

レーザーコンプトン反応により生成した準単色高エネルギー光子を用いた 線検出器の応答特性評価

天造 秀樹*

Gamma-ray Detector Response Function Measurement for Quasi-Monochromatic High Energy Photons Generated by Laser Compton Scattering Interaction up to 40 MeV

Hideki TENZOU

Synopsis

In gamma-ray spectrometry, NaI (TI) scintillation detectors are one of the most useful gamma detectors. The gamma ray response function is required in obtaining gamma-ray emission cross-sections by unfolding the measured pulse charge spectra. Experimental data was acquired in the energy range below 4.44 MeV by means of a gamma ray source used as a checking source. At higher energies above 10 MeV, it proved to be more challenging to measure the response function as there is a lack of natural monochromatic gamma ray sources. We used laser compton scattering (LCS) photons as a source of quasi- monochromatic gamma rays. 20 and 40 MeV quasi- monochromatic gamma-rays were successfully measured. We also compared our experimental measurements to simulated data which can be obtained from the EGS4 Monte-Carlo simulation software. The simulated response function showed a good agreement with our experimental data from low energies up to 40MeV high energy gamma-rays.

1. 緒言

加速器駆動未臨界型原子炉 (ADS) は次世代の原子炉として近年、注目を浴びている。一方、高エネルギー加速器を必要とする ADS は通常の原子炉とは異なり、より高い十 MeV 以上のエネルギーを持つ放射線に対して精度よく遮蔽設計を行う必要がある。放射線遮蔽設計においては高い透過力を持つ 線に対する輸送計算が重要となる。輸送計算においては 線生成二重微分断面積の測定結果が不可欠である。線のエネルギー計測には密度が高い NaI(Tl)がためよく用いられる。NaI(Tl)の臨界エネルギーは 12.5MeV であることからこれ以上のエネルギーを持つ 線計測においてエネルギー分解能の劣化は電磁シャワーが主の原因となる。10MeV 以上の 線を生成する主要な反応として以下のような π^0 の崩壊 ¹⁾がある。

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (1)$$

NaI(Tl)検出器に入射する 線のエネルギーを測定するためには NaI(Tl)検出器で計測されたエネルギースペクトルをアンフォールディングす

る必要がある。アンフォールディングにおいてはすでに既知の単色エネルギーに対する検出器の応答関数が測定されている必要がある ^{2),3),4)}。通常、数 MeV 以下では放射性同位元素試料を用いて応答関数を測定するのであるが、10MeV 以上のエネルギー領域においては準単色エネルギーの試料が存在しないため、応答関数の測定は困難である。しかしながら、近年、産業総合技術研究所の電子加速器施設において 750MeV に加速された電子にレーザー光子を衝突させることで 10MeV 以上の光子(LCS Photon)を発生させることに成功している。

そこで、本研究では、線生成二重微分断面積測定に持ちこたれる NaI(Tl)検出器のアンフォールディング作業のために、準単色の 20MeV と 40MeV の LCS Photon を用いて応答関数を測定することにした。そして EGS4 電磁カスケードコード ^{5),6)}との比較を行うことにした。

2. 実験

2.1 レーザーコンプトン光子(LCS Photon)

実験は産業総合研究所の TERAS 電子貯蔵リン

* 電子工学科

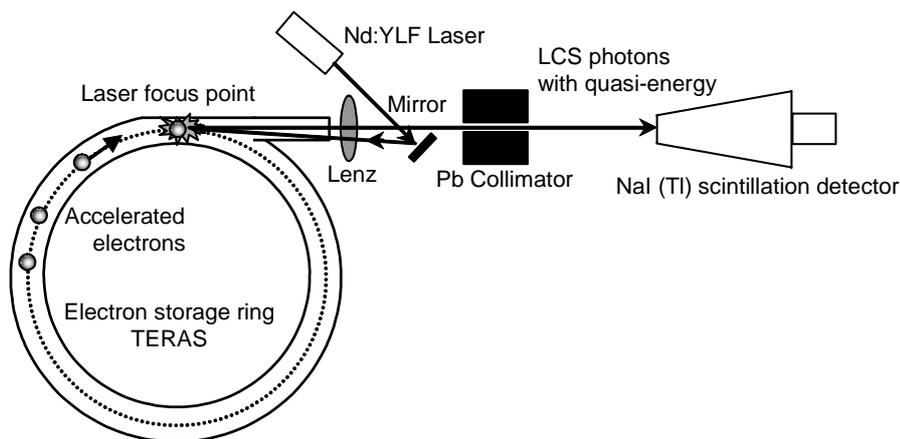


図1. LCS Photonによる応答関数測定実験

グ加速器施設において行った。加速器内の加速電子とレーザー光子とを衝突させて後方にコンプトン散乱した光子を取り出し、高エネルギーLCS Photonとして用いた。LCS photonは準単色のエネルギーを持ち、加速器内の電子のエネルギー、もしくは抽出する散乱角を変えることでエネルギーも可変である。Ohgaki⁷⁾らが CsI(Tl) 線検出器を用いて LCS Photon のエネルギーの分解能を測定したところ、5MeV の LCS Photon に対して 2.7%、10MeV に対しては 6.6% であることがわかった。本測定においては、図 1 に見られるようにレーザー光子発生源として Nd:YLF laser を用いた。波長は 10MeV の LCS Photon を生成するときには 527nm、40MeV に対しては 263nm を用いた。レーザーのパルスサイクルは 1kHz に設定した。レーザーはミラーやフォーカスレンズを經由して加速器リング内に入射される。電子は 750MeV に加速させた。コンプトン散乱した光子は 20MeV に対して 5.5%、40MeV 対し 10% になるようにコリメータによって細く絞った。加速器周辺からのバックグラウンドを除去するため、鉛ブロックをおいた。

2.2 NaI(Tl)シンチレーション検出器

測定に用いた NaI(Tl)検出器を図 2 に示す。入射平面は 115 mm × 64 mm である。0.5mm のアルミカバーで NaI が空気中の湿度にさらされるのを

防いでいる。図 3 に示すように回路を構成し、パルス波高を取得した。増幅された信号はディバイダーによって 2 つに分割され、一方は Analog Digital Converter ADC (LeCroy 2245A) のゲート信号を生成するために、そしてもう一方は ADC の入力部に接続されている。ゲート信号では入力信号とタイミングを合わせるため、ディレイを設けてある。10MeV 以下の線に対しては ⁶⁰Co と ¹³⁷Cs を用い、図 2 のように入射方向を設定した。

検出器は図 1 のように LCS Photon の下流側においた。バックグラウンドと過剰な LCS Photon を抑えるために鉛板をおいた。LCS Photon を NaI(Tl)検出器に照射しているときの様子を図 4 に示す。光っている場所が LCS Photon が照射されている部分である。

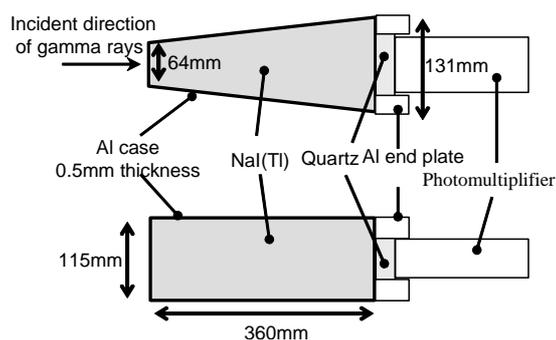


図 2. NaI(Tl)検出器の概観

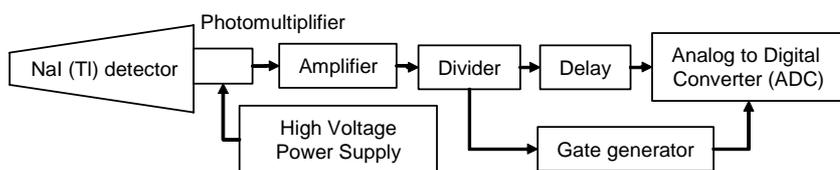


図3. ADCを用いた波高測定システムのブロック図

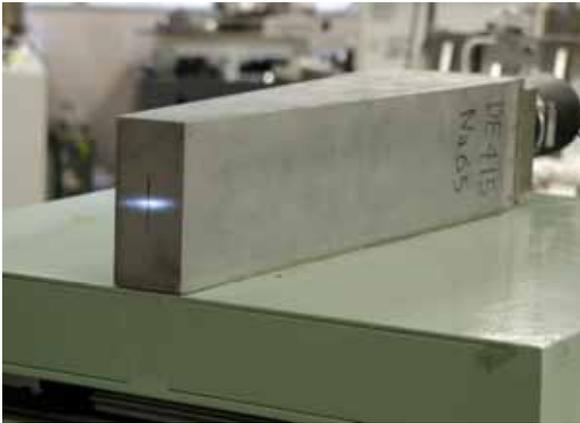


図 4. LCS Photon を NaI(Tl) 検出器に照射しているときの様子

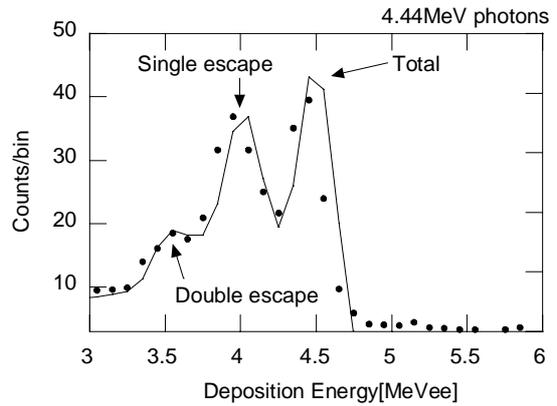


図 5. Am-Be から 4.44 MeV の線エネルギースペクトルの測定結果。点線は実験値、実線は EGS4 で計算した結果。

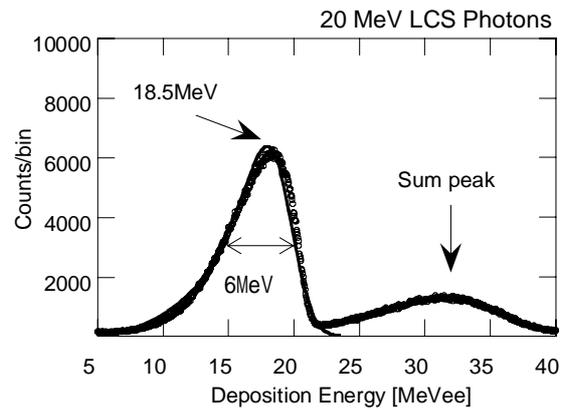
3. 結果

3.1 応答関数

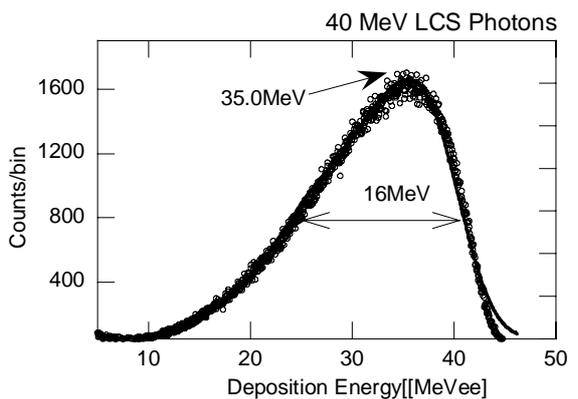
^{60}Co , ^{137}Cs , Am-Be の放射性同位元素試料に対して応答関数を測定した。これらのうち、4.4 MeV の線を放出する Am-Be の測定結果を図 5 に示す。図中の点が実験値を表している。全エネルギーピークとエスケープピーク、コンプトン端が見られるのがわかる。比較のために EGS4 で計算した結果を図 5 に実線で示す。計算条件として放射線源を等方放出と仮定し、電気的ノイズを再現するために付与エネルギーに乱数をかけて実験値を再現するようにノイズを加えた。全エネルギーピークとエスケープピーク、コンプトン端を非常によく再現していることがわかる。

10 MeV 以上の高エネルギーにおいて 20 MeV と 40 MeV の LCS Photon を用いて応答関数の測定を行った。図 6-(a) が 20 MeV の LCS Photon に対する応答関数、図 6-(b) が 40 MeV に対する応答関数である。ただし、20 MeV の場合には 2 つのピークが見られる。これはゲート幅に対して入射 LCS Photon の数が多く、偶発的に同時に 2 つの光子が検出器に入射したためと考えられる。

EGS4 を用いてシミュレーションした結果を同図の実線で示す。この際に乱数によってノイズを加える作業は行っていない。同時入射による影響を除けばシミュレーションをよく一致していることがわかる。



(A) 20 MeV LCS photon



(B) 40 MeV LCS photon

図 6. LCS Photon のエネルギースペクトル。(A) は 20 MeV に設定、(B) は 40 MeV に設定。点線は実験値、実線は EGS4 で計算した結果。

3.2 エネルギー分解能

NaI(Tl)の臨界エネルギーは12.5MeVであるので、これ以下のエネルギー領域では今回のように大きな検出器の場合、検出器のエネルギー分解能は検出器内で生成される光子の数に比例すると考えられる。よって以下のような式で表されると考えられる。

$$\frac{\Delta E}{E_0} \propto \frac{\sqrt{E_0}}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{E_0}} \quad (2)$$

ここで E_0 は入射光子のエネルギーである。この式は入射エネルギーが高くなるほど分解能がよくなることをあらわしている。しかしながら、臨界エネルギー以上になると電磁シャワーにより検出器から漏れ出ることがエネルギー分解能に主要な影響をもたらすと考えられる。この場合、以下のような式にしたがうと考えられる。

$$\frac{\Delta E}{E_0} \propto \frac{X_0}{\ln 2} \ln \left(\frac{E_0}{E_c} \right) \quad (3)$$

ここで X_0 は放射長、 E_c は臨界エネルギーである。そこで全エネルギー範囲についてアンフォールディングを行うために、エネルギー分解能の式を以下のように仮定した。

$$\frac{\Delta E}{E_0} = a \frac{1}{\sqrt{E_0}} + b \ln(E_0) + c \quad (4)$$

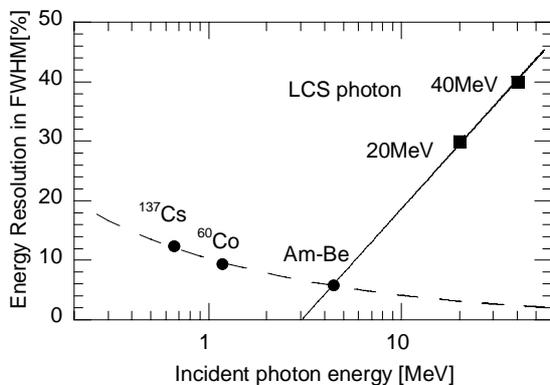


図7. エネルギー分解能の入射線エネルギー依存性。実線は実験値に対してフィッティング式を適用した結果。

ここで a, b, c はフィッティングパラメーターである。図7にこの式でフィッティングした結果を示す。この式はNaI(Tl)検出器のエネルギー分解能を非常によくあらわしていることがわかる。

4. 結論

NaI(Tl)検出器で測定した高エネルギー線のエネルギースペクトルに対しアンフォールディングを行うために20MeVと40MeVのLCS Photonを用いて応答関数の測定を行った。10MeV以下の低エネルギー線に対しては放射線同位元素試料を用いて測定を行った。測定した結果とEGS4シミュレーションコードとの比較を行った結果、非常によく一致することがわかった。また、全エネルギー範囲にわたるエネルギー分解能のフィッティング式を見つけ、これが実験値をよく再現することも示した。これらの式を用いれば、任意の入射エネルギーに対してEGS4を用いて応答関数行列を計算でき、アンフォールディングを精度よく行うことができるようになった。

参考文献

- 1) Kiminori IGA et. al, 1998 Symposium on Nuclear Data (JAERI-Conf 99-002)
- 2) B. W. Rust, D. T. Ingersoll, and W. R. Burrus, *A User's Manual for the FERDO and FERD Unfolding Codes*, ORNL/TM-8720, 1983
- 3) W.R. Burrus, *Utilization of A Priori Information by Means of Mathematical Programming in the Statistical Interpretation of Measured Distributions*, ORNL-3743 (1965)
- 4) W.R. Burrus and V.V. Verbinsky, *Nucl. Instrum. Methods*, 67, 181 (1969)
- 5) H. Hirayama and Y. Namito, *Implementation of a General Treatment of Photoelectric-Related Phenomena for Compounds or Mixtures in EGS4*, KEK Internal 2000-2 (2000)
- 6) W. R. Nelson, H. Hirayama, D.W. O. Rogers, *The EGS4 code system*, SLAC-265, Stanford Linear Accelerator Center, 1985
- 7) Hideaki Ohgaki, Hiroyuki Toyokawa et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, A455(2000) 54--59