

EXCITATION OF THE CYCLOTRON MAGNET AND TRANSIENT VARIATION OF THE MAGNETIC FIELD FOR A FAST BEAM CHANGE*

Mitsuhiro Fukuda ^{#,A)}, Susumu Okumura^{B)}, Nobumasa Miyawaki^{B)}, Takahiro Yuyama^{B)}, Tomohisa Ishizaka^{B)}, Satoshi Kurashima^{B)}, Hirotugu Kashiwagi^{B)}, Ken-ichi Yoshida^{B)}, Ikuo Ishibori^{B)}, Yosuke Yuri^{B)}, Takayuki Nara^{B)}, Watalu Yokota^{B)}, Kichiji Hatanaka^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

^{B)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Research Agency

1233 Watanuki, Takasaki, Gunma, 370-1292

Abstract

A cyclotron-magnet excitation procedure for a fast change of a beam condition such as ion species and energy has been improved by optimizing the excitation pattern of the main coil current. According to the magnetic flux density of the cyclotron field setting, three types of the excitation pattern were developed to minimize the elapsed time for production of a highly-stabilized magnetic field with high reproducibility. Achievement of the magnetic field stability of $\Delta B/B < 1 \times 10^{-4}$ within 30 minutes was confirmed by the simulation of the transient field variation using Opera-3D/ELEKTRA, which was demonstrated by the actual main-coil excitation test for the JAEA AVF cyclotron.

サイクロトロンにおける短時間ビーム切替のための電磁石励磁と過渡的磁場変動

1. はじめに

サイクロトロンにおける加速粒子の回転周波数は、加速粒子の Q/M 値及び磁束密度 B に比例する。一般に、サイクロトロンにおいて加速イオン種或いは加速エネルギーを変更するためには磁場を励磁し直す必要があり、ビーム調整時間も含めると、通常のビーム切替には数時間必要であった。ビーム切替時間の大幅短縮を実現するためには、サイクロトロン本体電磁石の再励磁時間の短縮と、短時間での磁場の安定性及び再現性の向上が求められる。従来は、鉄心のヒステリシス効果による励磁磁場の差異を最小限に抑えるため、メインコイルを一旦最大電流まで通電して磁場を飽和させ、初期状態の違いをキャンセルした後に数分毎に励磁電流を増減させて設定値に収束させるサイクリング励磁法（所要時間約 30 分）を経験的に採用してきたが、必ずしも短時間で磁場が安定するわけではなかった。

磁場の安定化に時間を要する主な原因は、ヒステリシス損失や渦電流損失などに起因した鉄心内の磁化の遅れである。また、再現性の悪化を招く主たる要因は、再励磁開始時の残留磁化の違いにある。従って、設定磁場への到達時間を十数分以内に短縮し、且つ短時間で高安定な磁場を形成するためには、励磁レベルに応じた励磁パターンの最適化が求められる。

そこで、メインコイル励磁における 3 次元過渡的磁場変動解析により、メインコイル電流を単調に設

定値まで増加させる方法、一旦飽和状態に励磁した後で励磁レベルを上下させながら設定値に収束させる従来のサイクリング励磁法、完全に飽和させずに励磁レベルを周期的に上下に複数回変えることによって設定値に収束させる励磁法のそれぞれについて磁場の安定性と再現性を評価し、サイクロトロン電磁石の再励磁法の最適化を試みた。

本論文では、上記 3 種類の励磁パターンにおける過渡的磁場変動量を 3 次元磁場解析コード Opera-3D/ELEKTRA により定量的に求め、短時間ビーム切替のための励磁方法の有用性を議論する。また、メインコイル励磁において発生する渦電流に起因した磁場変動量についても近似的に見積もり、安定性への影響を評価する。

2. 従来のメインコイル励磁パターン

一体型の電磁石を有する AVF サイクロトロンは、上下の磁極にメインコイルが巻かれ、スパイラル・セクター磁極の表面に同心円状のトリムコイルを配置している。常伝導電磁石の場合、銅のホロウ・コンダクターを同心円状に 2 層巻いて製作したパンケーキ・コイルを一つの単位とし、それを幾つか重ねてメインコイルを形成している。K 値が 100 MeV を超える大型の AVF サイクロトロンの場合、磁極直径は 2 m を超え、電磁石全体の重量も 200~400 ton にも及ぶ。ビーム引き出し半径における平均磁場は、常伝導電磁石の場合、鉄心の磁束の飽和と、鉛直方向のビーム集束力を十分に確保するための磁場分布形成の制約から 1.6~1.7 T が最大である。

一般的に、メインコイルに通電して電磁石を励磁していくと、コイル電流の上昇に追従して磁束密度

*Work supported by Quantum Beam Technology Project of MEXT, Japan

mhfukuda@rcnp.osaka-u.ac.jp

は増加するものの、コイル電流の変化に対して鉄心の磁化には遅れが生じる。主な遅延の原因には、磁性体の励磁曲線に依存したヒステリシス損失、鉄心中の磁束の変化に伴って発生する渦電流損失などがある。交流磁化の場合、ヒステリシス損失は交流電流周波数の一乗に比例し、渦電流損失は周波数の二乗に比例する。従って、サイクロトロン電磁石を励磁、或いは再励磁した直後の磁場の安定性は、メインコイルの励磁電流の大きさと時間的な変化率（励磁パターン）に大きく依存する。

一方、励磁後の磁束密度は、初期の残留磁化と励磁のヒステリシスに依存するため、同じコイル電流設定値であっても、生成される磁束密度の再現性は必ずしも保証されない。従って、サイクロトロン電磁石を励磁する際には、励磁開始時の残留磁化状態の差異を一旦キャンセルするようなヒステリシスの軌跡を描かせる、或いはヒステリシスの軌跡の違いを次第に最小化して設定値に収束させるような反復的励磁パターンを描かせるなどの手法が求められる。

従来、サイクロトロン電磁石では、一旦、メインコイル電流を定格電流まで上げて磁束を飽和させた状態で一定に保ち、数分後にコイル電流を数十 A 程度の低励磁状態まで下げ、再び数分間コイル電流を一定に保った後に設定電流値の+1%、-1%の電流値で増減させた後に最終的な設定値に落ち着かせるサイクリング励磁パターンを経験的に採用してきた。図 1 に典型的なサイクリング励磁パターンを示す。この場合、通電開始から約 15 分後に設定電流値に到達し、経験的には通電開始から約 30 分後に磁場がほぼ安定して次の運転操作に移る。このサイクリング励磁法は、初期の残留磁化の影響を最小限に留め、高い再現性が得られることから、多くのサイクロトロンで用いられている。しかしながら、磁場の安定性と再現性の点でサイクリング励磁パターンの妥当性が定量的に評価されているわけではなく、励磁レベルに応じて励磁時間の短縮化を図るためにはメインコイル通電パターンの最適化が必要とされる。

3. 励磁パターンと過渡的磁場変動

3.1 励磁に伴う磁場変動の解析

サイクロトロン電磁石の励磁レベルを、磁束が十分に飽和している高励磁レベル（引出半径での平均磁場が 1.5 T を超える領域）、磁束の飽和が顕著になり出す中励磁レベル（引出半径での平均磁場が 1 T 前後の領域）、磁束の飽和がなくヒステリシスの影響を受けやすい低励磁レベル（引出半径での平均磁場が 0.5 T 前後の領域）の 3 つに分け、3 次元磁場解析コード Opera-3D/Elektra を用いてメインコイル電流の時間変動によって生じる過渡的な磁場変化のシミュレーション計算を行った。電磁石の励磁には、従来のサイクリング励磁法、単純に設定値までコイル電流を上げていく単調増加励磁法、設定値に向けてコイル電流を周期的に増減させながら設定値との差を段階的に小さくしていく収束型サイクリング励磁法の 3 種類の励磁パターンを想定し、それぞれの過渡的な磁場変動について評価を行った。

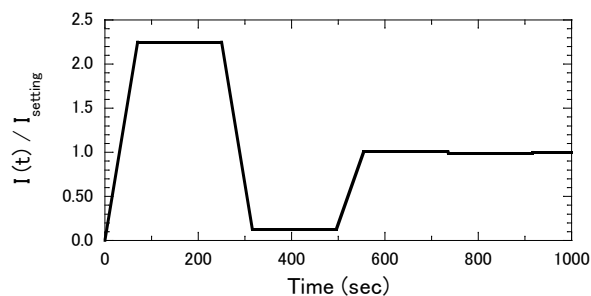


図 1 従来のメインコイル・サイクリング励磁パターンの例。70 秒で定格電流 900A まで通電し、一旦 50A まで下げ、設定電流値 400A の±1%に増減させた後に 917 秒後に設定値に到達させる。

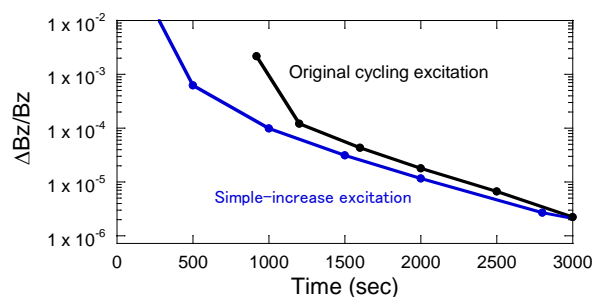


図 2 メインコイルを 868A に励磁する場合の従来のサイクリング励磁法と 70 秒で設定電流値まで単調に増加させる励磁法の比較。横軸は通電開始からの経過時間を示す。

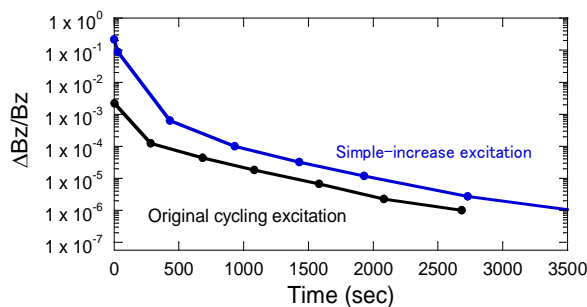


図 3 従来のサイクリング励磁法と 70 秒で設定電流値まで単調に増加させる励磁法における設定電流値 (868A) 到達後の磁場変動の比較。横軸は設定完了後の経過時間を示す。

3.2 高励磁レベル

JAEA AVF サイクロトロン (K=110MeV) において、メインコイル (定格電流 900A) を 868A にサイクリング励磁した場合 (図 1 と同様の励磁パターン) と、70 秒間で単調に 0A から 868A に励磁した場合の相対的な磁場変動量の時間変化を図 2 に示す。但し、磁場計算点はスパイラル・セクター磁極のセンターラインに近い場所 (実際には NMR プローブを設置している場所) である。通電開始から約 20 分

後にはいずれの励磁パターンでも $\Delta B/B < 10^{-4}$ の磁場変動に収まるが、単調増加励磁パターンの方が安定化するトータル励磁時間は短い。従って、励磁時間の短縮化の観点では、サイクリング励磁パターンより単調増加励磁パターンの方が有利であることがわかる。

通電完了後の磁場の絶対値は、サイクリング励磁法も単調増加励磁法も 2.236 T に収束する。これは、サイクリング励磁の場合には定格電流値までフル励磁した後一旦 50A まで磁場を下げることから磁化の状態は最初の時点とは異なり、単調増加励磁パターンとは明らかに異なるヒステリシスを描くことになるが、磁束が十分に飽和した領域にコイル電流値が設定されているため、ヒステリシスの違いはあっても結果的にその差は小さくなり、ほぼ等しい磁束密度に収束する。

コイル電流が設定値に到達した時点からの磁場変動を図 3 に示す。明らかにサイクリング励磁法の方が相対的な磁場変動量は小さい。これは、単調増加励磁法の場合、設定値までコイル電流を増加させたことによる渦電流磁場が比較的長く続くのに対して、サイクリング励磁法の場合には、コイル電流を一旦定格電流値まで増加させた時に発生する渦電流を、次の 50A まで電流値を下げる操作によって打ち消す方向に働くことになり、同様のコイル電流の増減操作を繰り返すことによって全体的に渦電流の効果を抑制しながら励磁していると考えられる。しかしながら、前述のように通電開始からの経過時間で比較すると、結果的にサイクリング励磁法の通電時間が長い分、磁場が安定になるまでのトータルの時間は多少長くなってしまふ。従って、サイクリング励磁の途中の段階でコイル電流値を一定に保つ時間を可能な限り短くし、全体の励磁時間を短縮する工夫が必要とされる。

3.3 中励磁レベル

メインコイル電流値を 400A に設定し、サイクリング励磁法（設定完了まで約 15 分）と単調増加励磁法（設定値まで 35 秒）により通電を開始した後の磁場変動の時間変化を図 4 に示す。磁場が安定化する時間はサイクリング励磁法の方が短い、いずれの励磁法も磁場変動が $\Delta B/B < 10^{-4}$ に収まるのに 20 分以上かかる上、 $\Delta B/B < 10^{-5}$ の安定性にはほど遠い計算結果が得られている。計算点における磁場の収束値は 1.346 T 前後であるが、2 つの励磁法の差は 0.1% 程度見られる。

サイクリング励磁法において、通電完了までの時間を 7 分に短縮したときの磁場変動の時間変化を図 5 に示す。サイクリング励磁時間を 7 分間に短縮した方が $\Delta B/B < 10^{-4}$ に収束する時間は短くなり、また $\Delta B/B < 10^{-6}$ オーダーに近いところまで安定化する傾向が伺える。通電スピードや全体のサイクリング励磁時間などの最適化がまだ必要とされる。

3.4 低励磁レベル

メインコイル電流値を設定値の 200%、25%、150%、75%、100%の順に変化させてサイクリング

励磁したときの磁場変動の時間変化を図 6 に示す。通電開始から 30 分以上経過しないと $\Delta B/B < 10^{-4}$ オーダーに下がらないものの、計算上は 1 時間経過すれば $\Delta B/B < 10^{-6}$ の安定性が得られることがわかる。しかしながら、JAEA AVF サイクロトロン電磁石における励磁磁場変動の実測データ^[1]によれば、磁場を $\Delta B/B < 10^{-5}$ オーダーに安定化させるまでの時間は数十分程度であり、実験データとの差異をさらに解析する必要がある。

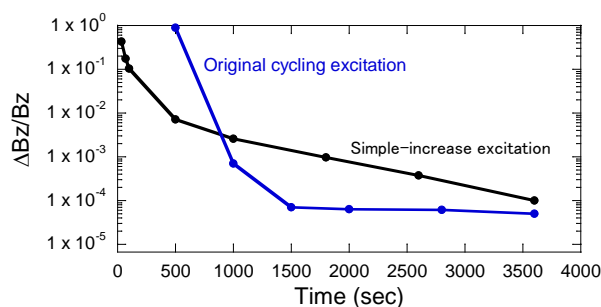


図 4 400A に励磁する場合のサイクリング励磁法と単調増加励磁法（400A/35sec）の磁場変動。横軸は通電開始からの経過時間。

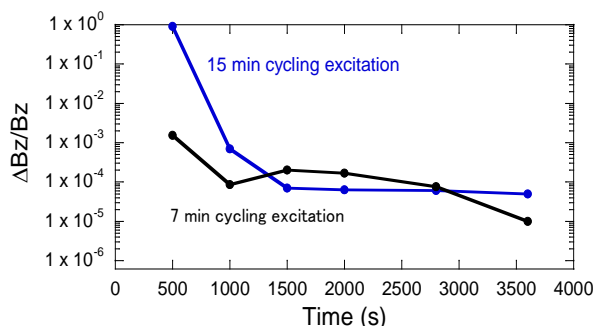


図 5 サイクリング励磁法のコイル電流設定完了時間を 7 分と 15 分にしたときの磁場変動。但し、設定電流値は 400A、横軸は通電開始からの経過時間。

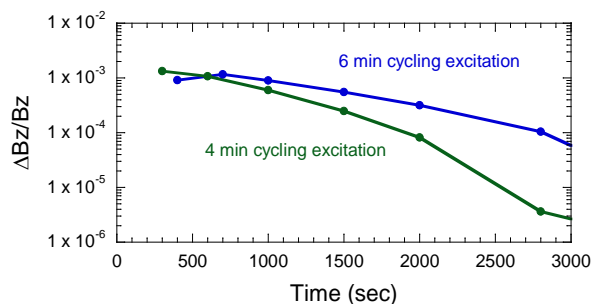


図 6 コイル電流設定値（176A）に対し、200%、25%、150%、75%、100%の順に通電電流を次第に収束させながらサイクリング励磁したときの磁場変動の時間変化。サイクリング励磁が完了するまでの時間は 220 秒（約 4 分）と 340 秒（約 6 分）。

4. まとめ

一体型の電磁石を有する AVF サイクロトロン
のメインコイル励磁において 3 次元の過渡的磁場変動
解析を行い、1.4 T を超える高磁場励磁の場合には、
メインコイル電流を単調に設定値まで増加させる励
磁法が短時間の安定化と高い再現性が得られること
を明らかにした。一方、0.6~1.4T 程度の中磁場励磁
の場合には、一旦飽和状態に励磁した後で励磁レベ
ルを上下させながら設定値に収束させる従来のサイ
クリング励磁法が比較的良好であり、励磁時間を短
縮した方がより高い安定性と再現性が得られる可能
性を示唆している。しかしながら、他の励磁レベル
に比べて安定化の度合いはまだ不十分であり、励磁
パラメータの最適化が必要とされる。0.6T 以下の低
磁場励磁レベルにおいては、完全に飽和させずに励
磁レベルを周期的に上下に数回変えることによって
設定値に数分で収束させるサイクリング励磁法が比
較的安定化させ易いが、短時間で高い安定性を得る
ためには励磁パターンの最適化が求められる。

参考文献

- [1] S. Okumura, et al., "Correction system of the cyclotron magnetic field for quick change of acceleration beam", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, August 1-3, 2011, pp. 374-376.