

氏 名	伊 藤 伸 夫
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 5 年 3 月 25 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	グリッドチェンバー手法による二次荷電粒子スペク トロメータの開発とその応用に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 平川 直弘
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 平川 直弘      東北大学教授 武部 雅汎 東北大学教授 中村 尚司      東北大学助教授 馬場 護

## 論 文 内 容 要 旨

将来のエネルギー源として開発が進められている核融合炉の実用化や核分裂炉の高性能化には、耐放射線を有する高機能材料の開発が不可欠である。しかし、構造材の損傷評価を行うためのデータベースは極めて乏しいのが現状である。なかでも損傷の主な原因となる中性子照射に伴う荷電粒子生成については、生成粒子のエネルギー・角度分布すなわち反応の二重微分断面積 (DDX) データが必要不可欠であるが、実験上の困難のためごく少数の実験データが報告されているにすぎない。また、特に重要な構造材核種の  $(n, \alpha)$  反応に関しては、簡便な放射化法の適用が困難な場合が多いため反応断面積自体についてすらデータは乏しい。このような事情により、14MeV までの広い中性子エネルギー領域に亘ってデータの整備が急務となっている。

しかし、従来用いられてきたカウンターテレスコープ手法による生成粒子の直接測定の場合、幾何学的検出効率が非常に小さいために、実験は強力な中性子源と長時間の測定を必要とし、上記の要請に応えるのは困難である。本研究では100%近い高い幾何学的検出効率を有し、かつ生成粒子のエネルギーと角度の決定が可能であるグリッドチェンバー (GIC) の特徴に着目し、これを荷電粒子生成反応断面積の測定に応用する手法の開発を行った。その手法に必要な高い阻止能と低いバックグラウンド生成率を有する GIC 型スペクトロメータを開発し、性能の検証を行うとともに、実験及びデータ処理手法を開発した。更に本手法を 4~14MeV 中性子エネルギーに対する Fe, Ni, Cu の主要構造材核種について  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  反応断面積の測定に応用した。

本研究では、本スペクトロメータの最大の特長である高い幾何学的効率に加えて低いバックグラ

バックグラウンド生成率を実現することにより、従来の手法に比べて1/10以下の短い時間で測定が可能となり、これまでデータが希少であったDDXについて系統的データを新たに提供した。本手法により、断面積の立ち上がり付近から14MeVまでの広い中性子エネルギー範囲に亘り、一貫したデータを提供することが可能となった。

本論文は全7章からなり、以下にその概要を述べる。

## 第1章 序 論

荷電粒子生成反応断面積の重要性、データの現状、従来の測定法の概要と問題点及びGICの特徴、本研究の目的を述べている。

## 第2章 グリッドチェンバーの動作原理

本章では、GICの基本構成である平行平板二極電離箱の動作原理と出力信号について概観し、それに基づいてGICの動作原理、得られる情報とその特長を述べている。その結果を用いてGICのアノード・カソード2次元データから粒子の放出エネルギー・角度を決定する手法とその有効性を明らかにしている。

## 第3章 測定システム

本章では、GICを荷電粒子生成反応断面積の測定に応用するためには高い阻止能と低いバックグラウンド生成率を有するGICの開発が必要であることを示し、そのための開発項目を、(1)GIC本体、(2)真空排気系とガス供給系、(3)検出ガス、(4)信号処理・データ収集系に分類し、その設計指針及びシステムの詳細について述べている。

(1)GIC本体：本GICは、高い阻止能を実現するために1.3MPaまでの高圧力での動作を可能とし、検出ガスの純度保持のためにサンプル交換機構を設けた。バックグラウンド低減のために全電極を重核核種で構成するとともに、シールド、リング電極を新たに設けた。GIC内部の電界計算を行い、有感領域内で一様な電界が実現されることを確認した。

(2)真空排気系、ガス供給系：高圧力の下で電離箱として動作させるために不可欠な検出ガス中の不純物ガスの排除を行うために、高真空排気系とガス供給系を整備した。

(3)検出ガス：検出ガスに必要な条件を考慮し、大きな電子流動速度、高い阻止能、低いバックグラウンド生成率を満足するものとして、Krを主成分とし、2～3%のCO<sub>2</sub>もしくは5%のCH<sub>4</sub>を混合した検出ガスが有効なことを明らかにした。

(4)信号処理・データ収集系：GICの特長を発揮させるために、アノード・カソード信号の2次元データを収集・解析するためのマルチパラメータ型の信号処理・データ収集システムを構築した。

## 第4章 特性試験

本章では、スペクトロメータの基本的な性能と高圧力下での正常な動作の検証、及び荷電粒子生成反応の研究への適用性の評価とデータ処理手法の検証について述べている。

検出器特性に関しては、(1)各電極への印加電圧比の決定を行うとともに、(2)電荷収集の飽和特性の検証、及び(3)それが粒子のエネルギーや角度によらないことの確認を行い、(4)エネルギー・角度分解能について評価した結果、本スペクトロメータが高圧力下で所期の特性を達成していることを確認した。また、データ処理手法に関して、(5)放出角度の導出法、(6)幾何学的検出効率の補正法、(7)断面積決定に必要な  $H(n, p)$  反応からの反跳陽子収量の導出法を開発し、その妥当性を検証した。

## 第5章 Ni(n, p) 反応断面積の測定

本スペクトロメータを用いて荷電粒子生成反応断面積の測定を行うためには、実験手法・データ処理手法を新たに開発し、その妥当性を検証することが必要である。また、その測定に際してのバックグラウンド生成率の評価を行い、 $S/N$ の観点から本スペクトロメータの適用性を検証することが重要である。

実験方法に関して検討すべき項目は、(1)実験配置、(2)サンプル、(3)検出ガスの選定と、(4)エネルギー軸の決定に大別される。また、データ処理手法に関しては、(5)エネルギーと放出角度の決定、(6)DDXの導出、(7)サンプル中でのエネルギー損失の補正、(8)誤差評価が挙げられる。

Ni(n, p) 反応の断面積値は、放射化法による数多くの測定結果が存在するため良く知られている。したがって、本章では本手法によってNi(n, p) 反応断面積の測定を行い、本スペクトロメータの適用性及び実験方法・データ処理手法の妥当性の評価を行った結果を述べている。

アノード・カソード2次元スペクトル及びアノードスペクトルにおいて、低波高領域に検出ガスからのバックグラウンドが観測されたが2次元のデータ処理手法の導入によって大幅に低減させ得ることを明らかにし、良好な $S/N$ を実現できることを確認した。また、本測定によって得られたNi(n, p) 反応断面積が核データ評価値と誤差内で一致することから、実験方法・データ処理手法が妥当であることを検証した。

## 第6章 陽子、 $\alpha$ 粒子放出反応断面積測定への応用

本章では、本スペクトロメータをNi(n,  $\alpha$ ), Fe(n,  $\alpha$ ), Cu(n,  $\alpha$ ), Cu(n, p) 反応断面積の測定に応用した結果について述べている。本研究では、Ni(n,  $\alpha$ ), Fe(n,  $\alpha$ ) 反応断面積については4.2~10.6及び14MeVの中性子エネルギー領域で、Cu(n,  $\alpha$ ), Cu(n, p) 反応については5.1~6.2MeVのエネルギー領域で測定を行った。

実験方法・データ処理手法に関しては第5章で述べた内容に加えて、 $\alpha$ 粒子の測定や14MeV中性子に対する実験での新たな事項についても検討している。その内容は、実験方法に関して、(1)D(n, np) ブレークアップ反応による寄生中性子の寄与、(2) $\alpha$ 粒子測定用サンプル、(3)検出ガスの選定、(4)14MeV中性子源、(5)反跳陽子テレスコープを用いた測定による断面積の規格化であり、データ処理法に関しては、(6)低エネルギー陽子の除去、(7)14MeVでの測定における断面積値の決定の2点である。(6)は $\alpha$ 粒子の測定に固有のものであり、(7)は実験方法(5)に対応して必要となるデータ処理方法上の事項である。

これらの成果によって、 $(n, x\alpha)$  反応に対するデータで問題となる低波高領域での検出ガスからのバックグラウンドを大幅に低減させ、良好な S/N を達成した。

各反応の測定結果について、DDX, 角度微分断面積 (ADX), エネルギー微分断面積 (EDX) 及び反応断面積を導出し、他の測定結果及び核データ評価値と比較し考察を加えた。DDX について、実験データは従来ほとんど報告されていない。

Ni( $n, x\alpha$ ) 反応に対して、典型的な DDX を核データファイル ENDF/B-VI の値と比較した結果、本測定結果では運動学的効果で説明されるスペクトルのシフトが観測されているのに対し、ENDF/B-VI ではこの効果が考慮されていないために、スペクトル形状の違いが大きいたことが明らかとなった。また、ADX, EDX においては、従来わずかながら報告されている他の測定結果は本結果と概ね一致したが、ENDF/B-VI はスペクトル形状、絶対値ともに大きな差異を示した。また、生成  $\alpha$  粒子のエネルギースペクトルは、中性子エネルギーとともに系統的な変化を示すことが明らかとなった。反応断面積に関しては、本結果は Paulsen らの測定結果及び JENDL-3 の評価をほぼ支持することが確認された。

Fe( $n, x\alpha$ ) 反応についても、Ni の場合と同様に運動学的効果がみられ、これを考慮していない ENDF/B-VI のデータでは、実験値を再現できないことがわかった。また ADX, EDX に関して、従来の測定データは本結果と概ね一致したが、 $E_n=9.7\text{MeV}$  における Saraf らの結果は半分程度と非常に小さい。ENDF/B-VI の評価は、ADX の分布形状が異なるものの総じて一致は良好であった。反応断面積に関しては、本結果は Paulsen らの結果と誤差内で一致した。

Cu( $n, \alpha$ ) 反応について、ENDF/B-VI の DDX データは本結果と大きな不一致を示したが、反応断面積に関しては、放射化法によるデータに基づく値及び JENDL-3, ENDF/B-VI の評価値は、本結果と誤差内で一致した。

Cu( $n, p$ ) 反応の場合、 $(n, \alpha)$  とは異なり、本結果で得られた DDX は高エネルギー部に残留核  $^{63}\text{Ni}$  の基底状態に対応するピーク構造を示した。これは、 $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  反応の間で反応機構の違いがあることを示唆する。ENDF/B-VI においてもこの構造が見られるがスペクトル形状の一致は良好ではなかった。それに対し、反応断面積に関しては ENDF/B-VI の値と良く一致した。

## 第 7 章 結 論

本章では、本研究を総括している。

## 審査結果の要旨

高速中性子による荷電粒子放出反応断面積は、高速炉、核融合炉の核設計において、照射損傷や核発熱を評価するために不可欠なデータであるが、実験上の困難のため殆ど測定がなされておらず、それは特にエネルギーと角度に関する二重微分断面積（DDX）について著しい。著者は、核分裂片などの測定に使用されているグリッドチェンバー（GIC）を $\alpha$ 粒子、陽子等の軽荷電粒子放出反応断面積の測定に応用することを着想し、そのためのGICの開発を行い、かつそれを用いて原子炉構造材核種の荷電粒子放出反応断面積の測定を行った。本論文はその経緯を述べたもので全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章ではGICの動作原理を述べ、荷電粒子放出反応断面積の測定にGICを使用することの利点を述べている。

第3章では、第2章で述べたGICの長所を活かす測定システムの開発を(1)GIC本体、(2)検出ガス、(3)真空排気系とガス供給ライン、(4)信号処理とデータ収集系に分けて述べている。14MeVまでの入射中性子によって生成される $\alpha$ 粒子の測定を目的として、耐ガス圧1.3MPaの、電極材料にTa、Wを用いたGICを設計し、Krを主体とする検出ガスの使用およびシールド、リング電極の導入によりバックグラウンドの低減を図り、また検出ガスの純度保持のための排気やチェンバー内にサンプルチェンジャーを設置するなどの新しい工夫を施している。

第4章では開発した検出器に対して行った特性試験について述べている。 $^{241}\text{Am}$   $\alpha$ 線源、 $^6\text{Li}$  ( $n, t$ )  $\alpha$ 反応からのトリトン、 $\text{H}(n, p)$  反応による反跳陽子を用いて、検出器の飽和特性、広範囲の放出エネルギー・角度領域における電荷収集の完全さ、エネルギー分解能および放出角度の導出法、幾何学的検出効率等をデータ処理法を含めて検討し、本GICが荷電粒子放出反応断面積の測定に十分応用可能であるという結果を得ている。

第5章では本GICを測定データのあるNi( $n, p$ )反応断面積の測定に適用し、その結果がJENDL-3、ENDF/B6等の評価値と誤差内で一致することから、本研究の実験方法、データ処理法が妥当であることを検証している。

第6章では本GICを4～14MeVの入射中性子エネルギーに対するNi、Fe、Cuの陽子および $\alpha$ 粒子放出反応断面積の測定に応用し、GICの高効率性により、従来の1/10以下の時間でこれまで殆ど測定例のないDDXの系統的データを新たに提供し得たことを述べている。これは重要な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、高速中性子による荷電粒子放出反応断面積の測定を目的として、新たな着想に基づくグリッドチェンバーを開発し、これを用いてFe、Ni、Cuの二重微分断面積の系統の実験データを新たに取得したもので、原子核工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。