

FLUX CALIBRATION OF GAMMA RAY BY ACTIVATION METHOD

Daisuke Tonaka^{1,A)}, Ken Horikawa^{A)}, Satoshi Hashimoto^{A)}, Syuji Miyamoto^{A)}

^{A)} NewSUBARU Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry (LASTI), University of Hyogo
1-1-2 Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo, 678-1205

Abstract

We have measured gamma ray flux by the activation method which assumed Cu a target peak energy of gamma-ray was 17MeV generated by scattering between Nd lasers of wavelength 1.064μm 1GeV electrons. Measured result by the activation method was in agreement with the value estimated from measurement with GSO detector.

放射化法によるコンプトンγ線源フラックス計測

1.はじめに

現在、兵庫県立大学、高度産業科学研究所のNewSUBARU放射光施設、ビームライン1番(BL01)ではレーザーコンプトン散乱を用いたγ線利用研究を行っている。NewSUBARUでは通常、電子電流220-mA、電子エネルギー1-GeVでのTopUp運転を行っている。BL01では波長1.064-μm(2倍高調波0.532-μm)のNdレーザーを1-GeV電子で散乱させることにより、最大エネルギー17-MeV(34-MeV)のγ線ビームを定常的に発生・利用することが可能である。また波長10.6-μm付近のCO₂レーザーをもちいることで、約1桁エネルギーの低い最大エネルギー1.7-MeVのガンマ線も発生できる。BL01で使われている主な機器を表1に示す。

表1 BL01装置

装置名	材質	
Ndレーザー	Nd:YVO ₄	CW・パルス動作10~100-kHz/8ns。基本波(1.064-μm)2倍高調波(0.532-μm)
CO ₂ レーザー	CO ₂	CW動作。レーザー波長10.5~10.7-μm(最短波長10.52-μm)
コリメータ	Pb	厚さ100mm。開口直径3mmと6mm。
Ge検出器	Ge	結晶サイズ:64φ×60mm。分解能(FWHM@1.33MeV):0.92keV
GSO検出器	Ce:Gd ₂ SiO ₅	結晶サイズ:36×36×180mm×4。γ線17MeV係数率99%

MeVから数十MeVのガンマ線は、電子対生成や

重元素の光核反応断面積の巨大共鳴エネルギー領域である。このガンマ線減は、コリメーターを用いることで、準単色化でき、また直線偏光や円偏光ガンマ線の発生が用意な特性から、磁気コンプトン散乱、光核反応による放射性廃棄物の核変換による安定化研究や、宇宙核物理研究として超新星爆発時の(γ, n)反応による重元素生成の解明、ニュートリノ効果のための核構造測定などの応用研究に用いられている。これらの応用にはガン線フラックスやガンマ線エネルギー、ガンマ線の偏光特性(直線偏光、円偏光)などのガンマ線特性の正確な把握が必要である。今回はそのフラックス測定の検証について調べた。図1には、表1のGSO検出器を用いて計測したγ線光子数の電子電流及びレーザー出力依存性を示す。高電流(100mA以上)のときは検出器の不感時間が大きいためフラックス測定精度が大きく低下する。正確に評価するためには大型の検出器と高速計数が必要である。この計測に対してクロスキャリブレーションを行うため放射化法を用いた計測を行った。

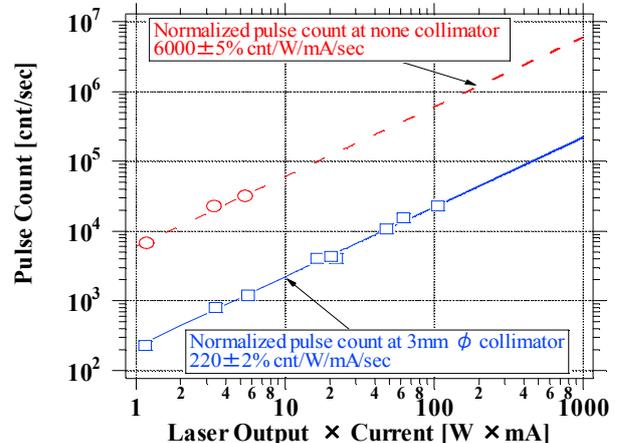
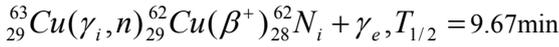


図1: GSO検出器で測定したγ線光子数のレーザー出力・電子電流依存性。[1]

¹ dtonaka@lasti.u-hyogo.ac.jp

2.放射化法によるγ線フラックス測定

光核反応断面積が既知であるターゲットにγ線を照射することでターゲットを放射化させ崩壊時に生ずる低エネルギー(数百 keV 程度)のγ線を測定することで入射γ線のフラックスを評価する。



今回、ターゲットには銅(Cu: 5.0mm φ × 50mm)を用いた。Cu の天然に存在する核種(親核種)は Cu-63(69.1%)、Cu-65(30.9%)であり、それぞれ光核反応領域のガンマ線を照射することで、(γ, n)反応によって娘核種 Cu-62、Cu-64 が生成される。この壊変によって発生する低エネルギーγ線を測定することで Cu-62、Cu-64 の生成量を計算できる。この結果と既知の核反応断面積によって入射γ線のフラックスを評価した。低エネルギーγ線の検出には Ge 検出器を用いた。

単位時間・単位長さ当たりの娘核種の生成量 dY[個]

$$dY = n \times N_\gamma(x) \times \sigma_R \times dx$$

$$dN_\gamma = n \times N_\gamma(x) \times (\sigma_R + \sigma_S) \times dx$$

$$N_\gamma(x) = N_\gamma e^{-n(\sigma_R + \sigma_S)x}$$

各娘核種の生成量 Y[個]

$$Y = \int dY = \frac{\sigma_R}{\sigma_R + \sigma_S} N_\gamma [1 - e^{-n(\sigma_R + \sigma_S)L}] \quad (1)$$

n は親核種の原子数密度[cm⁻³]、N_γ(x) はある位置 x での単位時間当たりのガンマ線光子数[photon sec⁻¹]、N_γ(x) は x によって変化し、その変化量 dN_γ、σ_R は核反応断面積[cm²]、σ_S は核反応以外の断面積[cm²]、N_γ はターゲットである親核種に単位時間当たり入射するガンマ線光子数[photon sec⁻¹]、L はターゲットの厚さ[cm]である。核反応断面積 σ_R は参考文献[2]、核反応以外の断面積 σ_S は参考文献[3]の Cu の値を使用した。スペクトル反応断面積を図 2 に示す。

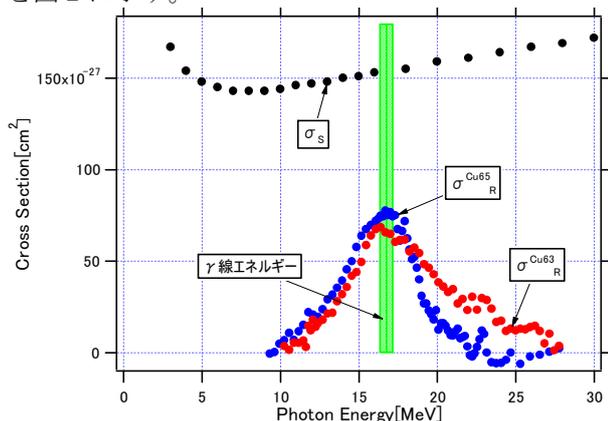


図 2 : Cu の断面積 入射γ線のエネルギー 16.7MeV(5%b.w.)での Cu-63 の平均核反応断面積 $\sigma_{R}^{Cu63} = 6.47 \times 10^{-26} \text{ mm}^2$ 、Cu-65 では $\sigma_{R}^{Cu65} = 7.6710^{-26} \text{ mm}^2$ 、核反応以外の断面積は $\sigma_S = 1.53 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ を用いた。

3.最適な照射、測定時間の見積もり

単位時間当たりの娘核種の崩壊量 d [sec⁻¹]は次の式(2)のように記述される。

$$d = \lambda \times N \quad (2)$$

ここで、λは娘核種の崩壊率[sec⁻¹]、Nはその量[個]である。ガンマ線照射中、単位時間当たりの娘核種の増加量は

$$\frac{dN}{dt} = Y - d = Y - \lambda N \quad (3)$$

γ線照射時間 t における娘核種の娘核種の量 N は(3)の微分方程式を解いてつぎのようになる。

$$N = \frac{Y}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda \cdot t)] \quad (4)$$

式(1)から、照射しつづけると Cu-62、Cu-64 の量は、 $\frac{Y}{\lambda}$ に漸近する。

崩壊率 λ は Cu-62 の半減期が 9.74[min]、Cu-64 の半減期が 12.7[h]である。[4]

半減期を T_{1/2} とすると次式から求められる。

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (5)$$

また本実験ではガンマ線フラックスの測定が目的であるが、生成量と照射時間の見積もりのため、図 1 の値より 3mm φ コリメータを使用して 220photonW⁻¹mA⁻¹sec⁻¹ を用いてレーザー出力 4.5W、蓄積電流値 200mA とすると単位時間当たりの入射ガンマ線光子数 N_γ は

$$N_\gamma = 1.98 \times 10^5 \text{ photon sec}^{-1} \text{ である。}$$

以上の条件から単位時間当たりの Cu-62、Cu-64 の生成量 Y[個]は式(4)に各値を代入することでそれぞれ求めることができる。

$$Y_{Cu-62} = 1.92 \times 10^5 \text{ 個}$$

$$Y_{Cu-64} = 1.91 \times 10^5 \text{ 個}$$

この条件での娘核種の照射時間 t[sec]依存を図 3 に示す。

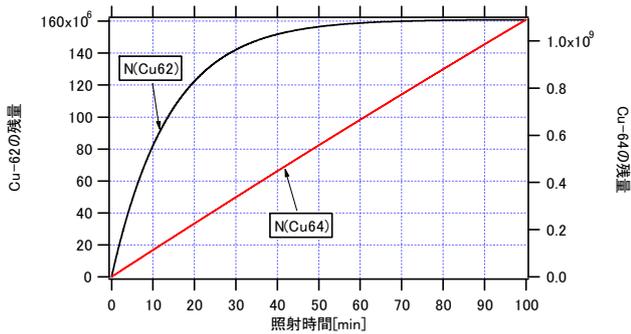


図3 照射時間と Cu-62,64 の量

照射時間を長くするにつれ、Cu-62 の量は 20 分ころから飽和をはじめ、80 分を超える照射を行っても Cu-62 の生成量は増えない。曲線の肩となるのは照射時間が 20 分あたりであり、この程度の照射、が適当と考えられる。

4. 崩壊放射線信号量

Cu-62、Cu-64 のからは様々なガンマ線が発生する。その中で最も割合が高いのはどちらも 511keV である。Cu-62 で $\eta_\gamma=195\%$ 、Cu-64 で $\eta_\gamma=35\%$ である。

[5] 図 3 での Cu-62、Cu-64 の残量 N に崩壊率 λ をかけることで単位時間当たりの崩壊放射線量(511keV)を求めることができる。崩壊 γ 線(511keV)の量は 20 分照射において

$$N_{\gamma_e} = d \times \eta_\gamma$$

すると、511keV の信号量は 20 分照射において

$$\text{Cu-62} \quad N_{\gamma_e}(\text{Cu-62}) = 1.95 \times 10^5 \text{ sec}^{-1}$$

$$\text{Cu-64} \quad N_{\gamma_e}(\text{Cu-64}) = 3.73 \times 10^2 \text{ sec}^{-1} \text{ となる。}$$

Cu-64 からの γ 線は Cu-62 に比べ 0.2% 以下であるため無視した。

5. 実験結果

Ge 検出器の検出効率

放射線核種の Ba133 を用いて Ge 検出器の検出部の中心から 0.5cm ずつ動かして信号量の変化を図 6 に示す。

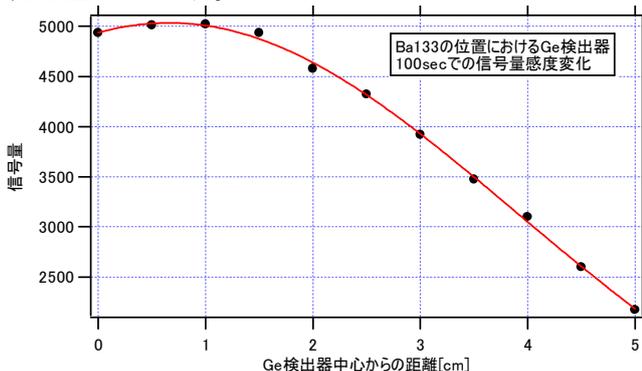


図 6 Ge 検出器のターゲットの位置による感度変化

Ge 検出器で測定した Ba133 の信号量は 34.1 sec^{-1} である。

測定は 20 分照射後、20 分測定で行った。崩壊 γ 線 511keV の信号量の変化を図 5 に示す、崩壊時に発生する放射線のグラフを図 4 に示す。

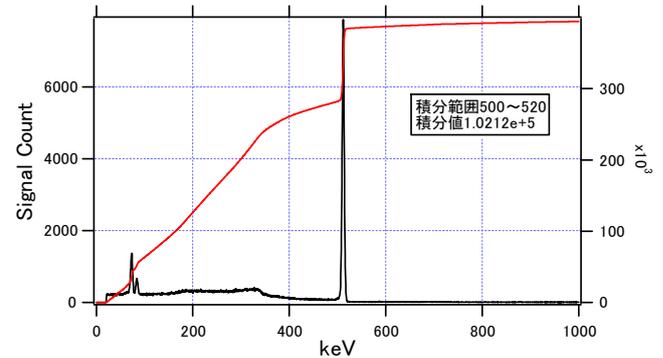


図 4 20 分照射後の発生した放射線のグラフ

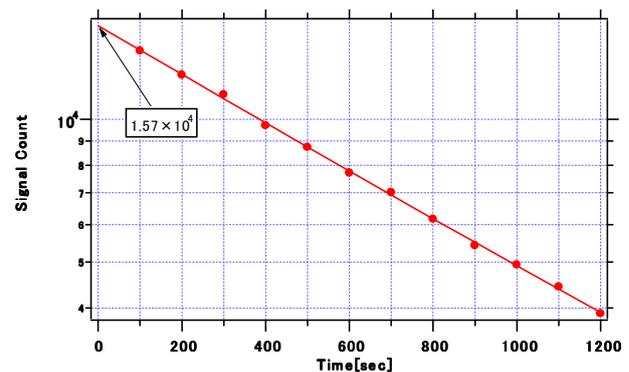


図 5 100sec ごとの 511keV の信号量の変化

崩壊率 λ

図 4 よりフィッティングした直線から崩壊率 λ [sec^{-1}] は

$$\lambda = 1.16 \times 10^{-3} [\text{sec}^{-1}] \text{ である。}$$

Cu-62 の残量 N

生成された Cu-62 の量 N_0 は図 4 より、0sec での y 軸との交点から

$$\lambda N = 1.57 \times 10^2 \text{ sec}^{-1} \text{ がわかる。}$$

Cu ターゲットの 511keV ガンマ線の吸収

511keV のガンマ線が全てターゲット中心で発生を仮定して、ターゲット自身によって吸収されて減衰する崩壊 γ 線の量を評価する。

ターゲット内部での減衰の割合は $e^{-n\sigma t}$ で表される。

ここでターゲットの密度 $n=8.95 \text{ g/cm}^3$ 、断面積 σ

$$= 8.36 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$$

$r=0.25 \text{ cm}$ (ターゲットの半径) とする。

$$e^{-n\sigma L} = 0.83$$

6.まとめ

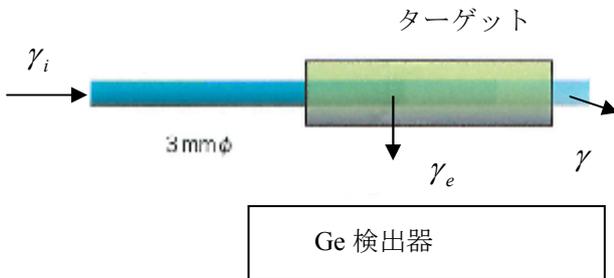
Cu をターゲットとした放射化法により γ 線フラックスを計測した。 γ 線は波長 $1.064 \mu\text{m}$ の Nd レーザーを 1GeV 電子で散乱させて発生したエネルギー 17MeV 付近の準単色を用いた。放射化法で測定した γ 線フラックスと GSO 検出器で測定した γ 線フラックスの測定結果の値は以下の通りである。放射化法で測定した γ 線フラックスは式(1)により N_γ を求めた。

<GSO 検出器による γ 線フラックス評価値>

$$N_\gamma = 1.98 \times 10^5 \text{ phton} \cdot \text{sec}^{-1}$$

<Cu 放射化法による γ 線フラックス評価値>

$$N_\gamma = 1.58 \times 10^5 \text{ photon} \cdot \text{sec}^{-1}$$



放射化法での計測結果とは GSO での結果と比べるとガンマ線フラックスは 20%の誤差で一致していた。NewSUBARU の電子電流が高電流時においてもフラックス計測は放射化法を用いることにより、計測が可能であると考えられる。今後精度向上のために、Ge 検出器の検出効率シミュレーションを援用等もする。

参考文献

- [1] Ken.Horikawa, "Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 618 (2010) 209-215",
- [2] Nuclear Data Services(EXFOR)
- [3] National Institute of Standards and Technology(Photon Cross Section Database)
- [4] 地人書館 「放射線データブック」
- [5] National Nuclear Data Center