

## 最新の非破壊検査に活用されるX線技術②

# X線非破壊検査のためのMIC電子加速器

(株)光子発生技術研究所 長谷川 大祐・山田 廣成・山田 貴典・林 太一

### はじめに

非破壊検査のニーズが高まり、様々な試料の超微細構造を非破壊で見たいという要求が最近のトレンドである。この様なトレンドに対して、X線発生装置に求められているのは、第1に、微小光源点の生成であるが、それはあくまでX線フラックスを損なうこと無しに微小光源点を実現することである。第2は、発生装置の小型軽量化である。小型軽量化は、現場での利用や製造ラインへ組み込むために必要である。しかし、この場合もフラックスを犠牲にしての小型軽量化は無い。そこで本稿では、(株)光子発生技術研究所(PPL)が開発したマイクロトロン(MIC)で非破壊検査を行ったその性能について紹介する。

従来、透過力が必要な厚い構造物の非破壊検査には1~10MeVライナック(LINAC)が用いられてきたが、我々が開発したマイクロトロン(MIC)は、電子エネルギーの分散が小さく、0.5mmの光源点サイズを持ち、且つ大電流を発生できるので、ライナックよりも使い勝手が良いと主張している。我々は、卓上型放射光装置の入射器としてMICを開発したのだが、その性能がライナックよりも数段優れていることが明らかに成った。0.5mm程度の解像度が要求される場合にはMICの利用を提案している。装置は、

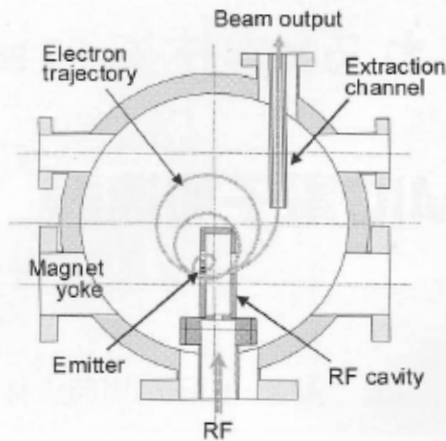
3MeV以上の場合、ライナックより小型であり、加速効率が高い分電源に対する負荷が少ないのでコストダウンが可能である。ピークで300mAという大電流を発生できるのも特長である。余談ではあるが、マイクロトロンでは、300mA出せるところから、滅菌・殺菌用に平均パワー30kWのEB装置を開発するプロジェクトも進んでいる。

### Kapitza型マイクロトロン

マイクロトロンは円形の高周波加速器である。様な磁場中で高周波加速空洞により加速し、加速するたびに電子軌道半径が大きくなる。一周期の軌道長が常にマイクロ波の波長の長さの整数倍になるように加速ゲインを決めることにより、電子が常に加速フェーズで高周波加速空洞に進入するように設計されている。一回のゲインは1MeVであり、4MeV装置ならば、4周回の後に取り出される。

当社が開発したマイクロトロン(我々はMICと呼んでいる)は、ロシアのKapitza研究所で開発されたモデルであり、当初Kapitza研究所の協力で導入された。その出力は当初100mAであったが、独自の改良を施し、現在では300mAを出すことに成功している。

MICは第1図に示すように、加速空洞の内部







第1図 加速空洞の内部にLaB<sub>6</sub>のエミッターを内蔵したKapitza型マイクロトロン (2MeVモデル)

にLaB<sub>6</sub>で出来たエミッターが内包されていて、電子ビームを1MVの高周波電圧で引き出し、500keVを加速した後2ターン目からは1MeVで加速する。外部に電子銃を持つ従来のクラシカルマイクロトロンと異なり、加速空洞内部に電子銃があることにより、共鳴条件を作りやすく、電子エネルギーも或る程度可変に出来るというKapitza型マイクロトロンの特長が現れる。最終エネルギー段では、鉄管により磁場を打ち消すことにより、ビームを取り出すという簡単な機構である。4MeV MICのヨーク外径は、

30cmである。

MICは、ライナックと比べて次のような特長を有する。一様磁場中で電子エネルギーを選別しながら加速するため、①電子エネルギーの分散が低い。そのために、②電子ビームを収束したときのビームサイズが小さく、1MeVモデルでも0.5mmを達成できる。③電子エネルギーを選別しながら加速するため加速効率が高いという特長が有る。ライナックならば電子銃+α磁石+加速管が必要であるが、これらの機構をひとまとめにしたのがマイクロトロンである。④加速管は1セルであるから製造が容易である。真空ロー付けの必要がないので製造が容易であり、周波数の調整は1セルについて行うだけである。⑤磁石は一様磁場であるからこれも製造が容易である。エミッターが加速管に内蔵されておりRF電子銃を構成しているので、⑥小型化が達成されている。第1表に当社(PPL)が開発した1~20MeVのマイクロトロンを掲載するが、1MeV装置は一辺20cm、4MeV装置は外径30cm、20MeVでも130cmという大きさである。同じマイクロトロンでも、スカンジトロニクス社製のマイクロトロンは約2倍の大きさとなる。例えば20MeV装置は、外径3mである。

第1表 光子発生技術研究所が開発した各種エネルギーKapitza型マイクロトロン

型式	MIC1	MIC1L	MIC1-EB	MIC4	MIC4L	MIC6	MIC10	MIC10-EB	MIC20
エネルギー可変幅 [MV]	0.5 - 1.5			3.0 - 4.0		5.0 - 6.0	8.0 - 10.0		12.0 - 20.0
装置イメージ 本体サイズ									
ピーク電流 [mA]	500			300		200	200	200	150
パルス幅 [ms]	2.0	5.0	5.0	2.0	5.0	2.0	2.0	5.0	1.0
繰り返し数 [pps]	1,000		5,000	500		500	500	5,000	500
平均電流 [mA]	1.0	2.5	12.5	0.3	0.75	0.2	0.2	5.0	0.075
ビーム出力 [kW]	1.0	2.5	12.5	1.2	3.0	1.2	2.0	50.0	1.5
高周波源	Magnetron 2,993MHz	Klystron 2,856MHz	Klystron 2,856MHz	Magnetron 2,993MHz	Klystron 2,856MHz	Klystron 2,856MHz	Klystron 2,856MHz	Klystron 2,856MHz	Klystron 2,856MHz

高周波ソースとしてKlystron又はMagnetronを用いる。10~50kW出力の装置はEB滅菌に使用する。非破壊検査用には1kWで十分であり、MIRRORCLEの入射器としては2kWを用いる。

マイクロトロン外部から本体へ電子ビームを入射する際、特定の共鳴条件が必要であり磁場を高くすることが出来ないために大型になる。さらには、静電型の電子銃を用いるマイクロトロンやライナックは、⑦電子銃を高圧に浮かせて使用し無ければ成らないので危険が伴うという問題があるが、我々のMICにはそれが無いため取り扱いが容易であり、かつ⑧安全である。

PPLのRF電子銃は1MVという高い加速電圧で電子を一挙に引き出すため、⑨エミッタンスが低く、且つ、⑩2Aという高いエミッションを引き出すことができる。加えるに、MICは、⑪エネルギーが可変である。通常のマイクロトロンは、共鳴条件で縛られるため、エネルギーは可変では無い。我々は、クライストロンのパワーを変え、磁場を変えることにより、約10%にわたり、エネルギーを変更することができる。これは、シンクロトロンへの入射器としては大変便利である。シンクロトロンへの入射の際に、共鳴条件を容易に探すことができる。

以上、PPLのマイクロトロンは、11項目に渡る従来の電子加速器には無い優れた特性を備えている。製造が容易であり、取り扱いも安全で容易である。ライナック加速器と比較するならば、それは革命的だと言って良いかも知れない。

## X線強度

壊検査用線源としては、DOSEモニターを用いて、吸収線量であるGy (ジュール/kg) で表すのが適当であり、他の線源と比較するのが容易である。全X線量を求めるのに校正されたイオンチェンバーを用いて測定した。低、中エネルギー用のイオンチェンバー (PTW N23342及びTN31013) を用い、さらにTN31013にビルドアップキャップを付けて高エネルギー領域を測定したのが第1表である。低エネルギー用は8~30keV領域、中エネルギー用は150keV以下、ビルドアップ付き高エネルギー用は1MeV以上のX線に対して感度が高いがそれ以外に対して全く感度が無いと言わけでは無い。検出器の断面は、2×3mm<sup>2</sup>。測定はすべて光源点から1mの位置で行っている。単位はmGyである。

第2表のMIC1は1MeVマイクロトロンを単体で用いた場合の結果であり、ターゲットに1mm厚の鉛を用いて1,400mGy/minを出している。ピーク電流値300mA、繰り返し1kHz、パルス幅2μsであるから、平均電流値が0.6mAであり、電子ビームパワーに直すと0.6kWである。市場に最も多く出回っているのはライナックであり、0.95MeV装置の出力は250mGy程度であるから、我々の装置は、十分に非破壊検査に応え

第2表

model	Dose rate [mGy/min @1m distance]			Xray target type	beam current, repetition, timing window, total charge
	Model #23342 soft xray (8 - 30 keV)	Model #31013 hard xray (< 150 keV)	Model #31013 hard xray (~1.3 MeV)		
MIC1		1380		1mm thick Pb	300mA, 1kHz, 2μs, 600μC
CV1	16800	21600	18	Cu 30μm foil	300mA, 10kHz, 200ns, 600μC
CV4	172	490	544	W 30μm ball	200mA, 5kHz, 200ns, 200μC,
6X	-	10	24	W 30μm ball	120mA, 400Hz, 200ns, 10μC
20SX	-	-	11	Be 100μm thick sheet	120mA, 500Hz, 200ns, 12μC

MIC1以外に、参考として卓上型放射光、MIRRORCLE-CV1、-CV4、6X、20SXのX線強度を校正されたイオンチェンバー (IC) を用いて計測した結果を示す。卓上型放射光であるCV1は100keV以下のX線利用に優れ、CV4は100keV以上のX線利用に適している。同じ1MeV電子エネルギーであるが、CV1のX線発生効率がMIC1よりも格段に優れている。

ることができる値である。1/5の出力でも十分と言えらる。現在、我々は、高周波ソースにクライストロンを用いているが、0.6kWというビームパワーはマグネトロンで十分に供給できるパワーであるから、非破壊検査用には、第1表に示すようにマグネトロンモデルを提案している。マグネトロンはコストも低く、効率が80%有るので電源容量も少なくて済む。装置のコストダウンは重要な課題である。

MIC1は、ピーク電流値が高いので電子ビーム(EB)照射装置にも適している。現在のパラメータで、MIC1についてビーム径を約3mmに絞り、電子ビームパワーを測定したところ25kGy/sが観測された。この値は、ビームを3mmに絞った状態で十分に滅菌が出来る値であるが、実用的には50cm幅に広げて照射をする必要があるからビーム強度を20倍ほど上げるのが良い。我々は25kWクライストロンを保有しているので、15kW程度の1MeV EB装置を提供できる。

## MIC1を用いた非破壊検査

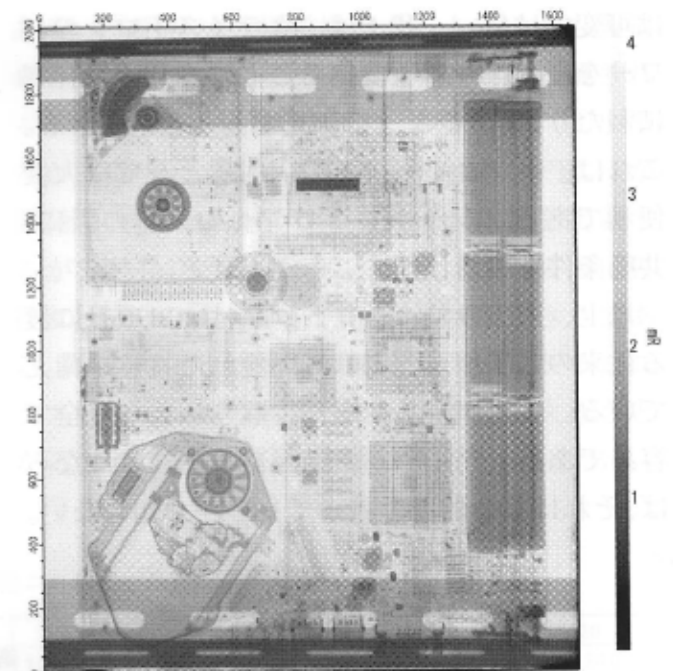
構造物の非破壊検査にはライナックがよく用いられているが、その画像解像度は数ミリであると言われている。1MeVのマイクロトロンMIC1では、現在のところ $0.65 \times 1.0 \text{mm}^2$ を出している。スリットでエネルギーの分散を抑えるならば、電流値を多少犠牲にして $0.36 \text{mm}^2$ となる。4MeVのMIC4はMIRRORCLE-CV4の入射器として用いており、単独では用いてないので計測してない、4MeV以上のマイクロトロンでは解像度0.1mmを出せると想定している。現在、6MeVのマイクロトロンを非破壊検査用に調整中で有るから、その結果をこの9月には報告することができる。

光源点の大きさを測定するのにピンホールカメラを用い、撮像装置にはイメージングプレート(IP)を用いた。そのピクセルサイズは0.1mmで

あるから、数ミリの光源点を撮像するのに問題はない。ピンホールの大きさが $\sigma_{\text{pin}} = 1.35 \text{mm}$ であったから、撮像結果の $\sigma_{\text{exp}} = 1.5 \text{mm}$ に対して、光源点サイズ $\sigma_{\text{光源}} = \sqrt{(\sigma_{\text{exp}}^2 - \sigma_{\text{pin}}^2)} = 0.65 \text{mm}$ であることがわかる。

1MeV装置で、0.65mmという解像度は、ライナックと比較して格段に優れている。

この様なMIC1を用いて、幾つかの被写体を撮像したのが、第2図である。光源点サイズがミリ単位の場合には密着で撮像する。ラップトップコンピューターの全体をフルパワーで0.6秒露光して得られた象である距離は光源点から0.5mであった。撮像素子はIPである。



第2図 MIC1で撮像したラップトップコンピュータ全体を1秒で撮像している。IPを用いた密着撮影である。

## おわりに

以上、本稿ではKapitza型マイクロトロンを非破壊検査で利用する場合の特長について述べた。

従来のマイクロトロンは、かなり大型であったために非破壊検査に用いられた実績が無く、

市場に広く出回ることも無かったので、マイクロトロンの評価は芳しい物ではなく、その様な既成概念が作り上げられた。従って、ライナックが圧倒的なシェアを世界で獲得する結果となった。しかし、Kapitza型のマイクロトロンを開発した結果、その大きさを従来の半分にする事ができ、電流値を300mAまで引き上げることに成功したので、従来の既成概念は一変されたであろう。MICは今後非破壊検査のみならず放射線治療、さらにはEB滅菌の分野で利用して十分な競争力をもつ装置になったと確信する。実際、PPLが製造販売するMICシリーズは、1~20MeVをカバーし、その大きさは、1MeVで25cm、4MeVで35cm、10MeVで60cmという小型である。電流値は、MIC1で400mA、MIC4で300mA、MIC10で150mAを提供できる。EB滅菌あるいは放射線治療用の大パワーMICを現在NEDOの補助金で開発中であるが、1~10MeVの電子エネルギーで、平均15kW出力を目指している。

MICはビーム特性も非常に良い。エネルギーの分散が5%とライナックの半分であり、ビーム収束させた場合のスポットサイズも約半分の0.6mmが実現している。非破壊検査装置の性能として、高解像度の画像を得るには光源点の大きさが最も重要なファクターであり、1MeVで0.6mmが得られたのは画期的なことである。

今日まで、電子加速器と言えばライナックで有ったが、20MeVまでならば、Kapitza型マイクロトロンの性能が2.856MHzライナックをビーム特性、大きさ、パワーと加速効率の点で凌駕することが明らかになった。その上、製造は

容易である。1セルの加速空洞と永久磁石でできており、ライナックの様に多数のセルの周波数を調整し、真空炉の中でロウ付けする高度な技術も必要としない。今後は、MICを大量生産するための量産技術の確立へ進む考えである。

#### <参考文献>

(1) 光子発生技術研究所WEB:

<http://www.photon-production.co.jp/j/application/nondestructive.htm>

#### 【筆者紹介】

長谷川 大祐

(株)光子発生技術研究所

〒525-0058 滋賀県草津市野路東7-3-46

滋賀県立テクノファクトリー7号棟

TEL: 077-566-6362 FAX: 077-566-6368

山田 廣成

(株)光子発生技術研究所 代表取締役

立命館大学 教授

〒525-0058 滋賀県草津市野路東7-3-46

滋賀県立テクノファクトリー7号棟

TEL: 077-566-6362 FAX: 077-566-6368

山田 貴典

(株)光子発生技術研究所

〒525-0058 滋賀県草津市野路東7-3-46

滋賀県立テクノファクトリー7号棟

TEL: 077-566-6362 FAX: 077-566-6368

林 太一

(株)光子発生技術研究所

〒525-0058 滋賀県草津市野路東7-3-46

滋賀県立テクノファクトリー7号棟

TEL: 077-566-6362 FAX: 077-566-6368

### ● 優良技術図書案内

#### ● Exaflops 米国ハイテク戦略の全貌

畑次郎著 A5判 176頁 定価: 1,890円 (本体: 1,800円)

お問合せは日本工業出版(株)販売課まで 販売直通 03 (3944) 8001 FAX 03 (3944) 0389