

# 中性子測定による光核反応断面積の研究

(東北大学 動力炉・核燃料開発事業団共同研究成果報告書)

1997年3月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

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

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

動力炉・核燃料開発事業団

( Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation ) 1997

公開資料

PNC TY8601 97-001

1997年3月

## 中性子測定による光核反応断面積の研究

(平成8年度 東北大学 動力炉・核燃料開発事業団共同研究成果報告書)<sup>1)</sup>

笠木治郎太<sup>2)</sup>, 木下忠<sup>2)</sup>, 依田哲彦<sup>2)</sup>, 山崎寛仁<sup>2)</sup>, 原田秀郎<sup>3)</sup>, 重留義明<sup>3)</sup>

### 要旨:

東北大学と動力炉・核燃料開発事業団は、光核反応による放射性核廃棄物処理の可能性を追及するための基礎データを得ることを目的として、中性子測定による光核反応断面積の共同研究を行った。平成8年度は中性子測定を行うための検出器系の開発を目標に光中性子放出反応測定の予備実験を実施した。

実験は、工業技術院電子技術総合研究所リニアック棟電子蓄積リング施設で行った。蓄積リングに周回する748 MeVの電子に、レーザー光を入射し、逆コンプトン散乱によって発生したガンマ線の水標的に入射し、放出される中性子数を測定した。今年度は、来年度から予定している中性子測定による光核反応断面積の研究を行うのに適した中性子測定系を開発し、開発した中性子測定系が十分な粒子識別能力を有すること、バックグラウンドの中性子と目的とする光核反応の中性子が識別可能であることを確認した。

平成9年度は今回開発した中性子測定系を使用し、中性子測定による光核反応断面積の新たな手法を開発、確立する予定である。

---

<sup>1)</sup> 本報告書は東北大学理学部（担当者：笠木治郎太）と動力炉・核燃料開発事業団との共同により実施した研究の成果である。

<sup>2)</sup> 東北大学 東北大学理学部附属原子核理学研究施設

<sup>3)</sup> 動力炉・核燃料開発事業団 核燃料技術開発部 先端技術開発室

Study of the photonuclear reaction cross section by using neutron detection<sup>1)</sup>

J. Kasagi<sup>2)</sup>, T. Kinoshita<sup>2)</sup>, T. Yorita<sup>2)</sup>, H. Yamazaki<sup>2)</sup>, H. Harada<sup>3)</sup>, Y. Shigetome<sup>3)</sup>

Abstract:

A study of photonuclear reaction cross section by using neutron detection was performed to obtain fundamental data for the transmutation of radioactive nuclear wastes by the collaboration of Tohoku University and Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp. The test experiments of  $(\gamma, n)$  reaction, which were aimed at development of a neutron detection system were performed in this year.

The experiments were carried out at Electrotechnical Laboratory, Agency of Industrial Science and Technology. The photon beam was produced by backscattering of a laser light from a 748 MeV electron beam in the electron storage ring. The neutrons which were emitted from the water target were measured. The neutron detection system which had enough ability to distinguish neutrons from gamma rays was successfully developed in this year. It is found that this detector system is very useful to measure the photoneutron clearly separated from the background events.

---

<sup>1)</sup> This work was performed by J. Kasagi *et al.*, Tohoku University under the contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp.

<sup>2)</sup> Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University

<sup>3)</sup> Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp.

# 目次

1 背景 .....	2
2 本研究の目的 .....	2
3 実験 .....	3
3.1 実験方法.....	3
3.2 中性子の測定.....	4
3.3 実験(1)の方法.....	5
3.4 実験(2)の方法.....	5
4 結果 .....	6
4.1 実験(1)の結果.....	6
4.2 実験(2)の結果.....	6
5 まとめ.....	7
謝辞 .....	8
図 .....	9

## 1 背景

現在、原子力発電により生じる放射性核廃棄物の処理が社会的な関心を集めている。原田らは、巨大共鳴領域に於ける光核反応によって中性子を放出する反応に着目し、高純度ゲルマニウム半導体検出器を使った光吸収断面積の微細構造の探索実験に着手した。この実験は近年の高純度ゲルマニウム半導体検出器の進歩によって可能となった実験であり、世界でも初めての試みである。この実験は、目的とする原子核標的に光子を入射し、反応を起こすことなく透過した光子の数を、エネルギー分解能数 keV の高分解能で測定することにより、現在まで知られていなかった巨大共鳴領域に於ける極めて狭い幅の共鳴を探索することを目的としている。光子を吸収した長寿命の核種は、巨大共鳴を経由した後中性子を放出し、短寿命の核種に変化する事が期待される。現在まで行われてきた研究によって、巨大共鳴領域に於ける光吸収反応の断面積は、数百 keV 程度のエネルギー分解能で調べられている。極めて幅の狭い共鳴が存在するならば、その光吸収断面積はその共鳴に集中することが予想される。この事は、効率良く核廃棄物処理を行う際に必要な条件である。巨大共鳴領域の微細構造を探索し、将来の光核反応による核廃棄物処理の可能性を探るこの実験は、極めて興味深い。

原田らの現在開発している実験方法は、光吸収断面積をエネルギー分解能良く決定する事が可能であるが、励起された共鳴状態が中性子を放出して崩壊するか否かは確認することができない。そのため、東北大学のグループは、原田らのグループとの共同実験によって光中性子放出反応の断面積測定実験を計画した。東北大グループの担当した光中性子放出反応の断面積測定は、原田らによる光吸収断面積の測定を補うものであり、将来の光核反応による核廃棄物処理の可能性を探る上で重要な資料となる。

## 2 本研究の目的

本研究の最終的な目的は、巨大共鳴領域に於ける光中性子放出反応の反応断面積を精密に測定することにあるが、本年度はその測定手法の確立を目的とした。具体的には次の3点を目的とする。

1. レーザー逆コンプトン反応によるガンマ線発生装置（電子蓄積リング）が稼働している環境の元で、液体有機シンチレーター（NE213）を使用し、中性子とガンマ線を識別すること。

2. レーザー逆コンプトン反応によるガンマ線発生装置（電子蓄積リング）からのバックグラウンド中性子の性質を理解し、バックグラウンド中性子と光核反応に起因する中性子とを識別すること。
3. 1., 2.の結果を基に、光中性子放出反応の反応断面積を測定する手法を確立すること。

### 3 実験

実験は工業技術院電子技術総合研究所(ETL)リニアック棟電子蓄積リング施設で行った。ガンマ線は、電子蓄積リング内で周回する最高エネルギー748 MeVの電子にレーザー光を入射し、コンプトン散乱を起こすことで発生する。得られたガンマ線を鉛でコリメートした後に標的に入射し、実験を行う。

今回の本研究の目的は、光中性子反応断面積の測定手法を確立することであるが、原田らの光吸収断面積の測定実験のパラサイト実験として実験を行った。原田らの実験では、これまでの研究で比較的幅の狭い共鳴の存在が確認されている酸素の吸収断面積を測定することを目的としているため、取り扱いが容易な水を標的として使用した。

光中性子反応の測定手法を確立するにあたり、次の二点を明らかにする必要がある。

1. 電子蓄積リング稼働している環境下でガンマ線と中性子の粒子識別を行うことができるか否か。
2. リングから発生するバックグラウンド中性子を効率良く排除し、光核反応起源の中性子のみを選び出すことができるか。

以上の二点を明らかにするために、実験は二回に分けて実施した。一回目の実験は鉛、及びコンクリートで完全に遮蔽した部屋の中で $^{16}\text{O}(\gamma, n)$ 反応によって発生する中性子を検出した。二回目の実験は、鉛、コンクリートによる遮蔽を行わずに $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ を標的とした実験を行い、反応しきい値の違いから光核反応起源の中性子と、バックグラウンド中性子の計数率の違いを比較した。

#### 3.1 実験方法

実験は、実験(1)、実験(2)と二回に分けて実施したが、どちらの実験においても約600 mm長(1 radiation length に相当)の $\text{H}_2^{16}\text{O}$ 及び $\text{H}_2^{18}\text{O}$ を標的として使用した。この水標的の大きさはガンマ線のビームサイズより充分大きく、ビーム

を完全に覆うように設置した。

実験(1), 実験(2)は, 遮蔽とバックグラウンド中性子の関係を調べるためにセットアップが異なっている。また, 原田らの実験のパラサイト実験として実験を行ったため, バックグラウンド中性子と, 光核反応起源の中性子の識別方法も, 異なった方法を採用している。そこで, 本報告書においては, 3.2 節で両者の実験に共通する中性子検出器と, ガンマ線と中性子の識別方法について述べ, 3.3, 3.4 節で実験(1), 実験(2)を個別に報告する。

### 3.2 中性子の測定

中性子の検出には 300 mm  $\phi$  x 100 mm の液体シンチレーション・カウンター (NE213) に光電子増倍管 (R1250, 浜松フォトニクス社製) を接合した検出器を用いた。

NE213 のシンチレーション光は, 光の減衰時間の長い ‘遅い成分’ と, 減衰時間の短い ‘速い成分’ の二成分からなる。中性子が NE213 に入射した場合には, NE213 中の陽子と中性子が弾性衝突し, 衝突によってエネルギーを得た陽子が NE213 中でエネルギーを失うことによって発光する。一方ガンマ線が NE213 に入射した場合には, ガンマ線と NE213 中の電子とのコンプトン散乱により電子がエネルギーを獲得し, そのエネルギーを失うことで発光する。このように中性子とガンマ線の発光機構が異なるため, 遅い成分と速い成分の割合を比較すると, 中性子を入射したときの検出器の出力は, ガンマ線を入射したときの出力と比較して, 遅い成分の割合が多くなる。そこで, 図 1 に示すように, fast gate と total gate の二つのゲートで中性子検出器の出力信号の電荷量の積分を行い, 双方の電荷量を比較することによって中性子とガンマ線の粒子識別を行うことが可能である。

図 2 に,  $^{252}\text{Cf}$  から放出されるガンマ線と中性子を実験に使用する中性子検出器で測定したときの, fast gate の範囲で積分された電荷量の ADC データ (以後 fast 成分) と, total gate の範囲で積分された電荷量の ADC データ (total 成分) の二次元プロットを示す。 $^{252}\text{Cf}$  は, 自発的核分裂で崩壊し, その際数個の中性子とガンマ線を放出するため, 中性子検出器の校正に使用される放射線源である。図の横軸は total 成分, 縦軸は fast 成分である。中性子検出器の検出しきい値は 1 MeVee に設定している。検出しきい値は, 次節から説明するガンマ線をつかった実験においても同じ値を採用している。

図中には原点近くから斜めに伸びるローカスが二本確認できる。上側に存在するローカスはガンマ線が中性子検出器に入射した場合の出力に相当し, その下



に存在するローカスは中性子が入射した時の出力に相当する。この様にして、total ゲートと fast ゲートの二種類のゲートにより検出器の出力信号の電荷量を積分し比較することにより、ガンマ線と中性子を識別することができる。

### 3.3 実験(1)の方法

レーザー逆コンプトン散乱によって発生した最高エネルギー20 MeVのガンマ線を鉛のコリメータにより準単色化した後に、 $\text{H}_2\text{O}$  標的に入射し、発生する中性子数を測定する。 $^{16}\text{O}$  の中性子放出しきい値は 15.7 MeV のため、最高エネルギー20 MeV のガンマ線を入射した場合には、 $^{16}\text{O}(\gamma, n)$  反応によって中性子が放出されることが期待される。

図 3a に実験(1)のセットアップを示す。図のように、この実験は鉛とコンクリートで完全に遮閉された部屋の中で行ったため、リングや鉛のコリメーターから発生するバックグランド中性子の計数率は充分小さいものと予想できる。そこで、バックグランド中性子の見積りは、標的がある場合とない場合の中性子の計数率と比較し、標的がない場合に検出される中性子をバックグランド中性子として見積もることとする。

### 3.4 実験(2)の方法

図 3b に実験(2)のセットアップを示す。この実験は、電子蓄積リングや鉛のコリメーターから放出されるバックグランド中性子の性質を把握するために、実験(1)で使用した鉛、及びコンクリートで遮蔽された部屋の外で実験を行った。このような条件のもとでは、実験(1)と比較し、バックグランド中性子や、中性子の粒子識別の際にバックグランドとなるガンマ線が多くなると考えられる。そこで、レーザー逆コンプトン散乱によるガンマ線の最高エネルギーを 12 MeV とし、 $\text{H}_2^{16}\text{O}$ 、 $\text{H}_2^{18}\text{O}$  の二種類の標的を使用した。 $^{16}\text{O}$  の中性子放出しきい値は 15.7 MeV、 $^{18}\text{O}$  の中性子放出しきい値は 8.0 MeV なので、最高エネルギー12 MeV のガンマ線を入射した場合には  $^{16}\text{O}(\gamma, n)$  反応は起こらずに、 $^{18}\text{O}(\gamma, n)$  反応のみが起こると考えられる。そこで、 $\text{H}_2^{16}\text{O}$ 、 $\text{H}_2^{18}\text{O}$  の標的を 100 秒ごとに入れ換え、それぞれの中性子計数率を比較することによってバックグランド中性子の数を見積もることとした。具体的には、 $\text{H}_2^{16}\text{O}$  標的の際に計数された中性子はすべてバックグランド中性子と仮定し、 $\text{H}_2^{18}\text{O}$  標的の際に計測された中性子の数と比較し、このようなセットアップのもとで光核反応に起因する中性子のみを測定することが可

能かどうか判断する。

## 4 結果

### 4.1 実験(1)の結果

実験(1)の結果を図4, 図5に示す。図の横軸, 及び縦軸は, 図2の場合と同様に横軸に total 成分, 縦軸に fast 成分である。図4は  $H_2^{16}O$  標的ありの場合の測定結果, 図5は標的がない場合の測定結果である。図4を見ると, 図2の  $^{252}Cf$  を測定した時ほど明確に中性子, ガンマ線によるローカスは見えていないが, 実用的な範囲において中性子とガンマ線の識別ができていることが判る。total 成分を10チャンネルごとに分割し, ガンマ線が中性子事象に混入する割合を見積もったところ, total 成分の大きさによって違いがあるものの, 総じて10%以下であることが明らかになった。この事から, 我々の計画している中性子検出系は, 電総研蓄積リングに於けるレーザー逆コンプトン( $\gamma, n$ )反応の中性子検出を行うにあたり, 十分な中性子識別能力を持つことが明らかになった。

粒子識別を行った後に, 標的がある場合とない場合について平均の計数率を求めると,  $H_2^{16}O$  標的がある場合には  $3.2 \times 10^{-2}$  count/sec, 標的がない場合には  $4.4 \times 10^{-3}$  count/sec となる。この事から, 鉛, コンクリートによって遮蔽された環境のもとでは, バックグラウンドとなる蓄積リングや鉛コリメーターからの中性子の数は, 光核反応に起因する中性子の数のほぼ1/10に押さえられていることが明らかになった。この結果は, 来年度に予定している光中性子放出反応の精密実験を行うにあたり, 十分なSN比である。しかしながら, 中性子の収量はこれから実験を行う上で十分な収量とは言い難い。来年度以降の研究を進める上で, 今後中性子検出器の立体角を増やすこと等を検討する必要がある。

### 4.2 実験(2)の結果

鉛, コンクリートで遮蔽しない場合の結果を図6, 図7に示す。図6,7はそれぞれ  $H_2^{16}O$ ,  $H_2^{18}O$  を標的とした場合の結果である。実験(1)では, ガンマ線と中性子の粒子識別において, 中性子中に10%以下のガンマ線の混入が見られたため, 実験(2)においては, 測定回路系に多少の改善を加えた。そのため, 鉛, コンクリートによる遮蔽が無い環境でガンマ線の計数率が増大しているにも関わらず, ほとんどガンマ線の混入がなく中性子の粒子識別を行うことが可能となった。図中の直線で囲まれている部分を中性子検出器に中性子が入射した事象

として、以下の解析を行う。

実験(2)において中性子の計数率を求める際に、 $\text{H}_2^{16}\text{O}$  標的の場合と  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  標的の場合で両者の計数率に大きな違いは認められなかった。そのため、バックグラウンド中性子と光核反応起源の中性子の数の比を議論するためには十分な統計精度を必要とする。また、電子蓄積リングに電子を入射した直後にはバックグラウンド中性子の数が増大すると考えられるため、蓄積リングへの電子入射から半日程度経過した後のデータのみを使用し、 $\text{H}_2^{16}\text{O}$  標的の場合と  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  標的の場合について、1200 秒当たりの中性子の計数率を求めた。1200 秒の測定で検出された中性子数は、 $\text{H}_2^{18}\text{O}$  標的の場合には  $381 \pm 19$  counts,  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  標的の場合には、 $329 \pm 18$  counts であった。 $\text{H}_2^{16}\text{O}$  標的の場合に検出された中性子は全てバックグラウンド中性子であり、 $\text{H}_2^{18}\text{O}$  標的の場合に検出された中性子はバックグラウンド中性子と光核反応起源の中性子の和であると考え、両者の計数は一標準偏差以上の差が存在するため、 $\text{H}_2^{18}\text{O}$  標的の場合には光核反応起源の中性子が含まれているものとするのが妥当である。しかしながら、光核反応起源の中性子と比較して、バックグラウンド中性子の計数は 7 倍以上となり、今後計画している光中性子放出反応の精密実験を行うにあたって、実験(2)のようなセットアップは適当ではない事が明らかになった。

## 5 まとめ

本研究において中性子測定による光核反応断面積測定実験のための中性子検出器系を開発し、工業技術院電子技術総合研究所(ETL)リニアック棟電子蓄積リング施設において中性子測定の予備実験を行った。その結果、実用上十分な粒子識別能力を持つ中性子検出器系を開発することができた。

バックグラウンドとなる中性子やガンマ線の性質を把握するため、検出器の遮蔽の条件を変えて実験を実施した。その結果、鉛、コンクリートで遮蔽を行った条件のもとでは、1/10 程度の十分な S/N 比が得られることが明らかになった。また、その時の光核反応起源の中性子の収量は  $3.2 \times 10^{-2}$  count/sec であった。

以上の結果から、今後中性子測定による光核反応断面積の研究を行うために、中性子検出器の大立体角化、入射ガンマ線量を増やす等の対策が必要なことが明らかになった。

## 謝辞

本研究は、東北大学と動力炉・核燃料開発事業団との共同研究によるものです。この研究を実施する機会を与えてくださった関係者の皆様，特に工業技術院電子技術総合研究所量子放射部の山崎鉄夫部長に深く感謝いたします。

実験を実施するにあたり，工業技術院電子技術総合研究所の大垣英明氏，野口勉氏には，加速器のオペレーションから実験の実施まで広い範囲にわたりお世話になりました。両氏の献身的なお世話無くしてはこの研究は成り立ちませんでした。深く感謝いたします。

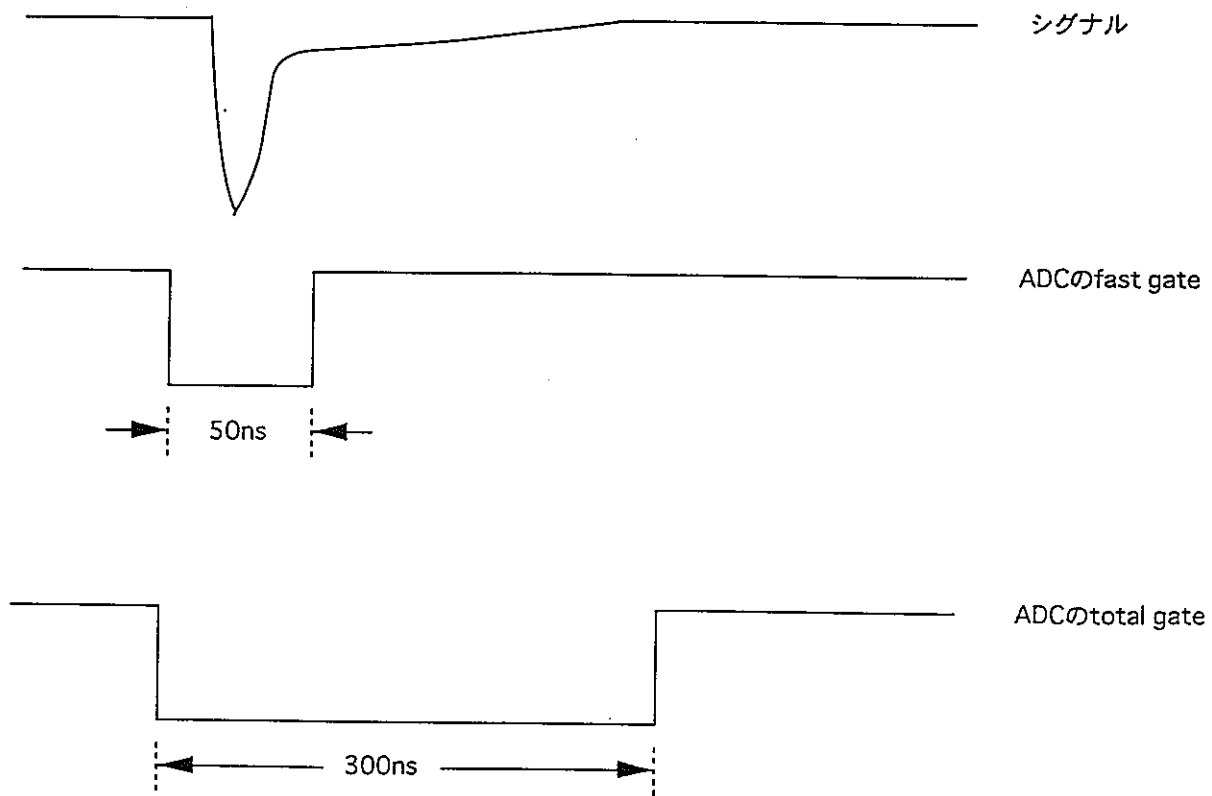


図1. 中性子検出器からのシグナルとADCのfast gate ,total gateの時間関係。

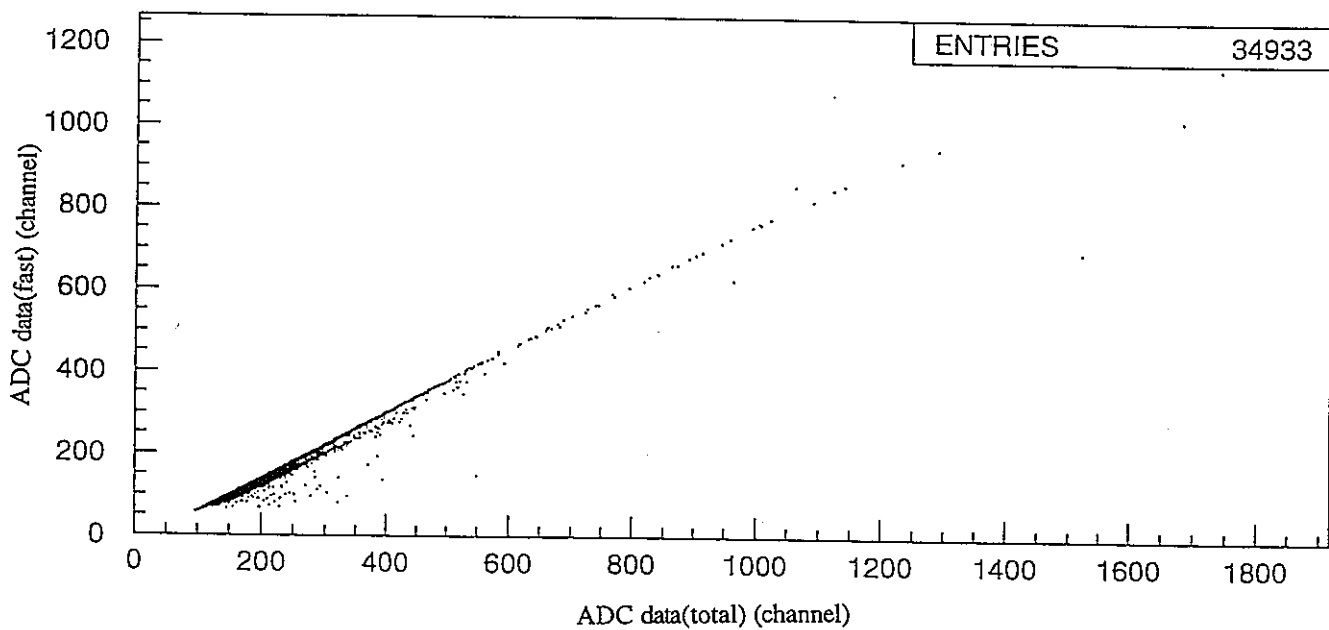


図2.  $^{252}\text{Cf}$ からのガンマ線と中性子の2次元プロット。縦軸がfast成分、横軸がtotal成分。  
濃い2本の線の上側がガンマ線、下側が中性子。

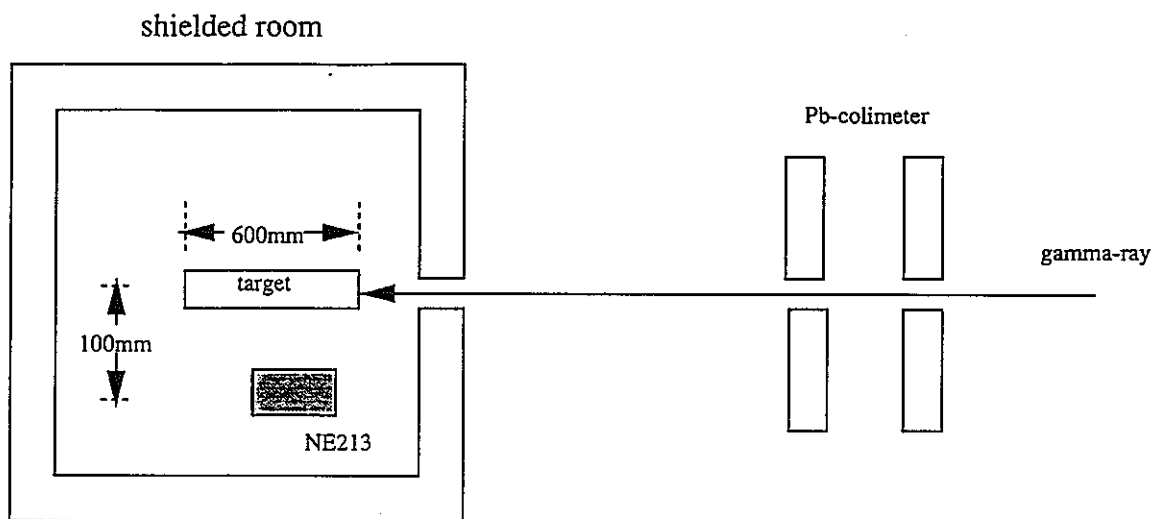


図 3 a. 実験(1)のセットアップ。実験は遮蔽されている部屋で行われた。

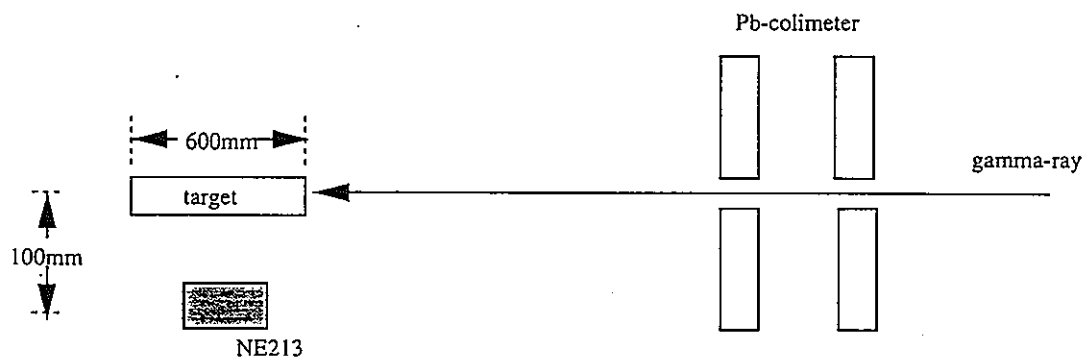


図 3 b. 実験(2)のセットアップ。実験は遮蔽されていない状況下で行われた。

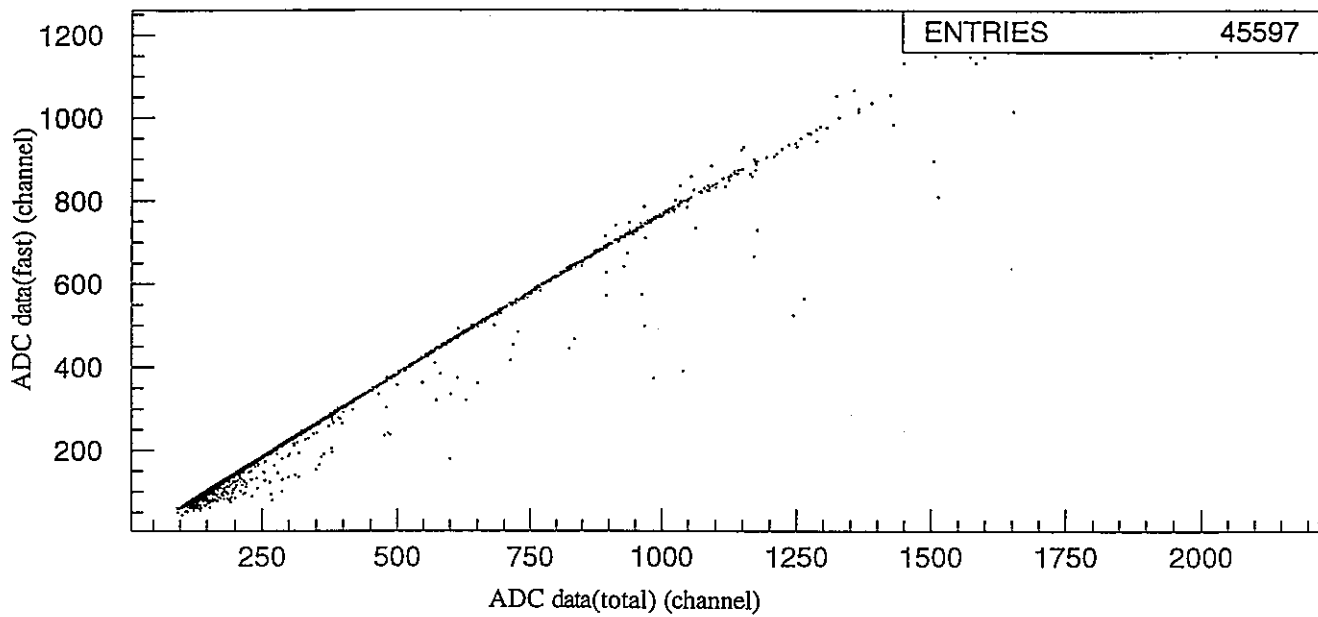


図4. 実験(1)で $H_2^{16}O$ 標的ありの場合。縦軸がfast成分、横軸がtotal成分。

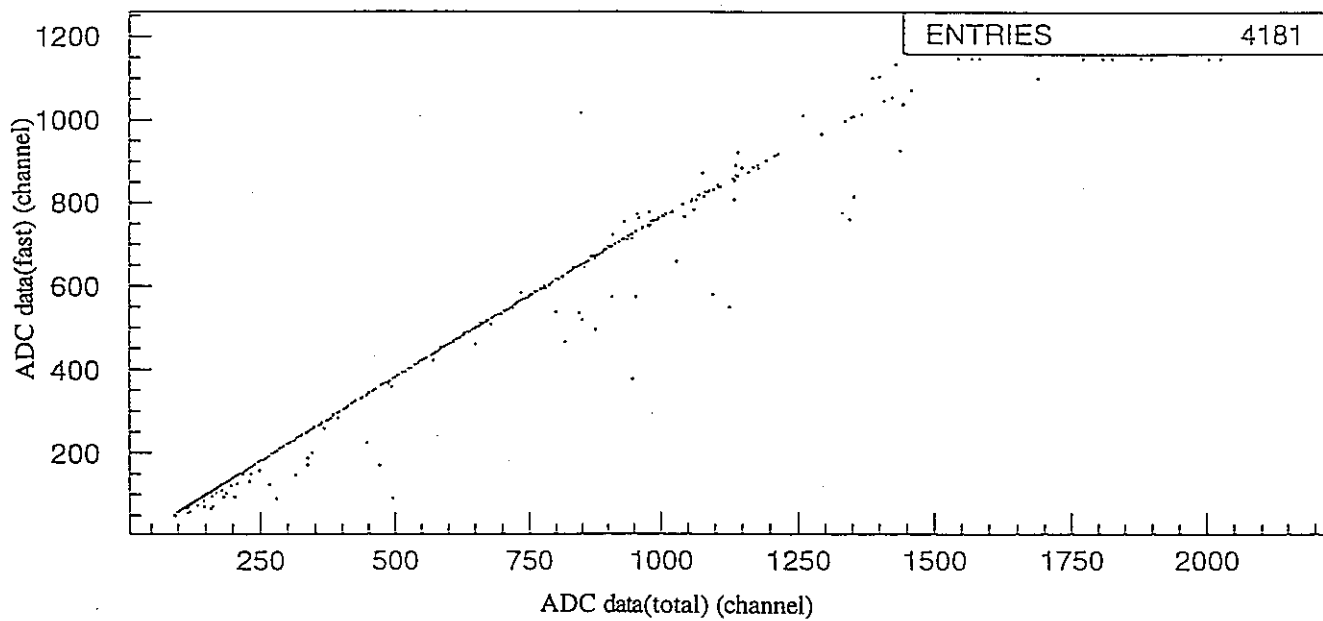


図5. 実験(1)で標的なしの場合。縦軸がfast成分、横軸がtotal成分。

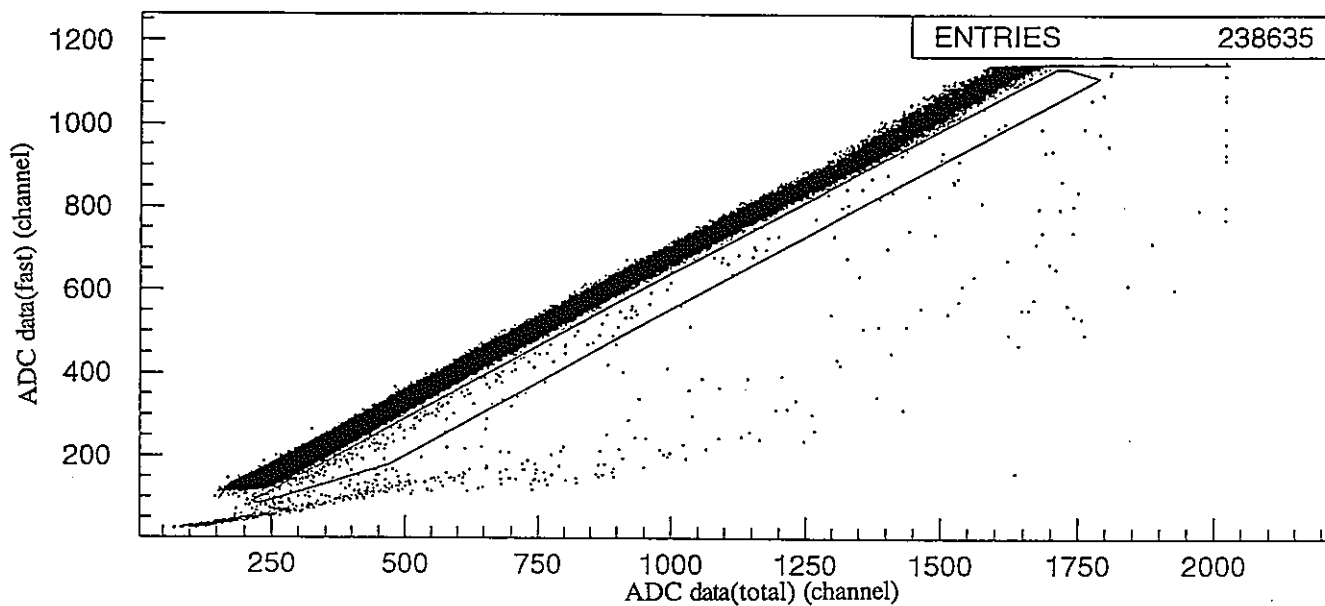


図6. 実験(2)で  $H_2^{18}O$  標的の場合。図中の線で囲まれている点を中性子とした。  
縦軸がfast成分、横軸がtotal成分。

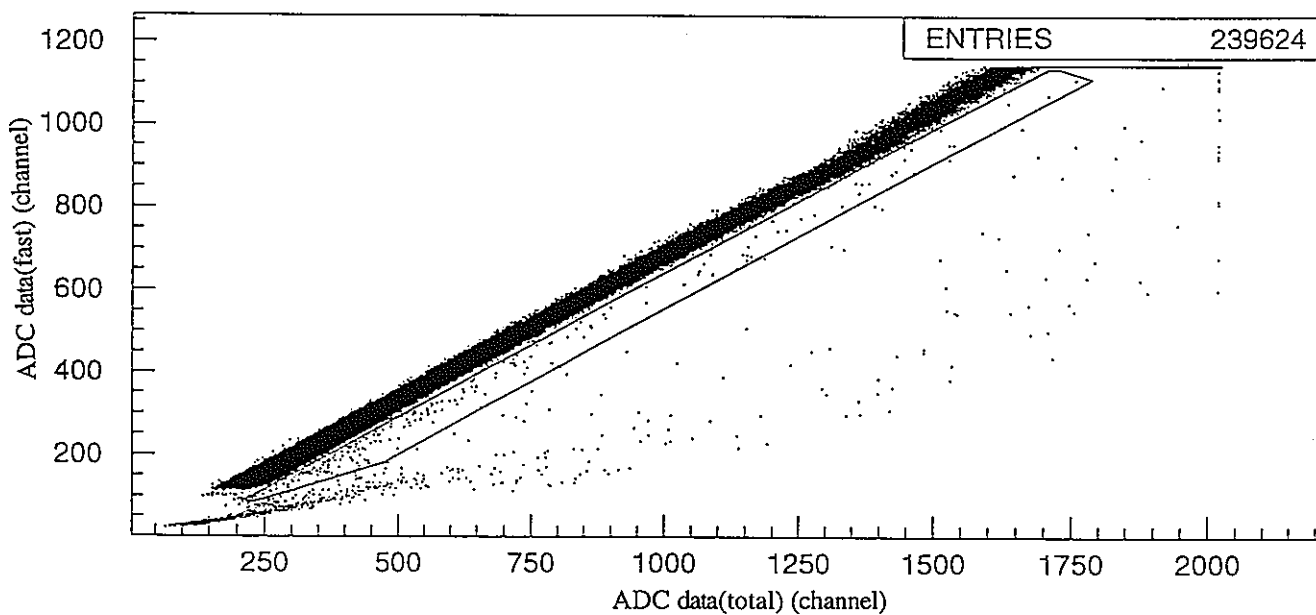


図7. 実験(2)で  $H_2^{16}O$  標的の場合。図中の線で囲まれている点を中性子とした。  
縦軸がfast成分、横軸がtotal成分。