

# CORRECTION SYSTEM OF THE CYCLOTRON MAGNETIC FIELD FOR QUICK CHANGE OF ACCELERATION BEAM

Susumu Okumura<sup>#A)</sup>, Nobumasa Miyawaki<sup>A)</sup>, Takahiro Yuyama<sup>A)</sup>, Tomohisa Ishizaka<sup>A)</sup>, Satoshi Kurashima<sup>A)</sup>, Hirotsugu Kashiwagi<sup>A)</sup>, Ken-ichi Yoshida<sup>A)</sup>, Ikuo Ishibori<sup>A)</sup>, Yosuke Yuri<sup>A)</sup>, Takayuki Nara<sup>A)</sup>, Watalu Yokota<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>B)</sup>

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

Reduction of the beam changing time is required to increase the available beam time for users. We are developing a technique for reducing the changing time of the magnetic field of the cyclotron, since it takes a long changing time to form the magnetic field for acceleration. Since the deviation of the magnetic field from the desired value for acceleration in the start-up process of the magnetic field does not decrease in a short time, a correction system of the cyclotron magnetic field with a bipolar power supply and a 5-turn coil was developed. We confirmed that this system enables the magnetic field to be controlled quickly with a pc-based PID controller.

## ビーム迅速切換のためのサイクロトロン磁場補正システム

### 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、ビーム切替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替の時間短縮を目指している。

ビームを切り換えるためには通常、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 や高電圧関連の機器はこの電磁石立ち上げ完了後数分で完了する。また、イオン源においてもビーム切替に伴って、ガス等の変更やイオン源そのものの切替作業に、ビームの種類によって数十分から数時間を要している。

そこで、加速可能なビーム全てに対して適用可能なビーム迅速切替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替時間短縮の課題となっている、磁場の迅速な立ち上げ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ながら加速するため、イオンが加速位相を逸脱しないように、半径方向の等時性磁場分布を形成するとともに、 $10^{-5}$  台の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この  $10^{-4}$  台の磁場変動の抑制に成功し、立ち上げ直後から磁場を比較的安定に形成することが可能となった<sup>[1]</sup>。また、NMR 磁場

測定システムで常時サイクロトロン電磁石の磁場を高精度でモニタしているため、立ち上げ時に問題となる磁場変動が観測できる。これらの技術開発を基に、電磁石立ち上げ時に発生する磁場の過渡的变化を収束させ、 $\Delta B/B \sim 10^{-5}$  以下の安定した磁場強度を短時間で得る磁場立ち上げ方法を検討した。従来方法では、主コイル励磁電流を約 27 分にわたって、あるサイクリングパターンにしたがって変化させるが、磁場強度によっては、収束には立ち上げ後さらに 10 分程度を要していた。そこで、このサイクロトロン磁場立ち上げ方法の改良を進め、磁場収束に比較的多くの時間を要す低磁場強度の運転に対して、「減衰振動型励磁パターン」を開発し、立ち上げに 6 分、磁場収束に 3 分という、時間短縮を可能にした<sup>[2]</sup>。但し、中磁場強度運転の立ち上げでは、この「減衰振動型励磁パターン」を用いても磁場収束時間は 10~20 分程度必要である。さらに、低磁場強度運転の立ち上げでも、高磁場強度運転直後では磁場収束時間の増加（運転停止後の時間間隔や磁場強度履歴によって 10~30 分）が認められた。そこで、上記磁場立ち上げ方法に加え、積極的に磁場収束を可能とする、磁場補正システムの構築を試み、その性能を確認した。

本稿では、この磁場補正システムの概要を述べるとともに、低磁場強度運転である 10MeV  $H^+$  運転での磁場収束テスト結果を示す。

### 2. 磁場補正システム

サイクロトロン電磁石は H 型構造の鉄心で、対向する上下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。さらに、磁極対向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半径方向の磁場分布を

<sup>#</sup> okumura.susumu@jaea.go.jp

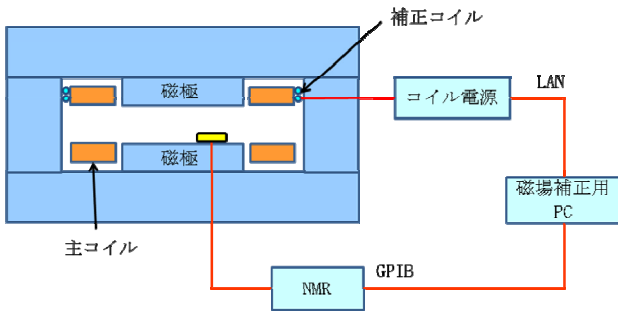


図 1 : 磁場補正システムの構成

生成し、加速ビームに応じた等時性磁場分布を形成する。

磁場立ち上げ時の磁場変動の大半は主磁場に帰因すると考えられる。そこで、この主磁場補正を対象とした。主コイルはターン数が上下で合計 480 ターン、最大励磁電流は 900A である。最小磁極間隔（セクターギャップ）は 166mm で、ここでの最大磁場強度は 2.04T である。主コイルの励磁電流は DCCT を用いた電流計測回路および恒温槽で温度制御された電流制御回路を用いており、電流安定度は  $10^{-6}$  台であるが、電流設定用 DAC は 16 ビット分解能のため、 $1 \times 10^{-5}$  以下の磁場補正制御は困難である。そこで、主コイルとは別に補正コイルを設置することにした。

図 1 に磁場補正システムの構成を示す。上側メインコイルの外周に 3 芯の多芯ケーブルを 2 本巻き付けて固定した。これによって 6 ターン分のコイルが形成できるが、1 ターンは予備として、現在は 5 ターン分を使用している。補正コイル用電源は両極性出力 ( $\pm 20A \pm 20V$ ) が可能なバイポーラ電源 (菊水電子 PBZ20-20) を採用し、放射線損傷を防止するために、サイクロトロン本体室の地階に設置した。

磁場計測は下アース板上に設置した NMR プローブを用い、セクターギャップでの磁場強度をモニタ

している。NMR プローブはヘッドアンプを経由して制御室の磁場計測用コントローラ（エコー電子製）に接続され、その発振周波数のモニタ信号を周波数カウンタへ入力し PC へ読み込んでいる。

磁場補正は、この磁場計測値と目標値を比較して補正コイル用電源の電流出力を制御して行う。制御プログラムは LabVIEW を用いている。PID 制御パラメータは試行を繰り返して決定した。

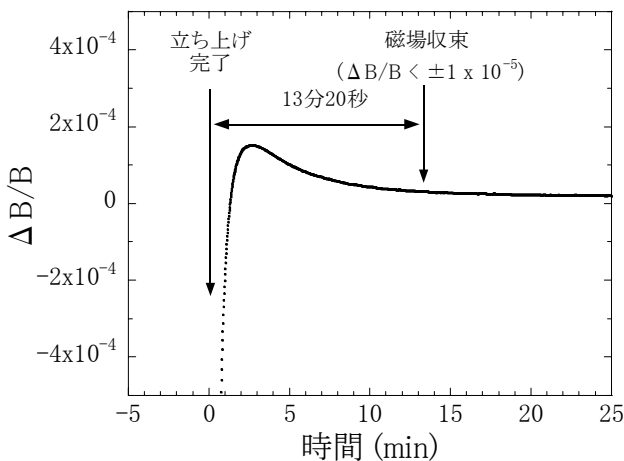
### 3. 磁場制御テスト

#### 3.1 履歴磁場強度による磁場収束時間の違い

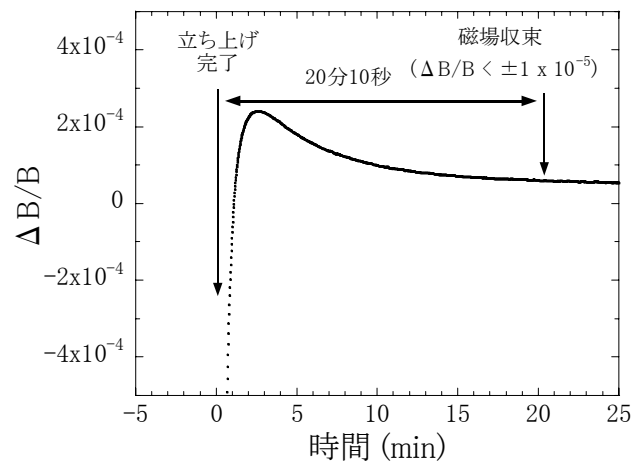
磁場収束時間は、磁場立ち上げ前にどのような磁場強度を経由したかによって異なる。今回対象とした 10MeV  $H^+$  ビームの運転条件（主コイル励磁電流 175.5A、セクター磁場強度 0.6T）でサイクロトロンを「減衰振動型励磁パターン」（最大励磁電流を従来の 351A から 450A へ変更）で立ち上げる際に、その直前に同一の運転条件であった場合と高磁場強度であった場合の結果を図 2 に示す。図 2 (a) の高磁場経由無しでは直前に 10MeV  $H^+$  ビームの運転を停止し、10 分後に再び 10MeV  $H^+$  ビームの運転条件で磁場立ち上げを行った場合の磁場強度変化で、磁場変化率が  $\Delta B/B < \pm 1 \times 10^{-5}$  となるのに 13 分 20 秒要している。図 2 (b) の高磁場経由有りでは直前に主コイルを最大電流 900A で励磁し、10 分後に停止（励磁電流 0A）、さらに 10 分後 10MeV  $H^+$  ビームの運転条件で磁場立ち上げを行った場合の磁場強度変化で、磁場変化率が  $\Delta B/B < \pm 1 \times 10^{-5}$  となるのに 20 分 10 秒要している。高磁場強度を経由した場合に磁場収束時間が長くなることが判明した。

#### 3.2 磁場補正制御による磁場収束時間の短縮

磁場補正システムを用いて、磁場収束時間の短縮を試みた。条件は上記 3.1 の 2 つの条件で、いずれも磁場立ち上げ完了直後に磁場補正制御を開始している。図 3 に磁場変動率の変化を示す。いずれの条



(a) 高磁場経由無し



(b) 高磁場経由有り

図 2 : 異なる磁場強度を経由した場合の磁場強度変化

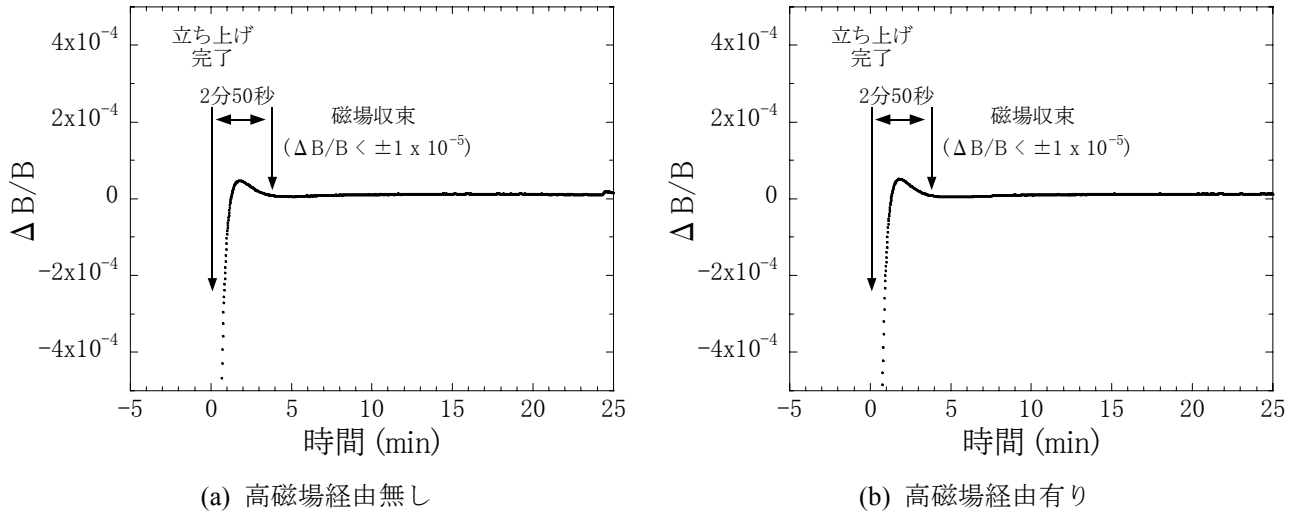


図 3 : 磁場補正制御を用いた場合の磁場強度変化

件でも磁場収束時間は等しく、磁場変化率が  $\Delta B/B < \pm 1 \times 10^{-5}$  となるのに 2 分 50 秒要している。高磁場経由の有無によらず、磁場補正制御によって磁場収束時間の短縮が実現されている。

### 3.3 磁場補正制御のビーム電流への効果

磁場収束に対しては、磁場補正制御の効果が確認できたが、この時の引き出しビーム電流についても確認を行った。図 4 にビーム電流計測結果を示す。いずれも高磁場経由の場合で、図 4 (a)は磁場補正制御無し（この時の磁場変化は図 2 (b)）、図 4 (b)は磁場補正制御有り（この時の磁場変化は図 3 (b)）の条件で計測したビーム電流の時間変化である。図 4 (a)では立ち上げ完了後 10 分経過してもビーム電流の変化が顕著だが、図 4 (b)では立ち上げ完了後約 1 分でほぼ安定となっている。

## 4. おわりに

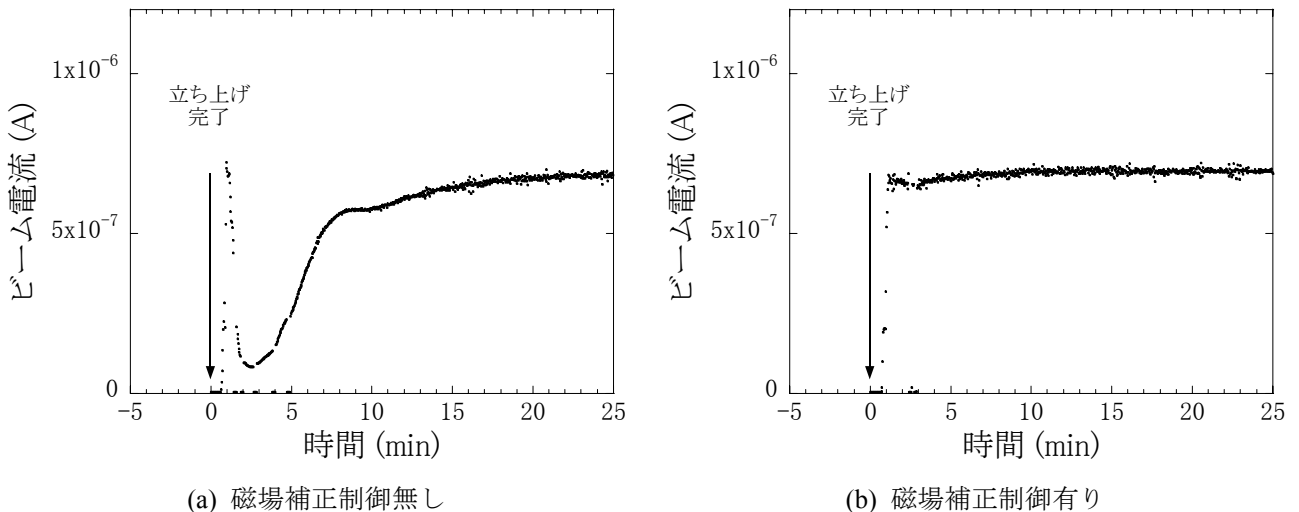


図 4 : 高磁場経由時のビーム電流変化

磁場補正システムによって磁場立ち上げ時の磁場収束時間の短縮が可能となった。その結果、引き出しビーム電流も磁場収束に対応して安定化されている。

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 22 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] N. Miyawaki, et al, "Reduction of Start-up Time of the Cyclotron Magnetic Field for Quick Change of Acceleration Beam", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 975-978, (2010)