

## レーザーCompton散乱ガンマ線ビーム源特性と偏光ガンマ線利用 PREPERATION OF PAPERS FOR ACCELERATOR CONFERENCES

宮本 修治<sup>#,A)</sup>, 天野 壯<sup>A)</sup>, 橋本 智<sup>A)</sup>, 松本 卓也<sup>A)</sup>, 小林 花繪<sup>A)</sup>, 望月 孝晏<sup>A)</sup>, 寺澤 倫孝<sup>A)</sup>,  
坂井 信彦<sup>A)</sup>, 小泉 昭久<sup>B)</sup>, 関岡 嗣久<sup>C)</sup>, 宇都宮 弘章<sup>D)</sup>, 山県 民穂<sup>D)</sup>, 秋宗 秀俊<sup>D)</sup>, 嶋 達志<sup>E)</sup>,  
高久 圭二<sup>E)</sup>, 早川 岳人<sup>F)</sup>, 静間 俊行<sup>F)</sup>, 今崎 一夫<sup>G)</sup>, 李大治<sup>G)</sup>, 井澤 靖和<sup>G)</sup>, 堀 史説<sup>H)</sup>,  
岩瀬 彰宏<sup>H)</sup>, 浅野 芳裕<sup>I)</sup>, 皆川 康幸<sup>J)</sup>, 竹村 育浩<sup>J)</sup>, 濱田 洋輔<sup>J)</sup>, 伊達 伸<sup>J)</sup>, 大熊 春夫<sup>J)</sup>  
Hanako Marui <sup>#,A)</sup>, Taro Masugu<sup>A)</sup>, Ryushi Kasoku<sup>B)</sup>

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

<sup>B)</sup> Graduate School of Material Science, University of Hyogo

<sup>C)</sup> Graduate School of Engineering, University of Hyogo, <sup>D)</sup> Konan University

<sup>E)</sup> Research Center of Nuclear Physics, Osaka University, <sup>F)</sup> Japan Atomic Energy Agency

<sup>G)</sup> Institute for Laser Technology, <sup>H)</sup> Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

<sup>I)</sup> RIKEN Spring-8 Center, <sup>J)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute

### Abstract

Laser Compton scattering gamma-ray beam source was developed on BL01 of NewSUBARU synchrotron radiation facility. The gamma-ray beams were used for application experiments, a nuclear physics research, a nondestructive inspection of thick material, a magnet Compton scattering measurements, and nuclear transmutation research. New gamma-ray irradiation hutch was started to use. Gamma-ray photon energy of up to 76 MeV is available. Expected flux of quasi-monochromatic gamma-ray (16.7MeV,  $\Delta E/E \sim 5\%$ ) is more than  $10^6$   $\gamma/s$  using 35W Nd laser and 300 mA electron current. Recently, new electron energy value operation of NewSUBARU was tested. The electron energy of 0.55 GeV to 1.47 GeV were used for changing energy of quasi-monochromatic gamma-ray beam.

### 1. はじめに

兵庫県立大学ニュースバル (NewSUBARU) 放射光施設<sup>[1]</sup>では、放射光利用研究と並行して、2005年度より専用ガンマ線ビームライン<sup>[2]</sup>を用いてレーザー・Compton散乱ガンマ線の発生試験と利用実験を行なってきた<sup>[3, 4]</sup>。昨年度より、放射光施設の運転・利用と同時に、1-MeVから76-MeVの準単色ガンマ線を安定に発生・利用が可能となっている。また、最大ガンマ線パワーも約20倍の0.33mWのガンマ線まで発生可能である。

1-GeVのTopUpモード運転で、Ndレーザー(波長1 $\mu$ m)を用いる場合、最大エネルギー16.7-MeVのレーザー・Compton散乱ガンマ線ビームを発生でき、レーザーパワー35-W、電子電流300-mAでは、 $10^6$   $\gamma$ /秒以上のフラックスの準単色 ( $\Delta E/E \approx 5\%$ ) ガンマ線が発生できる。ガンマ線ビーム利用研究者と協力して、ガンマ線源の評価とビームラインの改良を進めて行く予定である。

Table. I にはニュースバル電子蓄積リングのパラメーターを示す。通常運転モードは、電子エネルギー1-GeVのTopUpモード(表示電子エネルギー974-MeV)と、電子蓄積後、電子エネルギーを1.5GeVまで加速する高エネルギー蓄積モード(表示電子エネルギー1.47 GeV)が、週間スケジュールされている。電子エネルギーは、0.55-GeVから1.47-GeVの範囲で変更可能であるが、標準エネルギー以外での運転は、現在のところ、夜間か休日限られる。

### 2. NewSUBARUガンマ線ビーム源構成

Fig. 1に、ニュースバル実験ホールの南東部に設置している、レーザー・Compton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 hutch-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 hutch-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機会が多いが、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。

Fig. 2に現在ガンマ線発生に使用しているレーザーの写真を示す。レーザーは、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

Table 1 : Parameters of NewSUBARU ring.

Storage energy	0.7 – 1.5 GeV
TopUp operation	1.0 GeV / 250 mA
Circumference	118.731 m
RF frequency	499.955 MHz
Harmonic number	198
$\Delta E/E$ (1.0/1.5 GeV)	0.047% / 0.072%
Emittance(1.0/1.5 GeV)	37 nmrad / 67 nmrad

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

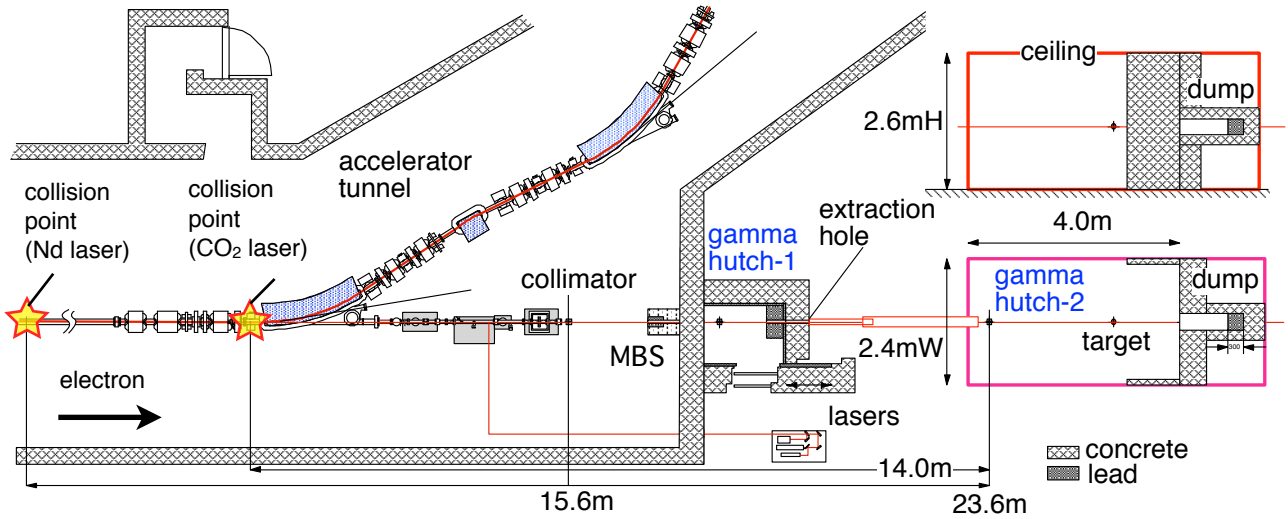


Fig.1. Detail of gamma-ray beamline BL01A. Part of electron storage ring and hutch-1 and hutch-2 are shown.

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ーのアライメントを容易にするために、レーザー入射の反対側（蓄積リングの約30m上流側）のビームライン(BL01B)からHeNeレーザーを導入して、基準アライメントとしている。LCS用レーザー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、レーザーアライメントずれた場合は、このHeNeレーザー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用レーザーの光学系は、可視

および近赤外用 (Ndレーザー  $\omega$  および  $2\omega$ , Er:Fiberレーザー) と遠赤外用 (CO<sub>2</sub>レーザー) 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レーザー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>レーザーの場合、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>。

真空中の放射光光学系には、汚染物質の付着という問題が発生する。これは、放射光の軟X線から紫外線領域の光が、真空中の残留ガス、特に炭化水素径分子と反応して、ミラーや真空窓に堆積するためである。波長にも寄るが、これがレーザー反射率低下の

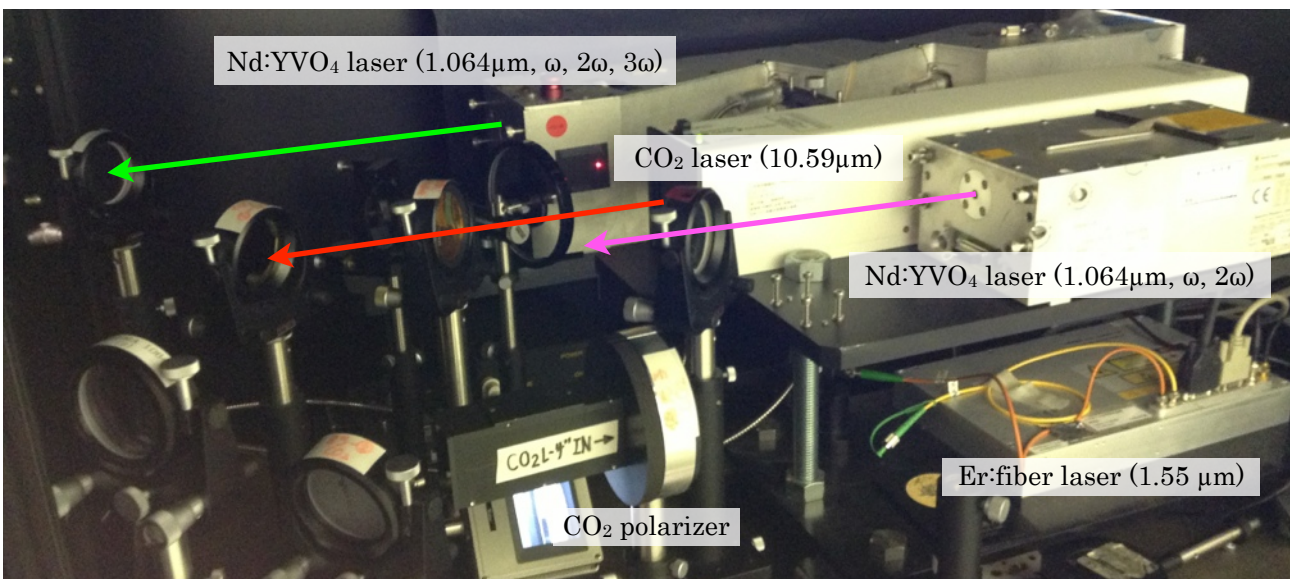


Fig.2. Laser stages for laser Compton scattering gamma-ray source. Four lasers and optics are shown.

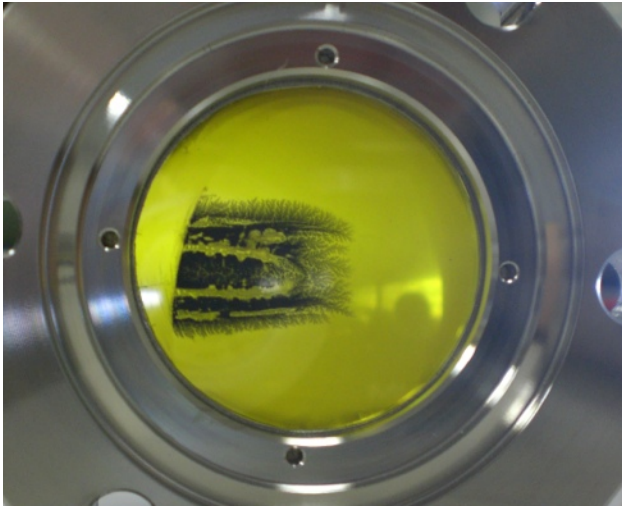


Fig.3. Contamination on the vacuum window (ZnSe) for CO<sub>2</sub> laser light injection. Black contamination was seen on vacuum side of the window.

原因となり、ミラーダメージと、レーザパワー減少の原因になる。ニューズバル・ガンマ線ビームラインでは、だいたい1年に1回、ミラーや窓の交換を行っている。ただ、CO<sub>2</sub>レーザ入射用光学ラインにおいて、特異な汚染物質の付着が観測されており、機構がわかっていない。Fig. 3に1年ほど使用した、ZnSe真空窓の写真を示す。黒い縞模様様の汚れは、真空側に付着したもので、主に炭素である。この窓は、CO<sub>2</sub>レーザ入射窓で、真空保全のための2重化している窓の真空側である。直接放射光には晒されない部分であるが、真空中に設置した銀ミラーを介して、放射光が窓に照射され、汚染物質が付着すると考えられる。ただ、同様な銀ミラーを用いている、Ndレーザ用の合成石英窓には、ほとんど汚染物質の付着が見られないため、窓材料および照射レーザ波長に依存した付着メカニズムがあると考えられる。

### 3. NewSUBARUレーザCompton散乱ガンマ線ビーム源の特徴

ニューズ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のガンマ線照射ハッチ2の内部写真をFig. 4に示す。ハッチ1に設置したコリメーターで準単色とした偏極ガンマ線ビームを高分解能Ge検出器で計測し、そのビームを使って、光核反応中性子発生スペクトル反応断面積の計測に使われている。写真ではガンマ線スペクトル検出器、中性子検出器、ダンプ部のフラクスマモニターが直列の設置されている

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。鉛コリメーターでビーム軸成分のみを取り出すことで準単色とすることができる。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、XYθ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。

準単色ガンマ線のエネルギー幅は、Ndレーザの場合、衝突点から約15.6mに設置したコリメーターにより、 $\Delta E/E=10\%$  (6mmφ) および5% (3mmφ) 程度の広がりとなっている。Fig. 5に、電子を800MeVに減速して、CO<sub>2</sub>レーザを散乱させた場合のガンマ線を直径1mmのコリメーターを通して準単色化し、Ge検出器で計測したスペクトル例を示す。Ge検出器サイズは直径60mm程度であるが、全エネルギーピークが綺麗に見えており、スペクトル広がり、3%程度である。

偏極ガンマ線を利用実験に使う場合は、必要に応じてそれぞれのレーザ光学系に偏光子、波長板等を導入する。レーザ・コンプトン散乱では、入射レーザの偏光をガンマ線が保存するため、散乱角度を制限してやることで、高度に偏光した直線偏光、あるいは円偏光ガンマ線を取り出すことができる。

Fig. 6にガンマ線の直線偏光性を計測するために導入した、偏光計の外観を示す。小口径のガンマ線ビームを、ガンマ線通過孔中央に設置した、Compton散乱ターゲットで散乱させ、90度方向への

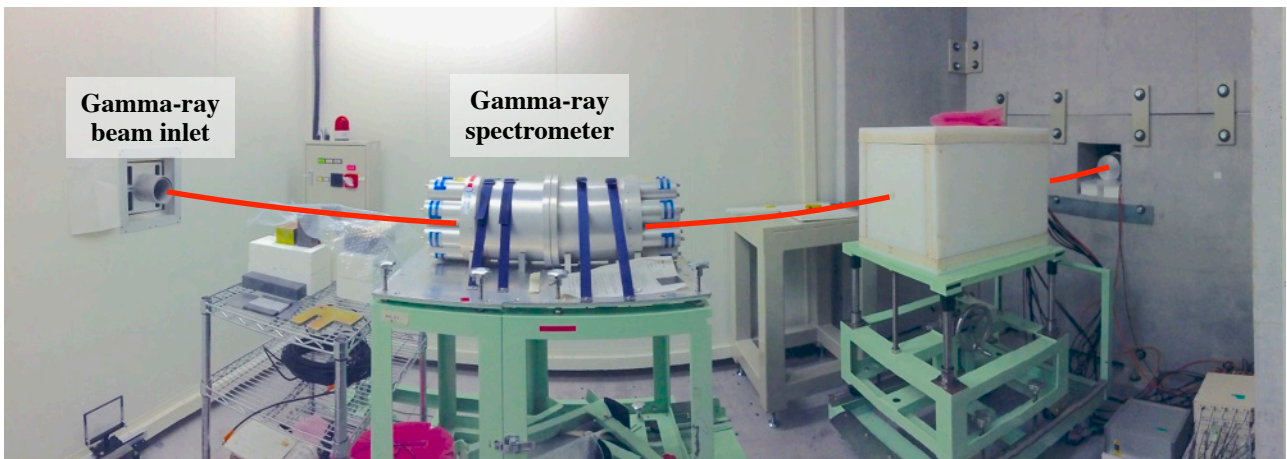


Fig.4. Interior photo of the gamma-ray irradiation hutch-2.

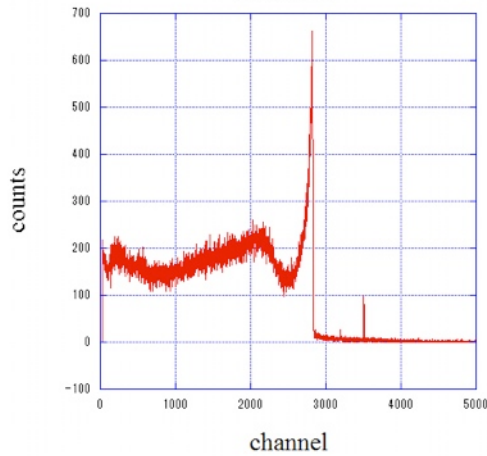


Fig.5. Gamma-ray spectrum taken by Ge detector. CO2 laser (10.59 $\mu$ m) was scattered by 800 MeV electron beam. Collimator of 1mm in diameter was used.

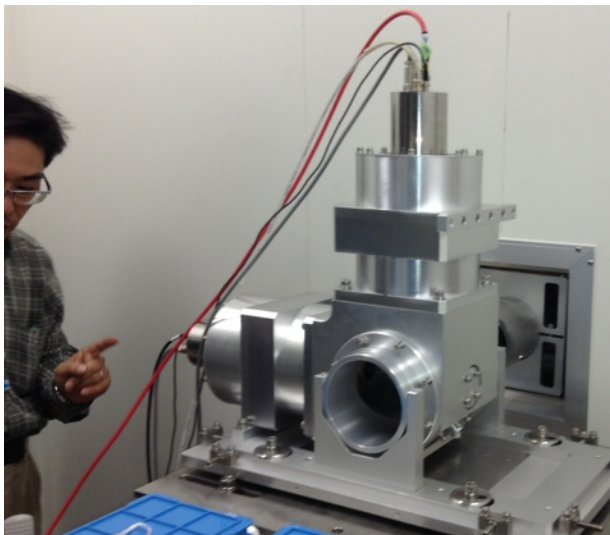


Fig.6. Gamma-ray polarimeter and flux monitor.

散乱強度分布を計測して、ガンマ線の偏光度を計測する。数十MeV程度までのガンマ線エネルギーなら偏光依存したCompton散乱強度で計測可能である。例えば、1.7MeVガンマ線では、偏光方向と直角方向

との散乱強度比は1:2程度となり、十分精度よく計測可能である。また、90度異なる方向で同時に散乱強度を測定することで、ガンマ線のフラックスモニターとしても利用する予定である。

Table IIにニュースバルガンマ線源のフラックスと光子エネルギーを示す。コリメーターなしの場合のYieldは、電子電流1mA、レーザ出力1Wで規格化した値を示している。コリメーターなしの場合でも、加速器蓄積リングとビームラインの接続部近傍に、不要な放射光を吸収する「アブソーバー」を設置しているため、散乱角度の大きい、低エネルギーガンマ線は透過できない。そのためガンマ線スペクトルは、低エネルギー側がカットされたスペクトルとなる。ガンマ線ハッチで利用可能なガンマ線光子数は、1.0GeVのTopUp運転で、電流250mA、レーザ出力10Wの場合、規格化フラックスの2500倍の光子数となる。

#### 4. まとめ

NewSUBARUレーザCompton散乱ガンマ線ビーム源では、数種類の波長の異なるレーザを組み合わせることで、1.7MeVから76MeVの間で、いくつかのエネルギー領域のガンマ線ビームを利用できるようになった。また、ガンマ線照射ハッチ2を設置することで、ガンマ線利用実験の自由度が向上した。さらに、電子エネルギーを変更して、ガンマ線円エネルギーのチューニングも可能となっている。今後は、高出力は超可変レーザーの導入を目指す予定である。

#### 参考文献

- [1] 宮本 修治 他, "ニュースバル放射光施設", 本年会プロシーディングス, SSFP07 第10回日本加速器学会年会, 名古屋大学, 8月3-5日 (2013).
- [2] S.Miyamoto et al., "Laser Compton back-scattering gamma-ray beam-line on NewSUBARU", Radiation Measurements, **41**, pp. S179- S185 (2007).
- [3] T.Hayakawa et al., "Half-life of  $^{184}\text{Re}$  populated by the  $(\gamma, n)$  reaction from laser Compton scattering  $\gamma$  rays at the electron storage ring NewSUBARU", Phys. Rev. C **74**, 065802 (2006).
- [4] 宮本修治 「レーザ・コンプトン散乱ガンマ線ビームライン - NewSUBARU放射光施設 -」 加速器学会誌「加速器」, **5**, pp.111-116 (2008).

Table II. Expected gamma-ray energy and flux of NewSUBARU LCS gamma-ray source.

Parameter / Lasers		Nd( $\omega$ )	Nd(2 $\omega$ )	Er	CO <sub>2</sub>
Laser wavelength $\lambda$		1064 nm	532 nm	1540 nm	10590 nm
Laser power (max) PL		35 W	20 W	4 W	7.5 W
Gamma-ray energy (no collimator)	Ee= 974 MeV	5-16.7 MeV	10-33.4 MeV	3.5-11.5 MeV	0.5-1.7 MeV
	Ee=1470 MeV	8-37.6 MeV	15-73 MeV	5-25.7 MeV	0.7-3.9 MeV
Yield (no collimator)	Ee= 974	6000 $\gamma$ /s/mA/W	3000 $\gamma$ /s/mA/W	7000 $\gamma$ /s/mA/W	7200 $\gamma$ /s/mA/W
Gamma-ray energy (3mm $\phi$ collimator)	Ee= 974 MeV	15.4-16.7 MeV	30.5-33.3 MeV	10.6-11.5 MeV	1.57-1.7 MeV
Yield (3mm $\phi$ collimator)	Ee= 974 MeV I=250 mA	2 $\times$ 10 <sup>6</sup> $\gamma$ /s	6 $\times$ 10 <sup>5</sup> $\gamma$ /s	3 $\times$ 10 <sup>5</sup> $\gamma$ /s	1 $\times$ 10 <sup>6</sup> $\gamma$ /s