

MAGNETIC FIELD STABILIZATION AT THE JAERI AVF CYCLOTRON

Susumu Okumura¹, Satoshi Kurashima, Nobumasa Miyawaki, Ken-ichi Yoshida, Hirotsugu Kashiwagi,
Mituhiro Fukuda, Takayuki Nara, Takashi Agematsu, Ikuo Ishibori, Yoshiteru Nakamura, Watalu Yokota
Japan Atomic Energy Research Institute
1233 Watanuki, Takasaki, Gunma 370-1292, Japan

Abstract

Highly stabilized magnetic field is essential for advanced beam applications using a precisely controlled ion beam, especially a microbeam at the JAERI AVF cyclotron. We have achieved magnetic field stability of $\pm 5 \times 10^{-6}$ and the beam intensity has been stabilized well in the normal multi-turn extraction mode. Instability of the beam intensity was observed in the single-turn extraction mode for reduction of the beam energy spread, required for production of a microbeam. A slight magnetic field change, caused by a change of the excitation current of the main coil of the order of 10^{-6} , induced the beam intensity change.

原研AVFサイクロトロンにおける磁場高安定化

1. はじめに

原研AVFサイクロトロンでは、運転開始当初からビーム強度が時間と共に徐々に減少することがたびたび発生していた。トリムコイル電流を再調整することでビーム強度が回復することから磁場変動が原因であると推察すると共に、鉄心温度上昇との相関を明らかにした^[1]。一方、磁場変動量計測に関しては、トリムコイル補正量から予想される磁場変動量が $B/B = 10^{-5} \sim 10^{-4}$ とわずかであるが、磁場勾配など精密な磁場計測に不向きなサイクロトロン内部環境のため、当初は計測が困難であったが、NMRプローブの改良を進めることで、ビーム加速時における磁場変動量の測定に成功した^[2]。その結果、 10^{-4} 台の磁場変動が観測され、磁場減少に伴うビーム位相の遅れがビーム強度減少の原因であると判明した。鉄心温度を詳細に測定した結果、磁場変動の原因については、その変動量が、鉄心の温度上昇によるポールギャップや鉄心の磁気特性変化で十分説明でき、その時定数もほぼ一致することから、鉄心温度上昇であると断定した。鉄心温度上昇は、メインコイルからの熱流入が主な原因であるため、メインコイルが接触している上下ヨークとの間に温度制御可能な定温板を設置するなどの対策で温度上昇が抑制できることをシミュレーションで確認した。この対策で、鉄心温度変動を抑制し、磁場変動量 $B/B = \pm 5 \times 10^{-6}$ 以内を達成した。その結果、通常の運転では磁場変動に伴う重大なビーム強度減少は生じなくなった^[3]。

一方、材料・バイオ研究へのサイクロトロンビーム応用の進展に伴い、従来は静電加速器が中心であったマイクロビーム形成を、サイクロトロンの数百MeV重イオンビームで実現する技術開発を進めている。当初は、コリメータ方式で進められてきたが、目標とするビーム径 $1 \mu\text{m}$ を達成することはコリ

メータでの散乱等の問題により困難であり、現在は集束方式でのマイクロビーム開発を進めている。集束方式での最大の問題は、集束に用いる四重極電磁石での色収差で、通常のサイクロトロンではマルチターン引出のため 0.5% 前後のエネルギーの拡がりがあり、色収差によるビームサイズの拡がり数が μm に達する。そこで、原研AVFサイクロトロンでは、フラットトップ加速によってシングルターン引出を実現し、エネルギーの拡がりを目標である 0.02% 以内とするよう開発を進めている^[4]。フラットトップ加速に必要な磁場安定度は計算上、既に達成された $B/B = \pm 1 \times 10^{-5}$ 以内で十分であるが、これまでのビーム加速実験では、トリムコイル補正量から推定すると、ビーム強度は $B/B = 10^{-6}$ 台の磁場変動で変化しており、さらなる磁場安定化が必要となっている。 $B/B = 1 \times 10^{-6}$ 以下の分解能での磁場測定は現在のところ達成できていないが、フラットトップ加速用高調波励振時にはノイズによる擾乱が大きく、NMRプローブによる測定は困難と考えられる。そこで、現在は、メインコイル励磁電流のモニタのみ実施しているが、シングルターン引出時においては、メインコイルの励磁電流変動 $I/I = 10^{-6}$ 台に対してビーム強度が変動することが確認されている。

本報告では、これまでに実施した鉄心温度定温化による磁場安定化、そして、現在進めているフラットトップ加速における磁場変動の影響について述べる。

2. サイクロトロン電磁石の磁場及び温度の測定による磁場変動要因の特定

原研AVFサイクロトロンの鉄心構造はH型で、4組のスパイラル形状のセクタが上下ポール面に配置

¹ E-mail: okumura@taka.jaeri.go.jp

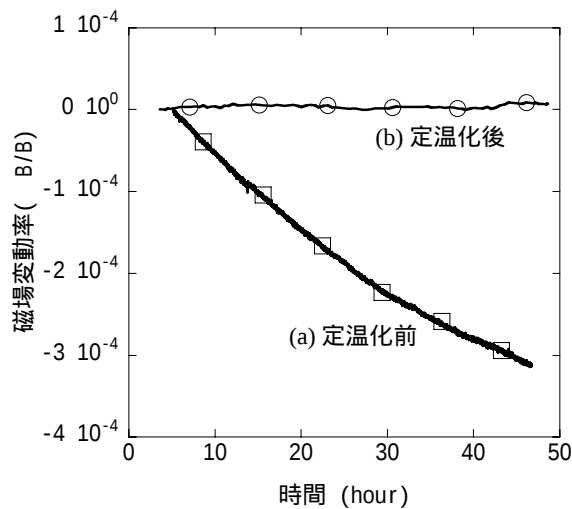


図 1：鉄心温度定温化前後の磁場変動率

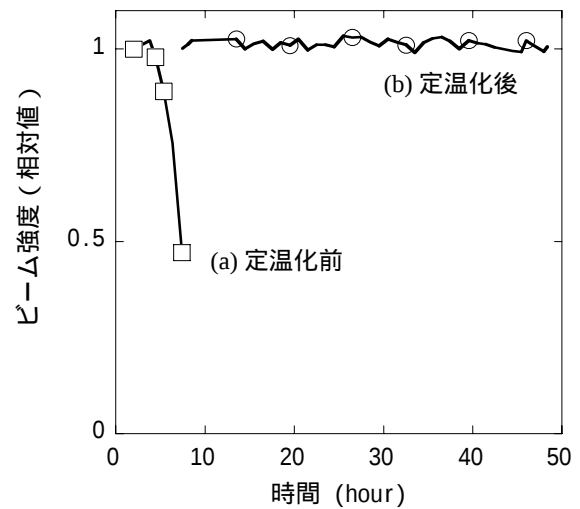


図 2：鉄心温度定温化前後のビーム強度変化

されている。トリムコイルは同心円状にセクタ上に設置され、その上からアース板がポール先端を覆っている。

サイクロトロン電磁石のポールギャップにおける磁場測定を行うために、最も磁場勾配が小さいセクタ中心軸付近の真空中にNMRプローブを1台設置した。信号ケーブルは、RFノイズによる擾乱を防ぐためにシールドを二重に施すと共に可能な限り堅牢な固定を行って振動によるノイズの発生を防いだ。NMRによる測定では 1×10^{-4} /cc以内の磁場均一度が必要であり、サイクロトロン勾配磁場中での測定を可能にするために補正コイルを使用した。本NMRプローブを用いることで、 $B/B = 1 \times 10^{-6}$ 程度の分解能で磁場測定が可能となった。その測定の結果、42時間で $B/B = 3 \times 10^{-4}$ の磁場変動が確認された(図1の(a))。同時に測定された、引出半径近くの位相プローブによるビーム位相変動量から磁場変動量を推定したところ、NMRプローブによる実測磁場変動量とほぼ一致していた。このことから、磁場変動は場所に依存しないで一様に変化していると推測された。この磁場変動によりビーム強度は急激に減少し、5時間で半減してしまった(図2の(a))。

鉄心温度測定には当初、熱電対を使用していたが、磁場の影響を受けたため、白金測温抵抗体へ変更した。外部環境の影響を抑えるために、シート型センサーを鉄心に密着させて断熱材を施したが、最終的にはシース型センサー(長さ50mm)を鉄心に穴を開けて埋め込むことで高精度な温度測定が可能となった。温度上昇は場所によって異なるが、メインコイルから離れた位置では3～4度/47h程度であった。鉄の熱膨張率や磁化率の温度依存性がだいたい $10^{-5} \sim 10^{-4}$ /度であることから、確認された磁場変動はこの温度上昇で十分引き起こされると考えられる。一方、時間的变化についても時定数が磁場35時間、鉄心温度30～60時間とほぼ一致している

ことから、磁場変動原因は鉄心温度上昇であると断定した。

3．鉄心温度定温化による対策

鉄心温度の定温化を図るためにサイクロトロン電磁石の熱モデルを用いて対策の検討を行った。熱モデルは単純化のため、熱源は鉄心への影響の大きいメインコイルとトリムコイルのみとし、熱伝達はメインコイル・ヨーク間、メインコイル・ポール間、トリムコイル・セクタ間の3カ所の熱伝導と周辺空気への自然放熱を仮定した。鉄心温度データを1度以内の誤差で再現するように熱伝導率等のパラメータを決定した。その結果、メインコイルとヨークの間に温度制御可能な定温板を設置すること、そしてトリムコイルの冷却水温度を調整することで0.5度以内の温度上昇に抑制できることが判明した。そこで、メインコイルとヨークの間に冷却水配管を内

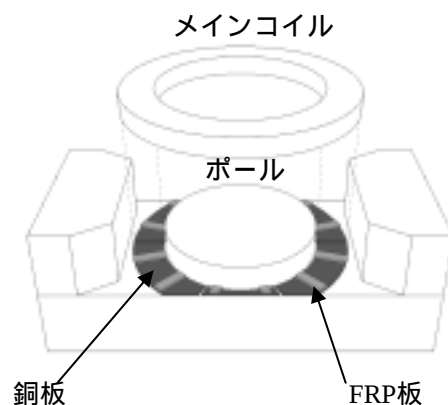


図 3：定温板設置

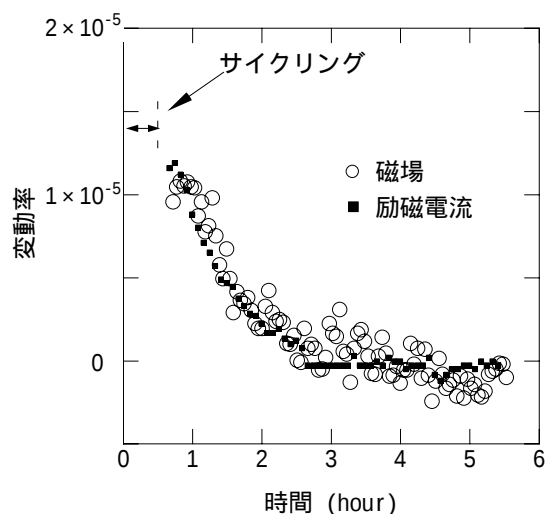


図4：励磁電流と磁場変動

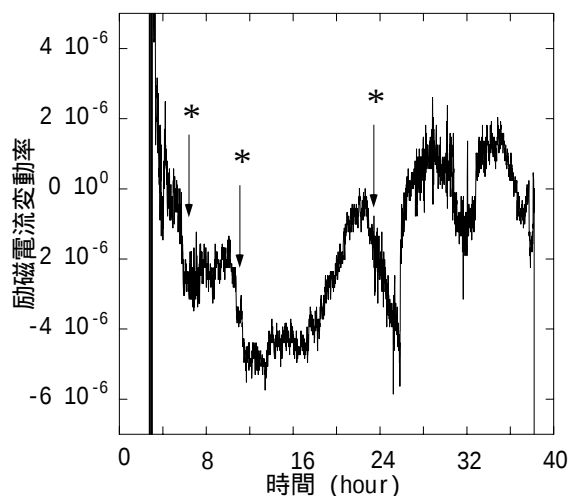


図5：磁場補正に対応した励磁電流変動(*)

蔵した銅板(厚さ8mm)を設置すると共に、メインコイルからの直接的な熱流入を防ぐため、メインコイルと銅板との間にはFRP板(厚さ2mm)を部分的に挿入した(図3)。この銅板の冷却水とトリムコイルの冷却水の温度制御を行うために、新たに冷温水ユニットを設置して、 ± 0.1 度の温度制御を実施した。冷却水温度を最適化することで、鉄心温度は安定し、その変化量は ± 0.1 度程度である。この時の磁場変動は45時間で $B/B = \pm 5 \times 10^{-6}$ 以内に収まり(図1の(b))、ビーム強度も $\pm 2\%$ 以内で安定した(図2の(b))。鉄心重量は約207tと大きく、温度変化は非常に遅いため、鉄心温度制御は運転前から常時実施する必要がある、特にサイクロトロン停止中は熱源がなくなるため、高めの冷却水温度設定が必要となる。また、室温の影響についても、その定量的評価は困難であるが、様々な対策を講じてきた。特に、サイクロトロン下方に設置されている冷却水バルブスタンドや各種電源等からの発熱が大きいため、鉄心下面へ定温板を追加すると共に、局所空調も新設することでその発熱の影響を抑制している。

4．電磁石電源安定性のビームへの影響

鉄心温度定温化によって磁場安定度が向上した結果、メインコイル励磁電流変動の磁場への影響が明らかとなり、メインコイル励磁電流の変動によって励磁直後に $B/B = 1 \times 10^{-5}$ の磁場減少が引き起こされていることを確認した(図4)。但し、通常のマルチターン引出でのビーム調整ではこの影響は小さく、ビーム強度の減少などは発生していない。

一方、フラットトップ加速によるシングルターン引出のためのビーム調整においては、たびたびビーム強度が減少し、トリムコイルまたはディー電圧を調整する必要がある。トリムコイル補正量から推定される磁場変動量は、 $B/B = 10^{-6}$ 台であり、フラットトップ加速でエネルギーの拡がり目標値0.

0.2%以内を達成するために十分な磁場安定度 $B/B = \pm 1 \times 10^{-5}$ よりも小さい。ビーム強度減少時のトリムコイル補正量にほぼ相当した変動がメインコイル励磁電流測定において確認できた(図5の*印)。このわずかな磁場変動でビーム強度が減少する原因については追及中であるが、マイクロビーム形成への安定したビーム提供には $B/B = 10^{-6}$ 台前半の磁場安定度の確保が必要と考え、メインコイル電源の現在の安定度 $I/I = 1 \times 10^{-5}$ (仕様値)の向上や鉄心温度のさらなる定温化を中心に検討を進めている。

参考文献

- [1] 高田義久編, “第8回医療用陽子加速器ワークショップ”, Proceedings of 8-th Workshop for Medical Proton Accelerator in Japan, Tsukuba, Dec. 4, 1996 (pp.27-60)
- [2] S. Okumura, K. Arakawa, M. Fukuda, Y. Nakamura, W. Yokota, T. Ishimoto, S. Kurashima, I. Ishibori, T. Nara, T. Agematsu, T. Nakajima, Nukleonika 48, Suppl. 2, S35 (2003).
- [3] S. Okumura, K. Arakawa, M. Fukuda, Y. Nakamura, W. Yokota, T. Ishimoto, S. Kurashima, I. Ishibori, T. Nara, T. Agematsu, M. Sano, T. Tachikawa, Rev. Sci. Instrum. 76, 033301 (2005).
- [4] M. Fukuda, S. Kurashima, S. Okumura, N. Miyawaki, T. Agematsu, Y. Nakamura, T. Nara, I. Ishibori, K. Yoshida, W. Yokota, and K. Arakawa, Rev. Sci. Instrum. 74 (4), 2293 (2003).