

JAERI - M  
91-108

Sn計算におけるR-Z形状モデルに対する  
白色境界条件, 反射境界条件および  
白色反射境界条件の妥当性に関する検討

1991年7月

高野 誠

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、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 Division  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-  
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 いばらき印刷株

Sn計算におけるR-Z形状モデルに対する白色境界条件，反射境界条件  
および白色反射境界条件の妥当性に関する検討

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

高野 誠

(1991年6月6日受理)

二次元 Sn計算コード TWOTRANは炉心解析等に以前から広く使われているコードである。TWOTRANコードで扱える形状の一つにR-Z形状があるが，外周の境界条件としては無限配列セル計算の場合，白色境界条件又は反射境界条件しか用意されていない。本報では，実際の使用済 PWR燃料棒セル計算をTWOTRANコードのR-Z形状で解析した際に生じた問題点を示し，一次元SnコードANISNやモンテカルロコードKENOによる結果との比較検討により，R-Z形状の外周境界条件としては白色境界条件および反射境界条件が不適當となる場合があることを示した。このため，新たに「白色反射境界条件」を提案し，これを TWOTRANコードに組み込み，他の境界条件を使用した場合と比較した結果，最も良好な結果を示すことが判明した。

Applicability of White, Reflective and White-Reflective  
Boundary Conditions to R-Z Geometry Model in Sn Calculation

Makoto TAKANO

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

(Received June 6, 1991)

A two-dimensional Sn transport code, TWOTRAN, has been widely used for various reactor analyses for a long time. The code is able to analyze R-Z (Cylinder) geometry applying either white or reflective boundary condition on the cylindrical side, in the case of infinite cell calculation. The report describes the problem encountered during the analysis of a PWR spent fuel cell by TWOTRAN code employing R-Z geometry. The comparative analysis has performed by using ANISN, one-dimensional Sn code, and KENO, Monte Carlo code. The comparison has revealed that the two boundary conditions available in TWOTRAN code, namely, white and reflective, is not adequate in some cases. Consequently, "White-Reflective boundary condition" has been proposed and is installed in TWOTRAN code. The results have showed that the proposed boundary condition produces much better result than the other two boundary conditions.

Keywords: TWOTRAN, Cylinder, R-Z Geometry, White Boundary Condition, Reflective Boundary Condition, Comparison, ANISN, KENO, Infinite Cell Calculation

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 細いピン状セルの無限増倍率計算 (問題提起) .....	1
2.1 燃焼度依存の燃料棒中核種組成 .....	2
2.2 燃料中FP核種の選定 .....	2
2.3 マクロ断面積の作成 .....	3
2.4 軸方向1燃料領域モデルのANISN, TWOTRAN, KENOによる中性子増倍率の比較 (Model-1) .....	3
2.5 燃料棒端に水反射体を有する体系のTWOTRANおよびKENOによる 中性子増倍率の比較(Model-2) .....	4
2.6 軸方向2領域を有する燃料棒に水反射体を有する体系のTWOTRANおよび KENOによる中性子増倍率の比較(Model-3) .....	4
3. TWOTRANとKENOによる固有値の相違に関する検討 .....	4
3.1 軸方向2領域の相互割合による効果(Model-4) .....	4
3.2 軸方向2領域無限長燃料棒モデルによる検討(Model-5) .....	5
3.3 平板2領域モデルによるANISN, TWOTRAN, KENOコードの相互比較(Model-6) .....	5
3.4 円筒2領域モデルによるTWOTRANコードによる解析(Model-7) .....	6
4. 二次元R-Z円筒形状に対する白色反射境界条件の妥当性 .....	7
4.1 円筒2領域モデル(Model-7)に対する白色反射境界条件の使用 .....	7
4.2 軸方向2領域無限長燃料棒モデル(Model-5)に対する白色反射境界 条件の使用 .....	7
5. 結 言 .....	8
謝 辞 .....	8
参考文献 .....	8
付録1 サブルーチンSETBCの変更 .....	23

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Infinite Multiplication Factor Calculations of a Long and Slender Fuel Pin Cell .....	1
2.1 Nuclides Composition of a Spent Fuel with Burnup .....	2
2.2 Selection of Important FPs in Spent Fuel .....	2
2.3 Production of Macro Cross Sections .....	3
2.4 Comparison of Multiplication Factors of an Axially Two-Region Model Calculated by ANISN, TWOTRAN and KENO Codes (Model-1) .....	3
2.5 Comparison of Multiplication Factors of a Fuel Pin System with Water Reflector at Both Ends Calculated by TWOTRAN and KENO codes (Model-2) .....	4
2.6 Comparison of Multiplication Factors of a Two Fuel Regions System with Water Reflector at Both Ends Calculated by TWOTRAN and KENO codes (Model-3) .....	4
3. Investigation of Discrepancies in Multiplication Factors Calculated by TWOTRAN and KENO codes .....	4
3.1 Effects by Ratio of Axial Two Regions (Model-4) .....	4
3.2 Analysis using an Axially Two-Region Infinite Length Cylinder Model (Model-5) .....	5
3.3 Comparison using Two-Region Plane Model by ANISN, TWOTRAN and KENO codes (Model-6) .....	5
3.4 Analysis of a Two-Region Cylinder Model by TWOTRAN Code (Model-7) .....	6
4. Applicability of White-Reflective Boundary Condition to Two-Region Cylinder Model .....	7
4.1 Application of White-Reflective Boundary Condition to Two-Region Cylinder Model (Model-7) .....	7
4.2 Application of White-Reflective Boundary Condition to Axially Two-Region Infinite Length Model Cylinder (Model-5) .....	7
5. Conclusion .....	8
Aknowledgements .....	8
References .....	8
Appendix 1 Modification of Subroutien SETBC .....	23

## 1. 緒 言

本報では、輸送計算コードTWOTRAN<sup>1)</sup>で使用可能なR-Z形状により、無限配列体系をモデル化する際に問題となる、計算形状外周に適用される境界条件について検討を行う。

本検討を行った背景には、PWR使用済燃料棒体系の中性子増倍率を求めた際、TWOTRANコードとモンテカルロコードKENO<sup>2)</sup>との結果に大きな不一致が見られた点があげられる。通常、使用済PWR燃料棒では長さ方向に燃焼度が異なり、特に両端部数10cmの領域では、燃料棒平均燃焼度の半分位になっている。このため、軸方向の燃焼度分布の効果を含めた検討<sup>3)</sup>をするため、R-Z形状での解析を行う必要が生じる。予備的な検討として、燃料棒端部と中心部の2領域モデルで解析を行った所、TWOTRANとKENOで得た中性子増倍率に約8.7%  $\Delta k$  もの大きな相違が見られた。この点につき、第2章ではANISN<sup>4)</sup> TWOTRAN, KENOで一次元円筒モデルでの比較を行った。この結果三者相互に良い一致を示し、先の大きな相違が、Sn法とモンテカルロ法の相違ではなく何か別の原因に基づくものであることが示された。

さらに第3章で、KENOとTWOTRANによる中性子増倍率の相違の原因について検討し、一次元平板状モデルとの比較検討により、R-Zモデルの外周に適用される境界条件に問題のあることが明らかとなった。特に、R-Zモデルの半径Rが小さい場合に境界条件による問題が大きくなることが判明した。

第4章では、R-Z形状モデルの外周に適用可能な新たな境界条件（白色反射境界条件）を提案し、これをTWOTRANコードに組み込み、従来の白色境界条件や反射境界条件と比較した所、最も良好な中性子増倍率を与えることが判明し、提案した新たな境界条件の有効性が示された。

## 2. 細長いピン状セルの無限増倍率計算（問題提起）

細長いピン状セルとして実際に解析したのは、使用済PWR燃料棒セルの無限配列体系である。一般的に、PWRの使用済燃料棒では軸方向にFig. 2.1に示す様な燃焼度分布を有しており、軸方向に均一な新燃料の場合と異なり、軸方向の非均質性を解析で考慮する必要がある。

そのため、予備的な解析モデルとしてFig. 2.2に示す様な軸方向2燃料領域モデルに対する解析を行う。さらに参照用モデルとして、軸方向1燃料領域モデルの解析を予め行う。ここで、Sn計算コード(ANISN, TWOTRAN)では固有値収束条件を $5 \times 10^{-5}$ とし、モンテカルロ計算コード(KENO)では2万ヒストリーの計算を行っている。特に第2.6節では、燃料棒の軸方向非均質性に対し、TWOTRANとKENOで増倍率の値が大きく異なるという問題点が示された。

## 1. 緒 言

本報では、輸送計算コードTWOTRAN<sup>1)</sup>で使用可能なR-Z形状により、無限配列体系をモデル化する際に問題となる、計算形状外周に適用される境界条件について検討を行う。

本検討を行った背景には、PWR使用済燃料棒体系の中性子増倍率を求めた際、TWOTRANコードとモンテカルロコードKENO<sup>2)</sup>との結果に大きな不一致が見られた点があげられる。通常、使用済PWR燃料棒では長さ方向に燃焼度が異なり、特に両端部数10cmの領域では、燃料棒平均燃焼度の半分位になっている。このため、軸方向の燃焼度分布の効果を含めた検討<sup>3)</sup>をするため、R-Z形状での解析を行う必要が生じる。予備的な検討として、燃料棒端部と中心部の2領域モデルで解析を行った所、TWOTRANとKENOで得た中性子増倍率に約8.7%  $\Delta k$  もの大きな相違が見られた。この点につき、第2章ではANISN<sup>4)</sup> TWOTRAN, KENOで一次元円筒モデルでの比較を行った。この結果三者相互に良い一致を示し、先の大きな相違が、Sn法とモンテカルロ法の相違ではなく何か別の原因に基づくものであることが示された。

さらに第3章で、KENOとTWOTRANによる中性子増倍率の相違の原因について検討し、一次元平板状モデルとの比較検討により、R-Zモデルの外周に適用される境界条件に問題のあることが明らかとなった。特に、R-Zモデルの半径Rが小さい場合に境界条件による問題が大きくなることが判明した。

第4章では、R-Z形状モデルの外周に適用可能な新たな境界条件（白色反射境界条件）を提案し、これをTWOTRANコードに組み込み、従来の白色境界条件や反射境界条件と比較した所、最も良好な中性子増倍率を与えることが判明し、提案した新たな境界条件の有効性が示された。

## 2. 細長いピン状セルの無限増倍率計算（問題提起）

細長いピン状セルとして実際に解析したのは、使用済PWR燃料棒セルの無限配列体系である。一般的に、PWRの使用済燃料棒では軸方向にFig. 2.1に示す様な燃焼度分布を有しており、軸方向に均一な新燃料の場合と異なり、軸方向の非均質性を解析で考慮する必要がある。

そのため、予備的な解析モデルとしてFig. 2.2に示す様な軸方向2燃料領域モデルに対する解析を行う。さらに参照用モデルとして、軸方向1燃料領域モデルの解析を予め行う。ここで、Sn計算コード(ANISN, TWOTRAN)では固有値収束条件を $5 \times 10^{-5}$ とし、モンテカルロ計算コード(KENO)では2万ヒストリーの計算を行っている。特に第2.6節では、燃料棒の軸方向非均質性に対し、TWOTRANとKENOで増倍率の値が大きく異なるという問題点が示された。



## 2.1 燃焼度依存の燃料棒中核種組成

解析対象とした使用済燃料棒は、ウェスチングハウス社製15×15タイプのPWR燃料棒であり、Table 2.1に、主要諸元を示す。初期燃料濃縮度、燃焼度および炉取出後冷却期間は、それぞれ3.2w/o, 30Gwd/t (燃料棒平均値) および14年間である。解析で必要となる燃料の中性子反応断面積は15, 30, 33Gwd/t 燃焼に対するものであり、ORIGEN2コードにより核種組成を求める。

ORIGEN2(The ORNL Isotope Generation and Depletion Code) は、多目的の一点近似燃焼計算コードあり、定係数の大規模な連立一次微分方程式系で表される核種の生成崩壊量を指数行列法により解く。本コードのライブラリには、半減期、各種崩壊に対する分岐比、崩壊熱、各種の中性子断面積、核分裂中性子生成率、多群の光子放出データ等が格納されている。本コードにより、LWR, LMFBR, CANDUのFP, 被覆材及び燃料の核種組成変化や放射能を計算できる。ここで、ORIGEN2で出力される結果は、各核種に対し、グラム当量, gram atom)\* 単位で示される。入力データとしては、ウラン1トン当りの計算を行うようになっており、原子個数密度( $n/10^{-24}\text{cm}^3$ )の単位へ変換する必要がある。したがって、計算で得られたある核種のグラム当量をxとすれば、

$$x \text{ gram atom/ton} = x \text{ mol/ton} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、Table 2.2よりウラン金属密度は9.075g/cm<sup>3</sup>であるから、ウラン金属1トン当り体積は、

$$\frac{1\text{ton}}{9.075\text{g/cm}^3} = 1.1019 \times 10^5 \text{cm}^3 \dots\dots\dots (2.2)$$

したがって、(2.1)式は

$$\frac{x\text{mol}}{1.1019 \times 10^5 \text{cm}^3} = x \times 9.0750 \times 10^{-6} (\text{mol/cm}^3) \dots\dots\dots (2.3)$$

よって、求める原子個数密度はアボガドロ数を $N_{AV}$ とすれば

$$x \times 9.0750 \times 10^{-6} \times N_{AV} (\text{個/cm}^3) \dots\dots\dots (2.4)$$

となる。

## 2.2 燃料中FP核種の選定

燃焼計算の結果得られるFP核種数はかなり多く、総てのFP核種をマクロ断面積作成の際に使用するのには、あまり実際的ではない。また、マクロ断面積作成用コードMAILでは、ライブラリの不備から総てのFP核種を取扱うことができない。したがって、ORIGEN2の出力結果を参照し、FP核種中吸収の大きい下記10種の主要FP核種についてのみ取扱うこととする。

\*グラム当量(gram atom)

元素の量を表わす一種の単位として用いられるもの。質量をグラム単位で表わした数値がその元素の原子量に等しくなる量をいい、1グラム原子は原子の1モルに相当する。

Tc99, Rh103, Xe131, Cs133, Nd143, Sm149, 151, 152, Eu153, Gd155

上記10核種で、FPのみによる吸収全体の68%を占めている。残りのFP核種による効果として、吸収の残り分32%を上記10核種に押し込めるため、ここでは上記10核種の原子個数密度を32%だけ増加させるものとする。また、燃料中では、全FP核種による吸収は全体の約10%を占めるに過ぎず、上記の操作によるスペクトル変化などの効果は無視できるものと考えられる。

ここで、アクチノイド核種としては、ORIGEN2の計算により得られる全核種について取扱う。

これらは、以下の核種である。

U234, 235, 236, 238

Np237

Pu238, 239, 240, 241, 242

Am241, 243

以下の核種に対し、ORIGEN2で得られたグラム当量を(2.4)式により原子個数密度に変換した結果を、Table 2.2に示す。

### 2.3 マクロ断面積の作成

解析対象燃料棒の断面積セットはMAIL3.0コードにより作成する。核データライブラリーJENDL-3を用いたライブラリは整備中でもあり、ここでは、ENDF-B/IVをベースとしたライブラリのみが先節で選定した核種をすべて有する。そこで、解析用マクロ断面積はENDF-B/IVベースの26群 $P_1$ 断面積とする。

燃料ペレット部については、前節で示した燃焼度依存の原子個数密度を使用し、被覆材および水については、MAIL3.0コード内蔵(ZIRCALOY-4, H<sub>2</sub>O at 20°C)のデータを使用する。

### 2.4 軸方向1燃料領域モデルのANISN, TWOTRAN, KENOによる中性子増倍率の比較(Model-1)

簡単な体系について、ANISN, TWOTRANおよびKENOを用いた解析を行い中性子増倍率を比較する。使用する断面積はMAILコードにより直接ANISNおよびKENO用のものを作成し、バイナリファイルを介し両コードに供給する。TWOTRAN用の断面積は、ANISN型断面積を一旦、文字型イメージでファイルに作成し、これを他のTWOTRAN用入力データとJCL上で結合して与える。

解析対象は、全長5mの燃料棒セルの無限配列体系であり、上下端は真空境界条件である。TWOTRANコードおよびANISNコードでは、セル外周は円筒であり白色境界条件を使用しているが、KENOコードに対しては、セル外周は直方体となっており完全反射境界条件を使用する。解析形状をFig. 2.3に示す。解析の結果得られた中性子増倍率をTable 2.3に示す。同表から、これら3種のコードによる中性子増倍率の差は、0.24%  $\Delta k$  で小さく、有意な差があるとは言えず、Model-1に対し、各コードは同一の中性子増倍率を与えうる。

## 2.5 燃料棒端部に水反射体を有する体系のTWOTRANおよびKENOによる中性子増倍率の比較 (Model-2)

先のModel-1に対し、燃料棒端部に水反射体を付加した体系について、TWOTRANおよびKENOコードにより中性子増倍率の評価を行う。解析形状をFig. 2.4に示す。同図上に併せて得られた中性子増倍率を示す。両者の差は、 $0.19\% \Delta k$ であり、この場合にも両コード間の有意な差は認められない。

## 2.6 軸方向2領域を有する燃料棒に水反射体を有する体系の TWOTRANおよびKENOによる中性子増倍率の比較(Model-3)

ここでは、先のModel-2の燃料棒を軸方向に2分割したModel-3に対する中性子増倍率をTWOTRAN およびKENOにより評価する。解析形状をFig. 2.5に、得られた固有値と併せて示す。これより、TWOTRANとKENOで評価したModel-3の固有値には $8.2\% \Delta k$ もの大きな相違がここで見られる。実験値との比較ではなく、コード間の比較であるため、この段階では TWOTRANとKENOのどちらに問題があるかは不明である。次章で、この相違について、さらに詳細に検討する。

# 3. TWOTRANとKENOによる固有値の相違に関する検討

前章で明らかになったように、Model-1およびModel-2ではTWOTRANコードとKENOコードは大変良く一致しており、TWOTRAN で円筒形状に対し使用した白色境界条件を含め特に問題は見られなかった。一方、Model-3では、燃料棒を2領域に分割し軸方向を不均一としたのみであるが、両者の固有値に大きな相違が発生した。

本章では、燃料棒2領域部分の相互の割合を変え、軸方向の不均一効果についてさらに検討する。

## 3.1 軸方向2領域の相互割合による効果(Model-4)

先のModel-3においては、燃料棒上部の15GWd/t燃焼部が全長183cm に対し30cmであったが、この部分を60cm, 90cm, 120cm と長くしてゆき、TWOTRAN とKENOとで評価した中性子増倍率の変化を比較、検討する。

Fig. 3.1に解析形状を示す。両コードで得られた中性子増倍率をTable 3.1およびFig. 3.2に示す。この結果からTWOTRANとKENOの差は15GWd/t燃焼部分が小さい時に顕著であることがわかる。この体系では、15GWd/t部分が反応度的に主要な寄与をしており、残りの33GWd/t燃焼部分は殆んど反

## 2.5 燃料棒端に水反射体を有する体系のTWOTRANおよびKENOによる中性子増倍率の比較 (Model-2)

先のModel-1に対し、燃料棒端部に水反射体を付加した体系について、TWOTRANおよびKENOコードにより中性子増倍率の評価を行う。解析形状をFig. 2.4に示す。同図上に併せて得られた中性子増倍率を示す。両者の差は、 $0.19\% \Delta k$ であり、この場合にも両コード間の有意な差は認められない。

## 2.6 軸方向2領域を有する燃料棒に水反射体を有する体系の TWOTRANおよびKENOによる中性子増倍率の比較(Model-3)

ここでは、先のModel-2の燃料棒を軸方向に2分割したModel-3に対する中性子増倍率をTWOTRAN およびKENOにより評価する。解析形状をFig. 2.5に、得られた固有値と併せて示す。これより、TWOTRANとKENOで評価したModel-3の固有値には $8.2\% \Delta k$ もの大きな相違がここで見られる。実験値との比較ではなく、コード間の比較であるため、この段階では TWOTRANとKENOのどちらに問題があるかは不明である。次章で、この相違について、さらに詳細に検討する。

# 3. TWOTRANとKENOによる固有値の相違に関する検討

前章で明らかになったように、Model-1およびModel-2ではTWOTRANコードとKENOコードは大変良く一致しており、TWOTRAN で円筒形状に対し使用した白色境界条件を含め特に問題は見られなかった。一方、Model-3では、燃料棒を2領域に分割し軸方向を不均一としたのみであるが、両者の固有値に大きな相違が発生した。

本章では、燃料棒2領域部分の相互の割合を変え、軸方向の不均一効果についてさらに検討する。

## 3.1 軸方向2領域の相互割合による効果(Model-4)

先のModel-3においては、燃料棒上部の15Gwd/t燃焼部が全長183cm に対し30cmであったが、この部分を60cm, 90cm, 120cm と長くしてゆき、TWOTRAN とKENOとで評価した中性子増倍率の変化を比較、検討する。

Fig. 3.1に解析形状を示す。両コードで得られた中性子増倍率をTable 3.1およびFig. 3.2に示す。この結果からTWOTRANとKENOの差は15Gwd/t燃焼部分が小さい時に顕著であることがわかる。この体系では、15Gwd/t部分が反応度的に主要な寄与をしており、残りの33Gwd/t燃焼部分は殆んど反

応度的には無視できると考えられる。この15GWd/t燃焼部分は水反射体部分および33GWd/t部分と接しており、この境界部分の効果について次に検討する。

### 3.2 軸方向2領域無限長燃料棒モデルによる検討(Model-5)

前節のModel-4では燃料棒上端は水反射体と接していたが、ここでは水反射体を除去し燃料棒の不均一効果のみについて検討する。そのため、Fig. 3.3に示すような軸方向2領域無限長燃料棒モデル(Model-5)を用いる。

両コードによる解析結果をTable 3.2に示す。この結果をグラフにして示したのがFig. 3.4である。これからこのモデルにおいてもTWOTRANとKENOでは中性子増倍率に差が見られ、特に15GWd/t燃焼部が15cmの所で大きく、5.8% $\Delta k$ の差が見られる。先のModel-4では、15GWd/t燃焼部が30cmのとき8.2% $\Delta k$ の差が生じており、Model-5ではこの差が小さ目となっているが、TWOTRANとKENOの差は15GWd/tと33GWd/t燃焼部領域の境界部分に原因があると思われる。いずれの場合にもTWOTRANコードの方が中性子増倍率をKENOコードより大き目に評価している。

ここで、熱群(23群, 0.045eV)の中性子束分布を先のModel-3について見れば(Fig. 3.5) TWOTRANの方が15GWd/t燃焼部分で中性子束分布をKENOよりも大き目に評価しており、そのため中性子増倍率もKENOより大きな値になるものと考えられる。この中性子束分布の相違の原因は何であろうか。明らかに、15GWd/tと33GWd/t燃焼の不連続部分近傍での中性子流が異なると考えられる。この原因としてTWOTRANで使用している白色境界条件の妥当性がある。次に、R-Z円筒形状に対し白色境界条件を使用することの是非について検討してゆく。

### 3.3 平板2領域モデルによるANISN, TWOTRAN, KENOコードの相互比較(Model-6)

これまでの解析では、燃料棒と水減速材を別個に非均質に取扱っていたが、軸方向の不均一に対する境界条件の影響について検討するため、燃料と水を混合した均質燃料断面積を15GWd/tと33GWd/t燃焼の2種作成し、軸方向に不均一性を有する平板状モデルを作成し、ANISN, TWOTRANおよびKENOコードにより中性子増倍率を比較してみる。このモデルにより、軸方向の不均一性を上記3種のコードで比較検討できる。平板2領域へのモデル化をFig. 3.6に示す。さらに、3種のコードそれぞれに対し作成した計算形状モデルFig. 3.7に示す。ANISN用のモデルは無限平板状であるが、TWOTRANでは、同図に示したように20cmおよび1cm厚のモデルに対し反射境界条件を使用してANISNモデルとの対応を取っている。厚みを20cmと1cmとすることにより境界条件による中性子増倍率への効果が現われやすくなるようにしている。KENO用モデルでは、断面が20cm $\times$ 20cmの直方体および、1cm $\times$ 1cmの直方体モデルに対し反射境界条件により、他コード用モデルとの対応を取っている。これらモデルが取扱っている実際の体系はすべて同一であり、中性子増倍率もすべて基本的に同一の値となるべきものである。

解析結果をTable 3.3に示す。この結果から、ANISN, KENOに対しTWOTRANは約1% $\Delta k$ 程度大き

目の評価をしているが、メッシュ効果等も考慮すれば、これら3種のコードは平板2領域モデルに対しほぼ同一の結果を与えると言って良いだろう。さらに、計算モデルの大小による差(20cm×20cmに対し1×1cm)は有意なものではないことが判る。したがって、基本的にここで解析対象としたような軸方向不均一体系に対し、3種のコードは矛盾のない結果を与える。

### 3.4 円筒2領域モデルによるTWOTRANコードによる解析(Model-7)

前節では、本質的に同一の中性子固有値を与えるような平板状モデルをANISN, TWOTRAN, KENOコード用に作成して解析を行い、これら3種のコード間でほぼ同一の中性子増倍率が得られることを確認した。このときのモデルでは境界条件として反射境界条件を使用した。本節ではTWOTRANのR-Z形状に対し白色境界条件を使用した場合について検討する。

計算モデルでは、軸方向には前節の平板モデルと同一としたが、ただし半径の大きさをパラメータとして中性子増倍率の変化について検討する。本質的に体系がR-Z形状となっはいるが、無限体系であり先の平板モデルと同一の中性子増倍率を与えるはずである。半径として50cm, 20cm, 1cm, 0.8cmの場合について検討する。解析形状をFig. 3.8に示す。

解析結果をTable 3.4に示す。この結果から半径が小さくなると中性子増倍率が4%Δk程度大きくなるのがわかる。中性子増倍率は本モデルでは半径によらず一定であるべきであり、4%Δkも増大するのはどこかに問題がある。考え得る原因としては、境界条件による効果がある。ここで使用している白色境界条件は次元Rモデルのような横断面状モデルに対しては適当なものであるろうが、軸方向に不均一な場合には、境界面に入射する中性子をすべて均一にして再び放出する白色境界条件は不適切であると言えよう。つまり、Fig. 3.9に示すように、入射してきた中性子の境界面への入射角を全て無視して、入射中性子量と同量の中性子を全て均一に体系内に戻す白色境界条件では、θ方向に不均一性のないR-θモデルやZ方向に不均一性のないR-Zモデル以外には難点があると考えられる。特に、先の第2章で問題点が示された、R-ZモデルでZ方向に不均一性がある場合には、Fig. 3.9示すように、軸方向の中性子束分布は平坦ではなく、図中点Aでは、上方から入り下方へ出てゆく中性子流が支配的な訳だが、TWOTRANの白色境界条件ではこの点を考慮できない。先にFig. 3.5に見られたTWOTRANとKENOの中性子束分布の相違についても、上の理由で説明がつけられる。

したがって、R-Z形状に対する境界条件としてより適切であると考えられる方法は、Z方向には反射条件を有しR方向には白色条件を有するようなものであると考えられる。この概念を図に示したのがFig. 3.10である。つまり、境界上の入射点に対しθの角度で入ってくる中性子に対しては、反射境界条件として同図に示すようにθの角度で再び入射点から出てゆくようにして、入射中性子の有するZ方向ベクトル成分に関して反射境界条件となるようにする。一方、R方向成分については、方向性を無視し白色境界条件を有するようにする。このような境界条件を「白色反射境界条件」と呼ぶものとする。次章で白色反射境界条件の妥当性について検討する。

## 4. 二次元R-Z円筒形状に対する白色反射境界条件の妥当性

本章では、先のFig. 3. 8に示したR-Z円筒形状モデルに対し、ここで提案した白色反射境界条件および白色境界条件、反射境界条件を適用し相互比較を試みる。さらにFig. 3. 3に示した様な、R、Z両方向に不均一性の有する場合についても比較を行う。

### 4.1 円筒2領域モデル(Model-7)に対する白色反射境界条件の使用

先のFig. 3. 8に示した円筒2領域モデルに対し白色反射境界条件を適用し、中性子増倍率の半径による変化について調べる。白色反射境界条件はTWOTRANコードのサブルーチンSETBCを変更することにより実現した。白色境界条件および反射境界条件についても併せて解析を行い、その結果をTable 4. 1に示す。Table 4. 2には半径20cmの白色反射境界条件の結果を基準とした時の相対差を示す。この結果から、白色反射境界条件はR-Z形状の半径の変化に対し安定している。白色境界条件は前章でも見たように半径が小さくなるにつれて中性子増倍率を大き目に評価する傾向があり、一方、反射境界条件は半径の減少とともに中性子増倍率を小さ目に評価する傾向が見られる。したがって、白色反射境界条件では、これら相反する傾向が打ち消し合うため中性子増倍率が半径の変化に影響されないものと考えられる。

### 4.2 軸方向2領域無限長燃料棒モデル(Model-5)に対する白色反射境界条件の使用

第3. 2節で検討したModel-5に対し、15GWd/t燃焼部が15cmの場合につき、白色反射境界条件を適用してみる。比較のため、本節でも反射および白色境界条件を使用した場合の解析とKENOによる解析結果(再計算も含む)も合せて示す。ここで、燃料ピン外側にある水層の厚さを変化させて、モデル半径を0. 665cm, 0. 760cm, 0. 950cmおよび1. 140cmとした場合について解析する。ここで、半径0. 950cmの時に中性子増倍率が最大となり水部での中性子熱化条件が最適のものとなっている。

解析結果をTable 4. 3に、さらにKENOによる中性子増倍率との差をTable 4. 4に示す。これからいずれの場合にも白色反射境界条件を使用した結果がKENOによって得た結果に最も近いものとなっている。ここで、先の第3. 3節で行った平板2領域モデルによる検討で、Table 3. 3に見られる通りTWOTRANとKENOでは0. 7~1. 6%  $\Delta k$ 程度の差が見られた。断面積やモデル、境界条件は両者とも条件は同じであり、両コードの有する固有の差であると考えられる。したがって、TWOTRANコードは約1%  $\Delta k$ 程度KENOより中性子増倍率を大き目に評価すると考えれば、Table 4. 4のKENOとの差は+0. 74%  $\Delta k$ ~1. 9%  $\Delta k$ となり、両者の差はかなり改善されたと言えよう。

## 5. 結 言

輸送計算コードTWOTRANでは、2次元形状で3次元を近似できるR-Z形状モデルを取扱うことが出来、燃料棒のセル計算等に頻繁に使用されている。燃料棒セル計算では、燃料ピンの部分をR-Z形状でかなり正確に模擬できるが、燃料ピン外周の冷却材部は直方体で模擬し反射境界条件を使用するのが良いが、R-Z形状で取扱うため通常、等価的な円柱で近似している。このとき境界条件として白色境界条件がよく使用されるが、これは便宜的なもので必ずしも正確なものではない。また、反射境界条件も円筒形状に対しては正確なものとは言えない。

本報では、R-Z形状の外周に対する境界条件として、より適切と考えられる白色反射境界条件をTWOTRANコードに組み込み、形状を正確に扱えるモンテカルロコードKENOによる結果と比較を行った。ここで、白色反射境界条件は、Z方向には反射境界条件、R方向には白色境界条件として作用する。検討の結果、白色反射境界条件は、白色境界条件および反射境界条件に対し、半径Rの依存性が小さく最も安定であり、かつKENOによる結果とも最も良く一致した。ここで、R-Z形状モデルに対する外周境界条件の影響は半径が小さくなるにつれ相対的に顕著となる訳だが、いずれにしろR-Z形状に対しては現実には存在しえない人工的境界条件を使用せざるを得ず、その適用限界については常に念頭に置く必要がある。

## 謝 辞

本検討を通じ、核燃料施設安全評価研究室の内藤淑孝室長および臨界安全研究室の須崎武則氏から大変有益な御指摘をいただきました。ここに深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) K. D. Lathrop, "TWOTRAN-II ; AN Interfaced Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport", LA-4848-MS (1973)
- 2) L. M. Petrie, N. F. Cross; "KENOIV An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938 (1975)
- 3) 高野, 増川, 内藤, 「使用済燃料棒の燃焼度分布による臨界性への効果」, 日本原子力学会 1991年 春の年会, A22, 近畿大学, 3月28日~30日, (1991)
- 4) W. W. Engle, Jr, "A User Manual for ANISN, A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code With Anisotropic Scattering", K-1693, March(1967)



## 5. 結 言

輸送計算コードTWOTRANでは、2次元形状で3次元を近似できるR-Z形状モデルを取扱うことが出来、燃料棒のセル計算等に頻繁に使用されている。燃料棒セル計算では、燃料ピンの部分をR-Z形状でかなり正確に模擬できるが、燃料ピン外周の冷却材部は直方体で模擬し反射境界条件を使用するのが良いが、R-Z形状で取扱うため通常、等価的な円柱で近似している。このとき境界条件として白色境界条件がよく使用されるが、これは便宜的なもので必ずしも正確なものではない。また、反射境界条件も円筒形状に対しては正確なものとは言えない。

本報では、R-Z形状の外周に対する境界条件として、より適切と考えられる白色反射境界条件をTWOTRANコードに組み込み、形状を正確に扱えるモンテカルロコードKENOによる結果と比較を行った。ここで、白色反射境界条件は、Z方向には反射境界条件、R方向には白色境界条件として作用する。検討の結果、白色反射境界条件は、白色境界条件および反射境界条件に対し、半径Rの依存性が小さく最も安定であり、かつKENOによる結果とも最も良く一致した。ここで、R-Z形状モデルに対する外周境界条件の影響は半径が小さくなるにつれ相対的に顕著となる訳だが、いずれにしろR-Z形状に対しては現実には存在しえない人工的境界条件を使用せざるを得ず、その適用限界については常に念頭に置く必要がある。

## 謝 辞

本検討を通じ、核燃料施設安全評価研究室の内藤倅孝室長および臨界安全研究室の須崎武則氏から大変有益な御指摘をいただきました。ここに深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) K. D. Lathrop, "TWOTRAN-II ; AN Interfaced Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport", LA-4848-MS (1973)
- 2) L. M. Petrie, N. F. Cross; "KENOIV An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938 (1975)
- 3) 高野, 増川, 内藤, 「使用済燃料棒の燃焼度分布による臨界性への効果」, 日本原子力学会 1991年 春の年会, A22, 近畿大学, 3月28日~30日, (1991)
- 4) W. W. Engle, Jr, "A User Manual for ANISN, A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code With Anisotropic Scattering", K-1693, March(1967)

## 5. 結 言

輸送計算コードTWOTRANでは、2次元形状で3次元を近似できるR-Z形状モデルを取扱うことが出来、燃料棒のセル計算等に頻繁に使用されている。燃料棒セル計算では、燃料ピンの部分をR-Z形状でかなり正確に模擬できるが、燃料ピン外周の冷却材部は直方体で模擬し反射境界条件を使用するのが良いが、R-Z形状で取扱うため通常、等価的な円柱で近似している。このとき境界条件として白色境界条件がよく使用されるが、これは便宜的なもので必ずしも正確なものではない。また、反射境界条件も円筒形状に対しては正確なものとは言えない。

本報では、R-Z形状の外周に対する境界条件として、より適切と考えられる白色反射境界条件をTWOTRANコードに組み込み、形状を正確に扱えるモンテカルロコードKENOによる結果と比較を行った。ここで、白色反射境界条件は、Z方向には反射境界条件、R方向には白色境界条件として作用する。検討の結果、白色反射境界条件は、白色境界条件および反射境界条件に対し、半径Rの依存性が小さく最も安定であり、かつKENOによる結果とも最も良く一致した。ここで、R-Z形状モデルに対する外周境界条件の影響は半径が小さくなるにつれ相対的に顕著となる訳だが、いずれにしろR-Z形状に対しては現実には存在しえない人工的境界条件を使用せざるを得ず、その適用限界については常に念頭に置く必要がある。

## 謝 辞

本検討を通じ、核燃料施設安全評価研究室の内藤倅孝室長および臨界安全研究室の須崎武則氏から大変有益な御指摘をいただきました。ここに深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) K, D, Lathrop, "TWOTRAN-II ; AN Interfaced Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport", LA-4848-MS (1973)
- 2) L. M. Petrie, N. F. Cross; "KENOIV An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938 (1975)
- 3) 高野, 増川, 内藤, 「使用済燃料棒の燃焼度分布による臨界性への効果」, 日本原子力学会 1991年 春の年会, A22, 近畿大学, 3月28日~30日, (1991)
- 4) W, W, Engle, Jr, "A User Manual for ANISN, A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code With Anisotropic Scattering", K-1693, March(1967)

Table 2.1 Specification of a PWR Rod for Analysis

15×15 Type PWR Fuel Assembly by Westinghouse	
Number of Rods	204 Rods/Assembly (15×15-21)
Lattice Pitch	1.43 cm (15×15 rods assumed)
Stack height	365.76 cm
Fuel Density (Initial)	10.295 gUO <sub>2</sub> /cm <sup>3</sup> 9.075 gU/cm <sup>3</sup>
Pellet Density	92% TD UO <sub>2</sub>
Pellet Diameter	9.29 mm
Cladding	
Material	Zircaloy-4
Outer Diameter	10.72 mm
Thickness	0.617 mm
Fuel Status	
Initial Fuel Enrichment	3.2 w/o
Burnup*	30 GWd/t
Cooling Time	14 years

\* Axially Averaged Value

Table 2.2 Number Densities of Nuclides in Spent Fuel at 15, 30 and 33 Gwd/t (After 14 years of Cooling)

NUCLIDE	15 Gwd/t NUMBER DENSITY	30 Gwd/t NUMBER DENSITY	33 Gwd/t NUMBER DENSITY	
U {	234	5.6000E-06	4.6970E-06	4.5480E-06
	235	4.2110E-04	2.1540E-04	1.8540E-04
	236	5.7020E-05	8.8050E-05	9.1750E-05
	238	2.2000E-02	2.1740E-02	2.1680E-02
Np···237	3.3500E-06	9.1210E-06	1.0380E-05	
Pu {	238	4.4270E-07	2.3980E-06	2.9860E-06
	239	9.3500E-05	1.1360E-04	1.1510E-04
	240	2.2890E-05	4.8740E-05	5.2680E-05
	241	5.0040E-06	1.2710E-05	1.4110E-05
	242	1.3480E-06	8.2000E-06	1.0180E-05
Am {	241	5.0680E-06	1.2710E-05	1.4080E-05
	243	9.9470E-08	1.3740E-06	1.9130E-06
Tc···099	2.7790E-05	5.2520E-05	5.7040E-05	
Rh···103	1.6630E-05	3.0780E-05	3.3120E-05	
Xe···131	1.3040E-05	2.2660E-05	2.4140E-05	
Cs···133	3.0840E-05	5.7360E-05	6.2070E-05	
Nd···143	2.3290E-05	3.7890E-05	3.9860E-05	
Sm {	149	1.0280E-07	1.3450E-07	1.4200E-07
	151	4.1220E-07	5.2040E-07	5.4080E-07
	152	3.0910E-06	5.7030E-06	6.1270E-06
Eu···153	1.7250E-06	4.5090E-06	5.0920E-06	
Gd···155	1.4800E-07	4.7460E-07	5.6490E-07	

↑ Increased  
by 32%  
↓

Table 2.3 Multiplication Factors of Model-1  
by ANISN, TWOTRAN and KENO Codes

Code	Multiplication Factor
ANISN	0.9903
TWOTRAN	0.9879
KENO	0.9884 ( $\pm 0.0017$ )
Max. Difference	0.0024 ( $\Delta k$ )

Table 3.1 Multiplication Factors of Model-4  
by TWOTRAN and KENO Codes

	Code	TWOTRAN	KENO
Length of 15 Gwd/t part (cm)	30	1.1349	1.0532 ( $\pm 0.0020$ )
	60	1.1769	1.1409 ( $\pm 0.0020$ )
	90	1.1907	1.1733 ( $\pm 0.0021$ )
	120	1.1960	1.1911 ( $\pm 0.0021$ )
	Full	1.2106	1.2078 ( $\pm 0.0018$ )

Table 3.2 Multiplication Factors of Model-5  
by TWOTRAN and KENO Codes

Fuel Length		TWOTRAN	KENO
15 GWd/t	33 GWd/t		
0	200	0.9517	0.9562 (±0.0018)
15	185	1.1417	1.0847 (±0.0021)
50	150	1.1889	1.1841 (±0.0019)
100	100	1.2028	1.2034 (±0.0020)
150	50	1.2086	1.2132 (±0.0021)
185	15	1.2088	1.2130 (±0.0017)
200	0	1.2144	1.2174 (±0.0018)

Table 3.3 Multiplication Factors of 2-Region  
Plane Models by ANISN, TWOTRAN and  
KENO Codes (Model-6)

Code	Model	Multiplication Factor
ANISN	—	1.1105
TWOTRAN	20 × 20 cm	1.1246
	1 × 1 cm	1.1216
KENO	20 × 20 cm	1.1086 (±0.0019)
	1 × 1 cm	1.1143 (±0.0019)

Table 3.4 Multiplication Factors of 2-Region  
Cylinder Model by TWOTRAN Code  
(Model-7)

Radius (cm)	R/Z Ratio	Multiplication Factor
50	0.25	1.1253
20	0.10	1.1275
1.0	0.005	1.1642
0.8	0.004	1.1667
Plane Model		1.1246

Table 4.1 Multiplication Factors of 2-Region  
Cylinder Model applying White-Reflective  
Boundary Condition

Radius (cm)	Boundary Condition		
	White-Reflective	White	Reflective
20	1.1217	1.1275	1.1210
5	1.1236	1.1394	1.1201
1	1.1182	1.1642	1.0266

Table 4.2 Relative Difference of Multiplication  
Factors (%)

Radius (cm)	Boundary Condition		
	White-Reflective	White	Reflective
20	0	+0.58	-0.07
5	+0.19	+1.77	-0.16
1	-0.35	+4.25	-9.51

Table 4.3 Multiplication Factors of Model-5 applying  
White-Reflective Boundary Condition  
(Length of 15 GWd/t is 15 cm)

Cell Radius (cm)	Boundary Condition			KENO
	White-Reflective	White	Reflective	
1.140	1.0659	1.0967	1.0688	1.0485
0.950	1.1060	1.1417	1.1123	1.0821
0.760	1.0354	1.0764	1.0510	1.0064
0.665	0.8931	0.9351	0.9205	0.8738

Table 4.4 Relative Differences of Multiplication  
Factors (%)

Cell Radius (cm)	Boundary Condition			KENO
	White-Reflective	White	Reflective	
1.140	1.74	4.82	2.03	0.00
0.950	2.39	5.96	3.02	0.00
0.760	2.90	7.00	4.46	0.00
0.665	1.93	6.13	4.67	0.00



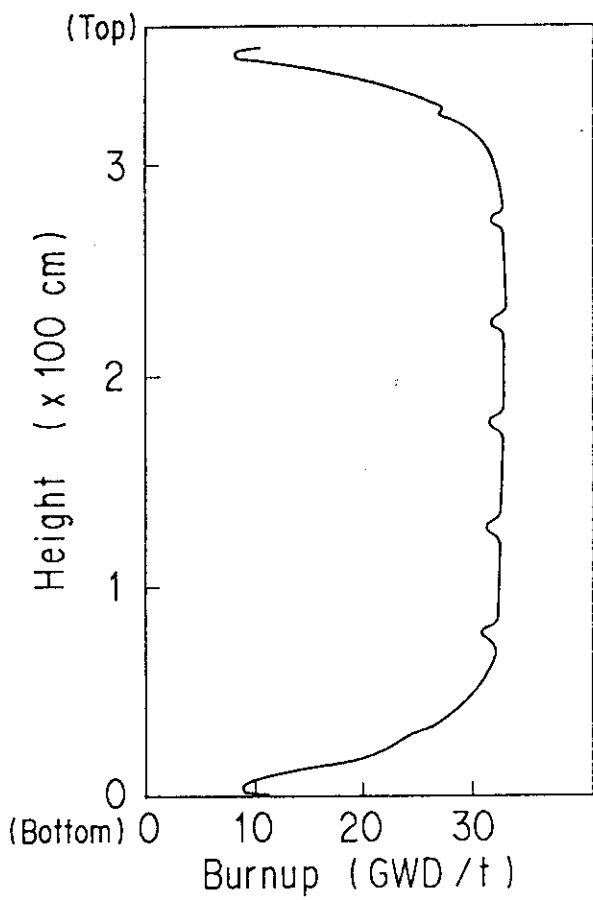


Fig. 2.1 Axial Burnup Distribution of a PWR Spent Fuel Rod

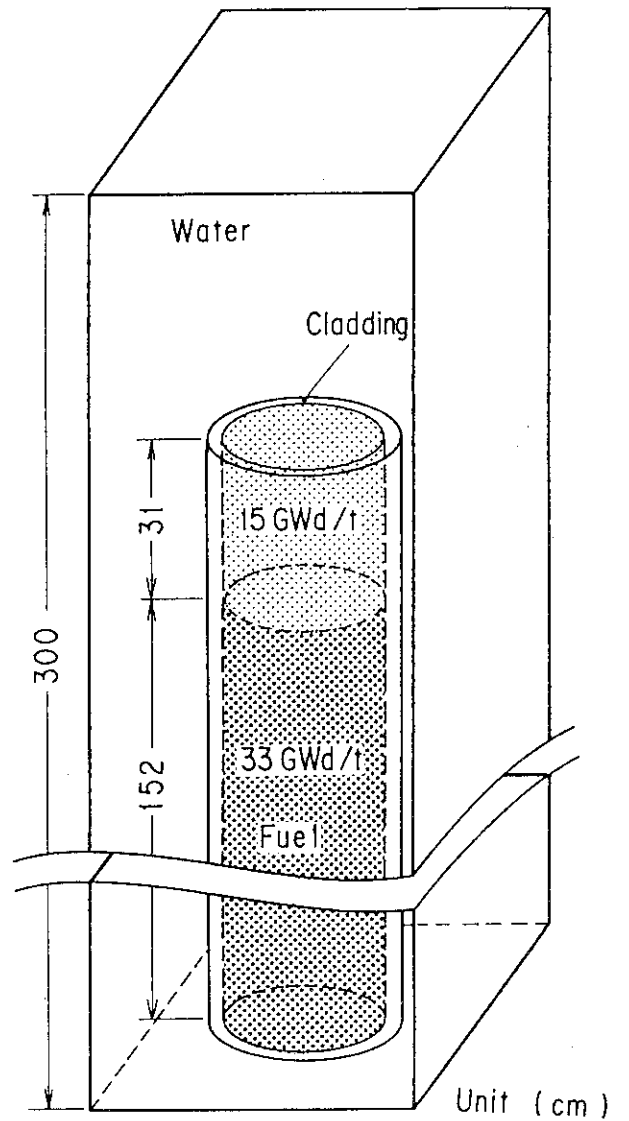


Fig. 2.2 Two-Region Model of a PWR Spent Fuel Cell

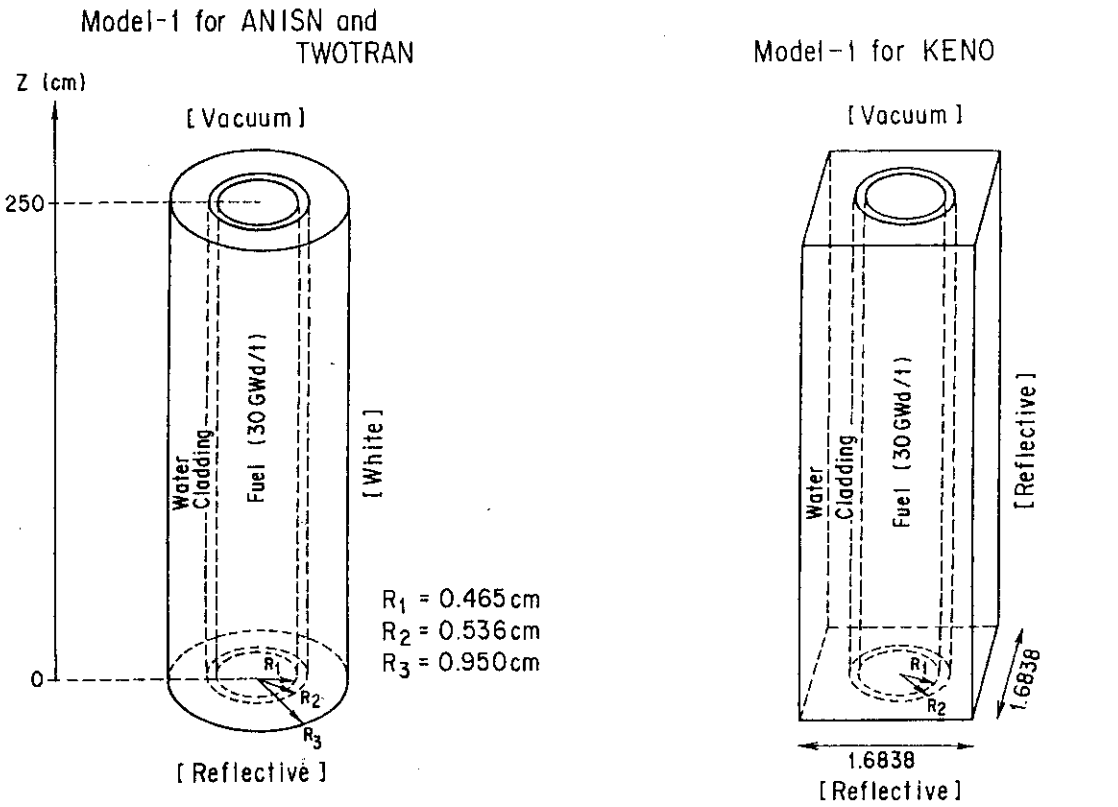


Fig. 2.3 Model-1 for ANISN, TWOTRAN and KENO Calculations

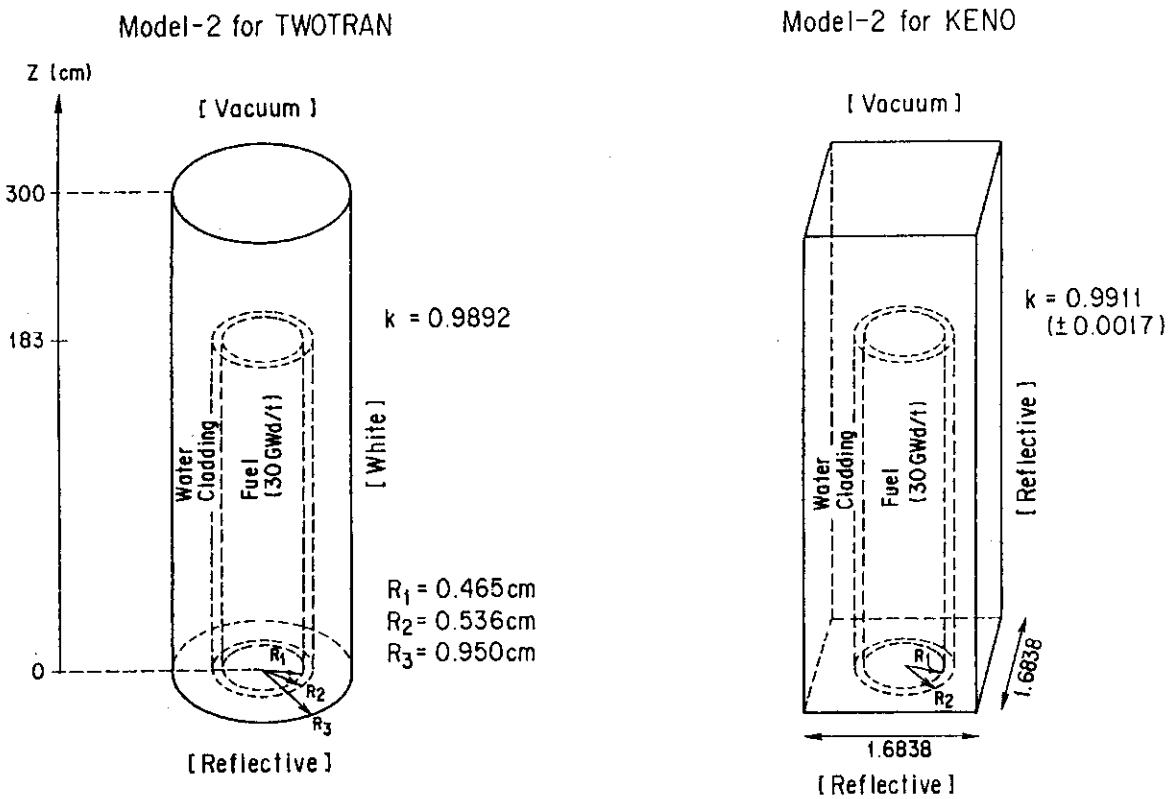


Fig. 2.4 Model-2 for TWOTRAN and KENO Calculations

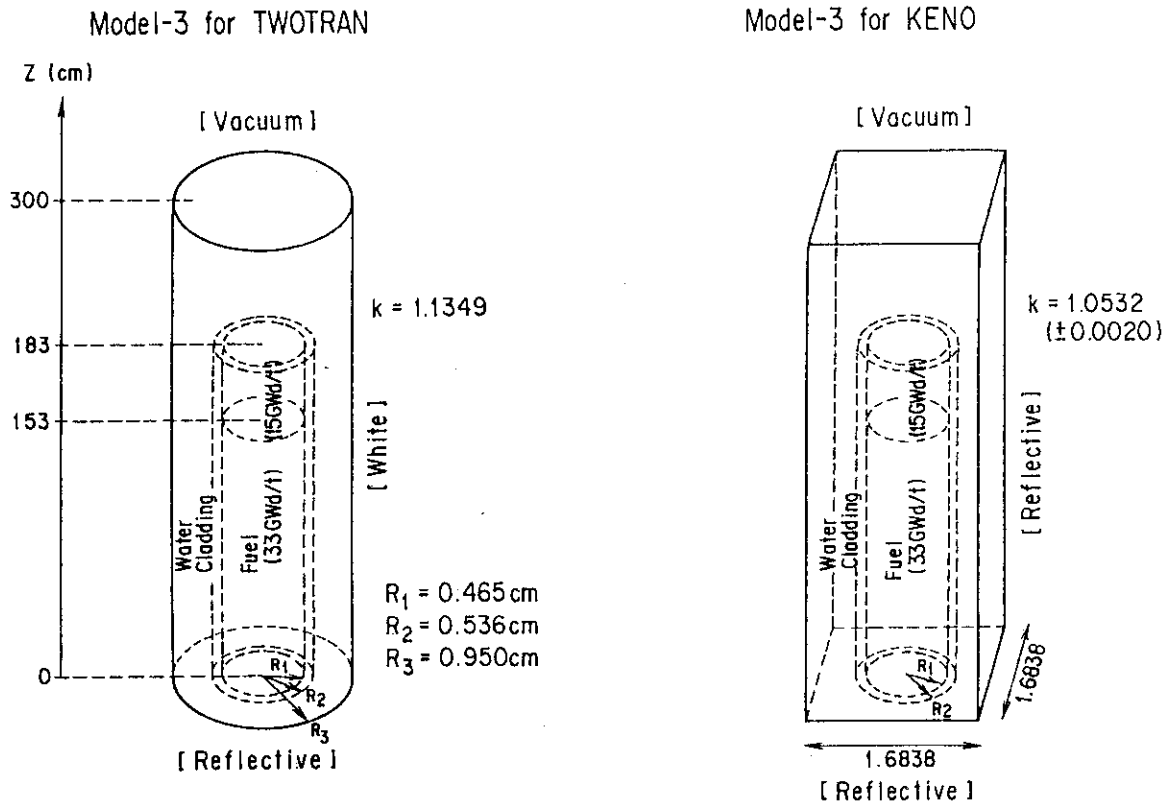


Fig. 2.5 Model-3 for TWOTRAN and KENO Calculations

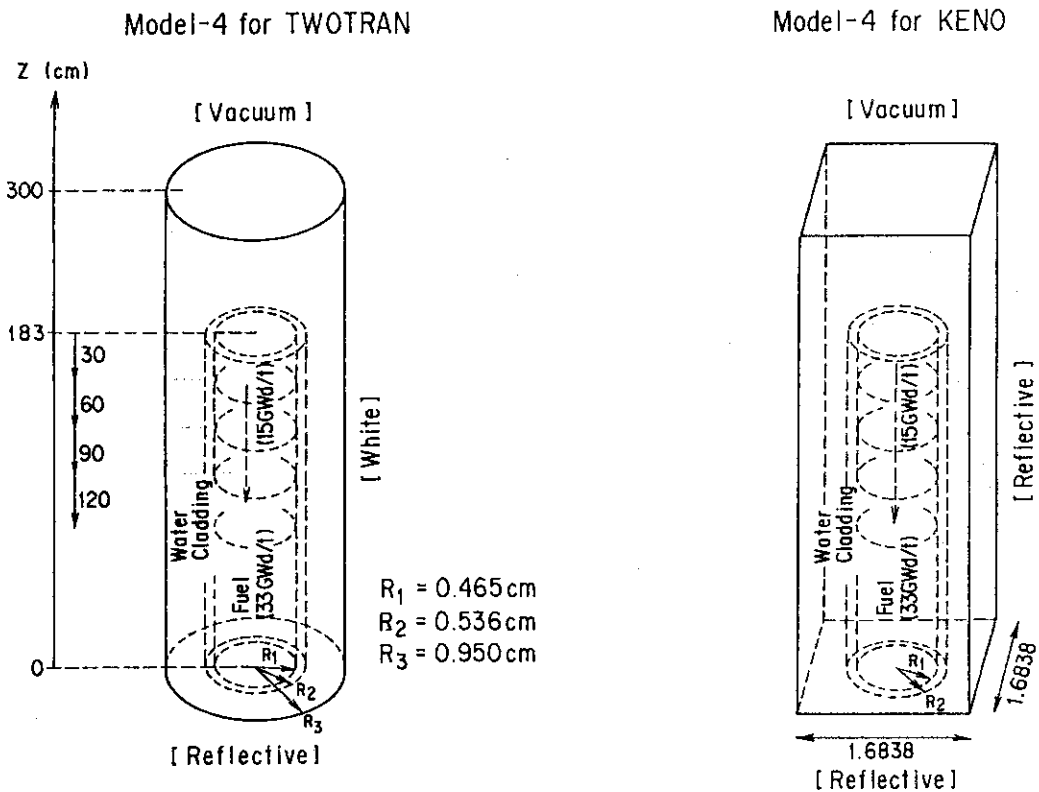


Fig. 3.1 Model-4 for Various Length of 15 GWd/t Fuel Part

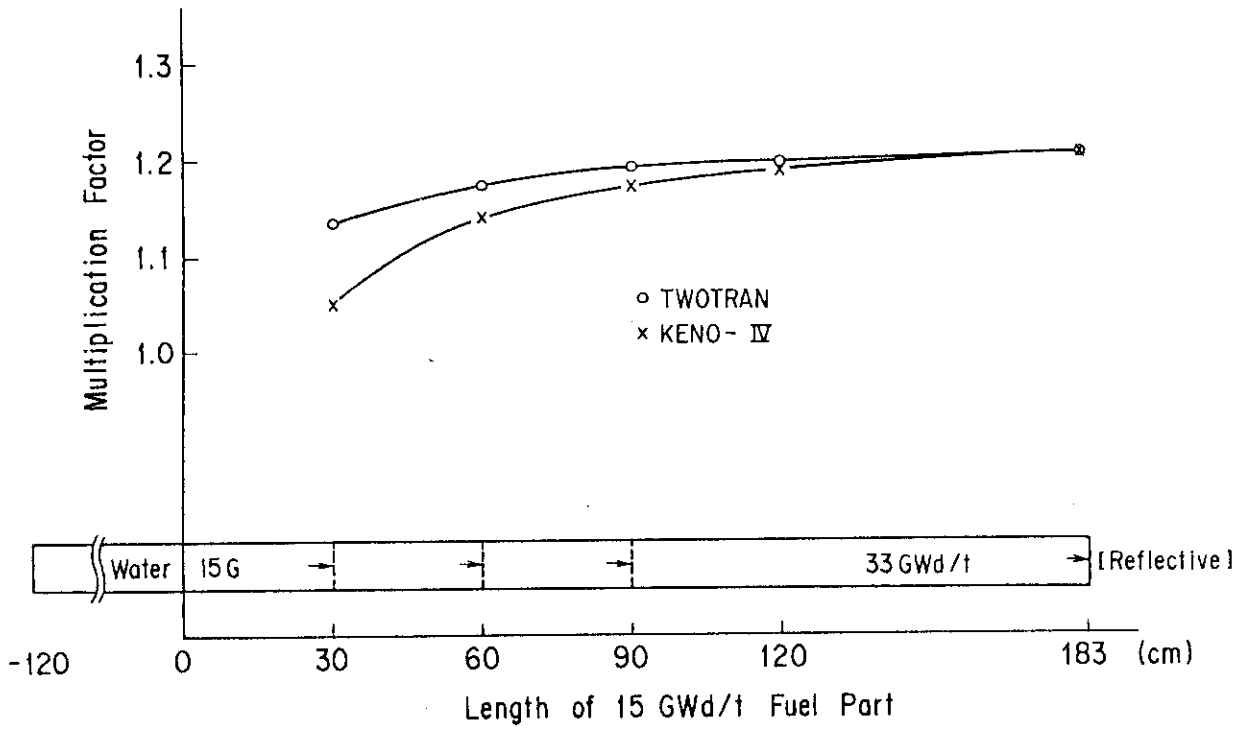


Fig. 3.2 Results of Model-4 Calculations

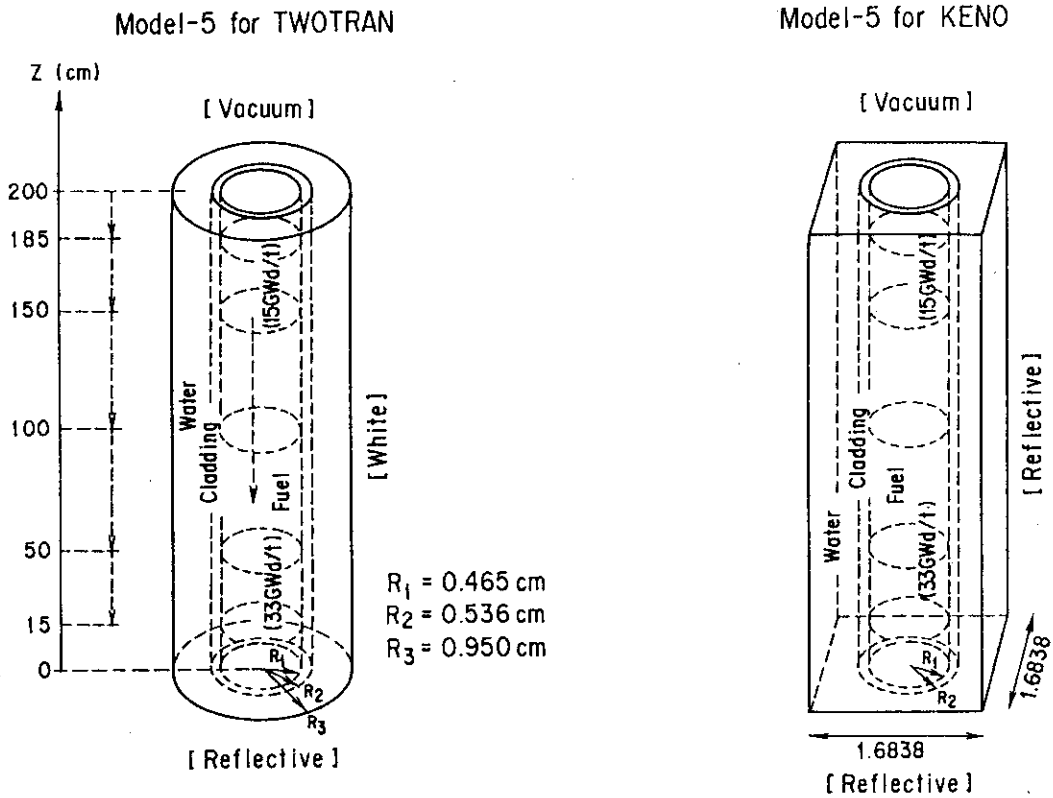


Fig. 3.3 Model-5 for 2 Fuel Regions Effect

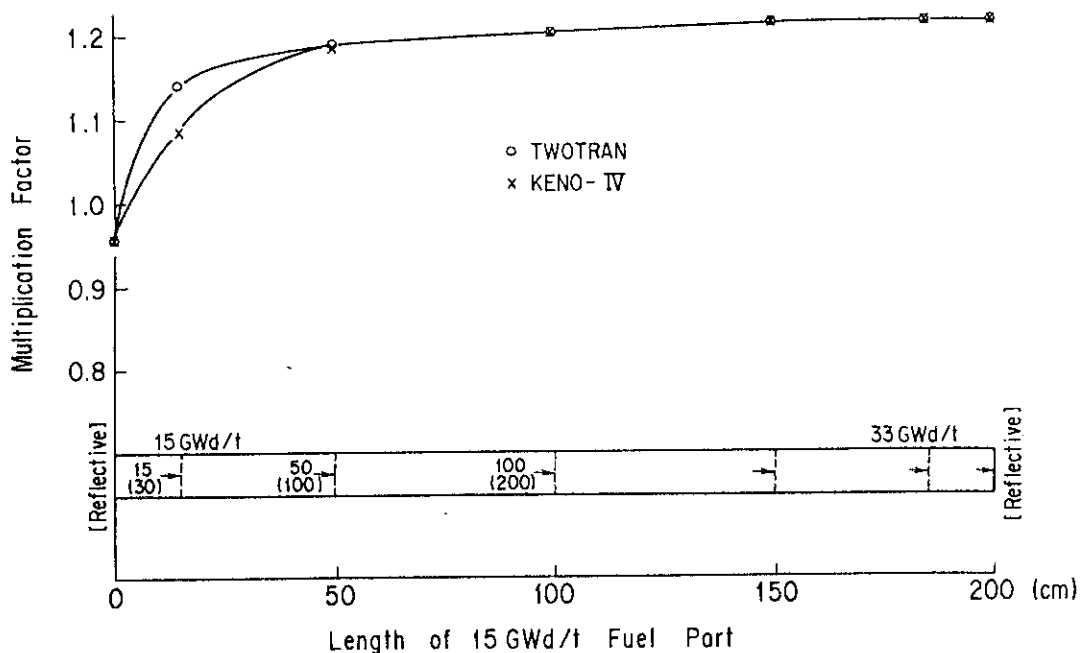


Fig. 3.4 Results of Model-5 Calculations

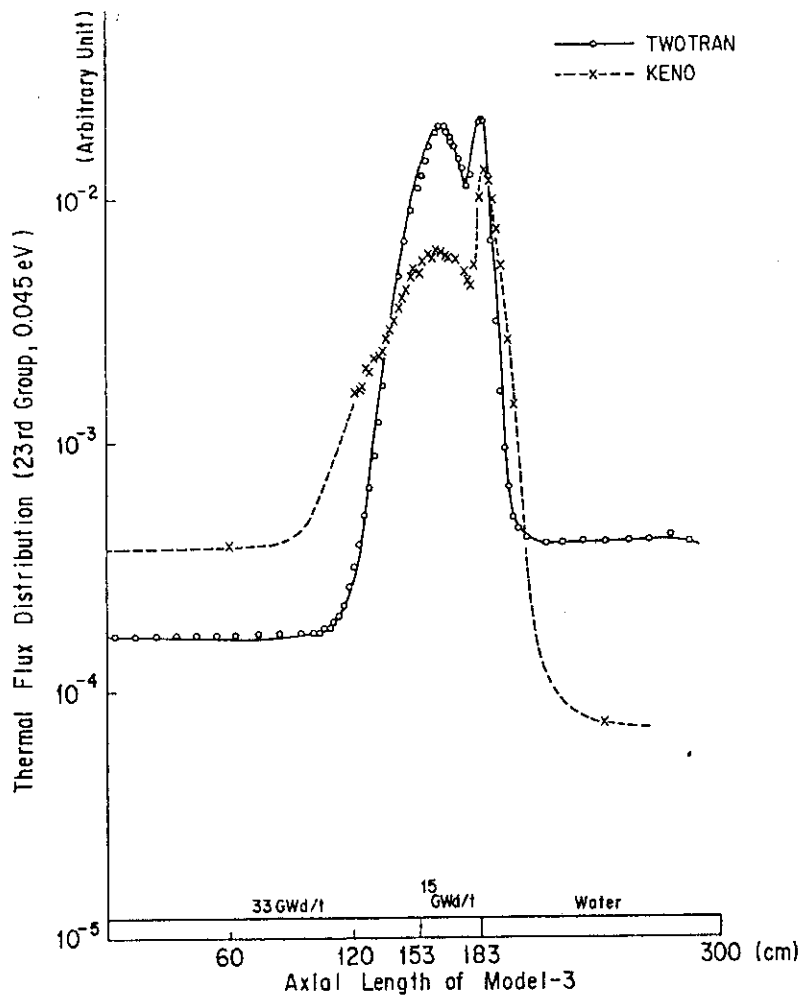


Fig. 3.5 Thermal Flux Distributions of Model-3 by TWOTRAN and KENO Codes

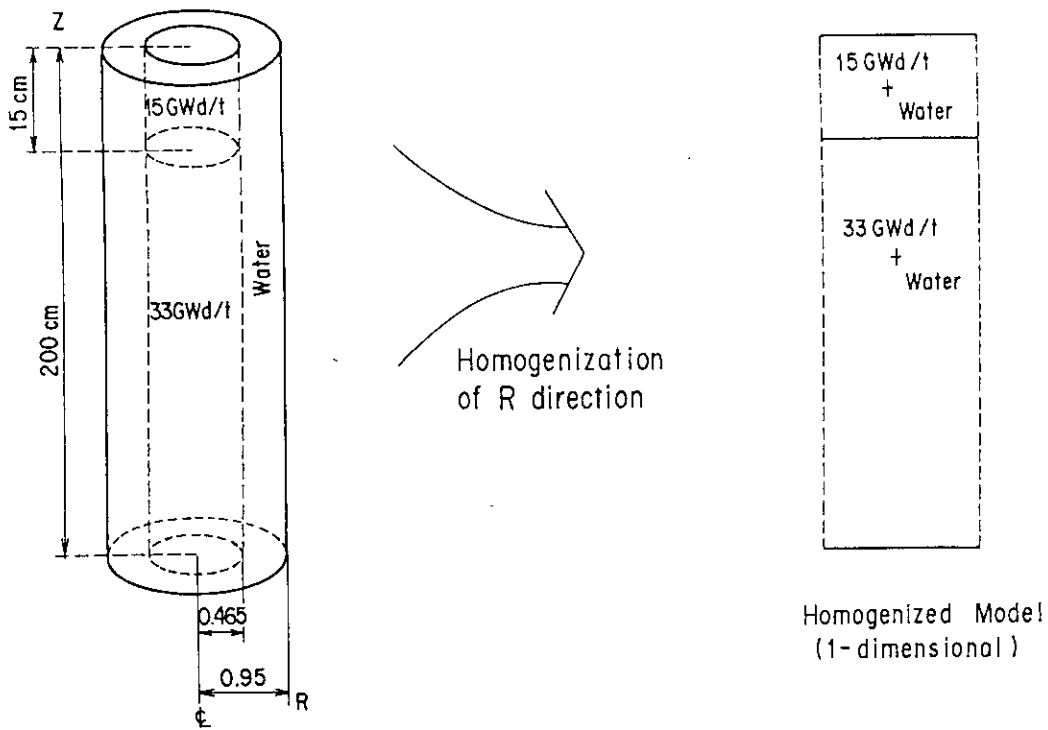


Fig. 3.6 Radial Homogenization for 2-Region Plane Model

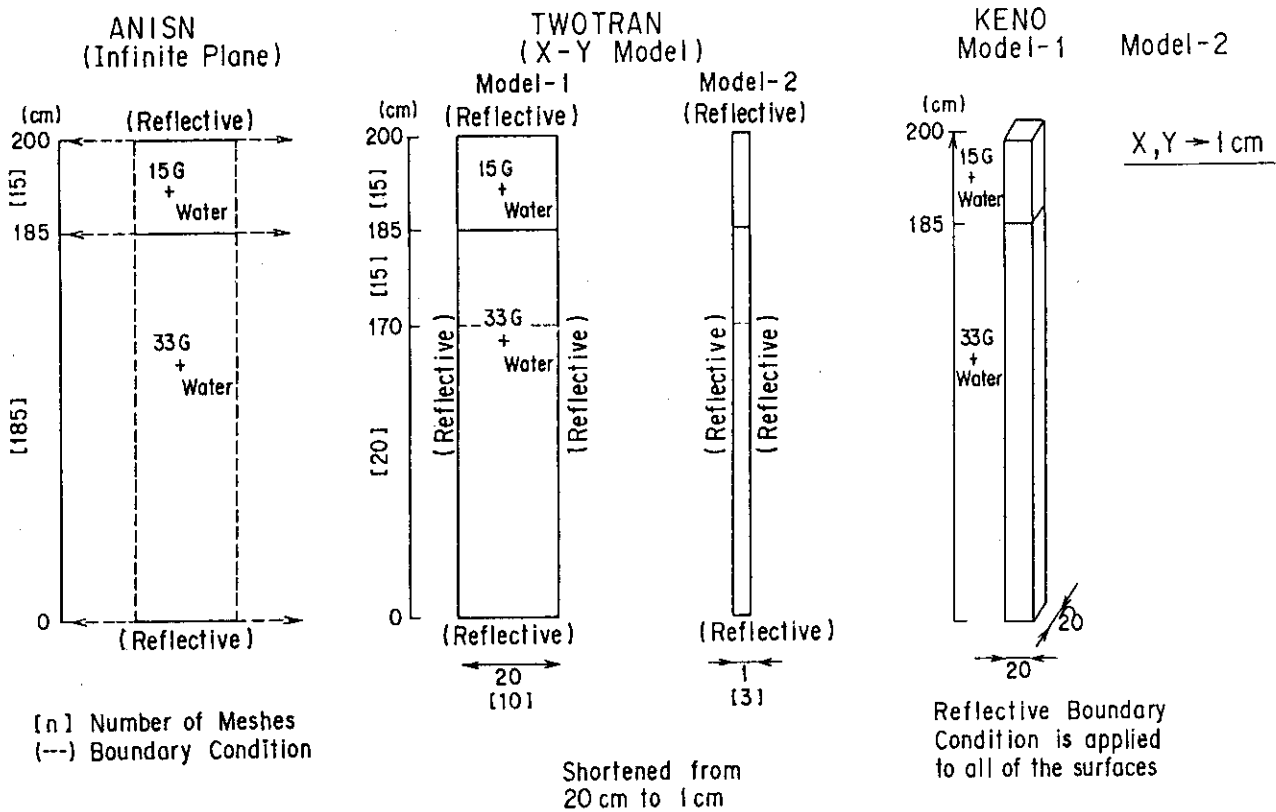


Fig. 3.7 2-Region Plane Models for ANISN, TWOTRAN and KENO Codes

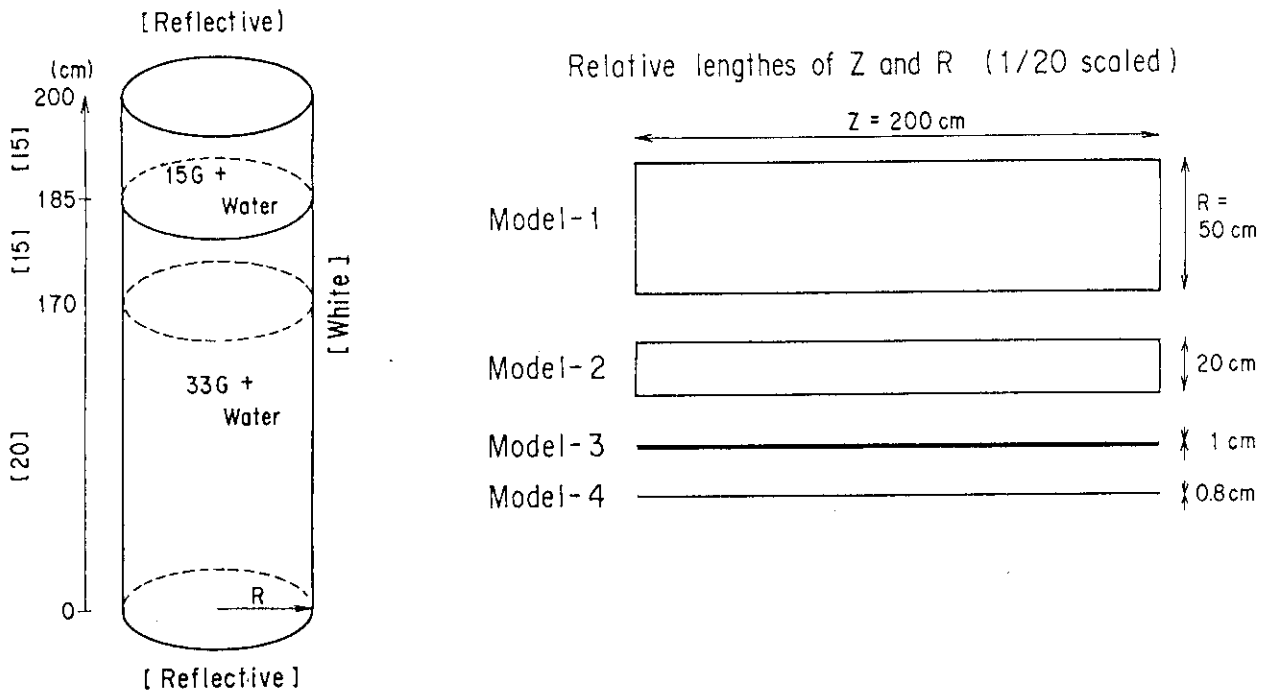
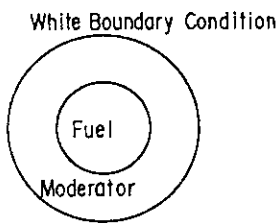
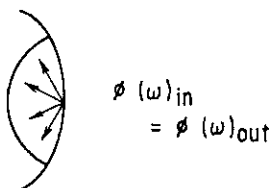


Fig. 3.8. 2-Region Cylinder Model for TWOTRAN Code

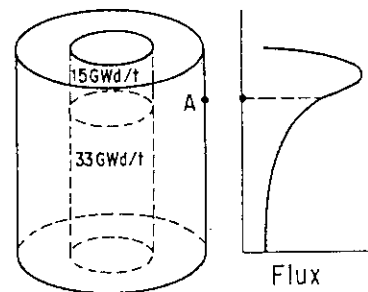
White Boundary Condition applied to Horizontal (R) Model



Case where white B.C. holds



White B.C. to Cylinder (R-Z) Model



White B.C



In this case, releasing the incoming neutrons isotropically would cause erroneous results since angular dependency of the incoming neutron could not be disregarded

Fig. 3.9 White Boundary Condition and R-Z Geometry

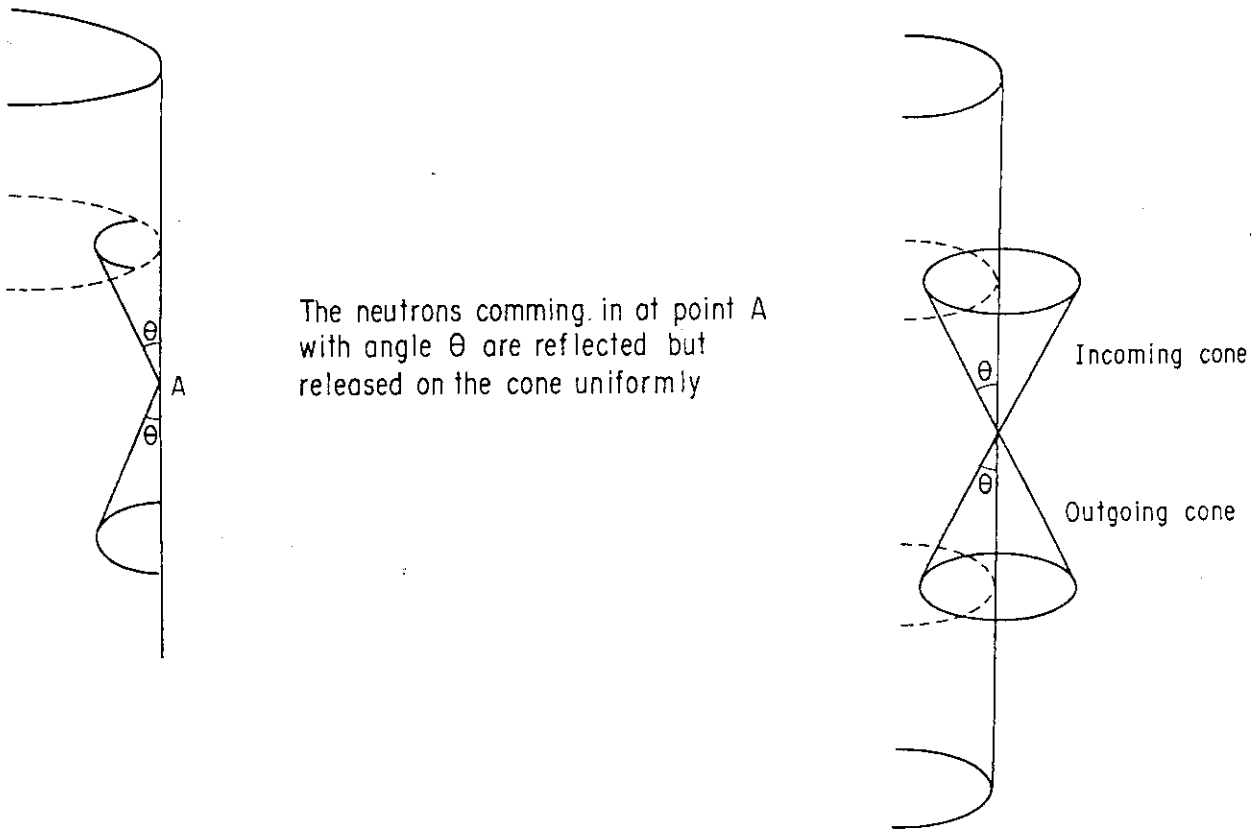


Fig. 3.10 Proposed Boundary Condition for R-Z Geometry (White-Reflective Boundary Condition)



## 付録1 サブルーチンSETBCの変更

TWOTRANコード内のサブルーチンSETBCを変更し白色反射境界条件を取扱えるようにした。ここでは、S16の場合につき示しているが、他の場合も同様である。この他、サブルーチンINPT11も白色反射境界条件をIBL=IBR=4として作動させたため軽微な変更が必要である。

```

SUBROUTINE SETBC (A,B,P,Q,W,MM,L,IB,IQ,T,C,D,F,ID,AA,II,JJ,KK,A4)
C
DIMENSION A(L,MM),B(L,MM),P(L,MM),Q(L,MM),W(1),C(L,MM),D(L,MM),
1F(II,JJ),ID(1),AA(1)
C
IF (IB.GT.0) GO TO 110
C
VACUUM
C
DO 100 M=1,MM
DO 100 I=1,L
A(I,M)=0.0
100 B(I,M)=0.
GO TO 220
C
CHOICE OF BOUNDARY CONDITIONS
C
CM110 GO TO (150,120,160), IB
110 GO TO (150,120,160,121) IB
C
WHITE
C
120 DO 140 I=1,L
TA=0.
DO 130 M=1,MM
130 TA=TA+W(M)*(B(I,M)+A(I,M))
TA=TA/(T+T)
DO 140 M=1,MM
A(I,M)=TA
140 B(I,M)=TA
GO TO 180
CMT
CMT CYLINDER
CMT
121 DO 141 I=1,L
A(I,2)=(W(2)*A(I,2)+W(3)*A(I,3))/(W(2)+W(3))
B(I,2)=(W(2)*B(I,2)+W(3)*B(I,3))/(W(2)+W(3))
A(I,3)=A(I,2)
B(I,3)=B(I,2)
A(I,4)=(W(4)*A(I,4)+W(5)*A(I,5)+W(6)*A(I,6))/(W(4)+W(5)+W(6))
B(I,4)=(W(4)*B(I,4)+W(5)*B(I,5)+W(6)*B(I,6))/(W(4)+W(5)+W(6))
A(I,5)=A(I,4)
B(I,5)=B(I,4)
A(I,6)=A(I,4)
B(I,6)=B(I,4)
A(I,7)=(W(7)*A(I,7)+W(8)*A(I,8)+W(9)*A(I,9)+W(10)*A(I,10))
* / (W(7)+W(8)+W(9)+W(10))
B(I,7)=(W(7)*B(I,7)+W(8)*B(I,8)+W(9)*B(I,9)+W(10)*B(I,10))
* / (W(7)+W(8)+W(9)+W(10))

```

```

A(I,8)=A(I,7)
B(I,8)=B(I,7)
A(I,9)=A(I,7)
B(I,9)=B(I,7)
A(I,10)=A(I,7)
B(I,10)=B(I,7)
A(I,11)=(W(11)*A(I,11)+W(12)*A(I,12)+W(13)*A(I,13)+W(14)*A(I,14)
*          +W(15)*A(I,15))
*          /(W(11)+W(12)+W(13)+W(14)+W(15))
B(I,11)=(W(11)*B(I,11)+W(12)*B(I,12)+W(13)*B(I,13)+W(14)*B(I,14)
*          +W(15)*B(I,15))
*          /(W(11)+W(12)+W(13)+W(14)+W(15))
A(I,12)=A(I,11)
B(I,12)=B(I,11)
A(I,13)=A(I,11)
B(I,13)=B(I,11)
A(I,14)=A(I,11)
B(I,14)=B(I,11)
A(I,15)=A(I,11)
B(I,15)=B(I,11)
A(I,16)=(W(16)*A(I,16)+W(17)*A(I,17)+W(18)*A(I,18)+W(19)*A(I,19)
*          +W(20)*A(I,20)+W(21)*A(I,21))
*          /(W(16)+W(17)+W(18)+W(19)+W(20)+W(21))
B(I,16)=(W(16)*B(I,16)+W(17)*B(I,17)+W(18)*B(I,18)+W(19)*B(I,19)
*          +W(20)*B(I,20)+W(21)*B(I,21))
*          /(W(16)+W(17)+W(18)+W(19)+W(20)+W(21))
DO 142 J=17,21
A(I,J)=A(I,16)
142 B(I,J)=B(I,16)
A(I,22)=(W(22)*A(I,22)+W(23)*A(I,23)+W(24)*A(I,24)+W(25)*A(I,25)
*          +W(26)*A(I,26)+W(27)*A(I,27)+W(28)*A(I,28))
*          /(W(22)+W(23)+W(24)+W(25)+W(26)+W(27)+W(28))
B(I,22)=(W(22)*B(I,22)+W(23)*B(I,23)+W(24)*B(I,24)+W(25)*B(I,25)
*          +W(26)*B(I,26)+W(27)*B(I,27)+W(28)*B(I,28))
*          /(W(22)+W(23)+W(24)+W(25)+W(26)+W(27)+W(28))
DO 143 J=23,28
A(I,J)=A(I,22)
143 B(I,J)=B(I,22)
A(I,29)=(W(29)*A(I,29)+W(30)*A(I,30)+W(31)*A(I,31)+W(32)*A(I,32)
*          +W(33)*A(I,33)+W(34)*A(I,34)+W(35)*A(I,35)+W(36)*A(I,36))
*          /(W(29)+W(30)+W(31)+W(32)+W(33)+W(34)+W(35)+W(36))
B(I,29)=(W(29)*B(I,29)+W(30)*B(I,30)+W(31)*B(I,31)+W(32)*B(I,32)
*          +W(33)*B(I,33)+W(34)*B(I,34)+W(35)*B(I,35)+W(36)*B(I,36))
*          /(W(29)+W(30)+W(31)+W(32)+W(33)+W(34)+W(35)+W(36))
DO 144 J=30,36
A(I,J)=A(I,29)
144 B(I,J)=B(I,29)
141 CONTINUE
GO TO 180

C
C REFLECTIVE
C
150 GO TO 180

C
C PERIODIC
C
160 DO 170 I=1,L
DO 170 M=1,MM
TA=A(I,M)
A(I,M)=C(I,M)
C(I,M)=TA
TA=B(I,M)
B(I,M)=D(I,M)
170 D(I,M)=TA

```

```
C
C   COMPUTE PARTIAL FLOW
C
C   180 IF (KK.EQ.0) GO TO 200
C
C   TOP OR BOTTOM
C
C   DO 190 I=1,L
C   K=ID(I)
C   DO 190 M=1,MM
C   190 F(K,KK)=F(K,KK)+W(M)*AA(I)*(A(I,M)+B(I,M))
C   GO TO 220
C
C   RIGHT
C
C   200 DO 210 I=1,L
C   K=ID(I)
C   TA=AA(I)*A4
C   DO 210 M=1,MM
C   210 F(II,K)=F(II,K)+W(M)*TA*(A(I,M)+B(I,M))
C   220 IF (IQ.EQ.0) RETURN
C
C   ADD BOUNDARY FLUX
C
C   DO 230 M=1,MM
C   DO 230 I=1,L
C   A(I,M)=A(I,M)+P(I,M)
C   230 B(I,M)=B(I,M)+Q(I,M)
C   RETURN
C   END
```