

Present Status of AVF Cyclotron at JAEA

Ikuo Ishibori^{A)}, Takayuki Nara^{A)}, Satoshi Kurashima^{A)}, Ken-ichi Yoshida^{A)}, Takahiro Yuyama^{A)}, Tomohisa Ishizaka^{A)}, Susumu Okumura^{A)}, Nobumasa Miyawaki^{A)}, Hirotsugu Kashiwagi^{A)}, Yosuke Yuri^{A)}, Watalu Yokota^{A)}, Toshihiro Yoshida^{B)}, Katsuhiko Akaiwa^{B)}, Satoshi Ishiro^{B)}, Tsuyoshi Yoshida^{B)}, Satoshi Kano^{B)}, Akira Ihara^{B)}, Keisuke Takano^{B)}, Seigo Mochizuki^{B)}, Hiroyuki Saitoh^{B)}

^{A)}Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency
1233 Watanuki-machi, Takasaki-shi, Gunma, 370-1291, Japan

^{B)}Beam Operation Service, Co., Ltd.
1233 Watanuki-machi, Takasaki-shi, Gunma, 370-1207, Japan

Abstract

The AVF cyclotron (K=110 MeV) at JAEA (Japan Atomic Energy Agency) provides ion beams of a variety of species and energies with a number of irradiation methods mainly for research in materials science, biotechnology. The regular maintenance of the cyclotron is carried out every year selectively on different parts that appear to be deteriorated in order to reduce troubles and to stably provide the ion beams. This led to completion of all the scheduled beam time in fiscal 2006 and 2008. The following major developments are in progress; a magnetic field measurement system with an NMR magnetometer for a wide range of main magnetic field strength of the cyclotron, a multipole-magnet system for uniform-beam irradiation and a measurement system of beam acceptance of the cyclotron.

原子力機構 AVF サイクロトロン の現状

1. はじめに

日本原子力研究開発機構(JAEA)高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設 TIARA はAVFサイクロトロン(K=110MeV)を有し、宇宙用半導体の耐放射線評価や生物細胞への低線量照射の影響など、材料・バイオ技術の研究を中心にイオンビームを提供している^[1]。ユーザーが要望する様々なイオン種・エネルギーに対応するために、3台の外部イオン源を用いてH⁺、D⁺などの軽イオンから¹⁹⁷Au³¹⁺まで多くのイオン種を、10~90MeV(H⁺)、2.5~27MeV/u(重イオン)の様々なエネルギーに加速している。一般的なサイクロトロンは主に核物理研究や医療分野に使用されているが、TIARAでは材料・バイオ技術の研究に用いるために、カクテルビーム加速技術、マイクロビーム照射技術、大面積均一照射技術などの高度な加速技術及び照射技術の開発を進めている。これらの技術を安定に利用するため、サイクロトロン電磁石の磁場安定化や冷却水の温度安定化^[2]など各種機器の安定化技術を開発した。また、装置の保守管理を定期的・計画的に行うことで、上記の技術に必要な基本性能を維持すると共に、安定なビーム提供を実現している。

2. 利用運転及び定期保守・整備

TIARAサイクロトロンではJAEA内外の多様なユーザーの要求に応えるために各種電磁石やイオン源など多くの運転パラメータを高い頻度で変更している。2008年度においては642件の実験に利用されており、イオン種及びエネルギー変更を234回、照射コース切り替えを308回行い、運転時間は3162時

表1 2008年度のイオン種・エネルギー、コース切り替え等回数

I イオン種・エネルギー変更	234 回
コース変更	308 回
加速モード変更	57 回
平均運転時間	4.9 時間/件
平均実験時間	3.9 時間/件
実験利用件数	642 件

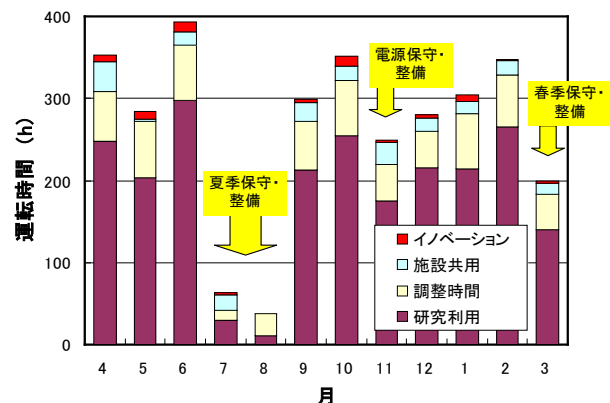


図1：2008年度のサイクロトロン の月別運転時間の内訳

間である(表1)。図1に2008年度の月毎の運転状況の内訳を示す。年間の照射実験時間は2533.5時

間(全体の約80%)であるのに対し、イオン種・エネルギー変更やコース変更のための調整運転に約630時間(全体の約20%)を費やしている。平均で1時間6分の調整運転で各実験にビームを提供していることが分かる。また2007年度7月より文部科学省の『先端研究施設共用イノベーション創出事業』を受託して、民間企業を中心とした利用に年間約70時間を供した。

TIARAではユーザーに安定なビームを提供することが重要な使命であるため、定期的・計画的な保守・整備により故障予防保全に重点を置くとともに、故障への迅速な対応ができる態勢作りを進めている。特に毎年7、8月に約6週間のサイクロトロン定期保守・整備、11月に1週間の電磁石電源定期保守・整備、3月に2週間その他の機器の保守・整備を実施している。保守・整備の内容は、高経年化に限られた箇所集中しないように、毎年計画的に替えている。最近の代表的なものは、サイクロトロン本体に2台設置されている共振器の4年振りの分解点検で、内筒及び外筒のコンタクトフィンガーを全て交換した。使用後のコンタクトフィンガーを観察すると外筒との接点に発熱と思われる損傷の著しい部分がみられた。ビーム調整に欠かせないマグネチックチャンネルプローブでは、ヘッド部のビーム計測用ブロックを長手方向が大きいものに交換することで、絶縁部にビームが当たらない様にするとともに、水冷ブロックの形状を改良し、ビームを止めた際に発生する熱に対する除熱能力を向上させ電流リード部への輻射熱を低減させた。その結果、発熱による電流リード部の劣化も改善された。デフレクターの電極磨き及び電極交換などは毎年行っている。電磁石電源に関しては、経年劣化が進んだ主要電磁石電源のコンデンサ類を交換、タイマーリレーは不良品が発見され高経年化が疑われたため全数を交換した。サイクロトロン本体電源の内部機器による温度上昇が著しい筐体には除熱用のファンを増設するなどの整備を実施した。真空排気系では、サイクロトロン本体に設置されている4台のクライオポンプの点検整備を2年振りに実施した。

加速後のビームを正弦波で間引くS型ビームチョッパーでは、アンプ筐体内に設置されている冷却水ホースは全数を交換し、1992年の設置後初めて、全ての電源回路に組み込まれている電磁接触器とリレーの全数の交換を実施した。

定期保守・整備以外では、装置が故障した場合に迅速な故障箇所の特定制理を行った。例えば、近年故障が多いサイクロトロンRFアンプの真空管交換については、従来はメーカーに交換作業を依頼したので2~3日を要していたが、現在は職員・オペレーターの手により数時間で交換できるため、照射実験に及ぼす影響は非常に小さい。このような態勢を積み重ねることにより2006年度に続き2008年度にも計画外停止が無く年間運転利用率100%を達成した。

3. 主な技術開発の概要

3.1 磁場計測システムの開発

サイクロトロンの調整時間を短くして照射時間に振替えることが強く求められている。従来の主電磁石の起動シーケンス(サイクリング励磁)では、サイクリング励磁による磁場立ち上げに約30分かかり、調整時間を長くする要因となっている。このため加速箱内に設置した核磁気共鳴(NMR)プローブでサイクロトロンの主磁場をリアルタイムで計測することにより短時間で磁場形成する技術の開発に着手した。サイクロトロンの主磁場は既にNMRプローブで測定可能となっているが、その磁場強度は1.6-2Tに限定されており、全運転条件(0.6-2T)での測定はできなかった。このため、全磁場強度範囲での計測を可能とするNMRプローブを新たに開発した。図2にNMRプローブの配置を示す。NMRプローブは磁場の均一度が良好でないとノイズが大きく測定できない。そのためサイクロトロン磁極間のアース板上で2次元的にプローブを動かすマニピュレータを製作し均一な場所を探索した。その結果、0.6~2Tの全域をNMRプローブで測定できるようになった^[3]。

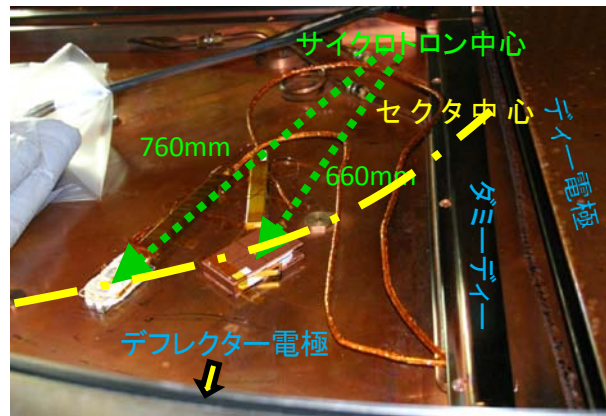


図2：サイクロトロン内部に設置したプローブ。左が従来型、右が全磁場強度範囲対応型。

3.2 多重極電磁石を用いた均一ビーム照射技術の開発

従来からTIARAサイクロトロンではラスタースキャン方式による最大10cm×10cmの大面积均一照射が利用されている。この方式は、2方向に異なる周波数(水平方向:50Hz、鉛直方向:0.25~5Hz)で双極磁場を変化させスポットビームを掃引する。つまり、局所的には、フルエンス率は一定ではなく、スキャン周波数に依存してゼロから非常に高い値まで周期的に変化する。スポットビームによる照射試料の加熱や局所的なフルエンス率の周期的変化が許容できない実験にはスキャンによる照射では対応できない。また、良い均一度を得るには、スキャンの周期に比べて照射時間を十分長くしなければならないなど、高い均一性を保ちつつ低フルエンスを実現す

ることは難しい。そこで、このような既存方式の欠点を補う新たな均一照射法として、非線形集束力によってビーム均一化ができることに着目し、拡大照射野のビーム照射技術を開発している^[4]。8極電磁石等のつくる非線形集束力によりビームの横方向強度分布のテイルを内側へ折り畳み均一化する。ビーム自身が均一な強度分布を有するので、広い照射野全体を同時に一定のフルエンス率で照射することが可能である。

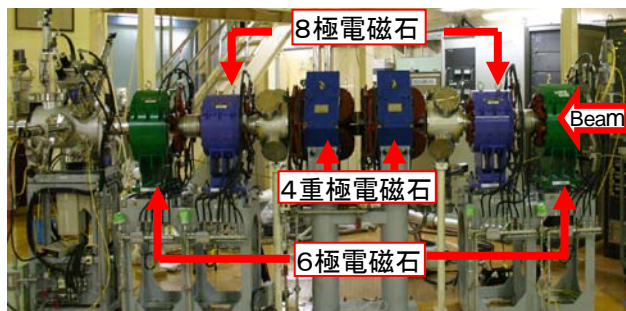


図3：多重極電磁石のビームライン構成

ビームラインには、ビームの広がりテイルを折り畳むための8極電磁石に加え、ビーム重心が中心軌道からずれた場合に補正する6極電磁石が設置されている。図3に各電磁石の配置を示す。拡大形成されたビームの均一度は元のビーム分布にも大きく依存する。十分に均一なビームを形成するには、初期分布はガウス分布や放物線分布のように滑らかである必要がある。サイクロトロンビームはこの様な分布と大きく異なるため、ビームラインの2ヶ所に散乱体（薄膜）を導入してガウス分布化を図っている。その結果、10MeV-H⁺ビームを用いてこれまでに6cm×6cmの均一照射野を形成し6%の均一度を達成した。フルエンス率やフルエンスを広範囲にわたって変更するには、サイクロトロン入射系に設置されている銅製多孔シートを用いたビームアテネータを使用する^[5]。パルス電場によるビームチョッピングを用いて1μs以下の短時間照射も可能である。

現在は均一度の評価にフィルム線量計を使用しているが、ビーム誘起蛍光を用いた計測系の開発を進めている。

3.3 アクセプタンスモニターの開発

サイクロトロンへのビーム入射及び加速におけるビームロスを低減するためには、サイクロトロンのアクセプタンスに入射ビームのエミッタンスを整合させる必要がある。サイクロトロンのアクセプタンスは設計時に大まかに検討されたことがあるが、実ビームを用いて測定されたことはない。このため、この整合を評価するためのエミッタンス及びアクセプタンスを測定する装置をビーム入射ラインに据え付けた。図4に装置の全体写真を示す（ビームは写真左側から入射される）。本装置を用いて今後サイ

クロトロンのアクセプタンスと入射されるイオンビームのエミッタンスのマッチングを明らかにする。

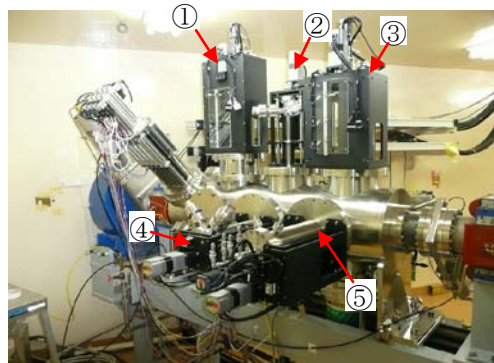


図4：アクセプタンスモニターの構成。①位置制限スリット(y)、②、④角度分布測定器、③角度制限スリット(y)、⑤角度制限スリット。

参考文献

- [1] K. Arakawa, et al., Proceedings of the 13th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, Canada, (1992) 119,
- [2] S. Okumura, et al, "Magnetic field stabilization by temperature control of an azimuthally varying field cyclotron magnet", Rev. Sci. Instrum. 76 (2005) 033301.
- [3] S. Okumura, et al, "Development of a magnetic field monitoring system for the JAERI AVF cyclotron", Nukleonika 48, Suppl. 2 (2003) S35.
- [4] Y. Yuri et al., Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting Japan, August 6-8, 2008., Higashihiroshima, (2008) 397.
- [5] T. Yuyama et al., Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting Japan, August 6-8, 2008., Higashihiroshima, (2008) 259.