

REDUCTION OF START-UP TIME OF THE CYCLOTRON MAGNETIC FIELD FOR QUICK CHANGE OF ACCELERATION BEAM

Nobumasa Miyawaki ^{#A)}, Susumu Okumura ^{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)}

^{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

Abstract

The ratio of the beam changing time, which is the time for changing the operation condition of the cyclotron, to the whole operation time is large at the JAEA AVF cyclotron, since most irradiation time is short and frequent change of beams is required by users, mainly in materials science and biotechnology. In order to increase the efficiency of the use of the cyclotron, we are developing a technique for reducing the beam changing time, which is dominated by the start-up process of the magnetic field. A quick start-up process for the main magnetic field with a damping oscillation excitation allows to reduce the start-up time of the magnetic field.

ビーム迅速切換のためのサイクロトロン磁場立ち上げ時間短縮

1. はじめに

原子力機構 AVF サイクロトロンでは、材料・バイオ研究利用が主流であるため、同じビームでの照射時間が 30 分から数時間程度と短く、ビーム切換時間の占める割合が大きい。マシンの利用効率を向上するために、高頻度で実施されるビーム切換の時間短縮を目指している。

通常ビームを切り換えるためには、全系を停止して、再度立ち上げを行っている。この際、サイクロトロン電磁石の立ち上げが最も時間を費やし、加速 RF や高電圧関連機器の立上げは数分で完了する。また、イオン源においてもビーム切換に伴って、ガス等の変更やイオン源そのものを切り換えるが、ビームの種類によっては数十分から数時間を要する場合がある。これらの所要時間を短縮する 1 つの方法として、カクテルビーム加速技術がある。これは、予め数種類のイオン種をサイクロトロンに入射して、サイクロトロン電磁石の再立ち上げを行うことなく、加速周波数等ごく一部の運転パラメータを変更するだけでビーム切換を可能とするもので、数分以内に異なるビームへ変更できる。現在、質量電荷比が 5 のイオン種を中心に実施しているが、ビームの種類が同じ質量電荷比のイオンに限定されるため、マシンの利用効率向上効果は限られていた。そこで、加速可能なビーム全てに対して適用できるビーム迅速切換技術の開発が必要である。特に、サイクロトロン本体でのビーム切換時間短縮のネックとなっている、磁場立ち上げの迅速化技術の開発を現在重点的に進めている。

サイクロトロンでは、数百回イオンを回転させるため、イオンが加速位相を逸脱しないように、半径

[#] miyawaki.nobumasa@jaea.go.jp

方向の等時性磁場分布を形成するとともに、安定した磁場の確保が必要である。サイクロトロン磁場形成では、立ち上げ後数十時間にわたって磁場強度が 10^4 台で変化するため、磁場形成の短時間化はこれまで注目されていなかった。しかし、原子力機構 AVF サイクロトロンでは、鉄心温度の定温化によって主な原因である鉄心温度上昇の抑制に成功し、磁場を比較的安定に形成することが可能となった¹⁾。また、NMR 等の磁場測定システムでサイクロトロン電磁石の磁場を高精度でモニタできるため、立ち上げ時に問題となる磁場変動が観測できる。これらの基盤技術を基に、電磁石立ち上げ時に発生する磁場の過渡的变化を短時間で収束させ、 $\Delta B/B \sim 10^{-5}$ 以下の安定した磁場強度を得る磁場立ち上げ方法を検討した。

本稿では、磁場立ち上げでの主要プロセスであるサイクリング励磁の時間を短縮するために行った減衰振動型励磁方法のテスト結果を示す。

2. サイクロトロンの磁場立ち上げ

2.1 サイクロトロン電磁石

サイクロトロン電磁石は H 型構造の鉄心で、上下に対向する磁極の間隙でイオンが加速される。各磁極外周には主コイルが配置され、主磁場を生成するとともに、磁極対向面には 4 組のスパイラル形状のセクタが設置され、その表面に同心円状に配置された上下 1 2 組のトリムコイルによって磁極間隙半径方向に等時性磁場分布が形成される。主コイル用電源は、電流モニタをシャント抵抗から DCCT へ変更し、さらに高精度な温調対策によって 10^6 台前半の安定度を実現している。

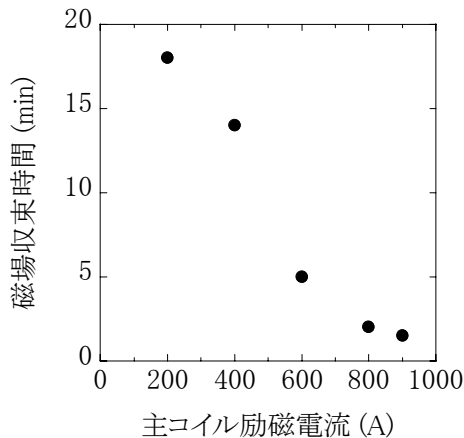


図 1. 主コイル励磁電流と磁場収束時間との関係

電磁石立ち上げは、まず主コイルから実施し、主磁場立ち上げ完了後トリムコイルを励磁する。主磁場立ち上げには、磁場の再現性と収束性が期待できる「サイクリング励磁」が用いられており、約 27 分必要である。トリムコイル立ち上げは 1 分程度のため、電磁石立ち上げの大半は主磁場立ち上げに費やされる。そのため、電磁石立ち上げにおいては主磁場立ち上げ時間の短縮が第一の課題となっていた。

2.2 磁場強度と収束時間との関係

主磁場立ち上げ時間の短縮では、磁場再現性は磁場の補正で対応することを想定しているため、磁場収束に要する時間の短縮がポイントとなる。そこで、サイクロトロン電磁石の磁極間にホール素子を設置して、主磁場収束時間を調べた。図 1 に主コイル励磁電流依存性を示す。収束時間は磁場強度変化率 $\Delta B/B$ が $\pm 5 \times 10^{-5}$ 以内へ収束した時間である。励磁電流は設定値まで一定スピード ($\sim 900\text{A}/1\text{min}$) で増加させた。この結果、励磁電流が低いほど磁場収束に時間がかかることが判明した。そこで、最も励

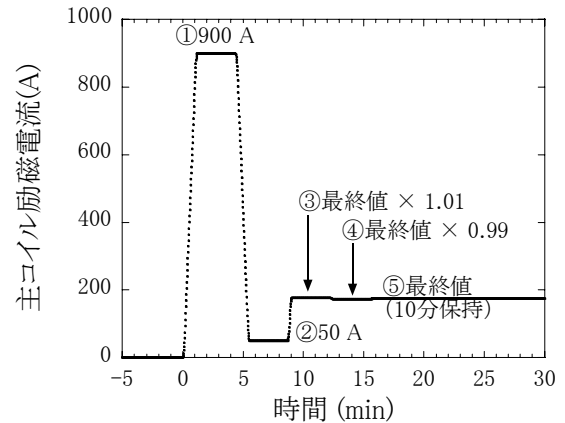


図 2. サイクリング励磁による主磁場立ち上げ

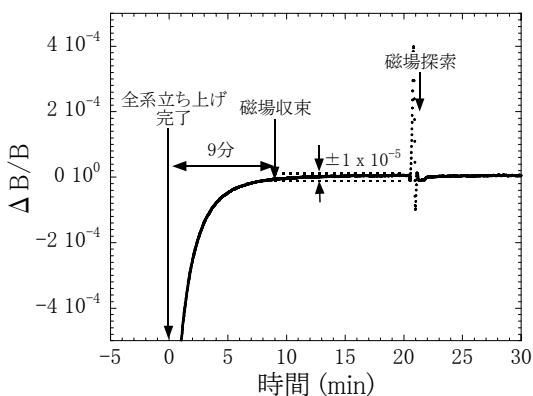
磁電流の低い 10MeV H^+ ($I = 175.5\text{A}$) の条件で主磁場立ち上げの短時間化を検討した。

3. 主磁場迅速立ち上げテスト

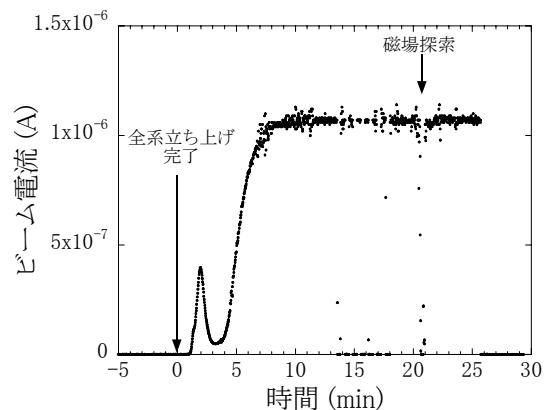
3.1 サイクリング励磁による立ち上げ

通常のサイクリング励磁による主磁場立ち上げ時の励磁電流の変化を図 2 に示す。最初に電源の最大電流へ設定してから徐々に最終値へ近づけ、最終設定値で 10 分待機した後、トリムコイル等の他の機器立ち上げを行い、主コイル立ち上げ開始から約 30 分で加速に必要な全ての機器立ち上げが完了する。

図 3 に立ち上げ直後からの磁場強度とサイクロトロンから引き出されたビーム電流の変化を示す。(これ以降の磁場強度は全て、このサイクリング励磁による主磁場立ち上げ時の安定した時の値を基準としてその変化率で示す。) 磁場強度は徐々に増加し、 $\Delta B/B < \pm 1 \times 10^{-5}$ への収束には、全ての機器立ち上げ完了から約 9 分要している。この間、磁場補正などは全く行わない状態でサイクロトロンにビーム

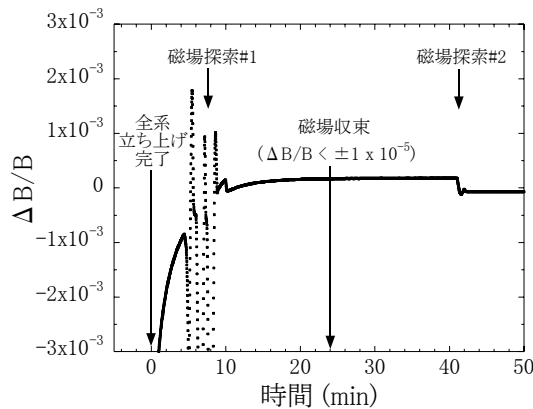


(a) 磁場強度：NMR プローブによる計測

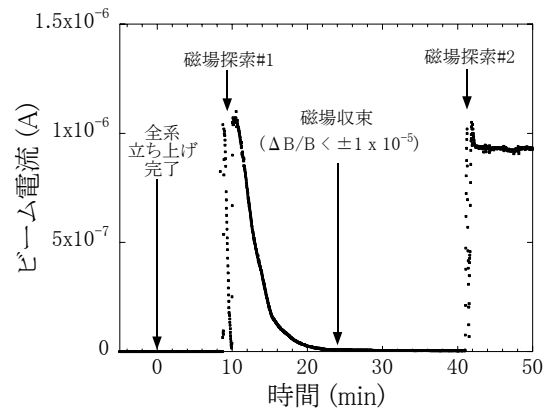


(b) ビーム電流：ファラデーカップによる計測

図 3 : サイクリング励磁立ち上げを経由した場合：磁場が 10^{-5} 台に収束すると、磁場調整しなくてもビームが引き出されている。磁場探索を実施するが、元の磁場強度が最適値であった。



(a) 磁場強度：NMR プローブによる計測



(b) ビーム電流：ファラデーカップによる計測

図4：最終値への直接立ち上げを経由した場合：磁場探索#1の調整で一旦ビームが引き出されたが、減少し、磁場が 10^{-5} 台に収束してからの調整（磁場探索#2）では安定したビーム電流が得られている。

を入射したところ、磁場収束に伴って加速されるビーム電流も増加し、最終的に通常通り（この場合入射ビームの約 10%）の透過効率で引き出された。

3.2 最終値への直接立ち上げ

サイクリング励磁を省いた磁場立ち上げの可能性については、いくつかの施設での実績をふまえて議論されている^[1]。しかし、確立された方法は無いため、まずはサイクリング励磁を経ず、直接最終励磁電流へ設定して立ち上げた。主コイル立ち上げ開始から 1～2 分で加速 RF やトリムコイルなど全ての機器が立ち上がった。立ち上げ直後からの磁場強度とサイクロトロンから引き出されたビーム電流の変化を図4に示す。全系立ち上げ完了直後にトリムコイルを調整するが、磁場強度の変化が激しく ($\Delta B/B \sim 10^{-3}$ 台)、ビームの引き出しは困難であった。立ち上げ 10 分後あたりで $\Delta B/B \sim 10^{-4}$ 台に磁場強度が収束し、トリムコイル調整でようやくビーム電流が引き出されたが、磁場変化が大きいため、すぐにビーム電流は失われた。全系立ち上げ完了後、約 2.4 分で $\Delta B/B < \pm 1 \times 10^{-5}$ に磁場が収束した後、再度トリムコイルの調整を行うことで、安定したビーム引き出しが可能となった。

3.3 減衰振動型励磁パターンによる立ち上げ

磁場立ち上げ時の磁場収束には、過渡的渦電流の抑制が必要と考えられる。渦電流を積極的に打ち消すように、励磁電流を増減させて徐々に増減幅を減らして最終励磁電流に収束させるパターンが有効と考えられる^[2]。このパターンでは、最終励磁電流を中心に励磁電流を減衰振動型に変化させ、励磁電流の振幅を小さくしながらステップ状に変えている。このステップ数や各ステップの励磁電流保持時間等のパラメータを最適化した結果、図5の主磁場立ち上げ励磁電流パターンが最も良好であった。最初の励磁電流の振幅として最終励磁電流を採用し、そ

の後振り幅を 1/4 ずつ減らしながら、途中の各ステップで 1 分間励磁電流を保持し、設定電流に到達させた。この励磁パターンは約 6 分であった。

立ち上げ直後からの磁場強度とサイクロトロンから引き出されたビーム電流の変化を図6に示す。当初ビーム電流はゼロだったが、立ち上げ直後のトリムコイル調整でビームが引き出された。 $\Delta B/B < \pm 1 \times 10^{-5}$ への磁場収束は全ての機器立ち上げ後約 3 分（上記トリムコイル調整直後）と非常に早く、その後も磁場強度とビーム電流がともに安定であった。

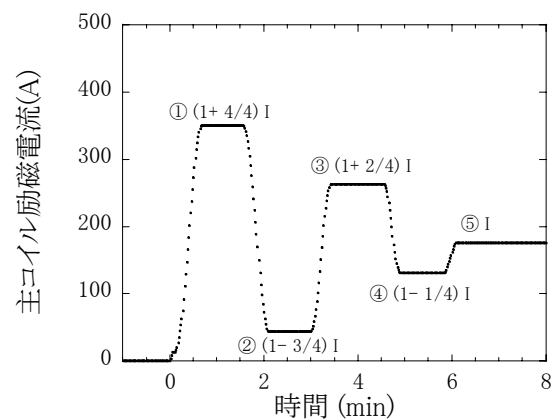
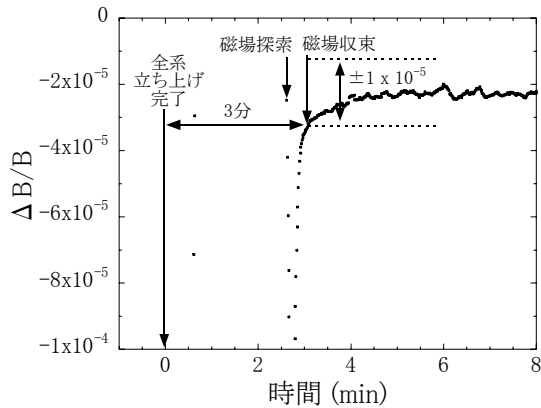


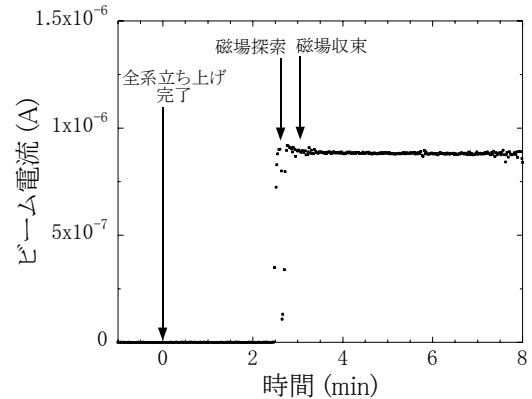
図5．減衰振動型励磁による主磁場立ち上げ

4. おわりに

減衰振動型励磁パターンが短時間化に最適な磁場立ち上げパターンであった。但し、今回は高磁場への励磁は経過していない。磁場強度が高い励磁条件直後の磁場収束にはさらに時間が必要と予想されるため、磁場強度を最適値へ積極的に制御するシステムを追加することで様々なビームへの迅速な切替が可能とする予定である。



(a) 磁場強度：NMRプローブによる計測



(b) ビーム電流：ファラデーカップによる計測

図6：減衰振動型励磁パターンを経由した場合：立ち上げ直後の磁場探索でビームが引き出され、磁場もその直後に $\Delta B/B < \pm 1 \times 10^{-5}$ へ収束し、安定したビーム引き出しが実現している。

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21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] S. Okumura, et al, "Magnetic field stabilization by temperature control of an azimuthally varying field cyclotron magnet", Rev. Sci. Instrum. 76, 033301 (2005)
- [2] K.Sato, "重イオン・シンクロトロン of 加速器技術と物理・その3", Journal of the Particle Accelerator Society of Japan, Vol.3, No.3, 234-250, 2006
- [3] K.Sato, "RCNP サイクロトロンの超高品質ビーム", Workshop on Beam Stabilization in Japan, Tsukuba, Oct. 15-16, 2001, <http://acc-web.spring8.or.jp/~oper/beam-stabilize-ws/index.html>