STATUS OF THE RCNP CYCLOTRON FACILITY

Mitsuhiro Fukuda^{1,A)}, Kichiji Hatanaka^{A)}, Takane Saito^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hitoshi Tamura^{A)},

Mitsuru Kibayashi^{A)}, Hiroyuki Okamura^{A)}, Atsushi Tamii^{A)}, Yasuhiro Sakemi^{A)}, Keiichi Nagayama^{A)},

Michio Uraki^{A)}, Shunpei Morinobu^{A)}

^{A)} 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 A control system and some power supplies have been replaced by new ones to enhance reliability and maintenance efficiency.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)^[1]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[2]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^[3]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 ^[4,5]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ΔE =20~30keV 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^[6]。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Li³⁺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。

¹ E-mail: mhfukuda@rcnp.osaka-u.ac.jp

表 1	:	RCNP	AVF	サイク	クロ	トロン	ンの主	なア	ップ	グ
				レー	ード	内容				

項目	内容
RF 系	・フラットトップ加速システムの開発
	・ディー電極の更新 ・終段真空管アンプと電源の更新
イオン 源系	・18GHz 超伝導 ECR イオン源の開発 ・偏極Li ³⁺ イオン源の開発
ビーム 輸送系	 AVF サイクロトロンの分析ビームラ イン(AVF サイクロトロンからリン グサイクロトロン実験室へのバイパ スビームラインも兼用)を新設
制御系	・PCベースの制御システムに更新
電源系	・トリムコイル電源等の更新



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^[7]、理研 ^[8]、原子力機構^[9]のAVFサイクロトロンにおいて、 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サイクロトロンでは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^[10]を設計した。フラットトップ加速に 必要とされる高調波電圧は、基本波加速電圧の1/n² (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^[11]。

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^[12]。

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 ${}^{4}\text{He}^{2+}$ (基本波周波数f₁ = 10.144 MHz、第5高調波周波数f₅ = 50.720 MHz、第 7高調波周波数f₇ = 71.008 MHz)、18.7 MeV ${}^{2}\text{D}^{+}$ (f₁ = 6.75 MHz、第9高調波周波数f₉ = 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^[13]を参考に し、六極磁石の内径を90 mmに、プラズマチェン 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 0_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4 e_{μ} Aの⁸⁴Kr²²⁺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° 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°偏向電磁石D1の上流にsource point、90°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。



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年間が経過し、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

- 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.*, "Flattop 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.