

## 小型・高輝度マイクロトロン産業利用

### INDUSTRIAL USE OF SMALL AND BRILLIANT MICROTRON

長谷川大祐<sup>A)</sup>, 山田貴典<sup>A)</sup>, 前尾修司<sup>A)</sup>, 林太一<sup>A)</sup>, 齋藤省吾<sup>A)</sup>, 山田廣成<sup>A,B)</sup>

Daisuke Hasegawa<sup>#,A)</sup>, Takanori Yamada<sup>A)</sup>, Shuji Maeo<sup>A)</sup>, Taichi Hayashi<sup>A)</sup>, Shogo Saitou<sup>A)</sup>, Hironari Yamada<sup>A,B)</sup>

<sup>A)</sup> Photon Production Lab., Ltd.

<sup>B)</sup> Ritsumeikan University

#### Abstract

Performance of our compact and brilliant microtron in the industrial use is described. Our microtron lineup covers from 1 up to 20 MeV. An energy distribution less than 2 %, and the peak beam current over 300 mA are achieved. In the non-destructive testing (NDT) of the concrete using 1-MeV microtron, cracks and an internal structure is clearly observed in only 5 minutes through 60 cm thick concrete. It was shown that NDT of the concrete bridge beams built over the field by mobile use of 1-MeV microtron is possible. The CT imaging of whole mobile engine is obtained in only 5 minutes. It is useful for an inspection of defects and a reverse engineering. Since the focal spot size is a sub-millimeter, a magnified corn beam CT is possible.

#### 1. はじめに

マイクロトロン電子加速器は(株)光子発生技術研究所が日本では唯一製造・販売している。卓上型放射光発生装置 MIRRORLCE<sup>[1]</sup>の入射器として開発したが、LINAC と比較して遙かに優位な性能を示したので現在は MIC という名称で単独で利用される機会も多い<sup>[2]</sup>。エネルギー分散が約 2% (LINAC: 5%) と低いこと、加速効率が高いので大電流の発生が容易なことを特長としている。4 MeV 装置では 300 mA を達成している<sup>[3,4]</sup>。結果として電子ビームを収束させて作る X 線光源点の大きさは、0.5~0.7 mm φ を達成している。この値は LINAC の半分である。

1MeV 装置を用いた場合、LINAC では 60 cm コンクリートの検査が出来ないようであるが、MIC では鮮明な透過写真を約 5 分で撮影する。LINAC の場合平均の X 線エネルギーが 700 keV 程度であるが、MIC の場合は平均値が 1 MeV であるのがその理由である。

本稿ではこの 1 MeV マイクロトロン MIC1 を用いた橋梁検査及び X 線 CT を紹介する。現在光子研では 1 MeV の MIRRORCLE-CV1 と 6 MeV の MIC6 を稼働して非破壊検査、X 線 CT、残留応力測定の実験分析を行っている。様々な業種の企業や研究機関から X 線 CT の検査依頼がある。MIC1 を屋外へ持ち出して 60 cm コンクリートサンプルを検査した結果を述べる。最近では滅菌・殺菌問い合わせも増えている。

#### 2. Kapitzka 型マイクロトロン<sup>[5]</sup>の特長

我々のマイクロトロンのラインナップには 1~20 MeV がある。Figure 1 に示す様に、マイクロトロンは電子を一定磁場中で周回しながら高周波空洞を通過する毎に加速する。所定のエネルギーに到達した

電子は、ビーム取り出し管から磁石外部へ引き出される。そのため、取り出される電子のエネルギーは空洞と取り出し管の位置及び磁場強度で決まる。また同様に、取り出し管のアーチサイズと磁場強度の比でエネルギー広がりが決まる。4 MeV 以上の装置ではエネルギー広がりが 2% 以下になるよう設定され、Figure 2 (a) に示す様に、それ以外の電子が全く取り出されない構造になっている。一方、直線に加速する LINAC では、Figure 2 (b) に示す様に、低エネルギー成分が必ず含まれる。そのため、実効的なエネルギーは低くなる。

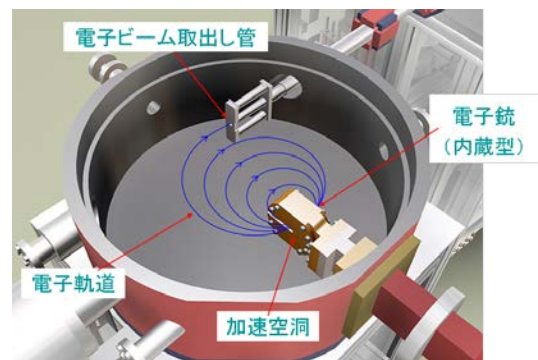


Figure 1: The illustration inside microtron with the accelerating cavity built in the electron gun.

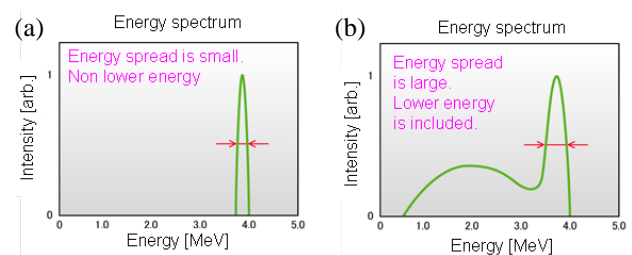


Figure 2: Comparison of an energy spread of a microtron (a) and a linac (b).

# daisuke@photon-production.co.jp

電子銃は、先に述べたように加速空洞に内蔵されているので、RF 電子銃の構造をしている。そのため高圧部が不要であり、小型化と同時に高輝度を実現している。高輝度である理由を以下に述べる。空洞に内蔵された電子銃から出るビームのエミッタンスは

$$\varepsilon_{n, RMS} = r/2(kT/mc^2)^{1/2}$$

から求められる。電子銃は、直径が 3 mm で長さ 5 mm の単結晶 LaB<sub>6</sub> を約 1,800 K に加熱して使用するので、 $\varepsilon_{n, RMS} = 0.41 \text{ } \mu\text{m}\cdot\text{mrad}$  と求まる。

一方、熱電子の放出電流密度は Richardson-Dushman の式

$$j_{th} = AT^2 \exp(-\phi/kT)$$

から、 $\phi = 2.6 \text{ eV}$  として  $j_{th} = 15.3 \text{ A/cm}^2$  が得られる。この値を空間電荷制限電流 (Child-Langmuir) の式

$$j_{sc} = 2.33E-6(V^{3/2}/d^2)$$

に代入して求めると、加速ギャップ長 2.5 cm の場合には  $V = 120 \text{ kV}$  と求まる。実際の運転では加速電圧  $V$  を 1 MV に設定しているので、その場合  $j_{sc} = 373 \text{ A/cm}^2$  となる。そのため空間電荷の影響を受けず電子の引き出しが可能で、高い引き出し電流と低エミッタンスを達成していることが分かる。

上で述べた様に電子銃を加速空洞に内蔵したマイクロトロンでは高いビーム電流の引き出しが可能で、4 MeV の装置では電子銃の引き出し電流が 1 A、ビーム電流は 300 mA と加速効率 30% を達成している。エミッタンスは、水平方向が  $60 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  で、縦方向が  $15 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  となっている。水平方向のエミッタンスが大きいのが、エネルギー分散が 2% と小さいため X 線焦点サイズはターゲット上で  $0.5 \sim 0.7 \text{ mm}$  とサブミリに収束可能である。

みらくるの様に  $10 \text{ } \mu\text{m}$  の焦点サイズではないものの、マイクロトロンでは 1 MeV 以上の高エネルギー X 線でサブミリの解像度を達成している。そこで、光子研ではサブミリの解像度で十分な産業向け非破壊検査装置として、1. 重構造物の非破壊検査装置、2. エンジン等の CT 検査装置、3. 実橋検査に向けた 1 MeV 装置の屋外での使用、の開発に取り組んでいる。

### 3. マイクロトロンの産業利用

#### 3.1 単純撮影による非破壊検査

高エネルギーかつサブミリの解像度を有するマイクロトロンの特性を活かし、コンクリート構造物の非破壊検査や厚さ数十センチにもなる鋼鉄製構造物の検査を想定した鋼ブロックの透過試験をおこなった。

コンクリート検査では、劣化した橋や被災した建物の診断に需要があり、Figure 3 (a)に示す 1 MeV 未

満のマイクロトロン (MIC1: 加速電圧 950 keV 以下) の利用を提案している。現行の MIC1 は高周波源にクライストロンを用いているが、可搬式の場合にはより小型で軽量なマグネトロンとモジュレータを用い簡素化される。Figure 3 (b)に MIC1 による 60 cm コンクリートの非破壊検査結果を示す。X 線源側にヒビの入った厚さ 20 cm のコンクリートを置き、さらに 40 cm のコンクリートを通してヒビの状態が明瞭に検出され、MIC1 がコンクリートの劣化診断に有効な光源であることが示された。

鋼鉄製構造物の非破壊検査は、原子炉などの特殊な構造物の検査である。透過能の評価のため、鋼ブロックの X 線源側に透過度計を取り付け、X 線源には 6 MeV のマイクロトロンを用いた。鋼ブロックの厚さ 40 cm での透過試験結果を Figure 4 に示す。厚さ 40 cm の鋼ブロックを通して No.8 の透過度計が検出されている。

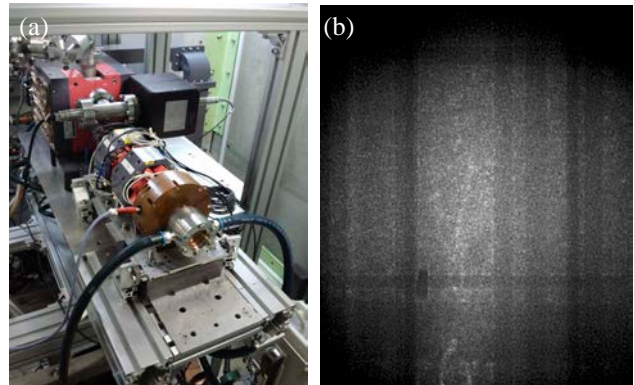


Figure 3: Our 1-MeV microtron model MIC1 (a) and the X ray imaging result for 60 cm concrete with crack (b).

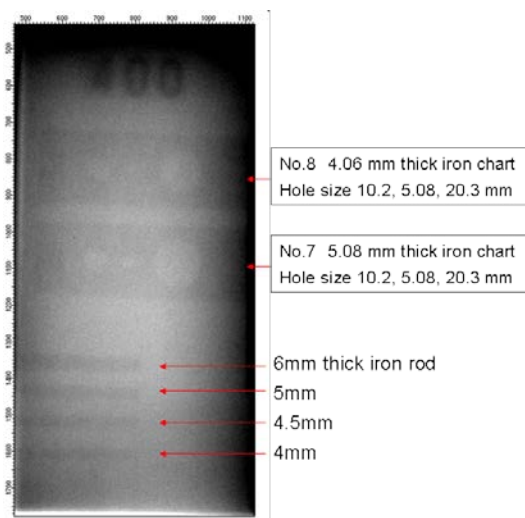


Figure 4: The X ray imaging result for the permeation rate test through a 40-cm-thick steel block.

#### 3.2 CT 検査

産業界で最もニーズが高いのは CT 検査によるリバースエンジニアリングである。市場にはマイクロフォーカス X 線管・600 kV の X 線管・LINAC を

使った CT 装置がある。我々の CT システムの特長は、X 線管では透過できない重構造物の CT 検査をサブミリの解像度で可能にしていることである。X 線管や LINAC の焦点サイズは数ミリで解像度が低い。また直線に加速する LINAC ではエネルギー分散が大きいため実効エネルギーは低い。マイクロフォーカス X 線管は高解像度だが、エネルギーが低く透過力に欠ける。以上の様な理由から、マイクロトロンを用いた CT システムは優位性がある。

マイクロトロンとパーキンエルマのフラットパネルを用いた我々の CT 検査システムを Figure 5 に示す。CT の回転ステージは重量 100 kg に対応し、フラットパネルの視野は 40 cm 角である。

自動車会社からの依頼で、アルミダイキャスト製のエンジンや鋼鉄製のピストンヘッドといった部品の巢の検査をおこなった。X 線スポットサイズが 1 mm 以下なのでコーンビーム CT での撮影が可能となっている。エンジンであっても CT 撮影するのに要する時間は 5 分である。撮影した CT 像から 3D の立体構造を CAD 化できるのでリバースエンジニアリングに役立っている。Figure 6 にトランスの CT 像を示す。内外の巻線がそれぞれ明瞭に識別できるだけでなく、巻損じの箇所も検査できるので、ハイブリッド車等に使われるモータコイルの検査にも最適な光源である。



Figure 5: CT system image consists of 100 kg rotation stage and Perkin Elma flat panel with 40 cm square view.



Figure 6: CT images and 3D model of the transformer.

コンクリート構造物の CT 検査では、独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ<sup>10)</sup>の依頼で、40cm に切り出した橋梁サンプルの CT 撮影をおこなった。CT 撮影の結果を Figure 7 に示す。コンクリート内部のクラックの形状や、シース管内部の鋼線が一本一本見え、グラウトの充填具合が明瞭に見えている。CT 撮影により、側面からの単純撮影では得られない橋梁内部の状態が把握できるので、橋梁の劣化診断法として期待される。

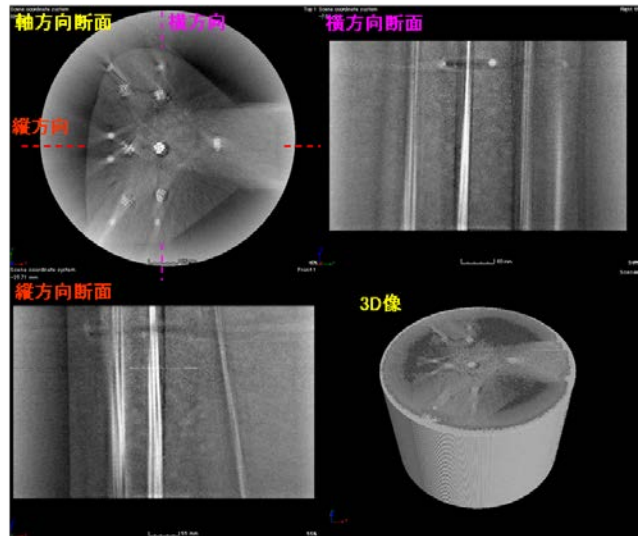


Figure 7: CT images of a concrete bridge beam sample.

### 3.3 1 MeV マイクロトロンの屋外使用

1MeV 未満の電子加速器は戸外に自由持ち出す許可が与えられている。そこで、橋梁やコンクリート構造物の劣化診断に可搬型の MIC1 の利用を提案している。実際に戸外へ持ち出し 60 cm 厚コンクリートの非破壊検査デモンストレーションをおこなった。高周波電子加速器を戸外に持ち出して検査したのは、光子研が初めてであると言って良い。実橋の検査では橋梁部の検査が主で、60 cm 厚のコンクリート内部にあるシース管の状態を把握できることが求められる。

Figure 9 に戸外で行った 60 cm 厚コンクリートの非破壊検査デモンストレーション時の写真を示す。デモンストレーションでは、MIC1 本体と各電源やチャージャーといった付帯設備一式をトラックで移動した。フィールドでの使用を想定しているため、MIC1 の運転に必要な電力はディーゼル発電機から供給し、撮影にはイメージングプレートを使用した。Figure 10 に示すように、60 cm 厚の橋梁を模したコンクリートサンプルをわずか 5 分で明瞭に検査できることを実証した。

現在、MIC1 を用いた床版検査装置を独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の平成 24 年度研究開発費補助金 (ベンチャー企業への実用化助成事業) により進めている。



Figure 9: The photograph of the non-destructive testing for a 60-cm thickness concrete demonstrated in an open field.

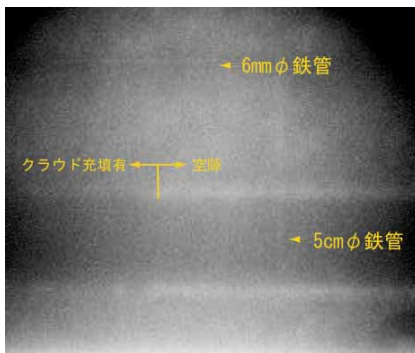


Figure 10: The X-ray image of the sheath pipe inside 60-cm thickness concrete is clearly photoed in only 5 minutes.

#### 4. まとめ

以上に述べた結果は、我々が独自に開発してきた小型で高輝度の電子加速器マイクロトロンが産業の様々な分野からの要望を満たすのに十分な性能を有していることを示している。今後は、高周波源をクライストロンからマグネトロンに置き換えることで可搬性を高めた製品の開発も行っていく。また、海外の企業からは、非破壊検査の問い合わせだけでなく、EB 照射設備の問い合わせも引き続き来ている。装置が小型であることからインラインでの滅菌・殺菌が低コストで実現でき、企業に需要がある。今後も「みらくる」の入射器としての利用に限らず、サブミリの解像度が要求される重構造物の X 線非破壊検査や、インラインでの滅菌・殺菌向け EB 照射装置、小型で高輝度の電子銃としての利用と他分野への更なる展開に期待している。

最後に、高度経済成長期に建設されたトンネルの内壁や橋梁の健全性が問われている中、昨年末に笹子トンネルの天井崩落事故が起きた。要因には、簡便で信頼性の高い検査装置が無かったことや、検査を省いていた業界の悪い体質がある。ライフラインである橋梁やトンネルの健全性の検査は、国民の安全を守るために極めて重要な仕事である。また、工業製品の試作サンプルを短時間で明瞭に CT 検査できるのであれば、ユーザの安全安心を得る商品の開

発期間が短縮されることになる。そこには高性能で簡便な装置が求められるが、我々のマイクロトロンはそのニーズに応えられる装置と確信している。

#### 参考文献

- [1] H. Yamada, "Tabletop Synchrotron Light Sources and Advanced Applications", ed. By H. Yamada, AIP Conference Proceedings
- [2] H. Yamada, et al., "X 線橋梁検査のための MIC 電子加速器", 検査技術, No. 1, Vol. 18, 2013
- [3] D. Hasegawa, et al., "Portable Microtron Achieved 300mA Beam Current", Proceedings of the 8th Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011
- [4] <http://www.photon-production.co.jp/index.htm>
- [5] S. Kapitza, et al., "The Microtron: Development and Applications", The Physics and Technology of Particle and Photon Beams, Vol. 10.
- [6] <http://www.pwri.go.jp/caesar/public/media.html>