氏名	竹内清（たけうちきよし）
学位の種類	工学博士
学位記番号	論工博第507号
学位授与の日付	昭和47年3月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
学位論文題目	**中性子遮蔽解析に用いる輸送方程式の数値解法の研究**
論文調査委員	（主査）教授 兵藤知典　教授 岡本朴　教授 柴田俊一

論文内容の要旨

この論文は，中性子しゃへい体中での中性子輸送方程式の数値解法のうち，最も適しているとされている，ディスクリート　オーディネート法を用いて解を求める場合，在来の計算法の持つ不利な点や限界を克服して，より正確かつ効果的に計算出来る方法を確立しようと試みた研究をまとめたもので，11章および附録より成っている。

第1章は序論で，研究の目的と意義，在来の中性子しゃへい計算法が述べられている。著者はこれらの各方法ごとに，中性子しゃへい計算に適用する場合の限界や不利の点に言及している。

第2章では，物質中の定常状態の中性子輸送方程式を導いている。

第3章では，本研究に必要な中性子と物質との相互作用をあげ，それぞれにつき断面積，計算上必要なエネルギー範囲，仮定などについて述べている。

第4章では，中性子しゃへい体中での中性子分布をあらわす中性子輸送方程式の数値解法のうち，ディスクリート　オーディネート法について，過去の主な研究を述べている。ディスクリートオーディネート法とは，中性子輸送方程式の散乱に関する項の積分を，有限の角度分点に関し種々の求積法を用いて求める方法である。この方法は原子炉しゃへい体などの中で，中性子の非等方散乱が比較的多く行なわれている場合に用いて，成功することが多い計算方法である。本章ではこの方法の適している理由を述べ，ついで第5章以下で述べる著者の計算方法と比較するため，他の研究者により開発されたディスクリート Sn法，直接積分法（NIOBE），著者が他の研究者と共同で開発した直接積分法（EOS）について述べている。

第5章では，著者が新しく開発した，ディスクリート　オーディネート直接積分法の一方法について，主要な式の導出がなされている。この方法は，中性子の輸送方程式を中性子の進行方向単位ベクトルについて，単位球面上に選ばれた角度分点ごとに表示する。この輸送方程式の右辺の散乱積分を数値積分により計算する。各角度分点で独立に輸送方程式を直接積分するので，前方方向の中性子の角度分布を，他の方向の角度分布に比較的影響されないで計算することが出来る。また最終的な式の導出まで空間形状を固

定しないので，最終式は任意の空間形状に適用出来る。

散乱積分計算は，弾性散乱および非弾性散乱に分け，前者は非等方散乱，後者は等方散乱の取扱とした。角度分点は種々考えられるが，本研究では単位球面上における等面積法をとり，極角に関してはガウス求積法の積分点をとり，これに対応する方位角の角度分点を定めた。中性子エネルギーについては等レサジー間隔に分点をとった。かくして中性子束および散乱角度分布関数のルジャンドル多項式展開係数は，角度およびエネルギーの微小区間でステップ関数で近似出来るとの仮定の下に，角度分点に関する中性子輸送方程式を誘導している。空間変数についてメッシュに分割すれば，式は差分の形になり，高エネルギーおよび外側のメッシュから計算を進めて行く。同一エネルギー内の中性子散乱については，繰返し収斂法を用いないで，全断面積の減少と考えた。

第6章では，第5章で空間形状を固定しないで導いた解を，実際の座標形状にあてはめて書きかえている。対象としたのは，原子炉の中性子しゃへい計算に多く用いられる，平板形状，球対称形状，無限円柱形状，有限円柱形状，直角座標形状である。著者はこの方法で，一次元平板形状，球対称形状，二次元円柱形状に対し中性子しゃへい計算コードを作製し PALLAS と命名している。予備的な段階の MENE コードと共に実用に供されている。

第7章では，本計算法の精度をみる第一段階として，解析的に求めた物質中の非散乱中性子束と，本解法による計算結果との比較について述べている。この比較の結果，一次元平板形状における計算では，30 平均自由行程までほとんど誤差がなく，一次元で取扱いうる球形状の大きな線源に対しても同様であった。小型線源に対しては，他の方法ではかなり大きな誤差が生ずるが，本法では第1角度分点を適当に選べば，よい精度で前方ピークの角度分布が得られることが判明した。二次元形状についてもかなりあらいメッシュを用いたにかかわらず，かなり良い一致が得られた。

第8章では，本計算法の精度をみるために，他の研究者によりなされた中性子の物質透過実験の結果および他の計算コードによる計算の結果と PALLAS コードによる計算の結果との比較について述べている。実験値とは，中性子の物質中における減衰，角度分布のみでなく，スペクトルまでかなりよく一致している。一致がよくない点について，著者は計算コードの側と実験の側と双方からくわしい検討を行なっている。他の計算結果との比較でも同様にかなり良い一致を示している。

第9章では，本解法による実際の中性子しゃへいの解析の例として，日本原子力研究所の JRR-4 原子炉で，舶用炉の一次しゃへいを模擬した実験の結果と対応する計算をした結果について述べている。この結果多重層内での中性子角度分布を正確に取扱いうることが判明した。

第10章では，これらの比較検討を総合的に見て，第1章より第9章までに述べた事項につき逐次検討を行なっている。他の方法に比し有利な点と不利な点をくわしく列挙している。

第11章では，結言および今後の課題について述べている。結言では本計算法の特長についてのべ，中性子しゃへいの解析および設計計算に対し有効かつ精度のよい計算方法であるとの結論を述べている。今後の課題としては，二次元形状に対する計算精度のチェック，計算に使用する核データの信頼性向上，熱中性子および γ 線の分布計算への応用，中性子ダクトストリーミング計算への応用，最適設計計算への応用などをあげている。

付録Aは複合核モデル，付録Bは弾性散乱における諸関係式，付録Cはダイヤモンド差分法とステップ近似，付録Dは微分散乱断面積の取扱いに関し記述したものである。

論文審査の結果の要旨

中性子しゃへい体中での中性子の挙動は，ボルツマンの輸送方程式に従うのであるが，この場合ボルツマンの輸送方程式を解析的に解くことは困難であり，一般に数値計算によって解を求めている。現在最も正確なしゃへい体中での中性子分布の計算は，ディスクリート　オーディネート法であるとされている。この計算方法は輸送方程式の散乱に関する項の積分を，有限の角度分点に関し種々の求積法を用いて求める方法である。

著者は，在来の計算コードとほぼ同じ方法の計算コード EOS を作り種々計算を試みた結果，在来の計算方法の持つ不利な点や限界があることを知り，新たにより正確で，計算時間の短い計算コードを作ることに努力した。しゃへい体のように中性子の深い透過で問題となる，極端な前方ピークの角度分布を有限項のルジャンドル多項式で展開近似をするのは若干の無理が伴うことを知った。著者は適当に定めた角度分点ごとに表示した輸送方程式を導き，適当に定めた空間メッシュごとに積分した。

この計算法には次のような利点があることが判明した。

1. しゃへい体の空間形状に対する制限を設けていないので多種類のしゃへい解析および設計に使用出来る。

2. 多重層しゃへい体のように，境界で大きな中性子角度分布の変化がある場合にも，比較的簡単に正確に計算可能であるという，ディスクリート　オーディネート法の特徴がよく生かされている。

3. 角度分点で中性子の進行方向にそって方程式を直接積分するから，中性子角度分布が極度に前方ピークであっても正確に解析出来る。また比較的あらい空間メッシュでも精度のよい計算が出来るので計算時間の節約となる。

4. 弾性散乱の非等方扱いのためのルジャンドル多項式展開の次数に制限を設けていないため，状況に応じ任意の高次の非等方成分まで取り扱うことが出来る。

5. 繰返し収斂法の使用を回避したため，収斂しない場合や，異常な値に収斂することがなく，また計算時間を節約出来る。

6. 中性子断面積を任意のレサジー間隔で選ぶことが出来，詳細なスペクトルを得ることが出来る。

これに対し空間，角度，エネルギーを全部メッシュ点表示するので大量のメッシュ点が必要であるが，現在の電子計算機の能力で充分カバー出来る。レサジー間隔が大きいと誤差が大となるが，0.1 程度で充分の精度となり，他の計算法による同精度の計算に比し，計算時間はかなり短かい。

以上述べたように，この論文は中性子しゃへい体内の中性子束分布，中性子角度分布を，精度よくしかも速かに求めるための数値解析的方法を研究し，新しい方法を開発し，実用的な計算コードを完成した。その計算法の有用性は多数の計算例により立証されて居り，学術上実際上寄与するところが少なくない。

よって，本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。