

住友重機械 技報

SHI 

Feb. 2024

No.212 ISSN 0387-1304

Sumitomo Heavy Industries Technical Review

医療・半導体関連技術特集

Special Issue for Medical and Semiconductor Related Technologies

住友重機械技報 No. 212 2024

巻頭言

「医療・半導体関連技術特集号」に寄せて

平岡和夫

医療・半導体関連技術特集

論文・報告	動く臓器の短時間照射を目指した次世代陽子線治療システム	佐々井健蔵	1
	陽子線がん治療向け超電導 AVF サイクロトロン	江原悠太, 筒井裕士, 中島 秀, 吉田 潤, 鶴留武尚, 宮下拓也	5
	重粒子線治療用マルチイオン源の開発	野村真史, 高橋伸明, 坪松悟史	9
技術解説	5馬力級 水冷圧縮機	勢村健太, 大谷祐貴	13
	プロトン照射による SiC パワー半導体の順方向通電劣化抑制技術	坂根 仁, 原田俊太, 加藤正史	15
	省スペース型BNCT(ホウ素中性子捕捉療法)システム	楠岡新也	17
新製品紹介	枚葉式超高エネルギーイオン注入装置 SS-UHE II		20
	8 インチウエハー一括照射対応レーザーアニール装置 SWA-22USH		21
	精密ステージ SA-G II シリーズ		22

Message for "Special Issue for Medical and Semiconductor Related Technologies" Kazuo HIRAOKA

Special Issue for Medical and Semiconductor Related Technologies

T/PAPERS	Next-Generation Proton Therapy System for Short-Time Irradiation of Moving Organs Kenzo SASAI	1
	Superconducting AVF Cyclotron for Proton Therapy Yuta EBARA, Hiroshi TSUTSUI, Shu NAKAJIMA, Jun YOSHIDA, Takehisa TSURUDOME, Takuya MIYASHITA	5
	Development of Multi-Ion Source for Heavy-Ion Therapy Shinji NOMURA, Nobuaki TAKAHASHI, Satoshi TSUBOMATSU	9
T/INVITATIONS	5HP Water Cooling Compressor Kenta SEMURA, Yuki OOTANI	13
	Suppression of Forward Degradation in SiC Power Semiconductor by Proton Beam Irradiation Hitoshi SAKANE, Shunta HARADA, Masashi KATO	15
	Space-saving BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) System Shinya KUSUOKA	17
NEW PRODUCTS	Serial Ultra High Energy Ion Implanter SS-UHE II	20
	Laser Annealing System SWA-22USH Capable of 8-inch Wafer Batch Irradiation	21
	High Precision Stage SA-GII series	22

「医療・半導体関連技術特集号」に寄せて

取締役
専務執行役員

平岡和夫



住友重機械工業株式会社は既存事業の収益基盤強化とともに、4つのセグメントのコア技術をベースに重点投資領域を伸長し、新たな価値創造と企業価値向上を目指しています。具体的にはロボティクス・自動化分野、半導体分野、先端医療機器分野、環境・エネルギー分野ですが、今回の特集号では「先端医療機器分野」と「半導体分野」についての製品・技術を紹介します。

現在、世界では、心臓、脳血管障害、がんが死因のトップ3であり今後も患者が増加すると見込まれていますが、日本では2人に1人ががんになり、3人に1人ががんで亡くなると言われています。一方で医療の進歩は日進月歩で早期発見によって「がんは治る病気」になりつつあります。当社では癌を発見するPET サイクロトロンとその周辺装置、発見した癌を治療する粒子線治療装置として陽子線治療装置、重粒子線治療用入射器、BNCT装置を医療機器化しています。

日本は先進国のなかで放射線治療が選択される割合がまだまだ低いのが実情ですが、今後選択機会の増加が期待されます。また粒子線治療は、ピンポイントでがんを叩くため、副作用が少なく患者に優しい治療です。早期診断とQOL(Quality Of Life)の高い治療の提供によりがんになっても健康で長生きできる社会を作ることが我々の目的です。SDGsに直結した医療機種で今後とも人と社会に貢献していきます。

半導体については今更詳細を述べるまでもなく、社会の発展に必要不可欠であり、その市場は拡大の一途をたどり、2030年までに世界の半導体市場は100兆円規模に成長すると予測されています。当社グループでは複数の事業ユニットで半導体関係の事業を展開しており、イオン注入装置、レーザアニール装置、シリコン単結晶引き上げ装置などの半導体製造装置事業、クライオポンプ、真空ロボットなどの半導体製造装置向けコンポーネント事業およびイオン照射サービス事業等を行っています。グローバル成長市場に対してSDGsやカーボンニュートラルといった社会変革に伴う顧客の要望にタイムリーに応え、社会課題の解決に貢献していきます。

本特集号では、当社における上述の取組みの一端を紹介させていただきますが、先端技術で社会に貢献する取組みに終わりはありません。今後とも皆様方のご指導、ご鞭撻をよろしくお願い申し上げます。

動く臓器の短時間照射を目指した次世代陽子線治療システム

Next-Generation Proton Therapy System for Short-Time Irradiation of Moving Organs

●佐々井 健蔵*
Kenzo SASAI

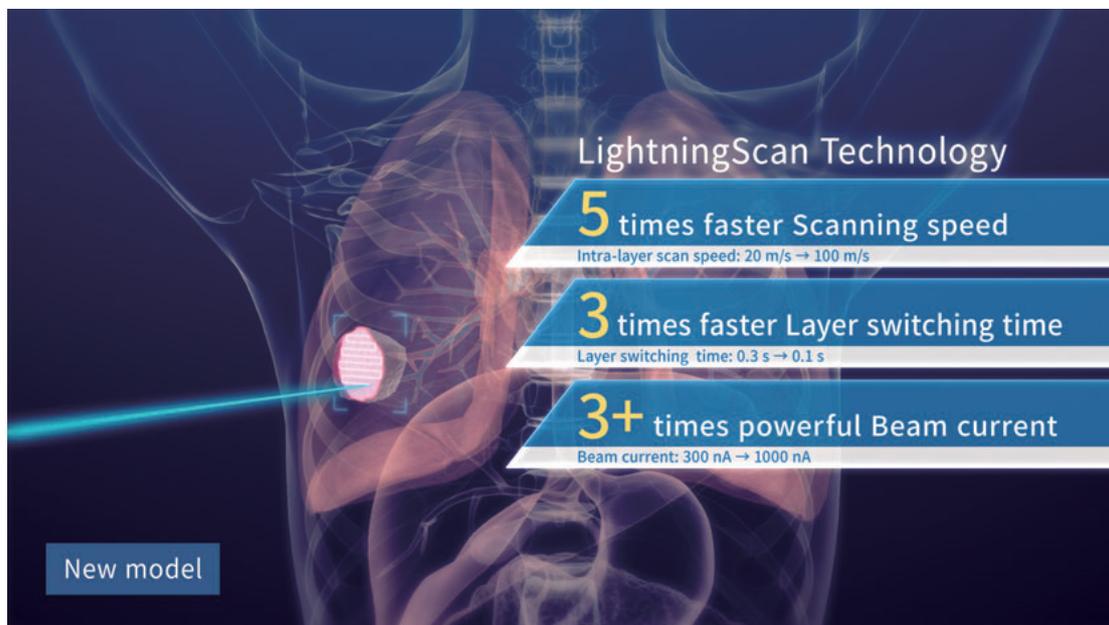


図1 超高速照射技術のコンセプトイメージ
Conceptual image of ultra-fast irradiation technology

陽子線治療における課題には呼吸性移動臓器への照射、大きな建屋の必要性、患者スループットがある。当社は、これらの課題を解決すべく次世代陽子線治療システムを開発した。次世代システムの特長は、動く臓器への短時間照射、建屋体積の低減、患者位置決めの特長である。これらの特長によって陽子線治療に関する課題解決が期待される。

Challenges in proton therapy include irradiation of respiratory organs, the need for large buildings, and patient throughput. SHI has developed a next-generation proton therapy system to solve these problems. The features of the next-generation system are short-time irradiation for moving organs, reduced building volume, and simplified patient positioning. These features are expected to solve issues related to proton therapy.

1 まえがき

陽子線治療は、X線を利用した通常の放射線治療と比べて優れた線量分布を与えるため、より良い治療効果が期待されるが、その導入台数は極めて少なく、保険収載されている疾患が限定されている。より多くのがん患者が陽子線治療を含めた最適な治療方法を選択できる社会を実現するには、陽子線治療の臨床的有用性と事業性の改善が必要である。臨床的有用性の改善の一つに呼吸性移動臓器への照射があり、事業性の改善には建屋体積の低減と患者スループットの向上がある。

2 陽子線治療の課題

2.1 臨床的有用性の改善—呼吸性移動臓器への照射—

呼吸性移動を伴うがんは世界のがん症例数の20%以上を占

め、その割合は増加傾向にある⁽¹⁾。陽子線治療は、2022年度の診療報酬改定で大型の肝細胞癌、肝内胆管癌、局所進行肺癌または大腸癌術後局所再発に係るもの(いずれも切除不能のものに限る)に適用範囲が拡大された。前三つは呼吸性移動を伴うがんである。

近年の陽子線治療では、スキヤニング照射が採用されている。スキヤニング照射では、腫瘍の形状に合わせて細い陽子線を走査することで周辺臓器に投与される線量の低減が可能となる。その反面、陽子線が動的に走査されることから呼吸に伴って動く臓器を治療する際には、インタープレイ効果と呼ばれる塗りむらが発生する恐れがある。また、呼吸性移動を管理するために呼吸同期照射などの手技や装置が併用されることで、その管理を必要としない場合に比べて治療時間が長くなる傾向がある。これらの問題の解決に向けて、1回の



図2 新しく開発され、西条工場に設置された超電導サイクロトロン (SC230)
Newly developed superconducting cyclotron (SC230) installed at Saijo Works

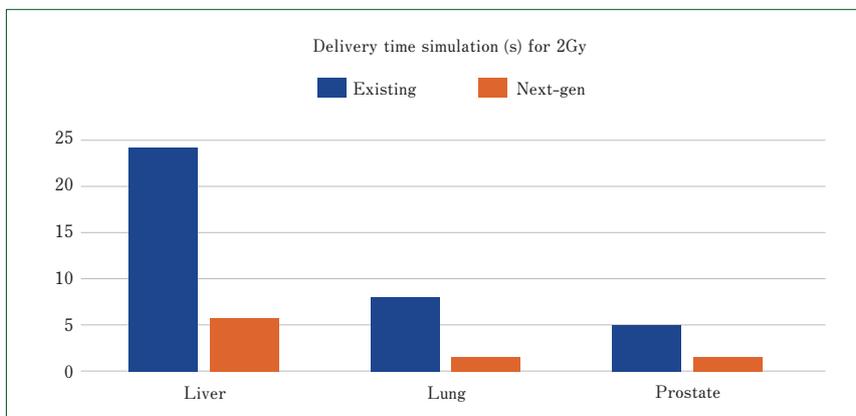


図3 従来モデルと次世代モデルで比較した部位ごとの照射時間のシミュレーション
Simulation of irradiation time per site compared between conventional and next-generation models

息止めのなかで照射を完了する手技が複数のユーザーから提案された。1回の息止めのなかで照射が完了すれば、インタープレイ効果の対策をしながら治療時間が短縮できる。

2.2 事業性の改善－建屋体積の低減と患者スループットの増加－

陽子線治療システムの導入が検討される際には、その投資回収性の低さが指摘される。大規模な初期投資と、それに伴う長い回収期間が原因である。大規模な初期投資は大型の専用建屋とその建設費が一因であり、回収期間を短縮するには患者スループットの改善が課題であった。建屋体積を低減して患者スループットが向上すれば、事業性の改善が期待できる。

3 次世代陽子線治療システムの特長

当社は、前述した陽子線治療の問題を解決すべく次世代陽子線治療システムを開発した。その特長は次の3点である。

- ① 超高速スキャンニングによる短時間照射
- ② 単一治療室に最適なシステムデザインによる建屋体積の低減

- ③ 360°回転ガントリと大視野コーンビームCTによる患者位置決めの特長

3.1 超高速スキャンニングによる短時間照射

陽子線はそのエネルギーによって飛程が変化する。スキャンニング照射では、同一エネルギーの細い陽子線を横方向に走査するプロセスと、陽子線のエネルギーを切り替えるプロセスを繰り返して3次元の標的に線量を投与する。このことから、短時間照射を達成するには、横方向の走査速度と深さ方向のエネルギー切替え時間を高速化する必要がある。また、走査速度が増加すると、同じ陽子線強度では投与線量その分低下するので、陽子線強度も増強する必要がある。

次世代システムでは、走査速度を従来比5倍の100m/sに、エネルギー切替え時間を従来比3倍の100msに高速化し、ビーム電流を従来比の3倍にした(図1)。加速器からの陽子線強度については、超電導サイクロトロン(図2)を新しく開発し、従来比3.3倍の1000nAに増強した。これらによって、大型肝細胞がんのような大きな標的でも6秒以内に、肺がんでは2秒以内に照射が完了すると見込まれており、1回の息止めのなかで照射を完了させる手技が実現可能になる(図3)。

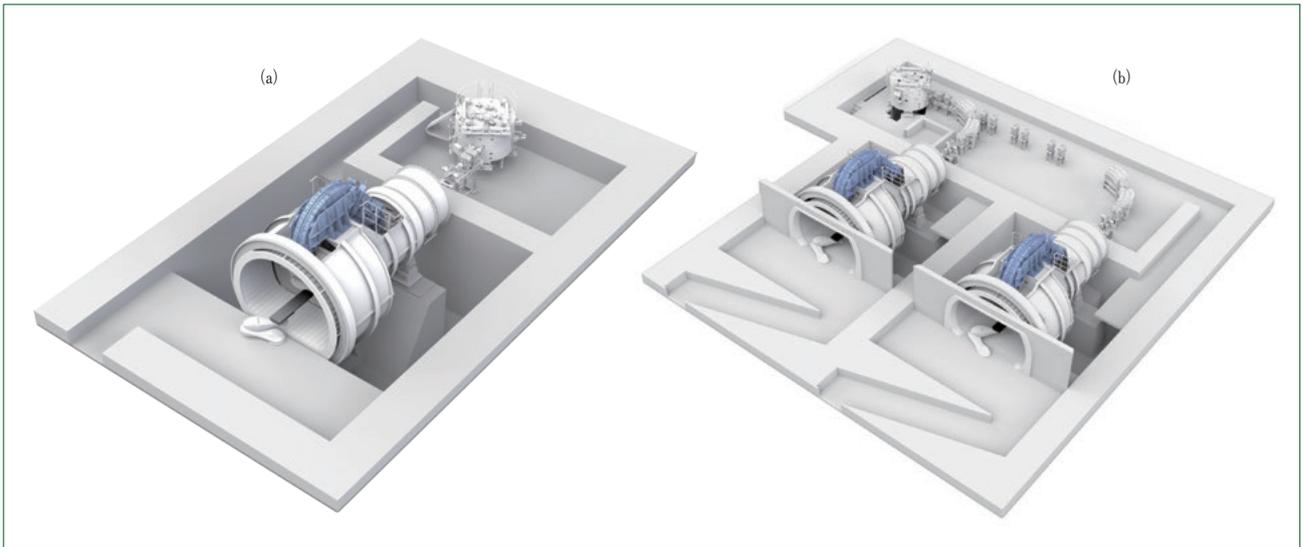


図4 単一治療室モデル(a)と複数治療室モデル(b)のレイアウト図
 複数治療室モデルは回転ガントリを含む治療室が複数設置可能
 Layout of (a) single- and (b) multi-treatment room models
 Multiple treatment room model allows for installation of multiple treatment rooms including rotating gantry

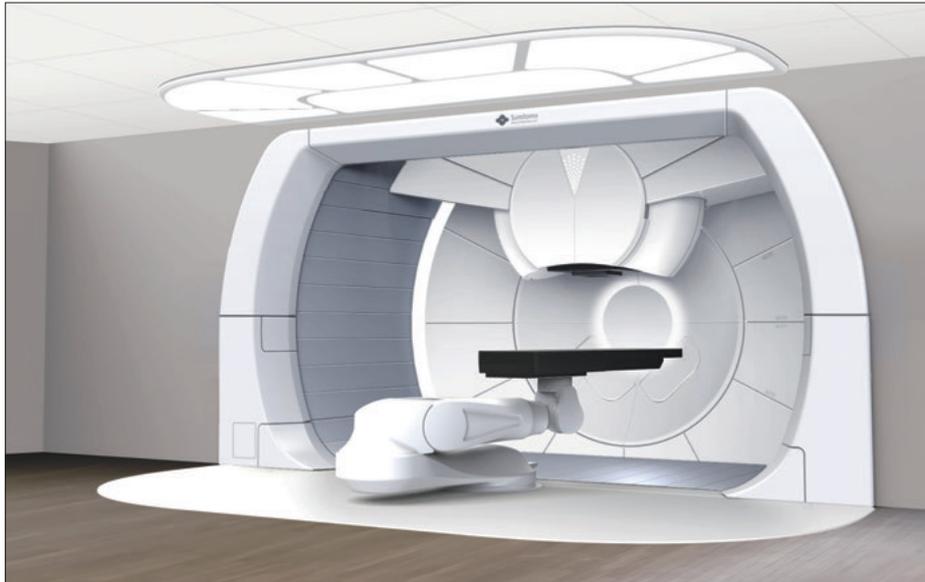


図5 治療室のイメージ
 治療室には 360°回転ガントリ、スキャニングノズル、コーンビームCT、ロボット寝台を備える
 Image of treatment room
 Treatment room is equipped with 360-degree rotating gantry, scanning nozzle, cone-beam CT, and robotic bed

3.2 治療室数に応じた最適なシステムデザインによる建屋体積の低減

陽子線治療システム用の建屋体積を低減するには、各コンポーネントの小型化とシステムデザインの最適化が必要である。次世代システム用に新たに超電導サイクロトロンと小型360°回転ガントリを開発した。この超電導サイクロトロンは従来比64%の直径2.8mに小型化されている。さらに、治療室数に応じた最適なシステムデザイン(図4(a))を採用することで、単一治療室モデルで建屋体積を約30%低減することが可能になった。これにより建設費の低減や工期の短縮も期待できる。さまざまな集患ニーズや将来計画に対応できるように、

複数治療室モデル(図4(b))や将来治療室を増設するオプションも選択可能である。

また、超電導技術の採用で加速器の消費電力は従来比44%となり、省エネルギー性能が向上した。さらに、液体ヘリウムフリーの超電導磁石によってメンテナンスが容易になっている。

3.3 360°回転ガントリと大視野コーンビームCTによる患者位置決めの特長

陽子線治療では、陽子線の照射時間が短い反面、患者の位置決めにかかる時間が長かった。特に180°ガントリでは照射方向ごとの再位置決めにかかる時間が長くなり、治療室内CTを利用

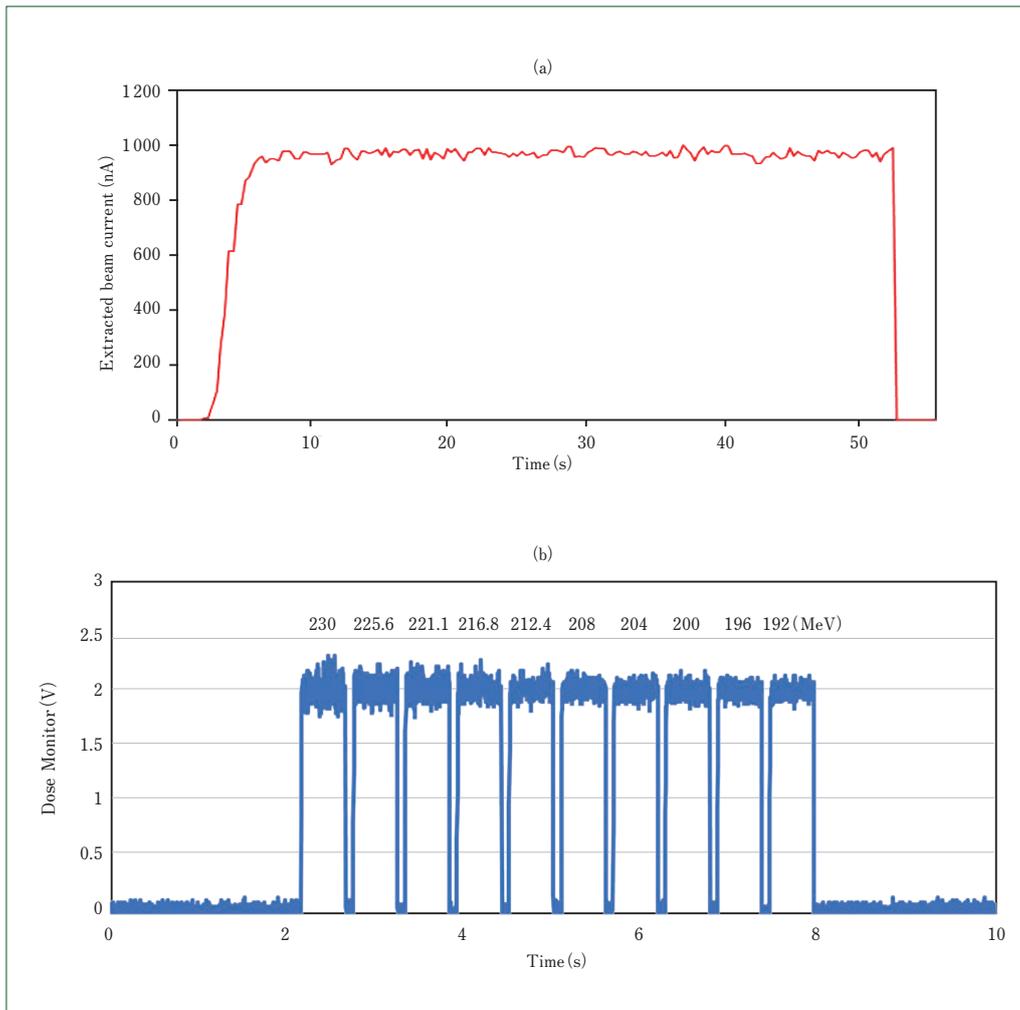


図6 性能試験の結果
 (a)サイクロトロンでの最大電流でのビーム安定性試験 (b)エネルギー切替え試験
 Results of performance tests
 (a) Beam stability test at maximum cyclotron current (b) Energy switching test

すると寝台の移動に時間がかかっていた。この問題を解決すべくコンパクトな360°回転ガントリと、ガントリ搭載型の大視野コンビームCTを開発した。360°回転ガントリはコンパクトながら広い患者空間を確保しており、寝台の回転が±90°可能で、さまざまな腫瘍の治療に対応可能である(図5)。大視野コンビームCTの視野は従来比1.8倍に拡大し50cmとなった。大視野コンビームCTによって、インルームCTなしでも高精度な患者位置決めがガントリアイソセンターで可能になる。これらにより患者位置決めがシンプルになり、位置決め時間短縮、ひいては治療時間の短縮および患者スルーットの向上が期待できる。

4 性能検証

2022年前半までに、当社の西条工場(愛媛県)で次世代陽子線治療システムの試験機を使用して陽子線を照射する試験を実施し、サイクロトロンからのビーム安定性、エネルギー切替え時間、ビーム位置精度などの主要な性能を検証した(図6)。さらに、実際の標的を模擬した総合的な照射試験も行い、照射時間の短縮が実証された。

5 むすび

当社は、陽子線治療システムの提供を通じてがん患者が陽子線治療を選択できる機会を増やし、がんになっても健康で長生きできる社会の実現に貢献していく。

(参考文献)

- (1) Global Cancer Observatory - IARC

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

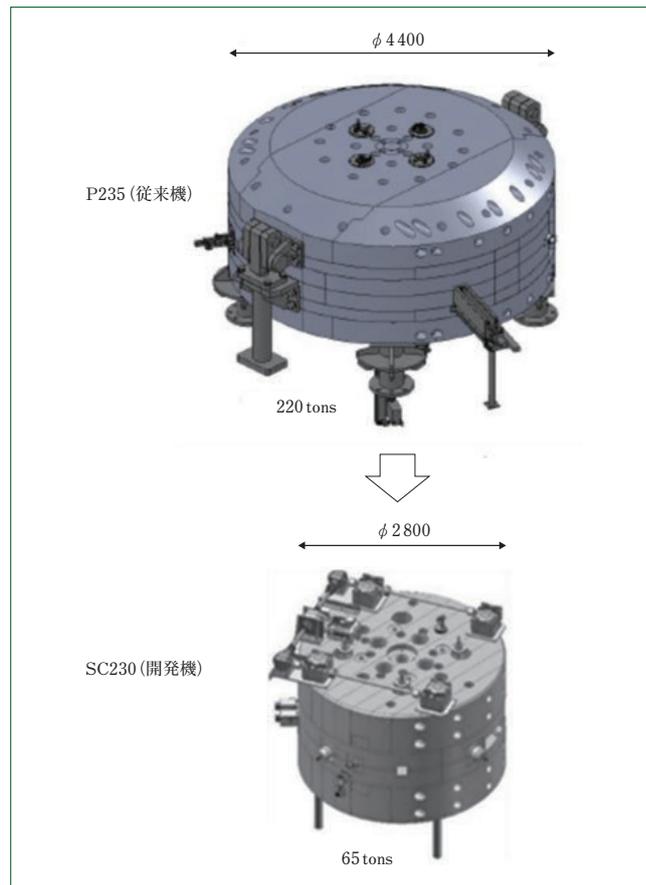


図1 超電導によるサイクロトロンの小型化
Size reduction of cyclotron by superconductivity

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

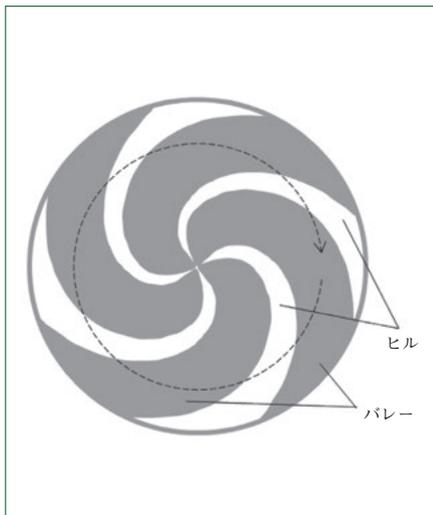


図2 SC230における磁極形状の概念図
Schematic of pole shape in SC230

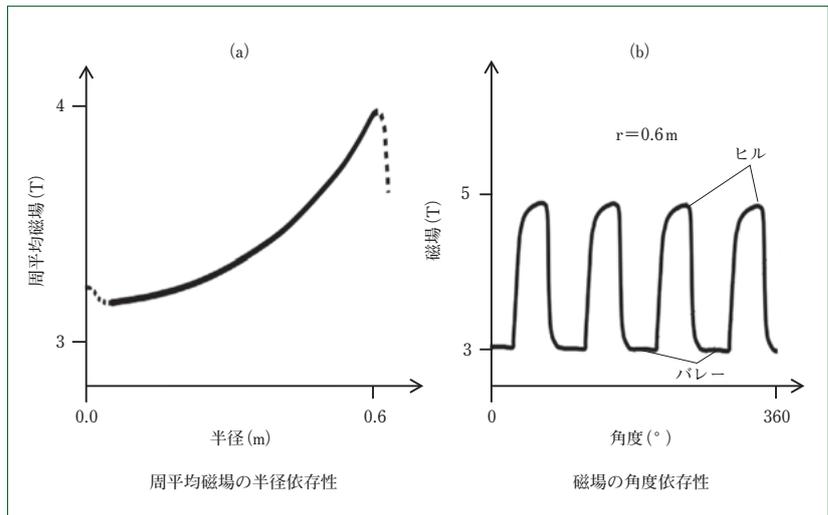


図3 SC230における磁場分布の概念図
Schematic of magnetic field distribution in SC230

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 $1\mu\text{A}$ 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。

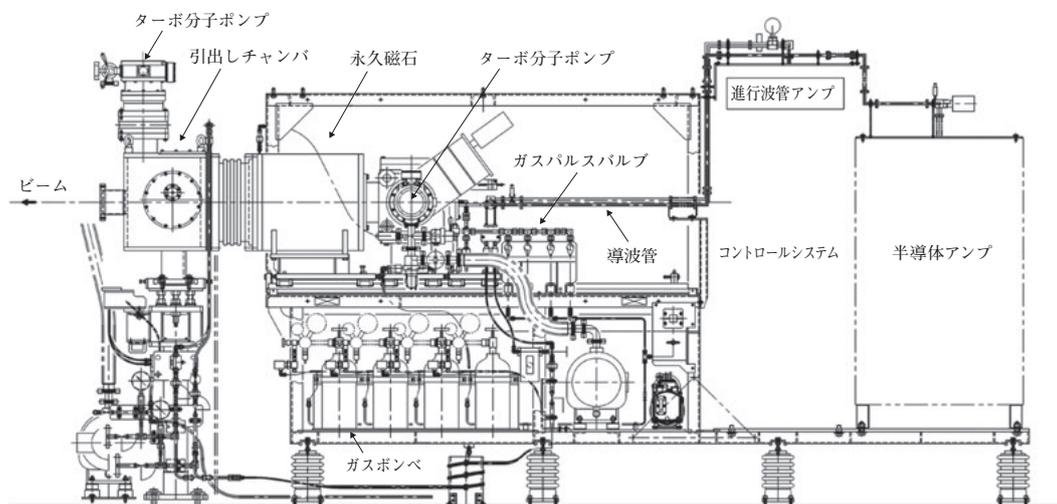
(参考文献)

- (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).

重粒子線治療用マルチイオン源の開発

Development of Multi-Ion Source for Heavy-Ion Therapy

●野村 真史* 高橋 伸明* 坪松 悟史**
Shinji NOMURA Nobuaki TAKAHASHI Satoshi TSUBOMATSU



マルチイオン源の概略図
Schematic drawing of multi-ion source

がん治療の一種である重粒子線治療のさらなる治療効果の向上を目指して、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(QST)を中心に量子メスプロジェクトが推進されている。量子メスプロジェクトでは、複数のイオンを用いるマルチイオン治療が開発され、より効果的で副作用の低い治療の実現が期待されている。当社はQSTと共同で、マルチイオン治療の実現に向けて極めて重要な役割を果たすマルチイオン源の開発に成功した。マルチイオン源はコンパクトな1台のイオン源で4種類のイオン(ヘリウムイオン、炭素イオン、酸素イオン、ネオンイオン)を高速に切り替えて生成することができる。開発したマルチイオン源をQSTの重粒子線治療装置(HIMAC: Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)に設置し、ビーム性能の確認試験を実施した。

The Quantum Scalpel project is primarily conducted by the National Institutes of Quantum Science and Technology (QST) to enhance the therapeutic effects of heavy-ion therapy. In the project, a multi-ion therapy using various ion species has been already developed to achieve more effective treatment with fewer side effects. In collaboration with QST, SHI has successfully developed a multi-ion source that will play a crucial role in realizing multi-ion radiotherapy. The multi-ion source is a compact unit capable of producing four types of ions (helium, carbon, oxygen, and neon ions) with fast switching. This ion source has been installed in HIMAC of QST, and its beam performance has been tested.

1 まえがき

がん治療の分野において、重粒子線治療はその高い線量集中性と生体への影響を最小限に抑える特性から、有望な治療法として注目されている。日本国内においては、炭素イオンを用いた重粒子線がん治療施設が7施設、世界規模では14施設あり、これらの施設は多くの患者に新たな治療の可能性を提供している。

当社は20年以上にわたり、重粒子線治療の発展に向けた研

究開発に従事してきた。特に、イオン源および入射器の開発において先進的な技術を追求め、その安定性と効率性の向上に取り組んでおり、これらの技術で重粒子線治療法の普及とさらなる研究の推進に貢献してきた。

重粒子線治療は、X線治療に比べて高い線量集中性と大きな細胞致死効果を有し、がん治療において優れた性質を備えている。このことから、患者の生活品質の向上と治療効果の最大化を追求するうえで重要な役割を果たしている。近年、さらなる治療効果の向上を目指し、QSTを中心に量子メス

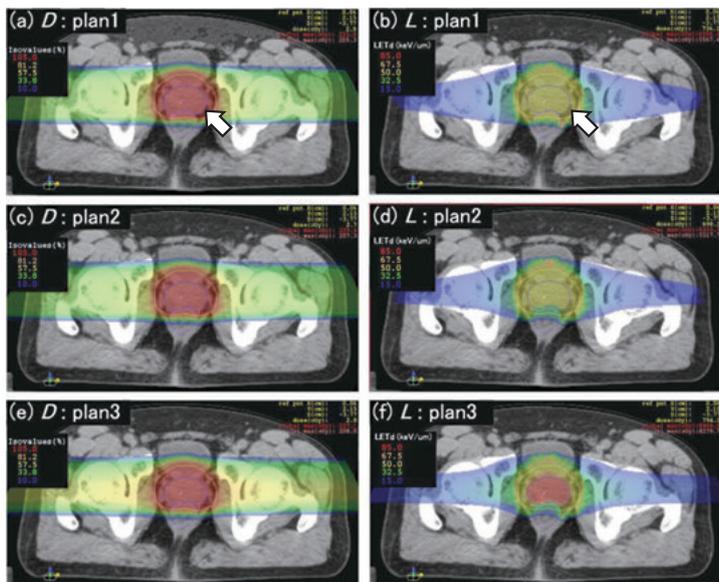


図1 マルチイオン照射による線量分布(左列)とLET分布(右列)のシミュレーション結果⁽¹⁾
Simulation results of dose distribution (left) and LET distribution (right) by multi-ion irradiation

プロジェクトが推進されており、複数のイオンを治療に用いるマルチイオン照射の導入が決定し、より効果的な照射と副作用低減の実現が期待されている。

現在の重粒子線治療では炭素イオンのみが使用されている。炭素イオンは、X線や陽子線に比べて線エネルギー付与(LET: Linear energy transfer)が高く、がん細胞に対してより致命的な損傷を与えることができる。近年、LETの異なる複数のイオンを組み合わせ、LETの分布を最適化することにより治療効果が向上することが分かってきた。図1に、マルチイオン照射をした場合の線量分布とLET分布のシミュレーション結果を示す⁽¹⁾。plan 1, 2, 3は使用しているLETの数がそれぞれ1, 2, 3と異っている。plan 1, 2では、線量分布については腫瘍(図1各画像中央の紫色の線で囲われた矢印の部分)に対して均一であるが、LET分布については、腫瘍の外側に局所的に高いLETが存在している。一方、plan 3では、線量分布はplan 1, 2と同様に均一で、かつ、LET分布も腫瘍に高いLETが集中している。このことから、複数のLETを用いることで線量分布だけでなく、LET分布も最適化できることが分かる。しかし、従来の治療では線量分布の均一性のみを求め、LETの分布にはあまり着目してこなかった。そこで、より高い自由度でLETの分布を最適化することを目的に、複数のイオン種を治療に用いるマルチイオン照射の開発を開始した⁽¹⁾。

マルチイオン照射においては、複数のイオンを高速で切り替える必要がある。さらに、装置のコスト低減の観点から、複数のイオン種を1台のイオン源から生成することが重要となる。当社は、QSTとの共同研究を通じてマルチイオン照射を可能にするマルチイオン源の設計および開発を進めてきた⁽²⁾。そして2022年3月に、炭素イオンだけでなくヘリウム、酸素、ネオンなど複数のイオン種を高速に切り替えて生成するマルチイオン源の開発に成功した⁽³⁾。この革新的な技術によりマ

表1 マルチイオン源と従来機の比較
Comparison of multi-ion source with conventional ion source used in heavy ion therapy

	マルチイオン源	従来機
磁場生成方法	永久磁石	永久磁石
イオン種	He ²⁺ , C ⁴⁺ , O ⁶⁺ , Ne ⁷⁺	C ⁴⁺
マイクロ波アンブ	半導体アンブ	進行波管アンブ
マイクロ波周波数	14GHz	10GHz
運転モード	パルス	パルス
繰返し周波数	1/3-2Hz	1Hz
運転パルス幅	50ms	50ms
ガス種切替え時間	60秒程度	-

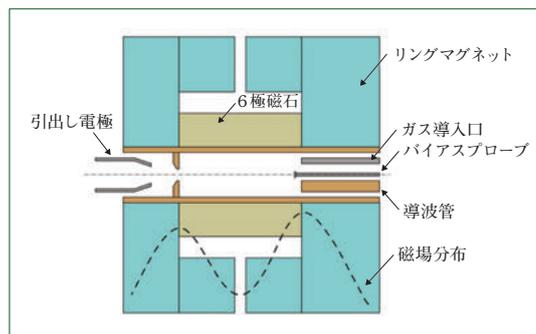


図2 従来機 ECRイオン源の概略図
Schematic drawing of conventional ECR ion source

ルチイオン照射が現実のものとなり、がん治療に新たな可能性が開かれることが期待される。

2 マルチイオン源の概要

表1に、マルチイオン源と現行の重粒子線治療に広く使用されている炭素イオンの生成に最適設計されたイオン源(従来機)との比較を示す。マルチイオン源では1台のイオン源でHe²⁺, C⁴⁺, O⁶⁺, Ne⁷⁺の4種類のイオン種を高速に切り替えて生成することができる。60秒ほどでガス種の切替えを行うことにより、さまざまなイオン種を用いた治療を1回の治療セッションで行うことが可能である。これにより、患者への治療効率が向上し、臨床的な応用が広がることが期待できる。

マルチイオン源は、従来機と同様に電子サイクロトロン共鳴(ECR: Electron Cyclotron Resonance)を利用したECRイオン源である。図2に、従来機の概略図を示す。導波管から導入したマイクロ波が電子サイクロトロン共鳴により電子を加熱することでプラズマが生成される。生成されたプラズマは、リングマグネットと6極磁石から作られた磁場により閉じ込められ、導入したガス種の多価イオンが逐次的に生成される。マルチイオン源は、従来機と同様にリングマグネットと6極磁石に永久磁石を使用することで電源や冷却システムを不要とし、コンパクトで費用対効果の高いイオン源を実現している。マルチイオン源ではHe²⁺, C⁴⁺, O⁶⁺, Ne⁷⁺のイオン種を1台のイオン源から生成できる。永久磁石を用いたことからイオン種ごとの磁場調整はできないが、すべてのイオ

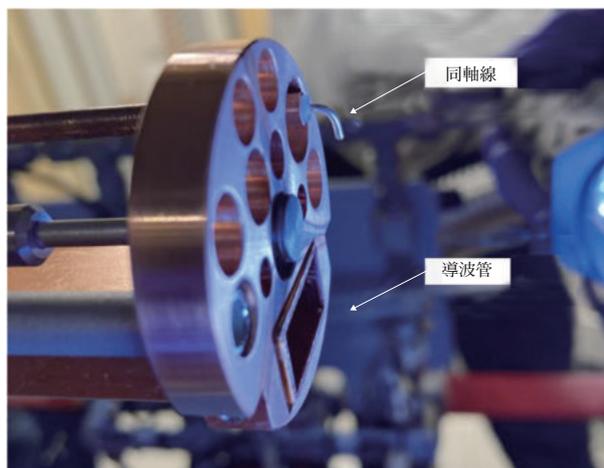


図3 2重周波数加熱
Two-frequency heating technique



図4 HIMACに設置したマルチイオン源
Multi-ion source installed in HIMAC

ン種に最適化した同一の磁場分布を使用することで、1台のイオン源で4種類のイオン種の生成が可能となっている。このように、永久磁石を用いた設計により占有面積を従来機と同程度に抑えている。このコンパクト設計は、施設内での設置および運用において貴重なスペースを節約し、効率的な配置を可能にすることで施設の建設費用にも影響を与え、経済的な利点をもたらすことが期待されている。

マルチイオン源では、ECRプラズマを発生させるために出力マイクロ波周波数14GHzの半導体アンプ(SSA: Solid-State Amplifier)を採用している。この半導体アンプはGaN高電子移動度トランジスタ(HEMT: High Electron Mobility Transistor)を使用しており、公称デューティ5%で最大1kWのマイクロ波を発生させる能力を備えている。また、従来機で使用されている進行波管アンプ(TWTA: Traveling Wave Tube Amplifier)とは異なり、冗長性の高い設計となっており、故障しても運転を継続できることから治療施設の信頼性向上に寄与する。この冗長性は、患者に対して中断のない治療を提供する重要な要素となっている。

マルチイオン源は、従来機と同様にECRイオン源であることから、比較的多量のイオンを生成することができる。これにより、現用の入射器においても、マルチイオン源で生成したイオンを加速することが可能となる。既存の重粒子線がん治療施設においてもマルチイオン源が導入できることから、マルチイオン治療の普及促進につながることを期待している。

3 マルチイオン源の特長

3.1 磁場分布

永久磁石の磁場分布の設計として、まずはQSTにある18GHzのECRイオン源(NIRS-HEC⁽⁴⁾)を用いて、ビーム電流量の要求値を満たすためのミラー磁場の最適値を調査した。NIRS-HECは、軸方向磁場をミラー電磁石によって調整することが可能である。マイクロ波を変化させてそれぞれのイオン種のビーム電流量を調べた結果、 Ne^{7+} の生成がほかのイオンの生成に比べて困難であることが分かった。そこで Ne^{7+} のビーム電流量を要求値に達成させることを目的として、上流

ミラーコイルの電流値を840Aに設定し、下流のコイル電流依存性を調べた結果、下流コイルが500Aと520Aのときに Ne^{7+} のビーム電流量が要求値より高くなることが分かった⁽²⁾。こうしたNIRS-HECを用いた実験から、4種のイオンの要求値を達成させる上流ミラーピーク(B_{inj})、最小磁場(B_{min})、下流ミラーピーク(B_{ext})の最適磁場の値をそれぞれ決定した。

決定した B_{inj} 、 B_{min} 、 B_{ext} の磁場を再現するように永久磁石の設計を行った。永久磁石とヨークを含む設計の制約条件を直径400mm、長さ400mm以下として、電磁界解析ソフトJMAGを使用して磁場の最適化を行った。磁石にはネオジウム、鉄、ホウ素を主成分とする信越化学工業株式会社製のネオジウム磁石を採用した。実際に製作したマルチイオン源の磁場分布は、 B_{inj} 、 B_{min} 、 B_{ext} の仕様値に対して1.5%以下の精度を達成することができた。これにより、要求されるイオン生成の精度が確保された。

3.2 ガス切替え

さまざまなイオン種を用いた治療を1回の治療セッションで行うには、ガス種の切替えを60秒ほどで行う必要がある。この要求を満たすべく、高速でイオン種を切り替えることを目的としたガスパルス法が開発された。この方法は、高速パルスバルブを使用してプラズマチャンバに供給されるガス量を制御する。高速パルスバルブはガス供給ラインと連結されており、ガス供給の開始および終了を正確に制御する。マルチイオン源では He^{2+} 、 C^{4+} 、 O^{6+} 、 Ne^{7+} の4種類のイオンの生成に、それぞれヘリウム、メタン、酸素、ネオンのガスが使用されている。高速パルスバルブの開時間を変更することでガスの総量を制御する。この制御によりイオン種の高速スイッチングが実現し、異なるイオン種を迅速に供給することができる。

3.3 引出し電極の駆動

マルチイオン源では、質量と価数の異なる4種類のイオン種を効率的に引き出すべく、引出し電極を駆動できるような設計とした。直線導入機を採用することにより、真空の外から引出し電極の位置を調整することができる。引出し電極を冷却することを目的とした配管にはフレキシブルチューブを

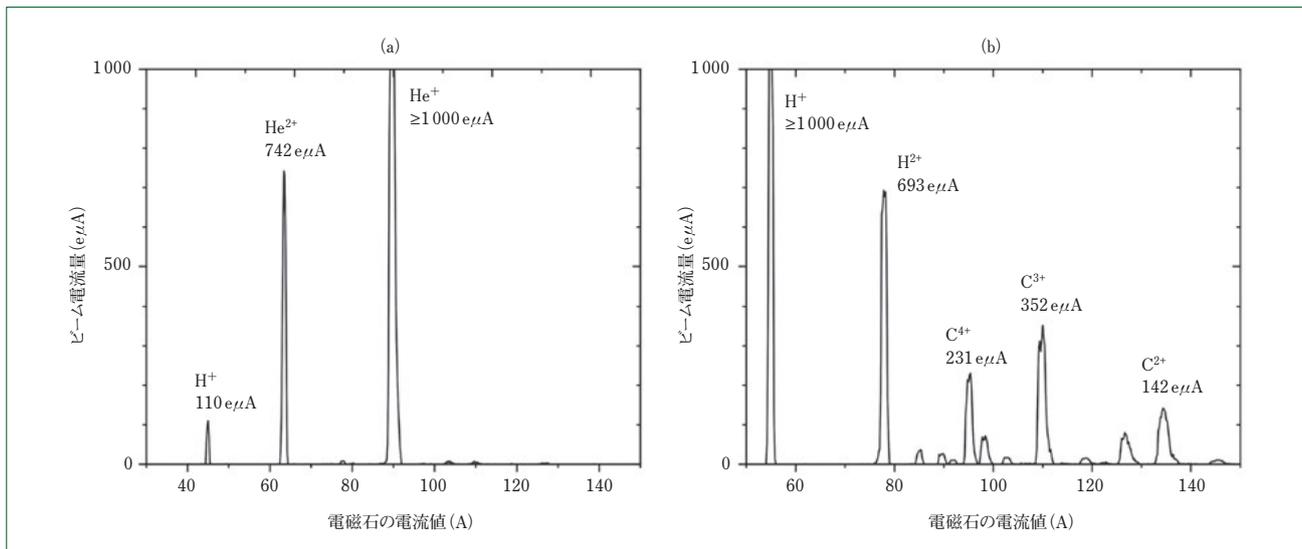


図5 ビーム試験時の価数分布 (a)ヘリウムイオン, (b)炭素イオン
Charge state distribution at beam test (a) helium ion, (b) carbon ion

用いることで、引出し電極の駆動に合わせて可動する設計とした。

3.4 2重周波数加熱(two-frequency heating technique)

ECRイオン源では、2つの周波数でマイクロ波を供給することにより、プラズマの安定性が向上することが知られている⁽⁵⁾。この技術は、2重周波数加熱と呼ばれている。従来機では10GHzの1つのマイクロ波のみを使用しているが、マルチオン源では従来のC⁴⁺に加えて、より重く、より多価のイオンを生成すべく2重周波数加熱が導入された。前述した14GHzの半導体アンプをメインのマイクロ波アンプとし、2重周波数加熱用に10~18GHzの進行波管アンプをサブのマイクロ波アンプとした。サブのマイクロ波アンプは周波数帯が広いことから、2重周波数加熱に最適な周波数に容易に調整できる。プラズマチャンバへのマイクロ波の導入には、メインのマイクロ波は導波管をサブのマイクロ波は同軸線を用いて1/4波長(≒5mm)のアンテナを使用した(図3)。

4 ビーム試験

マルチオン源は、2022年に製作が完了し、同年3月にQSTにあるHIMACに導入された(図4)。マルチオン源を現地に据え付けた後、検収のためのビーム試験を行った。図5に、試験で取得した価数分布の一部を示す。マルチオン源の据付け時において、He²⁺は700eμA以上、C⁴⁺は200eμA以上のビーム電流量が引き出されることが確認された。

5 むすび

- (1) 複数のイオンを治療に用いるマルチオン照射は、より効果的な照射と副作用の低減により、重粒子線治療の新たな可能性が期待されている。
- (2) マルチオン照射を可能にするマルチオン源の開発に成功した。マルチオン源は、永久磁石によるコンパクトな設計で、半導体アンプにより高い冗長性を備え、

高速ガス種の切替えに優れた効率性と柔軟性を備えている。

- (3) マルチオン照射による治療の実現に向けて、今後もQSTと協力しながら実用化を目指していく。また、当社がこれまで提供してきた入射器のラインナップにマルチオン源を展開していく計画である。

(参考文献)

- (1) Inaniwa, T., Kanematsu, N., Noda, K. & Kamada, T., Treatment planning of intensity modulated composite particle therapy with dose and linear energy transfer optimization, *Phys. Med. Biol.*, 62-12 (2017), 5180.
- (2) Muramatsu, M. et al. Concept design of new compact electron cyclotron resonance ion source with permanent magnets for multi-ion radiotherapy. in *Journal of Physics : Conference Series*, 2244 (2022), 012094.
- (3) Iwata, Y. et al. Design of a compact superconducting accelerator for advanced heavy-ion therapy. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 1053 (2023), 168312.
- (4) Kitagawa, A. et al. Development of 18 GHz electron cyclotron resonance ion source with high-voltage extraction configuration. *Rev. Sci. Instrum.*, 69-2 (1998), 674-676.
- (5) Kitagawa, A. et al. Recent developments of ion sources for life-science studies at the Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba. *Rev. Sci. Instrum.*, 87-2 (2016), 02C107.

5馬力級 水冷圧縮機

5 HP Water Cooling Compressor

● 勢村 健太* 大谷 祐貴*
Kenta SEMURA Yuki OOTANI



圧縮機ユニット E-77A
Compressor unit E-77A

1 はじめに

当社では、極低温冷凍機とその応用製品であるクライオポンプを販売している。GM (Gifford-McMahon) 冷凍機、パルスチューブ冷凍機およびGM-JT (Joule-Thomson) 冷凍機をそろえ、医療用MRIなどに代表される超電導コイルの冷却、希釈冷凍機予冷や電波望遠鏡の素子冷却など先端技術製品に広く使用されている。

長年培ってきた極低温技術を用いた製品群は、小型かつ信頼性が高いことで市場から高評価を得ている。SDGsやカーボンニュートラルといった社会変革に伴う顧客の要望にタイムリーに応えるべく、製品の効率化・高機能化や新規制に対応した製品ラインアップの拡充に取り組んでいる。

極低温冷凍機は冷凍機(コールドヘッド)と圧縮機ユニットで構成されており、圧縮機ユニット(図1)はHeガスの再圧縮にとどまらず、圧縮熱の排熱、油滴や異物のない清浄なガスを冷凍機に供給し続ける役割を担う。大きな電動機を持つことにより、圧縮機の電力制御はシステム全体の消費電力量に大きな影響を及ぼすこととなる。

近年、省エネルギーが重要視されており、従来の効率評価指標であるCOP(Coefficient Of Performance)だけでなく、通年非効率の削減を加えたAPF(Annual Performance Factor)という評価方法へのシフトが進んでいる。これは、たとえば昼夜で使用頻度が大きく異なる医療機器に対し、冷凍能力を

変更可能とすることで無駄な電力消費を抑制してCO₂排出削減につなげるといった考え方である。本報では、APF向上を目的に開発されたインバータ圧縮機ユニットE-77Aについて紹介する。

2 インバータ圧縮機 E-77A の開発

E-77Aの開発は、顧客の省エネルギーのニーズに合わせて2021年度より着手した。当初の技術的課題は、コンパクト化であった。圧縮機ユニットは顧客装置に組み込まれることも多く、従来のインバータを搭載していない製品とのサイズ互換性を維持することが必要である。このことからインバータを搭載するスペースを確保しつつ部品の小型化を含めて全面的に見直し、互換性を考慮したアーキテクチャへと設計を進めた。

オイルセパレータや熱交換器など、新たに開発した技術により通常運転時の動作も従来品質と遜色がないことが確認できた。また最小消費電力は3.75kWとなり、省エネルギーを印象づけるため型式頭文字となるEはEfficiencyから採ることとした。

E-77Aの性能仕様と新たに採用された技術について解説する。

2.1 性能仕様(RDE-412D4との組合せ)

圧縮機ユニットのスペックとして、代表機種であるRDE-412D4と組み合わせた性能を示す(図2)。通常時の冷凍能力

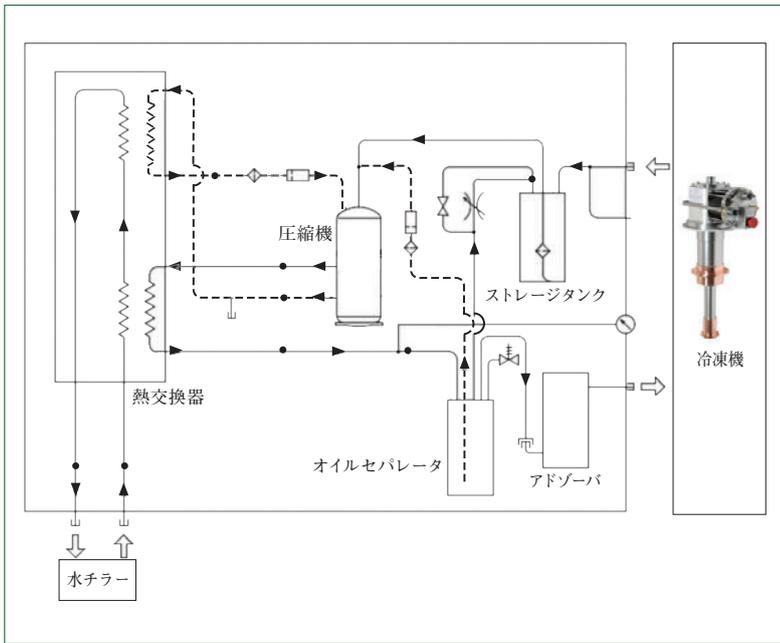


図1 圧縮機ユニットの構成
Compressor unit structure

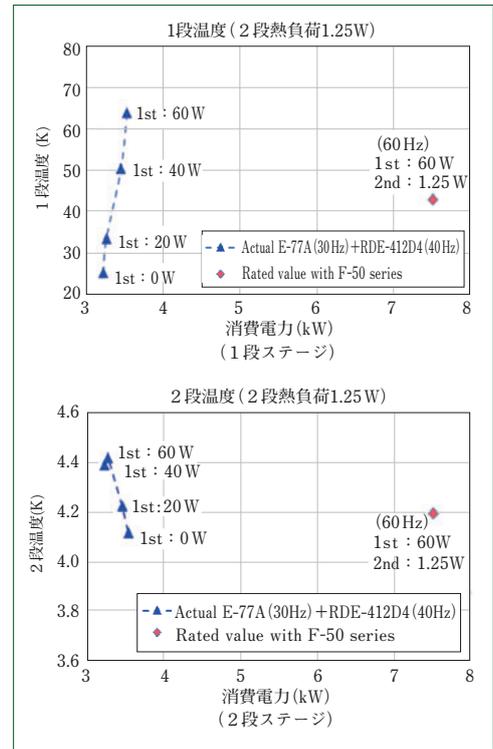


図2 省エネ運転による冷凍能力
Cooling performance with energy-saving operation

は従来と同等であり、入力周波数の可変により電力抑制(最大出力から約50%減)しつつ、安定的な動作の確認ができた。

- ・ 冷凍能力
 - 1 段ステージ 53 W at 43 K (既存機種と同一)
 - 2 段ステージ 1.25 W at 4.2 K (既存機種と同一)
- ・ 消費電力 7.5 kW (既存機種と同一) から
最小3.75 kW までの省エネルギー運転
- ・ 圧縮機外形寸法 450 (W) × 485 (D) × 590 (H) mm (既存機種と同一)

2.2 新たに採用された技術

(1) オイルセパレータの効率化による小型化⁽¹⁾

圧縮時の冷却・潤滑を目的として冷媒ガスにはオイルが注入される。オイルセパレータは、圧縮後の冷媒ガスに含まれるオイルとガスを分離させる目的で用いられる。本開発ではオイルセパレータ内部品の最適化を行い、従来品よりも分離性能を向上させたことで占有容積を約30%縮小することができた。

(2) 熱交換器の形状見直しによる小型化(特許出願中)

従来は箱型かコイル状の熱交換器を採用し、機内レイアウトでも広い容積を必要としていた。E-77Aの開発において熱交換器の方式や形状を見直して平面的な熱交換器を開発した。これにより隙間となるフレームパネル沿いに配置することが可能となり、従来機比で占有容積を約30%縮小することができた。

(3) UL60335対応の電装部品

ULは米国の安全規格であり、顧客医療装置が北米医療認証規格に準拠しているかを審査される際に極低温冷凍機も評価対象となる。圧縮機ユニットを含む極低温

冷凍機は現行UL471に準拠しているが、2024年9月末にはその規格が廃止されることが決定している。E-77Aは、より高い安全性が認証条件となるUL60335に準拠した設計とし、第三者認証機関による認証を得た。

3 E-77Aの特長

- ・ インバータを備え、熱負荷に合わせた電力抑制機能を搭載している。
- ・ 最小消費電力運転では、定格比50%となり消費電力を削減した。
- ・ 顧客装置に組み込まれる既存機とのサイズ互換性を実現した。
- ・ より高い安全性を保証するUL60335の第三者機関認証済みである。

4 おわりに

本開発により、獲得した部品の小型化などの技術は他機種へ水平展開していく予定である。

近年市場要求が多様化するなかで極低温冷凍機にもさまざまな機能が求められており、それらに対応すべく機能拡充とともに安全性に配慮した製品提供を続けていく。

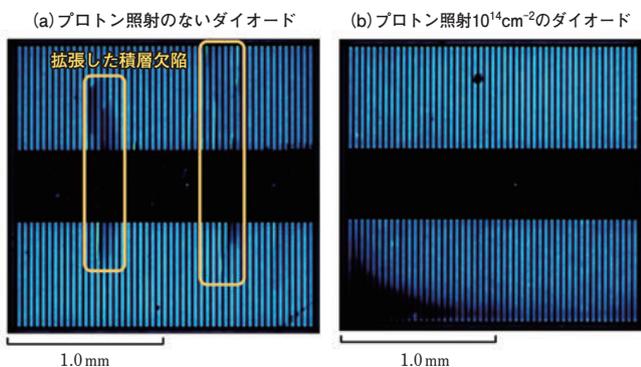
(参考文献)

- (1) 特許第 7292904 号

プロトン照射によるSiCパワー半導体の順方向通電劣化抑制技術

Suppression of Forward Degradation in SiC Power Semiconductor by Proton Beam Irradiation

● 坂根 仁* 原田 俊太** 加藤 正史***
Hitoshi SAKANE Shunta HARADA Masashi KATO



負荷試験の後のPiNダイオードの電極窓から観察されたEL像
EL images of PiN diodes after the electrical stress

1 はじめに

シリコンカーバイド(SiC)は、バンドギャップが広いことから耐熱性に優れており、搭載装置の小型化につながるパワー半導体材料として注目度が高い。近年普及が進んでいるが、その一方で、高品質のSiCウエハでも結晶中には多数の転位という欠陥が存在しており、それらの転位がデバイスの製造歩留まりおよび信頼性を低減させるという問題を抱えている。転位のうち、特に基底面転位は順方向通電時の電流注入により積層欠陥となって拡張し、デバイスの電気特性を劣化させることが広く知られており、この解決が産業応用上の課題となっている。

転位の拡張を抑制する技術の一つとして、SiC結晶中に欠陥を導入することでキャリア寿命を意図的に低減させ、基底面転位に流れるキャリアを抑制し、積層欠陥の拡張を抑えるという方法があるが、キャリアを基底面転位に完全に到達させないようにするのは難しい⁽¹⁾。一方、本報におけるプロトン照射技術は、不純物の固着により基底面転位の積層欠陥への拡張を抑制しつつ、アニーリングにより欠陥の発生を抑制し、キャリア寿命を極力低減させないということを可能としている。これにより長いキャリア寿命が高性能化につながるデバイス、たとえばバイポーラトランジスタにおいて、高いデバイス性能を保ちつつ積層欠陥による信頼性の低減を回避することができる。

2 転位欠陥拡張抑制のイメージ

一般的に半導体のみならず結晶材料中の転位は、点欠陥などの不純物と相互に作用することが知られている。その相互作用により転位の電気伝導が変化することや、不純物と転位が固着し、転位が動かなくなることが複数の半導体結晶材料

で報告されている。したがってSiCにおいても、転位との相互作用が強い不純物を導入して転位に固着させることで、転位の動きを制御できると考えた。本技術開発では、図1に示すようにSiC結晶中に導入した水素もしくは点欠陥といった不純物を基底面転位と相互作用させ、転位の動きを不活化させることを想定している。注入物として、SiCの電気伝導にほとんど影響を与えない水素を選択した。また、不純物導入後に熱処理を施すことで、不必要な欠陥の発生を抑制し、転位不活化後のSiCの結晶品質を保つ。本技術は、SiCのデバイス特性を安定させつつ、デバイスの信頼性確保につなげることができる。

3 転位欠陥の抑制効果観測

SiCにプロトン照射を施すことで、積層欠陥の拡張にどのような影響を与えているかを観察した。観察には、放射光トポグラフィによる欠陥の観察技術を用いた⁽²⁾。トポグラフィ画像は、SiCに放射光を照射して、回折した放射光の強度を原子核乾板で記録するもので、非破壊で転位などの結晶欠陥、貫通転位およびエピタキシャル(エピ)層の欠陥などを検出することができる。さらに、UV照射によりSiCエピ層にキャリア再結合エネルギーを付与しながら、積層欠陥拡張を観察する技術を活用し、プロトン照射の拡張運動への影響を時系列に沿って詳細に観察した。

図2に、UV光を120時間照射する前後の積層欠陥の比較を示す。 $1 \times 10^{11} / \text{cm}^{-2}$ (e, f)のプロトン照射を施すと概略図(g)のように、UV照射前に存在していた水平方向に向かって存在していた基底面転位から、図の下方向に向かって部分転位が発生し、その双方の間に形成される積層欠陥が発生していることが分かる。 $1 \times 10^{12} / \text{cm}^{-2}$ (c, d), $1 \times 10^{13} / \text{cm}^{-2}$ (a, b)のプロトン照射ではUV120hの照射後にも関わらず、まったく拡張が見られない。通電状態や不純物濃度によって異なると思われるが、閾値以上のプロトン照射を施すことで抑制効果が発現することが分かる⁽³⁾。

4 プロトン照射プロセスの最適化

プロトン照射には、現在シリコンパワー半導体への照射サービスに使用しているサイクロトロンもしくは静電加速器を用いる。このような加速器を用いることで、エピ層表面から数 μm から数十 μm 程度の深さに存在するエピ層の基板界面付近に水素および点欠陥といった不純物を導入することができる。この界面付近は基底面転位から積層欠陥への変換が生じやすい領域に相当し、抑制効果を十分に発揮できる。

PiNダイオード製造における従来のイオン注入プロセスは、電極取り付け後にプロトン照射を施すが、電極へのダメージが無視できない。そこで図3に示すように、基板側およびエピ

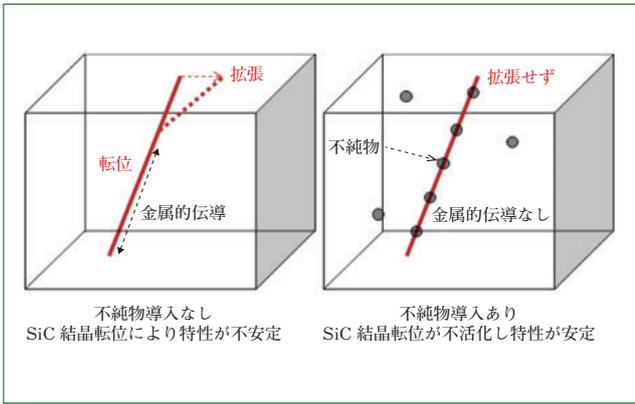


図1 不純物注入によるSiC結晶の不活性化イメージ
Image of inactivation of SiC crystals by impurity implantation

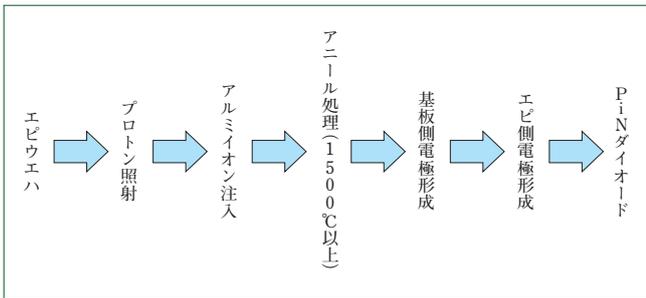


図3 PiNダイオード製造プロセス
Processes for PiN diode with proton irradiation

側への電極形成前にプロトン照射を行うことにした。プロトン照射後、P層形成を目的として注入されたAl(アルミ)を活性化すべく1500℃以上の高温アニールを施すが、転位欠陥に固着した不純物は残留することを想定している。その後、電極形成を行うことで、高性能な電極コンタクトが維持できる。

5 プロトン照射 PiN ダイオードへの電流注入評価⁽⁴⁾

水素導入したPiNダイオードに対して温度上昇を抑えつつ試験の負荷を高めることを目的として、実際の通電負荷と同程度と考えられる200 A/cm²以上のパルス電流による通電試験を実施することにした。試験では、ダイオードの温度上昇を抑えながら212.5 A/cm²の負荷で10パルス/秒、2時間の通電を行った。

プロトン照射を新たに導入したプロセスで作製したPiNダイオードに対して、長時間の電流負荷試験を実施した後のエレクトロルミネッセンス(EL)像を観測した。ELは、エピ面に形成したストライプ状の窓を有する電極を通して観測されるが、積層欠陥はEL像において暗部となることから、積層欠陥の拡張の有無が判定できる。

冒頭の図は、負荷試験後の「プロトン照射なし」および「プロトン照射あり(10¹⁴cm⁻²)」のPiNダイオードのEL像である。図中の暗部が基底面転位が拡張した積層欠陥に相当しており、プロトン照射なしでは積層欠陥が拡張し、プロトン照射ありでは拡張が抑制されていることが分かる。また、プロトン照射をさらに増やしても積層欠陥の拡張が抑制されることも確認できた。プロトン照射が積層欠陥の拡張を抑制し

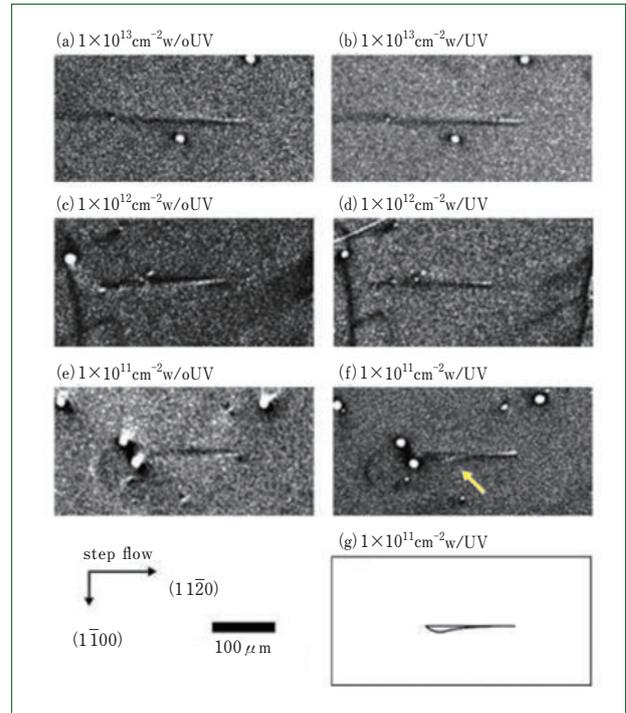


図2 プロトン照射(照射量10¹¹~10¹³cm⁻²)後のSiCの積層欠陥拡張のトポグラフィ画像
(a), (c), (e)はUV照射前, (b), (d), (f)はUV照射後, (g)は(f)の拡張イメージ図
(a)-(f) X-ray topography images of specimens with proton irradiation fluence ranging from 10¹¹ to 10¹³cm⁻² before (a,c,e) and after UV(b,d,f). (g) is illustration of (f).

ており、順方向通電時における劣化を解決する技術となり得ることが明らかとなった。

6 おわりに

- (1) SiCパワー半導体の実用化の障害となっていた通電劣化に対して、その要因となる基底面転位の積層欠陥への拡張を抑制するプロトン照射技術を新たに提案することができた。
- (2) プロトン照射後に、高温のアニーリングにより欠陥の発生を抑制し、キャリア寿命を極力低減させないことを可能とした。このことにより、長いキャリア寿命が高性能化につながるデバイス、たとえばバイポーラトランジスタにおいて高いデバイス性能を保ちつつ、積層欠陥による信頼性の低減を回避することに成功した。
- (3) 本技術に対する国内外のパワー半導体デバイスメーカー、ウエハメーカーの関心度は高く、産業応用に向けた試験がメーカー主導で開始されつつある。

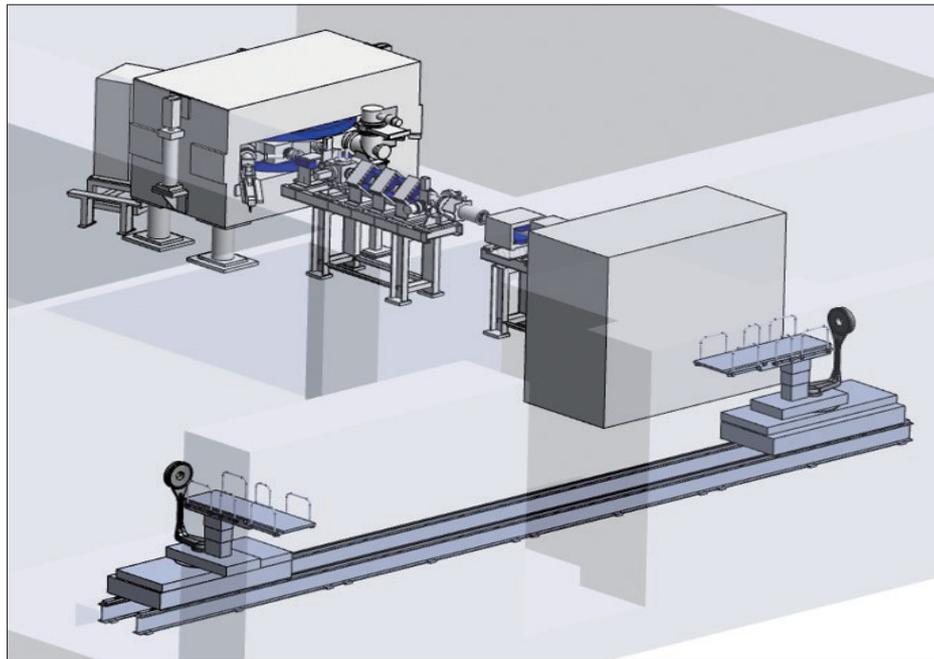
(参考文献)

- (1) T. Mii et al., Mater. Sci. Semicond. Process. 153, 107126 (2023).
- (2) S. Harada et al., Sci. Rep. 12, 13542 (2022).
- (3) S. Harada et al., Appl. Phys. Express, 16, 021001 (2023).
- (4) M. Kato et al., Sci. Rep. 12, 18790 (2022).

省スペース型 BNCT (ホウ素中性子捕捉療法) システム

Space-saving BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) System

● 楠 岡 新 也*
Shinya KUSUOKA



BNCT Comfort Modelの概観図
Overview of BNCT Comfort Model

1 はじめに

組織を切除することなく、臓器の形状や機能を保ちながらがんを治療できるのが放射線治療の利点であり、その治療法の一つにBNCT (Boron Neutron Capture Therapy: ホウ素中性子捕捉療法) がある。BNCTは、がん細胞にホウ素原子を含有する薬剤を取り込ませ、そこに中性子線を当てることで中性子とホウ素原子を反応させ、そこで生じた高エネルギーの α 粒子とLi原子核により、がん細胞を選択的に破壊する治療法である。

当社は2009年度に、世界初の病院に設置可能なBNCT用の中性子照射装置を国立大学法人京都大学原子炉実験所と共同で開発し、2014年度に一般財団法人脳神経疾患研究所付属南東北BNCT研究センター、2017年度には大阪医科薬科大学関西BNCT共同医療センターに納入した。そして2020年度に医療機器「BNCT治療システム NeuCure」として承認され販売を開始した。しかし、本装置は高額な医療機器であり、また、大型の装置であるため設置には敷地面積が広く専用の建屋も必要となることから採算性が低く、これがBNCTの普及を妨げる一因となっている。そこで当社は、治療現場から得られたさまざまな知見をもとにNeuCureを構成する機器の配置・機能・建築レイアウトの最適化を行い、省スペース・省コストのBNCT Comfort Modelを開発した。本報では、このBNCT Comfort Modelについて紹介する。

2 主要仕様

表1に、BNCT Comfort Modelの主要仕様を示す。本装置の特筆すべき点は装置全体の延床面積である。NeuCureとの比較で23%削減を達成した。

3 NeuCureの配置と機能最適化

すでに納入した2台のNeuCureから得られた知見により、次の4項目について検討を行い、敷地面積を削減した。

- ① ビームトランスポートシステムの最適化
- ② ターゲット交換システムの変更
- ③ 建屋レイアウトの最適化
- ④ 治療台機能の最適化

3.1 ビームトランスポートシステムの最適化

中性子を発生させることを目的として陽子ビームをターゲットまで輸送するシステムをビームトランスポートシステムと呼ぶ。これまで当社が納入してきたNeuCureのビームトランスポートシステムは、図1に示すように偏向電磁石を用いてビーム軌道を曲げ、陽子ビームをターゲットまで輸送している。

本ビームトランスポートシステムは、偏向電磁石の磁場を切り替えることにより異なる部屋へビームを輸送できるという利点はあるが、病院が所有する土地が狭小で治療室が1室しか用意できない場合、この偏向電磁石が装置面積を大きく

表1 BNCT Comfort Modelの主要仕様
Main specifications of BNCT Comfort Model

項目	主仕様
ビーム電流値	1 mA
ターゲット交換	手動
ビームトランスポート	直線
治療室数	1部屋
治療準備室数	1部屋
治療台種類	臥位
コリメータ	延長コリメータ
シミュレーション室	なし(BNCT Comfort Model導入後に追設可能)
年間想定治療人数	200人
装置延床面積	23%削減(NeuCure比)

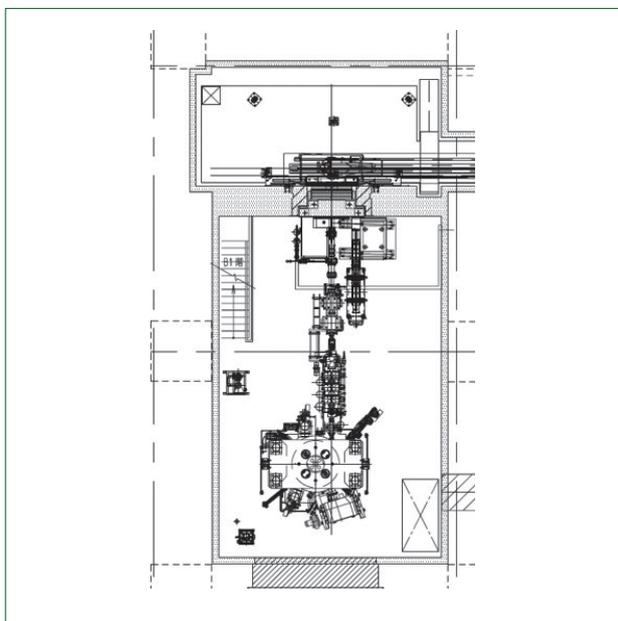


図2 BNCT Comfort Modelのビームトランスポートシステム
Beam transport system of BNCT Comfort Model

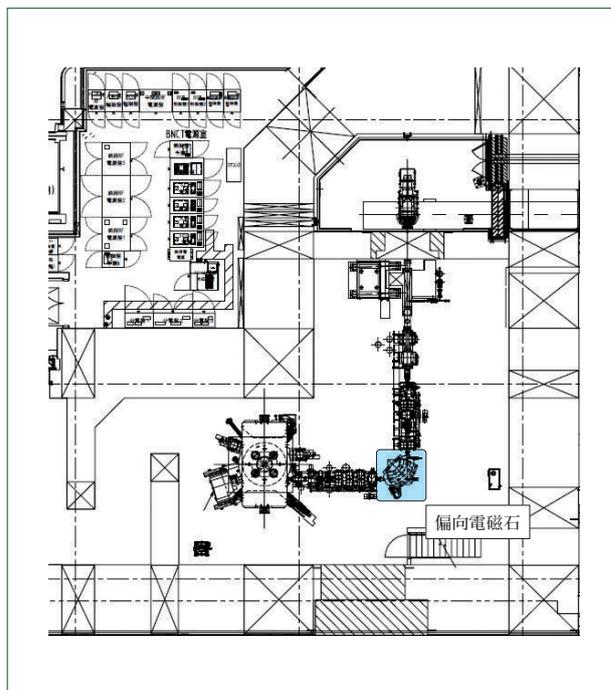


図3 NeuCure (1-port type)のビームトランスポートシステム
Beam transport system of NeuCure (1-port type)

する要因となり客先の要望に応えることができない。

そこでBNCT Comfort Modelでは、図2に示すように偏向電磁石を廃止し、ターゲット位置でのビームサイズを変えることなくビームトランスポートシステムを直線型とした。この変更により、従来機(1治療室モデル)と比べ四極電磁石を2台、偏向電磁石を1台、ステアリング電磁石を2台削減でき、6%の床面積削減を達成した。

3.2 ターゲット交換システムの変更

BNCTでは中性子を発生させるターゲットを定期的に交換する必要がある。しかし、ターゲットは陽子ビームの照射により放射化していることから、ターゲット交換時の作業者の被ばくを低減する装置が必要である。NeuCureでは、地下からターゲット受けが上昇してきてターゲットダクトを保持し地下へと降ろすという半自動の装置を採用しており、これが作業者の被ばく低減の一翼を担っていた。しかし、ターゲットの交換は年に1~2回、作業時間は1~2時間であること

から、すべての作業を手動で実施した場合でも放射化したターゲットから十分に距離を取り、視認性が良い鉛ガラスで局所的に遮蔽していれば、作業者の被ばくをNeuCureと同等レベルに抑えることができる。そこでBNCT Comfort Modelでは、地上でターゲットから十分な距離を確保してターゲットを交換することが可能な交換台車を開発した。この交換台車を採用することによって、作業者の被ばく量をNeuCureと同等レベルに抑え、加えて地下のターゲット交換装置駆動部のスペースを不要とした。こうして空いたスペースに冷却システムを配置することによりNeuCure(1治療室モデル)との比較で、地下室の面積を17%削減した。

3.3 建屋レイアウトの最適化

施設の採算性を改善するには、敷地面積の低減による建屋コストの削減とともに、治療患者数を増やすことが有効である。そこでNeuCureで蓄積されたノウハウを生かし、治療フローに基づいて建屋レイアウトを最適化することで、建屋コストの低減と効率的な治療フローの両立を実現した。この治療フローでは、準備室と治療室をそれぞれ1室設けて医師、技師、患者の動線を考慮し、準備室と治療室を含め医療行為に関係する部屋を最適位置に配置することで4人/週、200人/年の治療が可能となった。また装置導入後にシミュレーション室を追設し、治療前準備作業の効率を上げることで400人/年の治療が可能になった。

なお、建屋レイアウトを最適化するに当たり、株式会社フジタと協業しStandard Planを作成した。図3に、そのレイアウトを示す。本レイアウトでは治療行為に必要な最小限のサイズ(27.5×34m)の部屋を確保しており、従来機の27.5×44.2mと比較してコンパクトに仕上がっている。また、本モデルの加速器室には株式会社フジタの特殊技術を用いた低放

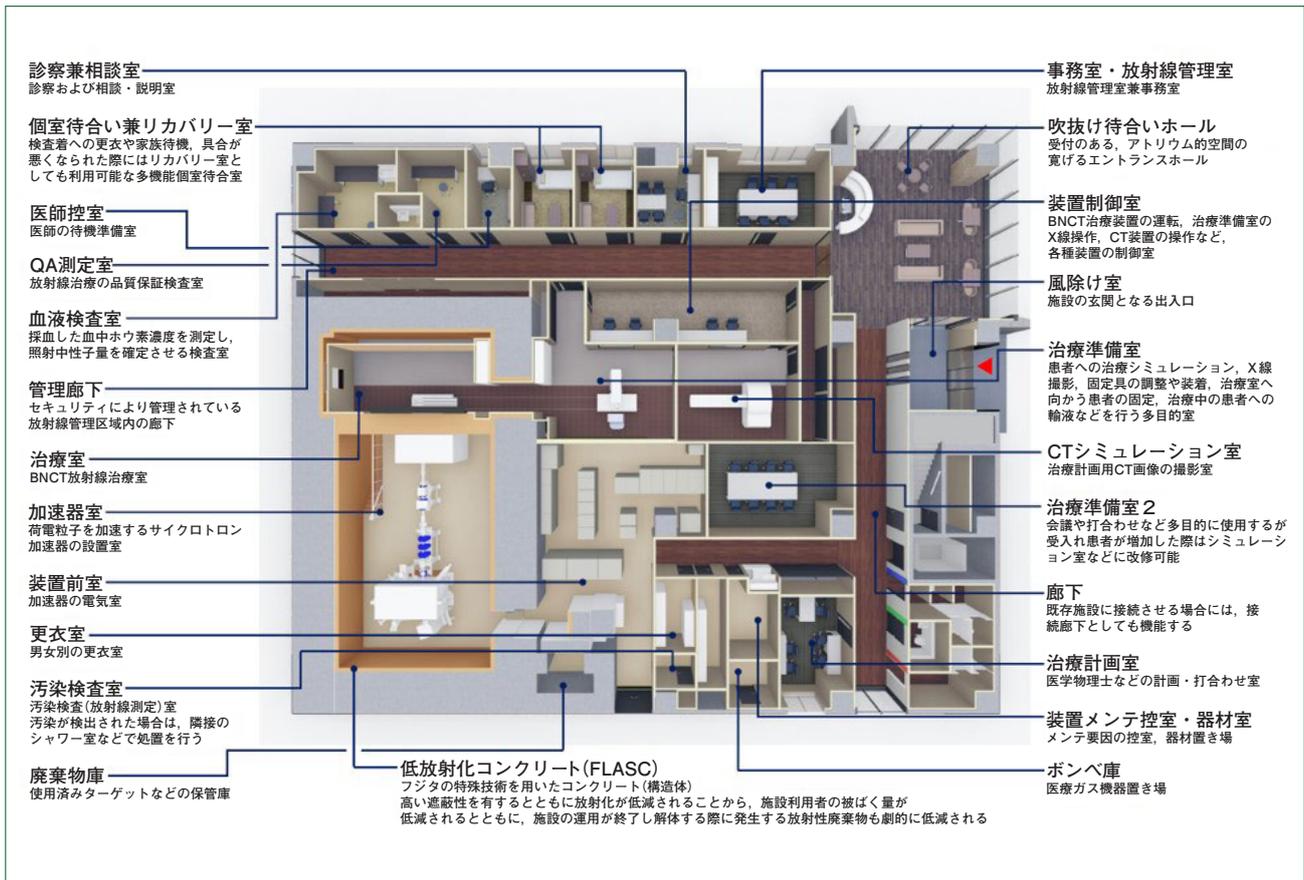


図3 BNCT Comfort Model の標準レイアウト
BNCT Comfort Model Standard Plan

射化コンクリート(FLASC)を採用しており、施設の運用が終了し解体する際に発生する放射性廃棄物の低減も図っている。

3.4 治療台機能の最適化

初期導入費用の削減を目的とし、NeuCureが展開している治療台機能の最適化を行った。NeuCureでは頭頸部照射時に治療に必要な患者体位を得るために、ほとんどの場合で座位・立位治療台を使用し、臥位治療台は使用していなかった。しかし、2022年2月に延長コリメータが薬事承認された後では患者体位決定時の自由度が上がり、臥位での治療実績が急増した。これは、座位や立位と比べて臥位の方が患者の負担が軽減されることによる。また、位置決めが容易になることで、医療スタッフの負担が軽減されることも臥位治療台が優先的に使用される一因となっている。そこで本モデルでは、臥位治療台と延長コリメータの組み合わせを標準とし、座位・立位治療台はオプションとしたことで装置導入初期費用の低減を実現した。

4 おわりに

- (1) BNCTの普及促進を目的とし、採算性を向上させたBNCT Comfort Modelの開発を行った。
- (2) BNCT Comfort Modelは、NeuCureで得た治療現場のノウハウを生かして装置、建屋レイアウトの最適化を行った結果、従来比23%の延床面積削減を実現し、省コス

ト・省スペースの要望に対応できる製品となった。
(3) BNCT Comfort Modelの上市によってBNCTの普及促進が期待されるとともに、がん治療分野におけるウェルビーイングの実現にも貢献できる。

※ 「NeuCure」は、住友重機械工業株式会社の登録商標です。
「FLASC」は、株式会社フジタの登録商標です。

枚葉式超高エネルギーイオン注入装置 SS-UHE II

Serial Ultra High Energy Ion Implanter SS-UHE II



本装置SS-UHE IIは、超高エネルギーでのイオン注入プロセスに対応した300mmウエハ用枚葉式超高エネルギーイオン注入装置SS-UHEの後継機である。従来機SS-UHEは、CMOSイメージセンサデバイスの微細化や高性能化に伴い、フォトダイオード部へのイオン注入がより深く、より正確に行えるように、注入エネルギーを旧機種種の最大2倍に高め、注入角度精度を大幅に向上させた。

SS-UHE IIは、AIやIoT技術の普及拡大に伴う顧客の旺盛な設備投資による急激な装置需要拡大に対応し装置COO (Cost Of Ownership：ウエハ1枚当たりの処理費用)削減、リードタイム短縮、装置軽量化およびスマートファクトリー化を実現すべく、SS-UHEをさらに進化させた装置として開発され、すでに最先端のCMOSイメージセンサメーカーに複数台納入されている。

主要仕様

最大ビームエネルギー	14.4MeV
ドーズレンジ	$1 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{17}$ ions/cm ²
ドーズ均一性、再現性	0.5%以下
質量分解能	$M/\Delta M \geq 90$
メカニカルスループット	450枚/Hr

特長

- (1) 中性子線内部遮蔽
超高エネルギーのホウ素イオン注入においては、微弱

ながら中性子線が発生する。SS-UHE IIでは、ビームライン各部の発生源に対しシミュレーション (PHITS) を繰り返して内部遮蔽の構造を決定し、中性子線発生源近傍に遮蔽材を配置した。従来の外部遮蔽構造から内部遮蔽構造に変更することにより、SS-UHE との比較で重量を75%、部品点数を80%削減した。

(2) 新コントロールシステム

近年急速に普及しつつあるICTを活用したスマートファクトリー化の実現に対応すべく、コントロールシステムを全面的に刷新した。制御の応答性や拡張性が向上したことで、大容量の装置センシングデータ収集や各装置をネットワークで接続することが可能となった。このシステムにより、生産工程で収集し蓄積されたデータを機械学習・解析などのAI技術を使って処理することにより、装置間の性能のバラツキ抑制および予防保全を可能とする。

※ 「UHE」は、住友重機械イオンテクノロジー株式会社の登録商標です。

(住友重機械イオンテクノロジー株式会社 岡本信介)

8インチウエハ一括照射対応レーザーアニール装置 SWA-22USH

Laser Annealing System SWA-22USH Capable of 8-inch Wafer Batch Irradiation



Si-IGBTパワー半導体に代わり、特性に優れたSiCパワー半導体の需要が世界的に高まっている。SiCパワー半導体では、SiCと電極金属との間に低抵抗なオーミック・コンタクトを形成することが求められており、レーザーによるアニール処理でシリサイド化することによってオーミック・コンタクト形成を実現し、その結果としてデバイスの電気特性を改善することができる。SiCパワー半導体の需要が高まるなか、レーザーアニールプロセスにおいては生産性を上げるための高スループット化に対する既納顧客からの要求が増大している。

このような要求に対応すべく、オーミック・コンタクト形成に特化した高スループットレーザーアニール装置SWA-20USHを上市した。本製品は光学系の伝送効率を改善することにより、従来機と同じフットプリント・加工品質のまま従来機比1.5倍のスループットを達成した。設計においては、従来機からの変更を最小限とすることで、既納装置のバージョンアップ展開も容易としたほか、従来機同様のユーザーインターフェースを搭載し、操作性は変えずに生産性を向上させた。

一方、SiCパワー半導体の製造に用いられるSiCウエハは近年大口径化が進んでおり、これまでの主流であったφ6インチからφ8インチの時代へと移行しつつある。従来の当社装置では、φ8インチウエハの全面加工はスキャンエリアの制約により4つに分割したエリアを順番に処理するプロセスとなり、ごく一部の範囲に分割境界部が生じる。境界部に未加工領域は生じないので電気特性に問題はないが、外観上の

差異を嫌う顧客も多く、φ8インチウエハ全面一括加工への対応が求められるようになった。その課題に対応すべく、スキャンエリアを拡大しφ8インチウエハ一括照射を可能にしたレーザーアニール装置SWA-22USHの開発を進めており、2024年初旬に上市を計画している。

従来機との比較を次の表に示す。

項目	従来機	SWA-20USH	SWA-22USH
ビームサイズ	○	◎	◎
伝送効率	×	○	○
スループット(6インチ)	○	◎	◎
スループット(8インチ)	×	○	◎
8インチ一括加工	不可	不可	可

特 長

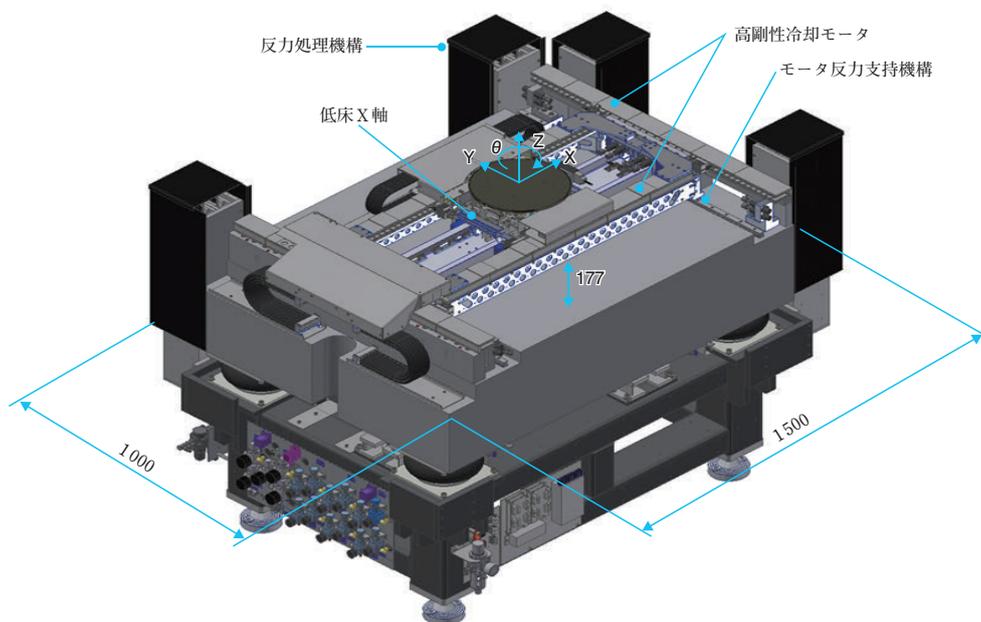
- (1) スキャンエリア境界部を拡大したことで分割境界部のないφ8インチウエハ全面の一括照射を可能とした。
- (2) 装置フットプリントおよびユーザーインターフェースは従来機と同等である。

本レーザーアニール装置は、国内外の主要なパワー半導体デバイスメーカーへの販売を見込んでいる。今後もレーザーアニール技術でパワー半導体の生産に貢献していく。

(メカトロニクス事業部 大庭 卓)

精密ステージ SA-GIIシリーズ

High Precision Stage SA-GII series



当社はXYステージ(SA-GIIシリーズ)を開発し、半導体装置市場向けに販売を開始した。半導体市場は年々プロセスの微細化が進み、製造装置の性能には生産性の確保を目的とした高速化ならびに高精度化が求められている。これらの要求に対し、本製品は従来製品(SA/SLシリーズ)との比較で、ベースモデルにおける最大速度を1.5倍、最大加速度は1.8倍とし、高速化に対応した。また、高精度化については装置低床化によるアップ誤差(装置計測点とワークポイントの高さの差で発生する誤差)の低減、高剛性冷却モータの標準搭載による長時間運用時の位置決め精度の向上を実現した。さらに、従来技術の反力処理機構に加え、モータの駆動反力を下軸構造に伝えない独自構造を採用し、下軸構造のヒステリシス低減による位置決め精度の向上や整定時間性能の短縮も実現している。

半導体市場において、これまで市場のデザインルールをけん引してきたムーアの法則に限界説が唱えられるなか、AI時代が到来し、集積回路の実装技術は積層化・多様化へとプロセスが進化している。当社も長年培った精密駆動技術を進化させ、半導体製造装置市場に貢献していく。

主要仕様

速度	1500mm/s
加速度	17640mm/s ²
停止安定性	±10nm
位置決め精度	0.15μm(長期)

整定時間 370ms@300mm動作時(整定幅 ±0.1μm)

特長

- (1) 高速かつ高精度
最適構造の見直しによる高剛性および低床化により、アップ誤差の低減とともに軽量化、高速化、高精度化を実現した。
- (2) 高位置決め精度(長時間運用時の安定性)
高剛性冷却モータを標準搭載し、長時間の運用でも高位置決め精度を維持できる構成とした。
- (3) 高位置決め精度(短期間の安定性)、高安定性
上軸モータ駆動反力を下軸に伝えない独自構造(モータ反力支持機構)を採用し、高加速度運用でも高位置決め性能および安定性能を実現した。
- (4) 高スループット
従来技術の反力処理機構が搭載可能で、高スループットに対応することができる。

(メカトロニクス事業部 中島龍太)

住友重機械技報第212号発行に当たり

住友重機械技報第212号をお届け致します。

本誌は、当社が常々ご指導いただいている方々へ、最近の新製品、新技術をご紹介申し上げ、より一層のご理解とご協力をいただくよう編集したものです。

本誌の内容につきましては、さらに充実するよう努めたいと考えますので、なにとぞご意見賜りたく、今後ともよろしくご支援下さるよう、お願い申し上げます。

なお、貴組織名、ご担当部署などについては、変更がございましたら裏面の用紙にご記入のうえ、FAXでお知らせいただきたくお願い申し上げます。また、読後感や不備な点を簡単に裏面用紙にご記入願えれば幸いに存じます。

2024年2月

〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号 (ThinkPark Tower)

住友重機械工業株式会社

技術本部 技報編集事務局

(宛先)

(発信元)

住友重機械工業(株)
技術本部 技報編集事務局 行
FAX 横須賀 046 - 869 - 2357

貴組織名
担当部署
氏 名
TEL No.
FAX No.

住友重機械技報第212号の送付先の確認と読後感などの件

送 付 先 変 更	(旧送付先)	(新送付先)
	送付番号 _____	送付番号 _____
	組織名称 _____	組織名称 _____
	担当部署 _____	→ 担当部署 _____
	所在地 _____ 〒 _____	所在地 _____ 〒 _____

新 規 送 付 先	新しい部署ができた場合ご記入下さい。
	組織名称 _____
	担当部署 _____
	所在地 _____ 〒 _____
	必要部数 _____ 部

本 号 の 読 後 感 に つ い て	1. 本号で、一番関心を持たれた記事は。
	2. 本号を読まれたご感想をお知らせ下さい。(○印でご記入下さい。)
	1 興味深かった 2 特に興味なし
	その理由をお聞かせ下さい。

キ
リ
ト
リ
線

主要営業品目

メカトロニクス

- ギヤモータ:サイクロ減速機, ハイボニック減速機, アステロギヤモータ
 - 大型ギヤボックス:パラマックス減速機, 特定用途向け減速機, カップリング
 - 精密制御用減速機:精密制御用サイクロ減速機, 精密制御用Eサイクロ減速機, サーボモータ用遊星歯車減速機 IBシリーズ
 - モータ・インバータ:インバータ, Lafert/Invertek
 - ドライブソリューション:AGV/AMR用ドライブソリューション Smartris
 - 自律移動ロボット:KeiganALI
 - 精密位置決め装置:SA/SL Series 小型サーフェイスステージ, TL Series スタック型リニアガイドステージ
 - レーザー関連装置
 - 制御システム:Roll to Roll 搬送装置向け駆動制御システム
 - モーションコンポーネント:高性能モーションコントローラ MG78, 高精度サーボドライブ SDLN/SDPH, コアレスリニアモータ SM/SL/SSL, エアアクチュエータ Airsonic 50N
 - 協働ロボット
- サイクロ, サイクロ減速機, ハイボニック減速機, アステロ, パラマックス, Smartris, AIRSONICは, 住友重機械工業株式会社の登録商標です。

インダストリアル マシナリー

- 射出成形機:Zero-molding, ダイレクトドライブシステム
- 封止プレス
- 極低温冷凍機:GM 冷凍機, パルスチューブ冷凍機, GM-JT 冷凍機, ソルバイ冷凍機
- クライオポンプ

- イオン注入装置
- PET用サイクロトロンシステム
- PET用薬剤合成システム
- 陽子線治療システム
- 真空成膜装置
- 鍛造プレス
- STAF (Steel Tube Air Forming)
- リフティングマグネット
- 非破壊検査
- スピニングマシン
- クリーンルームシステム
- 集塵装置:新型パルス式バグフィルタ エコバルサー
- 圧延用ロール
- 平面研削盤:CNC 門形平面研削盤 KSL Series, CNC 門形平面研削盤 KSL-F Series, 立軸円テーブル形平面研削盤 SVR Series, 立軸円テーブル形平面研削盤 SPG Series
- クーラント処理装置
- ラミネータ装置:コンパイングアダプター, SPS7000 オートTダイ, コンピュータコントロールシステム MACS-Win

Zero-molding, STAFは, 住友重機械工業株式会社の登録商標です。
エコバルサーは, 日本スピンドル製造株式会社の登録商標です。

ロジスティクス&コンストラクション

- 油圧ショベル
- 道路機械
- クローラクレーン
- 基礎工事用機械(アースドリル, 地盤改良機など)
- 運搬荷役機械:連続式アンローダ(パケットエレベータ型)
- 物流システム
- 機械式駐車場
- フォークリフト

エネルギー&ライフライン

- 循環流動層(CFB)ボイラ
 - バブリング流動床(BFB)ボイラ
 - 液化空気エネルギー貯蔵(LAES)
 - ロータリーキルン式再資源化設備
 - 電気集じん機
 - 灰処理設備
 - 蒸発・晶析装置
 - 流動床ガス化炉:空気式/酸素-蒸気式
 - 廃熱ボイラ
 - 廃棄物発電プラント
 - CFB スクラバ
 - バグフィルタ式排ガス処理装置
 - 排煙脱硝装置(選択接触還元法/無触媒脱硝法)
 - デジタルサービス(プラント運用支援システム)
 - 産業排水処理施設
 - 下水処理施設:メンブレンパイプ式超微細気泡散気装置ミクラス
 - 蒸気タービン
 - プロセスポンプ
 - 蒸留・抽出設備
 - 反応容器
 - 攪拌槽
 - コークス炉機械
 - 食品・飲料製造設備
 - オイルタンカー
- ミクラスは, 住友重機械エンパイロメント株式会社の登録商標です。

※文章中のソフトウェア等の商標表示は, 省略しております。

事業所

本社	〒141-6025	東京都品川区大崎2丁目1番1号(ThinkPark Tower)	技術研究所	〒237-8555	神奈川県横須賀市夏島町19番地
関西支社	〒530-0005	大阪市北区中之島2丁目3番33号(大阪三井物産ビル)	技術研究所	〒792-8588	愛媛県新居浜市惣開町5番2号(新居浜)
中部支社	〒461-0005	名古屋市東区東桜1丁目10番24号(栄大野ビル)			
九州支社	〒812-0025	福岡市博多区店屋町8番30号(博多フコク生命ビル)			
田無製造所	〒188-8585	東京都西東京市谷戸町2丁目1番1号			
千葉製造所	〒263-0001	千葉市稲毛区長沼原町731番1号			
横須賀製造所	〒237-8555	神奈川県横須賀市夏島町19番地			
名古屋製造所	〒474-8501	愛知県大府市朝日町6丁目1番地			
岡山製造所	〒713-8501	岡山県倉敷市玉島乙島 8230番地			
愛媛製造所					
新居浜工場	〒792-8588	愛媛県新居浜市惣開町5番2号			
西条工場	〒799-1393	愛媛県西条市今在家1501番地			

本号に関するお問い合わせは, 技術本部技報編集事務局(電話番号は下記)宛お願い致します。

住友重機械工業株式会社のホームページ <https://www.shi.co.jp/>

技報編集委員

委員	鈴木 哲史	委員	阿部 昌博
	廣田 真人		白澤 克年
	井上 千晶		野口 真人
	梶谷 純平		中川 崇
	針ヶ谷 崇		霜島 貴之
	有吉 政博		坂根 剛
	石川 賢治		石倉 武久
	諏訪 義和		志摩 孝洋
	幾島 悠喜		前野 亮一
	小林 友和	事務局	技術本部
		編集協力	(株)千代田プランニング

住友重機械技報

第212号 非売品

2024年2月10日印刷 2月20日発行

発行 住友重機械工業株式会社

〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号(ThinkPark Tower)

お問い合わせ電話 横須賀 046-869-2300

発行人 千々岩敏彦



住友重機械工業株式会社
Sumitomo Heavy Industries, Ltd.



Printed in Japan