

JAERI-Research
96-060



FPガスによる燃料変形モデル(FRAP-T6用)
開発とNSRR照射済み燃料実験の解析

1996年11月

中村武彦・細山田龍二*・笹島栄夫・更田豊志・森 行秀**

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。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。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 緯原子力資料サービス

F P ガスによる燃料変形モデル（F R A P - T 6 用）の開発とNSRR照射済み燃料実験の解析

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・細山田龍二*・笹島 栄夫

更田 豊志・森 行秀**

(1996年10月22日受理)

NSRRでは燃焼の進んだ軽水炉燃料の反応度事故時の挙動を調べるパルス照射実験を実施している。同実験では照射済燃料において未照射燃料に比べて大きい半径方向歪みが観測された。この変形挙動を再現するため核分裂生成物（F P）ガスによる被覆管変形モデルを開発し、事故時燃料挙動解析コードF R A P - T 6 に導入した。これに併せて物性、燃料割れモデル等の改良も行い実験の解析を行った。この結果、被覆管温度が上昇し燃料全体で結晶粒界割れが見られたJM-4実験では、F P ガスの結晶粒界での膨張による変形でNSRR実験結果が良く再現できることが明らかとなった。同実験では燃料半径方向の発熱分布は平坦で、燃料全体の結晶粒界ガスが変形に寄与したものと考えられる。他方、照射済軽水炉燃料では燃料外周部での出力密度が高く、パルス照射時に瞬時に高温となる。この温度分布に伴う燃料の割れの増加を考慮するGAPCONモデルをこの変形モデルと併用する事により実験結果が良く再現できることが明らかとなった。本報告書では、これらのモデルを説明し、NSRR実験の解析結果を示す。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

* 株) キューブシステム

** 三菱重工業株式会社

Fission Gas Induced Deformation Model for FRAP-T6 and NSRR Irradiated
Fuel Test Simulations

Takehiko NAKAMURA, Ryuji HOSOYAMADA *, Hideo SASAJIMA,
Toyoshi FUKETA and Yukihide MORI**

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

(Received October 22, 1996)

Pulse irradiation tests of irradiated fuels under simulated reactivity initiated accidents (RIAs) have been carried out at the Nuclear Safety Research Reactor (NSRR). Larger cladding diameter increase was observed in the irradiated fuel tests than in the previous fresh fuel tests. A fission gas induced cladding deformation model was developed and installed in a fuel behavior analysis code, FRAP-T6. The irradiated fuel tests were analyzed with the model in combination with modified material properties and fuel cracking models. In Test JM-4, where the cladding temperature rose to higher temperatures and grain boundary separation by the pulse irradiation was significant, the fission gas model described the cladding deformation reasonably well. The fuel had relatively flat radial power distribution and the grain boundary gas from the whole radius was calculated to contribute to the deformation. On the other hand, the power density in the irradiated LWR fuel rods in the pulse irradiation tests was remarkably higher at the fuel periphery than the center. A fuel thermal expansion model, GAPCON, which took account of the effect of fuel cracking by the temperature profile, was found to reproduce well the LWR fuel behavior with the fission gas deformation model. This report present details of the models and their NSRR test simulations.

Keywords: Reactivity Initiated Accident, Fuel Rod Deformation, Fission Gas, NSRR, Irradiated Fuel

* Cube System (Co.)

** presently, Mitsubishi Heavy Industries

目 次

1. はじめに	1
2. NSRR照射済燃料実験の概要	2
3. 解析モデル	2
3.1 FRAP-T6の概要	2
3.2 FPガスによる変形モデル	3
3.3 GAPCONモデル	6
3.4 被覆管強度	7
3.5 热伝導率	8
3.6 フィン効果	9
4. NSRR実験の解析	10
4.1 計算条件	10
4.2 JM実験	11
4.3 PWR燃料実験	13
4.4 BWR燃料実験	14
5. まとめと考察	15
6. 結論	17
謝辞	18
参考文献	19
付録 I FRAP-T6に新たに加えたサブルーチンと修正箇所の概要	51
付録 II FRAP-T6の入力条件と解析結果	69
(Tests JM-4, 5, MH-3, GK-1, 2, HB0-2, 3, TS-4)	

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of NSRR Irradiated Fuel Tests	2
3. Model Description	2
3.1 Outline of FRAP-T6	2
3.2 Fission Gas Induced Deformation	3
3.3 GAPCON Model	6
3.4 Cladding Strength	7
3.5 Thermal Conductivity	8
3.6 Fin Effect	9
4. NSRR Test Simulation	10
4.1 Inputs and Assumptions	10
4.2 JM Tests	11
4.3 PWR Fuel Tests	13
4.4 BWR Fuel Tests	14
5. Summary and Discussion	15
6. Conclusions	17
Acknowledgements	18
References	19
Appendix I Outlines of Newly Developed Subroutines and Modification on FRAP-T6	51
Appendix II Inputs and Simulation Results of Each NSRR Irradiated Fuel Tests (Tests JM-4,5, MH-3, GK-1,2, HBO-2,3, TS-4)	69

1. はじめに

NSRRでは燃焼の進んだ軽水炉燃料の反応度事故時の挙動を調べるパルス照射実験を実施している。同照射済燃料実験では、商用BWRおよびPWRで照射された燃料を短尺化してパルス照射している（BWR燃料実験[1]、PWR燃料実験[2,3]）。また、JMTRで予備照射した短尺の高濃縮度燃料（10%、20%濃縮）を用いたより高い発熱量での実験（JM実験[4]、JMH実験）も実施している。これらの照射済燃料実験では未照射燃料実験に比べて大きな周方向歪みが測定されている。ピーク燃料エンタルピ約200cal/gまでの範囲で行ったJM実験では、最大8%の残留周方向歪みが、ピーク燃料エンタルピ108cal/gまでの範囲で行ったPWR燃料実験においても、4%を越える残留歪みが測定されている。（Fig. 1）他方、軸方向の被覆管および燃料スタックの伸び挙動には大きな差は見られていない。（Figs. 2, 3）

この変形挙動を説明するため、燃料中に蓄積されたFPガスによる変型モデルを開発しFRAP-T6コード[5]に導入した。このモデルでは、結晶粒界のFPガス量を仮定し、結晶粒界がしきい温度を越えたときに生ずる粒界割れによって、FPガス圧による被覆管の変型が起きるものとした。このとき、FPガスが割れた粒界を通り自由空間へ伝わる効果は変形が生じる短い時間内では無視した。また、被覆管の強度に関してはMATPRO-ver.11[6]の物性値を軽水炉燃料実験およびJM実験シリーズの照射後試験（リング引張り試験）の結果を考慮して補正した。

この結果、特に被覆管温度が上昇するJM実験では、FPガスの膨張による被覆管の膨張が模擬できた。他方、低濃縮の軽水炉燃料では、特に高燃焼度領域においてペレット外周部にPuが局所的に蓄積され、燃焼度が高い領域が生成される。この領域は、定常照射中は低い温度に保たれているものの、反応度事故時においては瞬時に高い出力密度で加熱される。このため、半径方向の出力ピーピングが小さいJM燃料に比べて小さい出力条件で、局所的な粒界割れが発生し、被覆管の大きな変型をもたらす可能性がある。未照射燃料を使ったNSRR実験においては、燃料のクラック発生モデルとしてGAPCONモデル[7]が燃料ペレット/被覆管間（P/C）ギャップおよび被覆管変型挙動を良く再現することが知られている[8]。軽水炉燃料実験においては、被覆管温度は全般に低いため、FPガスによる変形は余り大きくなく、GAPCONモデルによるペレット変形が残留歪みに支配的であった。PWR燃料実験ではP/Cギャップがほとんど無いため、大きな残留変形を示した。BWR燃料実験では大きなP/Cギャップにより被覆管の変形が緩和されされ、塑性変形に至ら無かったものと計算された。以下にモデルおよび計算結果を示す。

2. NSRR照射済燃料実験の概要

NSRRでは、室温大気圧の水を封入したカプセル(Fig. 4)に短尺の実験燃料を封入し炉心(Fig. 5)中央部の実験孔でパルス照射することにより反応度事故を模擬した実験を行っている。半值幅約5~10msのパルス照射(Fig. 6)により、実験燃料は急速に加熱される。模擬される反応度事故の大きさは、ピーク出力部で燃料に付与されたエネルギーと等しいとして実験的に求められるピーク燃料エンタルピ(Peak Fuel Enthalpy)で表される。

照射済燃料実験には、①発電用BWRおよびPWRで照射された燃料を切断し、新たに伸び計、燃料内圧計等を装備した端栓を溶接したもの、②高濃縮(10%、20%濃縮)燃料をJMTRでカプセル照射したもの、がある(Fig. 7)。それぞれの燃料の代表的な緒元をTable 1にまとめる。これらの燃料は照射履歴の違いにより、被覆管のクリープダウン、酸化、プルトニウム(Pu)の生成等が大きく異なっている。燃料半径方向の燃焼度・核分裂性物質・発熱量分布については4.1計算条件で詳しく述べる。

パルス照射実験では、被覆管温度、水温、燃料内圧、燃料スタック／被覆管伸び、カプセル内圧、原子炉出力がオンラインで測定される。燃料の残留変形(直径、長さ、曲がり)、FPガス放出、結晶構造の変化等は照射後試験で検査される。実験において測定された主な結果をTable 2にまとめた。また、実験燃料の一部を硝酸で溶解し、Ba-140(半減期：12.75d)およびNd-148(安定)量を定量することにより短期間および長期間の核分裂数を求め、パルス照射による発熱量と燃焼度を評価している。個々の実験についての詳しい結果はデータレポートに、それぞれ、まとめられている。[9-23]

3. 解析モデル

3.1 FRAP-T6の概要

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。同コードは燃料棒線出力、冷却材流量／温度等を入力条件として、燃料棒の温度、内圧、変形の時間変化を計算する。同コードは、石島らによって原研に導入され、米国で行われた反応度事故模擬の燃料

2. NSRR照射済燃料実験の概要

NSRRでは、室温大気圧の水を封入したカプセル(Fig. 4)に短尺の実験燃料を封入し炉心(Fig. 5)中央部の実験孔でパルス照射することにより反応度事故を模擬した実験を行っている。半值幅約5~10msのパルス照射(Fig. 6)により、実験燃料は急速に加熱される。模擬される反応度事故の大きさは、ピーク出力部で燃料に付与されたエネルギーと等しいとして実験的に求められるピーク燃料エンタルピ(Peak Fuel Enthalpy)で表される。

照射済燃料実験には、①発電用BWRおよびPWRで照射された燃料を切断し、新たに伸び計、燃料内圧計等を装備した端栓を溶接したもの、②高濃縮(10%、20%濃縮)燃料をJMTRでカプセル照射したもの、がある(Fig. 7)。それぞれの燃料の代表的な緒元をTable 1にまとめる。これらの燃料は照射履歴の違いにより、被覆管のクリープダウン、酸化、ブルトニウム(Pu)の生成等が大きく異なっている。燃料半径方向の燃焼度・核分裂性物質・発熱量分布については4.1計算条件で詳しく述べる。

パルス照射実験では、被覆管温度、水温、燃料内圧、燃料スタック／被覆管伸び、カプセル内圧、原子炉出力がオンラインで測定される。燃料の残留変形(直径、長さ、曲がり)、FPガス放出、結晶構造の変化等は照射後試験で検査される。実験において測定された主な結果をTable 2にまとめた。また、実験燃料の一部を硝酸で溶解し、Ba-140(半減期：12.75d)およびNd-148(安定)量を定量することにより短期間および長期間の核分裂数を求め、パルス照射による発熱量と燃焼度を評価している。個々の実験についての詳しい結果はデータレポートに、それぞれ、まとめられている。[9-23]

3. 解析モデル

3.1 FRAP-T6 の概要

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。同コードは燃料棒線出力、冷却材流量／温度等を入力条件として、燃料棒の温度、内圧、変形の時間変化を計算する。同コードは、石島らによって原研に導入され、米国で行われた反応度事故模擬の燃料

挙動実験SPERT/CDCおよびPBF/RIA[24]の解析評価[25]に使用されている。原研で開発した同種のコードにNSR-77[26]があるが、FRAP-T6では被覆管の内圧上昇による膨れを計算するBALLOONサブコード、燃料破損判定モデル、FPガスの生成放出挙動を計算するFASTGRASS[27]等を有し、より幅の広い挙動解析を行うことが出来る。Fig. 8にFRAP-T6の計算の流れを示す。NSRR照射済BWR燃料実験の結果をこれらのコードを用いて解析した結果は文献[28]にまとめられている。

FRAP-T6では燃料棒をFig. 9に示すように軸方向および半径方向のノードに分割する。軸方向の各ノードに対応するスライスは、温度・変形挙動においてそれぞれ独立であり、軸方向全体の挙動はそれらが積み上げられた合計として計算される。温度計算では、入力された出力から基本的に半径方向1次元の熱伝導・熱伝達により燃料および被覆管の温度が計算される。この温度から燃料・被覆管の物性・熱膨張等が計算され変形・応力・FPガス放出等が評価される。

燃料と被覆管の変形と応力を計算する主なモデルには、FRACAS-IとFRACAS-IIがあり、それぞれ燃料ペレットを非圧縮性(剛体)、圧縮性(弾性体)として取り扱う。つまりPCMIが生じたとき、FRACAS-IIでは燃料ペレットは被覆管を押し広げ／伸ばすばかりではなくペレット自身も被覆管の拘束力によって縮む。他方、FRACAS-Iではペレットの変形に被覆管による拘束力は影響しない。ただし、NSRRにおける未照射燃料実験ではPCMIが発生する条件では、被覆管表面の熱流束が限界熱流束(critical heat flux: CHF)を超えて、核沸騰離脱(departure from nucleate boiling: DNB)が生じ、被覆管温度が急上昇する。このため、被覆管強度が急激に低下するためFRACAS-IIによる変形計算は数値計算上不安定になるため適応できていない。なお、FRAP-T6の熱伝達パッケージは運転条件での燃料挙動解析用に用意されており、サブクールの大きいNSRR実験条件に適応するため膜沸騰熱伝達に数式[29]を追加している。

3.2 FPガスによる変形モデル

照射済燃料中には照射中に発生したFPが蓄積される。このうち常温でガスのクリプトン(Kr)およびキセノン(Xe)は、例えば燃焼度50 GWd/tUの燃料1 g当たり約 6×10^{-5} mol存在する。燃料1gの体積は約0.1cm³であるので、このうち約2%の気泡部に全量が存在すると仮定すると室温での圧力は約70MPaとなる。実際には、FPガスの多くの部分が燃料マトリックス中に固溶しており、結晶粒界の気泡等に存在するガス量は20~30%以下と考えられる。したがって、ガス圧はその分低下するが、反応度事故時

において燃料温度が急上昇した（特に定常照射中の温度を越えた）場合には、その効果は無視できないものと思われる。そこで、燃料中に蓄積されたFPガスのうち結晶粒界に存在したものによる燃料および被覆管の変型モデルをFRAP-T6 コード[5]のFRACAS-I変形モデルに導入した。このモデルでは、結晶粒界のFPガス量を仮定し、結晶粒界がしきい温度を越えたときに生ずる粒界割れによって、FPガス圧による被覆管の変形が起きるものとした。このとき、FPガスの温度はは燃料温度と同じとし、FPガスが割れた粒界を通り自由空間へ伝わる効果は過渡加熱時には無視出来るものとした。変型モデルを模式的にFig. 10に示す。

FRAP-T6 による解析では、燃料ペレットをFig. 9に示すように半径方向のリングに分割する。i番目のリングにおいて時刻tで、 $n_i(t)$ molの結晶粒界ガスの圧力 $P_i(t)$ Paは、リング温度 $T_i(t)$ Kとリング内の粒界気泡体積 V_{i0} m³から

$$P_i(t) = \frac{n_i(t)RT_i(t)}{V_{i0}} \quad (1)$$

と表せる。ここで、Rはガス常数、8.314 J/mol/Kであり、結晶粒界が分離し粒界ガスの体積が $\Delta V_i(t)$ m³増加するとガス圧は、

$$P(t) = \frac{\sum n_i(t)RT_i(t)}{\sum (\Delta V_i(t) + V_{i0})} \quad (2)$$

Paとなる。ここで $\sum V_i(t)$ はFig.10の ΔV と等しいとし、被覆管の変形によって圧力が緩和されるとすると、

$$\Delta V = \sum \Delta V_i(t) = \pi(r_i(t)^2 - r_f(t)^2)h(t) \quad (3)$$

となる。結晶粒界割れが起きなかった場合の燃料の半径を $r_i(t)$ 、被覆管の内半径 $r_f(t)$ mとする。被覆管内半径は、被覆管の初期平均半径を r_0 m、初期肉厚を th_0 mとすると、被覆管の周方向および半径方向歪み $\epsilon_\theta(t)$ 、 $\epsilon_r(t)$ を用いて、

$$r_i(t) = r_0(1 + \epsilon_\theta(t)) - \frac{th_0}{2}(1 + \epsilon_r(t)) \quad (4)$$

と表せる。また、リングの高さ $h(t)$ は初期高さ h_0 と被覆管の軸方向歪み $\epsilon_z(t)$ から、

$$h(t) = h_0(1 + \epsilon_z(t)) \quad (5)$$

となる。

被覆管の周方向および軸方向応力、 $\sigma_\theta(t)$ 、 $\sigma_z(t)$ は燃料外圧を P_{ext} MPaとすると、

$$\sigma_\theta(t) = \frac{r_i(t)P(t) - r_{ext}(t)P_{ext}}{th(t)} \quad (6)$$

$$\sigma_z = \frac{\pi r_i(t)^2 P(t) - \pi r_{ext}(t)^2 P_{ext}}{\pi(r_{ext}(t)^2 - r_i(t)^2)} = \frac{r_i(t)P(t) - r_{ext}(t)P_{ext}}{2th(t)} = \frac{\sigma_\theta}{2} \quad (7)$$

となり、ガス圧による軸方向応力は周方向応力の約半分となる。NSRR実験解析においてPCMIによる被覆管の軸方向変形が大きいパルス照射直後では、被覆管の軸方向歪みは燃料の軸方向歪みに支配され、この変形に伴う応力はガス圧による応力に比べて一般に大きい。

被覆管の平均温度に応じてMATPROで計算されるヤング率E、ポアソン比v、熱膨張係数 α を用いて、P/Cギャップが閉じた後の燃料の熱膨張から求められる $\epsilon_z(t)$ と式(2)、(3)、(4)および(6)を満たすように仮定した $\epsilon_\theta(t)$ から、

$$\epsilon_\theta(t) = \frac{1}{E}(\sigma_\theta(t) - v\sigma_z(t)) + \epsilon_\theta^p(t) + \int \alpha dT \quad (8)$$

$$\epsilon_z(t) = \frac{1}{E}(\sigma_z(t) - v\sigma_\theta(t)) + \epsilon_z^p(t) + \int \alpha dT \quad (9)$$

を満たす $\sigma_\theta(t)$ 、 $\sigma_z(t)$ 、 $\epsilon_\theta(t)$ が収束計算により求められる。ここで塑性歪み $\epsilon_\theta^p(t)$ 、 $\epsilon_z^p(t)$ 、はPlandtl-Reussの法則から実効応力 σ_e を用いて計算される。

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_\theta)^2 + (\sigma_z)^2}{2}} \quad (10)$$

$$d\epsilon_i^p = \frac{3}{2} d\frac{\epsilon^p}{\sigma_e} s_i \quad (11)$$

$$S_i = \sigma_i - \frac{1}{3}(\sigma_\theta + \sigma_z) \quad (12)$$

ここで*i=r, θ, z*である。また半径方向の歪み $\epsilon_r(t)$ は周方向および軸方向応力より、

$$\epsilon_r(t) = -\frac{\nu}{E}(\sigma_\theta(t) + \sigma_z(t)) + \epsilon_r^p(t) + \int \alpha dT \quad (13)$$

として求められる。実際の変形計算では、塑性歪み、歪み速度、中性子照射量、温度、冷間加工、酸素濃度の関数としてMATPROのCSTRES、CSTRAN、CSTRNI等で計算される応力と歪みの関係を用いて変形計算が行われる。

以上の変形モデルのうちFPガス圧やそれに伴う変形は主にGASDEFVサブルーチン内にモデル化し、FRACAS-Iによる変形計算の中でFCMIサブルーチン内でこれを呼んでいる。Fig. 11に計算の流れを示す。また、新たに追加したサブルーチンの概要・引数等を付録Iにまとめた。

3.3 GAPCONモデル

反応度事故条件の燃料挙動を評価する上では、過渡時の燃料と被覆管のギャップの変化を適切に評価することが重要である。NSRRにおける未照射燃料実験の結果では、燃料の膨張に加え、クラックの発生に伴う燃料のリロケーションを評価するモデルとして、CRACKおよびGAPCONモデル[7]が検討されている[8]。Fig.12にモデル

の概要を示すが、CRACKモデルは、クラック発生に伴う燃料の追加膨れを入力パラメータとしている。他方、GAPCONモデルは最高温度に達した半径方向リングの熱膨張が燃料の膨張を支配するものとしている。つまり、内部の低温部では熱膨張が足りない分だけクラックが発生していることとなる。NSRRにおける未照射燃料のパルス照射実験の結果はGAPCONモデルで良く記述されており[8]、同モデルは入力パラメータに依存しないため、これをFRAP-T6に導入した。しかし、同モデルでは、外周部の高い出力ピーク部の温度にパルス照射直後の変型挙動が支配されるため、特にPWR燃料実験では半径方向ノード分割が影響することが予想される。FRAP-T6は、CRACKモデルとほぼ同等の変型モデル、Relocationモデルを有する。同モデルではクラック率 f_c は最大で燃料半径の0.25%であるが、P/C接触圧に応じて小さくなり、34.5MPaで0となる。したがって、被覆管が冷たく降伏応力が大きいパルス直後の変形にはクラックは寄与しない。同モデルのクラックは、むしろP/Cギャップを小さくすることによりギャップ熱伝達を向上させるため、熱的な効果が大きい。本研究ではFRAP-T6 オリジナルのRelocationモデルによる計算とGAPCONモデルによる計算を行い。燃料変型モデルの影響を調べた。

3.4 被覆管強度

FRAP-T6 では3.2 FPガスによる変形モデルで示したように被覆管の変形計算には物性値パッケージMATPROの応力・歪みの関係式を用いる。本研究では被覆管強度は非常に重要な物性値であるので、MATPROのCSTRES、CSTRAN、CSTRNIを三島[30, 31]の研究、およびHBO・JM実験シリーズの照射後試験（リング引張り試験）の結果を考慮して補正した。軽水炉燃料被覆管の照射硬化は燃焼度約10GWd/tUに相当する高速中性子照射量でほぼ飽和し、それ以降余り上昇しない。高燃焼度の燃料であるHBO実験燃料の被覆管のリング引張り試験の結果[23, 18]も三島らの結果とほぼ一致している。同燃料棒は上部ほど酸化膜が厚く、水素吸収量が大きい。最大の水素吸収を示した部分では被覆管は弾性変形の後最大応力に達すると殆ど延性を示さずに破断した。しかし、降伏応力自体には、部位によって有意な差はなかった。JM燃料被覆管についても同様の試験を実施しているが、降伏応力は大きく違っていない。これらのデータを用いてMATPROの被覆管強度を補正した。Fig.13に温度の関数として被覆管の降伏応力を示す。MATPROではの降伏応力は、

$$\sigma = K(\epsilon_e^p)^n \left(\frac{\dot{\epsilon}_e^p}{10^{-3}} \right)^m \quad (14)$$

と表す。 σ は実効応力、 ϵ_e^p 、 $\dot{\epsilon}_e^p$ はそれぞれ実効塑性歪みとその変化率（速度）である。 K 、 n 、 m はそれぞれ強度係数、歪み硬化乗数、歪み速度乗数と呼ばれる。 K は温度、冷間加工（焼き鈍し）、高速中性子照射量、酸素濃度の関数であり、 n と m は温度と歪み速度の関数となっている。Fig.13の○△記号で示されるようにMATPROオリジナルの関係式では高速中性子照射量の増加による硬化が強く、特に燃焼度の高いHBO実験燃料の被覆管降伏応力を2倍以上に過大評価する。そこで、 K を修正し実験値に合うようにした。修正に用いた試験は室温から400°Cの範囲で、 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ /s程度のゆっくりした引張り速度で行われたが、これより高温部ではMATPROの温度依存性を用いて外挿した。歪み速度依存性についてはMATPROでは最大4/sの実験結果を考慮しているが、実験に用いた燃料被覆管については実測値がないのでMATPROの関係式をそのまま用いた。

3.5 熱伝導率

NSRR照射済燃料実験では残留歪みの大きい場合、多くの実験で結晶粒界割れが観測されている。この割れは燃料の熱伝導率を下げ、燃料および被覆管の温度挙動に影響を及ぼすことが予想される。そこで、粒界割れに伴う気泡体積 ΔV_i の増加を考慮して以下の2つの手法で熱伝導率を更新した。

①MATPROの燃料熱伝導率計算サブルーチンFTHCONで使用する燃料密度を ΔV_i を考慮した密度に更新する。

②FRAP-T6の燃料ペレットのクラック発生モデルにおける空隙率の増加に ΔV_i を考慮し、実効熱伝導率を更新する。

①のFTHCONでは熱伝導率は温度、密度、酸素メタル比（O/M比）、プルトニウム濃度の関数となっている。密度 D （理論密度との比）について燃料の熱伝導率 k_f は、

$$k_f = \frac{D}{1 + (6.5 - 0.00469 T')(1-D)} A + B \quad (15)$$

と表される。 T は<1364K(1191°C)では温度であるり、>1843K(1570°C)では燃料密度

を含む(15)式のAの係数は1となる。1364Kと1843Kの間はこの2つの内挿値を用いる。ここでAおよびBは温度、熱膨張、比熱等の関数となっている。Fig.14に温度および密度の比の関数として熱伝導率を示す。同図に示されるように熱伝導率は約1500°C以下では、密度の低下によって大きく減少するが、高温域での効果はない。

他方、②のFRAP-T6の空隙率Vの増加により低下した実効熱伝導率 k_{eff} は、

$$k_{eff} = (1.0 - 0.48 \frac{V}{4 \times 0.8 \times 10^{-4} r_f(0)} (1.0 - \frac{k_g}{k_f})) k_f \quad (16)$$

と表現される。ここで、 r_f は燃料初期半径、 k_g はこの場合粒界FPガスの熱伝導率である。この関係式はINELのPBFにおけるGap conductance実験[32]の結果に基づいた経験式であり、NSRRにおけるRIA実験への適応性は不明であるが、起こりうる熱伝導率の変化の可能性を示す1例と考えられる。Fig.15に温度と熱伝導率の関係を示す。同モデルでは(16)式のVを含む分数の項は1.0以下に制限されるため、熱伝導率は理論密度の燃料熱伝導率の約半分以下にはならない。FRAP-T6の実行に当たっては、以上2つの熱伝導率のうち1つを選択して使用する。

3.6 フィン効果

実験時の被覆管の温度は変型量を決める重要なパラメータであるので、実験時に熱電対によって測定されたものを用いた。ただし、膜沸騰状態では、熱電対はそれ自体のフィン効果[33]によりやや低い測定値を示すことが知られているため、これを補正し、実測による外面温度を平均温度に補正した。この被覆管平均温度を、変形計算では被覆管強度を決めるパラメータとして使用する。フィン効果を補正した被覆管表面温度に、計算によって求めた被覆管内外温度差の1/2を加えて被覆管平均温度とした。

フィン効果による温度の低下は、被覆管温度、膜沸騰厚さ、熱電対太さ、冷却水のサブクール度・流速等によって変化する。照射済燃料実験に対応する静止水（サブクール度75°C）条件で被覆管温度が数百°Cを越えると120～150°Cの温度低下が観測されている。Fig. 16[33]に示すフィン効果の計算値(膜圧 $a_g=1.0\text{mm}$)を用いてDNBが発生した場合の被覆管外面温度を補正した。

4. NSRR実験の解析

4.1 計算条件

発電炉用の低濃縮燃料では、定常照射中に燃料外周部に多く生成された核分裂性プルトニウム(Pu-239、Pu-241)により、外周部において燃焼度が高くなる。NSRRでのパルス照射においても、これらのPuの蓄積により外周部の出力密度が高くなる。この効果を評価するためにRODBURNコード[34]により半径方向の燃焼度・核分裂性物質分布を評価した。Fig.17に代表的な燃料の半径方向燃焼度および核分裂性物質分布を示す。これを用いてSRACコードシステム[35]による核計算によって燃料棒の半径方向発熱分布を求めた。この結果から、JM燃料においては初期濃縮度が高くPuの生成による発熱の効果が無視できるため、出力ピーピングは約1.2で未照射燃料と同等かやや小さい事が分かる。他方、低濃縮のBWRおよびPWR燃料では、外周部に蓄積されたPuによる発熱の効果が非常に大きく、高燃焼度PWR燃料では出力ピーピングは2.7に達した。Fig.18に標的燃料の半径方向の出力分布を示す。各実験燃料についてのピーピング係数をTable 1にまとめる。

NSRRにおける照射済み燃料を用いた反応度事故実験では、燃料の大きな変形に加えて、Table 2に見られるように燃料温度の低い実験においても大きなFPガスの放出が観測されている。燃料温度が比較的高くなった実験 (JM燃料を用いた比較的高発熱量の実験においても高温での保持時間は短いことから、このFPガスの放出は定常照射中に結晶粒界に蓄積されたガスの放出が支配的であろうと考えられている。パルス照射後の金相写真においてもJM-4実験[22]においては半径全体にわたる結晶粒界割れが、低発熱量の発電炉燃料実験TS-4[12]においても外周部での結晶粒界割れが観測されている(Photo. 1)。変形計算では、結晶粒界がある条件で割れそこに存在したガスのみが被覆管に負荷を与えるものとして計算を行った。FPガスによる変形を評価する際、燃料結晶内外のガスバブルの弾性変形的な膨張も燃料の変形に寄与するものと思われるが、簡単のため、これは無視した。粒界割れがおこるしきい値は単純に温度とし、粒界割れの範囲と、FPガスの放出を妥当に判断できる値として1100°Cを採用した。FRAP-T6のFRACAS-Iモデルでは、燃料と被覆管のギャップが閉じると、被覆管の変形は周方向も軸方向も燃料の変形に支配される。言い換えれば、被覆管の変位量は燃料の熱膨張(クラックの効果を含む)で決まり、その変位量(歪み)に対応した接触圧が計算される。本研究で考慮するFPガスによる変形は、ガス圧(しきい温度を越えた領域の)が燃料の熱膨張(クラックの効果を含む)に

よる接触圧を越えると発生すると考えられる。しかし、ガス圧は被覆管が変型すると体積膨張により緩和されるため、温度とガス量によって決まるガス圧が被覆管強度とバランスする点でガス圧による変形量は決まる。この時、ガス圧は、半径方向ばかりではなく軸方向にも働くが、ガス圧による被覆管の軸方向応力は式(7)に示されるように周方向応力の約半分であり、軸方向では熱膨張した燃料に拘束されることによる応力が支配的である。したがって、被覆管のガス膨張による変型は周方向のみを考慮し、軸方向は燃料の熱膨張に拘束されたものとした。

ベース照射終了時のFPガスの、結晶粒内外の存在比を実験的に求めた例としては、燃焼度22GWd/tUのCANDU燃料について粒界割れを発生させ、約20%のFPガスが粒界に存在した事を測定したものがある[36]が、実験データは限られている。また、FASTGRASS[27]等の計算コードによって評価したBWR燃料(TS実験用)では、生成量の約14%が結晶粒界に存在していた[28]。これらの結果を踏まえて、計算を単純化する意味も含めてほとんどの実験解析では、半径方向均一に生成量の15~25%が粒界に存在するものとした。唯一、燃焼度の高いHBO実験燃料では外周部にリム領域が形成されていたので、リム領域(幅200μm)では結晶粒内ガスは全て粒界に移動しているものとした[37]。同燃料では光学的リムは60μmであったが、ガスの粒界への移動が顕著な領域はその3倍程度ある[37]ものとした。Fig. 19に解析に想定したFPガス分布の例を示す。また、計算に用いた主な仮定、およびモデルをTable 3にまとめた。結晶粒界割れが生じた燃料ペレットの熱伝導率は3.5熱伝導率の②実効熱伝導率を全ての実験解析に用いた。

4.2 JM実験

JM-4実験では、被覆管外面温度は最高約780°Cに達した。この時、燃料温度は全ての半径位置で2000°Cに達したと計算された(Fig. 20)。この実験での被覆管表面温度の実測値○Expを、フィン効果による温度低下を補正したものを□Exp+Finとして、さらに被覆管の内外温度差(計算による)を補正し平均温度としたものを◇Exp+Fin+dtとしてFig. 21に示す。この図に示されるように、フィン効果および被覆管内の温度分布を考慮すると、被覆管平均温度は950°Cに達したものと推定された。この温度を用いて計算された被覆管の歪みと応力の時間履歴をFigs. 22, 23示す。パルス照射直後に、ギャップが閉じ燃料ペレットの熱膨張により被覆管は急激に1%程度膨らむ。ただし、大部分が弾性変形であり、塑性変形は0.3%程度に留まる。この後、

被覆管温度が500°Cを越えた0.25s頃から被覆管はガス圧による変形を始め、0.4s過ぎにはほぼ安定する。この時の変形量は被覆管温度で決まる被覆管の応力とFPガス圧がバランスする点となる。実験においては、被覆管温度測定部で周方向平均約6%（ピーク部6.5%、最小部3.5%）の周方向残留歪みが測定された。計算結果は5.2%の残留歪みを示しており実測値とほぼ一致する。この解析では950°Cの被覆管の降伏応力を20Mpa程度としており、被覆管の強度補正に用いた実験の範囲を超えていている。しかし、外挿に用いたMATPROそのものの適応温度範囲内である。

Fig. 24にペレットの熱膨張による被覆管との接触圧(○Contact pressure)とFPガスによる被覆管への圧力(◇Grain pressure)の時間変化を示す。燃料ペレットの急速な熱膨張により接触圧はパルス照射と同時に上昇し100Maを越える。この変形は変位支配型であり、被覆管温度の上昇により降伏応力の低下とともに低下する。一方燃料温度は全ての領域で1100°Cを越えるため粒界のFPガスは全て活性化され、生成量の15%のガスが燃料体積の2%と仮定した初期体積で圧力約30MPaを被覆管に及ぼす。このガス圧は時刻約2.5sで熱膨張による接触圧を上回るため、この時点から接触圧はFPガス圧に支配され被覆管の膨れ変形が始まる。

この解析では、変形に寄与したFPガス量を全インベントリの15%と仮定した。同実験燃料は破損したためFPガスの放出量は測定されていないが、同程度の加熱条件で行われたJM-8実験(燃料エンタルピ160cal/g, 燃焼度20GWd/tU)では約17%のFPガス放出が観測されており、JM-4実験において15%のFPガスが変形に寄与し、後に放出されたという仮定は妥当であろうと思われる。

被覆管温度がどの程度変形挙動に影響するかを調べる目的で、Fig.21でフイン効果も被覆管内の温度分布を考慮しない場合（測定した被覆管外面温度をそのまま使う場合）、被覆管内の温度分布のみ考慮しない場合、の計算を行ってその歪み履歴をFig. 25にまとめた。同図に示されるように、変形挙動は被覆管温度に対して非常に敏感であり、特に温度が900°Cを越えると変形量は急速に拡大する。

若干低い発熱量(158cal/g)で加熱されたJM-5実験では、被覆管平均温度の最高値は600°C足らずに留まり、周方向の残留歪みも2.1%とJM-4実験に比べて小さく留まった。FRAP-T6による同実験の解析は残留歪みを1.2%とし、若干の過小評価となった。解析の主な結果（ピーク値）をTable 4にまとめた。また、経時変化については付録IIに実験ごとに示した。

4.3 PWR燃料実験

PWR燃料実験では、被覆管の温度は低く留まり変型の絶対量は最大でも4%とJM実験に比べて小さい。しかし、HBO-1実験では、被覆管の脆化により燃料の破損が生じている。この時の被覆管の周方向残留歪みは、1.5%（HBO-1実験と同じ発熱量で照射され破損を生じなかったHBO-3実験における周方向歪み）から2.5%（破損したHBO-1実験燃料の金相検査結果に基づく歪み）程度と見積もられている。

HBO-1実験では、パルス照射による燃料の破損は0.204秒に生じたと見られる。この時、燃料中心温度は約1000°Cに、被覆管内面温度は約300°C（表面は室温のまま）に達したと計算された（Fig.26）。また、燃料・被覆管のギャップはベース照射中の被覆管のクリープダウンにより殆ど無いため、被覆管はパルス照射初期からペレットとの接触により急速に変形する。被覆管歪みおよび応力の時間履歴をFigs.27, 28に示す。被覆管の周方向残留歪みは1.2%、最大応力はパルス照射直後に1000～1100Mpaに達したものと計算された。

HBO-1, 3条件におけるFRAP-T6の周方向残留歪みの予測値は、FPガスの膨張を考慮せず、変形モデルにRelocationを使うオリジナルのモデルによる計算では約0.12%、FPガスの膨張を考慮してRelocationモデルを使った計算では約0.45%となった。したがって、同実験解析におけるFPガス膨張の寄与は0.33%と見積もられる。Fig.29にRelocationモデルとGAPCONモデルによる周方向歪みを比較して示す。同図に示されるように、ガス膨張モデルに加えペレット変型モデルにGAPCONを使用した場合、残留歪みは約1.15%となった。つまり、この実験の解析においては残留歪みのうち0.7%がGAPCONモデルによるクラックの発生により生じたことになる。Fig.30に示した燃料内の半径方向の温度分布に見られるように、PWR燃料では半径方向での最高温度は、パルス照射からの時間の経過に伴って徐々に中心に移動しながら低下する。燃料中のクラック発生の効果を含む熱膨張量を半径方向の最高温度位置の半径の増加を基に計算するGAPCONモデル（Fig. 12参照）では、0.205～0.210s頃の外周部での温度ピークが高い時点での熱膨張を大きく評価する。Fig.29のGAPCONによる計算に見られるパルス照射直後の周方向全歪みのピークはこのためである。

HBO-1, 3燃料と同じ燃料棒から切り出した実験燃料を用いて、小さなパルス照射を行ったHBO-2実験（ピーク燃料エンタルピ37cal/g）では、被覆管最高温度は120°Cに留まり、周方向残留歪みも<0.41%と小さかった。計算では燃料温度はいずれの領域でも1100°Cに達せず、FPガスによる変形は計算されなかった。計算での周方向変形はペレットの熱膨張により0.9%に達したが、残留変形は0.12%に留まった。Table

4および付録2に結果を示す。

17×17型のHBO実験燃料に比べてやや太い14×14型で、燃焼度のやや低い燃料でパルス照射を行ったMH-3(燃焼度38.9GWd/tU)およびGK-1,2(燃焼度42.1GWd/tU)実験では、1~2%程度の被覆管残留歪みが観測されている。ピーク燃料エンタルピ67~93cal/gでパルス照射を行ったこれらの実験では、Table 2に示すように被覆管表面の最高温度は200~300°C程度に達し、周方向の残留歪みは1.0~2.3%に達した。FRAP-T6は周方向の残留歪みを0.25~0.77%と計算し、実験結果に比べ若干小さい値となった。Table 4および付録IIに結果を示すが、変形は主にペレットの熱膨張によりパルス照射と同時に発生している。

4.4 BWR燃料実験

燃焼度26GWd/tUの7×7型燃料棒をパルス照射したTS-4実験(ピーク燃料エンタルピ89cal/g)では、被覆管表面でのDNBは発生せず、表面温度は最高150°Cに留まった。また、実験燃料の被覆管の定常照射中のクリープダウンも小さく、燃料被覆管間のギャップ(P/Cギャップ)は初期の155μmから余り減少していなかった。パルス照射実験で燃料はPCMIによる軸方向の急速な伸び(0.41%)を示したが、周方向(直径)には有意な残留変形は認められなかった。

FRAP-T6による燃料および被覆管の温度履歴をFig.31に示す。被覆管の若干のクリープダウンを考慮してP/Cギャップを110μmとしたFRAP-T6による計算では、被覆管は周方向に0.3%の最大歪みを示すが(Fig.32)、被覆管の最大応力は500MPa程度に留まり(Fig.33)変形は弾性変形のみで、残留歪みは0となった。軸方向についても最大0.64%の歪みを計算したが弾性変形であり、実験結果(最大伸び0.41%)とほぼ一致する。文献[28]では、半径方向の燃焼度およびPuの分布を均一とし、パルス照射時の半径方向の出力ピーピングを1.1程度と非常に低く見積もった計算を行った。しかし、熱膨張およびクラック発生計算における追加のRelocationを0とした変形モデルを用い、P/CギャップとしてRelocationを含む見かけのギャップ70μmを用いているため、大きな半径方向出力ピーピングとGAPCONモデルによりペレットの熱膨張を大きく計算した本解析と、見かけ上同様の結果となっている。

5. まとめと考察

照射済燃料実験で測定されている大きな周方向残留周方向歪を説明するため、燃料中に蓄積されたFPガスによる変型モデルをFRAP-T6コードに導入した。この結果、特に被覆管温度が上昇し強度が急速に低下したJM実験では、FPガスの膨張により被覆管が数パーセント膨張した実験結果が妥当に模擬できた。これらの計算でFPガスによる変形は、パルス直後の燃料ペレットの熱膨張に伴うPCMIによる変形にやや遅れて始まるものと計算された。被覆管の降伏応力が計算で使用した値に比べて2/3程度と小さかった場合、FPガスによる変形がパルス直後から発生するものと考えられるが、ガス圧による応力は変形により大きく緩和される。したがって、いずれにしても変形は被覆管温度の上昇に伴ってすすみ、変形速度はパルス直後の燃料の熱膨張によるPCMIによる変形と比べて遙かにゆっくりであったものと評価される。本解析では、実測値によりMATPROの被覆管強度を修正して用いたが、修正に用いた実測値の歪み速度は、対象としている変形に比べて小さいので被覆管強度に関してはさらに確認が必要であろう。また、計算で得られた変型量は高温での被覆管の強度に強く依存した。従って、被覆管温度（特に最高値）および対応する被覆管強度の評価が重要であることが分かった。

他方、PWR燃料では、特に高燃焼度領域においてペレット外周部にPuが局所的に蓄積され、核分裂性物質および燃焼度が高い領域が生成される。このため反応度事故時においては、この部分が瞬時に高い出力密度で加熱される。したがってPWR燃料実験では、半径方向の出力ピーピングが小さいJM燃料に比べて、小さい出力条件で局所的な粒界割れが発生し、被覆管の大きな変型をもたらす計算結果となった。また、PWR燃料においては、ガス膨張モデルとGAPCONモデルを使用した場合、燃料の割れを考慮した熱膨張によって比較的大きな応力が被覆管に作用し、HBO-1, 3実験条件において約1.2%の残留歪みが計算された。他方、FPガスの膨張によても、被覆管の降伏応力を越える同程度の応力が発生することが計算された。しかしながら、ガス圧による応力は被覆管の変形により大きく緩和されるため、残留変形に対するガス圧の寄与は約1/3と小さいものと計算された。HBO-1,3 実験では、燃料外周部200 μm におけるリム層の形成と、リム層ではFPガスは100%粒界に存在していることを仮定した結果、放出ガス量、変形量共に計算結果は実験値をやや過小評価した。さらに、低発熱量のHBO-2実験においては、計算上粒界割れを起こし変形に寄与したFPガスの量は0%となった。これは、実験で得られたFPガスの放出量約20%を大きく下回る。このことは、この燃料でのFPガス放出のしきい温度が1100°Cよりも（FRAP-T6によるHBO-2実験での燃料外周部の最高温度の評価値850°Cよりも）低いことを示すものと考えられる。本研究では、リム部を結晶が微小化し、FPガスが

全て粒界に移動した領域と仮定し、リム部においてもしきい温度がその他の領域と変わらないものとしている。しかし、高燃焼度燃料を用いたHBO実験において、ガス放出が低めに計算された結果は、しきい値が燃焼によって低下する可能性を示していると考えられる。特に、局部的に燃焼度が高く組織変化を起こしているリム部では、さらに低下する可能性が高いものと考えられる。今後は、しきい温度が、ガス量（燃焼度）あるいは組織変化に如何に依存するかを実験的に研究する必要がある。

BWR燃料実験TS-4では、パルス照射により被覆管はペレットにより急速に軸方向に伸ばされ、最大0.41%の過渡歪みを記録した。しかし、被覆管表面でDNBは発生せず、周方向の変形も弾性範囲であり有意な残留歪みは観測されなかった。照射済BWR燃料ではパルス照射時の半径方向出力分布はPWR燃料とほぼ同じであるが、Figs. 1,3に示されるように被覆管の変形挙動は、JM実験と類似している。この結果は、BWR燃料では定常照射中の被覆管のクリープダウンがほとんど無いため、パルス照射以前のP/Cギャップが十分存在していることによるものと考えられる。つまり、半径方向の出力分布と同様に、ペレット被覆管間の残留ギャップが燃料の過渡挙動に重要であることを示している。

実験および解析による変形挙動をTable 5にまとめた。解析結果は伸び挙動を含めて実験値と妥当な一致を示していることが分かる。本研究で最も注目した周方向の残留歪みについては、Fig. 34に実験結果と解析結果をあわせて示す。これらの解析では、燃料内に生成されたFPガスの10~22%(HBO-2実験を除く)程度が、変型に寄与したと仮定している。この仮定は、実験後測定したパルス照射によるFPガスの追加放出量にほぼ対応しており大まかには妥当であると思われる。しかしながら、結晶粒界割れが生じ／結晶粒界のFPガスが変形に寄与するしきい温度、結晶粒界インベントリ等については今後実験的に確認してゆく必要がある。粒界割れのしきい値は、前述のように、燃焼度および組織変化に依存するものと見られ、詳しい研究が必要と思われる。結晶粒界割れについては、被覆管の拘束を除いた条件での低発熱量でのパルス照射実験により粒界の変化を観察する実験を、粒界インベントリの測定については酸化雰囲気での低温アニール実験により、粒界ガスを選択的に放出させ評価する実験を、それぞれ実施することを検討している。

本解析では、変形計算に当たり被覆管温度として実測値を補正したものを使用した。しかし、NSRR実験の範囲を超えた予測計算を行う場合には、被覆管温度の推定精度が変形計算に大きく影響することが明らかとなった。NSRRにおける照射済燃料実験においては、被覆管温度が未照射燃料実験に比べて低く留まっている。本研究においても、燃料の膨れに伴う熱伝導率の低下は予備的に考慮しているが、燃焼による効果、被覆管の表面状態の変化による表面熱伝達の変化の効果も含めて詳細な検討が必要である。

6. 結論

燃料棒の事故時温度・変形挙動を計算するFRAP-T6 コードに結晶粒界のFPガスによる被覆管の変形モデルおよび燃料熱膨張モデルGAPCONを追加し、NSRRで行った照射済燃料のパルス照射実験の解析を行った。これらの実験の計算の結果は、実験結果を比較的良く再現し、照射済燃料の反応度事故挙動においてFPガスが燃料の変形に強く影響することが示された。また、解析の結果から実験結果は以下のように理解できることができることが分かった。

- 1) 被覆管温度が上昇し、燃料全体が結晶粒界割れのしきい温度以上に上昇したと見られるJM-4実験では、15%程度のFPガスにより5%程度の残留歪みを伴う被覆管の直径の増加が生じることが計算により確認された。変形はパルス照射直後のペレット熱膨張によるPCMIにやや(0.05s程度)遅れて始まり、約0.2~0.3s間続いたものと思われる。
- 2) PWR燃料においては、パルス照射時に燃料外周部での出力密度が高くなるため、またその部分でのFPガスのインベントリも大きいため、FPガスの変形に及ぼす効果は大きい。しかしながら、1%以上の残留変形を記録したHBO-1, 3実験の計算では、FPガスによる残留変形は全体の1/3程度に留まった。残りの変形は、GAPCONモデルによって考慮した不均一な温度分布に伴うクラックの発生による熱膨張量の増加のために生ずるものと計算された。
- 3) TS-4実験に用いた照射済BWR燃料は、照射済PWR燃料が定常照射終了時に被覆管のクリープダウンによりペレット・被覆管間のギャップがほとんど無いのとは異なり、十分なギャップ(100μm以上)があった。このため、半径方向出力分布(高燃焼度PWRに比べてやや小さい)・燃料ペレットの変形量等は照射済PWR燃料とは大きくは異なるが、被覆管の変形量は小さく弾性変形に留まった。

上記の変形挙動は、結晶粒界割れのしきい温度、結晶粒界インベントリを仮定して評価した。これらの仮定は、実験で観測されたFPガスの放出量にほぼ対応するガスが変形に寄与したと仮定するのとほぼ等価であるが、個々の値は燃焼条件の違いに依存して変化するものと考えられる。今後は、被覆管の高温あるいは高歪み速度での強度を含めて、これらの仮定について個別効果実験等により研究を進める必要がある。

謝辞

本研究の基礎であるNSRR照射済燃料実験の実施に当たっては、NSRR管理室・ホット試験室・材料試験炉部・分析センタの協力を頂いたことを感謝します。また、本研究を指揮する石島清見反応度安全研究室長、藤城俊夫原子炉安全工学部長に感謝します。FRAP-T6の改造を始めるに当たり米国INELのL. J. Seifken氏に貴重なコメントを頂きました。

参考文献

- [1] T. Nakamura et al. "Boiling Water Reactor Fuel Behavior at Burnup of 26GWd/tonne U under reactivity-Initiated Accident Conditions," Nucl. Technol. 108, 45, 1994.
- [2] T. Fuketa et al. "Behavior of 50MWd/kg PWR Fuel Under a Simulated RIA Condition," Nucl. Eng. Dsgn. submitted.
- [3] T. Fujishiro et al. "Transient Fuel behavior of Preirradiated PWR Fuels under Reactivity Initiated Accident Conditions," J. Nucl. Mater., 188, 162, (1992).
- [4] K. Ishijima, S. Tanzawa, T. Fuketa and T. Fujishiro, "Behavior of Preirradiated Fuels under Simulated RIA Conditions", Proceedings of the Intl. Topical Meeting on Safety of Thermal Reactors, Portland, ANS, Oregon U.S.A. July 1991.
- [5] L. J. Siefken, C. M. Allison, M. P. Bohm and S. O. Peck, "FRAP-T6: A ComputerCode for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods," NUREG-CR-2148, EGG-2104, 1981.
- [6] D. L. Hagrman, G. A. Reymann and R. E. Mason, "MATPRO-Version 11 (Revision 2) A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water reactor Fuel Rod Behavior," NUREG/CR-0479, TREE-1280 rev.2, 1981.
- [7] C. R. Hann et al. BNWL-1778, 1973.
- [8] K. Ishijima, "Measurement and Preliminary Analysis on Transient Cladding Deformation during Reactivity Initiated accident Conditions," J. Nucl. Sci. Technol. 22, 2, 81-92, 1985.
- [9] T. Nakamura, M. Yoshinaga, M. Sobajima, T. Fujishiro, O. Horiki, T. Kikuchi, T. Yamahara and Y. Ichihashi, "Experimental Data Report for Test TS-1, Reactivity Initiated Accident Test in NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M 91-217, Jan. 1992.
- [10] T. Nakamura, M. Yoshinaga, M. Sobajima, T. Fujishiro, S. Kobayashi, T. Yamahara, T. Sukegawa and T. Kikuchi, "Experimental Data Report for Test TS-2, Reactivity Initiated Test in NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M 93-006, Feb. 1993.

- [11] T. Nakamura, M. Yoshinaga, M. Sobajima, T. Fujishiro, S. Kobayashi, T. Yamahara, T. Sukegawa and T. Kikuchi, "Experimental Data Report for Test TS-3, Reactivity Initiated Test in the NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M 93-183, Sep. 1993.
- [12] T. Nakamura, M. Yoshinaga, M. Sobajima, T. Fujishiro, S. Kobayashi, T. Yamahara, T. Sukegawa and T. Kikuchi, "Experimental Data Report for Test TS-4, Reactivity Initiated Test in the NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod", JAERI-M 94-030, March. 1994.
- [13] T. Nakamura et al. "Experimental Data Report for Test TS-5, Reactivity Initiated Test in NSRR with Pre-irradiated BWR Fuel Rod," JAERI-Research 95-080, (1993).
- [14] K. Yanagisawa et al. "Pre-pulse Irradiation Examination, NSRR Pulse Irradiation and Post-pulse Irradiation Examination of MH-1 Fuel Rod," JAERI-M 91-220 (1991).
- [15] K. Yanagisawa et al. "Pre-pulse Irradiation Examination, NSRR Pulse Irradiation and Post-pulse Irradiation Examination of MH-2 Fuel Rod," JAERI-M 92-015 (1992).
- [16] H. Sasajima et al. "Behavior of Irradiated PWR Fuel Under A simulated RIA Condition [Results of NSRR Test MH-3]," JAERI-Research 95-087 (1995).
- [17] H. Sasajima et al. "Behavior of Irradiated PWR Fuel Under A simulated RIA Condition [Results of NSRR Test GK-1]," JAERI-Research (in preparation).
- [18] Y. Mori et al. "Behavior of Irradiated PWR Fuel Under A simulated RIA Condition [Results of NSRR Test HBO-2]," JAERI-Research (in preparation).
- [19] K. Ishijima, S. Tanzawa, T. Fuketa, K. Homma and T. Fujishiro, "Experimental Data Report for Test JM-1, Series of Reactivity Initiated Accident Test in NSRR with Fuel Rod Pre-irradiated in JMTR", JAERI-M 91-127, Aug. 1991.
- [20] S. Tanzawa, T. Fuketa, K. Homma, K. Ishijima and T. Fujishiro, "Experimental Data Report for Test JM-2, Series of Reactivity Initiated Accident Test in the NSRR with Fuel Rod Pre-irradiated in the JMTR", JAERI-M 91-157, Sep. 1991.

- [21] T. Fuketa, H. Sasajima, Y. Mori, K. Homma, S. Tanzawa, K. Ishijima, T. Fujishiro, S. Kobayashi, T. Kikuchi and H. Sakai, "Behavior of Pre-irradiated Fuel under a Simulated RIA Condition [Result of NSRR Test JM-3]", JAERI-Research 94-006, July 1994.
- [22] T. Fuketa, H. Sasajima, y. Mori, K. Homma, S. Tanzawa, K. Ishijima, S. Kobayashi, T. Kikuchi and H. Sakai, "Behavior of Pre-irradiated Fuel under a Simulated RIA Condition [Result of NSRR Test JM-4]", JAERI-Research 95-013, July 1995.
- [23] T. Fuketa et al. "Behavior of Pre-Irradiated Fuel Under A simulated RIA Condition [Results of NSRR Test JM-5]," JAERI-Research 95-078 (1995).
- [24] P. E. MacDonald, S. L. Seiffert, Z. R. Martinson, R. K. McCardell, D. E. Owen and S. K. Fukuda, "Assessment of Light-Water-Reactor Fuel Damage During a Reactivity-Initiated Accident", Nuclear Safety, Vol. 21, No. 5, September-October 1980.
- [25] 本間功三、石島清見、藤城俊夫 "照射済燃料を用いたSPERT及びPBF・RIA実験における燃料破損挙動の再評価," JAERI-M 92-044, 1992.
- [26] 大西信秋、石島清見、斎藤伸三 "軽水炉の事故時燃料挙動解析コードNSR-77," JAERI-M 82-050, 1982.
- [27] J. Rest and S. A. Zawadzki, "FASTGRASS: A Mechanistic Model for Prediction of Xe, I, Cs, Te, Ba, and Sr Release from Nuclear Fuel under Normal and Severe-Accident Conditions," NUREG/CR-5840, TI92 040783, 1992.
- [28] 中村武彦、室伏昭、細山田龍二 "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," JAERI-M 94-031, 1994.
- [29] Y. Sudo, J. Nucl. Sci. Technol. 17, 7, 516 (1980).
- [30] Y. Mishima et al. "Proving Test on Reliability for BWR Fuel Assemblies," J. At. Energ. Soc. Japan, 29, 2, 90, 1987(in Japanese).

[31] Y. Mishima et al. "Proving Test on Reliability for PWR Fuel Assemblies," J. At. Energ. Soc. Japan, 31, 10, 1129, 1989 (in Japanese).

[32] R. W. Garner et al., "Gap Conductance Test Series-2 Test Results Report for Tests GC 2-1, GC 2-2 and GC 2-3," NUREG/CR-0300, TREE-1268, 1980.

[33] T. Tsuruta and T. Fujishiro, "Evaluation of Thermocouple Fin Effect in Cladding Surface Temperature Measurement during Film Boiling," J. Nucl. Sci. Technol. 21, 7 515-527, 1984.

[34] M. Uchida and H. Saito, "RODBURN: A code for calculating Power Distribution in Fuel Rods," JAERI-M 93-108, 1993 (in Japanese).

[35] K. Tsuchihashi, Y. Ishiguro, K. Kaneko and M. Ido, "Revised SRAC Code System," JAERI-1302, 1986.

[36] P. H. Elder, D. S. Cox, L. W. Dickson and R. V. Murphy, "New Post-Irradiation Examination Techniques at Chalk River Laboratories: Gamma Tomography and Grain-Boundary-Inventory Measurements on Irradiated Fuel," IAEA Technical Committee Meeting on "Recent Development on Post-Irradiation Examination Techniques for Water reactor Fuel," Cadarache, France 17-21 October 1994.

[37] M. E. Cunningham, M. D. Freshley and D. D. Lanning, "Development and characteristics of the rim region in high burnup UO₂ fuel pellets," J. Nucl. Mater. 188, 19-27, 1992.

Table 1 Specifications of irradiated test fuel rods for NSRR pulse irradiation tests

	BWR	PWR		JM
Type	7x7 (7B)	17x17 (17P)	14x14 (14P)	14x14 (14P)
Cladding Material	Zry-2	Zry-4	Zry-4	Zry-4
Initial Enrichment, %	2.79	3.2~3.4	2.6~3.4	10, 20
Burnup, GWd/tU	26	39~ 50	38.9~42.1	13~ 26
Initial Fuel Diameter, mm	12.37	8.05-8.19	9.29	9.29
Initial Cladding Diameter, mm	14.3	9.5	10.72	10.72
P/C gap, μm	70~155	<10	~20	~80
Cladding oxidation μm	<6 (Nodular: \leq 63)	15-50	<30	0
Radial Burnup Peaking*	1.72	~2.2	~2.2	1.2
Radial Power Peaking**	2.27	2.4~3.0	2.4~3.0	1.20
Test Series (References)	TS (1, 9~13)	MH, GK (2, 18)	HBO (3, 14~17)	JM (4, 19~23)

*Estimated radial burnup distribution by RODBURN code.

**Estimated power peaking by SRAC code for pulse irradiation at the NSRR.

Table 2 Test conditions and results of the NSRR irradiated fuel tests

Test No.	Burnup (GWd/tU)	Peak Fuel Enthalpy (cal/g)	Cladding Surface Peak Temperature (°C)	Cladding Residual Hoop Strain (%)	Cladding Peak Elongation (%)	Fuel Stack Peak Elongation (%)	FGR** (%)
MH-3	38.9	67	202	1.68(max.) 1.0(T/C)*	0.91	0.97	4.5
GK-1	42.1	93	300	2.34 1.2(T/C)*	0.95	1.05	14
GK-2	42.1	90	280	1.05	0.22	0.59	7.8
HBO-1	50.4	73	400	1.5	nm	nm	22.7
HBO-3		74					
HBO-2	50.4	37	120	0.41(max.)	0.36	0.42	17.7
TS-4	26	98	150	<0.4	0.41	0.56	15±5
JM-4	21.2	168	780	6.5-3.5 6.0(T/C)*	nm	nm	17*** (JM-8)
JM-5	25.7	158	330	3.0(max.) 2.1(T/C)*	nm	nm	17*** (JM-8)

nm: not measured

* Strains at thermocouple locations where cladding temperature was measured.

** FGR: Fraction of fission gas release

*** Reference value in Test JM-8 in which a test fuel was pulse irradiated in a close condition to Test JM-4.

Table 3 Assumptions and conditions in FRAP-T6 simulations for the NSRR tests

Test No.	Burnup (GWd/tU)	Radial Power Peaking	Cladding Average Temp.* (°C)	P/C Gap ** (μm)	Gap Gas Pressure ** (MPa)	Threshold Temp. *** (°C)	GB Pore**** (%)	GB FGF***** (%)
MH-3	38.9	2.7	340	20	5.218	1100	2	15
GK-1	42.1	2.4	520	18	5.218	1100	2	15
GK-2	42.1	2.4	410	18	0.101	1100	2	15
HBO-1	50.4	2.7	470	5	0.101	1100	2	25
HBO-3								[100]
HBO-2	50.4	2.7	250	5	5.167	1100	2	25
TS-4	26	2.27	150	110	1.1	1100	2	15
JM-4	21.2	1.21	950	95	0.1	1100	2	15
JM-5	25.7	1.21	550	95	0.1	1100	2	15

* Peak temperature during the tests.

** After steady state irradiation prior to the pulse irradiation tests.

*** Threshold temperature for grain boundary separation.

**** Fraction of pores in GB (Grain boundary), (volume of GB pore)/(fuel volume).

***** FRF: Fission gas fraction, values in [] indicate the fraction in the rim region of 200μm wide at the fuel periphery.

Table 4 FRAP-T6 simulation results of the NSRR irradiated fuel tests

Test No.	Fuel Center Peak Temperature (°C)	Fuel Surface Peak Temperature (°C)	Cladding Residual Hoop Strain (%)	Cladding Peak Elongation (%)	Fuel Stack Peak Elongation (%)	FGR*
MH-3	770	970	0.25 [0.95]*	0.72	0.81	10.5
GK-1	1040	1150	0.77 [1.4]*	1.07	1.15	22.0
GK-2	1000	1520	0.75 [1.5]*	1.04	1.11	19.3
HBO-1	950	1600	1.16	1.01	1.07	18.9
HBO-3			[1.9]*			
HBO-2	720	850	0.12 [0.9]*	0.68	0.75	0.0
TS-4	1080	1860	0.0 [0.3]*	0.64	1.32	10.6
JM-4	2020	2130	5.2 [6.1]*	1.09	2.95	15.0
JM-5	1800	1750	1.23 [1.85]*	2.22	2.44	15.0

* Values in [] indicate peak hoop strains including elastic deformation during the tests.

* FGR: Fraction of fission gas release which originally located at grain boundaries and contributed to the cladding straining.

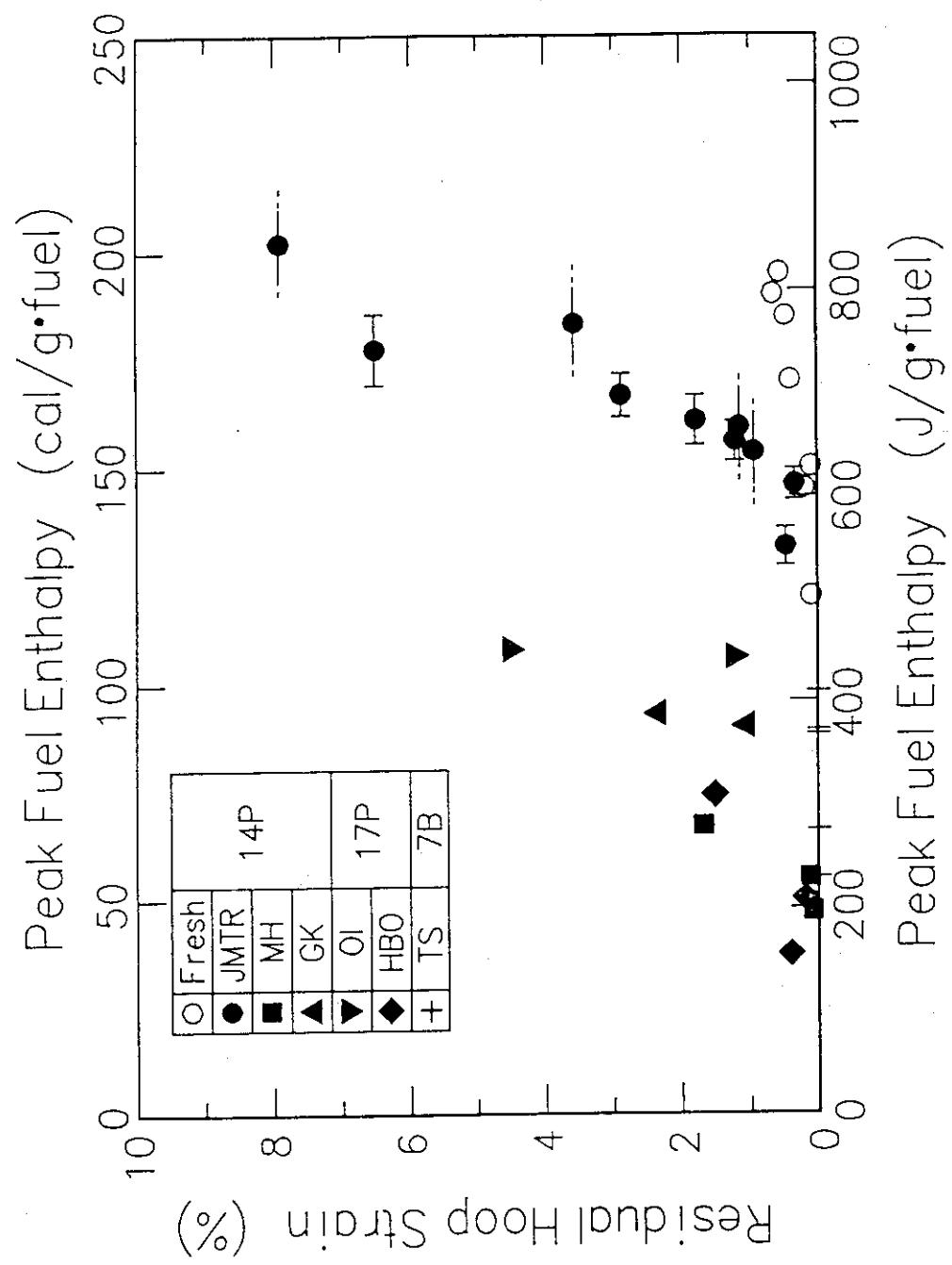


Fig. 1 Cladding residual hoop deformation in the NSRR tests. Results of four types of test fuel rods, i.e. fresh, JMTR, PWR(JMTR), PWR(MH, GK, OI, HBO) and BWR(TS) are assembled as a function of peak fuel enthalpy by the pulse irradiations.

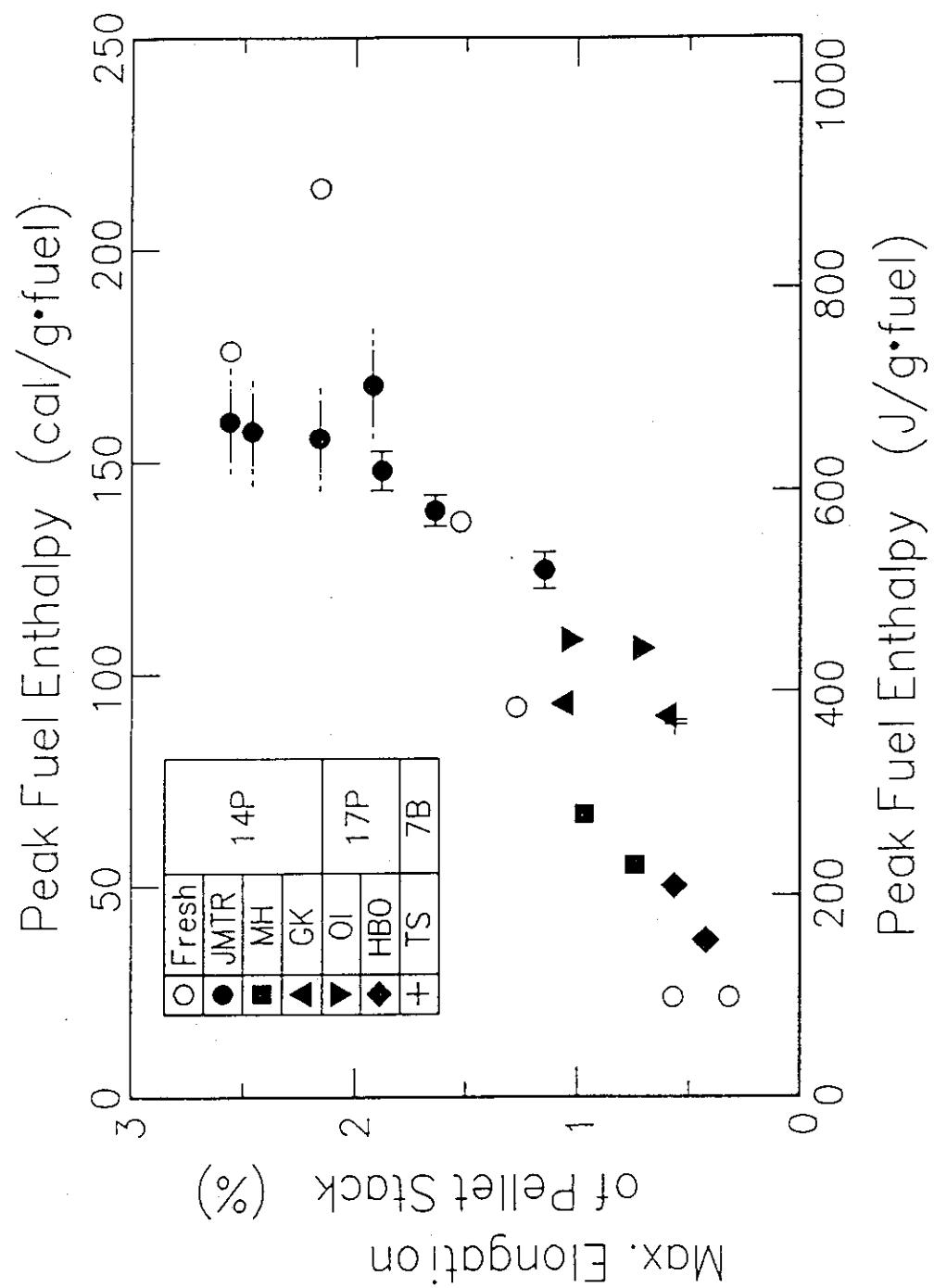


Fig. 2 Fuel stack peak elongations in the NSRR tests.

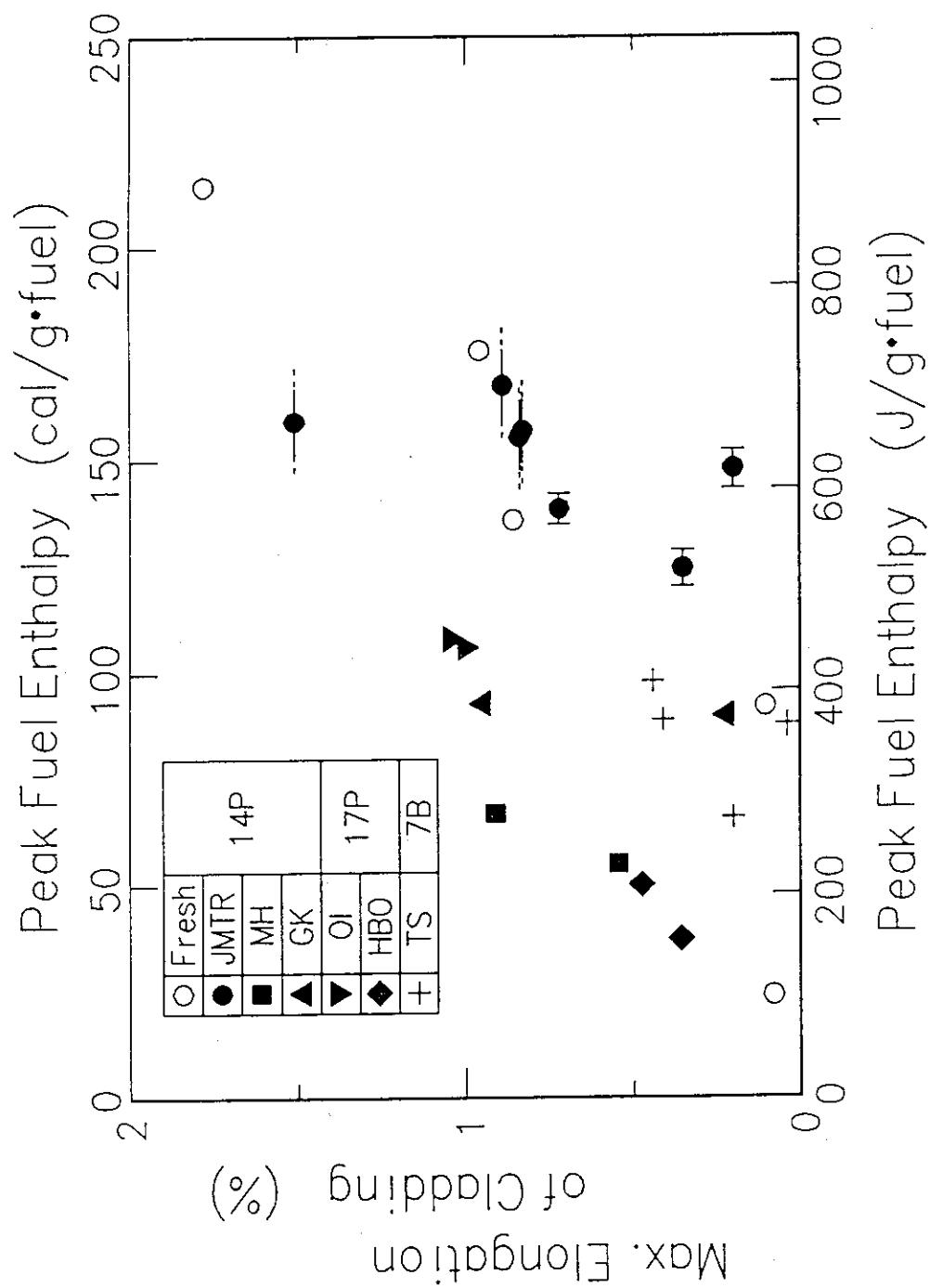


Fig. 3 Cladding peak elongations in the NSRR tests.

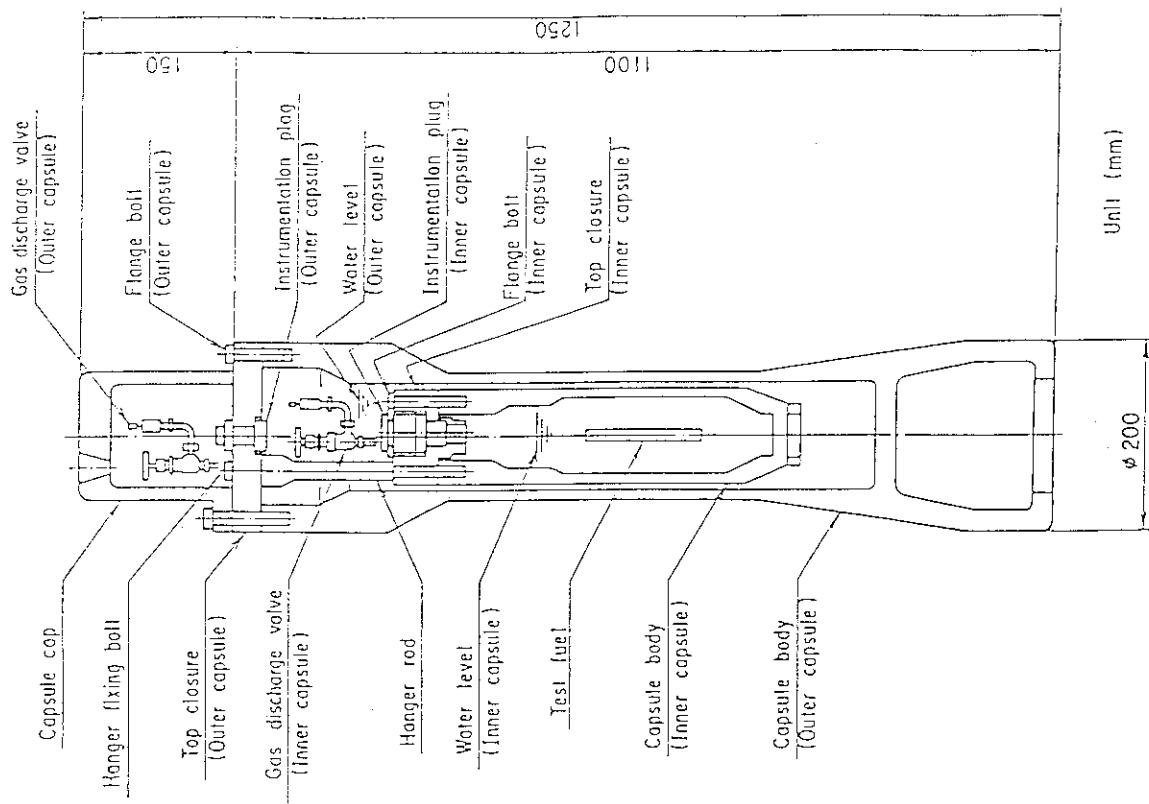


Fig. 4 Test capsule for NSRR pulse irradiation tests of irradiated fuels.

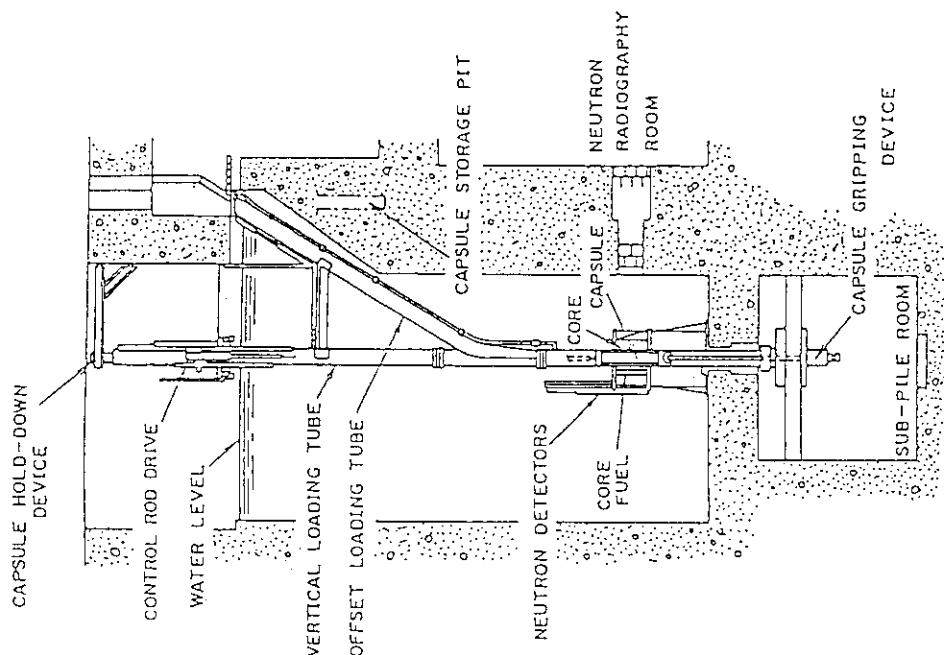


Fig. 5 NSRR reactor configuration.

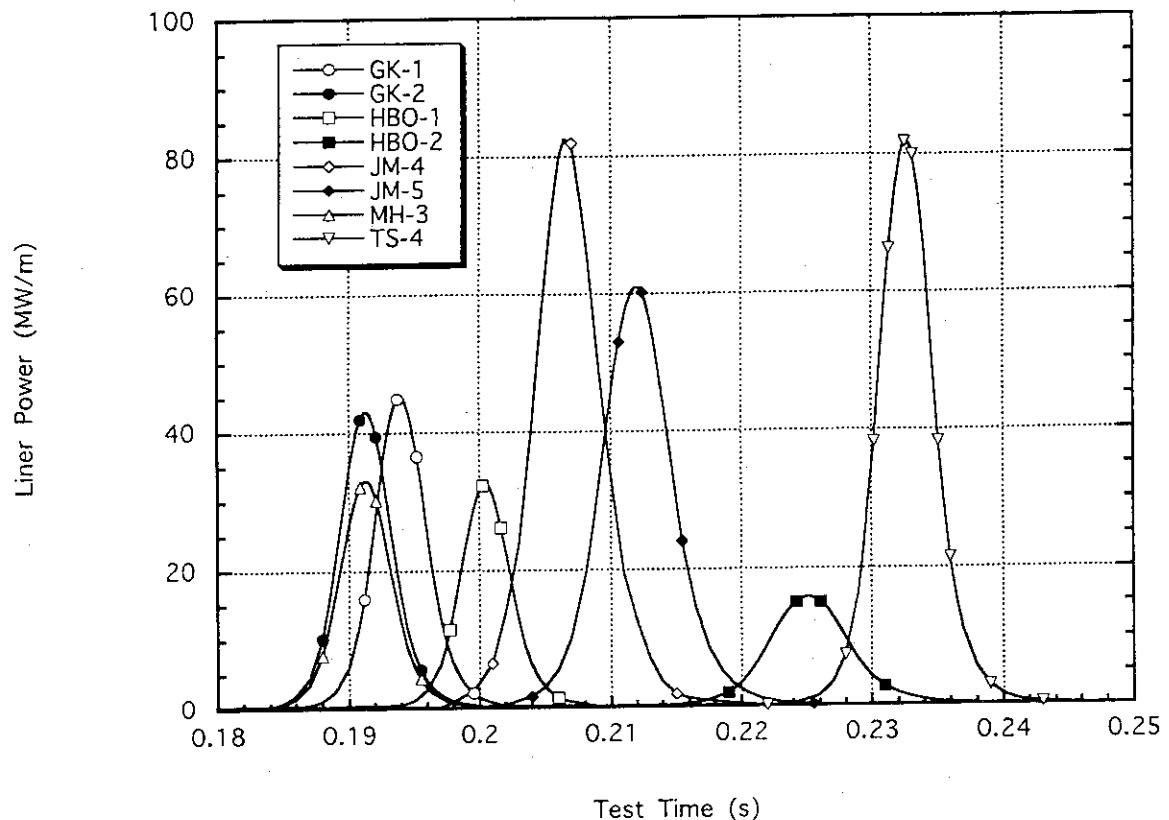
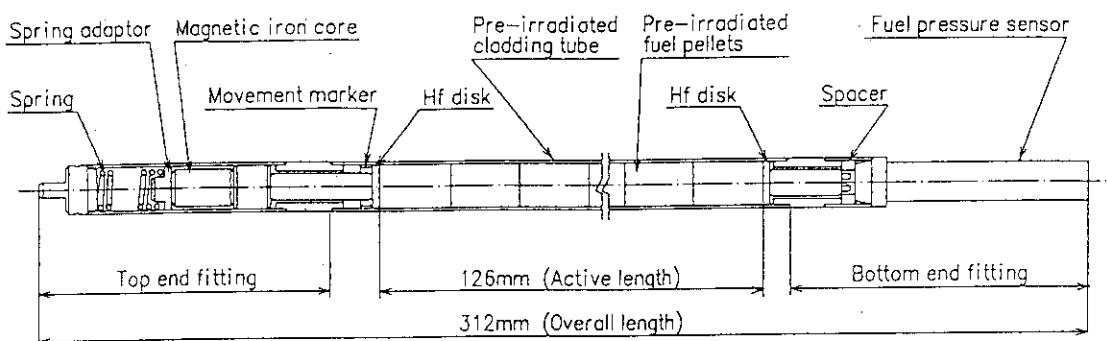
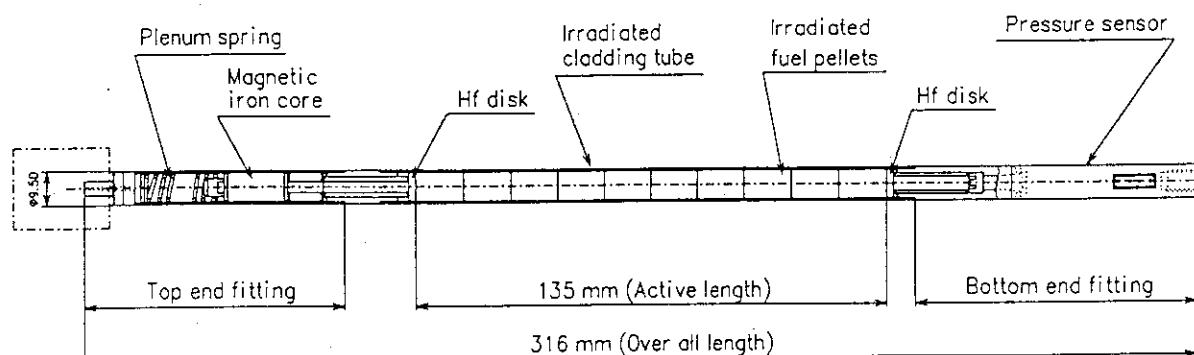


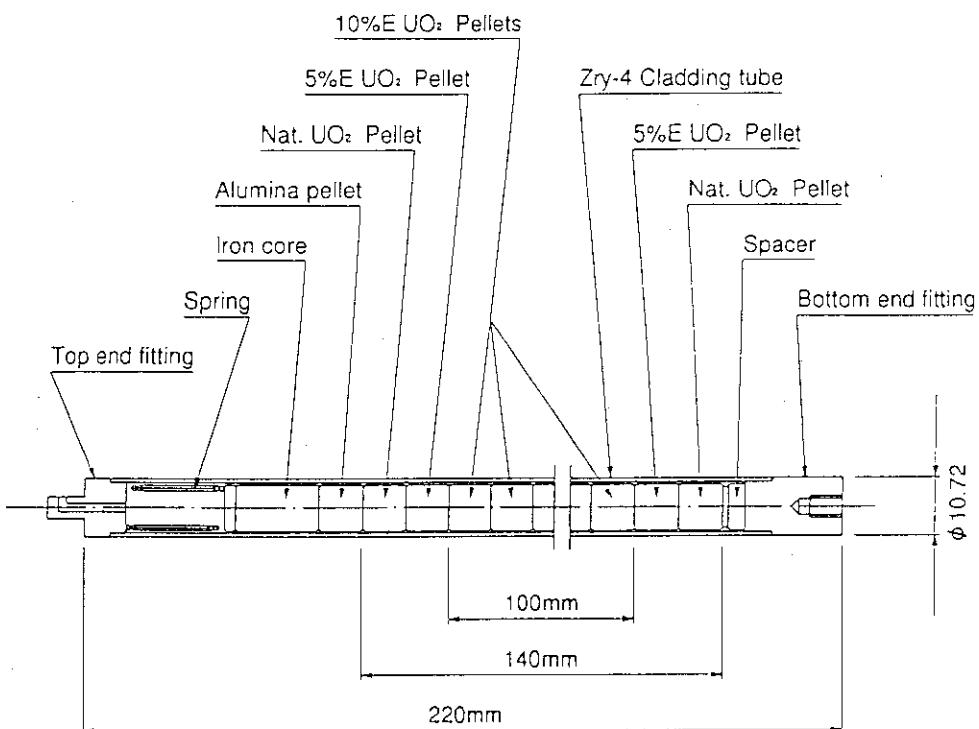
Fig. 6 Power pulsings for NSRR tests. Thermal energy of 50 ~ 200 cal/g proportional to the reactor power is subjected to the test fuel by the pulsings.



(a) BWR fuel (TS tests)

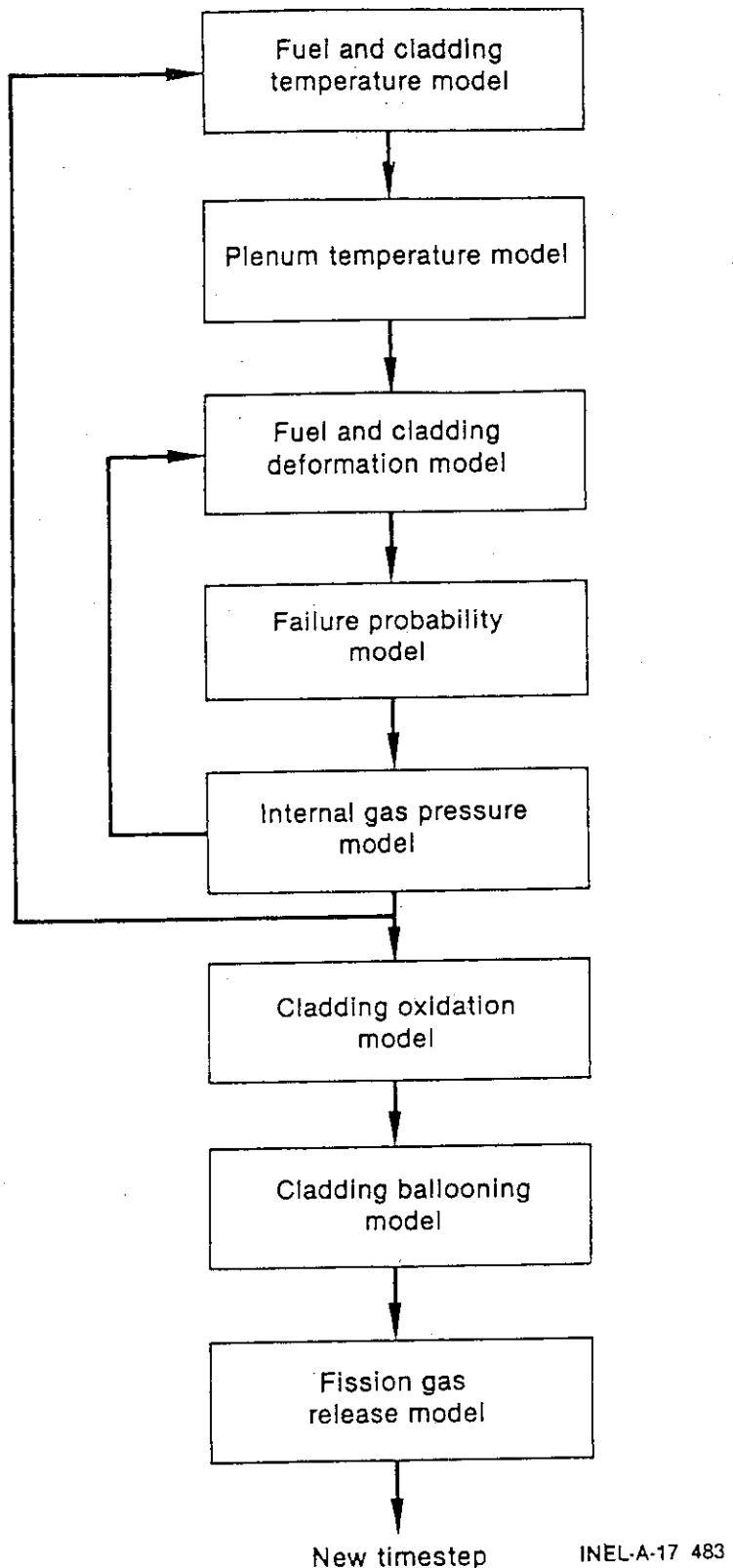


(b) PWR fuel (HBO tests)

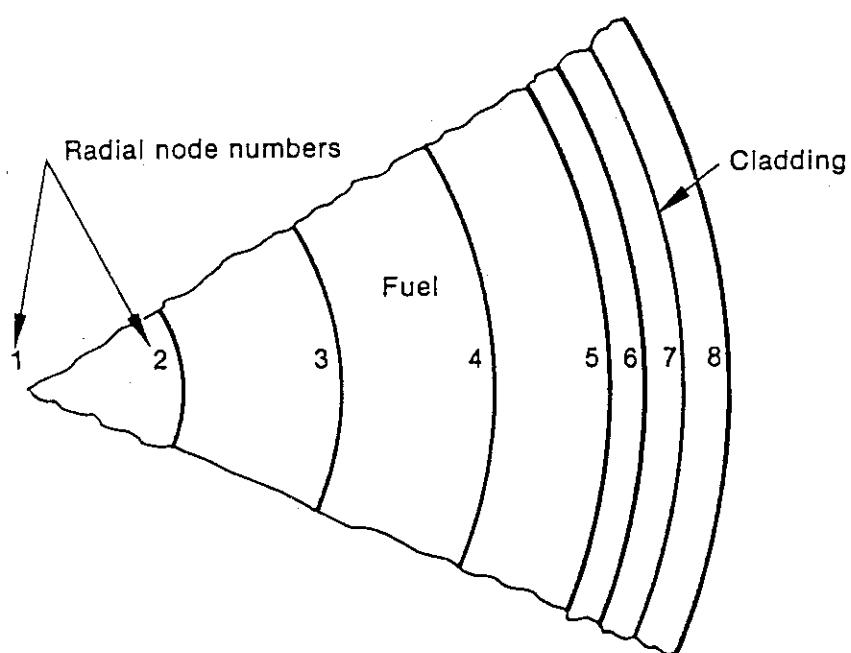
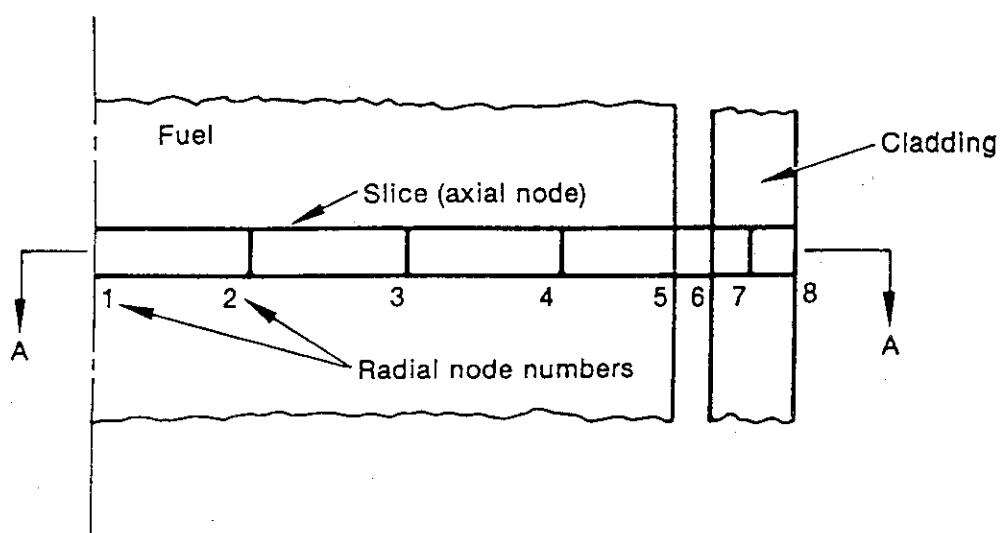


(c) JM fuel (JM tests)

Fig. 7 Irradiated test fuel rod configuration for the NSRR tests.



[5]
Fig. 8 Flow of calculation in FRAP-T6 (Order of general models).



Section A-A

INEL-A-17 616

Fig. 9 Nodeing in FRAP-T6 calculation. [5]

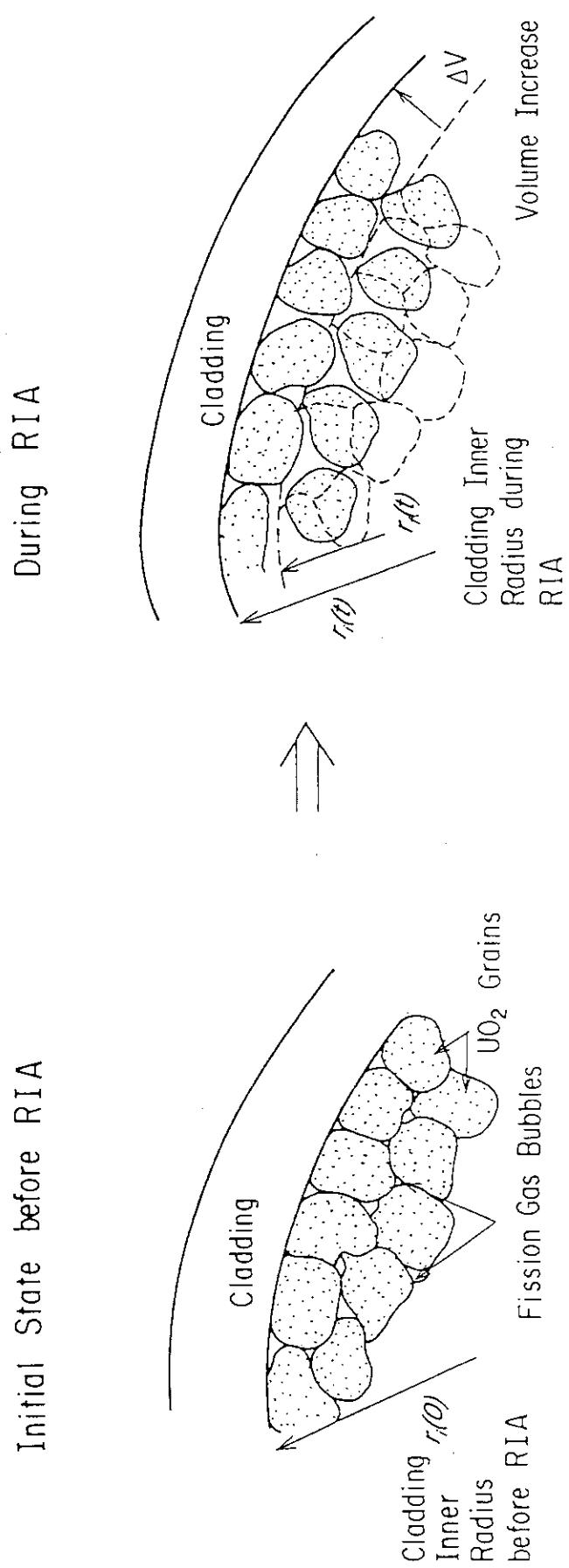


Fig.10 Concept of fission gas induced deformation model

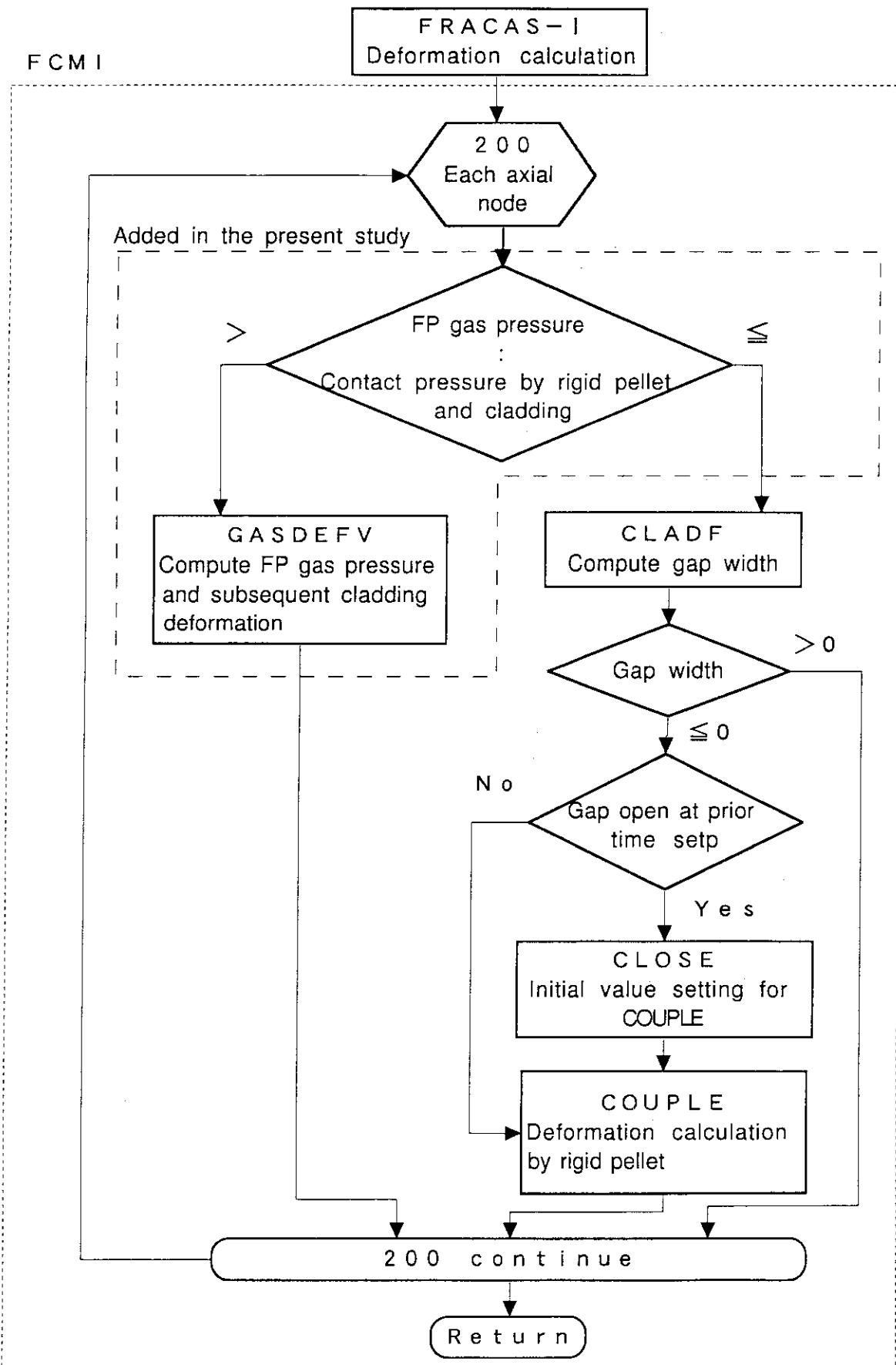
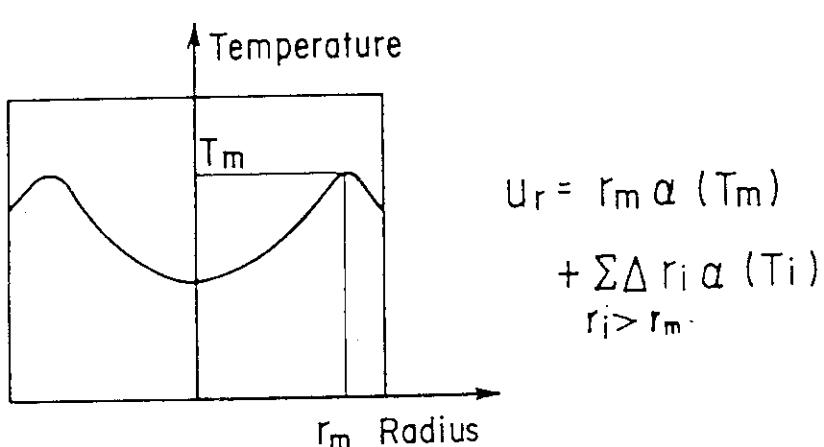
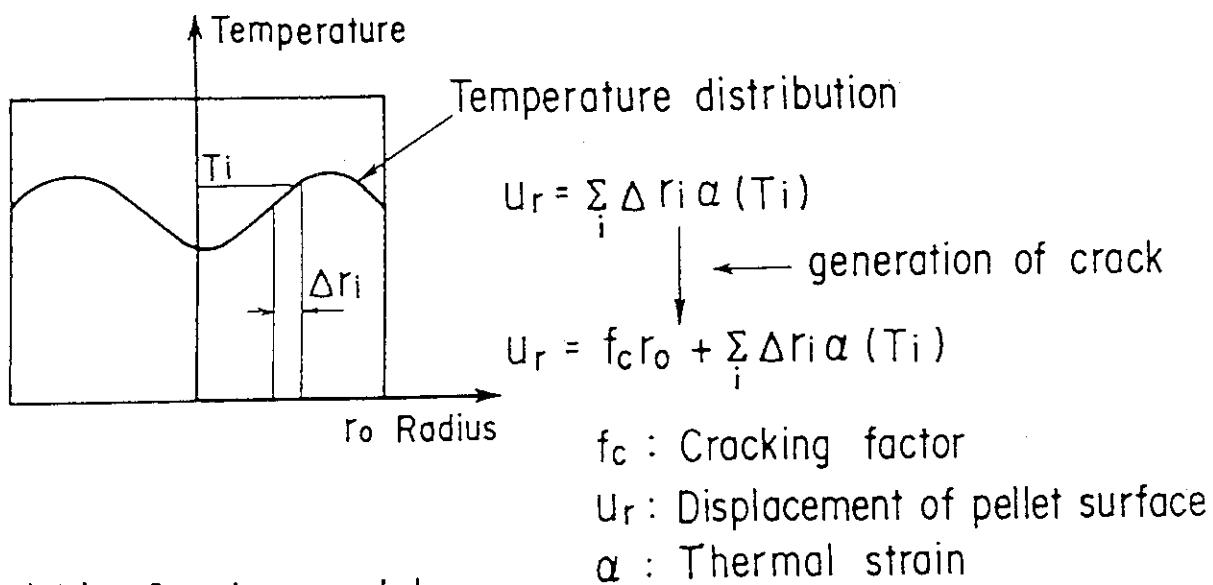


Fig. 11 Flow of deformation calculation by fission gas in FCM1 subroutine for



(B) Gapcon model

Fig. 12 Fuel cracking models, Crack and GAPCON, in FRAP-T6[8].

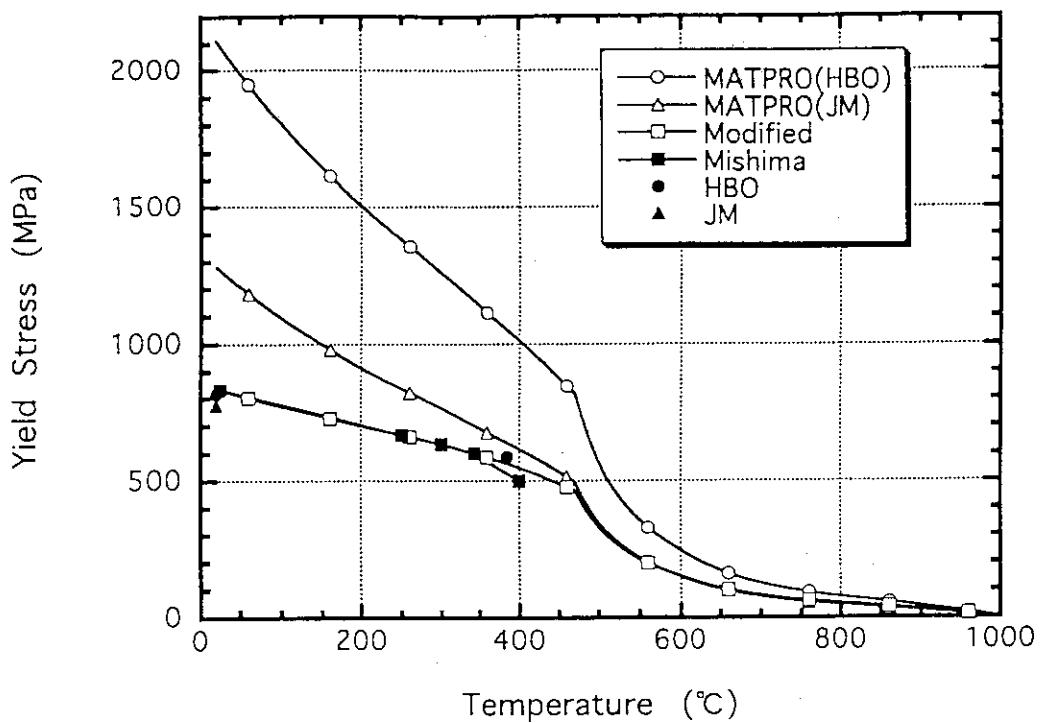


Fig. 13 Cladding yield stress for JM and HBO test fuels by MATPRO at strain rate of about 10^{-4} (1/s).

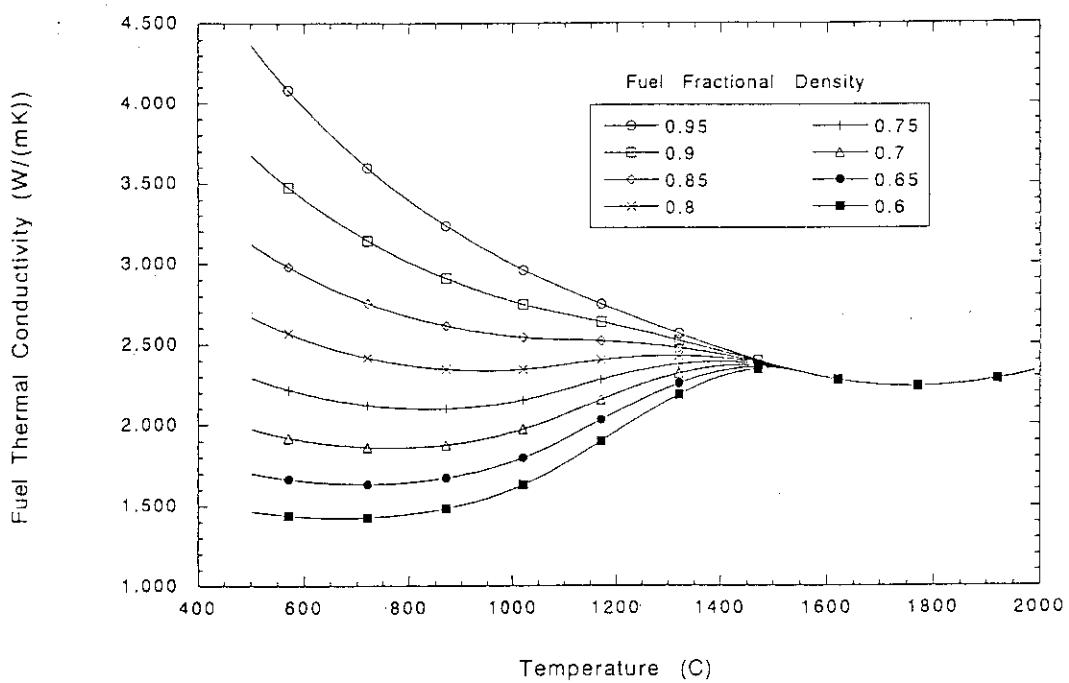


Fig. 14 Thermal conductivity as a function of fuel density modeled in MATPRO ver. 11.

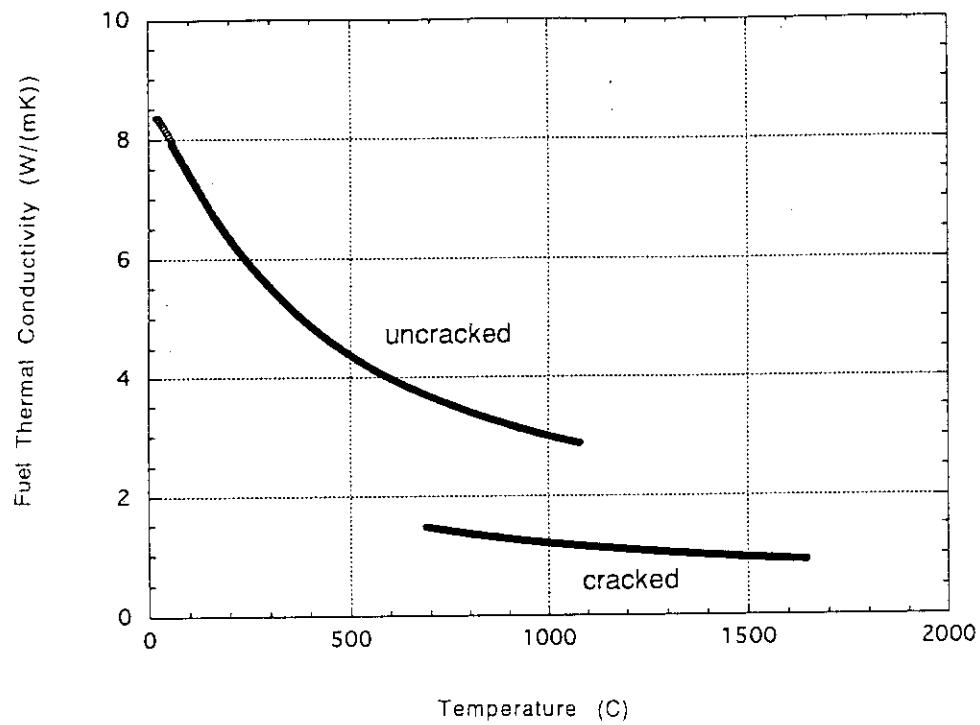


Fig. 15 Thermal conductivity as a function of void fraction modeled in the FRAP-T6 cracking model.

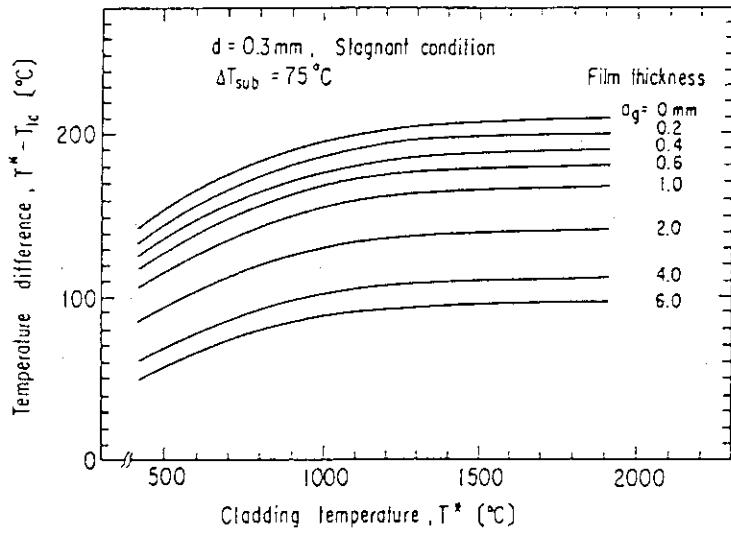


Fig. 16 Thermocouple fin effect[33]. Calculated temperature drop as a function of temperature and film thickness in the film boiling condition is shown.

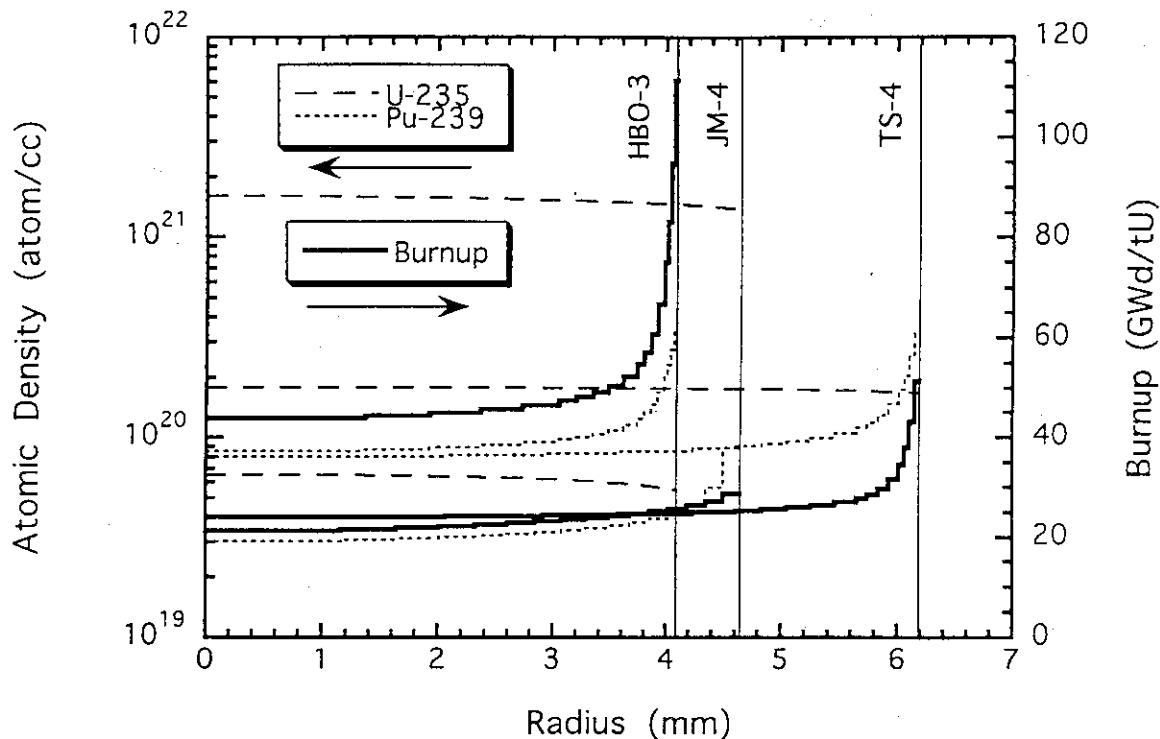


Fig. 17 Examples of radial burnup and fissile profiles in various test fuels.

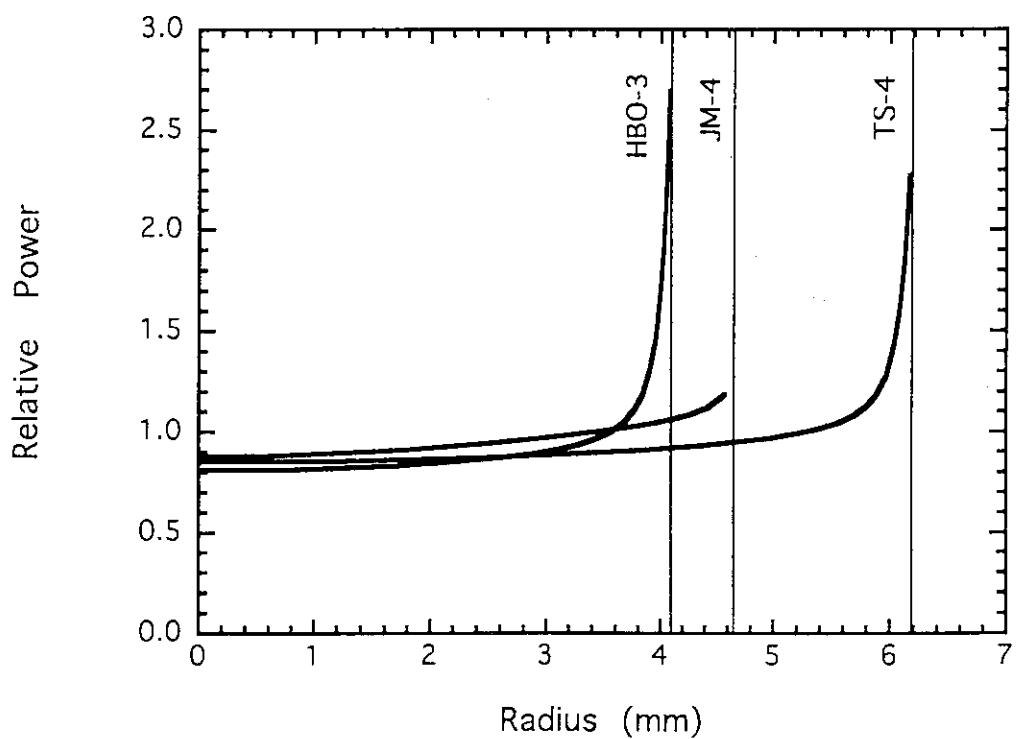


Fig. 18 Examples of radial power peaking of the test fuels during pulse irradiations in the NSRR.

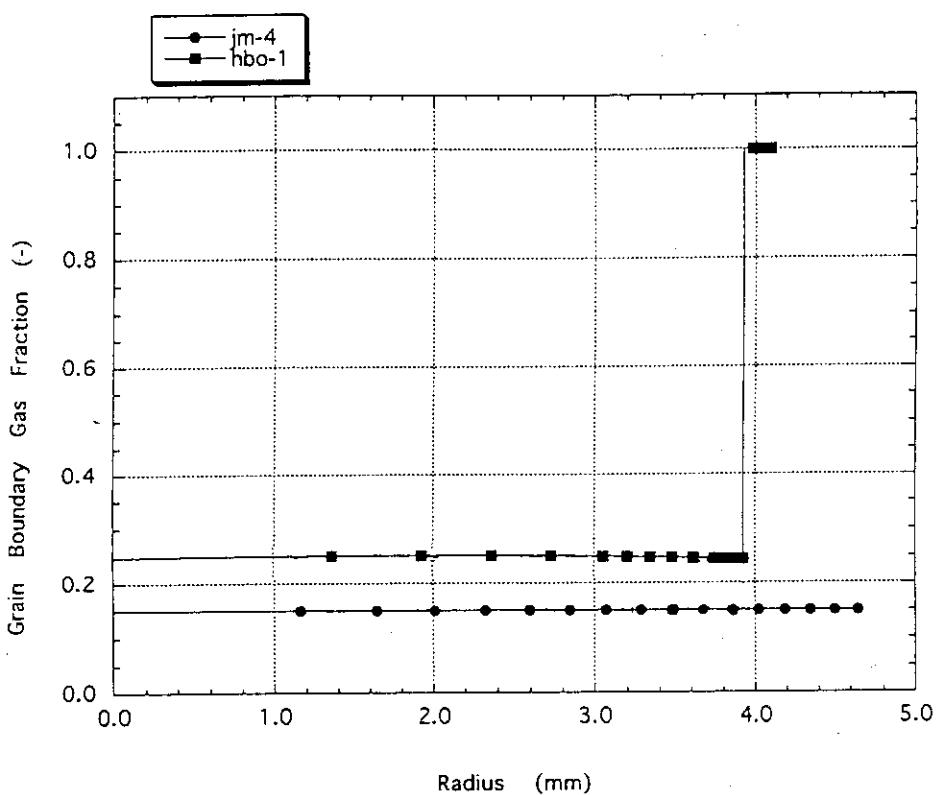


Fig. 19 Radial distribution of fraction of grain boundary gases assumed for the NSRR test simulations.

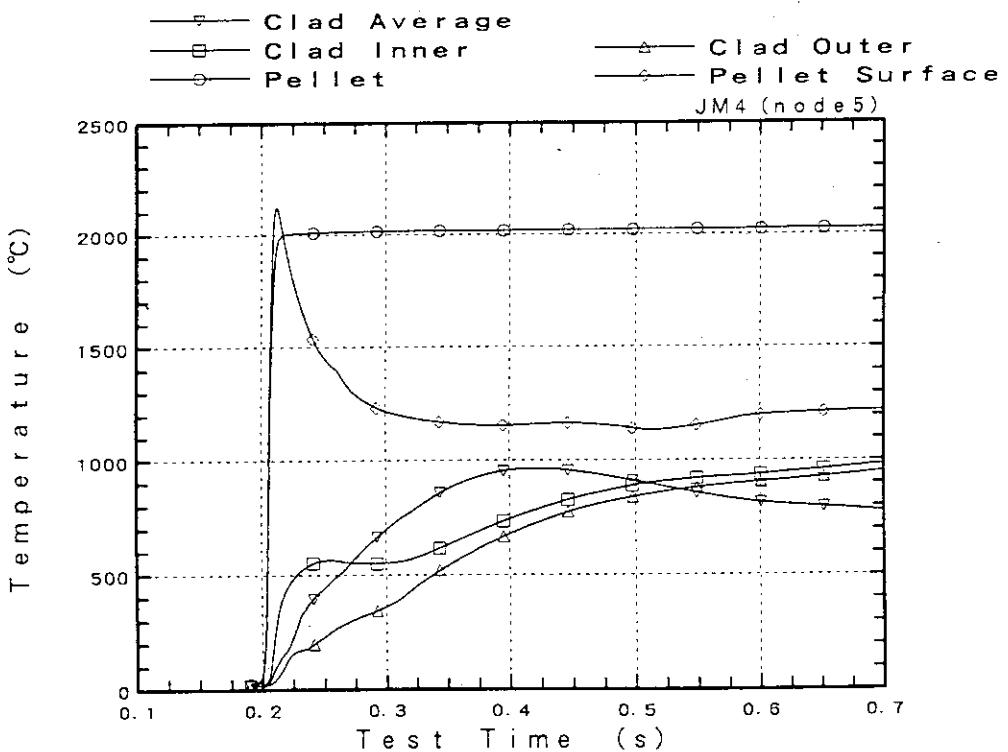


Fig. 20 Fuel and cladding temperature histories in Test JM-4.

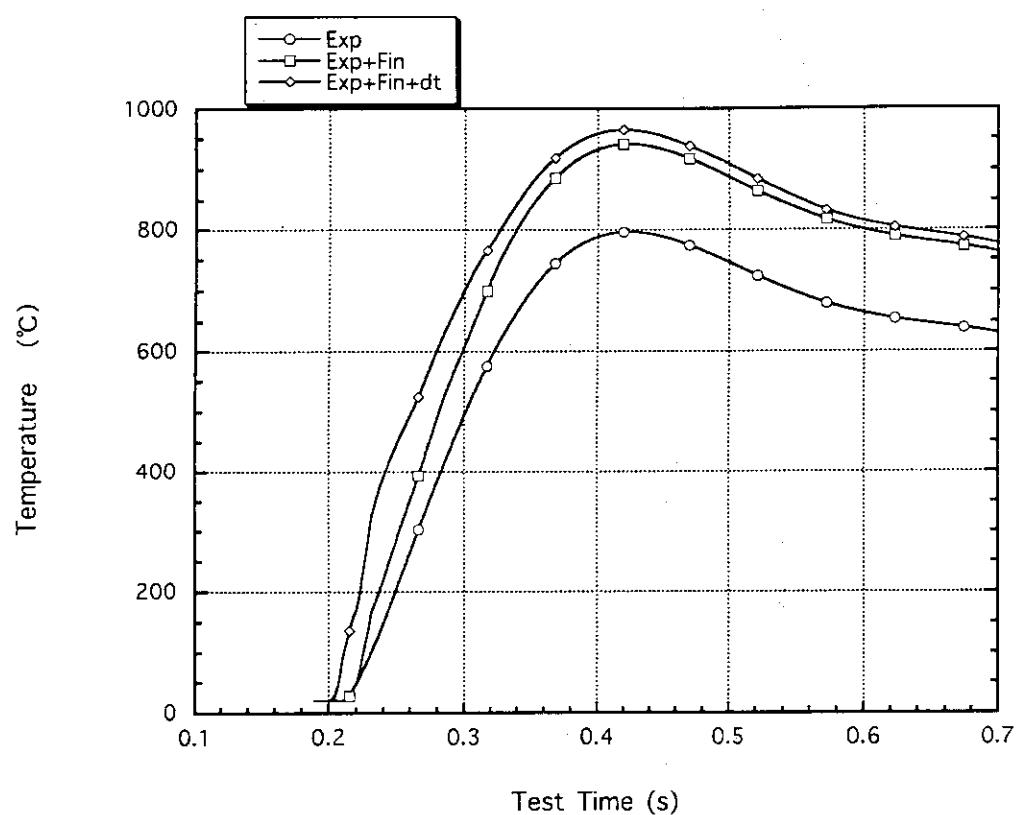


Fig. 21 Cladding surface temperature and estimated cladding average temperature taking account of the T/C fin effect in Test JM-4.

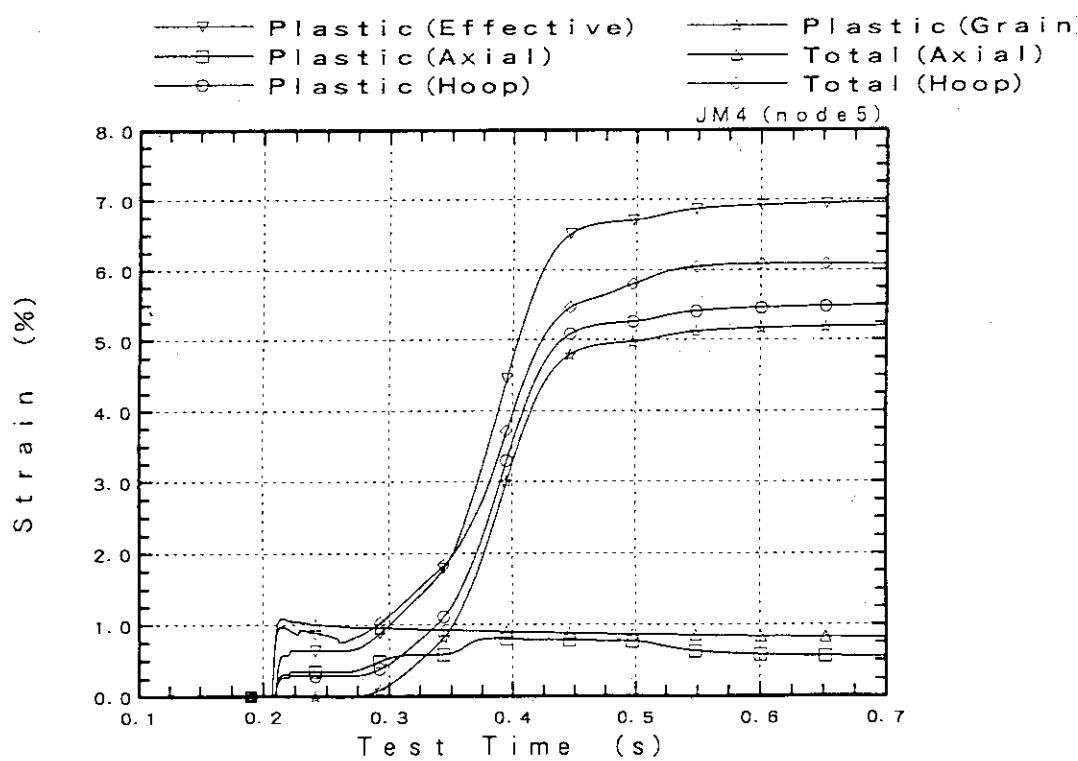


Fig. 22 Calculated cladding strain in Test JM-4.

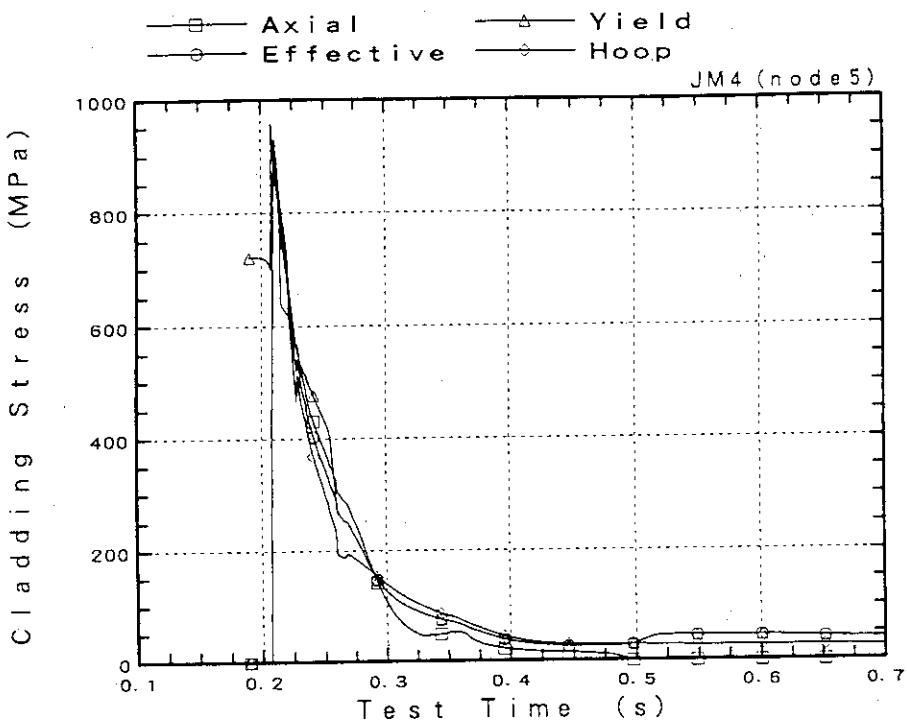


Fig. 23 Calculated cladding stress in Test JM-4.

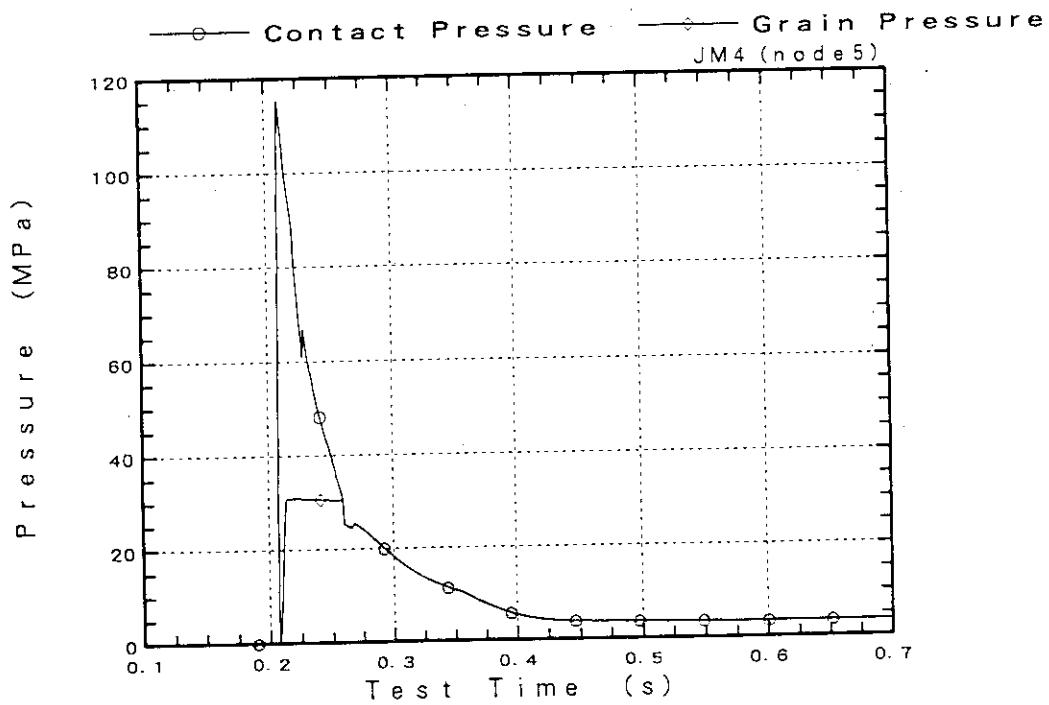


Fig. 24 Fuel pellet and cladding contact pressure by fuel thermal expansion with GAPCON model and grain boundary fission gas pressure calculated for Test JM-4.

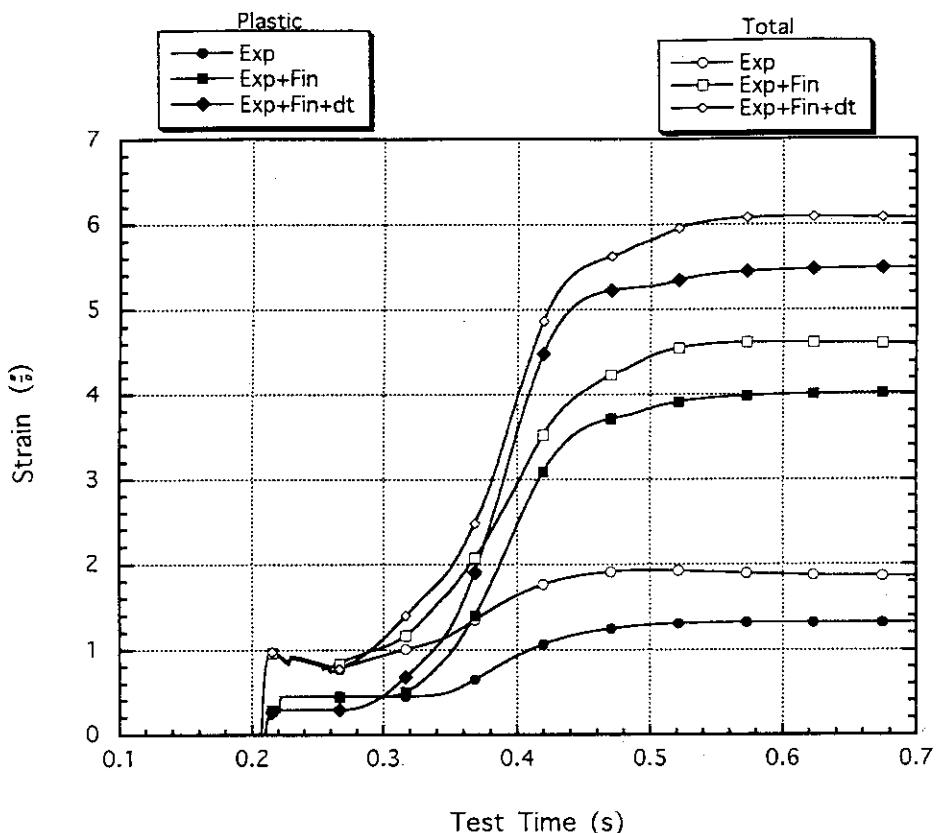


Fig. 25 Calcurated cladding hoop strain with different cladding temperatures.

Calculated cladding stress and strain for Test JM-4.

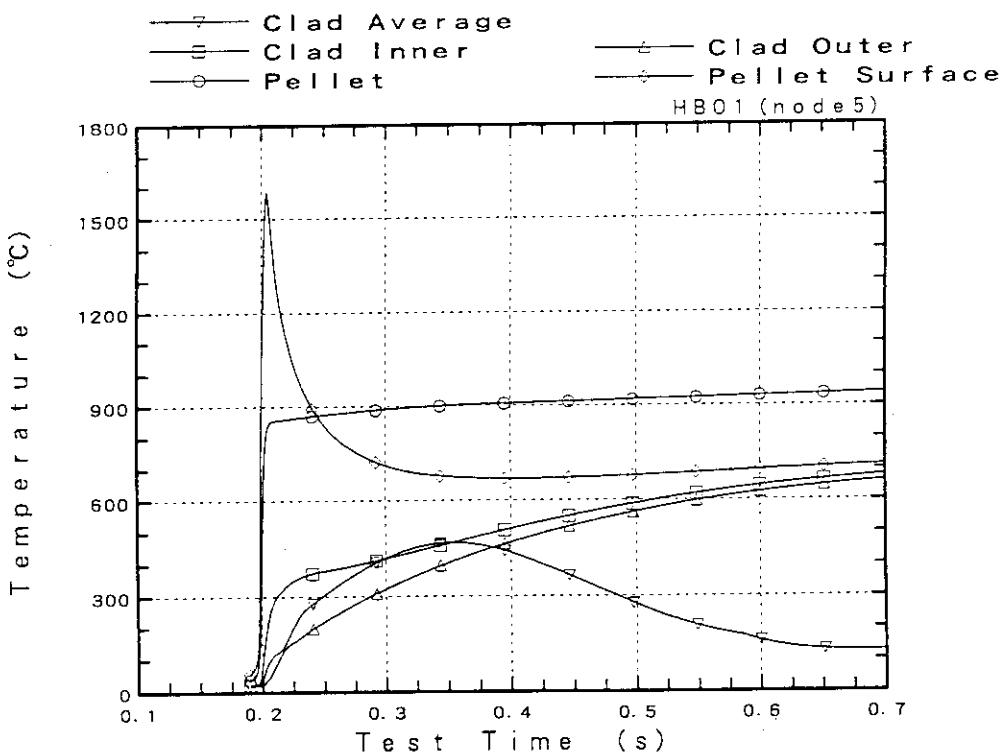


Fig. 26 Fuel and cladding temperature histories in Tests HBO-1 and 3.

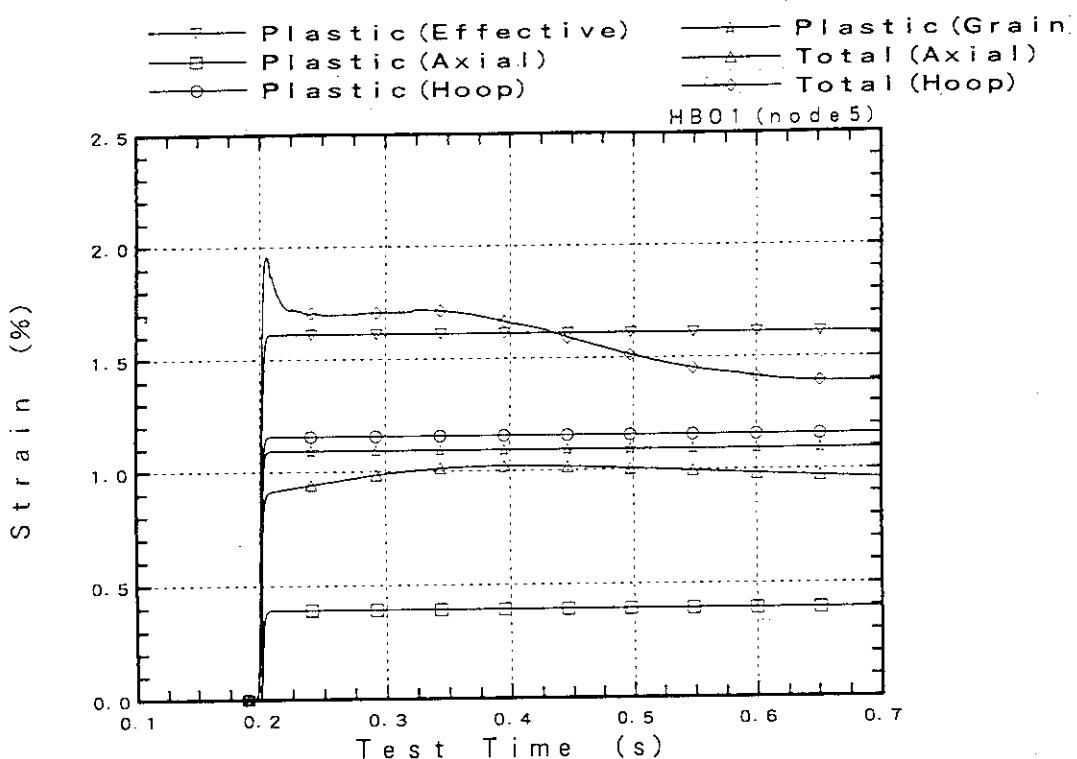


Fig. 27 Calculated cladding strain in Tests HBO-1 and 3.

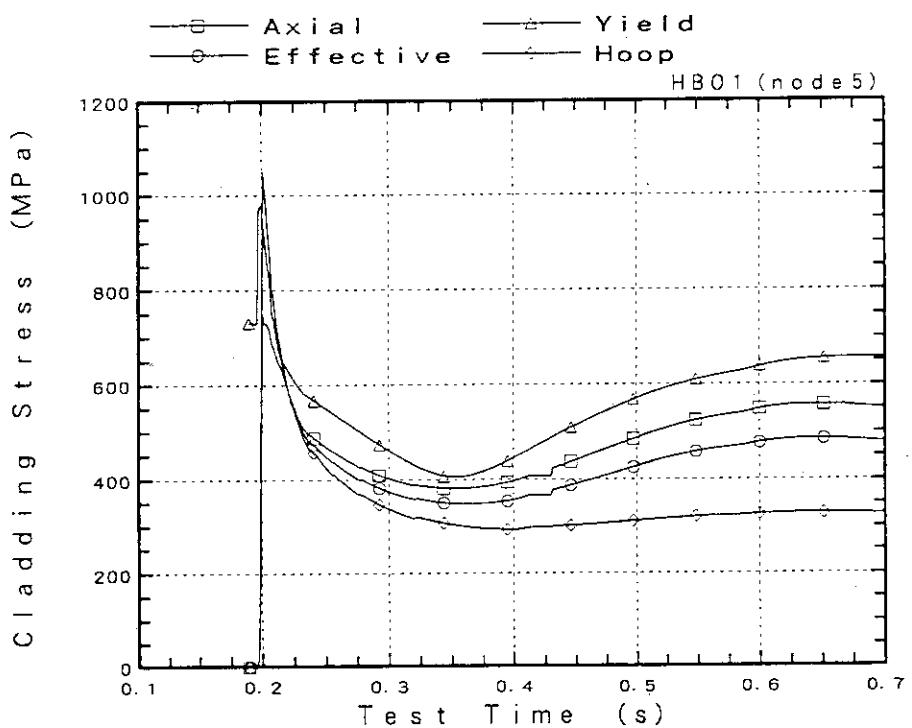


Fig. 28 Calculated cladding stress in Tests HBO-1 and 3 .

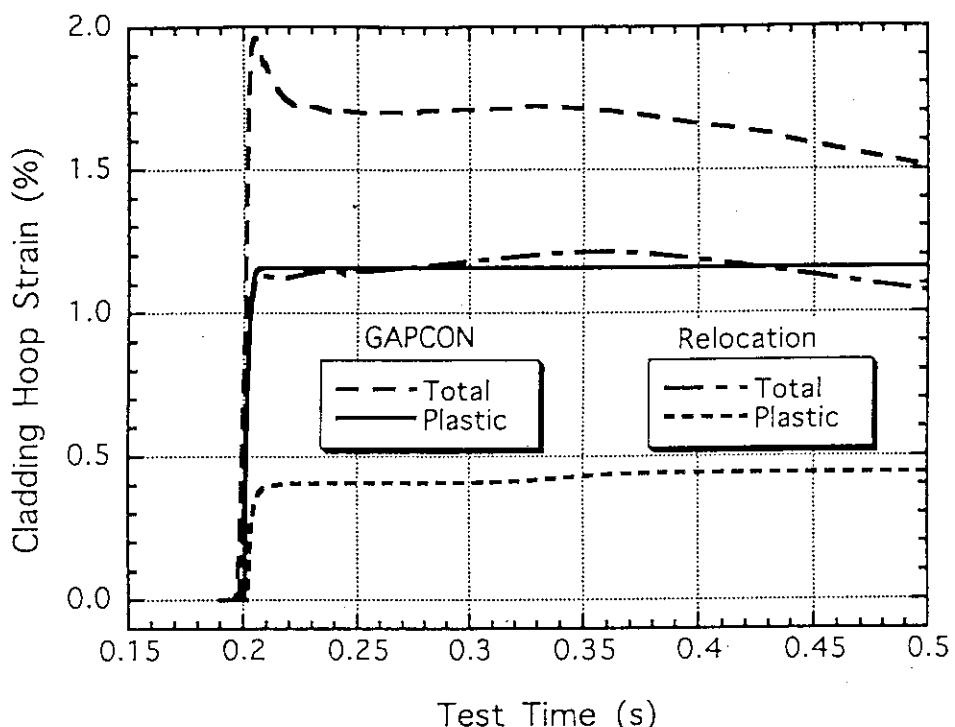


Fig. 29 Cladding hoop deformation calculated with Relocation and GAPCON models for Tests HBO-1 and 3.

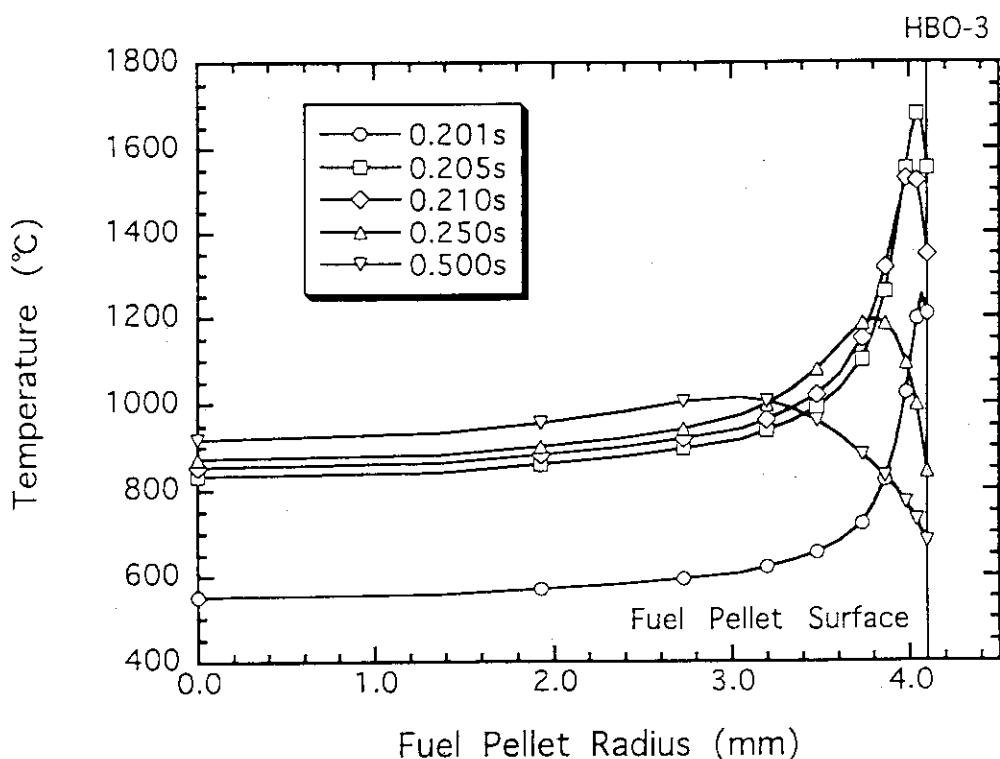


Fig. 30 Radial temperature profiles in HBO-3 test fuel at early stages of the pulse irradiation test.

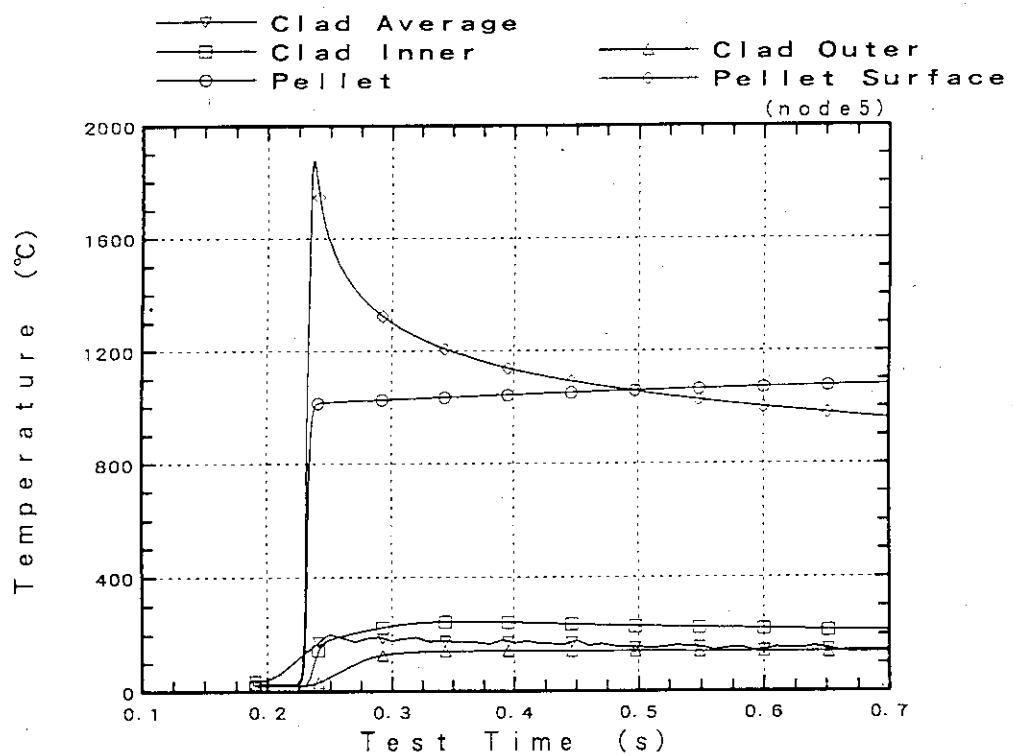


Fig.31 Fuel and cladding temperature histories in Test TS-4.

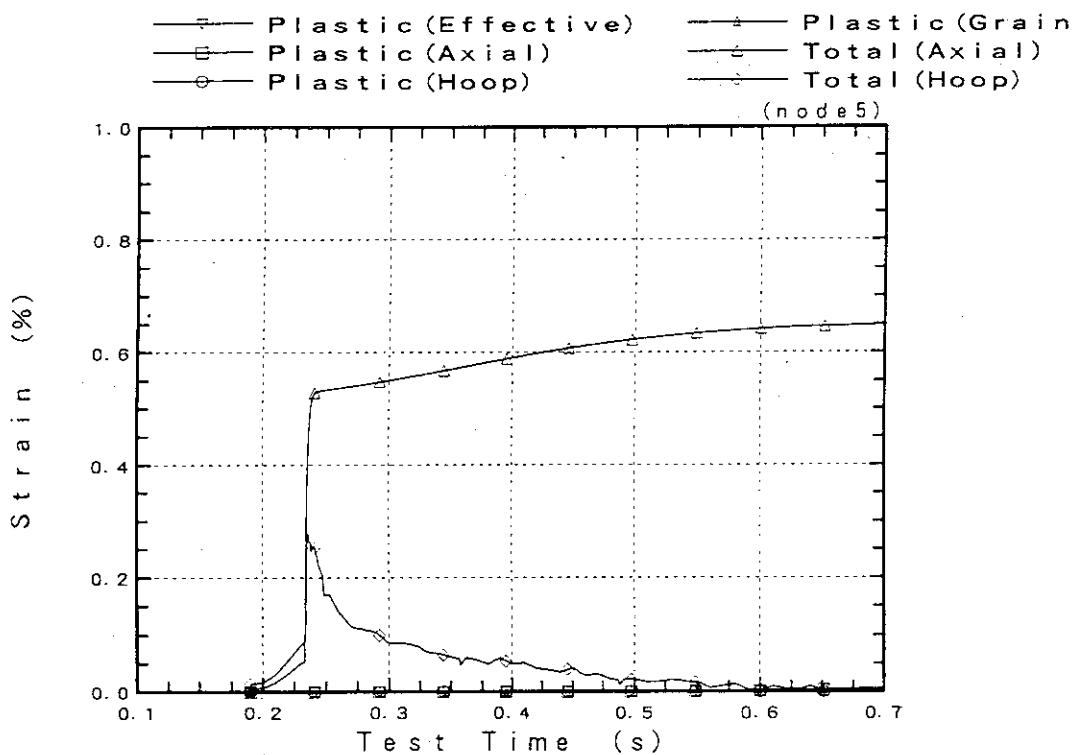


Fig. 32 Calculated cladding strain in Test TS-4.

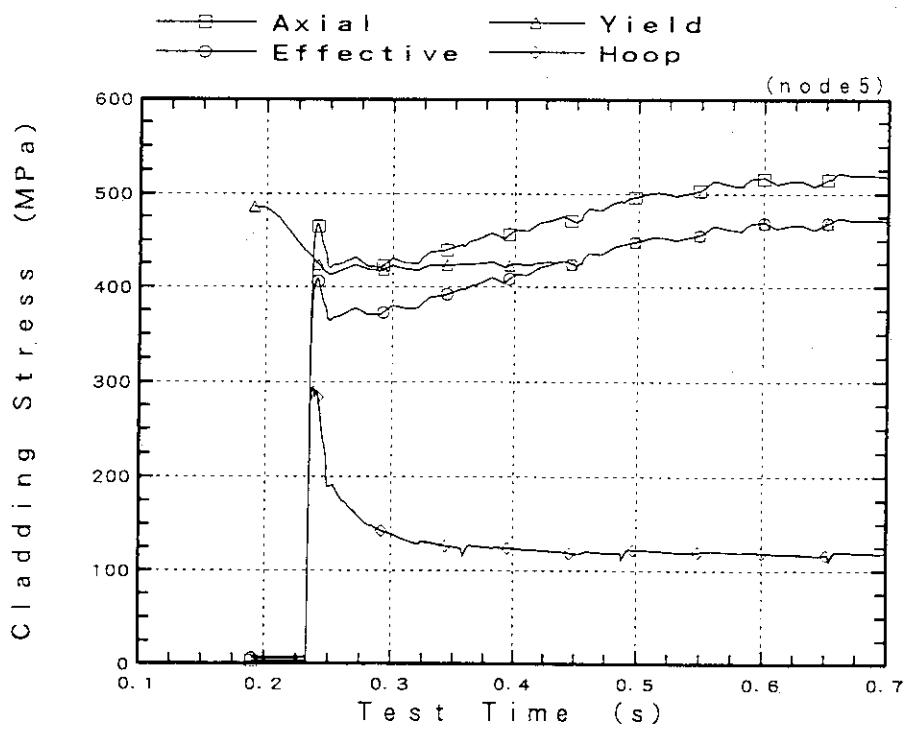


Fig. 33 Calculated cladding stress in Test TS-4.

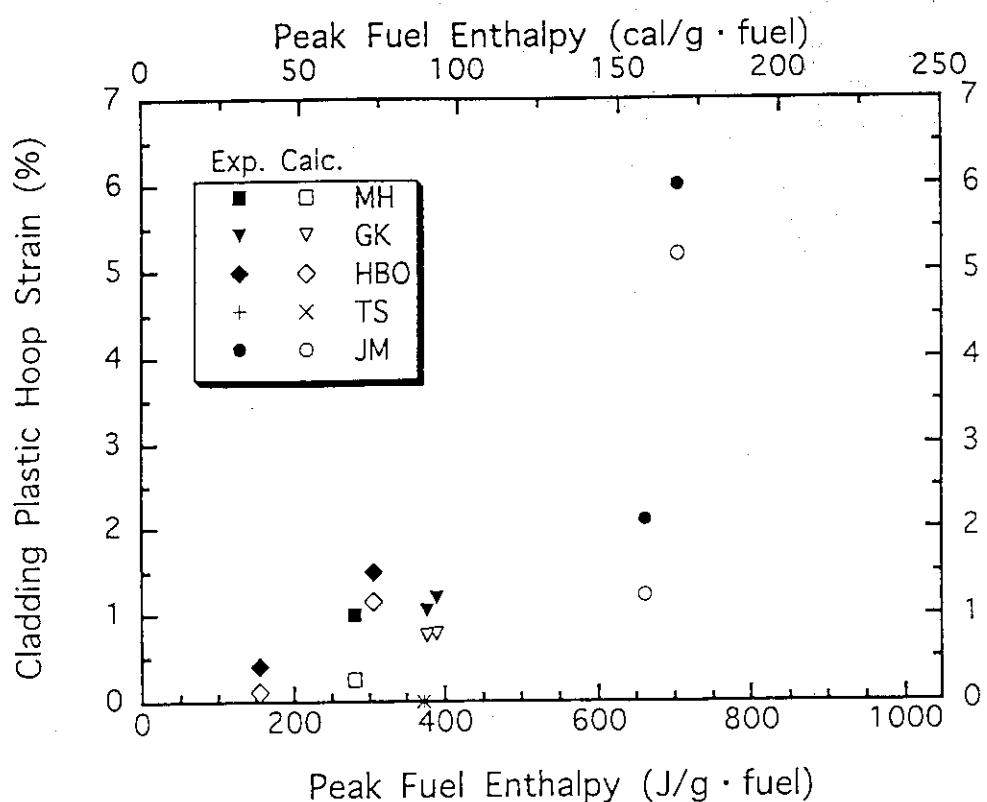


Fig. 34 Cladding residual hoop deformations measured and calculated in NSRR tests.

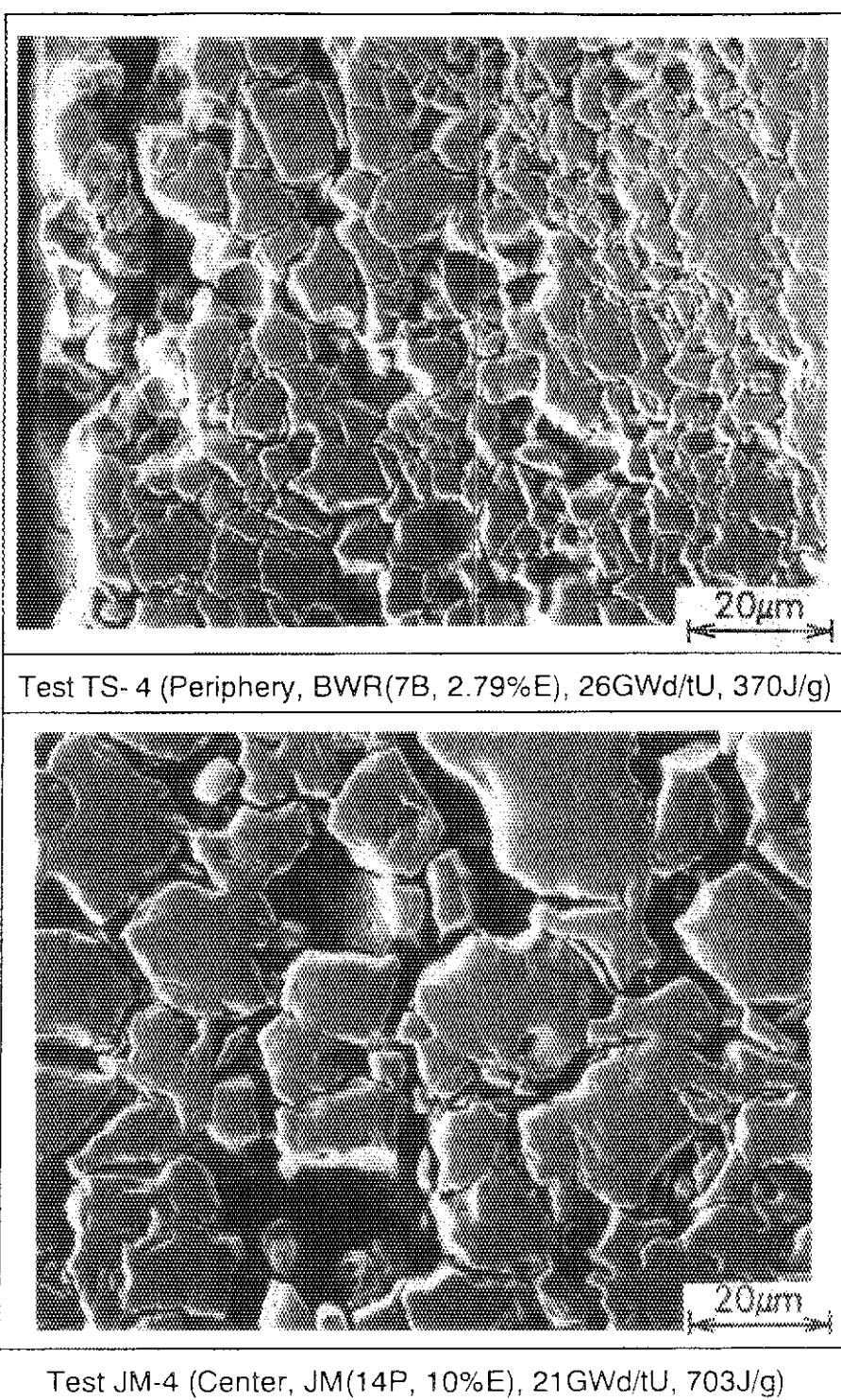


Photo. 1 Grain boundary separation observed in Tests TS-4 (12) and JM-4 (22).

付録 I FRAP-T6 に新たに加えたサブルーチンと修正箇所の概要

Appendix I Outlines of newly developed subroutines and modification on FRAP-T6

- 1 F R A P - T 6 の追加入力データ説明

本作業で追加した入力データを下記に示す。

1. f o r m a t (*)

① m o d e x p : G A P C O N - T H E R M A L モデルの選択

= 1 : モデル選択

② m o d p e l : ベレット熱伝導補正モデル

= 0 : F R A P - T 6 モデル (T D を用いる、ガス膨張考慮しない)

= 1 : ガス膨張の効果をポロシティとして考慮

= 2 : ガス膨張の効果をガス熱伝導係数との混合熱伝導として考慮

K _r と X _e の組成比を考慮したガス熱伝導係数

③ m o d c k m : 降伏応力値の補正

= 1 : 補正を行う

④ m o d t e m : 被覆管平均温度補正

= 0 0 0 : 入力温度データなし (F R A P - T 6 の計算結果を使用)

= 0 0 1 : ファイル機番 1 からデータを読み込む (入力設定)

= 0 1 1 : 入力設定に対して、F R A P - T 6 で求められる被覆管
表面と内側温度差 (ΔT) を補正

= 1 0 1 : 入力設定に対して、フィン効果を補正

= 1 1 1 : 入力設定に対して、 ΔT とフィン効果を補正

⑤ i t g a s n : ガス収束計算の収束回数

⑥ d t g a s n : ガス収束計算の補正係数

⑦ e p g a s n : ガス収束計算の収束値

2. m o d p e l = 2 の場合 f o r m a t (*)

① f k r : K _r 組成比

② f x e : X _e 組成比

計算コードで、1. 0 に規格化される。

3. f o r m a t (8 f 1 0, 0)

① g a s t o t : ガスモル数 (k · mol/m)

② g a s t m p : ガス放出温度 (K)

③ g a s t i m : ガス放出時間 (秒)

④ g a s r e l : ガスプレナム移動時間 (秒)

⑤ g a s r a t : ガス体積比

4. f o r m a t (i 3)

① i r : 径方向メッシュ数

5. f o r m a t (1 2 f 6, 0)

① r a d b u r n (i r) : 径方向燃焼度分布

6. f o r m a t (1 2 f 6, 0)

① r a d g a s r (i r) : 径方向ガス放出比

7. f o r m a t (i 3)

① i z : 軸方向メッシュ数

8. f o r m a t (1 2 f 6, 0)

① a x i b u r n (i z) : 軸方向燃焼度分布

追加した入力データ例を下記に示す。

修正前の入力データ例

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+
1      0.0000000    00.70    0    0      <---- frap-t6 Control Input
jm-4 : ria(0.18s, 8.5ms), expan(0.7, 1.15), pint(6. d7)  <---- タイトル
```

修正後入力データ例

```
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+*****+
1      2      1     111     9999  5.0d-3  1.0d-3      <---- 1
1.0   9.2  /kr xe    <---- 2
1      0.0000000    00.70    0    0    1      <---- frap-t6 Control Input
1.370e-5    2000.0    0.0050    5.0      0.02    0.25      <---- 3
16      <---- 4
0.884  0.898  0.911  0.923  0.935  0.949  0.963  0.977  0.992  1.009  1.028  1.048  <- 5
1.069  1.094  1.129  1.192
0.15  0.15  0.15  0.15  0.15  0.15  0.15  0.15  0.15  0.15  0.15  0.15  <- 6
0.15  0.15  0.15  0.15
10      <---- 7
1.102  1.064  1.036  1.012  1.003  0.984  0.970  0.965  0.942  0.923      <---- 8
jm-4 : ria(0.18s, 8.5ms), expan(0.7, 1.15), pint(6. d7)  <---- タイトル
```

- 2 F R A P - T 6 の使用方法

1. ファイル関連

ファイルは、反応度安全研究室における S U N ワークステーション上に設定されている。

(1) ソースファイル

- ・ /export/home1/naka/f6new/new/sou/ ガス膨張モデル修正ソース
- ・ /export/home1/naka/f6new/soua/ upfrap の修正版
- ・ /export/home1/naka/f6new/upsoua/ soua から平成 6 年度作業修正ソース
- ・ /export/home1/naka/f6new/upenvrl/ ソース
- ・ /export/home1/naka/f6new/upfrap/ 修正前ソース

(2) ライブラリファイル

- ・ /export/home1/naka/f6new/lib/sth2xt

(3) ロードモジュールファイル

- ・ /export/home1/naka/f6new/new/dat/newfrap.out

(4) 実行方法

- ・ 実行シェルを下記に示す。

```
echo " <<< new-version frapt6 run $2.inp inp "
date
ln -s exptemp/$3 fort.1
$1.out input/$2.inp
rm fort./*
date
echo "                                end >>>"
```

- ・ シェル説明

- \$ 1 : ロードモジュール名
- \$ 2 : 入力データファイル名
- \$ 3 : 実験測定被覆管表面温度データファイル

(5) 入力データファイル

- ・ /export/home1/naka/f6new/new/dat/input/

(6) 実験測定被覆管表面温度データファイル

・./export/home1/naka/f6new/new/dat/exptemp/

・データファイルのレコードフォームについて以下に各入力例を示す。

軸方向同一で、時刻と温度対は、2500点設定できる。

① x, y の対で入力する方法

時刻 (秒) 温度 (°C)

0.000 2.87858E+01

0.001 2.12319E+01

②フィッティング式を入力する方法

fit 入力 I D

0.0 0.2 20.0 1.001 温度一定開始時刻、終了時刻、温度 (°C)

温度設定時刻

7 次数 (最大8次まで)

7.10240d+3 a₀

-1.23459d+5 a₁

8.26567d+5 a₂

-2.76448d+6 a₃

5.11857d+6 a₄

-5.34907d+6 a₅

2.96028d+6 a₆

-6.75455d+5 a₇

$$T = a_0 + a_1 \times t + a_2 \times t^2 + a_3 \times t^3 + a_4 \times t^4 + a_5 \times t^5 \\ + a_6 \times t^6 + a_7 \times t^7$$

t : 時刻 (秒) 、 T : 温度 (°C)

- 3 修正モジュール説明

1. 実測温度の入力設定に伴う修正モジュール

(1) m a i n モジュール (修正)

・入力データの設定

・実測温度ファイル (ファイル機番 1) からデータの読み込み

(2) e x p d a s t モジュール (追加)

・被覆管平均温度に対して、実測温度の設定、 ΔT 、フィン効果等の設定を行う。

(3) c o m p u t モジュール (修正)

・e x p d a s t モジュールを呼び出す

2. 降伏応力値計算モジュールの改良に伴う修正モジュール

(1) m a i n モジュール (修正)

・入力データの設定

(2) c k m n モジュール (修正)

・強度係数に対して、補正係数を用いて修正する。

3. ベレット熱伝導補正係数の改良に伴う修正モジュール

(1) m a i n モジュール (修正)

・入力データの設定

(2) h e a t モジュール (修正)

・h t l t d p モジュールの引数修正

(3) h t l t d p モジュール (修正)

・オプションにより、u p k m o d 、u p v k m o d モジュールを呼び出すようにした。

(4) u p k m o d モジュール (追加)

・ガス膨張をボロシティとして考慮

(5) u p v k m o d モジュール (追加)

・ガス膨張をガス熱伝導係数として考慮

4. 結晶粒界ガスによる変形モデルの改良に伴う修正モジュール

(1) m a i n モジュール (修正)

・入力データの設定

(2) g a s p r o p モジュール (修正)

・ガス放出領域の設定

(3) r t e m p s e t モジュール (追加)

・ベレット径方向温度分布設定

(4) f c m i モジュール (修正)

・ガス膨張モデル計算処理を組み込んだ

(5) g a s d e f v モジュール (追加)

・ガス膨張モデル計算、被覆管の応力とひずみを考慮する。

(6) u p s t r a i n モジュール (追加)

・径方向ひずみに振動が生じるために、計算フローを変えた。

修正モジュール一覧

No.	モジュール名	チェック	修正概要
1	aacstran.f	追加	cstran.fと同じ(デバッグ用に作成)、呼び出しモジュールaastrain
2	aastrain.f	追加	strain.fと同じ(デバッグ用に作成)、呼び出しモジュールcouple
3	celmod.f	修正	温度が1090°C以上になった場合に $\alpha + \beta$ 層対応した値を計算処理をしないようにした。(JM4の計算結果から)
4	ckmn.f	修正	降伏応力補正係数設定を行った。
5	cladf.f	修正	デバッグ用
6	comput.f	修正	rtempset, expdastの追加
7	couple.f	修正	デバッグ用aastrainを追加
8	cshear.f	修正	温度が1090°C以上になった場合に $\alpha + \beta$ 層対応した値を計算処理をしないようにした。(JM4の計算結果から)
9	cstran.f	修正	デバッグ用
10	ctres.f	修正	デバッグ用
11	cstrni.f	修正	符号間違い
12	deform.f	修正	gap con - thermalオプション設定、デバッグ用
13	expdast.f	追加	被覆管平均温度設定
14	fcmi.f	修正	ガス膨張モデル計算モジュールgasdefvの追加
15	gaphtc.f	修正	デバッグ用
16	gapprs.f	修正	ガス体積の設定
17	gasdef.f	追加	ガス膨張モデル計算(収束方法が違う)(リンクされていない)
18	gasdefv.f	追加	ガス膨張モデル計算
19	gsflow.f	修正	gapprs設定
20	heat.f	修正	htltdpモジュール呼び出し引数を変更
21	htltdp.f	修正	ヘレット熱伝導補正計算設定
22	initia.f	修正	デバッグ用
23	intinp.f	修正	デバッグ用
24	main.f	修正	追加入力データ読み込み、実測温度分布読み込み
25	plotwr.f	修正	図形出力項目の追加
26	rtempset.f	追加	径方向温度分布設定、径方向体積等の設定、呼び出しモジュールcomput
27	strain.f	修正	デバッグ用
28	stress.f	修正	デバッグ用
29	upcstrni.f	追加	初期ひずみ率の変更(cstrni)
30	upkmod.f	追加	ヘレット熱伝導補正計算 ポロシティで考慮
31	upstrain.f	追加	応力が振動解を与えないように修正した(gasdefvで使用)
32	upvkmod.f	追加	ヘレット熱伝導補正計算 ガス熱伝導係数で考慮

モ デ ル 修 正 内 容					
	モジュール名： a a c s t r a n				
処理概要	①被覆管実効塑性ひずみの計算を行う。 ②呼び出しモジュール a a s t r a i n ③モジュール c s t r a n に対してデバッグ文を追加した。				
・修正内容					
引数					
No.	変数名	配列	タイプ	入・出	説 明
1	ctemp		r*8	入	被覆管温度 (K)
2	deoxy		r*8	入	酸素濃度比
3	fnck		r*8	入	積算高速中性子束 (n/m^2)
4	fnen		r*8	入	積算高速中性子束 (n/m^2)
5	cwkf		r*8	入	冷間加工係数
6	cwnf		r*8	入	冷間加工係数
7	rstran		r*8	入	実効塑性ひずみ速度 (1/s)
8	strest		r*8	入	実効応力 (Pa)
9	strant		r*8	出	実効塑性ひずみ
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					

モジュール修正内容					
処理概要 ・修正内容	モジュール名: aastrain				
	①被覆管実効塑性ひずみの計算を行う。 ②呼び出しモジュールcouple ③モジュールstrainに対してデバッグ文を追加した。				
引数	No.	変数名	配列	タイプ	入・出
	1	sig		r*8	入 応力 (p s i)
	2	eps		r*8	出 ひずみ
	3	eplas		r*8	入・出 前ステップの塑性ひずみ
	4	temp		r*8	入 温度 (F)
	5	edot1		r*8	入 周方向ひずみ率 (1 / s)
	6	edot2		r*8	入 軸方向ひずみ率 (1 / s)
	7	edot3		r*8	入 径方向ひずみ率 (1 / s)
	8	tmax		r*8	入 被覆管最高温度 (F)
	9	cflux		r*8	入 高速中性子束 (n / m ² · s)
	10	coldw		r*8	入 冷間加工比
	11	tflux		r*8	入 時間 (s)
	12	dt		r*8	入 時間幅 (s)
	13	j		i*4	入 軸メッシュ位置
	14	jload		i*4	入 cstrainとcstrnの選択
	15	sigeff		r*8	出 実効応力 (p s i)
	16				
	17				
	18				
	19				
	20				
	21				
	22				
	23				
	24				
	25				

モ デ ル 修 正 内 容						
モジュール名: expdast						
処理概要	①被覆管平均温度を設定する。 平均温度は、入力設定値と Δt 及びフィン効果等をオプションにより設定する。 ②呼び出しモジュール compute					
修正内容						
引数						
No.	変数名	配列	タイプ	入・出	説明	明
1	time		r*8	入	時刻(秒)	
2	ave		r*8	入	被覆管平均温度(F)	
3	outave		r*8	出	被覆管平均温度(F)	
4	jnode		i*4	入	軸メッシュ番号	
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						

モ デ ル 修 正 内 容					
モジュール名:	gasdefv				
処理概要	①ペレット内ガス膨張によるモデルによる被覆管応力計算を行う。 ②呼び出しモジュールfcmi				
修正内容					
No.	変数名	配列	タイプ	入・出	説 明
引	1 jreal		i*4	入	軸方向メッシュ数
	2 rgap		r*8	出	=0.0を設定
	3 t0		r*8	入	基準温度(F)
	4 pg		r*8	入	ギャップガス圧(p s i a)
	5 pc		r*8	入	システム圧(p s i a)
	6 tc		r*8	入	被覆管温度(F)
	7 rcli		r*8	入	被覆管内径(i n)
	8 rcoi		r*8	入	被覆管外径(i n)
	9 csig	3	r*8	入・出	周・軸・径方向応力(p s i a)
	10 ceps	3	r*8	入・出	周・軸・径方向ひずみ
	11 cepp	3	r*8	入・出	周・軸・径方向塑性ひずみ
数	12 cep		r*8	入・出	実効ひずみ
	13 edot1		r*8	入	周方向ひずみ率(1/s)
	14 edot2		r*8	入	軸方向ひずみ率(1/s)
	15 edot3		r*8	入	径方向ひずみ率(1/s)
	16 tcmax		r*8	入	被覆管最高温度(F)
	17 cflux		r*8	入	高速中性子束(n/m ² ·s)
	18 tflux		r*8	入	時間(s)
	19 coldw		r*8	入	冷間加工比
	20 dt		r*8	入	時間幅(s)
	21 dz		r*8	入	軸方向メッシュ幅(i n)
	22 xpgap		r*8	出	ギャップ幅
	23 j		i*4	入	軸方向メッシュ数
24					
25					

モ デ ル 修 正 内 容						
処理概要	モジュール名: rtempset					
修正内容	①ペレット内の径方向体積と径方向ガス分布の初期設定と 径方向温度分布の設定を行う。 ②呼び出しモジュール comput					
引数						
No.	変数名	配列	タイプ	入・出	説明	明
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						

モ ジ ュ ー ル 修 正 内 容					
モジュール名： upestrn i					
処理概要	①被覆管実効塑性ひずみの計算を行う。 ②モジュールc strainをもとにして、ひずみ率が0.0と固定としてある処理を前ステップにおけるひずみ率を用いるように変更した。 ③呼び出しモジュールupstrain				
・修正内容					
引数	No.	変数名	配列	タイプ	入・出
引数	1	delh		r*8	入
	2	ctemp		r*8	入
	3	fnck		r*8	入
	4	fnch		r*8	入
	5	cwkf		r*8	入
	6	cwnf		r*8	入
	7	srest		r*8	入
	8	stant		r*8	入・出
	9	edotl		r*8	入
	10				
	11				
	12				
	13				
	14				
	15				
	16				
	17				
	18				
	19				
	20				
	21				
	22				
	23				
	24				
	25				

モジュール修正内容					
	モジュール名: upkmod				
処理概要	①ガス膨張による効果をポロシティで考慮してペレット熱伝導係数の計算を行う。 ②呼び出しモジュール h t l t d p				
修正内容					
引数	No.	変数名	配列	タイプ	入・出
引数	1	cond	1	r*8	入・出
	2	rint	1	r*8	入
	3	igpnod		i*4	入
	4	pres		r*8	入
	5	bu		r*8	入
	6	gasfr	1	r*8	入
	7	vrelc		r*8	入
	8	modfd		r*8	入
	9	temp	1	r*8	入
	10	frden		r*8	入
	11	tsntrk		r*8	入
	12	ncladi		i*4	入
	13	modkf		r*8	入
	14	isin		i*4	入
	15	fotmol		r*8	入
	16	jreal		i*4	入
	17				
	18				
	19				
	20				
	21				
	22				
	23				
	24				
	25				

モ デ ル 修 正 内 容					
処理概要	モジュール名:	u p s t r a i n			
①被覆管実効塑性ひずみの計算を行う。					
②モジュール <i>s t r a i n</i> をもとにして、降伏応力を越えない場合の処理を					
越えた場合の処理と同じ処理にした。 <i>e p s</i> が振動を起こしているために処理を変更した。					
③呼び出しモジュール <i>g a s d e f v</i>					
要・修正内容	容				
引数	No.	変数名	配列	タイプ	入・出
	1	<i>sig</i>		r*8	入
	2	<i>eps</i>		r*8	出
	3	<i>epplas</i>		r*8	入・出
	4	<i>temp</i>		r*8	入
	5	<i>edot1</i>		r*8	入
	6	<i>edot2</i>		r*8	入
	7	<i>edot3</i>		r*8	入
	8	<i>temax</i>		r*8	入
	9	<i>cflux</i>		r*8	入
	10	<i>coldw</i>		r*8	入
	11	<i>tflux</i>		r*8	入
	12	<i>dt</i>		r*8	入
	13	<i>j</i>	i*4		入
	14	<i>jload</i>	i*4		入
	15	<i>sigyy</i>	r*8		出
	16	<i>eest</i>	r*8		出
	17				
	18				
	19				
	20				
	21				
	22				
	23				
	24				
	25				

モジュール修正内容					
処理概要	モジュール名:	u p v k m o d			
①ガス膨張による効果をガス熱伝導係数で考慮してペレット熱伝導係数の計算を行う。					
②呼び出しモジュール h t 1 t d p					
修正内容	No.	変数名	配列	タイプ	入・出
引数	1	cond		1 r*8	入・出
	2	rint		1 r*8	入
	3	igpnod		i*4	入
	4	pres		r*8	入
	5	bu		r*8	入
	6	gasfr		1 r*8	入
	7	vrele		r*8	入
	8	modfd		r*8	入
	9	temp		1 r*8	入
	10	frden		r*8	入
	11	tsntrk		r*8	入
	12	ncladi		i*4	入
	13	modkf		r*8	入
	14	isin		i*4	入
	15	jreal		i*4	入
	16				
	17				
	18				
	19				
	20				
	21				
	22				
	23				
	24				
	25				

- 4 図形出力ファイルフォーム

図形ファイルフォーム (機器60)

No.	id	項目	説明
1	1 title	タイトル (72文字)	
2	1 irm	径方向メッシュ数	
2	1 izm	軸方向メッシュ数	
3	1 npems	ペレット表面メッシュ位置番号	
4	1 nclmps	被覆管内側メッシュ位置番号	
5	1 ipl1	ロッド項目数	
6	1 ipl2	軸項目数	
7	1 ipl3	径・軸項目数	
3	1 r(irm)	径方向メッシュ位置 (mm)	
2	1 z(izm)	軸方向メッシュ位置 (mm)	
3	1 zl(izm-1)	軸方向メッシュ位置 (mm)	
4	1 time	時刻 (秒)	
2	1 dt	時間幅 (秒)	
3	1 avfrp	ロッド平均出力 (kW/m)	
4	1 avfte	ペレット平均温度 (℃)	
5	1 metwrtle	水反応による発熱量 (kW)	
6	1 fsxex	燃料スタック軸方向伸び (mm)	
7	1 cladaxex	被覆管軸方向伸び (mm)	
8	1 tp	フレナムガス温度 (℃)	
9	1 prspln	フレナムガス圧力 (MPa)	
10	1 flowg	ガス移動速度 (g m-moles/s)	
11	1 molffrac	molten fuel fraction in fuel rod	
12	1 ffr	破損率 (%)	
13	1 volfg	全ガス体積 (mm ³)	
14	1 volpl	フレナム体積 (mm ³)	
15	1 volcr	クラック体積 (mm ³)	
16	1 volgap	ギャップ体積 (mm ³)	
17	1 volpol	ボロシティ体積 (mm ³)	
18	1 voldis	ディッシュ体積 (mm ³)	
19	1 volcen	中心ボイド体積 (mm ³)	
20	1 volsurfgr	燃料表面粗さ体積 (mm ³)	
21	1 volclngr	被覆管表面粗さ体積 (mm ³)	
22	1 gasrel	ガス放出率 (%)	
23	1 gasmol	ガス生成量 (moles)	

径・軸データ

No.	id	項目	説明
6	1 radtemp	径方向温度分布 (℃)	

軸データ

No.	id	項目	説明
5	1 locropdw	軸線出力 (kW/m)	
2	1 ent	エンタルピー (J/kg)	
3	1 ent1	energy in fuel per unit length (kW-s)	
4	1 ent2	energy in cladding per unit length (kW-s)	
5	1 ent3	energy input after steady-state (kW-s m)	
6	1 ent4	energy output after steady-state (kW-s m)	
7	1 coldlkte	冷却材温度 (℃)	
8	1 colql	クオリティー	
9	1 colmsflx	冷却材質量流量 (kg/m ² s)	
10	1 surhtflx	表面熱流束 (W/m ²)	
11	1 crthtflx	限界熱流束 (W/m ²)	
12	1 rchf	表面熱流束/限界熱流束	
13	1 surhtc	表面熱伝達係数 (W/m ² K)	
14	1 heattrmd	熱伝達モード	
15	1 gapthc	ギャップコンダクタンス (W/m ² K)	
16	1 thmrg	Thermal ギャップ (μm)	
17	1 strucrg	Structural ギャップ (μm)	
18	1 gappr	ギャップ圧力 (MPa)	
19	1 colpe	冷却材圧力 (MPa)	
20	1 fsdsp	ペレット表面変位 (μm)	
21	1 cldsp	被覆管表面変位 (μm)	
22	1 cladhsn	被覆管周方向全ひずみ	
23	1 cladphsn	被覆管周方向塑性ひずみ	
24	1 cladpasn	被覆管軸方向塑性ひずみ	
25	1 strucip	接触圧力 (MPa)	
26	1 cladhs	被覆管周方向応力 (MPa)	
27	1 cladaxss	被覆管軸方向応力 (MPa)	
28	1 efcladss	被覆管実効応力 (MPa)	
29	1 cladys	被覆管降伏応力 (MPa)	
30	1 effstain	被覆管実効ひずみ	
31	1 cladinf	cladding instability strain	
32	1 oxide	被覆管表面酸化膜厚さ (μm)	
33	1 oxthin	oxygen stabilized alpha thinkness (μm)	
34	1 colxwd	被覆管内側表面酸化膜厚さ (μm)	
35	1 metwre	metal-water reaction energy (kW·m)	
36	1 ctemp	ペレット中心温度 (℃)	
37	1 fstemp	ペレット表面温度 (℃)	
38	1 cladite	被覆管内側温度 (℃)	
39	1 cladote	被覆管表面温度 (℃)	
40	1 cladzsn	被覆管軸方向全ひずみ	
41	1 cladave	被覆管平均温度 (℃)	
42	1 pelgas	粒子境界内ガス圧力 (MPa)	
43	1 gaspst	粒子境界内ガス圧力による塑性ひずみ	
44	1 pelvol	粒子境界内の体積 (cm ³)	
45	1 dpelvol	粒子境界塑性ひずみによる全体積 (cm ³)	
46	1 addpelvol	粒子境界塑性ひずみによる体積 (cm ³)	
47	1 gasave	ガス圧に寄与するガス組成比	
48	1 exsuf	被覆管表面測定温度 (℃)	
49	1 exave	測定値による被覆管平均温度 (℃)	
50	1 epsr	R方向塑性ひずみ速度 (s ⁻¹)	
51	1 epsh	Hoop方向塑性ひずみ速度 (s ⁻¹)	
52	1 epsz	Z方向塑性ひずみ速度 (s ⁻¹)	

付録II

FRAP-T6 の入力条件と解析結果

(Tests JM-4, 5, MH-3, GK-1, 2, HBO-2, 3, TS-4)

Appendix II

Inputs and simulation results of each NSRR irradiated fuel tests

(Tests JM-4, 5, MH-3, GK-1, 2, HBO-2, 3, TS-4)

```

jm4c01.inp
1 neadax= froot6
2 neadax= froot8 sum
3 reservar= univ 0.0
4 *
5 FILE05= null/file1 STATUS= scratch FORM= FORMATTED
6   CARRIAGE CONTROL LIST
7 FILE05= ... lib stExt
8   STATUS= old FORM= UNFORMATTED
9 *
10 FILE05= jm4c01 11st STATUS= UNKNOWN CARRIAGE CONTROL LIST
11 FILE05= jm4c01 f30 STATUS= UNKNOWN FORM= UNFORMATTED
12 ****
13   1 2 1 111 3998 5 0d-3 1.0d-3
14   1 0 3 2 kr xs
15   1 0.0000000 00 70 0 0 !
16   1 370+5 2000.0 0.0050 5.0 0.02 0.25
17 18
18 0.334 0.393 0.911 0.623 0.335 0.949 0.963 0.377 0.992 1.009 0.023 1.043
19 1.063 1.034 1.122 1.192
20 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15
21 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15
22 10
23 1.02 1.064 1.035 1.012 1.003 0.381 0.370 0.385 0.342 0.923
24 jmt1 ria 0.18s 3.5ms texpans 0.7 1.15 print 8 67
25 to data block
26 inout
27 si units
28 output
29 si units
30 print interval 0.1
31 plot output 0.00010
32 end block
33 solution control
34 property tables
35 fuel conductivity 100 290 3300
36 cladding conduct. 50 290. 2300.
37 time control
38 time step 4.1080e5 -1.0e8 4.1080e5 -0.001
39 0.001 0.0000 0.00100 0.179
40 0.000100 0.1801 0.000100 0.20
41 0.000100 0.200100 0.000100 1.22
42 0.000001 1.230001 0.000010 1.52
43 0.001 4.0001 0.001 5.0
44 0.005 5.0001 0.005 50.0
45 steady state limit 5.0
46 convergence criteria
47 implicit .01 .01
48 temperature calc. 100 100 10.0
49 nodalization
50 axial nodes 0.005 0.015 0.025 0.035
51 0.045 0.055 0.065 0.075
52 0.085 0.095
53 fuel radial nodes 0.0 1.1610E-3 1.6420E-3 2.0110E-3
54 2.0230E-3 2.5970E-3 2.8440E-3 3.0720E-3
55 3.2850E-3 3.4840E-3 3.6720E-3 3.8510E-3
56 4.0230E-3 4.1870E-3 4.3450E-3 4.4980E-3
57 4.8450E-3
58 cladding radial node 3
59 end block
60 design of fuel rod
61 fuel rod 0.100 0.010720 293.0
62 pellet 0.0 0.0 0.01 0.0 0.00929 2.12
63 0.95 1934272.0 0.0 2.0 1883.0 8.0
64 cladding 0.0000950 0.5 1.14 4.5485e16 4.1080e7 0.04
65 upper plenum 10 0.023 0.0090 0.0012 2.42e-6
66 gas composition 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
67 0.0 0.0 1.0e-5 293.0
68 end block
69 power definition data block
70 power history. 25 3 -4 1080e7 25 3 -1.0 25.3 -0.1
71 2.750e-04 0.00000 2.750e-02 0.15000 2.7500000 0.15000
72 27 500000 0.19000 200.26912 0.19725 1289.0452 0.19825
73 2919.7725 0.19350 3815.3070 0.20000 6587.4050 0.20100
74 17577.311 0.20200 23551.374 0.20300 40455.191 0.20400
75 61738.320 0.20500 71671.401 0.20550 78782.688 0.20600
76 30229.455 0.20610 82513.988 0.20650 82221.200 0.20675
77 81387.300 0.20700 79143.741 0.20725 72997.278 0.20775
78 65235.550 0.20825 50940.957 0.20900 33705.744 0.21000
79 13504.240 0.21100 12613.704 0.21200 7310.5600 0.21300
80 3034.7775 0.21400 1893.322 0.21500 1289.0452 0.21600

```

Test JM-4 input

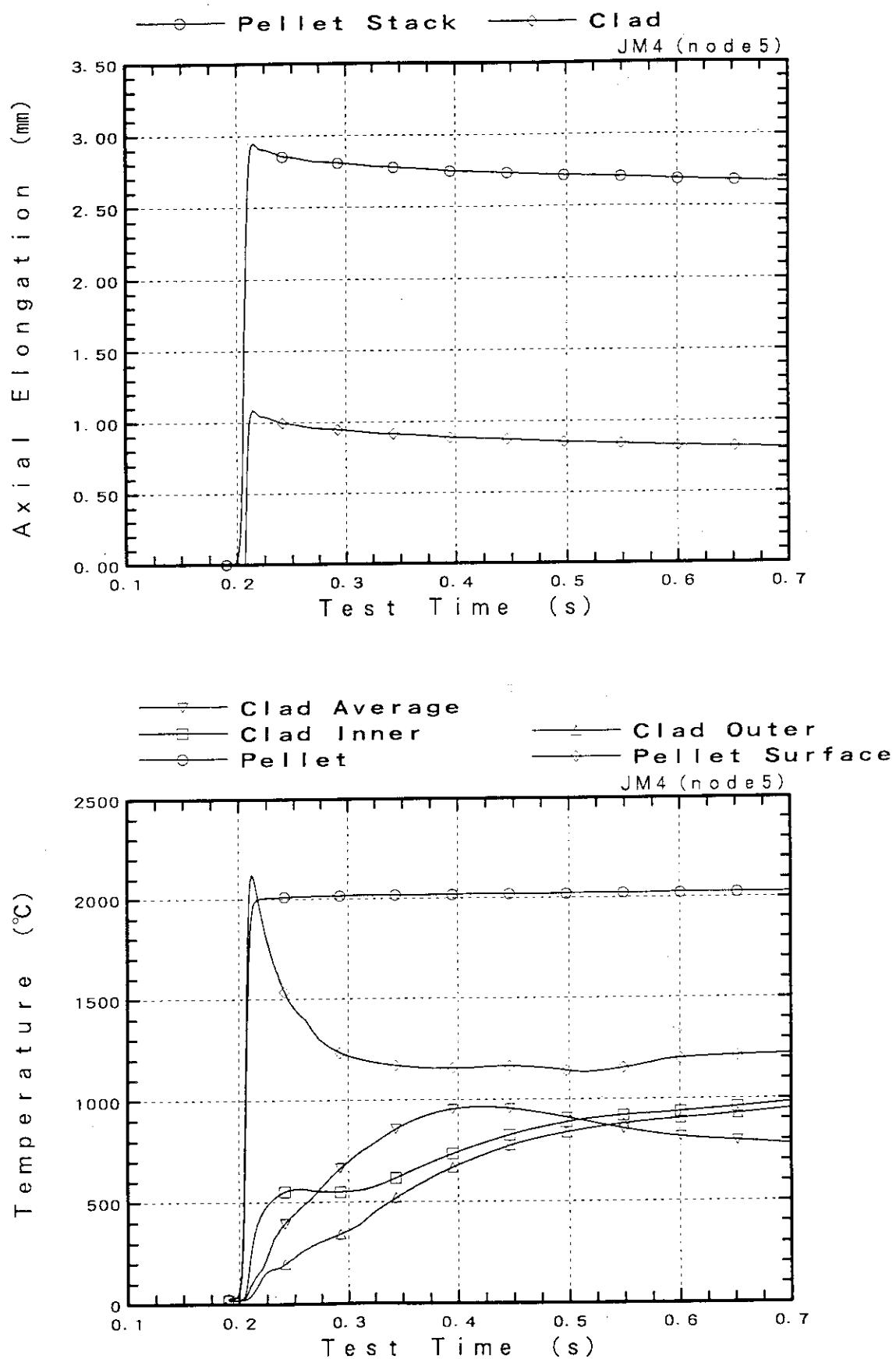


図 II - 1 実験 JM4 の計算結果

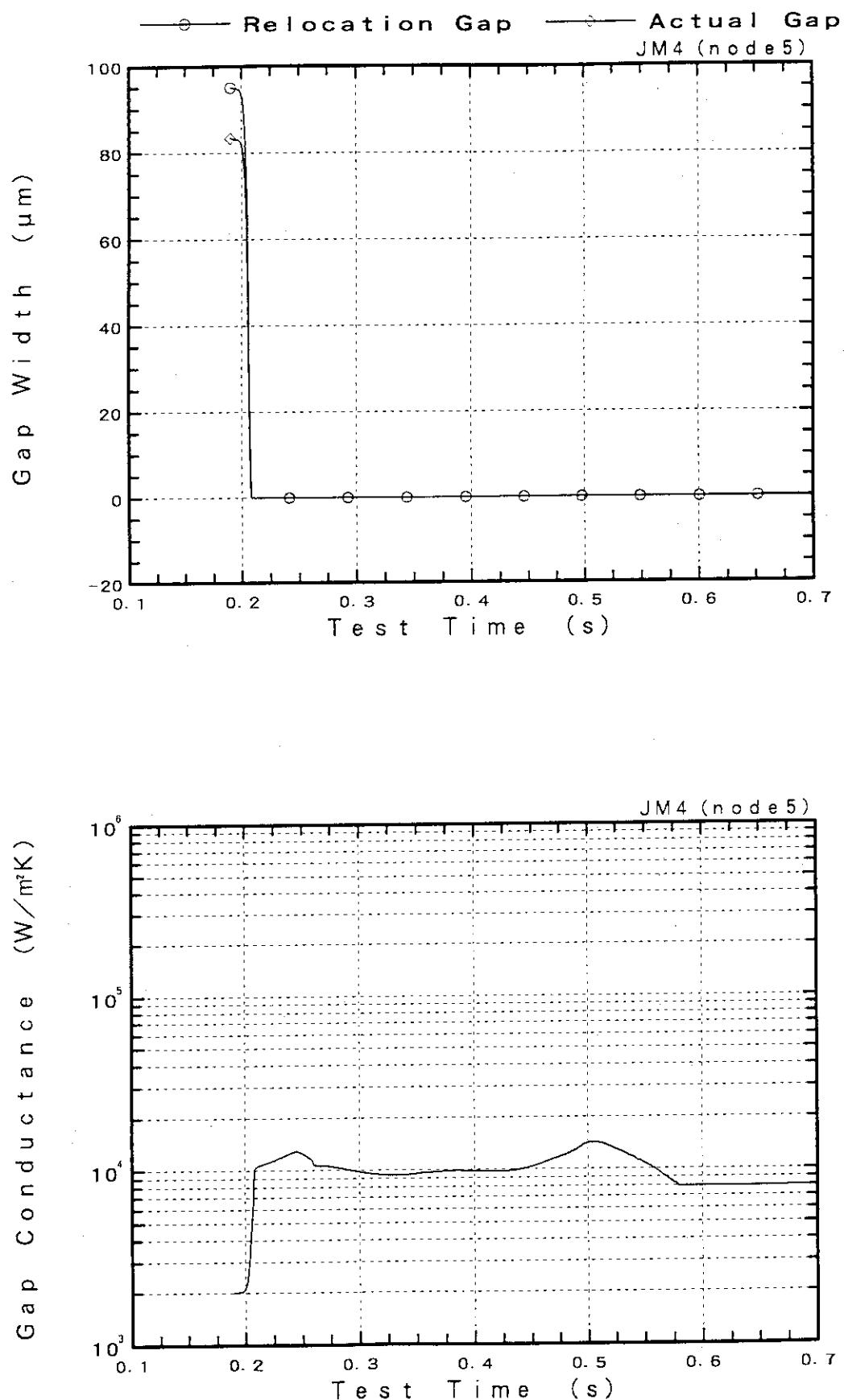


図 II-1 (続き) 実験 JM4 の計算結果

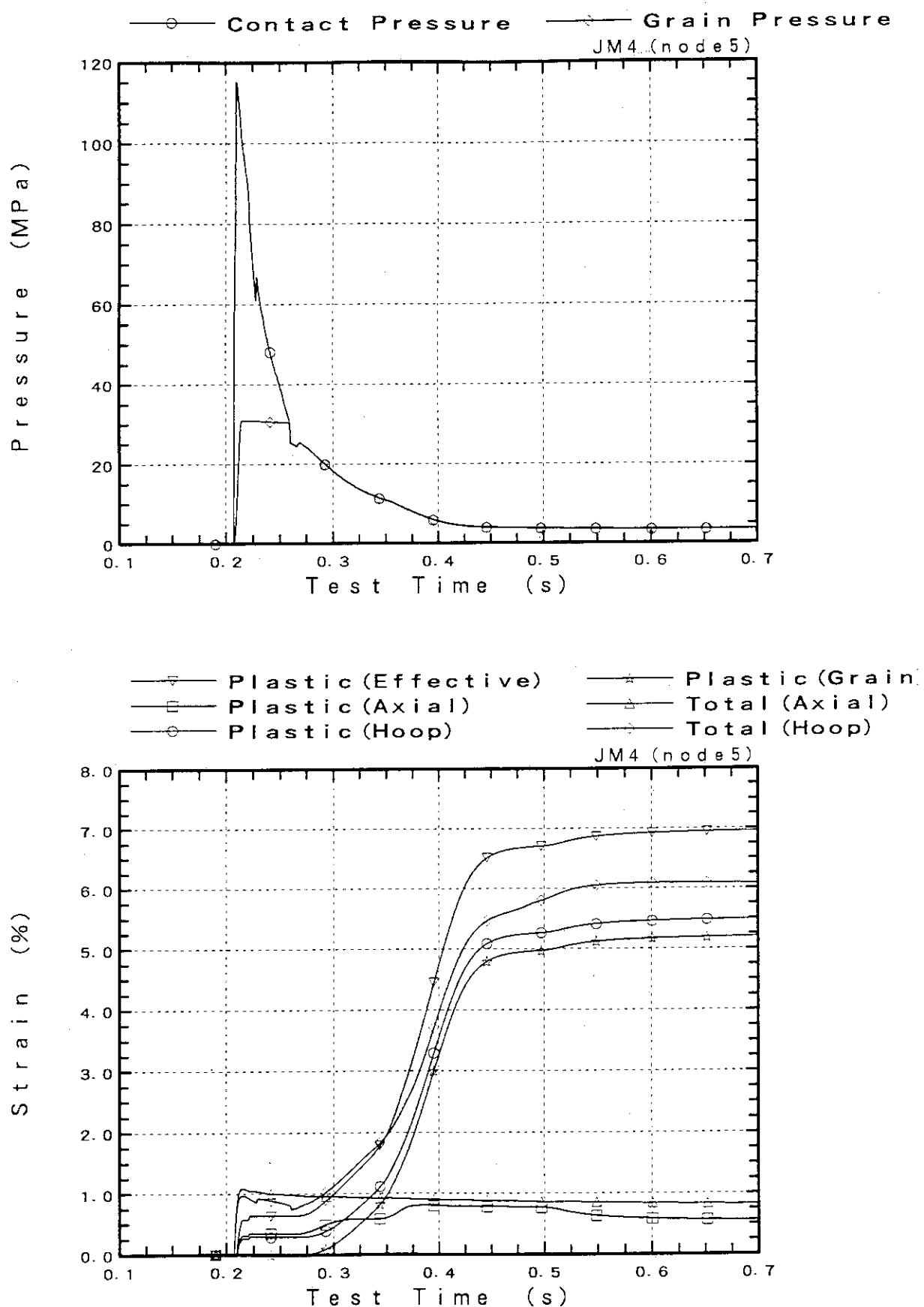


図 II - 1 (続き) 実験 JM4 の計算結果

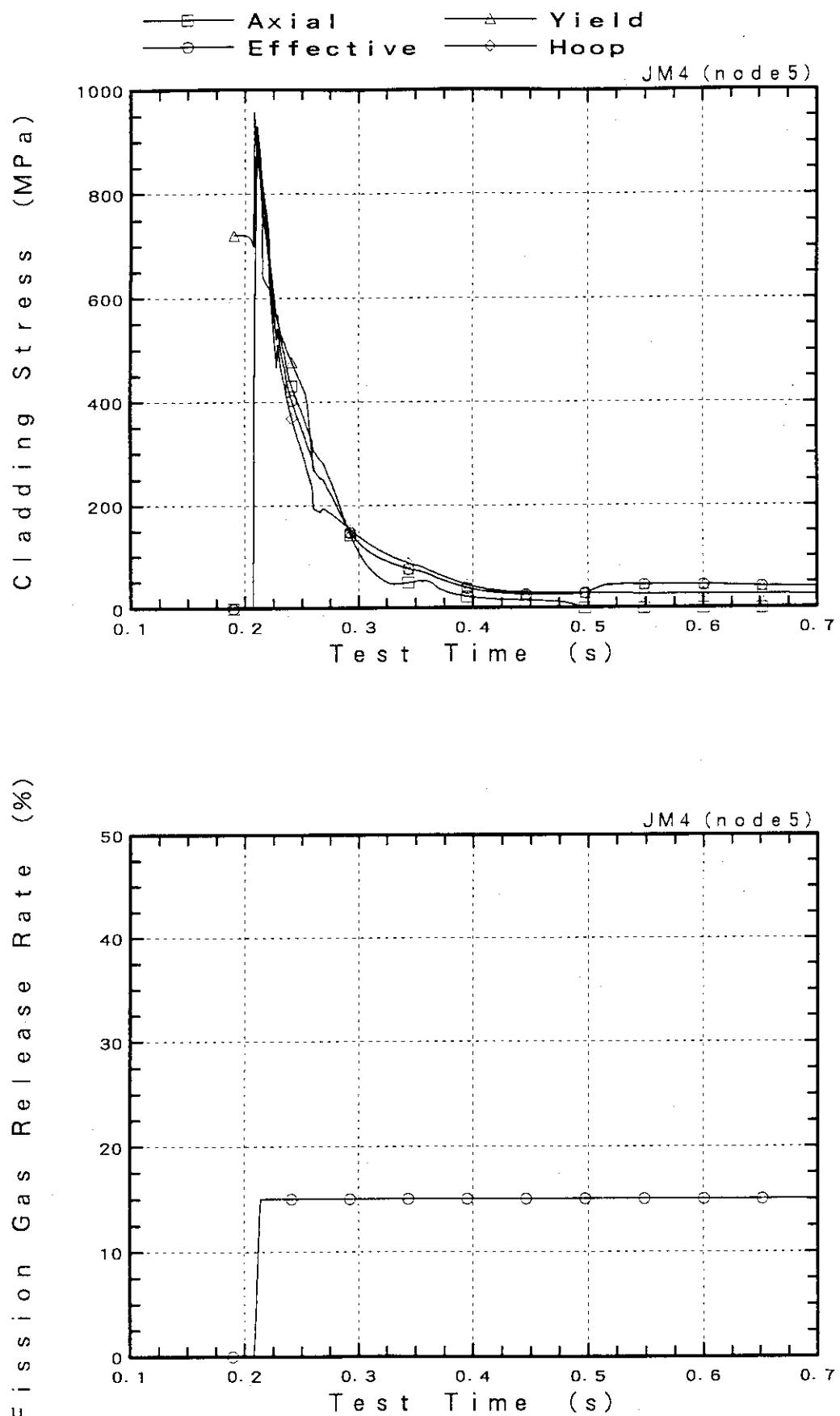


図 II - 1 (続き) 実験 JM4 の計算結果

```

jm5c01.inp
1 reacax= fract3
2 reacat= fract3 sub
3 reserv= unix(0,0)
4 *
5 FILE05= jm5c01.firebaseio STATUS= scratch FORM= FORMATTED
6   CARRIAGE CONTROL= LIST
7 FILE15= jm5c01.firebaseio STATUS= old FORM= UNFORMATTED
8   *
9 FILE05= jm5c01.firebaseio STATUS= UNKNOWN CARRIAGE CONTROL= LIST
10 FILE05= jm5c01.firebaseio STATUS= UNKNOWN FORM= UNFORMATTED
11 FILE05= jm5c01.firebaseio STATUS= UNKNOWN FORM= UNFORMATTED
12 ****
13   1   1   1   111 39999 5 0d-3 1.0d-3
14   1   0.000000 00.70 0 0 1
15   1 1.00e-5 1300 0 0 0005 5.0 0.02 0.25
16   15
17 0.884 0.893 0.911 0.923 0.935 0.943 0.963 0.977 0.992 1.009 1.028 1.048
18 0.083 1.084 1.129 1.132
19 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15
20 0.15 0.15 0.15 0.15
21 10
22 1.014 0.985 0.992 0.989 0.993 0.992 0.995 1.000 1.011 1.024
23 jm5c01. ria on .t=0.5ms. xap=22. a=0.7.r=15. sin=6. d7
24 /o data block
25 /input
26   si units
27 /output
28   si units
29   print interval 0.1
30   elat output 0.0001
31 /end block
32 /solution control
33 /property tables
34   fuel conductivity 100 290. 3500.
35   cladding conduct 50 290. 2300.
36 /time control
37   time step 4.10800e5 -1.0e8 4.10800e5 -0.001 117
38   0.002 -0.0009 0.00001 0.2 118
39   0.000010 0.2001 0.000010 1.8 119
40   0.0001 1.7001 0.001 2.0 120
41   0.001 4.0001 0.001 5.0 121 htc factor
42   0.005 5.0001 0.005 50.0 122
43   steady state limit $,0
44 /convergence criteria
45   implicit 001 .001
46   temperature calc 100 100 1.0
47 /nodalization
48   axial nodes 0.005 0.015 0.025 0.035 129 deformation model
49   0.045 0.055 0.065 0.075 129 no balloon
50   0.085 0.095 0.105 0.115 130 fuel expansion
51   fuel radial nodes 0.0 1.1610E-3 1.8420E-3 2.0110E-3 131 failure model
52   2.3230E-3 2.5970E-3 2.8440E-3 3.0720E-3 132 general 1.0
53   3.2850E-3 3.4840E-3 3.6720E-3 3.8510E-3 133 metal-water reaction
54   4.0230E-3 4.1870E-3 4.3450E-3 4.4980E-3 134 cathcart
55   4.6450E-3
56   cladding radial node 3
57 /end block
58 /design of fuel rod
59   fuel rod 0.100 0.010574 293.0
60   pellet 0.0 0.0 0.01 0.0 0.00929 2.12 140 okmn 0.680
61   0.65 222393E 0 0.0 2.0 1883.0 8.0 141 /end block
62   cladding 0.000022 0.5 1.14 6.122e16 4.1080e7 0.04 142 /end
63   upper climum 10 0.023 0.0090 0.0012 2.10e-8
64   gas composition 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
65   0.0 0.0 1.0e+5 293.0
66 /end block
67 /power definition data block
68 power history 33.3 -4.1080e7 33.3 -1.0 33.3 -0.1
69   1.8900e-4 0 0000 1.8900e-4 0.17734 1.14801e-1 0.18802
70   2.39830e-0 0.19302 4.60935e+1 0.19802 1.52944e+2 0.20002
71   5.07457e+2 0.20202 1.63390e+3 0.20402 3.08736e+3 0.20502
72   5.59740e+3 0.20602 1.01778e+4 0.20702 1.84719e+4 0.20801
73   2.15285e+4 0.20228 2.34745e+4 0.20882 3.60541e+4 0.20936
74   4.37039e+4 0.20989 4.93213e+4 0.21032 5.29398e+4 0.21063
75   5.58354e+4 0.21091 5.80769e+4 0.21119 5.94470e+4 0.21142
76   6.02463e+4 0.21159 6.08237e+4 0.21173 6.09402e+4 0.21186
77   6.10251e+4 0.21200 8.09402e+4 0.21214 8.08629e+4 0.21227
78   6.02463e+4 0.21241 5.94877e+4 0.21258 5.80778e+4 0.21281
79   5.58377e+4 0.21309 5.29414e+4 0.21337 4.93231e+4 0.21368
80   4.37063e+4 0.21411 3.60557e+4 0.21464 2.84773e+4 0.21518

```

Test JM-5 input

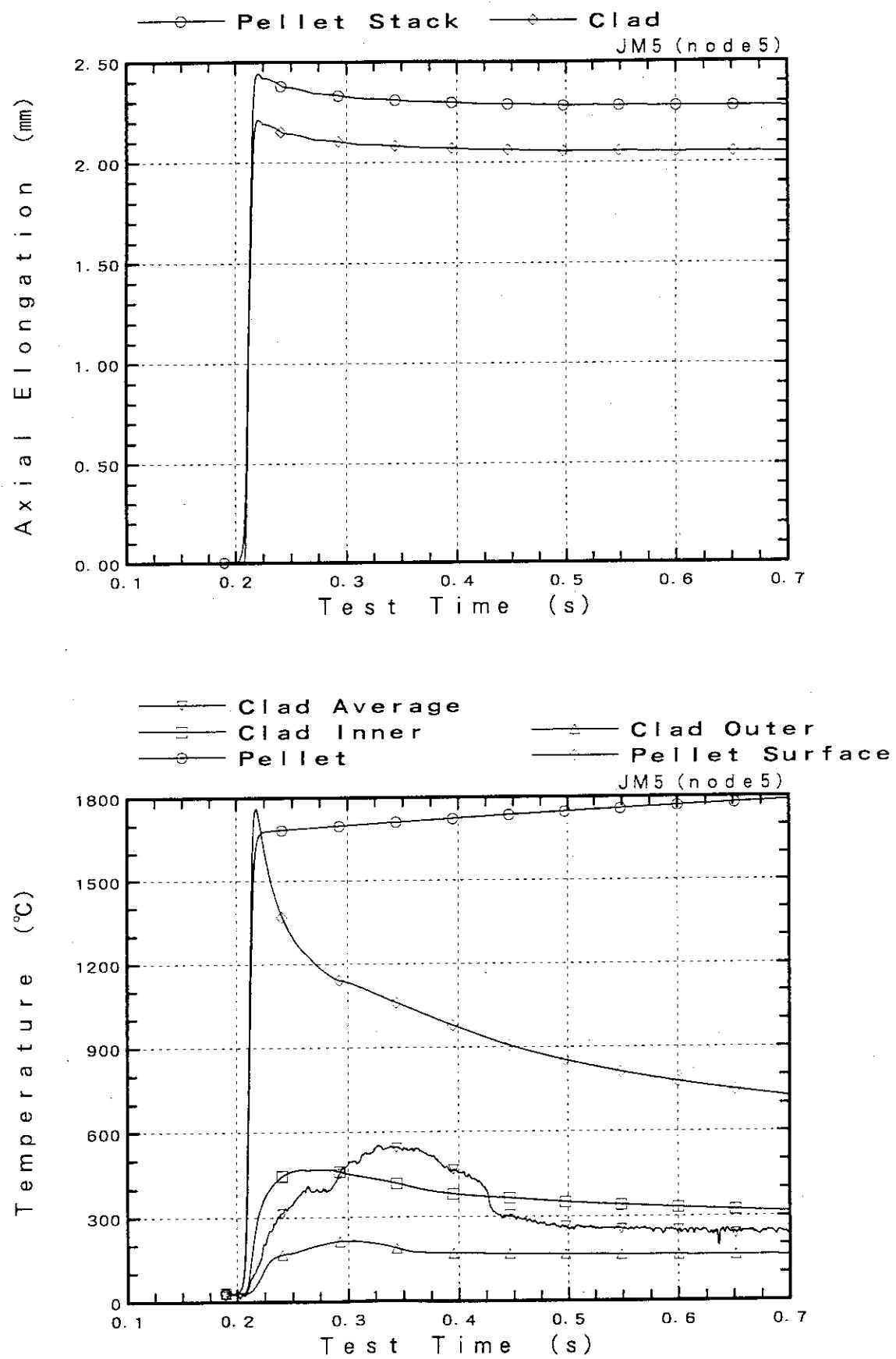


図 II - 2 実験 JM5 の計算結果

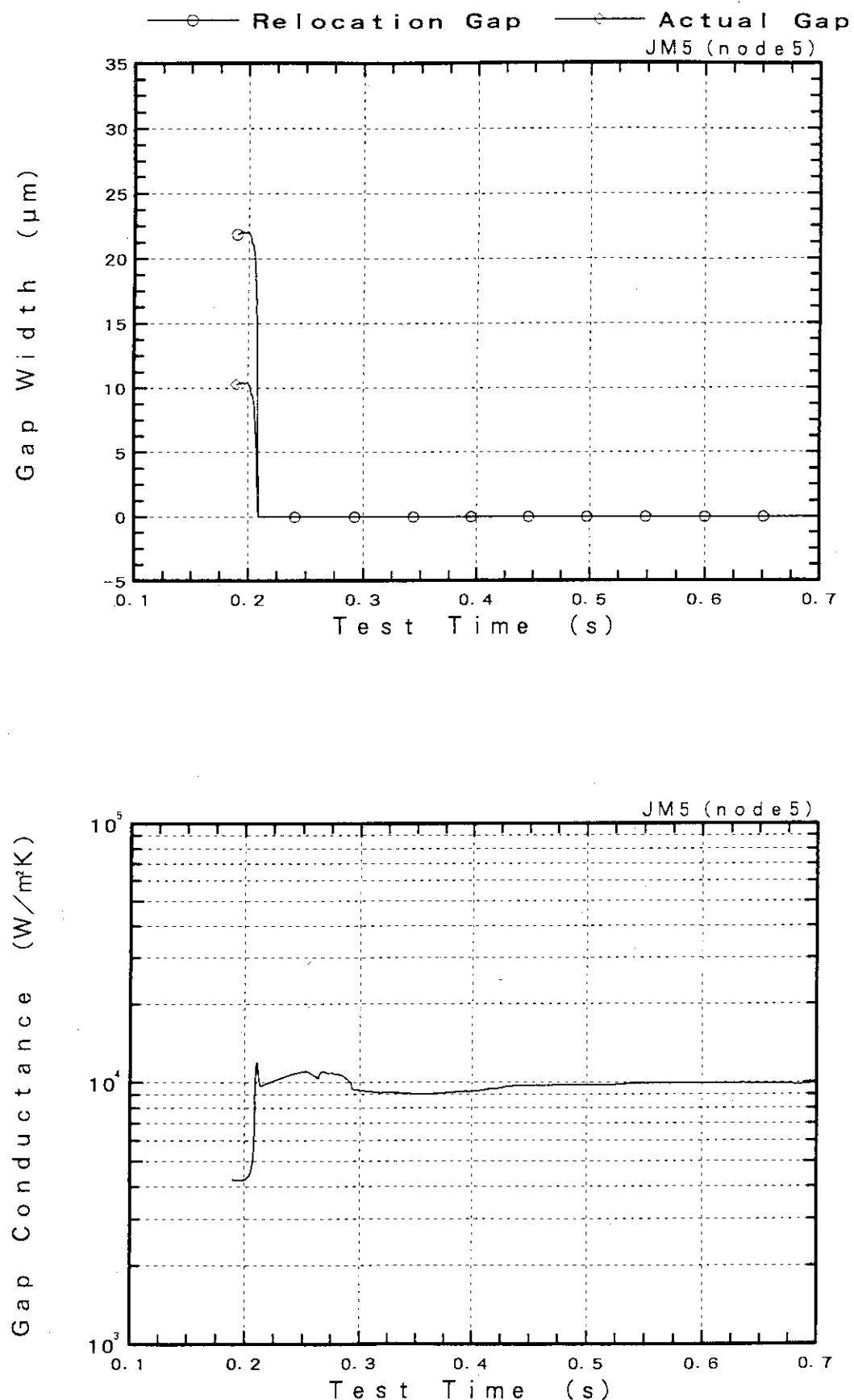


図 II - 2 (続き) 実験 JM5 の計算結果

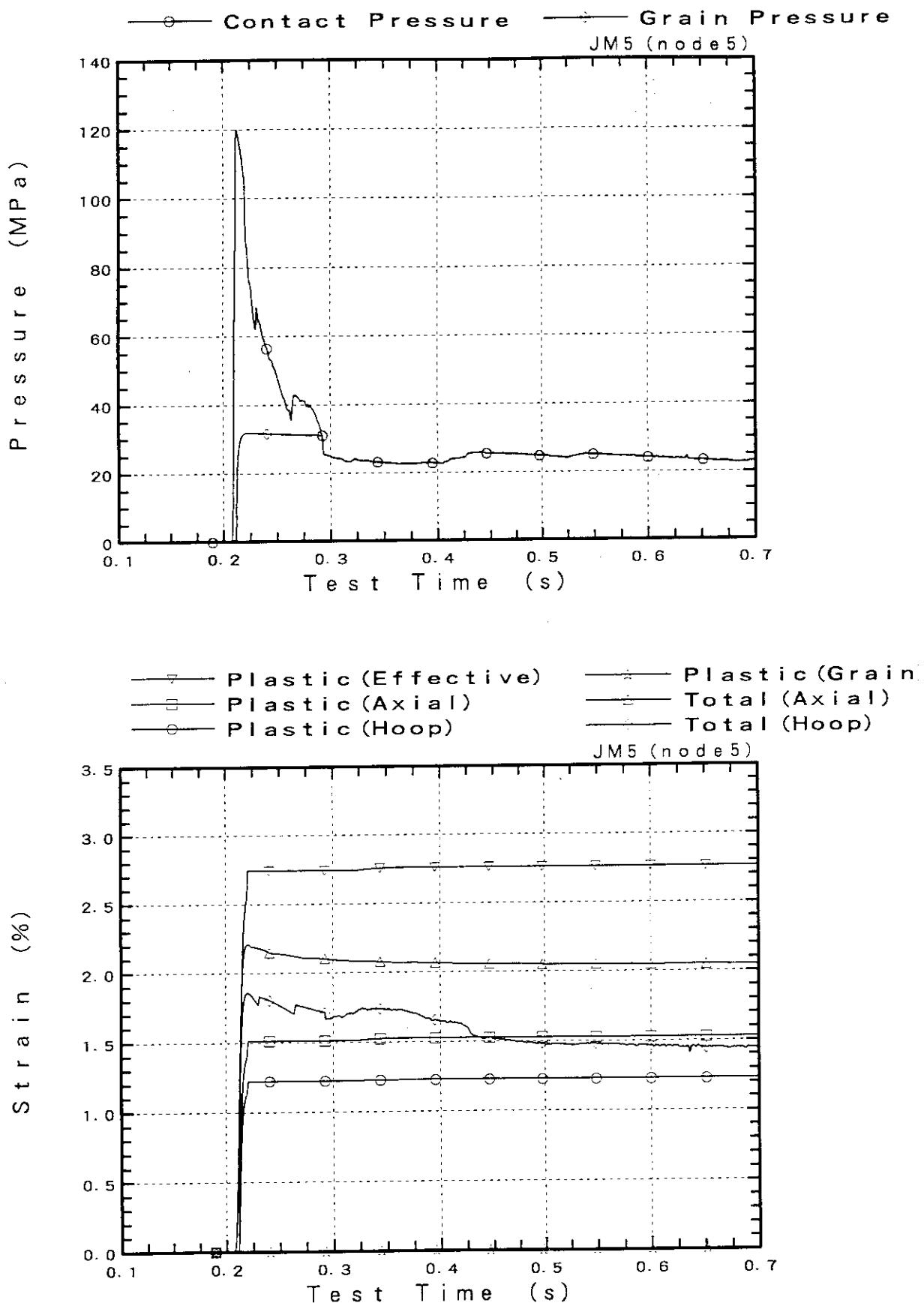


図 II - 2 (続き) 実験JM5の計算結果

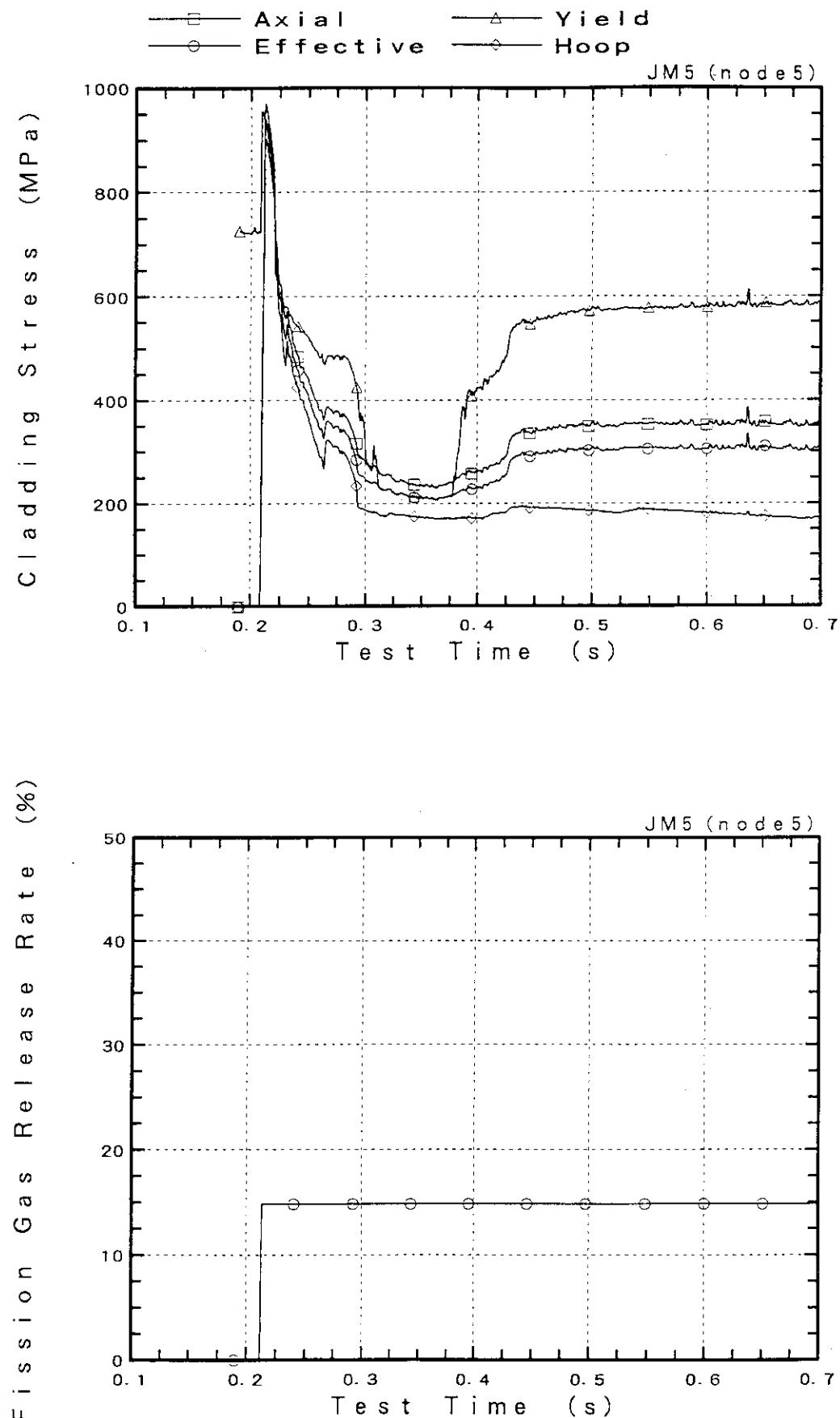


図 II - 2 (続き) 実験JM5の計算結果

```

mh3c01.inp
 1 NP3PMX= frcnts
 2 NFACLU= frcnts.duh
 3 NPSERVE= unix:0:0
 4
 5 FILE05= ~u11f14, STATUS= scratch, FORM= FORMATTED
 6   CARRIAGE CONTROL= LIST
 7 FILE15= lib sth2x1,
 8   STATUS= old!, FORM= UNFORMATTED
 9
10 FILE06= mh3c01 lis, STATUS= UNKNOWN, CARRIAGE CONTROL= LIST
11 FILE07= mh3c01 f50, STATUS= UNKNOWN, FORM= UNFORMATTED
12
13   1   1   111 99999 5.0d-2 1.0d-3
14   1   0.0000000 0.70 0 0 1
15   2.520e-5 1373.0 0.0005 5.0 0.02 0.40
16 .18
17 0.372 0.382 0.994 0.908 0.926 0.944 0.958 0.976 1.000 1.034 1.078 1.120
18 1.135 1.255 1.453 1.619 1.873 2.267
19 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25
20 0.25 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0
21 .8
22 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000
23 mm=3 ria 0.32s 30.Gms .expan 0.7. t 15.
24 id data block
25 input
26   si units
27 output
28   si units
29   print interval 0.10
30   slot output 0.0001
31 end block
32 solution control
33 property tables
34   fuel conductivity 100 290. 3500.
35   cladding conduct. 50 290. 2300.
36 time control
37   time step 1.15920e6 -1.0e8 1.15920e6 -0.001 117 end block
38   0.001 00.0000 0.0001 0.179 118 /matpro selection data block
39   0.00001 0.180001 0.00001 1.5 119 cknn 0.415
40   0.0005 3.50001 0.00005 3.6 120 end block
41   0.001 4.0001 0.001 5.0 121 /end
42   0.005 5.0001 0.005 50.0
43 steady state limit 5.0
44 convergence criteria
45   implicit .01 .01
46   temperature calc. 100 100 10.0
47 nodalization
48   axial nodes 8
49   fuel radial nodes 0.0 1.5490E-3 2.1910E-3 2.6830E-3
50   3.0980E-3 3.4840E-3 3.6330E-3 3.7940E-3
51   3.9490E-3 4.0980E-3 4.2420E-3 4.3120E-3
52   4.3810E-3 4.4490E-3 4.5160E-3 4.5490E-3
53   4.5820E-3 4.6150E-3 4.6470E-3
54   cladding radial nodes 3
55 end block
56 design of fuel rod
57 fuel rod 0.1224 0.010570 293.0
58 pellet 0.00305 0.00026 0.01224 9.134e-9 0.009294 2.12
59 0.95 3.36096e6 0.0 2.0 1883.0 6.4
60 cladding 0.00002D 0.5 1.14 7.528e17 9.4320e7 0.04
61 upper plenum 8 0.025 0.0092 0.0012 2.02e-6
62 gas composition 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
63 0.0 4.327e-3 5.218e6 293.0
64 end block
65 cover definition data block
66 cover history 18.0 -9.4320e7 18.0 -1.0 18.0 -0.1
67 5.4050e-05 0.000005.4148e-05 0.1853355.4202e-01 0.182000
68 2.8460e-02 0.1840005.5213e-02 0.185001.4943e-03 0.188000
69 3.4242e-03 0.1870007.8462e-03 0.1880009.0122e-03 0.188187
70 1.1868e-04 0.1884981.5432e-04 0.1889021.9539e-04 0.189308
71 3.3635e-04 0.1897142.8730e-04 0.1900342.8691e-04 0.190285
72 3.0261e-04 0.1904833.1475e-04 0.1906913.2238e-04 0.190684
73 3.2550e-04 0.1909913.2827e-04 0.1910973.3026e-04 0.191200
74 3.3072e-04 0.1913033.3026e-04 0.1914083.2837e-04 0.191509
75 3.3551e-04 0.1916153.2239e-04 0.1917423.1475e-04 0.191915
76 3.0261e-04 0.1921232.8691e-04 0.1923402.8730e-04 0.192572
77 2.3628e-04 0.1928921.9541e-04 0.1932981.5433e-04 0.193704
78 1.2923e-04 0.1939691.2348e-04 0.1940008.8974e-03 0.194500
79 5.2924e-03 0.1950004.4100e-03 0.1955003.078e-03 0.196000
80 2.1923e-03 0.1965001.0953e-03 0.1975005.5468e-02 0.198500

```

Test MH-3 input

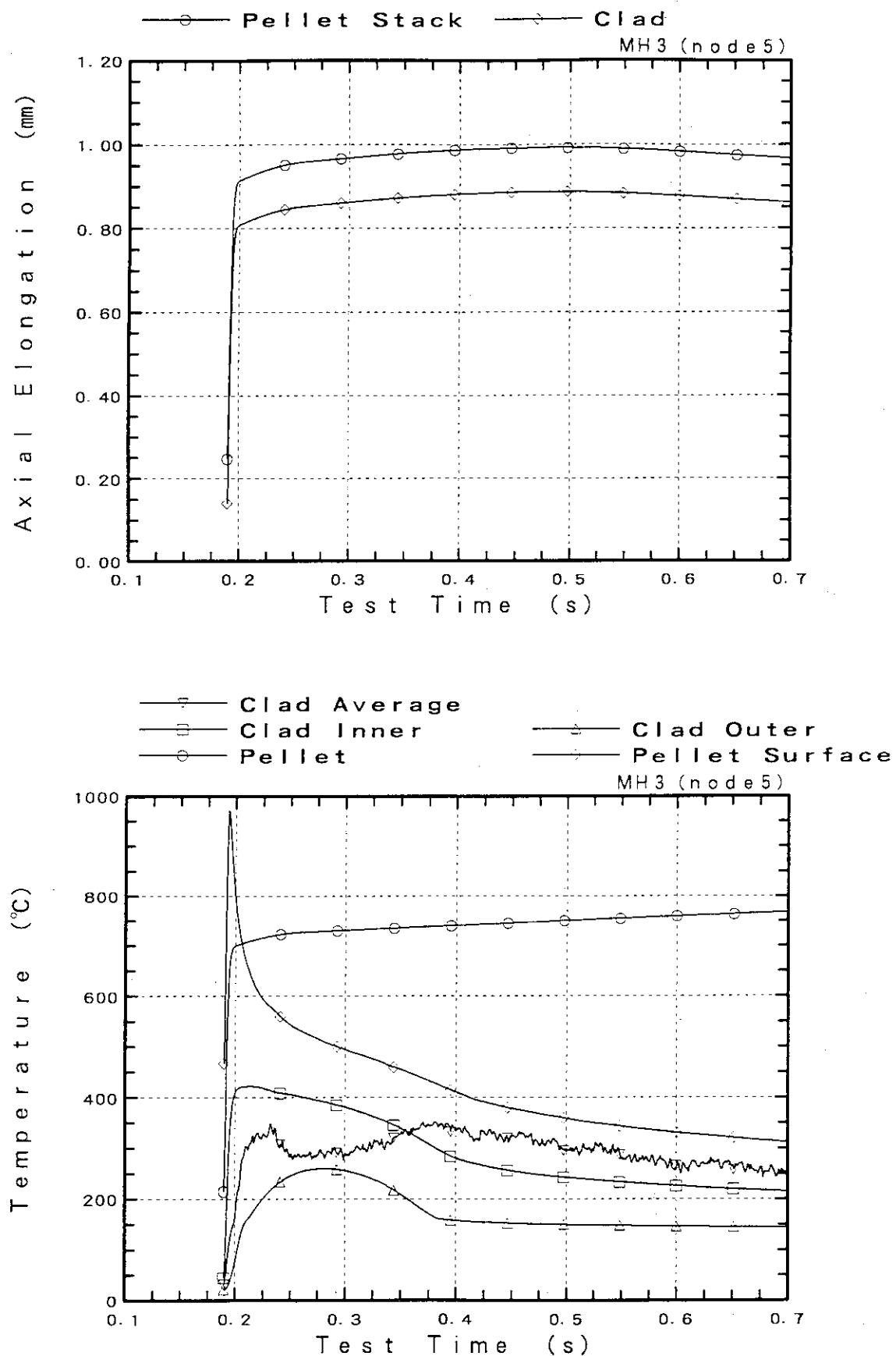


図 II - 3 実験MH 3の計算結果

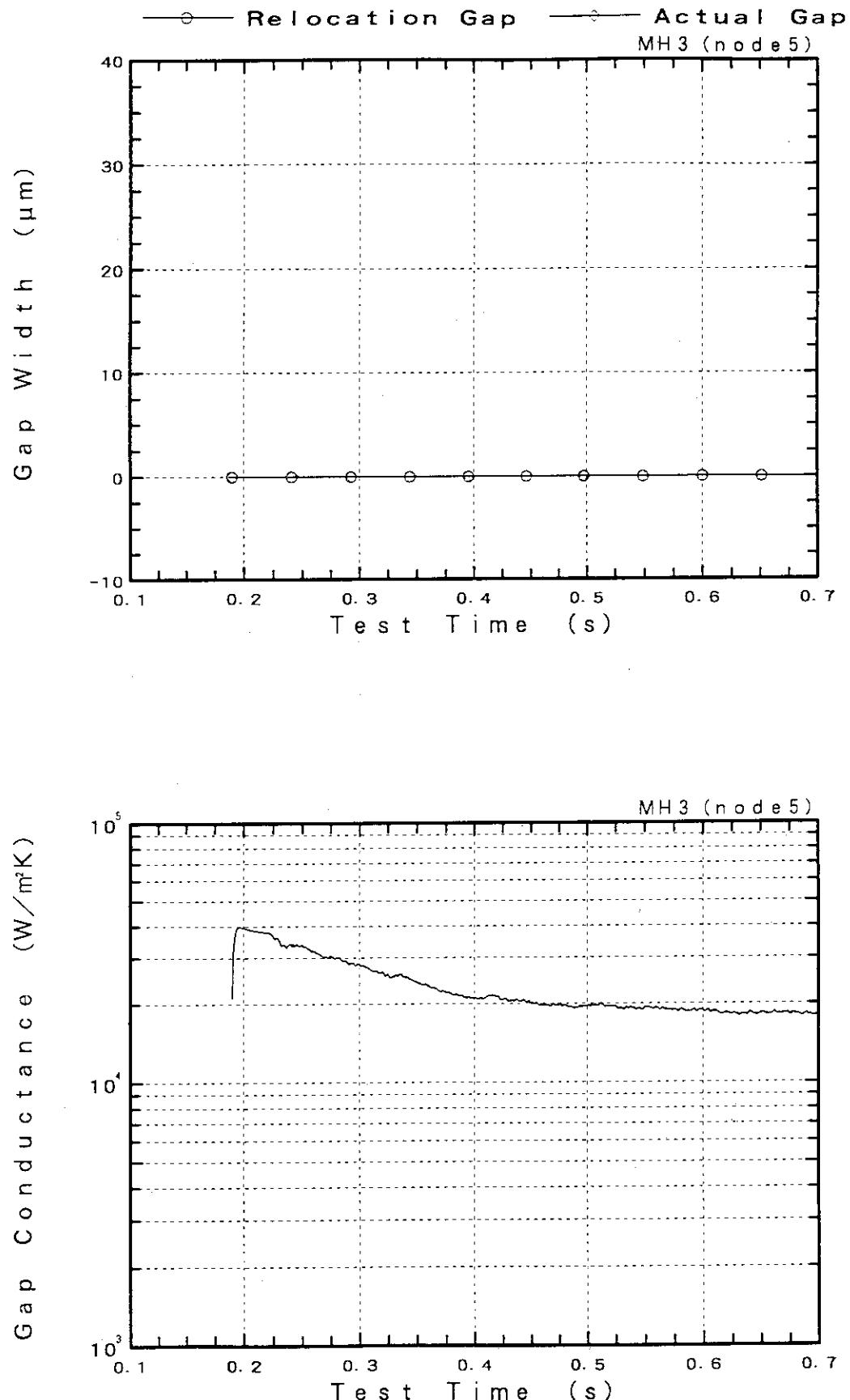


図 II - 3 (続き) 実験MH 3 の計算結果

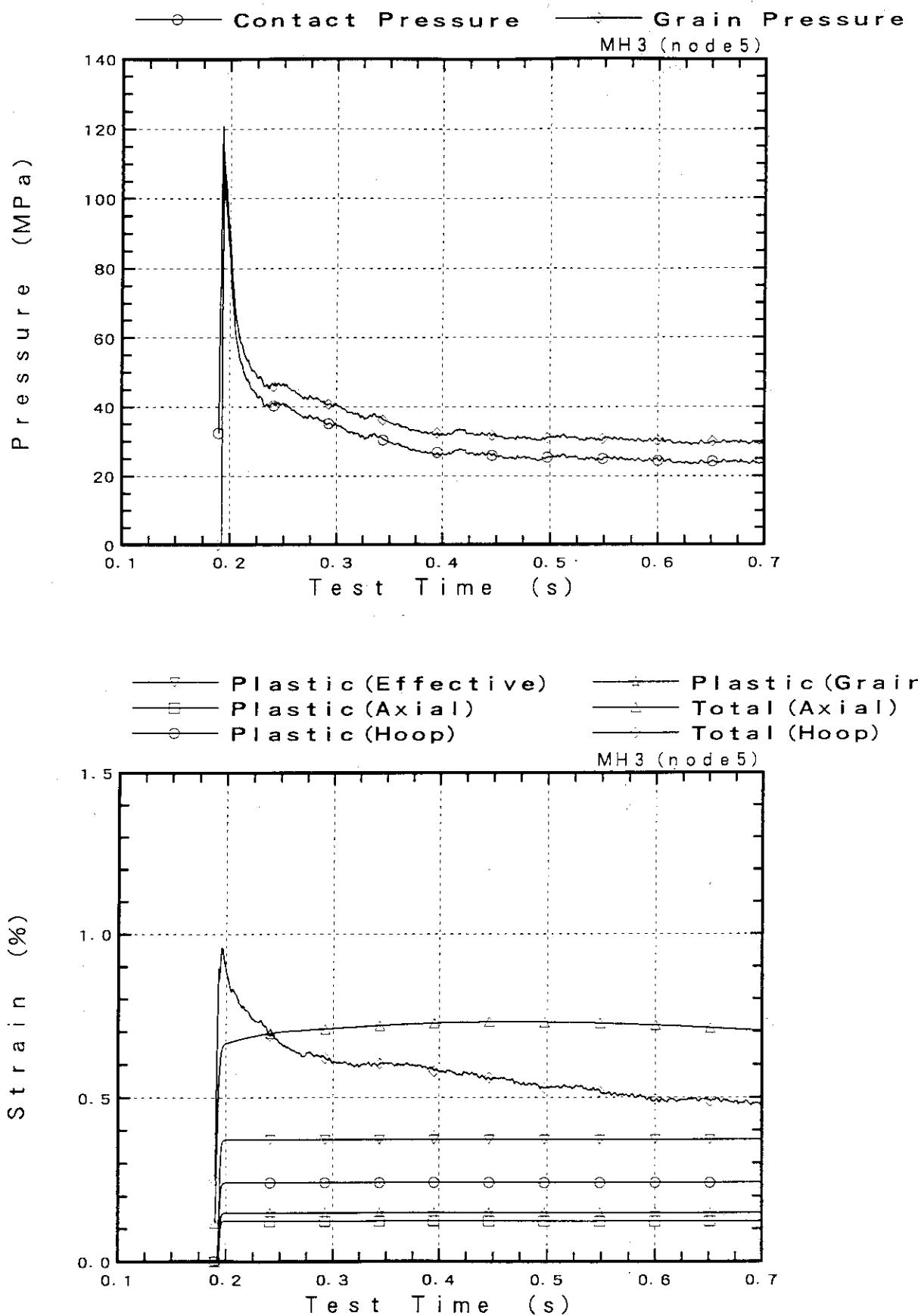


図 II - 3 (続き) 実験MH 3の計算結果

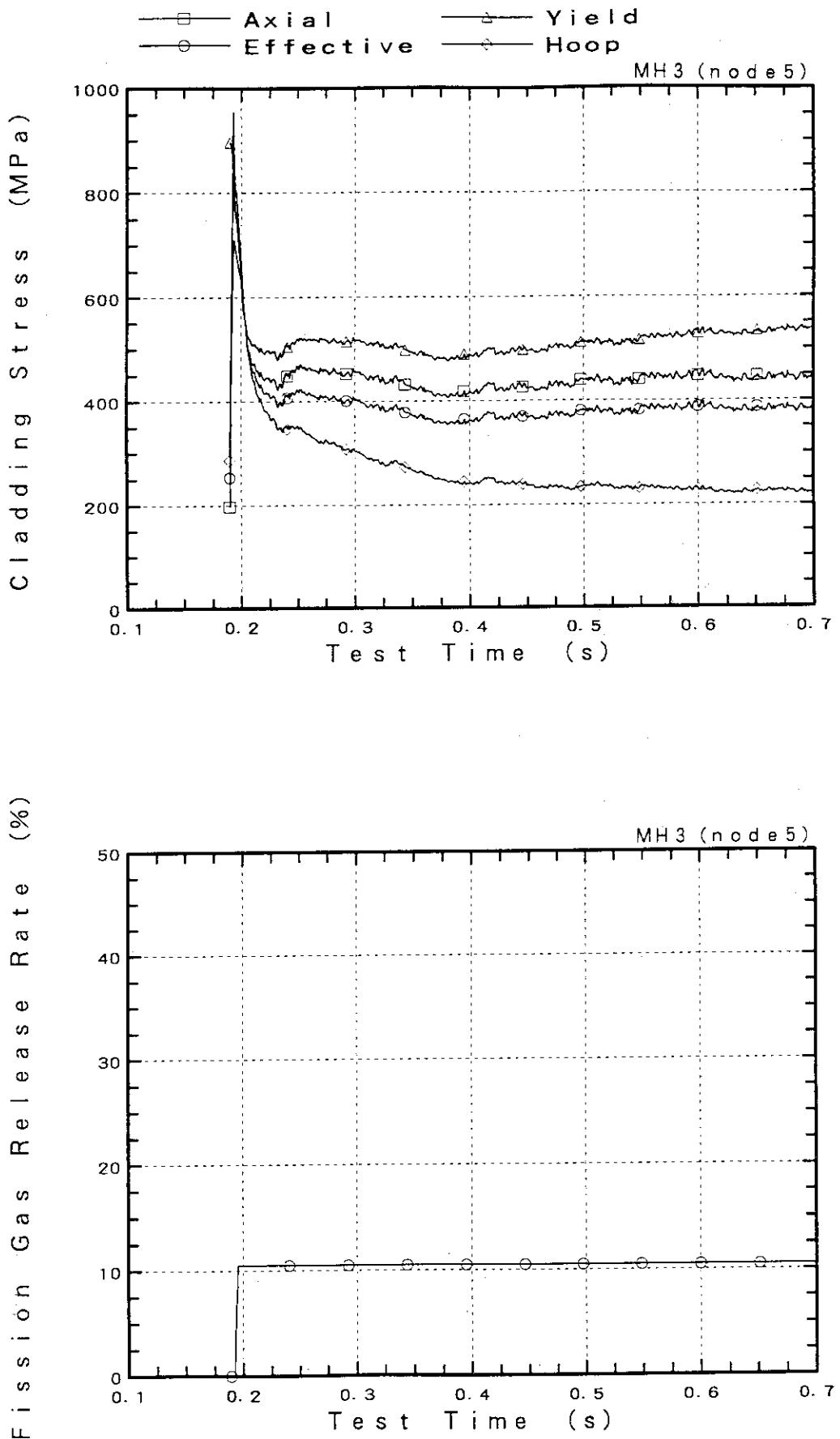


図 II - 3 (続き) 実験MH 3の計算結果

gk1c01.inp

```

1 NPF74=4 fract3
2 NPADUM= fract3.duh
3 NPASERV= unix 0 0
4 *
5 FILE05= nullfile STATUS= scratch FORM= FORMATTED
6   CARRIAGE CONTROL= LIST
7 FILE15= ... lib std2kt
8   STATUS= old . FORM= UNFORMATTED
9 *
10 FILE09= gk1c01.lis . STATUS UNKNOWN . CARRIAGE CONTROL= LIST
11 FILE09= gk1c01.fed . STATUS UNKNOWN . FORM= UNFORMATTED
12 *
13 1 F 1 111 39999 5 0d-2 5 0d-3
14 1 0 000000 0 70 0 0 1
15 2 720e-5 1373 0 0.0005 5.0 0.02 0.40
16 18
17 0.928 0.998 0.908 0.921 0.937 0.953 0.966 0.982 1.002 1.032 1.070 1.107
18 1.153 1.257 1.390 1.527 1.753 2.047
19 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25
20 0.25 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0
21 8
22 1 000 1 000 : 000 1 000 : 000 1 000 1 000 1 000
23 gk-1.ria 0.22s, 30.0ms exan 0 7.1 15
24 no data block
25 input
26 si units
27 output
28 si units
29 print interval 0.10
30 plot output 0.0001
31 end block
32 solution control
33 property tables
34 fuel conductivity 100 290. 3500.
35 cladding conduct. 50 290. 2300.
36 time control
37 time step 1.15920e-6 -1.0e8 1.15920e-6 -0.001 117 end block
38 0.100 -0.0009 0.0001 0.180 118 /matpro selection data block
39 0.00001 0.180001 0.00001 1.2 119 ckmn 0.415
40 0.00002 1.50001 0.00002 1.7 120 end block
41 0.001 2.0001 0.001 5.0 121 /end
42 0.005 5.0001 0.005 50.0
43 steady state limit 5.0
44 convergence criteria
45 implicit .01 .01
46 temperature calc 100 100 10 0
47 nodalization
48 axial nodes 8
49 fuel radial nodes 0.0 1.5490E-3 2.1910E-3 2.6830E-3
50 3.0980E-3 3.4640E-3 3.6330E-3 3.7940E-3
51 3.9490E-3 4.0880E-3 4.2420E-3 4.3120E-3
52 4.3810E-3 4.4490E-3 4.5160E-3 4.5490E-3
53 4.5820E-3 4.5150E-3 4.6470E-3
54 cladding radial node 3
55 end block
56 design of fuel rod
57 fuel rod 0.1224 0.010568 293.0
58 pellet 0.00205 0.00026 0.01224 9.134e-9 0.009294 2.12
59 0.35 3.63744e-6 0.0 2.0 1883.0 6.4
60 cladding 0.000018 0.5 1.14 8.848e17 9.7200e7 0.04
61 upper plenum 8 0.025 0.0092 0.0012 2.02e-6
62 gas composition 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
63 0.0 4.327e-3 5.215e+6 293.0
64 end block
65 power definition data block
66 power history 20.0 -9.7200e7 20.0 -1.0 20.0 -0.1
67 7.2159e-05 0.0000007.2300e-05 0.1882484.8975e+02 0.187000
68 1.1331e-03 0.1830002.5217e-03 0.1890008.0658e+03 0.190000
69 1.2257e+04 0.1806391.5940e+04 0.1911892.1082e+04 0.191571
70 2.6694e+04 0.1912743.2358e+04 0.1923763.6517e+04 0.192692
71 3.9198e+04 0.1929224.1341e+04 0.1931374.2999e+04 0.193343
72 4.4043e+04 0.1935143.4605e+04 0.1938404.4928e+04 0.193745
73 4.5113e+04 0.1938474.5182e+04 0.1939494.5119e+04 0.194051
74 4.4829e+04 0.1941534.4608e+04 0.1942584.4044e+04 0.194384
75 4.3000e+04 0.1945554.1341e+04 0.1947613.9197e+04 0.194976
76 3.6518e+04 0.1952063.2359e+04 0.1955232.6995e+04 0.195925
77 2.1084e+04 0.1963271.7050e+04 0.1965931.3179e+04 0.197000
78 9.2374e-03 0.1975008.4775e+02 0.1980004.5453e+03 0.198500
79 3.1325e+03 0.1990002.2454e+03 0.1995001.5823e+03 0.200000
80 1.1130e+03 0.2005003.6532e+02 0.2015002.1637e+02 0.203000

```

Test GK-1 input

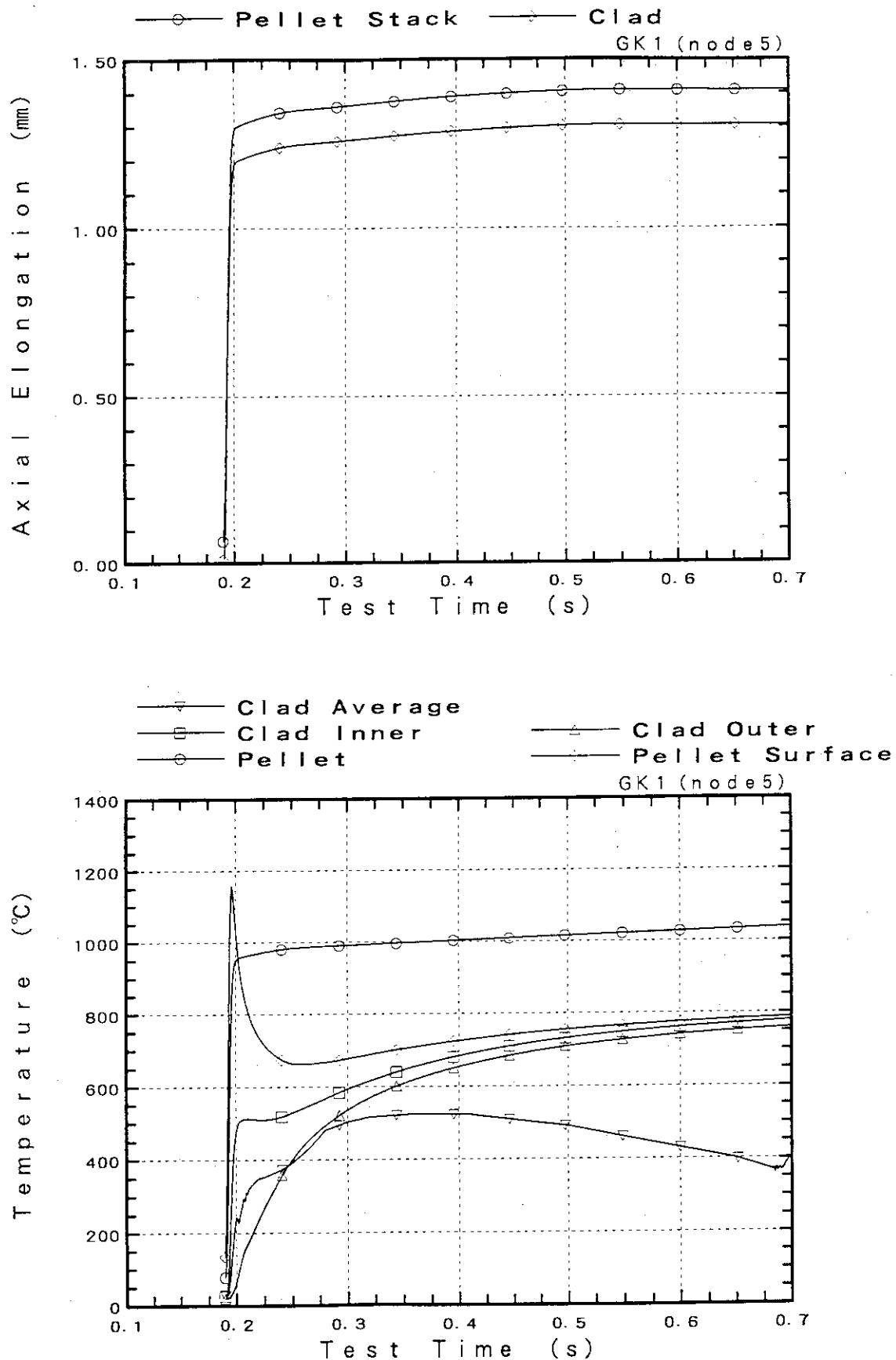


図 II - 4 実験 G K 1 の計算結果

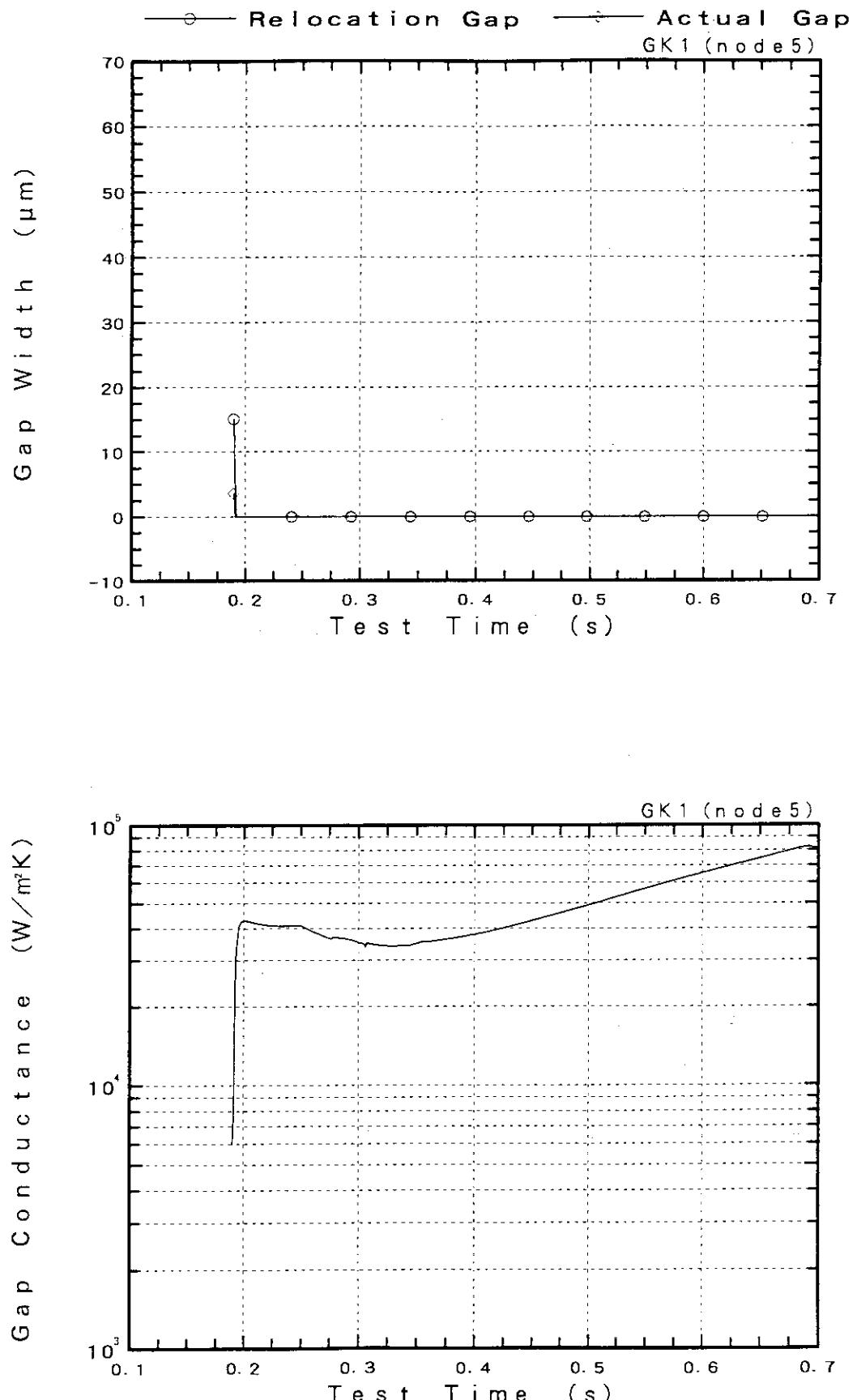


図 II-4 (続き) 実験GK1の計算結果

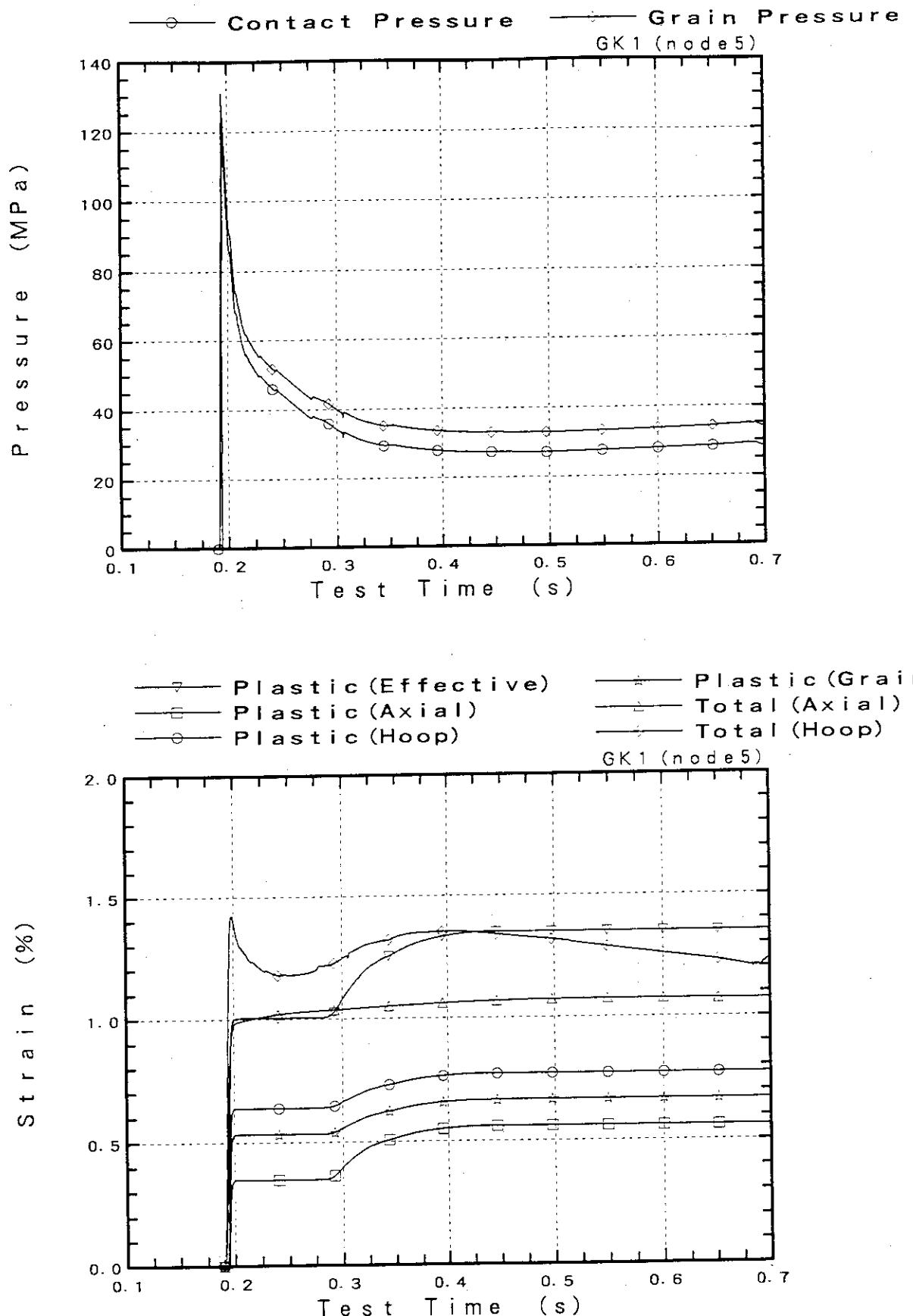


図 II - 4 (続き) 実験GK1の計算結果

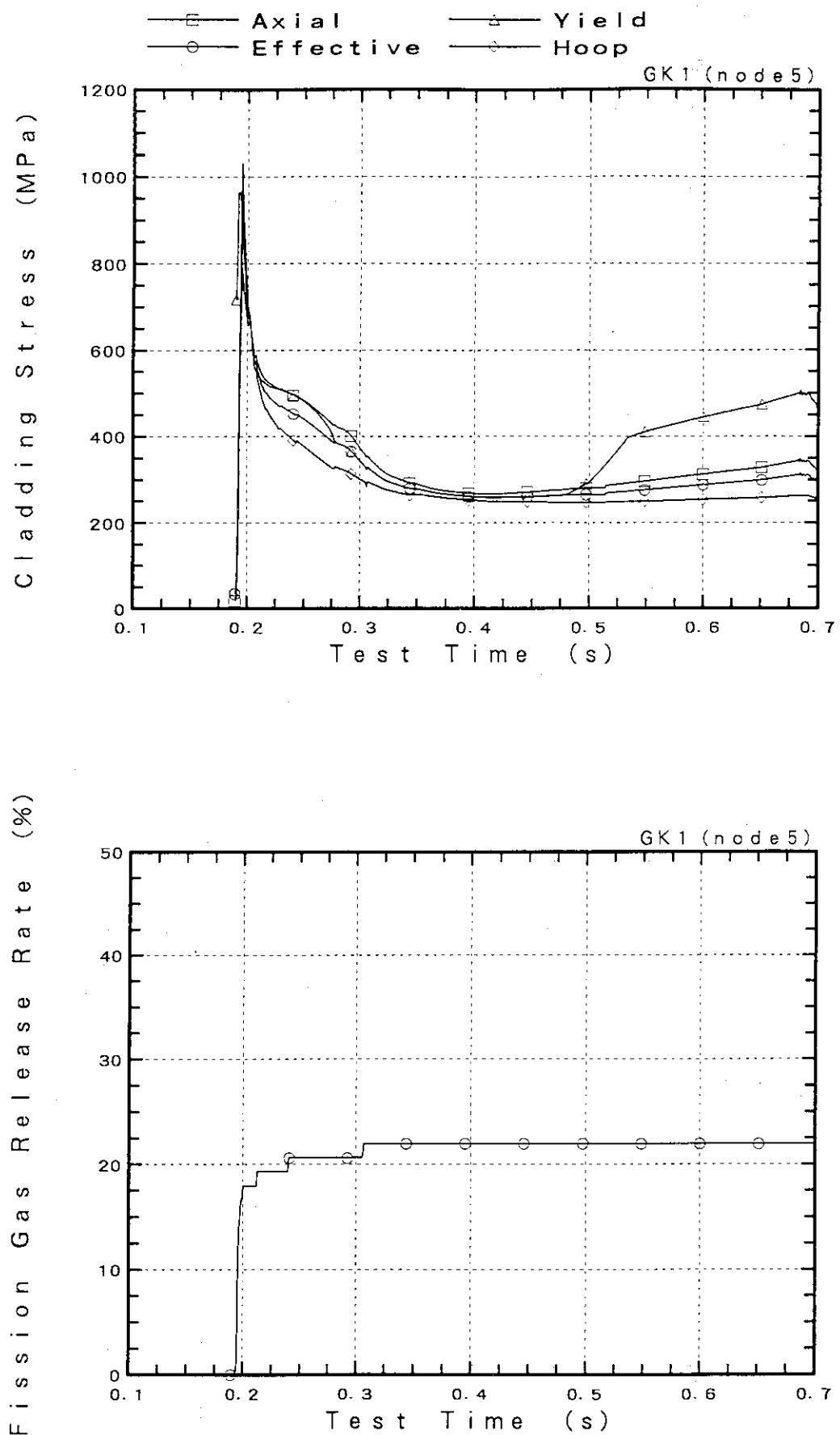


図 II - 4 (続き) 実験GK1の計算結果

```

gk2c01.inp
1 NPAPAX= 1#actd
3 NPADUM= fractd.suh
3 NFASERV= unix 0.0
4 *
5 FILEDS= auxfile STATUS= scratch FORM= FORMATTED
6   CARTRIDGE CONTROL= LIST
7 FILEIS= lib sth2xt
8   STATUS= old FORM= UNFORMATTED
9 *
10 FILEDR= gk2c01.lis STATUS= UNKNOWN CARTRIDGE CONTROL= LIST
11 FILEDD= gk2c01.fed STATUS= UNKNOWN FORM= UNFORMATTED
12 ****
13   f   f   111 99999 5 0d-2 1 0d-3
14   1   0.000000  0.70  0   0   1
15   2 720e-5 1373 0  0.005  5 0   0 02  0 40
16   18
17 0.388 0.338 0.308 0.221 0.237 0.353 0.265 0.382 1.002 1.032 1.070 1.107
18 1.132 1.257 1.390 1.527 1.733 2.047
19 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25
20 0.25 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0
21 8
22 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000
23 gk=3.ria 0.22s.10000.0ms expand 0.7.3.15
24 no data block
25 input
26   si units
27 output
28   si units
29   print interval 0 10
30   plot output 0.0001
31 end block
32 solution control
33 property tables
34   fuel conductivity 100 290. 3500.
35   cladding conduct. 50 290. 2300.
36 time control
37   time step 1.15920e6 -1.0e8 1.15920e6 -0.001 117 end block
38   0.002 -0.0009 0.0020 0.160 118 /matpro selection data block
39   0.00001 0.160100 0.00001 1.5 119 chmn 0.415
40   0.0005 3.50001 0.00005 3.0 120 end block
41   0.001 4.0001 0.001 5.0 121 /end
42   0.005 5.0001 0.005 50.0
43   steady state limit 5.0
44 convergence criteria
45   implicit 01 .01
46   temperature calc. 100 100 10.0
47 nodalization
48   axial nodes 8
49   fuel radial nodes 0 0 1.5490E-3 2.1910E-3 2.6830E-3
50   3.0990E-3 3.4840E-3 3.6330E-3 3.7940E-3
51   3.9490E-3 4.0980E-3 4.2420E-3 4.3120E-3
52   4.3810E-3 4.4490E-3 4.5160E-3 4.5490E-3
53   4.5820E-3 4.6150E-3 4.6470E-3
54   cladding radial node 3
55 end block
56 design of fuel rod
57 fuel rod 0.1224 0.010585 293.0
58 pellet 0.00035 0.00025 0.01224 9.134e-9 0.008294 2.12
59   0.95 3.63744e8 0.0 2.0 1883.0 8.4
60 cladding 0.000018 0.5 1.14 8.848e17 9.7200e7 0.04
61 upper silicon 3 0.025 0.0092 0.0012 2.02e-6
62 xas composition 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
63   0.0 8.402e-5 1.01325e5 293.0
64 end block
65 power definition data block
66 power history 20.0 -9.7200e7 20.0 -1.0 20.0 -0.1
67 7.0419e-05 0.000007.0547e-05 0.1853357.0818e+01 0.182000
68 7.7079e-02 0.1840001.4964e+02 0.185001.9449e+03 0.186000
69 4.4612e+03 0.1870001.0223e+04 0.1880001.1742e+04 0.188187
70 1.5201e+04 0.1884362.0105e+04 0.1889022.5457e+04 0.189308
71 3.0589e+04 0.1897143.4825e+04 0.1900343.7380e+04 0.190258
72 3.9425e+04 0.1904834.1007e+04 0.1906914.2003e+04 0.190684
73 4.2539e+04 0.1909914.2847e+04 0.1910974.3029e+04 0.191200
74 4.3089e+04 0.1913034.3023e+04 0.1914064.2847e+04 0.191509
75 4.2539e+04 0.1916154.2003e+04 0.1917424.1008e+04 0.191913
76 3.9423e+04 0.1921233.7331e+04 0.1923403.4828e+04 0.192572
77 3.0589e+04 0.1923922.5452e+04 0.1932982.0107e+04 0.193704
78 1.6344e+04 0.1933691.6475e+04 0.1940001.1592e+04 0.194500
79 8.1590e+03 0.1950005.7456e+03 0.1955004.0490e+03 0.196000
80 2.3563e+03 0.1955002.0.73e+03 0.1970001.0140e+03 0.198000

```

Test GK-2 input

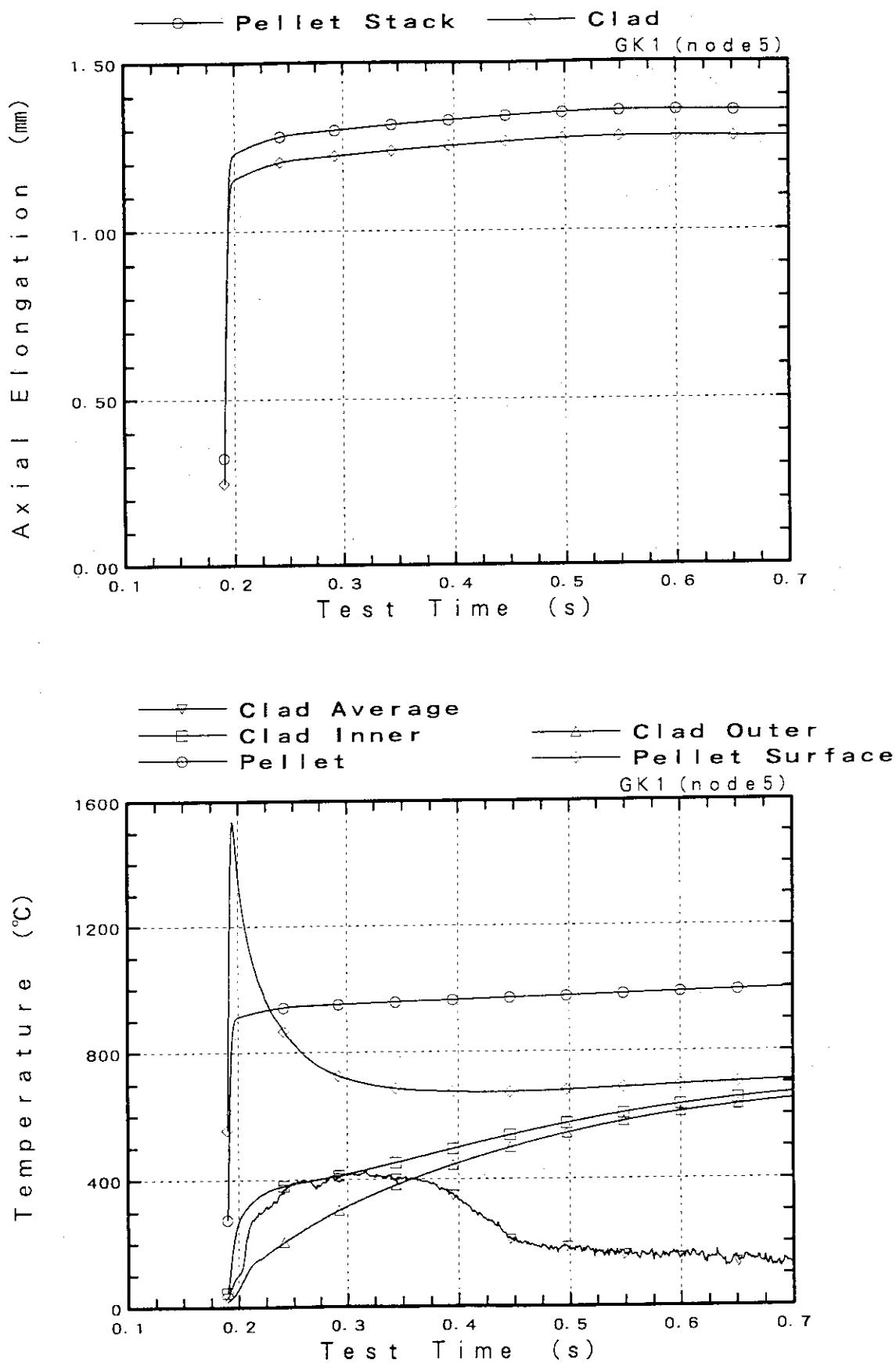


図 II - 5 実験GK2の計算結果

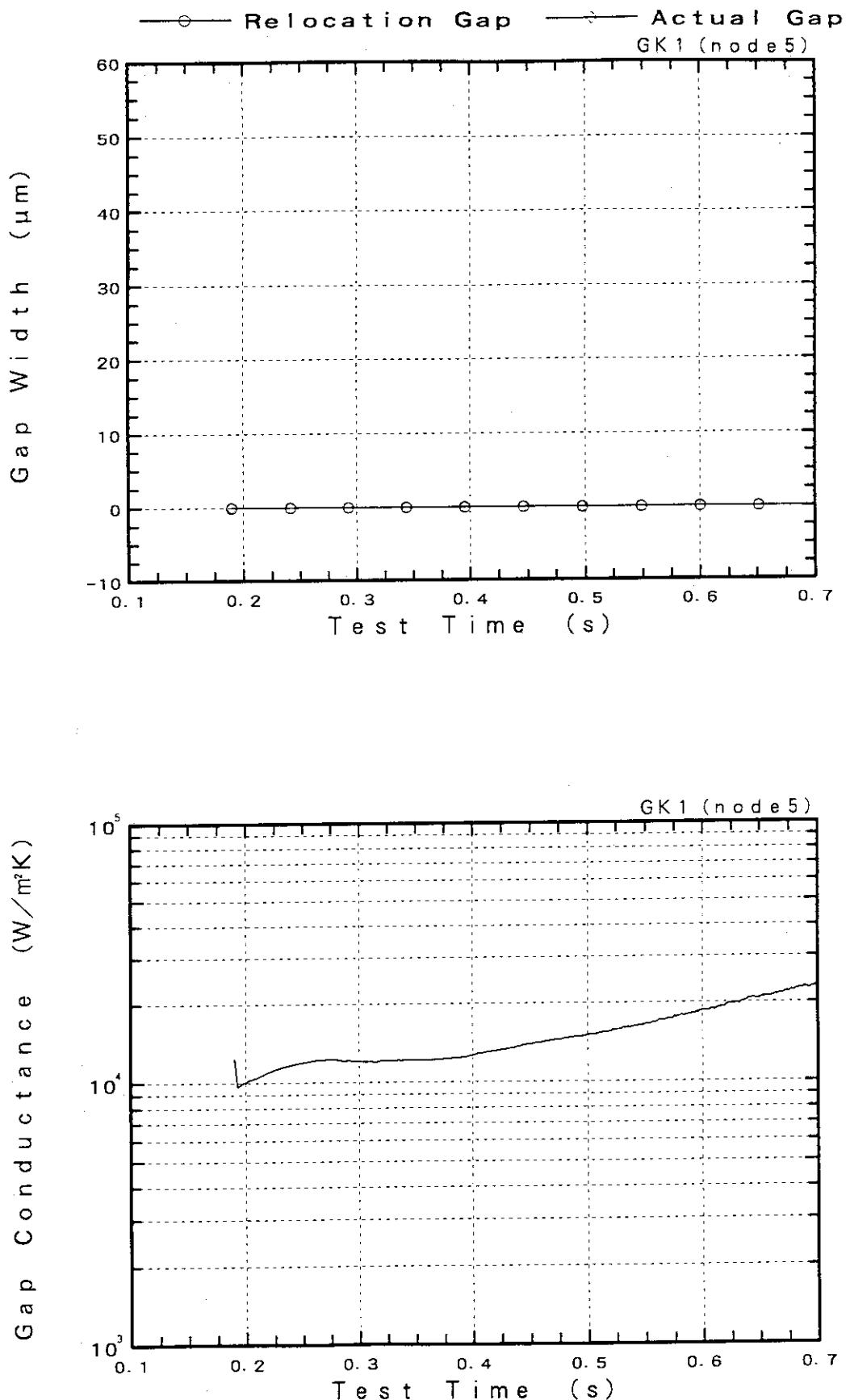


図 II-5 (続き) 実験GK 2の計算結果

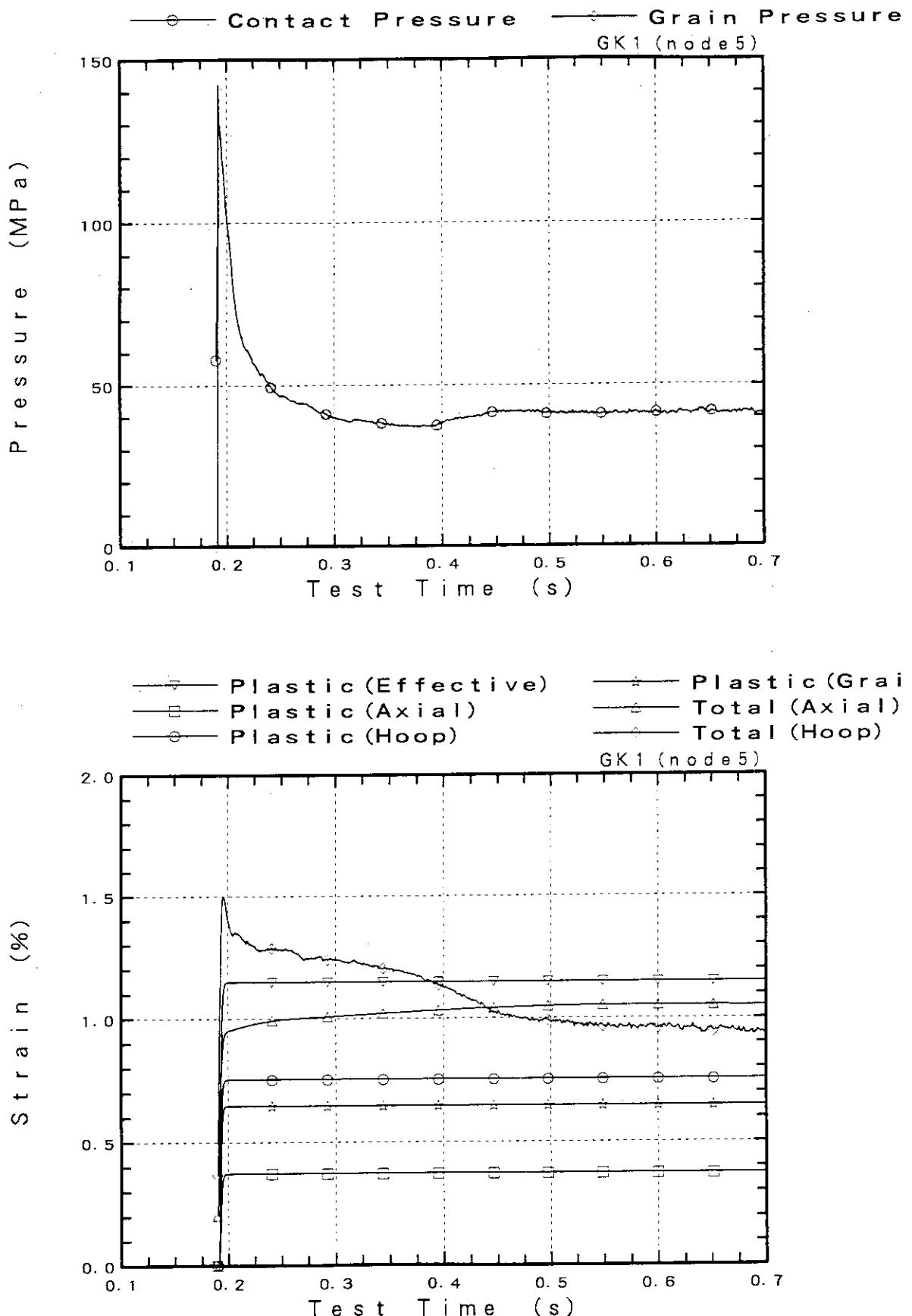


図 II - 5 (続き) 実験GK2の計算結果

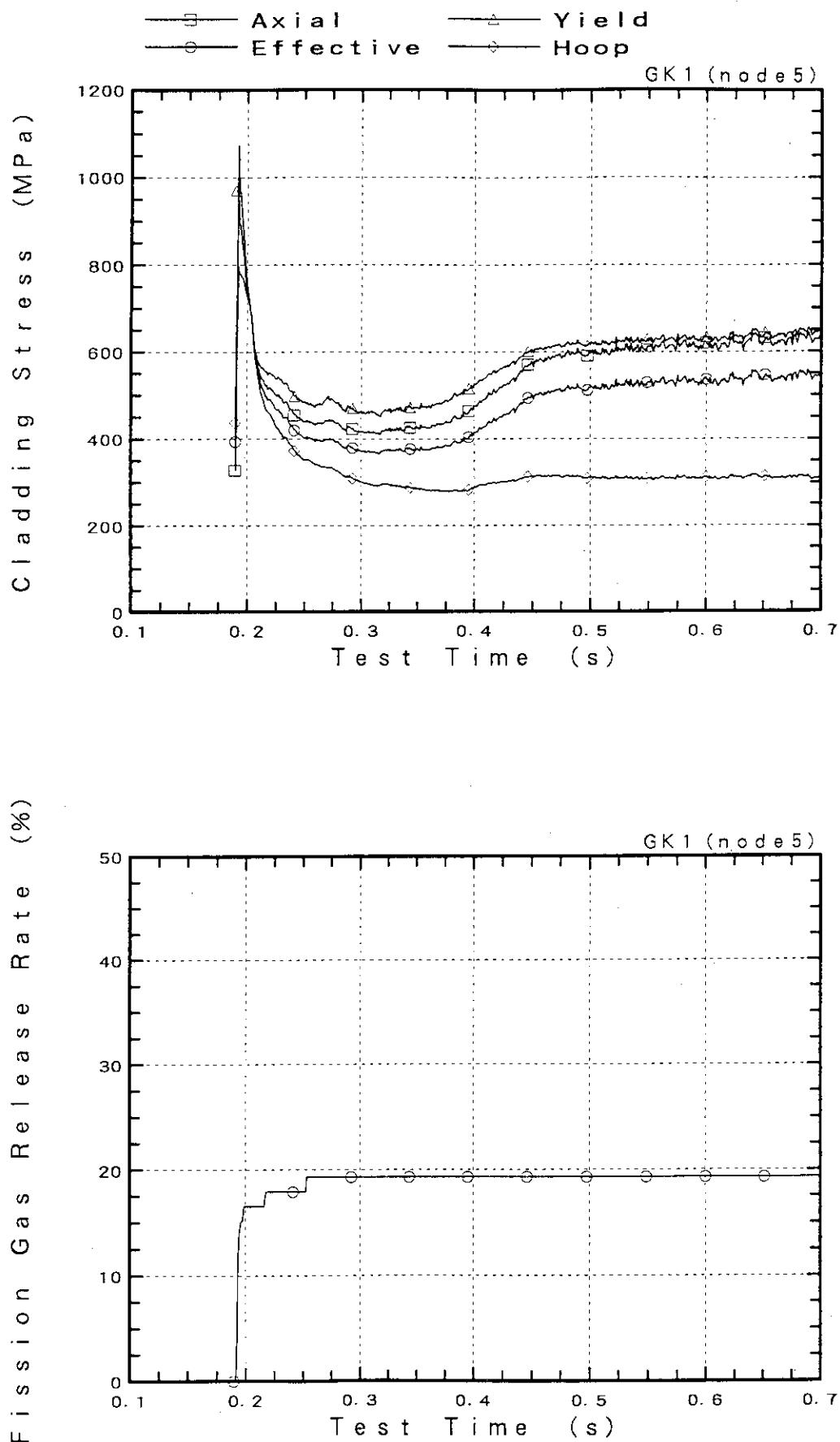


図 II - 5 (続き) 実験GK 2の計算結果

```

hb01c01.inp
 1 NPAPMAX=4*part3
 2 NPADUM=frac3*sub
 3 NPASEEV=unix/0/0
 4 #
 5 FILE05= multifile STATUS=scratch FORM=FORMATTED
 6   CARRIAGE CONTROL=LIST
 7 FILE06=   lib strxt
 8   STATUS=old FORM='INFORMATTED'
 9 #
10 FILE08= hb01c01.frs STATUS=UNKNOWN CARRIAGE CONTROL=LIST
11 FILE09= hb01c01.fed STATUS=UNKNOWN FORM=UNINFORMATTED
12 =====
13   1 1 1 111 39999 5.0d-2 1.0d-3
14   ; 0 0000000 0 70 0 0 1
15   3 250e-5 1373.0 0 0003 5.0 0.02 0.70
16   18
17 0.337 0.873 0.889 0.804 0.921 0.940 0.955 0.974 0.999 1.036 1.084 1.131
18 1.203 1.322 1.454 1.645 1.874 2.206
19 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25
20 0.25 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0
21 10
22 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000
23 hb01c01.frcasf, ria 0.226, 10.0ms, 50.5med t-node=5 2.7
24 io data block
25 input
26   si units
27 output
28   si units
29   print interval     0.10
30   plot output        0.0001
31 end block
32 solution control
33 property tables
34   fuel conductivity    100 290. 3500.
35   cladding conduct. 50 290. 2300.
36 time control
37   time step          1.15920e6 -1.0e8 1.15920e6 -0.001 117 end block
38   0.010 00.0000 0.0010 0.188 118 /metpro selection data block
39   0.00001 0.190010 0.00001 2.5 119 okmn 0.415
40   0.0005 3.50001 0.0005 3.7 120 end block
41   0.001 4.0001 0.001 5.0 121 /end
42   0.005 5.0001 0.005 50.0
43 steady state limit      5.0
44 convergence criteria
45   implicit .01 .01
46   temperature calc. 100 100 10.0
47 nodalization
48   axial nodes       10
49   fuel radial nodes 0 0 1.3850E-3 1.9310E-3 2.3850E-3
50   2.7310E-3 3.0530E-3 3.2020E-3 3.3440E-3
51   3.4810E-3 3.6120E-3 3.7390E-3 3.8010E-3
52   3.8620E-3 3.9220E-3 3.9510E-3 4.0100E-3
53   4.0390E-3 4.0670E-3 4.0960E-3
54 cladding radial node   3
55 end block
56 design of fuel rod
57 fuel rod 0.1350 0.009342 293.0
58 pellet 0.002985 0.00030 0.01350 7.827e-9 0.006192 2.12
59   0.95 4.35456e6 0.00746 2.0 1883.0 8.0
60 cladding 0.000005 0.5 1.14 7.593e17 1.1592e8 0.04
61 upper plenum 13 0.025 0.0081 0.0012 1.152e-6
62 gas composition 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
63   0.0 4.800e-5 1.01325e5 293.0
64 end block
65 power definition data block
66 power history 16.1 +1.1592e8 16.1 -1.0 16.1 -0.1
67 5.017e-05 0.0000005 0.00005 0.1751234.9405e+02 0.194000
68 1.1597e+03 0.1930002.7225e+03 0.1980008.3809e+03 0.197000
69 3.7452e+03 0.1973881.1455e+04 0.1977011.5144e+04 0.198098
70 1.9175e+04 0.1984942.3244e+04 0.1988902.8231e+04 0.199203
71 2.8156e+04 0.1994292.9697e+04 0.1996413.0888e+04 0.199844
72 3.1038e+04 0.2000123.2042e+04 0.2001373.2274e+04 0.200240
73 3.2411e+04 0.2003413.2456e+04 0.2004413.2411e+04 0.200541
74 3.3274e+04 0.2006423.2042e+04 0.2007453.1638e+04 0.200870
75 3.0828e+04 0.2010282.9697e+04 0.2012412.8157e+04 0.201453
76 3.3222e+04 0.2018302.2245e+04 0.2019921.9176e+04 0.202388
77 1.5145e+04 0.2027584.1.2525e+04 0.2030549.1.103e+03 0.203500
78 6.3454e+03 0.2040094.4233e+03 0.2045002.0851e+03 0.205000
79 2.1539e+03 0.2055001.5080e+03 0.2080001.0552e+03 0.206500
80 1.9202e-02 0.2090001.0528e+02 0.2100001.9466e+01 0.370000

```

Test HBO-1, 3 input

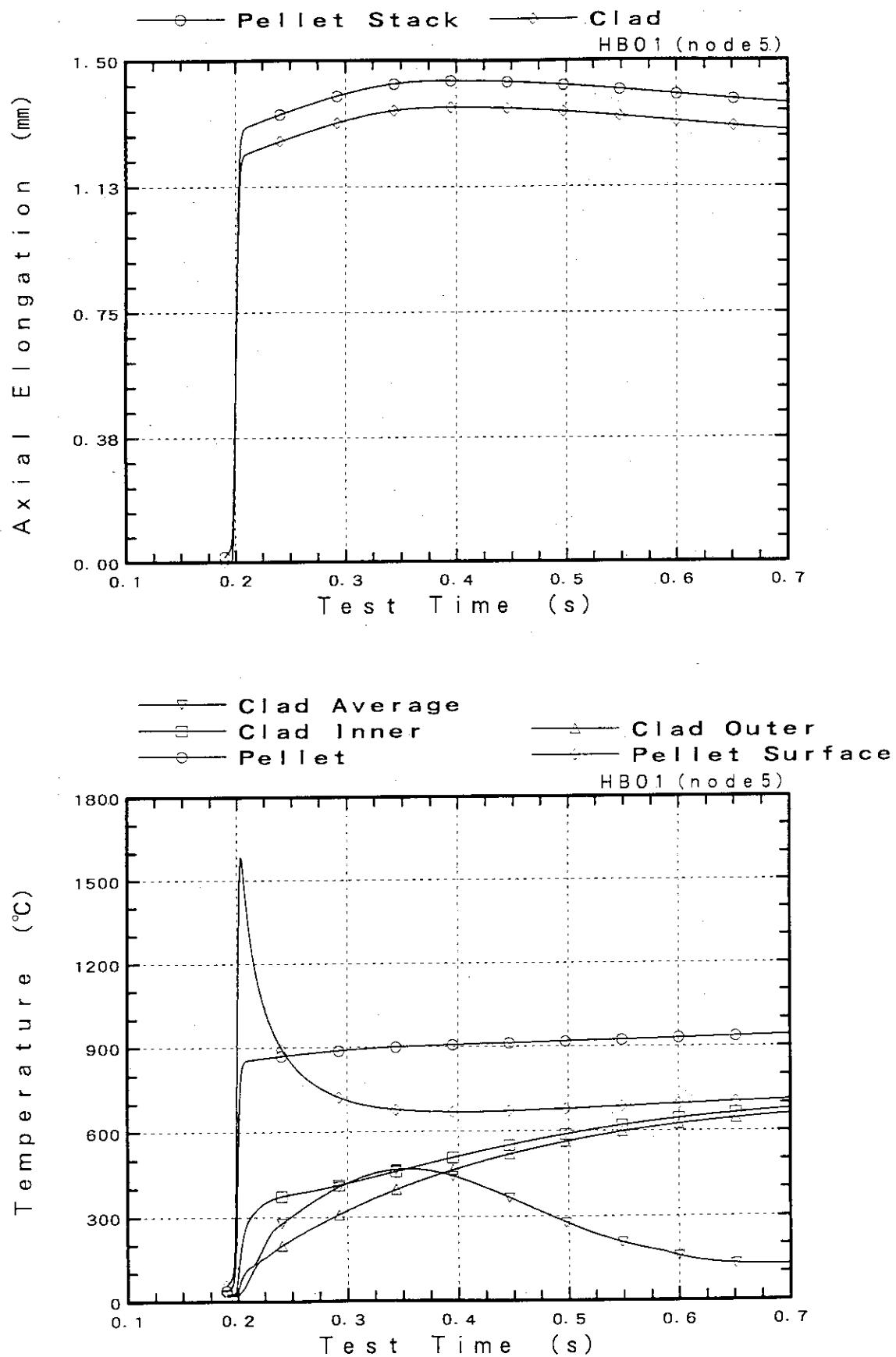


図 II-6 実験HBO1の計算結果

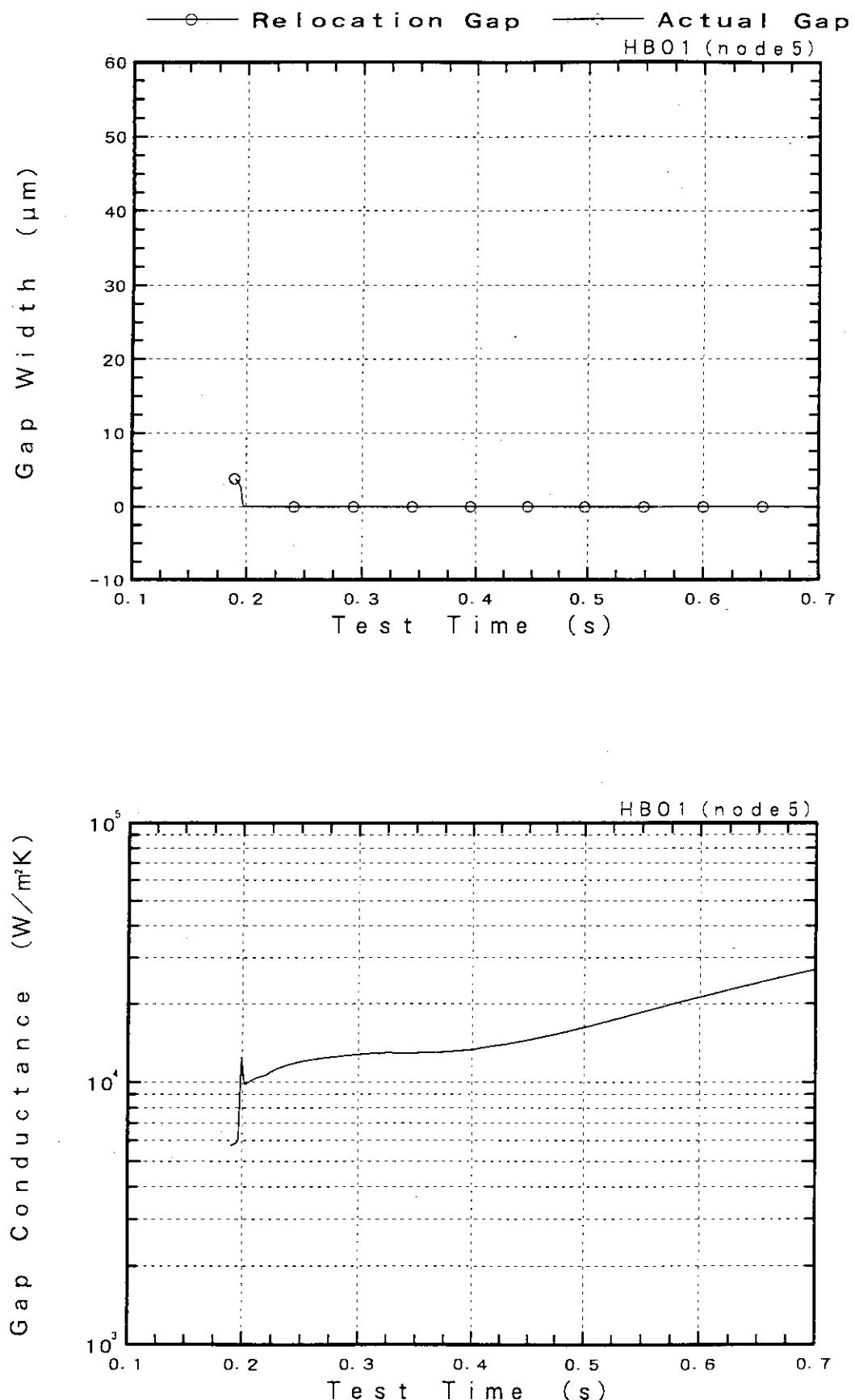


図 II - 6 (続き) 実験HBO1の計算結果

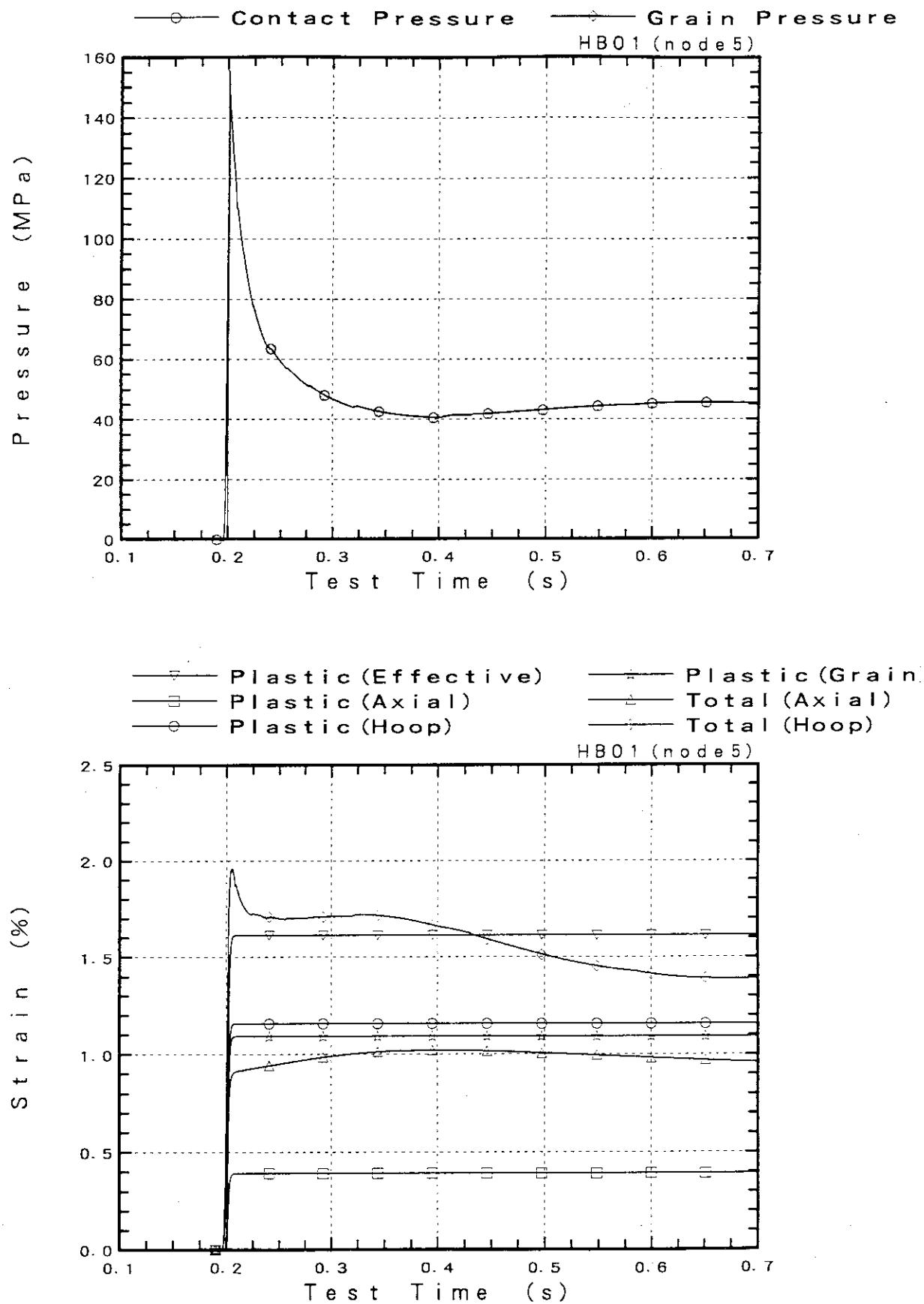


図 II - 6 (続き) 実験HBO1の計算結果

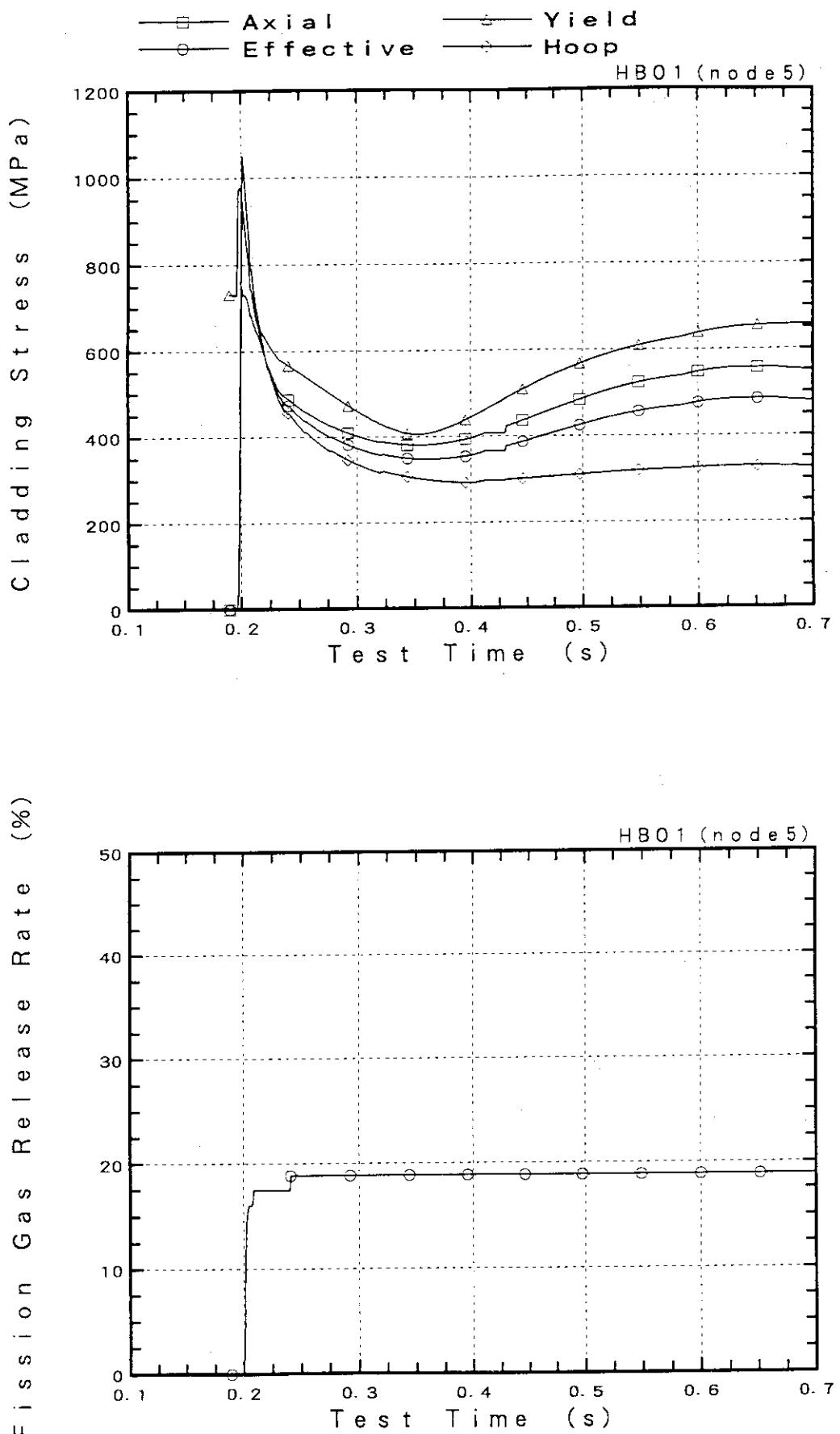


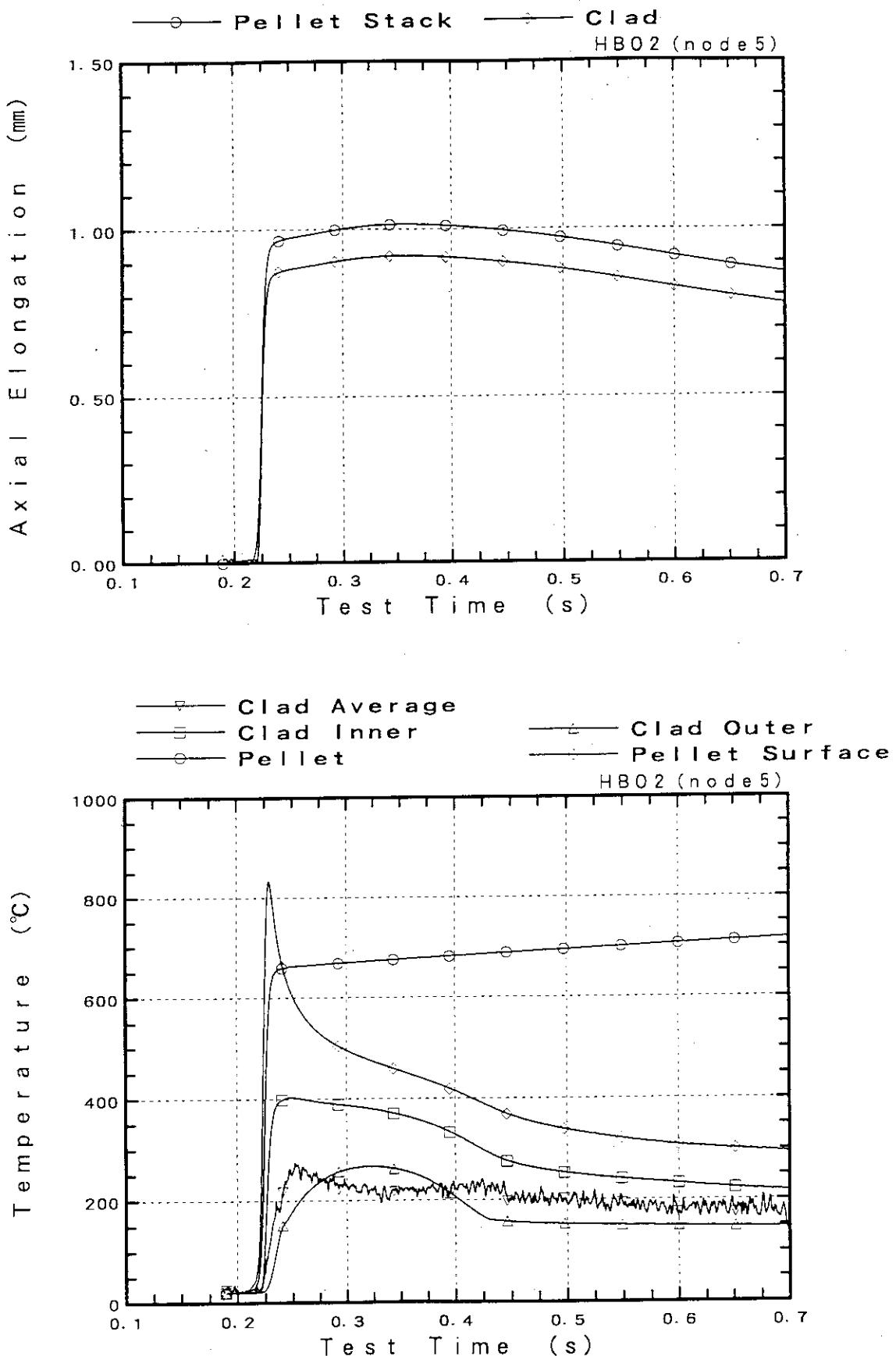
図 II - 6 (続き) 実験HBO1の計算結果

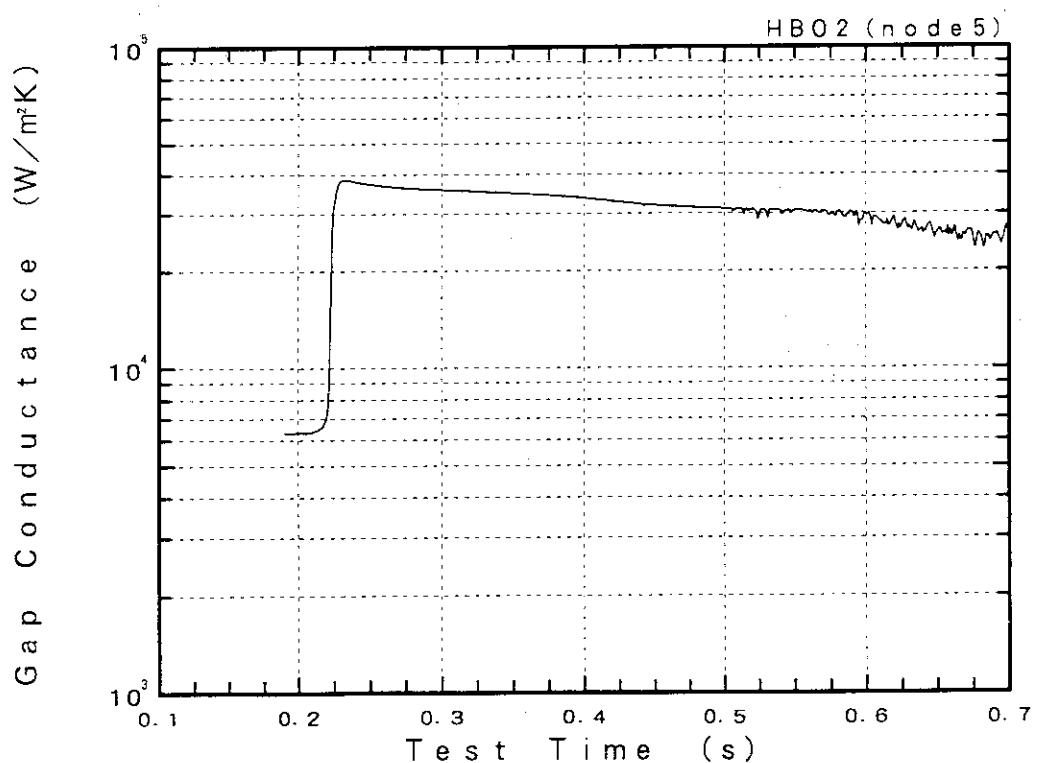
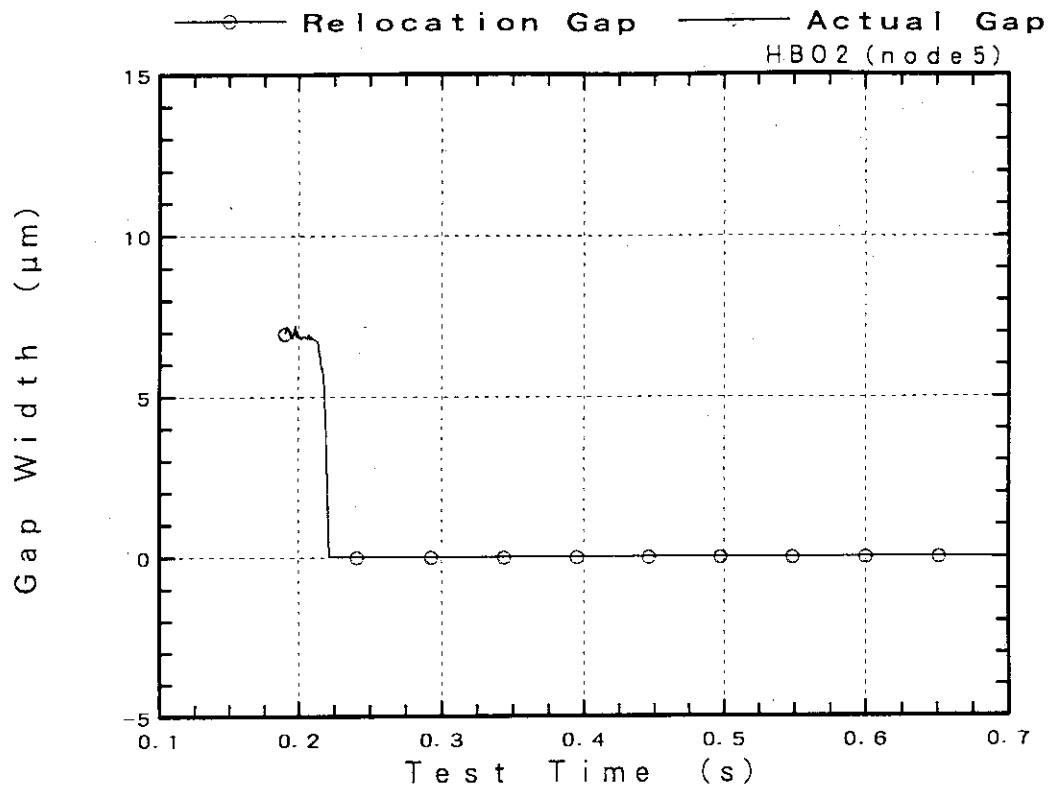
```

hbo2c01.inp
  1 NPAPAK= fract5
  2 NPADUM= fract5.dum
  3 NPASERV= unix:0.0
  4 #
  5 FILE05= nullfile STATUS= scratch FORM= FORMATTED
  6   CARTRIDGE CONTROL= LIST
  7 FILE15= //is std2xt
  8   STATUS= old FORM= UNFORMATTED
  9 #
 10 FILE06= hbo2c01.1.s STATUS= UNKNOWN CARTRIDGE CONTROL= LIST
 11 FILE06= hbo2c01.feo STATUS= UNKNOWN FORM= UNFORMATTED
 12 #
 13   t   t   t   (1) 09999 5.0d-2 1.0d-3
 14   0.000000  0.70  0  0  1
 15   3.250e-5 1373 0  0.005  5.0  0.02  0.70
 16   13
 17 0.357 0.375 0.389 0.904 0.921 0.940 0.955 0.974 0.999 1.036 1.084 1.131
 18 1.203 1.322 1.484 1.645 1.874 2.208
 19 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25
 20 0.25 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0
 21 10
 22 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000
 23 hbo2c01.0.225.80.Gms.,expan 0.7.1.15
 24 io data block
 25   input
 26     si units
 27 output
 28     si units
 29     print interval 0.10
 30     plot output 0.0001
 31 end block
 32 solution control
 33 property tables
 34   fuel conductivity 100 290. 3500.
 35   cladding conduct. 50 290. 2300.
 36 time control
 37   time step 1.15920e-06 -1.0e-8 1.15920e-06 -0.001 117 end block
 38     0.001 00.0000 0.0001 0.210 118 /metaro selection data block
 39     0.00001 0.210001 0.00001 2.5 119 clean 0.415
 40     0.0005 3.50001 0.0005 3.7 120 end block
 41     0.001 4.0001 0.001 5.0 121 /end
 42     0.005 5.0001 0.005 50.0
 43   steady state limit 5.0
 44 convergence criterias
 45   implicit .01 .01
 46   temperature calc 100 100 10.0
 47 nodalization
 48   axial nodes 10
 49   fuel radial nodes 0.0 1.3850E-3 1.9310E-3 2.3850E-3
 50     2.7310E-3 3.0530E-3 3.2020E-3 3.3440E-3
 51     3.4910E-3 3.6120E-3 3.7390E-3 3.8010E-3
 52     3.8820E-3 3.9220E-3 3.9810E-3 4.0100E-3
 53     4.0330E-3 4.0670E-3 4.0960E-3
 54   cladding radial node 3
 55 end block
 56 design of fuel rod
 57 fuel rod 0.1350 0.009342 293.0
 58 pellet 0.002885 0.00030 0.01350 7.827e-9 0.008192 2.12
 59     0.95 4.35456e-6 0.00748 2.0 1883.0 8.0
 60 cladding 0.000005 0.5 1.14 7.593e17 1.1592e8 0.04
 61 upper plenum 13 0.025 0.0081 0.0012 1.152e-6
 62 gas composition 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 63     0.0 2.448e-35 1.67575e-6 293.0
 64 end block
 65 power definition data block
 66 power history 15.1 -1.1592e8 16.1 -1.0 16.1 -0.1
 67     6.52884e-05 0.0000006 5409e-05 0.1856308 7812e-01 0.204000
 68     2.5095e-02 0.3150007 3479e+02 0.2170001 2329e+03 0.218000
 69     2.0688e-03 0.31930003 4714e+03 0.2200004 9487e+03 0.220684
 70     5.5573e-03 0.3209157 3501e+03 0.2215299 3067e+03 0.222143
 71     1.1281e+04 0.2227571 2731e+04 0.2232411 3666e+04 0.223592
 72     1.4413e+04 0.2239201 4932e+04 0.2242351 5356e+04 0.224496
 73     1.5552e+04 0.2245891 5664e+04 0.2248481 5731e+04 0.225005
 74     1.5752e+04 0.2251601 5731e+04 0.2253151 5664e+04 0.225472
 75     1.5552e+04 0.2256311 5355e+04 0.2258241 4992e+04 0.226085
 76     1.4414e+04 0.2264001 3665e+04 0.2267281 2732e+04 0.227079
 77     1.1282e+04 0.2275839 3075e+03 0.2281777 3510e+03 0.228791
 78     6.3229e+03 0.2293646 7171e+03 0.2290004 3357e+03 0.230000
 79     2.8017e+03 0.2310001 3155e+03 0.2320001 1773e+03 0.233000
 80     7.3705e+02 0.2340005 0334e+02 0.2350001 5318e+02 0.236000

```

Test HBO-2 input

図 II - 7 実験HBO₂の計算結果

図 II-7 (続き) 実験HBO₂の計算結果

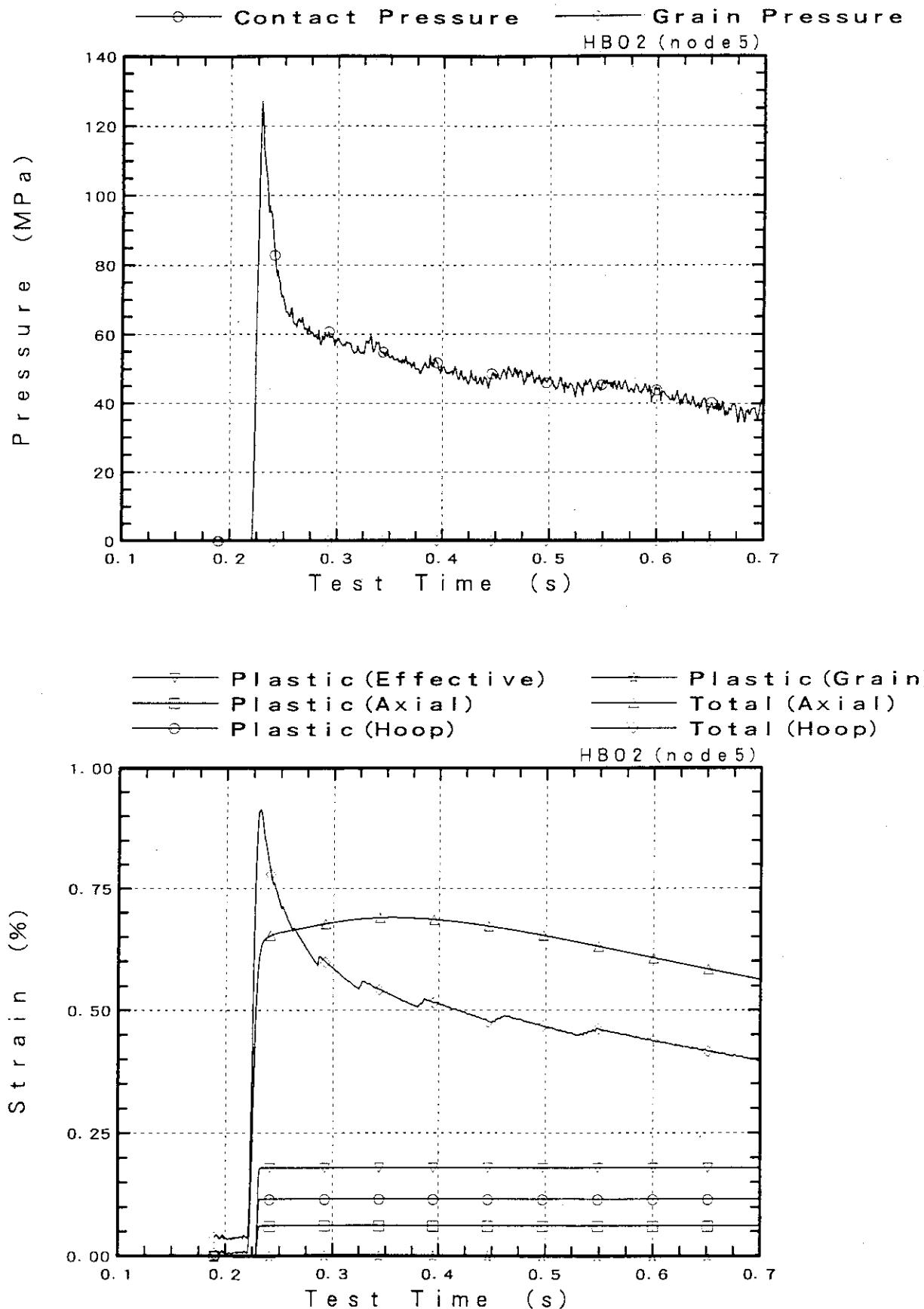


図 II - 7 (続き) 実験HBO2の計算結果

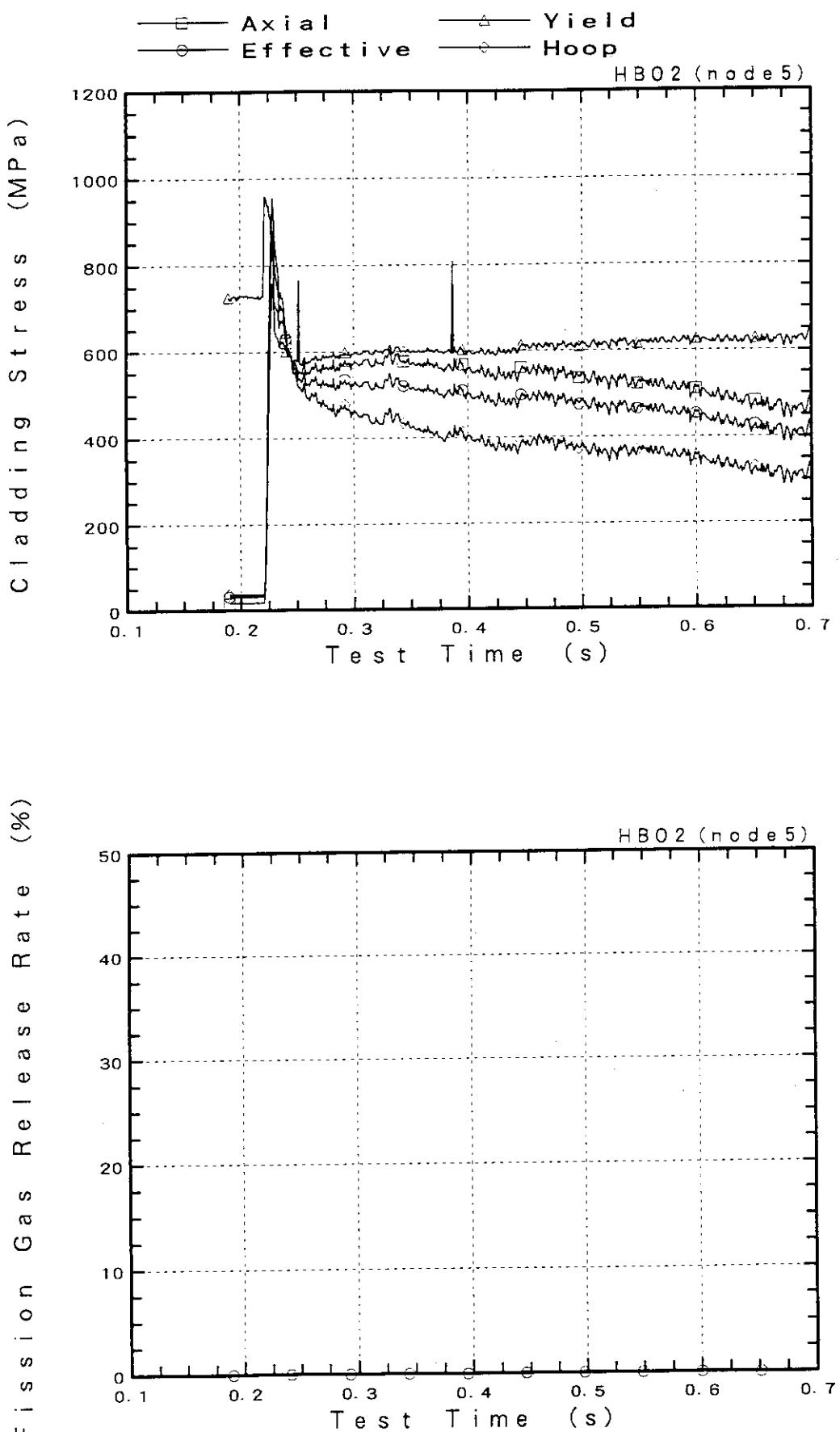


図 II-7 (続き) 実験HBO2の計算結果

```

ts4.inp
 1: opeax= freact2
 2: measure= freact5.suh
 3: neserve= unix:0.0
 4: *
 5: FILE05= multfile STATUS='scratch', FORM='FORMATTED'.
 6:   CARRIAGE CONTROL= LIST
 7: FILE15= lib eth2xt
 8:   STATUS= old, FORM= UNFORMATTED
 9: *
10: FILE06= ts4.lib STATUS='UNKNOWN', CARRIAGE CONTROL= LIST
11: FILE07= ts4.fso STATUS='UNKNOWN', FORM= UNFORMATTED
12: ****
13:   1   1   1   011   2390.5 0d-2  1.0d-3
14:   1   0.000000   00.70   0   0   1
15:   3.705e-3   1373.0   0.0050   5.0   0.02
16:   18
17: 0.305 0.312 0.819 0.829 0.340 0.843 0.859 0.870 0.885 0.906 0.931 0.956
18: 0.995 1.061 1.159 1.257 1.438 1.718
19: 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15
20: 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15 0.15
21: 10
22: 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000
23: ts=4 47.0ew m=4 47.7sec
24: no data block
25: neut
26: si units
27: output
28: si units
29: print interval 0.1
30: plot output 0.00010
31: end block
32: solution control
33: property tables
34: fuel conductivity 100 280. 3500.
35: cladding conduct. 50 290. 2300.
36: time control
37: time step 4.47e4 -1.1e8 4.47e4 -8.94e4 117 end block
38: 4.47e1-5.93999e4 4.47e1 -0.001 118 end
39: 0.010 00.0000 0.0010 0.200
40: 0.00001 0.200010 0.00001 2.5
41: 0.0005 3.50001 0.0005 3.7
42: 0.001 4.0001 0.001 5.0
43: steady state limit 0.5
44: convergence criteria
45: implicit .01 .01
46: temperature calc 100 100 10.0
47: nodalization
48: axial nodes 10
49: fuel radial nodes 0.0 2.0610E-3 2.9160E-3 3.5710E-3
50: 4.1240E-3 4.8100E-3 4.8250E-3 5.0490E-3
51: 5.2560E-3 5.4540E-3 5.6460E-3 5.7400E-3
52: 5.8320E-3 5.9220E-3 5.0110E-3 6.0550E-3
53: 5.0990E-3 8.1410E-3 6.1850E-3
54: cladding radial node 3
55: end block
56: design of fuel rod
57: fuel rod 0.125 0.01421 300.0
58: pellet 0.00425 0.0004 0.021 2.6e-8 0.01237 2.12
59: 0.35 2246400.0 0.0 2.0 1883.0 5.0
60: cladding 0.000110 0.5 1.14 3.85e17 4.47e7 0.04
61: upper plenum 7 0.026 0.012 0.001 7.0e-6
62: gas composition 0.108 0.0 0.113 0.779
63: 1.10e-3 300.0
64: end block
65: power definition data block
66: power history 47.000 -1.04e8 47.000 -1.0000 47.000 -0.1000
67: 0.000001 0.0000 12.729 0.2200 62.480 0.2220
68: 305.428 0.2240 150.027 0.2260 331.786 0.2270
69: 7330.912 0.2230 16349.550 0.2290 22679.494 0.2294
70: 23304.381 0.2297 38223.350 0.2302 48466.512 0.2306
71: 58677.159 0.2310 65219.062 0.2313 74956.500 0.2318
72: 79837.353 0.2322 81473.063 0.2324 81818.625 0.2325
73: 81932.351 0.2325 81818.319 0.2327 81473.437 0.2329
74: 79882.550 0.2331 74367.319 0.2335 65221.069 0.2340
75: 48409.350 0.2347 38233.125 0.2351 32394.969 0.2354
76: 30003.731 0.2355 21417.775 0.2360 15293.689 0.2355
77: 10926.554 0.2370 5590.266 0.2380 2876.274 0.2390
78: 1495.834 0.2400 793.867 0.2410 436.486 0.2420
79: 254.760 0.2430 24.114 0.2465 40.090 0.7000
80: 31.370 1.0000 22.783 1.6000 22.359 1.6400

```

Test TS-4 input

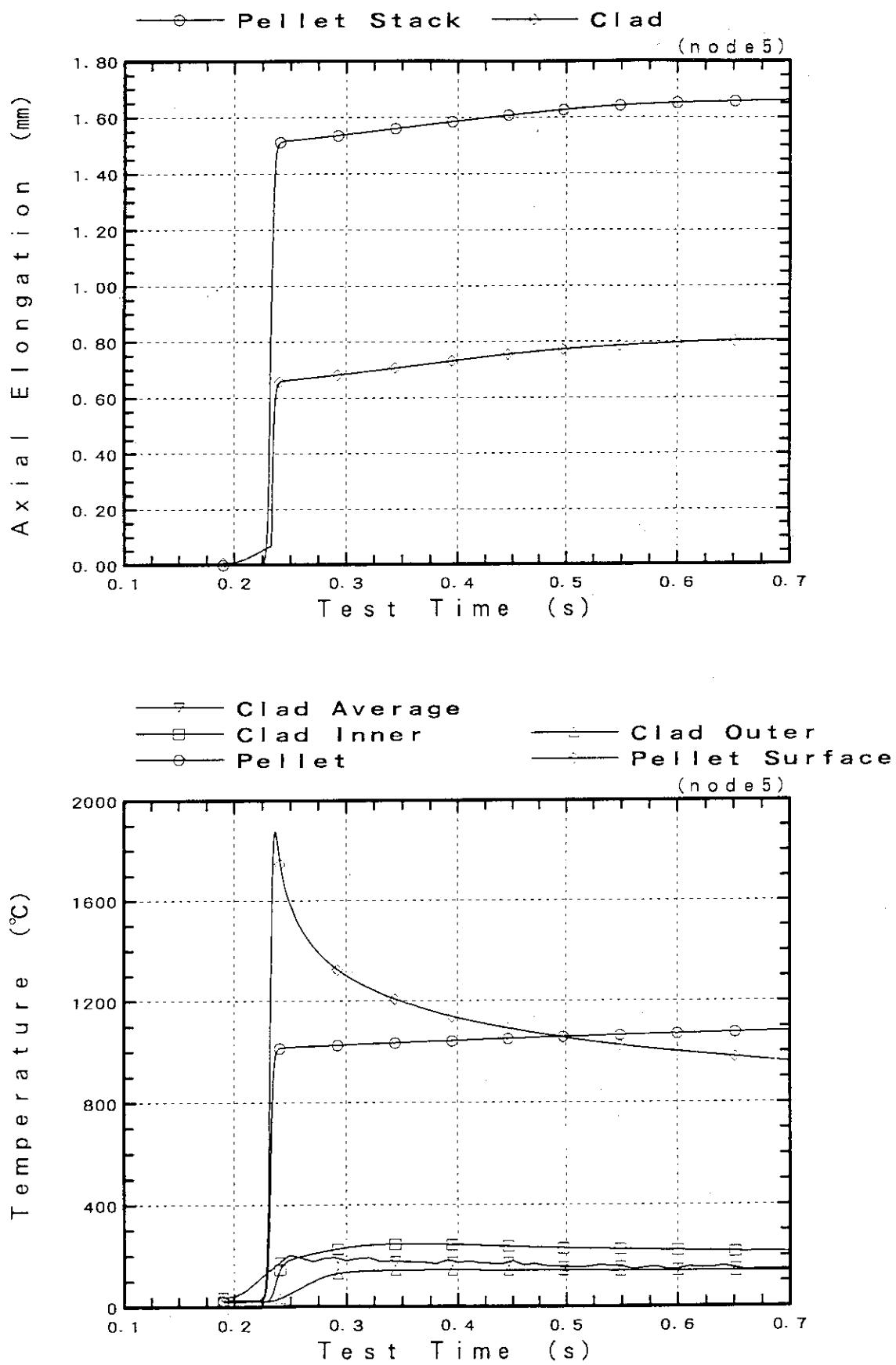


図 II - 8 実験 TS 4 の計算結果

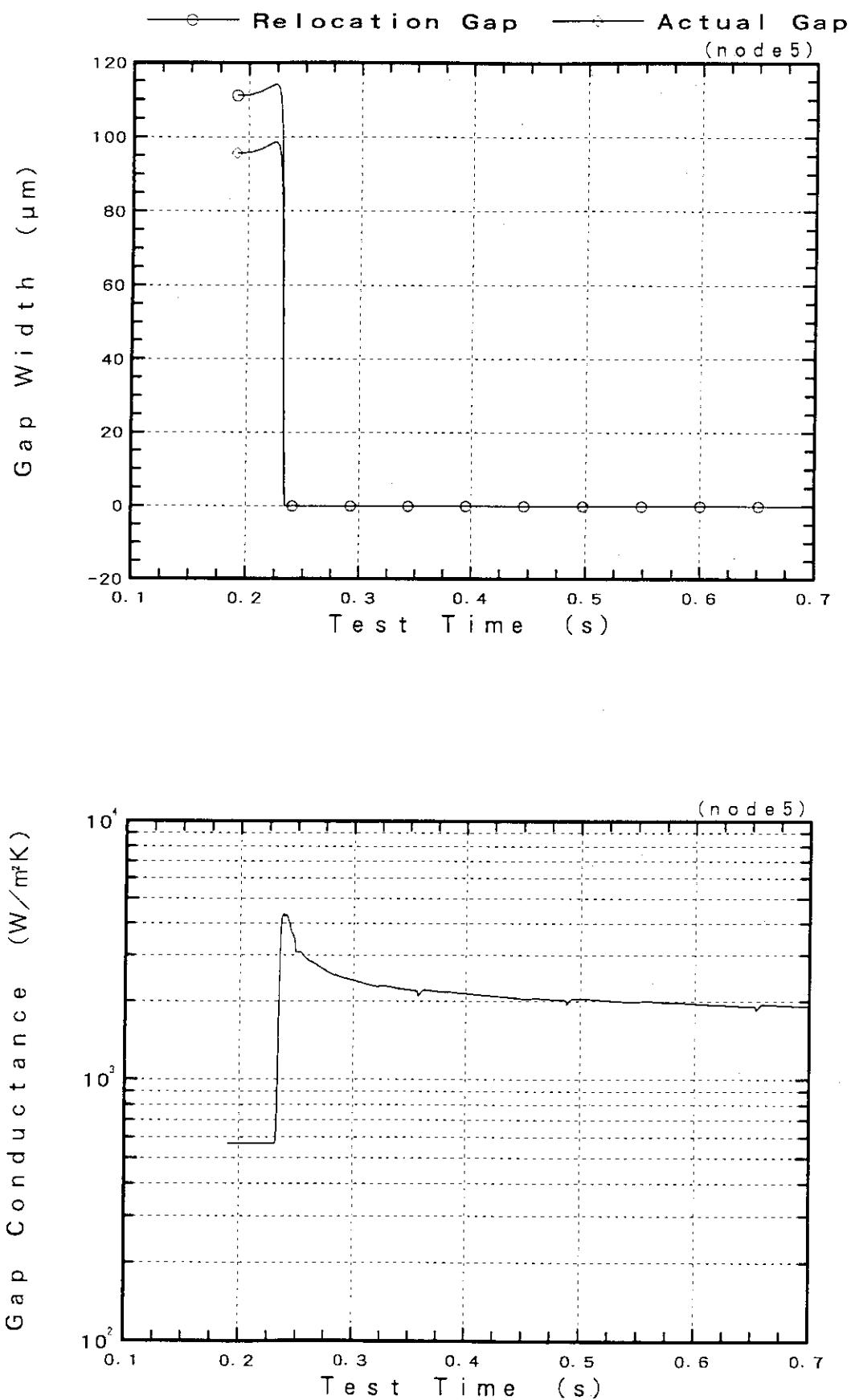


図 II-8 (続き) 実験 TS 4 の計算結果

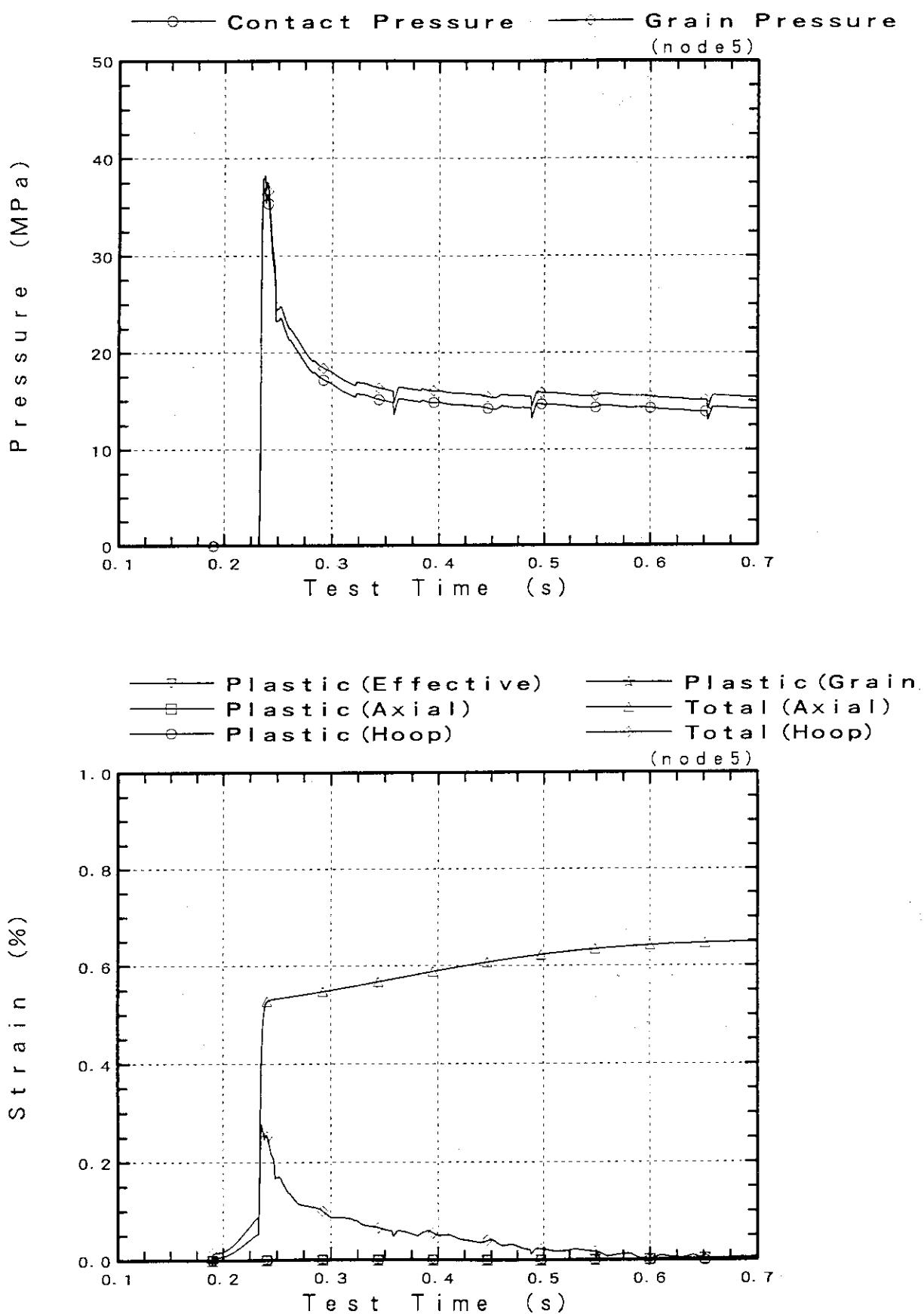


図 II - 8 (続き) 実験 TS 4 の計算結果

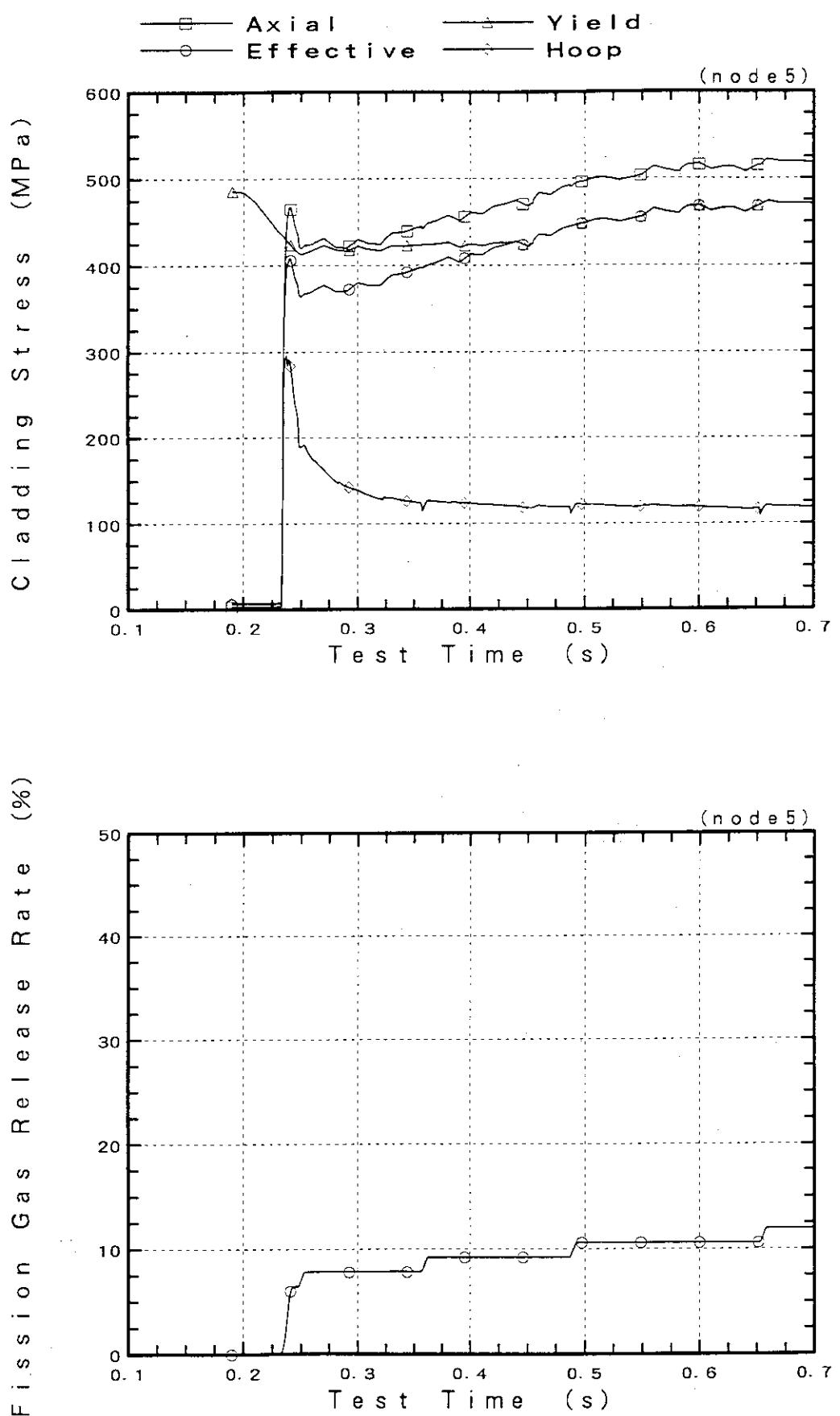


図 II - 8 (続き) 実験 TS 4 の計算結果