

# RACETRACK MICROTRON FOR NUCLEAR MATERIAL DETECTION SYSTEM

Toshitada Hori<sup>#, A)</sup>, Ryota Kinjyo<sup>A)</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>A)</sup>, Toshiteru Kii<sup>A)</sup>, Mohamed Omer<sup>A)</sup>, Hideyuki Kotaki<sup>B)</sup>, Masaki Kando<sup>B)</sup>, Izuru Daito<sup>B)</sup>, Ryoichi Hajima<sup>B)</sup>, Takehito Hayakawa<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Gokanosyo, Uji, Kyoto, 611-0011

<sup>B)</sup> Japan Atomic Energy Agency

8-1-7 Umemidai, Kizugawa, Kyoto, 619-0215

## Abstract

A nuclear material detection system based on neutron /  $\gamma$ -ray hybrid approach has been proposed for the container inspection at the sea port. While the neutron will be used for a fast pre-screening, the quasi-monochromatic  $\gamma$ -ray beam from the laser Compton Backscattering source will be used for an isotope identification on the precise inspection. Nuclear resonance fluorescence method will be employed for the isotope identification because of its superiority in high selectivity and in high penetration capability through the shielding objects. In the system we need an electron beam of good quality for the laser Compton Backscattering. A racetrack microtron is one of the most promising candidates for such the electron source.

## 核物質非破壊検知用マイクロトロン

### 1. はじめに

平成 22 年度より、安全・安心な社会のための犯罪・テロ対策技術等を実用化するプログラムの一環として「ガンマ線による核物質非破壊検知システム」<sup>[1]</sup>が 5 年計画でスタートした。これは、コンテナ中の核物質の有無を密閉したまま検知しようとするものであり、その測定手法に「逆コンプトンガンマ線核共鳴光散乱」を利用しようとする新しい試みである。図 1 はその全体システム<sup>[2]</sup>を示しており、およそのサイズが 4x3 m<sup>2</sup> 程度の電子加速器マイクロトロンと高出力レーザー、および放射線検出系から構成される。ここでは触れないが本システムのもうひとつ重要かつ特徴的な部分、すなわち中性子による前段スクリーニングの装置も図には示されている。本手法は、遮蔽が容易で放射能汚染が非常に少ないクリーンなシステムを構築できるという点で従来の方式（注：トリチウムを使用したり制動放射ガンマ線を使う方式が知られている）に優り、また高い S/N 比で物質の識別が可能となる。

ウランに代表される核物質の検知には 2 MeV 級のガンマ線を照射する必要がある。レーザーと相対論的電子ビームの散乱によって生成される単色度の高い逆コンプトンガンマ線を利用する場合、そのために必要な電子ビームのエネルギーは 220 MeV 程度と見積られる。システムの実用化には高輝度かつ小型の逆コンプトン散乱ガンマ線発生装置の開発が不可欠であり、就中、電子源を如何に小型・高効率化できるかが問われる。有力な候補に挙げられるのが小型で知られる電子加速器マイクロトロンである。

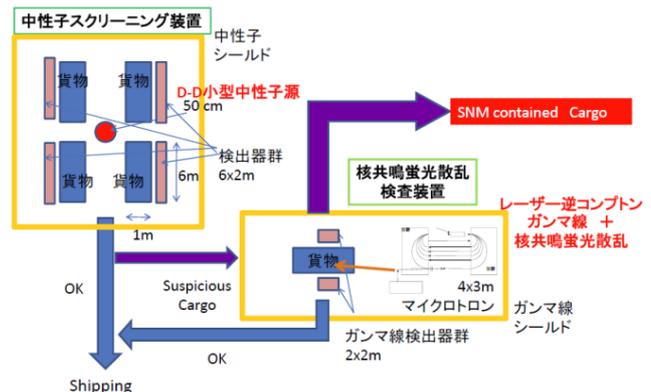


図 1：検知システムの全体図<sup>[2]</sup>

### 2. 電子加速器マイクロトロン

正式名称はレーストラック型マイクロトロン（軌道の形状に由来する）である。一般に 1m 未満の比較的短い加速管で電子ビームを繰り返し加速するため、リアックに比べ小型にできる。加速管が短いので励振電力が少なくすむという利点がある反面、大電流を加速しようとした場合にビームローディングが問題となってくる。最大の特徴は、何度も周回する間に両側の 180 度偏向電磁石がエネルギーアナライザとして機能し、自動的にエネルギー幅の狭い良質ビーム ( $\Delta E/E \sim 10^{-3}$ ) が得られることである。

原研関西光科学研究所に設置されているマイクロトロンのレイアウトを図 2<sup>[3]</sup>に、その全景を図 3 に示す。ほぼ同じ仕様で製造されたマイクロトロンは他にも 3 台国内に存在するが、本装置はフォトカ

<sup>#</sup> toshihori@iae.kyoto-u.ac.jp

ソード RF ガンを装備した唯一のマイクロトロンである。

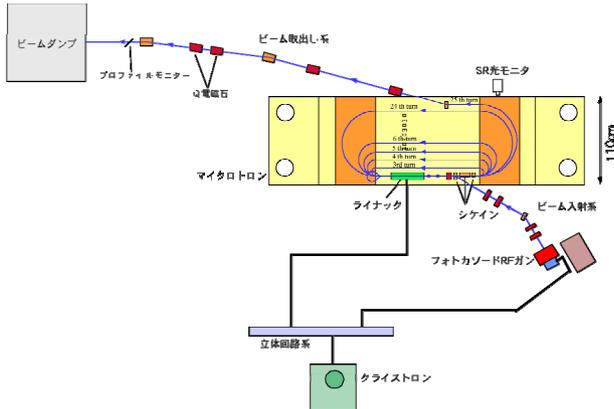


図 2：フォトカソードマイクロトロン<sup>[3]</sup>のレイアウト @ 原研関西光科学研究所

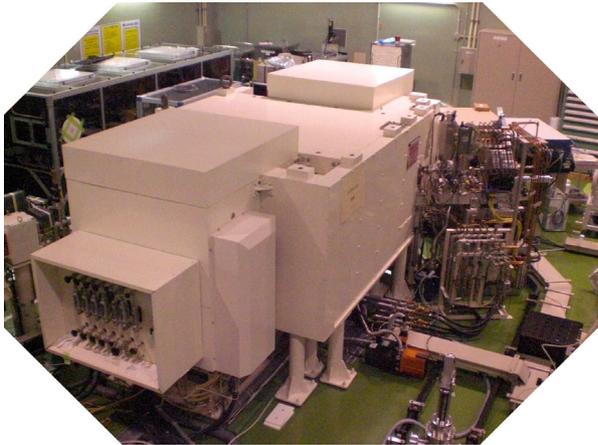


図 3：フォトカソードマイクロトロンの全景

この装置を用いた検知システムの実証試験がこれから実施されることになっている。このマイクロトロンの仕様は一周当りの加速エネルギーが 6 MeV、25 回の周回で、エネルギー 150 MeV の電子ビームが引き出される。実用化に必要な電子エネルギー 220 MeV のマイクロトロンを新しく設計する際のベースとなる装置である。

### 3. 新マイクロトロンの基本概念

核物質の非破壊検知にはエネルギー 220 MeV の電子ビームが必要である。従って、新しいマイクロトロンは電子を 220 MeV 以上にまで加速する能力を有し、かつ、レーザーとの衝突を考え極小スポットにビームを絞り込めるものでなければならない。換言すれば、エミタンスの小さい高品質の電子ビームが求められている。レーザーとの衝突点に空間的にも時間的にも電子を集中させることを考えると、フォトカソード RF ガンとの組み合わせが最適である。

マイクロトロンの基本パラメータを決める際に先ず考慮すべきことは、周回ビームの同期条件を維持するための(1)式<sup>[4]</sup>を満たす組合せを選択することである。

$$\Delta E(\text{MeV}) = \frac{v \cdot \lambda(\text{cm})}{2.096} B(\text{T}) \quad (1)$$

ここで、 $\Delta E$ ：周回当りのエネルギー利得、 $B$ ：偏向磁石の磁場強度、 $\lambda$ ：加速高周波の波長、 $v$ ：(周回当り軌道長の増分) /  $\lambda$ 。  $v$  はマイクロトロンに特有のパラメータで、次のターンが前のそれに比べてどれだけ周回軌道が長くなったかを波長  $\lambda$  で規格化した値であり、必ず整数にしなければならない。

実用化の観点から、他のマイクロトロンと同様に S バンドの代表的な周波数  $f=2856$  MHz を加速高周波に選び、 $\Delta E$  と  $B$  の合理的な組合せの例を以下に示す。

表 1：新マイクロトロンの基本仕様

引出エネルギー	220	MeV
パルス幅	20/10	psec
繰返し	100	Hz
電荷量	0.5	pC/bunch
指標 $v$ (整数)	1/2	
$\Delta E$	7.5/12	
$B$	1.5/1.2	
$\lambda$ (f)	10.5 (2856) cm (MHz)	
周回数	30/19	ターン
電子源	レーザーフォトカソード RF ガン	
エネルギー	~4	MeV
規格化エミタンス	1 ~ 10 $\pi$	mm-mrad

上表で指標  $v$  として 1 と 2 の場合をそれぞれ示したが、熱電子銃から電子ビームを入射する通常のマイクロトロンでは  $v=1$  に限定されており、 $v \geq 2$  のケースはまず見かけない。理由は、次の(2)式<sup>[4]</sup>で表されるマイクロトロンで加速可能な安定位相領域  $\phi_s$  がほぼ半減するデメリットが大きいためである。

$$0 < \tan \phi_s < \frac{2}{\pi v} \quad (2)$$

S バンドの加速周波数の場合、 $v=1$  のときの安定位相領域は時間幅にして 30 psec 程度である。熱電子銃のように  $\mu\text{sec}$  オーダーのマクロパルスビームをマイクロトロンで加速する場合は、 $v=1$  として加速電流が増える条件を優先するのが自然である。しかしながら、今回は電子源がフォトカソード RF ガンであり、そのマイクロパルス幅を考慮すると  $v=2$ 、すなわち 15 psec 程度の安定位相領域でも十分という考えも成り立つ。

それに関連して考慮すべき点は、フォトカソード RF ガンを使う場合、単発のマイクロ単バンチを加速していることである。熱電子銃のときは、マイクロパ

ルスが数千～数万個連なったパルス列を数 $\mu\text{sec}$  幅のマクロパルスとして加速するため、加速電場は定常状態になっていると考えてよい。しかしながら、マイクロ単バンチを加速する場合、電子がマイクロトロンを周回する概略の所要時間  $0.5 \mu\text{sec}$  が加速管の時定数 $\tau=0.56\mu\text{sec}$ <sup>[4]</sup>とほぼ等しいため、加速管内の電場を定常状態と見なすことができない。つまり、過渡状態の電磁場で加速されており、このとき電子は加速管内に蓄えられた stored energy を消費することでエネルギーを得ている。この場合、高周波電源からの電力供給はあまり期待できない。

以上のことから、加速管内の stored energy が大きいほど単バンチ加速に有利であろうと容易に想像できる。安定加速領域の広さでは明白に劣るものの stored energy の大きさは周回当りの加速エネルギー  $\Delta E$  で決まるので、一般に $v=2$  のケースが有利である。いずれにせよ、加速可能な最大電荷量などの具体量は、これから実施されるシミュレーションの結果を解析した上で確定するパラメータである。なお、上述の原研関西光科学研究所のフォトカソードマイクロトロンも指標は $v=1$  である。

#### 4. これから

今秋から原研関西光科学研究所に設置されている 150 MeV マイクロトロンを使った実証試験が開始される予定である。この試験で目標とするガンマ線の生成量は  $3 \times 10^5$  photons/sec であり、非破壊で透過による模擬コンテナ内部の物質同定試験までを実施する。また、同じマイクロトロンの方式を踏襲しつつエネルギーを 220 MeV にまで増強した新しいマイクロトロンの設計も同時に行う。目指すゴールは、実用化に必要な $\sim 10^8$  photons /sec のガンマ線の発生を可能とする全体システム概念を確立することである。

#### 参考文献

- [1] H. Ohgaki, et al., “Conceptual design of a Nuclear Material Detection System Based on the Neutron / Gamma-ray Hybrid Approach”, Proc. 2010 IEEE Int'l Conf. on Technologies for Homeland Security (HST), Waltham, MA, USA, Nov. 8-10, 2010, pp.525-529
- [2] 大垣英明他「中性子/ $\gamma$ 線複合型核検知システム開発の現状Ⅱ」日本原子力学会 2011 年秋の大会(9/19-21)、北九州国際会議場
- [3] 神門正城他「原研フォトカソードマイクロトロンの現状」Proc. 26<sup>th</sup> Linear Accel. Mtg. in Japan, pp.132-134 (2001)
- [4] 堀利匡「小型放射光源用入射器マイクロトロンの開発」総研大 2002 年 3 月 (学位論文)