

J A E R I - M
93-108

燃料棒内出力分布計算コード：RODBURN

1993年5月

内田 正明・斎藤 裕明*

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

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1993
編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

燃料棒内出力分布計算コード：RODBURN

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部
内田正明・斎藤裕明*

(1993年4月6日受理)

燃料を高燃焼度まで照射すると、出力分布は照射初期とは異なったものになる。とくに半径方向には、燃料表面でのピーキングが大きくなる場合が多く、リム効果として知られる燃料組織変化の原因になることがある。燃料の照射実験において、このような出力分布を簡便に解析するための手段として、多領域の燃焼過程計算コードRODBURNを開発した。

このコードは、既成の燃焼コードORIGENのアクチニドに関する部分を中心とし、燃料表面に偏ったプルトニウムの生成を扱うために、これに共鳴吸収計算コードRABBLEを結合したものである。高燃焼度までの燃料照射実験についての検証計算により、コードは種々の初期濃縮度をもつ燃料における半径方向燃焼度分布を再現しうることが示された。

RODBURN: A Code for Calculating Power Distribution in Fuel Rods

Masaaki UCHIDA and Hiroaki SAITO*

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

(Received April 6, 1993)

Irradiation of fuel to high burnup causes considerable difference in power distribution the initial state. Particularly in the radial direction, peaking of power density, and hence of burnup at the periphery causes a microstructural change known as the rim effect. To provide a simple analytical tool for dealing with such power or burnup distribution, a multi-region burnup analysis code RODBURN has been developed.

RODBURN incorporates the actinide-related part of the burnup analysis code ORIGEN as the central routine and also the resonance integral code RABBLE for calculating the localized plutonium production.

Calculations on some high-burnup experimental fuels have revealed that the code can reproduce the radially-localized burnup distributions in fuels having various initial enrichments.

Keywords: Code, RODBURN, Fuel, Irradiation, Power Distribution, Burnup, ORIGEN, Resonance Integral

* CRC Research Institute, Inc.

目 次

| | |
|----------------------------|----|
| 1. 序 論 | 1 |
| 2. アルゴリズム | 3 |
| 2.1 ORIGENとRABBLEの利用 | 3 |
| 2.2 出力分布の計算法 | 5 |
| 3. 計算例と検証結果 | 14 |
| 3.1 半径方向の出力, 燃焼度分布 | 14 |
| 3.2 軸方向の出力分布 | 15 |
| 4. 結 言 | 21 |
| 参考文献 | 21 |
| 付録1 入力マニュアル | 22 |
| 付録2 オフライン・プロッターの使用法 | 28 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Algorithm | 3 |
| 2.1 Use of ORIGEN and RABBLE Codes | 3 |
| 2.2 Calculation of Power Distribution | 5 |
| 3. Application and Verification | 14 |
| 3.1 Radial Power and Burnup Distributions | 14 |
| 3.2 Axial Power Distribution | 15 |
| 4. Conclusion | 21 |
| References | 21 |
| Appendix 1 Input Manual | 22 |
| Appendix 2 Manual of Off-line Plotter | 28 |

1. 序論

燃料を原子炉で照射することによって起こる諸変化を検討する技術分野は、一般に燃料の燃焼過程そのものは対象外として扱うことで成り立ってきた。すなわち、燃焼過程は炉物理の分野に任せ、発熱量や分布は与えられた条件として、そのほかの物理、化学的な変化を問題にしてきたのである。

初期の燃料ではこのようなアプローチで十分であった。取り出し燃焼度が低く、主として ^{235}U の燃焼にたよった運転が行われていたので、取り出し時の出力およびその分布は装荷時のそれと大きく変わることがなかったからである。現在では5%を超える取り出し燃焼度が検討されるようになってきた。これは装荷時の濃縮度を高めにする代わりに、 ^{235}U がほとんど消失したあとでもプルトニウムの生成に頼った運転を続けるものである。プルトニウムの生成は空間的にきわめて偏っているので、高燃焼度では出力分布は初期の分布とは大きく異なることになる。プルトニウム生成の偏りによる効果として、現在問題にされている現象にリム効果がある。これはペレット最外周の低温部に大きな組織変化が生ずるものである。

このような高燃焼度における出力分布は、もちろん炉物理、燃焼コードの組み合わせによって計算することが可能である。一般にそのような計算は、狭義の炉物理コードすなわちあたえられた炉心配置における中性子のバランスを計算するコードと、核反応による組成変化を時間を追って計算する燃焼コードを交互に用いることによって行われる。さらに細かくいえば、炉物理計算は中性子のエネルギー分布に重点をおいた計算と、空間分布に重点をおいた計算を交互におこなう場合が多い。

さらに最近では、ある時点での中性子束分布と燃焼過程の計算を、並行して計算していく試みもなされるようになってきた。そのようなコードのうち、かなり局所的な計算が可能なものの代表例として、WIMS-E⁽¹⁾がある。ただし、WIMS-Eはコードそのものは非公開である。

しかし燃料の化学的变化を主として調べる燃料研究者の立場からすると、このようなコードも十分目的に答えるものとはいい難い。

まず第一に、原子炉内でおこるプロセスをどこまでも詳細に追跡しようとすれば、コードは際限もなく複雑なものになって行く。一般に、炉物理コードは燃料研究者にとって、取扱いが複雑すぎる場合が多く、またもとめる情報が必ずしも直接アウトプットとして出てくるとは限らない。

第二に、厳密な炉物理的アプローチをとっても、精度の良い出力推定は、各原子炉ごとに蓄積された経験的なノウハウなしには困難であるということがある。とくにBR-3、HBWRなどの研究炉では、それぞれの炉に適したコードの使用法によって出力推定を行ってきたものである。燃料研究者は個々の研究炉に専門化する訳には行かない。

主として燃料の化学的な状態変化を問題にする立場からすると、簡単な入力データによ

って出力、燃焼度、組成の分布が直接計算されて出てくることが何より必要なことである。これは精度に関する要求は多少ゆるめても良いということである。精度に多少問題があるても、これまで燃焼にともなう出力分布の変化をほとんど無視した取扱いが行われてきたことからすれば、大きな変化である。

このような考慮にたって、燃焼にともなう燃料棒内出力分布の変化を計算するコード R O D B U R N を開発した。このコードは複数の既存のコードを接続して用いるものである。コードの本体部分は、燃焼コード O R I G E N ⁽²⁾ のうちアクチニドに関する部分を用いた。O R I G E N はほんらい空間構造をもたないが、本コードにおいては燃料を空間メッシュに分け、それぞれから O R I G E N をよびだして燃焼計算を進めるようにしている。燃料表面に局所化した共鳴吸収によるプルトニウム生成は、このような扱いによっても計算することができない。そこで計算の最初に共鳴吸収に関する計算を行い、空間メッシュごとに共鳴積分をもとめて O R I G E N の核データライブラリーを改訂するという方法をとっている。そのために、多領域多群コード R A B B L E ⁽³⁾ をサブコードとして採用した。

このコードの使用法としては、大別して次の二つがある。

第1に、熱中性子束の履歴が、軸方向分布とともに入力データとして与えられる場合である。この場合、コードは半径方向の振り分けが加わる以外は通常の論理にしたがって組成の変化および発熱量を計算していく。

第二に、燃料の照射実験においては、燃料棒の平均的な発熱量の履歴だけがデータとして与えられ、その分布および組成の変化が求めたい場合がある。本コードはそのような場合を扱うことができるが、その場合、中性子束の軸方向相対分布に関しては仮定を行い、入力で指定しなければならない。コードはそれにしたがって発熱量の履歴に適合するような中性子束の絶対値を求め、組成の変化の計算を進めていくものである。

同じような目的をもって、燃料棒内の詳細な燃焼計算を行うコードとして、電力中研で開発された A N R B ⁽⁴⁾ がある。A N R B の場合、中性子輸送計算と燃焼計算を交互に行つて行く点で、より詳細な計算になっている。一方、R O D B U R N では、非常に簡便な扱いではあるが、燃料棒軸方向の出力変化も扱えるようにしている点に特徴がある。R O D B U R N は、燃料研究者のための手軽なコードという性格を、より強調しているものである。

2. アルゴリズム

RODBURNの計算の流れを第1図に示す。また、主要なサブルーチン構成を第2図に示す。履歴計算に入る前に、適当に設定された組成の下で、共鳴積分の計算を1回だけ行う。履歴を追った出力分布変化の計算は、中性子束の絶対値の履歴を入力する場合と、発熱量の履歴と中性子束の相対分布を入力して、中性子束の絶対値を計算する場合に分かれ る。

2. 1 ORIGENとRABBLEの利用

本コードはORIGENとRABBLEという、2つの既成のコードを、いずれも一部修正して利用しているものである。

ORIGENはORNLで開発された、原子炉内での核種の生成と消滅を計算するコードであり、世界中で広く使われている。このコードはその後、核種の一部抽出などの複雑な操作も扱えるバージョンORIGEN2に拡張されたが、本コードで利用しているのは旧バージョンである。ORIGENは、全FPおよびアクチニド核種の生成、消滅を計算する機能を有する。しかし本コードでは、出力分布の変化を計算するために利用するのであるから、計算時間の節約のためにU、Np、Puの3元素の同位体に関する部分だけを切り離して利用している。

ORIGENは、単位重量の核燃料を出発点とし、熱中性子束の履歴、または発熱量の履歴にしたがって核種の組成の変化を計算する。前者のオプションが基本的なものであり、後者の計算では入力された発熱量に見合った熱中性子束を求め、それにしたがって核種の増減を計算することになる。本コードでは、ORIGENは前者の形で使い、局所的な発熱量の分布に対応する中性子束分布は、自身で計算する方針をとっている。

ORIGENは、「燃料棒」を想定していない。ORIGENは、あくまで単位重量の燃料物質が、ある中性子束場におけることを想定するのみである。もし中性子束の絶対値とミクロ断面積が、空間的にも、エネルギー的にも、極度に微分的に決定できるならば、「単位重量の燃料」が希薄な形で露出していても、燃料棒の一部であっても、反応率が計算できることになる。熱中性子による核反応の場合には、中性子束と断面積を極度に微分的に扱わなくても、両者の積によって反応率が求められる。したがって、燃料棒を領域に分け、それぞれにおいて少數群の中性子束を定義してORIGENにより計算すれば、反応の分布、発熱量の分布が求められることになる。しかし共鳴領域での核反応については、このような扱いでは、空間分布をうまく計算できない。

共鳴領域での核反応は、ごく狭いエネルギー幅の中性子に対してのみ、非常に大きい確率で反応が起こる。これを多群計算で扱おうとすると、きわめて多数のエネルギー群が必要になる。このため、一般に炉物理計算においては、これを広いエネルギー範囲にわたって平均化した「共鳴積分」が使われる。

共鳴積分は、断面積のある特定のエネルギー・スペクトルの型について平均化したものであるから、物性値とはいはず、想定している炉型に依存する。しかし一般には、共鳴領域においては、単位レサジーあたりの中性子束が一定であるという（ $1/E$ 分布）仮定が行われる。その場合には、もしごく微量の燃料物質が、ある中性子束場の中に孤立して存在しているならば、共鳴積分は、物性値的な性格をもつことになる（無限希釈共鳴積分）。

実際には、共鳴核反応はきわめて狭いエネルギー幅の中性子にたいして、きわめて大きい確率で起こるため、構造をもった燃料中の ^{238}U のような濃度の大きい核種に対しては、外部からやってくる中性子にたいして自己遮蔽効果が非常に大きくなる。ORIGENは、主として燃料棒を想定しているが、空間的な構造をもたず、平均的な中性子束にたいして平均的な反応量を計算するコードである。したがって、内蔵された共鳴積分は無限希釈共鳴積分ではなく、平均的な燃料棒にたいして平均化されたものである。燃料の半径方向の出力分布、反応分布を詳細に計算する場合には、燃料内の各領域において異なる共鳴積分を用いなければならない。

共鳴吸収計算の流れを、第3図に示す。この計算を行うのは、 ^{238}U と ^{240}Pu （MOX燃料の場合）のみであり、いずれも中性子捕獲反応に関してだけ、ORIGENのデータを変更する。

共鳴吸収に関して、一般に「核データ」として与えられているのは、個々の吸収線の位置や幅に関するデータである。これをまず多群計算用のミクロ断面積に変換しなければならず、さらにスペクトルに関する適当な仮定の下に、これをORIGENの3定数で規定される実質的に3群計算用の定数に変換しなければならない。

この第1の段階を、共鳴吸収計算用のコードRABBLEをサブコードとして取り込むことにより扱っている。RABBLEは、共鳴吸収を計算するための超多群セル計算コードである。最高12の核種、800の共鳴線、20の領域を扱う。エネルギー領域は、25の広域群、1000の中間群に分けられる。中間群はさらに必要に応じて、微細群に分けられる。RABBLEは、3.52 keVから0.5 eVまでのエネルギー範囲で減速過程の計算を行う。すなわち、捕獲に関する共鳴積分が次の形で定義される。

$$(RI) = \frac{\int_{0.5\text{eV}}^{3.52\text{keV}} \sigma(E) \phi(E) dE}{\int_{0.5\text{eV}}^{3.52\text{keV}} \phi(E) dE} \quad (1)$$

ここで $\phi(E)$ は単位エネルギー幅の中性子束であり、 $1/E$ に比例するものと仮定する。 $\sigma(E)$ は考へている核種の捕獲断面積である。

RABBLEで扱わない高エネルギー領域（3.52 - 820 keV）については、WIMS-Dコードのライブラリーにある無限希釈共鳴積分によって補完している。このエ

エネルギー範囲では、自己吸収効果はほとんど考えなくて良い。

R A B B L E 計算用の核データ・ライブラリーとしては、E N D F - B / IV 分離共鳴パラメータを用いている。

2. 2 出力分布の計算法

(1) 中性子束を入力する場合

ORIGIN (旧バージョン) の論理に従い、中性子束は熱中性子束を基準にし、高速中性子束、共鳴領域中性子束は、これからスペクトルパラメータによって比例計算される。熱中性子束は燃料棒の軸方向位置、半径方向位置、時間の関数である。

$$\phi_t = \phi_t(r, z, t) \quad (2)$$

入力されるのは、平均中性子束と軸方向の相対分布である。したがって、各軸方向位置ごとに、半径方向に平均化された中性子束の絶対値が与えられることになる。

$$\phi_{t^a}(z, t) = \int_0^{r_p} r \phi_t(r, z, t) dr / (1/2 r_p^2) \quad (3)$$

ここで r_p はペレットの半径である。

スペクトルパラメータは、ORIGIN に従い、次の 3 つが使われる。

$$\text{THERM} = \sqrt{\frac{\pi}{4} \frac{T_0}{T}} \quad (4)$$

ここで T は熱中性子温度 (K) 、 $T_0 = 293, 16$ K である。

$$\text{RES} = (\text{単位レサジーあたりの共鳴中性子束}) / \text{熱中性子束} \quad (5)$$

$$\text{FAST} = \text{高速中性子束} / \text{熱中性子束} \quad (6)$$

ここで熱中性子領域の上限は 0.5 eV、高速領域の下限は 1 MeV である。

これら 3 定数は、炉型毎に決められた値がコードに内蔵されている。それらを第 1 表に示す。PWR, BWR については、ORIGIN の推奨値⁽⁵⁾をそのまま用いている。重水炉 (HWR) としては、ハルデン炉 (HBWR) だけを取り上げており、3 定数はハルデン計画で計算したスペクトル分布にもとづいて求めた。ただし、一般の重水炉にも、かなり適用性はあるものと思われる。

軸方向には、これら 3 群のスペクトル分布と空間分布は変数分離して扱う。すなわち、ある軸方向位置の熱中性子束が別の位置の 2 倍であるならば、共鳴領域中性子束、高速中性子束も 2 倍であるとする。

しかし半径方向には、スペクトルによって異なった扱いをする。高速、共鳴領域中性子束については、平均中性子束を各半径位置でそのまま用いる。

$$\bar{\phi}_t(r, z, t) = \phi_t(z, t), \quad \bar{\phi}_r(r, z, t) = \phi_r(z, t) \quad (7)$$

熱中性子束の半径方向分布は、濃縮度が大きいと中心に向かって大きく落ち込むことがある(flux depression)。このため、半径方向熱中性子束分布は、あらかじめ炉型毎、濃縮度レベルごとに計算された相対分布をコードに内蔵しておき、実際の濃縮度に従ってこれを内挿して用いることにしている。これらの相対分布を第2表に示す。ただし、HWRにおける分布は、別に第3表に示す。初期の濃縮度は一般に半径方向に一様であるが、燃焼が進むにしたがって、残存²³⁵Uの分布は不均一になる。さらにプルトニウムの生成はきわめて不均一である。しかしこれらの不均一の影響は無視し、ある軸位置でのfissile物質の平均濃度(²³⁹Pu, ²⁴¹Puは²³⁵Uと等価としてあつかう)を用いて表の数値を内挿する。

第2表の熱中性子束相対分布は、WIMS-Dコードによって計算されたものである。重水炉に関する数値は、ハルデン・プロジェクトによって推奨された次の方法によったものである。

$$\phi_t(r) = C I_0(\kappa r) \quad (8)$$

ここでCは規格化の定数、 I_0 は変形ベッセル関数、rは半径(cm)、 κ は拡散距離の逆数(cm⁻¹)であり、次式で与えられる。

$$\kappa = 0.328 (\varepsilon \rho)^{0.8} + 0.54 d_p^{-0.82} (\varepsilon \rho)^{0.19} \quad (9)$$

ここで ε は濃縮度(%)、 ρ はペレット密度の理論密度比、 d_p はペレット直径(cm)である。

²³⁸Uによる共鳴吸収は、²³⁸Uの量が大きいだけに強い自己遮蔽効果を示し、そのためにプルトニウムの生成はきわめて表面に偏った分布を示す。²⁴⁰PuはMOX燃料の場合でも量はあまり大きくないが、共鳴吸収断面積(共鳴積分)はさらに大きい。2.1で述べたように、このように表面に偏った分布はORIGENでは扱うことができない。そこで本コードでは、共鳴吸収計算コードRABBLEをサブコードとして取り込み、燃焼過程の計算の最初に各半径方向領域ごとに上記2つの核種について共鳴積分を計算する。その後のORIGENによる計算において、これらのデータに関してだけはORIGENの本来のライブラリーデータを使わず、RABBLEの計算結果を用いている。

(2) 発熱量の履歴を入力する場合

燃料の照射実験においては、燃料棒の平均線出力密度の履歴だけが報告されていて、その分布の履歴および核種組成の変化を計算したい場合がある。そのような場合を簡便に扱うために、この計算オプションを設けた。通常の計算手順とは逆に、与えられた平均発熱量に見合う中性子束を求めていくことになる。ただし一般に、報告された出力履歴も、適当な仮定の下にプルトニウム生成などを計算した結果であるので、なるべく(1)の方法で中性子束の絶対値の履歴を仮定した計算を何度かを行い、平均出力履歴そのものも検討対象とする方が望ましい。

1) 中性子束分布の表現

本コードは、炉物理計算と燃焼計算を並行して行う方針をとっていないので、中性子束分布については適当な仮定を行わなければならない。高速、共鳴中性子束については、(1)の場合と同じく、半径方向に一様とし、熱中性子束についてはfissile物質濃度に応じて表を参照して分布を定めて行く。

軸方向分布は、(1)の場合と同様に、スペクトルによらず同じ形を仮定する。軸方向分布として最も簡単なものは、余弦分布である。余弦分布をつぎのように修正して、やや変わった分布も表現できるようにした。

$$\bar{\phi}(z, t) = A \cos \left\{ \pi \left(\frac{z - z_m}{L + \delta_b + \delta_t} \right) \right\} / \cos \left\{ \alpha \pi \left(\frac{z - z_m}{L + \delta_b + \delta_t} \right) \right\} \quad (10)$$

$$z_m = (L + \delta_b + \delta_t) / 2 \quad (11)$$

ここでAは規格化定数、Lは燃料スタックの全長、zはスタック下端からの距離、 δ_b 、 δ_t はそれぞれ下端、上端における「外挿距離」である。 α は「余弦分布より平坦化した分布」を表現するための定数であり、 $0 \leq \alpha < 1$ の範囲で変えられる。 $\alpha = 0$ とすれば分母は1になるので、余弦分布そのものとなる。 α を大きくするほど分布は平坦化する。

δ_b 、 δ_t の2つの外挿距離は、炉物理でいう外挿距離よりは、むしろ研究炉における特殊な照射条件を表現することをねらったものである。燃料の照射実験においては、炉心の高さより短い試験燃料棒を、炉心の上方、または下方に偏って装荷することが良くある。このような場合の中性子束分布は第2図に示すように、2つの外挿距離 δ_b 、 δ_t をそれぞれ独立に設定することにより表現することができる。

このような分布の形をあらかじめ計算しておき、相対分布を数値として入力することができる。どちらの場合も、軸方向中性子束相対分布は照射期間中に数回変更することができる。

2) 絶対中性子束の計算

各タイムステップの当初において、(r, z)全メッシュにおいて各核種の濃度が与えられている。断面積は固定である。また中性子束の相対分布も与えられている。この相対分布を表す規格化された分布関数をF(r, z)とすれば、(全燃料棒) 平均中性子束のあるレベル ϕ_0 に対応する全発熱量は

$$Q_0 = E_f \int \phi_0 \sigma_f F(r, z) dv \quad (12)$$

で求められる。ここで σ_t は核分裂断面積、 E_t は核分裂あたりのエネルギーである。入力した平均線出力密度に対応する全発熱量を Q とすれば、実際の平均中性子束は単純に

$$\phi = \phi_0 \frac{Q}{Q_0} \quad (13)$$

で与えられる。各位置での中性子束は、これから $F(r, z)$ を使って配算される。ただし実際には、これらの計算は各核種、高速中性子、熱中性子を全部考慮して行われる。

局所中性子束が求められたので、ORIGENによってそのタイムステップ中の各核種の増減が計算される。ORIGENは、(12)の計算の時とあわせて、2回呼ばれることになる。

ここで注意すべきことは、入力ではひとつのタイムステップの間、一定の発熱量が仮定されていることである。ORIGENによる計算では、そのステップの間も核種の量は変動し、その変動にしたがった積算発熱量すなわち燃焼度が計算される。したがってタイムステップ幅があまり粗いと、出力に関する入力データと燃焼度、核種濃度との間に食い違いが生ずることになる。これを防ぐために、入力されたタイムステップを再分割して、ステップ幅が大きくならないようにしている。

第1表 スペクトル3定数、THERM, RES, FAST

| 炉型 | THERM | RES | FAST |
|----------|-------|-------|-------|
| PWR | 0.701 | 0.304 | 2.010 |
| BWR | 0.676 | 0.307 | 1.514 |
| HWR | 0.450 | 0.100 | 1.500 |
| PWR(MOX) | 0.592 | 0.366 | 2.390 |
| BWR(MOX) | 0.632 | 0.355 | 1.694 |

第3表 濃縮度に依存する半径方向熱中性子束分布(HWRの場合)

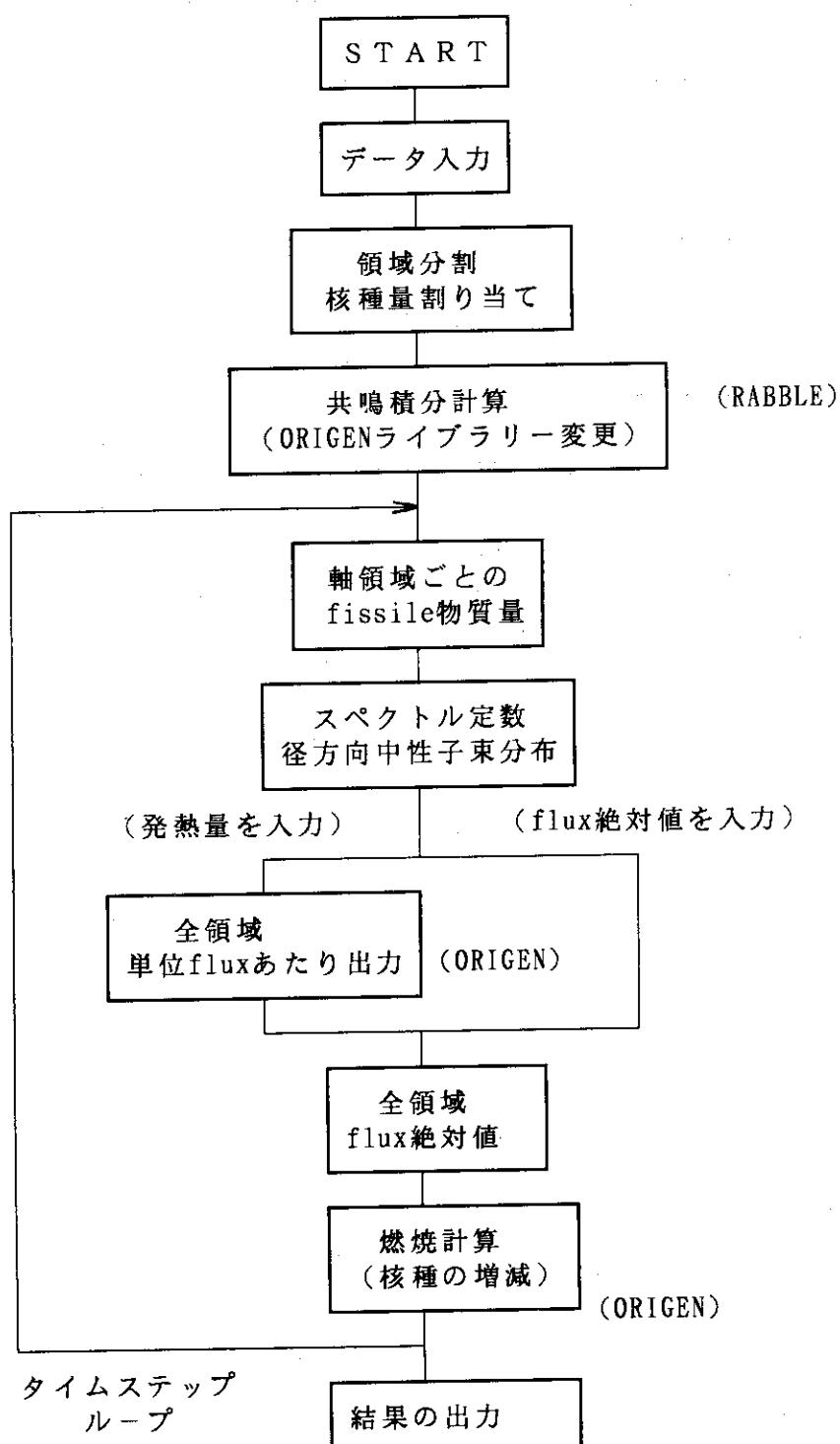
| RADIUS (mm) | HWR | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 % | 3 % | 5 % | 7 % |
| 2.01 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 2.84 | 1.008 | 1.025 | 1.045 | 1.068 |
| 3.47 | 1.014 | 1.043 | 1.077 | 1.117 |
| 4.01 | 1.020 | 1.060 | 1.109 | 1.165 |
| 4.49 | 1.026 | 1.078 | 1.141 | 1.216 |
| 4.91 | 1.032 | 1.096 | 1.174 | 1.267 |
| 5.31 | 1.038 | 1.114 | 1.207 | 1.319 |
| 5.67 | 1.043 | 1.132 | 1.241 | 1.372 |
| 6.02 | 1.049 | 1.150 | 1.276 | 1.428 |
| 6.34 | 1.055 | 1.168 | 1.310 | 1.483 |

第2表 濃縮度に依存する半径方向熱中性子束分布

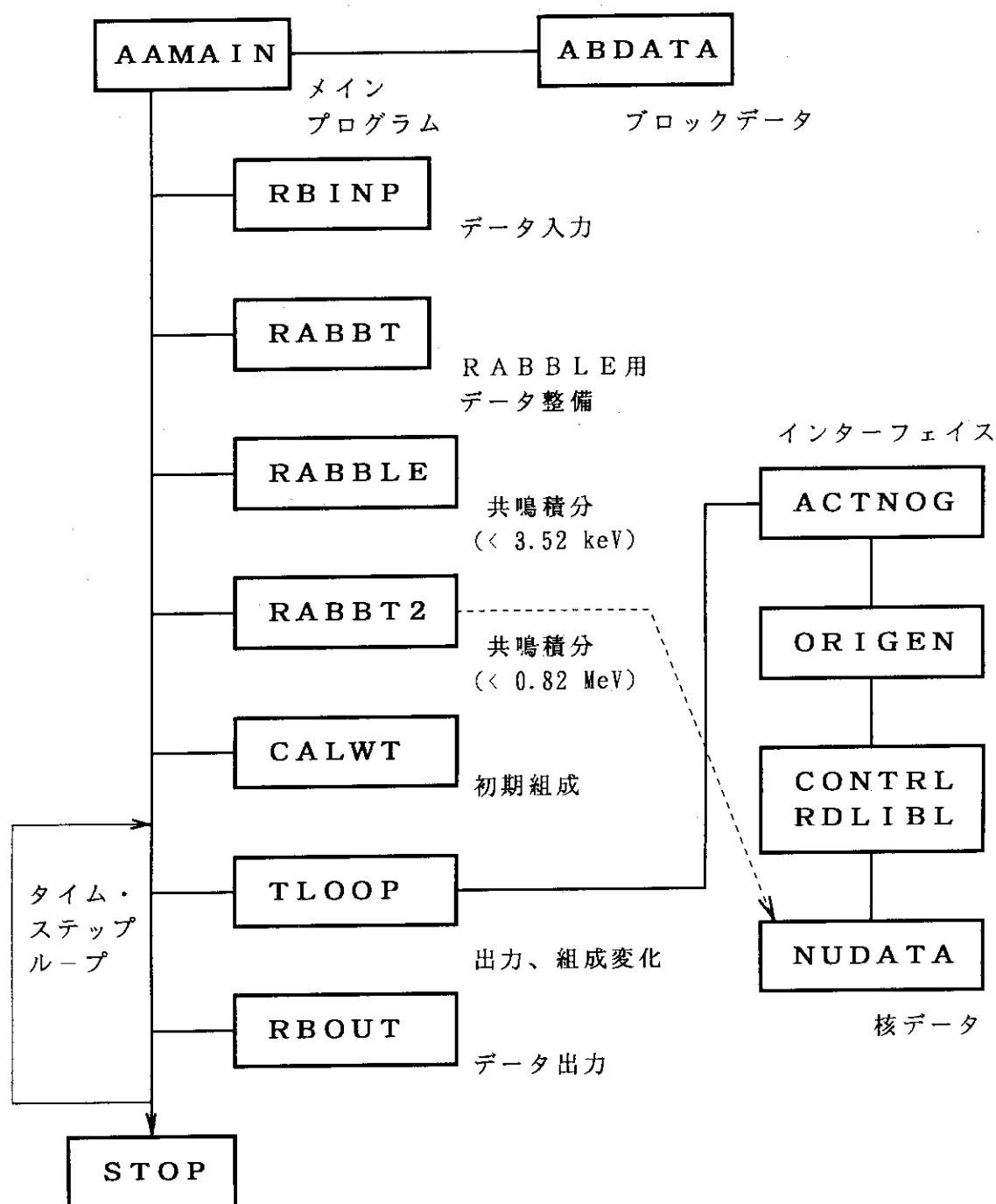
| RADIUS (MM) | PWR(U) | | | | | | PWR(MOX) | | |
|----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|--------|--|
| | 1.% | 3.% | 5.% | 7.% | 0.25% | 3.78% | 7.31% | 10.83% | |
| 1.27 | 0.985 | 0.964 | 0.944 | 0.923 | 0.996 | 0.901 | 0.798 | 0.703 | |
| 1.83 | 0.987 | 0.968 | 0.950 | 0.932 | 0.996 | 0.911 | 0.819 | 0.731 | |
| 2.25 | 0.989 | 0.974 | 0.959 | 0.944 | 0.997 | 0.926 | 0.849 | 0.774 | |
| 2.59 | 0.992 | 0.981 | 0.970 | 0.958 | 0.998 | 0.945 | 0.886 | 0.826 | |
| 2.90 | 0.995 | 0.989 | 0.982 | 0.976 | 0.998 | 0.967 | 0.930 | 0.890 | |
| 3.18 | 0.999 | 0.998 | 0.997 | 0.996 | 1.000 | 0.993 | 0.982 | 0.966 | |
| 3.43 | 1.004 | 1.009 | 1.014 | 1.019 | 1.001 | 1.024 | 1.045 | 1.059 | |
| 3.67 | 1.009 | 1.021 | 1.034 | 1.046 | 1.003 | 1.060 | 1.120 | 1.175 | |
| 3.89 | 1.016 | 1.037 | 1.058 | 1.079 | 1.005 | 1.104 | 1.216 | 1.325 | |
| 4.10 | 1.025 | 1.059 | 1.093 | 1.127 | 1.008 | 1.168 | 1.355 | 1.551 | |

| RADIUS (MM) | BWR(U) | | | | | | BWR(MOX) | | |
|----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|--------|--|
| | 1.% | 3.% | 5.% | 7.% | 0.25% | 3.78% | 7.31% | 10.83% | |
| 1.90 | 0.990 | 0.977 | 0.964 | 0.951 | 0.993 | 0.844 | 0.698 | 0.570 | |
| 2.68 | 0.992 | 0.980 | 0.968 | 0.957 | 0.994 | 0.861 | 0.728 | 0.609 | |
| 3.29 | 0.993 | 0.983 | 0.974 | 0.964 | 0.995 | 0.885 | 0.771 | 0.668 | |
| 3.79 | 0.995 | 0.988 | 0.980 | 0.973 | 0.996 | 0.914 | 0.825 | 0.740 | |
| 4.24 | 0.997 | 0.993 | 0.988 | 0.984 | 0.998 | 0.949 | 0.890 | 0.829 | |
| 4.65 | 0.999 | 0.998 | 0.998 | 0.997 | 1.000 | 0.989 | 0.968 | 0.937 | |
| 5.02 | 1.002 | 1.005 | 1.009 | 1.012 | 1.002 | 1.037 | 1.061 | 1.072 | |
| 5.37 | 1.006 | 1.014 | 1.021 | 1.029 | 1.004 | 1.094 | 1.178 | 1.246 | |
| 5.69 | 1.010 | 1.024 | 1.037 | 1.051 | 1.008 | 1.164 | 1.328 | 1.480 | |
| 6.00 | 1.016 | 1.038 | 1.060 | 1.082 | 1.012 | 1.265 | 1.553 | 1.847 | |

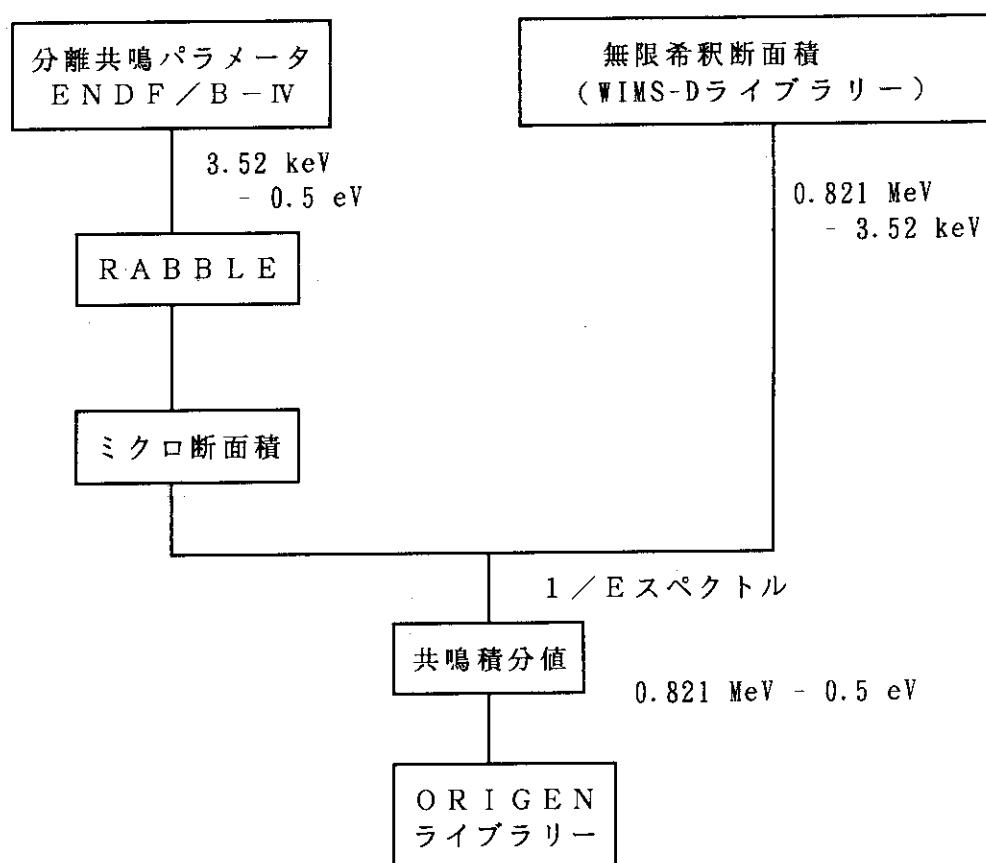
RODBURNコード計算の流れ



第1図 RODBURNコード計算の流れ



第2図 RODBURNコードのサブルーチン構成



第3図 共鳴吸収計算の流れ

3. 計算例と検証結果

3. 1 半径方向の出力、燃焼度分布

燃料棒の半径方向の出力分布は、炉型がきまれば、比較的炉心全体の中性子束分布とは独立した形で計算することができる。線出力密度、または熱中性子束の絶対値は既知でなければならない。燃焼度分布は、照射後の燃料断面についてのマイクロガンマスキャン、またはX線マイクロ分析(XMA)によるFP濃度分布データと照合することができる。

初期濃縮度が高い条件で、高燃焼度まで燃料を照射した場合の計算例として、ハルデン炉照射燃料(Rod 201)に関する計算結果を第4図、第5図に示す。この燃料棒はBWR 7x7型で、ペレット直径が12.4mmと大きいうえに、初期濃縮度は7%と高い。照射期間は16年で、平均燃焼度は63MWd/kg-Uと見積もられている。計算は、全照射期間中熱中性子束が一定という条件の下で行った。

第4図には、半径方向燃焼度分布の計算値が示されている。図には、XMAによるネオジミウムの濃度分布測定結果が破線で示されている。この濃度分布はほぼ局所燃焼度の相対分布を示すものと考えることができる。計算結果と濃度分布測定結果は、相対分布としては良く一致している。計算された燃焼度分布は、さらに²³⁵Uの核分裂による分と、プルトニウムの分裂による分に分けることができる(ただしRODBURNの出力データとはしていないので、手計算による)。ハルデン炉(HBWR)は重水炉であり、スペクトルはソフトであり、共鳴吸収によるプルトニウム生成は小さい。初期濃縮度が高いためもあり、燃焼はほとんど²³⁵Uによるものである。燃料ペレットの表面におけるピーキングが小さいのはこのためである。

第5図には、出力密度(W/cc)の半径方向分布の、照射中の変化に関する計算結果が示されている。この計算結果と照合すべき実測データはない。計算結果によれば、出力密度の半径方向分布は、初期には熱中性子束のdepressionにより、中心に向かっての落ち込みが大きい。燃焼が進むにつれて、表面付近の²³⁵Uが損耗するので、出力分布は逆転する方向にむかう。しかし、寄与が小さいとはいえ、プルトニウムが表面付近を中心に生成、燃焼するので、²³⁵Uの減少を補うことになり、結果としてほぼ平坦な出力分布となっている。

次に濃縮度が低い燃料を高燃焼度まで照射した場合の計算結果を、第6図、第7図に示す。これはバッテル高燃焼度効果研究計画(HBEP計画)⁽⁶⁾の一部として、試験が行われたBWR(TVO炉)燃料に関するものである。この燃料では、わずか1.4%の濃縮度で、平均48MWd/kg-Uまでの照射が行われた。第6図は、80%燃焼度位置における半径方向燃焼度分布を示す。この場合も、照射後におけるNdの濃度分布実測結果を破線で示している。この燃料の場合には、プルトニウムの核分裂の寄与が大きく、また空間的にかたよっているので、Ndの濃度分布がそのまま燃焼度分布に対応しているわけではない。Puの核分裂によるNdの収率は、²³⁵Uのそれにくらべて25%程小さいから

である。このことを考慮に入れると、実際の燃焼度分布は $N d$ の分布よりさらに表面でのピーキングが大きいはずである。したがって、燃焼度の相対分布に関する計算と実測の一一致は非常によいことになる。

第7図には、照射中の出力の分布の計算結果を示す。この低濃縮燃料の場合には、出力の空間的な偏りは、照射初期には小さく、高燃焼度ではプルトニウムの生成のかたよりのために、きわめて表面に偏ったものになっている。したがって線出力密度が同じでも、第5図の高濃縮燃料の場合にくらべて、除熱が容易なので燃料温度は低くなる。

3. 2 軸方向の出力分布

燃料棒の軸方向の出力分布は、炉心全体の中性子束分布に関係しており、ある燃料棒だけをとりだして解析することは困難である。とくに、BWR実炉で燃料集合体として照射が行われる場合には、制御棒位置やボイド率の軸方向変化、集合体内分布などを考慮する必要があり、本格的な炉物理コードを用いてさえ、燃焼過程を追う計算はむずかしい。また逆に、現在のPWR燃料照射では、軸方向中性子束分布は最初から非常に平坦化している場合が多く、その場合にはとくに解析を加える必要性は小さい。

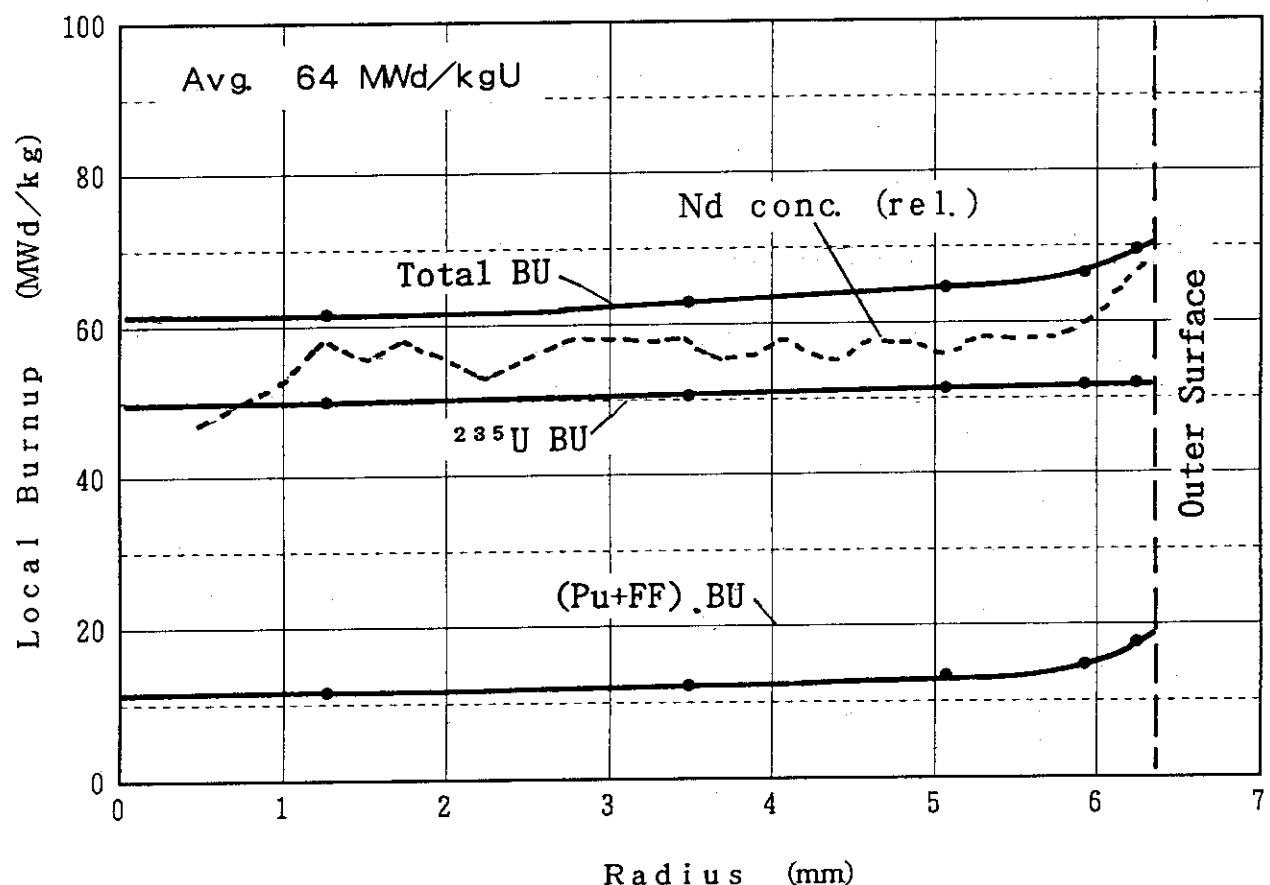
そこで、RODBURNを軸方向の出力分布の計算に適用して意味あるのは、おもに研究炉照射で、1本の燃料棒が炉心の全長にわたって、またはそれに近い状態で長期間照射される場合ということになる。そのような場合には、軸方向の中性子束分布は、その原子炉の特性によってほぼ決定されるからである。

そのような照射実験例はあるが、高燃焼度まで照射され、かつ原子炉の中性子束分布（概略値）のデータが付加されて報告されている例はほとんどない。そこでここでは、検証計算とはせず、初期濃縮度が低い燃料、高い燃料を一定の中性子束分布の場において照射した場合に、出力分布がどう変化するか、計算結果のみを示すことにとする。

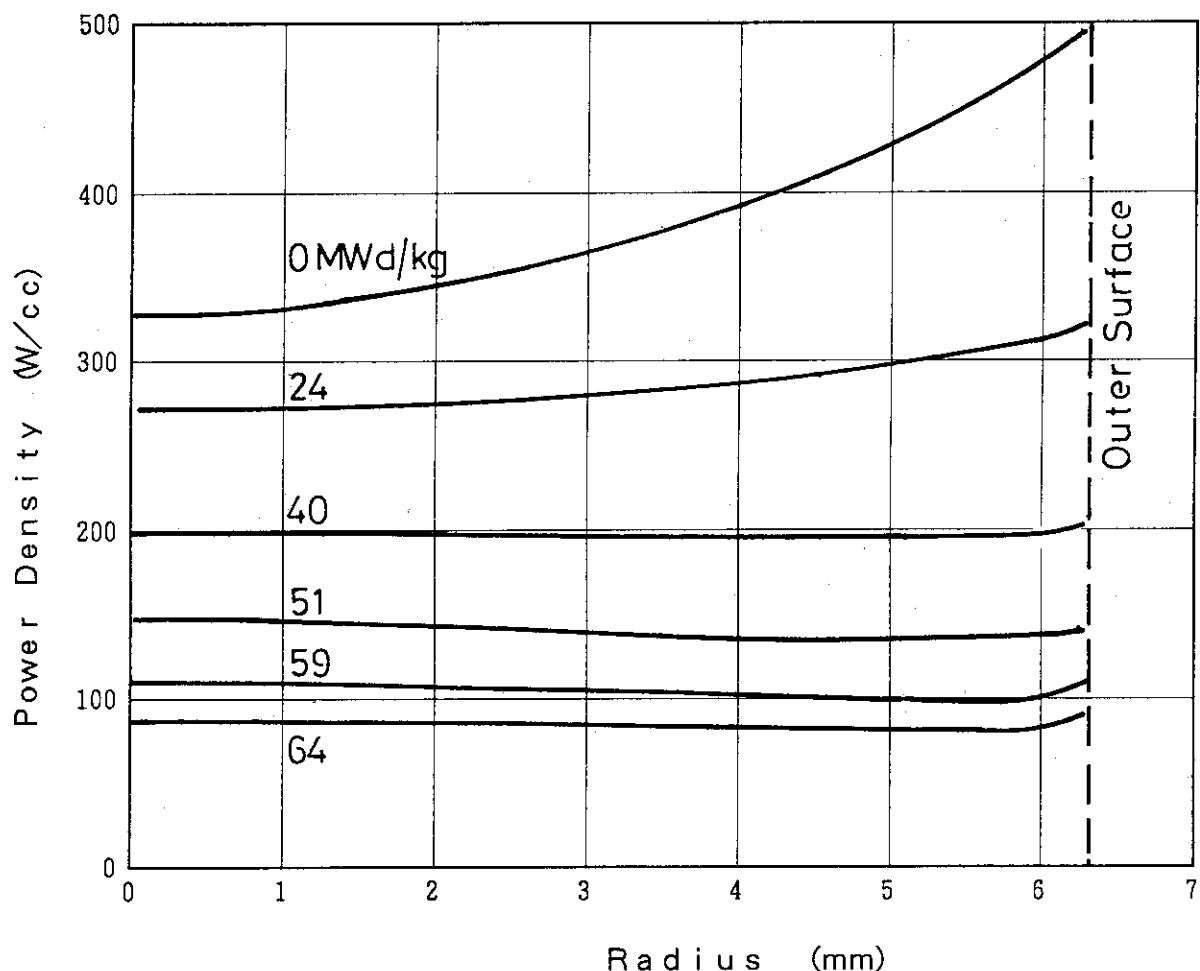
第8図に、初期濃縮度が1.5%の燃料、7%の燃料を、一定中性子束のもとで平均燃焼度約4.5、 $0.00\text{MWd}/\text{t}$ まで照射した場合の、軸方向出力分布の変化の計算値を示す。燃料の諸元はバッテル高燃焼度研究計画⁽⁶⁾のPWR燃料をモデルとしている。

ただし低濃縮燃料では、平均中性子束を大きくして、燃焼度が高濃縮度の場合と同じになるように設定している。しかし軸方向の中性子束相対分布は、両者とも同じく余弦分布を仮定している。

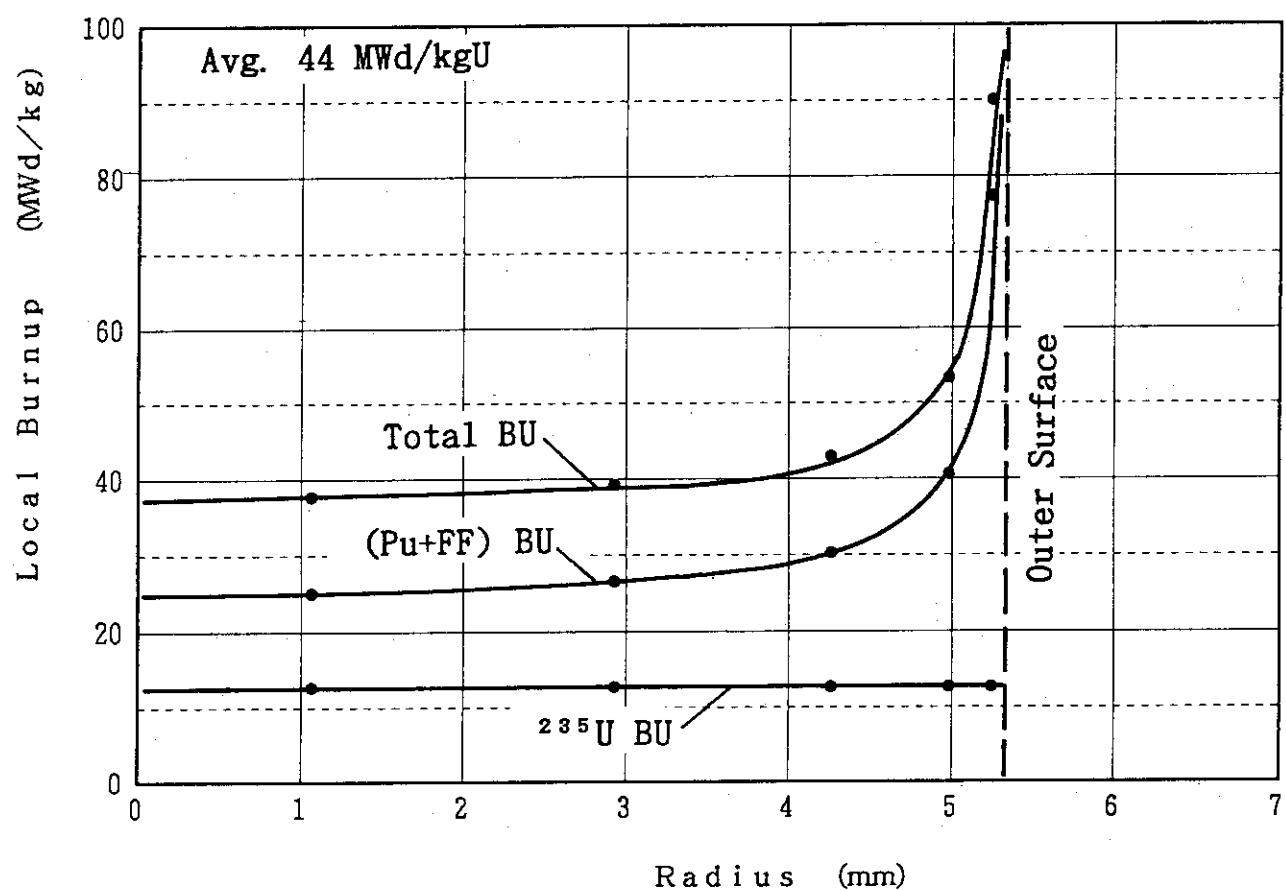
高濃縮燃料棒では、燃焼とともに中央部での ^{235}U の損耗のために、出力分布は平坦化して行く。低濃縮燃料（高中性子束）では、Puの核分裂の寄与が相対的に大きいために、中性子束の高い領域での出力が低下せず、初期の出力分布が保たれて行くのが分かる。



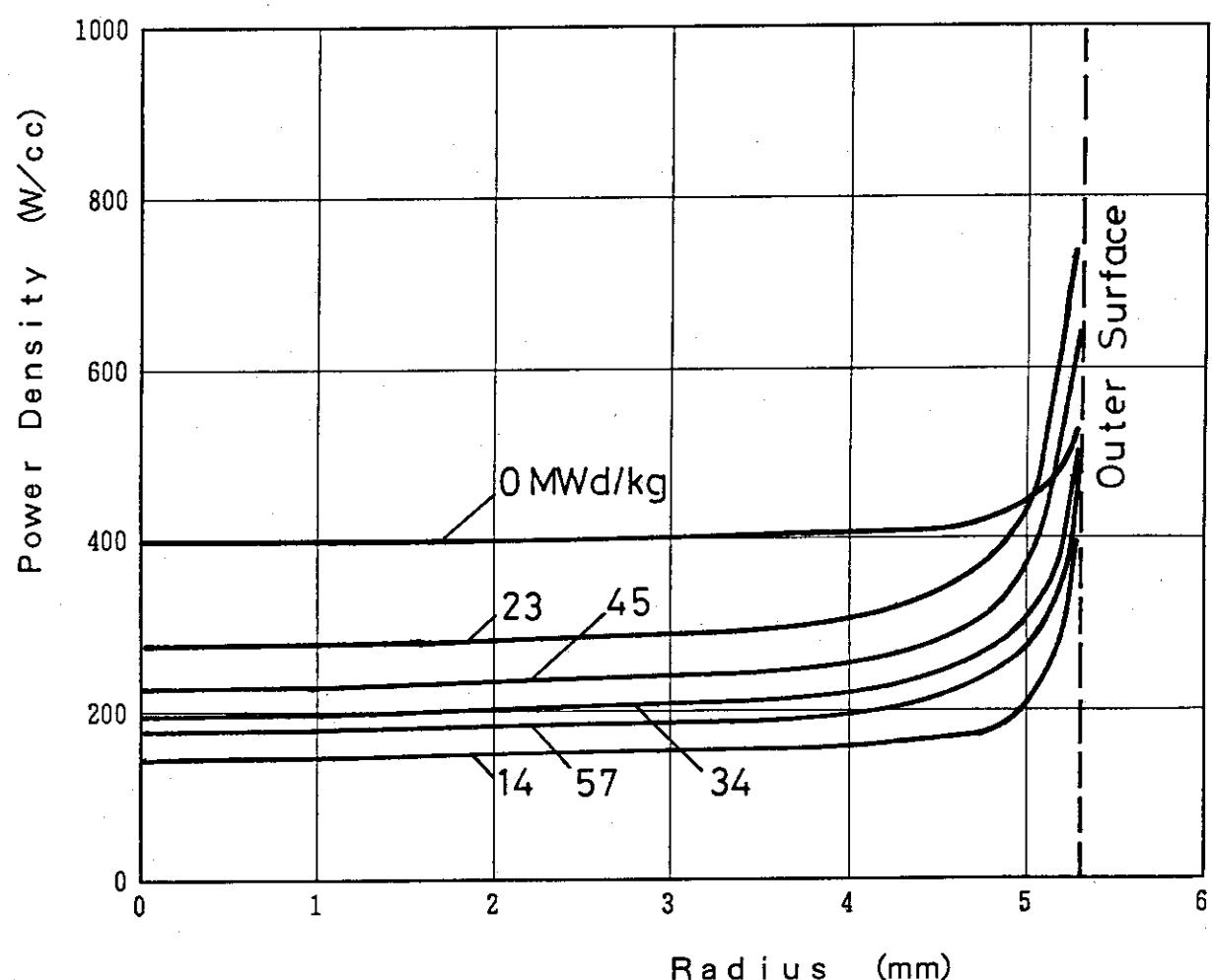
第4図 ハルデン炉照射燃料（高濃縮度）における半径方向燃焼度分布



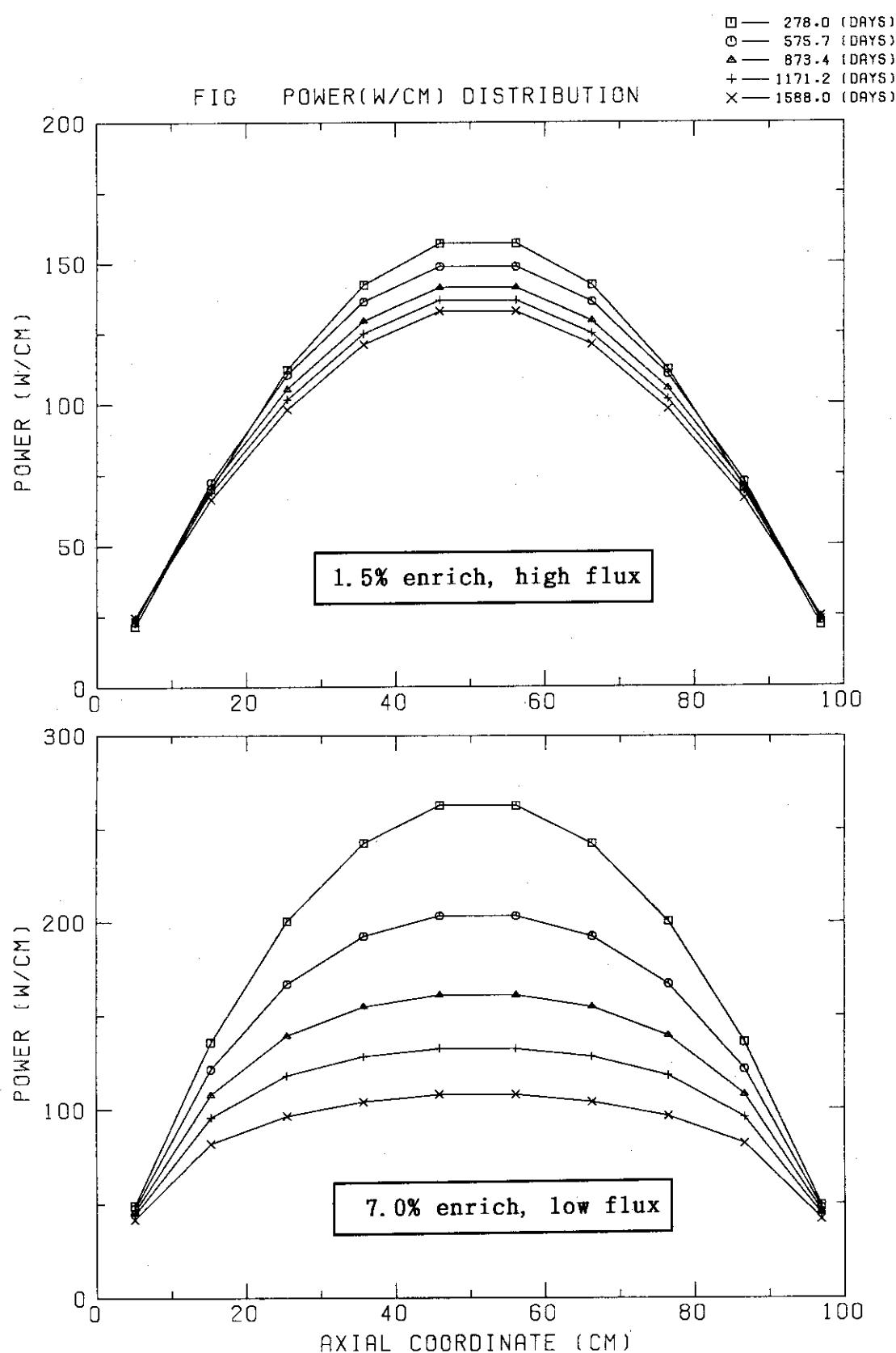
第5図 ハルデン炉照射燃料（高濃縮度）における半径方向出力分布の変化



第6図 バッテルH E P計画, TVO (BWR) 燃料 (低濃縮度) における
半径方向燃焼度分布



第7図 バッテルH E P計画, T V O (BWR) 燃料(低濃縮度)における
半径方向出力分布の変化



第8図 中性子束余弦分布のもとでの軸方向出力分布の変化
(燃焼度約45MWd/kgまで)

4. 結 言

燃料を高燃焼度まで照射した場合の、燃料内出力分布の変化を簡便に計算するためのコードRODBURNを開発した。このコードは単純な構成をもっているにもかかわらず、その計算結果は、特に半径方向の燃焼度分布に関して、照射後の分析結果と良く一致することが示された。照射実験の解析の手段として有効であると考えられる。

参考文献

- (1) M. E. Gubbins, M. E. Roth, and C. J. Taubman, "A general introduction to the use of the WIMS-E modular program", AEEW-R-1329 (1982)
- (2) M. J. Bell, "ORIGEN-The ORNL isotope generation and depletion code", ORNL-4628 (1973)
- (3) P. H. Kier and A. A. Robba, "RABBLE, A program for computation of resonance absorption in multiregion reactor cells", ANL-7326 (1967)
- (4) 松村哲夫、「超ウラン元素の燃料棒内生成分布の検討」電中研報告T87006 (1987)
- (5) A. G. Croff et al, "Revised uranium-plutonium cycle PWR and BWR models for the ORIGEN computer code", ORNL/TM-6051 (1978)
- (6) M. E. Cunningham et al, "High burnup effects program. Qualification of fission gas release data from Task 3 rods", HBEP-60 (1990)

4. 結 言

燃料を高燃焼度まで照射した場合の、燃料内出力分布の変化を簡便に計算するためのコードRODBURNを開発した。このコードは単純な構成をもっているにもかかわらず、その計算結果は、特に半径方向の燃焼度分布に関して、照射後の分析結果と良く一致することが示された。照射実験の解析の手段として有効であると考えられる。

参考文献

- (1) M.E. Gubbins, M.E. Roth, and C.J. Taubman, "A general introduction to the use of the WIMS-E modular program", AEEW-R-1329 (1982)
- (2) M.J. Bell, "ORIGEN-The ORNL isotope generation and depletion code", ORNL-4628 (1973)
- (3) P.H. Kier and A.A. Robba, "RABBLE, A program for computation of resonance absorption in multiregion reactor cells", ANL-7326 (1967)
- (4) 松村哲夫、「超ウラン元素の燃料棒内生成分布の検討」電中研報告T87006 (1987)
- (5) A.G. Croff et al, "Revised uranium-plutonium cycle PWR and BWR models for the ORIGEN computer code", ORNL/TM-6051 (1978)
- (6) M.E. Cunningham et al, "High burnup effects program. Qualification of fission gas release data from Task 3 rods", HBEP-60 (1990)

付録1 入力マニュアル

R O D B U R N を実行する場合の、J C L の例を付表1-1に示す。この例では、入力データはR B U R N 9 2. D A T A というファイルから供給している。機番28には、R B U R N 9 2. O U T という1日ファイルが割り当てられている。これは、R O D B U R N の計算結果を、オフラインプロッターの入力データとして使用するためのものである。プロッターを使用しない場合でも、28番にはなんらかのファイルは割り当てなければならぬ。また、19、22、26、52、55番のファイルは、大量のデータを扱うための一時退避用ファイルである。

入力データのマニュアルを付表1-2に示す。また、入力データの例を付表1-3に示す。入力上の注意事項はおおむね表に記述されているが、そのほかに次のような点に注意されたい。

- 燃料表面における燃焼度ピーキングを詳細に計算するためには、最外メッシュを非常に細かく（0.1厚さ程度）設定することが必要である。
- オフライン・プロットを行う場合、「基準点」あるいは複数曲線の「パラメータ」として設定する予定の照射時点は、あらかじめ本体の計算において、「プリントアウト時点」として設定しておかなければならない。ただし、経時変化のプロットにおいて、時間をx軸データとして連続的に使う場合には、これは必要ない。
(付録2：「オフラインプロッターの使用法」参照。)

付表1-1 JCLの例

```

<<< JCL STATEMENTS LIST >>> DATE 01/11/93 TIME 10:45
1 //F2179121 JOB ('448621790936.01
2 //          'T.03W.01C.01I.01E.02','
3 //          'MA.UTIDA ',CLASS=B,PRTY=07,TIME=(0001,00),
4 //          MSGCLASS=X,MSGLEVEL=(2,0,1),
5 //          NOTIFY=J2179,
6 //          USER=J2179,GROUP=G0936,PASSWORD=
7 ***JOBPARM      S=ANY,R=2179,L=0003,C=0000000
***** LIST OF PRIVATE PROC *
***** LIST OF USER JCL *
*** EXEC LMGD,
** LM='J2179.RODBURN'
10 //SYSIN     DD DSN=J2179.RBURN92.DATA(TEST),DISP=SHR
11 //FT25F001 DD DSN=J2179.RODBURN.ACTIN,DISP=SHR,LABEL=(,,,IN)
12 //FT01F001 DD DSN=J2179.RABBLE.FT01,DISP=SHR,LABEL=(,,,IN)
13 //FT02F001 DD DSN=J2179.RABBLE.FT02,DISP=SHR,LABEL=(,,,IN)
14 //FT50F001 DD DSN=J2179.RABBLE.FT50,DISP=SHR
15 //FT51F001 DD DSN=J2179.RABBLE.FT51,DISP=SHR
16 //FT60F001 DD DSN=J2179.RABBLE.DATA(EJU238),DISP=SHR,LABEL=(,,,IN)
17 //FT61F001 DD DSN=J2179.RABBLE.DATA(EJPU240),DISP=SHR,LABEL=(,,,IN)
***FT28F001 DD DSN=J2179.RODBURN.OUT(TEST),DISP=SHR
18 //FT28F001 DD UNIT=TSSWK,DISP=(NEW,CATLG),SPACE=(TRK,(10,30)),
//          DSN=J2179.RBURN92.OUT,
//          DCB=(RECFM=FB,LRECL=137,BLKSIZE=13700)
//          //FT19F001 DD UNIT=TSSWK,DISP=(NEW,PASS),SPACE=(TRK,(10,30)),
//          //DCB=(RECFM=FB,LRECL=137,BLKSIZE=13700)

19 //          DCB=(RECFM=FB,LRECL=137,BLKSIZE=13700)
//FT22F001 DD UNIT=TSSWK,DISP=(NEW,PASS),SPACE=(TRK,(10,30)),
//          DCB=(RECFM=FB,LRECL=137,BLKSIZE=13700)
20 //FT26F001 DD UNIT=TSSWK,DISP=(NEW,PASS),SPACE=(TRK,(10,30)),
//          DCB=(RECFM=FB,LRECL=137,BLKSIZE=13700)
21 //FT55F001 DD UNIT=TSSWK,DISP=(NEW,PASS),SPACE=(TRK,(10,30)),
//          DCB=(RECFM=FB,LRECL=137,BLKSIZE=13700)
22 //FT52F001 DD UNIT=TSSWK,DISP=(NEW,PASS),SPACE=(TRK,(10,30)),
//          DCB=(RECFM=FB,LRECL=137,BLKSIZE=13700)
//
```

<<< SYSTEM MESSAGES LIST >>>

```

DS40613I USER(J2179) LAST ACCESS DATE(1993.01.11),TIME(10:42:23)
DJ142I F2179121 RUN - STEP WAS EXECUTED - COND CODE 0000
DJ373I STEP/RUN / START 93011.1045
DJ374I STEP/RUN / STOP 93011.1047 CPU      0MIN 23.25SEC SRB      0MIN 00.01SEC VIRT   244K
CT0611    SYSTEM ( SYSC M-780 ) EXCP      138TIMES
DJ375I  JOB/F2179121/ START 93011.1045
DJ376I  JOB/F2179121/ STOP 93011.1047 CPU      0MIN 23.25SEC SRB      0MIN 00.01SEC

```

付表1-2 RODBURN入力データ(1)

RODBURN入力データ

| No. | 変数名 | FORMAT | 内 容 |
|-----|-------------------------------|------------------------------|--|
| 1 | TITLE | 18A4 | 計算の表題 |
| 2 | MODEL | 6I6 | (オプションおよび配列の大きさ) 炉型 : 1= PWR, 2= BWR, 3= HWR, 4= PWR(MOX) 5= BWR(MOX) |
| | MESHZ | | 軸方向領域数(12以下) |
| | KREG | | 半径方向領域数(20以下、共鳴積分の計算のため冷却材領域を含める。) |
| | MESHR | | 半径方向領域数のうち、ペレット領域の数。 (軸領域によって、濃縮U、天然U等、異なる組成を用いてもよいが、領域数はそろえねばならない。) |
| | IOPT | | 照射履歴の入力法を指定するオプション。 =0: 平均熱中性子束を入力する。 =1: 平均線出力密度(W/cm)を入力する。 |
| | IDIST | | 軸方向中性子束分布の入力法のオプション。 =0: (変形された)余弦分布で与える。 =1: 数値データにより分布を与える。 (注意: IOPT=1であっても、IDISTおよび関連配列データは与えねばならない。) |
| 3 | ZMESH(I) I=1,MESHZ | 9F8.4 | 各軸方向領域の上端座標(cm) |
| 4 | RMIN, RMAX(I) I=1, KREG | F8.0, 8F8.0 (/ 8X, 8F8.0) | RMIN: ペレット内半径(cm) RMAX(I): 各領域の外半径(cm) (すなわち中心孔は「領域」に数えない。) |
| 5 | TEMP(I), I=1, KREG | 8x, 8F8.0 (/ 8X, 8F8.0) | 各領域の温度(K) (時間、軸方向位置によらない概略値) |
| 6 | NMIX | I6 | 組成の異なる「混合物」の総数。 |

付表1-2 RODBURN入力データ(2)

RODBURN入力データ(続き)

| No. | 変数名 | FORMAT | 内 容 |
|-----|--|---------------|--|
| 7 | (NUCLX(I), CONCEx(I), I=1, 7) | 7(I3, F7. 3) | <p>このカードは、NMIX枚続けて入れる。 各カードは一つの混合物に対応し、それぞれ 最大7つの核種の組み合わせを指定する。</p> <p>NUCLX(I): 核種番号 CONCEx(I): 濃度(g/cc)</p> <p>核種番号: 1 = ^{238}U, 2 = ^{240}Pu, 3 = H, 4 = D, 5 = ^{16}O, 6 = He, 7 = Zr-2, 8 = Zr-4, 9 = ^{235}U, 10 = ^{239}Pu, 11 = ^{241}Pu, 12 = ^{242}Pu</p> |
| 8 | (MIX(I, J), I=1, KREG, J=1, MESHZ) | 30I2 | <p>このカードは、MESHZ枚続けて入れる。 各カードは各軸領域に対応する。各カードにおいて、内側から順に各半径方向領域にどの「混合物」が対応するか指定する。 (カード7において混合物を入力した順番が「混合物番号」になる。)</p> |
| 9 | NDIST | I6 | 軸方向中性子束分布のパターンの総数 (タイムステップごとにパターンを指定できる。) |
| 10 | (ALPH(K), EXTL(K), EXTT(K), K=1, NDIST) | 3F8. 4 | <p>(IDIST=1の場合不要) このカードは、NDIST枚入力する。 ALPH(I): I番目のパターンの平坦化定数。 (本文参照) EXTL(I): 下部「外挿距離」(cm) EXTT(I): 上部「外挿距離」(cm) (余弦分布を修正するための定数。すべて0とすれば単純な余弦分布になる。)</p> |
| 11 | (FLUXZ(I, K), I=1, MESHZ, K=1, NDIST) | 9F8. 2 | <p>(IDIST=0の場合不要) 軸方向中性子束分布(相対値) このカードはNDIST枚入力する。</p> |
| 12 | ISTP, DTIME | I6, E12. 5 | <p>ISTP: タイムステップ数(200以下) DTIME: 最大タイムステップ幅(day) ここでいうステップ数とは、出力履歴の概略を規定する回数をいう。全照射期間を1ステップとしても良い。コードは、1ステップ長さがDTIME以下になるようステップを再分割する。 DTIMEは照射量が$1 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$以下(ただしステップ数200以下)になるように設定すると良い。</p> |

付表1-2 RODBURN入力データ(3)

RODBURN入力データ(続き)

| No. | 変数名 | FORMAT | 内容 |
|-----|--|----------------------|--|
| 13 | (TIMX(I), KDIS(I), PLHR(I, 1), PLHR(I, 2), I=1, ISTP | E12.5, I6, 2E12.5 | (ISTP枚入力する。) TIMX(I):ステップIの終わり(day) KDIS(I):ステップIにおける出力分布の番号。 (カード10、11における変数k) PLHR(I, 1), PLHR(I, 2): それぞれステップIの 最初と最後の平均出力規定量。 (IOPT=0の場合) 平均熱中性子束 (n/cm ² /s) (IOPT=1の場合) 平均線出力密度 (W/cm) |
| 14 | NPRINT | I6 | プリントアウトを行う時点の総数。 (最終結果はこれ以外に出力される。) |
| 15 | TIMPRN(I), I=1, NPRINT | 9F8.2 | プリントアウトを行う時点(day) (順にTIMPRN(I)を過ぎた最初のステップの 結果が出力される。) |
| 16 | IDIMPR(I), I=1, NPRINT | 9I8 | カード15に対応して、各時点でどんな出力 を行うか指定する。 IDIMPR=1: 1次元データのみ出力 (軸ノード平均の燃焼度等、 全軸ノードについて出力) =2: 1次元データおよび発熱関連 変数の(r, z)分布 (カード17で指定する軸ノード についてのみ出力) =3: さらに核種量の2次元データも 出力する。(同上) |
| 17 | IZD2(I), I=1, 12 | 12I6 | 2次元データ出力を行う軸ノード番号を順番に 必要なだけ指定する。 |
| 18 | STOP | A4 | 入力データの終わりを示すために1カラム から4カラムまでにSTOPと入力する。 |

付表1-3 サンプル入力データ

RODBURN *** BATTELLE TVO-1 H8/36-4 (BWR, ENRICH 1.39%)

| INPUT DATA LIST | | | | | | | |
|-----------------|--|--------|--------|---------|---------|--------|---------------|
| CARD NO. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| |5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0 | | | | | | |
| 1. | BATTELLE TVO-1 H8/36-4 (BWR, ENRICH 1.39%) | | | | | | |
| 2. | 2 | 9 | 8 | 5 | 0 | 0 | 00010000 |
| 3. | 36.8 | 73.6 | 110.4 | 147.2 | 184.0 | 220.8 | 257.6 |
| 4. | 0.0 | 0.2130 | 0.3727 | 0.4792 | 0.5165 | 0.5325 | 0.6125 |
| 5. | | | | | 0.8337 | | 1.05500040001 |
| 6. | | | | | | 570. | 550. |
| | | | | | | 550. | 550.00050001 |
| | | | | | | | 00060000 |
| 7. | 1 | 9.08 | 9 | 0.122 | 5 | 1.23 | 00070001 |
| 8. | 7 | 6.57 | | | | | 00080000 |
| 9. | 3 | 0.111 | 5 | 0.889 | | | 00090001 |
| 10. | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| 11. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 12. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 13. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 14. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 15. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 16. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 17. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 18. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 19. | | | | | | | 00190001 |
| 20. | | 0.0 | 20.0 | 20.0 | | | 00200000 |
| 21. | | 0.3 | 20.0 | 20.0 | | | 00210000 |
| 22. | | 0.5 | 20.0 | 20.0 | | | 00220000 |
| 23. | | 5 | 30.0 | | | | 00230000 |
| 24. | | 320.0 | 1 | 2.1E+13 | 2.1E+13 | | 00240000 |
| 25. | | 636.0 | 1 | 2.0E+13 | 2.0E+13 | | 00250000 |
| 26. | | 894.0 | 2 | 3.0E+13 | 3.0E+13 | | 00260000 |
| 27. | | 1183.0 | 3 | 2.9E+13 | 2.9E+13 | | 00270000 |
| 28. | | 1531.0 | 3 | 3.0E+13 | 3.0E+13 | | 00280000 |
| 29. | | | 4 | | | | 00290000 |
| 30. | | 300.0 | 800.0 | 1000.0 | 1200.0 | | 00300000 |
| 31. | | 1 | 2 | 3 | 2 | | 00310000 |
| 32. | | 1 | 3 | 5 | 7 | | 00320000 |
| 33. | STOP | | | | | | 00330000 |
| |5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0 | | | | | | |

付録2 オフライン・プロッターの使用法

(1) 概要

R O D B U R N の計算結果は、ディスクに格納して、オフライン・プロッター・プログラムによりグラフ化することができる。計算結果のうち、たとえば局所線出力密度 q をとりあげてみると、 q は一般に、

$$q = f(r, z, t)$$

のように、半径方向位置 r 、軸方向位置 z 、時間 t の関数である。燃料棒平均出力を y 軸にとる場合には、 r 、 z は独立変数ではなくなり、 t のみが独立変数として残る。

一般に、1枚のグラフは、ある独立変数を x 軸にとるほかに、複数の曲線を書き込むことによって、もう一つの独立変数をパラメトリックに扱うことができる。その場合、第3の独立変数は基準点として固定しなければならない。R O D B U R N 用のプロッター・プログラムは、 y 軸の変数ばかりでなく、 x 軸変数、パラメータ、固定変数としてとるべき変数として、位置座標、時間のさまざまな組み合わせが可能なように工夫されている。

(2) J C L

オフライン・プロッターの J C L の例を付表 2-1 に示す。コンパイル、リンクエージと実行を分けているが、もちろん一括して実行しても良い。

R O D B U R N の計算結果は、ここでは R B U R N 9 2 . O U T というファイルに格納されている。プロッターの実行段階では、このファイルを機番 28 に割り当てる。このファイルのデータを用いてプロットが行われる。

作図の仕様を規定する入力データは、別にファイルを作り（ここでは R B P L O T . I N P D A T A という名前になっている）、機番 29 に割り当てる。

(3) 入力マニュアル

入力マニュアルを付表 2-4 に示す。この入力法は、まず固定 F O R M A T で図の総数を規定し、それぞれの図について N a m e l i s t " P L O T " で、その仕様を規定するものである。

y 軸データ、 x 軸データ、パラメータのとり方の概要を、付表 2-2 に示す。 y 軸データとしてプロットできる変数は、

1. 局所 (r , z) 出力密度
2. 局所燃焼度
3. 局所熱中性子束
4. 局所高速中性子照射量 (フルエンス)
5. 局所核種濃度
6. 燃料棒内核種総量

- 7. (軸方向位置ごとの) 平均線出力密度
- 8. (同上) 平均燃焼度
- 9. 燃料平均線出力密度
- 10. 燃料平均燃焼度
- 11. 燃料平均熱中性子束

の 11 種である。どの変数を選ぶか (IZNUMにより指定) によって、図は 5 種類に大別される。それぞれの種類ごとに、次のオプション変数 I G N U M の働きが異なる。I G N U M は、x 軸にどの変数をとるか、複数曲線 (最大 5 まで) を規定するパラメータとしてどの変数をとるか、さらに固定して扱う変数を規定する。

複数曲線に対応するパラメータの種別は I G N U M で規定されるが、それぞれの曲線にどのデータをあてはめるかは、5 つの入力変数 I P 1 - I P 5 によって、付表 2-3 のように指定される。同様に、固定して扱う変数の種別は I G N U M で規定されるが、どの値に固定するかは、入力変数 K I J U N で指定する。

I P 1 - I P 5、および K I J U N に入力する値は、すべてメッシュ番号等、整数を用いる。時間に関する整数値規定は、R O D B U R N 本体の計算において、プリントアウト出力をおこなった時点の番号を用いる。たとえば、照射中の状況について、5 つの時点でプリントアウトを行ったとすれば、I P および K I J U N に用いることのできる整数データは、1、2、3、4、5 のいずれかである。逆にいえば、プロットにおいて、固定点またはパラメータとしてある時点を使おうとすれば、あらかじめ R O D B U R N の計算においてその時点をプリントアウト時点として指定しておかなければならぬ。

(4) 入出力例

ここで具体的な例をあげて、入力法を説明する。R O D B U R N 本体の計算が次のような条件で行われ、結果がファイルに出力されているものとする。

軸方向メッシュ数 = 10

径方向メッシュ数 = 10

(0.20, 0.28, 0.34, 0.39, 0.44, 0.48, 0.52, 0.55, 0.59, 0.62 cm)

本体計算でのプリントアウト時点数 = 3

(30.0, 60.0, 90.0 days)

ここで入力パターン1-1, 1-2を例として、各変数の具体的な内容を説明する。

\$PLOT

| | | | | |
|-------------|-----------------|-----------------|-----|---------|
| I Z N U M = | 1 , I G N U M = | 1 , K I J U N = | 3 , | パターン1-1 |
| I A T = | 1 , N A X = | 5 , I O P T = | 1 , | |
| I P 1 = | 1 , I P 2 = | 3 , I P 3 = | 5 , | |
| I P 4 = | 8 , I P 5 = | 10 , | | |

\$END

I Z N U M 1 : ①各メッシュ毎の出力密度のグラフを選択する。

I G N U M 1 : X軸=軸方向位置、パラメータ=径方向位置、基準点=経過時間とする。

K I J U N 3 : タイムステップ番号=3番(90.0days)の位置のグラフを描くよう指定する。

I A T 1 : オートスケールを使用する。

N A X 5 : 図中に5本の線を描くことを指定する。

I O P T 1 : I O P T = 1 の形のX軸を描くよう選択する。

I P 1 1 : 1本目の線のパラメータを径方向位置の1番目(0.20cm)とする。

I P 2 3 : 2本目の線のパラメータを径方向位置の3番目(0.34cm)とする。

I P 3 5 : 3本目の線のパラメータを径方向位置の5番目(0.44cm)とする。

I P 4 8 : 4本目の線のパラメータを径方向位置の8番目(0.55cm)とする。

I P 5 10 : 5本目の線のパラメータを径方向位置の10番目(0.62cm)とする。

\$PLOT

| | | | | |
|-------------|-----------------|-----------------|-----|---------|
| I Z N U M = | 1 , I G N U M = | 2 , K I J U N = | 5 , | パターン1-2 |
| I A T = | 1 , N A X = | 3 , I O P T = | 1 , | |
| I P 1 = | 1 , I P 2 = | 2 , I P 3 = | 3 , | |
| I P 4 = | 0 , I P 5 = | 0 , | | |

\$END

I Z N U M 1 : ①各メッシュ毎の出力密度のグラフを選択する。

I G N U M 2 : X軸=軸方向位置、パラメータ=径方向位置、基準点=経過時間とする。

K I J U N 5 : 径方向位置の5番目(0.44cm)の位置のグラフを描くよう指定する。

I A T 1 : オートスケールを使用する。

N A X 3 : 図中に3本の線を描くことを指定する。

I O P T 1 : I O P T = 1 の形のX軸を描くよう選択する。

I P 1 1 : 1本目の線のパラメータをタイムステップ番号=1番(30.0days)とする。

I P 2 2 : 2本目の線のパラメータをタイムステップ番号=2番(60.0days)とする。

I P 3 3 : 3本目の線のパラメータをタイムステップ番号=3番(90.0days)とする。

I P 4 0 : パラメータ4と5は使用しない。(N A X = 3であるから)

I P 5 0 :

これらの入力パターンに対応するプロットを付図2-1に示す。

付表2-1 オフライン・プロッター・プログラムのJCL

EDIT --- J2179.RODBURN.JCL(PLOTGO) - 01.21 ----- 表示欄 001 072
 コマンド ==> 移動量 ==> CUR

***** ***** データの先頭 *****V10L30*****

```

000001 //JCLG JOB
000002 //JCLG EXEC JCLG
000003 //SYSIN DD DATA,DLM='++'
000004 // JUSER 44862179,MA.UCHIDA,0936.01
000005 T.3 W.3 C.3 I.4 E.2 GRP
000006 OOPTP PASSWORD=HORN NOTIFY=J2179
000007 OOPTP MSGCLASS=0
000008 // EXEC LMGO,LM=J2179.RBPL0T1
000009 //FT28F001 DD DSN=J2179.RBURN92.OUT,DISP=SHR,LABEL=(,,,IN)
000010 //FT29F001 DD DSN=J2179.RBPL0T.INPDATA(TEST),DISP=SHR,LABEL=(,,,IN)
000011 //FT31F001 DD UNIT=TSSWK,DISP=(NEW,PASS),SPACE=(TRK,(10,30)),
000012 // DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3200)
000013 //FT30F001 DD DSN=J2179.RBPL0T.DATA,DISP=(NEW,PASS),
000014 // UNIT=TSSWK,SPACE=(TRK,(10,30)),
000015 // DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3200)
000016 // EXEC LMGO,LM=J2179.RBPL0T2
000017 // EXPAND GRNLP,SYSPUT=N
000018 //FT30F001 DD DSN=J2179.RBPL0T.DATA,DISP=(OLD,DELETE)
000019 //FT10F001 DD DSN=J2179.RBPL0T.OUT,DISP=SHR
000020 ++
000021 //

```

付表2-2 グラフの骨格の指定法

| グラフの種別 | 入力変数 IZNUM | 入力変数 IZNUM | X 軸変数 | 複数曲線のペラメータ (IP1-IP5で規定) | 基準点 (KIJUNで規定) |
|--------|--|------------|-------|-------------------------|----------------|
| 1 | 1 : 局所出力密度 (W/cc) | 1 | 軸方向位置 | 径方向位置 | 時間 |
| | 2 : 局所燃焼度 (MWd/t-U) | 2 | 軸方向位置 | 時間 | 径方向位置 |
| | 3 : 局所熱中性子束 (n/cm ² /s) | 3 | 径方向位置 | 軸方向位置 | 時間 |
| | 4 : 局所高速フアルエンス (n/cm ²) | 4 | 径方向位置 | 時間 | 軸方向位置 |
| 2 | 5 : 局所核種濃度 *1 (g/cc) | 5 | 時間 | 軸方向位置 | 径方向位置 |
| | 6 : 燃料棒内核種総量 (g) | 6 | 時間 | 径方向位置 | 軸方向位置 |
| 3 | 7 : 径方向平均線出力密度 (W/cm) | 1 | 軸方向位置 | 時間 | 時間 |
| | 8 : 径方向平均燃焼度 (MWd/t-U) | 2 | 時間 | 軸方向位置 | 時間 |
| 5 | 9 : 燃料平均線出力密度 (W/cm) | 1 | 時間 | — | — |
| | 10 : 燃料平均燃焼度 (MWd/t-U) | 1 | 時間 | — | — |
| | 11 : 平均熱中性子束 (n/cm ² /s) | | | | |

*1 核種濃度は、照射終了時点についてのみプロットする。

付表2-3 パラメータ IP1-IP5の入力方法

| | I2NUM = 5 or 6 の場合 | それ以外の場合 |
|-------------------|--|---------------------------------|
| IP1 =1: =0: | ^{235}U のデータをプロットする。 しない。 | 第1の曲線の軸位置、半径位置、 ステップ等の番号を入力。 |
| IP2 =1: =0: | ^{238}U のデータをプロットする。 しない。 | 第2の曲線の軸位置、半径位置、 ステップ等の番号を入力。 |
| IP3 =1: =0: | ^{239}Pu のデータをプロットする。 しない。 | 第3の曲線の軸位置、半径位置、 ステップ等の番号を入力。 |
| IP4 =1: =0: | ^{240}Pu のデータをプロットする。 しない。 | 第4の曲線の軸位置、半径位置、 ステップ等の番号を入力。 |
| IP5 =1: =0: | ^{241}Pu のデータをプロットする。 しない。 | 第5の曲線の軸位置、半径位置、 ステップ等の番号を入力。 |

付表2-4 オフライン・プロッター・プログラムの入力データ(1)

| Card No | 変 数 の 説 明 (FORMAT) | | 省 略 値 |
|------------|--------------------|--|-------|
| 1 | M S E T | 図の総数 (I 5) | |
| \$ P L O T | | | |
| | I Z N U M | Y軸を指定する。 | |
| | I G N U M | グラフのX軸とパラメータを指定する。 | |
| | K I J U N | X軸、パラメータで指定されなかった変数の基準点を指定する。 | |
| | I A T | オートスケールを使用するかどうか指定する。 =0:使用しない =1:使用する | |
| | N A X | パラメータの数を指定する。 (MAX = 5) | |
| | I O P T | R O D B U R コード用のX軸のオプション。 1 | |
| 2 | I P 1 | 1番目のパラメータを指定する。 | |
| | I P 2 | 2番目のパラメータを指定する。 | |
| | I P 3 | 3番目のパラメータを指定する。 | |
| | I P 4 | 4番目のパラメータを指定する。 | |
| | I P 5 | 5番目のパラメータを指定する。 | |
| | X O | X軸の最小値 | |
| | X M | X軸の最大値 | |
| | X L | X軸のグラフ枠の実長 (cm) 20.0 | |
| | X U I N E | X軸のt i c m a r kの間隔 | |
| | X N U M | X軸の格子目盛の数値の間隔 | |
| | I X N | 軸目盛の数値の少数点以下に表示される桁数 I X N > 0 : 整数部分と小数点と小数点以下 I X N 桁が表示される。 I X N = 0 : 整数部分と小数点が表示される。 I X N = -1 : 整数部分のみ表示される。 オートスケール使用時入力不要 | -1 |

付表2-4 オフライン・プロッター・プログラムの入力データ(2)

| Card No | 変 数 の 説 明 (FORMAT) | 省 略 値 |
|---------|--|-------|
| | Y O Y 軸の最小値 | |
| | Y M Y 軸の最大値 | |
| | Y L Y 軸のグラフ枠の実長 (cm) | 15.0 |
| | Y LINE Y 軸の tick mark の間隔 | |
| | Y NUM Y 軸の格子目盛の数値の間隔 | |
| | IYN 軸目盛の数値の少数点以下に表示される桁数 IYN > 0 : 整数部分と小数点と小数点以下 IXN桁が表示される。 IYN = 0 : 整数部分と小数点が表示される。 IYN = -1 : 整数部分のみ表示される。 | -1 |
| 2 | HAXIS X軸、Y軸の目盛の数字の高さ (cm) | 0.4 |
| | ILTP 線分の形状の指定 = 0 : データ間を直線で結ぶ。 = 1 : データ間を直線で結び、各データ点に 記号を描く。 = N : データ間を直線で結び、N個ごとの データ点に記号を描く。 = - N : N個ごとのデータ点に記号だけを描く。 | 1 |
| | NOLINE = 0 : グラフ中に格子線を描く。 = 1 : グラフ中に格子線を描かない。 | 1 |
| | ITYPE = 0 : 点と点を結ぶ直線を描く。 = 1 : 点と点を滑らかな線で結ぶ | 0 |
| | HTX X軸のタイトル文字の高さ。 | 0.4 |
| | HTY Y軸のタイトル文字の高さ。 | 0.4 |
| | HTT 図のタイトル文字の高さ。 | 0.5 |
| | \$END | |

オートスケール使用時入力不要

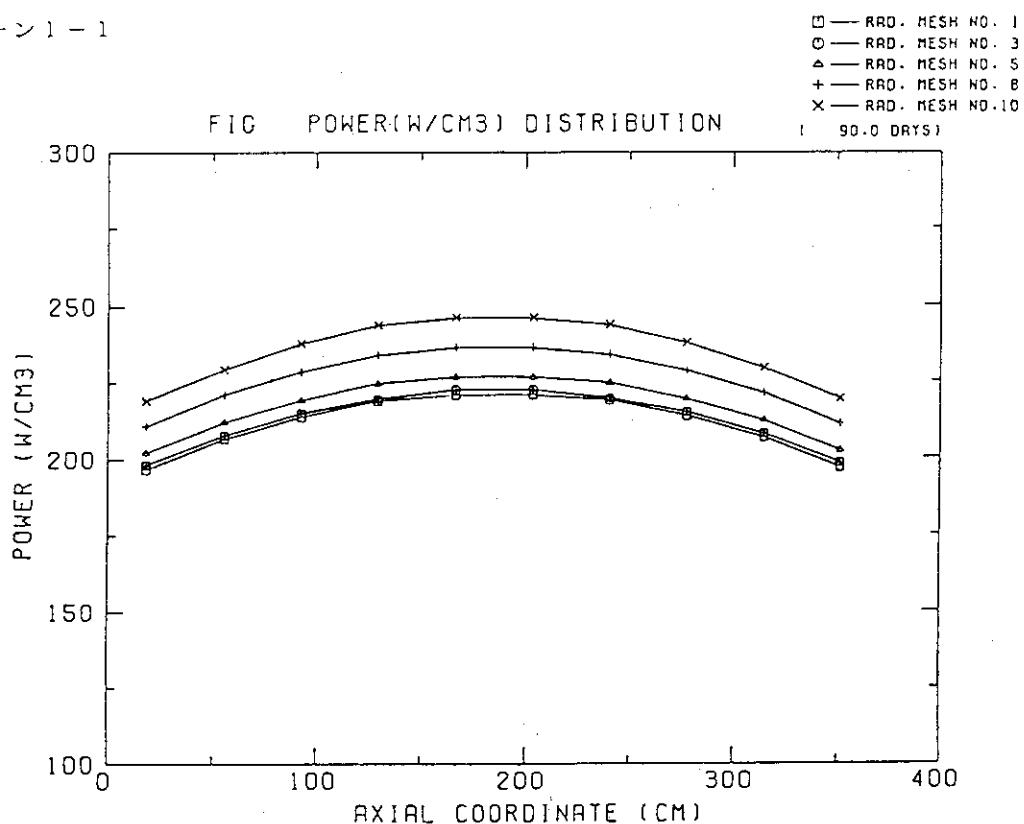
カードNo.1のMSETの数だけカードNo.2を指定する。

カードNo.2はネームリスト入力なので必要な変数のみ入力すれば良い、また、入力されなかった変数には右側の省略値が入力されたものとする。

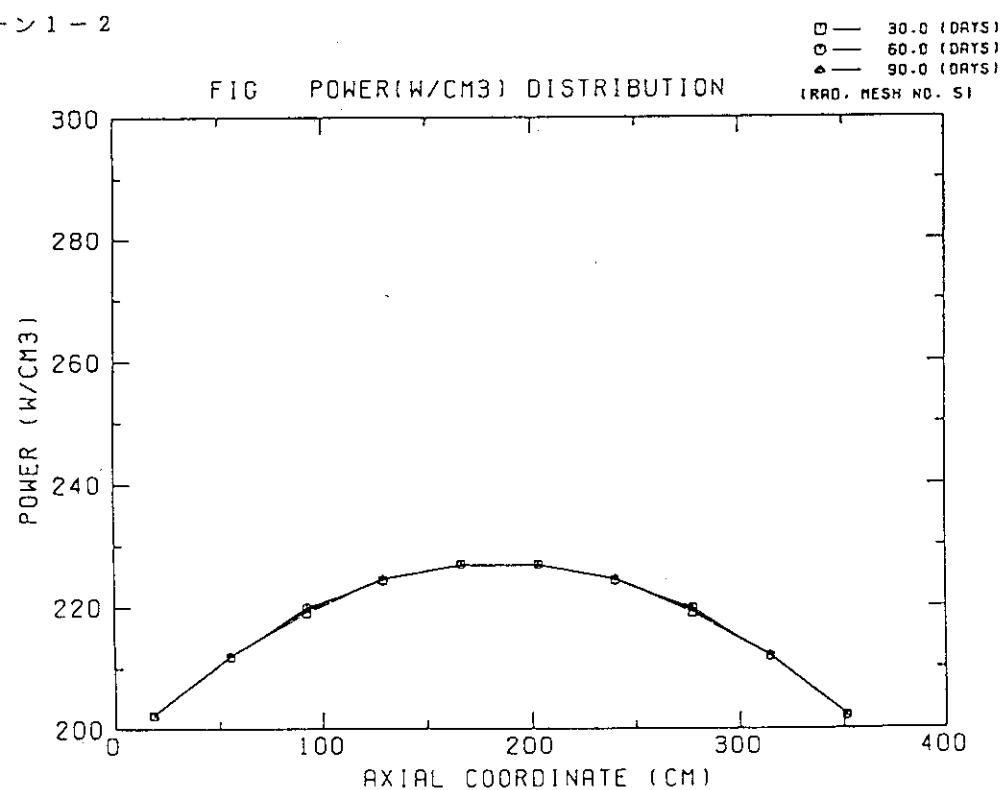
カードNo.2とカードNo.2の間は1行ブランクを開ける。

X軸に経過時間をとるときにはX0, XMの入力した値の範囲だけを描く対象とする事ができる。

パターン 1 - 1



パターン 1 - 2



付図 2-1 プロッター出力の例