

マイクロビーム形成・利用を実現した AVF サイクロトロンにおける ビーム位相制御技術の開発

DEVELOPMENT OF BEAM PHASE CONTROL TECHNOLOGY OF AVF CYCLOTRON FOR REALIZATION OF MICROBEAM FORMATION AND ITS APPLICATION

宮脇信正[#], 倉島 俊

Nobumasa Miyawaki [#], Satoshi Kurashima

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and
Technology

Abstract

The heavy-ion microbeam formation and its application, in the TIARA AVF cyclotron facility, have been realized by the development of beam phase control technique, which consists of phase bunching in the central region and a technique for analysis and control of the acceleration beam phase. We clarified the mechanism of the phase bunching, which narrows the beam phase width in the acceleration condition of acceleration harmonic mode 2. The acceleration beam phase was obtained simply by measuring and analyzing symmetry of the beam current pattern with changing of acceleration frequency in the cyclotron, and was controlled by adjusting coil currents of a few trim coils. The heavy-ion microbeam with a minimum spot size of about 2 μm for the biological applications has been obtained using the beam phase control technique, and quick change of the ion species in microbeam formation has been achieved by a cocktail beam acceleration technique in an experiment time.

1. はじめに

サイクロトロンは 1 個の巨大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。このため、磁場や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という宿命を負っている。従って、エネルギー幅 $\Delta E/E$ の小さいビームを取り出すには、磁場や位相に対して非常に高い安定度と制御性が要求される。しかし、通常の一般的なビーム照射では、 $\Delta E/E$ の大小がそれほど問われないこともあり、ある程度良好な磁場分布が形成できれば広い範囲の RF 位相で加速可能なため、サイクロトロンにおけるビーム位相の測定技術や制御技術の発展が近年あまり見られなかった。

量子科学技術研究開発機構 [1] のイオン照射研究施設 (TIARA) が有する K110 AVF サイクロトロン [2] は、バイオ技術や材料科学の研究にイオンビームを提供し、特殊な照射技術としてマイクロビームがある。バイオ技術研究では、生物細胞核 (5~10 μm) を狙った照射を必要とするため、これ以下のビーム径、及び照準精度を必要とした。そこで、1 μm のビームスポット径および照準位置精度を有するマイクロビームの形成を目標とし、その形成では四重極電磁石を用いるため、色収差の影響があり、 $\Delta E/E$ を小さくする必要があった。サイクロトロンビームの $\Delta E/E$ は静電加速器と比較して、一般的に一行以上大きい 10^{-3} 台以上であり、1 μm までの集束は困難である。そこで、 $\Delta E/E$ を縮小するために、磁場の安定化 [3] や高調波電圧を用いてエネルギーゲインを平坦化してビームを加速するフラットトップ (FT) 加速システム、FT 加速で必要なビーム位相の測定及び制御、その縮小化の技術開発が必要であった。

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

技術開発の結果、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 μm のマイクロビームの形成に成功した [4]。しかし、このマイクロビームを実験で利用する場合に、FT 加速システムにおいて放電を抑えて安定な加速電圧を得るまでに時間を要することがネックとなった。そこで、マイクロビームを定常的に利用 (実用化) することを目指し、基本波の正弦波電圧のみで可能な限り $\Delta E/E$ を小さくするため、加速位相制御技術や位相バンチングによる位相幅の縮小技術の開発を進め、真空中で約 2 μm のマイクロビーム形成に成功した。本稿では、これらサイクロトロン技術開発について報告する。

2. 集束方式のマイクロビーム形成システム

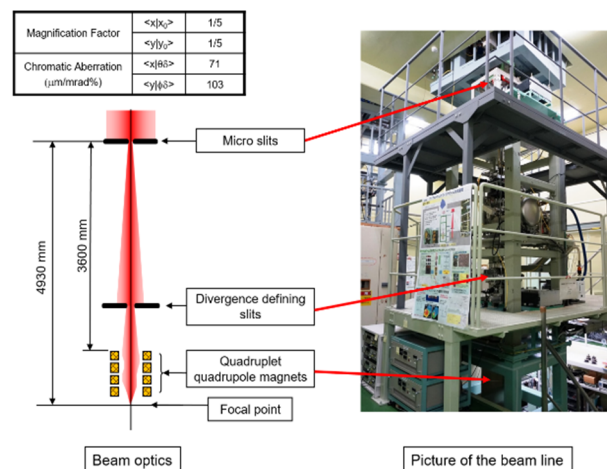


Figure 1: Beam optics and picture of the vertical microbeam formation system using focusing magnets.

TIARA AVFサイクロトロン集束方式のマイクロビーム形成システムでは、Fig. 1 に示すように、マイクロスリットで物点を形成し、発散制限スリットで制限した後に4連の四重極電磁石により、1/5の倍率で集束している。集束点付近のターゲットステーションでは、真空を封じる大気取出し窓(Si₃N₄, 200nm)によって、イオンビームを大気に取り出している。ビームは、この窓と大気により散乱される。計算では、1点から出るビームでも窓から1mm離れた場合には2 μ m程度に広がった。この影響を抑えるため、ターゲットは可能な限り大気取出し窓に近づける必要がある。

本システムでは、マイクロビーム形成後にビーム強度を大幅に下げて、イオンの個数を1個ずつ制御しながら、マイクロビーム径の精度で任意の位置に照射できる、シングルイオンヒットシステムが備わっている。シングルイオンヒットシステムは、Fig. 2 に示すように、主に静電スキャナ、半導体検出器及び高速ビームキッカー(チョッパー) [5]で構成される。ターゲットを透過したイオンを半導体検出器で検出し、その信号を用いて、サイクロトロンに入射するビームのタイミングをチョッパーで制御すると共に、次の照射位置に照準する静電スキャナの制御を行っている。これらによって、細胞照射等の応用研究に欠かせない600 hit/min以上の高速シングルイオンヒットが可能となっている。

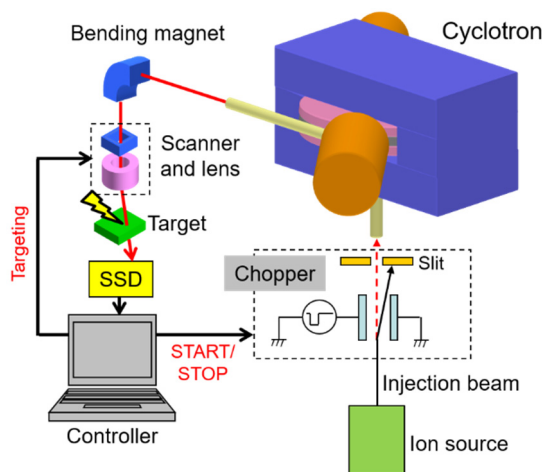


Figure 2: Layout of equipment for microbeam formation and single-ion hit control system at the TIARA cyclotron facility.

3. マイクロビーム径の最小化のためのフラットトップ加速

本マイクロビーム形成システムにおいて1 μ mのビーム径を達成するためには、 $\Delta E/E$ を 2×10^{-4} 程度まで縮小する必要があった[6]。そこで、正弦波であるサイクロトロンの基本波加速電圧に起因するエネルギー利得差を縮小するため、高調波電圧を重畳するFT加速システムを導入した。TIARA AVFサイクロトロンでは、リングサイクロトロンのように高調波専用の加速電極を設置できる空間がないため、一つのディー電極上に基本波と高調波の電圧を発生させる必要があった。この方式を既に実施していたiThemba LABSのAVFサイクロトロン

システム[7]を参考に、高調波用共振空洞の設置場所や高調波の周波数範囲等を検討し、第5高調波を選択した。基本波電圧の周波数範囲は11~22MHzであるので、第5高調波として55~110MHzの周波数範囲で励振可能なシステムを開発した[8]。基本波に第5高調波を重畳したFT加速による $\Delta E/E$ への効果について、基本波のみの正弦波と第5高調波を加えたFT波形で加速した場合のRF位相に対するエネルギー利得の関係をFig. 3に示す。 $\Delta E/E=2 \times 10^{-4}$ 程度となるビーム位相の許容範囲は、FT加速では約14度、基本波では約2度である。従って、ビーム位相幅をある程度制限することで、FT加速では容易に 10^{-4} 台前半の $\Delta E/E$ を達成できる。一方、基本波の加速では、ビーム位相はその許容範囲が狭いため、ビーム位相幅をかなり制限すると共に、常時加速RF位相の中心に正確に留める必要がある。

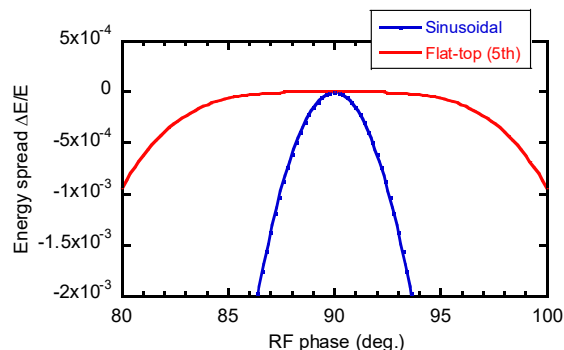


Figure 3: Ratio of the energy-gain difference to the peak as a function of the RF phase. The red line represents the energy spread for the flat-top acceleration using the fifth harmonic frequency, and the blue line for the ordinary acceleration using the sinusoidal wave voltage.

FT加速システムの開発により 10^{-4} 台の $\Delta E/E$ を達成し、260 MeV ²⁰Ne⁷⁺ビームについて真空中でスポット径が約0.7 μ mと静電加速器に匹敵するマイクロビームの形成に成功した。しかし、月に1~2回しか使用しないFT加速システムは立ち上げ時に放電が頻発に発生し、枯らすために時間がかかるため、通常の実験利用の時間枠内での使用は困難であった。

4. マイクロビームの実用化のためのビーム位相制御技術等の開発

4.1 ビーム位相と位相幅の測定・制御

FT加速システムによるマイクロビームの実用化が困難であることから、基本波電圧だけでマイクロビーム形成を行うために、ビーム位相を加速RF位相の中心付近に正確に制御すると共に、ビーム位相幅の精密な測定・制御が必要となった。加速位相を求める手法として古くからミス・ガレン法[9]が知られているが、この手法は計測や解析に時間がかかるため、我々は簡便な計測手法を新たに開発した [10]。この手法は、良好な等時性磁場(位相の相対変化が約5度RF以内)が形成されている場合において、Fig. 4 に示すように加速周波数を基準値から僅かに走査しながら取り出し前のビーム電流の計測を行い、電流が半減する周波数を2点求めることで Eq. (1)に示

すように、ビームの加速位相 θ を求めることができる。

$$\theta = \text{Sin}^{-1} \left(1 - 2 \frac{\frac{\Delta f_A}{f}}{\left(\frac{\Delta f_A}{f} - \frac{\Delta f_B}{f} \right)} \right) \quad (1)$$

求まった加速位相からの最適化 ($\theta=0$) は、中心バンブ磁場の調整で容易に行うことができる。本手法は特別な知識や技術を必要とせず、10分程度で加速位相の最適化を行うことができる。さらに、この手法ではビームが減少する時の傾きからビーム位相も評価できるため、次項で述べる位相バンチングによるビーム位相幅の縮小を確認することもできた。

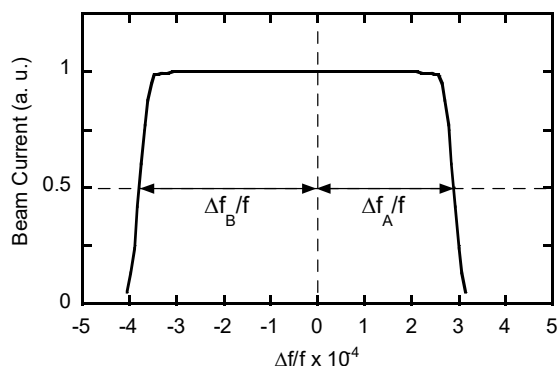


Figure 4: Measured beam current pattern in the cyclotron when the acceleration frequency is scanned. The acceleration phase is lagging in this example.

4.2 位相バンチング

基本波電圧による加速では、FT 加速に比べて大幅なビーム位相幅の縮小化が必要である。従来のビーム位相幅の縮小化は、サイクロトロンに入射ビームラインに設置されたバンチャーによるビームの時間的圧縮とサイクロトロンの中心領域に設置された位相スリットを用いたビーム軌道の制限によって行っている。しかし、マイクロ

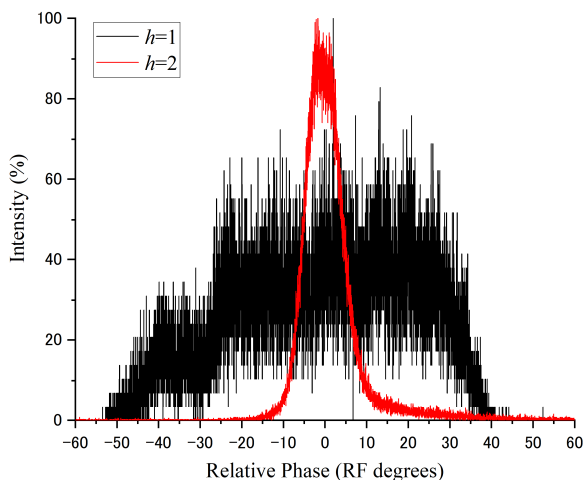


Figure 5: Measured beam phase distributions without phase defining slits and beam buncher.

ビーム形成のためには、更なる縮小化を図る必要があった。そこで、サイクロトロンを中心領域で発生する可能性がある位相バンチングに着目し、その発生メカニズムを解明し、ビーム位相幅の縮小化に用いた。

位相バンチングは、加速 1 回あたりのエネルギー利得がビームエネルギーより大きい第 1 加速ギャップにおいて、加速電圧波形の増加勾配部分で加速することによって第 2 加速ギャップで時間的にビームの圧縮が起こり、その後の加速を電圧波形の頂点部分で行った場合、狭いビーム位相幅が保持される現象である。TIARA AVF サイクロトロンでは、イオンの回転周期と RF の加速周期の比である加速ハーモニクス数 (h) が 2 の時にこの効果が得られた[11, 12]。Figure 5 は、バンチャーの使用や位相スリットを用いたビームの制限は行わず、シンチレータを取り付けたプローブをサイクロトロン内部に挿入して測定した、107 MeV ${}^4\text{He}^{2+}$ ($h=1$) と 260 MeV ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ ($h=2$) のビーム位相分布である。本サイクロトロンを中心領域の $h=1$ と 2 の電極配置がほぼ同じであるにも関わらず、位相バンチングは $h=2$ では発生し、 $h=1$ では発生しないことが確認できた。従って、 $h=2$ では、バンチャーの使用と位相スリットによるビームの制限によって、更なるビーム位相幅の狭小化が可能である。これらの加速位相制御技術と位相幅縮小化技術を用いて、基本波電圧のみによるマイクロビーム形成を行い、 $h=2$ で加速した 260 MeV ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ ビームに対して真空中でビーム径約 $2\mu\text{m}$ の形成を達成した。

4.3 カクテルビーム加速

TIARA におけるイオンビーム照射実験では、LET (Linear Energy Transfer) が大きく異なるビームを使う場合が多く、短時間でビームを切り換えることは、マイクロビームを利用する上で非常に有用である。しかし、マイクロビームの形成には、サイクロトロンの立ち上げから合計約 8 時間程度が必要であり、頻繁なビーム切替は困難であった。そこで、サイクロトロンの特徴である優れた質量分解能力を利用して、加速周波数もしくは全体磁場を僅かに変更して、磁気剛性がほぼ同じビームを短時間で切り換えるカクテルビーム加速技術に着目した[13]。サイクロトロンでの短時間切り換えに加えて、磁気剛性がほぼ同じビームであるため、最初のビーム調整で 4 時間程度要していたビーム輸送やマイクロビームへの集束が、ビーム切替時には 10 分程度の微調整で済むことも大きな利点である。Equation (2) により定義される質量分解能 R は、TIARA AVF サイクロトロンでは 3300 である。

$$R = \left| \frac{(M/Q)}{\Delta(M/Q)} \right| = \left| \frac{f_{\text{RF}}}{\Delta f_{\text{RF}}} \right| \quad (2)$$

Table 1 は、 $M/Q \approx 2.86$ (M : イオンの質量数、 Q : 同価数) の一例として、195 MeV ${}^{14}\text{N}^{5+}$ 、260 MeV ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ 、520 MeV ${}^{40}\text{Ar}^{14+}$ のパラメータを示す。マイクロビーム形成を ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ ビームで行った後に、加速周波数を変更して ${}^{40}\text{Ar}^{14+}$ ビームをサイクロトロンから容易に取り出すことができ、マイクロビームラインまでのステアリング磁石を若干微調整しただけで、ビーム切替から約 30 分で ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ ビームと同等のサイズのマイクロビームを形成することに成功した。サイクロトロン特有の本技術は、マイクロビーム形成においても非常に有用な技術であることを確認でき、

半導体への照射実験に利用された[14]。

Table 1: Ion Species with the $M/Q \approx 2.86$ for the cocktail beam acceleration. For calculation of the M/Q , mass of the stripped electrons and the mass excess of atom were corrected.

Ion	M/Q	$\Delta(M/Q) / (M/Q)$	RF (MHz)	LET in water (keV/ μm)
$^{14}\text{N}^{5+}$	2.80007	-1.94×10^{-2}	17.8210	186.6
$^{20}\text{Ne}^{7+}$	2.85551	0	17.4750	387.2
$^{40}\text{Ar}^{14+}$	2.85391	-5.60×10^{-4}	17.4848	1143

5. まとめ

上述のビーム位相制御技術によって TIARA AVF サイクロトロン集束方式のマイクロビームは、基本波電圧のみの加速で、8時間程度で安定な形成が可能となった。実際のシングルイオンヒット照射の一例として、2値化したロゴマークのデータについて、ステップ幅を約 $1.5\mu\text{m}$ で約 12500 箇所照射した結果を Fig. 6 に示す。現在、マイクロビームは、バイオ技術研究において生物細胞の核を染色して照準するシングルイオンヒットによる照射 [15] に用いられている。

今回紹介したビーム位相制御技術は、磁場安定化技術 [3] と共に、マイクロビーム形成のみならずサイクロトロン多様なビーム利用の基盤技術となっている。例えば、ビームパルスの周期を通常の $50 \sim 100\text{ns}$ 程度から数 μs 以上にビームチョッパーを用いて拡大するシングルパルスビーム実用化も、ビーム位相制御技術なしでは実現できなかった [16]。また、カクテルビーム加速においては、異種イオンの混入を減らした上で長時間安定に供給することに寄与している。今後は位相バンチング技術を他のサイクロトロンへ応用する等、サイクロトロンや加速器技術の発展に引き続き貢献したい。

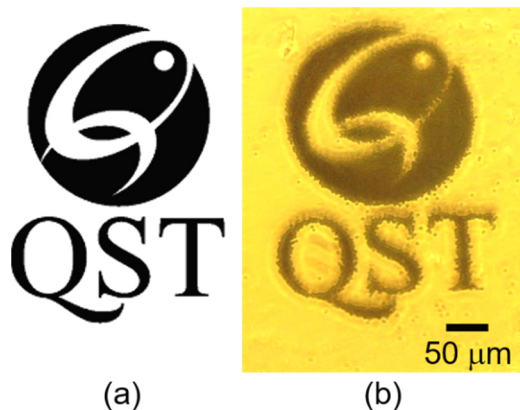


Figure 6: (a) Binarized image of the QST logo and (b) Photomicro-graph of the CR-39 detector etched by solution after drawing the QST logo with the $260\text{MeV } ^{20}\text{Ne}^{7+}$ microbeam.

謝辞

本技術開発を進めるにあたり、多くのご指導、ご助言を頂きました大阪大学核物理研究センターの福田光宏教授に深く感謝申し上げます。また、TIARA AVF サイクロトロングループ、マイクロビーム形成グループ及びマイクロビーム生物研究グループのメンバーには、装置の整備や開発、また本プロシーディングスの作成にご協力して頂き、心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST); <http://www.qst.go.jp/>
- [2] S. Kurashima *et al.*, Quantum Beam Sci. 1, 2 (2017).
- [3] S. Okumura *et al.*, “Magnetic field stabilization by temperature control of an azimuthally varying field cyclotron magnet”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 76, p. 033301, 2005.
- [4] M. Oikawa *et al.*, “Focusing high-energy heavy ion microbeam system at the JAEA AVF cyclotron”, *Nucl. Instr. Meth. B*, vol. 260, pp. 85-90, 2007.
- [5] S. Kurashima *et al.*, “Enhancement of beam pulse controllability for a single-pulse formation system of a cyclotron”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 86, p. 073311, 2015.
- [6] M. Fukuda *et al.*, “Flat-top acceleration system for the variable-energy multiparticle AVF cyclotron”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 74, pp. 2293-2299, 2003.
- [7] J. L. Conrardie, A.H. Botha, J.J. Kritzing, R.E.F. Fenemore, and M.J. Van Niekerk, “A FLAT-TOP AC-CELERATION SYSTEM FOR THE NAC LIGHT ION INJECTOR CYCLOTRON”, in *Proc. 14th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications*, Cape town, South Africa, 1995, pp. 249-252.
- [8] S. Kurashima *et al.*, “Single-turn extraction from a K110 AVF cyclotron by flat-top acceleration”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 80, p. 033302, 2009.
- [9] A. A. Garren and L. Smith, in *Proc. Int. Conf. on Sector-focused and Meson Factories*, Geneva, Switzerland, 1963, pp. 18-23.
- [10] S. Kurashima *et al.*, “Useful technique for analysis and control of the acceleration beam phase in the azimuthally varying field cyclotron”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 81, p. 033306, 2010.
- [11] N. Miyawaki *et al.*, “Geometric analysis of phase bunching in the central region of cyclotron”, *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 715, pp. 126-131, 2013.
- [12] N. Miyawaki *et al.*, “Evaluation of phase bunching in the central region of a cyclotron by a radial probe with a plastic scintillator”, *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 767, pp. 372-378, 2014.
- [13] S. Kurashima *et al.*, “Quick change of ion species of heavy-ion microbeam by cocktail beam acceleration technique with the JAEA AVF cyclotron”, *Nucl. Instr. Meth. B*, vol. 267, pp. 2024-2027, 2009.
- [14] G. Vizkelethy *et al.*, “Time Resolved Ion Beam Induced Current measurements on MOS capacitors using a cyclotron microbeam”, *Nucl. Instr. Meth. B*, vol. 267, pp. 2185-2188, 2009.
- [15] T. Funayama *et al.*, “Heavy-Ion Microbeam System at JAEA-Takasaki for Microbeam Biology”, *J. Radiat. Res.*, Vol. 49, pp. 71-82, 2008.
- [16] S. Kurashima *et al.*, “Enhancement of beam pulse controllability for a single-pulse formation system of a cyclotron”, *Rev. Sci. Instrum.* 81 (2010) 033306.