

STATUS OF THE RCNP CYCLOTRON FACILITY

Mitsuhiro Fukuda^{#,A)}, Kichiji Hatanaka^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Takane Saito^{A)}, Hiroshi Ueda^{A)},
Hirofumi Yamamoto^{A)}, Hitoshi Tamura^{A)}, Mitsuru Kibayashi^{A)}, Keiichi Nagayama^{A)}, Shunpei Morinobu^{A)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University
10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

An upgrade program of the RCNP cyclotron facility is in progress to increase 400 MeV proton beam intensity to more than 5 μ A. An intense proton beam will satisfy the requirements of secondary particle production for neutron and muon applications. In order to produce the intense proton beam with high brightness and low emittance by a 2.45 GHz ECR proton source, rated output power of a 2.45 GHz microwave power supply was increased from 200 W to 2 kW and a waveguide system is being modified for the high power microwave transfer. Cooling performance of the proton source extraction electrodes was improved to achieve high stability and reliability for steady operation. An LEBT system of the K140 AVF cyclotron was newly equipped with a beam emittance monitor to evaluate the quality of the beam from ion sources. A new gradient corrector of the AVF cyclotron is being designed for improvement of beam focusing in the extraction region to avoid beam loss at a beam duct of the cyclotron exit. In this paper the present status of the RCNP cyclotron operation and R&D for production of the high intensity and quality proton beam is reported.

RCNP サイクロトロン施設の現状

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (Research Center for Nuclear Physics) のサイクロトロン施設では、AVF サイクロトロン (K 値 140MeV) を入射器とするリングサイクロトロン (K 値 400MeV) を用いて陽子、重陽子、³He、⁴He などの軽イオンビームの利用を中心とした原子核物理実験などが行われている。近年、超高分解能スペクトロメーター “Grand RAIDEN” などを用いた精密原子核物理研究に加えて、中性子やミュオンなどの二次粒子を用いた基礎・応用研究が幅広く行われるようになり、一次ビームである 400MeV 陽子ビームのビーム強度増強に対するニーズは高まっている。

400MeV 陽子ビームと鉛ターゲットの核破砕反応により生成した中性子による超冷中性子 (UCN: Ultra Cold Neutron) 源開発では、世界最高の UCN 密度 ~ 20 UCN/cm³ を達成し、UCN を用いた基礎物理研究が行われ始めた。また、タングステン・ターゲットに 400MeV 陽子ビームを照射して 30° 方向に得られる白色中性子束は、中性子に起因した半導体デバイスのシングルイベント効果などの研究に利用されており、半導体メーカーなどの産学連携共同研究も行われている。現状で得られる中性子強度は、400MeV 陽子の最大ビーム電流 1.1 μ A で制限されており、ユーザーからは、中性子生成量の増強が強く求められている。

一方、大型の超伝導ソレノイドコイルの中心に配置したグラフィット・ターゲットに 400MeV 陽子ビームを照射し、後方に放出されるパイオンを 3.5T の超伝導ソレノイドコイル磁場により大立体角で捕獲して別の超伝導ソレノイドコイルによる輸

送中にパイオンが崩壊して得られるミュオンを利用する MuSIC 装置が完成し、ミュオン生成試験がスタートした。世界最高強度のミュオンビーム生成を目指し、400MeV 陽子ビーム強度増強の要求も強まっている。

そこで、陽子ビーム強度の増強を実現し、ビーム透過効率を高めて機器の放射化を低減するため、永久磁石型 2.45GHz ECR イオン源の開発に着手し、高輝度で低エミッタンスの大強度陽子ビームの生成を目指している^[1]。AVF サイクロトロンでのビーム取り出しにおいては、水平方向のビーム集束力を強め、ビームダクト等でのビーム損失を抑制し、ビーム輸送系とのマッチングを向上させるためのグラディエント・コレクターの開発を進めている。また、リングサイクロトロンへのビーム輸送・入射効率などを改善し、高品質のビームを提供するため、AVF サイクロトロンに導入したフラットトップ (FT) 加速システムの改良とそれを用いたビーム開発も進めている。

一方、ここ数年、重イオンビーム利用のニーズが高まっており、重イオンの加速イオン種・エネルギー範囲の拡大とビーム強度増強を目指した 18GHz 超伝導 ECR イオン源の開発も行っている^[2]。特に、Ar や Kr、Xe などの多価重イオンビームの強度増強が求められており、18GHz 超伝導 ECR イオン源のプラズマ電極やバイアスプローブの形状・サイズ・配置などの最適化などを進めている。また、稼働中の 3 種類の ECR イオン源から引き出されたイオンビームの質を評価するため、既存のビームスリットとプロファイル・モニターを組み合わせたエミッタンス測定システムを AVF サイクロトロンに入射ビームラインに整備した。

[#] mhfukuda@rcnp.osaka-u.ac.jp

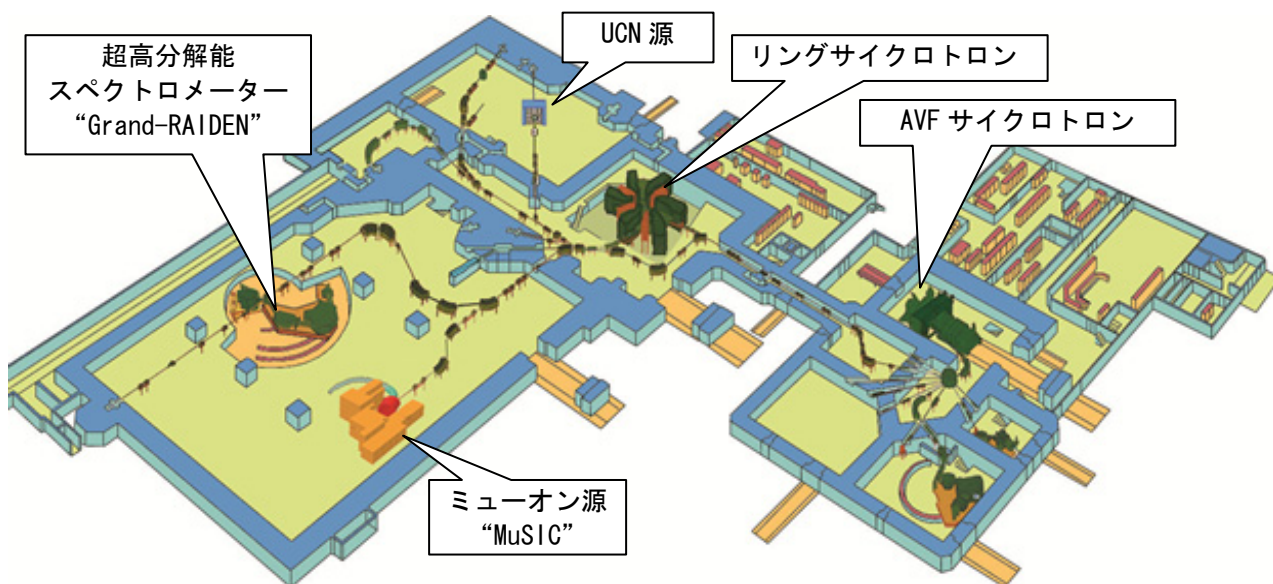


図1：RCNP サイクロトロン施設の鳥瞰図

2. サイクロトロンの運転状況

RCNP サイクロトロン施設のレイアウトを図1に示す。リングサイクロトロンの最大加速エネルギーは、陽子が 420MeV、 ^3He が 150MeV/n、 ^4He 及び重イオンが 100MeV/n であり、3 つの実験室にある 7 つのビームラインにビームを供給している。

加速ビームの実験利用、ビーム調整、ビーム開発などに要した 2010 年 1~12 月の総運転時間は 5,946 時間であり、その内、4,062 時間が陽子、重陽子、 ^3He 、 ^4He などの軽イオンビームの利用、1,884 時間が Li 以上の重イオンビームの利用に供された。図2に加速粒子別の運転時間を示す。最も運転時間が多かったのは陽子で、非偏極陽子ビームが全体の 30%、偏極陽子ビームの利用は 12%である。重陽子及び He イオンも含めると、これらの軽イオンビームの利用は全体の約 2/3 に及び、ここ数年は、この傾向は変わっていない。

サイクロトロンの老朽化に伴い、機器の不具合やトラブルの発生頻度は年々増えているが、応急処置などにより比較的短時間で復旧していることもあり、計画外のシャットダウン時間は 100 時間程度に留まっている。2008 年度に実施した AVF サイクロトロンの共振器異形部の冷却水配管補修箇所 (2 箇所) から再び漏水が発生し、今後のトラブル拡大が懸念されている。また、AVF サイクロトロンのバレーコイル冷却水配管からも漏水が発生したが、通常の運転範囲では冷却不要と判断し、特に修理は施していない。

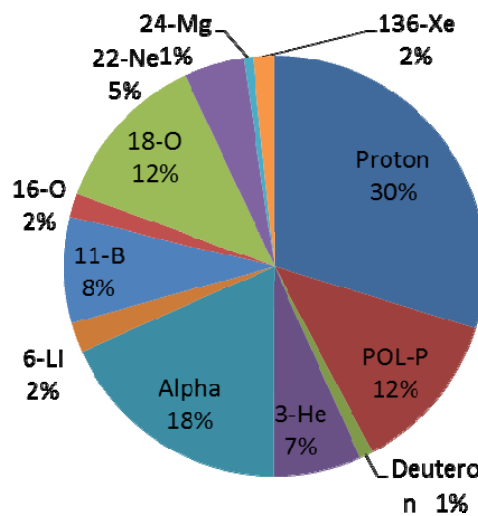


図2：2010年の加速粒子別の運転時間。総運転時間は 5,946 時間。

3. 2.45GHz ECR 陽子源の開発

これまで、2.45GHz ECR 陽子源には定格出力 200W のマイクロ波電源を用い、数 10~150W 程度のマイクロ波パワー、15kV の加速電圧で、0.5~0.6mA の陽子ビームを生成してきた。質の良いビームの中心部分だけをスリット等で切り出し、エミッタンスを小さく制限してサイクロトロンに入射するためには、ビーム強度をさらに高める必要がある。陽子源で得られるビーム強度はマイクロ波パワーに依存することから、マイクロ波電源を最大出力 2kW に更新した。

これに伴い、アイソレータや方向性結合器、スタブチューナーなどもマイクロ波電源マグネトロン・ヘッドの出力部フランジのサイズに合わせて WR340 に交換した。また、絶縁導波管でのパワー損失による温度上昇が大きくなることから、水冷タイプの絶縁導波管も用意している。

一方、陽子源の引出電極は、プラズマチェンバーに固定したプラズマ電極と、引き出し電場を形成する 4 連のギャップ電極から構成されているが、ステンレス製のギャップ電極は積極的に冷却しておらず、熱的に絶縁された状態になっていたため、数十 W の引き出しビーム損失パワーに対し、温度上昇が 200°C を超えていた。そこで、ギャップ電極を厚さ 15mm の銅板に固定し、この銅板を介して大気側に放熱できるように施した。また、ギャップ電極の開口部は陽子ビーム等のスパッタリングにより次第に大きくなり、削れた粉末が対向する電極に付着・成長して放電等の原因になったことから、開口部を比較的スパッタリングされにくいタンタル材に変更した。これにより、数ヶ月を超える長期間運転の目処が立った。

2. 45GHz ECR 陽子源のビームの質を評価するため、既存のビームスリットをギャップ 3mm に設定し、3mm 間隔で走査しながら下流のビームプロファイルモニターでビームの拡がりを繰り返し測定する簡易的な手法によりビームエミッタンス測定を行った。その結果、陽子源から引き出したビームのエミッタンスは陽子源の運転パラメータに依存し、50~200 π mm \cdot mrad の範囲で変化することが確認できた。陽子源下流の分析電磁石で陽子を分析した後に鉛直方向のビームスリットで制限を加えた場合には、15 π mm \cdot mrad 程度のエミッタンスになり、AVF サイクロトロンへの入射効率が向上することなども明らかになった。

4. グラディエント・コレクターの開発

AVF サイクロトロンのビーム取り出し系は、静電デフレクターと透過型磁気チャンネルから構成されているが、サイクロトロン本体電磁石の出口付近にビーム集束要素がないことから、ビームが水平方向に広がり、ビームのテールの一部が加速箱出口のビームダクトなどでロスし、放射化を招いていた。そこで、水平方向のビーム集束要素とビーム輸送ライン軸との整合を取るためのビーム軌道補正要素を兼ね備えたアクティブ型グラディエント・コレクターの開発に着手した。

図 3 にグラディエント・コレクターが無い場合のサイクロトロン本体内の磁場分布を示す。グラディエント・コレクターの設計に当たっては、広範な加速イオン種・エネルギー範囲に対応できるように、グラディエント・コレクターの磁極間隙部に発生させる磁場勾配を調整できるように磁極及びコイルの形状・サイズ・配置の最適化を図っている。ビーム輸送系のオブジェクト形成との整合性を確保するためには、 $(1/B \rho) dB/dx \sim 7/m^2$ の磁場勾配が必要とされている。

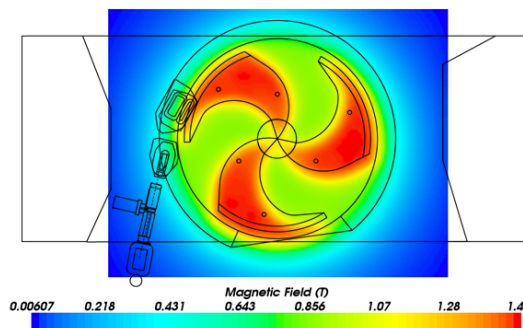


図 3 : 65MeV 陽子加速の場合の AVF サイクロトロン本体電磁石の磁場分布

参考文献

- [1] H. Yamamoto *et al.*, “永久磁石型 2.45GHz 陽子源の開発とエミッタンス測定”, 第 8 回日本加速器学会年会報告集, つくば市 (2011).
- [2] T. Yorita *et al.*, “RCNP 18GHz SCECR ビームの輸送系及びエミッタンスモニターの開発”, 第 8 回日本加速器学会年会報告集, つくば市 (2011).