

JAERI - M
84-216

PALLAS コードによる少数成分核種に
もとづく中性子コンクリート透過計
算の精度評価

1984年11月

笹本宣雄・小手川 洋

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 Division
Department 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 榎高野高速印刷

PALLAS コードによる少数成分核種にもとづく
中性子コンクリート透過計算の精度評価

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
笹本 宣雄・小手川 洋

(1984年11月1日受理)

放射線輸送コード PALLAS の計算効率の向上を目的として、コンクリート成分核種を少数核種にまとめた場合の、中性子のコンクリート内透過計算に対する精度評価を行った。速中性子透過計算に対しては、成分核種のまとめ方に対する依存性は弱いことがわかった。一方、熱中性子束計算は、主として、鉄の反応断面積が熱中性子に対して例外的に大きな負の感度を持つことから、成分核種のまとめ方に強く依存することが明らかになった。

An Accuracy Estimation on Neutron Penetration Calculation
through Concrete Shield with PALLAS Codes Using Bunched
Component Nuclides of Concrete

Nobuo SASAMOTO and Hiroshi KOTEGAWA

Department of Reactor Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 1, 1984)

In order to improve computational efficiency of PALLAS code, an accuracy is estimated on the neutron penetration calculation through a concrete shield, using bunched component nuclides of concrete. The calculated fast neutron flux is observed to depend weakly on how the nuclides are bunched. Contrary to this, the calculated thermal neutron fluxes are strongly dependent on the manner of bunching, mainly due to the fact that iron cross section has exceptionally large negative sensitivity to thermal neutron flux.

Keywords : PALLAS, Neutron, Transport Calculation, Penetration, Concrete
Shield, Sensitivity, Iron, Accuracy Estimation, Efficiency

目 次

1. まえがき	1
2. コンクリート内熱中性子束分布の解析	2
2.1 計算の概要	2
2.2 計算条件	2
2.3 計算結果と考察	3
3. 速中性子コンクリート透過問題の解析	4
3.1 計算の概要	4
3.2 計算条件	5
3.3 計算結果と考察	5
4. まとめ	7
参考文献	7

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Analysis of Thermal Neutron Distribution within Concrete	2
2.1 Outline of Calculation	2
2.2 Calculational Conditions	2
2.3 Results and Discussion	3
3. Analysis of Fast Neutron Penetration Problem Through Concrete	4
3.1 Outline of Calculation	4
3.2 Calculational Conditions	5
3.3 Results and Discussion	5
4. Summary	7
References	7

1. ま え が き

直接積分法輸送計算コード PALLAS¹⁾では、物質の成分核種毎に、弾性散乱による中性子の運動エネルギー減少幅と散乱角の関係を正確に考慮して散乱計算を実行する。そのため Sn 輸送計算法で用いられる、空間領域とそこに含まれる物質とを一对一に対応づける mixture の概念は、PALLAS 計算にはなじまない。しかも、PALLAS 計算では散乱計算が輸送計算全体の計算時間 (C. P. U. time) に占める割合が大きいため、計算時間を節約するためには、計算精度を犠牲にすることなく、適当に核種をまとめることにより、考慮すべき物質の成分核種を減らすことが望ましい。

散乱過程におけるエネルギー減少幅と散乱角の関係が標的核の質量数の関数として記述されることから、通常は、原子数密度が他の主要核種に比べて極端に小さい核種を、質量数の近い核種に組み込むことにより、考慮すべき核種数の節減をはかっている。この方法は、核種数が減少しても領域内の原子数の保存を保証するものである。しかし吸収過程においては組み込みの影響に注意する必要がある。

我々は、JPDR 体系における中性子放射化量の評価を目的として、2次元輸送コード PALLAS-2DCY²⁾を用いて中性子束分布の計算を実施した。その際、プログラムサイズの制限および計算時間節約等の理由から、コンクリート中に含まれる7核種の成分核種を H, O, Si の3核種にまとめて計算を行った。厚さ約2mを有するコンクリート遮蔽体中での熱中性子束分布の計算値を、熱中性子束に比例するとみなせる残留放射能分布実測値と比較した結果、計算による熱中性子束のコンクリート内減衰率が実測による放射能減衰率よりも小さい、すなわち減衰が緩やかになることが明らかになった。この不一致の原因を究明するため、成分核種として分析値に基づいて決定した7核種全部を考慮した計算を行った。その結果、計算値と実験値間の減衰率の不一致が大幅に改善されることがわかった。すなわち、熱中性子束計算値が、考慮するコンクリート成分核種の選択に強く依存することがわかった。

PALLAS の計算精度と計算の経済性の妥協点をどこに求めるかは、本コードを現実の遮蔽設計に適用する際に避けて通れない重要な問題である。さらに、中性子放射化量の精度は、中性子捕獲反応を通して主として熱中性子束の精度に依存する。そこで、考慮すべきコンクリート成分核種のまとめ方による計算精度を検討するため、まずコンクリート中での熱中性子束分布および速中性子線量率についてのコンクリート成分核種毎の感度評価を行った。つづいて、核分裂中性子を線源としたコンクリート透過実験を、1次元輸送コード PALLAS-PL, SP-Br³⁾、2次元コード PALLAS-2DCYを用いて解析をした。コンクリート組成のパラメトリックな組合せにもとづく計算結果と実験値との比較を行い、成分核種毎の感度評価の結果を参照して、コンクリート成分核種の合理的なまとめ方を検討した。本解析で取り上げた実験は2種類あり、1つは JPDR コンクリート遮蔽体中における ^{60}Co 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 ^{134}Cs からのガンマ線分布を測定したものであり、⁴⁾他の1つはウランコンバータで得られた核分裂中性子を、プール水中に設置したコンクリート供試体に入射させ、供試体背面の水中での速中性子線量率を測定したものである。⁵⁾

2. コンクリート内熱中性子束分布の解析

2.1 計算の概要

JPDR コンクリート遮蔽体内における熱中性子束分布を、1次元、2次元輸送コード PALLAS を用いて計算した。計算に用いたコンクリートは、比重が約 2.2 g/cm^3 の普通コンクリートであり、その成分は Table 1 に示す 7 核種からなる。PALLAS では散乱計算を核種毎に独立に行うため、必要とする計算時間は考慮すべき核種数により直接左右される。コンクリート内の輸送計算において 7 核種全部を正確に考慮することが最良の方法であるのは当然であるが、計算時間の点から、許容できる計算精度の範囲で考慮すべき核種数を減らすことが現実的である。そこで計算精度とコンクリート成分核種との関係を明らかにするために、はじめに 7 核種全部を考慮した詳細計算により基準解を求め、実測値との比較を通して PALLAS 計算の精度を検証した。その上で考慮する成分核種を 3 核種から 6 核種まで順次変えて輸送計算を行い、それぞれの結果を基準解と比較することにより精度の検証を行った。さらにこれら少数核種計算の結果の解析に必要なデータとして、核種毎に単位原子当りの熱中性子束に対する感度評価を行った。

2.2 計算条件

JPDR 体系を 2 次元円筒形状でモデル化した計算体系図を Fig. 1 に示す。我々の計算は、炉心中心レベルにおけるコンクリート遮蔽体内での熱中性子束の評価が主たる目的である。そのため、計算体系としては、上部方向は上部グリッドの上の水領域 (Water 2) を上限とし、下部方向は下部グリッドを下限とした。また半径方向にはコンクリート遮蔽体を最外層にとり、その厚さを 188.7 cm とした。Fig. 2 は炉心中心レベルにおいて半径方向に 1 次元球および無限平板形状でモデル化した計算体系を示す。同図に示した炉心領域幅を表わす L は、球体系に対して炉心体積を保存するように決定した実効半径を、平板体系に対しては円筒炉心半径をそれぞれ適用した。1次元、2次元計算体系とも、対応する領域の物質組成を Table 1 に与える。炉心内出力分布は燃焼度、炉心パターンにより変化するが今回の計算ではそれらを運転期間にわたり時間平均したデータを使用した。2次元出力分布 $S(R, Z)$ は、

$$S(R, Z) = S(R) \times S(Z)$$

と仮定し、Fig. 3 に半径方向および軸方向の相対出力分布 $S(R)$ 、 $S(Z)$ を示す。1次元計算では球体系、平板体系とも $S(R)$ を用いた。

計算に使用した群定数は PALLAS ライブラリ⁶⁾を参照した。エネルギーメッシュ構造は、 14.2 MeV を第 1 メッシュ点とし、 116.8 KeV までのエネルギー領域を 0.2 レサジー幅で 25 メッシュに区切り、以下熱エネルギー領域までを 0.4 レサジー幅で 32 メッシュとし、合計で 57 エネルギーメッシュ構造とした。

上述の条件のもとで、まずコンクリート成分核種毎のコンクリート内熱中性子束に対する感度評価を 1 次元計算により行った。成分核種のうち特定の 1 核種につき、原子数密度を仮想的に 1% 増加さ

せて熱中性子束を計算し、正しい原子数密度で計算した基準解との比を空間メッシュの関数として求めた。さらにそれらの値を、原子1個当りの感度に規格化した。これらは、ある核種を別の核種に組み込む際の熱中性子束計算値に対する影響を調べるのに好都合なデータである。

次に、考慮すべきコンクリート成分核種の核種数を減らした場合の熱中性子束計算への影響を1次元計算により調べた。そのために、まず7核種全部を考慮して基準解を求め、次に以下に示す3つの基準に基づいた核種のまとめにより成分核種を3核種から6核種まで変えて計算を行い、その結果を基準解と比較した。組み込みによる核種のまとめの基準は次の通りである。

- i) できるだけ質量数の近い核種へ組み込む。
- ii) Hへの組み込みおよびHの他核種への組み込みは行なわない（これはPALLASの散乱計算において、水素と非水素核種の取り扱いが全く別だからである）。
- iii) 普通コンクリート成分中、原子数密度の大きさから決定できる三大重要核種であるH, O, Siを基準にして組み込みの組合せを設定する。

2.3 計算結果と考察

Fig. 4は、コンクリート成分7核種を全部考慮して1次元球、平板および2次元円筒形状PALLASコードにより計算したコンクリート中の熱中性子束分布と、実測による ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{60}Co , ^{134}Cs からの残留放射能分布との比較を示すものである。これらの放射性核種はいずれも主として熱中性子に対して感度を有する中性子捕獲反応により生成するものである。また、熱中性子束と熱外中性子束の比率がコンクリート内ではほぼ一定であり、さらに両中性子束の差から判断して、中性子捕獲反応に対する熱中性子束の寄与が支配的であることから、これらの核種による放射能分布は本質的に熱中性子束分布と比例関係にあると考えることができる。^{*}計算による熱中性子束と実測された残留放射能を絶対値で関連づけるには、放射性核種の生成・崩壊過程を時間依存で評価しなければならないが、ここではその評価が目的ではないので、PALLAS計算の精度評価を計算値と実測値の相対分布、すなわち体系内減衰率の比較により行った。同図から明らかなように、計算値の減衰はいずれも実測値よりもわずかに緩やかである。これは計算において、コンクリート中の補強材として大量に使用されている鉄筋の存在が無視されているからであると考えられる。したがってこの影響を考慮すれば実測値と計算値の減衰率についての一致は良くなることが期待される。1次元計算と2次元計算を比較すると2次元計算の減衰の方が緩やかな傾向が得られているが、この差の主たる要因は角度分点の粗さにあると考えられる。さらに1次元計算同志を比較すると、平板体系の減衰の方がわずかに緩やかであるが、これは球体系と平板体系の減衰に対する形状効果を考えれば当然の結果である。以上の結果から、考慮するコンクリート成分核種と計算精度の関係を検討する手段として、PALLAS 1次元平板計算は十分に信頼できる精度を有すると考えられる。

Fig. 5はコンクリート成分核種毎の、コンクリート内熱中性子束計算値に対する、原子1個当り

*) コンクリート表面から1mの深さでの、熱中性子および熱外中性子による放射化放射能の比の概算値は、 $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$, $^{133}\text{Cs}(n, \gamma)^{134}\text{Cs}$, $^{151}\text{Eu}(n, \gamma)^{152}\text{Eu}$ の各反応に対して、各々 >20 , >5 , >30 と評価された。したがって、 ^{134}Cs では熱外中性子の寄与を全く無視することはできないが、 ^{60}Co , ^{152}Eu については熱中性子寄与分のみを考慮すれば十分である。

に規格化した感度を示したものである。HとNaだけはコンクリート表面近くでわずかに正に感度を持つ(すなわち断面積が増加すると熱中性子束が大きくなる)。しかしそれ以外はすべて負の感度特性を示すことがわかる。ここで最も特徴的な点は、Feの感度が例外的に大きい負の感度を有することである。このことは、後述するように、ある核種を他の核種へ組み込む際、Feの取り扱いには慎重な配慮が必要となることを示唆している。

Fig. 6に、考慮すべき核種をコンクリートの3大成分核種であるH, O, Siにまとめた場合の熱中性子束分布と、7成分核種を考慮した詳細計算に基づく基準解との比較を示す。核種の組み込みの組合せは同図の表題に記号で与えた通りであるが、例えばX31はNaとAlをOに組み込み、CaとFeをSiに組み込むことにより核種を3種類にまとめることを意味する。同図から明らかなように、X31, X32, X33の3種類の結果はいずれも深さ170cm位置で基準解X7を6~8倍過大評価しており、3核種にまとめた計算は核種の組合せいかんによらず大幅な過大評価を生ずることがわかった。一方、Fig. 7に示すように、5核種による計算結果と基準解とを比較すると、X51, X52, X56はFeを他の核種へ組み込んだケースであり、その結果はいずれも基準解X7を過大評価し、その反対に他の核種をFeへ組み込んだケースであるX54, X55の計算結果は、基準解X7に比べていずれも過少評価である。一方、X53は組み込みの対象からFeを独立させたケースであり、この場合のみ計算結果が基準解と良く一致することがわかった。本報告書には示さなかったが、これらと同様の傾向が4核種、6核種の計算の場合でも明確に示された。これらの結果は、Fig. 5で明らかなようにFeの熱中性子束に対する負の感度が例外的に大きいため、核種間の組み込みによるまとめの段階で、Feを他の核種へ組み込んでも、また逆に他核種をFeへ組み込んでも必ず誤差を増大させる要因となることを意味している。同様にFig. 6に示した3核種による計算結果の過大評価も、Feを他の核種へ組み込んだ事に原因があることがわかった。

以上の結果から、普通コンクリート内の熱中性子束の計算では、Feの原子数密度として分析値に基づく正確な値を与え、他核種とのまとめの対象から独立させれば、それ以外の核種については、そのまとめ方にかかわらず基準値に近い解を得ることが期待できる。すなわち成分核種としてまずFeを単独で考慮し、次に三大成分であるH, O, Siを考え、残りの核種をその質量数にしたがってHを除くOまたはSiの中に組み込むことにより、最低4核種を考慮すれば基準解を良い精度で再現することがわかった。また、上述の条件を満足しながら考慮すべき核種数を増やしていくと、基準解に対する計算誤差は減少傾向を示すことも明確になった。

3. 速中性子コンクリート透過問題の解析

3.1 計算の概要

コンクリート中の速中性子透過計算に対する、考慮すべきコンクリート成分核種と計算精度の関係を検討するため、核分裂中性子を線源とした普通コンクリートおよび重コンクリート透過実験の結果を、1, 2次元PALLASコードを用いて解析した。実験ではウランコンバータで得られた核分裂中性子を、水中に浸したコンクリート供試体前面に入射させ、0.2 MeV以上の中性子に対して感度を持つHurstカウンタを用いて、供試体背面直後の水中での速中性子線量率を測定した。測定値は、

に規格化した感度を示したものである。HとNaだけはコンクリート表面近くでわずかに正に感度を持つ(すなわち断面積が増加すると熱中性子束が大きくなる)。しかしそれ以外はすべて負の感度特性を示すことがわかる。ここで最も特徴的な点は、Feの感度が例外的に大きい負の感度を有することである。このことは、後述するように、ある核種を他の核種へ組み込む際、Feの取り扱いには慎重な配慮が必要となることを示唆している。

Fig. 6に、考慮すべき核種をコンクリートの3大成分核種であるH, O, Siにまとめた場合の熱中性子束分布と、7成分核種を考慮した詳細計算に基づく基準解との比較を示す。核種の組み込みの組合せは同図の表題に記号で与えた通りであるが、例えばX31はNaとAlをOに組み込み、CaとFeをSiに組み込むことにより核種を3種類にまとめることを意味する。同図から明らかなように、X31, X32, X33の3種類の結果はいずれも深さ170cm位置で基準解X7を6~8倍過大評価しており、3核種にまとめた計算は核種の組合せいかんによらず大幅な過大評価を生ずることがわかった。一方、Fig. 7に示すように、5核種による計算結果と基準解とを比較すると、X51, X52, X56はFeを他の核種へ組み込んだケースであり、その結果はいずれも基準解X7を過大評価し、その反対に他の核種をFeへ組み込んだケースであるX54, X55の計算結果は、基準解X7に比べていずれも過少評価である。一方、X53は組み込みの対象からFeを独立させたケースであり、この場合のみ計算結果が基準解と良く一致することがわかった。本報告書には示さなかったが、これらと同様の傾向が4核種、6核種の計算の場合でも明確に示された。これらの結果は、Fig. 5で明らかなようにFeの熱中性子束に対する負の感度が例外的に大きいため、核種間の組み込みによるまとめの段階で、Feを他の核種へ組み込んでも、また逆に他核種をFeへ組み込んでも必ず誤差を増大させる要因となることを意味している。同様にFig. 6に示した3核種による計算結果の過大評価も、Feを他の核種へ組み込んだ事に原因があることがわかった。

以上の結果から、普通コンクリート内の熱中性子束の計算では、Feの原子数密度として分析値に基づく正確な値を与え、他核種とのまとめの対象から独立させれば、それ以外の核種については、そのまとめ方にかかわらず基準値に近い解を得ることが期待できる。すなわち成分核種としてまずFeを単独で考慮し、次に三大成分であるH, O, Siを考え、残りの核種をその質量数にしたがってHを除くOまたはSiの中に組み込むことにより、最低4核種を考慮すれば基準解を良い精度で再現できることがわかった。また、上述の条件を満足しながら考慮すべき核種数を増やしていくと、基準解に対する計算誤差は減少傾向を示すことも明確になった。

3. 速中性子コンクリート透過問題の解析

3.1 計算の概要

コンクリート中の速中性子透過計算に対する、考慮すべきコンクリート成分核種と計算精度の関係を検討するため、核分裂中性子を線源とした普通コンクリートおよび重コンクリート透過実験の結果を、1, 2次元PALLASコードを用いて解析した。実験ではウランコンバータで得られた核分裂中性子を、水中に浸したコンクリート供試体前面に入射させ、0.2 MeV以上の中性子に対して感度を持つHurstカウンタを用いて、供試体背面直後の水中での速中性子線量率を測定した。測定値は、

7.5 cm, 5.0 cm, 2.5 cm 厚の供試体および供試体の無い場合のそれぞれについて得られ、結果は減衰曲線の形でまとめられた。

解析は次の手順で行った。まず1, 2次元 PALLAS コードを用いて、コンクリート成分の7核種全部を考慮した詳細計算を行い、実験値との比較により本コードの計算精度の検証を行った。次に7.5 cm 厚供試体について、成分核種毎の速中性子線量率の計算値に対する感度の評価を行った。最後に、第2章において提示した核種のまとめ方の基準に従い、考慮すべきコンクリート成分を少数核種にまとめた場合の計算を行い、詳細計算との比較により少数核種計算の精度評価を行った。

3.2 計算条件

2次元円筒形状でモデル化した計算体系を Fig. 8 に示す。ここで、上、下端境界および半径方向外側境界はすべて真空境界を仮定した。また線源はウランコンバータ内に核分裂スペクトル中性子による分布線源を仮定した。

Fig. 9 は1次元平板形状でモデル化した計算体系である。Fig. 10 にコンバータ内の半径方向相対出力分布を与える。2次元計算のZ軸方向および1次元計算におけるX軸方向の線源分布は、コンバータ領域の幅が0.3 cm と小さいため、領域内で様な分布を仮定した。Table 2 に、計算で用いた物質組成を示す。ここで、普通コンクリートおよび重コンクリートの密度はそれぞれ2.45, 3.59 g/cm³ である。

本計算では200 keV までの速中性子の評価が目的である。したがってエネルギーメッシュ構造は、1.42 MeV から200 keV までのエネルギー領域を0.1 レサジー幅で23メッシュに分割し、全領域にわたって細かいメッシュ構造とした。中性子束から線量率 (mrem/hr) への変換係数は、文献⁷⁾ から引用したデータのうち、該当するエネルギー領域の値のみを使用した。

3.3 計算結果と考察

Fig. 11 に、普通コンクリート透過問題についての速中性子線量率の1, 2次元 PALLAS による計算値と実験値との比較を示す。これらのデータはすべてコンクリート供試体厚さが0 cm (供試体無し) の体系での値を1.0に規格化した相対強度で与えられている。同じく Fig. 12 は重コンクリートの場合の計算値と実験値を比較した図である。普通コンクリートの透過問題では、2次元計算が実験値をわずかに過少評価しており、1次元計算は明らかに過大評価である。一方、重コンクリートの透過問題では、2次元計算が非常に良く実験値の減衰を再現しており、1次元計算は普通コンクリートの場合と同様、実験値に対して明らかに過大評価となっている。1次元計算が2次元計算および実験値に対して過大評価となる理由は、1次元平板体系がX軸と垂直方向に無限の広がりを持ち、コンバータの線源領域が広がると共に、その方向への中性子の体系からの漏洩が無視されるためである。他方、2次元計算については、実験値との一致の度合いが供試体の種類によって変わることで、および実験値との差は小さいことの2点から、普通コンクリートの過少評価の原因は PALLAS コードの計算手法そのものにあるのではなく、物質組成等データの問題であると考えられる。(実験仕様に与えられた普通コンクリートの密度2.45 g/cm³ は一般に使用される密度よりも5~10%大きいようである)。したがって、本コードは感度特性の評価およびコンクリート成分の変化による線量率

計算値の影響を検討するための一連の解析に対して、十分信頼できる精度を有すると判断できる。

Fig. 13 は、速中性子線量率の計算値に対する成分核種あたりの相対感度を示したものである。両コンクリートの場合とも、Hの負の感度が最も大きく、Oの負の感度が最小であることがわかる。また、それ以外の成分核種の感度間に大きな差は見い出せなかった。第2章で評価した熱中性子束に対する成分核種の感度と比較すると、Feを除くすべての核種について、速中性子線量率に対する感度の絶対値は約 $1/2$ の大きさである。Feについては、熱中性子に対する感度が例外的に大きいため、両者の比をとると $1/7 \sim 1/8$ に達する。以上の感度評価の結果は、考慮するコンクリート成分核種数や核種間のまとめの組合せを変えても、速中性子線量率の計算値は熱中性子束計算値ほど大きくは変化しないことを示唆するものである。

原子数密度の大きさから、普通コンクリートについてはH, O, Siを、重コンクリートについてはH, O, Feをそれぞれ3大成分核種とみなすことができるが、今回の少数核種による輸送計算では、これら3大成分核種を基準にして残り4核種を適当な組合せでまとめることにより成分核種の少数化を行った。

Fig. 14, 15 はそれぞれ、普通コンクリートおよび重コンクリート体系における、3成分核種と5成分核種にもとづく計算結果を示す。これらの結果は、コンクリート成分として7核種全てを考慮した詳細計算に基づく基準解との差の相対比として与えられる。図中に記号で示した核種の組み込み方法は図の表題の中に明記してあるが、例えばO31はMgをOに、Al, Ca, FeをSiに組み込むことを意味する。同図から明らかな様に、普通コンクリートの場合の3核種計算では、核種の組み込み方法によらず75 cmの透過で基準解に対して最大10%の過少評価となった。一方、重コンクリートの場合の3核種計算では、H31の場合は $\pm 10\%$ の誤差内に十分入るが、H32の場合、最大20%の過大評価を示す。また普通コンクリートと重コンクリートの結果で特徴的な差は、前者が過少評価のみを示すのに対し、後者では過少評価から過大評価へと傾向が変化する点である。

一方、普通コンクリートの場合の5核種計算では、O51は基準解に対して最大16%の過少評価となるが、O52, O53では共に5~6%の過少評価にとどまることがわかる。Fig. 14 から明らかなように、普通コンクリートの場合、5核種計算の方が3核種計算よりも誤差の絶対値が大きくなる場合があるが、これは3核種計算において偶然プラスとマイナスの誤差が相殺して絶対値誤差が小さくなった結果である。重コンクリートの5核種計算では、H51は7%以内の過少評価に、H52は3%以内の過大評価の範囲にそれぞれおさえることが可能であることがわかった。

上記の3核種、5核種を考慮した計算の他に、本文中に示してはいないが、4核種、6核種の計算も同様に実施した。それらの結果は、普通コンクリート、重コンクリートの場合とも、3核種、5核種計算で得られた誤差と大差なく、その大きさは高々18%である。また6核種計算に対する誤差が、それよりも少数の核種を仮定したいずれの計算の誤差よりも小さくなることも確認できた。すなわち、コンクリート成分として考慮すべき核種を3核種から6核種に変化させた場合の計算値の、基準値に対する誤差は、核種間の組み込み方法によらず、75 cmの速中性子透過問題に対して高々20%程度であることが分った。この値は第2章で述べた熱中性子束計算の誤差に対してかなり小さいものである。このことは、速中性子線量率に対する核種毎の感度が小さいため、核種の個数の保存さへ保証されれば、考慮すべき核種をまとめても計算誤差を小さくおさえられることを示している。同時にこれらの計算結果は、速中性子計算に対しては、熱中性子束計算におけるFeのような、他核種に比して例外的に大きい感度を持つ核種が存在しないため、核種間のまとめの組合せを変えても誤差の変動

は少ないことを示すものである。

4. ま と め

放射線輸送コード PALLAS の計算効率の向上を目的として、核種の組み込みによりコンクリート成分を少数核種にまとめた場合の、速中性子および熱中性子のコンクリート内透過計算の精度評価を行った。

核種毎に得られた、コンクリート内における熱中性子および速中性子輸送計算に対する感度は、コンクリート成分の全核種について、熱中性子計算に対する値の方が速中性子の値よりも大きい。熱中性子計算に対しては、Fe だけが例外的に大きな負の感度を有するが、速中性子計算においてはそのような特定の核種は存在しない。これらの点から、速中性子計算では核種の組み込み方法によらず計算結果の変動が小さいこと、また逆に熱中性子計算においては、Fe を含む核種間のまとめ方により計算結果が大きく影響を受けること、などの全体的傾向が容易に理解できる。

以上の結果から、7核種からなるコンクリート成分核種を少数の核種にまとめる場合の基準は、速中性子領域までの計算と、速中性子を含む熱中性子領域までの計算とで分離して考える必要がある。速中性子計算の場合、核種間のまとめ方に対する依存性が弱いため、三大成分核種（普通コンクリートでは H, O, Si, 重コンクリートでは H, O, Fe）を基準とし、残りの核種をそれらの三大成分のうちのいずれか質量数の近い核種へ組み込むことが可能である。一方、普通コンクリート体系での熱中性子群までの計算の場合、明らかに熱中性子計算に対する基準は速中性子計算に対する基準を含むものである。したがってこの場合は、普通コンクリートの三大成分である H, O, Si の他に、第4番目の成分として Fe を考慮し、H と Fe だけは単独に取り扱い、残り3核種を O または Si のいずれか質量数の近い方に組み込めば良いことが結論づけられる。これは Fe の吸収断面積が中・低エネルギー領域において特に大きいことと、H の減速能が他核種に較べて大きいためである。

参 考 文 献

- 1) Takeuchi K. and Sasamoto N. : Nucl. Sci. Eng. , 80, 536 (1982).
- 2) Takeuchi K. and Sasamoto N. : "PALLAS-2DCY: A Code for Direct Integration of Transport Equation in Two-Dimensional (R, Z) Geometry," JAERI-M 9014 (1980).
- 3) Takeuchi K. and Tanaka S. : "PALLAS-PL, SP-Br: A Code for Direct Integration of Transport Equation in One-Dimensional Plane and Spherical Geometries," JAERI-M 9695 (1981).
- 4) 中村竹夫氏他: 私信
- 5) 日本原子力船開発事業団: 「原子力第1船遮蔽効果確認実験報告書・第5篇」, JNS-4-5 (1968).
- 6) 笹本宣雄, 田中俊一, 竹内 清: 「PALLAS コード用多群中性子群定数ライブラリ」,

は少ないことを示すものである。

4. ま と め

放射線輸送コード PALLAS の計算効率の向上を目的として、核種の組み込みによりコンクリート成分を少数核種にまとめた場合の、速中性子および熱中性子のコンクリート内透過計算の精度評価を行った。

核種毎に得られた、コンクリート内における熱中性子および速中性子輸送計算に対する感度は、コンクリート成分の全核種について、熱中性子計算に対する値の方が速中性子の値よりも大きい。熱中性子計算に対しては、Fe だけが例外的に大きな負の感度を有するが、速中性子計算においてはそのような特定の核種は存在しない。これらの点から、速中性子計算では核種の組み込み方法によらず計算結果の変動が小さいこと、また逆に熱中性子計算においては、Fe を含む核種間のまとめ方により計算結果が大きく影響を受けること、などの全体的傾向が容易に理解できる。

以上の結果から、7核種からなるコンクリート成分核種を少数の核種にまとめる場合の基準は、速中性子領域までの計算と、速中性子を含む熱中性子領域までの計算とで分離して考える必要がある。速中性子計算の場合、核種間のまとめ方に対する依存性が弱いため、三大成分核種（普通コンクリートでは H, O, Si, 重コンクリートでは H, O, Fe）を基準とし、残りの核種をそれらの三大成分のうちのいずれか質量数の近い核種へ組み込むことが可能である。一方、普通コンクリート体系での熱中性子群までの計算の場合、明らかに熱中性子計算に対する基準は速中性子計算に対する基準を含むものである。したがってこの場合は、普通コンクリートの三大成分である H, O, Si の他に、第4番目の成分として Fe を考慮し、H と Fe だけは単独に取り扱い、残り3核種を O または Si のいずれか質量数の近い方に組み込めば良いことが結論づけられる。これは Fe の吸収断面積が中・低エネルギー領域において特に大きいことと、H の減速能が他核種に較べて大きいためである。

参 考 文 献

- 1) Takeuchi K. and Sasamoto N. : Nucl. Sci. Eng. , 80, 536 (1982).
- 2) Takeuchi K. and Sasamoto N. : "PALLAS-2DCY : A Code for Direct Integration of Transport Equation in Two-Dimensional (R, Z) Geometry, " JAERI-M 9014 (1980).
- 3) Takeuchi K. and Tanaka S. : "PALLAS-PL, SP-Br : A Code for Direct Integration of Transport Equation in One-Dimensional Plane and Spherical Geometries, " JAERI-M 9695 (1981).
- 4) 中村竹夫氏他 : 私信
- 5) 日本原子力船開発事業団 : 「原子力第1船遮蔽効果確認実験報告書・第5篇」, JNS-4-5 (1968).
- 6) 笹本宣雄, 田中俊一, 竹内 清 : 「PALLAS コード用多群中性子群定数ライブラリ」,

JAERI-M 7445 (1977).

- 7) Radiation Protection Instrumentation and Its Application, ICRU report 20 (1971).

Table 1 JPDR 体系物質組成

(10²⁴/cm³)

	Lower Grid	Lower Ring	Shroud	Water 1 ^{*)}	Pressure Vessel	Air	Liner	Concrete
H	3.410-2	1.810-2		5.055-2				7.558-3
N						4.965-5		
O	1.886-2	9.256-3		2.527-2				4.413-2
Na								1.024-3
Al								1.745-3
Si								1.516-2
Ca								2.799-3
Mn					3.979-3			
Fe	2.674-2	5.580-2	8.725-3		8.156-2		8.622-2	9.921-4
Zr								

	Lower Plenum	Core 1	Core 2	Core 3	Upper Grid	Water 2 ^{*)}	Chimney
H	3.401-2	3.733-2	2.256-2	1.907-2	2.455-2	3.242-2	
N							
O	1.876-2	2.582-2	2.343-2	2.169-2	1.231-2	1.621-2	
Na							
Al							
Si							
Ca							
Mn							
Fe	1.555-2				8.786-3		7.396-2
Zr		1.400-2	1.400-2	1.400-2	3.242-3		

*) 277°C

Table 2 速中性子のコンクリート透過実験体系の物質組成

 $(10^{24}/\text{cm}^2)$

	Atomic Weight	Water	Converter	Ordinary Concrete ($\rho = 2.45$)	Heavy Concrete ($\rho = 3.59$)
H	1.008	6.686-2		1.017-2	6.456-3
O	16.00	3.343-2		4.470-2	4.777-2
Mg	24.31			1.390-3	1.085-3
Al	26.98			6.015-3	7.372-4
Si	28.08			1.256-2	5.320-3
Ca	40.08			3.851-3	2.854-3
Fe	55.84			1.459-3	1.930-2
^{238}U	238.1		4.748-2		

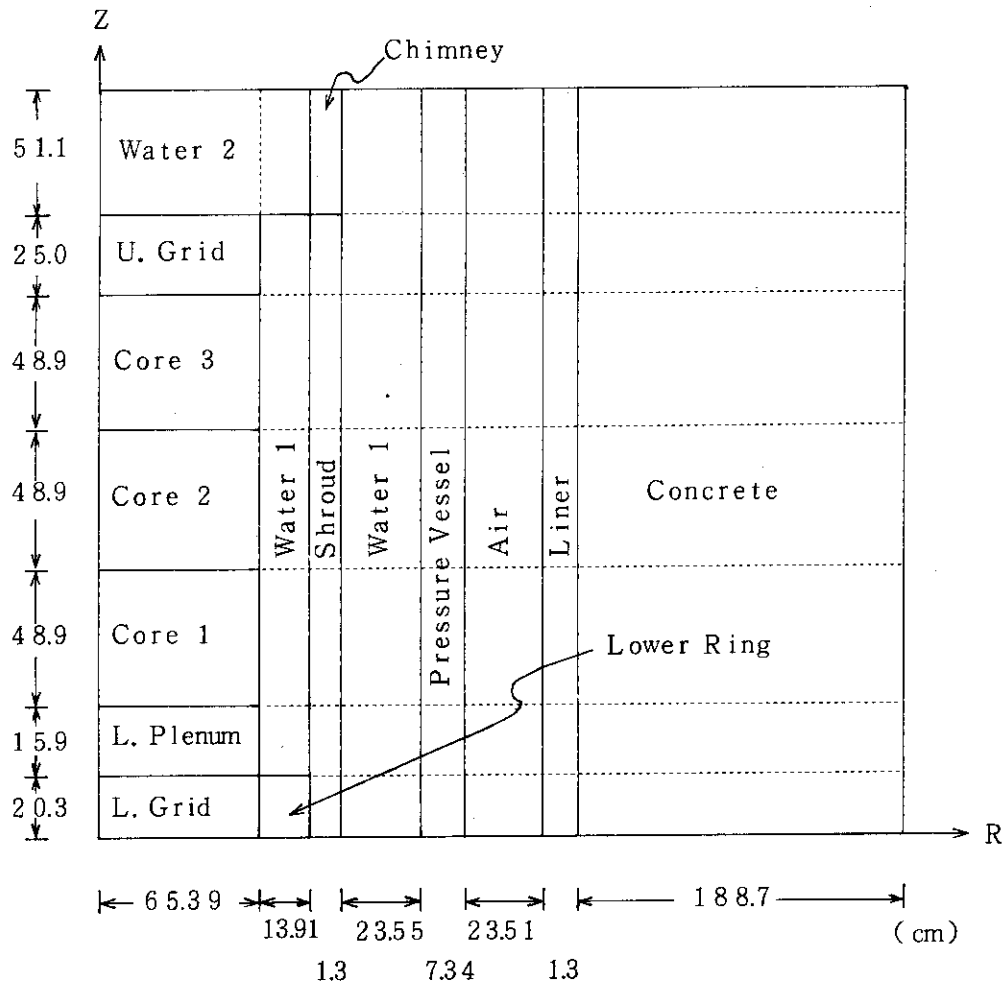
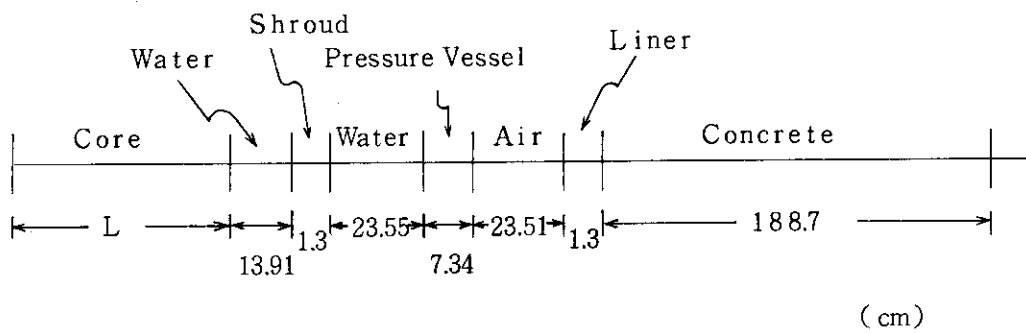


Fig. 1 2次元円筒形状でモデル化した J P D R 計算体系図



$$L = \begin{cases} 65.39 & (\text{Plane}) \\ 77.78 & (\text{Sphere}) \end{cases}$$

Fig. 2 1次元平板形状でモデル化した J P D R 計算体系図

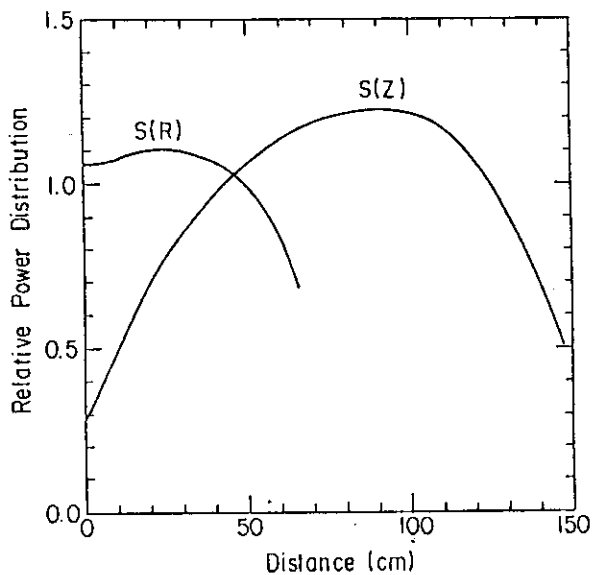


Fig. 3 JPDR 炉心内半径方向および軸方向出力分布

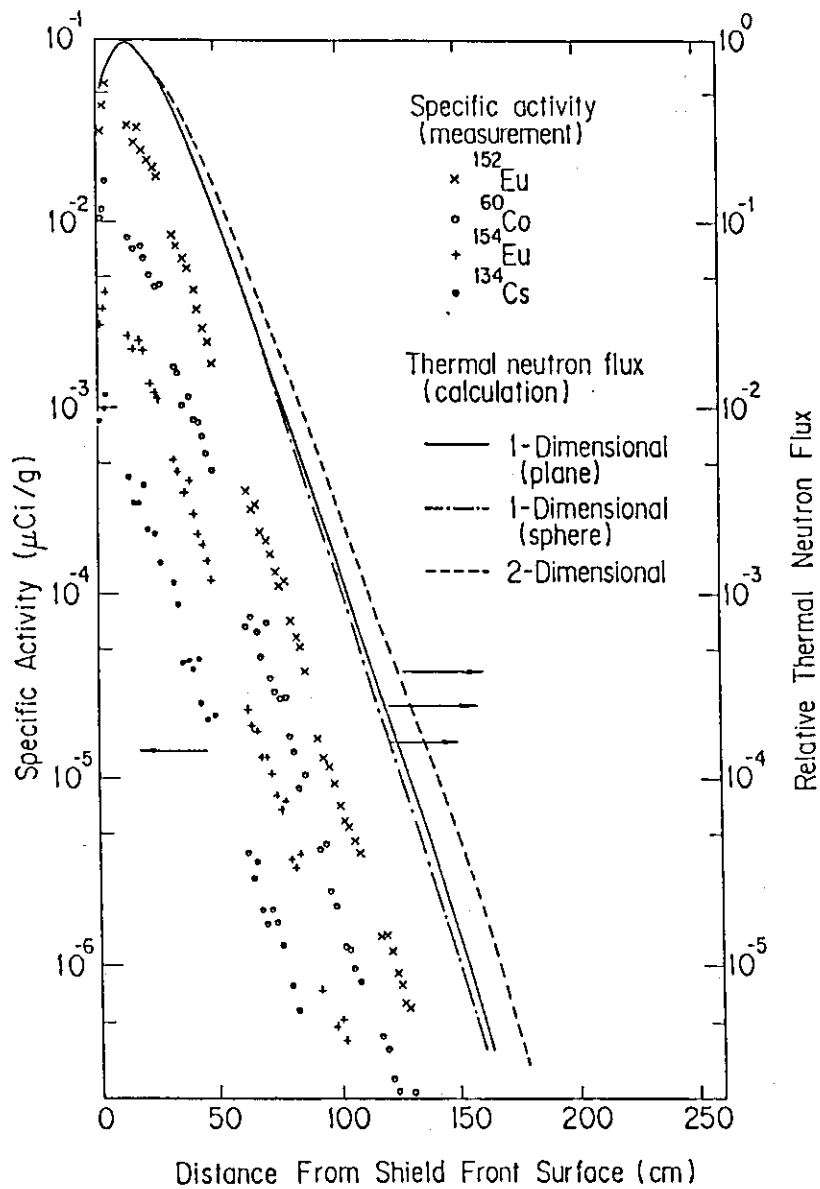


Fig. 4 コンクリート遮蔽体内熱中性子束分布の計算値と残留放射能実測値との比較

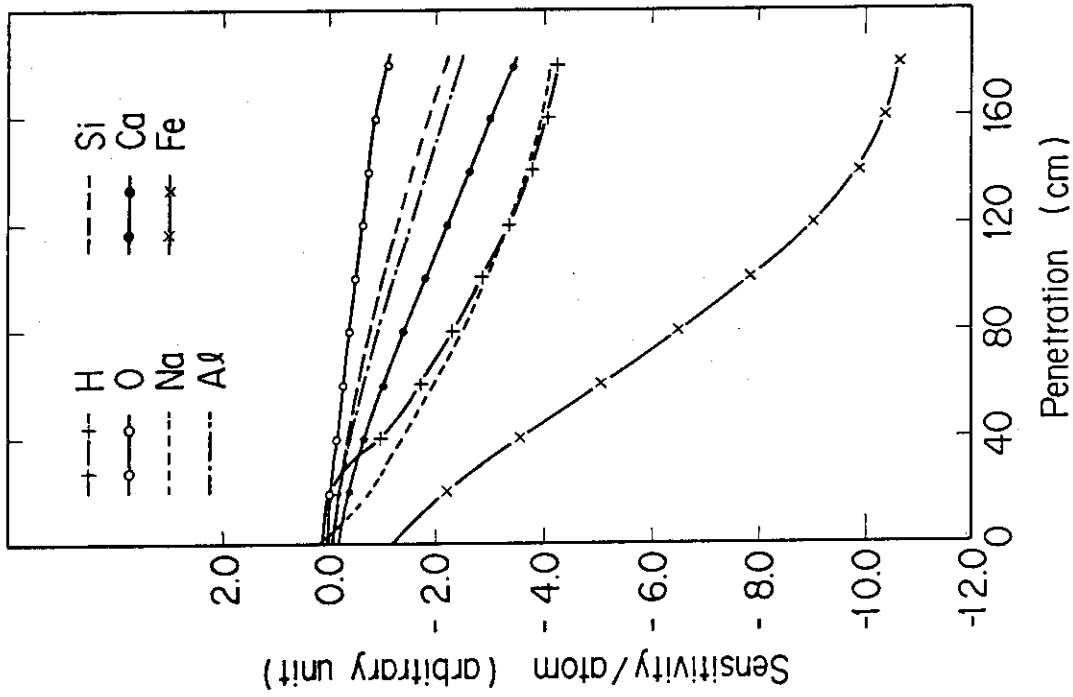


Fig. 5 コンクリート遮蔽体内熱中性子束計算に
対する成分核種 1 原子当りの感度

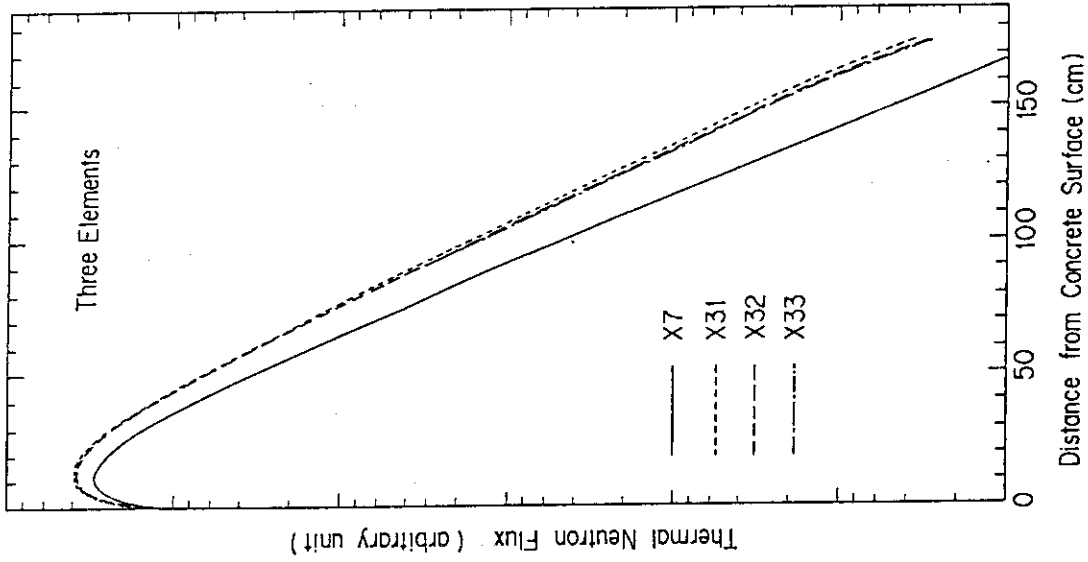


Fig. 6 3 成分核種計算によるコンクリート遮蔽体内熱
中性子分布。X 7 は 7 核種計算による基準解、
X 3 1 は (Na → O, Al → O, Ca → Si, Fe →
Si), X 3 2 は (Na → O, Al → Si, Ca → Si,
Fe → Si), X 3 3 は (Na → Si, Al → Si, Ca
→ Si, Fe → Si) の組み込み方式を表わす。

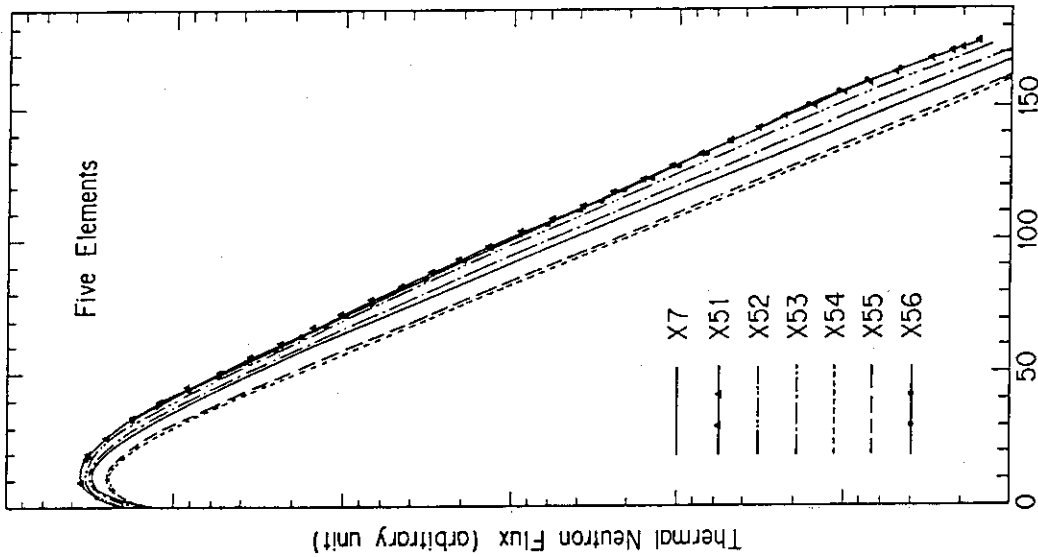


Fig. 7 5成分核種計算によるコンクリート遮蔽体内熱中性子束分布。X7は7核種計算による基準解, X51は(Na→Al, Fe→Ca), X52は(Al→Si, Fe→Ca), X53は(Na→Si, Al→Si), X54は(Al→Si, Ca→Fe), X55は(Na→Al, Ca→Fe), X56は(Ca→Si, Fe→Si)の組み込み方式を表わす。

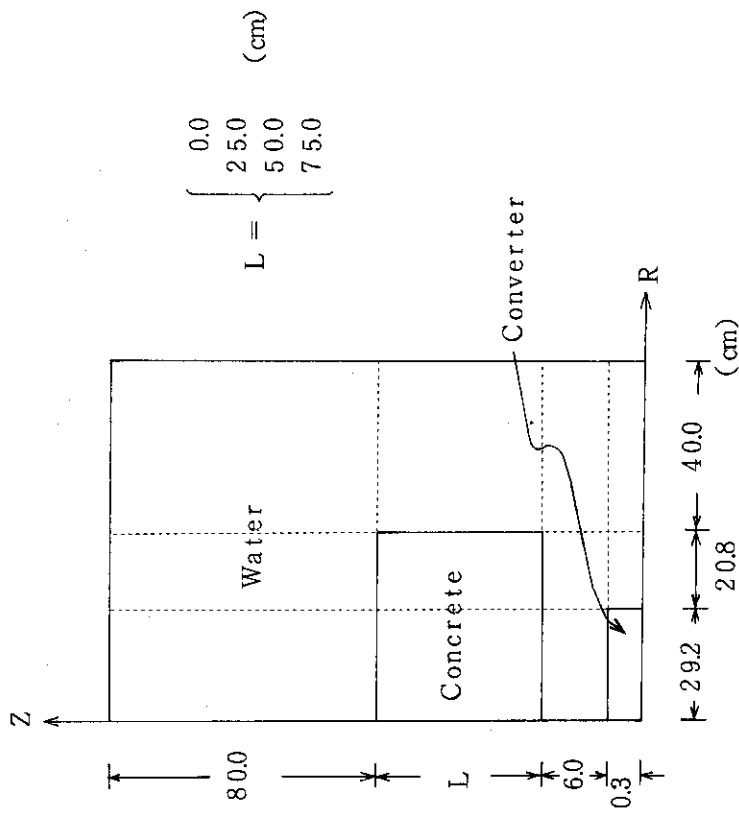


Fig. 8 2次元円筒形状でモデル化したコンクリート透過実験体系

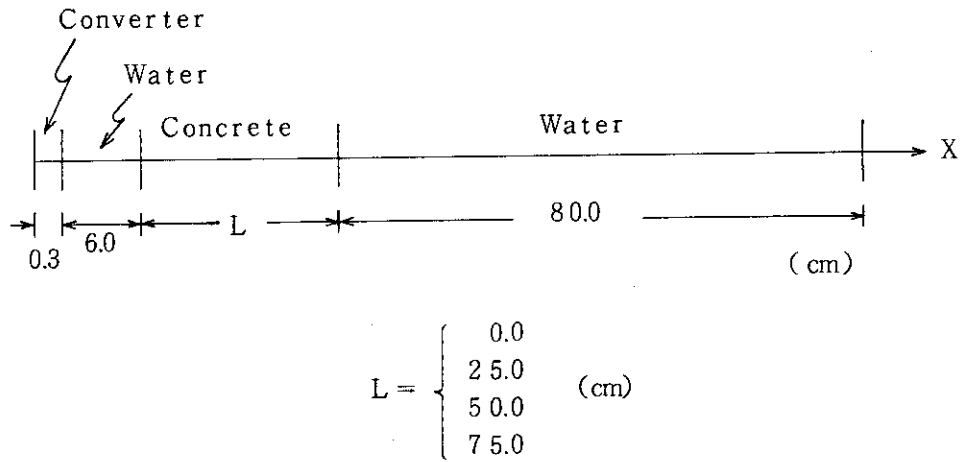


Fig. 9 1次元平板形状でモデル化したコンクリート透過実験体系

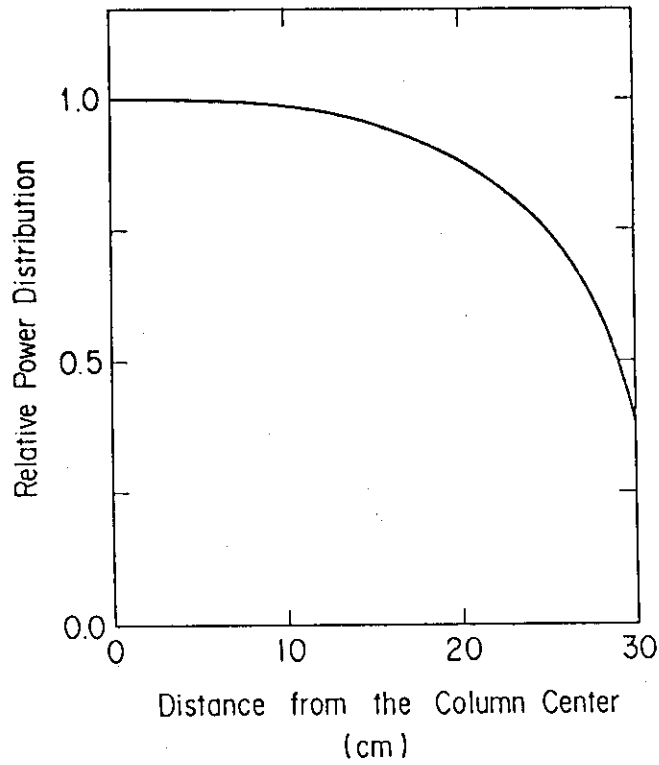


Fig. 10 コンバータ半径方向出力分布

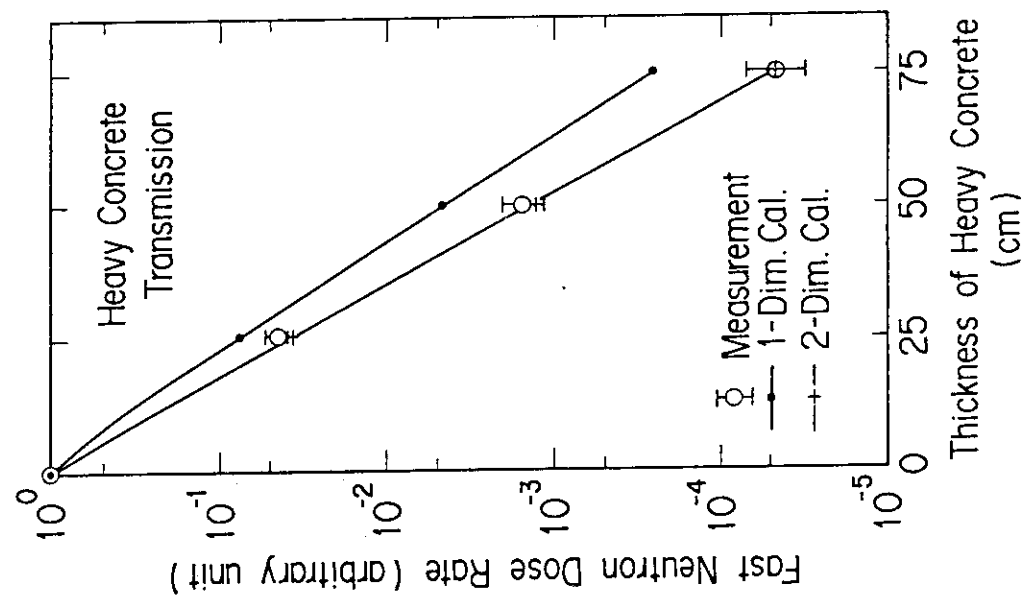


Fig. 12 重コンクリート透過速中性子線量率の計算値と実験値の比較

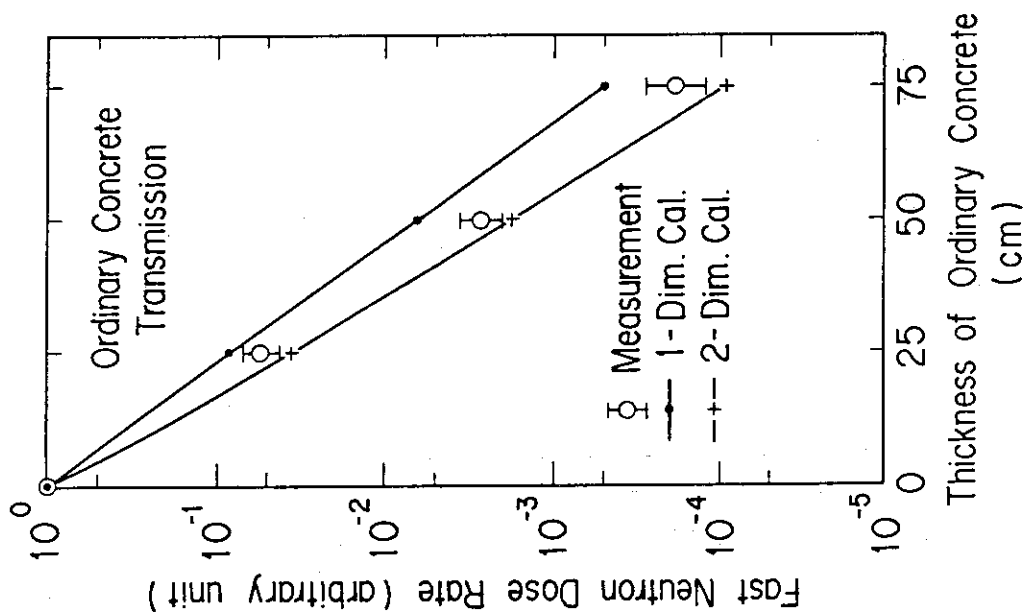


Fig. 11 普通コンクリート透過速中性子線量率の計算値と実験値の比較

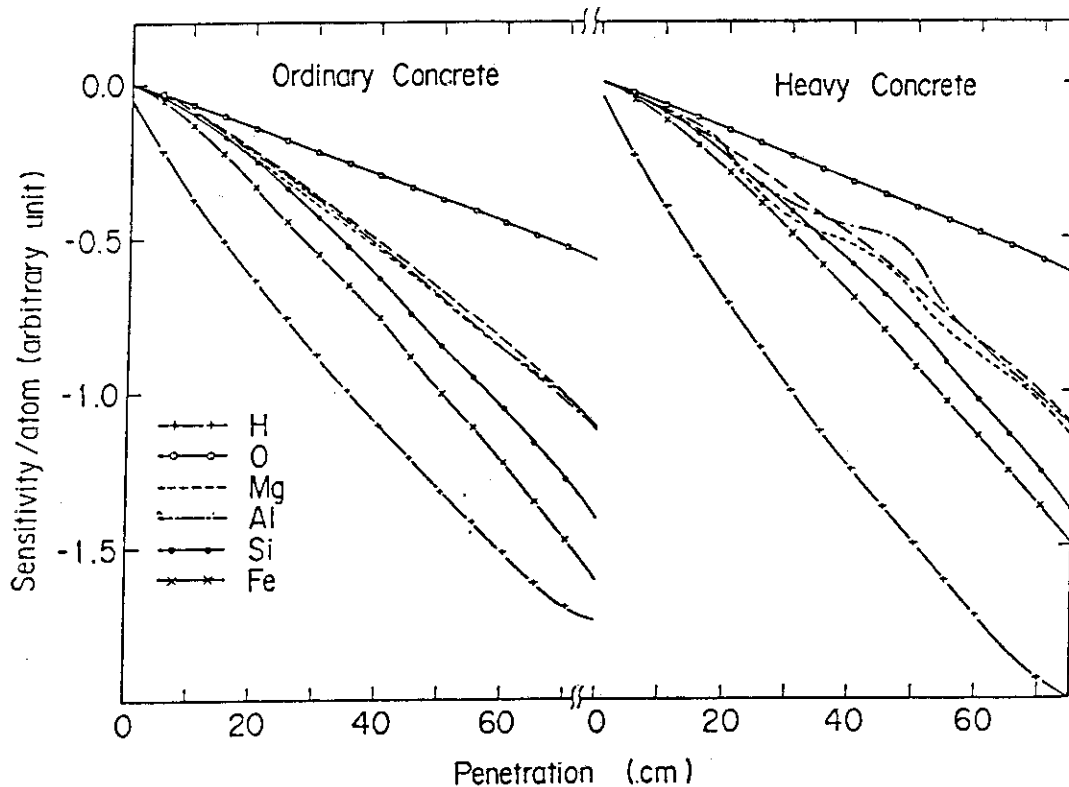


Fig. 13 コンクリート透過速中性子線量率計算に対するコンクリート成分核種1原子当りの感度

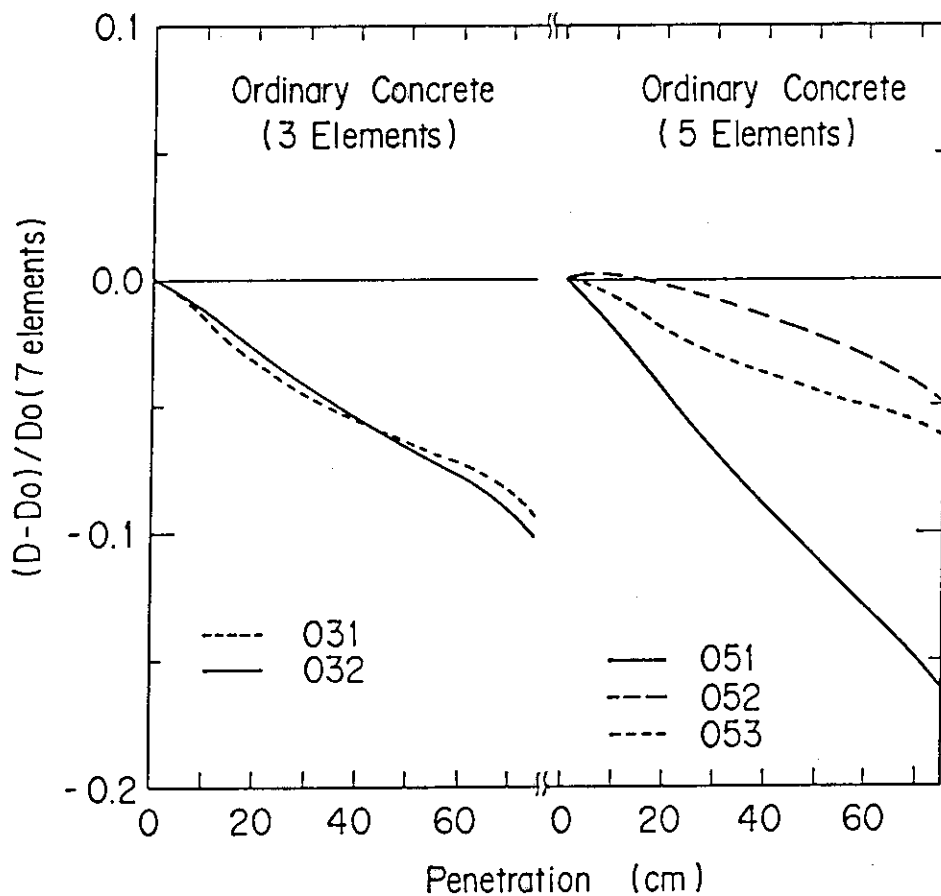


Fig. 14 普通コンクリートに対する3核種, 5核種計算による速中性子線量率の基準値との差の相対比。O 31は (Mg→O, Al→Si, Ca→Si, Fe→Si), O 32は (Mg→Si, Al→Si, Ca→Si, Fe→Si), O 51は (Ca→Si, Fe→Si), O 52は (Mg→Al, Fe→Ca), O 53は (Mg→Al, Ca→Si) の組込み方式を表わす。基準値の定義は Fig. 7と同じ。

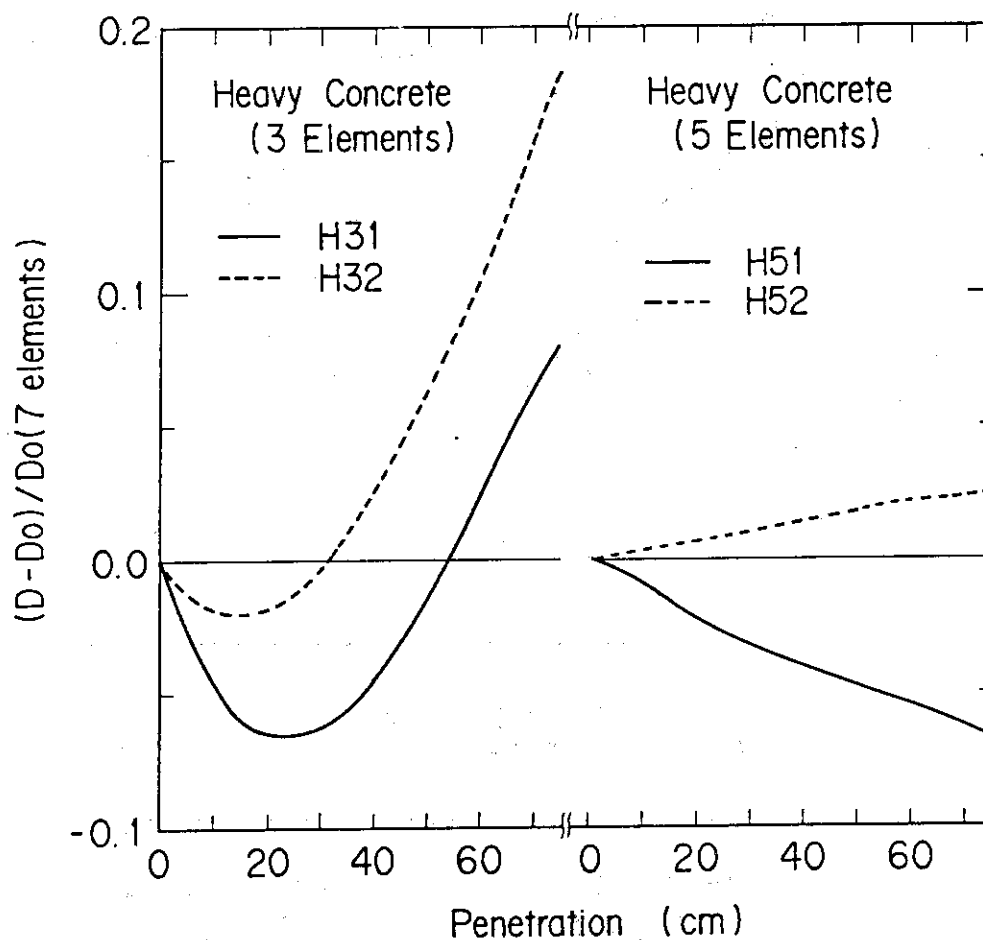


Fig. 15 重コンクリートに対する3核種, 5核種計算による速中性子線量率の基準値との差の相対比。H31は(Mg→O, Al→O, Si→O, Ca→O), H32は(Mg→O, Al→O, Si→O, Ca→Fe), H51は(Al→Si, Ca→Fe), H52は(Mg→Si, Al→Si)の組み込み方式を表わす。