

JAERI - M
84-029

ROSA-III 模擬炉心加熱電気出力曲線の改良

1984年2月

入子真規*・与能本泰介・鈴木光弘

久木田 豊・田坂完二

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, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 磯高野高速印刷

ROSA-III模擬炉心加熱電気出力曲線の改良

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

入子 真規* 与能本泰介・鈴木 光弘

久木田 豊・田坂 完二

(1984年1月27日受理)

ROSA-III装置による沸騰水型原子炉(BWR)の冷却材喪失事故(LOCA)に関する実験のための新しい炉心電気出力曲線を求めた。この出力曲線は、ROSA-III電気ヒーターロードにおいて核燃料の被覆管表面熱流束を正しく模擬できるように定めたものである。一方、従来ROSA-III実験で用いられていた電気出力曲線は、被覆管表面熱流束が過大に(保守的に)なるように設定されていた。電気出力曲線を決定するため、燃料棒内の非定常熱伝導を考慮した被覆管表面の熱伝達に関する計算を行った。本計算では、被覆管表面では核沸騰が維持されると仮定した。これらの計算により、それぞれ平均出力ロードおよび最高出力ロードでの熱流束が正しく模擬されるような2つの電気出力曲線を得た。

* 出向職員 コンピューター・サービス(株) (CSK)

Updated Core Power Curves for ROSA-III Facility

Masanori IRIKO*, Taisuke YONOMOTO, Mitsuhiro SUZUKI,
Yutaka KUKITA and Kanji TASAKA

Department of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 27, 1984)

New core electric power vs. time curves are developed for experiments on boiling-water-reactor (BWR) loss-of-coolant accidents (LOCAs) with the ROSA-III facility. These power curves are determined so that correct rod surface heat flux is obtained on the ROSA-III electric heater rods which represent the BWR nuclear fuel rods. The power curve formerly used in the ROSA-III experiments was determined conservatively so that the rod surface heat flux was higher than that on the BWR fuel rods.

The new power curves are determined based on simplified core heat transfer calculations which account for the non-steady heat conduction within the fuel/heater rods. It is assumed that nucleate boiling is maintained on the rod surface throughout the blowdown. Two power curves are presented with which correct heat flux is obtained on the ROSA-III average-power and peak-power rods, respectively.

Keywords: BWR, LOCA, ROSA-III, Core Power, Heat Transfer, Heat Conduction, Reactor Safety

* On leave from Computer Service Co. (CSK)

目 次

1. 緒 言	1
2. 最適電気出力曲線の決定	1
2.1 解析条件	2
2.2 解析モデル	3
2.3 最適電気出力曲線の決定	4
2.4 解析結果の検討	4
2.4.1 単一の電気出力曲線をすべてのヒーターロードに適用することの妥当性	5
2.4.2 被覆管表面熱流束の模擬に及ぼす破断面積の影響	5
2.4.3 ROSA-III電源容量の制約の影響	6
2.4.4 従来の電気出力曲線との比較	6
3. 核燃料の被覆管表面熱流束に対する各種パラメータの影響	27
3.1 感度解析パラメータ	27
3.1.1 バーン・アップによる物性値の変化	27
3.1.2 ギャップ幅の変化	27
3.2 感度解析結果	28
3.2.1 バーン・アップによる UO_2 の熱伝導率の減少の影響	28
3.2.2 ギャップ幅の変化の影響	28
3.3 解析結果の検討	28
4. 結 論	34
参 考 文 献	35
付 録	36
付 録A ROSA-III電気ヒーターロード基本ケース入力データ	37
付 録B BWR/ σ 核燃料基本ケース入力データ	44

CONTENTS

1. INTRODUCTION	1
2. CALCULATION OF ROSA-III CORE POWER CURVE	1
2.1 Assumptions	2
2.2 Analytical Method	3
2.3 Results	4
2.4 Discussion	4
2.4.1 Justification of Applying a Single Power Curve to All ROSA-III Heater Rods	5
2.4.2 Effect of Break Size on Simulation of Rod Surface Heat Flux	5
2.4.3 Effect of Limited Power Supply Capacity on Simulation of Rod Surface Heat Flux	6
2.4.4 Comparison of Rod Surface Heat Flux Obtained with Present and Formerly-Used ROSA-III Power Curves	6
3. SENSITIVITY STUDY ON HEAT FLUX OF NUCLEAR FUEL ROD	27
3.1 Parameters and Assumptions	27
3.1.1 Burn-Up Induced Rod Material Property Changes	27
3.1.2 Gap Deformation	27
3.2 Results	28
3.2.1 Effect of Burn-Up Induced Decrease of UO_2 Thermal Conductivity	28
3.2.2 Effect of Gap Deformation	28
3.3 Discussion	28
4. CONCLUSIONS	34
REFERENCES	35
APPENDIX	36
Appendix A RELAP5 Input Data for ROSA-III Electric Heater Rod Base Case	37
Appendix B RELAP5 Input Data for Nuclear Fuel Rod Base Case	44

LIST OF TABLES

Table 2.1	Conditions for Analysis of Heat Flux from Nuclear Fuel Rod
Table 2.2	Average-Power Rod-Based ROSA-III Power Curve
Table 2.3	Peak-Power Rod-Based ROSA-III Power Curve
Table 3.1	Conditions for Sensitivity Analyses of Heat Flux from Nuclear Fuel Rod

LIST OF FIGURES

- Fig.2. 1 Sources of Heat Transferred from Fuel/Heater Rod Surface During Blowdown
- Fig.2. 2 ROSA-III Electric Heater Rod
- Fig.2. 3 Thermal Conductivity of BN and UO_2 vs. Temperature
- Fig.2. 4 ANS Decay Power Curve
- Fig.2. 5 Volumetric Heat Capacity of UO_2 and Zircaloy-2 vs. Temperature
- Fig.2. 6 Volumetric Heat Capacity of He gas vs. Temperature
- Fig.2. 7 Thermal Conductivity of He gas vs. Temperature
- Fig.2. 8 Thermal Conductivity of Zircaloy-2 vs. Temperature
- Fig.2. 9 Assumed System Pressure Behavior (Taken from a Typical 20% Recirculation Line Break Test)
- Fig.2.10 RELAP5 Normalization of Rod Heat Transfer Model
- Fig.2.11 Updated ROSA-III Power Curves vs. ANS Decay Power Curve
- Fig.2.12 Comparison of Temperature Profiles in BWR Nuclear Fuel Rod and ROSA-III Heater Rod, Average-Power Rod
- Fig.2.13 Comparison of Temperature Profiles in BWR Nuclear Fuel Rod and ROSA-III Heater Rod, Peak-Power Rod
- Fig.2.14 Heater Rod Heat Flux, Average-Power Rod Loaded with Average-Power Rod-Based Power Curve
- Fig.2.15 Heater Rod Heat Flux, Peak-Power Rod Loaded with Peak-Power Rod-Based Power Curve
- Fig.2.16(a) Radial Power Distribution of Core in ROSA-III Test Facility
- Fig.2.16(b) Axial Power Distribution of Heater Rod in ROSA-III Test Facility
- Fig.2.17 ROSA-III Heater Rod Heat Flux, Peak-Power Rod Loaded with Average-Power Rod-Based Power Curve
- Fig.2.18 ROSA-III Heater Rod Heat Flux, Average-Power Rod Loaded with Peak-Power Rod-Based Power Curve
- Fig.2.19 Assumed Alternate System Pressure Behavior (Taken from a Typical 5% Recirculation Line Break Test)
- Fig.2.20 ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained for Alternate System Pressure Behavior, Average-Power Rod Loaded with Average-Power Rod-Based Power Curve

- Fig.2.21 ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained for Alternate System Pressure Behavior, Peak-Power Rod Loaded with Peak-Power Rod-Based Power Curve
- Fig.2.22 ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained for 44% Linear Heat Rate of BWR, Average-Power Rod Loaded with Average-Power Rod-Based Power Curve
- Fig.2.23 ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained for 44% Linear Heat Rate of BWR, Peak-Power Rod Loaded with Average-Power Rod-Based Power Curve
- Fig.2.24 ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained for 44% Linear Heat Rate of BWR, Average-Power Rod Loaded with Peak-Power Rod-Based Power Curve
- Fig.2.25 ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained for 44% Linear Heat Rate of BWR, Peak-Power Rod Loaded with Peak-Power Rod-Based Power Curve
- Fig.2.26 Comparison of Original and Updated Power Curves
- Fig.2.27 Comparison of Heater Rod Heat Fluxes Obtained with Original and Updated Power Curves, Peak-Power Rod
- Fig.3. 1 Change of Thermal Conductivity of UO_2 caused by Burn-up
- Fig.3. 2 Effect of Thermal Conductivity of UO_2 on Nuclear Fuel Rod Heat Flux, Average-Power Rod
- Fig.3. 3 Effect of Gap Width on Nuclear Fuel Rod Heat Flux, Average-Power Rod
- Fig.3. 4 Comparison of ROSA-III Heater Rod Heat Flux with Sensitivity Analysis Results for Nuclear Fuel Rod, Average-Power Rod
- Fig.3. 5 Comparison of ROSA-III Heater Rod Heat Flux with Sensitivity Analysis Results for Nuclear Fuel Rod, Peak-Power Rod
- Fig.3. 6 Comparison of ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained with Original Power Curve with Sensitivity Analysis Results for Nuclear Fuel Rod, Average-Power Rod
- Fig.3. 7 Comparison of ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained with Original Power Curve with Sensitivity Analysis Results for Nuclear Fuel Rod, Peak-Power Rod

1. 緒 言

日本原子力研究所では、沸騰水型原子炉（BWR）の冷却材喪失事故（LOCA）における基本的熱水力挙動を把握し、非常用炉心冷却系（ECCS）の安全余裕を評価すること、および原子炉の安全解析コードの予測性能を評価するためのデータを得ることを目的として、ROSA-Ⅲ装置によるLOCA総合模擬実験を行っている。

ROSA-Ⅲ装置⁽¹⁾は、BWR/6-251-848⁽²⁾（以下、実炉と呼ぶ）を体積比1/424で模擬した実験装置であり、炉心には核燃料のかわりにこれを模擬した電気ヒーターロードが装荷されている。実験で実炉のLOCA時の基本的熱水力挙動を正しく模擬するためには、被覆管表面での熱流束の時間変化を正しく模擬することが望ましい。一方、ROSA-Ⅲ装置で従来使用されていた電気出力の時間変化は、ROSA-Ⅲ電気ヒーターロードの熱容量を無視し、かつ実炉の燃料棒の物性値についても、熱流束を過大評価するよう見積るなど、保守的な設定の下に計算されたものであり、この電気出力変化を用いた場合、被覆管表面熱流束はやや過大であったと考えられる。

本報告の目的は、実炉の場合と同一の被覆管表面熱流束の時間変化を得るために電気ヒーターロードに与えるべき電気出力曲線を解析により求めることである。これとあわせて、ROSA-Ⅲ装置で用いられていた従来の電気出力曲線を与えた場合の被覆管表面熱流束についても検討する。また、炉心内の高さ方向・半径方向の出力密度分布、実験条件による冷却材温度挙動の相違が電気ヒーターロードによる熱流束の模擬に及ぼす影響について感度解析により検討を行う。

2. 最適電気出力曲線の決定

本報告の主要な目的は、ROSA-Ⅲ装置において実炉のLOCA時の被覆管表面熱流束を模擬するための電気ヒーターロードの熱出力変化（以下、最適電気出力曲線と呼ぶ）を求めることである。

LOCA時、あるいはLOCAを模擬した実験時には、被覆管表面熱流束は、燃料棒構成物質の熱容量および熱伝導率の影響を受ける。これは、燃料棒の発熱量がスクラム後の時間経過と共に急激に減少し、また燃料棒周辺の流体の温度・物性値や流動状況も時間と共に変化し、この結果、燃料棒内の非定常熱伝導が被覆管表面熱流束に支配的な影響を及ぼすためである。

被覆管表面の熱流束は、Fig. 2.1に示すように発熱量（熱出力） \dot{Q}_1 と燃料棒蓄積熱の時間変化割合 $-\dot{Q}_2$ との和として与えられる。ここで、蓄積熱は次式により表わされる。

$$Q_2 = \int \rho C_P T dV \quad (1)$$

ここで、

ρ : 密度

C_P : 定圧比熱

T : 温度

V : 体積

1. 緒 言

日本原子力研究所では、沸騰水型原子炉（BWR）の冷却材喪失事故（LOCA）における基本的熱水力挙動を把握し、非常用炉心冷却系（ECCS）の安全余裕を評価すること、および原子炉の安全解析コードの予測性能を評価するためのデータを得ることを目的として、ROSA-Ⅲ装置によるLOCA総合模擬実験を行っている。

ROSA-Ⅲ装置⁽¹⁾は、BWR/6-251-848⁽²⁾（以下、実炉と呼ぶ）を体積比1/424で模擬した実験装置であり、炉心には核燃料のかわりにこれを模擬した電気ヒーターロッドが装荷されている。実験で実炉のLOCA時の基本的熱水力挙動を正しく模擬するためには、被覆管表面での熱流束の時間変化を正しく模擬することが望ましい。一方、ROSA-Ⅲ装置で従来使用されていた電気出力の時間変化は、ROSA-Ⅲ電気ヒーターロッドの熱容量を無視し、かつ実炉の燃料棒の物性値についても、熱流束を過大評価するよう見積るなど、保守的な設定の下に計算されたものであり、この電気出力変化を用いた場合、被覆管表面熱流束はやや過大であったと考えられる。

本報告の目的は、実炉の場合と同一の被覆管表面熱流束の時間変化を得るために電気ヒーターロッドに与えるべき電気出力曲線を解析により求めることである。これとあわせて、ROSA-Ⅲ装置で用いられていた従来の電気出力曲線を与えた場合の被覆管表面熱流束についても検討する。また、炉心内の高さ方向・半径方向の出力密度分布、実験条件による冷却材温度挙動の相違が電気ヒーターロッドによる熱流束の模擬に及ぼす影響について感度解析により検討を行う。

2. 最適電気出力曲線の決定

本報告の主要な目的は、ROSA-Ⅲ装置において実炉のLOCA時の被覆管表面熱流束を模擬するための電気ヒーターロッドの熱出力変化（以下、最適電気出力曲線と呼ぶ）を求めることである。

LOCA時、あるいはLOCAを模擬した実験時には、被覆管表面熱流束は、燃料棒構成物質の熱容量および熱伝導率の影響を受ける。これは、燃料棒の発熱量がスクラム後の時間経過と共に急激に減少し、また燃料棒周辺の流体の温度・物性値や流動状況も時間と共に変化し、この結果、燃料棒内の非定常熱伝導が被覆管表面熱流束に支配的な影響を及ぼすためである。

被覆管表面の熱流束は、Fig. 2.1に示すように発熱量（熱出力） \dot{Q}_1 と燃料棒蓄積熱の時間変化割合 $-\dot{Q}_2$ との和として与えられる。ここで、蓄積熱は次式により表わされる。

$$Q_2 = \int \rho C_p T dV \quad \text{.....(1)}$$

ここで、

ρ : 密度

C_p : 定圧比熱

T : 温度

V : 体積

また、燃料棒内の半径方向の温度分布は次式により与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\lambda}{C_p \rho} \left\{ \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right\} - \frac{\dot{q}_1}{2\pi r C_p \rho} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- r : 燃料棒中心からの距離
- T : 温度
- λ : 熱伝導率
- ρ : 密度
- C_p : 定圧比熱
- \dot{q}_1 : 単位体積あたりの発熱量
- t : 時間

ただし、燃料棒軸方向の熱伝導を無視している。

ROS A-III装置で実炉の被覆管表面熱流束を模擬するためには、

$$(\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2)_{ROS A-III} = (\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2)_{BWR} \dots\dots\dots (3)$$

でなければならない。ここで、Fig.2.2 に示すようにROS A-III装置の電気ヒーターロッドは核燃料とは異なった内部構造を有し、異なった物質により構成されている。両者の主要な相違点は以下の3点である。

- ① ROS A-III電気ヒーターロッドの主要構成物質は、BNである。BNの熱伝導率はFig.2.3に示すように400～1,400Kで核燃料の主要構成物質であるUO₂の熱伝導率のおよそ3～7倍である。
- ② ROS A-III電気ヒーターロッドは、核燃料のギャップに相当する部分を持たない。
- ③ ROS A-III電気ヒーターロッドでは発熱はニクロムヒーター部分で集中的に生ずるのに対して、核燃料では燃料棒断面積の大半を占めるUO₂全体で発熱が生ずる。

このような燃料棒の構造・構成物質・発熱形式の相違のため、核燃料とROS A-III電気ヒーターロッドとでは、蓄積熱の放出割合 $-\dot{Q}_2$ に相違が生ずる。したがって、ROS A-III装置で実炉の被覆管表面熱流束を模擬するためには、(3)式がみたされるように発熱量 \dot{Q}_1 に適切な補正を加えなければならない。このような補正を行った発熱量が、ここで求める最適出力曲線である。

2.1 解析条件

最適電気出力曲線を求めるためには、まず実炉の被覆管表面での熱流束の時間変化を知る必要がある。一方、実炉の被覆管表面熱流束は、以下のパラメータの影響を受ける。

- (a) 燃料棒の発熱量 (核分裂による発熱および崩壊熱)
- (b) 燃料棒のまわりの流体条件
- (c) 燃料棒の物性値および形状の経時変化
 - (c-1) バーン・アップによる物性値の変化
 - (c-2) ギャップ幅の変化

本解析では、安全解析上の標準的な想定条件⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾およびR O S A - III実験の典型的な実験条件に従って Table. 2.1 に示す条件を想定した。また、解析に使用した燃料棒の発熱量および物性値を Fig.2.4 ~ 2.8 に示す。以下に説明を加える。

まず、(a)の発熱量は、初期線出力密度とスクラム後の減衰の積の形で表わすことができる。ここでは、初期線出力密度としては、定格出力時の炉心最高出力部分 (total peaking factor = 2.1) および平均出力部分 (total peaking factor = 1.0) の各々 (Table 2.1) について解析した。スクラム後の出力変化としては、米国原子力学会 (ANS) の定めた標準曲線ANS 5.1を用いた。また、炉心スクラムは0秒で起ると仮定した。なお、R O S A - III装置では電源容量の制約から、電気ヒーターロッドの初期線出力密度は実炉相当値の約44%に制限されているが、ここではこのような制約がないものと仮定して解析した。

(b)の流体条件は事故状況に依存する。ここでは、被覆管表面で常に核沸騰が維持され、流体側の熱抵抗が燃料棒内の熱抵抗に比べて無視できる条件を想定した。このような条件を実現するため、流量としては実炉の定格運転時の炉心中心付近での燃料棒1本あたりの流量である0.265 kg/s を、クオリティとしては0.05を設定した。

核沸騰時には、被覆管表面温度は流体の飽和温度にほぼ等しく、このため飽和温度の時間変化が被覆管表面熱流束に強い影響を与える。一方、飽和温度の時間変化 (すなわち、系圧力の時間変化) は、破断位置と破断面積に依存する。ここでは系圧力変化 (すなわち、流体の飽和温度変化) として、R O S A - III装置における標準的な実験である高圧炉心スプレー系 (High Pressure Core Spray System, HPCS) の故障を仮定した再循環ポンプ入口側配管の200%両端破断実験で得られた系圧力変化⁽⁹⁾を想定した。この系圧力変化をFig. 2.9に示す。

(c)の物性値および燃料形状の経時変化は、運転履歴に依存する。ここでは、新燃料の物性値および形状について解析を行った。

なお、上記の(a)および(b)のパラメータは、R O S A - III電気ヒーターロッドからの熱流束に対しても影響を与える。これらのパラメータについては、2・4で感度解析を行い、被覆管表面熱流束の模擬に与える影響を検討する。また、(c)は核燃料のみの問題であり、次章3で核燃料の被覆管表面熱流束に関する感度解析を行う。

2.2 解析モデル

解析には、PELAP 5 / MOD 1 / cycle 0 0 1コード⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を用い、実炉およびR O S A - III装置の炉心の一部をFig.2.10に示すノーディングで模擬した。ノード1が炉心の一部を模擬しており、本ノード内に2本の核燃料あるいは電気ヒーターロッドを設定し、それぞれ平均出力ロッドおよび最高出力ロッドを表わした。

核沸騰が維持されると仮定したことによって、炉心内の流速や高さ方向のボイド率分布を現実的に模擬することが不要となり、炉心モデルを単純化することが可能となった。すなわち、核燃料あるいは電気ヒーターロッドの軸方向出力分布は一様と仮定し、また、炉心入口流量、入口クオリティは一定とした。炉心高さは、実炉の炉心高さの1/8とし、流路面積は実炉の燃料棒2本分の流路面積を与え、ノード1内での流路面積の変化はないものとした。

なお、核燃料および電気ヒーターロッドに関するRE LAP 5の入力データを付録A, Bに示す。

2.3 最適電気出力曲線の決定

上記の解析条件・解析モデルにより、まずLOCA時における核燃料被覆管表面での熱流束の時間変化を求めた。次に、電気ヒーターロッドでこれと同一の熱流束時間変化を得られるように電気出力曲線を試行錯誤的に決定した。

この結果、以下の2つの最適電気出力曲線を得た。

- (1) 平均出力ロッド基準の電気出力曲線、すなわち、実炉とROSA-Ⅲ装置の平均出力ロッドにおける被覆管表面での熱流束の時間変化が一致するように決定した電気出力曲線。
- (2) 最高出力ロッド基準の電気出力曲線、すなわち、実炉とROSA-Ⅲ装置の最高出力ロッドにおける被覆管表面での熱流束の時間変化が一致するように決定した電気出力曲線。

これらをTables 2.2, 2.3に示す。また、両者を正規化したものをFig. 2.11に示す。Fig. 2.11に示すように、炉心スクラム後約200秒間にわたり、得られた2つの電気出力曲線はいずれも核燃料の正規化熱出力変化(ANS曲線)を上回っている。また、スクラム後約35秒間、最高出力ロッド基準の電気出力曲線の方が平均出力ロッド基準の変化を上回っている。しかし、35秒以降では2つの最適電気出力曲線は一致する。最適出力曲線のANS曲線に対する補正量は最大約700%であり、炉心スクラム後35秒以降は約30%以下である。

これらの出力曲線の間相違は、燃料棒蓄積熱の時間変化割合 \dot{Q}_2 が被覆管表面熱流束に占める割合が、燃料棒の構成および出力密度によって異なるためである。すなわち、以下に示すように、構成物質の熱伝導率が小さいほど、また出力密度が高いほど、スクラム直後数秒間の被覆管表面熱流束に占める蓄積熱放出量 \dot{Q}_2 の割合は大きい。

Figs. 2.12, 2.13は、実炉とROSA-Ⅲ装置の燃料棒内の温度分布を比較したものである。Fig. 2.12は平均出力ロッド、Fig. 2.13は最高出力ロッドに関する比較を示し、ROSA-Ⅲ電気ヒーターロッドには各々のロッドに関する最適出力曲線が与えられている。いずれの場合もスクラム時の燃料棒内温度分布は、核燃料とROSA-Ⅲヒーターロッドとの間で大きく異なっているが、これは構成物質の熱伝導率の相違と発熱量の空間分布の相違によるものである。炉心スクラム30秒以降は、核燃料、電気ヒーターロッドのいずれにおいても温度分布は一様に近づく。

Figs. 2.14, 2.15は、実炉とROSA-Ⅲ装置の被覆管熱流束および蓄積熱放出量を比較したものである。Fig. 2.14は平均出力ロッド、Fig. 2.15は最高ロッドに関する比較を示し、ROSA-Ⅲ電気ヒーターロッドには各々のロッドに関する最適出力曲線が与えられている。これらの図で明らかなように、スクラム直後核燃料における蓄積熱放出量が被覆管表面熱流束の最大約90%に達するのに対し、電気ヒーターロッドでは最大約15%にすぎない。一方、これらの図に示すように、このような蓄積熱の放出量の相違にもかかわらず、最適出力曲線を用いることによりROSA-Ⅲ電気ヒーターロッドでの熱流束は、核燃料の被覆管表面熱流束と良好に一致している。

2.4 解析結果の検討

ここでは、得られた電気出力曲線を実際のROSA-Ⅲ実験に適用する場合に問題となる点について検討し、また従来ROSA-Ⅲ実験で使われてきた電気出力曲線と比較・検討する。

2.4.1 単一の電気出力曲線をすべてのヒーターロッドに適用することの妥当性

R O S A - III 装置の炉心は、Fig.2.16(a),(b)に示すように高出力チャンネルAと平均出力チャンネルB, C, Dの計4チャンネルより構成され、各チャンネルはローカル・ピーキング・ファクターの異なる3つのグループのロッドにより構成されている。また、各々のロッドについて軸方向に線出力密度の分布が存在する。2.3で述べたように、最適(正規化)電気出力曲線は出力密度に依存する。したがって、R O S A - III 装置で実炉の被覆管表面熱流束を正確に模擬するためには、各ロッドの線出力密度に応じた電気出力曲線を与えることが理想的である。しかしながら、R O S A - III 装置では炉心全体を単一の電気出力曲線でコントロールするように設計されており、各々のロッドで被覆管表面熱流束を厳密に模擬することはできない。2.3では、平均出力ロッドおよび最高出力ロッドでの熱流束を各々模擬するため2種類の最適出力曲線を求めたが、これらの電気出力曲線をR O S A - III 実験に適用した場合の被覆管表面熱流束の模擬に及ぼす影響を検討した。結果をFigs.2.17, 2.18に示す。Fig.2.17は平均出力ロッド基準の正規化出力曲線を用いた場合の最高出力ロッドの熱流束を核燃料の熱流束と比較したものである。また、Fig.2.18は最高出力ロッド基準の正規化出力曲線を用いた場合の平均出力ロッドの熱流束を核燃料の熱流束と比較したものである。いずれの場合も、炉心スクラム後約35秒間、模擬すべき熱流束の時間変化からのずれが見られる。すなわち、平均出力ロッド基準の正規化出力曲線を与えた場合、ロッドの出力密度が平均出力密度を上回る場合は過小な熱流束が得られ、下回る場合には過大な熱流束が得られる。この場合、最高出力ロッドにおける熱流束の誤差は最大約20%である。また、最高出力ロッド基準の正規化出力曲線を与えた場合、最高出力ロッド以外では熱流束が過大となり、平均出力ロッドでは最大約20%過大な熱流束が得られる。したがって、この2つの最適出力曲線のいずれかを実験に使用した場合、炉心スクラム後約35秒以降ではすべての電気ヒーターロッドにおいて核燃料の熱流束が良好に模擬されるということが出来る。すなわち、炉心スクラム後35秒間の平均出力ロッドでの被覆管表面熱流束の模擬が重要であるような実験では、平均出力ロッド基準の電気出力曲線を、また同様に炉心スクラム後35秒間の最高出力ロッドでの被覆管表面熱流束の模擬が重要であるような実験では、最高出力ロッド基準の電気出力曲線を使用すべきであるが、炉心スクラム後35秒間の被覆管表面熱流束の模擬が重要でない実験では、この2つの最適出力曲線のどちらを用いても良く、その場合にどちらの出力曲線を用いても炉心スクラム後35秒以降の被覆管表面熱流束の模擬に差はない。

2.4.2 被覆管表面熱流束の模擬に及ぼす破断面積の影響

2.3で求めた最適出力曲線は大破断LOCA時の冷却材の飽和温度変化を基礎にしているため、大破断時の被覆管表面熱流束は正しく模擬できている。しかし、この最適出力曲線を小破断LOCA実験に使用した場合、実炉の小破断LOCA時の熱流束を正しく模擬できているかどうかについては不明である。そこで、最適出力曲線の小破断LOCA実験への適用性を検討するため、小破断LOCA時の流体条件下での被覆管表面熱流束を核燃料のそれと比較した。ここで小破断LOCA時の流体条件としては、大破断の場合と同様に核沸騰が維持される条件を想定し、Fig.2.19に示す小破断LOCAの典型的な圧力変化であるHPCSの故障を仮定した再循環ポンプ入口側配管の5%スプリット破断実験より得られた系圧力変化を仮定した。結果はFigs.2.20, 2.21に示す通りであり、どちらの最適出力変化を与えた場合でも、電気ヒーターロッドからの熱流束は核燃料のそれと良く一致した。すなわち、ここで求められた最適出力曲線は小破断LOCA実験にも十分適用できるものである。

2.4.3 ROSA-III電源容量の制約の影響

ROSA-III装置では2.2で述べたように利用できる電源容量の制約から最高炉心出力が実炉の定格出力の44%に制限されている。このため、電源容量に制約がないと仮定して求めた最適出力曲線をそのまま適用することはできない。そこで、実際の実験に適用する場合には従来の電気出力曲線と同様に、BWRの炉心出力が44%に達するまで炉心出力を一定に保ち、その後ここで求めた最適出力曲線に沿って電気出力を低下させることにする。この場合に、ROSA-III装置での定常状態の線出力密度は実炉の44%となるため、100%出力のときとは初期蓄積熱量が異なり、したがって炉心スクラム後の初期蓄積熱の放出量も異なるために被覆管表面熱流束の模擬に誤差を生ずる。そこで、このような電気容量の制約が熱流束の模擬に与える影響を調べた。その結果を核燃料の被覆管表面熱流束と比較し、Figs. 2.22~2.25に示す。Figs. 2.22, 2.23は平均出力ロッド基準の出力曲線を与えた場合の平均出力ロッドおよび最高出力ロッドでの被覆管表面熱流束の時間変化を示しており、Figs. 2.24, 2.25はそれぞれ最高出力ロッド基準の出力曲線を与えた場合のそれを示している。ここで、平均出力ロッド基準の出力曲線の場合には破断後7秒間、最高出力ロッド基準の出力曲線の場合には破断後8秒間出力を一定に保持している。Figs. 2.22, 2.25からわかるように、どちらの出力曲線を与えた場合とも熱流束を合わせた出力ロッドでは出力一定期間の熱流束は核燃料のそれより小さいが、それ以降の熱流束は良く一致している。このように、初期出力密度が異なるにもかかわらず出力低下開始後の熱流束が良好に一致するのは、電気ヒーターロッドでの熱流束に占める蓄積熱の放出量の割合が小さいためである。また、それ以外のロッドの熱流束も100%出力を与えた場合と同様、約35秒以降では核燃料の熱流束の時間変化とよく一致する。

2.4.4 従来の電気出力曲線との比較

今回求めた最適出力曲線と従来の電気出力曲線との比較をFig. 2.26に示す。あわせてANS曲線⁽⁷⁾も示す。電気ヒーターロッドの初期蓄積熱は核燃料のそれに比べて著しく小さいため、初期蓄積熱の影響の大きい初期30秒間では、最適電気出力曲線、従来の電気出力曲線ともANS曲線より大きい値をとる。従来の電気出力曲線は最適電気出力曲線よりさらに大きい。最適電気出力曲線は、炉心スクラム後200秒以降、従来の電気出力曲線は260秒以降ANS曲線に合わせてあるため、260秒以降では一致している。

また、平均出力ロッド基準の出力曲線、最高出力ロッド基準の出力曲線および従来の電気出力曲線をそれぞれ使用した場合の電気ヒーターロッド表面熱流束の時間変化をFig. 2.27に比較し示す。平均出力ロッド、最高出力ロッドとも熱流束の時間変化は、最適電気出力曲線を与えた場合の方が、従来の電気出力曲線を与えた場合より小さく、特に、炉心スクラム後約40秒では、最適電気出力曲線を与えた場合の熱流束は、従来の電気出力曲線を与えた場合のその50%程度である。しかし、約300秒以降では、熱流束の時間変化は一致している。

Table 2.1 解 析 条 件

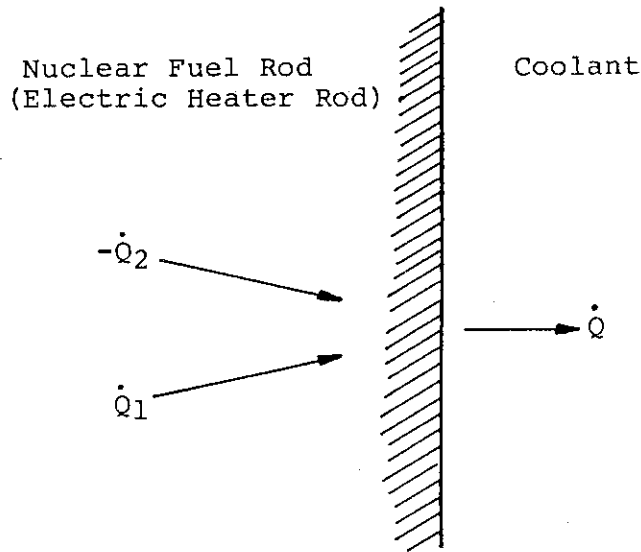
発 熱 量	平均出力 ロッド	19.22 kW/m × A N S 曲線 (Fig. 2. 4)
	最高出力 ロッド	40.36 kW/m × A N S 曲線 (")
体 積 熱 容 量	U O ₂	燃 焼 開 始 時 の 値 (Fig. 2. 5)
	He	" (Fig. 2. 6)
	Zircaloy - 2	" (Fig. 2. 5)
熱 伝 導 率	U O ₂	" (Fig. 2. 3)
	He	" (Fig. 2. 7)
	Zircaloy - 2	" (Fig. 2. 8)
ギャップ幅		0.1143 mm

Table 2.2 Average-Power Rod-Based ROSA-III Power Curve

NO	TIME S	NORMALIZED POWER (P/R)	NO	TIME S	NORMALIZED POWER (P/R)
1	0.0	1.0000	36	20.0	0.1104
2	0.5	0.9267	37	21.0	0.1016
3	1.0	0.8344	38	22.0	0.0929
4	1.5	0.7694	39	23.0	0.0857
5	2.0	0.7044	40	24.0	0.0784
6	2.5	0.6718	41	25.0	0.0731
7	3.0	0.6392	42	26.0	0.0677
8	3.5	0.6017	43	27.0	0.0638
9	4.0	0.5642	44	28.0	0.0599
10	4.5	0.5374	45	29.0	0.0572
11	5.0	0.5106	46	30.0	0.0545
12	5.5	0.4874	47	32.0	0.0535
13	6.0	0.4642	48	34.0	0.0526
14	6.5	0.4428	49	36.0	0.0513
15	7.0	0.4214	50	38.0	0.0498
16	7.5	0.4035	51	40.0	0.0482
17	8.0	0.3856	52	42.0	0.0473
18	8.5	0.3624	53	44.0	0.0465
19	9.0	0.3392	54	46.0	0.0457
20	9.5	0.3214	55	48.0	0.0449
21	10.0	0.3035	56	50.0	0.0440
22	10.5	0.2813	57	55.0	0.0419
23	11.0	0.2590	58	60.0	0.0398
24	11.5	0.2368	59	65.0	0.0376
25	12.0	0.2145	60	70.0	0.0355
26	12.5	0.2055	61	80.0	0.0338
27	13.0	0.1965	62	90.0	0.0321
28	13.5	0.1875	63	100.0	0.0304
29	14.0	0.1785	64	200.0	0.0290
30	14.5	0.1689	65	300.0	0.0273
31	15.0	0.1592	66	400.0	0.0255
32	16.0	0.1400	67	500.0	0.0245
33	17.0	0.1320	68	1000.0	0.0208
34	18.0	0.1240	69	2000.0	0.0170
35	19.0	0.1172	70	3000.0	0.0152

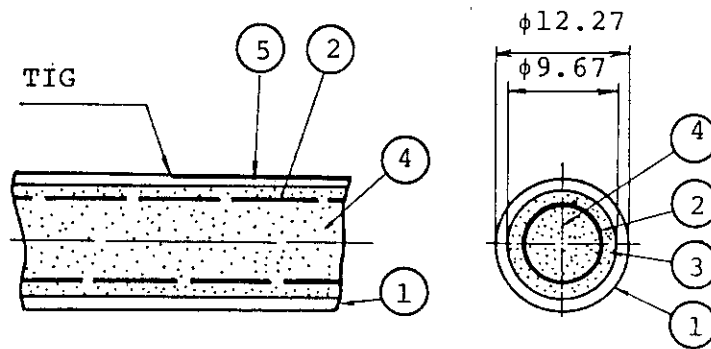
Table 2.3 Peak-Power Rod-Based ROSA-III Power Curve

NO	TIME S	NORMALIZED POWER (P/R)	NO	TIME S	NORMALIZED POWER (P/R)
1	0.0	1.0000	36	20.0	0.1304
2	0.5	0.9267	37	21.0	0.1152
3	1.0	0.8344	38	22.0	0.1000
4	1.5	0.7694	39	23.0	0.0928
5	2.0	0.7044	40	24.0	0.0857
6	2.5	0.6736	41	25.0	0.0803
7	3.0	0.6427	42	26.0	0.0750
8	3.5	0.6142	43	27.0	0.0714
9	4.0	0.5856	44	28.0	0.0678
10	4.5	0.5660	45	29.0	0.0661
11	5.0	0.5463	46	30.0	0.0643
12	5.5	0.5285	47	32.0	0.0594
13	6.0	0.5106	48	34.0	0.0546
14	6.5	0.4910	49	36.0	0.0513
15	7.0	0.4713	50	38.0	0.0498
16	7.5	0.4446	51	40.0	0.0482
17	8.0	0.4178	52	42.0	0.0473
18	8.5	0.3981	53	44.0	0.0465
19	9.0	0.3785	54	46.0	0.0457
20	9.5	0.3589	55	48.0	0.0449
21	10.0	0.3392	56	50.0	0.0440
22	10.5	0.3258	57	55.0	0.0419
23	11.0	0.3125	58	60.0	0.0398
24	11.5	0.2991	59	65.0	0.0376
25	12.0	0.2857	60	70.0	0.0355
26	12.5	0.2696	61	80.0	0.0338
27	13.0	0.2535	62	90.0	0.0321
28	13.5	0.2375	63	100.0	0.0304
29	14.0	0.2214	64	200.0	0.0290
30	14.5	0.2111	65	300.0	0.0273
31	15.0	0.2009	66	400.0	0.0255
32	16.0	0.1803	67	500.0	0.0245
33	17.0	0.1634	68	1000.0	0.0208
34	18.0	0.1464	69	2000.0	0.0170
35	19.0	0.1384	70	3000.0	0.0152



\dot{Q} : Rod Surface Heat Flux = $\dot{Q}_1 + (-\dot{Q}_2)$
 \dot{Q}_1 : Heat Generation Rate
 $-\dot{Q}_2$: Stored Heat Release Rate

Fig.2. 1 Sources of Heat Transferred from Fuel/Heater Rod Surface During Blowdown



Unit = mm

NO	PARTS	MATERIAL
1	SHEATH	INCONEL 600
2	HEATER	NICHROME
3	INSULATOR	BN
4	INSULATOR	BN
5	THERMOCOUPLE	CA/INC, 600

Fig.2. 2 ROSA-III Electric Heater Rod

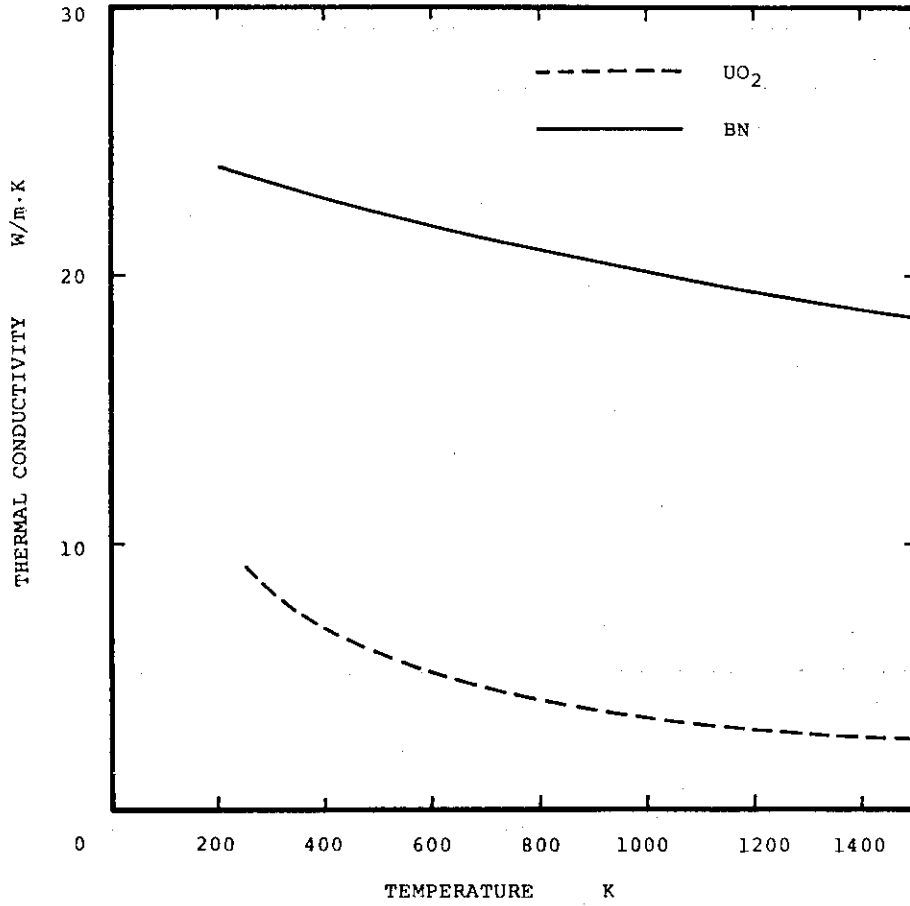


Fig.2. 3 Thermal Conductivity of BN and UO₂ vs. Temperature

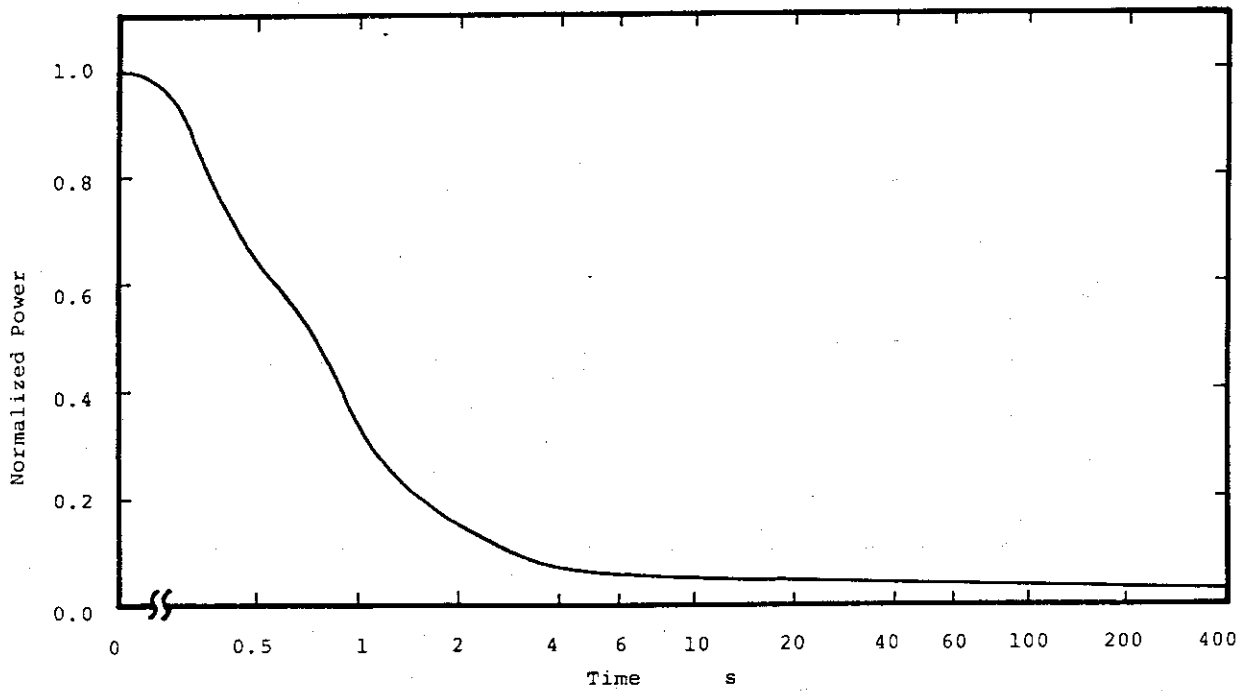


Fig.2. 4 ANS Decay Power Curve

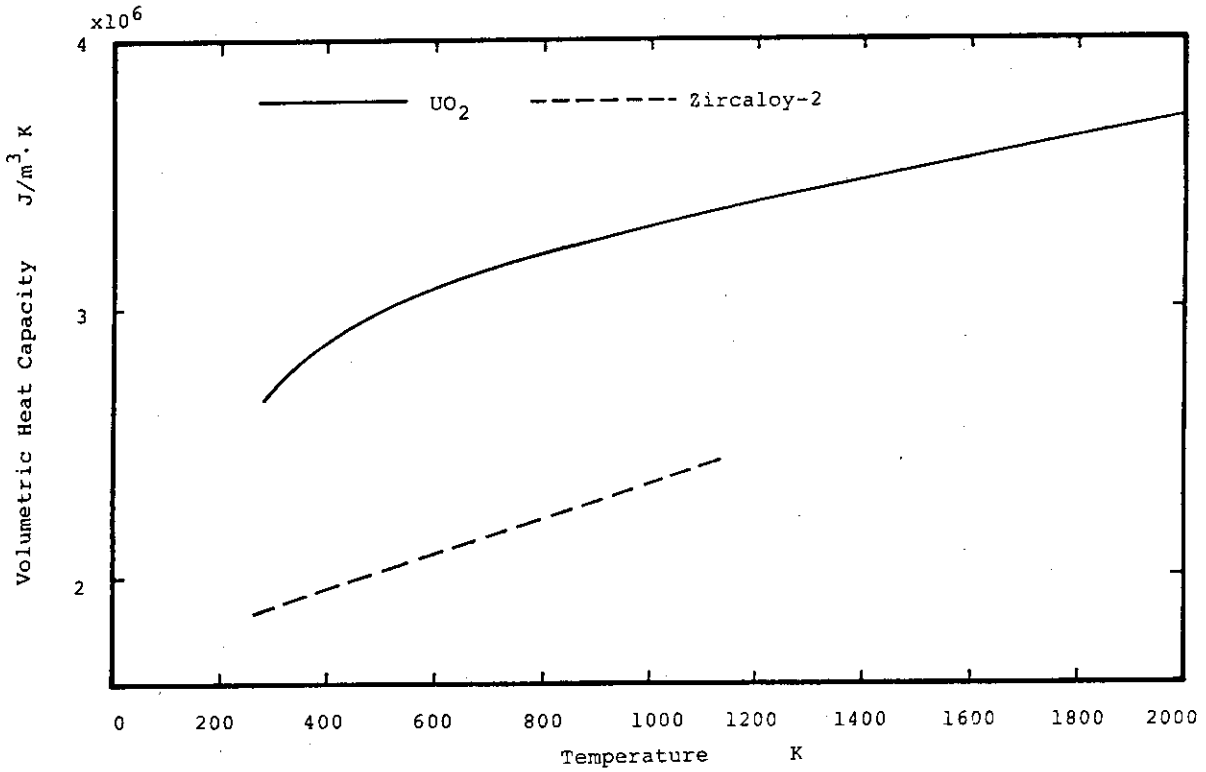


Fig.2. 5 Volumetric Heat Capacity of UO_2 and Zircaloy-2 vs. Temperature

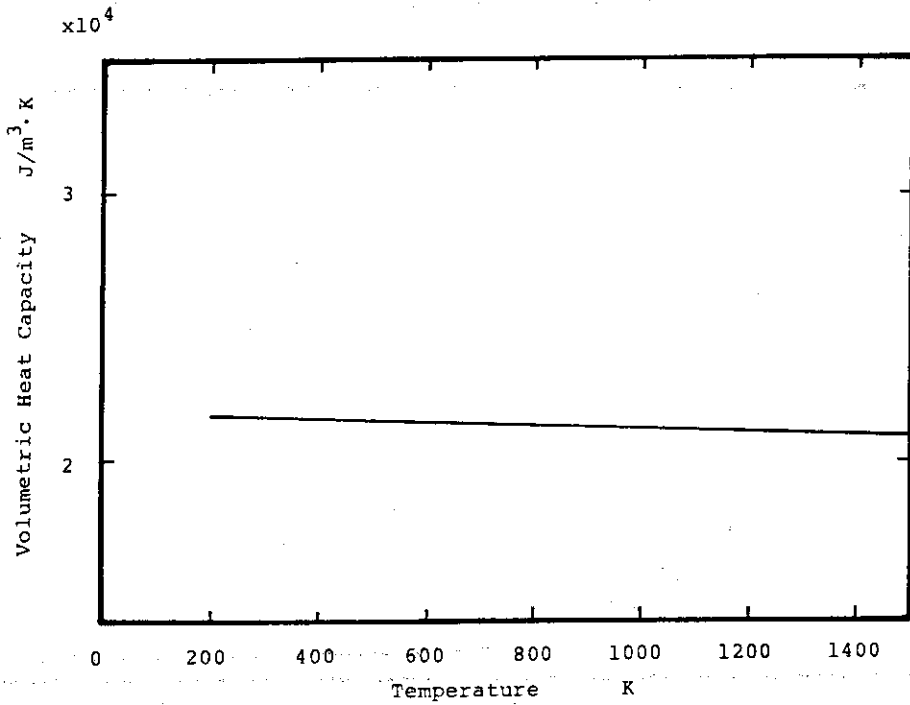


Fig.2. 6 Volumetric Heat Capacity of He gas vs. Temperature

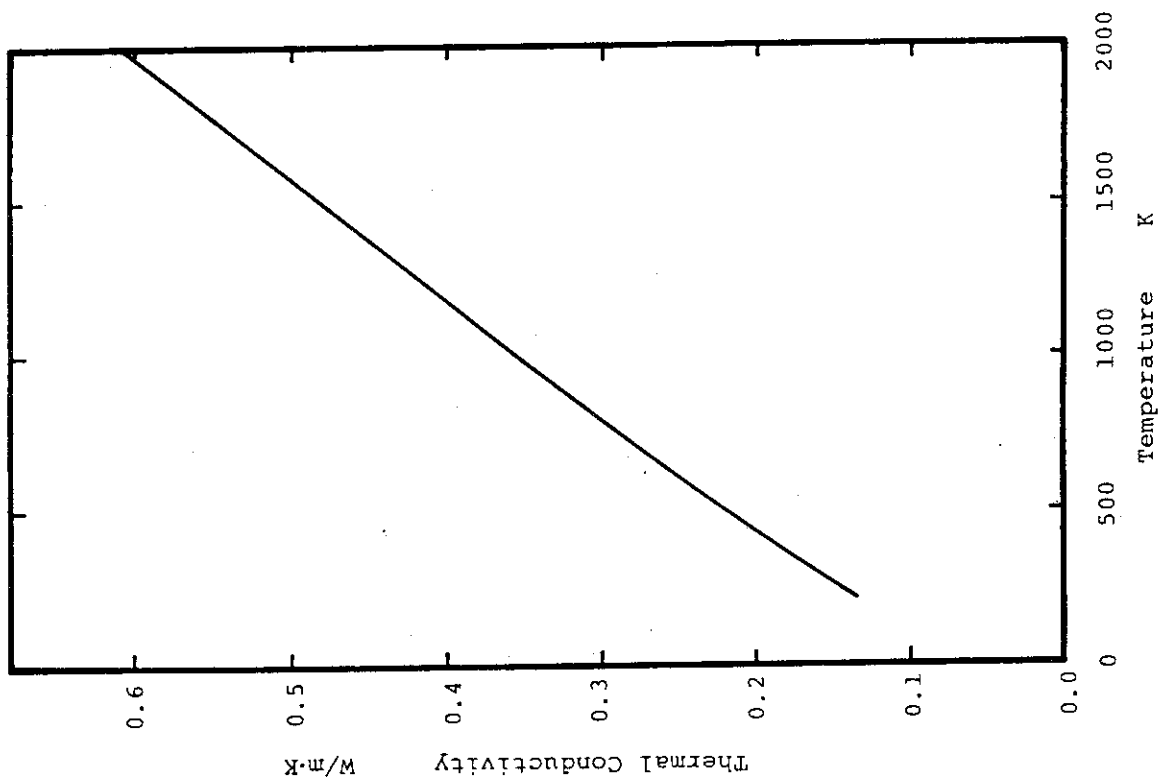


Fig.2. 7 Thermal Conductivity of He gas vs. Temperature

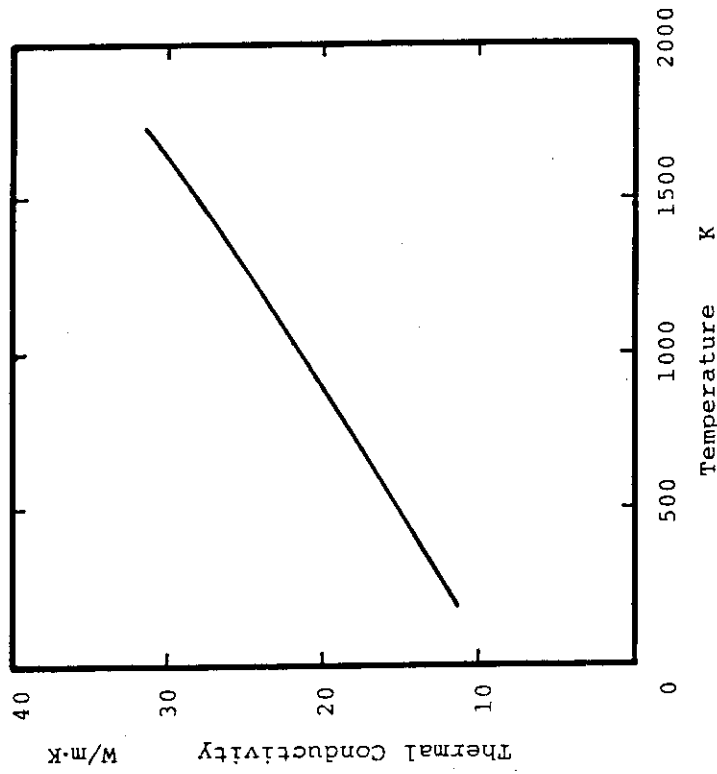


Fig.2. 8 Thermal Conductivity of Zircaloy-2 vs. Temperature

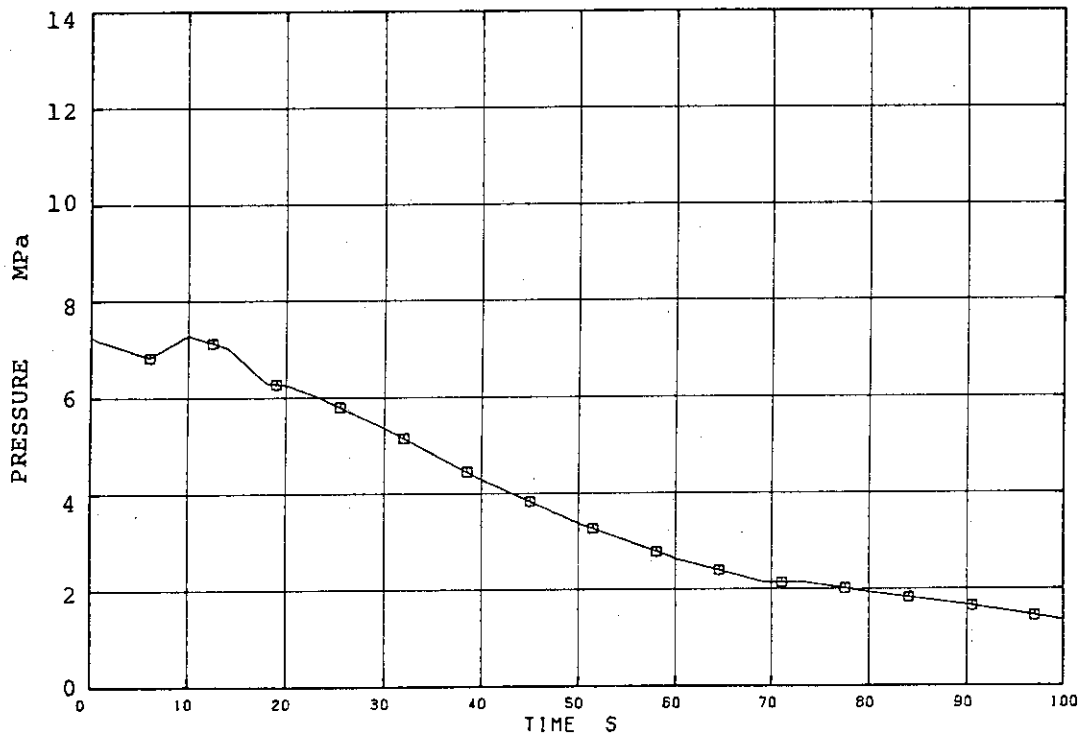


Fig.2. 9 Assumed System Pressure Behavior (Taken from a Typical 200% Recirculation Line Break Test)

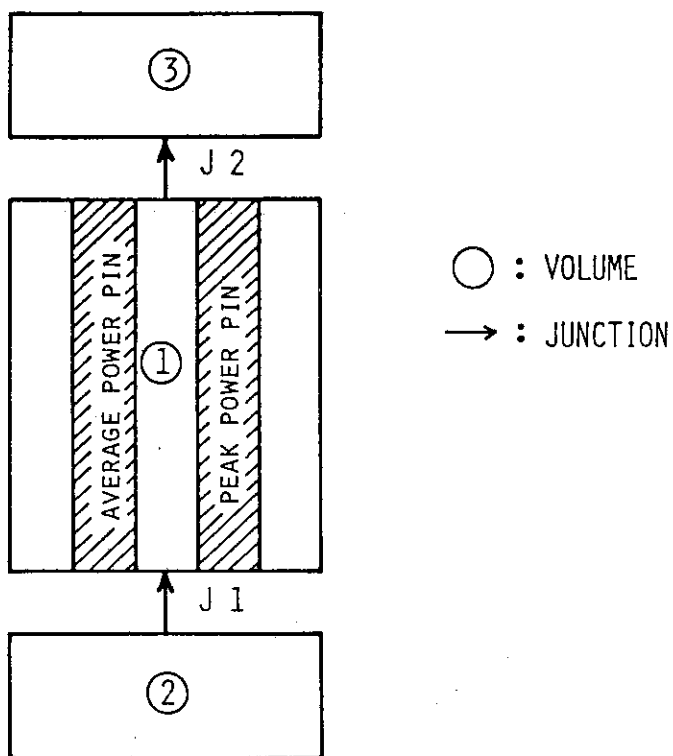


Fig.2.10 RELAP5 Nodalization of Rod Heat Transfer Model

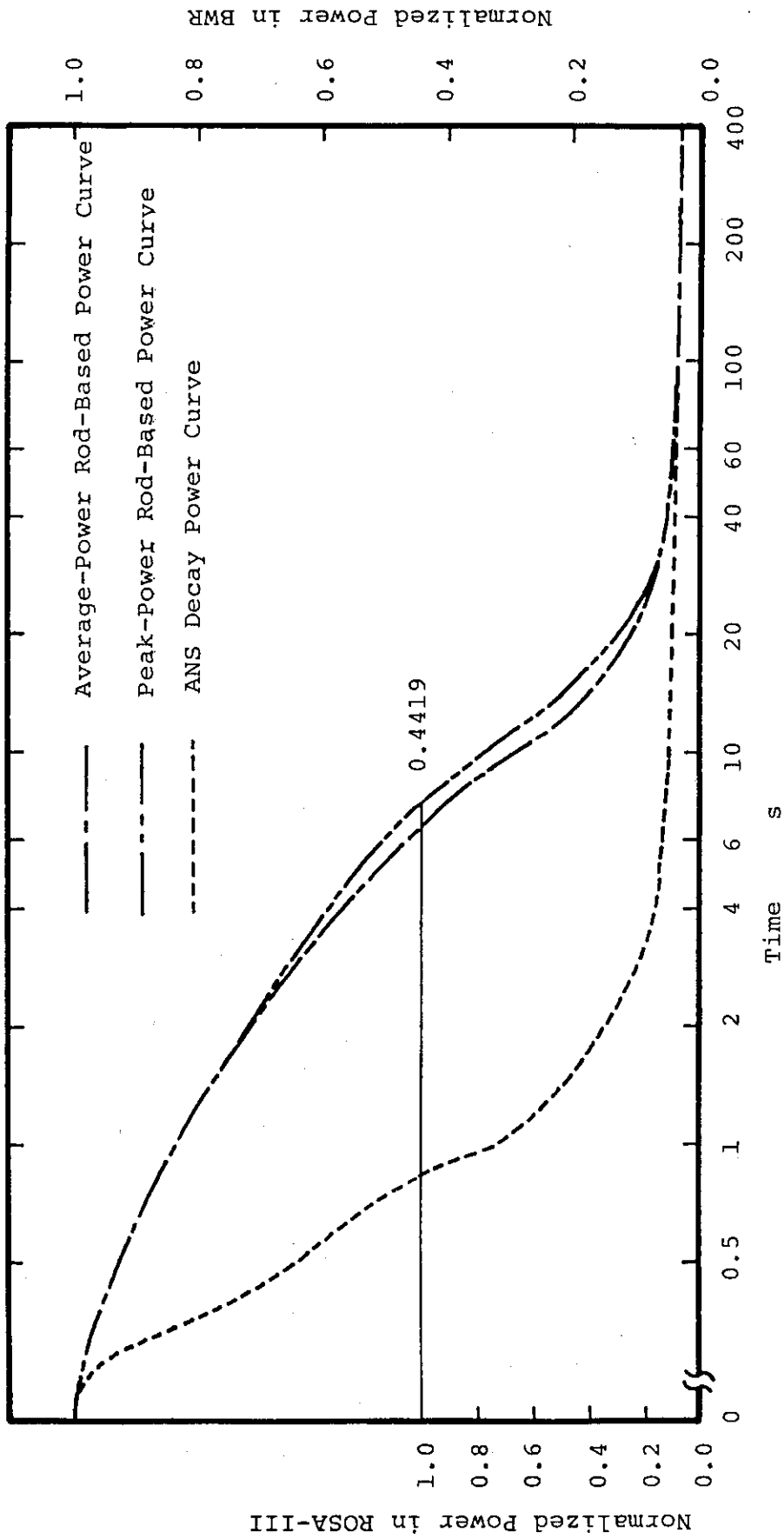


Fig.2.11 Updated ROSA-III Power Curves vs. ANS Decay Power Curve

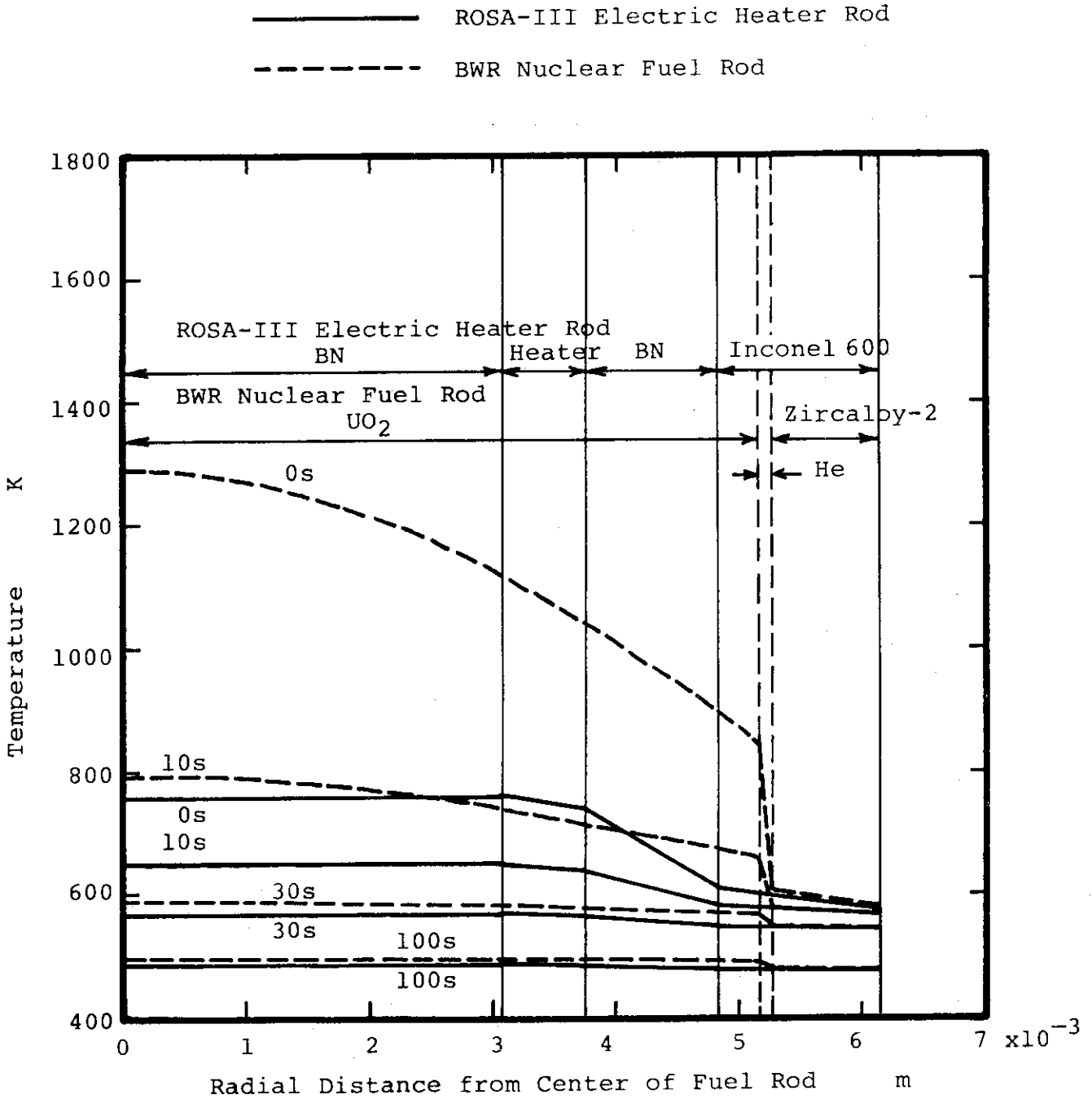


Fig.2.12 Comparison of Temperature Profiles in BWR Nuclear Fuel Rod and ROSA-III Heater Rod, Average-Power Rod

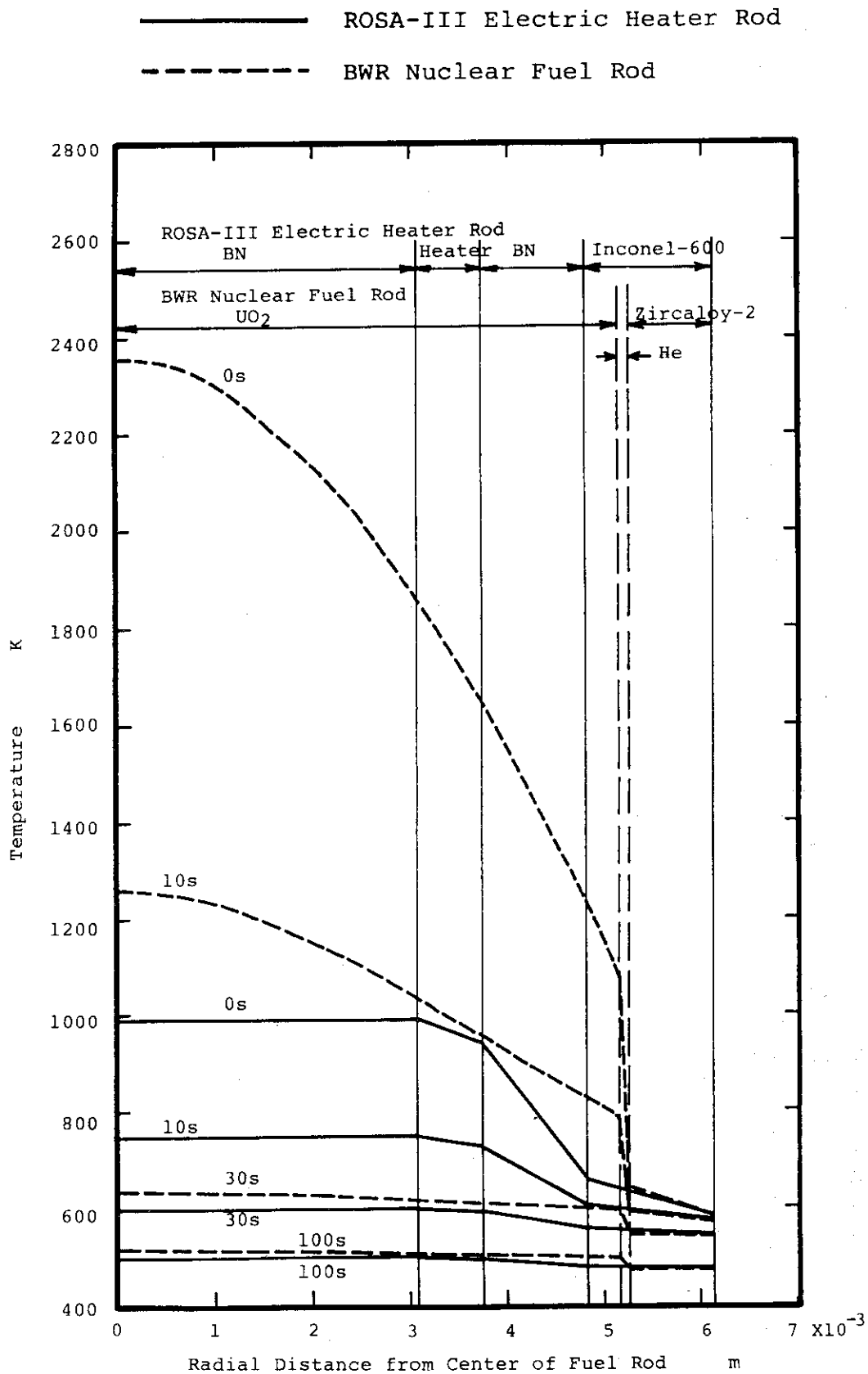


Fig.2.13 Comparison of Temperature Profiles in BWR Nuclear Fuel Rod and ROSA-III Heater Rod, Peak-Power Rod

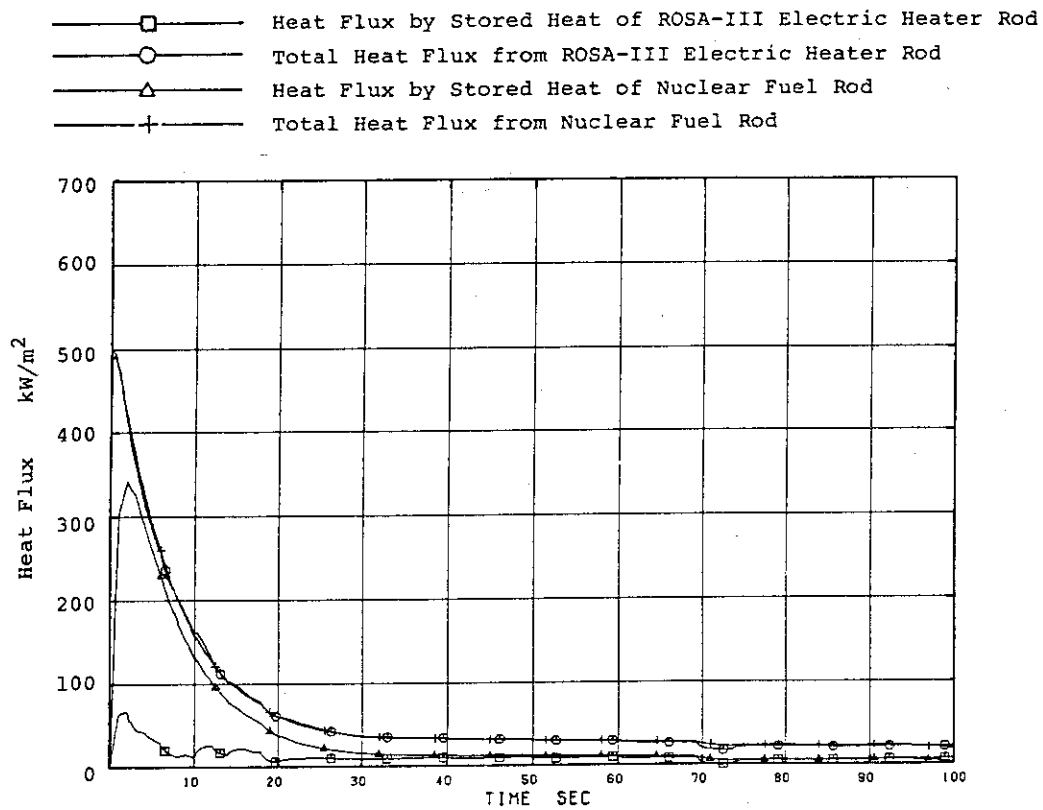


Fig.2.14 Heater Rod Heat Flux, Average-Power Rod Loaded with Average-Power Rod-Based Power Curve

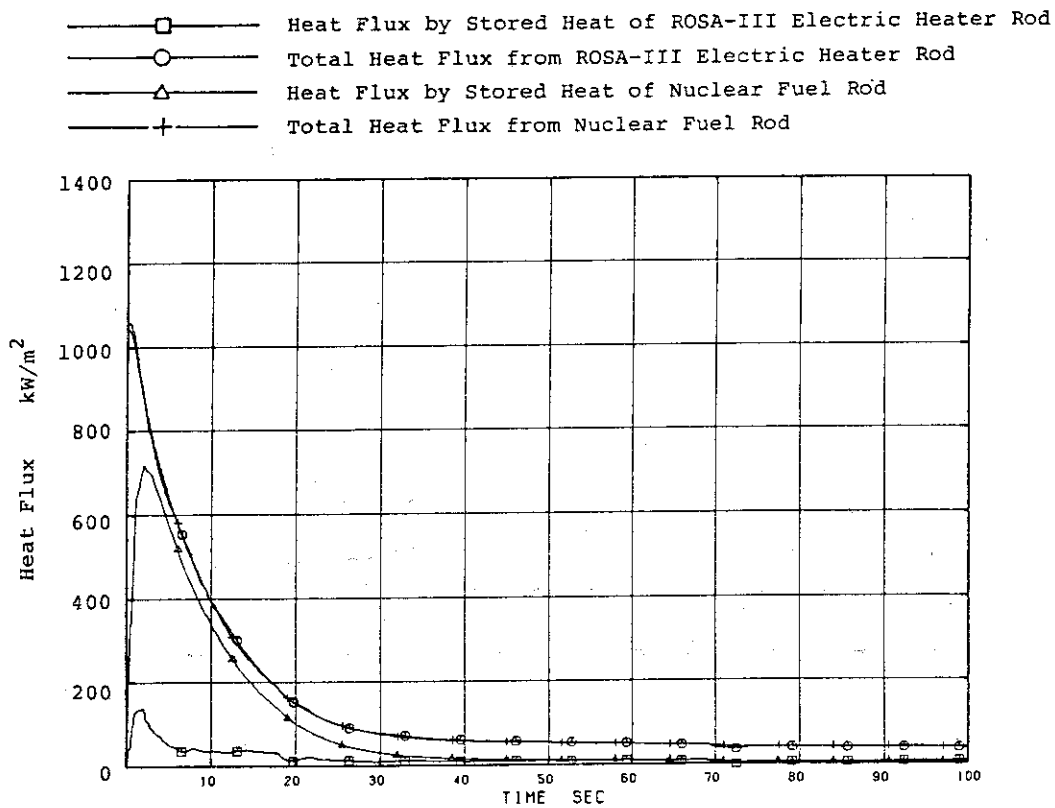
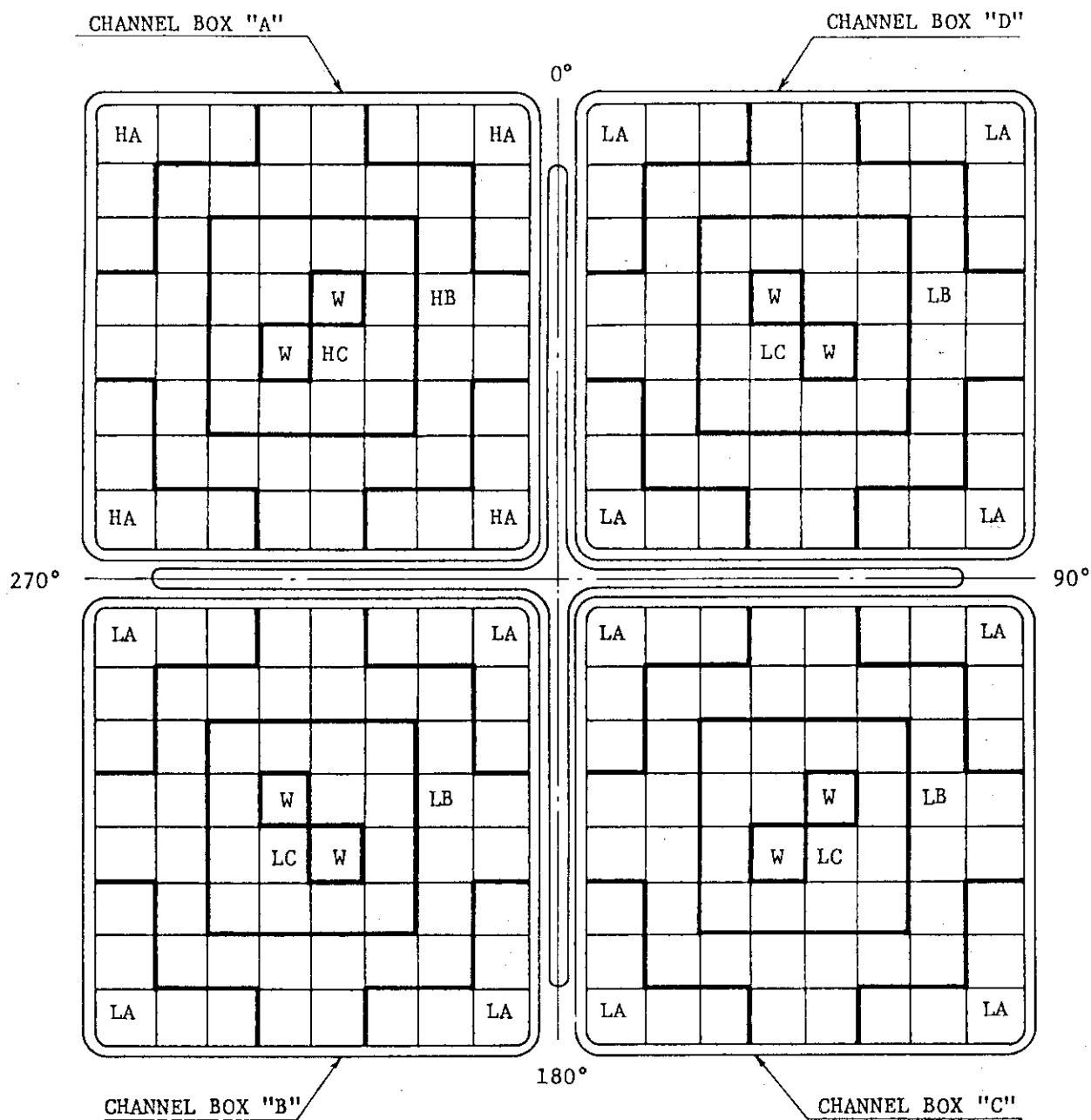


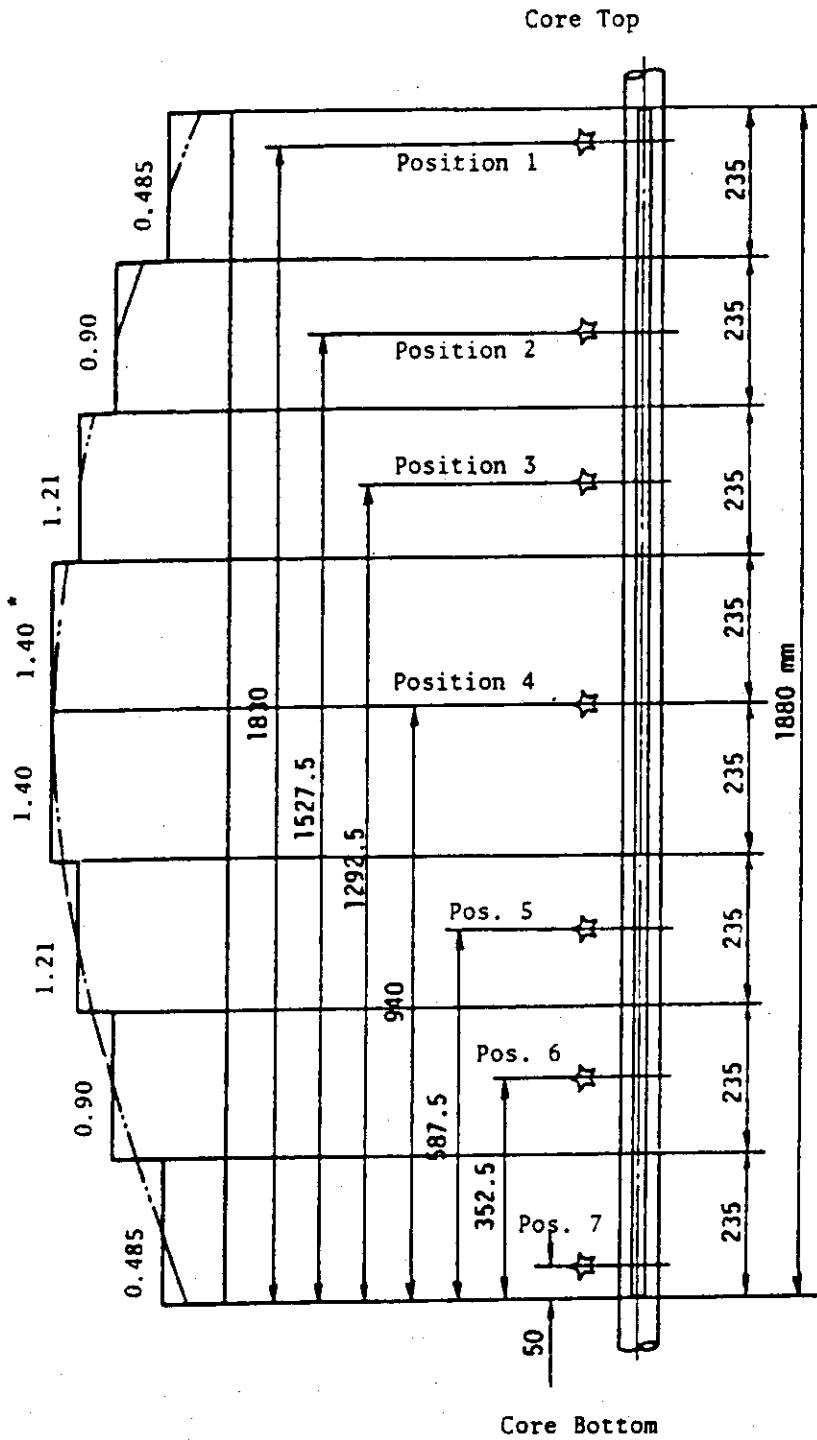
Fig.2.15 Heater Rod Heat Flux, Peak-Power Rod Loaded with Peak-Power Rod-Based Power Curve



Region	HA	HB	HC	LA	LB	LC	W
Linear Heat Rate (kw/m)	18.5	16.81	14.41	13.21	12.01	10.29	0.0
Local Peaking factor	1.1	1.0	0.875	1.1	1.0	0.875	0.0
No. of Rods	20	28	14	60	84	42	8

* note : Radial Peaking factor is 1.4

Fig.2.16(a) Radial Power Distribution of Core in ROSA-III Test Facility



☆ Indicates position of thermocouple. * Axial Peaking Factor

Fig.2.16(b) Axial Power Distribution of Heater Rod in ROSA-III Test Facility

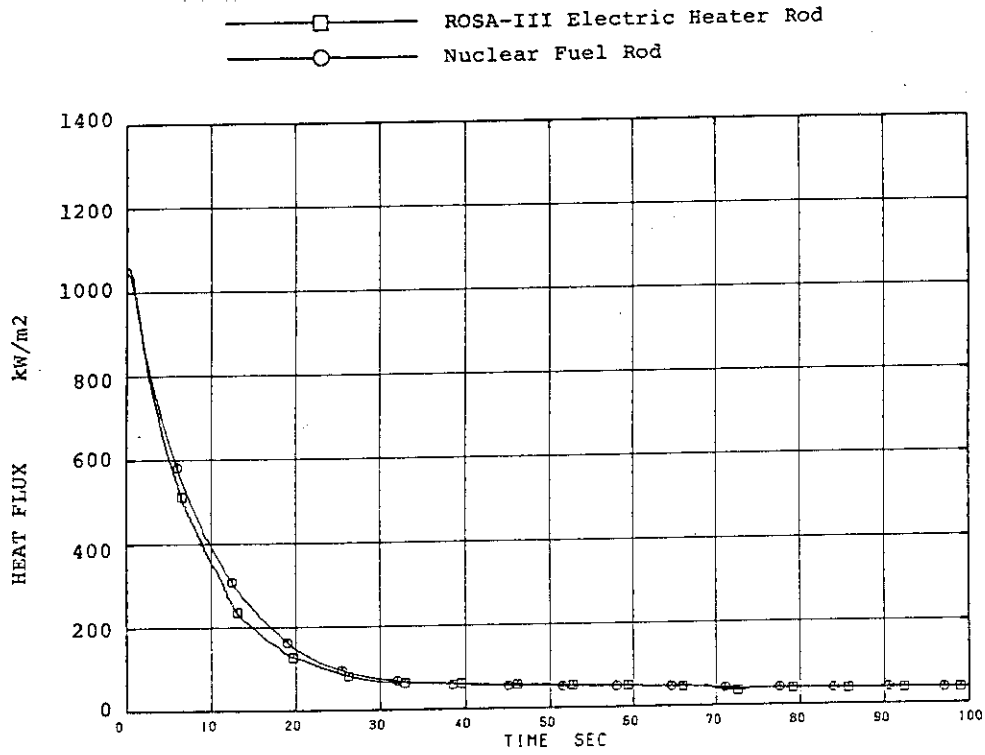


Fig.2.17 ROSA-III Heater Rod Heat Flux, Peak-Power Rod Loaded with Average-Power Rod-Based Power Curve

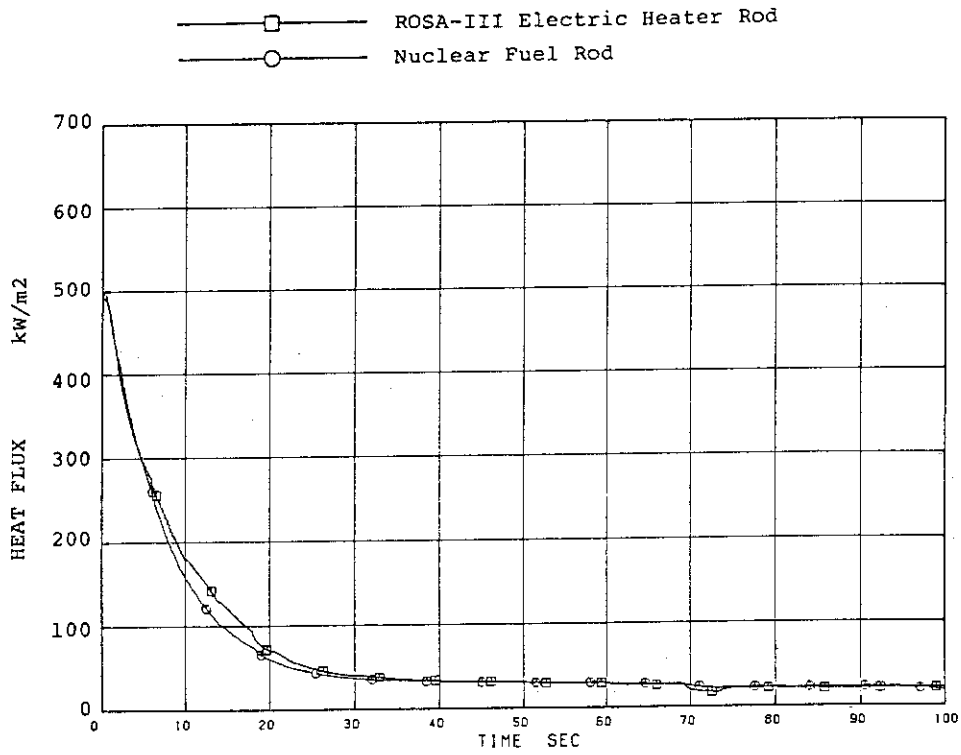


Fig.2.18 ROSA-III Heater Rod Heat Flux, Average-Power Rod Loaded with Peak-Power Rod-Based Power Curve

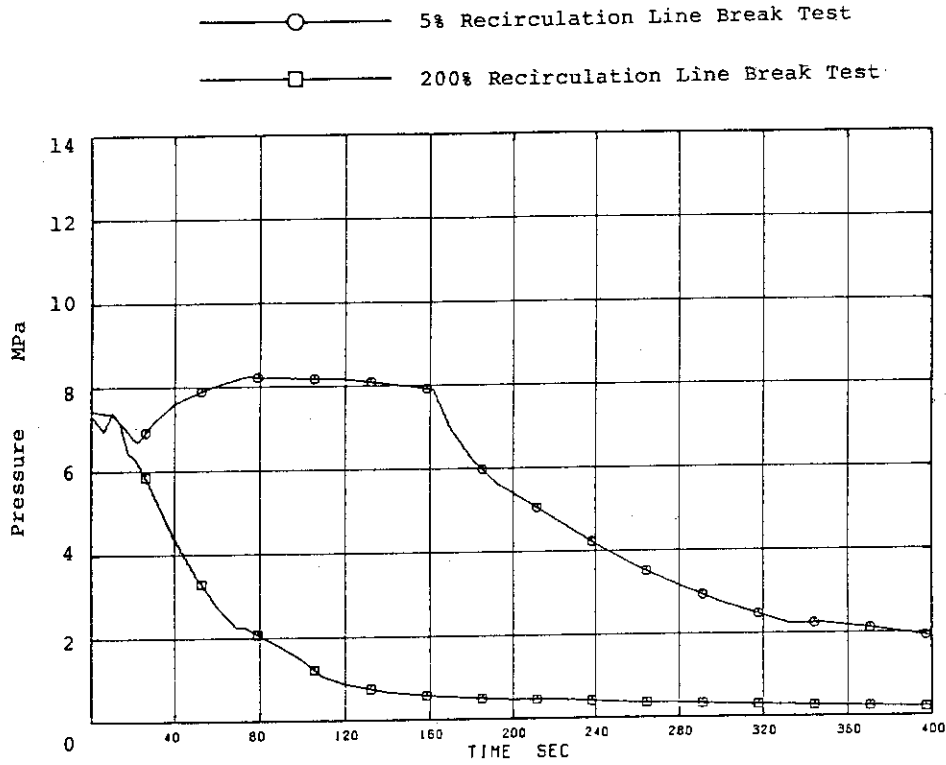


Fig.2.19 Assumed Alternate System Pressure Behavior (Taken from a Typical 5% Recirculation Line Break Test)

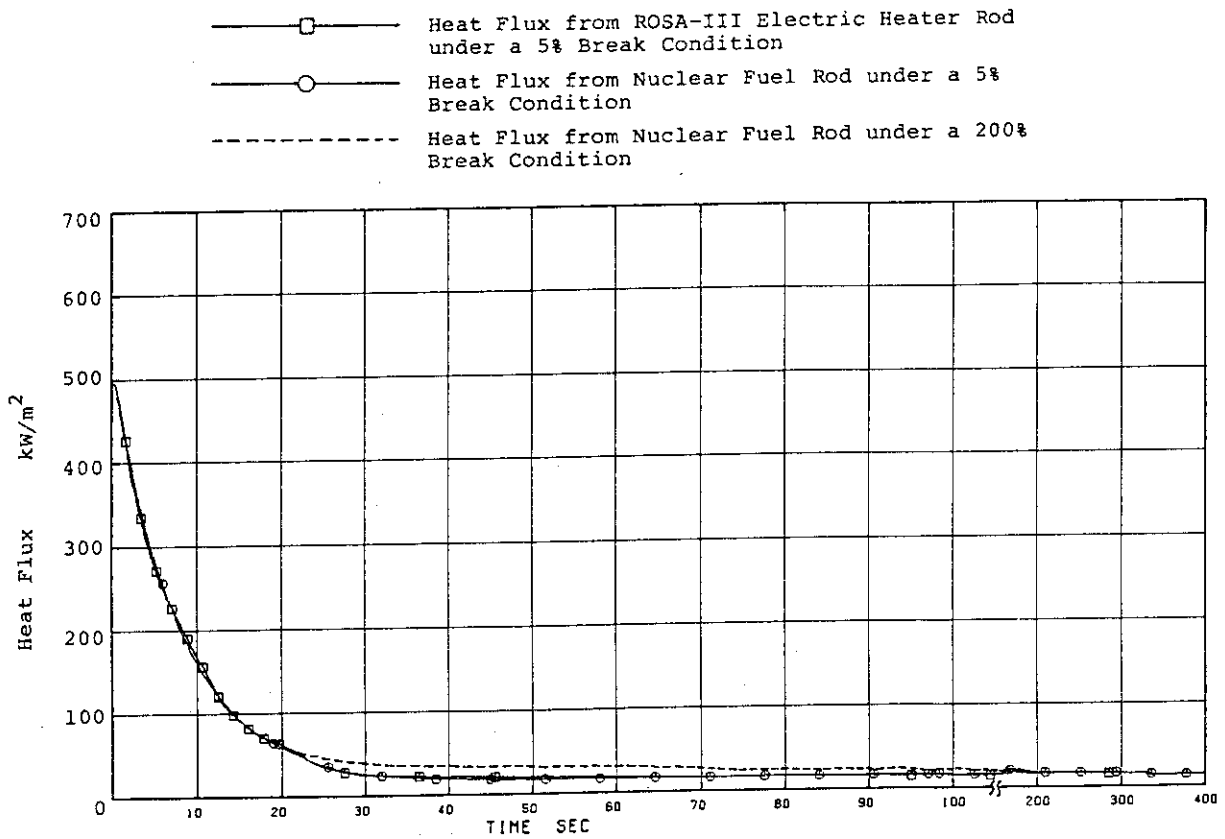


Fig.2.20 ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained for Alternate System Pressure Behavior, Average-Power Rod Loaded with Average-Power Rod-Based Power Curve

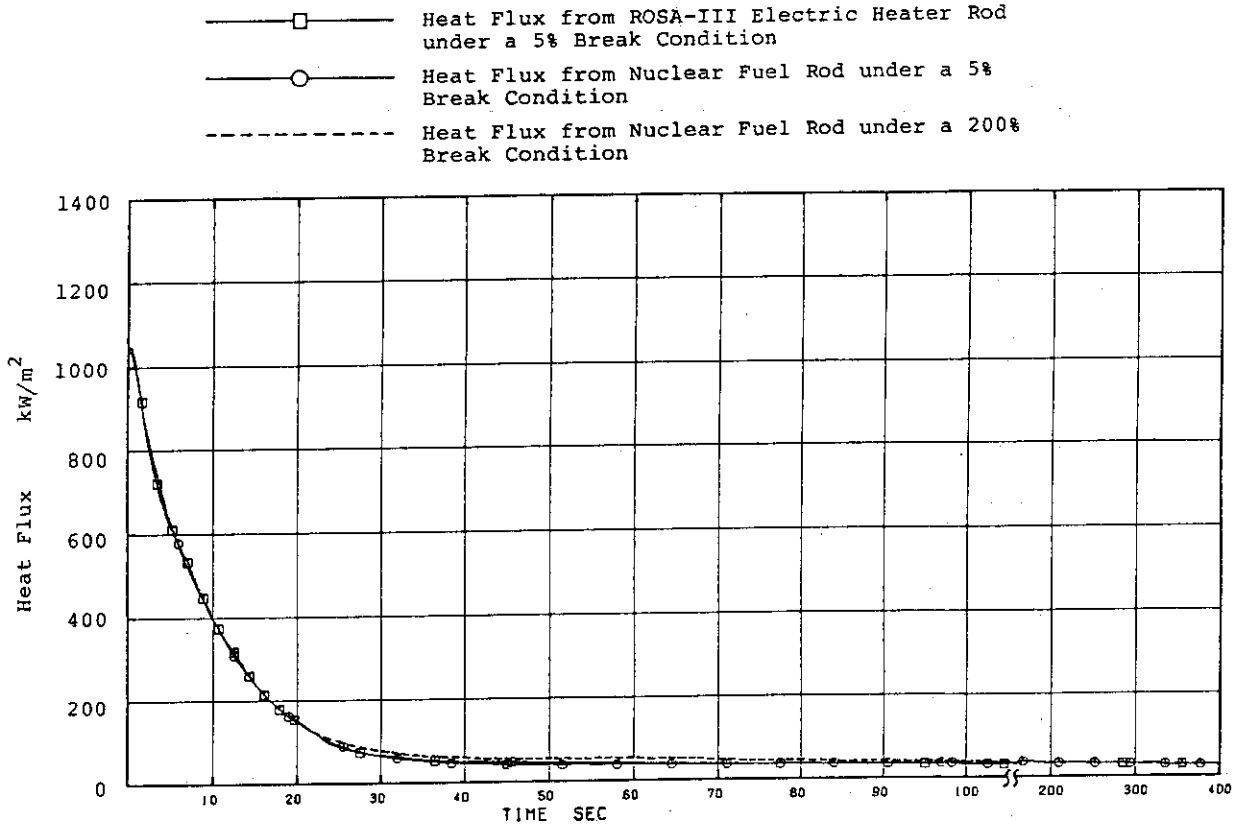


Fig.2.21 ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained for Alternate System Pressure Behavior, Peak-Power Rod Loaded with Peak-Power Rod-Based Power Curve

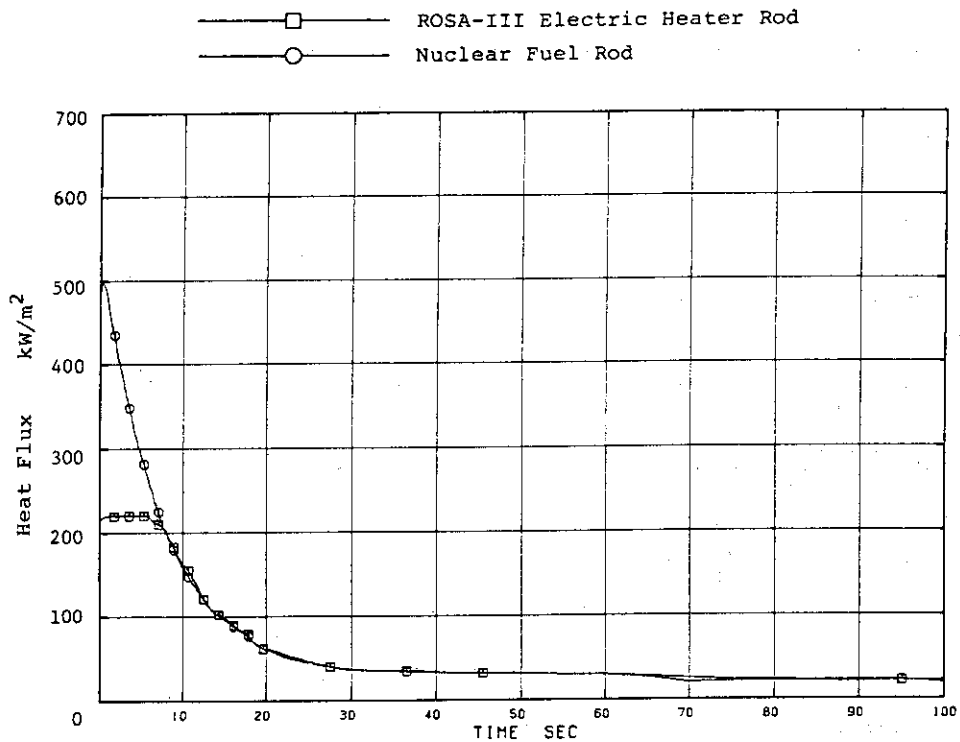


Fig.2.22 ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained for 44% Linear Heat Rate of BWR, Average-Power Rod Loaded with Average-Power Rod-Based Power Curve

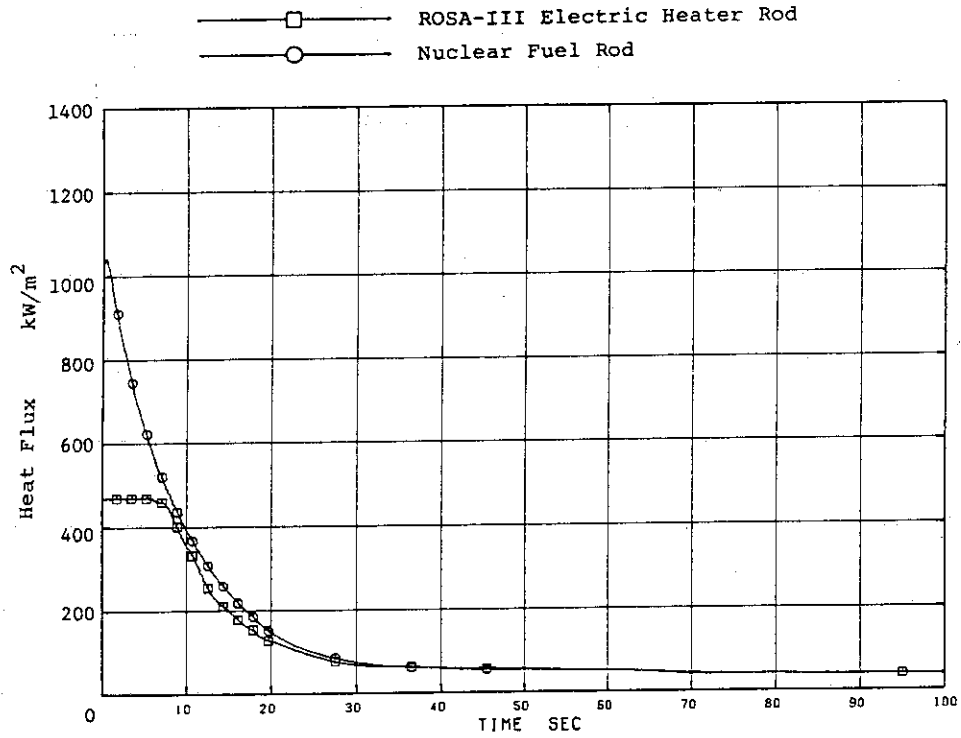


Fig.2.23 ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained for 44% Linear Heat Rate of BWR, Peak-Power Rod Loaded with Average-Power Rod-Based Power Curve

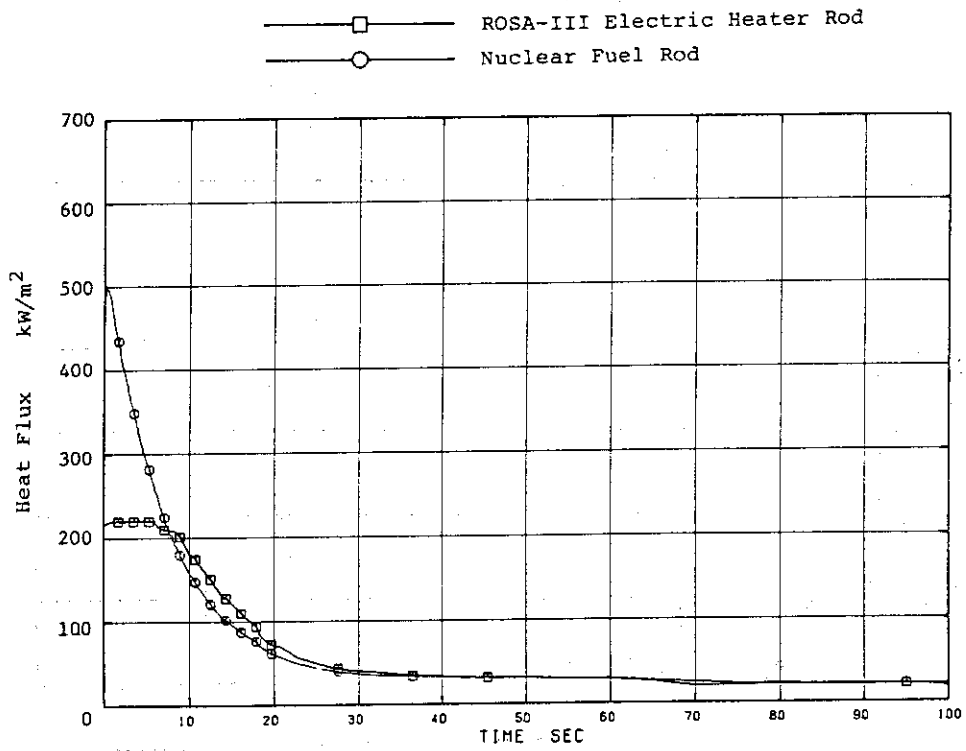


Fig.2.24 ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained for 44% Linear Heat Rate of BWR, Average-Power Rod Loaded with Peak-Power Rod-Based Power Curve

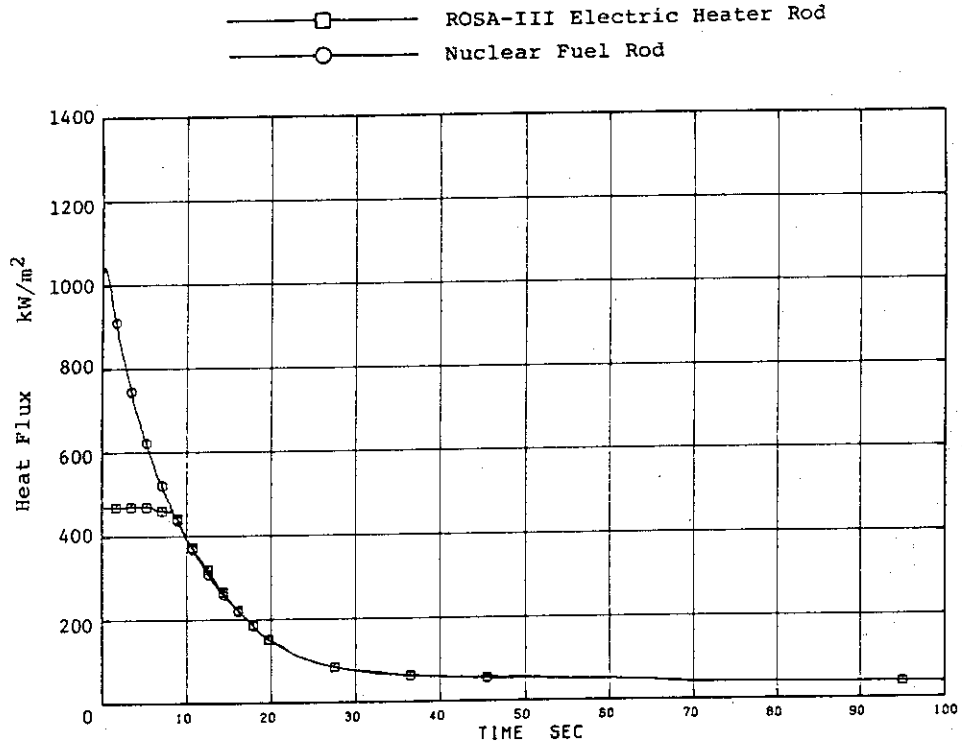


Fig.2.25 ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained for 44% Linear Heat Rate of BWR, Peak-Power Rod Loaded with Peak-Power Rod-Based Power Curve

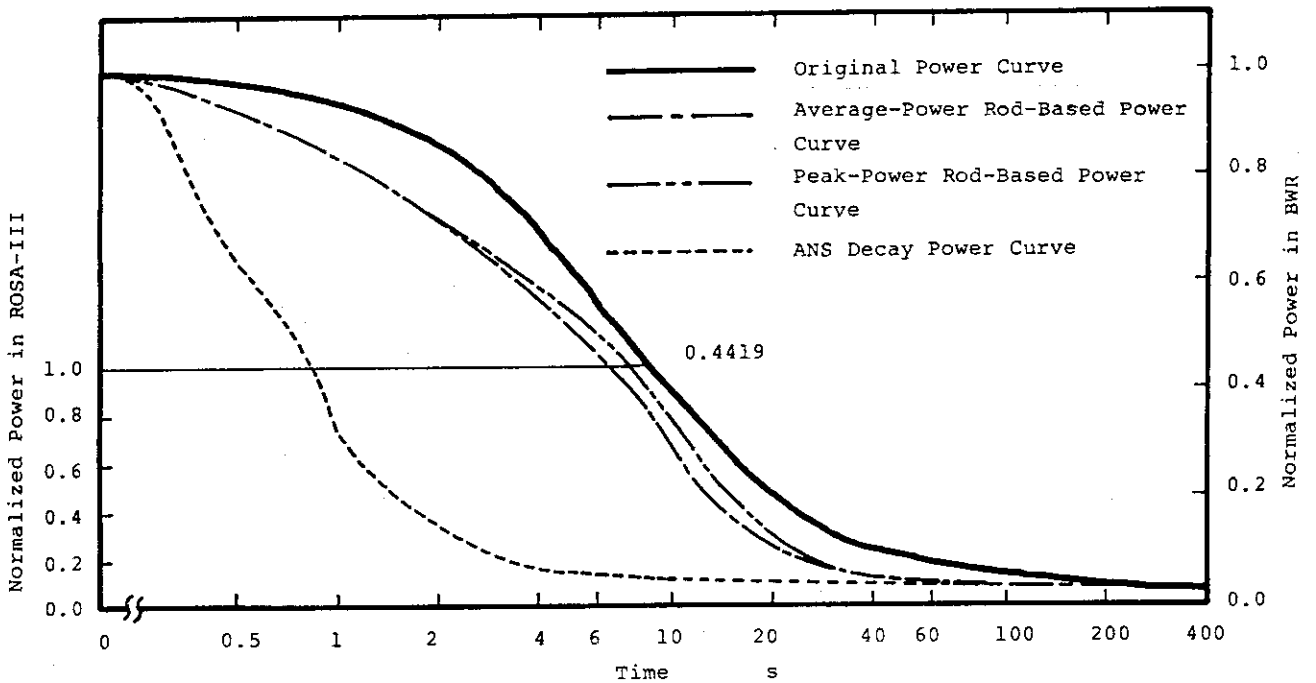


Fig.2.26 Comparison of Original and Updated Power Curves

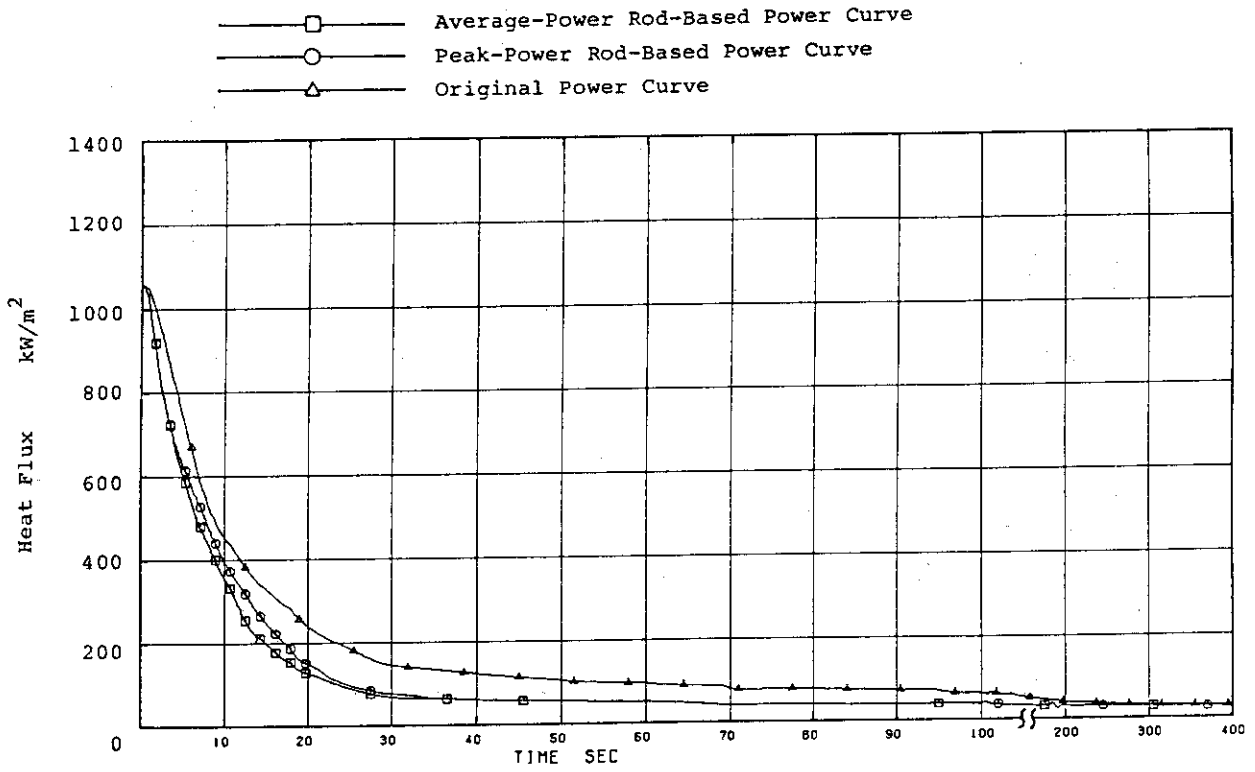


Fig.2.27 Comparison of Heater Rod Heat Fluxes Obtained with Original and Updated Power Curves, Peak-Power Rod

3. 核燃料の被覆管表面熱流束に対する各種パラメータの影響

ここでは、電気ヒーターロッドにより核燃料の被覆管表面熱流束を模擬する場合に問題となる各種パラメータの影響を感度解析を行うことにより調べた。

3.1 感度解析パラメータ

2.1で述べたように、実炉の被覆管表面での熱流束は、

- (a) 燃料の発熱量
- (b) 燃料棒まわりの流体条件
- (c) 燃料の物性値および形状の経時変化
 - (c-1) バーン・アップによる物性値の変化
 - (c-2) ギャップ幅の変化

の影響を受ける。(a)と(b)の影響についてはすでに2章で検討した。ここでは(c)の核燃料の物性値および形状の被覆管表面熱流束に与える影響について2.3で求めた核燃料の解析結果(基本ケース)と比較し、調べる。

3.1.1 バーン・アップによる物性値の変化

BWRの核燃料の平均燃焼度は、炉心装荷後取り替えられるまでの間に通常およそ 3×10^4 MWd/tにも達する。この間に、核燃料構成物質は中性子および γ 線等の照射により物性値が変化する。特に、燃料から冷却材への熱流束に与える影響として、 UO_2 およびジルカロイ-2の体積熱容量 ρC_p と熱伝導率の変化が重要である。 UO_2 の体積熱容量とジルカロイ-2の体積熱容量および熱伝導率の変化は小さく無視できるが、 UO_2 の熱伝導率⁽⁵⁾の変化はFig.3.1に示すようになりかなり大きい。ここでは、 UO_2 の熱伝導率の経時変化のみを考え、熱伝導率が一番小さくなる燃料取り替え時(燃焼度： 1.0×10^{20} fissions/cc)の物性値(ケース1)について比較のための解析を行った。解析条件をTable 3.1に示す。

3.1.2 ギャップ幅の変化

核燃料のギャップ幅は、燃料製造時には平均0.1143 mmであるが、原子炉の運転状況、燃料の照射履歴等によりかなり変化する。ここでは、外圧による被覆管のクリープダウン等の原因によってギャップが消失した場合(ケース2)と、ペレットの焼きしまり等の原因によりギャップ幅が通常の2倍になった場合(ケース3)とについて基本ケースとの比較のための解析を行った。ただし、両ケースともペレット、被覆管、ギャップの熱伝導率および体積熱容量 ρC_p は基本ケースの値をそのまま使用した。詳しい解析条件をTable 3.1に示す。

3.2 感度解析結果

3.2.1 バーン・アップによる UO_2 の熱伝導率の減少の影響

ケース1に関する解析結果と基本ケースとの比較をFig. 3.2に示す。 UO_2 の熱伝導率の減少の結果、本ケースでは初期蓄積熱が基本ケースに比べて大きく、スクラム後約50秒間にわたり被覆管表面熱流束は基本ケースの場合を上回った。基本ケースに対する熱流束の誤差は最大30%であった。しかし、炉心スクラム後50秒以降は、被覆管表面熱流束は基本ケースの場合とほぼ一致した。

3.2.2 ギャップ幅の変化の影響

ケース2, 3に関する被覆管表面熱流束の計算結果と基本ケースとを比較してFig. 3.3に示す。ギャップ幅が大きいほど初期蓄積熱量は大きく、スクラム後の熱流束が大きくなる傾向を示した。しかし、ギャップ幅の影響はスクラム後約50秒以降は消失した。

3.3 解析結果の検討

核燃料に関する感度解析結果を最適電気出力曲線および従来の電気出力曲線を用いて得られるROSA-III被覆管熱流束と比較し、検討する。

Fig. 3.4, 3.5は、最適電気出力曲線を用いた場合の熱流束の時間変化を感度解析結果と比較したものである。平均出力ロード基準の出力変化、最高出力ロード基準の出力変化のどちらを与えた場合でも、炉心スクラム後60秒間では熱流束に大きな差がみられるが、それ以降では全ケースともよく一致している。したがって、今回求めた2つの最適電気出力曲線は、2.3で述べたように炉心スクラム後35秒以降は同一の曲線であり、この曲線はスクラム後60秒以降では広範囲な燃料の物性値および形状下での核燃料の熱流束を模擬することがわかる。

Fig. 3.6, 3.7は、従来の電気出力曲線を用いた場合の熱流束の時間変化を感度解析結果と比較したものである。平均出力ロードで炉心スクラム後6~14秒、最高出力ロードで7~20秒の間、従来の電気出力曲線を用いた場合の熱流束がケース3の熱流束を下回っているものの、それ以外では従来の電気出力曲線を用いた場合の方が大きく、60秒付近では核燃料の熱流束の70%以上大きい。しかし、従来の電気出力曲線は260秒以降をANS曲線に一致させてあるため、約300秒以降の熱流束の時間変化は核燃料のそれと一致する。

Table 3.1 核燃料の熱流束に関する感度解析条件

感度解析パラメータ

パラメータ	基本ケース	ケース 1	ケース 2	ケース 3
熱伝導率 UO_2	燃焼開始時の値 (Fig.2.3)	燃料取替え時の値 ^(*) (Fig.3.1)	燃焼開始時の値 (Fig.2.3)	同 左
ギャップ幅	0.1143mm	0.1143mm	0.0mm	0.2286mm

(*) 燃焼度： 10×10^{20} fissions/cc

共通パラメータ

系 圧 力 変 化	200% 両端破断 (Fig. 2.9)	
流 量	0.265 kg/s	
ク オ リ テ ィ	0.05	
燃 料 の 発 熱 量	A N S 曲 線 (Fig. 2.4)	
体 積 熱 容 量	UO_2	燃 焼 開 始 時 の 値 (Fig. 2.5)
	He	" (Fig. 2.6)
	ジルカロー-2	" (Fig. 2.5)
熱 伝 導 率	He	燃 焼 開 始 時 の 値 (Fig. 2.7)
	ジルカロー-2	" (Fig. 2.8)

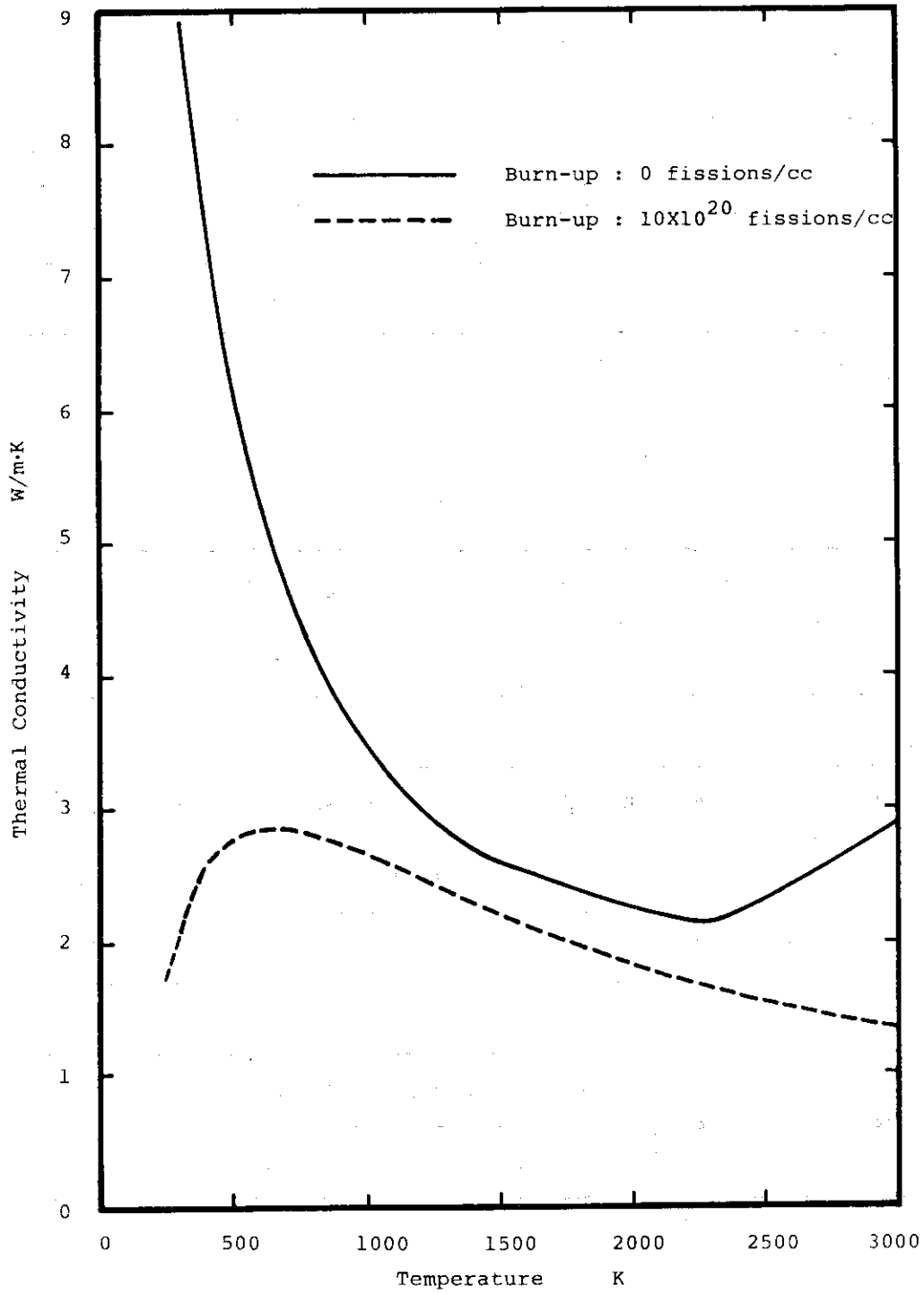


Fig.3. 1 Change of Thermal Conductivity of UO₂ caused by Burn-up

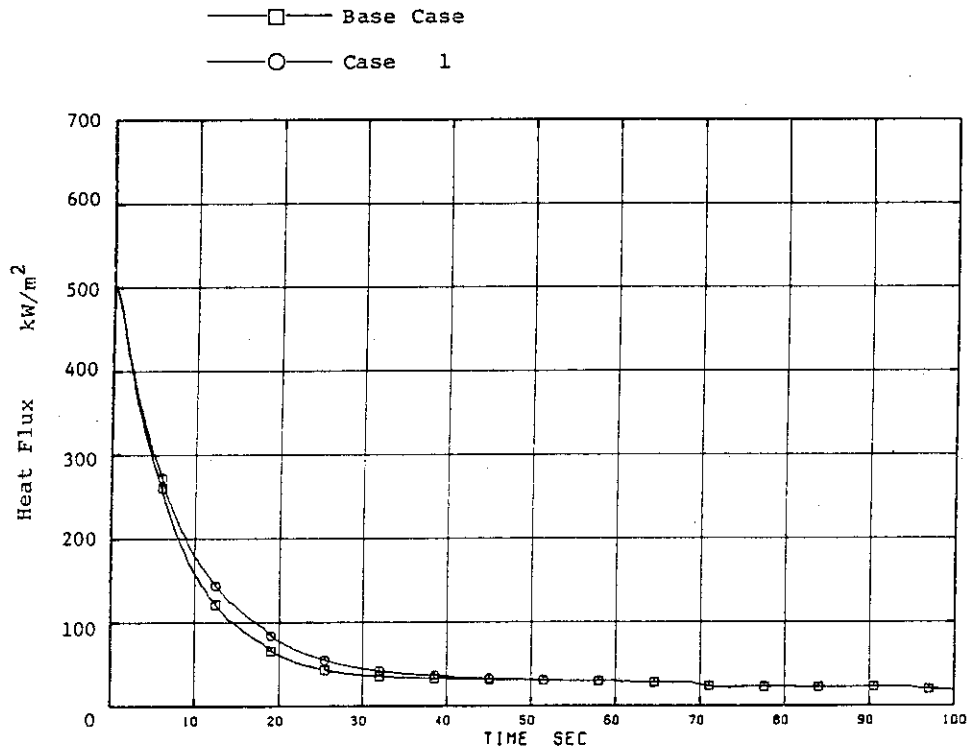


Fig.3. 2 Effect of Thermal Conductivity of UO₂ on Nuclear Fuel Rod Heat Flux, Average-Power Rod

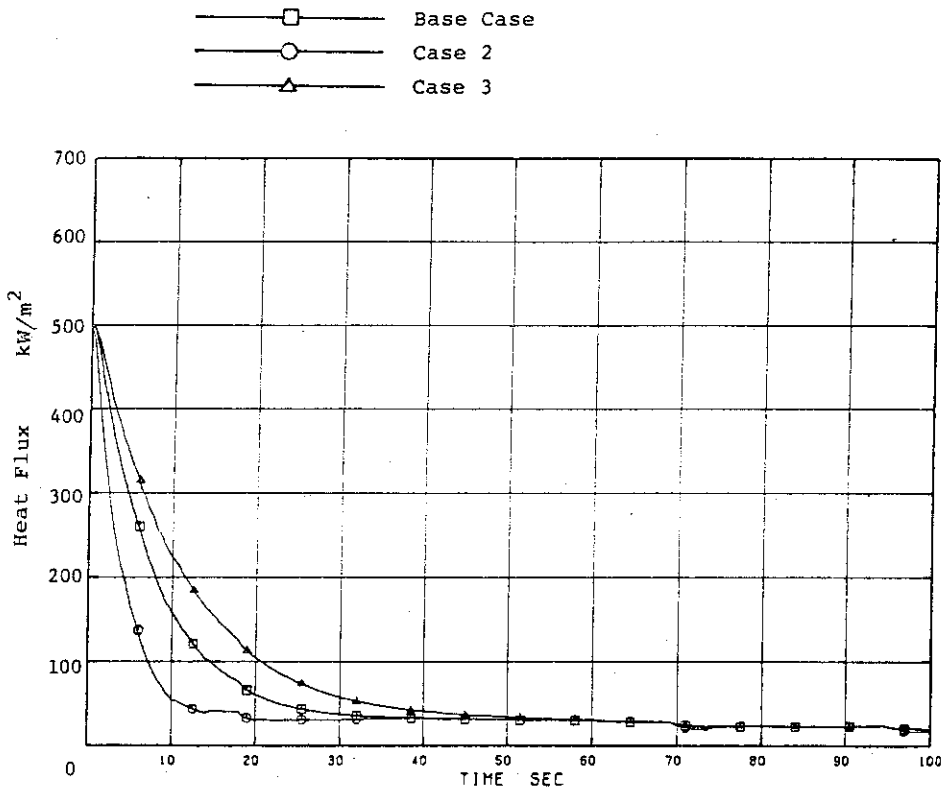


Fig.3. 3 Effect of Gap Width on Nuclear Fuel Rod Heat Flux, Average-Power Rod

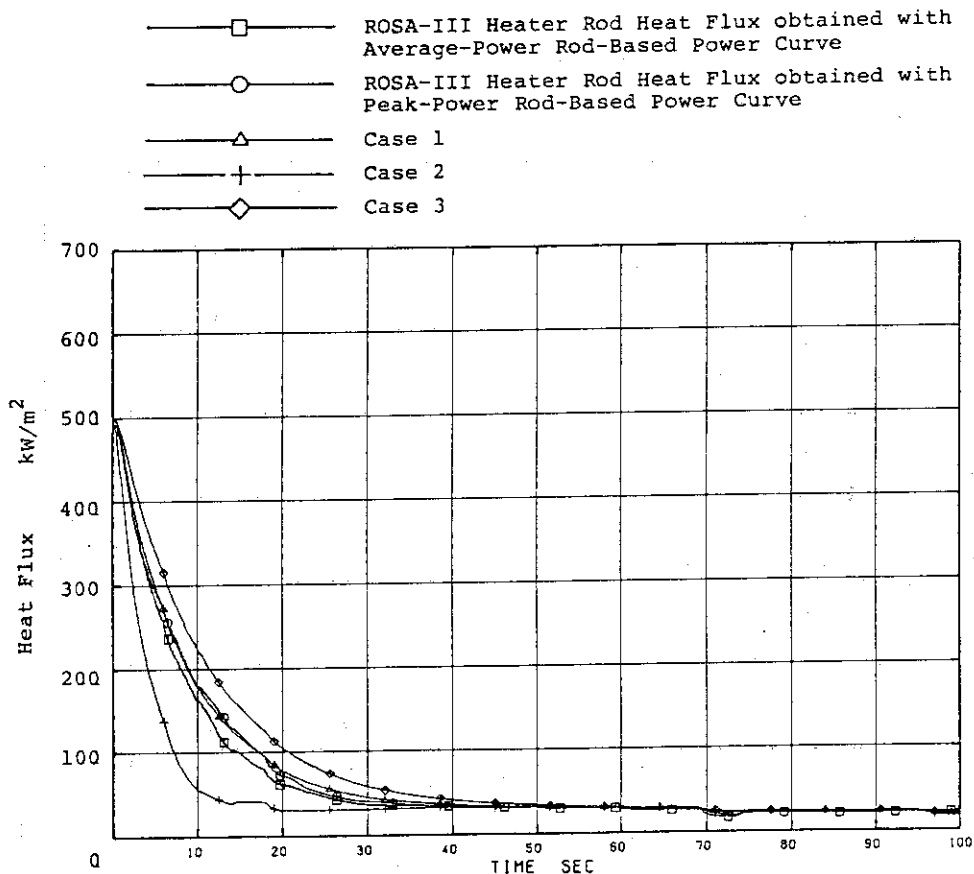


Fig.3. 4 Comparison of ROSA-III Heater Rod Heat Flux with Sensitivity Analysis Results for Nuclear Fuel Rod, Average-Power Rod

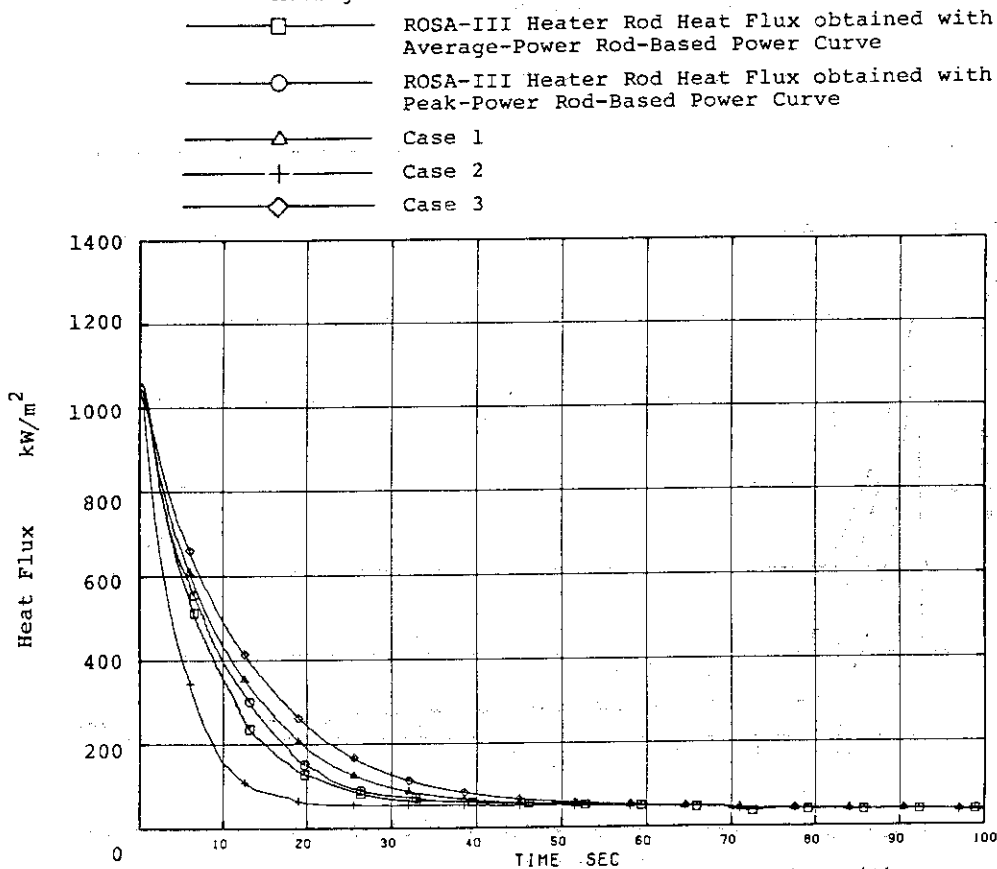


Fig.3. 5 Comparison of ROSA-III Heater Rod Heat Flux with Sensitivity Analysis Results for Nuclear Fuel Rod, Peak-Power Rod

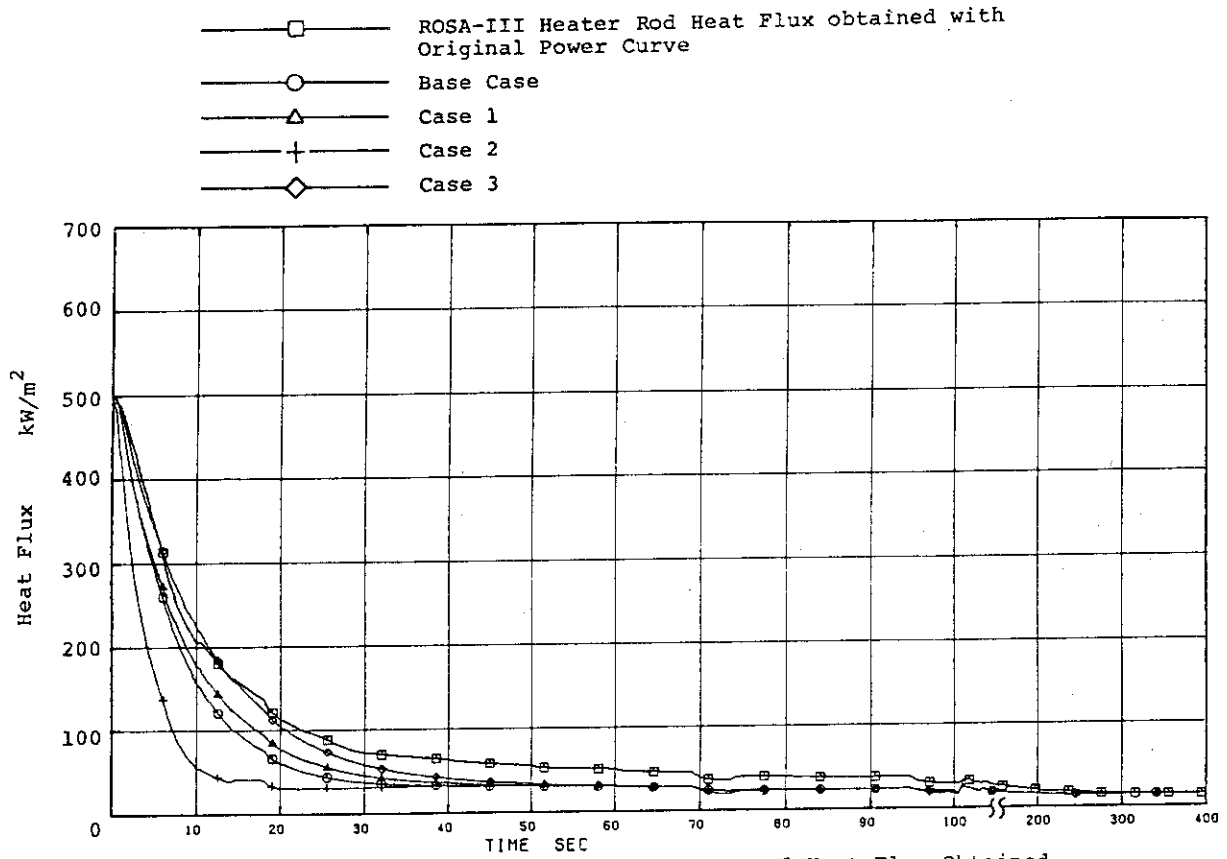


Fig.3. 6 Comparison of ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained with Original Power Curve with Sensitivity Analysis Results for Nuclear Fuel Rod, Average-Power Rod

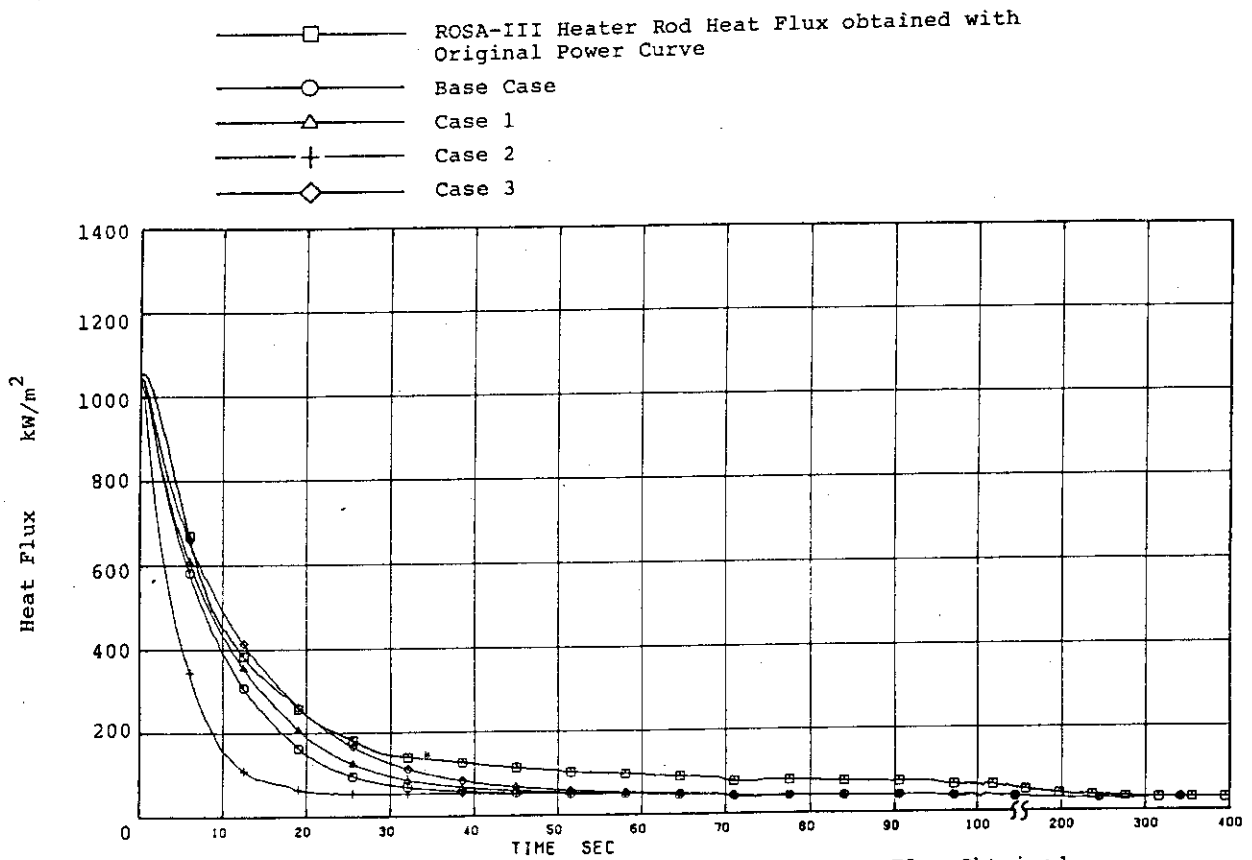


Fig.3. 7 Comparison of ROSA-III Heater Rod Heat Flux Obtained with Original Power Curve with Sensitivity Analysis Results for Nuclear Fuel Rod, Peak-Power Rod

4. 結 論

ROSA-III電気ヒーターロッドにより、実炉の被覆管表面熱流束を模擬するための電気ヒーターロッド熱出力の時間変化（最適電気出力曲線）を解析により求めた。また感度解析により、この電気出力曲線を用いた場合、実炉の熱流束をどの程度模擬することが可能か検討した。これらの解析、感度解析から得られた結論は以下の通りである。

- (1) ROSA-III電気ヒーターロッドは核燃料とは異なった内部構造を有し、異なった物質により構成されているため、スクラム直後の蓄積熱の放出挙動は核燃料とは異なる。しかし、本報で得られた最適電気出力曲線を用いることにより、核燃料の被覆管表面熱流束を良好に模擬することができる。
- (2) 最適電気出力曲線は、電気ヒーターロッドの熱出力を補正することにより蓄積熱放出量の相違を相殺するものである。核燃料の発熱量(ANS 曲線)に対する補正量は最大約700%であり、炉心スクラム後35秒以降は約30%以下である。
- (3) 正規化最適電気出力曲線（初期出力密度により正規化した最適電気出力曲線）は想定初期出力密度に依存する。このため、ROSA-III実験で単一の正規化電気出力曲線をすべての電気ヒーターロッドに適用した場合、炉心の半径方向及び燃料の軸方向の出力密度分布のため、すべての電気ヒーターロッドのすべての部位において熱流束の時間変化を正確に模擬することはできない。しかし出力密度分布による熱流束の誤差は、炉心スクラム後約35秒以降は消失する。
- (4) 最適電気出力曲線は、系圧力の想定時間変化（飽和温度の想定時間変化）に依存する。本報告では大破断LOCA時の系圧力変化を想定して最適電気出力曲線を求めたが、同一の電気出力曲線により小破断LOCA時の熱流束変化も良好に模擬されることを確認した。
- (5) ROSA-III装置では、電源容量の制約のため、初期出力密度は実炉相当値の約44%に制限されている。このような制約のため、炉心スクラム直後の被覆管表面熱流束は模擬できないが、実炉の炉心出力が44%に低下する炉心スクラム後約8秒以降は良好な模擬を期待できる。
- (6) 核燃料の被覆管表面熱流束は、燃料装荷後の経時変化の影響を受ける。ただし、炉心スクラム後60秒以降は経時変化の影響は少ない。
- (7) 従来ROSA-III試験で用いられていた電気出力曲線を用いた場合、核燃料の場合に比較して被覆管表面熱流束は最大70%過大となる。ただし、炉心スクラム後260秒以降では、従来用いられていた電気出力曲線は本報に求めた最適電気出力曲線に一致する。

REFERENCES

- (1) Anoda, Y. et al., "ROSA-III System Description for Fuel Assembly No.4", JAERI-M 9368 (February 1981)
- (2) "General Electric Standard Safety Analysis Report, BWR/6", DOCKET-STN-50477, GE. Co. (1978)
- (3) Tasaka, K. et al., "Study on the Similarity between ROSA-III Experiment and BWR LOCA (Pre-analysis of ROSA-III)", JAERI-M 6703 (August 1976)
- (4) Abe, N. et al., "Electric Power Transient Curve for ROSA-III Tests", JAERI-M 8728 (January 1980)
- (5) Morishima, A. et al., "Design For Power Reactor Fuel Assemblies Vol.1 (2nd Revision)", JAERI-M 4881 (June 1972)
- (6) "General Electric Company Analytical Model for Loss-of-Coolant Analysis in Accordance with 10 CFR 50 Appendix K", NEDO-20566 (1976)
- (7) American Nuclear Society Proposed Standard, ANS 5.1, "Decay Energy Release Rate Following Shutdown of Uranium-Fueled Thermal Reactors", (1971), (1973), (1978)
- (8) "WREM: Water Reactor Evaluation Model [Revision 1]", NUREG-75/056, (1977)
- (9) Nakamura, H. et al., "ROSA-III 200 % Double-ended Break Integral Test RUN 926", JAERI-M, to be published.
- (10) Ransom, V. H. et al., "RELAP5/MOD1 Code Manual Volume 1: System Models and Numerical Methods", NUREG/CR-1826 EGG-2070 (March 1982)
- (11) Wagner, R. J. et al., "RELAP5/MOD1 Code Manual Volume 2: Users Guide and Input Requirements", NUREG/CR-1826 EGG-2070 (March 1982)

Appendix

Appendix A に、ROSA-III 電気ヒーターロッド基本ケースのRELAP 5 用入力データを、Appendix B にBWR/6 核燃料基本ケースのRELAP 5 用入力データを示す。

Appendix A RELAP5 Input Data for ROSA-III Electric Heater Rod
Base Case

```

=ROSA-III POWER CURVE ANALYSIS *00000100
* RELAP5/MOD1 INPUT DATA *00000200
***** *00000300
***** MODULE NAME = RSA200T1 ***** *00000400
***** 1983.02.14 BY IRIKO ***** *00000500
***** + QUALITY = 0.05 ***** *00000600
***** + CORE FLOW RATE = 0.52942 KG/S ***** *00000700
***** + POWER = 28.005 KW ( ADJUSTING AVERAGE POWER ROD ) ***** *00000800
***** *00000900
* *00001000
* *00001100
0000100 TYPE NEW OPTION TRANSNT *00001200
* *00001300
* INPUT CHECK *00001400
0000101 RUN *00001500
* *00001600
* INPUT OUTPUT *00001700
0000102 SI SI *00001800
* *00001900
* T END MIN MAX CON MIE MAE MR *00002000
0000201 20.0 1.0-10 0.005 1 20 1000 1000 *00002100
0000202 50.0 1.0-10 0.005 1 100 4000 1000 *00002110
0000203 1000.0 1.0-10 0.010 1 500 4000 1000 *00002120
* *00002200
* *00002300
***** *00002400
***** *00002500
* *00002600
* CORE ( VOLUME 1 ) *00002700
* NAME TYPE *00002800
0010000 C001 SNGLVOL *00002900
* AREA LEN VOL HZ VR ELV ROUGH HYD FE *00003000
0010101 3.062-4 0.47 0.0 0.0 90.0 0.47 0.0 0.0 10 *00003100
* *00003200
* CTL PRESSURE TEMP ZERO *00003300
0010200 3 7.3000+6 561.0 0.0 *00003400
***** *00003500
* *00003600
* VOLUME 2 *00003700
* *00003800
* NAME TYPE *00003900
0020000 C002 TMDPVOL *00004000
* *00004100
* AREA LEN VOL HZ VR ELV ROUGH HYD FE *00004200
0020101 3.062-4 1.0 3.062-4 0.0 90.0 1.0 0.0 0.0 11 *00004300
* *00004400

```

1	2	3	4	5	6	7-R	8			
*	CTL	TRIP	ALPH	NUME			*00004500			
0020200	2						*00004600			
*							*00004700			
*	TIME	PRESSURE	QUALITY				*00004800			
0020201	0.0	7.35+6	0.05				*00004900			
0020202	6.0	6.95+6	0.05				*00005000			
0020203	10.0	7.41+6	0.05				*00005100			
0020204	14.0	7.15+6	0.05				*00005200			
0020205	18.0	6.41+6	0.05				*00005300			
0020206	20.0	6.37+6	0.05				*00005400			
0020207	23.0	6.15+6	0.05				*00005500			
0020208	30.0	5.47+6	0.05				*00005600			
0020209	40.0	4.40+6	0.05				*00005700			
0020210	50.0	3.49+6	0.05				*00005800			
0020211	60.0	2.75+6	0.05				*00005900			
0020212	69.3	2.25+6	0.05				*00006000			
0020213	73.5	2.25+6	0.05				*00006100			
0020214	80.0	2.05+6	0.05				*00006200			
0020215	90.0	1.78+6	0.05				*00006300			
0020216	100.0	1.47+6	0.05				*00006400			
0020217	109.0	1.08+6	0.05				*00006500			
0020218	120.0	0.88+6	0.05				*00006600			
0020219	140.0	0.68+6	0.05				*00006700			
0020220	160.0	0.58+6	0.05				*00006800			
0020221	180.0	0.52+6	0.05				*00006900			
0020222	200.0	0.47+6	0.05				*00007000			
0020223	220.0	0.47+6	0.05				*00007100			
0020224	240.0	0.42+6	0.05				*00007200			
0020225	260.0	0.37+6	0.05				*00007300			
0020226	280.0	0.36+6	0.05				*00007400			
0020227	300.0	0.32+6	0.05				*00007500			
0020228	400.0	0.22+6	0.05				*00007600			
*****							*00007700			
*							*00007800			
*		VOLUME 3					*00007900			
*							*00008000			
*	NAME	TYPE					*00008100			
0030000	C003	TMDPVOL					*00008200			
*							*00008300			
*	AREA	LEN	VOL	HZ	VR	ELV	ROUGH	HYD	FE	*00008400
0030101	3.062-4	1.0	3.062-4	0.0	90.0	1.0	0.0	0.0	11	*00008500
*										*00008600
*	CTL									*00008700
0030200	2									*00008800
*										*00008900
*	TIME	PRESSURE	QUALITY							*00009000
0030201	0.0	7.25+6	1.0							*00009100
0030202	6.0	6.85+6	1.0							*00009200
0030203	10.0	7.31+6	1.0							*00009300
0030204	14.0	7.05+6	1.0							*00009400
0030205	18.0	6.31+6	1.0							*00009500
0030206	20.0	6.27+6	1.0							*00009600
0030207	23.0	6.05+6	1.0							*00009700
0030208	30.0	5.37+6	1.0							*00009800
0030209	40.0	4.30+6	1.0							*00009900
0030210	50.0	3.39+6	1.0							*00010000
0030211	60.0	2.65+6	1.0							*00010100


```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-R-----8
0030212    69.3    2.15+6    1.0    *00010200
0030213    73.5    2.15+6    1.0    *00010300
0030214    80.0    1.95+6    1.0    *00010400
0030215    90.0    1.68+6    1.0    *00010500
0030216   100.0    1.37+6    1.0    *00010600
0030217   109.0    1.00+6    1.0    *00010700
0030218   120.0    0.80+6    1.0    *00010800
0030219   140.0    0.60+6    1.0    *00010900
0030220   160.0    0.50+6    1.0    *00011000
0030221   180.0    0.45+6    1.0    *00011100
0030222   200.0    0.40+6    1.0    *00011200
0030223   220.0    0.40+6    1.0    *00011300
0030224   240.0    0.35+6    1.0    *00011400
0030225   260.0    0.30+6    1.0    *00011500
0030226   280.0    0.29+6    1.0    *00011600
0030227   300.0    0.25+6    1.0    *00011700
0030228   400.0    0.15+6    1.0    *00011800
*****00011900
*****00012000
*
*      JUNCTION BETWEEN VOLUME 1 AND VOLUME 2      ( JUNCTION 1 )
*
*      NAME          TYPE
0110000    C011          TMDPJUN
*
*      FR          TO          AREA
0110101    002000000      001000000      3.062-4
*
*      CTL
0110200    1
*
*      TIME      FLOW-F      FLOW-G      VEL-J
0110201    0.0      0.370594    0.015826    0.0
*110202    10.00     0.12758     0.0      0.0
*110203    10.0001   0.00000     0.0      0.0
*110204    12.60     0.01276     0.0      0.0
*110205    14.60     0.0          0.0      0.0
*****00013900
*      JUNCTION BETWEEN VOLUME 1 (CORE) AND VOLUME 3
*      JUNCTION 2
*
*      NAME          TYPE
0120000    C012          SNGLJUN
*
*      FR          TO          AREA      FLOS      RLOS      CAHS      SUBC      TWOC
0120101    003000000      001010000      3.062-4    0.0      0.0      0.001    1.0    1.0
*
*      CTL      FLOW-F      FLOW-G      VEL-J
0120201    1      -0.51788    -0.01154    0.0
*****00015100
*****00015200
**      HEAT SLAB      ***00015300
*****00015400
*      00015500
*****00015600
***** AVERAGE POWER CHANNEL HEAT STRUCTURE *****00015700
*****00015800

```

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-R-----8
*
*          NH    NP   TYPE    S-FLG   L-COR
10010000    1    9    2        1       0.0
*
*          LOC-F   MESH-F
10010100    0        1
*
*          NO ITV   R-COR        NO ITV   R-COR        NO ITV   R-COR
10010101    3        0.003051 ,    1        0.0037511 ,    1        0.004835,
10010102    3        0.006135
*
*          FLG
*
*          CMP    NO    CMP    NO    CMP    NO    CMP    NO
10010201    1    3 , 2    4 , 3    5 , 4    8
*
*          FLG
*
*          SOURCE
10010301    0.0 3 , 1.0 4 , 0.0 5 , 0.0 8
*
*          FLG
10010400    0
*
*          TEMP    NP
10010401    554.8    9
*
***** LEFT *****
*          B.V.   INC    BCT    A-C    AREA    NH
10010501    0    0    0    0    0.0    1
*
***** RIGHT *****
*          B.V.          INC    BCT    A-C    SARFACE    NH
10010601    001010000    0    1    0    1.81173-2    1
*
*          TYPE    IS MULTI    L-D-H    R-D-H    NH
10010701    900    0.3168    0.0    0.0    1
*
***** LEFT *****
*          CHF    HYD    HEQ    CHAN    NH
10010801    0    0.0    0.0    0.0    1
*
***** RIGHT *****
*          CHF    HYD    HEQ    CHAN-L    NH
10010901    0    0.01306    0.01306    0.47    1
*
*****
***** HIGH POWER CHANNEL HEAT STRUCTURE *****
*****
*          NH    NP   TYPE    S-FLG   L-COR
10020000    1    9    2        1       0.0
*
*          LOC-F   MESH-F
10020100    0010
*

```

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-R-----8
*          FLG                                     *00021600
10020400   0010                                     *00021700
*                                                  *00021800
***** LEFT *****                             *00021900
*          B.V.  INC  BCT  A-C  AREA  NH         *00022000
10020501   0      0    0    0    0.0  1         *00022100
*                                                  *00022200
***** RIGHT *****                            *00022300
*          B.V.          INC  BCT  A-C  SARFACE  NH   *00022400
10020601   001010000      0    1    0    1.81173-2  1   *00022500
*                                                  *00022600
*          TYPE  IS MULTI  L-D-H  R-D-H  NH         *00022700
10020701   900      0.6832  0.0    0.0    1         *00022800
*                                                  *00022900
***** LEFT *****                             *00023000
*          CHF  HYD  HEQ  CHAN  NH               *00023100
10020801   0    0.0  0.0    0.0    1           *00023200
*                                                  *00023300
***** RIGHT *****                            *00023400
*          CHF  HYD  HEQ  CHAN-L  NH             *00023500
10020901   0    0.01306  0.01306  0.47    1       *00023600
*                                                  *00023700
*****00023800
*                                                  *00023900
***** HEAT STRUCTURE THERMAL PROPERTY DATA *****00024000
*                                                  *00024100
*****00024200
*                                                  *00024300
* INNER BN          TYPE          K-FLAG  CV-FLAG   *00024400
20100100          TBL/FCTN        1        1         *00024500
*                                                  *00024600
* HEATER           TBL/FCTN        1        1         *00024700
20100200          TBL/FCTN        1        1         *00024800
*                                                  *00024900
* OUTER BN         TBL/FCTN        1        1         *00025000
20100300          TBL/FCTN        1        1         *00025100
*                                                  *00025200
* INCONEL600      TBL/FCTN        1        1         *00025300
20100400          TBL/FCTN        1        1         *00025400
*                                                  *00025500
***** THERMAL CONDUCTIVITY  BTU/(S*FT*F) *****00025600
*                                                  *00025700
* INNER BN  TEMP  COND  TEMP  COND  TEMP  COND   *00025800
20100101   293.15 29.7824  773.15 28.0379  973.15 27.1656 *00025900
20100102   1173.15 26.2933  1273.15 26.8541 *00026000
*                                                  *00026100
* HEATER     TEMP  COND  TEMP  COND  TEMP  COND   *00026200
20100201   293.15 17.5081  373.15 13.8320  2873.15 11.6513 *00026300
*                                                  *00026400
* OUTER BN   TEMP  COND  * CONSTANT *           *00026500
20100301          5.7945 * CONSTANT *           *00026600
*                                                  *00026700
* INCONEL600 TEMP  COND  TEMP  COND  TEMP  COND   *00026800
20100401   294.26 14.8289  366.48 15.7012  477.59 17.5081 *00026900
20100402   588.71 19.1904  699.82 20.9350  810.93 22.8665 *00027000
20100403   922.04 24.7357  1033.15 26.8541  1144.26 28.9102 *00027100
*                                                  *00027200

```

```

-----*-----1-----*-----2-----*-----3-----*-----4-----*-----5-----*-----6-----*-----7-R-----*-----8
***** VOLUMETRIC HEAT CAPACITY          BTU/(FT3*F)          *****00027300
*
* INNER BN    TEMP      CAP      TEMP      CAP      TEMP      CAP
20100151     293.15  3.0716+5  783.15  4.0106+5  1123.15  5.0635+5  *00027500
20100152     1533.15 6.3512+5          *00027600
*
* HEATER
20100252     293.15  3.8496+6  373.15  3.7289+6  2873.15  3.8496+6  *00027700
*
* OUTER BN
20100351     293.15  3.0649+5  783.15  4.0173+5  1123.15  5.0702+5  *00027800
20100352     1533.15 6.3512+5          *00027900
*
* INCONEL600
20100451     294.26  3.7355+6  366.48  3.9100+6   477.60  4.0843+6  *00028000
20100452     588.71  4.2654+6  699.82  4.4398+6   810.93  4.6477+6  *00028100
20100453     922.04  4.9294+6 1033.15  5.1104+6  1144.26  5.2513+6  *00028200
*
*****00028300
***** POWER TRANSIENT DATA *****00028400
*****00028500
*
20290000     POWER          *00028600
*
*          TIME          POWER          *00028700
20290001         0.0          28.0050+3      *00028800
20290002         0.1          27.7224+3      *00028900
20290003         0.2          27.3387+3      *00030000
20290004         0.4          26.4625+3      *00030100
20290005         0.6          25.4442+3      *00030200
20290006         0.8          24.4000+3      *00030300
20290007         1.0          23.3667+3      *00030400
20290008         2.0          19.7275+3      *00030500
20290009         3.0          17.9000+3      *00030600
20290010         4.0          15.8000+3      *00030700
20290011         5.0          14.3000+3      *00030800
20290012         6.0          13.0000+3      *00030900
20290013         7.0          11.8000+3      *00031000
20290014         8.0          10.8000+3      *00031100
20290015         9.0           9.5000+3      *00031200
20290016        10.0           8.5000+3      *00031300
20290017        12.0           6.0082+3      *00031400
20290018        14.0           4.9988+3      *00031500
20290019        16.0           3.9206+3      *00031600
20290020        18.0           3.4728+3      *00031700
20290021        20.0           3.0913+3      *00031800
20290022        22.0           2.6016+3      *00031900
20290023        24.0           2.1966+3      *00032000
20290024        26.0           1.8958+3      *00032100
20290025        28.0           1.6785+3      *00032200
20290026        30.0           1.5254+3      *00032300
20290027        35.0           1.4599+3      *00032400
20290028        40.0           1.3493+3      *00032500
20290029        50.0           1.2328+3      *00032600
20290030        70.0           0.9941+3      *00032700
20290031       100.0           0.8500+3      *00032800
20290032       200.0           0.8122+3      *00032900

```

	1	2	3	4	5	6	7-R	8	
20290033	300.0		0.7645+3					*00033000	
20290034	400.0		0.7141+3					*00033100	
20290035	500.0		0.6861+3					*00033200	
20290036	1000.0		0.5825+3					*00033300	
*****								*00033400	
*****								*00033500	
*	MINOR EDIT								*00033600
*									*00033700
0000301	P		003010000					*00033800	
0000302	TEMPF		003010000					*00033900	
0000303	P		002010000					*00034000	
0000304	TEMPF		002010000					*00034100	
0000305	TEMPG		002010000					*00034200	
0000306	QUALS		002010000					*00034300	
0000307	P		001010000					*00034400	
0000308	TEMPF		001010000					*00034500	
0000309	TEMPG		001010000					*00034600	
0000310	QUALS		001010000					*00034700	
0000311	VOIDF		001010000					*00034800	
0000312	VOIDG		001010000					*00034900	
0000313	MFLOWJ		011000000					*00035000	
0000314	MFLOWJ		012000000					*00035100	
0000315	HTTEMP		001000101					*00035200	
0000316	HTTEMP		001000102					*00035300	
0000317	HTTEMP		001000103					*00035400	
0000318	HTTEMP		001000104					*00035500	
0000319	HTTEMP		001000105					*00035600	
0000320	HTTEMP		001000106					*00035700	
0000321	HTTEMP		001000107					*00035800	
0000322	HTTEMP		001000108					*00035900	
0000323	HTTEMP		001000109					*00036000	
0000324	HTTEMP		002000101					*00036100	
0000325	HTTEMP		002000102					*00036200	
0000326	HTTEMP		002000103					*00036300	
0000327	HTTEMP		002000104					*00036400	
0000328	HTTEMP		002000105					*00036500	
0000329	HTTEMP		002000106					*00036600	
0000330	HTTEMP		002000107					*00036700	
0000331	HTTEMP		002000108					*00036800	
0000332	HTTEMP		002000109					*00036900	
0000333	HTRNR		001000101					*00037000	
0000334	HTRNR		002000101					*00037100	
0000335	HTPOW		0010001					*00037200	
								*00037300	

Appendix B RELAP5 Input Data for Nuclear Fuel Rod Base Case

LISTING OF INPUT DATA FOR CASE 1

```

1  =ROSA-III POWER CURVE ANALYSIS *00000100
2  * RELAP5/MOD1 INPUT DATA *00000200
3  *****00000300
4  ***** MODULE NAME = BWR200C ( STEADY FLOW ) *****00000400
5  ***** 1983.02.17 BY IRIKO ( CSK ) *****00000500
6  ***** + QUALITY = 0.05 *****00000600
7  ***** + CORE FLOW RATE = 0.52942 KG/S *****00000700
8  ***** + INITIAL POWER = 28.005 KW *****00000800
9  *****00000900
10 * *00001000
11 * TYPE OPTION *00001100
12 0000100 NEW TRANSNT *00001200
13 * *00001300
14 * INPUT CHECK *00001400
15 0000101 RUN *00001500
16 * *00001600
17 * INPUT OUTPUT *00001700
18 0000102 SI SI *00001800
19 * *00001900
20 * T END MIN MAX CON MIE MAE MR *00002000
21 0000201 20.0 1.0-10 0.005 1 20 1000 1000 *00002100
22 0000202 50.0 1.0-10 0.005 1 100 4000 1000 *00002200
23 0000203 1000.0 1.0-10 0.010 1 500 4000 1000 *00002300
24 * *00002400
25 * *00002500
26 *****00002600
27 *****00002700
28 * *00002800
29 * CORE ( VOLUME 1 ) *00002900
30 * NAME TYPE *00003000
31 0010000 C001 SNGLVOL *00003100
32 * AREA LEN VOL HZ VR ELV ROUGH HYD FE *00003200
33 0010101 3.062-4 0.47 0.0 0.0 90.0 0.47 0.0 0.0 10 *00003300
34 * *00003400
35 * CTL PRESSURE TEMPERATURE ZERO *00003500
36 0010200 3 7.3000+6 561.0 0.0 *00003600
37 *****00003700
38 * *00003800
39 * VOLUME 2 *00003900
40 * *00004000
41 * NAME TYPE *00004100
42 0020000 C002 TMDPVOL *00004200
43 * *00004300
44 * AREA LEN VOL HZ VR ELV ROUGH HYD FE *00004400
45 0020101 3.062-4 1.0 3.062-4 0.0 90.0 1.0 0.0 0.0 11 *00004500
46 * *00004600
47 * CTL TRIP ALPH NUME *00004700
48 0020200 2 *00004800
49 * *00004900
50 * TIME PRESSURE QUALITY *00005000
51 0020201 0.0 7.35+6 0.05 *00005100
52 0020202 6.0 6.95+6 0.05 *00005200
53 0020203 10.0 7.41+6 0.05 *00005300
54 0020204 14.0 7.15+6 0.05 *00005400
55 0020205 18.0 6.41+6 0.05 *00005500
56 0020206 20.0 6.37+6 0.05 *00005600
57 0020207 23.0 6.15+6 0.05 *00005700
58 0020208 30.0 5.47+6 0.05 *00005800
59 0020209 40.0 4.40+6 0.05 *00005900
60 0020210 50.0 3.49+6 0.05 *00006000

```



```

123 *
124 *      JUNCTION BETWEEN VOLUME 1 AND VOLUME 2      ( JUNCTION 1 )
125 *
126 *      NAME      TYPE
127 0110000      C011      TMDPJUN
128 *
129 *      FR      TO      AREA
130 0110101      002000000      001000000      3.062-4
131 *
132 *      CTL
133 0110200      1
134 *
135 *      TIME      FLOW-F      FLOW-G      VEL-J
136 0110201      0.0      0.370594      0.158826      0.0
137 *110202      10.00      0.0      0.0      0.0
138 *****
139 *      JUNCTION BETWEEN VOLUME 1 (CORE) AND VOLUME 3
140 *      JUNCTION 2
141 *
142 *      NAME      TYPE
143 0120000      C012      SNGLJUN
144 *
145 *      FR      TO      AREA      FLOS      RLOS      CAHS      SUBC      TWOC
146 0120101      003000000      001010000      3.062-4      0.0      0.0      0001      1.0      1.0
147 *
148 *      CTL      FLOW-F      FLOW-G      VEL-J
149 0120201      1      -0.51788      -0.01154      0.0
150 *****
151 *****
152 **      HEAT SLAB      **
153 *****
154 *
155 *****
156 *****      AVERAGE POWER CHANNEL HEAT STRUCTURE      *****
157 *****
158 *
159 *      NH      NP      TYPE      S-FLG      L-COR
160 10010000      1      9      2      1      0.0
161 *
162 *      LOC-F      MESH-F
163 10010100      0      1
164 *
165 *      NO ITV      R-COR      NO ITV      R-COR      NO ITV      R-COR
166 10010101      5      0.005151 ,      1      0.0052653 ,      2      0.006135
167 *
168 *      FLG
169 *
170 *      CMP      NO      CMP      NO      CMP      NO
171 10010201      1      5 ,      2      6 ,      3      8
172 *
173 *      FLG
174 *
175 *      SOURCE
176 10010301      1.0      5 ,      0.0      6 ,      0.0      8
177 *
178 *
179 *      FLG
180 10010400      0
181 *
182 *      TEMP      NP
183 10010401      554.8      9
184 *

```



```

185 ***** LEFT ***** *00018500
186 * B.V. INC BCT A-C AREA NH *00018600
187 10010501 0 0 0 0 0.0 1 *00018700
188 * *00018800
189 ***** RIGHT ***** *00018900
190 * B.V. INC BCT A-C SARFACE NH *00019000
191 10010601 001010000 0 1 0 1.81173-2 1 *00019100
192 * *00019200
193 * TYPE IS MULTI L-D-H R-D-H NH *00019300
194 10010701 900 0.3226 0.0 0.0 1 *00019400
195 * *00019500
196 ***** LEFT ***** *00019600
197 * CHF HYD HEQ CHAN NH *00019700
198 10010801 0 0.0 0.0 0.0 1 *00019800
199 * *00019900
200 ***** RIGHT ***** *00020000
201 * CHF HYD HEQ CHAN-L NH *00020100
202 10010901 0 0.01306 0.01306 0.47 1 *00020200
203 * *00020300
204 ***** *00020400
205 ***** HIGH POWER CHANNEL HEAT STRUCTURE ***** *00020500
206 ***** *00020600
207 * *00020700
208 * NH NP TYPE S-FLG L-COR *00020800
209 10020000 1 9 2 1 0.0 *00020900
210 * *00021000
211 * LOC-F MESH-F *00021100
212 10020100 0010 *00021200
213 * *00021300
214 * FLG *00021400
215 10020400 0010 *00021500
216 * *00021600
217 ***** LEFT ***** *00021700
218 * B.V. INC BCT A-C AREA NH *00021800
219 10020501 0 0 0 0 0.0 1 *00021900
220 * *00022000
221 ***** RIGHT ***** *00022100
222 * B.V. INC BCT A-C SARFACE NH *00022200
223 10020601 001010000 0 1 0 1.81173-2 1 *00022300
224 * *00022400
225 * TYPE IS MULTI L-D-H R-D-H NH *00022500
226 10020701 900 0.6774 0.0 0.0 1 *00022600
227 * *00022700
228 ***** LEFT ***** *00022800
229 * CHF HYD HEQ CHAN NH *00022900
230 10020801 0 0.0 0.0 0.0 1 *00023000
231 * *00023100
232 ***** RIGHT ***** *00023200
233 * CHF HYD HEQ CHAN-L NH *00023300
234 10020901 0 0.01306 0.01306 0.47 1 *00023400
235 * *00023500
236 ***** *00023600
237 ***** HEAT STRUCTURE THERMAL PROPERTY DATA ***** *00023700
238 ***** *00023800
239 * *00023900
240 * UO2 PELET TYPE K-FLAG CV-FLAG *00024000
241 20100100 TBL/FCTN 1 1 *00024100
242 * *00024200
243 * HE GAS *00024300
244 20100200 TBL/FCTN 1 1 *00024400
245 * *00024500
246 * ZR-2 *00024600

```

247	20100300	TBL/FCTN	1	1				*00024700
248	*							*00024800
249	*****	THERMAL CONDUCTIVITY (W / M*K)						*****00024900
250	*							*00025000
251	* UO2 PELET	TEMP	COND	TEMP	COND	TEMP	COND	*00025100
252	20100101	323.15	7.871	373.15	7.243	473.15	6.113	*00025200
253	20100102	573.15	5.234	673.15	4.689	773.15	4.229	*00025300
254	20100103	973.15	3.55	1373.15	2.70	1773.15	2.40	*00025400
255	20100104	2273.15	2.15	2773.15	2.63	3073.15	2.95	*00025500
256	*							*00025600
257	* HE GAS							*00025700
258	20100201	323.15	0.1687	473.15	0.2148	673.15	0.2726	*00025800
259	20100202	773.15	0.2989	1773.15	0.55	2773.15	0.8	*00025900
260	*							*00026000
261	* ZR-2							*00026100
262	20100301	373.15	13.54	573.15	16.09	773.15	18.64	*00026200
263	20100302	973.15	21.19	1173.15	23.74	1373.15	26.29	*00026300
264	20100303	1573.15	28.84					*00026400
265	*							*00026500
266	*****	VOLUMETRIC HEAT CAPACITY (J/M3*K)						*****00026600
267	*							*00026700
268	* UO2 PELET	TEMP	CAP	TEMP	CAP	TEMP	CAP	*00026800
269	20100151	373.15	2.831+6	573.15	3.059+6	973.15	3.287+6	*00026900
270	20100152	1373.15	3.461+6	1773.15	3.623+6	2273.15	3.823+6	*00027000
271	20100153	2773.15	4.019+6	3073.15	4.136+6			*00027100
272	*							*00027200
273	* HE GAS							*00027300
274	20100251	323.15	2.1449+4	573.15	2.1432+4	773.15	2.1248+4	*00027400
275	20100252	2773.15	2.0000+4					*00027500
276	*							*00027600
277	* ZR-2							*00027700
278	20100351	373.15	1.932+6	573.15	2.063+6	773.15	2.194+6	*00027800
279	20100352	973.15	2.325+6					*00027900
280	*							*00028000
281	*****							*****00028100
282	*****	POWER TRANSIENT DATA						*****00028200
283	*****							*****00028300
284	*							*00028400
285	20290000	POWER						*00028500
286	*							*00028600
287	*	TIME		POWER				*00028700
288	20290001	0.0		28.005+3				*00028800
289	20290002	0.1		27.522+3				*00028900
290	20290003	0.2		25.889+3				*00029000
291	20290004	0.4		20.742+3				*00029100
292	20290005	0.6		16.405+3				*00029200
293	20290006	0.8		13.714+3				*00029300
294	20290007	1.0		9.404+3				*00029400
295	20290008	2.0		4.279+3				*00029500
296	20290009	3.0		2.570+3				*00029600
297	20290010	4.0		2.024+3				*00029700
298	20290011	5.0		1.773+3				*00029800
299	20290012	7.0		1.618+3				*00029900
300	20290013	10.0		1.440+3				*00030000
301	20290014	20.0		1.257+3				*00030100
302	20290015	30.0		1.181+3				*00030200
303	20290016	50.0		1.066+3				*00030300
304	20290017	70.0		0.992+3				*00030400
305	20290018	100.0		0.926+3				*00030500
306	20290019	200.0		0.813+3				*00030600
307	20290020	300.0		0.7637+3				*00030700
308	20290021	400.0		0.7144+3				*00030800

309	20290022	500.0	0.6853+3	*00030900
310	20290023	600.0	0.6567+3	*00031000
311	20290024	700.0	0.6357+3	*00031100
312	20290025	800.0	0.6150+3	*00031200
313	*****			*00031300
314	*****			*00031400
315	* MINOR EDIT			*00031500
316	*			*00031600
317	0000301	P	003010000	*00031700
318	0000302	TEMPF	003010000	*00031800
319	0000303	P	002010000	*00031900
320	0000304	TEMPF	002010000	*00032000
321	0000305	TEMPG	002010000	*00032100
322	0000306	QUALS	002010000	*00032200
323	0000307	P	001010000	*00032300
324	0000308	TEMPF	001010000	*00032400
325	0000309	TEMPG	001010000	*00032500
326	0000310	QUALS	001010000	*00032600
327	0000311	VOIDF	001010000	*00032700
328	0000312	VOIDG	001010000	*00032800
329	0000313	MFLOWJ	011000000	*00032900
330	0000314	MFLOWJ	012000000	*00033000
331	0000315	VOIDFJ	012000000	*00033100
332	0000316	VOIDGJ	012000000	*00033200
333	0000317	RHOFJ	012000000	*00033300
334	0000318	RHOGJ	012000000	*00033400
335	0000319	UFJ	012000000	*00033500
336	0000320	UGJ	012000000	*00033600
337	0000321	HTTEMP	001000101	*00033700
338	0000322	HTTEMP	001000102	*00033800
339	0000323	HTTEMP	001000103	*00033900
340	0000324	HTTEMP	001000104	*00034000
341	0000325	HTTEMP	001000105	*00034100
342	0000326	HTTEMP	001000106	*00034200
343	0000327	HTTEMP	001000107	*00034300
344	0000328	HTTEMP	001000108	*00034400
345	0000329	HTTEMP	001000109	*00034500
346	0000330	HTTEMP	002000101	*00034600
347	0000331	HTTEMP	002000102	*00034700
348	0000332	HTTEMP	002000103	*00034800
349	0000333	HTTEMP	002000104	*00034900
350	0000334	HTTEMP	002000105	*00035000
351	0000335	HTTEMP	002000106	*00035100
352	0000336	HTTEMP	002000107	*00035200
353	0000337	HTTEMP	002000108	*00035300
354	0000338	HTTEMP	002000109	*00035400
355	0000339	HTRNR	001000101	*00035500
356	0000340	HTRNR	002000101	*00035600
357	0000341	HTHTC	001000101	*00035700
358	0000342	HTHTC	002000101	*00035800
359	0000343	HTPOW	0010001	*00035900
360	.			*00036000