

Development of High Brightness Electron Source for Laser-Compton Scattering

F.Sakai^{1,A)B)}, T.Nakajyo^{A)}, T.Yanagida^{A)}, Y.Okada^{A)}, M.Yorozu^{A)}, Y.Aoki^{A)} and S.Ito^{B)}

^{A)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd.,

2-1-1 Yatocho, Nishitokyou, Tokyo 188-8585

^{B)} The Femtosecond Technology Research Association

5-5 Tokodai, Tsukuba, Ibaraki 300-2635

Abstract

We have been developing a short pulse x-ray generation system through Laser-Compton scattering. A stable electron source with 38MeV energy was developed to generate 30keV X-ray pulses under a head-on collision configuration. Electron energy was measured by a bending magnet to be 38MeV with 0.2% bandwidth (FWHM). Normalized emittance (rms). was measured to be 3.5 mm.mrad. We also demonstrated the x-ray generation and imaging.

レーザーコンプトン用高輝度電子線システムの開発

1. はじめに

我々は相対論的電子線による短パルスレーザーのフォトン散乱による高輝度X線発生装置の開発を行っている[1]。3年前に300フェムト秒短パルスX線の安定発生の原理実証を行った[2]。その後は、発生X線の利用を念頭に、発生X線のエネルギー増加のための電子線のエネルギー増加等の電子線システム改造、発生X線量の増大を目指したレーザー出力の増加、更により安定的なX線の発生を目指した同期系を含んだシステムの安定化、等の開発を進めてきた[3]。

ここでは、主に電子線システムの改造および発生電子線の特長について述べる。また、デモンストレーションとしてX線の発生結果についても述べる。

2. 実験装置

全体のシステムを図1に示す。以前の装置と大きく変わった点は、エネルギーをあげるために加速管を増強したこととX線の利用場所でのバックグラウンドを減らすためにビームラインに90度の偏向をいれて、加速ラインの軸とコンプトン散乱によるX線の発生軸を変えたことである。加速管は、1.5m長さのS-bandの定在波型ライナックを使用している。キャビティの構造は1/2モードのalternating-periodic structure(APS)で、前回使用したものと同じである。高周波(RF)は20MW(パルス幅4 μ s:FWHM)で、このうち5MWを電子銃に、残りを2分割して2本のライナックに供給している。また、ライナックへの供給ラインにはそれぞれPhase shifterを設置し、個々に加速位相を調整できるようにしている。90度の偏向は2台の45度偏向電磁石とachromatic(等色性)にするためにその間に設置した4台のQ-電磁石で構成している。Q-電磁石の調整は、粗調整時には加速管の位相を変えてエネルギーを変えた状況でビームを伝播する条件で行った

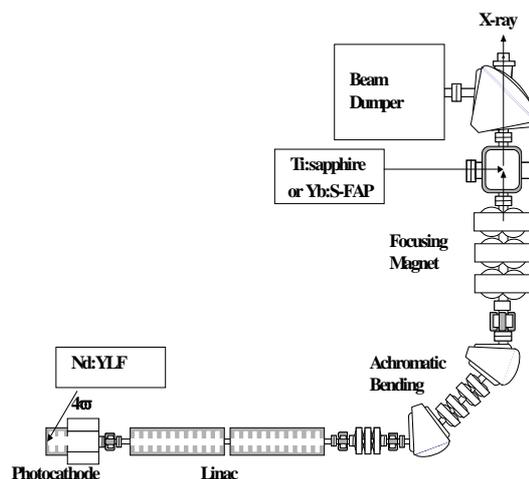


図1 電子線システム図

が、最終的にはエミッタンスの測定を行い、できる限り最小になるような条件を探して行った。

他の部分は前回と大きくは変わっていないが、以下に簡単に説明する[2]。

電子源はBNLタイプの高負荷タイプであるGun-でカソード材として銅を用いている。電子線発生用のレーザーはLaser Diode (LD)励起のNd:YLFで、波長変換素子により4倍波(波長:262nm)にした後、アイリスで整形し、そのイメージをレンズでカソード表面に転写している。また、電子ビームラインの近くに設置したプリズムを通してカソード表面にはほぼ垂直に入射を行っている。尚、プリズムには放射線の影響で劣化する恐れがあったため、反射コーティングをほどこしていない。そのため、1割弱の反射ロスがある。

¹ E-mail: fmo_sakai@shi.co.jp

発生した電子線を2本の加速管で加速し、90度ビームを曲げた後に、Q-Tripletで収束する。レーザーとの衝突によるX線発生した後は、90度偏向電磁石で鉛ブロックにダンプしている。

衝突チェンバーは、真空容器内にミラーを設置してより焦点距離を短くしてレーザーのビーム径を小さくできるようにした。ミラーは圧空の直線導入器により電子ビームの調整時には電子ビーム軸の水平面からはずし、レーザーの調整またはX線発生時には戻している。これにより電子線調整時のミラーの劣化を最小限にしている。また、ビームプロファイラーとしてアルミナの蛍光板を使用しているが、前回まで使用していた100 μ mの厚さのものから30 μ mの薄いものに変えた。

X線の利用に供するために長時間のシステムの安定性をあげる必要がある。このため、加速器のRF位相の制御回路(日本高周波製)を導入した。これは、加速管の方向性結合器からの信号とシンセサイザーの基準信号との間の位相を位相検出器で検出し、その変動を回路内の位相器で補償してRFドライバーへの供給RF位相を制御するものである。これにより、気温や冷却水等の緩やかな変動にはある程度対応することができた。ただし、ケーブルやレーザー側の機器(検出器や制御器)の温度変動の影響を避けることはできないため、やはり環境の安定化が重要であることはまちがいない。また、45度の偏向電磁石電源の安定度がビーム位置の安定性に大きく影響するため、 2×10^{-5} 以下の安定性電源を使っている。現在、ビームの位置の変動は問題ない程度になっているが、電流検出器を恒温槽に入れて更に安定化する予定である。

3. 実験結果

3.1 電子線システムの特徴

電子線の特徴として、エネルギーとエミッタンスおよび衝突点でのビームのポインティング安定性の測定を行った。

エネルギー測定は最後の90度偏向電磁石とスリットを用いて行った。ガンでのレーザーの入射位相は25度で固定した。ライナックの位相に関しては、最初のライナックでガンからでてくる電子線のエネルギー広がりをキャンセルしてエネルギー分散が最小になるように設定し、後段のライナックは最大電界になるように設定した。これにより得られた結果を図2に示す。エネルギーの中心で37.6MeVで分散として17keV(FWHM)、約0.2%であった。これは、前回の結果とほぼ同じであり、Parmelaでの計算結果とも一致している。

エミッタンスは最初の90度偏向後の収束用Q-電磁石と30 μ m厚みの蛍光板を用いて測定を行った。方法はQ-scan法で、水平及び垂直方向で行っている。45度偏向電磁石間のQ-電磁石の値をパラメーターとして測定した後、最適と思われる組み合わせの条件で測定したエミッタンス測定結果を図3に示す。横

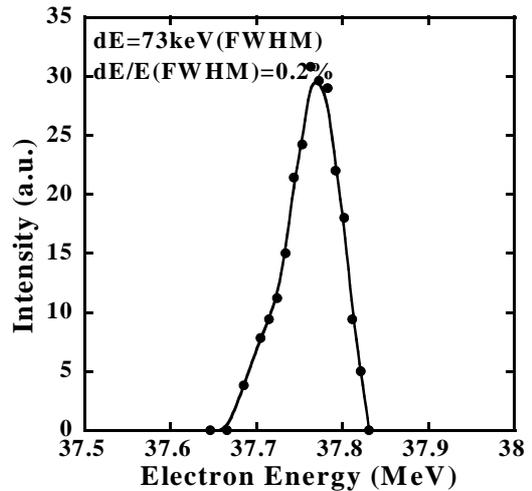


図2 エネルギー分布

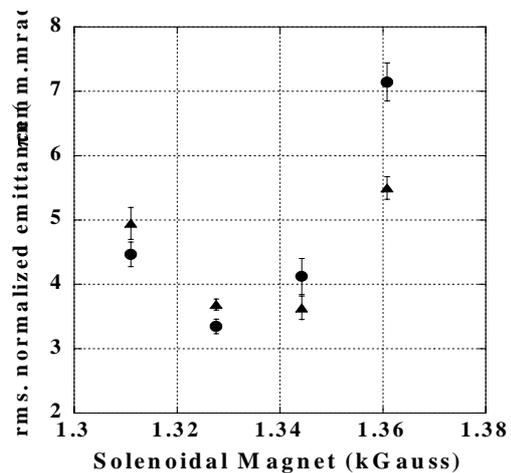


図3 エミッタンスのソレノイド電磁石の磁場依存性

軸はガン直後にあるエミッタンス補正用のソレノイドの磁場強度である。電荷は0.8nC/pulseでガン及びライナックの位相はエネルギー測定で述べた条件と同じである。ソレノイド磁場1.33kgauss付近で最小となり、規格化エミッタンスとして3.5 mm·mrad(rms.)が得られた。

また、収束した後にビーム中心およびビーム径の変動を測定した。測定時間は約30分間でビーム径61 μ m(垂直) \times 82 μ m(rms)(水平)に対し、ビームの中心位置は垂直、水平方向でそれぞれ1.4 μ m、5.3 μ m(rms)、ビーム径は垂直:4.1 μ m、水平1.4 μ m(rms)であった。中心位置に関しては満足する結果が得られているが、ビーム径の変動に関しては更に安定化する必要がある[4]。また、これらのデータは運転条件や周りの環境に依存するので、今後多くのデータを蓄積して定常的に運転できることを確認する。

3.2 X線発生の結果

開発の計画ではLD励起のYb:S-FAPレーザーを使用する予定であるが、現状では開発途中であるため、今回はTi:sapphireレーザーを使用した。レーザーの使用時の主な性能はエネルギー50-200mJ/pulse、パルス幅100-200fs(FWHM)であった。電子線とレーザーの衝突角度は約15度で、この時のX線の発生量を図4に示す。ここでは、前回の電子線14MeVでのデータも示す[2]。尚、検出器はMCP(Micro-Channel Plate)であり、エネルギーによる検出効率を考慮し、かつ検出器の有効面積とシミュレーション計算に基づくX線分布を仮定して、全発生量を算出している。前回に比べて効率で約一桁向上している。これは、電子線及びレーザーのビーム径が前回100 μ m(rms)に対して、30-60 μ m(rms)程度まで小さく絞ることができたことによるものである。今後、ビームパラメーター等の詳細なデータも並行して取得し、計算結果との比較を行う予定である。

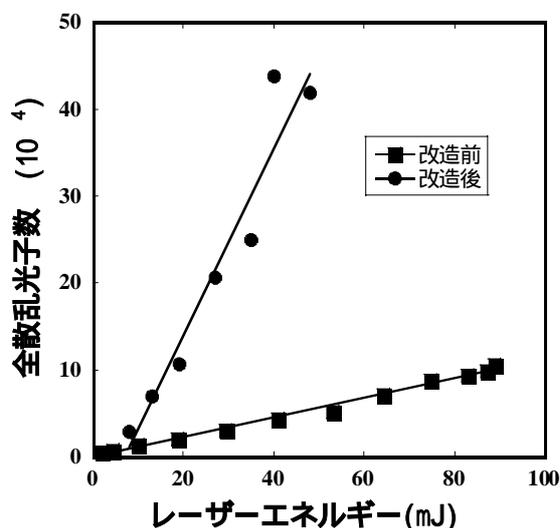
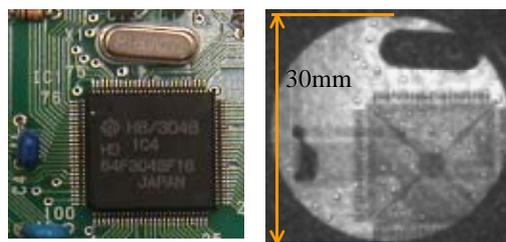


図4 X線発生量のレーザーエネルギー依存性は前回のデータ[2]、は今回のデータ

また、発生したX線によるイメージングのテストも行った。対象は電子基板で図5にそのイメージを示す。(a)は対象物の写真による像であり、(b)はX線の吸収像である。X線発生点から約2.8mの距離にある30mmのX線窓を通過した後、サンプルを測定している。レーザーコンプトンによるX線の特徴として点光源による空間コヒーレンス性が上げられ、



(a)写真 (b)X線像

図5 X線による電子基板の吸収像

今後屈折コントラスト法等のこれらの特徴を生かした像を取得する予定にしている。

4. おわりに

レーザーコンプトン散乱による高輝度X線発生装置の電子線システムの開発を行い、X線発生をスタートした。今後は、衝突用レーザーの開発を進め、X線の発生量、エネルギー分布等の特性を取得すると共に、イメージング等の発生X線の利用に関する研究を進めていく予定である。

尚、本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から研究を委託された技術研究組合・フェムト秒テクノロジー研究機構(FESTA)の研究の一環として行ったものである。

参考文献

- [1] 遠藤彰 “フェムト秒高輝度X線発生技術” 応用物理学誌、71, 200-203(2002)
- [2] F. Sakai, and et al. "Short Pulse X-ray Generation by Laser-Thomson Scattering", Proceeding of the 2001 Particle Accelerator Conf., Chicago, 2696-2697(2001)
- [3] F. Sakai, and et al., "Status of Laser-Compton X-ray Generation project for FESTA", Proceeding of SPIE 48th Annual Meeting, San Diego, (2003)
- [4] M. Yoroazu, and et al., "Fluctuation of femtosecond X-ray pulses generated by a laser-Compton scheme", Appl. Phys. B 74, 324-331(2002)