

RCNPにおけるサイクロトロン入射部の開発

DEVELOPMENT OF INJECTION SYSTEM FOR CYCLOTRONS AT RCNP

依田哲彦^{A)}, 畑中吉治^{A)}, 福田光宏^{A)}, 安田祐介^{A)}, 斎藤高嶺^{A)}, 田村仁志^{A)}, 森信俊平^{A)}, 鎌倉恵太^{A)}
Tetsuhiko Yorita^{A)}, Kichiji Hatanaka^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Yusuke Yasuda^{A)}, Takane Saito^{A)}, Hitoshi Tamura^{A)},
Shunpei Morinobu^{A)}, Keita Kamakura^{A)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, Japan

Abstract

Several developments of injection systems for cyclotrons at Research Center for Nuclear Physics (RCNP) have been carried recently in order to improve the highly intense ion beam of MeV region like intense protons for secondary nucleons or muons, and intense heavy ions for secondary RI beam. One of those is additional glazer lens on axial injection of AVF cyclotron for the purpose of increasing beam transmission to the inflector in center region. Another development is additional bancher for the heavy ion injection like Xe beam which requires high voltage in comparison with proton case. Extension of baffle slits on injection line of Ring Cyclotron also has been done to extend the flexibility of injection orbit. Modification of low energy beam transport (LEBT) from ion source to AVF injection axis also has been carried.

1. はじめに

近年、中性子やミュオンなどの大強度陽子ビームにより生成される2次ビームや、大強度重イオンにより生成されるRIビームの需要は高まっており、サイクロトロンによる中高エネルギーのイオンビームの大強度化は非常に重要なテーマである。大阪大学各物理研究センター(RCNP)サイクロトロン施設ではこのイオンビーム大強度化を目指して、サイクロトロン入射部においていくつかの改良・開発を行った。ひとつは、AVFサイクロトロンの中心軸入射グレーザーレンズの増強である。AVFの軸入射ラインは元々3つのグレーザーで構成されるビーム輸送系であったが、末端のインфлекターへ向けてビームを十分透過させるのが難しかったため、更に1台グレーザーを追加することによりこの問題の解決を図った。もうひとつの改良は、バンチャーの増強である。AVFサイクロトロン軸入射ラインには既に1台バンチャーが設置されているが、近年需要の多いXeなどの重イオンに対しては電圧が十分ではなかった。このためもう1台バンチャーを追加することにより、特に重イオンのバンチングに対応した。このほか、リングサイクロトロンの入射効率向上を目指して、入射ライン上のバフスリットの開口を拡げ、入射軌道の自由度を高めるということも行った。更にイオン源からAVF軸入射部までの輸送ラインLEBTの更新も行った。

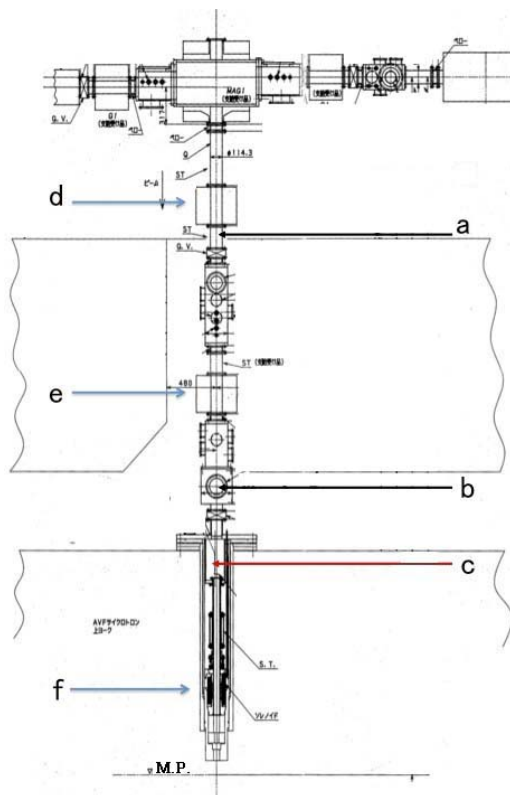


Figure 1: AVFサイクロトロン軸入射部の配置図。
a:新設バンチャー、b:既設バンチャー、c:新設グレーザー、d~f:既設グレーザーである。

2. AVFサイクロトロン入射部

2.1 バンチャーの増設

Xeなどの重イオンビーム強度向上のためAVF軸入射部にバンチャーを増設した。Figure 1のbで示

yorita@rcnp.osaka-u.ac.jp

したメディアンプレーン(MP)より2550mmの位置に既設のバンチャーがあるが、これは高周波の基本波、2倍波、3倍波の合成により最大±600Vの鋸歯状波を形成するが、m/qが小さく加速周波数の速い陽子などのバンチングには十分機能するものの、Xeなど

m/q が大きく加速周波数の遅いイオンには電圧が不十分であった。今回新設されたバンチャータは充放電型のもので、最大電圧は 2MHz で 0-1200V、6MHz で 0-750V、20MHz で 0-200V 出ている。またこの電圧で重イオンも十分バンチャングできるよう MP より 4600mm の位置に設置された。新設バンチャータの動作テストは $^{22}\text{Ne}^{8+}$ の加速により行った。このときの AVF の加速周波数は 9.32MHz である。まず既設バンチャータのみで加速調整を行い AVF の出口で $2.5\mu\text{A}$ のビームが得られている状態で、バンチャータなしとするとビーム量は $0.4\mu\text{A}$ であったが、ここで新バンチャータのみ起動し電圧と移送の調整を行うと $1.7\mu\text{A}$ のビームが得られ、バンチャータとして機能していることが確認された。但しこのときグレーザー等の磁石類の調整無しであったので、今後、重イオンビーム強度の更なる向上を目指して、軸入射ラインのコンポーネント全体の調整や既設バンチャータとのコンビネーションの取り方について最適化していく。

2.2 グレーザーレンズ

AVF へのビーム入射効率の向上を目指しグレーザーも増設した。Figure 1 の d,e,f で示したのは既設のグレーザーであるが、この 3つのレンズのみでは MP から 2m の範囲の $\phi 57$ と狭いビームダクトをロスなく通すことが難しい状況であった。そこで Figure 1 の f で示したグレーザーと同程度の性能のグレーザーを Figure 1 の c で示した箇所を増設した。設置後通電試験を行い十分機能していることを確認したので、今後は増設グレーザーを含めた軸入射部のオプティクスの見直しを図ることによる AVF 入射効率の向上を目指していく。

3. リングサイクロトロン入射部

リングサイクロトロンについてもビーム入射効率

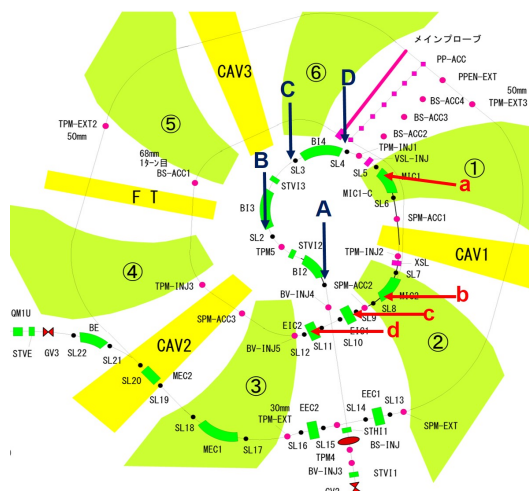


Figure 2: リングサイクロトロン入射ラインのスリット(A~D)、磁気チャンネル(a,b)、静電チャンネル(c,d)の配置図



Figure 3: 拡張されたスリットの例。左図が入射磁気チャンネル、右図が入射ラインスリットである。

の向上を目指し、入射ビーム軌道の自由度を上げる目的でスリットの大口径化を施した。Figure 2 の A~D が入射ラインのバップルスリット、a,b が磁気チャンネルのバップルスリット、c,d が静電チャンネルのバップルスリットであるが、これらの開口を開き保護に支障のない範囲で拡張した。例えば Figure 3 の左図で示した入射磁気チャンネルの場合は元々 15×15 の開口を 34×30 まで広げている。今後、上流側も含めた入射パラメータの再最適化を通してリングサイクロトロンへのビーム入射効率の向上を目指していく。

4. イオン源 LEBT の更新

AVF サイクロトロン入射部へのイオン源からの低

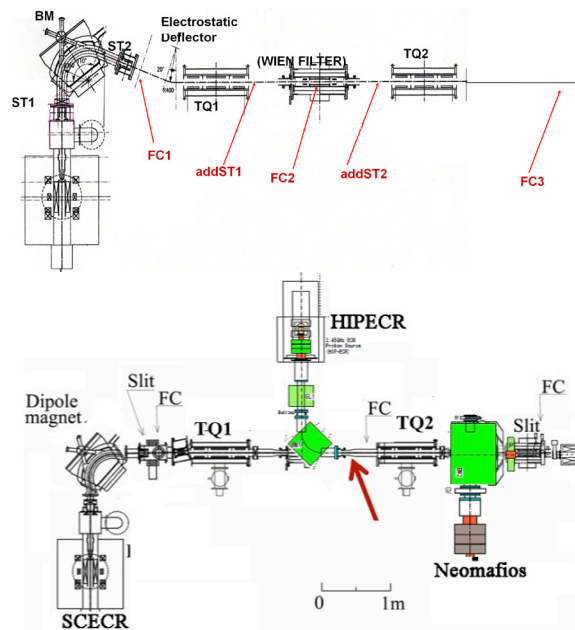


Figure 4: S-C-E-C-R のビーム輸送系と各コンポーネントの配置図。上図が更新前、下図が更新後。ST1, ST2 はステアリング、BM は偏向磁石、TQ1, TQ2 は静電 Triplet Q lens、FC1, FC2, FC3 はファラデーカップ、addST1, addST2 はステアリング電磁石である。

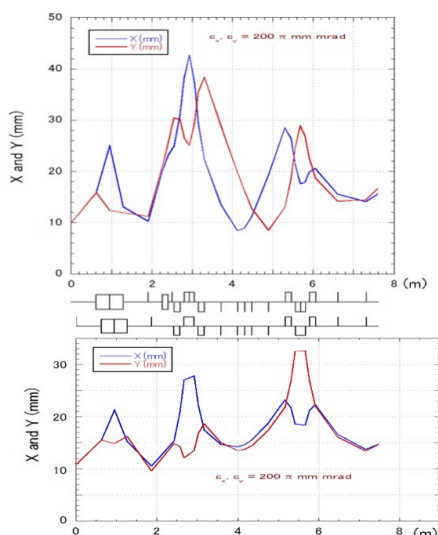


Figure 5: MadX の計算による更新前後の LEBT のビームエンベロップ。下図が更新後の場合。両図ともイオン源からのビームのエミッタンス 200π mm mrad を想定している。

エネルギービーム輸送系(LEBT)、とくに 18GHz S C E C R からの輸送系の更新を行った。旧 L E B T は Figure 4 の上図に示すとおりで、イオン源直後の分析電磁石が 110° の偏光角を持ち、その下流で 20° の静電偏向板で角度を戻す配置となっているが、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、M a d X [1]を使用したビームエンベロップの計算によると旧 L E B T ではエミッタンス 200π mm mrad 以上のビームは 80ϕ のバップルで制限されてしまうことがわかった[2](Figure 5 上図参照)。また 110° 偏向磁石と 20° 静電偏向板の部分をも 90° 偏向磁石に置き換える(Figure 4 下図)ことによりビームの透過効率の向上が見込まれる[2](Figure 5 下図参照)ため L E B T 系の変更電磁石

ION	FC1 [uA]	FC3 [uA]	FC3/FC1 [%]	MAINC [A]	adSTH [A]	adSTV [A]	
old LEBT	12C5+	240	200	83.3	0	0	0
New LEBT	13C5+	85	75	88.2	734	0.52	0.45
	22Ne8+	180	105	58.3	1125	0.7	1
	22Ne6+	125	110	88	0	0.16	0.15
	4He2+	250	200	80	440	0.23	0.21

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、FC1, FC3 はファラデーカップのビーム電流測定値、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。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 では条件によっては 90%近い透過効率を得られた。

部分の更新を行った。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%近いビーム透過効率を実現した(Table 1 参照)。ただし輸送されるビームのエミッタンスも大きくなっていると考えられるので、今後エミッタンス測定を詳細に行うことなどにより、入射のマッチングも最適化した上で加速ビームの大強度化を目指していく。また、AVF 主コイルの電流が大きいときの透過効率が依然悪いので改善策を模索していく。

5. まとめ

イオンビーム大強度化を目指して、サイクロトロン入射部においていくつかの改良・開発を行った。AVF サイクロトロンについては軸入射部のグレーザーレンズの増設、及びバンチャーの増設を行った。また、リングサイクロトロンについては入射ラインのバップルスリットの拡張を行った。AVF 軸入射部上流側のイオン源 LEBT についても更新を行い、ビームの透過効率が向上した。今後これらのコンポーネントの運用の最適化を行い、陽子から重イオンにいたるまで各イオンの大強度化を順次進めていく。

参考文献

- [1] CERN MAD-X Page: <http://frs.home.cern.ch/frs/Xdoc/>, MAD-X Primer CERN-AB-2004-027-ABP
- [2] T. Yorita, et. Al, Rev. Sci. Instrum. 85, 02A741 (2014)