

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

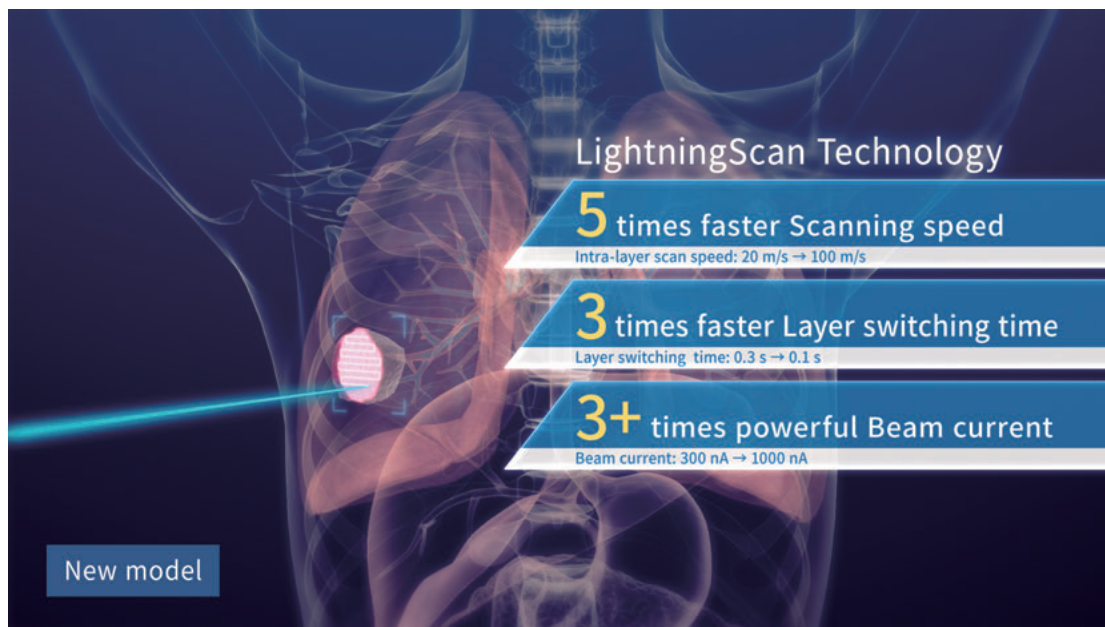


図1 超高速照射技術のコンセプトイメージ
Conceptual image of ultra-fast irradiation technology

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

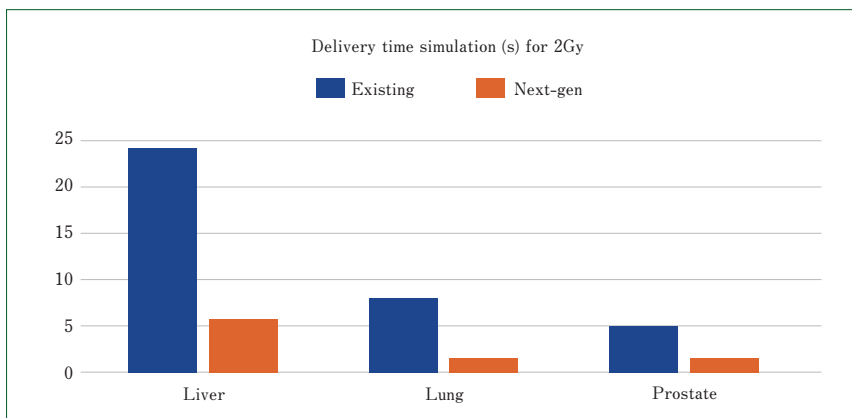


図3 従来モデルと次世代モデルで比較した部位ごとの照射時間のシミュレーション
Simulation of irradiation time per site compared between conventional and next-generation models

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)。

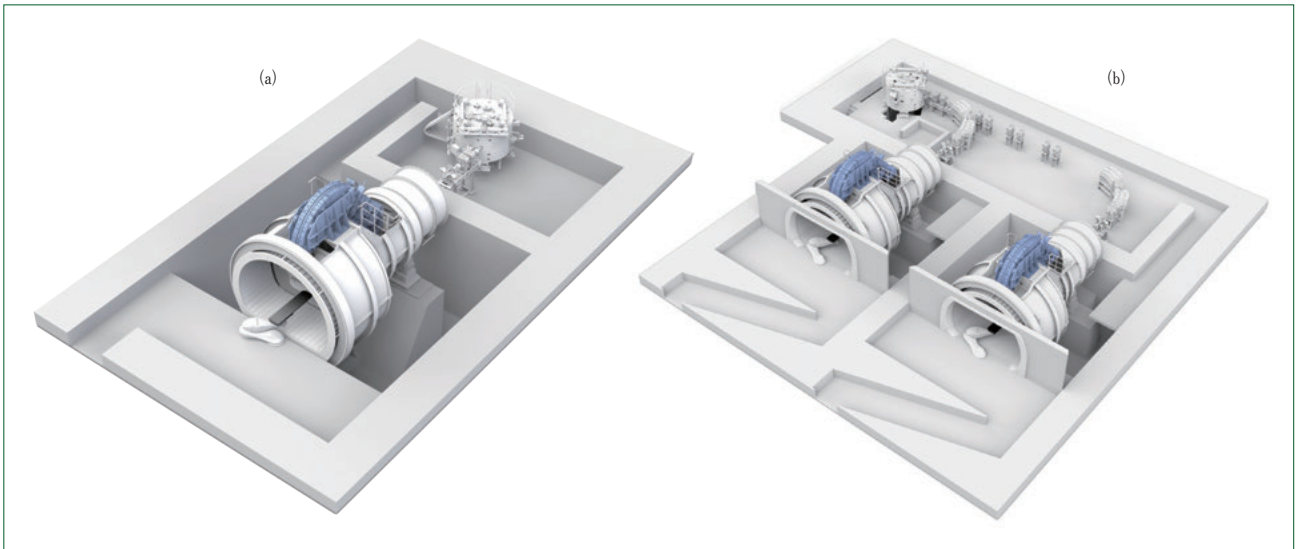


図4 単一治療室モデル(a)と複数治療室モデル(b)のレイアウト図
 複数治療室モデルは回転ガントリを含む治療室が複数設置可能
 Layout of (a) single- and (b) multi-treatment room models
 Multiple treatment room model allows for installation of multiple treatment rooms including rotating gantry

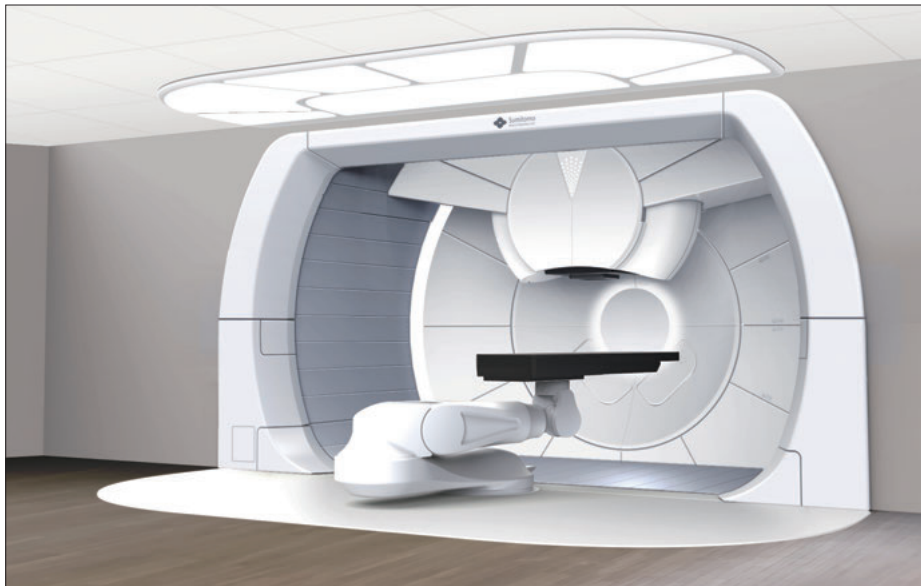


図5 治療室のイメージ
 治療室には 360°回転ガントリ、スキャニングノズル、コーンビームCT、ロボット寝台を備える
 Image of treatment room
 Treatment room is equipped with 360-degree rotating gantry, scanning nozzle, cone-beam CT, and robotic bed

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

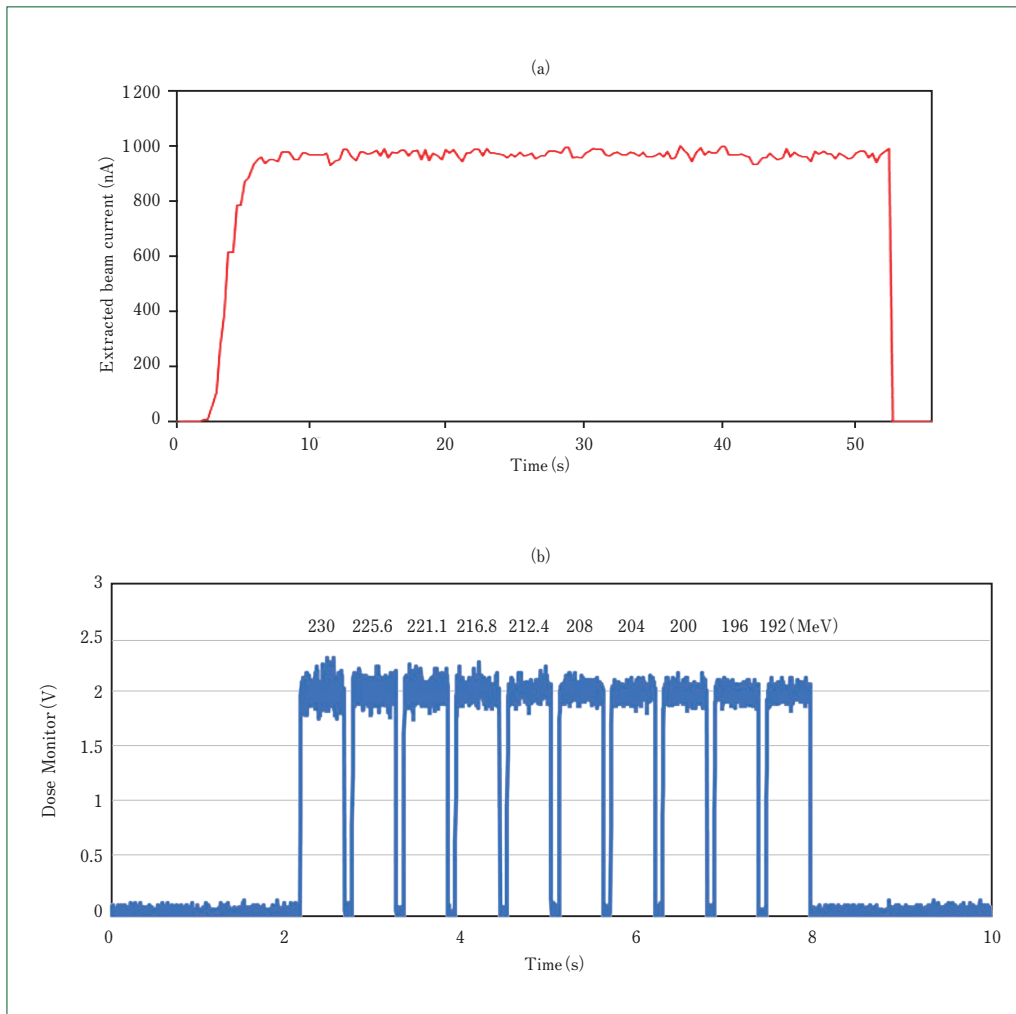


図6 性能試験の結果
 (a)サイクロトロンでの最大電流でのビーム安定性試験 (b)エネルギー切替え試験
 Results of performance tests
 (a) Beam stability test at maximum cyclotron current (b) Energy switching test

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