

氏 名	お だ の な お て る 小 田 野 直 光		
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )		
学位授与年月日	平 成 4 年 3 月 27 日		
学位授与の根拠法規	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 ( 博 士 課 程 ) 原 子 核 工 学 専 攻		
学 位 論 文 題 目	中 性 子 反 応 断 面 積 値 の 予 測 精 度 の 向 上 手 法 と そ の 不 安 定 核 種 に 対 す る 適 用		
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 梶 山 一 典		
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 梶 山 一 典	東 北 大 学 教 授 平 川 直 弘	
	東 北 大 学 教 授 中 村 尚 司		

## 論 文 内 容 要 旨

### 1. 序 論

核分裂炉・核融合炉の開発・設計において、その基礎となる核データ（原子炉を構成する物質と中性子・荷電粒子・ $\gamma$ 線との相互作用データ）を精度よく求めることは、重要な課題である。その核データの評価において、理論計算は重要な役割を果たしている。核データのなかでも原子炉構成材核種の高速中性子しきい反応断面積には、核分裂炉、核融合炉の開発・設計に関連した重要な反応が多い。核データ評価の要求精度は、核データの利用の目的により異なるが、例えば放射化反応断面積評価の要求精度は、核融合炉開発に関する応用を考えた場合には20%程度であり、一方でドシメトリ反応断面積の評価精度は5%以下が要求されている。近年、高速中性子ドシメトリ反応として $^{93}\text{Nb}(n, n')^{93\text{m}}\text{Nb}$ 反応が注目されているが、この反応は、実験データが少なく、理論計算の精度も十分でないために、評価精度が悪く、実験、理論計算ともにその精度の改善が望まれている。また、核融合炉開発・設計に関連した核データには、不安定核種に対するものが多く含まれる。しかし、不安定核種に対する高速中性子領域での実験データは存在しないため、それらの評価は理論計算に頼らざるを得ない。そこで、理論計算によって計算される反応断面積がどの程度の予測精度を持っているか議論することが必要である。本研究の目的は、原子炉構成材核種の高速中性子しきい反応断面積の理論計算手法について検討し、理論計算に用いるパラメータの選択方法を提唱し、それらの断面積値の予測精度の向上を図ることである。さらに、核融合炉の開発・設計に関連して

注目されている不安定核種に対する反応断面積の予測精度についても議論することをあわせて目的とした。

## 2. 高速中性子領域における理論計算コード

本研究では高速中性子領域での中性子反応断面積計算コードとして、Hauser-Feshbach 理論に基づく統計模型の計算コード EGNASH (ELIESE-GNASH 接続プログラム) を用いた。直接反応過程の寄与は、DWUCK (DWBA の計算コード) または ECIS (チャンネル結合理論の計算コード) を用いて計算した結果により考慮することができる。EGNASH コードでは、光学模型ポテンシャルパラメータ (OMP), 前平衡過程調整因子, 準位密度パラメータ, 離散準位データの入力により, しきい反応断面積, 放出粒子のスペクトルの計算を行える。高精度の断面積計算を行うためには, これらの入力パラメータを正しく決定する必要がある。

## 3. 高速中性子しきい反応断面積計算手法

第3章では, 第2章で述べた断面積計算において重要なパラメータの決定法を提唱した。従来の放射化反応断面積データファイルの作成では, EGNASH に内蔵されているパラメータを使うことが多かったが, その結果は必ずしも十分ではなかった。そのため, 本研究では, パラメータを決定するための手法として以下の点を提唱した。

- (1) 中性子 OMP を決定する際, global, particular OMP の中から候補を挙げ, それぞれのパラメータで計算される s-, p- 波中性子強度関数, ポテンシャル散乱半径, 全断面積を実験データと比較し, 最もよく実験データを再現するものを, 計算に用いる OMP とする。
- (2) 魔法核近傍では, 原子核の殻効果の補正がより精度よく含まれている Ignatyuk 準位密度模型を採用する。
- (3) 準位密度パラメータは山室の推奨値を初期値とし, 計算結果が実験データをよく再現するように調整を行う。

## 4. $^{93}\text{Nb}$ 反応断面積の計算

$^{93}\text{Nb}$  のドシメトリ反応断面積  $^{93}\text{Nb}(n, n')^{93m}\text{Nb}$  および  $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$  反応は応用上重要な反応であり, また, Nb は核融合炉材料の候補の一つであるため, 高精度で  $^{93}\text{Nb}$  反応断面積計算を行うことの意義は大きい。計算に用いたパラメータは, 第3章で提唱した方法に基づいて決定した。中性子 OMP は A.B.Smith らによって決定されたパラメータ (ポテンシャルパラメータの分散関係を考慮) を用いた。 $^{93}\text{Nb}$  は中性子マジック近傍であるので, 殻効果の補正を含む Ignatyuk 準位密度模型を採用した。離散準位データは最新の評価データである Demanins らの評価データを用いた。その結果,  $^{93}\text{Nb}(n, n')^{93m}\text{Nb}$  反応については, Fig. 1 に示すように, EGNASH の内蔵パラメータで計算した結果 (図中破線) と比較して, 本研究における計算結果 (図中実線) では飛躍的に断面積予測精度を向上させることができた。また,  $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$  反応や他の反応断面積についても, 実験値と比較してよい精度の断面積値を得ることができた。そのため, 本研究の

計算結果を用いて、これら2つのドシメトリ反応断面積の評価を、実験データも考慮して、一般化最小二乗法により行った。評価データを用いた積分テストの結果は良好であった。また、 $^{93}\text{Nb}(n, n')^{93\text{m}}\text{Nb}$  反応を実際にドシメータとして用いる場合は、残留核 $^{93\text{m}}\text{Nb}$ のburn-up効果の補正が必要になるが、従来その補正に必要な $^{93\text{m}}\text{Nb}$ に対する断面積値は存在しなかった。そこで、本研究では $^{93\text{m}}\text{Nb}$ に対する断面積値の計算を行い、その断面積値を用いてburn-up効果の補正を行った。その結果は従来の補正量とほぼ同等のものであり、本研究の計算結果の妥当性を裏付けるものである。

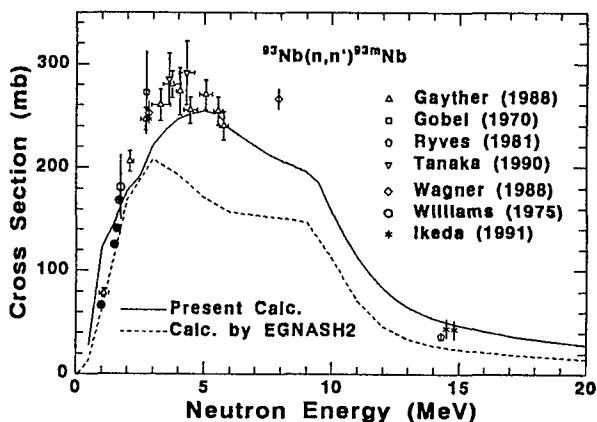


Fig. 1  $^{93}\text{Nb}(n, n')^{93\text{m}}\text{Nb}$  反応断面積の計算結果

## 5. 不安定核種の中性子反応断面積の計算

核融合炉の開発・設計に関連して、不安定核種に対する反応断面積の評価の重要性が指摘されている。しかし、それらの高速中性子領域での実験データは存在しないので、その断面積評価は理論計算に頼らざるを得ない、本研究では不安定核種に対する反応として、核融合炉停止後の材料の放射化率推定に必要とされている $^{60}\text{Co}(n, p)^{60}\text{Fe}$  反応 ( $^{60}\text{Fe}$ の半減期は $1.5 \times 10^6$ 年) をとりあげた。 $^{60}\text{Co}$ に対する断面積計算のアプローチとして、本研究では中性子数が1だけ違い、安定核種で実験データも多く存在する $^{59}\text{Co}$ に対する反応断面積の計算をまず初めに行い、計算に用いるパラメータを決定し、そのパラメータを $^{60}\text{Co}$ の計算にも用いることにした。第3章で提唱した方法により $^{59}\text{Co}$ の計算で用いるパラメータを決定した。中性子OMPにはWilmore-Hodgsonのパラメータを、陽子OMPにはMenetのパラメータをそれぞれ用いた。準位密度模型にはGilbert-Cameronのunified模型を用い、そのパラメータは山室の推奨値を初期値としたが、 $^{59}\text{Co}$ のパラメータを調整して、計算値の再現性をよくした。その結果、全体的に実験データをよく再現

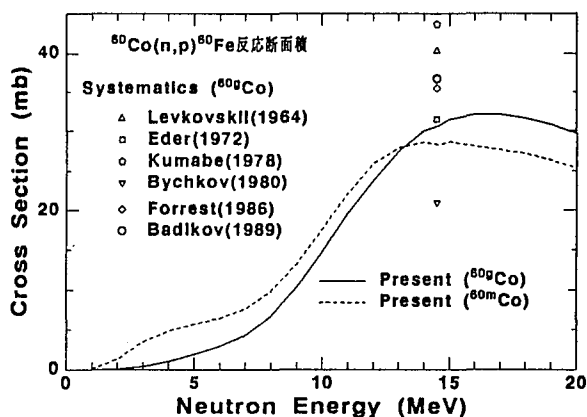


Fig. 2  $^{60}\text{Co}(n, p)^{60}\text{Fe}$  反応断面積の計算結果

する計算値を得ることができた。これらのパラメータを用いて $^{60}\text{Co}$ に対する断面積値の計算を行った。 $(n, p)$  反応断面積の計算結果を Fig. 2 に示す。14MeV 付近では反応断面積の系統式が知られており、それより計算される断面積値と、理論計算値とを比較し、理論計算値の予測精度に関する議論を行った。その結果、 $^{60}\text{Co}(n, p)^{60}\text{Fe}$  反応については、最新の Badikov らによる系統式から計算される値とは-14%の差があるものの、 $^{59}\text{Co}(n, p)^{59}\text{Fe}$  の計算結果では、理論計算値と実験値はよく一致するにもかかわらず、系統式から計算される値と実験値は-24%の差があり、Co に関しては系統式そのものに不確かさが含まれていることを明らかにした。従って、本研究による $^{60}\text{Co}(n, p)^{60}\text{Fe}$  反応断面積は応用上十分な精度で求めることができたと考えられる。また、 $^{60}\text{Co}(n, \alpha)^{57}\text{Mn}$ 、 $^{60}\text{Co}(n, 2n)^{59}\text{Co}$  反応断面積についても同様に、理論計算による断面積値の予測精度について議論した。

## 6. 結 論

本研究で得られた成果を総括し結論とした。本研究では Nb, Co を対象として高速中性子反応断面積値の予測精度の向上について議論したが、他の原子炉構成材核種に対して計算を行う場合にも、本研究で提唱した手法を用いることで、従来よりも高精度の断面積計算が行えると考えられる。また、不安定核種に対する断面積の予測精度に関する議論はこれまでになく、本研究の成果は、今後の不安定核種の断面積評価に対して重要な示唆を与えるものである。

## 審査結果の要旨

原子炉の核的設計においては中性子と原子炉構成物質との間に生ずる核反応の諸量が基礎的データとして重要なものであり、わが国、米国、欧州において評価されデータファイルとして提供されている。ところが、この核データファイルに格納されているデータのなかには実験値と著しく相違するものがある。これは十分に検討されない理論計算値が評価値として採用されているためである。本人は、この点に着目し研究を行って十分実用になる理論的予測計算値を求める手法と、実験測定を行うことが困難である放射性核種の中性子反応断面積予測まで拡張することを提案したもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章で、高速中性子エネルギー領域における中性子反応断面積の核理論にもとづく計算方法について検討を行っている。その結果、原子核の励起準位密度パラメータなどの一連のパラメータを正しく決定すべきことを主張している。

第3章では、前章で明らかにした高い精度の断面積計算において重要なパラメータの決定法を提唱している。これは本研究の一つの成果である。

第4章では、計算の対象核種として原子炉ドシメータとして注目されているニオブにおける  $(n, n')$  および  $(n, 2n)$  反応断面積をとりあげ理論計算にもとづく予測値を導出した結果、従来の評価値より実験値を再現し得ることを示した。さらに、ニオブが長期間中性子照射を受けた場合のニオブアイソマーの影響も理論的に予測しており、本研究の計算手法が妥当である結果を示した。

第5章では、本手法を不安定核種の中性子断面積計算に適用している。ここでは、不安定核としてコバルト60をとりあげ、安定核コバルト59のデータを基礎として長寿命の残留核を生成する  $(n, p)$  反応、さらに  $(n, \alpha)$  や  $(n, 2n)$  反応の断面積を求め予測精度について検討している。この手法は、将来他の多くの不安定核に適用され十分実用となる精度の核データファイルの評価編集に利用されることが期待される。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は中性子反応断面積の予測精度を向上させる計算法に新たな提唱を行ったもので原子核工学の発展に寄与するところが大きい。

よって、博士(工学)の学位論文として合格と認める。