

Xバンド線形加速器を用いた小型硬 X線源

- Xバンドクライストロンエージングと減速用ビームライン設計の状況 -

土橋 克広^{A)}、上坂 充^{B)}、飯島 北斗^{B)}、今井 之^{B)}

深澤 篤^{B)}、坂本 文人^{B)}、えび名 風太郎^{B)}

浦川 順治^{C)}、明本 光生^{C)}、肥後 寿康^{C)}、早野 仁司^{C)}

^{A)} 放射線医学総合研究所

^{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)} 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 10^8 photons/s (10pps)を目指す。

X線の強度を安定にするには、先ず、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、エネルギー広がりや衝突点でのビームサイズ増大や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や衝突点での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

医療、生命科学、材料科学など広い分野において、X線は非常に大きな役割を担っている。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場面で X線が使用されている。しかし、医療現場では放射線障害を含めたさまざまな患者や医療関係者への負担の低減は大きな課題となっている。心筋梗塞の治療において、動的な冠動脈の造影(CAG: Coronary Arteriography)が欠かせない。これは、沃素を含む造影剤をカテーテルにより冠状動脈に直接注入し X線管により X線を照射することによって、梗塞部位の透視を行うものである、ところが、ヨウ素(I)は 33 keV に K エッジがあり、33 keV 前後での X線吸収の断面積が 5.4 倍程度増加する。したがって、ブロードなエネルギーをもつ制動放射 X線(実際には金属板のフィルターを併用)を用いた現在のシステムでは、造影に寄与するエネルギーの X線量に比べ人体全体に吸収される X線が多くなってしまい、治療中の患者への大量の放射線被曝を余儀なくされる。

この問題を解決する方法として、電子貯蔵リングからのシンクロトロン放射(SR)光を単色化し血管造影に用いる方法が提案されている[1,2]。この方法ならば

造影剤投入は手首静脈から行なうことが可能となり、患者への負担は軽くなる。この経静脈動的冠状動脈血管造影:Dynamic IVCAG(Intravenous Coronary Arteriography)は各方面で研究が進んでいるが、放射光施設は一般的には高額巨大な装置であり、一般の大学の研究室や病院においそれと導入できるものではない。しかし、小さな電子線形加速器(リニアック、linac)を用い、大強度のレーザー光と電子ビームを衝突させて Compton 散乱(逆 Compton 散乱と呼ぶ場合もある)により高エネルギー X線を得る方法を適用すれば、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線源が実現でき、IVCAG の普及の可能性が開ける。

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 2.4 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[3,4,5]。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。

本稿では、この Xバンドリニアックを用いた小型硬 X線源の検証実験進行状況について報告する。

2 小型硬 X線源の概要

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枝があるが、Xバンド熱 RF ガン(電子銃)を採用する[6]。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。

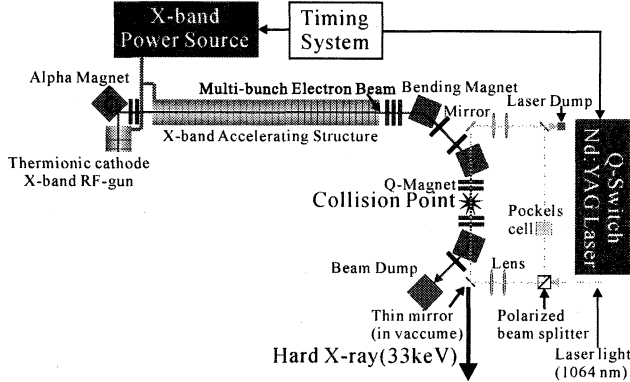


図 1 小型硬 X 線源概念図

X バンドシステムはリニア子ライダー用のものが KEK にて開発中であり [7], 各コンポーネントについて KEK で蓄積された技術を積極的に適応してビームラインを構築する。

X 線強度の計算には、電子ビームの品質を示す規格化 emittance を $10\pi\text{mm mrad}$, 電荷量を 20 pC/bunch, RF パルスあたりの bunch 数として 10^4 bunches/pulse (RF パルス長: 1 μs) を仮定した。最大の X 線強度を得るために、正面衝突させる。1RF パルスあたりの X 線強度は、各バンチの X 線強度を足し合わせたものであり、レーザーの品質を示す $M^2=1$ のとき 1.69×10^7 photons/pulse ($M^2=2$ のとき 1.15×10^7 photons/pulse) になる。電子ビーム 56 MeV の時、X 線の最大エネルギーは 56 KeV である。

図 2 に、SAD [8] を用いて計算した、現在検討中のビーム光学系を示す。

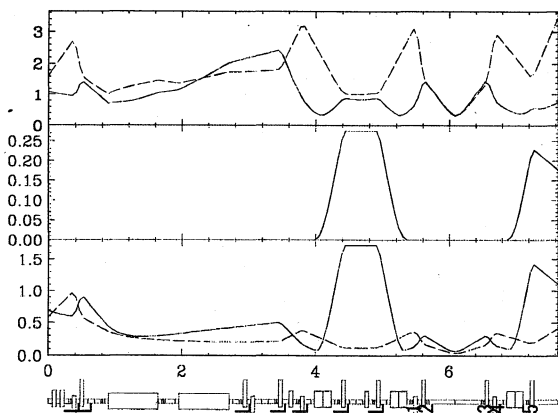


図 2 ビーム光学系

3 X バンド RF システムの構築

X 線生成実証実験のための X バンド線形加速器ビームラインを茨城県東海村の東大原子力施設に建設中であり、現在は第一段階として X バンド RF 発生装置の設置と調整を行っている。

X バンドクライストロンを駆動する RF モジュレーター電源は、今回新しく設計製作した。一般的に高出力の X バンドクライストロンは、印可電圧 500kV 近辺での運転が一般的であり、高耐圧化のため装置も大型になりがちである。我々は、小型化を実現するために、パルストランスの 1 次 2 次巻き線比を 1 対 32 とし PFN を低電圧大電流化することにより、気中での小型化を実現した。巻き線比による特性劣化を押さえるため、1 次側は 1 ターンとした。また、PFN は 4 並列とし、スイッチにサイクロトロン 2 本を使用している。今後半導体スイッチの採用も視野に入れている。PFN の充電にはインバーター方式の電源を電源を採用している。

クライストロンは KEK で開発中 PPM 方式のもの (東芝 E3768) を、設計はそのままに新たに製作した (E3768I)。モジュレーター出力が最大 142MW であるので、仮にクライストロンの効率 36% でも 50MW のピーク電力を期待できる (実際はクライストロンの絶対最大定格での制限があるが、効率は 45% 以上あると期待している)。クライストロンはエージングがなされていない状態での納入となり、このエージングと RF 出力試験が本研究の課題の一つとなっている。特に問題となるのが、クライストロン出力 RF 窓の破損であり、KEK での X バンドクライストロン開発の経過等を踏まえ、ダミーロード内その他での放電による反射波や発光を捕え RF パルス内でインターロックを掛けるなどの対策をとりながら慎重にエージングを進める予定である。

4 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。

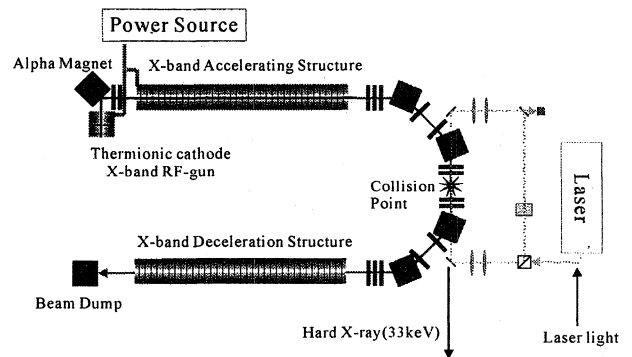


図 3 速管を導入した実験体系図 (概念図)

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が課題になってくる。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ブ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。

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

なっていることが知られている。

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、ビーム軌道差は運動量誤差を用いて

$$\Delta L = R_{56} \delta$$

と表されるので (は転送行列の(5,6)成分)、設計したビーム光学系が $\Delta L = 0$ を満たせばよい。また、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、衝突点前後のアーカ部について、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 mm、 β 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。

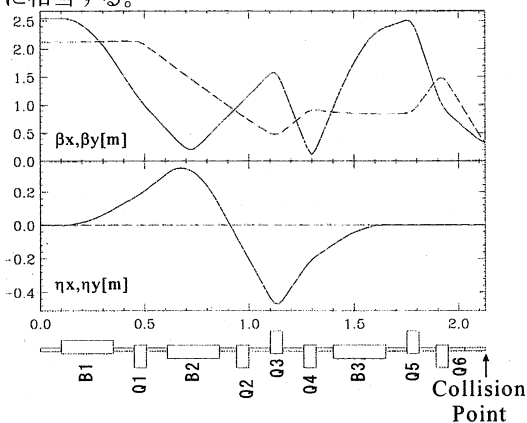


図 4 減速管導入ビームラインの衝突点前のアーカ部ビーム光学系。上段は β 関数、下段は運動量分散関数を示している。また B は偏向電磁石を Q は 4 極電磁石を表している。

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)型加速器[9]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。

まとめと今後の予定

我々は、Dynamic IVCAg に用いる超小型硬 X 線源を開発中であり、X バンド加速器、熱 RF ガンと Q スイッチ Nd:YAG レーザーを用いた小型システムで 10^8 photons/s の X 線の生成が可能であると期待している。本 X 線源の原理実証のための加速器構築を始めており、第一段階として X バンド RF 源の試験を進めている。平成 17 年度までに

前述の J 字型ビームラインにて、X バンドシステムによるビーム加速および、そのビームを用いた X 線発生を実証する。

本研究の最終目標は図 5 のようなものである。X バンド加速器とレーザー光循環システムを含めたレーザー装置を大型のアームに収め、患者のいろいろな角度から X 線を照射できるようにする。ビームラインの小型化のため、収束磁石と偏向磁石を永久磁石で構成し、偏向部には α 型磁石を導入して磁石の数を減らす。衝突後の電子ビームは減速され、低エネルギーでビームダンプにてダンプされる。

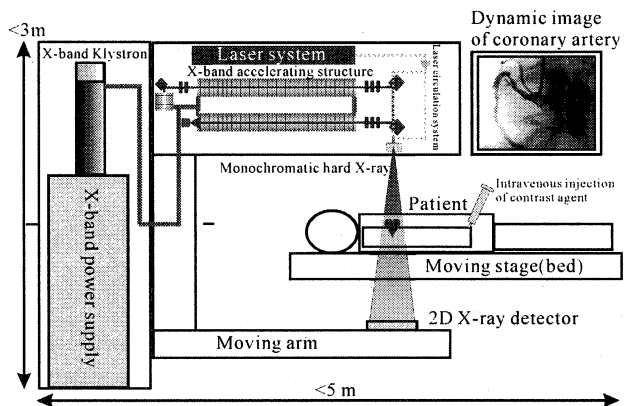


図 5 本研究の最終目標

前述の X 線生成実証試験と平行し、医療用小型硬 X 線源の設計検討を進める。また、X 線生成実験で生成した X 線の医療応用実験の検討も進めていく予定である。

参考文献

- [1] E. Rubenstein, et al., E Proc. Conf Digital Radiogr. 314, 42-49(1981).
- [2] S. Otsuka, et al, British Journal of Radiology 72, 25-28(1999).
- [3] M Uesaka et al., 原子核研究, Vol.47, No.4 (2002), pp.9-21.
- [4] K. Dobashi, et al., ICFA 24th Beam Dynamics Workshop on Future Light Source in SPring-8, Japan, 1-4 March (2002)
- [5] K. Dobashi, et al., 8th European Particle Accelerator Conference in Paris, France, 3-7 June (2002)
- [6] M. Yamanmoto, et al., (2002)
- [7] JLC-1, KEK Report, 92-16(1992).
- [8] SAD(Strategic Accelerator Design): K.Hirata, An introduction to SAD, Second Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop, CERN 88-04 (1988)
- [9] H.Sakae, et al., “小型硬 X 線源用 X バンド加速器の開発”, Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9, 2002.