

A T R実証炉燃料の第1～4回出力急昇試験（まとめ）
（IFA-591照射試験）

1995年11月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

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)
2001

ATR実証炉燃料の第1～4回出力急昇試験（まとめ）
（IFA-591照射試験）

実施責任者：上村 勝一郎*

報告者：矢野 総一郎*、河野 秀作*、加藤 正人*
菊池 圭一**、飯島 隆***

要 旨

本試験は、新型転換炉（ATR）実証炉の運転時に想定される異常な過渡変化時における、ATR実証炉用MOX燃料の破損しきい値及び照射挙動を調べることを目的とした出力急昇（ランプ）試験である。全計画40本中、11本のセグメント燃料（平均燃焼度約18.4GWd/t）についてランプ試験（第1～4回）を行った結果、線出力密度で最高68.4kW/mまで出力急昇したが、破損は認められなかったことから、低燃焼度（14.84～22.16GWd/t）では、ATR実証炉用MOX燃料は設計上の破損限界より十分高く、設計上の裕度が確認された。

なお、燃料組成について、従来は、ふげんでのベース照射時の長尺燃料平均値を採用していたが、ランプ試験に供したセグメント燃料毎の値を求めることで精度を高めた。これにともない、本報告書では第1～3回の線出力密度の値を見直してある。

なお、ATR実証炉計画の中止に伴い、第5回以降の出力急昇試験を実施するかは現在検討中である。

* 東海事業所 核燃料技術開発部 プルトニウム燃料開発室

** 東海事業所 技術開発推進部 炉心・燃料設計室

*** ふげん発電所 技術課

目 次

1. はじめに	1
2. 試験計画	1
3. 試験体	1
3.1 照射リグの設計	1
3.2 セグメント燃料の仕様	2
3.3 照射条件	4
4. 試験結果及び解析	7
4.1 ランプ試験前の非破壊試験結果	7
4.2 ランプ試験結果	7
4.3 燃料の安全裕度に関する検討	10
4.4 過渡時の燃料照射挙動	11
4.5 今後のランプ試験に反映すべき事項	14
5. まとめ	15

1. はじめに

本試験は、新型転換炉（ATR）実証炉の運転時に想定される異常な過渡変化におけるATR実証炉用MOX燃料の破損しきい値を求めるとともに、中空ペレット、Zrライナー付き被覆管を使用した改良型燃料のふるまいを評価し、ATR実証炉燃料の健全性評価基準の策定に資することを目的として実施している。過渡事象を模擬するために、「ふげん」でベース照射を行ったATR実証炉用MOX燃料集合体2体（集合体平均燃焼度18.4GWd/t及び23.0GWd/tの2種類）に装荷されたセグメント燃料（全長が約520mmの短尺燃料）について、燃焼度等を試験パラメータとしてハルデンにおいて出力急昇（ランプ）試験を行っている。

ランプ試験の試験モードとしては、セグメント燃料が破損するまで階段状に出力急昇するマルチステップランプ試験と短時間に直線上の出力上昇を行うシングルステップランプ試験の2つがある。セグメント燃料にはそれぞれ被覆管伸び計または内圧計のいずれかを取り付け、試験中のデータをオンラインで測定している。

ランプ試験は、平成6年8月から開始され、平成7年4月までにマルチステップランプ試験は6本、シングルステップランプ試験は5本の計11本のセグメント燃料について試験を終了した。

本報では、これら11本のセグメント燃料（集合体平均燃焼度18.4GWd/t、Puフィッサイル富化度3.7wt%）の被覆管伸び及び内圧の炉内計装データ等を整理、報告するとともに、その結果から、ATR実証炉用MOX燃料の過渡時における破損限界について考察した結果を述べる。

2. 試験計画

表1に本照射試験スケジュールを、図1に本照射試験の試験フローを示す。主な手順は以下のとおりである。

「ふげん」においてベース照射を行った2体の燃料集合体について、原研東海で非破壊試験を行う。その後、セグメント燃料40本（予備6本を含む）をハルデンに輸送し、セグメント燃料の非破壊試験を行い、燃料の健全性を確認する。続いて、ハルデン及びシェラー研究所においてそれぞれ、ランプ試験及び照射後試験を行う。

また、ランプ試験後の照射後試験結果との比較解析のため、ハルデンに輸送したセグメント燃料と同一の集合体に装荷された燃料の一部を動燃大洗工学センターに輸送し、破壊試験を行う。

当初、試験期間は平成11年度までであったが、ATR実証炉計画の中止に伴い、第5回以降の出力急昇試験を実施するか現在、検討中である。

3. 試験体

3.1 照射リグの設計

ランプ試験に用いるリグの略図を図2に示す。リグは1クラスタでできており、円周上に等間隔で3本のセグメント燃料を装荷できる。

試験用のセグメント燃料は、最初にリグ上部の中性子遮蔽材に覆われた位置（パーク位置）に配置され、3本のセグメント燃料のうち1本を中性子束の高いリグの下部（ランプ位置）に移動し、ランプ試験を行う。ランプ試験の方法としては、以下の2通りである。3本のセグメント燃料の試験を終了後、新たな3本のセグメント燃料と交換して次の試験を行う。

①ヘリウム-3減圧法

ヘリウム-3ガスの通るコイルに囲まれたランプ位置にセグメント燃料を配置しておき、中性子吸収断面積の大きいヘリウム-3ガスの圧力を下げることにより中性子束を高め、燃料の出力を変化させる方法である。この方法は、マルチステップランプ試験に適用した。

②セグメント燃料降下法

中性子束の低いパーク位置から、中性子束の高いランプ位置にセグメント燃料を降下させて、燃料の出力を変化させる方法である。この方法は、シングルステップランプ試験に適用した。これは、プレコンディショニングレベルの25kW/mから60kW/m以上の急激な出力急昇を行うには、He-3減圧法では出力上昇幅が不足するためである。なお、この方法では、計装データは、セグメント燃料が降下後、すなわち、出力急昇の初期約30-40秒後から得られる。

3.2 試験燃料棒の仕様

「ふげん」においてベース照射を行った集合体は2体であり、ベース照射の燃焼度が異なる。これらの集合体は、図3に示すように、ATR実証炉燃料と同様に、36本3層クラスタ構造（内層、中間層、外層）を有している。36本の燃料棒は、ランプ試験に供するセグメント燃料（軸方向に6本をつなげた）6本と、ベース照射後に一部破壊試験を行う長尺燃料30本からなる。

これらのセグメント燃料及び長尺燃料のパラメータには、被覆管の種類として、標準被覆管（Zry-2）とZrライナー付き被覆管（Zrライナー）の2種類が、またペレットの形状として中実と中空の2種類がある。

これらのパラメータを組み合わせ、セグメント燃料及び長尺燃料各々について、表2に示すようにType-I～IVの4種類を設定した。セグメント燃料及び長尺燃料の主要な仕様を以下に示す。

表2 燃料棒のタイプ

燃料棒のタイプ	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

(1)セグメント燃料

セグメント燃料は、「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、ハルデンでランプ試験が行われる。

セグメント燃料の主な仕様を表3に示す。セグメント燃料は短尺であることを除いて、ATR実証炉燃料と同一の仕様であり、燃料スタック長は365mmである。また、燃料ペレットは、PuO₂と天然UO₂とを機械混合法によりPuフィッサイル富化度を3.71%に調整した粉末を理論密度95%に焼結したペレットを用いている。

表3 燃料棒の主な仕様

項目	IFA-591燃料
1. 燃料ペレット	
種類	中実/中空
材質	MOX
外径	12.4mm
高さ	13.0mm
形状	デイツュ・チャンファ付き (中空ペレットはチャンファのみ)
密度	95%TD
Puフィッサイル富化度	3.71%/2.2% (長尺の外層のみ)
2. 被覆管	
種類	Zry-2/Zrライナー付きZry-2
外径	14.5mm
肉厚	0.82mm以上
Zrライナー層厚さ	0.075mm (Zrライナー付き)
3. 燃料要素	
全長	534mm
有効長	365mm
封入ガス	He
封入圧力	3kg/cm ²

セグメント燃料は、図4に示すように、集合体の内層、中間層にそれぞれ3本ずつが組み込まれている。1本のセグメント燃料は、ランプ試験に供する4本の中間短尺燃料と上部、下部短尺燃料の計6本から構成されている。それらの構造を図5に示す。各セグメント燃料の軸方向の配置を図6に示す。

(2)長尺燃料

長尺燃料の詳細な構造を図7に示す。燃料の仕様としては、セグメント燃料と同じであるが、集合体の外層に位置する燃料のPuフィッサイル富化度は2.2%で、内層、中間層は、セグメント燃料と同じ3.71%である。

3.3 照射条件

(1)「ふげん」でのベース照射条件

ランプ試験に供するセグメント燃料には、図4に示したように、「ふげん」でのベース照射の異なる2体の集合体の内層と中間層の2層にセグメント燃料があるため、4種類のベース照射条件の異なるセグメント燃料が得られる。

「ふげん」の運転条件を表4に、また「ふげん」でのベース照射条件を表5に示す。セグメント燃料の燃焼度、線出力は、内層、中間層で異なるが、各層の軸方向(4セグメント燃料)については、軸方向中心に位置する防振板の中性子吸収効果によりほぼ等しい値である。

表4 「ふげん」炉運転条件

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

(2)ハルデンでのランプ試験条件

ランプ試験は、段階上に出力上昇を行うマルチステップモードによる照射試験と、直線状に出力急昇を行うシングルステップモードによる照射試験からなる。

各ランプ試験モードの目的と照射条件及び計装を以下に示す。また、各ランプ試験に供するセグメント燃料のリストを表6に示す。

1)マルチステップランプ試験

目的

- ①破損しきい線出力の燃焼度依存性を求める。
- ②改良型燃料(Zrライナー付き被覆管、中空ペレット)の破損しきい値を求め、標準燃料と比較し、耐ペレット-被覆管相互作用(PCMI)特性の改善効果を確認する。
- ③過渡時の照射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8に、また試験条件を表7に示す。この試験では、セグメント燃料が破損するまでステップ状に出力上昇を行

う。ランプ試験方法としては、ヘリウム-3減圧法を用いた。試験条件の設定理由は、以下のとおりである。

表7 マルチステップランプ試験条件

項 目	条 件
線出力上昇幅 (ΔP)	5kW/m
線出力上昇速度 (\dot{P})	1.0kW/m/s
保持時間	60min
プレコンディショニングレベル (P_0)	25kW/m
プレコンディショニング時間 (T_{pre})	5 days

① 線出力上昇幅； $\Delta P = 5\text{kW/m}$

これまでに公開されているBWR用 UO_2 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； $\dot{P} = 1.0\text{kW/m/s}$

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； $T = 60\text{min}$

これまでに公開されているBWR用 UO_2 燃料のデータとの比較の観点より、他のランプ試験と同じ値に設定している。

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

これまでに公開されているBWR用 UO_2 燃料のマルチランプ試験結果において、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； $T_{pre} = 5\text{日間}$

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本の同一照射条件のセグメント燃料をペアにして、被覆管伸び計 (EC) と内圧計 (PF) を1本ずつ取り付け、破損検出とPCMI挙動データまたはFPガス放出挙動データを取得する。

2) シングルステップランプ試験

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 過渡時の照射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9に、試験条件を表8に示す。マルチステップランプ試験の結果、燃料破損が生じなかったことから、一部当初の試験条件を変更した。ランプ試験方法としては、セグメント燃料降下法を用いた。

表8 シングルステップランプ試験条件

項 目	Type-A	Type-B	Type-B'
到達線出力 (Pmax)	60→70kW/m	65kW/m ^{*1}	65kW/m ^{*1}
線出力上昇幅 (ΔP)	30→45kW/m	40kW/m ^{*1}	40kW/m ^{*1}
線出力上昇速度 (Ṗ)	1.0kW/m/s	1.0kW/m/s	1.0kW/m/s
保持時間	2→240min	60min	60min
プレコンディショニングレベル (P ₀)	30→25kW/m	25kW/m	25kW/m
プレコンディショニング時間 (T _{pre})	5 days	5 days	5 days

*1 マルチステップランプ試験結果から定める

① Type-A

到達線出力、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されている最もシビアな線出力上昇幅である30kW/mに設定した。プレコンディショニングレベルは、到達線出力と線出力上昇幅より定まる。

なお、先行したマルチステップランプ試験及びType-Bシングルステップランプ試験の結果、ハルデン炉の現状のリグ装荷位置で得られる最大線出力でも燃料破損に至らないことから、線出力上昇幅を30から45kW/mと増大できるよう、到達線出力を5kW/m高め、プレコンディショニングレベルを5kW/m下げた。プレコンディショニングの低下に伴い、保持時間を2から240minに延長した。これは、94年のANS Topical Meeting に報告されたBWRランプ試験条件を参考にした。

② Type-B及びB'

Type-B及びB'のランプ試験は、シングルステップランプ試験結果がマルチステップランプ試験結果と同等であることの確認のために実施する。そのため、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を設定し、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と同じ60min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である。

なお、先行したマルチステップランプ試験結果、ハルデン炉の現状のリグ装荷位置で得られる最大線出力でも燃料破損に至らないことから、到達線出力を最大値の65kW/mとした。また、破損線出力を超える設定ができないことから、Type-B'はType-Bと同一条件とした。

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。

4. 試験結果及び解析

4.1 ランプ試験前の非破壊試験結果

「ふげん」でのベース照射後、原研で非破壊試験を行うとともに、ハルデンへ輸送後のセグメント燃料12本（1本予備）について、輸送中の健全性の確認と照射後試験結果との比較評価を行うため、シェラー研究所において非破壊試験を行った。

セグメント燃料の外観、寸法、渦電流探傷検査から、欠陥や顕著な形状の変化は観察されず、また、γスキヤニング試験では、いずれのセグメント燃料においても、軸方向での大きな強度変化は観察されず、軸方向燃焼分布はほぼ一定であることを確認した。また、中性子ラジオグラフ試験でもペレットの顕著な割れは観察されず、ペレット配置も健全であることが観察された。試験結果を表9にまとめた。これらの非破壊試験結果から、「ふげん」でのベース照射後の燃料が健全であり、ランプ試験に十分供しうることが確認できた。

4.2 ランプ試験結果

表10にランプ試験を行った11本のセグメント燃料の主要な仕様と試験モード及び到達線出力を示す。最高線出力の燃料で、68.4kW/mまで達しているが、いずれの燃料とも破損せずに試験終了した。

表10 燃料仕様とランプ試験の到達線出力

試験No.	ペレット 形状	被覆管 タイプ	平均燃焼度 GWd/t	最大経線出力 W/m	ランプ試験	
					試験タイプ	到達線出力kW/m
IFA-591-1	中実	標準	15.50	18.1	マルチ	65.3
IFA-591-2	中実	Zrライナー	15.50	18.1	マルチ	66.3
IFA-591-3	中実	標準	21.16	23.7	マルチ	63.2
IFA-591-4	中実	標準	16.29	18.1	マルチ	66.4
IFA-591-5	中実	Zrライナー	16.29	18.1	マルチ	68.4
IFA-591-6	中実	標準	22.16	23.7	マルチ	66.8
IFA-591-7	中実	標準	16.29	18.1	シングル Type-A	65.5
IFA-591-8	中実	Zrライナー	14.84	18.1	シングル Type-A	68.0
IFA-591-9	中実	Zrライナー	16.58	18.1	シングル Type-B	65.2
IFA-591-10	中実	標準	21.16	23.7	シングル Type-B	59.4
IFA-591-11	中実	標準	22.16	23.7	シングル Type-B'	58.3

(1) マルチステップランプ試験

① IFA-591-1～3

(a) 出力急昇時の出力変化

図10～12に IFA-591.1～3のランプ試験時のセグメント燃料の線出力、被覆管伸び計装データ、冷却材の放射線量の経時変化を示す。図から試験が予定どおり順調に行われ、伸び計装及び冷却材の放射線量の変化から、セグメント燃料に破損等がなく、ランプ試験が終了したことを確認した。到達線出力は、当初目標の60kW/mを越えた。また、パーク位置にあるセグメント燃料の線出力がプレコンディショニング（線出力約25kW/m）以下であることを確認した。

出力急昇率は、目標の1kW/m/sに対して、0.155～1.077kW/m/sでかなり遅くなっている。

(b) 伸び計装

図12は、IFA-591-3（標準燃料、燃焼度21.16GWd/t）の結果である。燃料は7回の出力変化で62.2kW/mの線出力まで到達している。各出力変化時に対応して、急激なセグメント燃料の伸びの変化が起こっている。2回目以降はの出力変化では、セグメント燃料が伸びた後、直ちにセグメント燃料が収縮するリラクゼーションが観察できる。3回目のランプ時には出力が一定となった後、2分間燃料が伸び続けた。さらに、7回の出力変化が終了してから出力を下げている間に約55kW/mを境にセグメント燃料の収縮速度が遅くなっている。この出力は、ガス放出の起こる出力と一致している。

伸び計装データの変化は、他の試験結果も同様の傾向を示しており、被覆管のZrライナーの有無に関係なく、ほぼ同じである。

② IFA-591-4～6

(a) 出力急昇時の出力変化

図13～15に IFA-591.4～6のランプ試験時のセグメント燃料の線出力、被覆管内圧計装データ、冷却材の放射線量の経時変化を示す。図から試験が予定どおり順調に行われ、内圧計装及び冷却材の放射線量の変化から、セグメント燃料に破損等がなく、ランプ試験が終了したことを確認した。到達線出力は、当初目標の60kW/mを越えた。また、パーク位置にあるセグメント燃料の線出力がプレコンディショニング（線出力約25kW/m）以下であることを確認した。

出力急昇率は、目標の1kW/m/sに対して、0.174～0.890kW/m/sでかなり遅くなっている。

(b) 内圧計装

図15は、IFA-591-6（標準燃料、燃焼度22.16GWd/t）の結果である。燃料は、プレコンディショニングレベルの約25kW/mから8回のランプ試験によって66.8kW/mの線出力まで達している。内圧の変化は、1回目の出力急昇では変化なく、2回目の出力変化時に急激に内圧上昇が起こり、4回目ランプ以降では出力変化に関係なく連続的に内圧が上昇している。また、8回のランプを終了して、出力を下げている途中の約55kW/m付近で再び内圧上昇が起こっている。

内圧上昇は、IFA-591-4, 5, 6でそれぞれ 11.6, 11.2, 13.8bar である。内圧計装データの変化は、他の試験結果も同様の傾向を示しており、被覆管のZrライナーの有無に関係なく、ほぼ同じである。

(2) シングルステップランプ試験

① IFA-591-7～11

(a) 出力急昇時の出力変化

図16～20に IFA-591.4～6のランプ試験時のセグメント燃料の線出力、被覆管伸び計装データ、冷却材の放射線量の経時変化を示す。図から試験が予定どおり順調に行われ、伸び計装及び冷却材の放射線量の変化から、セグメント燃料に破損等がなく、ランプ試験が終了したことを確認した。到達線出力は、当初目標の60kW/mを越えた。なお、前述の通り、セグメント燃料降下法を採用したため、得られたデータは出力急昇後、30～40秒後からである。また、パーク位置にあるセグメント燃料の線出力がプレコンディショニング（線出力約25kW/m）以下であることを確認した。

出力急昇率は、目標の1kW/m/sに対して、0.93～1.42kW/m/s（降下する際にセグメント燃料が経験する線出力を考慮した場合、最大5.1kW/m/s）でかなり速くなっている。

(b) 伸び計装

図19は、IFA-591-10（標準燃料、燃焼度21.2GWd/t）の結果である。セグメント燃料伸び計装データは、計装データの採取開始時（ランプ開始後37秒）では既に収縮を示している。その後は、わずかな出力の変動に対応して、セグメント燃料の伸びも変動しながら収縮しているのがわかる。図20に標準燃料とほぼ同じ燃焼度のZrライナー付きセグメント燃料（IFA-591-11）の伸び計装データを示す。両方の燃料とも同様に变化しており、リラクゼーションの時間、大きさとも同じである。セグメント燃料の伸び計装データは、Zrライナーの有無に係わらず同様な変化を示した。

4.3 燃料の安全裕度に関する検討

(1) 破損しきい線出力の燃焼度依存性

図21に燃焼度と到達線出力の関係をまとめた。全数破損がないため、燃焼度範囲15.50~22.16 GWd/tでは、破損しきい線出力は、58.3kW/m以上である。燃焼度依存性については、破損しきい線出力が求められなかったことから、不明である。

(2) マルチステップランプ試験結果によるシングルステップランプ試験の代替可能性

UO₂燃料では、マルチランプステップ試験によって、実際の過渡事象を模擬したシングルステップランプ試験と同様な試験結果が得られることが報告されている。この点について、MOX燃料でも検討する必要がある。本試験では、マルチ、シングルのいずれの試験でも燃料破損はなく、破損しきい線出力の比較はできなかった。燃料挙動を比較すると、セグメント燃料の伸び計装データでリラクゼーションが観察できるのは両者とも同じであるが、シングルステップランプ試験では出力急昇中にすでにリラクゼーションが始まっていることやサーマルフィードバック現象がなかったこと等、いくつかの点で違いが見られる。そのため、MOX燃料のマルチステップランプ試験がシングルステップランプ試験を模擬しているかどうかはまだ議論の余地があり、結果の代替性については明確にならなかった。

(3) ATR実証炉設計への燃料健全性の確認

図22、23、24にこれまで報告されているBWR-UO₂燃料のマルチステップランプ試験データと本マルチステップランプ試験結果の比較を示す。²⁾⁶⁾ 図22は標準燃料の試験結果であるが、UO₂燃料の破損しきい線出力は、図中実線で示されることが報告されている。本試験結果では、ATR実証炉用MOX燃料は、UO₂燃料のデータに比べてかなり高い線出力まで破損することなく到達している。図23は、Zrライナー付き燃料のデータであるが、このタイプの燃料でも、UO₂燃料に比べ破損せずに高い出力まで達している。図24は最近得られた主として標準燃料の試験結果である。今回の試験データと比較できる燃焼度20GWd/t付近のUO₂燃料の破損しきい線出力は、図から500W/cm程度である。一方、ATR実証炉用MOX燃料は、600W/cm以上の

高線出力に破損することなく到達している。図25にシングルランプ試験結果の比較を示す。6) マルチランプ試験結果同様、Zrライナー付き燃料も含めてUO₂燃料のデータに比べてかなり高い線出力まで破損することなく到達している。

以上から、ATR実証炉用MOX燃料は、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が確認できた。この際、BWR-UO₂燃料の破損しきい線出力を用いることができる。

(4) PCI挙動のBWR燃料との比較

過渡時の燃料破損メカニズムは、ペレット被覆管相互作用 (PCI) であるが、特にFPガス放出による内圧上昇やPCMIが重要である。BWR燃料とATR燃料の燃料仕様を比較すると、同じ内圧が加わった場合、被覆管の径 (D) と厚さ (t) より (D/t) の大きいATR燃料の方がPCMIは厳しくなる傾向にある。また、同じ線出力の時の燃料の中心温度は、冷却材温度とペレットの熱伝導率から見積もると冷却材温度はATRの方が低いが、MOX燃料の熱伝導率が小さいためATR-MOX燃料の方が若干高くなる。

このような点からは、同じ照射条件下では、ATR-MOX燃料の方がPCIが厳しいことが予想できる。しかしながら、本試験結果ではATR-MOX燃料の方が破損しきい値が高い傾向にある。この理由として、本試験では燃料ペレットの変形に起因した大きなリラクゼーションが観察できる。また、一般にMOXはUO₂よりリクープ速度が大きく変形しやすいことが報告されている。1) よって、MOX燃料がUO₂に比べて変形しやすいために、破損しにくいと考えられる。

4.4 過渡時の燃料照射挙動

(1) PCMI挙動

① リラクゼーション挙動及びサーマルフィードバック現象

被覆管伸び計装データからシングル、マルチのいずれの試験モードでも被覆管のリラクゼーションが観察できた。

図12の伸び計装データを詳細に見ると、2回目のランプ試験時に、出力急昇後も約2分間にわたってセグメント燃料が伸び続け、その後リラクゼーションが起こる挙動が観察できる。この出力は、ガス放出が急激に起こる出力と一致するため、サーマルフィードバック現象が起こっていると考えられる。

出力急昇により、それまでペレット中に蓄えられたFPガスが急激に放出されると、ギャップコンダクタンスが悪くなり、さらに燃料温度が上昇するため、セグメント燃料が伸び続ける現象である。この現象は、内圧計装を取り付けたIFA-591-4, 5, 6でも同様に確認されたが、シングルステップランプ試験では観察できない。

図26にマルチステップランプ試験での各出力急昇時のセグメント燃料伸び量に対するリラクゼーションの割合を示す。出力が高くなるほどリラクゼーションの

割合が大きくなり、50kW/m以上ではリラクゼーションの割合は、80%以上でセグメント燃料の伸びはほとんどないことがわかる。出力急昇により温度が上昇した燃料ペレットは、熱膨張により被覆管を伸ばそうとする。被覆管がペレットから伸ばされるほど、被覆管から受けるペレットの拘束力は増大するため、出力急昇により高温になったペレットがクリープ変形すること、あるいは、被覆管と燃料ペレットの滑りによりリラクゼーションすることが観察できると考えられる。リラクゼーション量は、出力急昇の出力が高いほど、言い換えればペレット温度が高いほどペレットは変形しやすくなるため、その変化量は大きく、リラクゼーションが起こりやすくなると考えられる。

② 改良型燃料 (Zrライナー) と標準燃料との比較 (耐PCMI特性の改善)

図20にシングルステップランプ試験時の燃焼度のほぼ等しい標準燃料とZrライナー付き燃料の被覆管伸び計装データを示した。リラクゼーションは変化率、大きさ、時間ともに両者の間には違いはなく、マルチステップランプ試験でも違いは見られない。これは、リラクゼーションが被覆管には関係なく、ペレットの特性に起因することを示唆している。

以上から本試験の燃焼度範囲では、Zrライナーの有無に係わらず燃料破損しておらず、Zrライナーによる耐PCMI特性の改善については、確認できなかった。なお、中空ペレットについては、今回の一連のランプ試験には使用されていない。

③ 被覆管の塑性変形量

出力急昇後の出力降下時に被覆管の収縮速度が55kW/mを境に変化すること、後述するように、ガス放出が同じ出力で起こる。図27に被覆管伸びを冷却材温度に対してプロットした。ランプ試験中のセグメント燃料の伸び量のヒステリシスを見ることができる。試験後の出力低下時の55 kW/m以下では、セグメント燃料の収縮速度はほぼ直線となり、ランプ試験前の変化率とほぼ等しい。これらの変化率は図中に示した被覆管の熱膨張率とほぼ同じであり、冷却材温度は被覆管の温度とほぼ等しいため、この傾きの間はPCMIはなく、被覆管の伸びの変化は被覆管の熱膨張によってのみ起こっていることを示している。

また、図27をみると、ランプ試験の前後で、被覆管の長さが異なることに気がつく。試験終了後の方が被覆管が長くなっており、ランプ試験中にPCMIにより被覆管が軸方向に塑性変形したことを示している。被覆管の軸方向の塑性変形量を見積もると、表11のとおりである。

表11 被覆管の塑性変形量

セグメント燃料	塑性変形量	
	μm	%
IFA-591-1	55	0.011
IFA-591-2	70	0.013
IFA-591-3	53	0.010
IFA-591-7	30	0.006

(2) ガス放出挙動

① FPガス放出率

内圧上昇変化から見積もったランプ試験時の追加FPガス放出率（セグメント燃料端部を切断、He置換後、内圧計装取り付け）は、IFA-591-4, 5, 6でそれぞれ53.2, 51.5, 46.1%である。別途、長尺燃料の原研におけるパンクチャ試験結果から、「ふげん」ベース照射時のFPガス放出率は、0.03~0.19%であり、両者を加えたトータルのFPガス放出率は、55%以下である。

② FPガス放出メカニズム

過渡時のFPガス放出メカニズムとしては、(a) ペレットの結晶粒界やポア内に蓄積されたFPガスの急激な放出、(b) 結晶粒内からの拡散による放出、(c) 組織変化による放出、の3つのメカニズムが報告されている。1) 図15の2回目の出力急昇（35~40kW/m）で観察できる急激な内圧上昇は、線出力の上昇に伴い、ペレット温度が燃料のガス放出開始しきい温度（Vitanzaが提唱しているFPガス放出率1%以上のしきい温度）を越えたために、ベース照射で粒界やポアに蓄えられたFPガスが放出されるためである。その放出原因の1つに出力急昇時に起こるマイクロクラックが考えられる。そして、4回目の出力急昇以降の連続的な内圧上昇は、燃料温度の上昇による拡散や組織変化によるガス放出が支配的になるため、出力急昇には関係なく時間に依存した連続的なガス放出になると理解でき、従来報告されているメカニズムと一致する。

図28に燃焼度の異なる2本の標準燃料の内圧データを燃料出力に対してプロットした。この図からガス放出開始線出力が異なることがわかる。燃焼度16.3 GWd/tの燃料は、40kW/mで、22.2GWd/tの燃料は35kW/mでガス放出が起こっており、ガス放出開始しきい線出力に燃焼度依存性が観察できる。ペレット中に蓄えられるFPガスは、結晶内に原子として存在するものと、粒界及びポア中にガスとして存在するFPがあると考えられる。前述のように低い出力で起こる大きなガス放出は、粒界及びポア中に存在するガスが放出されるためと考えられ、燃焼度の高いペレットほど、そのFPガスが多いため、より低い出力でガス放出が起こりやすいと考えられる。

ガス放出挙動で、もう一つ興味深い現象として、ランプ後の出力減少時に起こ

るガス放出である。図15に示した燃焼度22.2GWd/t燃料では約55kW/mで放出が起こっている。この出力は、後のPCMI挙動でも述べるが、PCMIがなくなる出力ととく一致しているため、ペレットへの被覆管からの拘束力がなくなるために、PCMIによって結晶粒界に加わっていた応力が解放されることによってFPガスが放出されると考えると説明が付く。

以上のように、マルチステップランプにおけるガス放出挙動は、粒界、ポアに蓄えられたFPガスの急激なガス放出と粒内からの拡散、組織変化による連続的なガス放出があり、ランプ後の出力低下中にもPCMIの拘束力がなくなることに伴う新たなガス放出により説明することができる。また、ガス放出が開始する線出力に燃焼度依存性が観察できた。

4.5 今後のランプ試験に反映すべき事項

ATR実証炉計画の中止に伴い、本試験計画も第4回ランプ試験をもって終了することとなったが、試験方法等で今後のランプ試験に反映すべき事項を取りまとめた。

(1) 到達線出力

当初の試験計画では、60kW/mを到達線出力としていた。試験では、全数これを越える線出力を達成したが、破損には至らなかった。今後、破損しきい値を求めるべく破損を確認するには70kW/mを越える到達線出力を達成する必要がある。これには、ハルデン炉内装荷位置等について、ハルデン側との事前の調整が必要である。特に、第3回のランプ試験で経験したように、装荷位置の付近に試験の遂行を制限するような照射条件を有するリグがあると、到達線出力を高められなくなる。

(2) セグメント燃料の燃焼度仕様

1回のシリーズ試験に供する3体の試験燃料は、できる限り同一もしくは同程度の燃焼度のものを組み合わせるようにする。また、中実ペレットと中空ペレットの試験燃料についてもなるべく同じ仕様のもの同士が組み合わせるようにする。

(3) 線出力上昇率

目標の線出力上昇率1kW/m/sに対して、マルチステップランプ試験（³He減圧法）では、おおむね1/3程度、一方、シングルステップランプ試験（セグメント燃料降下法）では3～5倍の線出力上昇率となった。

安全審査上は、想定される異常過渡事象を包絡する線出力上昇率は1kW/m/s⁷⁾であり、これを上回る線出力上昇率が必要となる。このため、以下の対応が必要である。

- ①マルチステップランプ試験では、³He減圧の自動化に再度取り組み、実現する必要がある。
- ②シングルステップランプ試験では、後述する線出力上昇幅の条件の両方を満たすにはセグメント燃料降下法を選択する必要がある。この方法では、線出力上昇率

が高くなり過ぎるが、これを押さえようとして、セグメント燃料の降下速度を下げると、降下直後に通過する中性子フラックスの高い部分で燃料温度がオーバーシュートするというジレンマがある。また、降下中は、計装データ得られないというデメリットもあるが、これについては、リグ計装段階で考慮しておけば、降下中もデータが得られるよう改善できる見通しである。

(4) 線出力上昇幅

^3He 減圧法による線出力上昇幅は、元の線出力の約180%以下となる。プレコンデイショニングレベルを25kW/mとすると、到達線出力は45kW/mに制限される。これを越える到達線出力を得るには、①ハルデン側で ^3He 圧力を高める等の改造、あるいは、②セグメント燃料降下法、を選択する必要がある。

(5) 計装端栓の取り付け方法

第3回ランプ試験のIFA-591-9において、被覆管伸び計の異常が確認された。試験後、ECコア付き端栓をセグメント燃料に取り付けているネジが緩んで約7mm下方にずれていたことが判明した。第4回ランプ試験から、セグメント燃料側と端栓側の接触面でネジの緩みを防止すべく、端栓側にくぼみ部を作っておき、そこに向かって先のとがった道具で刻みを付ける方法に改善した。端栓部の緩み防止のため、この方法を踏襲する必要がある。

(6) 試験モード

安全審査への対応とは別に、マルチステップランプ試験もシングルステップランプ試験も最も厳しい条件となっていないのではないかと懸念がある。すなわち、マルチステップランプ試験では、ステップ毎にリクゼーションによりPCMIが緩和され、シングルステップランプ試験では、一気にペレットが高温に達することによりクリープによりPCMIが緩和されているのではないかと懸念である。この懸念を解消するための新たな試験モードが提案¹³⁾された(別紙参照)。これは、クリープによるPCMI緩和に至らない線出力(例えば45kW/m)まで出力急昇することを特徴とする方法である。

5. まとめ^{8)~13)}

ATR実証炉タイプの低燃焼度燃料(15.5~22.16GWd/t)について、ハルデンにおいて設計上考えられるすべての過渡事象より厳しい条件でランプ試験を行った。その結果、最高線出力68.4kW/mまで出力急昇したが、燃料破損はなく、本試験により低燃焼度燃料の設計上の安全上の裕度が確認できた。

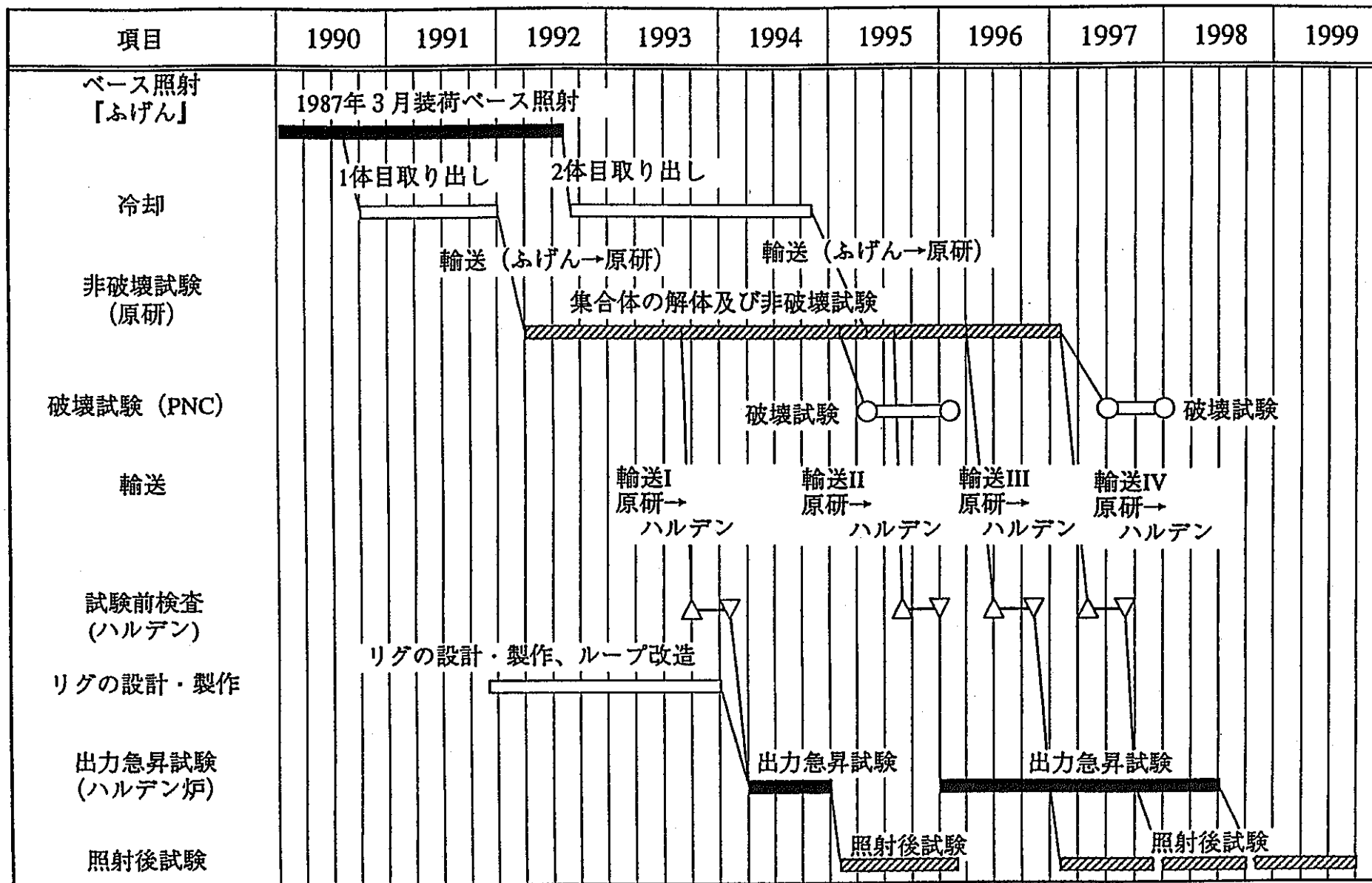
ランプ試験時のPCMI挙動として、ペレットの軸方向の高温変形に起因するセグメント燃料のリクゼーションが観察された。また、ランプ後の出力低下時にPCMIが解放されることによると考えられるガス放出が起ることを確認した。さらに、ランプ試験

中の被覆管塑性変形を確認した。

参考文献

- 1) (財)原安協編、軽水炉燃料のふるまい (1992)
- 2) The INTER-RAMP Project, Studsvik Report STIR-53
- 3) The SUPER-RAMP Project, Studsvik Report STSR-18
- 4) The DEMO-RAMP Project, Studsvik Report STDRH-12
- 5) 野俣輝満、久保浩ら、高性能燃料確証試験(3)-出力急昇試験- 日本原子力学会「1994年秋の年会」(1994)
- 6) 小原他、Fuel Behavior During Power Ramp Test, Int. Topical Meeting on LWR Fuel Performance, West Palm Beach (1994)
- 7) 金沢、運転時の異常な過渡変化時の特性値、日立製作所日立工場エンジニアリングシート ATR-H-4287
- 8) 河野秀作、加藤正人他 ATR実証炉燃料の出力急昇試験(I), 日本原子力学会「1995年春の大会」(1995)
- 9) 河野秀作、加藤正人他、ATR実証炉燃料の出力急昇試験(II), 日本原子力学会「1995年春の大会」(1995)
- 10) 加藤正人、ハルゲンプロジェクト出張報告 ATR実証炉燃料の第1回出力急昇試験、PNC PN8600 94-004
- 11) 菊池圭一、海外出張報告 ATR実証炉燃料の第2回出力急昇試験、PNC PN8600 94-008
- 12) 矢野総一郎他、ハルゲンプロジェクト出張報告 ATR実証炉燃料の第3回出力急昇試験、PNC PN8600 95-001
- 13) 飯島隆他、ATR実証炉燃料の第4回出力急昇試験、PNC PN8410 95-296

表 1 ATR実証炉燃料の出力急昇試験スケジュール



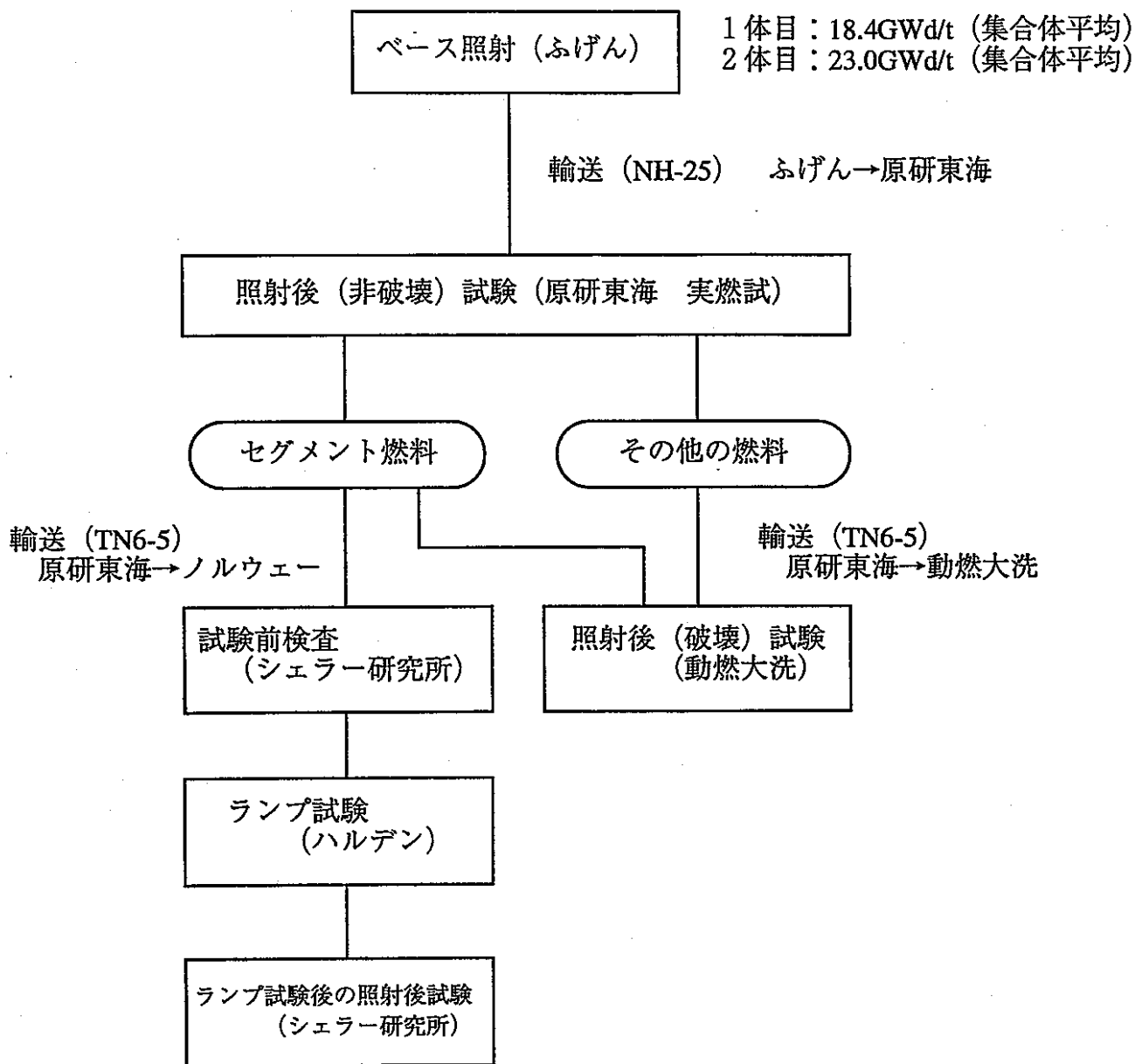


図1 ランプ試験に係わる作業の流れ

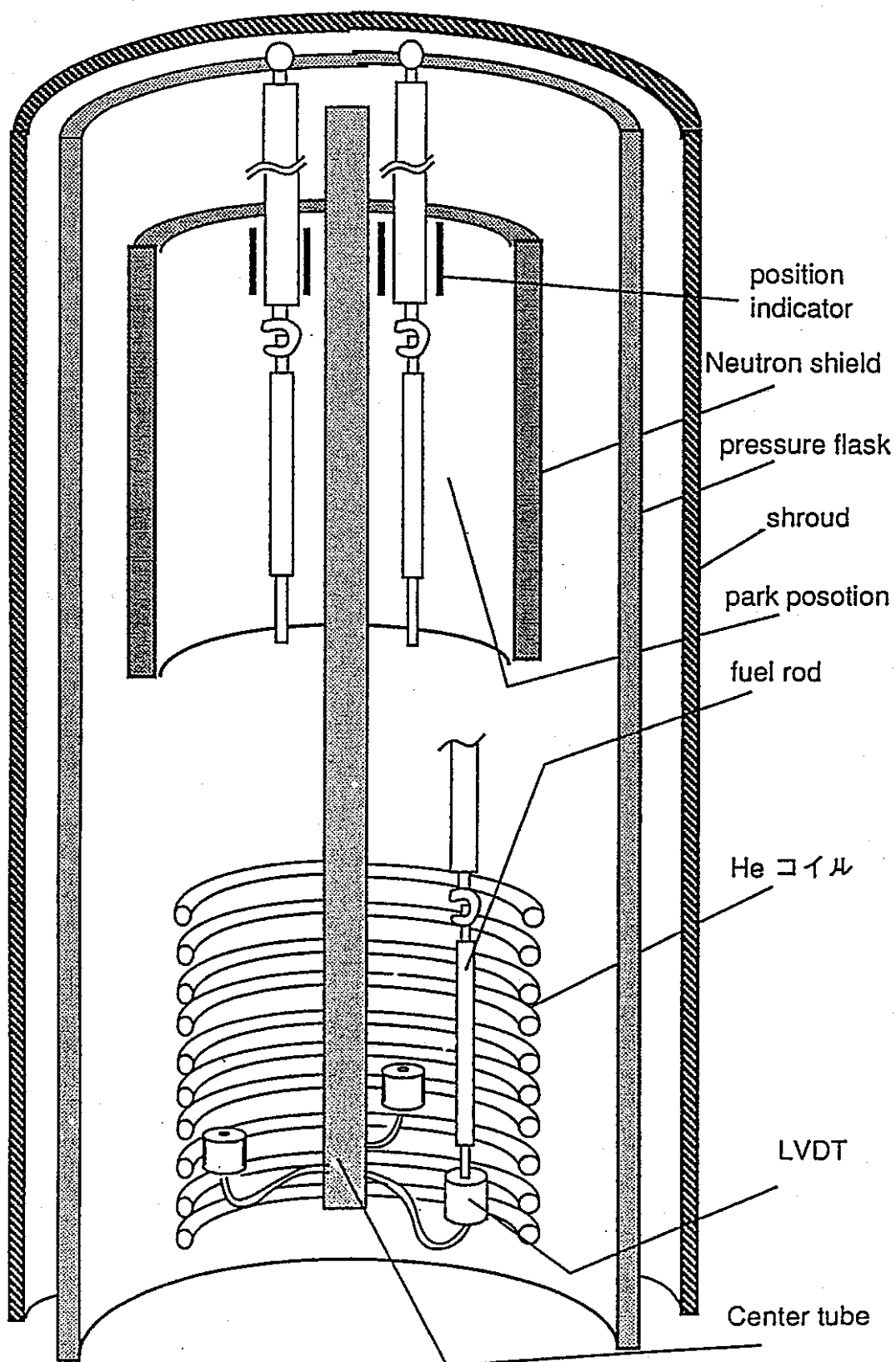


図2 ランプ試験用リグの略図

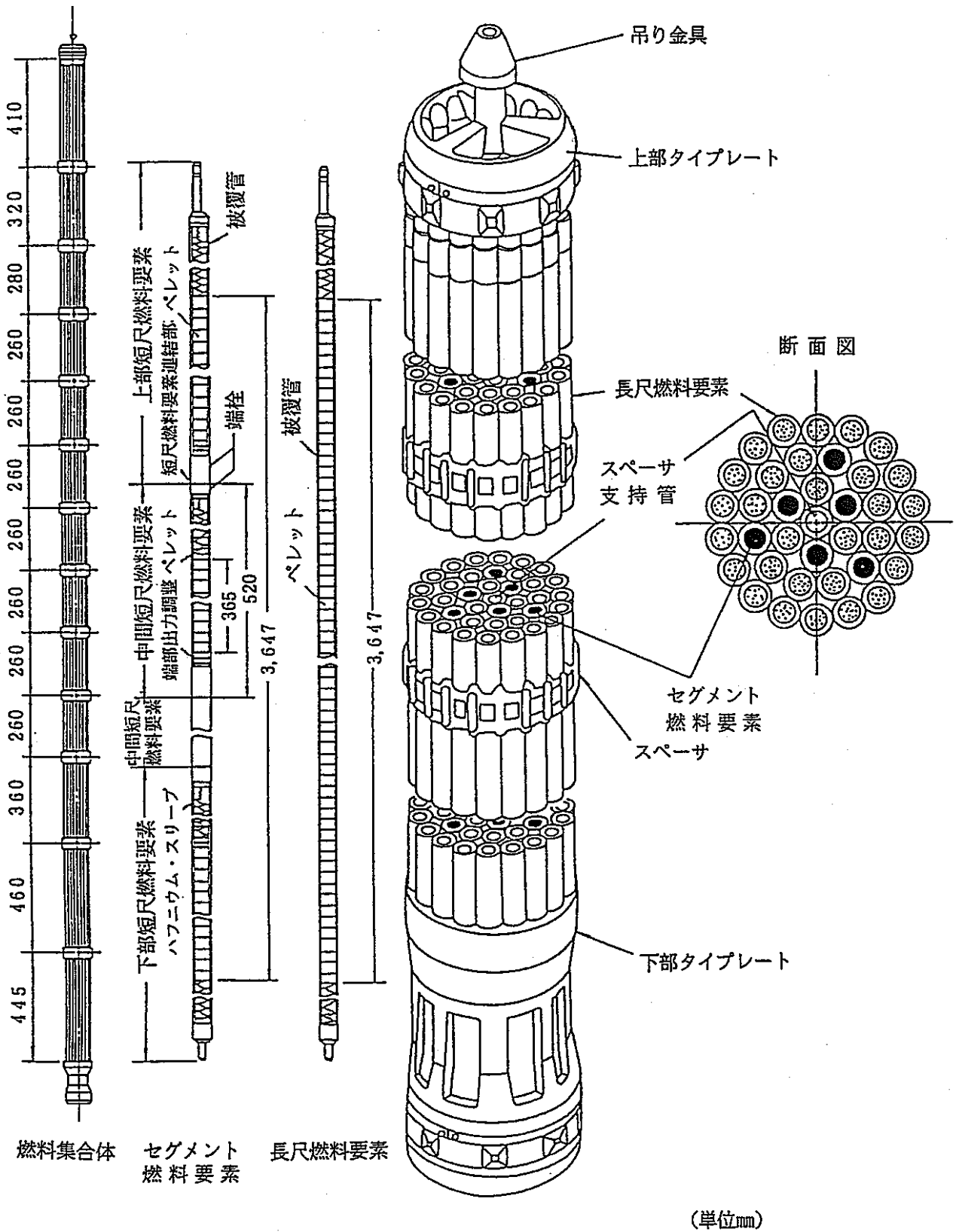


図3 燃料集合体構造図

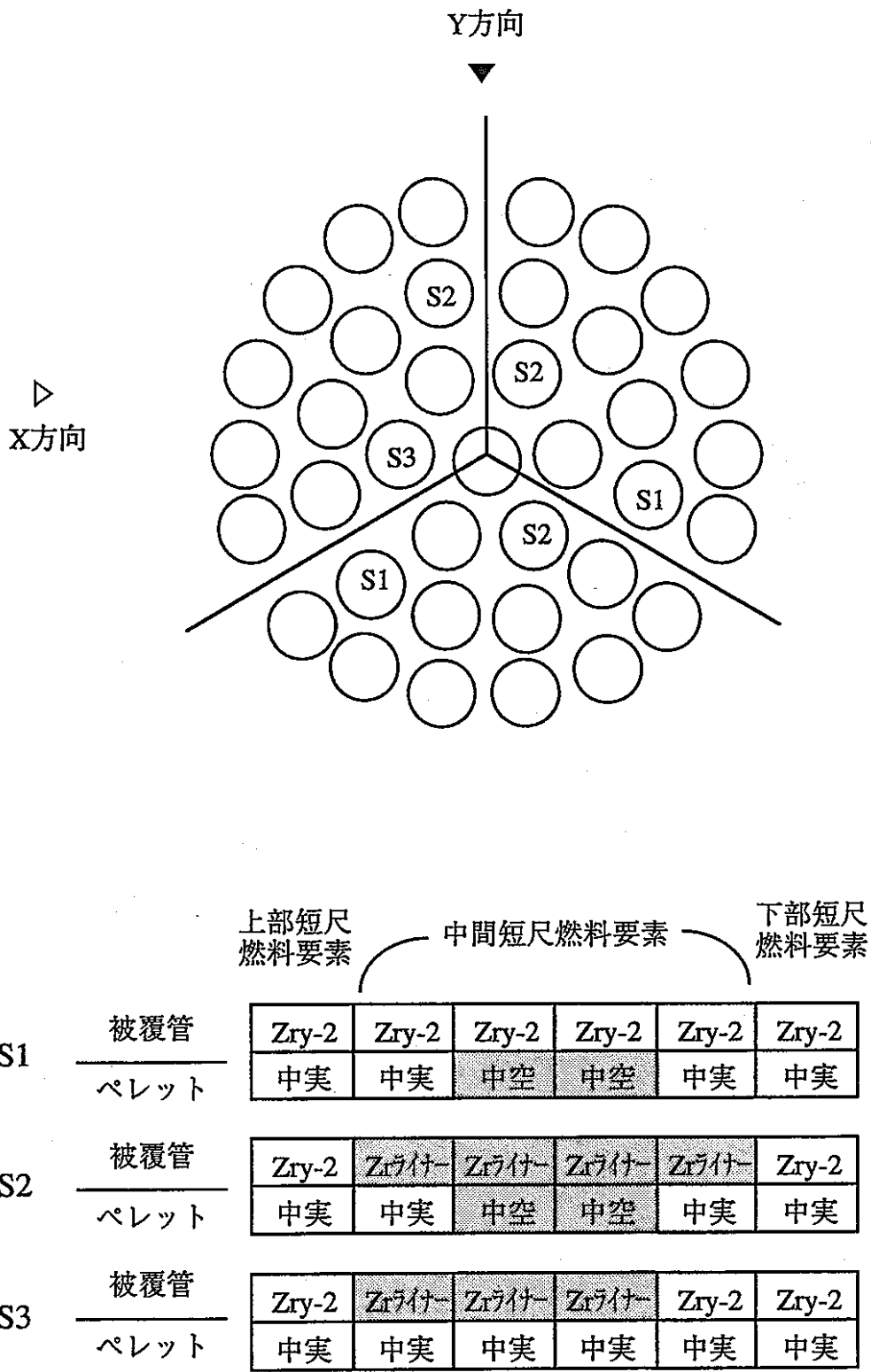


図4 照射用セグメント燃料集合体のセグメント燃料配置

表5 ベース照射結果

集合体	層位置	セグメント位置	経験最大* 線出力密度 kW/m	到達燃焼度** GWd/t	核分裂物質濃度 *** ($^{235}\text{U}+^{239}\text{Pu}+^{241}\text{Pu}$)(U+Pu) wt%	
集合体 I (PPFE07) 16サイクル 平均燃焼度 19GWd/t	BI-1 (内層)	1	18.1	約15.5	約2.2	
		2		約14.8	約2.2	
		3		約16.6	約2.1	
		4		約16.3	約2.1	
	BI-2 (中間層)	1	23.7	約21.2	約1.7	
		2		約20.4	約1.8	
		3		約22.6	約1.6	
		4		約22.2	約1.7	
	BO-1 (外層)		23.8	約19.7	—	
	集合体 II (PPFE06) 19サイクル 平均燃焼度 27GWd/t	BI-3 (内層)	1	20.7	約24.4	約2.1
			2 (中実)		約22.9	約2.3
2 (中空)			—		約2.3	
3 (中実)			約25.2		約2.1	
3 (中空)			—		約2.0	
4			約24.5		約2.1	
BI-2 (中間層)		1	24.7	約31.5	約1.5	
		2 (中実)		約29.8	約1.7	
		2 (中空)		—	約1.7	
		3 (中実)		約32.4	約1.4	
		3 (中空)		—	約1.4	
		4		約31.6	約1.5	
BO-1 (外層)			—	—	—	

* FODESからの集合体データを基に、炉燃室で内層、中間層、外層ピンの軸方向の平均的な線出力分布及びその最大値を求めた。その最大値のうち、ベース照射期間中の最大値を求めた。

** Eシート炉燃-06-111「セグメント燃料(E07)の中間短尺燃料要素の燃料組成評価」及びEシート炉燃-06-196「照射用セグメント燃料集合体(E06)の燃料組成の算出」(WIMS値を選択)から引用した。

*** 同上Eシート中の核種組成から計算した。

表6 ランプ試験に供する燃料のリスト

輸送	試験No.	要素位置	燃料No.	燃料タイプ	燃焼度	ランプ試験モード	計装
Transport I 1993	IFA 591-1	I 3	A4004	I	1	Multi	EC
	IFA 591-2	I 5	A6002	III	1	Multi	EC
	IFA 591-3	M 8	A4015	I	2	Multi	EC
	IFA 591-4	I 3	A4005	I	1	Multi	PF
	IFA 591-5	I 5	A6014	III	1	Multi	PF
	IFA 591-6	M 8	A4018	I	2	Multi	PF
	IFA 591-7	I 1	A4012	I	1	Type-A	EC
	IFA 591-8	I 1	A6016	III	1	Type-A	EC
	IFA 591-9	I 1	A6018	III	1	Type-B	EC
	IFA 591-10	M 16	A4006	I	2	Type-B	EC
	IFA 591-11	M 16	A4017	I	2	Type-B'	EC
	IFA 591-12	M 16	A5009	II	2	spare rod	T.B.D.
Transport II 1995	IFA 591-13	M 8	A5003	II	2	Multi	EC
	IFA 591-14	M 9	A5017	II	2	Multi	PF
	IFA 591-15	M 12	A6010	III	2	Multi	EC
	IFA 591-16	M 12	A6022	III	2	Multi	PF
	IFA 591-17	M 12	A7010	IV	2	Multi	EC
	IFA 591-18	M 12	A7011	IV	2	Multi	PF
	IFA 591-19	I 3	A4002	I	3	Multi	EC
	IFA 591-20	I 3	A4003	I	3	Multi	PF
	IFA 591-21	I 5	A6001	III	3	Multi	EC
	IFA 591-22	I 5	A6006	III	3	Multi	PF
	IFA 591-23	M 12	A4009	I	4	Multi	EC
	IFA 591-24	M 8	A4010	I	4	Multi	PF
Transport III 1996	IFA 591-25	M 8	A5011	II	4	Multi	EC
	IFA 591-26	M 8	A5016	II	4	Multi	PF
	IFA 591-27	M 12	A6009	III	4	Multi	EC
	IFA 591-28	M 12	A6017	III	4	Multi	PF
	IFA 591-29	M 12	A7001	IV	4	Multi	EC
	IFA 591-30	M 12	A7005	IV	4	Multi	PF
	IFA 591-31	I 1	A4007	I	3	Type-B	EC
	IFA 591-32	I 1	A6012	III	3	Type-B	EC
	IFA 591-33	I 1	A6015	III	3	Type-B'	EC
	IFA 591-34	M 16	A4011	I	4	Type-B	EC
	IFA 591-35	M 16	A4019	I	4	Type-B'	EC
	IFA 591-36	I 3	A5005	II	1	spare rod	T.B.D.
Transport IV 1997	IFA 591-37	I 5	A7006	IV	1	spare rod	T.B.D.
	IFA 591-38	I 3	A5002	II	3	spare rod	T.B.D.
	IFA 591-39	M 16	A5012	II	4	spare rod	T.B.D.
	IFA 591-40	I 5	A7002	IV	3	spare rod	T.B.D.

燃料タイプ I:Solid,Zry-2 II:Hollow,Zry-2 III:Solid,Zr-liner IV:Hollow,Zr-liner

燃焼度 1:13.5Gwd/t 2:18.6Gwd/t 3:24Gwd/t 4:32Gwd/t

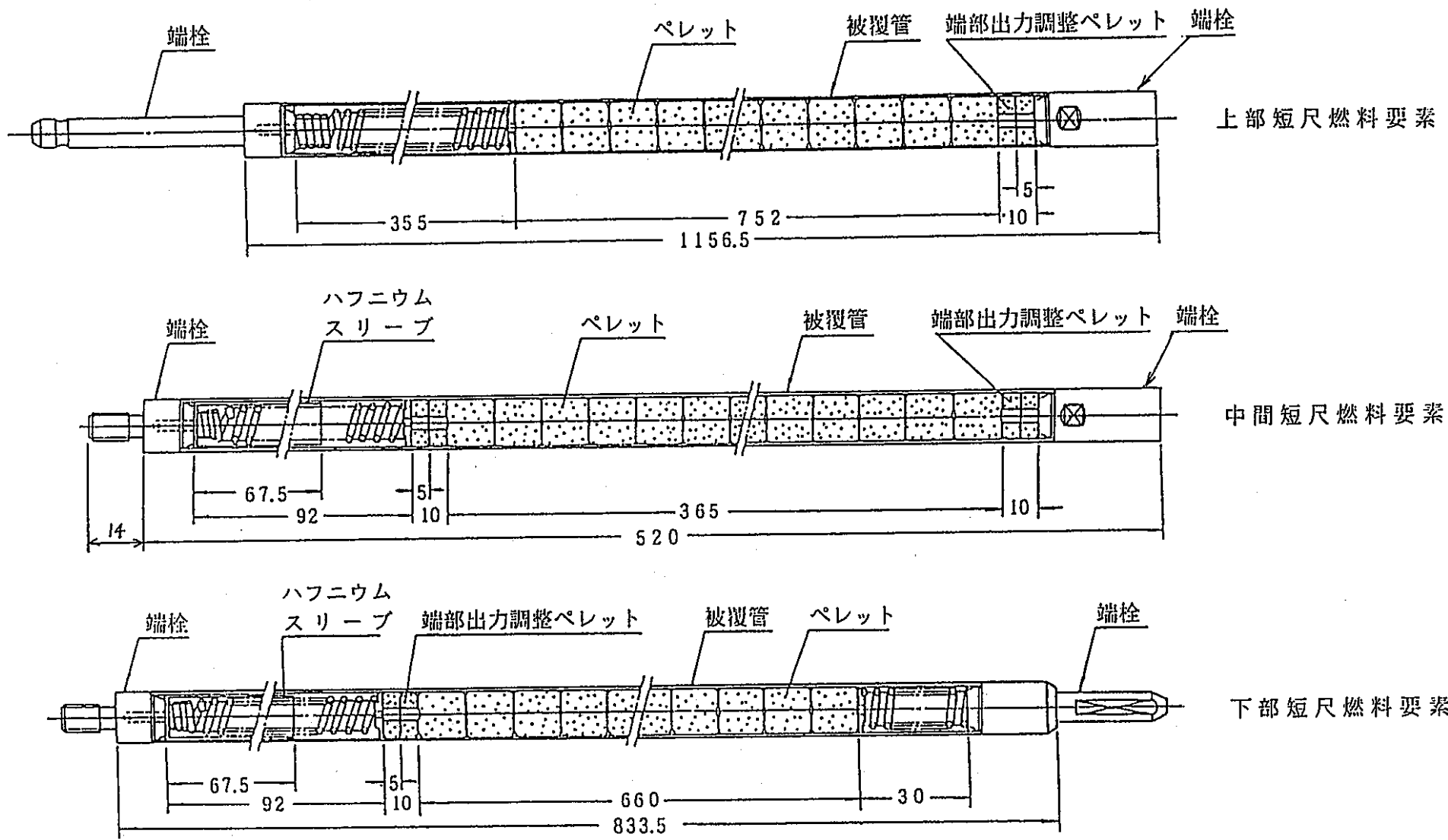


図5 短尺燃料構造図

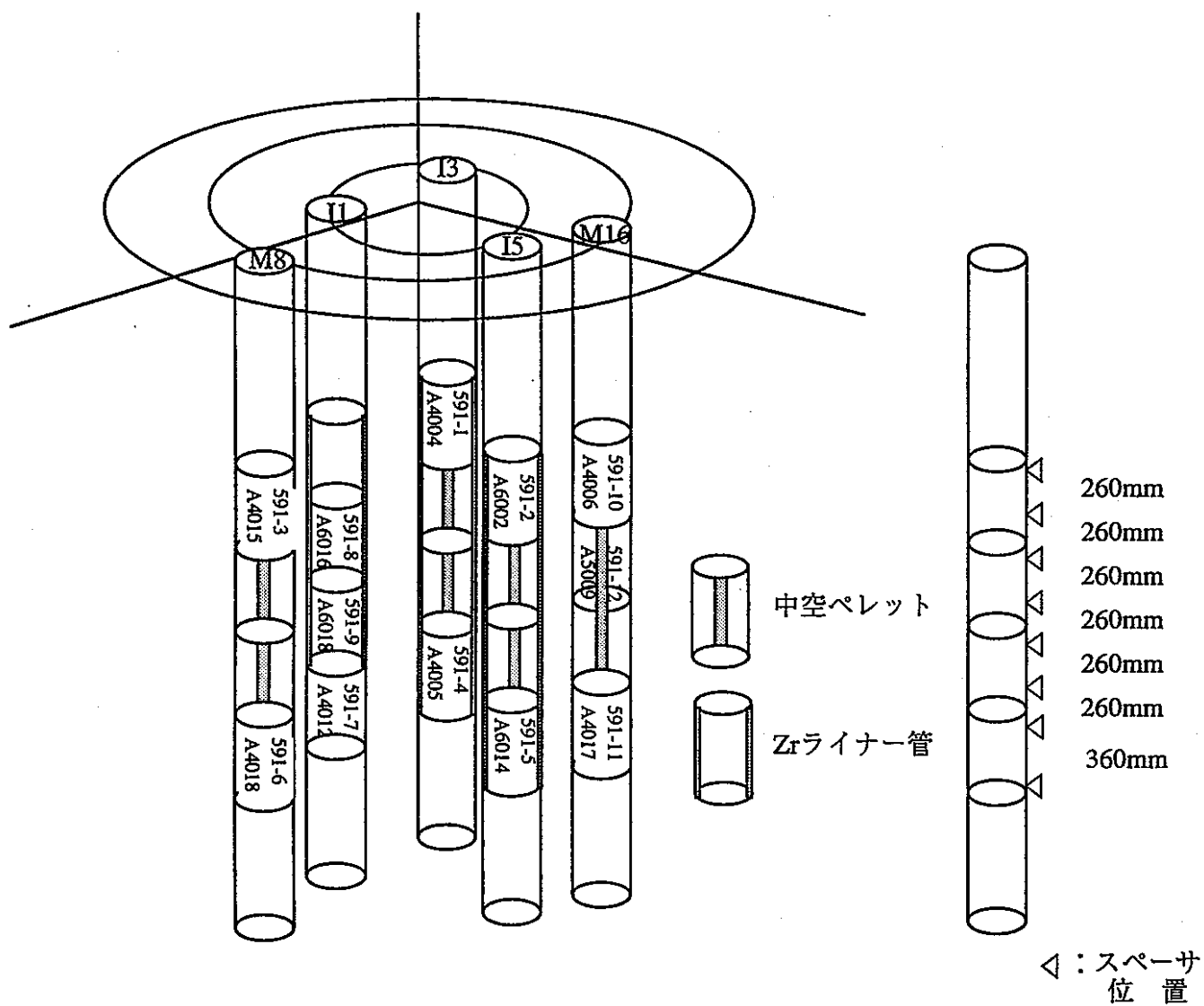


図6 PPFEO7内セグメント燃料の配置 (照射位置関係)

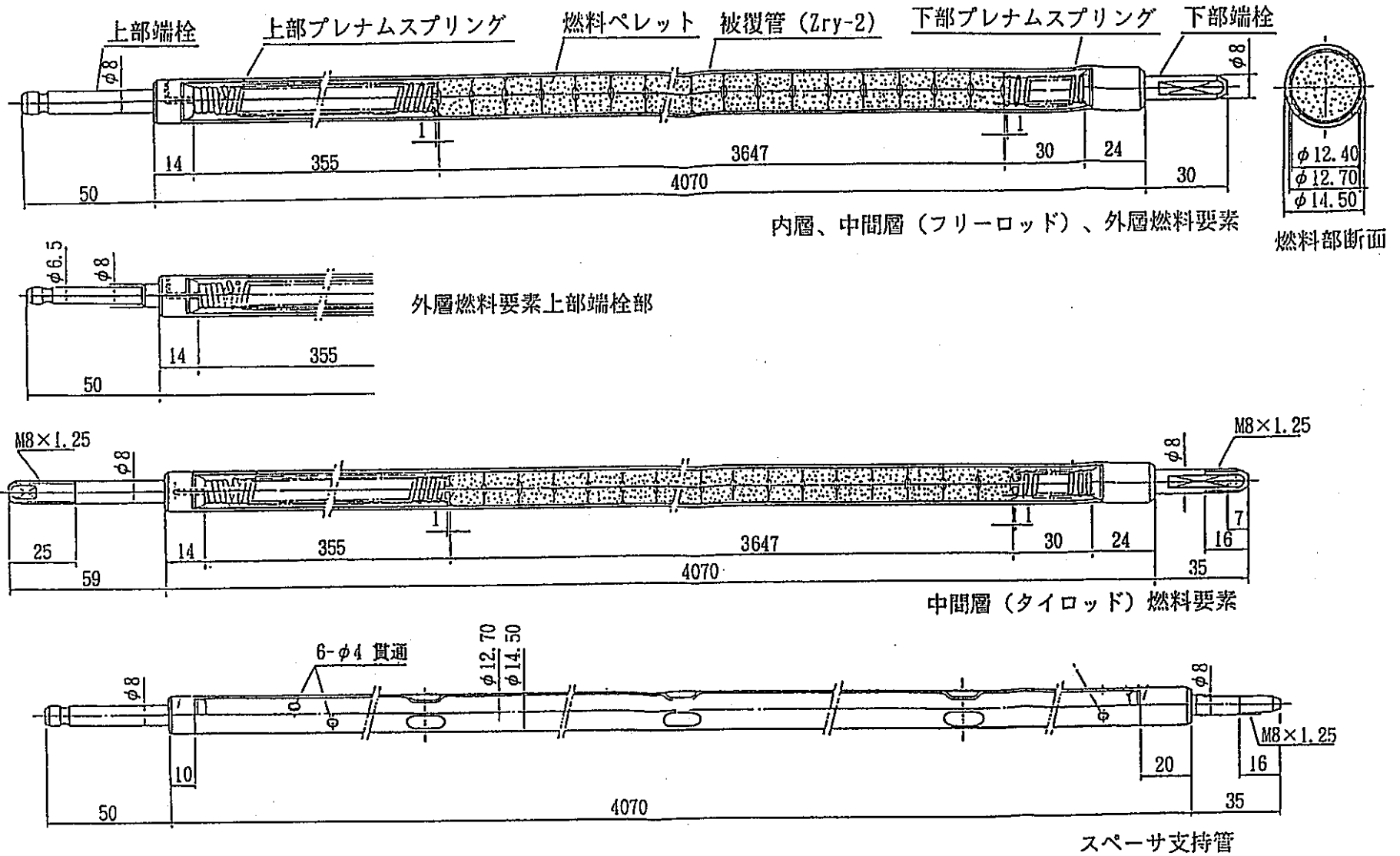


図7 長尺燃料構造図

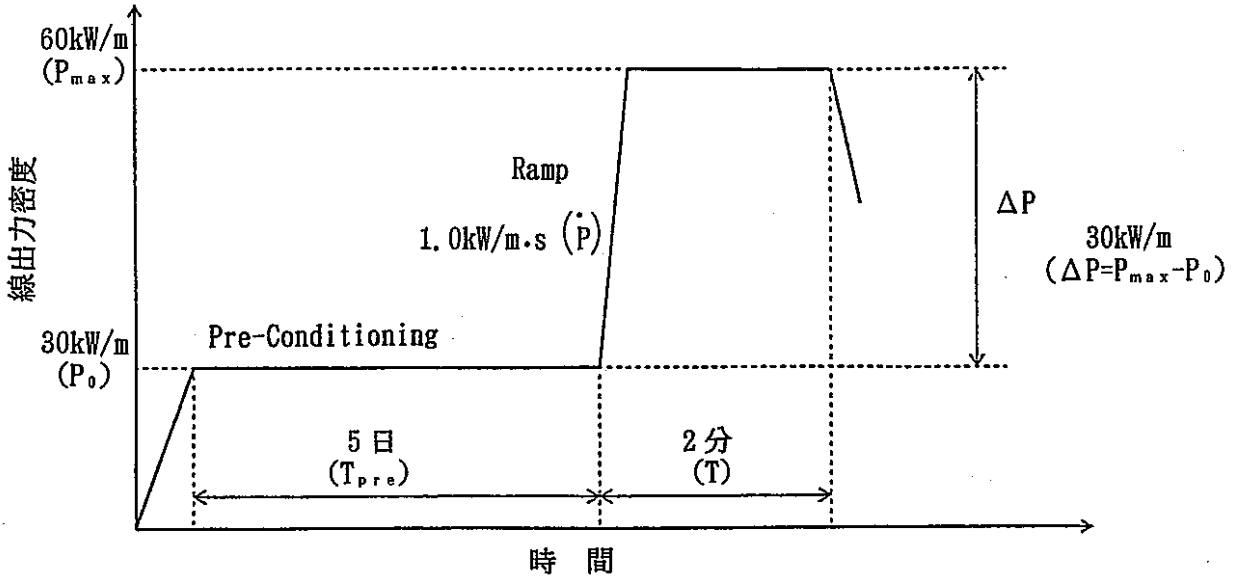


図9 シングルステップ出力急昇試験概念図

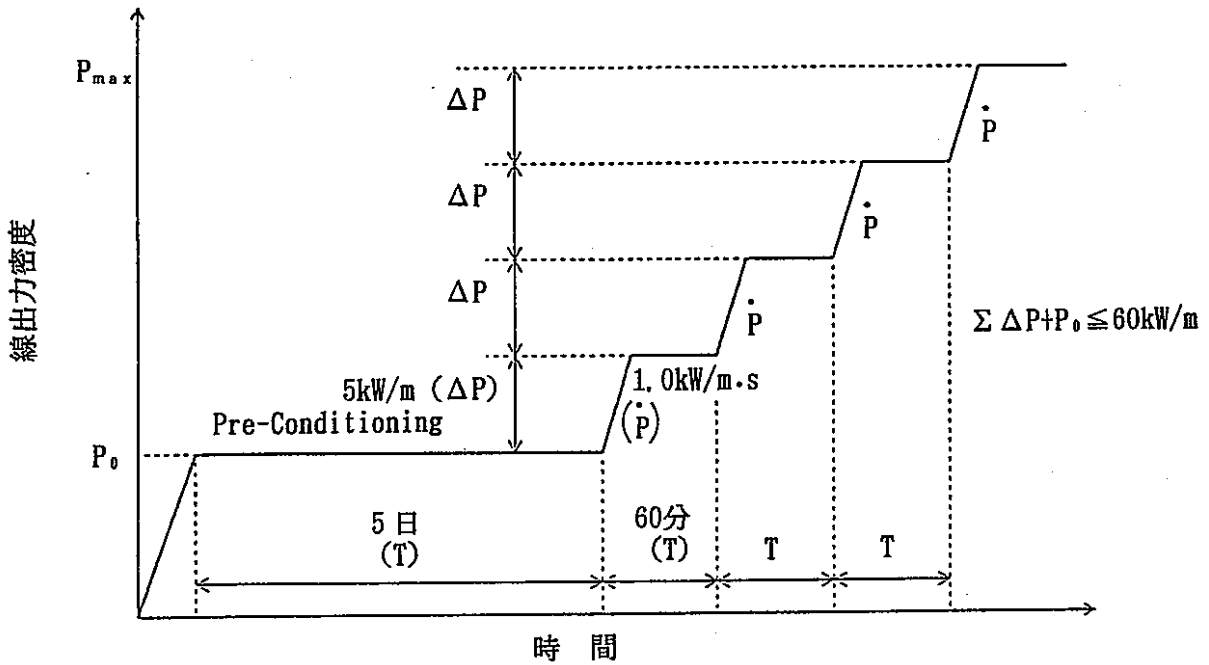


図8 マルチステップ出力急昇試験概念図

表9 ランプ試験に供した燃料棒の非破壊試験結果 (1/2)

回数	第1回ランプ試験			第2回ランプ試験			第3回ランプ試験		
燃料棒	IFA-591-1 (A4004)	IFA-591-2 (A6002)	IFA-591-3 (A4015)	IFA-591-4 (A4005)	IFA-591-5 (A6014)	IFA-591-6 (A4018)	IFA-591-9 (A6018)	IFA-591-10 (A4006)	IFA-591-11 (A4017)
	標準燃料 中実ペレット Zry-2管	改良型燃料 中実ペレット Zrリット管	標準燃料 中実ペレット Zry-2管	標準燃料 中実ペレット Zry-2管	改良型燃料 中実ペレット Zrリット管	標準燃料 中実ペレット Zry-2管	改良型燃料 中実ペレット Zrリット管	標準燃料 中実ペレット Zry-2管	標準燃料 中実ペレット Zry-2管
外観観察	①白色部 (スペーサ2箇所)	①白色部 (スペーサ2箇所) (追記) ②下部スベ-サ部で剥離	①白色部 (スペーサ2箇所)	①白色部 (スペーサ2箇所)	①白色部 (スペーサ2箇所) ②上部プレナム部白色化 ③ペレットペレット-インケ-スを観察	①白色部 (スペーサ2箇所)	①剥離 (下端から160-189mmスペーサ部) ②上部プレナム部白色化 ③ペレットペレット-インケ-スを観察 ④白色部 (スペーサ2箇所)	①傷跡、引っ掻き傷 (特に上部) ②ペレット-ペレット-インケ-スを観察 ③白色部 (スペーサ2箇所)	①局所的な剥離 (下端から61-86mm) ②上部プレナム部白色化 ③白色部 (スペーサ2箇所)
渦電流探傷試験	①部で大きな乱れ	①部で大きな乱れ	①部で大きな乱れ	①部で大きな乱れ	①部で大きな乱れ	①部で大きな乱れ	④部で大きな乱れ	③部で大きな乱れ	③部で大きな乱れ
外径測定	①部で80 μ m膨らみ、すぐ横で20 μ m減肉	①部で90 μ m膨らみ、すぐ横で30 μ m減肉	①部で90 μ m膨らみ、すぐ横減肉なし	①部で60 μ m膨らみ、すぐ横で15 μ m減肉	①部で78、68 μ m膨らみ、すぐ横で25 μ m減肉	①部で90、60 μ m膨らみ、すぐ横で減肉なし	④部で100 μ m膨らみ、すぐ横で60 μ m減肉 (剥離)	③部で70 μ m膨らみ、すぐ横で10 μ m減肉	③部で95 μ m膨らみ、すぐ横で減肉なし
酸化膜厚さ (推定)	スベ-サ部: 60 μ m 以外: 7-15 μ m	スベ-サ部: 65 μ m 以外: 7-15 μ m	スベ-サ部: 73 μ m 以外: 7-15 μ m	スベ-サ部: 60 μ m 以外: 7-15 μ m	スベ-サ部: 60 μ m 以外: 7-15 μ m	スベ-サ部: 60-80 μ m 以外: 7-15 μ m	スベ-サ部: 50-60 μ m 以外: 7-15 μ m	スベ-サ部: 60-70 μ m 以外: 7-15 μ m	スベ-サ部: 60-70 μ m 以外: 7-15 μ m
プロファイル燃料ロッドの最大曲がり	70 μ m	50 μ m	170-180 μ m	>0.29mm	0.32mm	0.10mm	0.15mm	0.12mm	0.12mm
X線透過写真スタック長の増加率	-0.45%	-0.35%	-0.26%	-0.24%	-0.25%	-0.21%	-0.3%	-0.4%	-0.04%
中性子ラジオグラフィ	ペレット割れ異常なし	同左	同左	同左	同左	同左	燃料スタック健全 ペレットキャップ健全 被覆管水素化物なし	同左	同左
ガンマスキャン (推定)	燃焼度ほぼ一定 特異事象なし	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左

表9 ランプ試験に供した燃料棒の非破壊試験結果 (2/2)

回数	第4回ランプ試験	
燃料棒	IFA-591-7 (A4012)	IFA-591-8 (A6016)
	標準燃料 中実ペレット Zry-2管	改良型燃料 中実ペレット Zr711管
外観観察	①白色部 (スベータ2箇所) ②上部プレナム部が一部 白色化	①白色部 (スベータ2箇所) ②ペレットペレットインターフェース を観察 ③下部スベータ部で剥離
渦電流探傷試験	①部で大きな乱れ	①部で大きな乱れ
外径測定	①部で60 μ m膨らみ、すぐ横で20 μ m減肉	①部で100 μ m膨らみ、すぐ横で50 μ m減肉
酸化膜厚さ (推定)	スベータ部: 50-60 μ m 以外: 7-15 μ m	スベータ部: 50-60 μ m 以外: 7-15 μ m
プロファイル 燃料ロッドの最大曲がり	0.11mm	0.18mm
X線透過写真 スタック長の増加率	-0.27%	0.04%
中性子放射線 燃料スタック健全 ペレットキャップ健全 被覆管水素化物なし	燃料スタック健全 ペレットキャップ健全 被覆管水素化物なし	同左
ガンマスキヤン (推定)	同左	同左

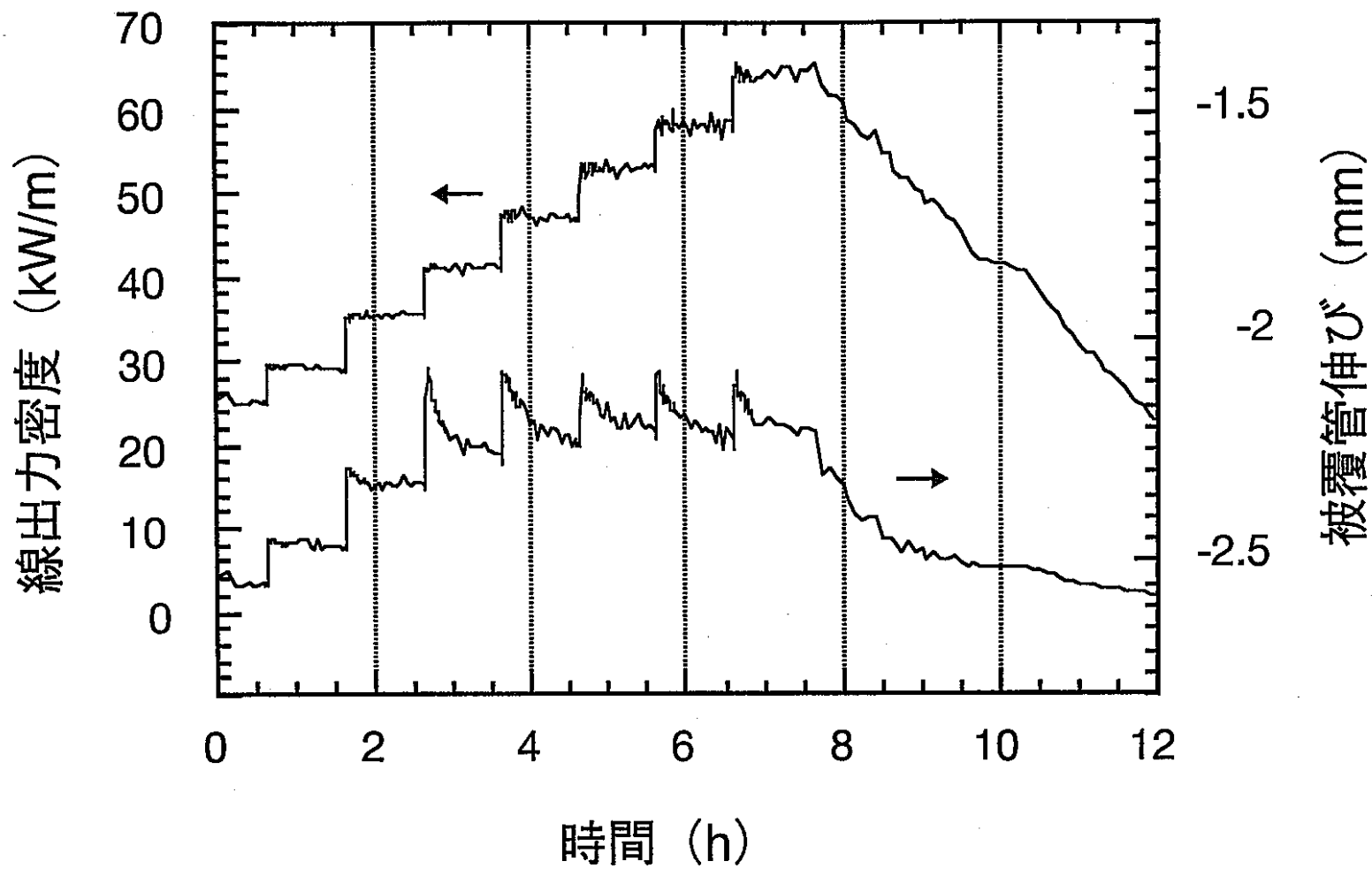


図10 IFA591-1の被覆管伸びと出力変化

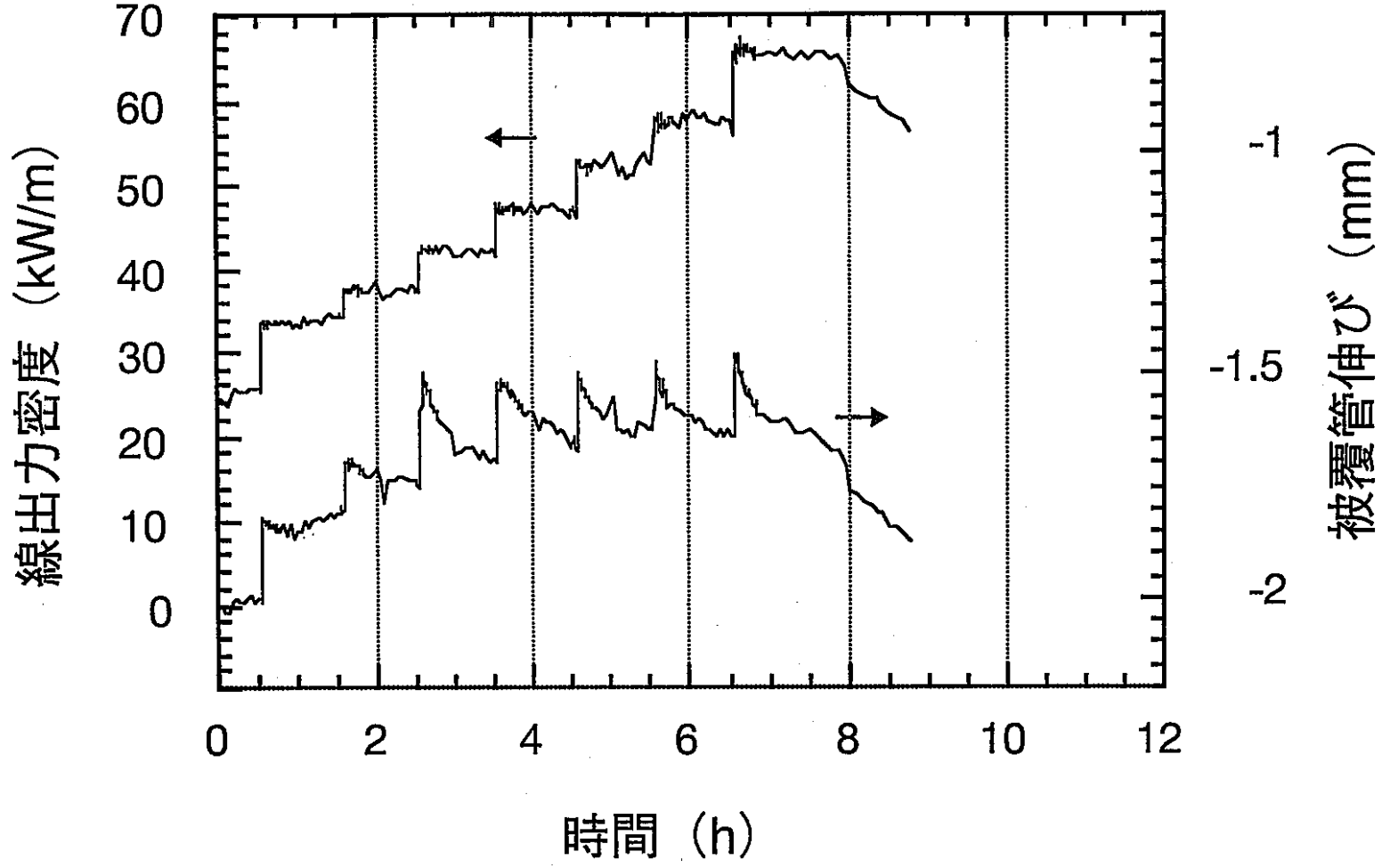


図11 IFA591-2の被覆管伸びと出力変化

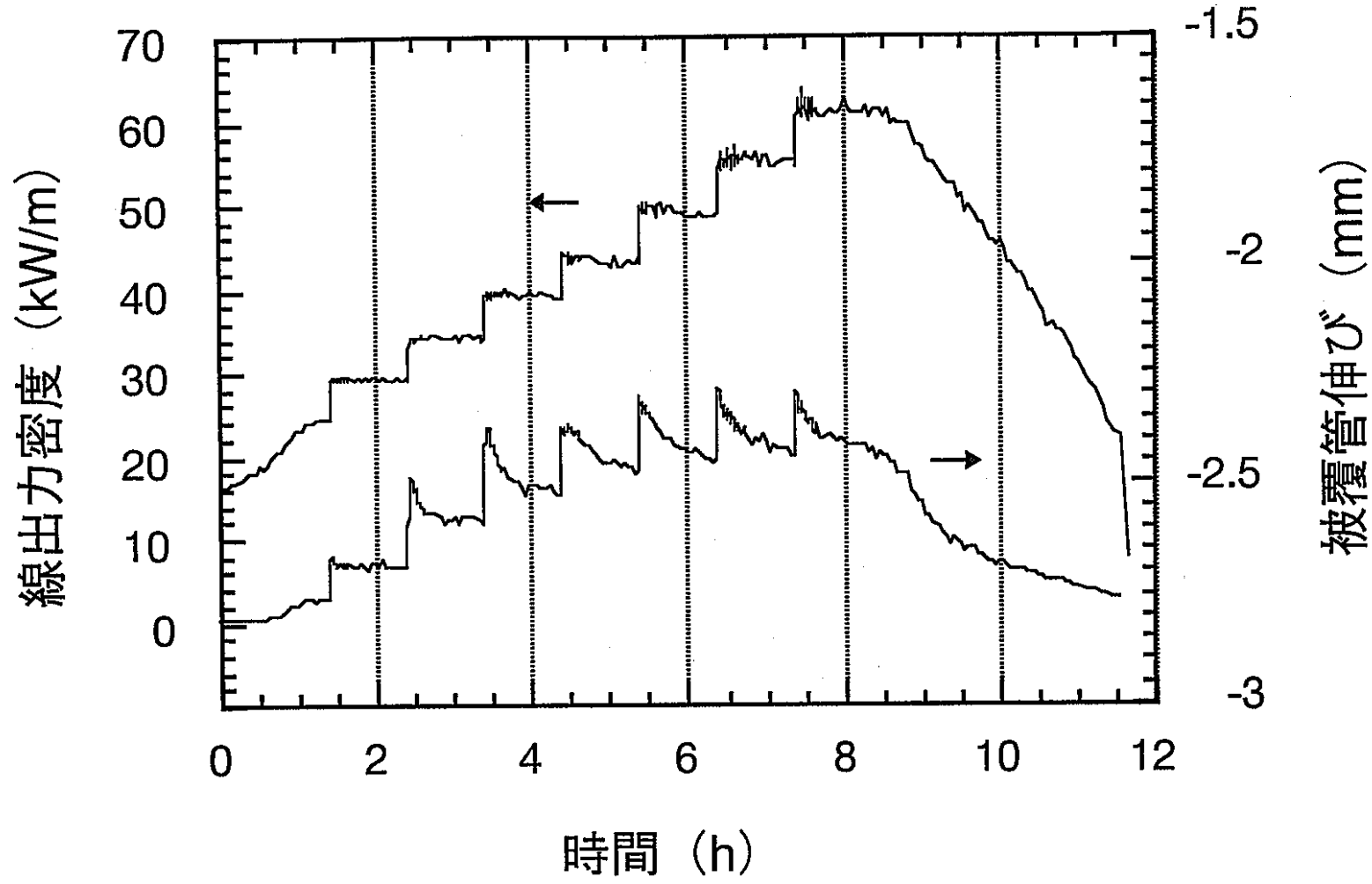


図12 IFA591-3の被覆管伸びと出力変化

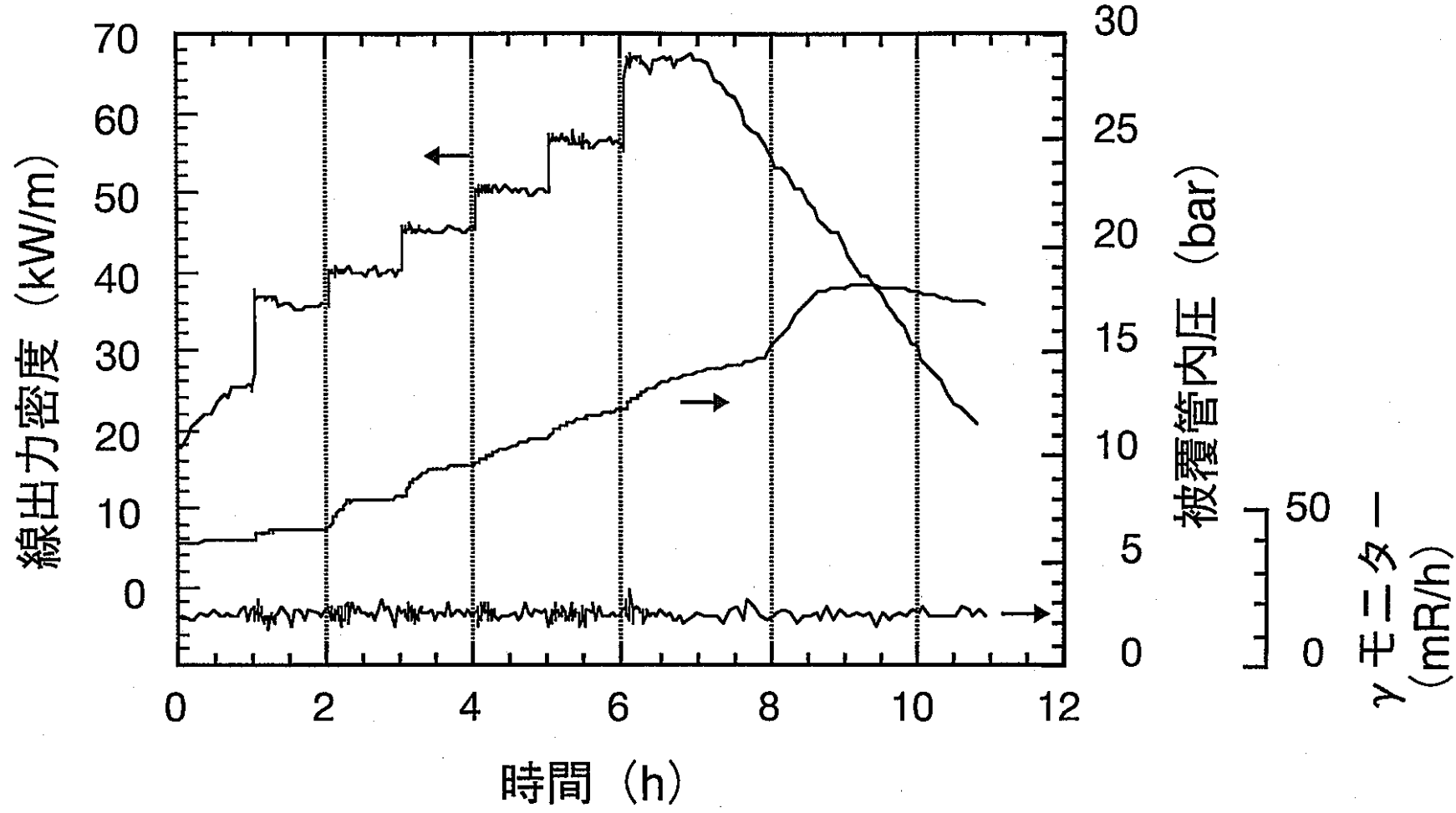


図13 IFA591-4の被覆管内圧と出力変化

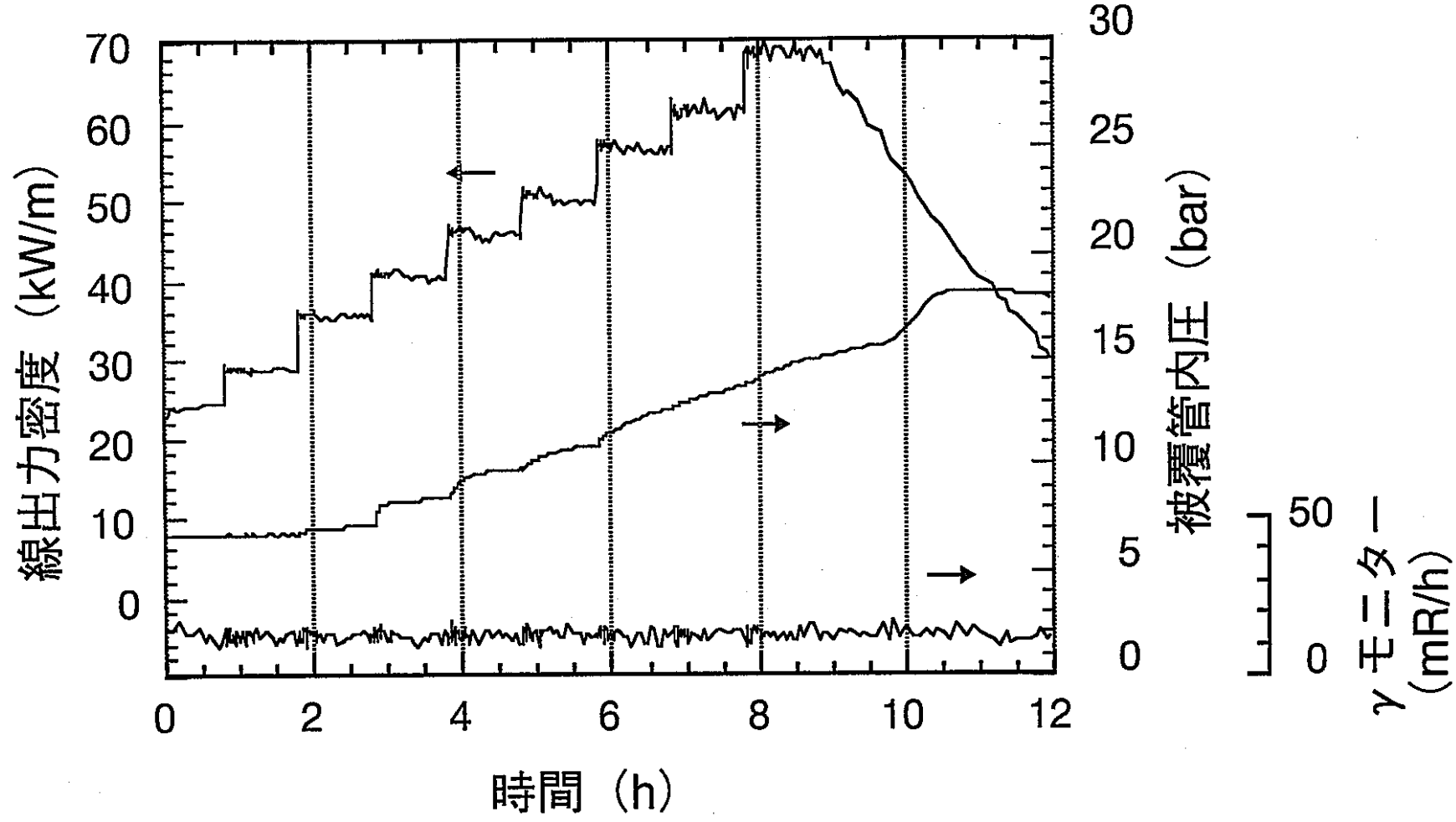


図14 IFA591-5の被覆管内圧と出力変化

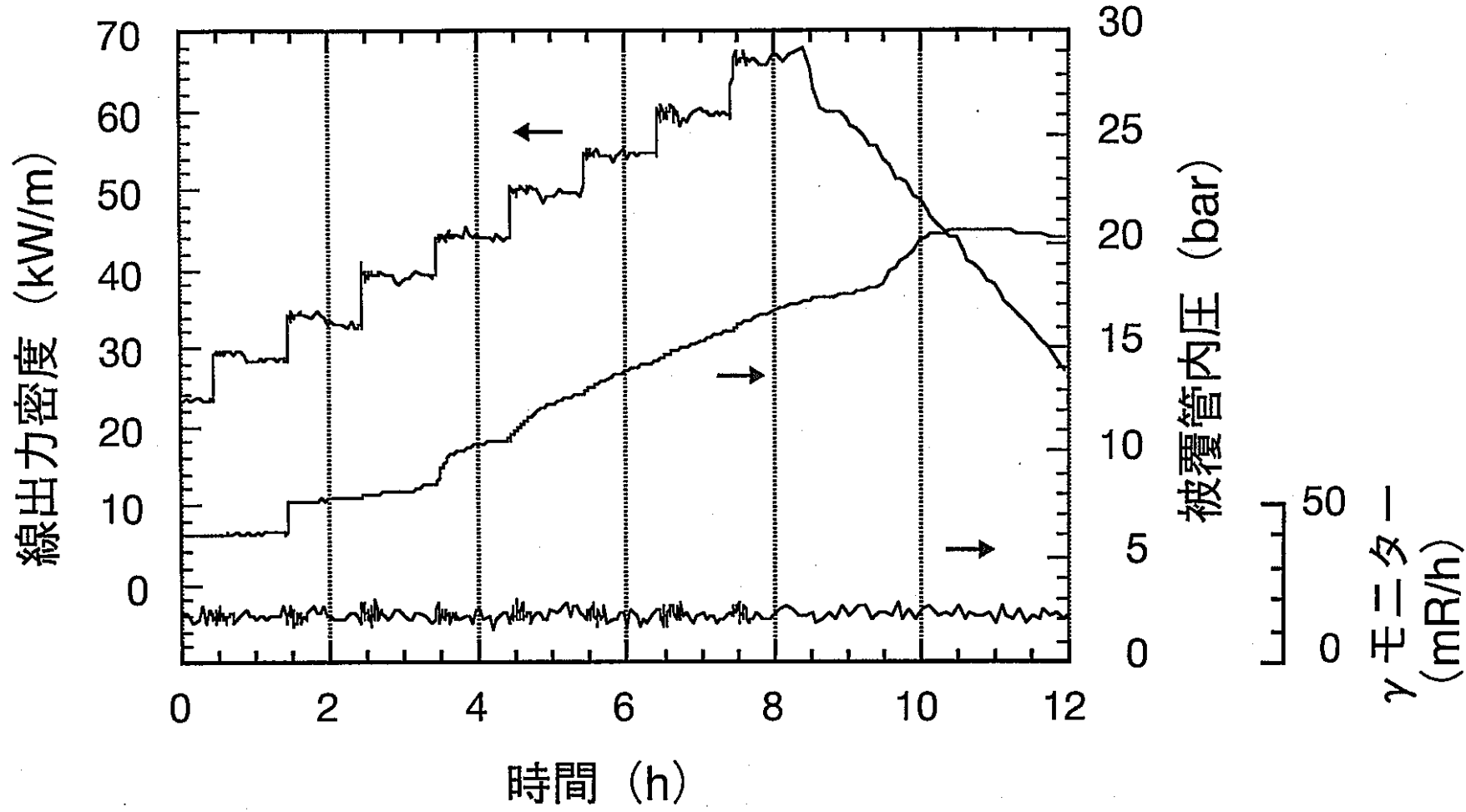


図15 IFA591-6の被覆管内圧と出力変化

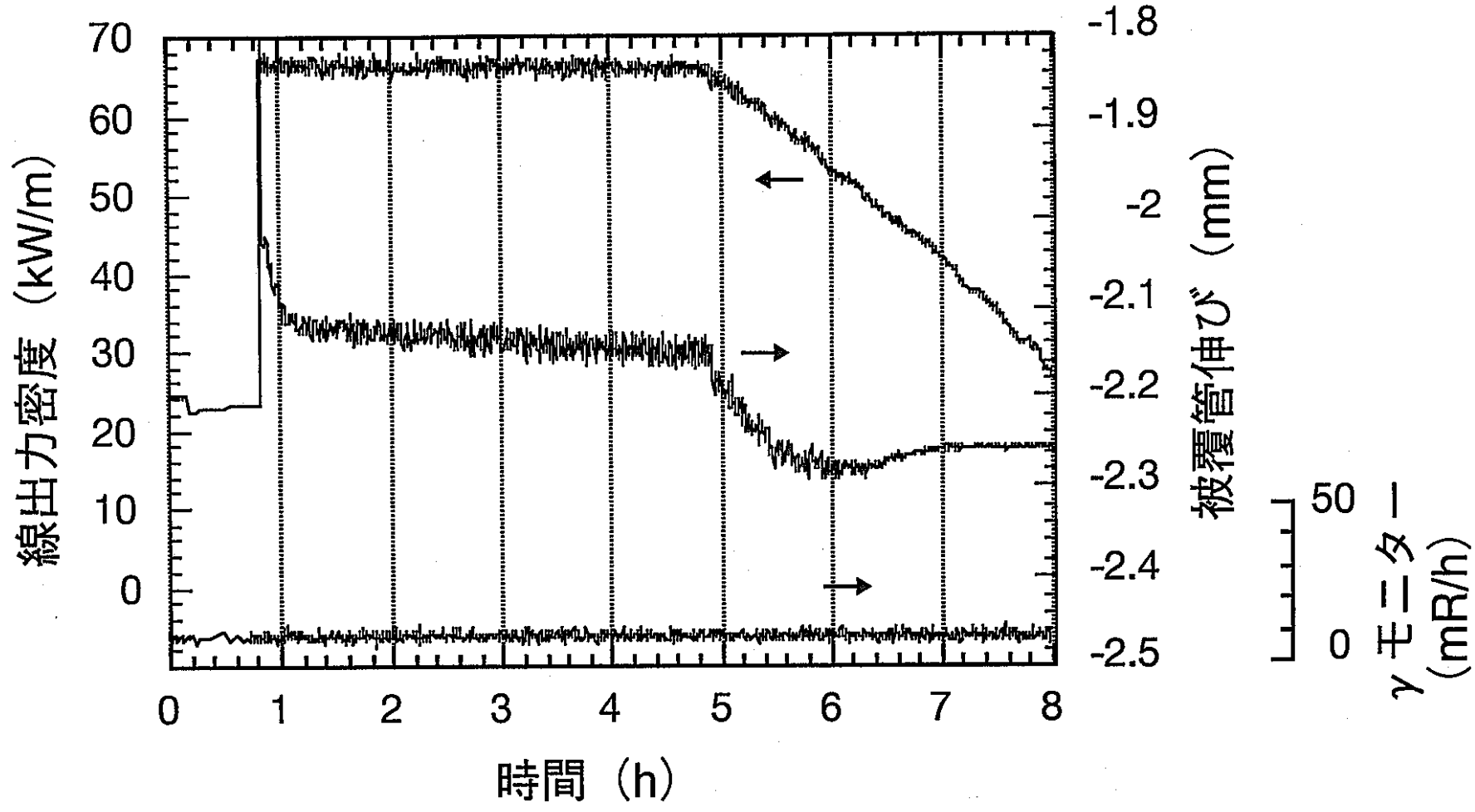


図16 IFA591-7の被覆管伸びと出力変化

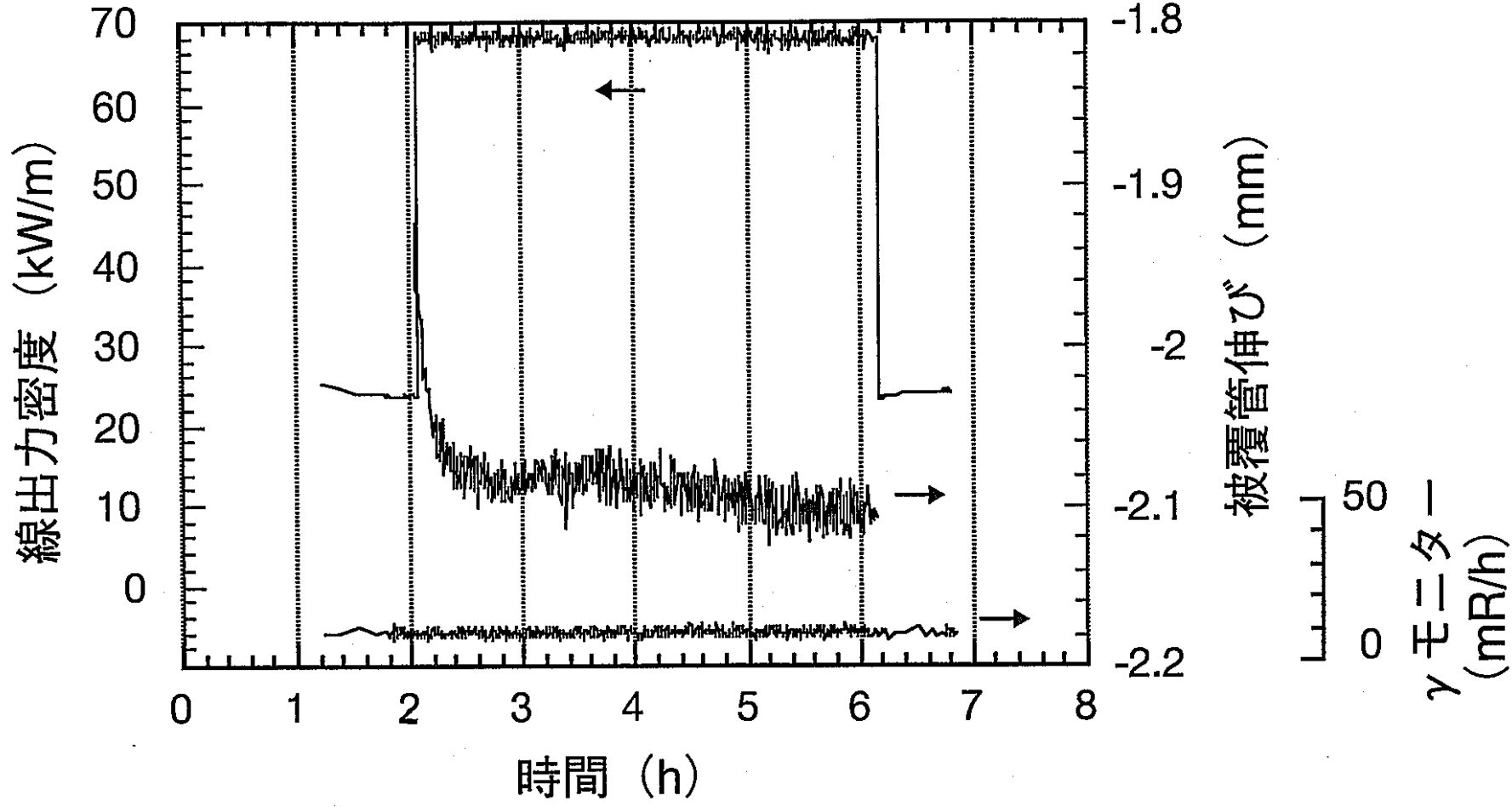


図17 IFA591-8の被覆管伸びと出力変化

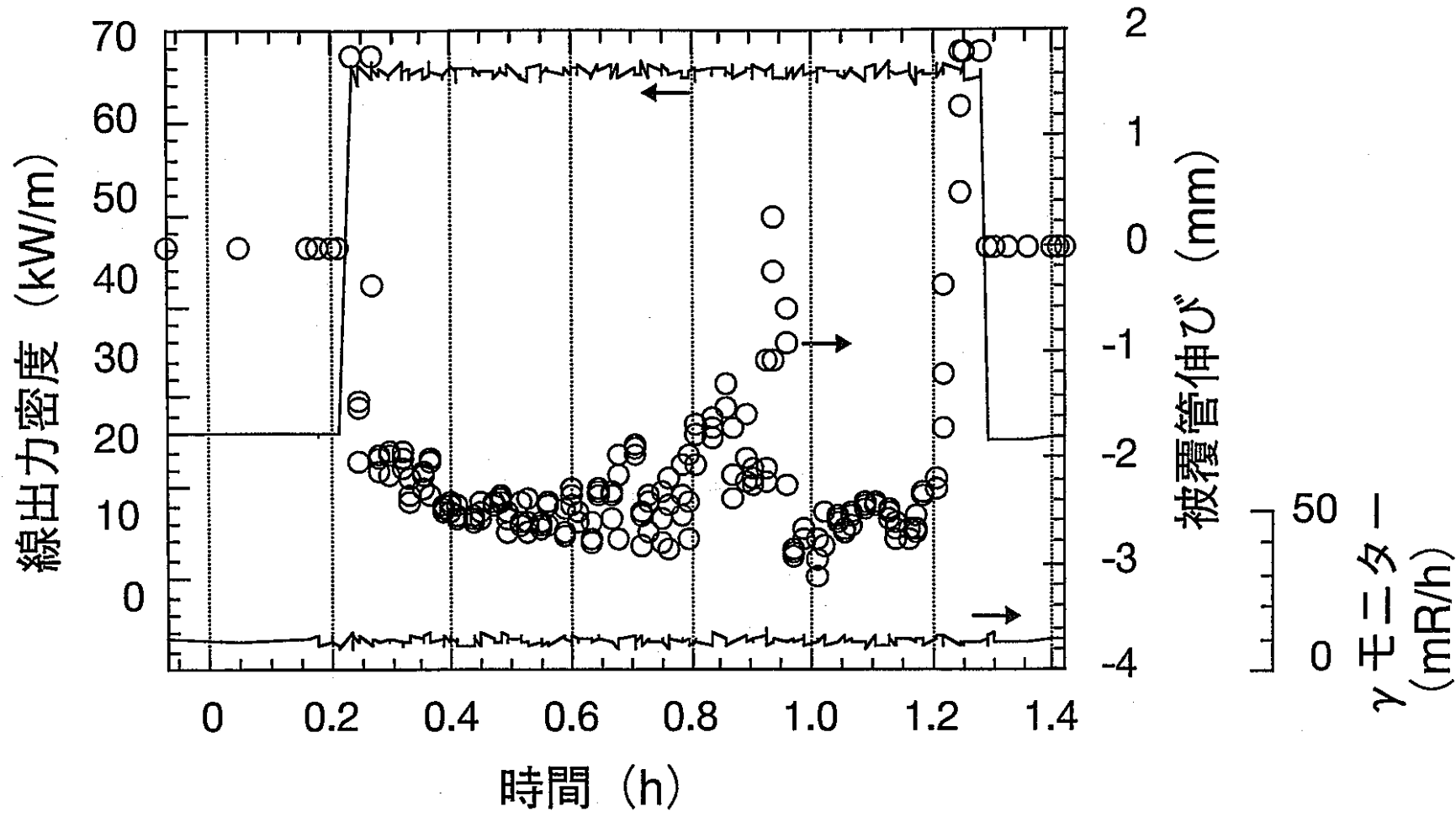


図18 IFA591-9の被覆管伸びと出力変化
(被覆管伸びにセグメント燃料の上下動が含まれる)

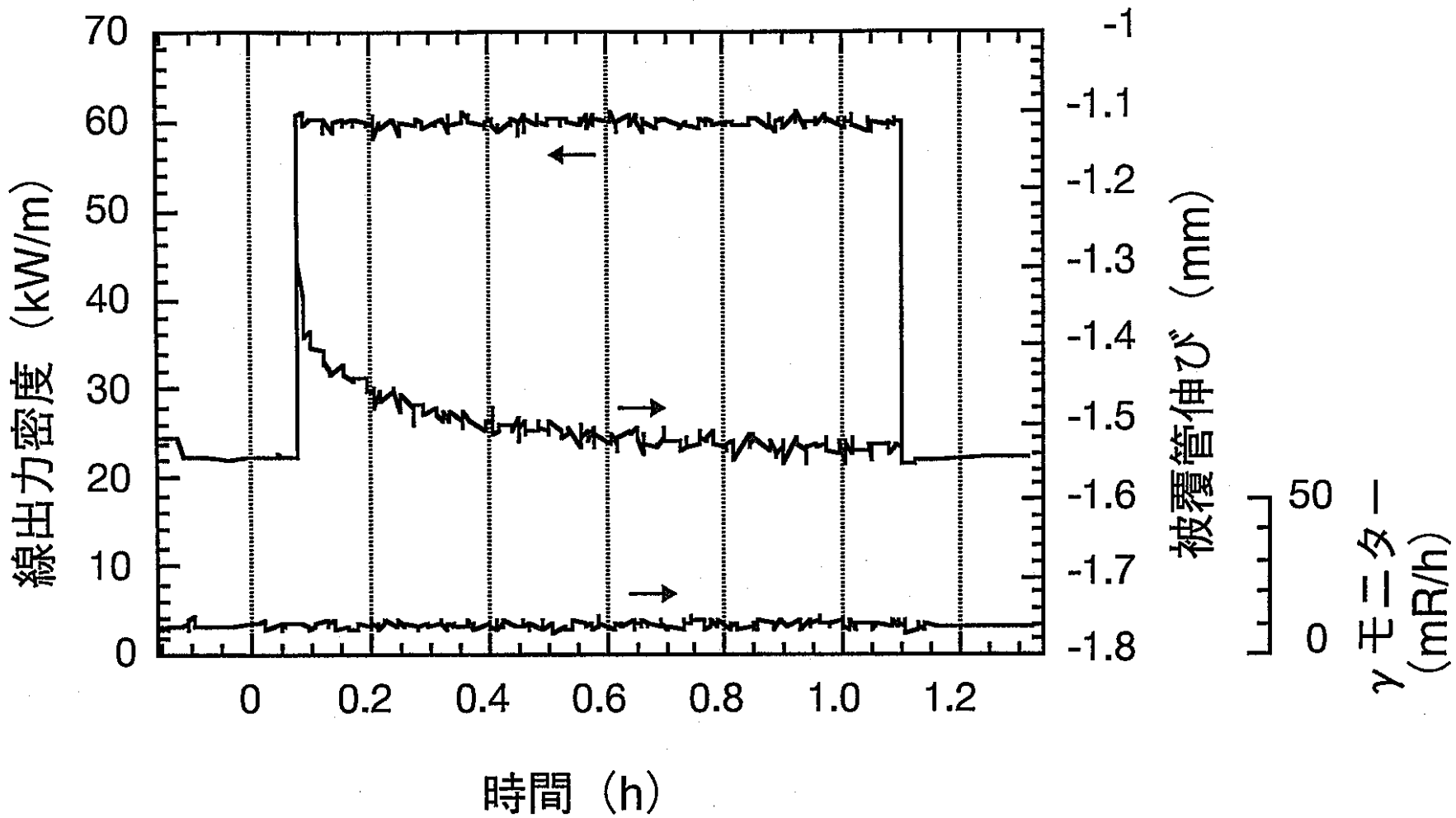


図19 IFA591-10の被覆管伸びと出力変化

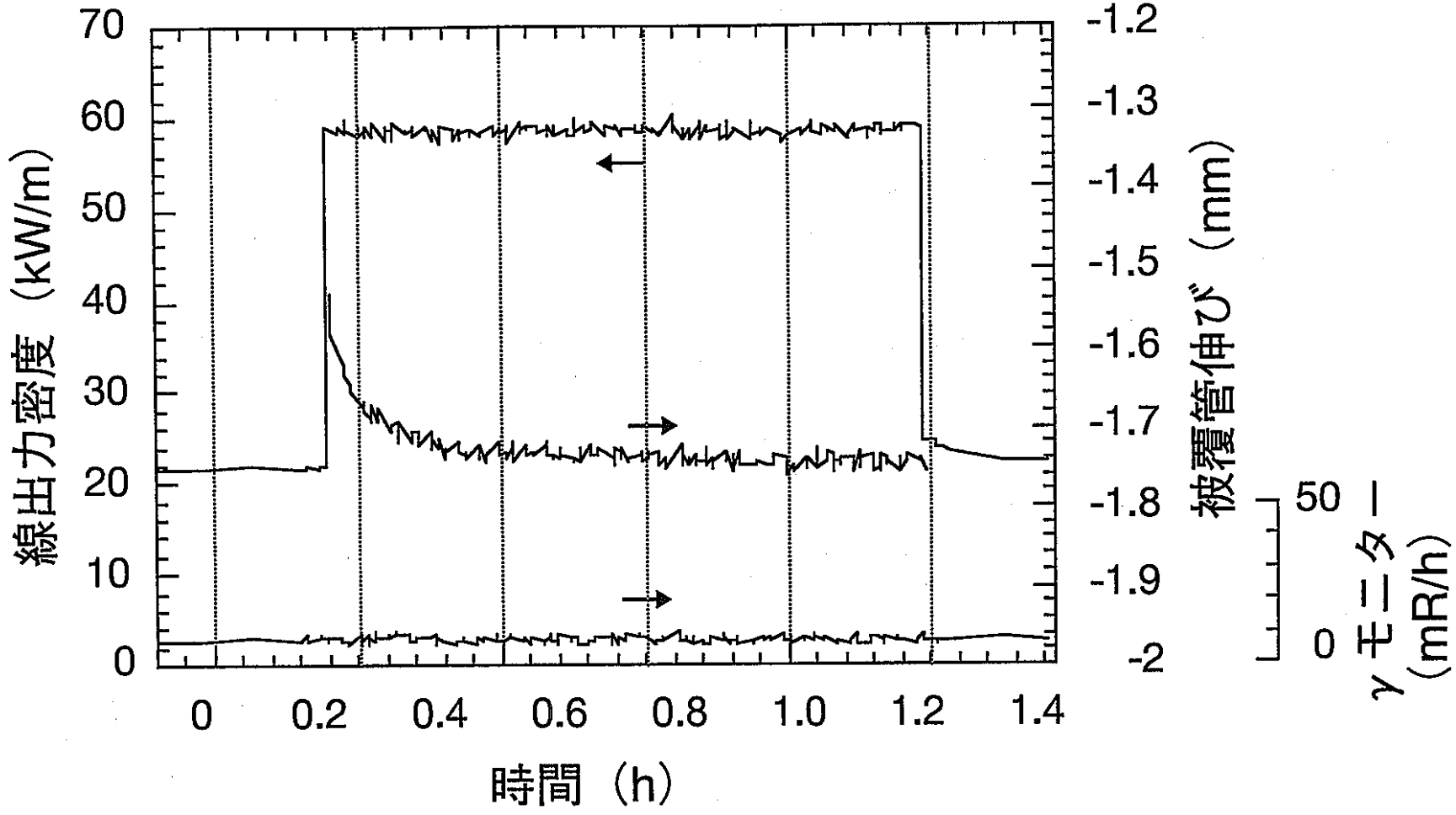


図20 IFA591-11の被覆管伸びと出力変化

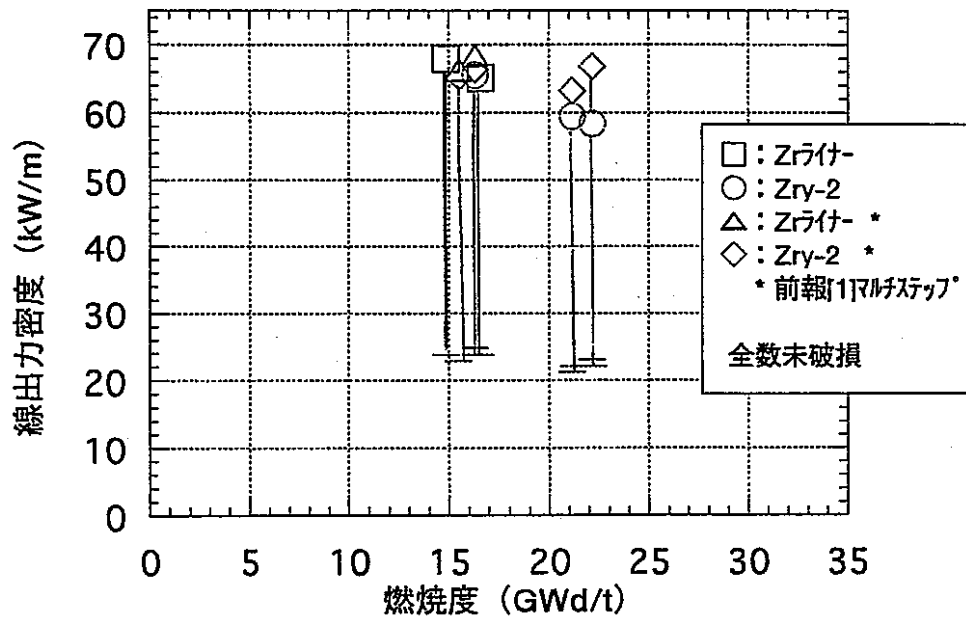


図21 ランプ試験結果

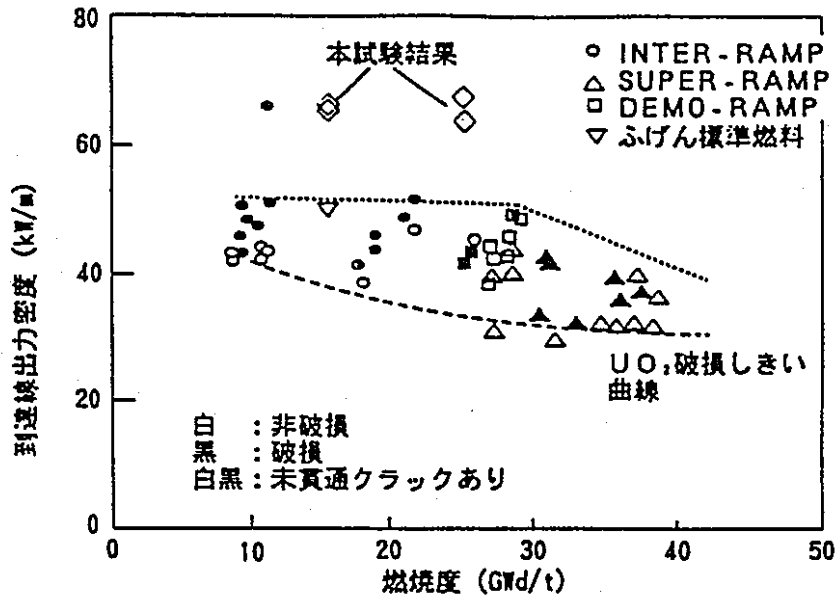


図22 BWR燃料のマルチステップランプ試験結果の到達線出力密度と燃焼度の関係 (Zrライナーなし)

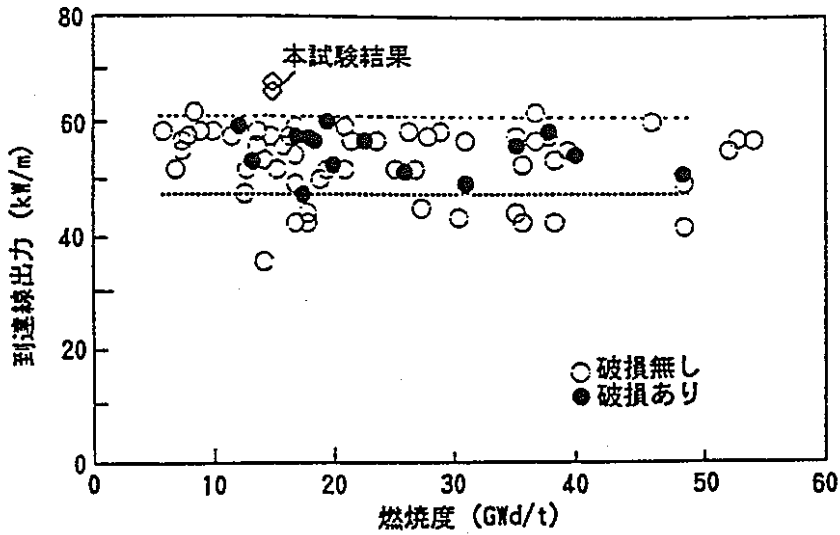


図23 BWR燃料のマルチステップランプ試験結果の到達線出力密度と燃焼度の関係 (Zrライナーあり)

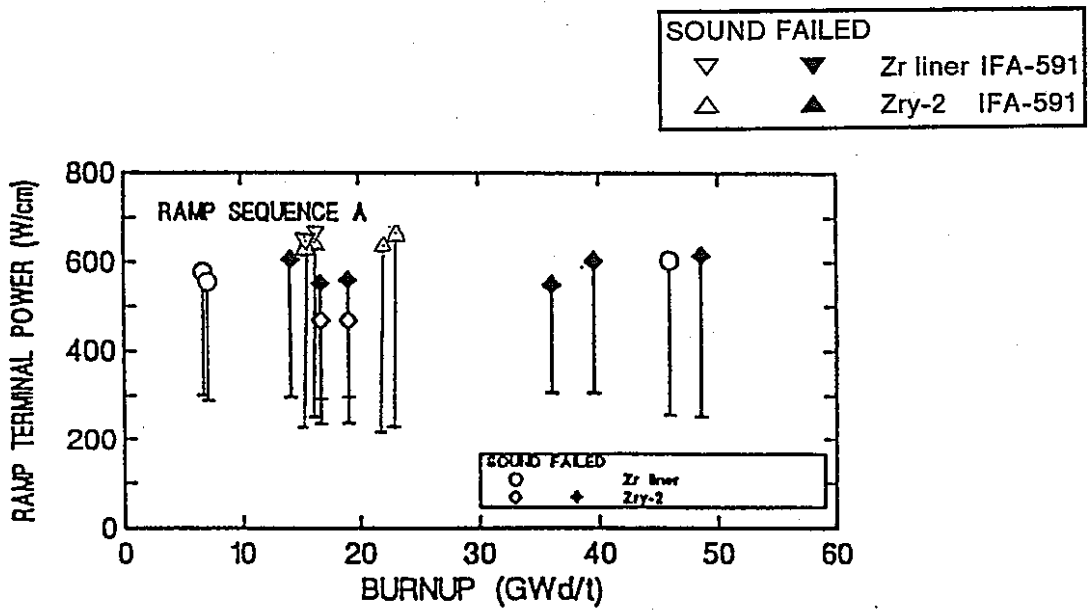
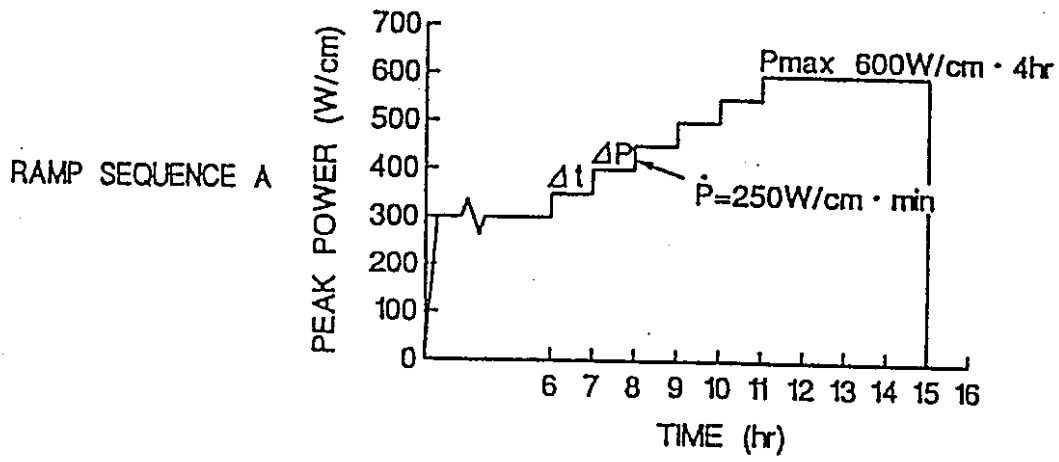


図24 BWR燃料のマルチステップランプ試験結果の到達線出力密度と燃焼度の関係

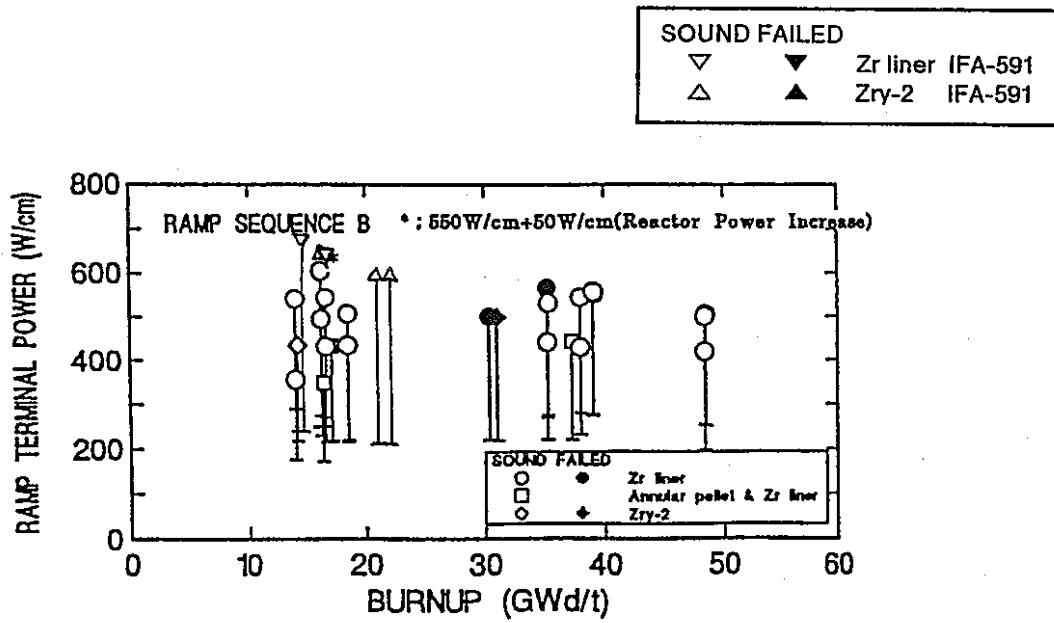
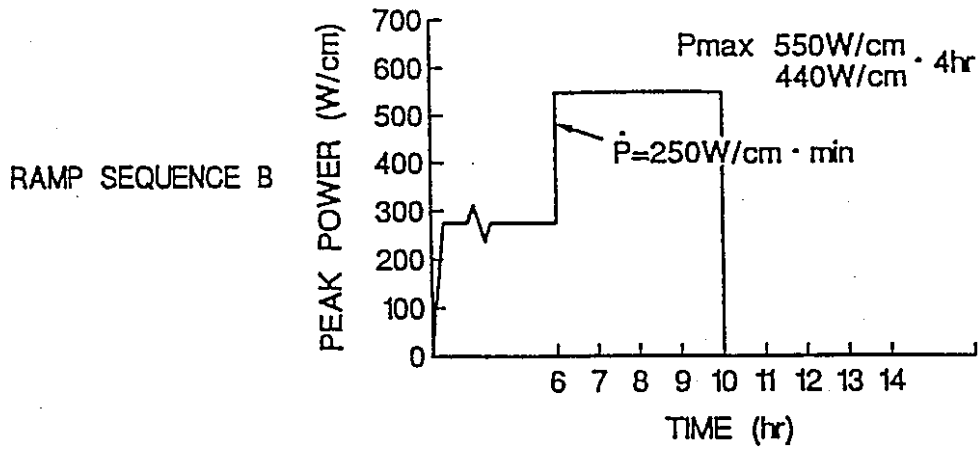


図25 BWR燃料のシングルステップランプ試験結果の到達線出力密度と燃焼度の関係

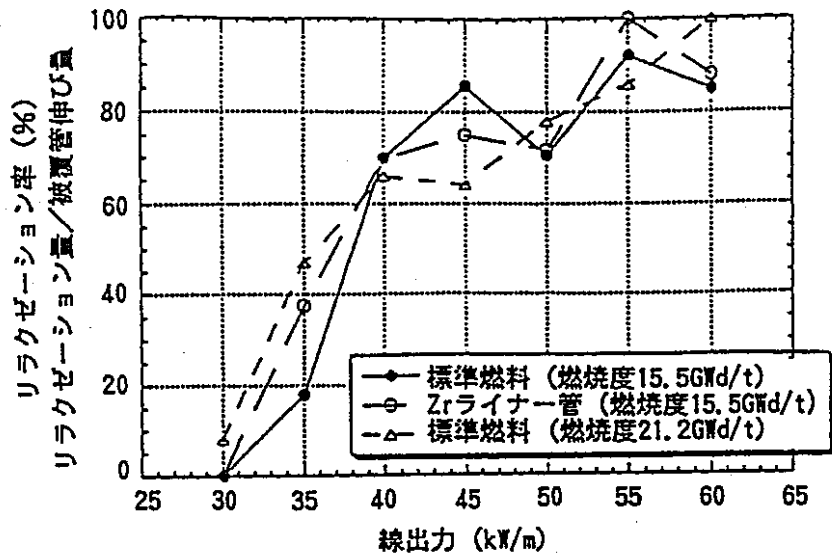


図26 リラクゼーション率の変化

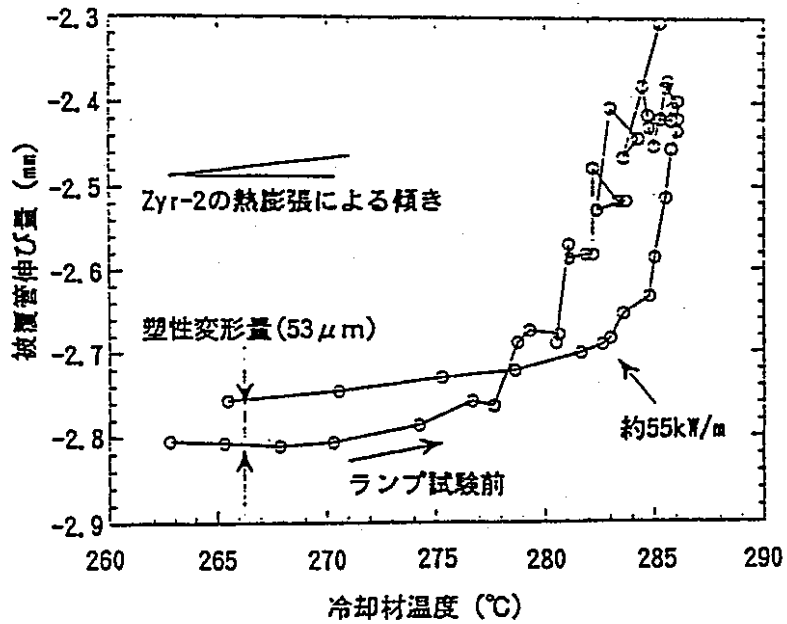


図27 被覆管伸びと冷却材温度の関係

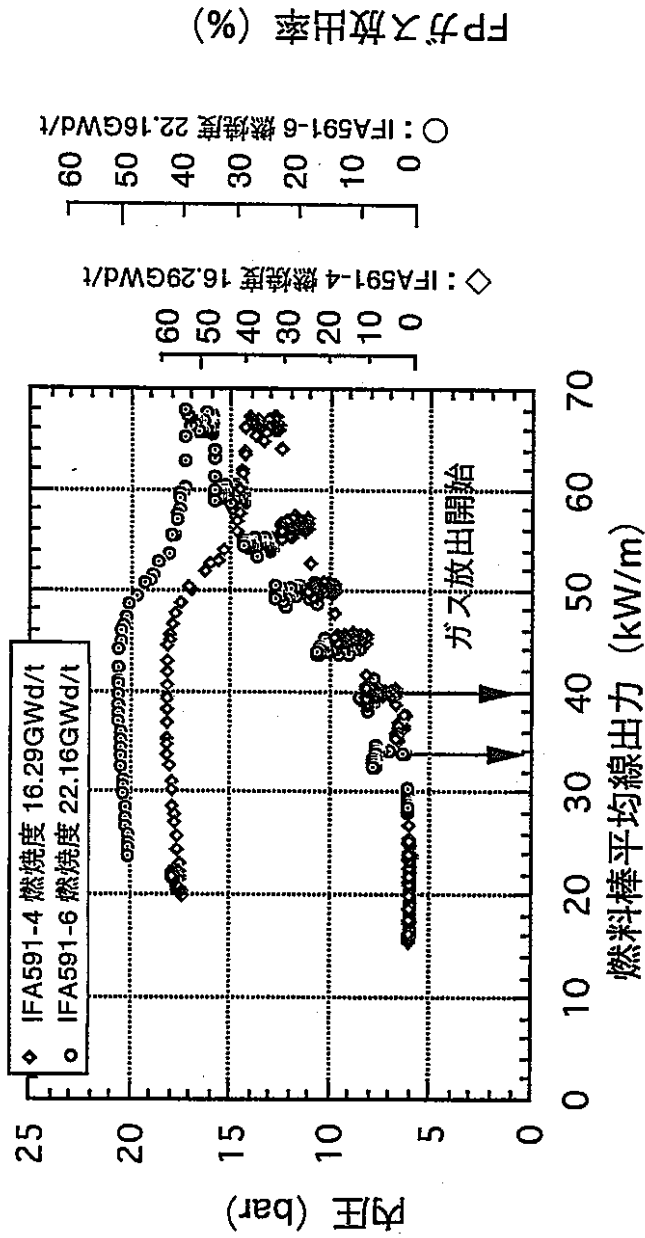


図28 標準燃料のガス放出と線出力の関係

別紙

出力急昇モードについて

これまでの試験では、従来の破損しきい予測値を大きく越える線出力までの急昇試験を行ってきたにも係わらず、燃料破損の兆候が一切確認されていない。唯一、第4回試験での被覆管の伸びデータにおいて、やや不連続的な変化が生じている疑いが見られたが、少なくとも、これまでの全試験燃料において被覆管の貫通孔は生じていない。この原因としては、従来の燃料破損予測式が過去のBWR燃料の試験データに基づいて作成されており、そこには現在までの燃料製造上の技術改良による高品質化やウラン燃料とMOX燃料の高温クリープ特性の違い等の効果が含まれていないこと等が指摘されている。そこで、今後の試験における出力急昇モードについて、燃料を破損させるにはどうしたら良いかという観点から再度検討する必要があると考えられる。ここでは、そのための一つの案を提案する。

第1回と第2回試験でのマルチステップ試験結果から、線出力を約40kW/mに上昇させた所でそれまでよりも強いPCMIが生じて被覆管は大きく伸ばされ、約45kW/mに上昇させた所でサーマルフィードバック現象が観察されるとともに、それ以上の出力では、リラクゼーション効果により被覆管の伸びが抑制されることが判っている。これは、約40kW/mより小さい出力領域ではペレットのクリープがごく小さいためにリラクゼーションがあまり生じないのに対して、約40kW/m以上では、ペレットと被覆管が強く接触し始めるものの、ペレットの温度も高くなっていくためペレットがクリープし易くなり、リラクゼーションが進むものと推測することができる。また、出力急昇を燃料降下法により行った場合は、試験燃料ロッド全体の線出力が均一に上昇するのではなく、前述のとおりロッド下端から順にステップ状に上昇するため、被覆管に加わる力が分散されて働く可能性がある他、燃料温度が局所毎に急速に上昇してクリープし易い領域にすぐに到達してしまうことも考えられる。そのため、ハルデン炉の試験条件も加味した上で、今後の出力急昇試験の試験モードとして、図に示すような出力急昇モードを提案する。この試験モードでは、出力上昇が試験燃料ロッド全体にわたって均一かつランプ状に行え、その間の計装データが確実に得られる³Heガス減圧法で行うことを提案している。以下にその概略手順を述べる。この中の線出力の数値は全て仮設定値

である。

- ① ^3He ガスを抜くことにより、下部試験位置に配置した試験燃料の線出力を約25kW/mから約45kW/mまで、原子炉制御可能な上昇速度（恐らく0.3kW/m/s程度）で上昇させる。
- ② 最もPCMIが厳しいと考えられる線出力約45kW/mの場合は、マルチステップ試験との比較の意味も含めて、1～4時間その出力で保持する。それ以外の線出力の場合は、燃料破損の兆候が確認できる最小時間（例えば約3分）だけ出力を保持する。この保持時間は、試験燃料ロッドのリラクゼーションが進まないようにできるだけ短い時間とする。
- ③ ^3He ガスを充填して燃料の出力を約30kW/mまで低下させる。
- ④ 原子炉出力を上昇するか、もしくは試験リグ周辺の制御棒操作により、下部試験位置の中性子フラックスを所定の値まで高くする。この時、試験燃料の線出力が約30kW/mに維持されるように、 ^3He ガスを更に充填して調整する。
- ⑤ ステップ①と同様の方法で、試験燃料の線出力を約54kW/mまで上昇させる。
- ⑥ 以上のステップ①～⑤をを繰り返し行って次第に到達線出力を上げていき、最終的には試験燃料の線出力を約70kW/mまで上昇させる。

上記の試験モードによれば、以下の成果が期待できると考えられる。

- ① 最初の出力急昇では、強いPCMIが生じ始めかつペレットの温度があまり高くない出力領域を狙って行うため、この領域が最も厳しい条件であるとする見解に対する回答が得られる可能性がある。
- ② 試験開始直前からの計装データが得られるため、被覆管の最大伸びやリラクゼーション挙動、サーマルフィードバック現象等の確認が可能である。
- ③ 1回の出力上昇幅は従来のシングルステップ試験条件よりも小さいが、マルチステップ試験の4回分の上昇幅をとることができ、更に、出力上昇幅以外はマルチステップ試験とほぼ同じ試験条件で実施することから、信頼性の高いマルチステップ試験との比較が可能である。

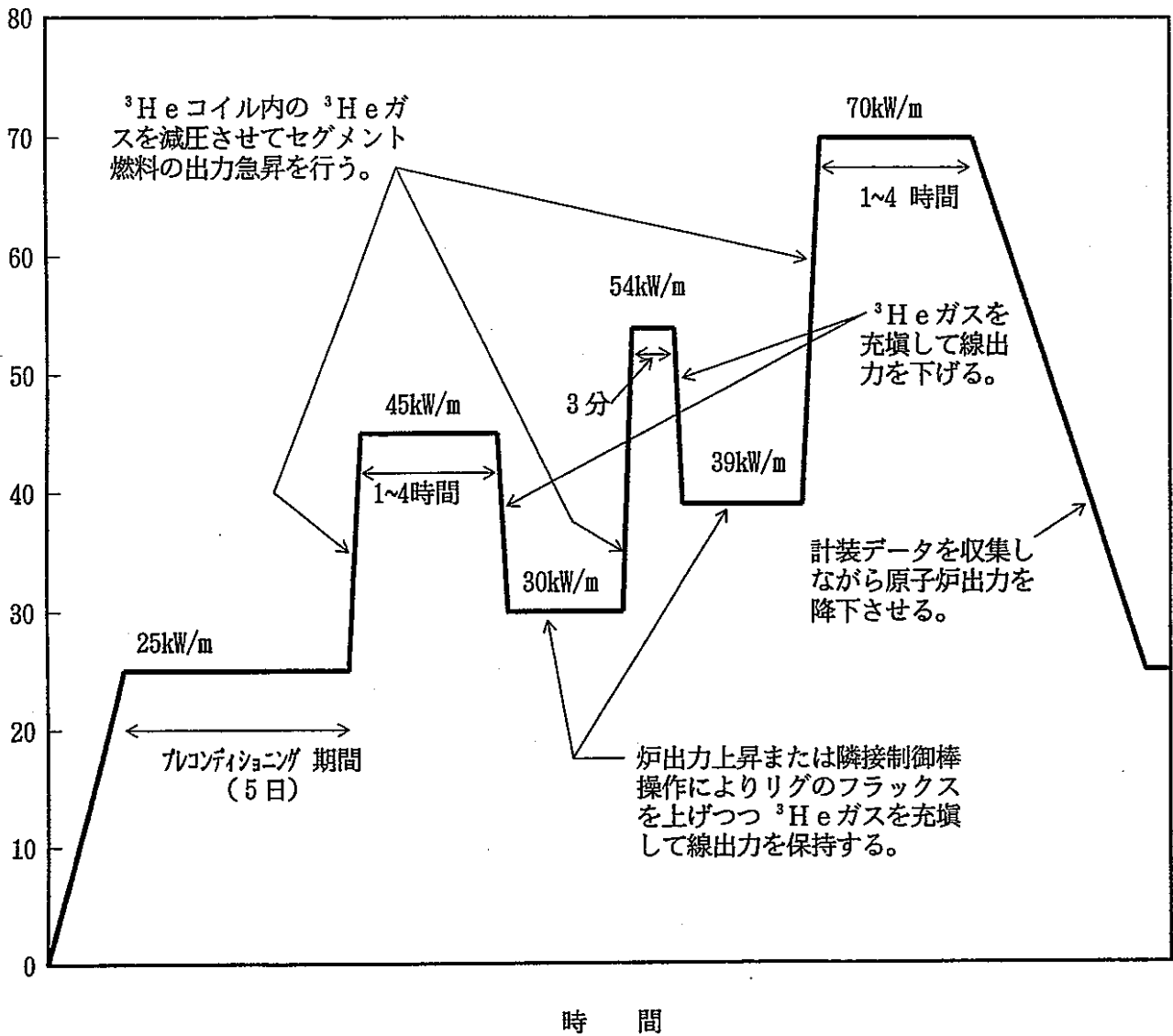


図 セグメント燃料の出力急昇試験モードの提案