

シリコン分光結晶によるガンマ線回折実験

TEST EXPERIMENT OF GAMMA-RAY DIFFRACTION USING SILICON CRYSTAL

松葉俊哉^{#, A)}, 早川岳人^{A)}, 静間俊行^{A)}, 西森信行^{A)},
永井良治^{A)}, 沢村勝^{A)}, クリストファーエンジェル^{A)}, 羽島良一^{A)},
Shunya Matsuba^{#A)}, Takehito Hayakawa^{A)}, Toshiyuki Shizuma^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)},
Ryoji Nagai^{A)}, Masaru Sawamura^{A)}, Christopher T. Angell^{A)}, and Ryoichi Hajima^{A)}
^{A)} Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki 319-1112, Japan

Abstract

A γ -ray diffraction property of a silicon single crystal and collimator system were studied in the Laue geometry using 1.33 MeV and 1.17 MeV γ -ray of ^{60}Co . The thickness was chosen to maximize the reflectivity of (440) lattice plane in γ -ray energy of 1.5 MeV. We measured diffracted γ -rays from the crystal by an NaI scintillator. A measured diffraction intensity of 1.33 MeV γ -rays was 37 counts/sec by using 3.0 TBq a ^{60}Co γ -ray radiation system.

1. はじめに

日本原子力研究開発機構(JAEA)では透過力の高い数 MeV のガンマ線を利用した、非破壊の核種分析システムの開発が進められている。原子核固有の励起エネルギーに等しいガンマ線を照射したときに発生する、核共鳴散乱(吸収)を利用して測定するために準単色、大強度、エネルギー可変のガンマ線源が必要となる。そのようなガンマ線はエネルギー回収型加速器(ERL)とレーザーエンハンスメント共振器等のレーザー技術を組み合わせたレーザーコンプトン散乱(LCS)ガンマ線で可能になり、今年度中にも KEK に建設されている試験器コンパクト ERL において光源の実証実験が行われる[1]。

ERL-LCS ガンマ線源等の次世代のガンマ線源は非破壊の核種分析だけでなく、産業や、基礎研究での利用も期待されており、ガンマ線の結晶分光器やガンマ線レンズ[2]といった光学素子の開発が望まれている。結晶分光器は結晶によるブラッグ反射を利用したもので、1970 年代以前はガンマ線でもよく利用されていたが、Ge 検出器の登場とともに使われなくなり、現在も活発に開発が続いているのはラウエランジェバン研究所だけである[4]。ここでは主に原子炉からの中性子を利用した捕獲ガンマ線を用いており、これまで LCS ガンマ線を対象とした分光器開発というものは行われてこなかった。

そこで LCS ガンマ線に適した結晶分光器の開発を目的として研究を開始した。しかし、分光器の効率が低いため既存の LCS 光源で試験を行うのは困難が予想された。そこで LCS ガンマ線を使用する前に、大強度の RI 線源によってコリメータや結晶など共通する装置を試験しておくことを検討した。 ^{60}Co 線源は 1.17 MeV と 1.33 MeV の二つのエネルギーが出てくるため、エネルギーが変化したときのブラッグ反射の挙動の違いが検証できることや、JAEA 内の放射線標準施設に大強度の線源があり、実験を行う

のに都合がよかったので、 ^{60}Co 線源でも使えるような結晶を準備した。

現在は ^{60}Co ガンマ線の回折光を測定することで各装置の試験を行っている。本報告ではその実験の内容を主に報告する。

2. 分光結晶

分光結晶はシリコンを透過型のラウエ配置で使用する。ブラッグ反射の積分反射強度は結晶の厚さや波長に依存するため 1 MeV~2 MeV で使えるように設計した。ガンマ線の反射率は結晶の厚さや反射する角度などに依存し、次のようにあらわされる[4,5,6]。

$$P(t, y) = \sin^2 \left(\frac{[A\sqrt{(1+y^2)}]}{1+y^2} \right), (1)$$

$$A = \frac{\pi t}{t_0}, \quad y \approx (\theta_B - \theta) \cdot \sin 2\theta_B \times t_0 / \lambda,$$

t は結晶の厚さ、 t_0 は消衰距離、 λ はガンマ線の波長、 θ_B はブラッグ角で、 θ は結晶格子面に対するガンマ線の反射角である。

式(1)を y の全範囲にわたって積分した反射強度の厚さ依存性を図 1 に示す。反射面は Si(440)面でガンマ線のエネルギーは ^{60}Co と NewSUBARU の LCS ガンマ線を想定している[7]。最適エネルギーをその中間に合わせてシリコン結晶の厚さを 2 mm とした。 ^{60}Co 線源を使用したときのビームプロファイルは図 2 のようになる。ブラッグ角は 1.33 MeV で 4.84 mrad 1.17 MeV で 5.56 mrad であり、反射の起きる角度は約 40 nrad FWHM、積分反射率は 49 nrad になる。

[#] matsuba.shunya @jaea.go.jp

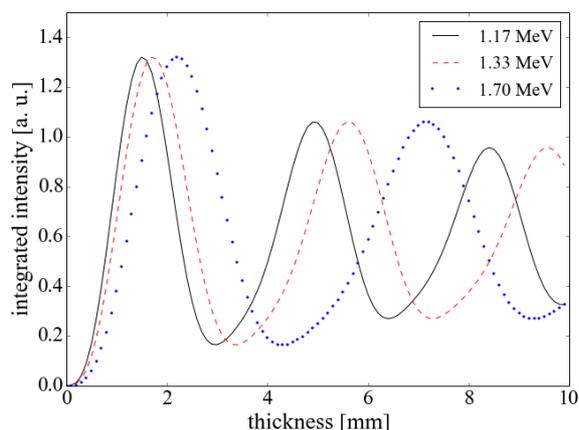


Figure 1: Thickness dependences of integrated intensity of S (440) reflection.

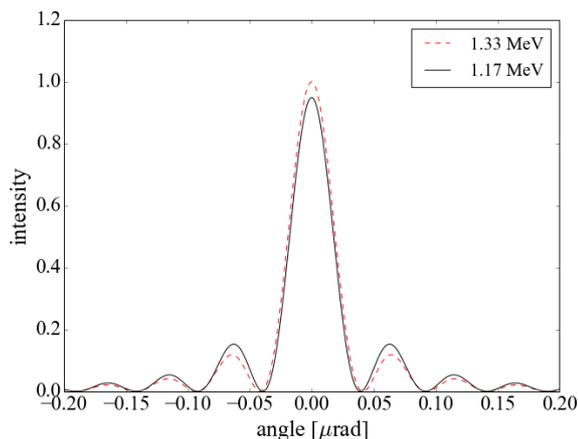


Figure 2: single crystal profiles for the Si(440) reflection at 1.33 MeV and 1.17 MeV.

3. ^{60}Co 線源による試験

図 3 に実験の配置図を示す。シリコン結晶の格子面をビーム軸からブラッグ角だけ傾けて設置する。ブラッグ条件を満たすガンマ線だけ $2\theta_B$ 傾きが変化し下流の検出器に入射する。 ^{60}Co の線源強度は実験時に 3.0 [TBq]であった。検出器のコリメータは 1.33 MeV のガンマ線に合わせて設置され、中心から $38.7 \pm 2 \text{ mm}$ に位置する。コリメータや遮蔽は鉛でできている。ガンマ線も前方への散乱は大きく、ビーム軸からわずかしか離れていないので、結晶前段のコリメータ内壁で散乱したガンマ線が直接検出器に入射しバックグラウンドとなる。そのバックグラウンドを低減させるため、結晶前に多段のコリメータを設置した。結晶の直前には上流からの散乱を遮蔽すると同時にそれ自身からの散乱を少なくするため短いコリメータが置かれる。大部分の回折しないガンマ線のためにビームダンプを設置し、自然放射線や回り込んでくるガンマ線を抑えるために検出器のビーム入射経路以外を遮蔽した。

検出器は分解能が比較的高く、内在バックグラウンドの存在しない NaI シンチレータを使用した。NaI シンチレータの信号はアンプした後マルチチャ

ネルアナライザーに入力しスペクトルを取得した。

結晶前で最も狭い第二コリメータは、結晶位置でのガンマ線を測定しながら位置調整されフラックスが最大となるように調整した。他のコリメータやビームダンプはレーザー墨出し器によってアライメントしている。

3.1 回折ガンマ線測定

フラックス測定および設置調整後に回折ガンマ線の測定を行った。結晶は市販の回転テーブル上に設置した。結晶の研磨面にレーザーを反射させて角度をアライメントし、次にガンマ線を照射しながら角度スキャンを行って、回折光の入る角度に調整した。ここから±数 mrad の範囲でガンマ線強度の角度依存性を詳細に測定した。図 4 に測定したスペクトルの例を示す。回折ガンマ線は最大でも数個毎秒しか入ってこないため、角度一点につき 480 秒間測定している。回折ガンマ線の入らない角度でも前方のコリメータ内壁等に起因するガンマ線が相当数入ってきてバックグラウンドを形成している。

各角度で得られたスペクトルを解析しエネルギー毎にガンマ線強度を求めた。1.33 MeV のガンマ線は全エネルギーピークのうち最大値を中心に 11 ch の範囲でカウント数を積分した。

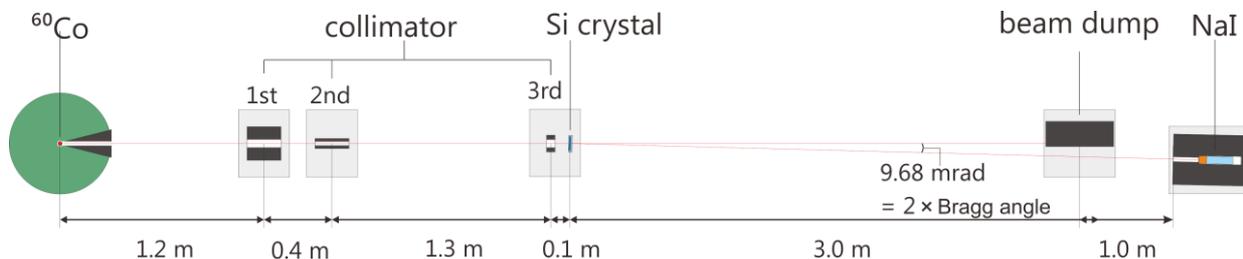


Figure 3: The experimental setup. The hole width, height and length of collimators were 8 mm × 20 mm × 200 mm (first collimator), 4 mm × 20 mm × 200 mm (second collimator), 8 mm × 20 mm × 45 mm (third collimator), 4 mm × 40 mm × 150 mm (detector collimator). For the sake of clarity, hole width of collimator was drawn incorrect scale.

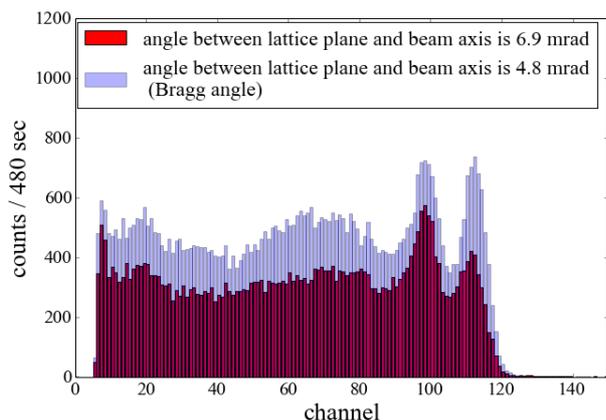


Figure 4: Examples of energy spectrum of NaI scintillator.

1.17 MeV ではバックグラウンドはピーク間の谷の位置でカウント数を半分とした点と低エネルギー側の数点で直線を仮定して、11 ch のカウント数から引き算した。

結果を図 5 に示す。この結果からはバックグラウンドを一様に差し引いており、それは中心から離れて回折ガンマ線が入ってこないと思われる点の強度を参考にしている。強度が最大となる角度はエネルギーによって変わり、ブラッグ角の違いから幾何的に計算した角度と一致している。同様に幾何的に計算すると 1.17 MeV の左側の山は(220)面による反射であることがわかる。また強度ピークの両側数 mrad にわたってガンマ線が検出されている。この原因についてはよくわかっていない。

3.2 予測される回折強度との比較

ガンマ線の回折強度は結晶位置でのガンマ線強度と角度広がりから計算できる。図 6 のようなジオメトリを考えると次のように与えられる、

$$I_{\text{eff}} \times \frac{W \cdot H}{4\pi R^2} \times \frac{\delta\phi}{\arcsin(W/R)} \approx I_{\text{eff}} \times \frac{H \cdot \delta\phi}{4\pi R}$$

I_{eff} は実効的なガンマ線強度で、図中で色の濃い領域だけが回折に寄与するためである。 I_{eff} は第二コリメータの幅で幾何的に決まり 2.0 TBq 程度と見積もられる。 H は結晶に当たるビームの垂直幅で今は第 3 コリメータにより 20 mm である。 $\delta\phi$ は積分反射率で 49 nrad となる。検出器に入射するものは垂直方向のアクセプタンスによって 6/7 に減少する。これらを考慮すると検出器に入射するガンマ線は約 46 個毎秒と換算される。

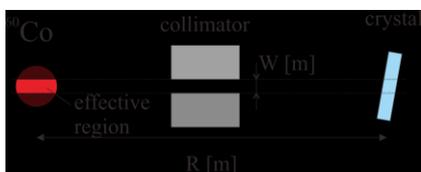


Figure 6: Schematic drawing of effective region of ^{60}Co source.

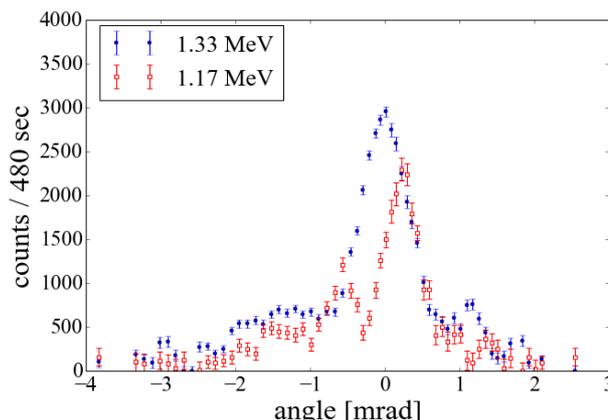


Figure 5: Crystal angle dependence of gamma-ray intensity.

NaI のピーク検出効率を別途測定した。検出器と同様のセットアップにし校正用の微量線源を離れた位置に設置し、スペクトルを測定する。実験と同様の解析方法を用いて出したガンマ線強度と幾何的に求まるガンマ線強度を比較して検出効率を求めると、1.33 MeV で約 16.5%であった。よって毎秒 7.6 個のガンマ線が検出される。

測定された 1.33 MeV のガンマ線数は 6.4 個毎秒であり 20% の範囲内で一致している。

4. まとめ

次世代のガンマ線源に向けた結晶分光器の試験を進めている。現在は将来的な LCS ガンマ線での実験に向けて、 ^{60}Co 線源によるガンマ線分光に共通なコリメータや結晶その他の試験を行っている。

回折強度の絶対値は 20% の範囲で理論と一致しており、バックグラウンドを抑えるようなコリメータの配置等も効果があった。しかし広い角度範囲にガンマ線が検出されるなど、完全に理解できていない点もあり今後の課題である。

参考文献

- [1] R. Nagai, et al., "Construction of the equipment for a demonstration of laser Compton scattered photon source at cERL" These Proceedings.
- [2] D.Habs, et al., Phys Rev Lett, 108,184802 (2012).
- [3] E.G.Kessler, Jr. et al., Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A 457 187-202 (2001).
- [4] W. H. Zachariasen. "Theory of X-ray diffraction in crystals." (John Wiley a Sons, New York, 1945).
- [5] D. Petrascheck, H. Rauch, Acta Cryst. A 40 445 (1984).
- [6] S.Miyamoto. et al., "NewSUBARU Polarized Gamma-ray Source" Proceedings of The 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-11, 2012.