

## STATUS OF THE RCNP CYCLOTRON FACILITY

Mitsuhiro Fukuda<sup>1,A)</sup>, Kichiji Hatanaka<sup>A)</sup>, Takane Saito<sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>, Hitoshi Tamura<sup>A)</sup>,  
Mitsuru Kibayashi<sup>A)</sup>, Hiroyuki Okamura<sup>A)</sup>, Atsushi Tamii<sup>A)</sup>, Yasuhiro Sakemi<sup>A)</sup>, Keiichi Nagayama<sup>A)</sup>,  
Michio Uraki<sup>A)</sup>, Shunpei Morinobu<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University  
10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

### Abstract

The RCNP cyclotron facility has been upgraded to produce beams of high quality and to increase intensity of heavy ion beams. A new flat-top acceleration system using the fifth, seventh and ninth harmonics has been installed to reduce the energy spread of the beams accelerated by the AVF cyclotron, and a flat-topped acceleration voltage waveform has been successfully produced by superimposing one of the harmonic voltage waveforms on the fundamental one. An 18 GHz superconducting ECR ion source has been developed to produce intense highly-charged heavy ion beam. A new beam line has been constructed to evaluate beam quality of the AVF cyclotron. A control system and some power supplies have been replaced by new ones to enhance reliability and maintenance efficiency.

## 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 (K140) を入射器としたリングサイクロトロン (K400) <sup>[1]</sup> で加速された良質のビームを用いて、高分解能の原子核物理研究などが精力的に行われている。リングサイクロトロンは、電磁石磁場の高安定化<sup>[2]</sup>により $10^{-6}$ オーダーの磁場安定性を実現し、フラットトップ加速<sup>[3]</sup>などによって $10^{-4}$ オーダーのエネルギー幅を有するビームを定常的に供給している。さらに、サイクロトロンのビーム輸送ラインと高分解能スペクトロメーター “Grand Raiden” を dispersion matching <sup>[4,5]</sup> させることにより、 $\Delta E/E=5 \times 10^{-5}$ の高分解能実験が行われており、例えば300~400 MeV 陽子ビームで $\Delta E=20 \sim 30$  keV FWHMの世界最高レベルのエネルギー分解能を達成している。

リングサイクロトロンの加速ビームの質が向上したことにより、エネルギー分解能は入射ビームを供給するAVFサイクロトロンの運転パラメータのわずかな変動に極めて敏感であることが明らかになってきた。つまり、AVFサイクロトロンの性能が実験のエネルギー分解能に影響を及ぼすような段階にきている。

そこで、AVFサイクロトロンの加速ビームの安定性をさらに高め、エネルギー幅を10keV程度まで縮小するとともに、リングサイクロトロンへのビームの入射効率を向上させるため、AVFサイクロトロンに新たなフラットトップ加速システムと超伝導ECRイオン源を導入するなど、RF系、イオン源系、ビーム輸送系、電源系、制御系等の更新を2004年度より

進めてきた<sup>[6]</sup>。講演では、AVFサイクロトロンのアップグレードを中心にした開発研究の現状について報告する。

### 2. AVFサイクロトロンのアップグレード

#### 2.1 アップグレードの概要

RCNP AVFサイクロトロンは1973年に稼動を開始して以来、長年にわたり原子核物理学や原子物理学などにおける実験研究を支える加速器として良質のイオンビームを提供してきた。1991年以降は主にリングサイクロトロンの入射器としてフル稼働し、“Grand Raiden”での高分解能実験の一翼を担っている。一方では、長年の稼動による機器の老朽化が進み、保守部品の確保などにも支障をきたしている。

そこで、AVFサイクロトロンで加速されるビームの質をより高め、リングサイクロトロンへの入射効率の向上を図るため、新たなフラットトップ加速システムの開発とそれに伴うRF系の改造、入射ビームの分析コースの新設を行った。また、重イオンと偏極Liイオンのビーム強度増強を図るため、超伝導ECRイオン源及び偏極Li<sup>3+</sup>イオン源の開発を進めている。さらに、制御系を融通性・拡張性に優れたPCベースのシステムにアップグレードするとともに、交換部品の入手が困難になっているトリムコイルなどの電源を更新した。アップグレードの主な項目と内容を表1に示す。

<sup>1</sup> E-mail: mhufukuda@rcnp.osaka-u.ac.jp

表1：RCNP AVFサイクロトロンの主なアップグレード内容

項目	内容
RF系	<ul style="list-style-type: none"> <li>フラットトップ加速システムの開発</li> <li>ディー電極の更新</li> <li>終段真空管アンプと電源の更新</li> </ul>
イオン源系	<ul style="list-style-type: none"> <li>18GHz 超伝導 ECR イオン源の開発</li> <li>偏極Li<sup>3+</sup>イオン源の開発</li> </ul>
ビーム輸送系	<ul style="list-style-type: none"> <li>AVFサイクロトロンの分析ビームライン (AVFサイクロトンからリングサイクロトン実験室へのパイパスビームラインも兼用) を新設</li> </ul>
制御系	<ul style="list-style-type: none"> <li>PC ベースの制御システムに更新</li> </ul>
電源系	<ul style="list-style-type: none"> <li>トリムコイル電源等の更新</li> </ul>

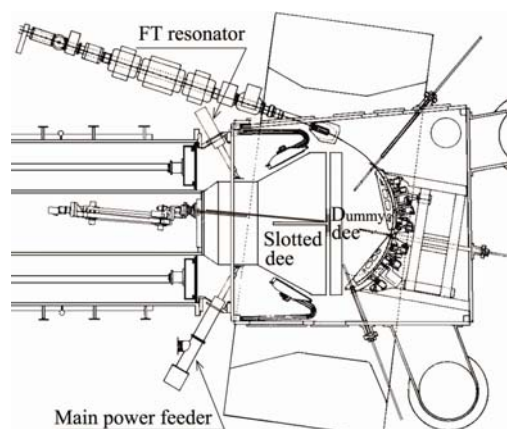


図1：RCNP AVFサイクロトロンの更新後の主な機器の配置図

## 2.2 フラットトップ加速システムの開発

加速粒子のエネルギー利得分布を均一化するため、基本波加速電圧に、基本波の整数倍の周波数を持つ高調波を重畳して加速電圧波形を平坦化する方法を採用した。これまでに、南アフリカのNAC<sup>[7]</sup>、理研<sup>[8]</sup>、原子力機構<sup>[9]</sup>のAVFサイクロトンにおいて、基本波の3倍または5倍の周波数の高調波を用いるフラットトップ加速システムが実用化されているが、RCNP AVFサイクロトンでは5倍、7倍、9倍の周波数の高調波の重畳が可能な新しいフラットトップ加速システム<sup>[10]</sup>を設計した。フラットトップ加速に必要なとされる高調波電圧は、基本波加速電圧の $1/n^2$  ( $n$ : 高調波次数) で与えられるため、高次の高調波を用いるフラットトップ加速は省パワーの点で極めて優れている<sup>[11]</sup>。

図1にAVFサイクロトロンの機器配置図を示す。外径170 mm、長さ700 mmのフラットトップ共振空洞を

容量結合により基本波共振空洞に連結した。基本波周波数6~18 MHzに対し、周波数帯域54~90 MHzの第5、第7、第9高調波を発生させることが可能である。定格10 kWのトランジスターアンプを用いて最大5 kV peakの高調波電圧を発生させることができる<sup>[12]</sup>。

フラットトップ加速システムの導入に当たっては、開き角180° のディー電極の中心軸に対して垂直な方向に励振される76.4 MHzの横方向共振モードの干渉を避けるため、中心軸に沿って幅10 mm、長さ1000 mmのスリットを設けたディー電極を製作した。また、基本波電圧を発生させる終段アンプ真空管をRCA4648から定格400 kWのRS2042SK(Siemens社製)に入れ替えるとともに、スクリーングリッド、コントロールグリッド、フィラメントの各電源も更新した。

これまでに、87 MeV <sup>4</sup>He<sup>2+</sup> (基本波周波数 $f_1 = 10.144$  MHz、第5高調波周波数 $f_5 = 50.720$  MHz、第7高調波周波数 $f_7 = 71.008$  MHz)、18.7 MeV <sup>2</sup>D<sup>+</sup> ( $f_1 = 6.75$  MHz、第9高調波周波数 $f_9 = 60.75$  MHz) などの加速条件などにおいて高調波電圧を発生させることに成功し、フラットトップ加速によるビーム開発を進めている。

## 2.3 18GHz超伝導ECRイオン源の開発

Krイオン等の重イオン加速のニーズに応えるため、大強度の多価重イオンビームの発生が可能な18 GHz超伝導ECRイオン源を開発した。設計に当たっては、理研の18 GHz超伝導ECRイオン源RAMSES<sup>[13]</sup>を参考にし、六極磁石の内径を90 mmに、プラズマチャンバー内径を80 mmに拡大するなどの改良を加えた。磁場測定を行った結果、半径36 mmにおいて820 mTの六極磁場が得られており、プラズマの閉じ込めに十分であることを確認した。

図2に超伝導ECRイオン源と分析電磁石等の写真を示す。超伝導ミラーコイルの冷却には伝導冷却式を採用し、約9日間で室温から通電可能な状態になる。運転を開始して間もないため、今のところ、安定にイオンを生成するためのコンディショニングに時間を要している。



図2：18GHz超伝導ECRイオン源と分析電磁石

多価の重イオン生成試験として $O_2$ をサポートガスとしたKrイオンの生成を開始し、これまでRAMSESと同様のミラー磁場設定により、RFパワー600 W、引出し電圧15 kVの条件で、約 $4e \mu A$ の $^{84}Kr^{22+}$ イオンの生成を確認した。今後、重イオンのビーム強度増強に向けた調整をさらに進めて行く予定である。

## 2.4 分析ビームラインの新設

リングサイクロトロンの入射ビームラインに $90^\circ$ 偏向電磁石を配置してビームラインを分岐し、AVFサイクロトロンで加速されたビームのエネルギー幅やエミッタンス等を測定するための分析ビームラインを新たに設置した。図3に分析ビームラインの概略図を示す。 $90^\circ$ 偏向電磁石D1の上流にsource point、 $90^\circ$ 偏向電磁石D2の下流にfocus pointをおき、運動量分散が12.6 mの分析システムを実現した。

この分析ビームラインは、リングサイクロトロン本体をバイパスしてリングサイクロトロンの引き出しビームラインに直結させており、高分解能のスペクトロメーターや中性子TOF装置などが置かれた実験室にAVFサイクロトロンのビームを直接輸送して利用することも可能である。

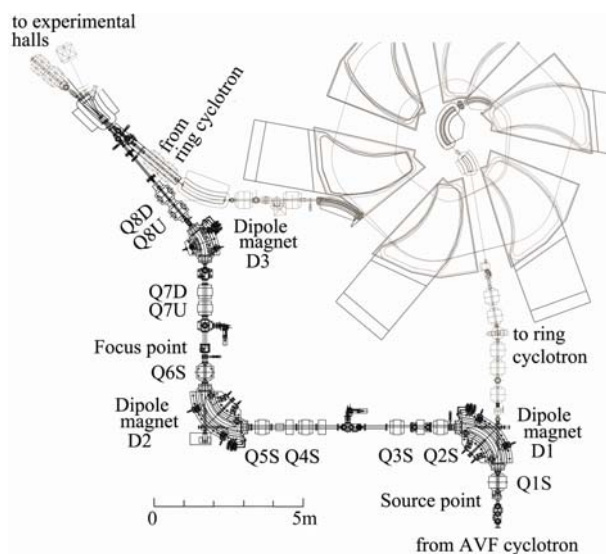


図3：新設された分析ビームライン

## 2.5 制御系および電源系の更新

従来は、micro VAXコンピューターをプラットフォームとし、最上位のSystem Control Unit (SCU)、その下層の6グループのGroup Control Unit (GCU)などから構成される階層型の制御システムであったが、micro VAXの保守が困難になったことから、ハードおよびソフトの融通性に優れ、将来的な拡張性も高いPCベースの制御システムに更新した。これまでローカル機器の制御や通信を担っていたMessage Tree Communicator (MTC) やMessage Tree Brancher (MTB)、Universal Device Controller (UDC) は継続して使用し、今回のアップグレードに伴って新設された機器の制御には、Programmable Logic

Controller (PLC) をベースにしたシステムを新たに導入した。

AVFサイクロトロンのトリムコイル電源は稼働してから35年が経過し、交換部品の調達が極めて困難になったことから、16台の電源の内の13台を更新した。その際、加速粒子に応じた等時性磁場の生成に必要なとされるトリムコイル電流値を再検討し、電源の定格電流値の見直しを行った。

## 参考文献

- [1] I. Miura *et al.*, "The Research Center for Nuclear Physics Ring Cyclotron", Proc. PAC1993, Washington D.C., USA (1993) pp1650-1654.
- [2] S. Ninomiya *et al.*, "RCNP Techniques for Producing Ultra-Precise Beams", Proc. Cyclotrons2001, East Lansing, Michigan, USA (2001) pp94-96.
- [3] T. Saito *et al.*, "The Flat-topping System for the RCNP Ring Cyclotron", Proc. Cyclotrons1995, Cape Town, South Africa (1995) pp169-172.
- [4] M. Fujiwara *et al.*, "Magnetic Spectrometer Grand Raiden", Nucl. Instrum. And Methods A422 (1999) pp484-488.
- [5] T. Wakasa *et al.*, "High Resolution WS Beam Line at RCNP", Proc. Cyclotrons2001, East Lansing, Michigan, USA (2001) pp458-460.
- [6] K. Hatanaka *et al.*, "Upgrade Project of the RCNP AVF Cyclotron Facility", Proc. Cyclotrons2004, Tokyo, Japan (2004) pp115-117.
- [7] J.L. Conradie *et al.*, "A Flat-top Acceleration System for the NAC Light Ion Injector Cyclotron", Proc. Cyclotrons1995, Cape Town, South Africa (1995) pp249-252.
- [8] S. Kohara *et al.*, "Flat-top Acceleration System in the RIKEN AVF Cyclotron", Nucl. Instrum. And Methods A526 (2004) pp230-238.
- [9] S. Kurashima *et al.*, "Development of the Flat-Top Acceleration System for the JAERI AVF Cyclotron", Proc. Cyclotrons2004, Tokyo, Japan (2004) pp362-364.
- [10] T. Saito *et al.*, "The Flat-topping System for the RCNP AVF Cyclotron", Proc. Cyclotrons2004, Tokyo, Japan (2004) pp333-335.
- [11] M. Fukuda *et al.*, "Flat-top Acceleration System for the Variable-Energy Multiparticle AVF Cyclotron", Rev. of Sci. and Instr., 74 (2003) pp2293-2299.
- [12] H. Tamura *et al.*, "RCNP AVFフラットトップシステム", 第3回日本加速器学会年会報告集, 仙台 (2006).
- [13] T. Nakagawa *et al.*, "Intense beam production from RIKEN 18 GHz ECRIS and liquid He free SC-ECRISs", Rev. of Sci. and Instr., 73 (2002) pp513-515.