

## 原研高崎研イオン照射研究施設(TIARA)における 核・遮蔽データ測定

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター

中村 尚司

e-mail: nakamura@risun1.cyric.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

TIARA の AVF サイクロトロン第三軽イオン室に  ${}^7\text{Li}(p,n)$  反応を用いた 20~90MeV 領域の準単色中性子場が設置され、遮蔽実験や核データの測定が行える設備と、測定システムが整備された。このような設備は諸外国にも殆ど無いユニークなものである。

平成4年度からは、5年計画で大学・原研プロジェクト共同研究として「加速器施設遮蔽基礎データに関する研究」が始まり、さらに平成5~7年度の3年間は科学研究費総合研究(A)「高エネルギー粒子線の物質内挙動と輸送現象に関する研究(代表者中村尚司)」が行われ、大学側から東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター(中村グループ)、東北大学工学部原子核工学科(馬場グループ)、東京大学原子核研究所(柴田グループ)、京都大学工学部原子核工学科(秦グループ)、高エネルギー物理学研究所(平山グループ)、原研側から東海研究所粒子線利用研究室、高崎研究所放射線高度利用推進室が参加して精力的な幅広い研究が行われた。この成果は、科学研究費総合研究(A)研究成果報告書(1996年3月)にまとめられているが、ここではそのうち次の5つの研究についてその概略をのべる。

- (1) 準単色中性子場の特性評価
- (2) コンクリート及び鉄遮蔽体透過実験
- (3) 中性子放射化断面積の測定
- (4) 荷電粒子生成二重微分断面積の測定
- (5) 荷電粒子による厚いターゲットからの中性子生成量

### 2. 準単色中性子場の特性評価

図1にTIARAのLCビームラインコースに設置された準単色中性子実験設備の断面図を示す。サイクロトロンからの陽子ビームはサイクロトロン室内  ${}^7\text{Li}$  ターゲットに入射される。 ${}^7\text{Li}$  ターゲットの厚さは陽子エネルギー40~90MeV に対し、3.2~6.6mmの間で陽子エネルギー損失が2MeV位になるように選んで、交換出来るようになっている。タ

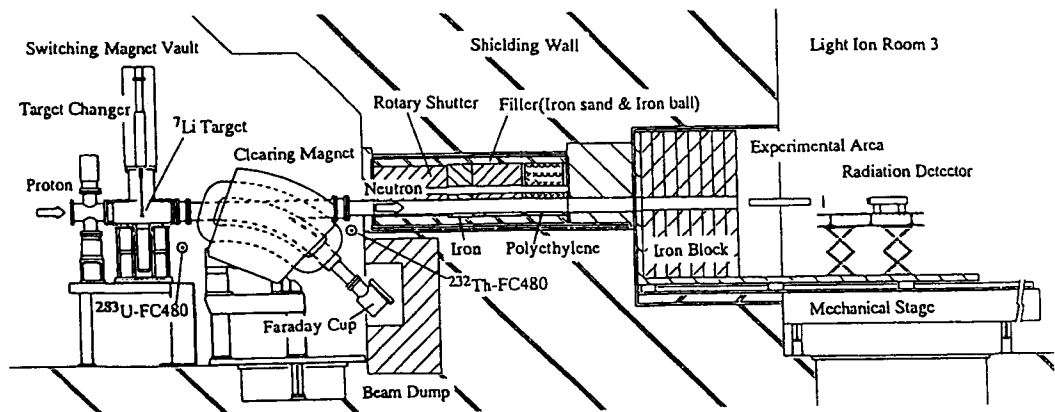


図1 準単色中性子実験設備断面図

ターゲットを通りぬけた陽子はクリアリング磁石で下方に曲げられ、ビームダンプに捨てられる。前方に放出された中性子だけが、厚さ 3.4m のコンクリート壁内のコリメータ(直径 11cm)を通して実験室に導かれる。コンクリート壁には 120cm×120cm の大きさで 120cm の深さの遮蔽実験孔があげられている。コリメータは鉄及びポリエチレンから成るロータリシャッタ (159cm 長) とその前後の鉄遮蔽体 (61cm 厚) から成っている。

この中性子場の中性子強度は図 2 に示す反跳陽子カウンタテレスコープ(PRT)で測定し、中性子スペクトルは 12.7cm 直径、12.7cm 長の BC501A 有機液体シンチレータを用

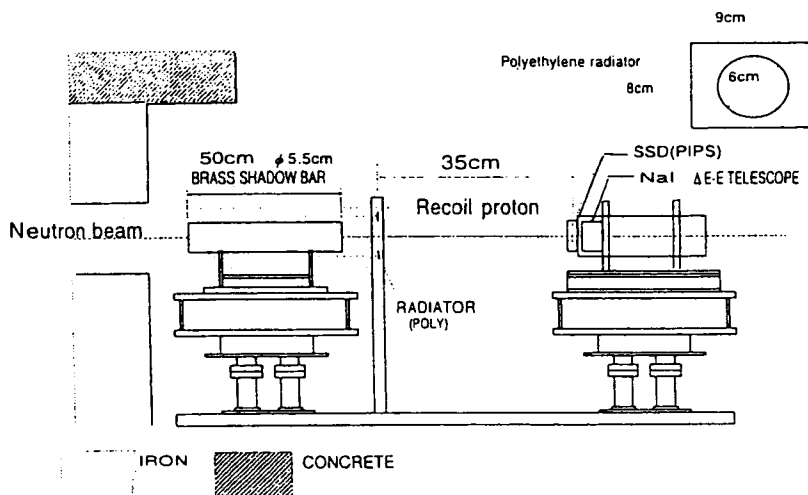


図2 PRT による中性子強度測定配置図

いて TOF 法により測定した。また様々な実験における中性子強度をモニターするために、 $^{232}\text{Th}$  と  $^{238}\text{U}$  の核分裂計数管を図 1 に示す位置に置き、PRT の計数值との対応をとることによって値付けを行った。従って各実験中の線源中性子強度は陽子ビームカレントと核分裂計数管のカウント数から算出される。

図 3 に陽子エネルギー 43, 58, 67, 87MeV の場合に PRT と BC501A で測定した中性子スペクトルを比較している。PRT によって 15MeV 位、BC501A によって 5MeV 位までのスペクトルが得られている。BC501A のデータは PRT のデータに規格化している。両者の結果はピーク部、連続部とも全体的に良く一致しているが、87MeV 陽子の PRT データの 60MeV 付近に BC501A データに無いピークが見られる。これは陽子が PRT のアパチャを部分的に通過したことによる陽子成分であることが分かった。連続部分の中性子スペクトルも線源スペクトルとして必要であり、これは Li の多体崩壊過程で放出される

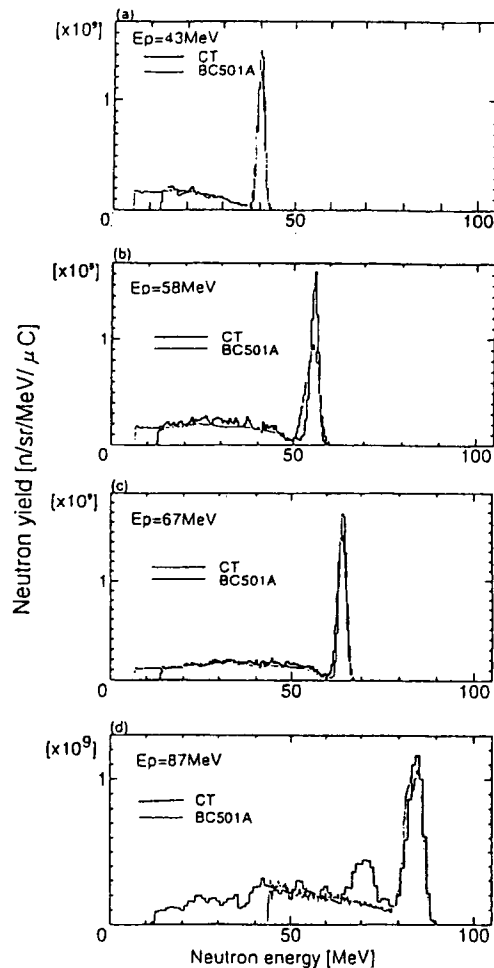


図 3 PRT と BC501A による  $^7\text{Li}(p,n)$  中性子スペクトル測定値

表 1  ${}^7\text{Li}(p,n)$ 中性子源のピーク収量

Ep [MeV]	En [MeV]	$\Delta E_n$ [MeV] *	$Y_n$ [ $n \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{C}^{-1}$ ]
43 (45)	40.1	3.0	$3.46 \times 10^9$ ( $\pm 3.4\%$ )
48 (50)	45.5	3.0	$2.70 \times 10^9$ ( $\pm 3.2\%$ )
58 (60)	56.0	3.0	$4.45 \times 10^9$ ( $\pm 3.5\%$ )
67 (70)	64.5	3.0	$4.82 \times 10^9$ ( $\pm 3.9\%$ )
87 (90)	84.6	5.5	$6.35 \times 10^9$ (6.2%)

\*FWHM 値

中性子と考えられ、位相空間分布で表すことによって評価した。この計算値は実験値をうまく再現した。表 1 にこの中性子場の単色ピーク中性子収量を示す。

### 3. コンクリート及び鉄遮蔽体透過実験

40 及び 65MeV 準単色中性子ビームを用いて図 1 に示す遮蔽実験孔でコンクリート及び鉄遮蔽体透過実験を行った。コンクリート及び鉄遮蔽体の大きさは 120cm×120cm であり、厚さはコンクリートは 25cm から 200cm まで、鉄は 10cm から 130cm まで変えている。中性子スペクトロメータとして、12.7cm 直径×12.7cm 長の BC501A シンチレータ、5.08cm 直径の球形  ${}^3\text{He}$  検出器( ${}^3\text{He}$ 10 気圧)を内蔵するポリエチレン減速材付検出器(ボナーボール)を用い、この他に  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{232}\text{Th}$  核分裂計数管、レムカウンタ、固体飛跡検出器、熱蛍光線量計の積分型検出器を用いて、遮蔽体後面に密着させて測定した。測定は、中性子ビーム軸上及びビーム軸から 20cm 及び 40cm 横方向にずらしたオフセンターの位置で行った。

このうち、BC501A 及びボナーボールで測定された中性子スペクトルを MORSE-CG、DOT3.5、HETC-KFA2 による計算値と比較した結果についてのみ述べる。BC501A による測定値は、TIARA 等での実験により得られた応答関数を用いて、FERDOU コードでアンフォールディングされ、ボナーボールによる測定値は計算により得られた応答関数を用いて SAND-2 コードでアンフォールディングされ、スペクトルを得ている。

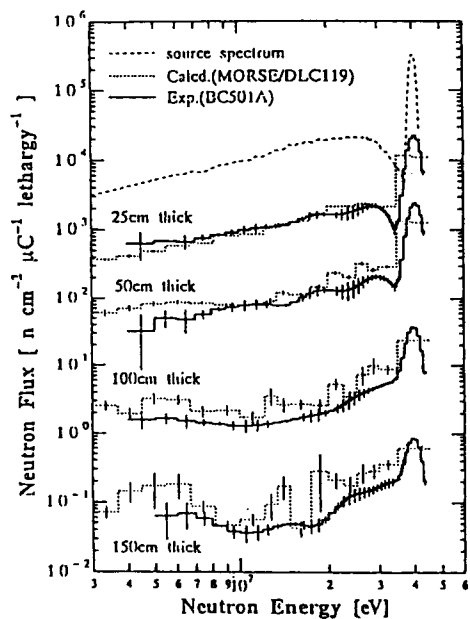
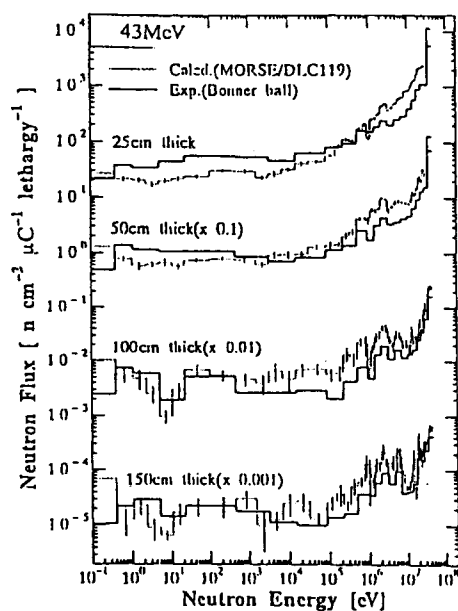


図4 43MeV  $p^{-7}\text{Li}$  中性子のコンクリート透過スペクトル (ビーム軸上)

(左) ボナーボール測定値と MORSE 計算値の比較

(右) BC501A 測定値と MORSE 計算値の比較

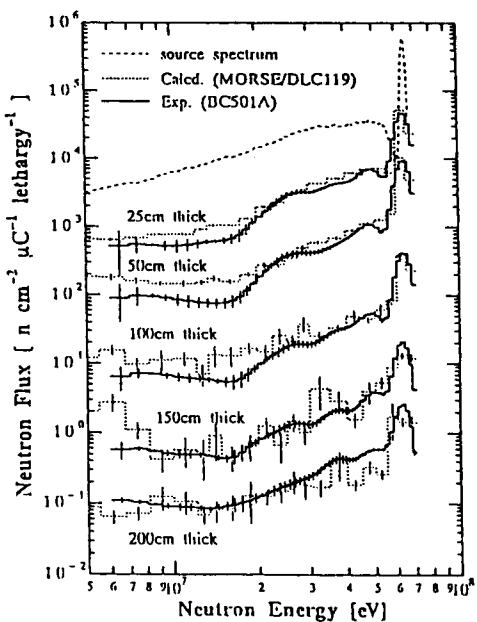
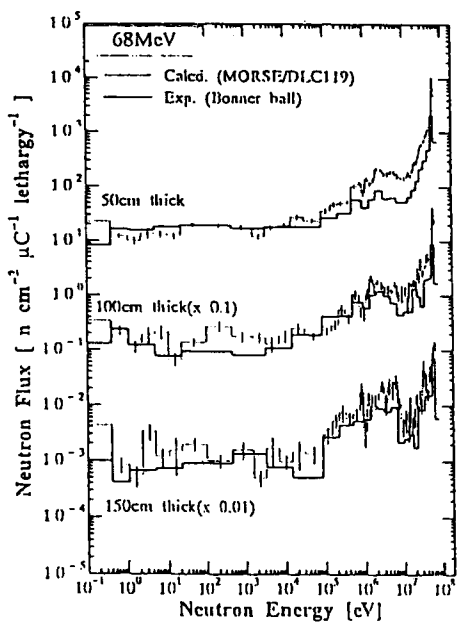


図5 68MeV  $p^{-7}\text{Li}$  中性子のコンクリート透過スペクトル (ビーム軸上)

(左) ボナーボール測定値と MORSE 計算値の比較

(右) BC501A 測定値と MORSE 計算値の比較

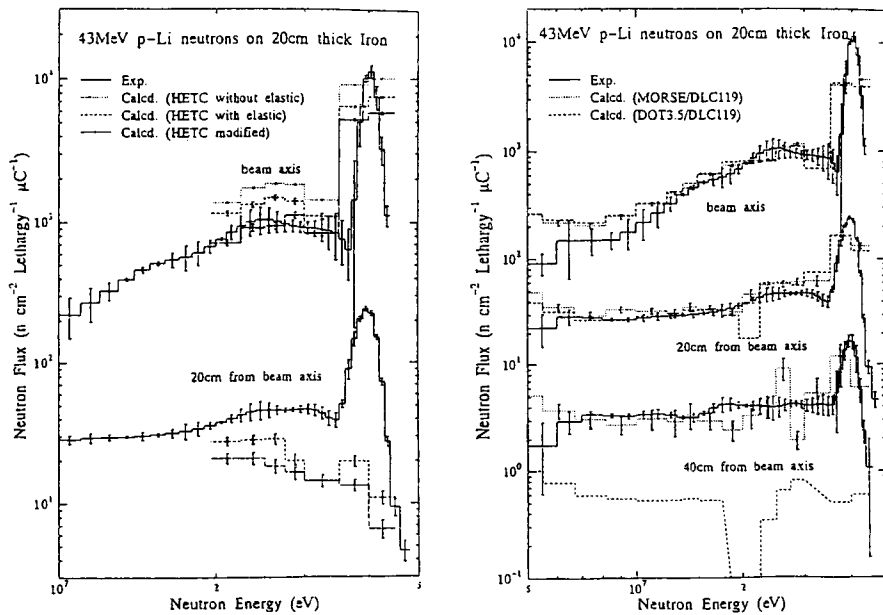


図6 43MeV p-Li 中性子の 20cm 厚鉄透過後のスペクトル  
 軸上及び 20cm、40cm オフセンターの位置  
 (左) MORSE、DOT3.5 計算値との比較  
 (右) HETC 計算値との比較

図4、図5にそれぞれ40MeV( $E_p=43\text{MeV}$ )及び65MeV( $E_p=68\text{MeV}$ )の準単色中性子のコンクリート遮蔽体透過後のスペクトルを示す。右側のグラフはBC501Aの測定値を、左側のグラフはポナーボールの測定値を、それぞれDLC119/HILO86群定数セットを用いてMORSE-CGコードで計算した値と比較している。全般的に見て実験値と計算値とは良く一致しているといえるが、詳細に見ると、厚さが薄い時のポナーボールの1MeV以上のスペクトルが計算値より過小評価になっていることが分かる。鉄遮蔽実験の場合も測定値とMORSEの計算値は全般的によく一致していた。ただし65MeV中性子の100cm厚の鉄透過後のポナーボールによるスペクトルは計算値より約5倍近い過大評価となった。オフセンターでの実験値の例として、43MeV p-Li 中性子の20cm厚鉄透過後のBC501Aのデータを各種計算値(MORSE、DOT、HETC)と比べたグラフを図6に示す。図よりMORSE計算値は実験値をうまく再現しているが、DOT計算値はビーム軸から40cm離れた点で大きく過小評価し、HETCも20cm離れた点で同じく大きく過小評価している。DOTの過小評価は計算に用いた $S_{\theta}$ 離散角度分点が粗すぎたことによると結論

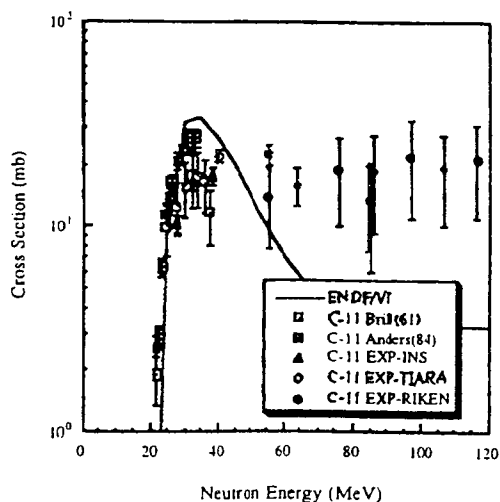


図7  $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$  反応断面積測定値の他の実験値と ENDF/B-VI との比較

される。また HETC では弾性散乱を考慮した取り扱い(with elastic)や、核内カスケード過程における疑似イベントを近似する修正をした(modified)計算も行っているが、多少の改善は見られるもののまだかなりの実験値との不一致がある。これは、HETC-KFA2 で用いられている弾性散乱の角度分布の前方性が大きすぎるためと思われる。

#### 4. 中性子放射化断面積の測定

中性子放射化断面積の測定は、東大核研(INS)の SF サイクロトロンで 20~40MeV、TIARA で、40~90MeV、理研のリングサイクロトロンで 80~210MeV のエネルギー領域で行っている。これまでに照射した試料は C, Al, Co, Cu, Bi の 5 つであり、照射試料から放出される  $\gamma$  線を Ge 検出器で測定し、そのエネルギーと半減期から核種を同定し、試料の自己吸収やサム・コインシデンス効果の補正を行って反応率を算出している。反応率と図 3 に示す中性子スペクトルから反応断面積が求められるが、単色ピーク以下の連続中性子成分からの寄与は、20MeV 以下で断面積データが十分評価されている場合はそれ (ENDF/B-VI 及び McLane らのデータ) を使い、データのないものは自分達の実験値のより低い中性子エネルギーの結果を内挿して用いた。

現在までに得られた結果のうち、 $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$  反応断面積を図 7 に、 $^{209}\text{Bi}(n,Xn)$  反応断面積を図 8 に示す。図には他の実験値及び ENDF/B-VI の高エネルギーファイルにある評価値も載せている。 $^{12}\text{C}(n,2n)$  反応断面積の実験値は 40MeV 以下では、これまでの実験値が約 30mb の高い値と約 20mb の低い値に二分されていたが、我々の実験値は低い方の値を支持した。また 40MeV から 120MeV の高エネルギー領域で約 20mb のほぼ一定値を示

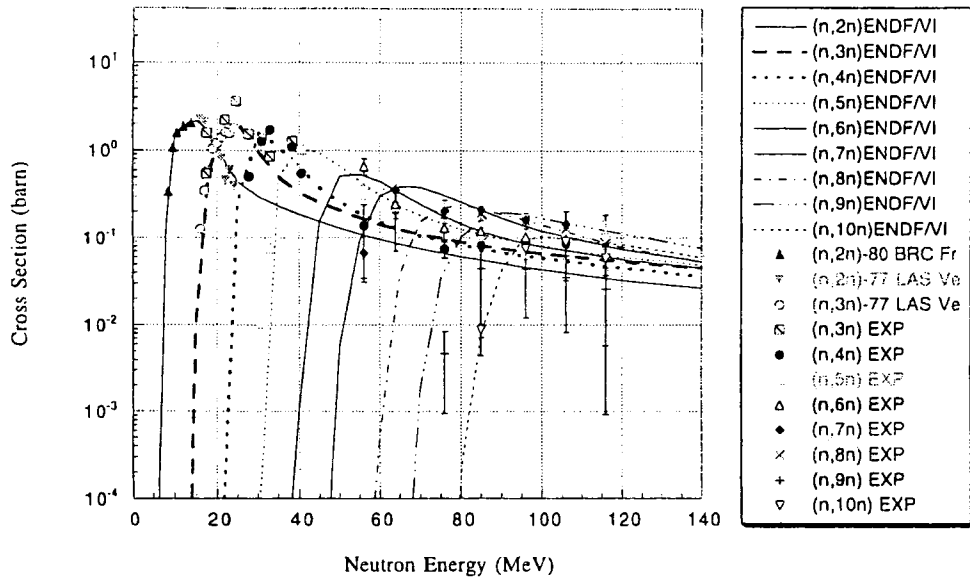


図8  $^{209}\text{Bi}(n,Xn)$ 反応断面積測定値の他の実験値と ENDF/B-VI との比較

し、ENDF/B-VIの計算値と大きく違っている。我々の結果はこれまで高エネルギー加速器の放射線防護の分野で広く用いられてきた20mb（陽子入射による実験値）という値に一致した。 $^{209}\text{Bi}(n,Xn)$ 反応の断面積の実験値は現在(n,3n)反応から(n,12n)まで得られており、図8には(n,10n)まで示しているが、(n,9n)反応を除いて深堀によりALICEコードで計算されたENDF/B-VIの値と非常に良く一致している。この計算は陽子入射の実験値をもとにパラメータを算出して、それを用いて中性子入射に対して行ったものであるが、極めて良い一致を示すことから高エネルギーでは陽子と中性子による反応の差が少ないことを示しているのであろう。 $^{209}\text{Bi}(n,9n)$ 反応の断面積は $^{209}\text{Bi}$ の628.5keVの $\gamma$ 線測定から求めたが、この分岐比(51%であるとの報告があるが出典不明)が分からないので100%とした。また $^{209}\text{Bi}$ から $^{208}\text{Bi}$ への壊変も含まれているがこの分岐比もよく分かっていない。この二つの分岐比の違いから計算値と実験値の差が説明出来るものと考えている。



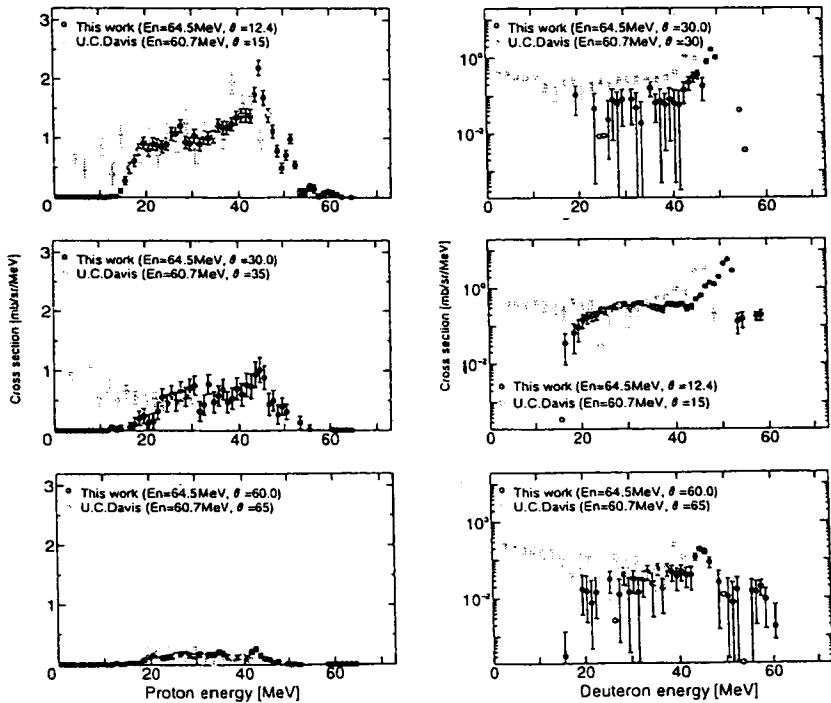


図9 65MeV 準単色中性子に対する C(n,Xp), (n,Xd)反応の二重微分断面積測定値 U.C.Davis との比較

## 5. 荷電粒子生成二重微分断面積の測定

図2に示したPRTを用いて、40, 65MeV 準単色中性子による C(n,Xp), C(n,Xd)反応の二重微分断面積を測定した。試料は 8cmx9cm の黒鉛板で厚さは 0.3mm( $E_n=40\text{MeV}$ ), 0.5mm( $E_n=65\text{MeV}$ )である。図9に  $E_n=65\text{MeV}$  に対する C(n,Xp), C(n,Xd)反応の荷電粒子放出角度 12.4 度, 30 度, 60 度における微分断面積を示す。参考のために U.C.Davis での  $E_n=60\text{MeV}$  での結果も示す。両者は全生成量、構造とも概ね良い一致を示した。高エネルギー領域では離散準位の励起が見られ、低エネルギー領域では連続スペクトルとなっている。また高エネルギー領域のスペクトルは角度とともに運動論に従って低エネルギー側にシフトしている。この連続部分の解析のために、位相空間分布モデル(重心系等を仮定)及び INCA コード( $\alpha$ クラスター性を取り入れた核内カスケード反応モデル)による計算値とを比較した。結果を図10に示すが、陽子生成反応では位相空間モデルは前方角ほど過小評価を与え、強い角度依存性を再現できない。また INCA コードは前方では実験値を良く再現するが、後方角では過小評価となる。重陽子生成反応についても、位相空間モデルは実験値をうまく再現できない。

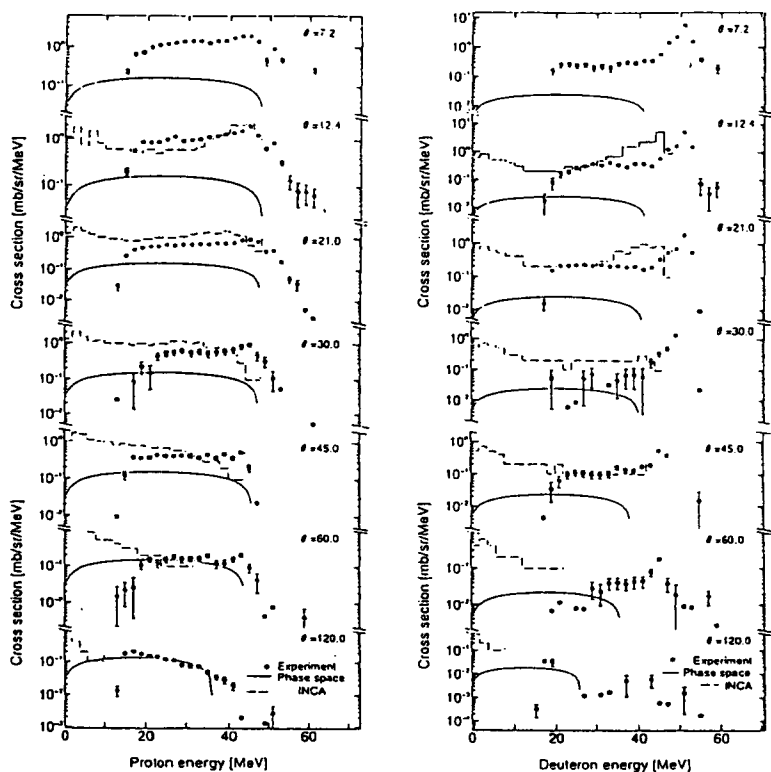


図 10 65MeV 準単色中性子に対する C(n,Xp)、(n,Xd)反応断面積測定値の位相空間分布と INCA による計算値との比較

## 6. 荷電粒子による厚いターゲットからの中性子生成量

本実験だけは準単色中性子ビームコースではなく重イオンコース(HB-1)で行った。図 11 に実験概要図を示す。表 2 に実験に用いた入射粒子とターゲットの組み合わせを示す。入射粒子を真空散乱槽に設置したビームを完全に吸収する厚いターゲットに当てて、生成された中性子のスペクトルを図 11 に示す各角度において、BC501A シンチレータを用いて TOF 法により測定した。室内散乱に起因するバックグラウンド中性子成分は、 $20 \times 20 \times 40 \text{cm}^3$  の鉄製シャドーバーをターゲットと検出器の間においた測定で評価し差し引いた。得られた測定値の例として、図 12、図 13 にそれぞれ陽子 68MeV、 $\alpha$  粒子 100MeV を厚い C ターゲットに入射した時の中性子スペクトルを示す。この結果は、NMTC/JAERI コードに媒質効果を考慮した核子・核子散乱断面積を用いる、改良型 ISOBAR オプションによる計算値及び量子分子動学的モデルに基づく QMD コードに統計的崩壊モデ

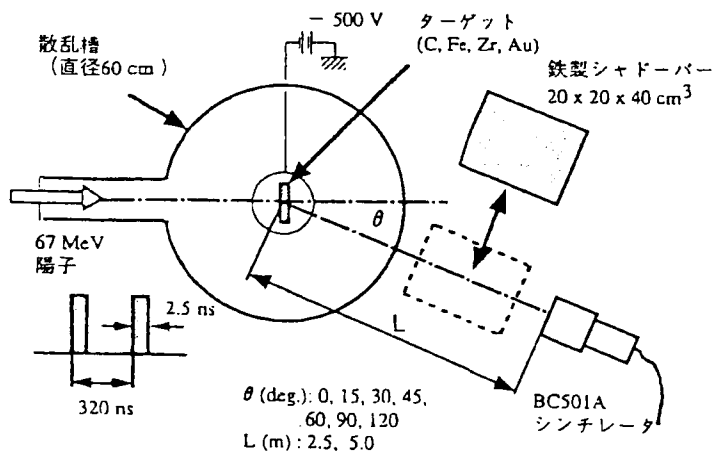


図 11 中性子スペクトル測定概要図

ルを加えた計算値と比較している。NMTC/JAERI コードは  $\alpha$  粒子の計算が出来ないので陽子入射のみ計算している。図 12 の陽子入射の場合、QMD 計算値は 40MeV 以上の高エネルギー領域で数倍程の過大評価を与えるが、それ以下では実験値をかなりよく再現している。NMTC/JAERI 計算値は特に前方で過小評価となっているが、後方では実験値とかなり良く一致している。図 13 の  $\alpha$  粒子入射の場合は、QMD の計算値は陽子入射の場合と比べてスペクトルの形が実験値よりも軟らかくなりすぎている。

表 2 入射粒子とターゲット核種の組み合わせ

入射粒子	入射粒子エネルギー	ターゲット	ターゲット寸法
p	68 MeV	C	直径30 mm、長さ 31 mm
		Au	直径30 mm、長さ 6.0 mm
α	100 MeV	C	直径30 mm、長さ 3.2 mm
		Fe	直径30 mm、長さ 1.3 mm
		Zr	直径30 mm、長さ 1.8 mm
		Au	直径30 mm、長さ 2.0 mm
C	220 MeV	C	直径30 mm、長さ 3.2 mm
		Fe	直径30 mm、長さ 1.3 mm
		Zr	直径30 mm、長さ 1.8 mm

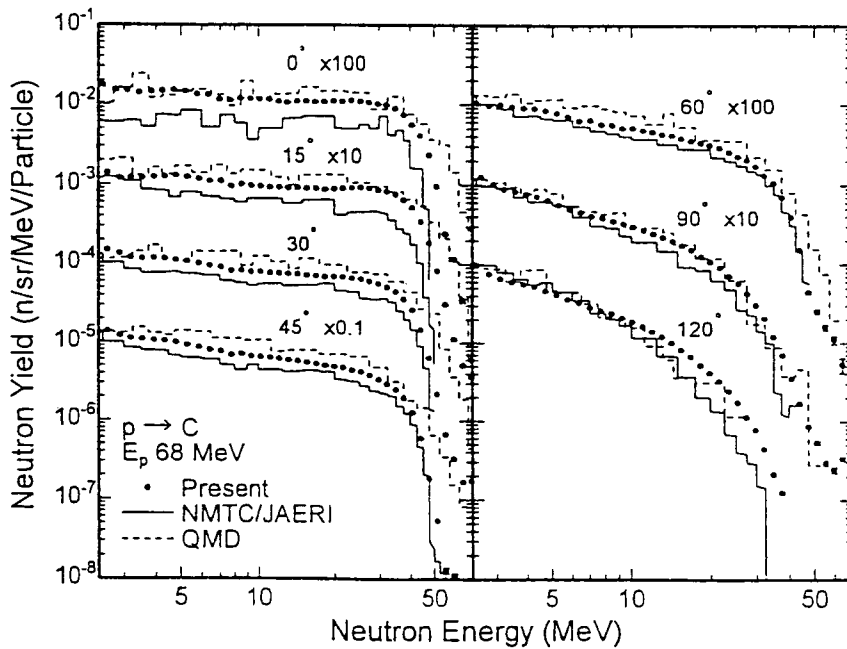


図 12 68MeV 陽子を厚いCターゲットに入射した時の中性子スペクトル—NMTC/JAERI.

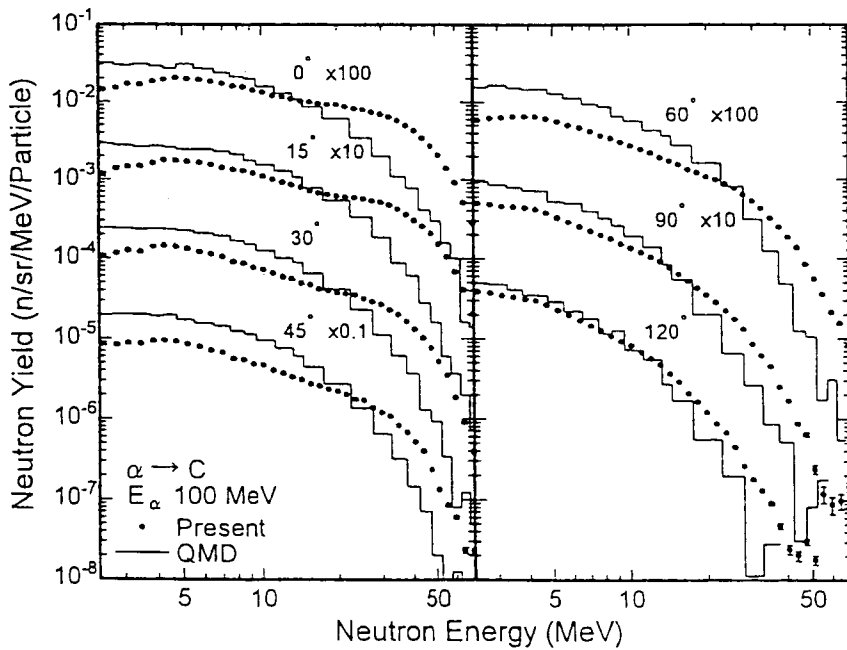


図 13 100MeV  $\alpha$ 粒子を厚いCターゲットに入射した時の中性子スペクトル—QMD 計算

## 7. おわりに

ここではプロジェクト共同研究により得られた成果のほんの一部の概要を述べただけであり、既に論文として公表又は公表予定のものも沢山ある。本文では参考文献も一切省略しており、より詳しい情報は最初に述べた科学研究費総合研究(A)の研究成果報告書に書かれているので、この報告書の入手を希望される方は是非筆者まで連絡されたい。連絡先は次の通りである。

Tel 022-217-7805～7808

FAX 022-217-7809

E-mail nakamura@risun1.cyric.tohoku.ac.jp

## 謝辞

この共同研究に参加されている諸氏すべてに感謝の意を表したい。