

## NIRS サイクロトロン施設 RI 生成用照射ポートのための Wobbling beam 照射システムの設計

### WOBBLED BEAM IRRADIATION SYSTEM FOR RADIOISOTOPE PRODUCTION IN NIRS CYCLOTRON FACILITY

片桐 健,\* 北條 悟, 中尾 政夫, 永津 弘太郎, 鈴木 寿,  
杉浦 彰則, 涌井 崇志, 野田 章, 野田 耕司  
国立研究開発法人 放射線医学総合研究所

Ken Katagiri, Satoru Hojo, Masao Nakao, Kotaro Nagatsu, Hisashi Suzuki,  
Akinori Sugiura, Takashi Wakui, Akira Noda, Koji Noda  
National Institute of Radiological Sciences

#### Abstract

A beam transport line is designed for production of medical-use radionuclides, such as an  $^{211}\text{At}$  (alpha-emitting radionuclide), and fundamental experiments related to the production method. To enhance the beam current for further increase of the yield, relaxation of the beam current density on the target system is required to avoid their damage. We are thus to employ wobbler magnets to enlarge radiation field for the radionuclide production. The wobbler magnets have been designed and fabricated so far. We also designed the beam optics of the beam transport. In this paper, we report those results of the design and the investigation.

#### 1. はじめに

放医研は 2 台のサイクロトロン (Thomson-CSF 社製 930 型 AVF サイクロトロン, 及び住友重機械工業製 HM-18 サイクロトロン)<sup>[1]</sup> を用いて, 物理/生物分野における基礎科学研究の為の共同利用施設を運営すると共に, 医療用放射性核種の製造により核医学診療に関連した研究開発を行っている. 放医研サイクロトロン施設は計 7 つの照射ポートにイオンビームを供給し, そのうち 3 本 (C6, C8, C10) は基礎科学実験のために, 残りの 4 本 (C1, C2, C4, C9) は医療用放射性核種の製造に用いられている (Fig. 1).

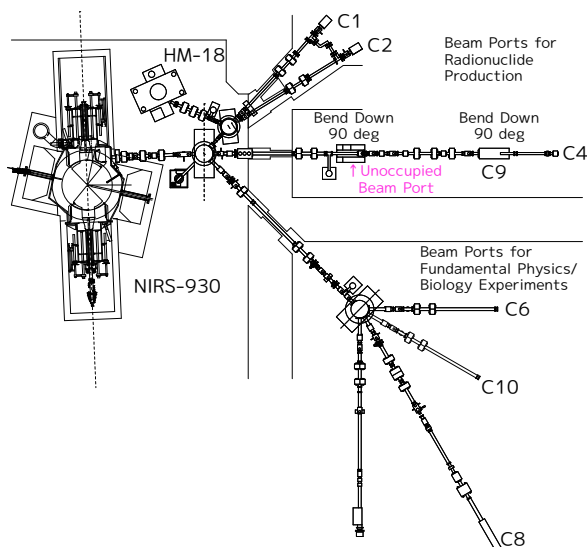


Figure 1: NIRS cyclotron facility.

新たな医療用放射性核種の製造に備えて, また重粒子線がん治療における不安定核イオンの加速を目指した基礎的実験を行うために, 新たなビーム照射ポートの整備を検討してきた. 新たな医療用放射性核種の製造として, Targeted radionuclide therapy への応用を目指した,  $\alpha$  崩壊核種 ( $\text{At-211}$ ,  $\text{Ac-225}$  等) の製造及び関連実験が計画されている. これらの放射性核種製造の際には, 収量の増加を狙って  $30\text{--}40\ \mu\text{A}$  の  $\sim 30\text{-MeV}$   $^4\text{He}^{2+}$  ビームの照射を行う.<sup>[2]</sup> このような強度のビームを照射に用いる場合には, ビーム加熱によって真空封じ用金属膜等のターゲット系の損壊が予想される. 一方で, 重粒子線がん治療における不安定核イオンの加速を目指した基礎的実験においては, 融点が低く熱伝導率も低いために熱によるダメージを受け易い材料 (ホウ素化水素ナトリウム:  $\text{NaBH}_4$ ) をターゲットとして用いることを検討している.<sup>[3, 4]</sup> これらのターゲットの融解や損壊を防止し安全に安定した照射を行うため, あるいは更なるビームの大電流化に備えるために, 我々はワブラー電磁石を用いた照射システムの設置を検討してきた.<sup>[3]</sup>

2014 年度は, このワブラー磁石の製作を行うとともに, 新たなビームポートへと繋がるビームトランスポート (BT) の設計を行なった. また, この BT の光学計算のために,  $34\text{-MeV}$   $^4\text{He}^{2+}$  ビームのエミッタンス測定, Twiss パラメーターの測定を Q-scan 法により行った. これら設計・製作の状況を報告するとともに, 測定結果を用いて行った光学計算の結果を示す.

#### 2. ワブラー磁石の設計と製作

Fig. 2 にサイクロトロン出口から照射ポートへと続く BT の模式図を示す. BM2 より下流の垂直部が今回新たに設置される BT である. 二つのワブラーのうち, 上流が Horizontal, 下流が Vertical に掃引する電磁石である. この Vertical ワブラーからターゲット位置までの距離は

\* tag410@nirs.go.jp

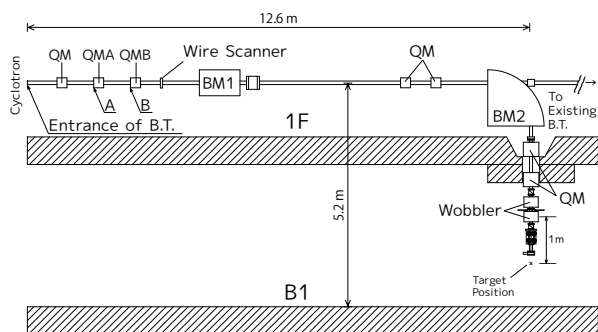


Figure 2: Layout of the new beam transport line. BM1 and BM2 are the horizontal 2.5-degree dipole magnet and the vertical 90-degree dipole magnet, respectively.

およそ 1 m である。このワブラーマグネットの製作のために検討したパラメーターを Table 1 に示す。ターゲット収納容器<sup>[3, 4]</sup>の大きさと上記のワブラー-ターゲット間の距離より偏向角を決めた。設置場所に空間的な余裕がないために、コンパクトなサイズとなることを第一に考慮し磁極長/磁極幅を決定した。この短い磁極長のために、実際の大きさに比べて実効長は 60% 近く大きい値となった。輸送する可能性がある中で最も rigidity の大きいビーム ( $B\rho \approx 1.03$ , 25-MeV  $^2\text{D}^+$  / 50-MeV  $^4\text{He}^{2+}$ ) を想定し、最大磁場強度を決定した。掃引周波数に関しては、不安定核イオンの加速を目指した基礎的実験にて用いるターゲット物質の溶解を防ぐ条件から、 $\sim 10\text{--}100$  Hz で使用することを想定した。<sup>[4]</sup> 現状では、すでに所有している 20 V, 2 kW の高速バイポーラ電源をワブラー電源として使用することを計画しており、その場合には 30 Hz 程度での掃引周波数で使用することが可能である。

短い磁極幅により磁場分布の悪化が懸念されたため、磁極にはシムを付加することを検討した。シムの形状は 2次元電磁場計算コード Poisson により検討した。計算の

Table 1: Specifications of Horizontal/Vertical Wobbler Magnets

Deflection angle (mrad)	15
Pole length / Effective length (mm)	100 / 156*
Pole width (mm)	70
Gap (mm)	70
Field strength (T)	0.1
Magnetomotive force (A·#)	$\approx 5500$
Num. of coil turns / pole (#)	30
Inductance / magnet (mH)	1.3*
Resistance / magnet (m $\Omega$ )	21*
Properties of laminated steel sheet	non-oriented, 500 $\mu\text{m}$
Hollow conductors	6 $\times$ 6-mm square

\*evaluated with numerical simulation.

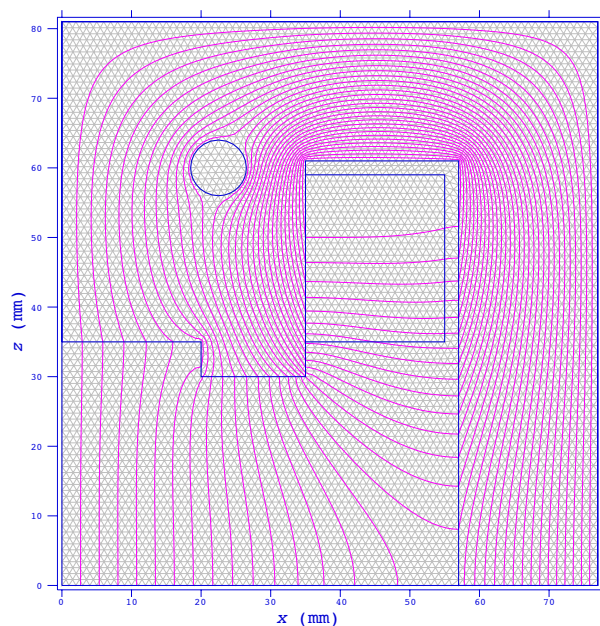


Figure 3: Cross section and magnetic force lines of the wobbler magnet. A hole on  $(x, z) = (22.5, 60)$  is for a binding bolt.

際に検討した磁極/鉄心の構造、及び計算の結果得られた磁力線を Fig. 3 に示す。同じくこの計算の結果得られた  $B_z$  を  $B_z|_{x=0}$  で規格化した値  $B_z/B_{z,0}$  の分布を Fig. 4 に示す。x 方向幅  $\times$  z 方向幅 = 15 $\times$ 5 mm のシムを付加することで、シムの無い場合に比べて大幅に磁場分布を改善出来ていることが分かる。x = 15 mm における磁場のズレはおよそ 1% であるため、ビーム幅を  $\pm 3\sigma = 30$  mm とすれば、それより大きい磁場のズレの影響を受ける粒子はおよそ 0.3% 未満であることになる。従って、今回製作したワブラー電磁石は照射野の形成に十分な一様性を備えていることが確認出来る。Fig. 4 に計算結果に加えて、製作後に行った  $B_z$  分布測定結果から導出した  $B_z(x)L/B_z(0)L$  分布 ( $B_z(x)L = \int_{-\infty}^{\infty} B_z(x, s) ds$ ) もプロットした。計算の結果に比べて、磁場のズレが緩和

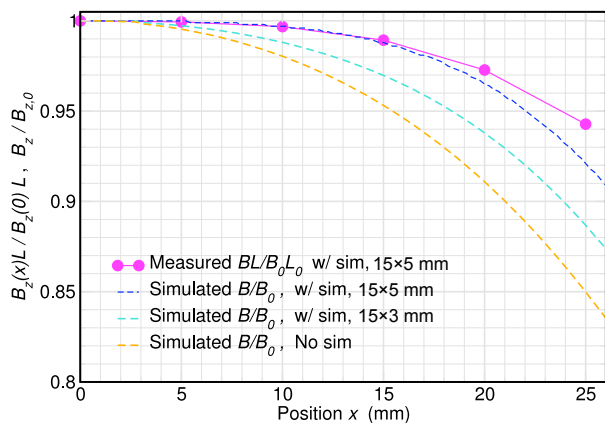


Figure 4: Field distribution  $B_z/B_{z,0}$  for the pole without any sim, with a 15 $\times$ 3-mm sim and with a 15 $\times$ 5-mm sim.

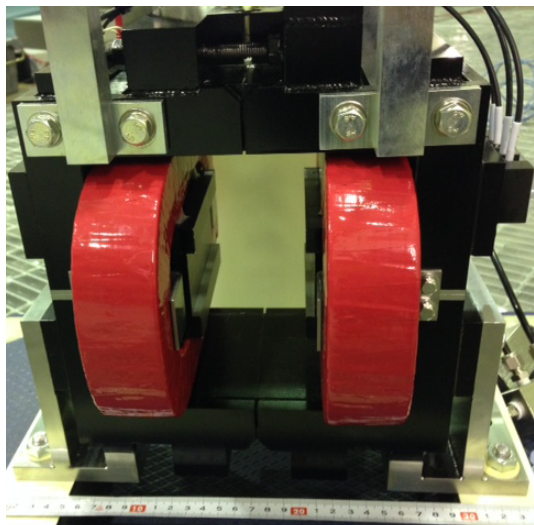


Figure 5: Manufactured vertical wobbler magnet.

されていることが分かる。これは短い磁極長であるために、磁石の端面に  $x$  方向に巻かれているコイルによって加えられる磁場のためと考えられる。Fig. 5 に完成したワブラー電磁石を示す。

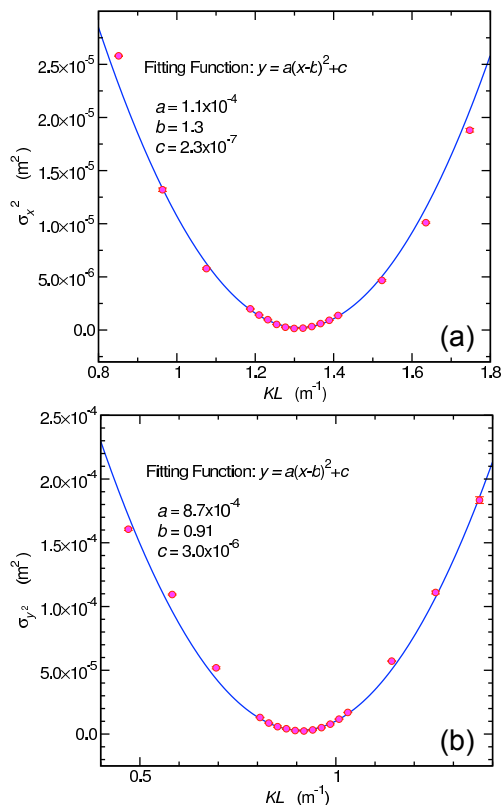


Figure 6: Fitting result of Q-scan measurement: (a) horizontal and (b) vertical.

Table 2: Results of Twiss Parameter and Emittance Measurements. Measurements Were Performed for 34-MeV  ${}^4\text{He}^{2+}$  Beams.

	Twiss parameters at the entrance of B.T.		2 $\sigma$ emittance of 34-MeV ${}^4\text{He}^{2+}$
	$\alpha$	$\beta$ (m)	$\varepsilon$ ( $\pi$ mm mrad)
Horizontal	-8.0	14.3	4.9
Vertical	5.7	17.8	16.5

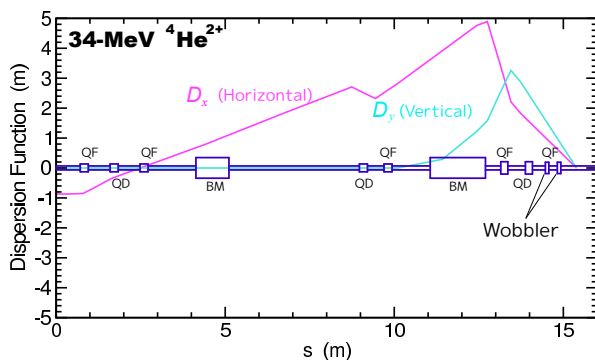


Figure 7: Horizontal and vertical dispersion functions for the new beam transport.

### 3. TWISS パラメーターの測定と光学関数の決定

ビームトランスポートのエンベロープ関数の計算・最適化を行うために、その入り口における Twiss パラメーターとエミッタンスの測定を Q-scan 法により行った。Fig. 2 の点“B”における水平方向のツイスパラメーターとエミッタンスは、四重極電磁石“QMB”の強度を変更することで行った。同様に点“A”における垂直方向のツイスパラメーターとエミッタンスは、四重極電磁石“QMA”により行った。ビームサイズの測定はこれら二つの四重極電磁石の下流にあるワイヤスキャナーにより行った。Fig. 6 に、水平/垂直方向におけるビームサイズ測定結果、およびその結果に二次関数をフィットした結果を示す。これらの点 A, B における解析結果からトランスフォーマトリックスを用いる事で、ビームトランスポートの入り口における Twiss パラメーター、エミッタンスを導出した。その結果を Table 2 に示す。光学計算の初期条件には、この Table 2 の値を用いた。また、水平方向ディスページョン関数の初期条件は、おおよそその見積りとして  $D_x \simeq -R_{\text{ext}}/\gamma^2 \simeq -0.9$  (m) とした。<sup>[5]</sup> 但し、 $R_{\text{ext}} (\simeq 0.93$  m) は取り出し半径、 $\gamma (\simeq 1.01$ , for 34-MeV  ${}^4\text{He}^{2+})$  はローレンツファクターである。その他の初期条件は  $D_y, D'_x, D'_y = 0$  (m) と仮定した。四重極電磁石の磁場勾配強度を最適化するために、ターゲットボックスの位置における束縛条件として次の値を用いた:  $\sqrt{\beta_x \varepsilon_x}, \sqrt{\beta_y \varepsilon_y} = 4$  mm,<sup>[3]</sup>  $D_x, D_y = 0$  (m)。

Fig. 7 は、上記束縛条件の元に決められた水平/垂直方向のディスページョン関数である。ターゲットボックス位置に於ける束縛条件は十分に満たされていることが確認

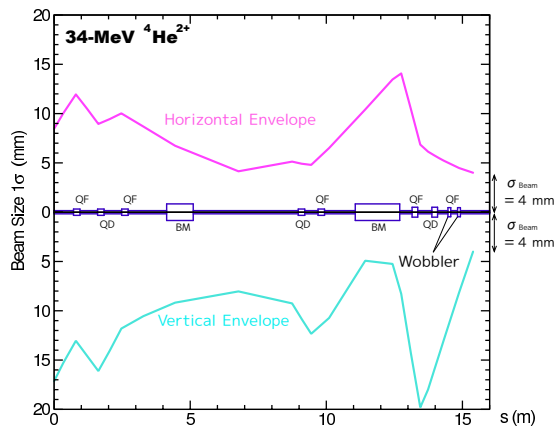


Figure 8: Horizontal and vertical envelope functions.

出来る. このディスパージョン関数とベータ関数, 計算により見積もられた運動量広がり  $\Delta p/p \simeq 1.5 \times 10^{-3}$ ,<sup>[6]</sup> 及び Table 2 のエミッタンスの値から, ビームエンベロープを導出した. その結果を Fig. 8 に示す. ターゲットボックス位置におけるビーム形状は定めた条件 ( $\sqrt{\beta_x \varepsilon_x}, \sqrt{\beta_y \varepsilon_y} = 4 \text{ mm}$ ) にマッチングしていることが確認できる.

#### 4. 結論

新たな医療用放射性核種の製造に備えて, また重粒子線がん治療における不安定核イオンの加速を目指した基礎的実験を行うために, 新たなビーム照射ポートの整備を検討してきた. ターゲットの融解や損壊を防止し安全に安定した照射を行うため, あるいは更なるビームの大電流化に備えるためにこの照射システムのためにワブラー電磁石を設計し製作した. また, サイクロトロン出口におけるエミッタンス, Twiss パラメーターを測定し, それを元に新たなビームトランスポートのビーム光学関数を検討した.

この新たなトランスポートの詳細設計・製作は現在進められており, サイクロトロン施設にて 2015 年 9 月に設置工事が行われ, 2016 年初めにビーム試験が開始される予定である.

#### 参考文献

- [1] T. Honma et al., Proceedings of 18th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Giardini Naxos, Italy, 2007, pp. 137.
- [2] K. Nagatsu et al., Applied Radiation and Isotopes 94, (2014) 363.
- [3] K. Katagiri et al., Proceedings of IPAC'14, Dresden, Germany, 2014, pp. 2162.
- [4] K. Katagiri et al., Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, 2014, pp. 1360.
- [5] M. Seidel, CERN Yellow Reports 2013-001 (2000) 17.
- [6] M. Nakao et al., Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, 2014, pp. 959.