

MAGNETIC FIELD MEASUREMENT SYSTEM FOR QUICK CHANGE OF THE CYCLOTRON MAGNETIC FIELD

Susumu Okumura^{1,A)}, Nobumasa Miyawaki^{A)}, Takahiro Yuyama^{A)}, Tomohisa Ishizaka^{A)}, Satoshi Kurashima^{A)}, Hirotsugu Kashiwagi^{A)}, Ken-ichi Yoshida^{A)}, Ikuo Ishibori^{A)}, Yosuke Yuri^{A)}, Takayuki Nara^{A)}, Watalu Yokota^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{B)}, Tsukasa Nakajima^{C)}

^{A)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Research Agency
1233 Watanuki, Takasaki, Gunma 370-1292

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

^{C)} Echo Electronics Co., Ltd.
4-8-41 Kasiwa, Siki, Saitama 353-0007

Abstract

High-frequency change of beams accelerated for users is required at the JAEA AVF cyclotron, since the irradiation time is short in most cases and a large variety of beams is used. The ratio of the beam changing time to the whole operation time is not negligible and the offering machine time for users is half the required one. We are developing a technique for reducing the changing time of the magnetic field of the cyclotron, which dominates the beam changing time. Since a precise and stable magnetic field is required for acceleration in the cyclotron, especially for advanced beam applications, such as microbeam production, a magnetic field measurement system with a nuclear magnetic resonance (NMR) magnetometer was developed to monitor a wide range of magnetic field for acceleration of variety of beams in the JAEA AVF cyclotron.

サイクロトロン磁場の迅速切替のための磁場計測システム開発

1. はじめに

日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設TIARAのAVFサイクロトロン（引き出し半径923mm）では、材料・バイオ研究を中心に研究開発がおこなわれている。その照射の特徴は短時間照射で、しかも多種多様なイオンビームが用いられることである。このため、運転スケジュールは、同一ビーム条件での連続運転が短く、ビームの種類を次々に変更する「短時間運転・高頻度切替運転」という、従来では想定されなかったサイクロトロン利用形態となっている。

サイクロトロンマシンタイム申込時間は募集時間の2倍となっており、マシンタイムは慢性的な不足状態である。このため、提供可能なマシンタイムをいかに捻出するかが重要な課題であった。「短時間運転・高頻度切替運転」においては、ビーム切替に要する時間の占める割合が多い¹⁾。そこで、ビーム切替時間の短縮に取り組んでいる。

サイクロトロンにおけるビーム切替では、サイクロトロン電磁石の磁場形成に大部分の時間を費やしている。TIARAサイクロトロンでは、プロトンから重イオンまで様々なビームを加速するために広い範囲にわたって磁場強度を生成する必要がある、しかもマイクロビーム形成など先端的ビーム応用のため、

高精度かつ高安定に磁場を形成しなければならない。磁場切替時の過渡的磁場変動抑制や十分な磁場再現性を得るために「サイクリング励磁」が従来から用いられており、約30分にわたりメインコイル電流を増減させる必要があった。

一方、サイクロトロンでは、メインコイルの電流が比較的高い場合、磁場立ち上げ後、数十時間にわたってビーム強度が減少するなどのビーム変動が発生していた。そこで、核磁気共鳴プローブをサイクロトロン内部に設置し、メインコイルの発熱による鉄心温度上昇で磁場が減少することを突き止めた。鉄心温度上昇を抑制することで高安定な磁場形成を実現した²⁾。その結果、鉄心温度上昇による磁場変動に隠れて、従来では確認できなかった、サイクロトロン電磁石の立ち上げ直後の過渡的磁場変動や磁場再現性、電源変動の影響がこの核磁気共鳴プローブで確認できるようになった。

そこで、サイクロトロン電磁石の磁場を直接モニタすることで、「サイクリング励磁」に代わる、短時間磁場形成技術の開発に取り組んでいる。しかし、このプローブでは、計測可能な磁場強度は高磁場(1.6-2T)に限定されており³⁾、TIARAサイクロトロンでの全運転条件での計測は困難であった。このため、全磁場強度範囲での計測を可能とする、核磁気共鳴プローブを用いた磁場計測システムを新たに開発し

¹⁾ E-mail: okumura.susumu@jaea.go.jp

た。

2. プローブ設置位置探索

TIARAサイクロトロンは、H型電磁石の平坦な磁極面に片面4つのスパイラル形状のセクターを付加したAVFサイクロトロンである。ビーム周回方向に磁場の強弱が、半径方向には等時性磁場勾配があり、通常核磁気共鳴プローブが用いられる均一な磁場分布ではない。最も均一性が高いのはセクター上の一部と考えられる。

磁極間隙は、アース板で上下を、加速箱で周りを囲まれた加速空間で、加速に必要なディー電極とダミーディ、ビーム引き出しに必要なデフレクター電極やマグネチックチャンネルなど、多数の機器が設置され、プローブを新たに設置できる空間は限定されている。セクター上の領域であり、しかもデフレクター電極の挿入口が利用できることから、デフレクター電極付近の下側アース板上で新プローブ設置位置探索を行った。

従来プローブでは、位置探索は高磁場条件のみで、セクター上のごく一部の領域に限定していた。しかも、磁場勾配補正等で磁場均一性の向上も磁場条件によっては必要となっていた。今回の新プローブ計測磁場強度範囲は従来より広く、磁場分布が磁場強度で異なるため、従来のプローブ位置ではすべての計測は困難であった。そこで、より広い領域で詳細な位置探索を可能とするために、サイクロトロン外部からプローブ位置を精密に操作できるマニピュレータを用いて最適な設置位置を探索した。

マニピュレータは、サイクロトロン外部のデフレクター挿入口に設置したXYステージから、サイクロトロン内部に伸びたステム先端のプローブの位置を走査する。横長形状のプロトン試料内での磁場強度変化を最小限に抑制してより大きな共鳴信号を得るために、プローブ本体はマニピュレータで回転可能となっている。さらに、プロトン試料位置での、1軸方向の磁場勾配補正が可能な磁場補正コイルをプローブ先端に取り付け、プローブ本体とは独立してマニピュレータで回転できる構造となっている。

全磁場強度範囲が網羅できるよう、TIARAサイク

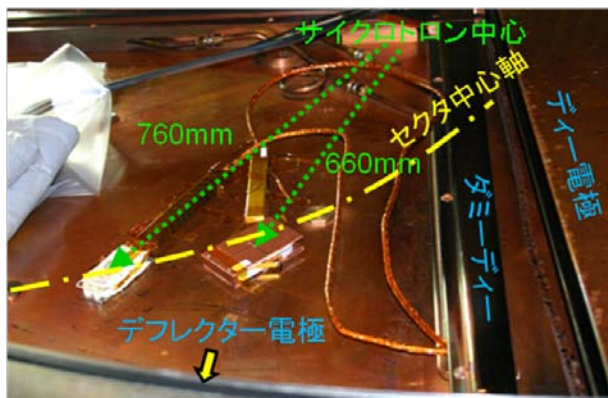


図1：サイクロトロン内部に設置したプローブ
(左が従来型で右が全磁場強度範囲対応型)

ロトロン of 代表的な運転条件、0.6, 1.0, 1.4, 2.1T (10MeV H⁺, 30MeV ⁴He²⁺, 50MeV ⁴He²⁺, 320MeV ¹²C⁶⁺)の磁場条件においてプローブ位置探索を実施し、共通して磁場計測が可能な位置を見いだした。従来は半径760mmであったが、今回の位置は半径660mmであり、いずれもセクター中心軸上である(図1参照)。

3. 磁場計測システム

3.1 概要

磁場計測システムは、プローブ、ヘッドアンプ、磁場測定器、周波数カウンタ、PCで構成されている。磁場変調によって検出した共鳴信号は、磁場測定器で自動追尾され、その共鳴周波数モニタ信号を周波数カウンタへ入力して、PCで磁場強度の自動計測が行われる。計測対象の磁場強度範囲が広いと、低磁場(0.5-1.2T)と高磁場(1.2-2.1T)の2つに分け、それぞれ独立した発振回路が1つのプローブ内に納められている。サイクロトロンでは磁場均一度が低いため、核磁気共鳴信号は小さい。そこで、プローブ等の振動やRFによるノイズ発生を極力抑えると共に、より大きな信号を得るために、共鳴吸収の緩和時間を考慮した、間欠変調モードによる計測(周期200ms)も可能としている。

3.2 プローブ

プローブは、発振回路、変調コイル、発振コイル、プロトン試料等から成る。回路素子等は接着剤(トルシール)で固定を施して振動を防止している。変調コイル中心に発振コイルとプロトン試料があり、低磁場用と高磁場用に分かれている。変調コイルのさらに外側には補正コイルが取り付けられている。

下側アース板上に設置したプローブからは多芯ケーブルが、ダミーディーとディー電極の間隙の下側アース板上を経て加速箱フランジのフィードスルー端子に接続されている。プローブはRFが侵入しないように銅板(厚さ10mm)でシールドを施し、ダミーディーの高さ50mmよりも十分低い25mmの高さとなっている。ケーブルもRFシールドを施すと共に、振動防止と固定のため随所に重石が取り付けられている。プローブ設置位置はデフレクター電極に近いが、放射線ダメージによる故障は今のところ発生していない。

3.3 磁場計測手順

サイクロトロン of 励磁完了後、発振周波数をまず手動で調整し、磁場測定器に表示される共鳴信号を見ながら、変調幅、信号ゲインを調整する。十分大きい信号が確認できたら自動追尾モードへ切り換える。必要に応じて補正コイル電流の調整や間欠変調モードを使用する。PCへ取り込まれた磁場データは、LabVIEWによるプログラムによって、トレンド表示

を行うと共に、ファイルへ保存される。

4. 磁場計測結果

4.1 立ち上げ時の磁場計測

10MeV H⁺の磁場条件で磁場計測を行った。メインコイルのサイクリング励磁を完了し、トリムコイル等すべての電磁石立ち上げ直後から計測を開始した。磁場強度は0.62Tで、運転条件の中では最も低い磁場条件である。図2は電磁石の立ち上げ完了時を基準時間として表示している。立ち上げ完了後、約4分で 1×10^{-4} 以内に磁場は安定となっている。一方、サイクリング励磁を省略した場合には、図3のように、立ち上げ完了後、 1×10^{-4} 以内に磁場が安定するには約10分かかり、しかも磁場再現性が悪い。

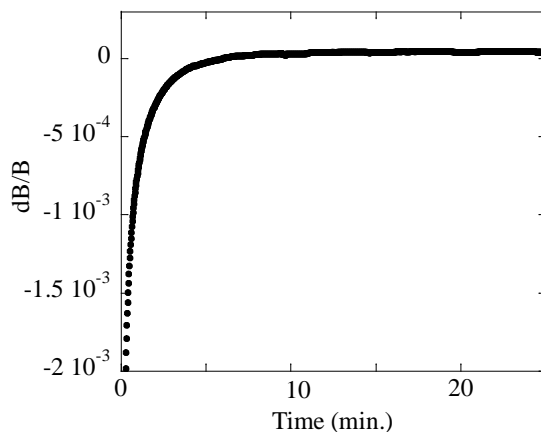


図2： 10MeV H⁺の立ち上げ時の磁場変化 (サイクリング励磁有り)

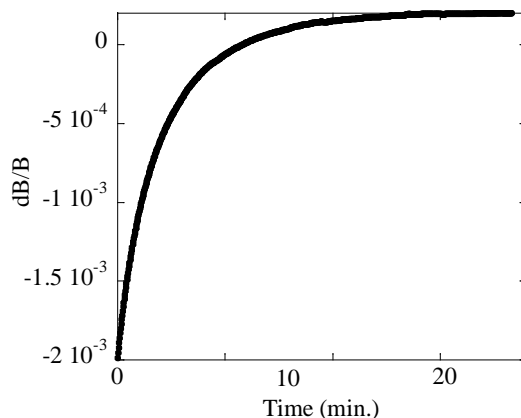


図3： 10MeV H⁺の立ち上げ時の磁場変化 (サイクリング励磁無し)

4.2 間欠変調モードによる磁場計測

320MeV ¹²C⁶⁺の磁場条件で磁場計測を行った。磁場強度は2.06Tで、運転条件の中では最も高い磁場条件である。共鳴信号が小さく当初はノイズに埋も

れていたが(図4)、間欠変調モードに切り換えたところ、共鳴信号が大きくなり十分自動追尾が可能となった。その結果、 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 以内の磁場安定度が確認できた(図5)。

5. おわりに

TIARAサイクロトロンでの運用で用いる広範囲の磁場強度において、本システムで磁場計測が可能であることが確認できた。しかし、加速RF等によるノイズのため必ずしも常時磁場計測は行っていない。今後は、常時磁場計測を可能とすると共に、短時間磁場形成技術の開発を進める。本技術開発は、文部科学省の量子ビーム基盤技術開発プログラムによる委託業務として実施した、平成20年度「多様なイオンによる高精度自在な照射技術の開発」の成果である。

参考文献

- [1] T. Yuyama, et al, "Present status of AVE cyclotron at JAEA", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, 259 (2008).
- [2] S. Okumura, et al, "Magnetic field stabilization by temperature control of an azimuthally varying field cyclotron magnet", Rev. Sci. Instrum. 76, 033301 (2005).
- [3] S. Okumura, et al, "Development of a magnetic field monitoring system for the JAERI AVF cyclotron", Nukleonika 48, Suppl. 2, S35 (2003).

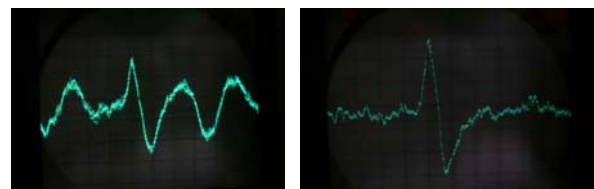


図4： 320MeV ¹²C⁶⁺での共鳴信号：右が間欠変調モード

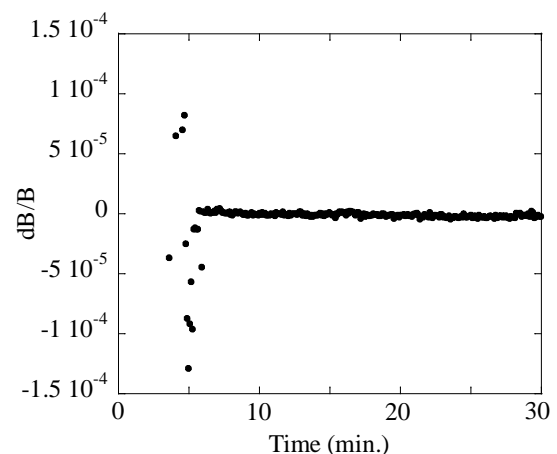


図5： 320MeV ¹²C⁶⁺での磁場計測結果 (5分過ぎ以降は間欠変調モードで十分大きな共鳴信号のため計測値が安定)