

## RCNPにおける重イオンビーム源およびLEBT系の開発

### DEVELOPMENT OF HEAVY ION SOURCE AND LEBT AT RCNP

依田哲彦<sup>A)</sup>, 畑中吉治<sup>A)</sup>, 福田光宏<sup>A)</sup>, 島田健司<sup>A)</sup>, 安田祐介<sup>A)</sup>, 斎藤高嶺<sup>A)</sup>, 田村仁志<sup>A)</sup>, 鎌倉恵太<sup>A)</sup>  
Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>, Kichiji Hatanaka<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Kenji Shimada<sup>A)</sup>, Yusuke Yasuda<sup>A)</sup>, Takane Saito<sup>A)</sup>,  
Hitoshi Tamura<sup>A)</sup>, Keita Kamakura<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, Japan

#### Abstract

Improving beam current is the one of important themes for cyclotron facility. Intense protons are needed to create secondary neutrons, muons, radioisotopes, etc. and intense heavy ions are needed for short life radioisotopes experiments. Recently several developments of Low Energy Beam Transport (LEBT) line of ion sources and its beam diagnostic systems have been done in order to improve the injection efficiency of heavy ion beam to AVF Cyclotron at Research Center for Nuclear Physics (RCNP) Osaka University. Modification of LEBT has been done and beam transmission is improved in combination with extraction voltage of 18GHz SC-ECR ion source which creates highly charged intense heavy ions. New Pepper Pod Emittance Monitor (PPEM) that can measure the emittance within a second has also been developed. The PPEM consists of copper pepper pod mask, multichannel plate (MCP), fluorescent screen, mirror, and CCD camera. The CCD image is taken via IEEE1394b to PC and analyzed immediately and frequently.

#### 1. はじめに

サイクロトロンにおける加速ビームの大強度化は非常に重要なテーマである。例えば、中性子やミュオンなどの2次ビーム生成やRI製造などのための陽子ビームの大強度化、あるいは短寿命RIビーム生成のための重イオンビームの大強度化が求められている。このうち重イオンビームの大強度化のため、大阪大学RCNPサイクロトロン施設では、18GHz超伝導(SC)-ECRイオン源による大強度多価の重イオンビーム生成の開発を継続的に行ってきた。特に近年ではイオン源からのビームをAVFサイクロトロンの入射部に高い透過率で導く低エネルギービーム輸送系(LEBT)のコンポーネントの改良や、ビーム調整の高効率化を実現する短時間測定可能なエミッタンスモニターなどのビーム診断系の整備を進めてきた。これらの開発をとおりして透過効率が高くサイクロトロンのアクセプタンスにマッチした重イオンビーム生成および輸送の実現を目指している。

#### 2. イオン源LEBTの更新

18GHz SC-ECR で生成した重イオンビームを高い透過率で AVF サイクロトロン入射部へ輸送するLEBTの改造は主に以下に示すとおり偏向電磁石の更新が行われ、これによりビーム透過率の向上が実現している[1,2]。但し、依然AVFサイクロトロンの磁場が強い場合、すなわち漏れ磁場の効果が多い状況下でのビーム透過率は低いという状況であったため、今回漏れ磁場の多い状況でのビーム透過率向上を目指したビーム開発を行った。改造したLEBTについて、その改造前の旧LEBTはFigure 4の上図に

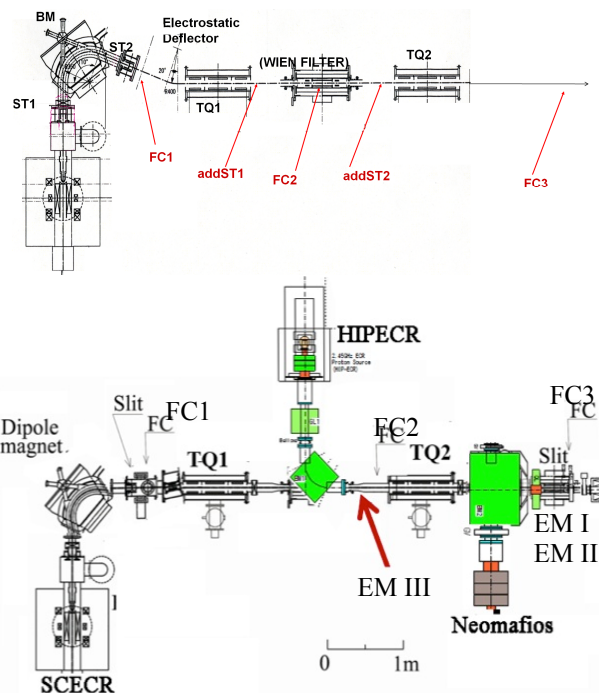


Figure 1: SC-ECRのLEBT配置図。上図が更新前、下図が更新後。ST1, ST2はステアリング、BMは偏向電磁石、TQ1, TQ2は静電Triplet Q lens、FC1, FC2, FC3はファラデーカップ、addST1, addST2はステアリング電磁石である。また、EM I, EM II, EM IIIはエミッタンスモニターを示す。

示すとおりで、イオン源直後の分析電磁石が $110^\circ$ の偏光角を持ち、その下流で $20^\circ$ の静電偏向

# yorita@rcnp.osaka-u.ac.jp

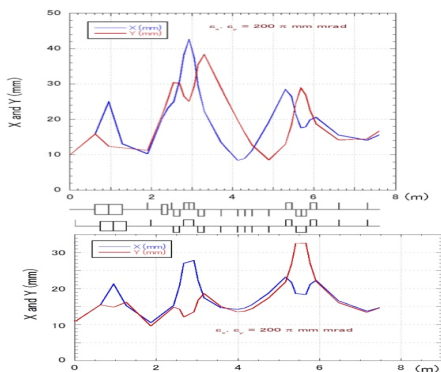


Figure 2: MadX の計算による更新前後の LEBT のビームエンベロープ。下図が更新後の場合。両図ともイオン源からのビームのエミッタンスを  $200 \pi \text{ mm mrad}$  とし計算している。

板で角度を戻す配置となっている。この旧 LEBT では図中のファラデーカップ FC1 から FC3 へのビーム透過率が 80% より向上しないという問題があった。これに対し、MadX[3]を使用したビームエンベロープの計算を試みたところ旧 LEBT ではエミッタンス  $200 \pi \text{ mm mrad}$  以上のビームは LEBT の途中の 3 連 4 重極静電レンズ中の  $80 \phi$  のバップルで制限されてしまうことがわかった(Figure 5 上図参照)。この  $110^\circ$  偏向磁石と  $20^\circ$  静電偏向板の部分、 $90^\circ$  偏向磁石に置き換える(Figure 4 下図)場合に対する MadX 軌道計算を行ったところビームに対する制限が小さくなり(Figure 5 下図参照) 透過効率の向

Table 1: LEBT 更新前後でのビーム透過効率の比較。MAINC は AVF 主コイルの電流設定値で漏れ磁場の影響の強さと相関する。FC1, FC3 はファラデーカップのビーム電流測定値、Extr はイオン源引き出し電極の電圧、adSTH, adSTV は AVF からの漏れ磁場対策に導入したステアリング磁石の設定値である。イオン源の加速電圧は 15kV、TQ などの値はビームが一番通るよう最適化された。旧 LEBT では AVF 主コイルからの漏れ磁場がないという好条件で 80% 強の透過効率であるが、新 LEBT では 90% 近い透過効率を得られた。また、漏れ磁場の大きい状況でも引き出し電圧を -6kV 程度まで上げることで高い透過効率を得られた。

	ION	AVF			W->E	U->D		
		FC1	FC3	FC3/FC1				
	[uA]	[uA]	[%]	MainC	Extr	adSTH	adSTV	
				[A]	[kV]	[A]	[A]	
LEBT 更新前	12C5+	240	200	83.3	0	-4.0	0.00	0.00
	12C5+	240	75	31.3	1000	-4.0	0.00	0.00
	12C5+	240	180	75.0	1000	-4.0	0.28	0.30
	16O6+	630	420	66.7	1035	-4.0	0.45	0.28
	16O6+	690	500	72.5	0	-4.0	0.00	0.00
LEBT 更新後	13C5+	85	75	88.2	734	-4.0	0.52	0.45
	22Ne8+	180	105	58.3	1125	-4.5	0.70	1.00
	22Ne6+	125	110	88.0	0	-2.8	0.16	0.15
	4He2+	250	200	80.0	440	0.0	0.23	0.21
	18O5+	370	240	64.9	953	0.0	0.24	-0.39
	12C5+	130	100	76.9	989	-4.1	0.15	-0.20
	40Ar12+	41	36	87.8	1074	-6.0	0.45	0.11
	13C5+	81	81	100.0	734	-6.0	0.26	-0.34

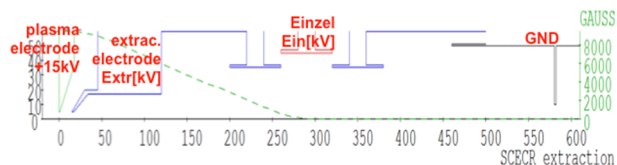


Figure 3: SC-ECR のビーム引き出し部分の配置図。

上が見込まれることがわかった[1,2]。実際にこの偏向部の更新を行い、更新後いくつかの種類イオンについて透過効率を測定したが、条件によって 90% 近いビーム透過率が実現した(Table 1 参照)。一方、AVF 主コイルの電流が大きいとき、即ち漏れ磁場の影響が多い場合の透過効率は依然悪かった。今回、このことについて SC-ECR イオン源の引き出し電圧(Figure 3)を調整してみたところ加速電圧 15kV に対して -6kV で引き出す場合、漏れ磁場の影響が多い状況下でもビーム透過効率の大幅な向上が見られた(Table 1 参照)。また、透過したビームのエミッタンスを測定したところ  $200 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  を超えるエミッタンスのビームが輸送されていることがわかった。よって LEBT の偏向部の改造により計算から期待される通りビームエンベロープに対する制限が緩和され、ビーム透過効率が向上した。

### 3. リアルタイムエミッタンス計測

ここまで見てきたとおりビーム透過率向上を目指したビーム調整を行う際、3 連 4 重極静電レンズやステアラーだけでなく、イオン源の引き出し電圧やアインツェルレンズの調整も重要になってくる。これらのコンポーネントの最適化を行う際、ファラデーカップによる電流値だけでなくエミッタンスの情報も重要となってくるが、多岐にわたるコンポーネントの最適化を効率的に行うためには、エミッタンスモニターの高速化、リアルタイム化が重要となる。RCNP のイオン源用のエミッタンスモニターは、当初は既存のスリット及びビームプロファイルモニターを転用したもので構成されていたが(Figure 1 中 EM I)それぞれの駆動に時間がかかりエミッタンスデータセットを取得するのに約 30 分かかっていた。この時間を短縮すべく  $45^\circ$  の駆動軸に x 及び y スリットを両方載せたスリット及び 18cps で xy 両プロファイルを同時計測可能なワイヤー回転型プロファイルモニター NEC BPM82 の組み合わせによるエミッタンスモニターを開発した(Figure 1 中 EM II)。これによりエミッタンスデータの取得時間が 70 秒と大幅に短縮された[4,5]。この測定時間の更なる短縮を目指しペッパーポット型エミッタンスモニターの開発が行われ(Figure 1 中 EM III)、測定時間が 10 秒まで短縮されたが[6]、今回、測定時間を更に短縮、リアルタイム化すべく、データ処理システムの更新を行った。

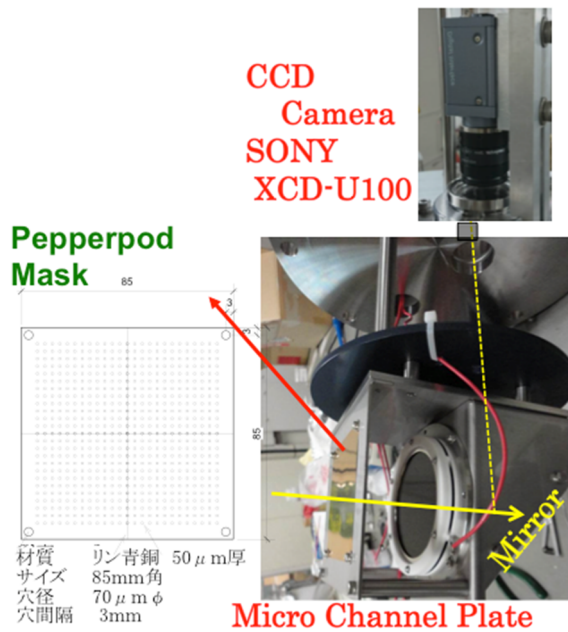


Figure 4: PPEM コンポーネント配置図。

### 3.1 ペッパーポッドエミッタンスモニターの概要

ペッパーポッド型エミッタンスモニターの概要を figure 4 に示す。ペッパーポッドマスクと称する  $\phi 70 \mu\text{m}$  の孔が縦横方向に 3mm 間隔で配置されている銅板でビームを制限し、このマスクを通過したビームのプロファイルを 2 次元的に測定する構造となっている。プロファイル像はマスクから 50mm 下流側に設置されたマイクロチャンネルプレート(MCP)で増幅され蛍光板に映し出され、この像を表面反射鏡で反射しビーム軸に対して  $90^\circ$  方向に接地した CCD カメラにより IEEE1394b 経由で PC に取り込む。カメラは SONY 製 XCD-U100 で 15fps での画像所得が可能である。この取り込まれる画像を解析することによりエミッタンス情報が得られるという仕組みになっている。

### 3.2 エミッタンス解析

このエミッタンスモニターで取得される画像の例を figure 6 に示す。縦横 3mm 間隔で並んでいるペッパーポッドマスクを通過したビームの像が各々見えるのがわかる。これらはビームの  $x$  分布、 $y$  分布を反映している。また、各々の像の構造は  $(x,y)$  それぞれの場所での  $x'$  分布  $y'$  分布を反映している。よってカメラのグレースケールの画像データは 4 次元位相空間のビーム分布  $G(x,y,x',y')$  に変換できる。この  $G(x,y,x',y')$  を  $y$  及び  $y'$  について積分することにより  $x$  位相分布  $\rho(x,x')$  が得られ、 $x$  及び  $x'$  について積分することにより  $y$  位相分布  $\rho(y,y')$  が得られる。この得られた位相空間分布を元にエミッタンスの値が導出される。

### 3.3 解析の高速化

ここまでペッパーポッド型エミッタンスの測定原

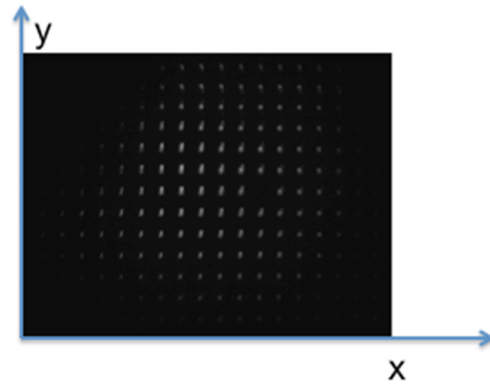


Figure 5: PPEM で取得した画像例。

理について述べた。カメラでの画像取得にかかる時間は数十  $\mu\text{s}$  であるので、測定的高速化のカギは解析スピードが握っている。ペッパーポッドエミッタンスモニター導入当初はカメラ画像の取得をカメラのデバイスドライバーが動作可能な Windows PC で行い、解析を Linux 汎用機で行うという手順でエミッタンスを測定していたため、ファイル転送などのオーバーヘッドで測定に 10 秒弱時間がかかっていた。そこで画像データ所得次第第座に解析が実行できるよう、カメラメーカー提供のカメラコントロールのサンプルプログラムを改変することにより、エミッタンスの測定値を 2Hz で連続的に測定することが可能となりエミッタンスのリアルタイム測定が実現した。CPU パワーのある PC を使用すれば更なる早い繰り返しでの測定が可能となると見込まれる。

## 4. まとめ

重イオンビーム大強度化を目指して、SC-ECR イオン源からサイクロトロン入射部までの LEBT ラインの改良及びリアルタイムエミッタンスモニターの開発を行った。イオン源 LEBT について偏向部での更新を行い、ビームの透過効率が軒並み向上し、AVF サイクロトロンからの漏れ磁場が大きい場合についてもイオン源の引き出し電圧を上げることで透過効率の向上を実現した。一方 LEBT に導入されているエミッタンスモニターの高速化、リアルタイムかも実現した。今後 LEBT 各コンポーネントの最適化をエミッタンスを見ながら行い、加速ビームの大強度化を進めていく。

## 参考文献

- [1] T. Yorita, et. Al, Rev. Sci. Instrum. 85, 02A741 (2014).
- [2] T. Yorita, et al., Proc. of PASJ14, SAP010 (2014).
- [3] CERN MAD-X Page: <http://frs.home.cern.ch/frs/Xdoc/>, MAD-X Primer CERN-AB-2004-027-ABP
- [4] K. Kamakura, et al., Proc. of Cyclotrons2013, TUPPT009
- [5] T. Yorita, et al., Rev. Sci. Instrum. 83, 02A335 (2012).
- [6] T. Yamane, et al., Proc. of PASJ14, SAP079(2014).