

## PROJECT OF MEV-GAMMA PHOTON BEAM BY LASER INVERSE COMPTON SCATTERING IN STRAIGHT SECTION OF SPRING-8 STORAGE RING

Akira Mochihashi<sup>A)</sup>, Haruo Ohkuma<sup>A)</sup>, Masazumi Shoji<sup>A)</sup>, Shinsuke Suzuki<sup>A)</sup>, Kazuhiro Tamura<sup>A)</sup>, Keigo Kawase<sup>B)</sup>  
Kazuya Nakayama<sup>C)</sup>, Shigeki Okajima<sup>C)</sup>, Mamoru Fujiwara<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> JASRI/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

<sup>B)</sup> Kansai Photon Science Institute, JAEA, 8-1 Umemidai, Kizugawa, Kyoto 619-0047, Japan

<sup>C)</sup> Center of Advanced Metrology, Chubu University, 1200 Matsumoto-cho, Kasugai, Aichi 487-8501, Japan

<sup>D)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, 10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

### Abstract

We are planning a project to produce intense MeV-gamma photon beam by laser inverse Compton scattering by utilizing a straight section in SPring-8 storage ring as the interaction point between the laser and the electron beam. To produce MeV-gamma photons efficiently we have selected an FIR laser system whose wavelength is sub-mm. Because of the long wavelength, the laser propagation is easily affected by the diffraction. We have estimated expected production rate of MeV-gamma photons by considering the diffraction effect with modeled apertures.

## SPring-8直線部を用いたレーザー逆コンプトン散乱による MeV領域ガンマ線ビーム計画

### 1. はじめに

数MeV~数十MeV領域のガンマ線は、原子核物理、天体核物理、核物性研究における有力な光源として注目されており、その生成手段の一つとして高エネルギー電子とレーザーとの衝突による逆コンプトン散乱が挙げられている。この方法は、高い偏光度を持つガンマ線を発生させる方法として1963年にMilburn<sup>[1]</sup>, Arutyunian, Tumanian<sup>[2]</sup>によって提唱された方法であるが、現在の放射光源加速器とレーザー装置にこの方法を適用することで、高偏光・低エミッタンスという高い品質を持つガンマ線を生成できる可能性がある。国内外でも逆コンプトン散乱によるMeVガンマ線の利用が行われている<sup>[3,4,5]</sup>。また、最近稼働し始めた上海放射光施設においても逆コンプトン散乱ガンマ線を利用する計画<sup>[6]</sup>が議論されている。

SPring-8蓄積リングでは、これまで数MeV~数十MeV領域のガンマ線源の開発研究を行ってきた<sup>[7]</sup>。SPring-8の電子ビームは高エネルギー(ローレンツ因子換算で $1.57 \times 10^4$ )と低エミッタンス(通常運転時のエミッタンスは3.4nm-rad)という2つの特徴を持つが、逆コンプトン散乱によって生成されたガンマ線は、電子ビームのこれらの特徴によって空間的指向性の高いものとなることが期待される。また、SPring-8では入射レーザーとして遠赤外(FIR)領域で発振するメタノールレーザーを採用している。これはサブミリ波(主な発振波長は118.8 $\mu$ m)でレーザー発振が得られるため単位パワー当りの光子数が可視域

レーザーと比較して桁違いに多く、効率よくガンマ線を生成できる可能性がある一方で、サブミリ波によるコンプトン散乱での電子ビームのエネルギー変動は蓄積リングのmomentum acceptance以内に収まるため、レーザー入射による電子ビームへの影響は無視できる。またSPring-8はtop-up運転により極めて高いビーム電流安定性が確保されており<sup>[8]</sup>、入射FIRレーザー出力も長時間に渡り高い安定性を保つものとなっている<sup>[7]</sup>ため、高安定度のガンマ線光源が期待できる。

SPring-8では、偏向電磁石セクション(BL38B2)にFIRレーザーを入射してMeV領域ガンマ線を生成する実験を行ってきた<sup>[7]</sup>が、さらに高強度のガンマ線を生成するべく、レーザー入射部をリング偏向部の代わりに約5mの挿入光源設置部とその前後を合わせた約16mの直線部に移す計画が現在進行中である。ここでは従来の偏向部と比較してレーザーとビームとの相互作用領域が長いだけでなく、レーザー導入位置をより相互作用領域に近くするという工夫を行ったため、高効率でレーザーをビーム軌道まで輸送できる。

### 2. 計画の概要と現状

8GeV電子ビームと波長118.8 $\mu$ m光子との正面衝突によるガンマ線のエネルギースペクトルを図1に示す。本計画で生成するガンマ線の最大エネルギーは10.22MeVである。本計画はSPring-8蓄積リング実験ホールから加速器収納部までFIRレーザーを輸送し、

挿入光源が設置してあるセル5直線部に向けてレーザーを電子ビーム下流より入射してガンマ線を生成し、同セルに設けた加速器診断用ビームライン(BL05SS)からガンマ線を取り出すものである。前述の偏向電磁石セクション(BL38B2)でのガンマ線生成では、大気中を輸送したFIRレーザー光を蓄積リングのビームダクトへ導入する鏡の位置が電子ビームとの衝突点からおよそ20m<sup>[7]</sup>であったのに対して、セル5直線部ではおよそ3.5mと近く、電子ビーム軌道までレーザーを効率よく輸送でき、従来と比較してより高強度のガンマ線生成が期待できる。

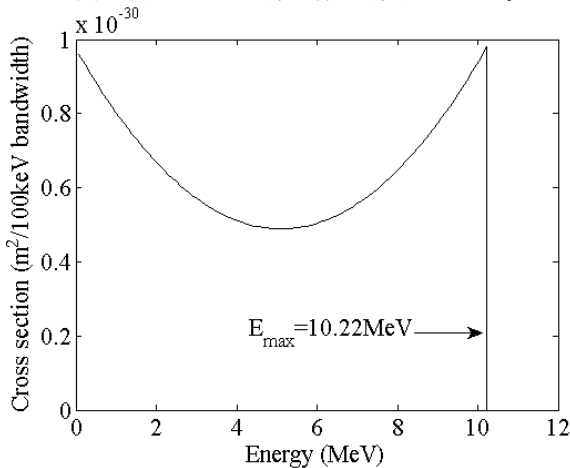


図1. SPring-8, FIRレーザーによる逆コンプトン散乱ガンマ線のエネルギースペクトル

本計画で使用されるFIRレーザーシステムは、リング偏向部におけるガンマ線生成実験の際に開発してきたシステム<sup>[7]</sup>をそのまま適用する。このシステムはCO<sub>2</sub>レーザーをポンプレーザーとするメタノールレーザーで構成されている。CO<sub>2</sub>レーザーはZnSeの出力鏡と金コーティングしたブレイズ型回折格子で共振器を構成したものであり、これまで発振線9P(36)で最大出力234.5W<sup>[4]</sup>を記録している。CO<sub>2</sub>レーザー光は金コーティングされた入力鏡に設けたφ3mmの軸外しの結合孔を通してメタノールレーザー共振器内へ導入される。共振器を構成する出力側の鏡は、水晶基板にCO<sub>2</sub>レーザー光を全反射してFIR光を透過させるコーティングを施した上に、鏡の中心にFIR光出力のためのφ11mmの結合孔部を残した金コーティングを重ねたハイブリッド鏡である。出力パワーはおよそ0.9Wであり、発振開始後15時間で出力パワー変動は±1%以下と安定した発振が得られている<sup>[7]</sup>。現状であるが、生成ガンマ線を取り出すビームラインBL05SSにレーザーハッチ・クリーンルームを設け、レーザーシステムの移設と再構築が進行中である。また、メタノールレーザーの新たな出力鏡の開発に着手しており、これによりレーザー取り出しの効率化を図る。

FIRレーザーは水蒸気によって容易に吸収されるため、レーザー輸送路は乾燥雰囲気を保つ必要がある。このため乾燥空気を充満したアクリルパイプ(内径49mm)導波管とコーナー鏡の組み合わせによるレーザー輸送路を使用している。実験ホール内

レーザーハッチから加速器収納部内レーザー導入部までのレーザー輸送路の建設は終了している。

FIRレーザーをビームダクトへ導入する箇所は、レーザーとビームが相互作用する直線部下流の偏向電磁石クロッチチェンバー部であり、その設置は終了している。当該チェンバーには入射鏡として金コーティングした水冷式金属鏡が設置されている。金属鏡のビーム軌道レベルには幅4mmのスリットが設けてあり、上流の偏向電磁石からの放射光の直撃を避けると共に生成したガンマ線の通過部となる。

### 3. 光学系の考察とガンマ線生成率の評価

入射鏡により導入されたFIRレーザーは、ビームダクト内の開口を通過して電子ビーム軌道へと導かれる。サブミリ波であるFIRレーザーは開口通過による回折の影響を受けやすいため、レーザー導入部での光学系の設計が高強度ガンマ線の生成の鍵となる。図2に直線部中心から入射鏡(距離11.76m)までのレーザー光路に沿った開口のサーベイ結果を示す。入射鏡から0.8mの位置におよそ1mに渡って鉛直方向の開口全幅12mmのスロットがあるが、ここではレーザーがNEGポンプ用のビームダクト側室とビームチェンバーとの間の偏向部アンテナチェンバーのポンピングスロットを通る。

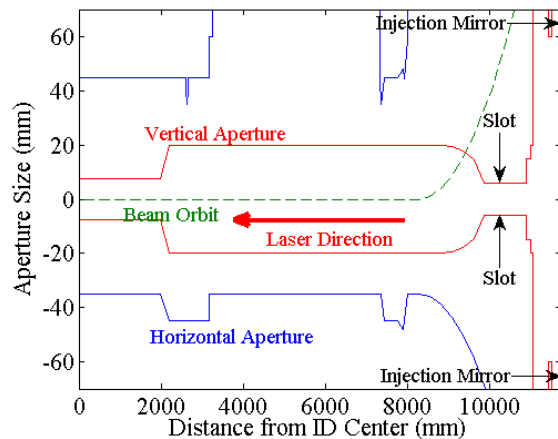


図2. 直線部中心から入射鏡までの開口

この開口条件の下でレーザー導入部の光学系を考察した。レーザー輸送路内ではレーザーはパイプの境界条件を満たす固有導波管モードで伝播し、末端部から自由空間中の波面<sup>[8]</sup>にて伝播する。レーザー導入部の光学系としては、放物面鏡を用いて末端部から放出された波面を一旦収束させて波面を整形し、その後再び放物面鏡を用いて電子ビーム軌道上でウェストを形成するものとした。開口通過による回折の効果を評価するため、Kirchhoff境界条件の元でHelmholtz-Kirchhoff積分を各開口にて求めて波面の伝播を計算した。簡単のため、考慮した開口はスリット付入射鏡及び前述したチェンバー部のスロットの出入口端部とした。導波管末端部から2mの位

置に一枚目の放物面鏡を置く場合を想定すると、一枚目の放物面鏡に入射されるレーザー形状は図3のようになる。また二枚の放物面鏡の焦点距離が(1m,2m)である場合のウェスト位置でのレーザー形状を図4に示す。この場合の放物面鏡間隔は4.1mでありウェスト位置は2枚目の放物面鏡から5.96mの位置にある。計算では入射鏡から二枚目の放物面鏡までの距離を1mとしているので、ウェストは直線部中心からおよそ6.80m(=11.76m-(5.96m-1m))の位置にある。また、鉛直方向全幅12mmのスロット開口の影響のため、スロット開口出口まで到達する光量は入射光量の20%程度まで減衰する。

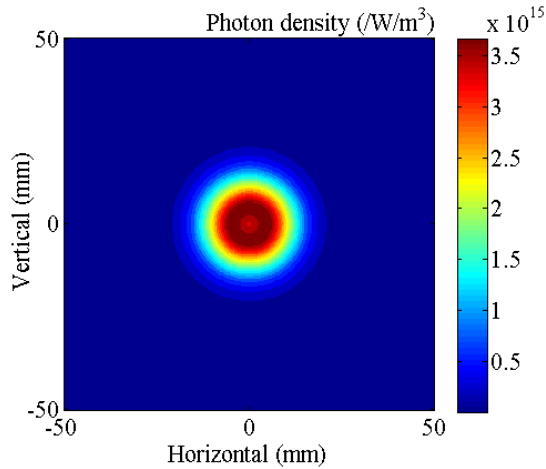


図3. 導波管から射出されたレーザープロファイル

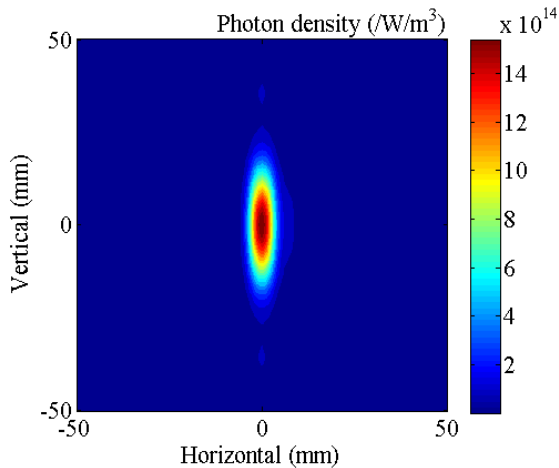


図4. ウェスト位置でのレーザープロファイル

上記の波面計算を元にガンマ線生成率の評価を行った。直線部の水平/鉛直電子ビームサイズは(300 $\mu$ m,4.4 $\mu$ m)であり、レーザービームサイズと比較して十分小さいため、電子ビームと交叉する光子数はレーザーの中心強度で決まる。直線部の広い範囲に渡ってレーザーと電子ビームは交叉するので生成率の評価では直線部下流端(入射鏡から3.5m, 直線部中心から8.27m)からビーム軌道上流に向かって6mの位置(鉛直方向開口が狭い挿入光源用チェンバー位置)までの寄与を積分した。結果を図5に

示す。図5では放物面鏡間隔を変えてウェスト位置を調整しつつ生成率を評価し、同様の評価を異なる焦点距離の放物面鏡の組み合わせについて行った。二枚の放物面鏡を用いた場合、現時点の検討では、焦点距離の組み合わせ(1m, 2m)でウェスト位置を適切に調整すると生成率として $2.05 \times 10^{34}$  [A/W/m<sup>2</sup>/sec]を得ている。コンプトン散乱の全散乱断面積はほぼトムソン散乱断面積( $6 \times 10^{-29}$  [m<sup>2</sup>])に等しく、またSPring-8通常運転時ビーム電流100mA, レーザーパワー1Wとすると、 $\sim 10^5$  [sec]程度のMeVガンマ線生成が期待できる。これはリング偏向部で得られた結果より2桁程度改善されることになり、直線部を用いるメリットが生かされている。

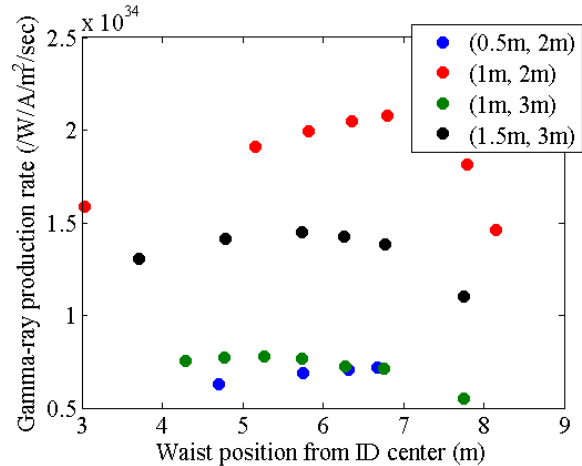


図5. ウェスト位置に対するガンマ線生成率の変化

#### 4. 今後の課題と方針

今後は速やかにFIRレーザーシステムの再構築と調整を行い、また入射光学系の検討を継続する。またFIRレーザー出力鏡の開発も行い更なるレーザー出力の改善を目指す。SPring-8におけるMeV領域ガンマ線生成は、高品質な電子ビームと高安定なレーザーとの組み合わせが特長の一つと言える。生成ガンマ線の品質の定量的評価を行い、期待される光源性能を具体的な議論を進めると同時に、速やかに生成試験を行うことを今後の方針とする。

#### 参考文献

- [1] R. H. Milburn, Phys. Rev. Lett. 10 (1963) 75.
- [2] F. R. Arutyunian, V. A. Tumanian, Phys. Lett. 4 (1963) 574.
- [3] H. Ohgaki, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 375 (1996) 602.
- [4] K. Aoki, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 516 (2004) 228.
- [5] V. N. Litvinenko, et al., Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 4569.
- [6] W. Guo, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 578 (2007) 457.
- [7] K. Kawase, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 592 (2008) 154.
- [8] H. Tanaka, et al., J. Synchrotron Rad. 13 (2006) 378.
- [9] J. J. Degnan, App. Optics 12 (1973) 1026.