

陽子線がん治療向け超電導 AVF サイクロトロン

Superconducting AVF Cyclotron for Proton Therapy

● 江原 悠太* 筒井 裕士** 中島 秀** 吉田 潤* 鶴留 武尚* 宮下 拓也**
 Yuta EBARA Hiroshi TSUTSUI Shu NAKAJIMA Jun YOSHIDA Takehisa TSURUDOME Takuya MIYASHITA



陽子線がん治療向け超電導 AVF サイクロトロン SC230
 Superconducting AVF cyclotron for proton therapy SC230

当社では、陽子線がん治療システムの製造・販売を行っており、これまで多くの病院でがん治療に貢献してきました。近年、より多くの病院への治療システム導入を可能にするため、主要コンポーネントの一つである陽子加速器の小型化が求められていた。このような背景のもと、当社において、超電導マグネットを用いた超電導 AVF サイクロトロン SC230 が開発され、小型化が実現された。この開発では、当社で長年培われてきた加速器や超電導マグネットに関する技術が取り入れられ、超電導コイルの冷却には当社製の極低温冷凍機が用いられている。開発された SC230 は、陽子線治療向け AVF サイクロトロンのなかで世界最小サイズである（2024年1月現在）。小型化と同時に治療性能を向上させる「ビームの大電流化」、運転費を下げる「システムの省エネ化」も実現された。本報では、開発した超電導 AVF サイクロトロン SC230 を紹介する。

The SHI Group has developed cyclotrons for proton therapy and has contributed to treatment at hospitals. A new superconducting AVF cyclotron SC230 was developed. With a yoke diameter, height and weight of 2.8m, 1.7m and 65t, respectively, it is currently the most compact isochronous cyclotron for proton therapy. Size reduction was achieved by a high magnetic field using cryogen-free superconducting coils. It has a maximum beam current of 1000nA. The total power consumption of its system is lower than 200kW. This paper introduces the developed superconducting AVF cyclotron SC230.

1 まえがき

陽子線治療は、ブラッグピークを持つ特徴的な深度線量分布により、正常細胞へのダメージを低く抑えることができる放射線がん治療である。日常生活を送りながら通院治療を受けることが可能になるなど、患者に優しいがん治療として注

目されている。世界で稼働中の陽子線治療施設数はすでに100を超えており、今後もさらなる増加が見込まれている。日本においても陽子線治療に対する期待は大きく、2022年4月から新たな4疾患に対して保険適用範囲が拡大された。

その一方、陽子線治療の導入は大型病院に限られており、中小規模の病院への導入は進んでいない。これは、陽子線治

表1 SC230の主要仕様
Main specifications of SC230

種類	AVF サイクロトロン
ビームエネルギー	233~237 MeV (固定)
最大ビーム電流	≥1000 nA
ヨーク直径	2.8 m
ヨーク重量	65 t
コイル	NbTi超電導コイル (上下2つ)
運転/最大コイル電流	442/488 A
起磁力	1×10^6 AT/coil
最大蓄積エネルギー	5.3 MJ
冷却冷媒	無冷媒
コイル冷却方式	極低温冷凍機による伝導冷却
引出し半径	0.6 m
RF周波数	95.3 MHz (h=2)
Dee電圧	50 kV (内側) 75 kV (外側)
RF壁損失	< 70 kW
システム全消費電力	< 200 kW

療装置が大型であり、建屋のための用地確保や建屋建設コストがシステム導入の障壁となっていることによる。このような背景のもと、陽子線治療システムにおける装置の小型化が求められている。なかでも主要コンポーネントの一つである加速器について超電導コイルを用いて小型化する取組みが、メーカー各社で進められている。超電導コイルによる加速器の小型化により、建屋の敷地面積を小さくできるだけでなく、耐荷重に対する要求も下がることから、建屋建設費用の削減が期待されている。さらに、大きなアSEMBリの状態で輸送できるので、分割や再組立ての工数が減り納期短縮が期待される。また、超電導コイルを用いることでコイル消費電力が低減され、これによりランニングコストが低減できる。コイル消費電力の低減により夜間の連続通電も可能になることから、病院における日常的なコイルの励消磁が不要となり、ダウンタイムの削減に貢献できる。このように、加速器の超電導化は利点が多い。

当社でも超電導技術による小型化を目指した超電導AVFサイクロトロンSC230の開発が行われた。SC230のヨーク重量は65 tであり、従来機の3/10に相当する。また、その特長は小型であることに加え、治療性能向上を目的とした大電流ビームにある。SC230の最大ビーム電流は、従来機の3.3倍に相当する1000 nA以上であり、商用陽子線治療用加速器として最大である。ビーム電流の増大により治療時間が短縮されることから患者の負担が軽減されるほか、より多くの患者へ

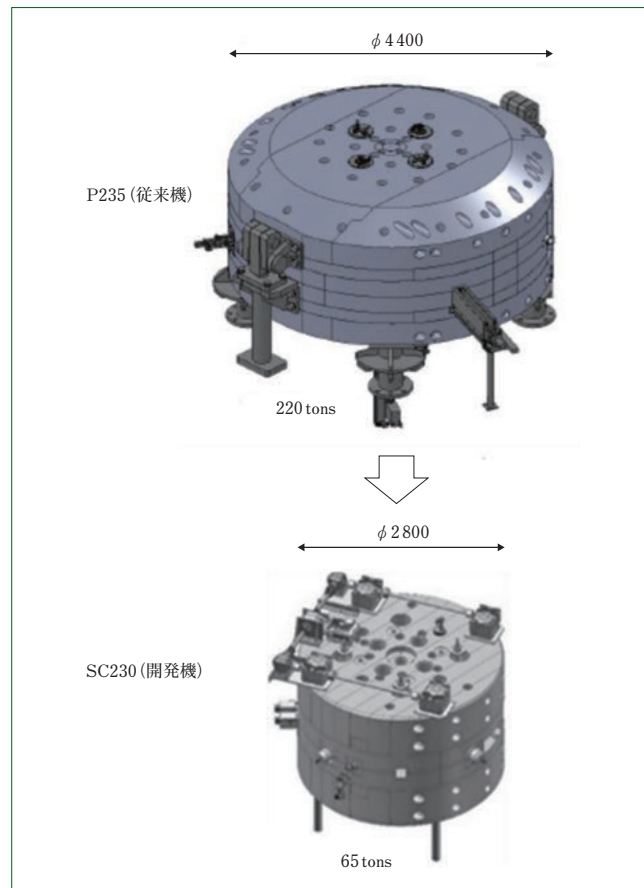


図1 超電導によるサイクロトロンの小型化
Size reduction of cyclotron by superconductivity

治療を提供することが可能になる。さらに、消費電力は従来の3/5に相当する200 kW以下であり、低消費電力であることも特長である。

2 主要仕様

表1に、開発した陽子線治療向け超電導AVFサイクロトロンSC230の主要仕様を示す。

3 特長

SC230では、陽子線治療に必要な約235 MeVの陽子ビーム生成とともに、小型化、ビームの大電流化、システムの省エネ化が実現された。

(1) 小型化

サイクロトロンは磁場によって荷電粒子を周回させるが、引出しエネルギーにおける軌道半径は磁場の強さに反比例する。SC230では、超電導マグネットを用いて3~5 Tの高磁場を発生させることでサイクロトロンの小型化が実現された。図1に、SC230と従来機P235を比較した概念図を示す。SC230の引出し軌道における平均磁場は約3.9 T、引出し半径は0.6 mである。このサイクロトロンでは、起磁力源として上下2つのNbTi超電導コイルが用いられている。超電導コイルは真空断熱のためクライオスタットの中に設置され、4台の極低温冷凍機による伝導冷却方式によって5 K以下に冷却されてい

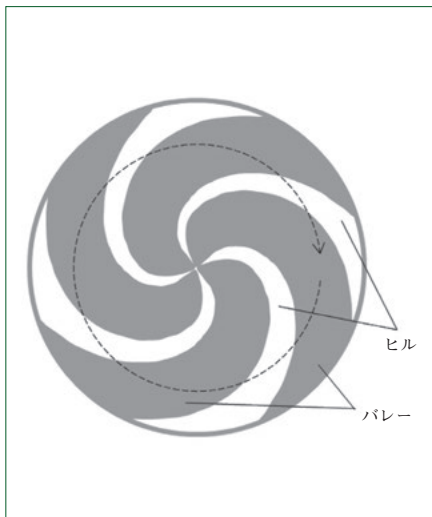


図2 SC230における磁極形状の概念図
Schematic of pole shape in SC230

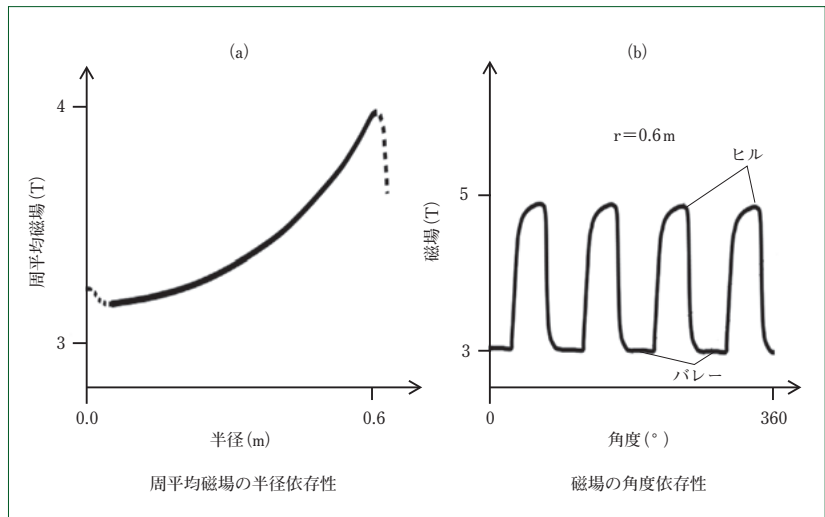


図3 SC230における磁場分布の概念図
Schematic of magnetic field distribution in SC230

る。冷媒冷却ではなく、冷凍機による伝導冷却方式が採用されたことで液体ヘリウムの扱いが不要となり保守性が高い。また、長期停電など避けられないクエンチ発生があっても、ヘリウム放出がなく安全性に優れている。ヘリウムの枯渇問題に伴う価格高騰の影響を受けないことも(冷媒方式に対する)優位性の一つである。この極低温冷凍機には、医療用MRIをはじめとした超電導マグネットの冷却で多くの実績がある当社製の4 KGM冷凍機が採用された。

小型化に伴い、複雑な磁極形状が採用されているのもこのサイクロトロンの特長である。SC230は4セクターのスパイラルセクター型AVFサイクロトロンである。古典的なサイクロトロンでは、粒子エネルギー上昇に伴い相対論的効果によって等時性が満たされなくなることから、加速エネルギーには限界がある。この上限を超える際に、シンクロトロンやシンクロサイクロトロンでは周波数を変調するが、ローレンツ因子に比例する磁場(等時性磁場)によって等時性を補償するのが等時性サイクロトロンである。等時性が満たされているので、各エネルギーの陽子を同時に加速することができる。シンクロトロンやシンクロサイクロトロンではビームがパルス状となるのに対し、等時性サイクロトロンではビームは連続的とみなせることから大電流ビームが生成できる。しかし、等時性磁場はサイクロトロン軸方向(z方向)のベータトロン振動を不安定にしてしまうことに注意が必要である。これに対し、周方向に変動する磁場(AVF: Azimuthally Varying Field)を用いた強集束の効果を利用してビーム安定を実現した等時性サイクロトロンがAVFサイクロトロンである。また、磁極を螺旋状にしてエッジ集束の効果を利用し、ビーム安定性をさらに向上させたものがスパイラルセクター型AVFサイクロトロンである。

図2に、SC230の磁極形状の概念図を示す。ヒル(磁極間隔の狭い領域)と、バレー(磁極間隔の広い領域)に

よって1つのセクターが形成される。図3に、SC230における磁場分布の概念図を示す。図3(a)は周平均磁場の半径依存性であり、等時性磁場(実線部)が形成されている様子を示している。図3(b)は磁場の周方向分布であり、AVFが形成されている様子を示している。SC230では、ヒル領域の磁極間距離は広い範囲で±10mm、最近接部では±6mmとし、最大約70°の大きなスパイラル角を持つ磁極形状が採用された。精度の高い磁場分布を形成するため、0.01mmオーダーの精密加工によって磁極製作が行われた。さらに、平均磁場における不確かさが50ppm以下となるような磁場測定・調整を行い、要求を満たす等時性磁場が形成された。図4に、SC230の加速空間の写真を示す。バレー領域などの磁極がつくる空間に各コンポーネントが配置されている様子が確認できる。

(2) 大電流ビーム

SC230の最大ビーム電流は1μAであり、陽子線治療向け商用加速器で最大である。当社では、引出しコンポーネントの一つである静電デフレクタがビーム損失によって損傷しないよう最大ビーム電流を設定している。SC230では、歳差引出し法によってターンセパレーションが広げられ、静電デフレクタにおけるビームの通過効率が向上したことで、大電流ビームが実現された。歳差引出し法は、サイクロトロン径方向(r方向)のベータトロン振動における共鳴現象を利用したビーム引出し方法である。SC230では $\nu_r=1$ の共鳴が用いられたため、軸方向磁場の1次のハーモニック成分 B_{z1} は精密に調整される必要があった。 B_{z1} は、事前に行われたシム調整・コイル位置調整によって十分低減された後で、対向する2組の引出しハーモニックコイルを用いて最終調整された。また、前述の狭い磁極間隔によってフリッジ場を減衰させていることも、引出し後のビームを安定させ、効率的なビーム引出しに貢献している。

(3) 低システム消費電力

SC230システムの消費電力は200kW以下であり、従来



図4 SC230の加速空間²⁾
Inside acceleration chamber of SC230

システムの3/5にまで低減されている。これは、超電導コイルを用いることでコイル消費電力が小さいことに加え、RFキャビティにおける消費電力が低減されたためである。サイクロトロンでは加速電場の形成にRFキャビティが用いられる。このRFキャビティは、Dee電極とアース板によって構成されている。SC230は、商用で最少となる2つのDee電極数、印加されるDee電圧は内側で50kV、外側で75kVと比較的小さい値で設計され低消費電力化が実現された。しかし、Dee電極数が少ないことやDee電圧が低いことは消費電力を抑制できる一方で、1ターン当たりのエネルギー利得の低下によってターン数が増大し、磁場の不確かさによる悪影響を大きくしたり、ターンセパレーションが狭まることでビームの引出しを難しくしたりするなど、技術的な問題を生む。このように挑戦的な設計であったが、調整によって等時性磁場に対する磁場の不確かさを十分に低減させ、歳差引出し法を採用しターンセパレーションを大きくすることで、これらの問題を解消した。

4 開発の経緯

2013年にSC230の基本設計が報告された¹⁾。数年にわたる要素技術開発を経て、2015年から超電導マグネットを含む各コンポーネントの設計や製作が進められた。2020年には愛媛製造所西条工場にテストサイトが新設され、コンポーネントの移設とコンディショニングが行われた。2020年末から開始されたコミッショニングにおいてパラメータ調整が実施され、2021年7月にフィルム感光によってサイクロトロン外部へのビーム引き出しが確認された。

5 性能試験

引き出されたビームの性能評価試験では、サイクロトロン外部に設けられた測定エリアで、ビームプロファイラや飛程

測定モジュールを用いてビーム電流やビームプロファイル、エネルギーなどが測定された。高速スキャンング照射を実現する次世代陽子線治療システムに用いられることから、このサイクロトロンでは、最大ビーム電流だけでなく電流安定性や位置安定性も要求される。試験では最大ビーム電流が $1\mu\text{A}$ を超えることに加え、ビーム引出し効率も仕様値の60%を上回る67%であることが確認された。このほか、電流安定性や位置安定性についても測定され、要求されるすべての仕様を達成するビームが得られていることが確認された²⁾。

6 むすび

- (1) 世界最小サイズの陽子線治療向け超電導AVFサイクロトロンSC230が開発された。
- (2) 治療性能に関わるビーム電流は、商用陽子線治療加速器のなかで最大である。
- (3) ビーム引出しが成功し、生成されたビームがすべての仕様を満たすことが確認された。
- (4) SC230は次世代陽子線治療システムの主要コンポーネントとして、今後、より多くの治療に貢献することが期待されている。

(参考文献)

- (1) H. Tsutsui, et al., Design study of a superconducting AVF cyclotron for proton therapy, Proceedings of Cyclotrons 2013 (2013).
- (2) Y. Ebara, et al., First beam extraction from a superconducting azimuthally varying field cyclotron for proton therapy, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 1056 (2023).