

高強度小型サイクロトロンエネルギー効率向上を目指した要素技術開発

IMPROVEMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF HIGH INTENSITY COMPACT CYCLOTRON

福田光宏^{#, A)}, 依田哲彦^{A)}, 神田浩樹^{A)}, 安田裕介^{A)}, 武田佳次朗^{A)}, 原隆文^{A)}, 大本恭平^{A)}, 森田泰之^{A)}, 荘浚謙^{A)}, 趙航^{A)}, 篠塚勉^{B)}, 伊藤正俊^{B)}, 涌井崇志^{C)}, 倉島俊^{D)}, 宮脇信正^{D)}, 中尾政夫^{E)}, 松田洋平^{F)}, Mitsuhiro Fukuda^{#, A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hiroki Kanda^{A)}, Yuusuke Yasuda^{A)}, Keijiro Takeda^{A)}, Takafumi Hara^{A)}, Kyohei Omoto^{A)}, Yasuyuki Morita^{A)}, Tsun Him Chong^{A)}, Hang Zhao^{A)}, Tsutomu Shinoduka^{B)}, Masatoshi Itoh^{B)}, Takashi Wakui^{C)}, Satoshi Kurashima^{D)}, Nobumasa Miyawaki^{D)}, Masao Nakao^{E)}, Yohei Matsuda^{F)}

^{A)} RCNP, Osaka University

^{B)} CYRIC, Tohoku University

^{C)} NIRS, QST

^{D)} TIARA, QST

^{E)} GHMC, Gunma University

^{F)} Konan University

Abstract

A cyclotron originally has an excellent energy efficiency, defined by a ratio of beam power to operation power, because a cyclotron is a compact machine consisting of a minimum number of magnets and RF resonators. We are now designing and developing a high intensity compact cyclotron with energy efficiency of 30 % or more to provide mA-order intense beams of proton, deuteron, $^4\text{He}^{2+}$, H_2^+ , H⁺, D⁺. The key technologies to realize such a high-energy efficiency cyclotron are production of several tens to 100 mA ion beams by positive and negative ion sources, enhancement of high intensity beam transmission and injection efficiency from LEPT to a center region of a cyclotron, improvement of a charge stripping extraction system for a negative intense beam, maximization of energy efficiency of a cyclotron by reducing power consumption in magnet and RF resonator systems. The high energy-efficiency cyclotron will be applied for mass production of RIs and secondarily produced intense neutron flux for BNCT and neutron-induced RI production. In this paper, the conceptual design of a high intensity compact cyclotron to improve energy efficiency is presented.

1. はじめに

サイクロトロンは、コンパクト(直径2~3 m)で比較的安い建設コストでありながら数10 μA ~1 mA級の高強度陽子ビームを供給できる小型加速器として、学術的な利用に限らず社会に幅広く普及し、産業機器としても重要な役割を果たしてきた。特に、PET 検査用 F-18 の製造に代表されるように、がん検査・治療用短寿命 RI の大量製造におけるニーズは近年増しており、小型サイクロトロンが果たすべき役割は大きい。

難治性がんに対して画期的な治療実績を生み出しているアルファ線核医学治療では、半減期 7.2 時間の At-211 を用いた動物実験などが精力的に行われており、大阪大学においては 2021 年度内に医師主導治験が始まろうとしている。アルファ線放出核種である At-211 は、約 29 MeV の $^4\text{He}^{2+}$ ビームをビスマス・ターゲットに照射して $^{209}\text{Bi}(^4\text{He}^{2+}, 2n)^{211}\text{At}$ 反応(反応断面積は最大約 1 バーン)により生成しているが、臨床で求められる GBq 級の At-211 を製造するためには、数 100 μA 以上の高強度ヘリウムイオンビームが必要とされる。しかしながら、従来、高強度のヘリウムイオン加速を実現した加速器は存在せず、既存のサイクロトロンで得られるビーム強度は 30 μA 程度に留まっている。

欧米でのアルファ線核医学治療研究においては、アルファ線の放出個数が多い Ac-225 が用いられており、核燃料物質である $^{233}\text{U}/^{229}\text{Th}$ をジェネレータとする製造法が主流である。日本においては核燃料物質の取扱いに係る規制が厳重であるため Ac-225 の利用がかなり制約されているものの、15~18 MeV の陽子ビームを用いた $^{226}\text{Ra}(p, 2n)^{225}\text{Ac}$ 反応(反応断面積は最大約 0.7 バーン)による加速器ベースの製造法の研究も進められており、PET 用サイクロトロンを用いた製造法の確立が期待されている。しかしながら、既存の PET 用サイクロトロンで得られるビーム強度は数 10 μA 程度である上、ターゲットとなる ^{226}Ra は天然 RI であり、化学反応性も強い上にアルファ崩壊して肺がんのリスクが高いと WHO から警告されている気体のラドン(^{222}Rn)に崩壊することから、将来的な実用化のためには製造技術の高度化も求められている。

さらに、京都大学複合原子力科学研究所や南東北病院、大阪医科大学などに導入されている住友重機械工業(SHI)製のホウ素中性子捕捉療法(BNCT)用 30 MeV 1 mA の陽子加速専用サイクロトロン(HM30)に代表されるように、小型サイクロトロンは高強度中性子源としても利用されており、10~20 MeV の低エネルギー領域においては陽子ビームを用いるよりも重水素ビームをリチウムやベリリウム・ターゲットに照射する方が中性子発生量は大きい。

[#] mhfukuda@rcnp.osaka-u.ac.jp

そこで本研究では、 ${}^4\text{He}^{2+}$ 、 H_2^+ 、 D^+ 等のイオンビーム強度を従来の10倍以上の数~数10 mAまで増強するためのイオン源及びサイクロトロン要素技術開発に取り組んでいる。加えて、サイクロトロンは、同一の電磁石と加速電極を用いて加速粒子に渦巻き状の軌道を描かせながらほぼ同じタイミングで加速電場を通過させ、一度に全てのエネルギーの粒子を加速するという原理に基づいていることから、電磁石と共振器の消費パワーやエネルギー損失を最小限に留めることによってエネルギー効率を格段に向上させることが可能である。現在稼働中のサイクロトロンの実例では、スイスのポールシェラー研究所(PSI)の590 MeV 2.2 mAの陽子ビームを加速するリングサイクロトロン(エネルギー効率は約13%)、前述のSHI製HM30では約12%を達成しており、一般的な線形加速器(エネルギー効率は数%程度)に比べても十分に大きなエネルギー効率を実現している。しかしながら、ビーム強度が大きくなればそれに比例して運転に必要とされる電力も増えることになり、例えば、RI製造用の中性子を発生させるために40 MeV 10 mAのD⁺ビームを加速した場合には出力されるビームパワーは400 kWにも及び、エネルギー効率を12%と仮定すると3.3 MWの入力パワーが必要となってしまう。そこで、ビーム強度増強と共に消費電力削減の対策も講じ、エネルギー効率を従来の2倍以上に高めて30%以上のエネルギー効率を目指した要素技術開発も併せて進めている。

2. ビームの高強度化とエネルギー効率向上のための課題

サイクロトロンは、磁場で加速粒子を周回させながら固定された電極間隙に発生する高周波電場を用いて加速することができ、コンパクト性とエネルギー効率の点で原理的に優れた特徴を有している。しかしながら、コンパクト性と引き換えに入射領域のアクセプタンスが小さいために空間電荷効果によって広がったビームを全て受け入れることができず、またビーム取り出しのスペースも限られていてビーム引出機器での大強度ビームの損失・放射化を招き易いという難点を抱えている。従って、本研究では、サイクロトロンにおいて可能な限りコンパクト性を犠牲にせず、如何に数 mA~数 10 mA のビーム強度を達成するか、という問いに答えるため、次の課題について重点的に取り組んでいる。

- 数 10~100 mA 級のイオンビームの生成
- 空間電荷効果を考慮した限られた空間でのビーム輸送と入射
- 高強度負イオンビームの荷電変換取り出し
- 高強度化とともに消費パワーを減らしてエネルギー効率を30%以上に高める電磁石及びRF共振器の開発

これらの問題を解決し、ビームの高強度化とエネルギー効率の向上を同時に実現できるように、以下のような要素技術開発を進めている。

2.1 イオン源

${}^4\text{He}^{2+}$ や H_2^+ 生成用に世界で初めて銅酸化物超伝導体のREBCO高温超伝導線材を用いた10 GHz ECRイオン源を試作し、数 10~100 mA 級の正イオンビーム生

成を試みる。D⁺イオン生成においては、セシウムを用いた体積生成型マルチカスプイオン源をベースとして負イオンの高密度化を図り、低エミッタンスの高輝度ビームを生成するため、単孔を用いたビーム引き出しによって20 mA/cm²以上の電流密度と1 π mm·mrad以下の規格化エミッタンスを目指す。

2.2 ビーム入射系

低エネルギーの高強度ビームの空間電荷効果を考慮した上でサイクロトロン入射部の横方向と縦方向の位相空間アクセプタンスにビームを完全整合させる。また、中心領域における横・縦両方向の位相空間のカップリングを上手く活用してビームを恣意的に拡散し、空間電荷効果によるビーム品質の劣化を緩和するような入射・初期加速法を試みる。

2.3 ビーム引出系

負イオン取り出しの場合には、荷電変換フォイルとして使用する炭素薄膜中の加速粒子のエネルギー損失よりも、剥離した電子が磁場によって戻ってくることによるパワーロスが大きい。そこで、小口径のコイルなどを用いて薄膜領域の磁場を制御し、さらに電子を薄膜から逃がすような電磁場を形成することによって数 10 mA 級のビーム強度においても炭素薄膜の寿命を格段に延ばす手法の確立を目指す。

2.4 エネルギー効率の向上

サイクロトロンの場合、消費電力の70%弱を占めているのが電磁石と加速空洞である。エネルギー効率を向上させるためにサイクロトロン電磁石の側ヨークに永久磁石を配置して電磁石の完全電力フリー化を試みる。また、加速空洞の省電力化を図るために、サイクロトロンで初めてサイクロトロン加速空洞の超伝導化を図るための設計検討を行う。

3. 高強度陽子源の開発

2.45 GHzのマイクロ波源を利用した永久磁石型 ECR 陽子源の開発を進めている[1]。Figure 1に2.45 GHz ECR 陽子源の全体写真を示す。軸方向に着磁した台形ブロック状のNd-Fe永久磁石を円環状に配置して1組の磁石を組み立て、それを軸方向に2つ並べて2.45 GHzの電子サイクロトロン共鳴磁場である875(G)前後の磁場分布を形成する。導波管とプラズマチェンバーのインピーダンスを整合させるため、階段状の形状をしたridged transformerをプラズマチェンバーへの入口部分に設置した。また、プラズマチェンバー内でTE₁₁₁モードの電場を発生させて電子を最大限加速できるように、ANSYS/HFSSコードを用いて円筒形状のプラズマチェンバーの内径と軸方向の長さの最適化を図った。これにより、1Wの入力当たり、8000 V/m以上の半径方向の電場を形成できることが確認できた。Figure 2にプラズマチェンバー内の電場分布の一例を示す。イオン化する水素ガスは導波管と並行にプラズマチェンバーの端部近くから導入している。ビームを取り出すための電極は、プラズマチェンバーに直付けされたプラズマ電極、最初の引出電場形成を行うA電極、負の電圧を印加して加速電位を大きくするためのB電極、グラウンド電位まで戻

すためのC電極とD電極の5つの電極から構成される。取り出したビームの強度を最大化し、且つエミッタンスを最小化するためのそれぞれの電極の位置と電位をIGUNコードを用いたシミュレーション計算により最適化した。その結果、加速電圧 50 kV で、引出ビーム電流 3 mA、ビームエミッタンス(RMS) $2.6 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ のビーム条件が達成しうることを見出した。この設計をベースに、実ビーム生成試験を行っている。

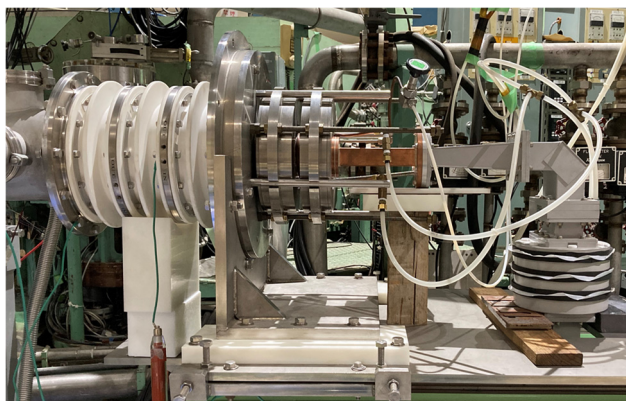


Figure 1: 2.45 GHz ECR proton source.

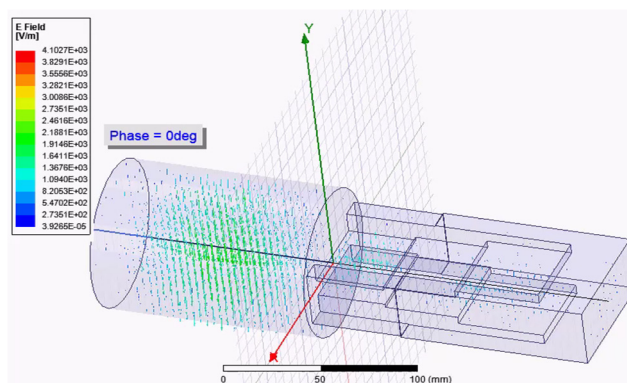


Figure 2: Electric field distribution of TE₁₁₁ mode generated in the plasma chamber.

4. サイクロトロン電磁石の永久磁石化

加速ビームの高エネルギー化とサイクロトロン本体電磁石のコンパクト化を狙って超伝導電磁石を採用したサイクロトロンがMSUやINFN-LNS, KVIをはじめとした研究用サイクロトロンだけでなく、陽子線がん治療用サイクロトロンでも既に実用化されている。高磁場化と消費電力の最小化を両立させる点では大きなメリットがあるが、超伝導コイルを冷却するための液体ヘリウムが高価だったり、伝導冷却によって極低温まで下げるための冷凍機も電力を消費したりしていることから、運転コストと消費電力はゼロにはできないという難点がある。そこで、イオン源と同様に、サイクロトロン磁石に永久磁石を組み込み、電力フリーな磁場形成を行うための設計検討に着手した。手始めに、RCNPにある既存のAVFサイクロトロンの側ヨーク部分を永久磁石(NEOMAX-48BX)に置き換えた

場合の磁場計算を行った。Figure 3 に加速平面上での方位角方向の磁場分布を示す。セクター磁極領域での最大磁場は 8 (kG)程度、平均磁場でも約 6 (kG)の磁場を発生できることがわかる。これにより、加速エネルギーを固定して磁極ギャップを調整すれば、十分に実用になり得ることが推測できる。磁場レベルの微調や、メンテナンスのための加速領域での減磁・消磁法、他の機器への影響など、実用に向けた諸課題を今後検討していくよていである。

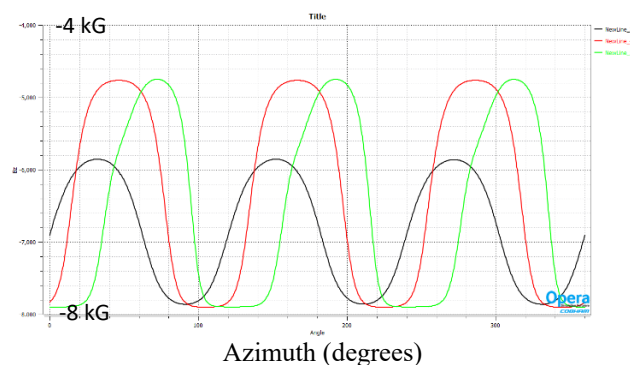
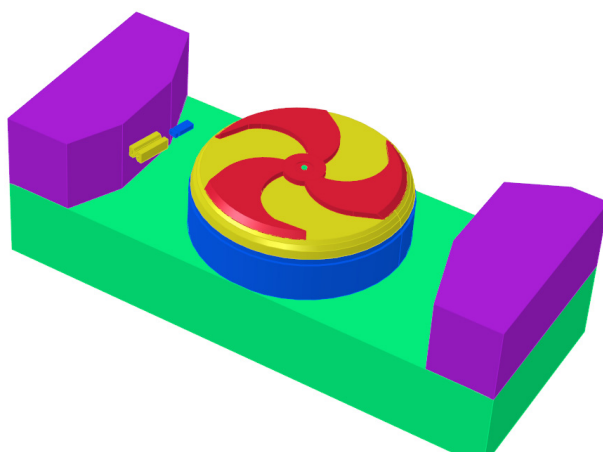


Figure 3: Magnetic field distribution in the azimuthal direction of the RCNP AVF cyclotron magnet using a permanent magnet at side yokes.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H04454 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Yamamoto *et al.*, “Development of 2.45GHz permanent-magnet proton source”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Osaka, Japan, 2012, pp. 1092-1095.