

# NIRS サイクロトロン・RI 生成用ビームポートのためのビーム輸送ラインの設計

## DESIGN OF BEAM TRANSPORT LINES FOR RADIOISOTOPE PRODUCTION SYSTEMS IN NIRS CYCLOTRON FACILITY

片桐 健, 北條 悟, 中尾政夫, 杉浦彰則, 野田 章, 野田耕司  
Ken Katagiri\*, Hojo Satoru, Masao Nakao, Akinori Sugiura, Akira Noda, Koji Noda  
National Institute of Radiological Sciences

### Abstract

A new beam transport and a irradiation system were designed for radionuclides production with heat damageable targets. The incident beam is swept along a circle on the irradiation target with fast steering magnets. The width and the sweeping radius of the incident beams were optimized to achieve high production efficiency and avoid the heat damages. Based on those optimized parameters, beam optics of the new beam transport lines was optimized. To obtain initial conditions for the optical calculations, the beam emittance and the Twiss parameters were measured at the upper stream of the new beam transport lines. In this paper, we present the results of the calculations and the optimized beam transport lines.

### 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) [1, 2] 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). 新たな医療用放射性核種の製造とそれらに関連した実験に備えて, 新たなビーム照射ポートの整備が検討されている. この照射ポートでは,  $\alpha$  崩壊核種 (At-211) や金属核種 (Cu-67) の製造とそれらに関連した基礎的な研究・実験が計画されている. またこれらに加えて, 重粒子線がん治療のための  $^{10/11}\text{C}$  ビーム生成を背景とした  $^{10/11}\text{C}$  核種を含むメタン分子 ( $^{10/11}\text{CH}_4$ ) の生成実験が行われる予定である. この実験では, ターゲット材料としてホウ素化水素ナトリウム ( $\text{NaBH}_4$ ) を用いることを検討している. このターゲットをプロトン照射することで, 揮発性の  $^{10/11}\text{CH}_4$  分子

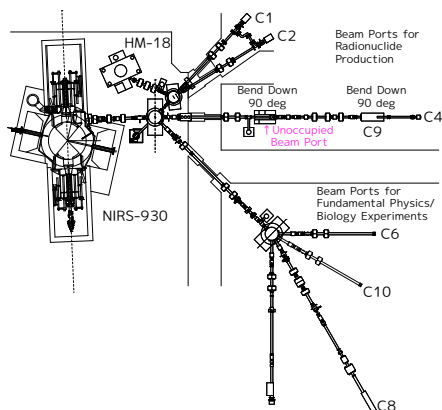


Figure 1: NIRS cyclotron facility.

を直接生成でき, その結果として  $^{10/11}\text{C}$  核種を効率的に捕集できることが判明している.[3] しかしその一方で, 低い融点 ( $\sim 400$  deg.) と低い熱伝導率のために, ビーム加熱による熱のダメージを受け易いという欠点がある. このダメージを避ける為には, 照射ビームの電流密度を  $4 \times 10^{-2} \mu\text{A}/\text{mm}^2$  程度に抑える必要がある. 一方で十分な収量を得る為にはビーム電流を下げることは好ましくない. これら二つの要求を満たす為に, 水平/垂直方向のステアリングマグネットを用いてビームを円状に走査し, 適切な照射野を形成する方法を検討した. またこの照射装置へのビーム輸送ラインの設計を行った. このビーム光学の計算に初期条件として必要となるエミッタンス, Twiss パラメーターは Q-scan 法を用いた測定により導出した. これらを元に計算を行い, 照射野の形成に適した光学関数を検討した.[4]

### 2. 照射野の形成

Figure 2 にサイクロトロン出口から新たに設置を予定している照射ポート “Port A” までの断面図を示す. 1F のビームトランスポートは既に設置されており, Fig. 1 に示す C4, 及び C9 照射ポートへとビームを輸送するために用いられている. 本稿ではサイクロトロン出口から “Port A” に至るまでの光学関数を検討する.

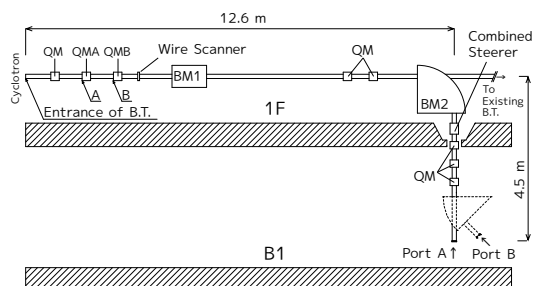


Figure 2: Layout of the beam transport line from the NIRS 930 cyclotron. BM1 and BM2 are the horizontal 2.5-degree dipole magnet and the vertical 90-degree dipole magnet, respectively.

\* tag410@nirs.go.jp

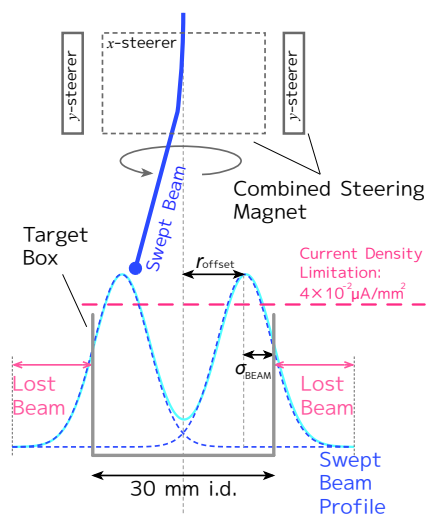


Figure 3: Irradiation field formation using fast combined steering magnets.

Figure 3 にステアリングマグネットにより拡大されたビームとターゲットボックスの模式図を示す。ターゲット材料はターゲットボックスに封入され、ターゲットボックスは冷却水により冷却される。1 g の  $\text{NaBH}_4$  ターゲットを 30 MeV のプロトンビームで照射したとき、溶解までの時間はその比熱 ( $\sim 90 \text{ J/mol/K}$ ) から  $\sim 1 \text{ s}$  と見積られる。従って、ステアリングマグネットにより円状に走査したビームを定常な拡大ビームとして考えるために、走査の周波数を 1 Hz よりも十分に高く ( $\sim 100 \text{ Hz}$  程度) する必要がある。陽子/重粒子線がん治療で用いられるワブラー照射法 (ブロードビーム照射法) [5] では、ビームを円状に走査すると共に散乱体を用いる。しかし、大電流・低エネルギービームを用いる放射性核種製造のためのビームトランスポートでは、その除熱や放射化、或はビームのエネルギー損失が問題となるため、本システムでは散乱体を用いないことにした。

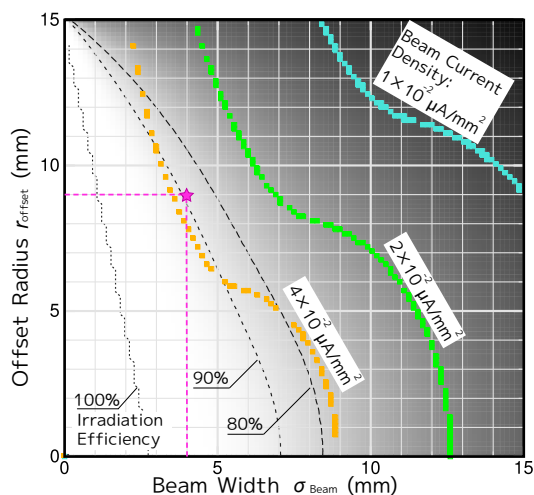


Figure 4: Contour map showing the irradiation efficiency  $\epsilon_{\text{beam}}$  (black/white) and the current density of the incident beam  $i_{\text{beam}}$  (turquoise/green/orange).

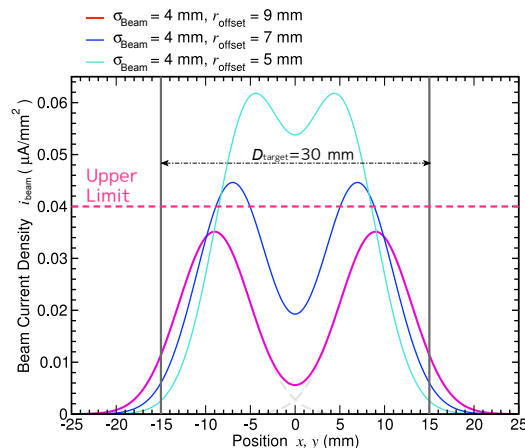


Figure 5: Beam profile for  $(\sigma_{\text{beam}}, r_{\text{offset}}) = (4 \text{ mm}, 9 \text{ mm})$ . Beam profiles for  $r_{\text{offset}} = 5$  and  $7 \text{ mm}$  are also plotted as a reference.

ビームスポット幅  $\sigma_{\text{beam}}$  と円状に走査する際のオフセット半径  $r_{\text{offset}}$  は、次の二つの条件により決定した: (1) ビーム電流密度  $i_{\text{beam}}$  は  $4 \times 10^{-2} \text{ uA/mm}^2$  以下であること, (2) 照射効率  $\epsilon_{\text{beam}}$  は可能な限り高くすること (放射性核種の収量を増やすため). このビーム電流密度  $i_{\text{beam}}$  の上限は、 $\text{NaBH}_4$  ターゲットが溶解しない最も高い電流密度として決められた.[3] また、照射効率  $\epsilon_{\text{beam}}$  は、全ビーム電流のうちターゲットを照射出来ている電流の割合として定義した. この照射効率は、Fig. 3 に示す “Lost Beam” の増加と共に低下する. 本研究では内径  $\phi 30 \text{ mm}$  のターゲットボックスについて検討した.

ビームスポット幅  $\sigma_{\text{beam}}$  とオフセット半径  $r_{\text{offset}}$  を決定するために、 $0 \leq \sigma_{\text{beam}}, r_{\text{offset}} \leq 15 \text{ mm}$  の広いレンジに渡ってビーム電流密度  $i_{\text{beam}}$  と照射効率  $\epsilon_{\text{beam}}$  を計算した. その結果を Fig. 4 に示す.  $\phi 30 \text{ mm}$  のターゲットボックスを用いた場合には、 $\epsilon_{\text{beam}} \geq 0.9$  の照射効率を得る事は困難であった. (1), (2) の条件を満たす点として、Fig. 4 に星点で示す  $(\sigma_{\text{beam}}, r_{\text{offset}}) = (4 \text{ mm}, 9 \text{ mm})$  を選択した. この星点の条件で得られるビームプロファイルを図 5 に示す. 一様性には乏しいが、熱のダメージを受けやすいターゲットを用いた放射性核種製造において、収量の向上が実現される好ましいプロファイルであると期待出来る.[4]

### 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. Figure 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ースキャナーにより行った. Figure 6 に水平方向におけるビームサイズ測定結果を二次関数にフィットした結果を示す. フィッ

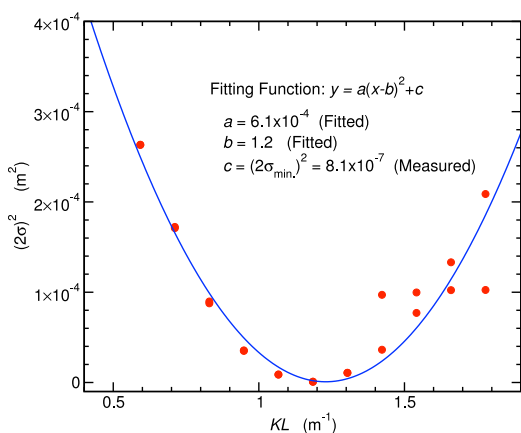


Figure 6: Fitting result of Q-scan measurement for horizontal Twiss parameters.

ティングでは変数  $c$  の誤差が増大したため ( $\sigma_{\text{error}}/c \sim 100\%$ ), その値は測定したビームサイズの最小値から決めた ( $c = (2\sigma_{\text{min}})^2$ ). 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 1 に示す. 光学計算の初期条件には, この Table 1 の値を用いた. また, 水平方向ディスパ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>[6]</sup> 但し,  $R_{\text{ext}} (\simeq 0.93$  m) は取り出し半径,  $\gamma (\simeq 1.03$ , for 30-MeV proton) 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為に, 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 (Fig. 4 より導出された条件),  $D_x, D_y = 0$  (m).

Figure 7 は, 上記束縛条件の元に決められた水平/垂直方向のディスパ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>[7]</sup> 及び Table 1 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

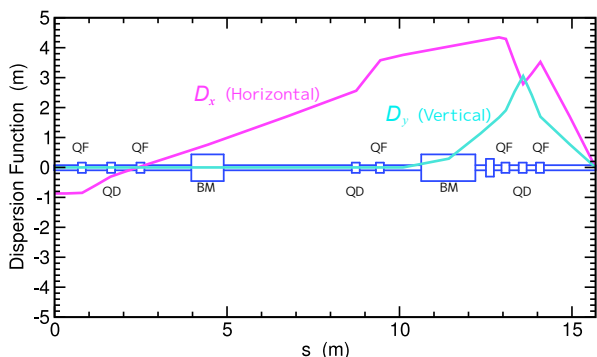


Figure 7: Horizontal and vertical dispersion functions for the new beam transport.

Table 1: Results of Twiss parameter and emittance measurements. Measurements were performed for 30-MeV proton beams.

	Twiss parameters at the entrance of B.T.		$2\sigma$ emittance of 30-MeV proton $\varepsilon$ ( $\pi$ mm mrad)
	$\alpha$	$\beta$ (m)	
Horizontal	-8.2	11.9	15.2
Vertical	-2.7	8.7	12.7

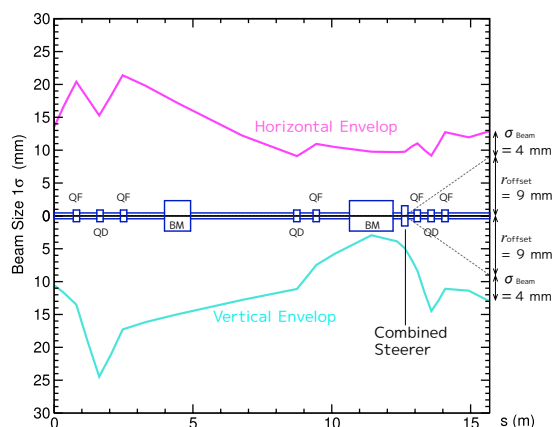


Figure 8: Horizontal and vertical envelope functions with kicks produced by the fast combined steering magnets. The kicked beam axis is shown with a broken line. The kick angle is  $\theta \simeq 3$  mrad.

クス位置におけるビーム形状は Fig. 4 で定めた条件にマッチングしていることが確認できる.<sup>[4]</sup>

## 4. 結論

30 mm のターゲットボックスと溶解しやすい  $\text{NaBH}_4$  ターゲットを用いた  $^{10/11}\text{C}$  核種生成のために, ステアリングマグネットを用いた照射システムと形成される照射野を検討した. さらに, この照射野を形成する為に最適なビーム光学関数を検討した. これらによって,  $^{10/11}\text{C}$  核種の収量の向上が期待できる. より正確なビームエンベロープ関数の導出のために, ビームトランスポート入り口のディスパージョン関数の測定を予定している.

## 参考文献

- [1] T. Honma, et al., Proc. 18th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications 2007, Oct. 1-15, 2007, Giardini Naxos, Italy, p137-139.
- [2] S. Hojo, et al., in these proceedings.
- [3] K. Katagiri, K. Nagatsu, et al., Rev. Sci. Instrum. 85 (2014) 02C305-1.
- [4] K. Katagiri, et al., Proc. IPAC2014, 2014, p. 2162.
- [5] W.T. Chu, S.B. Curtis, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci 32 (1985) 3321.
- [6] M. Seidel, CERN Yellow Reports 2013-001 (2000) 17.
- [7] M. Nakao, et al., in these proceedings.