

Evaluation of 3.95MeV and 950keV X-ray source based on 9.3GHz X-band linac

Katsuhiro DOBASHI*, Mitsuru UESAKA, Ming JIN
Nuclear Professional School, School of Engineering University of Tokyo
22-2 Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1188, JAPAN
Joichi KUSANO, Naoki NAKAMURA, Masashi YAMAMOTO
Accuthera Inc.
2-7-6 Kurigi, Asaoku, Kawasaki-city, Kanagawa 215-0033, JAPAN

Abstract

X-ray source based on 9.3GHz X-band linac with magnetron is under developing. 3.95 MeV X-ray source is aim to non destructive testing (NDT) for concrete bridges. 950 keV X-ray source is aim to NDT for plumbing of chemical plants. NTD for steel bridge is also possible by our 950 keV X-ray source. The accelerating structures of new X-band linac are changed to side coupled, because of the beam of ole 950 keV linac with axial coupling accelerating structure is not so stable. Stable and intense X-ray is generated by those X-ray sources.

9.3GHz Xバンド 3.95MeV, 950keV ライナック X線発生装置のビーム性能評価

1. はじめに

昨今の社会的要請として大型建造物の複雑化・老朽化に伴い、そのメンテナンスが重要な課題となってきた。橋梁や大型プラントなど人工物の寿命延長・保全・品質確保のため、建造物の亀裂や減肉検査、支柱等の腐食検査などには検査に伴う莫大な費用が発生している。

その最たる例として、鹿島石油化学コンビナートでは、配管の外表面腐食が問題となっている。特に鹿島のコンビナートの場合は海が隣接し、厳しい塩害のために他地域に比べて塔や配管の外表面腐食が激しく、メンテナンス上の課題となっている。メンテナンスは塔や配管の内面の減肉量から寿命を予測し、計画的に実施されているが、外表面腐食に関しては、仮設足場の設置、保温材の撤去、プラントの停止など多大な費用が発生する。特に最近発生している外表面腐食は保温材破損部での発生が5%程度であり、大半は外装健全部で発生している。このため、外観からは判断できない保温材下の腐食を感知できる非破壊検査技術の開発が強く求められている。

また、道路等の橋梁においても、同様の問題が発生している。特に、高度経済性長期に建設されたコンクリート製の橋梁においては内部の様子を把握できないために、内部鉄筋等の劣化が激しいにも係わらず見過ごされることが懸念されている。このため、厚さ30cm以上のコンクリート建造物の透視画像を得られるような高エネルギーの可搬型X線源の実用化が望まれている。

こういった状況を踏まえ、我々は9.3GHzのマグネトロンをRF源としたXバンドライナックをベースとしたX線発生装置を開発している。3.95 MeV X線発生装置(3.95 MeV機)は、主にコンクリート製の橋梁の非破壊検査を主眼に置いて開発を行っている、また、950 keV X線発生装置(950 keV機)は、化学プラントでの配管の非破壊検査が主な目的であるが、鋼製橋梁の検査も可能であると考えている。

2. 3.95 MEV、950 KEV Xバンドライナック X線発生装置

表1に両X線発生装置の主な仕様を示す。

	950 keV	3.95MeV
電子ビームエネルギー	950 keV	3.95MeV
マグネトロン RF(peak)	250 kW	1.5 MW
最大繰り返し	550pps	200pps
平均ビーム電流	120 μ A	80 μ A
X線強度	50mGy/min	2Gy/min

表1: X線発生装置仕様

図1に3.95 MeV X線発生装置の概略図を、図2に950 keV X線発生装置の概略図を示す。

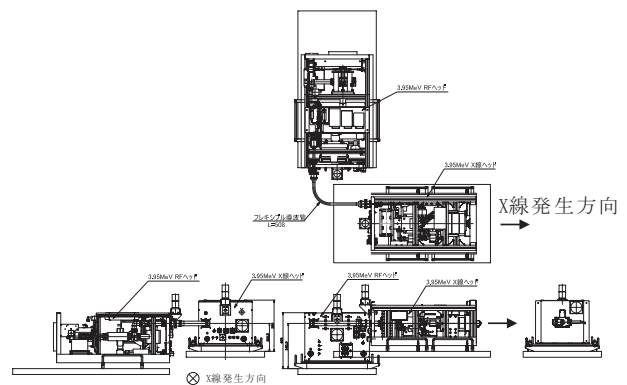


図1: 3.95 MeV X線発生装置

加速管及びX線ターゲットはX線ヘッドと呼ばれる筐体に納められている。RFユニットにはマグネトロンとパルストランスが納められている。マグネトロンに印加する高圧電圧パルスは、制御ラック下部に納められているHVユニットにより発生され、6本のRG59ケーブルを用いてRFユニットに伝送される。RFは、RFユニット内のマグネトロンで発生し、フレキシブル導波管によってX線ヘッドへとフィードされる。

* kdobashi@nuclear.jp

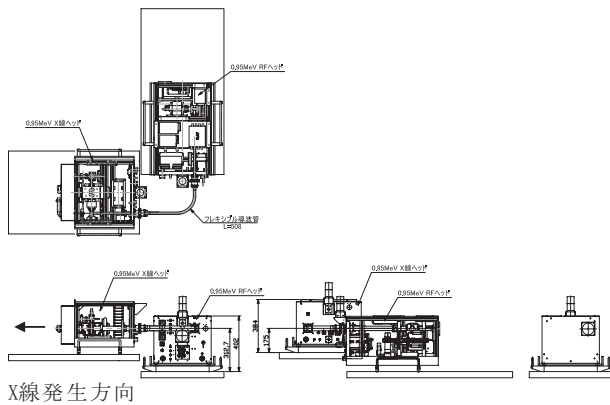


図 2: 950 keV X 線発生装置

肝となる RF 源は、950 keV 機にはピーク RF パワー 250 kW の 9.3 GHz マグネトロンを採用した。3.95 MeV 機にはピーク RF パワー 1.5 MW のマグネトロンを使用している。

制御ラックには、制御ユニットのほか HV 電源が設置されている。950 keV 機では HV 電源は 1 台であるが、3.95 MeV 機では 2 台を並列に運転する。

冷却水は、950 keV 機では制御ラックに納められたチラーにより供給される。このため、950 keV 機は、X 線ヘッド、RF ユニット、制御ラックの三筐体で構成できた。

3.95 MeV 機の冷却水は別筐体の小型チラーにより供給され、全体で四筐体となった。

2.1 950 keV X バンドライナック X 線発生装置一号機からの改良点

我々はこれまでに、950 keV X バンドライナック X 線発生装置 (950 keV 一号機) を一台製作し、試験を行ってきた。

950 keV 一号機は発振周波数 9.4 GHz、ピーク RF パワー 250 kW のマグネトロンを用い、加速空洞の構造は同軸カップリングであった。

950 keV 一号機については、ビーム試験においてビーム強度が設計値よりも低く、ビームが適切に加速されていないことが分かった。夏井による数値解析^[1]の結果、ビームと空洞 RF とのカップリング異常によりビーム加速勾配や RF 位相が振動していると推測された。

解決策として、今回は、同軸カップリングではなくサイドカップリングの加速空洞を採用することにした。

その他の改良点としては、全体的に装置を小型集積化し、屋外での使用に耐えられるように 3 個ないし 4 個の筐体としたこと、取扱い方法の簡素化、屋外での非破壊検査を想定したターゲットコリメーターの装着などがある。

2.2 医療用小型ライナック室

地上階には、及び 6MeV 9.3GHz ライナックが設置されている。0.95MeV 機は 250kW マグネトロンを RF 源とし、主にプラント配管減肉検査^[2]の実験を行っている。また、3.95MeV 機は 1MW マグネトロンを RF 源とし、橋梁コンクリートの非破壊検査^[2]に応用する

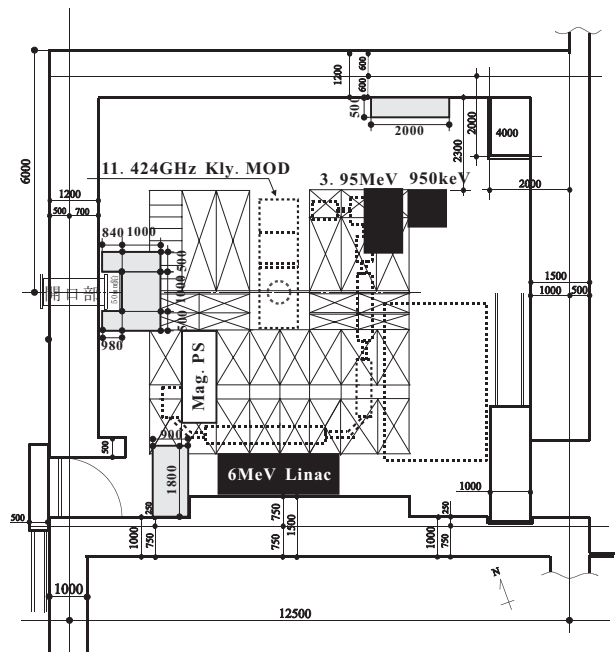


図 3: 医療用小型ライナック室全体図

ことを主な目的としている。6MeV 機も 1.5MW マグネトロンを RF 源とし、主に医療応用を目指している。

0.95 MeV 機、3.95 MeV 機とも、2011 年 2 月末に医療用小型ライナック室に搬入設置された。950 keV 機については X 線発生装置として使用許可が降りている。3.95 MeV 機は現在性能評価試験中 (本稿) である。

図 4 に現在の医療用小型ライナック室の様子を示す。元々 11.424GHz 機の伝磁石電源ラックが設置されていた場所に、950 KeV 機と 3.95 MeV 機が陣取っている。

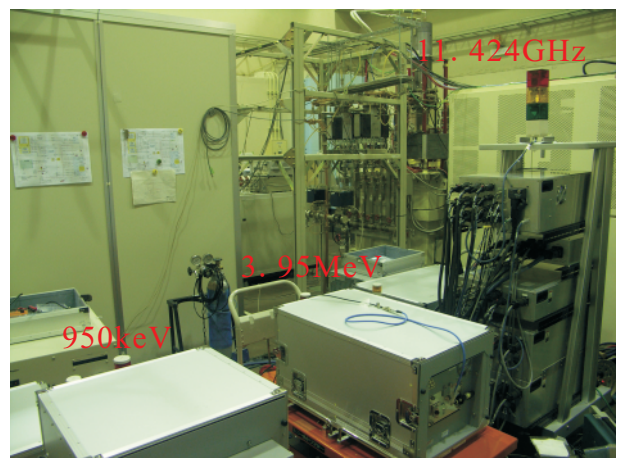


図 4: 医療用小型ライナック室の様子

尚、6MeV 機は 2010 年 2 月 8 日に、11.424GHz30MeV 機は 2009 年 3 月 9 日に放射線発生装置としての許認可が降りている。

3. ビーム特性測定試験

X線強度の測定の前に、まずはビームの特性を測定した。測定したのは、パルス内ビーム電流値、ビームエネルギー及びビームサイズ(プロファイル)である。

3.1 パルス内ビーム電流測定

パルス内ビーム電流値の測定は、他とは絶縁されたターゲットからの電流を直接オシロスコープで観測することにより測定でき、ほぼ想定内のビーム波形であった。一号機で見られたような不安定性は観測されなかった。これにより、サイドカップリング型加速管の有効性が確かめられた。

3.2 ビームサイズ測定

ビームエネルギー及びビームサイズ(プロファイル)の測定にあたっては、本来装着されているX線ターゲット及びターゲットコリメーターを取り外し、ビーム取り出し窓を持つビームスクリーンチェンバーを取り付けた。測定体系の概略を図5に示す。ビーム取り出し窓はチタン製で、スクリーンは所謂デマルケストを厚さ0.1mmまで研磨したものである。ビームスクリーンはビーム軸に対し45度傾けて設置され、手動によりビーム軸から移動させることができるようになっている。スクリーンをビーム軸から外した状態でビーム取り出し窓からビームを取り出すことができる。

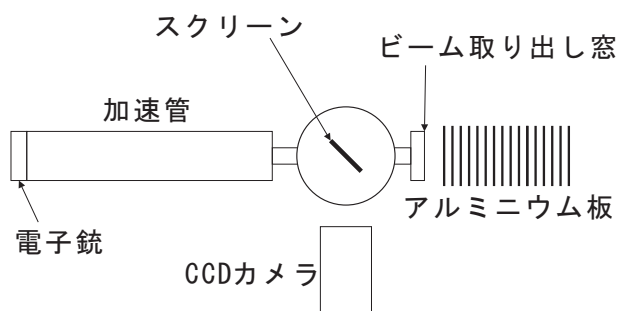


図5: ビームエネルギー及びビームサイズ(プロファイル)の測定のための体系

通常運転時は他と絶縁されたターゲットからの電流を測定することができるようになっているが、ターゲットを取り外した関係で、ターゲット電流を測定することが出来なくなる。また、ビーム電流モニター(CT)を取り付けるスペースはなかった。

また、スクリーン及びビーム取り出し窓の熱負荷の関係により、測定は数pps程度の低い繰り返しでの運転で測定した。

ビームプロファイルは、スクリーンの発光をテレセントリックレンズ付きのCCDカメラで撮影することにより測定した。

ビームサイズ(FWHM)は概ね数mmであった。

しかしながら、950keV機においては、スクリーンの帯電および放電によると思われる発光が見られ、正しいビームサイズを評価するのは非常に困難であった。

スクリーンの帯電を防止するためにチタン等の薄膜を蒸着することが知られており、このような対策を施してから再度測定すべきと考える。

3.3 ビームエネルギー測定

ビームエネルギーの測定は一般的には偏向電磁石を用いるが、今回は設置空間などの様々な条件を考慮し、ビーム取り出し窓から取り出したビームをアルミニウム板を積層したものに照射し、アルミニウム内での電子の飛程を測ることにより行った。

アルミニウム板の厚さは950keV機と3.95MeV機で50 μ m、250 μ mのものを使い分け、16枚積層し各々を絶縁した。各々のアルミニウム板にリード線を取り付け電流を読み出す。電流値はCAMACの14bit16ch電荷積分型ADCにより数値化した。

物質中の電子の飛程からエネルギーを評価するのは、飛程をどう評価するかという点で非常に難しい面がある。エラーがどの程度であるかも、議論の余地がある。

ビームエネルギーが1MeVないし4MeVに達するのは法令に違反することになるので、これを下回る範囲で性能を満たす運転パラメーターを探すことが重要である。加速器のビームエネルギー設計値を概ね満たす運転パラメーターを確認することが出来たと考えている。

3.4 高繰り返し運転試験

両機は高いX線線量を実現するために、200pps以上の高い運転繰り返し周波数で運転される。

低い運転繰り返し周波数では、平均ビーム電流及びX線線量は繰り返し周波数に比例するが、高い繰り返しでは比例するとは限らない。

考えられるのは、加速空洞の過熱によるデチューニングであるが、最も影響が大きいのは、空洞の発熱やビームがチェンバーに衝突することにより放出されるガスによる真空の悪化である。真空の悪化は電子縦のエミッションの悪化に直結する。従って、実際に高繰り返し運転を行いビーム電流やX線線量を測定して初めて目標性能を達成したといえる。

実際は、高繰り返し運転ではガス放出が多く、ビームを出しながら長時間のエージングを行う必要があった。

最終的には両機とも規定の運転繰り返し周波数で目標としたX線線量を発生することが出来た。

4. まとめ

950keVX線発生装置一号機の経験を踏まえ、加速管構造は、アキシアルカップリングからサイドカップリングに変更した。

両X線発生装置は東京大学大学院工学系研究科原子力専攻内のプランケット棟医療用小型ライナック室にてビーム発生試験が行われ、ビームエネルギーやビームプロファイル及びX線発生量の評価も行い、X線線量は設計値に達することを確認した。950keVX線発生装置一号機のようなビーム不安定性は無く、安定にビームが加速されており、サイドカップリングへの変更が効果的であったことが確認できた。

参考文献

- [1] 夏井拓也、修士学位論文、2007。