

JAERI - M
94-031

FRAP-T6およびNSR-77コードによる
照射済BWR燃料実験(TS実験)の解析

1994年3月

中村 武彦・室伏 昭^{*}・細山田龍二^{**}

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, Tokaimura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

F R A P - T 6 および N S R - 77 コードによる
照射済 B W R 燃料実験 (T S 実験) の解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部
中村 武彦・室伏 昭*・細山田龍二**

(1994年1月31日受理)

N S R R では、軽水発電炉で実際に使用した照射済の燃料棒の反応度事故時の挙動を調べる実験を行っている。このうち 7×7 型照射済 B W R 燃料を用いた実験は1989年から1993年までに TS-1 から TS-5 までの 5 回の実験を行った。本報告書はこれらの実験を事故時の燃料挙動計算コードとして広く世界的に使用されている F R A P - T 6 コードおよび、N S R R 実験における照射燃料の挙動計算に実績のある N S R 77 コードを用いて、解析した結果をまとめたものである。また、計算結果を実験結果と比較することにより、これらの計算コードの反応度事故条件における照射済燃料の挙動解析に対する適応性を検討した。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

* カナザワ・コンピュータサービス(株)

** キューブシステム(株)

Simulation of Irradiated BWR Fuel Rod (TS) Test in NSRR
Using FRAP-T6 and NSR-77

Takehiko NAKAMURA, Akira MUROFUSHI^{*} and Ryuji HOSOYAMADA^{**}

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

(Received January 31, 1994)

Series of pulse irradiation tests have been performed in the Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) to investigate irradiated fuel rod performance under the Reactivity Initiated Accident (RIA) conditions. Five tests, called Tests TS-1 through TS-5, were conducted in a period from 1989 to 1993 with irradiated 7×7 type BWR fuel rods provided from a commercial power plant. Simulation calculations of the TS tests were carried out with the FRAP-T6 code, which is widely used in the world to estimate fuel performance under various accident conditions, and with the NSR77 code, which describes fresh fuel rod performance well in the NSRR tests. Results of the calculation are compiled in this report and applicability of the codes to the irradiated BWR fuel rod tests is discussed.

Keywords: RIA, FRAP-T6, NSR-77, BWR Fuel, PCMI, Fission Gas Release,
NSRR, Pulse Irradiation

* Kanazawa Computer Service Corp.

** Cube System (Co.)

目 次

1.はじめに	1
2.照射済BWR燃料実験の概要	2
2.1 実験条件	2
2.2 実験結果	2
3.FRAP-T6による解析	3
3.1 ベース照射	4
3.2. パルス照射	6
4.NSR77による解析	8
5.まとめと考察	10
6.結論	13
謝辞	15
参考文献	15
付録I FRAP-T6コードによるTS実験の解析結果	51
付録II NSR77コードによるTS実験の解析結果	127

Contents

1. Introduction	1
2. Irradiated BWR Fuel Rod Test	2
2.1 Test Conditions	2
2.2 Test Results	2
3. FRAP-T6 Simulation	3
3.1 Base Irradiation	4
3.2 Pulse Irradiation	6
4. NSR77 Simulation	8
5. Summary and Discussion	10
6. Conclusions	13
Acknowledgement	15
References	15
Appendix I Simulation Results of TS Test Calculated with the FRAP-T6	51
Appendix II Simulation Results of TS Test Calculated with the NSR77	127

1. はじめに

原子炉安全性研究炉(Nuclear Safety Research Reactor : NSRR)では反応度事故(Reactivity Initiated Accident : RIA)時における燃焼の進んだ燃料の挙動を調べる実験を1989年より実施している。商用のBWRタイプの発電炉で実際に照射された燃料では、敦賀1号炉で照射された 7×7 型燃料棒を短尺化したものを用いて、これまでにTS-1からTS-5までの5回の実験[1-4]を実施した。実験燃料の製作に供したBWR燃料は、1972年から1978年にかけて6サイクル(5年半)の照射を受けた燃料棒で、平均燃焼度は22GWd/tU、実験に供した部分の局所燃焼度は26GWd/tUであった。

NSRRにおけるパルス照射実験(TS-1～TS-5)では燃料最高エンタルピは98cal/g•fuelに達したが、被覆管は全て健全であった。実験では照射済み燃料の特徴的な挙動が観察された。その主なものが被覆管の伸び挙動と燃料内圧上昇である。TS実験ではパルス照射時に、未照射燃料実験に比べて大きい被覆管の被覆管ペレット機械的相互作用(Pellet Cladding Mechanical Interaction : PCMI)によると考えられる過渡歪が測定された。しかし、被覆管の軸方向歪量は最大0.44%と破断歪(7～10%)に比べて十分小さく被覆管の破損はなく、燃料発熱量85cal/g•fuelでPCMIにより破損したSPERT(RUN859)実験とは異なる結果となった。また、パルス照射に伴うFPガスの追加放出量は、生成量の約10%と大きく燃料棒内圧は最高で加圧量の2倍以上の約2.6MPaに達した。未照射燃料実験ではパルス照射による内圧上昇量は初期加圧量の25～30%であり、照射済燃料ではパルス照射時の内圧上昇が大きいことが分かる。5回の実験ではDNBは発生せず被覆管表面温度は100°C程度に留まったため有意な変形は生じなかったが、PCMI破損が生じなくとも被覆管温度が上昇する条件では未照射燃料棒に比べて低い発熱量で燃料のふくれ、さらには破裂破損を生じる可能性があることが分かった。

事故時の燃料挙動を記述する計算コードとして広く世界的に使用されているFRAP-T6コード[5]、並びにNSRR実験における未照射燃料の挙動を記述する計算コードとして実績のあるNSR77コード[6]を用いて、上記の5実験のシミュレーションを行った。照射済み燃料を用いた反応度事故実験は1989年に始まったNSRR実験以前には米国におけるSRERT実験[7-8]およびPBF実験[9-10]の合計13実験に限られており、照射済み燃料の反応度事故時挙動解析におけるこれらの計算コードの適応能力は十分に検証されていない。したがって、本計算の目的は、計算結果を実験結果と比較することにより、これらの計算コードの適応能力を見極め、計算モデルの不十分な点を摘出することである。

2. 照射済BWR燃料実験の概要

2.1 実験条件

敦賀1号炉では、初めて国産の被覆管を用いて製造した7×7型燃料集合体を1972年から1978年にかけて照射した。この集合体の燃料棒については詳細な照射後試験が土江ら[11-14]によって行われている。この集合体の燃料棒1本を短尺加工し、上下端に新しく伸び計や燃料内圧計を装備した端栓を溶接し、実験カプセル内でNSRRにおいてパルス照射する実験を行った。実験燃料の構造をFig. 1に、実験カプセルの構造をFig. 2にそれぞれ示す。また、NSRRの構造をFig. 3に示す。TS-1～TS-5実験では、実験燃料を装着した実験カプセルをNSRR炉心中心の実験孔に挿入し、\$3.68～\$4.6の投入反応度による単一パルス照射を行った。単一パルス照射ではNSRR出力は、Fig. 4に例を示す様に、半値幅数msで炉出力は急上昇し実験燃料は反応度事故時と同様に急速に加熱される。実験燃料にはFig. 5に示すように、ペレットスタックおよび被覆管伸び計、被覆管温度測定用熱電対、燃料内圧計等が装着されており、過渡加熱時の燃料挙動が測定された。

実験燃料棒は、平均燃焼度21.3GWd/tUの集合体JAB73から取り出した燃料棒平均燃焼度22GWd/tUのB6燃料を用いて製作した。B6燃料は初期濃縮度2.79%、直径12.3mm、高さ21mmのディシュ付き無添加UO₂ペレットにより構成されている。実験燃料はFig. 6に示すように燃料棒中央部の燃焼度分布の平坦なところから採取した。実験燃料棒位置での燃焼度はTS-1実験燃料溶液の化学分析の結果26GWd/tUと評価された。実験燃料は中央部に照射済みペレット6個（スタック長さ126mm）とその周りに約140mm長の照射済被覆管を有している。Table 1に実験燃料棒の諸元を示す。

5回の実験ではすべてBWRのコールドスタートアップ条件を模擬した大気圧・室温・静止水冷却条件で、X-II型およびX-IV型カプセル内で実験燃料各1本を単一パルス照射した。パルス投入反応度は\$3.68～\$4.6、公称発熱量は70～118cal/g•fuelであった。燃料のピークエンタルピはパルス照射中に即発的に燃料に与えられた発熱量と等しいものとして、55～98cal/g•fuelと評価された。なお、TS-5実験においては発電炉の燃料集合体における燃料／冷却材比を模擬する目的で、実験燃料を流路管で囲みパルス照射を行った。同実験においても静止水（自然対流）冷却条件で実験を行った。

2.2 実験結果

パルス照射実験の結果得られた主な計測結果をTable 2まとめた。被覆管温度はTS-5実験において一瞬170°Cに達しているが、大体100°C程度で核沸騰に留まっている。燃料棒内圧は、

パルス照射と同時に急速に上昇し初期加圧量（1.1MPa）の2倍以上である最高値2.6MPaを示した。この内圧上昇量は、未照射加圧燃料棒実験の結果[15]に比べて大きく、3～6倍であった。燃料ペレットスタックの伸びは、最高0.71mm（0.56%）に達した。一方、被覆管の伸びは実験によってバラついているが最高0.55mm（0.44%）を示した。Figs. 7、8にTS-3、TS-4のペレットスタックおよび被覆管の伸び挙動を示す。

実験燃料棒の外観検査・寸法測定（直径プロファイル、曲がり、長さ）・渦電流探傷試験・X線写真観察を行った結果、TS-1～TS-5いずれの実験に於いてもパルス照射による有意な残留変形及び被覆管の貫通欠陥の発生は発見されず、燃料棒が健全性を維持したことが判明した。

TS-2～TS-5実験燃料については、ガスパンクチュア試験によりパルス照射により燃料ペレットからギャップ中に放出された核分裂生成物(Fission Product : FP)ガス量を評価した。TS-3実験燃料は封入ガスがヘリウムであるので、パンクチュア試験の結果測定されたXeおよびKr量をORIGEN-2コードにより計算された生成量と比較して放出率を求めた。一方、TS-2およびTS-4実験燃料にはFPガスの元素組成を模擬した封入ガスが用いられていたため、各元素の同位体比がFPガスと封入ガスで異なることを用いて、同位体比の変化から放出量を評価した。結果をTable 2示す。Kr及びXeのパルス照射による放出率は実験による大きな差ではなく平均 $11.0 \pm 1.8\%$ と評価された。なお、実験に用いたBWR燃料棒の敦賀1号炉に於けるベース照射による炉内放出量は $19.7 \pm 0.5\%$ と評価された。

実験燃料は切断後、金相・SEM/EPMA等の検査を行った。Photo. 1にパルス照射を経験した燃料（実験TS-2、TS-4）と経験しない燃料の断面写真を示す。パルス照射を経験した燃料には半径方向にクラックが多く発生していることがわかる。Photo. 2に照射前後の結晶の様子を比較して示す。ペレットの中心部、中間部では結晶粒界の剥離はみられない。しかし、Photo. 1に見られるように、ペレット外周部はパルス照射により脆くなっている様子で研磨状態でのペレットの欠け落ちが目立ち、周方向のクラックも発生している。金相検査結果を含む実験の詳細は文献[2-4]に詳しく示した。

3. FRAP-T6による解析

FRAP-T6コード[5]は、米国INELで開発された過渡状態あるいは事故状態における軽水炉燃料の挙動を計算するコードである。本コードは、時間依存の燃料棒出力・冷却材条件を境界条件として燃料棒の温度・圧力・変形等を計算する。FRAP-T6コードは石島ら[16]によって原研に導入されSPERT/CDCおよびPBF/RIA実験の解析[17]等に使用されている。本コードの主要なモデルには、温度計算を行うサブルーチンHEAT（燃料内熱伝導・燃料／被覆管ギャ

パルス照射と同時に急速に上昇し初期加圧量（1.1MPa）の2倍以上である最高値2.6MPaを示した。この内圧上昇量は、未照射加圧燃料棒実験の結果[15]に比べて大きく、3～6倍であった。燃料ペレットスタックの伸びは、最高0.71mm（0.56%）に達した。一方、被覆管の伸びは実験によってバラついているが最高0.55mm（0.44%）を示した。Figs. 7、8にTS-3、TS-4のペレットスタックおよび被覆管の伸び挙動を示す。

実験燃料棒の外観検査・寸法測定（直径プロファイル、曲がり、長さ）・渦電流探傷試験・X線写真観察を行った結果、TS-1～TS-5いずれの実験に於いてもパルス照射による有意な残留変形及び被覆管の貫通欠陥の発生は発見されず、燃料棒が健全性を維持したことが判明した。

TS-2～TS-5実験燃料については、ガスパンクチュア試験によりパルス照射により燃料ペレットからギャップ中に放出された核分裂生成物(Fission Product : FP)ガス量を評価した。TS-3実験燃料は封入ガスがヘリウムであるので、パンクチュア試験の結果測定されたXeおよびKr量をORIGEN-2コードにより計算された生成量と比較して放出率を求めた。一方、TS-2およびTS-4実験燃料にはFPガスの元素組成を模擬した封入ガスが用いられていたため、各元素の同位体比がFPガスと封入ガスで異なることを用いて、同位体比の変化から放出量を評価した。結果をTable 2示す。Kr及びXeのパルス照射による放出率は実験による大きな差ではなく平均 $11.0 \pm 1.8\%$ と評価された。なお、実験に用いたBWR燃料棒の敦賀1号炉に於けるベース照射による炉内放出量は $19.7 \pm 0.5\%$ と評価された。

実験燃料は切断後、金相・SEM/EPMA等の検査を行った。Photo. 1にパルス照射を経験した燃料（実験TS-2、TS-4）と経験しない燃料の断面写真を示す。パルス照射を経験した燃料には半径方向にクラックが多く発生していることがわかる。Photo. 2に照射前後の結晶の様子を比較して示す。ペレットの中心部、中間部では結晶粒界の剥離はみられない。しかし、Photo. 1に見られるように、ペレット外周部はパルス照射により脆くなっている様子で研磨状態でのペレットの欠け落ちが目立ち、周方向のクラックも発生している。金相検査結果を含む実験の詳細は文献[2-4]に詳しく示した。

3. FRAP-T6による解析

FRAP-T6コード[5]は、米国INELで開発された過渡状態あるいは事故状態における軽水炉燃料の挙動を計算するコードである。本コードは、時間依存の燃料棒出力・冷却材条件を境界条件として燃料棒の温度・圧力・変形等を計算する。FRAP-T6コードは石島ら[16]によって原研に導入されSPERT/CDCおよびPBF/RIA実験の解析[17]等に使用されている。本コードの主要なモデルには、温度計算を行うサブルーチンHEAT（燃料内熱伝導・燃料／被覆管ギャ

の熱伝達・被覆管の熱伝導・被覆管から冷却材への熱伝達)、燃料／被覆管の変形を計算するサブルーチンDEFORM、燃料からのFPの放出を計算するサブルーチンFASTGRASS、燃料棒の物性値パッケージMATPRO等がある。

3.1 ベース照射

FRAP-T6コードは原子炉の過渡状態や冷却材喪失事故や反応度事故における燃料挙動を計算するコードであるが、燃焼による燃料状態の変化を考慮するために、ベース照射時の燃料挙動を計算することが出来る。FRAP-T6では、過渡状態の開始時刻を0とし、ベース照射中の条件は負の時刻として計算を行う。ただし、出力履歴等を与える時間きざみ(タイムステップ数)の制限から、ベース照射時の出力は単純化して行う必要がある。したがってここでは、ベース照射中の出力は一定であるものと仮定し、燃焼度とベース照射中のFPガス放出量が実測値とあうように、照射中の線出力をパラメータにして計算を行った。本章では、ベース照射計算によって得られたパルス照射前の燃料状態を実際の燃料の照射後試験の結果と比較して示す。これにより、ベース照射条件と燃料の状態の関係を明らかにし、過渡計算の初期値として燃料のパルス照射前の適正な状態を推定した。また、ベース照射部分については、FRAP-T6コード計算の妥当性を確認するためにFEMAXI-Ⅲによる計算も併せて行い、結果を比較した。FEMAXI-Ⅲコードは中島ら[18, 19]により開発された定常照射時の燃料挙動解析コードであり、FPガス放出等については比較的単純なモデル化がなされているが、緩やかな出力上昇試験(ランプ出力試験)[20]等を含む広範な実験によって検証されている。

TS実験に用いた燃料棒はベース照射中に燃料棒平均で19.7%のFPガスがペレットから放出されたことが、実験燃料の元となったマザーロッドのガスパンクチュア試験の結果から分かっている。この結果を計算コードで再現するために線出力をパラメータにベース照射時の計算を行った。まず、線出力をパラメータにFPガスの放出量と燃料中の温度分布に着目して計算を行った。その結果、燃料温度についてはFRAP-T6とFEMAXI-Ⅲで若干の違い(燃料中心温度で100K程度)があるもののFPの放出量についてはほぼ一致した。Fig. 9にFRAP-T6とFEMAXI-Ⅲによって求めた燃料温度の半径方向分布を、Fig. 10に線出力によるFPガス放出量の変化を示す。いずれのコードにおいても線出力45kW/mでFPガス放出率は約20%となることが予測された。

実際の実験では、ベース照射は約4m長の長尺燃料について行われ、これを切断し両端に新しい端栓を溶接したものを実験燃料としパルス照射した。しかし、FRAP-T6計算ではベース照射とパルス照射で燃料の構造を変える事は出来ないので、初めから短尺加工した実験燃料を照射する形でベース照射計算を行った。

ベース照射の結果、TS実験に用いた長尺燃料からのベース照射後の燃料棒平均のFP放出率はガスパンクチュア試験の結果19.7%であった[3]。TS-1～TS-5実験に供した燃料はFig. 6に示す様に中央部の燃焼度の高い部分から採取した。この部分はFPガスのインベントリーも多く、ベース照射中の線出力も高い事からFPガスの放出率も高い。燃料棒平均のFPガス放出率の19.7%から実験に供した部分からの局所的FP放出率を評価するために文献[21]の線出力とFP放出率の関係(Fig. 11)を用いた。Table 3に実験燃料を13分割して得られた長尺燃料のFP放出率の軸方向分布を示す。なお本計算では、グロス γ 線強度はその部分の燃焼度と線出力に比例するものとし、FPガス量は燃焼度に比例するものとした。計算の結果、燃料中央部の実験燃料を採取した部分の線出力は49kW/m、局所FPガス放出率は30.9%と推定された。

商用炉で実際に照射された燃料棒はスタック長367.0cmに対して燃料棒内の自由空間の体積は63.7cm³である。他方、実験燃料はスタック長12.6cmに対し自由空間は約7cm³である。したがって自由空間/スタック長はそれぞれ、0.174と0.56と実験燃料棒が約3倍大きい。このため、FPガス放出による内圧上昇およびガス組成の変化は、同じ放出率に対しては実験燃料棒の方が小さい値となる。したがって、FRAP-T6計算においては、パルス照射前(ベース照射後)の燃料の状態が実際の実験に近くなる様に、初期封入ガス圧および組成を調整した。つまり、ガス組成をHe30%，Xe70%とし0.8MPaの初期加圧としてベース照射計算を行った。ベース照射時の線出力を45kW/m～50kW/mとして線出力依存性を見た。このうち、線出力を47kW/mとして計算した結果は、局所的FP放出率28.3%でほぼ予定した値となった。また、ギャップガス中のFPガスの割合、燃料内圧についても、ほぼPIE結果と近い値となった。FRAP-T6計算の結果、燃料中心から相対半径(R/R_0)<0.4の部分では、100%近いFPガスが放出されている事を予測した。FP放出率は0.4< R/R_0 <0.7付近で急速に減少し、外周部(0.8< R/R_0)ではほぼ0と計算された。Fig. 12にFRAP-T6計算で得られた半径方向のFPガスの放出率分布、Fig. 13に残留FPガス濃度分布を示す。また、パルス照射前の燃料についてマイクロガンマスキャニングにより得られた¹³⁷Cs分布をFig. 14に示す。Fig. 13に示した計算で求められたFPガスの半径方向分布は、マイクロガンマスキャニングで得られた¹³⁷Csの分布(Fig. 14)と定性的にはよい一致を示した。また、FRAP-T6は残留するFPガス生成量の71.7%のうち、13.3%が結晶粒界に存在する事を予測した。Fig. 15に線出力47kWとして計算したベース照射終了時の燃料中のFPガスの半径方向分布と照射終了直前の温度分布を併せて示す。計算の結果、燃料中心温度は1698°C(1970K)に達している。ベース照射終了後の燃料金相検査の結果は、燃料中心部で等軸晶(Equiaxed grain)の成長が認められており、粒状晶(Columnar grain)が見られない事[2, 3]から1500°C以上1700°C以下と考えられている。線出力47kW/mの計算結果は燃料中心温度は1698°Cであり金相検査の結果が示す温度の上限であるが矛盾はしない。また、金相試験の結果[2, 3]は相対半径 $R/R_0=0.5$ の付近にポーラスア

ニュラスと呼ばれる変色部[10]が見られ、これはFRAP-T6計算で得られたFPガス放出率が大きく変化する領域に対応している。

Table 4にベース照射後の燃料の状態を照射後試験（Post Irradiation Examination : PIE）によって得られた結果と、FRAP-T6によって計算された結果を比較して示す。パルス照射時の燃料挙動の計算に影響するパラメータについて計算結果とPIEの結果をみてみると、燃料ペレットと被覆管のギャップはパルス照射直前の状態を再現するために初期ギャップを $70\mu\text{m}$ として計算した結果、ベース照射終了後で $58\mu\text{m}$ と計算されPIEで得られた見かけのギャップ約 $70\mu\text{m}$ と大差ない。また、計算で得られた被覆管のクリープダンは極くわずかであり、これもPIEにおける知見と一致している。計算ではノジュラー腐食を評価しないが、均一の酸化膜厚は $3\mu\text{m}$ とPIEで得られた最大値 $6\mu\text{m}$ と大差ない値となっている。なお、この計算ではギャップの効果を単純化して取り扱うために、照射による燃料ペレットの割れに伴うギャップの変化を考慮したRelocationモデルは使わなかった。

以上の検討により、FRAP-T6によるベース照射計算結果はパルス照射前の実験燃料の状態を比較的良く再現していると言える。

3.2 パルス照射

パルス照射時に燃料に取付けられる実験計装は限られているため、実験で測定の出来ない燃料状態を推定し、またNSRR実験に比べてゆるやかな過渡過渡変化を主に開発／検証されたFRAP-T6コードの反応度事故条件への適応性を調べる目的でTS-1～5実験の解析を行った。パルス照射前の燃料条件は、燃料棒平均FPガス放出率約20%を達成するピーク線出力 47kW/m 、局所燃焼度 26GWd/tU の条件で計算した。

パルス照射時の燃料挙動の解析結果をTS-4実験を例に概説する。室温大気圧の静止水霧囲気に置かれた実験燃料は、Fig. 16に示す様に、急速に加熱される。実験燃料は自己遮蔽により凹型の発熱分布を持つ[22]ので燃料外周部がまず最高温度に達し約3秒遅れて燃料中心が最高温度に達する。被覆管温度も上昇するが、表面は核沸騰に留るため、被覆管温度は 100°C （ 373K ）を大きくは超えない。燃料エンタルピはパルス照射中に即発的に与えられる発熱量でピークに達し、除熱量がランアウト出力を上回るため徐々に低下する。なお、パルス照射時の投入反応度が小さいために、パルス出力の半値幅が大きく、ランアウト出力が即発出力に比べて相対的に大きいTS-1実験等では、やや遅れて燃料エンタルピはピークとなる（付録I参照）。Fig. 17にTS-4実験における燃料エンタルピの時間履歴を示す。

パルス照射により、燃料ペレットは急速に熱膨張し、被覆管と接触し、被覆管を押し広げ

る。ペレットと被覆管の機械的相互作用（Pellet Cladding Mechanical Interaction : PCMI）はパルス照射直後に始まりFig. 16において燃料および被覆管の温度変化率が変化する5sの時点まで続いている。この結果ペレットスタックは最大1.9mmの伸びを示し、被覆管は主にPCMIによる最高0.94mmの伸びると計算された。Fig. 18に燃料ペレットおよび被覆管の変形挙動を示す。

PCMIによる被覆管の応力はパルス照射直後の被覆管温度上昇が非常に限られている時点で急上昇し周方向応力は最高値437MPaに達している。軸方向応力はペレット／被覆管の伸びと共に増加し、約2.8sで最高の551MPaに達した。被覆管の降伏応力は室温で約1300MPaであったものがパルス照射直後に被覆管の温度上昇により970MPaの程度まで減少するが、被覆管温度が約127°C (400K) で安定する5s以後には1150MPaまで回復するものと計算された。Fig. 19に応力の時間履歴を示す。なお、本解析では、ペレットの熱膨張は等方的で、被覆管との接触面にはすべりはなく、また、ペレットは剛体であり一方的に被覆管を変形させるものと仮定したFRACAS-I モデルを用いた。

Table 5にFRAP-T6によるTS-1～5実験の解析結果の主要な項目を示す。燃料温度に関しては、実験では、わずかに被覆管表面温度が測定されているだけである。被覆管温度は最大170°Cに留まり核沸騰離脱（Departure from Nucleate Boiling : DNB）による被覆管温度の急上昇は発生しなかった。解析結果は被覆管表面温度を比較的よく再現しているが、TS-5実験において流路管ありの場合、FRAP-T6が予測したDNBによる被覆管温度の急上昇は実験では発生しなかった。また、燃料中心温度はFRAP-T6計算によるとTS-1～5実験で909°C～1450°Cに達したものと推定される。Fig. 19にパルス照射実験における燃料ピークエンタルピと燃料温度の関係を示す。Fig. 20に燃料ペレットおよび被覆管の軸方向歪と燃料ピークエンタルピの関係を示す。FRAP-T6計算は、実験で測定された被覆管歪および燃料歪を約2倍の値に過大評価している。

Fig. 21に計算で得られた被覆管の応力を示す。また、計算で得られた応力／歪の関係を用いて実験結果から評価した応力を併せて示した。TS-4実験までは被覆管応力は降伏応力の半分程度に留まっており、実験の結果で有意な残留変形が検出されなかった事に矛盾しない。

パルス照射によるFPガスの追加放出については、Fig. 22に示す様に、FRAP-T6は実験結果に比べて非常に小さい値を示した。実験における放出量は、図中の横線で示される結晶粒界のFP量にはほぼ等しい事が分かる。FRAP-T6では、FASTGRASSコードによりFPガスの挙動を計算しており、コードでは比較的早い加熱条件に対応するためモデル（過渡加熱時にFPの拡散速度／放出確率を増加させるモデル、マイクロクラックモデル等）が導入されているが、検証実験は、冷却材喪失によるシビアアクシデント実験やPower Cooling Mismatch (PCM) 実験が主体である。反応度事故の様な非常に早い加熱条件では、別の放出メカニズム

ムの導入が必要と考えられる。また、FRAP-T6では燃料内圧の増加を非常に小さく計算している。

4.NSR77による解析

NSR77は反応度投入事象における軽水炉燃料の挙動を記述する目的で開発された計算コード[6]で、MCDRAN-I [23]を原型に、単一燃料棒の熱的および機械的挙動を解析するものである。同コードは、NSRR実験における未照射燃料棒の挙動の解析に広く使用されて来ており、反応度事故条件における未照射燃料の温度および変形挙動をよく再現する[24]ことが知られている。NSR77コードにおいては、サブコードFISGASによりFPの挙動を計算する事が可能であり、物性値についてもサブコードMATPROは燃料密度等一部の物性について燃焼の効果を考慮しているが、被覆管のクリープダウン等についてはモデル化がなされておらず、長期照射燃料の挙動については検証はほとんどなされていない。そこで、本解析においては、NSR77コードは照射による効果を考慮しない形で用いる事とした。つまり、未照射燃料の挙動を代表するものとしてNSR77計算を行い、実際に照射燃料が実験で示した挙動と比較する事により、ベース照射の効果を明らかにすることを目的とした。

実験解析はTS-3およびTS-4実験を対象とし、ギャップガスの違いによる効果（TS-3はHe、TS-4はXe/Kr/He混合ガス）、および燃料ペレットおよび被覆管のギャップ幅の効果に着目して計算を行った。また、TS実験との比較用として行った未照射燃料実験についても計算を行い、結果を比較した。

NSR-77コードにおいてもFRAP-T6コードと同様に、変形モデルはペレットを剛体と仮定し、被覆管のみの変形を考えた薄肉円筒モデルを採用しており、ギャップが閉じた後はペレットと被覆管のすべりはなく一体として変形するモデルとなっている。

実験燃料棒の発熱分布は、初期濃縮度2.79%の燃料棒を燃焼度22GWd/tUまで照射した際の燃料組成をORIGEN-2コードにより求め、この燃料をNSRR照射した際の発熱分布を中性子輸送計算によって求めたもの[22]を用いた。Fig. 23に半径方向の出力分布を示す。なお、前章のFRAP-T6計算でも同じ出力分布を用いた。Table 6にNSR77による解析結果の一覧を示す。解析のパラメータとしては、燃料と被覆管のギャップ幅を製造時の $155\text{ }\mu\text{m}$ 、ベース照射終了時の見かけのギャップ $70\text{ }\mu\text{m}$ 、および $40\text{ }\mu\text{m}$ として計算を行った。ギャップ幅 $155\text{ }\mu\text{m}$ 及び $70\text{ }\mu\text{m}$ で行った計算では、パルス照射によっても燃料と被覆管のギャップは閉じる事がなく、パルス照射による被覆管の最大伸びは $0.12\sim0.19\text{mm}$ と熱膨張程度の値に留まっている。実際、TS-3実験では被覆管の伸びは 0.05mm と小さく熱膨張程度であった。しかし、TS-4実験では

ムの導入が必要と考えられる。また、FRAP-T6では燃料内圧の増加を非常に小さく計算している。

4.NSR77による解析

NSR77は反応度投入事象における軽水炉燃料の挙動を記述する目的で開発された計算コード[6]で、MCDRAN-I [23]を原型に、単一燃料棒の熱的および機械的挙動を解析するものである。同コードは、NSRR実験における未照射燃料棒の挙動の解析に広く使用されて来ており、反応度事故条件における未照射燃料の温度および変形挙動をよく再現する[24]ことが知られている。NSR77コードにおいては、サブコードFISGASによりFPの挙動を計算する事が可能であり、物性値についてもサブコードMATPROは燃料密度等一部の物性について燃焼の効果を考慮しているが、被覆管のクリープダウン等についてはモデル化がなされておらず、長期照射燃料の挙動については検証はほとんどなされていない。そこで、本解析においては、NSR77コードは照射による効果を考慮しない形で用いる事とした。つまり、未照射燃料の挙動を代表するものとしてNSR77計算を行い、実際に照射燃料が実験で示した挙動と比較する事により、ベース照射の効果を明らかにすることを目的とした。

実験解析はTS-3およびTS-4実験を対象とし、ギャップガスの違いによる効果（TS-3はHe、TS-4はXe/Kr/He混合ガス）、および燃料ペレットおよび被覆管のギャップ幅の効果に着目して計算を行った。また、TS実験との比較用として行った未照射燃料実験についても計算を行い、結果を比較した。

NSR-77コードにおいてもFRAP-T6コードと同様に、変形モデルはペレットを剛体と仮定し、被覆管のみの変形を考えた薄肉円筒モデルを採用しており、ギャップが閉じた後はペレットと被覆管のすべりはなく一体として変形するモデルとなっている。

実験燃料棒の発熱分布は、初期濃縮度2.79%の燃料棒を燃焼度22GWd/tUまで照射した際の燃料組成をORIGEN-2コードにより求め、この燃料をNSRR照射した際の発熱分布を中性子輸送計算によって求めたもの[22]を用いた。Fig. 23に半径方向の出力分布を示す。なお、前章のFRAP-T6計算でも同じ出力分布を用いた。Table 6にNSR77による解析結果の一覧を示す。解析のパラメータとしては、燃料と被覆管のギャップ幅を製造時の $155\mu\text{m}$ 、ベース照射終了時の見かけのギャップ $70\mu\text{m}$ 、および $40\mu\text{m}$ として計算を行った。ギャップ幅 $155\mu\text{m}$ 及び $70\mu\text{m}$ で行った計算では、パルス照射によっても燃料と被覆管のギャップは閉じる事がなく、パルス照射による被覆管の最大伸びは $0.12\sim0.19\text{mm}$ と熱膨張程度の値に留まっている。実際、TS-3実験では被覆管の伸びは 0.05mm と小さく熱膨張程度であった。しかし、TS-4実験では

0.55mmとペレット伸びの0.7mmに相当する被覆管（弾性）伸びを記録した。ギャップ幅40 μm とした計算結果は、この被覆管変形量をよく再現した。しかし、計算におけるペレット伸びは1.6mm前後であり、実測値の2倍近い値となっている。ギャップ幅40 μm の計算では、パルス照射時にペレットと被覆管のギャップが閉じ、ペレットにより被覆管が引き伸ばされているが、その時の被覆管応力は640~700MPaとなっており、室温~100°Cにおけるジルカロイ被覆管の降伏応力1300~1000MPaに比べて小さく、変形が弾性的である事を予想している。Fig. 24に燃料ペレットおよび被覆管の伸び挙動を、Fig. 25に被覆応力の計算結果を示す。TS-3およびTS-4実験において被覆管の伸び量が大きく異なっている理由は、ギャップ幅がベース照射中の割れ/移動の具合により異なっていたために、PCMIの程度が異なったものと考えられる。NSR77の計算結果は、ペレット変計量を過大評価しているが、原因としては(1)被覆管の拘束によるペレット膨張量の減少の効果、あるいは(2)実験燃料はその製作時にペレット下端側にも0.5mm~1mm程度の空隙が生じている可能性が高く、この事によりペレットスタック伸びが実際よりも小さく測定されていること、の2つが考えられる。

燃料ペレット/被覆管ギャップの違いによる燃料温度挙動の違いを見ると、ギャップ幅が大きい(155 μm)場合、Xe/Kr/He混合ガスの場合ギャップ熱伝達係数が小さいために、ペレットの除熱量が小さく、燃料表面温度はギャップガスがHeである場合に比べてパルス照射2s後には約2倍の値となっている(Fig. 26)。ギャップを小さくした計算の結果も同様で、燃料表面温度はギャップを70 μm とした計算では155 μm の約70%、40 μm とした計算では約30%の値となっている。但し、燃料中心温度にはあまり差は現れていない。Fig. 27にギャップガスを混合ガスおよびHeとした場合の半径方向の燃料温度分布を、上記3種類のギャップ幅で計算した結果を示す。計算結果は、ギャップ幅が小さくなるにつれ燃料外周部の温度が低くなる事を示しており、その効果はギャップガスが混合ガスの場合の方が大きい。これは、混合ガスの熱伝導度がHeの約1/10と小さいためだと考えられる。ギャップが小さい場合にはギャップ熱伝達は主に接触熱伝達により決まるのでギャップガスの効果は顕著ではない。照射済燃料実験では、TS-2~4にPCMIによる被覆管の伸びが検出されている事から分かる様に、パルス照射時にはペレット/被覆管ギャップは閉じている。照射済燃料のRIA挙動に対しては、ギャップガスの影響は未照射燃料に較べて低い発熱量領域に限定され、その効果は小さい事を計算結果は示している。

Fig. 28に燃料エンタルピの計算結果を示す。ギャップ幅が大きい(155 μm)場合にはペレットの除熱量が小さく、ランアウト出力により燃料エンタルピが上昇し、他の条件での計算に較べてややピークエンタルピが高くなっている。

5.まとめと考察

本章では、FRAP-T6およびNSR77による計算結果を実験結果と併せて比較検討し、照射済燃料の反応度事故時挙動に対する両コードの適応能力、適応限界、照射済燃料の挙動の特徴等について検討する。

燃料棒温度

燃料ピークエンタルピ $55\sim98\text{cal/g}\cdot\text{fuel}$ の範囲の実験では被覆管表面は核沸騰に留まり、DNBに伴う被覆管温度の急上昇は発生せず、測定された被覆管表面温度は飽和温度の 100°C を大きくは超えなかった。ただし、流路管付き体系で行ったTS-5実験では、瞬間に被覆管温度は 170°C に上昇しておりDNBに近い状況であったことを暗示した。同実験に対してFRAP-T6はDNBを予測し被覆管最高温度を 452°C と計算し(Table 5)、同実験がDNBの発生しきい値近傍であることを予測した。計算結果はDNBしきい値を多少低く評価していると考えるべきであるが、さほどの外れではないと考えられる。この点を除くとFRAP-T6およびNSR77コードはTS実験における被覆管表面温度をよく再現した(Fig. 29)。また、FRAP-T6はTS-1~4実験のようにプール沸騰条件での照射済BWR燃料実験でのDNBの発生は燃料ピークエンタルピ $110\sim120\text{cal/g}\cdot\text{fuel}$ で発生することを予測している。これを実験的に確認することは現状の実験能力では不可能であるが、TS-4実験においても瞬間に被覆管表面温度が 150°C に達していることを考えると燃料ピークエンタルピ $98\text{cal/g}\cdot\text{fuel}$ を大きくは超えない条件でDNBが発生することが予想される。

NSRRにおける未照射燃料実験では、DNBの発生と燃料ペレット/被覆管ギャップが閉じることは強い相関をもっており、燃料ペレットと被覆管の接触が生ずるとDNBが生じ、その結果、被覆管の温度が急上昇し、その後安定した膜沸騰が維持されることが知られている[25]。照射済燃料を用いたTS実験では、次項に示すように燃料ペレットと被覆管の接触は少なくとも部分的には生じているがDNBは生じていない。このことは照射済燃料においては必ずしも、ギャップの閉塞がDNBを起こす必要十分条件では無いことを示している。FRAP-T6においては、燃料/被覆管ギャップを機械的ギャップと熱的ギャップの2種類に分けて考えており、機械的ギャップが閉じPCMIが発生する状況にあっても熱的ギャップは開いている状況を考慮している。これは、熱的には平均的なギャップが重要であるが、PCMIによる変形や破損を考える場合には局所的な最大値が重要であるためと考えられる。FRAP-T6の機械的ギャップの意味をこう捕らえると実験結果とよく符合する。

燃料ペレット温度については実験では測定されていないが、FRAP-T6およびNSR77の計算結果は、燃料中心温度についてよい一致を示している(Fig. 29)。燃料表面温度については、

ギャップを狭くしたNSR77計算が燃料表面温度の最高値を小さく計算しているが、Fig. 26に示した燃料ペレットの温度履歴からも分かるように燃料表面温度はパルス照射と同時に瞬間に高温になるが、急速に冷却される。Fig. 29に示した値は瞬間的な最大値であり、次の段落で示す燃料ペレットの軸方向伸びにはあまり影響しない。

燃料/被覆管の変形

TS実験では、パルス照射時にPCMIによると考えられる被覆管の急速な伸びが検出された。軸方向の伸び量（歪）は最大0.55mm (0.44%)と弾性変形範囲内であるが、ペレットスタック伸び（歪）の最大値0.71mm (0.56%)と同程度の値であり、被覆管がほとんど滑りなしでペレットに引っ張られて伸びたことを暗示している。FRAP-T6およびギャップ幅を40 μm としたNSR77計算の結果は、被覆管の軸方向伸びおよびペレットスタック伸びを、両コードとも実験で得られた値の約2倍に過大評価している(Fig. 30)。未照射の燃料棒を使った実験では、ギャップが十分広く燃料ペレットと被覆管の接触がほとんど生じない場合は、燃料スタックの伸びはFRAP-T6による計算値とよく一致するが、ギャップが比較的狭く接触が生ずる場合には燃料ペレットの伸びは約20%程度小さくなる事が知られている[26]。これは被覆管による拘束により燃料ペレットが圧縮されたものと考えられる。FRACAS-1モデルはペレットを剛体と仮定するために、照射済燃料を用いたTS実験においても燃料ペレットの伸びを過大評価しているものと考えられる。さらに、TS実験用の照射済BWR燃料棒は長尺の実用燃料棒を切断し、その両端から燃料ペレットを5~10mm程度取り除き断熱ペレット等を内蔵する上下端栓を溶接して取り付けている[2-4]。下部端栓側は出来るだけ燃料ペレットと断熱ペレットの間に隙間が開かないように注意して製作されているが、0.5mm程度あるいはそれ以下の隙間がある可能性は否定できない。これにより実験に於けるペレットスタック伸び測定は50%変形量を過小評価している可能性がある。しかし、いずれにせよ実験結果は照射済燃料のパルス照射による膨張量は、被覆管による拘束があり、かつ燃料ピークエンタルピが100cal/g•fuel以下の条件では未照射燃料と比べて大きくは違わないことを示している。FRAP-T6およびNSR77では、燃料の物性はMATPRO Ver.11[27]を用いている。同モデルでは熱膨張率を温度、PuO₂富化度、溶融割合の関数として与えており、燃焼に伴うガス状あるいは固体状のFPの蓄積による効果は、別に燃料スウェーリングとして主にバーンアップの関数として与えられている。同モデルでは定常状態でのゆっくりした変化を考えているため、FPガスによる燃料スウェーリングは燃料温度が高いほどガスの燃料中の残存量が減るので小さくなる。NSRRによるパルス照射実験のような速い加熱条件ではFPガス気泡の膨張により燃料ペレットの膨張が加速される可能性があるが、TS実験においては燃料スタックの伸びは未照射燃料の伸びを上回らなかったことから、実験の燃料エンタルピ/温度範囲ではFPガス気泡の

膨張による燃料ペレットの急速なスウェーリング現象は起きないか、あるいは効果が小さかったものと考えられる。

以上の結果から照射済BWR燃料棒のPCMIによる破損の可能性についてまとめてみる。燃料最大エンタルピ $98\text{cal/g}\cdot\text{fuel}$ までの実験で得られた被覆管の最大歪は0.44%（TS-4実験）で弾性範囲内であった。この被覆管の歪は、被覆管の熱膨張から予想される歪量0.1%に比べて非常に大きく、むしろペレットスタックの歪量0.56%とほぼ等しい。また、歪速度もペレットスタックとほぼ等しいことから、変形がPCMIによるものでありペレットと被覆管の間にほとんど滑りがない状態であったことを示している。しかし、この歪量は照射済み被覆管の破断歪7-10%に比べて非常に小さい。また、FRAP-T6およびNSR77によって評価されたパルス照射時の被覆管応力は、それぞれ軸方向応力 $3\times 10^2\text{MPa}$ 以下、半径方向応力 $2\times 10^2\text{MPa}$ 以下であり(Fig. 31)、室温における照射済み被覆管の引っ張り強さ $1.3\times 10^3\text{MPa}$ に比べて十分小さい。他方、TS-3実験ではTS-4実験と大差ない発熱量で実験が行われたのにも係わらず非常に小さい被覆管歪しか測定されておらず、被覆管のクリープダウンが小さいBWR燃料の場合、局所的なギャップの状態によりPCMIの程度は大きく異なるものと考えられる。

以上のことから、今回実験した発熱量範囲では最大でも歪量は破断伸びの約10分の1であり、被覆管の破損はおろか塑性変形も無かった。PCMIによる破損が発生するすれば、JM-4、JM-5実験[28]でみられたような結晶粒界の剥離を伴う燃料ペレットの大きなスウェーリングが発生した場合に限られるものと思われる。TS実験燃料をNSRRで照射した場合の燃料ピークエンタルピは、最大パルスを用いても約 $100\text{cal/g}\cdot\text{fuel}$ なのでこの点に関しては、JM実験等の高発熱量実験の結果をよく検討する必要がある。

FPガス放出と燃料内圧上昇

パルス照射によるFPガスの放出については、FRAP-T6は実験結果に比べて小さい値を計算した。実験における放出量は、同コードによるベース照射計算で予測された結晶粒界中（Grain FaceおよびGrain Edge）のFPガス量にはほぼ等しかった。FRAP-T6でFPガスの挙動を計算しているFASTGRASSコードは、比較的早い加熱条件に対応するためモデル（過渡加熱時にFPガス気泡の内圧の関数として拡散速度／放出確率を増加させるモデル、結晶粒界の脆性変形に対応したマイクロクラックモデル）が導入されているが、定常あるいは負荷変動運転、冷却材喪失によるシビアアクシデント実験、あるいはPower Cooling Mismatch（PCM）実験を主体に検証されている。反応度事故の様な非常に早い加熱条件では、別の放出メカニズムの導入が必要と考えられる。

FPガスが放出されると燃料内圧が上昇する。実験用燃料棒はプレナム等の燃料棒内の自由空間体積のスタック長さに対する比が長尺の商用燃料棒に比べて約3倍大きい。このため、

パルス照射によって生成量の約10%のFPガスが放出されたとしてもガス温度が室温のまま変わらないとすれば燃料内圧は約0.16MPa上昇するに留まる。仮に放出されたガスの温度を燃料最高温度の約1700K (TS-5実験: 98cal/g•fuel) としても、内圧上昇量は0.9MPa程度であり実験における内圧上昇量の測定値1.5MPaに比べると小さい。これは、実験では燃料と被覆管のギャップがほとんど閉じていたため、燃料上部のプレナムがガス貯めとして機能せず、非平衡的に燃料下部の圧力が上昇したものと考えられる。ただし、燃料内圧により燃料の膨れ、あるいは破裂が起きるような条件では、ギャップは開くので燃料内圧はむしろ平衡圧に近い値になることが予想される。

以上の結果から照射済燃料棒の内圧破裂の可能性について検討する。実験に使用した照射済BWR燃料棒はベース照射中のFPガスの放出によりその内圧は約1MPaに達している。TS-2およびTS-3実験では、パルス照射により内圧は約2MPaまで上昇し、内圧による周方向応力は約15MPaに達した。TS-5実験では、パルス照射により内圧は約2.6MPaまで上昇し、内圧による周方向応力は約20MPaに達した。未照射燃料によるNSRR実験の結果では燃料内圧による周方向応力が20MPaの場合、被覆管温度が約900°Cに達すると燃料が内圧破損することが知られている[15]。未照射燃料実験の結果から対応する燃料ピークエンタルピを推定すると約160cal/g•fuelとなる。なお、FRAP-T6による予測計算は180cal/g•fuel程度で被覆管温度が900°Cとなる(Fig. 19)。ここでパルス照射によるFPガスの追加放出がない場合を考えると、1MPaにHe加圧した燃料の破損時の燃料ピークエンタルピは約180cal/g•fuelであるので、FPガスの追加放出の効果により、内圧破損の燃料ピークエンタルピが若干小さくなる可能性があることが分かる。また、TS実験は短尺化した燃料棒を用いて行ったが、この結果を長尺の敦賀燃料棒に当てはめると、Table 7に示すように、長尺燃料棒はプレナムの体積が相対的に小さいので、仮にFPガス生成量の10%がペレットの最高温度1700Kで断熱的に放出されたとすると、反応度事故によるパルス状の出力上昇による燃料内圧上昇は約2.5MPa(初期圧との合計約3.5MPa)となり、内圧による周方向応力は約27MPaに達するものと予想される。従って、長尺の敦賀燃料棒の場合には、短尺の実験燃料棒に比べてやや低い被覆管温度でバースト破損を起こす可能性がある。

6.結論

燃料ピークエンタルピ98cal/g•fuelまでの範囲で行われたTS実験の解析をFRAP-T6およびNSR77コードで解析した結果、両コードは実験における燃料挙動を比較的よく再現し、燃料棒がこのエネルギー領域ではパルス照射によるPCMIや内圧上昇により破損しないための十分な

パルス照射によって生成量の約10%のFPガスが放出されたとしてもガス温度が室温のまま変わらないとすれば燃料内圧は約0.16MPa上昇するに留まる。仮に放出されたガスの温度を燃料最高温度の約1700K (TS-5実験: 98cal/g•fuel) としても、内圧上昇量は0.9MPa程度であり実験における内圧上昇量の測定値1.5MPaに比べると小さい。これは、実験では燃料と被覆管のギャップがほとんど閉じていたため、燃料上部のプレナムがガス貯めとして機能せず、非平衡的に燃料下部の圧力が上昇したものと考えられる。ただし、燃料内圧により燃料の膨れ、あるいは破裂が起きるような条件では、ギャップは開くので燃料内圧はむしろ平衡圧に近い値になることが予想される。

以上の結果から照射済燃料棒の内圧破裂の可能性について検討する。実験に使用した照射済BWR燃料棒はベース照射中のFPガスの放出によりその内圧は約1MPaに達している。TS-2およびTS-3実験では、パルス照射により内圧は約2MPaまで上昇し、内圧による周方向応力は約15MPaに達した。TS-5実験では、パルス照射により内圧は約2.6MPaまで上昇し、内圧による周方向応力は約20MPaに達した。未照射燃料によるNSRR実験の結果では燃料内圧による周方向応力が20MPaの場合、被覆管温度が約900°Cに達すると燃料が内圧破損することが知られている[15]。未照射燃料実験の結果から対応する燃料ピークエンタルピを推定すると約160cal/g•fuelとなる。なお、FRAP-T6による予測計算は180cal/g•fuel程度で被覆管温度が900°Cとなる(Fig. 19)。ここでパルス照射によるFPガスの追加放出がない場合を考えると、1MPaにHe加圧した燃料の破損時の燃料ピークエンタルピは約180cal/g•fuelであるので、FPガスの追加放出の効果により、内圧破損の燃料ピークエンタルピが若干小さくなる可能性があることが分かる。また、TS実験は短尺化した燃料棒を用いて行ったが、この結果を長尺の敦賀燃料棒に当てはめると、Table 7に示すように、長尺燃料棒はプレナムの体積が相対的に小さいので、仮にFPガス生成量の10%がペレットの最高温度1700Kで断熱的に放出されたとすると、反応度事故によるパルス状の出力上昇による燃料内圧上昇は約2.5MPa(初期圧との合計約3.5MPa)となり、内圧による周方向応力は約27MPaに達するものと予想される。従って、長尺の敦賀燃料棒の場合には、短尺の実験燃料棒に比べてやや低い被覆管温度でバースト破損を起こす可能性がある。

6.結論

燃料ピークエンタルピ98cal/g•fuelまでの範囲で行われたTS実験の解析をFRAP-T6およびNSR77コードで解析した結果、両コードは実験における燃料挙動を比較的よく再現し、燃料棒がこのエネルギー領域ではパルス照射によるPCMIや内圧上昇により破損しないための十分な

強度余裕を有していることを示した。以下に得られた主な知見をまとめる。

(1)FRAP-T6はパルス照射前の見かけの燃料/被覆管ギャップを用いることにより、被覆管および燃料ペレットの変形挙動を比較的よく再現したが、変形量を2倍程度過大に評価した。より現実的に変形量を予測するためには、被覆管による燃料変形の拘束の効果等を考慮する必要がある。また、NSR77を用いてギャップ条件をパラメータとして行った計算により、照射済燃料では燃料/被覆管ギャップが未照射燃料に比べて小さいため、温度挙動に対してギャップガスの影響は大きくなく、むしろギャップ幅の適切な評価が重要であることが示された。

(2)照射済み燃料実験ではパルス照射時のFPガスの追加放出により、未照射燃料棒に比べてパルス照射による燃料棒の内圧上昇が大きいが、FRAP-T6はこれを過小評価した。パルス照射実験で放出されたFPガス量はFRAP-T6の計算したベース照射後の結晶粒界でのFPガス蓄積量とほぼ等価であった。しかし、FRAP-T6の計算したパルス照射によるFPガスの放出量は粒界蓄積量の約10~50%に留まった。このことから、反応度事故の様な非常に速い加熱速度でのFPガスの放出モデルには改良が必要である事が示された。

(3)燃料被覆管は実験範囲のエネルギーではPCMIによる変形は弾性変形に留まった。FRAP-T6およびNSR77の計算結果はパルス照射時の被覆管は被覆管の引っ張り強さに比べて十分小さく、TS実験に用いた燃料棒は破損を起こさないための十分な強度余裕を有していることを示した。

(4)未照射燃料では燃料と被覆管のギャップが閉じるとDNBが発生し被覆管温度が急上昇するが、照射済燃料ではギャップが閉じても98cal/g•fuel以下ではDNBは発生しなかった。プール沸騰条件であるNSRR実験における7×7型照射済BWR燃料棒のDNB発生しきいエンタルピをFRAP-T6は110cal/g•fuel以上と予測した。

今回の反応度事故模擬実験の計算では、事故条件以前の照射における燃料挙動を含めた全ての計算を、短尺化した燃料に対してFRAP-T6コードにより単純化して行った。しかし、照射済み燃料の反応度事故の挙動の評価に当たっては、事故に至る以前の燃料の状態を精度良く推定する必要がある。このためには、FRAPCON-2コード等を用いた通常照射中の挙動の詳細な評価が必要となり、特に燃料/被覆管ギャップとFPガス放出の評価が重要と考えられる。また、反応度事故時挙動についても、今回はFRACAS-Iモデルのみを用いたが、今後はRelocationモデルやFRACAS-IIモデルを用いて、その適応性を調べ、照射済み燃料の反応度事故に

における挙動評価の標準的手法の確立と必要なモデルの整備を進める必要がある。

謝辞

本研究を遂行するに当たりご指導を頂いた原子炉安全工学部の藤城俊夫次長ならびに反応度安全研究室の石島清見室長に感謝の意を表します。また、文書整理に協力頂いた千代田メイントナス（株）の黒沢義明氏を記して感謝します。

参考文献

- [1] T. Nakamura, M. Sobajima, H. Sasajima, M. Yoshinaga and T. Fujishiro, "Transient Performance of BWR Type Fuel at Burnup of 26 GWd/t under simulated RIA Conditions", SMiRT11 Transactions Vol. C, Tokyo Japan, Aug. 1991.
- [2] T. Nakamura et al., "Experimental Data Report for Test TS-1, Reactivity Initiated Accident Test in NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M 91-217.
- [3] T. Nakamura et al., "Experimental Data Report for Test TS-2, Reactivity Initiated Accident Test in NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M 93-006.
- [4] T. Nakamura et al., "Experimental Data Report for Test TS-3, Reactivity Initiated Accident Test in NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M, 93-183.
- [5] L. J. Seifken, et al., "FRAP-T6: A Computer Code for the Transient Analyusis of Oxide Fuel Rods", NUREG/CR-2148, EGG-2104, 1981.
- [6] 大西信秋 他, "軽水動力炉の事故時燃料挙動解析コード NSR-77", JAERI-M 82-050, 1982.
- [7] R. W. Miller, "THE EFFECTS OF BURNUP ON FUEL FAILURE 1.Power Burst Test on Low Burnup UO₂ Fuel Rods", IN-ITR-113, IDAHO NUCLEAR CORPORATION, July

における挙動評価の標準的手法の確立と必要なモデルの整備を進める必要がある。

謝辞

本研究を遂行するに当たりご指導を頂いた原子炉安全工学部の藤城俊夫次長ならびに反応度安全研究室の石島清見室長に感謝の意を表します。また、文書整理に協力頂いた千代田メイントナス（株）の黒沢義明氏を記して感謝します。

参考文献

- [1] T. Nakamura, M. Sobajima, H. Sasajima, M. Yoshinaga and T. Fujishiro, "Transient Performance of BWR Type Fuel at Burnup of 26 GWd/t under simulated RIA Conditions", SMiRT11 Transactions Vol. C, Tokyo Japan, Aug. 1991.
- [2] T. Nakamura et al., "Experimental Data Report for Test TS-1, Reactivity Initiated Accident Test in NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M 91-217.
- [3] T. Nakamura et al., "Experimental Data Report for Test TS-2, Reactivity Initiated Accident Test in NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M 93-006.
- [4] T. Nakamura et al., "Experimental Data Report for Test TS-3, Reactivity Initiated Accident Test in NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M, 93-183.
- [5] L. J. Seifken, et al., "FRAP-T6: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods", NUREG/CR-2148, EGG-2104, 1981.
- [6] 大西信秋 他, "軽水動力炉の事故時燃料挙動解析コード NSR-77", JAERI-M 82-050, 1982.
- [7] R. W. Miller, "THE EFFECTS OF BURNUP ON FUEL FAILURE 1.Power Burst Test on Low Burnup UO₂ Fuel Rods", IN-ITR-113, IDAHO NUCLEAR CORPORATION, July

おける挙動評価の標準的手法の確立と必要なモデルの整備を進める必要がある。

謝辞

本研究を遂行するに当たりご指導を頂いた原子炉安全工学部の藤城俊夫次長ならびに反応度安全研究室の石島清見室長に感謝の意を表します。また、文書整理に協力頂いた千代田メイントナス（株）の黒沢義明氏を記して感謝します。

参考文献

- [1] T. Nakamura, M. Sobajima, H. Sasajima, M. Yoshinaga and T. Fujishiro, "Transient Performance of BWR Type Fuel at Burnup of 26 GWd/t under simulated RIA Conditions", SMiRT11 Transactions Vol. C, Tokyo Japan, Aug. 1991.
- [2] T. Nakamura et al., "Experimental Data Report for Test TS-1, Reactivity Initiated Accident Test in NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M 91-217.
- [3] T. Nakamura et al., "Experimental Data Report for Test TS-2, Reactivity Initiated Accident Test in NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M 93-006.
- [4] T. Nakamura et al., "Experimental Data Report for Test TS-3, Reactivity Initiated Accident Test in NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M, 93-183.
- [5] L. J. Seifken, et al., "FRAP-T6: A Computer Code for the Transient Analyusis of Oxide Fuel Rods", NUREG/CR-2148, EGG-2104, 1981.
- [6] 大西信秋 他, "軽水動力炉の事故時燃料挙動解析コード NSR-77", JAERI-M 82-050, 1982.
- [7] R. W. Miller, "THE EFFECTS OF BURNUP ON FUEL FAILURE 1.Power Burst Test on Low Burnup UO₂ Fuel Rods", IN-ITR-113, IDAHO NUCLEAR CORPORATION, July

1970.

- [8] R. W. Miller, "THE EFFECTS OF BURNUP ON FUEL FAILURE Power Burst Tests on Fuel Rods with 13,000 and 32,000 MWd/MTU Burnup", ANCR-1280/TID-4500,R63, AEROJET NUCLEAR COMPANY, January 1976.
- [9] S. L. Seiffert, Z. R. Martinson and S. F. Fukuda, "Reactivity Initiated Accident Test Series Test RIA 1-1 (Radial Average Fuel Enthalpy of 285 cal/g) Fuel Behavior Report, NUREG/CR-1465/EGG-2040, Idaho National Engineering Laboratory, September 1980.
- [10] B. A. Cook, S. K. Fukuda, Z. R. Martinson and P. Bott-Hembree, "Reactivity Initiated Accident Test Series Test RIA 1-2 Fuel Behavior Report", NUREG/CR-1842/EGG-2073, Idaho National Engineering Laboratory, January 1981.
- [11] Y. Tsuchie, T. Kodama and Tsuruga Fuel PIE Team, "Post Irradiation Examination of Tsuruga Fuel Using Cladding Tubes Manufactured in Japan", Journal of the Atomic Energy Society of Japan (in Japanese), Vol. 29, No. 3, pp 219-243, 1987.
- [12] Y. Tsuchie and K. Iwamoto, "Post-irradiation Examination (PIE) of Tsuruga Fuel", IAEA Specialists' Meeting on Examination of Fuel Assembly for Water Cooled Power Reactor, IWGFPT/12, pp 221-243, 1981.
- [13] Y. Tsuchie and T. Kodama, "Post-irradiation Examination (PIE) of Tsuruga Fuel, Part 2", IAEA Specialists' Meeting on Post- Irradiation Examination and Experience, IWGFPT/22, pp 123-157, IWGFPT/22, 1985.
- [14] Y. Tsuchie and K. Iwamoto, "STUDY OF LWR FUEL BEHAVIOR BY CHARACTERIZED TESTS PART II Post-irradiation Examination and Its Related Analysis of Tsuruga Fuel", ANS Topical Meeting on LWR Extended Burnup-Fuel Performance and utilization, pp 2-87 - 2-95, Williamsburg, Virginia, U.S.A., 1982.
- [15] S. Saito, et al., "Effects of Rod pre-Pressurization on Light Water Reactor Fuel Behavior during Reactivity Initiated Accident Conditions", Journal of Nuclear Science and Technology,

19[4], pp289~306, 1982.

[16] 反応度安全研究室・NSRR管理室, "NSRR実験プログレス・レポート・20(1988年1月～1989年3月)", JAERI-M 92-049, 1992.

[17] 本間功三 他, "照射済燃料を用いたSRERT及びPBF・RIA実験における燃料破損挙動の再評価", JAERI-M 02-044, 1992.

[18] T. Nakajima et al., "FMAXI-III:A Computer Code for Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods", JAERI 1298, 1985.

[19] 斎藤裕明 他, "燃料ふるまい解析コードFEMAXI-IIIの開発的検証と入出力", JAERI-M 83-056, 1983.

[20] K. Ito et al., "A Comparison of FEMAXI-III Code Calculations with Irradiation Experiments", Res Mechanica 2, 109-121 ,1981.

[21] R. A. Lorenz and G. W. Parker, "Calculation of Amount of Radioactivity in Fuel Rod Void Spaces", Nuclear Safety Program Annual Progress Report for Period Ending December 31, 1967, ORNL-4228, 1968.

[22] 中村武彦 他, "NSRR実験における照射溶融化ウラン燃料の発熱量の検討", JAERI-M 準備中.

[23] 大西信秋, "軽水炉の事故時の燃料挙動解析コードMCDRAN-I", JAERI-M 8634. 1980.

[24] K. Ishijima, "Measurement and Preliminary Analysis on Transient Cladding Deformation during Reactivity Initiated Accident Conditions", Jounal of Nuclear Science and Technology Vol. 22, No. 2, pp.81~92, M. 1985.

[25] 藤城俊夫, "反応度事故条件下における軽水炉燃料のギャップ熱伝達の研究", JAERI-M 84-063, 1984.

- [26] K. Ishijima and T. Nakamura, "Measurement of Transient Elongation of a Fuel Rod under reactivity Initiated Accident Conditions and Preliminary Analysis", d-26, ICONE-1, Tokyo, 1991.
- [27] D. L. Hagrman et al., "MATPRO Version11 (Revision 2), A Handbook of Material Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior", NUREG/CR-0479, TREE-1280, Rev.2 R3 and R4, EG&G Idaho, 1981.
- [28] T. Fujishiro et al., "Transient fuel behavior of Preirradiated PWR fuels under Reactivity Initiated Accident Conditions", J. of Nucl. Mat. 188(1992)162-167.

Table 1 Major characteristics of the BWR test fuel rods for TS tests

Career	Fuel type	BWR 7x7
	Irradiation site	Tsuruga unit 1
	Period of irradiation	1972~1978
	Bundle No./Rod No.	JAB73/B6
	Burnup (Bundle average)	21.3GWd/tU
	(Rod average)	22.0GWd/tU
Test Fuel Rod	Type of pellet	Dished, No-additives
	Pellet o.d.	12.37mm (nominal)
	Pellet length	21.0mm (nominal)
	Fuel stack length	126.0mm (nominal)
	Burnup (local)	26.0GWd/tU
	Enrichment (^{235}U)	2.79% (initial)
		0.87% (at 26GWd/tU ¹⁾)
	(fissile)	1.41% (at 26GWd/tU ¹⁾)
	Cladding o.d.	14.3mm
	Cladding thickness	0.81mm
	Pin pressure	1.1 MPa
	Filled gas composition	Xe/Kr/He=77.9/11.3/10.8(TS-1, 2, 4) He=100 (TS-3) Xe/Kr/He=72.0/9.3/18.7(TS-5)

1) Estimated with ORIGEN-2 code for fuel at a burnup of 26GWd/tU.

Table 2 Summary of irradiated BWR fuel rod test results

Test No.	TS-1	TS-2	TS-3	TS-4	TS-5
Fill Gas	Mixture ¹⁾ 1.1MPa	Mixture ¹⁾ 1.1MPa	He ²⁾ 1.1MPa	Mixture ¹⁾ 1.1MPa	Mixture ¹⁾ 1.1MPa
Peak Fuel Enthalpy, J(cal)/g·fuel	230 (55)	275±21 (66±5)	366 (88)	370 (89)	410 (98)
Max. Cladding Surface Temperature (°C)	383 (110)	383 (110)	393 (120)	423 (150)	443 (170)
Max. Water Temperature (°C)	313 (40)	308 (35)	314 (41)	315 (42)	355 (82)
Peak Fuel Rod Internal Pressure Increase (MPa)	NM	0.98	0.95	NM	1.5
Peak Pellet Stack Elongation (mm)	NM	NM	0.71 (0.56%)	0.70 (0.56%)	NM
Peak Cladding Elongation (mm)	NM	0.26 (0.2%)	0.05 (0.04%)	0.55 (0.44%)	0.55 (0.44%)
Fission Gas Release, %	NM	12±7	10±1	15±5	8±3
Failure	No	No	No	No	No

1) A mixture gas of Xe/Kr/He:77.9/11.3/10.8(Xe/Kr/He:72.0/9.3/18.7 in Test TS-5 fuel rod), simulating the EOL gap gas of the mother rod, was charged in the test fuel rod.

2) Pure helium gas was charged in the test fuel rod in Test TS-3 to evaluate the transient gas releases accurately.

NM : Not measured.

Table 3 Axial distributions of Linear Heat Rate (LHR), fuel burnup and Fission Gas Release (FGR)

Axial Section			LHR, kW/m	Burnup, GWd/tU	FGR, %			
No.	Elevation, mm							
	Bottom	Top						
1	0	102	13.6	7.5	0.2			
2	102	194	15.8	8.7	0.2			
3	194	285	25.1	13.8	0.4			
4	285	459	31.6	17.3	1.9			
5	459	595	39.1	21.5	8.6			
6	595	744	43.1	23.6	15.8			
7	744	2630	47.4	26.0	26.7			
8	2630	2997	43.1	23.6	15.8			
9	2997	3177	39.1	21.5	8.6			
10	3177	3327	31.6	17.3	1.9			
11	3327	3480	25.1	13.8	0.4			
12	3480	3593	15.8	8.7	0.2			
13	3593	3670	7.9	4.3	0.2			
ave.	0	3670	35.0	22.0	19.7			

Table 4 End of base irradiation conditions of tested fuel rod obtained by post irradiation examinations and FRAP-T6 simulation

	Initial Condition		End of Base Irradiation	
	PIE	FRAP-T6 ¹⁾	PIE	FRAP-T6 ¹⁾
Pellet Stack Length, mm	3657	126	3670	126
Free Gas Volume, cm ³	32.6 (Gas Plenum Only)	6.9	63.7 (6.8-7.4 for segment fuel rods)	7.4
Gap Gas Pressure ²⁾ , MPa	0.1	0.8	1.1	1.2
Gap Gas Composition, % (He)	100	30	18.1	20.4
(Xe)	0	70	71.9	79.6
(Kr)	0	0	8.6	0
FGR at Peak Power Pellet, %	0	0	30.9 ³⁾	28.3
Radial Gap Width, mm	155	155	~70	58 ⁴⁾ 74 ⁵⁾
Oxide Thickness, μm (Outer Surface)	0	0	Uniform: ≤ 6 Nodular: ≤ 63	Uniform: 3
(Inner Surface)	0	0	≤ 6	3
Cladding Outer Surface Radial Displacement, μm	0	0	$\leq +20$ ≤ -40	-1.6

1) FRAP-T6 simulation of the base irradiation was conducted for a segmented test fuel rod under a condition of linear heat rate (LHR) of 47kW/m, coolant temperature of 288°C, system pressure of 7.2MPa, and flow velocity of 5m/s.

2) At the room temperature.

3) Fractional Gas Release (FGR) from peak power pellets was estimated from the rod average gas release rate of 19.7% evaluated from the gas puncturing test and the correlation of FGR to LHR in Ref. 20.

4) Structural gap estimated by FRAP-T6[5].

5) Thermal gap estimated by FRAP-T6[5].

Table 5 Summary of FRAP-T6 simulation on TS tests

	TS-1	TS-2	TS-3	TS-4	TS-5 with shroud	TS-5 without shroud
Peak Fuel Enthalpy, J(cal)/g-fuel	241 (58)	266-295 (64-71)	366 (88)	370 (89)	408 (98)	408 (98)
Fuel Center Temperature K (°C)	1182 (909)	1268-1405 (995)-(1132)	1617 (1344)	1627 (1354)	1723 (1450)	1722 (1449)
Fuel Surface Temperature K (°C)	1124 (851)	1202-1330 (929)-(1057)	1541 (1268)	1545 (1272)	1645 (1372)	1646 (1373)
Clad Surface Temperature K (°C)	398 (125)	400-410 (127)-(137)	425 (152)	426 (153)	725 (452)	429 (156)
Pellet Stack Elongation mm (%)	1.18 (0.94)	1.32-1.54 (1.04)-(1.22)	1.89 (1.50)	1.90 (1.51)	2.06 (1.63)	2.06 (1.63)
Clad Elongation mm (%)	0.23 (0.18)	0.23-0.58 (0.18)-(0.46)	0.91 (0.72)	0.94 (0.75)	1.00 (0.79)	1.1 (0.87)
Clad Hoop Stress MPa	8.5	8.6-133	428	437	643	586
Clad Axial Stress MPa	3.9	4.0-256	530	551	724	694
Fuel Internal Pressure MPa	1.33	1.34-1.36	1.40	1.40	1.48	1.43
Transient FP Gas Release %	0.8	1.3-1.7	4.2	4.4	6.2	6.10

Table 5 (Continued)

	TS-1	TS-2	TS-3	TS-4	TS-5 with shroud	TS-5 without shroud
Peak Fuel Enthalpy, J(cal)/g:fuel	241 (58)	266-295 (64-71)	366 (88)	370 (89)	408 (98)	408 (98)
Fuel Center Peak Temperature, K (°C)	1182 (909)	1268-1405 (995)-(1132)	1617 (1344)	1627 (1354)	1723 (1450)	1722 (1449)
Fuel Surface Peak Temperature, K (°C)	1124 (851)	1202-1330 (929)-(1057)	1541 (1268)	1545 (1272)	1645 (1372)	1646 (1373)
Clad Surface Peak Temperature, K (°C)	398 (125)	400-410 (127)-(137)	425 (152)	426 (153)	725 (452)	429 (156)
Pellet Stack Peak Elongation, mm (%)	1.18 (0.94)	1.32-1.54 (1.04)-(1.22)	1.89 (1.50)	1.90 (1.51)	2.06 (1.63)	2.06 (1.63)
Clad Peak Elongation, mm (%)	0.23 (0.18)	0.23-0.58 (0.18)-(0.46)	0.91 (0.72)	0.94 (0.75)	1.00 (0.79)	1.1 (0.87)
Peak Clad Hoop Stress, MPa	8.5	8.6-133	428	437	643	586
Peak Clad Axial Stress, MPa	3.9	4.0-256	530	551	724	694
Peak Fuel Internal Pressure, MPa	1.33	1.34-1.36	1.40	1.40	1.48	1.43
Transient FP Gas Release, %	0.8	1.3-1.7	4.2	4.4	6.2	6.10

Table 6 Summary of NSR77 simulation results on TS tests

Test No.	TS-3			TS-4			550-1	
Gap Gas ¹⁾	He			Xe/Kr/He ²⁾			Xe/Kr/He ²⁾	He
Reactivity Insertion, \$	4.3						2.8	
Gap Width, μm	155	70	40	155	70	40	155	
Fuel Enthalpy ³⁾ , J/g (cal/g)	336 (80.3)	327 (78.0)	327 (78.0)	352 (84.0)	327 (78.3)	324 (77.5)	423 (101.1)	379 (90.5)
Fuel Centerline Temp. ³⁾ , K ($^{\circ}\text{C}$)	1473 (1200)	1473 (1200)	1463 (1190)	1473 (1200)	1463 (1190)	1423 (1150)	1723 (1450)	1693 (1420)
Fuel Surface Temp. ³⁾ , K ($^{\circ}\text{C}$)	1373 (1100)	1123 (850)	873 (600)	1403 (1130)	1313 (1040)	1063 (790)	1673 (1400)	1483 (1210)
Cladding Inner Surface Temp. ³⁾ , K ($^{\circ}\text{C}$)	493 (220)	673 (400)	723 (450)	413 (140)	553 (280)	673 (400)	403 (130)	533 (260)
Cladding Outer Surface Temp. ³⁾ , K ($^{\circ}\text{C}$)	393 (120)	393 (120)	413 (140)	383 (110)	393 (120)	393 (120)	383 (110)	383 (110)
Fuel Stack Elongation ³⁾ , mm (%)	1.62 (1.29)	1.60 (1.27)	1.60 (1.27)	1.60 (1.27)	1.55 (1.23)	1.53 (1.21)	2.04 (1.62)	1.96 (1.56)
Cladding Elongation ³⁾ , mm (%)	0.116 (0.09)	0.186 (0.15)	0.83 (0.66)	0.075 (0.06)	0.117 (0.09)	0.77 (0.61)	0.08 (0.06)	0.13 (0.10)
Cladding Hoop Stress ³⁾ , MPa	9.1	113	660	9.1	100	640	9.2	9.2
Cladding Axial Stress ³⁾ , MPa	4.2	137	760	4.2	122	700	4.3	4.3

1) At a pressure of 1.1MPa.

2) At a gas composition of Xe/Kr/He:77.9/11.3/10.8.

3) Peak values by the pulse irradiation.

Table 7 Estimated internal pressure increase of a commercial fuel rod under hypothetical RIA conditions at peak fuel enthalpy of about 100 cal/g•fuel

	Segment Rod (Test No. TS-5)	Commercial Rod (under Hypothetical RIA)
Burnup ¹⁾ , GWd/tU	26	22
Free Gas Volume, cm ³	7	63.7
Stack Length, cm	12.6	367
FGR by Pulse Irradiation, %	10	10^2
Fission Gas Inventory, mols	4.58×10^{-4} (Kr) 4.21×10^{-3} (Xe)	1.16×10^{-2} (Kr) 1.02×10^{-1} (Xe)
Released Fission Gas, mols	4.67×10^{-4} (Kr+Xe)	1.14×10^{-2} (Kr+Xe)
Estimated Peak Fuel Temperature, K	1700	$1700^2)$
Pressure Increase ³⁾ (Estimated), MPa	0.9	2.5
Pressure Increase (Measured ⁴⁾), MPa	1.5	—

- 1) Rod average burnup.
- 2) Assumed.
- 3) Equilibrium pressure increase by the released gas at the temperature shown in upper row.
- 4) Transient pressure increase measured in the TS test.

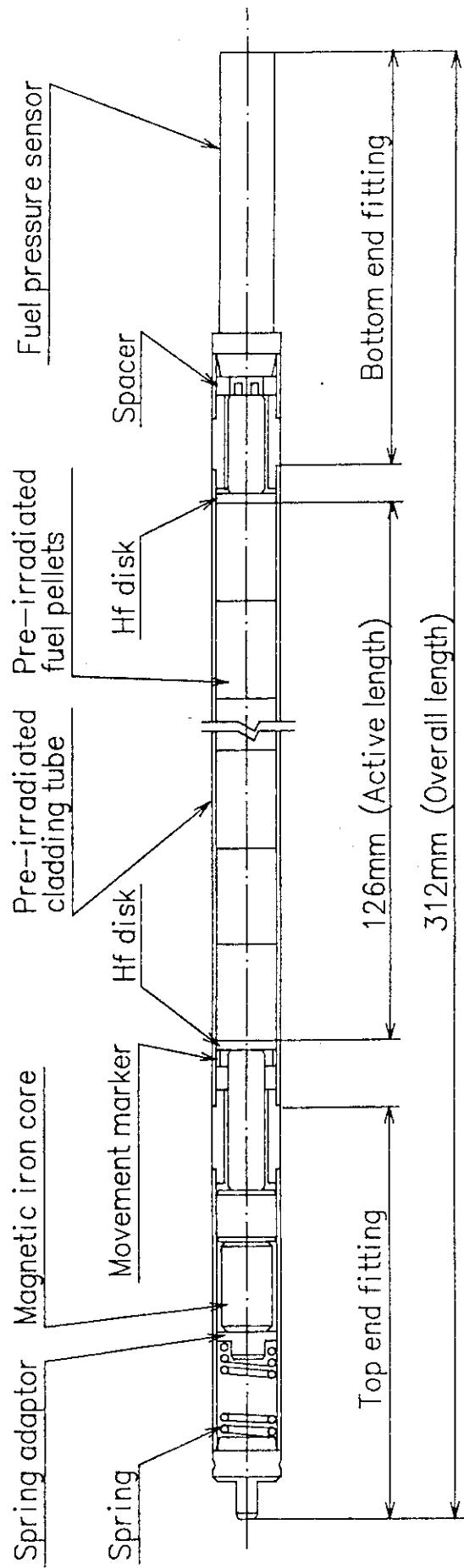


Fig. 1 Schematic configuration of the pre-irradiated BWR fuel rod for the TS tests.

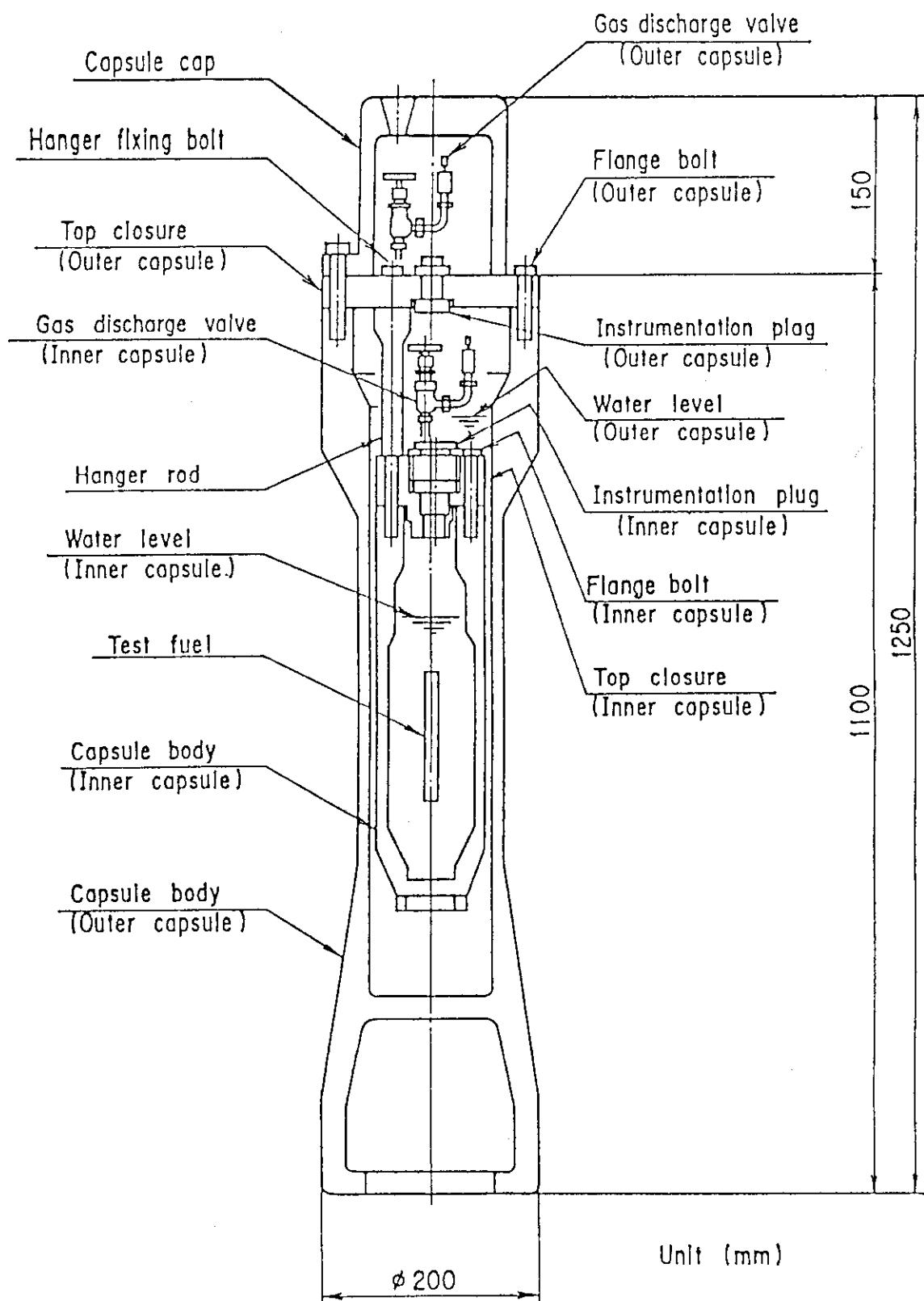


Fig. 2 Schematic configuration of the test capsule for the NSRR pre-irradiated BWR fuel rod tests.

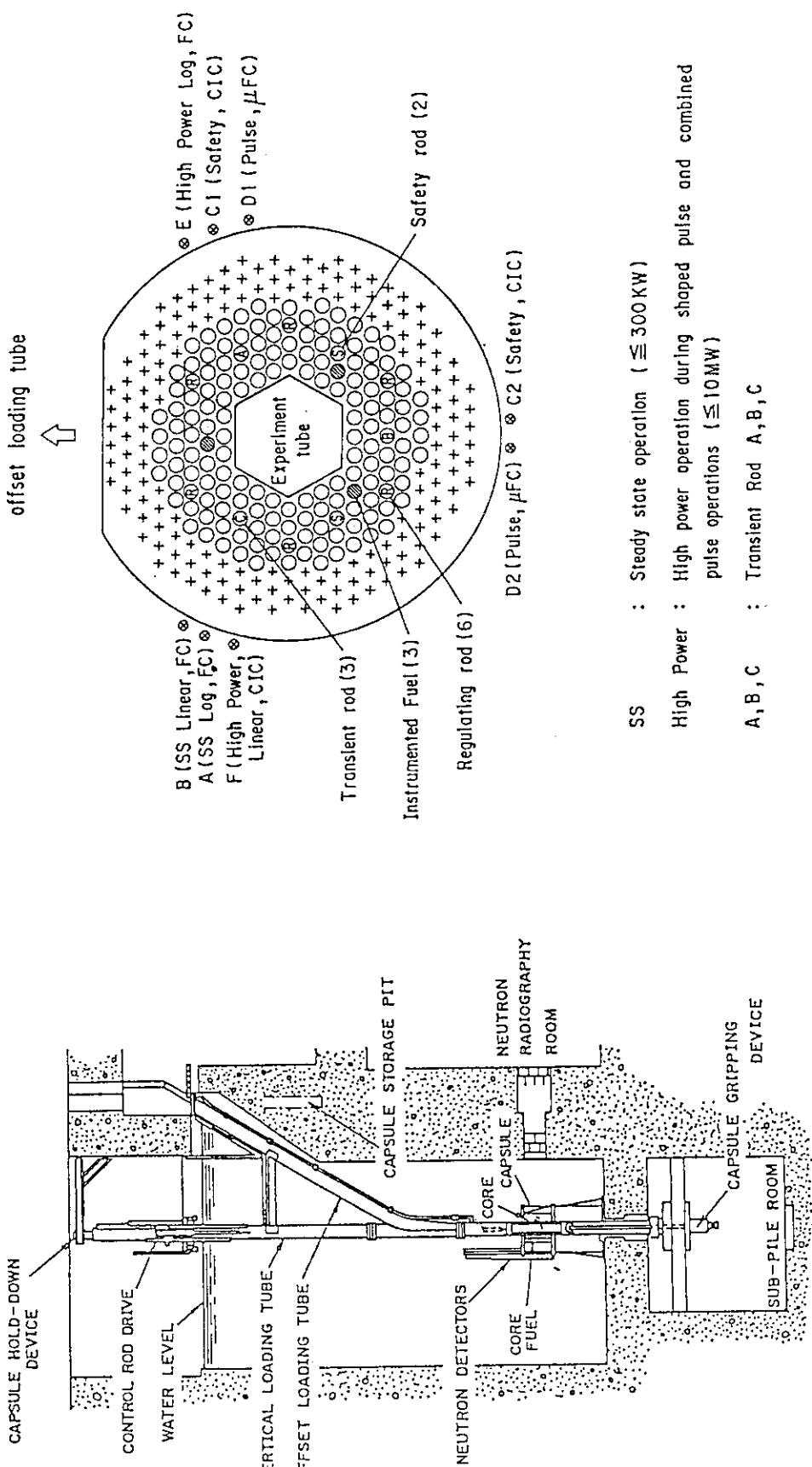


Fig. 3 Configuration of the NSRR.

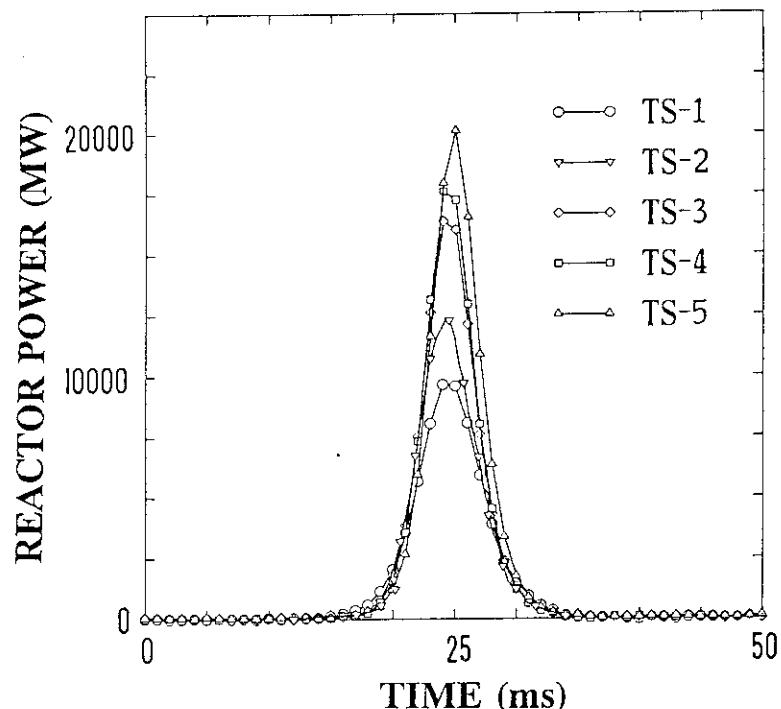


Fig. 4 Reactor power histories in the TS tests.

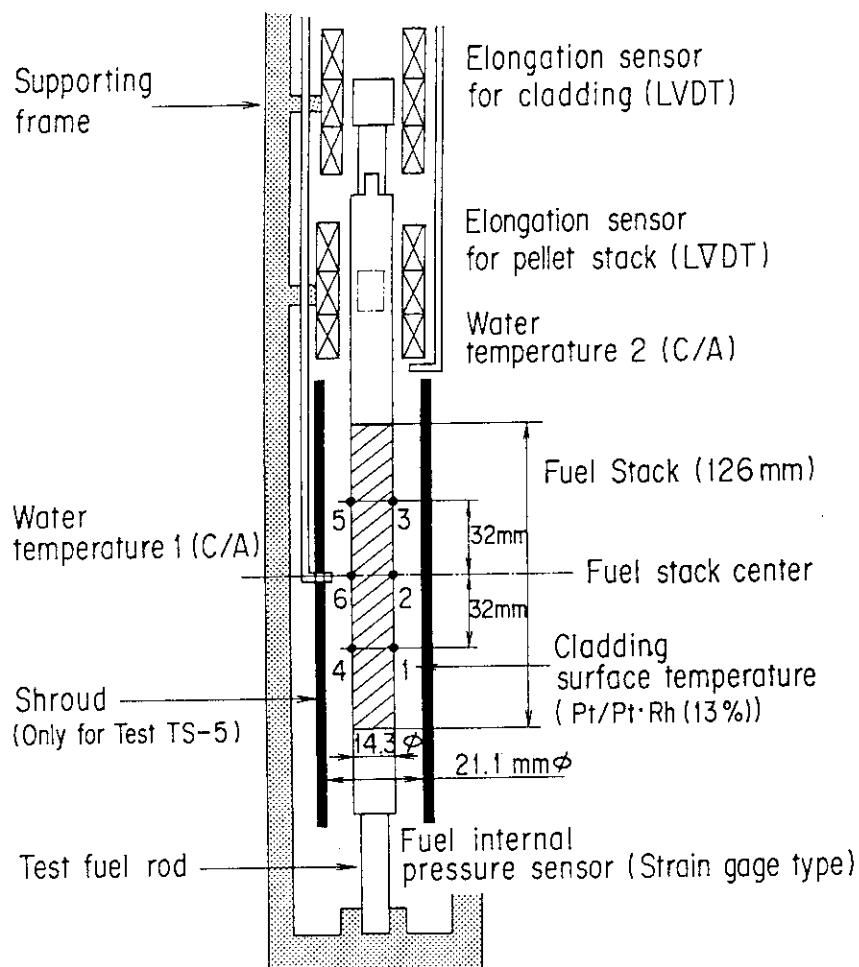


Fig. 5 Test arrangement and instrumentation in TS tests.

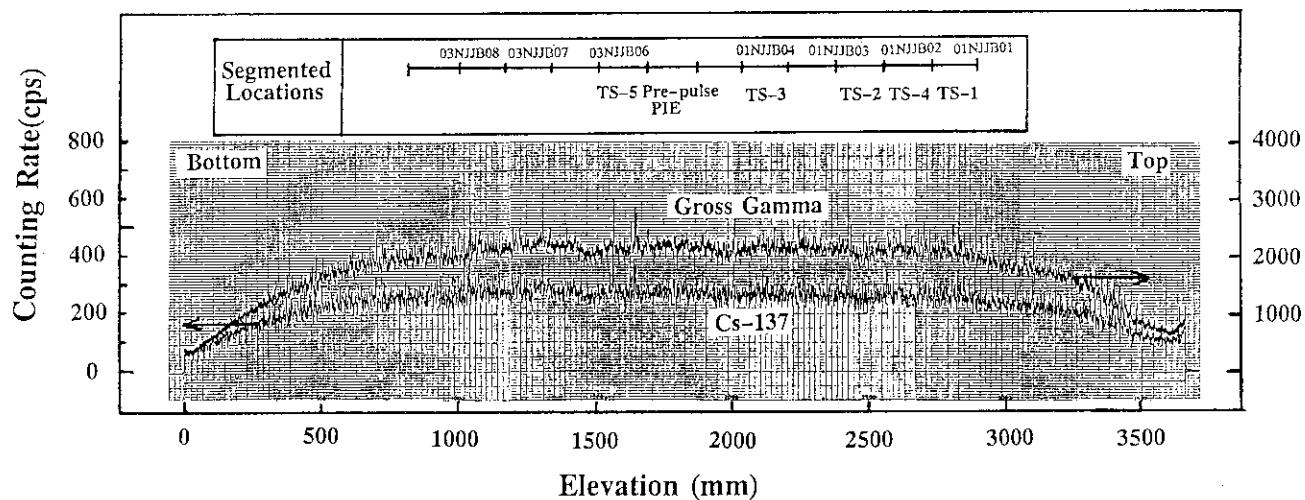


Fig. 6 Gamma scanning profiles of the commercial BWR fuel rod and the locations of the segments for the NSRR TS tests.

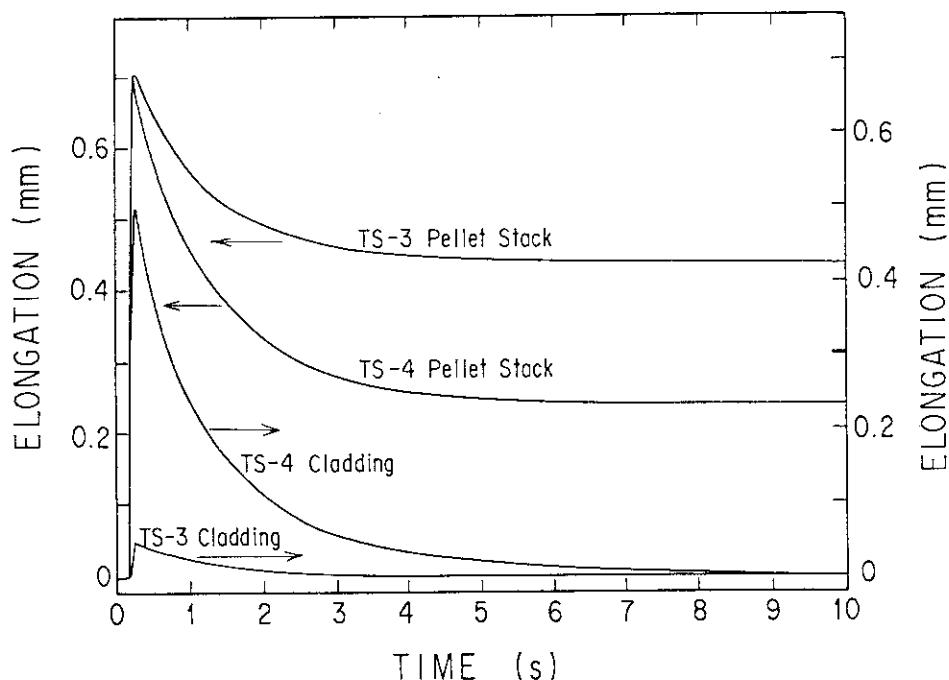


Fig. 7 Elongation histories of fuel stack and cladding in Tests TS-3 and TS-4.

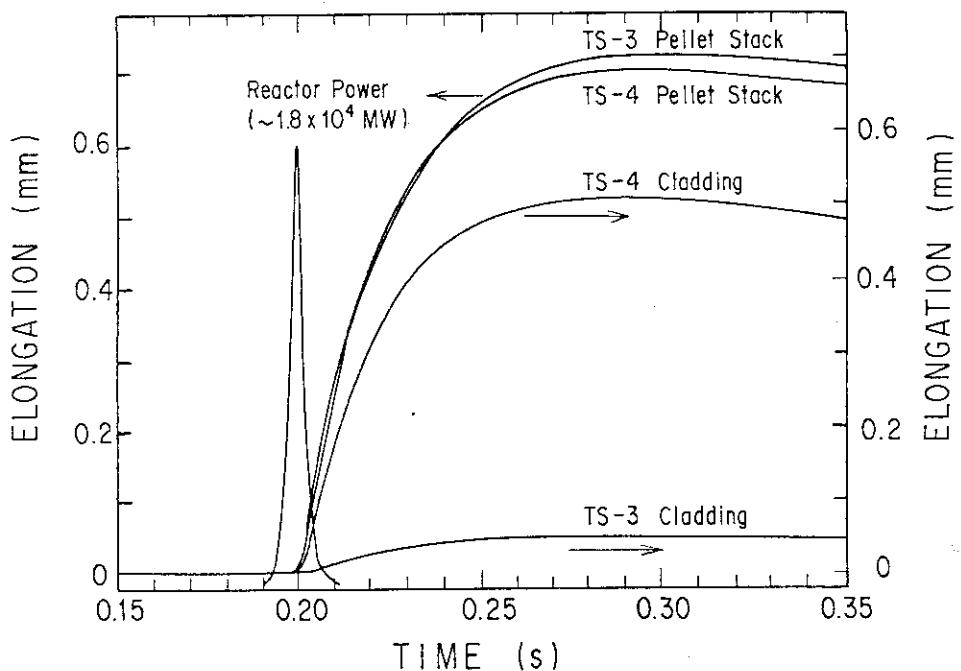


Fig. 8 Expanded view of the elongation histories during the pulse irradiation in Tests TS-3 and TS-4.

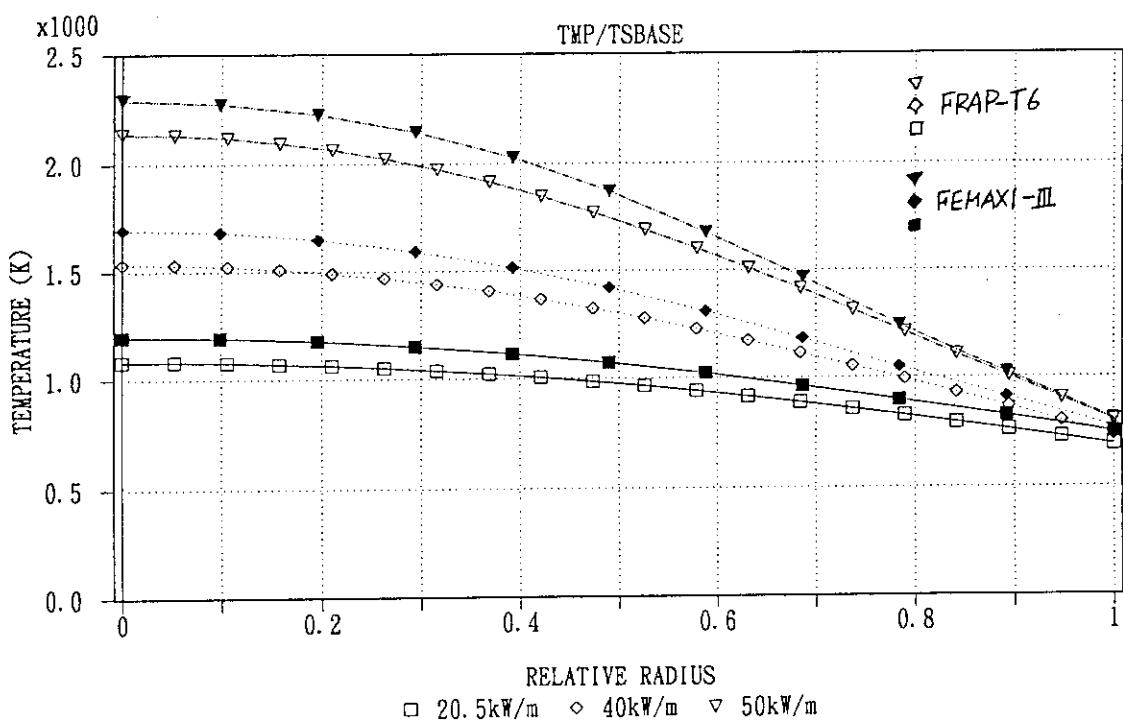


Fig. 9 Radial temperature profiles of the BWR fuel rod during the base irradiation in the commercial reactor estimated with FRAP-T6 and FEMAXI-III codes.

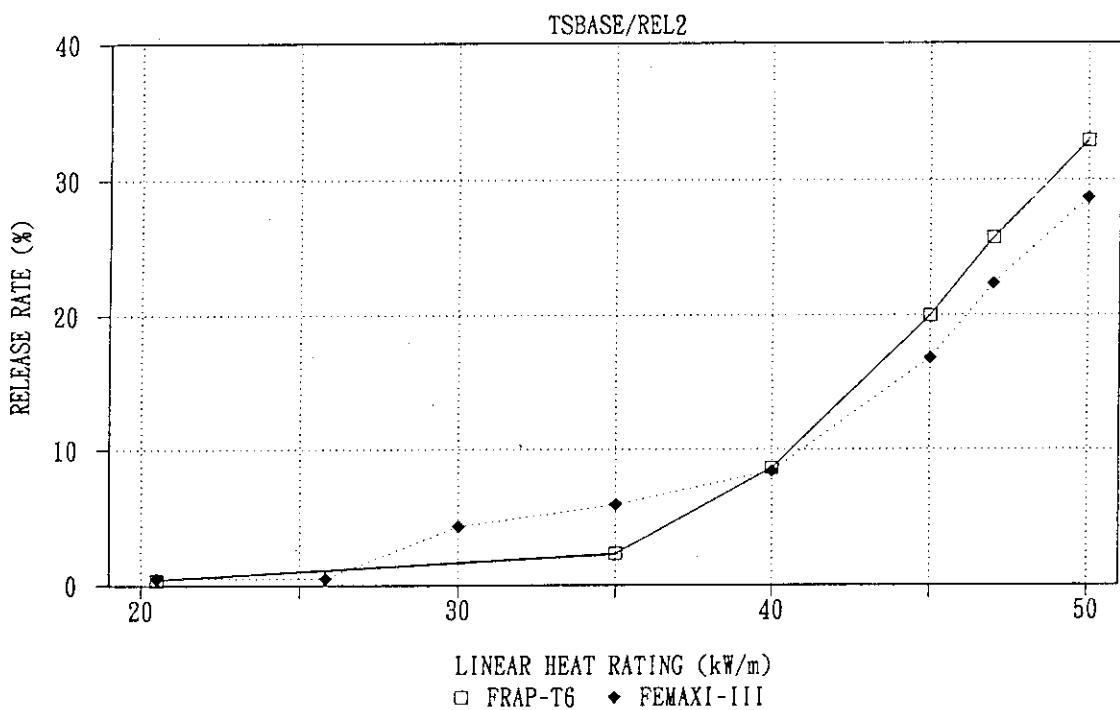


Fig. 10 Fission gas release as a function of linear heat rate during the base irradiation estimated with FRAP-T6 and FEMAX-III.

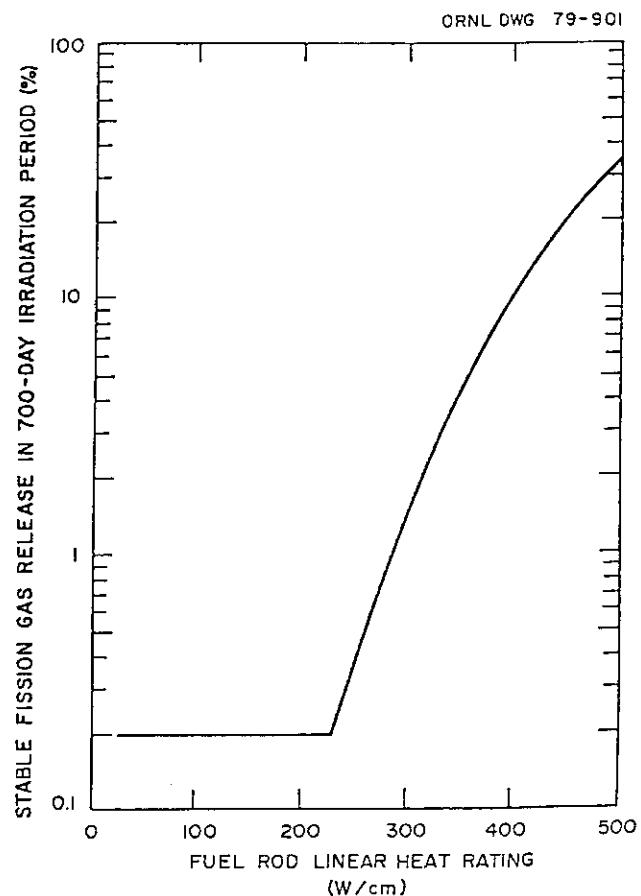


Fig. 11 Stable fission gas release estimated as a function of linear heat rating. [21]

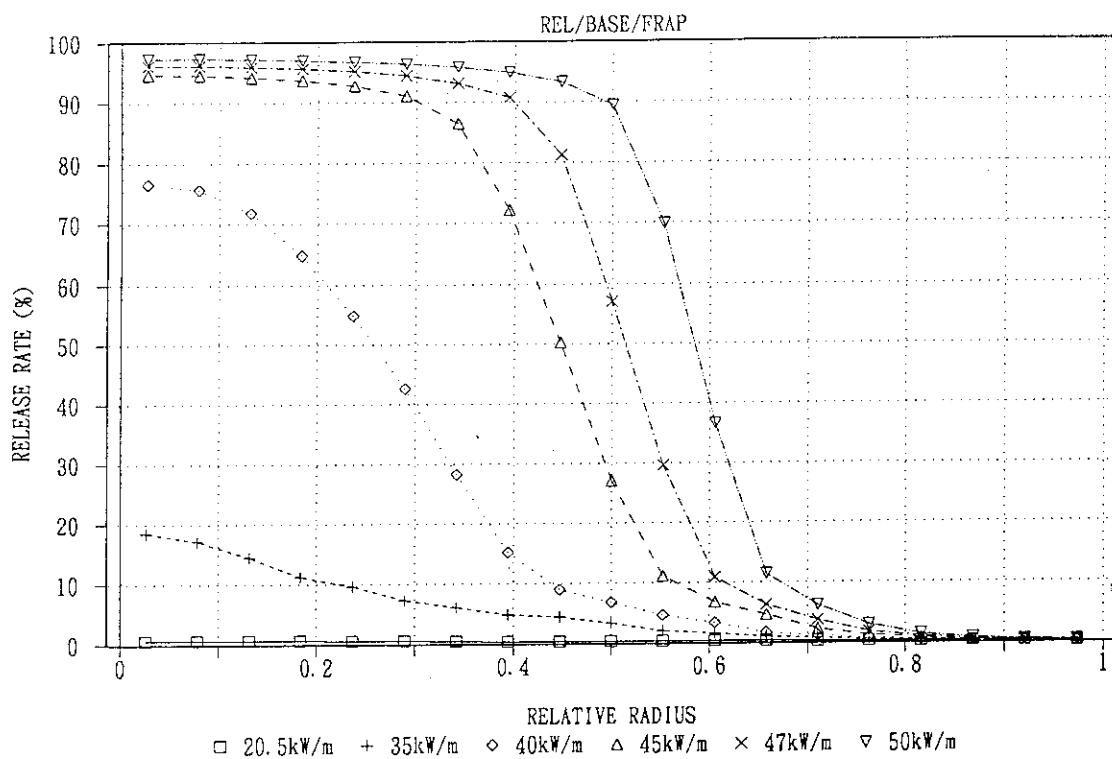


Fig. 12 Radial profiles of fission gas release fraction at several linear heat rates estimated with FRAP-T6.

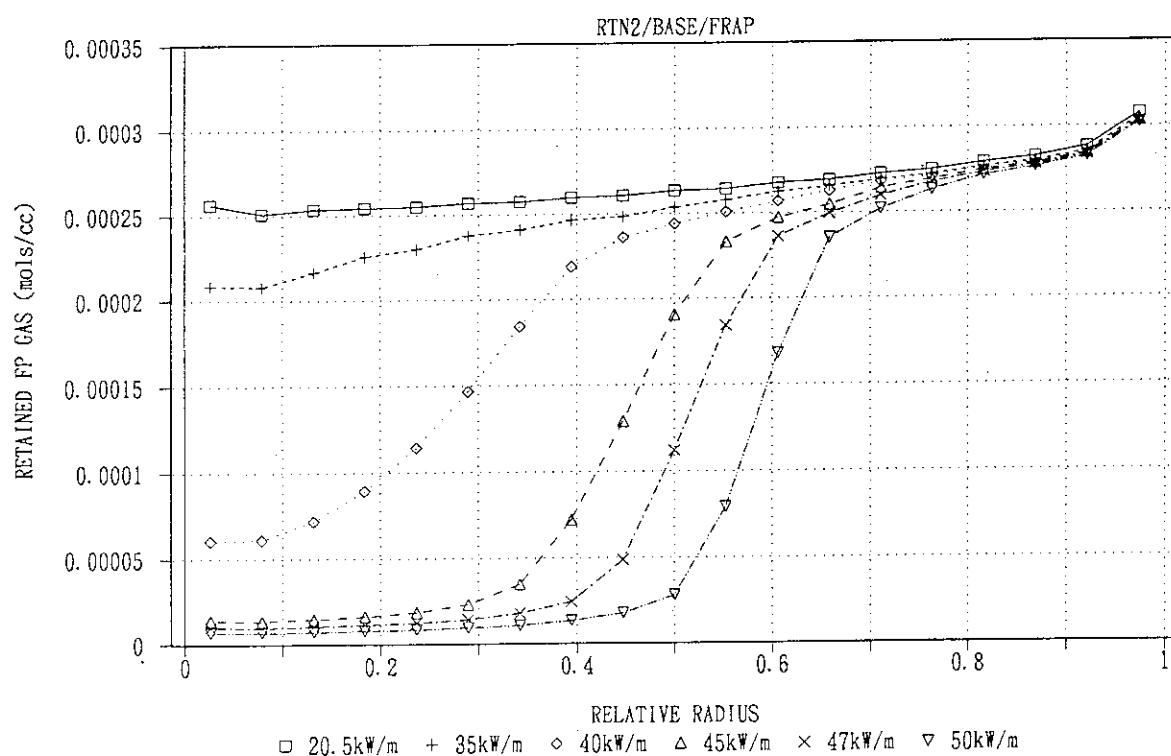


Fig. 13 Radial profiles of the retained fission gas concentration at several linear heat rates estimated with FRAP-T6.

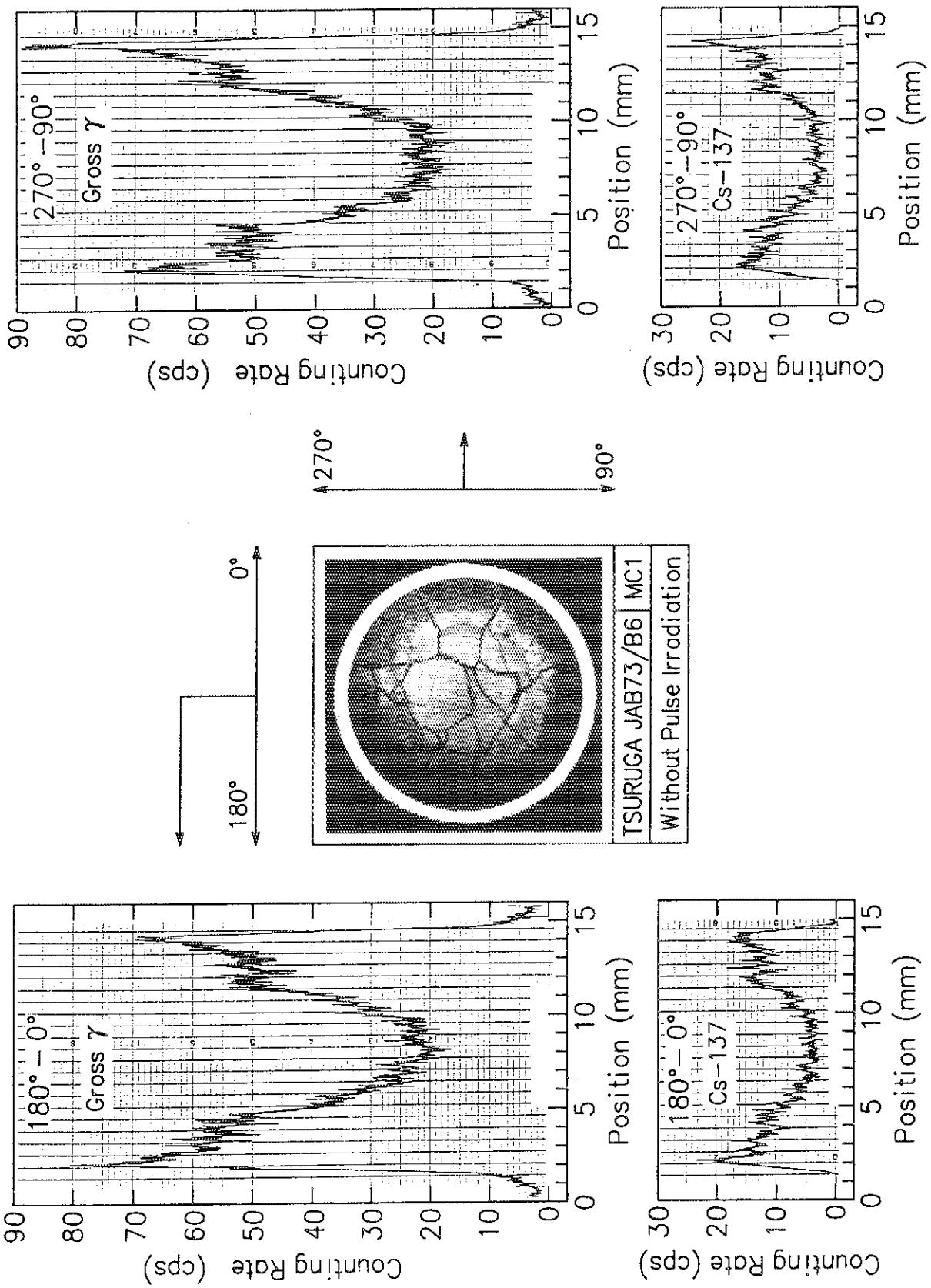


Fig. 14 Radial profiles of ^{137}Cs in the irradiated BWR fuel before the pulse irradiation in the NSRR.

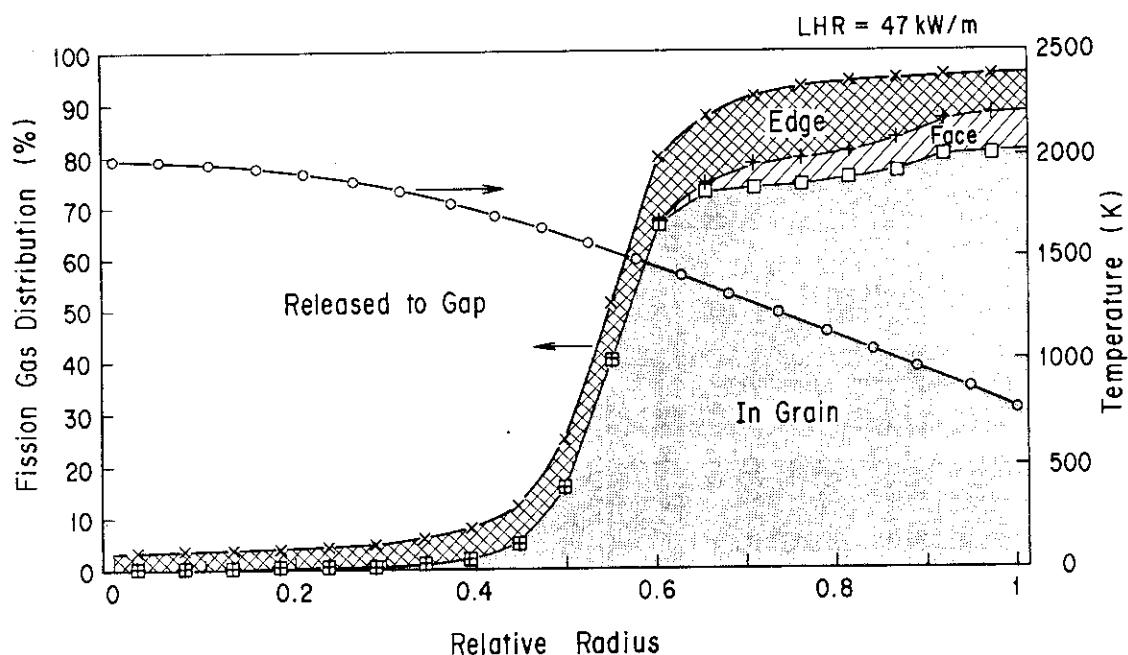


Fig. 15 Fission gas and temperature distribution at the end of base irradiation estimated by FRAP-T6 at a linear heat rating of 47 kW/m.

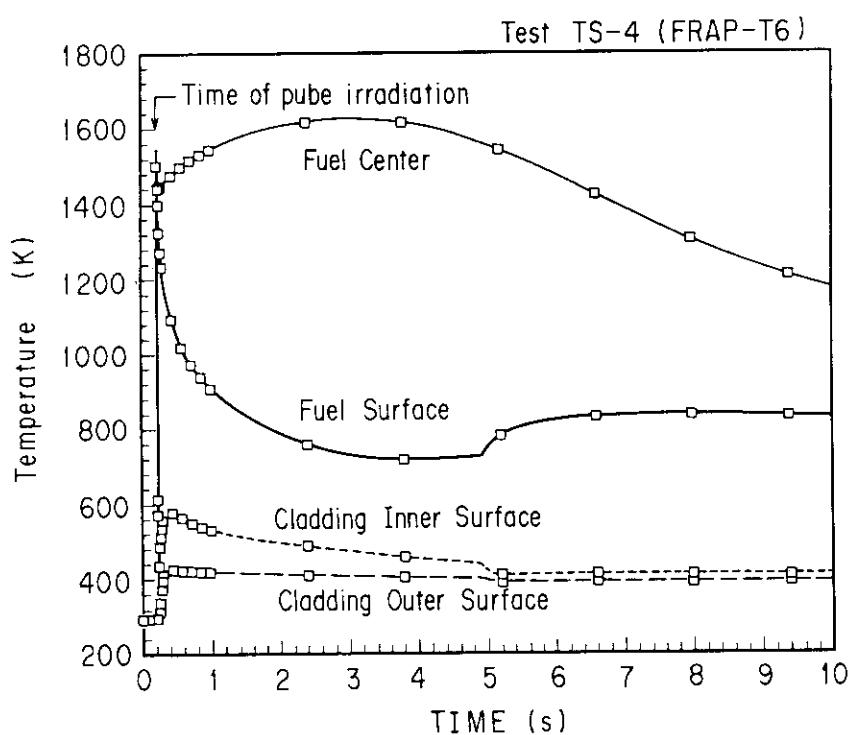


Fig. 16 Fuel rod temperature histories in TS-4 simulated by FRAP-T6.

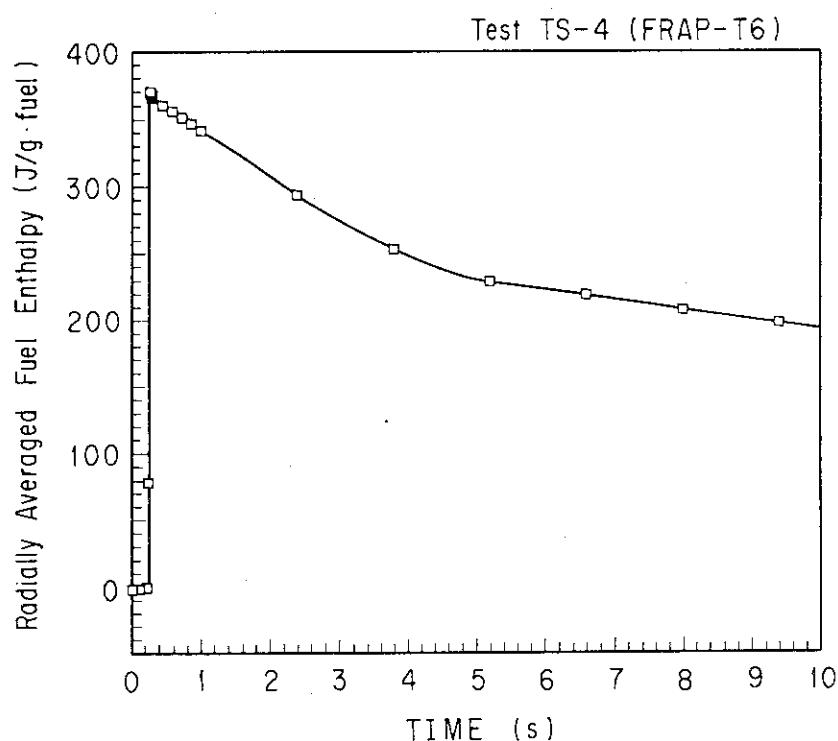


Fig. 17 Fuel enthalpy history by pulse irradiation in TS-4 simulated by FRAP-T6.

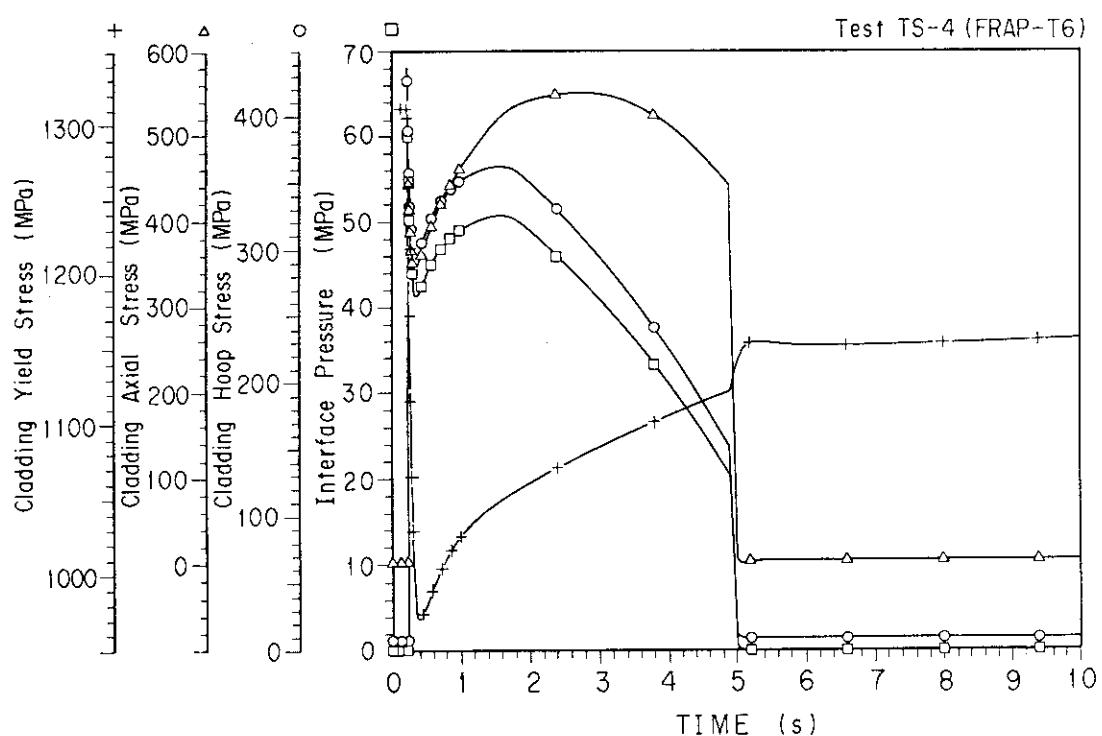


Fig. 18 Cladding stress histories in Test TS-4 simulated by FRAP-T6.

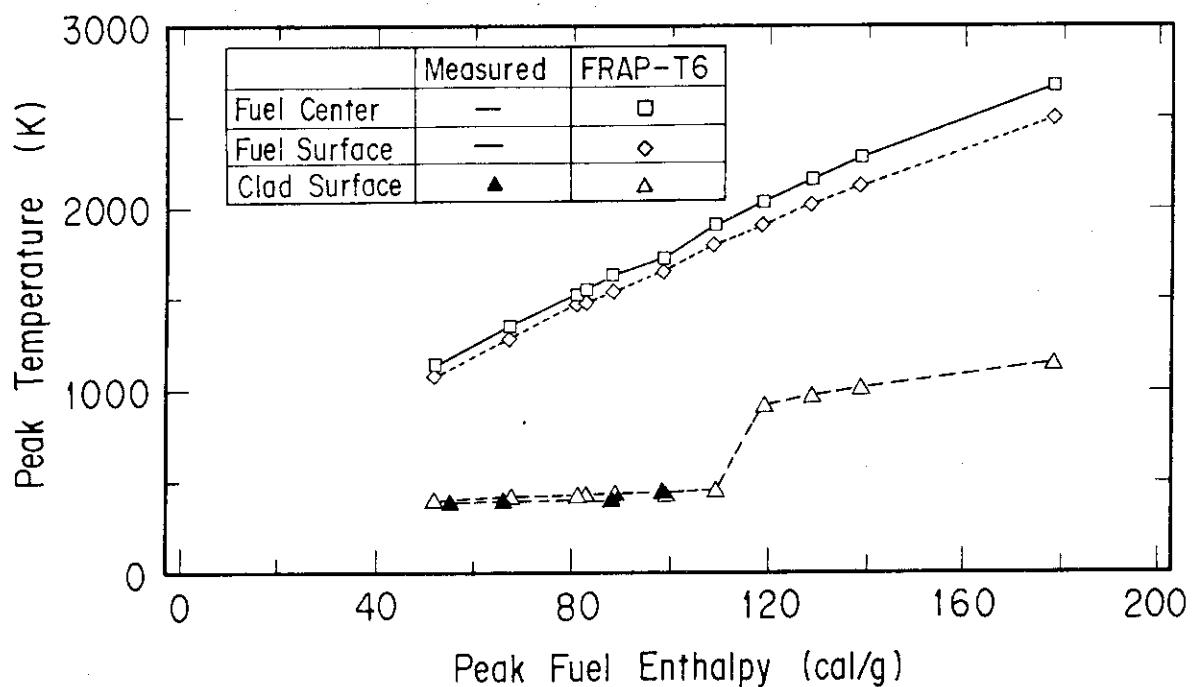


Fig. 19 Peak temperatures by pulse irradiations in TS tests.
(Measured/FRAP-T6 simulation)

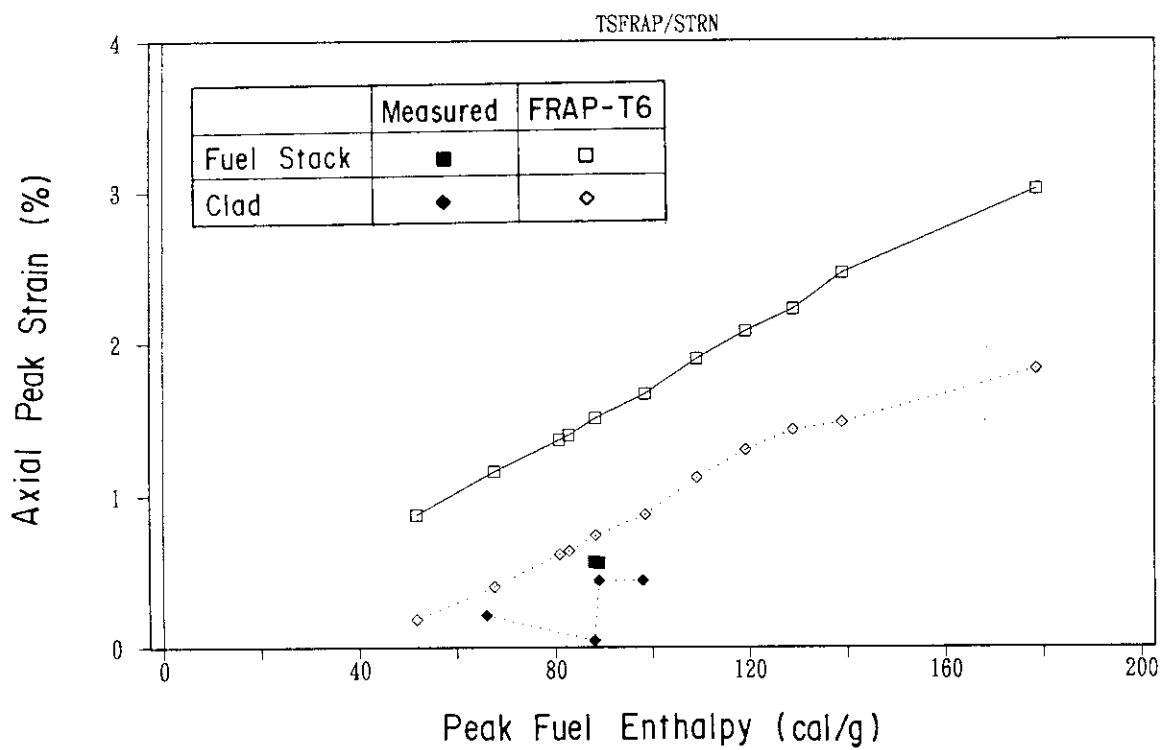


Fig. 20 Fuel and cladding strain caused by pulse irradiations in TS tests.
(Measured/FRAP-T6 simulation)

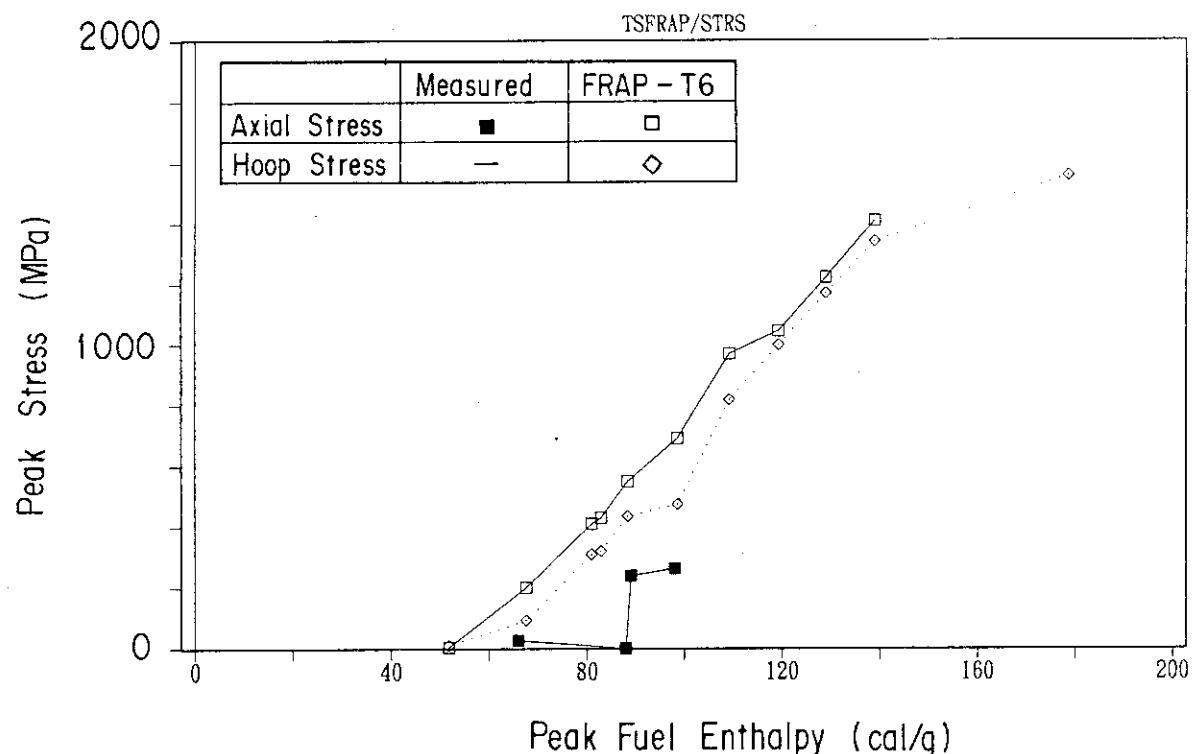


Fig. 21 Estimated cladding stress in TS test (Measured/FRAP-T6)
Axial stress in the test are estimated from the measured axial strain.

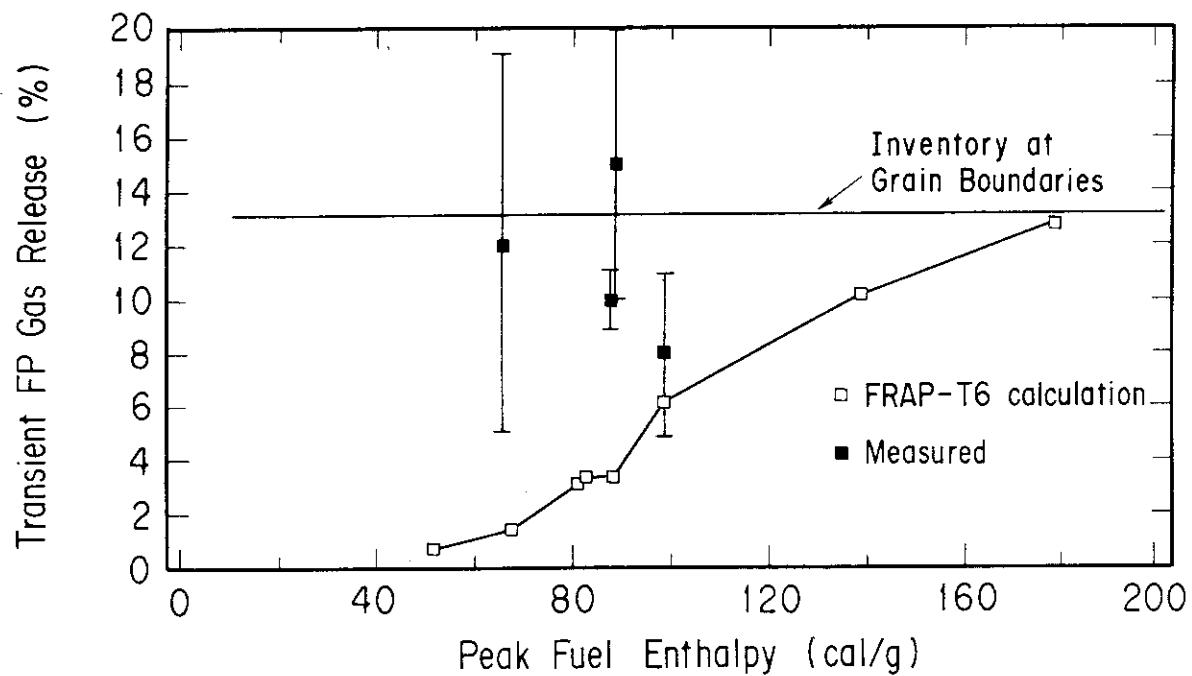


Fig. 22 Fission gas release by pulse irradiations in TS tests.
(Measured/FRAP-T6 simulation)

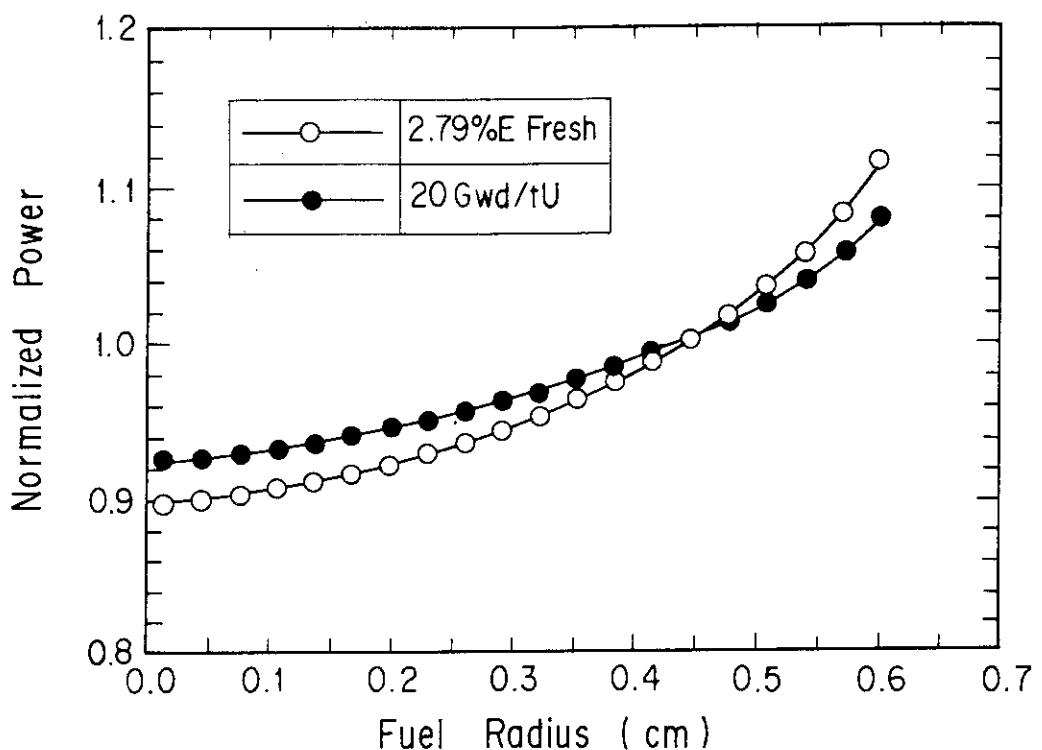


Fig. 23 Radial power distributions in 7×7 BWR type fuel by pulse irradiation in NSRR.

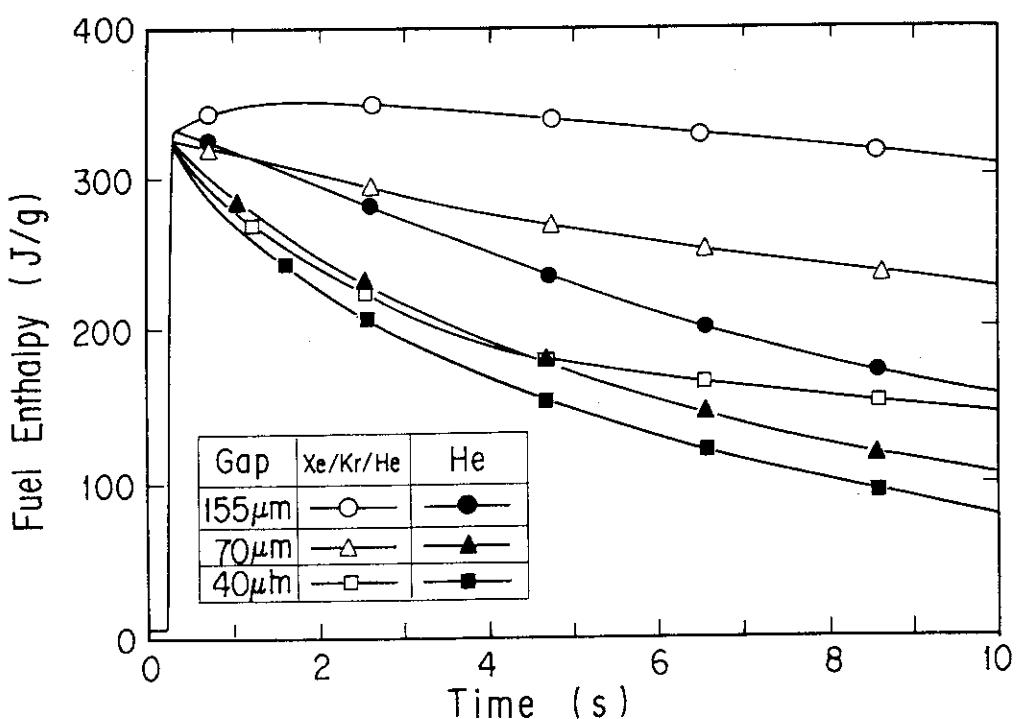


Fig. 28 Fuel enthalpy histories calculated with NSR77 code at various gap conditions.

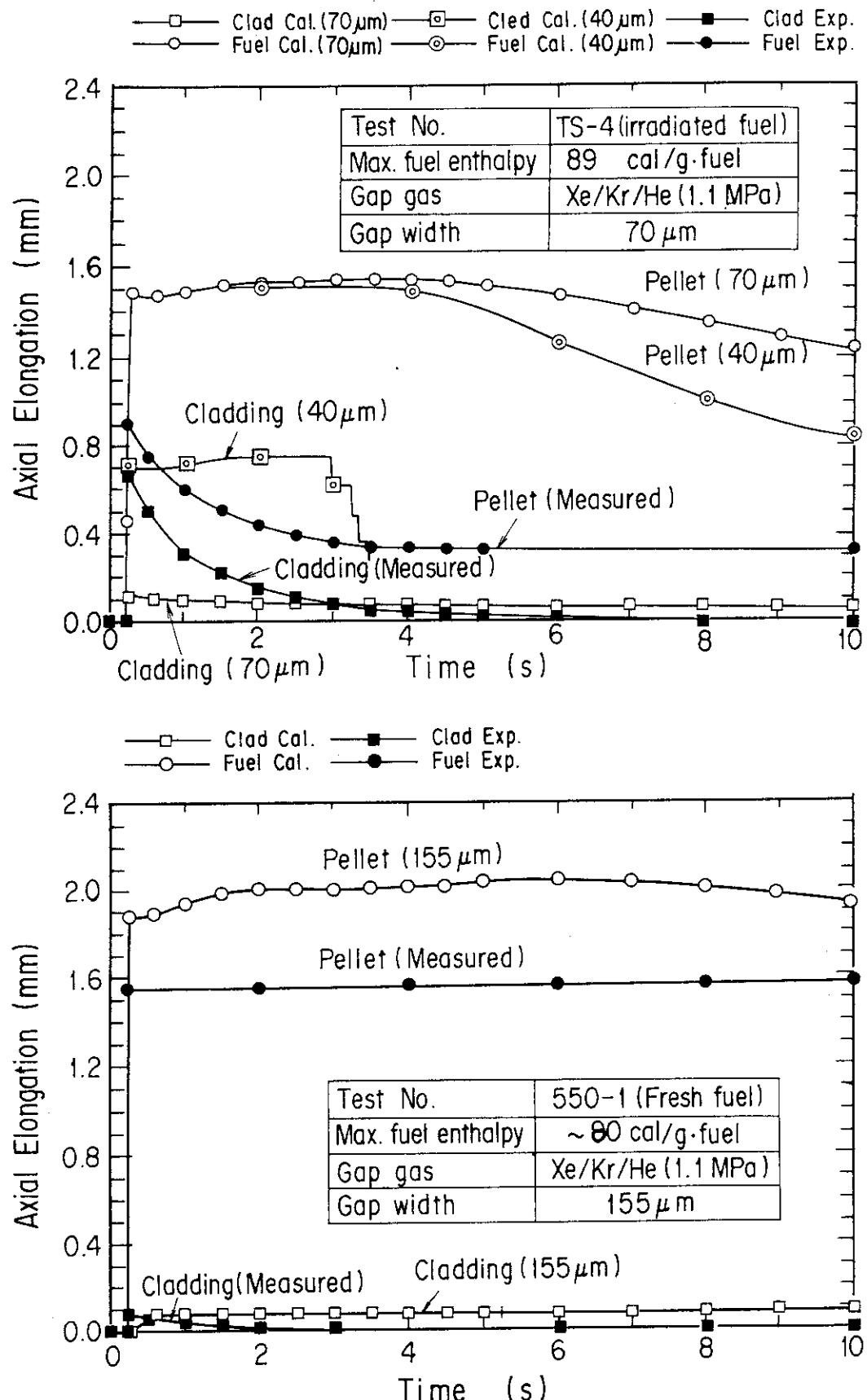


Fig. 24 Calculated thermal expansions of fuel pellet stack and cladding. The cladding elongation is assumed to be totally controlled by pellet stack movement after the gap is calculated to be closed.

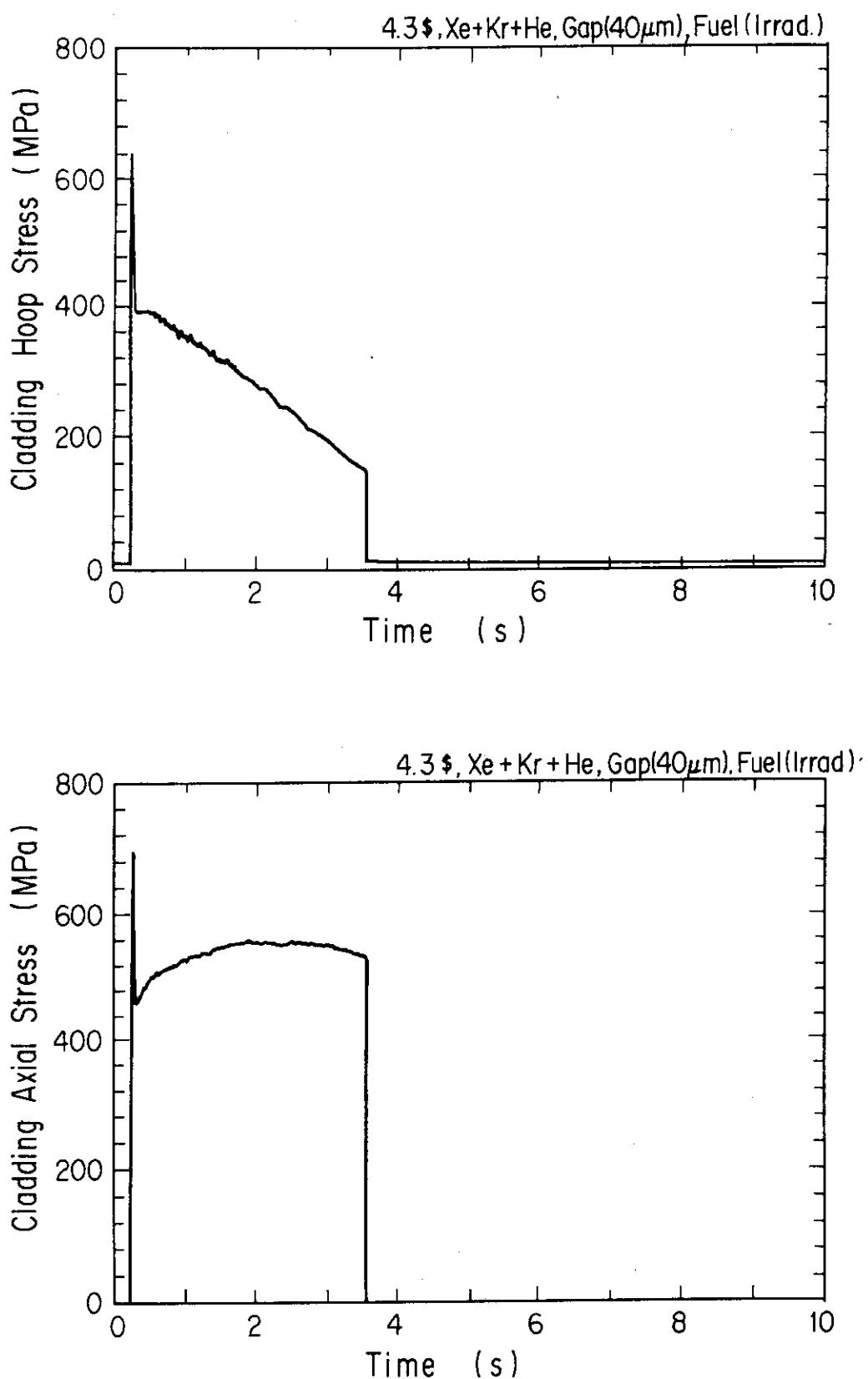


Fig. 25 Cladding strain estimated with NSR77 code
at a gap width of 40 μ m.

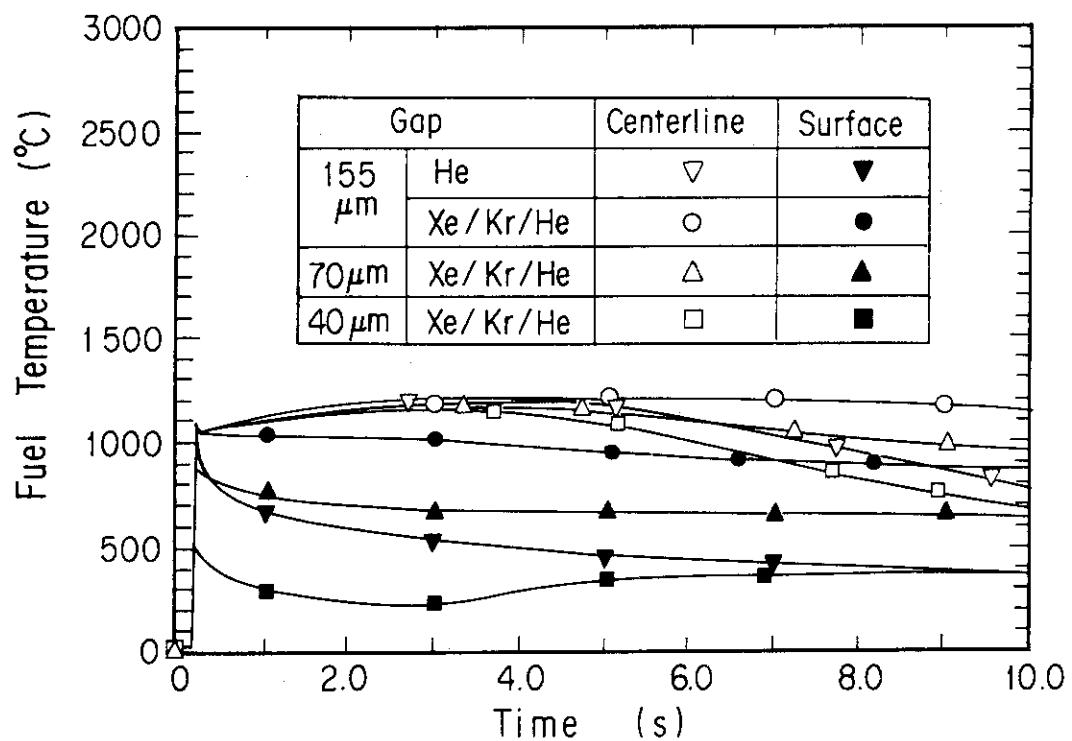


Fig. 26 Temperature histories of fuel centerline and surface by the pulse irradiation in the NSRR calculated with NSR77 code at various gap conditions.

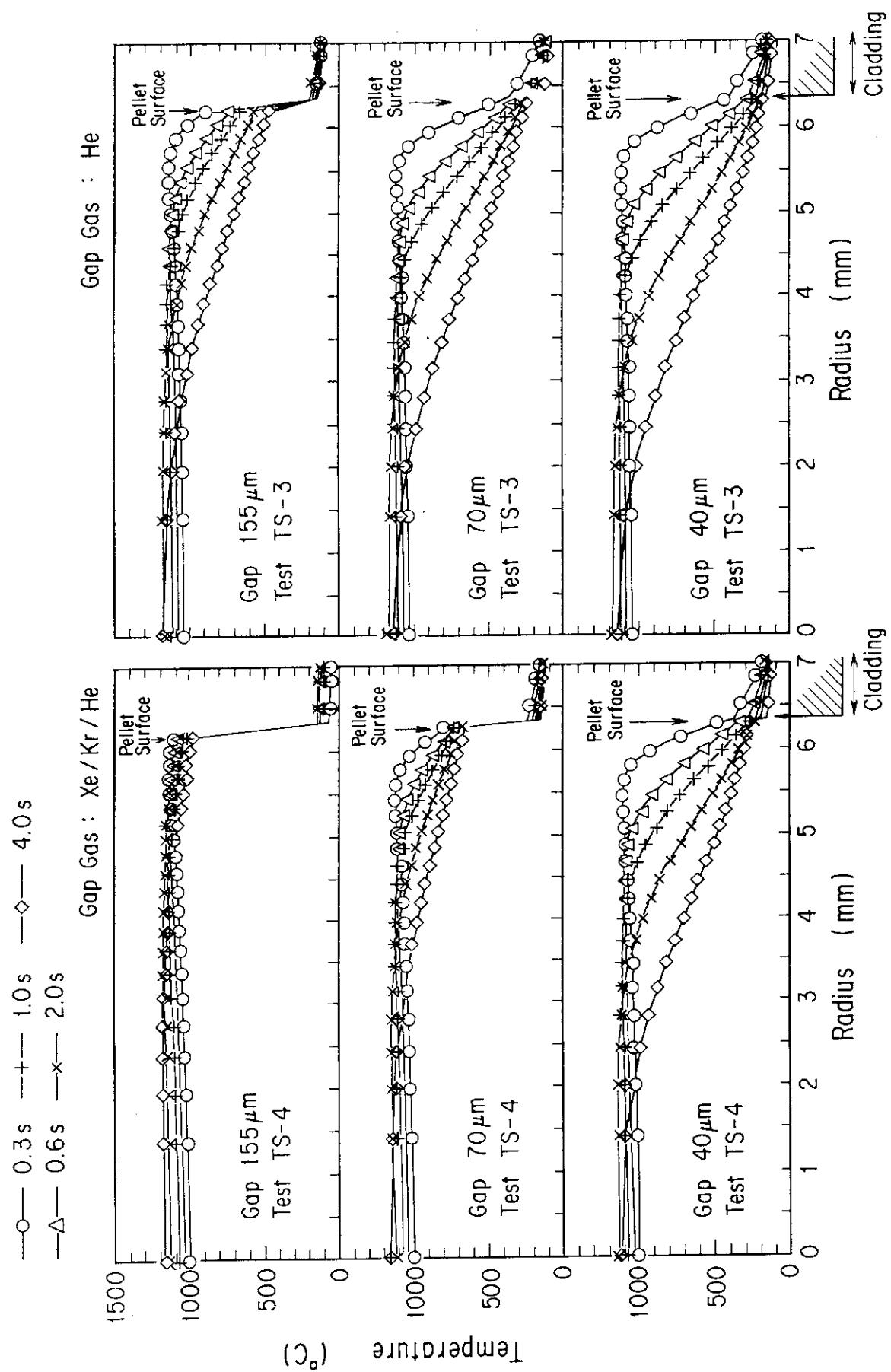


Fig. 27 Radial temperature distributions in Tests TS-3 and 4 calculated with NSR77 code.

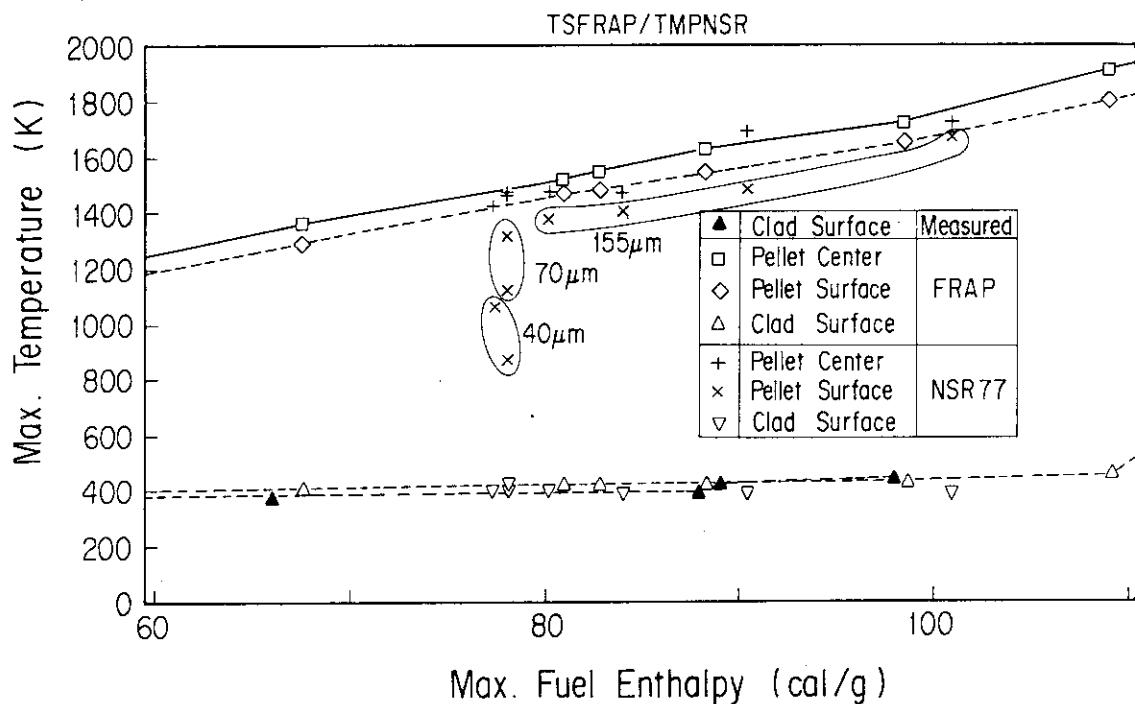


Fig. 29 Fuel and cladding temperature as a function of peak fuel enthalpy, measured and estimated with FRAP-T6 and NSR77 codes.

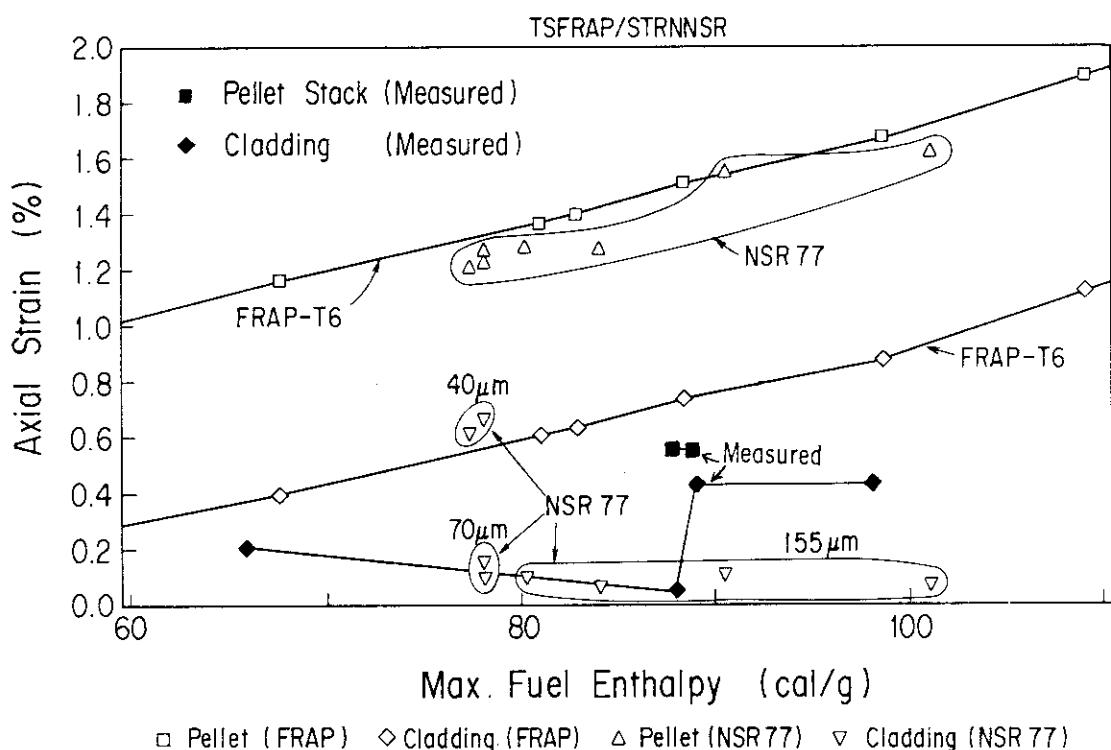


Fig. 30 Axial deformation of the fuel rod pulse irradiated in the NSRR. Measured strain was compared with the estimated strain with FRAP-T6 and NSR77 as a function of the peak fuel enthalpy.

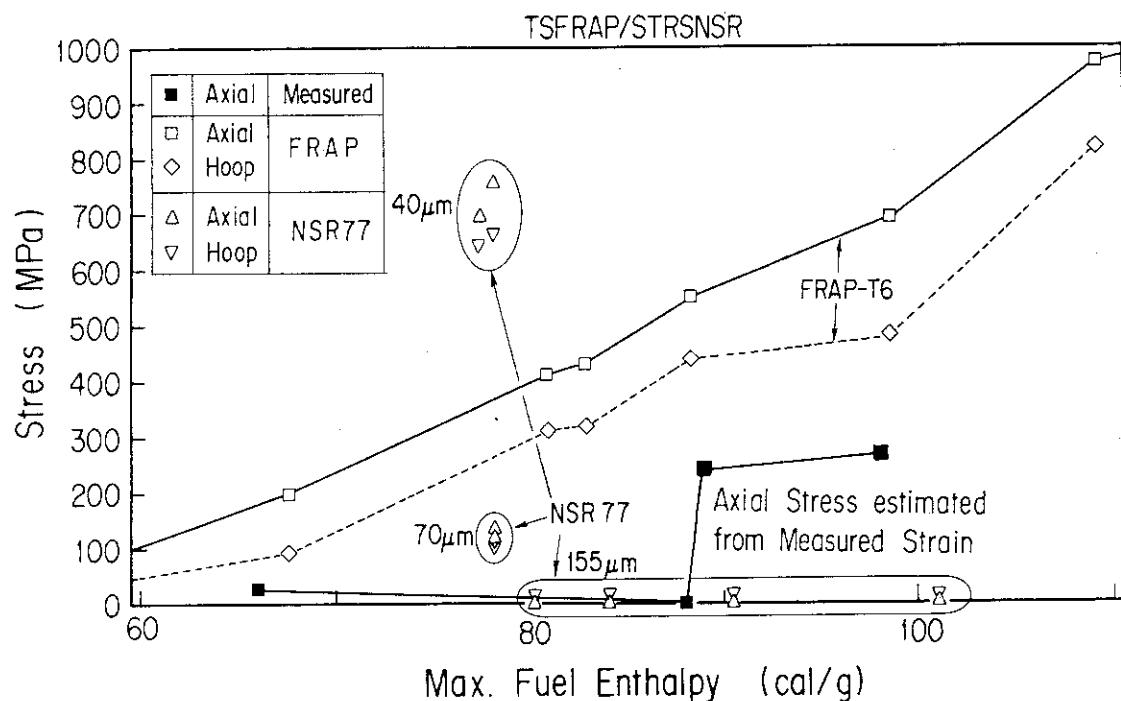


Fig. 31 Peak cladding stress in the pulse irradiation tests as a function of the peak fuel enthalpy. Peak axial stress in the TS tests are estimated from the FRAP-T6 simulation which caused the peak fuel stress measured in the tests.

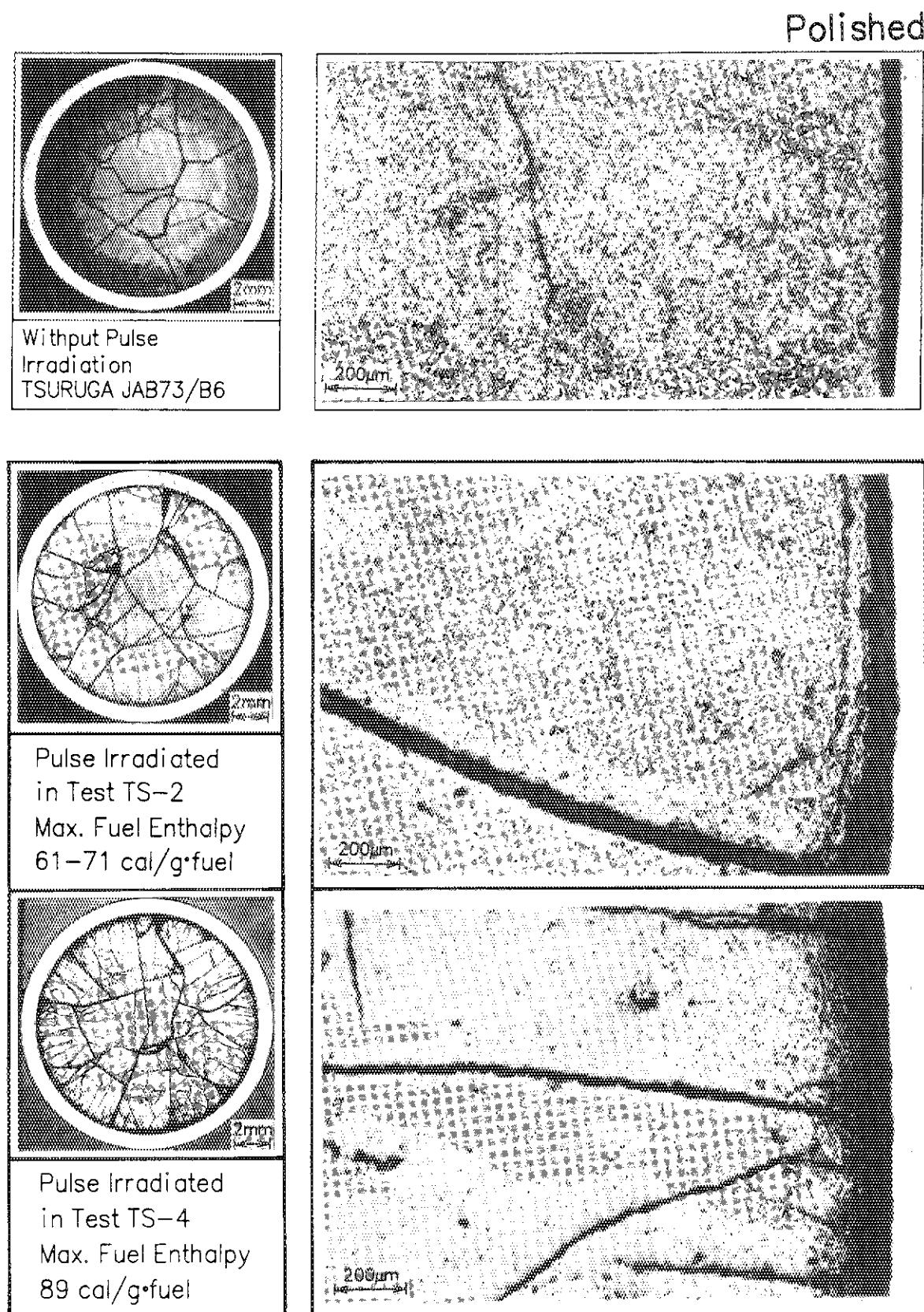


Photo. 1 Cross sections of BWR fuel rods with or without pulse irradiation in TS tests.

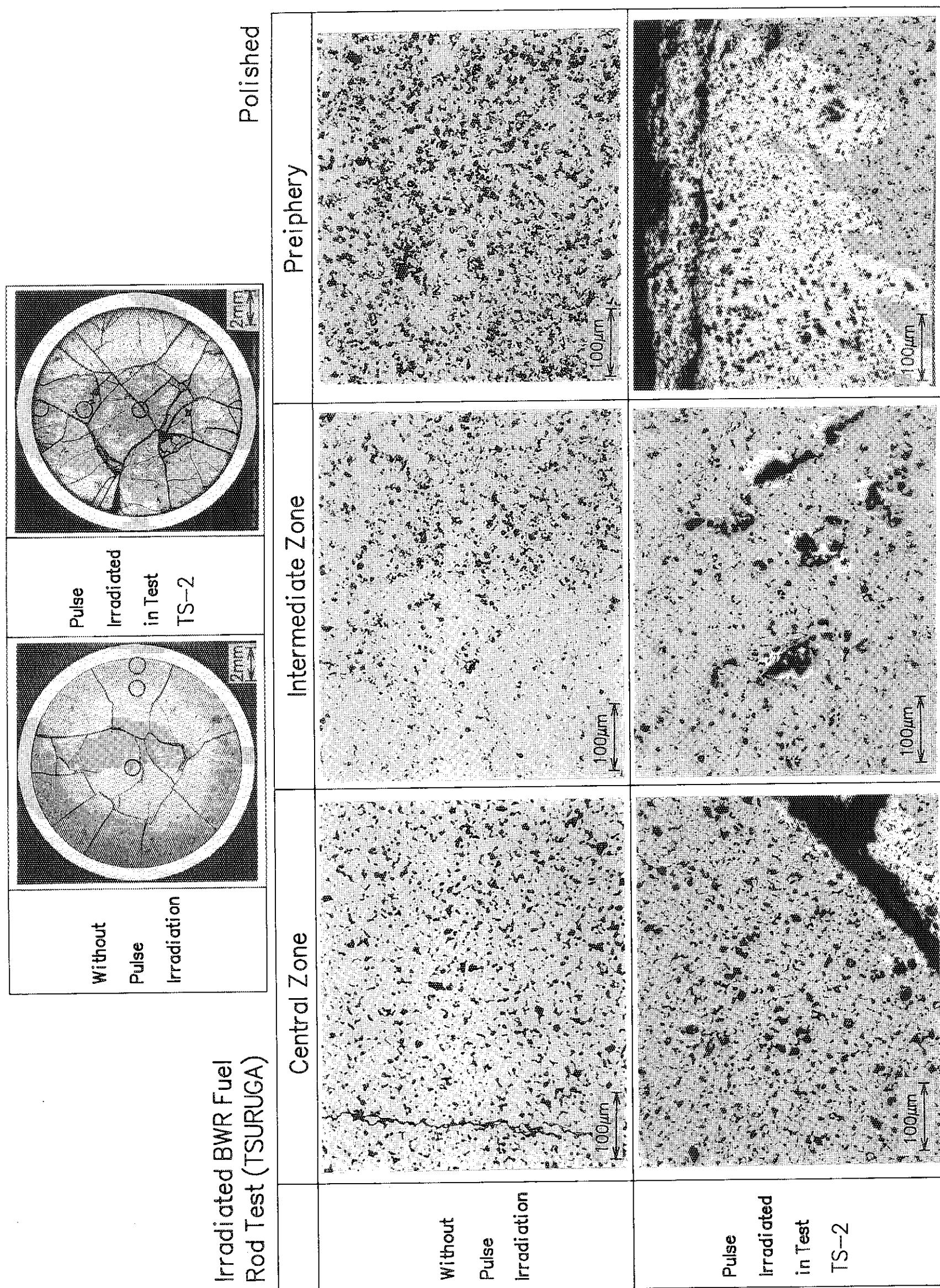


Photo. 2 Comparison of micro structures of fuel with or without pulse irradiation (Polished) in Test TS-2. [3]

付録 I FRAP-T6コードによるTS実験の解析結果

Appendix I Simulation Results of TS test calculated with FRAP-T6

Test No.	Base Irradiation Condition	Pulse Irradiation Condition		Contents
		Peak Fuel Enthalpy, cal/g·fuel	Geometry	
TS-1	47kW/m, 26GWd/tU, BWR Cooling Condition	58	without shroud	Input data list Summary list Figures
TS-2	ditto	64	ditto	ditto
		71	ditto	ditto
TS-3	ditto	88	ditto	ditto
TS-4	ditto	89	ditto	ditto
TS-5	ditto	98	ditto	ditto
		98	with shroud	ditto

FRAPI-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM

TS-1 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER*55/52)

JAERI-M 94-031

TIME		AVE. FULL		VUL.AVE.		AXIAL EXTENSION		FP GAS		GRAIN		FACE		EDGE RELEASE		ERROR		
(SEC)	ROD POWER	ROD TEMP.	(K)	P. STACK	CLADDING	(MM)	(MM)	RETAIN	(X)	(Z)	(X)	(Z)	(X)	(Z)	(X)	(Z)	(X)	(Z)
-4.470E+07	4.700E+01	1380.1	2.665E+00	1.253E+00	1.296E+00	78.92	65.54	6.56	6.81	21.32	0.041							
-2.25E+07	4.700E+01	1399.3	2.708E+00	1.647E+01	1.647E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376							
6.645E-10	1.930E+10	293.1	-8.679E-03	-8.679E-03	-8.679E-03	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376							
1.000E-01	2.864E-02	293.1	1.646E-01	1.646E-01	1.646E-01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376							
2.000E-01	5.727E-02	293.1	-8.650E-03	-8.650E-03	-8.650E-03	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376							
3.000E-01	5.195E+01	1087.3	9.712E-01	1.836E+01	1.836E+01	69.28	56.34	3.17	9.77	29.00	1.712							
3.100E-01	5.195E+01	1088.0	9.732E-01	1.855E+01	1.855E+01	69.28	56.34	3.17	9.77	29.01	1.710							
4.101E-01	4.554E+01	1094.3	9.922E-01	2.035E+01	2.035E+01	69.29	56.35	3.16	9.76	29.03	1.687							
5.101E-01	4.503E+01	1099.5	1.009E+00	2.192E+01	2.192E+01	69.28	56.37	3.16	9.75	29.05	1.668							
6.101E-01	3.759E+01	1104.1	1.024E+00	2.308E+01	2.308E+01	69.28	56.39	3.16	9.73	29.06	1.650							
7.101E-01	3.511E+01	1108.1	1.038E+00	2.308E+01	2.308E+01	69.29	56.40	3.16	9.73	29.08	1.634							
8.101E-01	3.267E+01	1111.6	1.052E+00	2.315E+01	2.315E+01	69.29	56.41	3.16	9.72	29.09	1.620							
9.101E-01	3.022E+01	1114.5	1.065E+00	2.316E+01	2.316E+01	69.29	56.42	3.16	9.71	29.10	1.607							
1.010E+00	2.776E+01	1116.8	1.076E+00	2.316E+01	2.316E+01	69.29	56.43	3.15	9.71	29.11	1.595							
2.010E+00	9.541E+00	1111.6	1.151E+00	2.303E+01	2.303E+01	69.30	56.47	3.13	9.70	29.15	1.550							
3.010E+00	4.352E+00	1086.1	1.181E+00	2.290E+01	2.290E+01	69.28	56.47	3.10	9.72	29.15	1.535							
4.010E+00	3.510E+00	1057.2	1.183E+00	2.278E+01	2.278E+01	69.24	56.42	3.07	9.74	29.16	1.605							
5.010E+00	2.674E+00	1029.4	1.166E+00	2.268E+01	2.268E+01	69.19	56.38	3.04	9.76	29.16	1.655							
6.010E+00	2.340E+00	1002.7	1.135E+00	2.259E+01	2.259E+01	69.13	56.39	3.01	9.78	29.16	1.713							
7.010E+00	2.005E+00	977.4	1.097E+00	2.232E+01	2.232E+01	69.06	56.29	2.99	9.79	29.16	1.773							
8.010E+00	1.672E+00	953.2	1.054E+00	2.246E+01	2.246E+01	69.00	56.24	2.96	9.81	29.16	1.835							
9.010E+00	1.340E+00	929.8	1.009E+00	2.240E+01	2.240E+01	68.94	56.19	2.93	9.82	29.17	1.897							
1.000E+01	1.171E+01	907.5	9.655E-01	2.234E+01	2.234E+01	68.88	56.14	2.90	9.83	29.17	1.956							

FRAPI-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM

TS-1 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER*55/52)

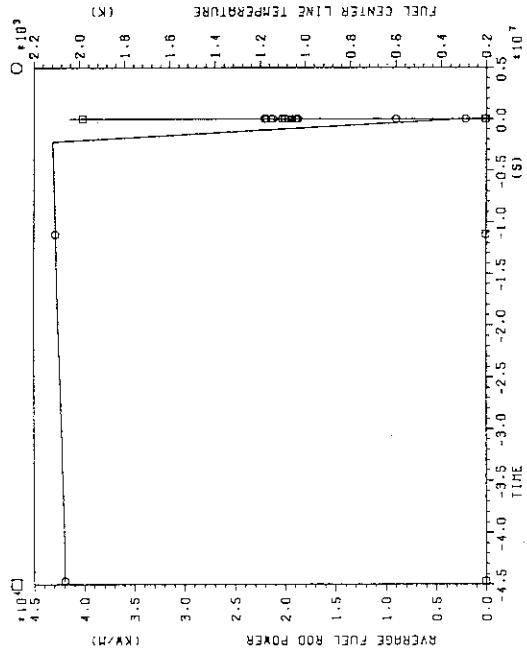
JAERI-M 94-031

RADIAL		AVE. FUEL		FP GAS		TEMPERATURE		GAS		DISPLACEMENT		LOADING	
TIME	ENTHALPY	GRAIN	FACE	RELEASE	PELLET	INNER SURFACE	CLADDING	STRUCTURAL GAP	RADIAL GAP	STRUCTURAL GAP	RADIAL GAP	HOOP	HOOP
(SEC)	(CAL/G)	(X)	(Z)	(X)	(Z)	(K)	(K)	(MM)	(MM)	(MM)	(MM)	STRAIN	STRESS
-4.470E+07	7.842E+01	78.92	65.54	6.56	6.81	21.12	0.041	2065.6	644.5	644.5	585.9	0.081E-01	3.470E-02
-2.255E+07	7.936E+01	78.92	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	293.1	293.1	73.36E-02	1.504E-02	5.320E-03
6.645E-10	3.866E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	293.1	293.1	7.36E-02	1.616E-03	4.377E+08
1.000E-01	3.864E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	293.1	293.1	7.36E-02	1.616E-03	4.741E+08
2.000E-01	3.855E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	293.1	293.1	7.36E-02	1.616E-03	7.782E+06
3.000E-01	5.517E+01	69.28	56.34	3.17	9.77	29.00	1.712	1037.8	1034.5	1034.5	5.814E-02	1.504E-02	3.578E-04
3.100E-01	5.522E+01	69.28	56.34	3.17	9.77	29.01	1.710	1039.2	1039.9	1039.9	5.814E-02	1.504E-02	3.578E-04
4.101E-01	5.369E+01	69.29	56.36	3.17	9.76	29.03	1.707	1052.4	1053.8	1054.6	5.814E-02	1.504E-02	3.578E-04
5.101E-01	5.609E+01	69.28	56.37	3.16	9.75	29.05	1.668	1063.9	1051.1	1042.1	5.814E-02	1.504E-02	3.578E-04
6.101E-01	5.663E+01	69.28	56.39	3.16	9.73	29.06	1.650	1074.3	1042.9	1041.8	5.814E-02	1.504E-02	3.578E-04
7.101E-01	5.674E+01	69.29	56.40	3.16	9.73	29.08	1.634	1084.1	1036.6	1036.6	5.814E-02	1.504E-02	3.578E-04
8.101E-01	5.701E+01	69.29	56.41	3.16	9.72	29.09	1.620	1093.2	1031.1	1027.4	5.814E-02	1.504E-02	3.578E-04
9.101E-01	5.723E+01	69.29	56.42	3.16	9.71	29.10	1.607	1101.8	1026.0	1027.6	5.814E-02	1.504E-02	3.578E-04
1.010E+00	5.741E+01	69.29	56.43	3.15	9.71	29.11	1.595	1109.7	1021.3	1027.5	5.814E-02	1.504E-02	3.578E-04
2.010E+00	5.702E+01	69.30	56.47	3.13	9.70	29.15	1.550	1159.4	975.3	424.0	396.9	2.358E-02	8.116E-03
3.010E+00	5.510E+01	69.28	56.46	3.10	9.72	29.15	1.565	1179.4	937.2	420.2	395.7	2.431E-02	8.844E-03
4.010E+00	5.291E+01	69.24	56.42	3.07	9.74	29.16	1.605	1181.1	907.2	416.9	394.6	2.571E-02	9.025E+06
5.010E+00	5.082E+01	69.19	56.38	3.04	9.76	29.16	1.655	1170.2	883.4	414.3	393.8	2.736E-02	9.103E+06
6.010E+00	4.882E+01	69.13	56.34	3.01	9.78	29.16	1.607	1150.2	863.2	412.0	393.0	2.914E-02	9.194E-03
7.010E+00	4.692E+01	69.06	56.29	2.99	9.79	29.16	1.773	1124.6	845.6	410.1	392.3	3.095E-02	9.549E-02
8.010E+00	4.511E+01	69.00	56.24	2.96	9.81	29.16	1.835	1095.8	829.3	408.4	391.7	3.275E-02	1.729E-02
9.010E+00	4.336E+01	68.91	56.19	2.93	9.82	29.17	1.897	1065.5	814.0	406.8	391.1	3.421E+06	6.866E-02
1.000E+01	4.170E+01	68.88	56.14	2.90	9.83	29.17	1.956	1035.3	799.5	405.4	390.5	3.621E-02	2.075E-02

FRAP-T6 V 1.3 (06/83)
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*SS/S2)

EG&G IDAHO INEL

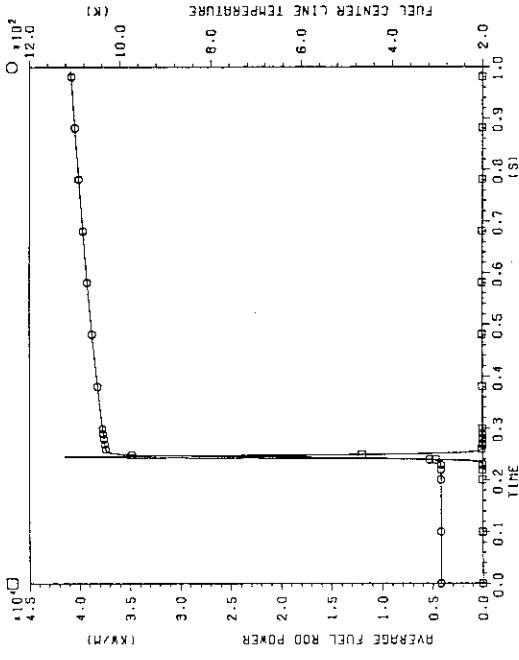
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*SS/S2)



FRAP-T6 V 1.3 (06/83)
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*SS/S2)

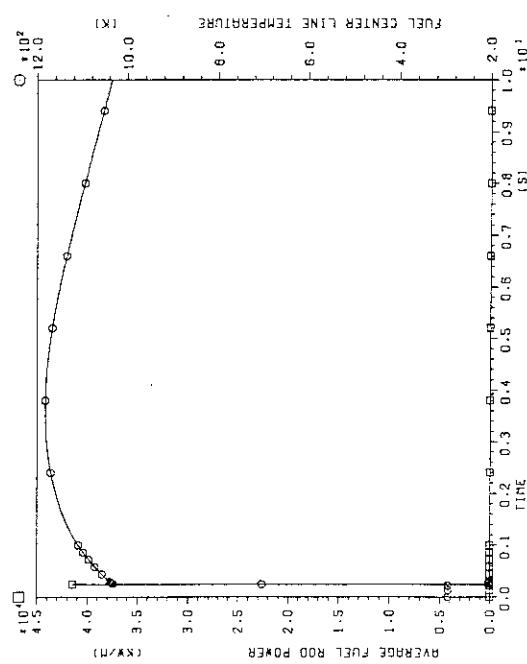
EG&G IDAHO INEL

FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*SS/S2)



FRAP-T6 V 1.3 (06/83)
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*SS/S2)

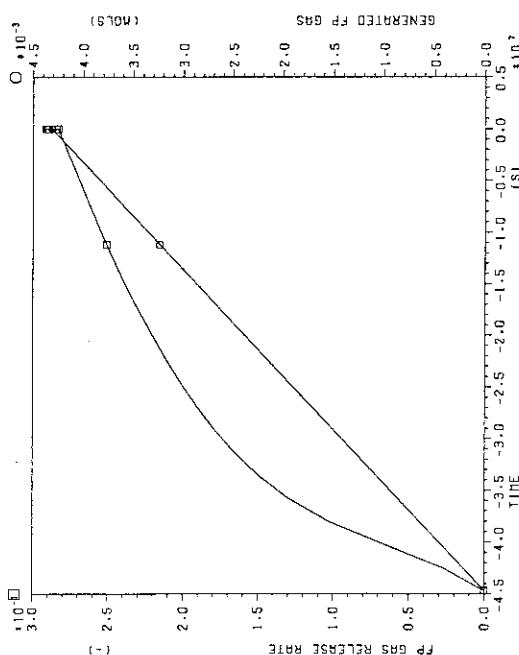
EG&G IDAHO INEL



FRAP-T6 V 1.3 (06/83)
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*SS/S2)

EG&G IDAHO INEL

FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*SS/S2)



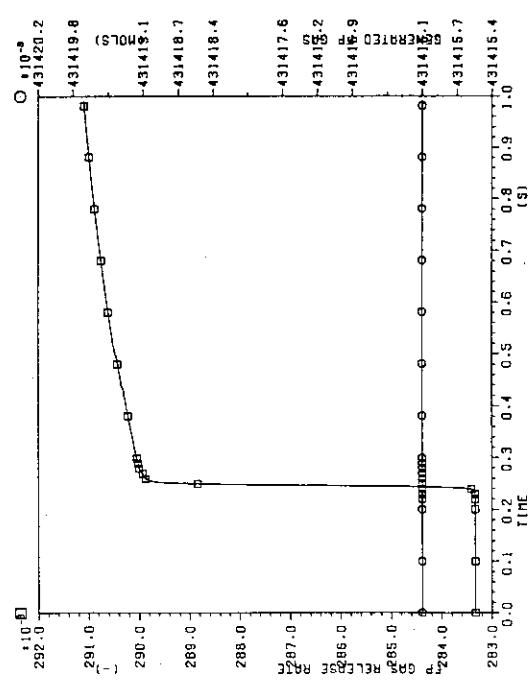
FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

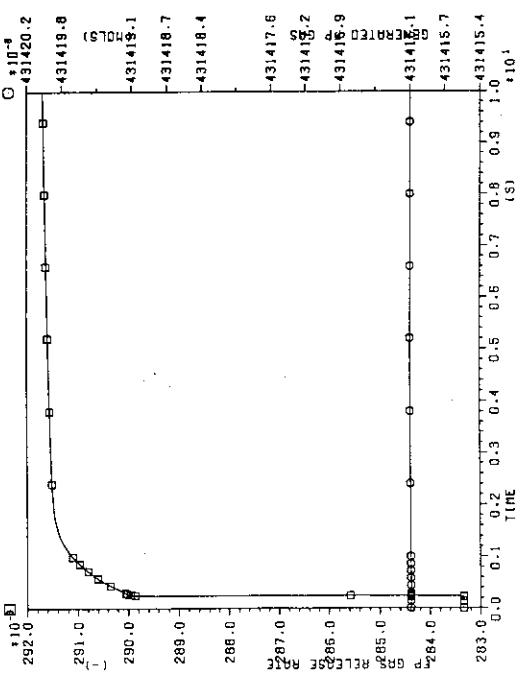


FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

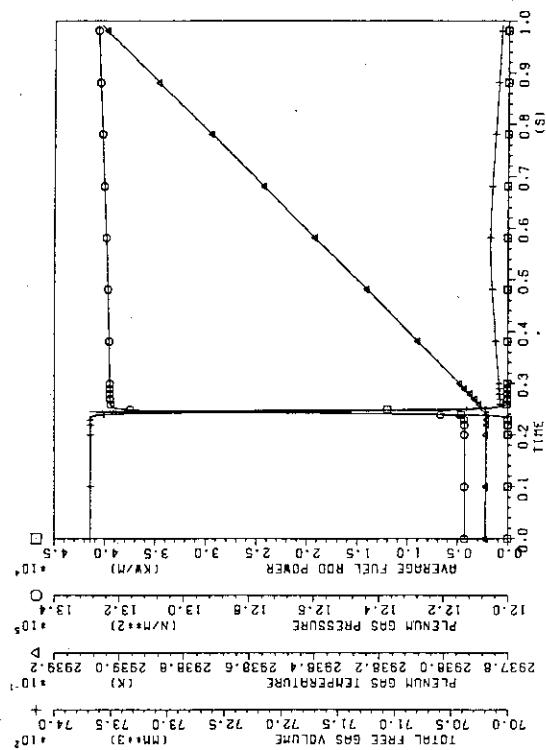


FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

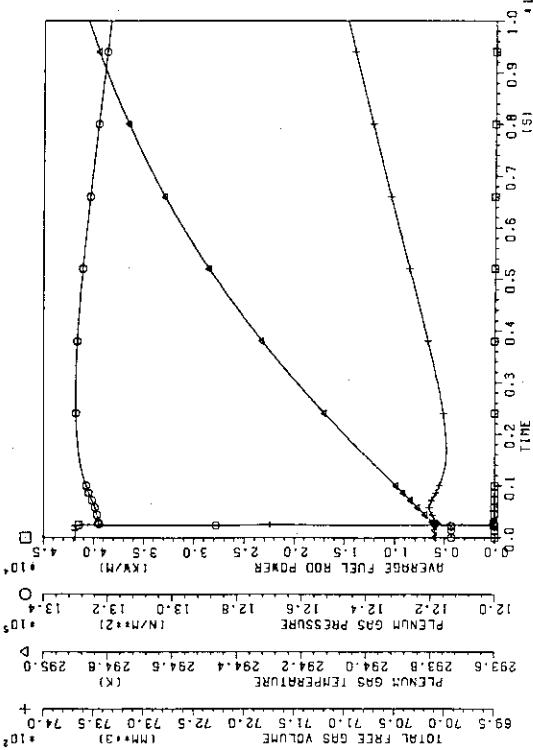
FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)



FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)



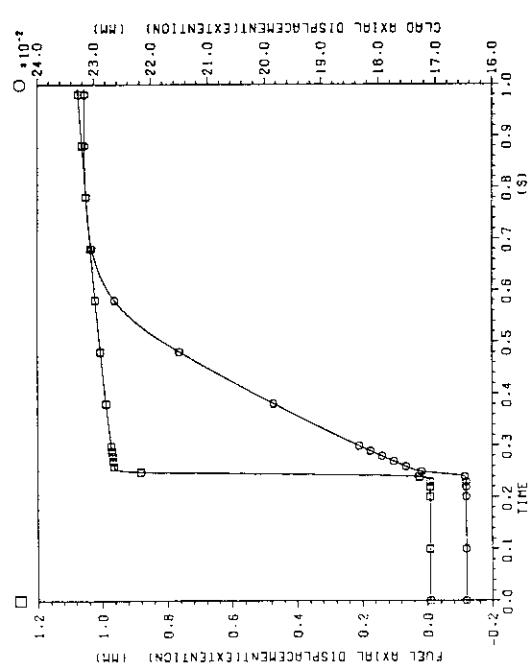
FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER*55/52)

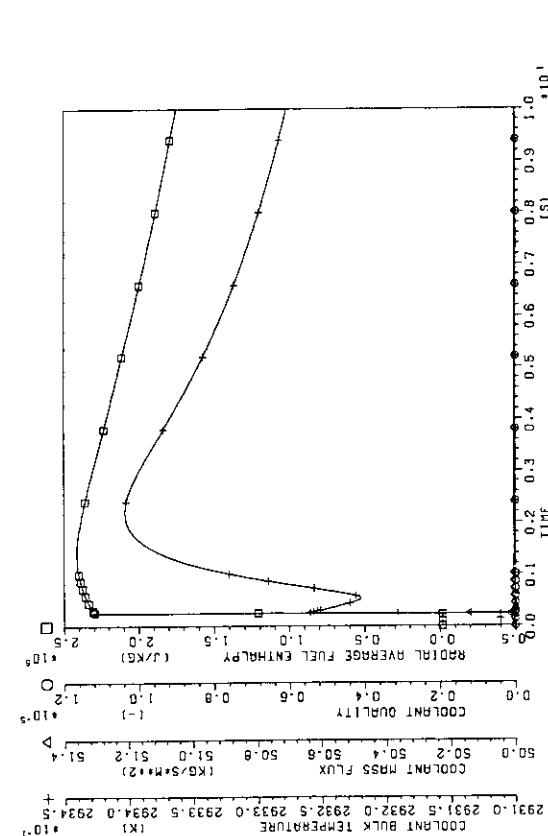
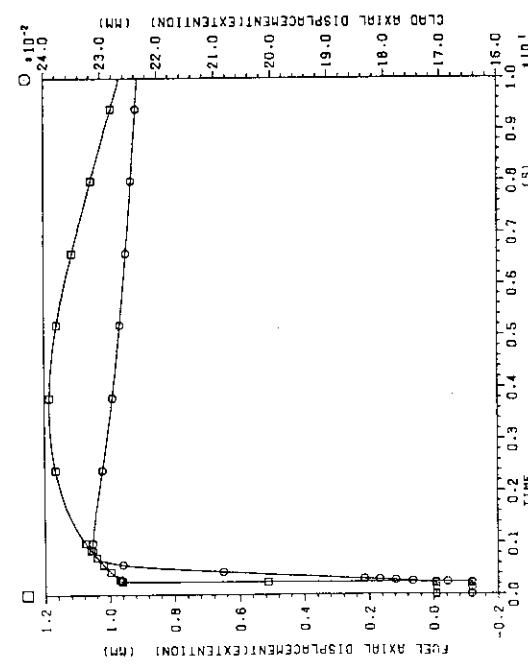
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*55/52)

FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*55/52)

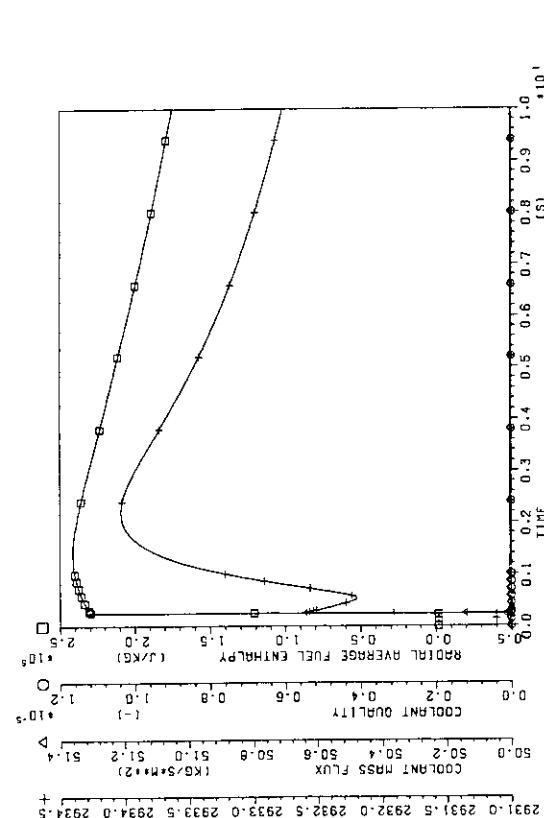
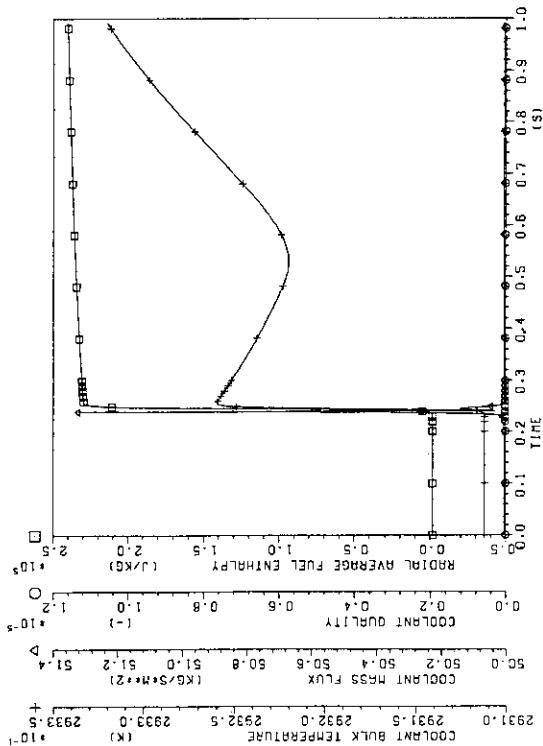
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*55/52)



FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*55/52)

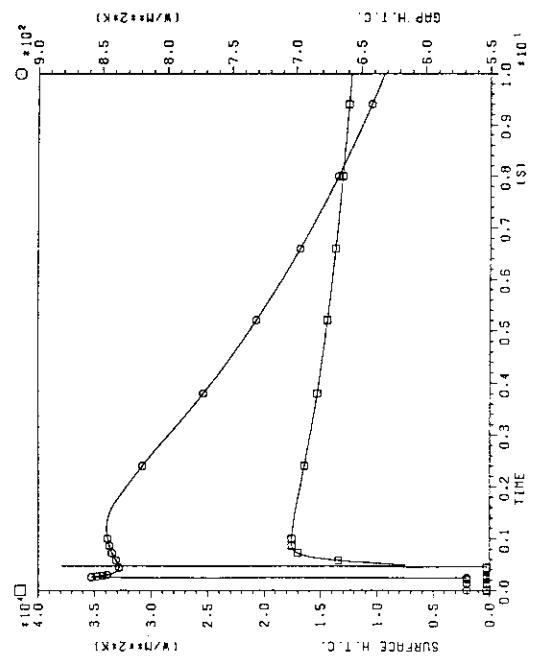
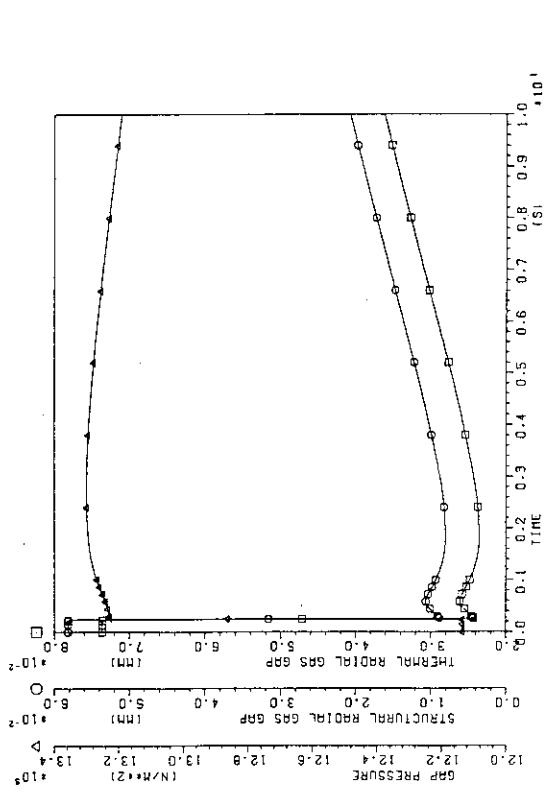
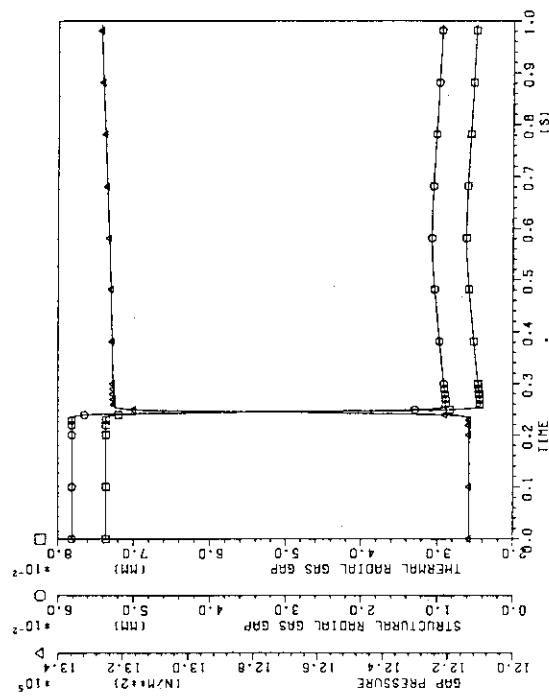
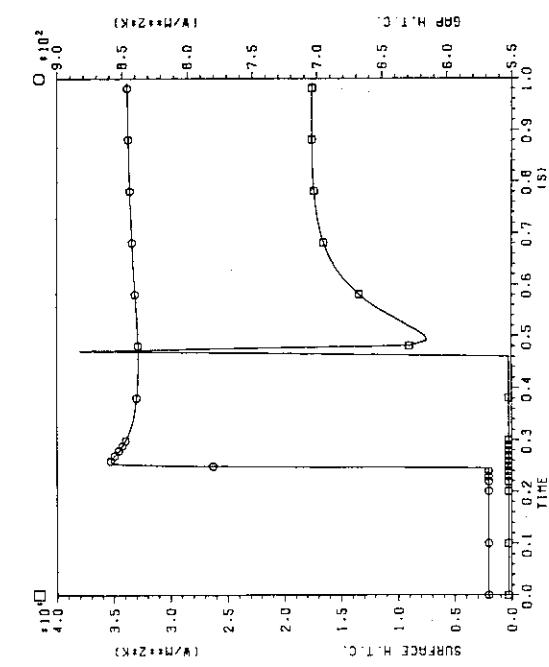


FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*55/52)



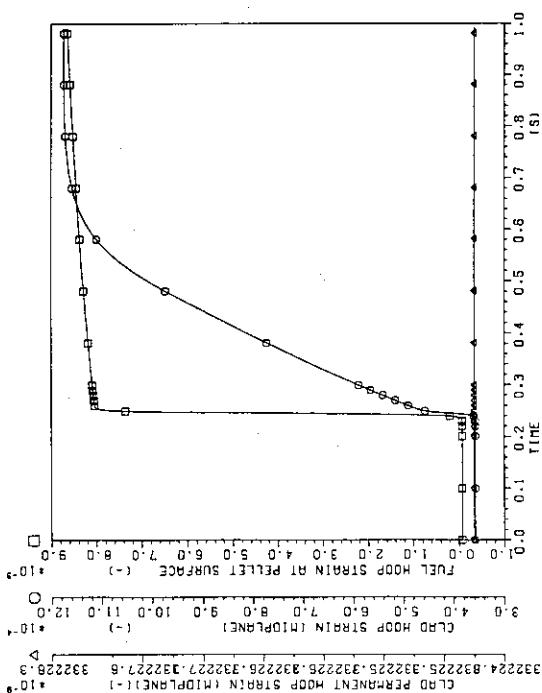
FRAPI-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC.,POWER*55/52)

FRAPI-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC.,POWER*55/52)

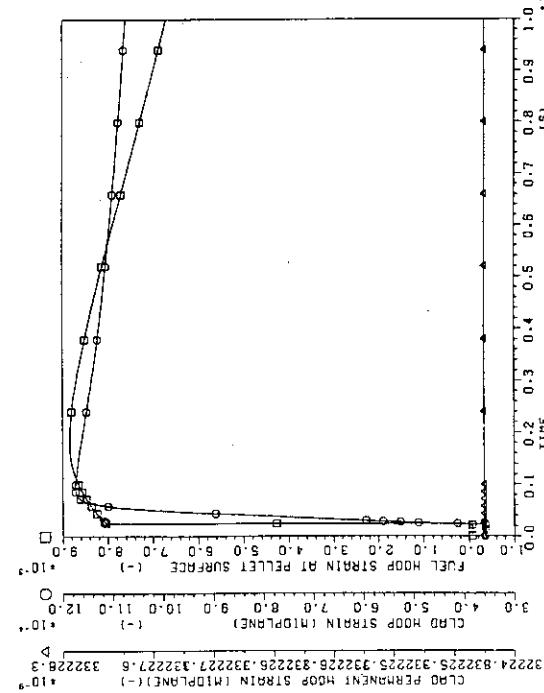


FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER•55/52)

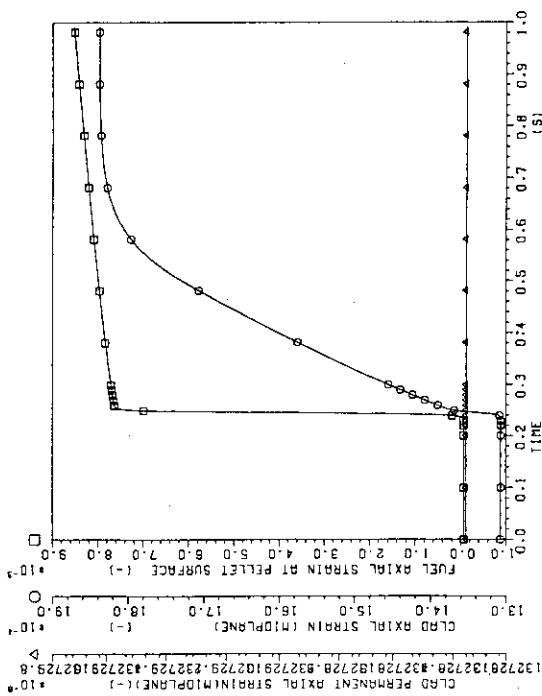
FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER•55/52)



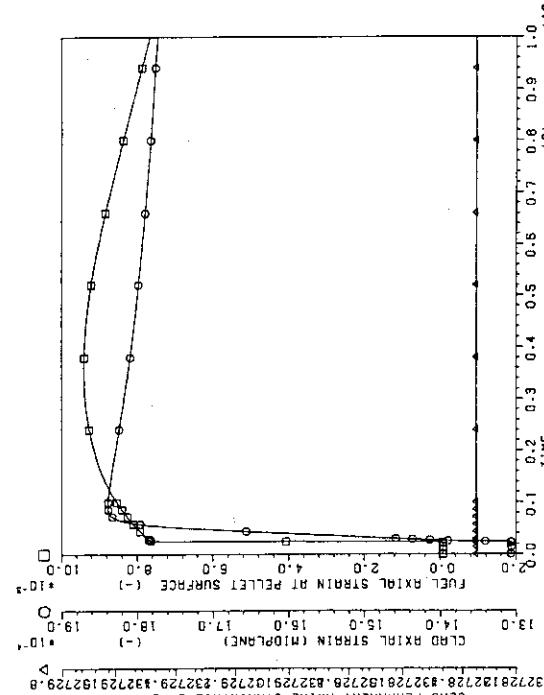
FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER•55/52)

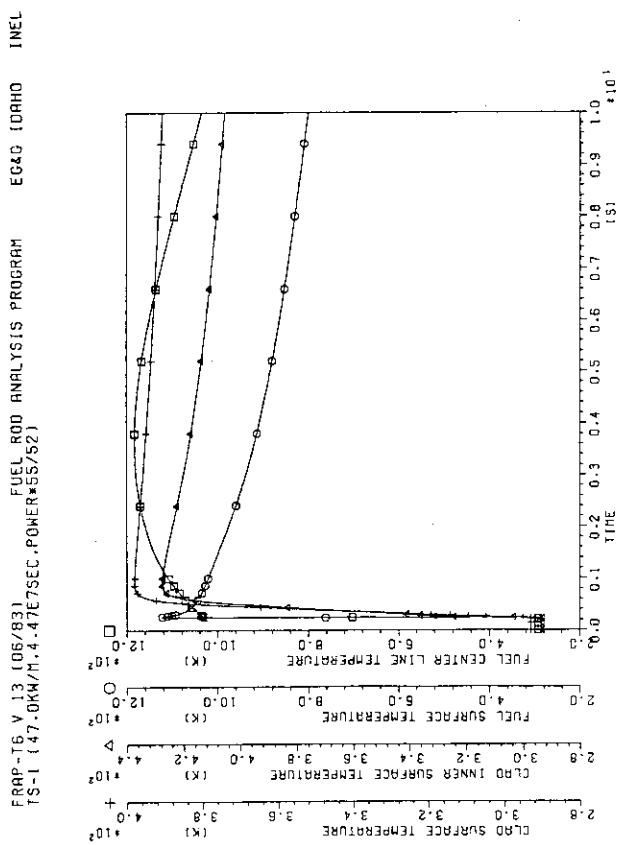
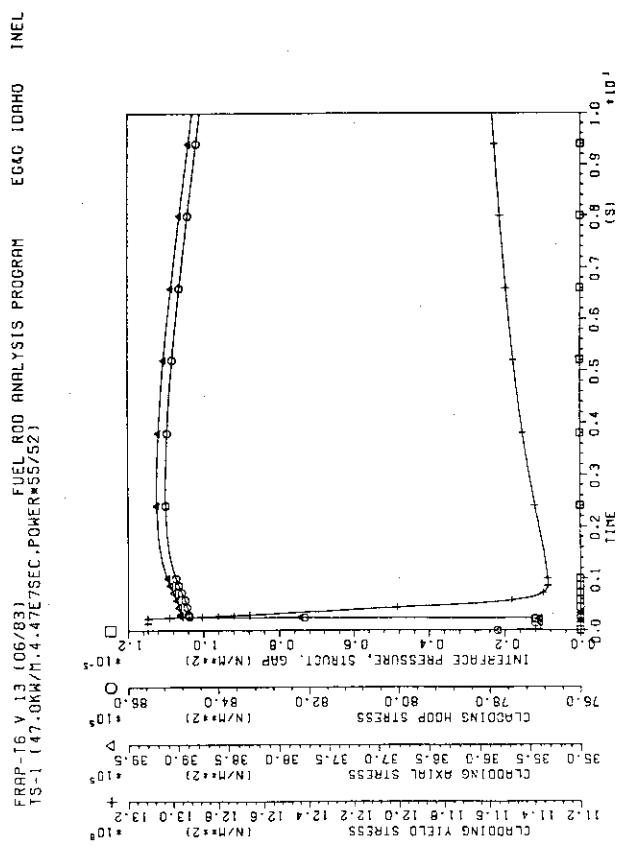
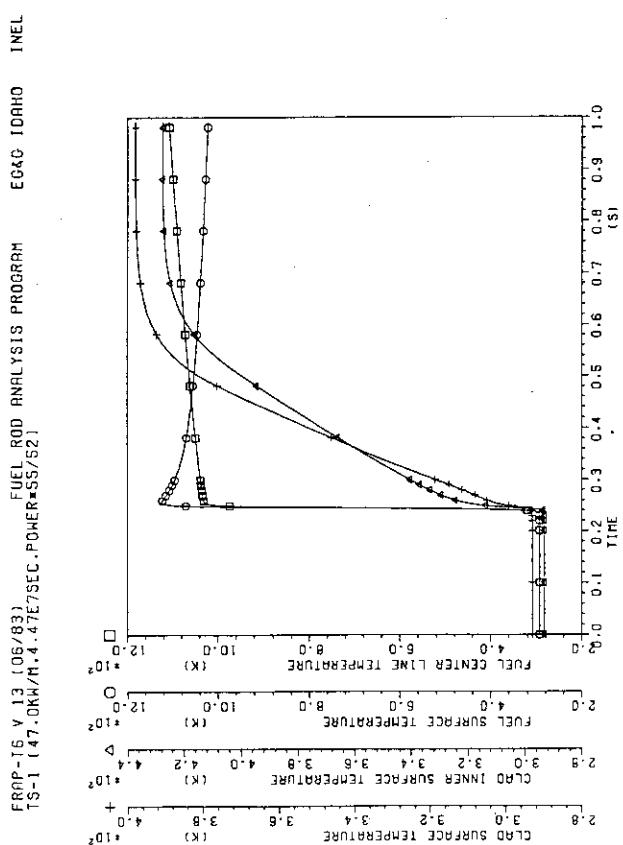
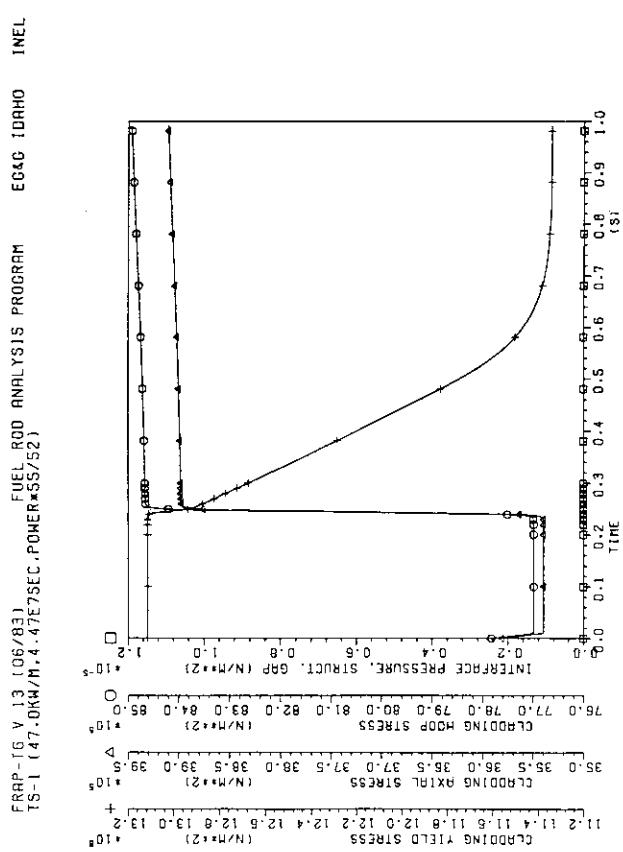


FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER•55/52)



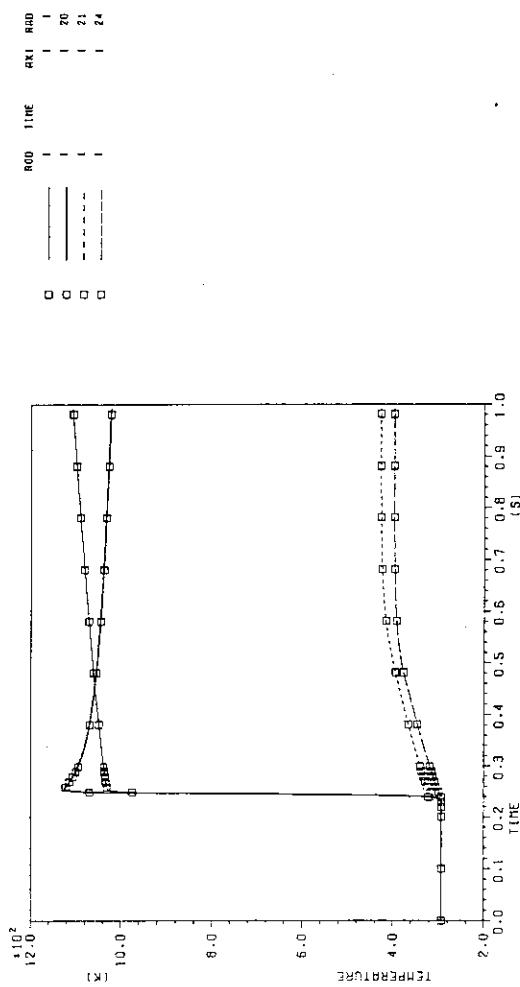
FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER•55/52)





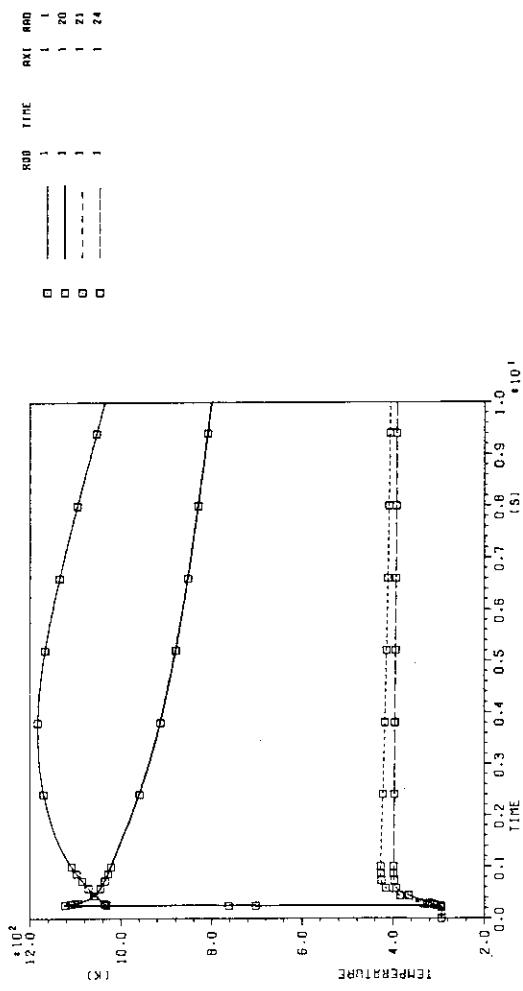
FRAP-T6 V 1.3 [06/83] FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 [47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWERSS/52]

EG&G IDAHO INEL



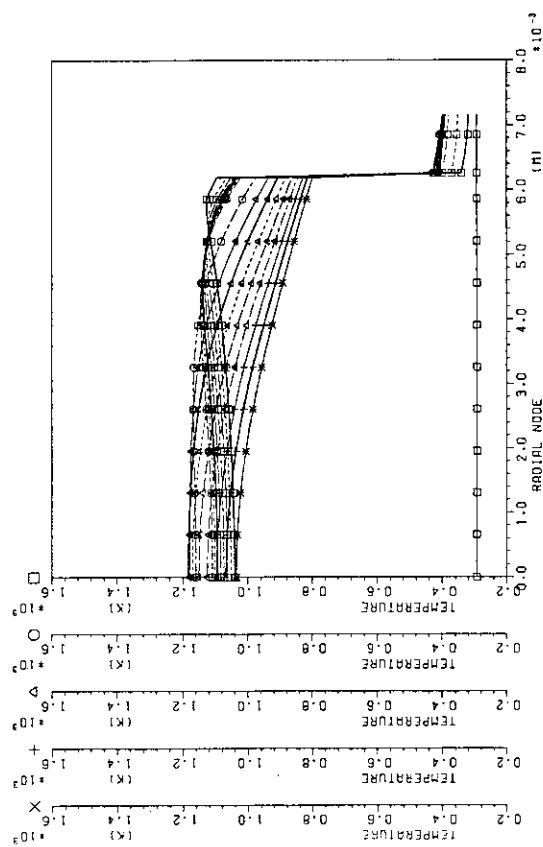
FRAP-T6 V 1.3 [06/83] FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 [47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWERSS/52]

EG&G IDAHO INEL



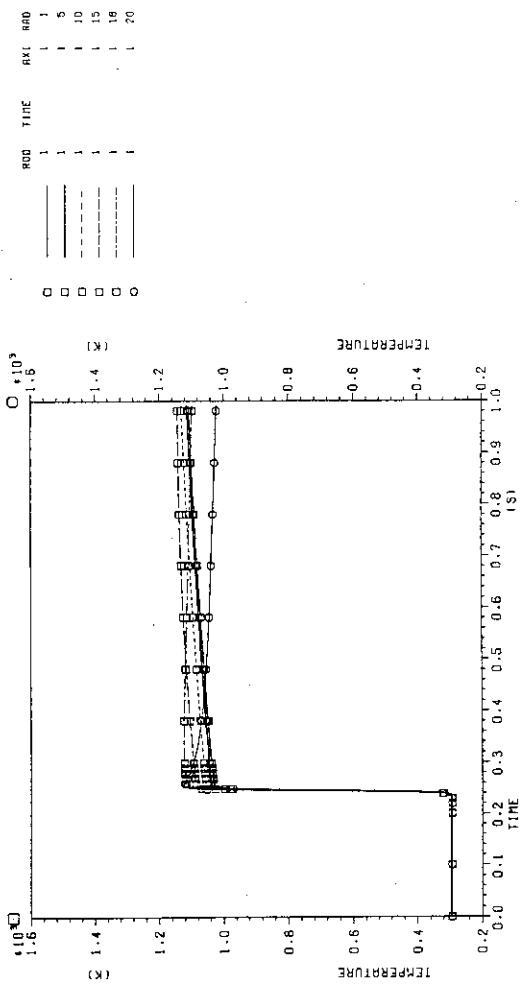
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER*SS/52)

EAGG 10RH0 INEL



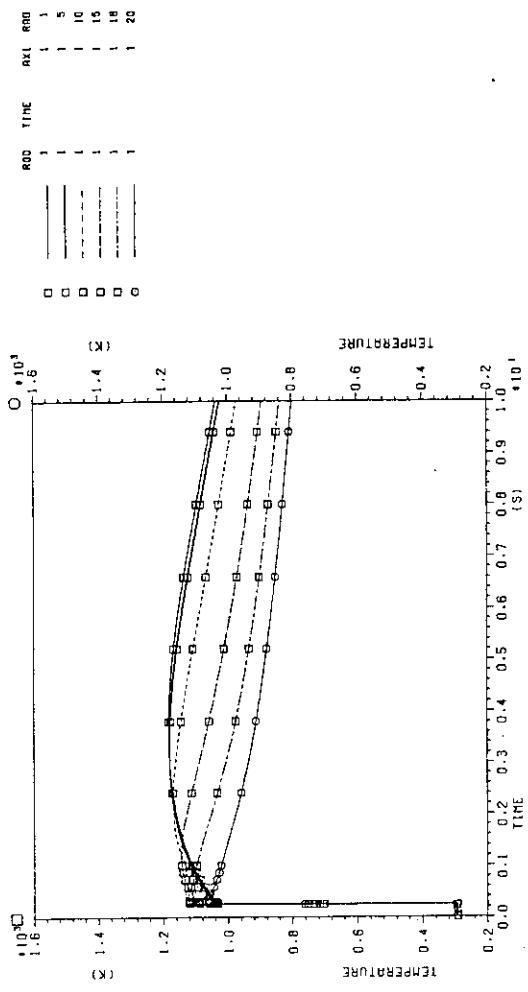
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER*SS/52)

EAGG 10RH0 INEL



FRAP-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-1 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=SS/S2)

EG&G IDAHO INEL



FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/N, 4.47E7SEC, POWER=61/68)

EG&G IDAHO INEL

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/N, 4.47E7SEC, POWER=61/68)

EG&G IDAHO INEL

TIME (SEC)	AVE. FUEL ROD POWER (KW/N)	VOL AVE. FULL TEMP. (K)	AXIAL EXTENSION P.S/TACK (MM)	CLADDING (MM)	FP GAS RETAIN (%)	GRAIN (%)	FACE (%)	EDGE RELEASE (%)	RELEASE ERROR (%)	EDGE RELEASE (%)	RELEASE ERROR (%)
-4.470E+07	4.700E+01	1380.1	2.665E+00	1.253E+00	78.92	65.54	6.56	6.81	21.12	0.041	
-2.235E+07	4.700E+01	1399.3	2.708E+00	1.296E+00	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	
6.645E+10	1.148E+09	293.1	8.645E-03	1.646E-01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	
1.000E+01	1.727E+01	293.2	8.540E-03	1.644E-01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	
2.000E+01	3.455E+01	293.2	1.076E+00	1.881E-01	69.31	56.48	3.02	9.80	29.16	1.533	
3.000E+01	7.300E+01	1162.8	1.191E+00	1.904E+01	69.31	56.49	3.02	9.80	29.16	1.529	
3.100E+01	7.179E+01	1163.9	1.105E+00	2.121E+01	69.31	56.51	3.01	9.79	29.19	1.498	
4.101E+01	5.969E+01	1173.2	1.266E+00	2.279E+01	69.29	56.53	3.01	9.75	29.24	1.473	
5.101E+01	4.760E+01	1180.0	1.142E+00	2.334E+01	69.29	56.55	3.01	9.74	29.26	1.455	
6.101E+01	3.655E+01	1186.8	1.157E+00	2.346E+01	69.28	56.56	3.00	9.72	29.28	1.441	
7.101E+01	3.481E+01	1189.2	1.170E+00	2.349E+01	69.28	56.57	3.00	9.71	29.29	1.427	
8.101E+01	3.306E+01	1191.2	1.184E+00	2.347E+01	69.28	56.58	3.00	9.70	29.30	1.415	
9.101E+01	3.132E+01	1192.9	1.196E+00	2.349E+01	69.28	56.59	3.00	9.69	29.31	1.403	
1.010E+00	2.957E+01	1185.1	6.538E+00	2.329E+00	69.29	56.63	2.97	9.68	29.36	1.354	
2.010E+00	3.109E+00	1170.3	1.310E+00	2.310E+01	69.25	56.60	2.95	9.70	29.36	1.385	
3.010E+00	5.481E+00	1118.0	1.315E+00	2.298E+01	69.21	56.57	2.92	9.72	29.37	1.428	
4.010E+00	4.425E+00	1086.9	1.298E+00	2.284E+01	69.15	56.52	2.89	9.73	29.37	1.484	
5.010E+00	3.168E+00	1056.7	1.263E+00	2.274E+01	69.08	56.47	2.86	9.75	29.37	1.530	
6.010E+00	2.319E+00	1077.6	1.217E+00	2.263E+01	69.00	56.41	2.84	9.76	29.37	1.622	
7.010E+00	2.049E+00	1000.3	1.166E+00	2.250E+01	68.93	56.35	2.81	9.77	29.38	1.694	
8.010E+00	1.779E+00	974.3	1.113E+00	2.250E+01	68.86	56.29	2.78	9.78	29.38	1.766	
9.010E+00	1.509E+00	974.3	1.113E+00	2.250E+01	68.86	56.29	2.78	9.78	29.38	1.834	
1.000E+01	1.242E+00	949.7	1.061E+00	2.244E+01	68.79	56.24	2.76	9.79	29.38	1.834	

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/N, 4.47E7SEC, POWER=61/68)

EG&G IDAHO INEL

AXIAL NODE NO. = 1

TIME (SEC)	RADially AVE. FUEL ENTHALPY (CAL/G)	FP GAS RELEASE (%)	TEMPERATURE CENTER SURFACE (K)	CLADDING INNER SURFACE (K)	GAS THERMAL PRESSURE (MM/Hg*#2)	DISPLACEMENT FUEL SURF. (MM)	CLADDING CLAD HOOP STRESS (MM**2)
-4.470E+07	7.841E+01	65.54	6.56	6.81	21.12	0.000E+00	1.713E+08
-2.235E+07	7.936E+01	78.92	6.56	6.81	20.90	0.000E+00	1.713E+08
6.645E+10	3.866E+01	68.29	54.99	9.87	28.33	3.376	1.504E+02
1.000E+01	-3.850E+01	68.29	54.99	9.87	28.33	5.814E+02	1.621E+03
2.000E+01	-3.801E+01	68.29	54.99	9.87	28.33	7.361E+02	1.741E+03
3.000E+01	6.091E+01	69.31	56.48	3.02	9.80	29.16	1.951E+02
3.100E+01	6.091E+01	69.31	56.49	3.02	9.80	1109.4	1.951E+02
4.101E+01	6.170E+01	69.31	56.51	3.01	9.79	1128.5	1.116E+02
5.101E+01	6.222E+01	69.29	56.53	3.01	9.75	1142.5	1.113E+02
6.101E+01	6.253E+01	69.29	56.55	3.01	9.74	1129.7	1.113E+02
7.101E+01	6.274E+01	69.28	56.56	3.00	9.72	1092.7	1.113E+02
8.101E+01	6.293E+01	69.28	56.57	3.00	9.71	29.29	1.113E+02
9.101E+01	6.309E+01	69.28	56.58	3.00	9.70	29.30	1.113E+02
1.010E+00	6.321E+01	69.28	56.59	3.00	9.69	29.31	1.113E+02
2.010E+00	6.284E+01	69.29	56.63	2.97	9.68	1126.1	1.113E+02
3.010E+00	5.999E+01	69.25	56.60	2.95	9.70	29.36	1.113E+02
4.010E+00	5.753E+01	69.21	56.57	2.92	9.72	1267.1	1.113E+02
5.010E+00	5.518E+01	69.15	56.52	2.89	9.73	1084.4	1.113E+02
6.010E+00	5.289E+01	69.08	56.47	2.86	9.73	29.37	1.113E+02
7.010E+00	5.070E+01	69.00	56.41	2.84	9.76	29.37	1.113E+02
8.010E+00	4.864E+01	68.93	56.35	2.81	9.77	29.38	1.113E+02
9.010E+00	4.664E+01	68.86	56.29	2.78	9.78	29.38	1.113E+02
1.000E+01	4.484E+01	68.79	56.24	2.76	9.79	29.38	1.113E+02

TIME (SEC)	RADially AVE. FUEL ENTHALPY (CAL/G)	FP GAS RELEASE (%)	TEMPERATURE CENTER SURFACE (K)	CLADDING INNER SURFACE (K)	GAS THERMAL PRESSURE (MM)	DISPLACEMENT FUEL SURF. (MM)	CLADDING CLAD HOOP STRESS (MM**2)
-4.470E+07	7.841E+01	65.54	6.56	6.81	20.90	0.000E+00	1.713E+08
-2.235E+07	7.936E+01	78.92	6.56	6.81	20.70	0.000E+00	1.713E+08
6.645E+10	3.866E+01	68.29	54.99	9.87	28.33	3.376	1.504E+02
1.000E+01	-3.850E+01	68.29	54.99	9.87	28.33	5.814E+02	1.621E+03
2.000E+01	-3.801E+01	68.29	54.99	9.87	28.33	7.361E+02	1.741E+03
3.000E+01	6.091E+01	69.31	56.48	3.02	9.80	1109.4	1.951E+02
3.100E+01	6.091E+01	69.31	56.49	3.02	9.80	1111.3	1.116E+02
4.101E+01	6.170E+01	69.31	56.51	3.01	9.79	1128.5	1.116E+02
5.101E+01	6.222E+01	69.29	56.53	3.01	9.75	1142.5	1.113E+02
6.101E+01	6.253E+01	69.29	56.55	3.01	9.74	1129.7	1.113E+02
7.101E+01	6.274E+01	69.28	56.56	3.00	9.72	1092.7	1.113E+02
8.101E+01	6.293E+01	69.28	56.57	3.00	9.71	29.29	1.113E+02
9.101E+01	6.309E+01	69.28	56.58	3.00	9.70	29.30	1.113E+02
1.010E+00	6.321E+01	69.28	56.59	3.00	9.69	29.31	1.113E+02
2.010E+00	6.284E+01	69.29	56.63	2.97	9.68	1126.1	1.113E+02
3.010E+00	5.999E+01	69.25	56.60	2.95	9.70	29.36	1.113E+02
4.010E+00	5.753E+01	69.21	56.57	2.92	9.72	1267.1	1.113E+02
5.010E+00	5.518E+01	69.15	56.52	2.89	9.73	1084.4	1.113E+02
6.010E+00	5.289E+01	69.08	56.47	2.86	9.73	29.37	1.113E+02
7.010E+00	5.070E+01	69.00	56.41	2.84	9.76	29.37	1.113E+02
8.010E+00	4.864E+01	68.93	56.35	2.81	9.77	29.38	1.113E+02
9.010E+00	4.664E+01	68.86	56.29	2.78	9.78	29.38	1.113E+02
1.000E+01	4.484E+01	68.79	56.24	2.76	9.79	29.38	1.113E+02

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/N, 4.47E7SEC, POWER=61/68)

EG&G IDAHO INEL

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/N, 4.47E7SEC, POWER=61/68)

EG&G IDAHO INEL

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/N, 4.47E7SEC, POWER=61/68)

EG&G IDAHO INEL

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/N, 4.47E7SEC, POWER=61/68)

EG&G IDAHO INEL

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/N, 4.47E7SEC, POWER=61/68)

EG&G IDAHO INEL

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/N, 4.47E7SEC, POWER=61/68)

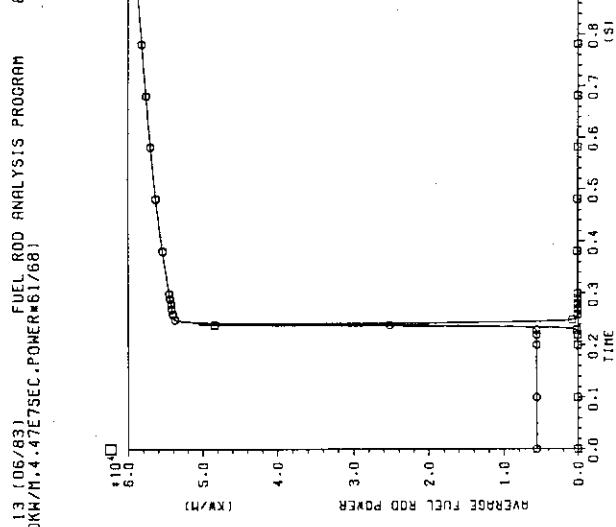
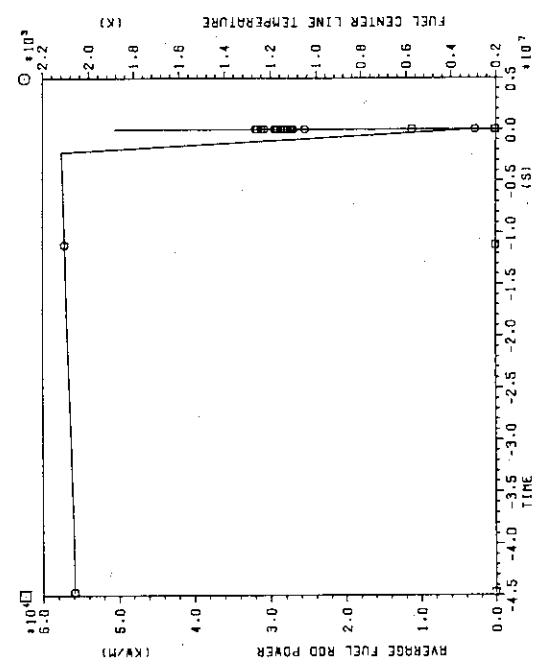
EG&G IDAHO INEL

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/N, 4.47E7SEC, POWER=61/68)

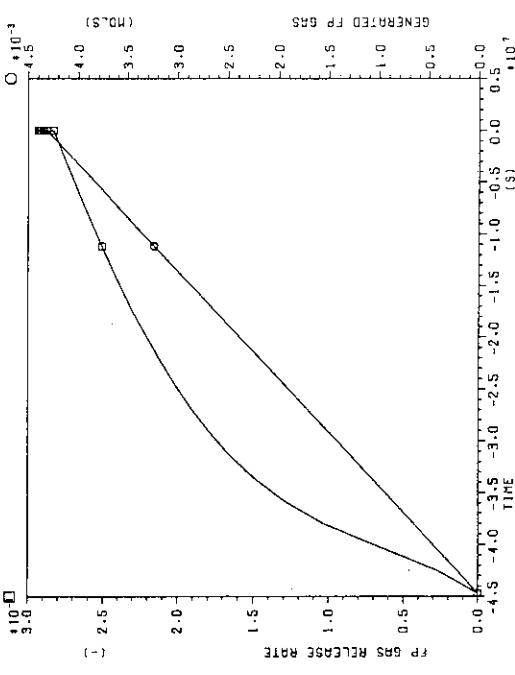
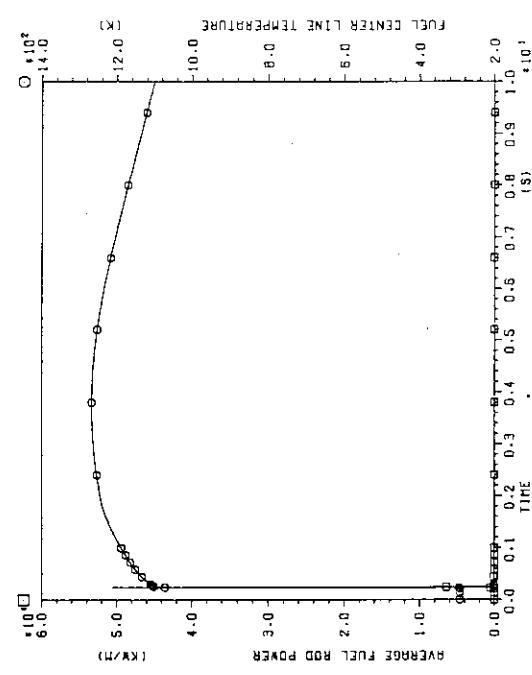
EG&G IDAHO INEL

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER#61/68)

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER#61/68)



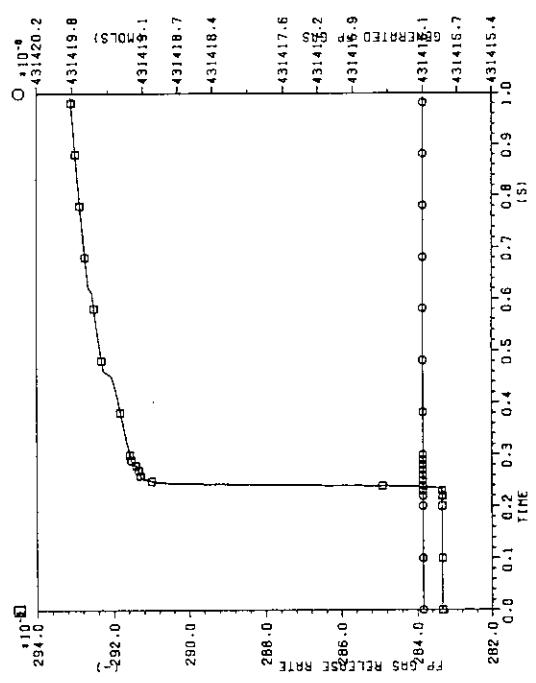
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER#61/68)



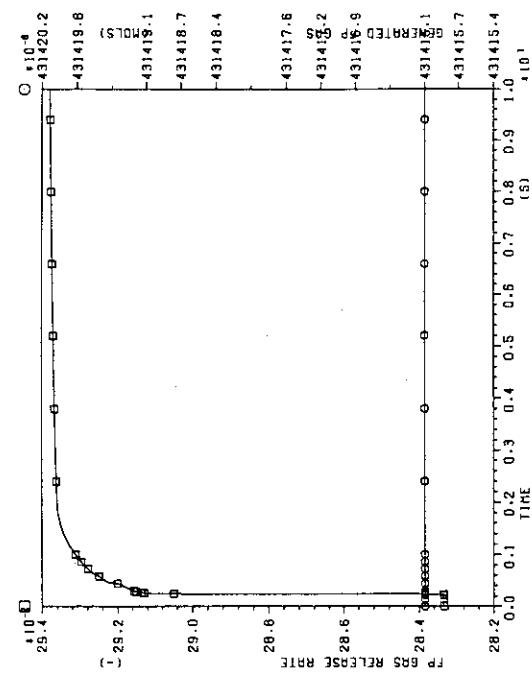
JAERI-M 94-031

FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0kW/H, 4.47E7SEC., POWER=61/68)

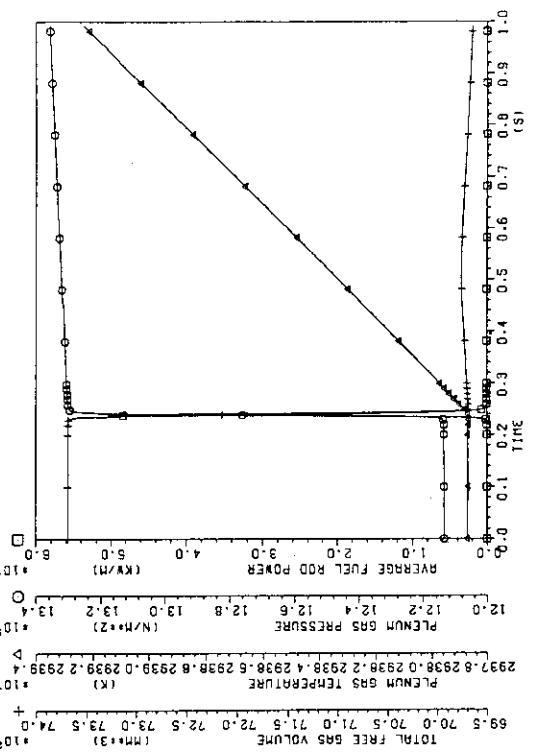
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0kW/H, 4.47E7SEC., POWER=61/68)



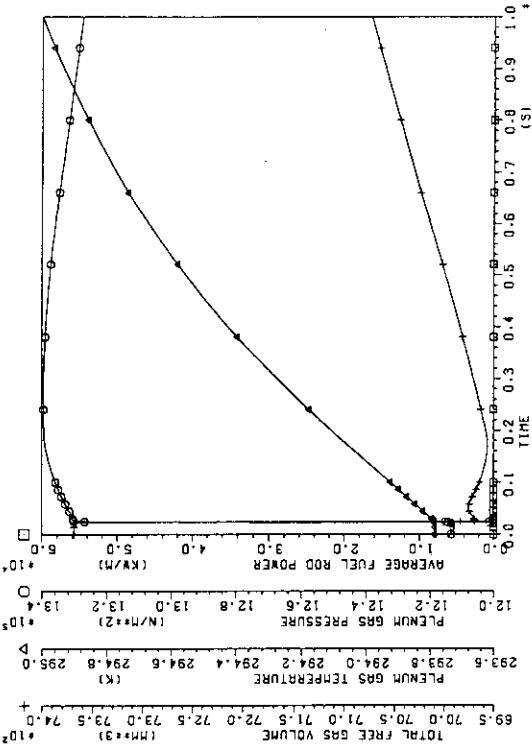
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0kW/H, 4.47E7SEC., POWER=61/68)



FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0kW/H, 4.47E7SEC., POWER=61/68)



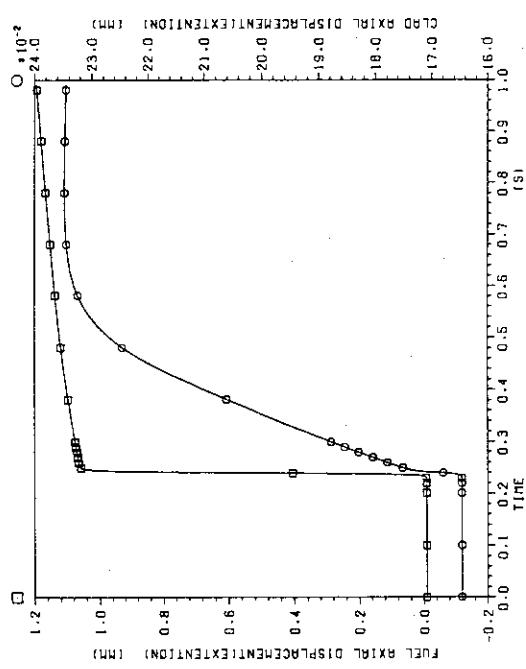
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0kW/H, 4.47E7SEC., POWER=61/68)



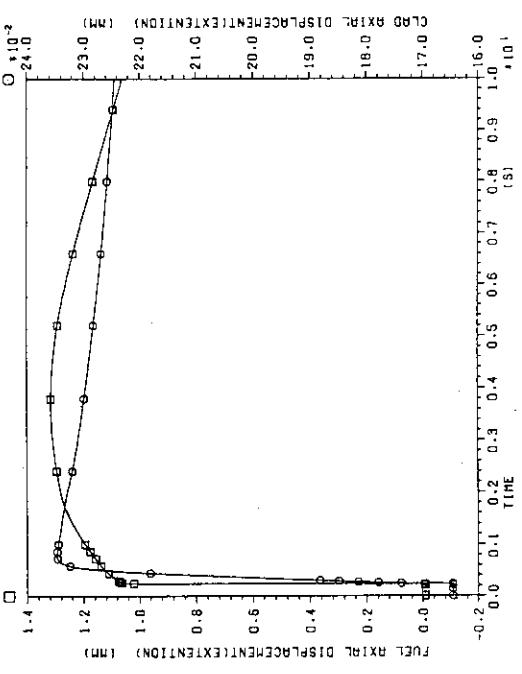
FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0KW/m, 4.47E7SEC, POWER#61/68)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/m, 4.47E7SEC, POWER#61/68)

EG&G IDAHO INEL

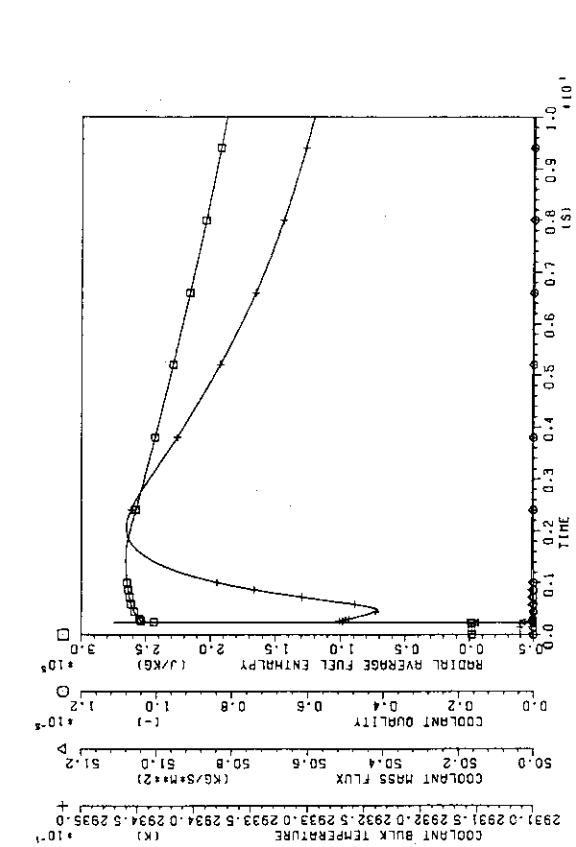
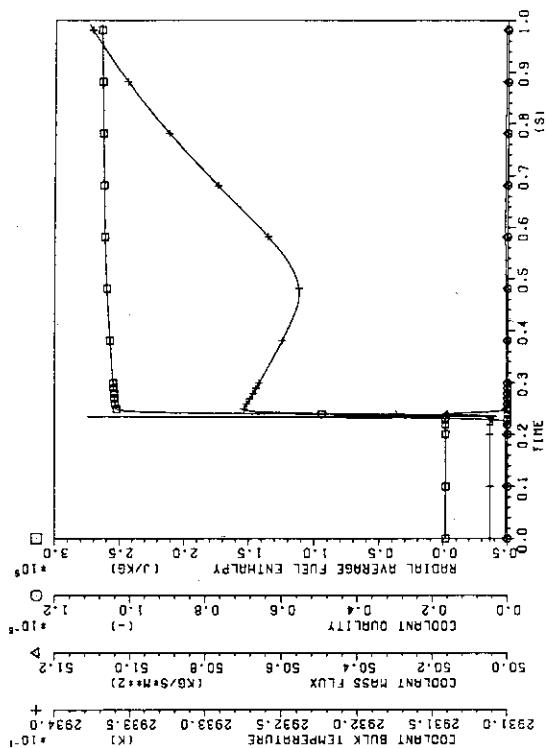


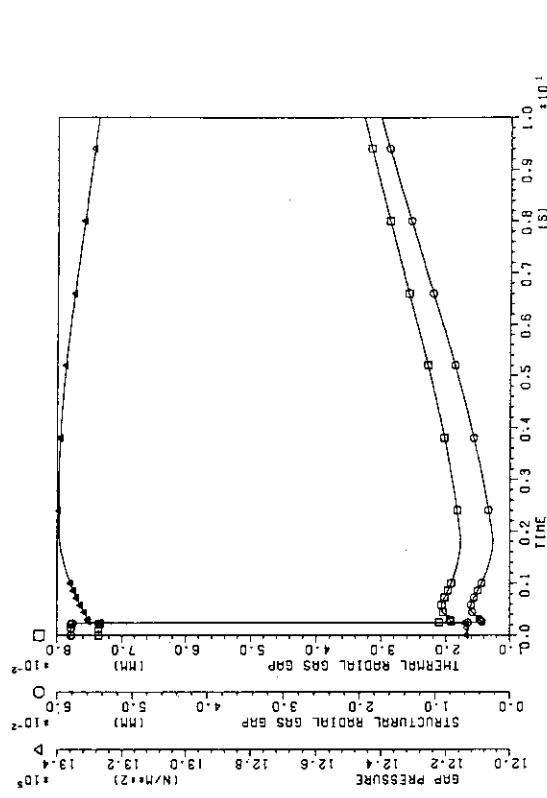
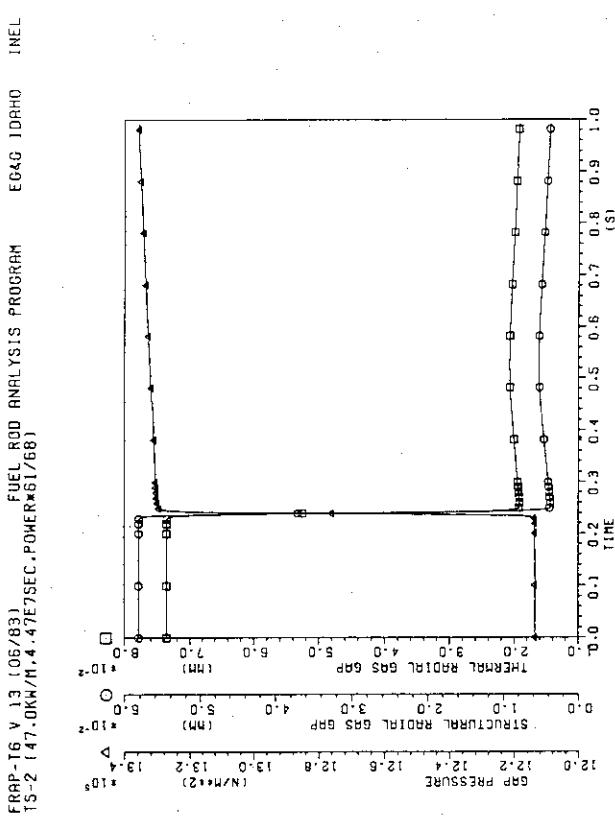
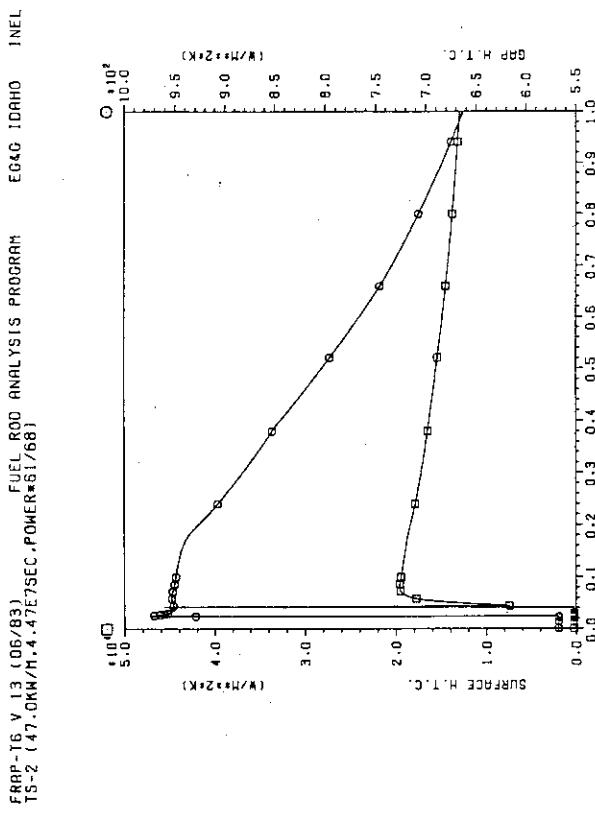
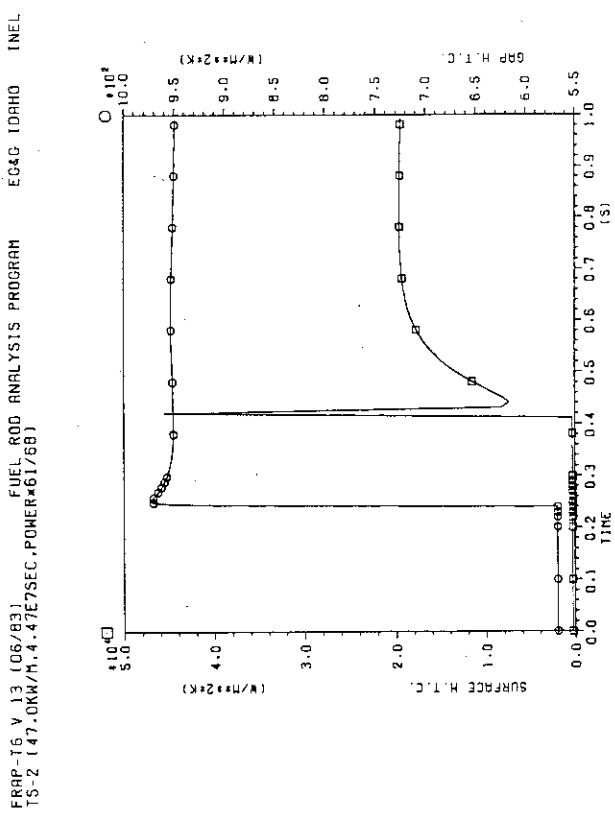
FUEL ROD AXIAL DISPLACEMENT EXTENSION (MM)
TS-2 (47.0KW/m, 4.47E7SEC, POWER#61/68)

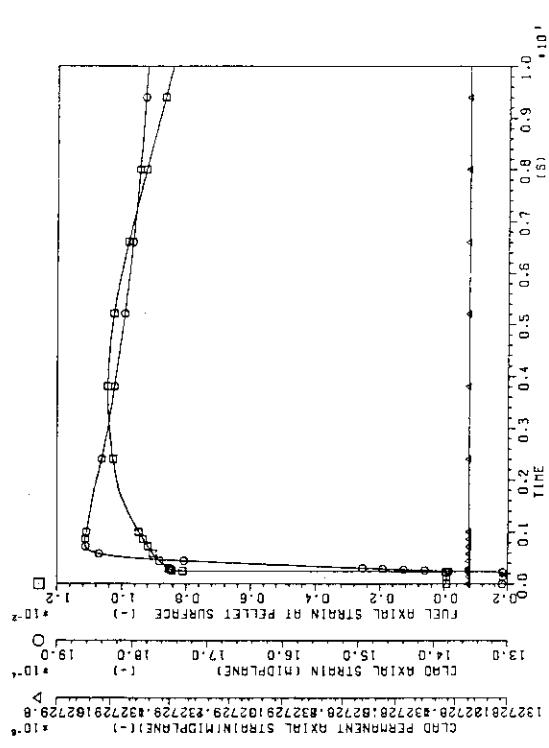
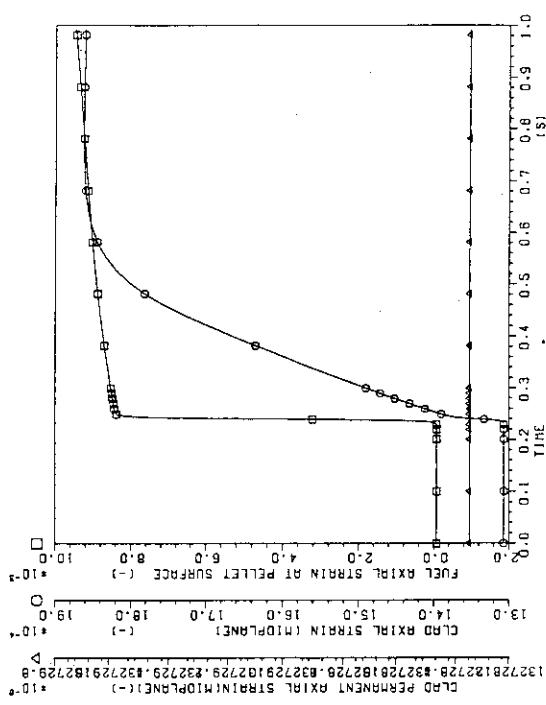
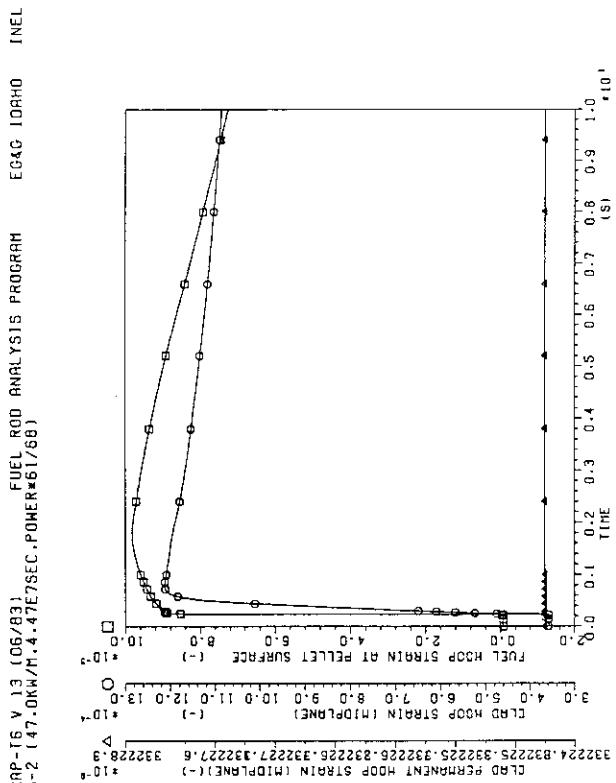
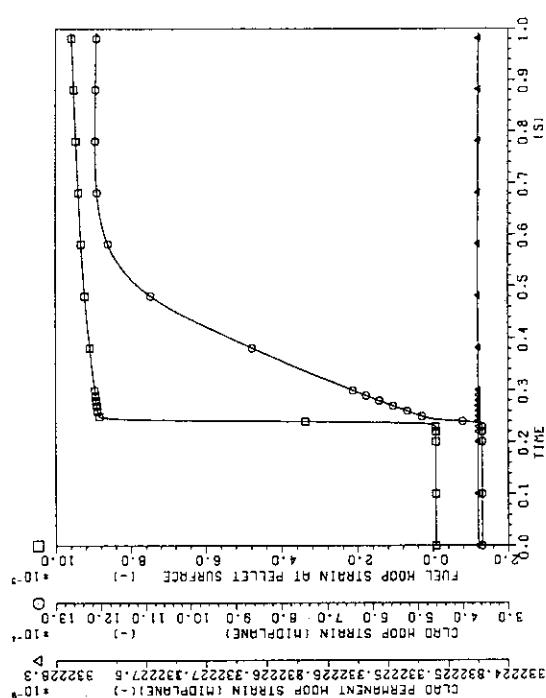


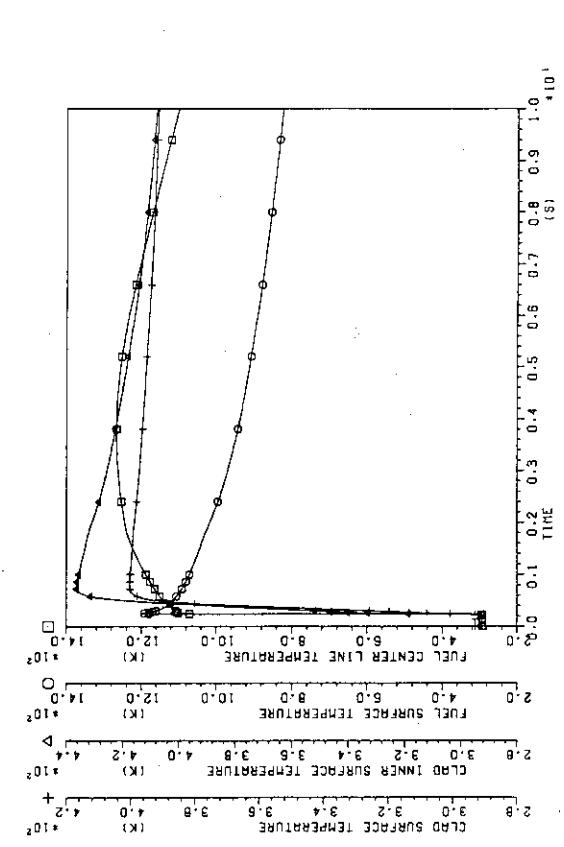
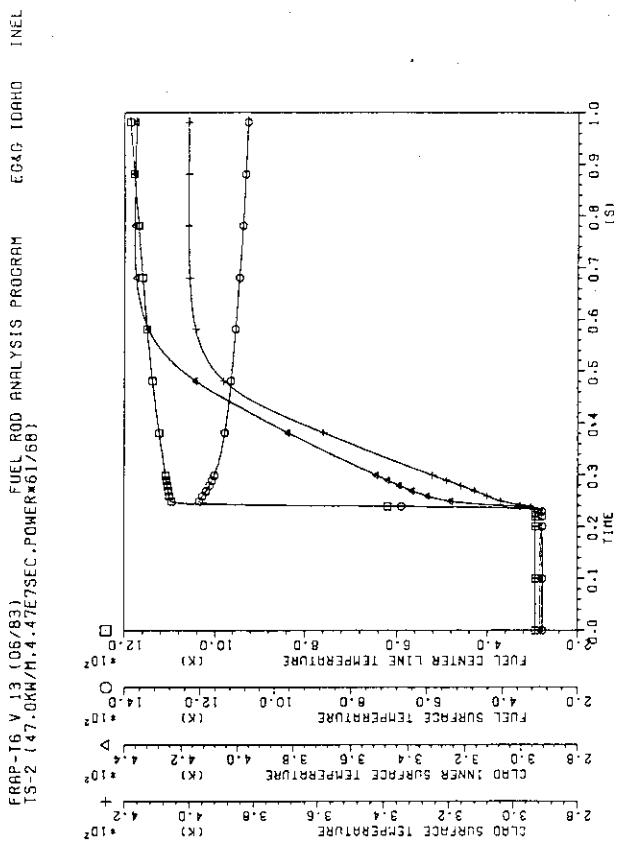
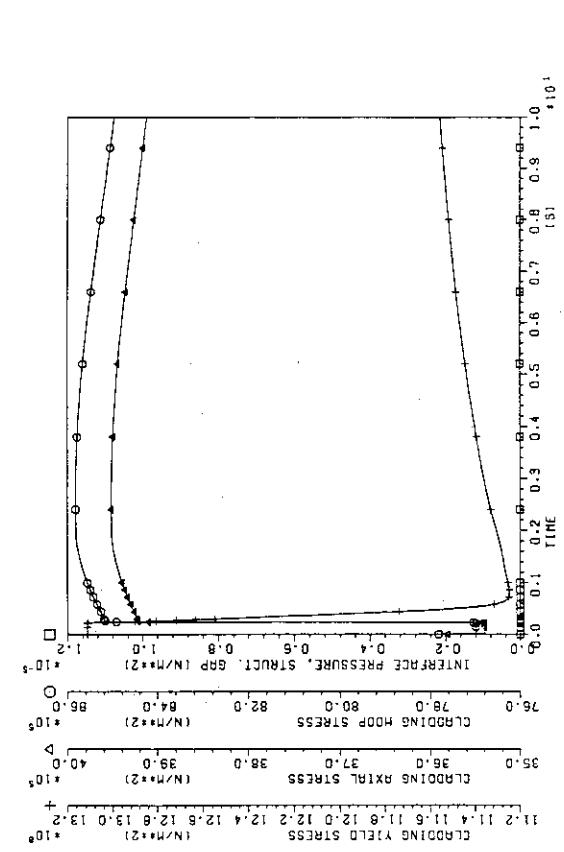
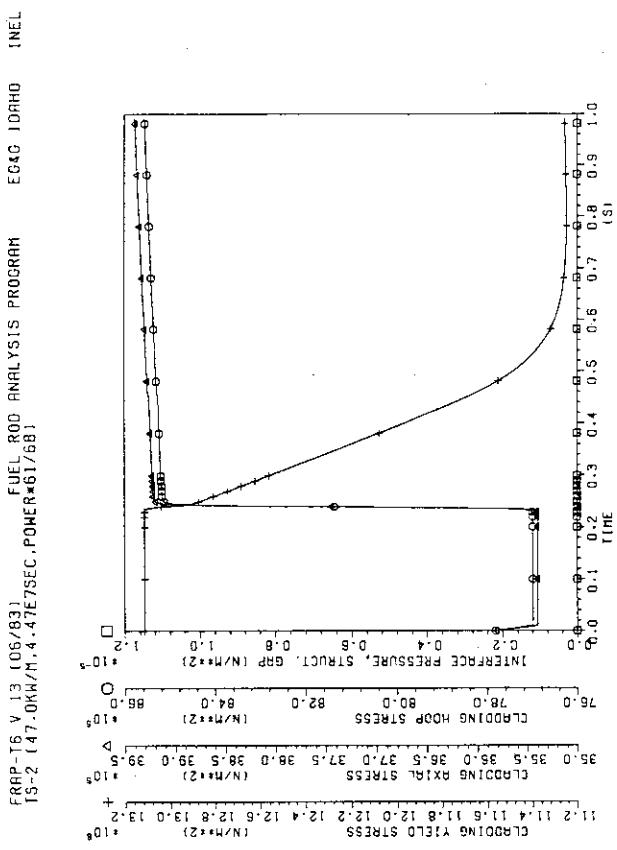
FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/m, 4.47E7SEC, POWER#61/68)

EG&G IDAHO INEL



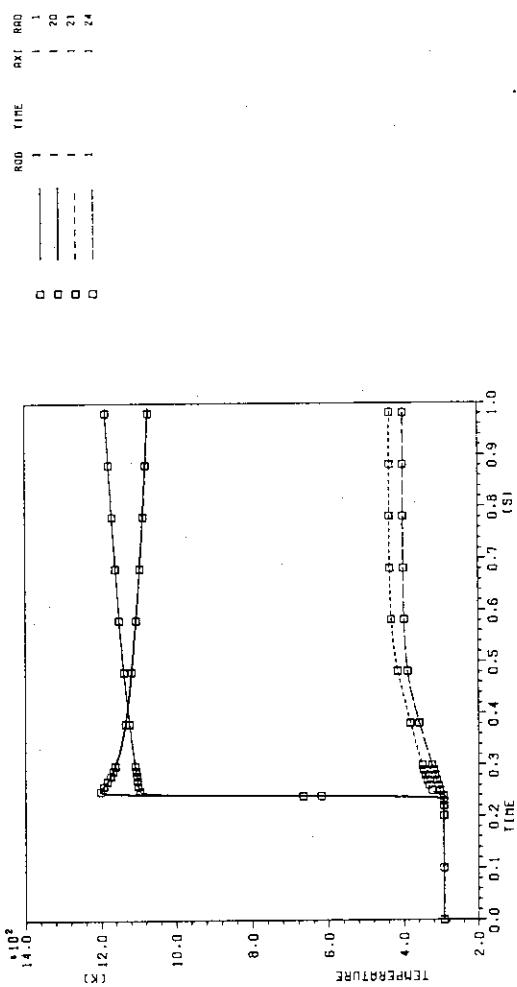






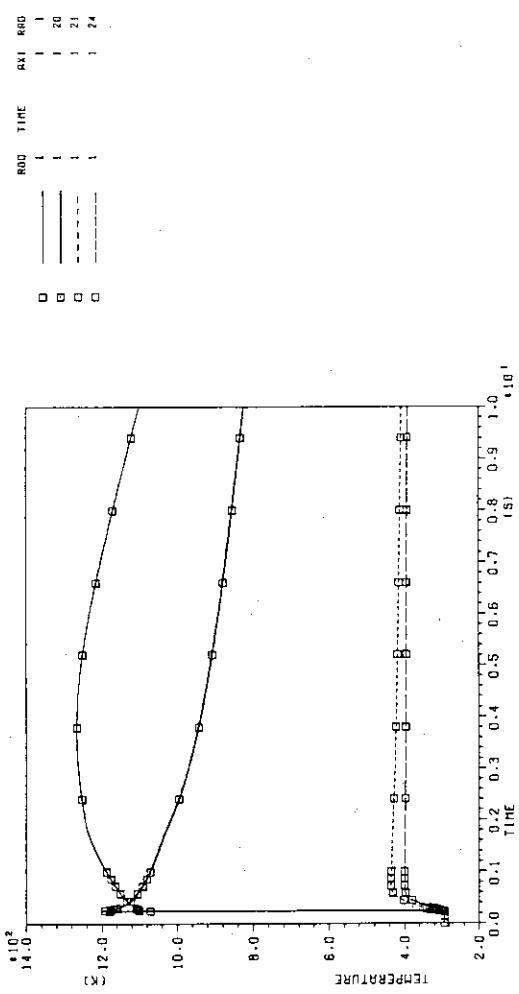
FRAP-TG V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TG-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=61/68)

EG&G IDAHO INEL



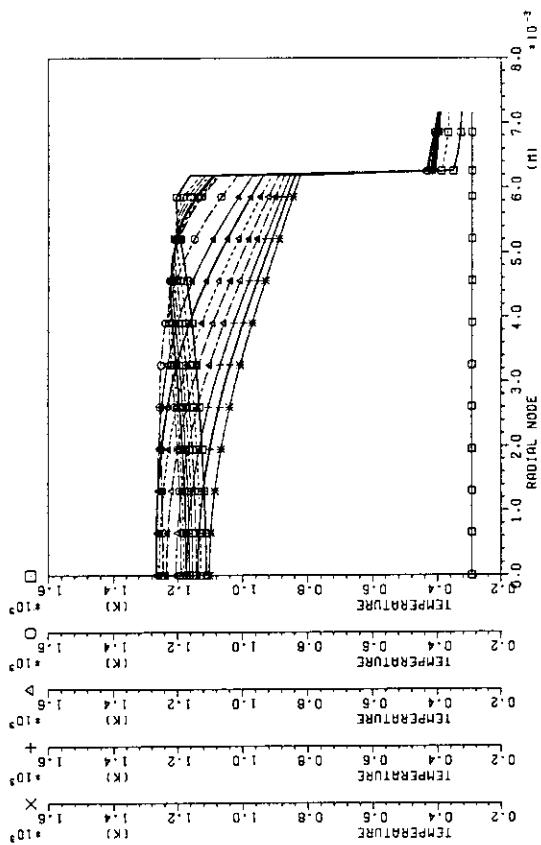
FRAP-TG V 1.3 (06/83)
TG-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=61/68)

EG&G IDAHO INEL



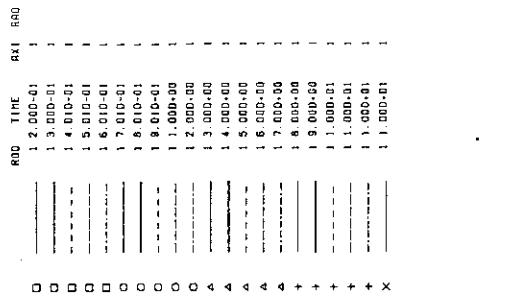
FRAP-16 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*61/68)

EG&G IDAHO INEL



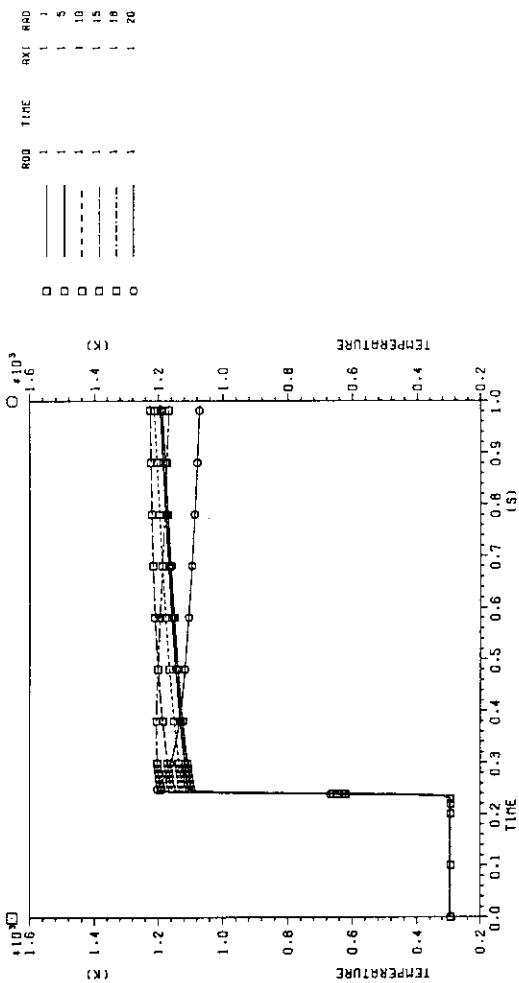
FRAP-16 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*61/68)

EG&G IDAHO INEL



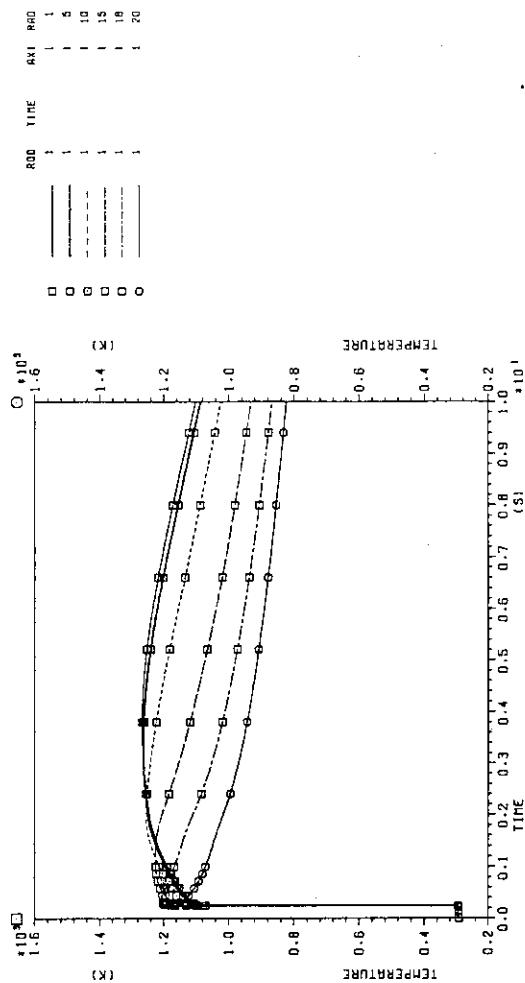
FRAP-16 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*61/68)

EG&G IDAHO INEL



FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/H.4.47E7SEC,POWER#61/68)

EG&G IDAHO INEL



FRAP-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/N, 4.47E7SEC, POWER#71/68)

EG&G IDAHO INEL

ITEM (SEC)	AVE. FUEL ROD POWR (KW/N)	VOL.AVE. FUEL TEMP. (K)	AXIAL EXTENSION			FP GAS (MM)	RETAIN. CLADDING (%)	GRAIN (%)	FACE (%)	EDGE RELEASE (%)	ERROR (%)
			P STACK (MM)	CLADDING (MM)	(%)						
-4.470E+07	4.700E+01	1380.1	2.665E+00	1.292E+00	78.92	65.54	6.56	6.81	21.12	0.041	
-2.235E+07	4.700E+01	1399.3	2.708E+00	1.296E+00	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	
6.645E+10	1.338E+09	293.1	-8.679E-03	1.647E-01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	
1.000E-01	2.014E+01	293.2	-8.539E-03	1.646E-01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	
2.000E-01	4.027E+01	293.3	-8.517E-03	1.647E-01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	
3.000E-01	8.497E+01	1288.5	1.262E+00	3.046E-01	69.26	56.74	2.75	9.77	29.52	1.221	
3.100E-01	8.356E+01	1293.5	1.266E+00	3.079E-01	69.13	56.74	2.75	9.77	29.52	1.218	
4.101E-01	6.947E+01	1294.6	1.296E+00	3.381E-01	68.97	56.77	2.73	9.64	29.68	1.187	
5.101E-01	5.540E+01	1298.0	1.321E+00	3.639E-01	69.07	56.79	2.72	9.56	29.77	1.163	
6.101E-01	4.254E+01	1298.3	1.340E+00	3.826E-01	69.01	56.76	2.72	9.50	29.84	1.148	
7.101E-01	4.051E+01	1297.1	1.358E+00	3.997E-01	68.94	56.81	2.72	9.42	29.92	1.137	
8.101E-01	3.848E+01	1295.6	1.374E+00	4.161E-01	68.93	56.81	2.71	9.40	29.94	1.127	
9.101E-01	3.645E+01	1293.5	1.390E+00	4.311E-01	68.93	56.82	2.71	9.39	29.95	1.119	
1.010E+00	3.442E+01	1291.0	1.404E+00	4.466E-01	68.93	56.83	2.71	9.39	29.96	1.111	
2.010E+00	7.610E+00	1239.9	1.505E+00	5.473E-01	68.88	56.82	2.69	9.36	30.01	1.113	
3.010E+00	6.380E+00	1173.3	1.534E+00	5.758E-01	68.80	56.76	2.67	9.37	30.01	1.191	
4.010E+00	5.150E+00	1137.3	1.525E+00	2.288E-01	68.73	56.71	2.65	9.38	30.02	1.253	
5.010E+00	3.920E+00	1109.1	1.478E+00	2.284E-01	68.65	56.65	2.61	9.39	30.02	1.327	
6.010E+00	2.699E+00	1079.5	1.408E+00	2.277E-01	68.56	56.57	2.58	9.41	30.02	1.417	
7.010E+00	2.385E+00	1050.5	1.333E+00	2.269E-01	68.47	56.50	2.54	9.43	30.02	1.508	
8.010E+00	2.070E+00	1022.9	1.259E+00	2.261E-01	68.38	56.43	2.50	9.45	30.03	1.596	
9.010E+00	1.756E+00	996.5	1.190E+00	2.252E-01	68.29	56.36	2.47	9.46	30.03	1.678	
1.000E+01	1.445E+00	971.3	1.127E+00	2.248E-01	68.21	56.30	2.43	9.48	30.03	1.755	

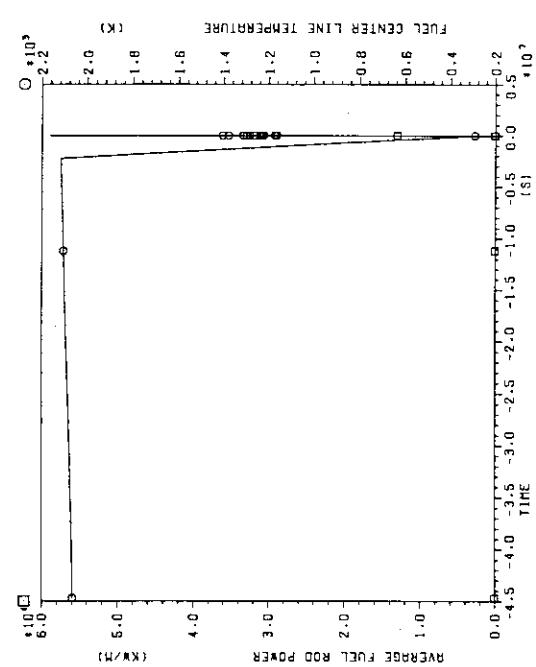
FRAP-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/N, 4.47E7SEC, POWER#71/68)

AXIAL MODE NO. = 1

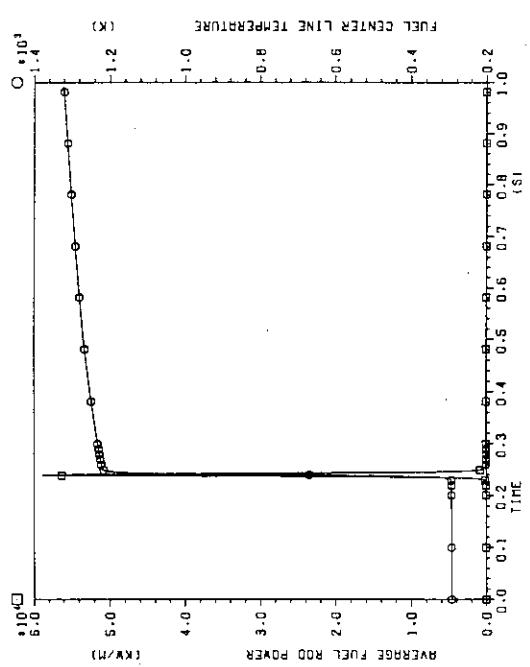
TIME (SEC)	AVE. FUEL ENTHALPY (CAL/G)	FP GAS (%)	RETAIN. GRAIN (%)	FACE (%)	RELEASE (%)	EDGE (%)	CENTER SURFACE (K)	INNER SURFACE (K)	CLADDING (K)	STRUCTURAL RADIAL GAP PRESSURE (N/mm ²)	DISPLACEMENT HOOP STRESS (N/mm ²)
							FUEL PELLET (MM)	CLAD INNER SURFACE (MM)	CLAD OUT. SURF. (MM)	FUEL OUT. SURF. (MM)	
-4.470E+07	7.842E+01	78.92	65.54	6.56	6.81	21.12	0.041	2065.6	814.5	646.1	585.9
-2.235E+07	7.936E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	293.1	7361E-02	5.815E-02
6.645E+10	3.866E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	293.1	1.213E+06	1.504E-02
-3.842E+01	68.01	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	293.1	293.1	1.616E-02	1.616E-03
2.000E+01	3.739E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.3	293.3	1.214E+06	1.504E-02
3.000E+01	7.058E+01	69.26	56.74	2.75	9.77	29.52	1.227.0	403.8	349.8	0.0001E+00	1.346E+06
3.100E+01	7.062E+01	69.25	56.74	2.75	9.77	29.53	1.221.8	403.8	349.8	0.0001E+00	8.031E+05
4.101E+01	7.105E+01	69.13	56.77	2.73	9.64	29.68	1.187	1253.7	1253.7	404.2	0.0001E+00
5.101E+01	7.132E+01	69.07	56.79	2.72	9.56	29.77	1.163	1269.7	1136.6	476.4	409.1
6.101E+01	7.159E+01	69.01	56.80	2.72	9.56	29.84	1.148	1282.3	1101.7	477.8	409.7
7.101E+01	7.126E+01	68.94	56.81	2.72	9.42	29.92	1.137	1293.2	1088.1	476.9	409.6
8.101E+01	7.115E+01	68.93	56.81	2.71	9.40	29.94	1.127	1303.6	1068.2	476.1	409.4
9.101E+01	7.099E+01	68.93	56.82	2.71	9.39	29.95	1.119	1313.4	1049.2	475.9	409.3
1.010E+00	7.080E+00	68.93	56.83	2.71	9.39	29.96	1.111	1322.8	1031.6	475.8	409.3
2.010E+00	6.692E+01	68.88	56.82	2.69	9.36	30.01	1.113	1305.8	909.2	464.8	407.1
3.010E+00	6.184E+01	68.80	56.76	2.67	9.37	30.01	1.104	1403.9	858.8	447.3	403.2
4.010E+00	5.906E+01	68.73	56.71	2.65	9.38	30.02	1.293	1359.2	897.6	419.7	395.5
5.010E+00	5.690E+01	68.65	56.65	2.61	9.39	30.02	1.327	1370.8	896.5	418.7	395.2
6.010E+00	5.464E+01	68.56	56.57	2.58	9.41	30.02	1.417	1327.3	885.5	416.7	394.6
7.010E+00	5.244E+01	68.47	56.50	2.54	9.43	30.02	1.508	1279.3	873.3	414.5	393.8
8.010E+00	5.035E+01	68.38	56.43	2.50	9.45	30.03	1.596	1221.1	860.6	412.5	393.1
9.010E+00	4.836E+01	68.29	56.36	2.47	9.46	30.03	1.678	1167.0	847.6	410.7	392.5
1.000E+01	4.647E+01	68.21	56.30	2.43	9.48	30.03	1.755	1144.9	834.3	409.1	391.9

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/M,4.47E7SEC,POWER#71/68)

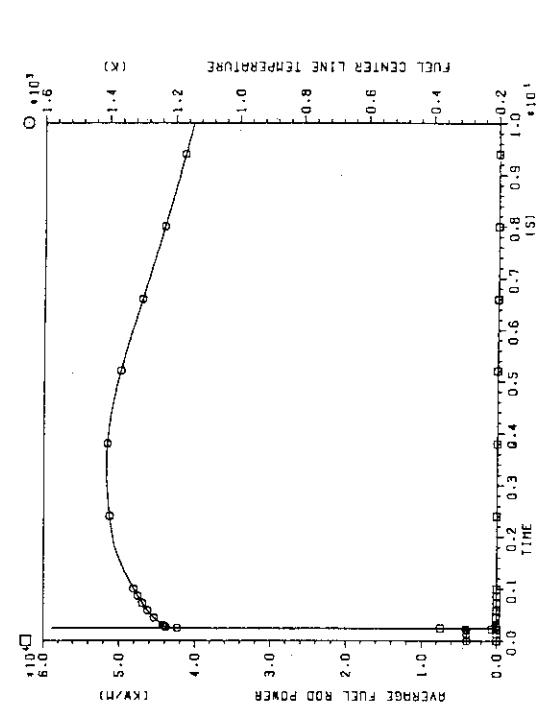
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/M,4.47E7SEC,POWER#71/68)



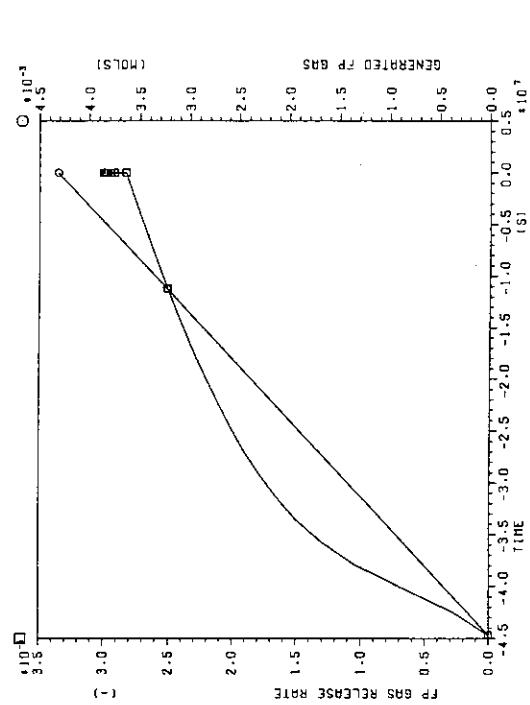
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/M,4.47E7SEC,POWER#71/68)



FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/M,4.47E7SEC,POWER#71/68)



FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/M,4.47E7SEC,POWER#71/68)



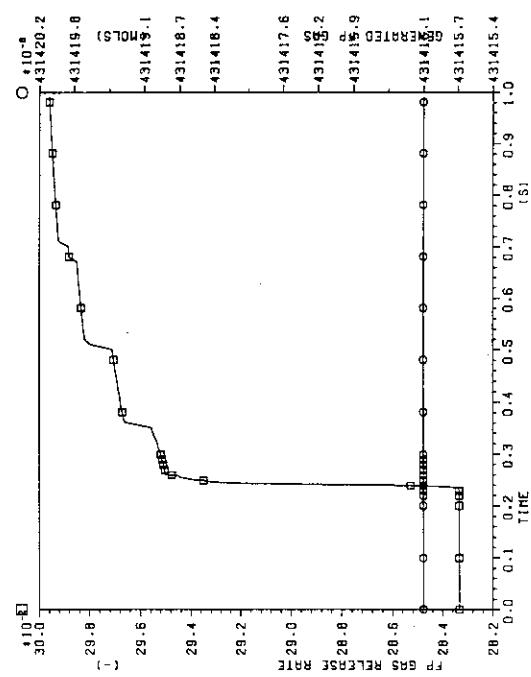
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC.,POWER#71/68)

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC.,POWER#71/68)

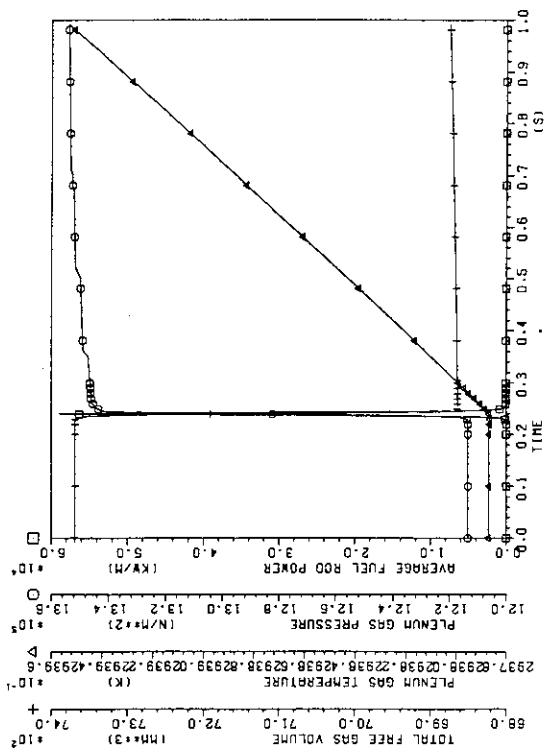
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC.,POWER#71/68)

EG&G IDAHO INEL

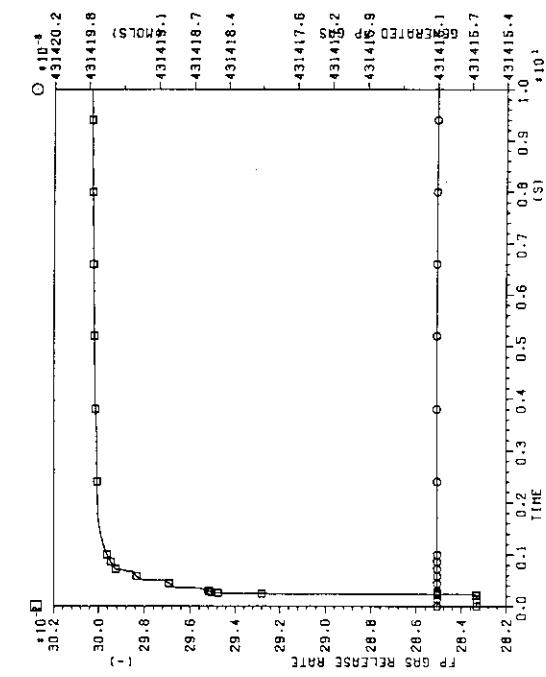
JAERI-M 94-031



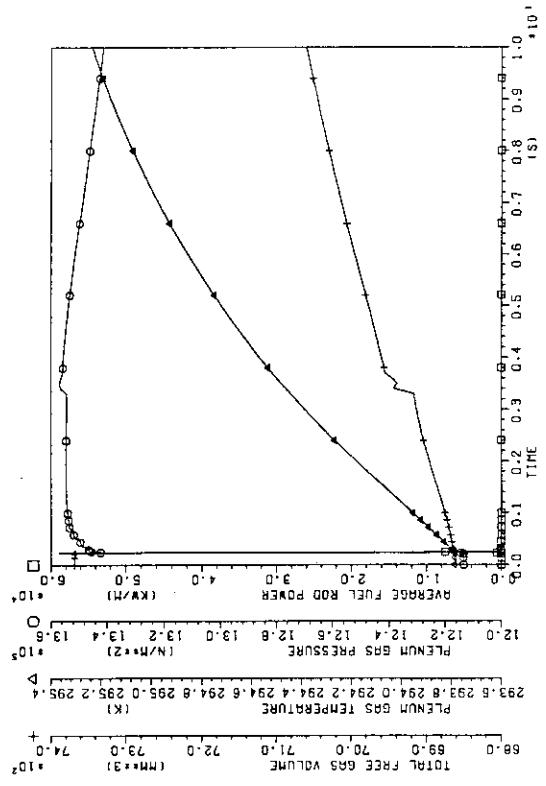
FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC.,POWER#71/68)



FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC.,POWER#71/68)



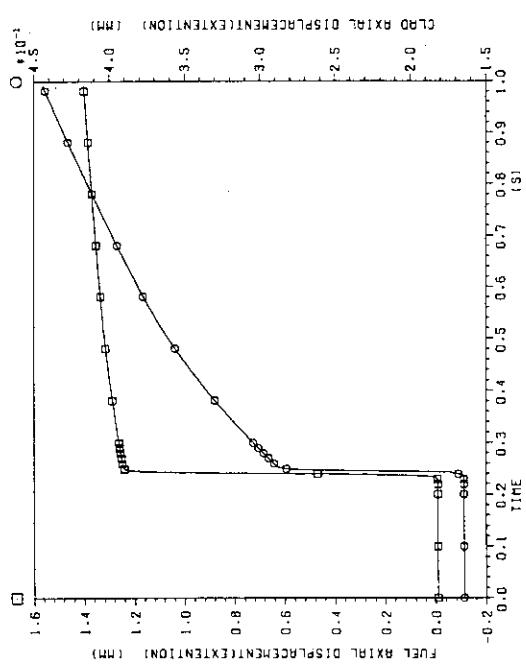
FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC.,POWER#71/68)



FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC.,POWER#71/68)

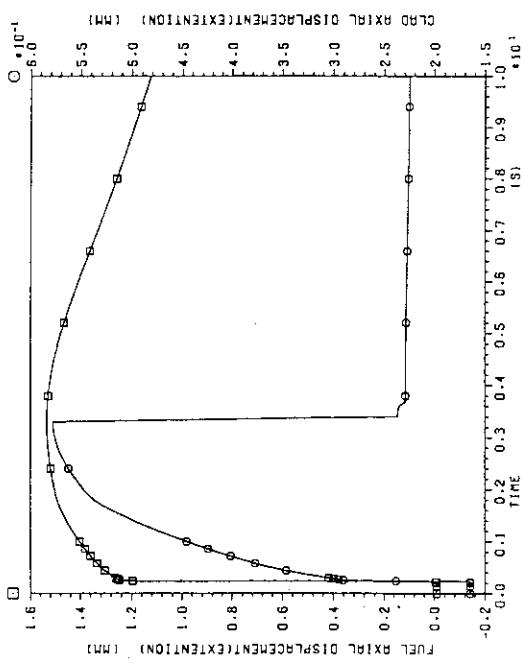
FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=71/68)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
INEL EG&G IDAHO



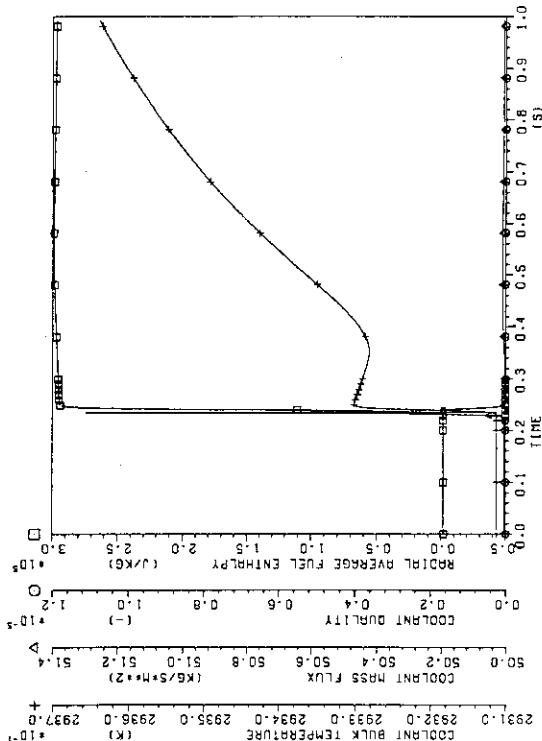
FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=71/68)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
INEL EG&G IDAHO



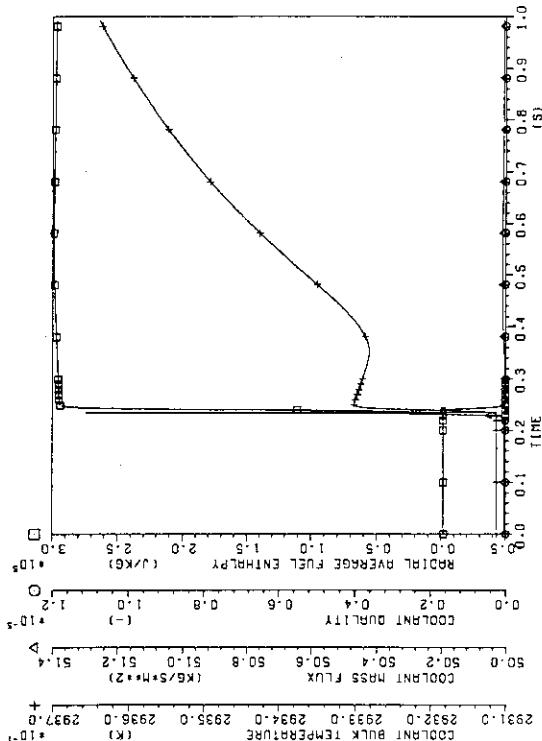
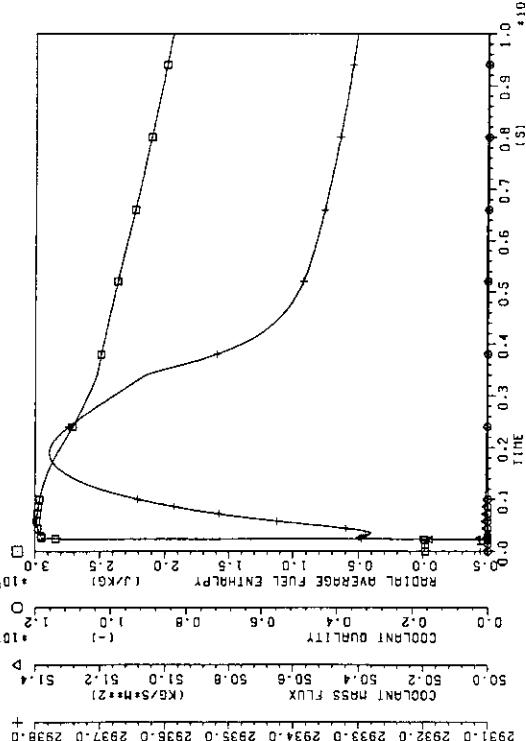
FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=71/68)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
INEL EG&G IDAHO



FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=71/68)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
INEL EG&G IDAHO

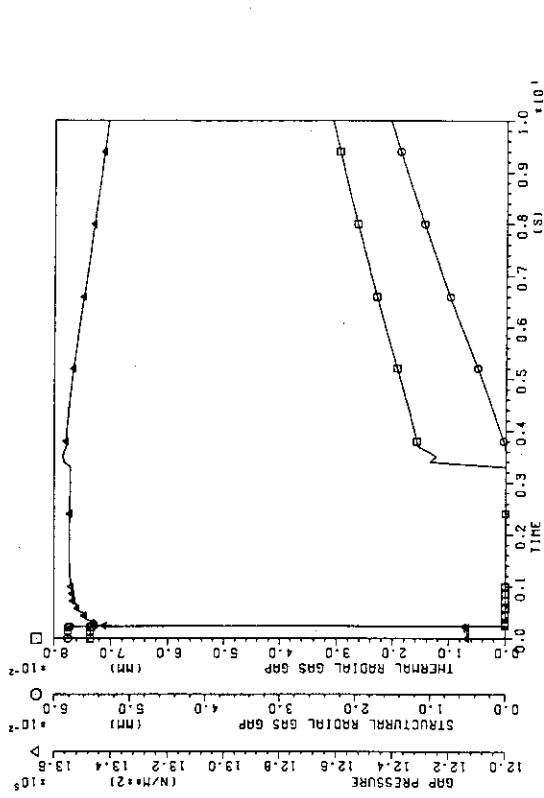
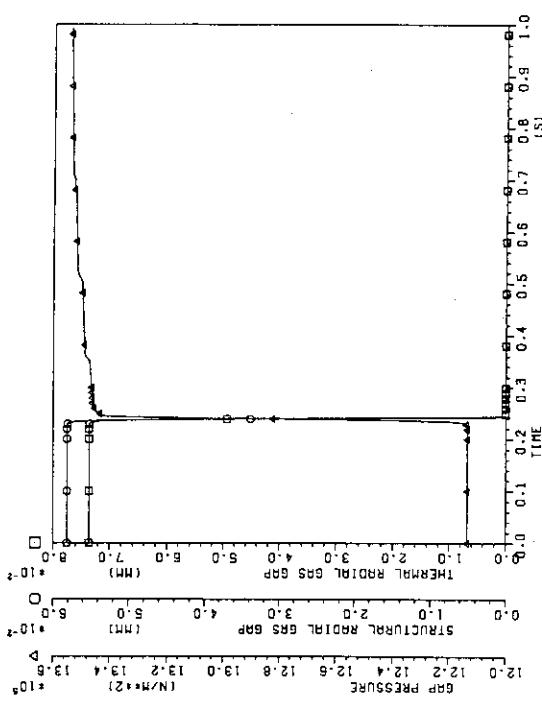
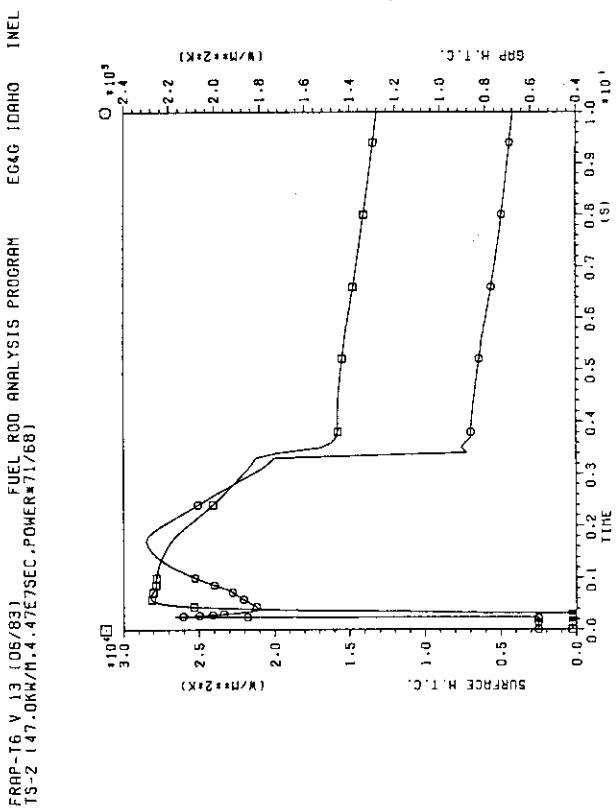
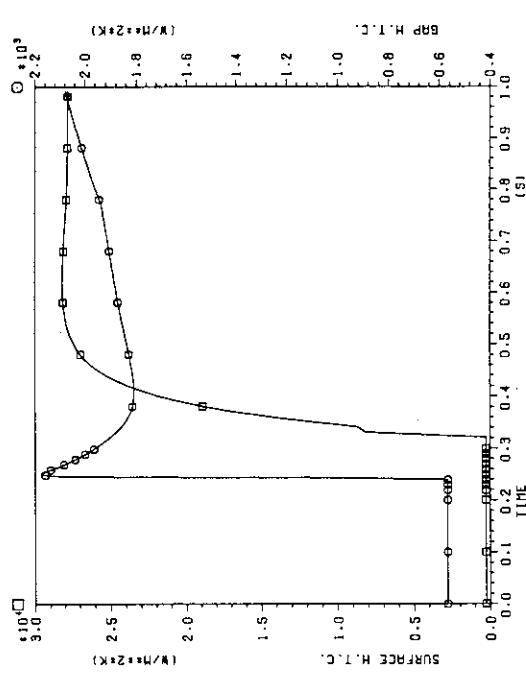


FRAPI-16 V.13 (06/83)
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC.,POWER#71/68)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC.,POWER#71/68)

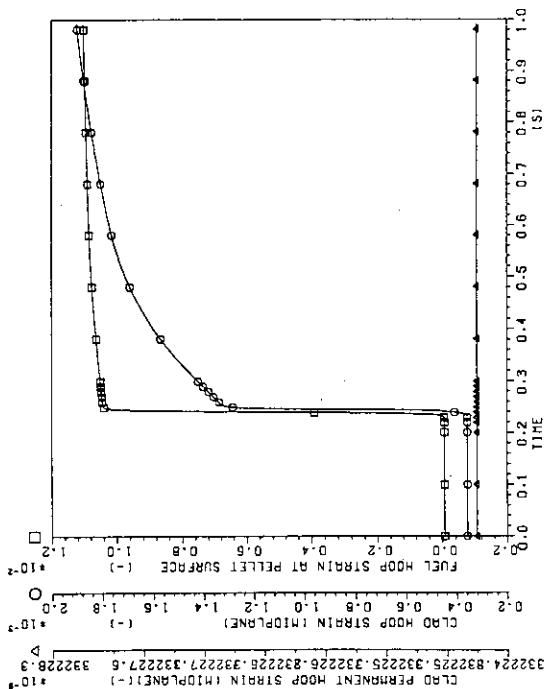
FRAP-16 V.13 (06/83)
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC.,POWER#71/68)

EG&G IDAHO INEL



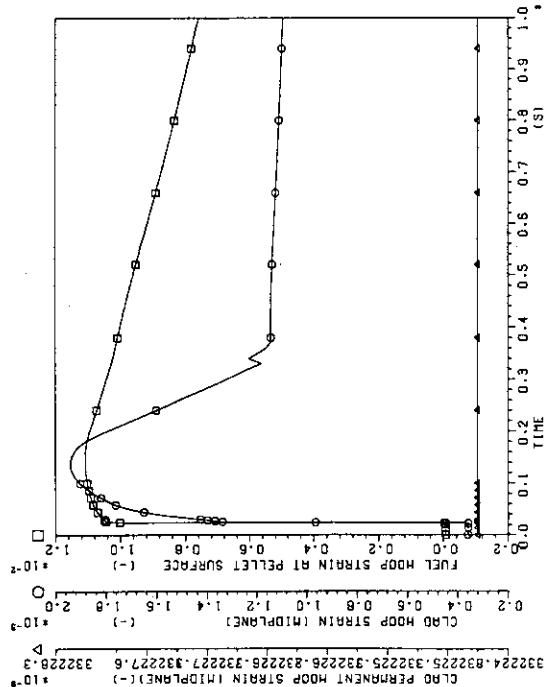
FRAPI-16 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0kW/m, 4.47 SEC., POWER*71/68)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
EG&G IDAHO INEL



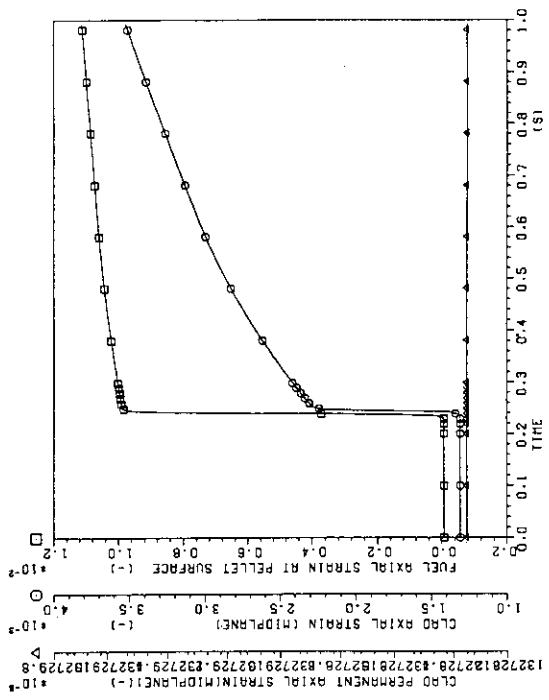
FRAPI-16 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0kW/m, 4.47 SEC., POWER*71/68)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
EG&G IDAHO INEL



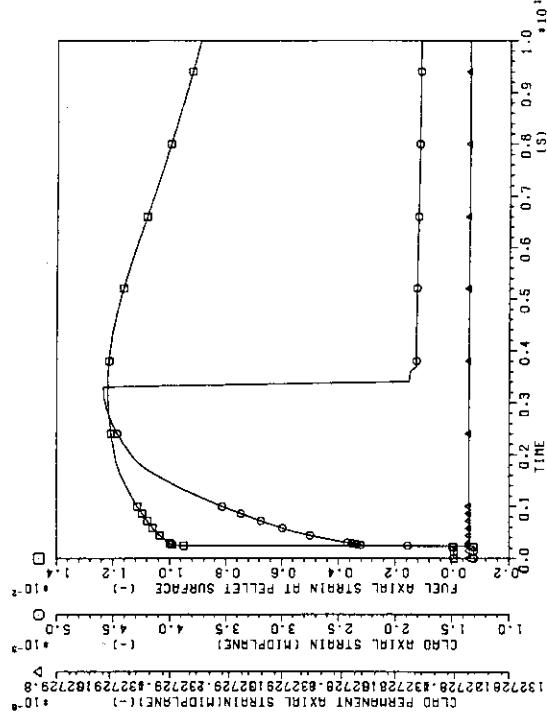
FRAPI-16 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0kW/m, 4.47 SEC., POWER*71/68)

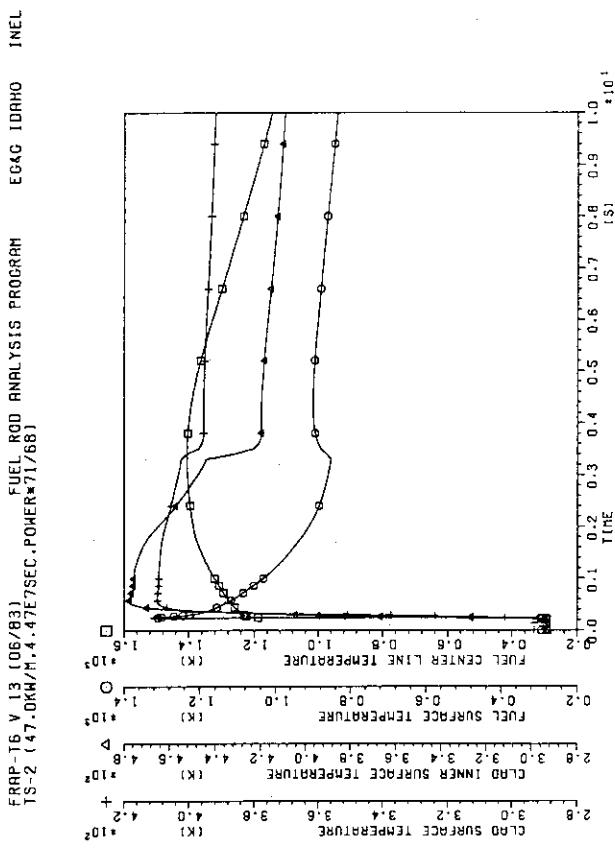
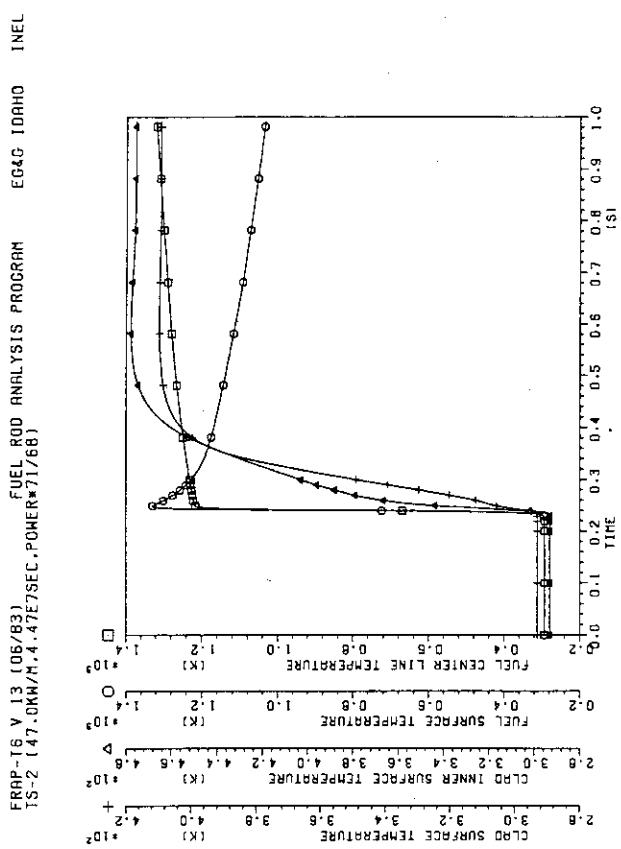
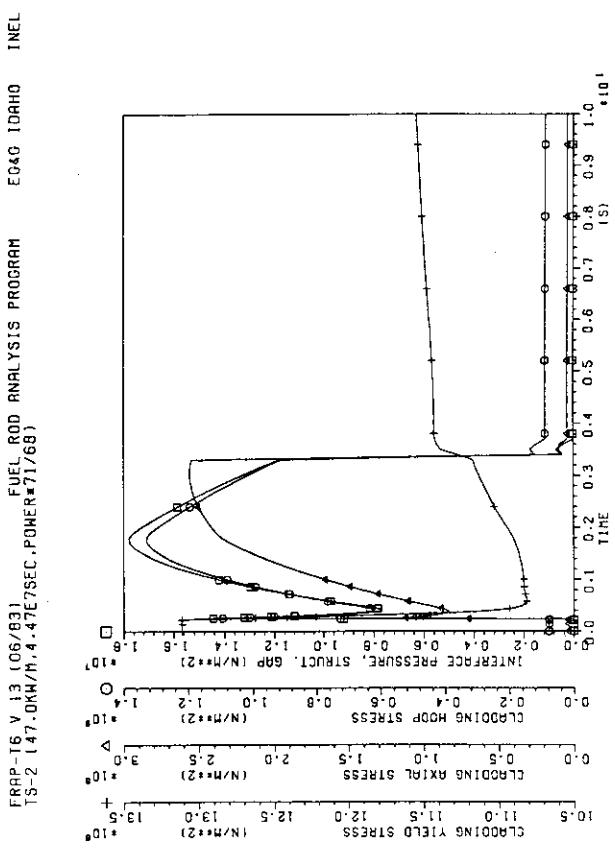
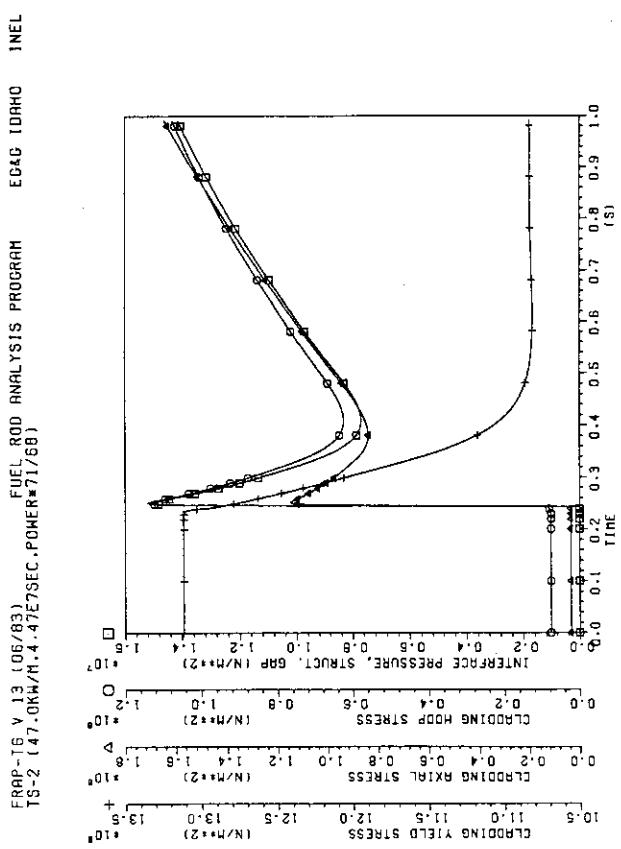
FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
EG&G IDAHO INEL



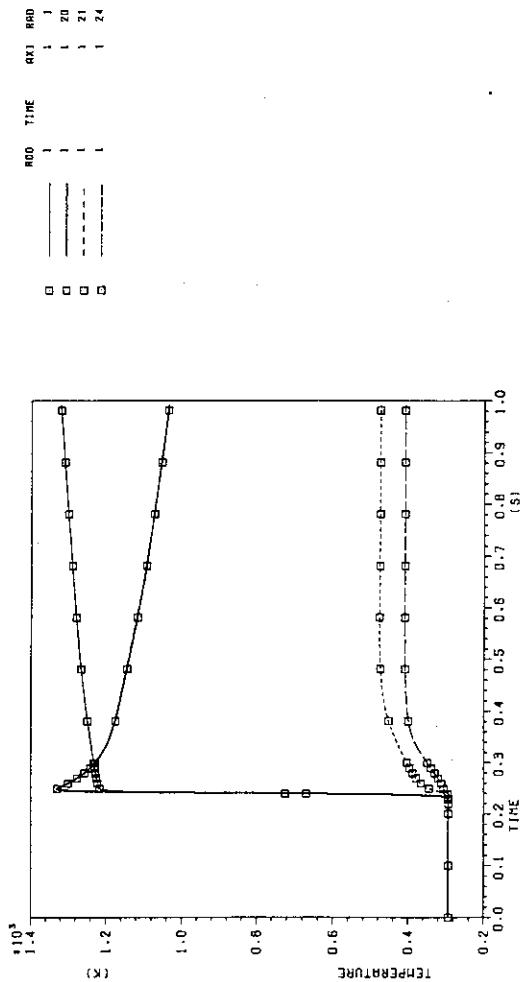
FRAPI-16 V 13 (06/83)
TS-2 (47.0kW/m, 4.47 SEC., POWER*71/68)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
EG&G IDAHO INEL

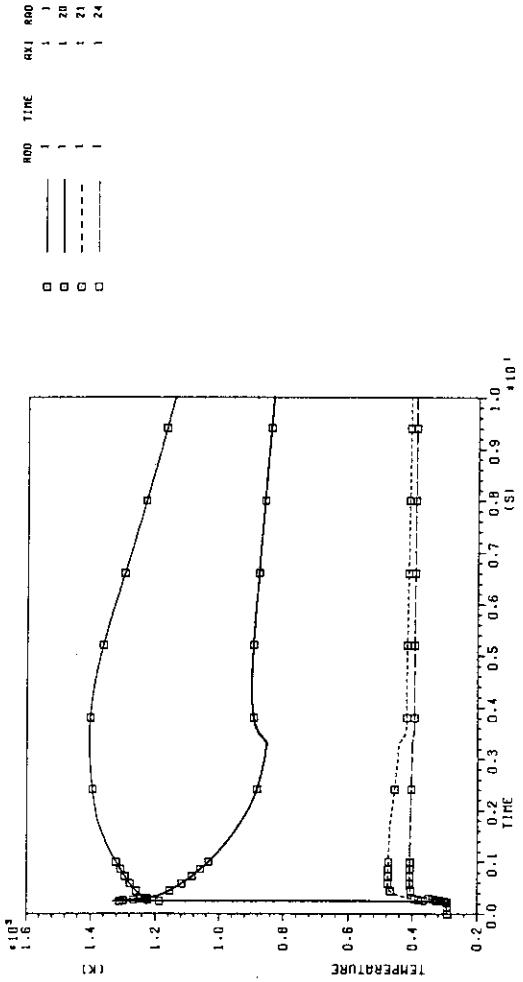




FRAP-T6 V 1.3 (06/83)
TS-2 (47.0kW/n.4.47E7SEC.POWER*7/68)

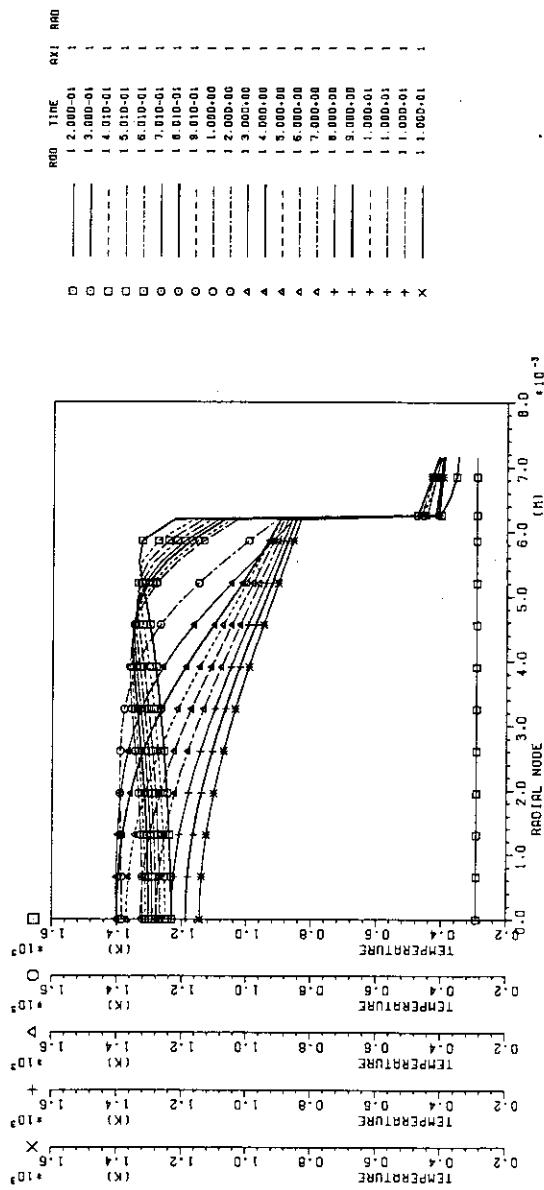


FRAP-T6 V 1.3 (06/83)
TS-2 (47.0kW/n.4.47E7SEC.POWER*7/68)



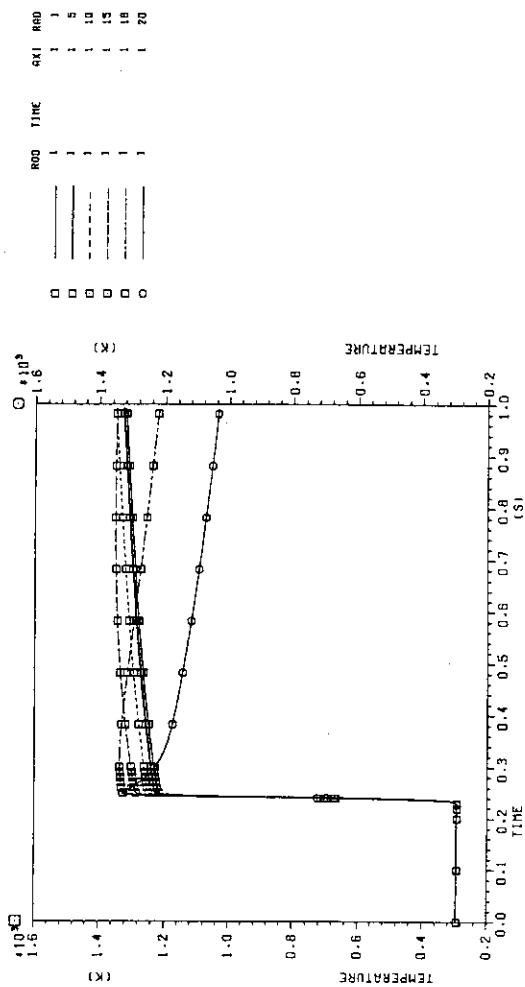
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0kW/h, 4.47E7SEC, POWER*71/68)

EGRG IDAHO INEL



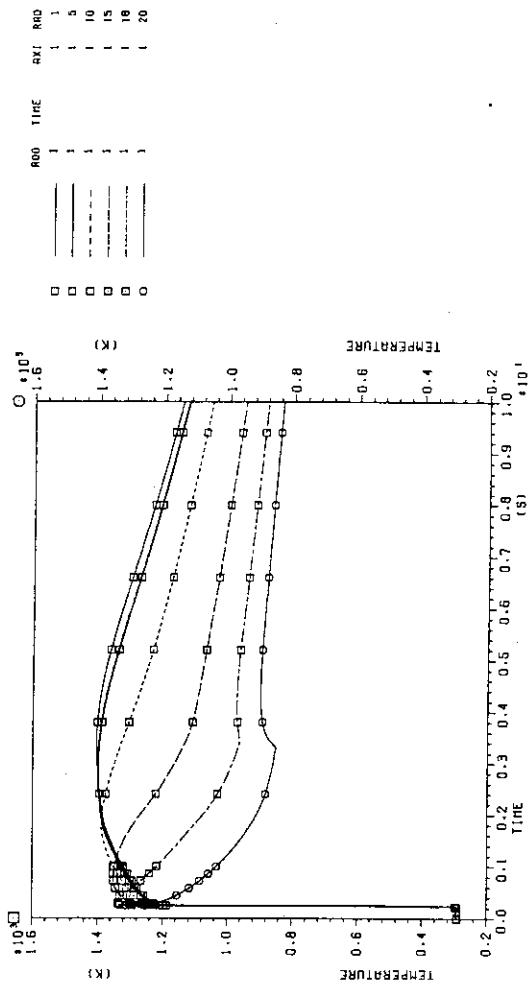
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0kW/h, 4.47E7SEC, POWER*71/68)

EGRG IDAHO INEL



FRAP-16 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-2 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER*1/68)

EG&G IDAHO INEL



FRAP-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*88/81)

EG&G IDAHO INEL

TIME (SEC)	AVE. FUEL POWER (KW/M)	VOL. AVE. FUEL TEMP. (K)	AXIAL EXTENSION P. STACK (MM)	CLADDING (MM)	FP GAS RELEASE (%)	FACE (%)	GRAIN (%)	FAKE (%)	EDGE RELEASE (%)	ERROR (%)
-4.470E+07	4.000E+01	1380.1	2.665E+00	1.296E+00	78.92	65.54	6.56	6.81	21.12	0.041
-2.235E+07	4.000E+01	1399.3	2.708E+00	1.296E+00	68.92	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376
6.645E-10	3.132E-08	293.1	8.679E-03	1.647E-01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.375
1.000E-01	4.714E+00	293.9	-7.734E-03	1.647E-01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.375
2.000E-01	9.427E+00	296.5	-4.838E-03	1.647E-01	68.30	55.00	3.43	9.87	28.33	3.370
3.000E-01	6.708E+01	1498.2	1.604E+00	6.281E-01	68.17	57.20	2.25	8.72	31.17	0.662
3.100E-01	6.636E+01	1496.5	1.633E+00	6.309E-01	68.16	57.19	2.25	8.72	31.18	0.662
4.101E-01	5.911E+01	1483.5	1.656E+00	6.574E-01	67.65	57.20	2.23	8.22	31.69	0.659
5.101E-01	5.226E+01	1472.0	1.678E+00	6.807E-01	67.53	57.20	2.23	8.10	31.82	0.658
6.101E-01	4.887E+01	1460.9	1.678E+00	7.020E-01	67.29	57.20	2.23	7.86	32.05	0.657
7.101E-01	4.347E+01	1450.5	1.698E+00	7.220E-01	67.03	57.20	2.23	7.60	32.32	0.657
8.101E-01	4.208E+01	1459.8	1.716E+00	7.406E-01	67.01	57.20	2.22	7.59	32.33	0.658
9.101E-01	3.869E+01	1429.6	1.733E+00	7.579E-01	66.89	57.19	2.22	7.47	32.45	0.660
1.010E+00	3.350E+01	1419.5	1.749E+00	7.739E-01	66.88	57.19	2.22	7.46	32.46	0.663
2.010E+00	1.351E+01	1313.9	1.852E+00	8.768E-01	66.77	57.12	2.21	7.44	32.49	0.745
3.010E+00	6.359E+00	1216.0	1.887E+00	9.118E-01	66.64	57.02	2.19	7.43	32.49	0.864
4.010E+00	5.309E+00	1137.6	1.877E+00	8.813E-01	66.51	56.90	2.18	7.43	32.49	0.993
5.010E+00	4.259E+00	1084.3	1.767E+00	7.219E-01	66.36	56.78	2.16	7.42	32.50	1.136
6.010E+00	3.215E+00	1004.6	1.636E+00	2.259E-01	66.22	56.68	2.14	7.40	32.53	1.255
7.010E+00	2.842E+00	1041.2	1.492E+00	2.259E-01	66.08	56.58	2.09	7.41	32.54	1.382
8.010E+00	2.469E+00	1017.4	1.362E+00	2.259E-01	65.96	56.48	2.04	7.44	32.55	1.498
9.010E+00	2.096E+00	993.7	1.234E+00	2.259E-01	65.85	56.39	1.99	7.47	32.55	1.599
1.000E+01	1.727E+00	970.5	1.167E+00	2.246E-01	65.76	56.32	1.94	7.50	32.56	1.686

FRAP-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*88/81)

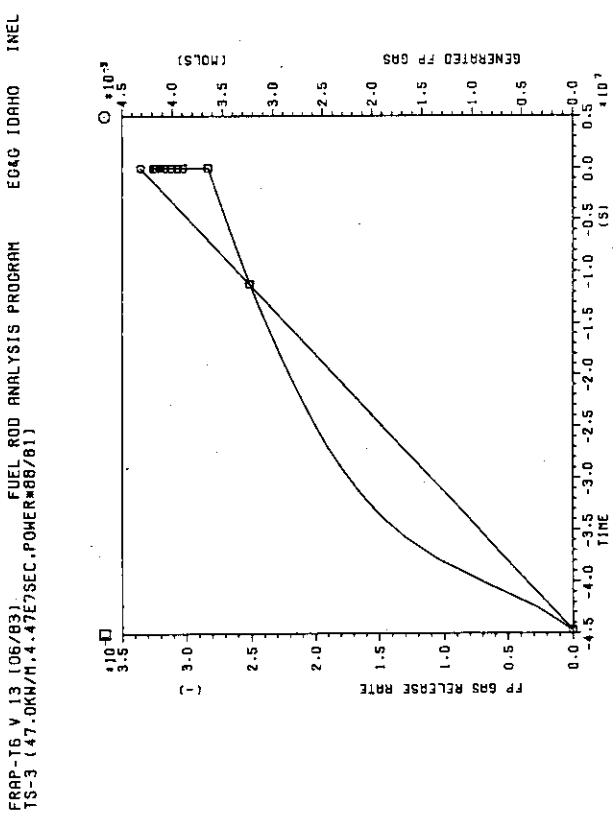
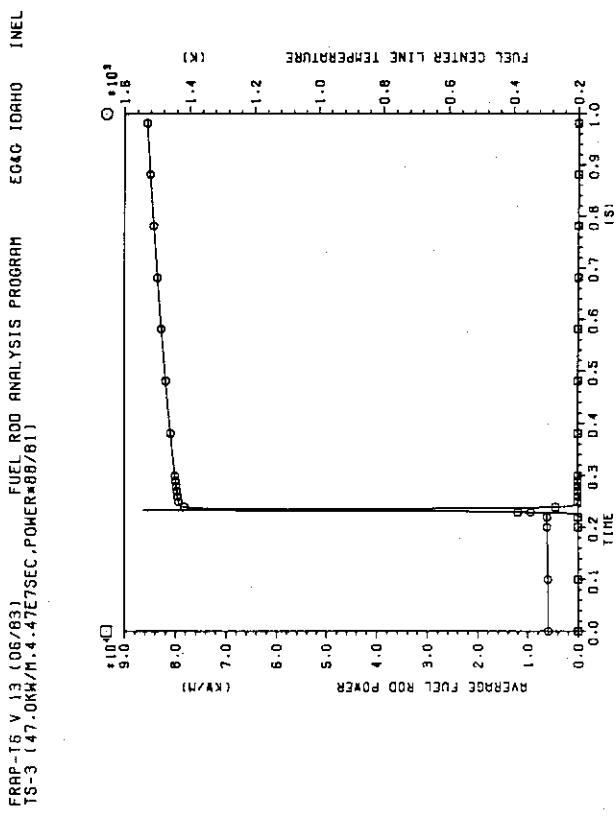
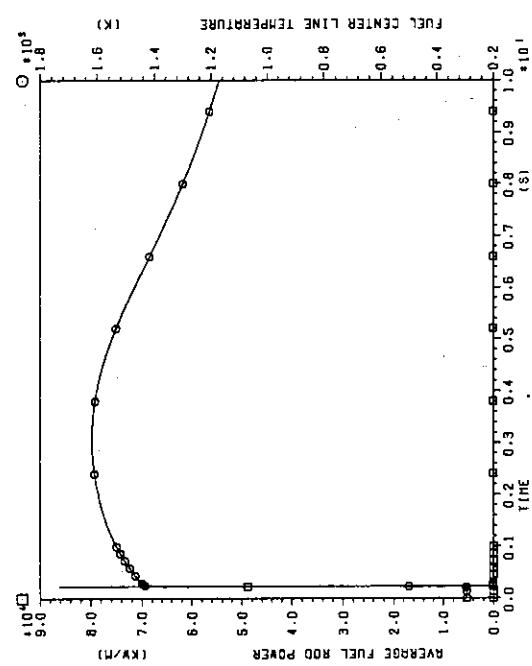
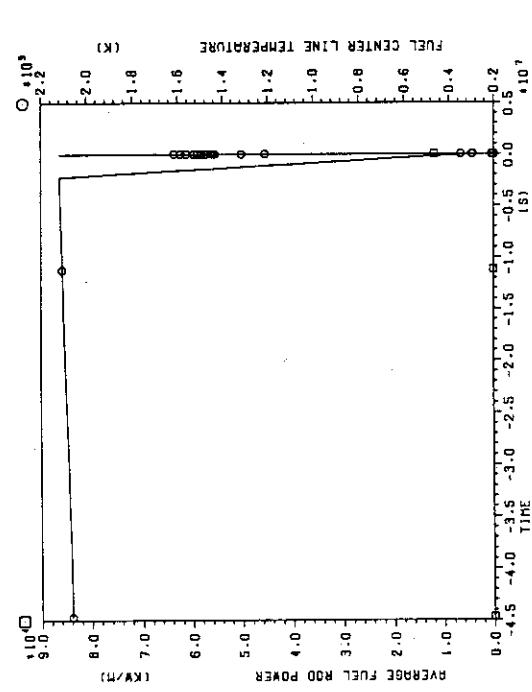
EG&G IDAHO INEL

AXIAL NODE NO. = 1

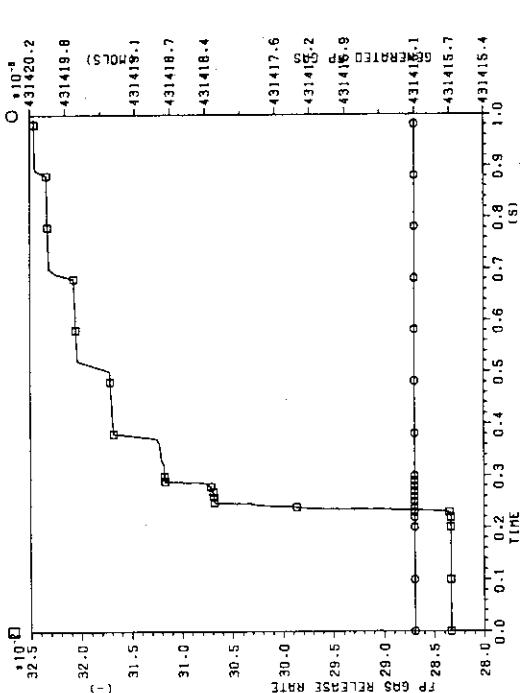
TIME (SEC)	RADIALY AVE. FUEL ENTHALPY (CAL/G)	FP GAS RELEASE (%)	TEMPERATURE CENTER PELLET (K)	TEMPERATURE INNER SURFACE (K)	CLADDING INNER SURFACE (K)	GAS THERMAL PRESSURE (N/mm ²)	STRUCTURAL RADIAL GAP PRESSURE (N/mm ²)	DISPLACEMENT OUT. SURF. (MM)	CLADDING CLAD. OUT. SURF. (MM)	CLADDING HOOP STRESS (MM ²)
-4.470E+07	7.924E+01	78.92	65.54	6.56	6.81	21.12	0.041	2090.0	827.7	646.1
-2.235E+07	7.924E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	293.1	7.361E-02
6.645E-10	-3.866E-01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	293.1	5.815E-02
1.000E-01	-3.417E-01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.375	293.1	293.1	1.214E+06
2.000E-01	-2.074E-01	68.30	55.00	3.43	9.87	28.33	3.370	296.4	293.3	7.342E-02
3.000E-01	8.704E-01	68.17	57.20	2.25	8.72	31.17	0.662	1445.6	1235.0	5.816E-02
3.100E-01	8.690E-01	68.16	57.20	2.25	8.72	31.18	0.662	1447.4	1215.5	646.1
4.101E-01	8.589E-01	67.65	57.20	2.23	8.22	31.69	0.659	1433.7	1181.1	585.9
5.101E-01	8.500E-01	67.51	57.20	2.23	8.10	31.82	0.658	1478.0	1058.0	565.5
6.101E-01	8.416E-01	67.01	57.20	2.23	7.86	32.05	0.657	1430.9	1012.5	422.5
7.101E-01	8.334E-01	67.03	57.20	2.23	7.60	32.32	0.657	1502.9	970.5	548.1
8.101E-01	8.254E-01	67.01	57.20	2.22	7.59	32.33	0.658	1514.1	947.1	420.6
9.101E-01	8.175E-01	66.89	57.19	2.22	7.47	32.45	0.660	1524.6	924.3	419.6
1.010E+00	8.098E-01	66.88	57.19	2.22	7.46	32.46	0.663	1524.2	905.0	418.7
2.010E+00	7.286E-01	66.77	57.12	2.21	7.44	32.49	0.745	1505.5	786.9	495.1
3.010E+00	6.533E-01	66.64	57.02	2.19	7.43	32.49	0.884	1616.9	735.2	472.1
4.010E+00	5.930E-01	66.51	56.90	2.18	7.43	32.49	0.998	1600.2	722.3	453.4
5.010E+00	5.518E-01	66.36	56.78	2.16	7.42	32.50	1.136	1587.9	770.4	414.1
6.010E+00	5.175E-01	66.22	56.68	2.14	7.40	32.53	1.255	1459.3	826.7	392.9
7.010E+00	5.178E-01	66.08	56.58	2.09	7.41	32.54	1.382	1380.9	837.9	411.6
8.010E+00	4.966E-01	65.96	56.48	2.04	7.44	32.55	1.498	1299.1	839.4	410.6
9.010E+00	4.816E-01	65.85	56.39	1.99	7.47	32.55	1.599	1299.5	835.2	409.4
1.000E+01	4.641E-01	65.76	56.32	1.94	7.50	32.56	1.686	1171.7	827.7	391.6

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER=88/81)

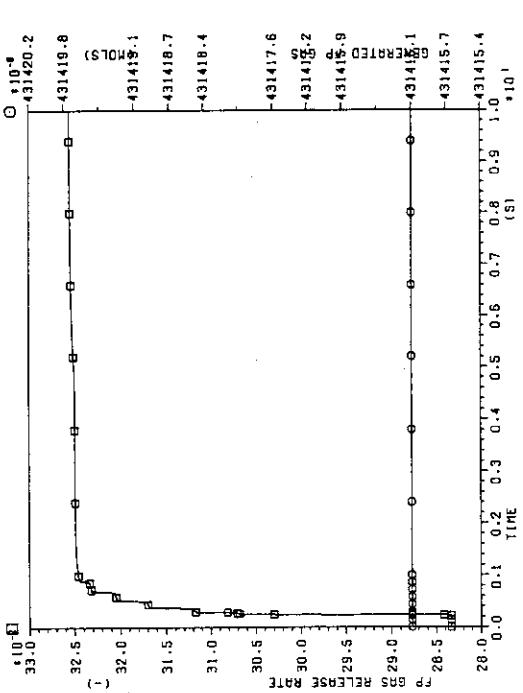
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER=88/81)



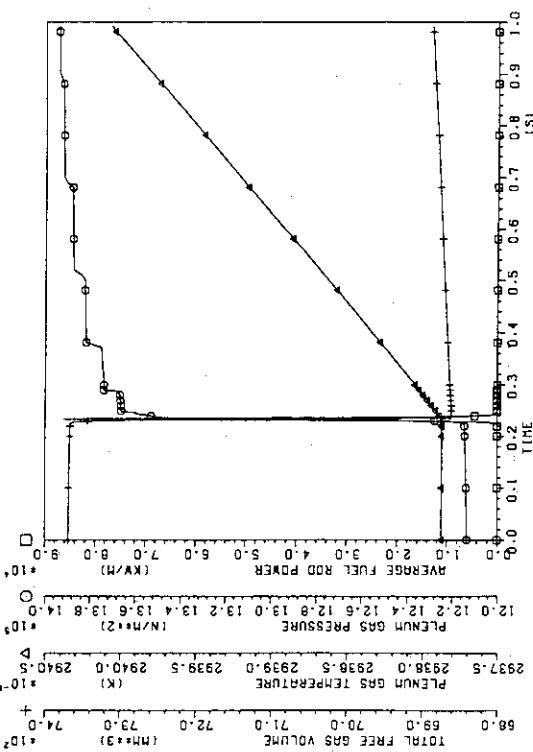
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0kW/M^{4.47E7SEC,POWER=88/01)}



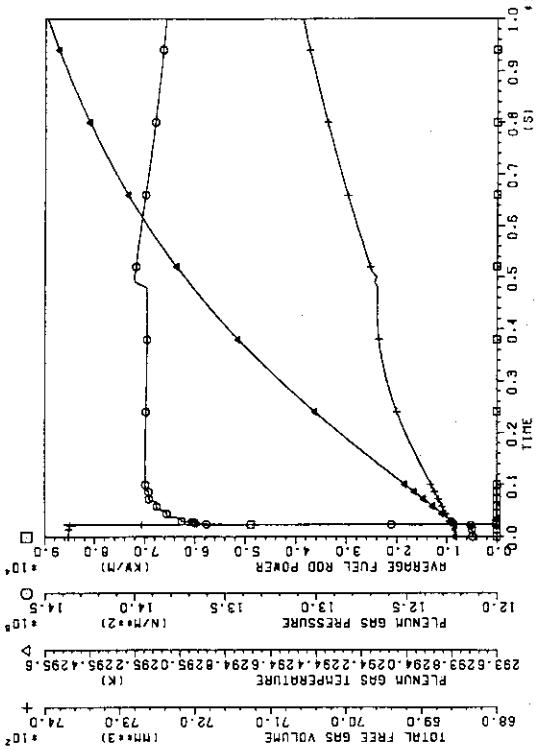
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0kW/M^{4.47E7SEC,POWER=88/01)}



FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0kW/M^{4.47E7SEC,POWER=88/01)}

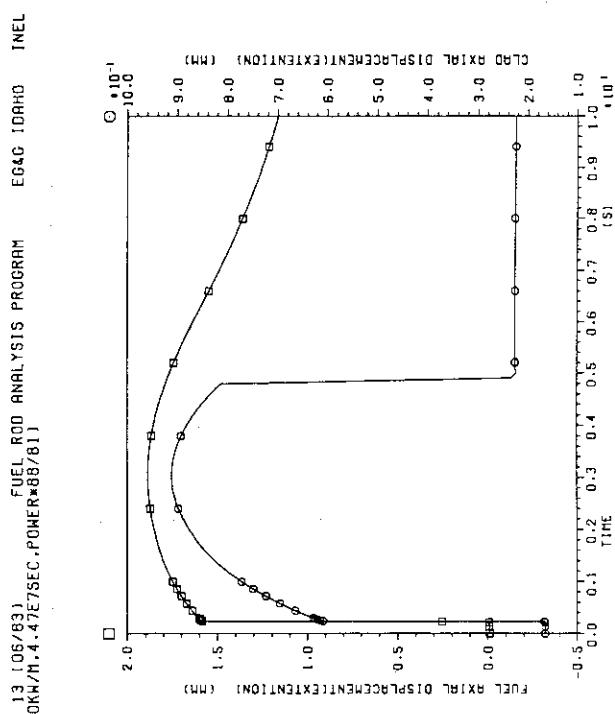
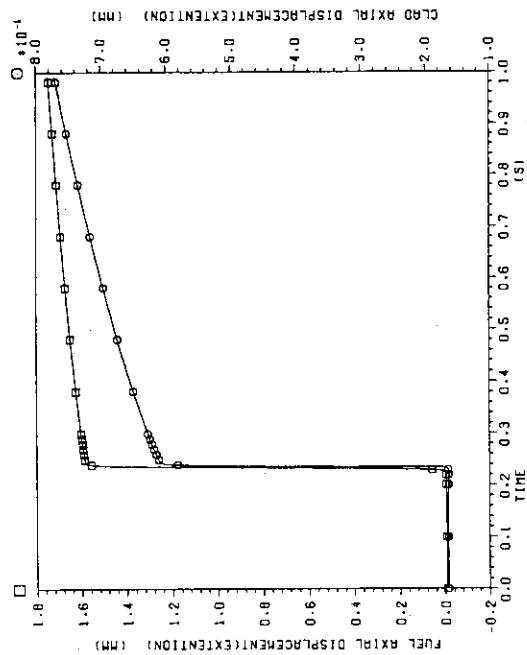


FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0kW/M^{4.47E7SEC,POWER=88/01)}

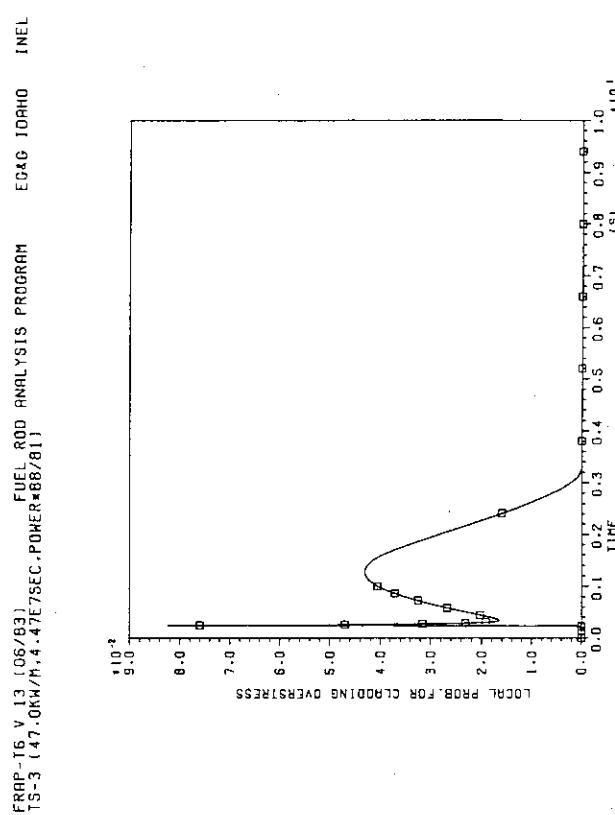
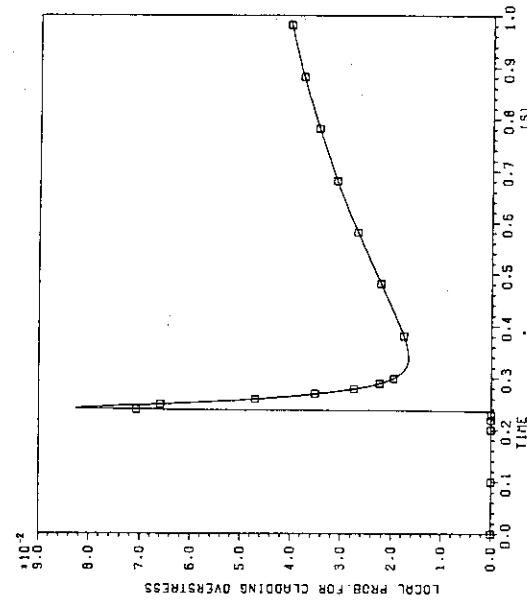


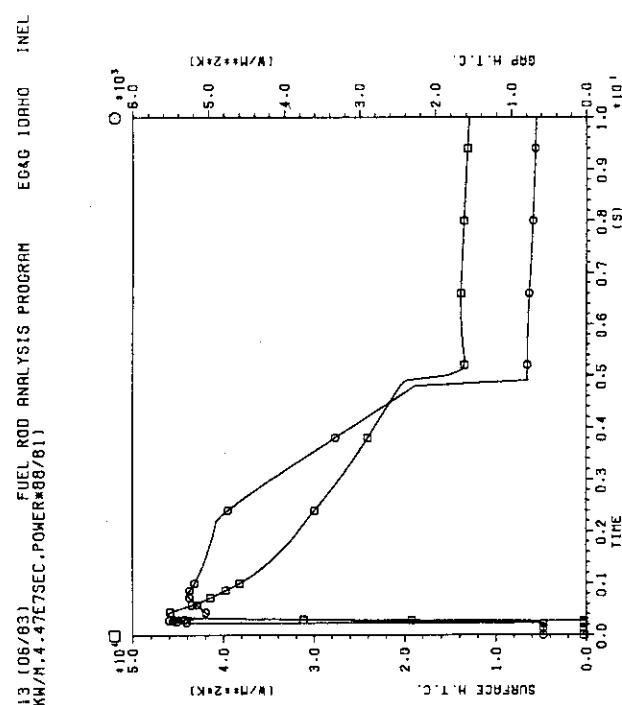
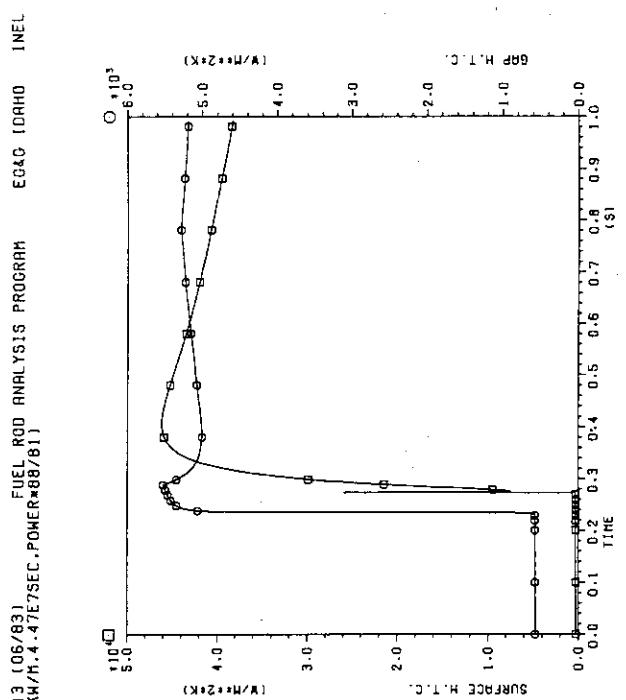
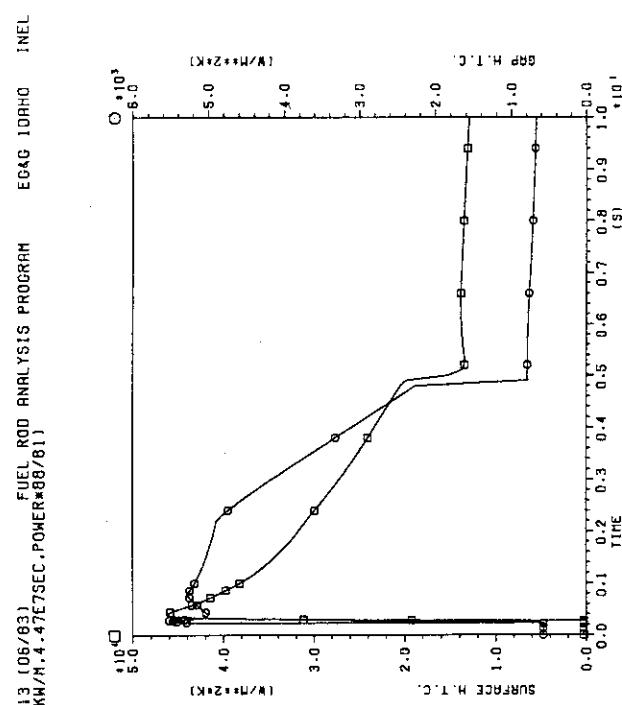
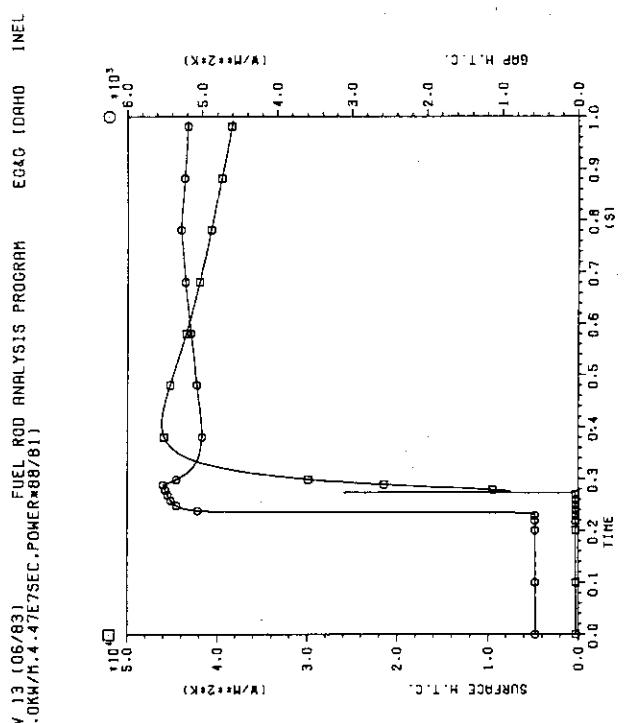
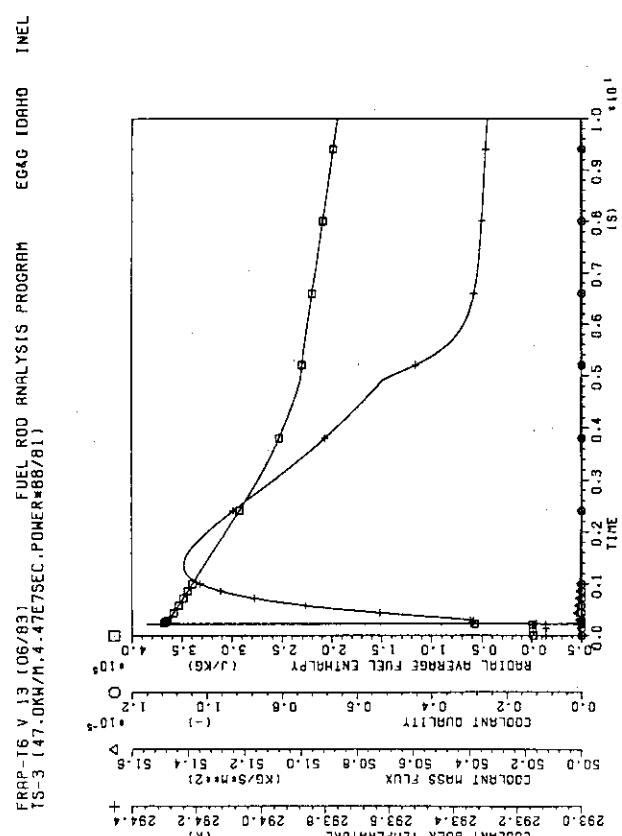
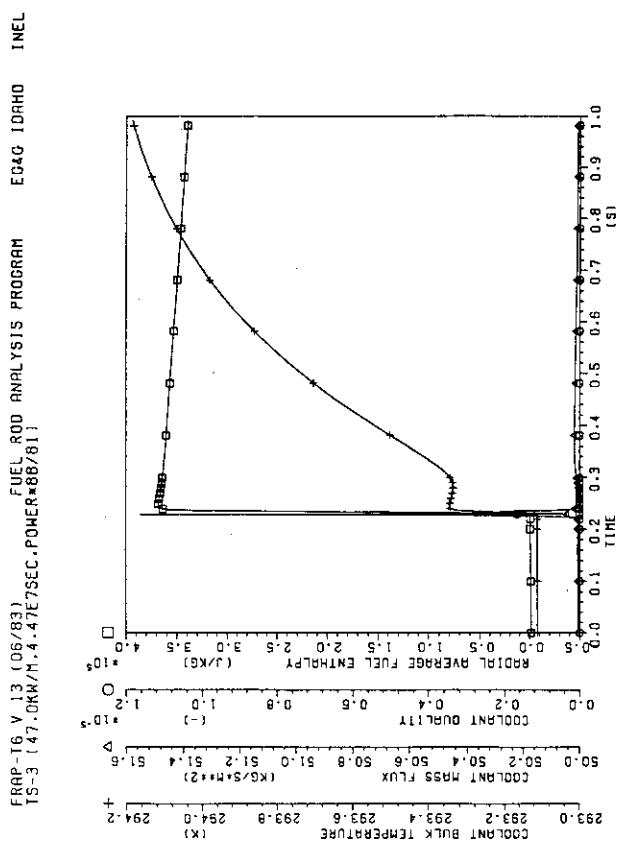
FRAPI-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
 TS-3 (47.0KW/h, 4.47E7SEC, POWER*88/81)

FRAPI-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
 TS-3 (47.0KW/h, 4.47E7SEC, POWER*88/81)



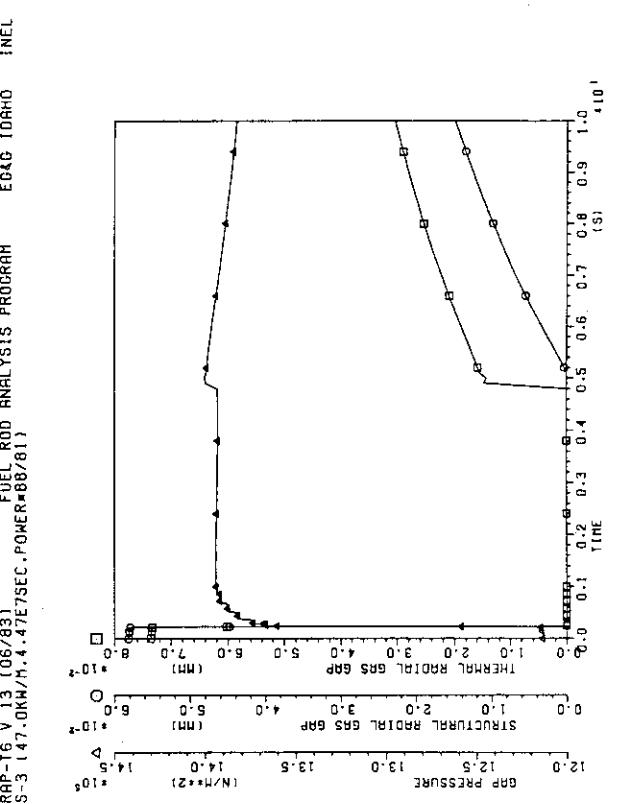
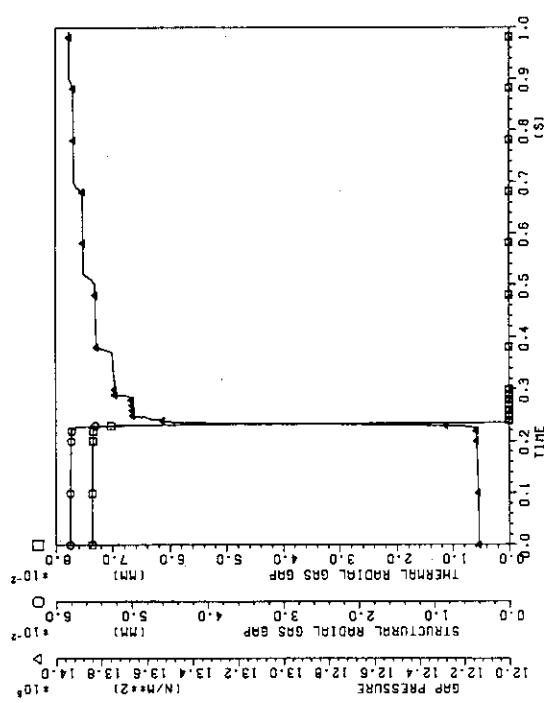
FRAPI-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
 TS-3 (47.0KW/h, 4.47E7SEC, POWER*88/81)



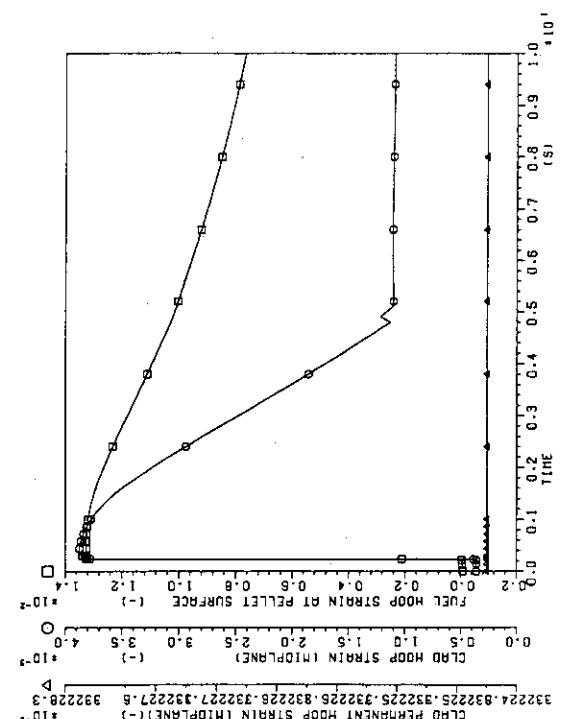
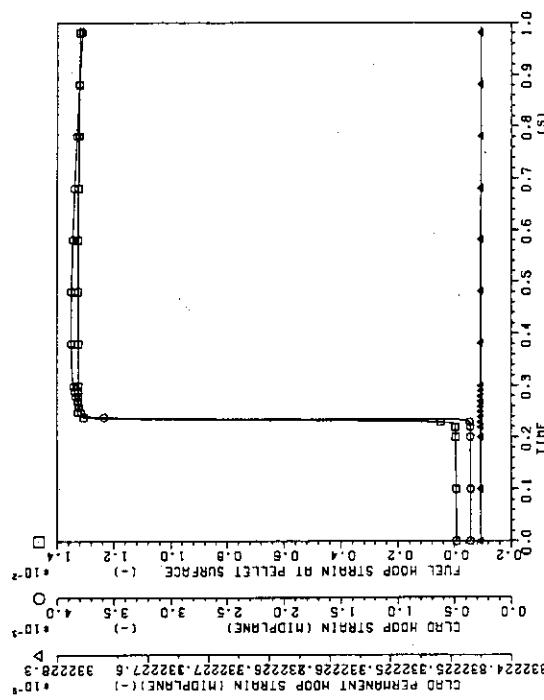


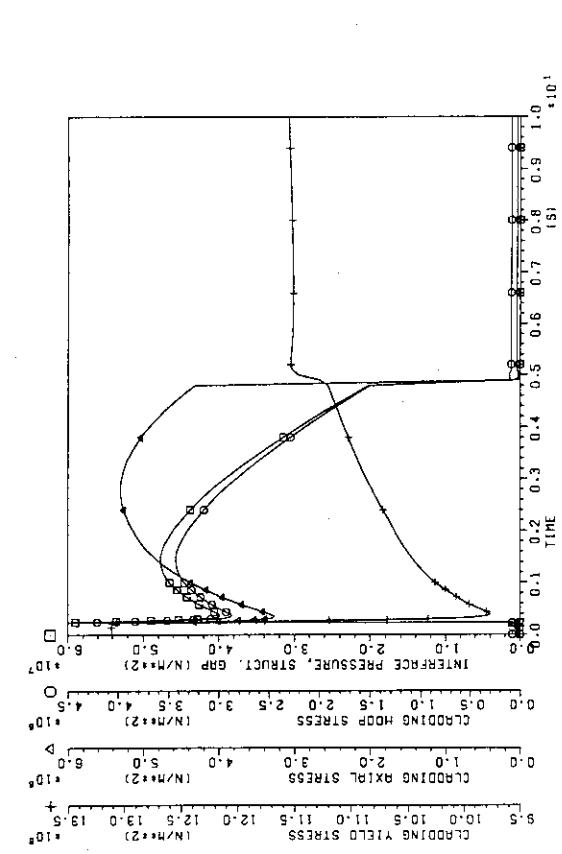
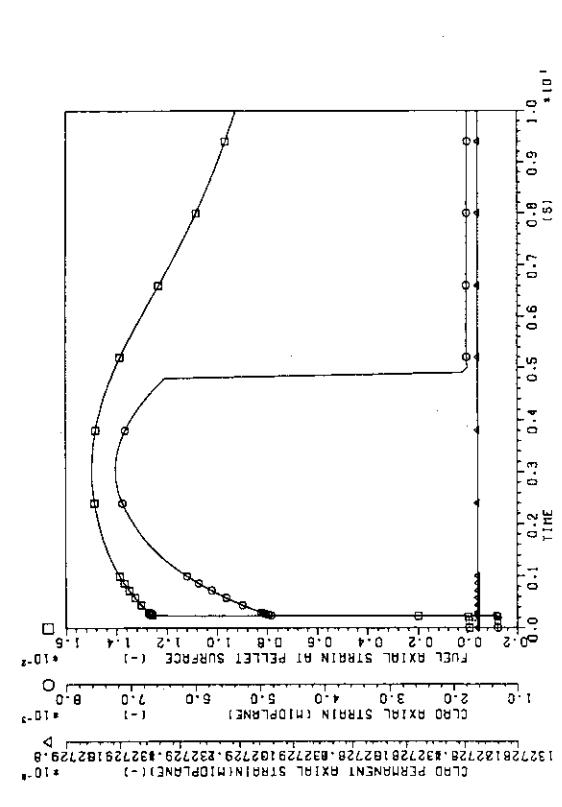
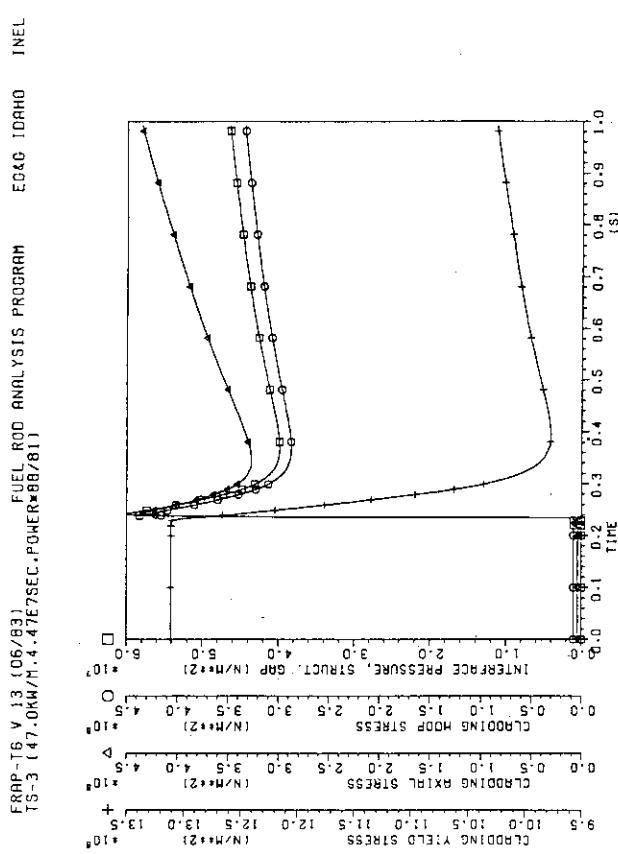
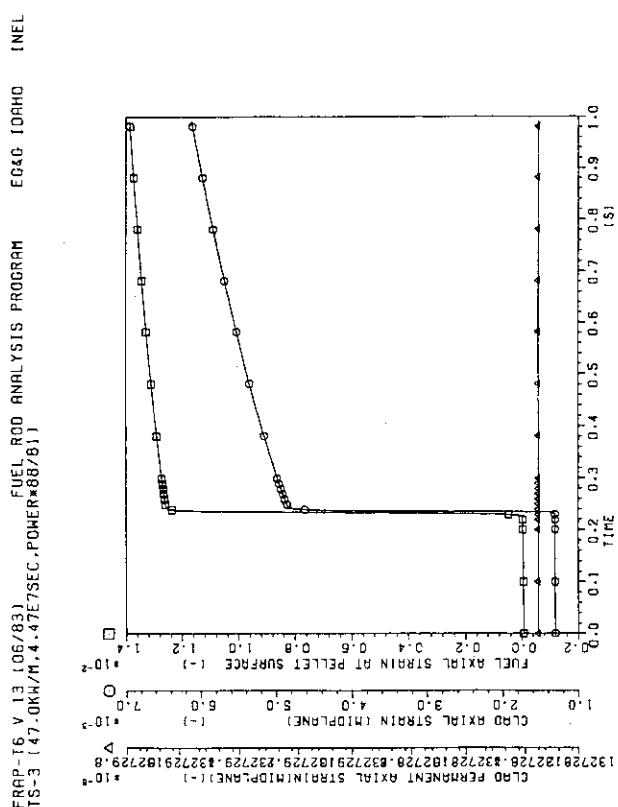
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=88/81)

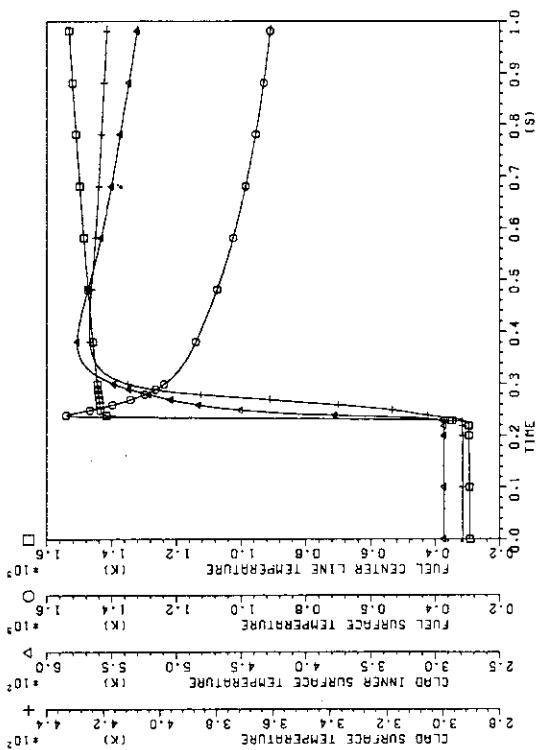
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=88/81)



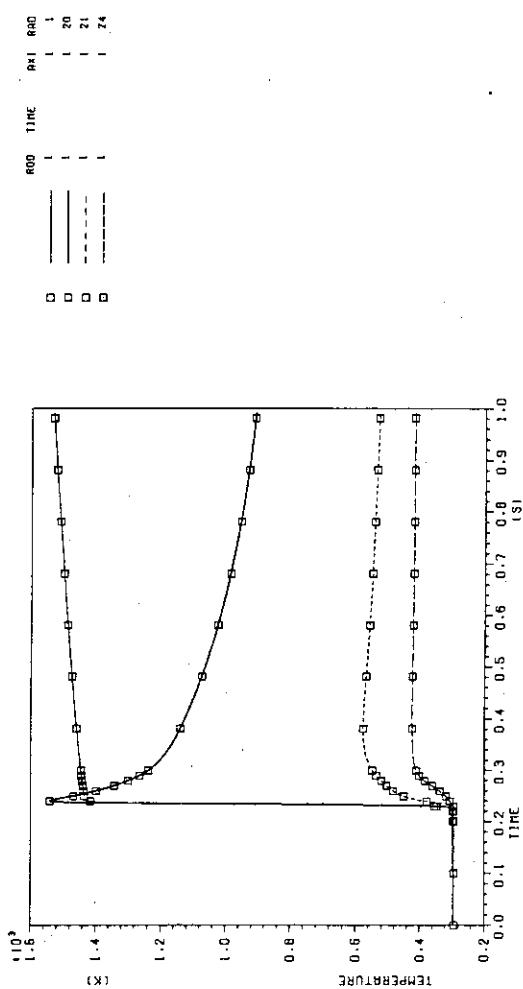
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=88/81)



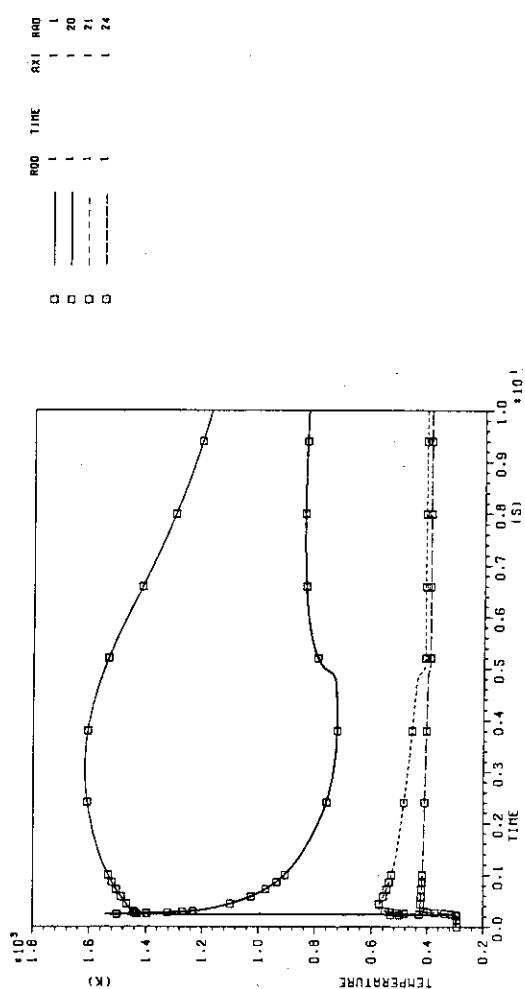


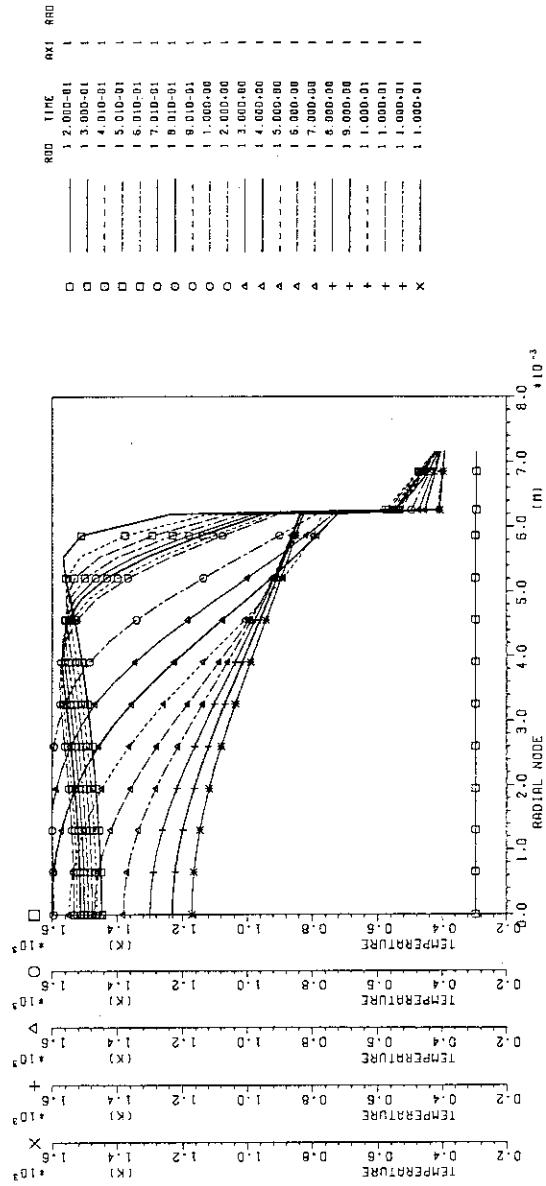


FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0KW/M.4.47E7SEC,POWER=88/81)
EG&G IDAHO INEL



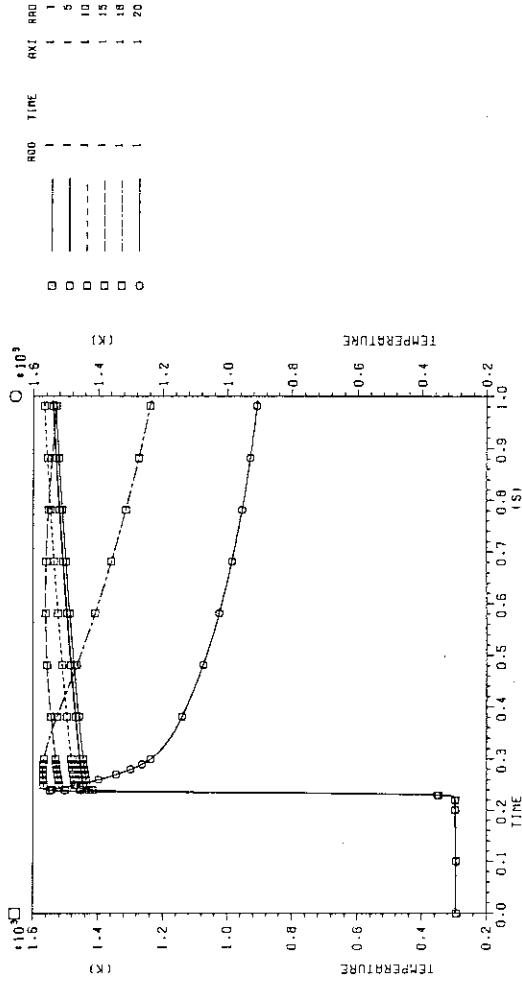
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0KW/M.4.47E7SEC,POWER=88/81)
EG&G IDAHO INEL



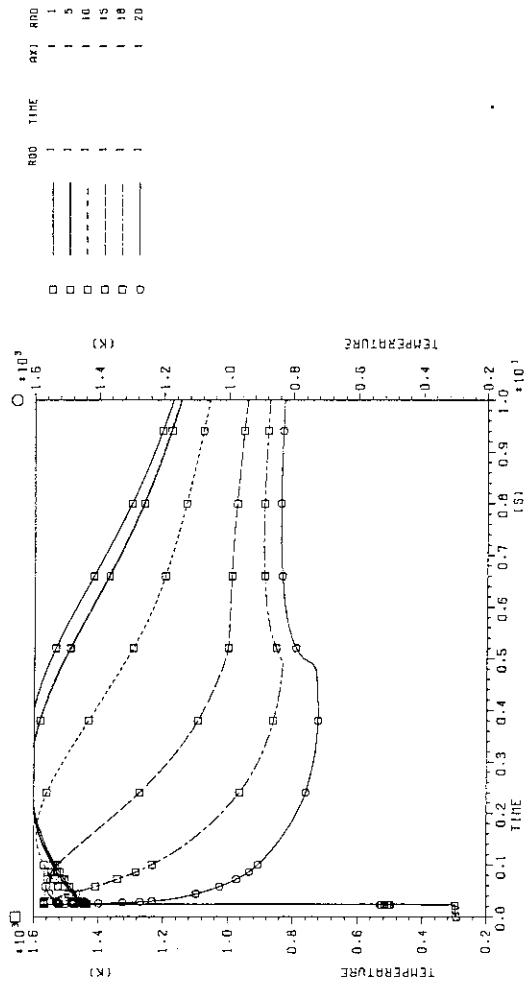


FRAP-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=88/81)

E&G IDAHO INEL



FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-3 (47.0kW/n, 4.47E7SEC, POWER=88.81)



FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KWH, 4.47E7SEC, POWER=83/83)

EG&G IDAHO INEL

ITEM (SEC)	AVE. FUEL POWER (KWH)	VOL./AVE. FUEL TEMP. ($^{\circ}$ K)	AXIAL EXTENSION (MM)	FP GAS P. STACK (MM)	CLADDING RETAIN (\times)	GRAIN (\times)	FACE (\times)	EDGE RELEASE (\times)	ERROR (\times)
-4.470E+07	4.700E+01	1389.1	2.665E+00	1.296E+00	78.92	65.54	6.56	6.81	21.12
-2.235E+07	4.700E+01	1399.3	2.708E+00	1.296E+00	68.29	59.99	3.43	9.87	28.33
6.645E-10	4.125E-08	293.1	-8.679E-03	1.647E-01	55.00	3.43	9.87	24.33	3.376
1.000E-01	6.208E+00	294.2	-7.436E-03	1.647E-01	68.39	59.99	3.43	9.87	23.374
2.000E-01	1.241E+01	297.3	-3.708E-03	1.647E-01	68.30	55.00	3.43	9.87	28.33
3.000E-01	8.466E+01	1503.2	1.612E+00	6.461E-01	68.16	57.21	2.24	8.71	31.20
9.101E-01	8.358E+01	1501.7	1.619E+00	6.496E-01	66.77	57.22	2.24	8.70	0.649
4.101E-01	7.317E+01	1491.7	1.648E+00	6.819E-01	67.63	57.22	2.22	8.70	0.636
5.101E-01	6.275E+01	1482.3	1.675E+00	7.098E-01	67.61	57.22	2.22	8.16	31.77
6.101E-01	5.235E+01	1472.1	1.699E+00	7.338E-01	67.18	57.23	2.22	7.74	32.20
7.101E-01	4.269E+01	1461.1	1.719E+00	7.538E-01	66.91	57.22	2.21	7.48	32.46
8.101E-01	3.975E+01	1449.9	1.737E+00	7.715E-01	66.90	57.22	2.21	7.46	0.625
9.101E-01	3.682E+01	1439.2	1.754E+00	7.880E-01	66.77	57.22	2.21	7.35	32.48
1.010E+00	3.401E+01	1428.6	1.769E+00	8.035E-01	66.76	57.21	2.21	7.34	32.60
2.010E+00	8.997E+00	1324.4	1.876E+00	9.105E-01	66.65	57.15	2.19	7.31	32.64
3.010E+00	6.937E+00	1219.8	1.904E+00	9.685E-01	66.52	57.03	2.18	7.31	32.64
4.010E+00	4.899E+00	1139.6	1.874E+00	9.083E-01	66.38	56.91	2.16	7.30	0.982
5.010E+00	4.156E+00	1082.5	1.782E+00	2.276E-01	66.23	56.79	2.15	7.29	32.65
6.010E+00	3.421E+00	1063.6	1.649E+00	2.258E-01	66.08	56.69	2.08	7.27	32.67
7.010E+00	2.691E+00	1040.5	1.502E+00	2.258E-01	65.94	56.58	2.08	7.28	32.68
8.010E+00	2.368E+00	1016.7	1.368E+00	2.254E-01	65.82	56.48	2.03	7.31	32.69
9.010E+00	2.046E+00	993.0	1.258E+00	2.250E-01	65.71	56.39	1.98	7.34	32.70
1.000E+01	1.727E+00	969.8	1.168E+00	2.245E-01	65.61	56.32	1.93	7.37	32.70

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KWH, 4.47E7SEC, POWER=83/83)

AXIAL NODE NO. = 1

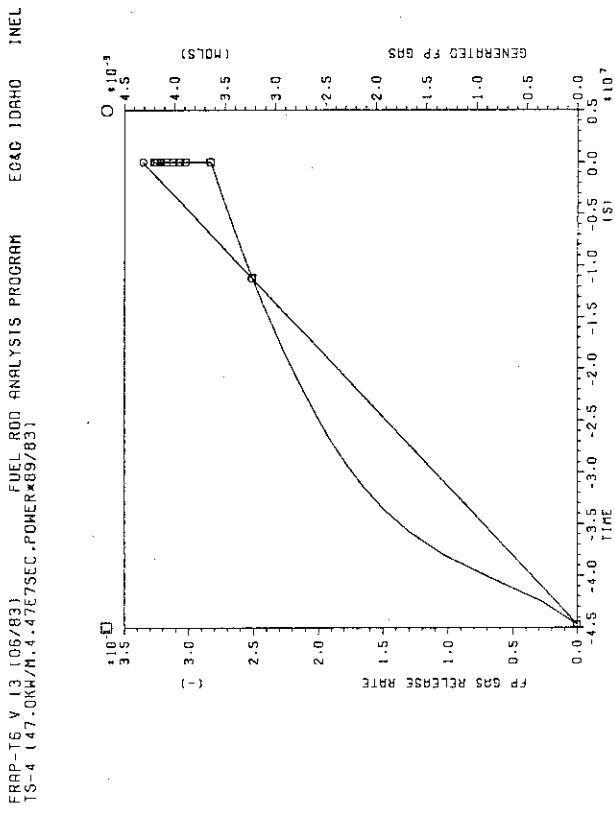
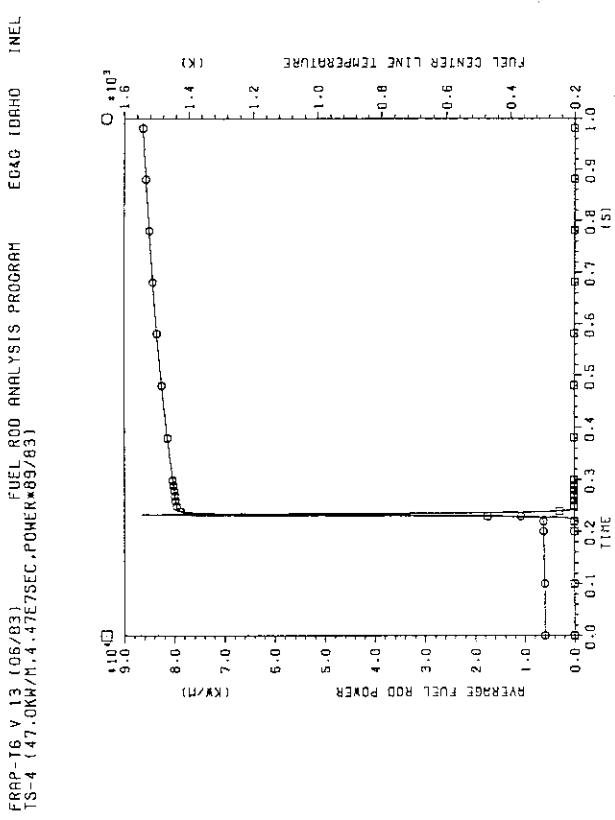
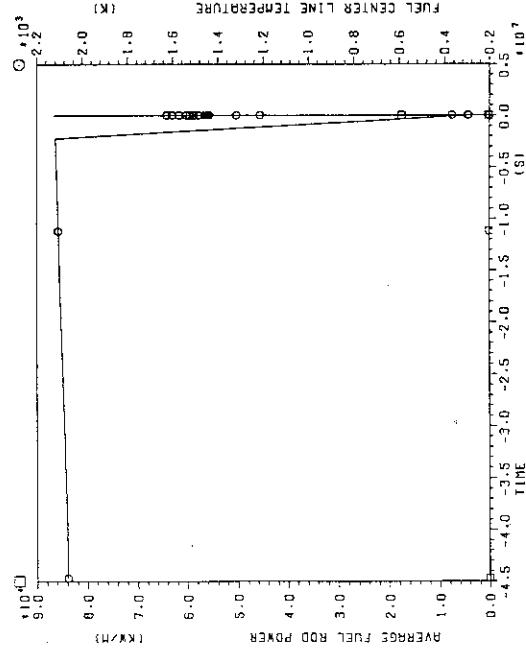
TIME (SEC)	RADIALLY AVL. FUEL (CALIG.)	FP GAS PELLET (\times)	GRAIN (\times)	FACE (\times)	RELEASE (\times)	TEMPERATURE CENTER SURFACE (\times)	INNER SURFACE (\times)	CLADDING INNER SURFACE (\times)	GAS RADIAL GAP PRESSURE (MM)	STRUCTURAL GAP PRESSURE (MM)	DISPLACEMENT OUT. SURF. (MM)	CLADDING OUT. SURF. (MM)	ROD STRESS (MM**2)	
-4.470E+07	7.842E+01	7.996E+01	78.92	65.54	6.556	6.81	21.12	0.041	2090.0	646.1	585.9	0.000E+00	1.081E-02	
-2.235E+07	7.996E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	827.7	646.1	585.9	0.000E+00	2.034E-02	
6.645E-10	3.866E-03	68.29	55.00	3.43	9.87	28.33	3.376	294.2	7.361E-02	646.1	585.9	0.000E+00	1.213E-02	
1.000E-01	3.275E-03	68.29	55.00	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	7.359E-02	646.1	585.9	0.000E+00	1.510E-02	
2.000E-01	1.507E-03	68.30	55.00	3.43	9.87	28.33	3.376	297.5	2.93E-02	646.1	585.9	0.000E+00	2.121E-03	
3.000E-01	8.743E-03	68.16	57.21	2.24	8.71	31.20	0.649	1450.6	550.6	412.6	0.000E+00	1.215E-02	5.150E-02	
3.100E-01	8.732E+00	67.63	57.21	2.24	8.70	31.20	0.648	1452.8	561.7	417.3	0.000E+00	1.374E-02	9.777E-02	
4.101E-01	8.654E+01	67.63	57.22	2.22	8.20	31.73	0.636	1472.6	5116.2	580.3	425.8	0.000E+00	1.383E-02	9.810E-02
5.101E-01	8.583E+01	67.61	57.22	2.22	8.16	31.77	0.628	1489.6	5054.8	570.9	424.7	0.000E+00	1.383E-02	9.813E-02
6.101E-01	8.505E+01	67.18	57.23	2.22	7.74	32.26	0.624	1504.1	1098.7	568.7	423.4	0.000E+00	1.384E-02	9.842E-02
7.101E-01	8.420E+01	66.91	57.22	2.21	7.48	32.46	0.625	1516.1	975.0	559.4	421.9	0.000E+00	1.384E-02	9.855E-02
8.101E-01	8.334E+01	66.90	57.22	2.21	7.46	32.48	0.626	1526.8	948.1	542.1	420.7	0.000E+00	1.384E-02	9.869E-02
9.101E-01	8.252E+01	66.77	57.22	2.21	7.35	32.60	0.631	1536.7	925.8	515.2	419.6	0.000E+00	1.386E-02	9.877E-02
1.010E+00	8.170E+01	66.68	57.21	2.21	7.34	32.60	0.636	1545.9	906.7	508.5	418.7	0.000E+00	1.386E-02	9.885E-02
2.010E+00	7.369E+01	66.65	57.15	2.19	7.31	32.64	0.712	1609.6	789.7	496.0	413.1	0.000E+00	1.386E-02	9.893E-02
3.010E+00	6.564E+01	66.52	57.03	2.18	7.31	32.64	0.845	1626.9	730.6	473.7	409.3	0.000E+00	1.385E-02	9.905E-02
4.010E+00	5.947E+01	66.38	56.91	2.16	7.30	32.64	0.982	1610.3	716.6	454.6	404.9	0.000E+00	1.385E-02	9.917E-02
5.010E+00	5.366E+01	66.23	56.79	2.15	7.29	32.65	1.126	1557.0	755.9	418.3	396.6	1.361E-02	9.926E-02	9.927E-02
6.010E+00	5.352E+01	66.08	56.69	2.12	7.27	32.67	1.245	1477.3	822.1	411.4	392.8	1.346E-02	9.937E-02	9.938E-02
7.010E+00	5.173E+01	65.94	56.58	2.08	7.28	32.68	1.374	1387.0	835.6	411.5	392.8	1.325E-02	9.945E-02	9.946E-02
8.010E+00	4.991E+01	65.82	56.48	2.03	7.31	32.69	1.502	1302.9	837.7	410.4	392.4	2.521E-02	9.952E-02	9.953E-02
9.010E+00	4.811E+01	65.71	56.39	1.98	7.34	32.70	1.521	1231.6	834.0	409.3	392.0	2.800E-02	9.959E-02	9.961E-02
1.000E+01	4.633E+01	65.61	56.32	1.93	7.37	32.70	1.683	1172.6	826.8	408.1	391.6	3.039E-02	1.493E-02	1.628E-02

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*89/83)

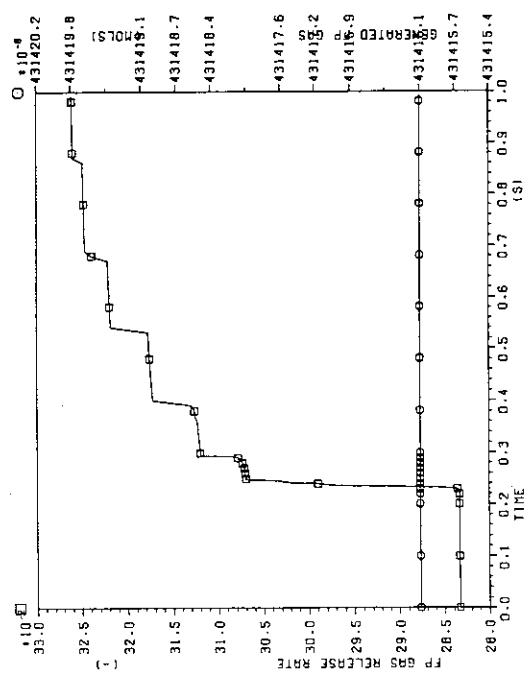
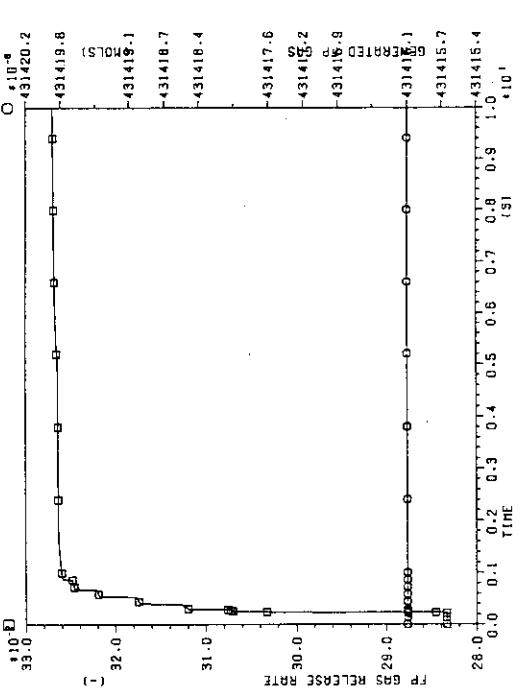
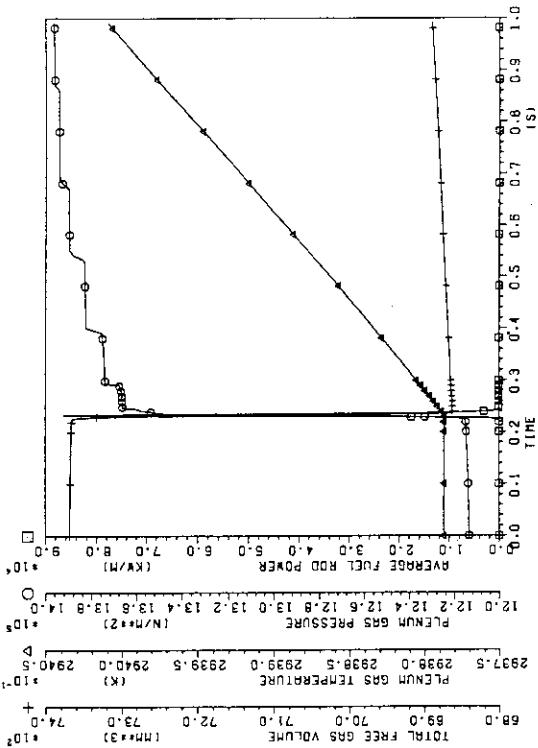
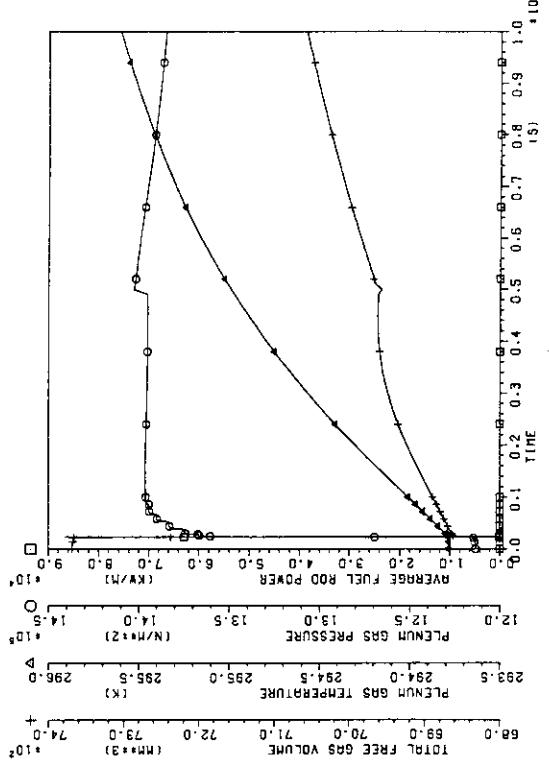
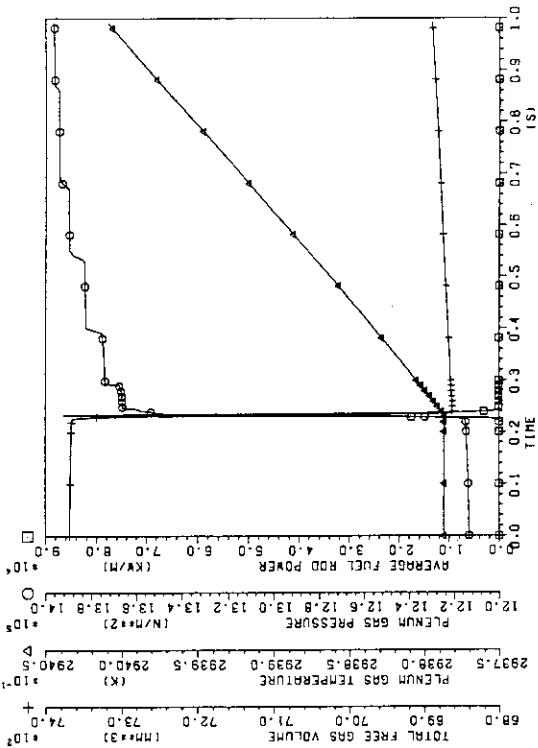
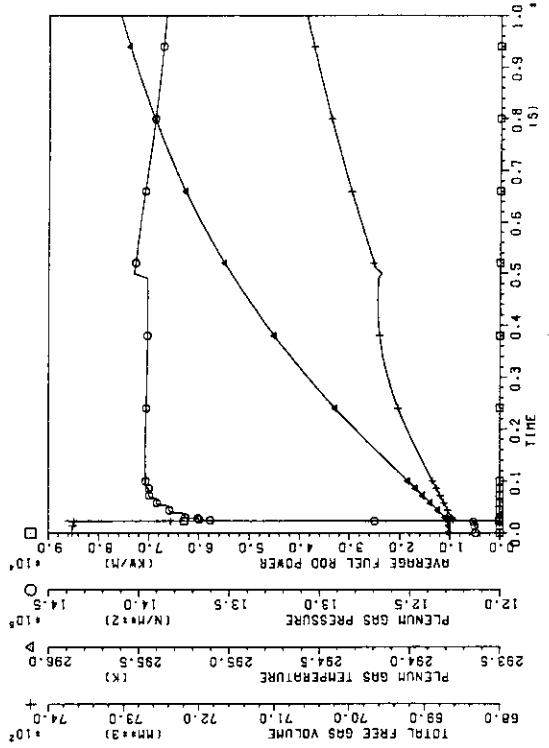
EG&G IDAHO INEL

FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-4 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*89/83)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
EG&G IDAHO INEL



FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER*89/83)

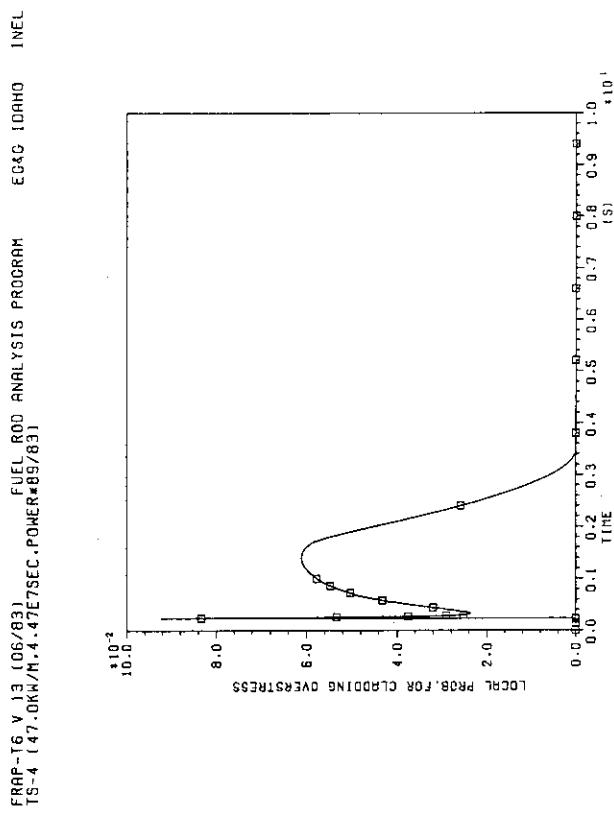
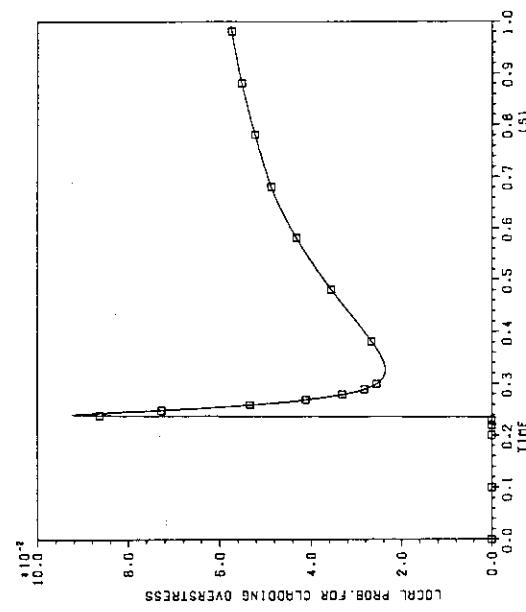
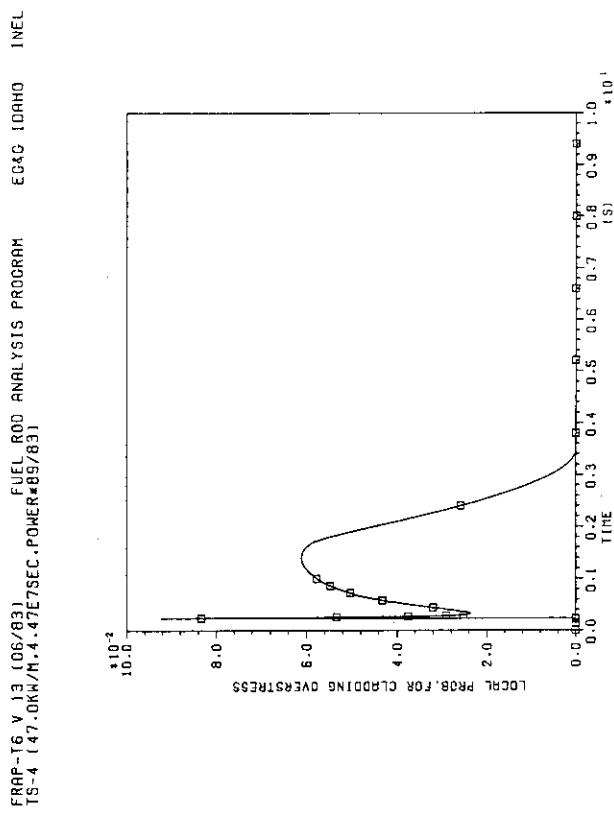
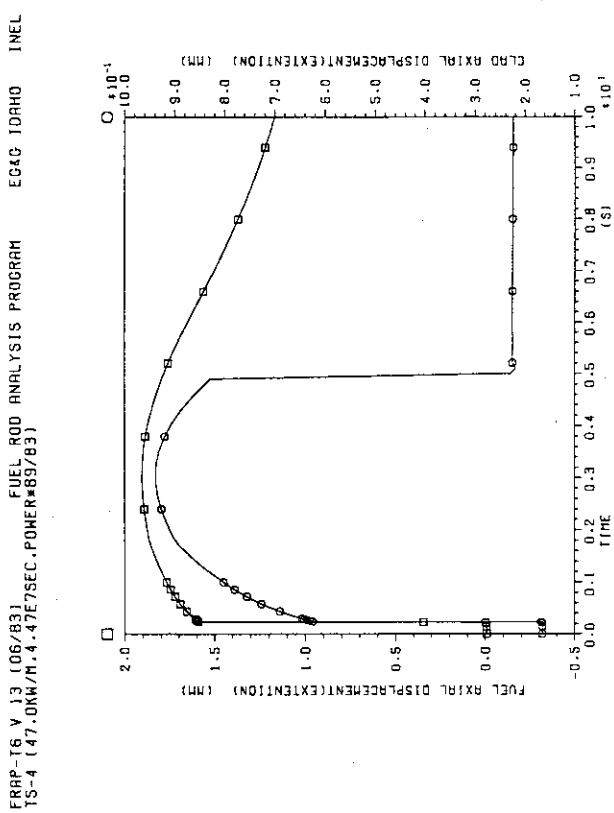
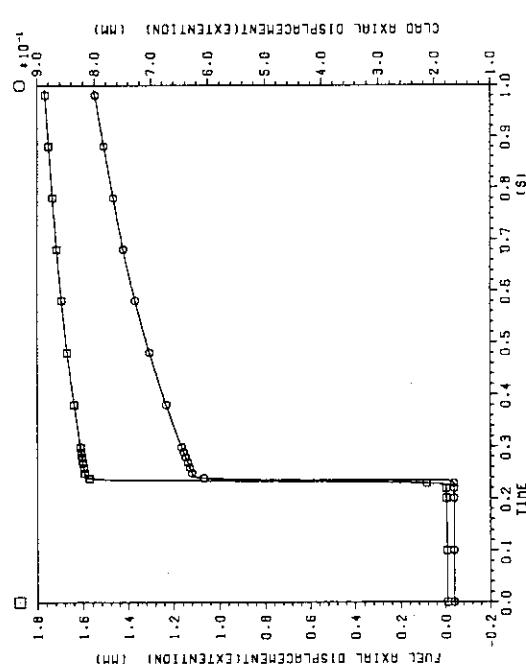
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=89/83)FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=89/83)FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=89/83)FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=89/83)FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=89/83)FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=89/83)FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=89/83)

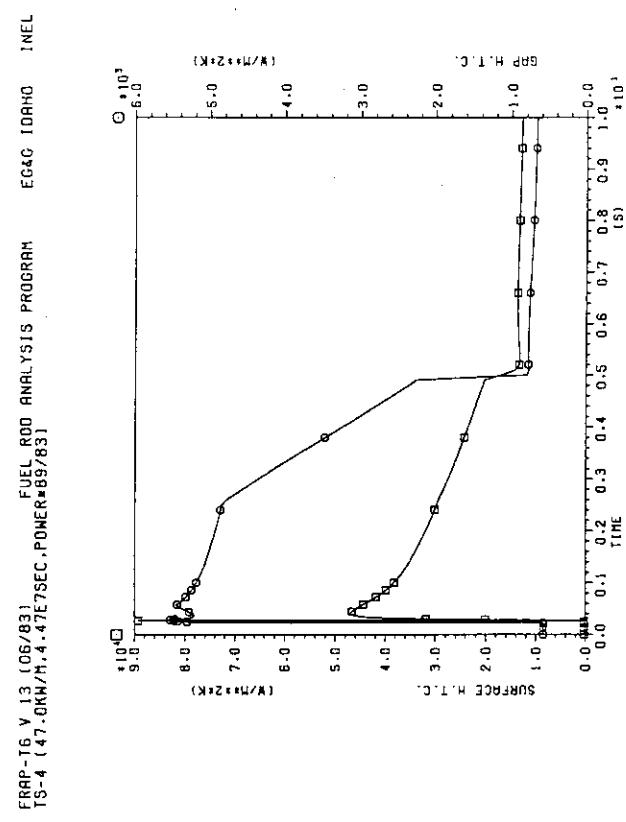
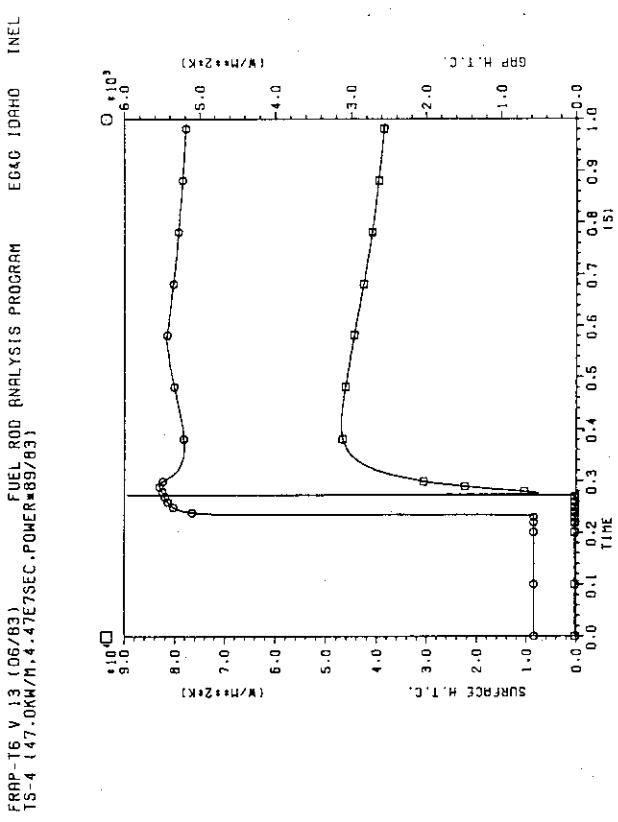
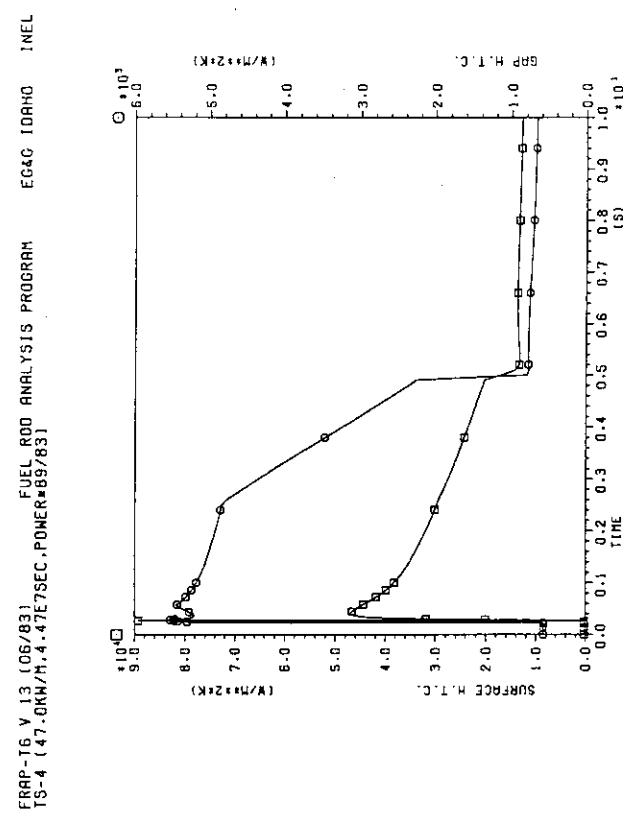
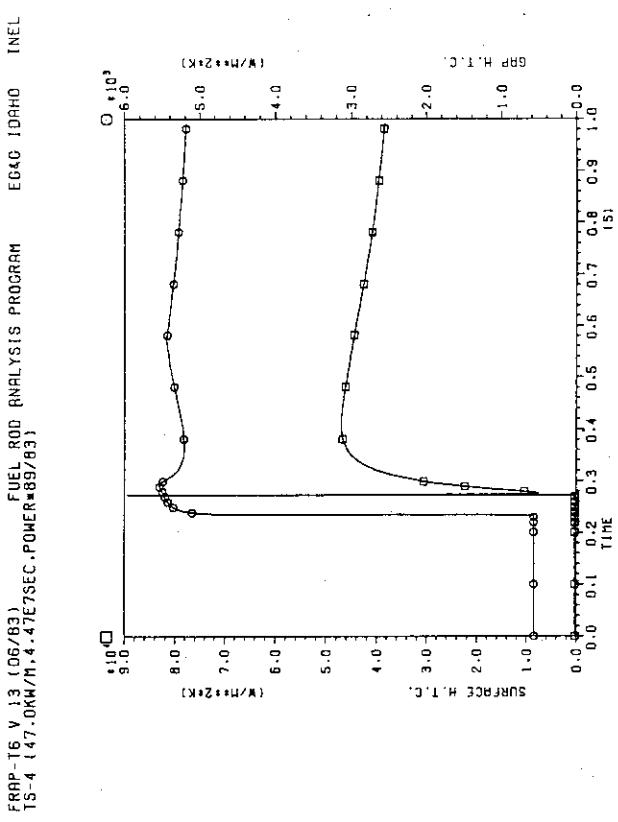
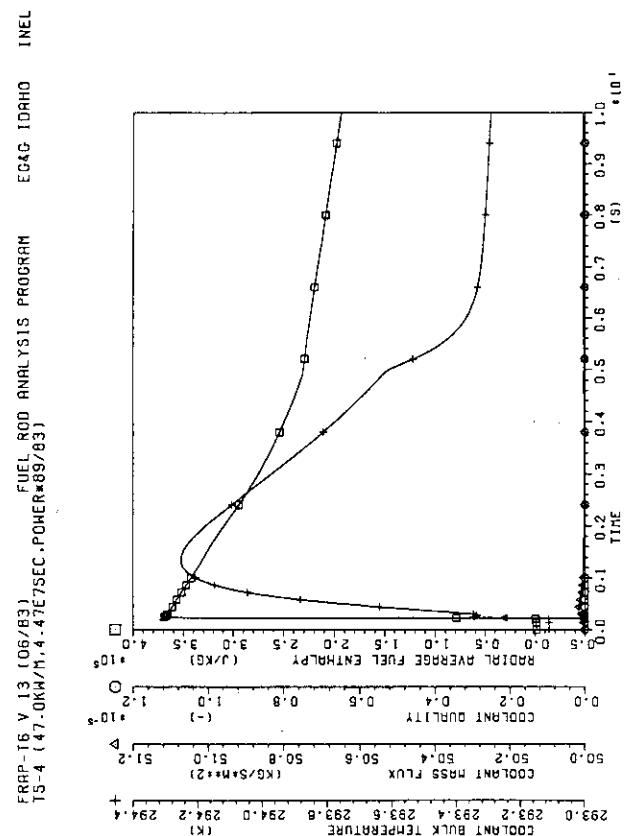
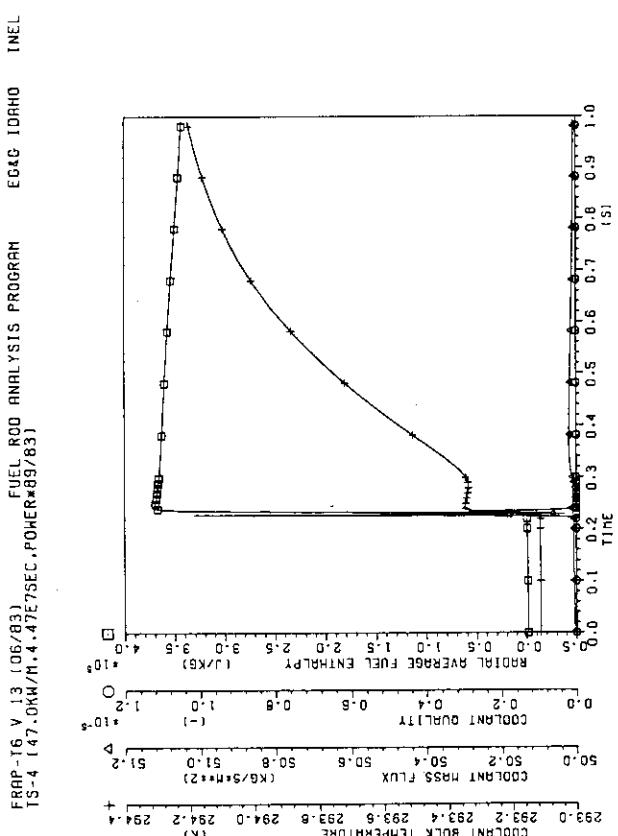
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER#89/83)

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER#89/83)

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER#89/83)

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/H,4.47E7SEC,POWER#89/83)



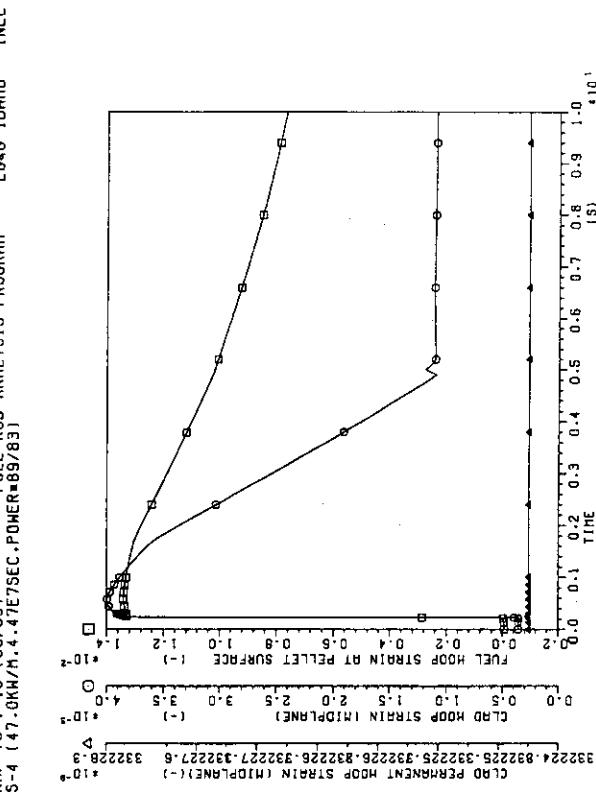
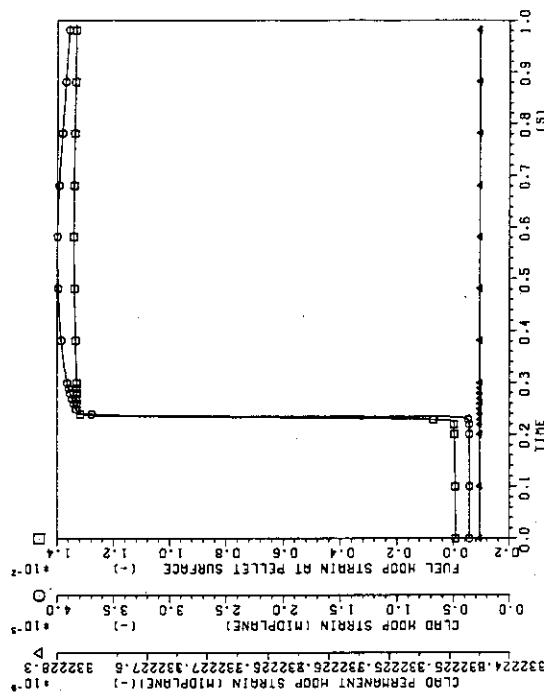
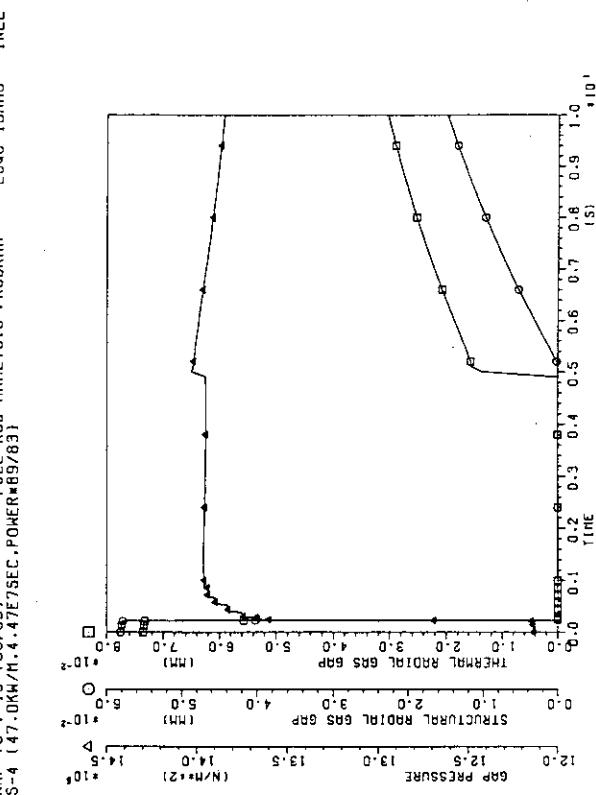
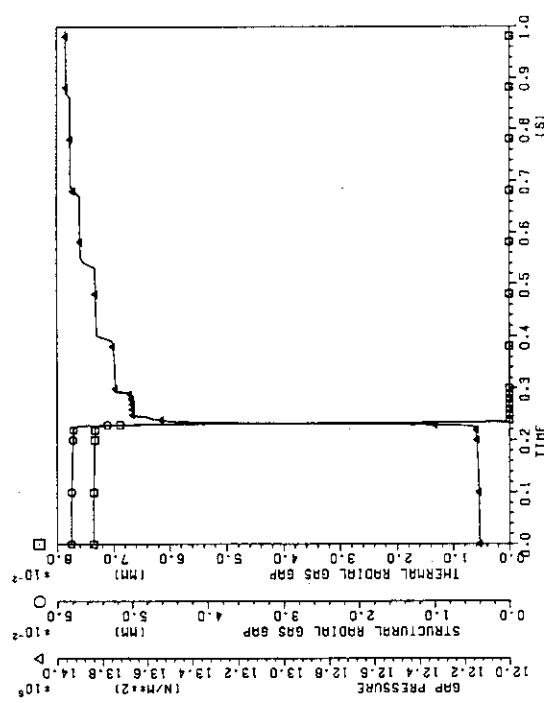


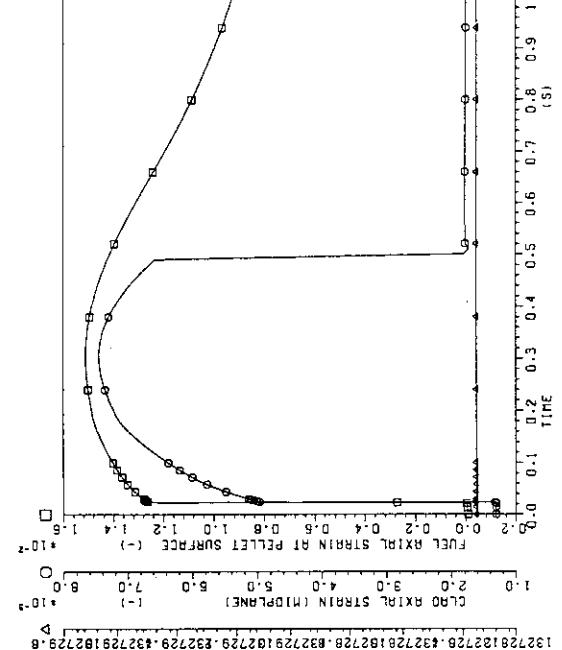
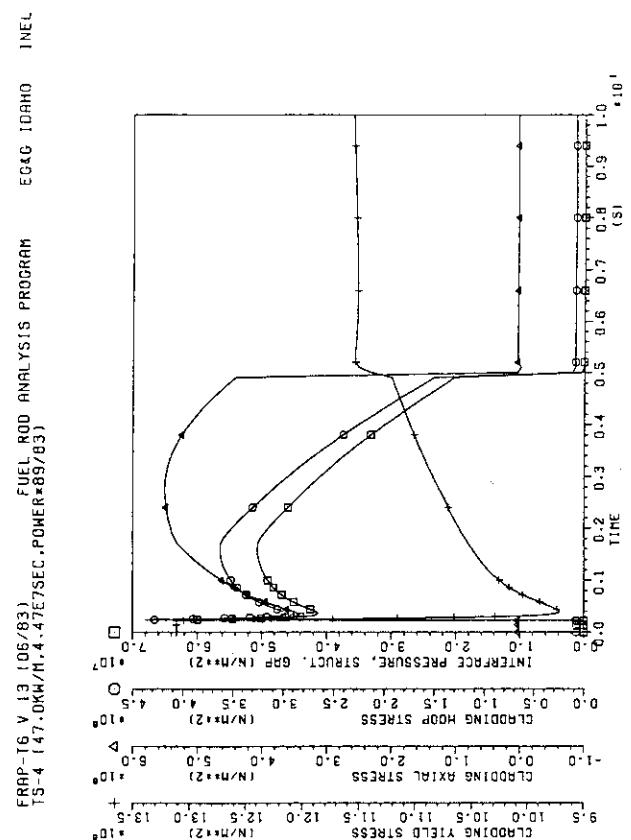
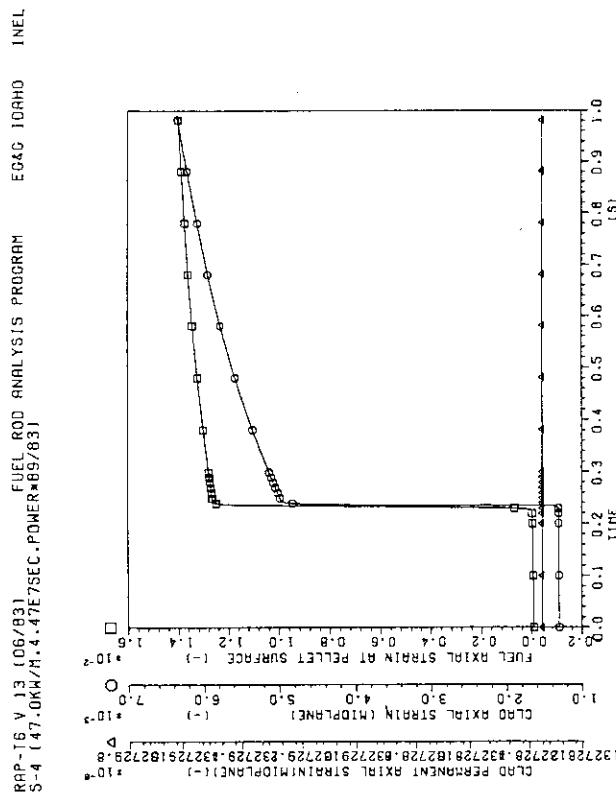
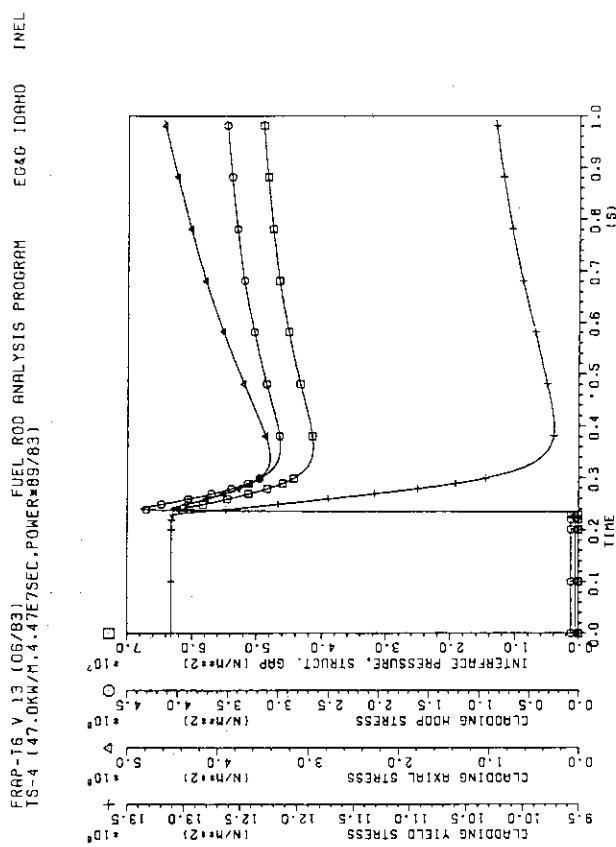
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=89/83)

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=89/83)

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=89/83)

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-4 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=89/83)



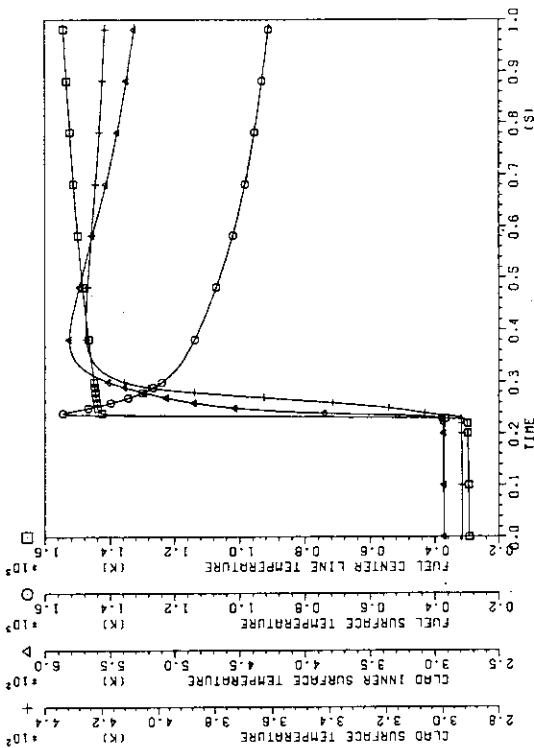


FRAP-T6 V 1.3 (06/83)
TS-4 (47.0KW/H, 4.47E7SEC., POWER=89/83)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM

EG&G IDAHO

INEL

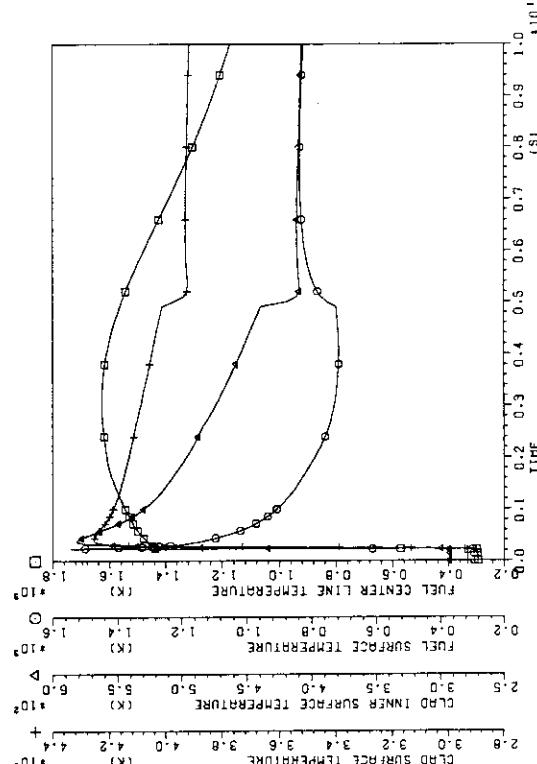


FRAP-T6 V 1.3 (06/83)
TS-4 (47.0KW/H, 4.47E7SEC., POWER=89/83)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM

EG&G IDAHO

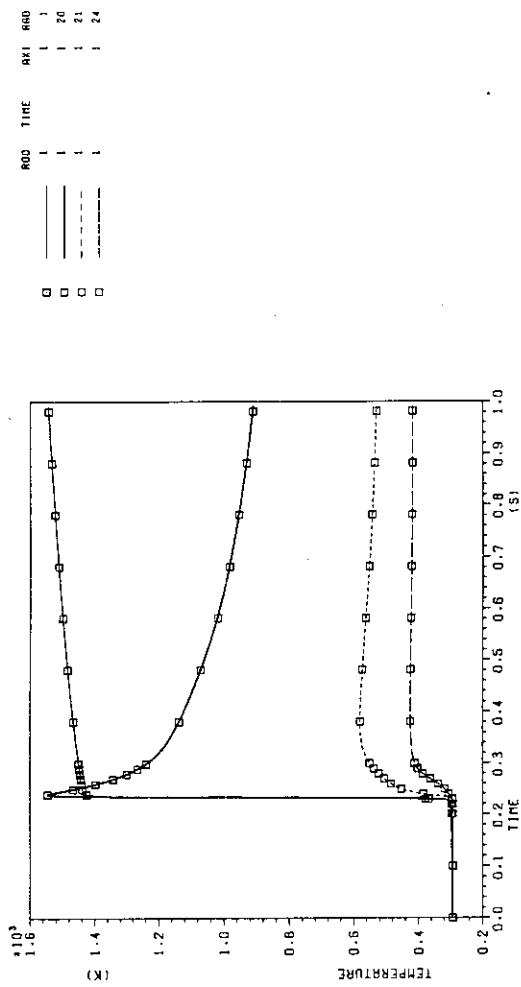
INEL



FRAP-T6 V 1.3 (06/83)
TS-4 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=89/83)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM

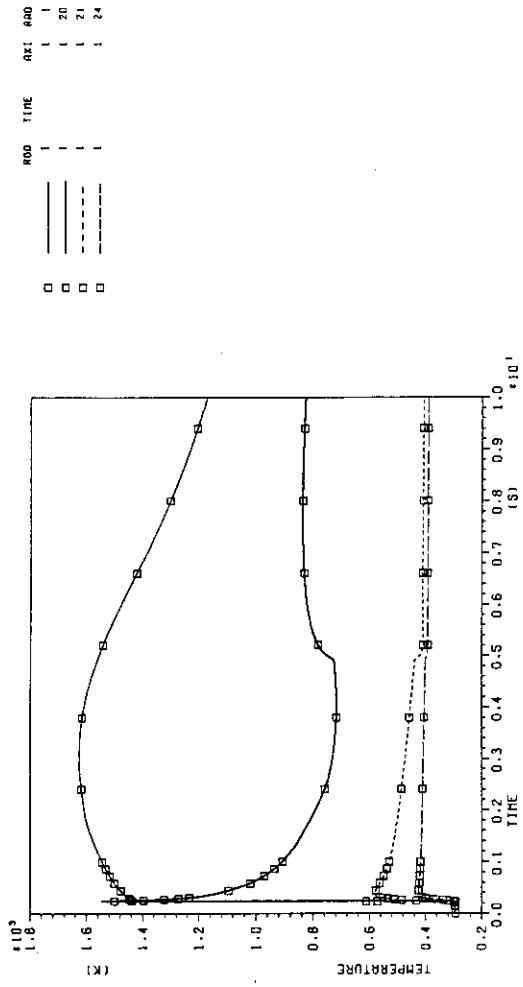
EG&G IDAHO INEL



FRAP-T6 V 1.3 (06/83)
TS-4 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=89/83)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM

EG&G IDAHO INEL



FRAPI-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M, 4.47E-01 SEC, POWER=1.08)

EG&G IDAHO INEL

ITEM (SEC)	AVE. FUEL ROD POWER (KW/M)	VOL./AVE. FUEL TEMP. (K)	AXIAL EXTENSION (MM)	P-STACK CLADDING (MM)	FP GAS RETAIN (%)	FACE (%)	EDGE (%)	RELEASE (%)	FACE RELEASE (%)	EDGE RELEASE (%)	ERROR (%)
4.470E+07	4.700E+01	1380.1	2.665E+00	1.253E+00	78.92	65.54	6.56	6.81	21.12	0.041	
2.235E+07	4.700E+01	1399.3	2.708E+00	1.296E+00	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	
6.645E+10	3.281E+20	293.1	-8.679E+03	1.646E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	
1.000E+01	3.281E+20	293.1	-8.679E+03	1.646E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	
2.000E+01	3.281E+20	293.1	-8.679E+03	1.646E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	
3.000E+01	7.229E+01	1598.4	1.766E+00	8.023E+01	67.37	57.42	2.05	7.89	32.24	0.391	
3.100E+01	7.163E+01	1596.4	1.766E+00	8.053E+01	67.36	57.42	2.05	7.89	32.25	0.391	
4.101E+01	6.545E+01	1580.3	1.798E+00	8.343E+01	66.58	57.42	2.04	7.12	33.03	0.391	
5.101E+01	5.924E+01	1567.4	1.828E+00	8.604E+01	66.55	57.42	2.04	7.09	33.07	0.389	
6.101E+01	5.306E+01	1553.4	1.848E+00	9.052E+01	65.59	57.42	2.03	6.54	33.62	0.388	
7.101E+01	4.687E+01	1543.7	1.869E+00	9.402E+01	65.63	57.42	2.03	6.18	33.99	0.389	
8.101E+01	4.104E+01	1532.0	1.888E+00	9.240E+01	65.53	57.41	2.03	6.09	34.07	0.392	
9.101E+01	3.844E+01	1520.3	1.905E+00	9.412E+01	65.41	57.41	2.03	5.84	34.33	0.396	
1.010E+00	3.584E+01	1509.0	1.921E+00	9.574E+01	65.26	57.40	2.03	5.83	34.34	0.401	
2.010E+00	9.735E+00	1397.7	2.033E+00	1.069E+00	65.14	57.33	2.02	5.80	34.37	0.485	
3.010E+00	7.509E+00	1285.9	2.067E+00	1.080E+00	64.85	57.20	2.00	5.79	34.38	0.523	
4.010E+00	5.297E+00	1190.0	2.044E+00	1.080E+00	64.38	57.07	1.99	5.78	34.38	0.774	
5.010E+00	4.502E+00	1111.8	1.956E+00	9.919E+01	64.68	56.93	1.98	5.78	34.38	0.940	
6.010E+00	3.706E+00	1064.9	1.817E+00	9.247E+01	64.31	56.79	1.97	5.76	34.39	1.099	
7.010E+00	2.915E+00	1046.1	1.649E+00	9.232E+01	64.35	56.67	1.94	5.74	34.41	1.235	
8.010E+00	2.567E+00	1024.0	1.482E+00	9.252E+01	64.20	56.55	1.90	5.75	34.42	1.371	
9.010E+00	2.218E+00	1001.4	1.340E+00	9.299E+01	64.08	56.45	1.85	5.78	34.43	1.589	
1.000E+01	1.873E+00	978.8	1.228E+00	2.246E+01	63.97	56.36	1.81	5.81	34.44	1.589	

FRAPI-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M, 4.47E-01 SEC, POWER=1.08)

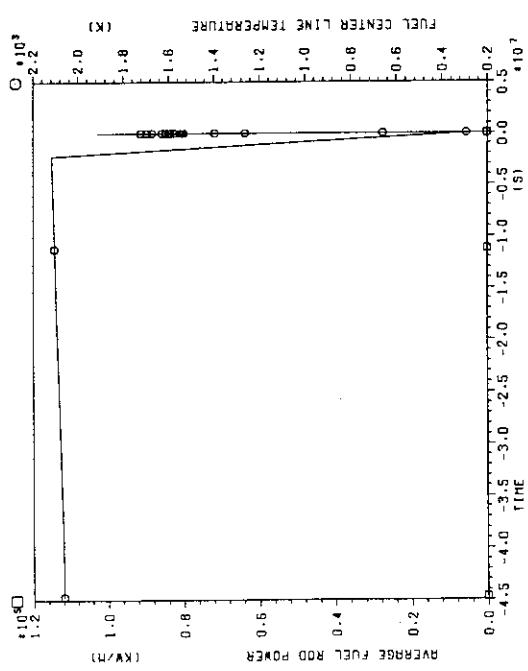
EG&G IDAHO INEL

AXIAL NODE NO. = 1

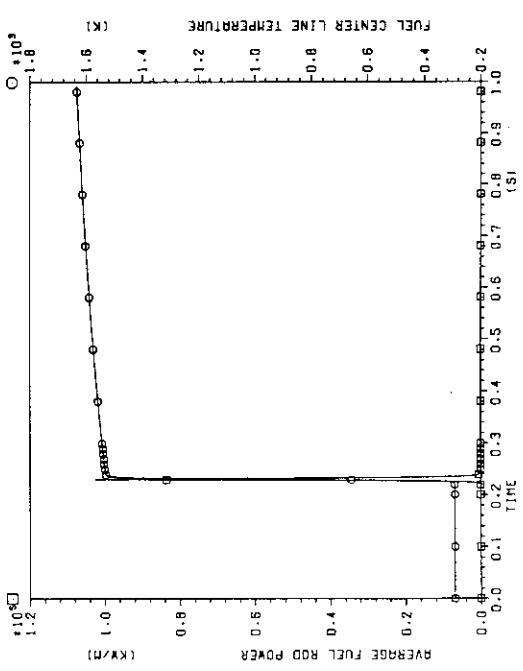
TIME (SEC)	RADIALLY AVL. FUEL ENTHALPY (CAL/G)	FP GAS RETAIN (%)	GRAIN (%)	FACE (%)	EDGE (%)	RELEASE (%)	TEMPERATURE CENTER SURFACE (K)	CLADDING INNER SURFACE (K)	CLADDING OUT SURF. (K)	GAS RADIAL GAP PRESSURE (MMHg)	DISPLACEMENT FUEL SURF. (MMHg)	CLADDING HOOP STRESS (NM/mm ²)
-4.470E+07	7.842E+01	7.996E+01	78.92	65.54	6.56	6.81	21.12	0.041	2090.0	627.7	66.1	5.325E+02
-2.235E+07	7.996E+01	78.92	65.54	6.56	6.81	6.81	21.12	0.041	2090.0	627.7	66.1	5.325E+02
6.645E+10	3.066E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	293.1	7.364E-02	5.815E-02	1.616E-03
1.000E+01	3.866E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	293.1	7.364E-02	5.814E-02	1.616E-03
2.000E+01	6.546E+01	68.29	54.99	3.43	9.87	28.33	3.376	293.1	293.1	7.364E-02	5.814E-02	1.616E-03
3.000E+01	9.365E+01	67.37	57.42	2.05	7.89	32.24	5.391	1543.5	1293.0	578.6	418.4	0.000E+00
3.100E+01	9.365E+01	67.36	57.42	2.05	7.89	32.25	5.391	1545.4	1291.5	588.1	422.0	0.000E+00
4.101E+01	9.365E+01	66.58	57.42	2.04	7.12	33.03	0.391	1562.9	1147.9	601.7	428.6	0.000E+00
5.101E+01	9.264E+01	66.55	57.42	2.04	7.09	33.07	0.389	1578.6	1055.6	584.6	426.6	0.000E+00
6.101E+01	9.172E+01	65.99	57.42	2.03	6.54	33.62	0.388	1592.6	1041.9	559.2	424.7	0.000E+00
7.101E+01	9.081E+01	65.63	57.42	2.03	6.18	33.99	0.388	1605.1	1008.0	523.1	423.1	0.000E+00
8.101E+01	8.990E+01	65.53	57.41	2.03	6.09	34.07	0.392	1616.2	980.3	550.6	421.9	0.000E+00
9.101E+01	8.900E+01	65.27	57.41	2.03	5.84	34.33	0.396	1626.4	957.1	543.4	420.8	0.000E+00
1.010E+02	8.812E+01	65.26	57.40	2.03	5.83	34.34	0.401	1635.9	937.2	537.4	419.9	0.000E+00
2.010E+02	7.950E+01	65.14	57.33	2.02	5.80	34.37	0.485	1701.3	814.1	502.1	414.2	0.000E+00
3.010E+02	7.083E+01	65.00	57.20	2.00	5.79	34.38	0.623	1721.6	743.3	482.5	410.6	0.000E+00
4.010E+02	6.343E+01	64.85	57.42	2.03	5.78	34.38	0.774	1709.5	697.4	469.7	408.1	0.000E+00
5.010E+02	5.740E+01	64.68	56.93	1.98	5.78	34.38	0.940	1659.6	689.1	451.2	404.1	0.000E+00
6.010E+02	5.373E+01	64.51	56.79	1.97	5.76	34.39	1.099	1578.3	611.2	408.1	391.7	0.000E+00
7.010E+02	5.220E+01	64.35	56.67	1.94	5.74	34.41	1.235	1477.7	811.1	409.9	392.2	0.000E+00
8.010E+02	5.049E+01	64.20	56.55	1.90	5.75	34.42	1.371	1374.9	825.6	409.8	392.2	0.000E+00
9.010E+02	4.876E+01	64.08	56.45	1.85	5.78	34.43	1.489	1285.1	829.0	409.1	391.9	0.000E+00
1.000E+03	4.705E+01	63.97	56.36	1.81	5.81	34.44	1.589	1212.3	826.1	408.1	391.6	0.000E+00

FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/M, 4.47E7SEC, POWER*1.08)

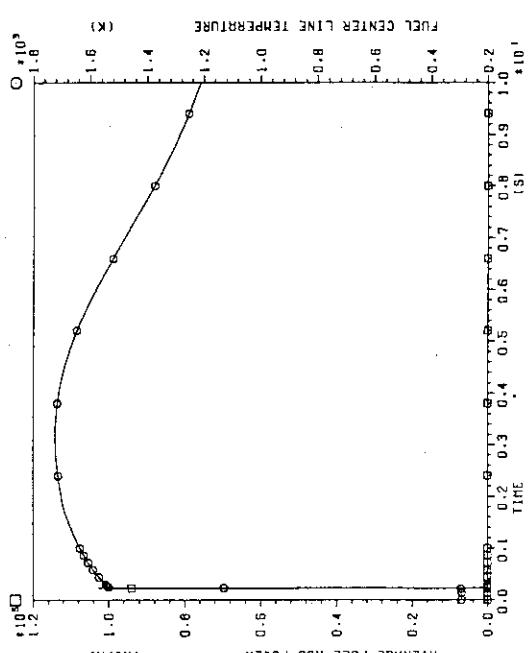
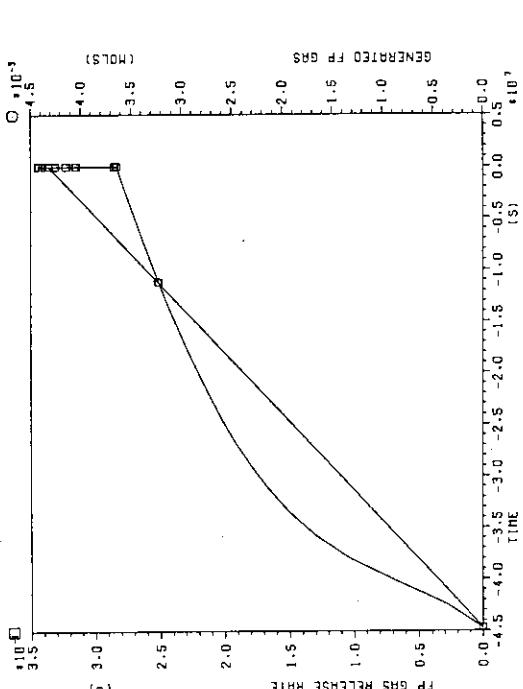
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/M, 4.47E7SEC, POWER*1.08)



FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/M, 4.47E7SEC, POWER*1.08)

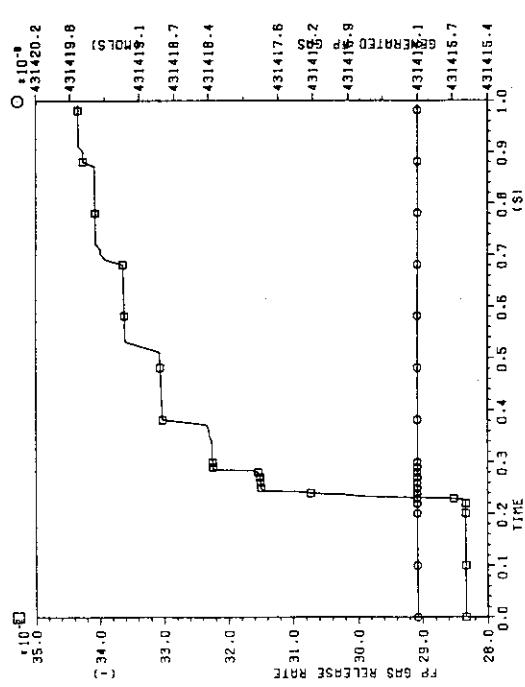


FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/M, 4.47E7SEC, POWER*1.08)



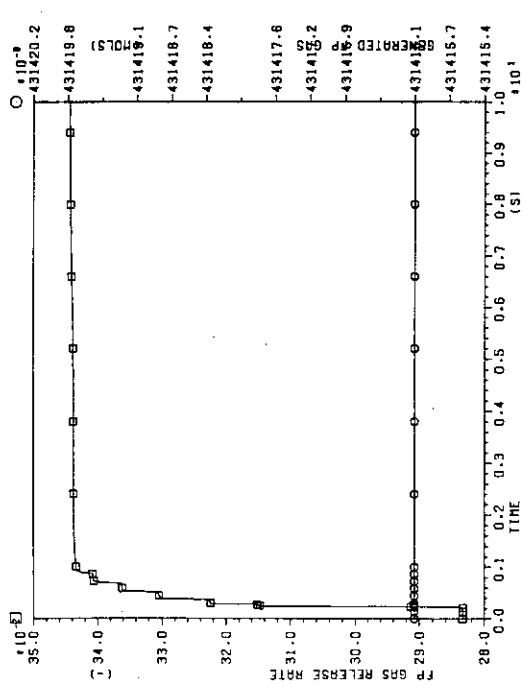
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/m.4.47E7SEC,POWER*1.08)

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/m.4.47E7SEC,POWER*1.08)



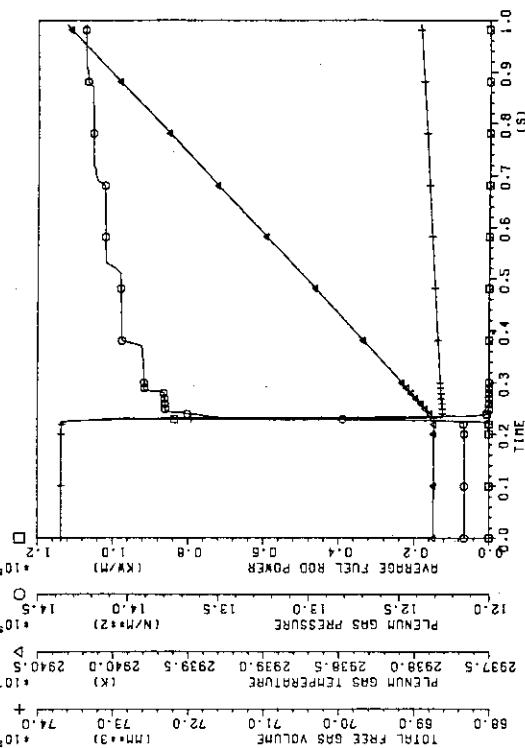
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/m.4.47E7SEC,POWER*1.08)

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/m.4.47E7SEC,POWER*1.08)



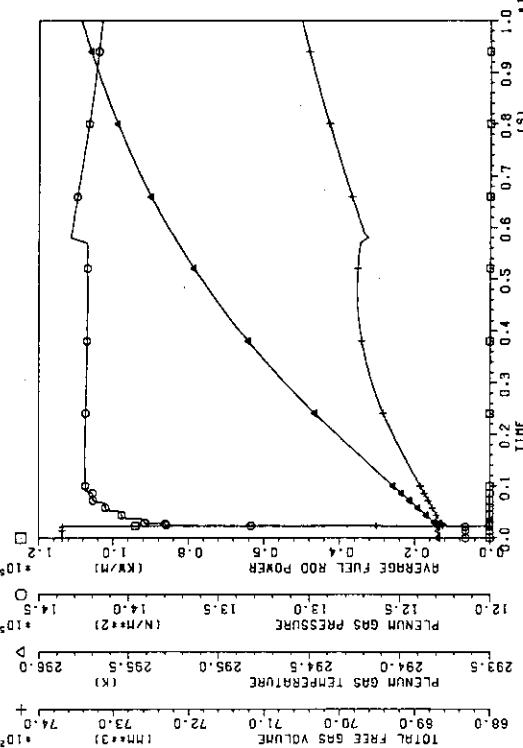
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/m.4.47E7SEC,POWER*1.08)

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/m.4.47E7SEC,POWER*1.08)



FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/m.4.47E7SEC,POWER*1.08)

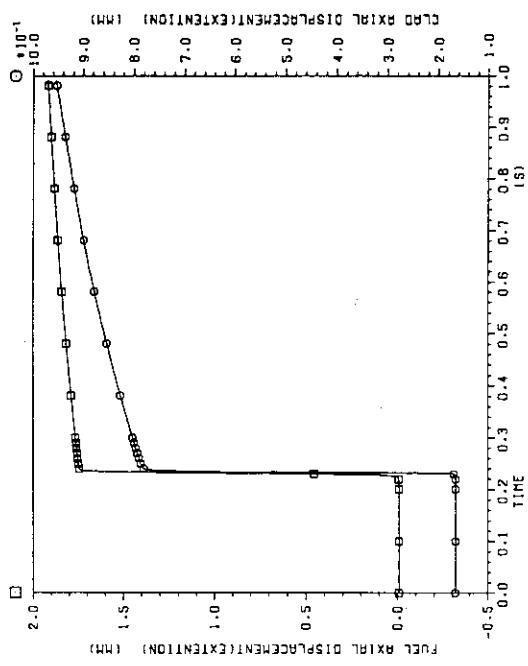
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/m.4.47E7SEC,POWER*1.08)



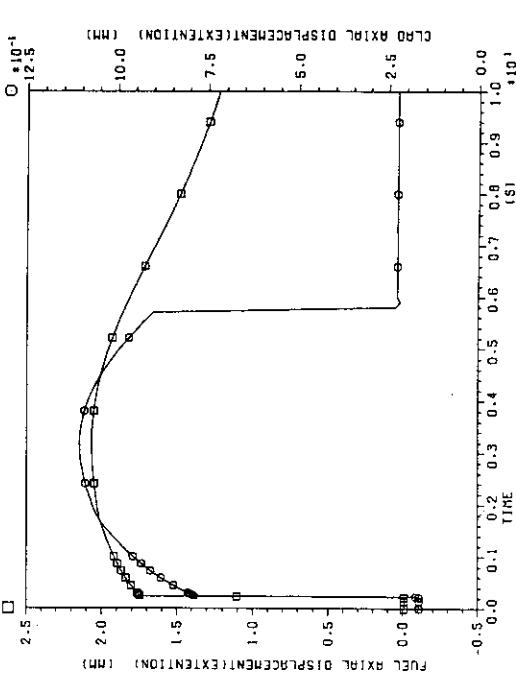
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M.4.47E7SEC,POWER*1.08)

FRAP-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M.4.47E7SEC,POWER*1.08)

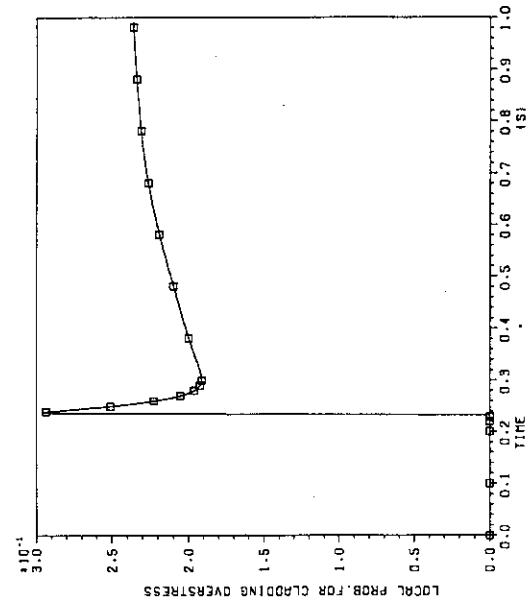
FRAP-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M.4.47E7SEC,POWER*1.08)



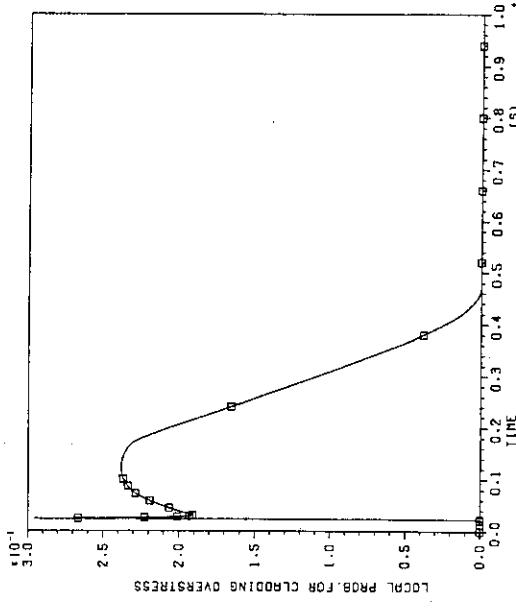
FRAP-T6 V 13 (06/83)
TS-5 (47.0KW/M.4.47E7SEC,POWER*1.08)

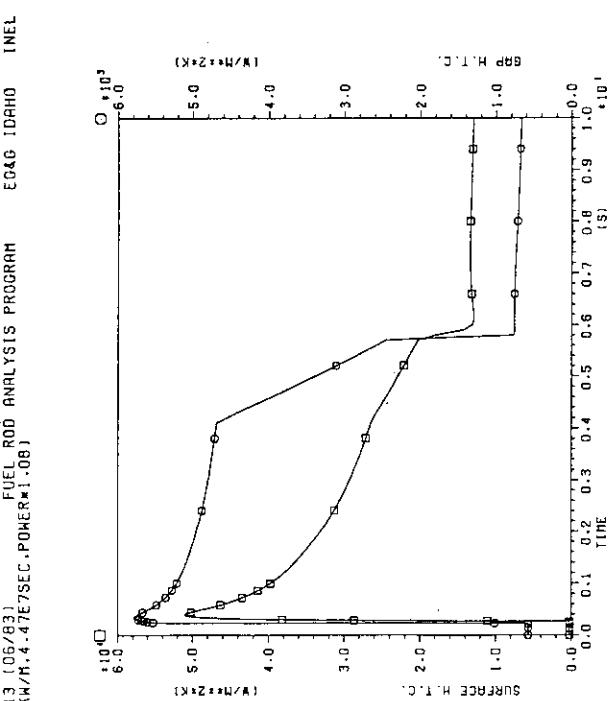
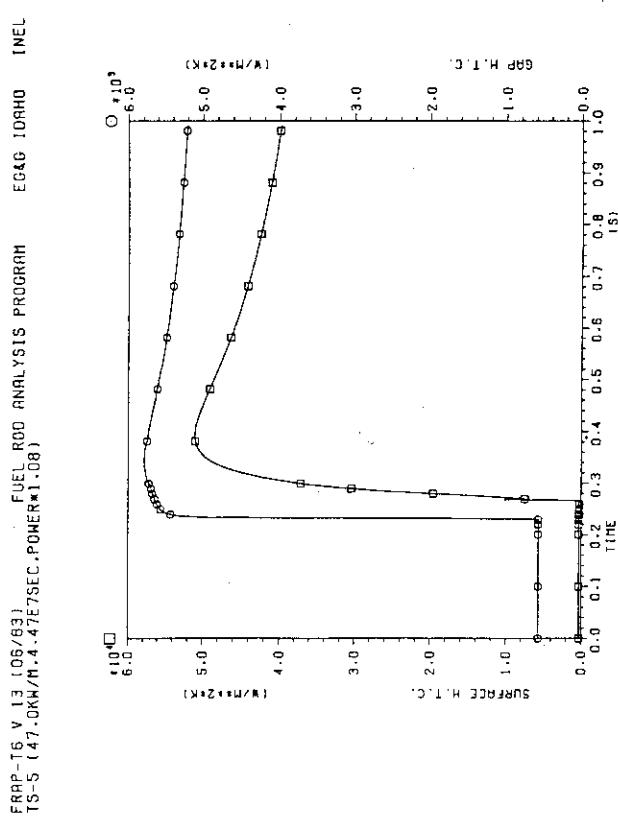
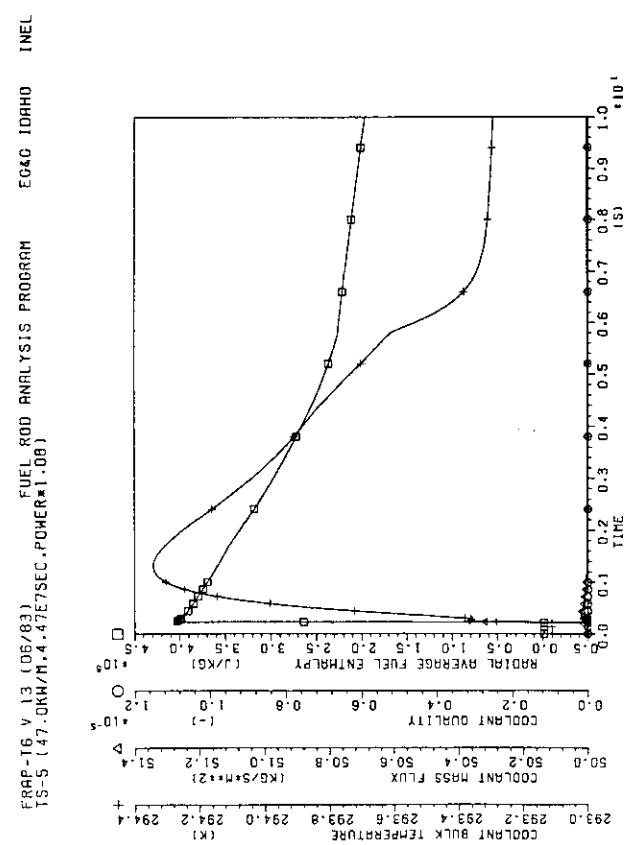
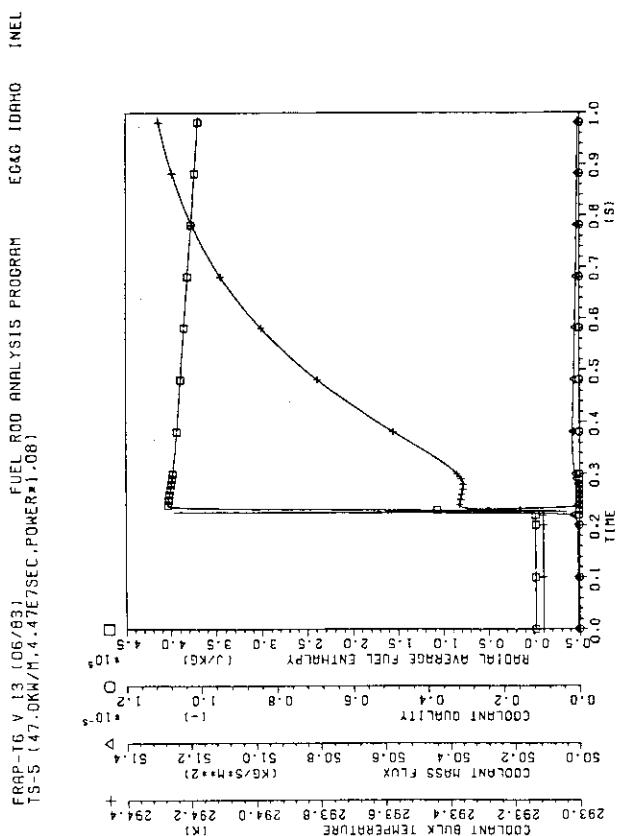


FRAP-16 V 13 (06/83)
TS-5 (47.0KW/M.4.47E7SEC,POWER*1.08)



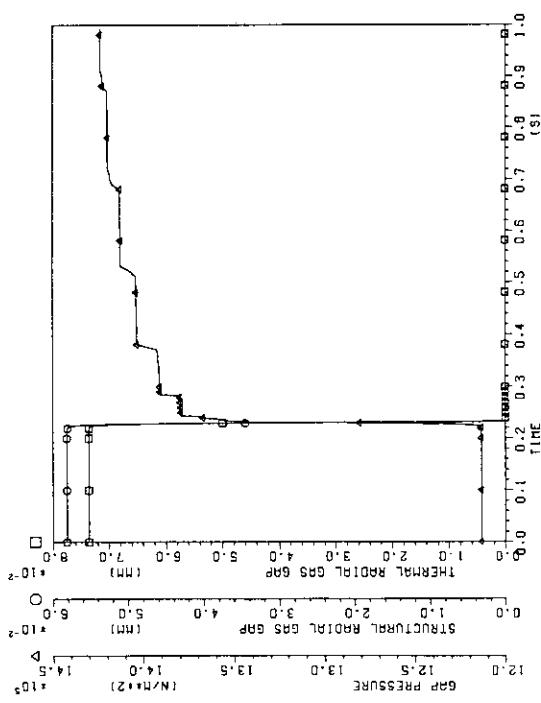
FRAP-16 V 13 (06/83)
TS-5 (47.0KW/M.4.47E7SEC,POWER*1.08)





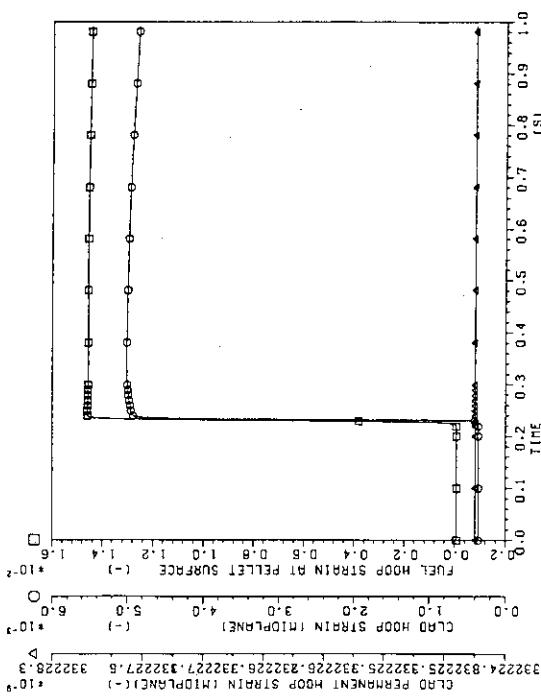
FRAPI-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08)

EG&G IDAHO INEL



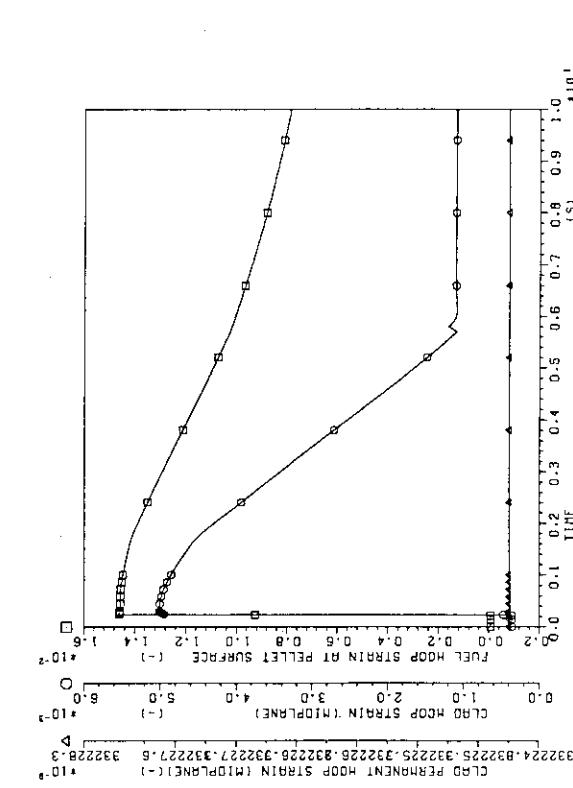
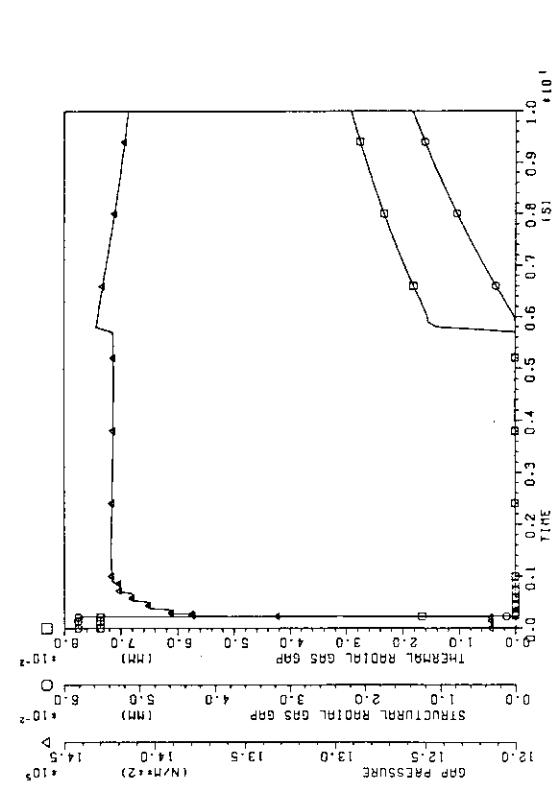
FRAPI-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08)

EG&G IDAHO INEL



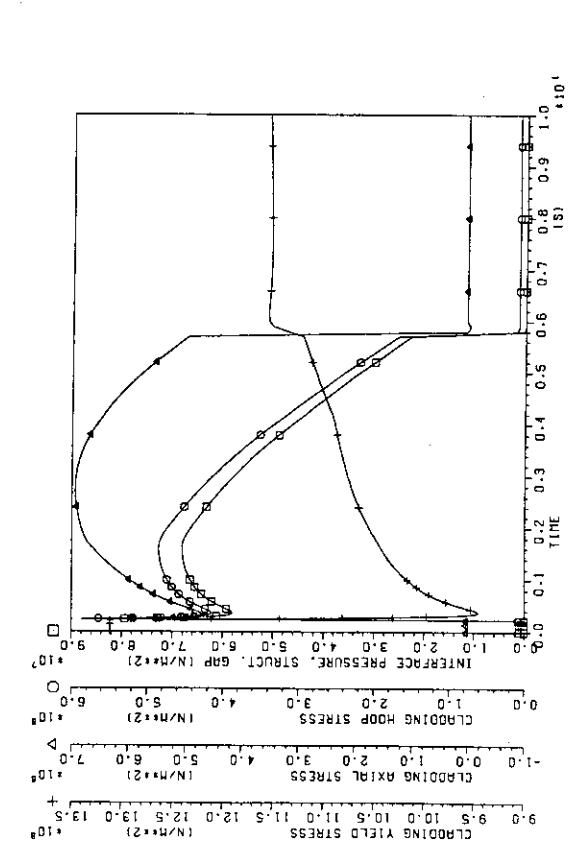
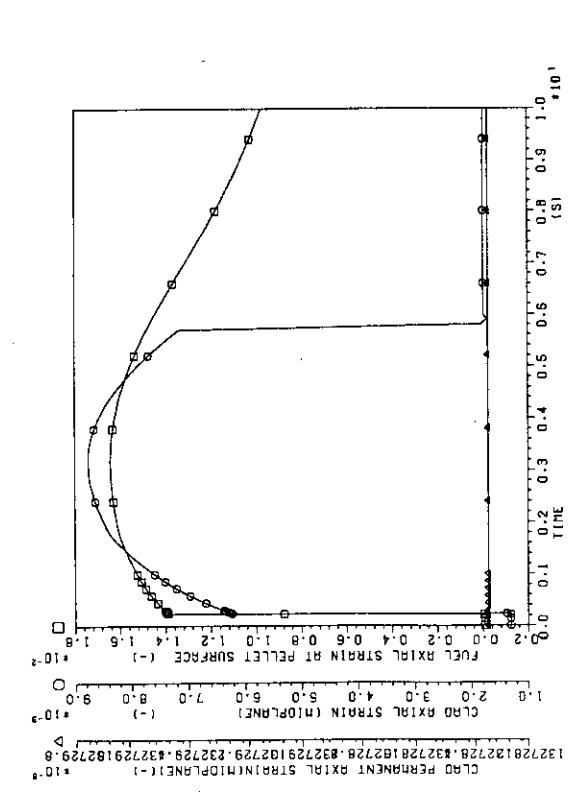
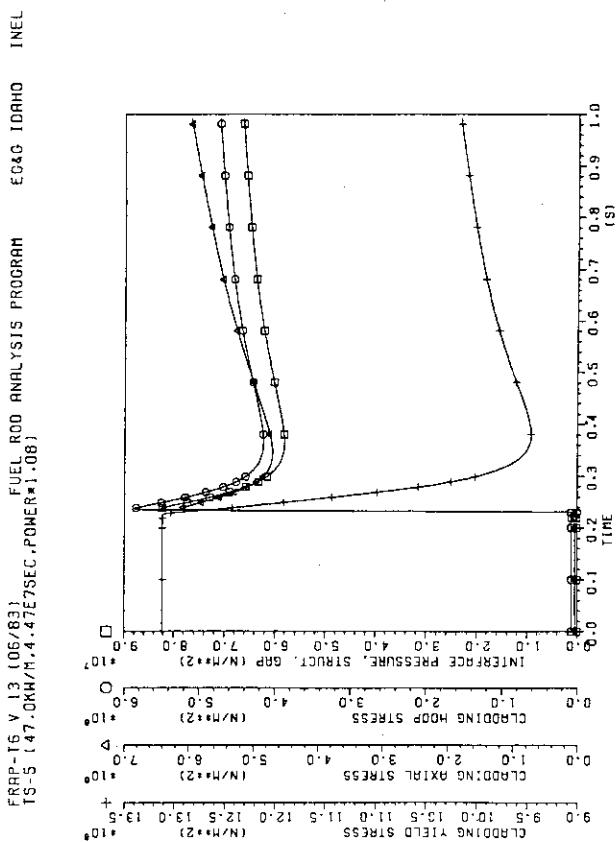
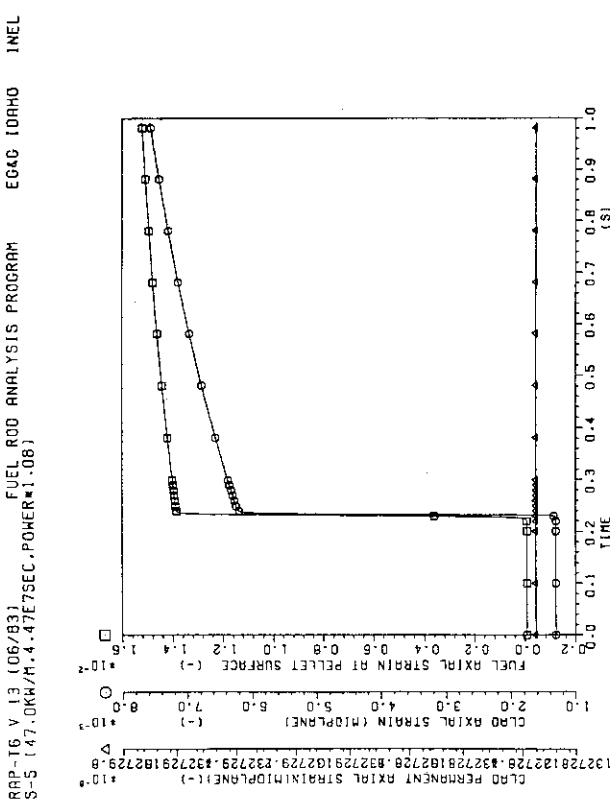
FRAPI-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08)

EG&G IDAHO INEL

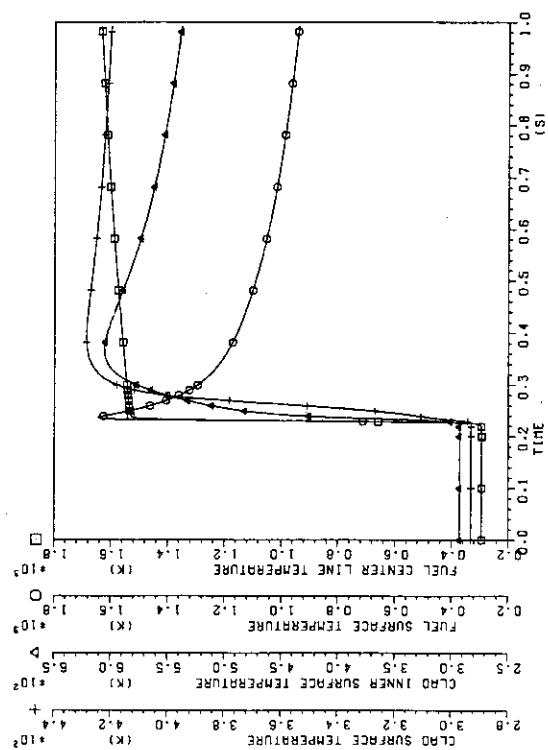


FRAPI-16 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08)

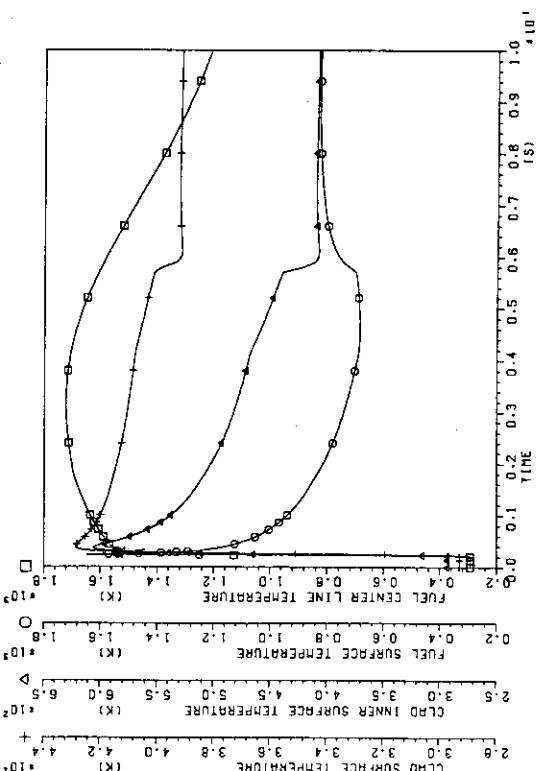
EG&G IDAHO INEL



FRAPI-16 V 1.3 (06/83) FUEL ROO ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/H, 4.47E7SEC, POWER=1.08)
EG&G IDAHO INEL

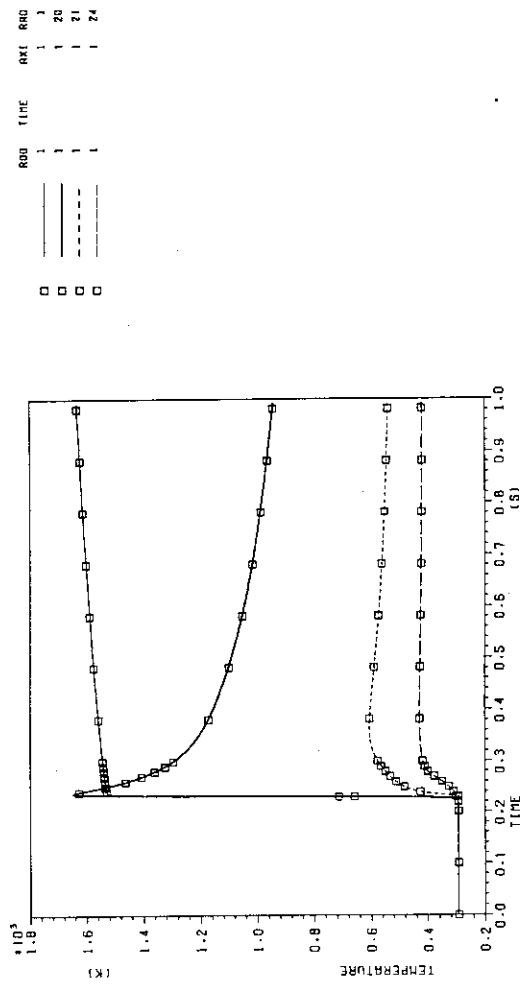


FRAP-TG V 1.3 (06/83)
TS-5 (47.0KWH/4.47E7SEC. POWER=1.08) FUEL ROO ANALYSIS PROGRAM
EG&G IDAHO INEL



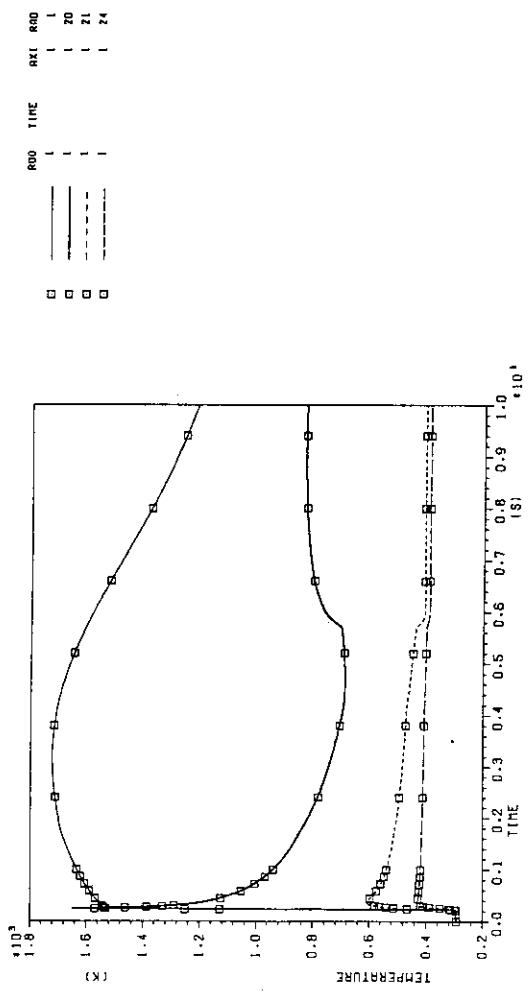
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08)

EG&G IDAHO INEL



FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08)

EG&G IDAHO INEL



JAERI-M 94-031

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM

EG&G IDAHO INEL

TS-5 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08,DHE,DHY,ACHN)

ITEM (SEC)	ROD POWER (kW/M)	VOL-AVE. FUEL TEMP., (K)	AXIAL EXTENSION (MM)	FP GAS P-STACK (MM)	CLADDING (MM)	GRAIN (MM)	FACE (X)	EDGE RELEASE (X)	FACE (X)	EDGE RELEASE (X)	ERROR (X)
-4.470E+07	4.700E+01	1371.2	2.645E+00	1.237E+00	79.56	66.18	6.50	6.78	20.48	0.041	
-2.355E+07	4.700E+01	1390.2	2.688E+00	1.280E+00	68.98	55.61	3.49	9.88	27.63	3.387	
6.645E-10	3.281E+20	293.1	-8.679E-03	-1.579E-03	68.98	55.61	3.49	9.88	27.63	3.387	
1.000E-01	3.281E+20	293.1	-8.679E-03	-2.559E-03	68.98	55.61	3.49	9.88	27.63	3.387	
3.000E-01	3.281E+20	293.1	-8.679E-03	-2.559E-03	68.98	55.61	3.49	9.88	27.63	3.387	
3.000E-01	7.225E+01	1598.3	1.766E+00	6.997E+01	68.12	58.07	2.08	7.97	31.51	0.371	
3.100E-01	7.163E+01	1596.2	1.769E+00	7.028E+01	68.11	58.06	2.08	7.96	31.52	0.371	
4.101E-01	6.543E+01	1580.2	1.798E+00	7.317E+01	67.36	58.06	2.07	7.23	32.27	0.370	
5.101E-01	5.924E+01	1567.6	1.824E+00	7.519E+01	67.33	58.06	2.07	7.20	32.30	0.367	
6.101E-01	5.306E+01	1556.4	1.848E+00	7.815E+01	66.71	58.07	2.06	6.58	32.92	0.365	
7.101E-01	4.687E+01	1545.8	1.866E+00	8.027E+01	66.35	58.07	2.06	6.22	33.29	0.364	
8.101E-01	4.104E+01	1535.4	1.888E+00	8.215E+01	66.26	58.06	2.06	6.13	33.38	0.365	
9.101E-01	3.844E+01	1525.7	1.905E+00	8.387E+01	66.00	58.06	2.06	5.88	33.63	0.367	
1.010E+00	3.544E+01	1516.6	1.921E+00	8.549E+01	65.99	58.06	2.06	5.87	33.64	0.369	
2.010E+00	9.735E+00	1441.2	2.033E+00	9.661E+01	65.87	58.03	2.05	5.80	33.72	0.406	
3.010E+00	7.509E+00	1359.1	2.068E+00	1.001E+00	65.77	57.94	2.04	5.79	33.73	0.504	
4.010E+00	5.927E+00	1265.0	2.053E+00	9.863E+01	65.62	57.91	2.03	5.79	33.73	0.647	
5.010E+00	4.502E+00	1162.9	1.986E+00	9.200E+01	65.44	57.65	2.01	5.78	33.73	0.830	
6.010E+00	3.706E+00	1083.3	1.878E+00	8.111E+01	65.26	57.49	2.00	5.77	33.73	1.012	
7.010E+00	2.915E+00	1033.5	1.732E+00	5.641E+02	65.08	57.34	1.99	5.75	33.74	1.178	
8.010E+00	2.567E+00	1014.7	1.564E+00	5.656E+02	64.92	57.22	1.96	5.74	33.76	1.316	
9.010E+00	2.218E+00	993.0	1.401E+00	5.662E+02	64.76	57.11	1.92	5.75	33.77	1.450	
1.000E+01	1.873E+00	971.0	1.266E+00	5.634E+02	64.66	57.01	1.88	5.77	33.78	1.565	

FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM

EG&G IDAHO INEL

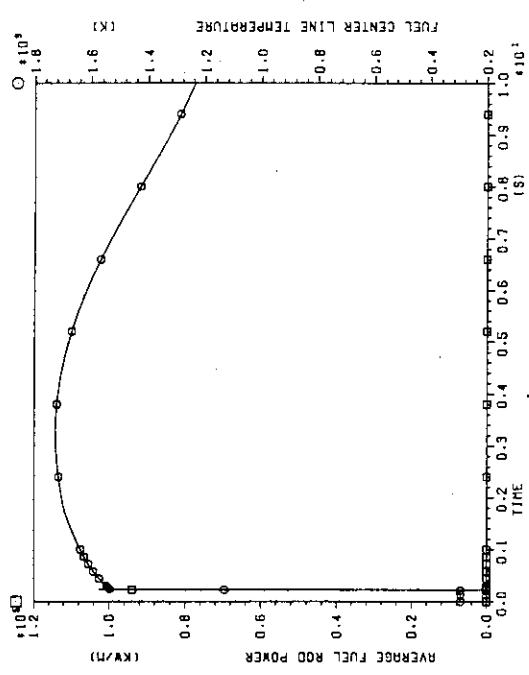
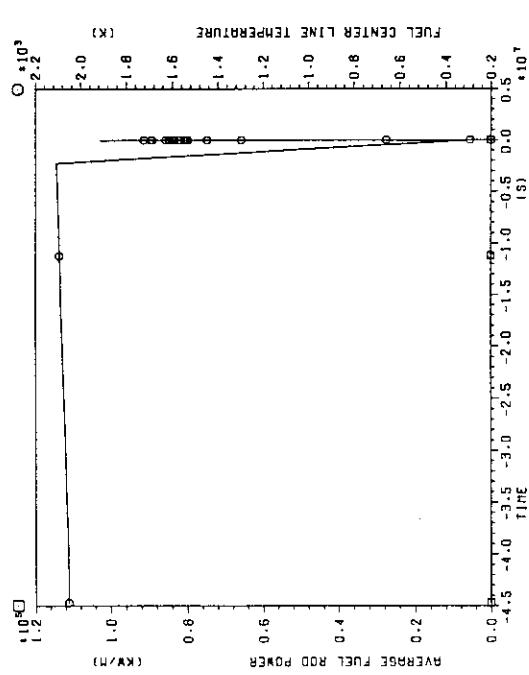
TS-5 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08,DHE,DHY,ACHN)

AXIAL NODE NO. = 1

ITEM (SEC)	RADIALLY AVE. FUEL ENTHALPY (CAL/G)	FP GAS RADIAL (MM)	RELEASE (X)	FACE (X)	EDGE (X)	RELEASE (X)	FACE (X)	TEMPERATURE PELLET (K)	CLADDING INNER SURFACE (K)	GAS THERMAL PRESSURE (NM**2)	STRUCTURAL GAP RADIAL (MM)	CLADDING INNER SURFACE (K)	GAS THERMAL PRESSURE (NM**2)	STRUCTURAL GAP RADIAL (MM)	FUEL OUT.SURF. (MM)	CLAD (MM)	DISPLACEMENT FUEL OUT.SURF. (MM)	CLADDING HOOP STRESS (NM**2)	CLADDING HOOP STRESS (NM**2)
-4.470E+07	7.772E+01	79.56	66.18	6.60	6.78	20.48	0.041	2054.3	808.5	638.4	578.0	0.000E+00	1.773E+06	1.075E+01	3.311E+02	5.250E+03	5.022E+08		
-2.235E+07	7.723E+01	79.56	66.18	3.49	9.88	27.63	3.387	293.1	293.1	293.1	293.1	7.064E+02	5.518E+02	1.294E+06	1.096E+01	3.453E+02	5.484E+03	5.384E+08	
6.645E-10	-3.866E+01	68.98	55.61	3.49	9.88	27.63	3.387	293.1	293.1	293.1	293.1	7.063E+02	5.517E+02	1.299E+06	1.504E+01	3.454E+02	2.602E+05	7.745E+06	
1.000E-01	-3.866E+01	68.98	55.61	3.49	9.88	27.63	3.387	293.1	293.1	293.1	293.1	7.063E+02	5.517E+02	1.291E+04	1.504E+02	2.517E+05	7.653E+06		
3.000E-01	-3.866E+01	68.98	55.61	3.49	9.88	27.63	3.387	293.1	293.1	293.1	293.1	7.063E+02	5.517E+02	1.291E+04	1.504E+02	2.517E+05	7.653E+06		
3.000E-01	9.505E+01	68.12	57.07	3.77	31.51	3.371	1545.4	416.4	416.4	416.4	0.000E+00	1.322E+06	1.058E+01	3.250E+02	5.107E+03	4.912E+08			
3.100E-01	9.489E+01	68.11	58.06	2.08	7.96	31.52	1545.4	588.0	419.6	419.6	0.000E+00	1.382E+06	1.056E+01	3.256E+02	5.081E+03	4.828E+08			
4.101E-01	9.364E+01	67.36	58.06	2.07	7.23	32.30	3.367	1562.9	609.5	450.5	0.000E+00	1.308E+06	1.372E+02	5.091E+03	4.581E+08				
5.101E-01	9.264E+01	67.33	58.06	2.07	7.20	32.30	3.367	1578.6	609.5	474.3	0.000E+00	1.306E+06	1.056E+01	3.279E+02	5.098E+03	4.507E+08			
6.101E-01	9.179E+01	66.71	58.07	2.06	6.58	32.92	0.365	1592.6	609.9	497.6	0.000E+00	1.406E+06	1.056E+01	3.285E+02	5.105E+03	4.420E+08			
7.101E-01	9.097E+01	66.35	58.07	2.06	6.22	33.29	0.364	1605.1	610.3	522.9	0.000E+00	1.432E+06	1.055E+01	3.291E+02	5.107E+03	4.294E+08			
8.101E-01	9.017E+01	66.26	58.06	2.06	6.13	33.38	0.365	1616.2	610.3	550.6	0.000E+00	1.436E+06	1.055E+01	3.296E+02	5.107E+03	4.127E+08			
9.101E-01	8.941E+01	66.00	58.06	2.06	5.88	33.63	0.367	1626.4	619.5	565.8	0.000E+00	1.422E+06	1.053E+01	3.302E+02	5.099E+03	3.936E+08			
1.010E-01	8.841E+01	65.99	58.06	2.06	5.87	33.64	0.369	1635.9	619.5	565.8	0.000E+00	1.423E+06	1.052E+01	3.308E+02	5.099E+03	3.742E+08			
2.010E+00	8.281E+01	65.87	58.03	2.05	5.80	33.72	0.406	1701.3	948.5	777.6	724.2	0.000E+00	1.473E+06	1.031E+01	3.168E+02	5.098E+03	2.877E+08		
3.010E+00	7.639E+01	65.77	57.94	2.04	5.79	33.73	0.504	1722.2	690.4	714.7	659.8	0.000E+00	1.446E+06	9.873E+02	2.680E+02	4.150E+03	9.955E+08		
4.010E+00	6.913E+01	65.62	57.81	2.03	5.79	33.73	0.647	1741.5	714.7	714.7	620.1	422.3	0.000E+00	1.454E+06	9.313E+02	1.986E+03	4.145E+08		
5.010E+00	6.131E+01	65.44	57.65	2.01	5.78	33.73	0.830	1676.9	611.8	461.3	404.0	0.000E+00	1.444E+06	8.646E+02	1.337E+02	2.225E+03	3.419E+08		
6.010E+00	5.521E+01	65.26	57.49	2.00	5.77	33.73	1.012	1613.7	613.7	446.8	400.6	0.000E+00	1.459E+06	8.015E+02	8.015E+02	1.339E+03	2.410E+08		
7.010E+00	5.134E+01	65.08	57.34	1.99	5.75	33.74	1.178	1527.5	613.7	389.8	403.9	0.000E+00	1.476E+06	7.476E+02	5.321E+03	9.535E+04	2.877E+08		
8.010E+00	4.983E+01	64.92	57.22	1.96	5.74	33.76	1.316	1426.1	702.1	406.8	389.9	1.946E+02	3.993E+03	1.473E+02	7.532E+03	9.497E+04	2.877E+08		
9.010E+00	4.815E+01	64.78	57.11	1.92	5.75	33.77	1.450	1324.4	806.3	406.9	390.1	2.300E+02	7.539E+03	1.467E+02	6.726E+02	9.535E+04	2.877E+08		
1.000E+01	4.647E+01	64.66	57.01	1.88	5.77	33.78	1.565	1237.2	809.4	406.2	389.8	2.600E+02	1.054E+02	1.461E+02	6.423E+02	9.530E+04	2.877E+08		

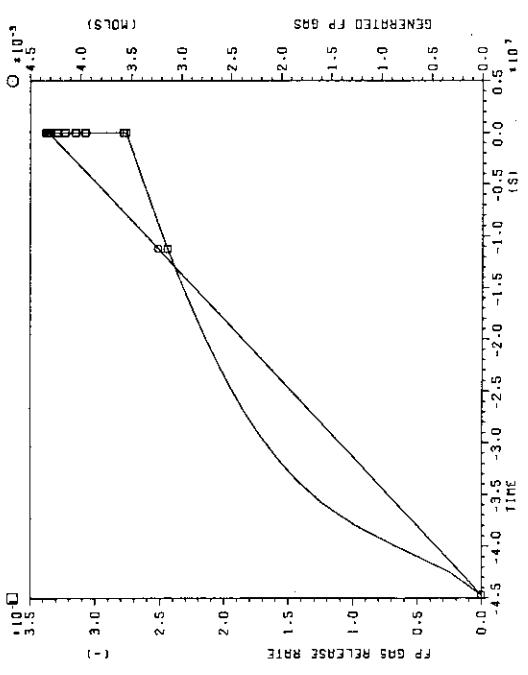
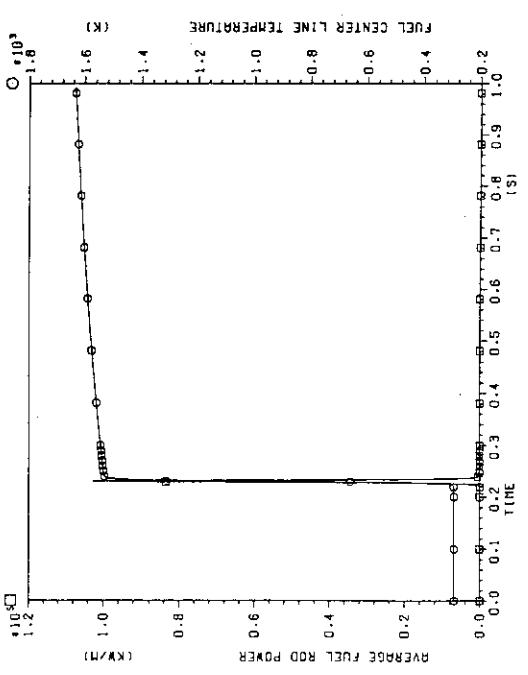
FRAPI-T6 V 1.3 [06/83] FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M,4.47E7SEC,POWER*1.08,DHE,DHY,ACHN)

FRAPI-T6 V 1.3 [06/83] FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M,4.47E7SEC,POWER*1.08,DHE,DHY,ACHN)



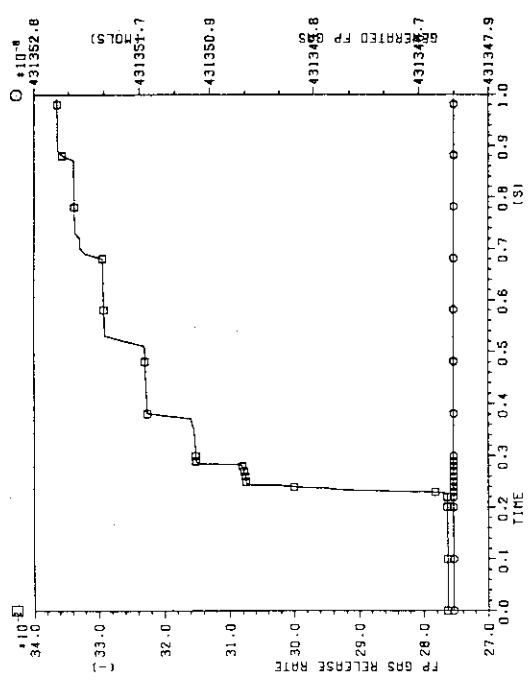
FRAPI-T6 V 1.3 [06/83] FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M,4.47E7SEC,POWER*1.08,DHE,DHY,ACHN)

FRAPI-T6 V 1.3 [06/83] FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M,4.47E7SEC,POWER*1.08,DHE,DHY,ACHN)

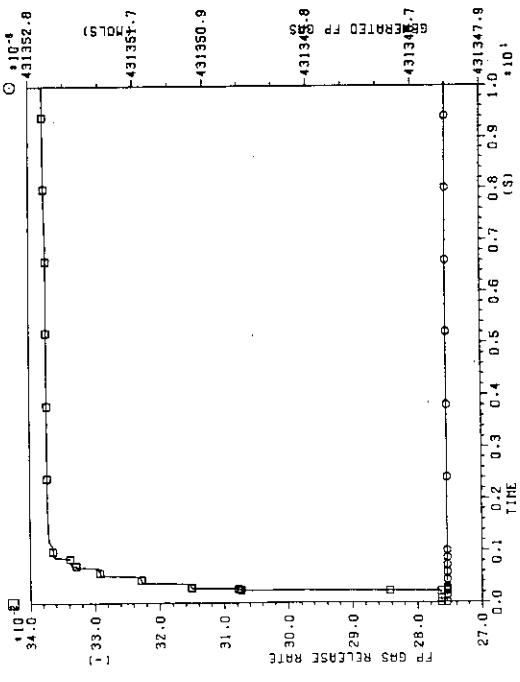


FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08,DHE,DHY,ACHN)

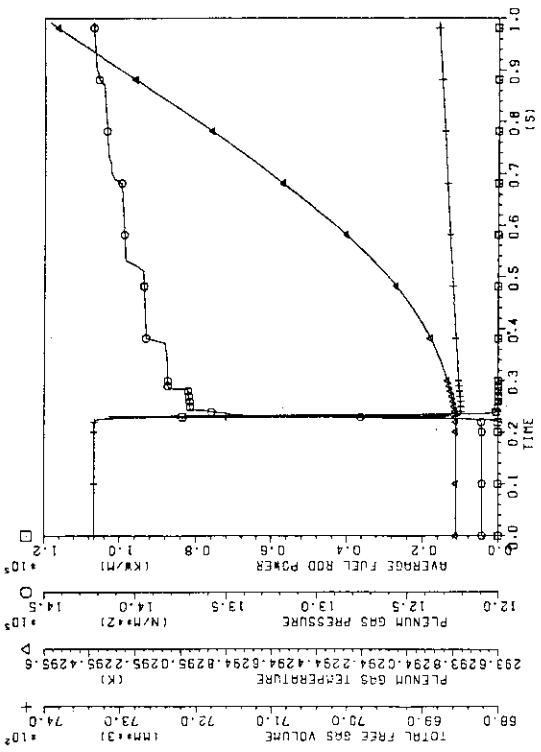
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08,DHE,DHY,ACHN)



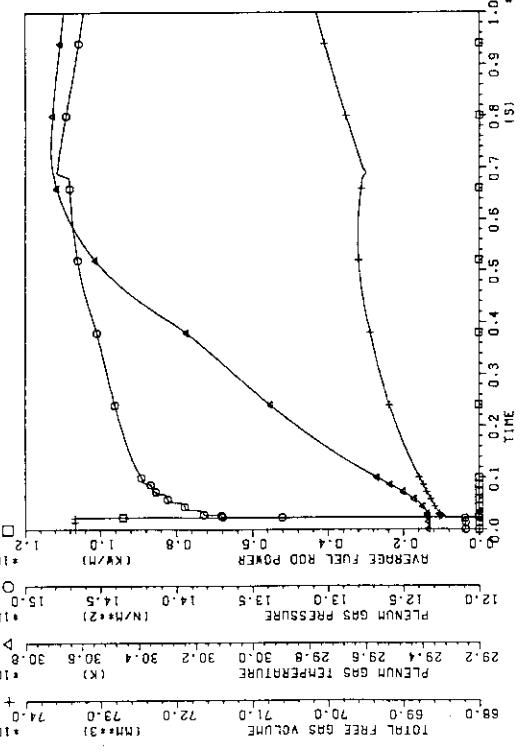
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08,DHE,DHY,ACHN)



FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08,DHE,DHY,ACHN)



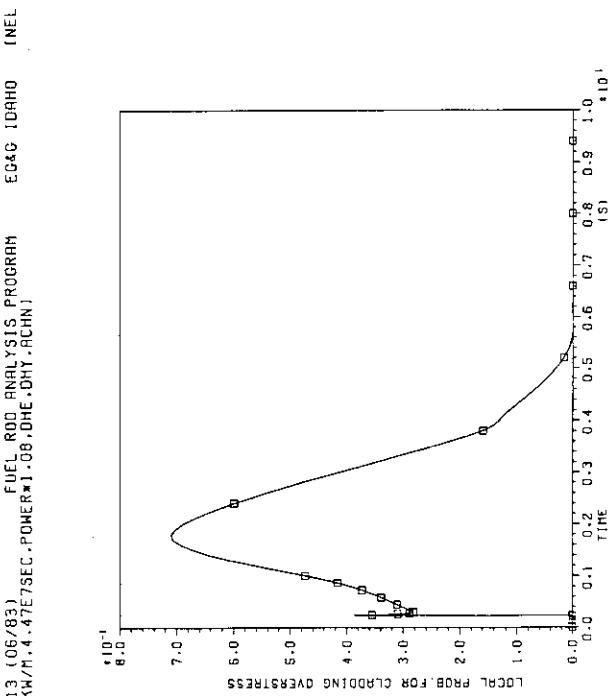
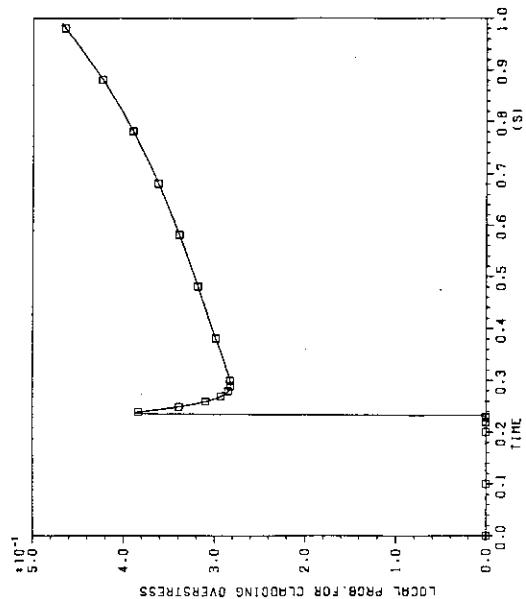
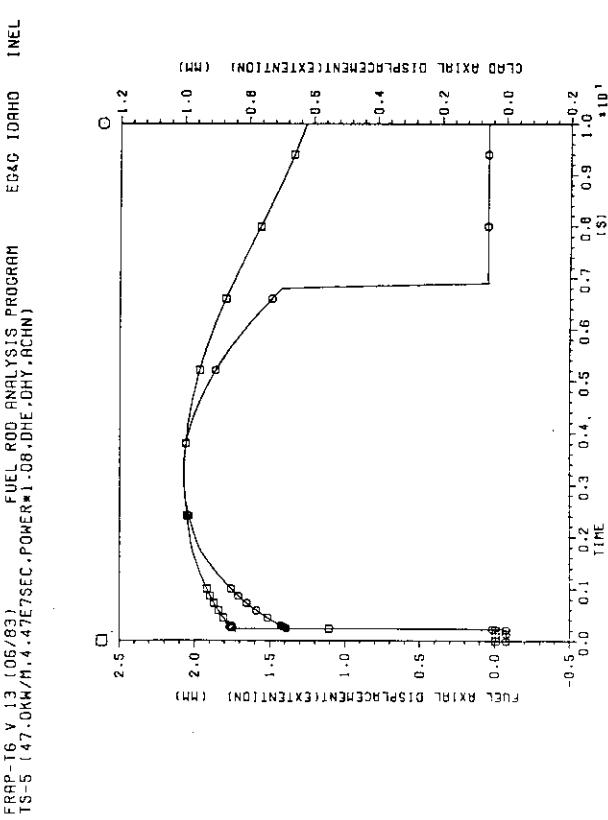
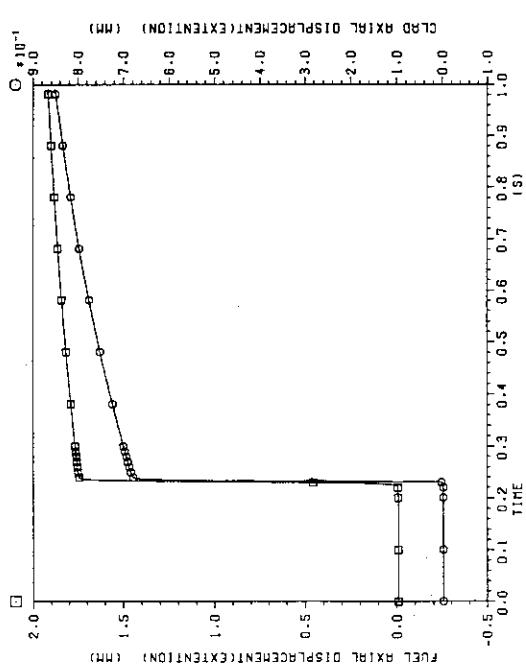
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08,DHE,DHY,ACHN)

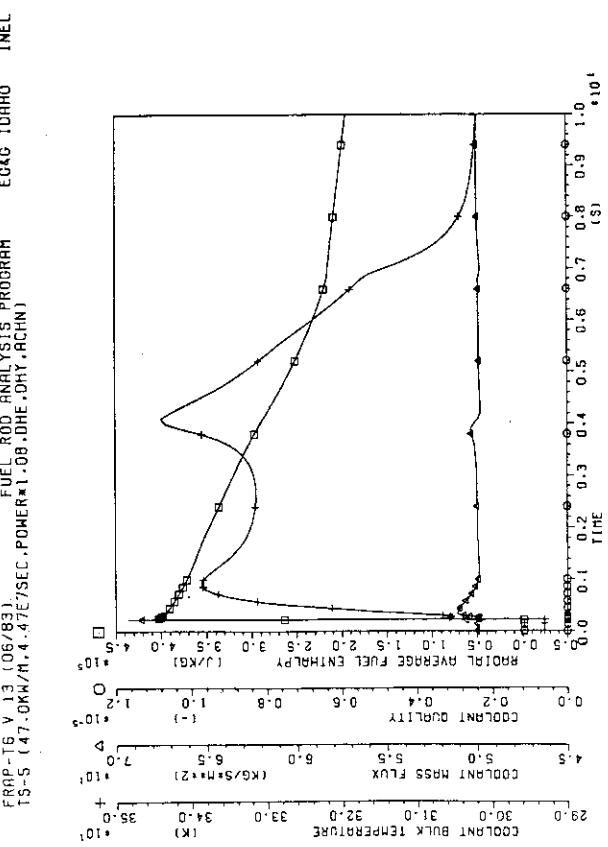
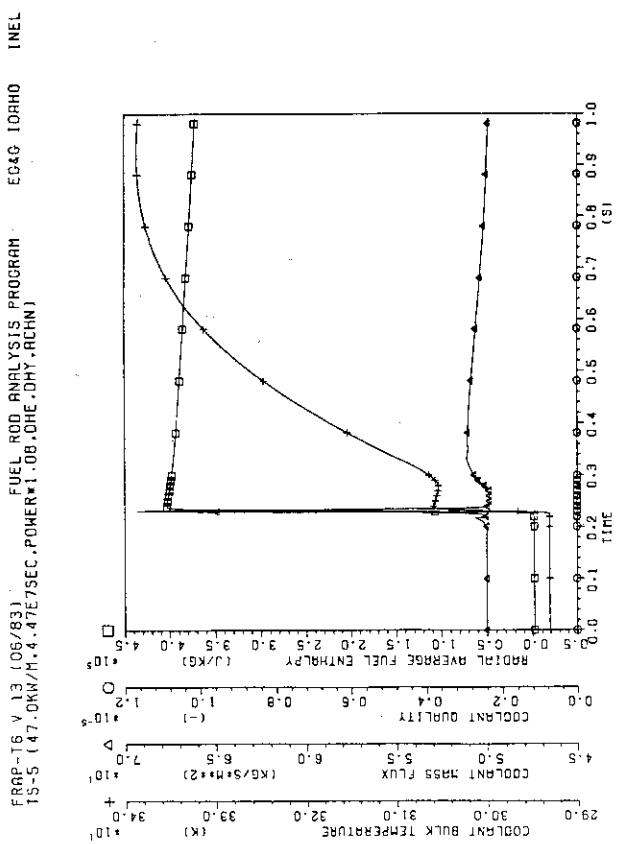


FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08,DHE,DHY,ACHN)

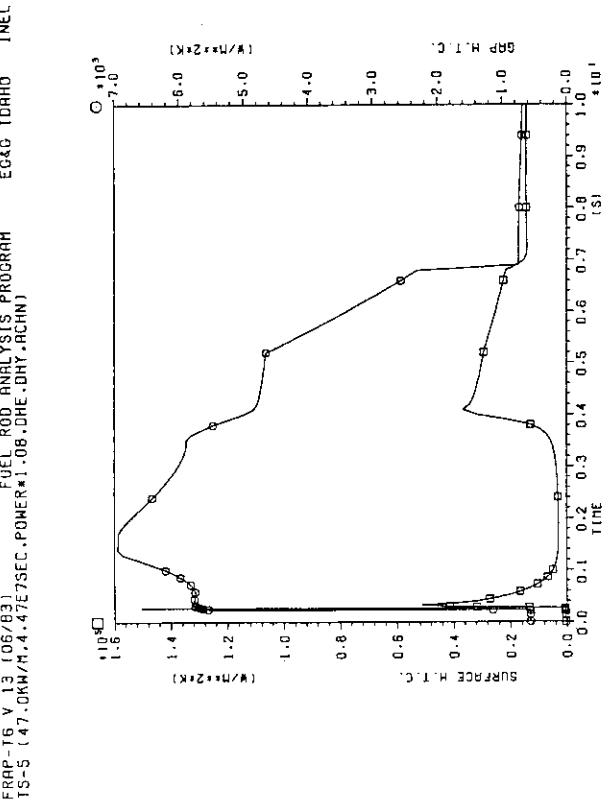
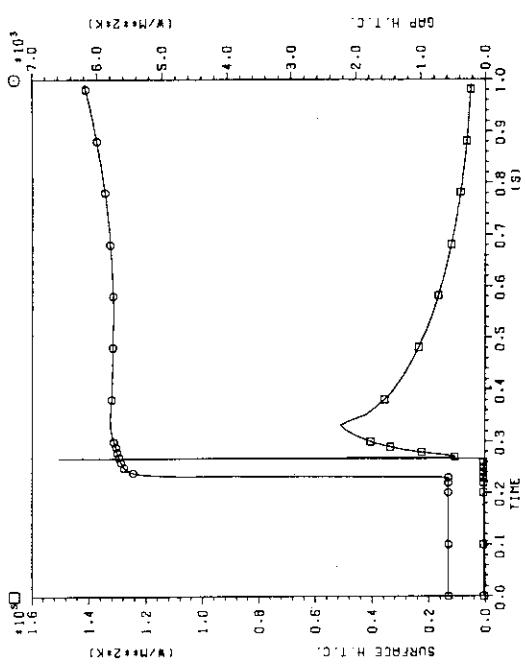
FRAP-T6 V 1.3 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/M,4.47E7SEC,POWER=1.08,DHE,DHY,ACHN)

FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0kW/M,4.47E7SEC,POWER=1.08,DHE,DHY,ACHN) INEL





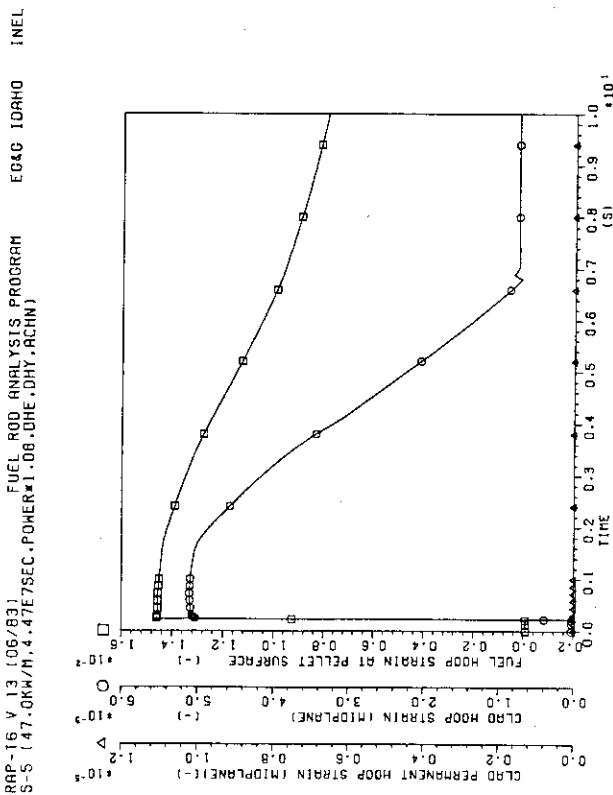
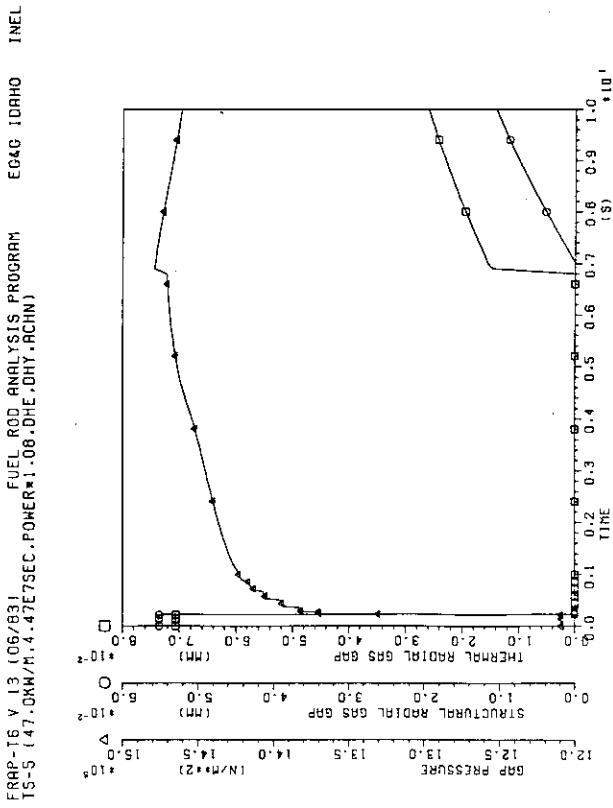
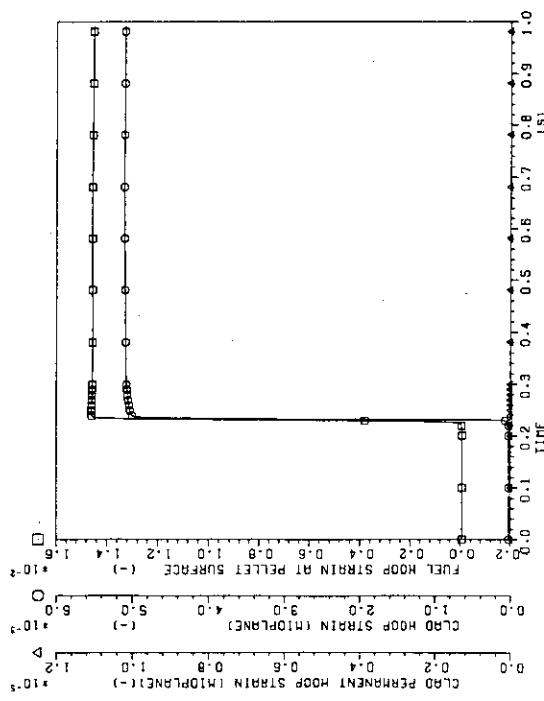
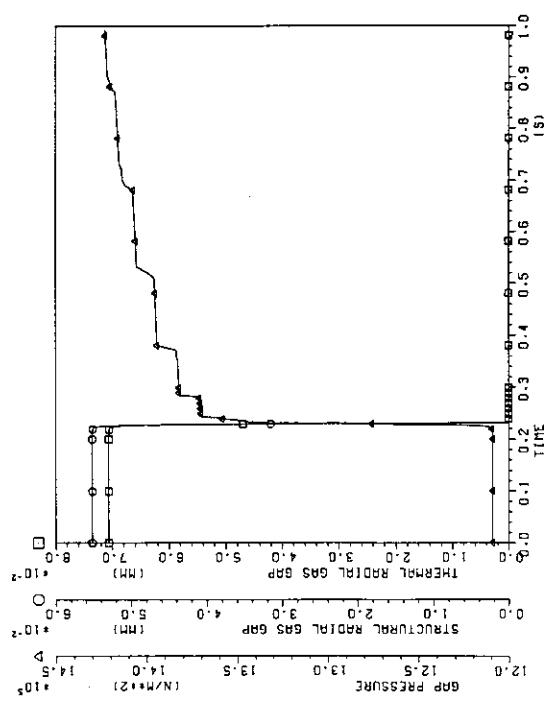
FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08, ONE.DRY, ACHN)

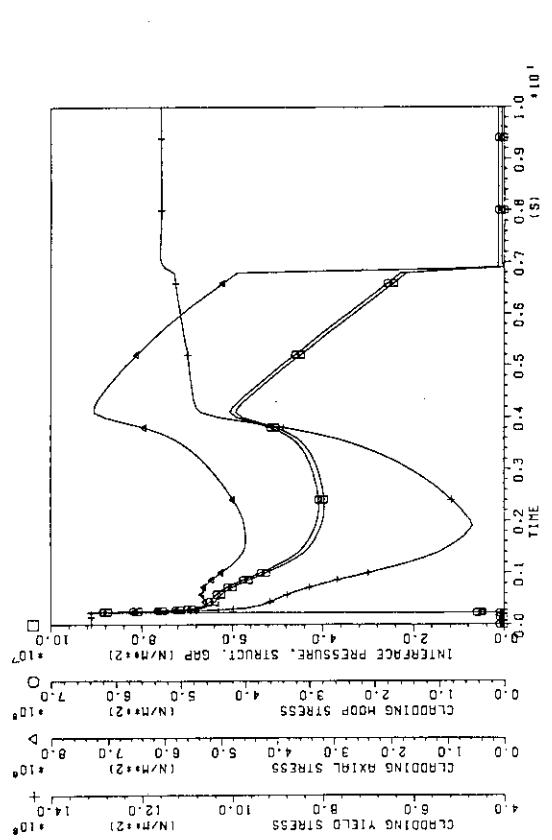
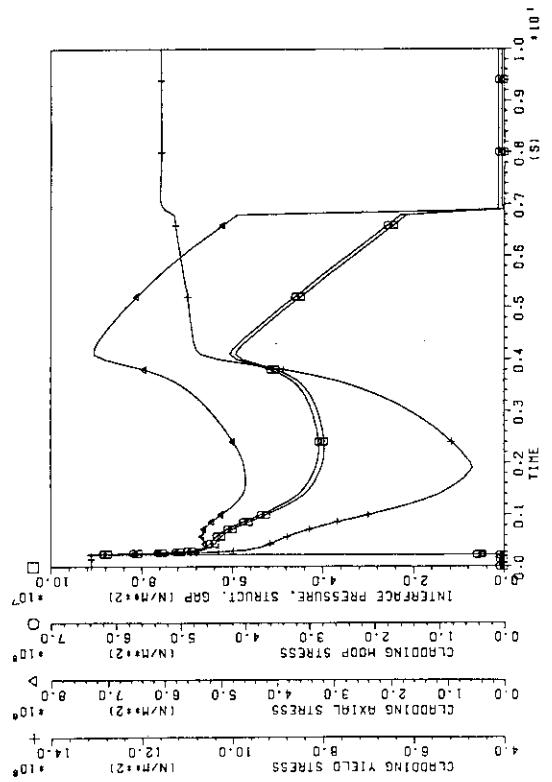
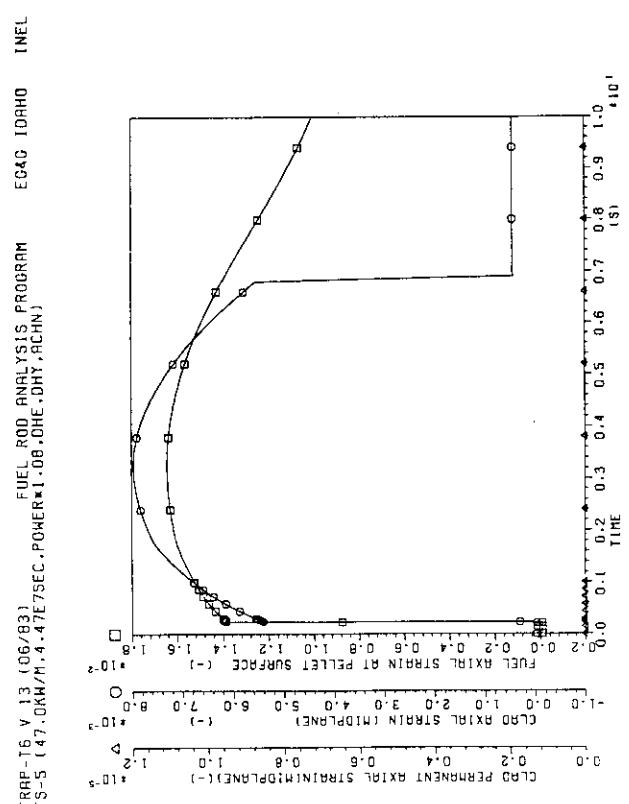
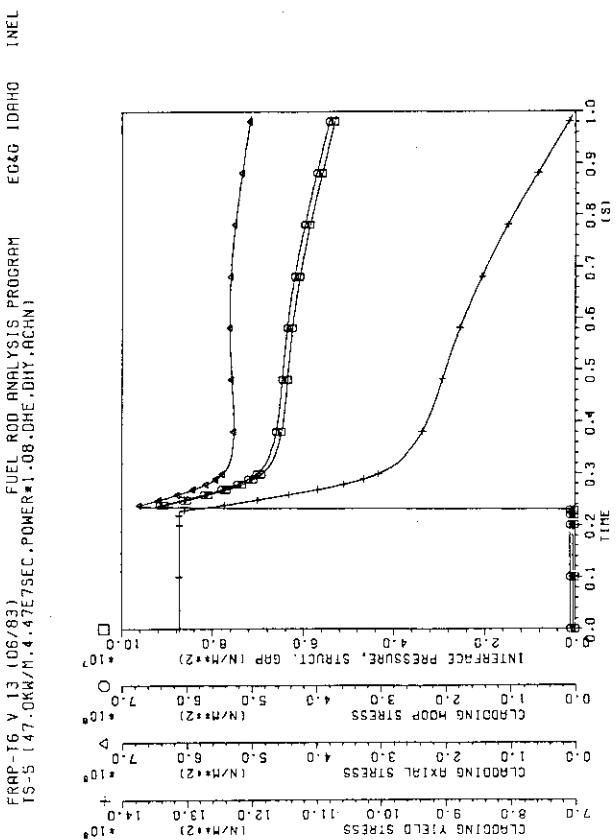
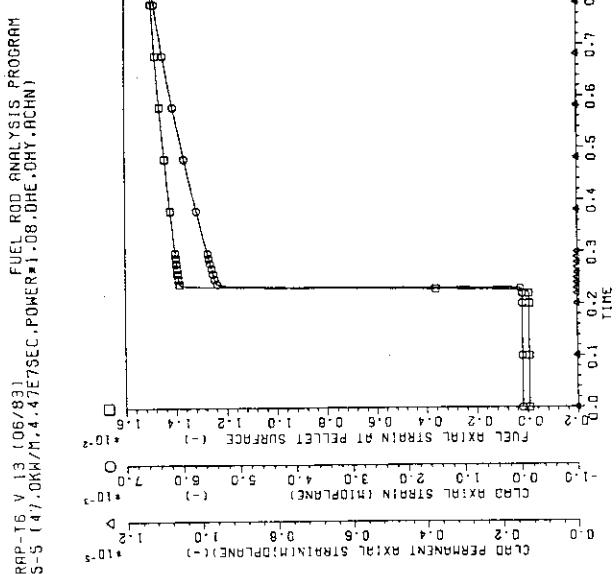


FRAPI-16 V.13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M,4.47E7SEC,POWER=1.08,DHE,DHY,ACHN)

FRAPI-16 V.13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M,4.47E7SEC,POWER=1.08,DHE,DHY,ACHN)

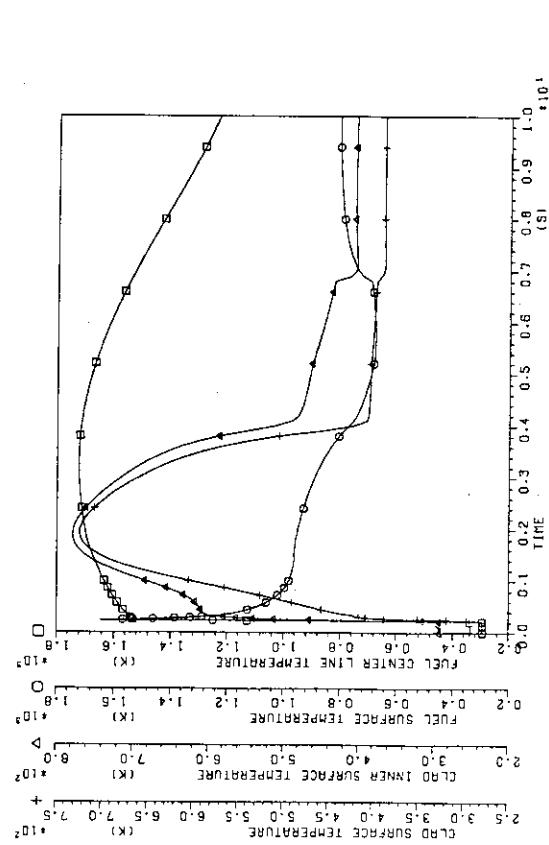
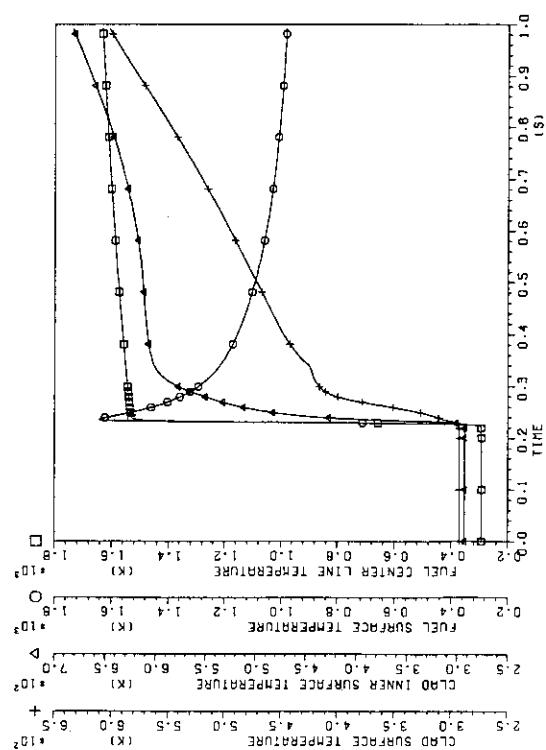
EG&G IDAHO INEL



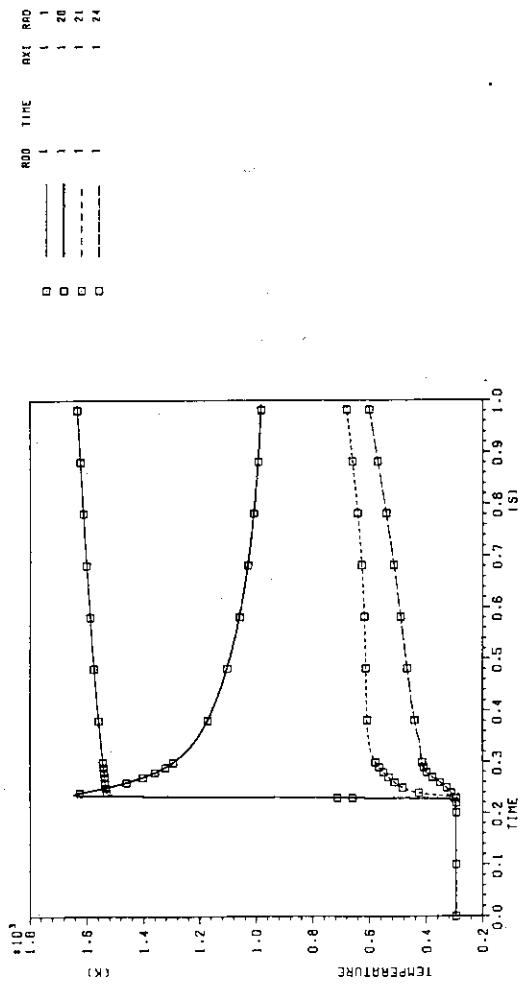


FRAP-T6 V 13 (06/83) FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 (47.0KW/M, 4.47E7SEC., POWER=1.0E+08,DHY,RCHN)

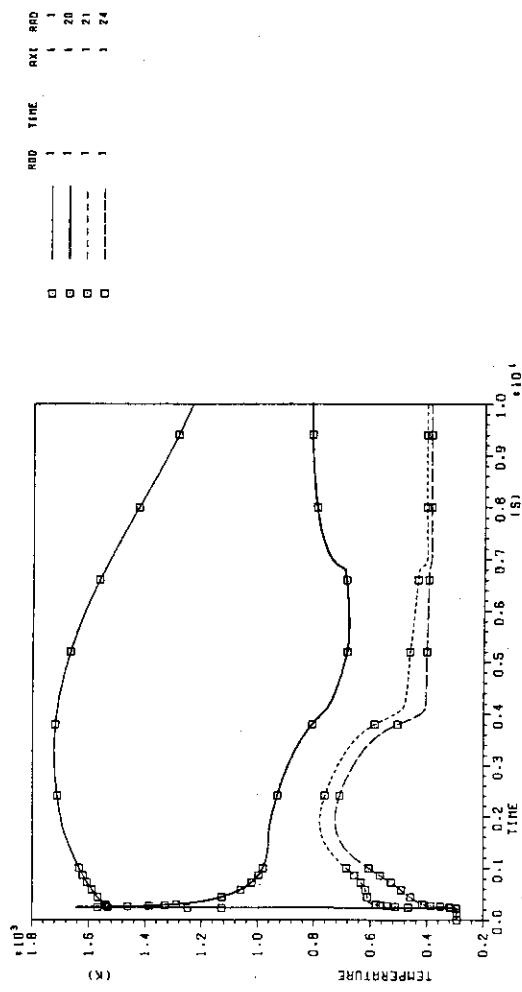
E64G IDAHO INEL



FRAPI6 V 13 [06/83] FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 [47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08,DHE,DHT,RCHN]



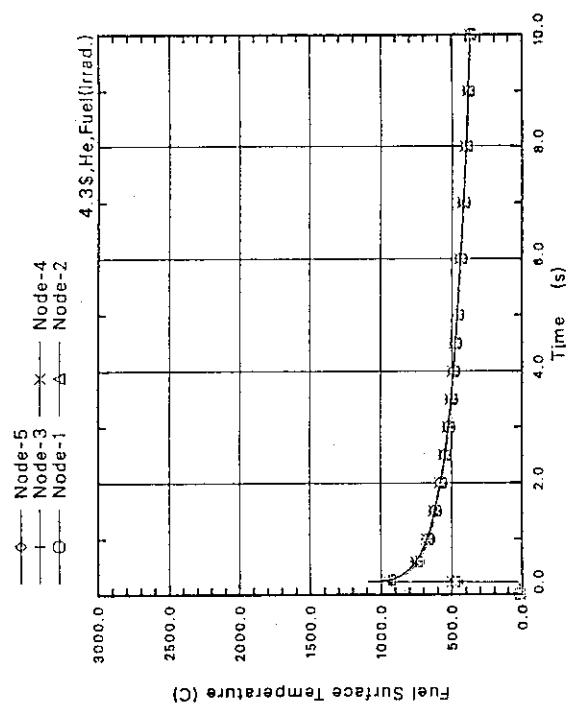
FRAPI6 V 13 [06/83] FUEL ROD ANALYSIS PROGRAM
TS-5 [47.0KW/M, 4.47E7SEC, POWER=1.08,DHE,DHT,RCHN]



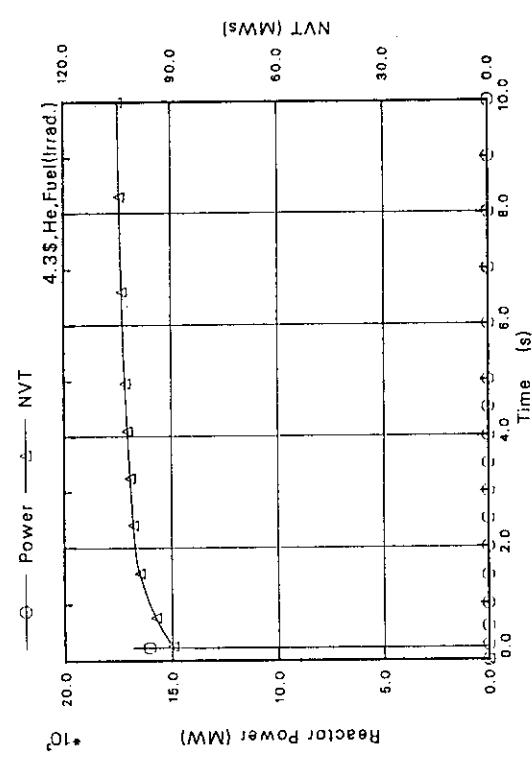
付録II NSR77コードによるTS実験の解析結果

Appendix II Simulation Results of TS test calculated with NSR77

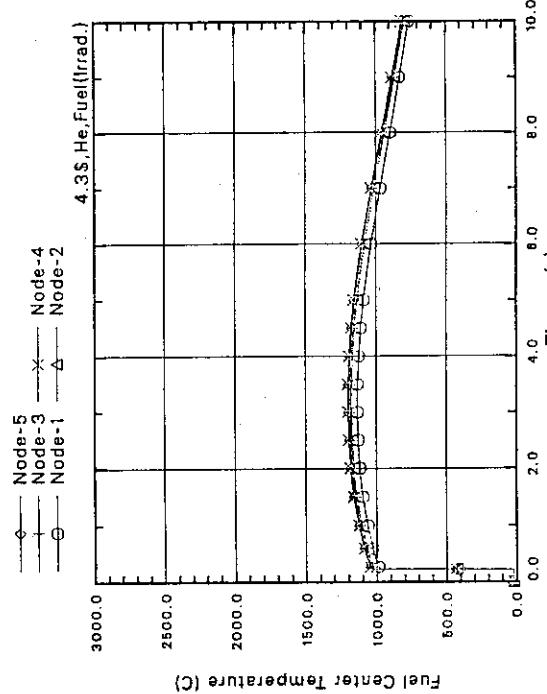
Test No.	Pulse Irradiation Condition			Contents	Case ID
	Peak Fuel Enthalpy, cal/g.fuel	Gap Gas	Gap Width, μm		
TS-3	80.3	He	155	Reactor Power, Temperature, Elongation, Cladding stress, etc.	1
	78.0	ditto	70	ditto	2
	78.0	ditto	40	ditto	3
TS-4	84.0	Xe/Kr/He	155	ditto	4
	78.3	ditto	70	ditto	5
	77.5	ditto	40	ditto	6
550-1 (Fresh fuel test)	101.1	Xe/Kr/He	155	ditto	7
	90.5	He	155	ditto	8



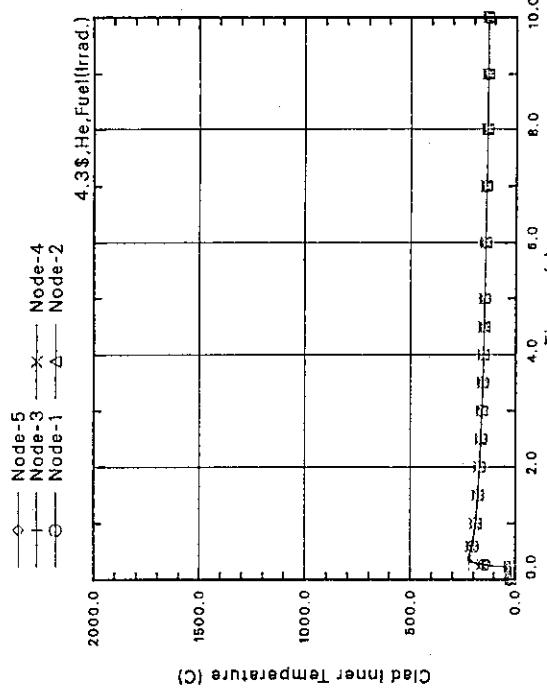
CASE 1 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 155 μ m
試験燃焼室表面温度



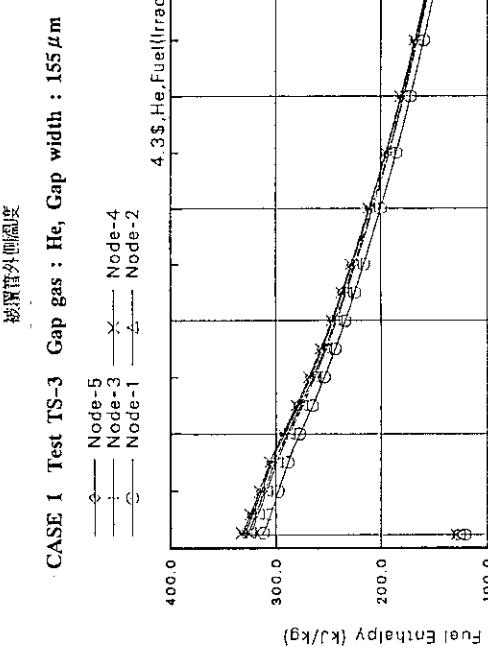
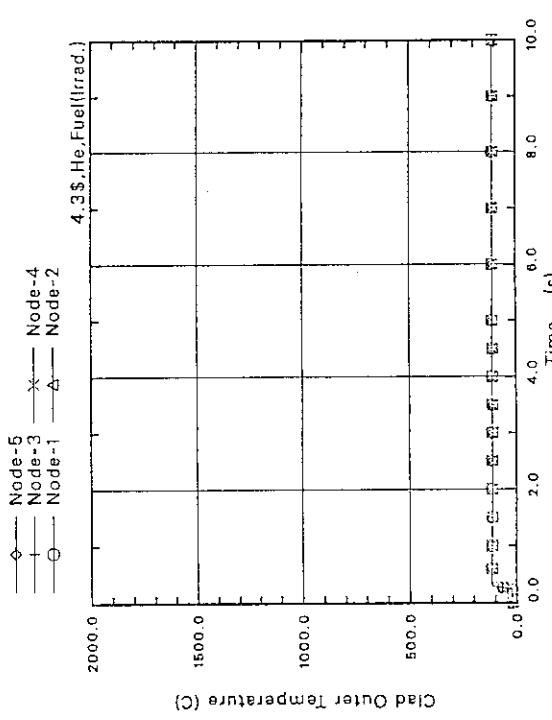
CASE 1 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 155 μ m
試験燃焼室出力



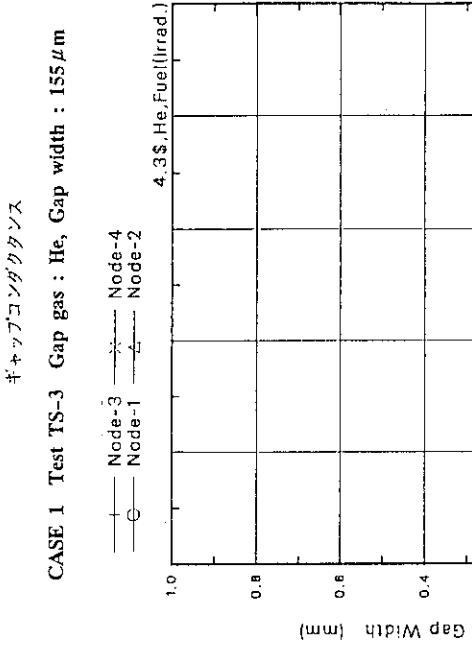
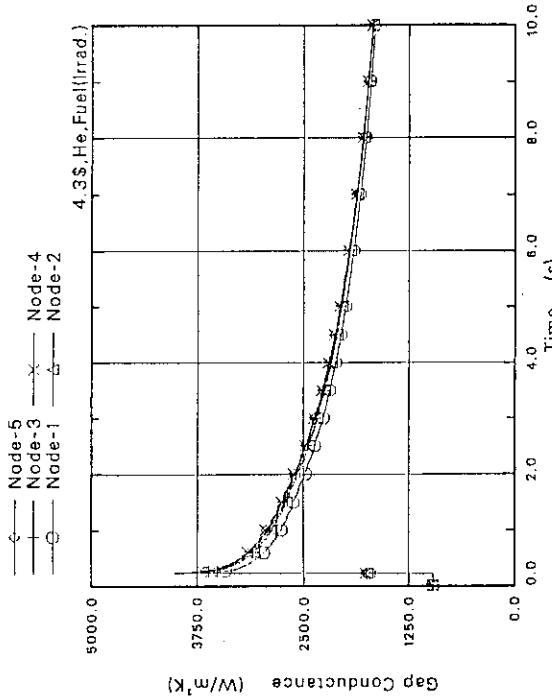
CASE 1 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 155 μ m
試験燃焼室中心温度



CASE 1 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 155 μ m
挿置管内側温度



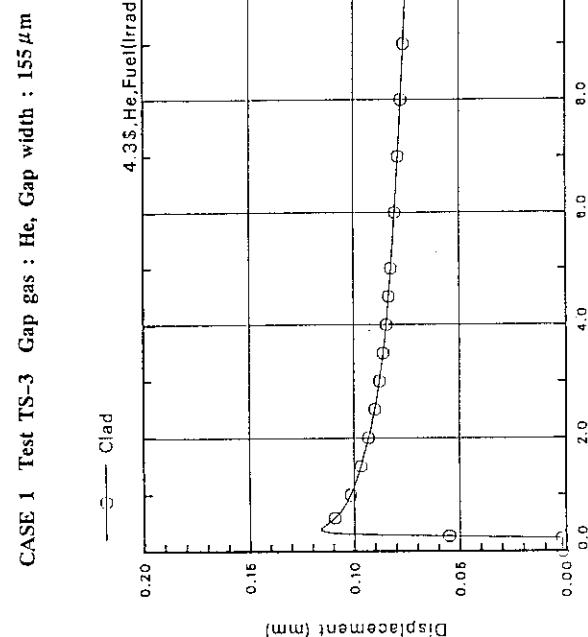
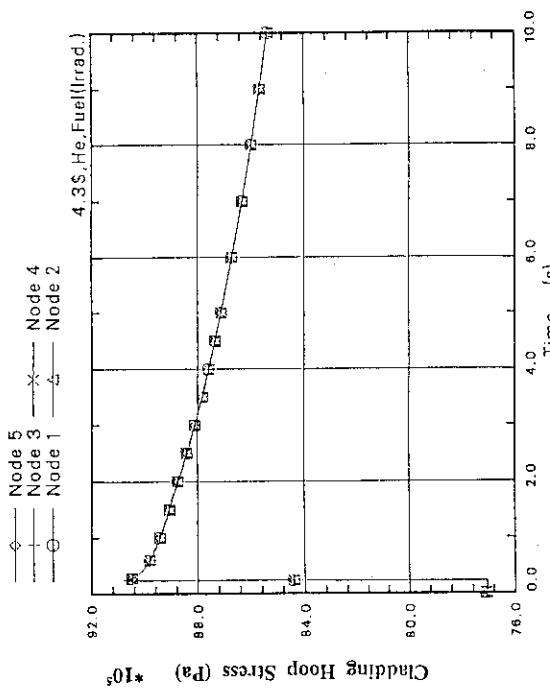
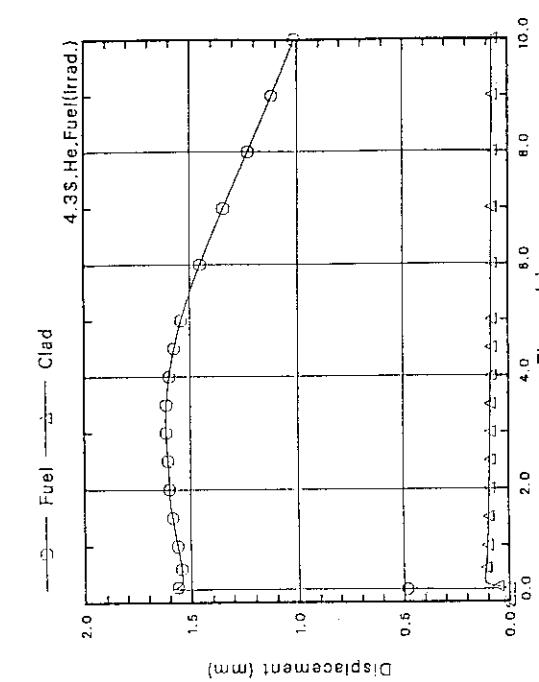
CASE 1 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 155 μm
熱絶縁材:エポキシ樹脂
ガス:ヘリウム



CASE 1 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 155 μm
熱絶縁材:エポキシ樹脂
ガス:ヘリウム

CASE 1 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 155 μm
熱絶縁材:エポキシ樹脂
ガス:ヘリウム

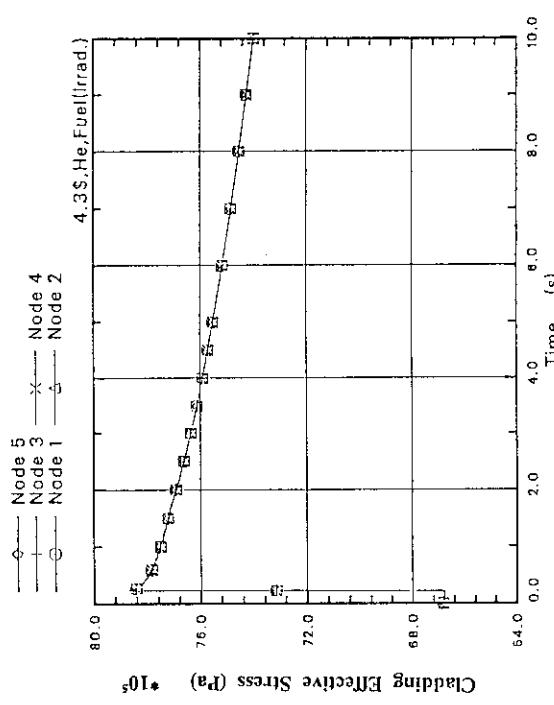
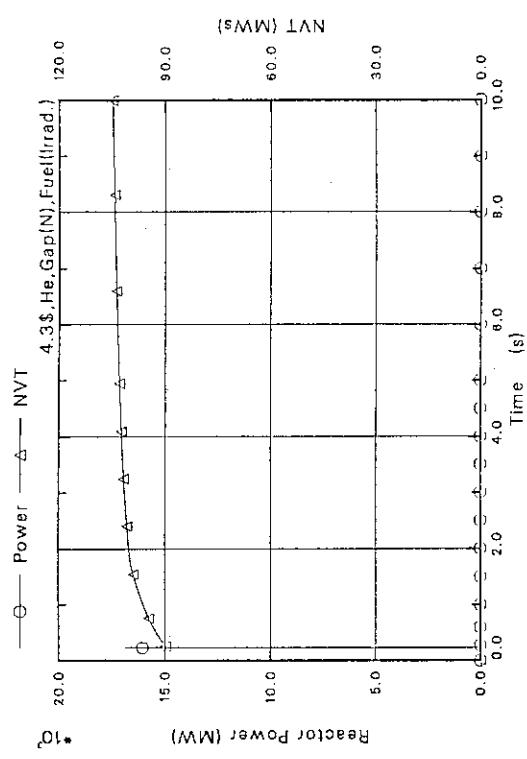
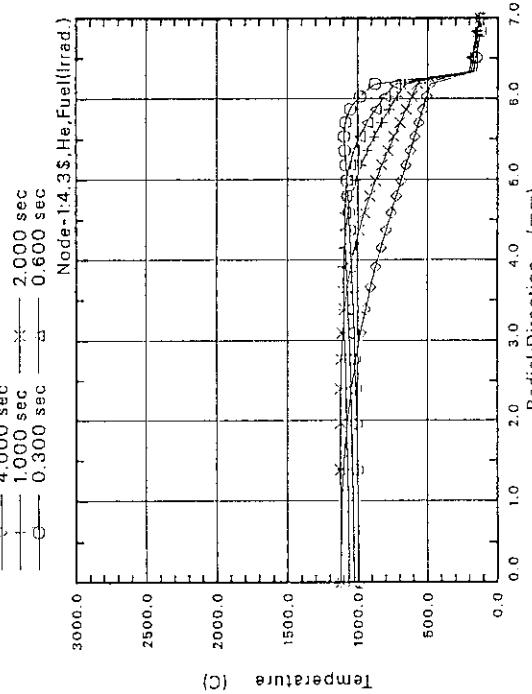
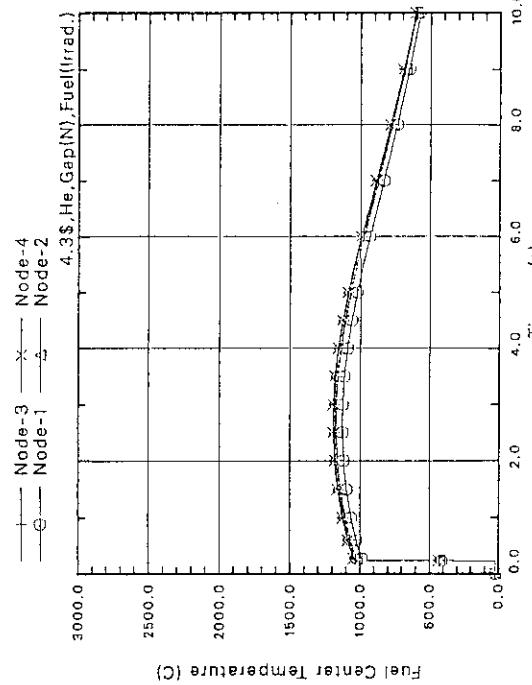
CASE 1 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 155 μm
熱絶縁材:エポキシ樹脂
ガス:ヘリウム

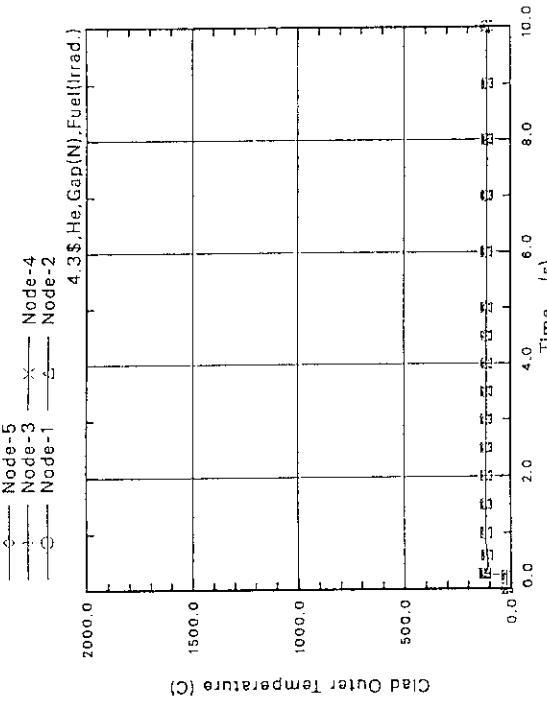
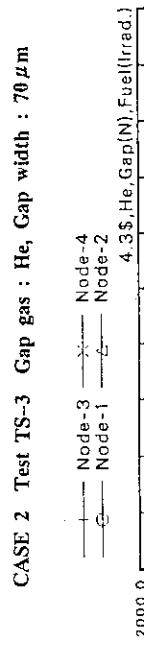
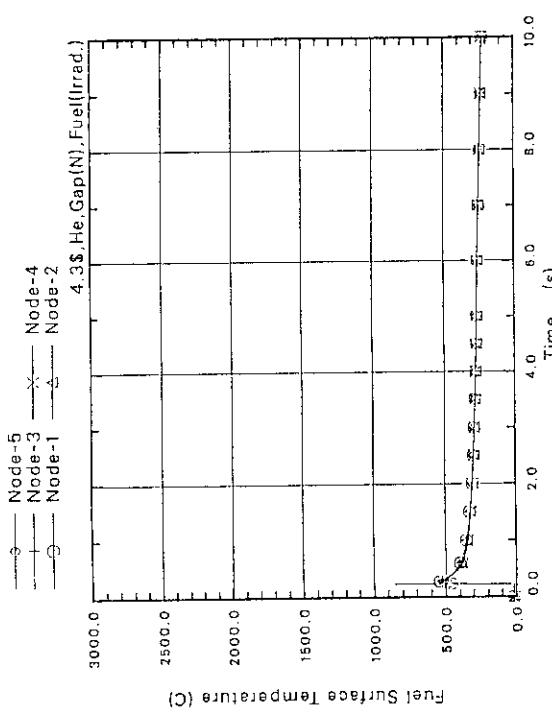


CASE 1 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 155 μm

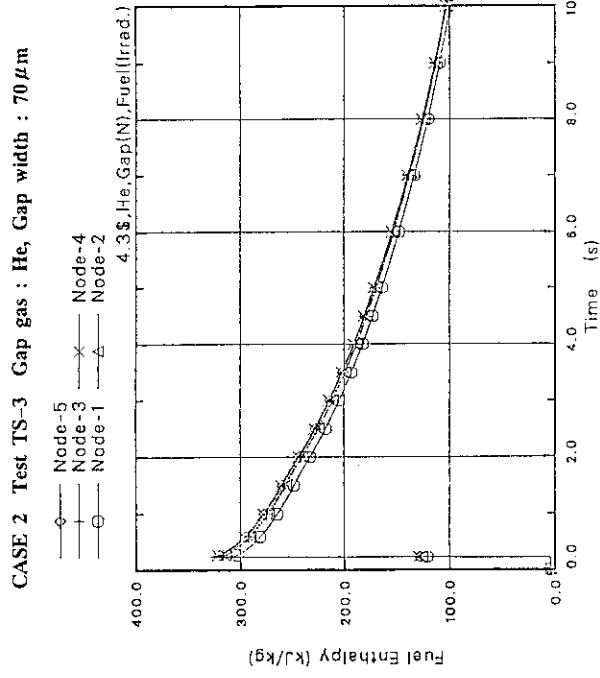
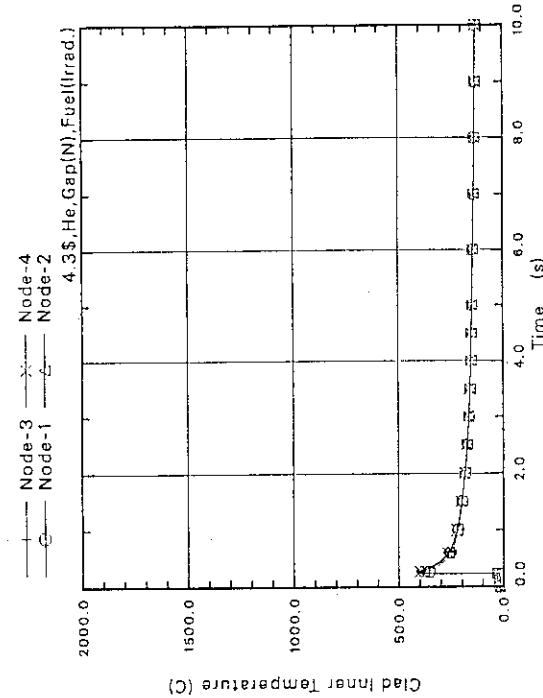
被覆管の軸方向のび

CASE 1 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 155 μm

CASE 1 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 155 μm CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 70 μm CASE 1 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 155 μm
Fig. 1 の径方向温度分布
説明: 中心温度CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 70 μm

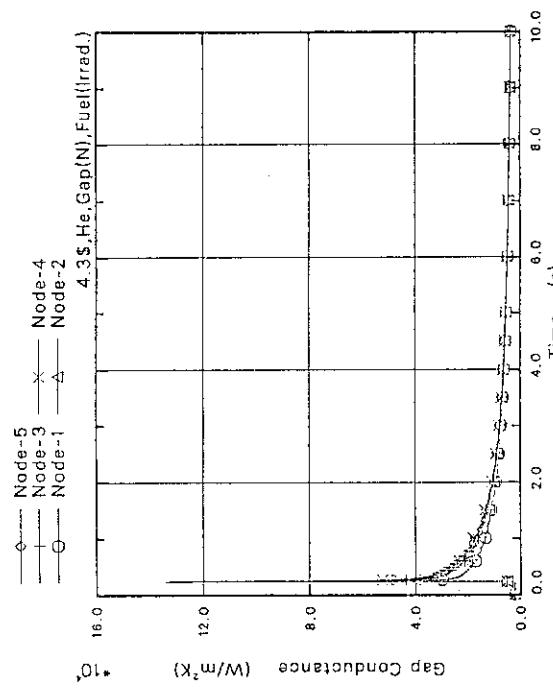


CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 70 μm
機器外側温度

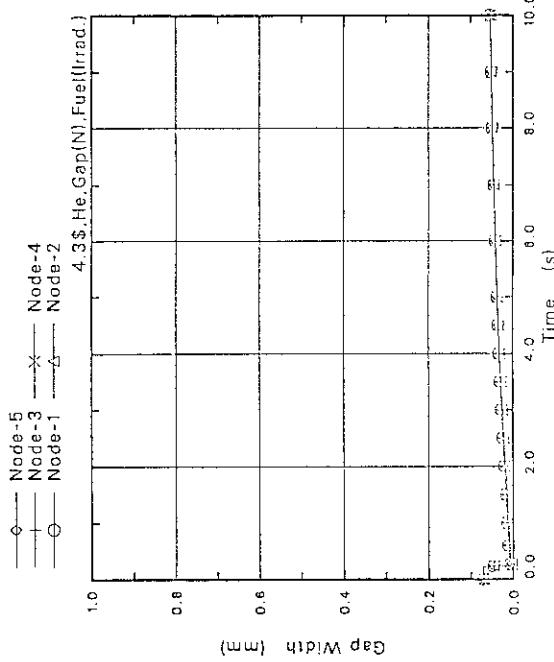


CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 70 μm
機器内側温度

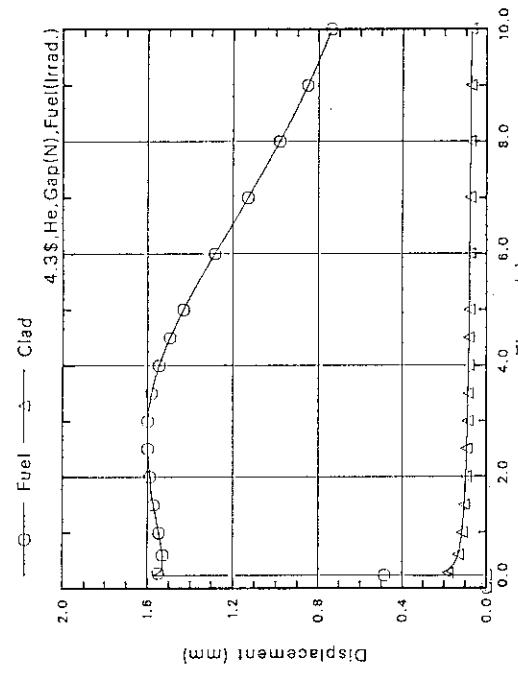
CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 70 μm
機器外側温度



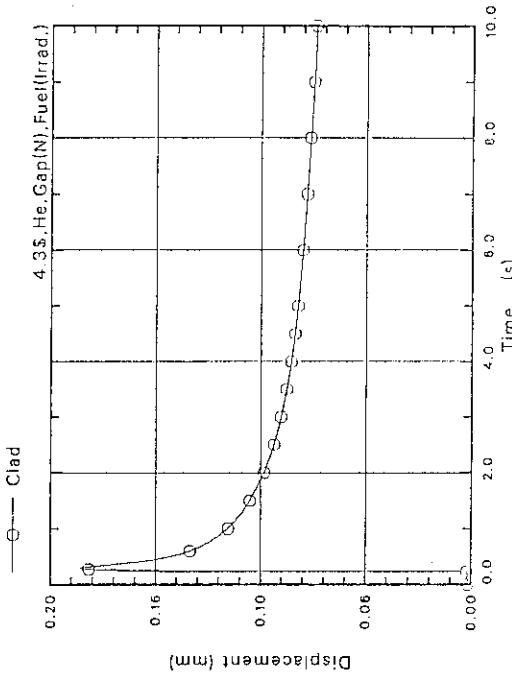
CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 70 μm
キャラップコンダクタンス



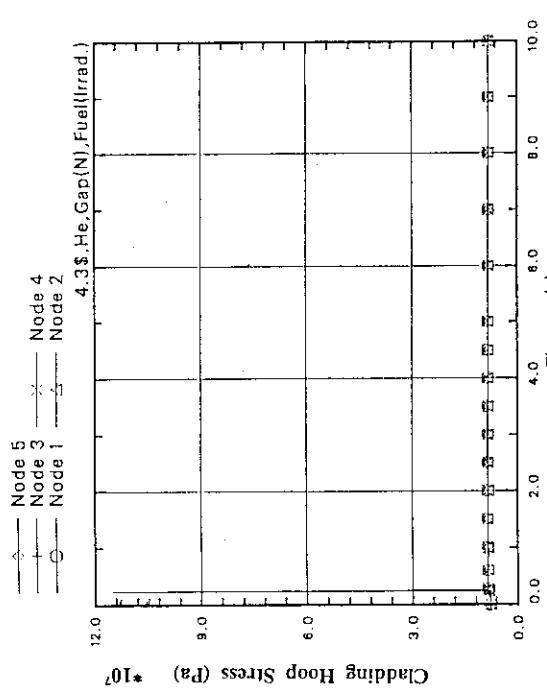
CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 70 μm
ガップ幅



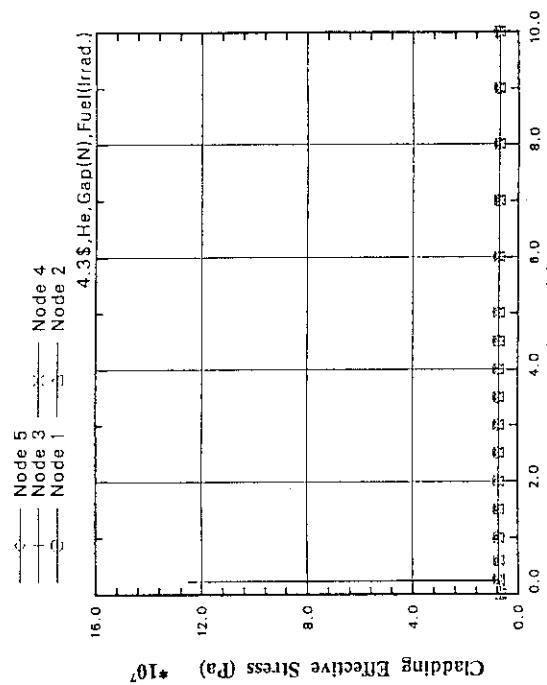
CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 70 μm
燃料と被覆管の軸方向のび



CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 70 μm
被覆管の軸方向のび

CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : $70 \mu\text{m}$

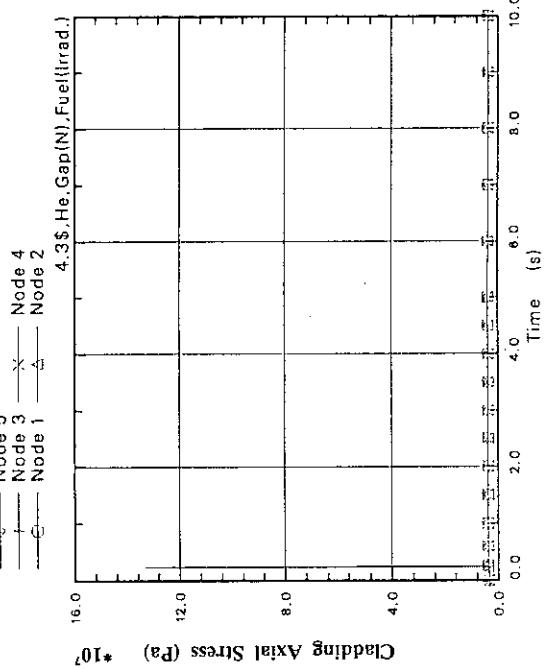
被覆管軸方向応力

CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : $70 \mu\text{m}$

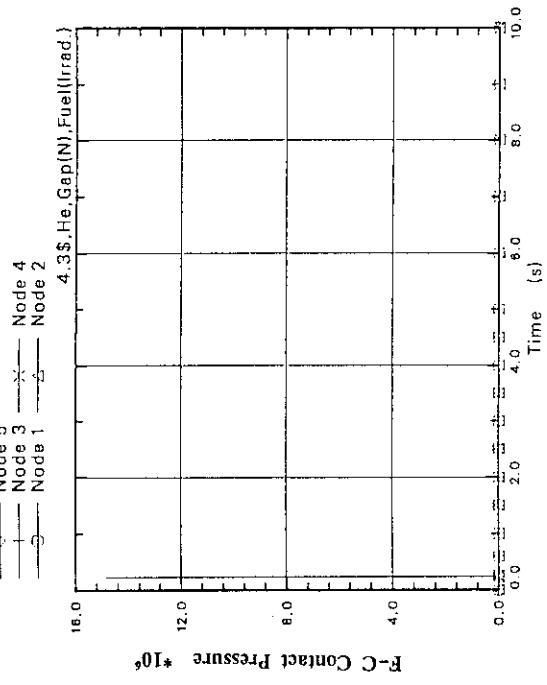
被覆管径方向応力

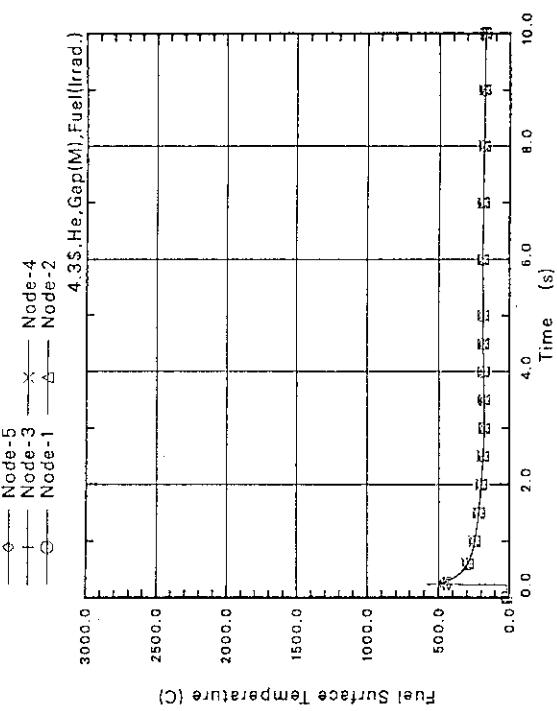
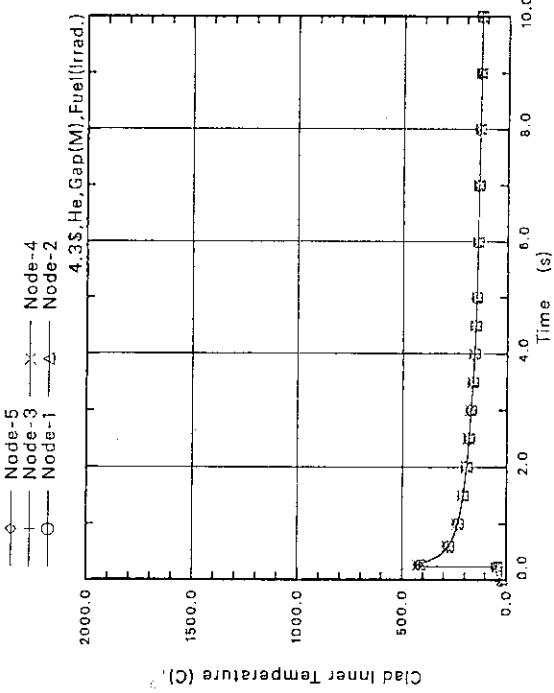
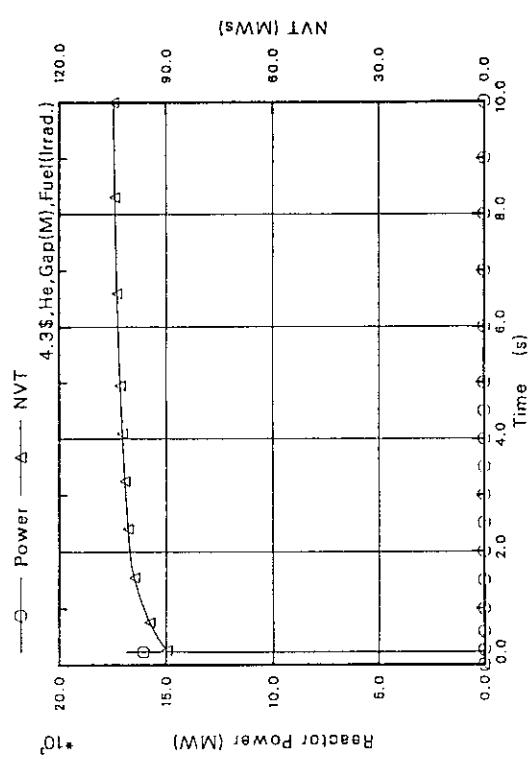
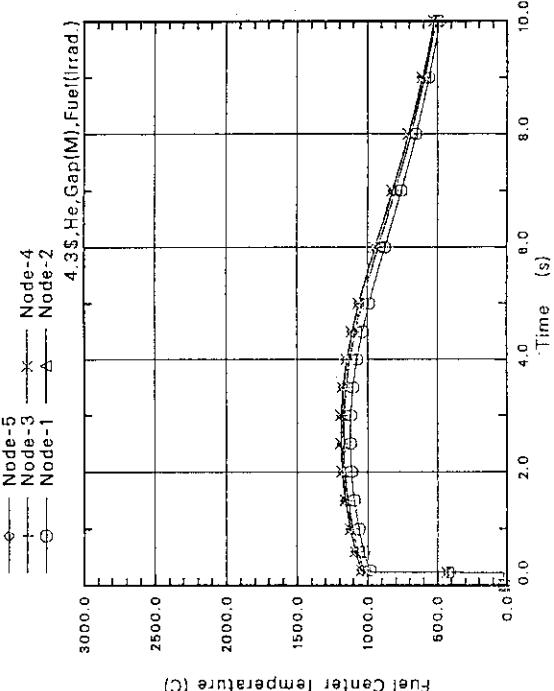
CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : $70 \mu\text{m}$

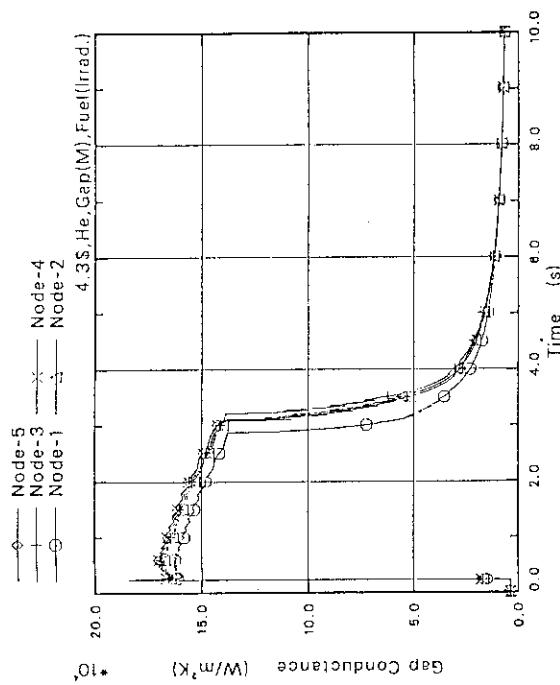
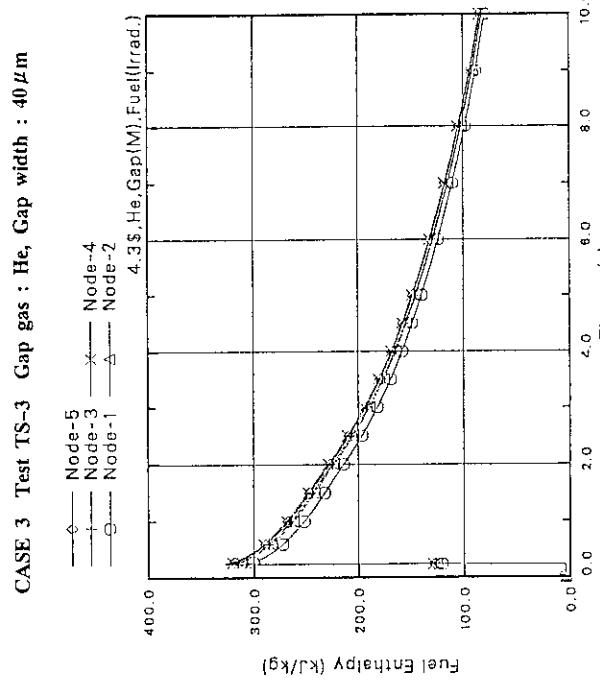
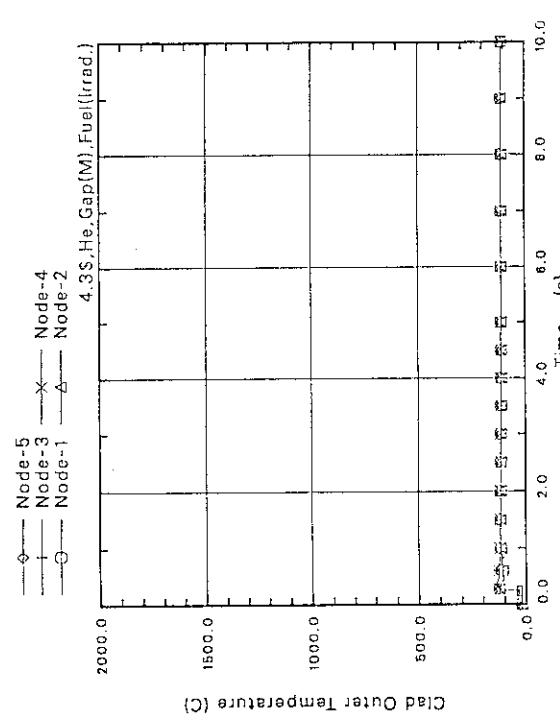
実効燃素管径方向応力

CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : $70 \mu\text{m}$

燃素 - 被覆管接続部応力

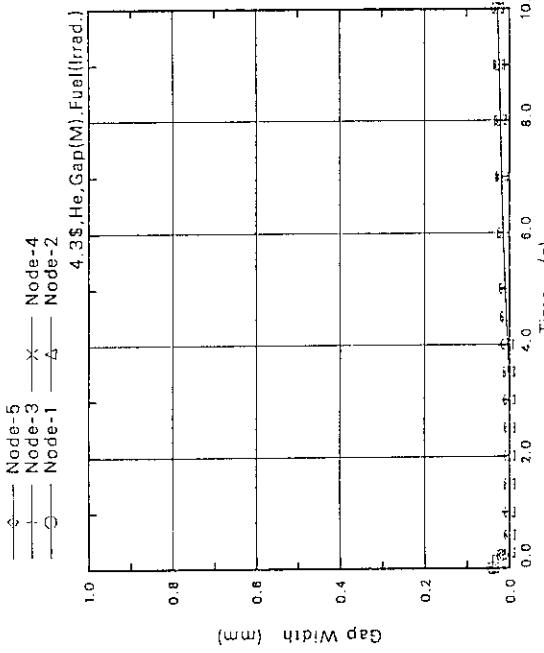
CASE 2 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : $70 \mu\text{m}$

CASE 3 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 40 μm CASE 3 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 40 μm CASE 3 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 40 μm CASE 3 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 40 μm



CASE 3 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 40 μm

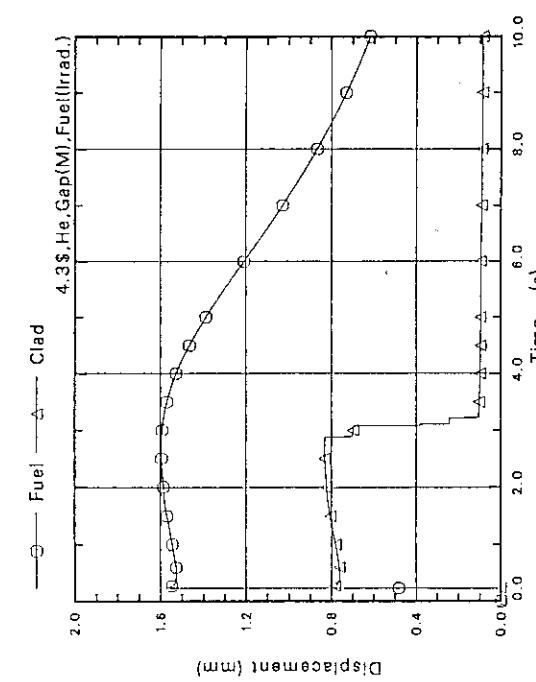
隙間熱伝導率



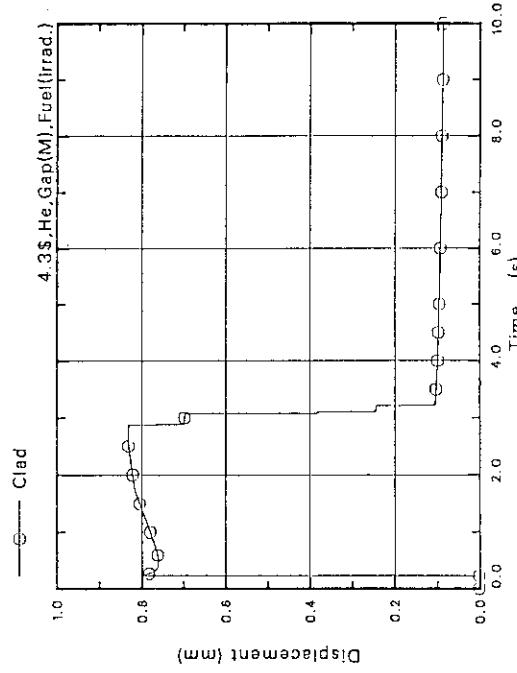
隙間幅

隙間熱伝導率

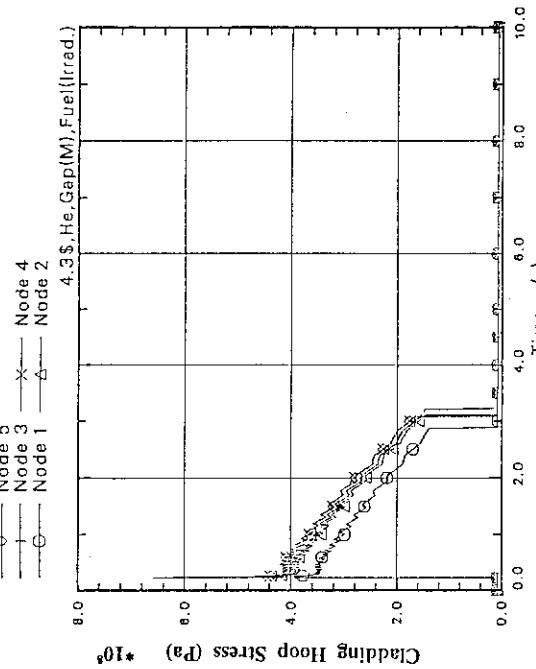
CASE 3 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 40 μm



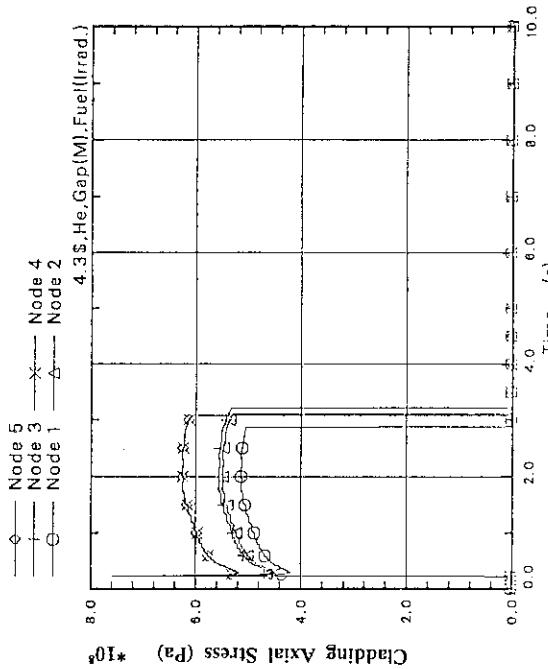
CASE 3 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : $40 \mu\text{m}$
燃料と被覆管の軸方向のひずみ



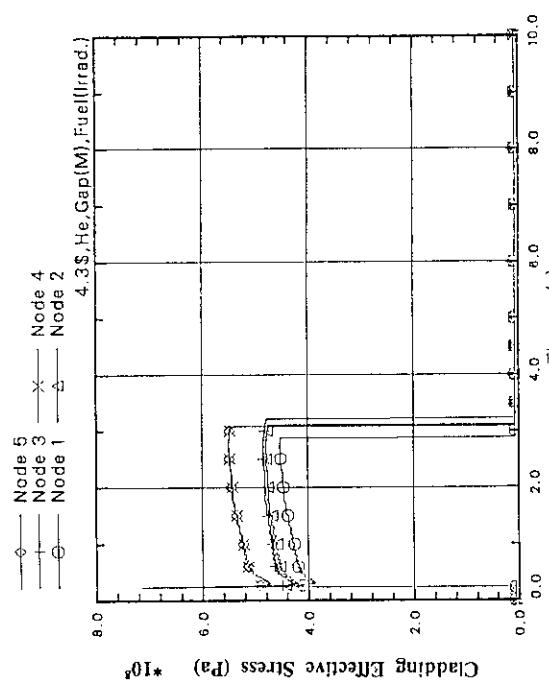
CASE 3 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : $40 \mu\text{m}$
被覆管の軸方向のひずみ



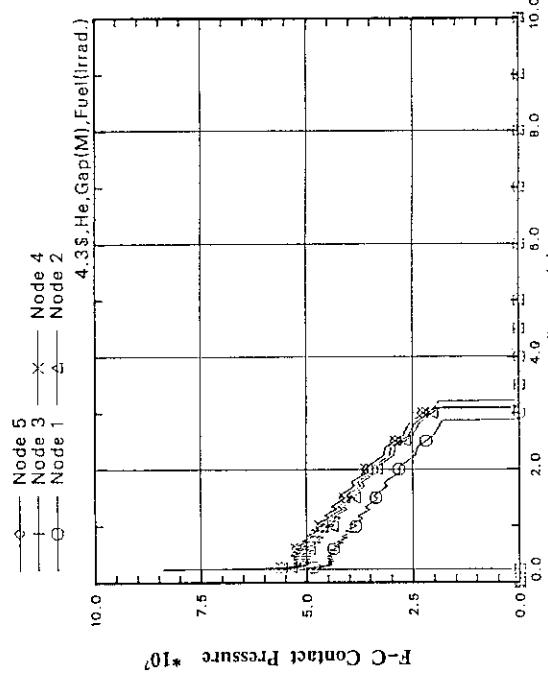
CASE 3 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : $40 \mu\text{m}$
被覆管径方向応力



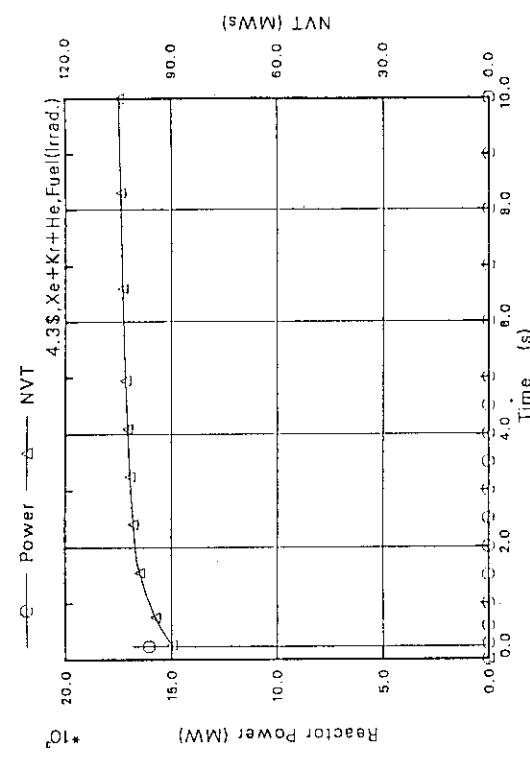
CASE 3 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : $40 \mu\text{m}$
被覆管軸方向応力



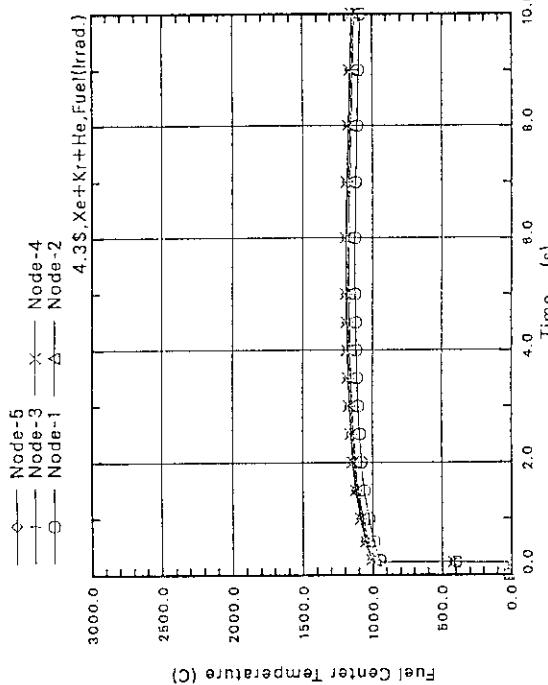
CASE 3 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 40 μm



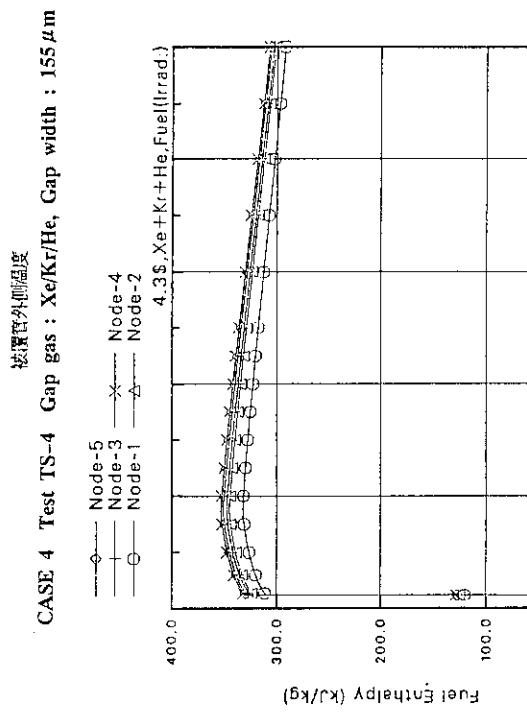
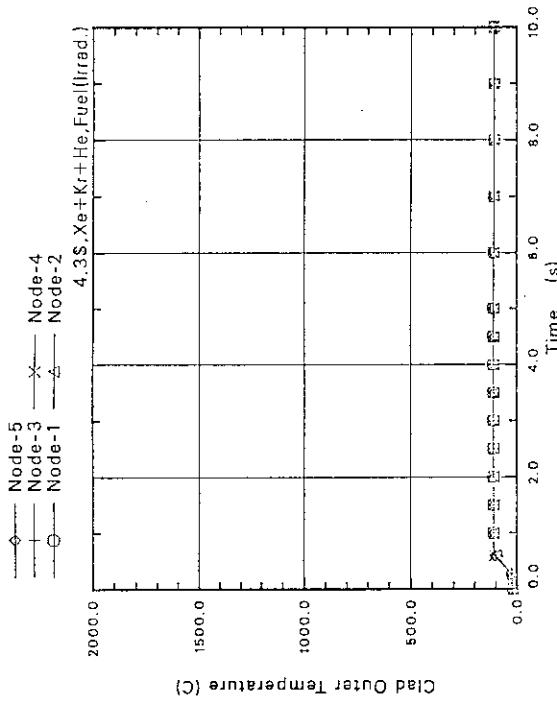
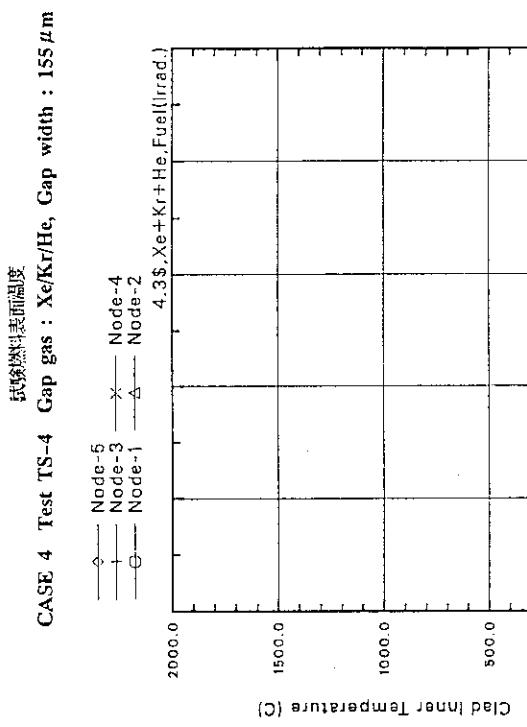
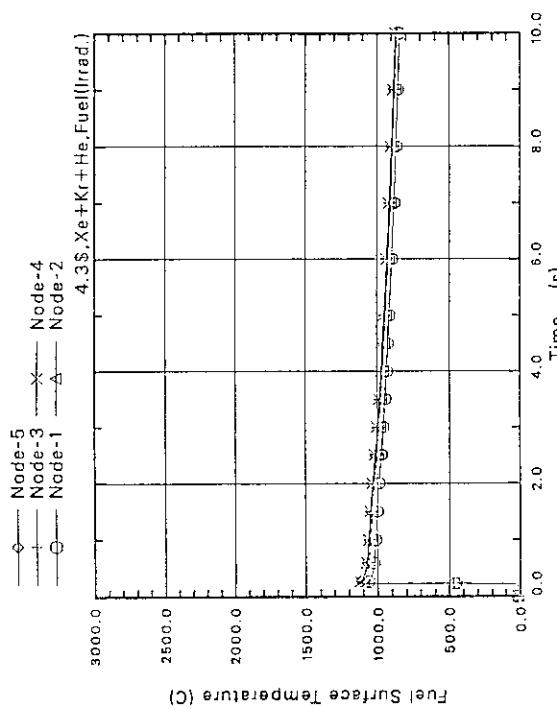
CASE 3 Test TS-3 Gap gas : He, Gap width : 40 μm



CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm

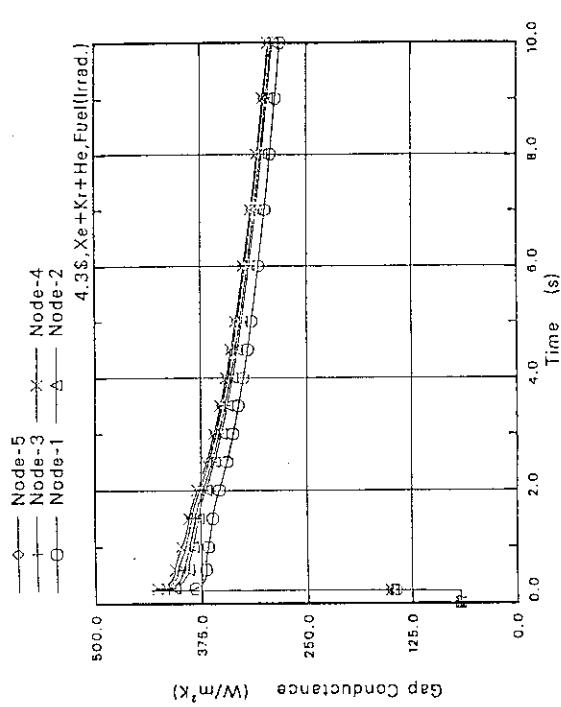
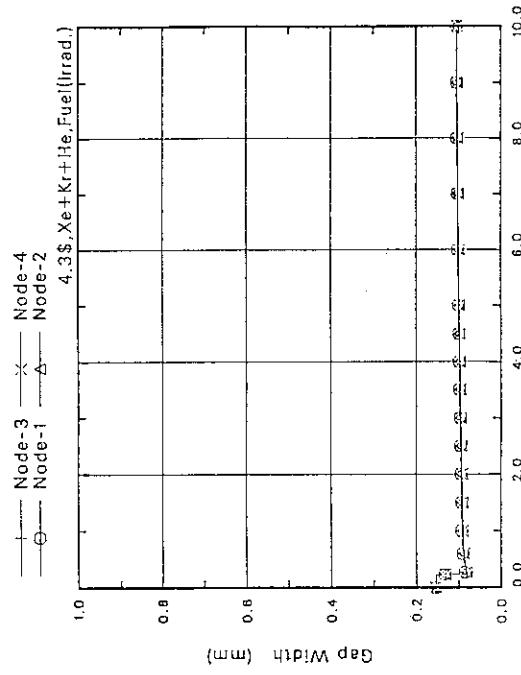
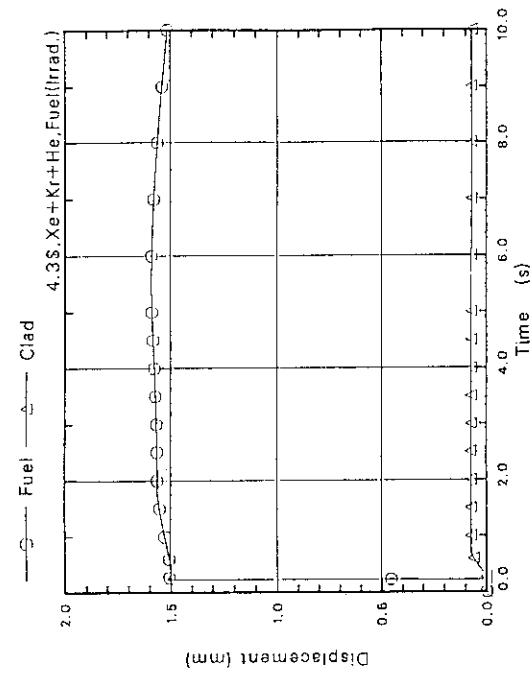
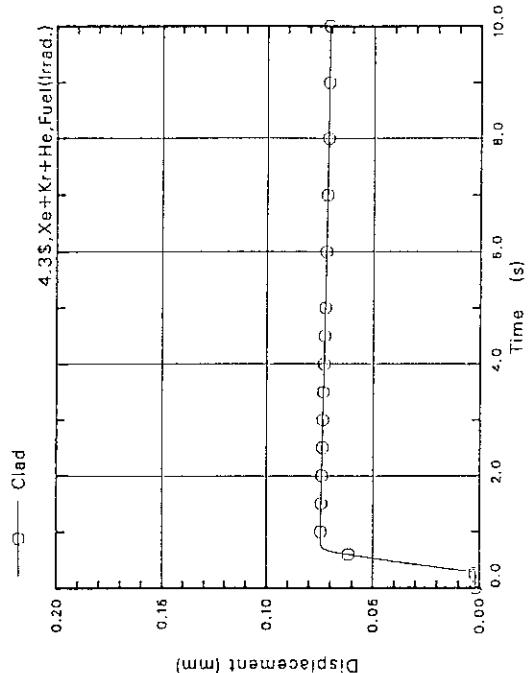


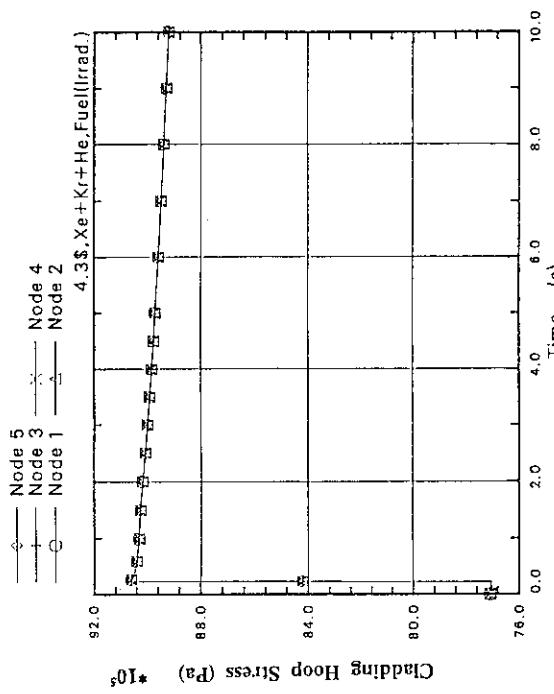
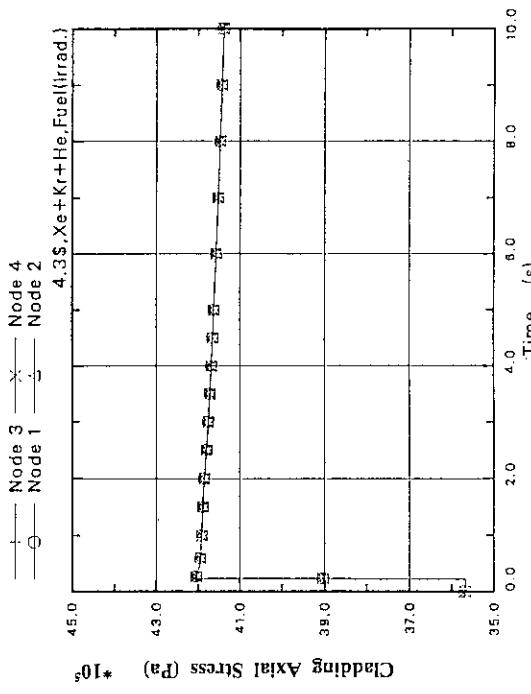
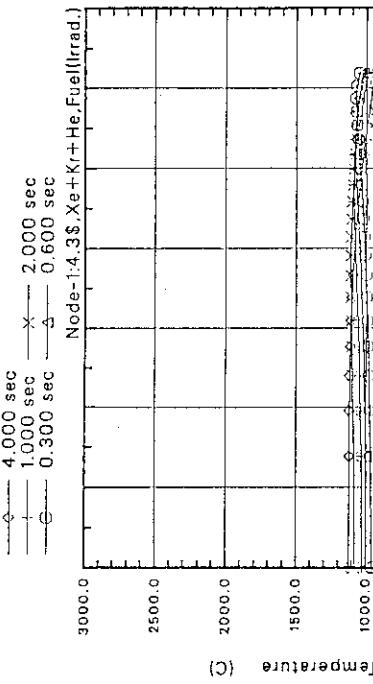
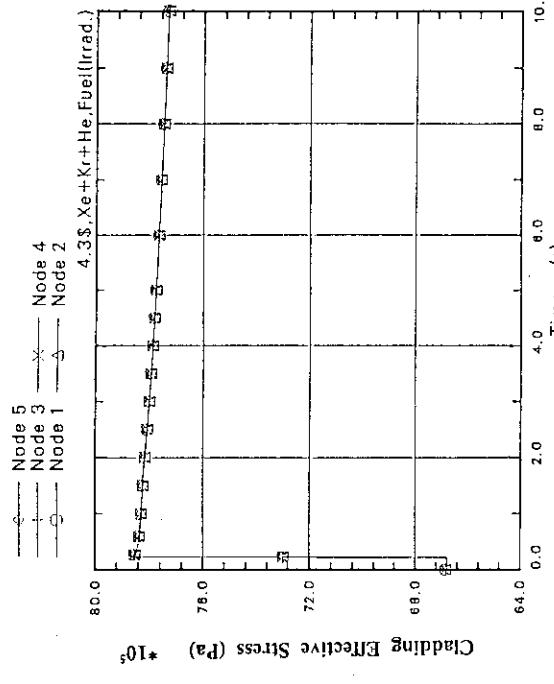
CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm



CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm

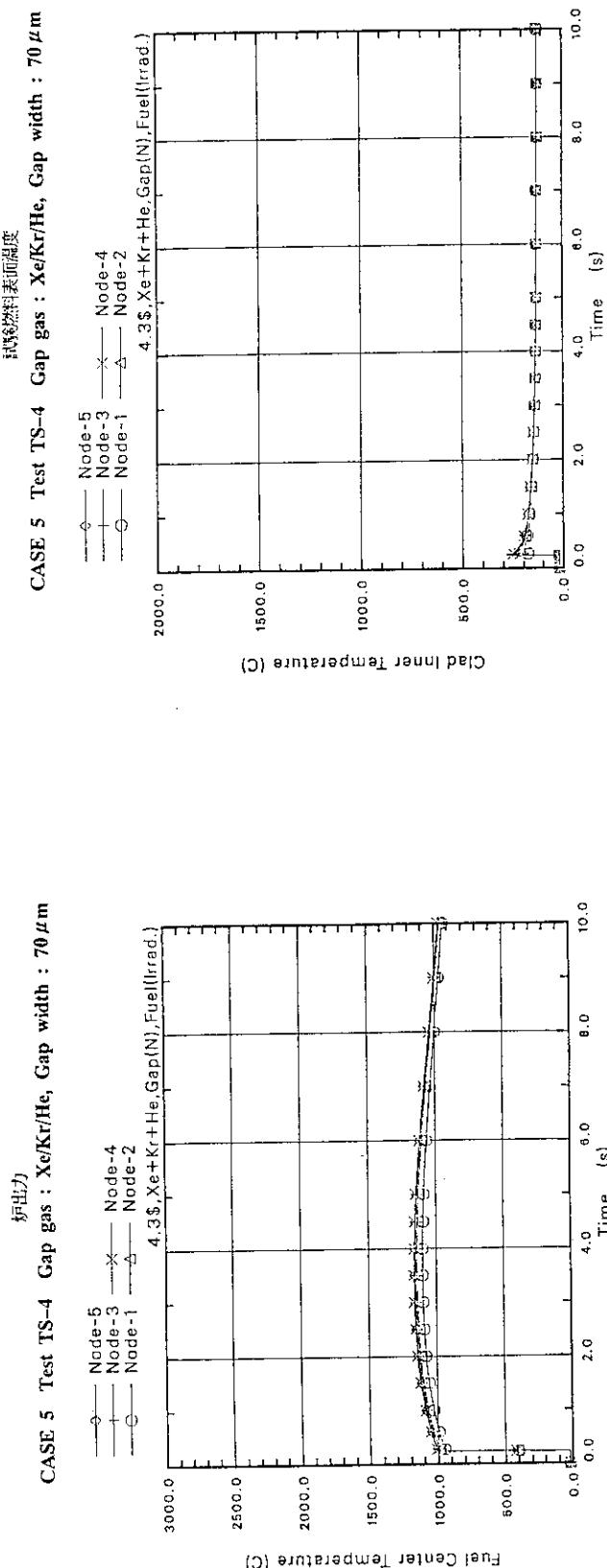
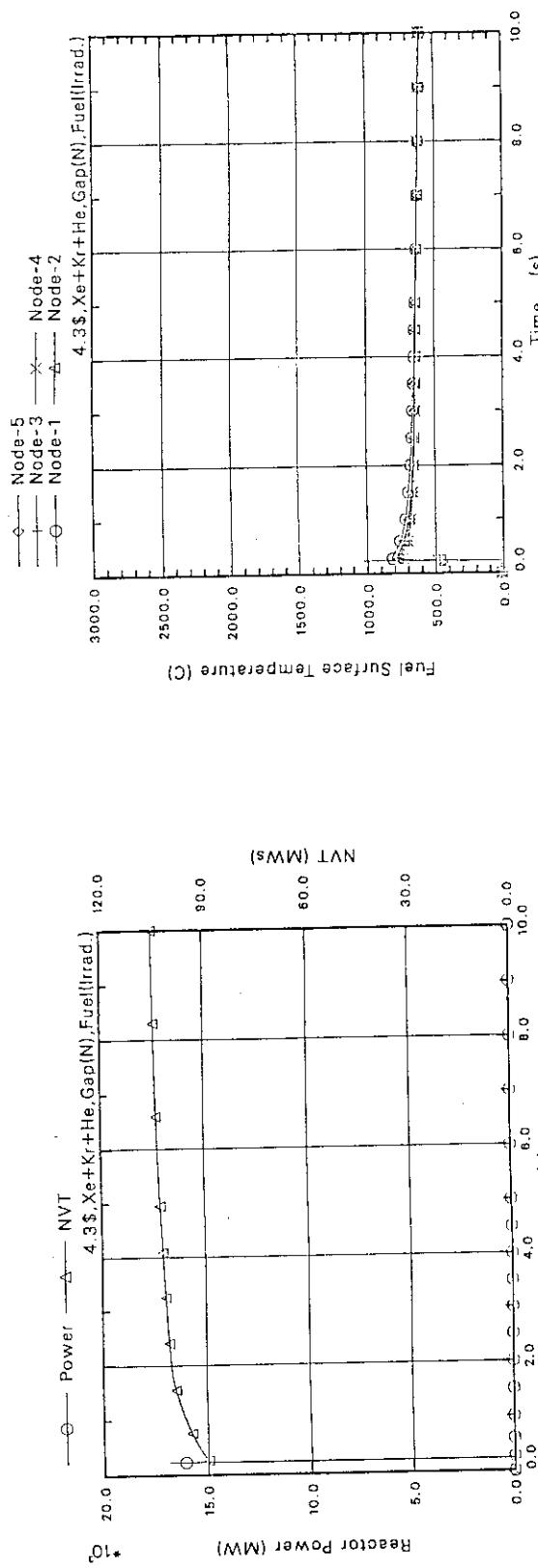
CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm

CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm

CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm

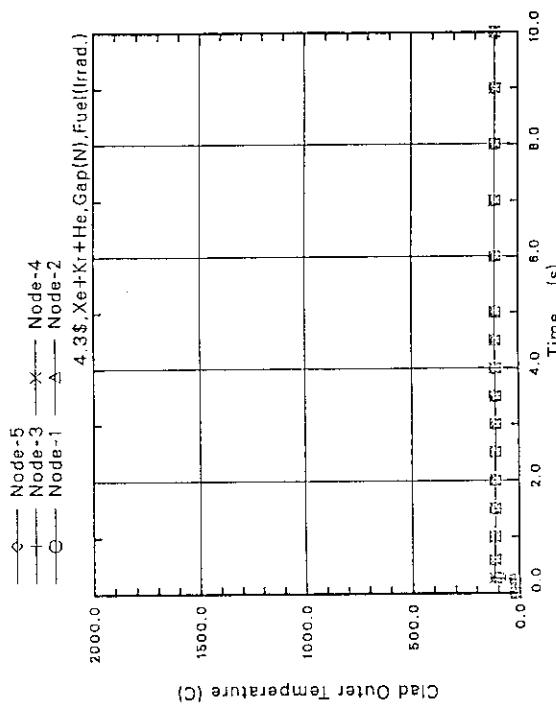
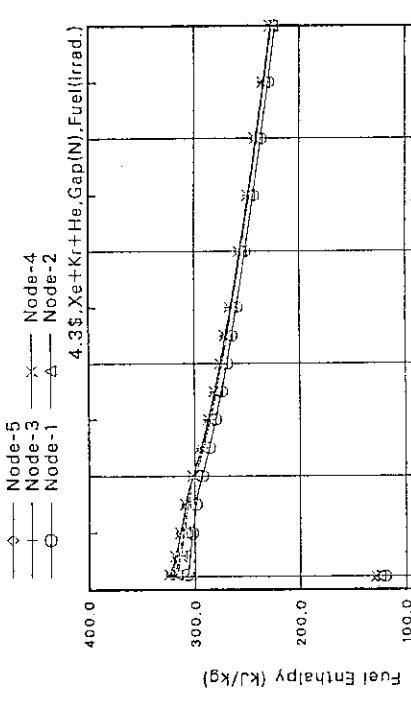
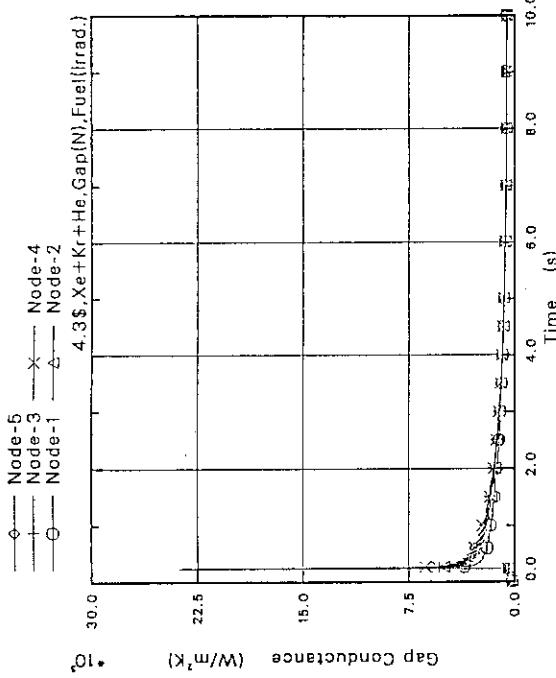
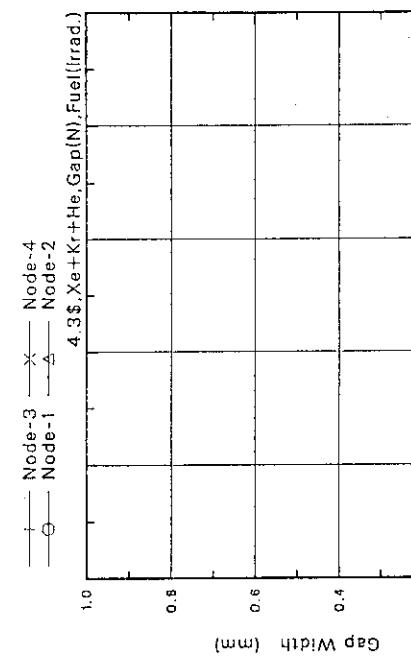
ノード 1 の径方向温度分布
被覆管外方圧縮力

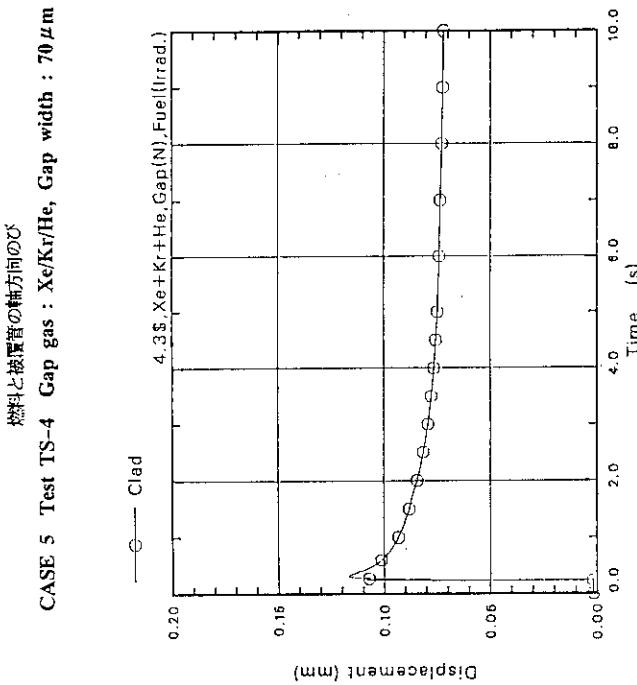
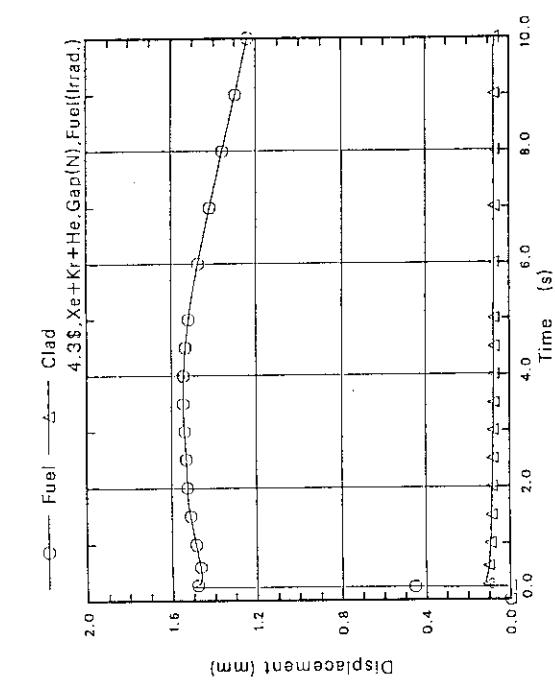
ノード 1 の径方向温度分布
CASE 4 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm



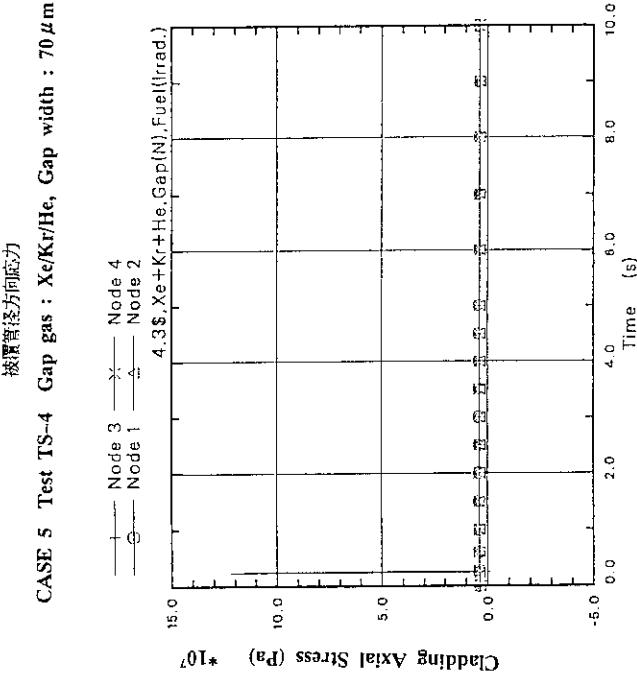
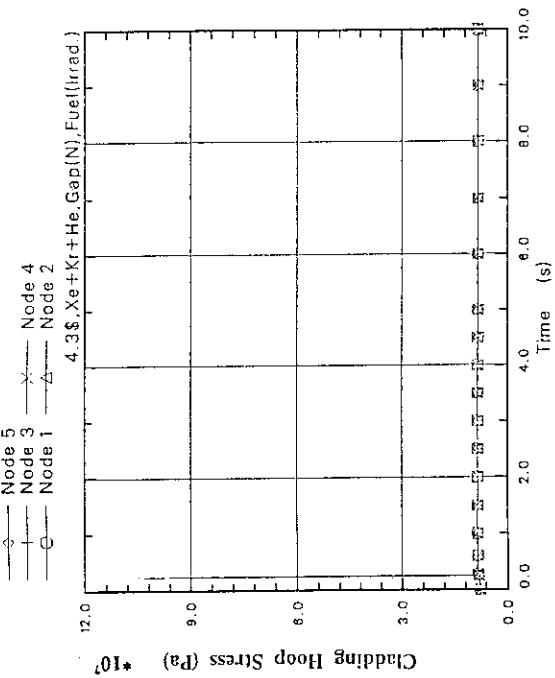
CASE 5 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 70 μm

被置管内側温度
燃料中心温度

CASE 5 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : $70\mu\text{m}$ CASE 5 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : $70\mu\text{m}$ CASE 5 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : $70\mu\text{m}$ CASE 5 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : $70\mu\text{m}$



CASE 5 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : $70 \mu\text{m}$



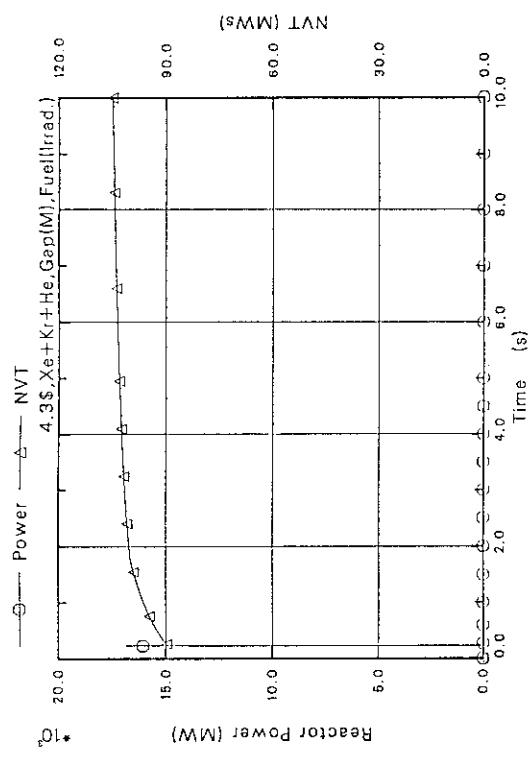
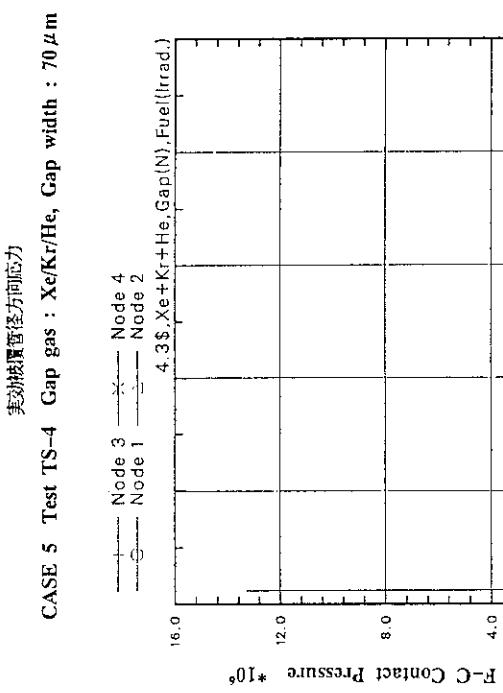
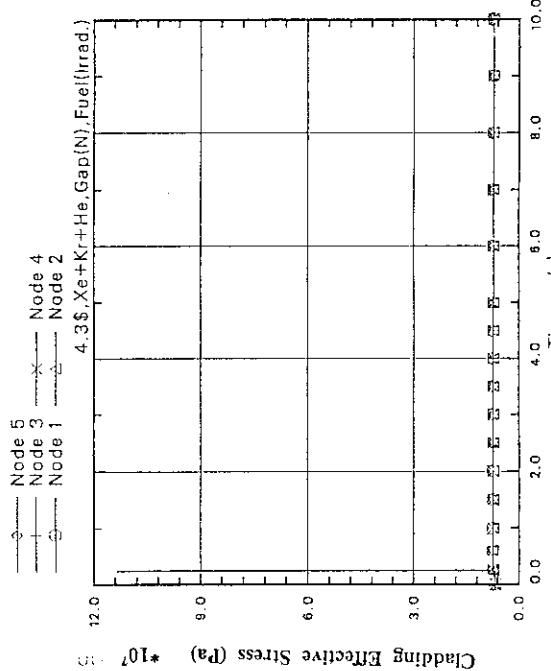
CASE 5 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : $70 \mu\text{m}$

CASE 5 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : $70 \mu\text{m}$

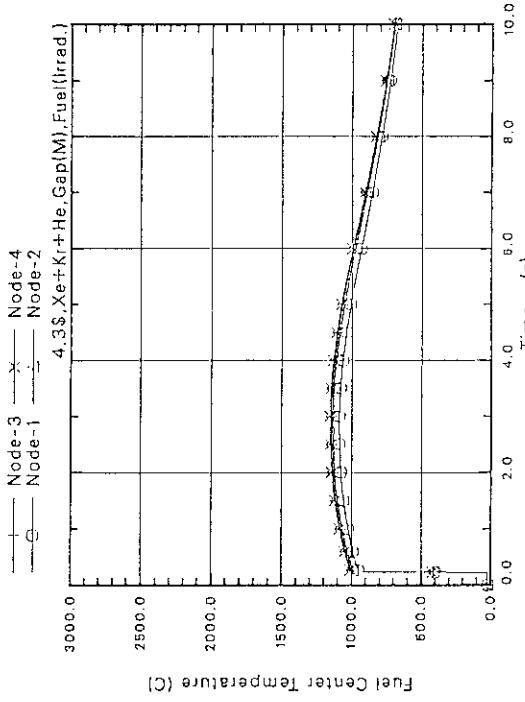
被覆管軸方向応力

CASE 5 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : $70 \mu\text{m}$

被覆管径方向応力

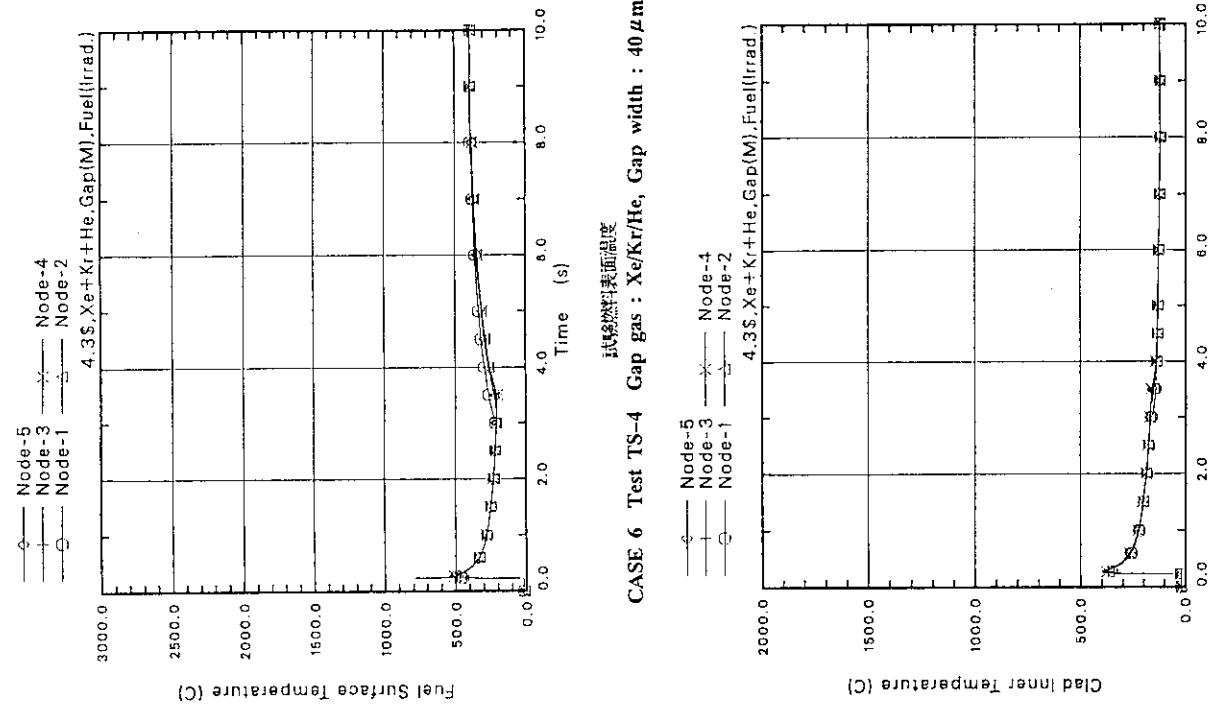


CASE 5 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 40 μm

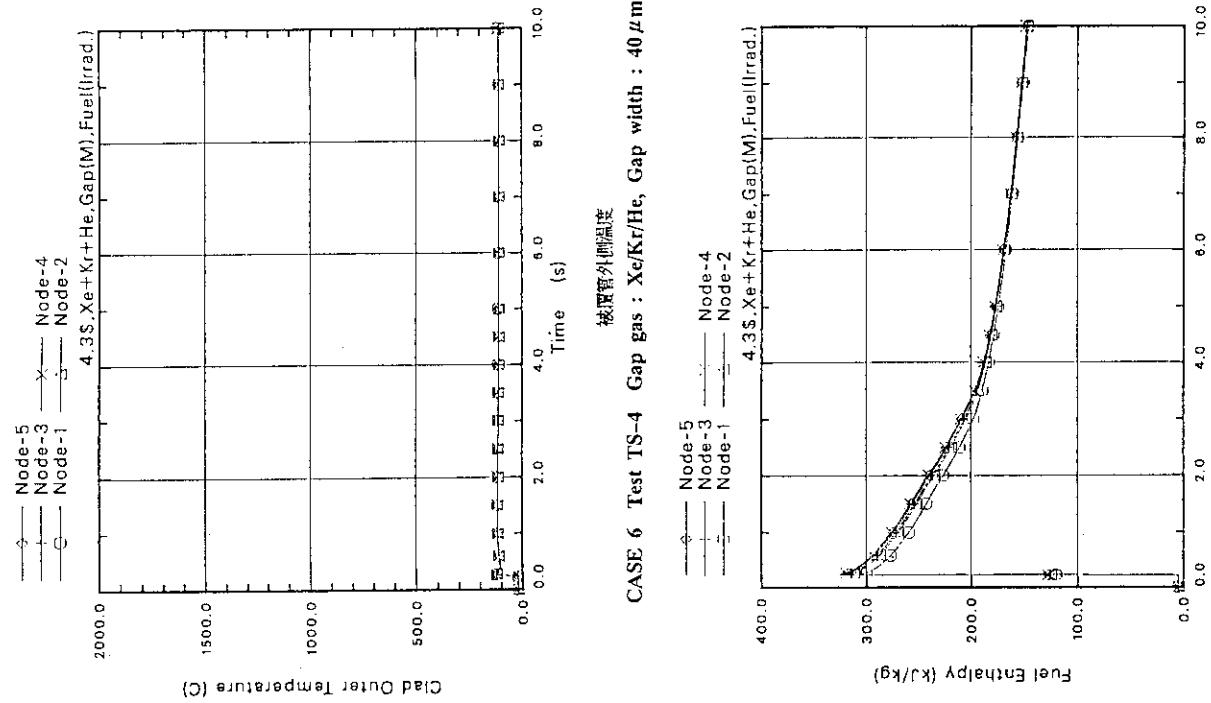


CASE 6 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 40 μm

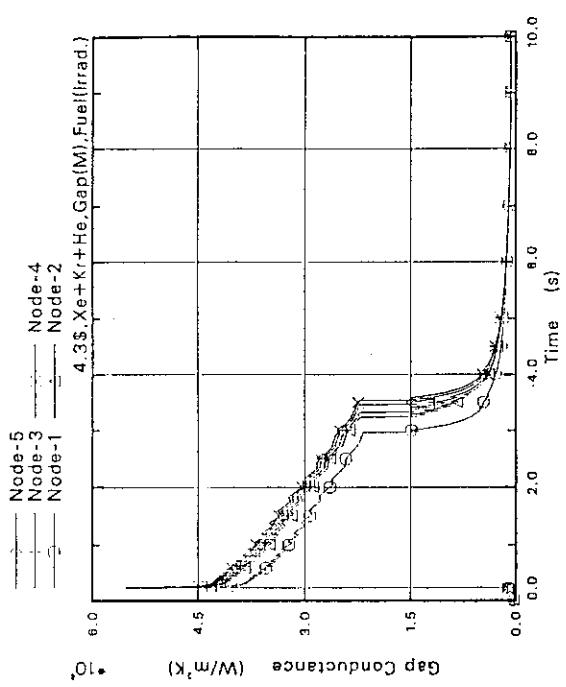
試験燃料芯温度



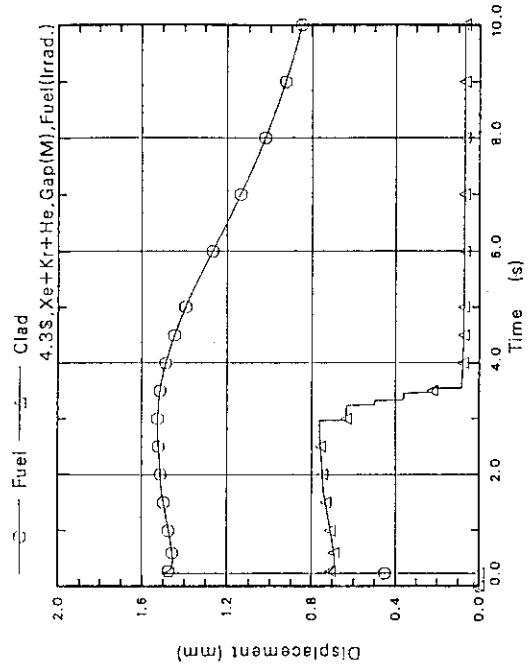
CASE 6 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 40 μ m
試験燃料表面温度



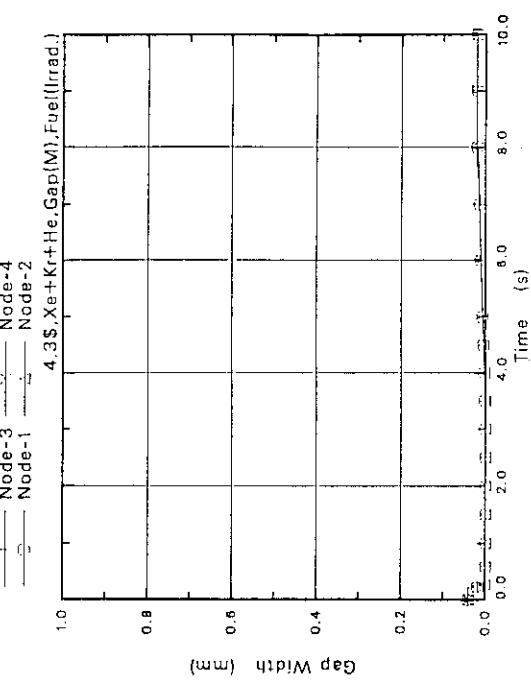
CASE 6 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 40 μ m
被覆管外側温度

CASE 6 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 40 μm

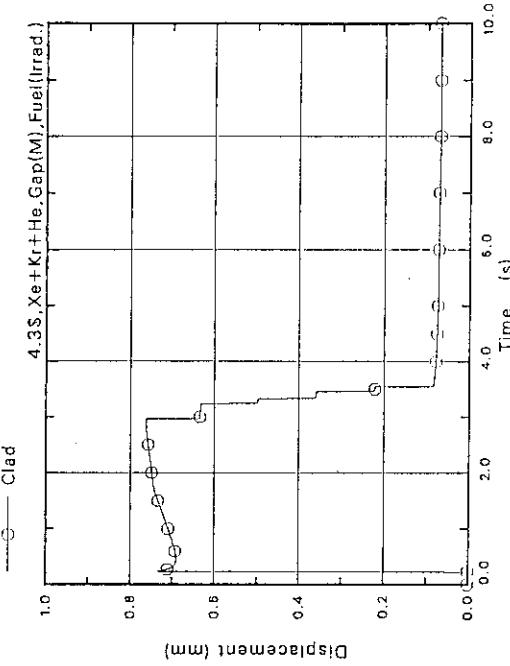
チャップコングランス

CASE 6 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 40 μm

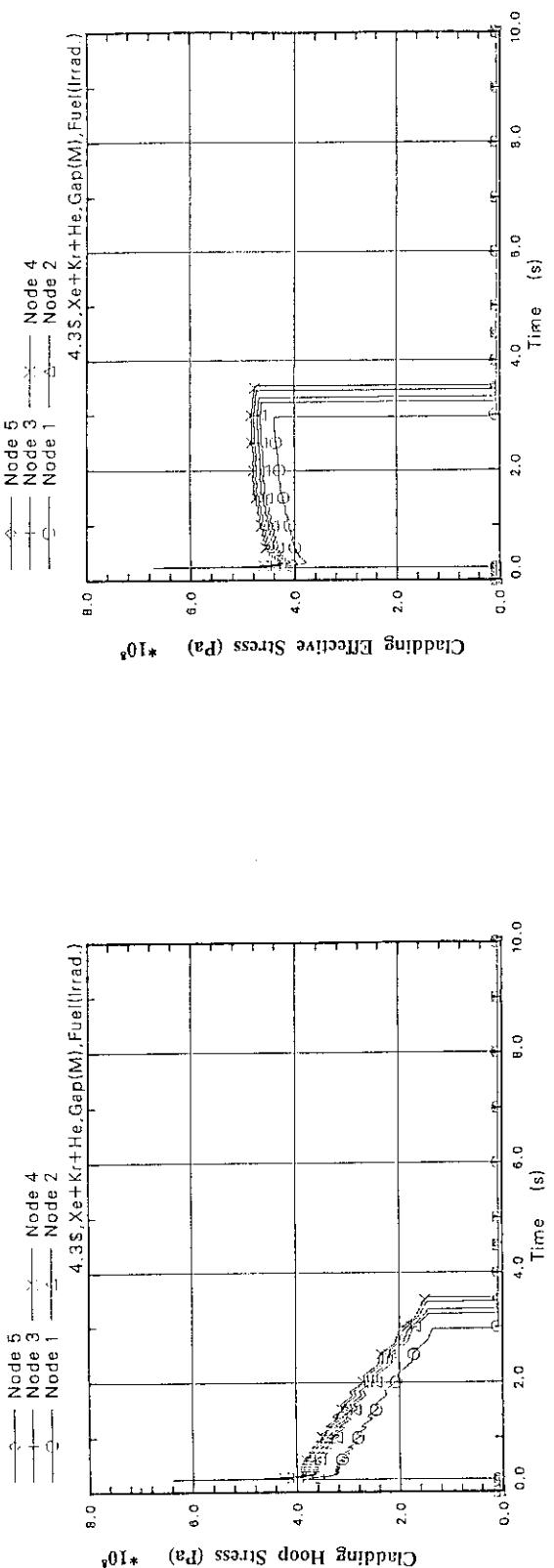
燃焼と燃質の軸方向のび

CASE 6 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 40 μm

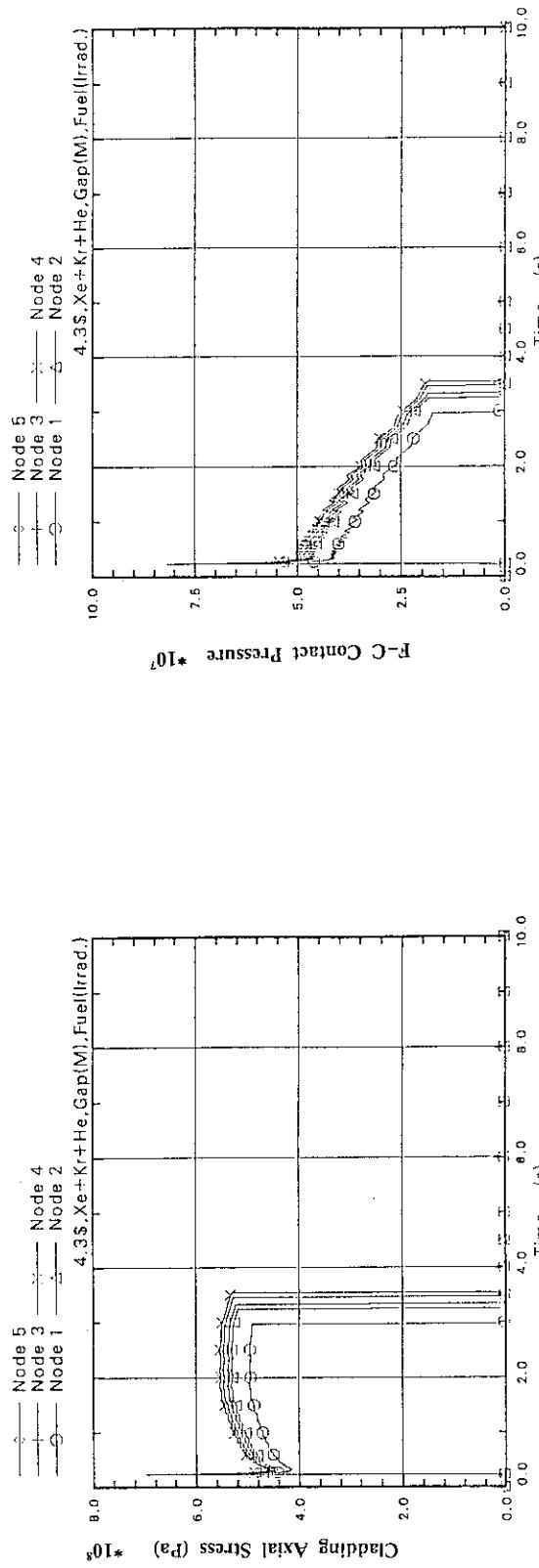
チャップコ

CASE 6 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 40 μm

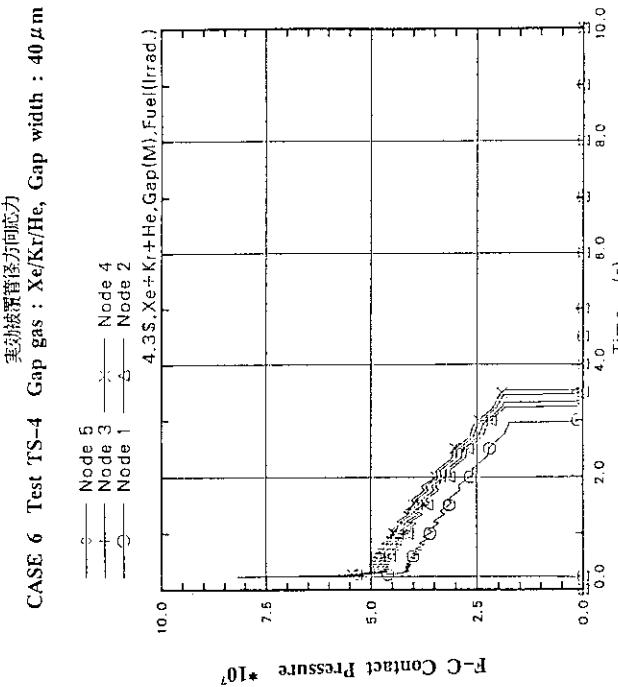
燃質の軸方向のび



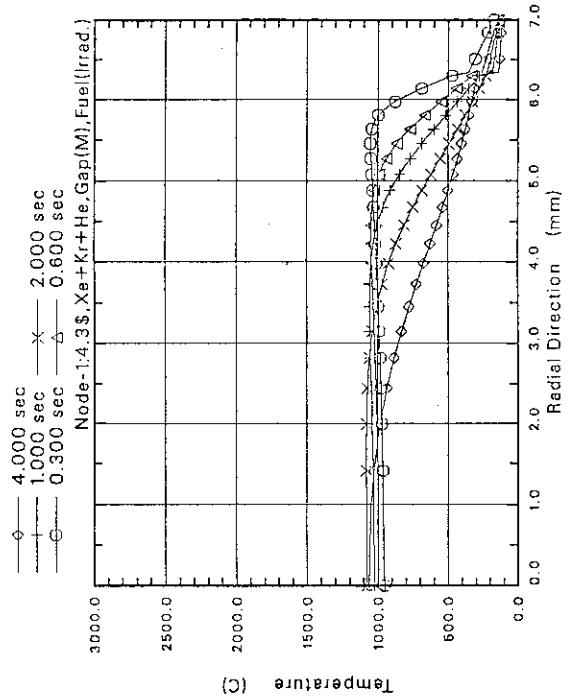
CASE 6 Test TS-4 被覆管径方向応力
Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 40 μ m



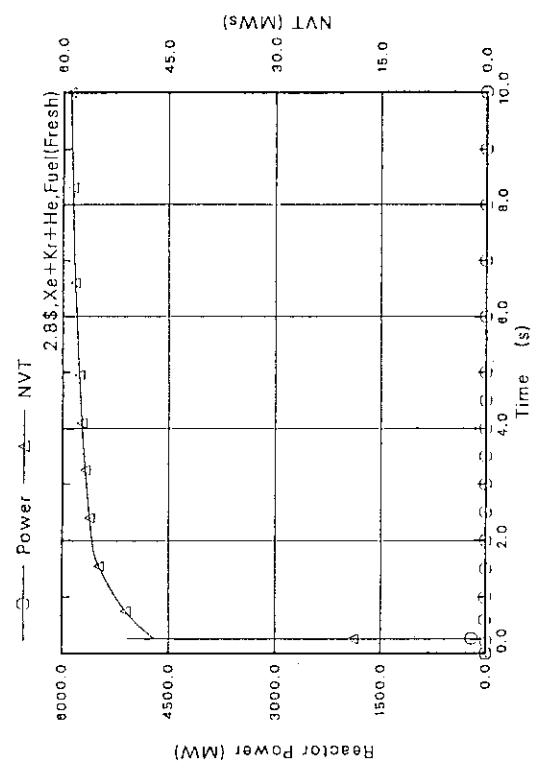
CASE 6 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 40 μ m



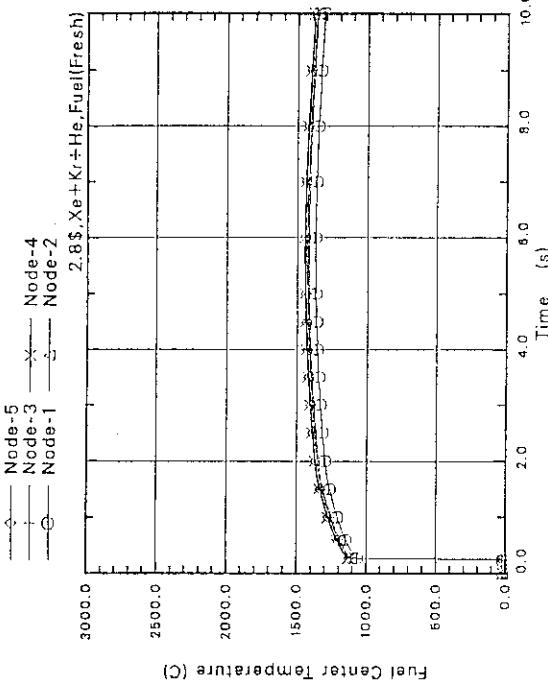
CASE 6 Test TS-4 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 40 μ m
実効被覆管怪力



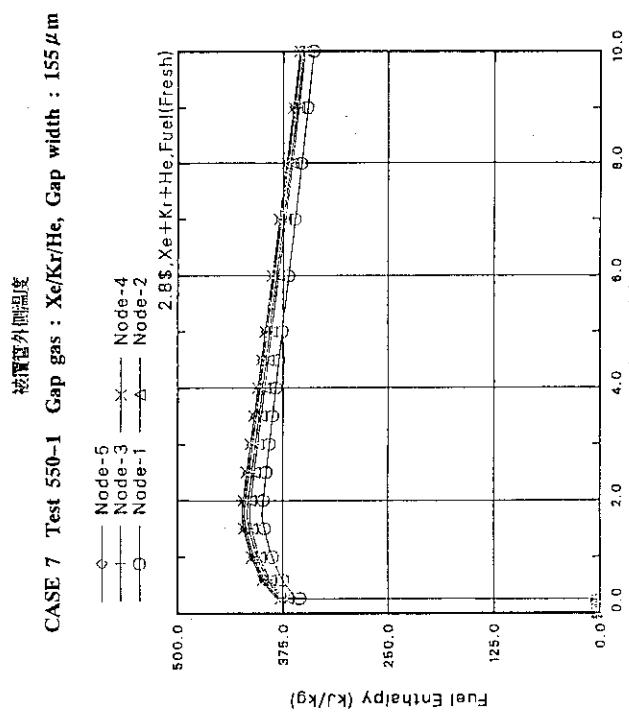
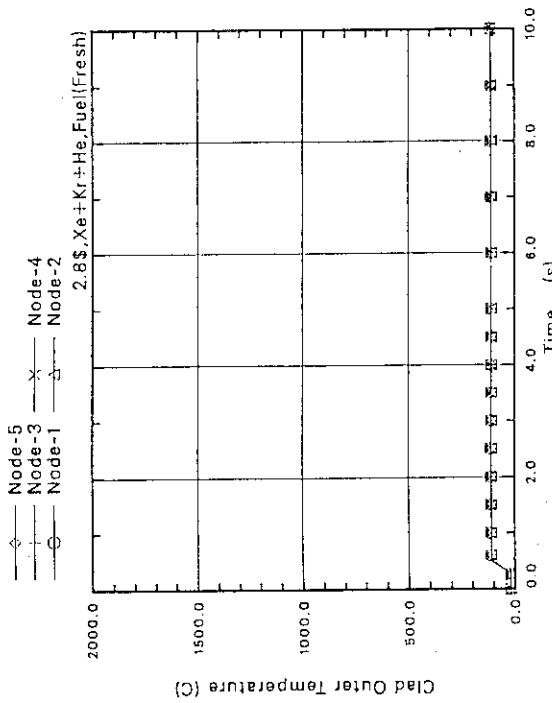
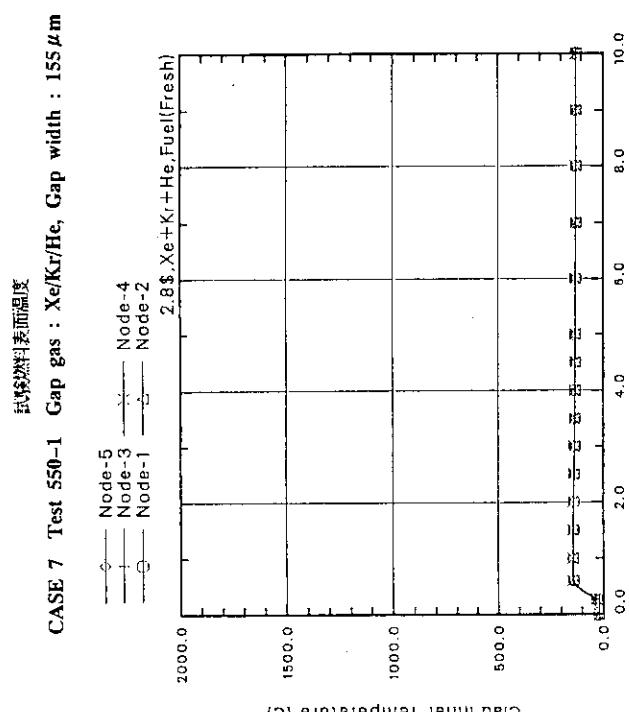
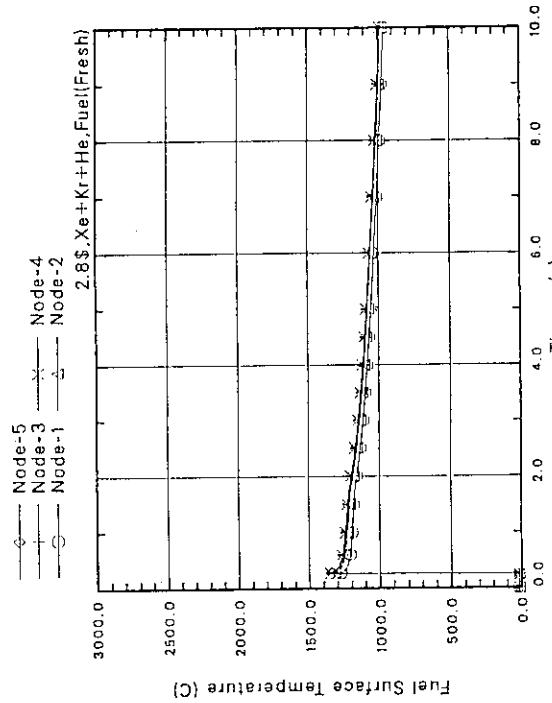
ノード 1 の径方向温度分布



炉出力

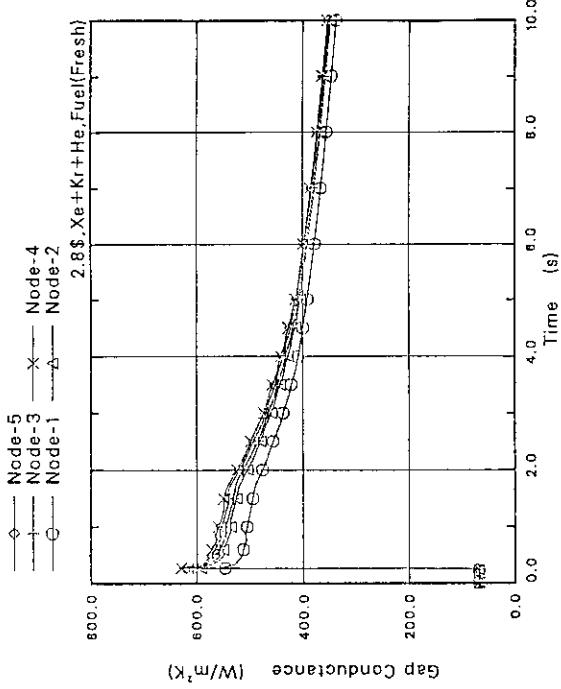


CASE 7 Test 550-1 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm

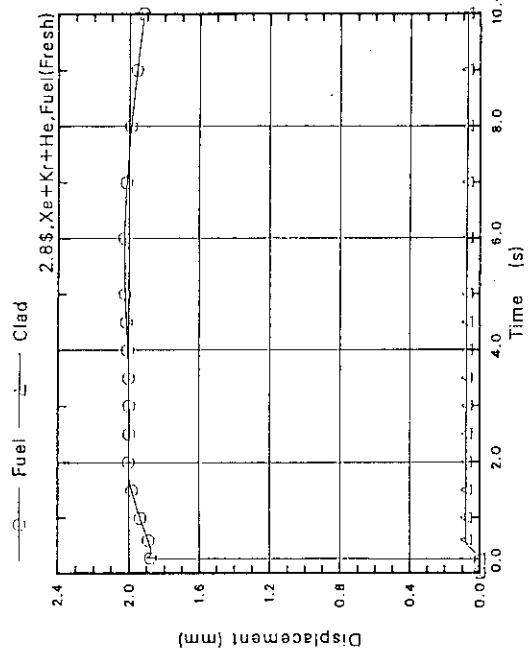


CASE 7 Test 550-1 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm

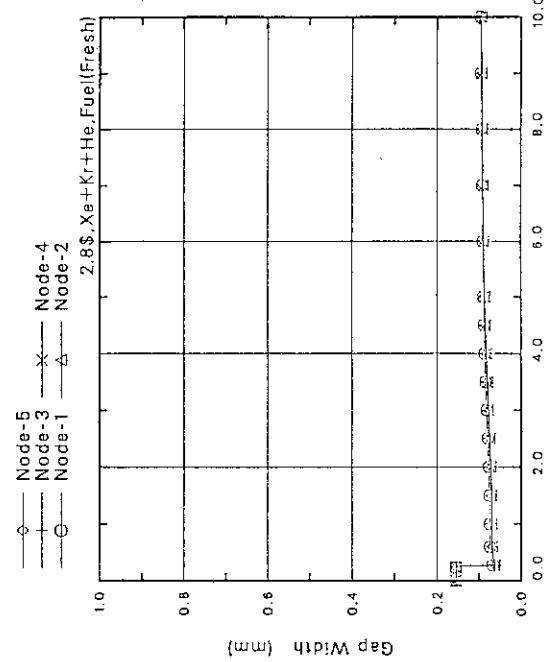
CASE 7 Test 550-1 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm



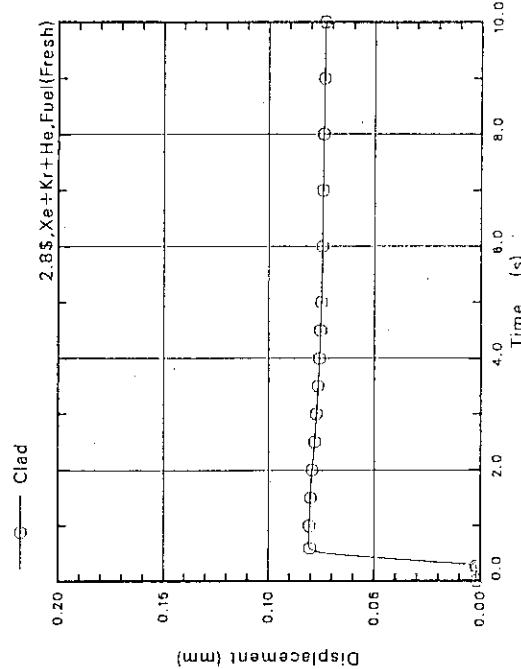
ギヤップコンタクタンス
CASE 7 Test 550-1 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm



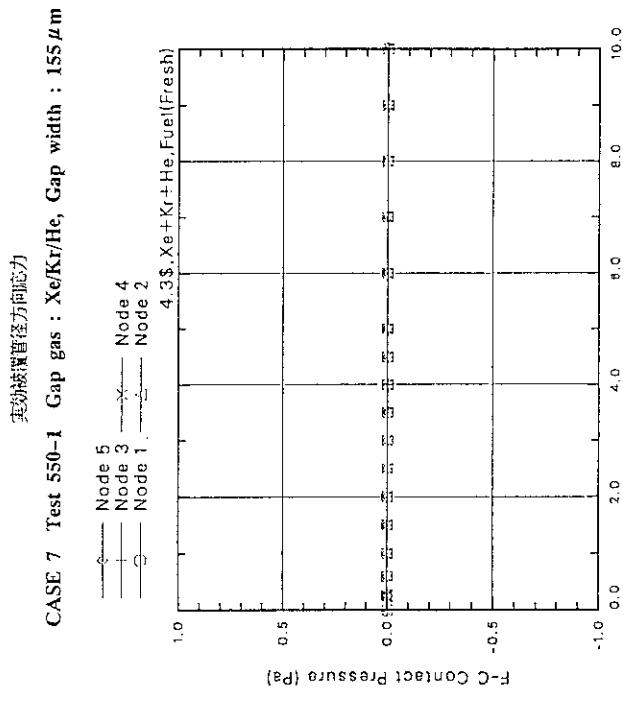
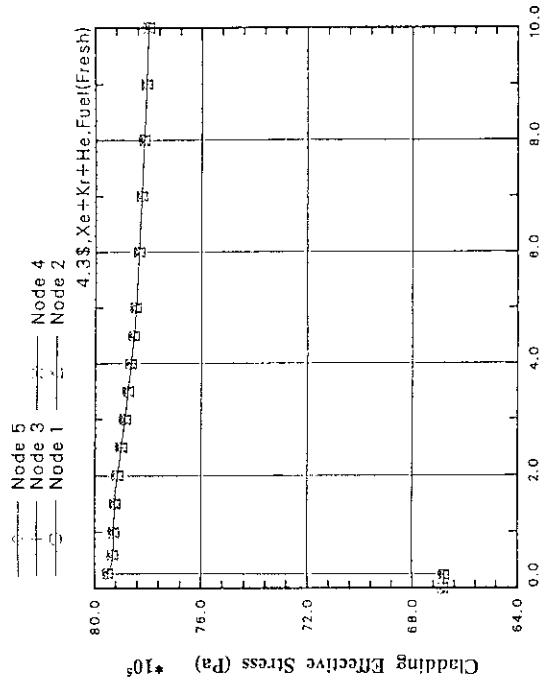
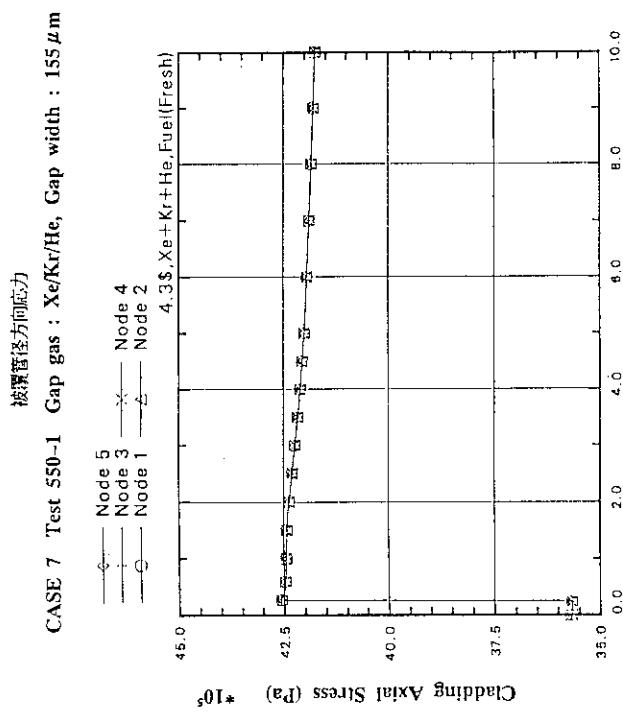
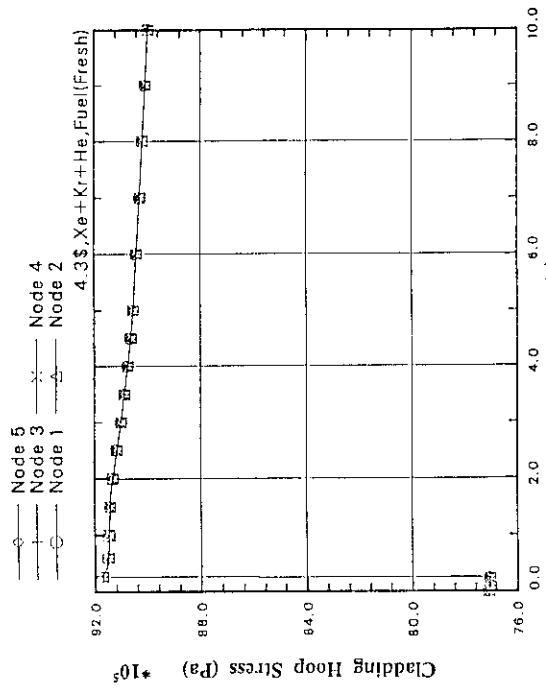
燃料と被覆管の軸方向のび
CASE 7 Test 550-1 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm



ギヤップ幅
CASE 7 Test 550-1 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm



被覆管の軸方向のび
CASE 7 Test 550-1 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm

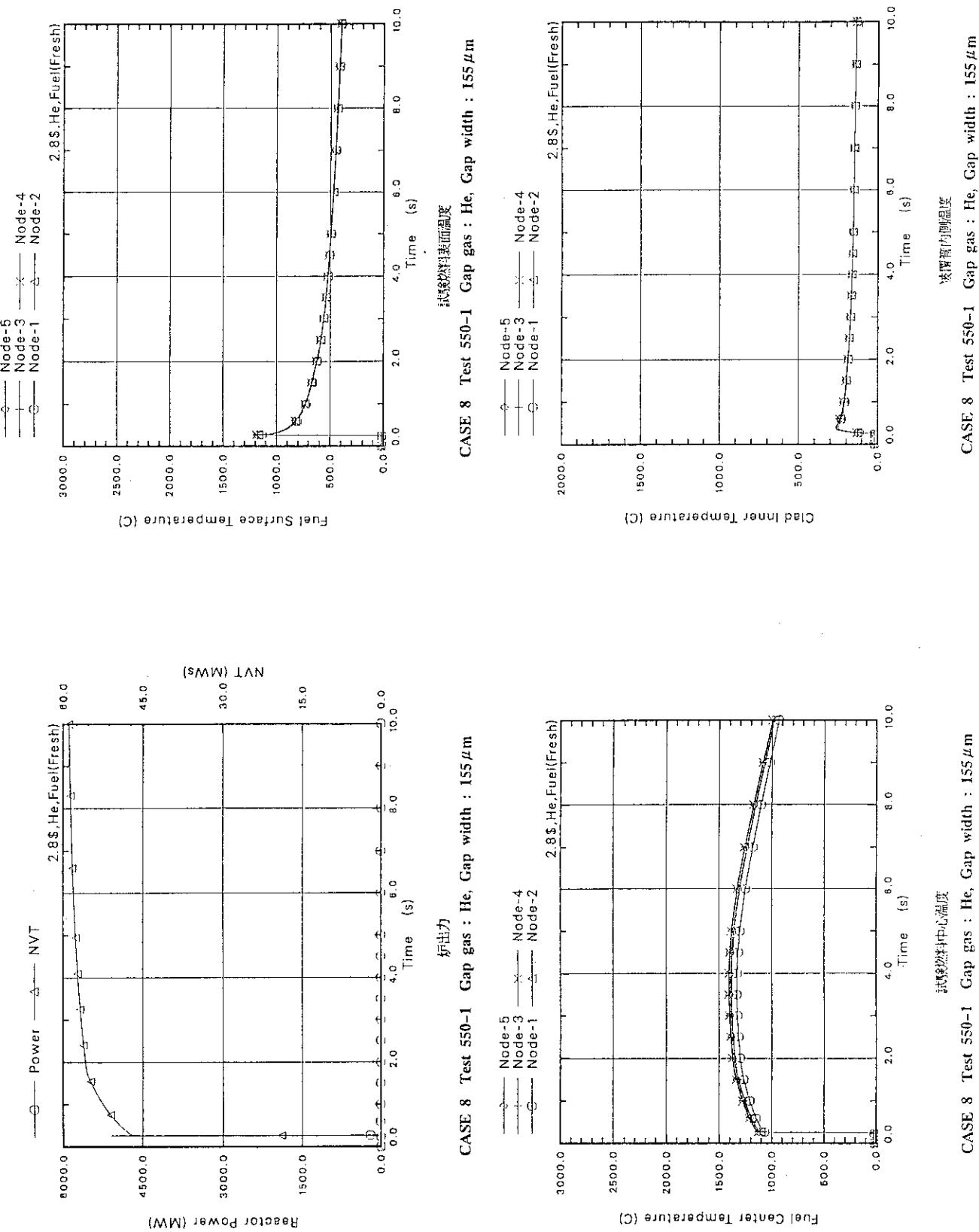


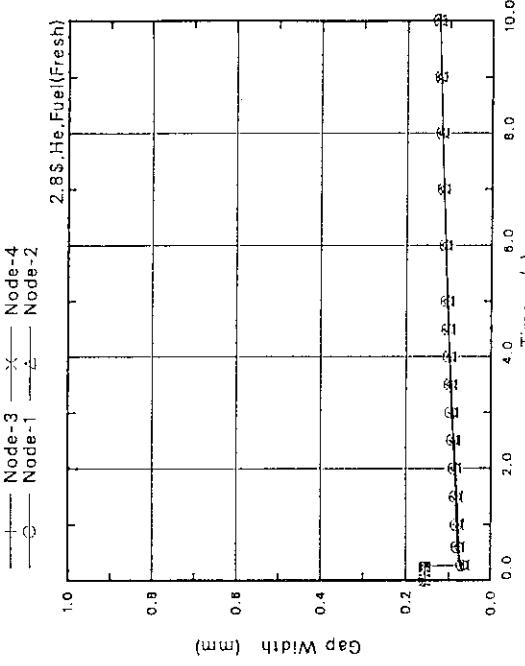
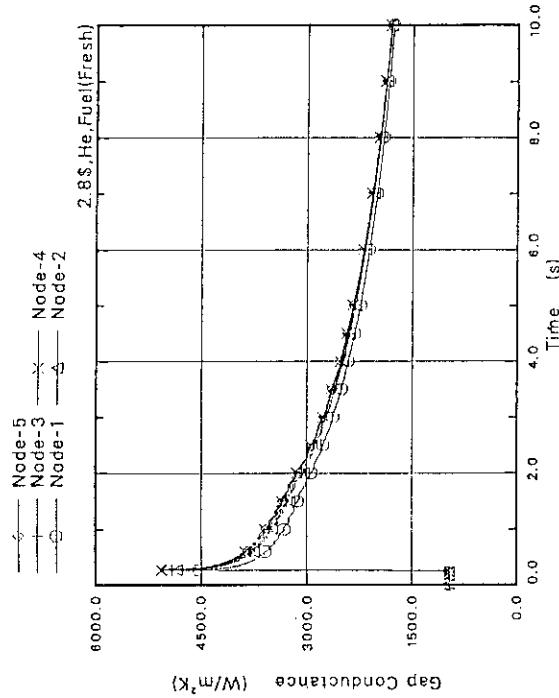
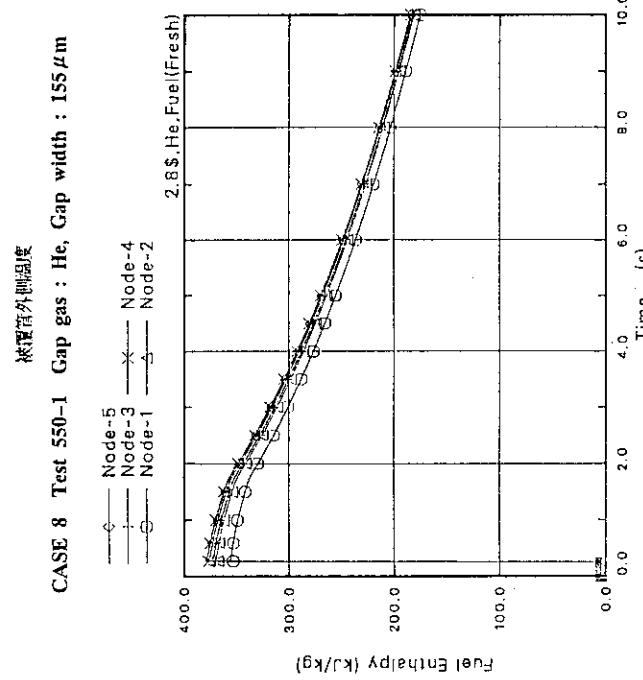
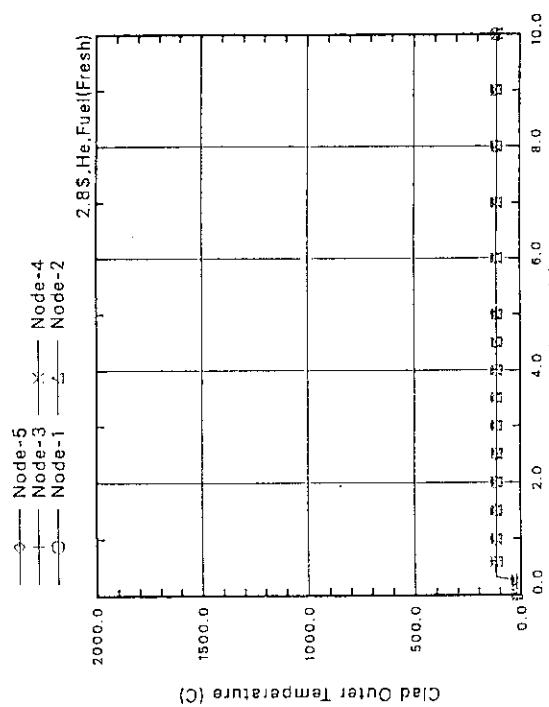
CASE 7 Test 550-1 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm

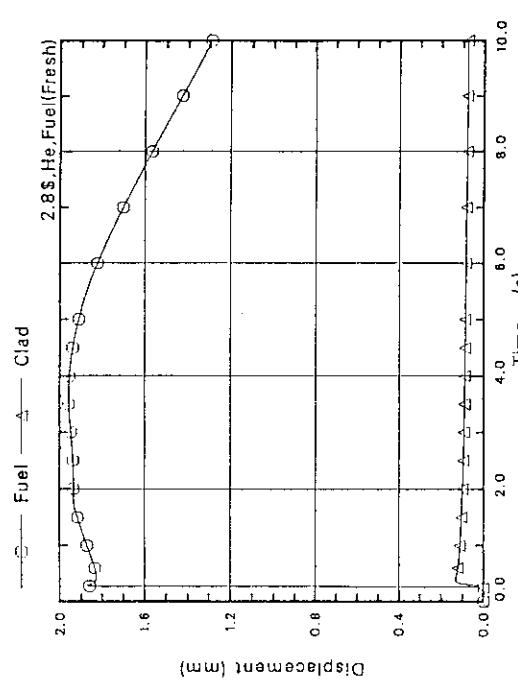
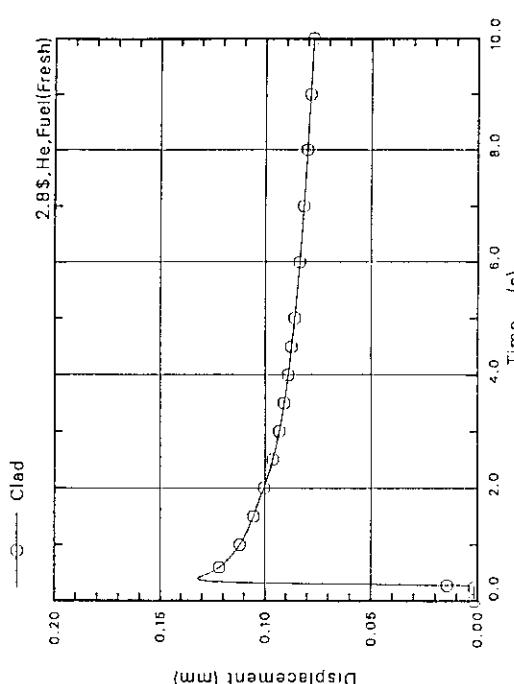
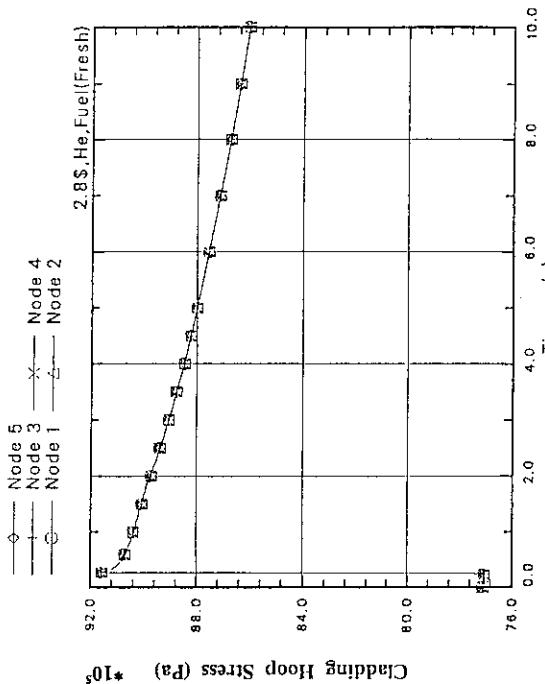
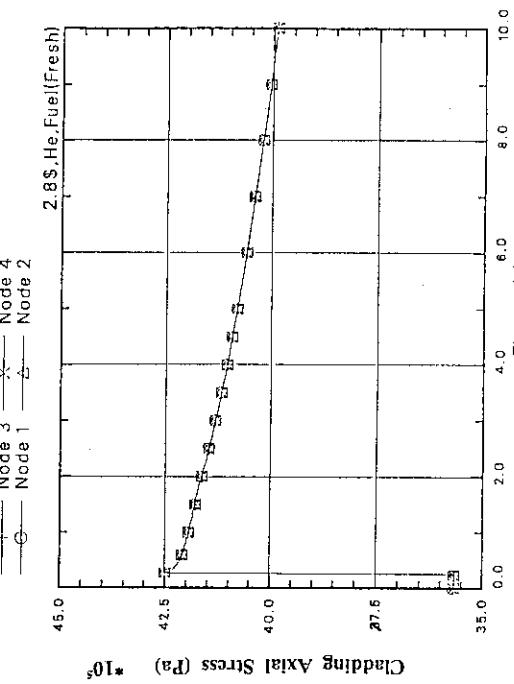
拔管轴向应力

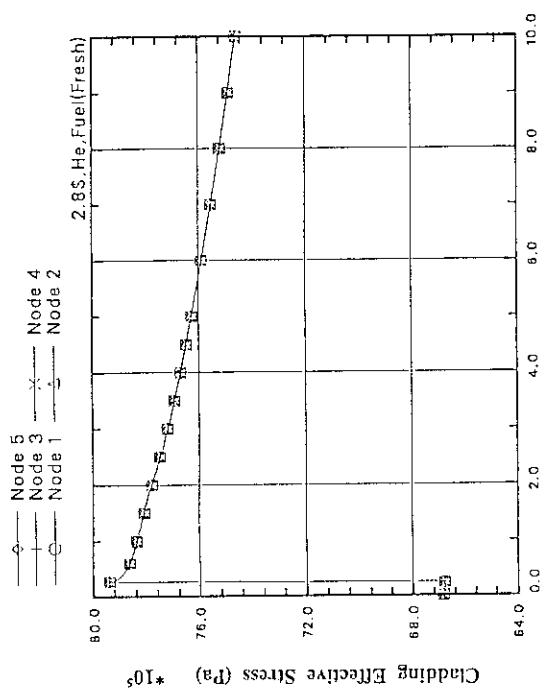
CASE 7 Test 550-1 Gap gas : Xe/Kr/He, Gap width : 155 μm

拔管管径方向应力

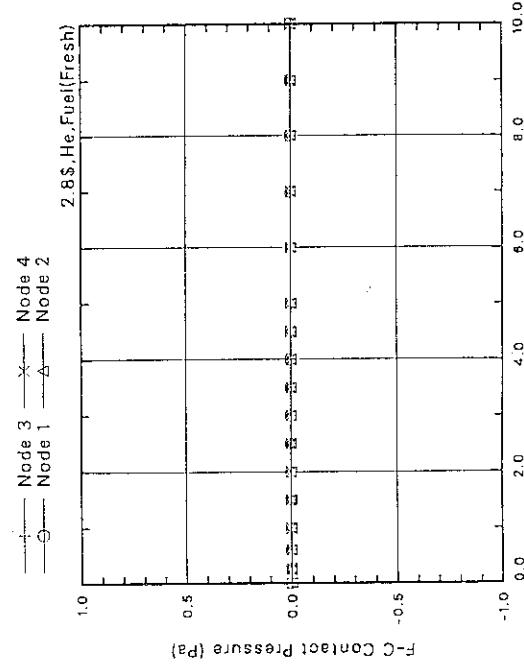




CASE 8 Test 550-1 Gap gas : He, Gap width : 155 μm
燃料と被覆管の軸方向のひずみCASE 8 Test 550-1 Gap gas : He, Gap width : 155 μm
被覆管の軸方向のひずみCASE 8 Test 550-1 Gap gas : He, Gap width : 155 μm
被覆管径方向応力CASE 8 Test 550-1 Gap gas : He, Gap width : 155 μm
被覆管径方向応力



CASE 8 Test 550-1 Gap gas : He, Gap width : 155 μ m
束効被覆管径方向応力



CASE 8 Test 550-1 Gap gas : He, Gap width : 155 μ m
燃料一被覆管接触圧力