

氏名	なうち やすし	名内 泰志	
授与学位	博士 (工学)		
学位授与年月日	平成 11 年 3 月 25 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項		
研究科、専攻の名称	東北大学工学研究科 (博士課程) 量子エネルギー工学専攻		
学位論文題目	数 10MeV 中性子に対する荷電粒子生成反応に関する実験的研究		
指導教官	東北大学教授 平川 直弘		
論文審査委員	主査 東北大学教授 平川 直弘	東北大学教授 石井 慶造	
	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

### 第 1 章 序論

加速器技術の発達により、中高エネルギー領域での粒子線の応用利用が実施、或は計画されている。これらの粒子線利用では数 10MeV 中性子が直接的或は間接的に発生し、それに伴う中性子誘起核反応の影響として核発熱、粒子線の輸送現象、粒子集積量などが問題となる。こうした影響の評価には中性子による核反応データが重要となり、なかでも荷電粒子生成反応の角度毎のスペクトル、即ち二重微分断面積(DDX)が不可欠である。しかしながら数 10MeV 領域での中性子実験データはほとんど報告されておらず、粒子線利用のマクロ量の解析は、陽子実験等をもとにパラメータを決定した理論計算コードを利用してなされている。

本研究ではこうした理論計算コードの開発と検証に不可欠な(n,xZ)反応 DDX の実験値の取得を目的とし、

1. 系統的なデータ取得に必要な実験手法とデータ解析法を確立する。特に他に例のない前方角度をカバーし、水素、He 同位体スペクトルを 5~80MeV という広帯域で計測する手法の開発に重点をおく。
2. 統計の良い実験データを取得し、最新の理論計算データの現状と課題を明らかにする。

### 第 2 章 核反応データの現状と二次荷電粒子測定手法の検討

第 2 章では数 10MeV 領域での核反応理論と測定実験装置の現状を調査した。その結果水素、He 同位体生成反応は強い前方性が予想されているものの、10° 近辺まで測定したデータはなく、また多種類の二次粒子を広いエネルギー範囲で同時に計測している例はほとんど無いということがわかった。本研究では日本原子力研究所高崎研究所 TIARA の  ${}^7\text{Li}(p,n)$  中性子源を使用し、(n,xZ)反応 DDX の計測を進めるシステムを開発を行う。そして従来計測が困難であった角度、エネルギー領域をカバーするため、1)annular 体系を利用した前方角計測システム、2)三要素検出器テレスコープを使用した広帯域計測システムを開発する。

### 第 3 章 前方角度における二次荷電粒子生成断面積の計測手法の開発

10° 近傍という前方角での測定を可能とする手法として、図 1 に示すような annular 体系を用いた測定法を開発した。これは荷電粒子検出器を 50cm の真鍮製シャドーバーで遮蔽し、円環状サンプルを使用して二次粒子を計測する、という手法で、前方角度の計測が良好なエネルギー分解能と S/N(Signal to Noise ratio)で達成できる。このシステムを用い、 $E_n=64.5, 75\text{MeV}$  に対する炭素とアルミニウムの(n, xp), (n, xd)DDX 計測を実施し、12° という前方角度でのデータを取得した。その 12° 及び一般的な幾何条件で計測した 40° での DDX を図 2 に示す。炭素では、陽子、重陽子共に高エネルギー部で直接反応によるピーク部を有し、高エネルギーほど強い前方性の角度分布をもつ、ということがわかった。アルミニウムの場合、重陽子は炭素同様に高エネルギー側で離散ピークをもつものの、陽子は全体に連続スペクトルを示すことがわかった。本研究での測定結果と核内カスケードモデルコード: ISOBAR, SMD+SMC モデルコード: GNASH、中性子検出器の応答関数計算コードに使用される SCINFUL/DDX の計算値との比較を行い、1)ISOBAR は連続スペクトル部をよく再現する、2)GNASH は(n, xd)反応についてはスペクトルの形状を再現出来ない、等の知見を得た。また本研究の実験データをもとに核データの応用として重要な炭素の陽子及び重陽子 KERMA 係数(Kinetic Energy Released in Material)の導出を行い、この結果、KERMA の導出において、前方角度の高エネルギー側で統計の良いデータを得ることが重要であることがわかった。

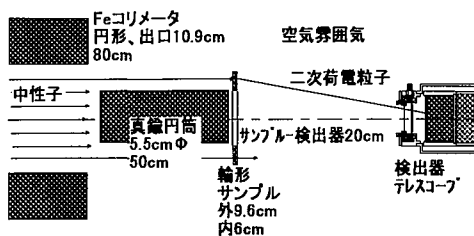


図 1: annular 体系

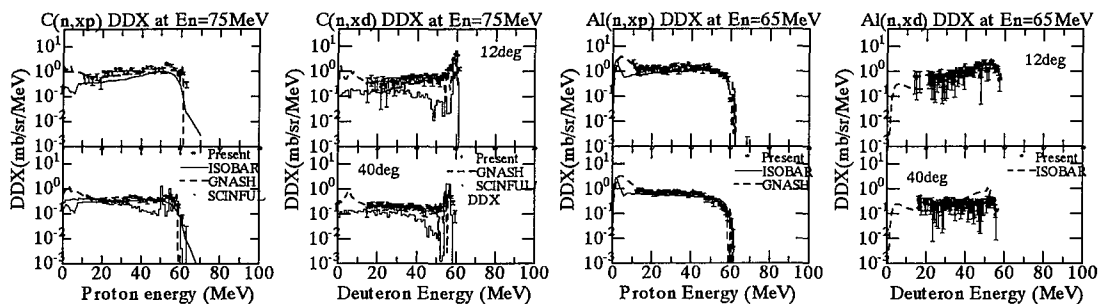


図 2: 炭素、アルミニウムの(n,xp), (n,xd)DDX 計測結果と理論計算値

#### 第 4 章 広帯域スペクトロメータの開発

5~80MeV というエネルギー範囲で水素、He 同位体放出スペクトルを同時に計測する広帯域スペクトロメータの開発を行った。エネルギー損失の大きい低エネルギー $\alpha$ 粒子を計測するために真空チェンバーを使用した。また異種粒子の同時計測では $\Delta E$  検出器の波高のダイナミックレンジが大きいため、ガス比例計数管、半導体検出器(SSD)、BaF<sub>2</sub> シンチレータからなる $\Delta E$ - $\Delta E$ -E 型三要素検出器テレスコープを開発し、18.5MeV 以下の $\alpha$ 粒子についてはガス-SSD 検出器テレスコープ、それ以外の粒子に関しては SSD-BaF<sub>2</sub> 検出器テレスコープで粒子弁別を行うことにした。スペクトロメータの全体図を図 3 に示す。テレスコープ 3 台で同時に三角度のデータを取得し、またテーパ付コリメータ等を使用することで S/N の向上も図った。データ取得回路として CAMAC システムを採用し、3 検出器からの 2 out of 3 coincidence 回路、SSD の 2-ゲイン回路を用意し、Gas-SSD 及び SSD-BaF<sub>2</sub> テレスコープにより粒子弁別を行う計測システムを構築した。75MeV 中性子を用いて行った C(n,xZ)反応断面積計測における広帯域粒子弁別の結果を図 4 に示す。SSD(低 gain)-BaF<sub>2</sub>、SSD(高 Gain)-BaF<sub>2</sub>、ガス検出器-SSD(高 gain)という 3 種類の二次元スペクトルを利用し、全放出エネルギー範囲に亘る水素、ヘリウム同位体の粒子弁別を達成した。またガス検出器の採用によって、

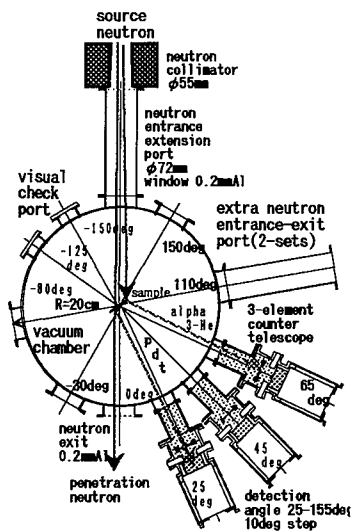


図 3: 広帯域スペクトロメータ全体図

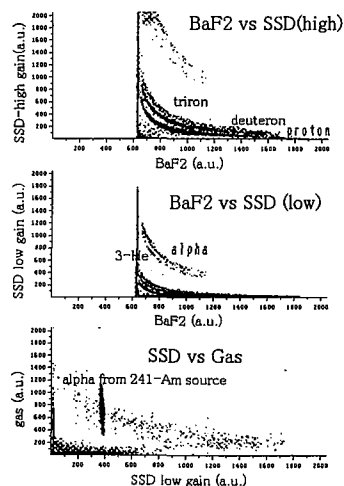


図 4: 三方式による粒子弁別スペクトル

$\alpha$ 粒子の測定下限エネルギーを2.5MeVまで下げた。またテーパ付きコリメータ及び真空チェンバーの利用により、測定のス/Nが3章の計測より5倍程度向上した。さらにC(n,xp)DDXの測定を行い、3章でのデータと矛盾しない結果を得て、本スペクトロメータ及びデータ解析手法の妥当性を総合的に確認した。

### 第5章 荷電粒子計測における逆問題の検討

荷電粒子スペクトル計測ではサンプル内でのエネルギー損失によって測定スペクトルが歪む、という問題があり、薄いサンプルを採用することが要求される。しかし中性子実験では中性子束が小さいので、陽子等低阻止能粒子の計測では統計を得るため厚いサンプルの使用することを強いられる。そこで陽子計測に十分な統計を与える厚さのサンプルを使用し、同時に測定される $\alpha$ 粒子スペクトルに対しては妥当な unfolding 手法を開発してスペクトルを導出することを検討した。まず測定における幾何条件をもとにエネルギー損失を評価し、生成エネルギー  $E_j$  に対し波高  $h_i$  を得る確率=応答関数  $r_{ij}$  を導出した。続いて Bayes 原理に基づく unfolding 法の導入を検討した。Bayes 推定法は、真スペクトル  $p_j(j=1,n)$  と測定スペクトル  $d_i(i=1,m)$  を定義し、真スペクトル  $p_j$  に対する1番目の推定スペクトル  $est_j^{(0)}$  を用意する。測定波高スペクトル  $d_i$  を得た場合、その  $est_j^{(0)}$  を Bayes 原理で繰り返し修正することにより  $est_j \rightarrow p_j$  を期するという手法である。

$$est_j^{(k+1)} = \frac{\sum_i d_i r_{ij} est_j^{(k)}}{\sum_j r_{ij} est_j^{(k)}}$$

真スペクトル(ideal)として  $p_j$  を仮定し、シミュレーション計算で擬似測定スペクトル  $d_i$  を作成して Bayes 推定法による unfolding の性質について調べた。統計量誤差が無視できる場合の unfolding の様子を図5に示す。この結果、Bayes 原理での修正計算を繰り返すことで folded スペクトルから真スペクトルに近い解を推定できることがわかった。また有限の統計誤差が unfolding に与える影響を情報エントロピー量  $\sum est_j \times \log(est_j/p_j)$  を使用して検討した。図6に示すように、統計量が決定された場合 unfolding 解の情報エントロピー量に極大値(最良解)があることがわかった。従って実験データの統計量に応じ修正計算回数を決定することで、情報エントロピー量最大の unfolding 解が得られる可能性のあることがわかった。以上の結果、Bayes 推定法の利用によって厚いサンプルでの実験データからのスペクトル推定が期待出来るようになった。

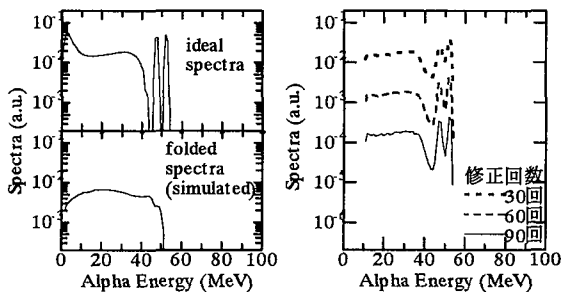


図5: Bayes 法による Unfolding

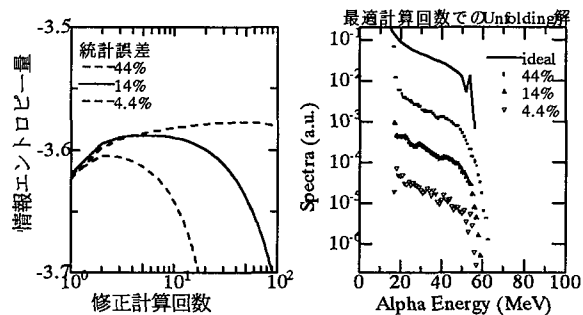


図6: 修正計算回数と情報エントロピー量

### 6章 総括

6章は総括である。中高エネルギー粒子線応用に重要な数10MeV領域における(n,xZ)反応DDXを広い角度、エネルギー範囲で取得するために1)annular体系を利用したシステム、2)真空チェンバーと三要素検出器テレスコープを開発し、炭素、アルミニウムに関しては新しいデータを取得した。また厚いサンプルで計測される $\alpha$ 粒子スペクトルに対しスペクトル型 Bayes 推定法を使用した unfolding 法の適用を検討した。本研究によって開発、実証されたスペクトロメータ及びデータ処理法により、TIARAでの系統的な(n,xZ)DDX計測が促進され、中高エネルギー粒子線応用の発展に資するものと期待される。

## 審査結果の要旨

近年、粒子加速器の開発は目覚ましく、工学、医学、農学等へとその応用の場が拡大しつつある。しかし、実際にこの技術を応用するためには、粒子輸送、核発熱、材料損傷等のいわゆるマクロ量を正しく評価することが必要であり、それらの評価のためにはマイクロデータとしての2次放出粒子の、放出角度毎のエネルギー微分断面積(DDX)が必要である。本研究は数10MeV中性子に対するDDXデータの取得を目的に行った一連の研究結果をまとめたもので全編6章より成る。

第1章は序論である。

第2章では数10MeV領域における中性子核反応データの現状について述べるとともに、特に日本原子力研究所高崎研究所のイオン加速器施設(TIARA)を中性子源として使用することを念頭において開発が必要な実験手法について検討している。

第3章ではDDXの測定に際して通常の幾何学的配置に加えて円環状の試料を採用して前方( $<20^\circ$ )角の計測を行うことにより、S/N比の改善を図り、入射中性子エネルギー64.5及び75MeVにおいて炭素及びアルミニウムを試料として陽子・重陽子生成DDXを測定している。そしてその結果を核内カスケードモデルISOBAR、ロスアラモス国立研究所のGNASH、中性子検出器応答関数計算のために開発されたSCINFUL/DDX等の計算コードによる結果と比較し、ISOBARがC(x,np)反応では高エネルギーの直接過程によるピーク以外の連続領域を、またAl(n,xp)反応では全体的に良く実験データを再現できたことGNASHは陽子の放出反応については良い再現性を見せたが重陽子の生成反応についてはスペクトルを再現できない、等の知見を得ている。また本研究で得られたデータを元にKERMA(Kinetic Energy Released in Material)を導出し、正確なデータを得るためには前方の高エネルギー側で統計の良いデータを得ることが重要なことを指摘している。

第4章では5MeV以下の $\alpha$ 粒子と80MeVの陽子のスペクトルの同時計測を行うことを目的に、低圧力比例計数管、厚さ150 $\mu\text{m}$ の半導体検出器(SSD)、BaF<sub>2</sub>シンチレーション検出器を組合わせた3要素カウンタテレスコープの開発について述べている。そしてテスト測定によって所期の目的が達成できたことを示している。この装置は今後TIARAにおいて荷電粒子DDXの系統的計測を可能とするもので貴重な成果である。

第5章では荷電粒子スペクトル計測において避けることのできない試料内部での粒子のエネルギー損失の補正法に対してスペクトル型ベイズ推定法を初めて具体的に応用し、また統計量と問題の収束性についての定量的考察を行っている。

第6章は総括である。

以上要するに本論文は、加速器の工学的、医学的利用に重要な数10MeV中性子に対する二重微分断面積の測定法に対し、新たな手法を導入したもので、量子エネルギー工学、特に核データ工学の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。