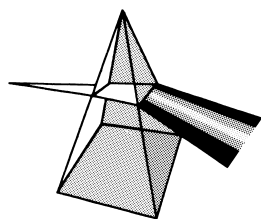


【技術報告】

資料番号：11-7



高分解能高エネルギー光子スペクトロメータの開発

古高 和禎 原田 秀郎

東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部

Development of the High Resolution High Energy Photon Spectrometer

Kazuyoshi FURUTAKA Hideo HARADA

Advanced Fuel Recycle Technology Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

原子核の光核反応断面積を高いエネルギー分解能で測定するために、高分解能高エネルギー光子スペクトロメータ（HHS）の開発を行った。HHSは、直径8cmφ高さ7cmの井戸型Ge結晶を二つ用いたTwin Geガンマ線検出器と、それを囲むBGOシンチレータのエスケープ・シールドからなる。既に性質の良くわかっている ^{13}C 核の15.11MeV準位によるレーザー逆コンプトン γ 線の吸収スペクトルをHHSを用いて測定したところ、HHSの高エネルギー γ 線に対するエネルギー分解能は15.11MeVで12keV（0.08%）であることが分かった。HHS検出器の概要と測定原理、性能試験の結果について概説した。

In order to determine nuclear photoabsorption cross sections with supreme energy resolution, the High resolution High energy photon Spectrometer (HHS) has been developed. The spectrometer consists of a Ge photon detector which contains two large volume (8cm ϕ $\times$ 7cm) Germanium crystals (Twin Ge), and four BGO scintillation detectors which are used as an escape shield. To determine intrinsic resolution of the HHS, an experiment has been done in which absorption of laser Compton photons through a ^{13}C sample was observed using the spectrometer. By analyzing an absorption peak caused by 15.11 MeV level of ^{13}C , it is found that the HHS attains an energy resolution of 12 keV (0.08%) for 15.11 MeV γ ray.

キーワード

核反応断面積，光核反応，高エネルギー γ 線，高分解能，Ge検出器，BGO検出器，エスケープ・シールド，反同時計測，レーザー逆コンプトン γ 線

Nuclear Reaction Cross Sections, Photoabsorption Reaction, High-energy γ -rays, High-resolution Measurements, Ge Detector, BGO Detector, Escape Shields, Anti-coincidence Measurements, Laser Compton Photons



古高 和禎

先進リサイクル解析評価グループ
核変換研究チーム所属
核変換技術開発のための基礎基盤データ及びその測定技術の高度化に関する研究に従事
理学博士



原田 秀郎

先進リサイクル解析評価グループ
核変換研究チーム所属
チームリーダー，主任研究員
核変換技術開発のための基礎基盤データに関する研究に従事
理学博士

1. はじめに

長寿命核種の核変換技術とは、高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種を、短寿命核種あるいは非放射性核種に変換するための技術で、我が国では、日本原子力研究所、サイクル機構が中心となって研究開発を進めている。この研究は、我が国のみならずフランス・EU 諸国及びロシアなどの諸外国でも活発に研究が行われている。

現在最も活発に研究が行われているのは、原子炉又は加速器によって発生された中性子線を用いた核変換法であり、現在基礎的な研究開発が進められている。しかし、核種によっては、それが持つ性質から、中性子との反応を起こしにくいものも存在する。それらの核種に対して有効な核変換手法はいまだ見出されておらず、個々の核種の特性に応じて革新的な核変換手法を構築することが望まれている。そのためには、個々の核種の特性、すなわち諸々の核反応様式に対する反応性を詳細に知ることが不可欠である。

中性子以外のものを用いた核変換手法のひとつとして、原子核に γ 線を吸収させて他の核種に変換する、いわゆる光核反応を用いる手法があげられるが、この手法の有効性を判断する上で必要となる原子核と γ 線の光吸収反応については十分に解明されているとは言い難い状況にある。原子核の光吸収反応の起こしやすさを表す光核反応断面積の γ 線エネルギーに対する依存性を調べてみると、その大部分は、原子核の質量数を A として、 $80A^{-1/3}$ MeV という高いエネルギーを中心とした領域に集中して分布しており、巨大共鳴と呼ばれる幅の広い構造を形成していることが知られている。従来、このエネルギー領域の光吸収強度の測定は、陽電子消滅または電子の制動輻射により得られる高エネルギー γ 線を用い、光核反応により発生する中性子を測定することにより行われてきた¹⁾。しかしながら、この方法では、光吸収反応の巨大共鳴構造をせいぜい 1 MeV 程度のエネルギー分解能で調べることしかできなかった。

我々は、巨大共鳴領域の光吸収反応断面積を精密に測定するために、高分解能高エネルギー γ 線スペクトロメータ (High resolution High energy photon spectrometer: HHS) の開発を行った。この HHS とそれを用いた新しい核分光的手法は、単色 γ 線と原子核との反応を約 0.1% というこれまでになし得なかった高いエネルギー分解能で観測することを可能とする。これを用いることにより、原子核の光吸収反応に関する全く新しい知見を得ることができ、革新的な核変換手法を創出するた

めの基盤データを蓄積することが可能となる。

本稿では、HHS 検出器の概要とその性能について概説する。

2. 高分解能高エネルギー光子スペクトロメータ (HHS) の概要

2.1 HHS 検出器の原理

γ 線は(1)光電効果(2)コンプトン散乱(3)電子・陽電子対生成の三つの過程を通して物質と相互作用を行う。 γ 線のエネルギーを測定する際は、これらの過程により検出器に付与されたエネルギーを測定する。検出器に入射した γ 線がこれら三つの過程を通してそのすべてのエネルギーを検出器に付与した場合 (フル・エネルギー事象) は、検出器により記録される信号は正確に元の γ 線のエネルギーを表している。しかし、コンプトン散乱 γ 線、又は電子・陽電子対生成で生成した陽電子が対消滅して生じる γ 線が検出器外に逃げ出た場合は、入射 γ 線のエネルギーの一部が失われ、もとのエネルギーより低いエネルギーとして観測される (エスケープ事象)。 γ 線のエネルギーが高い場合は、電子・陽電子対生成過程がシャワー状に生じるため、特にエスケープ事象が起きやすくなる。そのため、高エネルギー γ 線を測定する際は、エスケープ事象を低減するために、原子番号が大きな物質を用いた大体積の検出器が使用される。

原子番号の大きな元素を含む物質を用いたシンチレーション検出器は、大体積の結晶を容易に作成し得るので、従来より高エネルギー γ 線の測定に用いられてきている。代表的なシンチレータとしては、NaI (Tl)、BGQ (Bi₄Ge₃O₁₂)、BaF₂などが挙げられる。しかし、シンチレーション検出器を用いた場合は、数%以下のエネルギー分解能を達成することは困難である。

一方、原子核の γ 線核分光の分野においては、Ge 結晶を用いた半導体 γ 線検出器が用いられている。これを用いると、数百 keV 程度の γ 線を 0.1% 程度のエネルギー分解能で測定することが可能である。しかしながら、エスケープ事象が生じることは、シンチレーション γ 線検出器と同じである。そこで、エスケープ事象を低減し、フル・エネルギー事象を選択的に測定するために、原子番号の大きな物質を用いたシンチレーション検出器 (エスケープ・シールド) で Ge 検出器を囲み、Ge 検出器とエスケープ・シールドとの間で反同時計測を行う測定法が用いられてきた。これを高エネルギー γ 線の測定に応用したのが HHS 検出器である。

2.2 HHS 検出器の構成

HHS 検出器は、図1に示すように、 γ 線のエネルギーを精密の測定するためのGe検出器と、四つの独立なBGOシンチレーション検出器から構成されるエスケープ・シールドからなる。

前に述べたように、フル・エネルギー事象の割合は、検出器を構成する物質の原子番号が大きいほど、また検出器の体積が大きいほど増大する。しかし、Geの原子番号は32であり、またシンチレータと比較して大体積のものを作ることは困難である。そこで、二つのGe結晶を直列に配置した検出器を製作した(Twin Ge 検出器)。 γ 線のエネルギー情報は、両者からの信号を足し合わせるにより得ている。個々のGe結晶は、直径8cm、高さ7cmの円柱井戸型結晶で、7.6センチφ×7.6センチのNaI検出器に対して95%の相対検出効率

を持っている。

エスケープ・シールドには、高エネルギー γ 線からのエスケープ事象を高効率で検出するために、BGOシンチレータを用いたものを採用した。このBGO検出器は、側方で5cm、前方で10cmの厚さを持つ。

エスケープ事象により生じた γ 線がBGOエスケープ・シールドに入射する前に吸収されてしまい、反同時計測事象として記録されない事象を低減するため、Ge結晶にはN型の物を用いてGe結晶外側の電極を薄くするとともに、BGOエスケープ・シールドの内壁及びGe検出器の結晶を囲む部分には、厚さ1.0mmのアルミニウムを採用している。

図2に、HHS検出器からの信号処理の概略図を示す。それぞれのGe結晶からの信号は、前置増幅器を経て増幅器で増幅並びにゲイン調整をしてか

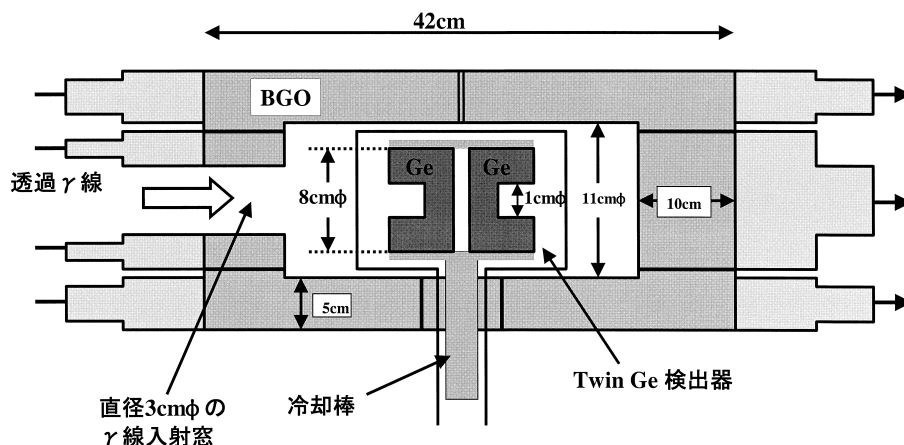


図1 HHS 検出器の概略図

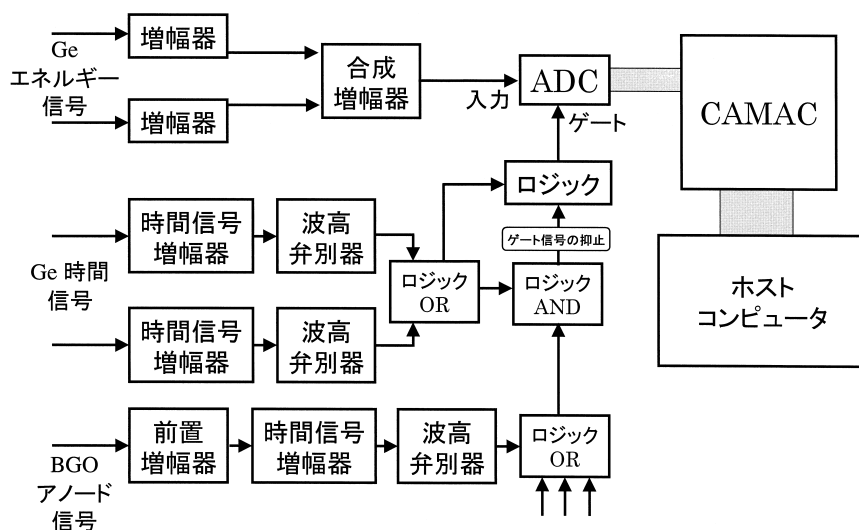


図2 HHS 検出器の信号処理回路の概略図

ら足し合わせ、アナログ デジタル変換器 (ADC) でデジタル信号に変換してホストコンピュータに記録される。この際、四つの BGO 検出器のいずれかで設定値以上のエネルギーが観測され、かつ Ge 検出器と BGO 検出器が同時計測した事象は、エスケープ事象とみなして、ADC のゲートへの信号出力を抑止し、データを破棄する。

図3は、Twin Ge単体で測定を行った場合とBGO エスケープ・シールドを用いた反同時計測による場合に対して、15MeV の単色 γ 線が入射した場合の検出器の応答 (検出器に記録されるエネルギーの分布) を、EGS4 コード³⁾を用いたシミュレーションにより計算したものである。BGO エスケープ・シールドを用いることにより、エスケープ事象、すなわち入射した γ 線のエネルギーより低いエネルギーとして観測される事象が大幅に低減されていることが分かる。

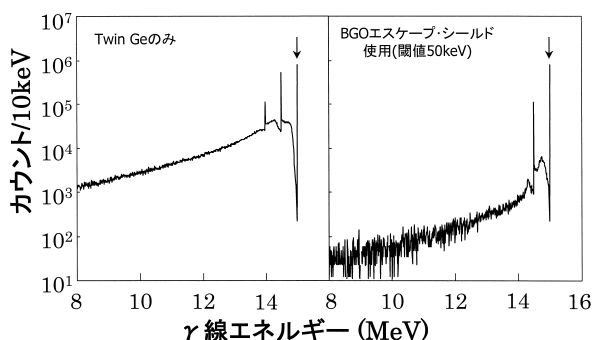


図3 エネルギー15MeV の単色 γ 線が入射した際の、Twin Ge 単独及びHHS 検出器 (BGO エスケープ・シールド使用時) の応答シミュレーション (矢印は入射 γ 線のエネルギーを示す)

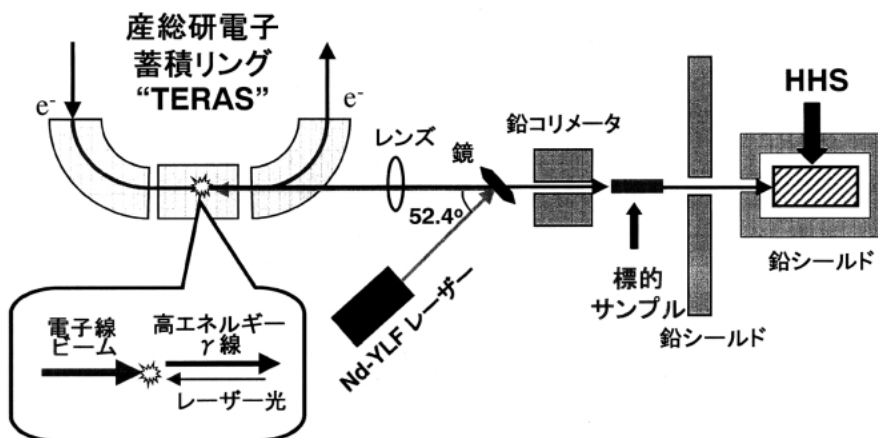


図4 産総研 (旧電総研) 電子蓄積リング “TERAS” のLCP 発生装置を用いた実験の概略図

2.3 透過法による光吸収反応断面積の精密測定

図4に、電子技術総合研究所の電子蓄積リング “TERAS” に設置されたレーザー逆コンプトン高エネルギー γ 線 (LCP) 発生装置を使用して、 γ 線透過法により光吸収反応断面積を測定する際の実験装置の配置を示す。レーザー光と電子線との衝突により生成された高エネルギー γ 線は、鉛コリメータを用いてコリメートすることによりエネルギー領域を選択した後、標的サンプルに入射する。標的サンプルに吸収されなかった γ 線は、HHS 検出器に入射して測定される。この場合、全光吸収反応断面積のエネルギー分布 $\sigma_{abs}(E)$ は次式により表すことができる (図5) :

$$\sigma_{abs}(E) = \frac{1}{\rho \ell} \log \left(\frac{cU_0(E)}{U(E)} \right) - \sigma_{atom}(E)$$

ここで、 $U_0(E)$ 及び $U(E)$ は、それぞれ標的サンプル入射前及び入射後の γ 線のエネルギー分布を表す。また、 ρ 及び ℓ はそれぞれ標的サンプルの密度及び厚さを表す。 $\sigma_{atom}(E)$ は、原子による過程で起きる光吸収断面積を表している。 c は規格化定数である。

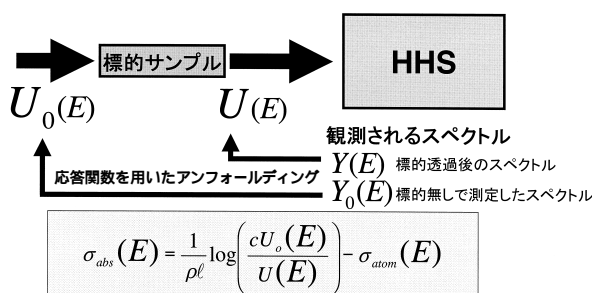


図5 HHS 検出器で観測されるスペクトル $Y(E)$, $Y_0(E)$ から全光吸収反応断面積 $\sigma_{abs}(E)$ を算出する方法

ここで、フル・エネルギー事象が観測される確率はエネルギー依存性を持つこと、並びに Twin Ge 結晶と BGO 結晶との間に存在する物質によりエスケープ γ 線が吸収されてしまうためにエスケープ事象の除去が完全ではないことにより、HHS 検出器で観測される γ 線のエネルギー分布 $Y(E)$ と $U(E)$ は異なる。観測されるスペクトル $Y(E)$ は $U(E)$ が検出器の応答関数 $F(E, E')$ で畳み込まれたものである：

$$Y(E) = \int_0^\infty F(E, E') U(E') dE'$$

したがって、 $\sigma_{abs}(E)$ を決定するためには、検出器の応答関数を用いて、観測した γ 線エネルギー分布 $Y(E)$ から HHS 検出器に入射した γ 線のエネルギー分布 $U(E)$ を決定する、アンフォールディングと呼ばれる操作が必要である。現在のところ、HHS 検出器の持つ分解能に匹敵するだけの狭いエネルギー分布を持った γ 線を人工的に発生する方法は存在しないため、HHS 検出器の応答関数を広いエネルギー領域に渡り実測することは困難である。そのため、現在は前述の EGS 4 コードを用いた精密なシミュレーションにより計算した応答関数を用いてアンフォールディングを行っている。

2.4 性能試験

HHS 検出器の高エネルギー γ 線に対するエネルギー分解能を実測するために、他の実験から既に性質がよく知られている ^{13}C 核の 15.11MeV 準位 ($T = 3/2$, $J^\pi = 3/2^-$) による光吸収断面積の測定に HHS を適用した。図 6 は、HHS 検出器で測定した LCP のエネルギー分布と、厚さ 71.6g/cm² の ^{13}C 標的サンプルを透過した γ 線のエネルギー分布を示している。図から分かるように、HHS 検出器を用いることにより、同準位による光吸収を半値幅

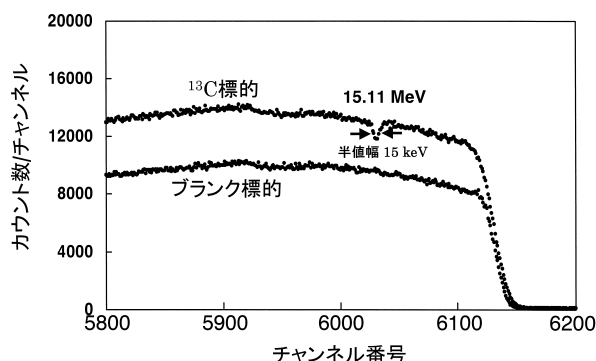


図 6 HHS 検出器を用いて観測した、レーザー逆コンプトン γ 線及び ^{13}C 標的透過後の γ 線スペクトル

15keV の吸収ディップとして観測することができた。観測した半値幅と同準位の幅から、HHS 検出器は 15.11MeV の γ 線を 12keV (0.08%) の分解能で測定しうることが分かり、設計通りの分解能を達成していることが実証できた²⁾。

図 7 は、HHS を用いた γ 線透過法により得られた ^{13}C 核の 15.11MeV 準位による光吸収断面積スペクトルを、Jury らによる陽電子消滅法を用いた測定結果⁴⁾と比較したものである。図から明らかなように、HHS 検出器を用いた γ 線透過法の実験により、巨大共鳴エネルギー領域の光吸収断面積の測定を従来と比較して遥かに高いエネルギー分解能で行うことができるようになった。

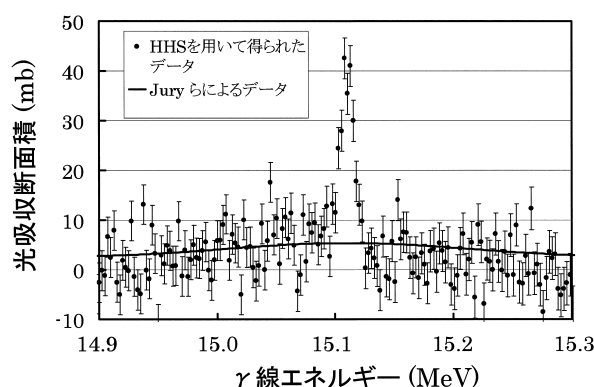


図 7 HHS を用いて得られた ^{13}C の全光吸収断面積スペクトルを、Jury らによる測定結果と比較したもの

3. おわりに

巨大共鳴エネルギー領域の光吸収断面積の精密測定を行うために、HHS 検出器の開発を行った。HHS 検出器を用いることにより、15.11MeV の γ 線を半値幅 12keV (0.08%) というこれまでにない高いエネルギー分解能で測定することができた。HHS 検出器の開発により、高エネルギー γ 線測定の新しい時代が開かれた。

本研究が革新的核変換手法の創造に結びつくためには、系統的な実験データに基づいて、光吸収の巨大共鳴構造について詳細に理解することが必要である。今後は、HHS を用いて核分裂生成核種^{*1}並びにマイナーアクチニド^{**2}領域の核種の光吸収断

*1 ウランやプルトニウム等の核分裂に伴って生じた核種及びその一連の放射性崩壊で生じる核種。

*2 原子番号 89 のアクチニウムから 103 のローレンシウムまでのアクチノイド元素のうち、アクチニウムを除いた元素群はアクチニドと呼ばれている。使用済み核燃料の中に生成するアクチノイド元素のうち、生成量の比較的多いプルトニウムを除いた、生成量の比較的小さいネプツニウム、アメリシウム、キュリウムなどの元素をマイナーアクチニドと呼ぶ。

面積の精密測定を系統的に行っていきたい。

また、HHS 検出器を用いて得られた実験データの解析法の更なる高度化も必要である。実験で得られた透過 γ 線のスペクトルから光吸収断面積スペクトルを引き出す際は、検出器の精密な応答関数を用いる必要がある。 $^{11}\text{B}(\phi, \gamma)$ 反応などの核反応から得られる γ 線等を HHS で測定し、得られた応答をシミュレーション結果と比較することにより、HHS 検出器の応答を詳細に理解するとともに、より正確な応答関数を整備することが必要である。

本研究には、独立行政法人産業技術総合研究所（旧工業技術院電子技術総合研究所）電子蓄積リング“TERAS”のレーザー逆コンプトン光発生施設が重要な役割を果たした。共同研究者である産

業技術総合研究所の大垣英明博士並びに豊川弘之博士に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Samuel S. Dietrich and Barry L. Berman:“ Atlas of Photo-neutron Cross Sections Obtained with Monoenergetic Photons ”, Atomic Data and Nuclear Data Tables, Vol. 38, No. 2, p 199 (1988)
- 2) H. Harada, K. Furutaka et al.:“ Super High Resolution Measurement of Fine Structure in the Total Photonuclear Cross Section of ^{13}C ”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 35, No. 10, p 733 (1998)
- 3) Walter R. Nelson, Hideo Hirayama, et al.:“ THE EGS4 CODE SYSTEM ”, SLAC-Report-265, Stanford Linear Accelerator Center(1985)
- 4) J. Jury et al.:Phys. Rev., C19, p 1684 (1979)