

JAERI - M  
82-127

軽水炉燃料の初期起動時における燃料  
中心温度の評価

—ハルデン出力急昇試験研究成果—

1982年9月

柳澤 和章・藤田 操

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 いばらき印刷(株)

軽水炉燃料の初期起動時における燃料中心温度の評価  
— ハルデン出力急昇試験研究成果 —

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

柳澤 和章・藤田 操

(1982年8月19日 受理)

燃料ペレット—ジルカロイ被覆管の相互作用に起因する水炉燃料棒の破損 (PCI 破損) の機構を解明するため、日本原子力研究所はノルウェー・ハルデン炉 (HBWR) にて炉内照射試験を実施している。試験は「ハルデン出力急昇試験」と称され昭和54年度より開始されている。同一の仕様にて製造された15本の国産燃料棒 (17 × 17 型 PWR 棒および 8 × 8 型 BWR 棒) が試験に用いられている。

現在、燃料棒は水炉模擬条件下にてベース照射されており、所要の燃焼度に到達後、出力急昇試験にかけられる。ベース照射下での燃料体に取り付けられた計装類から、運転状態下での燃料棒中心温度および棒プレナムガス圧力に関するデータを得た。

照射初期でのこれらデータの解析評価を、特に燃料中心温度につき実施した。解析には2つの燃料棒製造因子即ち、1) 直径ギャップ、2) 純ヘリウム封入ガス加圧量を用いた。

評価の結果を詳述した。評価の特徴の1つは軽水炉を模擬した運転状態下にある燃料棒の熱的ふるまいを理解する為の実験事実とそれに関連した解析を遂行した事である。

EVALUATION OF FUEL CENTERLINE TEMPERATURE OF LWR FUEL RODS  
DURING FIRST RISE TO OPERATING POWER  
-RESULTS FROM HALDEN POWER RAMP TEST

Kazuaki YANAGISAWA and Misao FUJITA  
Division of Nuclear Safety Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI  
(Received August 19, 1982)

In order to reveal principal mechanism which is dominating LWR fuel rod failure due to pellet-cladding interaction, in-reactor irradiation experiments at Halden Boiling Water Reactor (HBWR), Norway have been undertaken by Japan Atomic Energy Research Institute. The test titled as "Halden Power Ramp Test" has been initiated since 1979. In the test, fifteen Japanese fuel rods which have equivalent specification of 17x17 PWR rods and 8x8 BWR rods of current commercial power plants are involved.

The fuel rods for future power ramping are now in base irradiation stage under the simulated condition such as typical light water reactor. In spite of their base irradiation stage, it is possible to get in-reactor and on-power data by means of instrumented equipments to measure fuel centerline temperature as well as to measure rod plenum pressure as a function of linear heat generating rate.

Analytical evaluation of these data at the beginning-of-irradiation was performed here concentrating on fuel thermal behavior under the operation. Experimental variables in the analysis were addressed to two fabricating parameters such as diametral gap and pure helium fill gas pressurization.

The results of evaluation are described in detail. It is the specific feature of this study to include experimental facts and related analyses that enable us to understand thermal behavior of fuel rods under the operating condition of commercial power plants.

Keywords: Fuel Centerline Temperature, LWR, Power, Halden Power Ramp,  
Test Evaluation, Pellet-Cladding Interaction

## 目 次

1. はじめに	1
1.1 原研による「ハルデン出力急昇試験」の概要	1
1.2 炉内照射データ評価の意義と本報の目的	2
2. 実験の方法	3
2.1 燃料棒の特性	3
2.2 炉内中性子束分布	3
2.3 冷却軽水軸方向温度分布	3
2.4 燃料中心温度と棒出力	3
2.5 ギャップコンダクタンス評価と試験変数	4
3. 実験結果	7
3.1 燃料棒中心温度と製造ギャップ ( $\Delta TC$ と $\Delta d$ の関係)	7
3.2 燃料棒中心温度と製造時棒内充填ガス圧力 ( $\Delta TC$ と $\Delta g$ の関係)	9
4. 討 論	12
4.1 温度ジャンプ距離とギャップコンダクタンス	12
4.2 炉内実験結果とFEMAXI-IIIコード計算結果との比較	13
5. 結 言	16
謝 辞	17
参考文献	18
付録：I - PWR棒1～3及びBWR棒1, 3, 7に対するFEMAXI-III 計算による計算結果例	37
II - 温度ジャンプ距離に関する感度計算	47

## CONTENTS

1.	<u>Introduction</u> .....	1
1.1	Outlines of "Halden Power Ramp Test" being performed by JAERI .....	1
1.2	The meaning of in-reactor irradiation data evaluation and the purpose of this report .....	2
2.	<u>Experimental Methods</u> .....	3
2.1	Summary of fuel rod characterization .....	3
2.2	In-core neutron flux distribution .....	3
2.3	Axial temperature distribution of light water coolant .....	3
2.4	Fuel centerline temperature and rod linear heat generating rate .....	3
2.5	Evaluation of gap-conductance and experimental variables ..	4
3.	<u>Experimental Results</u> .....	7
3.1	Fuel centerline temperature as a function of as-fabricated diametral gap .....	7
3.2	Fuel centerline temperature as a function of as-fabricated fill gas pressurization .....	9
4.	<u>Discussions</u> .....	12
4.1	Temperature-jump distance relating to gap-conductance .....	12
4.2	Data comparison between results from in-reactor experiments and results from FEMAXI-III computer code calculation .....	13
5.	<u>Conclusions</u> .....	16
	ACKNOWLEDGMENTS .....	17
	REFERENCES .....	18
	APPENDICES I: Selected out puts by FEMAXI-III calculation for PWR rods 1-3 and for BWR rods 1,3,7. ....	37
	II: Parametric survey regarding temperature-jump distance ...	47

## 1. はじめに

### 1.1 原研による「ハルデン出力急昇試験」の概要

通常運転状態下にある水炉—ジルカロイ被覆燃料棒で破損がおこるとき有力なものとして一般に考えられているのがペレット—被覆相互作用による応力腐食割れ (Pellet—Clad Interaction—Stress Corrosion Cracking : PCI—SCC) 機構によるものである。

このPCI—SCC 破損に関連して燃料の設計仕様を一部改良して被覆管に与える応力及び燃料ペレットから放出される核分裂ガスの量等を低減させようとする様々の努力が国内に於ても(1) 国外に於ても (例えば 2—6) 続けられている。

PCI 破損機構を解明する事は、炉内での燃料体の安全性・健全性の向上に大きく貢献する。原研ではそれ故、幾つかの国際プロジェクトに加盟して、PCI 破損機構解明の為のデータの入手をはかる一方、原研独自の実験も行なっている。その1つにノルウェー・ハルデン炉 (HBWR) を用いた「ハルデン出力急昇試験」がある。

この試験の目的は、PCI 破損の環境下におかれた燃料棒の複雑なふるまいをハルデンプロジェクトにて開発された炉内計装装置により解析する事である。実炉条件にある燃料体のPCIに関する模擬性の観点から見ると、HBWRはその条件から少しはずれる。理由はHBWRは重水冷却材温度 240℃、炉圧 3.4 MPa と水炉の条件と少し様子が異なるからである。

この為原研の実験ではHBWR 炉心内に水炉条件をできる限り模擬しうる高温・高圧ループの設置が必要となった。そのループの概略図を Figure 1 に示す。ループは主として圧力制御系、冷却材 (軽水) 純化系及び2次冷却系より構成されて、実炉を模擬したPWR及びBWR条件が作り出せるようにした。

ループ中に高圧容器を収納し、そこに現行PWR及びBWR仕様の燃料体を装荷しうる様なリグを各々1基ずつ製造した。Figure 2は2基のリグのうちPWRの概略図である。リグには国産燃料の他に様々の計装類が装荷された。燃料体に対しては、棒中心温度測定用のW—Re熱電対、棒軸方向の寸法変化測定用の伸び計、棒内充填ガス圧力変化を検出するベロー型トランスデューサー等が計装類として取り付けられた。その他、冷却材流量計、中性子検出器 (SPND)、燃料棒を冷却する事で昇温した冷却材温度を下げる為特別に熱交換器もリグの冷却水出入口部に装荷した。

PCI 破損は、化学的に活性な核分裂生成物存在下での応力腐食割れ現象である為、水炉条件にて照射を継続している燃料体がその様なPCI—応力腐食割れ環境に入るのには、ある程度の棒の燃焼の進展が前提となる。この為、燃料体を水炉条件にて相当の期間、一定の出力にて照射を続行する (基礎照射を行なう) のがこの出力急昇試験の前提でもあり特徴でもある。

原研の「ハルデン出力急昇試験」における燃料棒の目標燃焼度は約 20 GWd/t Uである。これは商用炉で同様の照射を実施した場合の約 2 サイクル (約 2 ケ年) 運転に相当する。

## 1.2 炉内照射データ評価の意義と本報の目的

「ハルデン出力急昇試験」では全部で15本の軽水炉燃料棒を現在基礎照射している。内訳は17×17 PWR型9本、8×8 BWR型が6本である。これらの棒は燃焼の進んだ将来、出力急昇試験にかけられる訳であるが、基礎照射（一定出力、長期照射）中にもその装荷計装類から燃料体の安全性に密接に結びついた一般性のある有益なデータを得る事ができる。水炉条件下にある燃料棒の中心温度、棒内ガス圧力および棒の軸伸び変化を経時的に測定・解析したデータは世界的にも希有であり、ハルデンにおいてもこれだけの多重計装のものは珍らしく、更に燃料棒が日本に於て現行の商用炉にて使用されている仕様に近いものである、といった学術研究上でも価値あるデータを得る事ができた。本報はその解析結果の1部、即ち初期起動時の燃料中心温度について評価したものの報告を行なうものである。

水炉条件模擬試験では、燃料棒のみならず外部条件（例えば冷却条件、燃料棒局所出力、出力分布）等に関する炉内データも測定する事ができた。

この種のwell-characterizeされたデータがいかに重要でありかつ必要であるかは、種々の文献で力説されている（7, 8）。1例として話は少し飛躍するが燃料棒内の蓄積エネルギーの評価を考えてみよう。棒内蓄積熱エネルギーはLOCA評価、ECCS最終基準を決める安全審査上の1つの主要因子であり、一般には次の様な式で計算される事が多い。

$$\text{棒の蓄積エネルギー} \quad E = \int_V \rho \int_{T_r}^T C_p(T) dT dV \quad \dots\dots\dots (1)$$

- ここに  $\rho$  : 燃料密度
- $V$  : 燃料体積
- $C_p$  :  $UO_2$  の比熱
- $T_r$  : 冷却材温度

コード計算による上式を用いた蓄積エネルギー評価で一番重要なのは如可にして実験的に定量化されていない部分－特にギャップコンダクタンス関連項－を精度良く計算し誤差を低減できるかにかかっている。このギャップコンダクタンス評価作業で現在最も多用されているのがコードによる実験からの燃料中心温度との検証作業である。この過程に於て一番望まれているのがwell-characterizeされた燃料中心温度データしかも実炉条件下でのそれである。

米国原子力規制委員会（NRC）が従来安全審査用コードに開発した燃料性能コードGAPCONシリーズ（9-11）の温度計算で検証に使用した炉内温度データは大多数がHBWRからのものである。本報では更に一步進めてHBWRにおけるLWR模擬条件下から得た性質の良く知れた燃料中心温度の評価を製造因子別（製造ギャップと棒内充填ガス圧をPWRとBWRごとに）に行なった。更にはそのデータを使って原研がモデリングの開発をおし進めているFEMAXI-III燃料性能評価コード（例えば、12）による計算結果と実験値との比較もおこなった。

最後にRoss&Stouteによるギャップコンダクタンス評価式(13)中の1因子である温度ジャンプ距離についても、NRC実験結果との傾向比較も含めて討論を行なった。



## 2. 実験の方法

### 2.1 燃料棒の特性

燃料棒は現行標準型の仕様である。その代表的製造仕様を 17 × 17 PWR 型について Table 1 に、8 × 8 BWR 型については Table 2 にまとめて示した。

### 2.2 炉内中性子束分布

燃焼度を得る為の基礎照射における集合体平均線出力は実用炉に近い条件をとり PWR 棒で 25 kW/m、BWR 棒で 30 kW/m に設定した。基礎照射出力レベルでの中性子束分布を PWR の場合につき Figure 3 に、BWR の場合につき Figure 4 に示す。下部クラスターの熱電対部分で中性子束分布はピークを形成しピーキング係数が PWR、BWR 共に 1.2 程度になる様にして燃料体を炉に装荷した。リグに取り付けた中性子検出器からの積分中性子束値（実験データ）との比較をおこなった所、Figure 3 及び Figure 4 のそれと良い一致を示した。

### 2.3 冷却軽水軸方向温度分布

Figure 5 (PWR リグ)に見られる様に冷却材の流れは詳細には 3 様になっている。1 番外側、即ち圧力容器の外側では重水が自然循環にて底部から頂部に向かって流れる。この間の入口・出口間の温度変化は 240 °C から 280 °C までである。圧力容器内のリグ中ではダウンカマを（案内導水管）上部入口から下部にむけて流れて来た強制循環軽水はリグ底部で反転し燃料体を冷却した後、計装熱交換器を通過してリグ頂部出口から高圧ループ系に流れていく。その間の温度変化は Figure 5 に示す通りである。Zry-4 の被覆管はこの為に軸方向に複雑な温度勾配をもち最も高温になるのは上部クラスターの燃料部であり、約 315 °C 程度のサブクーリングとなる。

BWR 燃料体の冷却材軸方向温度分布を Figure 6 に示す。圧力容器外側の重水冷却材温度は、ほぼ 240 °C で一定である。強制循環されている冷却軽水の温度の変化はダウンカマをリグ頂部入口からリグ底部にむけて流れていて間に 40 °C、リグ底部から燃料を冷却してリグ頂部出口にむけて流れる間に 24 °C 程度の上昇を起こす。冷却水が最も高温になるのは上部クラスター燃料頂部付近で約 284 °C となっている。蒸気表によれば軽水 285 °C の沸騰圧力は 6.92 MPa であり運転圧力は 6.9 ~ 7.0 MPa と設定されているから、上記の条件はサブクール限界付近である。冷却材流速はいずれの場合も 1.5 ~ 2.0 m/s である。

### 2.4 燃料中心温度と棒出力

燃料中心温度測定用の熱電対を PWR 下部クラスターに装荷した棒 6 本と BWR 下部クラスター

ターに装荷した棒4本に取りつけた。計装熱電対はW3%Re/W25%Re型のものである。本報で報告する燃料中心温度のデータは照射初期のデータであるので熱電対の照射劣化は考慮しない。HBWRで用いている温度測定での系自身による測定温度誤差は一般に3℃以内である(14)。

棒平均出力はまず集合体出力QA(kW)を下式を用いて中性子検出器(SPND)の読みの値から決めたのち、棒本数N(本)と燃料棒実効長L<sub>f</sub>(m)の積で除して決める。

$$\text{集合体平均出力QA (kW)} = kg \cdot \overline{ND} \cdot Cd(Bu) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに kg : 熱水力的に決定した出力変換係数〔TW/A〕

$\overline{ND}$  : 軸方向の中性子束分布を考慮した平均中性子の値〔nA〕,

Cd(BU) : 燃焼度(Bu)と共に変化する燃料の減衰係数, 照射初期では1.0

従って棒平均出力 $\bar{P}$ (kW/m)は

$$\bar{P} = QA / N \cdot L_f \quad (\text{kW/m}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここにNは装荷燃料棒の本数, L<sub>f</sub>は燃料棒の実効長〔m〕(enriched fuel column length)である。

本報では熱電対部分(燃料頂部)での線出力として、集合体半径方向の中性子束分布を平面方程式で解いて求めた結果を考慮したものをを用いた。即ち熱電対部での局所出力P<sub>L</sub>(kW/m)は下式の様になる。

$$P_L = \frac{N(i)}{\overline{ND}} \bar{P} \quad (\text{kW/m}) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここにN(i)/ $\overline{ND}$ は熱電対部でのピーキング係数である。N(i)値にはリグ内の中性子検出器からの読取値を平面方程式の解に入れて解いた値を用いている。

## 2.5 ギャップコンダクタンス評価と試験変数

「ハルデン出力急昇試験」のために準備された燃料棒の製造に関係した試験変数を燃料の型別に整理すればTable 3の様になる。

試験変数として示された燃料棒直径ギャップ(ガスギャップ)および棒加圧量(純ヘリウム初期充填ガス圧力)と実験データとして得られる燃料中心温度とを結びつけているのは、ギャップコンダクタンスの式である。そこで現在最も一般的に使用されているRoss & Stoute型のギャップコンダクタンス評価式(13)を使い、試験変数と燃料中心温度との関係を記述しておく。

### 2.5.1 棒内ガスギャップに於ける温度降下量と燃料ペレット中心温度との関係

本実験(基礎照射を行なっている実炉条件模擬下)の燃料棒における平均線出力範囲(≤30 kW/m)では、ペレット-被覆管間のガスギャップはオープンギャップ状態と近次できる。

今燃料棒内につめられたペレットの状態を考えると、現実的にはおこり得ないであろうが、1番理想的なのはペレットが中心線上に1列に並んだ偏心なしの状態である。この状態を仮定し

たときのガスギャップ（つまりペレットと被覆管内面間の空間部分）に於ける温度降下TGは、このオープンギャップ状態下では次式で評価できる。

$$TG = q/Hg \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$= q / (kgas / (d + g)) \quad \dots\dots\dots(6)$$

- ここに q : 被覆管表面熱流束 (W/m<sup>2</sup> K)
- Hg : オープンギャップ状態でのギャップコンダクタンス (W/m<sup>2</sup> K)
- kgas : ガスギャップ部ガス熱伝導度 (W/mK)
- d : 製造直径ギャップ関連項 (m)
- g : 温度ジャンプ距離

(5)又は(6)式の左辺は実験的に測定するのが難しいし現実的に測定された例はないと考えられる。ところでペレットの熱伝導度と被覆表面熱流束との間には偏心しない理想配置のペレットの場合次式が成立する(15)。

$$q \cdot f = \frac{2}{r_0} \int_{TS}^{TC} k dT \quad \dots\dots\dots(7)$$

- ここに f : 中性子減衰係数
- r<sub>0</sub> : ペレット製造半径 (m)
- TC : 燃料中心温度(K)
- TS : 燃料表面温度(K)
- k : UO<sub>2</sub> 熱伝導度 (W/mK)

一定出力下 (qf → 一定) では右辺の積分項はほぼ一定に保たれる(15)。積分項 I ≡ ∫<sub>TS</sub><sup>TC</sup> kdT とおいて全微分をとると(8)式の様になる。

$$\Delta I = \frac{\partial I}{\partial TC} \Delta TC + \frac{\partial I}{\partial TS} \Delta TS \rightarrow 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

燃料中心部の温度の微小変化 ΔTC とペレット表面での温度の微小変化 ΔTS の比を α とすれば

$$\begin{aligned} \alpha &= \Delta TC / \Delta TS \\ &\equiv - (\partial I / \partial TS) / (\partial I / \partial TC) \\ &\equiv \kappa (TS) / \kappa (TC) \quad \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

ここに κ = ∫ kdT : 積分項 I の原始関数。

ペレット熱伝導度の積分下限に対してはペレット表面TS と被覆内面温度TC は同値量として取り扱える。従って

$$\begin{aligned} \alpha &= \Delta TC / \Delta TS \\ &\equiv \kappa (TS) / \kappa (TC) \\ &= \kappa (TG) / \kappa (TC) \end{aligned}$$

$$= \Delta T C / \Delta T G \quad \dots\dots\dots (10)$$

が成立する。

よって近似的に出力一定；オープンギャップで偏心のない1ペレットに対し下式が成立すると考えて良い。

$$\Delta T C = \alpha \Delta T G \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$= \alpha \cdot \Delta \left\{ \frac{q}{k_{gas} / (d+g)} \right\}$$

$$\Delta T C = \frac{\alpha \cdot q}{k_{gas}} \Delta (d+g) \quad \dots\dots\dots (12)$$

式(11)は棒内ガスギャップにおける温度降下量 ( $\Delta T C$ ) と燃料中心温度変化量 ( $\Delta T G$ ) の関係を示すものである。式(12)は(6)式を用いて式(11)を書き直したものでオープンギャップでのギャップコンダクタンスと燃料中心温度の関係を示す関係式である。

### 2.5.2 試験変数と燃料中心温度

式(12)より明らかな様に燃料中心温度変化量  $\Delta T C$  は量  $\Delta d$  と  $\Delta g$  の関数である。 $\Delta d$  という量は本来製造ギャップ（「出力急昇試験」パラメータ）と直接結びつけて良い。それは又熱応力によるペレットの割れにより生ずる初期リロケーション現象にも影響をうけて値が変化する（16-19）。

一方、もう1つの量温度ジャンプ距離  $\Delta g$  は「出力急昇試験」パラメータである）棒内初期封入ガス圧量に関連した量である（20-23）。例として原研やNRCで用いられている燃料性能評価計算コード中に組み入れられている温度ジャンプ距離の計算式（9-11, 24-27）をTable 4に示す。

Table 4の式では、温度ジャンプ距離はいずれも棒内ガス圧力と反比例の関係にある。

以上から初期ギャップと棒内ガス圧力といった本出力急昇試験に用いられた試験変数は燃料中心温度と密接に結びついている事がわかる。

### 3. 実験結果

#### 3.1 燃料棒中心温度と製造ギャップ ( $\Delta TC$ と $\Delta d$ の関係)

PWR及びBWR棒について製造ギャップ ( $\Delta d$ ) の違いがどの程度燃料棒の中心温度変化 ( $\Delta TC$ ) に影響するかを実験データを通して研究する。データは全て初期起動時の運転中からのものである。

##### 3.1.1 3.2 MPa 初期加圧のPWR棒の場合

棒の燃料中心温度をそこでの局所出力の増加に対して調べた結果を、3.2 MPa 初期加圧のPWR棒について Figure 7 に示す。また代表的な出力値に対する燃料中心温度値を Table 5 にもまとめておいた。Figure 7 はその Table 5 中の PWR 1, 7, 2 および 8 に関するデータプロットである。Table 5 中にはこの他コードで検証する際の基礎データとして不可欠な試験中の棒の外部冷却材の出力変化による温度変化の値等の実験データも含めてあると考えられる。

現行のPWR型商用炉で使用されている殆ど燃料棒の中心温度は、Figure 7 で大ギャップ棒としてプロットされているデータに近い温度履歴を取ると考えられる。

Figure 7 よりの知見を以下に1つずつのべる。

##### (i) 同一仕様 (製造ギャップの同じ) 棒間のデータのばらつき

製造ギャップの同じ燃料棒の中心温度観察で、ある一定局所出力時に温度にばらつきが生ずるとすれば、その主たる原因は(i)ペレット半径方向温度分布から生じたペレット内熱応力による割れによって、ペレット自身が分割され外側に押し出され、ガスギャップを狭くしようとする"リロケーション (relocation)", (ii)ペレットマトリクスでの核分裂によりポア分布が変動する事によりペレット自体は密度あげつつ体積を減少させ、ガスギャップを広くしようとする"稠密化 (densification)", が考えられる。

試験に使用したペレットは $UO_2$ 粉末をはじめ全て同一の製造過程を経ており $UO_2$ の物理・化学的性質に差異はなかった(28-29)。

稠密化に対する特性は炉外再焼結実験を行なって調べた。焼結温度 $1700^\circ C$ 、時間24 hの結果、PWR棒に使用したペレットは0.44%TD、BWR棒に使用したペレットは0.7%TD程度稠密化した。原研のペレット稠密化に関する一連の研究結果(30, 31)から、使用したペレットは稠密化に対して安定である。

従って棒間の中心温度に大きなばらつきが生ずれば、それは主としてリロケーションとペレットの偏心によるガスギャップでのコンダクタンスの変化によるものである。

実験結果から：

(イ) 大ギャップ ( $170 \mu m$ ) 棒間のある一定出力における燃料中心温度のばらつきは  $4 \pm 7^\circ C$  ( $1\sigma$ ) である。

(ロ) 小ギャップ ( $80 \mu m$ ) 棒間のある一定出力における燃料中心温度のばらつきは  $31 \pm 25^\circ C$

(1 $\sigma$ )である。

小ギャップ棒で温度のばらつきが大きかったのは、ペレットの偏心率が(大ギャップ棒に比べ)小さく、ペレット自体が均一稠密化を受けたのと、ガスギャップ空間が狭い為リロケーションの影響が大きく出たものと解釈できる。

大ギャップ棒のガスギャップがオープンのままであったであろう事は同時に測定した燃料棒軸伸び(Figure 8)及び棒プレナムガス圧力変化(Figure 9)にて知れる。即ちFigure 8から大ギャップ棒にペレット-被覆管の相互接触による機械的変形は発生せず、被覆管は内側からペレットに押されていない状態にあった。一方、Figure 9よりプレナムガス圧力は炉核加熱状態で製造時封入ガス圧力の約2倍となり、以後出力の上昇と共に単調に増加した。運転状態では約7.6 MPaとなった。

小ギャップ棒のガスギャップもオープンに近かった事はFigure 8の被覆管の変形が弾性的であり、Figure 9のプレナム部ガス圧変化が大ギャップ棒のそれと殆んど変わらなかった事から推定される。

### (ii) 大ギャップ棒と小ギャップ棒の棒中心温度の比較

棒内ガスギャップの違いによる中心温度の差の傾向を調べるのは、燃料性能評価コードに組みこまれた各種モデリングの妥当性の検証に重要である。実験結果を示すFigure 7によれば運転出力(～25 kW/m)で170  $\mu$ mと80  $\mu$ m製造ギャップの違いによる棒中心温度の差は130  $^{\circ}$ Cであった。

核分裂ガスのペレットマトリクスからの放出が比較的少ないいわゆる"クリーン"な状態にある実炉模擬のPWR棒の燃料中心温度は(運転平均出力25 kW/mで)～1000  $^{\circ}$ C程度である事がわかる。

### 3.1.2 0.1 MPa 非加圧BWR棒の場合

現行商用炉にて使用されている純ヘリウム封入0.1 MPa 非加圧8 $\times$ 8 BWR棒、および改良効果(燃焼後期の棒内FP放出による"汚染"の低減)をねらった0.3 MPa 加圧8 $\times$ 8 BWR棒の中心温度データをまとめてTable 6に示した。このうちBWR 7(0.3 MPa初期加圧棒)以外の3本の棒につき線出力に対して燃料中心温度をプロットしたのがFigure 10である。Figure 10中の大ギャップ棒の燃料中心温度データは現行BWR型燃料棒の運転中の温度履歴を模擬している。Figure 10より以下の様な事がわかる。

#### (i) 同一仕様(製造ギャップの同じ)棒間のデータのばらつき

2本の小ギャップ棒(100  $\mu$ m)に対する棒中心温度につきばらつきを調べた。ある一定の線出力における燃料棒の中心温度データ間のばらつきは $14 \pm 10^{\circ}$ C(1 $\sigma$ )であった。PWR小ギャップ(80  $\mu$ m)棒の燃料中心温度データのものよりばらつき量は2データ間の比較という限定条件付ではあるが小さかった。

PWR・BWRに限らず純ヘリウム充填棒の温度データは、照射初期でガスギャップが核分裂性ガスのXeやKrに汚染されていないクリーンの状態では、出力の増加と共に1次直線に近い形で増加するのがオープンギャップの特徴である。

#### (ii) 大ギャップ棒(230 $\mu$ m)と小ギャップ棒(100 $\mu$ m)間の中心温度の比較

上記(i)のデータのばらつき、および以下にのべる棒直径ギャップの差による燃料中心温度のデータ等は、PWR棒の関連項にてのべた様に燃料性能評価コードの組込モデルの妥当性の検証等に重要である。その結果は直接ギャップコンダクタンスの評価に反映する。

照射初期にある8×8 BWR棒の一定運転出力下(～30 kW/m)にある大ギャップ棒(230 μm)と小ギャップ棒(100 μm)の棒中心温度の差は約175℃であった。

BWR型商用炉にて経験のある非加圧燃料を模擬した棒(230 μm 製造ギャップ)の燃料中心温度は概略1070℃である。現行のLWR燃料の平均運転出力下での燃料中心温度は、照射初期では1000～1100℃程度にある事が模擬実験下での結論である。

燃料棒の機械的相互作用(PCMI)と棒内プレナム部ガス圧力の初期起動時における変化の様子を併せて調べた。その結果をFigure 11と12に示す。Figure 11の小ギャップ棒の軸変形は最も大きな変形を示した棒のものよりプロットした。小ギャップ棒ではペレットと被覆管との機械的相互作用が生じているのがFigure 11より判断できるが比較的弾性的である。一方、大ギャップ棒ではPCMIは生じなかった。

Figure 12の棒内プレナムガス圧力変化からみる限り、初期ガスギャップの違いは出力の変化によるプレナムガス圧力の変化に対してあまり影響しない。製造状態での測定プレナム全容積は(28-29)大ギャップは6.4 mℓ、小ギャップは5.6 mℓであった(両者の差は直径ギャップの違いによる差である)。

Figure 9(PWR)及びFigure 12(BWR)の結果から出力変化に対する棒プレナム部ガス圧力の変化において初期製造ギャップの差(PWRでは170 μm vs 80 μm, BWRでは230 μm vs 100 μm) -即ちギャップ容積の差の効果は本模擬実験では影響があまりあらわれなかった。

### 3.2 燃料棒中心温度と製造時棒内充填ガス圧力(ΔTcとΔgの関係)

PWR及びBWR棒について、製造時に棒内に充填した純ヘリウムガス圧力がどの程度ギャップコンダクタンス、結果的には燃料中心温度に影響するかを実験データにより調べた。

#### 3.2.1 0.17 mm 製造ギャップの17×17 PWR棒の場合

燃料棒の炉内ふるまいに関する安全設計の観点からみれば、純ヘリウムの製造時加圧量は重要である。安全性絡みではBOLに於て外圧に棒がつぶされず、EOLに於て放出FP圧等によって棒内圧が外圧に打ち勝つ事のない様にガス封入加圧量を考える様になっている。

棒の加圧量に対しては、3.2 MPaのものは比較的燃焼サイクルの短い棒に、1.5 MPaのものは比較的燃焼サイクルの長いものに使われている場合が多い。その2種類の棒の加圧量が燃料中心温度にどの程度影響し、加圧の差がどの程度の中心温度差を作り出すのかを実験で調べた。

実験では0.17 mm 製造ギャップ、17×17型PWR仕様の棒を用いた。線出力の増加による棒中心温度の増加の様子を2種類の加圧量に対して調べた実験解析結果をFigure 13に示す。0から2.5 kW/m おきの代表的な線出力に対する燃料中心温度の増加の値をTable 5に示した。結果の図Figure 13から以下の事がわかる。

(イ) 3.2 MPa と 1.5 MPa加圧の棒間中心温度にはデータのばらつきを考慮しても差がある -

即ち加圧効果がみられる。

(ロ) 運転出力 25 kW/m 付近に着目すると 3.2 MPa 加圧の棒の中心温度は約 1004 °C であり、1.5 MPa 加圧の棒の中心温度は 1049 °C であった。3.2 MPa 加圧の棒の方が 45 °C 程中心温度が低かった。

(イ) Table 5 の代表的線出力における 3.2 MPa 加圧と 1.5 MPa 加圧のデータについて、差が有意か否かの t 検定を実施した結果、有意という結論を得た。

棒の熱的解析に於て燃料中心温度とともに重要なのが棒内プレナム部ガスの圧力変化である。プレナムガス圧力の出力変化時でのふるまいを正確に把握する事により棒内の FP の動きを知ることができる。

プレナム部ガス圧力の出力及び冷却材温度・圧力による変化を調べた結果を Figure 14 に示す。図から次の様な事が知れる。

(イ) 炉内装荷時に大気圧条件から高温・高圧条件に環境が変わる為、ヘリウムガスの膨張がおこり零出力状態で製造時のガス圧は約 2 倍になる。この結果は理想気体の状態方程式からも説明がつく。

(ロ) 3.2 MPa 加圧のものも、1.5 MPa 加圧のものも棒の平均線出力の増加と共に圧力が増加した。前者は 6.5 MPa から 7.6 MPa まで約 1.1 MPa (11 気圧) の上昇、後者は 3.0 MPa から 3.2 MPa まで約 0.2 MPa (2 気圧) の上昇であった。

(イ) 出力が 8 kW/m 以下でのプレナム部ガス圧変化は冷却軽水の温度と圧力の上昇を同時にうけていた。

初期加圧量の違いが燃料中心温度上で Figure 13 に見られた様に明確に現われたが、これを第 1 章にて概略説明したギャップコンダクタンスの概念から理論的に考察すれば次の様になる。

前出式 / 12 / から燃料中心温度の変化量  $\Delta T_C$  は次の様にかけた。

$$\Delta T_C = \frac{\alpha \cdot q}{k_{gas}} \Delta (d + g) \quad \dots\dots\dots (12)$$

一方、温度ジャンプ  $g$  は

$$g = C_1 \frac{\sqrt{T_g}}{P} \quad \dots\dots\dots (13)$$

と表示できる。

ここに  $C_1$  : 定数

$T_g$  : ガスギャップ間平均温度で一定出力下ではほぼ定数

(13) 式から  $\Delta g = g - g_0$ 、即ち棒の加圧量を変化させたときの一定出力下での温度ジャンプ距離の変化は次の様になる。

$$\begin{aligned} \Delta g &= g - g_0 \\ &= -g_0 \left( 1 - \frac{g}{g_0} \right) \\ &= -g_0 \left( 1 - \frac{P_0}{P} \right) \quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$



$P \geq P_0$  の条件下,  $\Delta g$  を  $P$  の関数として(14)式を微分すると

$$\Delta g' = - \frac{g_0 P_0}{P^2} < 0 \quad \dots\dots\dots(15)$$

となり, 加圧 ( $P \geq P_0$ ) により  $\Delta g$  は単調減少する。従って(12)式に戻ると,

$$\Delta TC = \frac{\alpha \cdot q}{k_{gas}} \{ \Delta d + \Delta g \}$$

の式から加圧 ( $\Delta g \rightarrow$ 減少) により  $\Delta TC \rightarrow$ 減少となる。

実験結果からの傾向はこの考察と合っている。即ち Figure 13 (PWRの加圧効果に関する実験データ) からある一定出力値で, 1.5 MPa  $\rightarrow$  3.0 MPa に加圧した棒の中心温度は逆に小さく ( $\Delta TC < 0$ ) になっている。

### 3.2.2 0.23 mm 製造ギャップの 8 × 8 BWR 棒の場合

実用炉では非加圧 0.1 MPa 純ヘリウム充填棒が多くの BWR 炉にて用いられている。最近は伸長燃焼度対策で, ペレットからガスギャップ内に放出された FP によるコンダクタンスの低下防止つまり熱的フィードバックによる燃料温度上昇防止策として加圧燃料棒も徐々に使用されている(1)。従って加圧棒と非加圧棒の炉内特性の研究のうえでも, 実炉条記模擬下の燃料中心温度は興味深い。

0.23 mm ギャップ, 8 × 8 BWR 棒の線出力変化による燃料中心温度変化を加圧量をパラメータとしてプロットしたものを Figure 15 に示す。Figure 15 から燃料棒中心温度は 0.1 MPa から 0.3 MPa の加圧によって, あまり変化しなかった事がわかる。

このときの棒内のガス圧力の変化を Figure 16 に示す。0.3 MPa 加圧棒は 0.47  $\rightarrow$  0.73 MPa と約 0.26 MPa (2.6 気圧) の変化を生じ, 非加圧棒は 0.16  $\rightarrow$  0.23 と約 0.07 MPa (0.7 気圧) の変化を生じた。

## 4. 討 論

### 4.1 温度ジャンプ距離とギャップコンダクタンス

炉内及び炉外における温度ジャンプ距離のギャップコンダクタンスに及ぼす影響を調べた実験について結果を総説し、それと本実験結果との傾向比較をおこなう。

#### 4.1.1 炉内実験

炉内に於ける実験は、NRCが昭和54年からHBWRに於てIFA-430実験として実施した(14)。実験では約2.8 GWd/tU照射した燃料棒につき、出力範囲5～25 kW/m、充填ガス圧0.1～5.1 MPa、ガス組成純ヘリウム～(10% Xe + 90% He)という変数を用いている。

実験に用いられた燃料中心温度とガス圧力に対する基本式は本報(14)式とほぼ同じであるが、照射初期の燃料棒ではないので、リロケーションに対する効果を無視し、更に全く同一の棒につき実験を行なう為に(16)式中、

$$\Delta d \rightarrow 0$$

とした形、即ち

$$\begin{aligned} \Delta T C &= \frac{\alpha q}{k_{\text{gas}}} \Delta g \dots\dots\dots (16) \\ &= - \frac{\alpha q}{k_{\text{gas}}} g_0 \left( 1 - \frac{P_0}{P} \right) \end{aligned}$$

としている。

その結果の1部で、本報のBWR棒の条件に近いものをFigure 17に引用して示す。R. Miller (14)らは実験は式(16)に良く従った事—即ち、温度ジャンプ距離は加圧量に反比例し、ギャップ幅つまりガス伝導度とは無関係に出力によく比例した事を結論としている。

#### 4.1.2 炉外実験

温度ジャンプ距離評価の炉外実験に関する最近の成果はNRCがレーザーを用いてギャップコンダクタンスの測定をガス圧力、ガス組成および温度等について調べたものがある(23)。

その結果の1部で、純ヘリウムのギャップコンダクタンスに対する加圧効果について調べたものをFigure 18に引用して示す。この炉外実験はギャップ(に相当する値)が約6 μmと21 μmと非常に狭く本報で想定しているオープンギャップ状態とは少し条件が異なっている。Figure 19の結果が示す所によれば、温度に影響はされるが、温度ジャンプ距離は圧力に対して1 MPa(10気圧)までは非常に敏感であるがそれ以後は一定傾向になる。

#### 4.1.3 原研の結果との傾向の比較

燃料中心温度に対する棒内加圧量の効果に関する他国の実験結果を4.1.1と4.1.2にて総説したが、これを直接原研の結果、即ち Figure 13 等と比較するのは妥当でない。

試験の条件、方法等が異なっている他、原研の場合はリロケーション効果も実験データ中に含めているからである。従って結果の傾向について比較を行なうのが妥当であろう。データも比較的良くそろい、再現性のあった PWR 棒の燃料データにつき比較する。

代表線出力 20 kW/m に於ける原研実験結果 (Figure 13 参照) を下に示す。

線出力 20 kW/m での比較

	製造時圧力 (MPa)	*20 kW/m での圧力 (MPa)	20 kW/m での中心温度 (°C)	温度差 (°C)
PWR 棒	3.2	7.2	875 ± 7	37
	1.5	3.2	912 ± 12	

\*Fig. 14 より

線出力 20 kW/m 時、3.2 MPa に加圧した棒 (炉内ではそのとき 7.2 MPa) の中心温度は 1.5 MPa に加圧した棒 (炉内ではそのとき 3.2 MPa) の中心温度よりも 37 °C 低かった。

傾向として HBWR 条件よりも LWR 条件の方が更に加圧効果を増幅させる。

#### 4.2 炉内実験結果と FEMAXI-III コード計算結果との比較

燃料性能コードによる中心温度の計算には FEMAXI- (1)公開コード(32)を用いた。公開コード標準仕様と異なるのは、燃料ペレットの焼きしまり量に関する情報を炉外再焼結実験からの結果により入力データとした事のみである。棒外側の冷却材温度、圧力は入力としプレナム部のガス温度は冷却材温度よりも常に 25 °K 高いという仮定を用いた。

##### 4.2.1 製造ギャップをパラメータとした場合

実験値とコード計算結果との比較結果を PWR 棒 (3.2 MPa 加圧) については Figure 19 に、BWR 棒 (0.1 MPa) については Figure 20 にそれぞれ示す。

また FEMAXI-III 計算による結果の出力のうち、1) インプットリスト、2) インプットデータ仕様、3) 軸方向ピーキング 1.0 における熱計算情報 (軸方向 10 分割計算) および 4) 棒全体平均熱計算情報について、PWR 棒 3 本 (PWR 1, 2 および 3)、BWR 3 本 (BWR 1, 3 および 7) の計 6 本の結果を付録 I に添付する。

6 本の棒の特徴は下記の通りである。

棒番号	製造ギャップ (mm)	初期加圧量 (MPa)
PWR 1	0.17	3.2
PWR 2	0.08	3.2
PWR 3	0.17	1.5
BWR 1	0.23	0.1
BWR 3	0.10	0.1
BWR 7	0.23	0.3

Figure 19 の PWR 棒, 初期加圧 3.2 MPa の場合, 計算結果は出力  $\leq 20$  kW/m までは温度が低目に出る。しかし全体的には比較的良く分っている。

Figure 20 の BWR, 非加圧棒の場合, 計算結果と実験結果は非常に良く一致した。

#### 4.2.2 初期加圧量をパラメータとした場合

実験値とコード計算結果との比較結果を PWR 棒 (0.17 mm 初期ギャップ) については Figure 21 に, BWR 棒 (0.23 mm 初期ギャップ) については Figure 22 にそれぞれ示す (参照: 付録 I : コード計算結果例)。

FEMAX I - III の計算では, 燃料棒は炉内零出力時 (ホットスタンバイ) に 30% の熱リロケーションを起こすと仮定して計算をすすめていく。従って加圧量の効果は, 温度ジャンプ距離  $g$  への影響する。しかし照射開始ギャップが現行の PWR 仕様 ( $\sim 0.17$  mm) および BWR 仕様 (0.23 mm) の場合, この加圧量の効果は殆んど計算結果に影響しなかった。

Figure 21 よりわかる様に, コード計算は温度ジャンプ距離に敏感でない為, 1.5 MPa 及び 3.2 MPa に対する計算結果は殆んど同じ値になった。また実験値に比較して計算値は低目であった。特に現行の PWR 炉が高燃焼度用に開発をめざしている 1.5 MPa のものに対して過小評価の傾向にあった。但しギャップが閉鎖に近づく運転出力範囲 (20 kW/m 以上) では比較的良い一致がみられた。

1 つの試みとして, Table 4 に示した Gapcon-Thermal - I, 及び Gapcon-Thermal II or III に組みこまれた温度ジャンプ距離の式を FEMAX I - III に組み入れて感度計算を実施した。その結果を Table 7 に示す。また計算結果の 1 例を付録 I と同様な仕様で付録 II に添付する。付録 II は次の様な棒についての計算例が示されている。

番 号	棒	仕 様	モ デ ル
①	PWR 1	0.17 mm ギャップ / 3.2 MPa	G-T-1
②	PWR 1	0.17 mm ギャップ / 3.2 MPa	G-T-2 or-3
①'	PWR 3	0.17 mm ギャップ / 1.5 MPa	G-T-1
②'	PWR 3	0.17 mm ギャップ / 1.5 MPa	G-T-2 or-3

Table 7 によれば各モデルによる中心温度の差は高々 3～6℃程度であり、モデル間の差は小さかった。これは言い換えれば、オープンギャップ状態にある棒の中心温度計算を大きく支配するのは、初期リロケーションの量であり、温度ジャンプ距離の中心温度に対する効果（即ち圧力の効果）は小さいという事である。

Figure 22 よりわかる様に、BWR 棒に対してはコード計算結果は実験値と比較的良く合っていた。

## 5. 結 言

日本原子力研究所はノルウェー・ハルデン炉 (HBWR) を用いて P C I 破損機構解明を目的とした「ハルデン出力急昇試験」を昭和 54 年度から実施している。

本報は軽水炉条件模擬下で基礎照射に入った現行 17 × 17 PWR 及び 8 × 8 BWR 燃料棒につき初期起動時での燃料中心温度の評価を行なった解析結果をまとめたものである。解析は初期製造ギャップ及び棒内充填純ヘリウム加圧量を数種類に変えたときの燃料棒の中心温度の照射下ふるまいを運転出力に対しておこなった。

本報の特色は、実用炉にて使用されているのとほぼ同じ仕様をもった現行標準及び 1 部改良を行なった国産燃料体の照射下熱的ふるまいの評価・解析を実施した事にある。実験では燃料中心温度及びプレナム部ガス圧力を運転出力に対して経時的に再現性良く求めた。従って得られたデータは一般性がある。

解結から得られた結果は以下の通りである。

—燃料中心温度に及ぼす製造ギャップの効果

(1) 通常運転下 (平均線出力 ~ 25 kW/m) にある 3.2 MPa 加圧 17 × 17 PWR 棒 : 製造ギャップ 170 μm の燃料中心温度は 1000 °C 程度である。燃料ペレットのリロケーションや稠密化によると考えられる同一仕様燃料棒間の一定出力における温度のばらつきは  $4 \pm 7$  °C (1 σ) 程度である。同時に測定した棒内プレナム部ガス圧変化及び燃料棒軸方向伸び計から、燃料棒のガスギャップはオープンの状態にあった事がわかった。

製造ギャップを半分にした 3.2 MPa 加圧棒 : 製造ギャップ 80 μm では運転出力下での燃料中心温度を 130 °C 近く下げることができる。

(2) 通常運転下 (平均線出力 ~ 30 kW/m) にある 0.1 MPa 非加圧 8 × 8 BWR 棒 : 製造ギャップ 230 μm の燃料中心温度は 1070 °C 程度であった。燃料ペレットのリロケーションや稠密化によると思われる同一仕様燃料棒間の一定出力における温度のばらつきは  $14 \pm 10$  °C (1 σ) 程度であった。同時に測定した棒内プレナム部ガス圧力変化及び燃料棒軸方向伸び計から燃料棒のガスギャップはオープンの状態にあった事がわかった。製造ギャップを半分以下にした非加圧棒 : 製造ギャップ 100 μm 棒では運転出力下での燃料中心温度を 175 °C 下げることができる。

(3) 燃料棒プレナム部の出力変化によるガス圧力変化には初期の製造ギャップの効果は殆んどない。

—燃料中心温度に及ぼす製造時棒内充填ガス圧力の効果

(4) 通常運転下 (平均線出力 ~ 25 kW/m) にある 0.17 mm 製造ギャップ, 3.2 MPa 加圧の 17 × 17 PWR 棒に対し加圧量を 1.5 MPa におとしたものは、約 45 °C の中心温度の増加をおこした。1.5 MPa 加圧の棒の中心温度はそのとき 1049 °C であった。同一仕様の数本の棒間のデータ比較からリロケーション等を考慮しても上記の温度差 45 °C は加圧効果によるものと判断できた。

棒内プレナム部圧力は出力の増加と共に増加し、3.2 MPa 棒は運転出力条件下で 7.6 MPa, 1.5

MPa 棒は運転出力条件下で 3.2 MPa になった。

(5) 通常運転下（平均線出力～30 kW/m）にある 0.23 mm 製造ギャップ，非加圧の 8×8 BWR 棒に対し加圧量を 0.3 MPa にあげたものは，あまり燃料中心温度がかわらなかった。

棒内プレナム部圧力は出力の増加と共に増加し，0.1 MPa 棒は運転出力条件下で 0.23 MPa，0.3 MPa 加圧棒は運転出力条件下で 0.73 MPa になった。

(6) プレナム部ガス圧力は製造ギャップの量にあまり影響をうけない。

(7) 加圧量の効果を温度ジャンプ距離と結びつけた理論的考察の結果は実験結果をよく説明した。  
— FEMAXI-III コードによる計算と実験との比較

(8) BWR 棒については燃料中心温度に対する製造ギャップ，充填ガス圧量の効果がコード上で良く実験結果に合った。

PWR 棒については燃料中心温度に対する製造ギャップ，充填ガス圧量の効果がコード上で 20 kW/m までは低目に出たが，それ以後は良く合った。

(9) 初期起動時でギャップがオープンになっている状態では，FEMAXI-III，Gapcon-Thermal-I～III 等に組みこまれた温度ジャンプ距離に関するどのモデルを使用しても燃料中心温度は殆んどかわらず，3～6℃の差しか生じない。

## 謝 辞

燃料被覆管の製造については国内 BWR 及び PWR の各メーカーに，燃料棒の製作・圧力リグの製作・燃料体の炉運転保守については当時ハルデンプロジェクト派遣員で原研 JMTR 照射 1 課の高橋秀武氏他ノルウェー・シエラー研究所の各位に御世話になりました。燃料体の炉内装荷に係る安全設計およびデータ入手システムの整備等についてはハルデンプロジェクト副理事長 K. D. クヌッドセン，燃料部長 A. ハネビック，次長 E. コルスタッド氏他各位に御努力をいただきました。そして解析評価については適切な助言を原研燃料安全第 1 研究室長市川達生氏に賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

MPa 棒は運転出力条件下で 3.2 MPa になった。

(5) 通常運転下（平均線出力～30 kW/m）にある 0.23 mm 製造ギャップ，非加圧の 8×8 BWR 棒に対し加圧量を 0.3 MPa にあげたものは，あまり燃料中心温度がかわらなかった。

棒内プレナム部圧力は出力の増加と共に増加し，0.1 MPa 棒は運転出力条件下で 0.23 MPa，0.3 MPa 加圧棒は運転出力条件下で 0.73 MPa になった。

(6) プレナム部ガス圧力は製造ギャップの量にあまり影響をうけない。

(7) 加圧量の効果を温度ジャンプ距離と結びつけた理論的考察の結果は実験結果をよく説明した。  
- FEMAXI-III コードによる計算と実験との比較

(8) BWR 棒については燃料中心温度に対する製造ギャップ，充填ガス圧量の効果がコード上で良く実験結果に合った。

PWR 棒については燃料中心温度に対する製造ギャップ，充填ガス圧量の効果がコード上で 20 kW/m までは低目に出たが，それ以後は良く合った。

(9) 初期起動時でギャップがオープンになっている状態では，FEMAXI-III，Gapcon-Thermal-I～III 等に組みこまれた温度ジャンプ距離に関するどのモデルを使用しても燃料中心温度は殆んどかわらず，3～6℃の差しか生じない。

## 謝 辞

燃料被覆管の製造については国内 BWR 及び PWR の各メーカーに，燃料棒の製作・圧力リグの製作・燃料体の炉運転保守については当時ハルデンプロジェクト派遣員で原研 JMTR 照射 1 課の高橋秀武氏他ノルウェー・シエラー研究所の各位に御世話になりました。燃料体の炉内装荷に係る安全設計およびデータ入手システムの整備等についてはハルデンプロジェクト副理事長 K. D. クヌッドセン，燃料部長 A. ハネビック，次長 E. コルスタッド氏他各位に御努力をいただきました。そして解析評価については適切な助言を原研燃料安全第 1 研究室長市川達生氏に賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。



## 参考文献

- 1) 永井, 近藤ら: 我が国における核燃料開発の動向, 日本原子力学会誌 24,6 (1982) 404
- 2) W. Vogl, R. von Jan and H. Stehle: Experimental Strategy of Fuel Performance Testing with respect to PCI, Nucl. Eng. Design 65 (1981) 307
- 3) R. von Jan and W. Hering: Experience and Plans with PCI Protection in KWU LWR Plants, Nucl Eng. Design 65 (1981) 313
- 4) H.S. Rosenbaum et al: Demonstration of fuel resistant to pellet-cladding interaction, GEAP-23773-1 (1978), -23773-2 (1979), -25163-1 (1979), -25163-2 (1980)
- 5) C.E. Crouthamel and M.D. Freshly: Fuel Performance Improvement Program DOE/ET/34215-21, uc-78 (1981)
- 6) J.T.A. Roberts et al: Planning support document for the EPRI Light Water Reactor Fuel Performance Program, NP-737-SR (1978)
- 7) PNL: Stored energy calculation: The state of the art, PNL-2581/NRC-1&3 (1978)
- 8) D.D. Lanning: The possible impact of fuel pellet cracking on inferred gap conductance and fuel stored energy, Nucl Technology 56 (1982) 565
- 9) C.R. Hann et al: Gapcon-Thermal-1: A computer Program for calculating the gap conductance in oxide fuel pins, BNWL-1778 (1973)
- 10) C.E. Beyer et al: Gapcon-Thermal-2: A computer program for calculating the thermal behavior of an oxide fuel rod, BNWL-1898 (1975)
- 11) D.D Lanning et al: Gapcon-Thermal-3 code description, PNL-2434 (1978)
- 12) M. Ichikawa et al: FEMAXI-III: An Axisymmetric Finite Element Computer Code for the Analysis of Fuel Rod Performance, paper presented at the IAEA Specialists Meeting on Water Reactor Fuel Element Performance Computer Modelling, 1980 Black pool, UK
- 13) A.M. Ross and R.L. Stoute: Heat Transter Coefficient between  $UO_2$  and Zircaloy-2, AECL-1552 (CRFD-1075)
- 14) R.W. Miller and A.D. Appelhans: Effects of gap gas pressure and xenon concentration on the thermal behavior of operating fuel rods: experimental results and comparison with theory and FRAP code predictions, NUREG/CR-1719, EGG-2062 (1981.7)

- 15) L.S. Tong and J. Weisman: Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors, American Nuclear Society Monograph (1970)
- 16) R.E. Williford et al: The analysis of fuel relocation for the NRC/PNL Halder Assemblies IEA-432, and IEA-513, NUREG/CR-0588, PNL-2709 (1980)
- 17) R.E. Williford et al: A model for the effective thermal and mechanical properties of cracked  $UO_2$  pellets, Nucl. Technology 56, 340 (1982)
- 18) A.D. Appelhans et al: Cracking and relocation of  $UO_2$  fuel during initial nuclear operation, NUREG/CR-1425, EGG-2032 (1980)
- 19) 小熊正臣他: 燃料棒の照射初期のギャップ解析とリロケーションモデル, 日本原子力学会, 昭和 53 年, 秋の分科会, F 50 (1978)
- 20) E.H. Kennard: Kinetic Theory of Gases, McGRAW-HILL, P311 (1938)
- 21) W.R. Lloyd et al: Heat transfer in Multi-Component Monatomic Gases- in the Low, Intermediate and High Pressure Regime, Nuclear Thermionics Conference (1978)
- 22) S.K. Loyalka; A model for gap conductance in nuclear fuel rods, Nucl. Tech., 57 (1982) 220
- 23) J. Garnier and S. Begej; Ex-reactor determination of thermal gap conductance between uranium dioxide and Zircaloy-4, PNL-2696 (1979) and PNL-3232 (1980)
- 24) L.J. Siefken et al: FRAP-T5, A computer code for the transient analysis of oxide fuel rods, NUREG/CR-0840, TREE-1281 (1979)
- 25) 中島 et al: FEMAXI-111, 軸対称有限要素法による燃料ふるまいコード, JAERI-M 9251 (1980)
- 26) 原山 et al: FREG-3, 照射履歴に従った燃料ペレット-被覆管ギャップ熱伝達率評価プログラム, JAERI-M 7278 (1977)
- 27) C. Vitanza: Private communication (1977)
- 28) 榊澤, 高橋, 市川, 藤田: - to be published.
- 29) 榊澤, 高橋, 市川, 藤田: - to be published.
- 30) M. Uclinda et al: Densification of uranium dioxide fuel pellets (I), JAERI-M 6904 (1977)
- 31) K. Yanagisawa: Densification of uranium dioxide fuel pellets (II), JAERI-M 7807 (1978)
- 32) M. Ichikawa et al. : to be published

Table 1 Summary of 17×17 PWR fuel rod characteristics

1.	Fuel	
1.1	Material	Sintered UO <sub>2</sub> pellets
1.2	Enrichment(%U-235)	13%
1.3	Density	95 %T.D.
1.4	Pellet diameter	8.2-8.3 mm
1.5	Pellet length	13.5 mm
1.6	Dishing	Both ends(0.3mm in depth)
1.7	Edge chamfer	None
2.	Cladding	
2.1	Material	Zry-4
2.2	Heat treatment	Stress relieved
2.3	Surface treatment	Autoclaved outer surface only
2.4	Clad O.D.	9.5 mm
2.5	Clad I.D.	8.36mm
3.	Assembly	
3.1	Enriched fuel length	448 mm
3.2	Enriched fuel weight	243 grams
3.3	Diametral gap	0.080 and 0.170 mm
3.4	Fill gas	He at 1.5 and 3.2 MPa

Table 2 Summary of 8x8 BWR fuel rod characteristics

1.	Fuel	
1.1	Material	Sintered UO <sub>2</sub> pellets
1.2	Enrichment(%U-235)	13%
1.3	Density	95 %T.D.
1.4	Pellet diameter	10.31-10.44 mm
1.5	Pellet length	10 mm
1.6	Dishing	None
1.7	Edge chamfer	0.2x0.4 mm
2.	Cladding	
2.1	Material	Zry-2
2.2	Heat treatment	Fully annealed
2.3	Surface treatment	Autoclaved on both sides
2.4	Clad O.D.	12.27 mm
2.5	Clad I.D.	10.54 mm
3.	Assembly	
3.1	Enriched fuel length	448 mm
3.2	Enriched fuel weight	400 grams
3.3	Diametral gap	0.100 and 0.230 mm
3.4	Fill gas	He at 0.1 and 0.3 MPa

Table 3 Fuel characteristics as testing variables

FUEL CHARACTERIZATION

variable \ fuel type		PWR	BWR
As-built gap (mm)	large	0.17	0.23
	small	0.08	0.10
Pressurization (MPa)	high	3.2	0.3
	low	1.5	0.1

Table 4 Summary of equations of temperature-jump distance as a function of fill-gas pressure have been used in a various fuel performance computer codes

CODE	MODEL	EQUATION
GAPCON-THERMAL-1 FRAP-T5 FREG-3,4A	empirical	$g = 3.756 \times 10^2 \frac{\mu}{P} \sqrt{T_g/M}$
GAPCON-THERMAL-2 FRAP-T6 -3	Lloyd et al	$g = 0.2171 \frac{K_{gas}}{P} \sqrt{T_g} \frac{1}{\sum_i a_i f_i / \sqrt{M_i}}$
FEMAXI-III SIROD	Constant set	$g = \sum_i g_i \frac{10^5}{P}$
g : JUMP DISTANCE (m) μ : VISCOSITY OF GAS (gm/ms) P : PRESSURE OF GAS (Pa) T <sub>g</sub> : TEMPERATURE OF GAS (K) M : MOLECULAR WEIGHT OF GAS K <sub>gas</sub> : GAS CONDUCTIVITY (W/mK)		a <sub>i</sub> : ACCOMODATION COEFFICIENT f <sub>i</sub> : MOLE FRACTION M <sub>i</sub> : GRAM MOLECULAR WEIGHTS g <sub>i</sub> : JUMP DISTANCE OF EACH GAS (E.G., 10 μm FOR HELIUM)

Table 5 Fuel centerline temperature of variously designed 17x17 type PWR rods as a function of local representative power at thermocouple location in which coolant temperature as well as pressure at operating condition is included.

Diam. gap ( $\mu\text{m}$ )	170		170		170		80		80		Rod External Conditions			
	3.2	PWR1	3.2	PWR7	1.5	PWR3	1.5	PWR9	3.2	PWR2	3.2	PWR8	coolant temp. at thermocouple (MPa)	coolant pressure ( $^{\circ}\text{C}$ )
Fill gas (Mpa)	3.2		3.2		1.5		1.5		3.2		3.2			
Rod no.		PWR1		PWR7		PWR3		PWR9		PWR2		PWR8		
Selected power (kW/m)														
2.5	335		325	395	393		393		308		315	235	14.7	
5.0	415		420	435	439		439		383		400	244	"	
7.5	496		500	507	516		516		487		464	254	"	
10.0	566		572	587	590		590		500		525	264	"	
12.5	658		650	674	679		679		555		600	273	"	
15.0	730		737	776	770		770		637		678	283	"	
17.5	805		810	846	833		833		705		745	292	"	
20.0	870		880	920	903		903		750		800	300	"	
22.5	940		950	995	988		988		807		865	302	"	
25.0	1000		1008	1055	1043		1043		875		925	302	"	

#Coolant flow rate at test; 3.2 kl/h

Table 6 Fuel centerline temperature of variously designed 8×8 type BWR fuel rods as a function of local representative power at thermocouple location in which coolant temperature as well as pressure at operating condition is included.

Diam, gap ( $\mu\text{m}$ )	230	100	100	230	Coolant temp. at thermocouple ( $^{\circ}\text{C}$ )	Coolant pressure (MPa)
Fill gas (MPa)	0.1	0.1	0.1	0.3		
Rod no.	BWR1	BWR2	BWR3	BWR7		
Selected power (kW/m)						
2.5	308	280	288	317	220	7.0
5.0	377	340	345	378	234	"
7.5	446	405	403	460	240	"
10.0	513	458	460	550	250	"
12.5	595	517	530	625	252	"
15.0	670	570	595	700	254	"
17.5	724	620	650	767	258	"
20.0	814	685	690	840	260	"
22.5	880	730	750	900	264	"
25.0	938	785	805	968	268	"
27.5	1009	845	860	1050	270	"
30.0	1070	895	918	1100	275	"

# Coolant flow rate at test; 3.0 kl/h

Table 7 Calculating results of fuel centerline temperature of PWR 0.17mm as-built gap rods by using three different models of temperature jump distance

Pressure (MPa)	Power (kW/m)	FEMAXI-III ( $^{\circ}\text{C}$ )	GT-1 ( $^{\circ}\text{C}$ )	GT-2,3 ( $^{\circ}\text{C}$ )
3.2	0	240	240	240
	12	582	584	583
	23	964	968	967
	35	1319	1325	1324
1.5	0	240	240	240
	12	582	582	582
	23	964	965	963
	35	1319	1321	1319

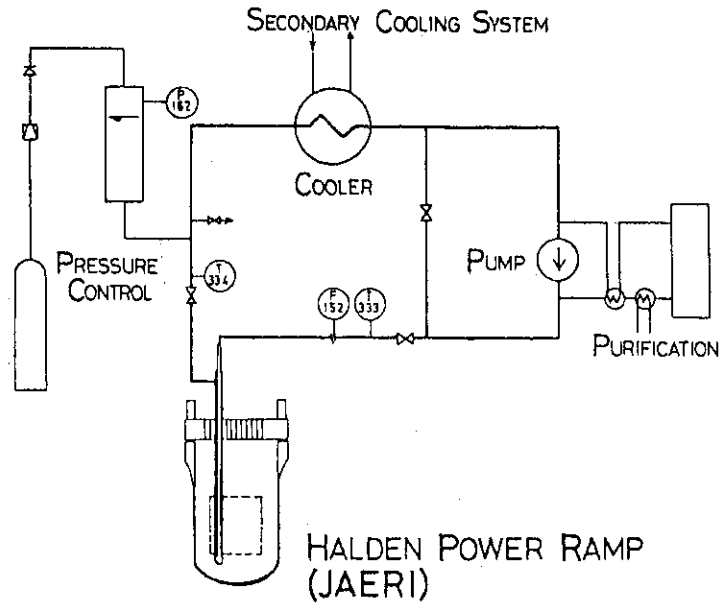


Fig. 1 Schematic representation of high pressure loop in HBWR for fuel rod base irradiation of Halden Power Ramp Test

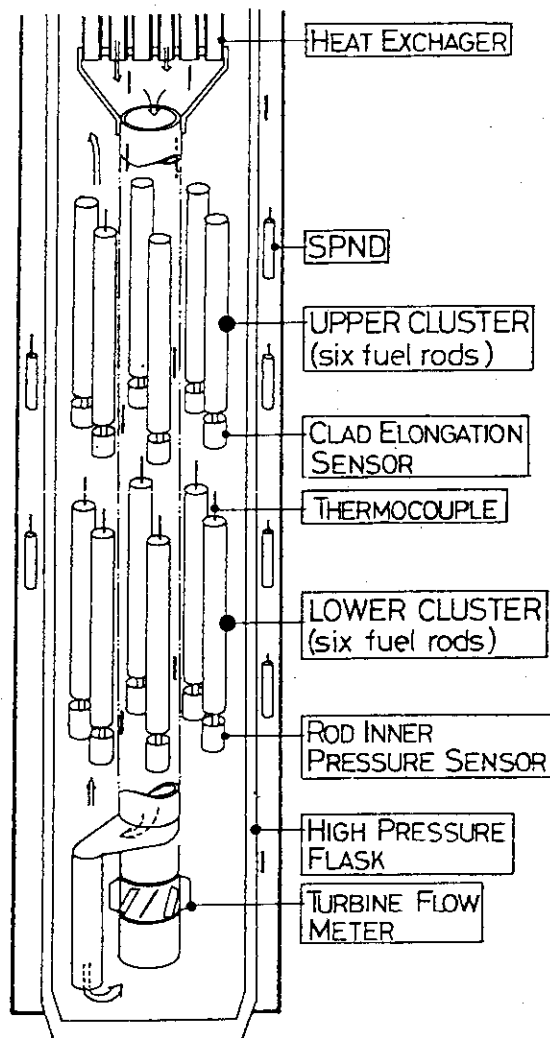


Fig. 2 Schematic representation of high pressure rig of PWR involving a various kind of instrumented fuel assemblies



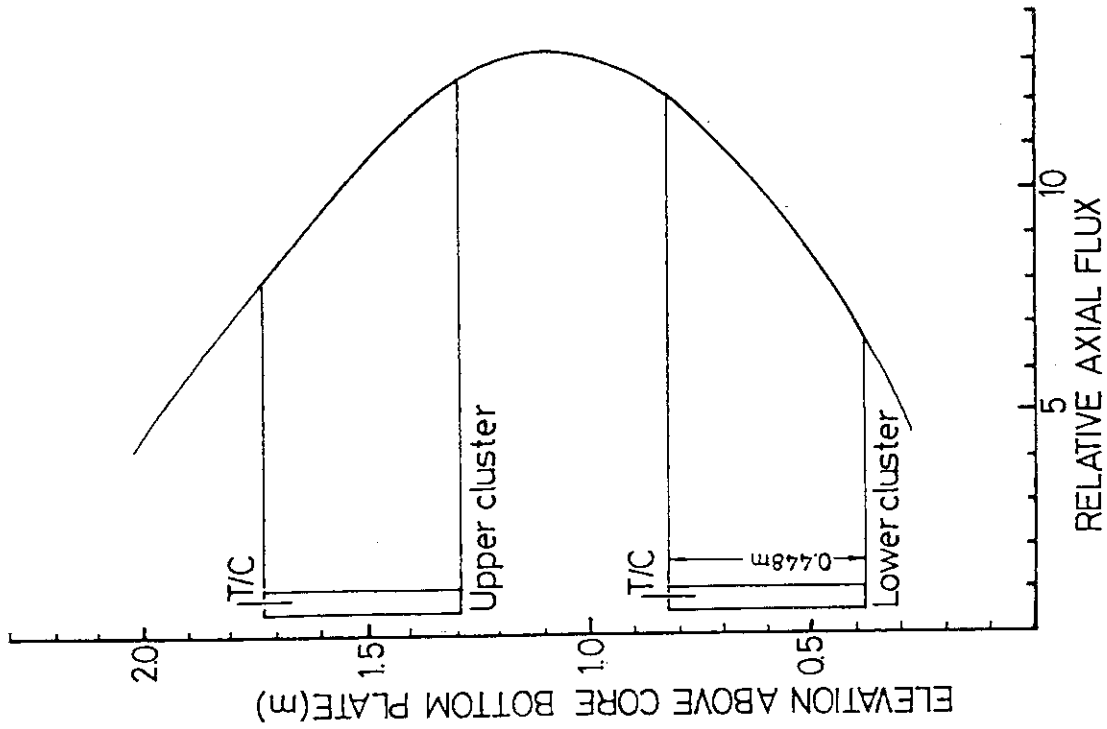


Fig. 3  
Relative axial flux distribution of PWR cluster at a maximum power level in base irradiation stage

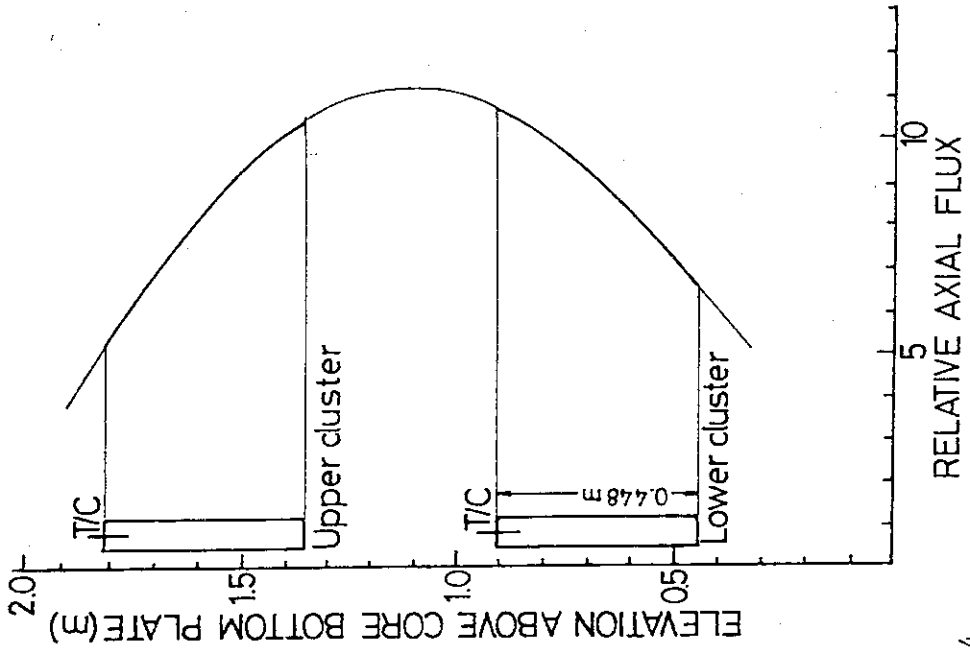


Fig. 4  
Relative axial flux distribution of BWR bundle at a maximum power level in base irradiation stage

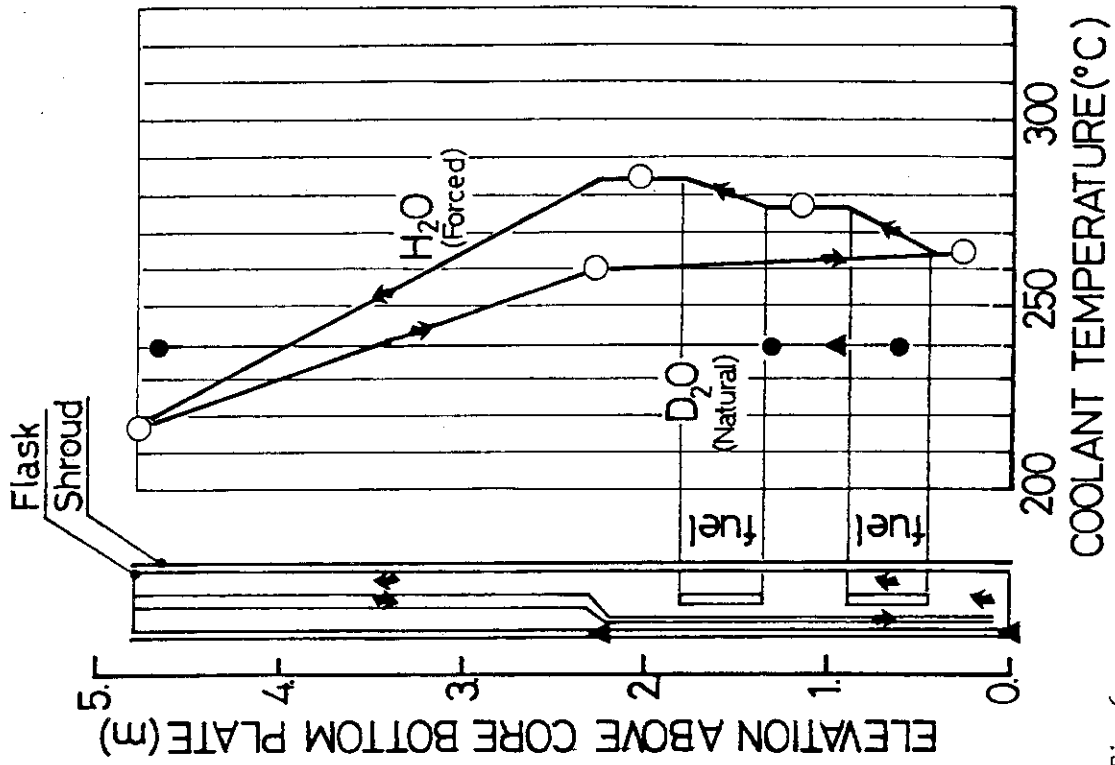


Fig. 5

Axial coolant temperature distribution of PWR cluster at a maximum power level in base irradiation stage

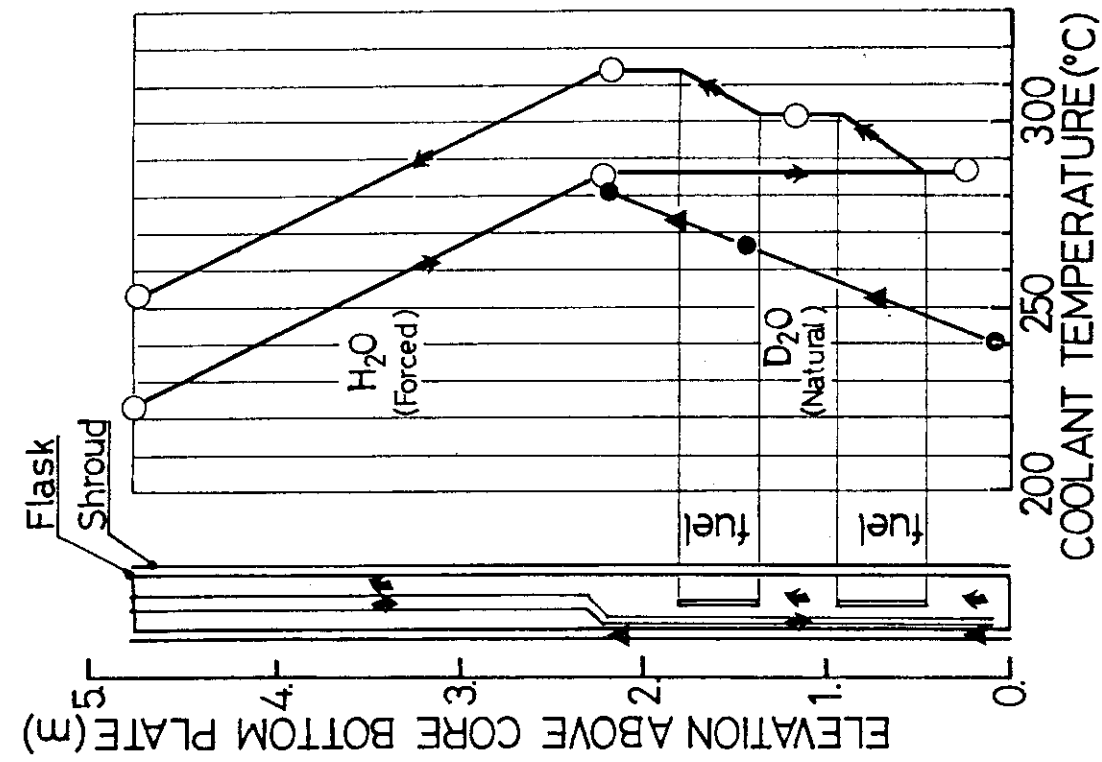


Fig. 6

Axial coolant temperature distribution of BWR bundle at a maximum power level in base irradiation stage

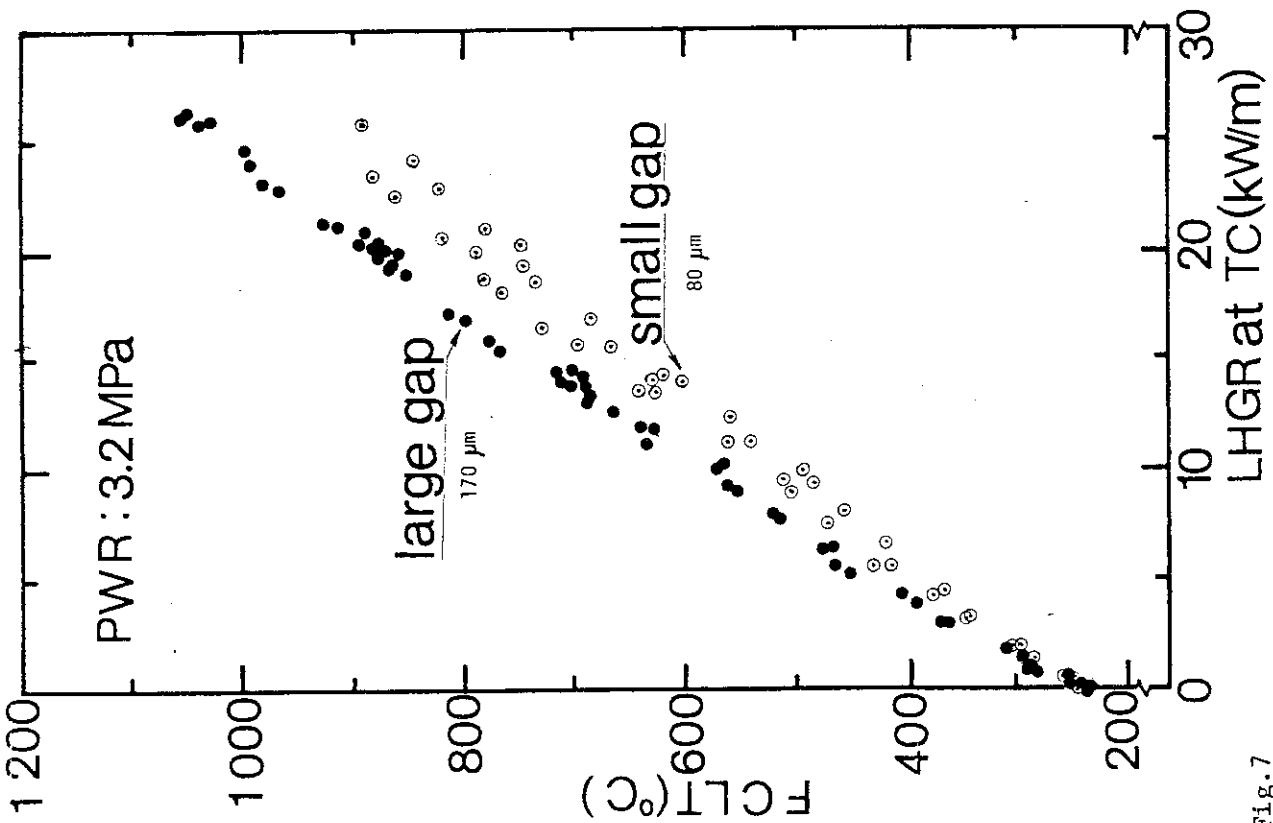


Fig. 7

Fuel centerline temperature of 3.2MPa pre-pressurized PWR rods vs local heat generating rate at thermocouple location as a function of rod as-fabricated diametral gap

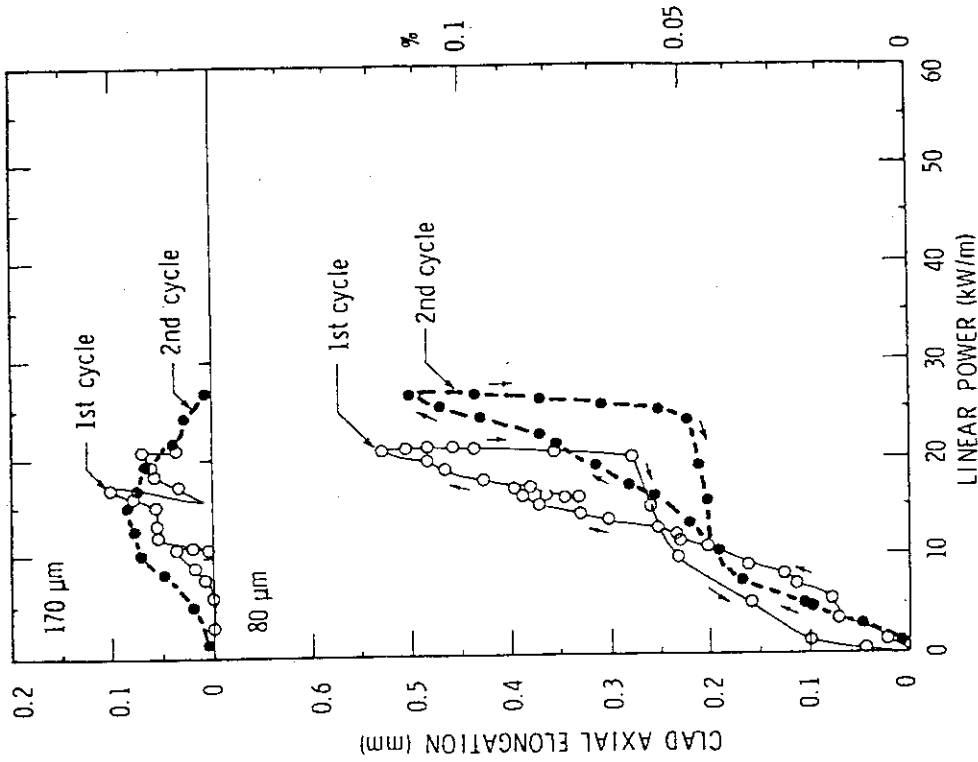


Fig. 8

Clad axial elongation of PWR pressurized 3.2MPa rods vs averaged linear power as a function of as-fabricated gap clearance (top; 170 $\mu\text{m}$ , bottom; 80 $\mu\text{m}$ ) during 1st startup cycle and subsequent 2nd cycle.

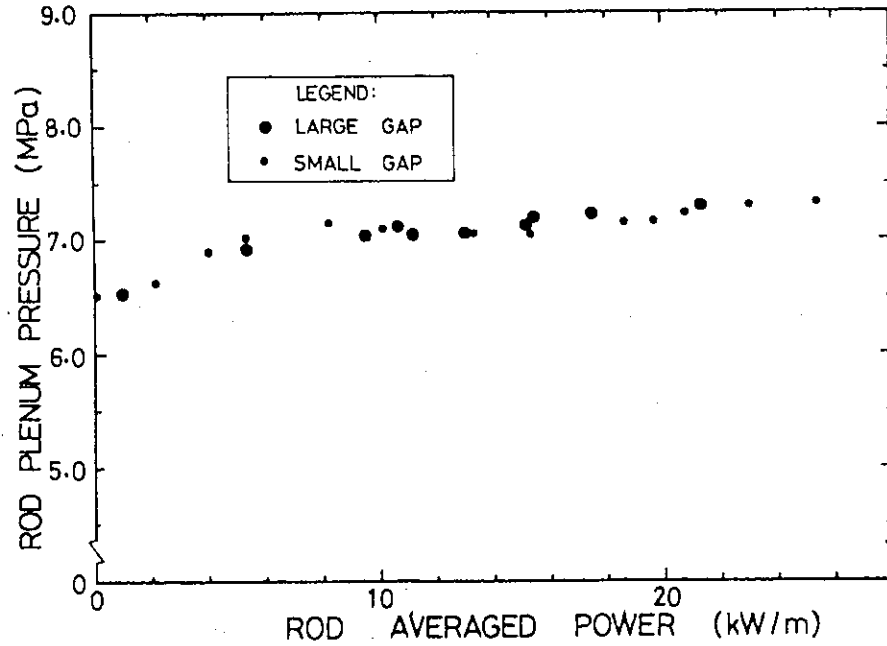


Fig. 9 Fuel plenum pressure of PWR pressurized 3.2MPa rods vs averaged linear power as a function of gap clearance (170 $\mu$ m and 80 $\mu$ m each) during 1st startup cycle

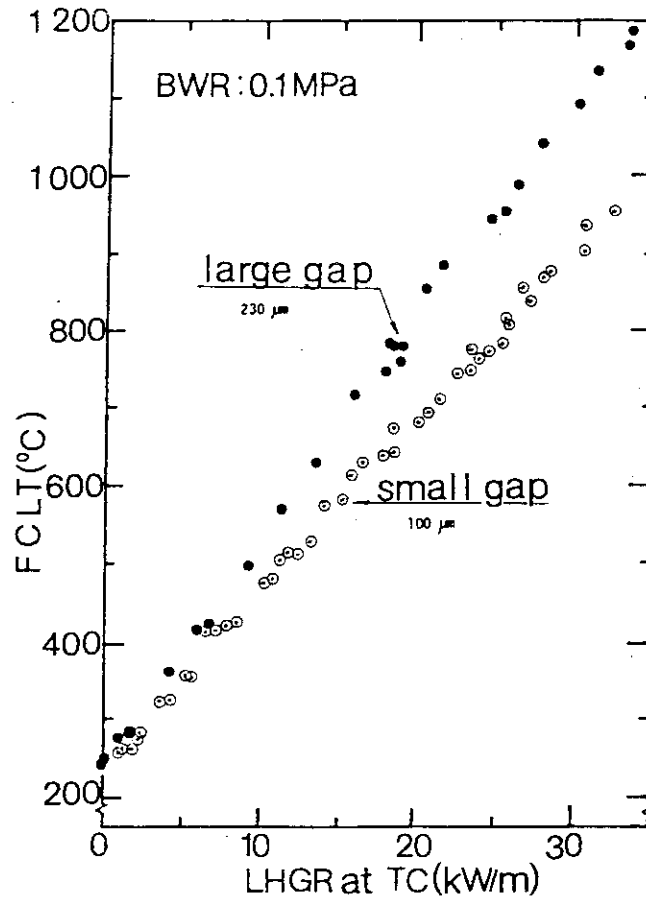


Fig. 10 Fuel centerline temperature of standard 8x8 BWR fuel rods vs local heat generating rate at thermocouple location as a function of rod as-fabricated diametral gap

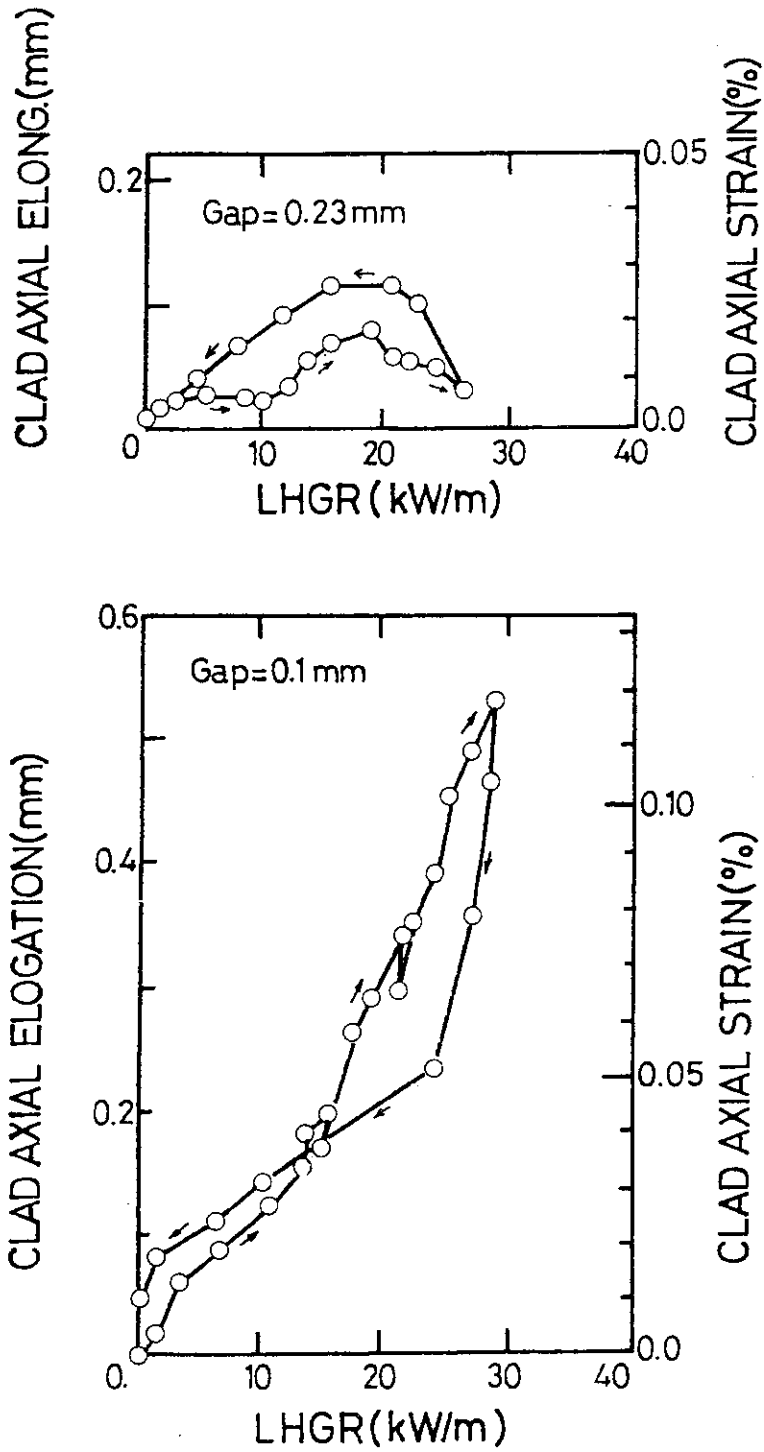


Fig. 11 Clad axial elongation of BWR standard rods vs averaged linear power as a function of as-fabricated gap clearance (top; 230 $\mu$ m, bottom; 100 $\mu$ m) during 1st startup cycle

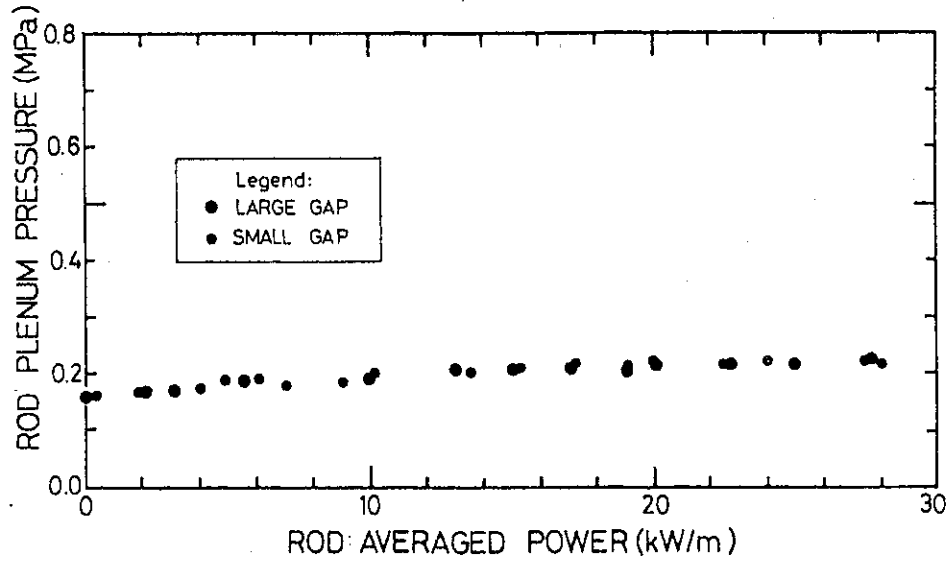


Fig. 12 Fuel plenum pressure of BWR standard rods vs averaged linear power as a function of gap clearance (230 $\mu$ m and 100 $\mu$ m each) during 1st startup cycle

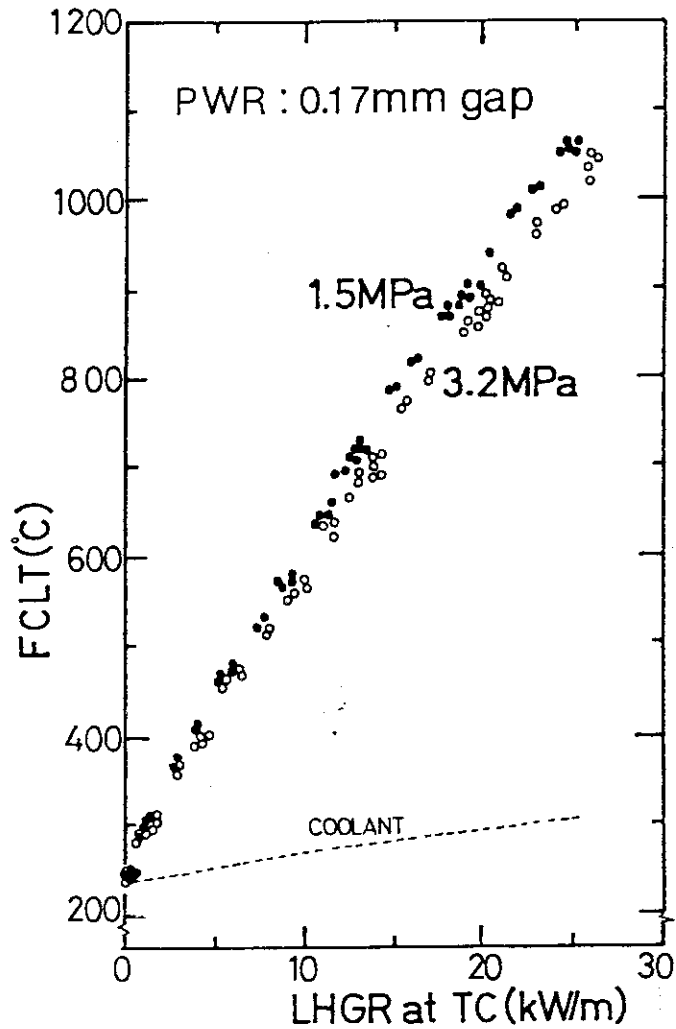


Fig. 13 Fuel centerline temperature of as-fabricated gap clearance of 170 $\mu$ m 17 $\times$ 17 PWR rods vs local heat generating rate at thermocouple location as a function of fill gas pressure in which coolant temperature at the place is indicated by broken line

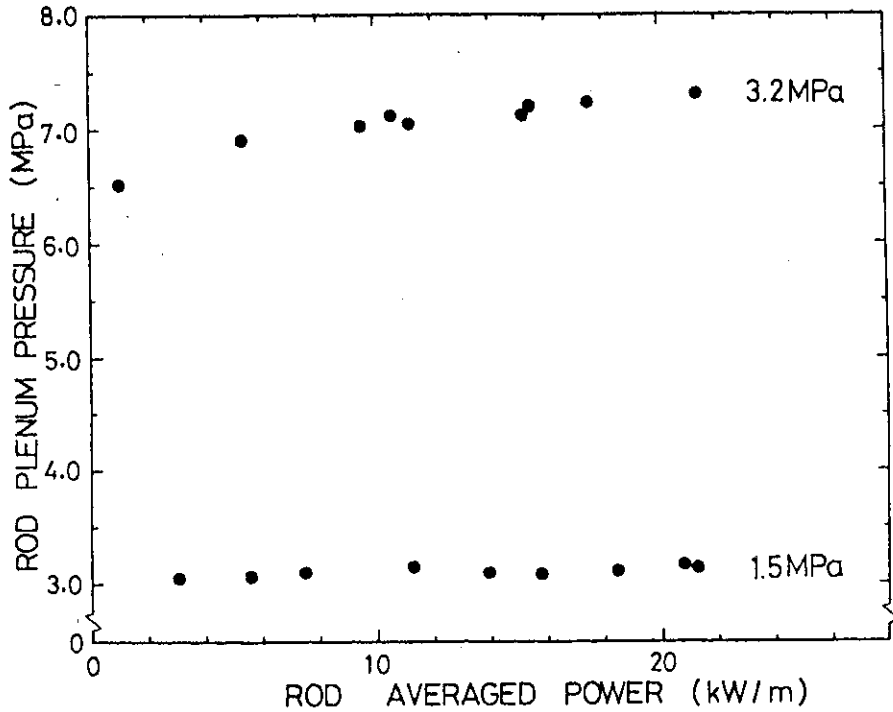


Fig. 14 Fuel plenum pressure of PWR large gap 0.17 $\mu$ m rods vs averaged linear power as a function of fill gas pressure (3.2MPa and 1.5 MPa each) during 1st startup cycle

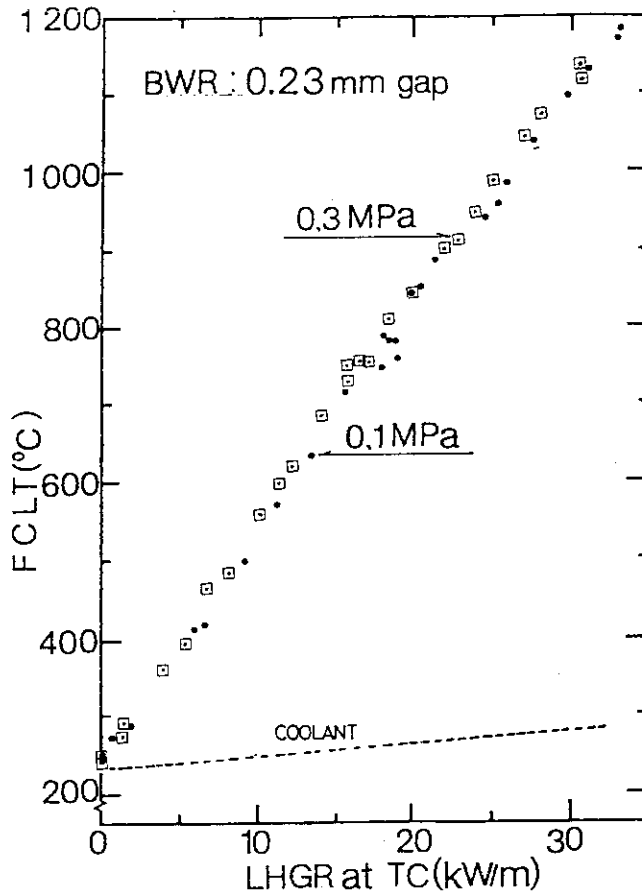


Fig. 15 Fuel centerline temperature of as-fabricated gap clearance of 230 $\mu$ m 8x8 BWR rods vs local heat generating rate at thermocouple location as a function of fill gas pressure in which coolant temperature at the place is indicated by broken line

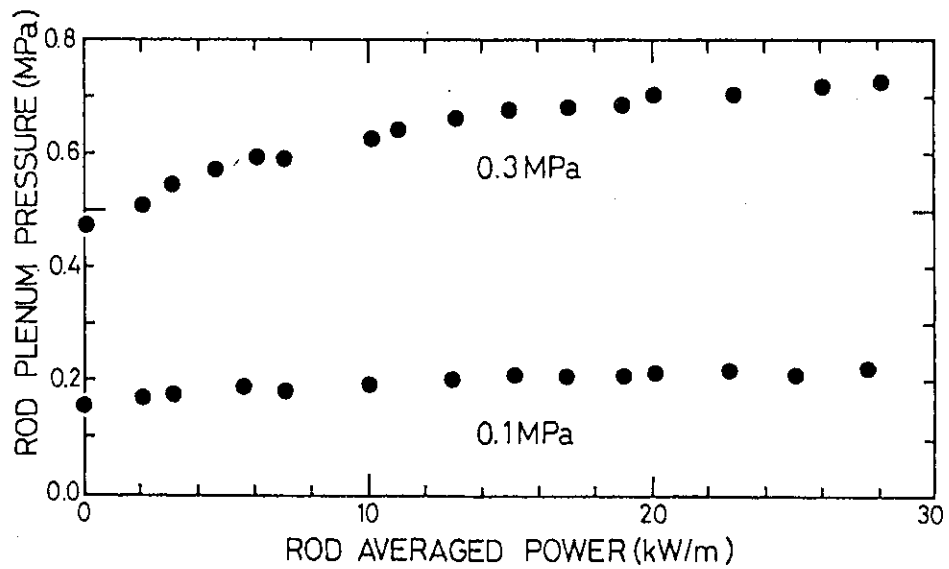


Fig. 16 Fuel plenum pressure of BWR standard 0.23mm gap rods vs averaged linear power as a function of fill gas pressure (0.3MPa and 0.1MPa each) during 1st startup cycle

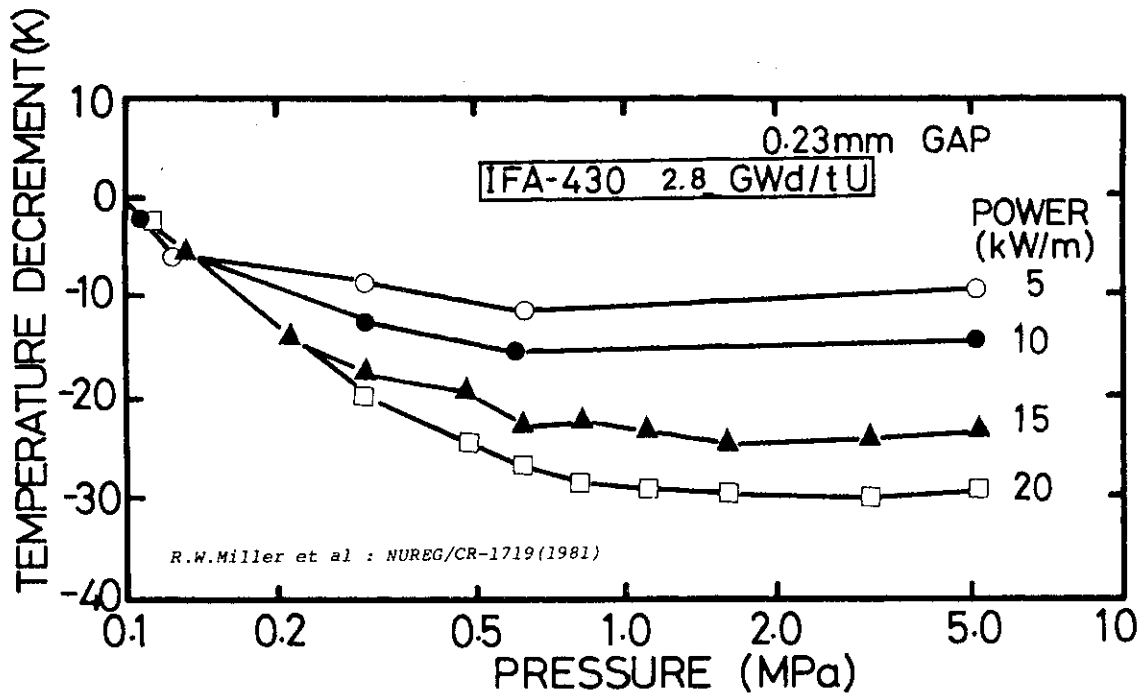
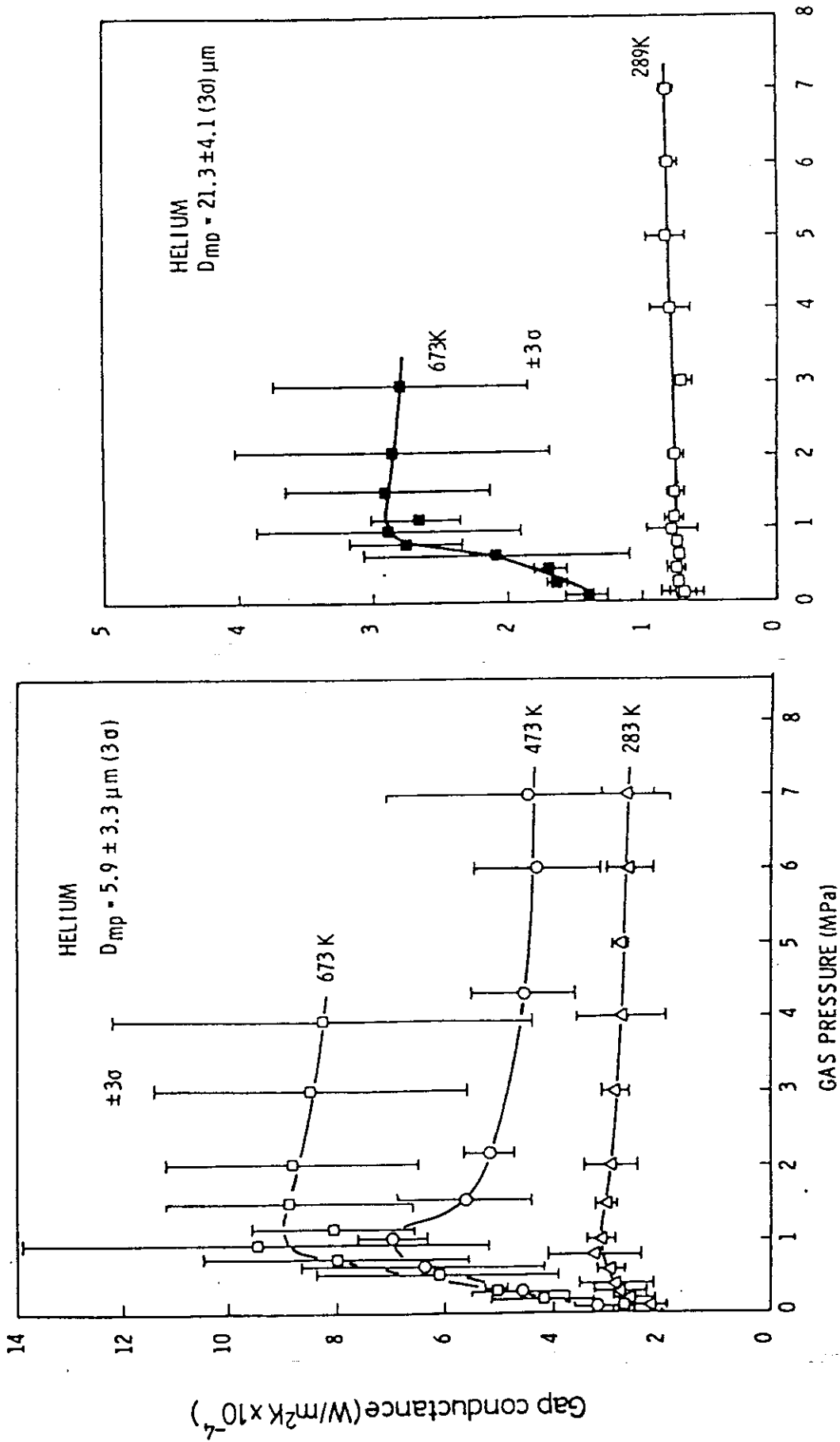


Fig. 17 Fuel centerline temperature decrements as a function of pressure for various linear powers, with pure helium (14)





*J.E.Garnier and S.Begej: NUREG/CR-0330(1979)*

Fig. 18 Gap conductance vs gas pressure for helium atmosphere;  
 Light contact  $D_{mp}=5.9\mu\text{m}$  (the left) and  $D_{mp}=21.3\mu\text{m}$   
 (the right) (23)

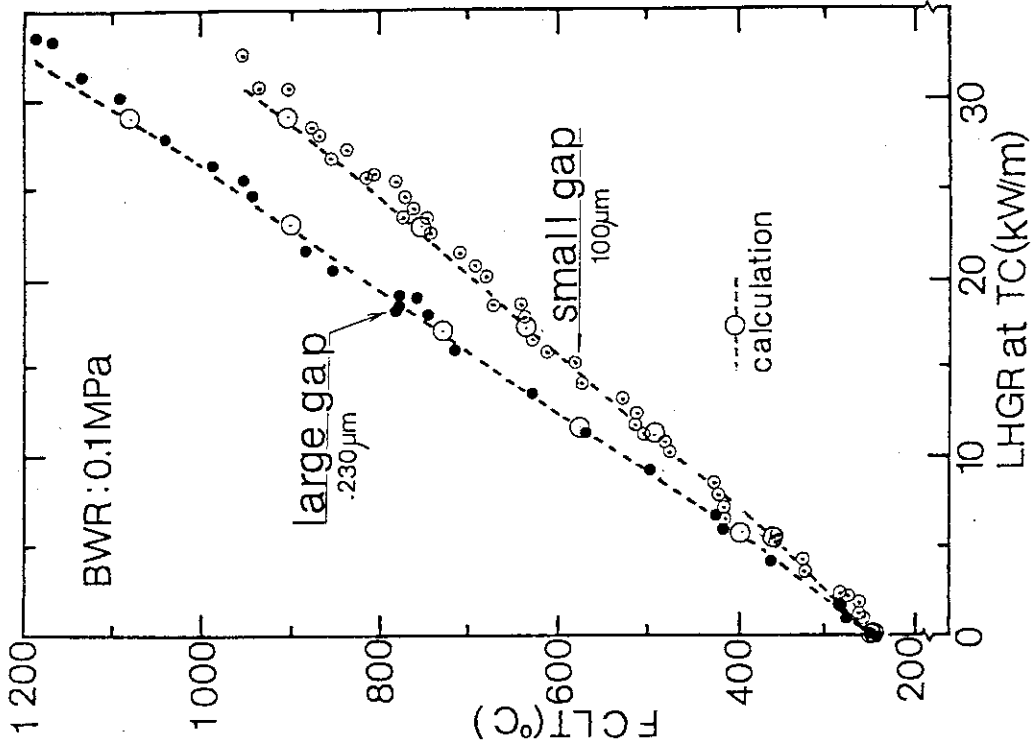


Fig. 20

Fuel centerline temperature of BWR 0.1MPa unpressurized rods vs linear heat generating rate at the thermocouple location as a function of as-fabricated diametral gap, in which the results from code calculation by FEMAXI-III are plotted by broken lines

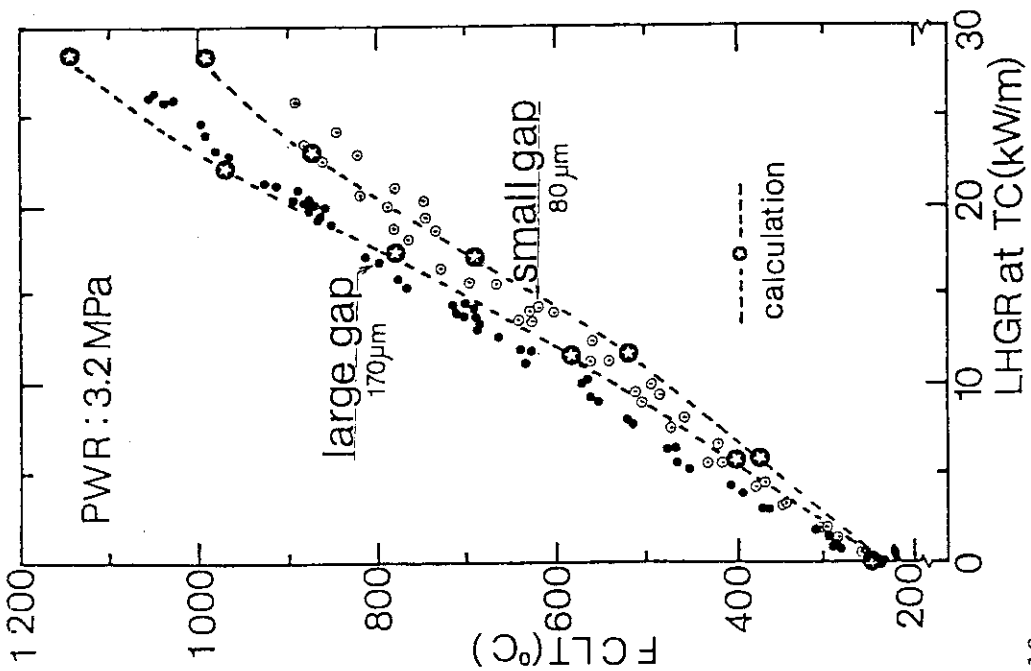


Fig. 19

Fuel centerline temperature of PWR 3.2MPa back-filled rods vs linear heat generating rate at the thermocouple location as a function of as-fabricated diametral gap, in which the results from code calculation by FEMAXI-III are plotted by broken lines

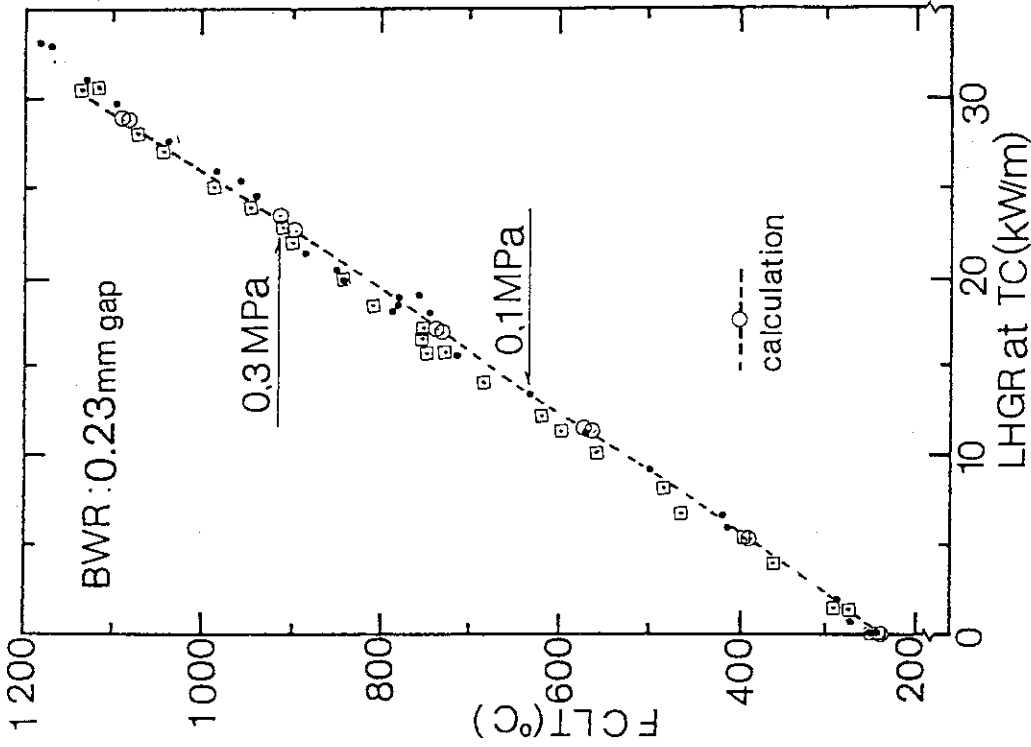


Fig. 22 Fuel centerline temperature of BWR 0.23mm as-built diametral gap vs linear heat generating rate at the thermocouple location as a function of fill gas pressure of pure helium, in which the results from code calculation by FEMAXI-III are plotted by broken lines

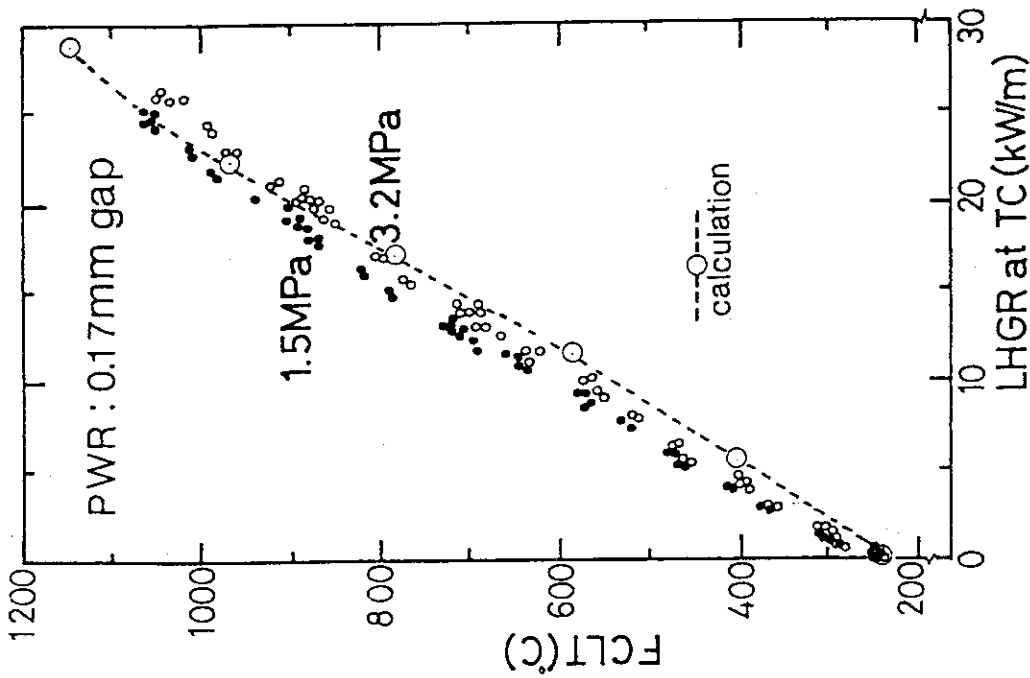


Fig. 21 Fuel centerline temperature of PWR 0.17mm as-built diametral gap vs linear heat generating rate at the thermocouple location as a function of fill gas pressure of pure helium, in which the results from code calculation by FEMAXI-III are plotted by broken lines

付 録 I

PWR棒 1～3 及び BWR棒 1, 3, 7 に対する FEMAXI

-(1) 計算による計算結果例





IFA-524 PWR-02(0.08MMGAP/3.2MPA-HE) FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

P.W.R. FUEL ROD.

\*INPUT DATA

(1) PELLETS SPECIFICATIONS ----

NODE	DIAMETER (CM)		SHAPE		U-235 ENRICH.	FRACTIONAL DENSITY	ONE PELLETT LENGTH (CM)	NODE LENGTH (CM)
	INSIDE	OUTSIDE	CHAMF	DISH				
1	0.0	0.828	**	**	0.130	0.952	1.006	4.400
2	0.0	0.828	**	**	0.130	0.952	1.006	5.000
3	0.0	0.828	**	**	0.130	0.952	1.006	5.000
4	0.0	0.828	**	**	0.130	0.952	1.006	5.000
5	0.0	0.828	**	**	0.130	0.952	1.006	5.000
6	0.0	0.828	**	**	0.130	0.952	1.006	5.000
7	0.0	0.828	**	**	0.130	0.952	1.006	5.000
8	0.180	0.828	**	**	0.130	0.952	1.006	6.000
9	0.180	0.828	**	**	0.130	0.952	1.006	4.400

DISH DIAMETER (CM) = 0.600      DISH DEPTH (CM) = 0.030      DISH BOTTOM (CM) = 0.0  
 PELLETT TOTAL WEIGHT (GRAM) = 247.000  
 GRAIN SIZE (MICRON) = 8.600  
 MAXIMUM FRACTIONAL DENSITY = 0.956  
 SATURATE BURNUP (MWD/TUO2) = 500.000

(2) OTHERS

CLAD. MATERIAL IS STRESS RELIEVED ZIRCALOY  
 CLAD. INSIDE DIAMETER (CM) = 0.836  
 CLAD. OUTSIDE DIAMETER (CM) = 0.950  
 THERMAL RELOCATION (-) = 0.300  
 PLENUM VOLUME (CM\*\*3) = 2.900  
 INITIAL GAS PRESSURE (MPA) = 3.200  
 INITIAL GAS COMPOSITION (PERCENT)  
     HELIUM = 100.0  
     NITROGEN = 0.0  
     KRYPTON = 0.0  
     XENON = 0.0  
 PELLETT SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0003  
 CLADDING SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0002  
 ROOM TEMPERATURE (DEG.K) = 291.15

IFA-524 PWR-02(0.08MMGAP/3.2MPA-HE) FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

PAGE 5

STAGE I		POWER HISTORY I				THERMAL INFORMATION (NODE NUMBER 5)									
NST I	TIME I	LHR	BURNUP I	PC	TEMPERATURE (C)			GAP CDN. (W/CM2 C)			CLEAR	CONTACT	F.G.R.	IOD(10-5	
I	(HR)	(W/CM)	(MWD/TUO2)I		PS	CI	CO	TOTAL	GAS	SOLID	(MIC)	(MPA)	(%)	G/CM2)	
1 I	0.0	0.0	0.0 I	239.9	239.9	239.9	239.9	0.5351	0.5331	0.0	26.781	0.0	0.500	0.000	
6 I	0.5	50.0	0.1 I	363.2	286.3	255.1	248.6	0.6134	0.6109	0.0	23.004	0.0	0.500	0.000	
11 I	1.0	100.0	0.4 I	513.1	340.0	286.1	273.4	0.7098	0.7067	0.0	19.636	0.0	0.500	0.000	
16 I	1.5	150.0	0.9 I	671.9	384.4	315.9	297.1	0.8374	0.8337	0.0	15.709	0.0	0.500	0.000	
21 I	2.0	200.0	1.5 I	837.1	418.5	343.5	318.9	1.0189	1.0146	0.0	11.214	0.0	0.500	0.000	
26 I	2.5	250.0	2.4 I	988.7	431.5	354.2	323.6	1.2368	1.2324	0.0	7.012	0.0	0.500	0.000	
31 I	3.0	300.0	3.4 I	1142.7	436.9	364.9	328.4	1.5933	1.5887	0.0	2.431	0.0	0.500	0.000	
61 I	4.0	0.0	4.5 I	239.9	239.9	239.9	239.9	0.5365	0.5345	0.0	26.676	0.0	0.500	0.000	

IFA-524 PWR-02(0.08MMGAP/3.2MPA-HE) FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

PAGE 10

STAGE I		POWER HISTORY I				THERMAL INFORMATION (ROD AVERAGE)									
NST I	TIME I	LHR	BURNUP I	TOTAL	GAS (MOLE)			F.G.R.	PRESSURE	IOD(10-5	FRACTIONS OF GAS MIXTURE (%)				
I	(HR)	(W/CM)	(MWD/TUO2)I		INITIAL	RELEASE	PRODUCE	(%)	(MPA)	G/CM2)	HE	N2	KR	XE	
1 I	0.0	0.0	0.0 I	0.00533	0.00533	0.00000	0.00000	0.500	5.833	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
6 I	0.5	50.0	0.1 I	0.00533	0.00533	0.00000	0.00000	0.500	6.063	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
11 I	1.0	100.0	0.4 I	0.00533	0.00533	0.00000	0.00000	0.500	6.279	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
16 I	1.5	150.0	0.9 I	0.00533	0.00533	0.00000	0.00000	0.500	6.446	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
21 I	2.0	200.0	1.5 I	0.00533	0.00533	0.00000	0.00000	0.500	6.577	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
26 I	2.5	250.0	2.4 I	0.00533	0.00533	0.00000	0.00000	0.500	6.659	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
31 I	3.0	300.0	3.4 I	0.00533	0.00533	0.00000	0.00000	0.500	6.726	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
61 I	4.0	0.0	4.5 I	0.00533	0.00533	0.00000	0.00000	0.500	5.833	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	







IFA-523 BWR-01(0.23MMGAP/0.1MPA-HE)FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

B.W.R. FUEL ROD.

\*INPUT DATA

(1) PELLETT SPECIFICATIONS ----

NODE	DIAMETER (CM)		SHAPE		U-235 ENRICH.	FRACTIONAL DENSITY	ONE PELLETT LENGTH (CM)	NODE LENGTH (CM)
	INSIDE	OUTSIDE	CHAMF	DISH				
1	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.356	4.400
2	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.356	5.000
3	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.356	5.000
4	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.356	5.000
* 5	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.356	5.000
6	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.356	5.000
7	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.356	5.000
8	0.180	1.031	*		0.130	0.948	1.356	6.000
9	0.180	1.031	*		0.130	0.948	1.356	4.400

CHAMFER WIDE (CM) = 0.045      CHAMFER DEPTH (CM) = 0.020  
 PELLETT TOTAL WEIGHT (GRAM) = 384.000  
 GRAIN SIZE (MICRON) = 7.800  
 MAXIMUM FRACTIONAL DENSITY = 0.955  
 SATURATE BURNUP (MWD/TUO2) = 500.000

(2) OTHERS

CLAD. MATERIAL IS FULLY ANNEALED ZIRCALOY  
 CLAD. INSIDE DIAMETER (CM) = 1.054  
 CLAD. OUTSIDE DIAMETER (CM) = 1.222  
 THERMAL RELOCATION (-) = 0.300  
 PLENUM VOLUME (CM\*\*3) = 6.400  
 INITIAL GAS PRESSURE (MPA) = 0.100  
 INITIAL GAS COMPOSITION (PERCENT)  
     HELIUM = 100.0  
     NITROGEN = 0.0  
     KRYPTON = 0.0  
     XENON = 0.0  
 PELLETT SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0003  
 CLADDING SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0002  
 ROOM TEMPERATURE (DEG.K) = 291.15

IFA-523 BWR-01(0.23MMGAP/0.1MPA-HE)FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

STAGE I POWER HISTORY I														THERMAL INFORMATION ( NODE NUMBER 5 )				
NST I	TIME I (HR)	LWR (W/CM)	BURNUP I (MWD/TUO2)	PC	TEMPERATURE (C)			GAP CON. (W/CM2 C)		CLEAR (MIC)	CONTACT (MPA)	F.G.R. (%)	IOD(10-5 G/CM2)					
					PS	CI	CO	TOTAL	GAS					SOLID				
1 I	0.0	0.0	0.0 I		240.2	240.2	240.2	240.2	0.2240	0.2220	0.0	78.711	0.0	0.500	0.000			
6 I	0.5	50.0	0.1 I		376.8	309.3	247.9	240.3	0.2485	0.2460	0.0	73.662	0.0	0.500	0.000			
11 I	1.0	100.0	0.2 I		533.2	379.7	270.8	255.8	0.2802	0.2769	0.0	68.035	0.0	0.500	0.000			
16 I	1.5	150.0	0.5 I		684.1	430.0	281.9	259.6	0.3092	0.3054	0.0	62.694	0.0	0.500	0.000			
21 I	2.0	200.0	1.0 I		840.0	471.2	295.6	266.1	0.3479	0.3435	0.0	55.798	0.0	0.500	0.000			
26 I	2.5	250.0	1.5 I		1005.1	507.2	311.7	275.1	0.3905	0.3856	0.0	49.455	0.0	0.500	0.000			
31 I	3.0	300.0	2.2 I		1170.2	532.8	326.0	282.5	0.4429	0.4375	0.0	42.568	0.0	0.500	0.000			
61 I	4.0	0.0	2.9 I		240.2	240.2	240.2	240.2	0.2239	0.2218	0.0	78.756	0.0	0.500	0.000			

IFA-523 BWR-01(0.23MMGAP/0.1MPA-HE)FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

STAGE I POWER HISTORY I														THERMAL INFORMATION ( ROD AVERAGE )				
NST I	TIME I (HR)	LWR (W/CM)	BURNUP I (MWD/TUO2)	TOTAL	GAS (MOLE)			F.G.R. (%)	PRESSURE (MPA)	IOD(10-5 G/CM2)	FRACTIONS OF GAS MIXTURE (%)							
					INITIAL	RELEASE	PRODUCE				HE	N2	KR	XE				
1 I	0.0	0.0	0.0 I	0.00035	0.00035	0.00000	0.00000	0.500	0.183	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0				
6 I	0.5	50.0	0.1 I	0.00035	0.00035	0.00000	0.00000	0.500	0.188	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0				
11 I	1.0	100.0	0.2 I	0.00035	0.00035	0.00000	0.00000	0.500	0.193	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0				
16 I	1.5	150.0	0.5 I	0.00035	0.00035	0.00000	0.00000	0.500	0.197	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0				
21 I	2.0	200.0	1.0 I	0.00035	0.00035	0.00000	0.00000	0.500	0.199	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0				
26 I	2.5	250.0	1.5 I	0.00035	0.00035	0.00000	0.00000	0.500	0.202	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0				
31 I	3.0	300.0	2.2 I	0.00035	0.00035	0.00000	0.00000	0.500	0.203	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0				
61 I	4.0	0.0	2.9 I	0.00035	0.00035	0.00000	0.00000	0.500	0.183	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0				

INPUT DATA LIST

CARD NO.	1	2	3	4	5	6	7	8
1.	IFA-523	BWR-03	CO.10MMGAP/O.1MPA-HE	FCLT-IN-BDL	LOWER CLUSTER			
2.	*INPUT BGR=7.8,R1=3.0,R2=2.0,DMAX=0.7,,SBU=500,,ICK1=1 WEND							
3.	9	5	2					
4.	0	1.0543	1.2223					
5.	0	1	0.0	1.0440	1.352	0.13	0.9480	4.4
6.	0	1	0.0	1.0440	1.352	0.13	0.9480	5.0
7.	0	1	0.0	1.0440	1.352	0.13	0.9480	5.0
8.	0	1	0.0	1.0440	1.352	0.13	0.9480	5.0
9.	0	1	0.0	1.0440	1.352	0.13	0.9480	5.0
10.	0	1	0.0	1.0440	1.352	0.13	0.9480	5.0
11.	0	1	0.0	1.0440	1.352	0.13	0.9480	5.0
12.	0	1	0.18	1.0440	1.352	0.13	0.9480	6.0
13.	0	1	0.18	1.0440	1.352	0.13	0.9480	4.4
14.	0.0454	0.02						
15.	5.6	0.1	1.0	0.0	0.0	0.0	392.	
16.	8							
17.	0.0		0.001	8.2E13	513.	6.3		
18.	0.71	0.78	0.86	0.94	1.00	1.06	1.12	1.16
19.	0.5		50.0					
20.	1.0		100.0					
21.	1.5		150.0					
22.	2.0		200.0					
23.	2.5		250.0					
24.	3.0		300.0					
25.	4.0		0.001	8.2E13	513.	6.3		
26.	STOP							

JMF2221 'JMFNAME' NAME IS NOT FOUND IN NAMELIST DICTIONARY. NAME IS 8GR

\*INPUT BGR=7.8,R1=3.0,R2=2.0,DMAX=0.7,,SBU=500,,ICK1=1 WEND  
ISN REL LOCATION

ERROR OCCURS AT NAMRD#  
NAMRD# CALLED BY MAIN 00026 061C94  
TAKEN TO (STANDARD) CORRECTIVE ACTION, CONTINUING TO EXECUTION

\*INPUT  
IREST=0,IN7ST=0,IPLT=0,ILOCK=0,MM=1,NN=5,KK=3,NGR2=3000,NGR3=200,ITEND=1,KUMAX=10,I2V=0,NREC1=11,NREC2=1,NTEMP=1,INPK=0,IBUNP=0,  
ICK1=0,ICK2=0,ECRAC1=200000000.00000000,EPRLZ=0.300000000000000010-02,XRELOC=0.300000000000000003,FRELOC=0.500000000000000000,  
GR=15.0000000000000000,R1=5.0000000000000000,R2=1.0000000000000000,THETP=0.5000000000000000,THETC=1.0000000000000000,AMU=  
0.399999999999999994,AY=0.19999999999999999D-02,CRTM=0.0,TRODM=291.149999999999977,DMAX=1.0000000000000000,SBU=2500.00000000000000,  
ZV=0.0,PWC=0.0,DCMG=0.5000000000000000,SPCON=-100000.0000000000,BETAX=0.1999999999999999D-02,XN=1.0000000000000000,DPXX=  
10.0000000000000000,EFCDEF=10.0000000000000000,IWREL=0.1,1.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,  
SY2=0.0,CRFAC=1.3000000000000004,GAPLK=3.0000000000000000,TCS=2073.1499999999998,SCS=100000000.00000000,SCT=10000000.000000000,  
ISCC=0,AD=0.0,  
&END

IFA-523 BWR-03(CO.10MMGAP/O.1MPA-HE)FCLT-IN-BDL:LOWER CLUSTER

B.W.R. FUEL ROD.

\*INPUT DATA

(1) PELLET SPECIFICATIONS ----

NODE	DIAMETER (CM)		SHAPE		U-235	FRACTIONAL	ONE PELLET	NODE
	INSIDE	OUTSIDE	CHAMF	DISH	ENRICH.	DENSITY	LENGTH (CM)	LENGTH (CM)
1	0.0	1.044	*		0.130	0.948	1.352	4.400
2	0.0	1.044	*		0.130	0.948	1.352	5.000
3	0.0	1.044	*		0.130	0.948	1.352	5.000
4	0.0	1.044	*		0.130	0.948	1.352	5.000
* 5	0.0	1.044	*		0.130	0.948	1.352	5.000
6	0.0	1.044	*		0.130	0.948	1.352	5.000
7	0.0	1.044	*		0.130	0.948	1.352	5.000
8	0.180	1.044	*		0.130	0.948	1.352	6.000
9	0.180	1.044	*		0.130	0.948	1.352	4.400

CHAMFER WIDE (CM) = 0.045 CHAMFER DEPTH (CM) = 0.020  
 PELLET TOTAL WEIGHT (GRAM) = 392.000  
 GRAIN SIZE (MICRON) = 15.000  
 MAXIMUM FRACTIONAL DENSITY = 0.958  
 SATURATE BURNUP (MWD/1002) = 2500.000

(2) OTHERS

CLAD. MATERIAL IS FULLY ANNEALED ZIRCALOY  
 CLAD. INSIDE DIAMETER (CM) = 1.054  
 CLAD. OUTSIDE DIAMETER (CM) = 1.222  
 THERMAL RELOCATION (-) = 0.300  
 PLENUM VOLUME (CM\*\*3) = 5.600  
 INITIAL GAS PRESSURE (MPA) = 0.100  
 INITIAL GAS COMPOSITION (PERCENT)  
 HELIUM = 100.0  
 NITROGEN = 0.0  
 KRYPTON = 0.0  
 XENDN = 0.0  
 PELLET SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0005  
 CLADDING SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0001  
 ROOM TEMPERATURE (DEG.K) = 291.15

IFA-523 BWR-03(0.10MMGAP/0.1MPA-HE)FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

PAGE 5

STAGE I POWER HISTORY I					THERMAL INFORMATION ( NODE NUMBER 5 )										
NST I	TIME (HR)	LHR (W/CM)	BURNUP I (MWD/TUO2)I	PC	TEMPERATURE (C) PS	CI	CO	GAP TOTAL	CON. GAS	(W/CM2 C) SDLID	CLEAR (MIC)	CONTACT (MPA)	F.G.R. (%)	IOD(10-5 G/CM2)	
1 I	0.0	0.0	0.0 I	240.2	240.2	240.2	240.2	0.3962	0.3942	0.0	33.132	0.0	0.500	0.000	
6 I	0.5	50.0	0.1 I	347.4	282.4	247.9	240.3	0.4400	0.4377	0.0	29.344	0.0	0.500	0.000	
11 I	1.0	100.0	0.2 I	475.5	331.1	270.8	255.8	0.5027	0.4998	0.0	25.034	0.0	0.500	0.000	
16 I	1.5	150.0	0.5 I	597.4	362.8	281.9	259.6	0.5628	0.5596	0.0	21.121	0.0	0.500	0.000	
21 I	2.0	200.0	1.0 I	724.0	387.9	295.6	266.1	0.6573	0.6537	0.0	15.779	0.0	0.500	0.000	
26 I	2.5	250.0	1.5 I	859.9	410.6	311.7	275.1	0.7671	0.7632	0.0	11.103	0.0	0.500	0.000	
31 I	3.0	300.0	2.1 I	995.6	424.7	326.0	282.5	0.9224	0.9182	0.0	5.998	0.0	0.500	0.000	
61 I	4.0	0.0	2.9 I	240.2	240.2	240.2	240.2	0.3967	0.3946	0.0	33.063	0.0	0.500	0.000	

IFA-523 BWR-03(0.10MMGAP/0.1MPA-HE)FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

PAGE 10

STAGE I POWER HISTORY I					THERMAL INFORMATION ( ROD AVERAGE )										
NST I	TIME (HR)	LHR (W/CM)	BURNUP I (MWD/TUO2)I	TOTAL	GAS (MOLE)			F.G.R. (%)	PRESSURE (MPA)	IOD(10-5 G/CM2)	FRACTIONS OF GAS MIXTURE (%)				
					INITIAL	RELEASE	PRODUCE				HE	N2	KR	XE	
1 I	0.0	0.0	0.0 I	0.00028	0.00028	0.00000	0.00000	0.500	0.183	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
6 I	0.5	50.0	0.1 I	0.00028	0.00028	0.00000	0.00000	0.500	0.187	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
11 I	1.0	100.0	0.2 I	0.00028	0.00028	0.00000	0.00000	0.500	0.190	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
16 I	1.5	150.0	0.5 I	0.00028	0.00028	0.00000	0.00000	0.500	0.192	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
21 I	2.0	200.0	1.0 I	0.00028	0.00028	0.00000	0.00000	0.500	0.194	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
26 I	2.5	250.0	1.5 I	0.00028	0.00028	0.00000	0.00000	0.500	0.196	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
31 I	3.0	300.0	2.1 I	0.00028	0.00028	0.00000	0.00000	0.500	0.197	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
61 I	4.0	0.0	2.9 I	0.00028	0.00028	0.00000	0.00000	0.500	0.183	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	

INPUT DATA LIST

CARD NO.	1	2	3	4	5	6	7	8
1.	IFA-523	BWR-07	(0.23MMGAP/0.3MPA-HE)FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER					
2.	INPUT	BGR=7.8,R1=3.0,R2=2.0,DMAX=0.7,,SBU=500.,ICK1=1	WEND					
3.								
4.	0	1.0552	1.2232					
5.	0	1	0.0	1.0310	1.361	0.13	0.9480	4.4
6.	0	1	0.0	1.0310	1.361	0.13	0.9480	5.0
7.	0	1	0.0	1.0310	1.361	0.13	0.9480	5.0
8.	0	1	0.0	1.0310	1.361	0.13	0.9480	5.0
9.	0	1	0.0	1.0310	1.361	0.13	0.9480	5.0
10.	0	1	0.0	1.0310	1.361	0.13	0.9480	5.0
11.	0	1	0.0	1.0310	1.361	0.13	0.9480	5.0
12.	0	1	0.18	1.0310	1.361	0.13	0.9480	6.0
13.	0	1	0.18	1.0310	1.361	0.13	0.9480	4.4
14.	0.0454	0.02						
15.	6.4	0.3	1.0	0.0	0.0	0.0	384.	
16.								
17.	0.0		0.001	8.2E13	513.	6.3		
18.	0.71	0.78	0.86	0.94	1.00	1.06	1.12	1.16
19.	0.5		50.0			508.	6.3	
20.	1.0		100.0			523.	6.8	
21.	1.5		150.0			525.	5.8	
22.	2.0		200.0			533.	7.6	
23.	2.5		250.0			541.	7.0	
24.	3.0		300.0			548.	7.0	
25.	4.0		0.001	8.2E13	513.	6.3		
26.	STOP							

JMF22ZI 'JMFNAMEL' NAME IS NOT FOUND IN NAMELIST DICTIONARY. NAME IS BGR

INPUT BGR=7.8,R1=3.0,R2=2.0,DMAX=0.7,,SBU=500.,ICK1=1 WEND

ERROR OCCURS AT NAMRD# ISN REL LOCATION  
 NAMRD# CALLED BY MAIN 00026 061C94  
 TAKEN TO (STANDARD) CORRECTIVE ACTION, CONTINUING TO EXECUTION  
 &INPUT

IREST=0,INTST=0,IPLT=0,ILOCK=0,MM=1,NN=5,KK=3,NGR2=3000,NGR3=200,ITEND=1,KUMAX=10,IZV=0,NREC1=11,NREC2=1,NTEMP=1,INPCK=0,IBUNP=0,  
 ICHI=0,ICK1=0,EFRAC3=200000000.00000000,EPSSLZ=0.30000000000000001D-02,XRELOC=0.300000000000000003,FRELOC=0.5000000000000000,  
 GR=15.000000000000000,R1=5.000000000000000,R2=1.000000000000000,THETP=0.5000000000000000,THETC=1.0000000000000000,AMU=0.39999999999999994,  
 AY=0.1999999999999999D-02,CRIM=0.0,TRDDM=291.149999999999977,DMAX=1.0000000000000000,SBU=2500.0000000000000,  
 ZV=0.0,PWCHG=0.0,DCHG=0.5000000000000000,SPCON=-100000.0000000000,BETAX=0.1999999999999999D-02,XN=1.0000000000000000,DPXX=10.000000000000000,  
 EFCDEF=10.000000000000000,IWREL=0.1,1.0,1.0,0.0,0.0,1.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,  
 SY2=0.0,CRFAC=1.3000000000000004,GAPLK=3.000000000000000,TCs=2073.14999999999998,SCS=100000000.00000000,SCT=10000000.000000000,  
 ISCC=0,AD=0.0,  
 &END

IFA-523 BWR-07(0.23MMGAP/0.3MPA-HE)FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

B.W.R. FUEL ROD.

\*INPUT DATA

(1) PELLETS SPECIFICATIONS ----

NODE	DIAMETER (CM)		SHAPE		U-235 ENRICH.	FRACTIONAL DENSITY	ONE PELLETT LENGTH (CM)	NODE LENGTH (CM)
	INSIDE	OUTSIDE	CHAMF	DISH				
1	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.361	4.400
2	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.361	5.000
3	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.361	5.000
4	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.361	5.000
* 5	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.361	5.000
6	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.361	5.000
7	0.0	1.031	*		0.130	0.948	1.361	5.000
8	0.180	1.031	*		0.130	0.948	1.361	6.000
9	0.180	1.031	*		0.130	0.948	1.361	4.400

CHAMFER WIDE (CM) = 0.045      CHAMFER DEPTH (CM) = 0.020  
 PELLETT TOTAL WEIGHT (GRAM) = 384.000  
 GRAIN SIZE (MICRON) = 15.000  
 MAXIMUM FRACTIONAL DENSITY = 0.958  
 SATURATE BURNUP (MWD/TU02) = 2500.000

(2) OTHERS

CLAD. MATERIAL IS FULLY ANNEALED ZIRCALOY  
 CLAD. INSIDE DIAMETER (CM) = 1.055  
 CLAD. OUTSIDE DIAMETER (CM) = 1.223  
 THERMAL RELOCATION (-) = 0.300  
 PLENUM VOLUME (CM\*\*3) = 6.400  
 INITIAL GAS PRESSURE (MPA) = 0.300  
 INITIAL GAS COMPOSITION (PERCENT)  
     HELIUM = 100.0  
     NITROGEN = 0.0  
     KRYPTON = 0.0  
     XENON = 0.0  
 PELLETT SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0005  
 CLADDING SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0001  
 ROOM TEMPERATURE (DEG.K) = 291.15

IFA-523 BWR-07(0.23MMGAP/0.3MPA-HE)FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

STAGE I POWER HISTORY I THERMAL INFORMATION (NODE NUMBER 5)																
NST I	I	TIME (HR)	LHR (W/CM)	BURNUP I (MWD/TU02)I	PC	TEMPERATURE (C)				GAP CON. (W/CM2 C)			CLEAR (MIC)	CONTACT (MPA)	F.G.R. (G/CM2)	IDD(10-5) (G/CM2)
						PS	CI	CO	TOTAL	GAS	SOLID					
1	I	0.0	0.0	0.0	I	240.2	240.2	240.2	240.2	0.2187	0.2167	0.0	81.979	0.0	0.500	0.000
6	I	0.5	50.0	0.1	I	378.5	310.8	247.9	240.3	0.2425	0.2400	0.0	76.861	0.0	0.500	0.000
11	I	1.0	100.0	0.2	I	536.5	382.5	270.8	255.8	0.2731	0.2698	0.0	71.150	0.0	0.500	0.000
16	I	1.5	150.0	0.5	I	689.0	433.9	281.9	259.6	0.3011	0.2973	0.0	65.710	0.0	0.500	0.000
21	I	2.0	200.0	1.0	I	846.6	476.0	295.6	266.1	0.3383	0.3339	0.0	58.700	0.0	0.500	0.000
26	I	2.5	250.0	1.5	I	1013.4	512.8	311.7	275.1	0.3793	0.3744	0.0	52.231	0.0	0.500	0.000
31	I	3.0	300.0	2.2	I	1180.1	539.1	326.0	282.5	0.4295	0.4241	0.0	45.207	0.0	0.500	0.000
61	I	4.0	0.0	2.9	I	240.2	240.2	240.2	240.2	0.2189	0.2168	0.0	81.916	0.0	0.500	0.000

IFA-523 BWR-07(0.23MMGAP/0.3MPA-HE)FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

STAGE I POWER HISTORY I THERMAL INFORMATION (ROD AVERAGE)																
NST I	I	TIME (HR)	LHR (W/CM)	BURNUP I (MWD/TU02)I	TOTAL	GAS (MOLE)				F.G.R. (G/CM2)	PRESSURE (MPA)	IDD(10-5) (G/CM2)	FRACTIONS OF GAS MIXTURE (%)			
						INITIAL	RELEASE	PRODUCE	HE				N2	KR	XE	
1	I	0.0	0.0	0.0	I	0.00106	0.00106	0.00000	0.00000	0.500	0.548	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
6	I	0.5	50.0	0.1	I	0.00106	0.00106	0.00000	0.00000	0.500	0.566	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
11	I	1.0	100.0	0.2	I	0.00106	0.00106	0.00000	0.00000	0.500	0.581	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
16	I	1.5	150.0	0.5	I	0.00106	0.00106	0.00000	0.00000	0.500	0.592	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
21	I	2.0	200.0	1.0	I	0.00106	0.00106	0.00000	0.00000	0.500	0.600	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
26	I	2.5	250.0	1.5	I	0.00106	0.00106	0.00000	0.00000	0.500	0.607	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
31	I	3.0	300.0	2.2	I	0.00106	0.00106	0.00000	0.00000	0.500	0.612	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
61	I	4.0	0.0	2.9	I	0.00106	0.00106	0.00000	0.00000	0.500	0.548	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0

付 録 II

温度ジャンプ距離に関する感度計算

場合1 : Gapcon-Thermal - 1 使用モデル

(データ番号①および②)

場合2 : Gapcon-Thermal - 2 or 3 使用モデル

(データ番号①' および②')







IFA-524 PWR-01(0.17MMGAP/3.2MPA-HE) FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

P.W.R. FUEL ROD.

\*INPUT DATA

(1) PELLETT SPECIFICATIONS ----

NODE	DIAMETER (CM)		SHAPE		U-235 ENRICH.	FRACTIONAL DENSITY	ONE PELLETT LENGTH (CM)	NODE LENGTH (CM)
	INSIDE	OUTSIDE	CHAMP	DISH				
1	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.011	4.400
2	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.011	5.000
3	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.011	5.000
4	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.011	5.000
* 5	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.011	5.000
6	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.011	5.000
7	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.011	5.000
8	0.180	0.819	**	**	0.130	0.952	1.011	6.000
9	0.180	0.819	**	**	0.130	0.952	1.011	4.400

DISH DIAMETER (CM) = 0.600      DISH DEPTH (CM) = 0.030      DISH BOTTOM (CM) = 0.0  
 PELLETT TOTAL WEIGHT (GRAM) = 241.000  
 GRAIN SIZE (MICRON) = 8.600  
 MAXIMUM FRACTIONAL DENSITY = 0.956  
 SATURATE BURNUP (MWD/TUO2) = 500.000

(2) OTHERS

CLAD. MATERIAL IS STRESS RELIEVED ZIRCALOY  
 CLAD. INSIDE DIAMETER (CM) = 0.836  
 CLAD. OUTSIDE DIAMETER (CM) = 0.950

THERMAL RELOCATION (-) = 0.300  
 PLENUM VOLUME (CM\*\*3) = 5.000  
 INITIAL GAS PRESSURE (MPA) = 3.200

INITIAL GAS COMPOSITION (PERCENT)  
 HELIUM = 100.0  
 NITROGEN = 0.0  
 KRYPTON = 0.0  
 XENON = 0.0

PELETT SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0003  
 CLADDING SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0002  
 ROOM TEMPERATURE (DEG.K) = 291.15

IFA-524 PWR-01(0.17MMGAP/3.2MPA-HE) FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

PAGE 5

STAGE I POWER HISTORY I		THERMAL INFORMATION ( NODE NUMBER 5 )												
NST I	TIME I	LHR	BURNUP I	PC	TEMPERATURE (C)		GAP CON. (W/CM2 C)		CLEAR	CONTACT	F.G.R.	IDD(10-5		
I	(HR)	(W/CM)	(MWD/TUO2)I		PS	CI	CO	TOTAL	GAS	SOLID	(MIC)	(MPA)	G/CM2)	
1 I	0.0	0.0	0.0 I	239.9	239.9	239.9	239.9	0.3030	0.3010	0.0	58.339	0.0	0.500	0.000
6 I	0.5	50.0	0.1 I	390.7	311.3	255.1	248.6	0.3425	0.3399	0.0	53.619	0.0	0.500	0.000
11 I	1.0	100.0	0.4 I	567.5	384.9	286.1	273.4	0.3894	0.3859	0.0	49.236	0.0	0.500	0.000
16 I	1.5	150.0	0.9 I	753.5	445.7	315.9	297.1	0.4442	0.4400	0.0	44.193	0.0	0.500	0.000
21 I	2.0	200.0	1.6 I	946.3	493.8	343.5	318.9	0.5117	0.5066	0.0	38.464	0.0	0.500	0.000
26 I	2.5	250.0	2.4 I	1127.5	519.3	354.2	323.6	0.5822	0.5767	0.0	32.895	0.0	0.500	0.000
31 I	3.0	300.0	3.5 I	1311.0	535.5	364.9	328.4	0.6763	0.6705	0.0	26.840	0.0	0.500	0.000
61 I	4.0	0.0	4.7 I	239.9	239.9	239.9	239.9	0.3035	0.3014	0.0	58.233	0.0	0.500	0.000

IFA-524 PWR-01(0.17MMGAP/3.2MPA-HE) FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

PAGE 10

STAGE I POWER HISTORY I		THERMAL INFORMATION ( ROD AVERAGE )												
NST I	TIME I	LHR	BURNUP I	TOTAL	GAS (MOLE)			F.G.R.	PRESSURE	IDD(10-5	FRACTIONS OF GAS MIXTURE (%)			
I	(HR)	(W/CM)	(MWD/TUO2)I		INITIAL	RELEASE	PRODUCE	(%)	(MPA)	G/CM2)	HE	N2	KR	XE
1 I	0.0	0.0	0.0 I	0.00879	0.00879	0.00000	0.00000	0.500	5.843	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
6 I	0.5	50.0	0.1 I	0.00879	0.00879	0.00000	0.00000	0.500	6.067	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
11 I	1.0	100.0	0.4 I	0.00879	0.00879	0.00000	0.00000	0.500	6.261	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
16 I	1.5	150.0	0.9 I	0.00879	0.00879	0.00000	0.00000	0.500	6.404	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
21 I	2.0	200.0	1.6 I	0.00879	0.00879	0.00000	0.00000	0.500	6.512	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
26 I	2.5	250.0	2.4 I	0.00879	0.00879	0.00000	0.00000	0.500	6.579	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
31 I	3.0	300.0	3.5 I	0.00879	0.00879	0.00000	0.00000	0.500	6.632	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0
61 I	4.0	0.0	4.7 I	0.00879	0.00879	0.00000	0.00000	0.500	5.843	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0

① INPUT DATA LIST

CARD NO.	1	2	3	4	5	6	7	8
1.	IFA-524 PWR-03(0.17MMGAP01.5MPA-HE) FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER							
2.	*INPUT GR=8.6,R1=3.0,R2=2.0,DMAX=0.44,SBU=500.,ICK1=1,IG12=2 VEND							
3.	9	5	3					
4.	1	0.8365	0.9505					
5.	2	0	0.0	0.819	1.0150	0.13	0.9516	4.4
6.	2	0	0.0	0.819	1.0150	0.13	0.9516	5.0
7.	2	0	0.0	0.819	1.0150	0.13	0.9516	5.0
8.	2	0	0.0	0.819	1.0150	0.13	0.9516	5.0
9.	2	0	0.0	0.819	1.0150	0.13	0.9516	5.0
10.	2	0	0.0	0.819	1.0150	0.13	0.9516	5.0
11.	2	0	0.0	0.819	1.0150	0.13	0.9516	5.0
12.	2	0	0.18	0.819	1.0150	0.13	0.9516	6.0
13.	2	0	0.18	0.819	1.0150	0.13	0.9516	4.4
14.	0.6	0.03						
15.	5.0	1.5	1.0	0.0	0.0	0.0	242.	
16.	B							
17.	0.0		0.001	7.8E13	513.	13.0		
18.	0.71	0.78	0.86	0.94	1.00	1.06	1.12	1.16
19.	0.5							
20.	1.0							
21.	1.5							
22.	2.0							
23.	2.5							
24.	3.0							
25.	4.0			0.001	7.8E13	513.	14.7	13.0
26.	STOP							

&INPUT  
 IREST=0,INTST=0,IPLT=0,ILOCK=0,MM=1,MN=5,KK=3,NGR2=3000,NGR3=200,ITEND=1,KUMAX=10,IZV=0,NREC1=11,NREC2=1,NTEMP=1,INPCK=0,IBUNP=0,  
 ICHI=0,ICK1=1,ECRAC3=200000000.00000000,EPSSLZ=0.30000000000000001D-02,XRELDC=0.300000000000000003,FRELOC=0.500000000000000000,  
 GR=8.6000000000000009,R1=3.0000000000000000,R2=2.0000000000000000,THETP=0.500000000000000000,THETC=1.0000000000000000,AMU=  
 0.39999999999999994,AT=0.1999999999999999D-02,CRTM=0.0,TRDDM=291.14999999999977,DMAX=0.4400000000000002,SBU=500.00000000000000,  
 ZV=0.0,PWCHG=0.0,DCHG=0.5000000000000000,SPCON=-1000000.0000000000,BETAX=0.1999999999999999D-02,XN=1.0000000000000000,DPXX=  
 10.0000000000000000,EFCOE=10.0000000000000000,IVREL=0.1,1.0,1.0,0.0,0.0,1.0,0.1,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,IYY=0,TTY1=0.0,SY1=0.0,TTY2=0.0,  
 SYY2=0.0,CRFAC=1.3000000000000004,GAPLK=3.0000000000000000,TCS=2073.14999999999998,SCS=100000000.00000000,SCT=10000000.000000000,  
 !SCC=0,AD=0.0,IG12=2,AKTR=6.15999999999999992,  
 &END

IFA-524 PWR-03(0.17MMGAP01.5MPA-HE) FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

P.W.R. FUEL ROD.

\*INPUT DATA

(1) PELLETS SPECIFICATIONS ----

NODE	DIAMETER (CM)		SHAPE		U-235 ENRICH.	FRACTIONAL DENSITY	ONE PELLETT LENGTH (CM)	NODE LENGTH (CM)
	INSIDE	OUTSIDE	CHAMF	DISH				
1	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	4.400
2	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	5.000
3	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	5.000
4	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	5.000
* 5	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	5.000
6	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	5.000
7	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	5.000
8	0.180	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	6.000
9	0.180	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	4.400

DISH DIAMETER (CM) = 0.600      DISH DEPTH (CM) = 0.030      DISH BOTTOM (CM) = 0.0  
 PELLETT TOTAL WEIGHT (GRAM) = 242.000  
 GRAIN SIZE (MICRON) = 8.600  
 MAXIMUM FRACTIONAL DENSITY = 0.956  
 SATURATE BURNUP (MWD/TUO2) = 500.000

(2) OTHERS

CLAD. MATERIAL IS STRESS RELIEVED ZIRCALOY  
 CLAD. INSIDE DIAMETER (CM) = 0.836  
 CLAD. OUTSIDE DIAMETER (CM) = 0.950  
 THERMAL RELOCATION (-) = 0.300  
 PLENUM VOLUME (CM\*\*3) = 5.000  
 INITIAL GAS PRESSURE (MPA) = 1.500  
 INITIAL GAS COMPOSITION (PERCENT)  
 HELIUM = 100.0  
 NITROGEN = 0.0  
 KRYPTON = 0.0  
 XENON = 0.0  
 PELLETT SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0003  
 CLADDING SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0002  
 ROOM TEMPERATURE (DEG.K) = 291.15

Table with columns: STAGE I, POWER HISTORY I, THERMAL INFORMATION (NODE NUMBER 5). Rows include NST I, TIME (HR), LHR (W/CM), BURNUP I (MWD/TUO2)I, PC, TEMPERATURE (C) PS, CI, CO, GAP CON. TOTAL, CON. GAS, SOLID, CLEAR (MIC), CONTACT (MPA), F.G.R. (X), and IDD(10-5 G/CM2).

Table with columns: STAGE I, POWER HISTORY I, THERMAL INFORMATION (ROD AVERAGE). Rows include NST I, TIME (HR), LHR (W/CM), BURNUP I (MWD/TUO2)I, TOTAL, GAS (MOLE) INITIAL RELEASE, F.G.R. PRESSURE HE (MPA), IDD(10-5 G/CM2), and FRACTIONS OF GAS MIXTURE (X) HE, N2, KR, XE.

2 INPUT DATA LIST

Input data list containing card numbers and parameters such as IFA-524 PWR-03(0.17MMGAPO1.5MPA-HE) FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER, GR=8.6, R1=3.0, R2=2.0, DMAX=0.44, SBU=500, ICK1=1, IG12=1, #END.

8 INPUT parameters including IREST=0, INTST=0, IPLT=0, ILOCK=0, MM=1, NN=5, KK=3, NGR2=3000, NGR3=200, ITEND=1, KUMAX=10, IZV=0, NREC1=11, NREC2=1, NTEMP=1, INPCK=0, IBUNP=0, ICH1=0, ICK1=1, ECRAC3=200000000.00000000, EPSRLZ=0.3000000000000000001D-02, XRELOC=0.300000000000000003, FRELOC=0.500000000000000000, GR=8.600000000000000009, R1=3.000000000000000000, R2=2.000000000000000000, THETR=0.500000000000000000, THETC=1.000000000000000000, AMU=0.399999999999999994, AV=0.19999999999999999D-02, CRTM=0.0, TRQOM=291.14999999999977, DMAX=0.440000000000000002, SBU=500.0000000000000000, ZV=0.0, PWHG=0.0, DCHG=0.500000000000000000, SPCON=-1000000.000000000000, BETAX=0.19999999999999999D-02, XN=1.000000000000000000, DPX=10.0000000000000000, EFCDEF=10.0000000000000000, IWREL=0.1, 1.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.1, 0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, IYY=0, TYY1=0.0, SYY1=0.0, TYY2=0.0, SYZ=0.0, CRFAC=1.3000000000000004, GAPLK=3.0000000000000000, TCS=2073.1499999999998, SCS=100000000.00000000, SCT=10000000.000000000, ISCC=0, AO=0.0, IG12=1, AKTR=6.15999999999999992, #END

IFA-524 PWR-03(0.17MMGAP01.5MPA-HE) FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

P.W.R. FUEL ROD.

\*INPUT DATA

(1) PELLET SPECIFICATIONS ----

NODE	DIAMETER (CM)		SHAPE		U-235 ENRICH.	FRACTIONAL DENSITY	ONE PELLET LENGTH (CM)	NODE LENGTH (CM)
	INSIDE	OUTSIDE	CHAMF	DISH				
1	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	4.400
2	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	5.000
3	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	5.000
4	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	5.000
5	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	5.000
6	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	5.000
7	0.0	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	5.000
8	0.180	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	6.000
9	0.180	0.819	**	**	0.130	0.952	1.015	4.400

DISH DIAMETER (CM) = 0.600      DISH DEPTH (CM) = 0.030      DISH BOTTOM (CM) = 0.0  
 PELLET TOTAL WEIGHT (GRAM) = 242.000  
 GRAIN SIZE (MICRON) = 8.600  
 MAXIMUM FRACTIONAL DENSITY = 0.956  
 SATURATE BURNUP (MWD/TUO2) = 500.000

(2) OTHERS

CLAD. MATERIAL IS STRESS RELIEVED ZIRCALOY  
 CLAD. INSIDE DIAMETER (CM) = 0.836  
 CLAD. OUTSIDE DIAMETER (CM) = 0.950

THERMAL RELOCATION (-) = 0.300  
 PLENUM VOLUME (CM\*\*3) = 5.000  
 INITIAL GAS PRESSURE (MPA) = 1.500

INITIAL GAS COMPOSITION (PERCENT)  
 HELIUM = 100.0  
 NITROGEN = 0.0  
 KRYPTON = 0.0  
 XENON = 0.0

PELLET SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0003  
 CLADDING SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0002  
 ROOM TEMPERATURE (DEG.K) = 291.15

IFA-524 PWR-03(0.17MMGAP01.5MPA-HE) FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

STAGE I POWER HISTORY I													THERMAL INFORMATION ( NODE NUMBER 5 )				
NST I	I	TIME (HR)	LHR (W/CM)	BURNUP I (MWD/TUO2)I	PC	TEMPERATURE (C)				GAP CON. (W/CM2 C)		CLEAR (MIC)	CONTACT (MPA)	F.G.R. 100(10-5)			
						PS	CI	CD	TOTAL	GAS	SOLID			(%)	G/CM2		
1	I	0.0	0.0	0.0	I	239.9	239.9	239.9	239.9	0.3053	0.3033	0.0	57.433	0.0	0.500	0.000	
6	I	0.5	50.0	0.1	I	390.2	310.8	255.1	248.6	0.3453	0.3427	0.0	52.667	0.0	0.500	0.000	
11	I	1.0	100.0	0.4	I	566.4	384.0	286.1	273.4	0.3928	0.3893	0.0	48.247	0.0	0.500	0.000	
16	I	1.5	150.0	0.9	I	751.9	444.5	315.9	297.1	0.4484	0.4441	0.0	43.179	0.0	0.500	0.000	
21	I	2.0	200.0	1.5	I	944.1	492.2	343.5	318.9	0.5169	0.5119	0.0	37.437	0.0	0.500	0.000	
26	I	2.5	250.0	2.4	I	1124.6	517.5	354.2	323.6	0.5887	0.5833	0.0	31.870	0.0	0.500	0.000	
31	I	3.0	300.0	3.5	I	1307.4	533.3	364.9	328.4	0.6848	0.6790	0.0	25.826	0.0	0.500	0.000	
61	I	4.0	0.0	4.6	I	239.9	239.9	239.9	239.9	0.3061	0.3041	0.0	57.233	0.0	0.500	0.000	

IFA-524 PWR-03(0.17MMGAP01.5MPA-HE) FCLT-IN-BOL:LOWER CLUSTER

STAGE I POWER HISTORY I													THERMAL INFORMATION ( ROD AVERAGE )				
NST I	I	TIME (HR)	LHR (W/CM)	BURNUP I (MWD/TUO2)I	TOTAL	GAS (MOLE)			F.G.R. PRESSURE (%)	100(10-5) (MPA)	G/CM2	FRACTIONS OF GAS MIXTURE (%)					
						INITIAL	RELEASE	PRODUCE				HE	N2	KR	XE		
1	I	0.0	0.0	0.0	I	0.00411	0.00411	0.00000	0.00000	0.500	2.739	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
6	I	0.5	50.0	0.1	I	0.00411	0.00411	0.00000	0.00000	0.500	2.844	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
11	I	1.0	100.0	0.4	I	0.00411	0.00411	0.00000	0.00000	0.500	2.934	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
16	I	1.5	150.0	0.9	I	0.00411	0.00411	0.00000	0.00000	0.500	3.000	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
21	I	2.0	200.0	1.5	I	0.00411	0.00411	0.00000	0.00000	0.500	3.051	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
26	I	2.5	250.0	2.4	I	0.00411	0.00411	0.00000	0.00000	0.500	3.082	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
31	I	3.0	300.0	3.5	I	0.00411	0.00411	0.00000	0.00000	0.500	3.107	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	
61	I	4.0	0.0	4.6	I	0.00411	0.00411	0.00000	0.00000	0.500	2.739	0.000	100.0	0.0	0.0	0.0	