

JAERI - M  
88-049

改良船用炉の試設計の評価 (2)

— 燃料特性(I); 丸棒燃料 —

1988年3月

安保 則明・中島 鐵雄・横村 武宣

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-  
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷株

改良船用炉の試設計の評価(2)  
— 燃料特性(I); 丸棒燃料 —

日本原子力研究所原子力船研究開発室  
安保則明 ・ 中島鐵雄<sup>+</sup> ・ 横村武宣

( 1988 年 2 月 16 日 受 理 )

改良船用炉の試設計研究で設計を実施した3炉型4炉心の内、丸棒燃料を評価するために、丸棒燃料の燃料特性について調査・検討するとともに、船用炉燃料としての要件である耐負荷変動性能を確認するために、耐PCI（ペレット-被覆管相互作用）性能解析による試設計3燃料棒の負荷変動時の挙動の評価を実施した。

Evaluation of the Trial Design Studies for  
an Advanced Marine Reactor (2)

— Fuel Specific Characteristics (I);  
Cylindrical Fuel Rod —

Noriaki AMBO, Tetsuo NAKAJIMA<sup>+</sup> and Takeyoshi YOKOMURA

Office of Nuclear Ship Research and Development  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Toranomom, Minato-ku, Tokyo

(Received February 16, 1988)

We researched and studied the fuel specific characteristics of a cylindrical fuel rod to evaluate the trial design fuels of three type reactors (four cores) of the Advanced Marine Reactor, and executed PCI (Pellet-Clad Interaction) analysis and evaluation of its analysis outputs to evaluate the behavior of three cylindrical trial design fuel rods in the rapid load change that was a requirement of a marine reactor fuel.

Keywords: Rod Type Fuel, PCI, Analysis, Marine Reactor, Design

---

<sup>+</sup> Department of Fuel Safety Research, Tokai Research Establishment

## 目 次

1. 序 言 .....	1
2. 概 要 .....	2
3. 改良船用炉試設計の炉心, 燃料 .....	3
3.1 炉心 .....	3
3.2 燃料 .....	3
4. 丸棒燃料の燃料特性 .....	12
4.1 丸棒燃料の基本設計基準 .....	12
4.2 耐負荷変動性能燃料 .....	12
4.3 高燃焼度燃料 .....	16
5. 耐 P C I 性能解析 .....	29
5.1 解析コード .....	29
5.2 解析条件 .....	31
5.3 解析結果 .....	33
5.4 評価基準 .....	33
5.5 FEMAXI-IIIの解析結果との比較 .....	34
6. 丸棒燃料の研究開発項目 .....	54
7. 結 言 .....	57

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Conception .....	2
3. Fuels of Trial Design of Advanced Marine Reactor .....	3
3.1 Core .....	3
3.2 Fuel .....	3
4. Fuel Specific Characteristics of Cylindrical Fuel Rod .....	12
4.1 Basic Design Criteria of Cylindrical Fuel Rod .....	12
4.2 Remedy Fuel .....	12
4.3 High Burn-up Fuel .....	16
5. Analysis of PCI (Pellet-Clad Interaction) .....	29
5.1 Analysis Codes .....	29
5.2 Analysis Condition .....	31
5.3 Analysis Result .....	33
5.4 Criteria for Evaluation .....	33
5.5 Comparison of FEMAXI-IV Result and FEMAXI-III Result .....	34
6. Research and Development Items .....	54
7. Conclusions .....	57

## 1. 序 言

原子力船研究開発室は、昭和58年から60年度にわたり、改良船用炉に関する試設計研究を実施した。これは小型・軽量で安全性、信頼性、経済性の優れた船用炉（改良船用炉）としての適性を有する炉型式を明らかにすることをねらいとし、現状技術に基づく複数の船用炉型式について、同一仕様のもとでの設計研究を行ない、それらの特徴、性能等を明らかにしたものである。

設計の対象とした炉型式は、半一体型（加圧水）炉、一体型（加圧水）炉及び自己加圧一体型（加圧水）炉の3炉型で、それぞれわが国固有の技術及びフランス、西ドイツとの提携技術を基盤技術としている。

昭和61年度には、試設計研究の成果を踏まえて、改良船用炉の研究開発を進めるに当たり、将来の船用炉として最も優れた炉型を選択し、合わせて必要な研究開発課題を明らかにすることを目的として、3つの試設計炉につき、以下の項目からなる比較、検討、評価を行なった。

- (1) 試設計炉
- (2) 燃料特性
  - (I) 丸棒燃料
  - ” (II) キャラメル燃料
- (3) 炉心特性
- (4) 蒸気発生器特性
- (5) 格納特性
- (6) 動特性
- (7) 遮蔽性能
  - (I) 遮蔽設計の妥当性
  - ” (II) 遮蔽の最適化に関する調査
- (8) 経済性

さらに、船用炉用途に関する調査を実施し、船用炉用途を踏まえた試設計の総合評価を実施し、用途に適合する炉型を明らかにするとともに次のステップで実施する設計研究等の目標性能、研究開発の進め方等を明らかにする。

本研究報告は、これら一連の設計評価研究のうち、燃料特性(1)丸棒燃料に関するものである。

本研究は、試設計3炉型式の燃料型式のうち丸棒燃料の燃料特性・性能などについて、検討および評価を実施したものである。

## 2. 概 要

本レポートは、改良船用炉試設計3炉型4炉心の燃料を評価するために、丸棒燃料の燃料特性について、特に船用炉燃料としての要件である耐負荷変動性能を確認するために耐PCI（ペレット-被覆管相互作用）性能解析による燃料棒の負荷変動時の燃料挙動の評価を実施し、比較、検討および評価を行った成果を報告するものである。

船用炉燃料特有の要求、要件として、上記の急激な負荷変動とともに船体動揺、振動に対する健全性の維持がある。

また、改良船用炉の炉心は、小型化および4年という長寿命化の要件により、高出力密度、高燃焼度の高性能炉心であり、このような炉心を成立させるためには、燃料設計においても、高性能燃料とする必要がある。この燃料の高性能化は、特に高燃焼度における急激な負荷変動に対する性能、すなわち耐PCI性能に優れた燃料とすることである。そのため、耐PCI性能を向上させる手段として、

- ・ 燃料棒径の細径化
- ・ ジルコニウムライナ付被覆管の採用

などがある。

そのため、細径燃料の製造性の検討やライナ付被覆管の効果の照射実験等による実証が必要である。しかしながら、実証実験などは未実施のものが多いため、ここでは解析コードによる耐PCI性能解析を試みたものである。また、高性能炉心を成立させるためには、余剰反応度の長期反応度制度が重要であるが、その反応度制御方式としては制御棒のみでは不十分であり、燃料 $UO_2$ 中に可燃性毒物（BP、材質ガドリニア）を混入させたBP入り燃料棒あるいは燃料中に混合せずにアルミナと混合させたガドリニアBP棒の採用（または併用）を必要とする。

この点に関しても、燃料集合体ベースでの検討として丸棒燃料の性能と重要な関連があるため、可燃性毒物の開発動向および長短所について検討した。

なお、高性能炉心を達成するためには、核設計との相互の関連を勘案して検討することが必要である。



### 3. 改良船用炉試設計の炉心、燃料

半一体型炉の評価炉心を含めた4炉心の燃料は、一体型炉が板状燃料（キャラメル燃料）を採用している他は、半一体型炉両炉心および自己加圧一体型炉ともに丸棒燃料としている。

#### 3.1 炉心

試設計3炉型4炉心（半一体型炉については試設計炉心と最適化設計を行った評価炉心の2炉心がある）の燃料を含めた炉心主要目を表3.1に、炉心構成を図3.1～図3.4に示す。

主要な炉心要目である炉心平均出力密度、炉心平均燃焼度および炉心寿命（燃料交換間隔）は、一体型炉炉心および半一体型炉の評価炉心が高性能であり、燃焼度は約30,000～32,000 MWD/tU、出力密度は約50～61 KW/ℓ、また、炉心寿命が4年である。なお、自己加圧一体型炉は、出力密度が55 KW/ℓと高いが、炉心寿命が3年と短く、燃焼度も19,000 MWD/tUという値である。

また、炉心構成で特徴的なのは、全炉心ともに反応度制御方式として制御棒の他に可燃性毒物を採用しており、その材質としてガドリニアを使用していることおよび型式として燃料UO<sub>2</sub>中にガドリニアを混入する型式だけでなく混入せずにアルミナとガドリニアを混焼した均質型ガドリニアBP棒とする型式を採用していることである。

ケミカルシムによる制御方式は自己加圧一体型炉が採用している。

#### 3.2 燃料

各炉心の燃料型式は、一体型炉が板状燃料であるがその他の半一体型炉両炉心および自己加圧一体型炉の3炉心とも丸棒燃料である。各炉心について、それぞれの燃料集合体内の燃料、制御棒および可燃性毒物の配置を図3.5～3.8に、燃料棒（板）および燃料集合体の構造を表3.2～3.3に示す。

丸棒の3燃料を比較すると、自己加圧一体型炉、半一体型（試設計）、同（評価炉心）の順で、細径燃料となっている。それに伴い燃料集合体巾も小さくなっている。

また、特筆すべきは、半一体型炉両炉心の燃料被覆管がジルコニウムライナー付であるということである。これはジルコニウムライナー付被覆管が耐PCI性能に優れており、急激な負荷変動のためPCI上厳しく高い耐PCI性能が要求される高性能船用炉炉心の燃料として採用したものである。ただし、ライナー効果については不明の点が多く実証もまだであるが、一般的に燃焼度の影響を除くと、以下の点が挙げられる。

- ① ジルカロイとFPガス（ヨウ素）との接触を遮断する。
- ② 柔い（ジルカロイの2分の1）のでクッションとなり、応力を緩和吸収する。

このライナ効果により、応力しきい値が大巾に高くなり倍以上にもなると言われている。これは実験結果があるが、高燃焼度における実証はなく、確かな性能は不明である。

従って、今回の評価では、ライナ効果についての過大評価は避けているが、ライナの効果は考慮する。

なお、自己加圧一体型炉の燃料は、ライナなしのジルカロイ-4製被覆管である。

表3.1 炉心主要目

半一体型炉 (試設計)	半一体型炉 (評価炉心)	一体型炉	自己加圧 一体型炉
炉心平均出力密度 33.8 kW/l	61.2 kW/l	50.4 kW/l	55 kW/l
炉心寿命 4年	4年	4年	3年
燃焼度(炉心平均) 18000 MWD/tU	32000 MWD/tU	30400 MWD/tU	19000 MWD/tU
燃焼度(局所最高) 44000 //	62000 //	55200 //	41000 //
燃料型式 丸棒燃料	丸棒燃料	板状(キャラメル) 燃料	丸棒燃料
燃料被覆材 ジルカロイ-4 (ライナ付)	ジルカロイ-4 (ライナ付)	ジルカロイ	ジルカロイ-4 (ライナなし)
燃料集合体数 37体	37体	32体	16体
制御棒型式 クラスタ型	クラスタ型	十字型	クラスタ型
制御棒材質 B <sub>4</sub> C	B <sub>4</sub> C(濃縮)	ハフニウム	B <sub>4</sub> C
制御棒本数 21本	21本	24本	16本
制御棒駆動装置基数 21基	21基	12基(2本を駆動)	16基
燃料濃縮度 第1領域 3.7wt% 第2領域 4.7wt%	第1領域 5.7wt% 第2領域 6.7wt%	第1領域 5.8wt% 第2領域 6.9wt%	第1領域 3.8wt% 第2領域 5.4wt%
制御方式 ①制御棒 ②可燃性毒物 ・材質ガドリニア ・燃料内混入タイプ	①制御棒 ②可燃性毒物 ・材質ガドリニア ・燃料内混入タイプ ・GdBP棒	①制御棒 ②可燃性毒物 ・材質ガドリニア ・GdBP棒	①制御棒 ②可燃性毒物 ・材質ガドリニア ・GdBP棒 ③ケミカルシム (冷却材中ボロン)
炉心等価直径 158 cm	131 cm	132.9 cm	136 cm
炉心有効高さ 150 cm	121 cm	143.2 cm	125 cm
熱流束熱水路係数 3.36	3.96	4.39	2.1
平均線出力密度 6.1 kW/m	7.1 kW/m	---	13.4 kW/m
最大線出力密度 20.5 kW/m	28.1 kW/m (PCI解析上は 34 kW/m)	---	40.2 kW/m

表 3.2 改良船用炉試設計 4 炉心の燃料構造

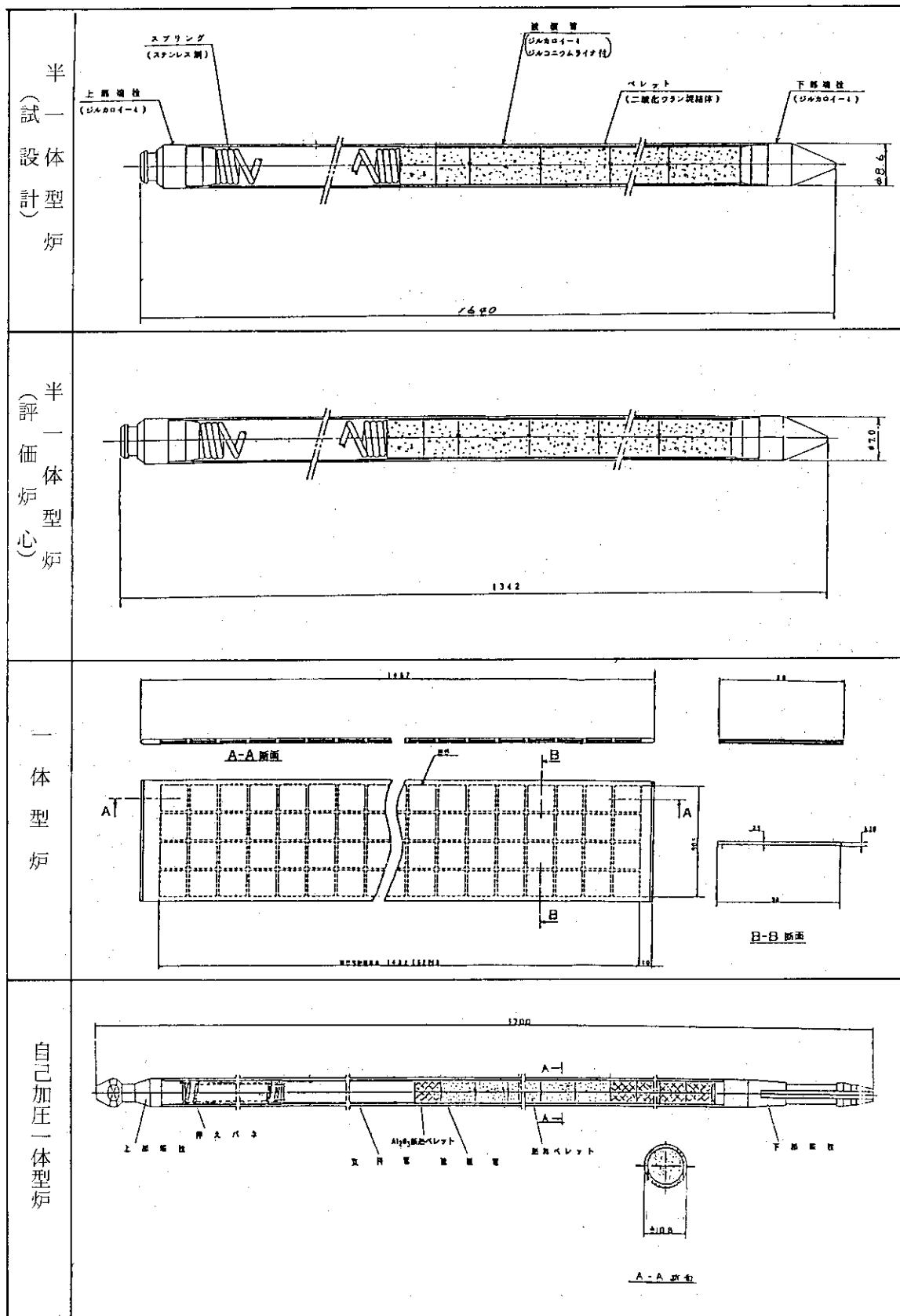
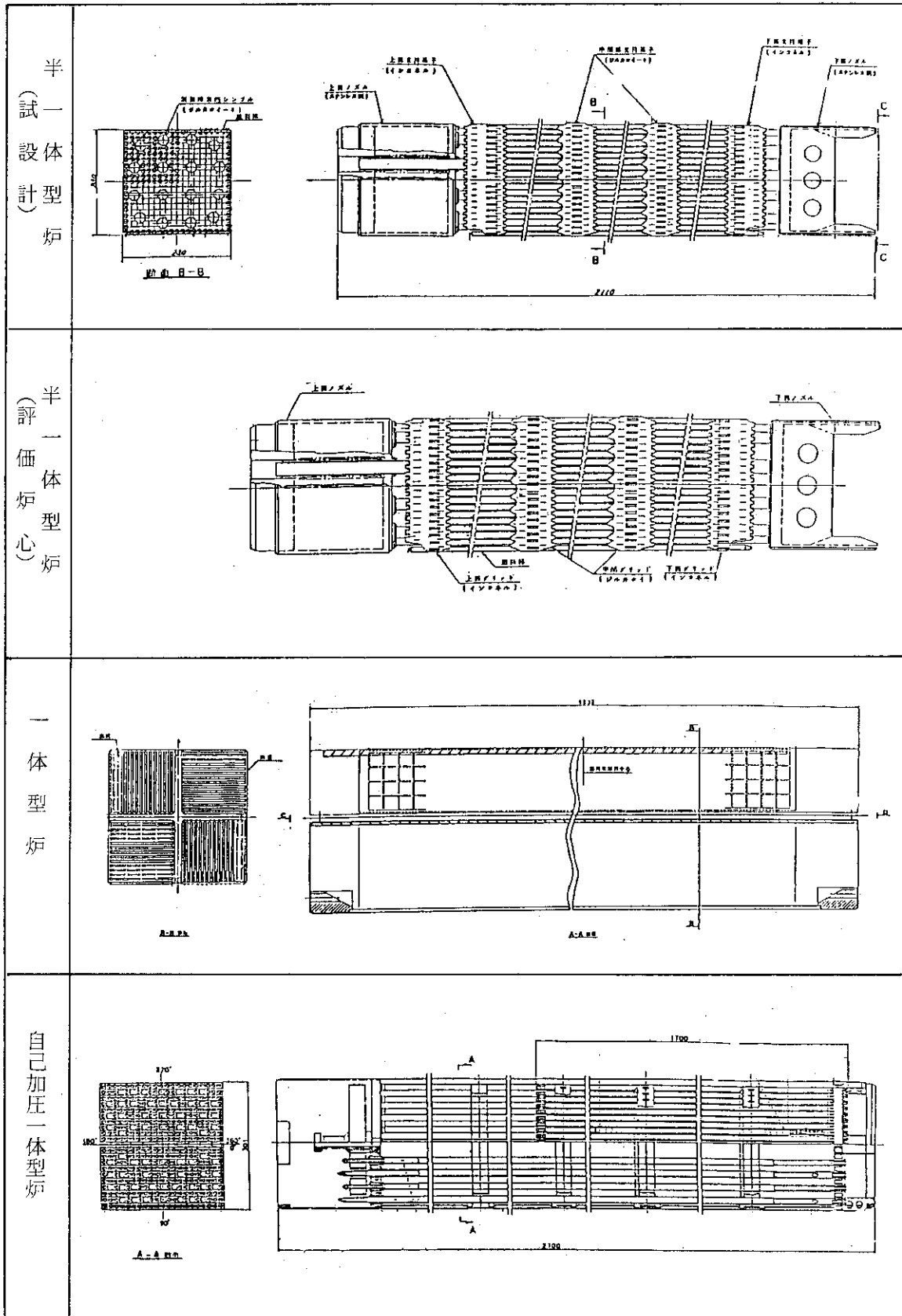


表 3.3 改良船用炉試設計 4 炉心の燃料集合体構造



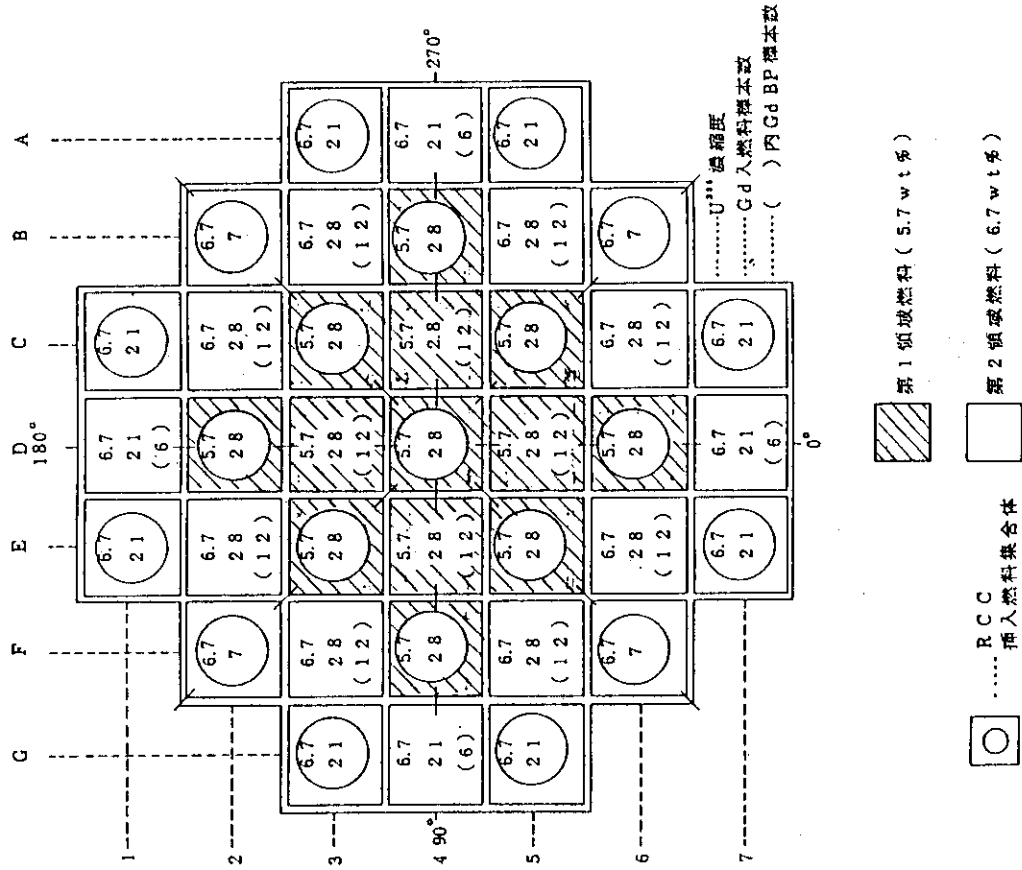


図 3.2 半一体型炉 (評価炉心) の炉心構成

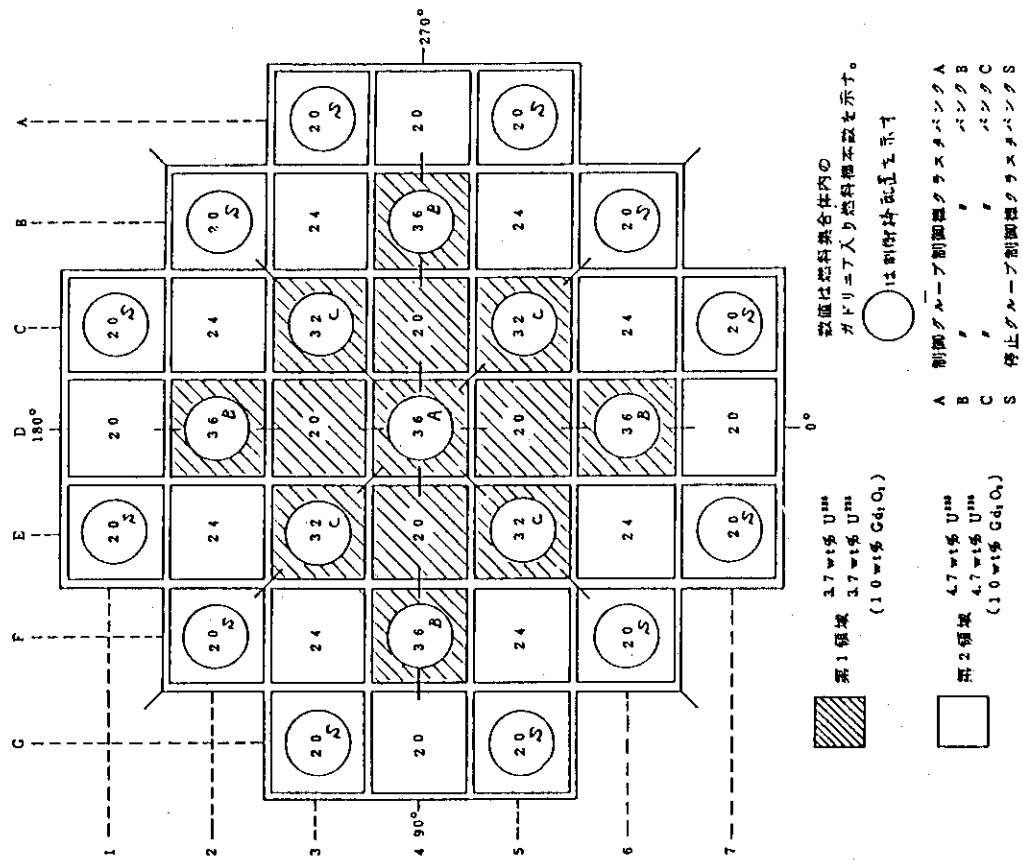


図 3.1 半一体型炉 (試設計) の炉心構成

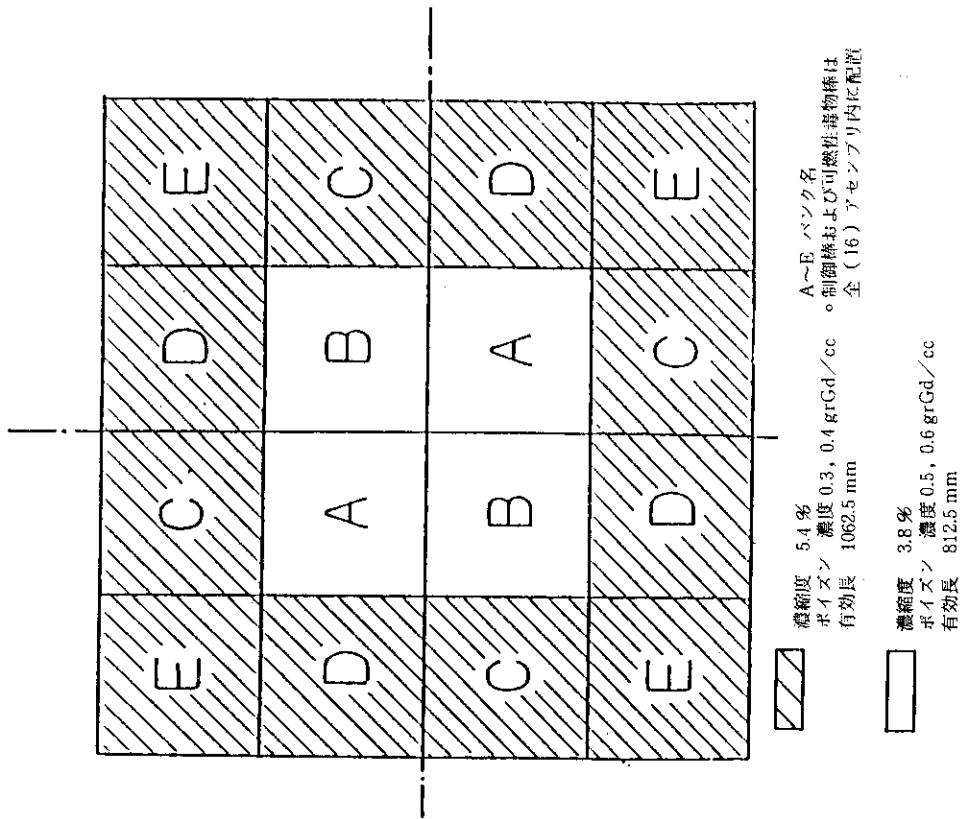


図 3.4 自己加圧一体型炉の炉心構成

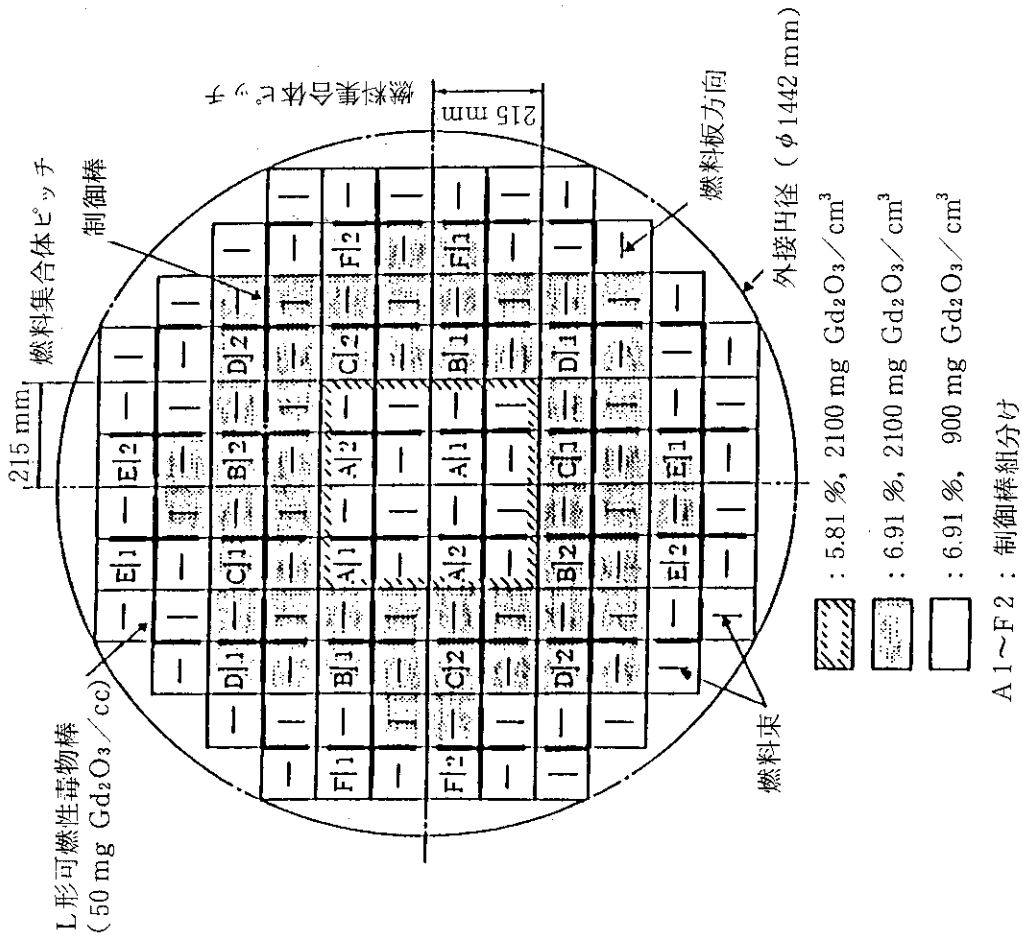


図 3.3 一体型炉の炉心構成

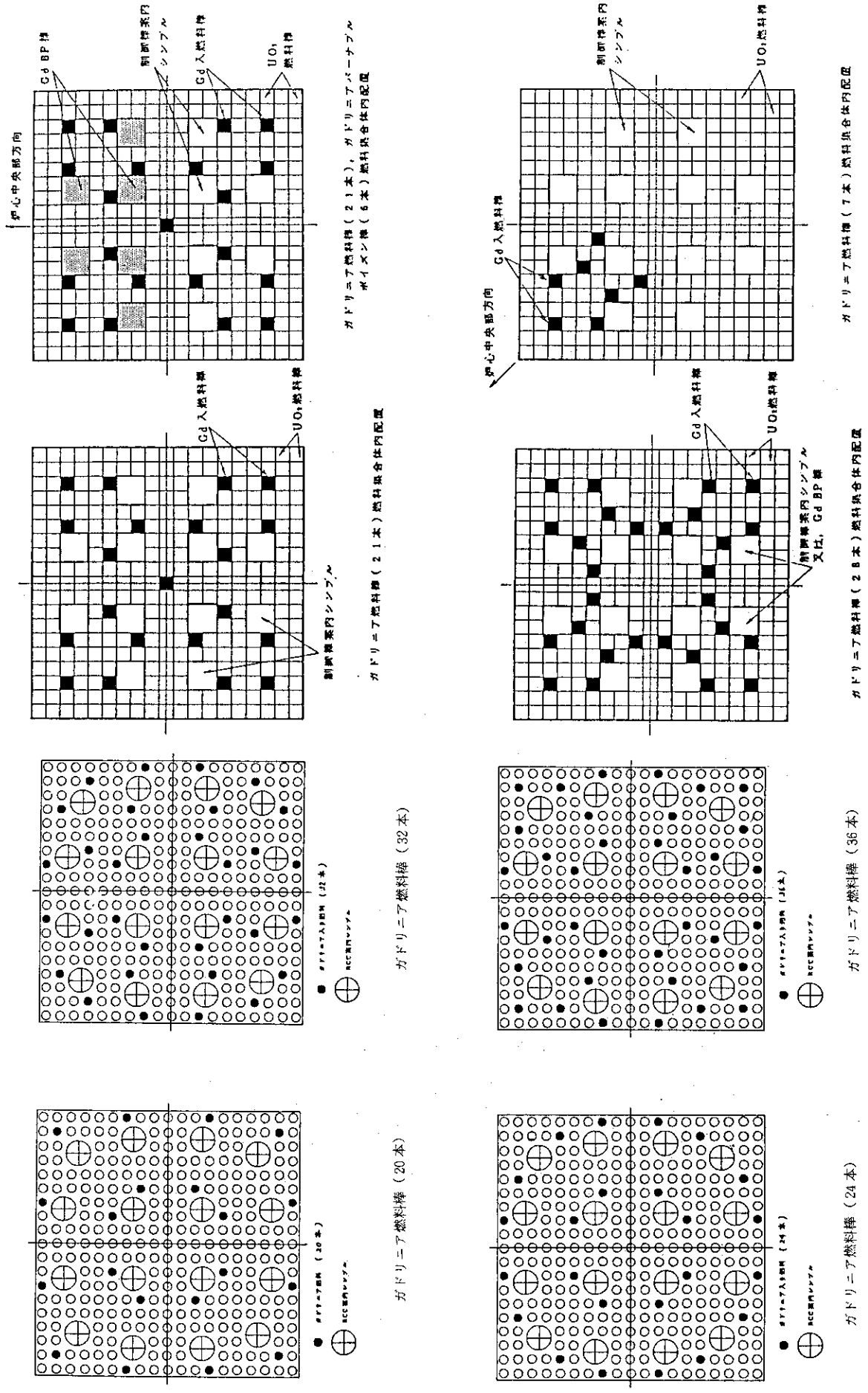
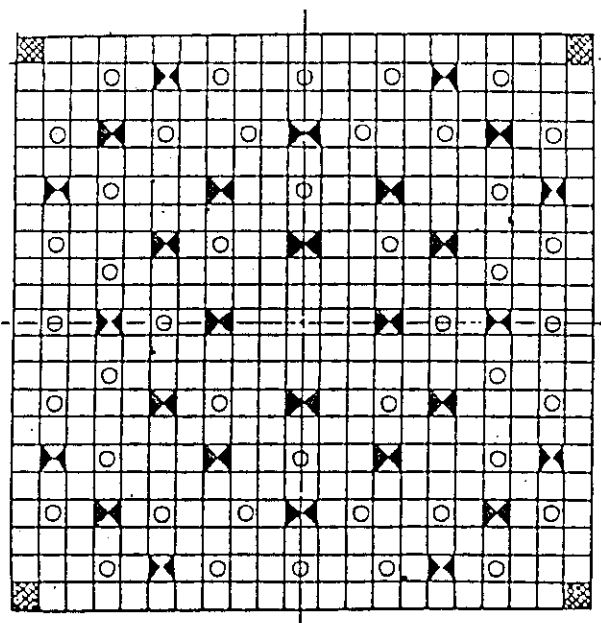


図 3.5 半一体型炉 (試設計) の燃料集合体内配置

図 3.6 半一体型炉 (評価炉心) の燃料集合体内配置





記号	名	材	質	数	位置
○	燃料	UO <sub>2</sub>		385	
△	燃料	B <sub>1</sub> C		44	
×	燃料	0.01 O <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		28	
■	燃料	ZrO <sub>2</sub>		4	

図 3.8 自己加圧一体型炉の燃料集合体内配置

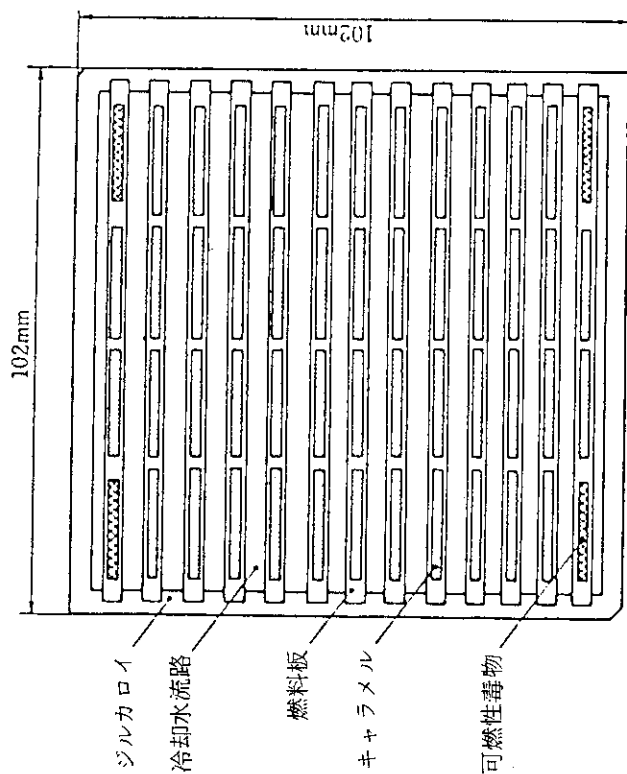


図 3.7 一体型炉の燃料束断面図

## 4. 丸棒燃料の燃料特性

### 4.1 丸棒燃料の基本設計基準

船用炉用丸棒燃料の基本的な設計基準は、以下に示すように発電用 PWR 燃料と同一であり、これらにより PWR において、燃料の機械的健全性を確保すると共に炉心の安全性への寄与を果たすことができる。

- 1) 燃料中心最高温度は、二酸化ウランの溶融点未満となるように設計する。なお、二酸化ウランの溶融点は未照射燃料に対しては約 2,800℃である。
- 2) 燃料棒内圧は、被覆管にかかる引張応力を抑え、拡管方向への過渡の歪を防止するため 1 次冷却材定格運転圧力以下となるように設計する。
- 3) 被覆管応力はジルカロイ-4 の耐力以下となるように設計する。
- 4) 被覆管に生じる円周方向引張歪の変化量は、各過渡変化に対して 1%以下となるように設計する。
- 5) 累積疲労サイクルは設計疲労寿命以下となるように設計する。

上記設計基準は、今回の改良船用炉試設計の半一体型炉燃料の基準であるが、一般的な丸棒燃料の基本設計基準であると考えられる。本設計基準をもとに、丸棒燃料は、所定の機能を果たすために、使用構成材料、炉内運転条件（使用温度、圧力、熱出力、照射効果）を考慮して、燃料温度、核分裂生成ガスの放出による内部ガス圧、被覆管の応力、歪を十分に抑制することにより、その健全性を確保する。

このため燃料の使用寿命を通して負荷変動等を含む通常出力運転時に於いて、下記の方針が満足される様に、燃料棒の設計を行なう。設計・検討にあたっては、原子炉運転中に燃料棒に生じる物理・化学的現象である燃料ペレットの温度、熱膨張、スエリング及び焼きしまり、核分裂生成ガスの生成と燃料棒内部自由空間への放出、被覆管の熱膨張、クリープ、照射成長及び弾性変形—いわゆる燃料棒ふるまい—を考慮する。

### 4.2 耐負荷変動燃料（改良燃料）

#### (1) 技術の現状

##### 1) 出力急昇時の燃料破損

HBWR（ノルウェー）において、1965～66年にスウェーデンの試験燃料 IFA-21 が約 10,000 MWd/t で破損した。燃料棒表面には、多数の長手方向クラックが見られ、ペレット-ペレットの接合面部の被覆管表面に、内面からのクラックの先端部分がくびれたことにより形成した X マークを観察した。そこで、IFA-21 の破損の再現性を確認するため、Studsvik R-2 炉（スウェーデン）において、燃料棒の出力サイクル試験および低出力で 5,000～20,000 MWd/t 照射した燃料棒の出力急昇試験を実施したところ、IFA-21 と同様な破損が観察さ

れた。これによって、IFA-21の破損は近接した制御棒の操作によって燃料棒出力が局所的に急激に上昇したことによるものと考えられた。

その後もDresden 1号炉(米国)で1970～71年ごろ被覆管の長手方向の割れを伴う破損が観察され、 $UO_2$ ペレットの熱膨張によって被覆管に局所的な応力と歪が付加され破損に至ったと考えられた。

これらの燃料破損は被覆管の内面より発生したクラックによって脆性的に破壊に至った特徴が見られ、単にペレットと被覆管の機械的相互作用(PCMI; Pellet-Clad Mechanical Interaction)のみでなく、腐食性核分裂生成ガスが破損に何らかの作用を与えていると推察された。

そこで、炉外試験において、よう素等の腐食性ガス雰囲気下で、被覆管に引張応力を加え、機械的作用にさらに化学的作用を加味した条件下での被覆管の破損形態、いわゆる応力腐蝕割れ(SCC; Stress Corrosion Cracking)を調べる研究が数多く実施された。この結果、被覆管が機械的に破損する応力レベル以下の負荷でも、被覆管は脆性的に破壊し、以下のような破損の特徴が認められた。

#### ① 破断部のクラック状態

炉外試験で被覆管に形成したクラックを観察すると、クラック開始部および伝播部の近傍には塑性変形が見られず脆性的な破壊である。

#### ② クラック破面

機械的破断で見られる延性破面はディンプル(小さなえくぼ、あるいは水面にできるさざなみの意味)と呼ばれる破面であるが、腐食性ガス雰囲気(よう素ガス)下での破面は粒内脆性破面の特徴であるへき開面やフルーティング(縦みぞ、あるいはひだの意味)が観察される。

一方、炉内において破損した燃料被覆管ではクラック形成状態およびクラック破面は、先に示した炉外試験結果と類似しており、出力急昇時の燃料破損がSCCに起因するものであると考えられる根拠となっている。

### 2) PCI破損の研究の現状

現在世界各国でPCI破損(PCI; Pellet-Clad Interaction)の研究が行なわれている。従来からPWR燃料設計においては高ヘリウム加圧燃料棒を採用し、使用期間中ペレットと被覆管の力学的な相互作用(PCMI)をできるだけ軽減するようにしている。一方、設計上はこのようなPCMIによる過大な応力および歪によって燃料破損に至ることを防止するために通常運転時および運転中の異常な過渡変化時においてつぎのような設計基準を設けている。

① 被覆管応力はジルカロイ-4の耐力以下であること。

② 被覆管に生じる円周方向引張り歪の変化量は各過渡変化に対して1%以下であること。

しかしながら最近の実炉あるいは試験炉でのデータによると上記①、②で予測されるよりも低い線出力上昇で被覆管が破損しその破面は応力腐蝕割れの様相を呈している例が報告されている。このような燃料破損に端を発して種々の試験研究がなされているが、大半が燃料製造メーカーおよび研究機関等による国際プロジェクトとして進められている。またこのような国際プロジェクトの他に、国内の独自の計画も進められている。

参考までに軽水炉用高性能燃料の開発に関する国内外の各プロジェクト（ただし、国内はPWRのみ）を表4.1に、また負荷追従運転時の局所線出力急昇の変化による実験例を図4.1に示す。

このように現在世界各国で種々の試験研究がなされ、これらの結果をもとにPCI破損機構の解明およびPCI破損しきい値の検討がなされた結果、現在までに得られている知見では完全にPCI破損の機構、しきい値を明確化するには至っていないが、概略つぎのように考えられている。すなわち、PCI破損は核分裂生成ガス（F.P；Fission Product）等の腐食性雰囲気条件下でおこるジルカロイの応力腐食割れと考えられている。

このような観点に立って前述のような出力急昇試験結果を整理すると、PCI破損しきい値は到達線出力レベル（Pmax）と出力変化幅（ $\Delta P$ ）によってある程度表わされ、これらが同時にあるしきい値をこえるとPCI破損がおこると考えられている。これらのパラメータのうちPmaxはペレットの温度に直接関連する因子であり、このためPCI破損条件のうちの腐食性雰囲気条件の成立に関連するパラメータと考えられている。一方 $\Delta P$ は被覆管の応力レベルに直接関連するパラメータである。

たとえば図4.2～4.3はインターランプテストの一例と結果を整理したものであるが、この内図4.3(a)は到達線出力レベルと燃焼度の相関を見たものである。ここで黒ぬりは破損を示し、部分的に黒ぬりになっているのは照射後試験（PIE；Post Irradiation Examinations）によって未貫通クラックが発見されたものである。図4.3(a)から判るように破損は42 Kw/m以上でおきている。またベース照射中の出力レベル（高出力グループおよび低出力グループ）の差によっても破損しきい値が分かれている。

一方図4.3(b)は出力変化幅（ $\Delta P$ ）をベース照射最終低出力レベルを基準にして求め、燃焼度との相関を見たものであり、この場合には高出力グループおよび低出力グループで差はない。

また、図4.3(c)は $\Delta P$ と破損検出時間（最終出力レベル到達後破損検出までの時間）の相関を見たものでこの場合には $\Delta P$ はベース照射中の第1回高出力期間中の平均出力レベルを基準に算出されたものであるが非常に良い相関が得られている。この図4.3(c)の $\Delta P$ の定義に従うと $\Delta P$ のしきい値は8 Kw/mになっている。

このようなデータを始めとして、いままでに得られている公開データを基に上記のPmaxおよび $\Delta P$ のしきい値を求めると燃焼がある程度進んだ時点（約20,000 MWd/t以上）で

Pmax	約 40 Kw/m
$\Delta P$	約 7 Kw/m

というPCI破損しきい値が示される。さらにこのようなPCI破損しきい値を基に実機PWR炉心でのPCI破損評価が現在進められているが、いままでに得られた結果では陸上発電用の実機PWR炉心においては通常運転時および運転時の異常な過渡変化時においてもPCI破損はおこらないであろうという見通しである。

## (2) 改良燃料の開発

前述のごとく、陸上発電用PWRでは現行設計燃料でも特にPCI破損が問題になることはないとの見通しを得ているが、一方ではさらに柔軟な運転に対応できるような改良燃料の開発も始められている。

現在までに改良燃料の候補として挙げられているものには

- 1) Zrライナー被覆管
- 2) グラファイトコーティング被覆管
- 3) 中空ペレット(アニューラーペレット)

がある。これらのうち、中空ペレットについてはその効果を直接示すような公表データは非常に限られているため、以下には1)、2)のZrライナー被覆管およびグラファイトコーティング被覆管について公表されている結果を紹介し、3)中空ペレットについては開発の考え方のみをここに述べることにする。なお上記のうちZrライナーおよび中空ペレットの実証試験の一部は(財)原子力工学試験センターからの委託によって三菱重工が実施しており、その概略スケジュールを表4.2に示す。

#### 1) Zrライナー被覆管

GEを含めたBWRグループで研究が進んでいる。GEは当初改良燃料の候補としてZrライナー被覆管とCuバリアー被覆管について炉外・炉内試験をスタートさせたが、炉内試験の進捗に伴ないCuバリアー被覆管は改良の効果が燃焼とともになくなる事が判明し、現在ではZrライナー被覆管の開発を進めている。StudsvikのR-2炉等でのランプテスト結果を図4.4に示す。

図には、標準燃料、Zrライナー燃料およびCuバリアー燃料の結果が示されている。Cuバリアーは燃焼が進むにつれてバリアーとジルカロイの境界部にCu-Zr反応層が形成されることにより改良の効果がなくなっている。一方Zrライナーについては未だ燃焼度は20,000 MWd/t程度であるが、標準(ジルカロイ被覆管)燃料に比べると良い結果が得られている。

#### 2) グラファイトコーティング被覆管

グラファイトコーティング被覆管についてはカナダでかなりの実績が得られている。図4.5はグラファイトコーティング燃料のランプテスト結果をPmaxと $\Delta P$ の傾向別に整理したものであるが、グラファイトコーティングしていない燃料の破損しきい値(図中破線で示されている)に比べ、かなり良い結果が得られている。

#### 3) 中空ペレット燃料

中空ペレット燃料はペレット中心部に設けた中空孔によって、燃料温度を低下し、核分裂生成ガスの放出を抑制し、ひいては被覆管のSCC破損を防止することを目的としたものである。

そこで、中空ペレット燃料の開発にあたっては、つぎのような手順が必要である。

##### ① 中空ペレット試作

中空孔径が異なる数種のペレットを試作し、寸法・形状、密度、組織、再焼結特性等、ペレットとしての一般的仕様を確認する。

##### ② 中空ペレット炉外試験(ペレットチップ/割れ挙動評価試験)

燃料ペレットは照射中に熱的および組織変化に伴ないクラックを形成する。中空ペレットではクラックによって、細分化したペレット破片がペレット中空部へ落下、移動し初期のペレット形状を維持できなくなるおそれがある。

そこで、①で試作した中空孔径が異なる数種のペレットを用いて短尺模擬燃料棒を製作

し、あらかじめ中空ペレットに熱的にクラックを形成させた後、燃料使用中および取扱い中を模擬した条件で振動試験を実施する。中空孔径と振動条件下でのペレットふるまいとの関連を評価し、寸法、形状等の決定に役立つ。

- ③ 中空ペレット燃料の照射および出力急昇試験を順に実施し、その性能を耐PCI性能改良の観点から評価する。

### 4.3 高燃焼度燃料

#### (1) 技術の現状

ウラン資源の有効利用あるいはプラント稼働率の向上のための長サイクル運転の採用という目的のために燃料の高燃焼化が提唱されており、各国でこの分野の研究開発が進められている。以下わが国（三菱・WH燃料）の照射実績および各国で進められている研究の動向などについて述べる。

##### 1) 三菱・WH燃料の照射実績

昭和56年までに我国のPWR発電プラントに使用されたPWR燃料は約2,400体にもなり、これらの燃料の達成燃焼度を表4.3にまとめた。表4.3に示すように伊方1号炉で最高燃焼度36,500 MWd/t（集合体平均）が達成されている。一方、海外においては、15×15燃料がZionで46,500 MWd/t（集合体平均）、又17×17燃料はSurry 2で42,700 MWd/t（集合体平均）を達成しているのを筆頭に230体以上の燃料が36,000 MWd/t以上の燃焼度を達成している。

以上は商業炉における照射実績であるが、スペインのZorita炉あるいはベルギーのMOL（BR-3）等での試験燃料の照射試験では最高74,000 MWd/t（ペレットピーク、BR-3計画）の燃焼度が達成されている。

##### 2) 高燃焼度下における燃料挙動

現在のPWR燃料の領域平均取出燃焼度は30,000～33,000 MWd/t程度になっている。今後予想される高燃焼化に伴い、燃料の健全性の観点から確認を要する項目としては次のようなものがあげられる。

##### (i) 燃料集合体

- ・ 寸法変化（伸び）
- ・ 燃料棒曲り
- ・ 支持格子ばね力の緩和

##### (ii) 燃料棒

- ・ 寸法変化（伸び）
- ・ F、P 放出
- ・ 被覆管外面腐食
- ・ PCI
- ・ 被覆管の機械的特性の変化

一方、現在でもある程度の燃焼度レベルまでの照射実績が得られており、上記の項目のう

ち、さらにデータの収集・評価が必要と考えられているのは、一般に①燃料被覆管の外面腐食と、②F、P放出と考えられている。

ただこれらの要因にしても、目標とする燃焼度レベルにもよるが、燃料の寿命を即座に制限するようなものは考えられていない。上記の確認項目の一つであるPCIについては、他の要因に比べややデータ不足の状態にあるが、現在進められている国際プロジェクトによって、今後ある程度データが得られる予定である。

以下に被覆管の外面腐食およびF、P放出について現在までに得られている知見を示す。

#### ① 被覆管外面腐食

図4.6はWHの腐食データである。燃料棒の燃焼度で約60,000 MWd/t程度までのデータが得られている。図ではクラッド(crad)の付着状況によって腐食量がかなり違うことが示されているが、一般的なクラッド厚さ(約8  $\mu\text{m}$ 以下)の状態では、燃焼が進んでも酸化膜厚は高々20  $\mu\text{m}$ (ジルカロイの反応厚にして約12  $\mu\text{m}$ )程度で問題になるようなものではない。一方、クラッドの付着が多い場合には腐食が加速されている。

このような厚いクラッド付着による腐食に対しては、冷却材中のLiおよびBの濃度を図4.7に示すような範囲でコントロールすることによって、クラッドの付着を少なくする、すなわち被覆管の腐食を抑制することができると考えている。

図4.6にTrojanでのデータが示されているが、クラッドが厚いケースのデータ(図中×印)はLi/Bが図4.7の斜線の範囲よりも下側になっていたものである。

このようなクラッド付着に関する試験は、Trojanの他にBeaver Valley 1号機でも行なわれている。

一方、図4.8はKWUのPWRにおける腐食データを示したものである。KWUによるとPWRにおいては炉外の腐食データに非常に近いが若干の照射効果があると述べている。KWUは燃料設計項目のうち、唯一被覆管の腐食が燃料寿命を制限する要因になり得るとの考えであるが、この腐食についてもたとえば、燃料の装荷パターンを従来の炉心外周部から徐々に中央に移すやり方のかわりに、最初、炉心の中央部に入れその後炉心外周に移すことによって、腐食量を軽減することができると考えている。これは酸化膜が厚くなるにつれ、酸化膜での温度上昇が高くなり、ジルカロイ部分での酸化速度を支配するため、酸化膜が薄い時に温度が高い(出力が高い)条件で使用するという考えである。

一方、図4.9および4.10は参考迄にBWRでの例を示したものであるが、PWRに比べかなり酸化膜が厚くなっている。

#### ② F、P 放出

F、P放出については、現在においてもデータの収集が引続き進められており、これらを基に今後F、P放出モデルの見直しが積極的に進められて行くものと考えられる。以下にWHおよびKWUデータをもとに高燃焼度下におけるF、P放出挙動について述べる。

図4.11はZorita試験燃料棒のF、P放出データを示すものである。また図4.12はZorita燃料の出力履歴の概略を示している。Zorita燃料は一般の商業炉での条件に比べると比較的高い出力で照射されたものであるが、図4.11からF、P放出は出力履歴に大きく依存していると考えられている。図4.11中の高出力燃料のデータのうち30,000 MWd

／t あたりのデータは1サイクル照射燃料で、また 35,000 ～ 40,000 MWd／t のデータは、2サイクル照射燃料のものである。約 50,000 MWd／t 以上のデータは3サイクル高出力で照射されたものである。

一方、現在進められている Zion（注2）の高燃焼度燃料は Zorita 燃料に比べて低い出力で照射されているもので、Zion 燃料のデータは Zorita 燃料のデータを補なう事ができ、出力履歴（ペレット温度）の効果をより明確にすることができると期待されている。

一方、図 4.13 は KWU PWR 燃料のデータである。これらは加圧型 PWR 燃料のデータをまとめたもので、照射中の出力履歴によって分けられている。KWU も照射中のペレット温度が F、P 放出に大きな影響を持っていると考えており、この限りにおいてはほぼ WH と同じ考えである。しかし、KWU のデータによると図 4.13 に示すように、比較的中程度の出力で照射された燃料で F、P 放出が高くなっている。一方、寿命の初期に短期間でも非常に高い出力で照射されたものは、その後も高い出力で照射しても F、P 放出はそれほど高くなっていない。これについて KWU は F、P 放出のメカニズムに関連するとの観点から、ペレット組織の変化、すなわち  $UO_2$  の粒成長および開気孔の減少が関係していると考えている。

以上 F、P 放出について概略述べたが、現朝までの知見では燃焼度レベルそのものよりも燃料照射期間中の出力履歴（ペレット温度履歴）と F、P 放出をより定量的に結びつけようという動向にあり、現在進められている各種の照射試験データの取得が望まれる。

以上高燃焼度下における燃料挙動について、特に被覆管の外面腐食および F、P 放出挙動の観点から技術の現状等について述べたが、参考までに許認可という観点から米国 NRC の考えを以下にまとめて示す。

- (イ) 現行の規制方針について、高燃焼度燃料という観点からレビューしたが、特に新たな規制要因を考える必要はない。
- (ロ) NRC としても過去にメーカーと数回の打合せをもったが、現在までに得られている知見は、相当なものであり、領域平均で 40,000 MWd／t 程度であれば十分許認可出来よう。

### 3) 高燃焼度燃料実証計画

- ① 表 4.4 および表 4.5 は三菱および WH の高燃焼度燃料の実証計画に関するものである。

燃料挙動の観点からは燃料集合体各部寸法の変化、燃料棒としては、核分裂生成ガスの蓄積および燃料被覆管の外面腐食等が要検討課題として考えられている。

三菱の計画は後述する WH 計画からのデータ収集に加えて、バッチルを中心にして進められている高燃焼度計画（HBEP 計画；High Burn up Effects Program）や前節、耐負荷変動燃料の項で述べた TRIBULATION 計画および三菱製燃料の照射後試験（PWR 燃料信頼性実証試験および高燃焼度燃料の照射後試験）などのデータを解析評価することによって、高燃焼度下での燃料の健全性を確認するものである。なお、表 4.6 は PWR 用 15 × 15 型燃料集合体の信頼性実証試験計画の概略スケジュールを示すものであるが、この計画は製造時および全照射期間を通じて詳細なフォローアップが

（注2）炉心平均線出力は 6.7 Kw／ft であるが、一般の商業炉に比べるとやや高い。



なされているものであり、高燃焼度燃料の健全性確認にあたっての基礎データとして十分活用できるものが得られる予定である。

- ② 一方WHの計画は主に DOE や EPRI からの援助に基づいて進められている。15×15 燃料の Zion における照射試験は当初 Commonwealth Edisonとの共同研究としてスタートしたものであるが、その後 EPRI との共同研究として照射が進められている。

燃料はリムバブルタイプのものが用いられており、サイトで各種の非破壊試験が行なわれている。なおこれらの Zion の燃料については、ESEERCO ( Empire State Electric Energy Research Cooperation ) からの援助によって、破壊試験を含めた照射後試験が計画されている。

一方 17 × 17 燃料については、Trojan および Surry における照射試験が EPRI 等からの援助によって進められている。Surry のデモンストレーション燃料のうちの 1 体は最終的には 4 サイクル照射され、1981 年 11 月炉から取り出され、サイトにおける非破壊試験に供されている。取り出し時に 42,000 MWd / t を達成したこの燃料については、何本かの高燃焼度燃料棒について、ホットセルで PIE を実施するよう計画されている。以上商業炉での実証試験計画について述べたが、これらの他に試験燃料の照射試験計画も豊富であり、Saxton, Zorita および BR-3 の計画がある。

- ③ なお以下にバッチルを中心に現在計画が進められている高燃焼度計画の概要を示す。

計画は高燃焼度下における F、P ガス放出をより詳細に、また定量的に調べるもので、各国から 24 の機関が参加し、日本からは電中研、原研、三菱等が参加している。

照射試験は大きく分けて商業炉で照射した燃料での試験 ( Task 2 ) と BR-3 での照射試験 ( Task 3 ) に分けられる。

Task 2 ではさらに 3 つのサブプログラムに分かれている。Task 2A および 2B は同種の試験で商業炉で照射された燃料の照射後試験を行なうものである。一方、Task 2C は、商業炉で照射された燃料を比較的ゆるやかな出力急昇試験に供し、F、P 放出挙動を調べる。一方、Task 3 は試験燃料棒を BR-3 で照射するものである。このテストでは予備を含めて計 40 本の試験燃料が準備され、少なくとも 36 本の照射試験を実施するよう計画されている。BR-3 での照射は出力履歴で特徴付けられている。

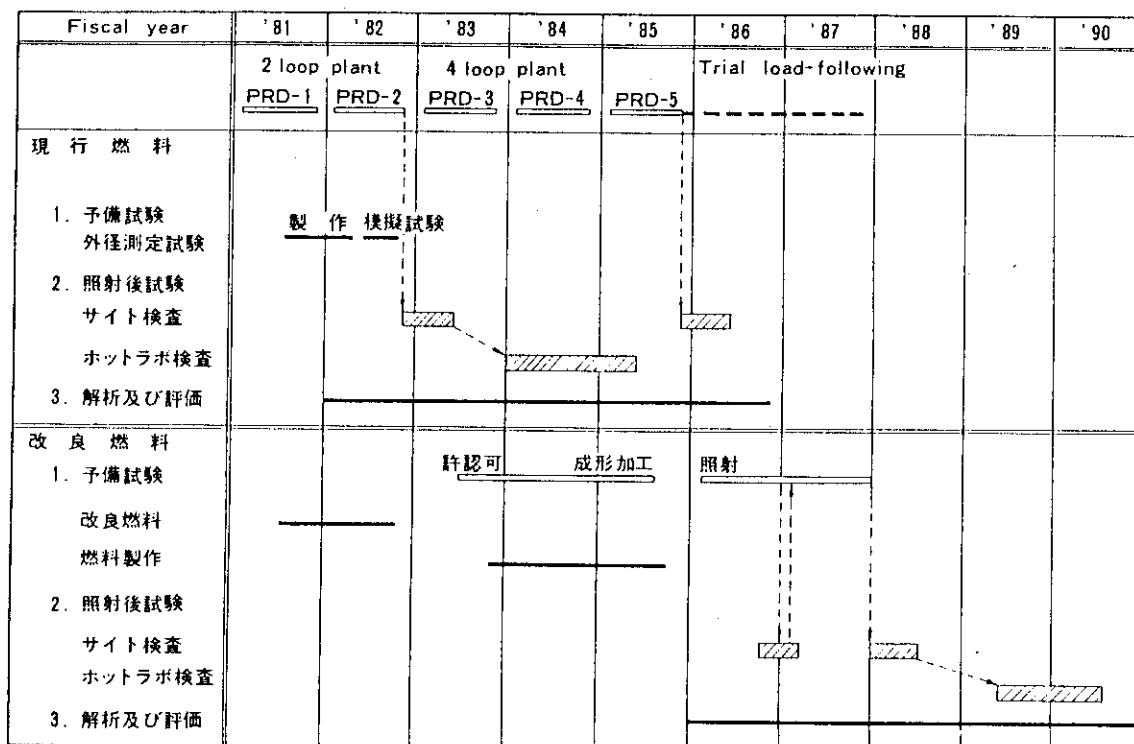
現在までに Task 2A の F、P ガス測定は完了し、Task 2B、2C は部分的に完了し BR-3 での照射 ( サイクル 4C ) を開始している。サイクル 4C は 1982 年 9 月に終了し、その後サイクル 4D での照射が継続される予定である。

表 4.1 海外及びわが国の燃料出力急昇試験

項目 プロジェクト名	試 験 内 容							
	BWR PWR の名	参加機関 メーカー名	供試燃料 メーカー	実 験 炉	試験項目	試 験 仕 様	試験期間他	
海外 (国際) プロジェクト	インターランプ	BWR	ASEA-ATOM, EPRI, JAERI, KWU等 13機関	ASEA- ATOM 被ふく管は Sandvik(米)	STUDSVIK R-2炉	ベース照射/ R-BOCA ランプ照射	ベース照射中の出力コ ントロールはBOCAの 位置替え, ランプ照射は He-3 の コントロールによる。 ランプ負荷 ~ 4 kW/m・min	完了
	オーバーランプ	PWR	WH, KWU JAERI, EPRI等を含む 12メーカー・ 機関	KWU/CE wh	①KWO炉 (Obrigheim炉) BR-3炉 ②STUDS- VIK R-2炉	ベース照射 ↓ ランプ照射 ↓	ランプ負荷 100W/cm・min ランプ到達レベル保持 時間は24H又は破損 検出まで	完了 (1977- 1981)
	スーパーランプ		高燃焼度燃料のランプテスト		未だ公表されていない			
	デモランプ	PWR	ランプテスト(主に保持時間の結果で調べる)未だ公表されていない					
	TRIBU- LATION	PWR	EPRI, DOE, FRAGEMA, BBR, 日本PWR5電 力, 三菱, 他	ベルゴニュー クリア, WH, FRAGEMA, BBR,	BR-3炉  BR-2炉	ベース照射  ランプ照射	17×17燃料48本 燃焼度20-40GWd/t 達成後, ランプテスト ヘシフト ランプテストはHeス クリーンで出力コント ロール ランプ負荷5-10/SEC	実施中
(*)国内 プロジェクト	パワーランプデモ (PRD)	PWR	日本PWR電力 と三菱の共同研 究		関電美浜 2号機	日負荷 追従運転	発電用実炉にて局部的 な出力運転は炉中の制 御棒1本を挿入・引抜 して実施	実施中 成績例 関電美浜 2号機
	17×17三菱 燃料負荷試験	PWR	負荷サイクル試験および出力上昇試験					

(\*) 国内プロジェクトはPWRのみを示す。

表 4.2 高性能燃料実証試験計画スケジュール



註 矢印は燃料の試験片の輸送を示す

表 4.3 PWR 燃料照射実績

(1981年12月現在)

原子炉名	運 開 (年)	電気出力 (MWe)	燃料棒配列	燃料装荷体数 (体)	集合体平均最大燃焼度 (MWd/t)	現行サイクル
美浜 1 号炉	1970	340	14×14	121	23,300	3
美浜 2 号炉	1972	500	14×14	121	32,600	6
美浜 3 号炉	1976	826	15×15	157	33,400	4
高浜 1 号炉	1974	826	15×15	157	36,100	6
高浜 2 号炉	1975	826	15×15	157	34,300	5
大飯 1 号炉	1979	1,175	17×17	193	19,900	3B
大飯 2 号炉	1979	1,175	17×17	193	23,800	3
玄海 1 号炉	1975	559	14×14	121	36,000	6
玄海 2 号炉	1981	559	14×14	121	—*	1
伊方 1 号炉	1977	566	14×14	121	36,500	5

\* 19,500MWd/t (1982年 2 月現在)

表 4.4 高燃焼度燃料の実証計画

	年 度								
	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	
(1) HBEP	_____								
(2) TRIBULATION	ペレット最高燃焼度 約70.000Mwd/tまで								
(3) 三菱燃料の高燃焼度燃料の評価	集合体平均燃焼度 36.000Mwd/t								
(4) WH社の高燃焼度燃料の評価	集合体平均燃焼度 31.000~55.000Mwd/t								

表 4.5 海外の高燃焼度計画及び実績 (WH社)

(単位: MWD/t)

	年 度												
	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	
17×17	Surry 2	7.200 EOC-1	13.800 EOC-2		28.000 EOC-3		42.700 EOC-4						
				12.900 EOC-1		21.000 EOC-2	31.000 EOC-3	40.000 EOC-4	48.000 EOC-5				
15×15	Zion	16.700 EOC-1	30.100 EOC-2	38.600 EOC-3	47.000 EOC-4				55.400 EOC-5				

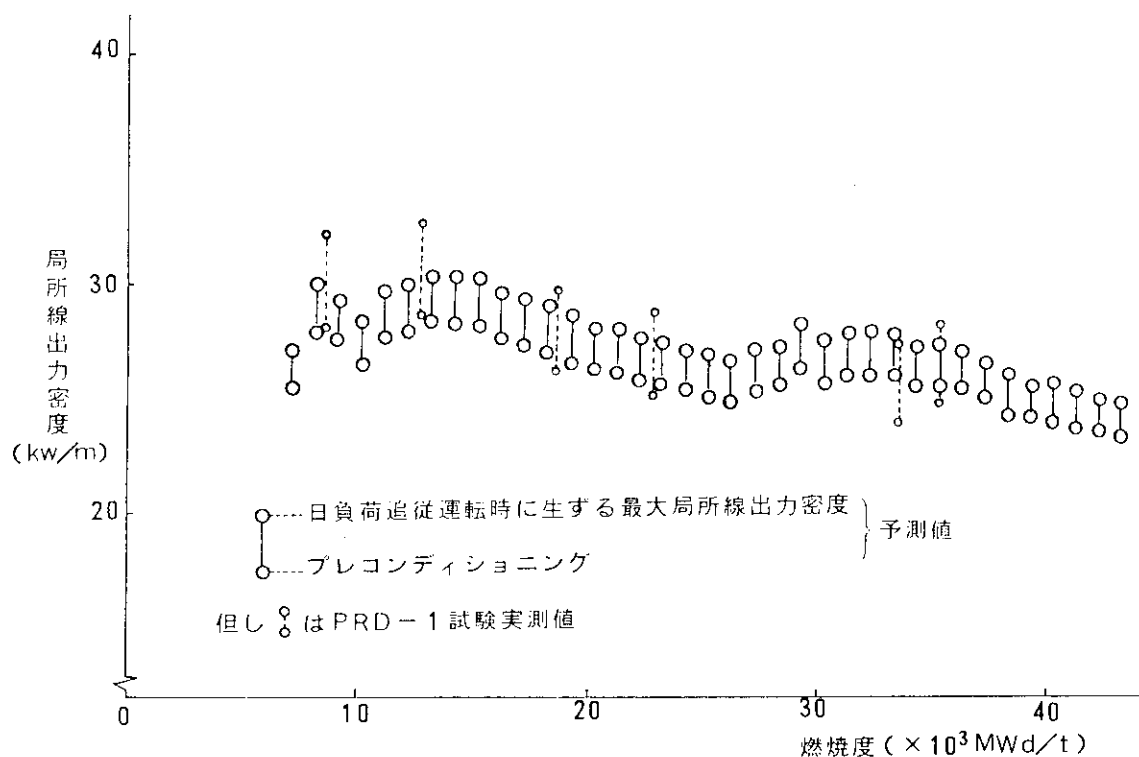


図 4.1 日負荷追従運転時の局所線出力密度変化代表例と PRD-1 実測値  
(美浜 2 号機サイクル 6 末期)

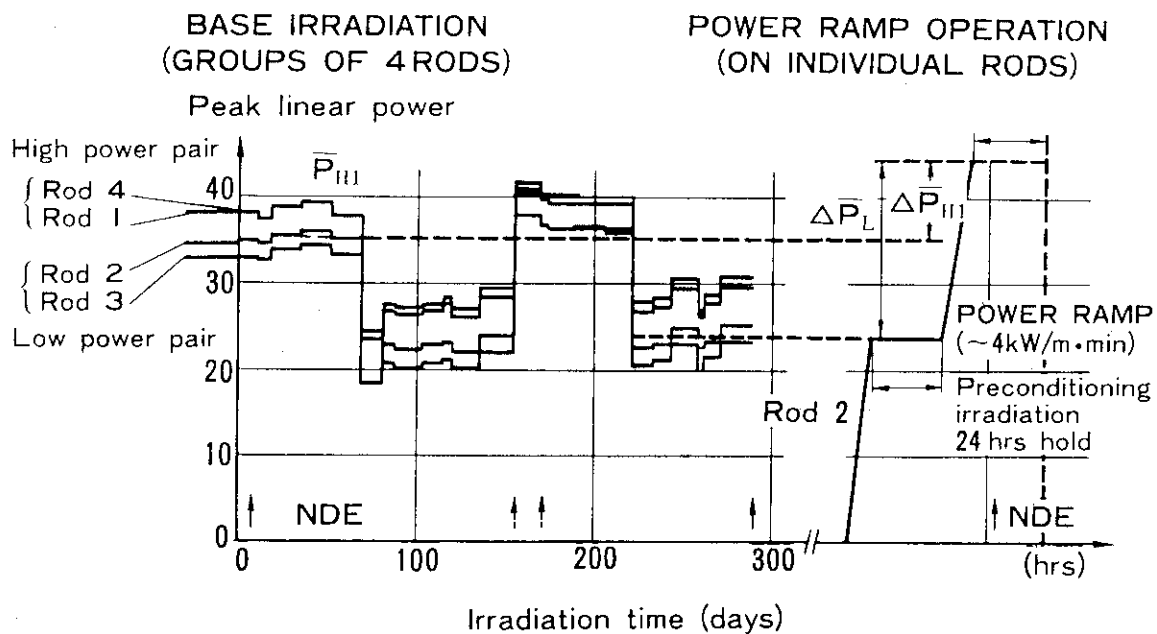


図 4.2 ベース照射中の出力履歴の一例

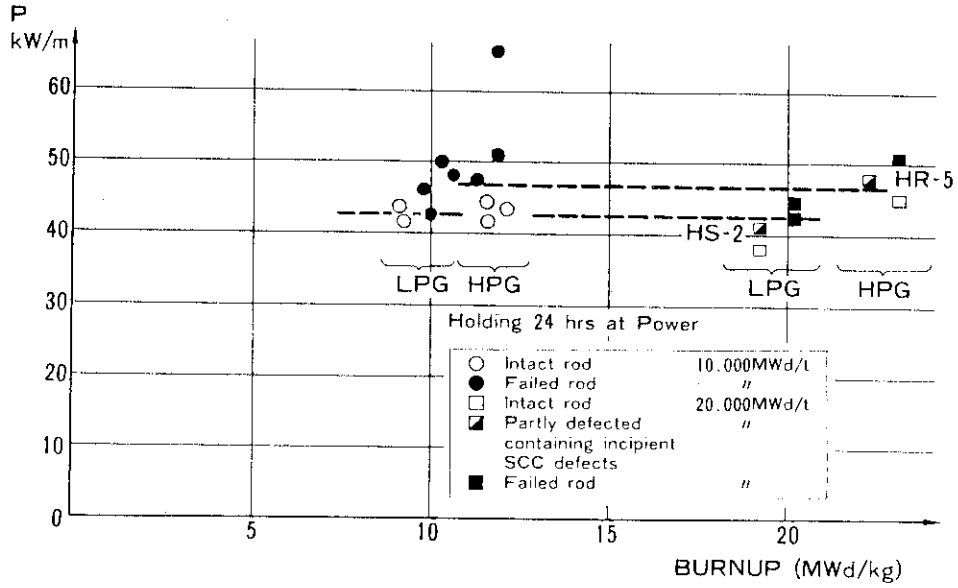


図 4.3(a) 到達線出力レベルと燃焼度の相関

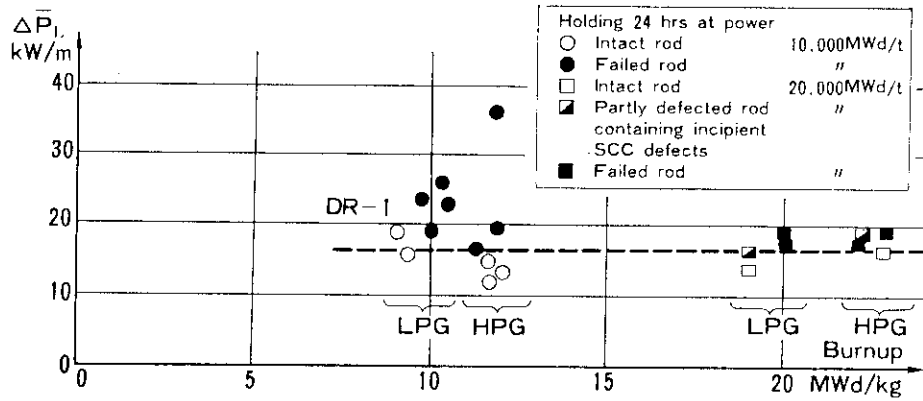


図 4.3(b)  $\Delta p$  (最終ベース照射出力レベル基準) と燃焼度の相関

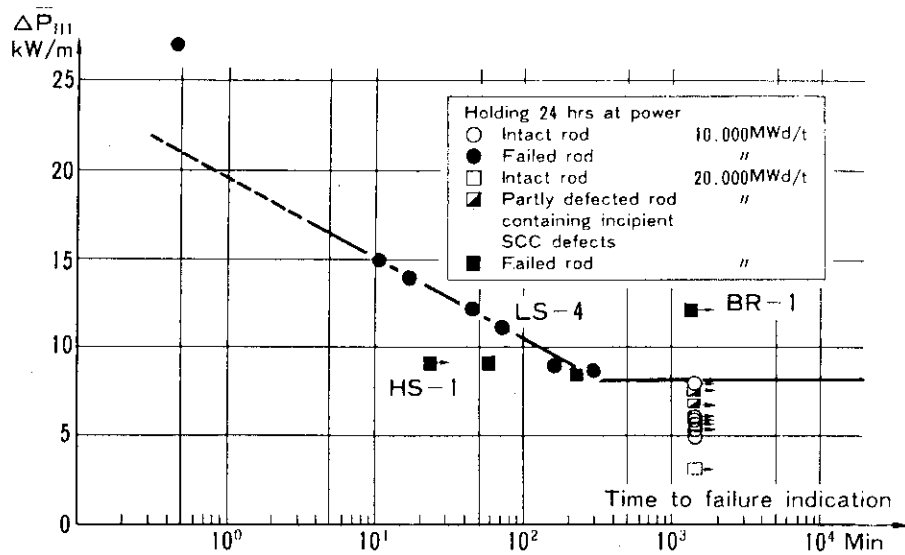
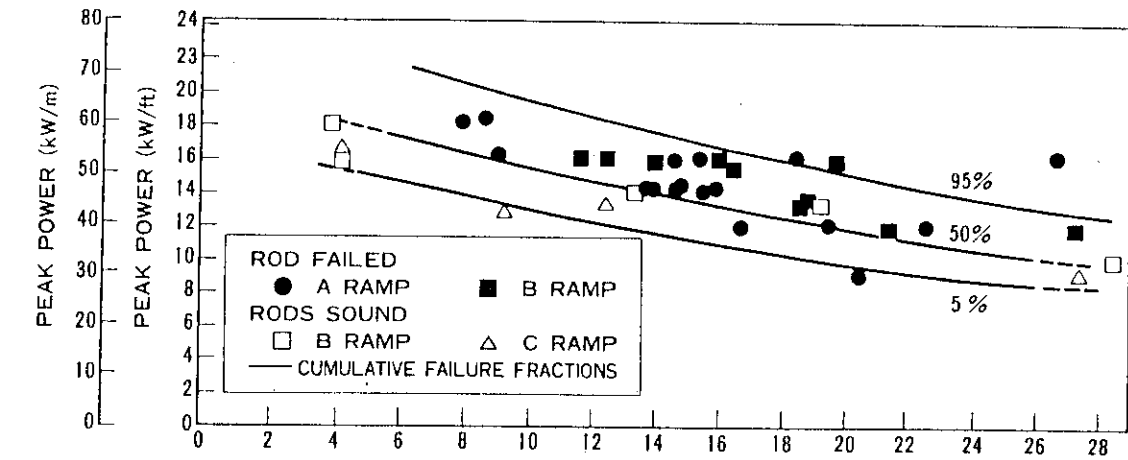
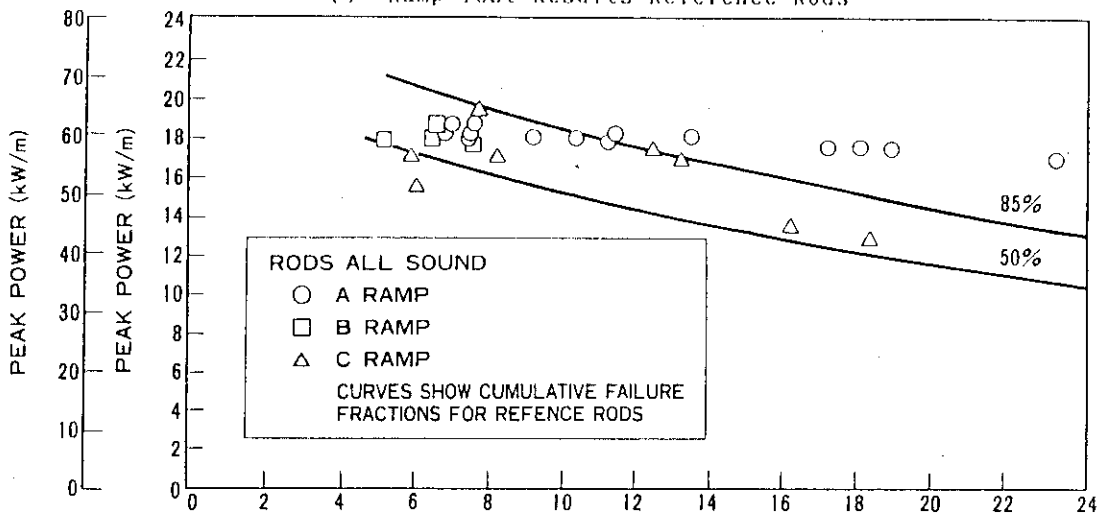


図 4.3(c)  $\Delta p$  (ベース照射第1回高出力レベル基準) と燃焼度の相関



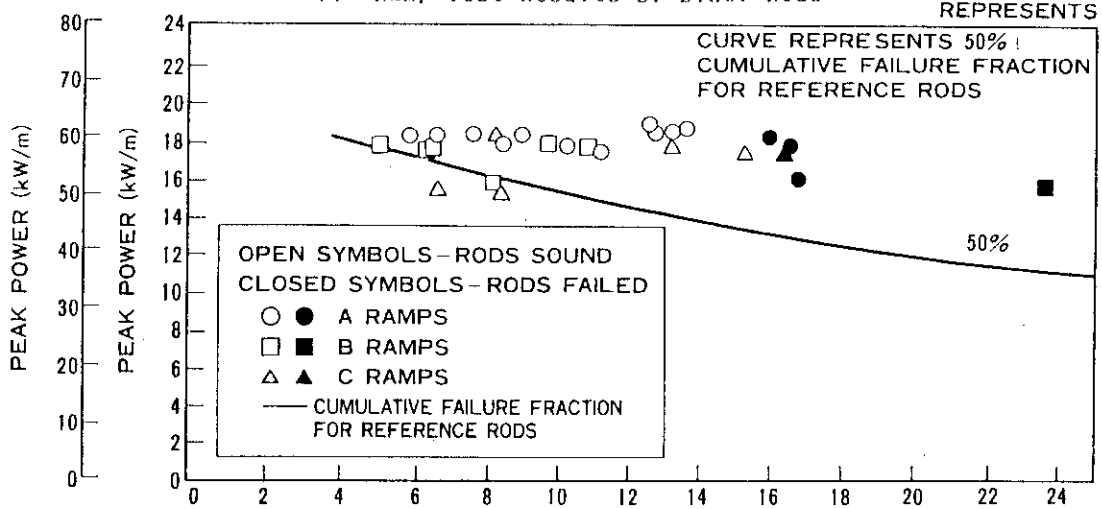
BURNUP (MWd/kg U) AT PEAK POWER NODE

(a) Ramp Test Results Reference Rods



BURNUP (MWd/kg U) AT PEAK POWER NODE

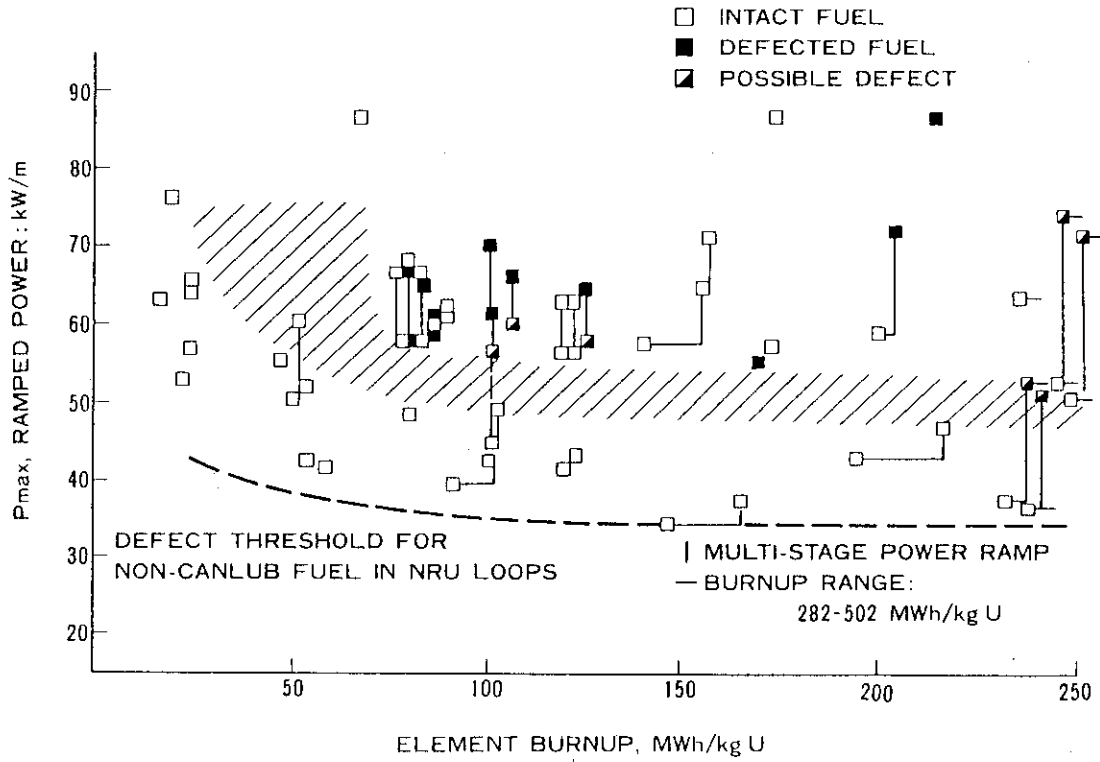
(b) Ramp Test Results Zr Liner Rods



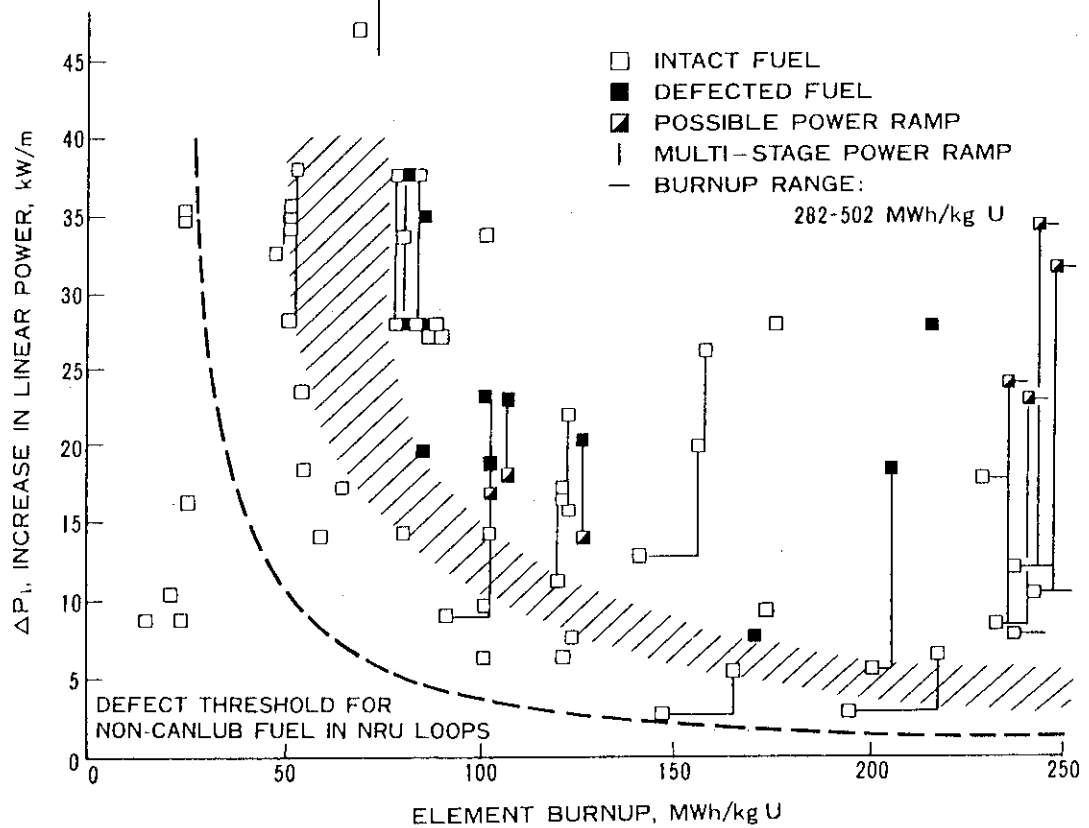
BURNUP (MWd/kg U) AT PEAK POWER NODE

(c) Ramp Test Results-Cu Barrier Rods

図 4.4 GEのランプテスト結果



(a) 燃焼度と $P_{max}$ の関係



(b) 燃焼度と $\Delta p$ の関係

図4.5 カナダNRUのランプテスト結果(グラファイト・コーディング被覆燃料)



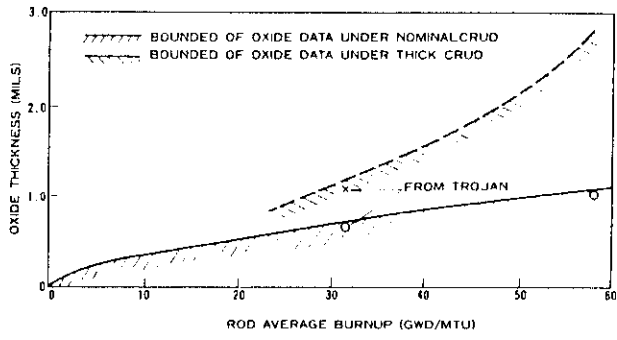


図 4.6 被覆管の腐食データ (WH)

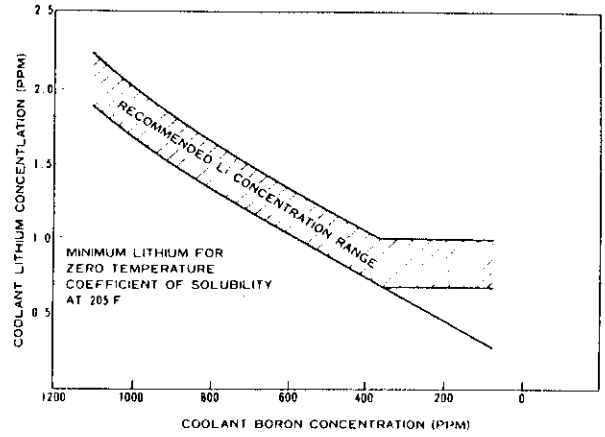


図 4.7 冷却材中の Li/B 濃度

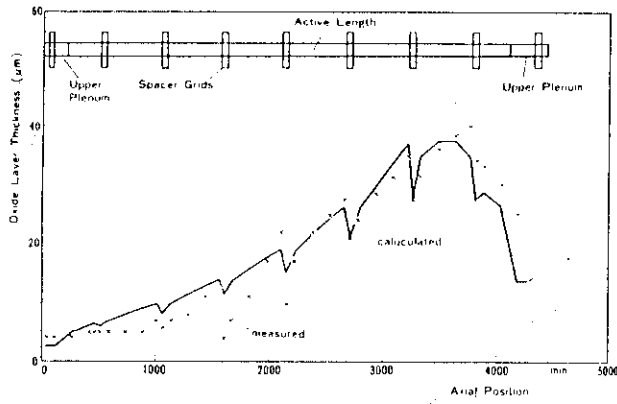


図 4.8 被覆管の腐食データ (KWU, PWR)

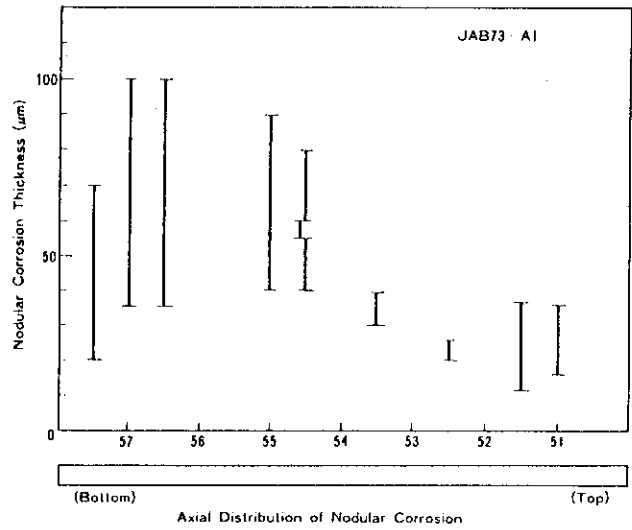


図 4.9 被覆管の腐食データ (ノジュール  
コロージョン; BWR)

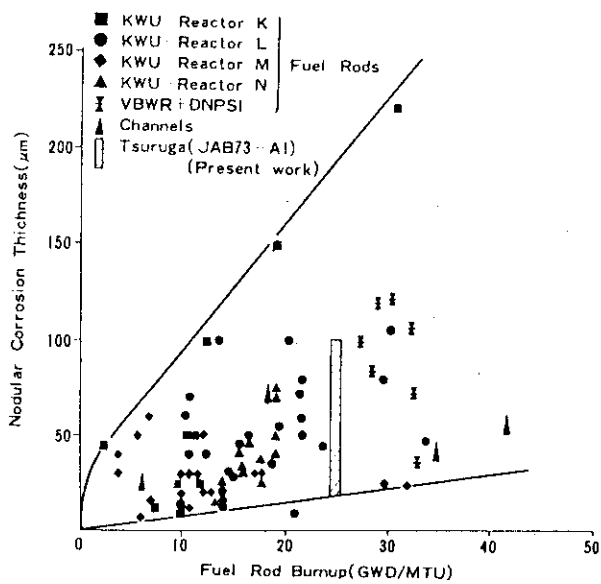


図 4.10 被覆管の腐食データ (BWR)

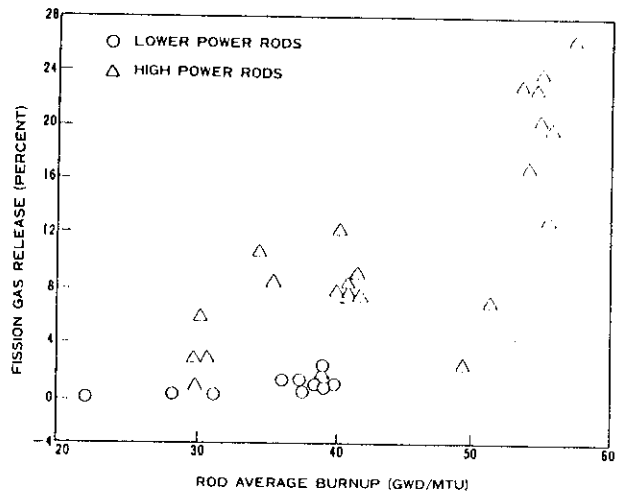


図 4.11 Zorita F・P 放出データ

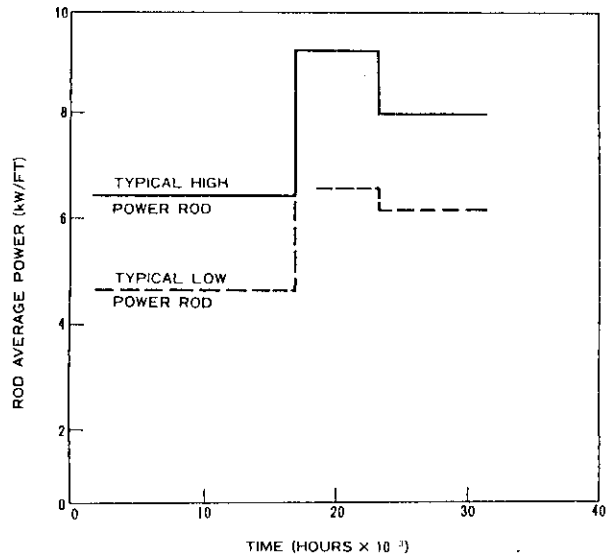


図 4.12 Zorita 燃料の出力履歴

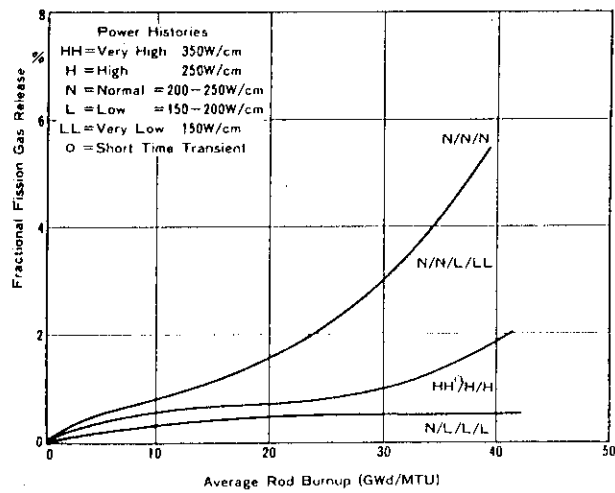


図 4.13 F・P 放出データ (KWU PWR)

## 5. 耐PCI性能解析

丸棒燃料を船用炉に使用した場合の重要な問題点は、船用炉特有の激しい出力変動条件下におけるPCI（ペレット-被覆管相互作用）に対して燃料の健全性を維持できるかどうかである。従って、改良船用炉用燃料として考えられている丸棒燃料の耐PCI性能を定量的に把握しておく必要がある。

本解析は、改良船用炉用燃料として提案されている3種類の丸棒燃料の出力変動時の耐PCI性能を、燃料挙動解析コード「FEMAXI-IV」（現在検証中の非公開コード）で参考用として解析し、丸棒燃料の負荷変動時の挙動を評価することにより、これら3種類の改良船用炉用丸棒燃料の耐PCI性能を把握することを目的とする。また、参考用として2種類の丸棒燃料について「FEMAXI-III」コードによる解析を行い、「FEMAXI-IV」コードの解析結果との比較を行った。

### 5.1 解析コード

#### (1) FEMAXI-IV コード

FEMAXI-IV コードは、現在、日本原子力研究所燃料安全工学部において開発中のコードであり、Halden, Studsvik (R2), Battelle 等の実験結果との照合計算を行なっている燃料挙動解析コードである。（非公開コード）

なお、今回は、現時点での最新バージョンを使用して解析を行った。

FEMAXI-IV は、FEMAXI-III をさらに改良したものであり、FEMAXI-III コードが通常時のペレットと被覆管の力学的解析を目的としているのに対して、FEMAXI-IV ではこれに非定常モデルを追加し、運転時の異常な過渡変化のような速い現象も扱えるようになっている。過渡時の速い現象を扱うために、次の3種類の時間依存モデルを追加した。

- i) 非定常熱伝導モデル（比熱を考慮）
- ii) 軸方向ガス混合モデル
- iii) FP ガス放出モデル

以下に軸方向ガス混合モデルとFP ガス放出モデルの概要を示す。

軸方向ガス混合モデル：

過渡時にギャップへ放出されたFP ガスは瞬時にプレナムガスと混合せず、時間遅れを伴って混合することが、実験事実より分っている。この混合の時間遅れによって、ギャップの熱伝達は悪化し、燃料温度は上昇してさらにFP ガス放出が促進される。FEMAXI-IV では、この現象を次の簡単化したモデルで記述している。

- 濃度勾配によるガスの相互拡散（Fick の第1法則）
- 圧力勾配によるガスの流動（瞬時圧力平衡を仮定）

FP ガス放出モデル：

FEMAXI-III のモデルでは、通常時においてFP ガスは、拡散によって放出される。一方、出力上昇時には、ペレットは高温部において結晶粒成長を起し、これに伴ってFP ガスが放出される。モデルでは、この高出力時におけるFP ガス放出を粒成長による掃き出しと、高温での拡散によって取り扱っている。

照射が進むと、粒内にはガス気泡が形成され、トラッピングサイトとして存在する。固体内に溶解しているガスは、濃度勾配を駆動力とし、拡散により粒界に移動し、そこに粒界気泡を形成し蓄積する。粒界でのガス濃度が一定の飽和量に達すると、気泡が連結し、自由空間へのトンネルが形成される。粒界が飽和すると、粒界より粒界へ流れ出てくる追加のガスは、トンネルより外界へ直ちに放出される。粒界が飽和するまで潜伏期間となる。モデルはこの現象を、理想化した結晶粒モデルを用いて解いている。この球内での拡散方程式は、ガス原子の粒内ガス気泡へのトラッピング、あるいは気泡から固体内への再溶解を考慮して解かれる。また粒界に溜っているガスも一定の割合で粒内へ再溶解することも考慮している。

## (2) FEMAXI-III コード

FEMAXI-III コードは、通常時における軽水炉燃料棒のふるまいを決定論的に解析するコードであり、特に出力上昇時の PCI ふるまいの評価を目的としている。FEMAXI-III コードは、温度分布やFP ガス放出など熱的ふるまいを解析する部分と、リッジ変形に伴う局部応力、ひずみなど力学的ふるまいを解析する部分から構成される。これらの概要を以下に示す。

熱的ふるまい部：

ここでは、径方向一次元軸対象問題として、ペレット被覆管間のギャップ幅変化、FP ガス放出およびこれらのギャップ熱伝達へのフィードバックを考慮して、温度分布やガス圧力を解析する。このとき軸方向出力分布（FP 生成および放出分布）を考慮するため、燃料棒は軸方向に最大 10 領域に分割され、熱的フィードバックが燃料棒全長にわたって収束するまで繰り返し計算が行われる。

力学的ふるまい部：

ここでは、軸対象有限要素法を燃料棒の一部に適用してペレットと被覆管の力学的相互作用を解析する。まず、熱膨張、焼きしまり、スエリングおよびリロケーションによる初期ひずみを計算し、ペレットの割れ、弾塑性およびクリープを考慮して剛性マトリックスを作成し、接触モードに対応する境界条件を仮定して剛性方程式を解き、応力やひずみを計算する。ここでは、塑性、クリープおよび割れペレットの弾性が未知量である応力ひずみの関数であることを考慮して、剛性マトリックスに関する繰り返し計算が行われる。また接触モード（固着あるいは滑り）を決定するため、境界条件に関して、仮定/判定の繰り返し計算が行われる。非接触→接触あるいは、弾性→塑性の状態変化時には、状態変化時刻に内挿し、その時刻以後について状態を改めて計算を行なうようになっている。

## 5.2 解析条件

### (1) 燃料仕様

表 5.1 に解析対象燃料である以下の A, B, AX の 3 種類の丸棒燃料の仕様・寸法を示す。

- 燃料 A : 半一体型炉 (試設計) 用丸棒燃料
- 燃料 AX : 半一体型炉 (評価炉心) 用丸棒燃料
- 燃料 B : 自己加圧一体型炉用丸棒燃料

### (2) 解析ケース

以下に示す全 9 ケースについて、FEMAXI-IV などを使用して解析を行う。表 5.2 に解析実施ケースの一覧を示す。

ケース 101	.....	FEMAXI-III との対比
ケース 102	.....	同 上
ケース 103	.....	燃料 A の設計条件
ケース 104	.....	燃料 AX の設計条件
ケース 105	.....	同 上
ケース 106	.....	燃料 B の設計条件

以上の 6 ケースは、設計条件ベースの解析である。

また、残る 3 ケースは、以下に示すように燃料 AX について現実的な最大線出力密度と現実的な燃焼度 (設計条件 (目標値) に基づき詳細な核計算を行った結果の数値) により解析を行う。

最大線出力密度	.....	34 KW/m (28.1 KW/m の 1.2 倍)
立ち上げ時の燃焼度	.....	62.000 MWD/tU (設計条件 : 66,000 MWD/tU)
ケース 201	.....	最大線出力密度 34 KW/m で燃焼度 62.000 MWD/tU で立ち上げる。
ケース 202	.....	最大燃焼度 (62.000 MWD/tU) における線出力密度 (18.2 KW/m) で最大燃焼度で立ち上げる。
ケース 203	.....	最大線出力密度で燃焼度 0 (BOL) で立ち上げる。

### (3) 出力履歴および出力変動パターン

- 図 5.1 にはケース 101 の出力変動パターン、
- 図 5.2 にはケース 102 の出力変動パターン、
- 図 5.3 にはケース 103, 104, 105, 106, 201 の出力変動パターン、
- 図 5.4 にはケース 202 の出力変動パターン、
- 図 5.5 にはケース 203 の出力変動パターンを示す。

出力変動パターンを決定する際、そのもとになるのは本船用炉の負荷変動条件である。本ケースでは負荷変動速度は合わせたが、負荷変動回数は 1~2 回とし、実際の回数について、細かく解析することはしなかった。これは、以下に述べるように短時間の負荷変動のくり返しは PCI 上はそれ程厳しくはなく、むしろクリープ疲労解析で考慮されなければならないということによる。

## ① 出力パターンの決定条件

図 5.6 において、 $\Delta t_2$ 、 $\Delta t_3$  が短時間の場合 ②、③における最大円周応力  $\sigma_{O,B}$ 、 $\sigma_{O,C}$  は、

$$\sigma_{O,B} = \sigma_{O,C}$$

である。

ただし完全に等しくはならず多少  $\sigma_{O,B}$  より  $\sigma_{B,C}$  の方が大きくなる。これを多数回繰り返した場合被覆管のクリープ疲労を考慮しなければならない。ここでもう一つの重要な factor は ②点と③点の間で燃焼度  $\Delta Bu$  がある程度経過すると、確実に  $\sigma_{O,B} < \sigma_{O,C}$  となる。

図 5.9 に示すが、④点と③点の応力の大小関係は  $\Delta Bu$  により必ずしも

$$\sigma_{O,A} > \sigma_{B,C}$$

成立しない。

又、 $\sigma_{O,A}$  から  $\sigma_{O,B}$  のクリープによる応力緩和量は  $\sigma_{O,C}$  から  $\sigma_{O,D}$  の応力緩和量より  $\sigma_{O,A} = \sigma_{O,C}$ 、 $T_A$  (A点での温度) =  $T_C$  の条件下では大きい。

従って、 $\sigma_{O,A} = \sigma_{O,C}$  の場合、被覆管にき裂がある場合 2 回目のき裂進展速度の方が速い事になる。

以上から出力パターンとして重要なことは、くり返しの負荷変動とする場合にはその間のベース出力の保持時間(燃焼度)を十分取ることにより、クリープによる応力緩和を十分発生させて、その後の負荷急昇による結果が控え目になるようにする点である。従って、細かく負荷急昇をくり返すことは、応力値は 1 回目の応力値以上とはならないので最大出力を保持しているのと、ほとんど変わらないことになる。

また、次のような出力パターン作成上の重要な点がある：

- ① ベース照射の出力が高すぎると早い時点でギャップがなくなり出力急昇時、楽となるため、ベース照射の出力は常用負荷(90%)以下とする。
- ② FP 放出が十分行なわれ、腐食性雰囲気が十分となる燃焼度(約 3,000 MWD/tU)より高い燃焼度としてから出力急昇を行う。
- ③ また、FP ガス放出によるギャップコンダクタンスの劣化の効果を考慮するため、出力急昇は高燃焼度(10,000 MWD/tU 以上)で行い、その高燃焼度まで常用負荷(90%)以下で運転を行う。

## (4) 軸方向出力分布

図 5.10 には燃料 A の全期間一定の場合(ケース 101)および燃料 B の全期間一定の場合(ケース 102, 106)の軸方向出力分布を示す。

図 5.12 には燃料 A の出力分布が変動する場合(ケース 103)のサイクル初期、サイクル中期、サイクル末期の軸方向出力分布を示し、図 5.11 には軸方向平均燃焼度分布を示す。

図 5.13 には燃料 AX の出力分布が変動する場合(ケース 104, 201, 202, 203)の、サイクル初期、サイクル中期、サイクル末期の軸方向出力分布を示し、図 5.14 には軸方向平均燃焼度分布を示す。

図 5.15 には燃料 AX の全期間一定の場合(ケース 105)の軸方向出力分布を示す。

## (5) インput上の考慮点

FEMAXI-Ⅳの適用性および過去の計算経験などから特に以下のinputについては入力上の考慮を行い、以下とする。

- ① ペレット表面粗さ：検証範囲内である1  $\mu\text{m}$ とする。
- ② 被覆管の0.2%耐力の照射硬化：現FEMAXI-Ⅳの照射硬化式では1 KW/m当り  $6.3 \times 10^{13}$  (n/cm<sup>2</sup>-S)という大きな高速中性子束を用いた場合、被覆管の0.2%耐力は照射硬化しない。このため被覆管の応力の計算結果が低く抑えられて算出される可能性がある。従って、このような大きな高速中性子束条件での被覆管の0.2%耐力を入力として扱った。

## 5.3 解析結果

今回のFEMAXI-Ⅳによる全9ケースの耐PCI解析結果を図5.16～5.24に、またそれらをまとめて表5.3に示す。スタートアップの出力急昇で接触しないCase No.203, 接触するが、ほとんど接触圧力を発生しないCase No.103, ベース照射レベルと同じレベルまでしかランプしないCase No.202を除いて、ランプ速度が速いため100 MPa以上の応力が計算された。ただし、Case No.106のB燃料を除いてFPガス放出は応力緩和してから発生している。

## 5.4 評価基準

丸棒燃料の健全性についての法規上の規定としては、4.1節で記述したように、歪み量と最高温度について以下に示すような発電炉用安全基準がある。

- (i) 被覆管に生じる円周方向引張歪の変化量は、各過渡変化に対して1%以下となるように設計する。
- (ii) 燃料中心最高温度は、二酸化ウランの溶融点未満となるように設計する。なお、二酸化ウランの溶融点は未照射燃料に対しては、約2,800℃である。

また、PCIによる破損はその現象が応力腐食割れ(SCC)とも考えられていることから、SCCの3大要因(応力、環境、材料)のうち、応力と環境(FPガス放出量)についていかに評価を行うかが、耐PCI性能解析を行う場合の重要な要素となっている。

しかしながら、この応力とFPガス放出量についての評価基準はない。

なお、応力についての評価基準として、

- ・ 被覆管材料(ジルカロイ-4)の耐力以下であること。

とする考え方もあるが、この耐力で評価するためには、SCCの1条件であるFPガス放出がない、あるいはライナ効果等によりFPガスが遮断されているという条件が必要である。したがって、FPガスがある場合は、耐力のみでは十分ではないと考えられる。

## 5.5 FEMAXI-Ⅲの解析結果との比較

FEMAXI-Ⅲは前述のようにFEMAXI-Ⅳの旧バージョンであり、FPガス放出を瞬時放出モデルとしている点などがFEMAXI-Ⅳと異なる。

前記ケースNo.101および102について、FEMAXI-Ⅲを使用して解析を行った結果をFEMAXI-Ⅳの解析結果と比較して表5.4に示す。

ケースNo.101では、FPガス放出がなく、ペレットが低温のため、両者の違いはほとんど見られない。ケースNo.102では、ランプ後にFPガス放出があり、両者のFPガス放出計算モデルの違いにより、FPガス放出率、温度、応力の値が異なった結果となっている。

今回の102ケースの計算結果では、応力、温度、FPガス放出率ともにFEMAXI-Ⅳの方が小さな値となった。



表 5.1 解析対象燃料の仕様・寸法

項 目	半一体型炉(試設計) 燃 料 A	半一体型炉(評価炉心) 燃 料 A X	自己加圧一体型炉 燃 料 B
ペレット形状	両ディッシュペレット	両ディッシュペレット	両ディッシュ・チャン フペレット
ペレット濃縮度	3.7および4.7%	5.1および6.1% (平均5.7%)	5.4%
ペレット密度 (対理論密度比)	0.95	0.95	0.944
燃料有効長	1500 (mm)	1,210 (mm)	1250 (mm)
被覆管材質	ジルカロイ-4 SR材 (ライナー付)	ジルカロイ-4 SR材 (Zrライナー付)	ジルカロイ-4 SR材
被覆管外径	8.60 (mm)	7.0 (mm)	10.80 (mm)
ギャップ幅	0.170 (mm)	0.13 (mm)	0.300 (mm)
プレナム容積	4.1 (cm <sup>3</sup> )	2.55 (cm <sup>3</sup> )	18.1 (cm <sup>3</sup> )
プレナム圧力	2.1 (Mpa)	2.4 (Mpa)	2.0 (Mpa)
プレナム組成	He 100%	He 100%	He 100%
一次冷却水圧力	10.69 (Mpa)	11.0 (Mpa)	9.65 (Mpa)
一次冷却水温度	556.5 (°K)	553.9 (°K)	573.15 (°K)
高速中性子束	出力(KW/m)×3.9×10 <sup>12</sup> (n/cm <sup>2</sup> ・sec)	出力(KW/m)×6.3×10 <sup>13</sup> (n/cm <sup>2</sup> ・sec)	1×10 <sup>14</sup> (n/cm <sup>2</sup> ・sec)
ペレット総重量	623.54 (gr)	326. (gr)	804.86 (gr)
炉心平均燃焼度	18,000 MWD/tU	32,000 MWD/tU	19,000 MWD/tU
炉心最大燃焼度	44,000 MWD/tU	62,000 MWD/tU	41,000 MWD/tU
平均線出力密度	6.1 KW/m	7.1 KW/m	13.4 KW/m
最大線出力密度	20.5 KW/m	34(41.3) KW/m	40.2 KW/m
炉心平均出力密度	33.8 KW/ℓ	61.2 KW/ℓ	55 KW/ℓ
水力的等価直径De (cm)	1.308	1.119	1.331
燃料棒ピッチ (cm)	1.21	1.0	1.43
冷却材炉心入口温度(°C)	271.8	271.0	292.0
冷却材炉心平均温度(°C)	283.3	280.7	300.0
冷却材炉心出口温度(°C)	294.7	290.3	308.0
冷却材流量 (t/h)	3000.0	3600.0	3530.0
炉心平均流速 (m/s)	1.03	1.69	1.86

$$De = \frac{4 \times \text{流路面積}}{\text{ぬれぶち長さ}}$$

表 5.2 PCI解析実施ケース一覧表

(\* Average Power)

ケースNo.	燃料	P1 (W/cm)	P2 (W/cm)	P3 (W/cm)	BU1	BU2 (GWD/tU)	BU3	BU4	$\alpha 2$ W/cm $\cdot$ min	備考
101	A	61	205	...	40	41	...	...	330	Ⅲ対比
102	B	110	158	402	10	40	41	...	650	Ⅲ対比
103	A	21	*61	205	25	43	44	...	330	
104	AX	41.3	*71	413	32	61	62	...	743.4	
105	AX	18	182	413	66	66+1hr	66+73hr	...	743.4	
106	B	40	*134	402	25	40	41	...	650	
201	AX	18	182	340	62	62+1hr	62+73hr	...	612	
202	AX	21	212	340	25	62	62+1hr	62+73hr	612	
203	AX	18	...	340	0	0+1hr	0+73hr	...	612	

表 5.3 耐PCI解析結果

Case No.	燃料 型式	最大燃焼度 (GWD/tU)	最大線出力 (W/cm)	最高中心温度 ( $^{\circ}$ C)	最大円周応力 (MPa)	FPガス放出率 (%)	ランプ時の円周 歪増分 (%)
101	A	41	205	785	126	0.5	0.17
102	B	41	402	1451	200	2.7	0.31
103	A	44	205	803	-41	0.5	0.05
104	AX	62	413	1607	279	3.0	0.75
105	AX	66	413	2095	224	15.3	0.77
106	B	41	402	1499	267	2.7	0.42
201	AX	62	340	1227	128	0.5	0.41
202	AX	62	340	1257	-2	0.5	0.09
203	AX	0	340	1320	-19	0.5	0.58

表 5.4 FEMAXI-ⅢとⅣ解析結果比較

Case No	燃料型式	解析コード	最大燃焼度 (GWD/tU)	最大線出力 (W/cm)	最高中心温度 (℃)	最大円周応力 (MPa)	FP ガス放出率 (%)	ランプ時の円周歪増分 (%)
101	A	FEMAXI-Ⅳ	41	205	785	126	0.5	0.17
		FEMAXI-Ⅲ	41	205	876	147	0.5	-
102	B	FEMAXI-Ⅳ	41	402	1451	200	2.7	0.31
		FEMAXI-Ⅲ	41	402	1665	259	7.0	-

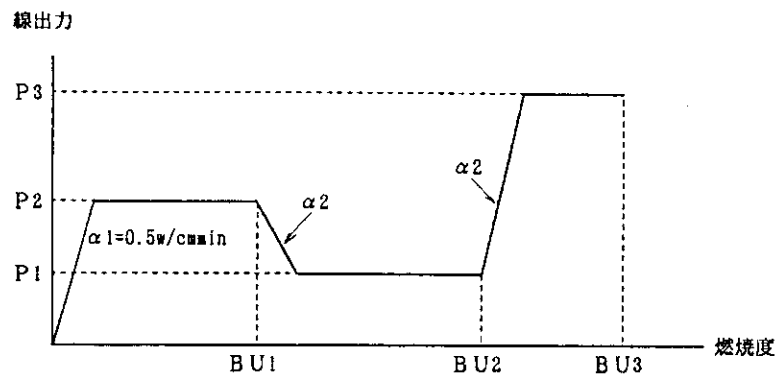


図 5.1 出力変動パターン A  
(ケース 103, 104, 105, 106, 201)

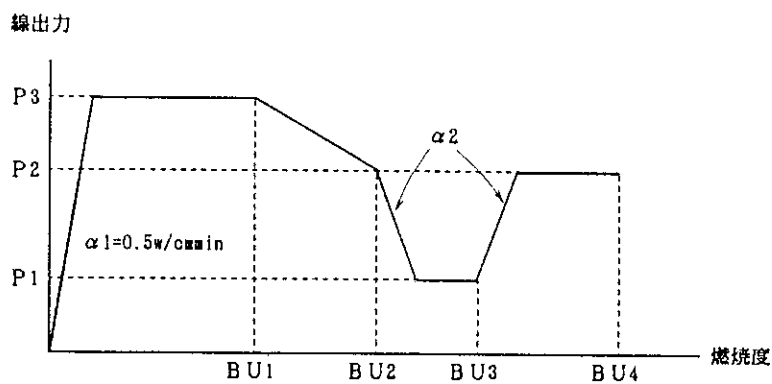


図 5.2 出力変動パターン B  
(ケース 202)

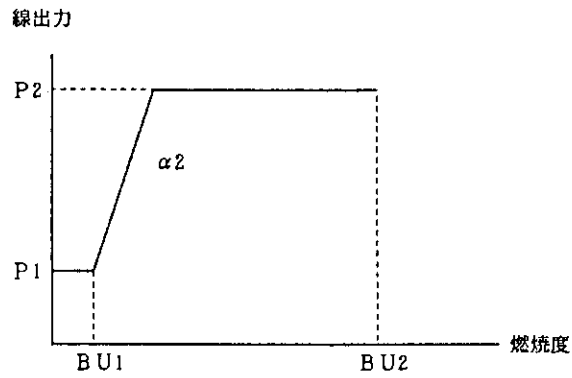


図 5.3 出力変動パターン C  
(ケース 203)

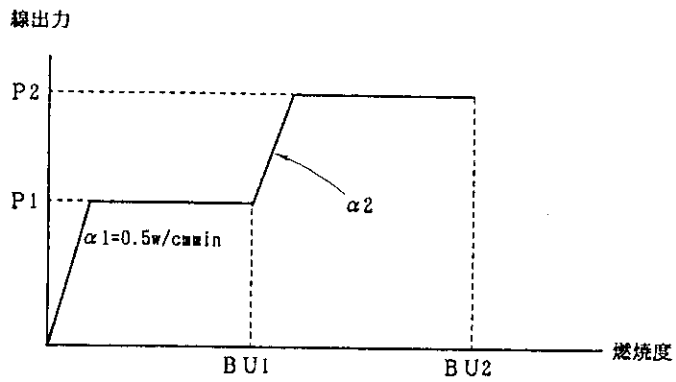


図 5.4 出力変動パターン D  
(ケース 101)

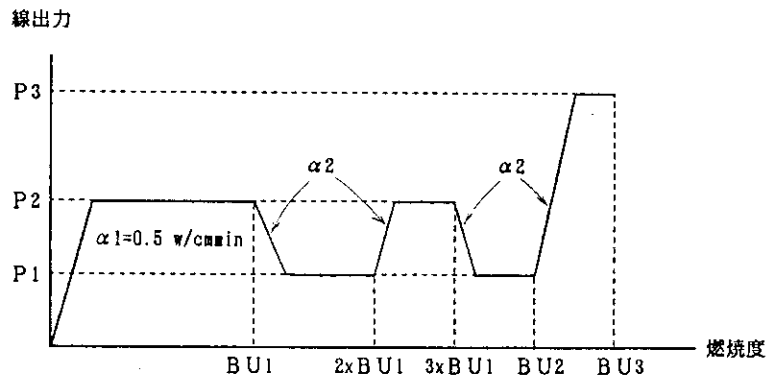


図 5.5 出力変動パターン E  
(ケース 102)

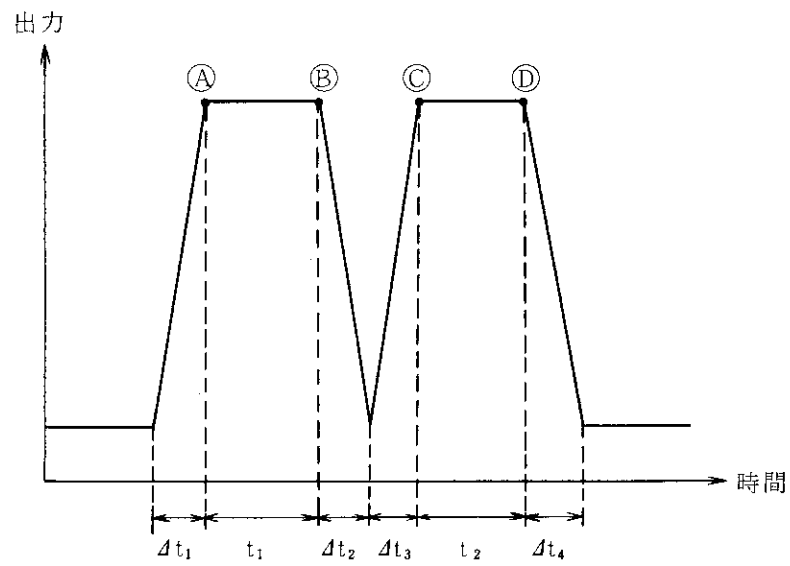


図 5.6 出力パターンの決定条件(1)

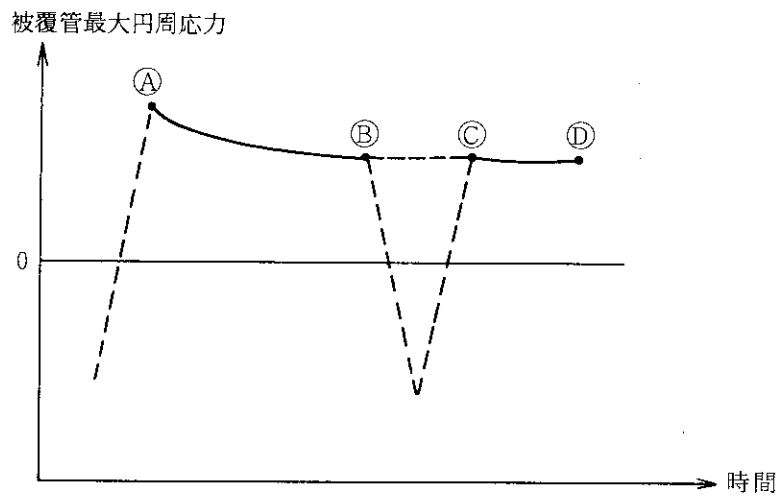


図 5.7 出力パターンの決定条件(2)

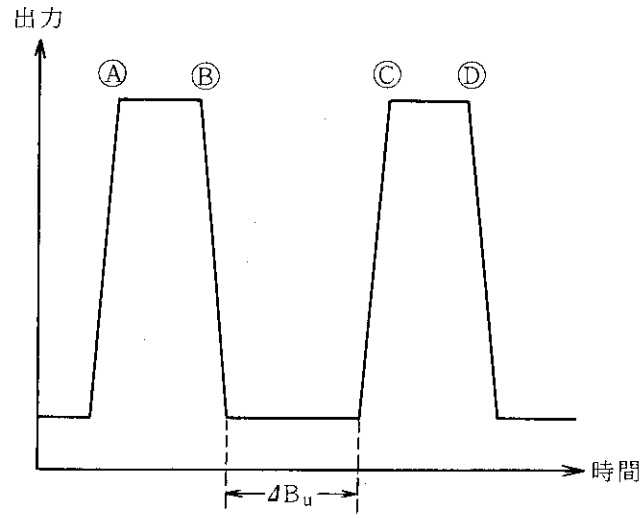


図 5.8 出力パターンの決定条件 (3)

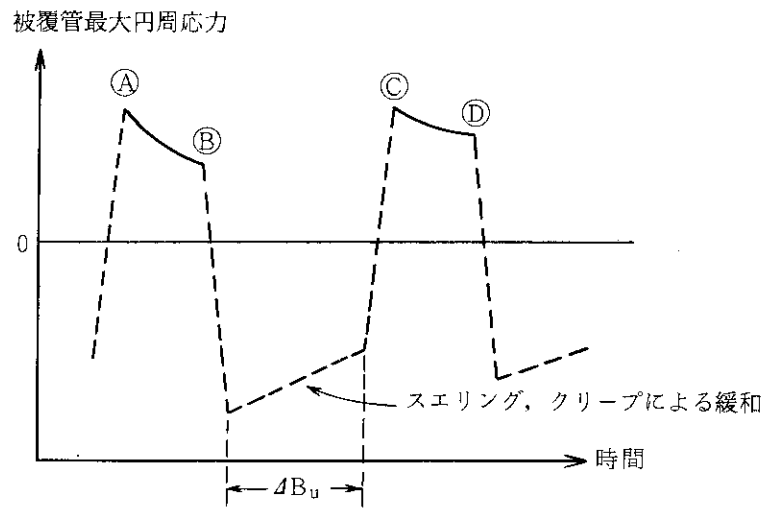


図 5.9 出力パターンの決定条件 (4)

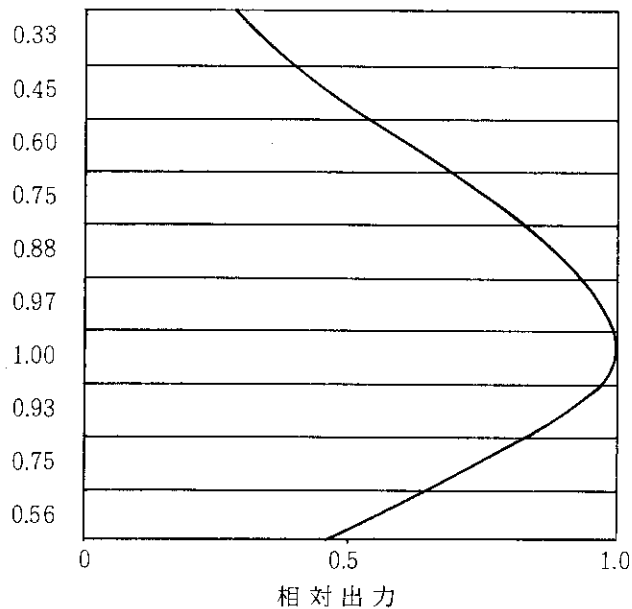


図 5.10 軸方向出力分布 (全寿命一定)  
 ケース 101 (燃料A) および  
 ケース 102, 106 (燃料B)

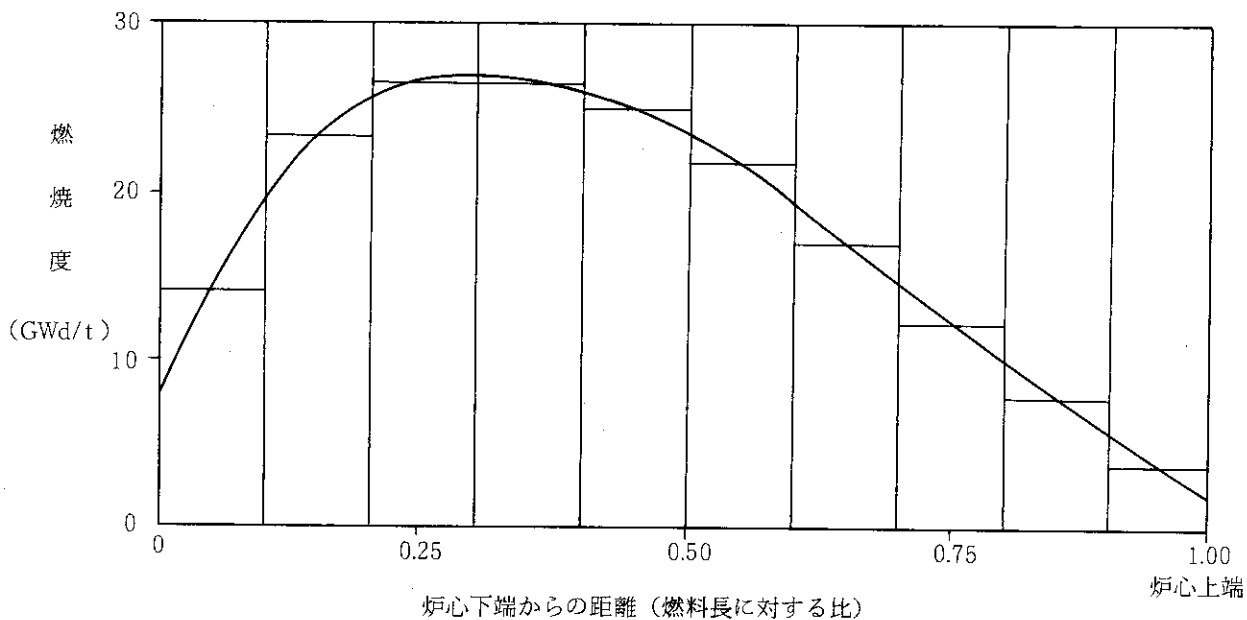


図 5.11 軸方向平均燃焼度分布 (燃料A) サイクル末期  
 (ケース 103)

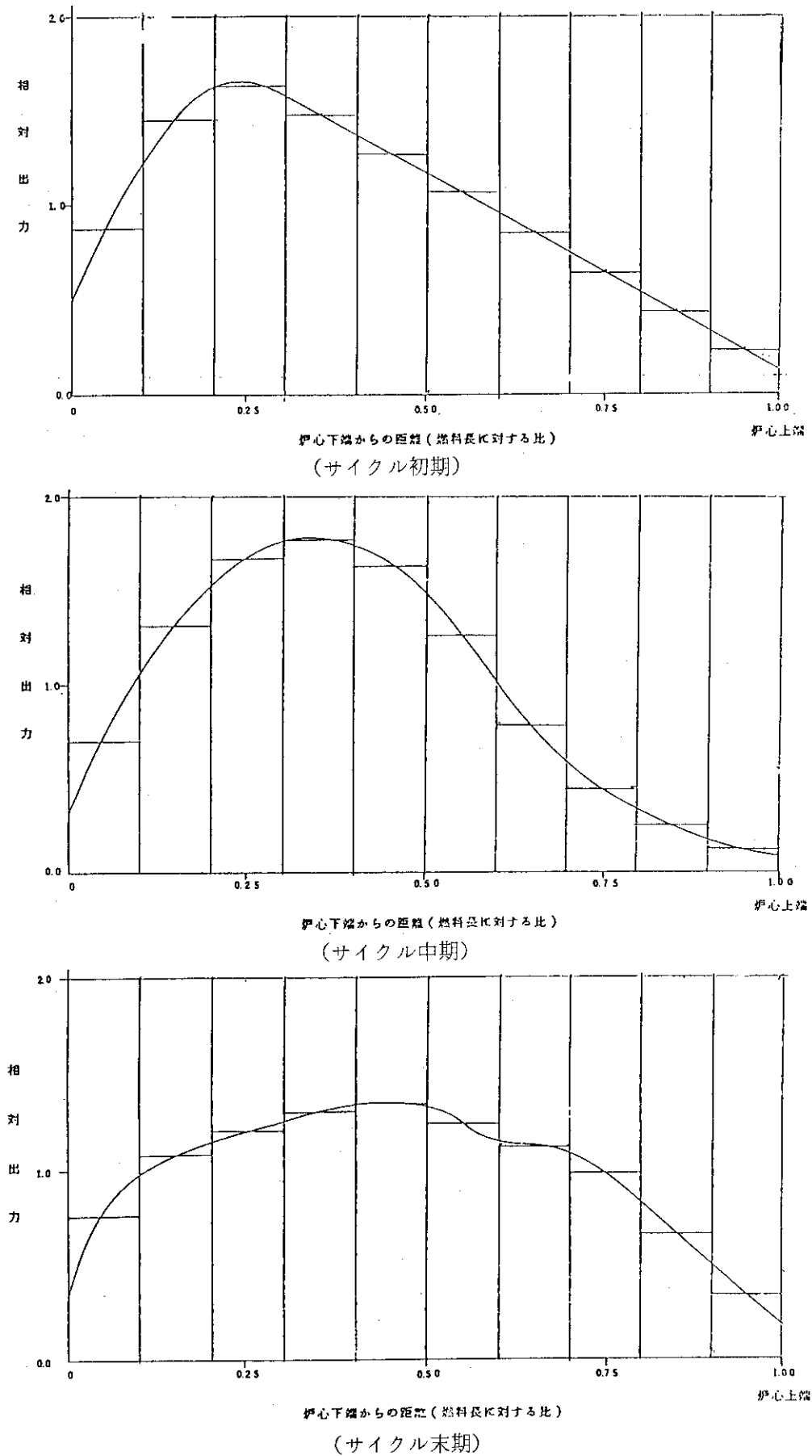


図 5.12 軸方向出力分布 (燃料 A) ケース 103



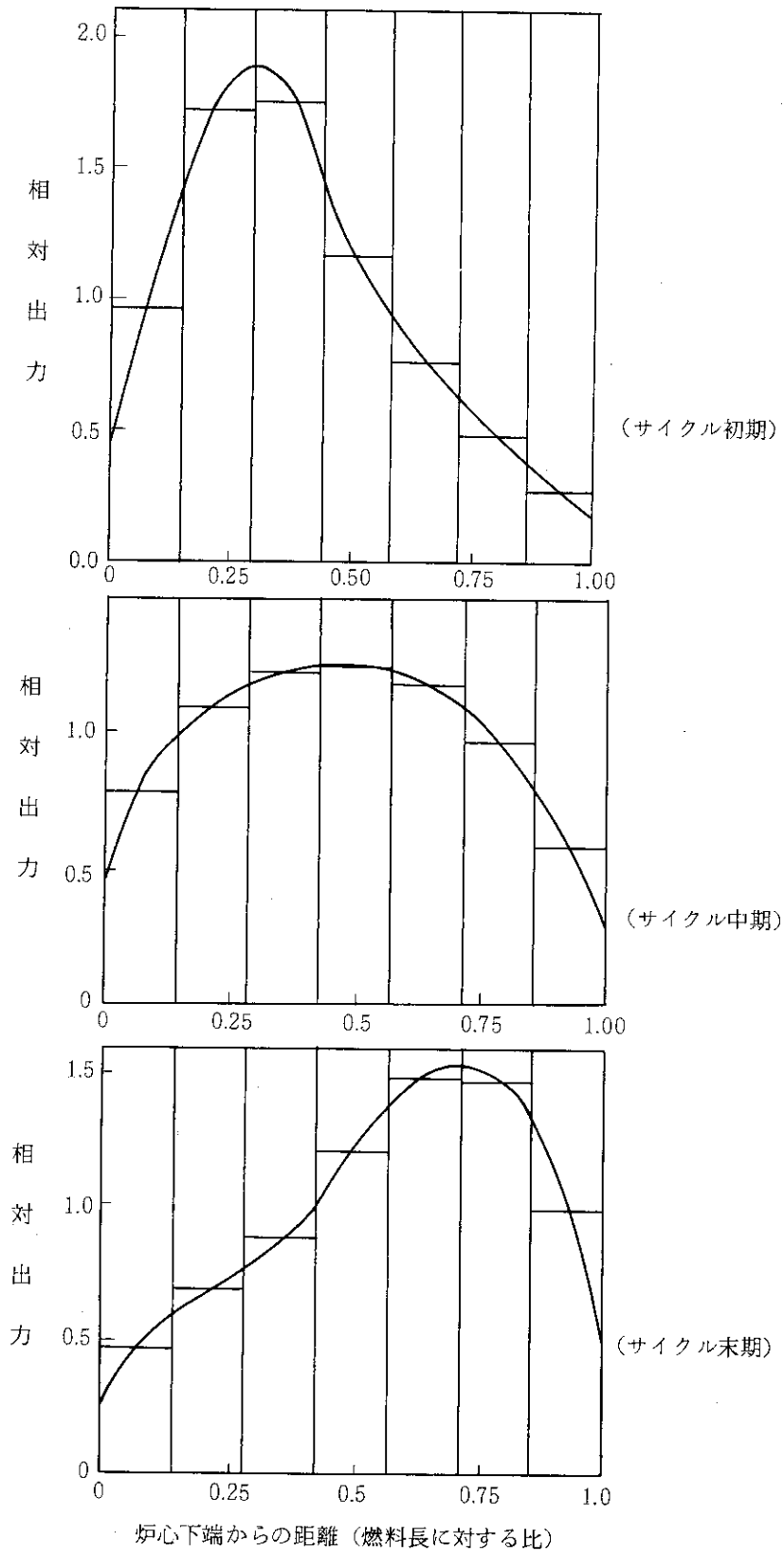


図 5.13 軸方向平均出力分布 (燃料 AX)  
(ケース 104, 201, 202, 203)

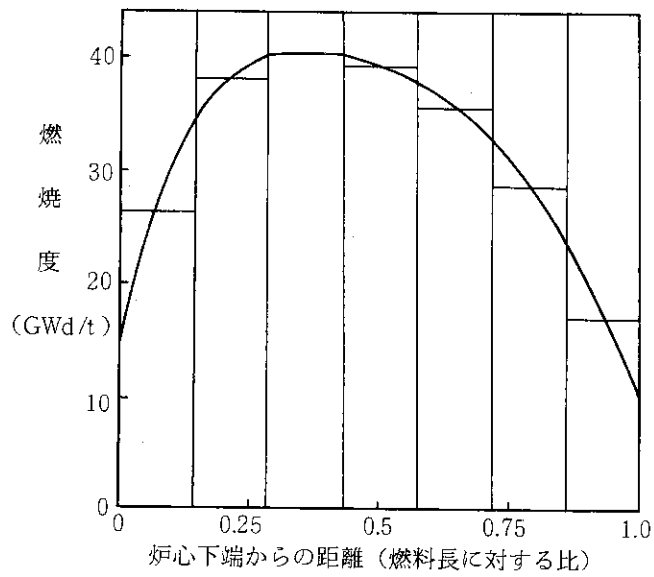


図 5.14 軸方向平均燃焼度分布 (燃料 AX)  
(ケース 104, 201, 202, 203)

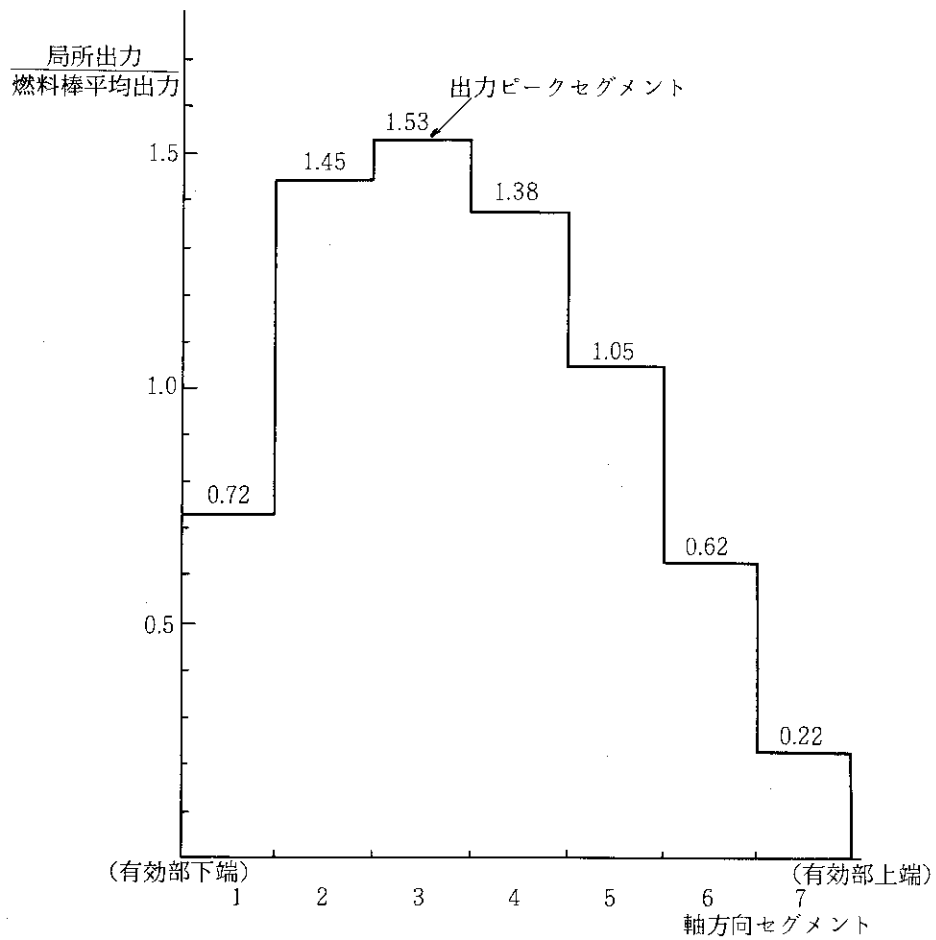


図 5.15 軸方向出力分布, ケース 105 (燃料 AX)  
(寿命中一定)

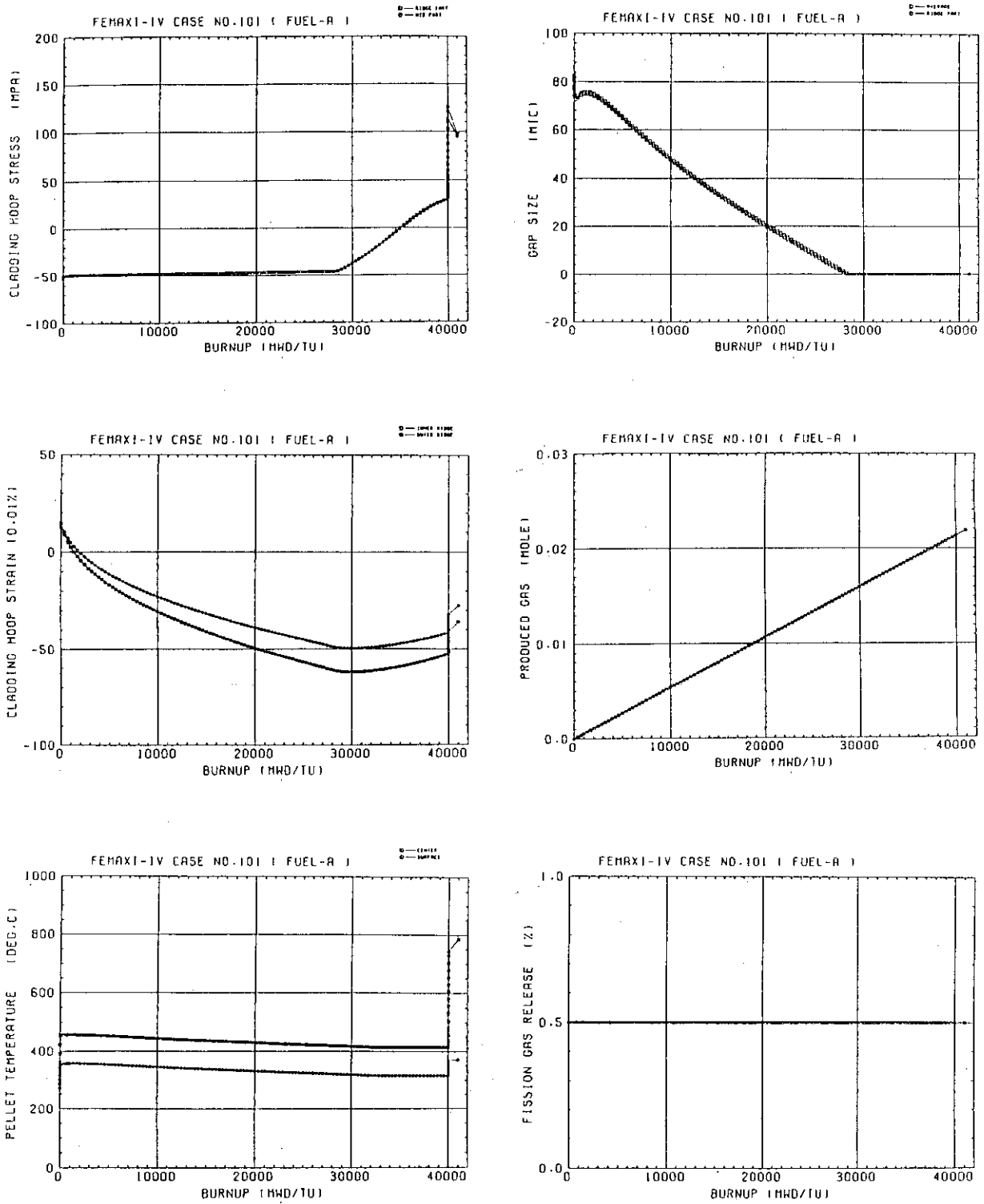


図 5.16 耐 PCI 性能解析結果 (1/9) ケース 101 (燃料 A)

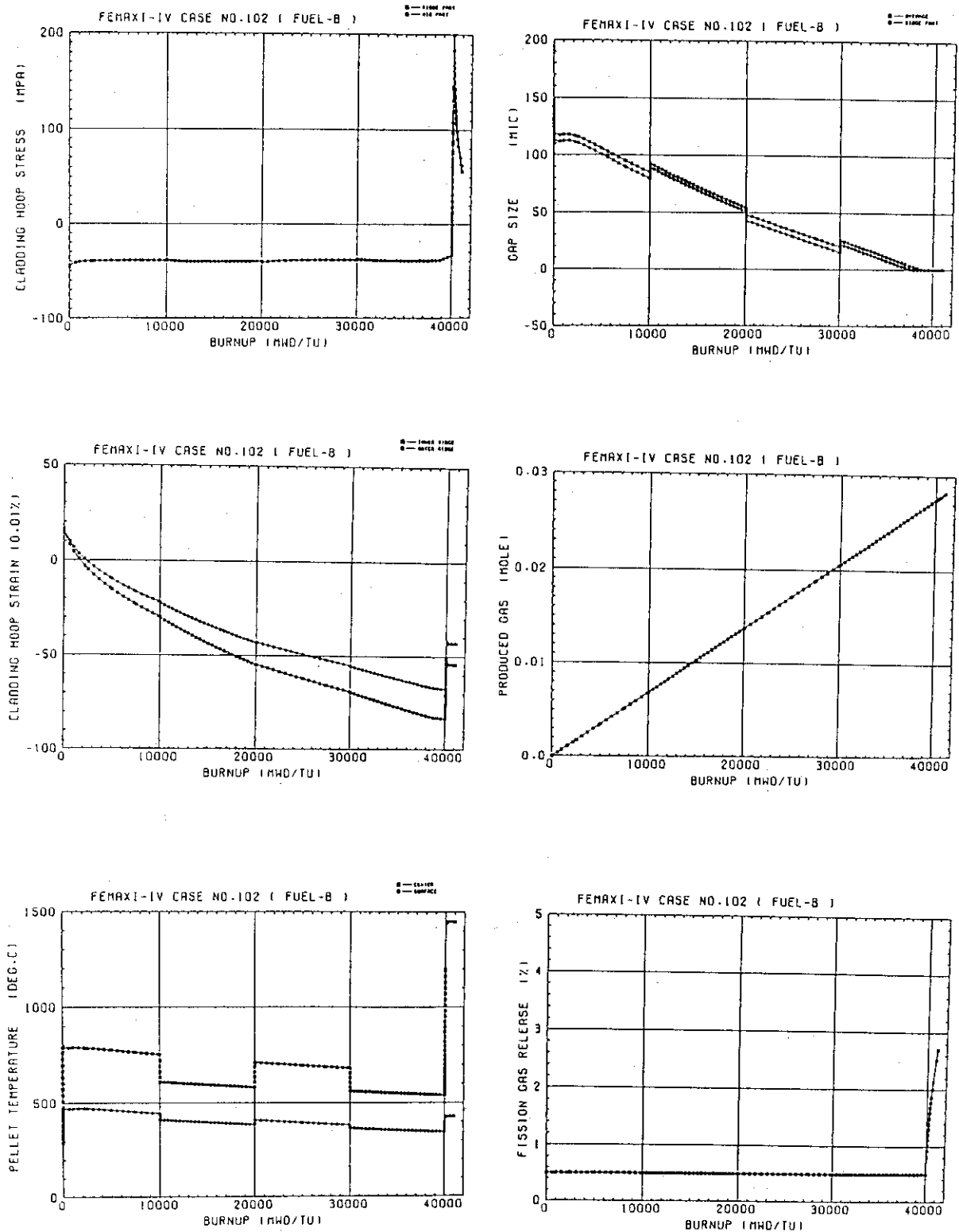


図 5.17 耐PCI性能解析結果 (2/9) ケース 102 (燃料B)

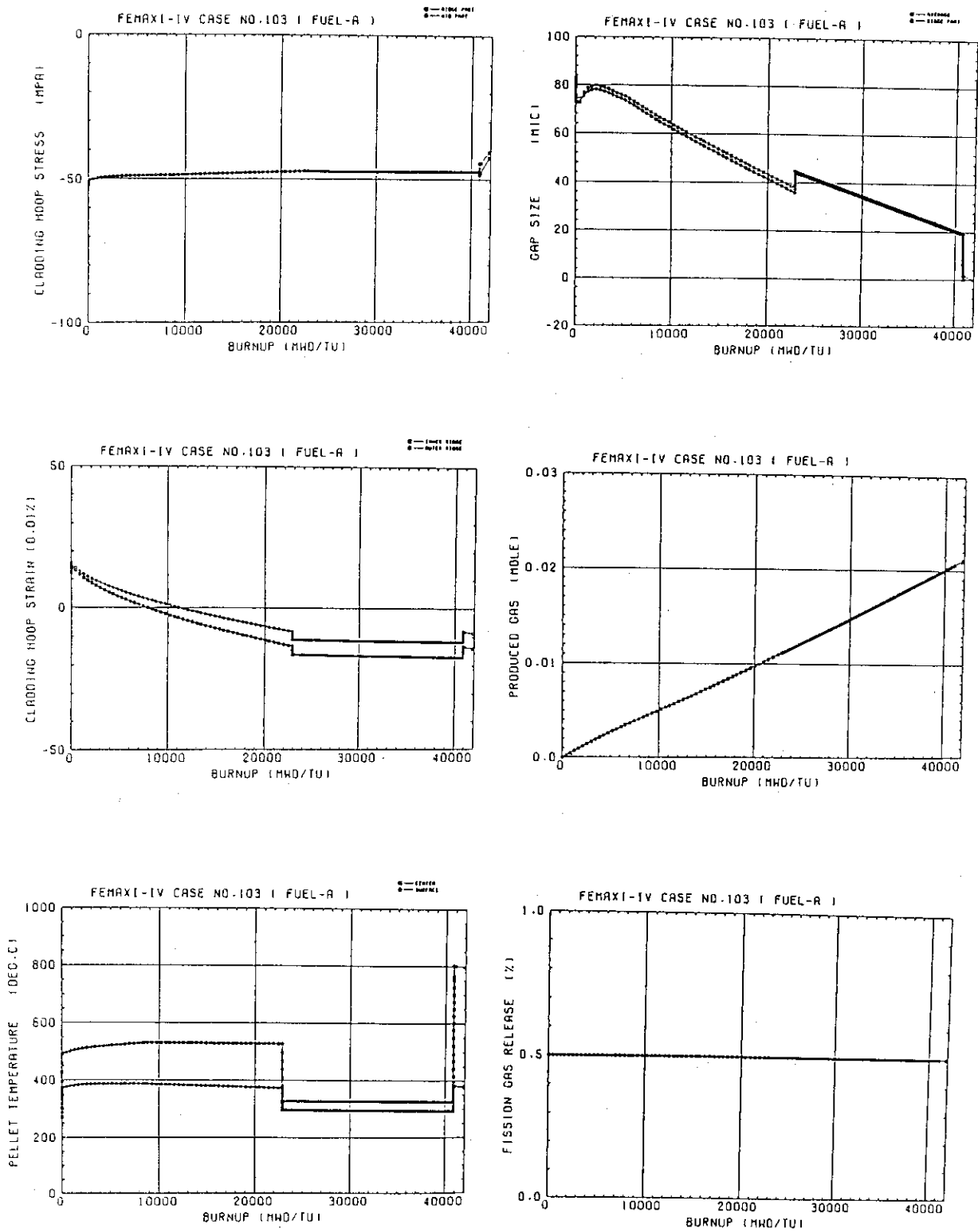


図 5.18 耐 PCI 性能解析結果 (3/9) ケース 103 (燃料 A)

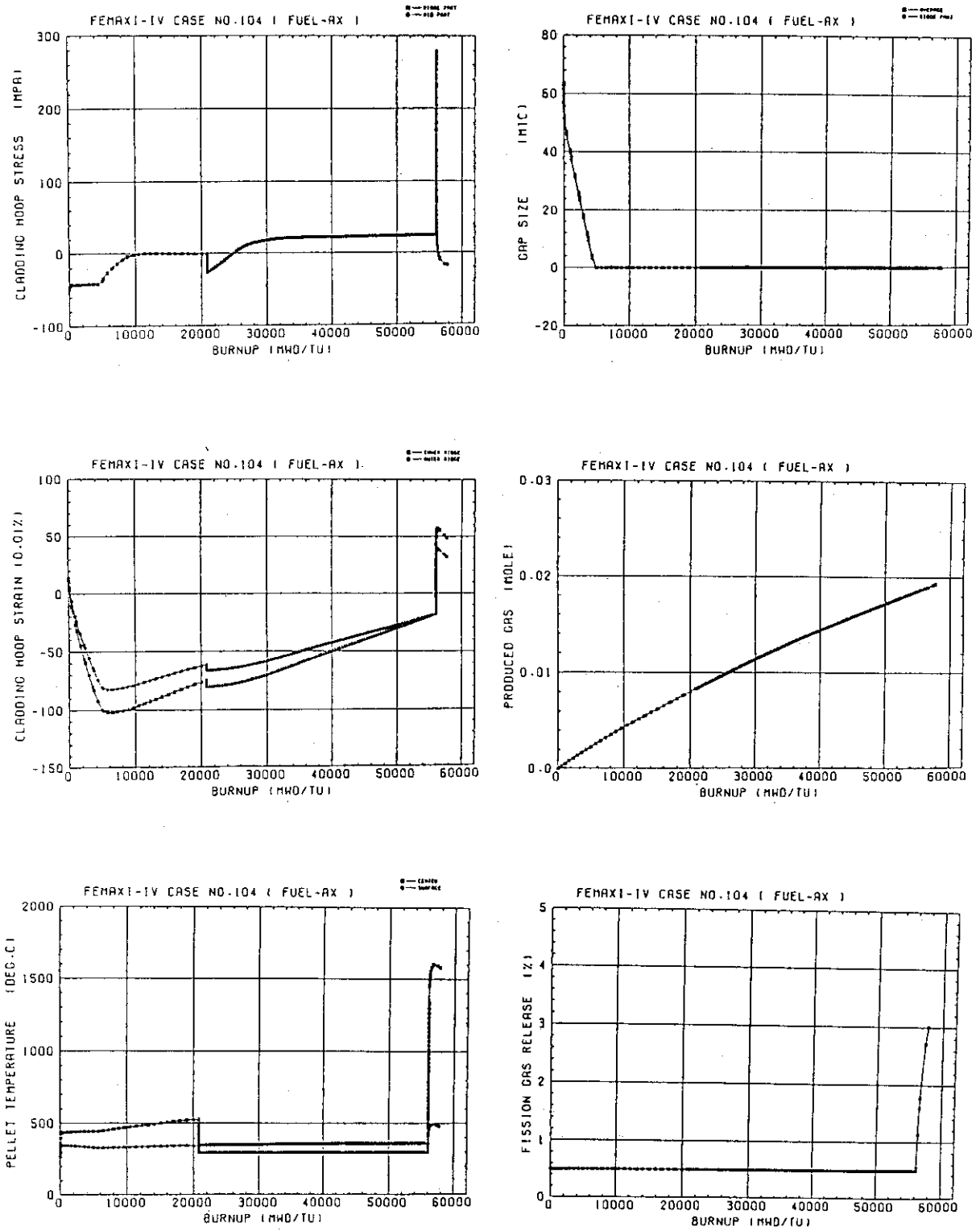


図 5.19 耐 PCI 性能解析結果 (4/9) ケース 104 (燃料 AX)

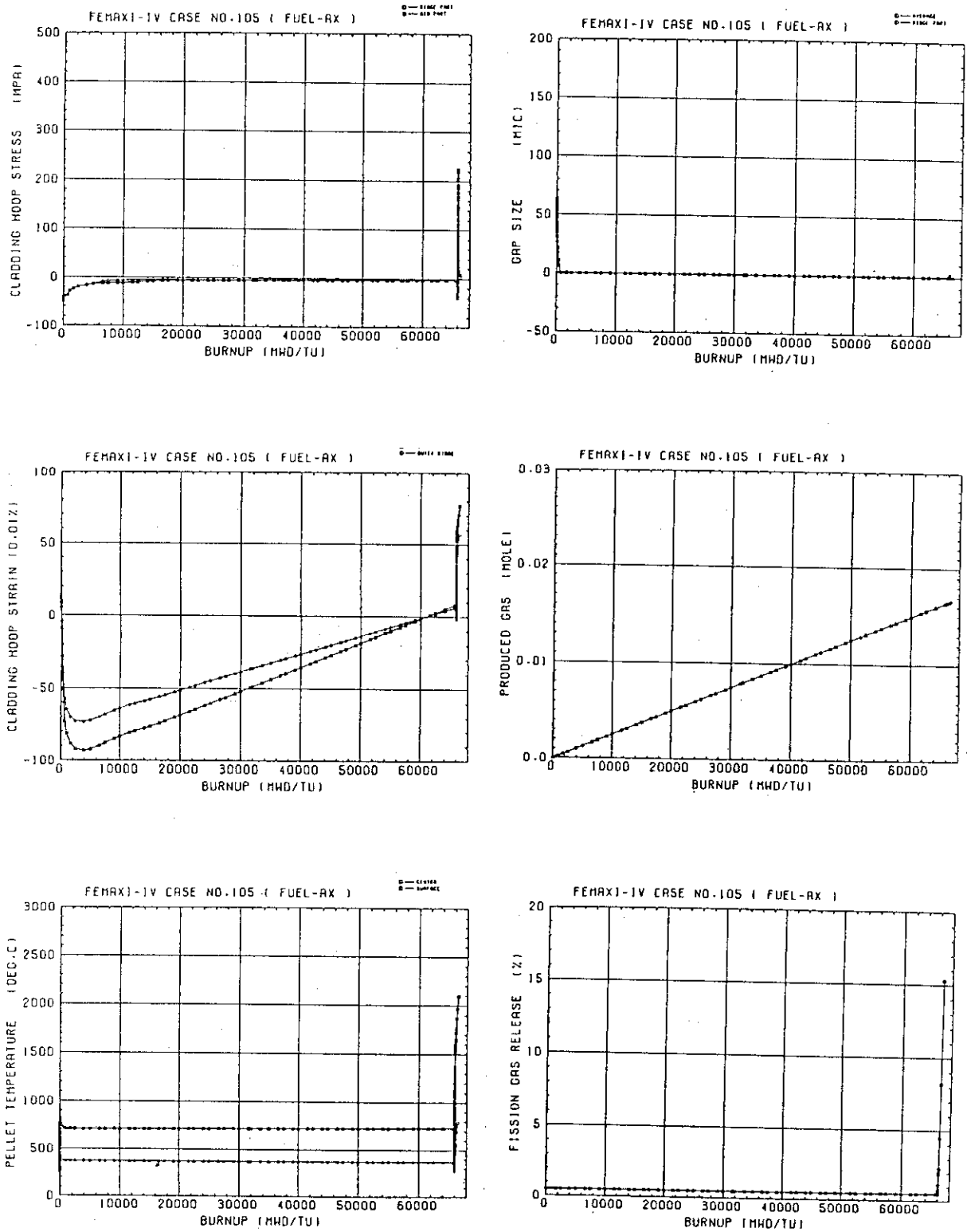


図 5.20 耐 PCI 性能解析結果 (5/9) ケース 105 (燃料 AX)

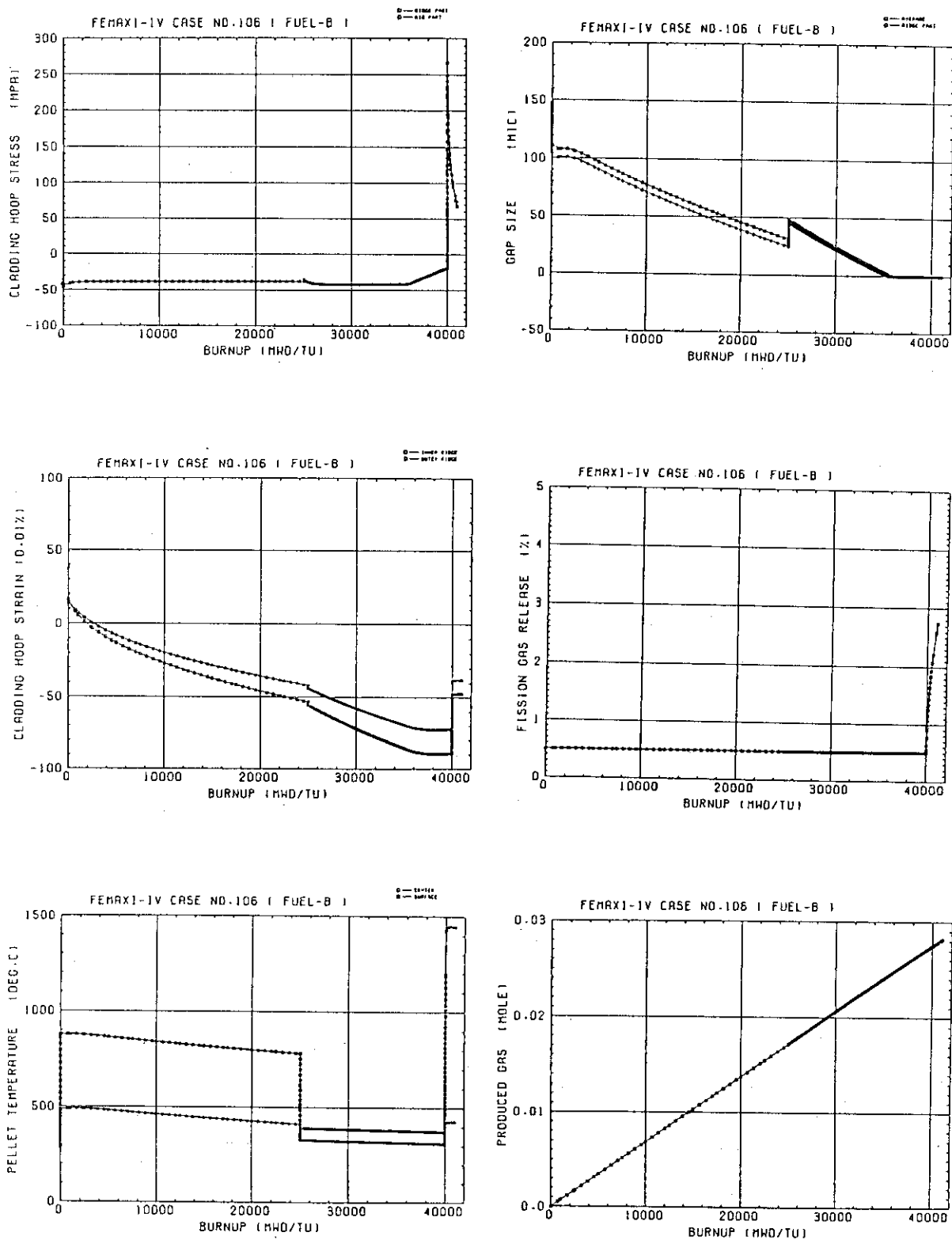


図 5.21 耐 PCI 性能解析結果 (6/9) ケース 106 (燃料 B)



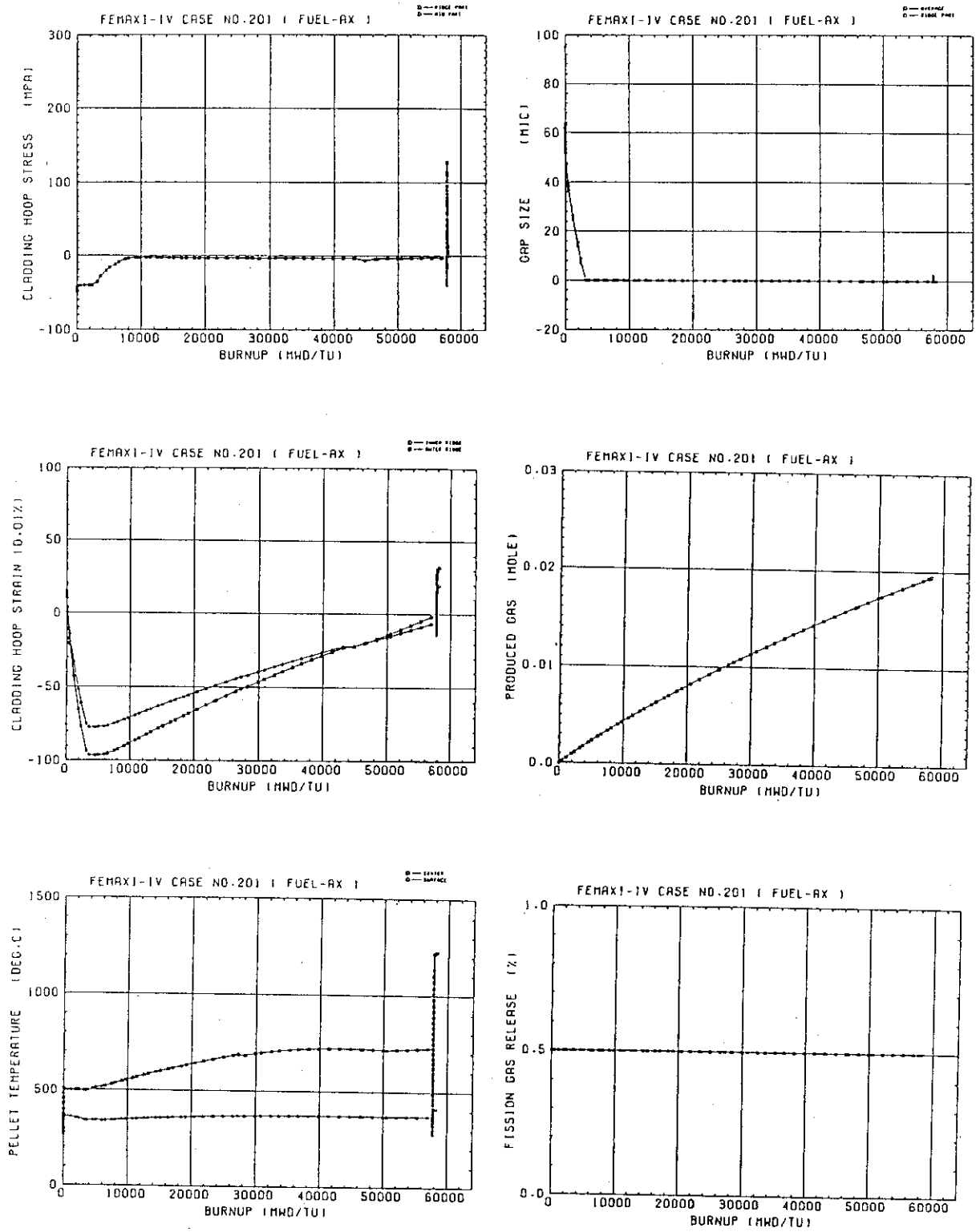


図 5.22 耐PCI性能解析結果 (7/9) ケース 201 (燃料 AX)

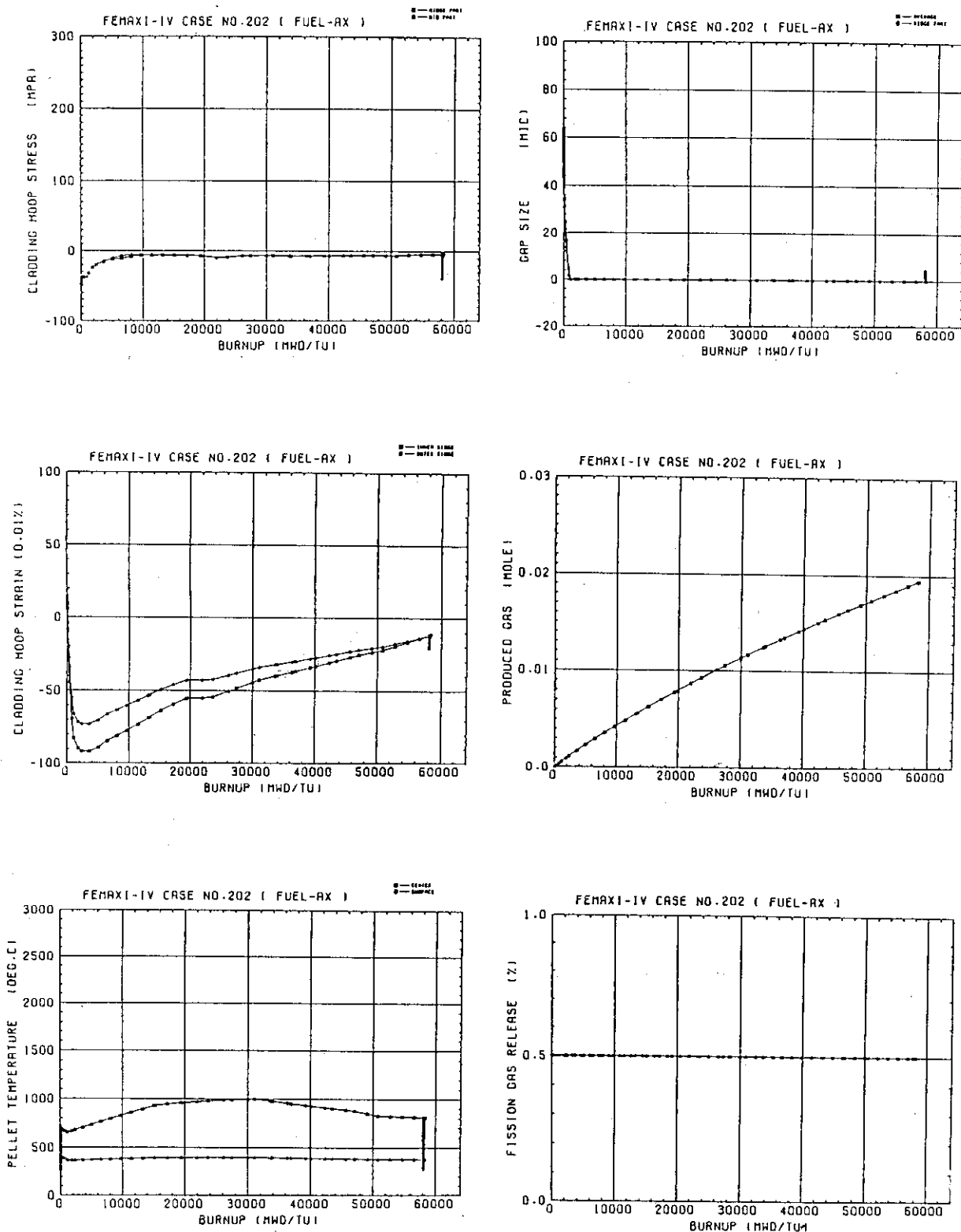


図 5.23 耐 PCI 性能解析結果 (8/9) ケース 202 (燃料 AX)

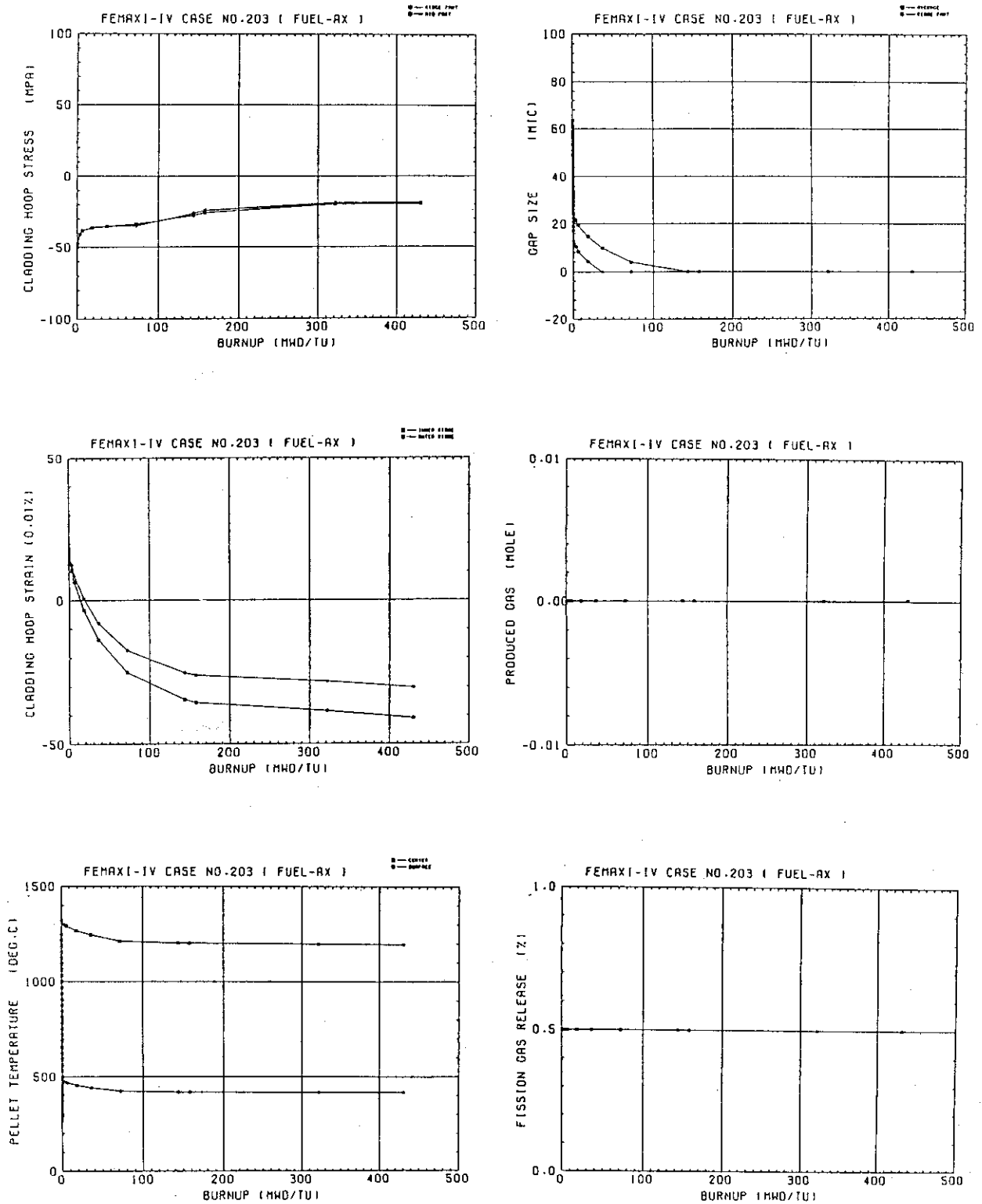


図 5.24 耐 PCI 性能解析結果 (9/9) ケース 203 (燃料 AX)

## 6. 丸棒燃料の研究開発項目

船用炉用丸棒燃料の研究開発は、炉心の高性能化と重要な関連があり、高性能炉心の成立の必須条件である。すなわち、船用炉特有の急激な負荷変動に耐える燃料の開発および経済性と保守性を考慮しての高燃焼度化も要求される。

また、設計評価の段階において、これら高性能炉心用燃料の健全性を評価するための解析コードの開発および検証が必要である。

以上をまとめると、丸棒燃料の研究開発項目は以下に示すようになる。

- (1) 耐負荷変動燃料の開発
  - (2) 高燃焼度燃料の開発
  - (3) 耐P C I 性能解析コードの開発・検証
  - (4) 船体振動・動揺に対する熱水力的安全性の実証
- 以下に、(1)から(3)について主な研究開発内容を示す。

### (1) 耐負荷変動燃料の研究開発項目

現在耐負荷変動改良燃料の候補としてはジルコニウムライナー付燃料被覆管や中心孔付ペレット等が考えられているが、これらの燃料を開発する場合、つぎのような開発試験が必要である。

#### 1) 炉外試験

ジルコニウムライナー燃料被覆管の場合、直接燃料設計に必要な機械特性（強度および熱クリープ特性）の把握の他に改良効果確認試験および事故時挙動評価試験を実施する。

改良効果確認試験は、P C I 破損条件を模擬した試験を実施しあらかじめその改良の効果を把握するものである。事故時挙動評価試験は特に許認可上要求されるもので内圧バースト試験等を実施する。

また燃料破損を想定し被覆管内面（ジルコニウムライナー部）酸化についてもデータを得ておく必要がある。一方、中空ペレットについては、焼きしまり特性試験を実施しペレットが熱的に安定であることを確認するとともにペレットチップ割れ挙動試験を実施しペレットチップの移動の有無を確認しておく必要がある。

またジルコニウムライナー被覆管あるいは中空ペレットを用いた燃料棒の振動特性についてもあらかじめ炉外試験で確認しておく必要がある。

#### 2) 照射試験

耐負荷変動改良燃料の照射試験であるため耐P C I 性能の改良の度合を直接出力急昇試験によって確認する。またジルコニウムライナー被覆管は従来のジルカロイ管とクリープ特性が異なる可能性があり、ベース照射中適宜燃料棒外径測定を実施して解析に用いるクリープモデルの実証データを得ておく。一方、中空ペレットについてはF、P 放出量も中空ペレットに比べて少なくなると予想されるため、高燃焼度燃料開発という観点からP I E時にF、P 放出量を測定する。

## (2) 高燃焼度燃料の研究開発項目

## 1) 高燃焼度燃料の燃料設計

燃料設計上は F、P 放出、被覆管腐食等につき今後も十分なデータ収集を行ない、その影響を評価する必要がある。しかしながら F、P 放出、被覆管の腐食については、種々の実証試験の結果から現時点でもある程度の燃焼レベルまでの知見が得られており、特に燃料の寿命を制限するものではないと考える。

船用炉での達成目標をたとえば 40,000 MWd / t とした時の燃料の健全性評価は、船用炉炉心で想定される炉心条件を想定して行なうが、現行設計燃料で上記目標が達成できない（あるいは非常に余裕がない）場合、改良燃料の開発が必要となる。高燃焼度燃料を開発する場合においても、耐負荷変動性能を考慮に入れた設計がなされなければならない。

現状では高燃焼度下における制限因子を充分定量的に抽出できていないが、仮に F、P 放出が制限因子となる場合には、F、P 放出を少なくする（例；中空ペレットの採用）あるいは F、P 放出の影響を少なくする（例 プレナム体積の増大、初期ヘリウム加圧量の低減等）などが考えられ、これらとたとえば、ジルコニウムライナー被覆管のような耐 PCI 性能改良燃料を組み合わせた燃料の設計を行なうことが考えられる。

## 2) 照射試験

現在までの燃料の照射実績から判断して、現状の PWR 燃料の設計仕様を大幅に変更することなく高燃焼度を達成する事ができると予想される。

したがって、高燃焼度燃料の照射試験およびその後の照射試験は、適当な設計条件のもとで製造された燃料を高燃焼度まで照射し、将来の健全性の見地から照射による燃料挙動に関する情報を調査し高燃焼度における

- (i) 燃料の健全性の確認
- (ii) 設計条件の妥当性の確認
- (iii) 設計基準の裕度の確認
- (iv) その他関連する情報の取得

を目的としたものとなる。

以上、高燃焼度燃料の開発の概要を述べたが、これをまとめて表 6.1 に示す。

## (3) 耐 PCI 性能解析コードの開発・検証

出力変動にさらされる燃料の PCI 破損を予測するには、いくつかの照射条件パラメータ（到達最高出力、出力上昇幅など）を実験炉における出力急昇試験のデータなどから得られる破損しきい値と比較して判断する経験的手法、これと解析手段とを組合せてパラメータをより本質に近い被覆管応力や腐食性 F、P 放出量などにおきかえ、これらに対応するしきい値と比較して判断する半経験的手法、さらに、破損メカニズムまでをモデル化して解析に取入れ理論的に評価する手法などがある。また、これらの決定的な予測手法の他に、破損に関する統計データをベースとした確率論的な予測手法もある。

これらの研究開発は平行的に進められており、特に経験的手法はかなり信頼性の高いものが確立されつつあり、また、半経験的手法についても開発研究が進んでいる。

さて、PWR 実炉燃料に関するこれらの実績を踏まえて船用炉燃料への適用をはかる目的で、

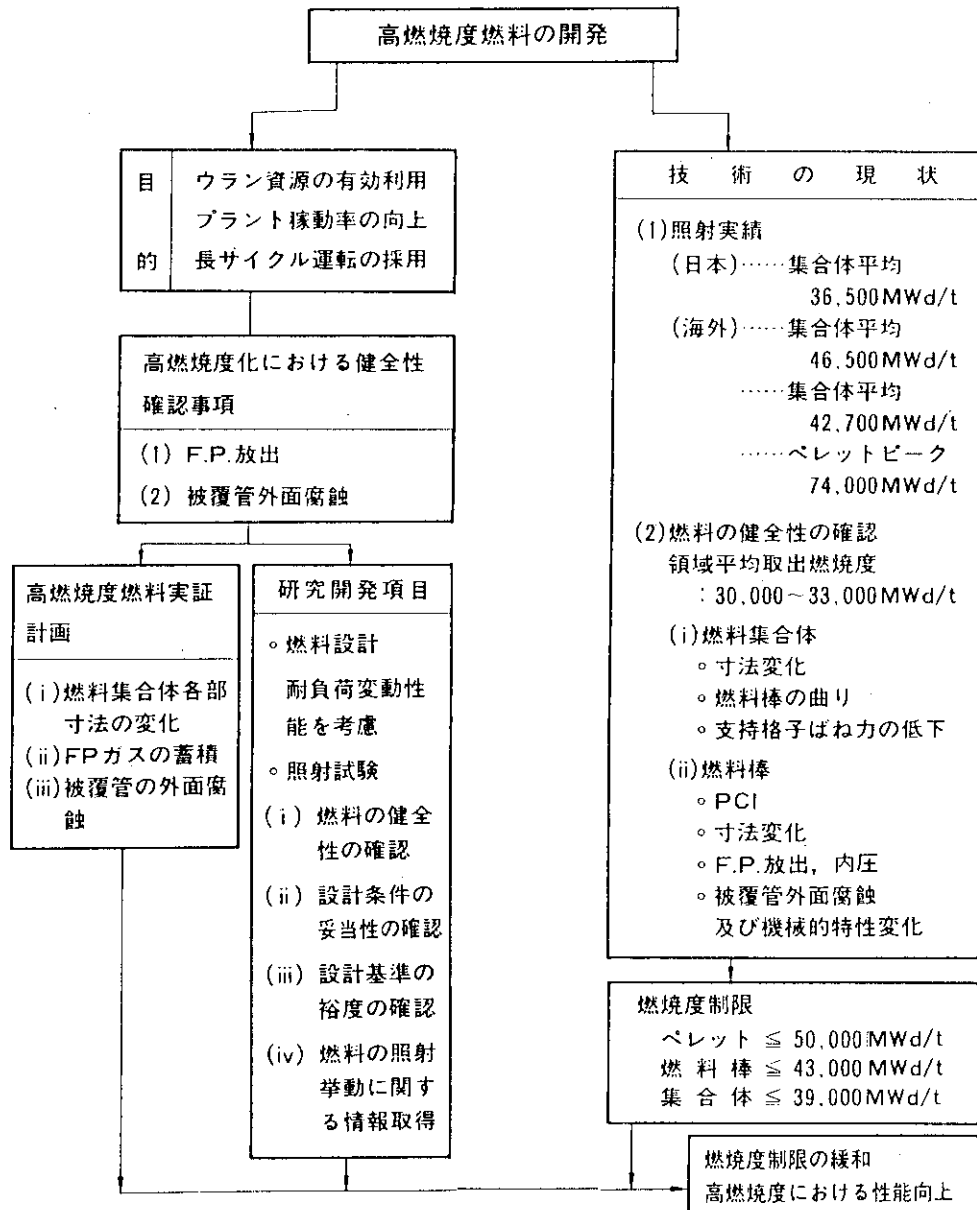
さらに、より詳細で信頼できる PCI 破損の解析的予測手法をめざす場合、その研究開発項目は以下の通りである。

1) PCI 破損予測手法の開発に関する検討

PCI 破損予測手法の確立のために必要な事項につき検討する。このなかで、燃料棒全体挙動解析と出力変動時の PCI を解析する燃料棒局所挙動解析を組合せた解析システムに PCI破損モデルを組合せた、PCI破損予測手法を開発することを想定し、現状の解析システムを船用炉燃料に適用する上での問題点の検討、適当な PCI破損モデルの調査や導入のための検討、さらには適当な公開の照射試験データや改良船用炉の目的に沿って実施されるべき出力急昇試験データの解析による検討を行なう。

本報告でも耐 PCI 性能解析を参考用として実施したが、解析コードのモデル化および実験データによる検証は十分ではないため、評価が困難であり、上記研究開発の必要性を実感させられた。

表 6.1 高燃焼度燃料の開発



## 7. 結 言

半一体型炉丸棒燃料は、両炉心用燃料ともにジルコニウムライナ付被覆管を採用していることや燃料棒径を従来より細くしており、急激な負荷変動や高燃焼度条件に対して、健全性を維持できると考えられる。

しかしながら、このようなライナ付燃料および高燃焼度燃料は、未だ十分な実績はなく、燃料棒健全性を照射実験などにより実証することが、実用化するまでには不可欠である。

また、高性能炉心を達成するために必要不可欠なもう一つの構成要素である高濃度ガドリニア可燃性毒物入り燃料棒あるいは燃料に混合しない非均質型のガドリニア可燃性毒物棒についても、実証が必要である。

今後の燃料の開発方向としては、炉心の高性能化の動向と相互に勘案して、より高燃焼度などの要件を満たす高性能燃料を開発することになると考えられる。

また、熱水力的には船体動揺・振動を考慮して、限界熱流束比を決定して（発電炉が1.30に対して1.53とした）、安全性を確認しているが、動揺時の熱水力的挙動の実験・解析・実証は未だ十分ではなく、今後の課題である。

なお、燃料棒、燃料集合体および支持構造物の機械的強度については、その健全性を考慮した設計としている。特に、細径としたことによる燃料棒の曲がり（ロッドボーイング）に対処するため、支持格子数を多くしている。