

JAERI-Tech

94-038



高温ガス炉燃料の高燃焼度照射試験における  
燃料温度予測  
(日米高温ガス炉燃料共同照射試験)

1995年1月

沢 和弘・福田幸朔・Raj ACHARYA\*

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開している研究報告書です。  
入手の間合わせは、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、お申し越してください。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。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

高温ガス炉燃料の高燃焼度照射試験における燃料温度予測  
(日米高温ガス炉燃料共同照射試験)

日本原子力研究所東海研究所燃料研究部

沢 和弘・福田 幸朔・Raj ACHARYA\*

(1994年12月12日受理)

本報は、米国オークリッジ国立研究所のHigh Flux Isotope Reactor (HFIR) の可動ベリリウム領域で照射を行っているHRB-22キャプセル照射試験の照射前に行った温度評価について記述したものである。本試験は、米国エネルギー省と原研との高温ガス炉研究開発試験協力に基づいて実施している高温ガス炉燃料日米共同照射試験の一部である。燃料は、高温工学試験研究炉 (HTTR) 用初装荷燃料よりも高燃焼度に耐えるよう設計した国産の改良型燃料である。照射中の燃料コンパクト内の重金属及び核分裂生成物量の変化は、CACA-2コードを用いて計算した。定常温度計算にはHEATING7.2コードを用いた。この計算結果に基づき、4サイクルの照射期間を通して燃料コンパクト平均温度及び最高温度をそれぞれ1250℃、1350℃以下にするよう、燃料コンパクトを収納する黒鉛及びキャプセルの直径を定めた。本検討結果に基づき、キャプセル部品寸法等の詳細設計を行った。

Fuel Temperature Prediction during High Burnup HTGR Fuel  
Irradiation Test  
(US-JAERI Irradiation Test for HTGR Fuel)

Kazuhiro SAWA, Kousaku FUKUDA and Raj ACHARYA\*

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

(Received December 12, 1994)

This report describes the preirradiation thermal analysis of the HRB-22 capsule designed for an irradiation test in a removable beryllium position of the High Flux Isotope Reactor(HFIR) at Oak Ridge National Laboratory. This test is being carried out under Annex 2 of the Arrangement between the U.S. Department of Energy and the Japan Atomic Energy Research Institute on Cooperation in Research and Development regarding High-Temperature Gas-cooled Reactors. The fuel used in the test is an advanced type. The advanced fuel was designed aiming at burnup of about 10% fima which was higher than that of the first charge fuel for the High Temperature Engineering Test Reactor(HTTR) and was produced in Japan. CACA-2, a heavy isotope and fission product concentration calculational code for experimental irradiation capsules, was used to determine time-dependent fission power for the fuel compacts. The Heat Engineering and Transfer in Nine Geometries(HEATING) code was used to solve the steady-state heat conduction problem. The diameters of the graphite fuel body, which contains the fuel compacts, and of the primary pressure vessel were

---

\*Oak Ridge National Laboratory

determined such that the requirements of running the fuel compacts at an average temperature less than 1250°C and of not exceeding a maximum fuel temperature of 1350°C were met throughout the four cycles of irradiation. The detail design of the capsule was carried out based on this analysis.

Keywords: Capsule Design, Irradiation, HFIR, Thermal Analysis, Advanced Fuel, Fuel Compact, HTGR, Temperature

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 照射試験の概要 .....	3
3. 計算条件 .....	5
3.1 核計算 .....	5
3.2 温度計算 .....	6
3.2.1 入力データ .....	6
3.2.2 計算モデル .....	8
4. 計算結果 .....	23
5. まとめ .....	34
謝辞 .....	35
参考文献 .....	35
付録-1 CACA-2コードの入力例 .....	36
付録-2 HEATING7.2コードの入力例 .....	38

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline of the Irradiation Test .....	3
3. Calculation Condition .....	5
3.1 Nuclear Calculation .....	5
3.2 Thermal Calculation .....	6
3.2.1 Input Data .....	6
3.2.2 Model .....	8
4. Results .....	23
5. Summary .....	34
Acknowledgements .....	35
References .....	35
Appendix-1 Example Input Data of CACA-2 Code .....	36
Appendix-2 Example Input Data of HEATING7.2 Code .....	38

# 1. ま え が き

現在、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）において、米国エネルギー省との高温ガス炉に関する研究開発協力実施取決め付属書2に基づく原研燃料照射試験（HRB-22キャプセル照射試験）が行われている<sup>(1-3)</sup>。本試験は、通常運転時の照射性能の試験を目的としており、原研燃料は、高温工学試験研究炉（HTTR）用初装荷燃料よりも燃料核直径を小さくし、バッファ層及びSiC層を厚くした、いわゆる改良型の高燃焼度燃料である。高燃焼度燃料は、10%FIMA（% fissions per initial metallic atom）程度の高い燃焼度まで照射健全性を保つよう設計された、改良型燃料である。主要な仕様及び照射条件を比較したものをTable 1.1に示す。原研燃料は、燃料コンパクトとして、HRB-22と命名されたキャプセルに装荷され、ORNLにあるHigh Flux Isotope Reactor（HFIR）の可動ベリリウム反射体（RB）領域で4サイクル照射された。照射は、1994年3月に開始し、1994年8月に終了した。この照射試験終了後、各種照射後試験を行う予定である。

本報は、照射試験に先立って実施した、HRB-22キャプセルの炉内温度挙動予測計算の方法及び結果を示したものである。本計算の目的は、キャプセルの詳細設計、安全評価を行い、照射試験計画を定めることである。

Table 1.1 Major specifications and irradiation conditions of coated fuel particles.

Fuel Type	Initial-core	Advanced
Kernel diameter ( $\mu\text{m}$ )	6 0 0	5 0 0
Buffer layer thickness ( $\mu\text{m}$ )	6 0	9 0
SiC layer thickness ( $\mu\text{m}$ )	2 5	3 5
Max. burnup (%FIMA)	3. 6	9. 4*
Max. fast neutron fluence ( $10^{25}\text{n/m}^2$ )	1. 3	2. 8*

\* Irradiated by HFIR



## 2. 照射試験の概要

HRB-22キャプセルは、12個の燃料コンパクトを黒鉛燃料体（HTTR燃料棒の黒鉛スリーブに相当する）に装荷し、さらにその外側を金属（インコネル）製の2重容器に収納したものである。燃料コンパクトは中空円筒で、外径26.05mm、内径10mm、高さ39mmである。黒鉛燃料体の材料は、Stackpole Carbon Company Ltd.で製作された微粒黒鉛であるSP2020黒鉛である。黒鉛燃料体の内、外径は、後述するように燃料温度の調整のために微調整を行ったが、外径約38mm、内径約26.15mmである。Figure 2.1にキャプセルの縦断面を示す。1番から6番までの燃料コンパクトは、黒鉛燃料体の上部に装荷され、炉心の高さ方向の中央から見て上部で照射された。6番目の燃料コンパクト下端位置は、炉心のほぼ中央であった。7番から12番の燃料コンパクトは炉心の中央から下で照射された。HFIRの中性子束分布は軸方向に対称性があり、上から6番目と7番目の燃料を中心として、1番目と12番目、2番目と11番目、…の燃料コンパクトは、出力、中性子束、温度等がほぼ同一でになる。

燃料コンパクトを装荷した黒鉛燃料体は、インコネル-718製の2重圧力容器内に収納される。キャプセルの断面をFig. 2.2に示す。黒鉛燃料体の温度は、各燃料コンパクトの軸方向中央部近くの位置でK型の熱電対によって測定する。燃料コンパクト自身の温度は直接測定できないので、この黒鉛燃料体の測定値を基に計算を行って推定する。キャプセルには、スweepガスの制御装置を設け、黒鉛燃料体とインコネル圧力容器間のギャップ及び燃料コンパクトと黒鉛燃料体間にスweepガスを流す。スweepガスは、ヘリウムとネオンの混合ガスであり、このガス中に含まれる気体状核分裂生成物のオンライン測定を行う。

キャプセルは、HFIRのRB領域で4サイクル照射された。燃料コンパクトの体積平均温度の目標値は1250°Cとし、また、燃料最高温度は1350°Cを超えないこととする基準を設けた<sup>(1)</sup>。これらの値は、現段階で想定される高燃焼度燃料の使用条件から定めたものである。コンパクト中の燃料装荷量は既に決まっており、照射中の燃料温度コントロールのためのパラメータとはできない。すなわち、燃料装荷量は全てのコンパクトで同一である（米国の燃料は、一般に、充填率を変化させて出力を調整するため、コンパクト毎に重金属装荷量が異なる）。そこで、燃料温度の制御は、黒鉛燃料体と内側圧力容器間のギャップ幅の調整及びギャップ内のヘリウムガスとネオンガスの混合比の調整によって行うこととした。すなわち、スweepガス混合比を変化させることによってキャプセル内の燃料コンパクト全体の温度調整を行い、ギャップ幅を軸方向位置毎に変えることによって燃料温度の軸方向分布を調整した。従って、キャプセルの詳細設計においては、製作時のギャップ幅の決定が大きな目的の一つであった。

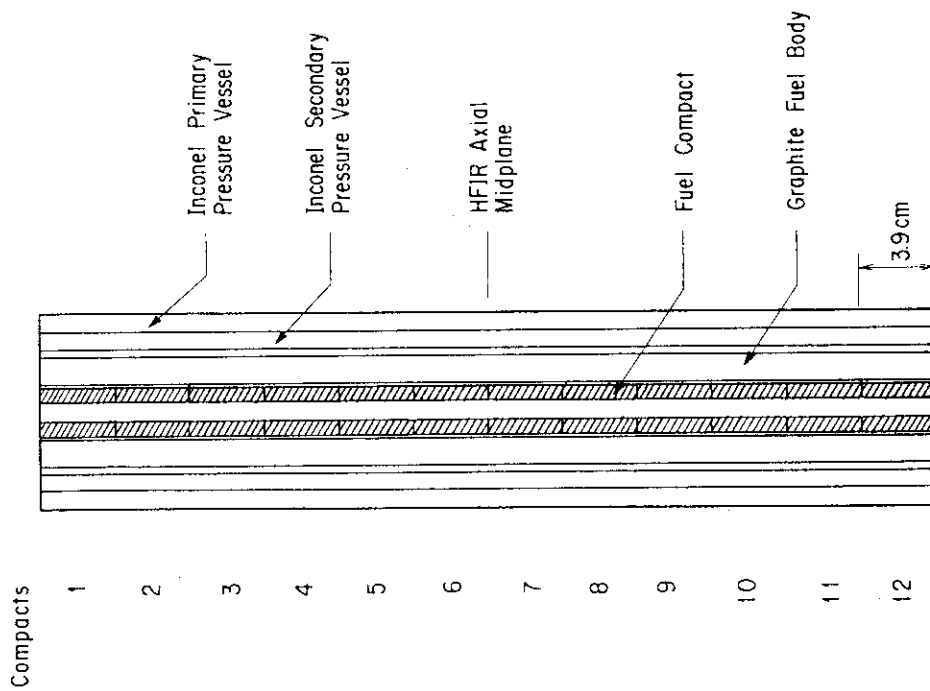


Fig. 2.1 Axial cross section of HRB - 22 irradiation capsule.

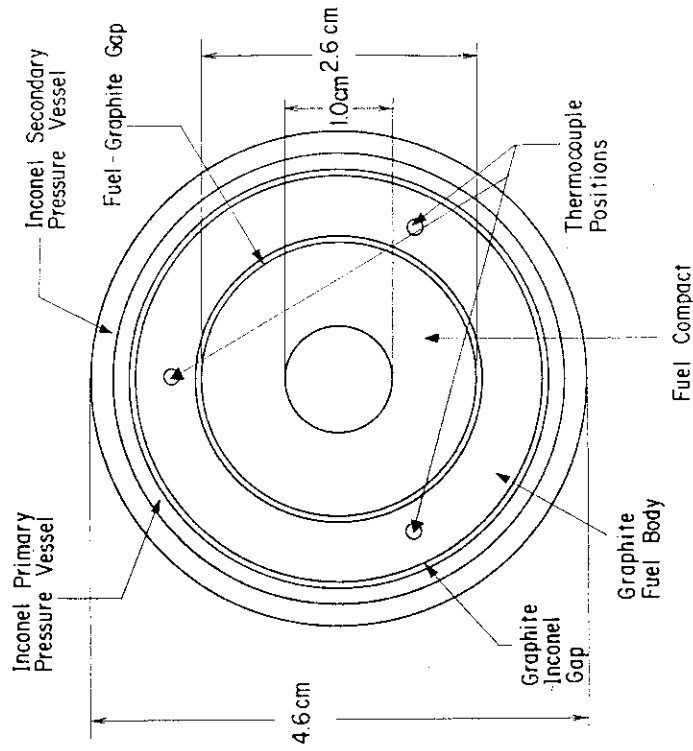


Fig. 2.2 Radial cross section of HRB - 22 irradiation capsule.

## 3. 計 算 条 件

### 3. 1 核計算

燃料コンパクト毎の出力密度はCACA-2コード<sup>(5)</sup>で計算した。CACA-2は、これまでHFIRで照射された多くのキャプセルの照射性能の評価に用いられてきた。例えば、米国のモジュラー型高温ガス炉(MHTGR)用燃料の照射を行ったHRB-21キャプセル照射試験では、CACA-2コードで計算した出力密度に基づく温度の計算値は、熱電対測定温度と±5%の範囲内で一致した<sup>(3,5)</sup>

キャプセルの温度解析を行うためには、詳細な形状及び運転状態が既知でなくてはならない。また、寸法の他にもキャプセルの各部分の時間依存の発熱量を知らなくてはならない。燃料コンパクトの出力は、核分裂で生じる他、HFIRのような高中性子束炉ではガンマ発熱によっても相当量生じ無視できない。

CACA-2コードは、燃料コンパクトの初期燃料装荷量、キャプセルの炉内位置、キャプセル内の燃料コンパクト位置、原子炉の運転出力に基づき、燃料コンパクトの時間依存核分裂出力を計算する。U-235及びU-238の装荷量は、製造時の検査データ<sup>(6)</sup>から計算した。解析においては、HFIRの運転パターンとして、22日間の連続運転とそれに続く5日間の停止を1つのサイクルと仮定した。原子炉の出力は、現在のHFIRの運転出力である85MW(t)(定格全出力100MW(t)の85%)とした。CACA-2コードの入力例を付録Aに示す。入力が簡単であることがこのコードの特徴の一つである。

CACA-2の解析結果から、個々の燃料コンパクトの時間依存核分裂出力密度を求めた。ガンマ発熱は、キャプセル内における燃料コンパクトの位置によって13から22W/cm<sup>3</sup>の範囲である<sup>(7)</sup>。各燃料コンパクトの核分裂及びガンマ線による出力密度の履歴をFig. 3.1に示す。この図より、出力密度は、各サイクルの初期に高くなることが分かる。また、キャプセルの端の方の燃料コンパクトは、サイクル中の出力密度の変化が大きいことが分かる。一方、中央近くの燃料コンパクトは、サイクル中ほぼ一定の出力密度である。これらは、HFIRの制御板のサイクル中の動き方を反映したものである。すなわち、HFIRでは炉心を2重に取り囲む2つの筒状の制御板が、1サイクルの間にそれぞれ上下方向に移動するため、各サイクルの末期になるにつれて端部の燃料コンパクトの出力が高くなっていく。全照射期間を通じての燃料コンパクトの出力密度の最大値は、第2サイクルの初期に現れる。

CACA-2を用いて照射中の燃焼度も計算により予測することができる。各燃料コンパクトの燃焼度の計算値をFig. 3.2に示す。キャプセル中央部の燃料コンパクト(第6、第7コンパクト)の燃焼度は約9%FIMAであり、端部の燃料コンパクト(第1、第12コンパクト)は約4%FIMAであると計算された。

各燃料コンパクトの高速中性子照射量の計算値を時間の関数としてFig. 3.3に示す。高速中性

子照射量の最大値は、約 $3.1 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$  ( $E > 29 \text{ fJ}$ ; 以下同様) (第6、第7コンパクト)である。最小値は、第1及び第12燃料コンパクトの $1.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ である。

### 3. 2 温度計算

#### 3.2.1 入力データ

温度計算の入力としては、キャプセル寸法、運転履歴及び材料挙動データベースが必要である。キャプセル寸法は、設計用図面に基づいた。時間依存の出力密度は、3. 1で述べたCACA-2の結果を用いた。材料データベース、すなわち、熱伝導度、熱膨張係数、照射による寸法及び物性変化については、その根拠とともに以下に示す。

#### (a) 燃料コンパクトの熱伝導度

未照射燃料コンパクトについて測定されたデータ<sup>(8)</sup>を2次関数でフィッティングし、以下の評価式を求めた。

$$K_{un} = a \times T^2 + b \times T + c \quad (1)$$

ここで、

$T$  : 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$a$  :  $1.01 \times 10^{-7}$

$b$  :  $2.92 \times 10^{-4}$

$c$  : 0.390

である。 $K_{un}$ の単位は $\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ である。

高速中性子照射量に対する燃料コンパクトの熱伝導率の変化についても、測定データ<sup>(8)</sup>に基づき以下に示す最適評価式を計算に用いた。

$$(K_{irr}/K_{un}) = d \times \Phi^2 + e \times \Phi + 1 \quad (2)$$

ここで、

$\Phi$  : 高速中性子照射量 ( $\text{n}/\text{m}^2$ ,  $E \geq 0.18 \text{ MeV}$ )

$d$  :  $5.31 \times 10^{-2}$

$e$  : -0.293

である。(1)、(2)式をそれぞれFig. 3.4及びFig. 3.5に示す。

#### (b) 燃料コンパクトの熱膨張

燃料コンパクトの熱膨張係数として $2.45 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ <sup>(8)</sup>を用いた。

## (c) 燃料コンパクトの照射寸法変化

燃料コンパクトの照射寸法変化として、以下の式が得られている<sup>(8)</sup>。

$$(\Delta d / d) = f \times \Phi^2 + g \times \Phi \quad (3)$$

ここで、

$(\Delta d / d)$  : 径方向の寸法変化率

$f$  :  $1.74 \times 10^{-3}$

$e$  :  $-1.006 \times 10^{-2}$

である。(3)式をFig. 3.6に示す。

## (d) 燃料コンパクトの輻射係数

輻射係数としては、ORNLにおけるキャプセル設計でこれまで用いられてきた標準値である0.9を用いた<sup>(10)</sup>。

## (e) SP2020黒鉛の熱伝導率

未照射SP2020黒鉛ログの径方向熱伝導率をFig. 3.7に示す。熱伝導率の照射量及び温度依存性は以下の式で表すことができる<sup>(7)</sup>。

$$\frac{1}{K_i(T)} = \frac{1}{K_o(T)} + \frac{F}{K_o(295K)} \quad (4)$$

ここで、

$K_i(T)$  : 照射黒鉛の温度T(K)における熱伝導率

$K_o(T)$  : 未照射黒鉛の温度T(K)における熱伝導率

$K_o(295K)$  : 未照射黒鉛の295(K)における熱伝導率

F : 中性子照射による熱抵抗増加量 (Figure 3.8<sup>(9)</sup> 参照)

である。

## (f) SP2020黒鉛の熱膨張

SP2020黒鉛の径方向熱膨張係数として $3.2 \times 10^{-6} K^{-1}$ <sup>(7)</sup>を用いた。

## (g) SP2020黒鉛の照射寸法変化

SP2020黒鉛の照射寸法変化をFig. 3.9<sup>(7)</sup>に示す。入力データとして問題となったのは、このSP2020黒鉛の照射寸法変化のデータベースである。Figure 3.9は、HFIRでこれまで照射

したSP2020黒鉛の種々のデータをプロットしたものである。図中にはIG-110黒鉛のデータも比較のために示してある。高速中性子照射量の最小値は、 $12 \times 10^{26} \text{ m}^{-2}$ のデータである。SP2020黒鉛のデータは実際のHFIRでの照射試験に用いた黒鉛材の照射後試験で得られたものであるため、途中の結果が無く、照射量が小さい範囲のものが無い。本試験における黒鉛燃料体の最大高速中性子照射量は、 $3.3 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ であるため、実際に必要な範囲のデータは無い。そこで、高速中性子照射量が $3.3 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ 以下の範囲では、寸法は高速中性子照射量に対して直線的に変化すると仮定した。

また、高速中性子束照射量に対する寸法変化の温度依存性についてはデータがほとんど無く、照射温度が $600^\circ\text{C}$ の場合のデータがあるだけである。HRB-22照射キャプセルでは、黒鉛燃料体は、 $500 \sim 900^\circ\text{C}$ で照射される。そこで、必要な温度範囲における寸法変化の評価方法の妥当性を $600^\circ\text{C}$ のデータを用いて検討した。寸法変化の温度依存性を推定するために、本予測計算においては、温度及び高速中性子照射量に対して十分なデータがあるH-451黒鉛の高速中性子照射量依存の寸法変化データベース<sup>(8)</sup>を用いた。今、解析で必要としている中性子照射量の範囲では、H-451黒鉛の照射寸法は、 $600^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ の範囲ではほとんど変わらず、高速中性子束に対して比例することが分かっている。<sup>(8)</sup> このことに基づき、SP2020黒鉛についても温度依存性は無いと推定した。

#### (h) SP2020黒鉛の輻射係数

燃料コンパクトと同様に輻射係数は0.9と仮定した。<sup>(10)</sup>

#### (i) インコネル718の熱膨張係数

インコネル718の熱膨張係数は $14.2 \times 10^{-6}$ <sup>(11)</sup>とした。その他の物性値はHRB-21キャプセル照射試験時と同じもの<sup>(10)</sup>を用いた。

### 3.2.2 計算モデル

キャプセルの定常温度解析は、HEATING7.2コードを用いて行った。このコードは、多次元の汎用熱計算コード<sup>(11)</sup>である。HEATING7.2は3次元までの定常及び非定常熱輸送問題を計算できる。本キャプセルは対称性があるので計算は円柱座標系(R-Z)で行った。

キャプセルのモデル化は、キャプセルの端部まですべてについて行った。個々の燃料コンパクトは出力の異なる領域とし、時間依存の出力密度は3.1で述べたCACA-2コードによる計算結果を用いた。ガンマ発熱は全ての領域、すなわち燃料コンパクト、黒鉛部、インコネル圧力容器について考慮した。モデルを単純化し、計算時間を短縮するために、熱電対はモデル化しなかった。

照射初期(第1サイクルの初め)の温度計算は、燃料コンパクト、黒鉛燃料体及びインコネル圧力容器の製作寸法に基づいて行う。照射が進むと、高速中性子照射によって燃料コンパクトと

黒鉛燃料体の寸法変化が生じる。すなわち、高速中性子による照射損傷に伴って、燃料コンパクト及び黒鉛燃料体は収縮する。この収縮により燃料コンパクトと黒鉛燃料体間のギャップ幅が変化する。ギャップの寸法変化はギャップコンダクタンスを変化させ、燃料コンパクトの温度を変化させる。この効果は大きいので、照射寸法変化は照射初期以外は常に考慮する必要がある。

寸法変化は、上述の相関式に基づいて計算した。寸法変化の計算結果をTable 3.1に示す。表には各サイクルの初期と末期に予測される寸法を示した。表に示した結果から、照射期間中に干渉が生じないこと、すなわち燃料コンパクト、黒鉛燃料体、圧力容器の接触は起こらないことが分かる。燃料コンパクトと黒鉛燃料体間のギャップ幅 (f-g gap) は、低温、高温状態ともに照射に伴って増加する。同様に、黒鉛燃料体と1次圧力容器間のギャップ幅 (f-inc gap) も照射期間を通じて増加する。Figure 3.10に燃料コンパクトと黒鉛燃料体間のギャップ幅の照射に伴う変化を示す。低温時のギャップ幅は、高速中性子照射によって初期の2.0mils(0.0508mm) から照射末期の6.6mils(0.1651mm) まで増加する。同様に、黒鉛燃料体と1次インコネル圧力容器間のギャップ幅の変化をFig. 3.11に示す。SP2020黒鉛の照射寸法変化を直線近似したため、ギャップ幅の変化も直線的である。

Figure 3.12、3.13及び3.14に、計算モデル図を示す。Figure 3.12は全体を、Fig. 3.13及び3.14はそれぞれ燃料コンパクト部の上部、下部の計算モデルを示している。これらの図に示すように、燃料コンパクト部の上部、下部には断熱構造を施して熱の逃げを抑制し、インコネル圧力容器の温度が過度に上昇しないような設計としている。

温度計算は反復計算を行った。すなわち、初期寸法を計算モデルに入れ、各照射サイクル初期と末期の温度計算を行った。この時、ヘリウムとネオンの混合比を調整して燃料の平均及び最高温度を目標値に合わせた。この計算を、初期寸法(すなわちギャップ幅)を調整しながら、各照射サイクルの初期、末期ともに望ましい温度が得られるまで繰り返し計算を行った。その後、各照射サイクルの残りの時間点についても計算を行い、燃料コンパクトの照射中温度履歴を予測した。





Table 3.1 Continued

Region 6	1.3025	1.28751	1.29131	1.30758	1.30306	1.30625	5.88	1.5050	1.49980	1.50346	1.90940	1.5115	1.5168	1.92632	6.7
<b>BOC 3</b>															
Region 1	1.3025	1.29356	1.29617	1.30758	1.30531	1.30803	4.67	1.4750	1.47244	1.47551	1.87390	1.5115	1.5168	1.92632	20.6
Region 2	1.3025	1.29184	1.29476	1.30758	1.30476	1.30757	5.04	1.4920	1.48878	1.49199	1.89483	1.5115	1.5168	1.92632	12.4
Region 3	1.3025	1.29027	1.29357	1.30758	1.30421	1.30732	5.41	1.4920	1.48816	1.49170	1.89446	1.5115	1.5168	1.92632	12.5
Region 4	1.3025	1.28908	1.29247	1.30758	1.30375	1.30660	5.56	1.5050	1.50060	1.50388	1.90992	1.5115	1.5168	1.92632	6.5
Region 5	1.3025	1.28820	1.29181	1.30758	1.30338	1.30642	5.75	1.5050	1.50017	1.50367	1.90966	1.5115	1.5168	1.92632	6.6
Region 6	1.3025	1.28751	1.29125	1.30758	1.30306	1.30616	5.87	1.5050	1.49980	1.50337	1.90928	1.5115	1.5168	1.92632	6.7
<b>EOC 3</b>															
Region 1	1.3025	1.29019	1.29355	1.30758	1.30419	1.30758	5.52	1.4750	1.47117	1.47500	1.87325	1.5115	1.5170	1.92655	21.0
Region 2	1.3025	1.28814	1.29168	1.30758	1.30335	1.30670	5.91	1.4920	1.48717	1.49100	1.89357	1.5115	1.5170	1.92655	13.0
Region 3	1.3025	1.28651	1.29024	1.30758	1.30255	1.30602	6.21	1.4920	1.48626	1.49022	1.89258	1.5115	1.5170	1.92655	13.4
Region 4	1.3025	1.28540	1.28916	1.30758	1.30186	1.30503	6.25	1.5050	1.49841	1.50207	1.90763	1.5115	1.5170	1.92655	7.4
Region 5	1.3025	1.28467	1.28837	1.30758	1.30128	1.30442	6.32	1.5050	1.49775	1.50136	1.90672	1.5115	1.5170	1.92655	7.8
Region 6	1.3025	1.28420	1.28795	1.30758	1.30079	1.30397	6.30	1.5050	1.49719	1.50084	1.90607	1.5115	1.5170	1.92655	8.1
<b>BOC 4</b>															
Region 1	1.3025	1.29019	1.29289	1.30758	1.30419	1.30695	5.54	1.4750	1.47117	1.47429	1.87235	1.5115	1.5167	1.92623	21.2
Region 2	1.3025	1.28814	1.29117	1.30758	1.30335	1.30620	5.92	1.4920	1.48717	1.49043	1.89284	1.5115	1.5167	1.92623	13.1
Region 3	1.3025	1.28651	1.28992	1.30758	1.30255	1.30573	6.22	1.4920	1.48626	1.48988	1.89215	1.5115	1.5167	1.92623	13.4
Region 4	1.3025	1.28540	1.28890	1.30758	1.30186	1.30483	6.27	1.5050	1.49841	1.50183	1.90732	1.5115	1.5167	1.92623	7.4
Region 5	1.3025	1.28467	1.28843	1.30758	1.30128	1.30442	6.29	1.5050	1.49775	1.50136	1.90672	1.5115	1.5167	1.92623	7.7
Region 6	1.3025	1.28420	1.28808	1.30758	1.30079	1.30405	6.29	1.5050	1.49719	1.50094	1.90619	1.5115	1.5167	1.92623	7.9
<b>EOC 4</b>															
Region 1	1.3025	1.28751	1.29090	1.30758	1.30306	1.30650	6.14	1.4750	1.46991	1.47378	1.87170	1.5115	1.5168	1.92637	21.5
Region 2	1.3025	1.28548	1.28905	1.30758	1.30191	1.30530	6.40	1.4920	1.48553	1.48940	1.89154	1.5115	1.5168	1.92637	13.7
Region 3	1.3025	1.28425	1.28800	1.30758	1.30085	1.30436	6.44	1.4920	1.48432	1.48832	1.89017	1.5115	1.5168	1.92637	14.2
Region 4	1.3025	1.28368	1.28743	1.30758	1.29993	1.30319	6.20	1.5050	1.49619	1.49994	1.90493	1.5115	1.5168	1.92637	8.4
Region 5	1.3025	1.28356	1.28725	1.30758	1.29918	1.30239	5.96	1.5050	1.49533	1.49903	1.90377	1.5115	1.5168	1.92637	8.9
Region 6	1.3025	1.28370	1.28742	1.30758	1.29855	1.30180	5.66	1.5050	1.49460	1.49835	1.90290	1.5115	1.5168	1.92637	9.2

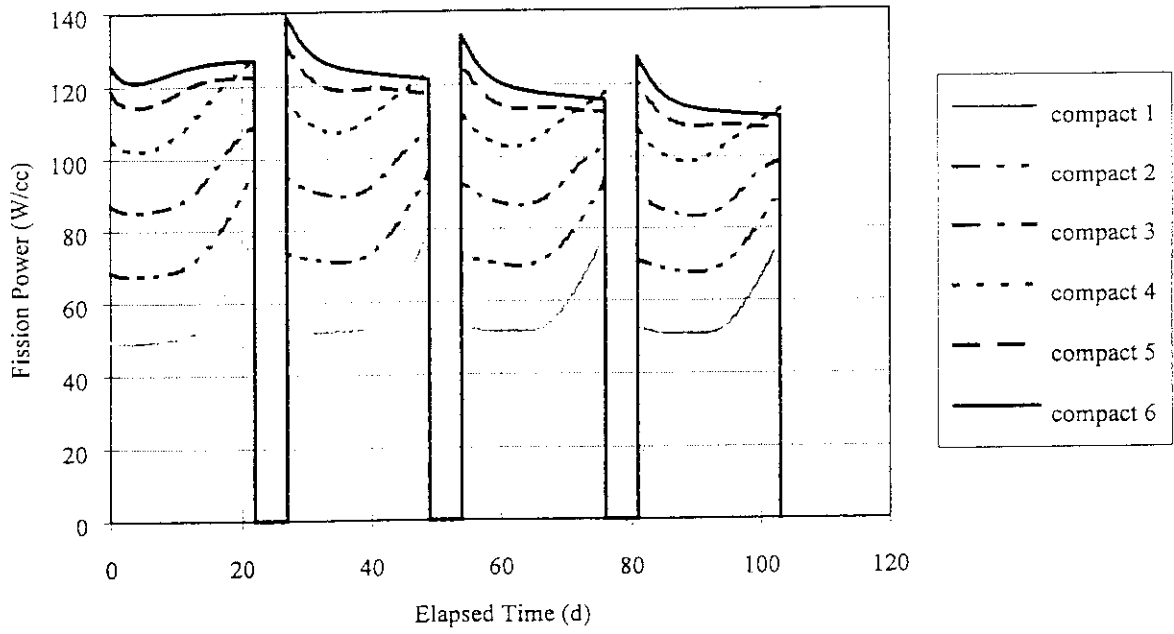


Fig. 3.1 Predicted total power history for individual compacts.

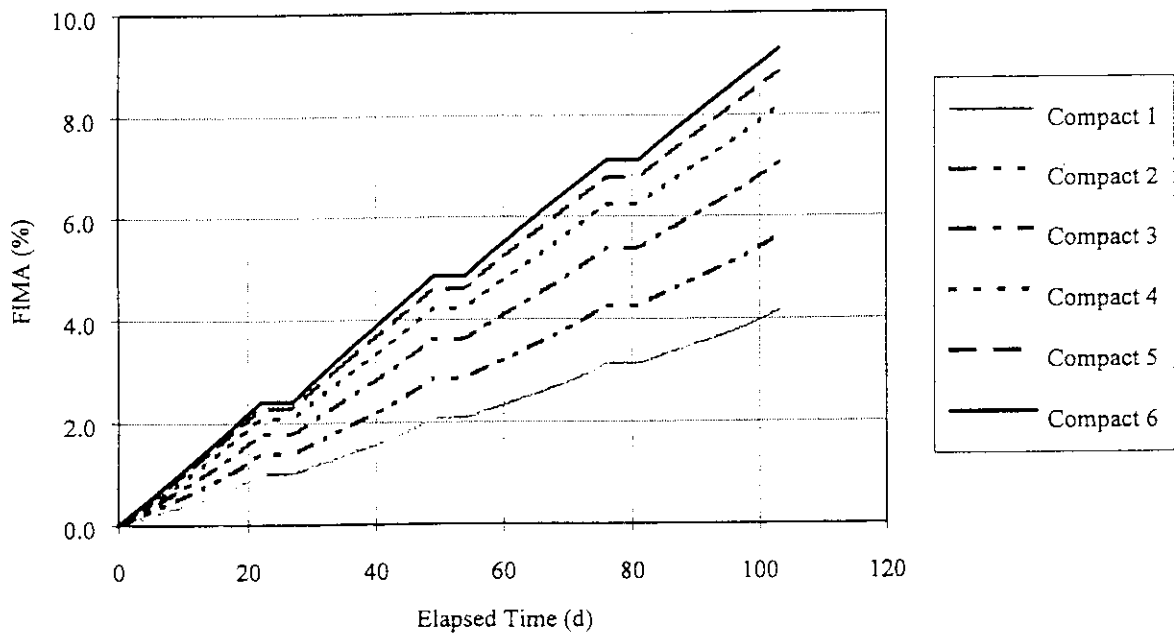


Fig. 3.2 Predicted burnup for individual compacts.

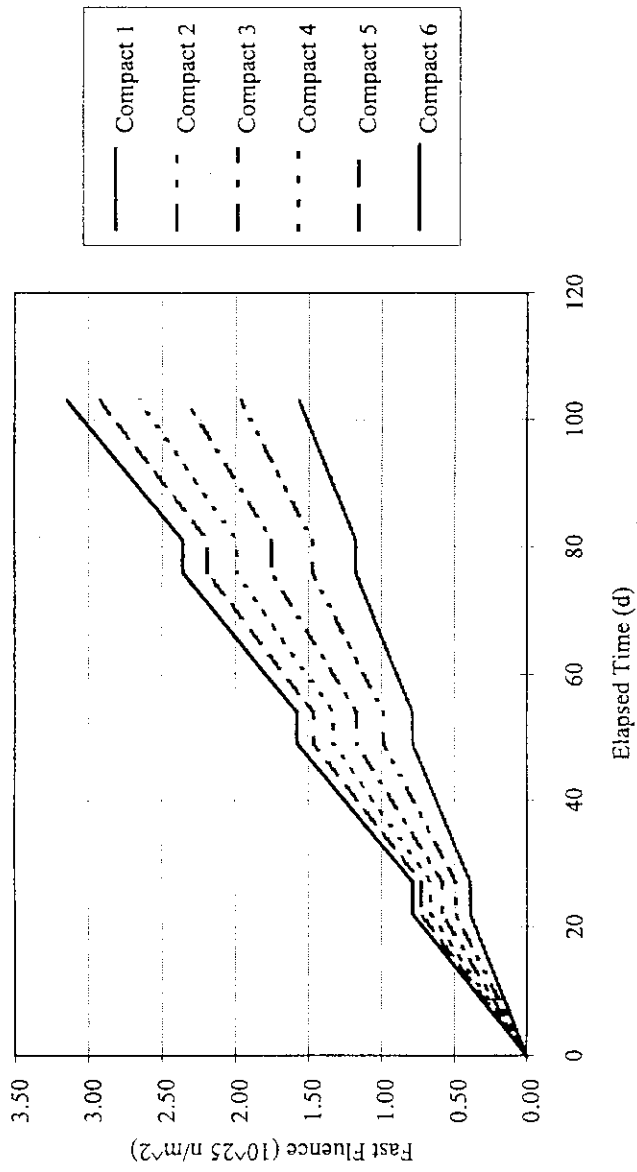


Fig. 3.3 Predicted fast neutron fluence for individual compacts.

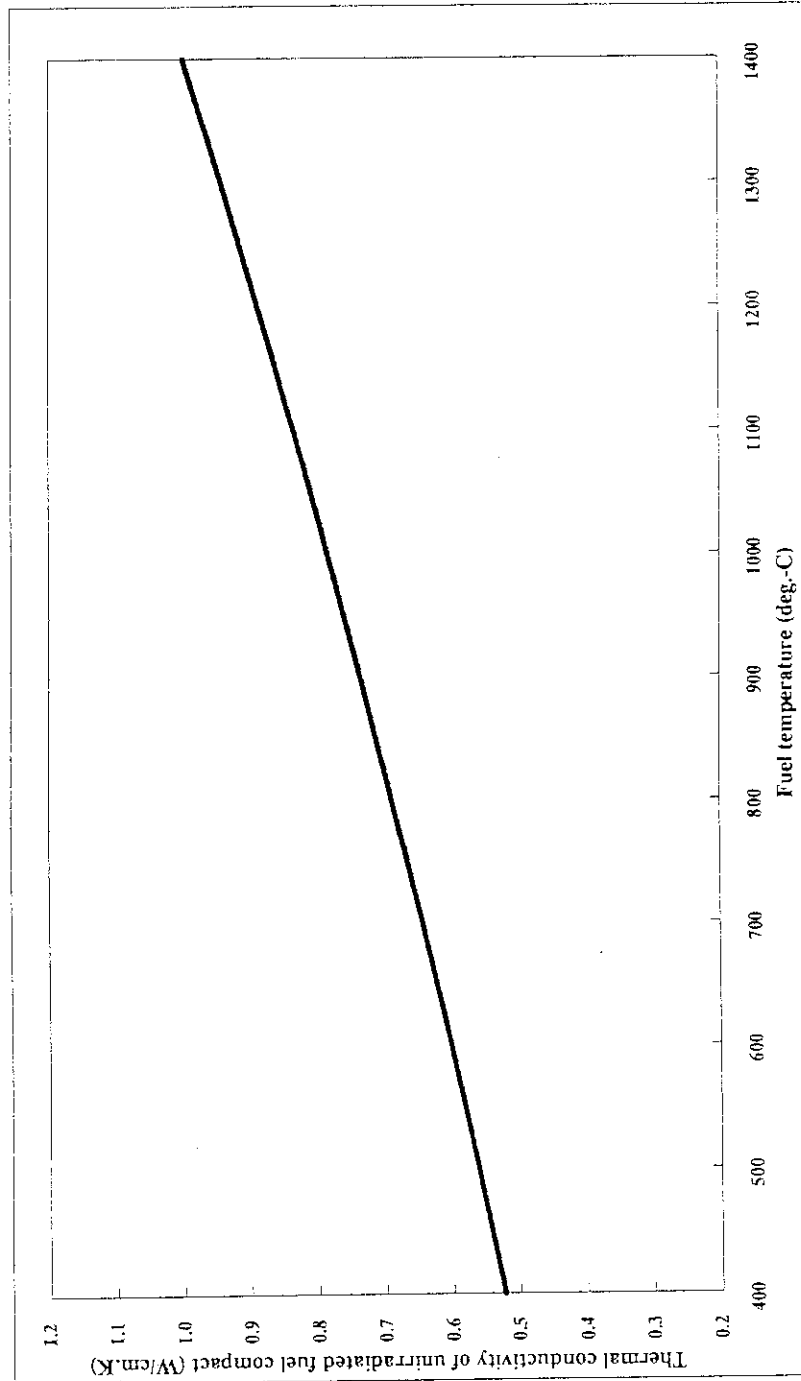


Fig. 3.4 Thermal conductivity of unirradiated fuel compact (temperature dependence).

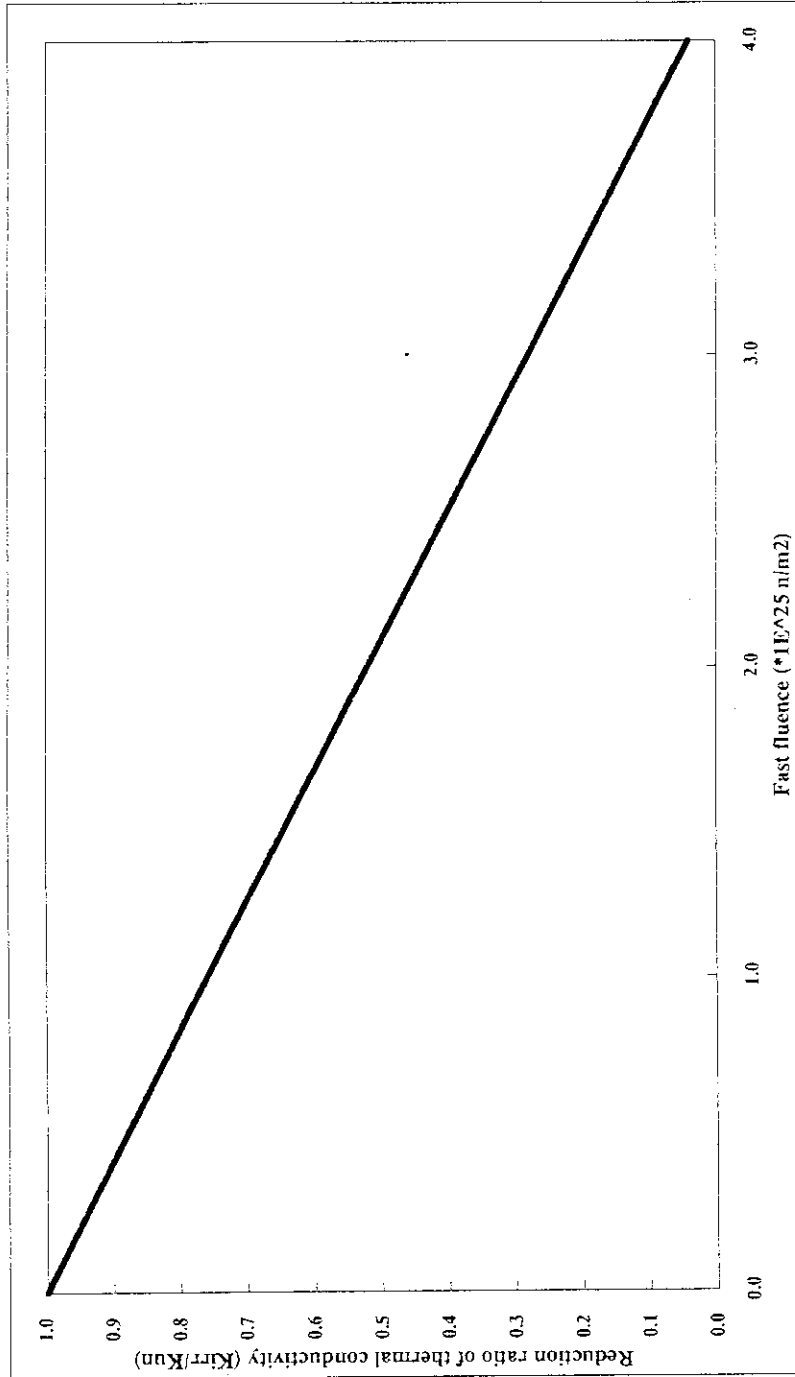


Fig. 3.5 Effect of fast neutron fluence on thermal conductivity of fuel compact.

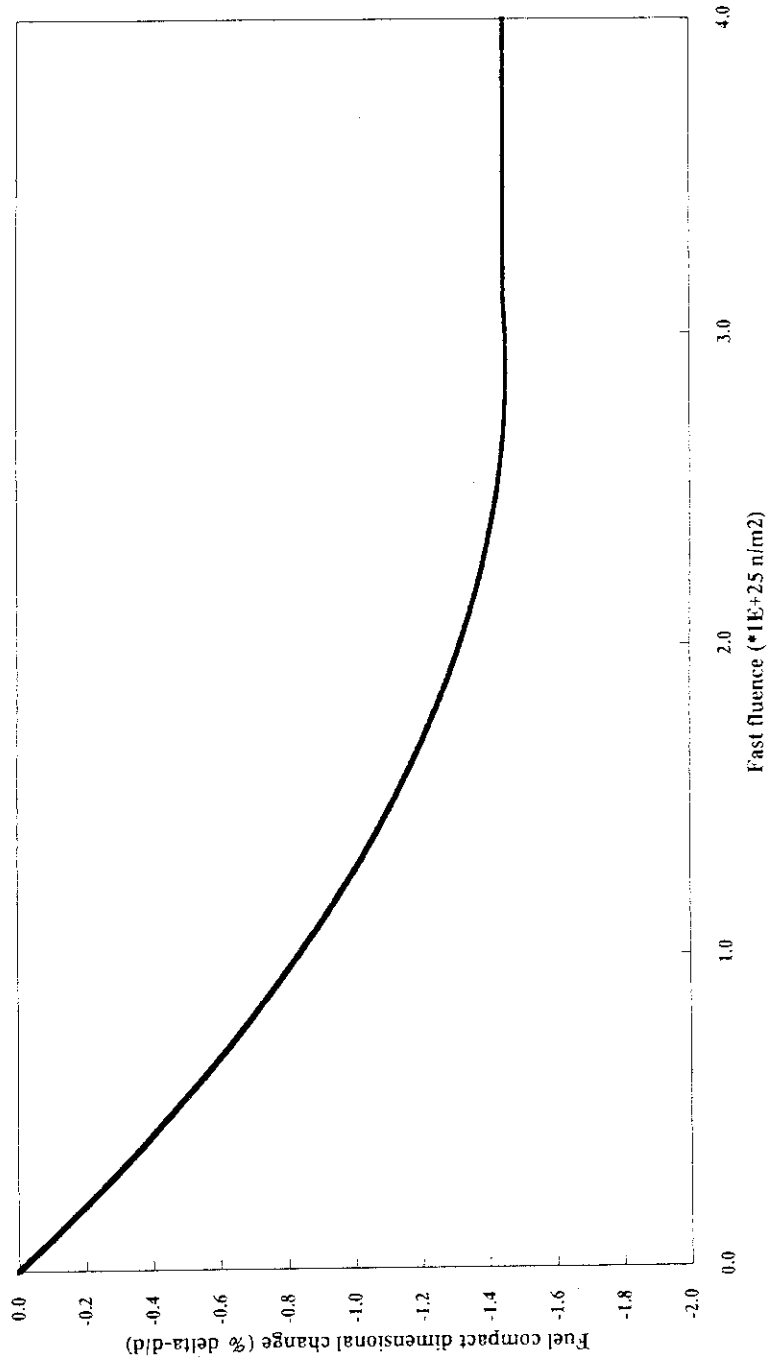


Fig. 3.6 Fuel compact dimensional change as a function of fast neutron fluence.

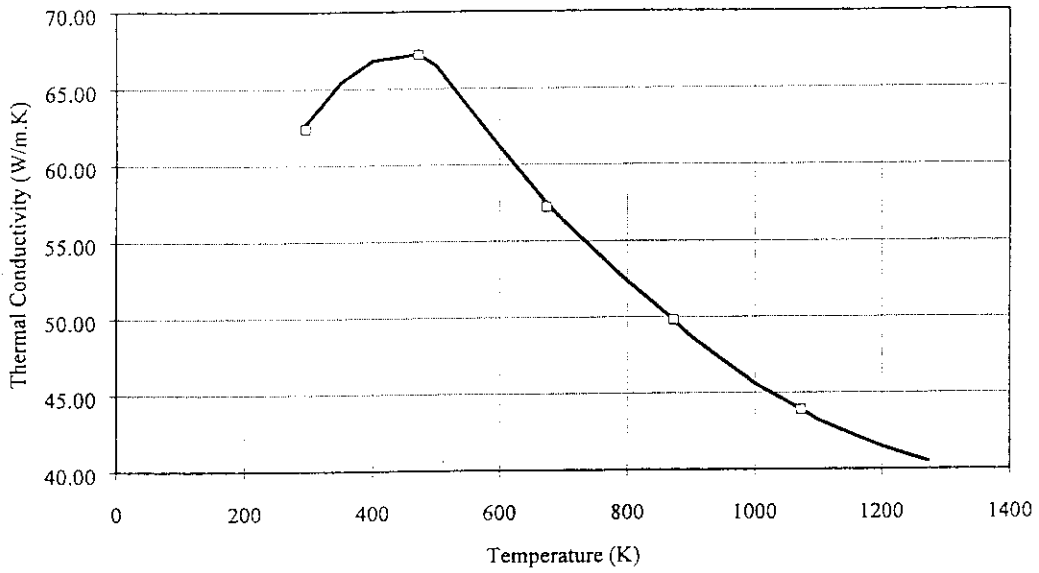


Fig. 3.7 Thermal conductivity of unirradiated SP2020 graphite.

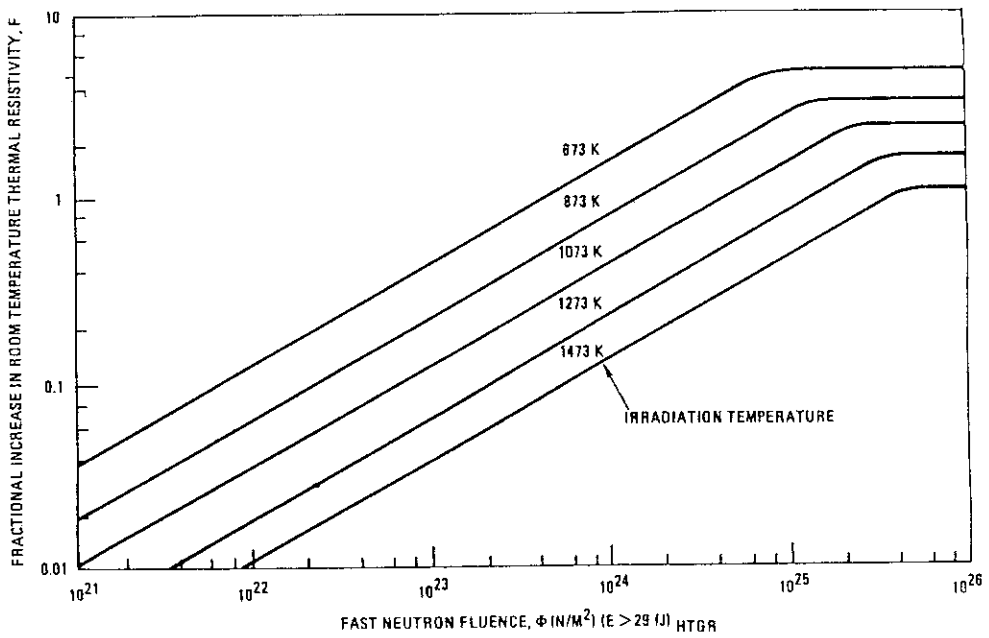


Fig. 3.8 Thermal resistivity of SP2020 graphite as a function of irradiation condition (at room temperature)

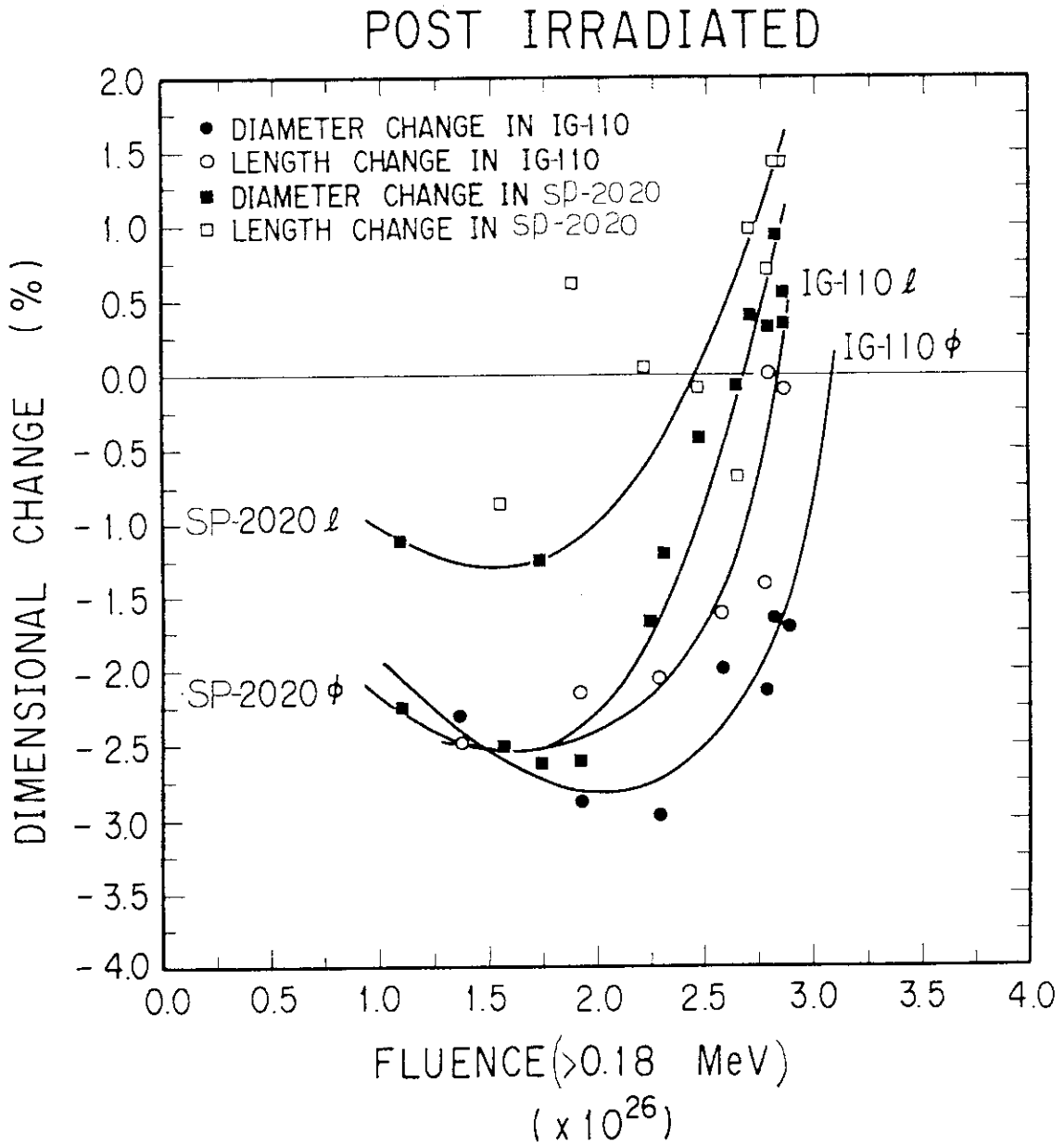


Fig. 3.9 Dimensional change of graphite by fast neutron fluence.



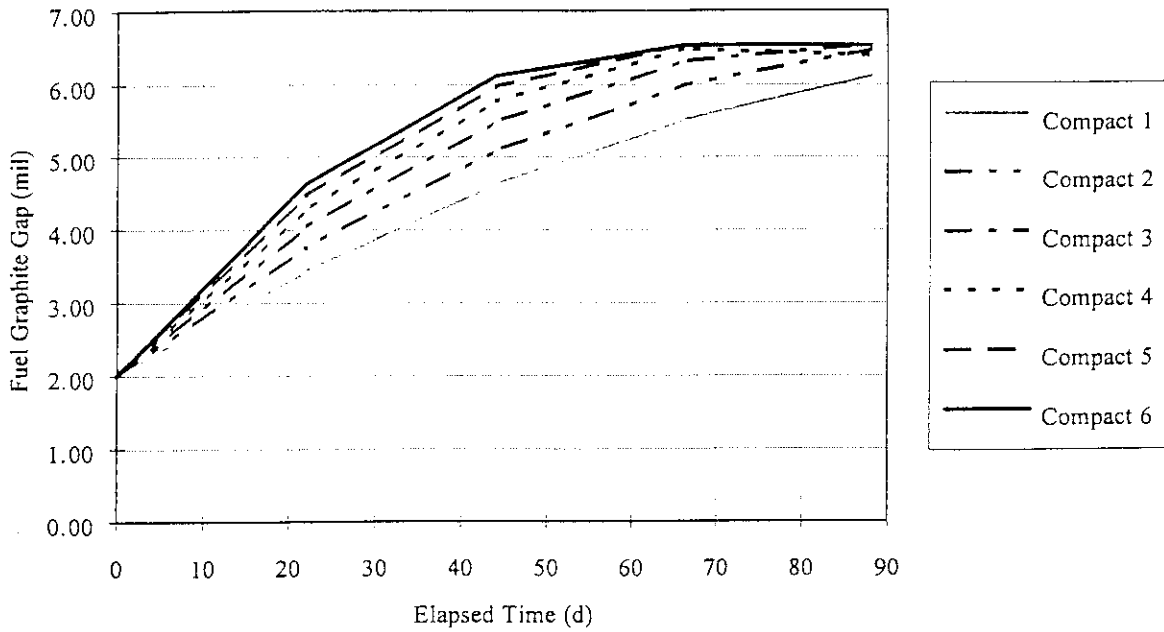


Fig. 3.10 Evolution of the cold gap between fuel compact and graphite fuel body.

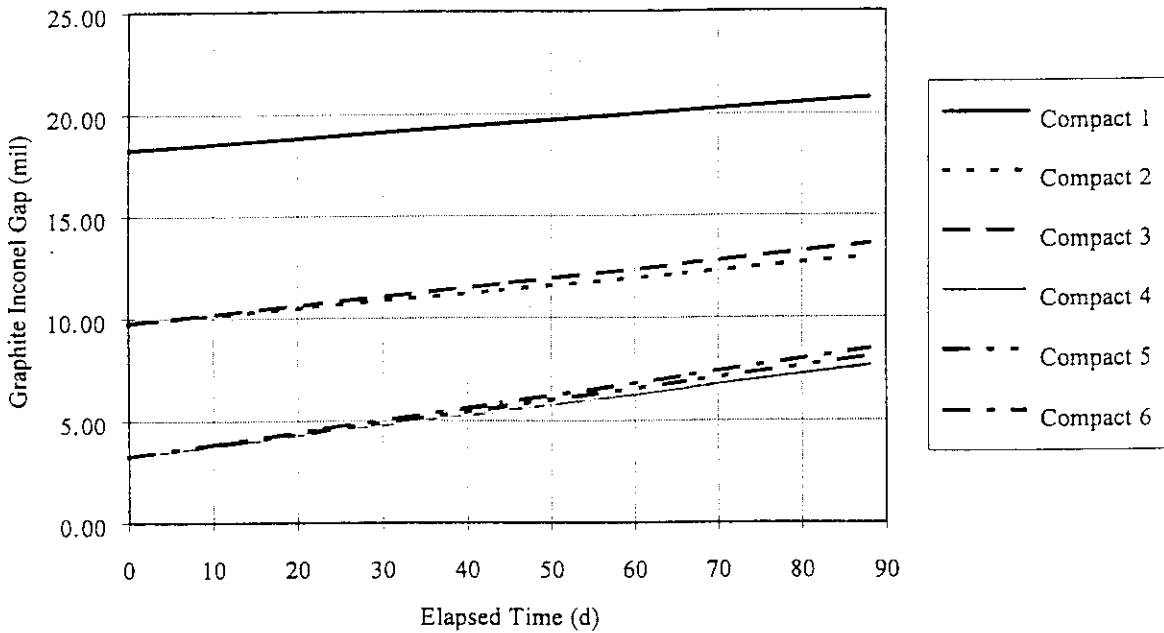


Fig. 3.11 Evolution of the cold gap between the graphite fuel body and primary inconel pressure vessel.

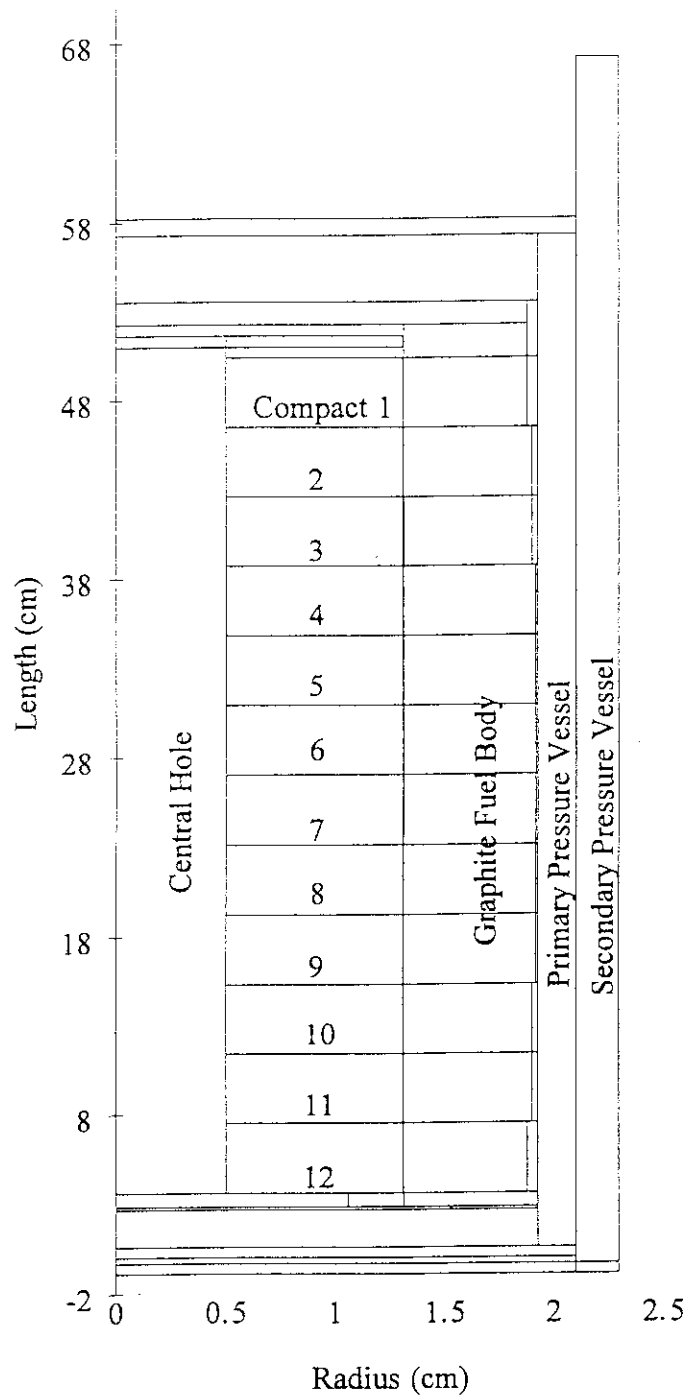


Fig. 3.12 HEATING7.2 model of HRB - 22 capsule.

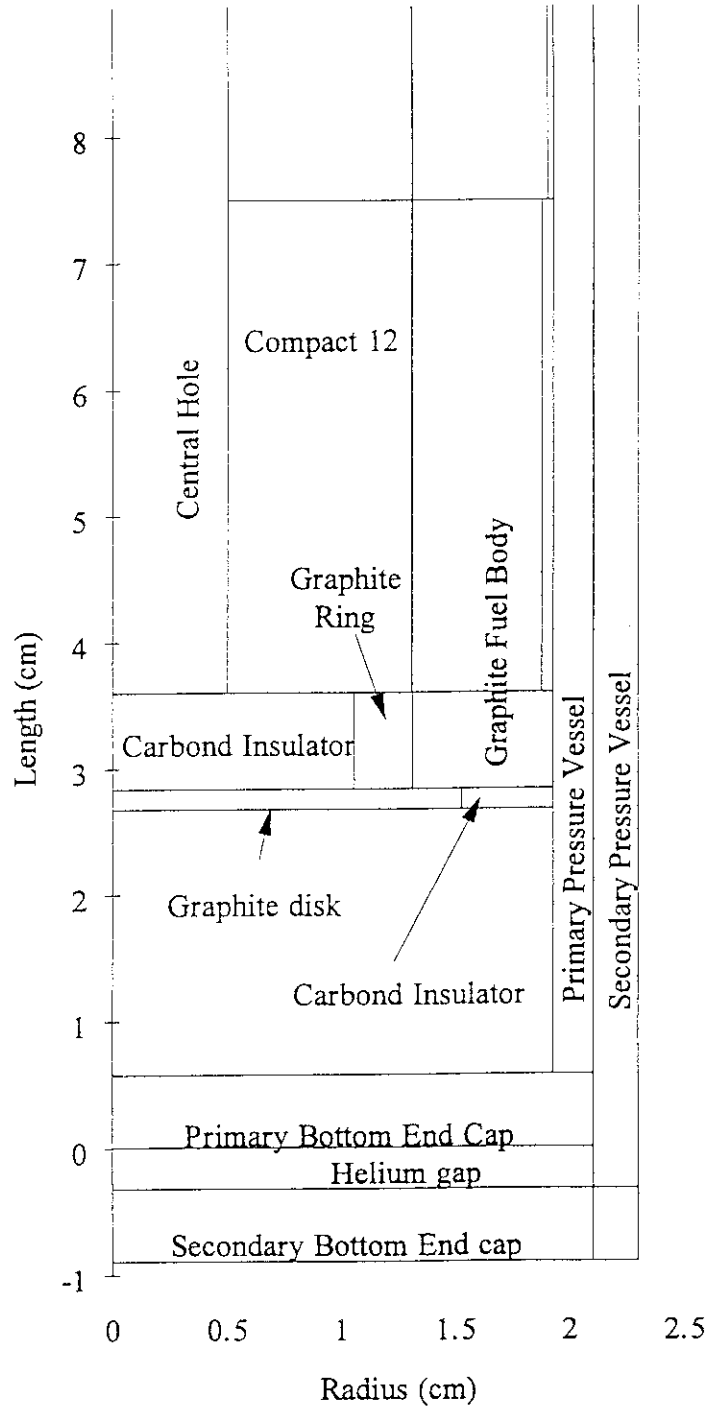


Fig. 3.13 HEATING7.2 model of HRB - 22 capsule (details of capsule bottom).

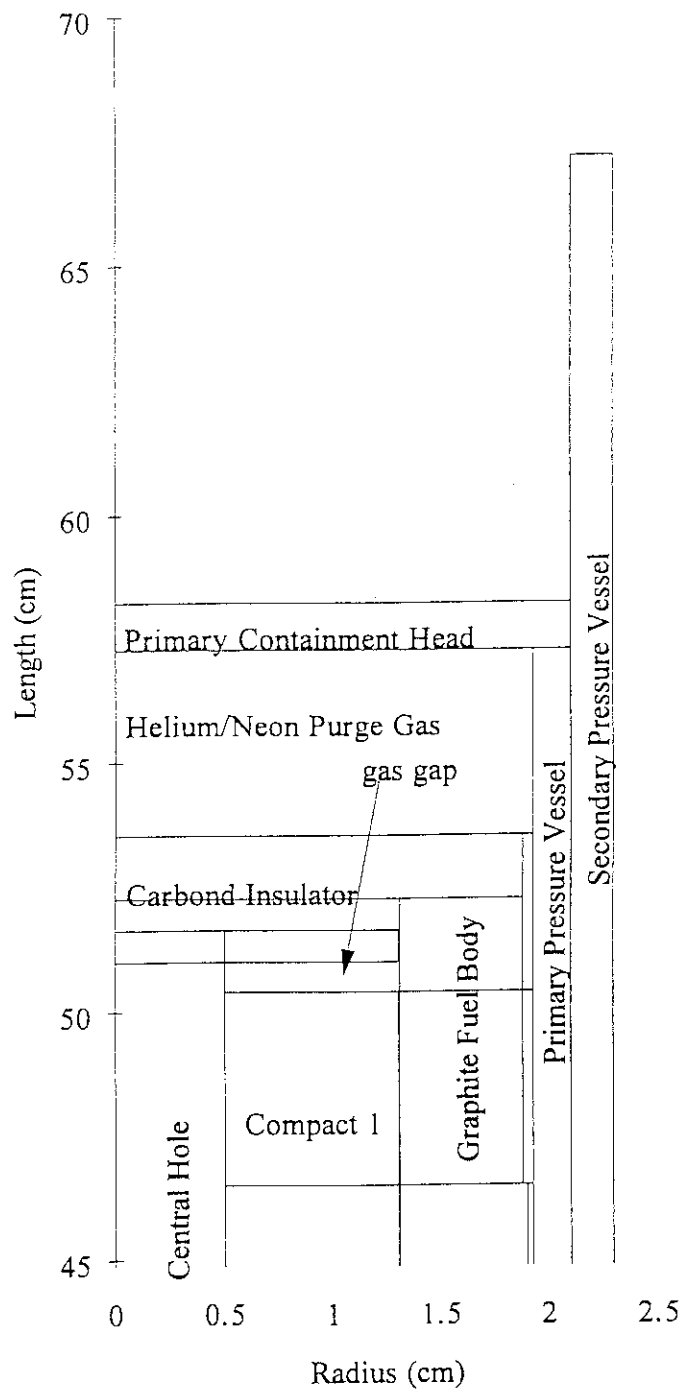


Fig. 3.14 HEATING7.2 model of HRB-22 capsule (detail of capsule top).

## 4. 計算結果

燃料温度計算により、燃料最高温度の基準を守るためには、中央部の燃料コンパクトについては初期の黒鉛燃料体とインコネル圧力容器間ギャップ幅を狭くしなくてはならないことが分かった。繰り返し計算によって最終的に選定したギャップ幅は3.3mils(0.08382mm)という非常に狭いものとなったが、このギャップ幅はHRB-21キャプセルで製作した経験があり、製作可能と判断した。

運転中の燃料コンパクト温度の予測値を、各照射サイクルの初期と末期についてFigs. 4.1～4.16に示す。これらの図には、以下の情報が含まれている。

- (a) 燃料コンパクト最高温度（中空コンパクト内面）の軸方向分布
- (b) 燃料コンパクト最低温度（中空コンパクト外面）の軸方向分布
- (c) 各燃料コンパクトの体積平均温度
- (d) 各燃料コンパクトに対応する黒鉛部に設置した熱電対温度位置の評価温度
- (e) 燃料コンパクトの軸方向中央面に沿ったキャプセル中心から圧力容器までの径方向温度分布

熱電対は、初めに予定されていた長さ40mmの燃料コンパクト（照射予定の燃料コンパクト長さは39mm）用に設計されたため、燃料コンパクトの軸方向中心部にはなっていないことに注意が必要である。本解析では、熱電対を正確にモデル化していないが、図では対応する位置の温度をプロットしている。実際の熱電対指示値は、ガンマ発熱によって図に示した値よりも若干（米国燃料の照射に用いたHRB-21キャプセルの場合は約20℃であった）高くなると予想された。

各燃料コンパクト間の出力の違いは、各照射サイクルの初期に最も大きくなる。例えば、第1サイクル初期では、端部の燃料コンパクト1の出力密度は49W/cm<sup>3</sup>であるが、中央部の燃料コンパクト6では128W/cm<sup>3</sup>である。軸方向の温度分布は、この出力の違いを反映し、各照射サイクル初期には中央部が高く、端部が低い燃料温度分布となっている。各照射サイクル末期には、3.1節で述べたように、端部の燃料コンパクトの出力が上昇するため図に示したように軸方向温度分布は平坦化する。

サイクル4の初期を除いて燃料コンパクト温度は制限値である1350℃を満足するという結果が得られた。サイクル4の初期には、燃料最高温度は制限値を上回ると予想された。製造時の黒鉛燃料体とインコネル圧力容器間ギャップ幅は、製作性の観点から現在の値(3.3mils, 0.08382mm)よりも狭くすることはできないため、温度を低減するには別の方法を考えなくてはならなかった。もしも第4サイクル初期の数日間、原子炉出力を下げる如果能够ならば、燃料温度を制限値

内に収めることができる。追加解析を行った結果、第4サイクル開始後の4日間にわたり、原子炉出力を85MWtから78MWtに下げれば燃料温度の基準値を満足できることが分かった。先に示したFig. 4.13及びFig. 4.14は、HFIRの出力を78MWtに下げた場合の温度分布である。

最後に、燃料コンパクト、黒鉛燃料体、圧力容器を通した温度分布の代表例をFig. 4.17に示す。

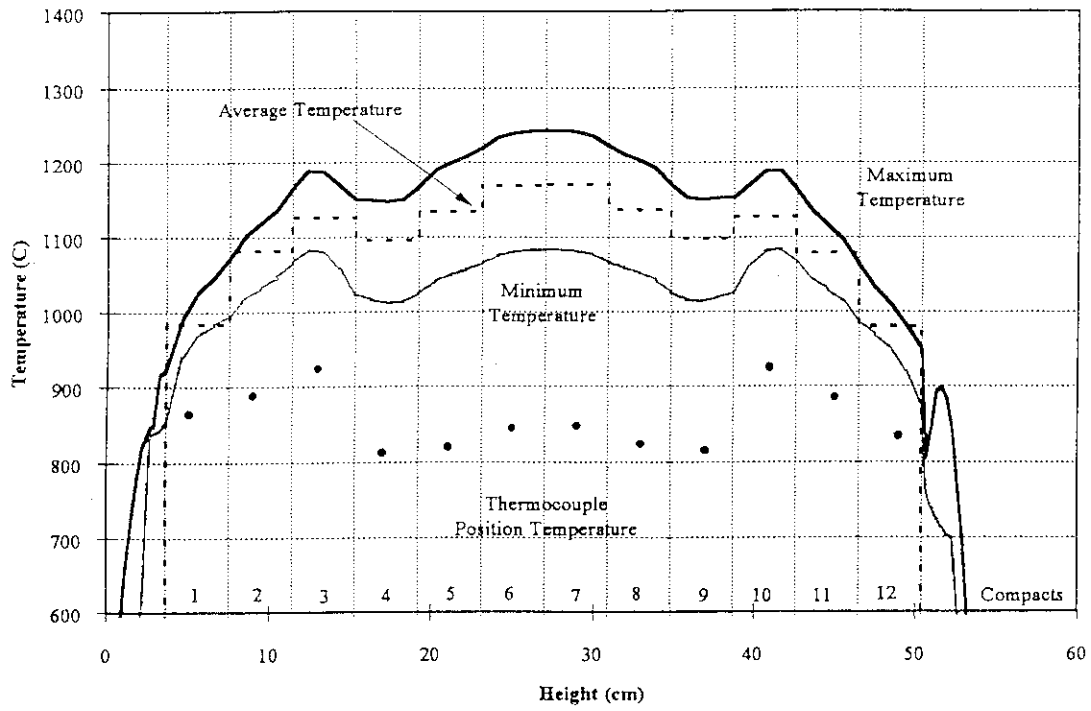


Fig. 4.1 Axial temperature distribution (beginning of cycle 1).

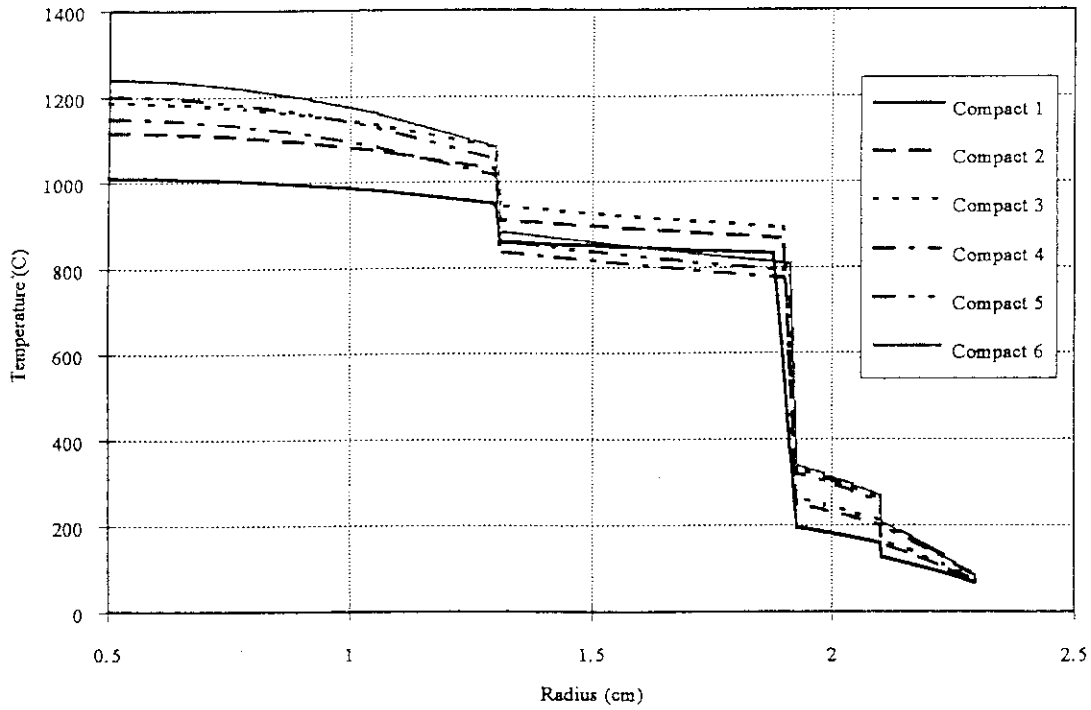


Fig. 4.2 Radial temperature distribution (beginning of cycle 1).

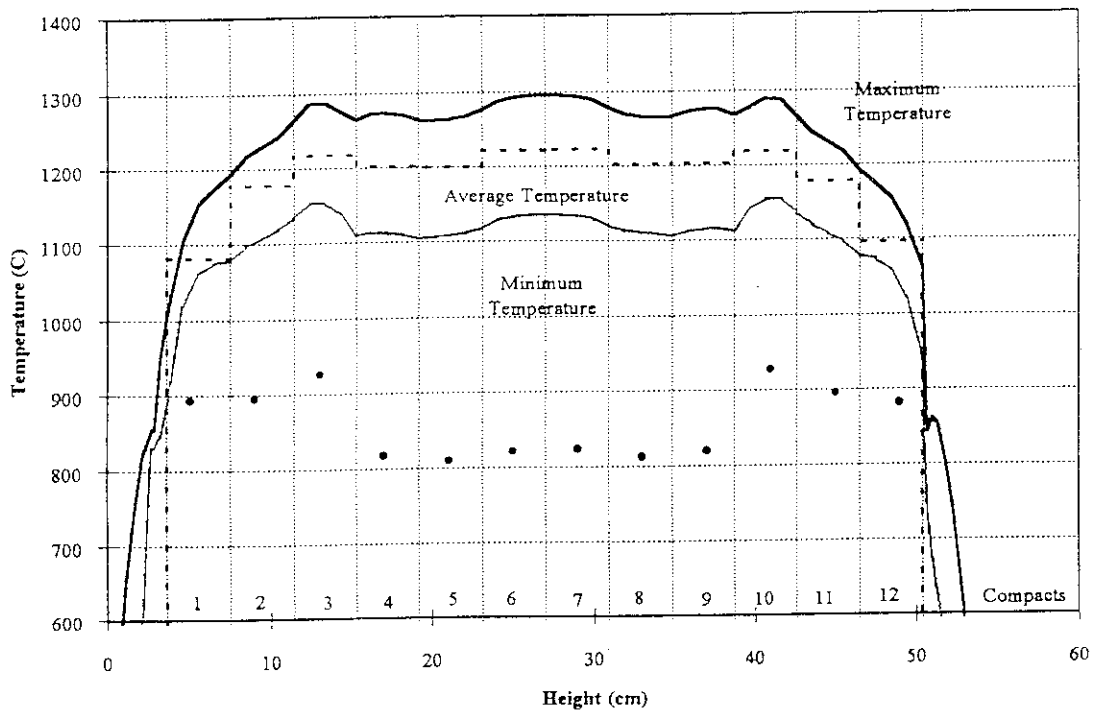


Fig. 4.3 Axial temperature distribution (end of cycle 1).

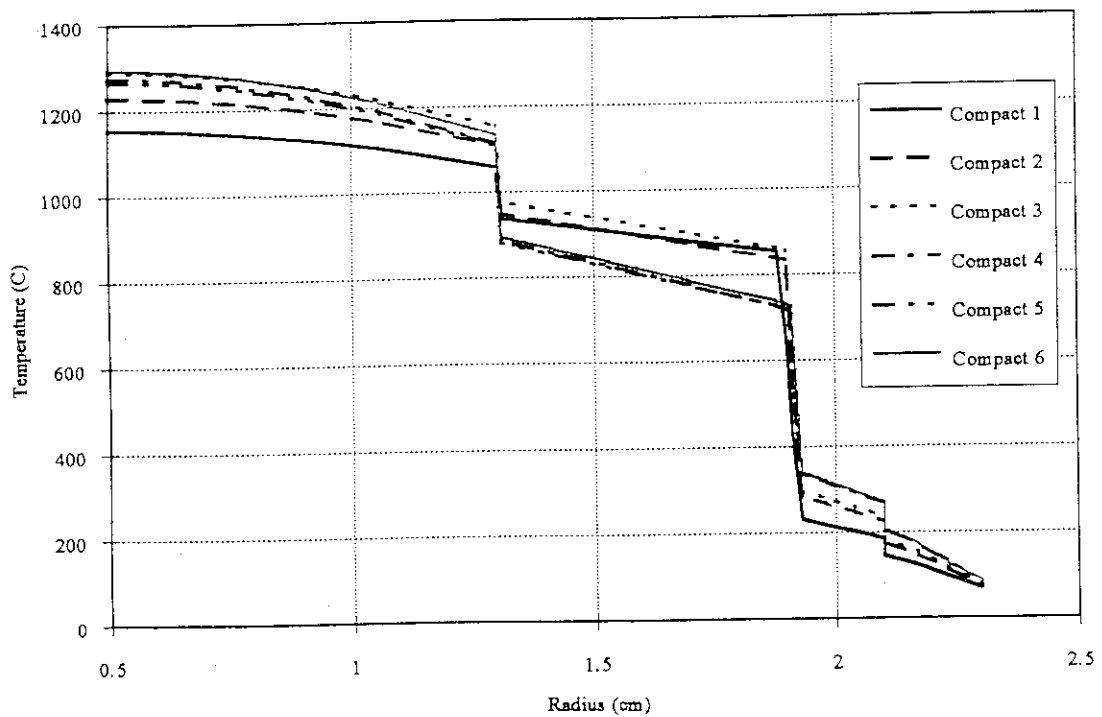


Fig. 4.4 Radial temperature distribution (end of cycle 1).



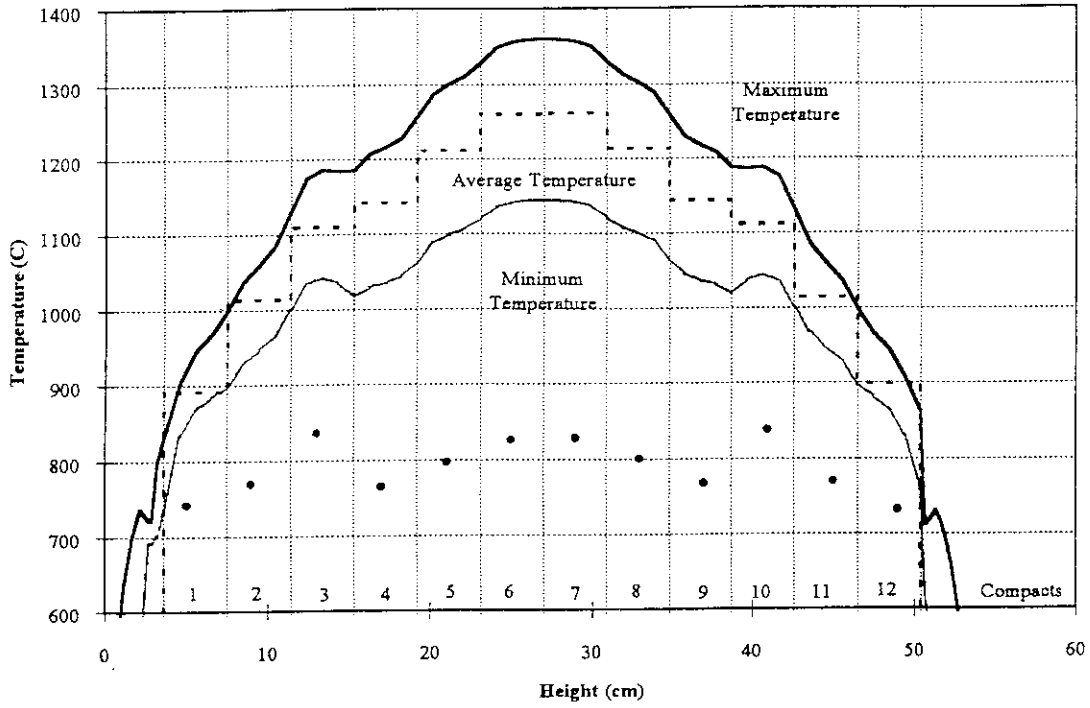


Fig. 4.5 Axial temperature distribution (beginning of cycle 2).

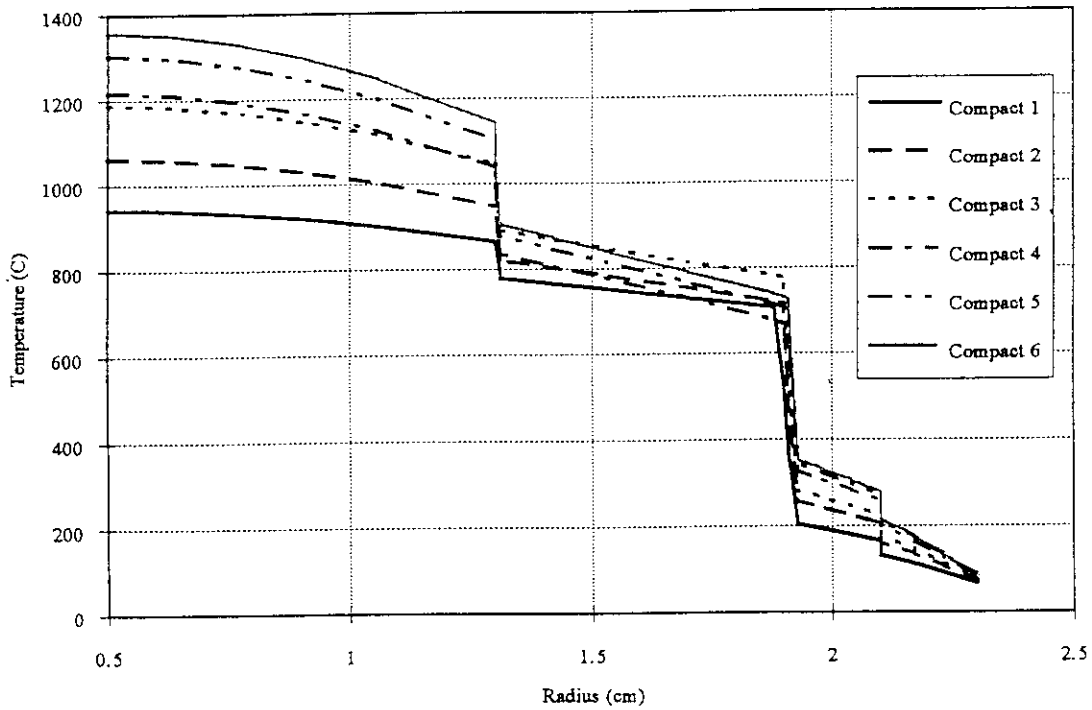


Fig. 4.6 Radial temperature distribution (beginning of cycle 2).

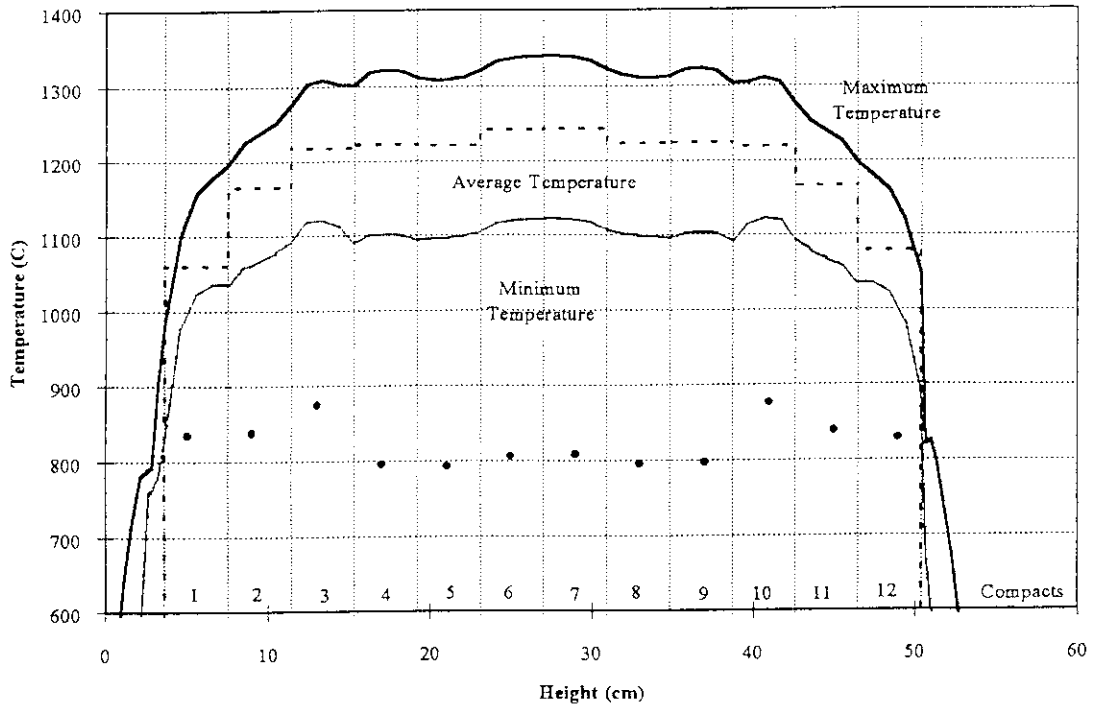


Fig. 4.7 Axial temperature distribution (end of cycle 2).

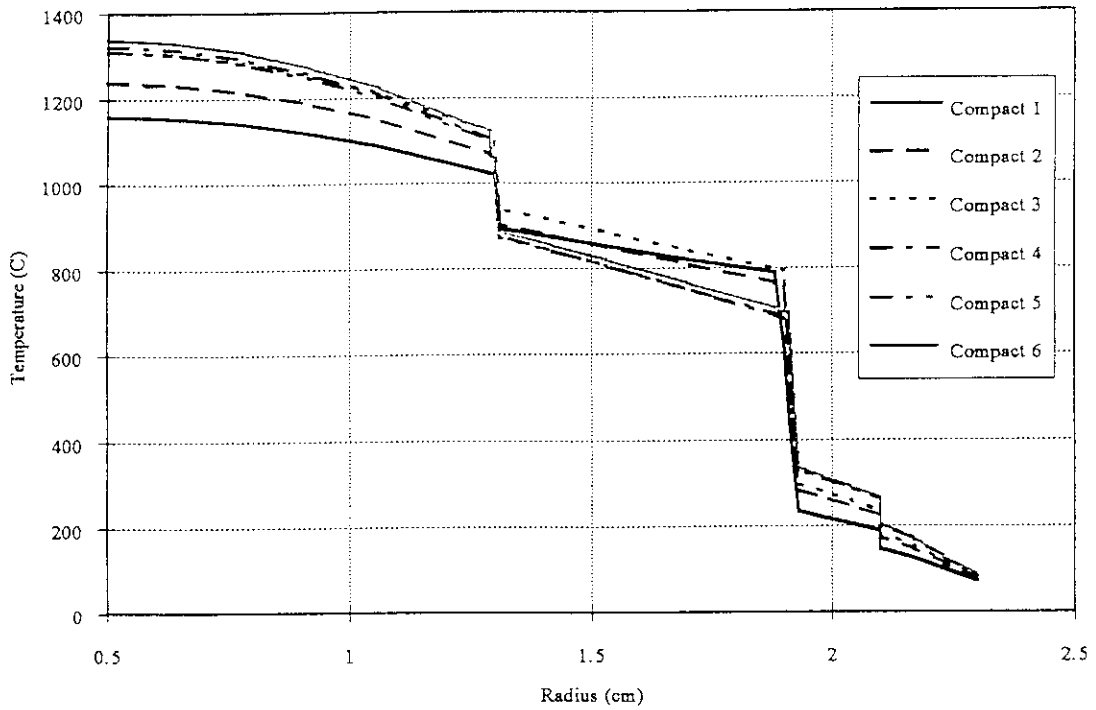


Fig. 4.8 Radial temperature distribution (end of cycle 2).

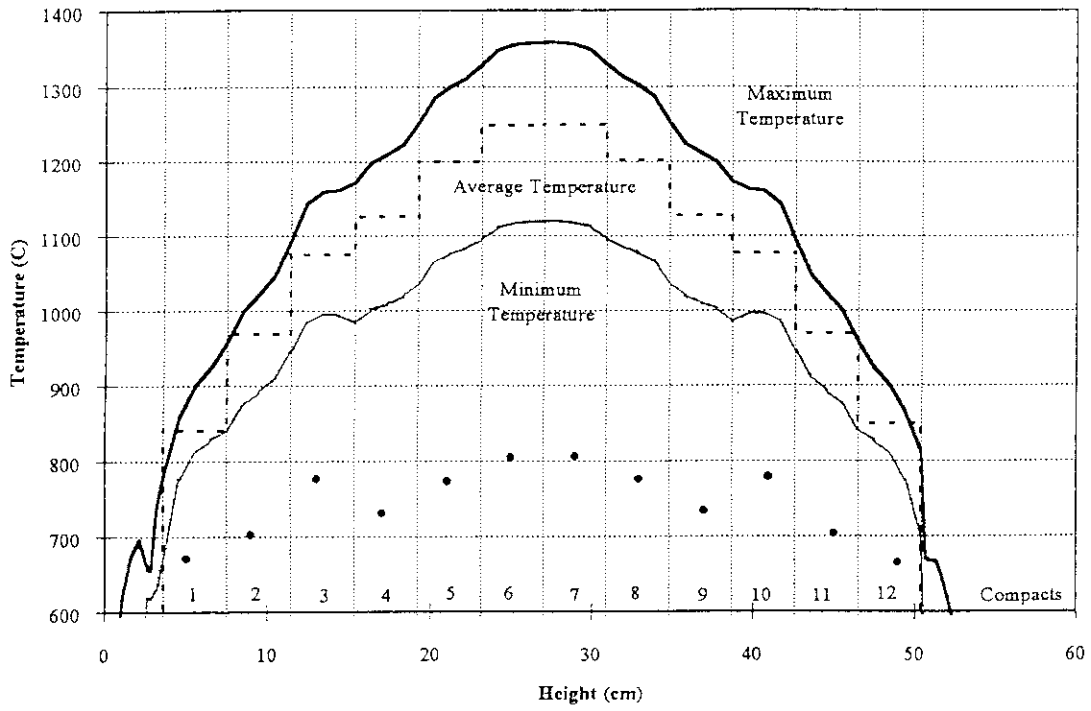


Fig. 4.9 Axial temperature distribution (beginning of cycle 3).

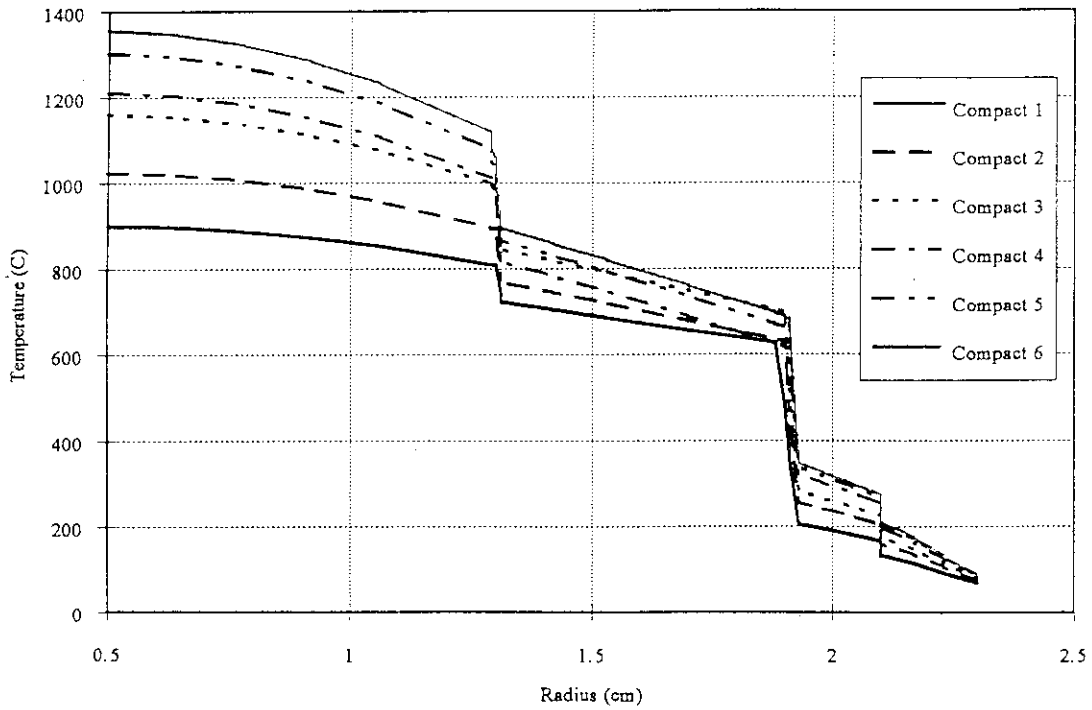


Fig. 4.10 Radial temperature distribution (beginning of cycle 3).

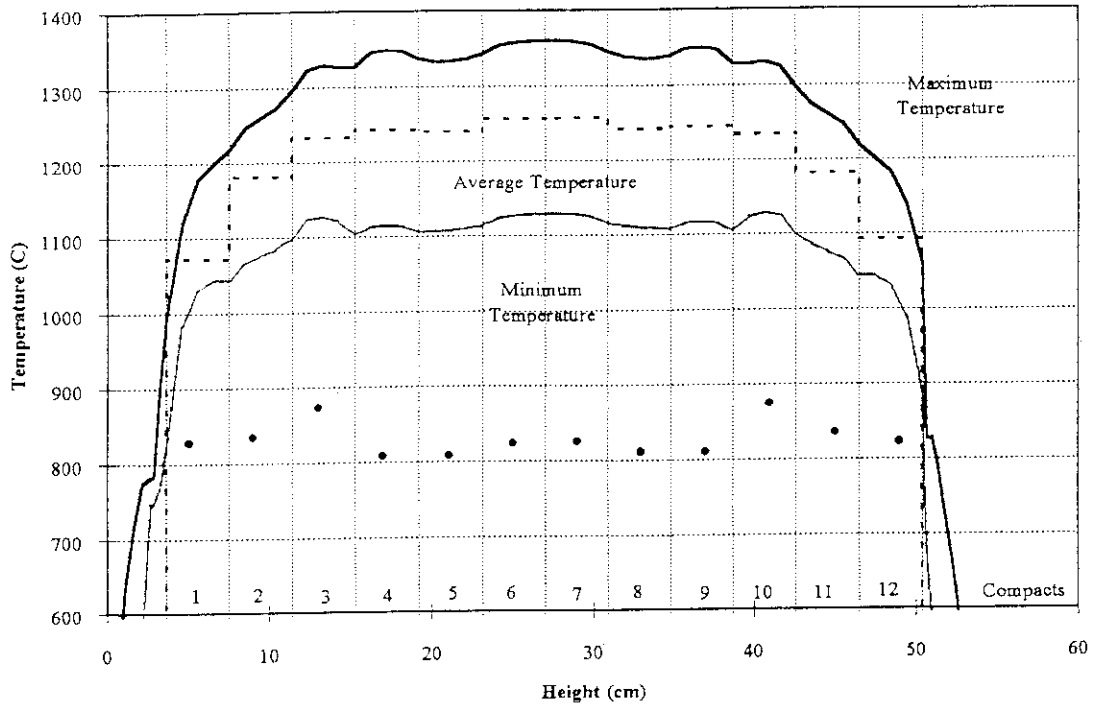


Fig. 4.11 Axial temperature distribution (end of cycle 3).

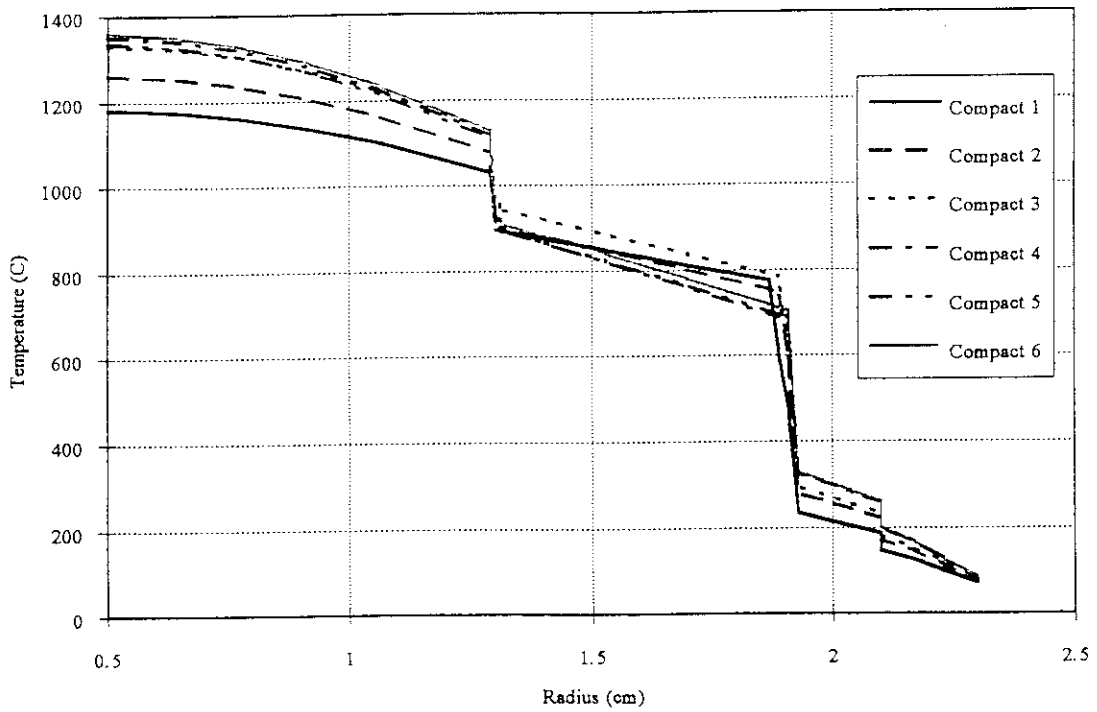


Fig. 4.12 Radial temperature distribution (end of cycle 3).

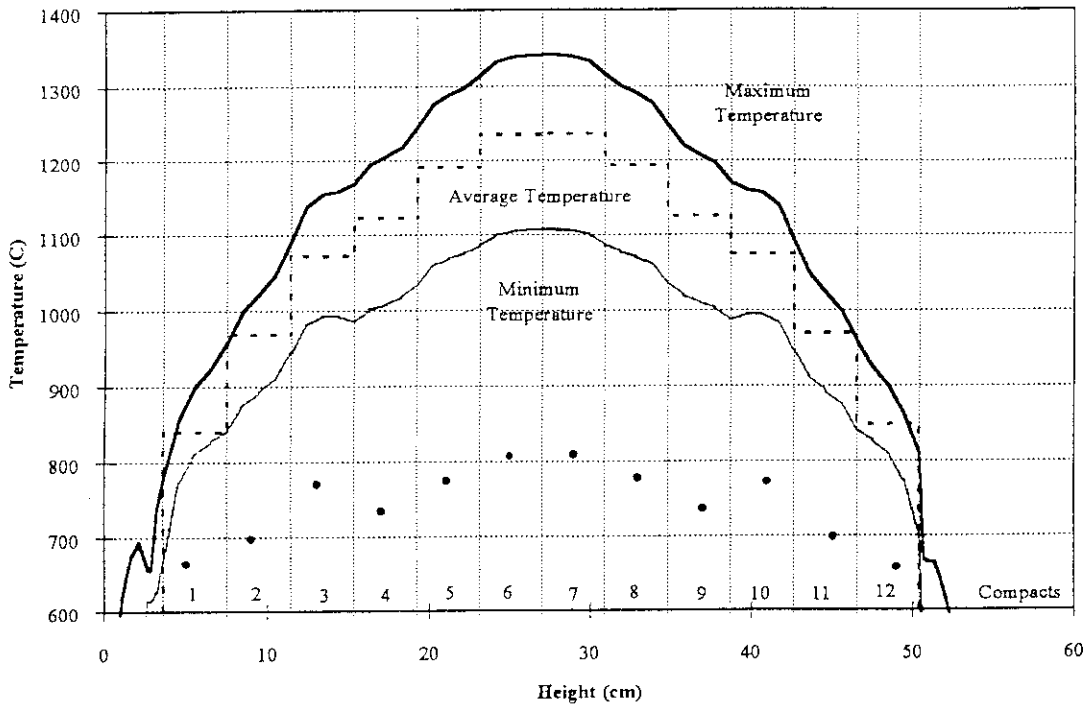


Fig. 4.13 Axial temperature distribution (beginning of cycle 4 : Reactor power = 78MWt).

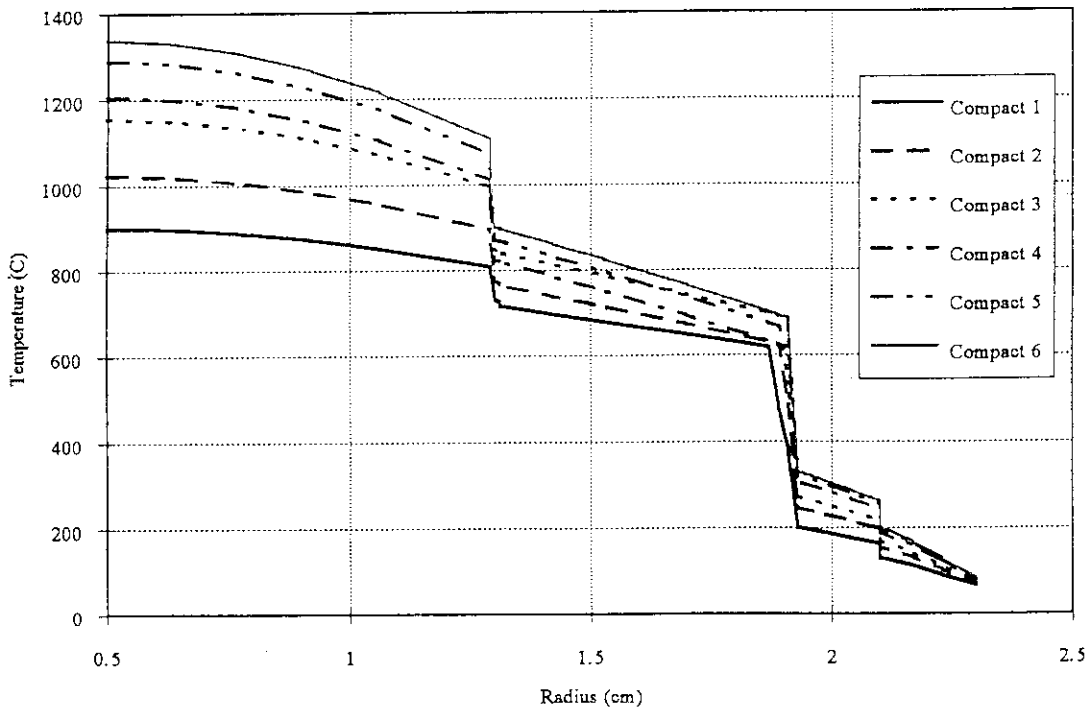


Fig. 4.14 Radial temperature distribution (beginning of cycle 4 : Reactor power = 78MWt).

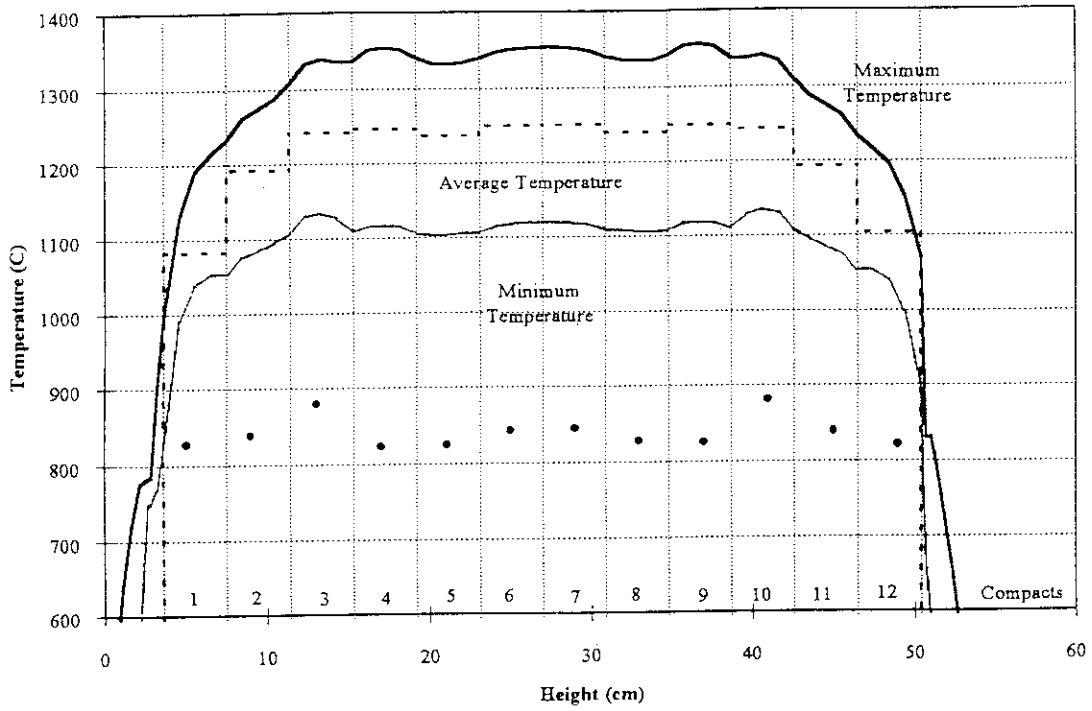


Fig. 4.15 Axial temperature distribution (end of cycle 4).

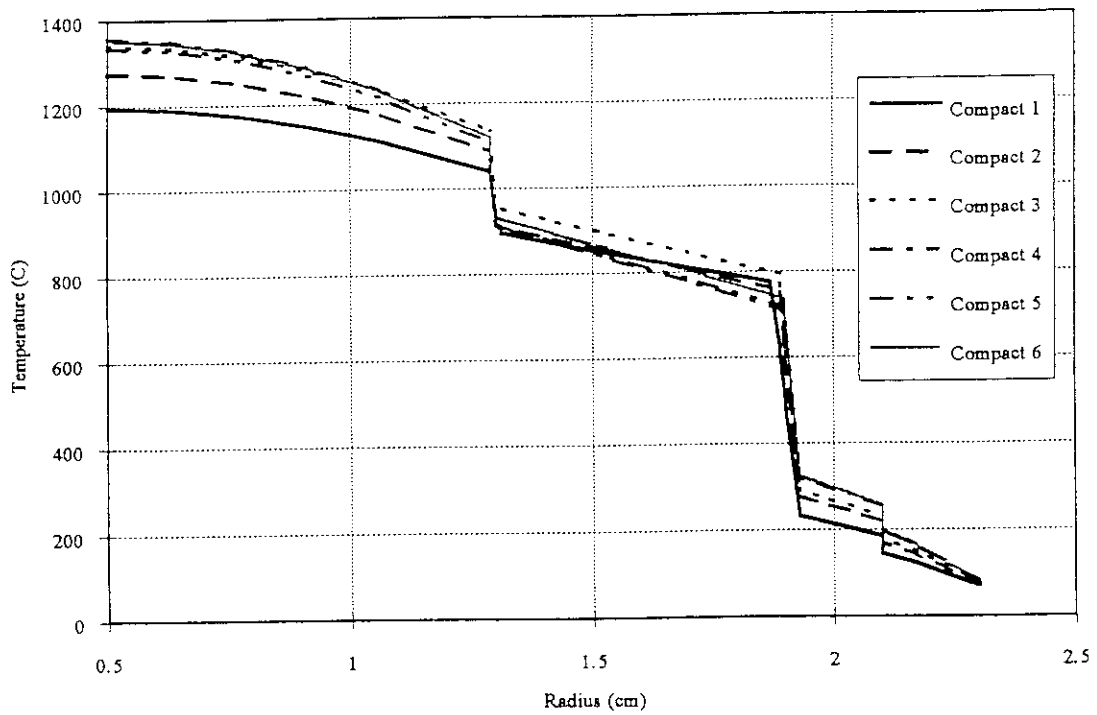


Fig. 4.16 Radial temperature distribution (end of cycle 4).

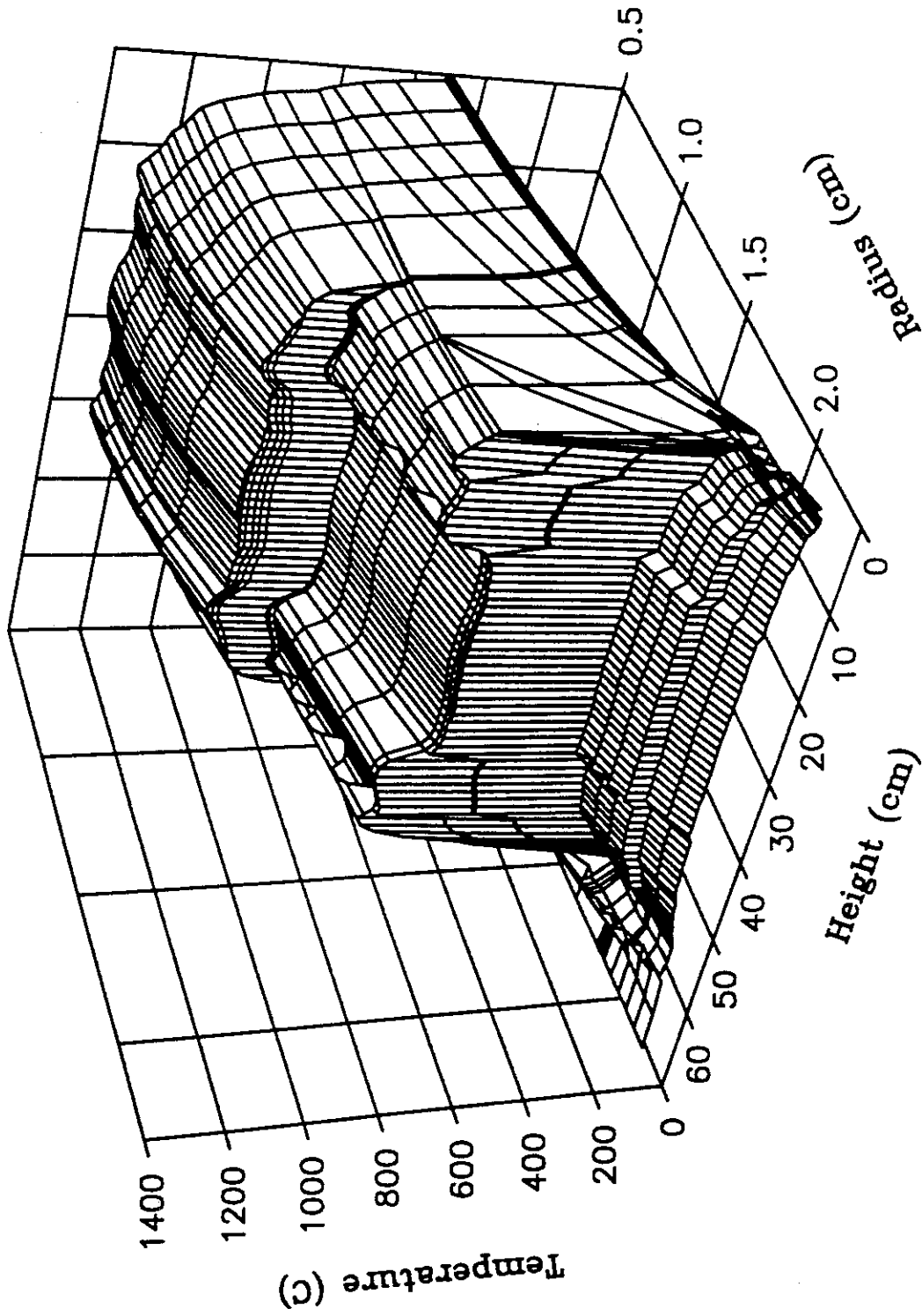


Fig. 4.17 Three - dimensional representation of temperature field in HRB - 22 capsule (end of cycle 1).

## 5. ま と め

原研の高燃焼度燃料の照射試験を行うHRB-22キャプセル照射試験のキャプセル設計、安全評価、照射試験計画を定めるために、照射試験に先立って照射中の燃料温度の解析を行った。

本解析結果によると、燃料温度はHFIRを定格全出力で運転した場合でも極く短期間を除き制限値内に収めることができることが分かった。

本解析結果に基づき、HFIRにて照射試験が行われた。照射中に特に問題は生じず、燃料最高温度が制限値を超える可能性があるとして予測された第4サイクル初期においても、黒鉛部の熱電対指示値から推定すると、予測したほど燃料温度は上昇せず、HFIRの出力を下げなくても対応が可能であった。この原因は、黒鉛材の照射による寸法収縮量が予想より小さかったのではないかと考えられているが、最終的には照射後にキャプセルを解体し、フルエンスモニタ、燃料コンパクト寸法等の測定を行い確認する予定である。さらに、燃料、核分裂生成物挙動の解析を行い報告する予定である。



## 謝辞

本検討は、筆頭著者が1993年2月から1994年に2月にORNLに留学中に実施した計算に基づいている。滞在中に、ORNLのDr.P.Rittenhouse, Dr.M.Kania, Dr.F.Montgomery, Dr.G.Bell, Dr.K.Thoms, Dr.O.Kimballには、多くの議論を行うとともに計算コードの使用法など種々の知見を御教示いただいた。また、燃料照射研究室の飛田勉氏、湊和生氏には燃料製造等に関し御教示いただいた。さらに、半田宗男燃料研究部長、飛岡利明高温工学試験研究炉開発部長、田中利幸同部調査役、塩沢周策同部H T T R原子炉開発室長には種々の御指導を頂いた。燃料研究部燃料照射研究室の林君夫氏には閲読の上有益なコメントを頂いた。以上の方々に深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) M.J.Kania and K.Fukuda, ORNL/TM-11346 (1989).
- (2) 沢 和弘, 「米国の高温ガス炉燃料照射試験の予備解析」(原研所内報)(1994).
- (3) K.Sawa, B.F.Myers and M.J.Kania, ORNL/TM-12732, To be published.
- (4) S.Saito, et.al, JAERI-1332 (1994).
- (5) E.J.Allen, ORNL/TM-52266 (1976).
- (6) J.T.Parks, "Transmittal of QA Package for the New HRB-22 Replacement Fuel Compacts", Private communication (1993).
- (7) R.L.Senn and W.R.Mixon, Nucl. Technol., 12, 235 (1971).
- (8) Graphite Design Data Manual, GA-906374, Issue A (1984).
- (9) 福田幸朔, 他, JAERI-M 89-007, (1989).
- (10) G.L.Bell, Private Communication.
- (11) Huntington Alloys Handbook.
- (12) K.W.Chids, ORNL/TM-12262 (1993).

## 謝辞

本検討は、筆頭著者が1993年2月から1994年に2月にORNLに留学中に実施した計算に基づいている。滞在中に、ORNLのDr.P.Rittenhouse, Dr.M.Kania, Dr.F.Montgomery, Dr.G.Bell, Dr.K.Thoms, Dr.O.Kimballには、多くの議論を行うとともに計算コードの使用法など種々の知見を御教示いただいた。また、燃料照射研究室の飛田勉氏、湊和生氏には燃料製造等に関し御教示いただいた。さらに、半田宗男燃料研究部長、飛岡利明高温工学試験研究炉開発部長、田中利幸同部調査役、塩沢周策同部HTTR原子炉開発室長には種々の御指導を頂いた。燃料研究部燃料照射研究室の林君夫氏には閲読の上有益なコメントを頂いた。以上の方々に深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) M.J.Kania and K.Fukuda, ORNL/TM-11346 (1989).
- (2) 沢 和弘, 「米国の高温ガス炉燃料照射試験の予備解析」(原研所内報)(1994).
- (3) K.Sawa, B.F.Myers and M.J.Kania, ORNL/TM-12732, To be published.
- (4) S.Saito, et.al, JAERI-1332 (1994).
- (5) E.J.Allen, ORNL/TM-52266 (1976).
- (6) J.T.Parks, "Transmittal of QA Package for the New HRB-22 Replacement Fuel Compacts", Private communication (1993).
- (7) R.L.Senn and W.R.Mixon, Nucl. Technol., 12, 235 (1971).
- (8) Graphite Design Data Manual, GA-906374, Issue A (1984).
- (9) 福田幸朔, 他, JAERI-M 89-007, (1989).
- (10) G.L.Bell, Private Communication.
- (11) Huntington Alloys Handbook.
- (12) K.W.Chids, ORNL/TM-12262 (1993).

付録-1 CACA-2コードの入力例

INPUT DATA SET FOR CACA-2 ANALYSIS

Run of CACA2 for HRB-22, 4 RB cycles, Individual compact loadings

2 1 1 6 7 6 6  
 HFIR PB-FACILITY, ORNL CROSS SECTIONS.  
 00208 2200. 243. 241. .00859 930.  
 432. 532. 5.21 37.1 0.0 24.3  
 52.6 44.0 8.97 180. 6.72 93.8  
 0.0 22. 221. 206. 342. 175.  
 35.5

HFIR RB-FACILITY, ORNL CROSS SECTIONS.  
 .006 1500. 151.0 144.0 .023 550.  
 281. 329. 2.77 32.2 150. 16.1  
 40.1 27.9 10.2 110. 5.908 65.6  
 13.0 8.3 130. 142. 287.0 109.  
 36.5

I-135	Xe-135m	Xe-135	I-133	Xe-133m	Xe-133		
2.931D-05	0.05494681		0.0	0.05002101	0.06280323	0.06914997	
0.0	0.06504610	0.06947724					
7.551D-04	0.00012933	0.0	0.00830833	0.00178358	0.00015624		
0.0	0.00737862	0.00159514					
2.106D-05	0.00004544	0.0	0.00436202	0.00078616	0.00011092		
0.0	0.00372093	0.00064680					
9.257E-06	0.03983277	0.0	0.06001006	0.06689589	0.06741997		
0.0	0.06974543	0.06728879					
3.663E-06	0.00002050	0.0	0.00043639	0.00001881	0.00001220		
0.0	0.00033912	0.00000615					
1.530E-06	0.00000721	0.0	0.00015490	0.00000665	0.00000417		
0.0	0.00009479	0.00000251					
22.0	5.0	22.0	5.0	22.0	5.0		
22.0							

1.11960E-05  
 2.63890E-04  
 1.13100E-05  
 2.66580E-04  
 1.12360E-05  
 2.64820E-04  
 1.15280E-05  
 2.71710E-04  
 1.14980E-05  
 2.71010E-04  
 1.14490E-05  
 2.69840E-04

17.730	3.900				
2 2 2 2	2 2 2				
.8500	0.0	.8500	0.0	.8500	0.0
.8500	0.0	.8500	0.0	.8500	0.0
9.13049d14	2.01658d13	-1.74940d13	5.39957d12	-7.73530d11	5.57093d10
-1.93210d09	2.58347d07				
1					
1					
	1.0				

```

      17.70      3.8980
2  2  2  2  2  2  2
      .8500      0.0      .8500      0.0      .8500      0.0
      .8500      0.0      .8500      0.0      .8500      0.0
1.32270d15 -6.05040d12  3.93244d12 -8.33860d11  6.54438d10 -1.23040d09
-3.47590d07  1.09850d06
1
2
      1.0
      17.70      3.9000
2  2  2  2  2  2  2
      .8500      0.0      .8500      0.0      .8500      0.0
      .8500      0.0      .8500      0.0      .8500      0.0
1.73911d15  2.03662d12 -2.19790d12  9.01068d11 -1.72210d11  1.56960d10
-6.26180d08  8.97961d06
1
3
      1.0
      17.70      3.9010
2  2  2  2  2  2  2
      .8500      0.0      .8500      0.0      .8500      0.0
      .8500      0.0      .8500      0.0      .8500      0.0
2.09581d15 -2.40620d12  4.06812d12 -1.62870d12  2.48078d11 -1.62602d10
4.86893d08 -5.52870d06
1
4
      1.0
      17.70      3.8990
2  2  2  2  2  2  2
      .8500      0.0      .8500      0.0      .8500      0.0
      .8500      0.0      .8500      0.0      .8500      0.0
2.38939d15 -4.14520d12  4.80375d12 -1.76470d12  2.75183d11 -1.99310d10
6.75507d08 -8.70290d06
1
5
      1.0
      17.70      3.8980
2  2  2  2  2  2  2
      .8500      0.0      .8500      0.0      .8500      0.0
      .8500      0.0      .8500      0.0      .8500      0.0
2.55995d15  0.00000000  0.00000000  0.00000000  0.00000000  0.00000000
0.00000000  0.00000000
1
6
      1.0

```

付録-2 HEATING 7. 2コードの入力例

HEATING 7.2 INPUT DATA SET FOR BEGINNING OF CYCLE 1

End of Cycle 2, 80%He 20% Ne Final Design 2/18/94  
 12000 3 0 1  
 0 0 1 1 0

regions

\* \*\*\*\*fuel compacts

1	1	0.501	1.29709	0.0	0.0	46.5	50.4
2	1	0	0	0	0	0	0
2	2	0.501	1.29555	0.0	0.0	42.6	46.5
2	2	0	0	0	0	0	0
3	3	0.501	1.29411	0.0	0.0	38.7	42.6
2	3	0	0	0	0	0	0
4	4	0.501	1.29285	0.0	0.0	34.8	38.7
2	4	0	0	0	0	0	0
5	5	0.501	1.29193	0.0	0.0	30.9	34.8
2	5	0	0	0	0	0	0
6	6	0.501	1.29131	0.0	0.0	27.0	30.9
2	6	0	0	0	0	0	0
7	6	0.501	1.29131	0.0	0.0	23.1	27.0
2	7	0	0	0	0	0	0
8	5	0.501	1.29193	0.0	0.0	19.2	23.1
2	8	0	0	0	0	0	0
9	4	0.501	1.29285	0.0	0.0	15.3	19.2
2	9	0	0	0	0	0	0
10	3	0.501	1.29411	0.0	0.0	11.4	15.3
2	10	0	0	0	0	0	0
11	2	0.501	1.29555	0.0	0.0	7.5	11.4
2	11	0	0	0	0	0	0
12	1	0.501	1.29709	0.0	0.0	3.6	7.5
2	12	0	0	0	0	0	0

\* \*\*\*\*\*

\* \*\*\*\*sweep gas in central space

13	14	0.0001	0.50100	0.0	0.0	3.6	51.0013
2	0	0	0	0	0	5	5

\* \*\*\*\*carbon insulator at bottom

14	16	0.0001	1.92673	0.0	0.0	0.5774	2.67544
1	15	0	0	0	0	0	0

\* \*\*\*\*inconel primary at bottom of capsule

15	13	0.0001	2.10092	0.0	0.0	0.0059	0.5774
1	14	0	0	0	0	0	0

\* \*\*\*\*He gas between containments at bottom of capsule

16	15	0.0001	2.10092	0.0	0.0	-0.3243	0.0059
3	0	0	0	0	0	4	4
17	15	2.10092	2.10265	0.0	0.0	-0.3243	0.0059
3	0	0	0	0	0	4	4

\* \*\*\*\*inconel secondary at bottom of capsule

18	13	0.0001	2.10092	0.0	0.0	-0.8958	-0.3243
----	----	--------	---------	-----	-----	---------	---------

	3	14	0	2	0	0	2	0
	19	13	2.10092	2.2961	0.0	0.0	-0.8958	-0.3243
	3	14	0	2	0	0	2	0
*	*****							
*	****Sweep gas between fuel and SP2020							
*	****Top							
	20	14	0.50100	1.30895	0.0	0.0	50.4	51.0013
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-1							
	21	14	1.29709	1.30895	0.0	0.0	46.5	50.4
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-2							
	22	14	1.29555	1.30832	0.0	0.0	42.6	46.5
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-3							
	23	14	1.29411	1.30786	0.0	0.0	38.7	42.6
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-4							
	24	14	1.29285	1.30698	0.0	0.0	34.8	38.7
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-5							
	25	14	1.29193	1.30652	0.0	0.0	30.9	34.8
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-6							
	26	14	1.29131	1.30625	0.0	0.0	27	30.9
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-7							
	27	14	1.29131	1.30625	0.0	0.0	23.1	27
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-8							
	28	14	1.29193	1.30652	0.0	0.0	19.2	23.1
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-9							
	29	14	1.29285	1.30698	0.0	0.0	15.3	19.2
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-10							
	30	14	1.29411	1.30786	0.0	0.0	11.4	15.3
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-11							
	31	14	1.29555	1.30832	0.0	0.0	7.5	11.4
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-12							
	32	14	1.29709	1.30895	0.0	0.0	3.6	7.5
	2	0	5	5	0	0	0	0
*	*****							
*	****SP2020 Region-1							
	33	7	1.30895	1.87522	0.0	0.0	46.5	50.4
	3	13	0	0	0	0	0	0
*	****SP2020 Region-2							
	34	8	1.30832	1.89592	0.0	0.0	42.6	46.5

	3	13	0	0	0	0	0	0
*	****SP2020 Region-3							
	35	9	1.30786	1.89524	0.0	0.0	38.7	42.6
	3	13	0	0	0	0	0	0
*	****SP2020 Region-4							
	36	10	1.30698	1.91047	0.0	0.0	34.8	38.7
	3	13	0	0	0	0	0	0
*	****SP2020 Region-5							
	37	11	1.30652	1.9098	0.0	0.0	30.9	34.8
	3	13	0	0	0	0	0	0
*	****SP2020 Region-6							
	38	12	1.30625	1.9094	0.0	0.0	27	30.9
	3	13	0	0	0	0	0	0
*	****SP2020 Region-7							
	39	12	1.30625	1.9094	0.0	0.0	23.1	27
	3	13	0	0	0	0	0	0
*	****SP2020 Region-8							
	40	11	1.30652	1.9098	0.0	0.0	19.2	23.1
	3	13	0	0	0	0	0	0
*	****SP2020 Region-9							
	41	10	1.30698	1.91047	0.0	0.0	15.3	19.2
	3	13	0	0	0	0	0	0
*	****SP2020 Region-10							
	42	9	1.30786	1.89524	0.0	0.0	11.4	15.3
	3	13	0	0	0	0	0	0
*	****SP2020 Region-11							
	43	8	1.30832	1.89592	0.0	0.0	7.5	11.4
	3	13	0	0	0	0	0	0
*	****SP2020 Region-12							
	44	7	1.30895	1.87522	0.0	0.0	3.6	7.5
	3	13	0	0	0	0	0	0
*	*****							
*	****SP2020_inconel sweep gas gap							
*	****Region-1							
	45	14	1.87522	1.92673	0.0	0.0	46.5	50.4
	3	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-2							
	46	14	1.89592	1.92673	0.0	0.0	42.6	46.5
	3	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-3							
	47	14	1.89524	1.92673	0.0	0.0	38.7	42.6
	3	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-4							
	48	14	1.91047	1.92673	0.0	0.0	34.8	38.7
	3	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-5							
	49	14	1.9098	1.92673	0.0	0.0	30.9	34.8
	3	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-6							
	50	14	1.9094	1.92673	0.0	0.0	27	30.9

	3	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-7							
	51	14	1.9094	1.92673	0.0	0.0	23.1	27
	3	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-8							
	52	14	1.9098	1.92673	0.0	0.0	19.2	23.1
	3	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-9							
	53	14	1.91047	1.92673	0.0	0.0	15.3	19.2
	3	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-10							
	54	14	1.89524	1.92673	0.0	0.0	11.4	15.3
	3	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-11							
	55	14	1.89592	1.92673	0.0	0.0	7.5	11.4
	3	0	5	5	0	0	0	0
*	****Region-12							
	56	14	1.87522	1.92673	0.0	0.0	3.6	7.5
	3	0	5	5	0	0	0	0
*	*****							
*	****Inconel primary wall							
	57	13	1.92673	2.10092	0.0	0.0	0.5774	57.2713
	3	14		0	0	0	0	0
*	****He gas between containments							
	58	15	2.10092	2.10265	0.0	0.0	0.0059	67.1925
	3	0	4	4	0	0	0	0
*	****Inconel secondary wall							
	59	13	2.10265	2.2961	0.0	0.0	-0.3243	67.1925
	3	14	0	2	0	0	0	2
*	****inconel top cap							
	60	13	0.0001	2.10092	0.0	0.0	57.2713	58.2238
	3	14	0	0	0	0	0	0
*	****Carbon insulator at top							
	61	16	0.0001	0.501	0.0	0.0	51.0013	51.635
	2	15	0	0	0	0	0	0
	62	16	0.501	1.29709	0.0	0.0	51.0013	51.635
	2	15	0	0	0	0	0	0
	63	16	1.29709	1.30895	0.0	0.0	51.0013	51.635
	2	15	0	0	0	0	0	0
*	****SP2020 at top							
	64	7	1.30895	1.87522	0.0	0.0	50.4	52.27
	1	13	0	0	0	0	0	0
*	****sweep gas at top							
	65	14	1.87522	1.92673	0.0	0.0	50.4	53.54
	1	0	3	3	0	0	0	0
	66	14	0.0001	1.92673	0.0	0.0	53.54	57.2713
	1	0	0	0	0	0	3	3
*	****Carbon insulator at top							



	67	16	0.0001	1.87522	0.0	0.0	52.27	53.54	
	1	15	0	0	0	0	0	0	
	68	16	0.0001	1.30895	0.0	0.0	51.635	52.27	
	1	15	0	0	0	0	0	0	
*	****Graphite ring								
	69	7	1.05698	1.30895	0.0	0.0	2.83546	3.6	
	1	13	0	0	0	0	0	0	
*	****graphite support disk								
	70	7	0.0001	1.52673	0.0	0.0	2.67544	2.83546	
	1	13	0	0	0	0	0	0	
*	**** Carbond between disk and inconel								
	71	16	1.52673	1.92673	0.0	0.0	2.67544	2.83546	
	1	15	0	0	0	0	0	0	
*	****Carbond between fuel and disk								
	72	16	0.0001	1.05698	0.0	0.0	2.83546	3.6	
	1	15	0	0	0	0	0	0	
*	**** SP2020 graphite								
	73	7	1.30895	1.87522	0.0	0.0	2.83546	3.6	
	1	13	0	0	0	0	0	0	
*	****Helium at top								
	74	15	0.0001	2.10092	0.0	0.0	58.2238	67.1925	
	3	0	0	0	0	0	4	4	
*	****Sweep gas between SP2020 and Inconel Region-72								
	75	14	1.87522	1.92673	0.0	0.0	2.83546	3.6	
	3	0	5	5	0	0	0	0	
*	*****								
	materials								
	1	fuelZ1	0.13457	1.93	0	0	0	0	0
			3						
	2	fuelZ2	0.13457	1.93	0	0	0	0	0
			3						
	3	fuelZ3	0.13457	1.93	0	0	0	0	0
			3						
	4	fuelZ4	0.13457	1.93	0	0	0	0	0
			3						
	5	fuelZ5	0.13457	1.93	0	0	0	0	0
			3						
	6	fuelZ6	0.13457	1.93	0	0	0	0	0
			3						
	7	Z1	1	1.78	0	-8	0	0	0
	8	Z2	1	1.78	0	-8	0	0	0
	9	Z3	1	1.78	0	-8	0	0	0
	10	Z4	1	1.78	0	-8	0	0	0
	11	Z5	1	1.78	0	-8	0	0	0
	12	Z6	1	1.78	0	-8	0	0	0
	13	inc-718	1	8.1933	0	-9	0	0	0
	14	he-ne	1	0	0	-12	0	0	0
	15	helium	1	0	0	-10	0	0	0
	16	Carbon	0.0015	0.15	0	0	0	0	0

\* \*\*\*\*\*

initial temperatures

1	200	0	0	0
2	1200	0	0	0
3	800	0	0	0

\* \*\*\*\*\*

heat generations

1	82.3	0	0	0	0	0
2	98.2	0	0	0	0	0
3	109.0	0	0	0	0	0
4	126.3	0	0	0	0	0
5	120.9	0	0	0	0	0
6	124.8	0	0	0	0	0
7	124.8	0	0	0	0	0
8	120.9	0	0	0	0	0
9	126.3	0	0	0	0	0
10	109.0	0	0	0	0	0
11	98.2	0	0	0	0	0
12	82.3	0	0	0	0	0
13	0.85	0	0	0	0	-3
14	0.85	0	0	0	0	-6
15	1.02	0	0	0	0	0
16	15	0	0	0	0	0

\* \*\*\*\*\*

boundary conditions

1	2	48.89				
2	1	48.89				
2.4						
3	3	0	0	0	0	0
0	2.00E-12					
4	3	0	0	0	0	0
0	1.40E-12					
5	3	0	0	0	0	0
0	5.10E-12					

\* \*\*\*\*\*

xgrid

	0.0001	0.50100	1.05698	1.29131	1.29193	1.29285
@	1.29411	1.29555	1.29709	1.30625	1.30652	1.30698
@	1.30786	1.30832	1.30895	1.52673	1.87522	1.89524
@	1.89592	1.9094	1.9098	1.91047	1.92673	2.10092
@	2.10265	2.29610				
	2	4	1	1	1	1
@	1	1	1	1	1	1
@	1	1	2	2	1	1
@	1	1	1	1	3	1
@	3					

\* \*\*\*\*\*

zgrid

-0.8958	-0.3243	0.0059	0.5774	2.67544	2.83546
---------	---------	--------	--------	---------	---------

@	3.6	7.5	11.4	15.3	19.2	23.1		
@	27	30.9	34.8	38.7	42.6	46.5		
@	50.4	51.0013	51.635	52.27	53.54	57.2713		
@	58.2238	67.1925						
	4	2	4	4	2	2		
@	4	4	4	4	4	4		
@	4	4	4	4	4	4		
@	2	2	2	2	2	2		
@	2	2						

\* \*\*\*\*\*

tabular functions

	1	15						
	-8.56	6	-3.48	8.8	1.6	12	6.68	15.1
@	11.76	17.6	16.84	19.9	21.92	22.3	27	23.6
@	32.08	22.9	37.16	21.1	42.24	17.6	47.32	15.1
@	52.4	12	57.48	8.8	62.56	6		
	2	15						
	-8.56	7	-3.48	9.5	1.6	13	6.68	16
@	11.76	20.4	16.84	22.3	21.92	24.6	27	25.9
@	32.08	25.7	37.16	23.4	42.24	20.4	47.32	16
@	52.4	13	57.48	9.5	62.56	7		
	3	15						
	-8.56	7	-3.48	10.6	1.6	14.1	6.68	18.6
@	11.76	22.2	16.84	24.6	21.92	25.6	27	26.6
@	32.08	26.4	37.16	24.6	42.24	22.2	47.32	18.6
@	52.4	14.1	57.48	10.6	62.56	7		
	4	15						
	-8.56	22.9	-3.48	37.7	1.6	55.7	6.68	72.1
@	11.76	87.7	16.84	106.5	21.92	122.9	27	135.2
@	32.08	132.7	37.16	116.3	42.24	98.3	47.32	81.9
@	52.4	65.5	57.48	47.5	62.56	32.8		
	5	15						
	-8.56	35.2	-3.48	51.6	1.6	68	6.68	84.4
@	11.76	95.8	16.84	117.2	21.92	136	27	144.2
@	32.08	142.6	37.16	131.1	42.24	106.5	47.32	84.4
@	52.4	68	57.48	51.6	62.56	35.2		
	6	15						
	-8.56	36.9	-3.48	53.3	1.6	77	6.68	102.4
@	11.76	114.7	16.84	131	21.92	141.6	27	147.5
@	32.08	145.8	37.16	139.3	42.24	123	47.32	102.4
@	52.4	77	57.48	53.3	62.56	36.9		

\* \*\*\*\* Thermal cond. of compact

	7	14						
	100	0.3614	200	0.3353	300	0.3112	400	0.2891
@	500	0.269	600	0.251	700	0.235	800	0.221
@	900	0.209	1000	0.1991	1100	0.1912	1200	0.1853
@	1300	0.1815	1400	0.1797				

\* \*\*\*\* Thermal cond. of SP2020

	8	8						
	500	0.1151	600	0.1385	700	0.1601		

@	800	0.1961	900	0.2170	1000	0.2532		
@	1100	0.2784	1200	0.3117				
*	**** Inconel 718 thermal conductivity							
	9	10						
	21.11	0.111	93.33	0.124	204.44	0.141	315.56	0.16
@	426.67	0.177	537.78	0.195	648.89	0.212	760	0.231
@	871.11	0.249	1093.33	0.28269				
*	****100% He and 0% Ne							
	10	18		1.0	0.0			
	27	0.0015	297	0.00236	597	0.00326	697	0.00354
@	777	0.00376	877	0.00403	977	0.00429	1027	0.00443
@	1077	0.00455	1127	0.00469	1177	0.00482	1227	0.00494
@	1277	0.00507	1327	0.00521	1377	0.00533	1427	0.00545
@	1477	0.00557	1577	0.00583				
*	****90% He and 10% Ne							
	11	18		0.9	0.1			
	27	0.001399	297	0.002198	597	0.00303	697	0.003289
@	777	0.003492	877	0.003742	977	0.003982	1027	0.004111
@	1077	0.004222	1127	0.004351	1177	0.004471	1227	0.004582
@	1277	0.004702	1327	0.004831	1377	0.004942	1427	0.005052
@	1477	0.005163	1577	0.005402				
*	****80% He and 20% Ne							
	12	18		0.8	0.2			
	27	0.001298	297	0.002036	597	0.0028	697	0.003038
@	777	0.003224	877	0.003454	977	0.003674	1027	0.003792
@	1077	0.003894	1127	0.004012	1177	0.004122	1227	0.004225
@	1277	0.004334	1327	0.004452	1377	0.004554	1427	0.004654
@	1477	0.004756	1577	0.004974				
*	****70% He and 30% Ne							
	13	18		0.7	0.3			
	27	0.001197	297	0.001874	597	0.00257	697	0.002787
@	777	0.002956	877	0.003166	977	0.003366	1027	0.003473
@	1077	0.003566	1127	0.003673	1177	0.003773	1227	0.003867
@	1277	0.003966	1327	0.004073	1377	0.004166	1427	0.004256
@	1477	0.004349	1577	0.004546				
*	****60% He and 40% Ne							
	14	18		0.6	0.4			
	27	0.001096	297	0.001712	597	0.00234	697	0.002536
@	777	0.002688	877	0.002878	977	0.003058	1027	0.003154
@	1077	0.003238	1127	0.003334	1177	0.003424	1227	0.003509
@	1277	0.003598	1327	0.003694	1377	0.003778	1427	0.003858
@	1477	0.003942	1577	0.004118				
*	****50% He and 50% Ne							
	15	18		0.5	0.5			
	27	0.000995	297	0.00155	597	0.00211	697	0.002285
@	777	0.00242	877	0.00259	977	0.00275	1027	0.002835
@	1077	0.00291	1127	0.002995	1177	0.003075	1227	0.003152
@	1277	0.00323	1327	0.003315	1377	0.00339	1427	0.00346
@	1477	0.003535	1577	0.00369				
*	****40% He and 60% Ne							
				0.4	0.6			

	16	18					
	27	0.000894	297	0.001388	597	0.00188	697 0.002034
@	777	0.002152	877	0.002302	977	0.002442	1027 0.002516
@	1077	0.002582	1127	0.002656	1177	0.002726	1227 0.002794
@	1277	0.002862	1327	0.002936	1377	0.003002	1427 0.003062
@	1477	0.003128	1577	0.003262			
*	****30% He and 70% Ne		0.3	0.7			
	17	18					
	27	0.000793	297	0.001226	597	0.00165	697 0.001783
@	777	0.001884	877	0.002014	977	0.002134	1027 0.002197
@	1077	0.002254	1127	0.002317	1177	0.002377	1227 0.002436
@	1277	0.002494	1327	0.002557	1377	0.002614	1427 0.002664
@	1477	0.002721	1577	0.002834			
*	****20% He and 80% Ne		0.2	0.8			
	18	18					
	27	0.000692	297	0.001064	597	0.00142	697 0.001532
@	777	0.001616	877	0.001726	977	0.001826	1027 0.001878
@	1077	0.001926	1127	0.001978	1177	0.002028	1227 0.002078
@	1277	0.002126	1327	0.002178	1377	0.002226	1427 0.002266
@	1477	0.002314	1577	0.002406			
*	****10% He and 90% Ne		0.1	0.9			
	19	18					
	27	0.000591	297	0.000902	597	0.00119	697 0.001281
@	777	0.001348	877	0.001438	977	0.001518	1027 0.001559
@	1077	0.001598	1127	0.001639	1177	0.001679	1227 0.001721
@	1277	0.001758	1327	0.001799	1377	0.001838	1427 0.001868
@	1477	0.001907	1577	0.001978			
*	****0% He and 100% Ne		0.0	1.0			
	20	18					
	27	0.00049	297	0.00074	597	0.00096	697 0.00103
@	777	0.00108	877	0.00115	977	0.00121	1027 0.00124
@	1077	0.00127	1127	0.0013	1177	0.00133	1227 0.001363
@	1277	0.00139	1327	0.00142	1377	0.00145	1427 0.00147
@	1477	0.0015	1577	0.00155			
steady state parameters							
	1	12000	1.00E-08	1.9	15		
%							