

PLAN OF X-RAY GENERATION USING A PULSED LASER SUPER CAVITY IN RF GUN TEST BENCH

Masafumi Fukuda^{A)}, Sakae Araki^{B)}, Koichiro Hirano^{A)}, Toshiya Muto^{B)},
Mikio Takano^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Junji Urakawa^{B)}, Yoshio Yamazaki^{B)},

^{A)} National Institute of Radiological Sciences (NIRS)
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract

We have developed a high flux X-ray generator via inverse Compton scattering of an e^- beam with a high power pulsed laser beam produced by accumulating the pulsed laser in a laser super cavity. The merit of this method is that the compact and inexpensive system of an X-ray generator can be constructed compared with a synchrotron radiation facility using a GeV order storage ring. In order to get prospects of realizing the X-ray generator, we will start to demonstrate the X-ray generation using the super cavity in RF Gun Test Bench from this autumn.

RF Gun Test Bench におけるレーザー蓄積装置を用いた X 線生成計画

1. はじめに

我々は医療応用等を目的とした小型高フラックス X 線源の研究開発を行っている。応用例としては動脈血管造影があり、患者の体内にヨウ素 (I) を注入し、X 線を照射して血管の像を得る。ヨウ素 (I) の K エッジは 33.169keV であり、その前後での X 線の吸収断面積が約 5.4 倍増加することを利用し、K エッジ前後のエネルギーの X 線を照射しそのコントラストから像を得ることができる。高エネルギー加速器研究機構の KEK-AR (蓄積リング) のアンジュレータービームラインでこれが行われている。現在、このように高輝度 X 線源としては GeV オーダーのエネルギーの放射光リングを利用したものがあり、高輝度で高安定な X 線を得ることが出来るが、一方で一般に装置が巨大で高価である。そこで、我々は小型高輝度 X 線源として共振器内に蓄積したハイパワーパルスレーザー (波長 1064nm) と小型蓄積リングの電子ビーム (50MeV) との逆コンプトン散乱を利用した高輝度 X 線源 (33keV) を提案している (図 1)。レーザーコンプトン散乱を利用した X 線源の利点は、同じエネルギーの X 線を得るのに、より低いエネルギーの電子ビームで済むため、蓄積リングを小型化することが可能になりより安価でコンパクトなシステムを構成できるということである。ただし、これはまだ実現しておらず実証、研究開発が必要である。

高輝度 X 線を作り出すためには、ピークパワーの高いパルスと衝突させることが重要である。そのためにレーザー蓄積装置を利用する。これは、2 枚の凹面ミラーで作られた共振器で、中のパルスと重なるように次々とレーザーパルスを送り込み共振器内に高いピークパワーをもつレーザーパルスを作り出すことが出来る装置である^[1]。これを使う利点はレーザーパワーを効率良く使用できることである。1 回の衝突によるコンプトン散乱ではレーザーパルス中の

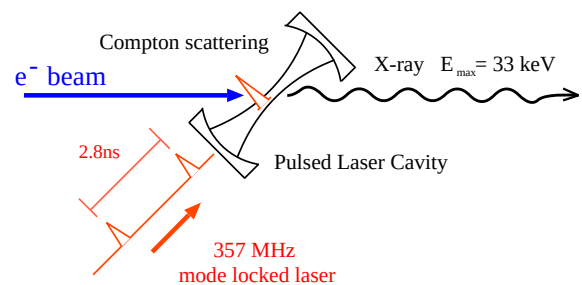


図 1: X 線生成方法概念図

大部分の光子は電子と衝突せずに素通りする。しかし、この方法ではパルスは共振器内で往復しているために、何度も電子ビームと衝突させることができる。また、ハイパワーのパルスを得るのにアンプ系を必要としないためレーザーシステムをコンパクトにすることが出来るのも利点である。

最終的なレイアウトは 50MeV の小型蓄積リングの電子ビームとレーザー蓄積装置内のレーザーパルスとの逆コンプトン散乱による X 線生成である。現在は周長 13.4m の現在コンパクトな小型蓄積リングの設計が行われている^[2]。

この X 線生成方法を実証するために KEK のアクセシブリーホールにある RF Gun Test Bench (RFGTB) において研究開発を行っている。現在は、ここでフォトカソード RFgun を用いた 100 バンチの高強度マルチバンチビーム試験を行っている^[3]。今秋、このビームラインに S-band 加速管を 1 本追加し、電子ビームのエネルギーを 50MeV まで増強し、共振器内に蓄積したパルスレーザーとの逆コンプトン散乱による X 線生成の実証試験を行う予定である。本稿では、この計画について報告する。

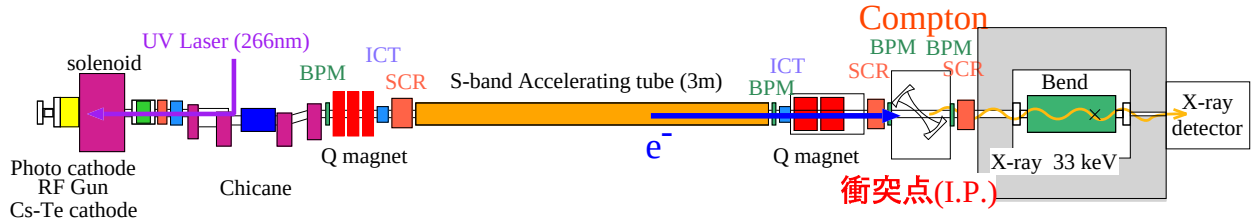


図 2: 現在検討中のビームラインのレイアウト

2. ビームライン

エネルギーを 50MeV に増強したときのビームラインのレイアウトは図 2 のようなものを予定している。電子銃からシケインまでの電子ビーム生成部は現在のもの^[3]を引き続き採用する。3m の S-band 加速管はシケインの下流に設置する。加速管の前後には四極電磁石を設置しており、下流側のものはレーザービームとの衝突点でのビームサイズを絞るため、上流側のものは加速管内でのビームサイズを小さく保つためと下流の四極電磁石でのビームサイズを大きくして衝突点でのビームサイズをなるべく小さく絞るためにある。その下流にレーザービームと衝突させて逆コンプトン散乱により X 線を生成するための X 線生成部があり、最後にビームダンプがあり、電子ビームは偏向電磁石により地面にダンプされる。曲げた後にはプロファイルモニタとファラデーカップを設置し、電子ビームのエネルギーやチャージ量を測定できるようにする予定である。衝突点にはレーザーパルスを蓄積するための共振器が置かれ、その前後には電子ビームの位置やサイズを測定するために Beam Position Monitor やプロファイルモニタを配置している。蓄積装置の乗っている架台は上下の位置を精度良く制御することができ衝突位置を調整することができるようになっている。ビームダンプ部は放射線シールドとしての 200mm 以上の鉛で囲まれる。X 線は偏向電磁石の後方に取り出され、検出器で測定できるようにしている。

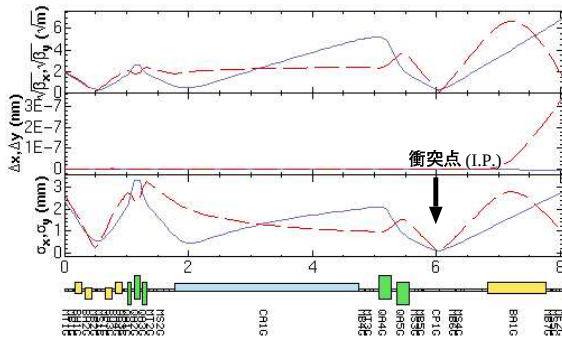


図 3: SAD で計算した電子ビームオプティクス

このビームラインのオプティクスは SAD(Strategic Accelerator Design)¹ を使って設計している。ビームオプティクスは次の 2 点を考慮した。一つは衝突点で

¹<http://acc-physics.kek.jp/SAD/sad.html>

表 1: 衝突点での電子ビームのパラメータ

エネルギー	43 MeV
ビーム強度	$1.25 \times 10^{10} \text{ e}^-/\text{bunch} (2\text{nC})$
バンチ長 (FWHM)	10 ps
ビームサイズ σ_h	120 μm
ビームサイズ σ_v	60 μm
バンチ数	100 bunches/train
繰り返し	12.5 trains/s

のビームサイズを出来るだけ絞る。もう一つはビームハローなどがビームパイプをかするなどして発生するバックグラウンドを極力減らすためビームライン全体でアパーチャに対して $\pm 5\sigma$ の余裕があるようなビームサイズを保つということである。図 3 は SAD で計算したオプティクスの図である。衝突点での Horizontal と Vertical のビームサイズは $\sigma_{eh} = 120\mu\text{m}$ 、 $\sigma_{ev} = 60\mu\text{m}$ となっている。また、全体を通してビームサイズが 3mm 以下に抑えられている。表 1 に電子ビームのパラメータを載せる。ビーム強度は定格で決まっており 2nC、100 バンチ、繰り返しは 12.5Hz となっている。

3. X 線生成

秋から始める実証試験では、100 バンチの電子ビームと共振器内のレーザーパルスとの逆コンプトン散乱による 33keV の X 線生成を目的としている。

コンプトン散乱において、生成 X 線のエネルギー k_s は

$$k_s = \frac{k_0 E_0 + k_0 \sqrt{E_0^2 - m_e^2} \cos \theta_c}{E_0 + k_0 - k_0 \sin \theta_c \sin \theta - \left(\sqrt{E_0^2 - m_e^2} - k_0 \cos \theta_c \right) \cos \theta} \quad (1)$$

と表せる。ここで、 E_0 、 m_e はそれぞれ電子のエネルギーと質量、 k_0 、 θ はそれぞれ光子のエネルギーと散乱角、 θ_c は電子ビームとレーザーの衝突角度である。また、ルミノシティは電子ビームもレーザーもガウス分布持っていると仮定すると

$$\mathcal{L} = \frac{N_e N_\ell}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\sigma_{ev}^2 + \sigma_{\ell v}^2}} \times \frac{1}{\sqrt{(\beta + \cos \theta_c)^2 (\sigma_{eh}^2 + \sigma_{\ell h}^2 \cos^2 \theta_c + \sigma_{\ell v}^2 \sin^2 \theta_c) + \sin^2 \theta_c (\sigma_{ev}^2 + \sigma_{\ell v}^2 \sin^2 \theta_c + \sigma_{\ell h}^2 \cos^2 \theta_c)}} \quad (2)$$

表 2: 衝突点でのレーザーのパラメータ

エネルギー	1.17 eV (1064nm)
パルスエネルギー	170 μ J/pulse
バンチ長 (FWHM)	10 ps
ビームサイズ σ_h, σ_v	100 μ m

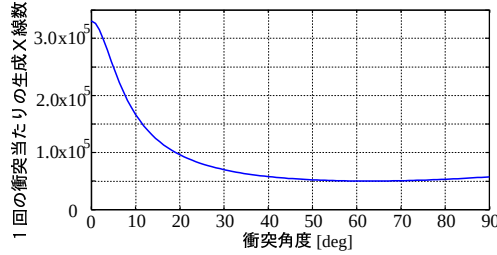


図 4: 衝突角と全生成X線数

となる。 $N_{e,\ell}$ 、 $\sigma_{eh,\ell h}$ 、 $\sigma_{ev,\ell v}$ 、 $\sigma_{et,\ell t}$ はそれぞれ電子ビームとレーザーの数、水平方向のビームサイズ、垂直方向のビームサイズ、パルス幅である。衝突角度 θ_c は水平方向についているとしている。

式(2)から分かるように、生成X線数はビーム強度とビームサイズで決まる。電子ビームについては表1にあるとおりであり、レーザーに関しては表2に示されている。レーザーは波長1064nm、357MHz(パルス間隔2.8ns)の6Wのモードロックレーザーを使用する予定である。現在、レーザー蓄積装置の共振器内に入力パルスの約 10^3 倍のパワーを持つパルスを蓄積することに成功している。今後さらに42cmの共振器を使い、ミラーの反射率を99.99%に上げることで 10^4 倍の蓄積率を目指す研究が進められており、この共振器を使って実験をする予定である。

図4は電子ビームとレーザーの衝突角度 θ_c と生成X線数の関係を表しており表1、表2のパラメータから式(2)を使って計算した。生成X線数を増やすためには出来るだけ正面衝突に近づけたほうがよい。完全に正面衝突をねらうと図1を見ても分かるとおり共振器を構成するミラーと電子ビームがぶつかってしまう。このことを考慮して衝突角度は 10° を選択した。また、式(1)より、この衝突角度のときに電子ビームのエネルギーを43MeVにすると最大エネルギーが33keVのX線が得られる。X線のエネルギー分布はKlein-Nishinaの式から計算でき、図5のようになる。このときコンプトン散乱の全断面積は665mbとなる。さらにX線の散乱角とエネルギーの関係は式(1)から図6のようになる。

図4から、このシステムで生成されるX線数は、1回の衝突あたり 1.7×10^5 個/trainであると予測される。12.5Hz 運転なので一秒あたりでは 2.1×10^6 photons/s となる。ただし、衝突点からX線検出器までの距離は約2mあり、ビームパイプ等のアパーチャーを考慮すると10mrad以内のX線を検出できることになる。これは19.4keV以上のX線に相当しエネルギー幅は41%になる(図6)。X線数では全体の40%にあたるの

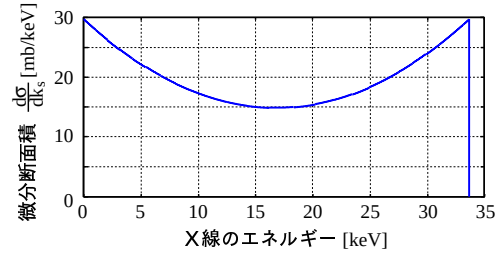


図 5: X線のエネルギー分布 (衝突角 10°)

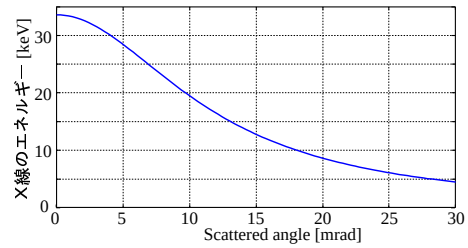


図 6: X線の散乱角とエネルギー (衝突角 10°)

で(図5)、検出器に来るX線は 0.7×10^5 個/trainになる。X線検出器については現在検討中である。X線検出において問題になると予測されるのは、ビームハロー等が加速管やビームパイプに当たって作られるバックグラウンドである。今のところは検出器の前にコリメータを置き、S/N比がなるべく上がるよう直径を調整することでX線を検出することを考えている。

4. まとめと今後

今秋からレーザー蓄積装置を用いたX線生成実験を開始する予定である。期待される生成X線数は 2.1×10^6 photons/sであり、これを実現するためには 10^4 倍の蓄積率を達成することが必要である。パワーを蓄積するには共振器長をいかに精度良く保つか鍵になり、 10^3 倍の蓄積率の場合で約1nm、 10^4 倍ではさらに1オーダー精密な制御が必要になる。そのため、この実験にとって、これを保つためのフィードバック技術の開発が非常に重要である。将来、小型蓄積リングで行う場合、衝突回数が飛躍的に増えるため 10^5 倍以上のX線数が期待できる。よって、この実験の成功させることで高輝度X線源としての見通しを付けることができる。

参考文献

- [1] K. Takezawa, et al., "STORAGE OF LASER PULSES IN A FABRY-PEROT OPTICAL CAVITY FOR HIGH FLUX X-RAY", Proc. of the 1st Annual meeting of particle accelerator society of Japan, Funabashi Japan, (2004)
- [2] J. Urakawa, et al., "Electron beam colling by laser", Nucl. Instr. And Meth. A532, 388, (2003)
- [3] K. Hirano, et al., "DEVELOPMENT OF A MULTI-BUNCH PHOTO-CATHODE RF GUN SYSTEM", Proc. of 9th EPAC, Lucerne, Switzerland (2004) 2628