

## 話 題

## TIARA サイクロトロンにおけるビーム位相制御技術の開発

宮脇 信正\*・倉島 俊\*

## Development of Beam Phase Control Techniques for the TIARA Cyclotron

Nobumasa MIYAWAKI\* and Satoshi KURASHIMA\*

## Abstract

The advanced techniques for an AVF cyclotron were developed to realize swift and frequent beam switching of the ion species and energy of an ion beam, and to provide highly-stable high-quality beam for special beam formation, such as a microbeam and a single-pulse beam. The high stability of the magnetic field was obtained by controlling the temperature of the magnet iron, and has enabled the fast and reliable beam switching. Based on the highly stabilized magnetic field, the sophisticated techniques for measurement and control of beam-phase and that of reduction of beam phase width by phase bunching in the central region of the AVF cyclotron were developed. Development of the advanced acceleration techniques have realized regular use of the special beams for the research in the fields of biotechnology and materials science.

## 1. はじめに

量子科学技術研究開発機構<sup>1)</sup>のイオン照射研究施設 (TIARA: Takasaki Ion accelerators for Advanced Radiation Application) の AVF サイクロトロン<sup>2)</sup> (以下, TIARA サイクロトロン) は, 原子核・素粒子研究や RI 製造の用途とは異なり, バイオ技術・材料科学分野の広範な研究課題における様々な照射実験に対応するために, 多様なイオン種・エネルギーのイオンビームの加速が求められている。このため, 4 台の ECR イオン源を切換えて多種類のイオンを供給するとともに, 三つの加速ハーモニックモード ( $h=1, 2, 3$ ) を使って幅広いエネルギー範囲 ( $H^+$  10~90 MeV, Au までの重イオン最高 27.5 MeV/u) をカバーしている。また, サイクロトロンの入射前または出射後に電場や磁場などでビーム強度, ビームサイズ, ビームパルス間隔, 照射面積などを制御することにより, 照射実験の多様な要求に応じた高安定で高品位なビームを提供している。さらに, バイオ技術・材料科学分野の研究ではビームタイムが短

いことから, 例えば 30 分間の実験照射に続けて 3 時間のビーム切換調整を行い, 直ぐに次の実験に異なるイオンビームを供給する等, 短時間でイオン種・エネルギー変更が高頻度で行われるのが最大の特徴である。

1980 年代後半に TIARA サイクロトロンの建設を検討した頃は, 一般的にサイクロトロンはコンパクトで安定な加速器とされていたため, 安定性を向上させるような特段のカスタマイズを行わずに導入した。しかし, 従来サイクロトロンを特徴づけていた「安定」の真意は, 十分なアイドリング時間が経過した後に達成しうる安定性のことであり, 同一ビームを 1 週間以上使用する原子核物理実験等のビームタイムでは常識的に達成しうるものであった。それに対して, 前述のようにビームタイムが極めて短いバイオ技術・材料科学の実験には当てはまらず, 幾つもの不安定な事象の発生が運用開始後に明らかになった。

具体的には, ビーム強度が短時間で減少する (酷い時には数時間でビームがなくなる) ために頻繁な磁場調整を必要として多くの実験に支障が

\* 量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所 Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

(Nobumasa Miyawaki E-mail: miyawaki.nobumasa@qst.go.jp)

宮脇信正氏, 倉島俊氏は第 15 回日本加速器学会技術貢献賞を受賞されました。

出たほか、チョッパーによる間引きで形成するシングルパルスビーム<sup>3,4)</sup>(1  $\mu$ s 以上の間隔で孤立した単一パルス)は調整に2時間かけて形成した後、ビーム位相(正弦波の加速電圧波形に対するビームの位相)の経時変化によりわずか20分でシングルパルスではなくなり、実験には利用できない等の弊害が生じた。

AVF サイクロトロンは、一体型の大きな電磁石が作る静磁場の中でイオンを数十~数百回回転させながら加速するため、磁場変動に起因するビーム位相の僅かなずれが周回毎に蓄積されて、最終的にビームの質に大きな影響をもたらす。加えて、加速に伴う相対論的効果によるイオンの質量増大に対応して、軌道半径の増加とともに磁場を強めて同じタイミング(等時性)で加速できるように等時性磁場分布を形成しているため、その特徴を常時維持するには磁場が安定で、粒子が加速ギャップを通過する際のビーム位相が変化しないという条件が極めて重要である。しかし、TIARA サイクロトロンでの短時間かつ高頻度のビーム切換えは十分なアイドリング時間を確保できないため、形成した等時性磁場分布が時間とともに変化して等時性条件が成り立たなくなった。そのため、ビーム位相がずれることでシングルパルスが崩れるなど、ビーム軌道の変化にも及んでビーム取出し効率の低下によるビーム強度の減少に至った。さらに、ビーム位相の変化により加速位相のトップ(正弦波の加速電圧波形の最大振幅近傍)からズレてしまい、ビームバンチ内のエネルギー利得の差が大きくなってエネルギー幅( $\Delta E/E$ )が増大し、 $\Delta E/E$ の小さなビームが必要なマイクロビーム形成にも悪影響を及ぼすことからビーム位相の精密な制御が必須である。

本稿では、まずTIARA サイクロトロンの独特な運転形態を紹介し、この運転形態で高安定なビーム供給を可能にした磁場高安定化技術<sup>5)</sup>、極

めて安定な磁場の下で特殊ビームを代表するマイクロビーム<sup>6)</sup>およびシングルパルスビームの形成を可能とした加速ビーム位相測定・調整技術<sup>7)</sup>、中心領域の位相バンチング<sup>8)</sup>を順次解説していく。

## 2. 独特な運転形態と特殊ビームの形成

TIARA サイクロトロンにおける運転スケジュールでは、**図1**に例示したように、月曜日の午前中に立ち上げて午後から実験利用を開始し、金曜日の夕刻に立ち下げるのが通例である。ビーム利用実験では、数時間以内の短時間照射が多いため、同一ビームの実験を可能な限り連続して行うように運転スケジュールを組むものの、それでも同一ビームの連続運転期間は1日程度であり、時には1日に複数回のビーム切換えを実施することもある。ビーム切換えが高頻度であるため、同一ビームでの連続運転時間が比較的長い原子核物理実験等で使用されるAVFサイクロトロンの場合と比べて、運転時間全体に対するビーム切換えに要する時間の占める割合が高い。

そこで、TIARA サイクロトロンではビーム切換えの時間を短縮するため、カクテルビーム加速<sup>9,10)</sup>による短時間ビーム切換えを実施している。サイクロトロンでは、 $M/Q$ ( $M$ :イオンの質量( $u$ ),  $Q$ :同価数)が $B/f$ ( $B$ :磁場,  $f$ :加速周波数)に比例することから、 $M/Q$ の僅かな差の分だけ $B$ もしくは $f$ をズラすことにより異種イオンをほぼ同じ軌道で加速して取出すことができるため、加速周波数やビーム取出しなどの5分程度の微調整で加速イオン種とエネルギーを変更することができる。従って、1回の照射実験の中で複数の種類のイオンビーム照射が可能となる。カクテルビーム加速により供給されるビームの核子当たりのエネルギーはイオン種に依らず等しくなることから、同じターゲット物質におけるLET(Linear Energy Transfer:線エネルギー付与)はイ

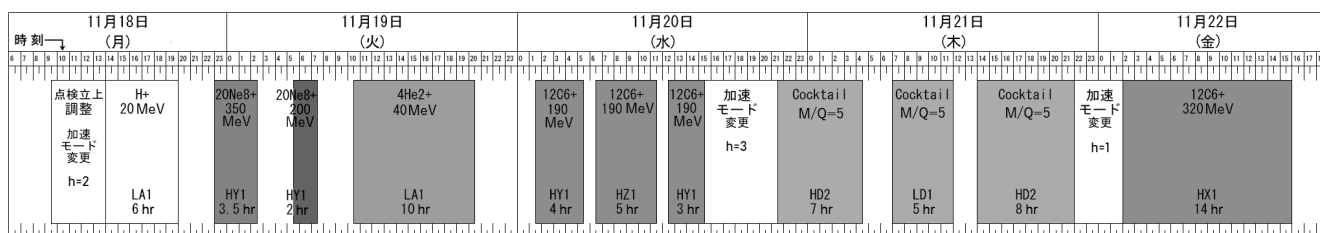


図1 通常の1週間の実験利用割当表の例。下方のアルファベットは実験ポート名称。

オン種によって異なる。この特徴から、カクテルビーム加速は幅広い範囲で異なる LET のビームを次々と切替える半導体の耐放射線性研究<sup>11)</sup>の実験を中心に用いられている。カクテルビーム加速では、等時性磁場分布が安定に維持されていないと目的のイオンとは異なるイオンが同時に取出されるため、ビームの純度を保証するためには長時間の磁場安定化が必須である。

一方、TIARA サイクロトロンではバイオ技術・材料科学分野の様々な実験ニーズに応えるため、特殊なビームを形成して照射を行っている。代表的な特殊ビームはシングルパルスビームとマイクロビームである。

シングルパルスビームは、イオンが物質中で励起する化学反応過程の測定<sup>12,13)</sup>(パルスラジオリシス)や TOF 法を用いた高エネルギー中性子標準場の開発<sup>14,15)</sup>に利用されている。サイクロトロンから加速周波数に応じた間隔(周期: 50~100 ns)で連続して取出される CW ビームの間隔を、入射前と取出し後の計 2 台のビームチョッパーを組み合わせることで、不要なパルスを間引くことで、ビームパルス間隔を 1  $\mu$ s~1 ms 以上に拡大してシングルパルスビームを形成する。入射前のチョッパーはシングルパルス間隔を決定するもので、直流ビームを 300 ns 程度の幅のパルスにする。各パルスに対してサイクロトロンから取出された 7 個までの複数個のビームパルスから 1 個を他方のチョッパーが選び出す設計になっている。ビームが加速位相のトップからずれると  $\Delta E/E$  が大きくなるが、等時性磁場の中ではビームバンチは半径方向に長く伸びて加速され続けるため、数回から百回以上にも分割されて取出されるマルチターン取出しとなり、取出し後のチョッパーの間引き条件(マルチターン数は 7 以下)を満たさなくなってしまう。そのためシングルパルスビーム形成では、ビームの加速位相の測定と加速位相のトップにビームを精密に留めておく必要がある。

バイオ技術研究において生物細胞核(5~10  $\mu$ m)を狙った照射などに用いられている重イオンマイクロビーム<sup>16)</sup>は、4 連の四重極電磁石とマイクロスリットを用いてビーム径を 1  $\mu$ m に集束して形成される。 $\Delta E/E$  が  $10^{-5}$  程度の静電加速器では同様の装置で形成されたマイクロビーム<sup>17)</sup>は広く使われているが、サイクロトロンでは加速

したビームの  $\Delta E/E$  は一般的に  $10^{-3}$  オーダーであり、色収差の影響が大きいため 1  $\mu$ m 径までの集束は不可能である。そこで、 $\Delta E/E$  を縮小するために、基本波加速電圧に基本波周波数の整数倍の高調波電圧を重畳してエネルギー利得をフラットトップ (FT) 化するシステム<sup>18)</sup>を導入し、世界で初めて数百 MeV 級重イオンビームでスポット径が真空中で最小約 0.7  $\mu$ m のマイクロビームの形成に成功した<sup>6)</sup>。しかし、FT 加速の調整と安定化にいつも数時間程度費やしていたことから定常的な実験利用の障害になっていた。実用上必要なのは、5~10  $\mu$ m の大きさの生物細胞核の内部に精度良く安定にビームを集束することであるため、FT 加速を使用せずに基本波加速電圧だけで  $\Delta E/E$  を可能な限り小さくして 2  $\mu$ m 径のマイクロビームを迅速に形成する技術開発に方針を転換した。これには、シングルパルスビームと同様に、加速位相のトップでのビーム加速とともにビーム位相幅の縮小化が必要である。

以上のような独特な運転形態と特殊ビームの利用を定常的に維持するためには、サイクロトロンの運転開始直後からビームが空間的・時間的に安定であること、つまりビーム軌道とビーム位相の時間変化が非常に小さいことが必須条件である。この条件が成立する鍵を握るのがサイクロトロン磁場の高安定化技術である。TIARA サイクロトロンで開発した磁場高安定化技術について経過を交えながら以下に説明する。

### 3. 磁場高安定化技術

TIARA サイクロトロンでは運転開始当初からビーム切替えのために磁場強度を変える際には、鉄心のヒステリシスによる励磁磁場の差異の影響を抑えるため、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)を用いてきた。これによりコイル電流の設定だけで目的の磁場強度が再現できてビームを加速できるが、ビーム電流は図 2 のように数十時間にわたって減少していた。そのため、図中の (a)~(c) でビーム強度を復活させるために 12 対のトリムコイル(図 3)の最外周のコイルで微調整をする必要があった。



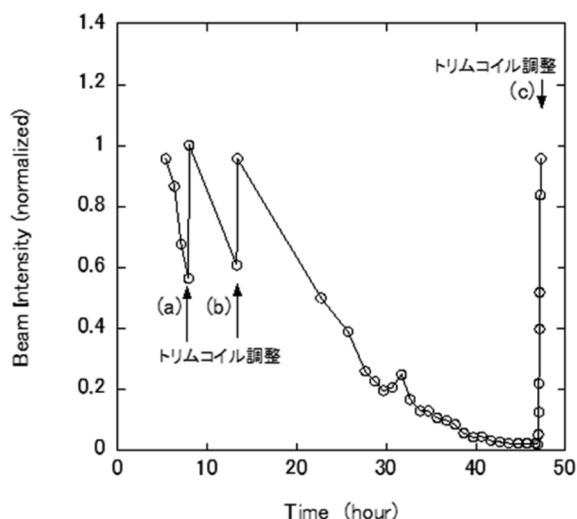


図2 メインコイルのサイクリング励磁後のビーム電流の時間変化（鉄心温度定温化前）。

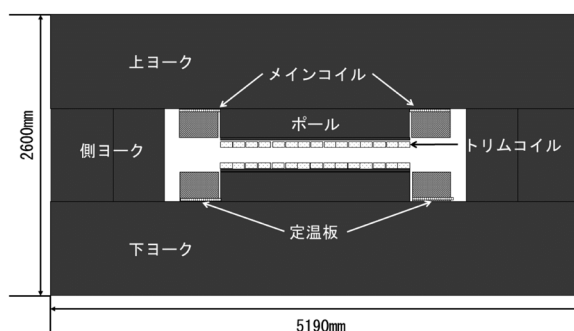


図3 TIARA サイクロトロンの電磁石の断面図。

TIARA サイクロトロンの電磁石は、図3に示す通り、H型の鉄心構造を有し、重量は220 t、ヨークと約4 mmの間隙を置いて最大900 Aの電流が流れるメインコイルが設置されている。メインコイルには銅製のホローコンダクタが用いられており、冷却水で除熱するように設計されている。冷却水の入口温度は30°Cだが、出口温度は55°Cにも上昇する。この発熱がメインコイルの支持構造体等を介して鉄心や磁極に伝わり、鉄心や磁極の温度が上昇して磁極間隔が変化し、磁場変動が生じてビーム位相変動の原因になったものと考えられた。そこで、ヨーク各所の温度モニターを数年にわたって実施した結果、温度変動と磁場変動の時定数がほぼ等しいことから、原因は鉄心や磁極の温度変化であると断定した。つまり、ビームの頻繁な変更に伴ってメインコイル電流が175~900 Aの間で増減するために鉄心の温度が平衡状態に至らず、主磁場強度( $B$ )が励磁

完了後数十時間で $\Delta B/B \approx 4 \times 10^{-4}$ も変動したために、ビームが急激に変動していた。なお、ビーム位相の変動量は磁場変動率とターン数に比例する。メインコイルから鉄心や磁極への熱伝導を最小化するため、図3のように水冷式銅板（定温板）をメインコイルとヨーク間に挿入して熱遮蔽する対策を検討した。構造解析プログラム NASTRAN を用いた解析により、局所的には10°Cにも及ぶ温度上昇が1°Cに抑えられることが明らかになった。

実際にこの対策を施し、さらに冷却水温度制御による鉄心の温度制御も行った結果、主磁場の安定度 $\Delta B/B$ は $4 \times 10^{-4}$ から $1 \times 10^{-5}$ 以下へと劇的に改善し、ビーム強度の減少はほぼなくなった。この安定度の実現によりビーム位相測定・制御技術の開発が可能になり、特殊な高品位ビームの形成を実現する基盤を築いた。

## 4. ビーム位相制御技術

### 4.1 ビーム位相の測定・制御技術

特殊ビームの形成には、サイクロトロンからほぼシングルターンで取出した $\Delta E/E$ の小さいビームを必要とし、エネルギー利得が最も高く、ビーム位相の変動の影響を受け難い加速位相のトップにビームを精密に調整しなければならない。そこで、ビーム位相の測定および制御技術の開発を行った。

ビーム位相を求める手法として Garren and Smith method<sup>19)</sup>が古くから知られているが、磁場調整等で時間を要するため、簡便な測定手法を開発した。本手法は、ビーム位相の相対変化が全加速域内で約5度以下の良好な等時性磁場が形成されている場合において、加速周波数を基準値から $\Delta f/f \sim 10^{-4}$ オーダーで僅かに変えながら最外周軌道のビーム電流を計測し、その変化から加速電圧波形のどの位相で加速しているかを解析する方法である。加速周波数を減少させていくと、ビームバンチが減速（エネルギー利得が負になる）領域に達するまでビーム電流に変化はないが、達した後は急激に減少する（図4）。ビーム電流が半減したところを、エネルギー利得がゼロとする。ビーム位相の初期値が加速電圧の頂点にない場合、加速周波数を増加方向もしくは減少方向にスキャンするとエネルギー利得がゼロに達するまでのビー

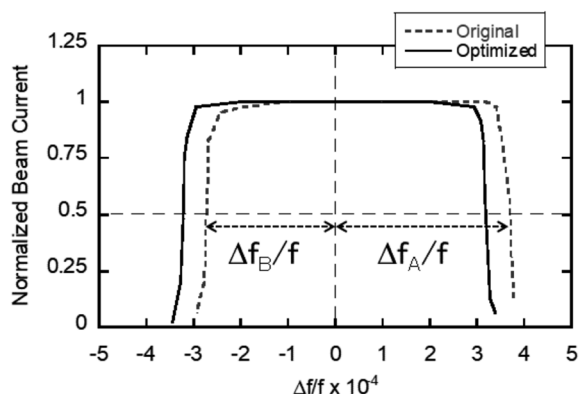


図4 加速周波数を増減させた時のビーム電流の変化.

ムの回転数に差が生じるため、図4の破線のような原点に対して非対称のパターンが得られる。

図の横軸は加速周波数の変化割合であり、原点は基準値である実際に加速を行う（等時性磁場に合致した）周波数である。エネルギー利得が最も高い加速位相（正弦波のトップ）とビームバンチの位相中心との差  $\phi$  は、図のパターンの非対称性から式(1)のように求まる。

$$\phi = \sin^{-1} \left( 1 - 2 \frac{\frac{\Delta f_A}{f}}{\frac{\Delta f_A}{f} - \frac{\Delta f_B}{f}} \right) \quad (1)$$

加速位相のトップとビームバンチの位相中心を一致させる ( $\phi=0$ ) ためには、最内周とその外側のトリムコイルで中心部の磁場強度を変えることにより、ビーム位相の最適化を図る。これを数回繰り返して調整すると、図4の実線のように対称な分布が得られ、エネルギー利得が最も高い加速位相でビームが加速できていることを示している。

## 4.2 位相バンチング

ビーム位相幅の縮小化は一般的に、入射ビームラインに設置されるバンチャーによる時間的な圧縮やサイクロトロン内部の位相制限スリットでビームを空間的に制限することによって行われている。TIARAサイクロトロンでは、より強力に縮小できる位相バンチングを中心領域において発現させる電極配置を見出した。

位相バンチングの解析は、図5に示すモデルを用いた。図のように異なる時刻に入射された粒子  $a$  と  $b$  が、プラー電極によって通常のディー電

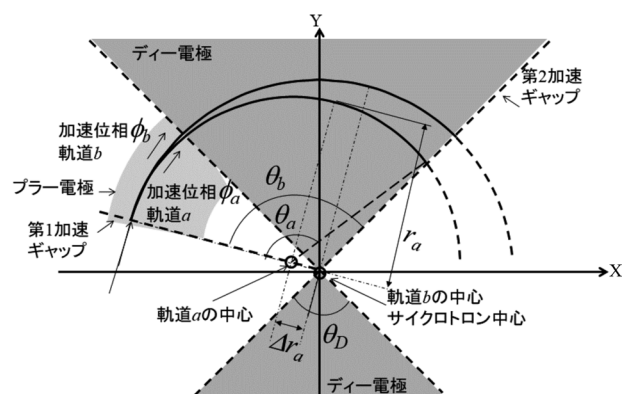


図5 位相バンチングの解析モデル.

極の加速位置よりそれぞれ早い位相  $\phi_a$  と  $\phi_b$  で加速することを想定する。プラー電極で作られる第1加速ギャップでの加速電圧は正弦波のトップではなく、時間に対して勾配のある電圧であるため、エネルギー利得に差が生じる。これが磁場で軌道半径の差 ( $\Delta r_a$ ) になって第2加速ギャップに到達する時の偏向角である  $\theta_a$  と  $\theta_b$  の差になる。この時の位相差は、偏向角の差と  $h$  の積であり、式(2)のように求まる。

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= h \cdot (\theta_a - \theta_b) \\ &= h \cdot \sin^{-1} \left( \frac{\Delta r_a}{r_a} \sin \theta_b \right) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $r_a$  はサイクロトロンへの入射エネルギーと第1加速ギャップでのエネルギー利得で決まる。もし入射エネルギーが大きいと、加速電圧によって生じる  $\Delta r_a$  が相対的に小さくなるため、位相バンチングの効果が小さくなる。従って、位相バンチングは、イオン源の加速電圧がサイクロトロンの加速電圧の数分の一程度に小さい場合に期待される AVF サイクロトロン特有の現象<sup>20)</sup> であり、解析モデルから TIARA サイクロトロンでは  $h=2$  で発生することが明らかになった。

実際に TIARA サイクロトロンの位相バンチングの効果を調べるために専用に開発したプラスチックシンチレータプローブ<sup>21)</sup> をサイクロトロン内部に挿入し、シンチレータで測定可能なビーム強度まで減衰させた上で、入射ビームラインのバンチャーや位相制限スリットを用いない条件で、ビーム位相の強度分布を測定した。その時のビームには、加速ハーモニック  $h$  毎の位相バンチングの効果を比較するため、中心領域の電

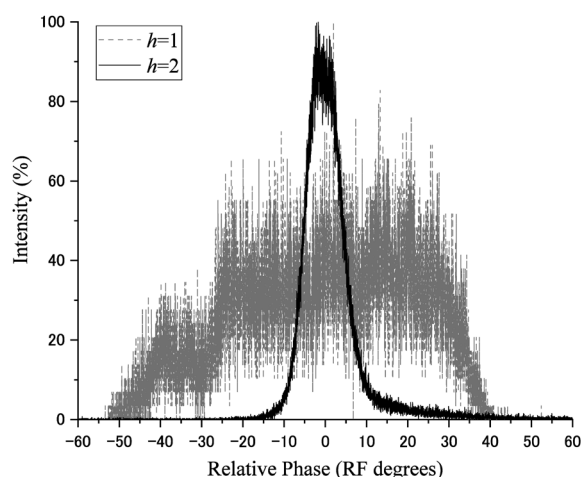


図6  $h$  毎のビーム位相の強度分布の測定結果.

極配置がほぼ同じだが  $h$  が異なる  $107 \text{ MeV } ^4\text{He}^{2+}$  ( $h=1$ ) と  $260 \text{ MeV } ^{20}\text{Ne}^{7+}$  ( $h=2$ ) を使用した. その結果, 図6 に示すように,  $h=2$  のビーム位相幅は  $h=1$  よりも狭く, 位相バンチングの効果を実証できた. 実際には, 両  $h$  ともバンチャーや位相スリットの使用によるビーム位相幅の縮小が可能だが,  $h=2$  は位相バンチングによってビーム位相幅が狭い上に, バンチャーの相対位相の変更に対するビーム位相の変化が小さく安定している. 結果として, 位相バンチングによって生じた狭いビーム位相幅が, エネルギー幅の狭小化に寄与し, 半径方向の広がりが抑制され, ビームの輸送効率の増加に寄与している.

## 5. おわりに

TIARA サイクロトロンは, 独特な運転形態がもたらした困難を磁場高安定化技術により解決し, これ得られた高安定磁場を基盤として開発した位相制御技術によりシングルパルスビームやマイクロビームのような特殊ビームを定常的に提供する独自の進化を遂げた. しかし運転開始から30年近く経過し, 老朽化による故障等が増加している. 特に, 2016年12月に発生したメインコイルのレイヤー間ショートは, 運転継続の可否に関わる大きなものであったが, 2019年3月にメインコイルの交換作業を完了した<sup>22)</sup>. この故障はメインコイルの通電中に一気に電圧が低下したことで発覚した. それまで通常のビーム照射は問題なく行われていたが, その数年前からマイクロビーム形成時にはビームの軽微な不安定事象の発生が

増えており, 予兆を捉えていたと考えられる. その後も, ビーム加速では問題がなくてもマイクロビーム形成時にビームが不安定になる問題があり, その1つはRF電源のコンデンサーの破裂による加速電圧の不安定化に起因していた. このようにサイクロトロンは, ある程度の許容できるトラブルを抱えていても通常のビーム加速ができて照射実験が可能であり, この意味で「安定」な加速器と言える. しかし, TIARA サイクロトロンように短時間かつ高頻度でのビーム切換えと特殊ビーム形成を実施する場合は極めて不安定であり, 高い安定性と信頼性を伴ったより高度な制御技術が求められる. 一方, これらの特殊照射のためのビームの品質は加速器の健全性を反映した指標になりうることもわかり, 今後の高経年化機器の改修で重要な情報源となると考えている.

今後は, サイクロトロンの磁極に設置したNMRプローブで測定した磁場強度により能動的に磁場を制御する技術の開発に取り組み, サイクリング励磁法に替わる, より短時間でビーム切換えが可能となる励磁法の開発にも繋げる計画である.

## 参考文献

- 1) <https://www.qst.go.jp/>
- 2) S. Kurashima, T. Satoh, Y. Saitoh and W. Yokota: *Quantum Beam Sci.* **1**, 2 (2017).
- 3) W. Yokota, M. Fukuda, S. Okumura, K. Arakawa, Y. Nakamura, T. Nara, T. Agematsu and I. Ishibori: *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 1714 (1997).
- 4) S. Kurashima, N. Miyawaki, H. Kashiwagi, S. Okumura, M. Taguchi and M. Fukuda: *Rev. Sci. Instrum.* **86**, 073311 (2015).
- 5) S. Okumura, K. Arakawa, M. Fukuda, Y. Nakamura, W. Yokota, T. Ishimoto, S. Kurashima, I. Ishibori, T. Nara, T. Agematsu, M. Sano and T. Tachikawa: *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 033301 (2005).
- 6) M. Oikawa, T. Satoh, T. Sakai, N. Miyawaki, H. Kashiwagi, S. Kurashima, S. Okumura, M. Fukuda, W. Yokota and T. Kamiya: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **260**, 85 (2007).
- 7) S. Kurashima, T. Yuyama, N. Miyawaki, H. Kashiwagi, S. Okumura and M. Fukuda: *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 033306 (2010).
- 8) N. Miyawaki, M. Fukuda, S. Kurashima, S. Okumura, H. Kashiwagi, T. Nara, I. Ishibori, K. Yoshida, W. Yokota, Y. Nakamura, K. Arakawa and T. Kamiya: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **636**, 41 (2011).
- 9) M. A. McMahan: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*

- 241, 409 (2005).
- 10) S. Kurashima, K. Yoshida, M. Oikawa, T. Satoh, N. Miyawaki, T. Yuyama, S. Okumura, H. Kashiwagi, I. Ishibori, T. Nara, T. Kamiya, M. Fukuda and W. Yokota: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **267**, 2024 (2009).
  - 11) T. Hirao, S. Onoda, M. Oikawa, T. Satoh, T. Kamiya and T. Ohshima: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **267**, 2216 (2009).
  - 12) K. Iwamatsu, M. Taguchi, Y. Sugo, S. Kurashima and Y. Katsumura: Trans. Mater. Res. Soc. Jpn. **36**, 329 (2011).
  - 13) T. Yanagida, M. Koshimizu, Y. Fujimoto, S. Kurashima, K. Iwamatsu, A. Kimura, M. Taguchi, G. Okada and N. Kawaguchi: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **409**, 27 (2017).
  - 14) A. Masuda, T. Matsumoto, H. Harano, Y. Tanimura, Y. Shikaze, H. Yoshitomi, S. Nishino, S. Kurashima, M. Hagiwara, Y. Unno, J. Nishiyama, M. Yoshizawa and H. Seito: IEEE Trans. Nucl. Sci. **62**, 1295 (2015).
  - 15) T. Matsumoto, A. Masuda, H. Harano, Y. Shikaze, Y. Tanimura, H. Seito, S. Kurashima, S. Nishino, H. Yoshitomi, J. Nishiyama, M. Hagiwara, Y. Unno and M. Yoshizawa: J. Nucl. Sci. Technol. **54**, 529 (2017).
  - 16) T. Funayama, T. Sakashita, M. Suzuki, Y. Yokota, N. Miyawaki, H. Kashiwagi, T. Satoh and S. Kurashima: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **465**, 101 (2020).
  - 17) T. Kamiya, T. Suda and R. Tanaka: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **104**, 43 (1995).
  - 18) M. Fukuda, S. Kurashima, S. Okumura, N. Miyawaki, T. Agematsu, Y. Nakamura, T. Nara, I. Ishibori, K. Yoshida, W. Yokota, K. Arakawa, Y. Kumata, Y. Fukumoto and K. Saito: Rev. Sci. Instrum. **74**, 2293 (2003).
  - 19) A. A. Garren and L. Smith: Proc. Int. Conf. on Sector-focused and Meson Factories, Geneva, Switzerland, 18 (1963).
  - 20) N. Miyawaki, M. Fukuda, S. Kurashima, H. Kashiwagi, S. Okumura, K. Arakawa and T. Kamiya: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **715**, 126 (2013).
  - 21) N. Miyawaki, M. Fukuda, S. Kurashima, H. Kashiwagi, S. Okumura, K. Arakawa and T. Kamiya: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **767**, 372 (2014).
  - 22) S. Hosoya et al.: Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, 1285 (2019).