

# 長寿命放射性廃棄物核種の 中性子吸収断面積の研究(I)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1994年2月

名古屋大学工学部 加藤敏郎

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

PNC TJ8603 94-001

# 長寿命放射性廃棄物核種の 中性子吸収断面積の研究(I)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1994年2月

名古屋大学工学部 加藤敏郎

長寿命放射性廃棄物核種の中性子吸収断面積の研究 (I) \*  
(平成5年度 動力炉・核燃料開発事業団委託研究報告)

加藤敏郎\*\*

要 旨:

ウランの核分裂生成物中の長寿命核種である  $^{99}\text{Tc}$  および  $^{129}\text{I}$  の原子炉による消滅処理を行うための基礎データとして、これらの核種の中性子吸収断面積と共鳴積分の値について調査と実測を行った。

$^{99}\text{Tc}$ の中性子断面積については調査のみならず実測を放射化法で行った。得られた値は熱中性子吸収断面積( $\sigma_0$ )については

$$\sigma_0 = 22.7 \pm 1.1 \text{ b.}$$

共鳴積分( $I_0$ )については

$$I_0 = 395 \pm 34 \text{ b.}$$

であった。生成核  $^{100}\text{Tc}$ の半減期も測定した。その値は  $15.5 \pm 0.1$  秒であった。

$^{129}\text{I}$ の中性子吸収断面積は過去の測定値は Fast chopper TOFによるもののみで、その値は  $35 \pm 4 \text{ b.}$  であった。平成6年度には  $^{129}\text{I}$ の中性子吸収断面積の測定を行う予定である。

---

\* 本報告書は名古屋大学工学部(担当者:加藤敏郎)が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

\*\* 名古屋大学工学部

PNC TJ8603 94-001  
1994 February

Measurement of Neutron Capture Cross Sections of  
Long-lived Radioactive Waste Nuclides(I)\*

Toshio KATOH\*\*

ABSTRACT

The thermal neutron cross section of the  $^{99}\text{Tc}(n, \gamma)^{100}\text{Tc}$  reaction has been measured by means of an activation method for the purpose to obtain fundamental data for the research of the transmutation of nuclear waste.

Targets containing about 360 kBq of  $^{99}\text{Tc}$  were irradiated for 2 m with reactor neutrons. Activation detectors of Co/Al and Au/Al alloy wires were irradiated to monitor the neutron flux and the Westcott's epithermal index  $r(T/T_0)^{1/2}$ .

Spectra of  $\gamma$ -rays from the irradiated Tc samples were measured with a high purity Ge detector. Decay of the 540-keV and the 591-keV  $\gamma$ -rays were followed. A half-life of the decay of the  $\gamma$ -rays was  $15.5 \pm 0.1$  s and in good agreement with the half-life of  $^{100}\text{Tc}$ .

The amount of the produced  $^{100}\text{Tc}$  was obtained from the intensities of the 540-keV and the 591-keV  $\gamma$ -rays.

The specific activity of  $^{99}\text{Tc}$  in the targets were obtained by measuring the specific  $\beta$ -activity of sample solution by the liquid scintillation counting method. Then, the amount of  $^{99}\text{Tc}$  in the targets were determined. A cross section of the  $^{99}\text{Tc}(n, \gamma)^{100}\text{Tc}$  reaction for a reactor neutron spectrum was determined from the number of  $^{99}\text{Tc}$  atoms of the target, the activity of the produced  $^{100}\text{Tc}$  and the neutron flux data. The cross section obtained is  $22.7 \pm 0.5$  b and is almost same as the values reported in references. The resonance integral was also measured by a Cd-ratio method, and is  $395 \pm 34$  b.

---

\* Work performed by Toshio Katoh, Nagoya University under the contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Co.

\*\* Department of Nuclear Engineering, Nagoya University

## 目 次

まえがき	1
1. $^{99}\text{Tc}(n, \gamma)^{100}\text{Tc}$ 反応の断面積と共鳴積分の測定	2
1-1. はじめに	2
1-2. 中性子照射とガンマ線測定	2
1-3. 測定データの解析	4
1-4. まとめ	7
2. $^{129}\text{I}(n, \gamma)^{130}\text{I}$ 反応の断面積について	8
謝辞	9
参考文献	9

長寿命放射性廃棄物核種の中性子吸収断面積の研究  
(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究)

加藤 敏 郎\*

まえがき

高レベル放射性廃棄物核種の処理処分の問題は原子力の今後の発展のためには避けて通れない重要な問題である。その方法の一として長寿命放射性核種を核反応を利用して短寿命あるいは安定な核種に変換させて比較的短い時間の中に非放射性核種に変えてしまう、いわゆる消滅処理法がある。使用済みの原子炉燃料のなかに含まれる放射性核種には、(1) スترونチウム-90、セシウム-137などの核分裂生成物、(2) 原子炉内の核反応により生成したアクチノイド元素、および(3) 残っているウランおよびプルトニウムなどの原子燃料がある。

本研究では核分裂生成物を中性子による核反応で核変換を起こさせて、短寿命核に変換する消滅処理法の可能性を検討するための基礎データとして、核分裂生成核種の中性子吸収断面積の調査と測定を行うことを目的とする。本研究の代表者(加藤)は既にセシウム-137およびストロンチウム-90について中性子吸収断面積を測定し、報告を行っている<sup>1)・2)</sup>。平成5年度はテクネチウム-99およびヨウ素-129の中性子吸収断面積について調査と測定を行った。調査の結果、一二の過去のデータ<sup>3)・4)</sup>が存在するがいずれも信頼するに足るものではないことがわかった。このため、細心の注意を払って再測定を行なうことにした。測定の結果、テクネチウム-99の中性子吸収断面積 $\sigma_0$ は  $22.7 \pm 1.1$  b. , 共鳴積分  $I_0$  の値は  $395 \pm 34$  b. であった。吸収断面積の値は従来<sup>3)</sup>の値とほぼ一致した。生成核  $^{100}\text{Tc}$  の半減期も測定し、その値は  $15.5 \pm 0.1$  秒であった。ヨウ素については調査の結果、Fast chopper TOF による測定値 ( $35 \pm 4$  b.)<sup>5)</sup> があるのみであった。平成6年度にはヨウ素-129の吸収断面積の測定を行う予定である。

---

\* 名古屋大学工学部

## 1. $^{99}\text{Tc}(n, \gamma)^{100}\text{Tc}$ 反応の断面積と共鳴積分の測定

### 1-1. はじめに

放射性核分裂生成核種  $^{99}\text{Tc}$  の核分裂収率は 6.1% と比較的が高く、半減期は  $2.1 \times 10^5$  年で長い。放射性廃棄物として相当の量が長期に残留する。

使用済み燃料をガラス固化体として保管廃棄する場合にも長期の保管を考えなければならない。それ故、使用済み燃料の処理処分に先立って  $^{99}\text{Tc}$  の量をできるだけ減らしておくことが望ましい。

$^{99}\text{Tc}$  の量を減らす方法として考えられている消滅処理法を検討するための基礎データとして  $^{99}\text{Tc}$  の中性子吸収反応,  $^{99}\text{Tc}(n, \gamma)^{100}\text{Tc}$ , の断面積と共鳴積分の測定値の調査を行った。過去の測定データは少なく, Ovechkin et al.<sup>3)</sup> と Pattenden<sup>4)</sup> のものがあるのみである。そこでこの断面積の値をあらためて測定することとした。測定はセシウムおよびストロンチウムの場合と同様に原子炉熱中性子を利用して放射化法で行った。共鳴積分の測定は Cd-比法で行った。

### 1-2. 中性子照射とガンマ線測定

#### a) 照射ターゲットの作成

照射ターゲットは Amersham 製の Standardized Solution をアイソトープ協会を通じて購入して使用した。原液の比放射能のカタログ値は 473.6 kBq/g であった。また、比放射能の値は液体シンチレーション計数管による効率トレーサー法で実際に測定も行った。実測値は  $461 \pm 12$  kBq/g でほぼカタログ値と一致した。この原液から約 0.8 g づつをポリエチレンの容器にとり、6 個の照射用ターゲットを作成した。各ターゲット試料の重量は Mettler 社の天秤(AE101, 精度は 0.03 mg) で測定した。各ターゲットに含まれる放射能はそれぞれの重量と測定した比放射能から求め、370~375 kBq であった。実験にはこのうち 4 個を使用した。使用したターゲットの原子核数は各ターゲットの放射能値から求め、Table 1. に示してある。



## b) 中性子照射

試料の中性子照射は立教大学原子力研究所の TRIGA II 型原子炉を利用して行った。上記のポリエチレン容器に入れた試料 ( $^{99}\text{Tc}$ ) を照射用カプセルに入れて紐で吊って、この原子炉の回転試料棚の試料挿入孔から挿入して2分間の中性子照射を行った。Cd-比の測定の場合にはポリエチレン容器に入れた試料をさらに円筒状のカドミウムケース(ケースの壁の厚み: 1 mm)に入れてから照射用カプセルに入れて照射を行った。照射位置での熱中性子束は、約  $4 \times 10^{11} \text{ n/s}\cdot\text{cm}^2$  であった。中性子束は Co/Al および Au/Al をモニターとして使用して毎回測定した。熱外中性子指数 Westcott Convention index は、 $r(T/T_0)^{1/2} = 0.033$  であった。使用したモニターの核データは Table 2. に示してある。Fig. 1. にこの原子炉の炉心および照射孔配置図を示す。

## c) ガンマ線測定

照射済み試料の中の  $^{100}\text{Tc}$  からのガンマ線測定はポリエチレン容器に入れたまま、照射終了の約 50~60 秒後に大型の高純度ゲルマニウム検出器(分解能: 2.1 keV at 2.3 MeV) を用いて行った。検出器の効率は 90% (3" x 3" の NaI シンチレーション検出器に比べて) であった。線源と検出器表面との距離は 10 cm であった。検出器の検出効率は混合線源 MIX-EGMA15 (フランス原子力庁から供給) を用いて校正した。この線源に含まれる核種は  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd} + ^{109\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{57}\text{Co}$  (122.0614 and 136.4743 keV),  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{113}\text{Sn} + ^{113\text{m}}\text{In}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ ,  $^{88}\text{Y}$  (898.042 and 1836.064 keV),  $^{60}\text{Co}$  (1173.238 and 1332.502 keV) で、59.537 keV から 1836.064 keV までのガンマ線のエネルギー領域を校正した。

各照射ごとに、ガンマ線のスペクトルを 20 秒ごとに測定し、そのときの線源からのスペクトルの変化を追跡した。 $^{100}\text{Tc}$  の半減期は約 15 秒で崩壊が早いので測定の総計数をあげるために測定の初期には計数が高くしてある。したがってパイルアップが起こる。パイルアップの補正はパルサーを用いて行った。また、このために測定用回路はキャンベラ社のモデル 2024 増幅器お

よびモデル 8077 FAST ADCを用いた早い回路を使用した。ガンマ線の波高分布は CAMAC Interface を通して LeCroy 3588 ヒストグラムメモリーに記憶させた。4 k チャンネルのスペクトルは 20 秒（測定時間）ごとにフロッピーディスクに記録した。Fig. 2. はこの回路系の配置図である。

Fig. 3. には測定されたガンマ線スペクトルの例を示す。Fig. 3(a). は "Cd 遮蔽ケースなし" で照射した試料からのガンマ線スペクトルであり、Fig. 3(b). は "Cd 遮蔽ケースあり" で照射した試料からのスペクトルである。

いずれのスペクトルにも  $^{100}\text{Tc}$  から放出される 540 keV ガンマ線と 591 keV ガンマ線のピークが見られる。

#### d) 半減期測定

各照射試料ごとにガンマ線スペクトルを 20 秒ごとに記録してガンマ線ピークの減衰を測定し、 $^{100}\text{Tc}$  の半減期を求めた。Fig. 4. にガンマ線ピークの崩壊図の一例を示す。4 個の照射試料についてそれぞれ 3 回の測定を行い、それぞれについて半減期を求め、その荷重平均をこの実験の結果とした。

Table 3. には各試料ごとの結果を示す。Table 3. の測定値の誤差は統計誤差のみである。測定値の誤差は測定回路による計時の誤差を考慮して 0.1 秒とした。半減期の値はこのことを考慮して  $15.5 \pm 0.1$  秒 となった。

### 1-3 測定データの解析

#### a) データの補正

スペクトルの中のガンマ線のピーク強度の解析の際にはすでに述べたパイラルアップの補正のほかに、540 keV と 591 keV のガンマ線がカスケード放出されるために起こるサムコインシデンスの効果をガンマ線角度相関を考慮して補正した。 $^{100}\text{Tc}$  の娘核の  $^{100}\text{Ru}$  の励起状態のスピンパリティが Fig. 5. に示されるように  $0^+ - 2^+ - 0^+$  であるために、角度相関はかなり大きい。立体角の広がりやガンマ線の検出器内での減衰も考慮してこの実験ではサムの効果は一様分布の場合に比べて前方への強い角度相関のため、2.24倍となり、サムコインシデンスの補正量は 540 keV ガンマに対して 4.4%、591 keV ガンマ

に対して 5.5% となった。

#### b) データ解析

生成された  $^{100}\text{Tc}$  の量はスペクトルのガンマ線ピーク強度から求めた。解析の手続きは次の通りである。

照射時間  $t$  の間に生成率  $R$  で生成された崩壊定数  $\lambda_2$  の放射性核の放射能  $\lambda_2 N_2$  は

$$\lambda_2 N_2 = N_1 \cdot R [1 - \exp(-\lambda_2 t)] \quad \dots (1)$$

である。

ここで  $N_1$  は試料の原子核数である。この式から  $R$  の値が計算できる。十分に減速された中性子場での実効断面積を  $\hat{\sigma}$  とすると  $R$  は次のようになる。

$$R = n v_0 \hat{\sigma} \quad \dots (2)$$

ここで  $n v_0$  は中性子束で、熱中性子および熱外中性子を含む。 $v_0$  の値は  $2200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  であり、 $\hat{\sigma}$  は次のように表される<sup>6)</sup>。

$$\hat{\sigma} = \sigma_0 [g G_{th} + r (T/T_0)^{1/2} \cdot s_0 G_{epi}] \quad \dots (3)$$

$\sigma_0$  は  $2200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  の中性子の反応断面積で、 $g$  は熱中性子領域の  $1/v$  法則からの断面積のズレを示すパラメーターである。 $r (T/T_0)^{1/2}$  は中性子スペクトル中の熱外中性子の割合を示すパラメーターである。 $s_0$  は次の式で表される。

$$s_0 = (2 \pi^{-1/2}) \cdot (I_0' / \sigma_0) \quad \dots (4)$$

$I_0'$  は  $1/v$  成分を差し引いた共鳴積分の値である。 $G_{th}$  および  $G_{epi}$  はそれぞれ熱中性子および熱外中性子に対する自己遮蔽係数である。これらのパラメーターのモニター ( $\text{Co}/\text{Al}$  および  $\text{Au}/\text{Al}$ ) に対する値は Table 4. に示してある。 $g$  および  $G_{th}$  は殆ど 1 として良いのでこの解析では今後  $g G_{th}$  は 1 として取り扱う。

式 (2) と (3) から次の関係が導ける。

$$R / \sigma_0 = n v_0 + n v_0 \cdot r (T/T_0)^{1/2} \cdot s_0 G_{epi} \quad \dots (5)$$

この関係は "Cdなし" の場合に適用される。"Cdあり" の場合には次の式に

なる。

$$R' / \sigma_0 = n' v_0 + n v_0 \cdot r (T/T_0)^{1/2} \cdot (1/K + s_0 G_{epi}) \quad \dots (6)$$

右辺の第1項は Cd 遮蔽の開口部から侵入する強度の弱くなった熱中性子の量を示す。1/Kの項は Cd カットオフ以上の断面積の1/v成分の寄与を示す。Kの値は Cd の厚みから計算される。式(5)と(6)はR/σ<sub>0</sub>とs<sub>0</sub>G<sub>epi</sub>は直線関係にあることがわかる。この関係とモニターのCo/AlおよびAu/AlによるR/σ<sub>0</sub>の測定値を用いてこの実験のR/σ<sub>0</sub>とs<sub>0</sub>G<sub>epi</sub>の関係を求めた。Fig. 6. にその結果を示す。Fig. 6. によればn'(Cd遮蔽のある場合の試料における熱中性子の密度)はn(Cdのない場合の試料における熱中性子の密度)の約1/23.6以下であることがわかり、このカドミウム遮蔽によって熱中性子成分がほとんどカットされていることがわかった。

式(5)と式(6)のn v<sub>0</sub>とr(T/T<sub>0</sub>)<sup>1/2</sup>の値は実験中かならずしも一定ではない。そこで式(5)と(6)を次のように書きなおす。

"Cd遮蔽なし" に対して

$$R / \sigma_0 = \phi_1 + \phi_2 \cdot s_0 G_{epi} \quad \dots (7)$$

"Cd遮蔽あり" に対して

$$R' / \sigma_0 = \phi_1' + \phi_2' \cdot s_0 G_{epi} \quad \dots (8)$$

ここでφ<sub>1,2</sub>とφ'<sub>1,2</sub>は各照射に対して決定される定数である。φ<sub>2</sub>はかならずしもφ'<sub>2</sub>に等しくない。2回の実験でCo/AlおよびAu/Alの中性子束モニターから得られたφ<sub>1,2</sub>とφ'<sub>1,2</sub>の値はTable 5. に示してある。

式(7)と(8)から次の式が得られる。

$$s_0 G_{epi} = - \frac{\phi_1 - \phi_1' \cdot (R/R')}{\phi_2 - \phi_2' \cdot (R/R')} \quad \dots (9)$$

<sup>99</sup>Tc(n, γ)<sup>100</sup>Tc 反応のs<sub>0</sub>G<sub>epi</sub>の値はR/R'から得られる。σ<sub>0</sub>の値は式(7)を用いて求められる。s<sub>0</sub>の値(G<sub>epi</sub> = 1.00)からI'<sub>0</sub>が求まる。カドミウムカットオフエネルギーが0.5 eVの場合は共鳴積分I<sub>0</sub>。

は次のようになる。

$$I_0 = I'_0 + 0.45\sigma_0 \quad \dots (10)$$

ここで  $0.45\sigma_0$  は  $1/v$  の寄与を示す。

断面積  $\sigma_0$ ,  $s_0$ , および  $I'_0$  から得られた各測定 of  $I_0$  の結果は Table 6. に示してある。

ここで統計誤差のほかに次の誤差を考慮した。

- i) 線源-検出器間の距離の誤差による検出効率の誤差: 1.5%
- ii) 検出効率曲線の誤差: 3%
- iii) ターゲット試料 ( $^{99}\text{Tc}$ ) の重量測定による誤差: 0.06%
- iv) 半減期の誤差:  $\pm 1$  s. (約 1%)
- v) 中性子束測定による誤差: 3.5%

この実験の測定値としては 540 keV ガンマ線による測定 of 平均値を採用することにする。591 keV ガンマ線の相対強度は 540 keV ガンマ線に対して  $82 \pm 6\%$ <sup>8)</sup> で、やや不確かさが伴うからである。しかし、Table 6. に見られるように二つのガンマ線による測定値は差の範囲でほぼ一致している。

熱中性子吸収断面積および共鳴積分の値として次の結果を得た。

$$\sigma_0 = 22.7 \pm 1.1 \text{ b.}$$

$$I_0 = 395 \pm 34 \text{ b.}$$

この  $\sigma_0$  の結果は Ovechkin et al.<sup>3)</sup> の結果とほぼ一致した。

#### 1-4. まとめ

立教大学の原子炉を利用して放射性核分裂生成核種  $^{99}\text{Tc}$  の中性子吸収断面積と共鳴積分の測定を行った。円筒状のカドミウム遮蔽ケースを用いて熱中性子成分を  $1/23.6$  以下にすることが出来た。試料ターゲット内の  $^{99}\text{Tc}$  の原子核数は液体シンチレーション法で決定した。照射済み試料からのガン

マ線は大型のゲルマニウム検出器で測定した。“Cd なし照射”と“Cd あり照射”の測定結果を解析して熱中性子吸収断面積( $\sigma_0$ )と共鳴積分( $I_0$ )の値として次の値を得た。

$$\sigma_0 = 22.7 \pm 1.1 \text{ b.}$$

$$I_0 = 395 \pm 34 \text{ b.}$$

## 2. $^{129}\text{I}(\text{n}, \gamma)^{130}\text{I}$ 反応の断面積について

$^{129}\text{I}$  は核分裂生成率は 0.7% であるが、半減期は  $1.6 \times 10^7$  年と長いので、 $^{99}\text{Tc}$  よりもさらに長期にわたって放射線を放出し続ける。したがってこの核種も消滅処理をすることを考えたい。そのための基礎データとして中性子吸収断面積の調査を行った。結果は Block et al.<sup>5)</sup> による Fast chopper TOF による測定値 ( $35 \pm 4 \text{ b.}$ ) があるのみである。評価値<sup>7)</sup> は 27 b. であった。そこで  $^{129}\text{I}$  についても放射化法で中性子吸収断面積の測定を行うことにした。

平成 5 年度は実験のための予備検討として実験に必要なターゲット核の量を計算し、それに基づいて予備実験を行った。必要量は計算では 1 試料あたり約 100 Bq の  $^{129}\text{I}$  があれば充分である、となった。この結果により試料を作成し、立教大学の原子炉で 10 分間の中性子照射を行って測定した照射済み試料からのガンマ線スペクトル中に  $^{130}\text{I}$  のガンマ線が検出され、実験を行うことが出来ることがわかった。平成 6 年度にはこの予備測定に基づいて  $^{129}\text{I}$  の中性子吸収断面積の測定を行う予定である。

## 謝辞

本研究は動力炉・核燃料開発事業団からの委託によるものである。この研究を実施する機会を与えられた同事業団には深く感謝致します。同事業団の高橋武士部長には絶えずご支援とご協力をして頂きました。原田秀郎氏と中村詔司氏とは実験をともにし、データの解析は全面的にお世話になりました。

立教大学原子力研究所の戸村健児教授には試料の中性子照射でお世話になりました。名古屋大学アイソトープ総合センターの緒方良至氏は試料の原子核数を液体シンチレーション法で測定してくださいました。以上の方々には深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 加藤敏郎： 動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書，  
PNC J1603 90-002, 1990年 3月
- 2) 加藤敏郎： 動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書，  
PNC PJ1603 91-002, 1991年 3月
- 3) B. B. Ovechkin et al.: INIS-mf-1543
- 4) N. J. Pattenden: P/11 UK
- 5) R. C. Block et al.: Nucl. Sci. Engineering, 8 p112(1960)
- 6) Westcott, C.H., Walker, W.H., Alexander, T.K.: Proc. 2nd Int. Conf.  
Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, United Nations, New York,  
16, 70(1958)
- 7) JNDC: JAERI 1320(1990)
- 8) G. Berzins, M. E. Bunker, J. W. Starner: Phys. Rev. 187 no.4 p1618  
(1969)

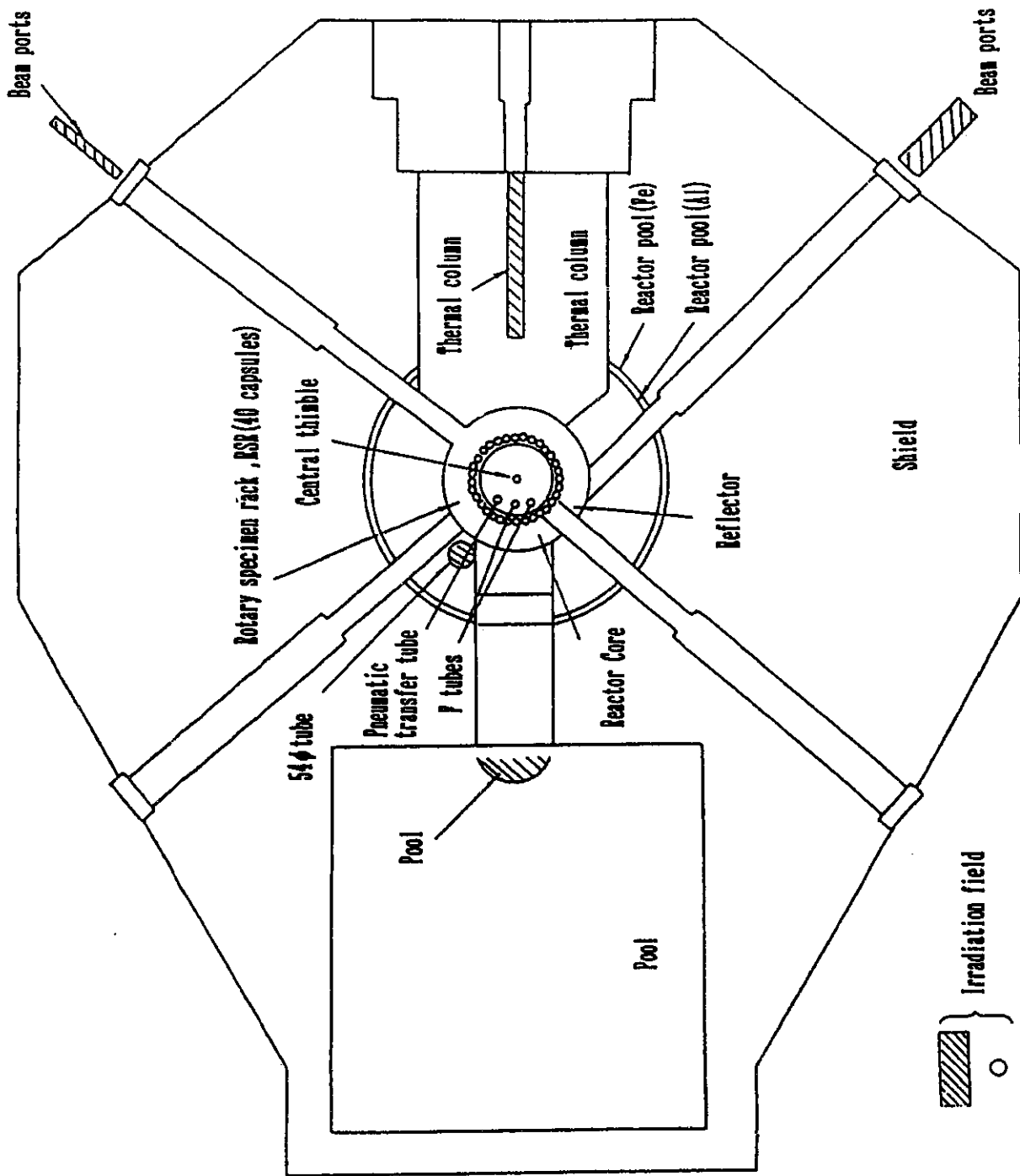
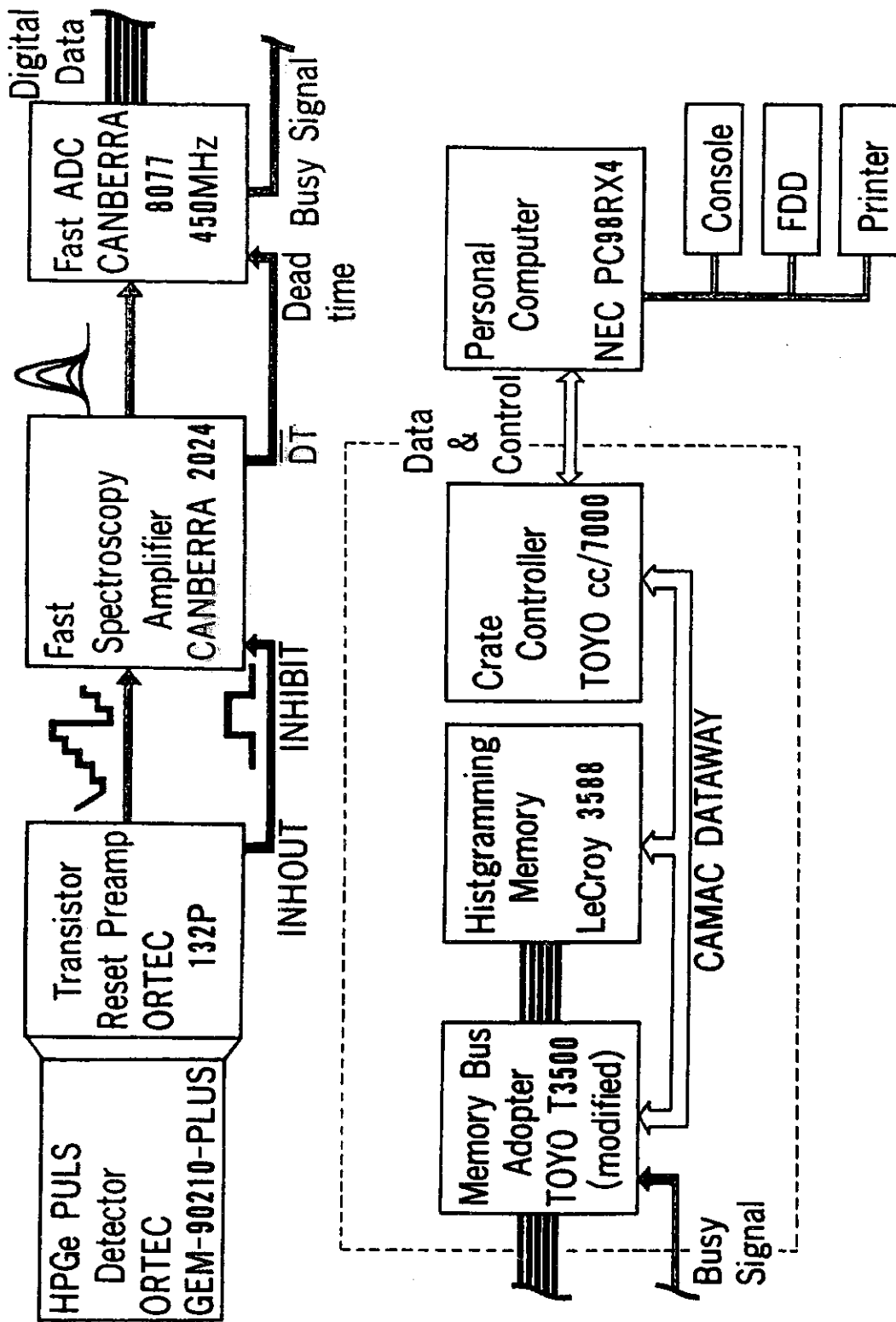


Fig. 1. 立教大学原子炉の照射孔配置図





**High Count Rate Spectroscopy Systems**

Fig. 2. 測定回路系

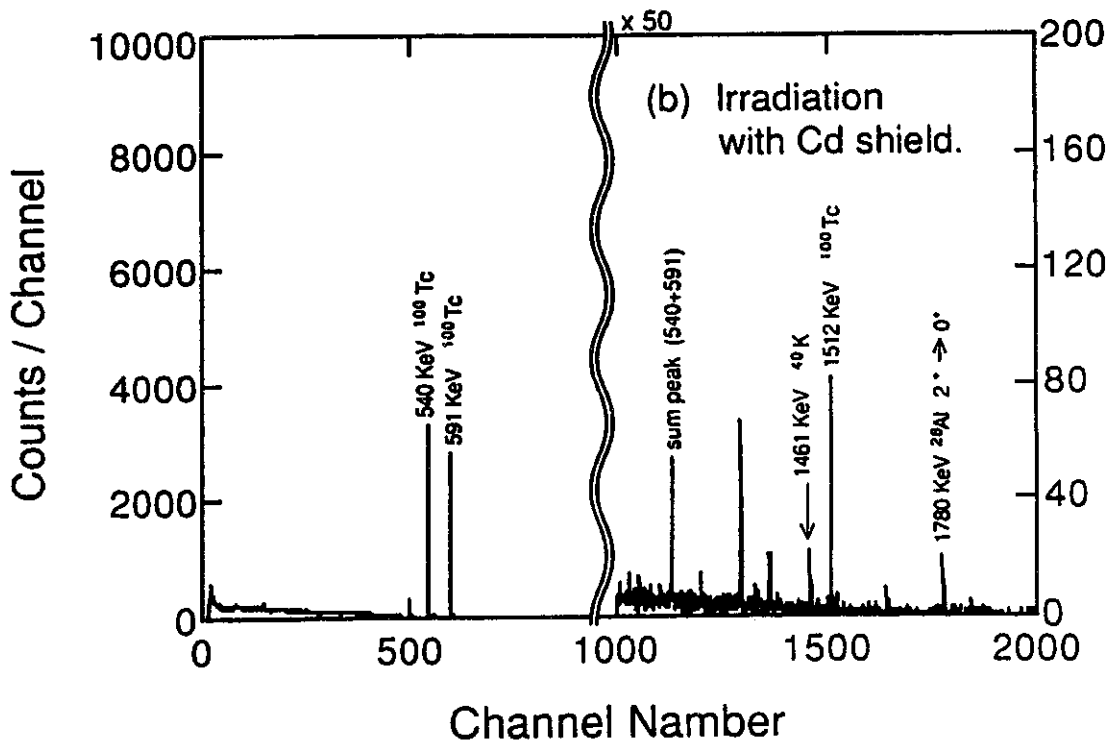
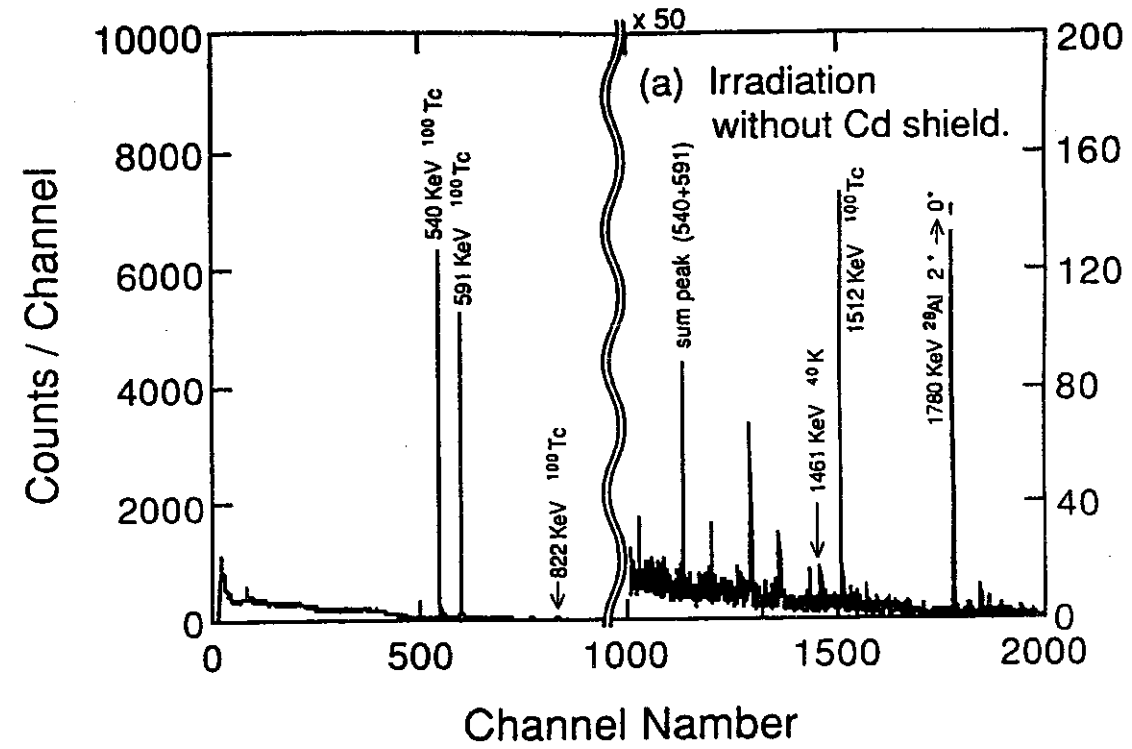


Fig. 3. 照射済み  $^{99}\text{Tc}$  試料 ( $^{100}\text{Tc}$  を含む) からのガンマ線スペクトル

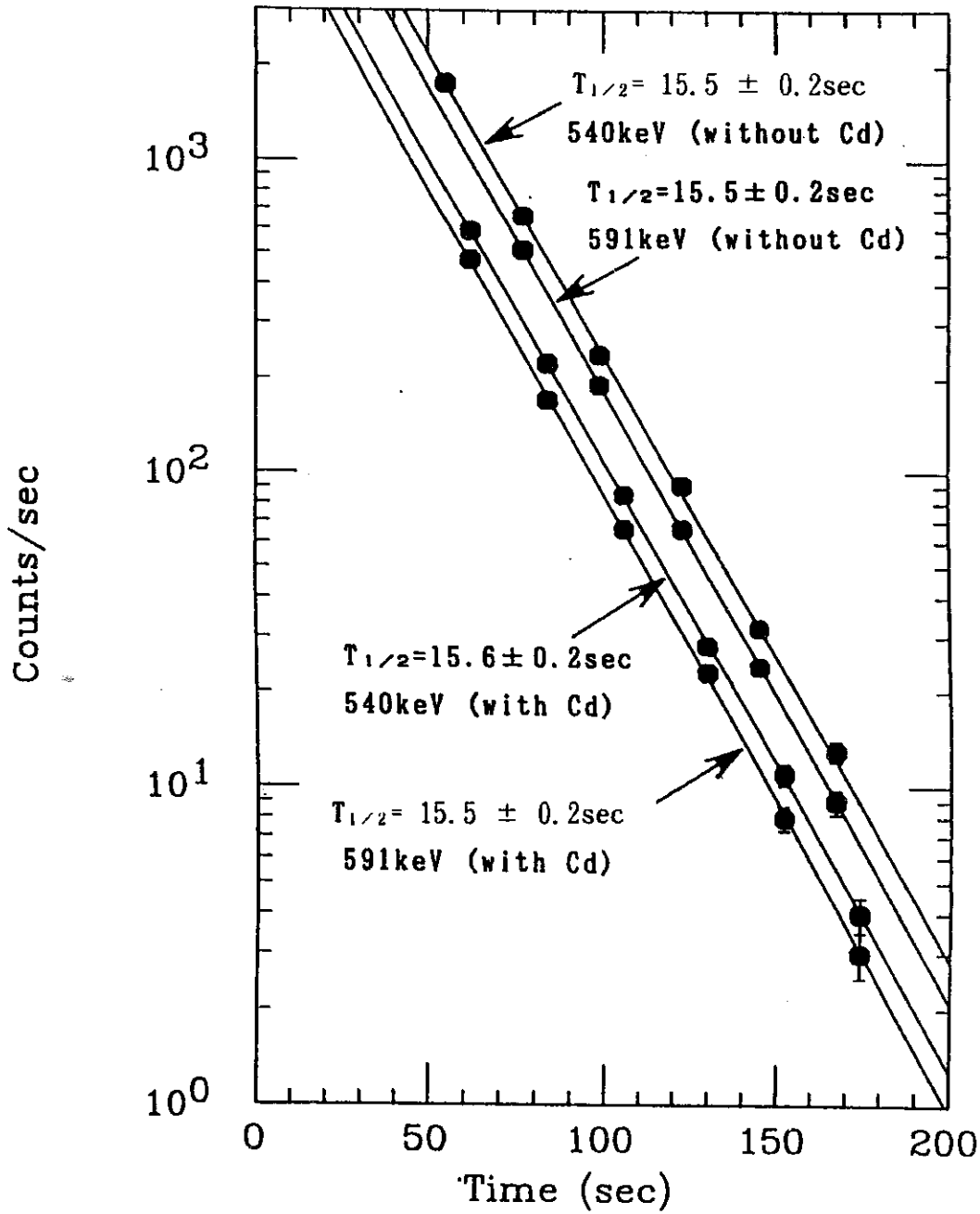


Fig. 4.  $^{100}\text{Tc}$  からのガンマ線の崩壊曲線

# Level Scheme

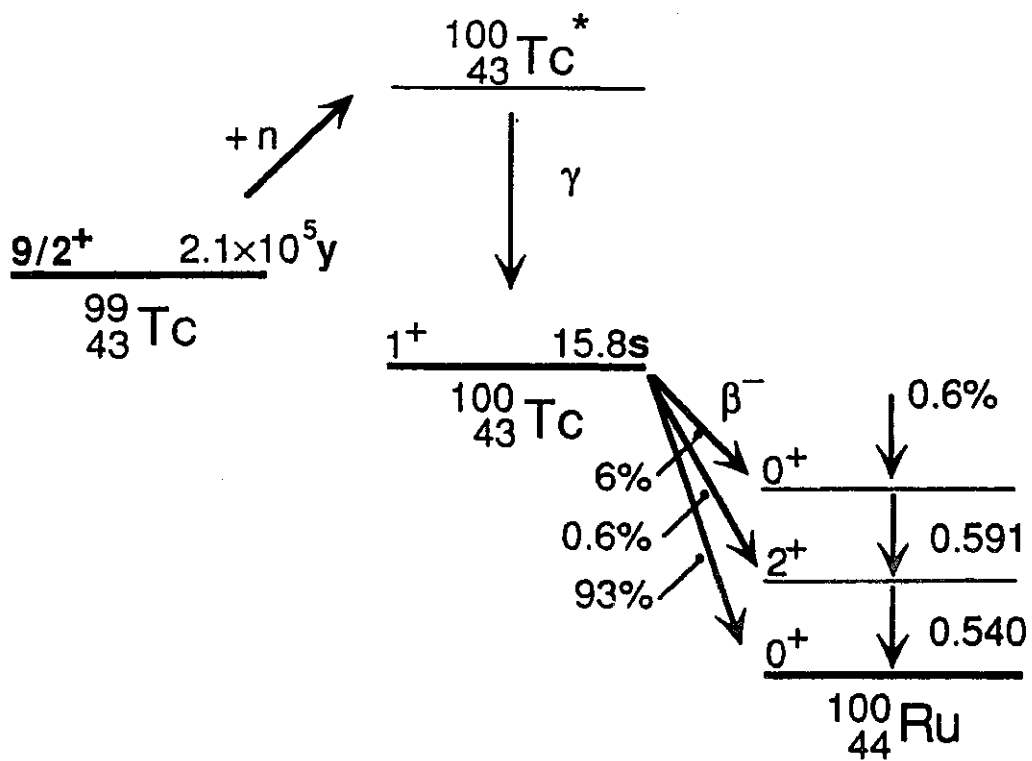


Fig. 5.  $^{100}\text{Tc}$  の崩壊図

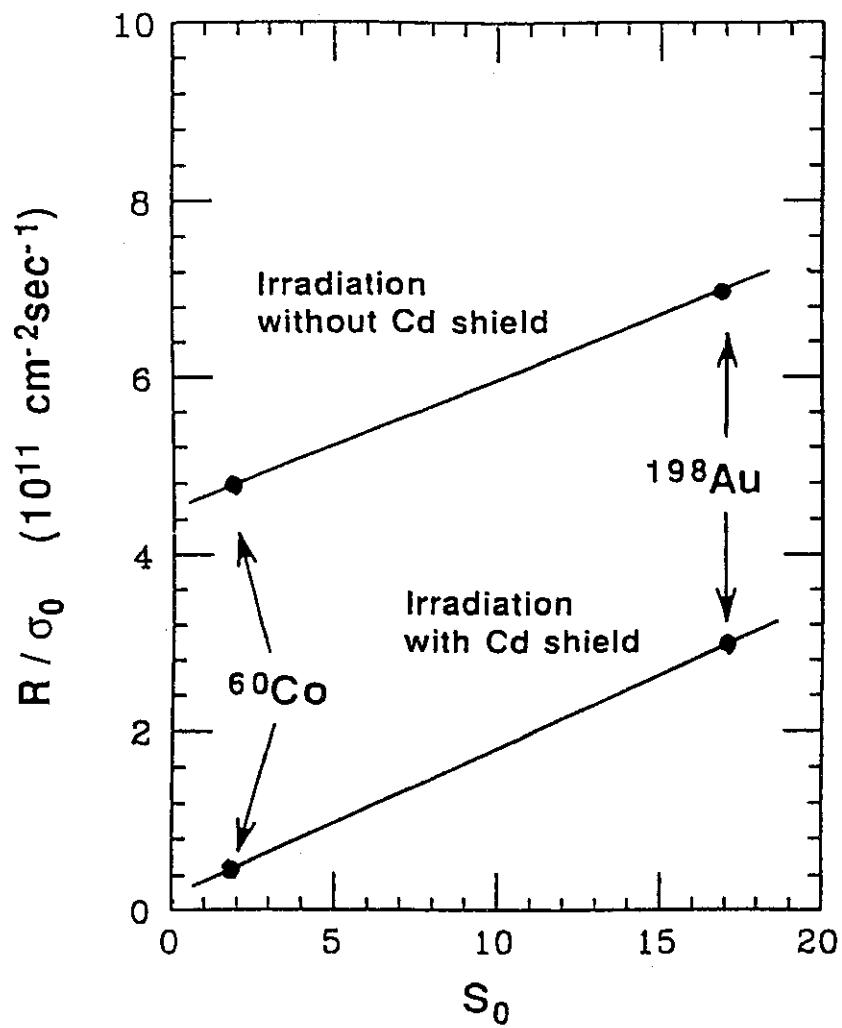


Fig. 6. モニター (Co および Au) による  $R/\sigma_0$  と  $s_0 G_{epi}$  の関係

Table 1. Activity and number of nucleus in the  $^{99}\text{Tc}$  targets

Target No.	Weight(g)	Activity(kBq)	No. of nucleus
#3	0.80810	372.228	$3.63 \times 10^{18}$
#4	0.80470	370.661	$3.61 \times 10^{18}$
#5	0.81460	375.222	$3.65 \times 10^{18}$
#6	0.80760	371.997	$3.62 \times 10^{18}$

(Specific activity of sample solution: 460.62 kBq/g)

Table 2. Nuclear data of monitors

Nuclide	Half-life	Gamma-ray Energy(keV)	Gamma-ray Intensity
$^{60}\text{Co}$	5.271 y.	1173	1.00
		1332	1.00
$^{198}\text{Au}$	2.696 d.	412	0.955

Table 3. Results of half-life measurement of  $^{100}\text{Tc}$

Target No.	Half-life	
	$E_{\gamma}:540 \text{ keV}$	$E_{\gamma}:591 \text{ keV}$
#3 no Cd shield	$15.51 \pm 0.10 \text{ s}$	$15.49 \pm 0.11 \text{ s}$
#3 with a Cd shield	$15.50 \pm 0.14$	$15.30 \pm 0.15$
#4 no Cd	$15.49 \pm 0.10$	$15.57 \pm 0.09$
#4 with Cd	$15.53 \pm 0.18$	$15.32 \pm 0.18$
#5 no Cd	$15.50 \pm 0.09$	$15.52 \pm 0.09$
#5 with Cd	$15.58 \pm 0.14$	$15.45 \pm 0.14$
#6 no Cd	$15.53 \pm 0.11$	$15.55 \pm 0.09$
#6 with Cd	$15.42 \pm 0.14$	$15.46 \pm 0.14$

Weighted average of measured half-life:  $15.50 \pm 0.04 \text{ s}$

Table 4. Data used for the determination of  $n\sigma_0$  and  $r(T/T_0)^{1/2}$  from radioactivities in flux monitors

Nuclear Reaction	$\sigma_0$ (b)	g	$G_{th}$	$S_0$	$G_{epi}$
$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$	37.2	1.00	1.00	1.83	1.00
$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	98.8	1.00	1.00	17.02	1.00

Table 5. Result of neutron flux determination

Irradiation type	Irradiation period	$\phi_1$ or $\phi_1'$ ( $10^8$ n/cm <sup>2</sup> ·s)	$\phi_2$ or $\phi_2'$ ( $10^8$ n/cm <sup>2</sup> ·s)
without Cd	10 min	$4.615 \pm 0.076$	$0.152 \pm 0.009$
with Cd	10 min	$0.196 \pm 0.014$	$0.168 \pm 0.004$

$$R/\sigma_0 = \phi_1 + \phi_2 \cdot S_0 G_{epi}$$

for irradiation without a Cd shield,

$$R'/\sigma_0 = \phi_1' + \phi_2' \cdot S_0 G_{epi}$$

for irradiation with a Cd shield.



Table 6-1. Results of measurement of neutron capture cross section and resonance integral

Measurement by the 540 keV  $\gamma$ -ray

( $\beta$ -branch: 5.7 + 0.54%, relative  $\gamma$ -intensity: 100%)

Run	Target no.	R/R'	$s_0$	$\sigma_0$ (b)	$I_0$ (b)
1	#3	2.16 $\pm$ 0.16	19.9 $\pm$ 1.8	22.7 $\pm$ 1.4	409 $\pm$ 47
	#4	2.19 $\pm$ 0.16	19.4 $\pm$ 1.7	22.8 $\pm$ 1.4	401 $\pm$ 46
	#5	2.24 $\pm$ 0.16	18.6 $\pm$ 1.7	23.4 $\pm$ 1.4	397 $\pm$ 45
	#6	2.24 $\pm$ 0.16	18.6 $\pm$ 1.7	23.3 $\pm$ 1.4	394 $\pm$ 45
2	#3	2.17 $\pm$ 0.16	19.7 $\pm$ 1.8	22.1 $\pm$ 1.4	396 $\pm$ 46
	#4	2.19 $\pm$ 0.16	18.5 $\pm$ 1.6	22.8 $\pm$ 1.4	383 $\pm$ 43
	#5	2.21 $\pm$ 0.16	19.1 $\pm$ 1.7	22.4 $\pm$ 1.4	389 $\pm$ 44
	#6	2.16 $\pm$ 0.16	19.8 $\pm$ 1.8	21.9 $\pm$ 1.3	394 $\pm$ 45
weighted average:			19.2 $\pm$ 1.2	22.7 $\pm$ 1.1	395 $\pm$ 34

Table 6-2(つづき).

Measurement by the 591 keV  $\gamma$ -ray

( $\beta$ -branch: 5.7%, relative  $\gamma$ -ray intensity:  $82 \pm 6\%$ )

Run	Target no.	R/R'	$s_0$	$\sigma_0(b)$	$I_0(b)$
1	#3	$2.16 \pm 0.16$	$19.8 \pm 1.8$	$23.1 \pm 1.4$	$417 \pm 48$
	#4	$2.24 \pm 0.16$	$18.7 \pm 1.7$	$24.3 \pm 1.5$	$413 \pm 47$
	#5	$2.25 \pm 0.17$	$18.4 \pm 1.7$	$24.4 \pm 1.5$	$411 \pm 47$
	#6	$2.22 \pm 0.16$	$18.9 \pm 1.7$	$24.1 \pm 1.5$	$417 \pm 47$
2	#3	$2.13 \pm 0.16$	$20.3 \pm 1.9$	$22.8 \pm 1.4$	$421 \pm 49$
	#4	$2.22 \pm 0.16$	$18.8 \pm 1.7$	$23.7 \pm 1.5$	$409 \pm 47$
	#5	$2.26 \pm 0.16$	$18.4 \pm 1.6$	$23.8 \pm 1.5$	$398 \pm 45$
	#6	$2.20 \pm 0.16$	$19.3 \pm 1.7$	$23.3 \pm 1.4$	$409 \pm 47$
weighted average:			$19.0 \pm 1.2$	$23.7 \pm 1.2$	$411 \pm 36$