

NONDESTRUCTIVE TEST FOR PIPE OF PETROCHEMICAL COMPLEX USING UPGRADED X-BAND 950 keV LINAC X-RAY SOURCE

Ming Jin^{A)}, Haifeng Jin^{A)}, Takuya Natsui^{A)}, Katsuhiro Dobashi^{A)}, Kazuyuki Demachi^{A)}, Mitsuru Uesaka^{A)},
Joichi Kusano^{B)}, Masashi Yamamoto^{B)}, Naoki Nakamura^{B)}, Eiji Tanabe^{B)}
Yukiya Hattori^{C)}, Yitaru Miura^{D)}

^{A)} Nuclear Professional School, School of Engineering University of Tokyo
22-2 Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki JAPAN 319-1188

^{B)} Accuthera Inc., Kawasaki-City, Japan

^{C)} Hitachi Engineering & Services Co., Ltd., Ibaraki-ken, Japan, ^{D)} Mitsubishi Chemical, Ibaraki-ken, Japan

Abstract

Our portable X-band (9.3GHz) 950KeV linac has been successfully upgraded. The problems of RF power oscillation, beam current oscillation and reduction and finally lack of X-ray intensity were solved by replacing the axial coupling cavities with the side-coupled ones. Designed X-ray dose rate of 0.05 Sv/min@1m is going to be achieved. Length of the accelerating tube is reduced to less than 25 cm. X-ray source part with the local radiation shielding is connected by the flexible waveguide with the box of the 250 kW magnetron and cooling unit. The total system consists of the three suit-case-size units, the last of which is one for the electric power supply. Even on-line dynamic transmission imaging is available by using the high intensity X-ray camera. Demonstration of the measurement of wall thinning of metal pipes with thick thermal shielding is under way.

Xバンド 950 keV リニアック X線源を用いた石油コンビナート配管の非破壊検査

1. はじめに

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。外表面腐食に関しては、仮説足場の設置、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。概観からは判断できない保温材下の腐食箇所の特定や減肉状況の定量的な評価などには、イメージングが可能な X 線撮影による検出に期待が寄せられている^[1]。本研究では改良型 X-band950KeV リニアック X 線源を用いて現場で保温材付き配管の腐食減肉を検査及び評価できることを目標にし、今回は実機試料を初めて用いて実験室で測定を行った。

2. 改良型 X バンド 950KeV ライナック

2.1 2号機の概略

図1に改良型 X バンド 950KeV ライナック (2号機)を示す。

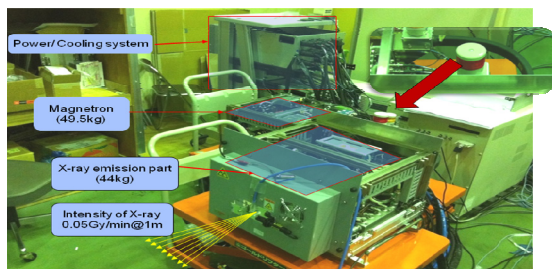


図1: 改良型 X バンド 950KeV ライナック

かげでコンパクトなシステムを実現した。加速管周波数を X バンド (9.3GHz) にすることで加速管自体を小型化し、またマイクロ波源に低電力 (250KW) のマグネトロンを使用することで冷却装置や電源も小型にする。また電子ビームエネルギーを 950KeV にすることで、放射線障害防止法に基づいた管理区域の設置が必要なく、装置を直接現場で使用できるようになる^[1]。具体的なライナックパラメータは表1に示す。

表1: ライナックパラメータ

運転周波数	9.3 [GHz]
RF 源	マグネトロン
入力 RF 電力	250KW
パルス幅・繰返数	3 [μ s]、280 [PPS]
加速管全長	25 [cm] 以下
加速管方式	Side coupled structure
加速セル数	Half1 + full18
セル間カップリング	3%
フィリングタイム	0.18 μ s
Shunt impedance	110-130M Ω /m レギュラー部

ビーム電流	64mA 以上
集束方式	RF 集束方式
X 線発生強度	50 [mGy/min]以上 at 1 [m]
電子銃電圧	20KV
電子銃	三極管

2.2 1号機の問題

APS 空洞を使用した1号機が平成19年度に完成しビーム測定が行われた。その結果、ビーム振動という問題が見つかった。その主な原因はビームローディングの影響だった。ビームローディング起こってエネルギーを失うのは主に高エネルギー領域であるがその影響は加速管全体におよぶ。この影響はほぼ加速管中の群速度の速さで伝わっていくので、低エネルギー領域のセルの**Stored energy** が低くなるにはある程度の遅延が発生する。この遅延が振動の原因であると考えている。すなわち、低エネルギー領域の電場が弱くなると、高エネルギー領域でのビームローディングがなくなるが、遅延を持っているのでそれまでに大きくエネルギーを失っている。この影響が低エネルギー領域に達してしまうと加速管全体でビームローディングが小さくなる。そしてまた、RF がたまっていき最初の状態にもどることが繰り返されていると考えられる^[1]。

2.2 サイドカップル空洞の設計

1号機においてのビーム振動問題はサイドカップル空洞の設計で解決した。サイドカップル空洞の構造は図2に示す。

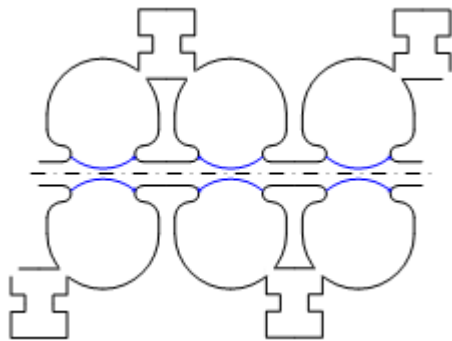


図2: サイドカップル空洞

サイドカップル空洞はシャントインピーダンスが高い、電場分布を自由に変化させるなどのメリットを持っている同時3次元構造であるため加工が難しい問題もある。

2.3 1号機と2号機の比較

表2に構造的比較を、表3に性能的比較をまとめた。

表2^[1]: 構造的比較

	1号機	2号機
加速管構造	APS cavity	Side coupled cavity
加速空洞数	21	7
総空洞数	38	13
全長[mm]	260	90

表3^[1]: 性能的比較

	1号機	2号機
加速電流[mA]	80	90
エネルギー幅[KeV]	100	60
ビームサイズ[mm]	2.0	1.3

3. 実験・分析

3.1 実験体系

図3に示したように配管サンプルをライナック X線源から1mくらい離れたところに置き、検出器を配管サンプルのすぐ後ろに配置する。X線の広がりには1mのところまで直径30センチである。配管サンプルの鉄管外面に人口欠陥が五つ作ってあり、深さは2mm、直径はそれぞれ1、3、5、7、10mmである。

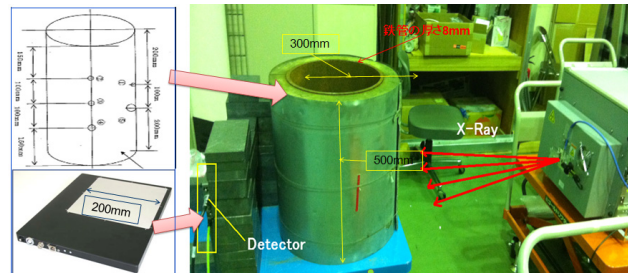


図3: 実験体系

3.2 2号器による実験

今改良型950KeV Linacは安定的に運転するようになり、各種パラメータが設計仕様に達成した。特にエネルギーについては、RF電力が設定格より高い250KWなので950KeVのX線が発生すると想定する。ただし、RF出力の繰り返すが80ppsで設計仕様の280ppsの30%しかない。100pps、120ppsまでも上げるが、長い時間の出力は保障できない状態である。そのため、強度が足りなくて今回の実験で撮った配管のX線画像では人口欠陥が見えなかった。

最初はソフトウェアで設定できる最大の積算時間は2秒で撮影を行った。300枚の画像を撮って処理した結果見えなかった。積算時間がずいぶん不足だと判断して、Detectorの外部からトリガーを送信す

る方法を採用して積算時間を 20 秒（最大値）まで上げた。この積算時間で X 線画像を 30 枚撮って画像処理したがやはり見えなかった。

改良型 950KeV Linac X 線源の透過率を調べるため以下のサンプルを作って実験を行った。

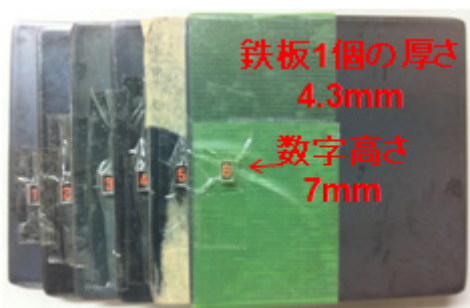


図 4: 平版サンプル

2s (Detector内部トリガーで設定した最大の積算時間)	20s (Detector外部パルス信号で設定した最大の固有積算時間)

図 5: 平版サンプル X 線画像

図 5 から X 線が 4 枚の平版サンプルを透過できるのが分かる。

実は配管の人工欠陥の位置が最初は知らなかった。人工欠陥を探すため 3.95MeV Linac（積算時間：2s）を用いて同じ実験を行った。3.95MeV Linac の線量は 950KeV に比べて 50 倍以上である。その結果は図 6 のようである。人工欠陥ははっきり見える。

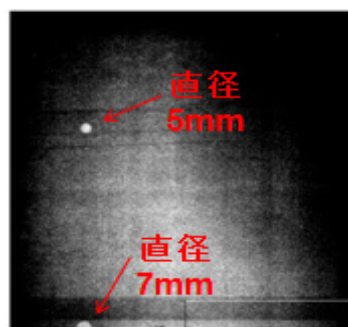
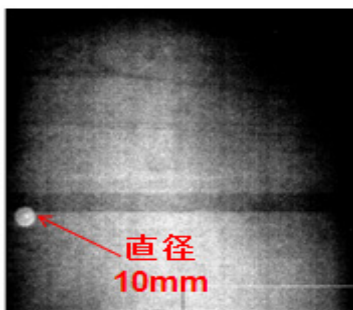


図 6: 人工欠陥

3.6 分析

950KeV の電子ビームは大体 100KeV の X 線をだす。理論的にも 100KeV X 線の 17mm 鉄の透過率はわずか 0.7% しかない。鉄板の X 線画像から見ると 4 個の鉄板（鉄板 1 個の厚さは 4.3mm X）をぎりぎり透過できるのが分かる。しかし、配管の厚さが 8mm だから少なくとも 16mm の鉄を透過しなければいけない。X バンド 950KeV Linac の X 線のエネルギーと線量が低く、しかも配管サンプルは大きいので Detector 全領域をカバーするため X 線散乱がもっと激しくて SNR が非常に低いと考える。今後フィルタとコリメータを用いて低エネルギー散乱 X 線を除去する予定である。

今回の画像処理は単純な画像合成つまり pixel のデータを合わせることに過ぎない。もちろんバックグラウンドの影響は除去したので SNR にわずかな影響しかないと想定できる。だからノイズは殆ど散乱された X 線でランダム性を持っている。20 秒の積算時間で撮った画像は 2 秒に比較してかなり向上したのが証明されたが、2 秒あるいは 20 秒の積算時間で撮った画像を簡単に合わせてもイメージの品質があまり変わらないのは、ノイズの割合がほぼ半分なのでいくら合わせてもノイズの影響は消えにくいのだと考える。今後この場合に適切な画像処理アルゴリズムを創り出すのに集中する予定である。

今回実験で用いたビームは 80pps で設計要求 280pps の 29% しかない。それゆえ、RF 出力繰り返すを上げることと全体的のエイジングで今の 5 倍の X 線強度が得られると考える。X 線強度が重要だから X 線強度を高めるのが今後の主な課題である。

参考文献

- [1] Takuya Natsui, Mitsuru Uesaka, Tomohiko Yamamoto, Fumito Sakamoto, Eiko Hashimoto, Lee Kiwoo, Naoki Nakamura, Masashi Yamamoto, Eiji Tanabe, "Development of a Portable 950 keV X-band Linac for NDT" The American Institute of Physics Conference Proceedings Series Volume1099 75-78 2009
- [2] Kiwoo Lee, Eiko Hashimoto, Tomohiko Yamamoto, Takuya Natsui, Azusa Mori, Shunsuke Hirai, Mitsuru Uesaka "Design and experiment of dual-energy X-ray material recognition using a 950 keV X-band Linac" Nuclear Instruments and Methods in Physics Volume637 S54-56 2011