Beam Measurement of X-band 11.424 GHz Linac for Compton Scattering X-ray Generation

Hirotoshi Masuda^{#,A)}, Takuya Natsui^{A)}, Azusa Mori^{A)}, Lee Kiwoo^{A)}, Mitsuru Uesaka^{A)}, Fumihito Sakamoto^{B)}

^{A)} Nuclear Engineering and Management, University of Tokyo

22-2 Shirane-shirakata, Tokai, Naka, Ibaraki JAPAN 319-1188

^{B)} Akita National College of Technology

1-1 Bunkyo-machi, Iijima, Akita city, Akita JAPAN 011-8511

Abstract

We are developing an X-band linac system for monochromatic X-rays source. The monochromatic X-ray is obtained by Compton scattering. Our system has an X-band (11.424 GHz) 3.5-cell thermionic cathode RF gun, traversing wave accelerating tube and a Q-switch Nd:YAG laser with a wavelength of 532 nm. We adopt a laser pulse circulation system. The RF gun can generate multi-bunch electron beam. We aim to generate 1 μ sec 30 MeV electron beam and collide it to circulated laser pulse. We succeeded in transporting electron beam to beam dump and preparing for Compton scattering experiment.

コンプトン散乱 X 線源用 X-band 11.424 GHz Linac のビーム測定

1. 東京大学 Xband コンプトン散乱 X 線源

東大の単色 X 線源は、電子源として X バンド 3.5 セ ル熱陰極 RF 電子銃を用いて、3 MeV のマルチバン チ電子ビームを発生させ、X バンド進行波加速管に より 30 MeV まで加速し、レーザー (Nd: YAG, 波 長: 1064 nm) と衝突させるというシステムとなって いる。主な特徴は以下の二つで、一つは、電子加速 周波数に従来使用されてきたSバンド(2,856 MHz)の1/4の波長であるXバンド(11.424 GHz) を使用している点、もう一つは、1 us のマルチバン チ電子ビームと 10 ns のロングパルスレーザー周回 システムを組み合わせている点である。これらによ り、電子加速装置のサイズの小型化、さらに両者の 衝突の頻度を増し最大で 10⁹ photons/s まで増幅する 設計となっている。その反面、コンプトン散乱X線 の強みである短パルス性はシングルバンチを採用し た場合に比べて劣る。



図1 東大 Xband コンプトン散乱 X 線システム 当研究室では以前より X バンド小型ライナック のコンプトン散乱による単色 X 線源の研究を行っ

ている。単色X線源の実用化は、既存技術の高精度 化および患者の負担の軽減に寄与するばかりでなく、 2 色X線 CT など新しい診断・治療技術への進展も 期待されている。現在、単色X線の利用は、シンク ロトロン放射光施設において放射光を分光結晶によ り単色化して行われている。単色性に優れ、かつ大 強度であることから研究での利用が進んでいるが、 放射光施設は大型で費用・場所の制限から医療用・ 産業用単色X線源としての普及は困難と考えられる。 RF 電子銃を設計・搭載し、初めてXバンド熱陰極 RF 電子銃での安定した MeV 級電子ビームの発生を 達成した。

表1 世界各国のコンプトン散乱 X 線源

| | 電子ビーム | レーザー | 発生X 線 | X 線础度 |
|------------------|-------------------|-------------------------|-----------|--------------------------------|
| | エネルギー | エネルギー | エネルギー | 人前人民反 |
| 東大 | 30 MeV X-band | 1.4 J/Pulse 10 nsec | 20-40 keV | 10 ⁸⁻⁹ |
| SLAC | 60 MeV- X-band | 100 mJ/pulse 50 fsec | 20-85 keV | 10 ⁸ |
| KAERI | 10 MeV UHF | 2 nJ/pulse 100 psec | 1.8 keV | 10 ⁶ |
| NSC KIPT | 43-225 MeV UHF | 1 mJ/pulse 50 psec | 6-900 keV | 10 ¹³ photons/s |
| LLNL "T- REX" | 120 MeV S-band | Unknow n UV laser | ~1 MeV | Unknow n |
| MXI | -75 MeV S-band | 1.5 J/pulse 8 psec | 8-100 keV | 10 ⁹ photons/8ps |
| BNL-ATF | 60 MeV- S-band | ~2 J/pulse 10 psec | ~8 keV | 10 ¹² photons/s |

2. ビーム衝突実験のシステム構築

2.1 ビームタイミング系の調整

電子ビームとレーザーの衝突実験のためにまず、二 つのタイミングを調整する体型を整えた。シグナル ジェネレータからの周波数 357MH、電力6 dBm の CW(連続波)のマイクロ波を分岐させ RF 系とパ ルスタイミング系へ伝える仕組みとなっている。



図2 ビームタイミング系



図3 タイミングの調整とTD4

今回新たに TD4 をパルスタイミング系に組み込み、 衝突のタイミングを組み込んだ TD4 一つで調整せ ることが出来る体型を構築した。

2.2 ビームサイズ調整と単色 X 線計測方法



図4 レーザー周回システム(シングルパス)

電子ビームの衝突点におけるパルス幅がまだ短いため、レーザーパワーの減衰を極力抑える透過損失の 少ないシングルパスのシステムに変更した。計測に は NaI シンチレーション検出器を用い、そのための コリメータの作成と遮蔽を鉛によって行った。



図5 コンプトン散乱実験システム構築

3. 実験

3.1 RFエージング・電子ビーム発生

RF エージングとは電子銃などの高周波機器に RF を 供給するプロセスのことであり、低電力から次第に 電力を上げていく。電子銃の空洞内壁の表面には鏡面加工でフラットに見えるが RF レベルでは微少な 突起が存在する。微少な放電によって表面を電気的 になめらかにし、最終的に電子銃には電力6 MW、 パルス幅 1 μ sec を供給することを目指す。図6に GUN での RF 測定結果を示した。3 MW、パルス幅 290 ns、の RF パワーが供給されていることを確認 した。



3.2 電子ビーム輸送

コンプトン散乱 X 線現用 X-band システムにおいて ビーム試験を行い RFgun のビームのスペクトルを測 定した。 電子銃後のビームエネルギーは, アル ファマグネット内の可変スリットを用いて測定する。 結果ビームエネルギーは最大 2.4MeV であり、 2.3MeV にピークを持つことが分かった。これは RF が3 MW の Gun 入力とするシミュレーション結果 よりも 0.1MW ほど低い結果であった。



クライストロンからの出力 RF パワーの測定結果 を示す。パワーの揺らぎが見て取れる。さらに RFgun への供給 RF 電力を測定し、発生ビーム電流 の測定結果と比較すると、揺らぎの周期が共に一致 していることが分かる。



電子ビーム発生試験時、RF gun から発生された ビームはビームラインに取り付けた CT により電流 量を測定した。ビーム輸送試験においては RF-gun で発生したビームを衝突点まで輸送することに成功 している。衝突点においてアルミナ蛍光板を使った スクリーンモニタにおいて電子ビームのプロファイ ルを測定した. 衝突点でのビームサイズは目標とす る半径 0.1mm には及ばず水平方向 0.56mm,垂直方向 0.7mm であった。



図9は CT で真空チャンバーを通過する電子ビーム のそれぞれの電流値である。これはスリットが十分 開いた状態でのアルファマグネット前後でのビーム 電流測定結果である。加速後のビームエネルギーを 計測したところ27 MeV に達した。

5.3 衝突試験

現在レーザーとビームの衝突実験の体制が整い衝 突実験を行っている。5mm の幅のコリメータを通 過後に NaI シンチレーション検出器を設置し計測し ている。2010 年 8 月時点バックグラウンドノイズ による信号が大きくコンプトン散乱による単色 X 線の発生は計測できていない。



Q マグネットを調整することにより多少のバック グラウンドのノイズが軽減する点が見られている。 またコリメータを閉じた場合にはバックグラウンド ノイズは計測されなかった。

3.3 考察

現在ビーム発生において不可解なビーム電流振動が 発生している。この振動周期は RF に見られる微少 な振動の周期と一致することから問題の所在地は ビームローディング過程ではなく RF にあると考え られる。単色 X 線計測に関して、衝突点付近の真 空チャンバー内壁に電子ビームが当たり、コリメー タから直接このノイズが入ってくると考えられる。 このバックグラウンド X 線を取り除くため電子 ビームがどの位置で輸送管内部に触れているのかを 特定し、マグネットの最適解を求め、必要であれば 輸送管の改良が求められる。

4. まとめ

RF の安定的な供給を実現し、コンプトン散乱実験を行える状態までシステムを構築した。

システム大きな問題としてアルファマグネットに よるビーム輸送は、バンチ圧縮が出来ずビームのク オリティを下げてしまう事が上げられる。代替案と して、アクロマティックアークをインストールする ことを検討する。ビーム発生・加速試験では、シ ミュレーション結果と実際の観測データとの比較検 討を行いながら、最適なマグネットの値を導き、高 輝度・高安定X線発生に向かっている。

参考文献

- [1] F. Sakamoto, et al., NIM A 608 (2009) S36-S40
- [2]M. Uesaka, et al., NIM A 608 (2009) S47–S50
- [3]N. Takuya, et al., Proc.(FPACA30) 6th PASJ (2009)
- [4]A. Mori, et al., Proc.(H48) 2009 Fall Meeting of AESJ
- [5]A. Mori, et al., HEBE 2009, Maui, Hawaii
- [6] H. Masuda, et al., 2010 Spring meeting of ARTA