

JAERI-M

90-002

実炉燃料照射データによる
FEMAXI-IVコードの検証

1990年2月

内田 正明・齊藤 裕明*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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）で複写による実費領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, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山田軽印刷所

実炉燃料照射データによる FEMAX I - IV コードの検証

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

内田 正明・齊藤 裕明*

(1990年1月5日受理)

燃料挙動解析コード FEMAX I - IV の実炉燃料への適用性を調べるため、BWR で福島第一・3号炉における信頼性実証試験、PWR で ZORITA 炉における高燃焼度燃料試験をとり上げ、公開文献に記載された条件に従った計算を行ない、結果を照射後試験データと比較した。

BWR 燃料に関する結果は、燃料棒変形、FPガス放出率等につき、おおむね良い一致を示し、同コードの 30 MWd/kg 程度の燃焼度までの BWR 実炉燃料への適用性を示した。PWR 燃料に関する結果は、設計パラメータの変化に対する過剰な応答が計算される等の問題が見られた。これは ZORITA 燃料が最高 56 MWd/kg - U と非常に高燃焼度であることが第一の原因であり、FEMAX I - IV に限らず、主に低燃焼度における知見をベースに構成されたコードを、高燃焼度まで適用する場合の問題を示していると考えられる。

Benchmarking of FEMAXI-IV Code with Fuel Irradiation Data
in Power Reactors

Masaaki UCHIDA and Hiroaki SAITO*

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 1990)

To study the applicability of the fuel behavior analysis code FEMAXI-IV to power reactor fuels, the Reliability Proving Test in Fukushima BWR and the extended burnup fuel test in Zorita PWR were taken up as benchmarking problems. Calculations were made based only on the published data and the results were compared with the post-irradiation examination data.

The results of calculation on the BWR fuel have shown generally good agreement with the measurement data on fuel rod deformation and fission gas release rate, demonstrating the applicability of the FEMAXI-IV CODE to BWR fuels with a burnup range up to 30 MWd/kg.

The result of benchmarking on the PWR fuel has revealed a problem that some calculated parameters excessively responds to changes of design or operation conditions. Its primary reason is considered to be the very high burnup of the Zorita fuel (56 MWd/kg): some concepts obtained from low burnup fuel experiences, on which fuel behavior codes as FEMAXI-IV are based, are considered to lose effectiveness at high burnup.

Keywords: Code, Fuel, BWR, PWR, Benchmarking, Swelling, Fission Gas Release

* Century Research Center Corp.

目 次

1. 序 論	1
2. 計算方法	2
3. 計算結果と検討	3
3.1 BWR 燃料	4
3.2 PWR 燃料	5
4. 考察 — 高燃焼度用コードの可能性	7
5. 結 論	9
参 考 文 献	10
付 錄 燃料設計諸元に関する入力データ	26

Contents

1. Introduction	1
2. Method of calculation	2
3. Results and Analysis	3
3.1 BWR fuel	4
3.2 PWR fuel	5
4. Discussion --- possibility of high-burnup code	7
5. Conclusion	9
Reference	10
Appendix Input data on fuel design parameters	26

1. 序論

FEMAX I - IV コードは、軽水炉燃料棒の通常運転時および過渡時に起る諸変化を解析するコードであり、原研の中島らによって開発されたものである。⁽¹⁾

FEMAX I シリーズの第 4 バージョンであるが、FEMAX I - I および II は被覆管の変形を計算する限定された目的のコードであり、FEMAX I - III⁽²⁾ に至って燃料の伝熱、FPガス放出等のモデルを組み込んだ総合的なコードになり、公開されたものである。FEMAX I - III から IV へのバージョン・アップでは、主として次のような点が改良された。

- (1) 過渡状態が扱えるよう、主要なモデルが時間依存型に置き換えられた。
- (2) FEMAX I - III の力学的モデルは、被覆管の局所的な変形（リッジング）を扱うことに着眼を置いたものであった。FEMAX I - IV でもこの機能は残してあるが、燃料ピン全体にわたる力のバランスを扱うモデル（FEMROD）が付加された。
- (3) FEMAX I - III は、主として BWR 燃料を念頭に置いて開発されたが、IV では PWR 燃料も扱えるよう若干の変更が行われた。

FEMAX I - III および IV は開発の過程で多くの検証計算が行われたが、それらはすべて開発者自身によるいわゆる「developmental」な検証であった。また検証に使われたデータはすべてハルデン計画、スタズビック・ランプ計画、バッテル HBEP 計画等から得られた短尺テスト燃料の照射データであった。これに対して、本報で述べる検証作業は第三者による、実炉照射データとの比較計算により、FEMAX I - IV コードの実炉への適用性を確認することを企図したものである。

第三者による検証が重要であることはいうまでもないが、実炉燃料照射データを用いて検証することの意義は次のように考えられる。

- (1) 燃料挙動解析コードを開発する最終目的は、実炉燃料の挙動に関する事前の予測計算である。しかるにこの種のコードは、一般に厳密な理論と物性値、分離効果実験データのみによって構成できるものではなく、恣意的なモデルも使用せざるを得ないのが通例である。これまでの開発的検証においても、各照射計画毎の説明できないデータの偏りがかなり顕著なように思われる。もし、いわゆる「チューニング」が不可避であるならば、それは最終目的からして、実炉照射データに対してなされることが望ましい。（ただし本解析においてはチューニングは排した。また実炉照射といつても、各炉、各照射計画毎の偏りは当然考えられるから、ひとつの検証結果を過大視すべきではない。）
- (2) 実炉燃料はスタック長が 4 m 近くあり、40 cm 程度のものが多い試験燃料とは大きな開きがある。燃料ピン軸方向の種々の相互作用が適切にモデル化されているかどうか調べる必要がある。
- (3) 研究炉での燃料照射データは、高燃焼度までの燃料挙動検証用としてはやや不十分なのが現状である（バッテル HBEP 計画では燃焼度は高いが、データは未公開である。）

実炉での燃料照射試験データとしては、1980 年代初頭にかけて USDOE の後援で行われた米国

各燃料メーカーによる高燃焼度実証試験があり、わが国でもPWR, BWRでの信頼性実証試験データがある。しかし、公開文献のみから何とか計算を実施し、結果を比較できるだけのデータが得られるという条件で見ると、選択は極めて限られる。その中からPWR燃料としてZORITA炉照射データ⁽³⁾を、BWR燃料として福島第一3号炉における信頼性実証試験データ⁽⁴⁾を選んだ。ZORITA炉照射は燃焼度、出力共に高く、設計パラメータを変えたデータがあるという点で興味があるが、公開文献が会議報文一編のみであり、入力データ作成に難があった。

一方福島データは、報告が比較的詳細であるのが利点であるが、燃焼度が約30 MWD/kg-Uとやや低く、また、設計パラメータが1種類のみであるという問題があった。いずれの場合も燃料ピンを1本ずつ特定することはできず、また、出力履歴は大よその傾向だけデータから定め、後はパラメトリックに扱わざるを得なかった。

しかし、このような計算法は、コードの実用化の上ではむしろ積極的な意味を持つものとも考えられる。なぜならば、完成したコードは実炉燃料の挙動予測計算に用いる場合には、出力履歴は当然ある幅をもって仮定せざるを得ないからである。その場合、計算結果は仮定した条件の不確定性に従って変動するであろうが、それでもなおその結果は意味あるものでなければならない。逆にいえば、もし仮にコードが完璧な予測能力を持っていたとしても、出力条件の不確定性により、結果が意味を失う程変動するのであれば、そのような現象をコード解析の対象とすることの意義が問われるであろう。

このような観点から、計算結果の照合にあたっては、絶対値の一致よりは燃焼度依存性等の傾向や設計パラメータの効果、複数の出力変数の変動傾向が実測データと一致するかどうかを重視した。

2. 計 算 方 法

福島燃料(BWR)およびZORITA燃料(PWR)の概要を、それぞれ第1表および第2表にまとめて示す。BWR燃料による信頼性実証試験は合計10本の集合体を用いているが、被覆管メーカー2社の製品を用いている他は、各集合体中に2w/oのガドリニア入り燃料棒が存在すること、濃縮度の異なる燃料棒を組み合わせている等、通常の集合体設計に見られる燃料棒仕様の相違以外には、特にパラメータを変えていない。そこで計算では、ガドリニア入り燃料棒は除外し、もっぱら出力履歴の相違をパラメータとして捉えることにした。10体の集合体の中からF3A3, F3A9の2つの集合体を選び、文献に記載されているサイクル毎の平均出力で運転された燃料棒を仮定して、これを標準ケースとした。さらに集合体内のピーキングを模擬するため、標準出力の90%, 108%, 115%に相当する出力の燃料棒を仮定して、パラメータとした(燃焼度もこれに応じて変える)。

ZORITA炉におけるPWR燃料の試験の場合は、これと異なり、出力レベルを変えるために濃縮度をかなり大きく変動させている他、加圧/非加圧の相違および焼結温度とペレット密度の相違をパラメータとした試験計画になっている。しかし、これらのパラメータがどのように組合われているのかは、公開文献からは十分にはわからない。そこで計算では、加圧/非加圧の相違

各燃料メーカーによる高燃焼度実証試験があり、わが国でもPWR, BWRでの信頼性実証試験データがある。しかし、公開文献のみから何とか計算を実施し、結果を比較できるだけのデータが得られるという条件で見ると、選択は極めて限られる。その中からPWR燃料としてZORITA
炉照射データ⁽³⁾を、BWR燃料として福島第一3号炉における信頼性実証試験データ⁽⁴⁾を選んだ。ZORITA炉照射は燃焼度、出力共に高く、設計パラメータを変えたデータがあるという点で興味があるが、公開文献が会議報文一編のみであり、入力データ作成に難があった。

一方福島データは、報告が比較的詳細であるのが利点であるが、燃焼度が約30 MWD/kg-Uとやや低く、また、設計パラメータが1種類のみであるという問題があった。いずれの場合も燃料ピンを1本ずつ特定することはできず、また、出力履歴は大よその傾向だけデータから定め、後はパラメトリックに扱わざるを得なかった。

しかし、このような計算法は、コードの実用化の上ではむしろ積極的な意味を持つものとも考えられる。なぜならば、完成したコードは実炉燃料の挙動予測計算に用いる場合には、出力履歴は当然ある幅をもって仮定せざるを得ないからである。その場合、計算結果は仮定した条件の不確定性に従って変動するであろうが、それでもなおその結果は意味あるものでなければならない。逆にいえば、もし仮にコードが完璧な予測能力を持っていても、出力条件の不確定性により、結果が意味を失う程変動するのであれば、そのような現象をコード解析の対象とすることの意義が問われるであろう。

このような観点から、計算結果の照合にあたっては、絶対値の一致よりは燃焼度依存性等の傾向や設計パラメータの効果、複数の出力変数の変動傾向が実測データと一致するかどうかを重視した。

2. 計 算 方 法

福島燃料(BWR)およびZORITA燃料(PWR)の概要を、それぞれ第1表および第2表にまとめて示す。BWR燃料による信頼性実証試験は合計10本の集合体を用いているが、被覆管メーカー2社の製品を用いている他は、各集合体中に2w/oのガドリニア入り燃料棒が存在すること、濃縮度の異なる燃料棒を組み合わせている等、通常の集合体設計に見られる燃料棒仕様の相違以外には、特にパラメータを変えていない。そこで計算では、ガドリニア入り燃料棒は除外し、もっぱら出力履歴の相違をパラメータとして捉えることにした。10体の集合体の中からF3A3, F3A9の2つの集合体を選び、文献に記載されているサイクル毎の平均出力で運転された燃料棒を仮定して、これを標準ケースとした。さらに集合体内のピーニングを模擬するため、標準出力の90%, 108%, 115%に相当する出力の燃料棒を仮定して、パラメータとした(燃焼度もこれに応じて変える)。

ZORITA炉におけるPWR燃料の試験の場合は、これと異なり、出力レベルを変えるために濃縮度をかなり大きく変動させている他、加圧/非加圧の相違および焼結温度とペレット密度の相違をパラメータとした試験計画になっている。しかし、これらのパラメータがどのように組合われているのかは、公開文献からは十分にはわからない。そこで計算では、加圧/非加圧の相違

はそのままパラメータとするが、焼結温度とペレット密度はそのまま取り上げず、FEMAX I モデル上のパラメータである最大焼きしまり量を1%と2%の2つのレベルにとることにより模擬することにした。さらに濃縮度の相違は、BWR燃料の場合と同様に出力履歴の相違として捉えることにし、標準出力ケースの他に92%，108%の2つのレベルを設定した。

計算パラメータを第3表にまとめて示す。FEMAX I - IVによる計算では、多くの入力データが必要であるが、それらを付録に示す。これらの入力データのかなりの部分が文献から決められないものであったが、それらのデータの一部は標準的なBWR, PWR燃料からの類推により、残りは恣意的に定めた。付録では、これらの入力データの出典、推定根拠も示してある。

計算で仮定したBWR, PWR各標準ケースの出力履歴を第1図に示す。図に見られるように、各サイクル内での出力の変動は無視した。燃料棒軸方向の出力分布も公開文献から得られない入力データのひとつであったが、これは全く恣意的にQuad Cities I 燃料照射データ⁽⁵⁾にあったガンマ・スキャン結果を用い、第2図のような相対出力分布の形をPWR, BWRを問わず、長さの異なる燃料に当てはめるという方法をとった。

これはいかにも乱暴な仮定ではあるが、動力炉燃料の出力分布はどれも余弦分布を平坦化したものであり、炉毎に大きな差異はない。また細かく見れば、相対出力分布も燃焼度と共に変わることが、燃料挙動解析の通例と同様、本解析においても相対分布は一定と仮定している。

またさらに実際のガンマ・スキャン結果といえども、主として照射後期の出力分布を反映しているのであり、照射中の平均的な出力分布よりは平坦化されていると考えなければならない。

最後に、FEMAX I - IVコードは他のコードと同様にいくつかのチューニング・パラメータを持っており、解析の目的によってはこれらのパラメータを操作することが意味のある場合もあるが、本解析においてはこのような操作は一切排した。動かした唯一のパラメータはPWR燃料の場合の最大焼きしまり量であるが、これは前述のように実験パラメータであるペレット焼結温度と密度を焼きしまり量で置きかえたに過ぎない。

このように本解析は、動力炉燃料の照射挙動を極めて大局的に捉えようとしたものであり、結果として種々の照射後測定結果と計算結果の一致が悪くなるのは、ある程度止むを得ない面がある。

3. 計算結果と検討

本解析の対象としたBWR燃料、PWR燃料共、実測データは全て照射後試験から得られている。従って、燃焼度依存性に関するデータは、異なる集合体、異なる燃料棒間の相互比較から得られるものである。計算では、いわば各燃料棒を連続的に試験しながら照射する場合に相当する。計算結果の一部も、実測データの形式に合わせて、各サイクル終了時の状態として表示してあるが、このような根本的な相違があることを念頭に置いて、検討を進めることにする。

はそのままパラメータとするが、焼結温度とペレット密度はそのまま取り上げず、FEMAX I モデル上のパラメータである最大焼きしまり量を 1% と 2% の 2 つのレベルにとることにより模擬することにした。さらに濃縮度の相違は、BWR 燃料の場合と同様に出力履歴の相違として捉えることにし、標準出力ケースの他に 92%， 108% の 2 つのレベルを設定した。

計算パラメータを第 3 表にまとめて示す。FEMAX I - IV による計算では、多くの入力データが必要であるが、それらを付録に示す。これらの入力データのかなりの部分が文献から決められないものであったが、それらのデータの一部は標準的な BWR, PWR 燃料からの類推により、残りは恣意的に定めた。付録では、これらの入力データの出典、推定根拠も示してある。

計算で仮定した BWR, PWR 各標準ケースの出力履歴を第 1 図に示す。図に見られるように、各サイクル内での出力の変動は無視した。燃料棒軸方向の出力分布も公開文献から得られない入力データのひとつであったが、これは全く恣意的に Quad Cities I 燃料照射データ⁽⁵⁾ にあったガンマ・スキャン結果を用い、第 2 図のような相対出力分布の形を PWR, BWR を問わず、長さの異なる燃料に当てはめるという方法をとった。

これはいかにも乱暴な仮定ではあるが、動力炉燃料の出力分布はどれも余弦分布を平坦化したものであり、炉毎に大きな差異はない。また細かく見れば、相対出力分布も燃焼度と共に変わることが、燃料挙動解析の通例と同様、本解析においても相対分布は一定と仮定している。

またさらに実際のガンマ・スキャン結果といえども、主として照射後期の出力分布を反映しているのであり、照射中の平均的な出力分布よりは平坦化されていると考えなければならない。

最後に、FEMAX I - IV コードは他のコードと同様にいくつかのチューニング・パラメータを持っており、解析の目的によってはこれらのパラメータを操作することが意味のある場合もあるが、本解析においてはこのような操作は一切排した。動かした唯一のパラメータは PWR 燃料の場合の最大焼きしまり量であるが、これは前述のように実験パラメータであるペレット焼結温度と密度を焼きしまり量で置きかえたに過ぎない。

このように本解析は、動力炉燃料の照射挙動を極めて大局的に捉えようとしたものであり、結果として種々の照射後測定結果と計算結果の一致が悪くなるのは、ある程度止むを得ない面がある。

3. 計算結果と検討

本解析の対象とした BWR 燃料、PWR 燃料共、実測データは全て照射後試験から得られている。従って、燃焼度依存性に関するデータは、異なる集合体、異なる燃料棒間の相互比較から得られるものである。計算では、いわば各燃料棒を連続的に試験しながら照射する場合に相当する。計算結果の一部も、実測データの形式に合わせて、各サイクル終了時の状態として表示してあるが、このような根本的な相違があることを念頭に置いて、検討を進めることにする。

3.1 BWR 燃料

福島炉における信頼性実証試験では、多岐にわたる照射後試験が行なわれているが、被覆管腐食量、強度、スペーサーの健全性等 FEMAX I - IV が解析対象としている現象のデータも多い。計算結果と照合できるのは FP ガス放出率、ペレット密度結晶粒径、燃料スタック長、燃料棒外径および長さ変化である。

はじめに F3A3, F3A9 集合体の最高出力部における燃料中心温度の変化の計算結果をそれぞれ第 3 図(a), (b) に示す。これに対応する実測結果はないが、サイクル毎の燃料温度の変化と、仮定した出力の相違の効果をコードがどう捉えているかを知るために、示したものである。

F3A3 集合体では、第 3 サイクルの、F3A9 では第 2 サイクルの出力が高く、それらの時期に最高温度（約 1500 °C）が現れている。

燃料中心温度に密接に関係した現象として、中心部における UO₂ の結晶粒径の変化が報告されている。また、文献(4)の図には、実験者たちによる計算結果も表示されている。FEMAX I - IV においても、粒径変化を計算しているが、モデルはいずれも Ainscough の式⁽⁶⁾ に温度を代入したものに過ぎない。これらをまとめて第 4 図に示す。実測値はいずれの計算結果にくらべてもかなり小さい。

Ainscough の式自体は、このような高燃焼度の実炉燃料の等軸晶成長に対して十分な根拠を持っているとはいい難く、不一致は驚くべきことではないが、信頼できる成長モデルが得られない現状では、FP ガス放出等のモデルを結晶粒径の計算値と強く結びつけるのは考え方である。

第 4 図の実験者による計算値はやはり Ainscough の式に基づき、F3A3, F3A9 の 2 つの集合体のいずれかの燃料棒に対応していると思われるが、本解析の 2 つの標準ケース（100 % 出力）の結果とほぼ一致しており、ほぼ同様な燃料温度が計算されたものと考えることができる。また、計算で出力パラメータの上限を 115 %としたのはかなり任意な仮定であったが、第 4 図で最高燃焼度の実験点は、115 % 曲線の最高燃焼度と一致しており、ほぼ妥当であったことがわかる。

FP ガス放出の測定データは、①放出率の燃焼度依存性、② 10MWd/kg 以上の燃焼度における経験最大出力依存性、を示す 2 つのグラフにより報告されている。計算値もこの形式に従ってまとめ、実験値と共にそれぞれ第 5 図、第 6 図に示した。実験値、計算値共に、FP ガス放出率は燃焼度にあまり依存せず、出力に強く依存することを示している（ただし、照射時間を固定すれば燃焼度は出力に比例するので、その意味での燃焼度依存性はある）。特に出力依存の様子は、本解析がきわめて粗い入力データに基づくにも拘らず、極めて良く一致しているといわねばならない。参考までに、第 7 図に照射期間全体にわたる FP ガス放出率の連続的な変化の計算結果を、F3A3 集合体の標準ケースについて示す。

ペレット密度の変化に関する実測値と計算値を第 8 図に示す。計算された密度は実測値に比べてかなり小さい。この不一致の第 1 の原因是、実際の燃料では焼きしまりが 1.5 ~ 2 % 程度起こったと推定されるのに対して、計算では PWR 燃料の場合と違って、最大焼きしまり量をパラメータとせず、標準値 1 % に固定したことである。この点は、もしペレットの 1700 °C 加熱のデータが入力データとして得られれば、チューニングを行なうことなく、かなり修正できよう。

しかし 10MWd/kg 以上での密度低下（スエリング）の割合も、計算値は実測値よりもかなり大

きい。また、計算結果のばらつき幅も、出力パラメータの変動幅90% - 115%の任意性を考慮しても、実測値のばらつき幅よりも大きい。これはいわゆるガスバブル・スエリングが過大に計算されていることを示していると考えられる。

ペレット密度変化に関する量として、燃料スタック長変化についての計算値と実測値の比較を第9図に示す。実測値はやや収縮側、計算値は横ばいなしやや伸長側で、その差は約1%である。先のペレット密度変化では、計算上ペレットは実測値より2~3%TDだけ多く密度減少（体積増加）しており、膨張・収縮が等方的であるとすると、この差はスタック長の差と一致する。絶対値的に見ると、ペレット密度の計算値が初期レベルに比べて、1.5~3.5%TDの密度減少を示しているのに対して、スタック長はこれに見合った分だけ増加せず、初期値とほとんど変わっていない。これは計算上ペレット中心部でのホット・プレス効果が働いているためである。一方実測データでも、ペレット密度が焼きしまり、スエリングの結果、最高燃焼度ではほぼ初期値に戻っているのに対して、スタック長は依然として0.5%程度収縮側になっている。このことから、ガスバブル・スエリングの過大評価はさておき、ホットプレス効果に関するコードのモデルはほぼ妥当なものと考えられる。

燃料棒外径変化に関する実測値と計算値の比較を第10図に示す。BWR燃料では、変形量が小さいが、計算値は実測値よりやや小さくなっている。この相違は必ずしも変形量の相違のみによるとは限らず、実測値ではコードでは考慮していないノジュラー腐食の寄与、除去されずに残ったcrud等の寄与もあると思われる。

燃料棒の長さ変化に関する測定値と計算値の比較を第11図に示す。かなり良く一致しているが、計算値の方がやや伸びが大きい。このような伸びは大部分ジルカロイ被覆管の異方性による照射成長により起こるものとされている。コードで使われている照射成長の式は照射量だけに依存する簡単なもので、この分だけを手計算すると、実測値とさらに良く一致する。すなわち、過大評価の分はペレット被覆相互作用等による力による変形である。

ペレット被覆相互作用に密接に関係するギャップ幅（最高出力位置、ホット状態）の計算結果を第12図に示す。計算上、ギャップは5MWd/kg以上の燃焼度で、閉じた状態が続いている（図上でパルス状の増加は停止期間を示す）。これに対応する測定結果はないが、燃料棒の直径、長さに関する比較結果から、ギャップ幅がやや過小評価されていると考えられる。さらにその原因として、先に述べたガスバブル・スエリングの過大評価があると考えられる。

3.2 PWR燃料

ZORITA燃料の場合は、準拠した実験報告が会議報文であるということもあり、利用できるデータはBWR燃料の場合よりも一層限られている。計算コードと実験報告の双方がとり上げ、それ故比較の対象となるデータは、ペレット密度、FPガス放出率、燃料棒の直径と長さの変化である。

第13図(a)に実験報告のペレット密度データ(体積変化)をそのまま示し、(b)にこれに対応する連続的な計算結果(100%標準出力ケース)を示す。実験データは93%TDから94%TDまで分布する初期密度からの体積変化として表現されており、焼結温度もパラメータにとっているが、計算

では初期密度を94% TDに固定し、モデル上のパラメータである最大焼きしまり量を1%と2%の2つのレベルに設定している。

全体的な傾向は、最大焼きしまり量を2%とした場合と一致している。燃焼棒内圧を34気圧とした燃料棒と非加圧棒の差は、実測結果、計算結果共30MWd/kg程度の燃焼度まではほとんどない。しかし、それ以上の燃焼度では、実験結果は加圧燃料棒の方がやや大きいスエリングを示しているように思われるのに対して、計算結果では非加圧燃料棒の方に、40MWd/kg附近で急激なガスバブル・スエリングが起こっている。この分を考慮に入れた場合のスエリング率は実測値よりかなり大きくなっている。実測のスエリング率は液浸法によるものであり、コード計算上のスエリングは外形上の膨張を念頭に置いたものであるという相違があり、開気泡の分だけ計算値の方が大きくなっているという見方はできる。

また第13図(a)の実測値を破線に惑わされずに見るならば、40MWd/kg附近からスエリングが顕著になるとも見られ、密度の絶対レベルはともかくこの傾向はうまく表現していると見られないこともない。しかしその場合には、40MWd/kg以下のフラットな傾向をどう説明するかという問題が残る。BWR燃料の場合とあわせ、焼きしまり / スエリング・モデルの問題を示していると思われる。

F Pガス放出率の実測結果を第14図(a)に、対応する計算結果を(b)に、それぞれ燃料棒平均燃焼度の関数として示す。両方共、データ点は3つのグループをなし、それぞれのグループ内での放出率対燃焼度の勾配は非常に大きくなっていることがわかる。これは照射期間が同じである燃料棒の出力の相違が、燃焼度の相違として表現されているためであり、BWR燃料について述べたように、出力の方が燃焼度(照射時間)よりもF Pガス放出率への寄与がはるかに大きいことを示している。この点では計算結果は測定結果と一致している。また、最高燃焼度グループについて、燃焼度のばらつきとその平均値に着目すると、計算で燃料棒間の出力変動幅を92% - 108%としたのはほぼ妥当であったこと、標準ケースの出力は5%程度高めであったかも知れないことがわかる。

このように出力依存性が大きいので、F Pガス放出率の絶対値はあまり重視すべきではないが、加圧燃料棒と非加圧燃料棒の差については、測定結果と計算結果の間にはっきりした不一致が見られる。すなわち、測定結果では、燃料棒加圧の効果はほとんど見られないが、計算では非加圧棒のF Pガス放出率は加圧棒に比べてF Pガス放出率が非常に大きい。この差は実験データの偏りに帰するにはあまり大きい。他の照射例で非加圧棒のF Pガス放出率が大きく出た場合もあるが、その差はこのように大きくない。また、ここで注意すべきは、実測のF Pガス放出率はどちらかといえば、非加圧棒の計算値に近いことである。これについては次章で検討する。

燃料棒長さ変化の測定結果と計算結果を第15図に示す。計算結果はハッチングした領域で示してある。両者の一致は非常に良い。縦軸は原報告にならって、rod growthとしているが、実際には単に長さの変化であり、照射成長だけでなくPCI、2軸クリープダウンの効果等を含めた全体が一致したということである。

燃料棒の高出力部における直徑変化の測定結果を第16図(a)に転載し、対応する計算結果(最高出力ノード)を(b)に示す。計算結果は最大焼きしまり量を2%とした場合であり、加圧棒、非加圧棒のそれぞれについて、出力レベルを変えた結果を3本の曲線によって示している。実験デー

タは比較的数が少なく、示された誤差範囲もかなり大きいが、非加圧棒で最大 $100 \mu\text{m}$ 程度、加圧棒で $50 \mu\text{m}$ 程度のクリープダウンが起こったものと解される。これに対して計算された最大クリープダウン量は、非加圧棒で約 $30 \mu\text{m}$ 、加圧棒で約 $20 \mu\text{m}$ と大体 $1/3$ になっている。

計算によるペレット被覆ギャップ幅の変化を第17図に示す（最大焼きしまり量 2%， 100%出力の場合）。これによると非加圧棒では約 10 MWd/kg 以後、加圧棒では約 20 MWd/kg 以後ギャップが閉じ、被覆管はペレットに支えられることになる。第16図(a)の測定結果も、ギャップは遅くとも 20 MWd/kg までに閉じたことを示唆している。さらにその後の経過を詳しく見ると、非加圧棒ではその後ペレットが強い剛性をもって被覆管を押し戻し、最高燃焼度では加圧燃料棒と大差ないレベルまで戻っていると解される。

計算結果を見ると、クリープダウンの絶対量はさておき、このような回復挙動は非加圧燃料棒の92%出力ケースがうまく表現している。これに対して100%出力、108%出力ケースでは、いったん縮まった直径の差は最後に再び拡大している。先のペレット密度の場合と同様に、ここでもガスバブル・スエリングのモデルに問題があることを示していると思われる。

4. 考察—高燃焼度用コードの可能性

以上見てきたように、雑誌、会議などの公開文献のみを用いても、コードの検証作業がかなり行えることがわかる。

BWR燃料の信頼性実証試験データを用いた検証結果は、全般的によい一致を示した。きわめて粗い入力データ設定にもとづく計算であることを考えれば、一致は非常によいとも言えよう。実験報告そのものに燃料棒軸方向分布の記述のあるデータが少ないが、少なくとも計算は 4 m 長さの燃料棒に対して安定的に行うことができ、長さが大きいことに起因する問題は特に見あたらなかった。ガドリニア添加燃料が扱えなかった問題は別にして、現行のBWR実炉燃料の 30 MWd/kg 程度の燃焼度までの挙動に対しては、FEMAX I-IVは十分な解析能力があることを示したものといえよう。

PWR燃料の場合は、いくつかの問題が明らかになった。これらの問題は、燃焼度が非常に高いことが一因であり、また、一般にPWR燃料はBWR燃料に比べて高温・高圧の冷却水中で、より厳しい条件下におかれること、従って、コード解析にとっても厳しい条件であることがもう一つの要因であると考えられる。

クリープダウンの過小評価の問題は比較的対処し易い問題である。FEMAX I-IVはジルカロイのクリープに対してMATPRO-09⁽⁷⁾のモデルを用いているが、このモデルは 300°C 以下で行われた Ibrahim の炉内クリープデータ⁽⁸⁾にもとづき、これに適当な温度係数を仮定したものである。PWR燃料の被覆管温度は、内面では最高 400°C 近くなるので、温度係数の誤差は大きくなりてくることになる。しかし、この問題はハルデン炉などでのクリープダウン実験、あるいは実炉燃料のデータそのものを用いることで対処できよう。

これに対して加圧燃料棒と非加圧燃料棒の差（FPガス放出率とスエリング）をよく再現でき

タは比較的数が少なく、示された誤差範囲もかなり大きいが、非加圧棒で最大 $100 \mu\text{m}$ 程度、加圧棒で $50 \mu\text{m}$ 程度のクリープダウンが起こったものと解される。これに対して計算された最大クリープダウン量は、非加圧棒で約 $30 \mu\text{m}$ 、加圧棒で約 $20 \mu\text{m}$ と大体 $1/3$ になっている。

計算によるペレット被覆ギャップ幅の変化を第17図に示す（最大焼きしまり量 2%， 100%出力の場合）。これによると非加圧棒では約 10 MWd/kg 以後、加圧棒では約 20 MWd/kg 以後ギャップが閉じ、被覆管はペレットに支えられることになる。第16図(a)の測定結果も、ギャップは遅くとも 20 MWd/kg までに閉じたことを示唆している。さらにその後の経過を詳しく見ると、非加圧棒ではその後ペレットが強い剛性をもって被覆管を押し戻し、最高燃焼度では加圧燃料棒と大差ないレベルまで戻っていると解される。

計算結果を見ると、クリープダウンの絶対量はさておき、このような回復挙動は非加圧燃料棒の92%出力ケースがうまく表現している。これに対して100%出力、108%出力ケースでは、いったん縮まった直径の差は最後に再び拡大している。先のペレット密度の場合と同様に、ここでもガスバブル・スエリングのモデルに問題があることを示していると思われる。

4. 考察—高燃焼度用コードの可能性

以上見てきたように、雑誌、会議などの公開文献のみを用いても、コードの検証作業がかなり行えることがわかる。

BWR燃料の信頼性実証試験データを用いた検証結果は、全般的によい一致を示した。きわめて粗い入力データ設定にもとづく計算であることを考えれば、一致は非常によいとも言えよう。実験報告そのものに燃料棒軸方向分布の記述のあるデータが少ないが、少なくとも計算は 4 m 長さの燃料棒に対して安定的に行うことができ、長さが大きいことに起因する問題は特に見あたらなかった。ガドリニア添加燃料が扱えなかった問題は別にして、現行のBWR実炉燃料の 30 MWd/kg 程度の燃焼度までの挙動に対しては、FEMAX I-IVは十分な解析能力があることを示したものといえよう。

PWR燃料の場合は、いくつかの問題が明らかになった。これらの問題は、燃焼度が非常に高いことが一因であり、また、一般にPWR燃料はBWR燃料に比べて高温・高圧の冷却水中で、より厳しい条件下におかれること、従って、コード解析にとっても厳しい条件であることがもう一つの要因であると考えられる。

クリープダウンの過小評価の問題は比較的対処し易い問題である。FEMAX I-IVはジルカロイのクリープに対してMATPRO-09⁽⁷⁾のモデルを用いているが、このモデルは 300°C 以下で行われた Ibrahim の炉内クリープデータ⁽⁸⁾にもとづき、これに適当な温度係数を仮定したものである。PWR燃料の被覆管温度は、内面では最高 400°C 近くなるので、温度係数の誤差は大きくいくことになる。しかし、この問題はハルデン炉などでのクリープダウン実験、あるいは実炉燃料のデータそのものを用いることで対処できよう。

これに対して加圧燃料棒と非加圧燃料棒の差（FPガス放出率とスエリング）をよく再現でき

なかった問題は、よりコードの基本構造に関わる問題であると考えられる。非加圧燃料棒のFPガス放出率が大きく（または加圧棒の放出率が小さく）計算されるに至ったコード上の論理は次のとおりである。

ある燃焼度でFPガス（Kr, Xe）が放出されはじめると、非加圧棒ではギャップガス中のFPガス割合が非常に大きくなるために、ガスの熱伝導度が加圧棒に比べて大きく低下する。このためにギャップ熱伝達率が低下し、燃料温度が上昇し、その後のFPガス放出を加速することになる。

これが第14図(b)で、30-40MWd/kg付近での加圧棒と非加圧棒の差である。実際の現象は、ギャップガスの熱伝導度の差はあったで有ろうが、ギャップ熱伝達率が全体の熱抵抗の中で大きな部分を占めていないために、その後のFPガス放出に大きな影響を及ぼさなかったものと考えられる。すなわち、ギャップ熱伝達率モデルの問題である。

しかし、計算上の加圧棒と非加圧棒のガス放出率の差は、40MWd/kg以上で更に拡大している。同時に第13図(b)で、急激なスエリングが起こっている。この2つは相互に関係したもので、スエリングの側からみると、非加圧棒では既に燃料温度が高い上に、スエリングを拘束するガス圧力が小さいために、ガスバブル・スエリングが急激に起こることになる。ペレットの密度低下は熱伝導度の低下につながり、燃料温度は更に上昇し、FPガス放出を捉すことになる。すなわち、スエリングとFPガス放出が正のフィードバックを起こしているのである。

前の章で述べたように、実際上のスエリングも、40MWd/kg付近から顕著になるとみられる。しかし、第16図(a)のクリープダウン後の回復挙動からみられるように、外圧に勝って被覆管を押戻すのであるから、剛性の強いスエリングであることは明かであり、スエリング率（燃焼度に対する割合）からみても、これは一般に固体FPスエリングと呼ばれるものに近いと考えられる。すなわち、大規模なガスバブルスエリングが起こった形跡はないのである。

Zorita燃料の、非加圧燃料棒に関する結果のみをもって、FEMAX I-IVの評価を下すのは適当ではないが、ここで明らかになった問題は、高燃焼度を扱うコードを考える上で重要な問題を提起していると考えられる。過剰な正のフィードバックを起こすに至った大きな原因は、ペレットの熱伝導度とギャップ熱伝達率、固体スエリングとガスバブルスエリング、溶解していたFPガスが気泡になった途端に低下するペレット熱伝導度といった二元的な概念構成にあると思われる。このような二元的な概念構成は、低燃焼度に於いては、それなりに有効な単純化である。しかし燃焼が進むにつれてこのような二極的な概念では記述できない現象が重要度を増し、結果として計算は実際の現象に比べて外部条件の変化に極端な応答を示すようになる。

今回の計算対象に限れば、スエリング・モデルなどの数値係数の若干の変動で、結果はかなり改善されるであろう。しかしそれでは別の対象で別の問題を生ずることになろう。二元的な概念化が不可避であるとしても、両極端の間はできるだけ滑らかに、燃焼度そのものが非常に重要な変数となるようにモデル化されなければならないと考えられる。

もし、高燃焼度に対応するために「滑らかな」モデル化を行うとすれば、それはいわゆるメカニスチックなアプローチをかなりの部分放棄しなければならないということを意味するであろう。メカニスチックなモデル化を支える実験データは得られないと思われるからである。今回の検証では、BWR燃料のうちガドリニア入り燃料は対象から除外したが、この場合のガドリニア濃度は

2 w/o と低く、その挙動は UO_2 燃料とあまり変わらなかったものと考えられる。しかし、ガドリニア濃度を 10 w/o 近くまで増すことが具体的な日程に入っており、その場合ガドリニア添加の効果は無視できないものとなろう。また、高燃焼度を実現するために、ペレットへのニオブ酸化物の添加、超大粒径化、新被覆管の採用などさまざまな工夫が考えられているのであり、これらに対しても「炉内物性値」を得ることは不可能といって良いであろう。このような事情から、計算コードで高燃焼度燃料を扱うとすれば、計算の目的そのものを良く検討しなければならないと考えられる。

これに関連して最後の問題は燃焼に伴う核的組成の変化および出力分析の変化である。今回の検証計算ではこれらを無視し、組成および出力分布は初期状態のままとした。また、ガドリニア入り燃料の無視には、物性的側面と同時に、特異な出力履歴をどう扱うかという問題もあった。炉物理コードを用いて、これを別途計算することはもちろん可能であるが、実際には筆者らにとっても、他のユーザーにとってもこれはかなり困難である。また前述のように、高燃焼度下では計算にのる現象そのものが少なくなると考えられるのに対して、核的変化は計算できる現象の代表である。現行の FEMAX I - IV がペレット内の初期出力分布（半径方向）を自前で計算しているように、照射による変化をある程度の精度で推定する機能を持つか、または簡単な前処理用コードが整備されることが望ましい。

5. 結 論

FEMAX I - IV コードを用いて、BWR, PWR の実炉燃料の照射挙動を解析し、結果を照射後試験データと比較した。結果は次のとおりである。

- (1) BWR 燃料については、不十分な入力データにも拘らず、計算結果は良い一致を示した。30 MWd/kg 程度の燃焼度までの実炉燃料に対して、FEMAX I - IV の適用性を示すものと考えられる。
- (2) PWR 燃料については、比較の対象となるデータが限られた中で測定結果を良く再現できた面もあるが、クリープダウンの過小評価、燃料棒加圧の効果の過大評価等いくつかの不一致も示した。
- (3) これらの問題は、現在のコードの枠組内での修正によってもある程度対応できる。しかし、高燃焼度領域において有用なコードを考えるには、低燃焼度領域において構成された諸概念を再検討する必要を示唆しているものと考えられる。

2 w/o と低く、その挙動は UO_2 燃料とあまり変わらなかったものと考えられる。しかし、ガドリニア濃度を 10 w/o 近くまで増すことが具体的な日程に入っており、その場合ガドリニア添加の効果は無視できないものとなろう。また、高燃焼度を実現するために、ペレットへのニオブ酸化物の添加、超大粒径化、新被覆管の採用などさまざまな工夫が考えられているのであり、これらに対しても「炉内物性値」を得ることは不可能といって良いであろう。このような事情から、計算コードで高燃焼度燃料を扱うとすれば、計算の目的そのものを良く検討しなければならないと考えられる。

これに関連して最後の問題は燃焼に伴う核的組成の変化および出力分析の変化である。今回の検証計算ではこれらを無視し、組成および出力分布は初期状態のままとした。また、ガドリニア入り燃料の無視には、物性的側面と同時に、特異な出力履歴をどう扱うかという問題もあった。炉物理コードを用いて、これを別途計算することはもちろん可能であるが、実際には筆者らにとっても、他のユーザーにとってもこれはかなり困難である。また前述のように、高燃焼度下では計算にのる現象そのものが少なくなると考えられるのに対して、核的変化は計算できる現象の代表である。現行の FEMAX I - IV がペレット内の初期出力分布（半径方向）を自前で計算しているように、照射による変化をある程度の精度で推定する機能を持つか、または簡単な前処理用コードが整備されることが望ましい。

5. 結 論

FEMAX I - IV コードを用いて、BWR, PWR の実炉燃料の照射挙動を解析し、結果を照射後試験データと比較した。結果は次のとおりである。

- (1) BWR 燃料については、不十分な入力データにも拘らず、計算結果は良い一致を示した。30 MWd/kg 程度の燃焼度までの実炉燃料に対して、FEMAX I - IV の適用性を示すものと考えられる。
- (2) PWR 燃料については、比較の対象となるデータが限られた中で測定結果を良く再現できた面もあるが、クリープダウンの過小評価、燃料棒加圧の効果の過大評価等いくつかの不一致も示した。
- (3) これらの問題は、現在のコードの枠組内での修正によってもある程度対応できる。しかし、高燃焼度領域において有用なコードを考えるには、低燃焼度領域において構成された諸概念を再検討する必要を示唆しているものと考えられる。

参考文献

- (1) T. Nakajima and H. Saito, "A comparison between fission gas release data and FEMAXI-IV calculations", Nucl. Eng. Des. 101(1987) 267
- (2) T. Nakajima et al, "FEMAXI-IV: A computer code for the analysis of thermal and mechanical behavior of fuel rods", JAERI 1298 (1985)
- (3) M.G. Balfour, E. Roberts, W.R. Smalley, and R.S. Miller, "High burnup zircaloy-clad UO₂ fuel performance in the Jose Cabrera (Zorita) PWR", Nuclear fuel performance, BENS, London, 1985
- (4) 三島良績他, "沸騰水型原子炉燃料集合体の信頼性実証試験", 原子力学会誌 29 (1987) 90
- (5) R.L. Crowther et al, "Quad Cities extended burnup fuel performance", Light Water Reactor Fuel Performance, Proceedings of ANS Meeting at Orlando, Florida, April 21-24, 1985
- (6) J.B. Ainscough et al, "Isothermal grain growth kinetics in sintered UO₂ pellets", J. Nucl. Mater. 49(1973/1974) 117
- (7) P.E. MacDonald and L.B. Thompson ed., MATPRO-Version 09, TREE-NUREG-1005 (1976)
- (8) E.F. Ibrahim, "In-reactor tubular creep of Zircaloy-2 at 260 to 300°C", J. Nucl. Mater., 46(1973) 169

第1表 BWR燃料の主要諸元⁽⁴⁾

項 目	諸 元
燃料集合体	
格子配列	8 × 8 正方格子
全長	4.47 m
燃料要素ピッチ	16.3 mm
全伝熱面積	9.06 m ²
UO ₂ 重量	約 210 kg
全重量 (チャンネルボックス を含む)	約 310 kg
燃料要素	
本数	63
有効長	3.66 m
プレナム長	0.40 m
充填ガス	He
充填ガス圧	1 kg / cm ² • a
ペレット	
外径	10.6 mm
高さ	10.7 mm
材質	UO ₂ (一部 UO ₂ - 2 w/o Gd ₂ O ₃)
密度	95 % T. D.
被覆管およびウォータ・ロッド	
外径	12.5 mm
肉厚	0.86 mm
材質	ジルカロイ-2 (再結晶化焼純材)
ウォータ・ロッド本数	1
支持格子	
個数	7
材質	ジルカロイ-4 / インコネルX-750

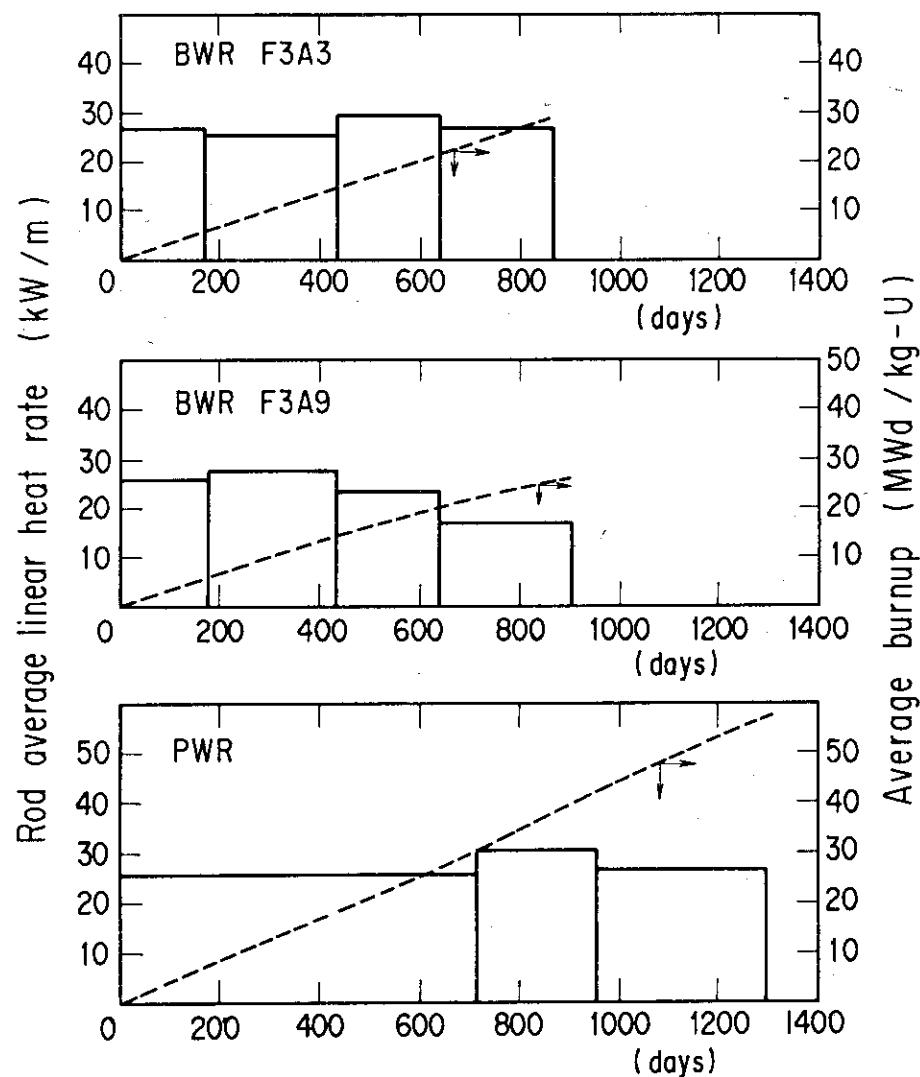
第2表 PWR燃料の主要諸元（文献(3)より構成）

項目	諸元
燃料集合体	
格子配列	14×14 正方格子
グリッド個数	6
グリッド材質	インコネル
燃料要素	
本数	164
全長	2.643m
有効長	2.167 ~ 2.431m
充填ガス	He (加圧), 空気 (非加圧)
充填ガス圧	0.1 MPa, 3.45 MPa
ペレット	
外径	9.32 mm
高さ	15.2 mm
形状	両端ディッシュ
ディッシュ深さ	0.34 mm
材質	UO ₂
濃縮度	2.40 ~ 6.60 %
密度	10.14 ~ 10.31 g / ml
焼結温度	1492 ~ 1750 °C
被覆管	
材質	ジルカロイ-4
熱処理	歪取り焼鈍
外径	10.72 mm
肉厚	0.62 mm

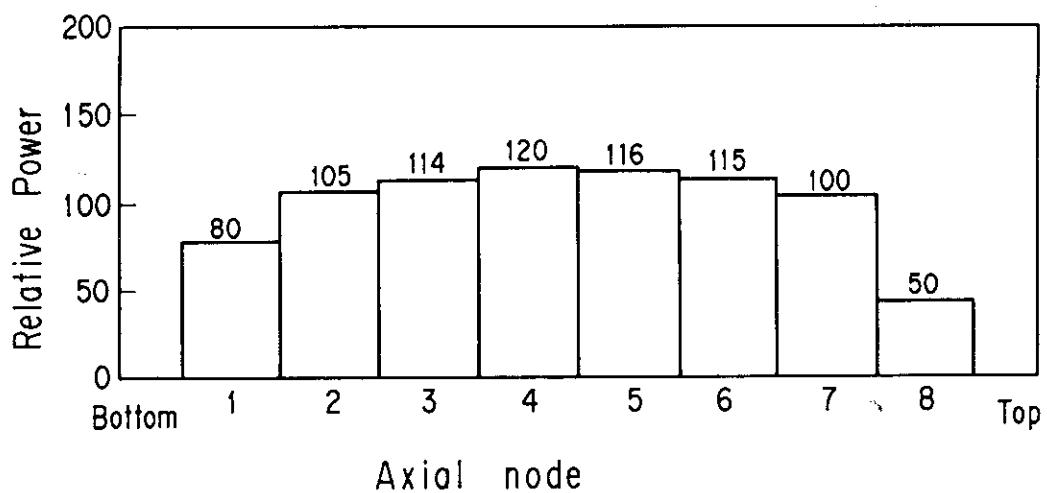
なお原子炉冷却水圧は 13.79 MPa である。

第3表 計算パラメータ

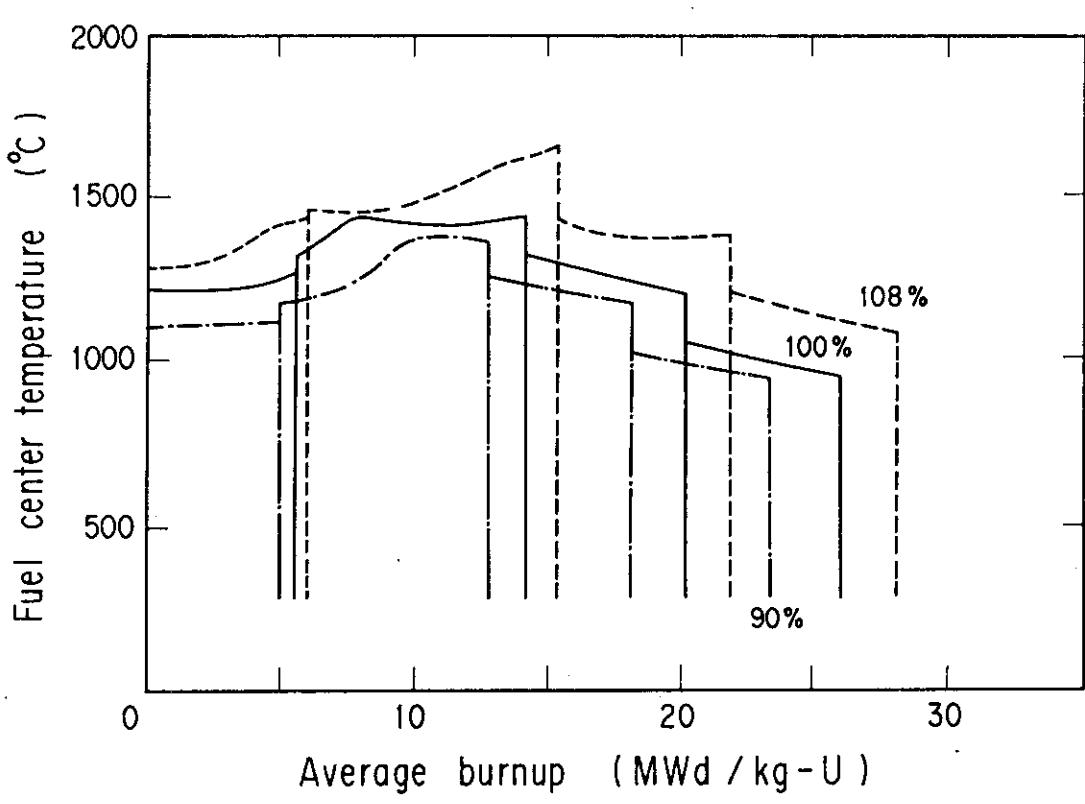
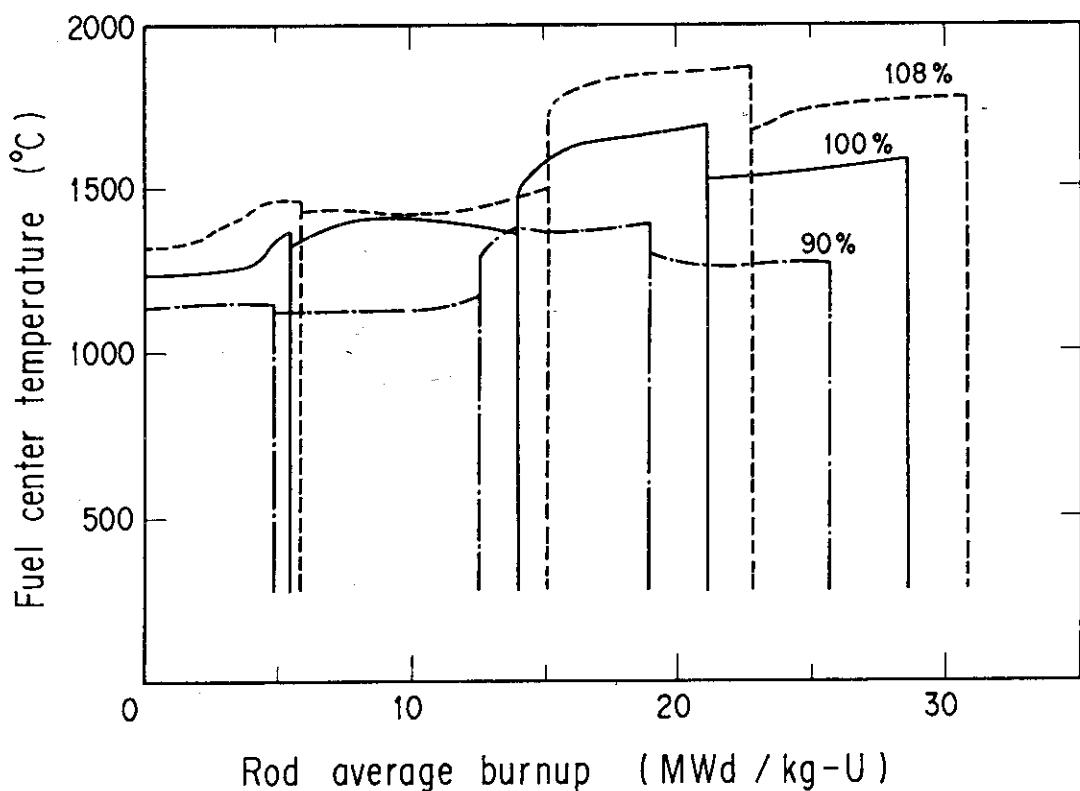
原子炉名	ケース名	出力 レベル (%)	最大焼き しまり量 (%)	初期ガス圧 (Mpa)	ペレット 密度対理 論密度比	オットフレス パラメータ	焼きしまり 完了燃焼度 (MWd/tUO ₂)
福島I-3	F3A3100	100	1.0	0.1013	0.95	0.002	1.0*10 ⁴
	F3A3108	108	1.0	0.1013	0.95	0.002	1.0*10 ⁴
	F3A3115	115	1.0	0.1013	0.95	0.002	1.0*10 ⁴
	F3A390	90	1.0	0.1013	0.95	0.002	1.0*10 ⁴
	F3A9100	100	1.0	0.1013	0.95	0.002	1.0*10 ⁴
	F3A9108	108	1.0	0.1013	0.95	0.002	1.0*10 ⁴
	F3A9115	115	1.0	0.1013	0.95	0.002	1.0*10 ⁴
	F3A990	90	1.0	0.1013	0.95	0.002	1.0*10 ⁴
ZORITA-1	Z1001P	100	1.0	3.4500	0.94	0.002	1.0*10 ⁴
	Z1001UP	100	1.0	0.1013	0.94	0.002	1.0*10 ⁴
	Z1081P	108	1.0	3.4500	0.94	0.002	1.0*10 ⁴
	Z1081UP	108	1.0	0.1013	0.94	0.002	1.0*10 ⁴
	Z921P	92	1.0	3.4500	0.94	0.002	1.0*10 ⁴
	Z921UP	92	1.0	0.1013	0.94	0.002	1.0*10 ⁴
	Z1002P	100	2.0	3.4500	0.94	0.002	1.0*10 ⁴
	Z1002UP	100	2.0	0.1013	0.94	0.002	1.0*10 ⁴
	Z1082P	108	2.0	3.4500	0.94	0.002	1.0*10 ⁴
	Z1082UP	108	2.0	0.1013	0.94	0.002	1.0*10 ⁴
	Z922P	92	2.0	3.4500	0.94	0.002	1.0*10 ⁴
	Z922UP	92	2.0	0.1013	0.94	0.002	1.0*10 ⁴



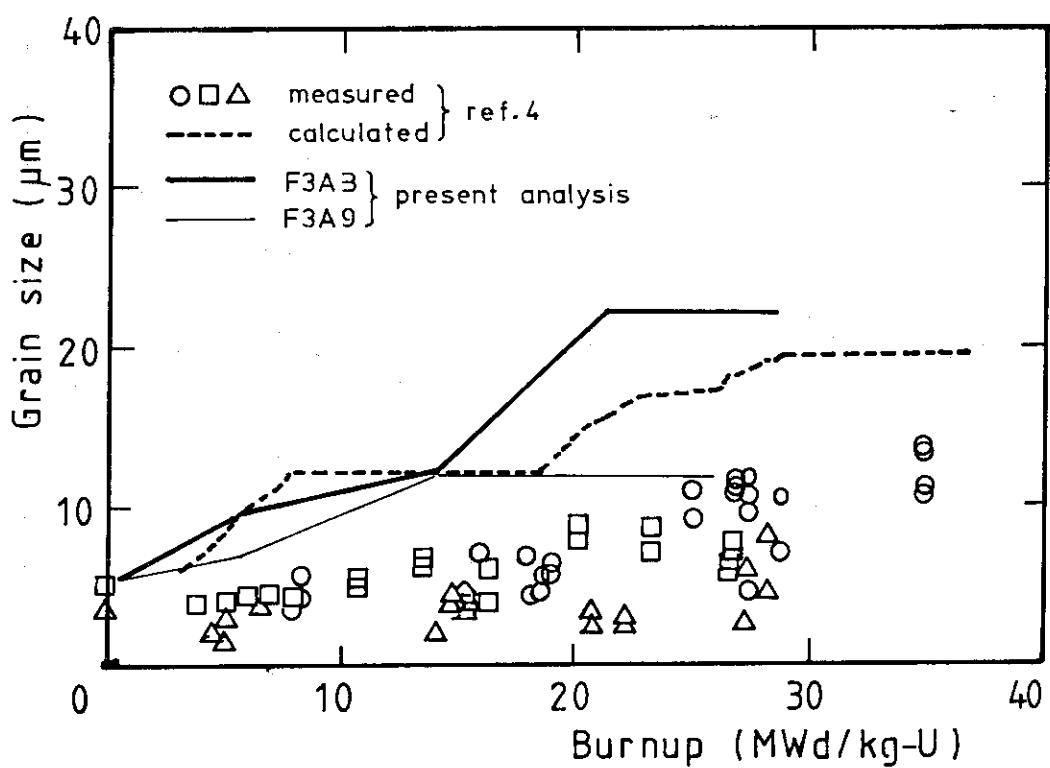
第1図 出力履歴入力データ



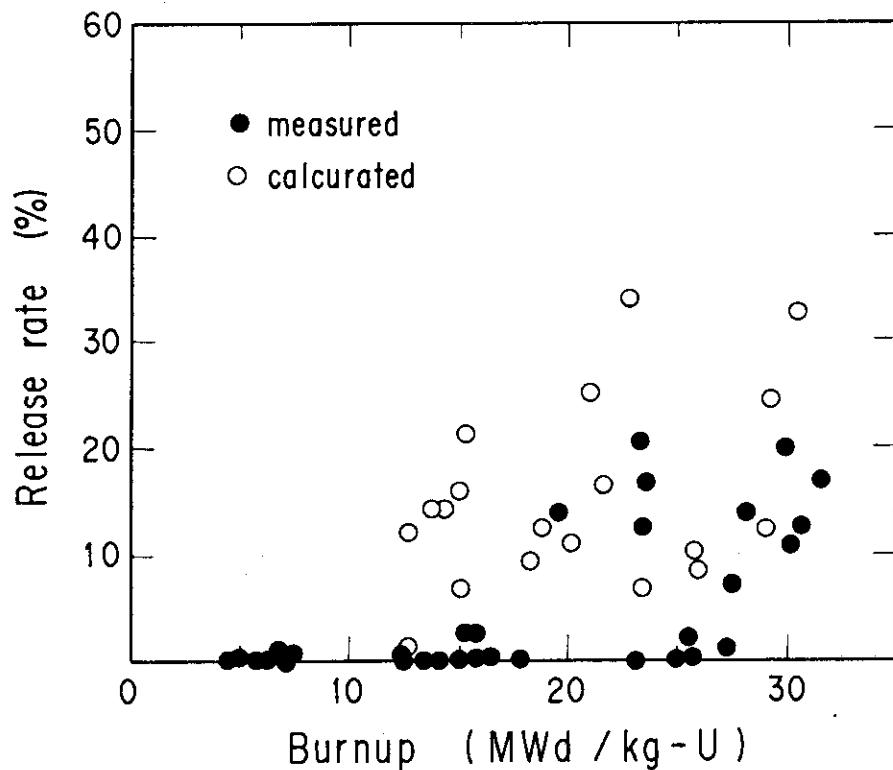
第2図 軸方向出力分布入力データ



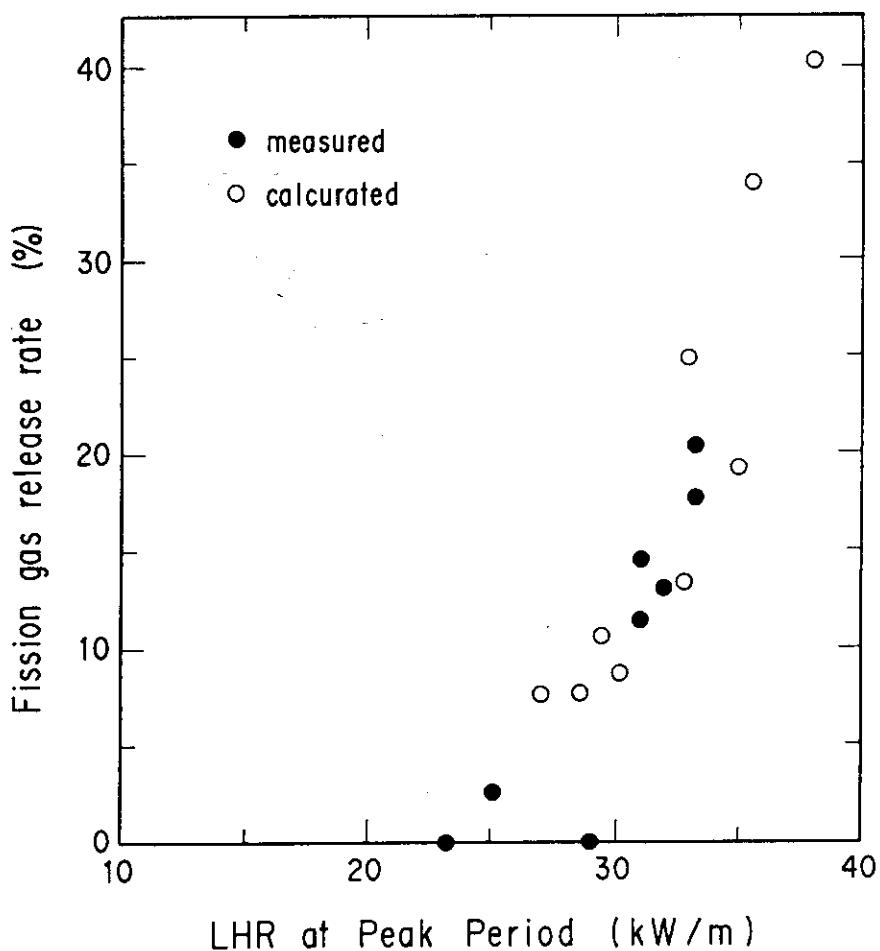
第3図 BWR燃料の中心温度（最高出力位置）計算結果



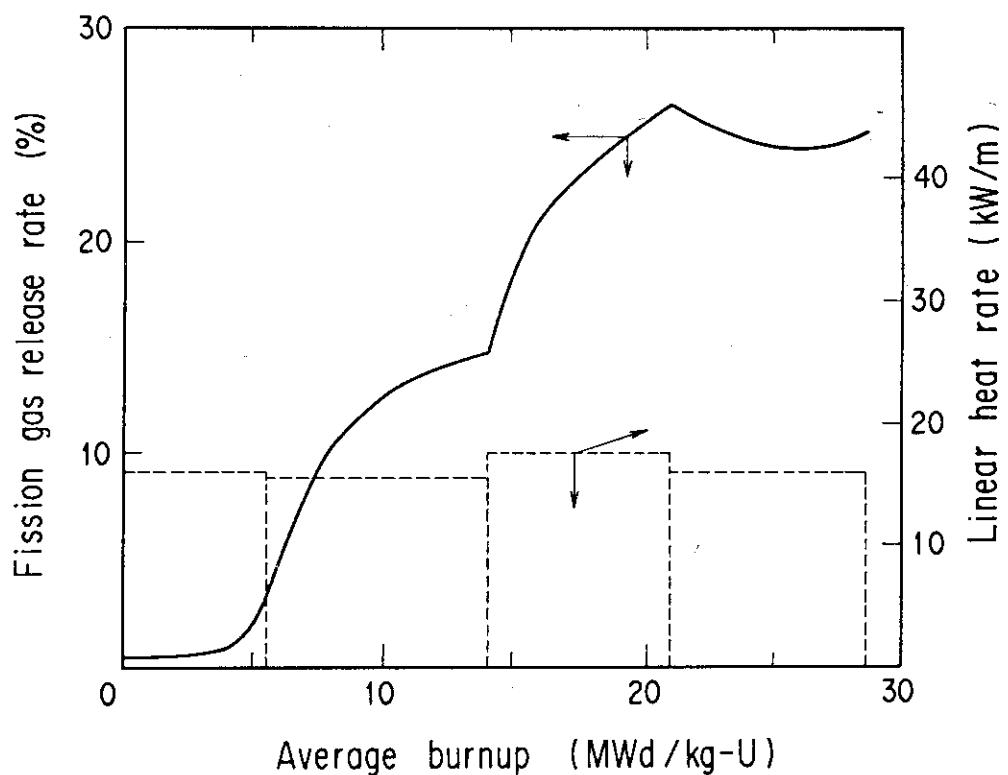
第4図 BWR燃料中心部における結晶粒成長（計算値は100%標準出力ケース）



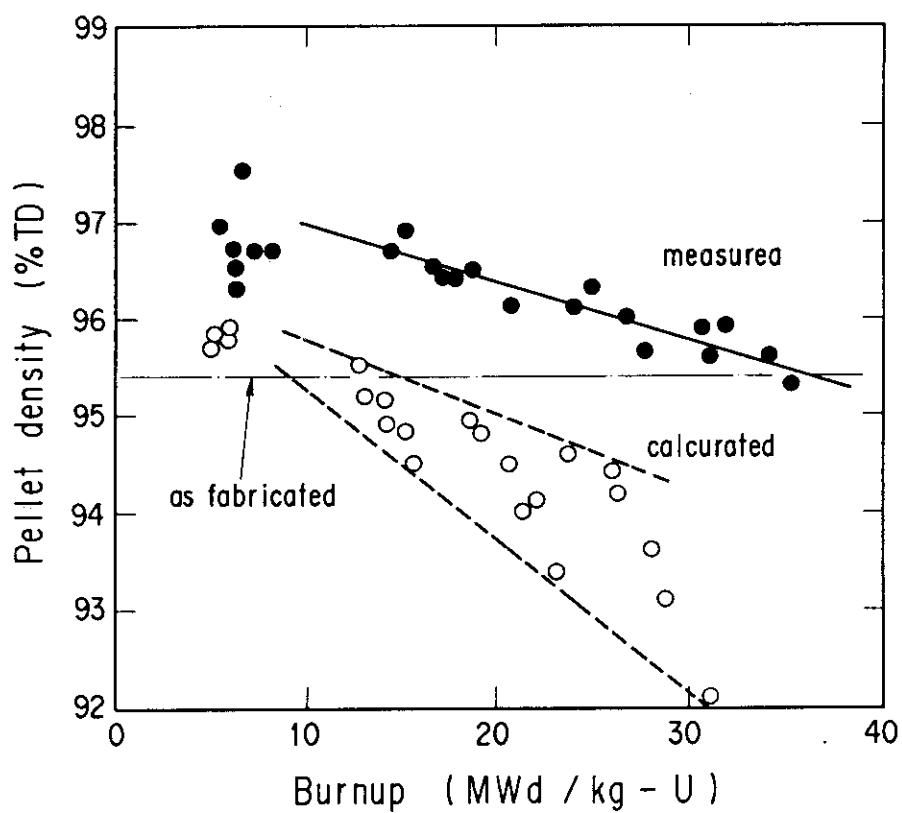
第5図 BWR燃料からのFPガス放出率の燃焼度依存性



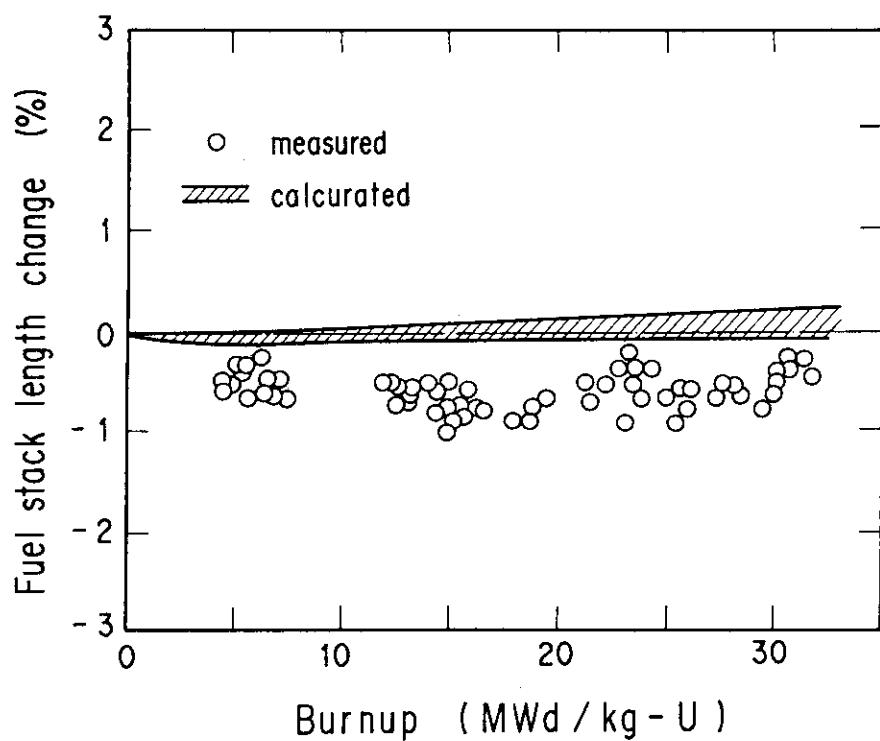
第6図 BWR燃料からのFPガス放出率の出力依存性
(10MWd/kg以上での経験最高出力)



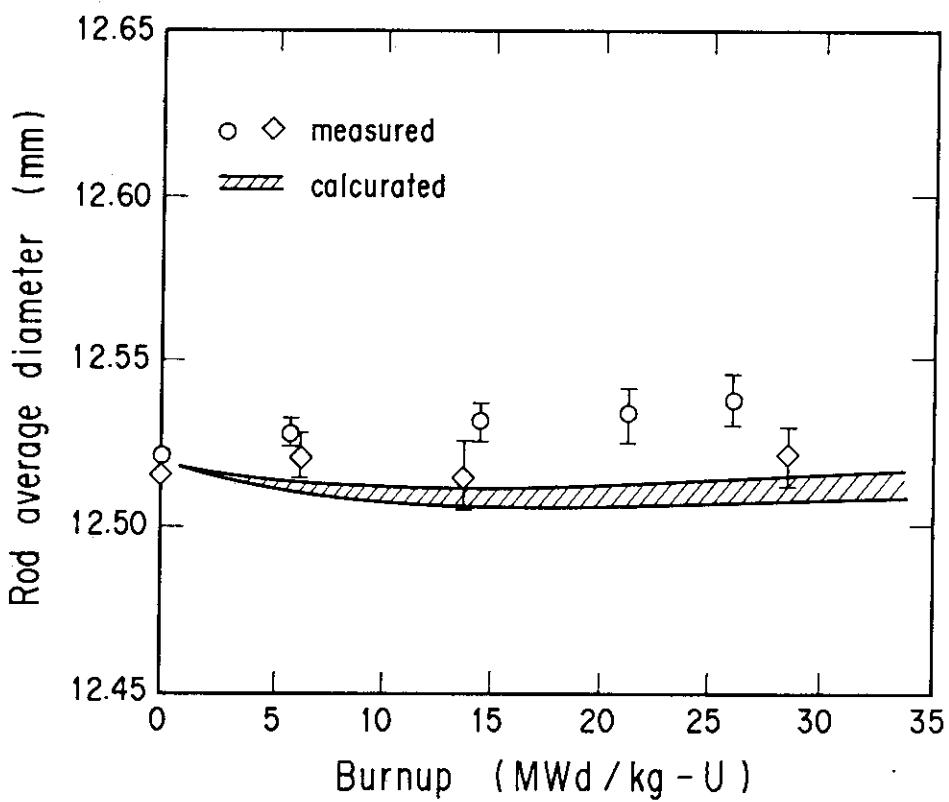
第7図 BWR・F3A3集合体からのFPガス放出履歴の計算結果



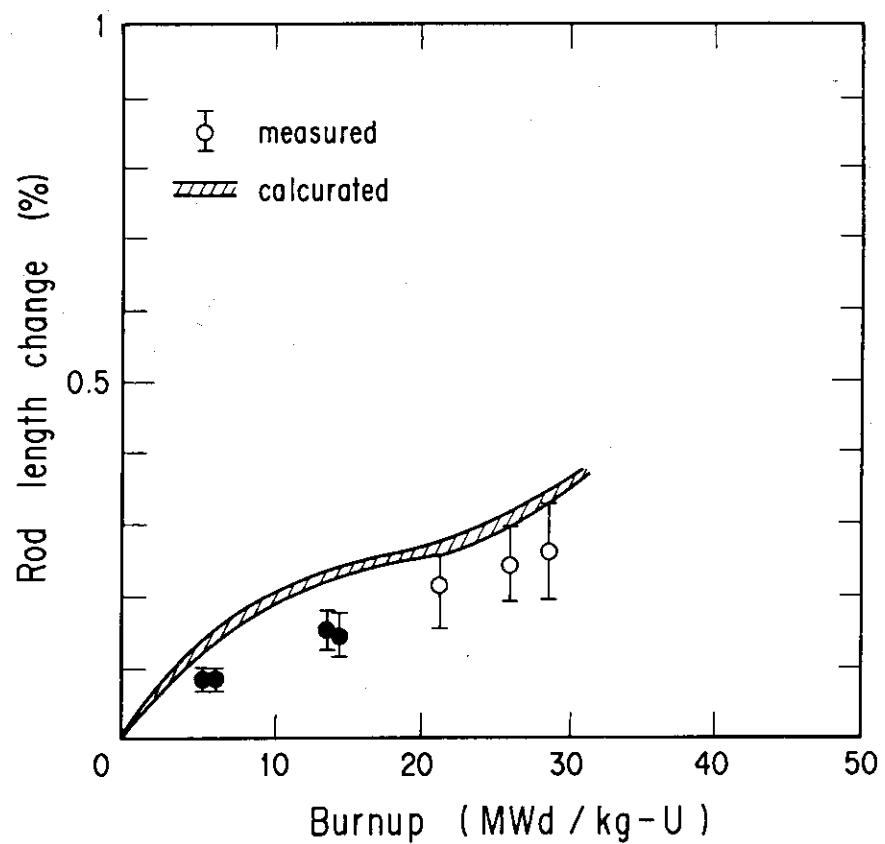
第8図 BWR燃料の密度変化



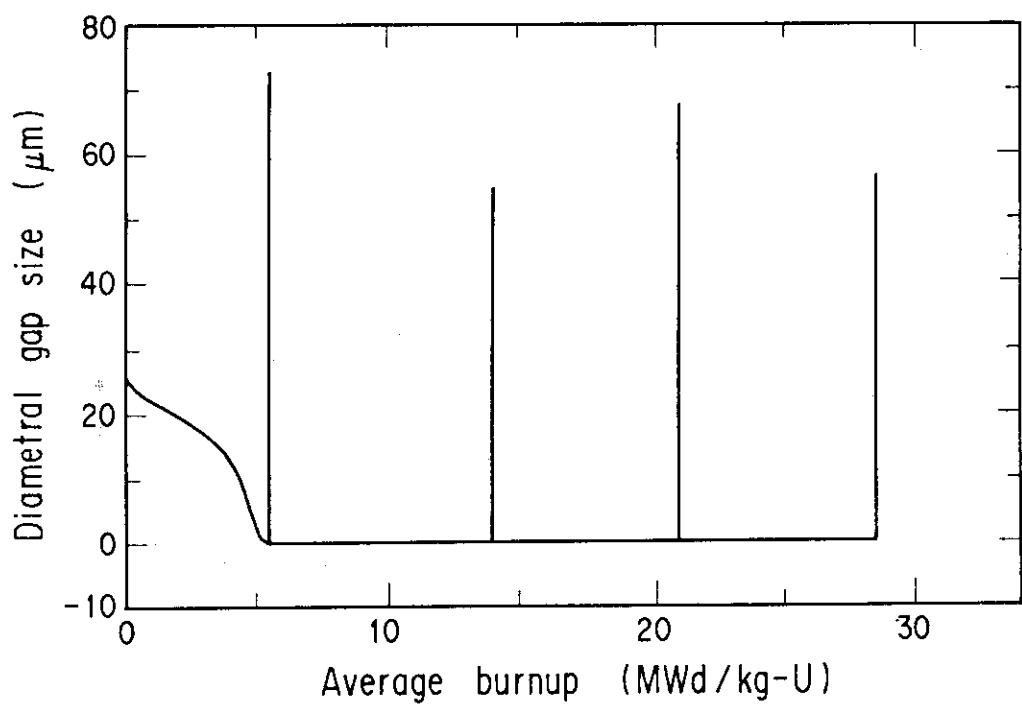
第9図 BWR燃料のスタック長変化



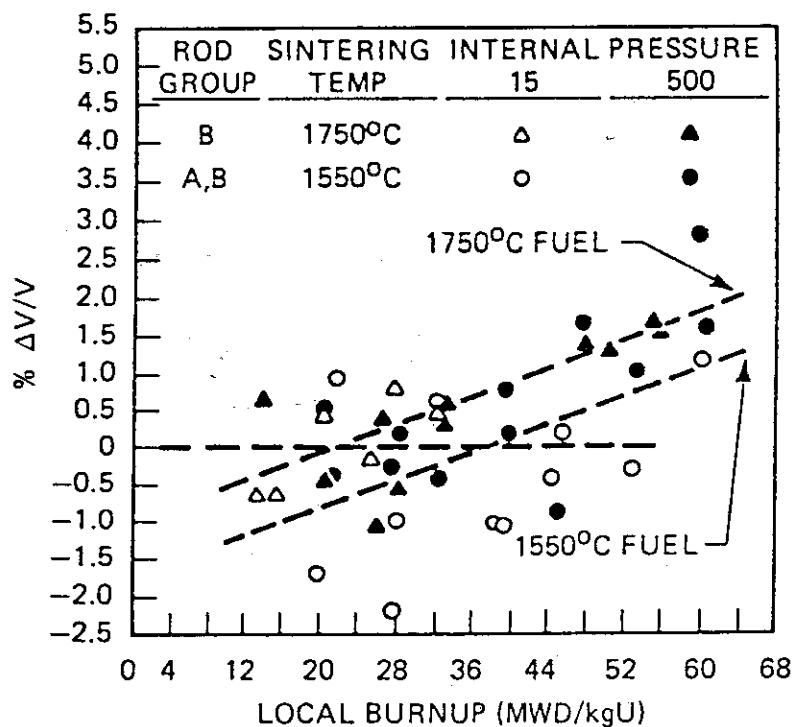
第10図 BWR燃料棒の平均直径変化



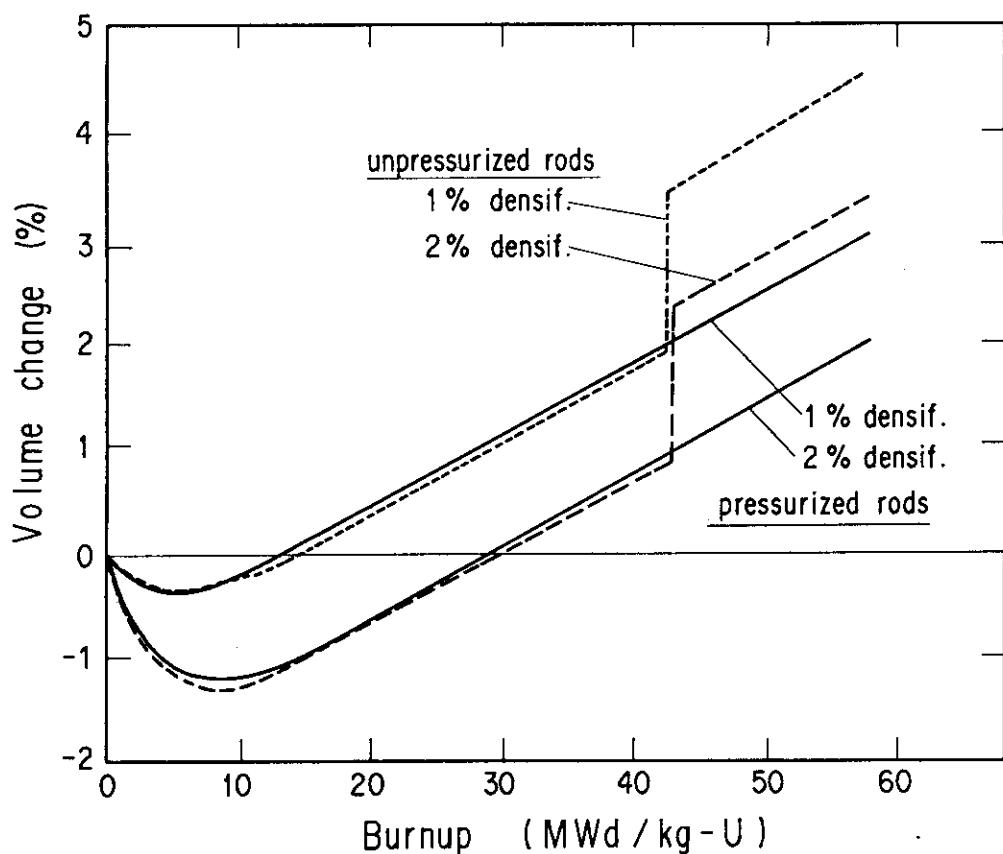
第11図 BWR燃料棒の長さ変化



第12図 BWR燃料のギャップ幅変化（最高出力位置）の計算結果（標準出力）

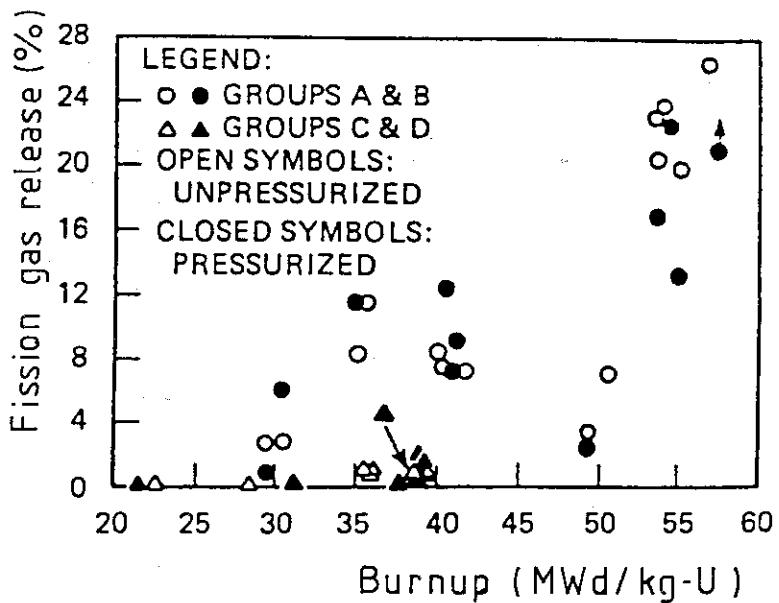


(a) 測定結果

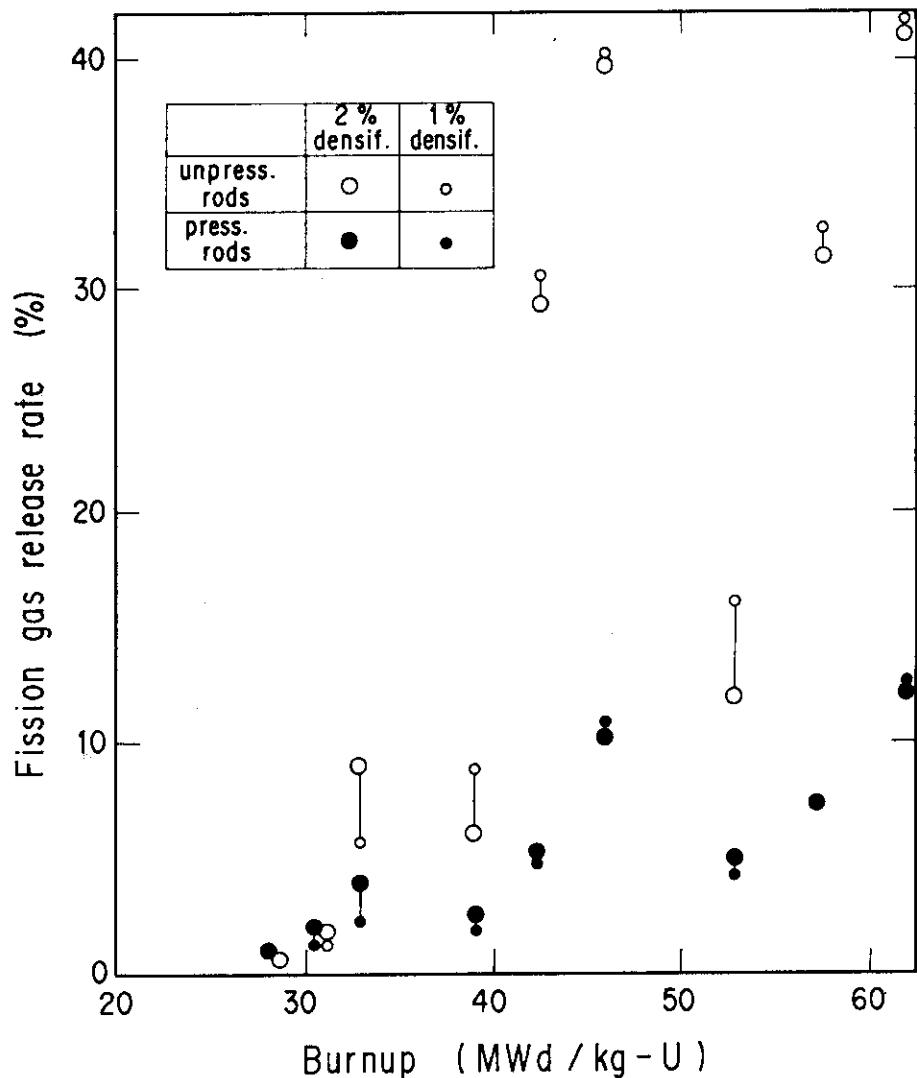


(b) 計算結果

第13図 PWR燃料ペレットの密度変化³⁾

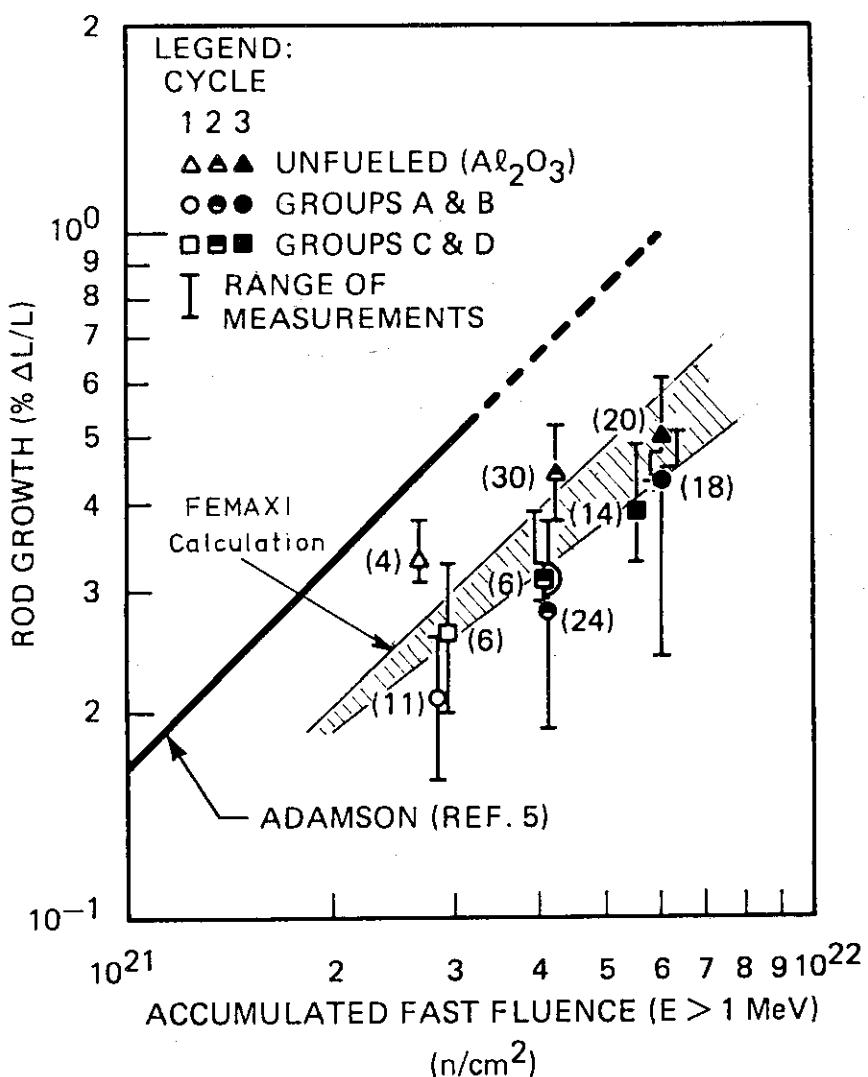


(a) 測定結果

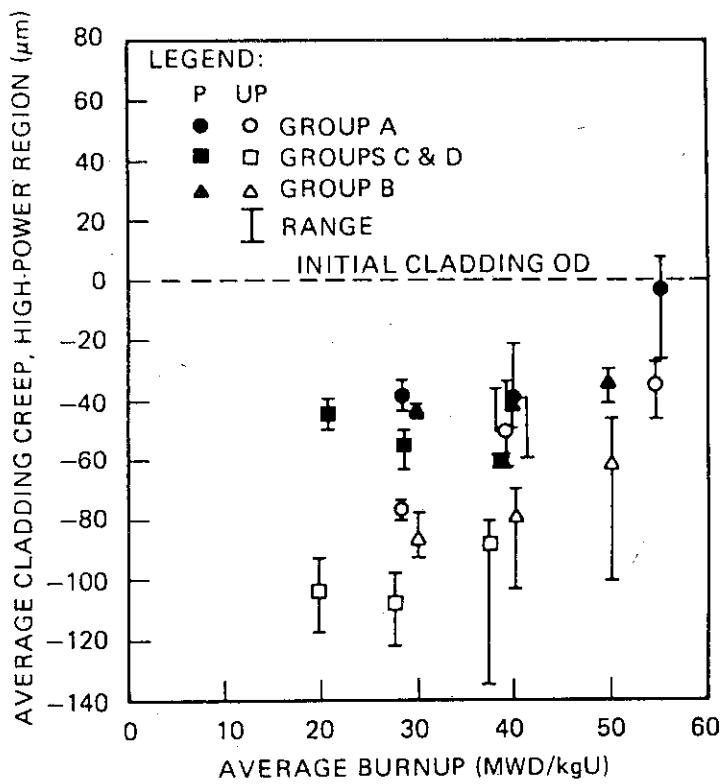


(b) 計算結果

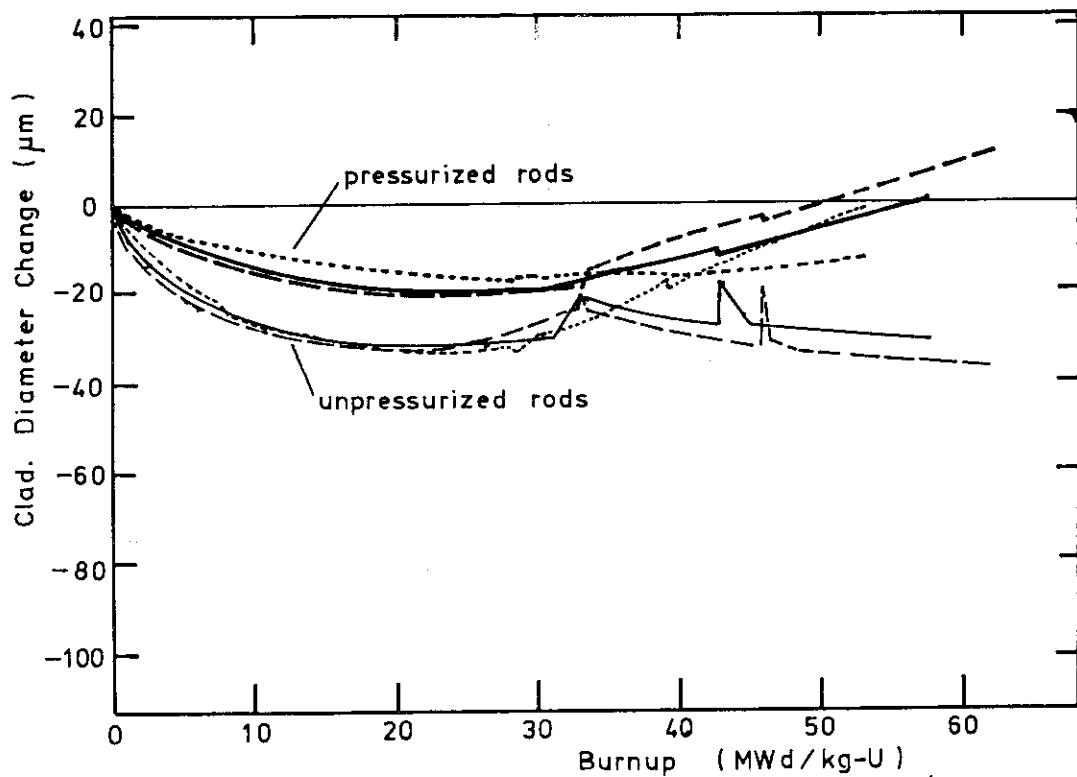
第 14 図 PWR 燃料からの FP ガス放出率³⁾



第 15 図 PWR 燃料棒の長さ変化

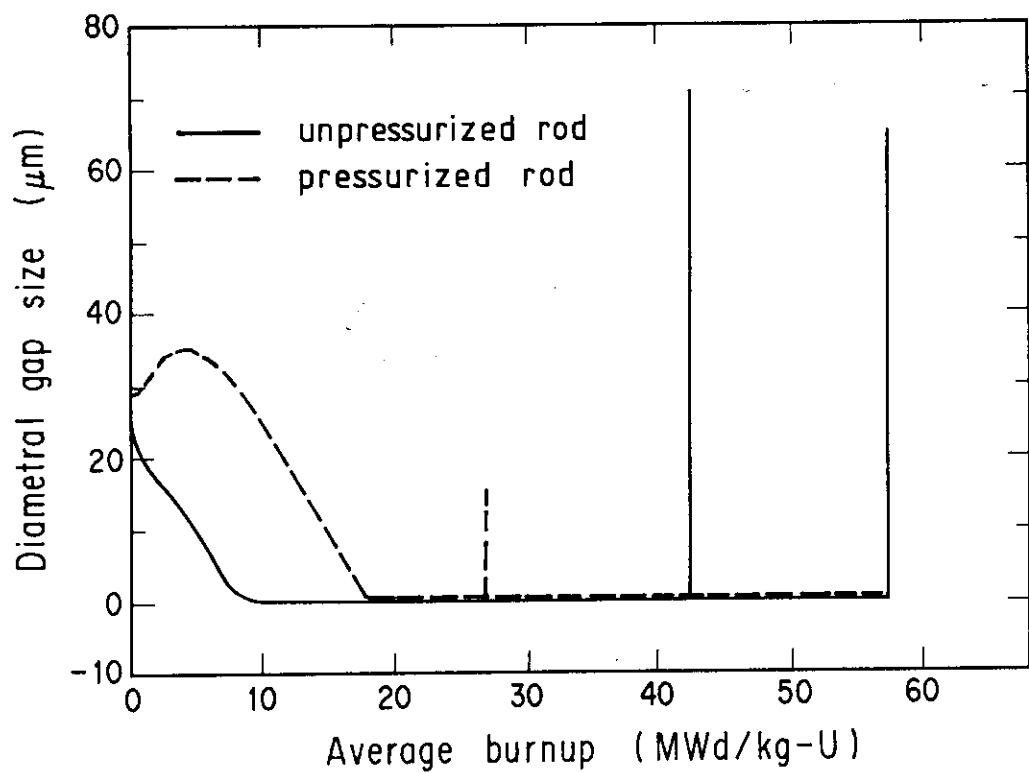


(a) 測定結果



(b) 計算結果

第 16 図 PWR 燃料棒の高出力部直径変化³⁾



第 17 図 PWR 燃料の最高出力位置でのギャップ幅変化（計算結果）

付録 燃料設計諸元に関する入力データ

BWR および PWR 燃料の設計諸元に関する入力データを、それぞれ表 A-1 および A-2 に示す。各表の右端には入力データを設定した根拠が記載されているが、ここでページ、図表等の番号は、それぞれの実験報告文献^{(3), (4)}における記載個所を示す。

表A-1 BWR燃料形状データ

NO	変 数	内 容	FUKUSHIMA I-3 BWR (8X8)	文献記述場所または作成方法
1	NAX	軸方向ノード数	8	_____
2	IFEM1	第1着目ノード番号	4	_____
3	IPLANT	=1 ;Halden BWR の場合 =2 ;その他の BWR の場合 =3 ;PWR の場合 =4 ;新クリーナ式(PWR)	2	_____
4	IFEM2	第2着目ノード番号	_____	_____
5	MRASA	=0 ;RA 材 =1 ;SR 材	RA Zr-2	P. 3 第2表
6	CDIN	被覆管内径 (cm)	1.078	$1.25 - 0.086 \times 2 = 1.078$
7	CDOUT	被覆管外径 (cm)	1.25	P. 3 第2表
8		被覆管肉厚 (cm)	0.086	P. 3 第2表
9	IDISH(I)	=0 ;テイッシュなしベット =1 ;片端面テイッシュ " =2 ;両端面 " "	0	_____
10	ICHAM(I)	=0 ;チタンワイヤなしベット =1 ;チタンワイヤベット	0	_____
11	PDIN (I)	ベット中心孔直径 (cm)	_____	_____
12	PDIA (I)	ベット直径 (cm)	1.06	P. 3 第2表
13	PLENG(I)	1ベット長さ (cm)	1.07	P. 3 第2表
14	ENR (I)	U-235 濃縮度 (-)	I 0.0145 II 0.0187 III 0.0222 IV 0.0301	P. 4 第2図
15	FDENI(I)	ベット密度対理論密度比 (-)	0.95	P. 3 第2表
16	DZ (I)	1ノードの軸方向長さ (cm)	45.75	$366/8=45.75$
17		燃料棒軸方向長さ (cm)	_____	_____

表A-1 BWR燃料形状データ(続)

NO	変 数	内 容	FUKUSHIMA I-3	文献記述場所または作成方法
			BWR (8X8)	
18	DISH	ディッシュ直径(cm)	_____	_____
19	DEPTH	ディッシュ深さ(cm)	_____	_____
20	DISHB	ディッシュ底直径(cm)	_____	_____
21	CHAMR	チャンフット幅(cm)	_____	_____
22	CHAMZ	チャンフット深さ(cm)	_____	_____
23	PLENUM(2)	上部 プルーム部容積 (cm ³)	33.5873	$40 * \pi * (1.078/2)^2 * 0.92$
24		プルーム長さ (cm)	40.0	P.3 第2表
25		スタック長 (cm)	366.0	P.3 第2表
26	GPIN	初期ガス圧力 (MPa)	0.1013	P.3 第2表
27	GMIX0(I)	初期ガス組成 (-) =1;He, =2;N ₂ , =3;Kr, =4;Xe	=1;1.0	P.3 第2表
28	PWEIT	ヘリウム総重量 (gram)	_____	_____
29	PLENUM(1)	下部 プルーム容積 (cm ³)	_____	_____
30	PITCH	燃料棒ピッチ (cm)	1.63	P.3 第2表
31		フューズ (n/cm ²)	$6 \sim 7 \times 10^{21}$	P.17 右L38

* ; 濃縮度選択値

表A-2 PWR燃料形状データ

NO	変 数	内 容	ZORITA-1 PWR (14X14)	文献記述場所または作成方法
1	NAX	軸方向ノード数	8	_____
2	IFEM1	第1着目ノード番号	4	_____
3	IPLANT	=1 ;Halden BWR の場合 =2 ;その他の BWR の場合 =3 ;PWR の場合 =4 ;新クリーフ式(PWR)	3	_____
4	IFEM2	第2着目ノード番号	_____	_____
5	MRASA	=0 ;RA 材 =1 ;SR 材	SR Zr-4	P. 29 右L14
6	CDIN	被覆管内径 (cm)	0.9486	1.072-0.0617*2=0.9486
7	CDOUT	被覆管外径 (cm)	1.072	P. 29 右L26
8		被覆管肉厚 (cm)	0.0617	P. 35 L35°
9	IDISH(I)	=0 ;ディッシュなしノット =1 ;片端面ディッシュ " =2 ;両端面 " "	2	_____
10	ICHAM(I)	=0 ;フランジなしノット =1 ;フランジ ノット	0	_____
11	PDIN (I)	ノット中心孔直径 (cm)	_____	_____
12	PDIA (I)	ノット直径 (cm)	0.932	P. 29 右L45
13	PLENG(I)	ノット長さ (cm)	1.52	P. 29 右L44
14	ENR (I)	U-235 濃縮度 (-)	I 0.0581 II 0.0600 III 0.0660 IV 0.0631	P. 29 Table 2
15	FDEN1(I)	ノット密度対理論密度比 (-)	0.94	P. 29 左L2
16	DZ (I)	ノードの軸方向長さ (cm)	27.0875	216.7/8=27.0875
17		燃料棒軸方向長さ (cm)	264.3	P. 29 右L27

表A-2 PWR燃料形状データ(続き)

NO	変数	内 容	ZORITA-1	文献記述場所または作成方法
			PWR (14X14)	
18	DISH	ディッシュ直径(cm)	0.7456	$0.9486 \times 0.8 = 0.7456$
19	DEPTH	ディッシュ深さ(cm)	0.034	P.29 左L1
20	DISHB	ディッシュ底直径(cm)	—	—
21	CHAMR	チャンフア幅(cm)	—	—
22	CHAMZ	チャンフア深さ(cm)	—	—
23	PLENUM(2)	上部 プルーム部容積 (cm ³)	30.9493	$47.6 \times \pi \times (0.9486/2)^2 \times 0.92$
24		アーチム長さ (cm)	47.6	$264.3 - 216.7 = 47.6$
25		スタック長 (cm)	216.7~243.1	P.29 右L35
26	GPIN	初期ガス圧力 (MPa)	① 3.45 ② 0.1013	P.29 右L32
27	GMIX0(1)	初期ガス組成 (-) =1;He, =2;N ₂ , =3;Kr, =4;Xe	① =1;1.0 ② =2;1.0	—
28	PWEIT	ヘリウム総重量 (gram)	—	—
29	PLENUM(1)	下部 プルーム容積 (cm ³)	—	—
30	PITCH	燃料棒ピッチ (cm)	1.286	$1.072 \times 1.2 = 1.286$
31		マニンス (n/cm ²)	5.3~5.9 X10 ²¹	P.30 Table 2

■ ; 作成データ
 * ; 濃縮度選択値