

JAERI - M
88-257

改良船用炉 概念確立設計
最適炉心の検討における丸棒燃料の耐PCI性能解析

1988年12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。
入手の問い合わせは、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 榎高野高速印刷

改良船用炉 概念確立設計
最適炉心の検討における丸棒燃料の耐PCI性能解析

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⁺・横村 武宣

(1988年11月25日受理)

当室は62年度から改良船用炉の概念確立設計を実施しており、62年度は炉構成の最適化研究として、最適炉心および炉プラント構成要素の最適化の検討を行った。

本レポートは、最適炉心の検討における最適炉心の丸棒燃料（及び参考用として3種類のサーベイ炉心の丸棒燃料）について、船用炉燃料としての要件である負荷変動時の燃料健全性を確認するための参考として、燃料挙動解析コードFEMAXI-IVによる耐PCI（ペレット-被覆管相互作用）性能解析を行い、各燃料棒の負荷変動時の挙動の評価を実施したものである。

その結果、各炉心燃料棒ともZrライナの効果が持続すると仮定すれば、燃料の設計基準である歪み変化1%以下を満たすという結果を得た。

Concept Design of Advanced Marine Reactor
PCI Analysis for Cylindrical-type Fuels in
Design Study of Optimum Design Core

Noriaki AMBO, Tetsuo NAKAJIMA⁺ and Takeyoshi YOKOMURA

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

(Received November 25, 1988)

We started the design study of the concept design of the Advanced Marine Reactor from FY 1987, and we researched and studied as for the optimization of the core and the components of the reactor plant in FY 1987.

This report describes as for the PCI (Pellet-Cladding Interaction) analysis for the fuel of the optimum core (and fuels of three survey cores) in the rapid change of power load with FEMAXI-IV code (fuel rod behavior analysis code) and the evaluation of its analysis results. That rapid load change is especially needed by the marine reactor (Nuclear ship).

As the results, all fuels are satisfied within less than 1 % strain change criteria of fuel design, if the effect of Zr-liner is continued.

Keywords: Marine Reactor, Fuel, PCI, FEMAXI-IV, Zr Liner

⁺ Department of Fuel Safety Research, Tokai Research Establishment

目 次

1. 序 言	1
2. 解析対象炉心, 燃料	2
3. 解析方法	6
3.1 解析コード	6
3.2 解析ケース	7
3.3 解析条件	7
4. 解析結果	14
5. 評価および検討	48
5.1 PCI評価基準について	48
5.2 歪み変化の検討	48
5.3 評 価	48
5.4 今後の研究開発の方向	49
6. 結 言	50
謝 辞	50
参考文献	51

Contents

1. Introduction	1
2. Analysis Core and Fuel	2
3. Analysis Method	6
3.1 Analysis Code	6
3.2 Analysis Cases	7
3.3 Analysis Condition	7
4. Analysis Result	14
5. Evaluation and Discussion	48
5.1 Evaluation Criteria of PCI	48
5.2 Study of Strain Change	48
5.3 Evaluation	48
5.4 Research and Development Items	49
6. Conclusion	50
Acknowledgements	50
Reference	51

1. 序 言

当室は、昭和58～61年度にわたって実施してきた改良船用炉試設計に引続き、62年度からはその成果を踏まえて、新しい開発要素を含む炉心、炉プラントについて小型・高性能な次期設計炉としての改良船用炉の基本概念を確立するため、概念確立設計を開始した。

62年度は、概念確立設計の1年目として以下の炉構成の最適化を実施した。

- ① 最適炉心の検討⁽¹⁾
- ② 炉プラント構成要素の最適化研究

ここでは、上記の「最適炉心の検討」における最適炉心および3種類のサーベイ炉心の計4炉心の丸棒燃料について、船用炉特有の急激な負荷変動条件下における耐PCI（ペレット-被覆管相互作用）性能解析を行い、燃料の健全性を確認、検討した。

昭和61～62年度には、「海洋における原子動力利用の調査」を実施して、船用炉の用途を明らかにするとともに、各用途に適合する原子炉の特質および技術課題を抽出した。その各用途に共通の課題としてあげられた課題のうち、軽量化、小型化の優先度が最も高く、続いて高信頼性化、システム簡略化、炉心長寿命化という調査結果であった。

この調査結果などを踏まえて最適化の開発目標を設定したが、軽量、小型化を最優先の課題とし、他の共通の技術課題を極力取り入れるものとした。また、最新技術あるいは将来技術を含めた検討とし、高性能にして経済性の優れた炉心を目指した。具体的には陸上発電炉の最新技術あるいは開発目標であるスペクトルシフトおよび高転換炉（HCPWR）技術の適用可能性を検討するものとし、出力密度および燃焼度をさらに高くするとともに、炉心寿命を4年から8年とすることを目標に検討した。

このように高出力密度、高燃焼度の炉心とすると、PCI上より厳しい炉心となりそれらの炉心を成立させるためには燃料の健全性の確認が必須となるため、耐PCI性能解析を行い、その燃料の健全性を確認したものである。

解析は、開発中の燃料挙動解析コードFEMAXI-IVを用いて行った。

また、解析および評価結果を踏まえ、燃料および炉心についての今後の研究、開発の方向を検討した。

2. 解析対象炉心，燃料

今回耐PCI解析を実施する丸棒燃料は，昭和62年度の最適炉心の検討⁽¹⁾における最適炉心の燃料および3種類のサーベイ炉心の燃料である。なお，サーベイ炉心については最適炉心選定時に検討しているため，各炉心の成立性を確認するための参考として解析を行う。

以下に最適炉心の検討の概要を示す。また，解析対象炉心，燃料の仕様，寸法を表2.1に示す。

(1) 最適炉心の検討

以下の炉心についてパラメータサーベイを行い，その結果を踏まえて最適炉心の概念を構築した。

- ① 長寿命・高燃焼度化炉心（スペクトルシフトの検討）
- ② 小型・高ウラン利用率化炉心（高転換炉技術）
- ③ 高燃焼度・高出力密度化炉心

各炉心の設定目標値は，将来の技術見直しを含め以下の通りとした。

出力密度 : 80~100 kW/ℓ

平均燃焼度 : 40,000~50,000 MWd/t

炉心寿命 : 8年または4年

サーベイの結果は次の通りである。

① 長寿命・高燃焼度化炉心

炉心寿命8年，50,000 MWd/tの目標を達成したが，出力密度が60 kW/ℓ程度となり炉心および炉内構造物が大型化する。

② 小型・高ウラン利用率化炉心

出力密度80 kW/ℓ，炉心寿命8年，燃焼度50,000 MWd/tの全目標値を満たす炉心が得られたが，ウラン濃縮度が高く燃料サイクル費が高くなる。

③ 高燃焼度・高出力密度化炉心

出力密度80 kW/ℓ，炉心寿命4年，燃焼度50,000 MWd/tとなり炉心寿命4年で目標性能に近いものとなった。

上記の検討結果を基に最適炉心の概念として，以下の炉心を再構成した。

- ・出力密度 90 kW/ℓ
- ・平均燃焼度 約50,000 MWd/t
- ・炉心寿命 約4年（1バッチ方式）
- ・ケミカルシムを使用しない
- ・炉心高さ 約100 cm

(2) 燃料

各炉心の燃料の仕様，寸法を表2.1に示す。

各燃料棒ともに陸上PWRで使用実績のある丸棒燃料を採用し，船用燃料として細径にするとともにさらに船用炉の特徴である急激な負荷変動に耐えるように被覆管内面にジルコニウム・ラ

イナーを設けている。

このジルコニウム・ライナーは、被覆管損傷の主たる原因である腐食性のFPガスに対するガス遮断効果と応力を緩和する効果がある。この結果により、破損のしきい値が高くなるという実験結果がでている。

特に今回のように高燃焼度のためFPガスの生成、放出量が多い場合には、その効果が重要である。

しかしながら、この効果は、現在のところ高燃焼度についてのデータがない。

各燃料棒の構造は、低濃縮二酸化ウラン焼結ペレットをジルカロイ-4製被覆管（ジルコニウム・ライナー付）内に積層装入し上部にプレナム空間部を設け、ここにコイルばねを入れ、両端にジルカロイ-4製栓を溶接接合して密封したものである。

表 2.1 解析対象炉心燃料の仕様, 寸法

項 目	最適炉心	サ - ベ イ 炉 心		
	Cの改良型	A	B	C
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	両ディッシュペレット	両ディッシュペレット
ペレット直径	4.8 (mm)	7.6 (mm)	8.1 (mm)	5.2 (mm)
ペレット高さ	5.8 (mm)	9.1 (mm)	9.7 (mm)	6.2 (mm)
ペレット濃縮度	9.8 %	16.6 %	11.2 %	11.4 %
ペレット密度 (対理論密度比)	0.95	0.95	0.95	0.95
燃料有効長	1000 (mm)	1108 (mm)	1219 (mm)	1108 (mm)
被覆管材質	ジルカローイ-4SR材 (ライナー付き)	ジルカローイ-4SR材 (ライナー付き)	ジルカローイ-4SR材 (ライナー付き)	ジルカローイ-4SR材 (ライナー付き)
被覆管外径	6.0 (mm)	9.1 (mm)	9.7 (mm)	6.3 (mm)
ギャップ幅	0.1 (mm)	0.4 (mm)	0.2 (mm)	0.1 (mm)
プレナム容積	2.48 (cm ³)	12.7 (cm ³)	21.8 (cm ³)	3.60 (cm ³)
プレナムガス組成	He 100 %	He 100 %	He 100 %	He 100 %
一次冷却水圧力	11.0 (MPa)	11.0 (MPa)	11.0 (MPa)	11.0 (MPa)
一次冷却水温度	553.9 (°K)	553.9 (°K)	553.9 (°K)	553.9 (°K)
高速中性子束	出力 X 9.1E13 (n/cm ² ・sec)	出力 X 1.0E14 (n/cm ² ・sec)	出力 X 1.0E14 (n/cm ² ・sec)	出力 X 1.0E14 (n/cm ² ・sec)
ペレット総重量	189 (gr)	519 (gr)	648 (gr)	243 (gr)
炉心平均燃焼度	52.6 (GWD/TU)	43 (GWD/TU)	50 (GWD/TU)	50 (GWD/TU)
炉心最大燃焼度	118 (″)	84 (″)	105 (″)	97 (″)

表 2.1 (続き)

項 目	最適炉心	サ ー ベ イ 炉 心		
	Cの改良型	A	B	C
平均線出力密度	7.8 (KW/M)	10.4 (KW/M)	9.9 (KW/M)	8.2 (KW/M)
最大線出力密度	36 (KW/M)	48 (KW/M)	46 (KW/M)	38 (KW/M)
炉心平均出力密度	90 (KW/l)	80 (KW/l)	60 (KW/l)	80 (KW/l)
水力的等価直径	8.27 (mm)	7.52 (mm)	6.77 (mm)	10.44 (mm)
燃料棒ピッチ	0.82 (cm)	1.09 (cm)	1.12 (cm)	0.91 (cm)
冷却材 炉心入口温度	271.1 (°C)	271.0 (°C)	271.0 (°C)	271.1 (°C)
冷却材 炉心平均温度	279.8 (°C)	280.7 (°C)	280.7 (°C)	279.8 (°C)
冷却材 炉心出口温度	288.5 (°C)	290.3 (°C)	290.3 (°C)	288.5 (°C)
冷却材流量	4000.0 (t/h)	3600.0 (t/h)	3600.0 (t/h)	4000.0 (t/h)
炉心平均流速	2.24 (m/s)	1.69 (m/s)	1.69 (m/s)	2.24 (m/s)

3. 解析方法

3.1 解析コード

本解析は、中島ら⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾によって開発中の燃料挙動解析コードであるFEMAXI-IVの現時点における最新バージョンを使用して行った。FEMAXI-IVコードは、ハルデン計画スタズビックランプ計画、バッチル計画等から得られた燃焼度数万MWd/tまでの実験結果を中心に照合計算を行いつつ開発を進めているコードである。したがって、本研究における解析対象燃焼度は、現在の検証範囲を大きく超えているが、参考のために解析を実施したものである。

FEMAXI-IVコードは、FEMAXI-III⁽⁵⁾コードを更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主目的としているのに対して、FEMAXI-IVコード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、この現象を次の単純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、出力上昇時においては、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、粒内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。

3.2 解析ケース

解析は，最適炉心の燃料棒について照射履歴を変えて，2ケース実施する。また，参考として行うサーベイ炉心A，B，Cについては各1ケースずつ行う。

ケースNo.とそれぞれに対応する炉心名，燃料型式名を以下に示す。

ケースNo.	燃料型式名	炉心名
ケース7	Cの改良型	最適炉心
ケース8	同上	同上
ケース12	A	サーベイ炉心A (小型・高ウラン利用率化炉心)
ケース14	B	サーベイ炉心B (長寿命・高燃焼度化炉心)
ケース16	C	サーベイ炉心C (高燃焼度・高出力密度化炉心)

3.3 解析条件

(1) 出力変動パターンおよび出力履歴

出力変動パターンは全ケースとも図3.1に示すように，急激に1回出力急昇する負荷変動で代表させた出力変動パターンとしている。出力変動パターンは本船用炉の負荷変動条件(表3.1に示す)をもとに決定するが，本解析では負荷変動速度(3%/sec)は合わせ，また負荷変動回数は1回とし，実際の回数(出力上昇：耐用期間中20,000回など)について細かく解析することとはしなかった。これは，短時間の負荷変動のくり返しはクリープなどによる応力緩和が十分ではないため，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考えられるからである。なお，出力急昇のくり返しの影響については，ハルデン炉において行われた実験の報告⁽⁶⁾がある。

また，出力履歴の入力条件を表3.2に示すが，いずれも平均出力でベース照射を最大燃焼度近くまで続け，いったん低出力で約1~2万MWd/tの間維持した後，最高線出力密度まで3%/secの出力上昇速度で出力急昇させてそのまま一定に保持して最大燃焼度に至るものである。ケース8は，ベース照射の出力を平均線出力密度より高目にとったケースである。

(2) 軸方向出力分布

本解析は燃料棒の軸方向を7~10セグメントに分割して各セグメント単位で計算していくが，出力分布を実際に近いものにするために，炉心寿命初期(BOL)，中期(MOL)および末期(EOL)毎の軸方向出力分布をセグメント数で分割して近似入力している。

サーベイ炉心はいずれも燃焼計算を実施していないため，前年度の炉心(試設計評価炉心)の計算結果としての軸方向出力分布としている。軸方向出力分布を図3.2に示す。

最適炉心(ケース7)の各寿命毎の軸方向出力分布を図3.3に示す。また，ケース8の最適炉心は，炉心寿命中一定として入力している。ケース8の軸方向出力分布を図3.4に示す。

(3) インプット上の考慮点

今回の耐PCI性能解析の入力では、前回の解析⁽⁷⁾経験結果を踏まえて、以下の点についてインプット上の考慮を行った。

- ① タイムステップ幅の決定条件中、FPガス放出、ギャップガス流動条件、非定常伝熱解析における制約条件を改めた。
- ② 被覆管軸方向照射成長モデルを導入した。
- ③ 軸力の発生条件を改めた。(最小ギャップ幅が $3\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ で軸力を発生するモデルとした。)
- ④ 伝熱計算でペレットクリープの参照温度の上限値を 1200°C から 1600°C に改めた。
- ⑤ 伝熱計算でリロケーションパラメータを0.5から0.3に改めた。
- ⑥ クリープ計算で使用する高速中性子束の上限値をMATPROモデルの場合 $10^{14}\text{ n/cm}^2\text{-sec}$ とした。(適用範囲 $\sim 2 \times 10^{13}\text{ n/cm}^2\text{-sec}$)

なお、パラメータの設定はFEMAXI-IV検証($\sim 40\text{ GWD/tU}$)の結果定めた値である。

表 3.1 改良船用炉負荷変動条件

- (1) 出力上昇及び減少 (耐用期間中 20,000回)
 基底負荷 ← → 常用負荷
 3%/sec
- (2) 急速出力減少 (耐用期間中 200回)
 全負荷 → 基底負荷
 1 sec
- (3) 前後進切換 (耐用期間中 各500回)
 a 前進より後進
 全負荷 → 基底負荷 → 後進全負荷
 5 sec 50 sec 3%/sec
 b 後進より前進
 後進全負荷 → 基底負荷 → 全負荷
 5 sec 50 sec 3%/sec
- 各負荷状態での出力比は次の通り
- | | |
|-------|------|
| 全負荷 | 100% |
| 常用負荷 | 90% |
| 後進全負荷 | 80% |
| 基底負荷 | 10% |
- (4) スクラム回数
 耐用期間中 1,000回

表 3.2 解析条件数値一覧

ケース No	燃料型式	P_1 (W/cm)	$P_2^{(*)}$ (W/cm)	P_3 (W/cm)	BU_1 (GWD/TU)	BU_2 (GWD/TU)	BU_3 (GWD/TU)	α_2 (W/cm \cdot min)	プレナム圧力 (MPa)
7	Cの改良型	36	78	360	97	117	118	648	1.75
8	Cの改良型	16	159	360	118	118+1hr	118+72hr (118.3)	688	1.75
12	A	48	104	480	63	83	84	864	2.3
14	B	46	99	460	84	104	105	828	3.25
16	C	38	82	380	76	96	97	684	2.8

(*) average

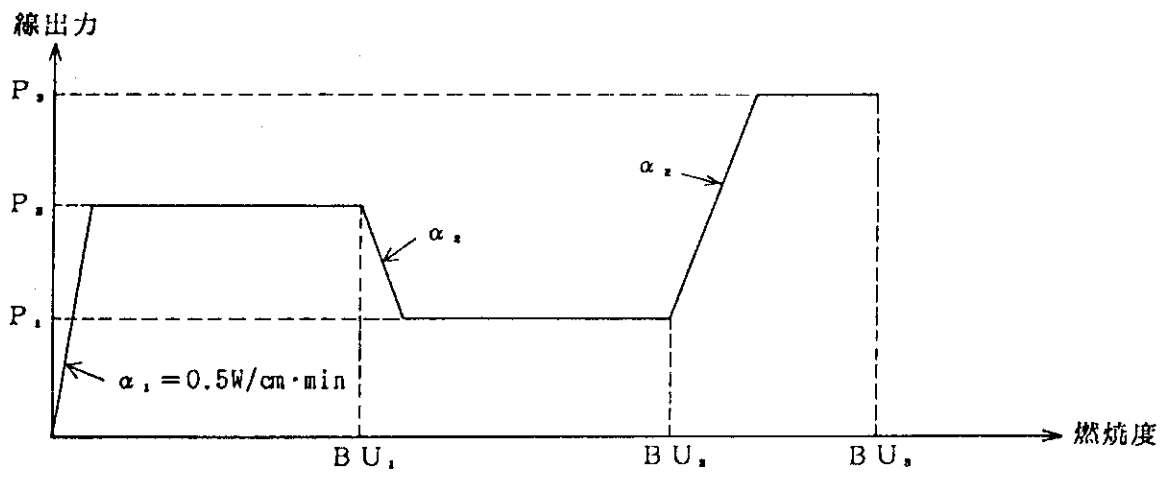


図 3.1 出力変動パターン

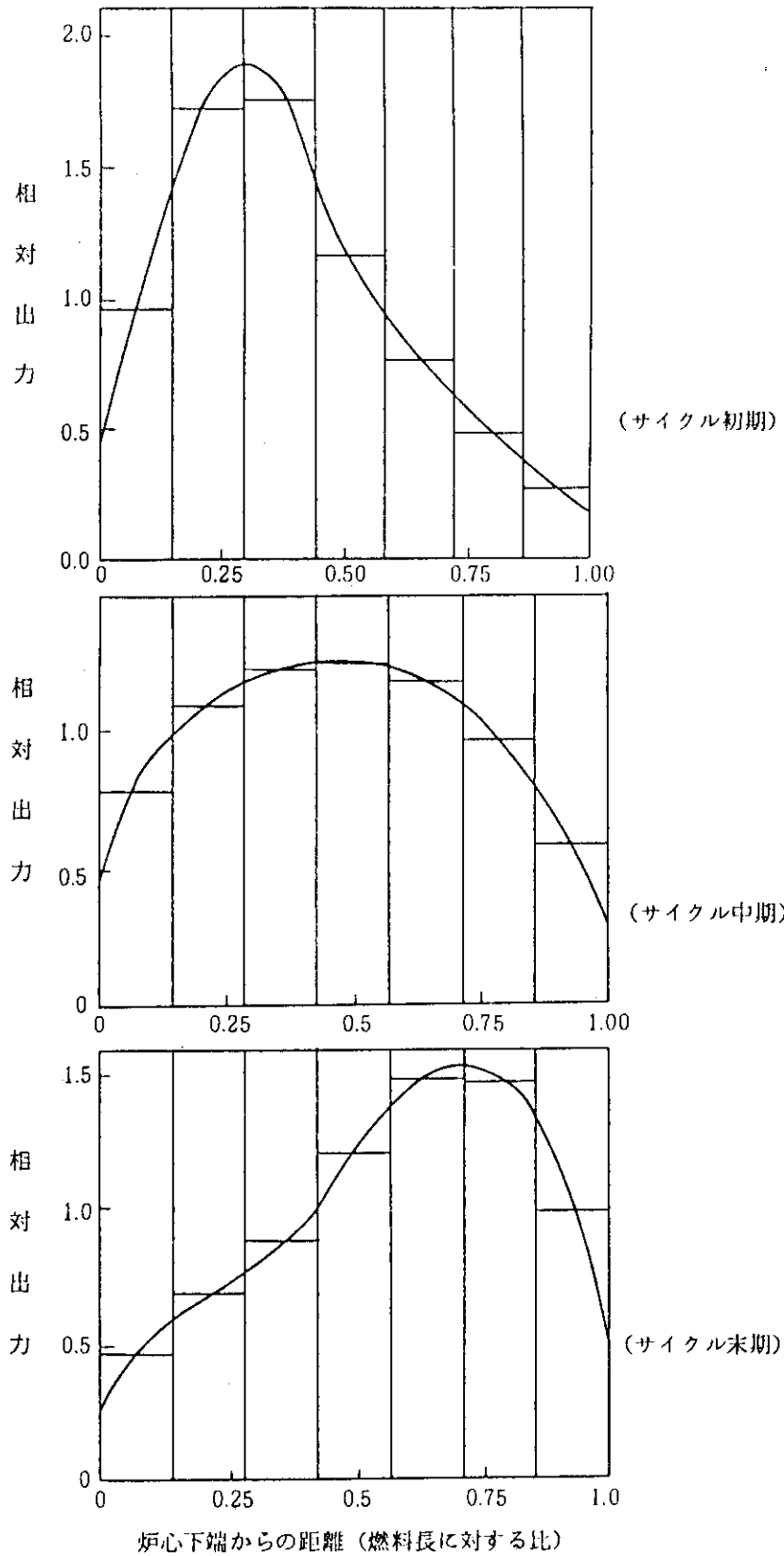


図 3.2 軸方向平均出力分布
(サーベイ炉心燃料：ケース 12, 14, 16)

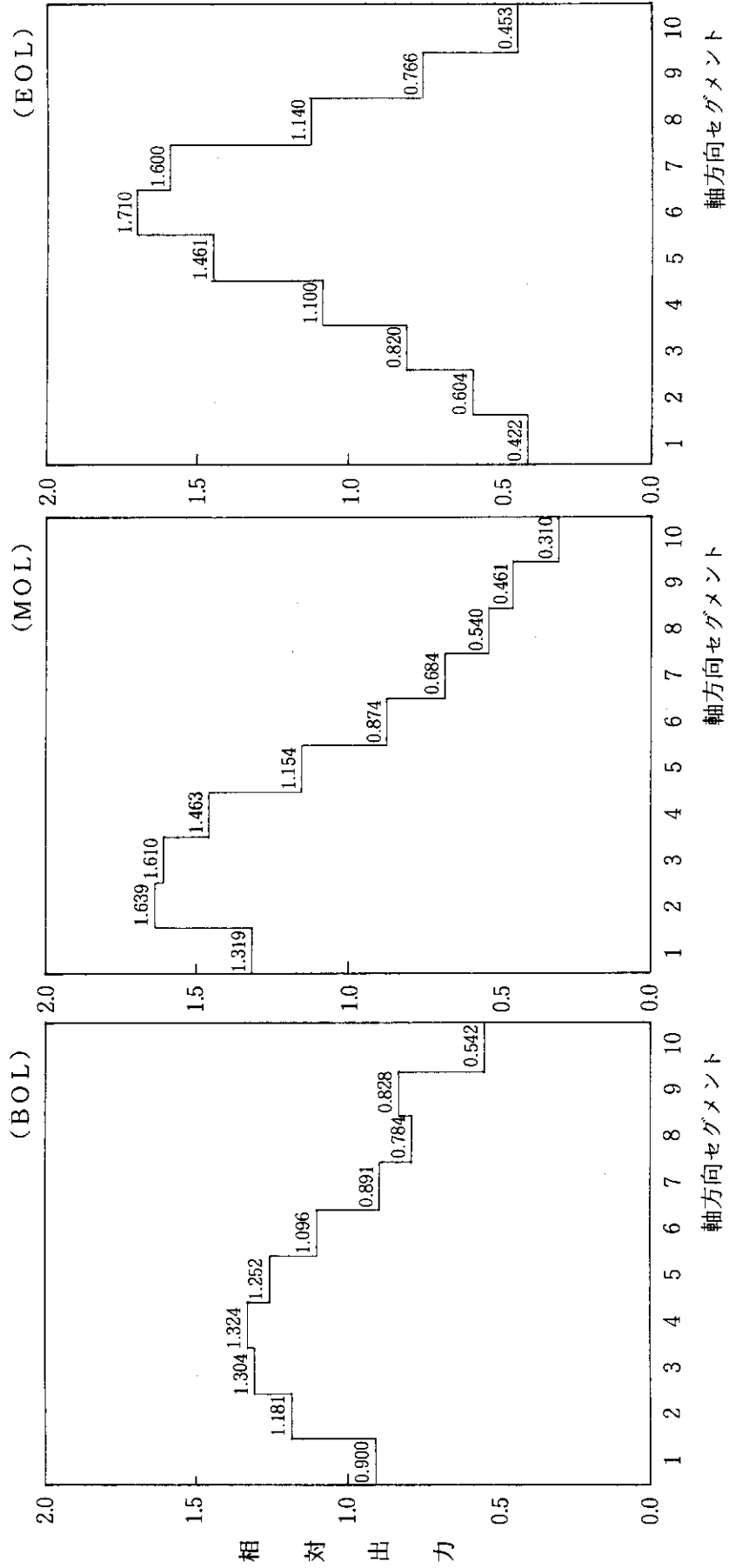


図 3.3 軸方向出力分布 (最適炉心: ケース 7)

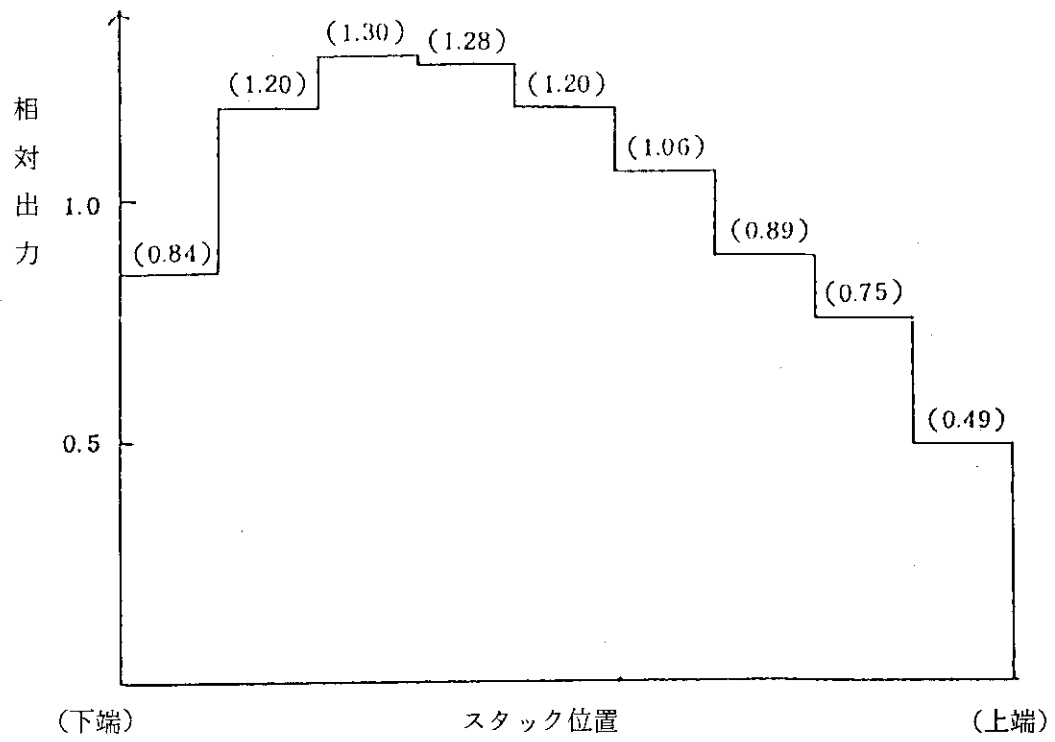


図 3.4 軸方向出力分布 (炉心寿命中一定)
(最適炉心: ケース 8)

4. 解析結果

解析結果について、過渡変化を図4.1～4.5に、また、最高値など解析結果の数値をまとめて表4.6に示す。

図番とケースNoとの対応は以下である。

図番号	ケースNo	炉心名
図4.1	ケース7	最適炉心
図4.2	ケース8	最適炉心
図4.3	ケース12	サーベイ炉心A
図4.4	ケース14	サーベイ炉心B
図4.5	ケース16	サーベイ炉心C

また、各図に示す出力パラメータは以下に示すように、燃料中心温度、FPガス放出率、被覆管応力および被覆管歪みなどである。

出力パラメータ：

- ① 燃焼度に対する燃料ペレット温度変化（中心，表面温度）（℃）
- ② 燃焼度に対するギャップ幅変化（リッジ部，平均）（ μm ）
- ③ 燃焼度に対するFPガス生成量変化（モル）
- ④ 燃焼度に対するFPガス放出率変化（％）
- ⑤ 線出力密度に対する被覆管円周応力（MPa）
（燃料ペレットリッジ部，中央部）
- ⑥ 線出力密度に対する被覆管円周歪み（％）
（リッジ部内側およびリッジ部外側）
- ⑦ 線出力密度に対する燃料ペレット温度（中心，表面温度）（℃）
- ⑧ ランプ後高出力保持中の被覆管円周応力変化（MPa）
（燃料ペレットリッジ部，中央部）
- ⑨ ランプ後高出力保持中の被覆管円周歪み変化（％）
（リッジ部内側およびリッジ部外側）
- ⑩ ランプ後高出力保持中の燃料ペレット温度変化（中心，表面温度）（℃）

上記でリッジ部とあるのは、燃料 UO_2 ペレットが照射によって鼓形に変形する時の凸部エッジ部（両端）である。リッジ部が最も被覆管応力，歪みが大きいため，リッジ部に注目する。また，⑥および⑨被覆管歪みにおいてリッジ部内側（INNER RIDGE）と外側（OUTER RIDGE）とあるが，これはリッジ部の被覆管の内側，外側歪みを示す。

なお，サーベイ炉心については⑧から⑩のランプ後高出力保持中のパラメータ変化拡大図は示していない。（サーベイ炉心A～C：ケース12，14および16）

以下に各ケースの解析結果について記述する。

全ケースともに歪み変化が1％以下ではあるが，燃焼度が高いため，FPガス放出率が高く，

被覆管応力も300MPaを超えている。

(1) ケース7 (最適炉心) (図4.1参照)

ケース7は最適炉心燃料に対する解析である。燃焼度97GWd/tUまで平均線出力78W/cmで照射し、その後117GWd/tUまで線出力36W/cmを保持後、出力上昇速度648W/cm・minで最大線出力360W/cmまでランプし、その出力を1GWd/tU間保持する履歴で解析した。

その結果はベース照射での出力レベルが低いのでFP放出が少なく、360W/cm到達時での温度は、図4.1の(2/6)と(6/6)に示すように、1386℃である。従って、燃料のクリープの効果は小さく応力は高くなり、(1/6)と(4/6)に示すように331MPaまで上昇した。360W/cmでの出力保持期間中の燃料ペレット中心温度の最大値は、1447℃である。

また、ランプ直前での被覆管円周歪みは、-0.14%と圧縮側にかなり大きな歪みとなっている。これはギャップ幅のゆとりが小さく外圧クリープの効果小さいためと高燃焼度によるペレットの固体スウェリングの膨れが大きく内側からの力が大きいためである。(1/6, 4/6参照)最大歪み変化は、0.58%である。(ランプ後出力保持期間中)

以下に、出力急昇(ランプ)直前、直後および出力保持中の各重要パラメータの解析結果数値を模式的に示す(表4.1)。

(2) ケース8 (最適炉心) (図4.2参照)

ケース8は最適炉心燃料に対する解析その2である。ケース7とは照射履歴を変えている。燃焼度118GWd/tUまで出力159W/cmで照射し、その後1時間、16W/cmで出力を保持後、最大線出力360W/cmまで30秒で出力急昇し、72時間出力を保持した。

ケース7に比べるとベース照射は多少高いので、図4.2(3/6)に示すように、ペレット中心部では多少FP放出がある。ランプ後360W/cm到達時の最大円周応力は、(1/6)と(5/6)に示すように326MPa、最大円周歪み変化は、(1/6)と(6/6)に示すように0.76%という結果である。

ケース7と比較すると、ギャップ中でのXe比がケース7より高いので熱フィードバックが早期に計算されており、中心温度の最大値は、(2/6)と(6/6)に示すように2169℃まで上昇している。また、円周歪みもベース照射レベルが高いため、ランプ直前で0.53%、最大で1.29%といずれも大きく、ケース7よりも厳しい結果である(表4.2)。

(3) ケース12 (サーベイ炉心A) (図4.3参照)

ケース12はサーベイ炉心A(小型・高ウラン利用率化炉心)の丸棒燃料についての解析である。計算結果は、ペレット中心温度の最大値が、図4.3(2/5)に示すように2210℃、最大FP放出率が、同図(3/5)に示すように全体12%(局所33.1%)、被覆管リッジ部最大円周応力は、(1/5)に示すように359MPa、被覆管円周歪み変化の最大値は、0.86%であった。

サーベイ炉心Aの燃料は、プレナム容積を当初の計画値(4.7cc)から12.7ccに大きくして

いる。4.7 ccは陸上発電炉に倣いプレナム長さを燃料全長の10%としたものであるが、その後の設計検討の結果でプレナム長さを長くしたものである。

このプレナム容積の効果は、プレナム容積が大きいと、ガス流動が大きくなり、このため局所的なXe比が低下し、熱伝達がよくなり（ギャップコンダクタンスが大きくなる）ペレット中心温度の増加を低く抑えることができ、FP放出率も低くすることができる。一方、プレナム容積が大きいと内圧が低くこのため外圧クリープは大きくなる。したがって、ランプ時におけるペレットと被覆管との接触力が大きく、被覆管の応力は高くなる結果となる。また、ランプ中の応力緩和も速いことになる。

また、今回の炉心は高速中性子束が大きく被覆管の外圧クリープを大きくしているため、上記のプレナムを大きくするメリットを小さくしている（表4.3）。

(4) ケース14（サーベイ炉心B）（図4.4参照）

ケース14は、サーベイ炉心B（長寿命・高燃焼度化炉心）の丸棒燃料についての解析である。

計算結果は、燃料中心温度の最大値は、図4.4（2/5）に示すように2023℃であり、FP放出率の最大値は、同図（3/5）に示すように全体約9%、局所最大で25%である。また、被覆管リッジ部における最大円周応力は、（1/5）に示すように34.9MPa、最大円周歪み変化は0.81%であった。

なお、本燃料もプレナム容積を当初の値（5.9 cc）から2.1.8 ccへと大きくした。プレナム容積を大きくした効果は、ケース12とほぼ同じ応答であったが、定量的にはプレナム容積の大きいケース14の方がそのよい点が反映されている。その理由はギャップ幅が狭い（ケース14：190 μm、ケース12：410 μm）ため、外圧クリープによる接触開始時期の差がケース12より小さいことによる（表4.4）。

(5) ケース16（サーベイ炉心C）（図4.5参照）

ケース16は、サーベイ炉心C（高燃焼度・高出力密度化炉心）の丸棒燃料についての解析である。

計算結果は、燃料中心温度の最大値は、図4.5（2/5）に示すように1412℃であり、FP放出率の最大値は、同図（3/5）に示すように全体1.7%局所最大で4.4%である。また、被覆管リッジ部における最大円周応力は、（1/5）に示すように34.2MPa、最大円周歪み変化は0.61%であった。

温度が低いのは線出力が380 W/cmと低いこととギャップが狭い（120 μm）ことによる。

なお、接触力はペレット温度が低いためペレットクリープによる緩和が少ないため大きい。

このケースの解析結果において、温度が低い点はPCIの観点から好ましいことであるが、応力は大きい（表4.5）。

表 4.1 解析結果 (ケース 7 : 最適炉心)

	出力急昇直前	出力急昇直後	出力保持中
ペレット中心温度 ($^{\circ}\text{C}$)	354	1386 (最大) 1447	1435
局所FPガス放出率 (%) (平均)	0.5 (0.5)	0.9 (0.7)	6.1 (1.8)
被覆管リッジ部円周応力 (MPa)	37	331 (最大) 332	66
被覆管リッジ部円周歪み (%)	-0.14	0.40 (最大) 0.45	0.39
		0.54	0.59

表 4.2 解析結果 (ケース 8 : 最適炉心)

	出力急昇直前	出力急昇直後	出力保持中
ペレット中心温度 ($^{\circ}\text{C}$)	307	1392 (最大) 2169	2169
局所FPガス放出率 (%) (平均)	1.4 (0.7)	1.8 (0.9)	53.3 (28.8)
被覆管リッジ部円周応力 (MPa)	-13	326 (最大) 326	3
被覆管リッジ部円周歪み	0.53	0.98 (最大) 1.29	1.07
		0.45	0.76

表 4.3 解析結果 (ケース 1 2 : サーベイ炉心 A)

	出力急昇直前	出力急昇直後	出力保持中
ペレット中心温度 ($^{\circ}\text{C}$)	3 9 9	1 6 1 1 (最大) 2 2 1 1	1 6 6 3
局所 F P ガス放出率 (%) (平 均)	0. 5 (0. 5)	0. 7 (0. 6)	3 3. 1 (1 1. 8)
被覆管リッジ部円周応力 (MP a)	1 7	3 5 8 (最大) 3 5 9	- 5 1
被覆管リッジ部円周歪み	- 1. 4 0	- 0. 7 7 (最大) - 0. 5 4	- 0. 8 7
		0. 6 3	0. 8 6

表 4.4 解析結果 (ケース 1 4 : サーベイ炉心 B)

	出力急昇直前	出力急昇直後	出力保持中
ペレット中心温度 ($^{\circ}\text{C}$)	3 7 3	1 5 4 9 (最大) 2 0 2 3	1 5 3 7
局所 F P ガス放出率 (%) (平 均)	0. 5 (0. 5)	0. 7 (0. 6)	2 5. 1 (8. 6)
被覆管リッジ部円周応力 (MP a)	3 5	3 4 9 (最大) 3 4 9	- 5 1
被覆管リッジ部円周歪み	0. 2 6	0. 9 1 (最大) 1. 0 7	0. 7 7
		0. 6 5	0. 8 1

表 4.5 解析結果 (ケース 16 : サーベイ炉心 C)

	出力急昇直前	出力急昇直後	出力保持中
ペレット中心温度 ($^{\circ}\text{C}$)	359	1372 (最大) 1413	1395
局所FPガス放出率 (%) (平均)	0.5 (0.5)	0.6 (0.5)	4.4 (1.7)
被覆管リッジ部円周応力 (MPa)	56	342 (最大) 342	81
被覆管リッジ部円周歪み	0.27	0.84 (最大) 0.88	0.82

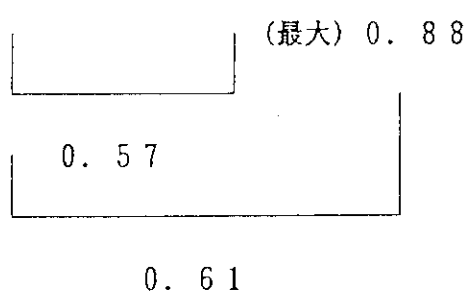


表 4.6 解析結果のまとめ

燃 料 型 式		最適炉心 (Cの改良型)		サーベイ炉心A	サーベイ炉心B	サーベイ炉心C
ケース番号		7	8	12	14	16
ベ中 レ心 ッ温 ト度 (°C)	最高温度	1447	2169	2211	2023	1413
	ランプ到達時	1386	1392	1611	1549	1372
	最終温度	1435	2169	1663	1537	1395
F P ガ ス 放 出 率 (%)	ランプ到達時 (局所)	0.9	1.8	0.7	0.7	0.6
	最 終 (局所)	6.1	53.3	33.1	25.1	4.4
	ランプ到達時 (全体)	0.7	0.9	0.6	0.6	0.5
	最 終 (全体)	1.8	28.8	11.8	8.6	1.7
内 圧 (MPa)	初 期	1.75	1.75	2.3	3.25	2.8
	ランプ到達時	4.49	4.45	6.16	7.12	6.79
	最 終	4.87	12.65	7.89	8.21	7.12
被覆管 シ(直径) 部(μm)	ランプ到達時	12.3	38.8	-67.9*	57.7	33.9
	最 終	11.4	41.0	-77.1*	44.9	32.8
被覆管 リップ シ部 (%)	最大歪み(最 大歪み変化)	0.45 (0.59)	1.29 (0.76)	-0.54* (0.86)	1.07 (0.81)	0.88 (0.61)
	ランプ到達時 (歪み変化)	0.40 (0.54)	0.98 (0.45)	-0.77* (0.63)	0.91 (0.65)	0.84 (0.57)
	最 終	0.40	1.07	-0.87*	0.77	0.82
被覆管 リップ シ部 (MPa)	最大応力値	332	326	359	349	342
	ランプ到達時	331	326	358	349	342
	最 終	66	3	-51*	-51*	81
被覆管 シ部 力(MPa)	ランプ到達時	365	356	373	369	369
	最 終	85	21	36	36	95

*圧縮方向

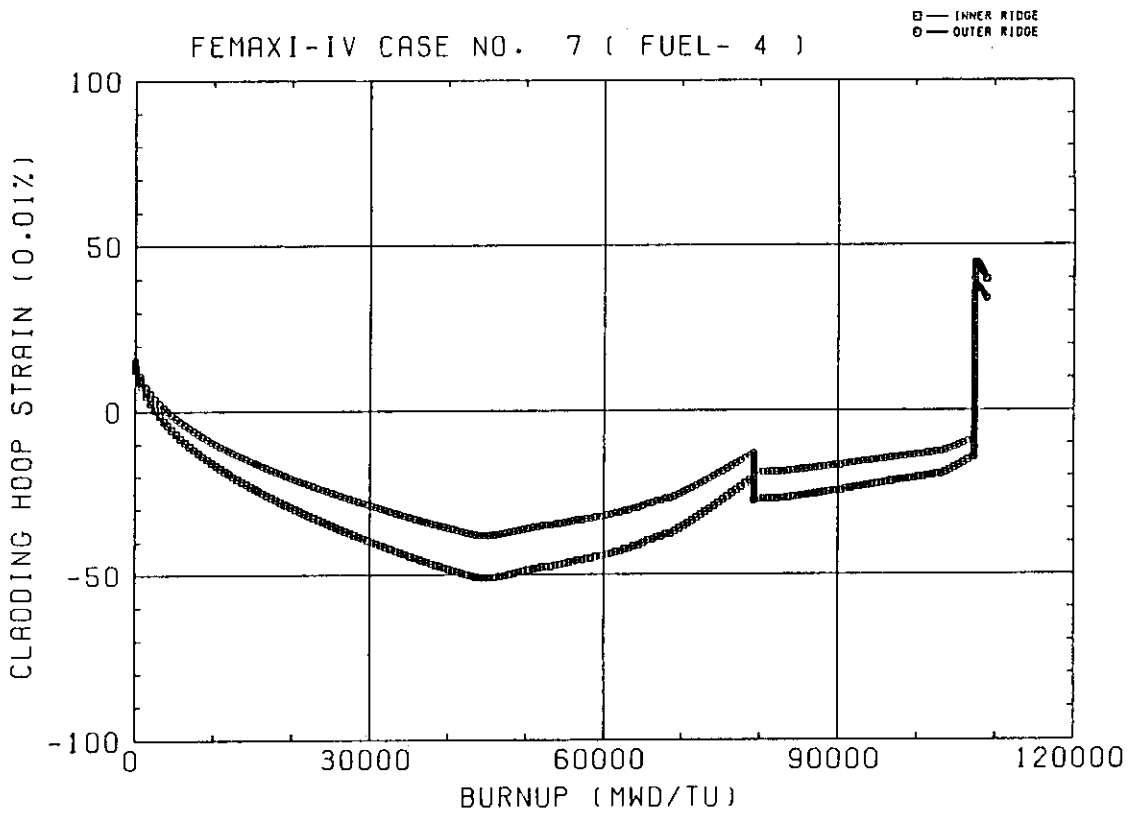
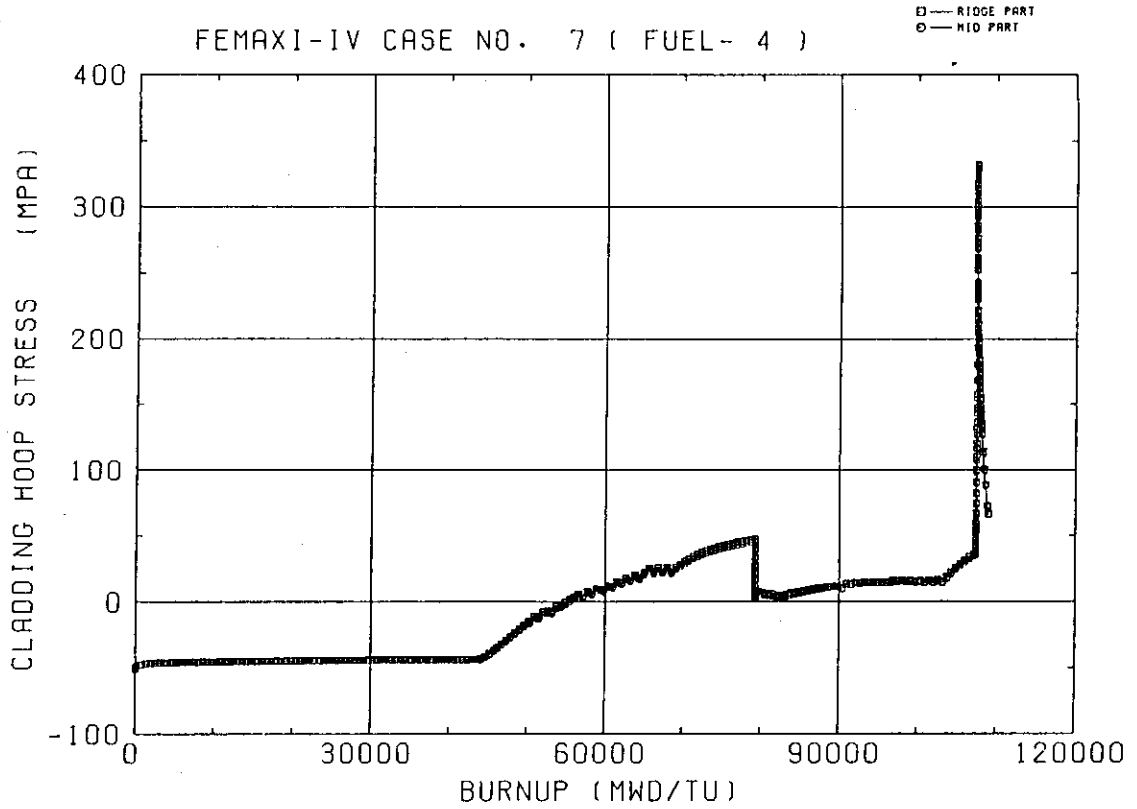


図 4.1 最適炉心 (ケース 7) 解析結果 (1/6)

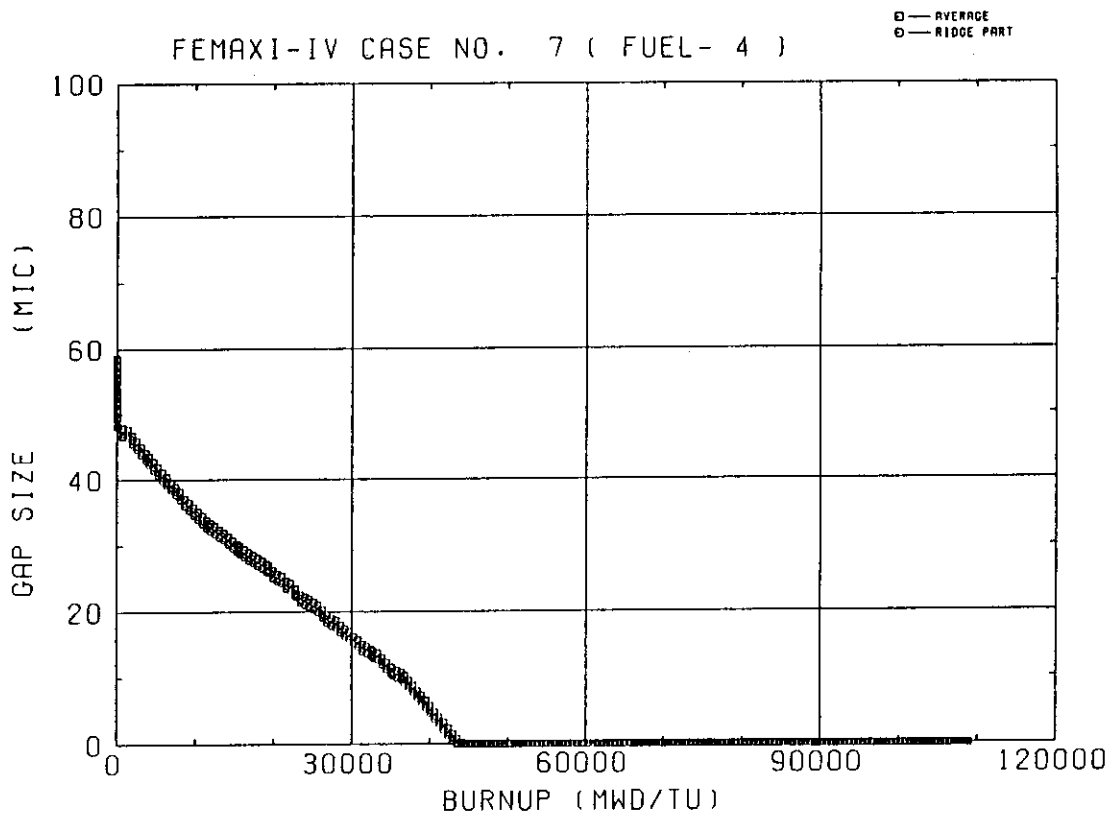
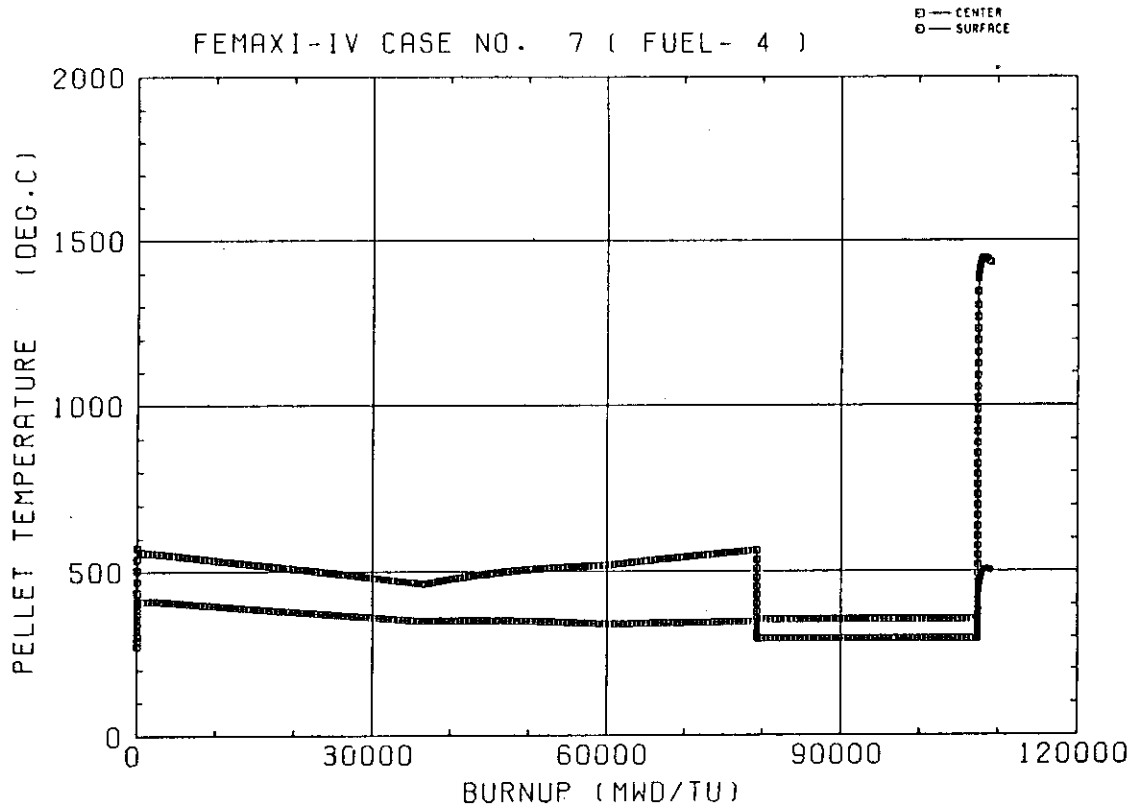


図 4.1 最適炉心 (ケース7) 解析結果 (2/6)

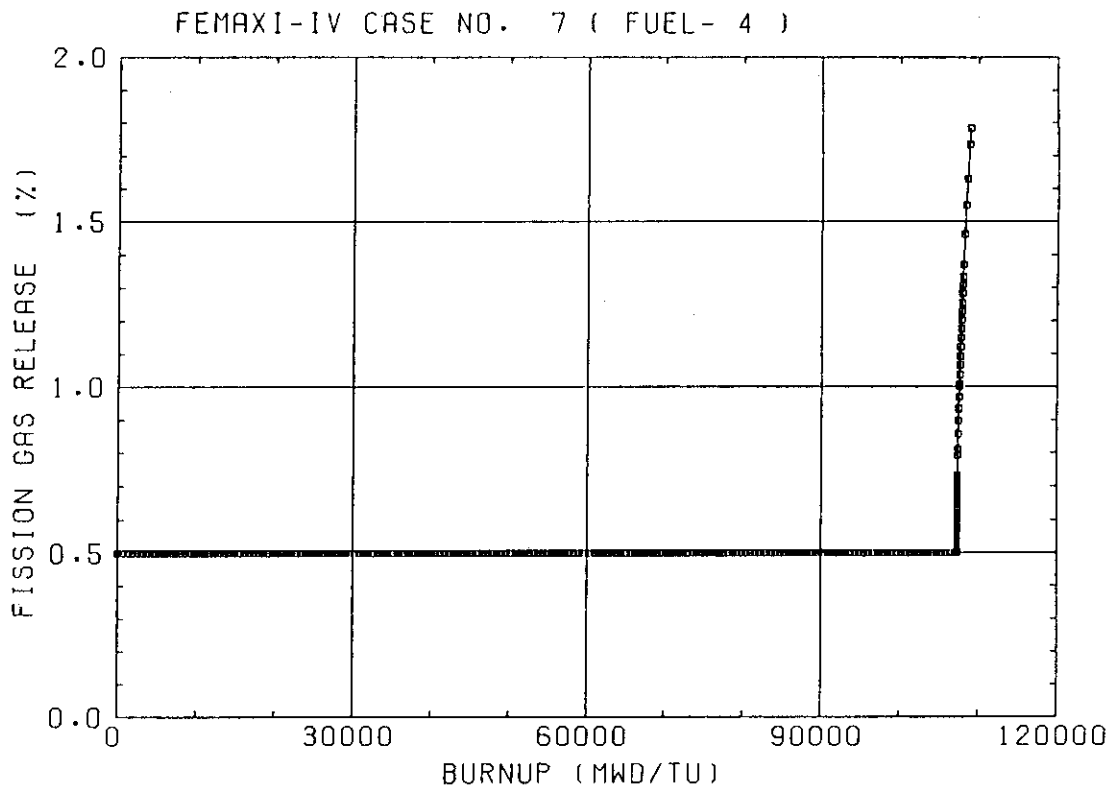
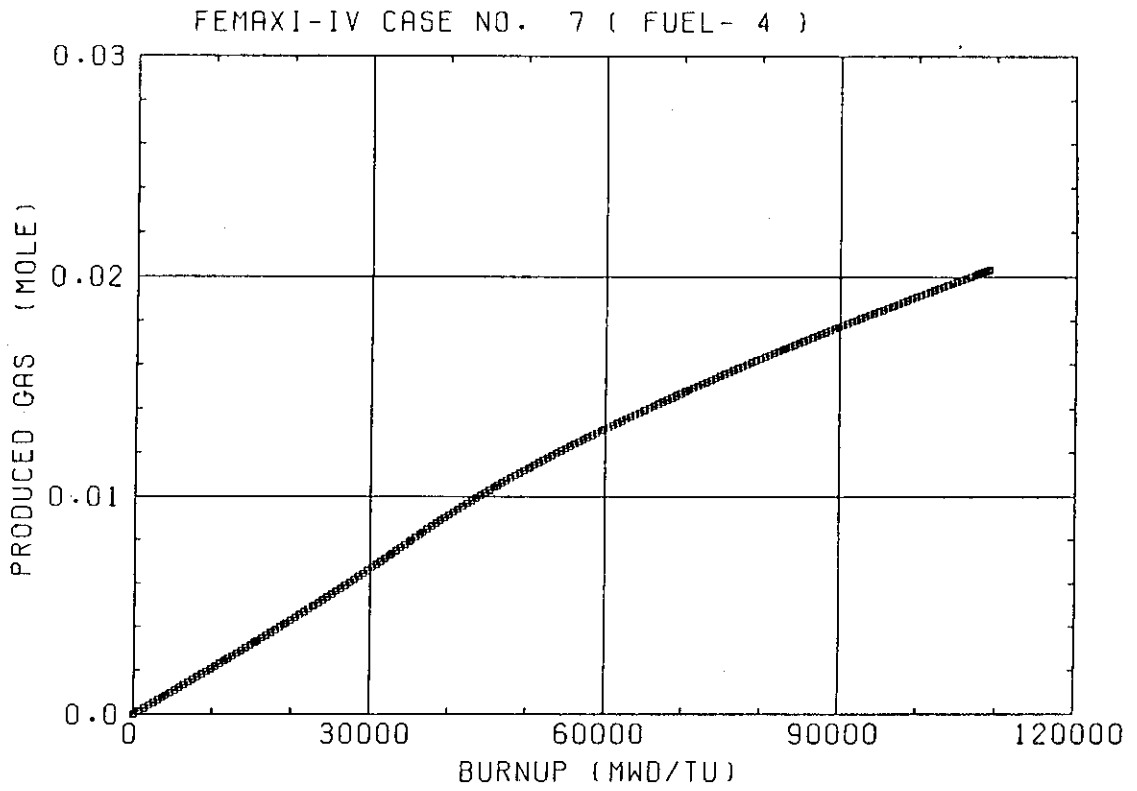


図 4.1 最適炉心 (ケース7) 解析結果 (3/6)

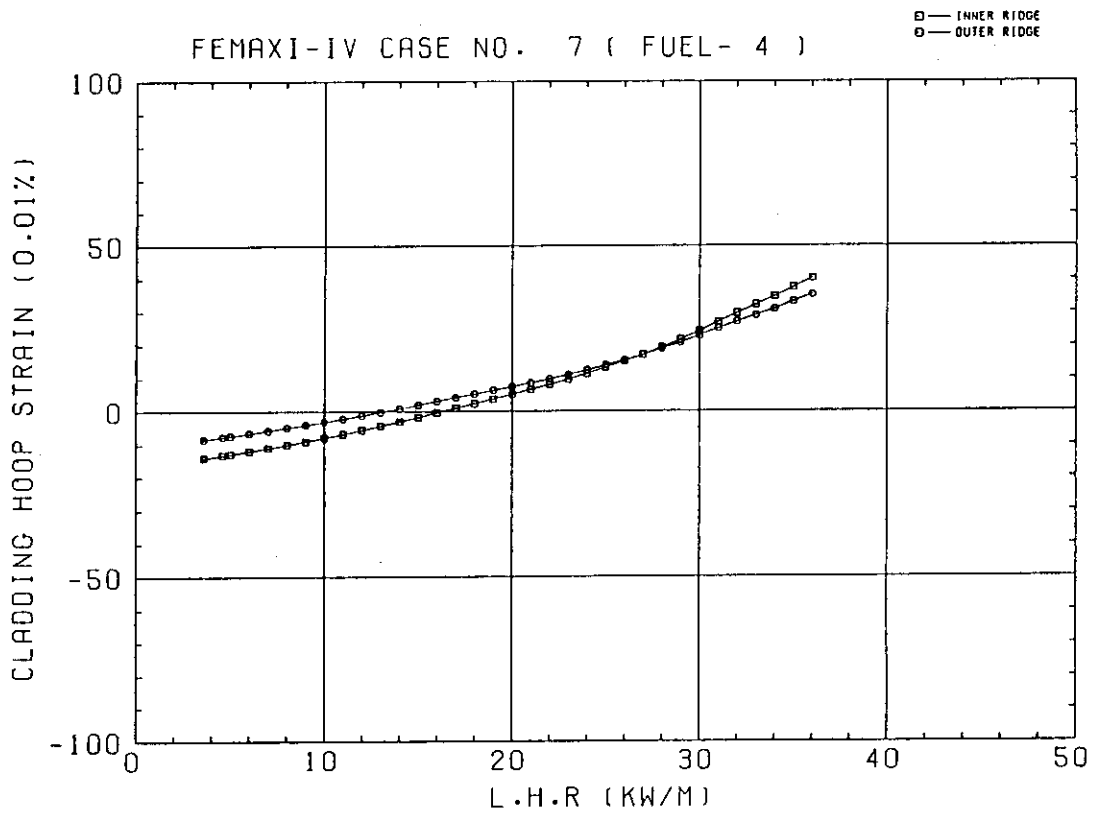
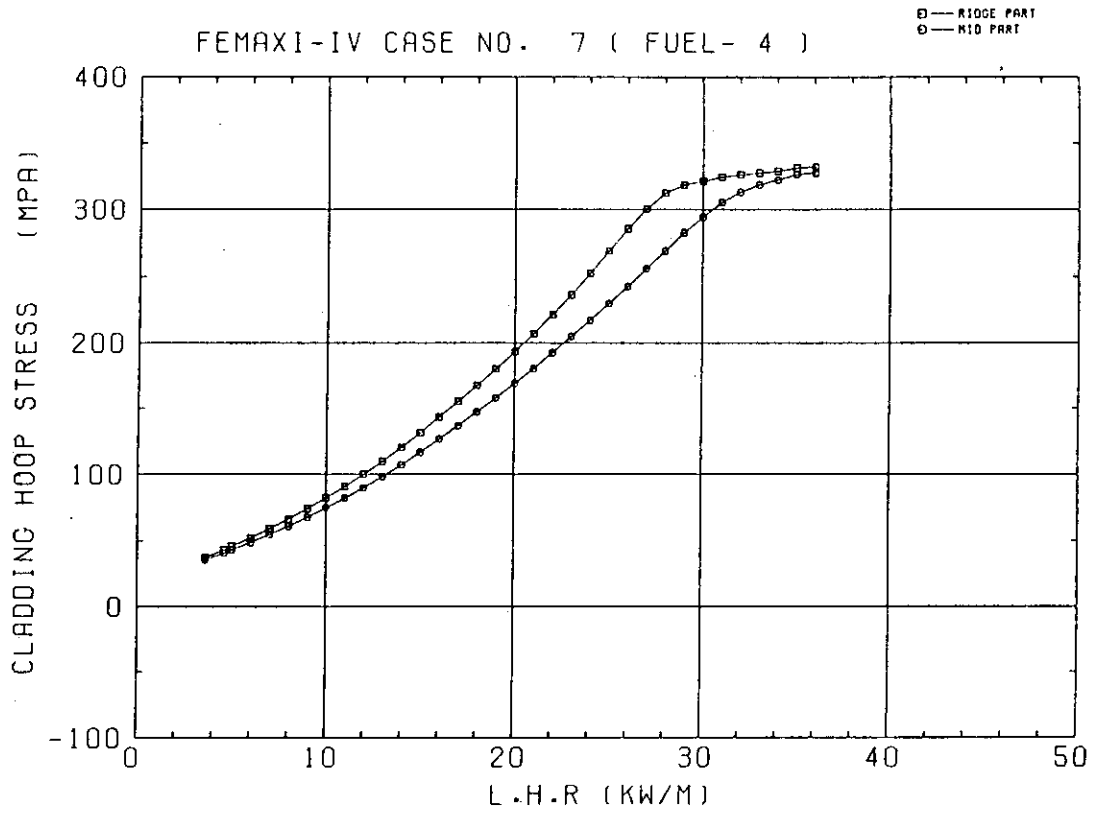


図 4.1 最適炉心 (ケース7) 解析結果 (4/6)

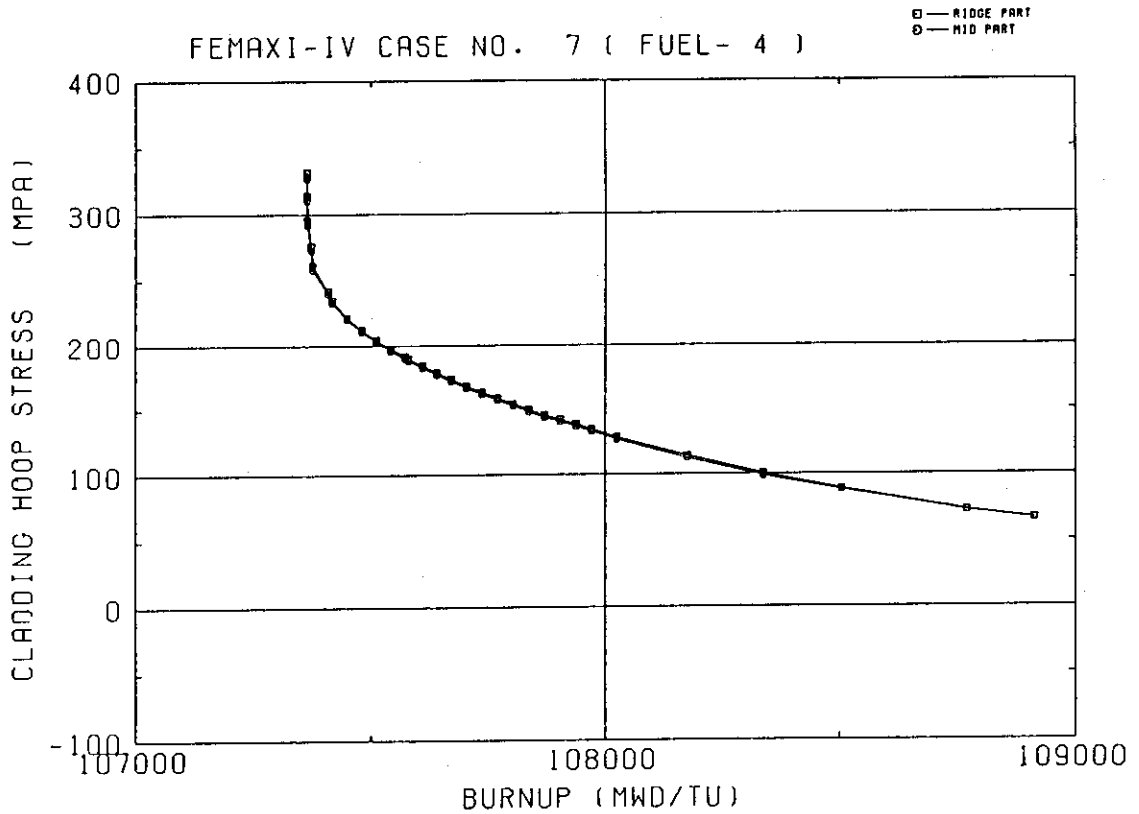
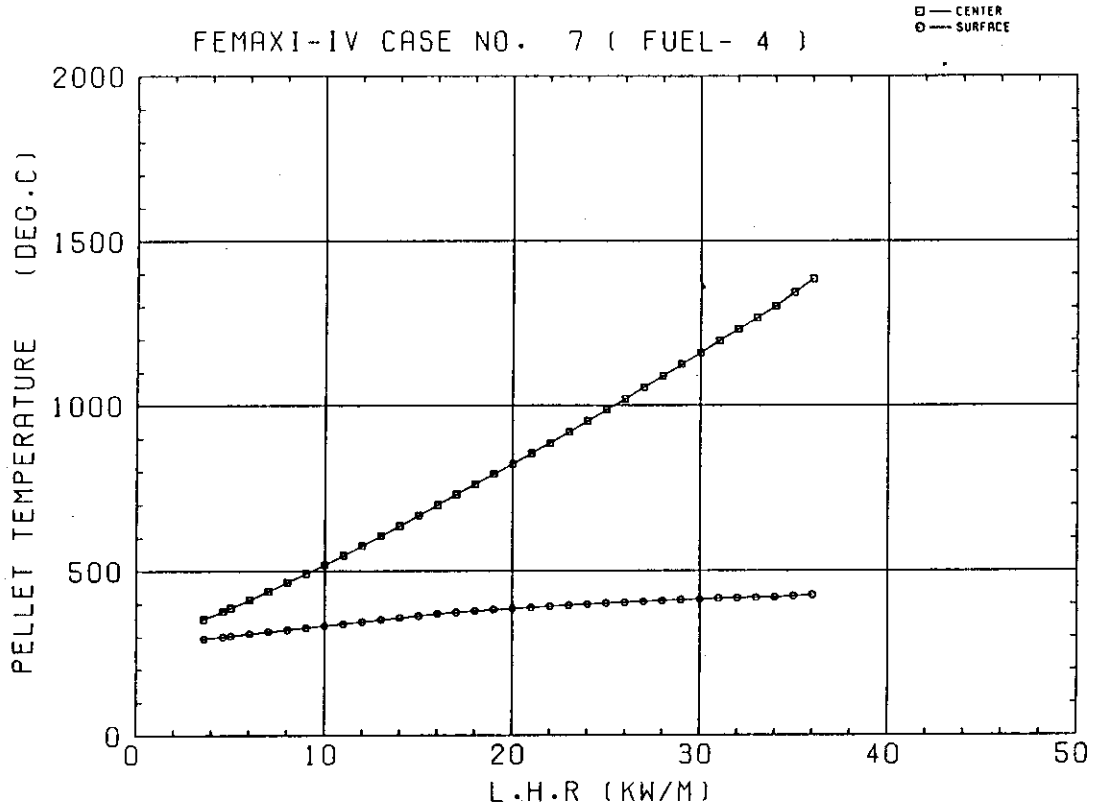


図 4.1 最適炉心 (ケース 7) 解析結果 (5 / 6)

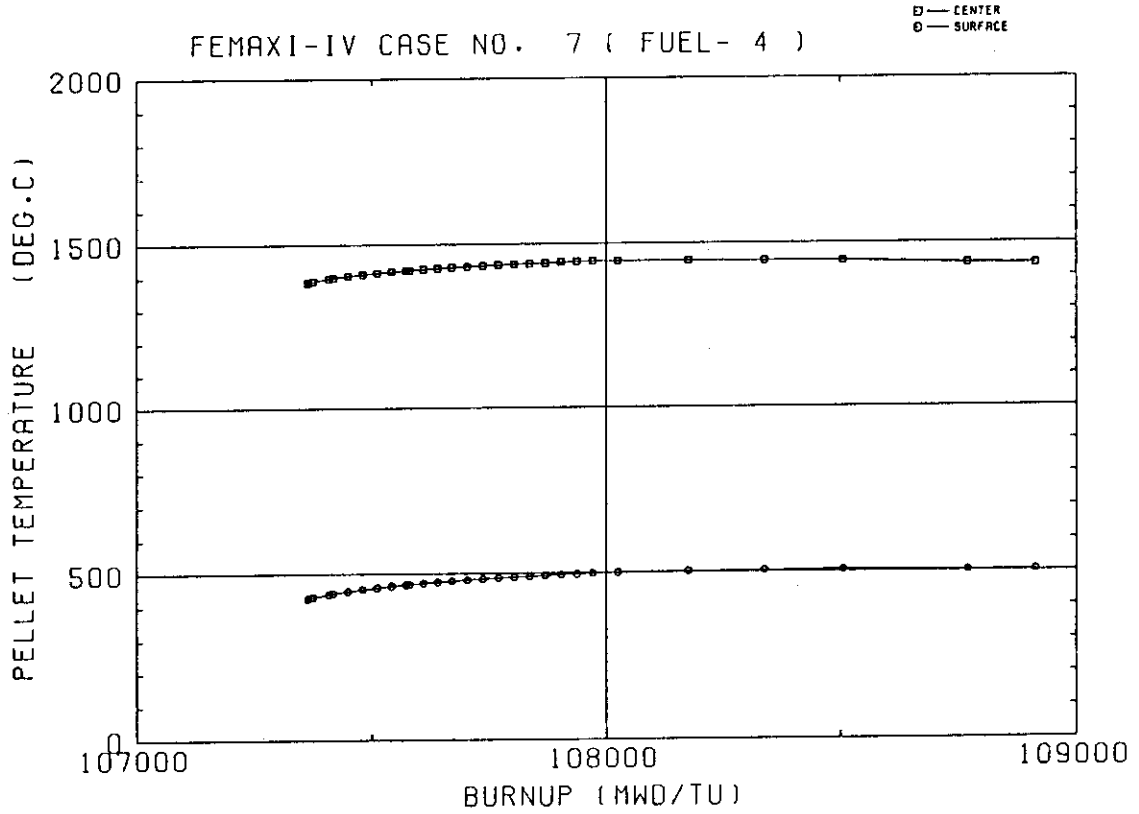
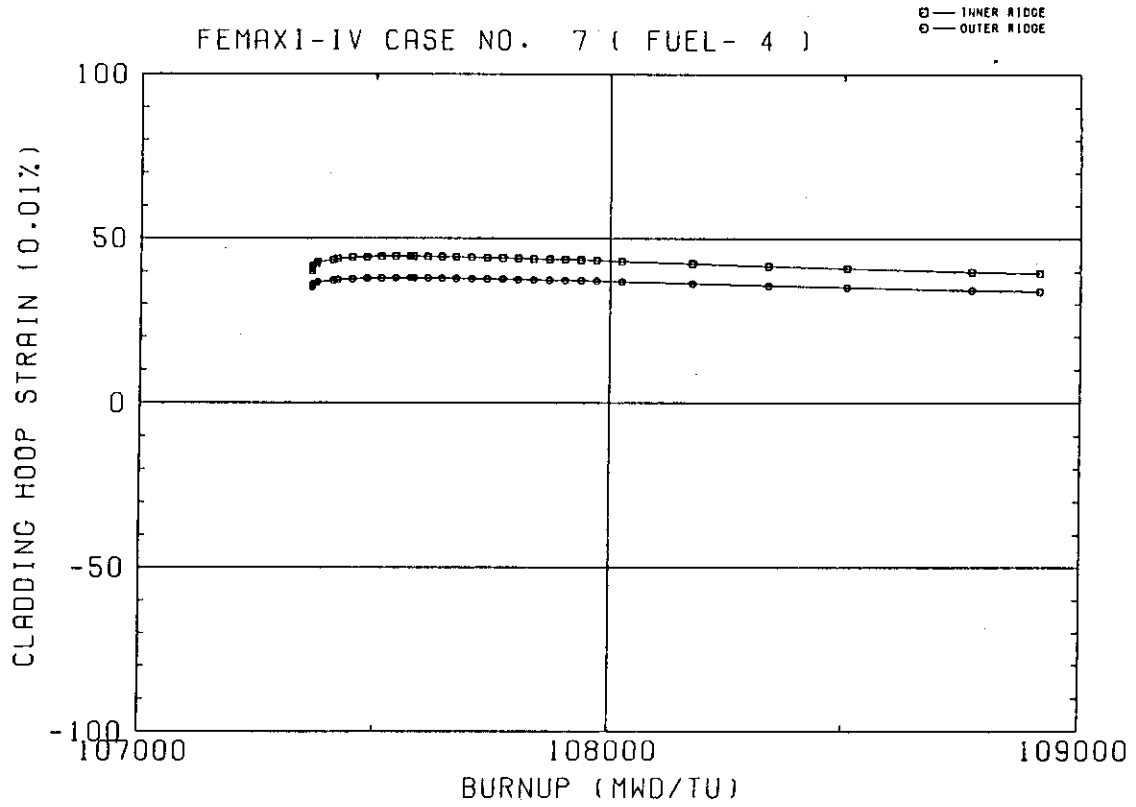


図 4.1 最適炉心 (ケース7) 解析結果 (6 / 6)

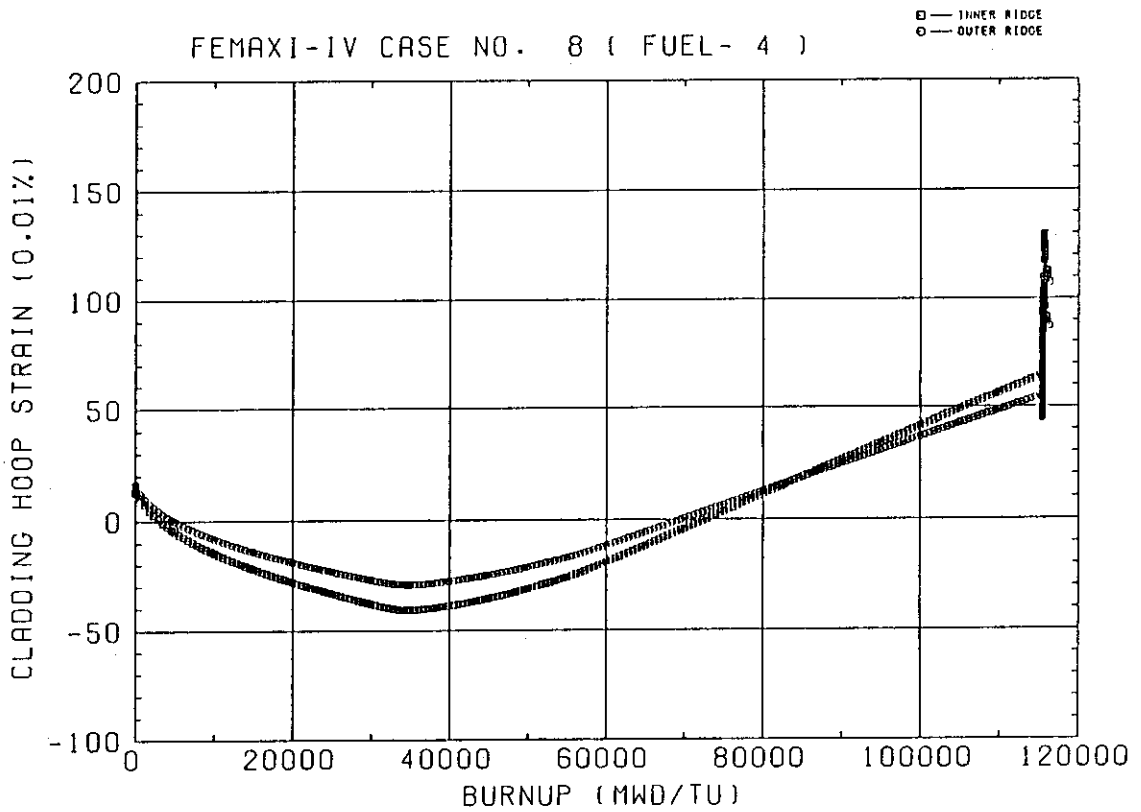
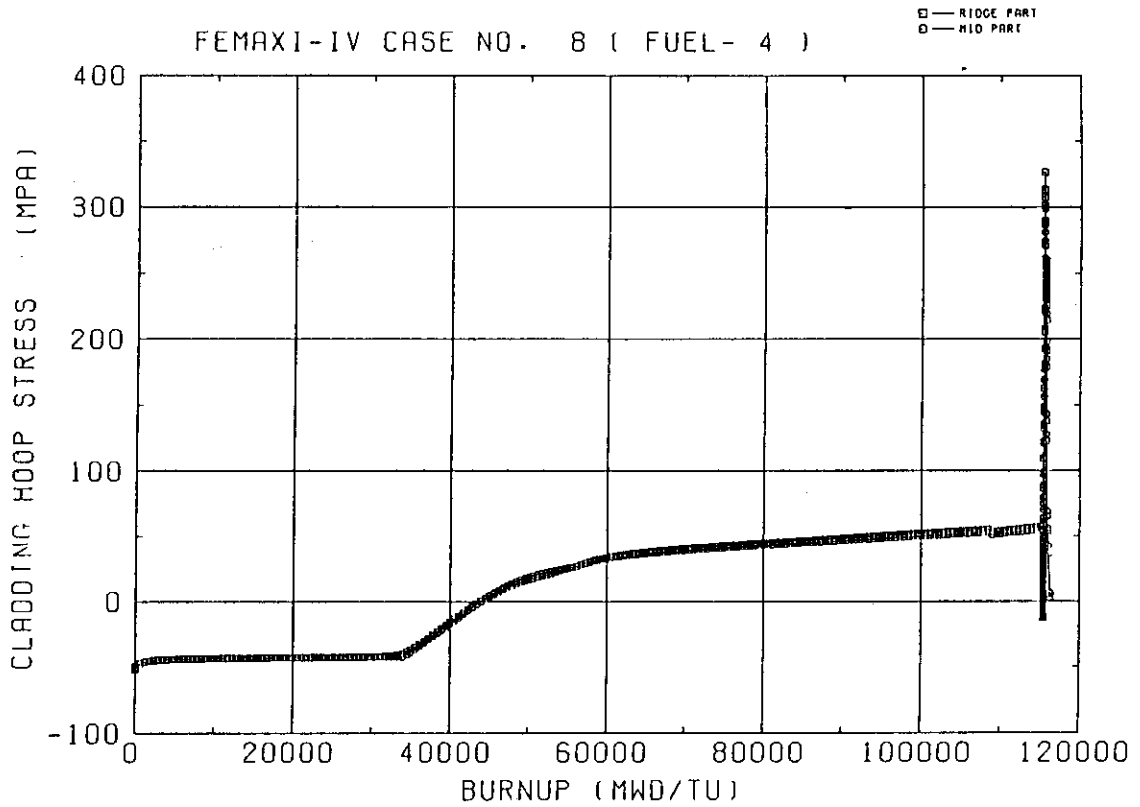


図4.2 最適炉心(ケース8)解析結果(1/6)

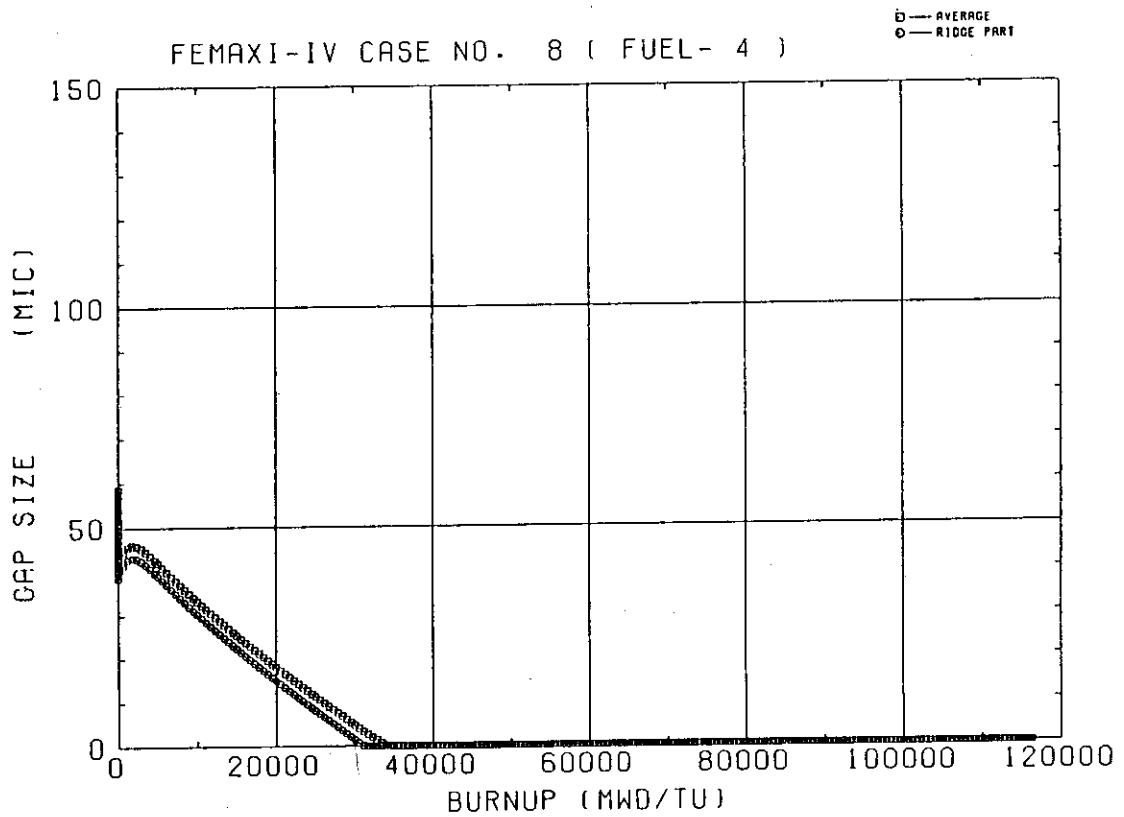
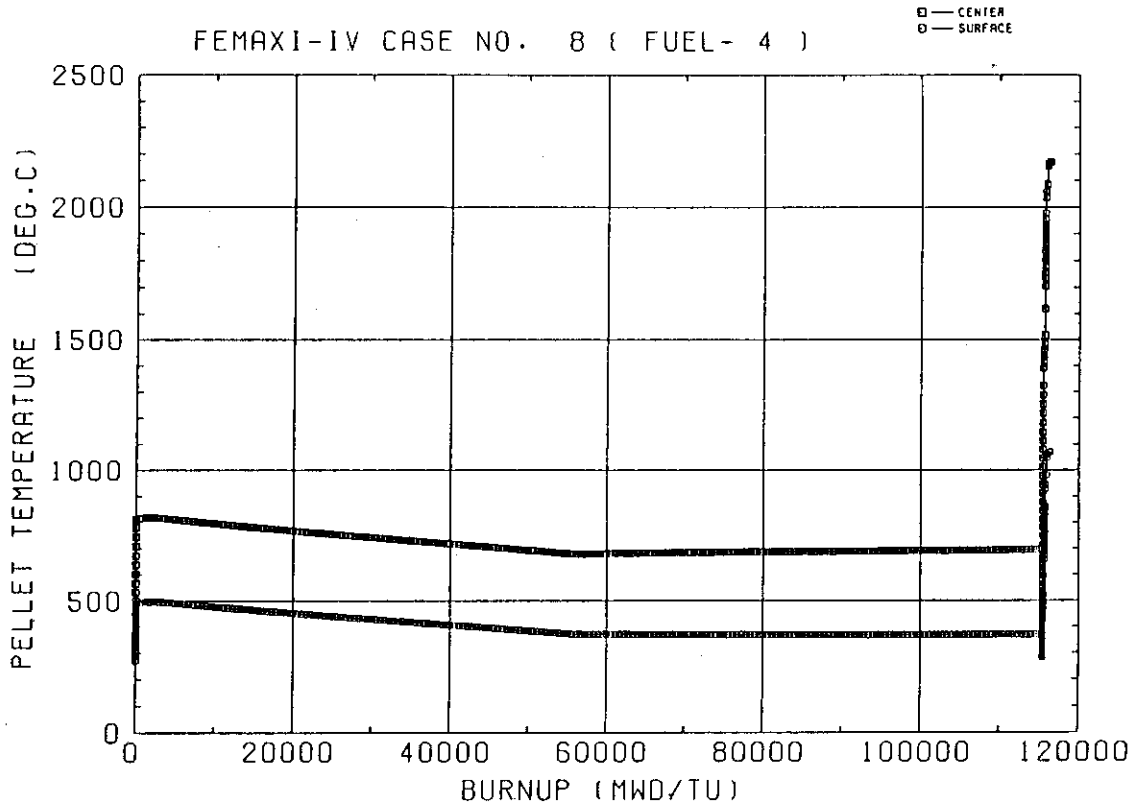


図4.2 最適炉心 (ケース8) 解析結果 (2/6)

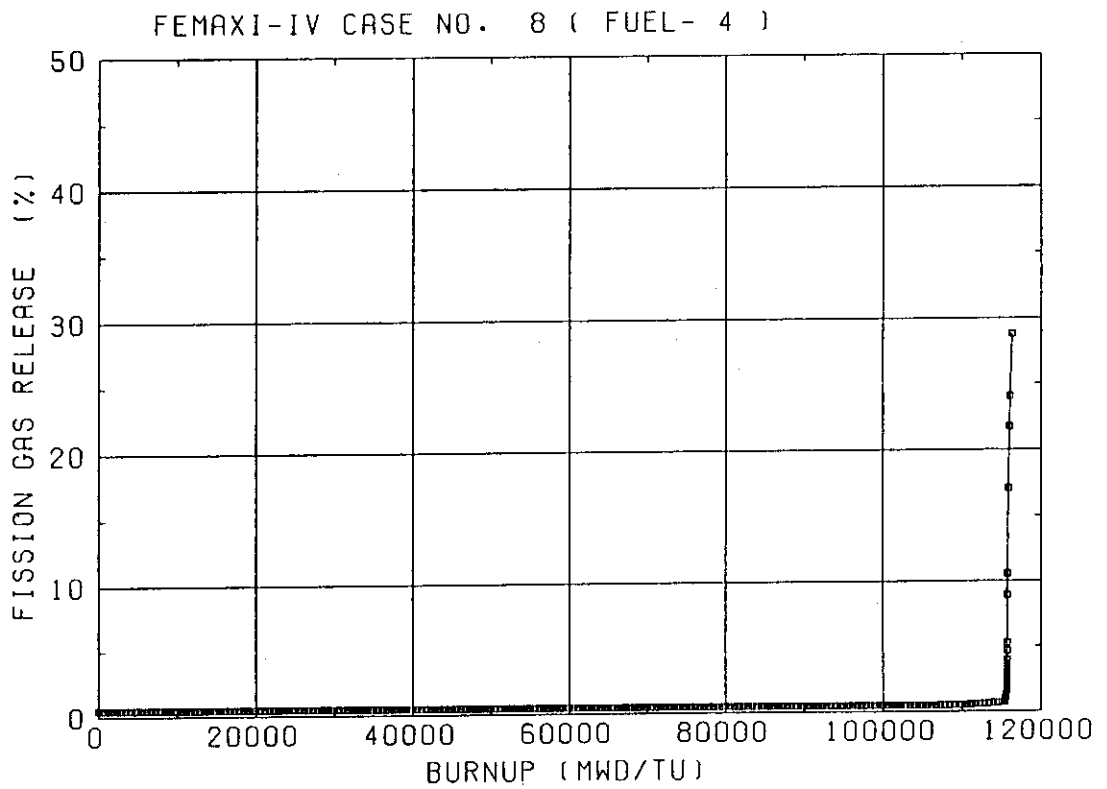
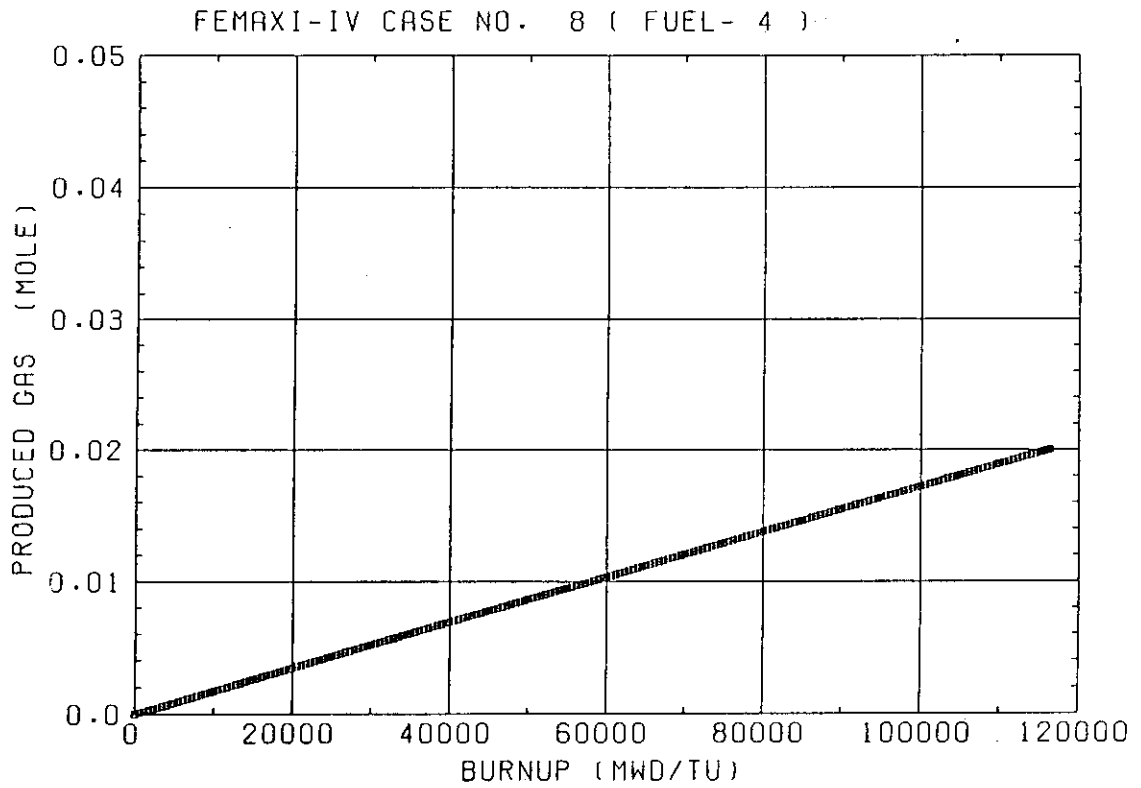


図 4.2 最適炉心 (ケース 8) 解析結果 (3 / 6)

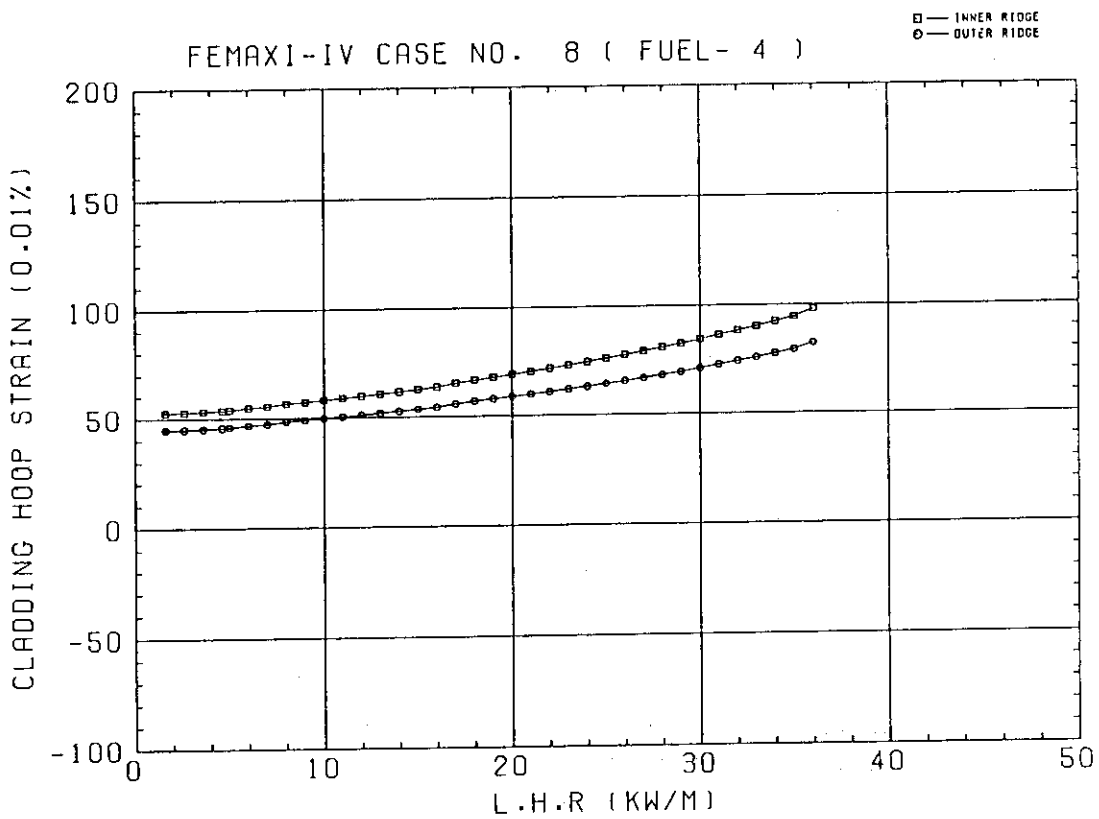
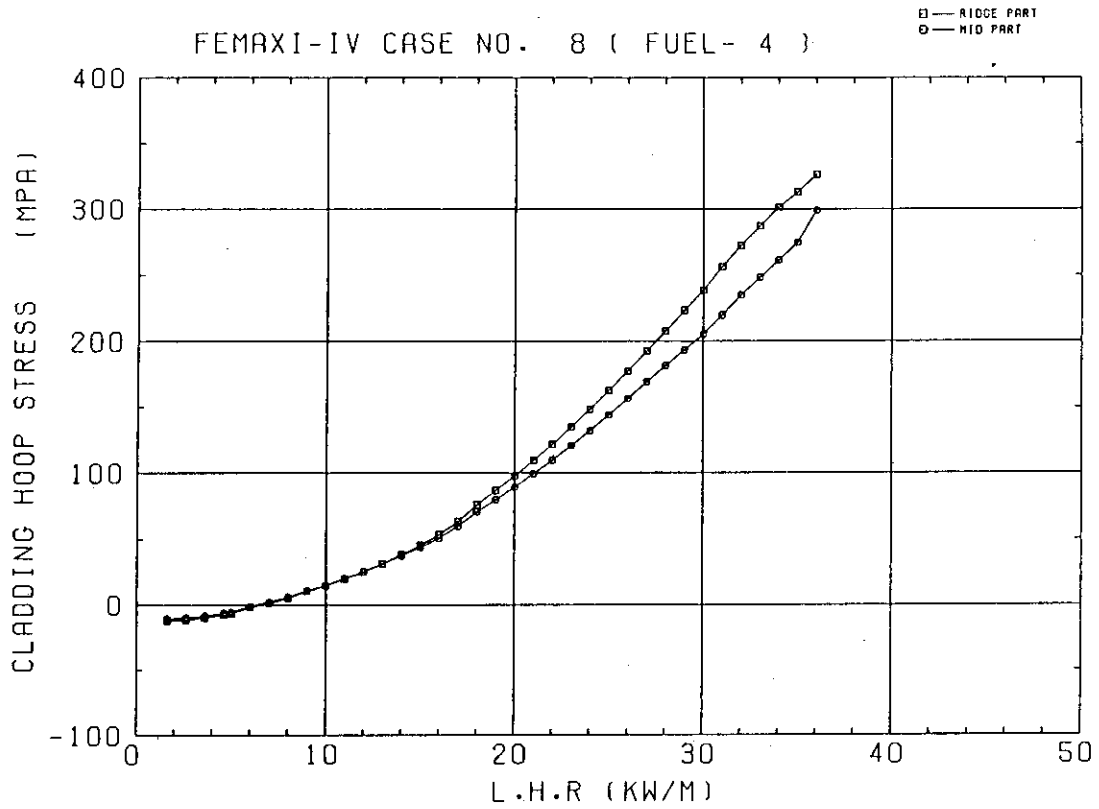


図 4.2 最適炉心 (ケース 8) 解析結果 (4 / 6)

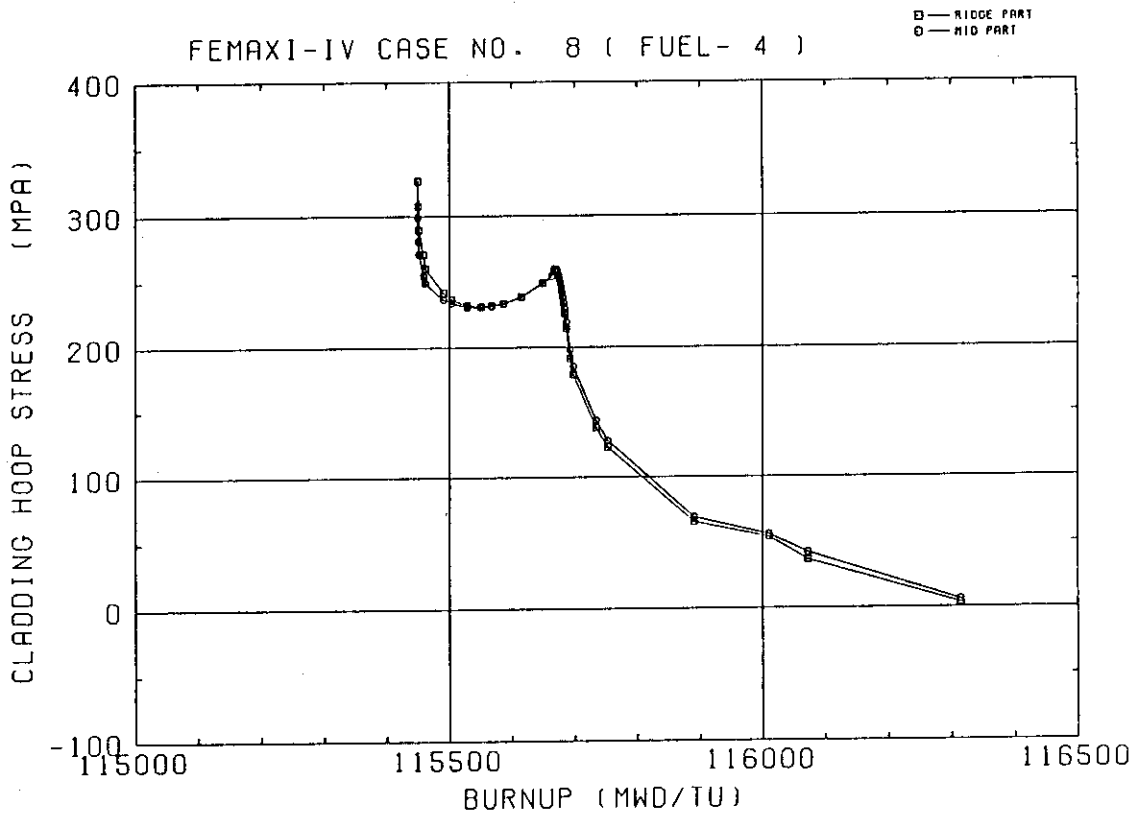
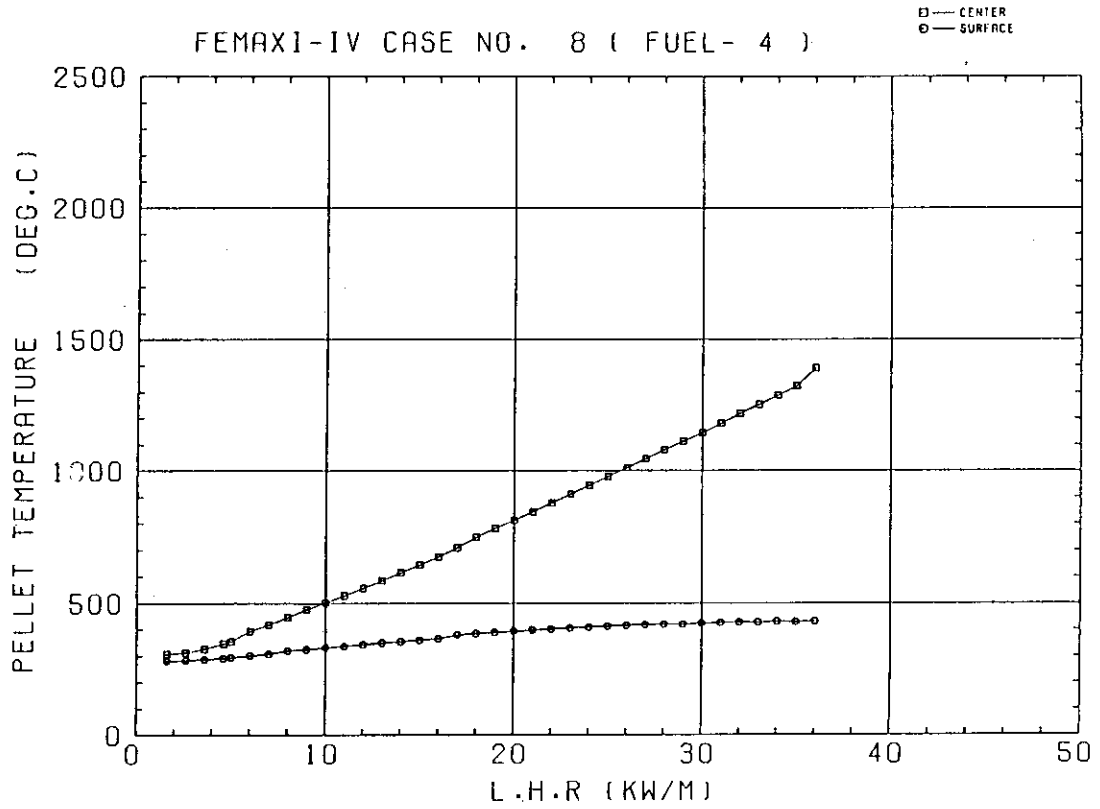


図 4.2 最適炉心 (ケース 8) 解析結果 (5 / 6)

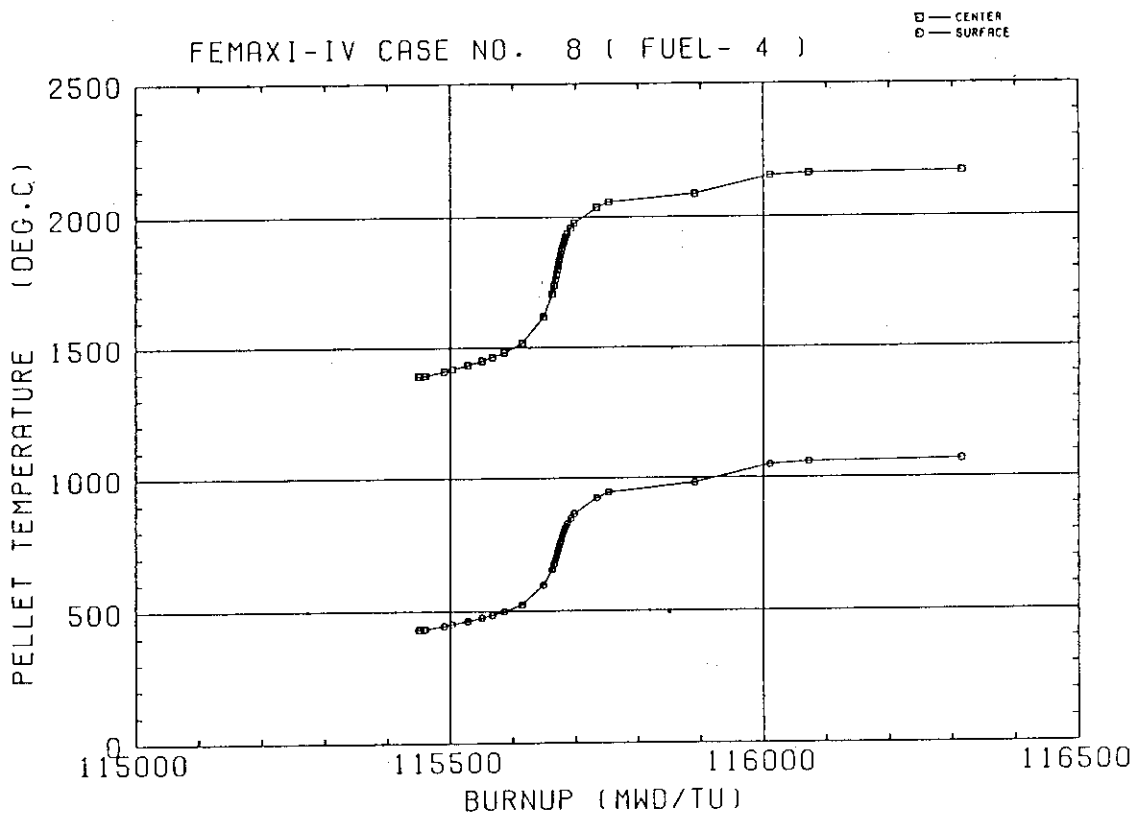
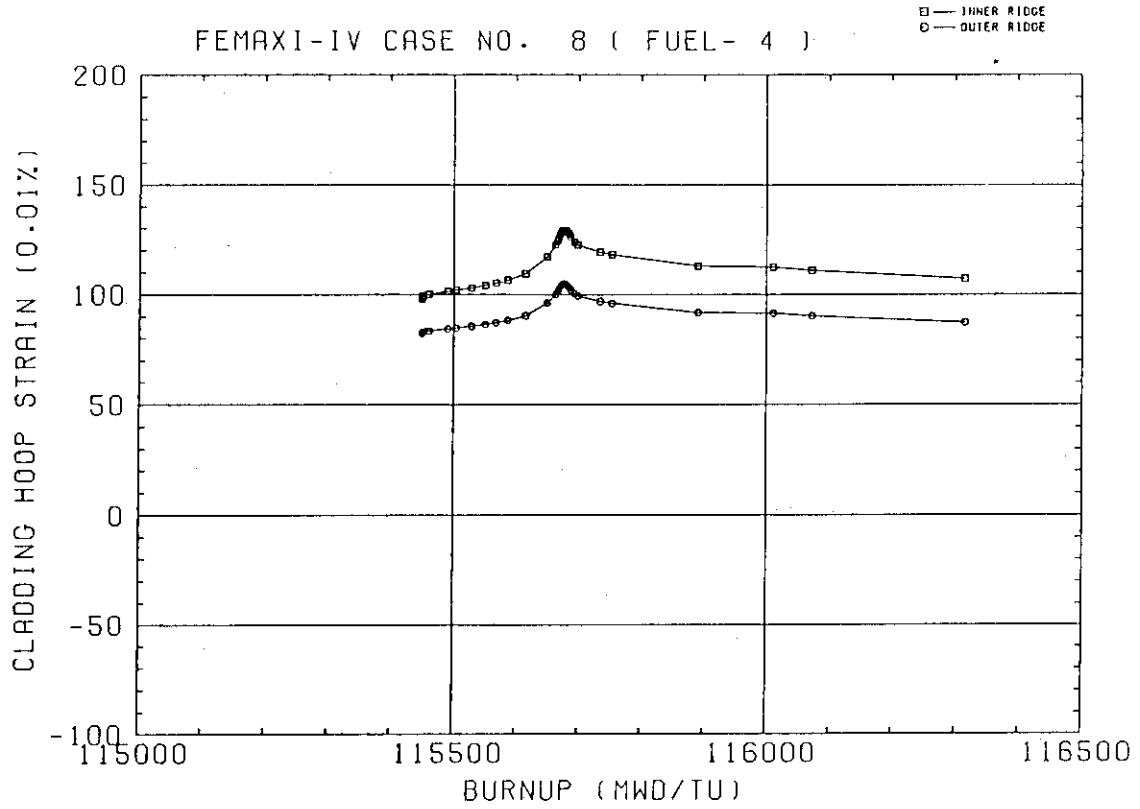


図 4.2 最適炉心 (ケース 8) 解析結果 (6/6)

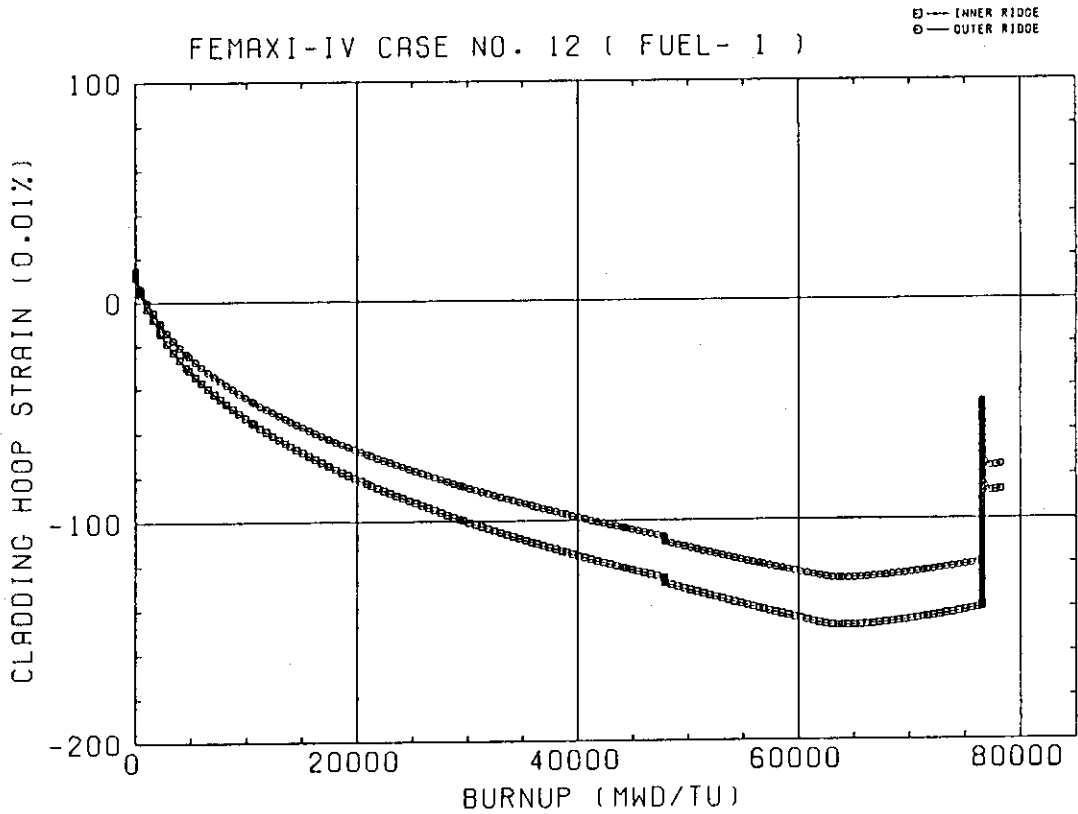
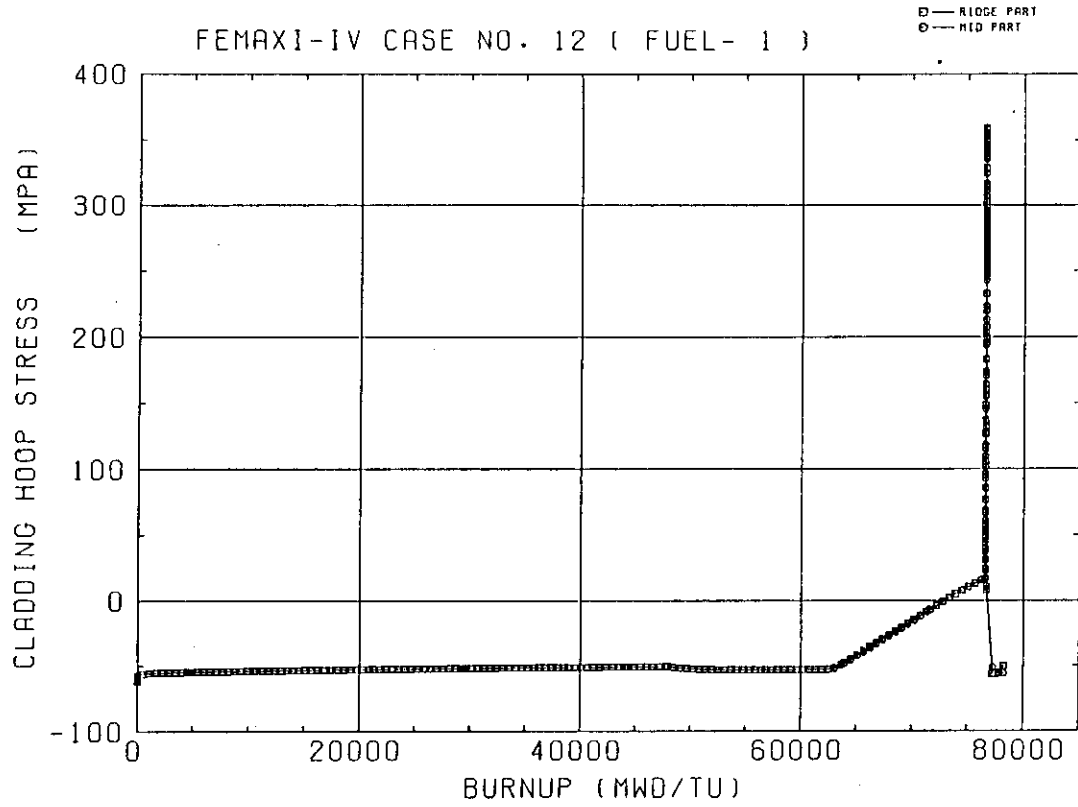


図4.3 サーベイ炉心A (ケース12) 解析結果 (1/5)

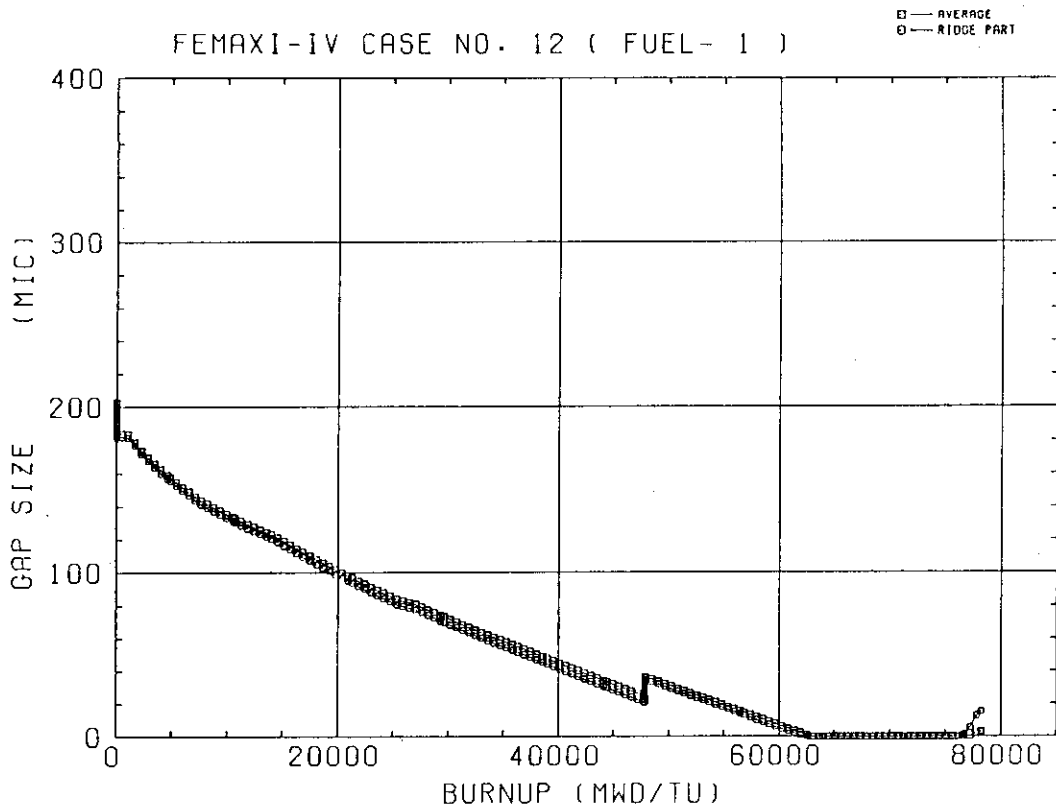
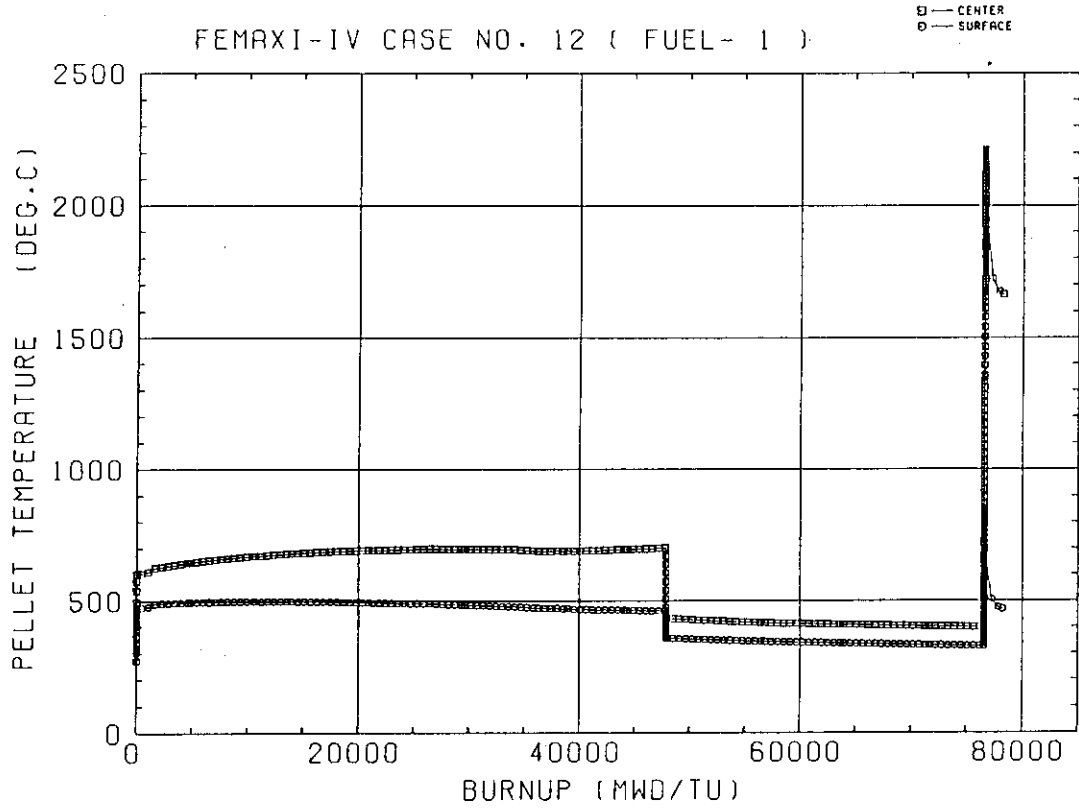


図4.3 サーベイ炉心A (ケース12) 解析結果 (2/5)

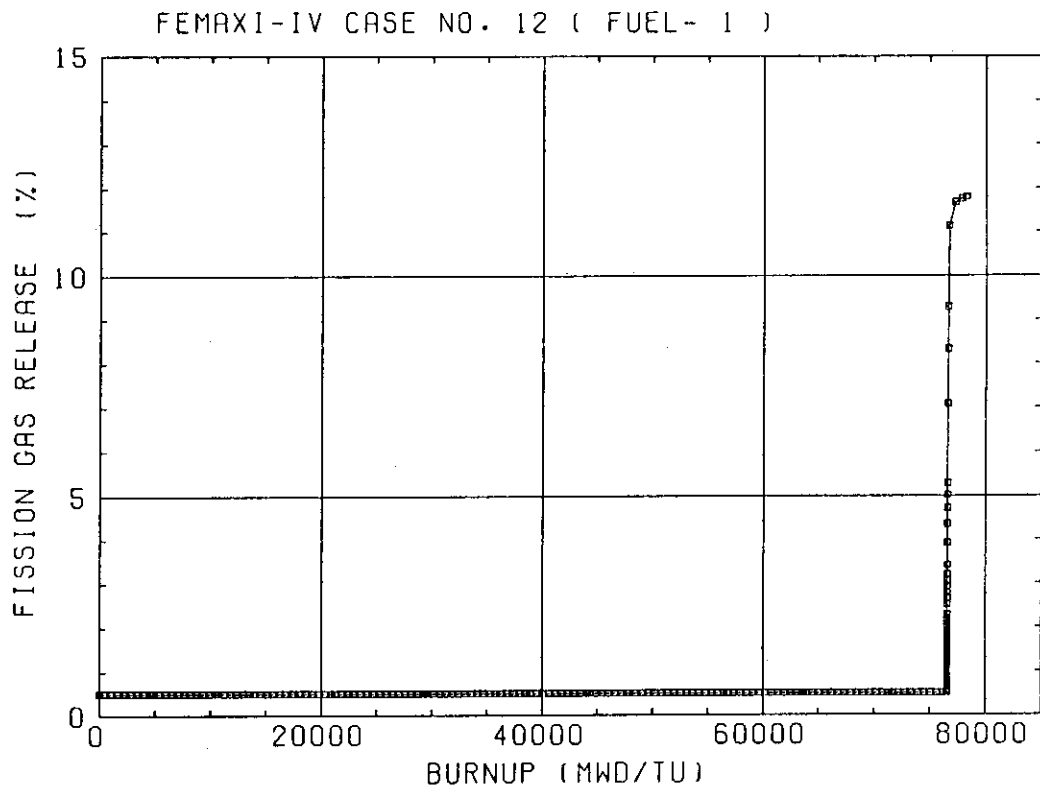
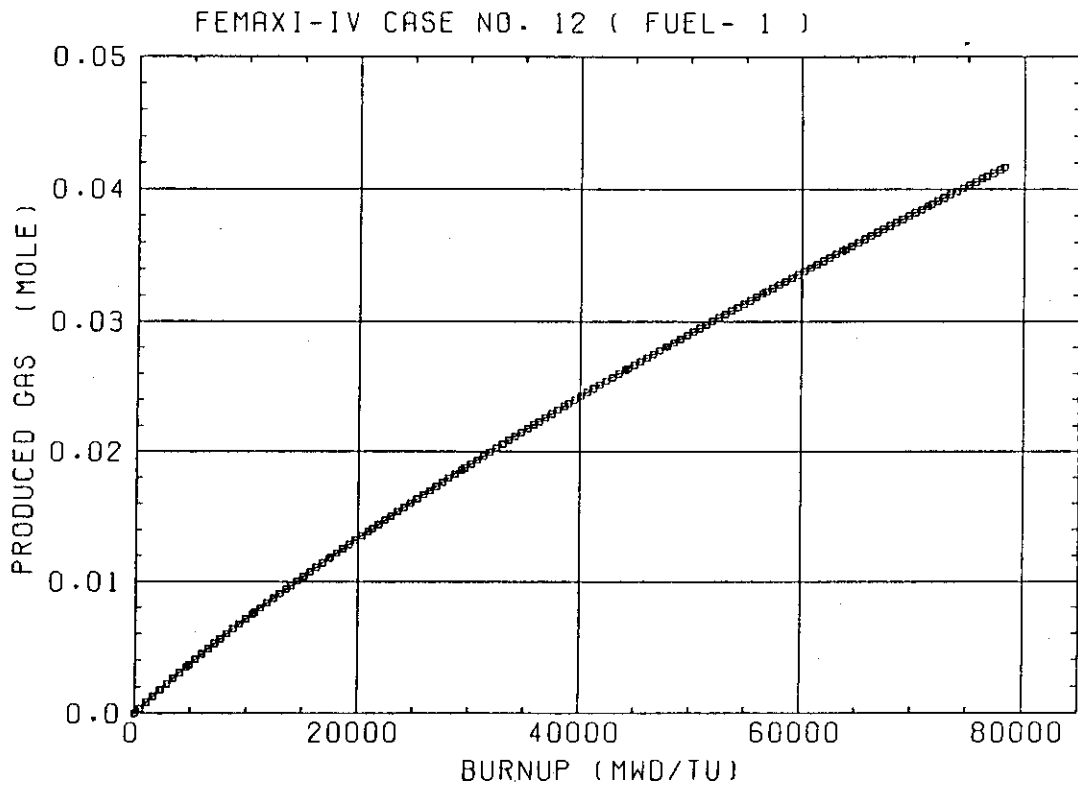


図 4.3 サーベイ炉心A (ケース12) 解析結果 (3/5)

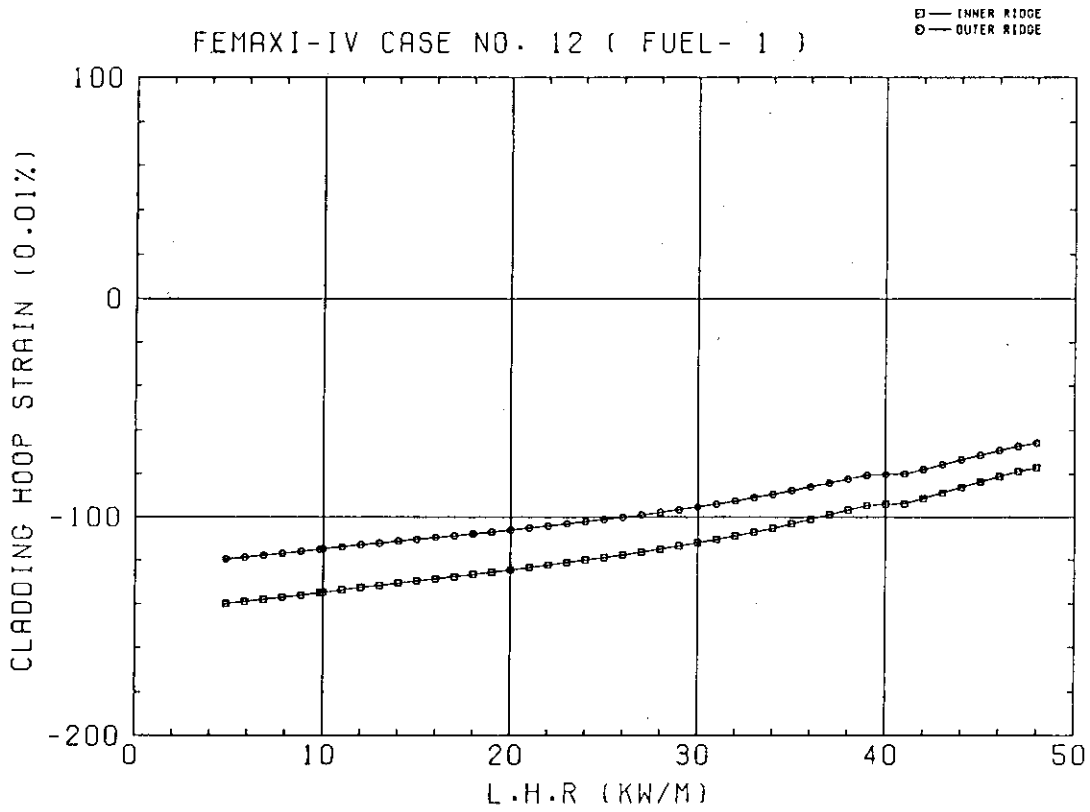
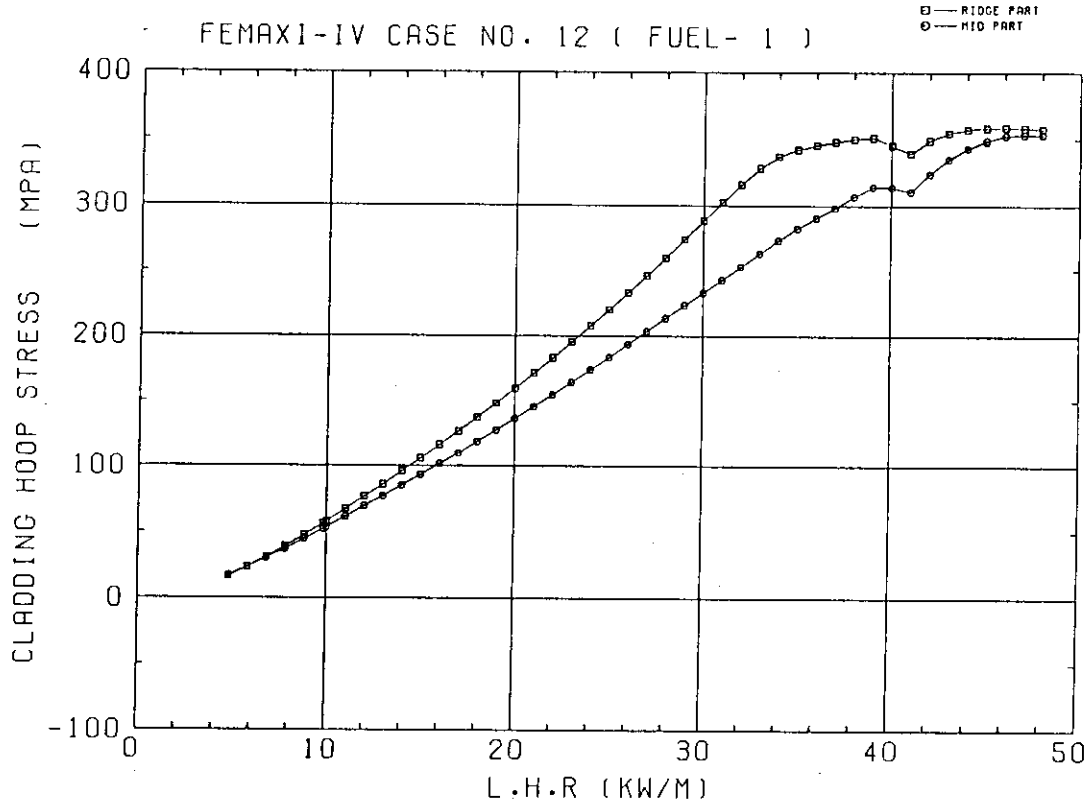


図 4.3 サーベイ炉心A (ケース12) 解析結果 (4/5)

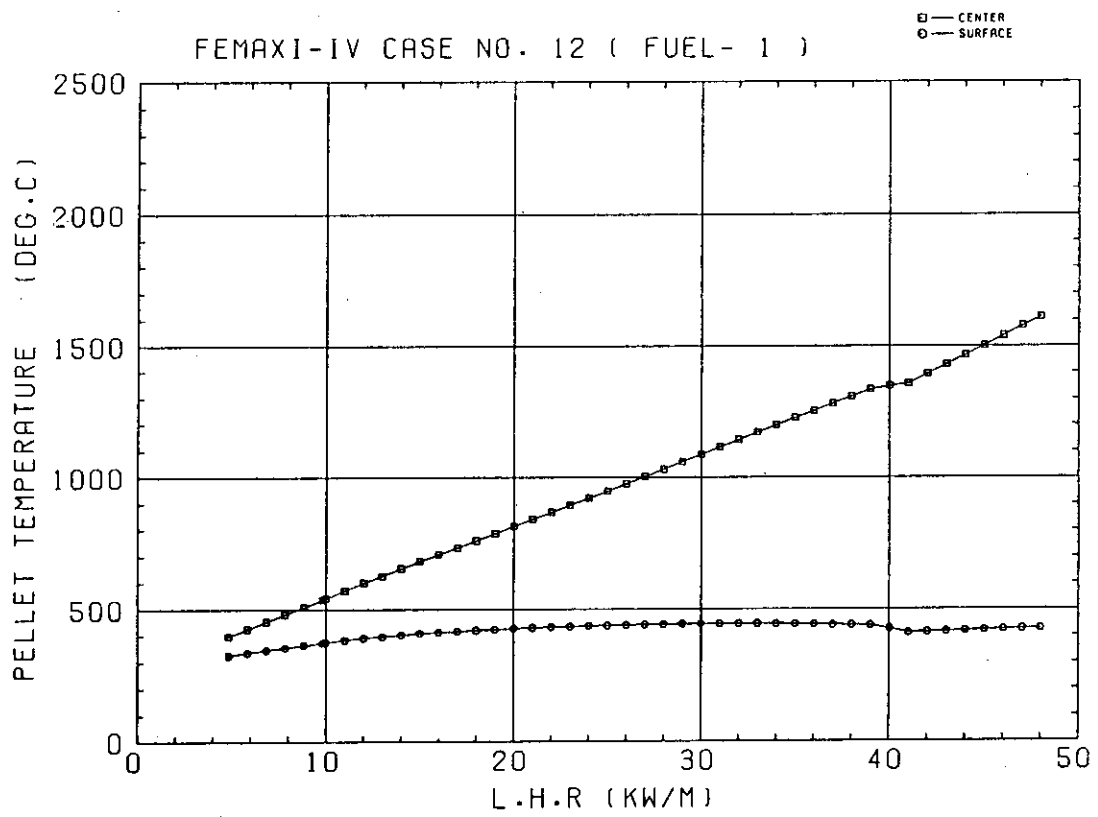


図4.3 サーベイ炉心A (ケース12) 解析結果 (5/5)

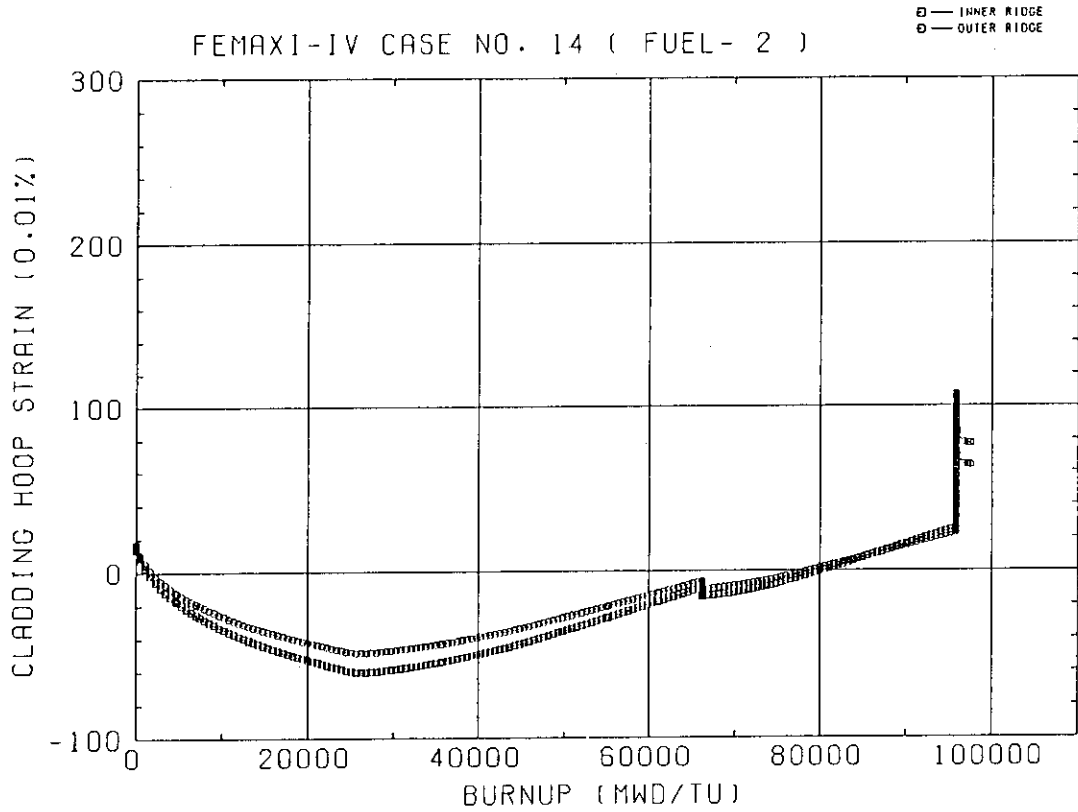
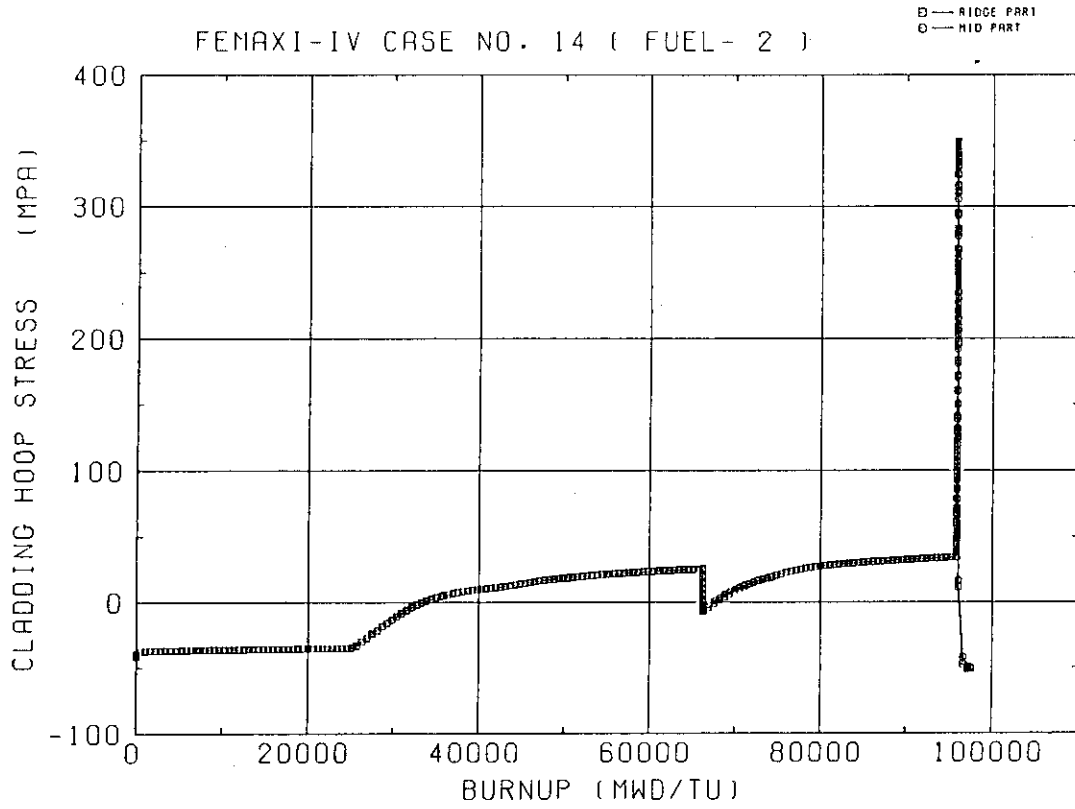


図4.4 サーベイ炉心B (ケース14) 解析結果 (1/5)

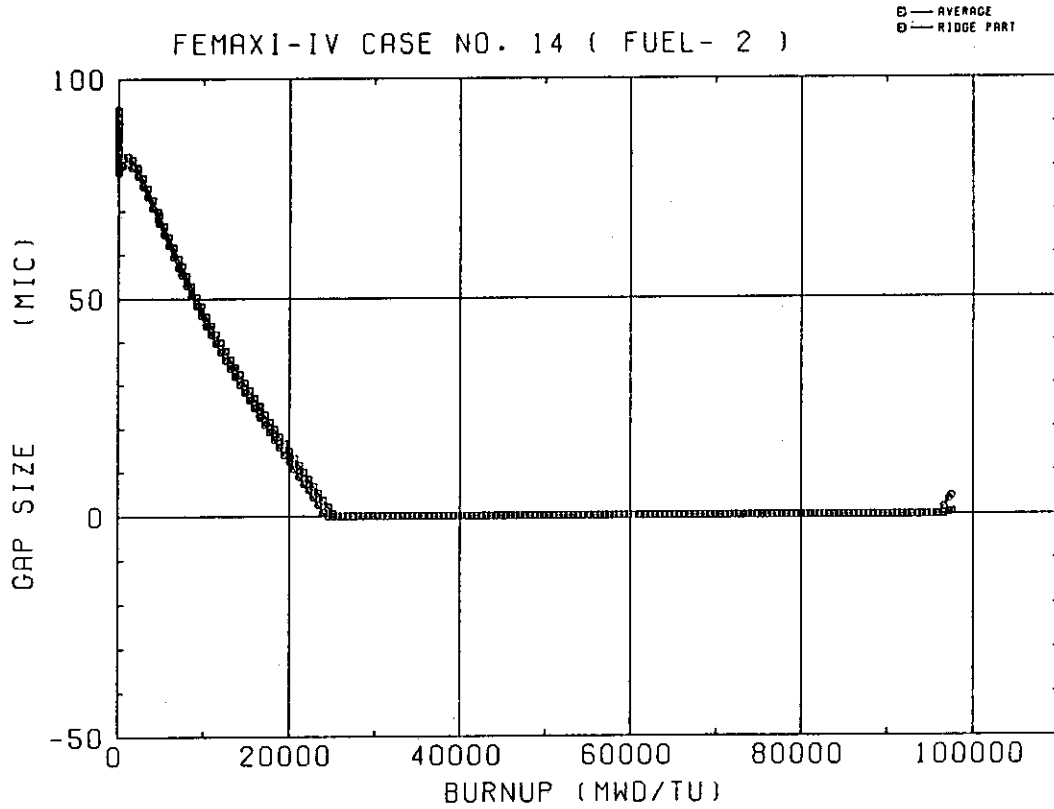
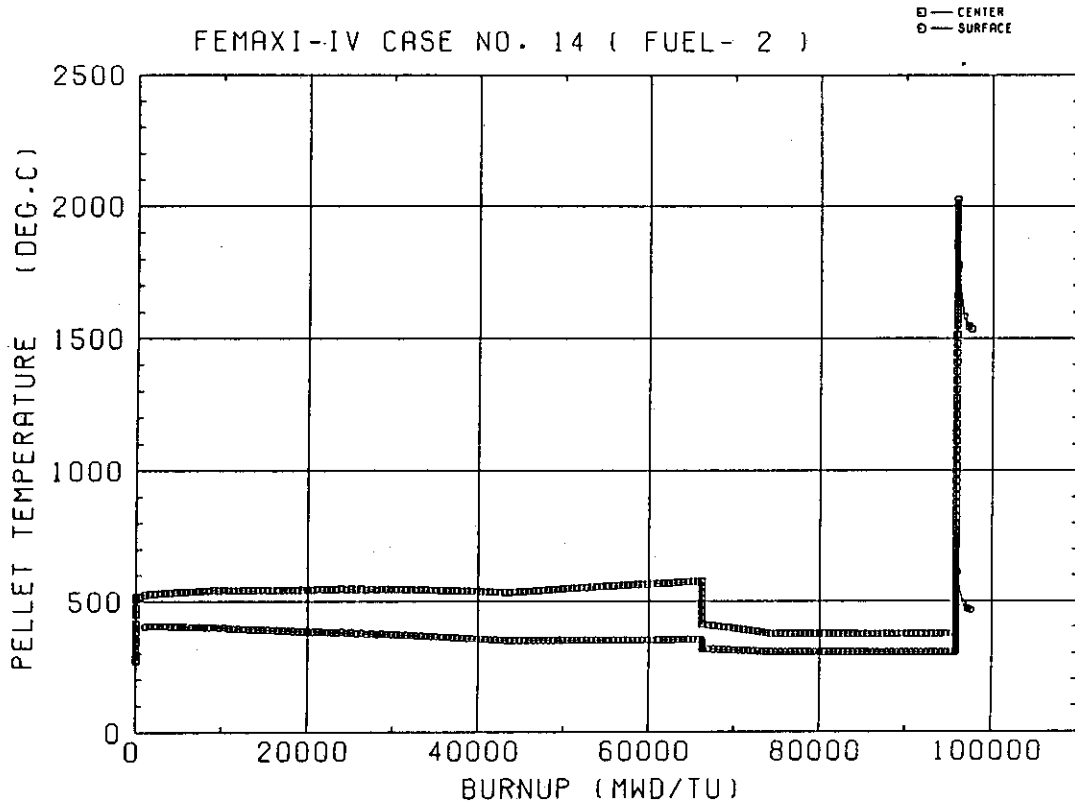


図4.4 サーベイ炉心B (ケース14) 解析結果 (2/5)

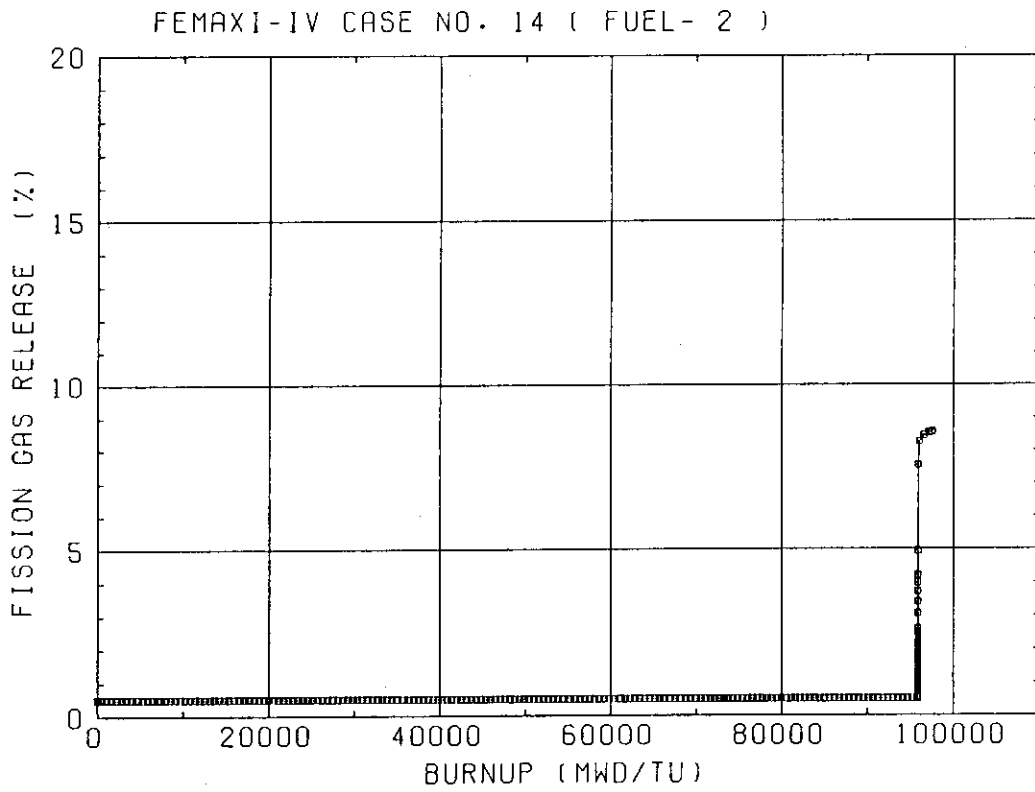
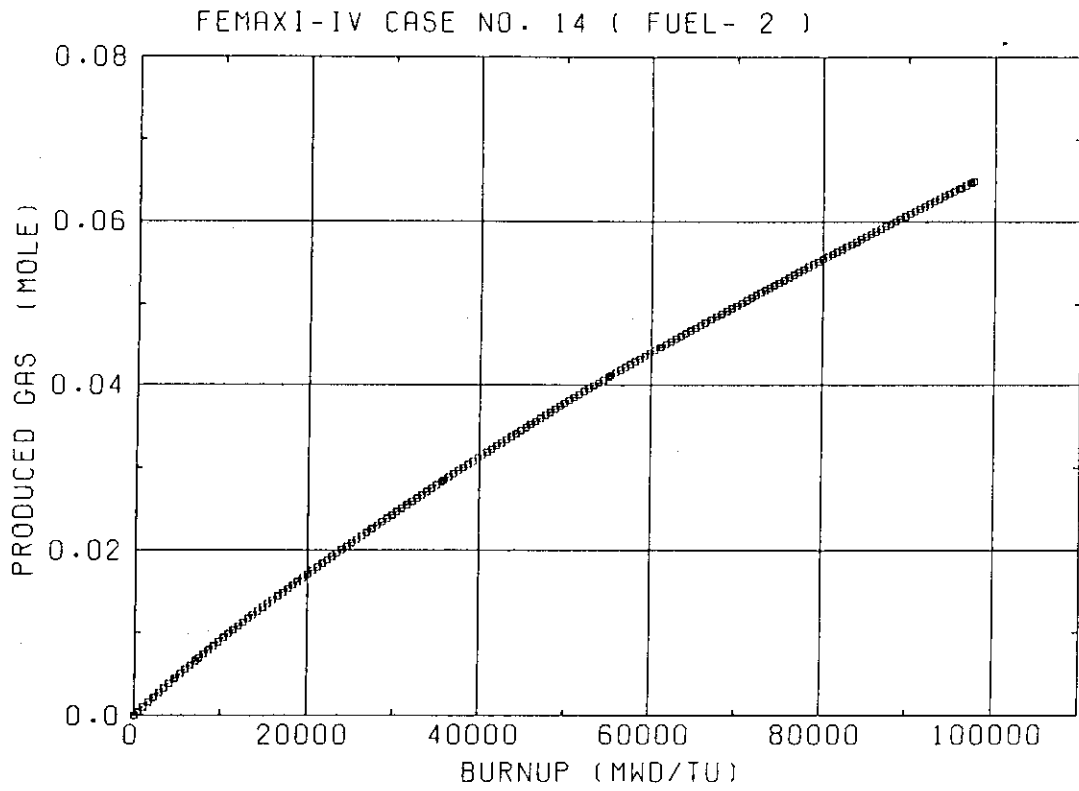


図4.4 サーベイ炉心B (ケース14) 解析結果 (3/5)

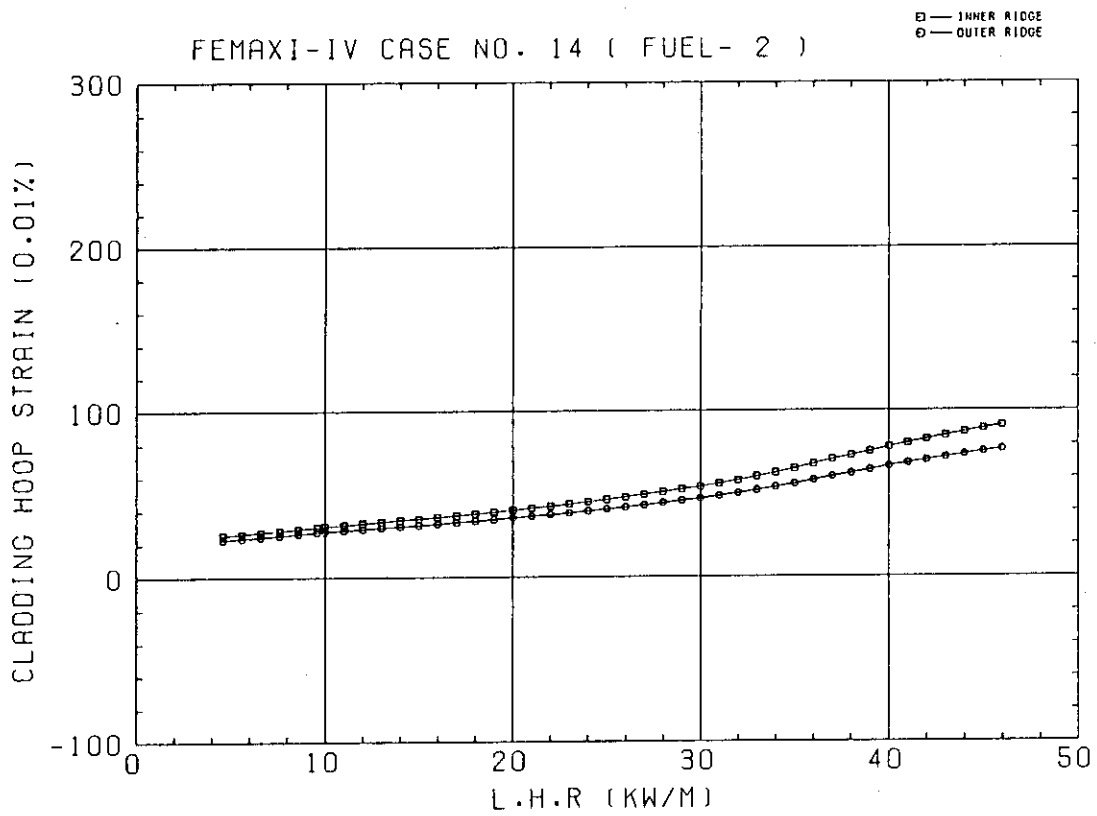
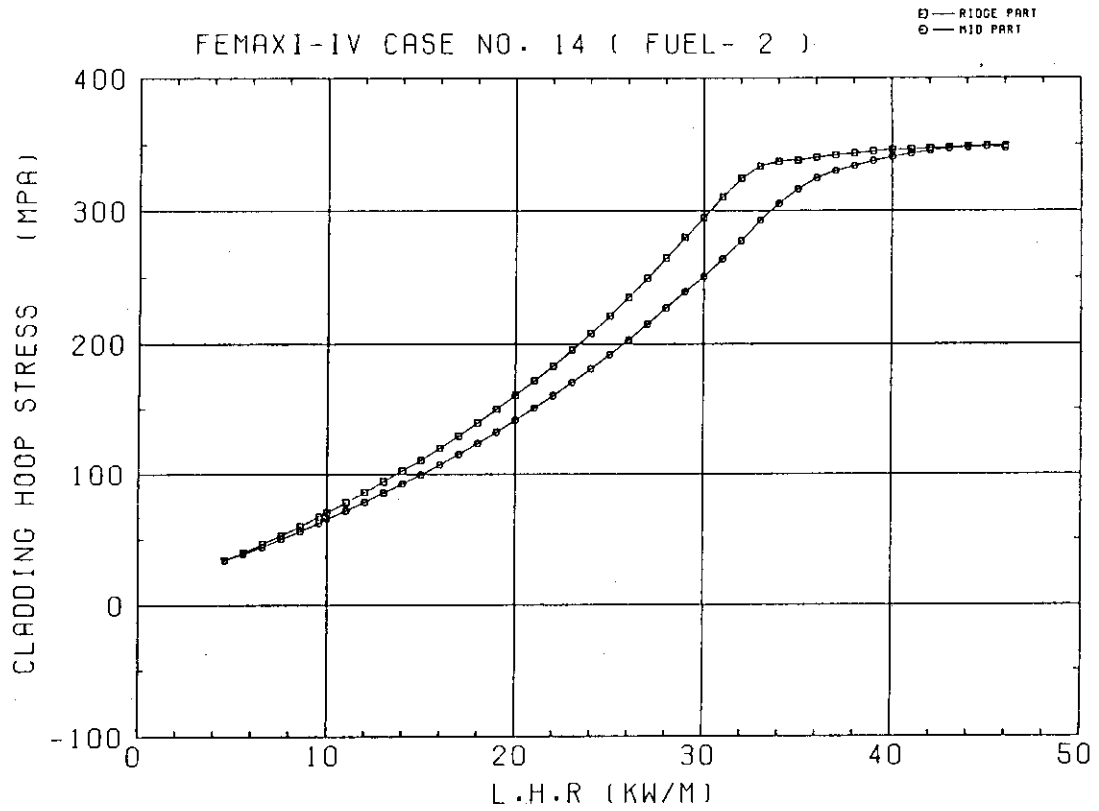


図4.4 サーベイ炉心B (ケース14) 解析結果 (4/5)

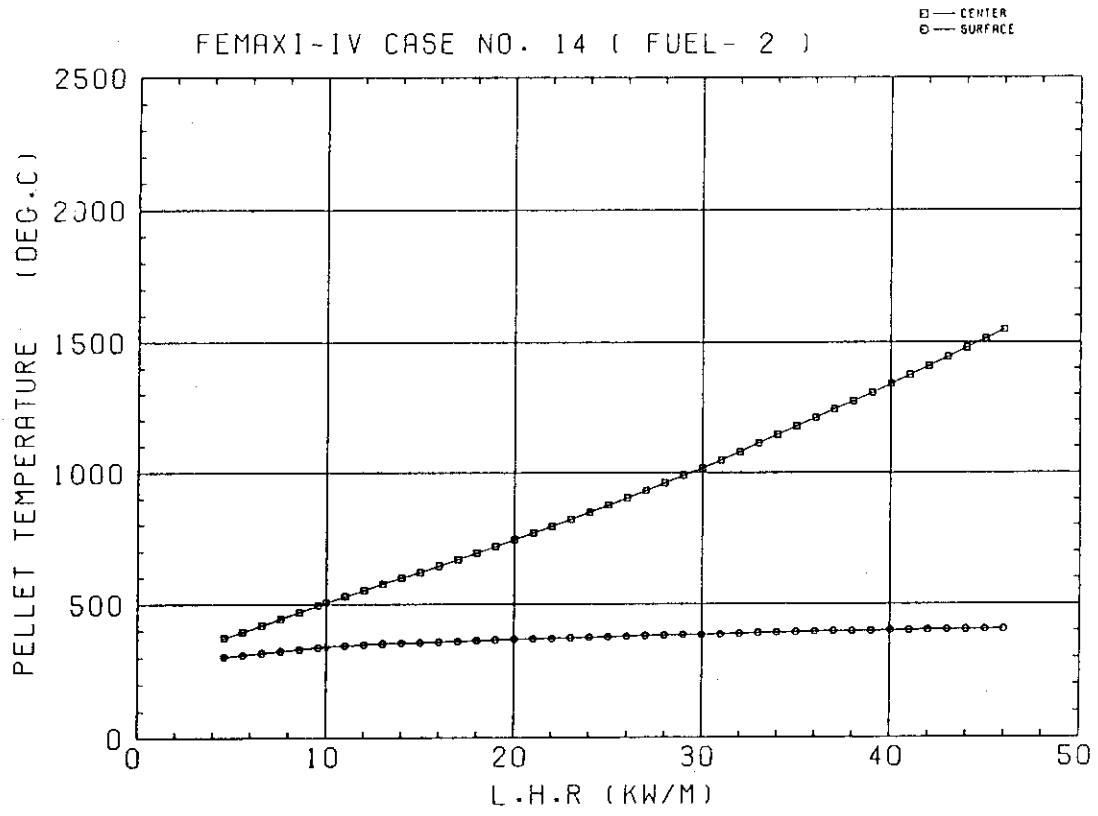


図4.4 サーベイ炉心B (ケース14) 解析結果 (5/5)

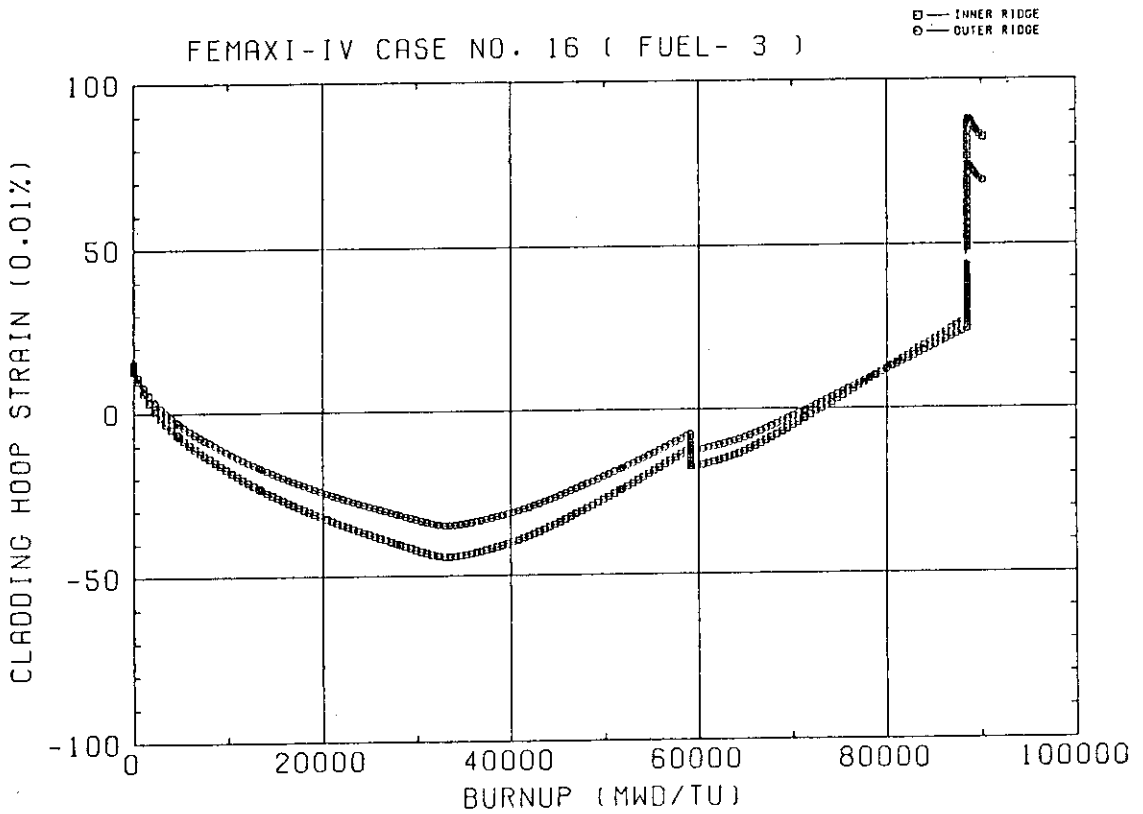
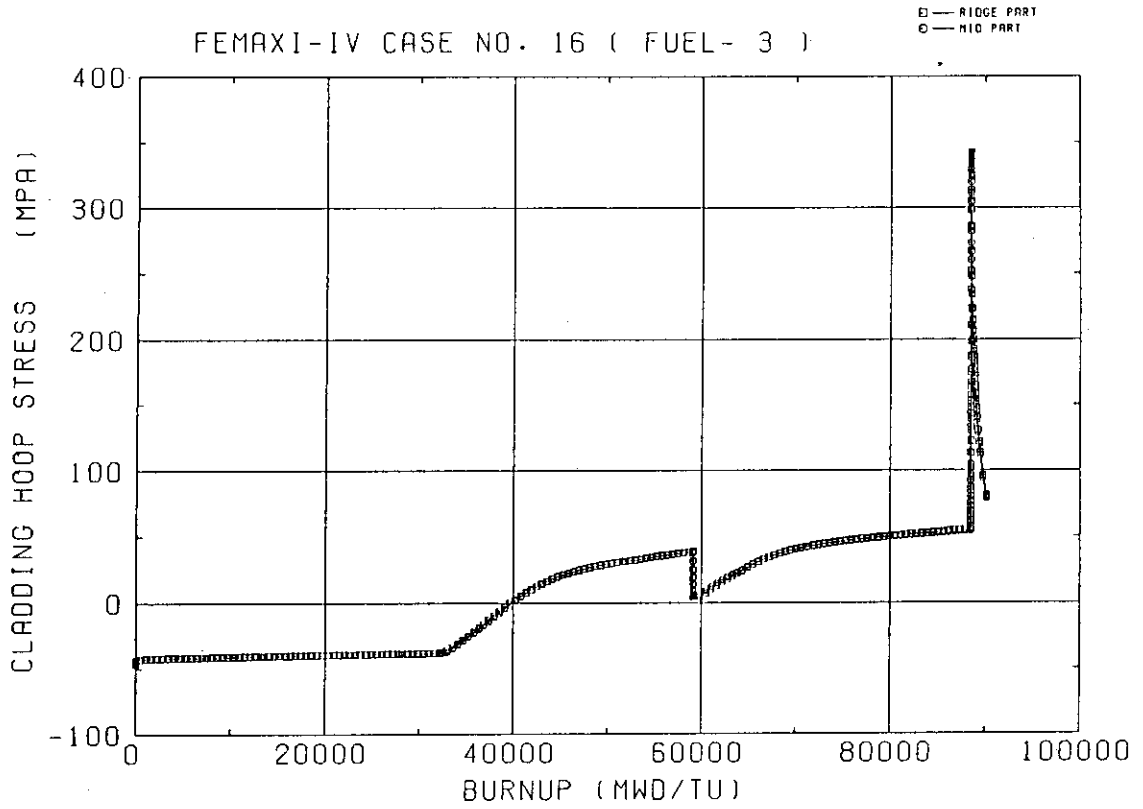


図 4.5 サーベイ炉心C (ケース16) 解析結果 (1/5)

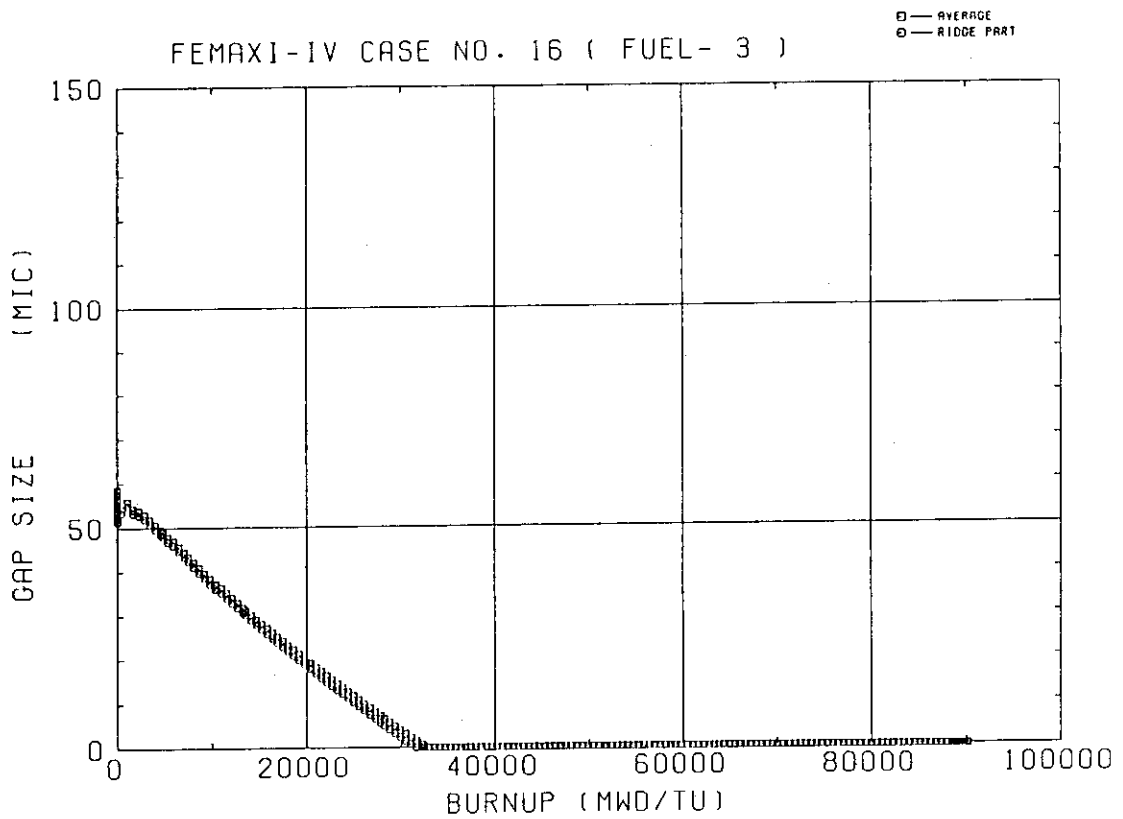
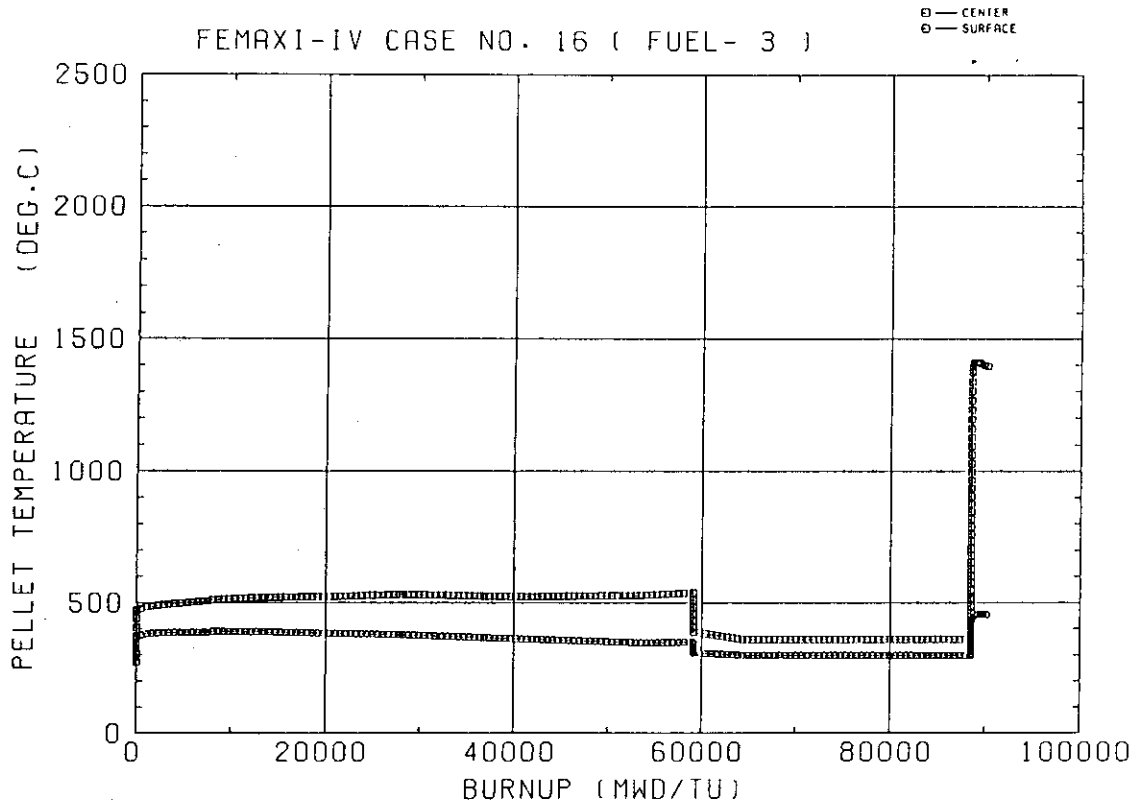


図 4.5 サーベイ炉心C (ケース16) 解析結果 (2/5)

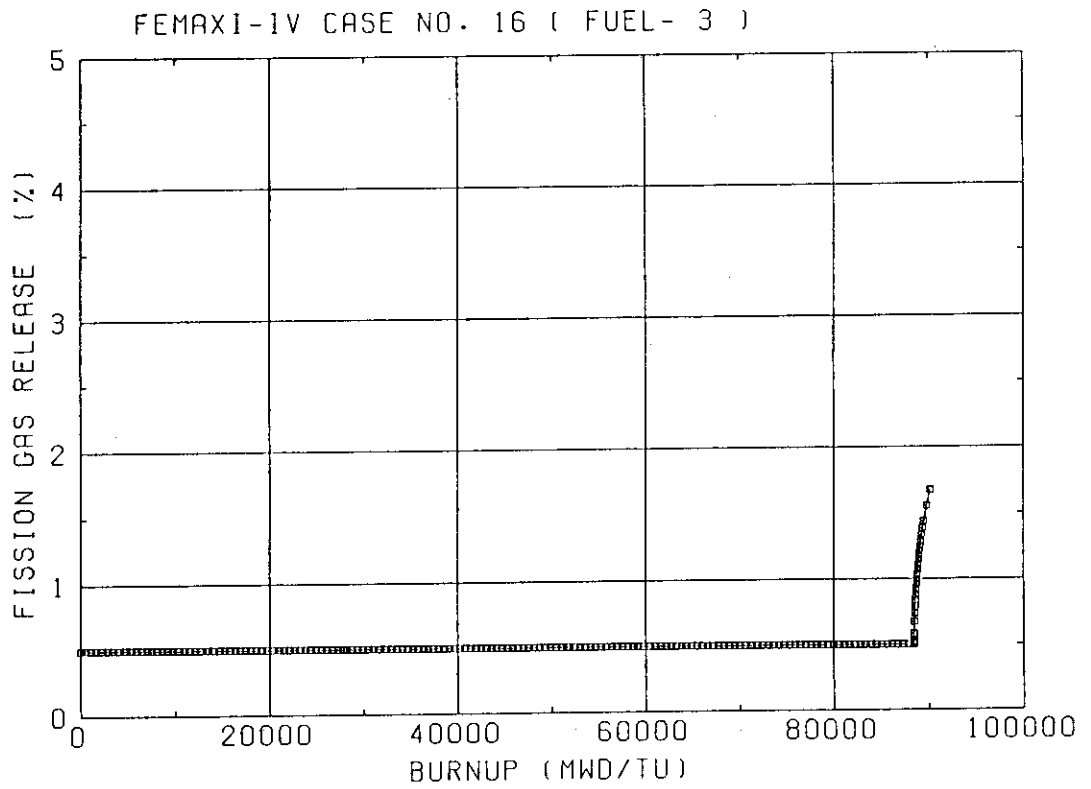
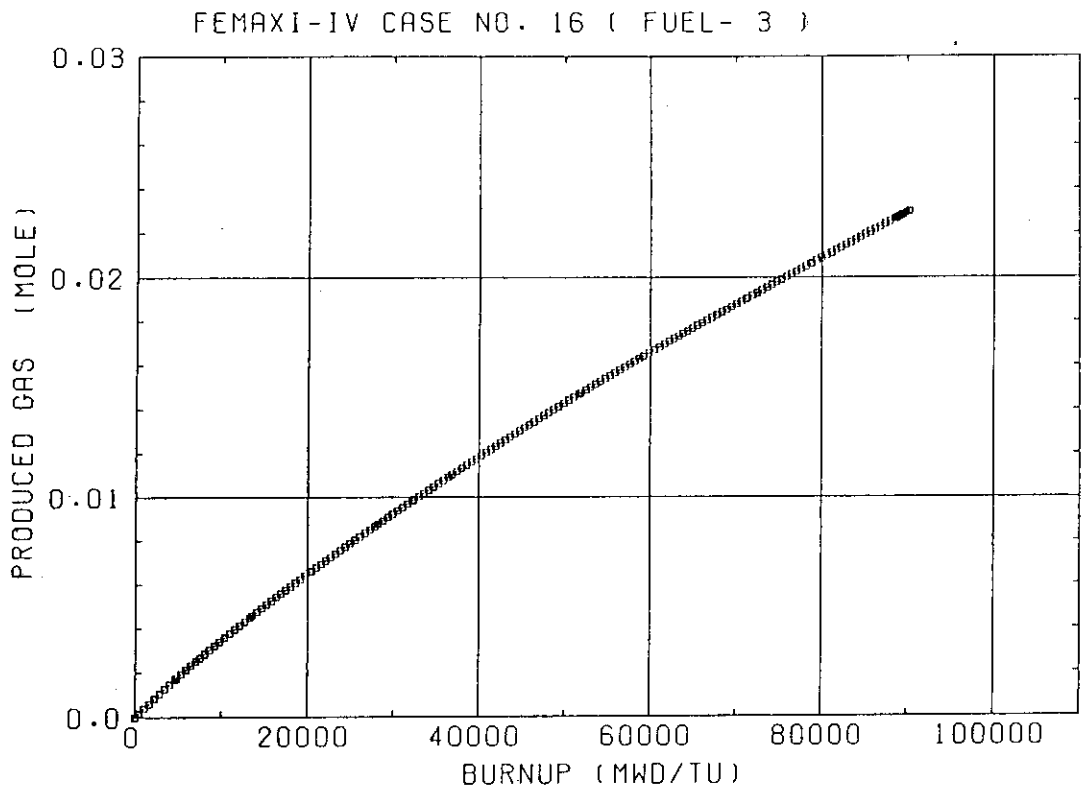


図4.5 サーベイ炉心C (ケース16) 解析結果 (3/5)

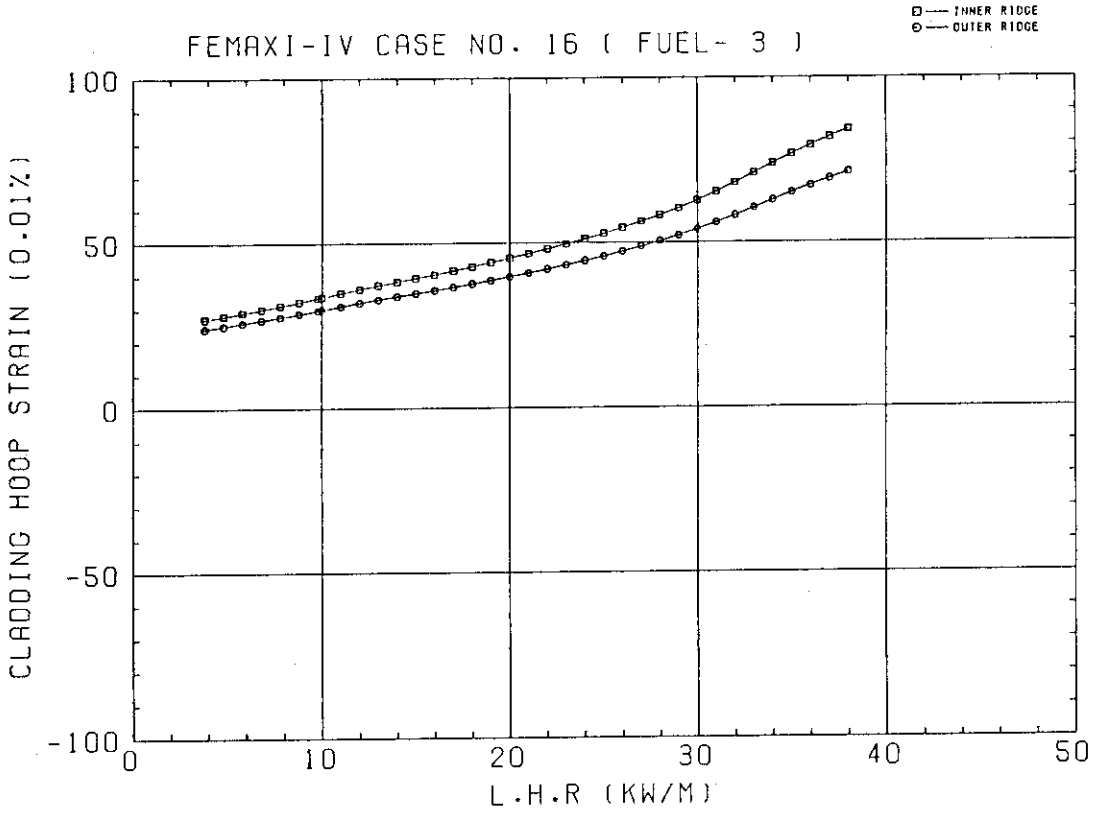
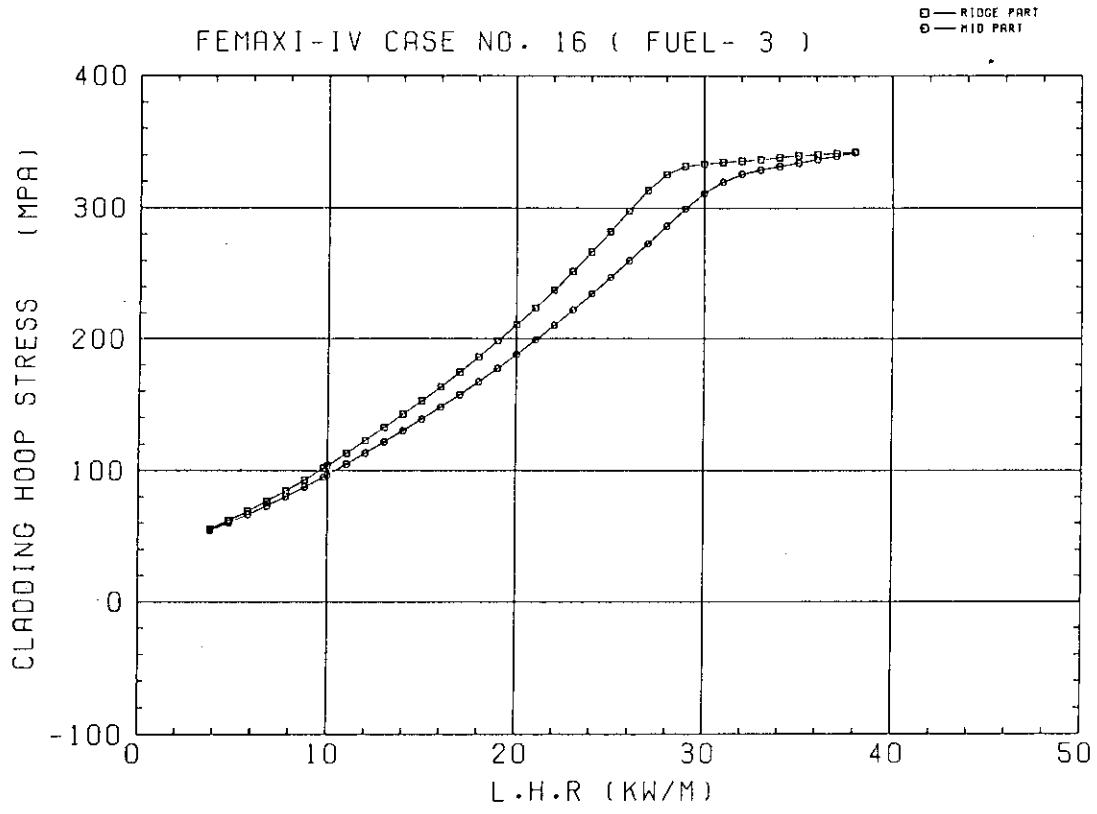


図4.5 サーベイ炉心C (ケース16) 解析結果 (4/5)

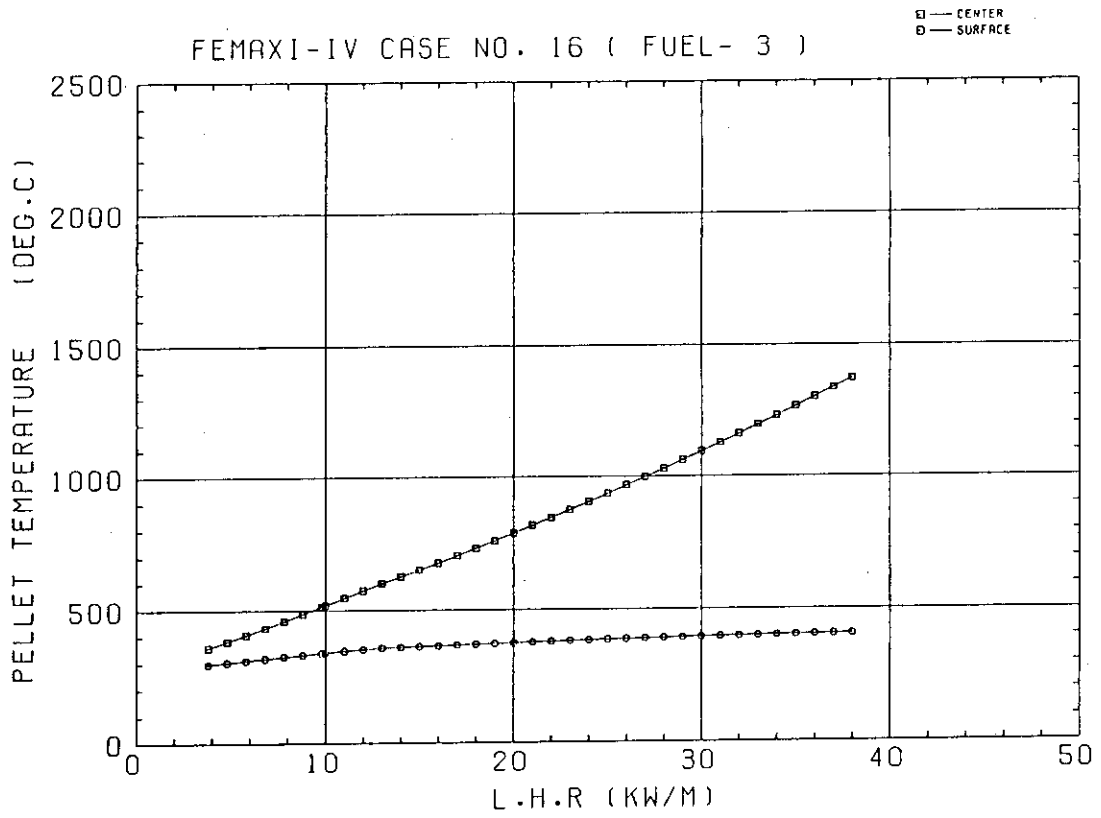


図 4.5 サーベイ炉心C (ケース16) 解析結果 (5 / 5)

5. 評価および検討

5.1 PCI評価基準について

PCIの評価基準を規定した法規は現在のところない。

一方、陸上PWR燃料の構造設計基準⁽⁸⁾として、以下の5基準がある。

- ① 燃料最高温度は二酸化ウランの溶融点未満であること。
- ② 燃料棒内圧は運転中冷却材圧力以下であること。
- ③ 被覆にかかる応力はジルカロイ-4の耐力以下であること。
- ④ 被覆に生ずる円周方向引張歪の変化量は各過渡変化に際して1%を超えないこと。
- ⑤ 被覆管の累積疲労サイクル数は設計疲労寿命を超えないこと。

この基準は、燃料棒の機械的健全性を一般的に評価するための構造設計基準であるが、今回のPCI解析結果の評価は評価基準がないため、この燃料棒構造設計基準のうち、特に、PCIの特性から関連の深い上記③、④の被覆管歪み変化および被覆管にかかる応力についての基準で検討、評価することとする。

5.2 歪み変化の検討

以下に示すように、全ケースとも被覆管の歪み変化は1%以下の基準を満足している。

ケースNo.	炉心名	最大歪み変化
7	最適炉心	0.59%
8	最適炉心	0.76%
12	サーベイ炉心A	0.63%
14	サーベイ炉心B	0.65%
16	サーベイ炉心C	0.57%

なお、ケース12は、圧縮側の歪みである。

5.3 評価

また、被覆管円周方向応力およびFPガス放出率の最大値を整理すると以下となる。

ケースNo.	炉心名	被覆管応力最大値	FPガス放出率最大値
7	最適炉心	332 (MPa)	1.8% (全体)
8	最適炉心	326 (MPa)	28.8% (")
12	サーベイ炉心A	359 (MPa)	11.8% (")
14	サーベイ炉心B	349 (MPa)	8.6% (")
16	サーベイ炉心C	342 (MPa)	1.7% (")

前項に示すように、全ケースとも被覆管の歪み変化は1%以下の基準を満足しているが、最大応力値については300MPaを超え、FPガス放出率の最大値も全体で数%から数10%となっており、非常に厳しい結果であることは否定できない。

従って、今後の研究開発の方向としては、燃料に対してより条件を緩和するべきと考えられる。その方向項目を次節に示すが、燃料については応力などが緩和されるような最適設計検討を進める。一方、炉心については性能を落とさずに、燃料に対してより楽な設計となるように出力ピーキングを下げる検討を進めて最高燃焼度を現在の実績最大値程度としていく。

5.4 今後の研究開発の方向

燃料に対してより条件を緩和する方向とし、以下に示す燃料ならびに炉心の検討を行う。

(1) 燃料の最適化の検討

P C I性能などを考慮するとき基本的な考え方として次の二つがある。

- ① ペレットの結晶粒径(グレン)サイズを大きくして、FPガスを出にくくする。
この場合、応力値は高くなる。
- ② もう一つは、逆にペレットのグレンサイズを小さくして、応力値を低くする。
この場合、FPガスは出やすくなる。

今回の場合は、高燃焼度でありFPガス量が多いことが問題であるので、ペレット粒径を大きくする方がよい。また、燃料設計上のさらなる改良点(最適化)として以下が考えられる。

- ① ペレット粒径を大きくする。
- ② 初期内圧を高くする。
- ③ プレナムを大きくする。(経済性は悪くなるので通常は採用しないが、ここでは燃料有効長は変わらないとして考える)
- ④ ライナ肉厚を増やす。(BUが延びる効果の確認は必要)
- ⑤ 被覆管の材質としてクリープしやすいものを採用する。
- ⑥ ペレット形状の検討。(効果はそれほど期待できないが、検討の余地はある。例えば、中空ペレットは3万MWd/t程度までならば効果があるが、FPガスがでやすく、高燃焼度では中空部がふさがり、結局、燃料中心温度はそれほど低くならなくなりオーバランブ実験結果でも破損しきい値はほとんど変わらない。)
- ⑦ ギャップサイズを大きくする。(ただし、高燃焼度ではギャップがふさがるため効果ないと考えられるが、確認は必要)

(2) 炉心の設計検討目標

炉心についても、燃料に対して条件を緩和する方向とするため、出力ピーキングを下げて、最高燃焼度を実績、検証範囲の70,000MWd/t(あるいは外挿可能範囲と考えられる80,000MWd/t)を目標として、さらなる最適炉心設計を行う。

そのための検討項目として以下などがある。

- ① 独立型の可燃性毒物の採用及び燃焼特性のよい材質(例えばB¹⁰)の検討。
- ② 燃料及び炉心(軸方向、半径方向とも)内濃縮度分布の多領域化の検討。

6. 結 言

最適炉心の検討のサーベイ炉心を含めた4炉心の燃料について、耐PCI性能解析を実施した結果を検討評価すると以下となる。

- (1) 全ケースとも被覆管の歪み変化1%以下を満足している。
- (2) ただし、今回の解析は最高燃焼度が実験による実績及びコードの適用範囲を超えているため、次のような仮定をおいての評価としているが、これらの点については、今後十分実験などによる実証および検証が必要である。
 - ① 被覆管のZrライナの効果（FPガス遮断効果）が最高燃焼度まで持続するものとする。
 - ② 負荷変動の繰り返しの影響については、ハルデン炉におけるサイクル実験結果と同様に、応力しきい値などは変わらないものとする。
 - ③ 解析コードの適用範囲を超えるところについては、解析理論および必要データについて外挿が可能であるとする。
- (3) 上記仮定によって歪み変化1%以下の基準を満足するという評価となったが、解析結果の最大値は応力については300MPaを超え、FPガス放出率も、全体で数%から数10%となっており、非常に厳しい結果であることは否定できない。
- (4) 従って、今後の研究開発の方向としては、燃料に対してより条件を緩和すべきと考えられる。即ち燃料については応力などが緩和されるような最適設計検討を進める。一方、炉心については性能を落とさずに、燃料に対してより楽な設計となるように出力ピーキングを下げる検討を進めて、最高燃焼度を現在の実績最大値である70,000MWd/tあるいはその外挿可能範囲と考えられる80,000MWd/t程度としていく。

謝 辞

本報作成に関して、燃料安全工学部燃料安全第1研究室の古田照夫室長、内田正明氏並びにCRC株式会社の斉藤裕明氏には、有益な助言をいただきました。ここに、謹んで感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) JAERI-Mレポート「改良船用炉最適炉心およびシステム簡略化の検討」(投稿中)
昭和63年
- (2) NAKAJIMA T "FEMAXI-IV: A Computer Code for the Analysis of Fuel Rod Behavior under Transient Conditions", Nuclear Engineering Design, 88 (1985)
- (3) NAKAJIMA T "A Comparison Between Fission Gas Release Data and FEMAXI-IV Code Calculations", 5th International Seminar on Mathematical/Mechanical Modelling of Reactor Elements, 1985
- (4) NAKAJIMA T "Analysis of Fission Gas Release from UO₂ Fuel during Power Transients by FEMAXI-IV Code", IAEA-TC-579/32, 1986
- (5) 中島, 市川, 斉藤 JAERI-M 9251 「FEMAXI-III軸対称有限要素法による燃料ふるまいコード」1981年1月
- (6) 柳沢和章他「軽水炉燃料のペレット-被覆相互作用, (I) PWR燃料棒」日本原子力学会誌 Vol. 28, No.7 (1986)
- (7) JAERI-M 88-049 安保, 中島, 横村「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
- (8) 科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室「原子力安全委員会安全審査指針集; 加圧水型原子炉に用いられる17行17列の燃料集合体について(原子炉安全専門審査会)」昭和59年3月大成出版社

謝 辞

本報作成に関して、燃料安全工学部燃料安全第1研究室の古田照夫室長、内田正明氏並びにCRC株式会社の斉藤裕明氏には、有益な助言をいただきました。ここに、謹んで感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) JAERI-Mレポート「改良船用炉最適炉心およびシステム簡略化の検討」(投稿中)
昭和63年
- (2) NAKAJIMA T "FEMAXI-IV: A Computer Code for the Analysis of Fuel Rod Behavior under Transient Conditions", Nuclear Engineering Design, 88 (1985)
- (3) NAKAJIMA T "A Comparison Between Fission Gas Release Data and FEMAXI-IV Code Calculations", 5th International Seminar on Mathematical/Mechanical Modelling of Reactor Elements, 1985
- (4) NAKAJIMA T "Analysis of Fission Gas Release from UO₂ Fuel during Power Transients by FEMAXI-IV Code", IAEA-TC-579/32, 1986
- (5) 中島, 市川, 斉藤 JAERI-M 9251 「FEMAXI-III軸対称有限要素法による燃料ふるまいコード」1981年1月
- (6) 柳沢和章他「軽水炉燃料のペレット-被覆相互作用, (I) PWR燃料棒」日本原子力学会誌 Vol. 28, No.7 (1986)
- (7) JAERI-M 88-049 安保, 中島, 横村「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
- (8) 科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室「原子力安全委員会安全審査指針集; 加圧水型原子炉に用いられる17行17列の燃料集合体について(原子炉安全専門審査会)」昭和59年3月大成出版社