

## 東工大における高速中性子実験用 $\gamma$ 線検出器システムの整備

(東京工業大原子炉工学研究所) 井頭 政之

### 1. はじめに

高速中性子断面積は原子力利用の高度化のために重要な核データである。また、他分野に於いても、例えば、keV領域の中性子捕獲断面積は宇宙初期および星の中での元素合成の研究に重要である。現在、これらの断面積の大部分はJENDL-3等の核データ・ライブラリに整備・格納されている。しかし、超ウラン元素(TRU)及び核分裂生成物(FP)の消滅処理等の先端的研究目的のためには、格納されている核種が充分とは言えない。また、実験データの欠如あるいは不足が原因で、格納されている評価データの一部分は信頼性が乏しいのが現状である。従って、これらの核データを精度良く測定することは、原子力開発研究におけるブレーク・スルーのためには非常に重要であると考えられる。

さて、中性子核反応の際に放出される $\gamma$ 線を精度良く測定することにより、捕獲断面積をはじめ種々の断面積を測定することが可能である。我々はこれまで実験装置の改良を重ねた結果、例えば軽い核のkeV中性子部分捕獲断面積については、 $\mu\text{b}$ オーダーの測定が可能になった。しかし、我々の $\gamma$ 線検出器のエネルギー分解能および検出効率の限界のため、残留核のレベル間隔が狭い場合には $\gamma$ 線遷移が同定できなかつたり、弱い遷移に対しては統計が不十分であつたりした。そこで我々は今回、より精度の良い高速中性子実験を行うために、これまで使用した $\gamma$ 線検出器(表1)と比較して、検出効率が数倍でGe検出器相当のエネルギー分解能を有する $\gamma$ 線検出器系を設計・制作したので、以下にその概要を述べる。

### 2. $\gamma$ 線検出器系の構成

一種類の検出器で上記の性能を満たすものは現存しないので、図1及び表1に示す様に、本システムを高分解能 $\gamma$ 線検出器系と高効率 $\gamma$ 線検出器系の2系統で構成することとした。2系統の検出器系を同時に使用すれば、高分解能・高効率を確保するだけではなく、測定用試料に入射する中性子に対して異なった角度で同時に $\gamma$ 線を測定することによって、角度分布の情報も一度に得ることができる。高分解能検出器として高純度Ge検出器を採用した。以下、この検出器系をGe系と略する。このGe検出器の仕様はエネルギー分解能2.2keV以下、相対検出効率100%以上で市販のものでは最大級のものである。波高スペクトルの解析を容易にするため、コンプトン除去用のNaI(Tl)検出器で囲ってある。高効率検出器としてはNaI(Tl)検出器を採用し、結晶寸法を152mm $\phi$ ×203mmとし、エネルギー分解能の仕様を8.5%以下とした。以下、この検出器系をNaI系と略す。Ge系と同様、コンプトン除去用の大型NaI(Tl)検出器で囲ってある。

高速中性子実験では、バックグラウンドの遮蔽が非常に重要である。このため、各々の検出器系

用に、鉛、カドミウム、ホウ酸入りパラフィンあるいはボロン入りポリエチレン、及び ${}^6\text{LiH}$ から構成される重遮蔽体(図1)を設計・製作した。 $\gamma$ 線コリメータ内の ${}^6\text{LiH}$ は、測定用試料で散乱された中性子を遮蔽するためのもので、keV領域の中性子実験ではSN比向上のために非常に効果がある。尚、Ge系用遮蔽体の鉛には低バックグラウンド仕様のもを用い、自然バックグラウンドを極力抑えている。

検出器が納められた各々の重遮蔽体はゴニオメータの動径方向台車の上に設置され、また、この台車はゴニオメータの角度方向台車の上に置かれている。各々の角度方向台車は、測定用試料の位置を軸として(図1)、試料に入射する中性子の方向に対して $-125^\circ \sim 125^\circ$ の範囲を動くことができ、また、各動径方向台車は角度方向台車の上を直線的に約1mの範囲を前後することができる。このゴニオメータによって、各 $\gamma$ 線検出器系の測定角度及び位置の設定を容易に行うことができる。

### 3. データ収集・処理システム

新 $\gamma$ 線検出器システムの性能を十分に発揮させるためには、このシステム及び中性子実験の際に同時に用いる中性子検出器等からの多数の出力信号を適切な速度で収集できるデータ収集装置が必要である。現在準備しているデータ収集・処理装置は、図2に示す様に4台のワークステーション(WS; SUN社のSPARCシリーズでオペレーションシステムはUNIX)と独立した2系統のデータ収集用インタフェースから構成されている。データ収集系を独立2系統に分割した理由は、片方が故障の場合でも、最低限のデータ収集が他方でできるようにするためである。データ収集ポート#1~#5は2あるいは3パラメータのデータ収集用であり、ポート#6は1パラメータ用である。ポート#1及び#4~#6のデータは、ADCから、CAMACデータウェイ、VMEバス、及びSバス(SUNのバス)を経由してWSに取り込まれる。ポート#2及び#3は高計数率用であり、CAMACデータウェイは省略される。ここに用いるVME規格のヒストグラムメモリは4MBでインテリジェント機能を持っており、WSの手を煩わすことなく、1Kチャンネル×1Kチャンネル程度の2次元ヒストグラムを作成することができる。このヒストグラムメモリを使いこなすには多少の時間を要するかもしれないが、32MBメモリの製造計画のこともあり、将来性に期待をかけている。尚、図に示されているように、オンラインあるいはオフラインでデータを処理するためのWS及びデータ収集・処理プログラム開発用のWSも各1台用意されている。

### 4. 特性試験結果

本検出器システムの特性試験を、標準 $\gamma$ 線源( ${}^{137}\text{Cs}$ 、 ${}^{60}\text{Co}$ 、 ${}^{88}\text{Y}$ 等)及び ${}^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 並びに ${}^{27}\text{Al}(p, \gamma)$ 、 ${}^{28}\text{Si}$ の共鳴反応を用いて、0.5~10.7MeVの $\gamma$ 線エネルギー範囲で行った。主要な結果を表1に示す。

1. 3.3MeVに於けるGe検出器のエネルギー分解能は1.86keVであり、仕様よりか

なり良い結果を得た。また、NaI系の主検出器のエネルギー分解能も7.0%と、仕様及び旧システムのものよりも良い結果を得た。全エネルギー・ピーク検出効率についての結果は、旧システムの1.33 MeV  $\gamma$ 線に対する検出効率 ( $8.0 \times 10^{-5}$ ) に対する比として表1に示されている。Ge系が旧システムとほぼ同じ検出効率を1~10 MeVの範囲で有していることが分かるが、これは、中性子及び $\gamma$ 線の遮蔽効果を中性子- $\gamma$ 線結合輸送計算によって検討し、更にこれまでの中性子実験の経験を基にして、Ge系用遮蔽体を可能な限りコンパクトに設計・製作し、表1に示した検出器の相対立体角を旧システムの1.9倍に増加させた結果である。NaI系は、旧システムの5倍(1.33 MeV)~10倍(10.7 MeV)の検出効率があり、この値は相対立体角(2.3)よりかなり大きな値となっている。これは、主検出器の直径が152 mmであるのに対してコリメータの直径が110 mmと小さく、僅かではあるがコリメータ・ビーム・ジオメトリになっていること、及び主検出器の寸法が直径並びに長さ共に旧システムよりも大きくなったことにより、入射 $\gamma$ 線の検出器内での多重散乱の効果が増大し、全エネルギー・ピークを形成する割合が旧システムの場合よりも増大した結果である。

図3にNaI系でコンプトン除去を行った場合(実線)と行わない場合(破線)の比較を示す。 $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 反応からの $\gamma$ 線を測定した例で、6.1及び7.1 MeVの $\gamma$ 線が観測されている。コンプトン除去を行わないと、全エネルギー・ピークの他に、シングル・エスケープ・ピーク、ダブル・エスケープ・ピーク、及びコンプトン連続部分が重畳して複雑な波高分布を形成していることが分かる。尚、7.1 MeVのダブル・エスケープ・ピークは6.1 MeVの全エネルギー・ピークと完全に重なっている。コンプトン除去を行うと、ダブル・エスケープ・ピークはほとんど完全に除去され、シングル・エスケープ・ピーク及びコンプトン連続部分もかなり抑えられ、全エネルギー・ピークが強調された単純な波高分布となっている。この比較から、コンプトン除去を行うと波高分布の解析が非常に容易になることが分かる。次に、同じ $\gamma$ 線をGe系で測定した結果を図4に示す。コンプトン除去を行った場合で、高エネルギー部分の波高分布のみを拡大して示している。尚、NaI系の場合と測定時間は異なっている。図が分かる様に、実は、7.1 MeV  $\gamma$ 線はドップラー効果によって約100 keVの幅に広がっており、また、6.1 MeV  $\gamma$ 線も低エネルギー側にドップラー効果が原因と思われるテイルが存在している。この様に、NaI系では観測出来ない現象も、エネルギー分解能の優れたGe検出器で測定すれば観測可能になることもある。

## 5. 高速中性子実験の計画

我々は中性子発生用加速器として、これまで3UH-HCベロトロン(米国nec社製のバン・デ・グラーフ型加速器で、最高加速電圧は3MV)を使用してきたが、今回、このイオン源、nsパルス化装置、及び加速管も更新した。旧パルス化装置では最高繰返し周波数が2MHzであり、この時の平均陽子ビーム電流は10~15  $\mu\text{A}$ であった。今回の更新では、2MHzで平均電流30  $\mu\text{A}$ 、更に、追加した4MHzのオプションで45  $\mu\text{A}$ を狙っている。これによ

て、パルス中性子源の強度が2～3倍に増加する予定である。現在、調整中であるが、近々、目標性能が達成されるものと期待している。

我々のこれまでの高速中性子実験と比較すると、 $\gamma$ 線検出器システムの検出効率が5～10倍になり、陽子ビーム電流が2～3倍になるので、SN比が同じと仮定すると、検出感度は10～30倍になる。更に、Ge系によって、エネルギーに関する詳細な情報を得ることができる。従って、これまでと同程度の測定用試料を用いれば、例えばkeV中性子部分捕獲断面積は、レベル密度の混んでいない軽核については100nb程度まで、一般の軽・中重核については1 $\mu$ b程度まで測定可能となる。また逆に、中重核について、ある単色 $\gamma$ 線の生成断面積が例えば10mbと仮定すると、 $10^{-3}$ mol程度(質量数が100とすると100mg)の試料でこの $\gamma$ 線を測定することが可能となる。このことは、高価で入手しにくい同位体分離した試料、気体の試料、及び放射性の試料についての測定を行なう際に非常に有利である。

以上の状況を踏まえて、我々はまず、軽・中重核のkeV中性子(部分及び全)捕獲断面積の精密測定及びFP領域核のしきいエネルギー付近での非弾性散乱断面積の精密測定を行なう計画である。並行して、 $^{14}\text{C}$ 及びTRU等の放射性核種のkeV中性子捕獲断面積測定技術の開発も行い、近い将来にこれらの断面積測定にチャレンジしたいと思っている。また、物質核変換の視点から、反応で発生する $\gamma$ 線を測定することにより、種々の断面積測定を積極的に行なうつもりである。更に、ペレットの強力nsパルス化ビーム(p、d、及び $\alpha$ がパルス化可能)を用いて、種々の断面積測定も行なう予定であり、例えば、 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応断面積測定の準備を理学部・永井研究室と共同で現在行なっている。

今回の報告では触れなかったが、我々の中性子実験室の45°ビーム・ライン(上記のシステムは30°ラインに設置してある)に、永井研究室が更に高検出効率の $\gamma$ 線検出器システムを今年度末に設置する予定である。測定角度は125°固定で、コンプトン除去は行なっていないが(プラスチック検出器で囲んであり、宇宙線は除去できる)、4台の大型NaI(Tl)検出器と遮蔽体からなり、検出効率は今回報告したシステムの約20倍になる見込みである。レベル密度の混んでいない軽核のkeV中性子捕獲断面積の測定には極めて優れた性能を発揮するものと期待している。

## 6. おわりに

以上の様に、我々は高速中性子実験を中心として、種々の実験を積極的に行なうつもりである。しかし、我々は小さなグループであり、マン・パワー及び予算等も不足しており、また放射性元素の取扱等の経験も少ない。また、今後予定している実験では、測定用試料の調達及び調整が極めて重要と予想され、その分野の方々の御協力を仰ぐ必要がある。各方面の方々の御協力をこの場を借りてお願いする次第である。

表1 高速中性子実験用 $\gamma$ 線検出器システムの構成及び性能等

	今回整備した $\gamma$ 線検出器システム		旧 $\gamma$ 線検出器システム
	高分解能 $\gamma$ 線検出器系	高効率 $\gamma$ 線検出器系	
主検出器	高純度Ge	NaI(Tl)	NaI(Tl)
結晶寸法	79mm $\phi$ ×89mm	152mm $\phi$ ×203mm	76mm $\phi$ ×152mm
光電子増倍管		5インチ×1	3インチ×1
エネルギー分解能 <sup>a</sup>	1.86keV(2.2keV)	7.0%(8.5%)	8.0%
相対検出効率 <sup>b</sup>	100.7%(100%)		
コンプトン除去用検出器	NaI(Tl)	NaI(Tl)	NaI(Tl)
結晶寸法 <sup>c</sup>	254(112) $\phi$ ×305 ;90(38) $\phi$ ×100	330(172) $\phi$ ×356	254(96) $\phi$ ×280
光電子増倍管	2インチ×8;0.75インチ×4	2インチ×10	3インチ×4
エネルギー分解能 <sup>d</sup>	7.0%(10%);9.1%(15%)	8.3%(10%)	約13%
重遮蔽体	有	有	有
コリメータ直径	95mm	110mm	65mm
試料~主検出器 <sup>e</sup>	約700mm	約900mm	約800mm
相対立体角 <sup>f</sup>	1.9	2.3	1
軽遮蔽体 <sup>g</sup>	有	無	無
コリメータ直径	95mm		
試料~主検出器 <sup>e</sup>	約400mm		
相対立体角 <sup>f</sup>	5.9		
検出効率 <sup>h</sup>			
@1.33MeV	1.0	5.1	1.0(基準)
@10.7MeV	0.19	2.7	0.25
時間分解能 <sup>i</sup>	約8ns	約5ns	4.0ns
中性子源~試料 <sup>j</sup>	240mm/120mm		152mm/81mm
試料最大直径	90mm		60mm

- a : Geについては1.33MeV $\gamma$ 線に対する半値幅、NaI(Tl)については0.662MeV $\gamma$ 線に対する半値幅。実測値と(仕様値)。  
 b : 1.33MeV $\gamma$ 線の全エネルギー・ピーク検出効率で、76mm $\phi$ ×76mmのNaI(Tl)検出器に対する相対値。実測値と(仕様値)。  
 c : 単位はmmで、括弧内は内径を示す。図1に示されている様に、高分解能 $\gamma$ 線検出器系のコンプトン除去用検出器は2台ある。  
 d : 0.662MeV $\gamma$ 線に対する半値幅。実測値と(仕様値)。  
 e : 中性子実験の際の、測定用試料中心から主検出器前面までの距離。  
 f : 中性子実験の際の、測定用試料中心から主検出器を見たときの立体角。鉛コリメータで隠れた部分は立体角に入れていない。旧システムに対する立体角を1としている。  
 g : コンプトン除去を行わない場合に使用する遮蔽体で、非常にコンパクトに設計されている。  
 h : 重遮蔽体を使用して中性子実験を行う際の全エネルギー・ピーク検出効率で、旧システムの1.33MeV $\gamma$ 線に対する検出効率( $8.0 \times 10^{-5}$ )に対する比で示してある。  
 i : 中性子実験の際の、システムとしての時間分解能。旧システムに対しては実測値が示されているが、新システムに対しては(現在行っている特性試験からの)予測値が示されている。  
 j : 中性子実験の際の、中性子源中心から試料中心までの距離。システムの時間分解能の関係から、中性子エネルギーによって距離を変える。

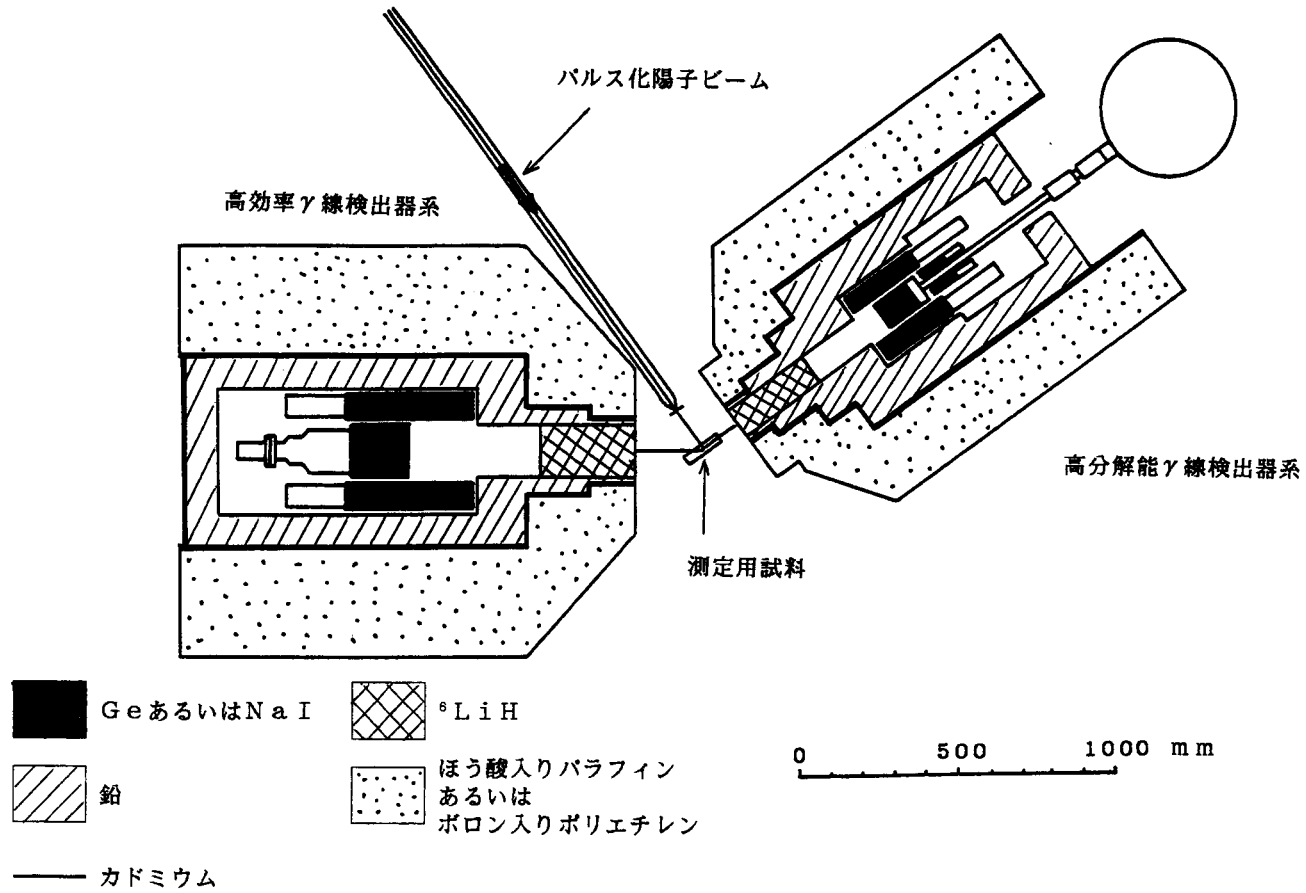
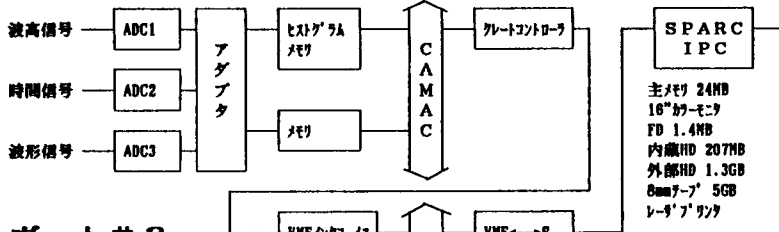
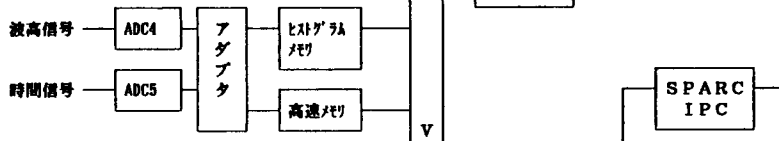


図1 新γ線検出器システムを用いた高速中性子実験の配置略図

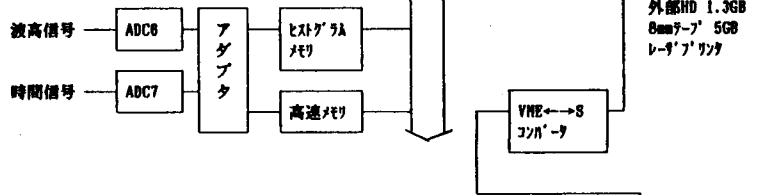
ポート # 1



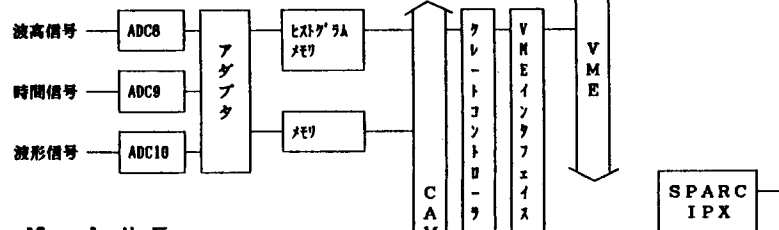
ポート # 2



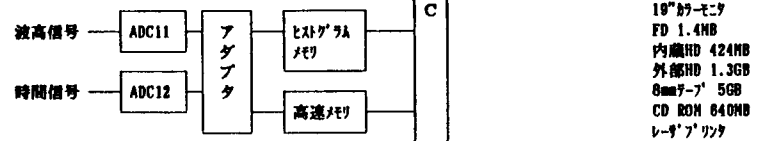
ポート # 3



ポート # 4



ポート # 5



ポート # 6

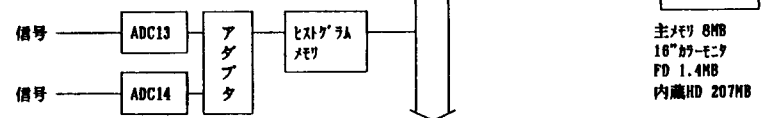


図2 データ収集・処理装置の概略図

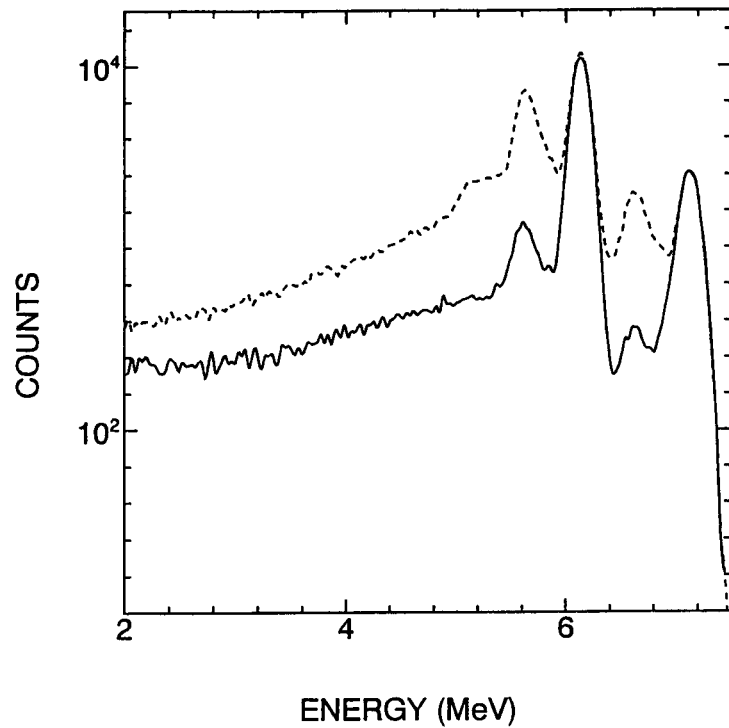


図3  $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$  共鳴反応からの  $\gamma$  線を測定して得られた波高分布。NaI系で測定した場合で、コンプトン除去を行った場合（実線）と行わなかった場合（破線）。

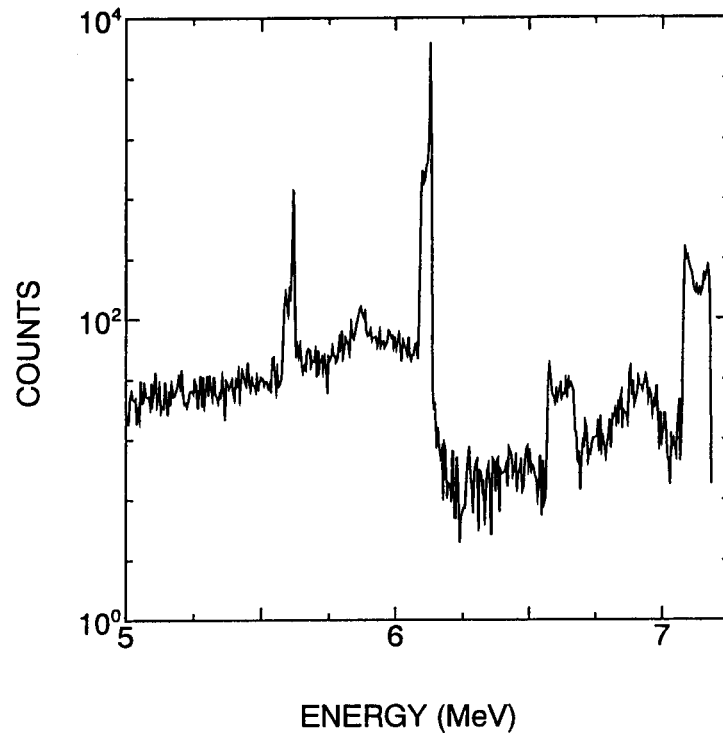


図4  $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$  共鳴反応からの  $\gamma$  線を測定して得られた波高分布。Ge系で測定した場合で、コンプトン除去を行っている。