

PRESENT STATE OF THE HEAVY-ION FACILITY PROJECT AT GUNMA UNIVERSITY

Mutsumi Tashiro¹, Ken Yusa, Tatsuya Ohno, Satoru Yamada, Takashi Nakano, Seiji Ozawa
Gunma University Heavy Ion Medical Center
3-39-22 Showa-Machi, Maebashi, Gunma 371-8511

Abstract

GHMC (Gunma-University Heavy-Ion Medical Center) has started to construct a carbon-ion cancer-treatment facility in February 2007. This facility is being constructed at Showa Campus of Gunma University, which has the University Hospital located at Maebashi City in Gunma Prefecture.

The facility contains 3 treatment rooms with 4 irradiation ports (horizontal, horizontal + vertical, and vertical) and an experiment room with a vertical port. The latter is intended for research and development of an advanced irradiation technique for smaller targets, and is being designed in the near future. The apparatus consists of a compact ECR ion source, a linear accelerator (RFQ + IH), a synchrotron, and beam delivery systems. The accelerated ion species and the maximum energy are carbon 12 and 400 MeV/u, respectively, having >25 cm residual range (water equivalent length) in a patient body. This apparatus is based on the compact carbon-therapy system designed by NIRS (National Institute of Radiological Sciences) for wide-spread use. The size of the facility is ~60 m × 50 m and about 1/3 of HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba). The construction will be completed in FY2008 and beam tests are scheduled in 2009.

群馬大学重粒子線照射施設計画の現状

1. はじめに

がんは1981年より我が国における死因の第1位を占め、その対応は国民の健康を守るための最優先課題となっている。放医研では、1984年より始まった「対がん10カ年総合戦略」の一環として、重粒子線がん治療装置(HIMAC)が計画・建設された。1994年より炭素線による臨床治療が開始され、2006年度末までに3000人以上の患者が治療された。現在先進医療として政府に認可され、一部有料にて治療が行われている。また、兵庫県立粒子線医療センターでは、2002年より炭素線治療が開始され、2005年に先進医療に認可されている。重粒子線はブラッグピークの形成や、比較的小さい多重散乱のため体内標的に対して線量集中性が高く、また高LETのため生物効果が大きく、放射線抵抗性のがんに対しても高い効果を発揮するといった特長を持つ。炭素線がん治療の有効性が認められたことにより、今後この治療法の全国展開が期待されるが、そのためには装置の小型化・コストダウンが不可欠である。この問題を解決すべく、近年、普及小型炭素線治療装置の研究開発が放医研によって進められ、2004年からは小型入射器などの要素技術開発が実施された^[1]。

群馬大学では、これまでの放射線治療や核医学分野における実績、HIMAC設置当初からの放射線生物学や放射線がん治療の臨床研究での放医研との共同研究、原研高崎との大学院講座及びCOEプログラムによる連携などの経験を踏まえ、2001年より重粒子線治療装置を学内に設置するための計画が進めら

れてきた。その結果、2006年度より群馬県との共同事業として、重粒子線照射施設の整備が認められ、施設建設が開始された。2009年度に臨床試験の開始を予定している。この治療装置は、放医研が主体となって研究開発を進めてきた普及小型重粒子線照射装置の技術実証機第1号と位置づけられる。設置後は医学部附属病院の一部として機能し、県内医療機関と連携して群馬医療圏に統合的がん医療体制を構築し、重粒子線照射施設を全国の諸地域に配置する場合の施設活用のモデルとなることを目指している。現在建屋が建設中であり、放医研の協力のもと装置の詳細検討が進んでいる。ここでは、施設の概要および現状を紹介する。

2. 装置の概要

2.1 装置の基本仕様

装置の基本的な仕様を表1に示す。イオン種は炭素であり、体内飛程25 cm以上を確保するために、エネルギーは最大400 MeV/uとなっている。拡大ブラッグピーク(SOBP)とは、ビーム進行方向に拡大された、最大線量となる領域であり、腫瘍の大きさに合わせて2 - 14 cmに調節可能としている。ラテラル方向の照射野サイズは最大15 cm□(22 cm φ)である。線量率は、15 cm φ, 10 cm SOBPのビーム条件で、アイソセンターにて5 GyE/min以上となっており、これを実現するために治療室直前で要求されるビーム

¹ E-mail: tashiro@gunma-u.ac.jp

Table 1: Basic specifications of the heavy-ion irradiation system.

Ion species	Carbon
Energy	140 - 400 MeV/u
Max. residual range	25 cm
SOBP	2 - 14 cm
Max. lateral field size	15 cm square (22 cm ϕ)
Max. dose rate	5 GyE/min (@ 15 cm ϕ , 10 cm SOBP)
Beam intensity	1.2×10^9 pps (@ beam irradiation system)
Irradiation method	Normal & spiral wobbling, Respiratory gating, Layer stacking
Time for energy & course switching	1 min
No. of treatment rooms	3 (horizontal, horizontal + vertical, & vertical ports)
No. of R&D rooms	1 (vertical port)
No. of treatments	> 600 patients/year

強度はおよそ 1.2×10^9 pps となっている。これら治療装置としての基本的要求は放医研での臨床治療経験から導出されたものであり、現HIMACの治療装置とほぼ同等の性能となっている。また、治療人数は年間600人以上を想定していることから、治療室は3室（水平ポート1室、水平・垂直ポート1室、垂直ポート1室）で構成される。この他、垂直ポート用1室（治療室4）が設けられており、将来微小標的に対する照射装置の研究開発や照射実験に使用される予定である。

以上の基本仕様を満たし、かつ普及機としてコスト・サイズを縮小した本学装置の概要を以下に述べる。

2.2 加速器及びビーム輸送系

加速器はイオン源、線型加速器、シンクロトロンから構成される。

イオン源は全永久磁石型ECRイオン源で、約10 GHzのマイクロ波により炭素4価を生成し、30 kVで引き出す（エネルギー：10 keV/u）。ビーム強度スケジュールより見積もられた必要強度は260 μ Aであるが、放医研での実証試験において400 μ Aが実現している。

線型加速器はRFQ及びAPF方式IH型DTLから構成される。RFQにて4価の炭素イオンは600 keV/uに、その後IH-DTLにて4 MeV/uまで加速される。運転周波数はともに200 MHzである。加速器の長さはそれぞれおよそ2.5 m及び3.5 mである。特に、後段のAPF方式IH型DTLは高周波電場のみでビームの加速と収束を同時に行うAPF方式と、高シャント抵抗が得られるIH型共振器を組み合わせた小型で高効率な線型加速器である^[2]。これにより2台の線型加速器の全長は6 mとなり、HIMAC既存の入射器の約1/7と大幅な小型化が実現している。必要ビーム強度は、その後の荷電変換装置通過後の炭素6価で200 μ Aであるが、放医研での実証試験において、線型加速器下流での炭素4価で390 μ Aを達成しており、十分な強度が得られている。

シンクロトロンでは4 MeV/uで入射した炭素イオン6価が140 - 400 MeV/uまで加速される。ラティス構造はFODO、セル数は6、周長は63 mで、直径では20 m程度である。繰り返し周波数は1/2 Hz（典型値）、加速粒子数は 2×10^9 pps程度である。呼吸同

期照射や積層照射のために、ビームは遅い取り出し法で、ビームon/offの速い応答に対応している。治療に使われずシンクロトロン内に残された炭素イオンは、入射エネルギーレベルまで減速されることにより、無駄な中性子発生を抑えて放射線遮蔽上有利となるように設計されている。

ビームコースやエネルギー切り替え時間を早く（1分程度）して治療の効率や自由度を向上させるため、高エネルギービーム輸送系の全ての電磁石は0.5 mmケイ素鋼板の積層構造となっている。

2.3 照射野形成装置

輸送されたペンシルビームは、患者毎に異なるある大きさ・形状をもった腫瘍に様に線量が投与されるよう、空間的に拡大される。照射装置の主な構成機器は、ビーム偏向用のワブラー電磁石、ビーム径を広げるための散乱体、SOBP形成のためのリッジフィルタ、ビーム飛程調整用のレンジシフタ、照射野形状を腫瘍形状に合わせて整形するための多様コリメータ、投与線量を管理するための線量モニタ等である。

横方向の照射野形成は、単円あるいは螺旋ワブラー法による。これは、ワブラー電磁石にてビームを2次元的に円または螺旋状に走査し、かつ、適当な厚さ（可変）の散乱体にてビーム径を広げることにより、アイソセンタ位置で必要領域について均一線量を得る方法である。今回新たに導入される螺旋ワブラー法は、単円ワブラー法に比べて、照射野内をより細かく走査するようにビームが動くため必要ビーム径が小さく、すなわち散乱体を薄くでき、その結果、ビーム利用効率の向上と患者飛程の向上が実現する。ただしその効率は照射野サイズなどのビーム条件で変わるため、患者毎の照射条件により両者を使い分ける。

標的への縦方向の均一線量投与のために、SOBPを用いる。SOBPは、リッジフィルタと呼ばれる、標的深さの必要幅にて臨床線量が均一となるように設計されたギザギザ形状のアルミニウム板を用いて、ビームにエネルギー分布を持たせることにより形成される。リッジフィルタは、患者毎に必要な厚さのSOBPに対応するものに切り替えられる。

呼吸性移動を伴う臓器への照射時にも線量集中性を確保するため、他の粒子線治療施設と同様に呼吸

同期照射に対応する。呼吸波形をモニタしてその波形レベルにより加速器からの取り出しを制御する事により、決まった呼吸位相(呼気時のみ)に照射できるようになっている。

ところで、SOBPは腫瘍の最も厚い部分で決まるため、これが厚い場合、照射野の辺縁部では正常組織への線量が増大し、例えばそれが体表面に達すると皮膚に障害が起こるなど問題となる可能性がある。これを回避するために、積層照射法に対応する。この照射法では、ミニSOBPビームにより標的内をスライス状に分割照射する。スライス毎に多様コリメータにて照射野形状を調節することにより、表面線量を抑えて線量集中性を高めることができる。

その他、治療照射に必要なものとして、治療台や位置決め機器など治療室周辺の機器、治療計画装置、CTシミュレータ、制御機器などがある。照射装置一式について2007年1月にメーカーと契約し、現在、上述の加速器を含めた照射装置全般について、放医研の協力のもと装置メーカーと詳細な検討を進めており、一部製作に入りつつある段階である。

3. 建屋の概要

建屋は2006年4月より基本設計、同年7月より実施設計が開始され、2007年2月に建設会社が決定し建設工事が開始された。地下1階、地上2階建ての鉄筋コンクリート一部鉄骨造で、建築面積が3140 m²、延床面積が6280 m²である。建屋のサイズは平面がおおよそ60 m×50 m、高さは最大20 m(垂直ポート用ビーム輸送ライン部)であり、施設面積はHIMACの1/3程度である。建物を地下4 m程にある砂礫層(支持層)に直接置くことにより、置換コンクリートが不要となっている。そのため床面レベルが地上より2 m下がる(そこが地下1階となる)が、建屋の高さが低くなることから周辺住宅への圧迫感の低減に寄与している。また、工事で発生する土砂を放射線遮蔽壁周辺に盛土することにより、壁厚の低減に貢献している。

加速器および治療室のある地下1階平面図を図1に示す。施設内の主要な部屋としては、加速器室、治療室1~4、治療ホール、計算機室、待合室、CTシミュレータ室、治療計画室、医用画像処理室、診察室、処置室、PET/CT室、MRI室、スタッフ室、カ

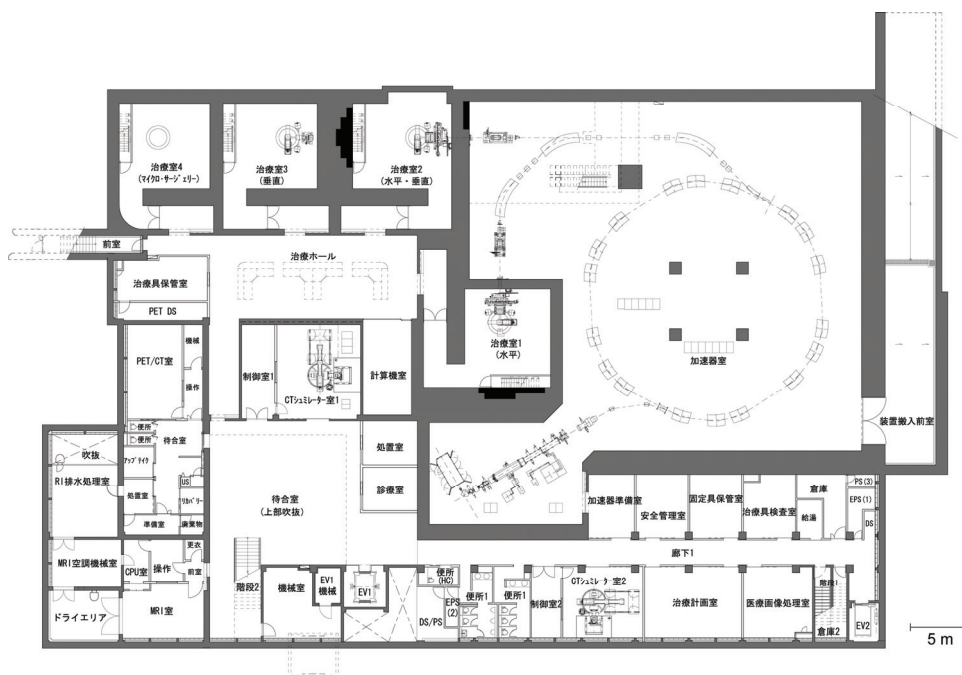


図1: 建設中の群馬大学重粒子線照射施設 地下1階平面図

ンフレンズ室、建屋及び装置の機械室/電源室などがある。

放射線管理区域は、人の動線及び管理の都合から3つに区分される。加速器エリア、治療室エリア、PET/CTエリアであり直接相互に行き来はできない。加速器エリアには通常使用される廊下からの出入口と、機器搬入口がある。治療室エリアには通常待合室から出入りするが、治療室4付近にも出入口があり、他の治療室と独立して作業が行えるようになっている。

現在、建屋は建設工事中であるが、装置側からの変更要求などに密に対応するため、建設会社・装置メーカー・大学との間で詳細な検討を行いながら、工事に反映させていく体制となっている。

4. まとめ

以上、群馬大学重粒子線照射施設計画の概要と現状を紹介した。建屋工事は2008年度中頃に完成予定である。一方、装置は現在詳細設計・製作の段階である。2008年中頃より搬入・据付を開始し、その後の組み合わせ試験、ビーム試験を経て、2009年度中の治療開始を目標としている。施設概要については本センターのホームページも参照されたい²。

参考文献

- [1] K. Noda, et al., "New Accelerator Facility for Carbon-Ion Cancer-Therapy", J. Radiat. Res., 48, A43-54, 2007.
- [2] Y. Iwata, et al., "Development of Alternating-Phase-Focused IH-DTL", to be published in this proceedings.

² <http://heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp/>