

X-band RF generation test of compact hard X-ray source based on X-band linac

K. Dobashi^{A)}, M. Uesaka^{B)}, A. Fukasawa^{B)}, H. Iijima^{B)},
F. Sakamoto^{B)}, F. Ebina^{B)}, H. Ogino^{B)}, J. Urakawa^{C)}, T. Higo^{C)}, M. Akemoto^{C)}, H. Hayano^{C)},

^{A)} NIRS: National Laboratory of Radiological Sciences,
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8555 Japan

^{B)} UTNL: University of Tokyo, Nuclear engineering research Laboratory,
2-22 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1188 Japan

^{C)} KEK: High Energy Accelerator Research Organization,
1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, Japan

Abstract

Compact monochromatic hard X-ray source based on laser-electron collision for dynamic Intravenous Coronary Arteriography (IVCAG) is proposed and designed. X-band linac is introduced to realize remarkably compact system. We have performed design of the compact monochromatic tunable hard X-ray source. Stability of output pulse voltage of the X-band RF modulator with 5pps, 430 kV is less than 0.1% in rms. Beam aging of the X-band Klystron Toshiba E3768I is finished. High speed RF interlock system for RF aging to protect the RF system from RF breakdown at waveguides is constructed and tested. Response of the interlock is about 350 ns. To install the X-band beam line to UTNL site, redesign of the beam line is performed.

X-band リニアックを用いた小型硬 X 線源のための X バンド RF 発生試験

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^[1, 2]。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。図 1 に、本研究の最終目標である、医療用小型単色可変硬 X 線源装置の概念図を示す。ガントリーに小型の X バンド線形加速器とレーザーを装備し、レーザー電子ビーム衝突により(準)単色硬 X 線を生成する。電子ビームを減速シグンプするためのビーム減速管システムを装備し、余分な放射線発生を極力抑える。X 線コリメーターによるエネルギー選別され、また X 線拡大光学系により拡大されてから患者に照射される。ガントリーの逆の腕に取り付けられた X 線 2 次元撮像装置により動画を取得する。X バンド線形加速器のための X バンド RF はガントリー外の X バンドクライストロンより供給される。

図 1 の最終目標を実現すべく、各種要素技術開発お

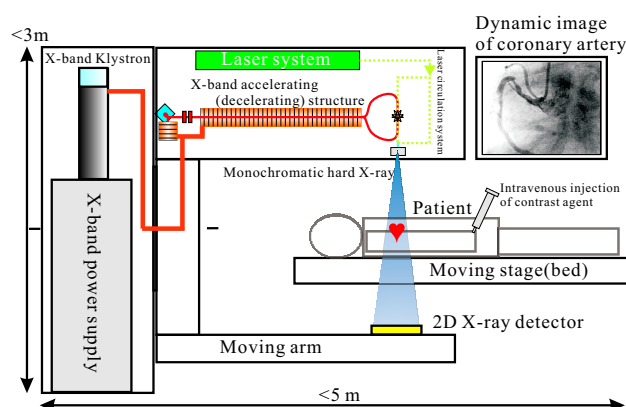


図 1: 本研究の最終目標

よび X 線生成実証試験を進めている^[3, 4, 5]。図 2 は、X 線生成実証のための X バンド線形加速器ビームラインの概念図である。実証試験においては、まず X バンド線形加速器が仕様どおりに安定に動作しビーム加速が可能かを試験する。その上で、加速されたビームを用いてレーザー電子ビーム衝突による硬 X 線生成の実証試験を行う。さらに、生成された X 線が医療用として十分有用であることを証明するために、X 線医療応用実験を行う。

2. X バンド硬 X 線源実証ビームライン再設計

平成 14 年度末に、本研究の実証試験ビームライン設置場所が茨城県東海村の東大原子力施設に変更決

* E-mail: kdobashi@utnl.jp

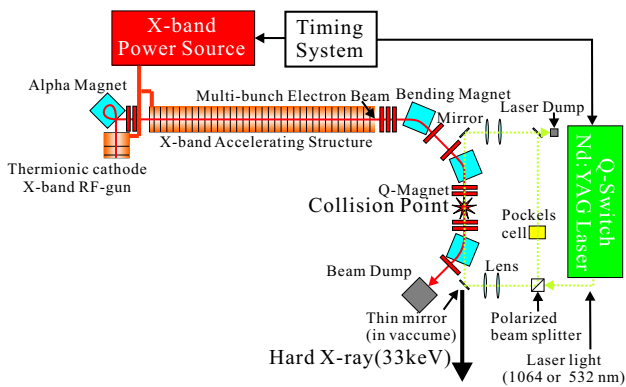


図 2: 実証ビームライン概念図

定された。ビームラインを設置するのは、縦横 6.5 m 四方の地下ピットであり、この中に衝突点を含めたビームラインを収める必要があった。このため、この設置場所にあわせてビームラインデザインの最適化を行った。

ビーム光学系の計算は SAD^[6] を用い、ビームラインが所定のサイズに収まるよう加速管の本数を 1 本に減らすなどし、ビームライン全体の概略設計をおこなった。各コンポーネントの間隔を吟味して、可能な限りの小型化を図った。衝突点でのビームサイズはほぼ目標どおり 100mm(rms) である。これにより、設置場所に十分収まるビームラインを設置できることがわかったが、加速管が 1 本となったことにより、33.169keV の X 線生成を行うために必要な 45MeV までの電子ビーム加速は困難になった。これに関しては衝突レーザーの波長を 2 倍高調波の 532nm にすることにより回避することを検討している。

3. Xバンド RF 発生試験

3.1 Xバンドクライストロンセットアップとビームエージング

平成 14 年度末に東大に搬入設置された X バンドクライストロン電源^[7]に、東芝製 X バンドクライストロン E3768I を設置し、ビームエージングを開始した。クライストロンの定格印加電圧である 470 kV に達した。途中冷却水設備の工事等で中断したが、昼間の運転 (1 日数時間) のみで 8ヶ月程度の日数を要した。但し、実際にクライストロンに高圧が印加されていた時間は 350 時間にも満たない。24 時間運転であれば、数週間で到達可能である。図 3 にクライストロン印加電圧波形の例を示す。

現在は後述の RF インターロックの整備を完了し、RF エージング作業中である。

3.2 Xバンドクライストロン電源動作試験。

X バンドクライストロン電源の動作試験を行い、設定出力電圧 406kV(図 3)、繰り返し 5 pps においてパルスランス二次側出力電圧波形の測定を行った。パルスごとに波形を計測して 100 個のパルス波形を取得、フラットトップのほぼ中心、立ち上がりから約

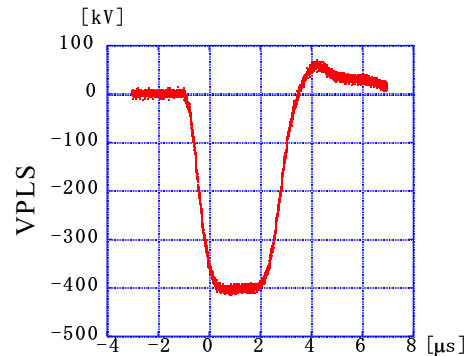


図 3: クライストロン印可波形 (Vpulse=406 kV)

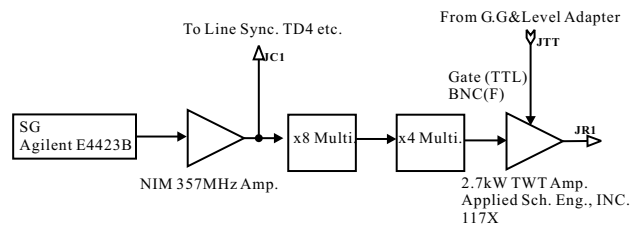


図 4: 低パワー RF 回路。357MHz の基準信号を逡倍して TWT アンプにて増幅し、クライストロンに入力する

2.5 μsec 位置の電圧を用いて解析を行った。rms が 0.35 kV、平均出力電圧 406.56 kV より、パルス間での安定度は ±0.086% であることが確認されている。

3.3 Xバンド RF エージング/大電力 RF 試験用インターロックシステム

図 4 に低パワー RF 系のブロック図を示す。本システムでは高精度の同期は必要なく、357MHz の基準信号を逡倍して TWT アンプにて増幅し、クライストロンに入力するような単純なシステムになっている。X バンドクライストロンの運転 (エージング) でもっとも深刻な問題は、大電力運転時における放電等による RF 出力窓の破損である。これらを防ぐため、通常は放電発生時に次の RF パルスの発生を停止するようなインターロックを設ける。しかしながら通常の方法では、クライストロンモジュレータ - 電源高圧トリガを停止するので、一度 RF パルスが発生したら RF パルスの最後まで RF は発生しつづけ、RF パルスの途中で停止することはない。このことは RF パルスの最初付近で発生した放電により、RF パルスの殆どのエネルギーが RF 窓や放電個所に落ちることを意味し、機器の破損の観点からは深刻な問題である。

このため、本 RF 発生装置では、RF パルスを途中で停止する高速インターロックを設ける。具体的な実現方法であるが、TWT アンプは通常 TTL レベルのゲート信号によって出力をコントロールされているので、インターロック信号によりこのゲート信号を停止する。インターロック信号発生回路を図 5 に示す。回路は市販の NIM モジュールにて構成した。

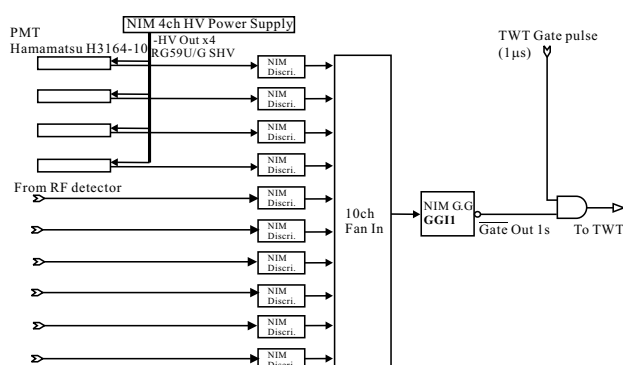


図 5: 高速 RF インターロック信号発生回路。PMT や RF 検波器からのパルス信号を Discriminator で波高弁別し、インターロック信号とする。負論理のインターロック信号と TWT ゲート信号の AND を取ることにより、放電発生時に TWT へのゲート信号を遮断し、クライストロンへの RF 供給を停止する。(Level Aapter や (低速) トリガイインターロック回路へのインターフェース等は省略)

捕える現象は、RF 窓や導波管の発光や、放電に伴う RF 反射波などである。発光に関しては、窓つきバンド導波管を RF 窓が目視可能なように設置し、光電子増倍管を用いて発光を検出する。反射波は、立体回路中でも RF 窓に近い部分に方向性結合器を設置し、RF 検波器で RF パルス波形を取得する。これらの信号を図 5 に示す回路で波高弁別し、インターロック信号とする。負論理のインターロック信号と TWT ゲート信号の AND を取ることにより、放電発生時に TWT へのゲート信号を遮断し、クライストロンへの RF 供給を停止する。

この動作を確認するために、TWT アンプ出力のモニター用方向性結合器に RF 検波器を取り付け、TWT アンプ自分自身の信号にてインターロックを動作させた。図 6 に、インターロック試験結果を示す。上の図はインターロック動作なしの場合の TWT アンプ RF 出力パルス検波波形であり、下の図はインターロック動作時の RF パルス検波波形である。RF パルス自分自身によってインターロックが動作してゲートパルスの幅が短くなり、本来 $1\mu\text{s}$ である RF パルス幅が 300 ns と短くなった。パルス幅が実質的なインターロック動作遅延時間に相当するので、ここではインターロック動作遅延時間は 300 ns と考えられる。この遅延は、ほとんどが TWT アンプ (250 ns) によるものである。

実際のインターロックシステムは、途中でクライストロンや、発光を捕らえる光電子増倍管などのデバイスによる遅延が含まれるはずであるので、今回の結果よりは若干反応速度が遅くなると思われるが、本高速インターロックによってはパルス前部での放電により RF エネルギーがコンポーネントに集中して破損を招く可能性を低くできるものと期待している。

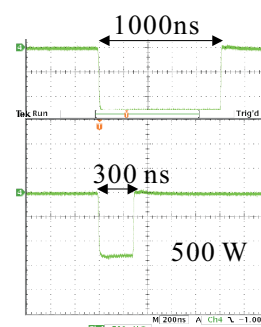


図 6: 高速 RF インターロック装置の反応速度試験結果。上: インターロック動作前の RF パルス。下: インターロック動作時の RF パルス。

4. まとめと今後の予定

現在東海村の東大原子力施設にて、X バンド硬 X 線源実証ビームラインの建設をすすめている。これまでに RF 源の設置および電源動作試験とビームライン設置のためのビームライン詳細設計をおこなった。今年度は RF 発生試験を行いながらビームラインの建設を行い、まず熱カソード RF 電子銃の試験を行う。できるだけ早くビーム加速試験を行いたい。

一方、上記ビームラインの建設/試験と平行して、最終目標である医療用小型硬 X 線源の設計検討もすすめている。医療用として十分な強度まで X 線強度を増強するための方策としてレーザーサーキュレーションの採用を検討しており、この秋にも実証試験を行う^[8]。これにより X 強度は最大 100 倍になると期待している。これら基礎技術の開発蓄積を進め、最終目標である医療用単色小型硬 X 線源を実現したい。

参考文献

- [1] M. Uesaka, 原子核研究, Vol.47, No.4 (2002), pp.9-21.
- [2] M. Uesaka, K. Dobashi, “小型電子・X 線診断治療システムの再構築”, 原子力核研究 Vol.48, No.5(2003) pp101-110.
- [3] K. Dobashi, et al., 8th European Particle Accelerator Conference in Paris, France, 3-7 June (2002)
- [4] K. Dobashi et al. Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, URL: <http://lam27.iae.kyoto-u.ac.jp>. URL: <http://lam27.iae.kyoto-u.ac.jp>.
- [5] M. Uesaka, et al., The XXI International LINAC Conference in Korea, 19-23 August (2002)
- [6] SAD(Strategic Accelerator Design): K.Hirata, An introduction to SAD, Second Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop, CERN 88-04 (1988), 43-47 (1999).
- [7] M. Akemoto et al., Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, URL: <http://lam28.tokai.jaeri.go.jp>.
- [8] F. Ebina et al., “Laser circulation system for compact monochromatic hard-X-ray generator”, 今学会で発表.