

JAERI - M
90-169

マグネシウムとシリコンのガンマ線生成核データの測定

1990年10月

井頭 政之^{*}・北沢日出男^{*}

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division,
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行　日本原子力研究所
印　　刷　(株)原子力資料サービス

マグネシウムとシリコンのガンマ線生成核データの測定

日本原子力研究所東海研究所物理部

井頭 政之*・北沢日出男*

(1990年9月3日受理)

東京工業大学原子炉工学研究所の3UH-HCペレトロン加速器とコンプトン抑止型 NaI(Tl) ガンマ線検出器を用いて、マグネシウムとシリコンの中性子捕獲ガンマ線スペクトルを測定した。入射中性子エネルギー範囲は、マグネシウムの場合、32～56 keV, 58～141 keV 及び 430 ± 30 keV であり、シリコンの場合は、50～110 keV, 110～210 keV 及び 520 ± 40 keV であった。実験で得られた捕獲ガンマ線波高分布を検出器の応答行列を用いてアンフォールディングすることにより、捕獲ガンマ線スペクトルを得た。シリコンの入射中性子エネルギー 50～110 keV 及び 520 ± 40 keV の測定結果を、原子核の統計模型に基づく計算結果と比較した。計算は、入射中性子エネルギー 520 ± 40 keV の実験をかなり再現できた。

本報告は、日本原子力研究所が東京工業大学に委託して行った研究の成果である。

東海研究所：〒319-11 挨城県那珂郡東海村白方字白根 2-4

*東京工業大学

Measurements of Gamma-ray Production Nuclear Data of
Magnesium and Silicon

Masayuki IGASHIRA^{*} and Hideo KITAZAWA^{*}

Department of Physics
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 3, 1990)

Neutron capture gamma-ray spectra of magnesium and silicon have been measured, using the 3UH-HC Pelletron accelerator and an anti-Compton NaI(Tl) gamma-ray detector of the Research Laboratory for Nuclear Reactors in the Tokyo institute of Technology. Incident neutron energy regions were 32~56 keV, 58~141 keV, and 430±30 keV for magnesium, and 50~110 keV, 110~210 keV, and 520±40 keV for silicon. Measured capture gamma-ray pulse-height spectra were unfolded to obtain capture gamma-ray spectra, using a response matrix of the detector. The experimental results of silicon at the neutron energy of 50~110 keV and 520±40 keV were compared with calculated ones based on a statistical model of the nuclei. At the neutron energy of 520±40 keV, the calculated spectrum is in considerable agreement with the observed one.

Keywords: Neutron Capture Gamma-ray Spectrum, keV Neutron, Magnesium, Silicon, NaI(Tl) Detector

This work was performed under contracts between Japan Atomic Energy Research Institute and Tokyo Institute of Technology.

* Tokyo Institute of Technology

目 次

1.はじめに	1
2.実験方法	2
3.データ処理	3
4.結果及び考察	3
4.1 測定結果	3
4.1.1 Mgの測定結果	4
4.1.2 Siの測定結果	5
4.2 統計模型による理論計算との比較	6
5.おわりに	6
謝辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental procedure	2
3. Data processing	3
4. Results and discussion	3
4.1 Experimental results	3
4.1.1 Experimental results for Mg	4
4.1.2 Experimental results for Si	5
4.2 Comparison with theoretical calculations on a statistical model	6
5. Conclusions	6
Acknowledgement	7
References	7

1. はじめに

中性子核反応によるガンマ線生成核データは、核分裂炉や核融合炉の核熱設計、ガンマ線遮蔽計算、及びガンマ線損傷の評価のために要求されている。高速炉や核融合炉のブランケットでは、隣接する炉心部から漏れてくるガンマ線、又は、そこで発生するガンマ線によって加熱されるが、このガンマ線加熱は熱出力の評価に対して欠くことのできないものである。ガンマ線による発生熱量を評価するためには、ガンマ線の強度及びスペクトルの詳細な知識が必要になる。

現在、これらのデータはPOPOP4(米国)やENDF/B-IV(米国)等のガンマ線生成核データ・ライブラリから取られているが、多くの核種に対して、収納されているデータと最近の測定値との間に食い違いが見られている。そこで、わが国においては、 10^{-5} eVから20 MeVまでの中性子に対する信頼性の高い評価済みガンマ線生成核データを日本の最新核データ・ライブラリ JENDL-3 (Japanese Evaluated Nuclear Data Library-3) に収納するため、昭和54年にシグマ委員会内にガンマ線生成核データ評価ワーキング・グループを設置し、高速炉や核融合炉において重要な24元素を選び評価作業を行ってきた。本研究の対象元素であるマグネシウム(Mg)とシリコン(Si)もそれらの中に含まれている。MgとSiは原子炉及び核融合炉の構造材で、それらの核データは重要なものと考えられる。

一般に、ガンマ線を発生させる中性子核反応は二種類に大別される。即ち、ガンマ線のみ放出する中性子放射捕獲反応、及び粒子とガンマ線の両方を放出する反応(例えば、 $(n, n' \gamma)$ 反応等)である。入射中性子エネルギー領域で対応させると、通常の原子核においては、 $E_n < 1$ MeVでは主に中性子放射捕獲反応によってガンマ線が発生し、 $E_n > 1$ MeVでは主に $(n, n' \gamma)$ 及び $(n, 2n \gamma)$ 反応によってガンマ線が発生する。

現在のガンマ線生成に関する測定データを見ると、 $E_n > 1$ MeVの領域では、軽核から重核までの20数核種についてかなり信頼性の高いデータが存在し¹⁾、これらが上記の評価作業の基礎データとなっている。一方、 $E_n < 1$ MeVの領域では、熱中性子領域を除けば、基礎データに成り得る信頼性の高い測定データは重核領域に偏っている²⁻⁴⁾。これは、軽・中重核においては、このエネルギー領域の捕獲断面積が小さく、測定が容易でないことによる。(ここで、捕獲断面積が小さいという意味は、重核よりも小さいという意味であり、原子核工学的に重要でないという意味ではない。)即ち、現在において最も不足しているガンマ線生成核データは、軽・中重核における信頼性の高いkeV領域中性子捕獲ガンマ線データである。この様な状況において、本研究では、keV中性子領域におけるMgとSiの捕獲ガンマ線スペクトルを測定し、これらの核データを提供することを主な目的とした。

測定は大別して二種類行われた。即ち、

- (a) $E_n \leq 200$ keV の入射中性子エネルギー領域に於ける測定。
- (b) $E_n = 500$ keV 付近の入射中性子エネルギーに於ける測定。

である。全ての測定は、東京工業大学原子炉工学研究所の広領域線質放射線照射実験室に設置されているペレトロン加速器を用いて行われた。以後、(a)を連続中性子を用いた測定、(b)を単色中性子を用いた測定と簡略化して呼ぶことがある。

2. 実験方法

ここでは実験の概要、測定用試料、及び測定を行った入射中性子領域について述べる。実験装置及び実験方法の詳細、即ちパルス中性子源、ガンマ線検出器の遮蔽体、ガンマ線検出器とその特性、及び測定回路系等については参考文献(5)に詳しく述べられているので割愛する。

実験は全て東京工業大学原子炉工学研究所の広領域線質放射線照射実験室で行なわれた。中性子捕獲ガンマ線測定の際の実験配置略図をFig. 1に示す。当実験室に設置されているペレトロン粒子加速装置（ペレトロンと略す）によって加速されたパルス陽子ビーム（パルス幅約1.5ns、繰り返し周波数2MHz）は、真空排気されたビーム延長管中を飛行し、キャバシティップ・ピックオフ（capacitive pick off）を通過し（パルス陽子ビームが通過するときに電気信号を発生し、この信号がパルス実験の時間基準となる）、延長管終端に取りつけられているリチウムターゲット（Li-target）に入射する。そして、リチウムターゲット内で、このパルス陽子ビームによる $^7\text{Li}(\text{p},\text{n})^7\text{Be}$ 反応によって、パルス化された中性子が発生する。中性子は、リチウムターゲットの下流（陽子ビームの流れに対して）約8cm或は15cmに置かれた測定用試料に入射し、試料中の原子核と(n,n)反応や(n, γ)反応等を起こす。 (n,γ) 反応から発生したガンマ線は、入射中性子に対して125°方向、試料から約80cmに置かれた7.6cm $\phi \times$ 15.2cmのNaI(Tl)検出器（A）で測定される。この検出器は、周りをコンプトン除去用大型環状NaI(Tl)検出器（B）で囲われており、anti-Compton spectrometerとして使用される。又、この検出器は、ホウ酸入りパラフィン、カドミウム、鉛、及び ^6LiH で構成されている重遮蔽体内に設置されており、実験室内の中性子及びガンマ線のバック・グランドから遮蔽されている。尚、 $E_n=500\text{keV}$ の単色中性子を用いた測定では、試料に入射する中性子の数及びエネルギー・スペクトルは、陽子ビームに対して-45°方向でリチウムターゲットから約1mの位置に置かれた ^6Li -ガラス・シンチレーション検出器及び7°方向で約5mの位置に置かれた ^6Li -ガラス・シンチレーション検出器によって、夫々、モニターされる。連続中性子を用いた測定では、-45°方向の中性子検出器のみ用いられる。

捕獲ガンマ線の波高分布と飛行時間（TOF）スペクトルは、両方共、512チャネルで測定された。波高は約25keV/ch、TOFは約0.35 ns/chで測定した。イベント・レコーディング（Event Recording）の様に全データを磁気テープ等に書き出せば、512×512の二次元測定も行なうことができるが、本実験では、データ取り込み用プログラムによってTOFデータに四つのデジタル・ウインドウ（Digital Window）を設けて、データを512×4の二次元に縮約してミニ・コンピュータの本体メモリーに取り込んだ。

捕獲ガンマ線測定用試料としては、天然の純度99.9%以上の金属マグネシウム及び純度99.99%以上のシリコン結晶を用いた。形状は共に直径60mmの円盤で、厚さはMgの場合が6mm或は8mm、Siの場合が15mm或は27mmである。これらの試料の諸元をTable 1に示す。この表から分かる様に、Mgから発生する捕獲ガンマ線は主に $^{24}\text{Mg}(n,\gamma)^{25}\text{Mg}$ 反応からのものであり、Siからの捕獲ガンマ線は主に $^{28}\text{Si}(n,\gamma)^{29}\text{Si}$ 反応からのものである。

測定は、MgとSiの両方について各々3箇所の入射中性子エネルギー領域で行われた。即ち、Mgの実験では①32～56keV、②58～141keV、及び③430±30keVで、Siの実験では①50～110keV、②110～210keV、及び③520±40keVである。MgとSi共に①～②の測定は、これらのエネルギー領域を全てカバーできるような連続中性子を発生させて一度行った。また、③の領域の測定は（準）単色の中性子を用いて行った。これらの測定条件をTable 2に示す。

3. データ処理

データ処理の詳細は参考文献(5)に述べられているので、ここでは概要のみを述べる。

Fig. 2 と Fig. 3 に、各中性子エネルギー領域において Mg の測定を行った際に得られたガンマ線検出器の TOF スペクトルを示す。Fig. 2 が $E_n \leq 200\text{keV}$ の測定の場合で、Fig. 3 が $E_n = 430\text{keV}$ の測定の場合である。(Si の場合も同様な TOF スペクトルが得られる。) 4 個のデジタル・ウインドウ (DW1~4) はそれぞれ図中のように設定された。Fig. 2 の DW1 と DW2 が前に述べた入射中性子エネルギー領域①と②にそれぞれ対応する。時間軸は右から左へと逆方向になっている。図中の A はほとんど時間に依存しないバック・グランド部分であり、B + Cあるいは $B_i + C_i$ ($i = 1, 2$) が目的とする (n, γ) 反応からの信号を含む部分 (フォア・グランド) である。すなわち、A の部分に設定された DW はバック・グランド測定用で、B + C の部分に設定された DW はフォア・グランド測定用である。例として Mg の中性子エネルギー 58~141 keV 領域の場合のフォア・グランドとバック・グランドを Fig. 4 に示す。Fig. 3 中の D の部分は、リチウムターゲットの $^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ 反応から発生したガンマ線によるものである。実験によっては、フォア・グランドの部分に $^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ 反応からのガンマ線の漏れ込みが生じたので、それを評価するために設けられた。正味の捕獲ガンマ線波高スペクトルを、Mg を例にとり、Fig. 5 から Fig. 7 に示す。

捕獲ガンマ線波高スペクトルをアンフォールディングして捕獲ガンマ線スペクトルを求める際、本研究では実際の測定に使用したガンマ線検出器の応答関数⁵⁾を用いて、計算コード F E R D O R⁶⁾を用いて行った。こうして得られた捕獲ガンマ線スペクトル $\nu(E\gamma)$ は最終的には次式によって規格化され、 γ rays/M e V/capture 単位で与えられた。

$$\int E\gamma\nu(E\gamma) dE\gamma = Bn + En \quad (3-1)$$

ここで、 $E\gamma$ はガンマ線エネルギー、 Bn は標的核の (平均) 中性子結合エネルギー、及び En は入射中性子エネルギーで、単位は全て M e V である。尚、得られた捕獲ガンマ線スペクトルの誤差として、統計誤差、ガンマ線検出器の検出効率の誤差、及びアンフォールディングの際に発生する誤差を考慮した。

4. 結果及び考察

4. 1 測定結果

Mg と Si の中性子捕獲ガンマ線スペクトルの測定結果を Fig. 8 ~ 13 に示す。Fig. 8 ~ 10 が Mg の結果で、Fig. 11 ~ 13 が Si の結果である。又、一中性子捕獲反応当たりに放出されるガンマ線数、即ちマルチプライシティ (multiplicity)、を Table 3 に示す。表中の値は、(3-1) 式で規格化されたスペクトル、即ち図で示したスペクトルの面積から求めた。

図中に示されている多数のラインは、 ^{25}Mg あるいは ^{29}Si の準位である。標的核の同位体の中で大部分を占めるのは、Mg の場合 ^{24}Mg であり Si の場合 ^{28}Si である。これらの核種の (n, γ) 反応から

3. データ処理

データ処理の詳細は参考文献(5)に述べられているので、ここでは概要のみを述べる。

Fig. 2 と Fig. 3 に、各中性子エネルギー領域において Mg の測定を行った際に得られたガンマ線検出器の TOF スペクトルを示す。Fig. 2 が $E_n \leq 200 \text{ keV}$ の測定の場合で、Fig. 3 が $E_n = 430 \text{ keV}$ の測定の場合である。(Si の場合も同様な TOF スペクトルが得られる。) 4 個のデジタル・ウインドウ (DW1~4) はそれぞれ図中のように設定された。Fig. 2 の DW1 と DW2 が前に述べた入射中性子エネルギー領域①と②にそれぞれ対応する。時間軸は右から左へと逆方向になっている。図中の A はほとんど時間に依存しないバック・グランド部分であり、B + Cあるいは $B_i + C_i$ ($i = 1, 2$) が目的とする (n, γ) 反応からの信号を含む部分 (フォア・グランド) である。すなわち、A の部分に設定された DW はバック・グランド測定用で、B + C の部分に設定された DW はフォア・グランド測定用である。例として Mg の中性子エネルギー 58~141 keV 領域の場合のフォア・グランドとバック・グランドを Fig. 4 に示す。Fig. 3 中の D の部分は、リチウム-ターゲットの $^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ 反応から発生したガンマ線によるものである。実験によっては、フォア・グランドの部分に $^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ 反応からのガンマ線の漏れ込みが生じたので、それを評価するために設けられた。正味の捕獲ガンマ線波高スペクトルを、Mg を例にとり、Fig. 5 から Fig. 7 に示す。

捕獲ガンマ線波高スペクトルをアンフォールディングして捕獲ガンマ線スペクトルを求める際、本研究では実際の測定に使用したガンマ線検出器の応答関数⁵⁾を用いて、計算コード F E R D O R⁶⁾を用いて行った。こうして得られた捕獲ガンマ線スペクトル $\nu(E\gamma)$ は最終的には次式によって規格化され、 $\gamma \text{ rays/MeV/capture}$ 単位で与えられた。

$$\int E\gamma\nu(E\gamma) dE\gamma = Bn + En \quad (3-1)$$

ここで、 $E\gamma$ はガンマ線エネルギー、 Bn は標的核の (平均) 中性子結合エネルギー、及び En は入射中性子エネルギーで、単位は全て MeV である。尚、得られた捕獲ガンマ線スペクトルの誤差として、統計誤差、ガンマ線検出器の検出効率の誤差、及びアンフォールディングの際に発生する誤差を考慮した。

4. 結果及び考察

4. 1 測定結果

Mg と Si の中性子捕獲ガンマ線スペクトルの測定結果を Fig. 8 ~ 13 に示す。Fig. 8 ~ 10 が Mg の結果で、Fig. 11 ~ 13 が Si の結果である。又、一中性子捕獲反応当たりに放出されるガンマ線数、即ちマルチプライシティ (multiplicity)、を Table 3 に示す。表中の値は、(3-1) 式で規格化されたスペクトル、即ち図で示したスペクトルの面積から求めた。

図中に示されている多数のラインは、 ^{25}Mg あるいは ^{29}Si の準位である。標的核の同位体の中で大部分を占めるのは、Mg の場合 ^{24}Mg であり Si の場合 ^{28}Si である。これらの核種の (n, γ) 反応から

^{25}Mg 及び ^{29}Si が生成される。 ^{25}Mg 及び ^{29}Si のレベル・スキーム⁷⁾をFig. 1-4に示す。捕獲ガンマ線スペクトルはガンマ線エネルギー0.8MeV以上の範囲で得られた。(0.8MeV以下の部分は、正味の波高スペクトルを参考にして外挿して得た。) 得られたスペクトルの誤差は、特にスペクトル強度の弱い部分を除いて、10~30%程度である。以下に、MgとSiに分けて、スペクトルの特徴について述べる。それぞれ、入射中性子エネルギーの低い方から順に説明する。なお、以下の文中に述べられている共鳴に関するデータは、Mughabghab et al.の評価⁸⁾から引用している。また、捕獲状態をc.s. (capture state)と略し、基底状態、第1励起状態、第2励起状態をそれぞれgnd.、1st.、2nd.のように略す。更に、例えばc.s.からgnd.への遷移をc.s.→gnd.と略記する。

4. 1. 1 Mgの測定結果

4. 1. 1. 1 32~56keV領域

この領域には、 ^{24}Mg の中性子共鳴として、46.35keV $d_{3/2}$ 波共鳴1個だけが知られている。図から分かる様に、 ^{24}Mg の低エネルギー準位への遷移に対応する幾つかのピークが観測されている。ガンマ線エネルギー7.4MeV付近のピークは、c.s.から ^{24}Mg のgnd. ($5/2^+$)への遷移によるガンマ線によって形成され、6.8MeV付近のピークは、c.s.から1st. (0.585MeV $1/2^+$)への遷移によるガンマ線によって形成されている。また、4.8MeV付近のピークは、c.s.から5th. (2.564MeV $1/2^+$)への遷移によるガンマ線によって形成されている。低エネルギー領域には、カスケード・ガンマ線によって形成されたと考えられる複雑な構造が観測されている。なお、0.6MeV付近の強いピークは ^{25}Mg の1st.からgnd.へのカスケード・ガンマ線であり、正味の波高スペクトルを参考にして評価した。8MeV以上の弱いピークは ^{25}Mg (同位体存在比: 10%、中性子結合エネルギー: 11.1MeV) の中性子捕獲ガンマ線と考えられる。

4. 1. 1. 2 58~141keV領域

この領域には、 ^{24}Mg の中性子共鳴として、83.50keV $p_{3/2}$ 波共鳴が1個だけ知られている。中性子エネルギー32~56keV領域のスペクトルと比較すると、c.s.から ^{25}Mg のgnd.への遷移強度とc.s.から1st.への遷移強度の強弱関係が逆転している。また、c.s.から5th.への遷移が相対的に強くなっている。これらの遷移は、中性子エネルギー32~56keV領域の場合は主に($d_{3/2}$ 共鳴からの) M1遷移であるのに対して、中性子エネルギー58~141keV領域の場合には主に($p_{3/2}$ 共鳴からの) E1遷移である。また、46.35keV d 波共鳴の全幅は2eV程度と非常に小さいのに対して、83.50keV p 波共鳴の全幅は7.7keVと非常に大きいので、これらの共鳴の配位の複雑さは双方で大きく異なっていると考えられる。これらのことから上記の相対遷移強度の差が生じたものと考えられる。低エネルギー領域には、中性子エネルギー32~56keV領域の場合と同様、カスケード・ガンマ線によって形成されたと考えられる複雑な構造が観測されている。なお、測定の際の統計が良かったため、 ^{25}Mg の中性子捕獲ガンマ線によるピークが8MeV以上の領域にはっきりと観測されている。

4. 1. 1. 3 430±30keV領域

この領域には、 ^{24}Mg の中性子共鳴として、430.6keV $p_{3/2}$ 波共鳴が1個だけ知られている。この共鳴は前述の83.50keV $p_{3/2}$ 波共鳴と非常によく似ている。即ち、 спин・パリティが同じで、ま

た共鳴の全幅も31keVと非常に大きい。測定された捕獲ガンマ線スペクトルを中性子エネルギー58~141keV領域のスペクトル（主に、 ^{24}Mg の中性子捕獲状態から遷移するガンマ線から成る。）と比較すると、統計精度は悪いものの、スペクトルの形は非常によく似ている。

なお、各入射中性子エネルギー領域に対して、 ^{24}Mg の中性子捕獲状態から遷移するガンマ線の強度をTable 4に示す。単位は γ rays/capture で、1捕獲当たりのガンマ線の数である。

4. 1. 2 Siの測定結果

4. 1. 2. 1 50~110keV領域

この領域には、 ^{28}Si の中性子共鳴として、55.00keV $s_{1/2}$ 波共鳴、55.9keV共鳴（スピノ・パリティ等は不明）、67.73keV $p_{3/2}$ 波共鳴、70.8keV $d_{5/2}$ 波共鳴、及び86.9keV $p_{3/2}$ 波共鳴の合計5個が知られている。捕獲ガンマ線スペクトル中には、 ^{28}Si の中性子捕獲状態から ^{28}Si の幾つかの状態への遷移によるガンマ線ピークが観測されている。即ち、8.5MeV付近のピークはc.s. \rightarrow gnd. ($1/2^+$) のガンマ線、7.2MeV付近のピークはc.s. \rightarrow 1st. ($1.27\text{MeV } 3/2^+$) のガンマ線、6.5MeV付近のピークはc.s. \rightarrow 2nd. ($2.03\text{MeV } 5/2^+$) のガンマ線、及び6.1MeV付近のピークはc.s. \rightarrow 3rd. ($2.43\text{MeV } 3/2^+$) のガンマ線によって形成されており、また、3.6MeV付近のピークは c.s. \rightarrow 10 th. ($4.93\text{MeV } 3/2^-$) のガンマ線によって形成されていると考えられる。なお、4.9MeV付近のピークは10 th. \rightarrow gnd.のカスケード・ガンマ線によって形成されていると考えられる。また、スペクトル中の3MeV以下の低エネルギー領域にも、カスケード・ガンマ線によるピークが幾つか観測されている。

4. 1. 2. 2 110~210keV領域

この領域には、 ^{28}Si の中性子共鳴として、幅の広い188keV $s_{1/2}$ 波共鳴1個が知られている。中性子エネルギー50~110keV領域のスペクトルと比較すると、c.s. \rightarrow 2nd.及びc.s. \rightarrow 3rd.の遷移が非常に弱くなっている。また、c.s. \rightarrow gnd.及びc.s. \rightarrow 10th.の遷移が少し強くなっている。なお、10.8MeV付近のピークは ^{29}Si （同位体存在比：4.67%、中性子結合エネルギー：10.61MeV）の中性子捕獲状態から ^{30}Si のgnd.への遷移によるガンマ線と考えられる。

4. 1. 2. 3 520±40keV領域

この領域には、 ^{28}Si の中性子共鳴として、527keV共鳴（スピノ・パリティ等は不明）、533.3keV $p_{3/2}$ 波共鳴、及び幅の広い565.4keV $p_{3/2}$ 波共鳴の合計3個の共鳴が知られている。中性子エネルギー50~110keV領域のスペクトルと比較すると、c.s. \rightarrow gnd.の遷移が強くなり、c.s. \rightarrow 2nd.の遷移が観測されなくなっている。

なお、各入射中性子エネルギー領域に対して、 ^{28}Si の中性子捕獲状態から遷移するガンマ線の強度（単位： γ rays/capture）をTable 5に示す。

4. 2 統計模型による理論計算との比較

原子核の統計理論に基づく計算コードCASTHY⁹⁾を用いて、中性子エネルギー80keV及び520keVにおいてSiの中性子捕獲ガンマ線スペクトルを計算し、対応する（複数の共鳴を含む入射中性子エネルギー領域の）測定結果との比較を行った。計算においてガンマ線強度関数として、M1遷移及びE2遷移に対してはガンマ線エネルギー依存のないWeisskopfの単一粒子模型¹⁰⁾によるものを用い、E1遷移に対しては巨大E1共鳴を考慮したBrink-Axel型¹¹⁾を用いた。原子核準位密度関数としては Gilbert-Cameronの準位密度公式¹²⁾を用いた。原子核準位密度パラメータは、今回新たに決定した。Brink-Axel型ガンマ線強度関数中のパラメータとしては、Bermanの編集した巨大E1共鳴パラメータを用いた¹³⁾。計算に用いた原子核準位密度パラメータ及び巨大E1共鳴パラメータを、それぞれTable 6 及びTable 7に示す。計算に際して、標的核として²⁸Si、²⁹Si、及び³⁰Siの全天然同位体を考慮した。CASTHYによって計算された捕獲ガンマ線スペクトルも、実験結果の場合と同様に、(3-1)式を用いてスペクトルの規格化を行った。

計算結果を測定結果と比較してFig. 15 及び16に示す。図中に示された多数のラインは、²⁹Siの準位である。図から分かるように、入射中性子エネルギー50~110keV領域では、計算は、c.s.→1st.、c.s.→2nd.、及びc.s.→3rd.の遷移を過小評価し、c.s.→10th.及び10th.→gnd.の遷移を過大評価している。入射エネルギー520±40keV領域では、計算は（主に3個の共鳴からの捕獲ガンマ線で形成されている）測定値をかなり良く再現している。

5. おわりに

本研究によって得られた成果及び結論をまとめると以下の様になる。

- (1) 入射中性子エネルギー領域 200keV 以下の2点、及び500keV付近の計3点においてMg及びSiの中性子捕獲ガンマ線スペクトルを測定し、Mg及びSiの両方について離散ガンマ線の強調されたスペクトルが得られた。
- (2) 測定されたスペクトルから、Mg及びSiの両方について、捕獲ガンマ線のマルチプリシティが求められた。
- (3) また、Mgについては、中性子捕獲状態から²⁵Mgの基底状態、第一励起状態、及び第五励起状態へ遷移するガンマ線の強度が求められた。Siについては、中性子捕獲状態から²⁹Siの基底状態、第一励起状態、第二励起状態、第三励起状態、及び第十励起状態へ遷移するガンマ線の強度が求められた。
- (4) Siについて、原子核の統計模型を用いて、中性子捕獲ガンマ線スペクトルの計算を行い、実験値との比較を行った。入射中性子エネルギー520±40keV領域では、計算は実験をかなり良く再現できた。

4. 2 統計模型による理論計算との比較

原子核の統計理論に基づく計算コードCASTHY⁹⁾を用いて、中性子エネルギー80keV及び520keVにおいてSiの中性子捕獲ガンマ線スペクトルを計算し、対応する（複数の共鳴を含む入射中性子エネルギー領域の）測定結果との比較を行った。計算においてガンマ線強度関数として、M 1遷移及びE 2遷移に対してはガンマ線エネルギー依存のないWeisskopfの単一粒子模型¹⁰⁾によるものを用い、E 1遷移に対しては巨大E 1共鳴を考慮したBrink-Axel型¹¹⁾を用いた。原子核準位密度関数としては Gilbert-Cameronの準位密度公式¹²⁾を用いた。原子核準位密度パラメータは、今回新たに決定した。Brink-Axel型ガンマ線強度関数中のパラメータとしては、Bermanの編集した巨大E 1共鳴パラメータを用いた¹³⁾。計算に用いた原子核準位密度パラメータ及び巨大E 1共鳴パラメータを、それぞれTable 6 及びTable 7 に示す。計算に際して、標的核として²⁸Si、²⁹Si、及び³⁰Siの全天然同位体を考慮した。CASTHYによって計算された捕獲ガンマ線スペクトルも、実験結果の場合と同様に、(3-1)式を用いてスペクトルの規格化を行った。

計算結果を測定結果と比較してFig. 1 5 及び1 6 に示す。図中に示された多数のラインは、²⁹Siの準位である。図から分かるように、入射中性子エネルギー50~110keV領域では、計算は、c.s.→1st.、c.s.→2nd.、及びc.s.→3rd.の遷移を過小評価し、c.s.→10th.及び10th.→gnd.の遷移を過大評価している。入射エネルギー520±40keV領域では、計算は（主に3個の共鳴からの捕獲ガンマ線で形成されている）測定値をかなり良く再現している。

5. おわりに

本研究によって得られた成果及び結論をまとめると以下の様になる。

- (1) 入射中性子エネルギー領域 200keV 以下の2点、及び500keV付近の計3点においてMg及びSiの中性子捕獲ガンマ線スペクトルを測定し、Mg及びSiの両方について離散ガンマ線の強調されたスペクトルが得られた。
- (2) 測定されたスペクトルから、Mg及びSiの両方について、捕獲ガンマ線のマルチプリシティが求められた。
- (3) また、Mgについては、中性子捕獲状態から²⁵Mgの基底状態、第一励起状態、及び第五励起状態へ遷移するガンマ線の強度が求められた。Siについては、中性子捕獲状態から²⁹Siの基底状態、第一励起状態、第二励起状態、第三励起状態、及び第十励起状態へ遷移するガンマ線の強度が求められた。
- (4) Siについて、原子核の統計模型を用いて、中性子捕獲ガンマ線スペクトルの計算を行い、実験値との比較を行った。入射中性子エネルギー520±40keV領域では、計算は実験をかなり良く再現できた。

謝　　辞

本研究は日本原子力研究所からの委託研究として行われましたが、核データセンターの皆様には大変お世話になりました。この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Dickens J.K., Morgan G.L., Chapman G.T., Love T.A., Newman E., and Perey F.G.: Nucl. Sci. Eng., 62, 515 (1977).
- 2) Igashira M., Kitazawa H., Shimizu M., Komano H., and Yamamuro N.: Nucl. Phys., A457, 301 (1986).
- 3) Voignier J., Joly S., and Grenier G.: Nucl. Sci. Eng., 93, 43 (1986).
- 4) Igashira M., Kitazawa H., and Uchiyama T.: Proc. 6th Int. Symp. on Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy, Leuven, Belgium, p.S699 (1987).
- 5) Igashira M. and Kitazawa H.: JAERI-M 89-089 (1989), in Japanese.
- 6) Kendrick H. and Sperling S.M.: GA - 9882(1970).
- 7) Table of Isotopes, 7th edition, edited by Ledever C.M. and Shirley V.S. (John & Sons, New York, 1978).
- 8) Mughabghab S.F., Divadeenam M., and Holden N.E.: Neutron Cross Sections, vol.1, part A (Academic Press, New York, 1984).
- 9) Igarasi S.: J. Nucl. Sci. Tech., 12, 67 (1975).
- 10) Blatt J.M. and Weisskopf V.W.: Theoretical Nuclear Physics (Wiley, New York, 1952).
- 11) Brink D.M.: Thesis, Oxford (1955) unpublished; P. Axel: Phys. Rev., 126, 671(1962).
- 12) Gilbert A. and Cameron A.G.W.: Can. J. Phys., 43, 1446 (1965).
- 13) Berman B.L.: At. Data and Nucl. Data Table, 15, 319 (1975).

謝　　辞

本研究は日本原子力研究所からの委託研究として行われましたが、核データセンターの皆様には大変お世話になりました。この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Dickens J.K., Morgan G.L., Chapman G.T., Love T.A., Newman E., and Perey F.G.: Nucl. Sci. Eng., 62, 515 (1977).
- 2) Igashira M., Kitazawa H., Shimizu M., Komano H., and Yamamuro N.: Nucl. Phys., A457, 301 (1986).
- 3) Voignier J., Joly S., and Grenier G.: Nucl. Sci. Eng., 93, 43 (1986).
- 4) Igashira M., Kitazawa H., and Uchiyama T.: Proc. 6th Int. Symp. on Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy, Leuven, Belgium, p.S699 (1987).
- 5) Igashira M. and Kitazawa H.: JAERI-M 89-089 (1989), in Japanese.
- 6) Kendrick H. and Sperling S.M.: GA - 9882(1970).
- 7) Table of Isotopes, 7th edition, edited by Ledever C.M. and Shirley V.S. (John & Sons, New York, 1978).
- 8) Mughabghab S.F., Divadeenam M., and Holden N.E.: Neutron Cross Sections, vol.1, part A (Academic Press, New York, 1984).
- 9) Igarasi S.: J. Nucl. Sci. Tech., 12, 67 (1975).
- 10) Blatt J.M. and Weisskopf V.W.: Theoretical Nuclear Physics (Wiley, New York, 1952).
- 11) Brink D.M.: Thesis, Oxford (1955) unpublished; P. Axel: Phys. Rev., 126, 671(1962).
- 12) Gilbert A. and Cameron A.G.W.: Can. J. Phys., 43, 1446 (1965).
- 13) Berman B.L.: At. Data and Nucl. Data Table, 15, 319 (1975).

Table 1 Data related to the samples.

Mg sample	purity: more than 99.9 %	shape: metallic disk(60mm ϕ × 6 or 8mm)
isotopes	^{24}Mg	^{25}Mg
abundances(%)	78.99	10.00
Bn ⁻ (MeV)	7.332	11.093
Si sample	purity: more than 99.99 %	shape: metallic disk(60mm ϕ × 15 or 27mm)
isotopes	^{28}Si	^{29}Si
abundances(%)	92.23	4.67
Bn ⁻ (MeV)	8.474	10.610

*neutron binding energies

Table 2 Experimental conditions.

Mg sample		
neutron energies	32~141 keV	430 ± 30 keV
sample thickness	6 mm	8 mm
distances between Li-target and sample	8.1 cm	15.6 cm
measuring times	39 hours	30 hours
average beam currents	9 μA	7 μA
Si sample		
neutron energies	50~210keV	520 ± 40 keV
sample thickness	15 mm	27 mm
distances between Li-target and sample	15.6 cm	15.6 cm
measuring times	62 hours	10 hours
average beam currents	6 μA	7 μA

Table 3 Multiplicities of neutron capture gamma rays.

target nuclei	incident neutron energy regions(keV)	multiplicities
Mg	32~ 56	1.86
	58~141	2.02
	430 ± 30	2.47
Si	50~110	2.16
	110~210	1.91
	520 ± 40	2.20

Table 4 Intensities* of gamma rays emitted from a capture state of ^{24}Mg .

final states	incident neutron energy regions(keV)		
	32~56	58~141	530±30
c.s. → gnd.	0.47	0.19	0.06
→ 1st.	0.28	0.63	0.34
→ 5th.	0.07	0.13	0.18

(γ rays/capture)Table 5 Intensities of gamma rays emitted from a capture state of ^{28}Si .

final states	incident neutron energy regions(keV)		
	50~110	110~210	520±40
c.s. → gnd.	0.19	0.34	0.28
→ 1st.	0.33	0.25	0.15
→ 2nd.	0.15	<0.03	<0.02
→ 3rd.	0.08	<0.05	0.10
→ 10th.	0.10	0.20	0.17

*(γ rays/capture)

Table 6 Nuclear level-density parameters used for the statistical model calculation.

Nuclei	$a(\text{MeV}^{-1})$	$E_x(\text{MeV})$	$T(\text{MeV})$	$\sigma^2(0)$	$\Delta(\text{MeV})$
^{29}Si	3.95	11.84	2.024	6.678	2.75
^{30}Si	3.96	12.49	2.024	4.458	3.35
^{31}Si	3.97	11.43	2.024	3.147	2.25

Table 7 Giant electric-dipole resonance parameters used for the statistical model calculation.

Nucleus	$E_1(\text{MeV})$	$\Gamma_1(\text{MeV})$	$\sigma_1(\text{mb})$	$E_2(\text{MeV})$	$\Gamma_2(\text{MeV})$	$\sigma_2(\text{mb})$
Si	20.5	5.2	9.0	—	—	—

Note: These parameters were used for all residual nuclei.

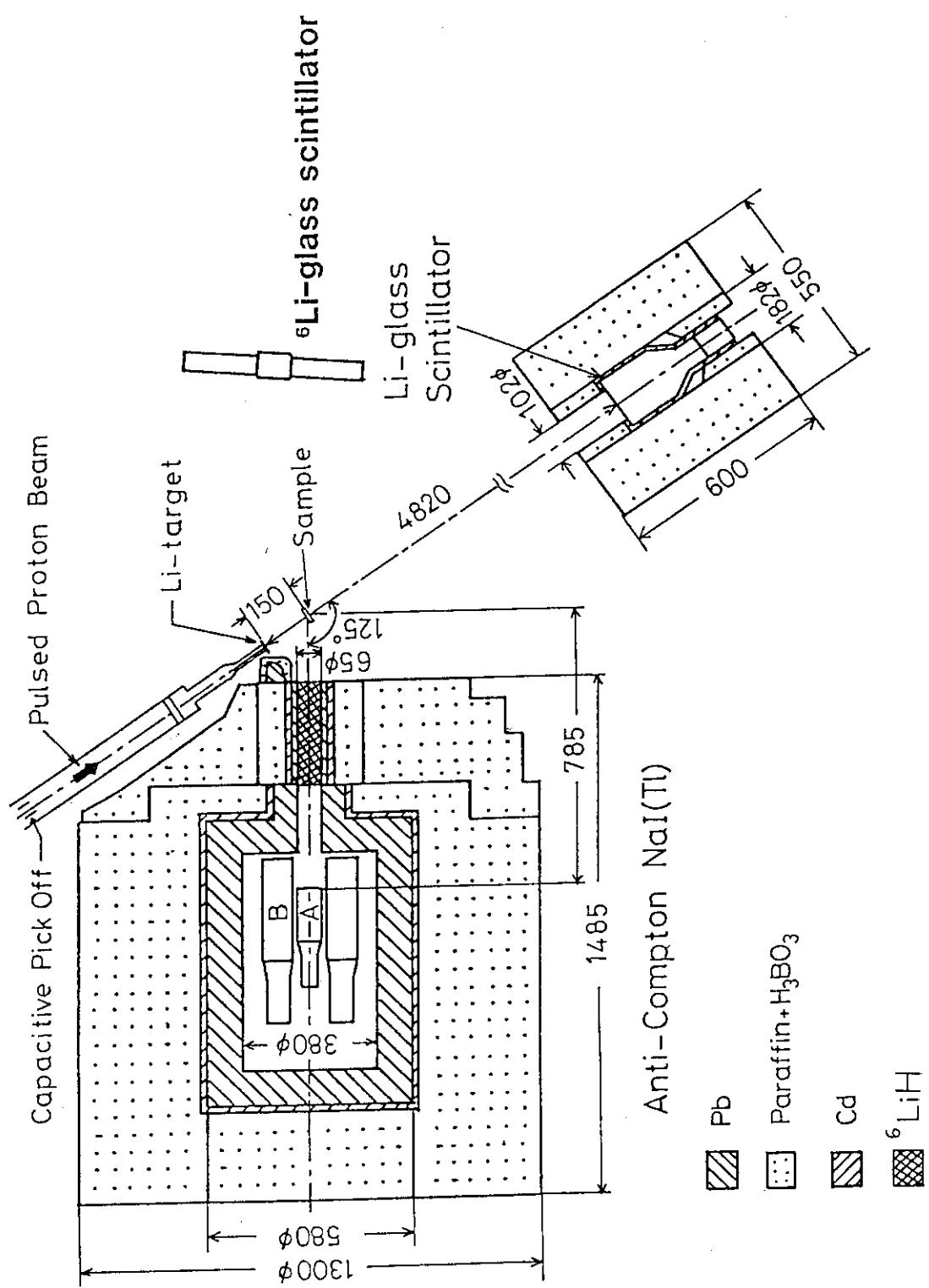
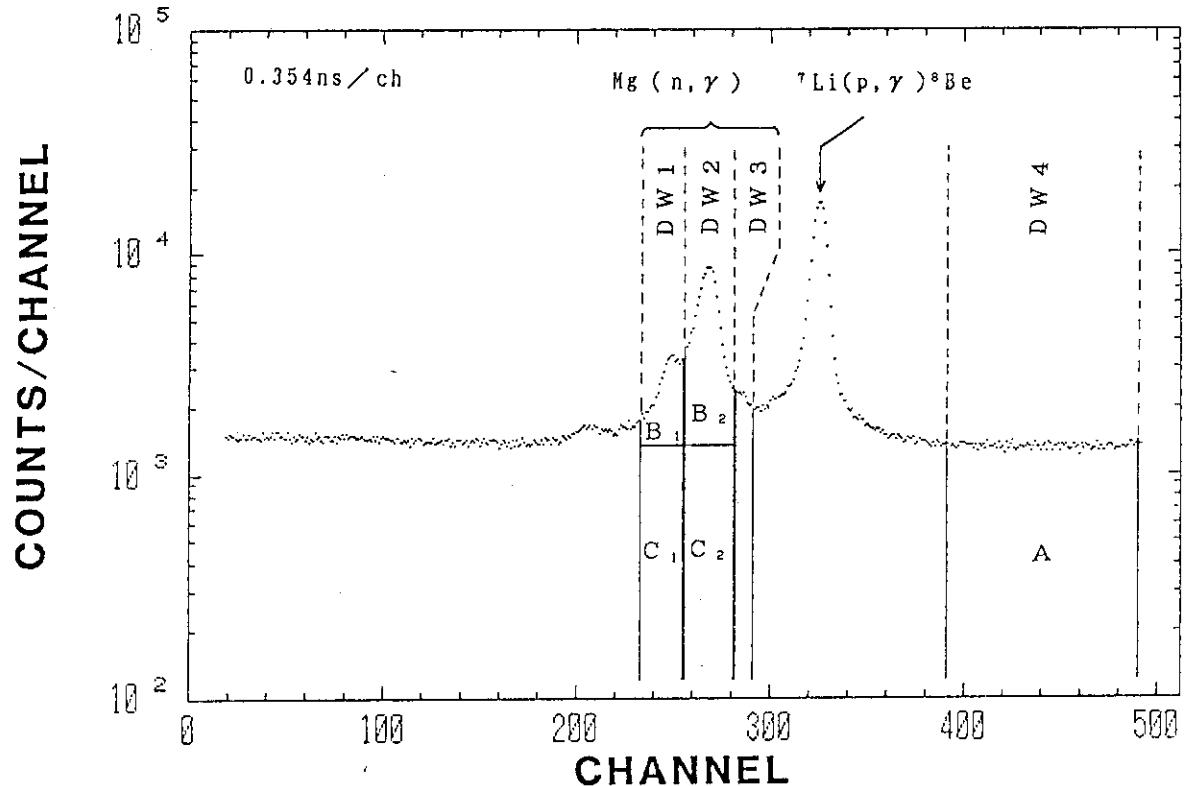
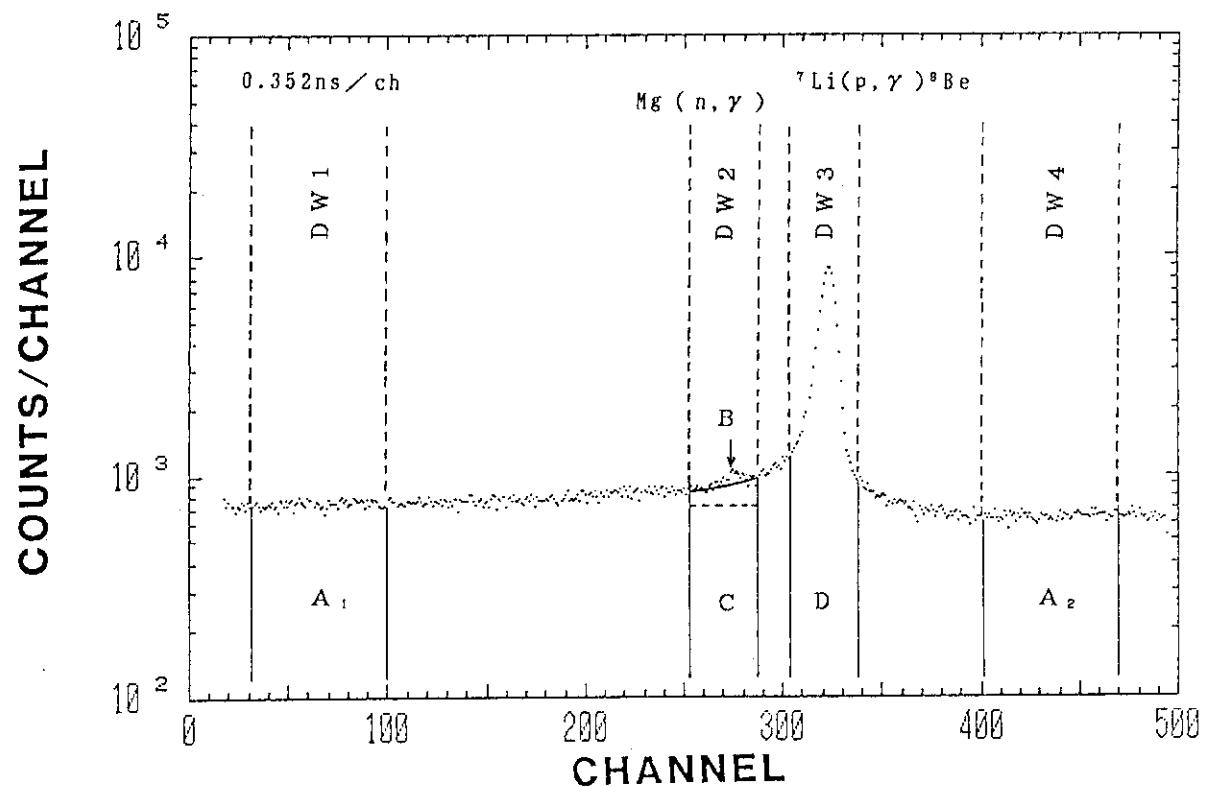


Fig.1 Experimental arrangement used to measure keV-neutron capture gamma-ray spectra.

Fig.2 TOF spectrum of the NaI(Tl) detector. (Mg sample, $En=32\sim 141$ keV)Fig.3 TOF spectrum of the NaI(Tl) detector. (Mg sample, $En=430$ keV)

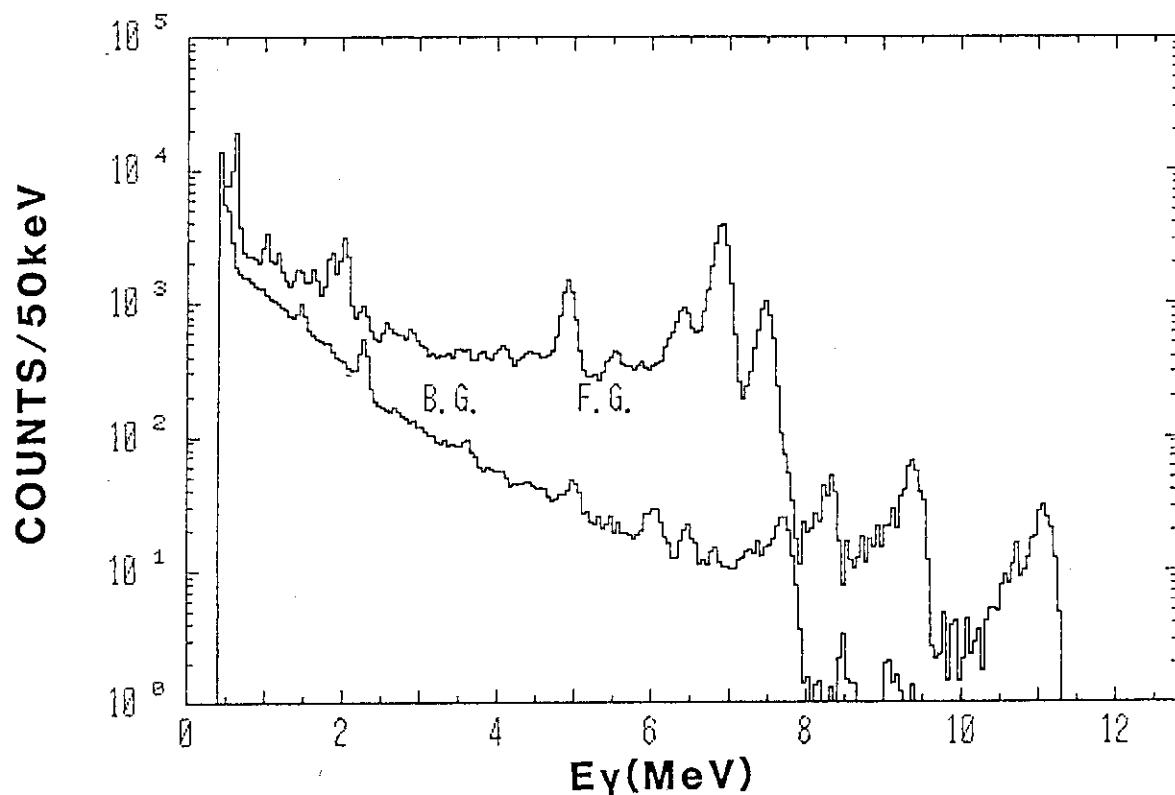


Fig.4 Foreground and background pulse-height spectra.
(Mg sample, $E_n=58 \sim 141 \text{ keV}$)

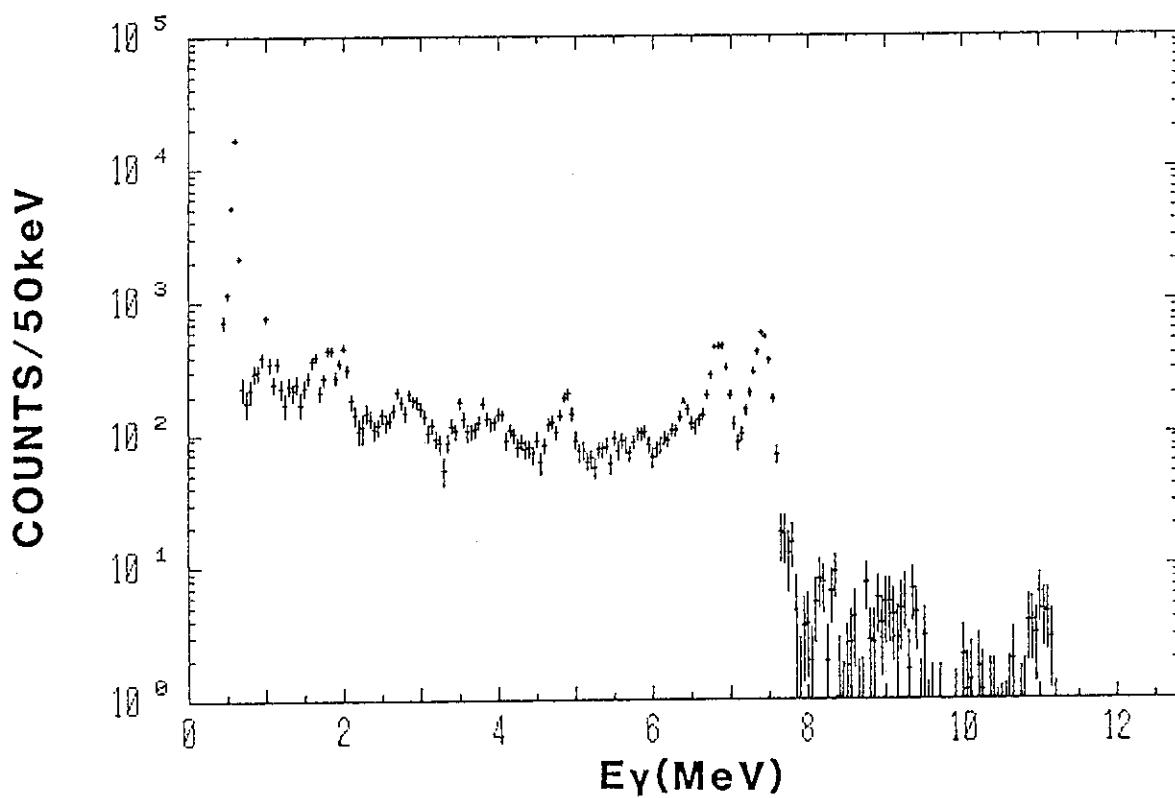
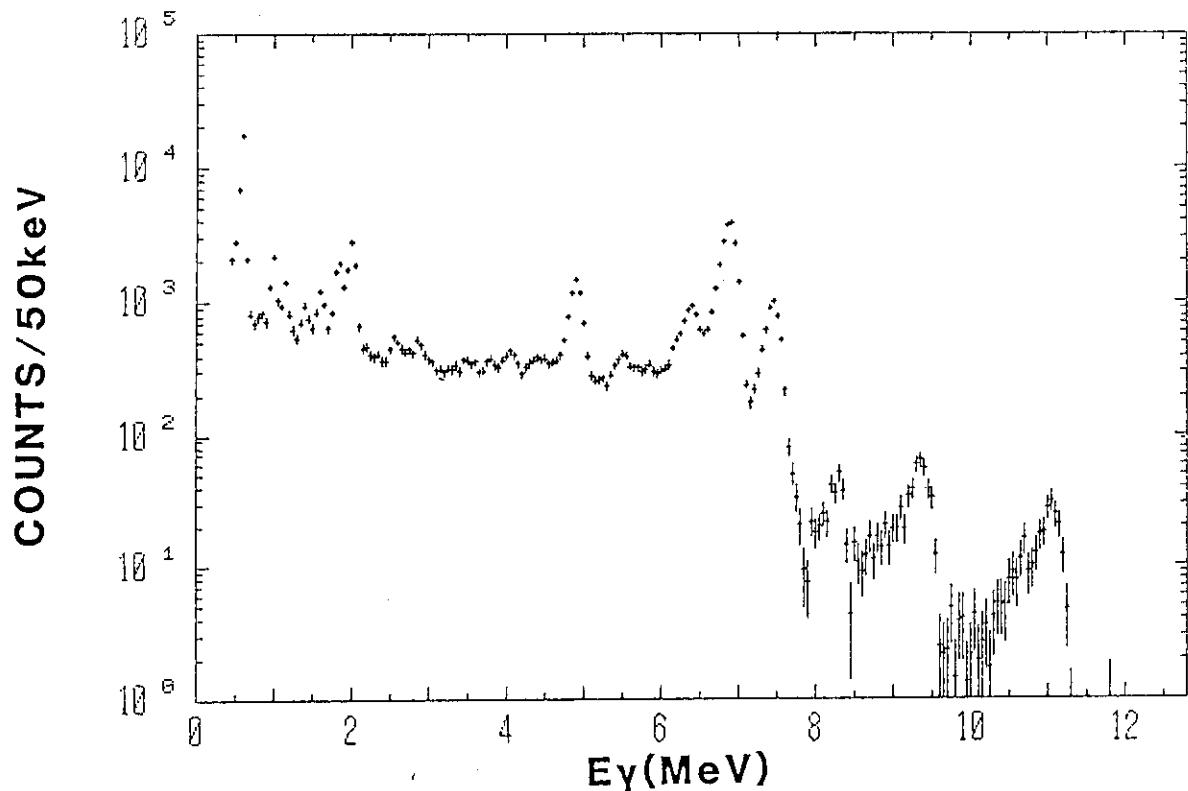
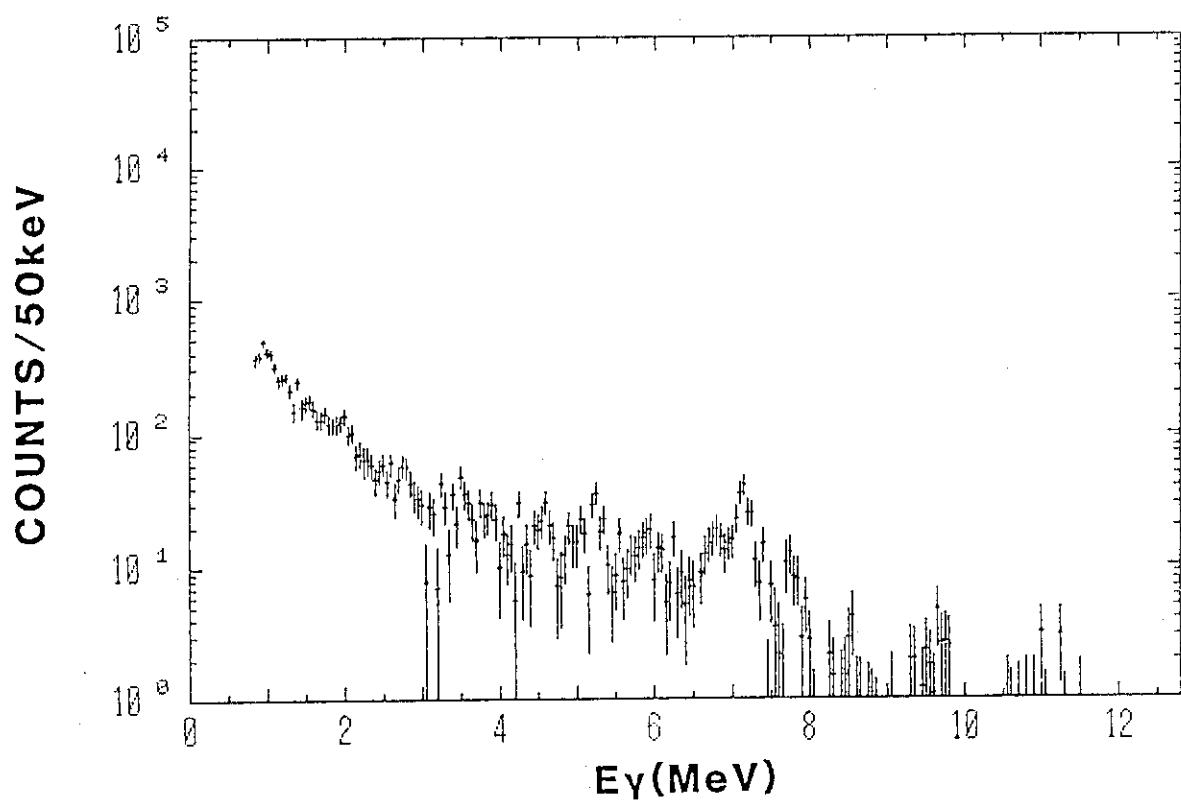
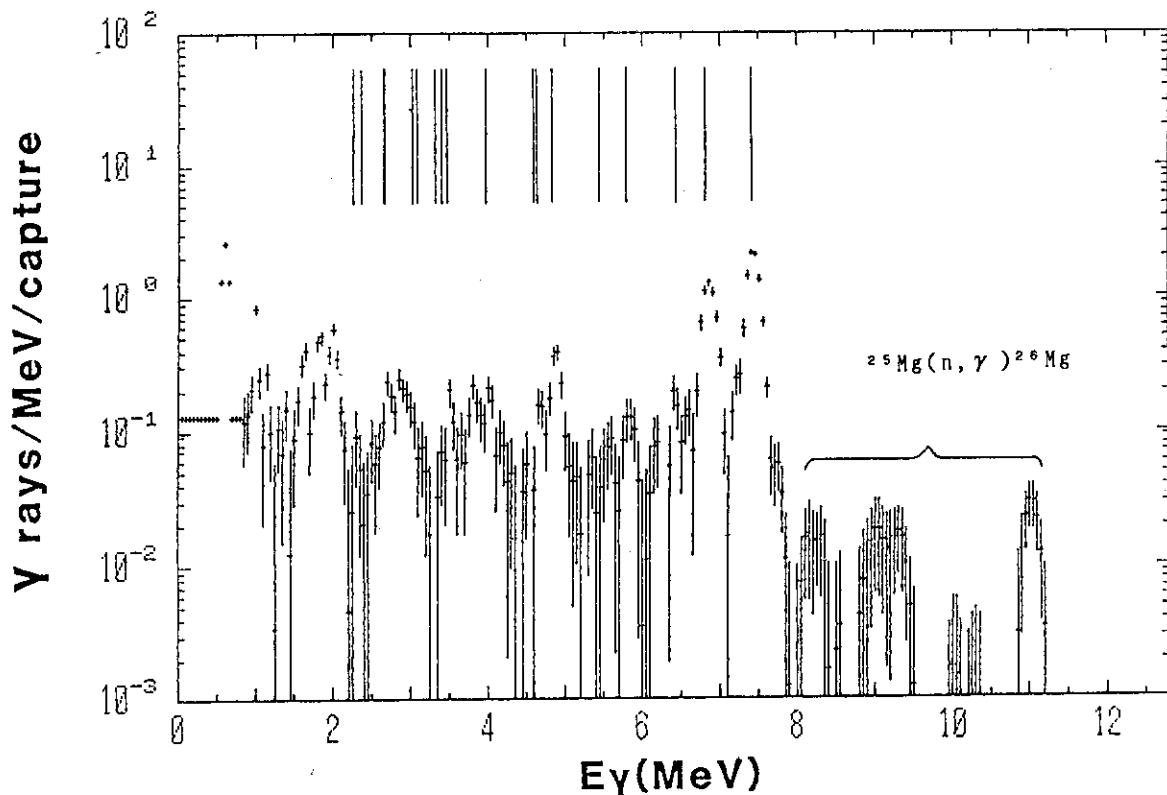
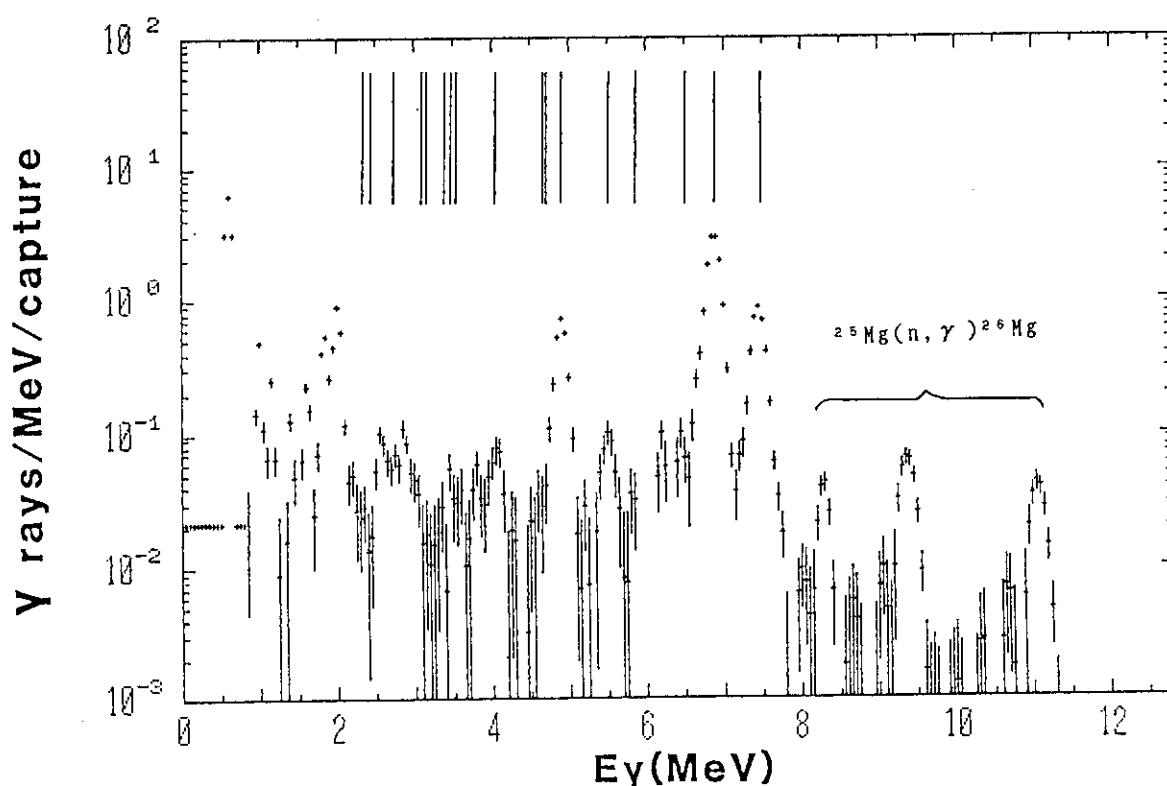
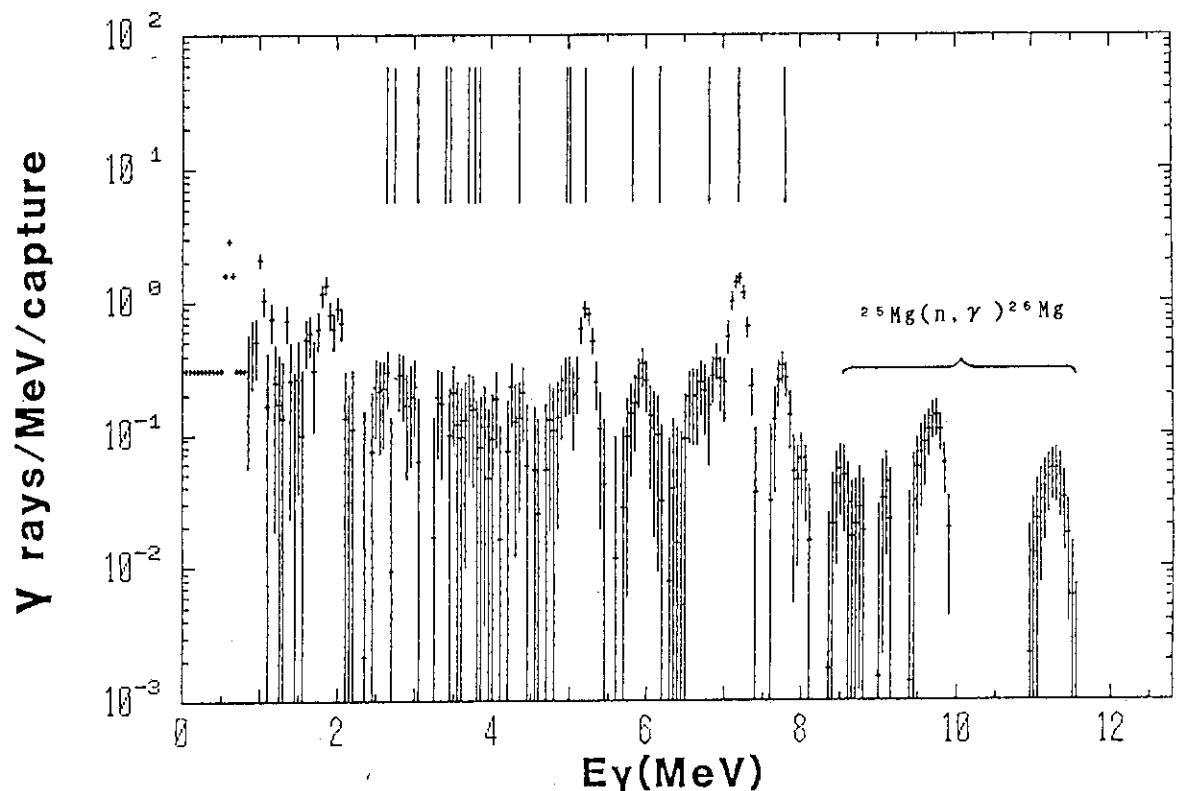
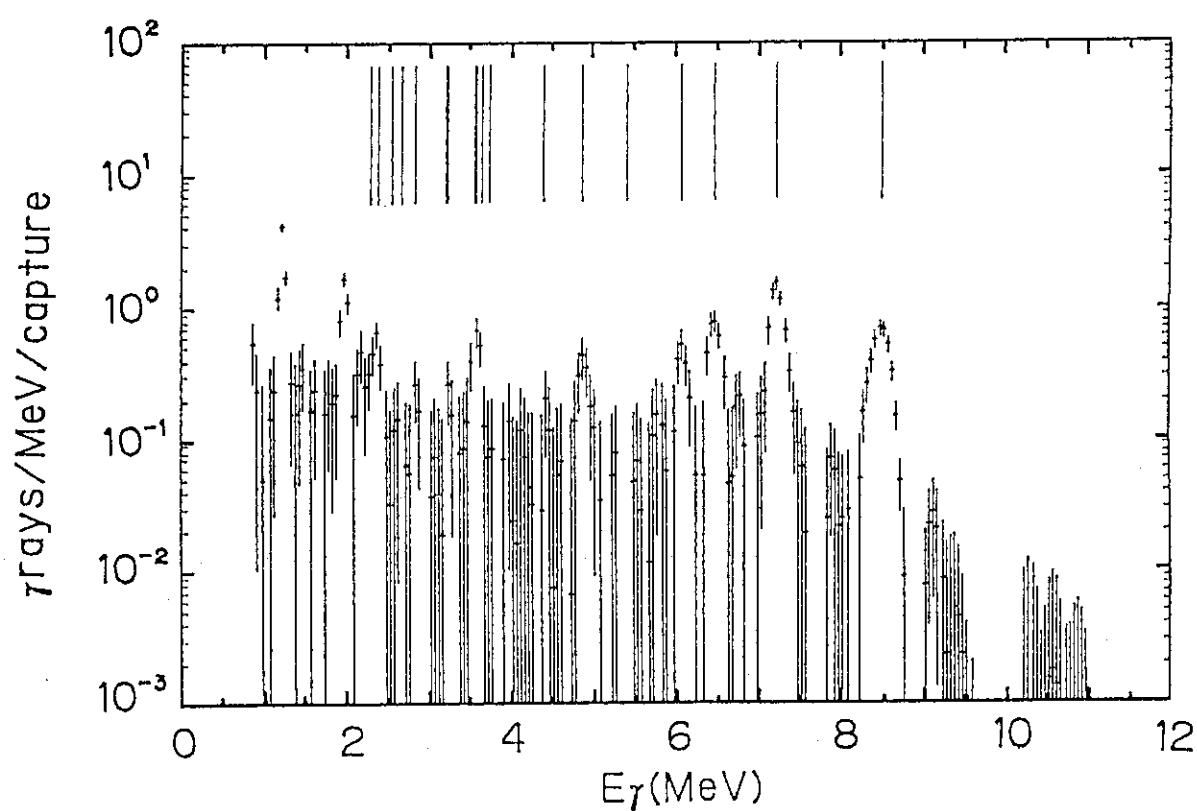
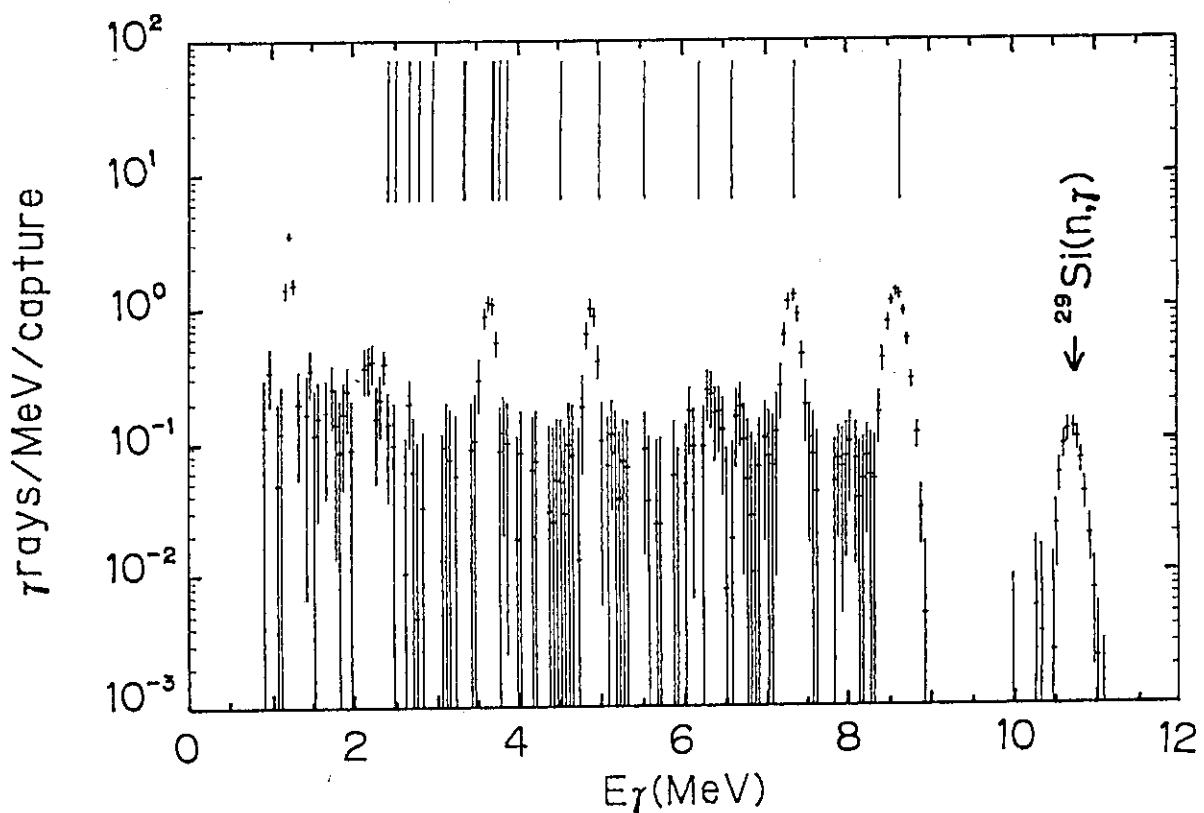
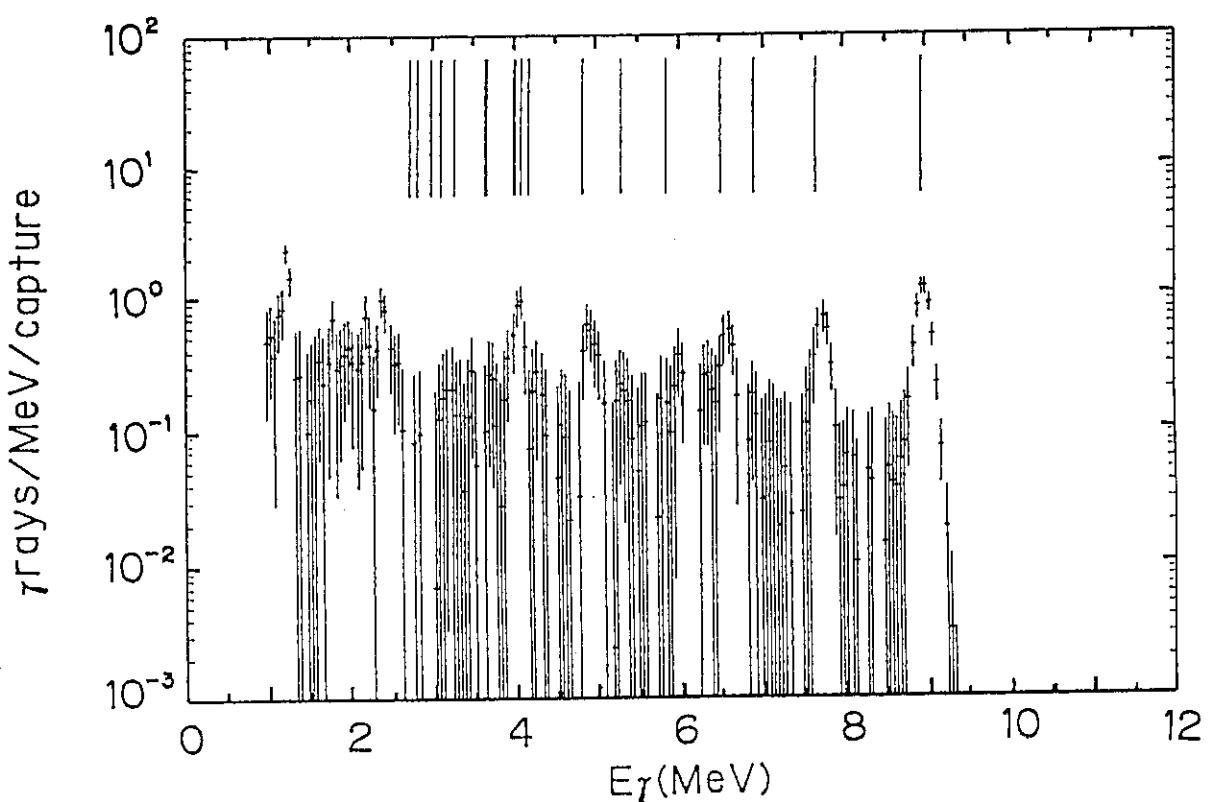


Fig.5 Neutron capture gamma-ray pulse-height spectrum of Mg. ($E_n=32 \sim 56 \text{ keV}$)

Fig.6 Neutron capture gamma-ray pulse-height spectrum of Mg. ($E_n=58\sim 141 \text{ keV}$)Fig.7 Neutron capture gamma-ray pulse-height spectrum of Mg. ($E_n=430 \text{ keV}$)

Fig.8 Neutron capture gamma-ray spectrum of Mg. ($E_n=32\sim 56$ keV)Fig.9 Neutron capture gamma-ray spectrum of Mg. ($E_n=58\sim 141$ keV)

Fig.10 Neutron capture gamma-ray spectrum of Mg. ($E_n=430$ keV)Fig.11 Neutron capture gamma-ray spectrum of Si. ($E_n=50\sim 110$ keV)

Fig.12 Neutron capture gamma-ray spectrum of Si. ($E_n=110\sim 210$ keV)Fig.13 Neutron capture gamma-ray spectrum of Si. ($E_n=520$ keV)

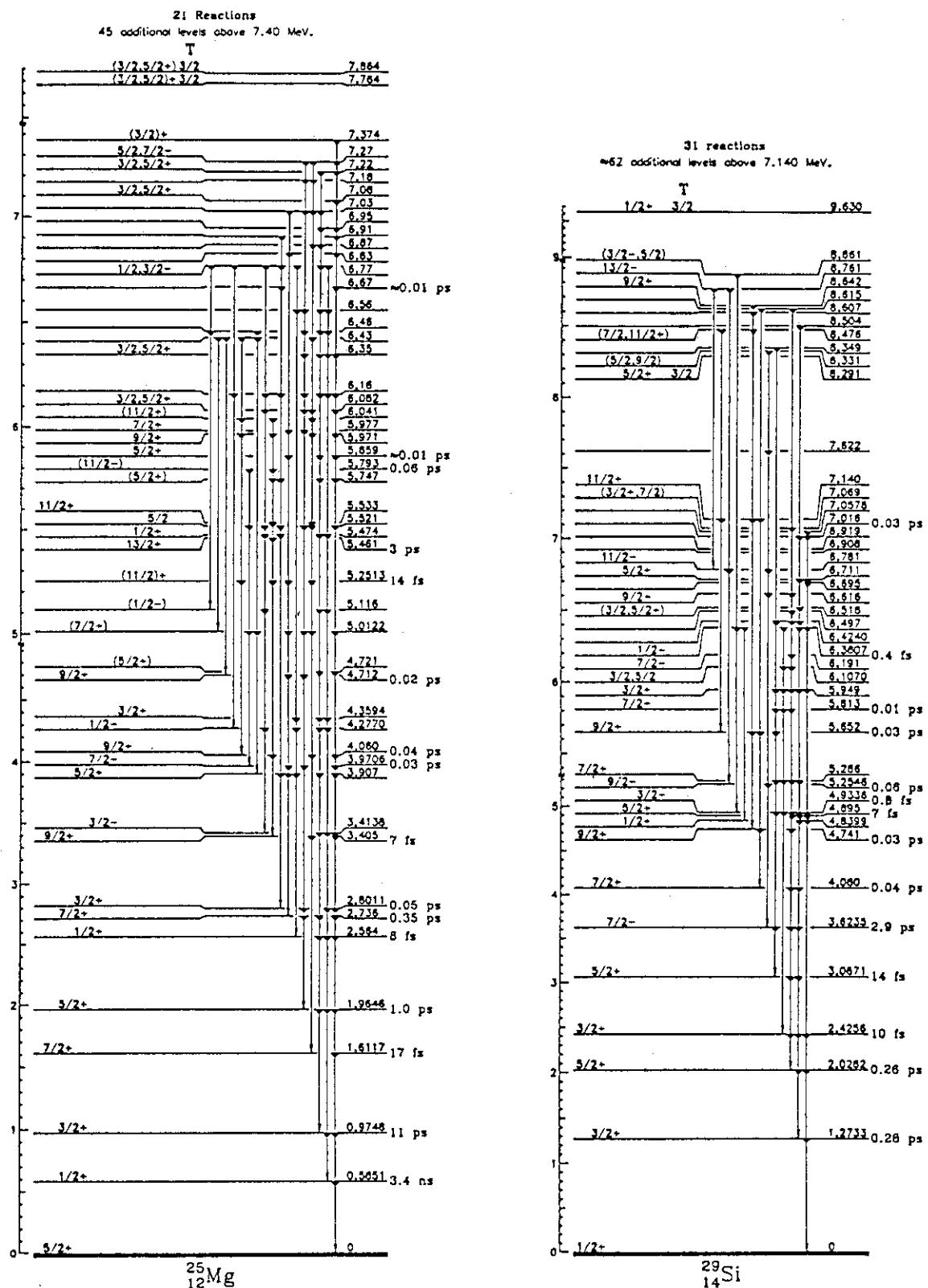


Fig.14 Level schemes of ^{25}Mg and ^{29}Si . (Cited from ref.7)

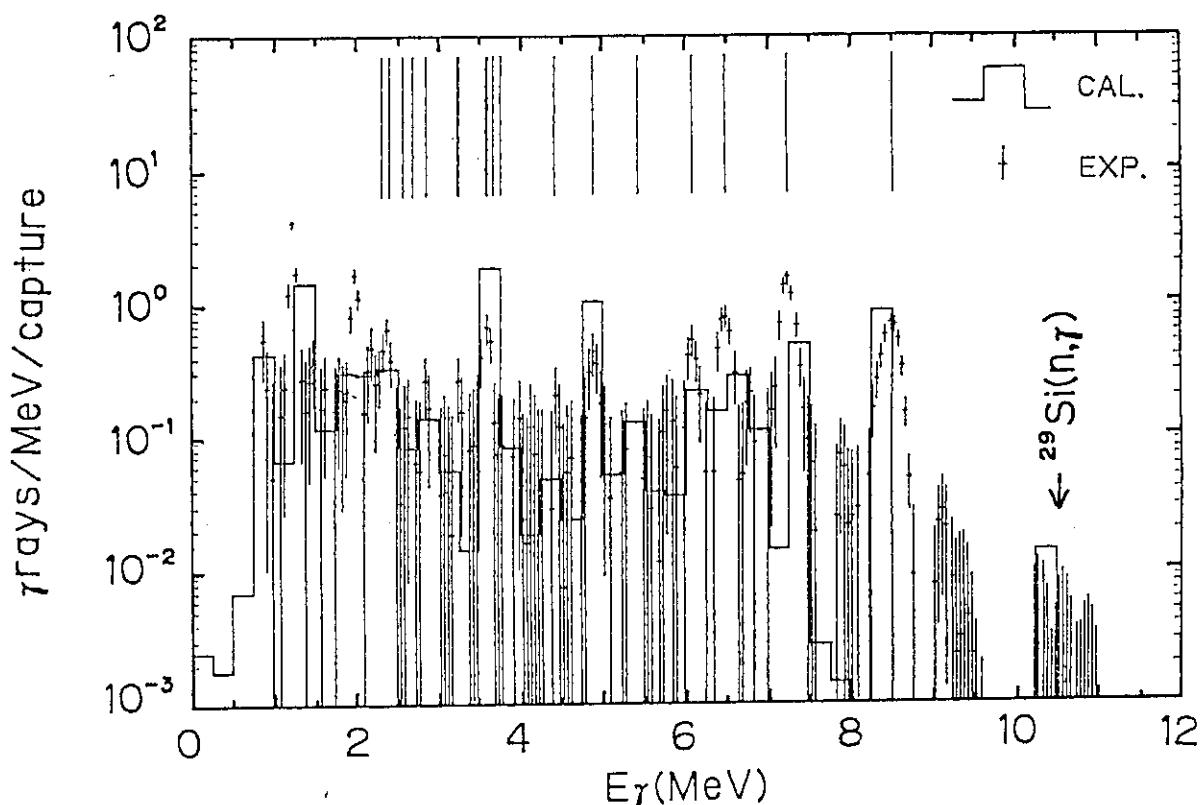


Fig.15 Comparison between the observed and calculated spectra.
(Si, $E_n=50\sim 110$ keV)

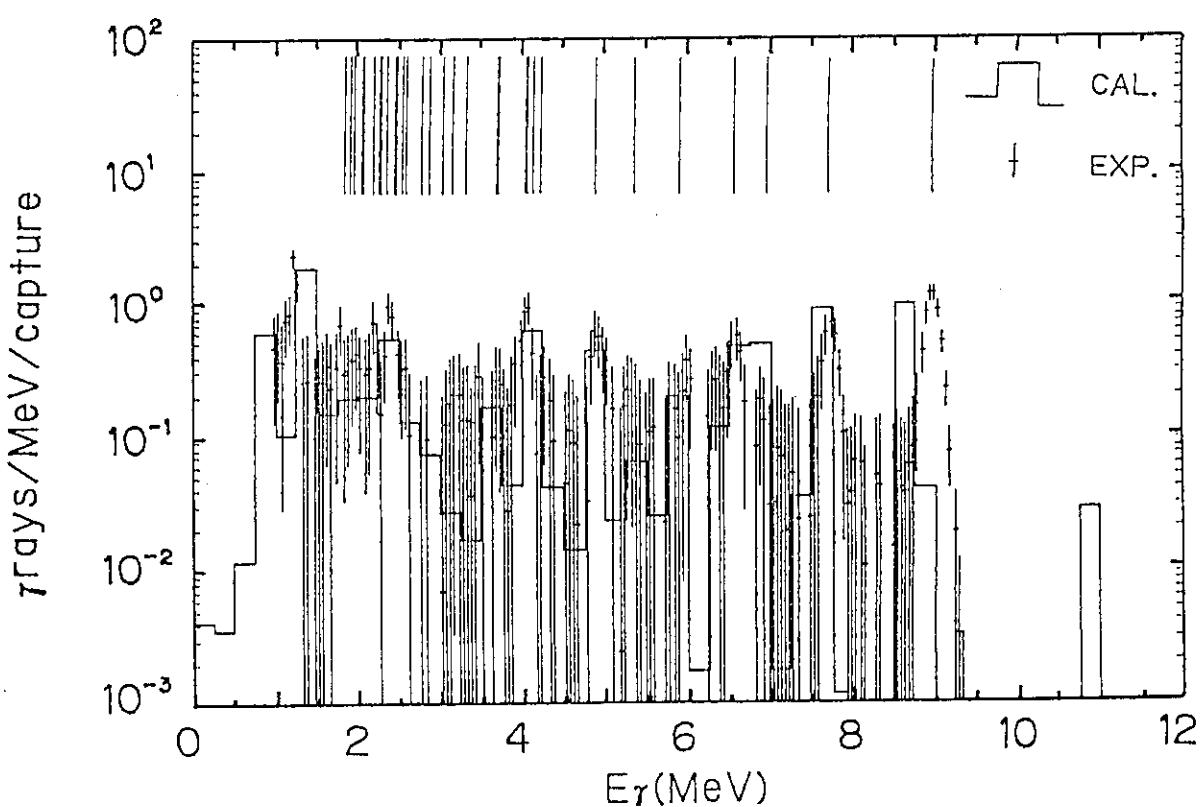


Fig.16 Comparison between the observed and calculated spectra.
(Si, $E_n=520$ keV)