

# レーザCompton散乱ガンマ線ビームによる遮蔽評価法 SHIELDING EVALUATION BY LASER COMPTON SCATTERING GAMMA-RAY

宮本 修治<sup>#,A)</sup>, 北川 靖久<sup>A)</sup>, 塚越 健一<sup>B)</sup>, 齊藤 義秀<sup>B)</sup>, 川原 竜太<sup>B)</sup>, 川原 愉<sup>B)</sup>

Shuji Miyamoto <sup>#,A)</sup>, Yasuhisa Kitagawa<sup>A)</sup>

Kenichi Tsukagoshi<sup>B)</sup>, Yoshihide Saito<sup>B)</sup>, Ryuta Kawahara<sup>B)</sup>, Satoshi Kawahara<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Laboratory of Advanced Science and Technplogy for Industry, University of Hyogo

<sup>B)</sup> KAWAHARA Technical Research

## Abstract

Laser Compton scattering gamma-ray beam was used for evaluation of gamma ray shield. The gamma source of a NewSUBARU Synchrotron Radiation Facility can generate the quasi- monochromatic gamma ray beam of 0.5-1.7MeV by combining a carbon dioxide laser and a 0.5-1.0 GeV electron beam. This gamma-ray source has small divergence of  $1/\gamma$  radian due to the relativistic effect, where  $\gamma$  is relativistic factor of electron. Small diameter test beam of gamma-ray of about 1mm in diameter is possible to use at the 10 m from the gamma-ray source by combining the small divergence gamma-ray beam with small hole lead collimator. Test sample size used was 2 cm in diameter. Measured shield factor was compared with calculated value using known shield materials such as lead.

## 1. はじめに

ガンマ線遮蔽材料の評価に、レーザCompton散乱(LCS)ガンマ線ビームを利用した。ニュースバル放射光施設のLCSガンマ線源<sup>1,2)</sup>は、炭酸ガスレーザー(波長10.59 $\mu$ m)と0.5 GeV - 1.0GeVの電子ビームを組み合わせることで、0.5MeVから1.7-MeVの準単色ガンマ線ビームを発生することができる。このガンマ線源は、ビーム状で広がりが小さいため、小口径の鉛コリメーターを利用することで、直径1mm程度の $\gamma$ 線ビームとして、試料の計測に用いることができる。これにより、直径2-cm程度の小さな試料のガンマ線遮蔽率を精度良く測定可能となった。また厚さの薄いサンプルでは、確率的変動や時間変動による計測精度が低下するため、参照データと繰り返し

計測を行うことで、統計的に精度を改善した。

## 2. レーザCompton散乱ガンマ線ビーム源

Fig. 1に、ニュースバル実験ホールの南東部に設置された、レーザ・コンプトン散乱ガンマ線ビームラインBL01Aの配置を示す。電子は左側壁面から、左回りに蓄積される。ガンマ線実験ハッチは2箇所あり、加速器収納トンネルに隣接して、コンクリート壁で囲まれた"Gamma hatch-1"と、この実験ハッチ背面のガンマ線ダンプ(鉛30cm厚+コンクリート45cm厚)にガンマ線通過孔をあけ、後方でガンマ線照射可能な"Gamma hatch-2"である。ハッチ1は、主にコリメーターハッチとして利用する場合が多い

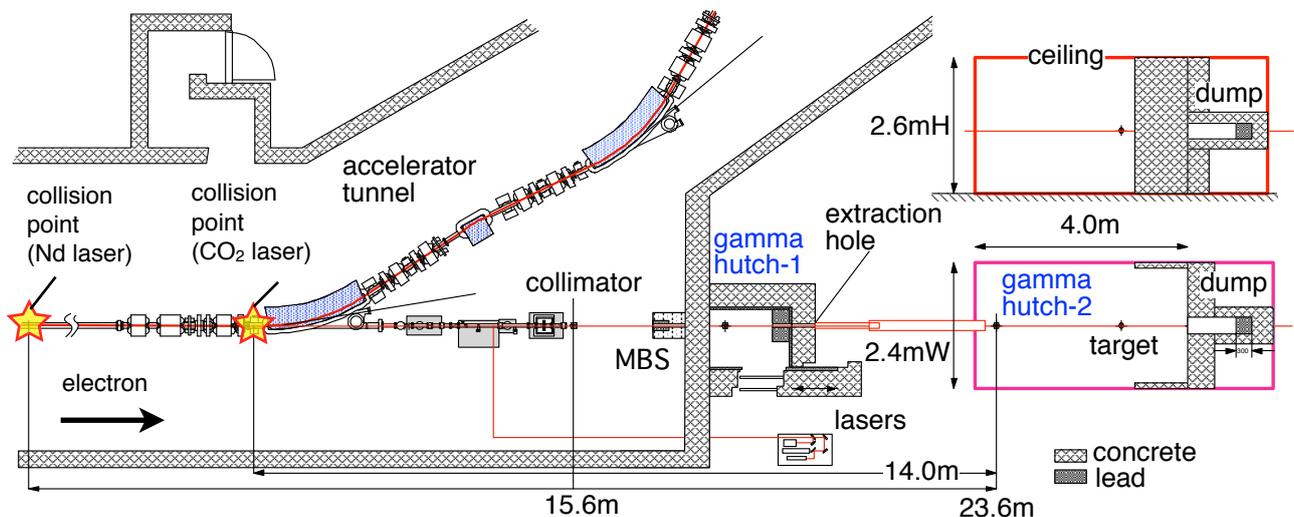


Fig.1. Detail of gamma-ray beamline BL01A. Part of electron storage ring and hatch-1 and hatch-2 are shown.

# miyamoto@lasti.u-hyogo.ac.jp

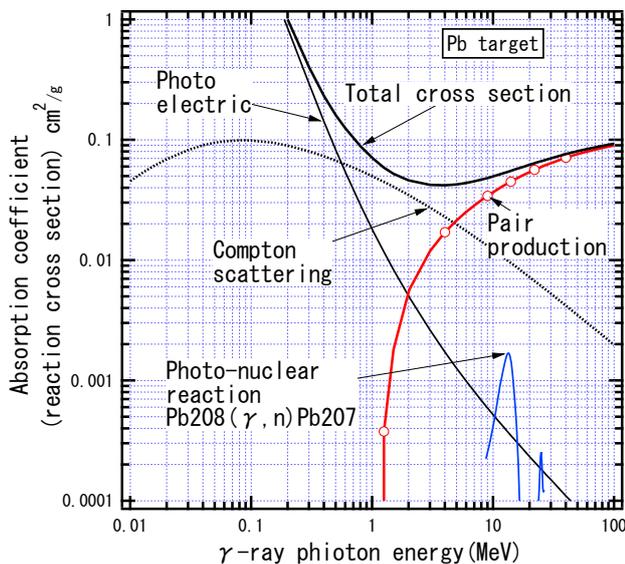


Fig.2. Absorption cross section of gamma-ray in the lead target. Main interaction mechanisms in the energy range of 0.1 MeV to 10 MeV are a photo electric absorption, the Compton scattering and the pair production.

が、ハッチ1のみで照射利用も可能である。その場合は、ハッチ1の背面ガンマ線ダンプ開口に、可動式エンドプラグを挿入して遮蔽する。

レーザは、加速器収納トンネル壁面の開口を通して、トンネル内の固定ミラーへ導かれ、集光レンズを介して、真空ダクト内のミラーにより、電子ビームとの散乱点まで導入される。真空ダクト内のミラーは放射光にさらされるため、水冷している。電子ビームとレーザのアライメントを容易にするために、レーザ入射の反対側（蓄積リングの約30m上流側）のビームライン(BL01B)からHeNeレーザを導入して、基準アライメントとしている。LCS用レーザの交換や波長変換結晶等新しい光学系を導入した場合など、レーザアライメントずれた場合は、このHeNeレーザにアライメントすることで、粗調をおこなう。最終的な微調整は、ガンマ線信号強度をモニターしながら、ミラーを振って精密アライメントを行う。

収納トンネル内のLCS用レーザの光学系は、可視および近赤外用(Ndレーザ $\omega$ および $2\omega$ )と遠赤外用(CO<sub>2</sub>レーザ)の2系統設置しており、遠赤外用光学材料は、ZnSeおよび金ミラーを用いている。Ndレーザと電子の衝突位置は、長直線部のほぼ中央で、集光レンズより13mの位置である<sup>[3]</sup>。CO<sub>2</sub>レーザの場合、同じ衝突位置では集光径が大きくなり、電子ビームとのマッチングが悪いため、衝突位置を偏向電磁石の直前の位置(集光レンズから約6m)としている<sup>[4]</sup>。

準単色ガンマ線の利用には、直径1mmから6mmのコリメーター(鉛製厚さ100mm)を用いた。コリメーターは、収納トンネル内とハッチ1内に設置してお

り、XY $\theta$ ステージによりガンマ線光軸とのアライメント調整を行うことができる。直径1mmのコリメーターを用いて、800MeVの電子ビームと、波長10.59 $\mu$ mのCO<sub>2</sub>レーザの散乱では、ガンマ線エネルギー広がり、3%程度と計測されている<sup>[5]</sup>。

Fig.2にガンマ線と物質の相互作用断面積(吸収断面積)の例として、鉛ターゲットの例を示す。ガンマ線エネルギー0.1MeVから10MeVあたりでは、低エネルギー側から、光電効果、Compton散乱及び電子対生成がそれぞれ、主要な相互作用となる。これらの全反応断面積は、鉛中では、3-5MeVの領域が最も小さくなり、最も反応断面積が小さなエネルギー領域となっている。これら主要な相互作用は、それぞれ、より反応断面積が大きな電子を発生し、ターゲットに吸収される。

計測で用いたガンマ線フラックスは、電子ビーム電流300mA、レーザ出力5Wで、1mmコリメーターから、4mの位置にセットしたサンプル上で、 $2 \times 10^5 \gamma$ /秒であった。この値は、計測器のデッドタイムが25%を超えないように設定した。同様なフラックスを、放射性同位体で実現するには、コリメーター位置(サンプルから4m)に、50TBqの放射性同位体を設置する必要がある。

### 3. 小サンプルの遮蔽計測と評価

Fig.3にガンマ線ハッチ2内に設置した試料および計測器の配置写真を示す。レーザCompton散乱ガンマ線ビームは、ハッチ1とハッチ2をつなぐ遮蔽ダクトを通り、ハッチ2に入射される。ビームの断面は、ハッチ1に設置している鉛10cm厚さのコリメーターによりほぼ期規定される。4m飛行後のガンマ線ビームサイズを確認するため、イメージングプレートで、サンプル位置のガンマ線像を計測した。ガンマ線径の半値幅は、ほぼコリメータサイズと同じ、直径1mmであった。

計測試料は直径2cm程度の物で、それを自動ステージ上の試料台に設置し、その後方50cmに置いたNaI検出器(直径6インチ、厚さ5インチ)で透過ガンマ線光子数を計測した。自動ステージにより、サンプルあるなしの計測を必要回数繰り返して、差分より、ガンマ線遮蔽率を算出した。

計測は電子ビームエネルギー982-MeVおよび609-MeVで実施した。CO<sub>2</sub>レーザとの散乱で発生するレーザCompton散乱ガンマ線の最大エネルギーは、それぞれ1.73MeVと0.665MeVとなる。電子エネルギー982MeVは、ニュースバル放射光施設の通常運転(1GeVモードTopUp運転)時の電子エネルギーで、本計測はほぼこのエネルギーで実施した。ガンマ線エネルギー0.665MeVは、ユーザーの希望により、レーザCompton散乱ガンマ線スペクトルピークが、Cs-137( $\beta^-$ )Ba-137\*(IT,  $\gamma$ )Ba-137からのガンマ線エネルギー662keV付近に来るように、電子ビームエネルギーを減速して実施した。

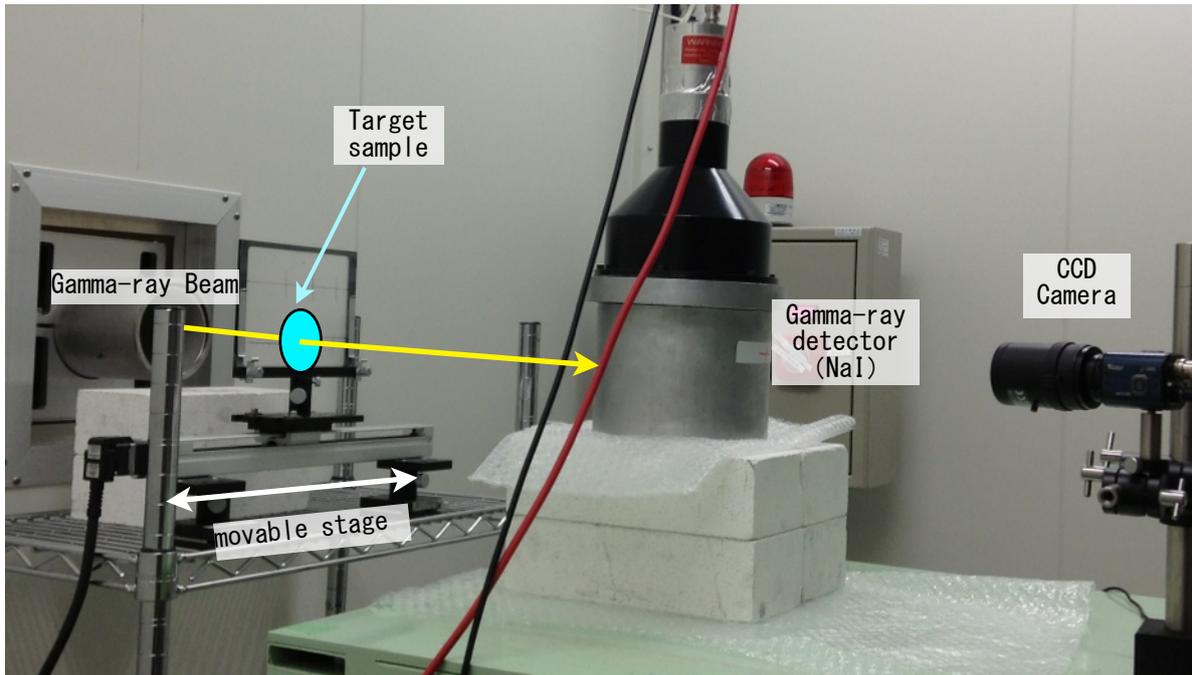


Fig.3. Photograph of interior of gamma-ray irradiation hutch. Measurement setup is shown. Yellow arrow indicates laser Compton scattering gamma-ray beam. The diameter of the beam was about 1mm which was measured by imaging plate. Transmitted gamma-ray photons are measured by NaI detector. Target samples are set on the movable stage.

Fig. 4に、NaI検出器で計測した、ガンマ線の信号を示す。黒線○マーカ信号が、試料がない場合のNaI検出器信号、赤線△マークは、計測試料通過後のガンマ線スペクトルである。横軸はMCAのチャンネルで表示しているが、スペクトルピーク付近が660keV当たりに対応している。正確なガンマ線スペ

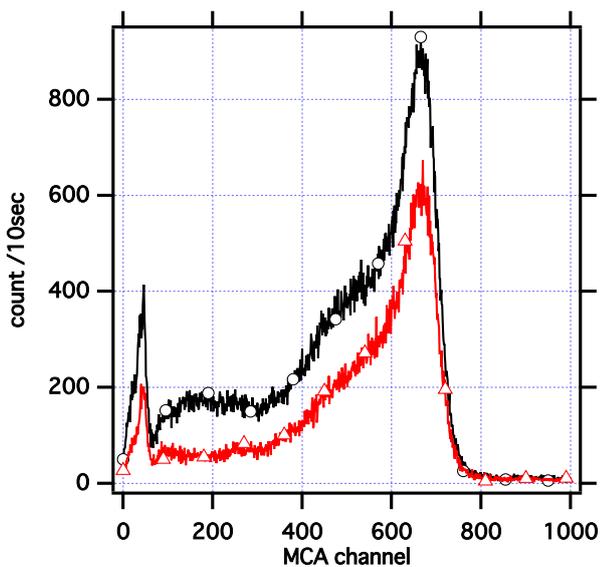


Fig.4. Example of gamma-ray beam spectrum before (○) and after (△) passing through the sample target.

クトルに関しては、Ge検出器と、解析シミュレーションにより求めているが、本試験ではNaI検出器を用いているため、スペクトル精度は求めている。透過ガンマ線のフラックスで評価した。ただ、低エネルギー端の(80keV付近)のピークは、コリメーターや遮蔽に用いている鉛のスペクトルであるため、低エネルギー側はカットして、吸収率評価には含めていない。既知サンプル用いたデータを、数値計算およびシミュレーションと比較して矛盾しないことを確認している。

### 参考文献

- [1] S.Miyamoto et al., "Laser Compton back-scattering gamma-ray beam-line on NewSUBARU", Radiation Measurements, **41**, pp. S179- S185 (2007).
- [2] 宮本修治 他, "ニュースバル偏光ガンマ線ビームライン", 第9回日本加速器学会年会, プロシーディングス, 大阪大学, FRLR17, August 8-10 (2012).
- [3] K.Horikawa et al., "Measurements for the energy and flux of laser Compton scattering  $\gamma$ -ray photons generated in an electron storage ring: NewSUBARU", Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res., A **618**, pp 209-215, (2010).
- [4] S.Amano et al., "Several-MeV  $\gamma$ -ray generation in NewSUBARU by laser Compton backscattering", Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res., A, **602**, pp.337-341(2009).
- [5] 宮本修治 他, "レーザCompton散乱ガンマ線ビーム源特性と偏光ガンマ線利用", 本年会プロシーディングス, M00T16, 第10回日本加速器学会年会, 名古屋大学, 8月5日 (2013).