

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 -

土橋 克広^{A)}、上坂 充^{B)}、深沢 篤^{B)}、飯島 北斗^{A)}、
今井 貴之^{B)}、坂本 文人^{B)}、えび名風太郎^{B)}、
浦川 順治^{C)}、肥後 寿泰^{C)}、明本 光生^{C)}、早野 仁司^{C)}、

^{A)} 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

^{B)} 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

^{C)} KEK: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

我々は、経静脈動的冠状動脈造影 (Dynamic IVCAG)、生命科学応用などさまざまな用途が考えられる高品質の硬X線源をより小型化する、Xバンドリニアックを持ちいたレーザー電子ビーム衝突による小型硬X線源を開発中であり、X線強度 10^9 photons/s (但し後述のレーザーサーキュレーションシステムを採用した場合) を目指す。

X線の強度を安定にするには、まず、RF源の出力を安定にする必要がある。また医療応用を考える場合、電源は小型である必要がある。電源で発生するビームエネルギーふらつきは、レーザー電子ビーム衝突ルミノシティーに影響を与えるが、これはビーム光学系に依存する。また、エネルギー広がり衝突点でのビームサイズ増大セルミノシティーの減少を招くため、実現できるビームエネルギー広がり範囲内でビームサイズへの影響を許容できるようなビーム光学系である必要がある。Xバンド加速器ビームラインのビームラティス設計とXバンドRF源性能評価試験の進行状況について報告する。

1. はじめに

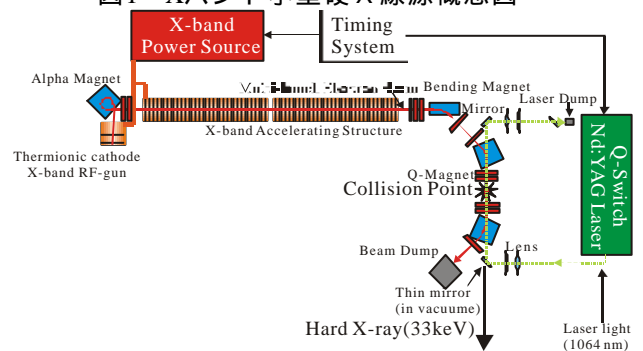
X線は医療、生命科学、材料科学など広い分野で利用されている。例えば医療関係では、定期検診や、非切開手術での人体透視、癌細胞への直接照射による治療などさまざまな用途がある。しかし放射線障害の問題は避けて通れず、医療現場ではこれを含めたさまざまな患者への負担の低減は大きな課題である。我々は、文部科学省先進小型加速器開発プロジェクト(取りまとめ放射線医学総合研究所) に参画し、従来使用されて来たSバンド(2856 MHz、波長10.5 cm)の1/4の波長であるXバンド(11.424 GHz、波長2.6 cm)リニアックを用いた、より小型の硬X線源を開発している。Xバンドを採用することで、Sバンドのシステムと単純に比較すると、長さ1/4、体積1/64にすることができる。

2. 基本設計

我々が提案する小型硬X線源は、図1のような、小型のXバンドリニアックで加速された電子ビームをレーザーと衝突させてX線を発生させるものである¹⁾。熱RFガンで生成されたマルチバンチ電子ビームはXバンド加速管で加速され、パルスレーザー光と衝突する。Compton散乱により、時間幅10ns(FWHM)の硬X線が生成される。

電子源としてはいろいろな選択肢があるが、Xバンド熱RFガン(電子銃)を採用する。他に、短バンチ高品質ビーム生成が可能なフォトカソードRFガンも考えられるが、高度なレーザー技術を要するドライブレザーが必要になるため、今回はオプションとした。衝突用レーザーに関しては、加速器の開発に専念するために、既存のレーザーを使用する。我々はパルス強度2J/pulse、繰り返し10pps、パルス長10ns(FWHM)、波長1064nmのQスイッチNd:YAGレーザーを採用する。これにより、小型でシンプルなX線生成装置が構築できる^{2,3,4)}。X線強度は 10^8 photon/sと見積もられている。

図1 Xバンド小型硬X線源概念図



3. Xバンド線形加速器ビーム光学系設計

数値計算による概念設計および、それに基づく開発方針の確認、第1号機の全体設計をもとに、

ビームライン(ビーム光学系)の詳細計算をおこなった。ビーム光学系の計算はKEKで開発されているSADをもちいた。計算より得られたビーム光学系について、RFパルスあたりX線強度のふらつきを評価した。

まず衝突点での最適ビームサイズの再検討をおこなった。これまでのIHIでのRFガン詳細計算⁵⁾より、予想ビームクオリティがわかっているので、このビームとレーザーを衝突させた場合の、ビームサイズによるX線強度の変化を調べた(図2)。この結果よりレーザ、電子ビームともに0.1mm(rms)が妥当と判断した⁶⁾。

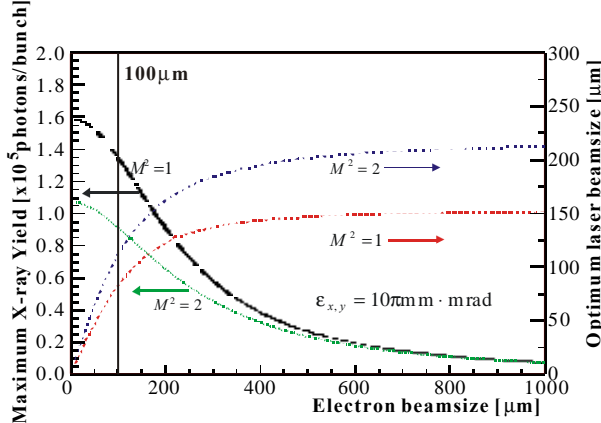


図2：電子ビームサイズと最大X線強度およびレーザービームサイズの関係

上記結果を受け、ビーム光学系の設計計算を行った。衝突点でのビームサイズが上記結果からの要求を満たすようビーム光学系の最適化を行った。また、ビームエネルギー変動によるX線強度のふらつきをなるべく抑えるため、衝突点での運動量分散関数と色収差を小さくするよう考慮した。このようにして設計したビームラインにより、衝突点でビームサイズ0.1mmを得られる(図3)

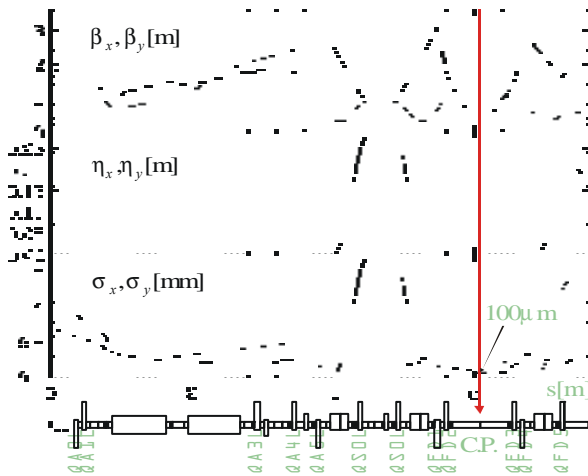


図3：ビーム光学系

このビームラインにおいて、電子ビームエネルギーが変化した場合の衝突点 関数とX線強度の

変化を計算した(図4)。エネルギー変動が±1%の範囲では、X線強度の低下は10%程度であることがわかる。後述の通り、XバンドRF源のパルスあたり出力安定性は±0.1%であるので、X線のパルスごとのふらつきは10%より小さくなることが予想される。

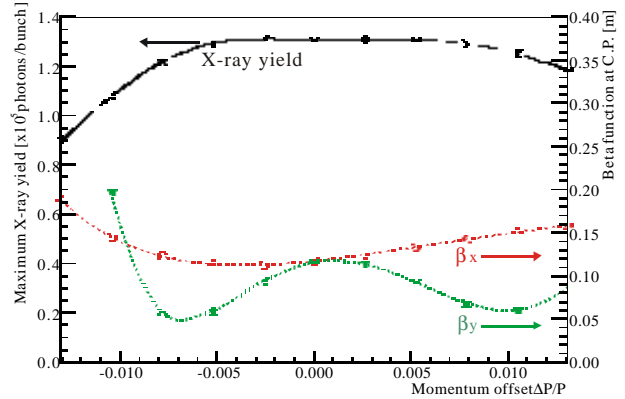


図4：電子ビームエネルギーが変化した場合の衝突点 関数とX線強度の変化

4. Xバンド加速器開発状況

ビームライン設計と平行して、KEK明本助手を中心に、XバンドRF源のキーデバイスであるRFモジュレータ-電源の設計製作をおこなった⁷⁾。特に今回は大出力電源を小型化することと、RF出力のふらつきを±0.1%以内に抑えるようにした。小型化に関しては、パルストランスの巻き線数を変更してPFN部を低電圧大電流化することにより、500kV、ピーク出力135MWでありながら、PFN部と制御部を1600W×2000H×1000D(クライストロンタンク及びクライストロンを含めると3115W×2255H×1350D)に収めることができた。このRF電源は工場での動作試験において出力パルス安定度がほぼデザイン通りの±0.12%であることが確認された。この装置を東海村の東大原子力施設に搬入設置した。



図5：XバンドRFモジュレータ-電源

この夏よりXバンドRF源の試験を行う。

5. 今後の予定

この夏よりXバンドRF源の動作試験をはじめ

る。Xバンドクライストロンのエージングの後、XバンドハイパワーRF生成試験において、ピークパワー50MW、パルス幅1 μ sのXバンドRF生成を目指す。

また、レーザー電子ビームの衝突を効率良く行うには、ビームプロファイルを精度良く測定するモニターが不可欠である。100 μ mを測定可能な高空間分解能及び、バンチ構造を測定できる高時間分解能を有するモニターとして、Wire scanner、OTRモニターに焦点をあて、その研究開発を行っており、東大SバンドライナックにてXバンドビーム加速試験に使用するプロファイルモニター⁸⁾の試験を行う。

冬季よりXバンド熱RF電子銃^{9,10)}の高電界試験をはじめ、来春にはビーム加速試験を行う予定である。

来年度中には加速管を加えた全Xバンドビームライン(図1)でのビーム加速を実証し、X線生成実験に備えたい。

これらの試験と平行して、図6のような血管造影実証機の実現に向けた各種要素技術開発を進める¹¹⁾。ビームラインをマグネットを用いてより小型化し、ガントリーに搭載可能にする。また、ビームエネルギー回収や永久磁石を用いたビーム光学系の設計、X線強度を1桁以上増加させるレーザーサーキュレーションシステムの検討も順次進めていく。

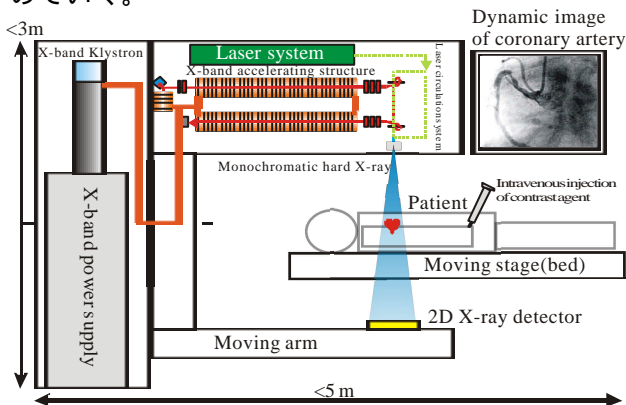


図6: 本研究の最終目標

REFERENCES

- [1] M. Uesaka *et al.*, 原子核研究, Vol.47, No.4 (2002), pp.9-21.
- [2] K. Dobashi, *et al.*, ICFA 24th Beam Dynamics Workshop on Future Light Source in SPring-8, Japan, 1-4 March (2002)
- [3] K. Dobashi, *et al.*, 8th European Particle Accelerator Conference in Paris, France, 3-7 June (2002)
- [4] K. Dobashi *et al.* 第27回リニアック技術研究会 (2002)
- [5] M. Yamanmoto, *et al.*, 第27回リニアック研究会 (2002)
- [6] M. Uesaka, *et al.*, The XXI International LINAC Conference in Korea, 19-23 August (2002)
- [7] M. Akemoto *et al.* 第28回リニアック研究会(2002) TP-25
- [8] F. Sakamoto *et al.* 第28回リニアック研究会(2002) TP-39
- [9] A. Fukasawa *et al.* 第28回リニアック研究会(2002) WP-8
- [10] K. Matsuo *et al.* 第28回リニアック研究会(2002) WP-24
- [11] T. Imai *et al.* 第28回リニアック研究会(2002) WP-5