

# X-bandリニアックを用いた小型硬X線源の高性能化 — 減速管導入ビームラインの設計 —

今井 貴之<sup>1,A)</sup>、上坂 充<sup>A)</sup>、土橋 克広<sup>B)</sup>、深澤 篤<sup>A)</sup>  
飯島 北斗<sup>A)</sup>、坂本 文人<sup>A)</sup>、えび名風太郎<sup>A)</sup>  
浦川 順治<sup>C)</sup>、肥後 寿泰<sup>C)</sup>、明本 光生<sup>C)</sup>、早野 仁司<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設  
〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根2-22

<sup>B)</sup> 放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1

<sup>C)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

## 概要

東京大学・原子力工学研究施設では、文部科学省先進小型加速器開発プロジェクトに参画し、X-bandリニアックで加速した電子ビームとレーザー衝突による逆コンプトン散乱を利用した、小型硬X線源の開発に取り組んでいる。既にX線生成実験用のビームラインの設計を終え、加速器実験の準備を行っているが、レーザー衝突までの現設計に減速管を導入して放射線バックグラウンドを低減させる等、システムの性能向上を目指した研究も同時に進めている。本稿では、減速管を導入した新しいビームラインの設計を中心に、X-bandリニアックを用いた小型硬X線源の高性能化について報告する。

## 1. 小型硬X線源の開発

我々は、文部科学省先進小型加速器開発プロジェクト(取りまとめ、放射線医学総合研究所)に参画し、動的血管造影用小型硬X線源の開発に取り組んでいる<sup>[1,2]</sup>。

動的な冠動脈の造影は、一般にカテーテルを心臓付近まで挿入してヨウ素を含む造影剤を注入し、X線管を用いて行う。ここでの問題の一つは、造影剤に含まれるヨウ素は33 keV 付近でX線吸断面積が急激に増加するため、制動放射を利用するX線管では生成されたX線のエネルギー拡がりが大きく、不要な被爆を受けてしまうことである。つまり単色化されたX線が必要となる。放射光を利用した心臓冠動脈造影検査は、高エネルギー加速器研究機構と筑波大が共同で行い、PF-ARにおいて成果を収めている<sup>[3]</sup>。しかし、装置が大型であることは否めない。

そこで本システムでは、電子ビームとレーザー光衝突させ、逆コンプトン散乱によりX線を生成する。この場合、比較的低い電子ビームエネルギーでも高エネルギーX線の生成が可能なので、電子加速にリニアックを用いることができる。さらに通常用いられるS-band より周波数の高いX-band (11.424 GHz)リ

ニアックを採用し、システムの小型化を図った。最終的な動的血管造影システムのプロトタイプを図1に示す。生成X線のエネルギー10～50 keV、強度 $10^{11}$  photons/s、時間幅10 ns を目標としている。

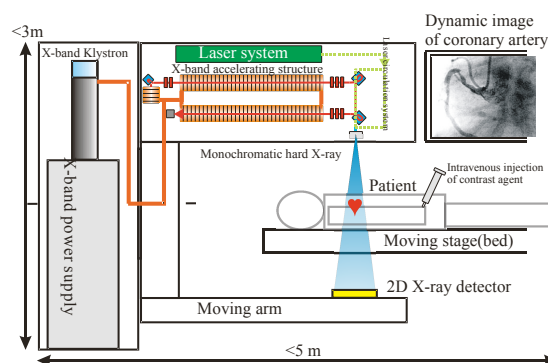


図1：X-band リニアックを用いた小型硬X線源による動的血管造影システム

現在、クライストロン、パルス電源<sup>[4]</sup>は製作が終了し、東京大学・原子力工学研究施設内に設置した。今後高電圧試験を行い、RF電子銃のビーム試験、更にはビーム加速実験、X線生成実験と開発研究を進めていく。

## 2. X線生成実験<sup>[2]</sup>

今後行う予定であるX線生成の実証実験の体系図を図2に示す。熱カソードRF電子銃<sup>[5,6]</sup>でマルチバンチ電子ビームが生成され、 $\alpha$ 電磁石、加速管、輸送ビーム光学系を通過して、QスイッチNd:YAGレーザーのパルス光と衝突する。電子ビーム、レーザーのパラメーターを表1に示す。この条件下で生成されるX線強度は、 $1.7 \cdot 10^7$  photons/pulse ( $1.7 \cdot 10^8$  photons/s)である。

<sup>1</sup> E-mail: timai@utnl.jp

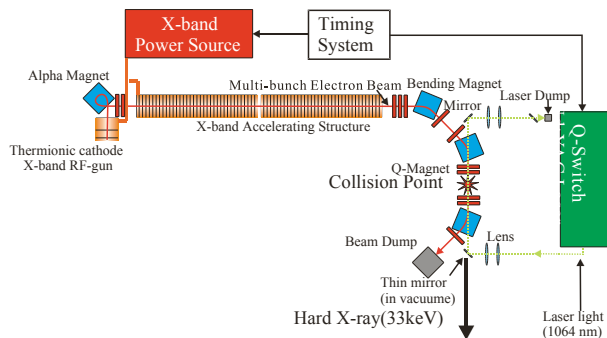


図 2 : X線生成実験体系図 (概念図)

表 1 X線生成実験パラメータ

Electron beam	Thermionic cathode RF Gun 20pC/bunch, 10 bunches/pulse
Laser	Q-switch Nd:YAG pulse intensity : 2J/pulse pulse length : 10ns repetition : 10pps wave length : 1064nm

また、図 3 に実験用ビームラインのビーム光学系を示す。ビームエネルギー変動による X 線強度のふらつきを抑えるため、衝突点での運動量分散関数と色収差を小さくするよう設計されている。また、衝突点での電子ビームサイズは 100  $\mu\text{m}$  であるが、この値は生成 X 線強度のビームサイズ依存性のシミュレーション結果から決定した。

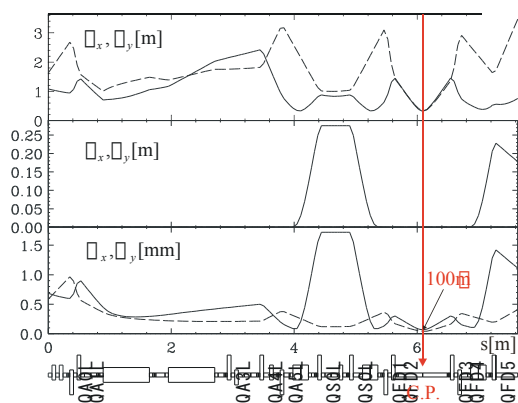


図 3 : X線生成実験用ビームラインのビーム光学系。β関数 (上) 運動量分散関数 (中)、ビームサイズ (下) を示している。(実線はx、破線はy、C.P.は電子・レーザー衝突点を表す)

### 3. 硬 X 線源の高性能化

前章で述べたように X 線生成の実証実験を行っていくが、硬 X 線源として開発するには課題がいくつか残されている。

一つは、X 線強度の増強である。実証実験で予想される  $1.7 \times 10^8$  photons/s は最終目標 ( $10^{11}$  photons/s) には満たない。この点については、電子ビームとの衝突後のレーザーを周回させ繰り返し入射させる、レーザーサーキュレーションシステム等、方策を検討している。

さらに、血管造影への利用を考慮するとシステム内の放射線バックグラウンドの軽減も課題である。図 2 に示したように、生成実験の第一段階では、レーザー衝突後の電子ビームは偏向後すぐにダンプさせる体系のため、ビームダンプが大きなバックグラウンド源となる。そこで、衝突後の電子ビームを減速させ、低エネルギーでビームをダンプさせてバックグラウンドレベルを軽減させることを検討している。つまり第二段階としては、図 4 に示すような減速管とビーム光学系を追加した体系を行う予定である。

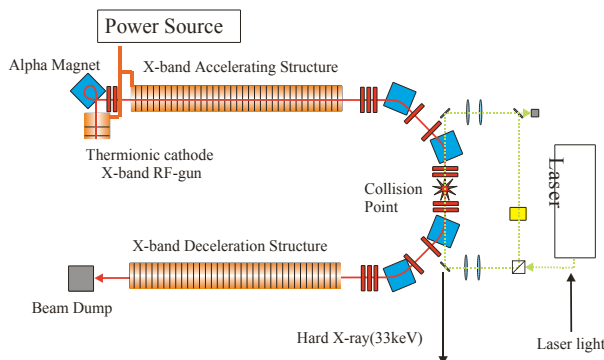


図 4 : 減速管を導入した実験体系図 (概念図)

### 4. 減速管導入ビームライン

減速管を導入した体系で放射線のバックグラウンドを軽減させるためには、減速管でのビームロスを抑えることが重要となる。ビームロスの要因の一つとして、ビームエネルギーの違いに起因する軌道長変化により、減速位相がずれることが挙げられる。これは、エネルギー回収型リニアック (Energy Recovery Linac, ERL) で不安定性の原因となることが知られている<sup>[7]</sup>。

その解決策として、isochronous、すなわちビームを偏向させてもエネルギーにより軌道長を変化させないようなビーム光学系を導入して、減速管に入射させることにした。つまり、ビーム軌道差  $\Delta l$  は運動量誤差  $\Delta p$  を用いて

$$\Delta l = R_{56} \Delta p$$

と表されるので ( $R_{56}$  は転送行列の (5,6) 成分)、設計したビーム光学系が  $R_{56} = 0$  を満たせばよい。

また第2章で述べたような、ビームエネルギー変動によるX線生成強度のふらつきを抑えるための衝突点でのパラメーターも考慮しなければならない。

以上を踏まえ、衝突点前後のアーチ部について、isochronousかつachromaticとなるビーム光学系を設計した。条件は、ビームエネルギー45 MeV、衝突点でのビームサイズ100  $\mu\text{m}$ 、 $\beta$ 関数0.1 m (x,y 共に)とした。シミュレーションには、加速器設計プログラム・SADを用いた。図5に設計したビーム光学系を示しているが、ビームラインで運動量分散関数の正負が逆転させている。これは、エネルギー差で軌道がずれる方向が反転し両者のバランスをとることにより、最終的には軌道長を揃えていることに相当する。

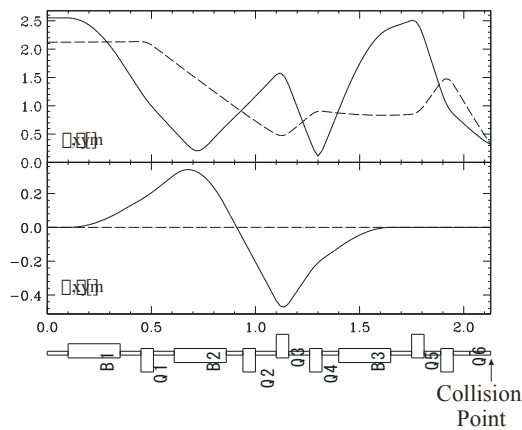


図5：減速管導入ビームラインの衝突点前のアーチ部ビーム光学系。上段は $\beta$ 関数、下段は運動量分散関数を示している。またBは偏向電磁石をQは4極電磁石を表している。

図1に示すように、最終的な血管造影システムでは、ビームラインをテーブルに載せ回転させてX線を照射することになるので、ビームラインの小型化、軽量化、簡素化が必要となる。そのため、永久磁石を製作して減速管導入ビームラインを構築する予定である。

減速管については、現在設計を行っている。既にX線生成実験用に製作したRDS(Round Detuned Structure)型加速管<sup>[8]</sup>の構造を基本としているが、少ないRFパワーでより高い減速勾配を達成するため、

シャントインピーダンスが大きくなるようシミュレーションを行い、構造を最適化している。

## 5. まとめ

X-bandリニアックを用いた小型硬X線源の開発に向け、X線生成実証実験の準備を進めると同時に、システムの性能向上を図るべく課題に取り組んでいる。その一つが放射線バックグラウンドの軽減を目的とした減速管の導入である。減速管でのビームロスを抑え、生成X線の強度を安定化させるため、isochronousかつachromaticとなる衝突点前後アーチ部のビーム光学系を設計した。今後、減速管の設計及び、血管造影への利用を視野に入れて永久電磁石を用いたビームラインの構築に取り組んでいく。

## 謝辞

本研究において、日本原子力研究所光量子科学研究センターの羽島良一氏に助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 上坂 充 他  $\text{\AA}$  束大原施クワッドライナック現状報告 2003  $\text{\AA}$  本研究会 WA-3.
- [2] 土橋 克広 他  $\text{\AA}$  X-bandリニアックを用いた小型硬X線源 - ビームライン全体の設計、開発の現状 -  $\text{\AA}$  本研究会 WD-1.
- [3] S.Ohtsuka, et al., "Dynamic intravenous coronary angiography using 2D monochromatic synchrotron radiation", The British Journal of Radiology, 72 (1999) 24-28.
- [4] 明本 光生 他 "Xバンドリニアックを用いた小型硬X線源の50MWクライストロン用パルス電源" 本研究会 TP-25.
- [5] 深澤 篤 他  $\text{\AA}$  X-band熱カソードRFガンにおけるビームローディング  $\text{\AA}$  本研究会 WP-8
- [6] 松尾 健一 他  $\text{\AA}$  Xバンド高周波電子銃の開発  $\text{\AA}$  本研究会 WP-24.
- [7] L.Merminga, et al., "Analysis of the FEL-RF interaction in recirculating, energy-recovering linacs with an FEL", NIM A 429 (1999) 58-64.
- [8] H.Sakae, et al.,  $\text{\AA}$  小型硬X線源用Xバンド加速管の開発  $\text{\AA}$  h Proceedings of the 27<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9, 2002.