

## 60 MeV 電子ライナックを用いた光核反応による RI 製造のための 照射 $\gamma$ 線のプロファイル測定

### PROFILE MEASUREMENTS OF GAMMA-RAY FOR RADIOACTIVE ISOTOPE PRODUCTION VIA PHOTONUCLEAR REACTION USING A 60 MEV ELECTRON LINAC

高橋 健<sup>#, A)</sup>, 柏木 茂<sup>A)</sup>, 日出 富士雄<sup>A)</sup>, 武藤 俊哉<sup>A)</sup>, 南部 健一<sup>A)</sup>, 長澤 育郎<sup>A)</sup>, 東谷 千比呂<sup>A)</sup>,  
小林 恵理子<sup>A)</sup>, 濱 広幸<sup>A)</sup>

Ken Takahashi<sup>#, A)</sup>, Shigeru Kashiwagi<sup>A)</sup>, Fujio Hinode<sup>A)</sup>, Toshiya Muto<sup>A)</sup>, Kenichi Nanbu<sup>A)</sup>,  
Ikuro Nagasawa<sup>A)</sup>, Chihiro Tokoku<sup>A)</sup>, Eriko Kobayashi<sup>A)</sup>, and Hiroyuki Hama<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

#### Abstract

Radioactive isotopes have been produced via photonic nuclear reaction using a 60 MeV high-power electron linac for research fields of nuclear chemistry and radioactive analysis at Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University. For a photonic nuclear reaction, Bremsstrahlung gamma ray is created by electron beam irradiating a 2 mm thickness platinum or tungsten target. The electron beam with the beam energy of 60 MeV and the average current more than 100  $\mu$ A is extracted from the vacuum through a Titanium thin foil. It is crucial to understand the beam property such as beam emittance and Twiss parameters at the electron - gamma ray converter to optimize a gamma ray profile to satisfy user experimental requirement. The emittance measurement employing a quadrupole scanning method and the gamma ray profile measurements using imaging plates have been studied. The current status of these measurements is reported.

#### 1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターでは大強度電子ライナックを用いて光核反応による RI 製造を行っている。最大 60 MeV まで加速した平均電流 100  $\mu$ A 以上の電子ビームを薄い Ti 箔に通して大気へ取り出す。ビーム軌道上に白金やタングステン板等の $\gamma$ 線生成用コンバータを挿入し、生成された制動放射 $\gamma$ 線と試料の光核反応で放射性同位体を製造する。試料とコンバータの距離の最適化や様々なサイズの試料への照射に対応していくためには、照射位置での $\gamma$ 線プロファイルを目的の光核反応同位体製造に最適化

する必要がある。加速器の運転パラメータや電子ビームプロファイルを把握することが重要である。今回、Q-Scan 法を用いた電子ビームのエミッタンス測定と、Ni 箔への $\gamma$ 線照射により生成した  $^{57}\text{Ni}$  の放射能強度分布測定から $\gamma$ 線プロファイルの測定を行った。

#### 2. 60 MeV 大強度電子ライナック

80 kV 電子銃の高圧パルスユニットでカソードから 300 pps で引き出した電子ビームをプリバンチャー、バンチャーで集群する。S-band 25 MW クライストロン 2 台と 1 m 加速管 8 本で 60 MeV まで加速して、ビーム偏向部で 90°進行方向を曲げて照射室へビームを輸送する(Figure 1)。利用運転時のエネルギーは最大 60 MeV でピーク電流 100 mA パルス幅 4  $\mu$ s となっている[1]。

#### 3. エミッタンス計測

##### 3.1 Q-scan 法

ビームエミッタンス測定には、四極電磁石でのビームの輸送において、測定点での RMS ビームサイズが四極電磁石の収束力  $k$  に依存することを利用した Q-scan 法を用いた[2, 3, 4]。

今、初期のビームエミッタンスと Twiss parameter を  $\epsilon, \beta_0, \alpha_0, \eta_0$ 、自由空間の転送行列を  $S$ 、収束力  $k$  の四極電磁石の転送行列を  $Q(k)$  とすると、全体の転送行列  $T$  は  $T(k) = SQ(k)$  と表せる。

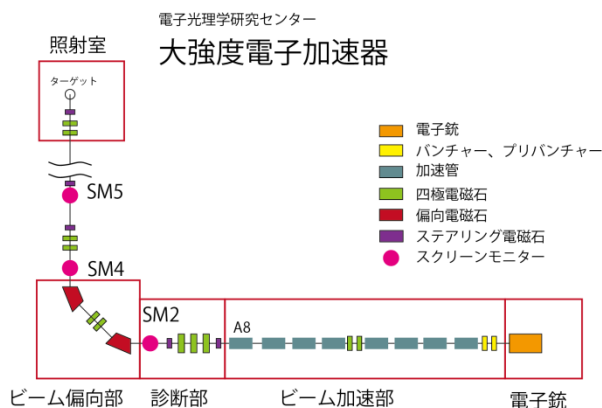


Figure 1: 60 MeV electron linac.

<sup>#</sup> ken\_takahashi@lns.tohoku.ac.jp

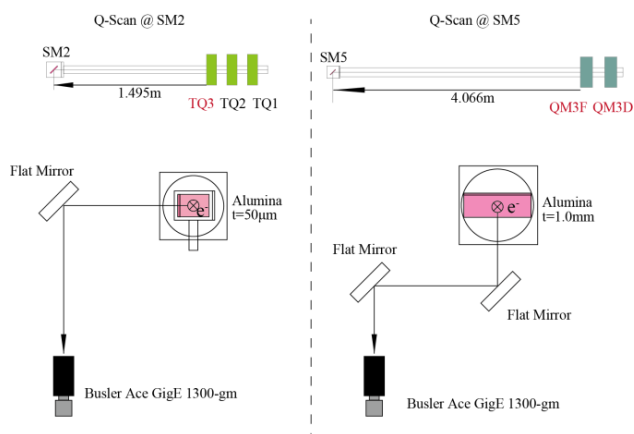


Figure 2: Experimental apparatus of Q-Scan @ SM2 (left) Q-Scan @ SM5 (right).

測定点までの Twiss parameter の転送行列は

$$\begin{bmatrix} \beta \\ \alpha \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11}^2 & -2T_{11}T_{12} & T_{22}^2 \\ -T_{11}T_{21} & T_{11}T_{22} + T_{12}T_{21} & -T_{12}T_{22} \\ T_{21}^2 & -2T_{21}T_{22} & T_{22}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \alpha_0 \\ \gamma_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

で表せ、測定点でのビームサイズ $\sigma$ は

$$\sigma = \sqrt{\epsilon\beta} = \sqrt{\epsilon(\beta_0 T_{11}^2(k) - 2\alpha_0 T_{11}(k)T_{12}(k) + \gamma_0 T_{12}^2(k))} \quad (2)$$

と表される。今、測定点までの距離は決まってい  
て電磁石の収束力  $k$  は設定可能である。ここである  $k_i$   
の時に測定されたビームサイズを $\sigma_i$ とすると

$$\chi^2 = \sum_i (\sigma_i - \sqrt{\epsilon(\beta_0 T_{11}^2(k_i) - 2\alpha_0 T_{11}(k_i)T_{12}(k_i) + \gamma_0 T_{12}^2(k_i))})^2 \quad (3)$$

を最小にする $\beta_0, \alpha_0, \gamma_0$ を求めることでビームエミ  
ッタンス $\epsilon$ を決定する。

### 3.2 加速管 A8 出口での Twiss parameter

利用運転時のコンバータまでのビーム軌道エンベ  
ロップを確認するため、(1)を用いて A8 出口での  
Twiss parameter を求めた。

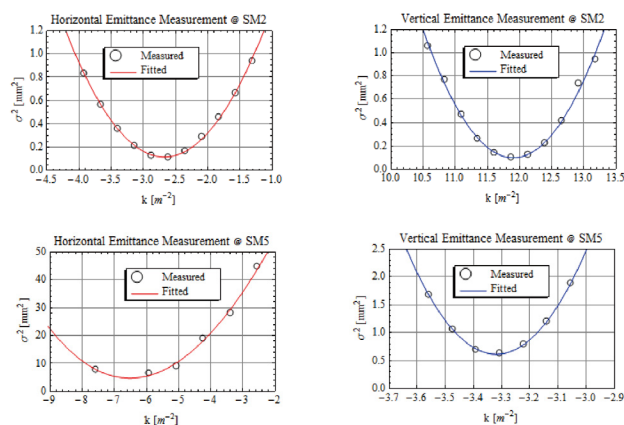


Figure 3: Measured beam sizes squared and fitted  $\sigma^2(k)$  Q-Scan @ SM2 (Top) Q-Scan @ SM5 (Bottom).

### 3.3 エミッタンス計測@SM2

ビーム加速部下流の診断部にある四極電磁石と 50  $\mu\text{m}$  厚のアルミナ蛍光板のスクリーンモニタ SM2 で Q-Scan 法を用いてエミッタンスの測定を行った。四極電磁石は 3 台あり発散、収束、発散の順番で設置されている(Figure 2)。今回は水平、垂直方向ともに最下流の四極電磁石 TQ3 の  $k$  値を変えて、1.5 m 先の蛍光板でビームサイズが最小となる  $k$  値付近の計 11 点でサイズを測定した。測定したビームサイズの自乗とフィッティングで求めた $\sigma^2(k)$ を Figure3 に示す。エミッタンスはそれぞれ 0.722 (水平)、0.729 mm mrad (垂直)と求めた(Table 1)。

### 3.4 エミッタンス測定@SM5

ビーム偏向部下流の四極電磁石と 1 mm 厚のアルミナ蛍光板のスクリーンモニタ SM5 でも同様に Q-Scan 法でのエミッタンス測定を行った。四極電磁石は発散、収束の順で設置されている(Figure 2)。水平方向は電磁石 QM3D の  $k$  値を変化させて約 4 m 先の蛍光板でビームサイズが最小となる点を含む 6 点でサイズを測定した。垂直方向の測定は電磁石 QM3F の  $k$  値を変えてビームサイズが最小となる  $k$  値付近の 7 点でサイズを測定した。測定したビームサイズの自乗とフィッティングで求めた $\sigma^2(k)$ を Figure 3 に示す。エミッタンスはそれぞれ 0.927 (水平)、0.712 mm mrad (垂直)と求めた(Table 1)。

## 4. 通常利用運転時の輸送オプティクス

試料の位置での光核反応に制動放射 $\gamma$ 線を最適化するにあたって、 $\gamma$ 線生成用コンバータに入射する

Table 1: Estimated Electron Beam Emittance and Twiss Parameters at Accelerating Structure 8 Exit

	$\epsilon_x$ [mm mrad]	$\epsilon_y$ [mm mrad]	$\beta_x$ [m]	$\beta_y$ [m]	$\alpha_x$	$\alpha_y$
by Q-Scan @ SM2	0.722	0.799	9.71	8.44	-2.65	-2.78
by Q-Scan @ SM5	0.937	0.712	20.8	314	2.15	-30.9

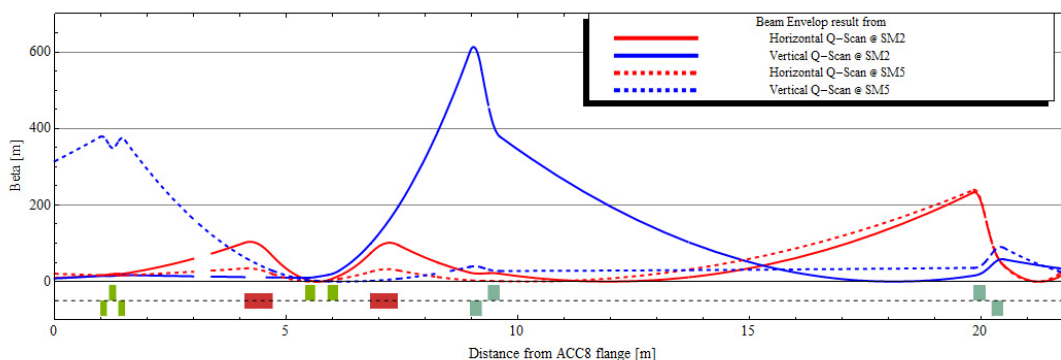


Figure 4: Expected envelopes of e<sup>-</sup> beam trajectories for the normal operation from the accelerating structure exit to the tungsten target.

電子ビームのエミッタンスや Twiss parameter は重要な情報である。

SM2 と SM5 の二箇所それぞれから求めた加速管出口でのエミッタンスと Twiss parameter をもとに、通常利用運転時の電磁石パラメータでのそれぞれ軌道エンベロップの確認を行った(Figure 4)。今、加速管出口からの距離を  $s$  とし、 $s$  の位置までの電磁石の転送行列を  $T(s)$  としたとき、任意の場所でのベータ関数は、

$$\beta(s) = \beta_0 T_{11}^2(s) - 2\alpha_0 T_{11}(s)T_{12}(s) + \gamma_0 T_{12}^2(s) \quad (4)$$

と表せる。

水平方向の軌道エンベロップは絶対値に違いはあるが同様のオプティクスでビームが輸送されることが分かり、利用運転での電子ビームの軌道エンベロップを再現していると思われる。

垂直方向の軌道エンベロップは二箇所のエミッタンス測定では一致しなかった。SM2 を用いたエミッタンス測定の結果からは、偏向部出口で垂直方向にビームが極端に大きくなっているが、偏向部出口にあるスクリーンモニタ SM4 で測定したビームプロファイルは  $\sigma_y = 4.6 \text{ mm}$  で、エミッタンス測定から計算される  $\sigma_y = 17.7 \text{ mm}$  ( $\beta_y = 391 \text{ m}$ ) と大きく異なる。また、SM5 の測定を用いると加速管 A8 出口でベータ関数が非常に大きくなってしまふ。

このようにビーム偏向部を介して垂直方向の Twiss parameter に違いが見られることから偏向部とその前後に何らかの垂直方向の収束力があることが考えられ、今後オプティクスの調査を行った上で二箇所でのエミッタンス測定の結果が一致するかどうかの確認を行う。

## 5. $\gamma$ 線プロファイルの測定

### 5.1 $^{57}\text{Ni}$ での $\gamma$ 線プロファイル復元

現在の電子光理学研究センター大強度電子ライナックは RI 製造や放射性同位元素を用いた研究での

利用が主である。今回、制動放射  $\gamma$  線を用いた光核反応の最適化を行うための基礎的データ収集を目的として利用者の協力を得てプロファイルの測定を行った。厚み  $10 \mu\text{m}$  の Ni 箔に制動放射  $\gamma$  線を照射して生成される放射性同位元素  $^{57}\text{Ni}$  の分布をイメージングプレートで測定することによって  $\gamma$  線のプロファイルを測定する [5]。

### 5.2 測定セットアップ

測定のセットアップを Figure 5 に示す。制動放射  $\gamma$  線を生成するコンバータの厚みは通常の利用運転と条件を同じにするためにタングステン  $1 \text{ mm}$  厚を 2 枚用いて計  $2 \text{ mm}$  とした。プロファイルの取得場所は 3 か所で、コンバータ上、実際の試料が置かれる位置(コンバータの下流  $3 \text{ cm}$ )、 $\gamma$  線の広がりを見るための試料の場所から  $3 \text{ cm}$  下流(コンバータの下流  $6 \text{ cm}$ )とした。設置した Ni 箔の厚みは  $10 \text{ m}$  クロンである。

### 5.3 照射する電子ビーム

利用運転では照射試料の大きさが直径  $10 \text{ mm}$  である。コンバータの場所に設置した調整用 BeO 板での発光を直径  $10 \text{ mm}$  程度に調整した電子ビームとコン

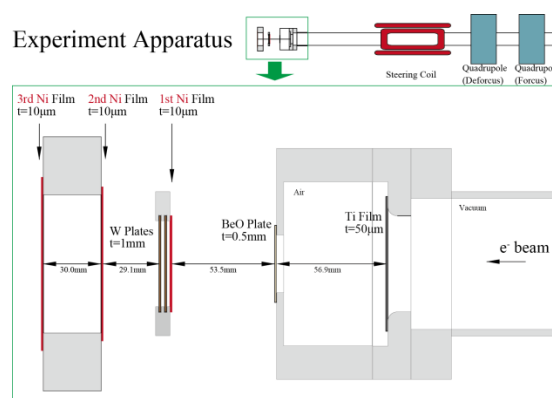


Figure 5: Experimental apparatus for irradiating Ni thin films.

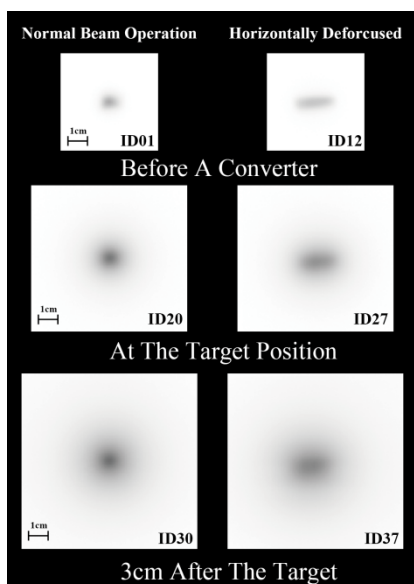


Figure 6: Restored profiles of  $^{57}\text{Ni}$  by imaging plates.

ターゲット直前での Q-Scan を想定したビームプロファイルで照射を行った。ビームの繰り返しは、今回のセットアップでのコンバータ冷却性能を考慮して 100 pps とした。イメージングプレートで測定した  $^{57}\text{Ni}$  のプロファイルを Figure 6 にそれぞれ示す。ID01, ID12 にはイメージングプレート BAS-IP SR 2025 E を、ID20, ID27, ID30, ID37 には BAS-IP MS 2040 E を使用した。

#### 5.4 利用運転時の $\gamma$ 線プロファイル

利用運転パラメータで照射した ID20 の  $^{57}\text{Ni}$  放射能強度分布とその射影を Figure 7 に示す。ID20 と ID30 について分布のピークでプロファイルを切り出して半値幅を求めた。それぞれ水平、垂直方向の順に試料の位置で 12.1 mm、11.4 mm、試料の 3 cm 下流で 17.1 mm、16.6 mm であった(Figure 8)。調整の

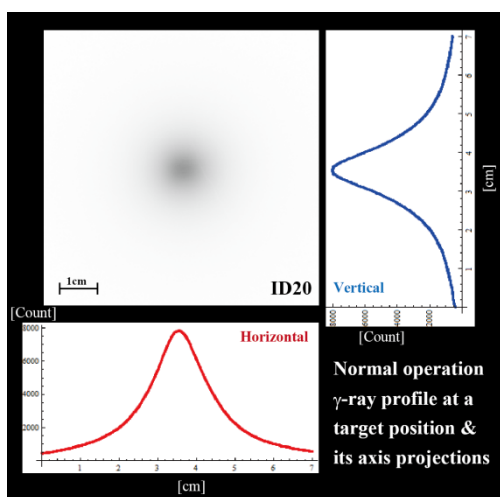


Figure 7:  $\gamma$ -ray profile of the normal operation at a target position by imaging plate.

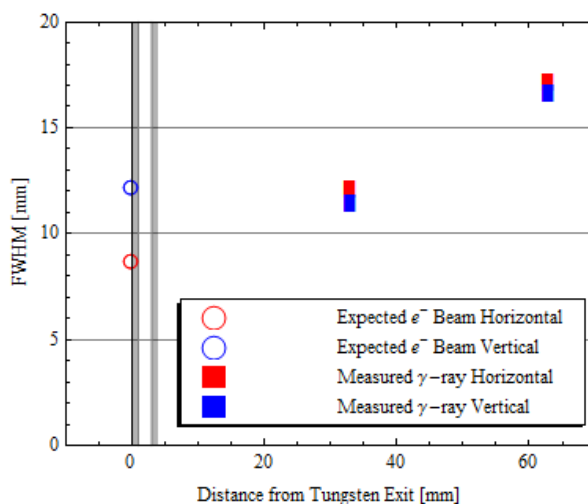


Figure 8: An expected electron beam size (FWHM) and measured  $\gamma$ -ray beam sizes (FHWM) along the beam axes for a normal linac operation.

BeO 板で直径 10 mm 程度に揃えた電子ビームで縦横比の揃った $\gamma$ 線を生成できていることを確認できた。

電子ビームの軌道エンベロップから予想されるタングステンの位置でのビーム半値幅は 8.6 mm(水平)、12.1 mm(垂直)で、測定から想定される $\gamma$ 線の発生点での半値幅と矛盾し、また縦横比も揃っていない。この $\gamma$ 線プロファイル測定の結果からもビーム偏向部のオプティクス確認が必要であることが分かった。

#### 5.5 $^{57}\text{Ni}$ プロファイルでの Q-Scan

Figure 6 のコンバータ上の Ni 箔(ID01, ID12)での  $^{57}\text{Ni}$  強度分布は Q-scan のプロファイルを反映していることは確認できたが GEANT でのシミュレーションの結果から、コンバータ上の Ni 箔で  $^{57}\text{Ni}$  が生成される主な要因は電子ビームではなく約 10 cm 上流にあるビーム引き出し用の 50  $\mu\text{m}$  厚 Ti 箔と約 5 cm 上流にあるビームプロファイル調整用の 0.5 mm 厚 BeO 板で生成された制動放射 $\gamma$ 線が主であることが分かった[6]。今後シミュレーションとの比較からタングステン直前での電子ビームのプロファイルを復元できるかどうか検討する。

## 6. まとめ

東北大学電子光物理学研究センターでは大強度電子ライナックを用いた光核反応による RI 製造を行っている。照射位置での $\gamma$ 線プロファイルを光核反応同位体製造に最適化するため、加速器のエミッタンス測定と制動放射 $\gamma$ 線のプロファイル測定を行った。

Q-Scan 法でのエミッタンス測定の結果から、加速後の電子ビームのエミッタンスは $\epsilon_x = 0.722$  mm mrad、 $\epsilon_y = 0.799$  mm mrad と測定された。垂直方向の電子ビーム軌道エンベロップが二箇所のエミッタンス測定の結果で矛盾することから、今後ビーム偏向部の

オプティクスを調査して再度エミッタンス測定を行う。

通常利用運転時のビーム輸送と照射セットアップを模擬することでタングステンからの制動放射 $\gamma$ 線のプロファイルとサイズの広がりを確認した。イメージングプレートで復元した照射位置での $\gamma$ 線プロファイルのサイズは半値幅で、12.1 (水平)、11.4 mm (垂直)であった。

今後、イメージングプレートのプロファイルからの生成した $^{57}\text{Ni}$ の放射能の強度を見積もり、 $\gamma$ 線プロファイルの実験とシミュレーションの比較、シミュレーションの評価を行い、基礎的なデータ収集を行うことで電子ライナックを用いたRI製造の最適化を図っていく。

今回実験や解析を行う上で協力を頂いた同センター光量子反応研究部門の方々に深く感謝します。

## 参考文献

- [1] Shigeru Kashiwagi, “大強度電子加速器と RI 製造”, 東北大学電子光理学研究センター研究会「大強度電子ビームとその応用利用」, Mar. 16-17, 2015.
- [2] H. Braun, “Emittance Diagnostics”, CAS Beam diagnostic Dourdan, 2.6.2008.
- [3] M. Minty, “Diagnostics II”, CERN Accelerator School, Sept 2004.
- [4] D. Brandt, “Introduction to Accelerators”, CAS Platja d’Aro 2006.
- [5] Hidetoshi Kikunaga, “制動放射線照射で製造できる RI”, 東北大学電子光理学研究センター研究会「大強度電子ビームとその応用利用」, Mar. 16-17, 2015.
- [6] Kyo Tsukada, Private communication.