである。燃焼度が約 $10,000 \text{ MWd/t MOX}$ 以上になると混合転換法で製造されたペレットを含む燃料棒の方が若干内圧が低くなる傾向を示している。

表3.1 ATR燃料集合体主要仕様

	「ふ げ ん」	実 証 炉
(1) 平均核分裂性物質量 (取替) (w/o) (Pu _f + ²³⁵ U)	1.4 ~ 2.0	3.0 ~ 3.2
(2) ペレット 直 径 (mm) 高 さ (mm) 形 状 密 度 (%T.D.)	14.4 18 ディッシュ, チャンファ付 95	12.4 13 ディッシュ, チャンファ付 95
(3) 被 覆 管 材 質 寸 法 外 径 (mm) 内 径 (mm) 肉 厚 (mm)	Zry-2 16.46 14.70 0.88	Zry-2 14.5 12.7 0.90
(4) スペーサ 材 質 配 列	インコネル 28本ロッド・クラスタ	インコネル 36本ロッド・クラスタ
(5) スペーサ支持管 材 質 本 数 (本)	Zry-2 4(長さ方向に13本連結したもの)	Zry-2 1(中心支持管)
(6) 燃 料 集 合 体 全 長 (mm) 有 効 長 (mm) 重 量 (kg) タイロッド燃料棒数(本) スペーサ数(個)	4,388 3,700 ~230 8(中間層燃料棒) 12	4,463 3,700 ~220 6(中間層燃料棒) 12
(7) 平均燃焼度(MWd/t) (取替)	17,000	30,000
(8) 最大線出力密度(kW/m) (定格時)	57.4	49.2

表3.2 ATR 燃料開発スケジュール

年 度 項 目	5 7	5 8	5 9	6 0	6 1	6 2	6 3	6 4	6 5	6 6	6 7	6 8	6 9	7 0
(1) 実証炉燃料の設計・試作					○									
(2) 照 射 試 験														
① 「ふげん」燃料の照射後試験					○	○	○	○	○	○	○			
② 実証炉燃料の照射試験														
(i) SGHWRにおける照射試験(36本定格照射)	○		○			○		○		○				
(ii) HBWRにおける照射試験(日負荷追従試験)	○		○			○		○		○				
(iii) 「ふげん」における照射試験 (a) 標準燃料(36本定格照射)	○		○			○		○		○		○		
(b) セグメント燃料(36本負荷変動)			○		○					○		○		
(3) 廉外評価試験														
① 伝熱, 流動, 耐久試験														

(注) PIE (Post Irradiation Examination) 照射後試験

表 3.3 セグメント燃料照射試験フローと測定項目

試験フロー	試験対象	測定項目
製造時検査	(1)被覆管(Zry-2, Zrライナ) (2)MOXペレット(中実, 中空) (3)長尺燃料棒 (4)セグメント燃料棒 (5)燃料集合体	(1)材料強度, 寸法, 金相 (2)寸法, 結晶粒度, Puスポット, 密度, 不純物ガス核分裂性物質量, O/M比, Pu同位体比 (3)寸法, プレナム体積, ギャップ巾, He加圧量, X線 (4)寸法, プレナム体積, ギャップ巾, He加圧量, X線 (5)外観, 寸法
炉心装荷前検査	燃料集合体	外観, 寸法
ベース照射	燃料集合体 長尺燃料棒 セグメント燃料棒	線出力密度履歴, 冷却材温度, 冷却材圧力, 高速中性子束, 燃焼度, 冷却材ボイド率, ^{10}B 濃度等
取出燃料検査	燃料集合体	燃料棒間ギャップ, クラッド付着状況, 外観
出力急昇前 照射後試験	燃料集合体	外観, 寸法
	出力急昇試験用セグメント燃料棒	外観, 外径プロファイル, 全長, 湍電流深傷, X線, ガンマ・スキャン, リーク試験等
	出力急昇試験をしない セグメント燃料棒	外観, 外径プロファイル, 全長, 湍電流深傷, X線, ガンマ・スキャン, FPガス分析, 金相, 被覆管強度, ペレット密度, 燃焼度等
	長尺燃料棒	外観, 外径プロファイル, 全長, 湍電流深傷, X線, ガンマ・スキャン, FPガス分析, 金相, 被覆管強度, 燃焼度, ライナ層密着性等
出力急昇試験	セグメント燃料棒	出力変動速度(\dot{P}), 変動前出力(P_0), 出力変動巾 (ΔP), 変動後出力(P_{max}), 軸方向出力分布, 冷却 材圧力, 被覆管表面温度, FPガス・モニタ(破損燃 料検出)燃料棒伸び等
照射後試験	セグメント燃料棒	外観, 外径プロファイル, 全長, 湍電流深傷, X線, ガンマ・スキャン, FPガス分析, 金相, 被 覆管強度, ペレット密度, 燃焼度, ライナ層密着性等

評価

燃料の照射挙動に関して予測解析, 試験結果等の解析を行
い, 照射後試験データと併せて, 負荷変動に対する
下記の性能評価を行う。

- 被覆管の軸方向, 径方向伸び
- 被覆管の変形(曲がり, リッジング等)
- 被覆管の材料強度
- FPガス放出量, 燃料棒内圧
- 破損しきい値



負荷変動時の燃料安全裕度確認, 高性能燃料の性能確認

表3.4 ATR MOX燃料の照射試験計画

項 目	照射名 「ふげん」実機燃料 の照射後試験	定 格 運 転 照 射 試 験		負 荷 変 動 照 射 試 験	
		SGHWR照射試験	「ふげん」36本 燃料照射試験	「ふげん」セグメント 燃料照射試験	HBWR照射試験
照 射 庫 (国 名)	「ふげん」	SGHWR (英 国)	「ふげん」	「ふげん」, JMTR	HBWR (ノルウェー)
照射期間または照射後試験実施期間	第1回(58.10~60.12) 第2回(61.6~62.12) 第3回	59.8 ~ 63.3	60.12 ~ 67.3	62.4 ~ 67.3	60.11 ~ 65.3
照 射 条 件					
(1) 最大線出力密度 (kW/m)	約 49.2	44.5	49.2	39.4	49.2
(2) 最大燃焼度 (MWd/t)	第1回(14,000) 第2回(18,000) 第3回	15,000	32,000	30,000	20,000
燃 料 仕 様					
(1) ペ レ ッ ト					
Puf 富化度 (w/o)	0.7 ~ 1.3	1.0 6	1.7 5	2.2 5	3.4
直 径 (mm)	1 4.4 0	1 2.4 0	1 2.4 0	1 2.4 0	1 2.4 0
高 さ (mm)	1 8	1 3	1 3	1 3	1 3
密 度 (% T.D.)	9 5	9 5	9 5	9 5	9 5
(2) 被 覆 管					
材 質	Zry-2	Zry-2	Zry-2	Zry-2	Zry-2
外 径 (mm)	1 6.4 6	1 4.5 0	1 4.5 0	1 4.5 0	1 4.5 0
内 径 (mm)	1 4.7 0	1 2.7 0	1 2.7 0	1 2.7 0	1 2.7 0

表 3.5 動燃事業団におけるMOX燃料(熱中性子炉用)の照射試験実績

照射プラント 炉型式	照射試験名	燃料集 合体数	燃焼度(MWd/t)		最大線出力 密度(kW/m)	Pu _f 富化度 (w/o)	照射期間
			ペレット最高	集合体平均			
HBWR 重水炉	1FA-159	1	12,500	9,420	34.8	2.3	43.6 ~ 45.3
	1FA-160	1	6,070	5,340	32.5	2.8	44.3 ~ 45.3
	1FA-423	1	6,670	5,000	49.5	0.91	50.6 ~ 51.10
	1FA-514	1	39,840*	33,200*	50.0	4.64	54.7 ~ 62.3
	1FA-529	1	33,820*	27,060*	50.0	6.0	55.6 ~ 61.9
Saxton PWR	Saxton (Loose)	2	8,750	5,340	51.2	5.0	46.11 ~ 47.5
	Saxton (D5)	1	6,680	2,830	38.1	4.0	同上
Saxton GETR PWR BWR	Saxton -GETR	—	38,050	25,370	47.2	4.0, 5.0	46.11 ~ 51.11
SGHWR 重水炉	標準燃料	1	9,860	6,420	48.9	1.7	50.10 ~ 52.4

* 61年6月15日現在実績値

(1FA-514:62年3月まで照射予定)
(1FA-529:61年9月 ")

表3.6 「ふげん」及びSGHWR照射燃料の主要仕様

試験名 項目	「ふげん」 P 0 6	S G H W R 照 射			
		Type-A	Type-B	Type-C	Type-D
(1) 燃 料 の 種 類	MOX	U O ₂	U O ₂	U O ₂	MOX
(2) ペレット					
Pu _f 富化度(w/o)	0.7	—	—	—	1.7
²³⁵ U濃縮度(w/o)	天然ウラン	2.3	2.8	2.4	天然ウラン
直 径 (mm)	14.40	14.56	8.37 12.74 (内) (外)	14.40	14.40
高 さ (mm)	1.8	2.0	1.2 1.7 (内) (外)	1.6	1.8
密 度 (%T.D.)	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
(3) 被 覆 管					
材 質	Zry-2	Zry-2	Zry-2	Zry-2	Zry-2
外 径 (mm)	16.46	16.70	9.74 14.72 (内) (外)	16.46	16.46
内 径 (mm)	14.70	14.85	8.62 13.04 (内) (外)	14.70	14.70
(4) 最大線出力密度 (kW/m)	41.5	56.2	16.3 44.4 (内) (外)	5.5	48.9
(5) 燃焼度 (MWd/t)					
集 合 体 平 均	13,600	2,900	8,580	8,050	6,420
ペレット最 高	17,140	4,450	11,760	12,250	9,860

表 3.7 ハルデン照射燃料の主要仕様

項目 \ 試験名	I F A - 5 1 4	I F A - 5 2 9
(1) 燃料の種類	M O X	M O X
(2) ペレット		
Pu _f 富化度 (w/o)	4. 6 4	6. 0
形 状	チャンファ付中実 チャンファ付中空	チャンファ付中実
直 径 (mm)	1 0 5 5	10.46, 10.56, 10.66
内 径 (mm)	(3.5)	—
高 さ (mm)	1 0	1 0
密 度 (%T.D.)	9 4	9 4
(3) 被覆管		
材 質	Zry - 2	Zry - 2
外 径 (mm)	1 2 5 2	1 2 5 2
内 径 (mm)	1 0 8 0	1 0 8 0
(4) ペレット一被覆管 キャップ (mm)	0.25	0.14, 0.24, 0.34
(5) 燃料有効長 (mm)	1,380	550

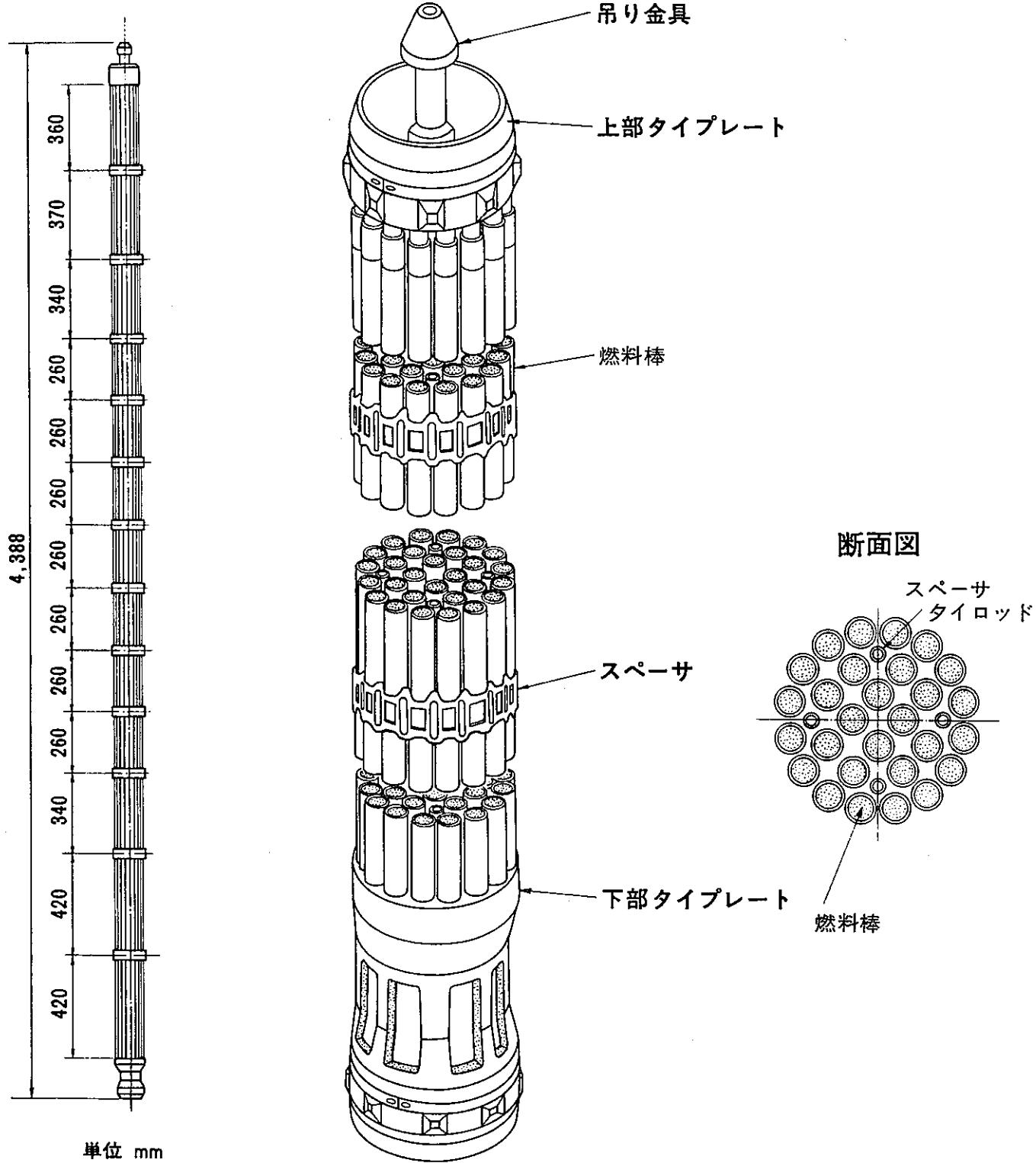


図 3.1 「ふげん」標準燃料集合体

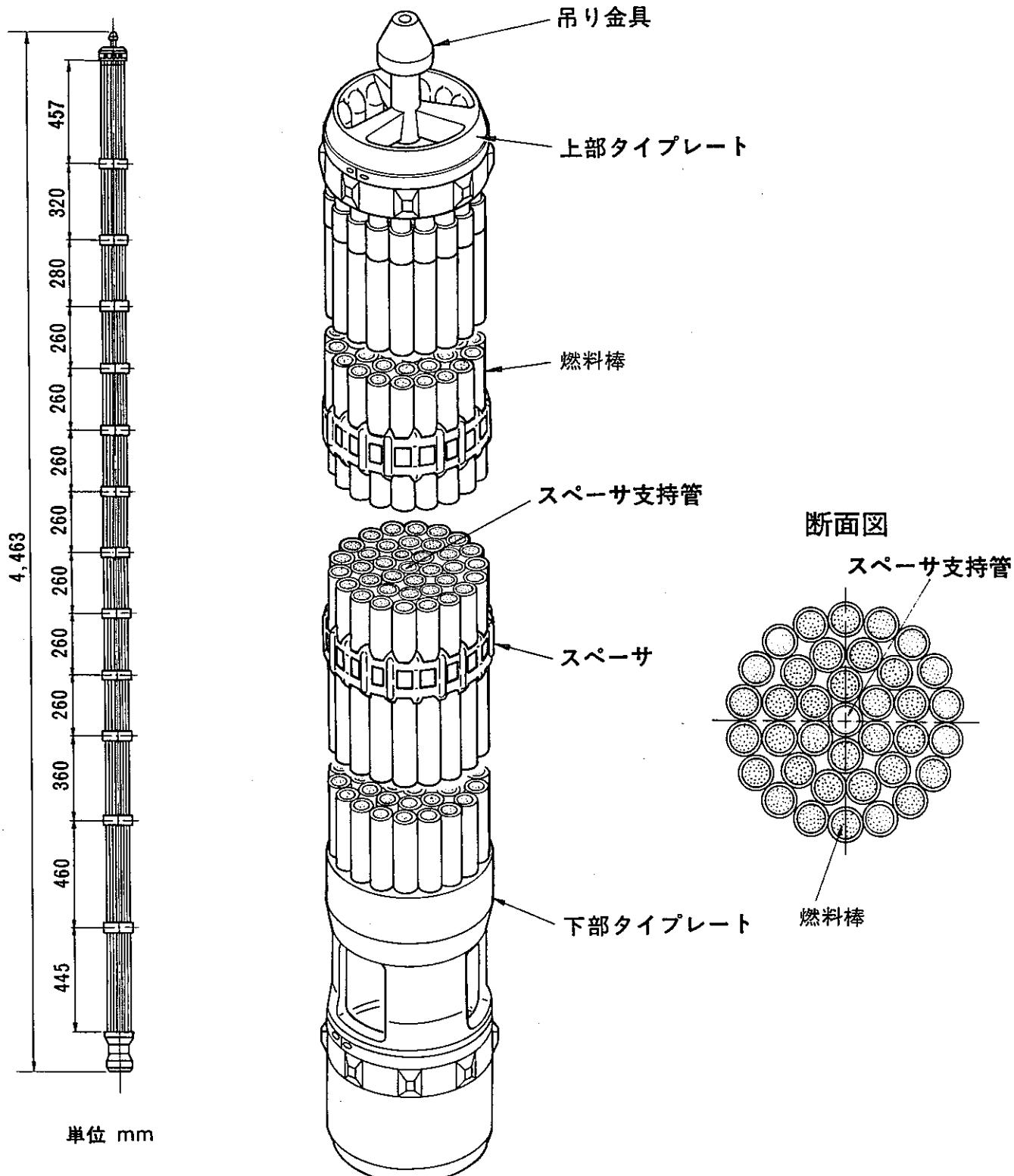


図3.2 ATR 実証炉標準燃料集合体

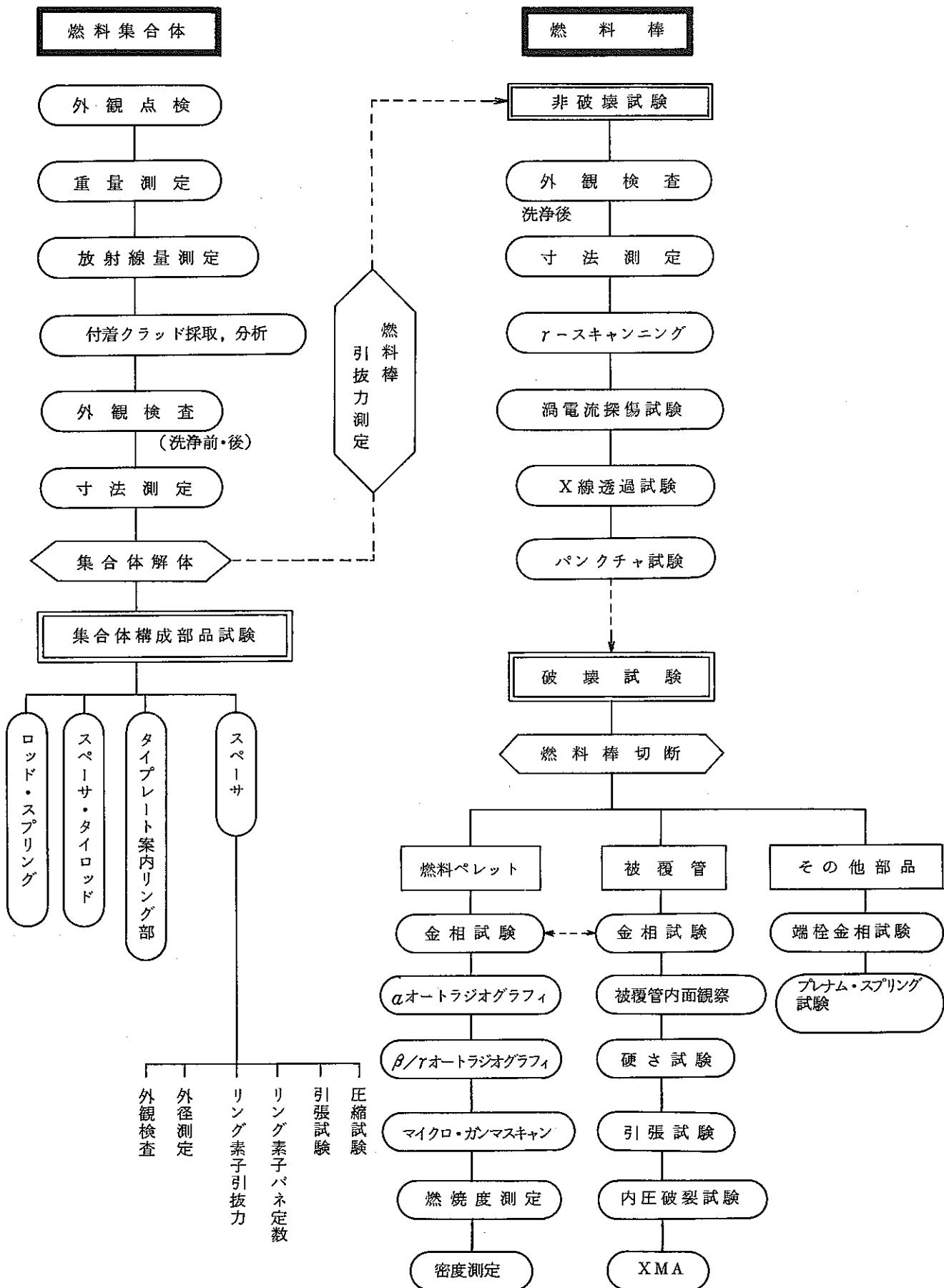


図3.3 「ふげん」燃料の照射後試験の流れ



図3.4 実証炉試作燃料集合体

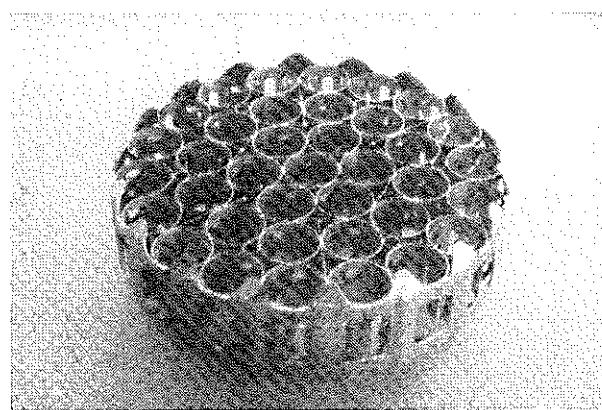


図 3.5 燃料スペーサ

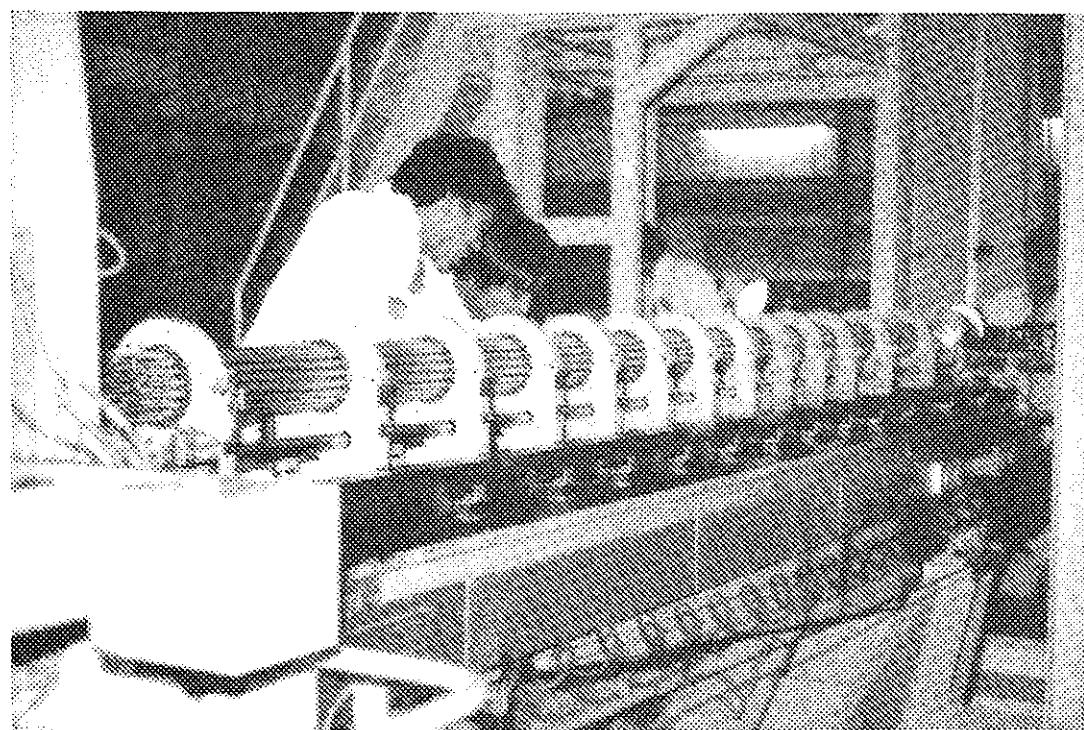


図 3.6 燃料集合体の組立工程

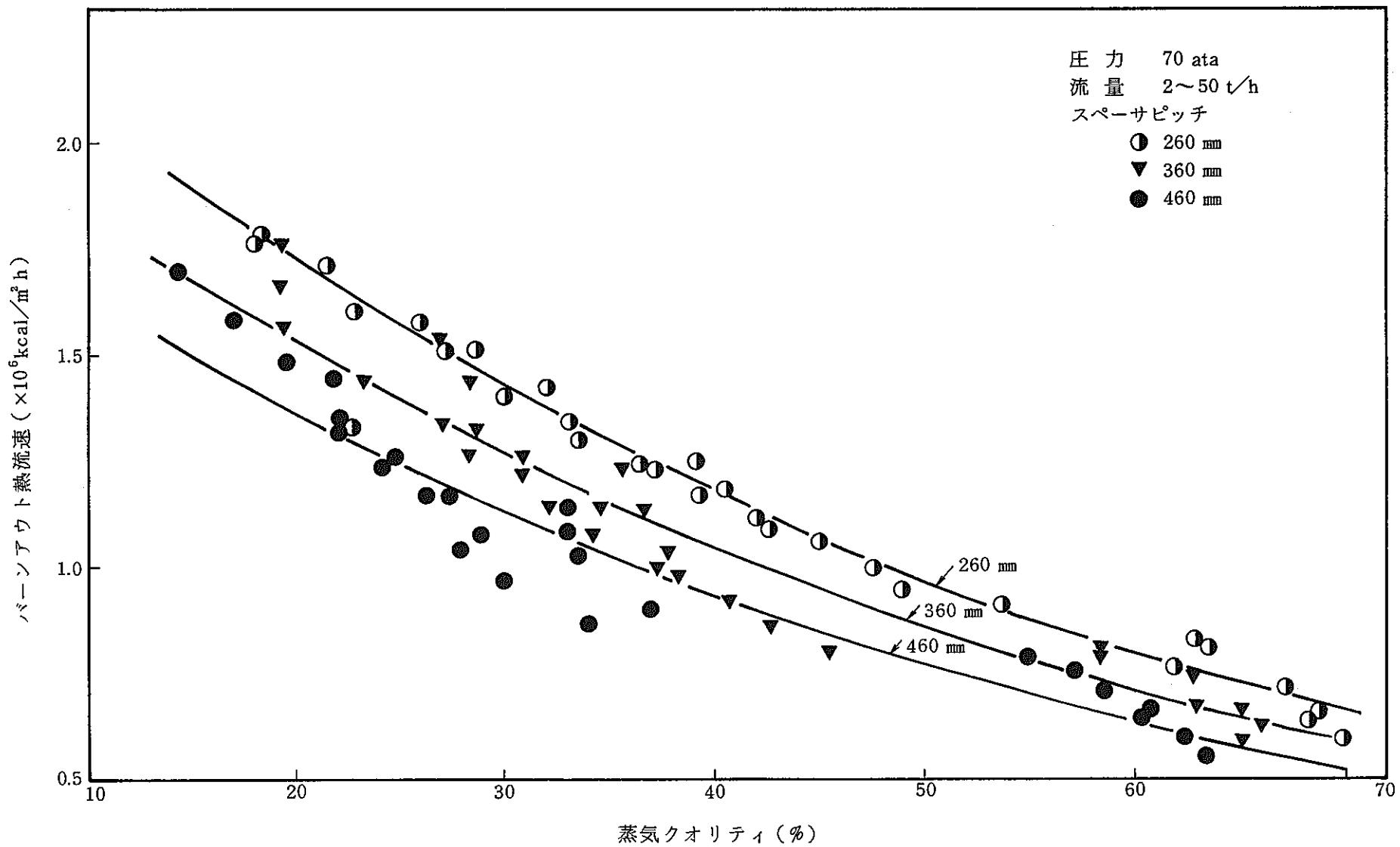


図 3.7 スペーサ間隔のバーンアウト熱流束に及ぼす影響

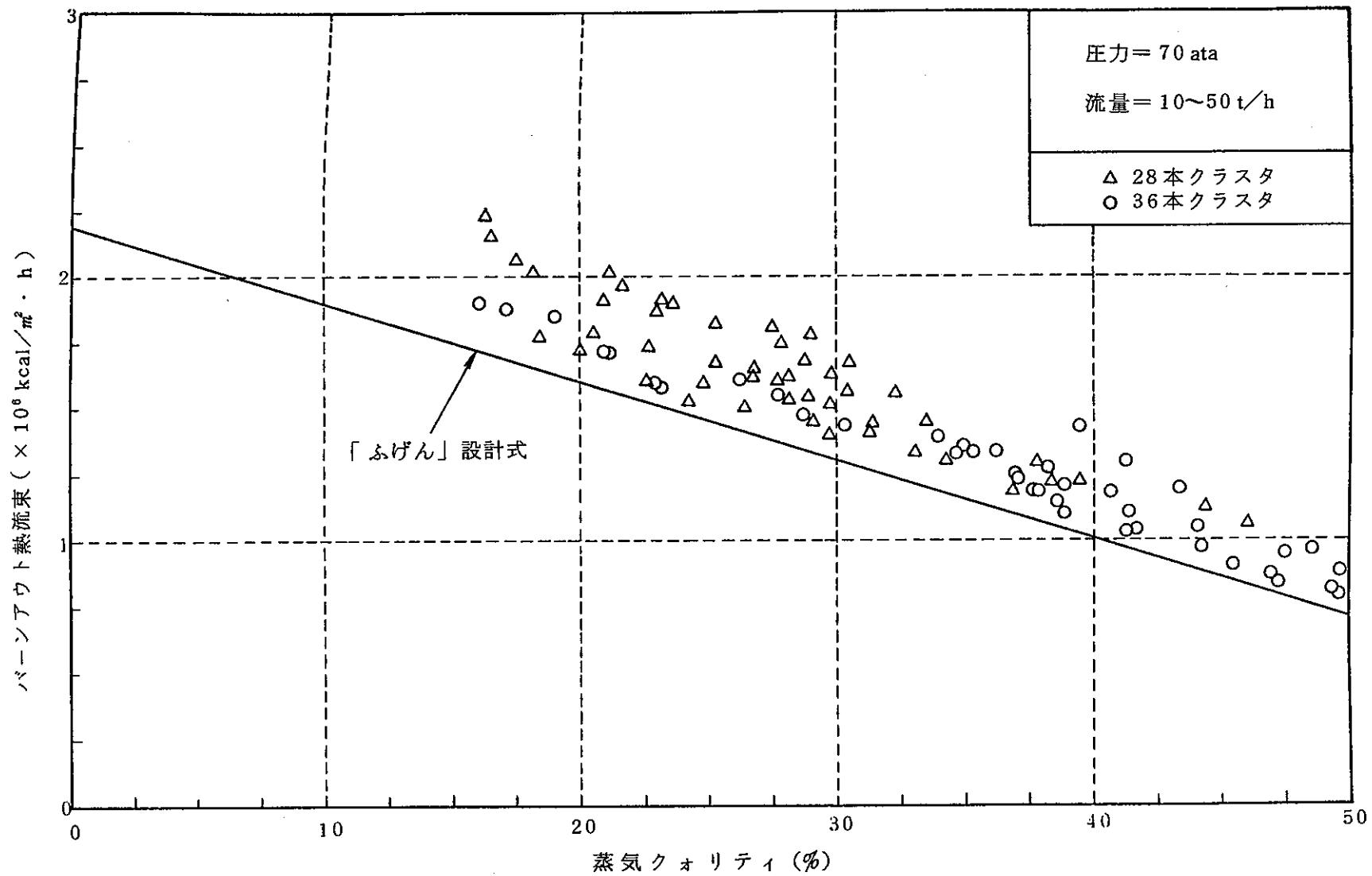


図 3.8 28本クラスタと36本クラスタのバーンアウト熱流束の比較

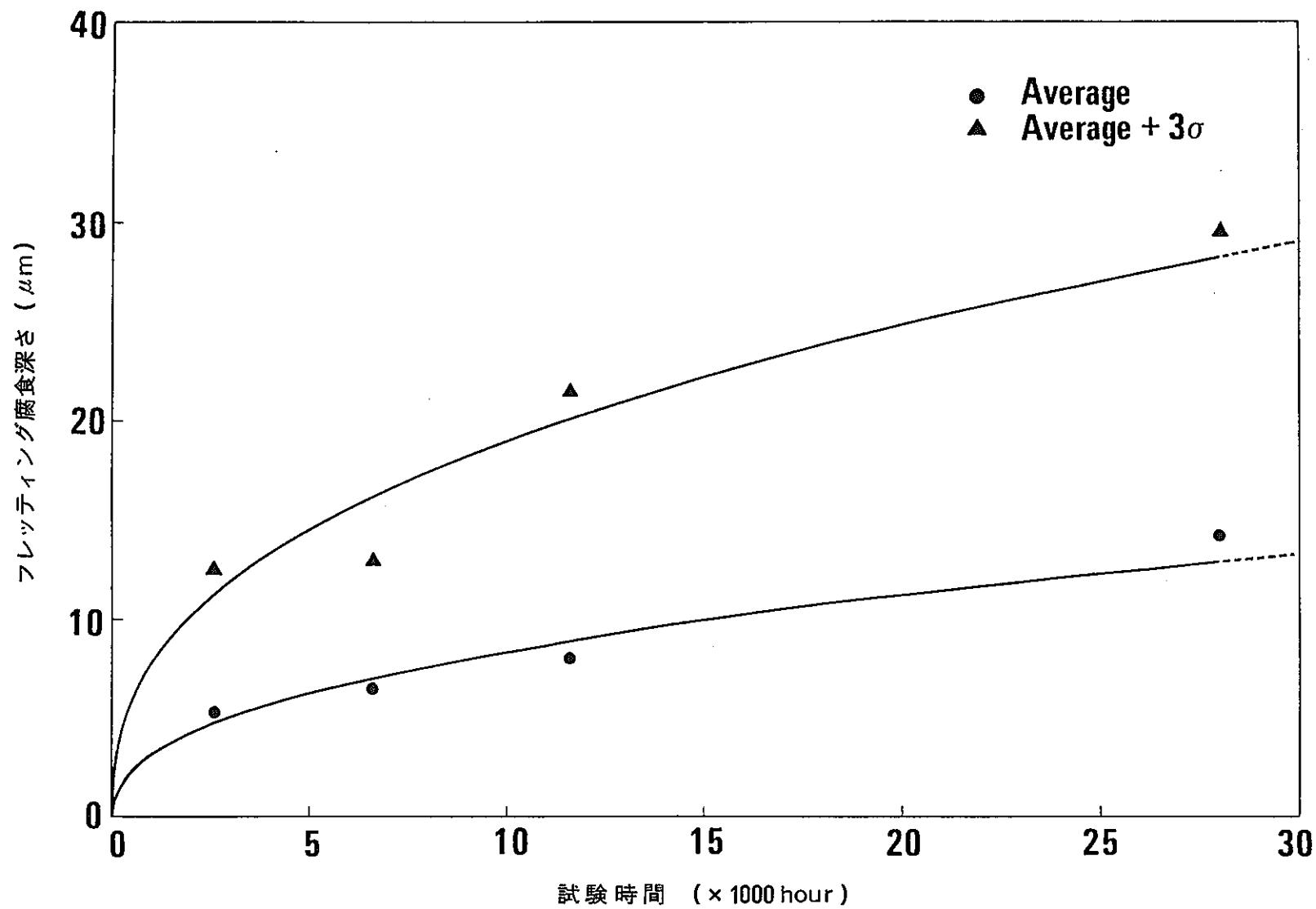


図 3.9 フレッティング腐食深さの経時変化

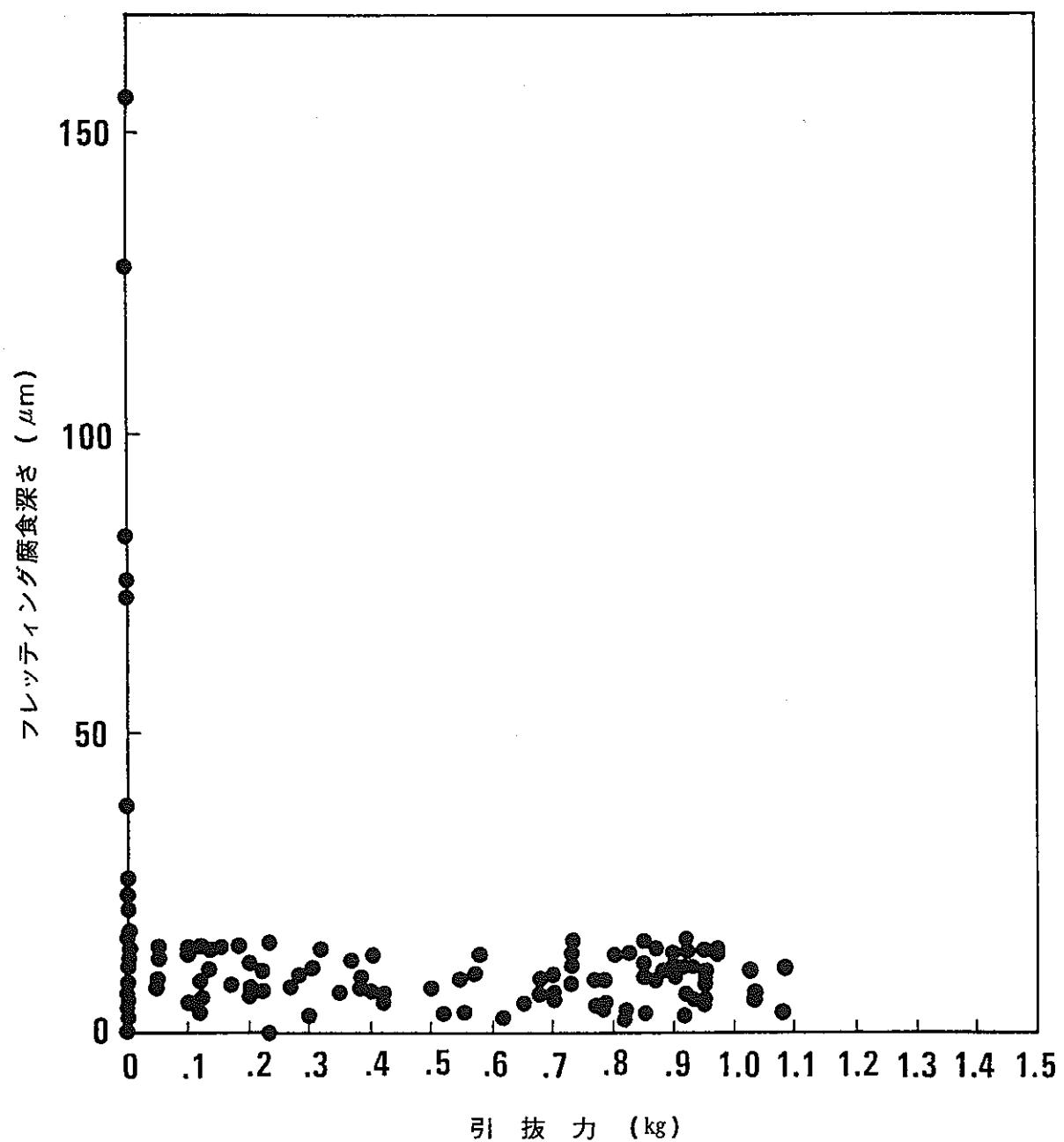


図 3.10 引抜き力とフレッティング腐食深さ

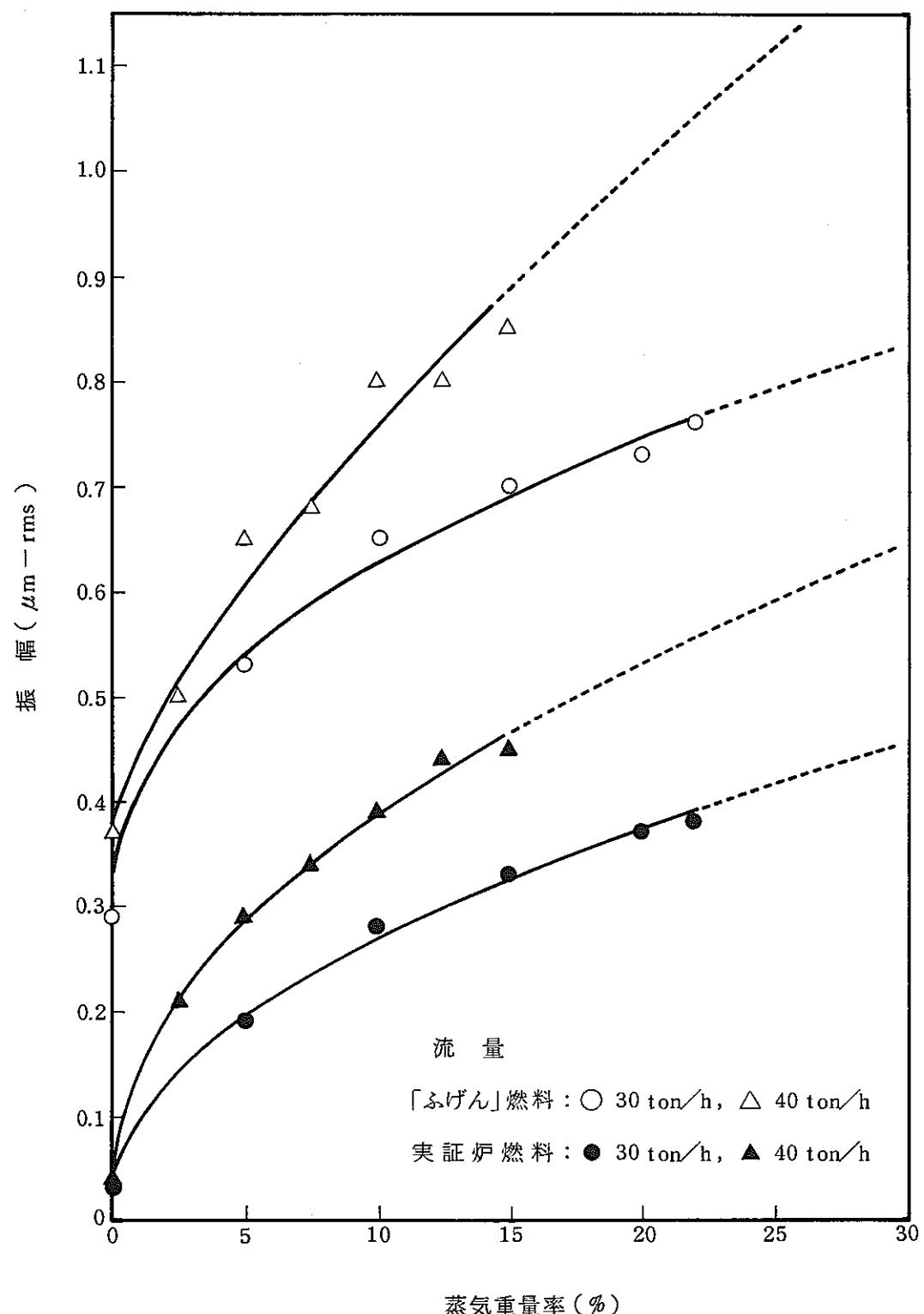


図 3.11 ATR 燃料の流力振動特性

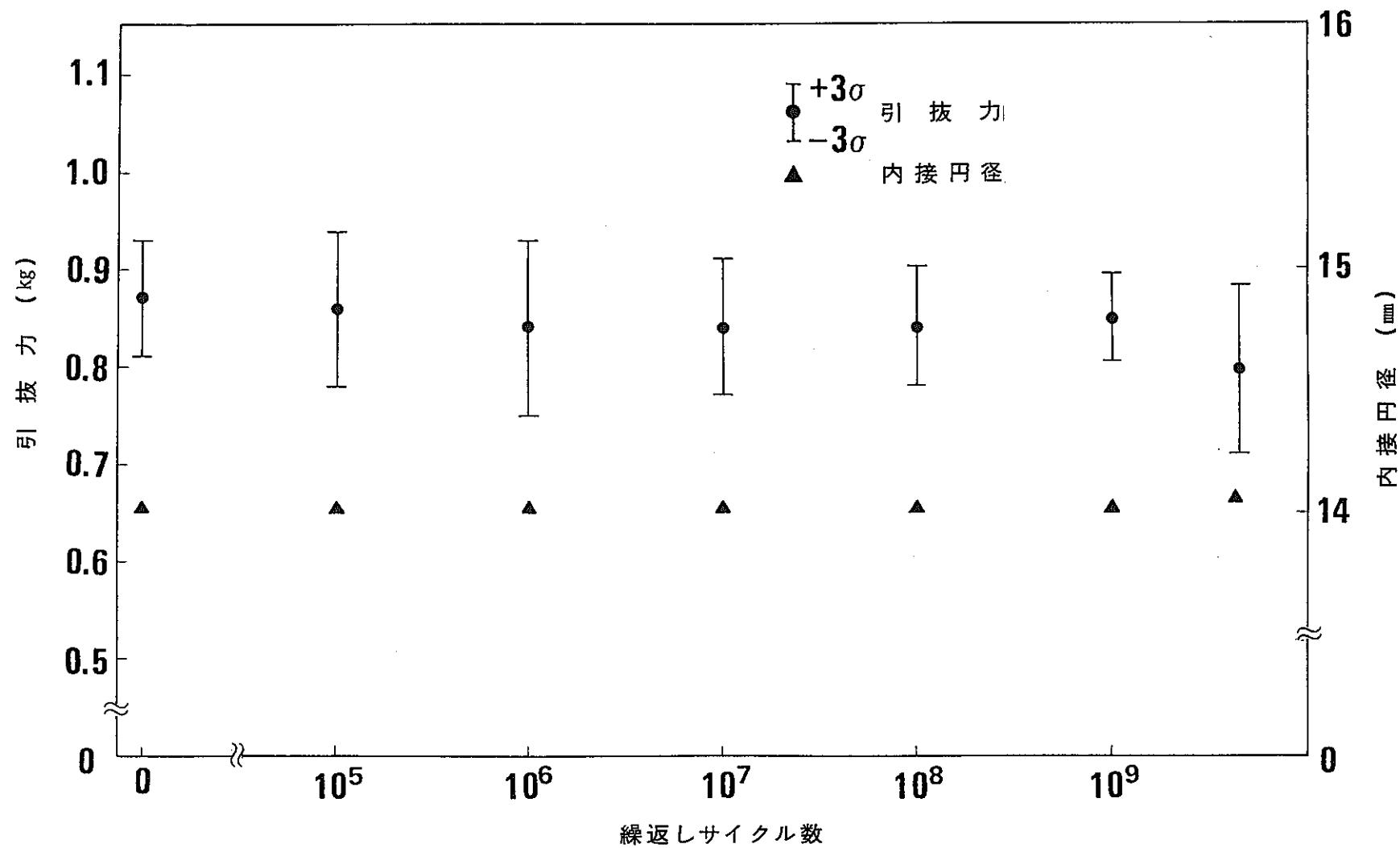


図 3.12 スペーサリング素子の疲労特性

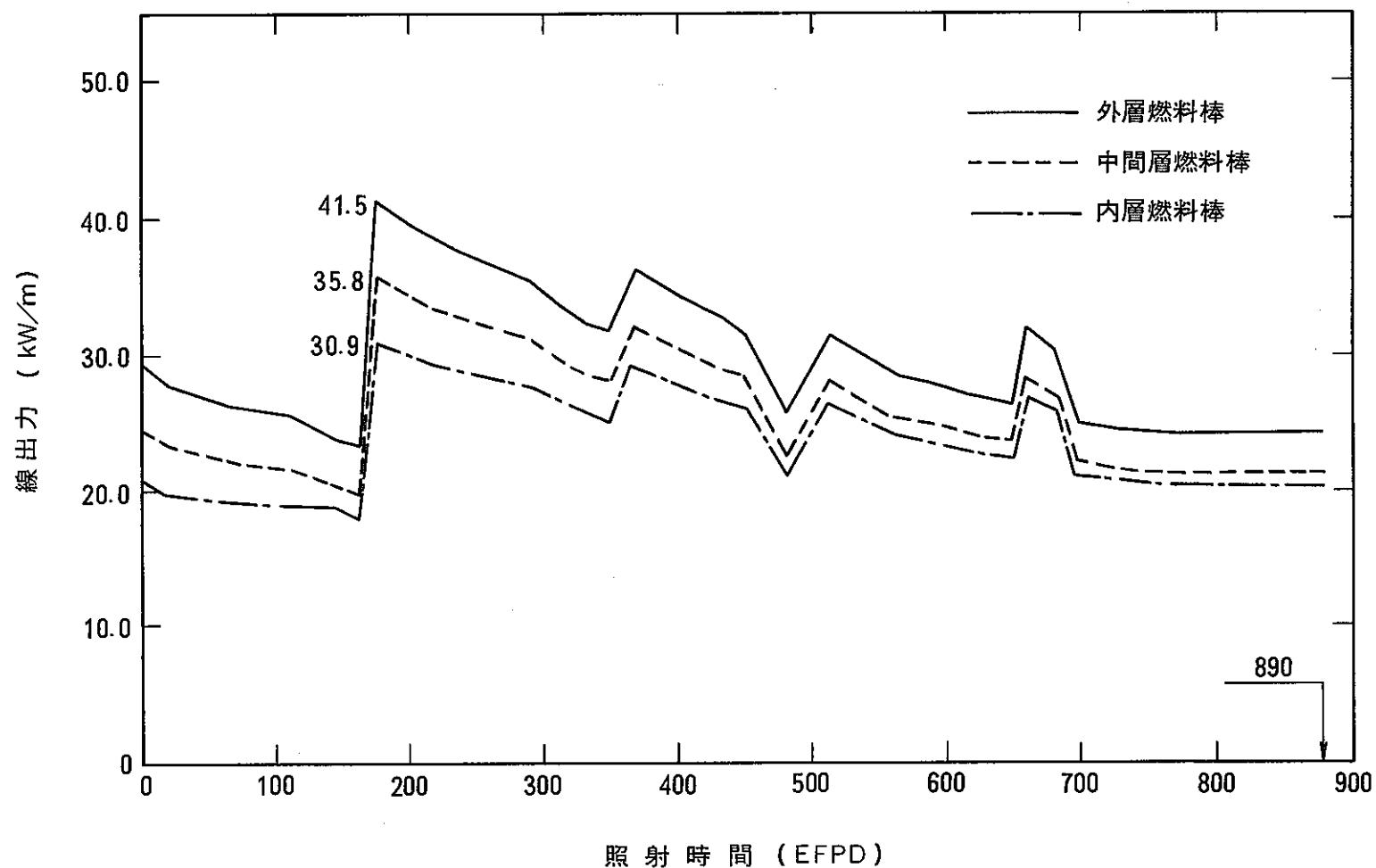


図 3.13 ふげん P06 燃料集合体の最高線出力の履歴

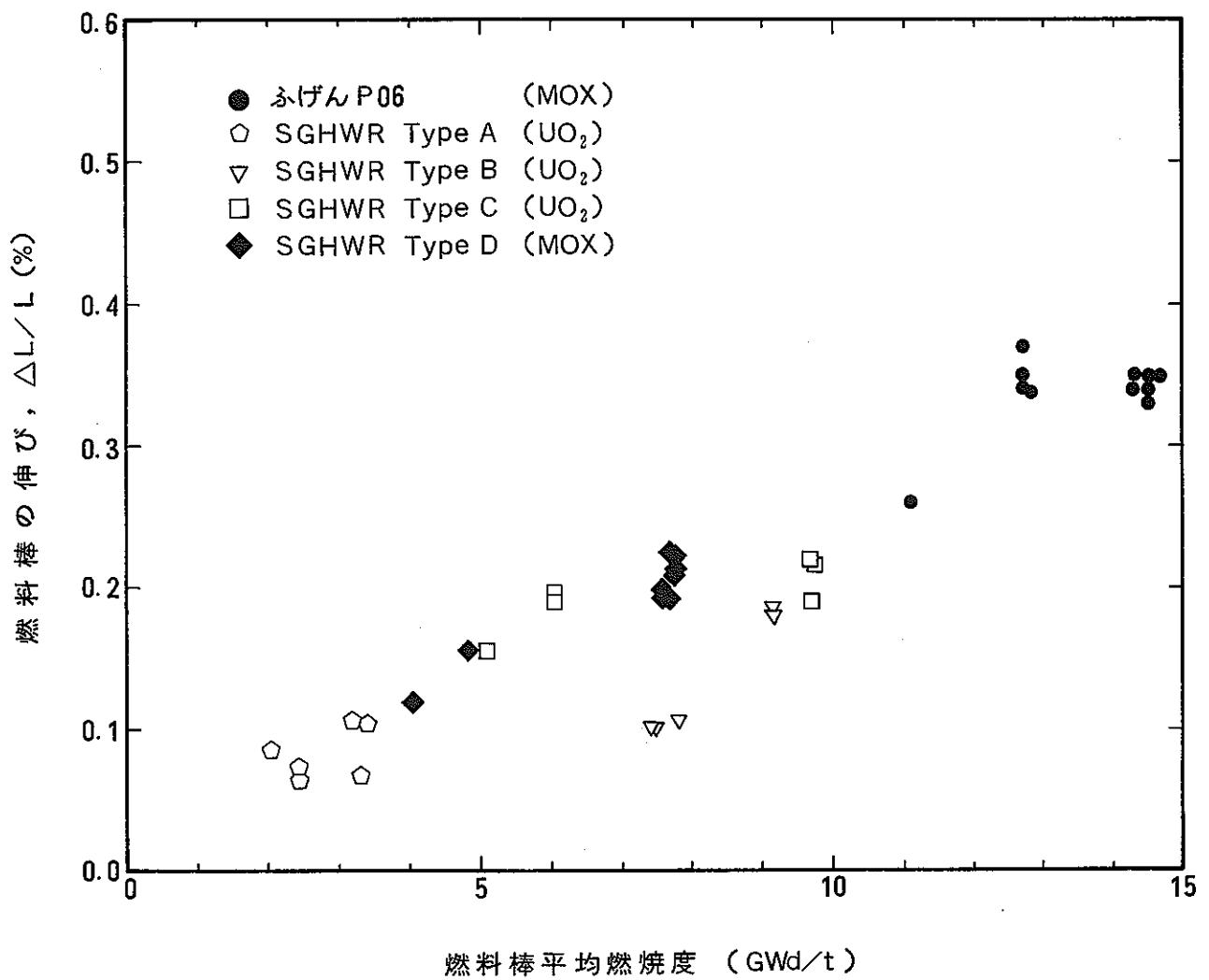


図3.14 燃料棒伸びの燃焼度依存性

中間層燃料棒 ($0^\circ - 180^\circ$, $90^\circ - 270^\circ$)

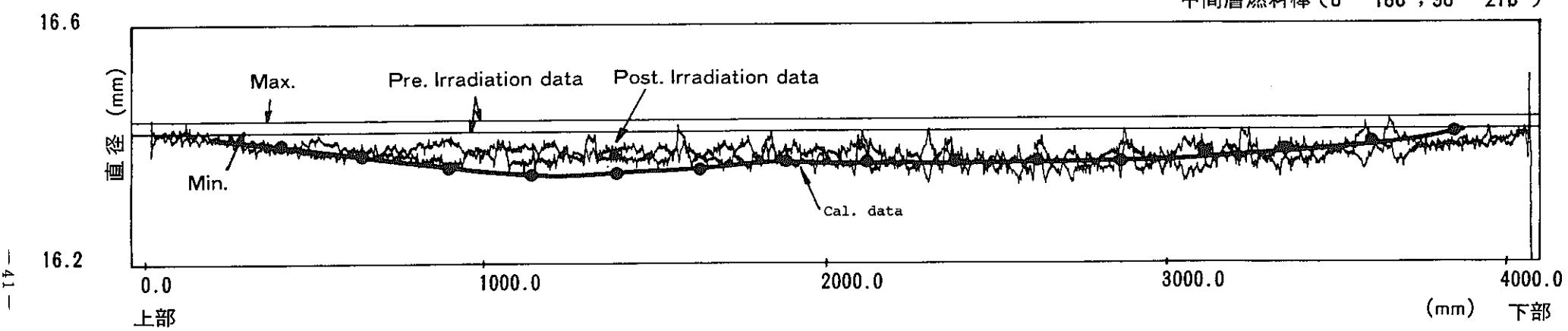


図 3.15 「ふげん」 MOX 燃料棒 (P06) の外径変化

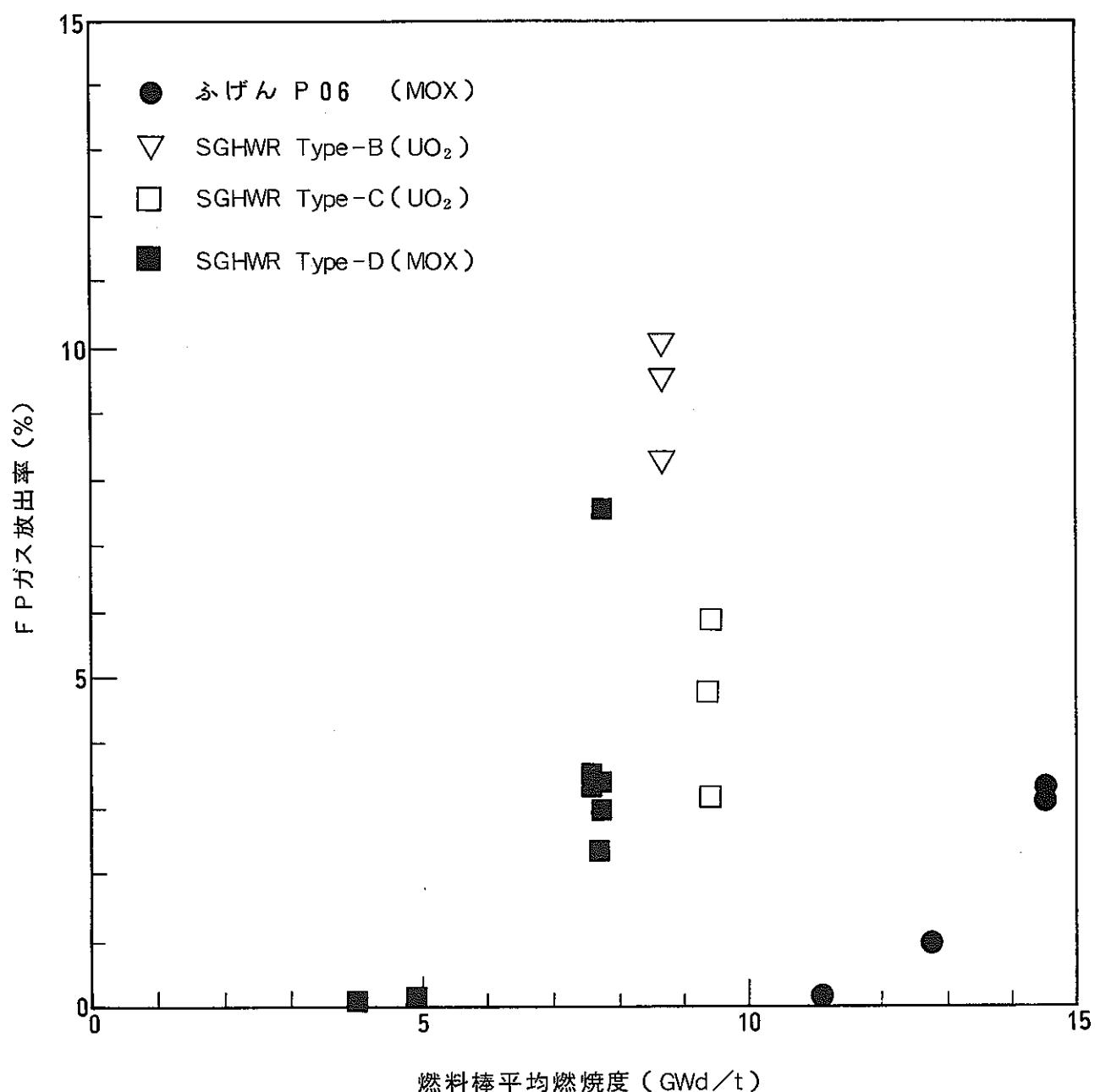


図3.16 FPガス放出率の燃焼度依存性

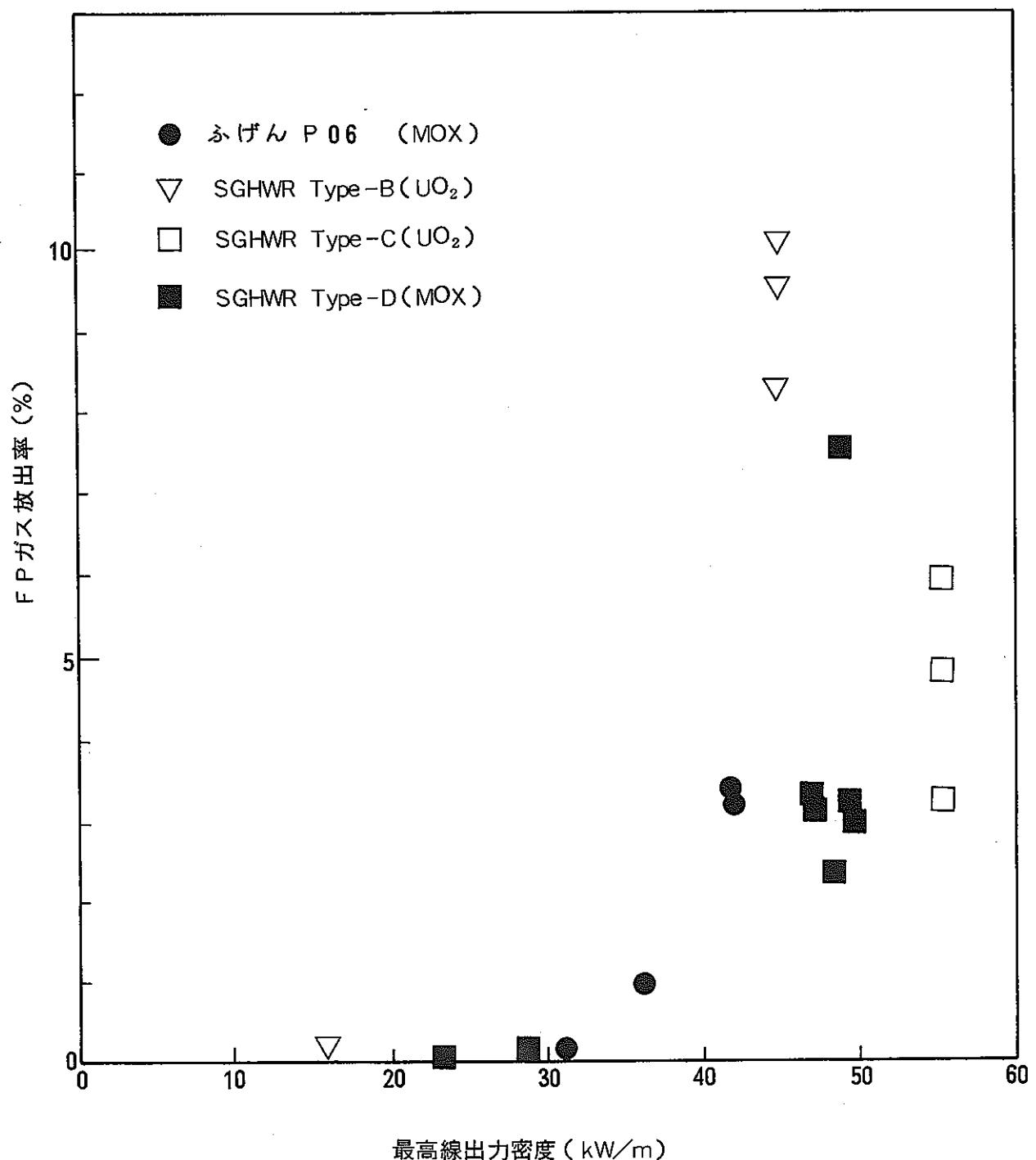


図 3.17 F P ガス放出率の燃料線出力密度依存性

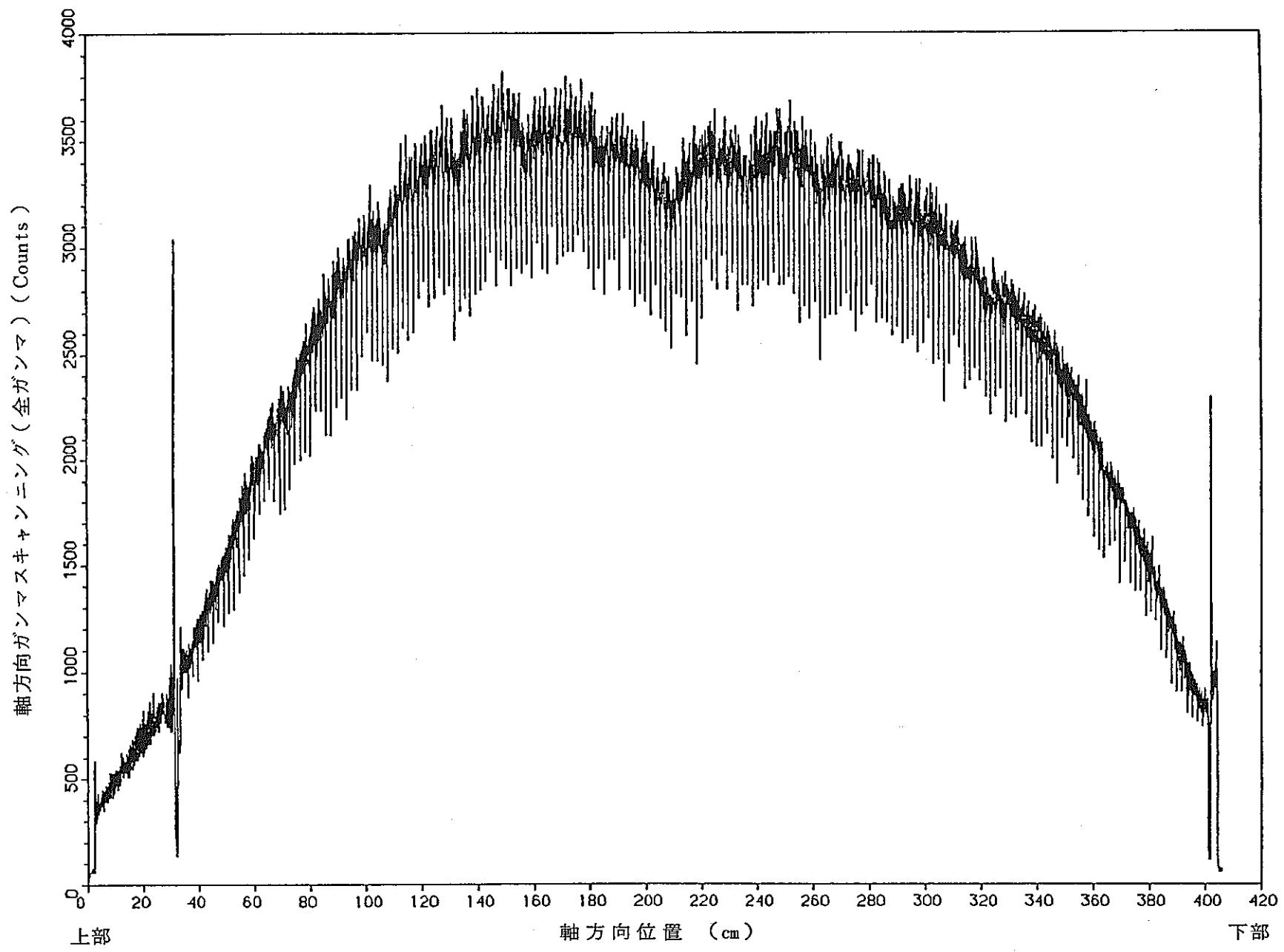


図 3.18 軸方向ガンマスキャニング(全ガンマ)(外層燃料棒)

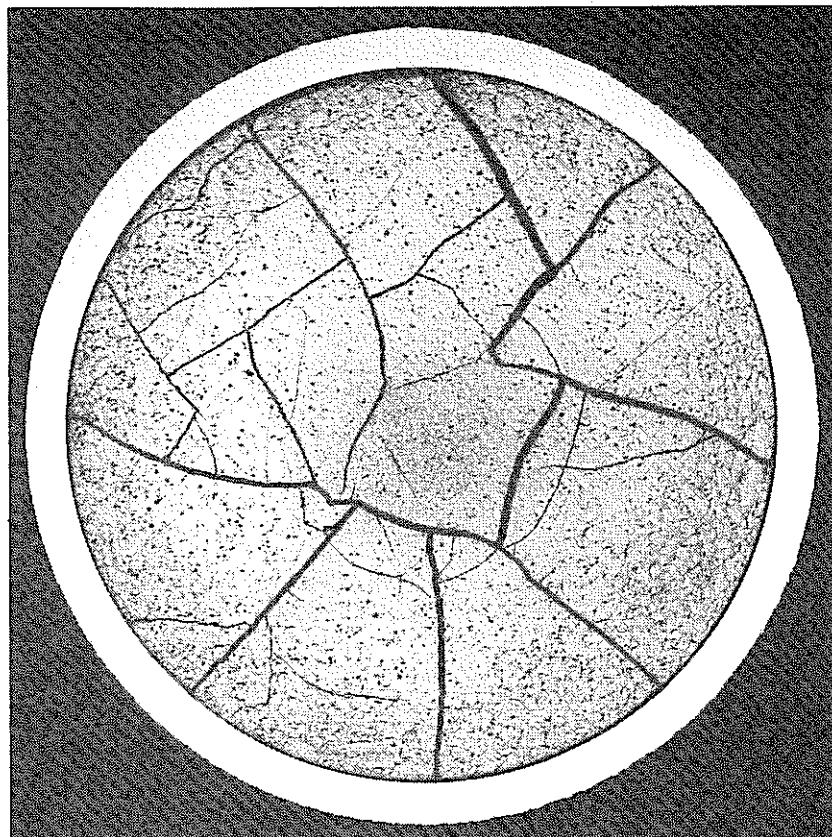


図 3.19-(1) 燃料ペレット組織変化(外層燃料棒)

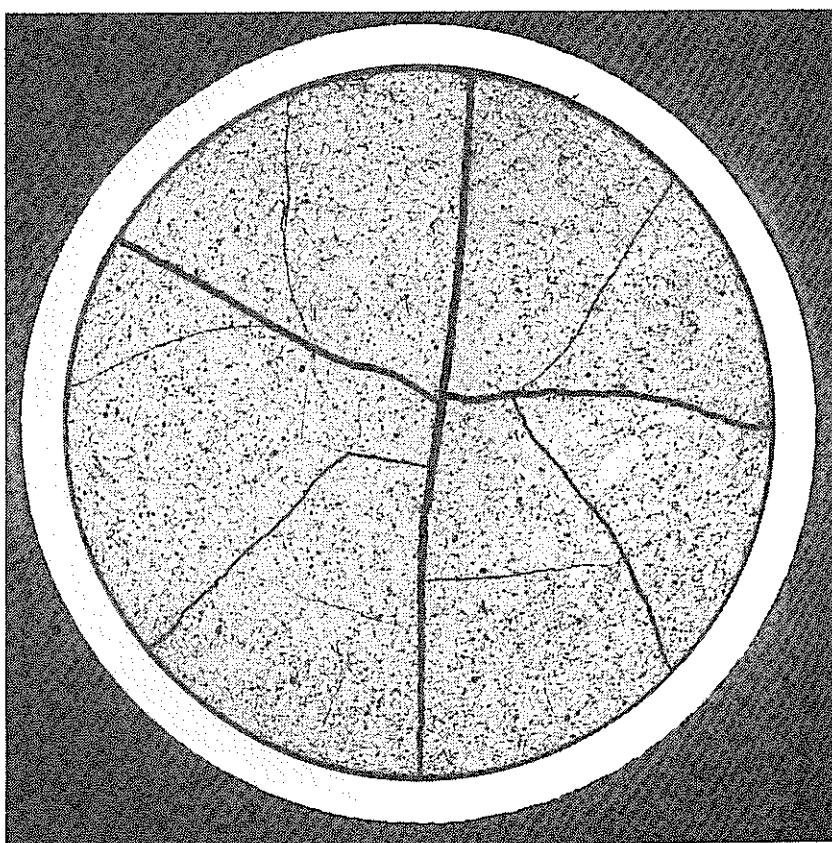


図 3.19-(2) 燃料ペレット組織変化(中間層燃料棒)

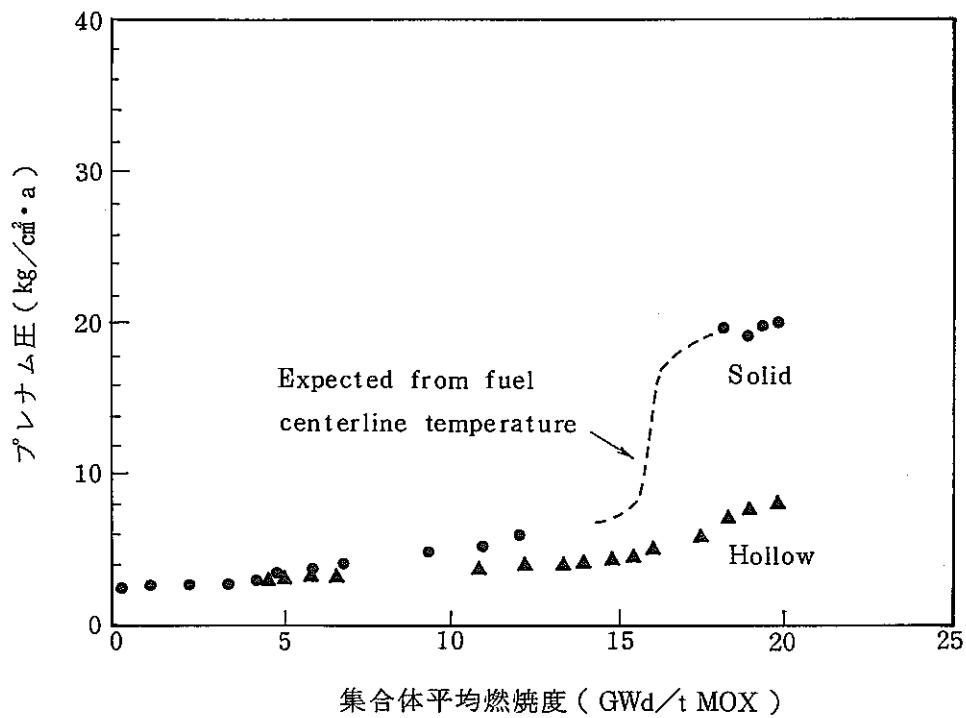


図3.20 中実ペレットと中空ペレットの内圧比較 (IFA-514)

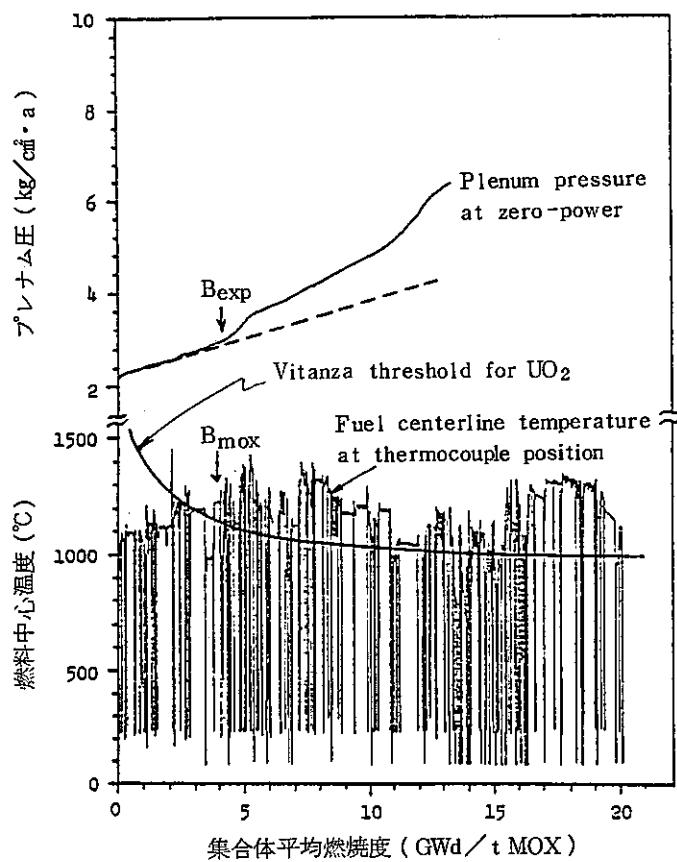


図 3.21 燃料棒内圧及び燃料中心温度と燃焼度との関係(IFA-514)

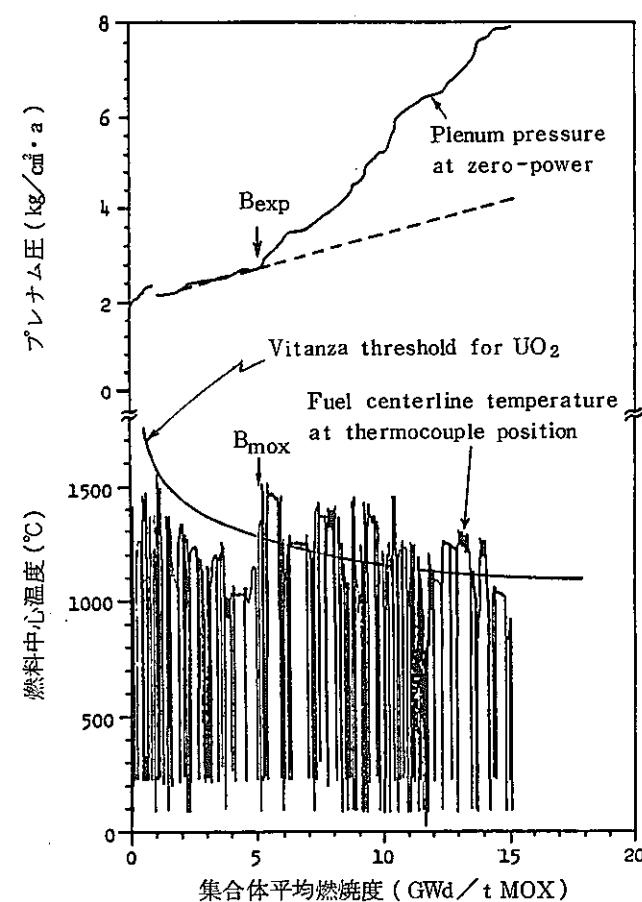


図 3.22 燃料棒内圧及び燃料中心温度と燃焼度との関係(IFA-529)

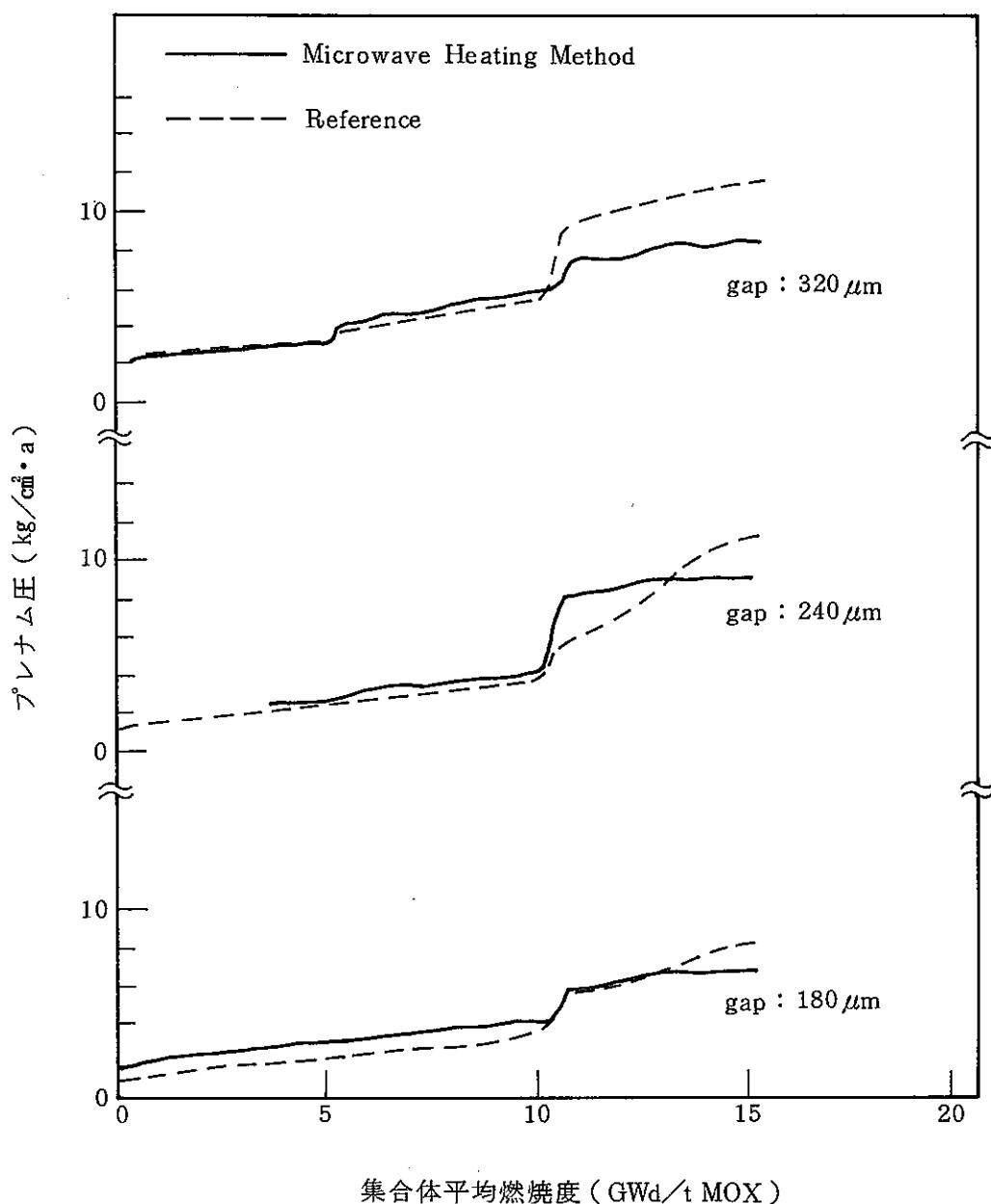


図 3.23 混合転換法と通常のボールミル混合法により製造したペレットの
燃料棒内圧と燃焼度との関係 (IFA-529)

4. MOX燃料の製造実績⁽¹³⁾

動燃事業団では、昭和41年に我が国で初めてMOX燃料の製造を開始して以来、各種照射用燃料、重水臨界実験装置（DCA）用燃料、新型転換炉「ふげん」用燃料及び高速実験炉「常陽」用燃料の製造を東海事業所・プルトニウム燃料第一開発室及び第二開発室で実施して来た。

4.1 MOX燃料製造上の特徴

MOX燃料製造をウラン燃料製造と比較した場合、MOX燃料製造はウラン燃料製造に加えて下記の特徴がある。

(1) プルトニウム封じ込め

プルトニウムは極めて強い α 線放射体であり、内部被曝防止対策上作業者や環境との隔離が必要となる。このため、特に被覆管に封入される前のプルトニウムの取扱いは、グローブボックス内や負圧に維持された施設内等で行うなど、プルトニウムの封じ込めに留意する必要がある。

(2) 外部被曝対策

プルトニウム同位体は、 ^{241}Pu を除き α 崩壊が主であるが、 α 崩壊に伴なって放出される γ 線、 ^{241}Pu が β 崩壊してできる ^{241}Am からの γ 線、 ^{238}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{242}Pu の自発性核分裂及び(α 、n)反応による中性子線のため線量率が高くなる。これらの線量率は、燃焼度の高い使用済み燃料から回収されたプルトニウムほど高くなり、さらに再処理後の時間経過とともに ^{241}Am の生成量が増加するため、 γ 線量率が高くなる。したがって、作業者の被曝線量を低減する対策が必要となる。 γ 線被曝量はプルトニウムの表面積に依存するため、グローブボックス内や機器に付着した粉塵等の管理が重要となる。中性子線被曝量はプルトニウムの質量に依存するため大量のプルトニウムを扱う工程が問題となる。 γ 線は鉛板等である程度遮蔽が可能であるが、中性子線の防護にはある程度距離を置くことが必要になるため、被曝防止上工程の自動化、遠隔化が重要である。

(3) 臨界管理

プルトニウムはウランに比べて臨界量が小さいため、ウラン燃料加工施設に比べて単体機器の大きさや形状等に、より厳しい制限が加わる。また、燃料棒や集合体については相互干渉の影響も考慮する必要がある。

(4) 保障措置及びフィジカルプロテクション(PP)対策

プルトニウム取扱施設では、保障措置の適用や PP 対策の実施がより重要となる。このため、UO₂ 燃料加工施設と比較して、より効果的な保障措置の実施を図り、PP 対応としては二重フェンスの設置、出入管理や侵入監視など管理体制の強化を図る必要がある。

図 4.1 に MOX 燃料の主要製造工程を示す。主要製造工程のうち PuO₂ 粉末の秤量から充填溶接までの工程は、グローブボックス(図 4.2)を介しての操作となり、工程設備は保守管理の面から特別な配慮が払われている。

品質管理面で特徴的なこととしてプルトニウムに対する分析測定がある。粉末については、プルトニウム同位体組成、プルトニウム富化度の測定とともに混合粉末の均質度等の管理が重要となる。ベレットに対しては、Pu スポット数及び大きさの測定検査がある。図 4.3 に α オートラジオグラフ法による検査例を示す。充填後の燃料要素に対しては、プルトニウム富化度の非破壊検査などがある。

4.2 MOX 燃料の製造実績

(1) 「ふげん」の初装荷用 MOX 燃料は、50 年 7 月から 53 年 2 月にかけてプルトニウム燃料第二開発室で製造した。その後も引き続いて取替燃料の製造を実施しており、61 年 8 月現在、MOX 燃料を 316 体装荷し 196 体取り出しているが、運転開始以来燃料体には異常は認められず、燃料製造技術及び品質管理技術の信頼性が実証されてきている。図 4.4 に MOX 燃料の製造実績を示す。

(2) また、実証炉燃料製造のための施設として、プルトニウム燃料第三開発室 ATR ラインを昭和 65 年度運転開始を目指して建設準備作業を行っている。

本施設の生産規模は 40 ton MOX/年で、これまでの第一開発室、第二開発室の経験と最

新の技術を基に作業員の被曝の低減、品質管理・生産効率化などの配慮から、搬送系を含むシステム全体を電算機制御による自動化を取り入れているのが特徴である。この施設の製造工程機器は保守点検時および品質管理工程の一部を除いて工程制御室からの遠隔・自動によって運転することとしている。

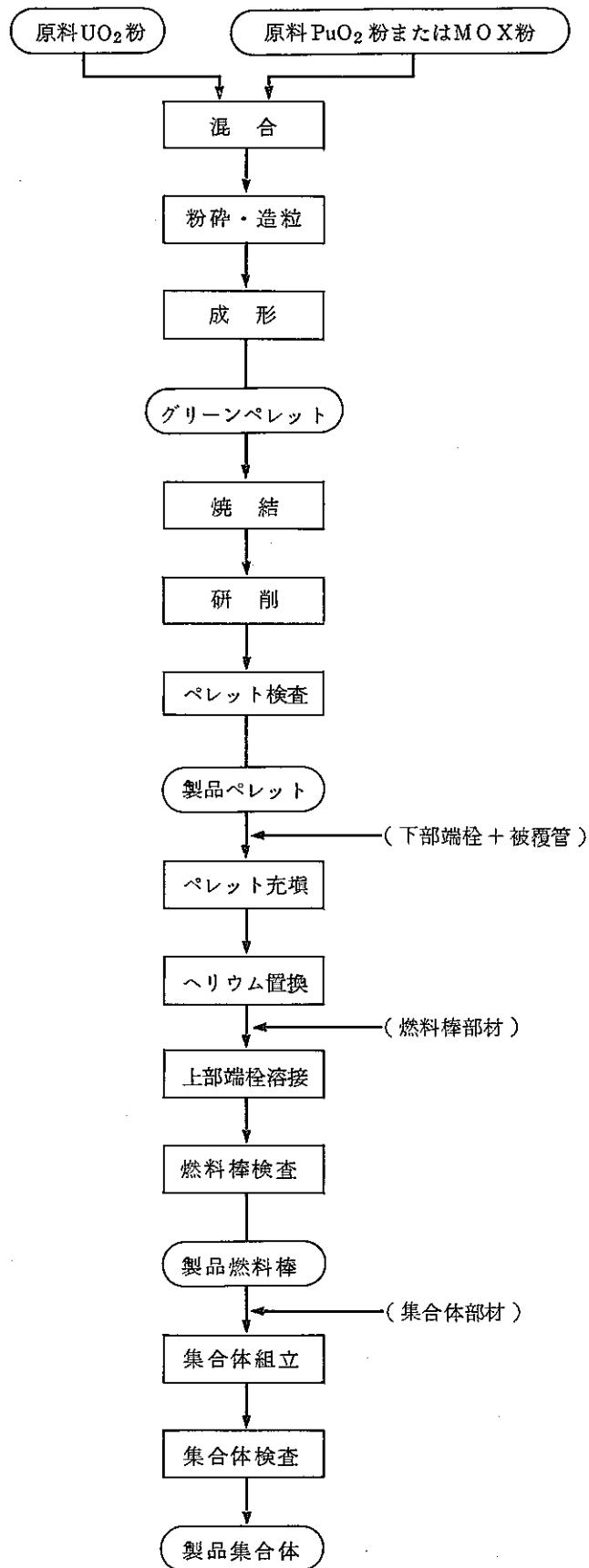
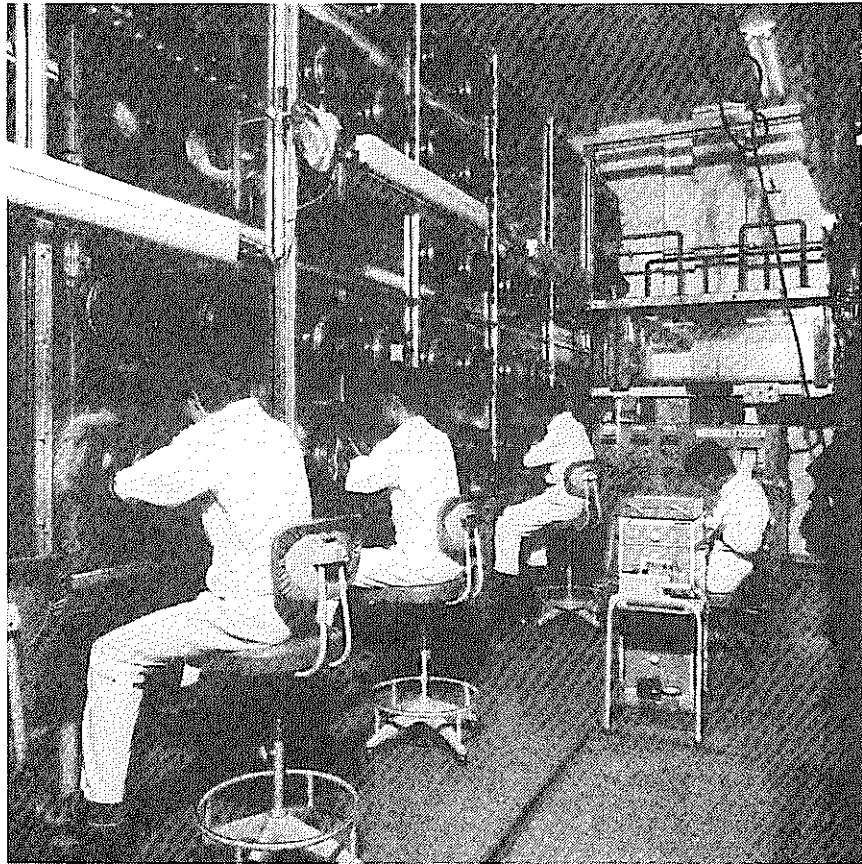
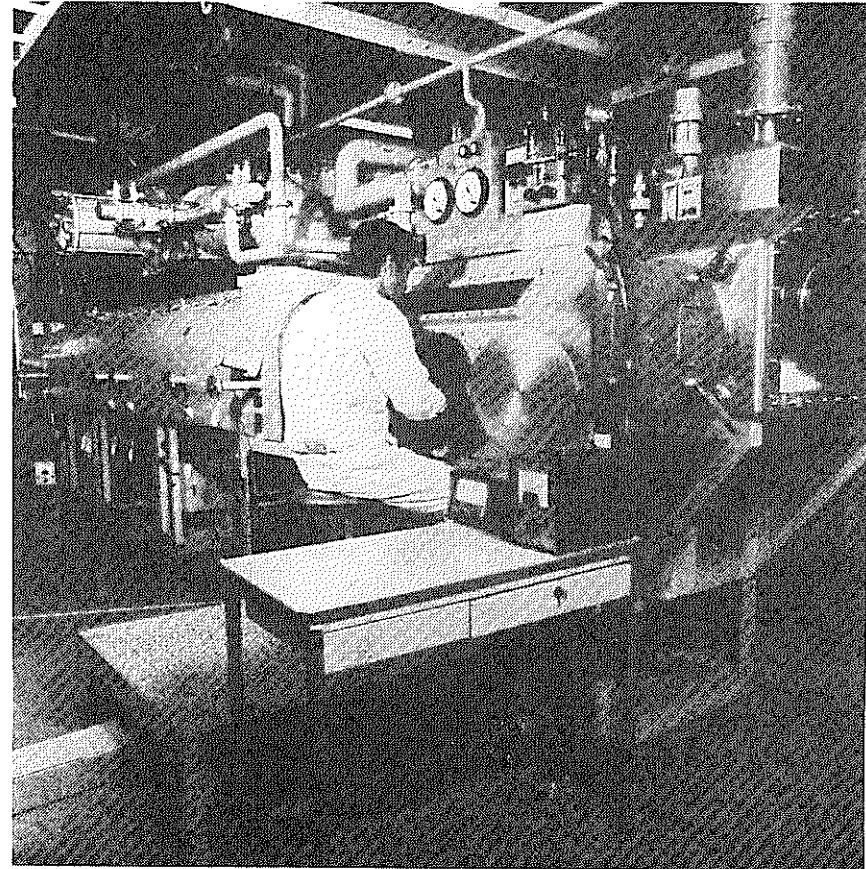


図 4.1 MOX 燃料の製造工程 フローシート



(a)



(b)

図 4.2 グローブボックス内のMOX燃料ペレットの製造

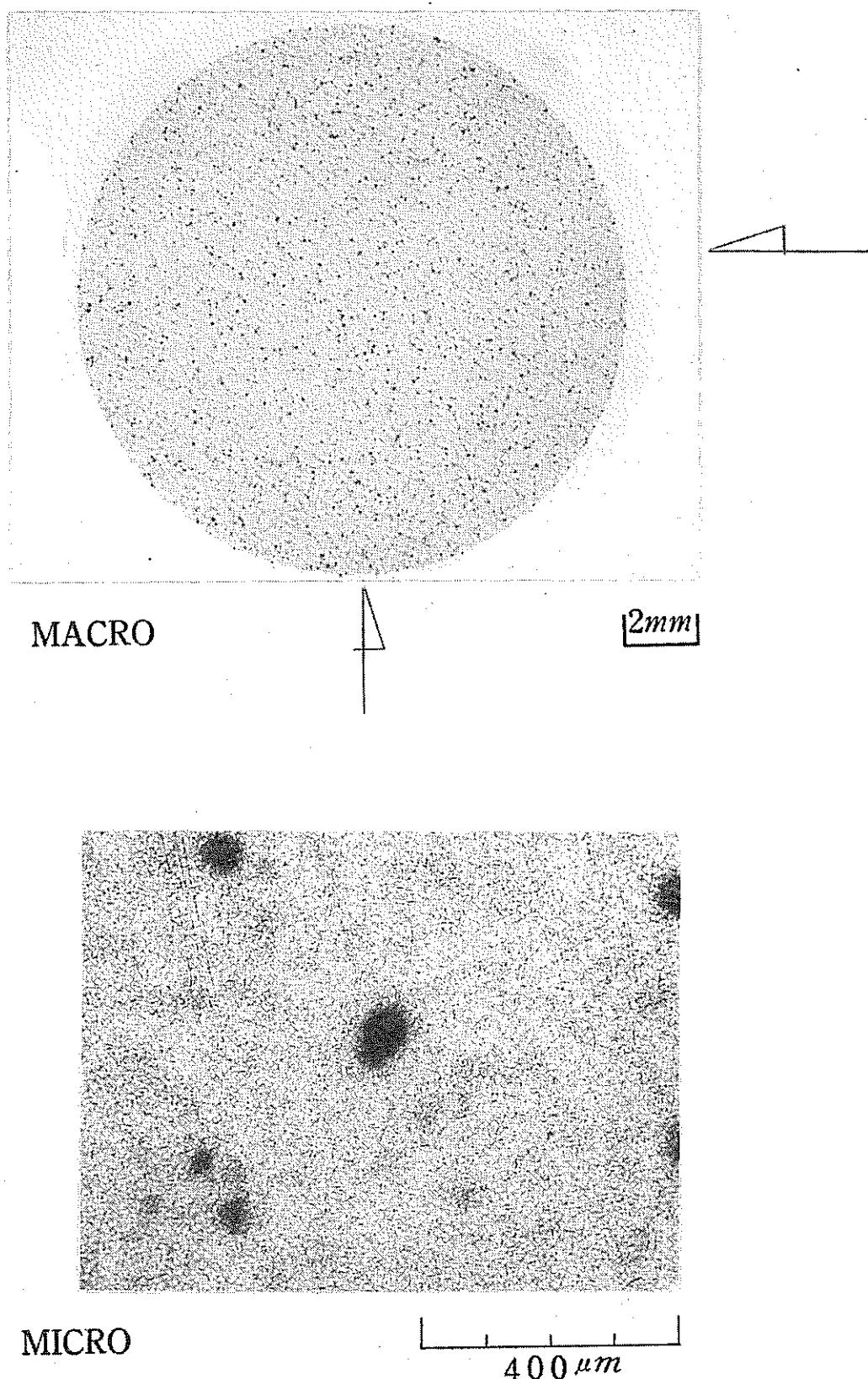


図 4.3 MOX燃料ペレットの α オートラジオグラフの例

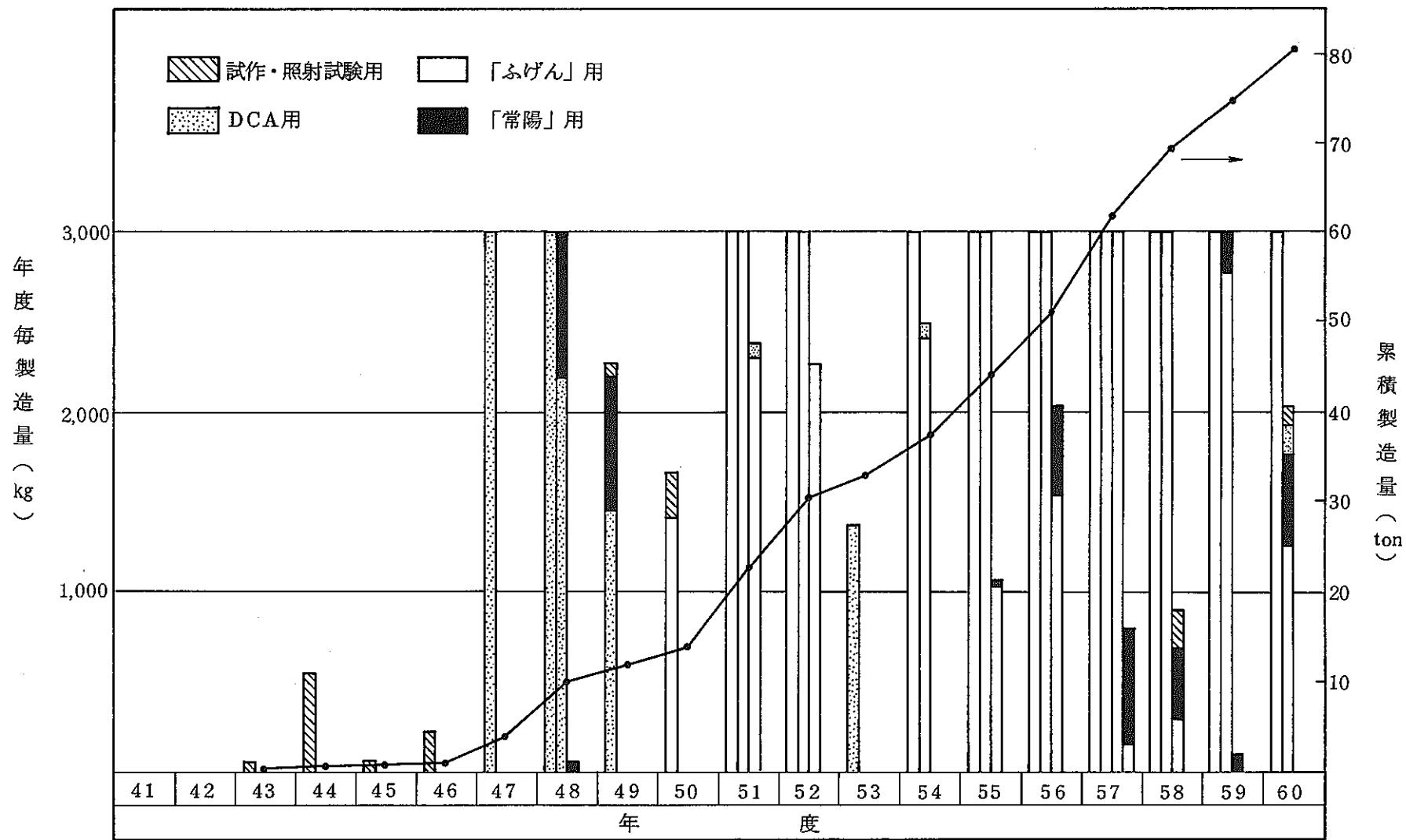


図 4.4 MOX 燃料の製造実績(昭和 61 年 3 月末現在)

5. ATR高燃焼度MOX燃料の開発

5.1 ATRMOX燃料の高燃焼度化

ATRMOX燃料の性能向上の一環として、MOX燃料の高燃焼度化を図るため、高燃焼度MOX燃料の開発を進めている。

(1) 高燃焼度化を図るための方策として、次のものが考えられる。

- ① 長期運転を可能にするための核分裂物質量の増加
- ② 高燃焼度化したときの出力ピーキングを抑えるためのGd₂O₃入り燃料及び軸方向富化度分布燃料の採用
- ③ 耐PCI性能を向上させるためのZrライナ管の採用
- ④ 燃料の長寿命化に備えた高耐食性被覆管の採用

(2) これらに対処して、高燃焼度化を実現するために、次のような炉心特性、熱水力特性、照射特性の評価を行っている。

- ① DCAにおけるGd₂O₃入り燃料及び軸方向富化度分布燃料の実験データ解析による核計算コードの精度の確認及び計算手法の確立
- ② HTLにおける燃料集合体内発熱不均一によるバーンアウト熱流束に及ぼす影響の解析評価
- ③ 高燃焼度下でのFPガス放出量、被覆管の腐食、燃料棒の照射成長、PCI等の照射挙動の評価

(3) 実炉での照射特性を確認するため、下記の燃料集合体を「ふげん」に装荷して、65年頃から照射試験を実施する予定である。

- ① 燃焼に伴うGd₂O₃入り燃料の照射特性及び炉心特性に及ぼす影響を確認するためのGd₂O₃入り燃料集合体
- ② 高燃焼度下での照射挙動を確認するため、(i) Gd₂O₃入り燃料、(ii) 軸方向富化度分布燃料、(iii) 改良被覆管(Zrライナ管、高耐食性被覆管)等を組合せた燃料集合体

5.2 高燃焼度 MOX 燃料(ペレット 50,000 MWd/t 程度)の挙動^{(14)～(16)}

ATRMOX 燃料の高燃焼度の挙動に関連して、高富化度の FBR 「常陽」 MK-I MOX 燃料の FP ガス放出について述べる。

- (1) FBR 「常陽」は、1977 年 4 月に臨界に達した後、順調に運転を続け熱出力 50 MW 廉心から 75 MW 廉心への出力上昇を経て 1982 年 1 月に増殖炉心 MK-I の運転を終了した。現在、「常陽」は照射用炉心 MK-II への移行を終え、熱出力 100 MW にて各種照射試験を実施している。
- (2) MK-I 廉心燃料集合体は、図 5.1 に示すように、正三角形状に配列された燃料ピン、ラッパ管、ラッパ管上方の取り扱い用ハンドリングヘッド、下方の冷却材導入用エントランスノズル等から構成されている。燃料ピンは、MOX 廉心ペレットと上下の劣化 UO₂ ペレットを SUS 316 相当被覆管に充填したものである。表 5.1 に MK-I 廉心燃料集合体の主な仕様を示す。
- (3) 「常陽」 MK-I 照射燃料の燃料ピン線出力は、12 ~ 28 kW/m、集合体平均燃焼度は 2,100 ~ 40,100 MWd/t であった。照射後の燃料ピンのパンクチャ試験により、燃料ペレットの FP ガス放出率を求めた。図 5.2 に、FP ガス放出率を燃焼度に対して整理した結果を示す。50 MW 出力レベル時の集合体では FP ガス放出はほとんど認められないが、50 から 75 MW への出力上昇を経験した集合体では FP ガス放出率は大きく変化している。これは燃料温度の増加によってそれまでにペレット中に蓄積されていたガスが放出されたものである。
- (4) 燃料の組織変化を局所線出力と燃焼度で整理してみると、線出力 20 kW/m、燃焼度 15,000 MWd/t 以下では、初期の出力上昇によりペレットにクラックが発生しているものの、ほぼ製造時の燃料組織が保たれている。線出力と燃焼度が更に増加すると、ペレットの中心部に粒界ガスバブルの成長領域、またその外側に製造時のポアの一部が消失してできた高密度化領域の存在が観察されている。また 26 ~ 28 kW/t の比較的高い線出力を経験したものは、クラック発生数の増加、ペレット中央部近傍での伸長晶、更にその周

囲に等軸晶が発生しているのがみられる。図 5.3 に燃料の組織変化を局所出力と燃焼度で整理したものを、また、図 5.4 に高燃焼度燃料の組織を示す。

(5) 燃料ペレット中に保持されている FP の分布を X 線マイクロアナライザ (EPMA) によって測定した結果に基づき、燃料組織変化と関連づけて FP ガス放出モデルの作成を行っている。図 5.4 に示した燃料断面に対応する保持 Xe 濃度の径方向分布の測定結果を図 5.5 に示す。保持 Xe 濃度と燃料組織には明瞭な対応が認められ、核分裂で生成した Xe は不変領域ではほぼ 100% 保持されているが、高密度化領域において放出が開始し、ガスバブル領域ではそのほとんどが放出していることが分かる。

表 5.1 「常陽」MK-I 廉心燃料集合体の主な仕様

(1) 燃料集合体		
◦全長	(mm)	2,970
◦燃料ピン本数	(本)	91
◦全重量	(kg)	約 60
(2) 燃料ピン		
◦全長	(mm)	1,910
◦廉心燃料部		
•燃料組成		PuO ₂ -UO ₂
•プルトニウム富化度 (w/o)		17.7
•ウラン 235 濃縮度 (w/o)		23
•長さ	(mm)	600
◦上部軸方向ブランケット		
•燃料組成		(劣化) UO ₂
•長さ	(mm)	400
◦下部軸方向ブランケット		
•燃料組成		(劣化) UO ₂
•長さ	(mm)	400
◦ペレット		
•高さ(廉心)	(mm)	10
•高さ(ブランケット)	(mm)	12
•直 径	(mm)	5.4
•密度(廉心)(%T.D.)		93.5
•密度(ブランケット)(%T.D.)		94
◦被覆管		
•外径	(mm)	6.3
•内径	(mm)	5.6
•肉厚	(mm)	0.35
•材質		SUS 316 CW
◦スペーサーワイヤ		
•直 径	(mm)	1.2
•巻ピッチ	(mm)	266
◦プレナム体積	(cc)	8.5

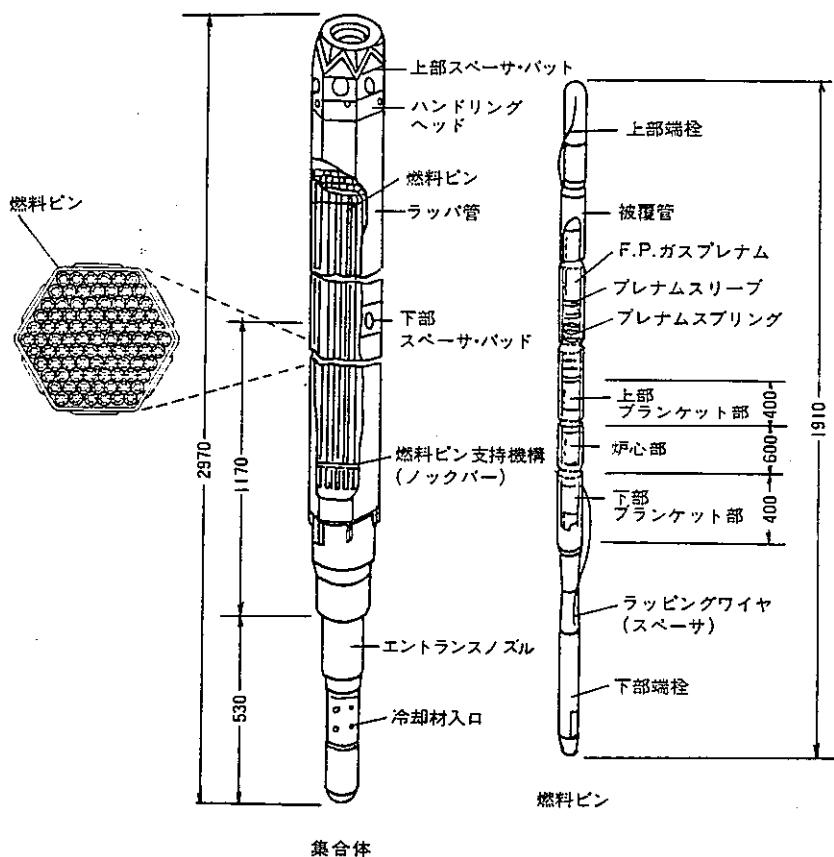


図 5.1 「常陽」MK-I 廉心燃料集合体及び廉心燃料ピンの構造

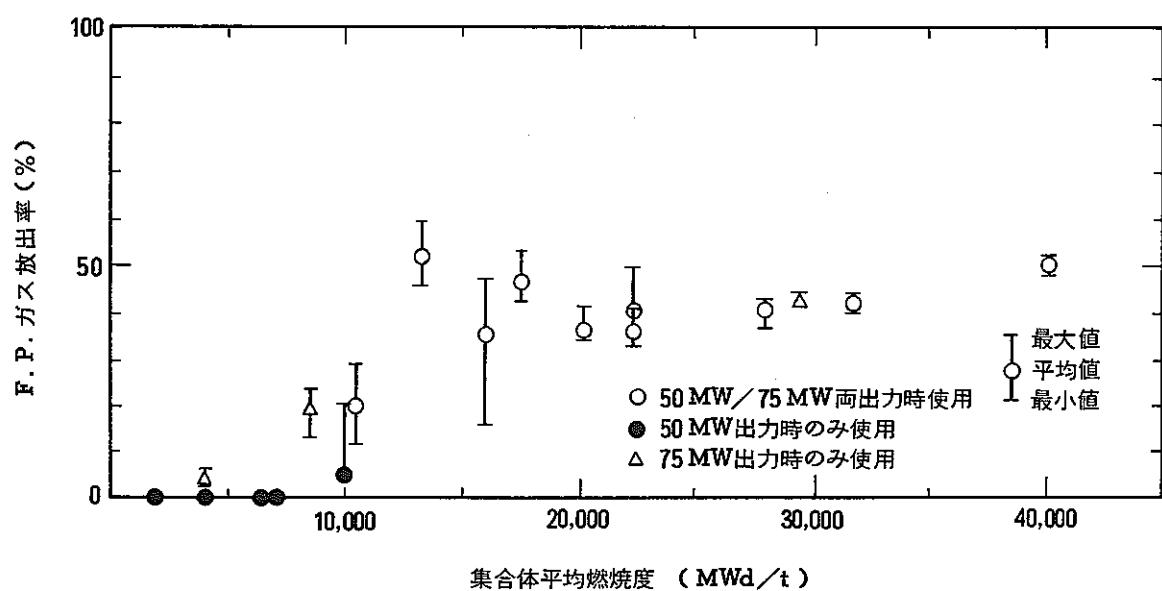


図 5.2 F.P. ガス放出率の変化

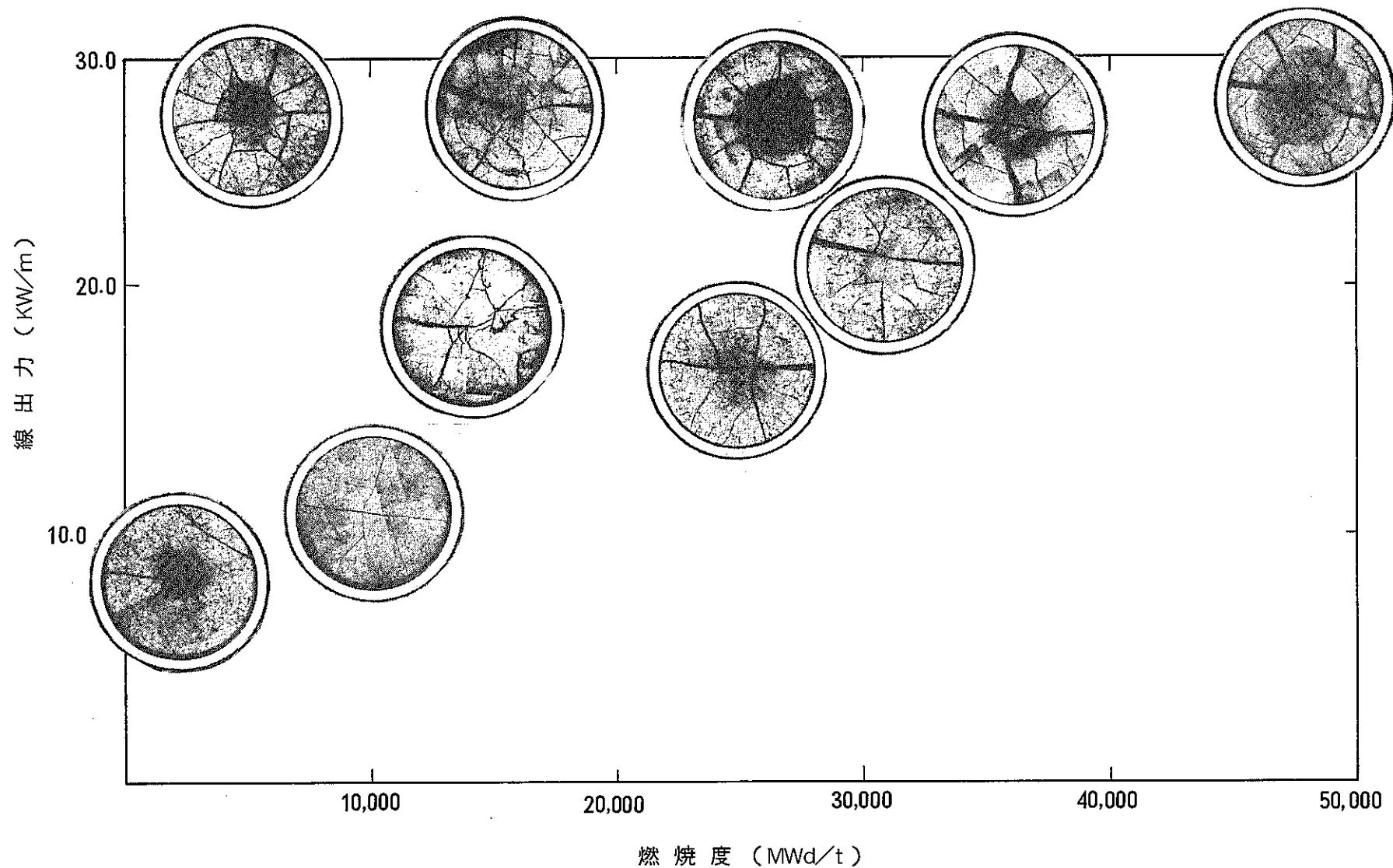
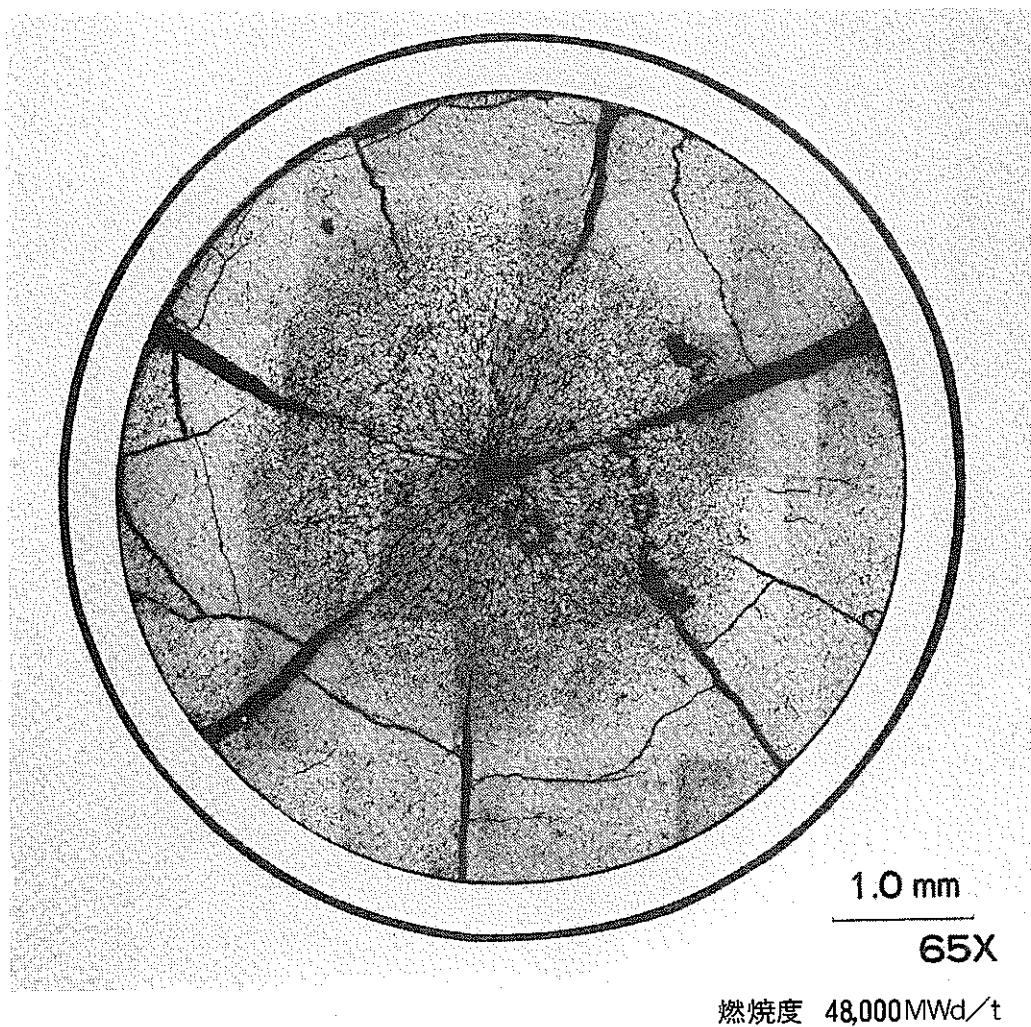


図 5.3 「常陽」MK-I 炉心燃料の組織変化



燃焼度 48,000 MWd/t

図 5.4 「常陽」MK-I 炉心燃料の照射後の断面組織

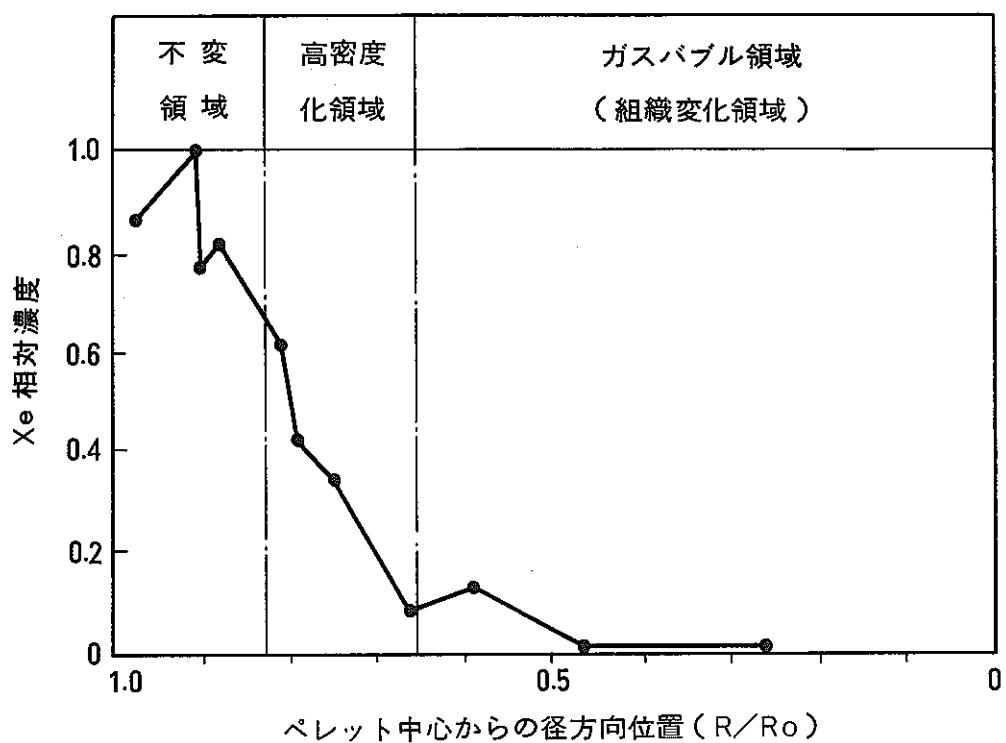


図 5.5 X_e 濃度の径方向分布

参 考 文 献

- (1) 澤井 定：「ATRにおけるPu利用の特長と関連技術の開発」，原子力工業，Vol. 31，No. 4 P. 9～16 (1985)
- (2) H. W. Schmitt et al., Phys. Rev., 141, 1146 (1966)
- (3) J. N. Neiler et al., Phys. Rev., 149, 894 (1967)
- (4) 羽角 孝, 外：「新型転換炉「ふげん」の燃料の設計及び製造」，動力炉技報(動燃事業団), No. 45, P. 49～64 (1983)
- (5) T. KOBORI : "Critical Heat Flux Measurements in Full Scale Rod Cluster", Bulletin of JSME, Vol. 19 No. 131, P 540～546 (1976)
- (6) 小鷹幸三, 外：「ATR実証炉燃料の流力振動特性測定」，日本原子力学会 昭和58年秋の分科会 (1983)
- (7) 小鷹幸三：「ATR 36本クラスタ型燃料のフレッティング摩耗特性試験」，日本原子力学会，昭和60年秋の分科会 (1985)
- (8) KODAKA and KITAHARA : "Endurance Test on Cluster Type Assemblies", Nuclear Fuel Performance, BNES, London (1985)
- (9) R. YAMANAKA, et al : "Post Irradiation Examination of Fugen MOX Fuel" IAEA Specialists' Meeting on Post Irradiation Examination and Experience, Tokyo (1984)
- (10) K. DOMOTO, et al : "The Development of ATR MOX Fuels", IAEA Specialists' Meeting of Improved Utilization of Water Reactor Fuel with Special Emphasis on Extended Burnups and Plutonium Recycling, Mol (1984)
- (11) 安部智之, 外：「MOX燃料の照射後試験」，日本原子力学会 昭和60年秋の分科会 (1985)
- (12) T. ABE, et al : "Thermal and Mechanical Behaviour of Plutonium-Uranium Mixed Oxide Fuels in IFA-514 and IFA-529 Experiments" Nuclear Fuel Performance, BNES, London (1985)
- (13) 佐藤政一, 外：「MOX燃料技術開発の動向—MOX燃料の製造」，原子力工業，Vol. 31, No. 12, P 65～72 (1985)
- (14) 井滝俊幸, 外：「高速実験炉「常陽」MK-I 廉心燃料集合体の照射挙動」，日本原子力学会誌 Vol. 27, No. 5, P 51～65 (1985)
- (15) 鵜飼重治, 外：「「常陽」MK-I 照射燃料のFPガス放出モデルの作成」，日本原子力学会 昭和60年秋の分科会 (1985)

(16) 柴原 格：「高燃焼度における高速炉燃料の挙動と長寿命燃料の開発」，動燃技報，No. 57，

P 20～39 (1986)