

新型転換炉実証炉燃料の照射試験計画

—セグメント燃料の出力急昇試験—

1992年11月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

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。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1992年11月

新型転換炉実証炉燃料の照射試験計画

— セグメント燃料の出力急昇試験 —

加藤 正人*，高橋 邦明*

河野 秀作*，上村勝一郎*

要旨

現在、Pu開室では新型転換炉(ATR) 実証炉用MOX 燃料の開発を進めている。本試験計画は、実証炉用MOX 燃料の標準燃料及び改良型燃料（中空ペレット、Zrライナー付き被覆管）を対象とし、燃料の破損限界及び出力過渡変化時の照射挙動を調べることを目的とした出力急昇試験に関するものである。

試験燃料2体は「ふげん」において、平均燃焼度約19GWd/t 及び約27GWd/t までベース照射を行う。その後、集合体は原研で解体し、照射後試験を行う。さらに、集合体中の出力急昇試験用の燃料棒をハルデンに輸送し出力急昇試験を行う。出力急昇試験を行う燃料は、全長約520mm の短尺燃料で、破損検出のための燃料伸び計又は内圧計の計装を取り付け、オンラインで計測を行う。また、出力急昇試験は、シングルステップランプ及びマルチステップランプモードで行い、60kW/mまで出力を変化させ破損限界を調べる。加えて、本試験では、燃料の破損限界を調べる他に、出力急昇試験中の照射挙動と照射後試験の結果とを合わせてATR 実証炉燃料の出力過渡変化時の照射挙動を解析・評価を行う。

* 核燃料技術開発部プルトニウム燃料開発室

目 次

1. 試験概要	1
2. 目 的	2
3. スケジュール	3
4. 燃料仕様	4
5. ベース照射	6
6. ベース照射燃料の照射後試験	7
6-1 非破壊試験	7
6-2 破壊試験	9
7. 輸送	10
8. ランプ試験前検査	11
9. ランプ試験	12
9-1 マルチステップランプ試験	12
9-2 シングルステップランプ試験	14
10. ランプ試験後燃料の照射後試験	16
11. まとめ	18

1. 試験概要

新型転換炉(ATR)実証炉燃料の開発を行うために、実証炉用MOX燃料の標準燃料及び改良型燃料(中空ペレット、Zrライナー付き被覆管)について、出力急昇試験を行い破損限界を調べる。

「ふげん」においてベース照射を行ったセグメント燃料要素について、原研での非破壊試験を経て、ハルデンへ輸送し出力急昇試験(ランプ試験)を行う。出力急昇試験は、40本のセグメント燃料要素について行い、4種類の燃焼度の標準燃料及び改良型燃料について破損限界を調べる。また、出力急昇試験中の照射挙動と照射後試験の結果とを合わせてATR 実証炉燃料の出力過渡変化時の照射挙動を解析・評価する。

2. 目的

本試験の目的を以下に示す。

- (1) ATR 実証炉燃料の安全審査に資するため、これまでに得られている軽水炉のランプ試験データが、ATR実証炉燃料に適用できる事の確認を行う。また、ATR実証炉燃料の破損しきい値を求める。
- (2) 改良型燃料 (Zrライナー付被覆管、中空ペレット) の標準燃料に対するPCI 特性の改善効果を確認する。
- (3) 異常な過渡変化における挙動を模擬する燃料挙動解析コードの検証に資する。

なお、本試験は国の安全研究としても位置づけられている。

3. スケジュール

表1-1と表1-2にランプ試験にかかるスケジュールと資金計画を示す。また、図1に作業の流れを示す。「ふげん」において2体の集合体のベース照射を行い、原研での非破壊試験を行った後、セグメント燃料40本をハルデンへ輸送し、ランプ試験を行う。一部の燃料要素については、動燃大洗工学センターに輸送し破壊試験を行う。原研からハルデンへの輸送する40本のセグメント燃料は、平成5年度から4回に分けて輸送し、ハルデンにおいて試験前検査、ランプ試験及び照射後試験(PIE)を行う。

また、本照射試験とは別に、ベース照射燃料についてNSRRでの照射試験も計画している。

全ての試験は、平成10年度までに終了する予定である。

4. 燃 料 仕 様

「ふげん」においてベース照射を行う集合体はPPFE06及びPPFE07の2体あり、ベース照射の燃焼度が異なる。それらの集合体の構造は図2に示す様に、ATR実証炉燃料と同様に36本3層クラスタ構造を有している。これら36本の燃料はランプ試験に供するセグメント燃料6本で構成される燃料要素6本と、ベース照射後に破壊試験を行う30本の長尺燃料要素からなる。これらセグメント燃料要素及び長尺燃料要素のパラメータとしては被覆管の種類とペレットの形状があり、被覆管には標準(Zry-2)とZrライナー付被覆管(Zrライナー)、ペレットには中実と中空がある。燃料要素の種類としては表2に示す様にType-I～IVの4種類である。各燃料要素の集合体中の位置に対応した燃料要素の位置番号、ピンNo. 及び燃料のTypeを図3に示す。また、各燃料要素の詳細な仕様については以下に記す。

(1) セグメント燃料要素

セグメント燃料要素は、「ふげん」でのベース照射を行った後、原研での非破壊試験を経て、ハルデン炉でランプ試験を行う。ランプ試験には、マルチランプ試験とシングルランプ試験があり、詳細は9章で記述する。セグメント燃料要素の主仕様を表3に示す。セグメント燃料要素は、図4に示すように集合体の内層、中間層のそれぞれに3本ずつの組み込まれている。1本のセグメント燃料要素は、ランプ試験に供する4本の中間短尺燃料要素(セグメント燃料)ならび上部、下部の計6本の短尺燃料要素から構成されている。それらの燃料要素の構造を図5に示す。さらに、各セグメント燃料の要素No.(A 4桁の数字)、I.D.No.(A-1～B-20、PIE-1～8)及びタイプ(I～IV)の集合体中の位置関係を図6に示す。I.D. No.は、セグメント燃料1本に付けた固有のNo.であり、以下に示す意味を持つ。

A-1～20：第1回取り出し出力急昇試験用セグメント燃料

A-1～12：マルチランプ試験に供する燃料

A-13～17：シングルランプ試験に供する燃料

A-18～20：予備燃料

B-1～20：第2回取り出し出力急昇試験用セグメント燃料

B-1～12：マルチランプ試験に供する燃料

B-13～17：シングルランプ試験に供する燃料

B-18～20：予備燃料

PIE-1～8：ランプ試験を行わず、大洗工学センターで破壊試験を行う燃料要素

マルチランプ試験に供する燃料は、番号順に2本ずつ同じタイプ及びベース照射条件の

燃料である。(1&2、3&4、5&6、・・・の番号で同じ燃料である。)

(2) 長尺燃料要素

長尺燃料要素の詳細な構造を図7に示す。燃料の仕様としてはセグメント燃料要素とは同じであるが、集合体の外層に位置する燃料の核分裂物質量は2.21%で、内層、中間層はセグメント燃料と同じ3.71%である。長尺燃料要素は、ベース照射終了後、原研で非破壊試験を行い、PNC(大洗)での破壊試験、またはNSRRでの照射試験を行う。

5. ベース照射

平均燃焼度約19GWd/t (PPFE07) 及び約27GWd/t (PPFE06) のベース照射を行った燃料集合体2体は、図2に示したように、それぞれの集合体に内層、中間層及び外層があり、集合体の径方向で燃焼度が変わるため集合体2体で6種類の照射条件の異なる燃料が得られる。これらの燃料にはセグメント及び長尺燃料要素があり、各燃料要素によってベース照射後の試験内容が異なる。

ランプ試験に供するセグメント燃料要素には、図4に示したように、集合体の内層と中間層に3本ずつのセグメント燃料要素があるため、4種類のベース照射条件の異なったセグメント燃料要素が得られる。これらの4種類の燃焼度の異なるセグメント燃料要素は、一部を除いて原研において分解し非破壊試験を行った後、再組み立てを行いハルデンへ輸送しランプ試験を行う。各ベース照射条件のセグメント燃料要素を表1～4で表す。これらの燃料の軸方向における4本のセグメント燃料要素の燃焼度、線出力密度は、軸方向中心に位置する防震板の中性子吸収効果によりほぼ等しい値である。なお、平均燃焼度及び核分裂性物質濃度は、WIMSコードによる推定値である。また、「ふげん」炉の運転条件を表5に示す。さらに、表6に各燃焼度毎のセグメント燃料要素本数をタイプ別に示す。()内はベース照射後にPIEを行う燃料要素で、ランプ試験は行わない。

一方、ランプ試験を行わない燃料のうち、集合体1体当たり5本の長尺燃料(燃料要素位置番号No. 2, 27, 28, 29, 30)と4本のセグメント燃料要素(燃料要素位置番号No. 1, 3, 5, 16のPIE用セグメント燃料)については原研での非破壊試験を行った後、PNC(大洗)に輸送し破壊試験を行う。(燃料要素位置番号は図2参照)

また、燃料要素位置番号No. 14, 15及びNo. 4(予備)の3本の長尺燃料要素は、別途計画されているNSRRでの照射試験のため実用燃料試験室に送られ、照射試験用に再加工される。

6. ベース照射燃料の照射後試験

ベース照射燃料のPIEは原研での非破壊試験とPNC(大洗)での破壊試験からなり、以下の3つの目的で行う。

- (1) 出力急昇試験（ランプ試験）後のデータと比較するためのランプ試験前のデータの取得
- (2) 改良燃料の照射挙動の把握
- (3) セグメントタイプの設計の妥当性評価のための燃料棒の健全性の把握

照射後試験のフローチャートを図8に、照射後試験の項目を表7に示す。また、各試験の内容を以下に記する。より詳細なPIE試験計画書については、本報とは別に作成する。

6-1 非破壊試験

ベース照射燃料の非破壊試験は、原研・安全性試験研究センター・ホット試験室で実施し、燃料集合体試験、燃料非破壊試験及び燃料集合体部材試験からなる。以下に試験項目と目的を示す。また、各試験と燃料の対応表を表8に示す。

(1) 燃料集合体試験

a) 集合体外観観察

- 燃料集合体構造の概略的健全性の確認
- 燃料要素及び燃料集合体部材の概略的健全性の確認
- クラッド(CRUD)付着状況の評価

b) 集合体寸法測定

(全長、曲がり、ねじれ、スペーサスパン長、外径、燃料要素間隔測定等)

- 燃料集合体伸び量評価
- スペーサ摺動機構の確認
- 燃料集合体構造の健全性の確認
- 燃料要素曲がり量評価
- 集合体の摺動機構の妥当性確認

c) 燃料要素引抜き力測定

- スペーサ保持力の評価

(2) 燃料非破壊試験

a) 燃料要素外観観察

- 燃料要素の健全性確認
- 燃料要素外表面状態の評価

- b) 燃料要素寸法測定(全長、直径測定)
 - ・燃料要素の燃焼に伴う伸び量の評価
 - ・被覆管変形量の評価 (クリープダウン量、PCMI)
- c) 燃料要素X線透過試験
 - ・燃料要素内部状況の確認
 - ・燃料スタック変化量評価
- d) 燃料渦電流探傷試験
 - ・被覆管の健全性確認
- e) 燃料要素被覆管酸化膜厚さ測定
 - ・被覆管酸化膜厚さの評価
- f) 燃料要素 γ スキャニング
 - ・燃料スタック長評価
 - ・軸方向燃焼度分布、FP分布評価
 - ・接合部の出力ピーニングの確認
- g) 燃料要素パンクチャー試験
 - ・燃料要素内圧評価
 - ・FPガス放出率の評価
 - ・FPガス分析
 - ・設計コードとの比較

(3) 燃料集合体部材試験

- a) スペーサ支持管試験
 - ・スペーサ支持管の照射成長量の評価 (スペーサ支持管全長測定)
 - ・スペーサ摺動機構の確認 (スペーサ取付け部引抜き力測定)
- b) スペーサ試験
 - ・スペーサの健全性確認
 - ・スペーサ引抜き力に対する照射効果の評価
 - ・スペーサ強度 (バネ定数測定、曲強度測定) に対する照射効果の評価
 - ・リング素子内接円径測定
- c) ロッドスプリング試験
 - ・ロッドスプリングの健全性確認
 - ・ロッドスプリングバネ定数測定
 - ・バネ特性の照射効果の評価

6-2 破壊試験

PNC（大洗）で行う破壊試験は、表8の最後の試験項目に示した様に、集合体1体当たり、5本の長尺燃料（燃料要素位置No. 2, 27, 28, 29, 30）と4本のセグメント燃料要素（燃料要素位置No. 1, 3, 5, 16のPIE用セグメント燃料）について行う。破壊試験は、燃料ペレット及び被覆管に関する試験を行う。各試験の項目と目的を以下に示す。

(1) 燃料ペレット

- a) 金相試験
 - 燃料ペレットの組織観察
- b) 燃料機器分析
 - FP分布、FPガス分析評価
 - Puスポットの分析
- c) 燃焼度分析
 - 燃焼度の確認
- d) 密度測定
 - ペレットの密度測定
- e) 融点測定
 - ペレット融点の燃焼度依存性の測定
- f) 热伝導率測定
 - ペレット热伝導度の燃焼度依存性の測定

(2) 被覆管

- a) 被覆管内圧バースト試験
 - 被覆管の照射による機械的強度の変化の評価
- b) 被覆管引張試験
 - 被覆管の機械的強度評価
- c) 被覆管硬さ測定
 - 被覆管の照射硬化評価
- d) 被覆管水素分析
 - 被覆管中の水素量の評価
- e) 被覆管内面観察
 - 被覆管内面の観察
- f) EPMA
 - 被覆管の析出物、付着物評価
- g) SCC試験
 - 被覆管の耐SCCの評価

（大洗工学センターで試験できない場合は、シェラー研究所での試験を検討）

7. 輸送

原研からハルデンへの海外輸送は、表1にスケジュールを示した様にセグメント燃料要素40本を輸送I～IVの4回に分けてハルデンへ輸送する。輸送に用いる容器はPNC(大洗FMS)所有のTN 6-5で行い、この輸送容器は、1回に12本までのセグメント燃料を輸送することができる。したがって、40本のセグメント燃料の輸送は平成5年度に12本、7年度に12本、8年度に12本、9年度に4本の輸送を行う。セグメント燃料には予備の燃料を6本含み、予備の燃料を必要としない場合は輸送は3回で終了する。また、帰りの容器は空のまま輸送する。

各輸送で運ぶセグメント燃料を表9に示す。ランプ試験は、マルチステップランプとシングルステップランプモードがあり、詳細なランプ試験の内容については9章で述べる。

輸送するセグメント燃料の順番を決めるにあたり、ランプ試験のスケジュールや試験内容に係わり以下に示す条件がある。

- (1) 輸送Iでは、集合体IIが冷却中のため、集合体Iの燃料しか運ぶことができない。
- (2) シングルステップランプ試験BおよびB'は、マルチステップランプ試験の試験データを用いるため、同じ燃焼度及び燃料タイプの燃料についてはマルチステップランプ試験を行なう。(ランプ試験の詳細は次章で述べる。)
- (3) 輸送IVは、輸送回数ができるだけ少なくしたいため、すべて予備燃料とする。

(予備燃料を使わなくてすめば、輸送は3回で終了する。)

これらの条件を下に表9で示すような各輸送で運ぶセグメント燃料を決めた。

また、輸送Iのセグメント燃料の仕様を表10に示す。燃料の燃焼度、Pu、Uの同位体量、放射能量、発熱量はORIGEN-79により求めた。

8. ランプ試験前検査

ランプ試験の照射後試験はシェラー研究所にて行うため、測定データの信頼性を高める為にシェラー研究所の装置を用いてランプ試験前の非破壊検査を行う。また、試験前のデータを得る事により輸送中に燃料が破損していないことの確認を行う。

ランプ試験前の試験項目を以下に示す。

- (1) 外観検査
- (2) 寸法測定
- (3) 外径プロフィロメトリー
- (4) 中性子ラジオグラフィ（2方向）
- (5) 過電流探傷試験

9. 出力急昇試験（ランプ試験）

ランプ試験で使用する照射ループは、ATR 実証炉用燃料の負荷追従試験 (IFA-554/555) で用いたループを改造して行う。照射リグ内の冷却水の温度及び圧力は、それぞれ279~286°C、 72 kg/cm^2 である。実験に用いるリグの図面を図9に示す。リグに3本のセグメント燃料要素を装荷し、リグ上部のpark position に配置する。この位置の中性子fluxはほとんどない。3本の燃料要素の内、1本を中性子fluxの高いリグの下部に移動し、ランプ試験を行う。試験を行う位置は ${}^3\text{He}$ のコイルに囲まれており、中性子断面積の大きい ${}^3\text{He}$ の圧力を下げる事によって中性子fluxを高め、燃料の出力を変化させる。このような手法によるランプ試験は、これまでにも多くのランプ試験で適用されている方法である。3本の燃料要素のランプ試験を終了後に、新たにセグメント燃料要素3本と交換し、次のランプ試験を行う。

ランプ試験の条件は、表11、12に示す条件により、1種類のマルチステップモードと3種類のシングルステップモードにより照射試験を行う。ランプ試験における試験モードは、直線状出力上昇（シングルステップランプ；図10参照）及び階段状出力上昇（マルチステップランプモード；図11参照）が一般的に採用されている。シングルステップランプモードは、設計上考慮している具体的な過渡事象を模擬しているが、破損しきい線出力の評価のためには、多くの試験回数が必要となる。一方、マルチステップランプモードは、具体的な過渡事象を模擬していないが、破損しきい線出力に対する評価が1回の試験で行うことができる。このため、燃料要素の破損しきい線出力の燃焼度依存性及び燃料のパラメータ依存性を調べるためにマルチステップランプモードを、具体的な過渡事象下での健全性を調べるためにシングルステップランプモードを用いる。本試験では、マルチステップモードのランプ試験は再現性の確認のため同一燃料について2回ずつ行う。シングルステップモードのランプ試験は、設計上想定される最もシビアな条件での健全性確認試験と、マルチステップモードで得られた破損しきい線出力を確認するための試験を行う。

また、これまでにStudsvik R2 炉、ハルデン炉で実施された軽水炉燃料の出力急昇試験実績及び試験条件の公開データ等から入手したものについて表13に示す。

各ランプ試験モードの目的と照射条件を以下に示す。また、各ランプ試験に供するセグメント燃料のリストは表9に示す。

9-1 マルチステップランプ試験

表13の公開データからBWR のマルチステップランプ試験の結果を図12、13の到達線出力密度－燃焼度、到達線出力密度－保持時間の図中に示した。これらの図からBWRのUO₂燃料の破

損しきい値が、図中の実線のように表すことが出来る。また、ATR 燃料の破損しきい値は、これまでの試験データから、UO₂のそれより約8kw/m高くなることが報告されている。この結果より、ATR 燃料の破損しきい値を図中に点線（標準燃料）及び一点鎖線（Zr ライナ）で想定し、示した。さらに、図中に本ランプ試験の破損、非破損の予想を示す。しかしながら、ATR 燃料の実験データは数少ないため、破損しきい曲線の信頼性は十分でない。このため、本試験のマルチステップランプ試験はUO₂ 燃料の想定した破損しきい曲線で燃料が破損する可能性も考えて試験条件を定めた。

以下にマルチステップランプ試験の目的と試験条件を記する。

目的

- (1) 破損しきい線出力の燃焼度依存性を求め、破損しきい値がBWR 燃料に比較し、同等以上であることを確認する。（一般に、MOX燃料の方がUO₂に比較し、クリープし易く耐PCI性に優れている。）
- (2) 改良型燃料（Zrライナ付被覆管、中空ペレット）の破損しきい値を求め、標準燃料と比較し、耐PCI特性の改善効果を確認する。
- (3) 過渡時の燃焼挙動データを取得する。

試験条件

マルチステップランプモードの出力変化を図11に示す。この試験では、燃料要素が破損するまでステップ状に出力上昇をおこなう。（但し、燃料のクリープ特性上、最大60kw/mとする。）

表11に試験条件を示す。また、その設定理由を以下に示す。マルチステップランプ試験は、データの信頼性上、同一条件の燃料を2本ずつ試験する。

- (1) 線出力上昇幅； $\Delta P = 5\text{kw/m}$

最大線出力までに 要するステップ回数等を考慮し、他のUO₂ 燃料のランプ試験と同じ値に設定した。

- (2) 線出力上昇速度； $P = 1.0\text{kw/m} \cdot S$

ATR実証炉設計において想定される過渡事象のうち最も速い値に設定した。

- (3) 保持時間； $T = 60\text{min}$

破損の判断をするためには、長いほうが良いが、UO₂ 燃料のデータとの比較の観点より、他のランプ試験の値と同じに設定している。

- (4) プレコンディショニングレベル； $P_0 = 25\text{kw/m}$

図12、13の想定した破損しきい曲線において、最も高い燃焼度の燃料では、約30kw/mで破損する可能性があるため、これより低い25kw/mとした。

(5) プレコンディショニング時間; $T_{pre} = 5$ 日間

ベース照射終了時の出力レベルとプレコンディショニングレベルの差を考慮して定めた。

計 装

2本ずつの同一燃料要素に対して、表9に示すように被覆管伸び計(EC)と内圧計(PF)を1本ずつ取付け、破損検出とPCMI挙動データ又はFPガス放出挙動データを取得する。

9 - 2 シングルステップランプ試験

ATR 実証炉設計において想定している過渡事象とType-Aの条件との関係を図14に示す。図に示すようにType-Aの条件(図中にAで示す。)は、到達線出力密度、線出力上昇幅、保持時間について想定している過渡事象を包絡するものである。

図15、16に表13のシングルステップランプ試験の公開データを到達線出力密度及び線出力上昇幅と保持時間のグラフ上に表した。到達線出力密度と線出力上昇幅は、いずれも燃料の過渡時の照射挙動を理解するうえで重要な因子である。これらの図中にType-Aの試験条件(図中にAで示す。)と図14のATR 実証炉設計において想定している過渡事象時の条件を示した。(図中の番号が図14の各事象に対応) 本試験で行なうType-Aの試験条件は、到達線出力密度、線出力上昇幅のいずれでも破損しきい値を大きく上回る条件であり、設計時に想定した過渡事象についても包絡している。

また、図15、16と同じ図中に本試験の試験条件を同時にプロットしたものについて図17、18に示す。シングルステップランプ試験の目的と試験条件を以下に記す。

目 的

- (1) ATR 実証炉設計において想定している過渡事象が起こった場合においても燃料が健全であることを確認する。
- (2) マルチステップランプ試験結果が、シングルステップランプ試験の結果と同等であることの確認を行う。
- (3) 過渡時の燃焼挙動データを取得する。

試験条件

シングルステップランプの出力変化のパターンを図10に示し、試験条件を表12に示す。

(1) Type-A

到達線出力密度、線出力上昇速度、プレコンディショニング時間についてはマルチステップランプ試験と同じ値とする。線出力上昇幅については、ATR 実証炉設計において要求しているもっともシビアな線出力上昇幅が30kw/mであるため30kw/mと設定した。ブ

レコンディショニングレベルは、到達線出力密度と線出力上昇幅より定まる。

(2) Type-B及びB'

Type-B及びB' のランプ試験は、マルチステップランプ試験の確認のための試験である。そのため、試験条件はType-Bについてはマルチステップランプ試験において、破損が発生した出力レベルに比べ 5kw/m 低い出力レベルに到達線出力密度を設定し、燃料破損が起こらないことを確認する。また、保持時間はマルチステップランプ試験都と同じ60minで打ちきるものとする。Type-B' はマルチステップランプ試験において破損が発生した出力レベルと同じ値に到達線出力密度を設定し、破損することを確認する。その他の線出力上昇速度、プレコンディショニング時間、プレコンディショニングレベルは、マルチステップランプ試験の条件と同じとする。

計 装

すべての燃料要素に被覆管伸び計を取り付け、破損検出と過渡時のPCMI挙動のオンラインデータを取得する。

10. ランプ試験後燃料の照射後試験

ランプ試験の終了したセグメント燃料は、非破壊及び破壊検査を行う。その内容と目的を以下に示す。また、照射後試験のフローチャートを図19に示す。また、より詳細なPIE 計画書については、本報とは別に作成する。

(1) 非破壊試験

- 外観観察

- 燃料要素の健全性を確認

- プロフィロメトリ

- 被覆管の変形量の測定

- 中性子ラジオグラフィ

- 燃料スタックなど燃料要素の内部観察

- 湍電流探傷試験

- 被覆管の健全性確認

- 被覆管酸化膜厚さ測定

- 被覆管の酸化膜厚さの評価

- γ スキャニング

- 軸方向燃焼度分布、FP分布評価、燃料スタック長の評価

(2) 破壊試験

- パンクチャ一試験

- 燃料要素内圧評価、FPガス放出率の評価

- 金相

- 燃料ペレットの観察

- γ スキャニング

- ペレット径方向の燃焼度分布、FP分布評価

- α -オートラジオグラフィ

- U, Pu スポット分布の評価

- β/γ オートラジオグラフィ

- FP分布の評価

- 燃焼度分析

- 燃焼度の確認

- 残留ガス分析

ペレット内のFPガス分析

- 密度測定

密度の評価

- 被覆管内面観察

PCI特性の評価

- SCC試験

ベース照射燃料について大洗工学センターでの破壊試験が実施不能の場合、シェラーリー研究所でのPIE計画に組み込む。

ランプ試験を行う燃料は一部のシングルステップモードの試験を除いてほとんどの燃料が破損に至る。破損燃料についてはパンクチャー試験を行わずに、破損箇所の破損孔、周辺のクラック等の観察を行う。さらに、破損箇所を切断し、破損近傍の燃料ペレット、被覆管についての詳細な観察及び分析を行う。

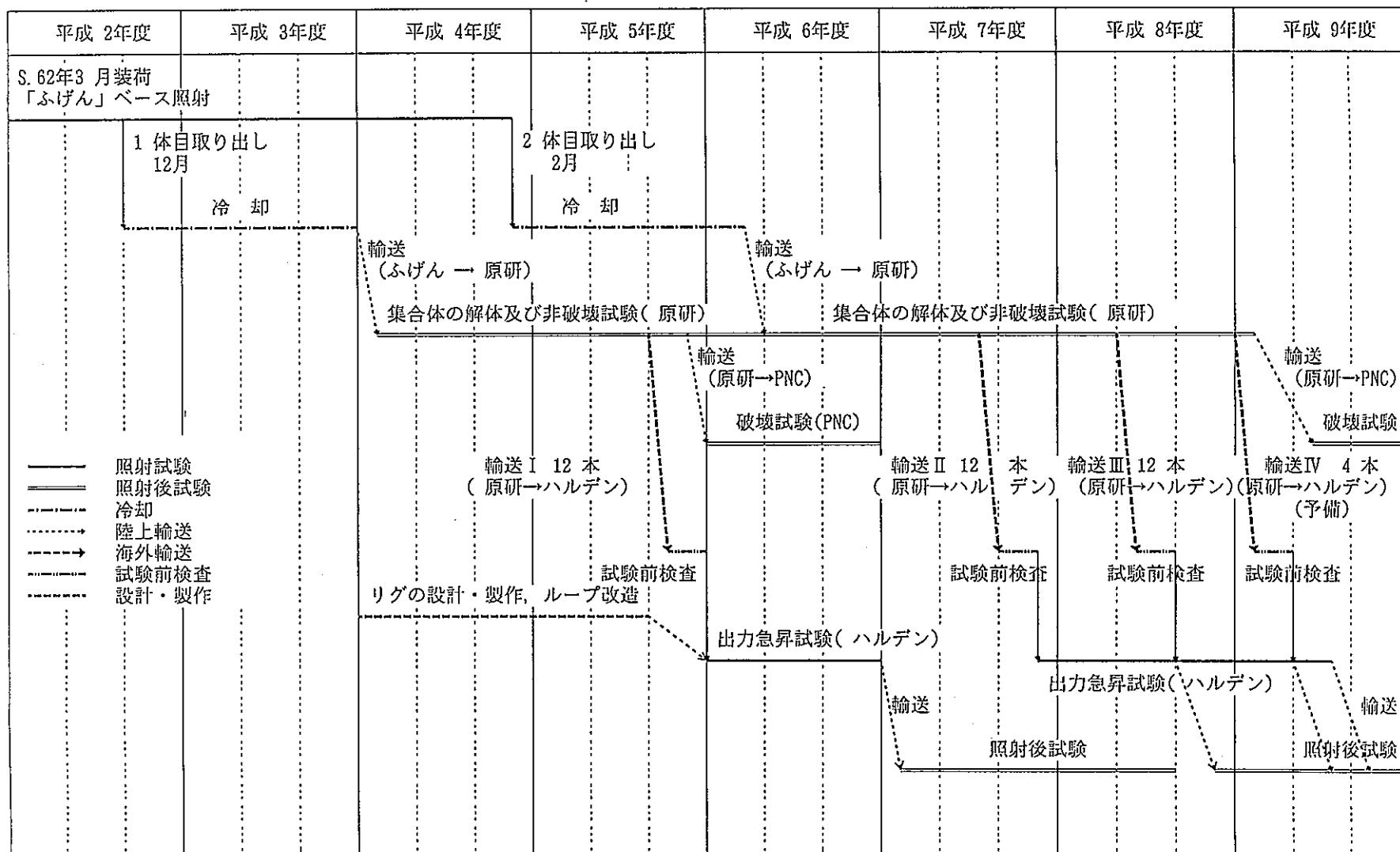
11. ま と め

本試験はATR 実証炉燃料の開発を目的に、標準燃料及び改良型燃料のマルチステップランプ試験とシングルステップランプ試験を行い照射挙動を調べる。マルチステップランプ試験は、各タイプの燃料の破損限界を調べ、さらに、シングルステップランプ試験によりマルチステップランプ試験の照射データを確認し、各データの信頼性、妥当性を評価する。

各燃料の照射データ及び照射後試験のデータは、燃焼度のパラメーターで整理・検討し、破損限界出力を求める。さらに、各タイプの燃料の破損時の振る舞いを調べる。

本試験で得られる、ベース照射の照射後試験結果、ランプ試験中の照射データ及びランプ試験の照射後試験結果等を総合的に解析し、ATR 実証炉燃料の出力過渡変化時の照射挙動を解析評価する。

表1 ATR実証炉燃料の出力急昇試験スケジュール



(単位：億円)

表1-2 ATR実証炉燃料の出力急昇試験資金計画

- 20 -

項目	1992	1993	1994	1995	1996	1997
(1)ベース照射(ふげん)		2体目取り出し				
(2)照射データ解析	(0.04)	(0.04)				
(3)輸送(ふげん➡原研)			(1.1)			
(4)照射後試験(原研)	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)	
(5)輸送(ふげん➡大洗)		(0.5)				(0.5)
(6)照射後試験(大洗)			(0.2)			(0.2)
(7)輸送(原研➡ハルデン)	(0.9)			(0.9)	(0.9)	(0.9)
(8)出力急昇試験(ハルデン炉)		(1.5)	(1.5)	(1.5)	(1.5)	(1.5)
(9)輸送(ハルデン➡シェラー)			(0.1)		(0.1)	(0.1)
(10)照射後試験(シェラー)				(1.0)	(1.0)	(1.0)
(11)照射リグ製作等	(0.6)	(0.8)				
計	2.54	3.84	4.8	4.4	4.5	3.3

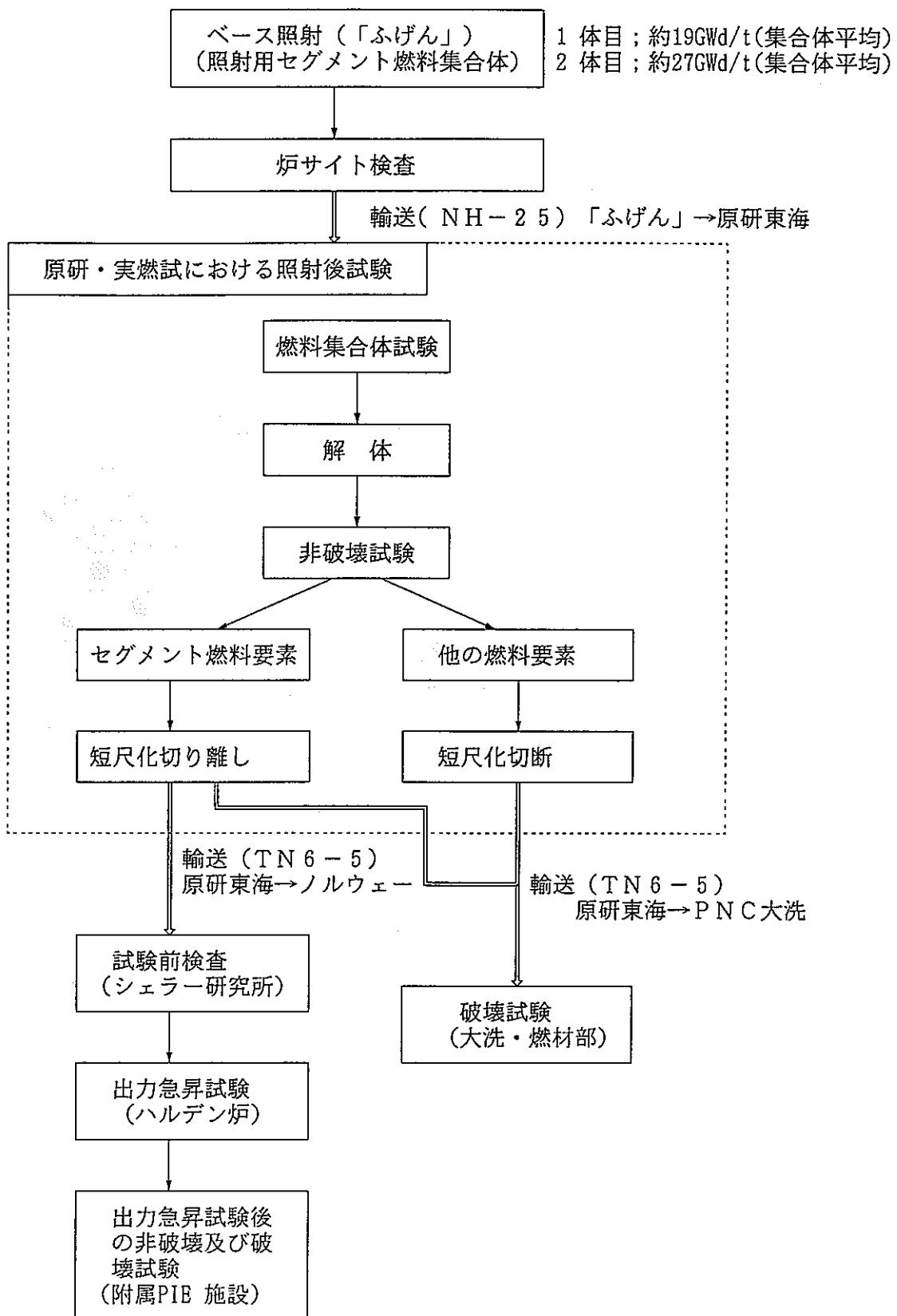


図1 出力急昇試験にかかる作業の流れ

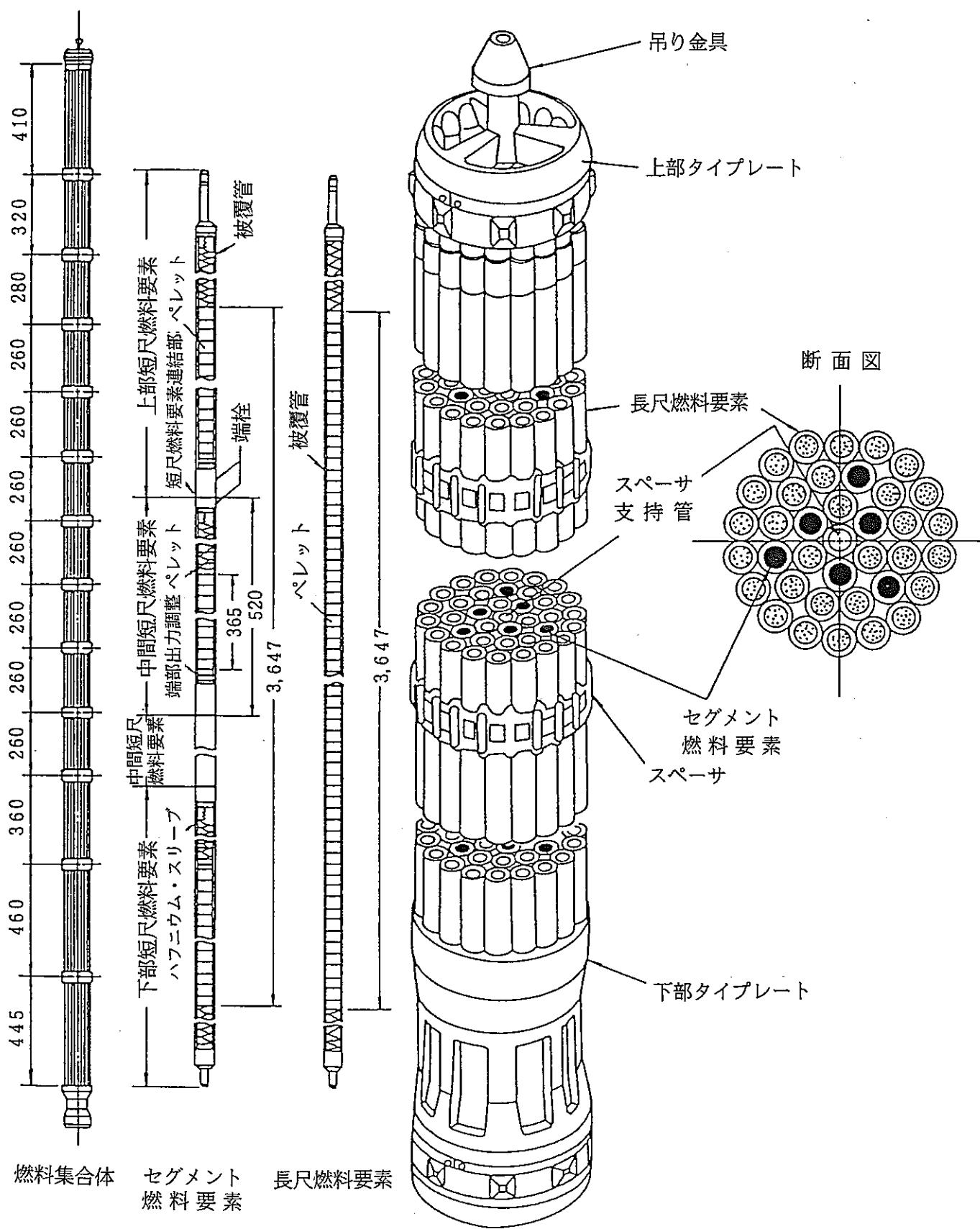
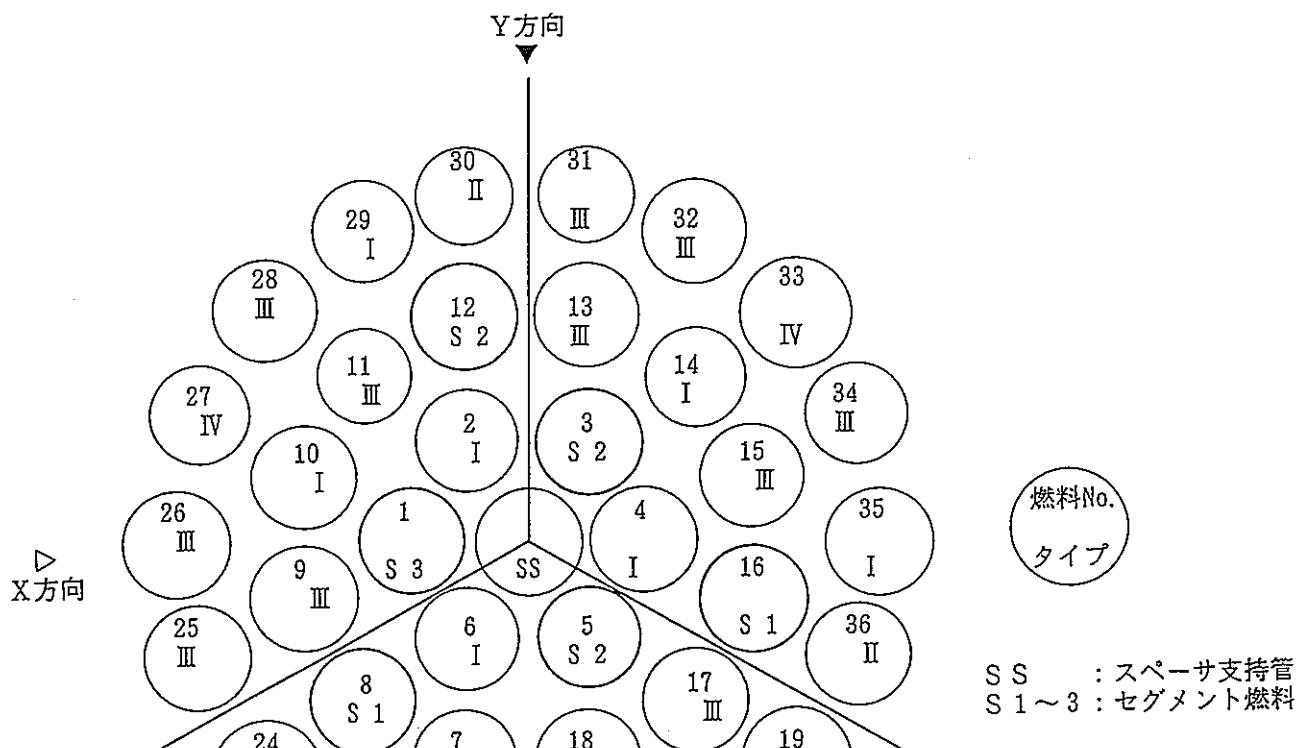


図2 燃料集合体構造図

(单位mm)

表2 燃料要素のタイプ

燃料要素のタイプ	ペレット	被覆管
Type - I	中 実	Zry - 2
Type - II	中 空	Zry - 2
Type - III	中 実	Zrライナー
Type - IV	中 空	Zrライナー



PPFE06

位置No.	ピンNo.	位置No.	ピンNo.
1.	AC101	19.	A2304
2.	A0101	20.	A2305
3.	AA101	21.	A3302
4.	A0102	22.	A2306
5.	AB101	23.	A0301
6.	A0103	24.	A1302
7.	A2251	25.	A2307
8.	AA201	26.	A2308
9.	A2202	27.	A3303
10.	A0201	28.	A2309
11.	A2252	29.	A0303
12.	AB201	30.	A1303
13.	A2203	31.	A2310
14.	A0202	32.	A2311
15.	A2253	33.	A3304
16.	AA202	34.	A2312
17.	A2204	35.	A0304
18.	A0203	36.	A1304

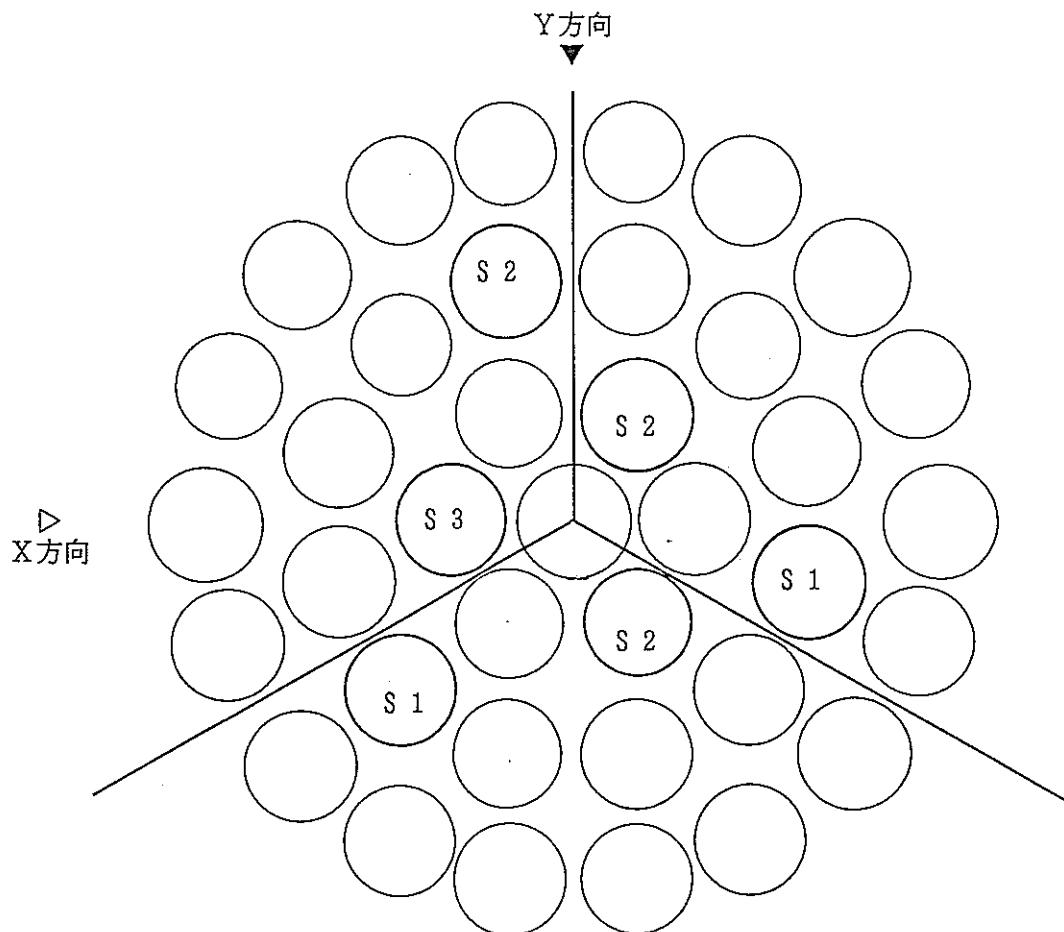
PPFE07

位置No.	ピンNo.	位置No.	ピンNo.
1.	AC102	19.	A2313
2.	A0104	20.	A2314
3.	AA102	21.	A3301
4.	A0105	22.	A2315
5.	AB103	23.	A0305
6.	A0106	24.	A1301
7.	A2254	25.	A2316
8.	AA204	26.	A2318
9.	A2206	27.	A3305
10.	A0204	28.	A2319
11.	A2255	29.	A0308
12.	AB202	30.	A1305
13.	A2207	31.	A2320
14.	A0205	32.	A2321
15.	A2256	33.	A3306
16.	AA205	34.	A2302
17.	A2208	35.	A0309
18.	A0206	36.	A1306

図3 集合体上部透視図

表3 燃料要素の主要仕様

	中間短尺燃料	長尺燃料
I. ペレット		
種類	中実 / 中空	
材質	MOX	
外径	12.4 mm	左
内径(中空ペレット)	3.5 mm	左
高さ	13.0 mm	左
形状	ディッシュ・チャンファ付 (中空ペレットはチャンファのみ)	左
密度	95% TD	同 左
核分裂物質量	3.71 wt%	3.71 wt% 内層中間層/2.2 wt% 外層
II. 被覆管		
種類	Zry-2 / Zrライナ付Zry-2	
外径	14.5 mm	左
内径	12.7 mm	左
Zrライナ層厚さ (Zrライナ付)	0.075 mm	左
III. 燃料要素		
全長	520 mm	4398 mm
有効長	365 mm	3647 mm
封入ガス	He	同 左
封入圧力	3 Kg/cm ²	同 左
プレナム体積比	0.2	0.1
端部出力調整ペレット長	10 mm (上端, 下端)	—



	上部短尺 燃料要素			中間短尺燃料要素		下部短尺 燃料要素	
S 1 被覆管 ペレット	Zry-2	Zry-2	Zry-2	Zry-2	Zry-2	Zry-2	Zry-2
	中実	中実	中空	中空	中实	中实	中实
S 2 被覆管 ペレット	Zry-2	Zrライナ	Zrライナ	Zrライナ	Zrライナ	Zrライナ	Zry-2
	中实	中实	中空	中空	中实	中实	中实
S 3 被覆管 ペレット	Zry-2	Zrライナ	Zrライナ	Zrライナ	Zry-2	Zry-2	Zry-2
	中实	中实	中实	中实	中实	中实	中实

図4 照射用セグメント燃料集合体のセグメント燃料要素配置

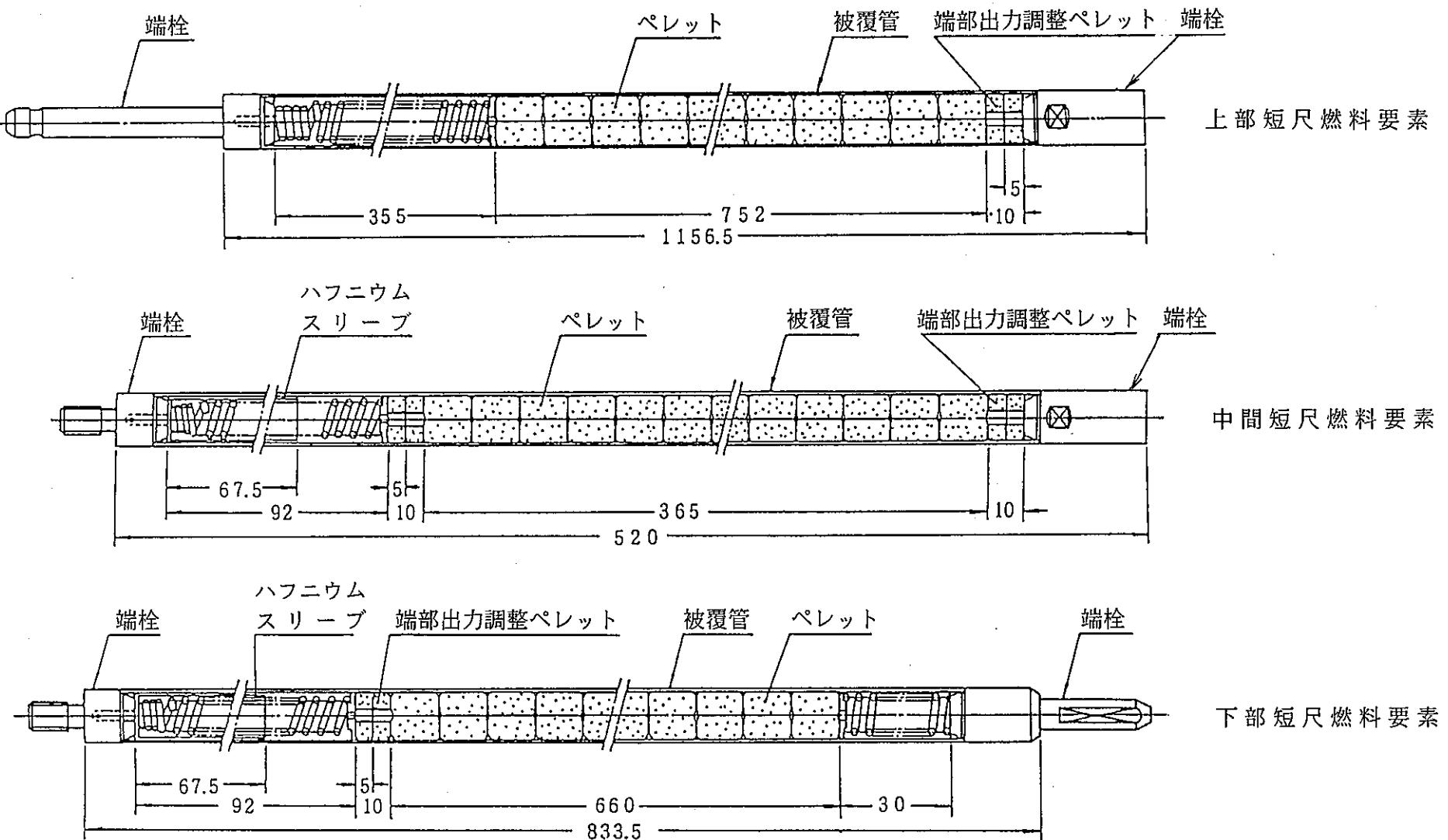


図5 短尺燃料構造図

PPFE07

位置番号	装荷位置	セグメントタイプ	燃料ピンNo.	中間短尺燃料			
				上部		下部	
3	I	S1	AA102	A-1(I) A4004	A-18(II) A5005	PIE-1(II) A5007	A-2(I) A4005
8	M	S1	AA204	A-5(I) A4015	A-7(II) A5003	A-8(II) A5017	A-6(I) A4018
16	M	S1	AA205	A-16(I) A4008	A-19(II) A5009	PIE-2(II) A5014	A-17(I) A4018
5	I	S2	AB103	A-3(III) A6002	A-20(IV) A7006	PIE-3(IV) A7008	A-4(III) A6014
12	M	S2	AB202	A-9(III) A6010	A-11(IV) A7010	A-12(IV) A7011	A-10(III) A6022
1	I	S3	AC102	PIE-4(III) A6007	A-14(III) A6016	A-15(III) A6018	A-13(I) A4012

PPFE06

位置番号	装荷位置	セグメントタイプ	燃料ピンNo.	B-1(I) A4002	B-18(II) A5002	PIE-5(II) A5010	B-2(I) A4003
3	I	S1	AA101				
8	M	S1	AA201	B-5(I) A4009	B-7(II) A5011	B-8(II) A5016	B-6(I) A4010
16	M	S1	AA202	B-16(I) A4011	B-19(II) A5012	PIE-6(II) A5013	B-17(I) A4019
5	I	S2	AB101	B-23(III) A6001	B-40(IV) A7002	PIE-7(IV) A7012	B-14(III) A6006
12	M	S2	AB201	B-9(III) A6009	B-11(IV) A7001	B-12(IV) A7005	B-10(III) A6017
1	I	S3	AC101	PIE-8(III) A6005	B-14(III) A6012	B-15(III) A6015	B-13(I) A4007

図6 試験用途とセグメント燃料要素番号対応一覧

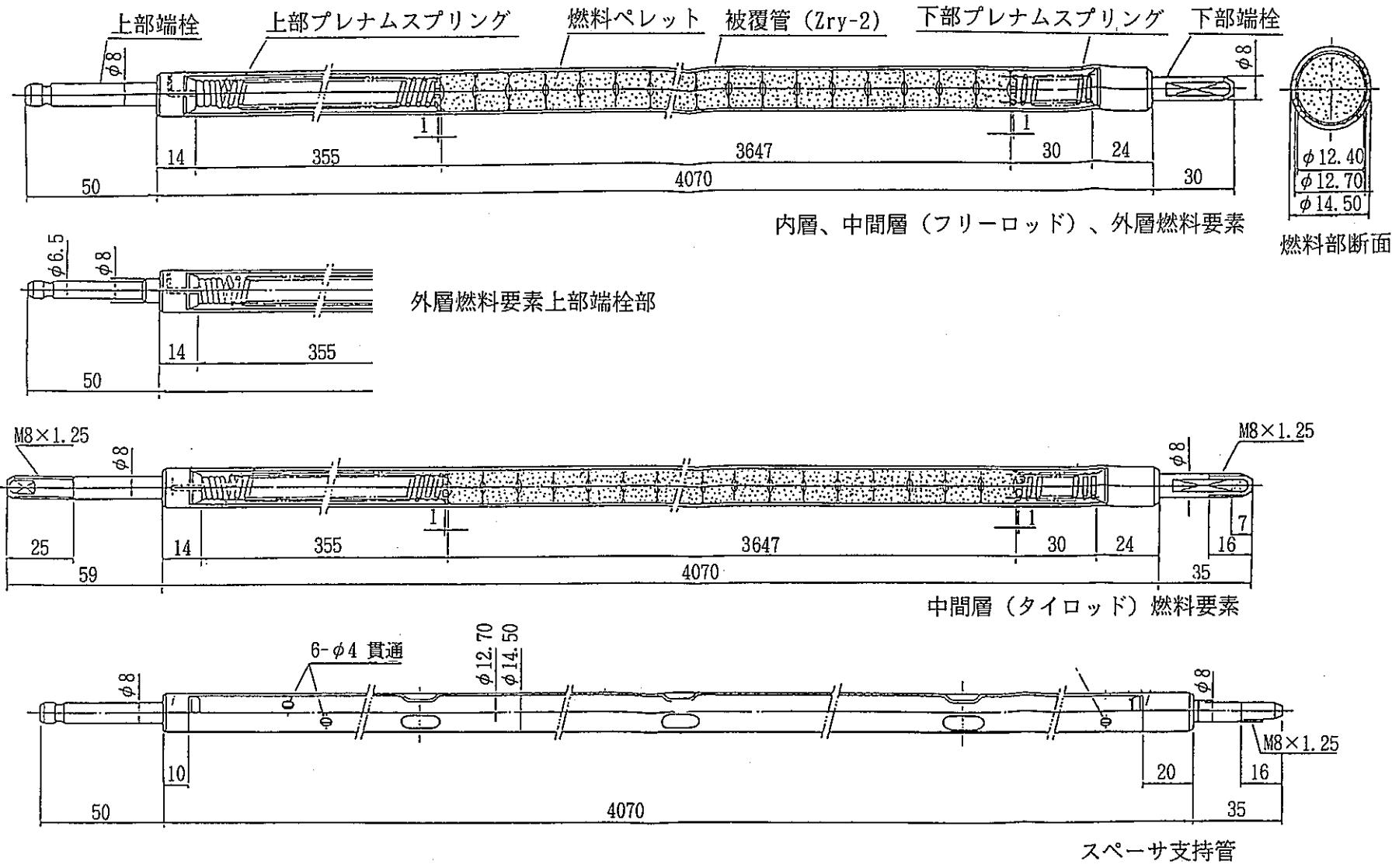


図7 長尺燃料構造図

表4 ベース照射条件

		経験最大 線出力密度	到達燃焼度	核分裂物質濃度 ($^{235}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$) (U+Pu)
集合体 I (PPFE07) 16サイクル 平均燃焼度 19GWd/t	BI-1 (内層)	18.1 KW/m	約13.5GWd/t	約 2.7wt% ²⁾
	BI-2 (中間層)	23.7 KW/m	約18.6GWd/t	約 2.1wt% ²⁾
	BO-1 (外層)	23.8 KW/m	約19.8GWd/t	——
集合体 II (PPFE06) 19サイクル 平均燃焼度 27GWd/t	BI-3 (内層)	17 KW/m ¹⁾	約 24GWd/t ²⁾	約 2.1wt% ²⁾
	BI-4 (中間層)	24 KW/m ¹⁾	約 32GWd/t ²⁾	約 1.5wt% ²⁾
	BO-2 (外層)	——	——	——

1) 第13サイクルまでの値

2) WIMSコードによるEOLにおける推定値

表5 「ふげん」炉運転条件

運転圧力	72 Kg/cm ²
冷却材入口温度	279°C
冷却材出口温度	286°C
冷却材出口蒸気重量率	38 wt%

表6 各燃焼度毎のセグメント燃料要素本数

燃料要素タイプ ベース照射条件	集合体 I		集合体 II	
	BI-1 (15GWd/t)	BI-2 (21GWd/t)	BI-3 (24GWd/t)	BI-4 (32GWd/t)
Type-I Zry-2, 中実	3	4	3	4
Type-II Zry-2, 中空	(2)	4	(2)	4
Type-III ライナ, 中実	4(1)	2	4(1)	2
Type-IV Zrライナ, 中空	1(1)	2	1(1)	2

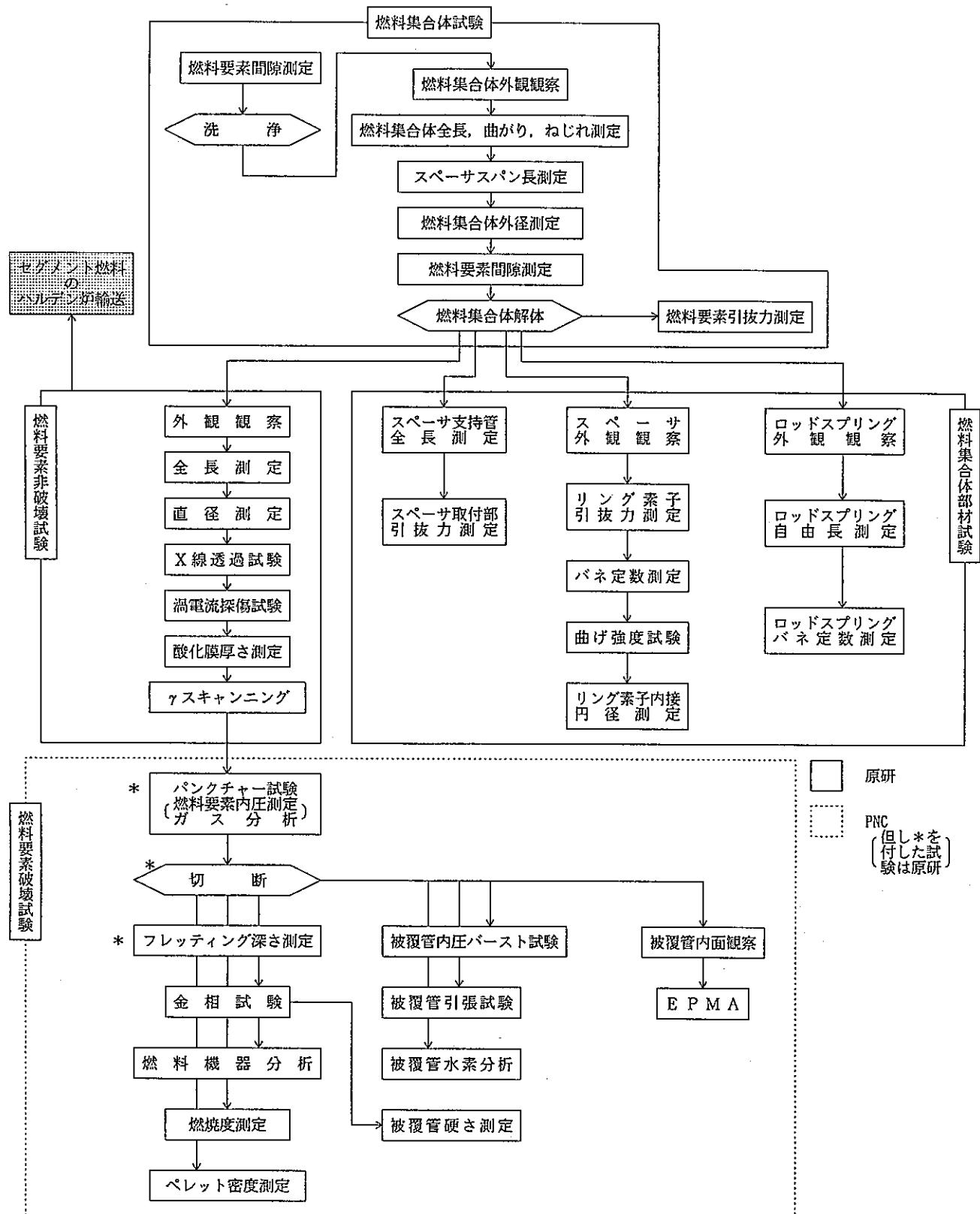


図8 ベース照射燃料の照射後試験フローチャート

表7-1 セグメント燃料集合体の照射後試験項目(1)

試験項目	試料数	目的	試験内容	採取データ
<燃料集合体試験>*				
1. 燃料集合体外観観察 (洗浄後)	1体	・燃料集合体構造の概括的健全性の確認 ・燃料要素及び燃料集合体部材の概括的健全性の確認 ・クラッド(CRUD)付着状況の評価	・ホットセルの窓を通じての目視による観察 ・120°間隔の3方向について軸方向の観察及び写真撮影(ペリスコープ使用) ・クラッドの付着状態、軸方向分布の観察	・燃料集合体外観観察結果記録 ・燃料集合体外観写真
2. 燃料集合体全長測定	1体	・燃料集合体伸び量評価 ・設計式の検証	・集合体全長、上部タイプレートと下部タイプレート間距離、曲がり、ねじり量の測定	・燃料集合体全長、バンドル部長さ、曲がり、ねじり量
3. スペーサスパン長測定	1体	・スペーサ摺動機構の確認	・90°間隔の4方向について各スペーザのスパン長の測定	・各スペーサスパン長
4. 燃料集合体外径測定 (洗浄前後)	1体	・燃料集合体構造の健全性確認 ・燃料要素曲がり量評価	・120°間隔の3方向について各スペーサスパンの上部、中央部、下部のバンドル外径測定。各スペーザの外径測定。 洗浄前 外層バンドル外径 3方向×17点=51点 洗浄後 外層バンドル外径 3方向×17点=51点	・各スペーサスパンのバンドル外径、スペーサ外径 } 図-4に測定方法を示す。
5. 燃料要素間隙測定 (洗浄前後)	1体	・燃料集合体の摺動機構の妥当性確認 ・燃料要素曲がり量評価	・各スペーサスパンの上部、中央部、下部のギャップ幅の測定。(洗浄前については外層燃料要素のみ) 洗浄前 外層ギャップ 18方位×17点=306点 洗浄後 外層ギャップ 18方位×17点=306点 " 中間層ギャップ " セグメント 6方位×22点=132点 " 中間層ギャップ 長 尺 6方位×12点=72点 内層ギャップ 6方位×22点=132点	・各スペーサスパンの燃料要素間隙幅 } 図-4に測定方法を示す。
6. 燃料要素引抜力測定	36本	・スペーサ保持力の評価	・燃料集合体の解体に際して各燃料要素の引抜力を連続的に測定	・各燃料要素引抜力

表7-2 セグメント燃料集合体の照射後試験項目(2)

試験項目	試料数	目的	試験内容	採取データ
<燃料要素非破壊試験>*				
7. 燃料要素外観観察	(概観) 25本 (詳細) 11本 長尺 6本 セグ 5本	・燃料要素の健全性確認 ・燃料要素外表面状態の観察 ・サンプリング計画への反映	(概観) ・目視による全長観察及び特徴部写真撮影 (詳細) ・ペリスコープによる全長観察及び全長写真撮影 ・酸化膜カバー率評価用写真集 ・接合部は詳細な外観検査を要する。	・燃料要素外観観察結果記録 ・燃料要素全長外観著侈 ・酸化膜カバー率
8. 燃料要素全長測定	長尺 9本 セグ 6本	・燃料要素の燃焼に伴う伸び量評価	・移動式マイクロスコープによる燃料要素全長(肩間)の測定	・燃料要素全長(肩間) ・セグメント要素(6本) × 6種
9. 燃料要素直径測定	長尺 7本 セグ 6本	・被覆管変形量(クリープダウン量, PCMI)評価 ・サンプリング計画への反応	・45°間隔の4方向の燃料要素外径の連続的測定	・燃料要素外径プロファイルチャート ・フロッピーデスク
10. 燃料要素X線透過試験	長尺 5本 セグ 6本	・燃料要素内部状況の観察 ・燃料スタック変化量評価	・90°間隔2方向のX線写真撮影	・X線写真(ポジ, ネガ)
11. 湍電流探傷試験	長尺 4本 セグ 1本	・被覆管の健全性確認 ・サンプリング計画への反応	・湍電流試験法による被覆管欠陥の検出 ・標準欠陥に対する信号との比較評価	・湍電流探傷試験, 信号アナログチャート
12. 酸化膜厚さ測定	長尺 5本	・被覆管酸化膜厚さの評価	・湍電流試験法による酸化膜厚さの全長測定	・酸化膜厚さ
13. γ スキャニング	長尺 11本 セグ 6本	・燃料スタック長評価 ・軸方向燃焼度分布, F.P. 分布評価 ・接合部の出力ピーキングの確認	・定点スペクトル測定(各層1本) ・グロスマ γ 線強度の軸方向についての連続的測定 ・核種別強度の軸方向についての連続測定	・ γ 線強度アナログチャート ・フロッピーデスク
<燃料要素破壊試験>				
14. パンクチャー試験*	長尺 5本	・燃料要素内圧評価 ・FPガス放出率の評価 ・設計コードとの比較	・パンクチャー試験機により燃料要素を穿孔し, 燃料要素内自由ガスの全体積の測定 ・燃料要素内自由体積の測定 ・燃料要素内自由ガスの捕集及びガス成分(H ₂ , He, O ₂ , Kr, Xe等)の成分	・燃料要素内自由ガス全体積 ・燃料要素内自由体積 ・燃料要素内自由ガス組成分析結果

表7-3 セグメント燃料集合体の照射後試験項目(3)

試験項目	試料数	目的	試験内容	採取データ
15. フレッティング深さ測定*	160点	フレッティング深さの評価	・破壊試験用燃料要素の切断後試料について形状測定装置により、フレッティング深さを測定	・フレッティング深さ ・32リング素子×5ディンプル=160
16. 被覆管硬さ測定	5ヶ	・被覆管の照射硬化評価 ・被覆管の機械的強度評価	・被覆管のビッカース硬さの測定	・被覆管ビッカース硬さ
<燃料集合体部材試験>*				
17. スペーサ支持管試験	1本	・スペーサ支持管の照射成長量の評価 ・スペーサ摺動機構の確認	(スペーサ外観検査) (1本) (スペーサ支持管長さ測定) (1本) ・スペーサ支持管全長の移動式マイクロスコープによる測定 (スペーサ支持管引抜力測定) (3ヶ) ・スペーサからのスペーサ支持管引抜力測定 ・スペーサ支持管のかしめ部の観察 (スペーサ支持管金相試験) (2ヶ)	・スペーサ支持管外観写真 ・スペーサ支持管全長 ・スペーサ支持管引抜力 ・スペーサ支持管かしめ部の写真 ・スペーサ支持管腐食厚さ
18. スペーサ試験	3ヶ	・スペーサの健全性確認 ・スペーサ引抜力に対する照射効果の評価 ・スペーサ強度に対する照射効果の評価	・スペーサの目視による健全性確認、特異部写真撮影 ・標準棒（マンドレル）を用いたスペーサの各リング素子の引抜力測定 ・バネ定数測定 ・曲げ強度試験 ・リング素子内接円径測定	・スペーサの各リング素子の引抜力 ・スペーサ外観写真（溶接部） ・バネの劣化度 ・曲げ破損荷重 ・リング素子の歪量
19. ロッドスプリング試験	4ヶ	・ロッドスプリングの健全性確認 ・バネ特性の照射効果の評価	・ロッドスプリングの自由長の測定及びバネ定数の測定 ・バネカバー除去後のロッドスプリングの観察（外層、中間層、内層のフリーロッド及びタイロッドに装着されているもの各一ヶづつ）	・ロッドスプリング自由長 ・ロッドスプリングバネ定数 ・ロッドスプリング外観写真

* : 集合体試験、燃料要素非破壊試験、破壊試験の一部（パンクチャ試験、フレッティング深さ測定）及び集合体部材試験は原研・ホット試験室で実施

表8 ベース照射燃料要素の照射後試験対応表

燃料要素位置番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
燃料要素パラメータ	装荷位置 (I, M, O)	I	I	I	I	I	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O			
	装荷状態 (F, T)	F	F	F	F	F	F	T	F	F	T	T	F	F	T	T	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F					
	サーベランスデータ (◎, ○)	◎	◎	◎	○	◎	○	○	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎					
	燃料タイプ (S, I~IV)	S3	I	S1	I	S2	I	III	S1	III	I	III	S2	III	I	III	S1	III	I	III	IV	III	I	II	III	III	IV	III	I	II							
試験項目		本数																																			
燃料要素外観観察(概観)		25																																			
燃料要素外観観察(詳細)		11																																			
燃料要素全長測定		15																																			
燃料要素直径測定(4方向)		13																																			
X線透過試験		11																																			
渦電流探傷試験*		5																																			
酸化膜厚さ測定		5																																			
γスキャニング(スキャン)		17																																			
γスキャニング(定点スペクトル)		7																																			
パンクチャーティー試験		5																																			
破壊試験		5																																			
セグメント燃料		4																																			
燃料要素パラメータ		IV × 1本																																			
装荷位置		III × 1本																																			
装荷状態		II × 1本																																			
サーベランスデータ		O: 有(詳細外径プロファイル) ◎: 有(詳細外径プロファイル)																																			
(X線透過試験)		+																																			
燃料タイプ		S1~S3 : セグメント燃料 S1 (3本) S2 (2本) S3 (1本)																																			
+		I (9本) II (3本) III (15本) IV (3本)																																			
+		: Zr-2 + 中実ペレット : Zr-2 + 中空ペレット : Zrライナ + 中実ペレット : Zrライナ + 中空ペレット																																			
(上部)		S1 - I I II II I I																																			
(下部)		S2 - I III IV IV III I																																			
		S3 - I III III III I I																																			
#セグメント燃料の渦電流探傷試験については炉サイトで実施する。																																					

表9 ランプ試験に供するセグメント燃料のリスト

Transport	I. D. No.	Rod No.	¹⁾ Fuel type	²⁾ Burn-up	Test mode	LVDT
Transport I (1993) 12 rods	A-1	A4004	I	1	Multi	EC
	A-2	A4005	I	1	Multi	PF
	A-3	A6002	III	1	Multi	EC
	A-4	A6014	III	1	Multi	PF
	A-5	A4015	I	2	Multi	EC
	A-6	A4018	I	2	Multi	PF
	A-13	A4012	I	1	Single A	EC
	A-14	A6016	III	1	Single A	EC
	A-15	A6018	III	1	Single B	EC
	A-16	A4008	I	2	Single B	EC
	A-17	A4018	I	2	Single B'	EC
	A-19	A5009	II	2	Spare rod	T.B.D.
	A-7	A5003	II	2	Multi	EC
	A-8	A5017	II	2	Multi	PF
	A-9	A6010	III	2	Multi	EC
	A-10	A6022	III	2	Multi	PF
	A-11	A7010	IV	2	Multi	EC
	A-12	A7011	IV	2	Multi	PF
Transport II (1995) 12 rods	B1	A4002	I	3	Multi	EC
	B-2	A4003	I	3	Multi	PF
	B-3	A6001	III	3	Multi	EC
	B-4	A6006	III	3	Multi	PF
	B-5	A4009	I	4	Multi	EC
	B-6	A4010	I	4	Multi	PF
	B-7	A5011	II	4	Multi	EC
	B-8	A5016	II	4	Multi	PF
	B-9	A6009	III	4	Multi	EC
	B-10	A6017	III	4	Multi	PF
	B-11	A7001	IV	4	Multi	EC
	B-12	A7005	IV	4	Multi	PF
Transport III (1996) 12 rods	B-13	A4007	I	3	Single B	EC
	B-14	A6012	III	3	Single B	EC
	B-15	A6015	III	3	Single B'	EC
	B-16	A4011	I	4	Single B	EC
	B-17	A4019	I	4	Single B'	EC
	A-18	A5005	II	1	Spare rod	T.B.D.
	A-10	A7006	IV	1	Spare rod	T.B.D.
	B-18	A5002	II	3	Spare rod	T.B.D.
	B-19	A5012	II	4	Spare rod	T.B.D.
	B-10	A7002	IV	3	Spare rod	T.B.D.

1) Fuel Type I:Solid,Zry-2 ; II:Hollow,Zry-2 ; III:Solid,Zr-liner ; IV:Hollow,Zr-liner

2) Burn-up 1: 13.5GWd/t, 2: 18.6GWd/t, 3: 24GWd/t, 4: 32GWd/t

表10 収納する核燃料物質の設計仕様

項 目	収 納 物	
種 類	ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料	
重 量		
・混合酸化物 (fissile 部)	5 5 2 0	g 以下
・ウラン酸化物 (fissile 部)	—	g 以下
・Pu-F i s s i l e	5 8 . 3	g 以下
・U-235	1 9 . 1	g 以下
・構造材試験片又は被覆管部材	3 5 1 5	g 以下
放 射 能 量	1 . 3 3 6 × 1 0 ¹⁴	Bq 以下
性 状	固体 (焼結体)	
濃 縮 度		
・プルトニウム富化度	3 . 5 2	wt%PuO ₂ 以下
・ウラン濃縮度	0 . 4 7 5	wt% 以下
燃 燒 度	2 1 0 0 0	MWd/t 以下
中 性 子 照 射 量	2 . 8 3 × 1 0 ²¹	nvt 以下
発 熱 量	1 1 . 4	W 以下
冷 却 日 数	1 0 9 5	日 以上

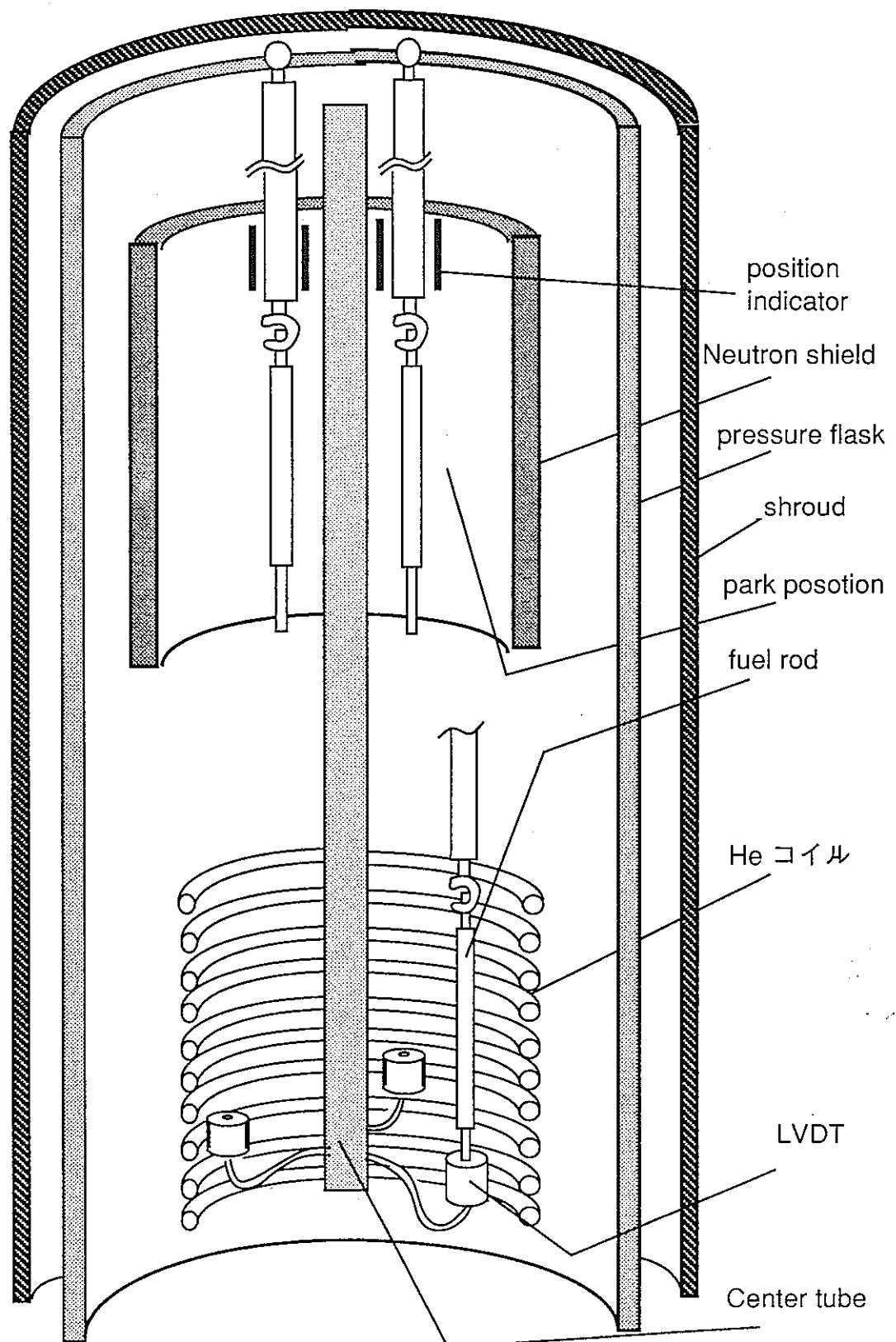


図9 ランプ試験用リグの略図

表11 マルチステップ出力急昇試験条件

項目	条件
線出力上昇幅 (ΔP)	5 KW/m
線出力上昇速度 (P)	1.0 KW/m · S
保持時間 (T)	60 min
プレコンディショニングレベル (P)	25 KW/m
プレコンディショニング時間 (T)	5 days

表12 シングルステップ出力急昇試験条件

項目	Type - A	Type - B	Type - B'
到達線出力密度 (P_{max})	60 KW/m	* 1	* 1
線出力上昇幅 (ΔP)	30 KW/m	* 1	* 1
線出力上昇速度 (P)	1.0 KW/m · S	1.0 KW/m · S	1.0 KW/m · S
保持時間 (T)	2 min	60 min	60 min
プレコンディショニングレベル (P)	30 KW/m	25 KW/m	25 KW/m
プレコンディショニング時間 (T)	5 days	5 days	5 days

* 1 マルチステップ出力急昇試験より定める。

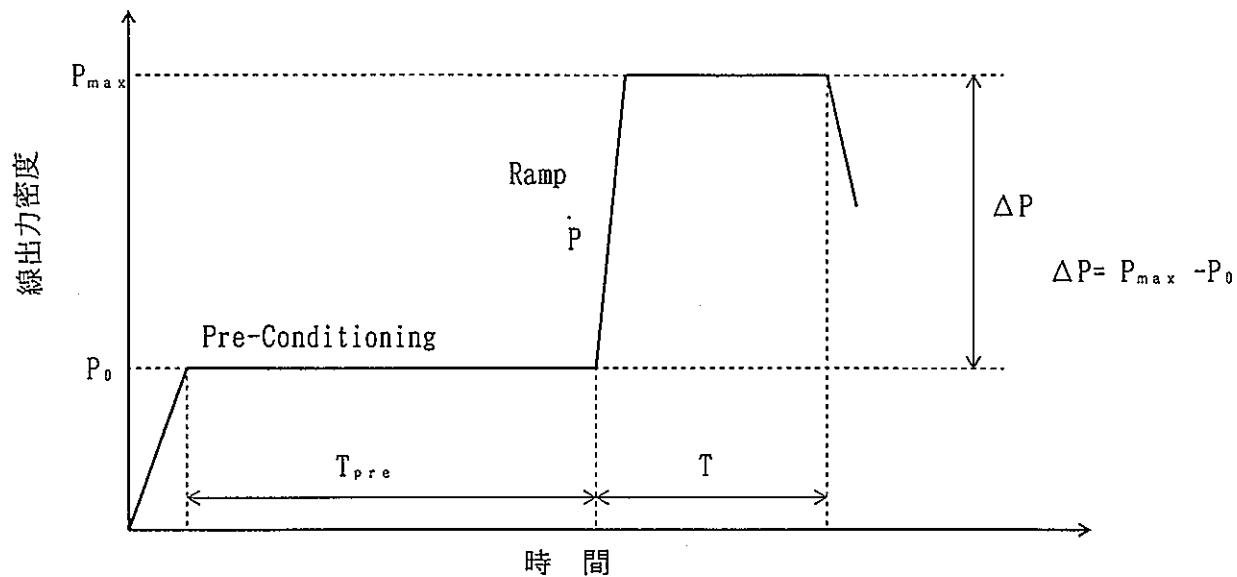


図10 シングルステップ出力急昇試験概念図

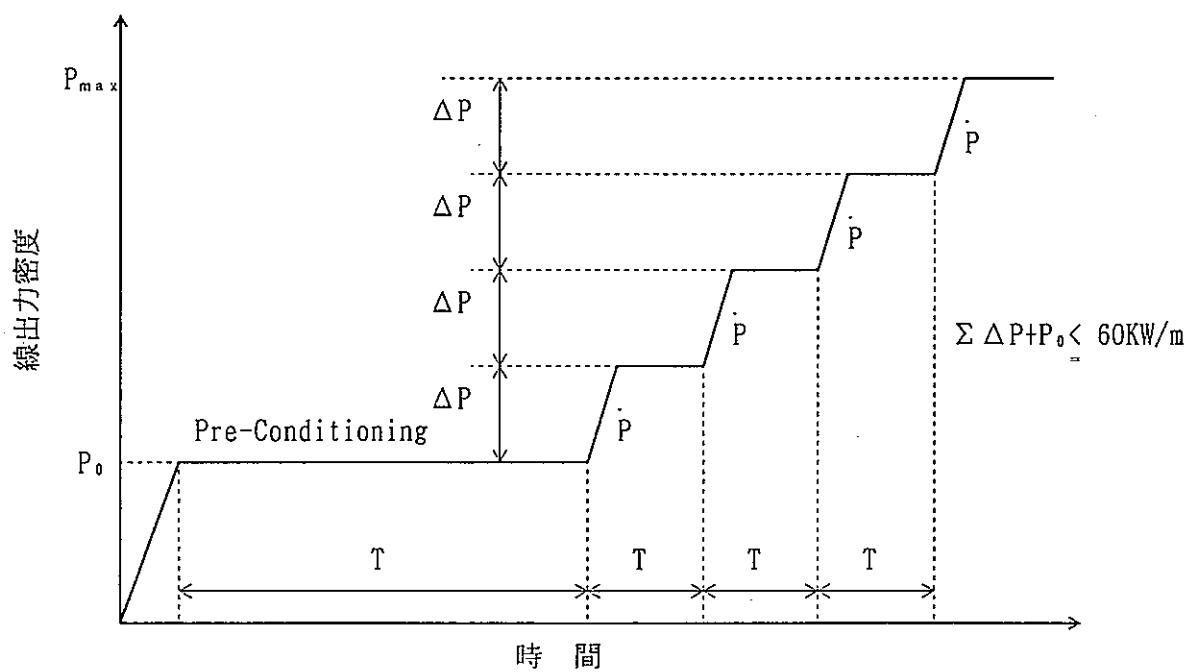


図11 マルチステップ出力急昇試験概念図

表13-1 軽水炉燃料の出力急昇試験実績と試験条件

試験名	試験炉	燃料タイプ	本数	ランプ試験条件							燃焼度 Gwd/T	備考
				ランプモード	プレコンレベル P_c (kW/m)	プレコン時間 T_{pre}	到達出力 P_{max} (kW/m)	出力変化幅 ΔP (kW/m)	出力変化速度 P (kW/m・min)	保持時間 T_{hold}		
インターランプ ('75.8～'79.6)	Studsvik R2	BWR(パラメータ；被覆管, P/C ギャップ, 密度, Bu)	20	シングル	23～35	24h	38～65	15～35	～4	24h	9～22	BWR燃料のPCI/SCC破損挙動研究
オーバーランプ ('77.4～'80.12)	同上	BWR(パラメータ；Bu, He圧 P/C ギャップ etc)	40	シングル	≈30	72h	37～53	16～31	0.05～11.5	24h	12～31	PWR燃料のPCI/SCC破損挙動研究
デモランプI ('79.7～'83.4)	同上	BWR(パラメータ；中空ペレット, 大粒径(Nb ₂ O ₅ 添加), Heガス予加圧)	5	シングル マルチ	≈30	24hr	45～60 ～60		11.5 5	1h	14～17	BWR改良燃料のPCI/SCC破損挙動の研究
デモランプII ('80.3～'82.6)	同上	BWR	8	シングル	≈30	24h	38～49	20～30	4～22	10sec～24h	26～29	短時間ランプ照射によるPCI/SCC 破損メカニズム研究(クラック)
スバーランプ ('80.4～'83.10)	同上	PWR BWR	28 16	シングル	≈25 18～33	24h 24h	35～51 30～44	18～31 16～32	8～10 0.004～10	12h 12hor24h	29～45 27～38	高燃焼度燃料のPCI/SCC 破損挙動の研究
トランスランプI ('82～'85)	同上	BWR (8×8標準)	5	シングル	30	24h	48～56	18～26	600	～2 min	18～21	実際の過渡変化に近い速い出力急昇におけるPCI/SCC 破損挙動の研究 IAEA Technical Committee on Fuel Internal Chemistry and Fission Products Behaviour, Germany, 11-15 Nov. 1985
トランスランプII	同上	PWR	6	シングル	20	6h	43～60	23～40	100	～1.5min	31～32	速い出力急昇におけるPCI/SCC 破損挙動の研究 IAEA International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, 1988

表13-2 軽水炉燃料の出力急昇試験実績と試験条件

試験名	試験炉	燃料タイプ	本数	ランプ試験条件							燃焼度 GWd/T	備考
				ランプモード	プレコンレベル P_{pre} (kW/m)	プレコン時間 T_{pre}	到達出力 P_{max} (kW/m)	出力変化幅 ΔP (kW/m)	出力変化速度 P (kW/m · min)	保持時間 T_{hold}		
高性能燃料の特性に関する研究 (電力, NPD etc)	Studsvik R2	BWR(パラメータ; 標準8×8, Zライナ, 銅バリア, 中空ペレット)	113	マルチ	27.5	—	57.5	5	6	1 h	~39	高性能燃料の耐PCI性の評価 日本原子力学会「昭和59年分科会」E4, 1984
軽水炉燃料出力急昇試験 (原研)	Halden	BWR PWR	10 10	マルチ	—	—	45~53	—	2.5	—	—	燃料棒仕様, 冷却材条件の影響の研究, 日本原子力学会「日本62年年会」G24, 1987
Zライナ燃料の高燃焼度のランプ試験 (電力, NPD etc)	Studyik R2	BWR	5	マルチ	—	—	60	5	6	1 h	~45	Zrライナ管燃料の高燃焼度における耐PCI特性の研究 日本原子力学会「1989 秋の大会JK35
IFA-531 (GE)	Halden	BWR	3	マルチ	26	6	56~60	6.6	6.6	1 h	10~12	HWR-121 (May 1984)
IFA-405	Halden	パラメータ(ギャップ幅; 中実/中空ペレット, Vipacコーティング)	22	シングル	ベース照射 26~46	—	47~70	16~35	~ 3.6	—	~ 8	
	Halden	パラメータ(ギャップ幅)	5	—	ベース照射 ~44(上部) ~55(下部)	—	35~65	—	1.5, 3.0	—	28~37	
IFA-415	Halden	パラメータ(被覆管肉厚)	10	シングル, マルチ	ベース照射 27(上部) 35(下部)	—	30~59	—	2.3~3.0	—	5~11	

表13-3 軽水炉燃料の出力急昇試験実績と試験条件

試験名	試験炉	燃料タイプ	本数	ランプ試験条件							燃焼度 GWd/T	備考
				ランプモード	プレコンレベル P_{pre} (kW/m)	プレコン時間 T_{pre}	到達出力 P_{max} (kW/m)	出力変化幅 ΔP (kW/m)	出力変化速度 R (kW/m・min)	保持時間 T_{hold}		
IFA-415	Halden		45	—	ベース照射 20~45	—	51~70	—	—	—	7~32	Enlarged Halden Program Group Meeting, Norway, 5th-9th June, 1978
IFA-106, 102, 132, 133, 216	Halden		8	—	—	—	51~90	—	—	—	7~25	

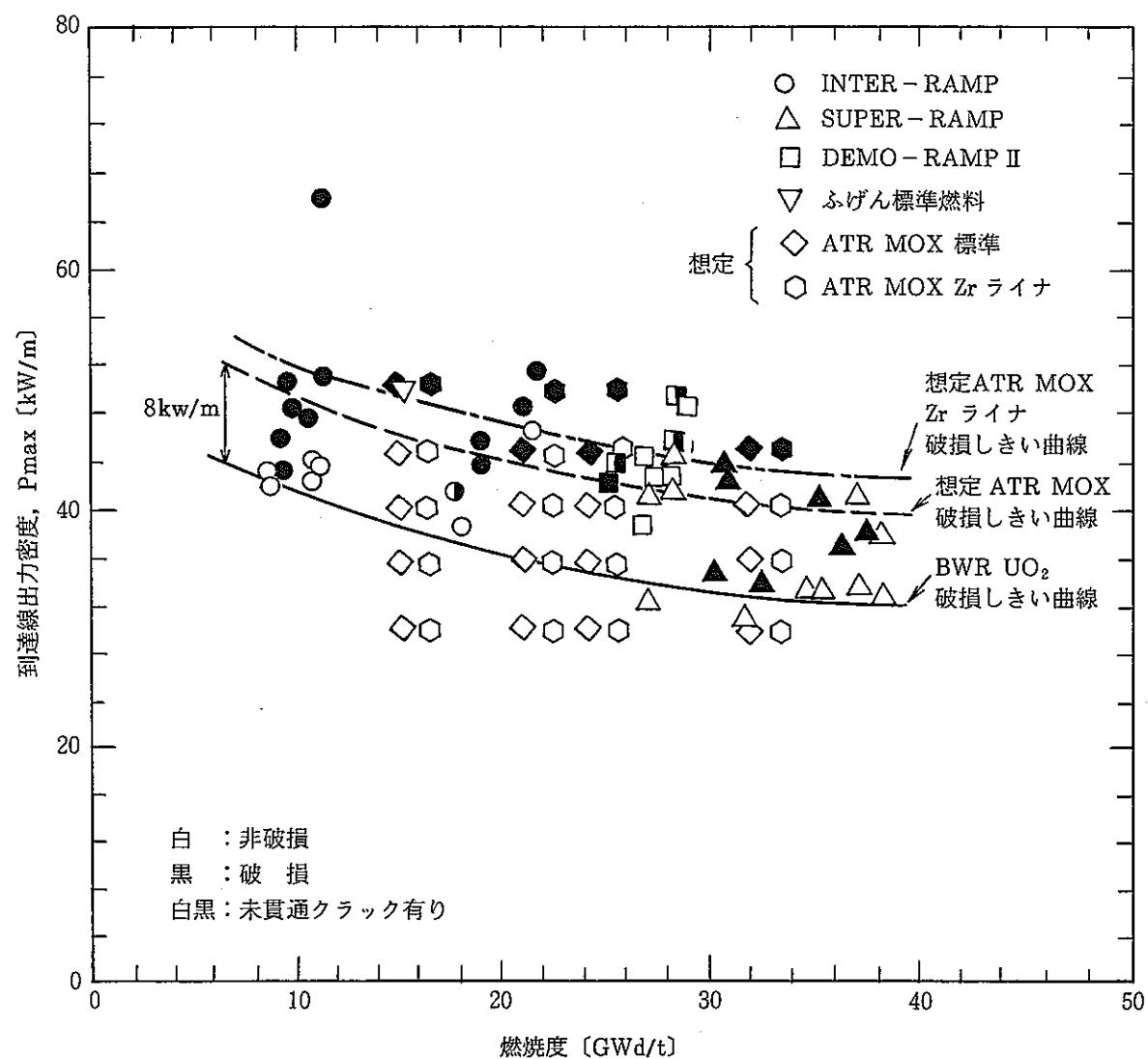


図12 BWR燃料のマルチステップランプ試験結果の
到達線出力密度と燃焼度の関係

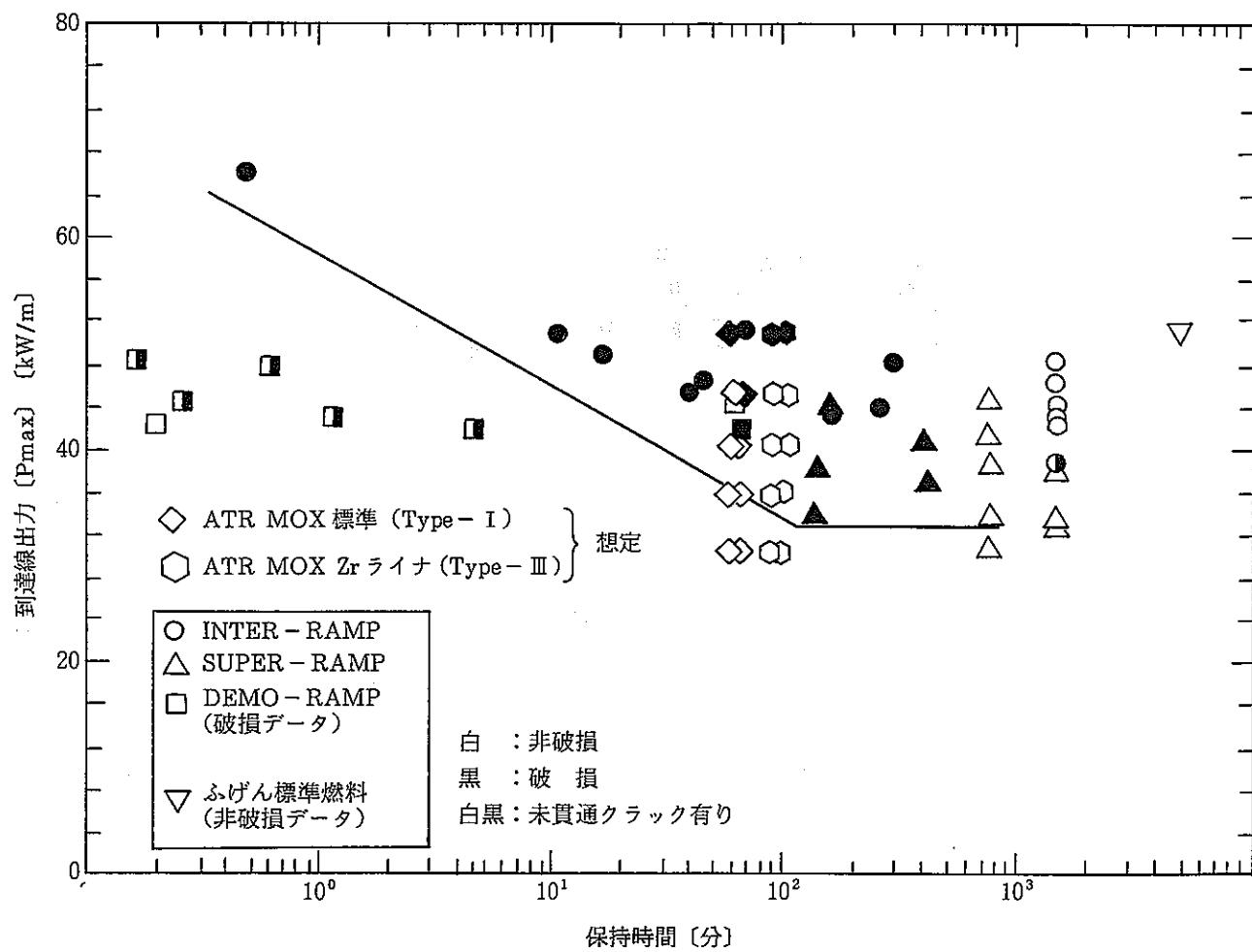


図13 BWR燃料のマルチステップランプ試験結果の
到達線出力密度と保持時間の関係

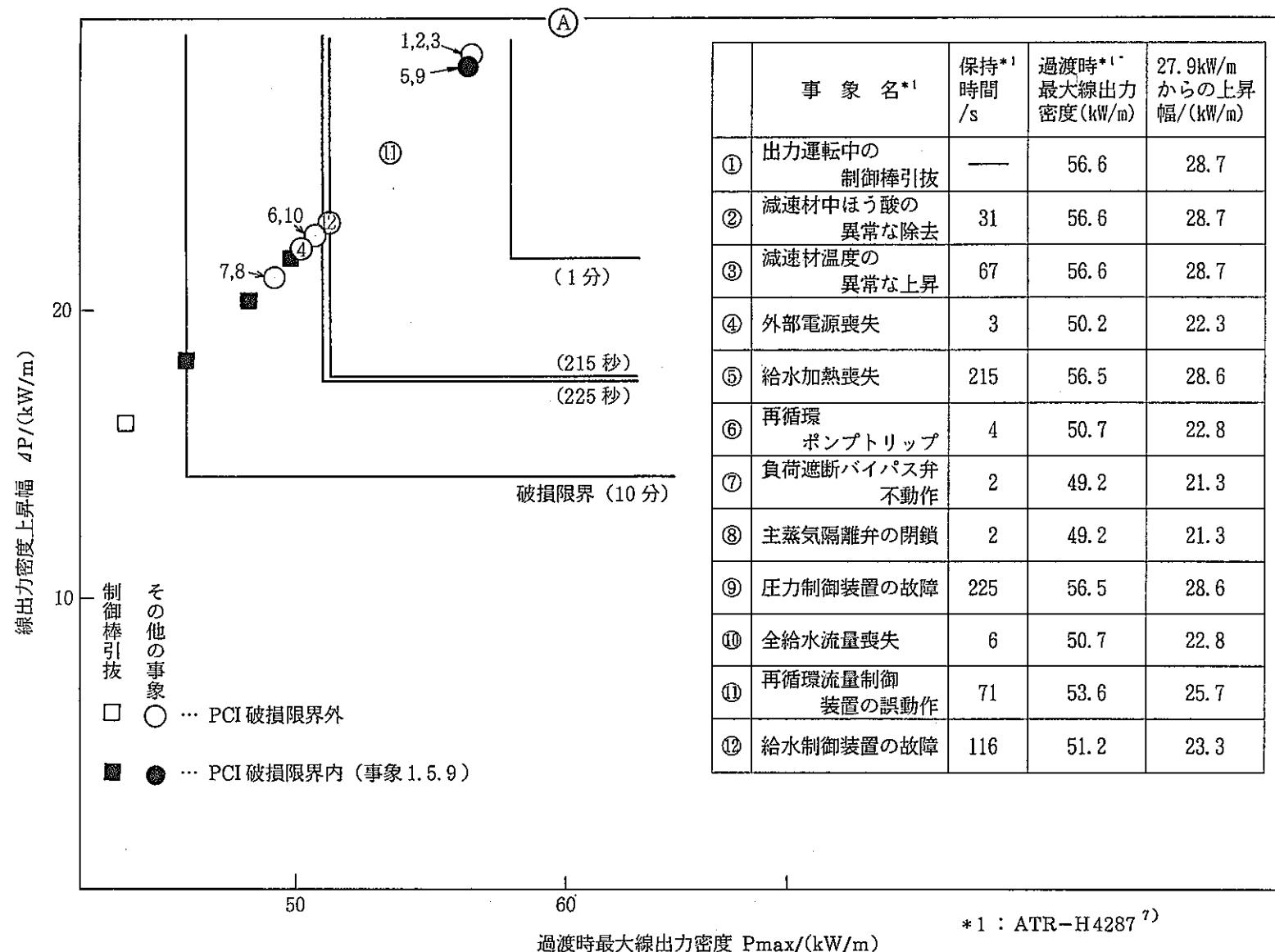


図14 異常過渡事象のPCI評価

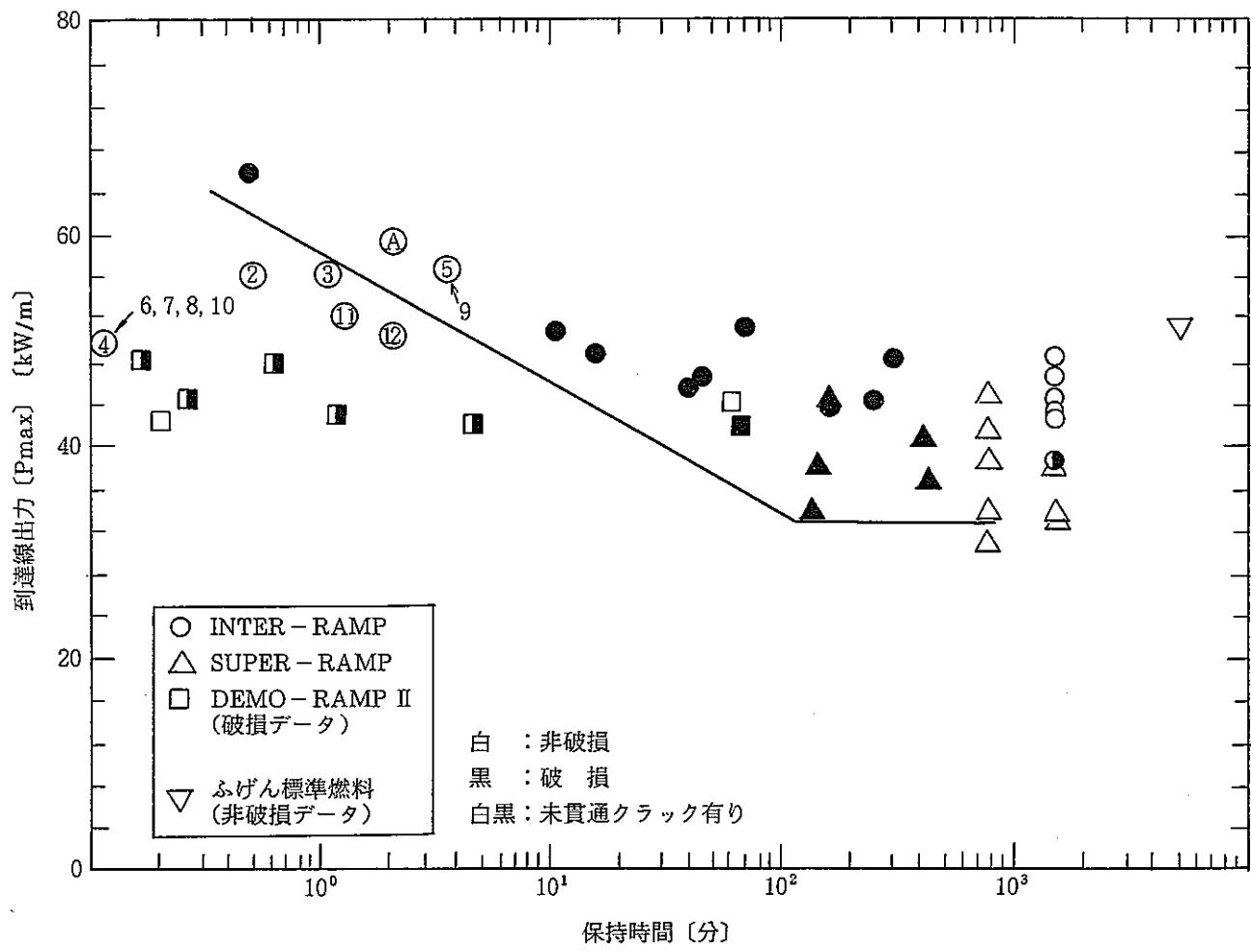


図15 BWR燃料のシングルステップランプ試験結果の到達線出力密度と保持時間の関係

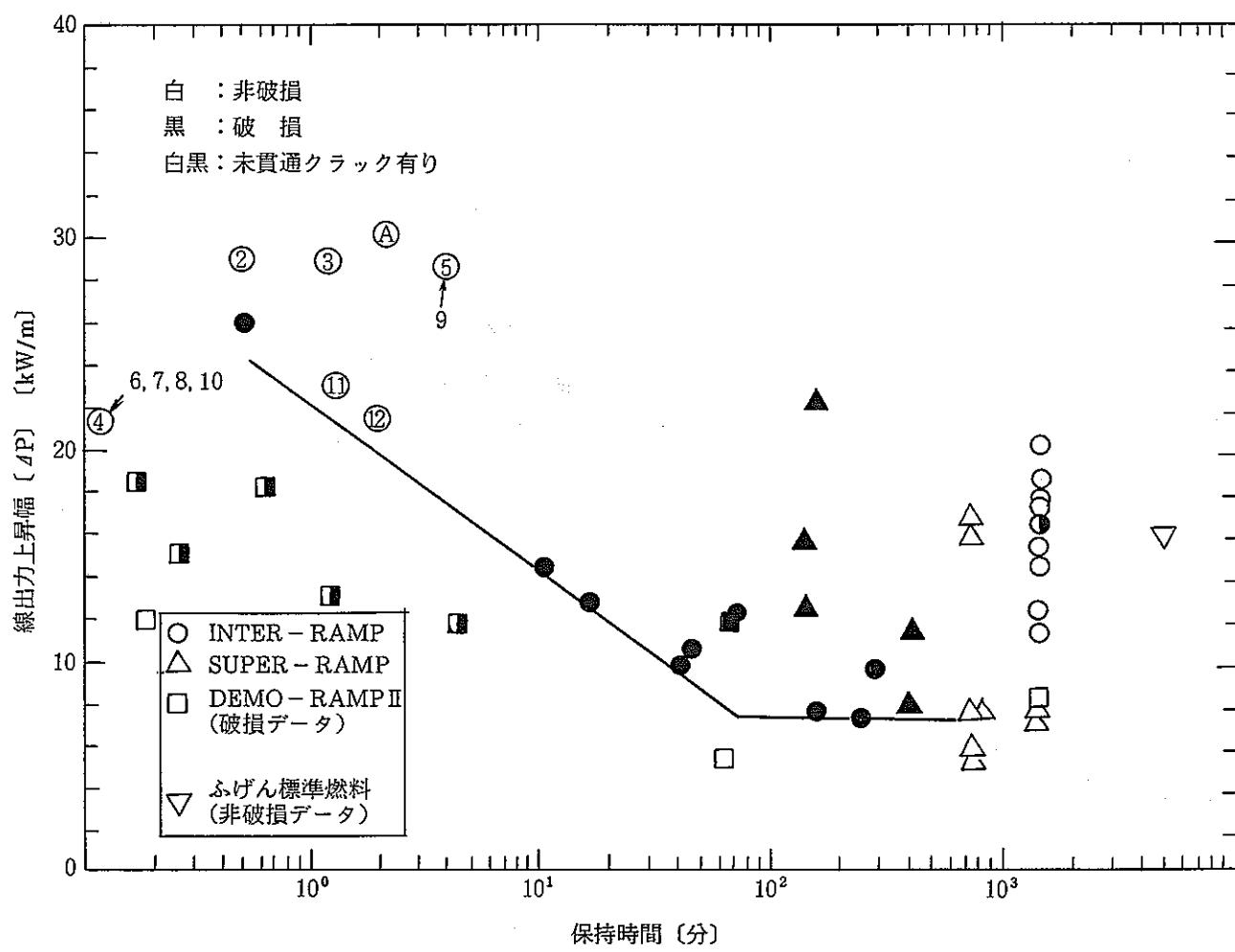


図16 BWR燃料のシングルステップランプ試験結果の
線出力上昇幅と燃焼度の関係

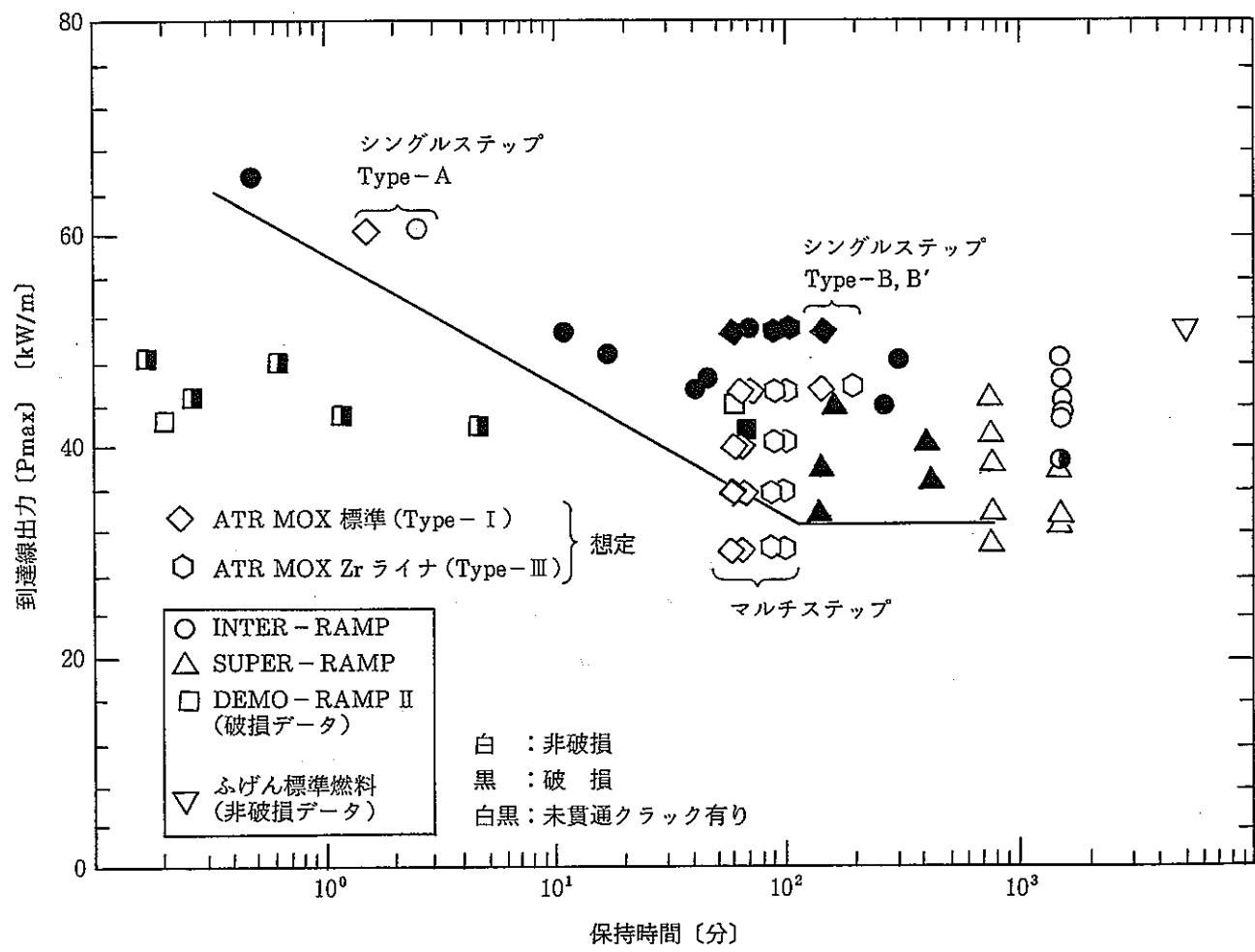


図17 BWR燃料のシングルステップランプ試験結果の
到達線出力密度と保持時間の関係

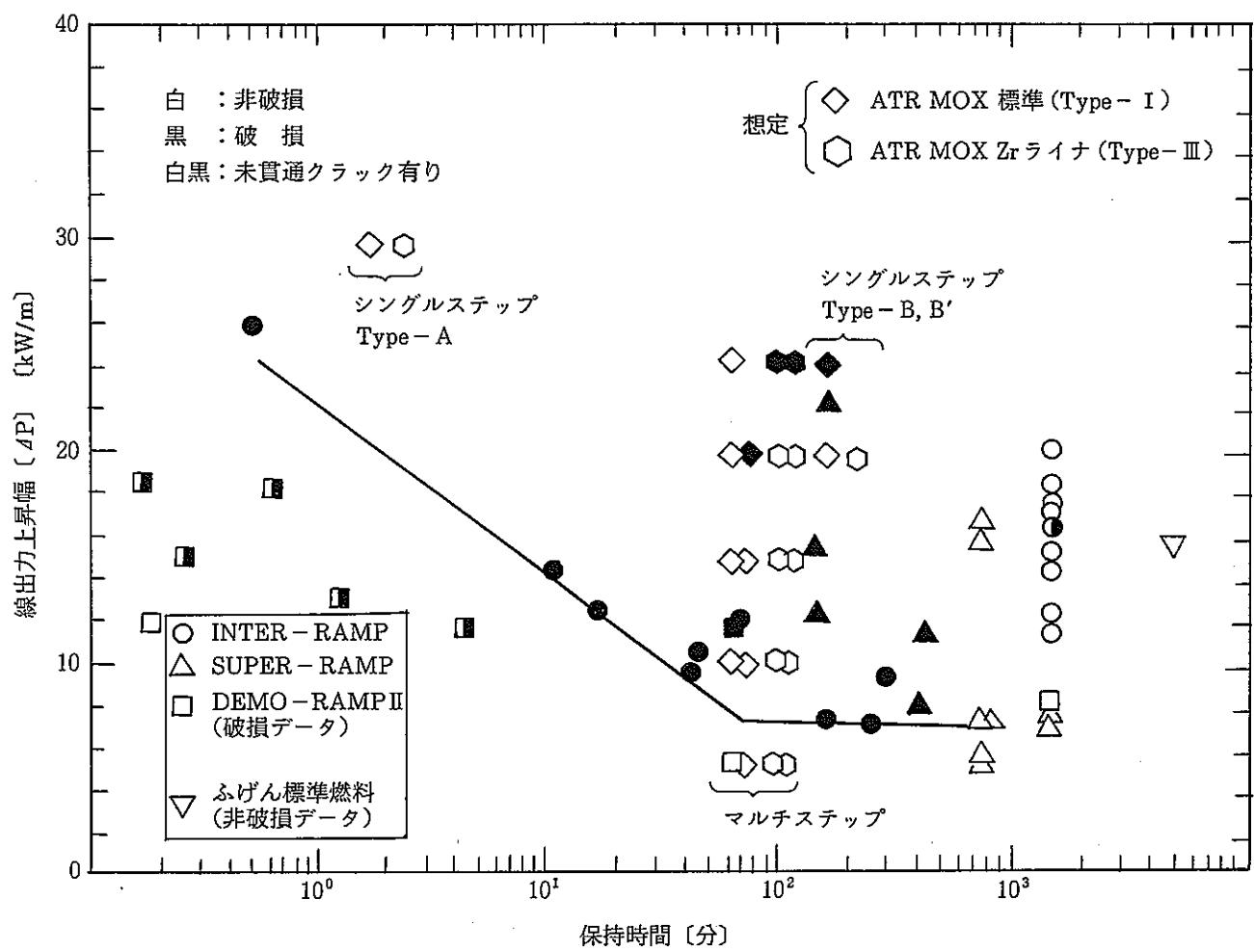


図18 BWR燃料のシングルステップランプ試験結果の
線出力上昇幅と保持時間の関係

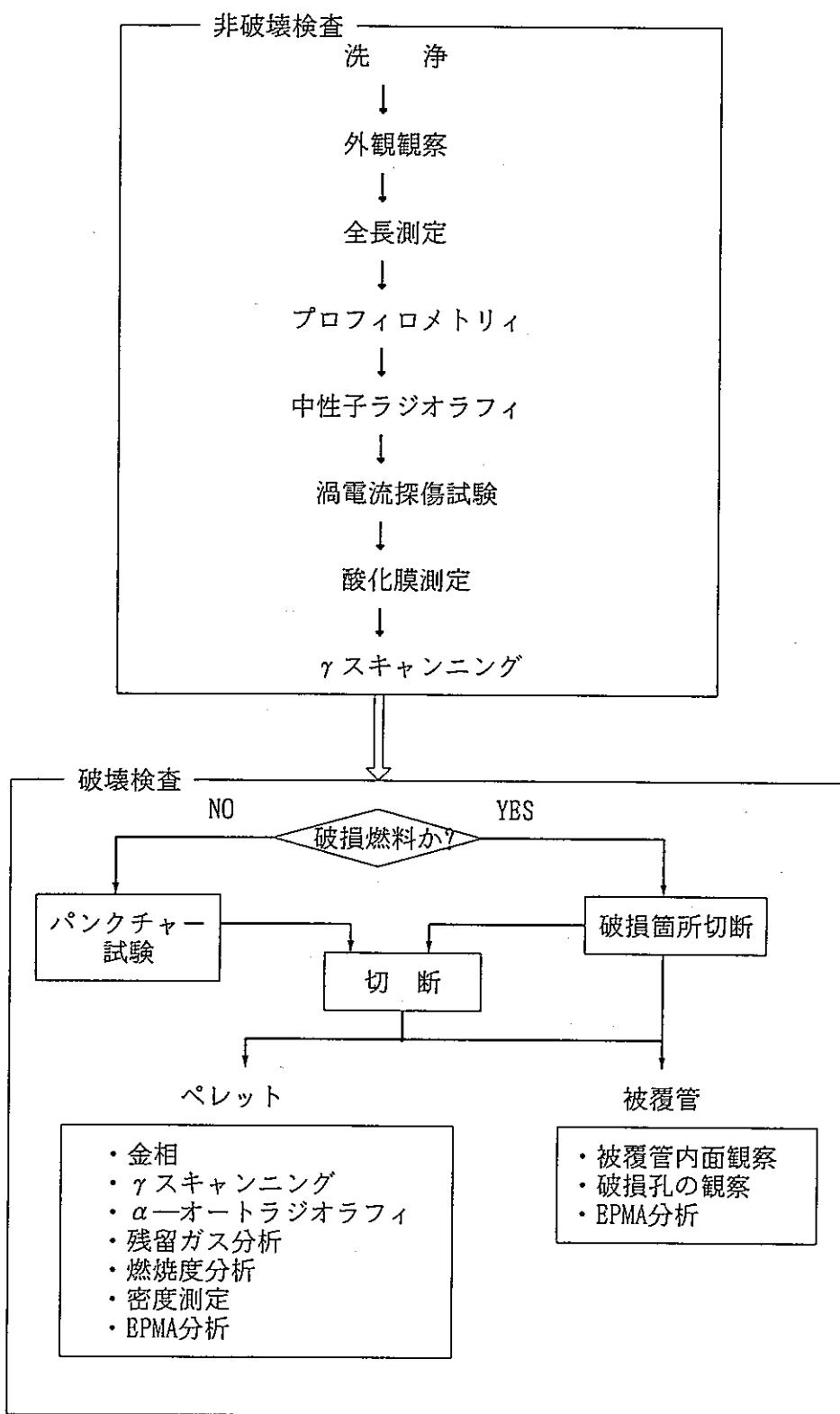


図19 照射後試験のフローチャート