

EXPERIMENT OF BEAM GENERATION AND ACCELERATION BY X-BAND ELECTRON LINEAR ACCELERATOR AT THE UNIVERSITY OF TOKYO

Fumito Sakamoto^{1,A)}, Katsuhiro Dobashi^{A)}, Mitsuru Uesaka^{A)}, Tomohiko Yamamoto^{A)}, De Meng^{A)}, Takuya Natsui^{A)}, Junji Urakawa^{B)}, Toshiyasu Higo^{B)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Hisaharu Sakae^{C)}, Kenichi Matsuo^{C)}, Masashi Yamamoto^{A)}

^{A)} Nuclear Professional School, the University of Tokyo

2-22 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1188, Japan

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{C)} Ishikawajima-harima Heavy Industry

1 Shin-Nakahara, Isogo, Yokohama, Kanagawa 235-8501, Japan

^{D)} Akita National College of Technology

1-1 Iijima-Bunkyo, Akita, Akita 011-8511, Japan

Abstract

We are currently developing a compact X-ray source based on laser-electron Compton scattering. To realize a compact system, we adopt an X-band linear accelerator (linac) and commercial Q-switch laser. The X-ray yield by the collision between the electron beam of 25 MeV and the Q-switch Nd: YAG laser of 1.4 J/10 ns (second harmonic) is 10^7 photons/RF pulse (10^8 photons/s for 10 pps). The injector of this system consists of an X-band thermionic cathode RF gun and an alpha magnet. So far, we have achieved beam generation from the X-band thermionic cathode RF gun. The beam energy is 2 MeV and the energy spread is less than 10 %. This experimental high energy (~2 MeV) beam generation from the X-band thermionic cathode RF gun is the first such achievement. In this presentation, we will report the details of our X-band linac system and experimental results of X-band thermionic cathode RF gun.

東大X-band電子ライナックにおける電子ビーム発生・加速試験

1. はじめに

単色X線は医療、生命科学、材料科学など広い分野で利用されている。単色X線は、既存X線応用技術の高精度/高度化だけでなく、新しい技術への期待もある。2色X線CT^[1]がその例であり、これは、エネルギーの違う2種類の単色X線を用いて、物質のエフェクティブな元素番号の分布を得ようとするものであり、単色X線は必要不可欠である。単色X線源として第3世代放射光施設に代表される、放射光施設が用いられているが、高額巨大な装置であり、普及性には難がある。

GeV程度のエネルギーの電子貯蔵リングで生成できるX線に相当するようなエネルギーのX線を生成可能な超小型の硬X線源を実現するための方策として、大強度のレーザー光と電子ビームを衝突させてコンプトン散乱により高エネルギーX線を得る方法がある。我々は、X-band (11.424 GHz、波長4.2 cm) リニアックを用いた、より小型の硬X線源の開発を進めている^[2-4]。

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻にて進め

ているシステム概念図を、図1に示す。これまでに、周期永久磁石収束 (PPM) 方式を採用したX-bandクライストロン (Toshiba E3768) の大電力試験と、3.5-cell X-band熱陰極高周波(RF)電子銃の高電界試験及びビーム生成試験を行ってきており、2 MeVの電子ビーム発生を確認している^[5]。現在は、ビーム加速に用いるX-band加速管の据付を終え、RFコンディショニングに移行している。同時に、コンプトン散乱実験に用いるNd: YAGレーザーの光学系の構築を進めている。

本発表では、X-band熱陰極RF電子銃試験結果の詳細と、加速管を含むビームラインの構築状況と詳細について報告する。

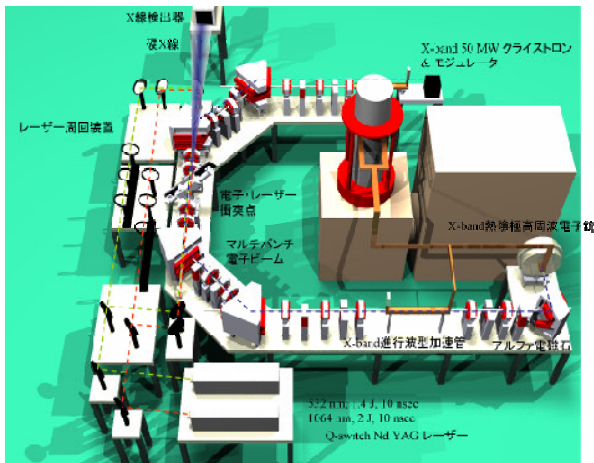
2. 小型X線源の概要

図1に現在構築を進めている、X-band電子ライナックを用いたコンプトン散乱硬X線源の概要を示す。このシステムは、X-band 50 MWクライストロン、X-band熱カソードRF電子銃、エネルギー選別・バンチ圧縮用アルファ電磁石、X-band進行波型加速管、

¹ E-mail: saka@utnl.jp

コンプトン散乱用Nd:YAGレーザー、X線検出器で構成されている。クライストロンモジュレータにはPFN充電にインバータ方式を採用しており、全体を小型化するように実装している。しかしながら、最大定格運転時において電磁ノイズによる制御機器の誤動作が発生する等、今後の課題点も残されているが、これまでX-band RF発生試験、電子銃ビーム発生試験、ビーム加速試験を順次展開している。

図1 東大コンプトン散乱X線源概念図



3. 3.5-cell X-band熱陰極RF電子銃試験

3.1 3.5-cell X-band熱陰極RF電子銃

電子ライナックの入射器として、3.5セル熱陰極RF電子銃とアルファ電磁石を採用している。電子銃の加速モードは π モードの定在波型であり、共振周波数は11.424 GHz、加速エネルギーは3.0 MeV (6 MW feed時)の設計となっている。図2に電子銃空洞の断面図を、表1に電子銃特性を示す。

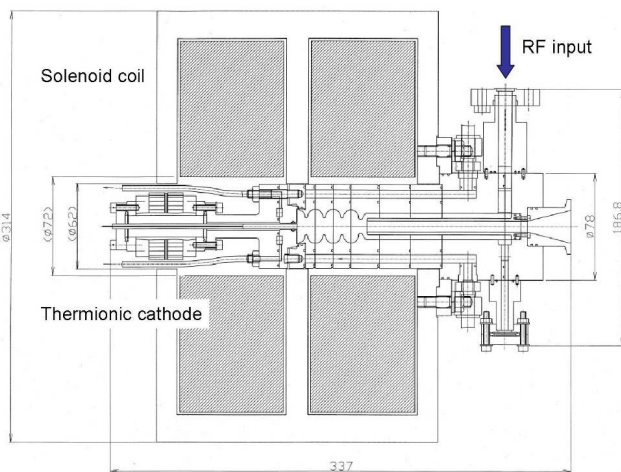


図2 X-band熱陰極RF電子銃^[6]

表1 電子銃特性^[6]

共振周波数	11.424 GHz
共振モード	π
Q	9138
シャント抵抗	70.85 M Ω /m
充填時間	400 ns
加速エネルギー	3 MeV
電荷量	20 pC/bunch

熱カソードにはタングステンを用いており、運転時の温度は約1000 °Cである。熱カソードと空洞本体とのRFコンタクトには、SUS製のスプリング構造を採用している。

電子銃の高電界試験とビーム発生試験を行うにあたり、図3に示す体系を構築した。

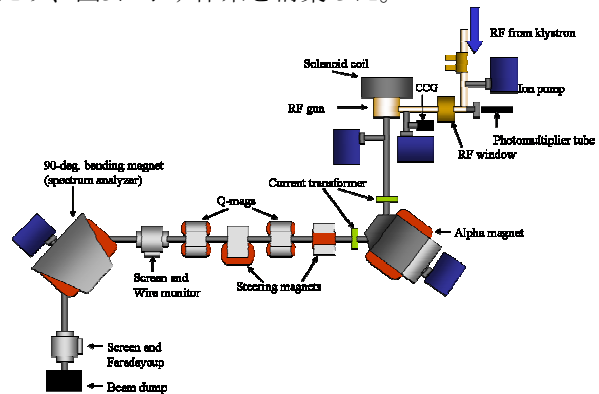


図3 電子銃試験用ビームライン

クライストロンから送られたRFは電子銃空洞手前のRF窓を通過し、同軸ケーブルにより空洞に入射される。その際、RF窓手前に設置してある検波器により、入射電力及び空洞からの反射電力波形をモニターしている。また、RF窓での放電による発光を観測するため、ビューポート付きHバンドを採用し、光電子増倍管を設置している。この発光シグナルと真空度を常時モニターしており、インターロック回路に接続している。図4に検波器により測定された典型的なRF波形を示す。また、RFプロセッシングの履歴例を

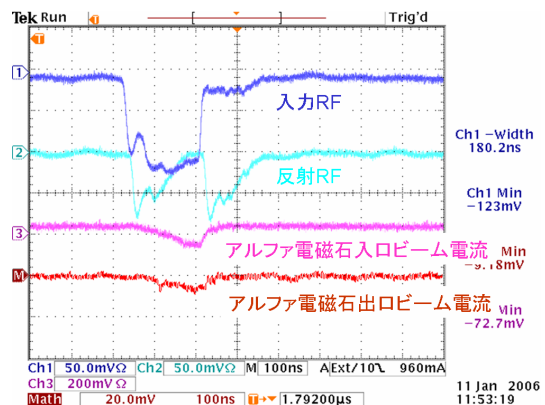


図4 空洞への入力電力波形、空洞からの反射波形、アルファ電磁石前後でのビーム電流波形

図5に示す。

入力電力6 MW、RFパルス幅200 ns投入の際、図4に示すようにアルファ電磁石の前後においてビーム電流を確認した。アルファ電磁石の磁場勾配を一定にし、磁場領域に設置したスリットを用いて電子ビームのエネルギースペクトルを評価した。その結果を図6に示す。アルファ電磁石出口においてピーク2 MeV、エネルギー拡がり10 %である。測定された電子ビームパラメータを表2にまとめる。この測定結果により、電子銃が放射線発生装置として認可された。

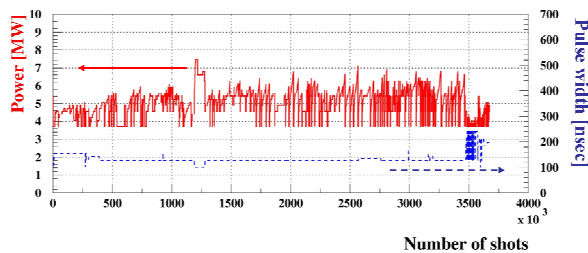


図5 RF電子銃RFプロセッシング履歴例

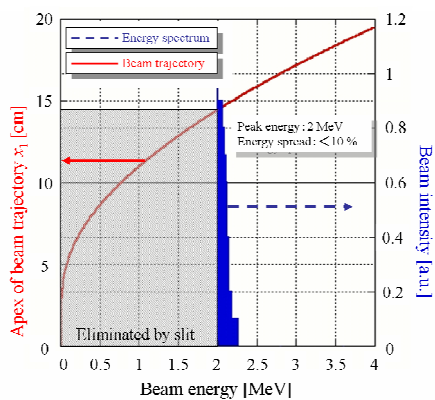


図6 電子ビームエネルギースペクトル

表2 電子ビーム発生試験結果

	設計値	実験結果
エネルギー	3.0	2.0 (<10%)
ビーム電流	2 μ A	0.15 μ A
パンチ電荷量	20 pC	1 pC (max)
入力RF電力	6 MW	5 MW
入力RFパルス幅	1 μ s	200 ns

しかしながら、図5に示すように6 MW、200 ns以上のRF投入は、空洞内の放電現象の多発によりコンディショニングが進んでいない。そのため、RFパルス幅が空洞充填時間よりも短く、設計値のビームエネルギーと電荷量が得られていない。空洞内の放電箇所と原因は現在調査中であるが、熱カードのRFコンタクトに採用しているSUSスプリング近傍での放電痕が確認されている。エミッタンスやパンチ長の測定は、今後予定している。

4. X-bandライナックビームライン

電子銃の試験に引続き、電子加速に用いる進行波型X-band加速管の据付が完了している。クライストロン出力を7 dB方向性結合器により4:1の割合で分割し、クライストロン出力50 MW時40 MWを加速管へ、10 MWをRF電子銃へフィードする。加速管は空洞内での電場分布を考慮するため、軸対象なダブルフィードタイプとなっている。加速管入力カップラ手前の3 dB方向性結合器によりRFを分割している。この方向性結合器における位相差は、ネットワークアナライザにより測定・調整し、1度以内に合せている。今後、加速管へのパワー投入を行い、順次電子加速試験を行う予定である。

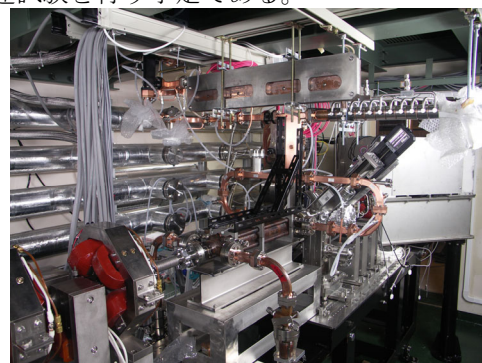


図7 X-band加速管と立体回路

5. まとめと今後の予定

東大原子力専攻において、X-band電子ライナックを用いた小型コンプトン散乱X線源の開発を進めている。クライストロンモジュレータや電子銃空洞内に諸問題を抱えているものの、2 MeV電子の発生を確認し、放射線発生装置として認可を受けた。今後は課題点の原因追求と対策を行いつつ、加速管による電子加速、コンプトン散乱実験へと展開していく予定である。

謝辞

本システム開発は文部科学省先進小型加速器の要素技術の普及事業（平成13-17年度取りまとめ放医研）によって行われた。また、レーザーシステムとX線発生・検出システムは独立行政法人科学技術振興機構の革新技術開発研究事業の委託研究として実施されたものである。

参考文献

- [1] M. Torikoshi, et. al., J. Biomedical Opt. 6, 371 (2001)
- [2] K. Dobashi, et. al., Jpn. J. Appl. Phys. 44, 1995 (2005)
- [3] F. Sakamoto, et. al., Proc. of the Advanced Accelerator Concepts Workshop, Lake Geneva, USA (2006)
- [4] K. Dobashi, et. al., Proc. of the European Particle Accelerator Conference, Edinburgh, Scotland (2006)
- [5] F. Sakamoto, et. al., J. Korean Phys. Soc. 49, 286 (2006)
- [6] K. Matsuo, et. al., Proc. of 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Ibaraki, Japan (2003)