

話 題

重粒子線治療プロジェクト SAGA-HIMAT

金澤 光隆*・遠藤 真広*・佐藤 弘史*・光武 亨剛*

SAGA-HIMAT project for carbon ion radiotherapy

Mitsutaka KANAZAWA *, Masahiro ENDO *, Hiroshi SATO * and Toshimasa MITSUTAKE *

Abstract

The SAGA Heavy Ion Medical Accelerator project in Tosu (SAGA-HIMAT) is promoted by Saga prefecture with private financial supports, investments, and also personal donations. With this funding, facility construction is conducted by a collaboration of a SAGA-HIMAT foundation and a SAGA-HIMAT company. The facility is under construction in Tosu-shi near Shinn-Tosu Shinkansen station, which has easy access from the Kyushu island area and also south west Japan. In the facility, there are three treatment rooms, where the first one has been equipped with horizontal and 45 degree oblique beam lines, the second one has horizontal and vertical beam lines, and the third one is for future preparation of a spot scanning irradiation system. The design of the accelerator itself is almost the same as a therapy facility at Gunma University, i.e., accelerated ion is carbon, maximum beam energy is 400 MeV/u, and maximum beam intensity is 1.3×10^9 pps. The injection line to the synchrotron and transport lines to the three treatment rooms have been rearranged. Design of the accelerator and an irradiation system started at the beginning of 2010, and the construction of the facility building has started at the beginning of 2011. Installations of accelerator devices have started at beginning of 2012, and the facility is planned to complete in 2013. In this paper, we present our project and current status of the facility construction.

1. はじめに

現在、佐賀県の鳥栖市において重粒子線治療施設 (SAGA-HIMAT) を建設中である。この治療施設は日本で四番目の重粒子線治療施設で、放射線医学総合研究所 (放医研) が開発をした普及型と言われるコンパクトな施設としては、群馬大学のものに続いて二番目になる。又、民間ベースで運営される重粒子線治療施設としては最初のケースで、2013 年春の完成を目指して建設中である。今回、この学会誌を借りて、本計画についてこれまでの経緯を含めて紹介する。

2. これまでの経緯

炭素イオンビームを使ったがん治療は、1994 年に放医研の HIMAC で始められ、最近では年間の治療患者数は約 700 名にのぼっている。しかも、この治療患者数は HIMAC を夜間及び週末は一般的な実験に利用し、夏と春にメンテナンス期間をそれぞれ約一か月ずつ取ったうえでの実績である。又、延べ治療患者数は 6000 名以上にのぼり、治療部位も胃、腸などの部位の

一部のがん以外の多くについて治療が行われている。2003 年からは治療費を患者から受け取って行う高度先進医療としての治療が始まり、現在では治療全体の 2/3 にのぼっている。又、最近では非常に治療が難しい膵臓癌に関しても、高度先進医療としての治療が開始されている。これらの実績をうけて、多くの人が重粒子線がん治療を利用できるように、小型で、かつ低価格の小型治療施設に対する強い要請を受け、放医研では 2004 年度から 2 年かけて、普及型治療施設のための開発を行った。その成果に基づき、実証装置として 2006 年度より群馬大学に治療施設を作る計画がスタートし、2010 年 3 月より実際の治療が行われている。

この群馬大学での計画に続いて、佐賀県でも粒子線がん治療施設を作る計画が持ち上がった。そのきっかけは、古川佐賀県知事の「がん治療の先端的施設の誘致に挑戦します」というマニフェストである。このマニフェストを掲げて、当選してすぐに「九州地区医学部長・病院長会議」、これに引き続いて九州各大学の学長 (又は医学部長又は病院長) をメンバーとして、「粒子線がん治療に関する大学長・医学部長・病院長会議」

* 九州国際重粒子線がん治療センター SAGA-HIMAT Foundation
(E-mail: kanazawa-mitsu@saga-himat.jp)



図1 九州新幹線のルートと高速道路図. 佐賀県鳥栖市新鳥栖駅前に建設中の重粒子線治療施設の位置を矢印で示している.

がもたれた。さらに放射線治療医及び粒子線治療の専門医も交えた「粒子線がん治療検討専門家会議」が計4回開催され、この会議の提言が2008年の春にまとめられた。この時点ではまだ重粒子線に絞られてはいなかったが、九州の経済界、医療界の関係者との意見交換を持つ中で、構想が徐々に具体的なものへと練られていった。その結果として、重粒子線がん治療施設を佐賀県の鳥栖市に建設する事が佐賀県の構想として発表された。これが、重粒子線がん治療施設 SAGA-HIMAT の計画がスタートした経緯である。その後、経済界、医療界、大学、行政からのメンバーからなる事業推進委員会を4回開催して、事業計画 ver.2.0¹⁾ が2010年1月に作られた。この計画では、総事業費を150億円とし、佐賀県からの補助金を20億、それ以外を主に民間からの出資金及び寄付金でまかなう事や、鳥栖市からの土地の提供を受けて建設場所を新幹線の新鳥栖駅の前にする事が決められた。

3. 計画の概要

このプロジェクトがこれまでと最も異なる特徴的なところは、佐賀県がこのプロジェクトに対してイニシアチブを持ちながらも、民間からの出資及び寄付、さらには個人の寄付も広く募って建設費を確保したところにある。この出資・寄付を募る範囲も佐賀県に限らず、九州全体で行っている。この意味で九州全体の計画という性格を持っている。このことは図1に示すように



図2 新幹線の新鳥栖駅（右端）に対する建設中の重粒子線治療施設の位置（矢印が建設中の施設）.

建設場所の鳥栖市が南北と東西に延びている高速道路、及び鉄道の交わる所であり、九州各地からアクセスするのに良好な所で、しかも新しく建設された九州新幹線・新鳥栖駅の真ん前（駅から歩いて2分、図2）に位置するという所にも表れている。現在、建物の建設が2012年の10月の完成を目指して急ピッチで進められている。ビーム運転ができ、治療照射可能になるのは2013年を予定しており、これに向けて加速器、照射機器の設計・製作及び治療システムに関連するソフトウェアを含んだ詳細な詰めを終え、現在、機器の搬入据え付けを行っている。

本計画では、事業費として150億円を見込んでおり、

これをどのように調達するかはこの計画の最も重要な点の一つである。これをできるだけ容易にするために、多様な形の資金を受け入れられるようにする事が必要とされる。まず、医療行為を行う組織は財団法人である必要があり、このために公益財団法人・佐賀国際重粒子線がん治療財団が設立された。この財団が、佐賀県からの補助金を受け、個人も含む民間からの寄付を受け付けている。さらに財団は企業からの出資金を受けることができないので、これを受けるために、九州重粒子線施設管理会社を設立している。(施設の建物はこの管理会社を中心になって建設を行っている。)これらの多様な形の資金を利用して、重粒子線の治療施設を建設する。

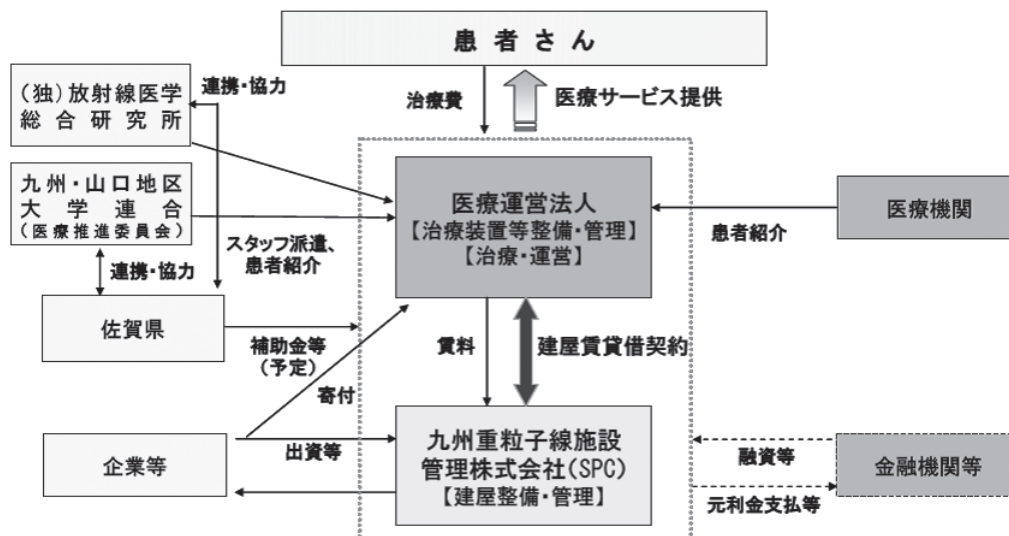
そして、患者さんからの治療費によって、この施設で働くすべての人(事務員、医師、看護師、技師、医学物理士、運転員等)の人件費及び資金の返済も含めて賄い、民間ベースで運営していく必要があり、重粒子線治療専用施設では初めての試みになる。そのために重要な事は、スムーズな治療システムの立ち上げ、その後予定通り治療患者数を増加させて治療出来る様にする事である。このためには放医研との協力関係が重要であるとともに、群馬大学の重粒子線治療施設での経験もできるだけフィードバックして、この施設での治療の立ち上げをスムーズにする必要がある。以上の理由から、この2カ所と協力協定を結んでいる。もちろん順調な施設の運営には、近くの医療機関との連携は非常に重要であり、今後具体的にしていく予定である。これらの関係の全体を示したのが図3である。

4. 治療施設

年間の治療患者数をどれだけ速やかに立ち上げられるかは、年間の運営コストがどの程度低く抑える事が出来るかと言う事と共にこの事業が旨くいく為の重要な点である。現在の計画では初年度は200人、2年目は400人、3年目が650人で、4年目には目標である年間800名の患者の治療を行う計画である。今回の施設自体には患者入院のための病院機能はない。したがって、近隣の病院の協力を受けて運営する必要がある。重粒子線治療自体はすべて通院で行われる。もちろん、ここでの治療に密接に関係する、X-CT, MRI, PETを使った検査はこの施設内で行えるように計画している。

4.1 基本性能

HIMATの基本仕様を表1に示すが、加速器自体は基本的に群馬大学のものと同様である。治療室は水平と45°の照射コースを持つ治療室Aと、水平と垂直照射コースを持つ治療室Bの2室あり、最初はこの2室で治療をスタートさせる予定である。群馬の施設との大きな違いは、この45度ビームラインを利用する治療室を設けている事である。これにより、照射方向の自由度を増す事が出来る。又、最初の段階では治療装置が整備されない、水平と垂直照射コースを持つ治療室Cがあり、将来に整備する予定である。ただし、この治療室へのビーム輸送ラインでは、後で設置が困難な偏向磁石は初めから設置しておき、それ以外はC治療室整備の時に設置する予定である。この治療室Cではスポットスキニング照射の実現を考えている^{2,3)}。



※ 佐賀県の補助金については、県議会による議決が必要である。

図3 今回の事業計画に関連する組織間の関係の説明図。

表1 基本仕様

ビーム	炭素 (^{12}C)
イオン源	永久磁石 ECR, 10 GHz $^{12}\text{C}^{4+}$, 10keV/u
入射リニアック	rf : 200 MHz (RFQ,IH) RFQ, 2.5 m, 0.61 MeV/u IH-APF, 3.5 m, 4 MeV/u ビーム強度 : 200 e μ A (C^{6+}) 以上
シンクロトロン	周長 : 61.5 m 最大運転周期 : 6 秒 出射エネルギー : 140~ 400 MeV/u 最大ビーム強度 : 1.3×10^9 pps
ビーム輸送系	コース・エネルギー切り替え時間 : 1 分程度以内
照射系	照射法 : 螺旋ワブラー法, 積層照射が可能. 最大照射野 : $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 照射線量率 : 5 GyE/min 以上
治療室	治療室 A (H/45°) 治療室 B (H/V) 治療室 C (H/V) : (将来増設, スポットスキニング照射法)

治療装置で重要な事は、加速器が故障せず安定に動いて、多くの患者治療が行える事である。又、出来るだけ少人数で加速器の運転が出来る事も運営コストを下げるために重要である。(基本的に加速器を立ち上げた後は、運転員は運転を終わって加速器を立ち上げる時まで加速器にさわらない。治療照射にあたって、ビームコース、エネルギーを変更するときは照射系制御卓のボタン選択で、治療照射に携わる技師が行う) そのために、群馬大学での経験に基づいて、現時点で改善出来る所は出来るだけ行うようにした。加速器のハードウェアに関する改善点について列挙すると、

- ・入射器 (イオン源, 線形加速器)

群馬大学での運転の経験からわかった、IH の最終段の真空管で、コントロールグリッド電極の静電容量の変更に対応した、ドライバー回路のインピーダンス整合がとれるようにする改良。

- ・シンクロトロン

フラットトップでの磁場の変動を抑えるため、シンクロトロンの偏向電磁石に補正コイルを巻いた。又、加速周波数の掃引は磁場の増減を検出する信号(B-クロッ

ク) を使わず、150 kHz のクロック信号を利用して行う。

- ・高エネルギー輸送ライン

垂直のビーム輸送ラインで、最後の偏向電磁石下流に3連Qを配置し、ビーム収束の調整をやすくしている(群馬大学の場合、ここにQ電磁石を配置せず、垂直ラインの高さを低く設計しているが、将来設置を予定している、スポットスキニング照射法の為に、ビーム収束の調整のしやすさを重視した)。取り出しビームがスピルの前後で動くのを止めるために、パターン運転出来るステアリングマグネットを設置した。又、輸送ラインの効率を正確に測定するために、輸送ライン終端に配置されている物と同じ型の2次電子モニターを、シンクロトロンからビームが取り出されたすぐの所に設置して、輸送効率を正確に測定できるようにしている。

4.2 施設レイアウト

施設のレイアウトでは、上記の3治療室をできるだけコンパクトな床面積で実現するように、入射器、シンクロトロン、高エネルギービーム輸送ラインを配置する必要がある。その際、ビーム輸送ライン用偏向電磁石の設置台数を少なくなることも重要である。又、治療室へのアクセスのしやすさも重要で、治療室の入り口はできるだけまとまっている必要がある。この様な要請を考慮して、図4に示すような配置を採用した。さらに、患者が利用する入り口は新鳥栖駅寄りにし、その入り口付近に受付、患者待合室、診察室、診断室を配置した。又、近くに民家があり、この方向には居室などを配置して、建物の高さを低くする配慮をした(図4の下の部分)。図5にはこの施設の模型の写真を示すが、垂直ビームラインのある所の建物の高さは約26 mになっており、こちら側は東側で民家の無い道路に面している。

4.3 照射機器配置

治療室B(図6)は水平及び垂直照射コースを備えており、螺旋ワブラー法を使った照射ができるように設計されている。最上流のワブラー電磁石の中心からビームオプティクス収束点であり患者ベットの回転中心でもあるアイソセンター(ここに腫瘍が来るようにする)までの距離は7.4 mで、水平と垂直照射コースで共通である。また、照射ビームの特性が共通になるよう、その他の照射機器の配置も水平と垂直で共通の設計となっている。最大線量率は5 GyE/min以上で、最大照射野は $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ となっている。

又、治療室Aは水平と45度ラインの照射コースを備えているが、この二つの照射コースでも照射機器の配置が治療室Bの照射コースと共通にしている。これ

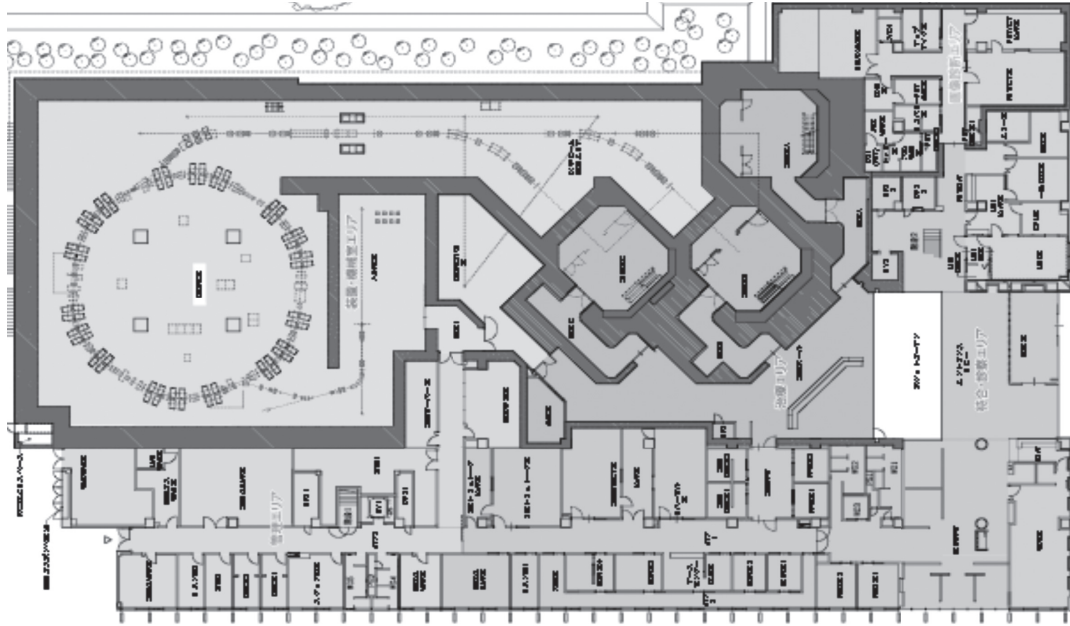


図4 施設全体の平面図（1階）．施設内の右上の部分にはPET/CT，MRI，X線写真撮影装置などの診断機器が配置される．新鳥栖駅はこの平面図の右上の方向にあり，そちらに近い右側中央を患者入り口としている．この入り口から内に入り左側に進むと，順に患者受付，待合室，相談室，診察室，固定具制作室が外に面した側に配置され，初めての患者にとってもわかりやすい様になっている．又，左側の入り口は職員用で患者用とは分けている．

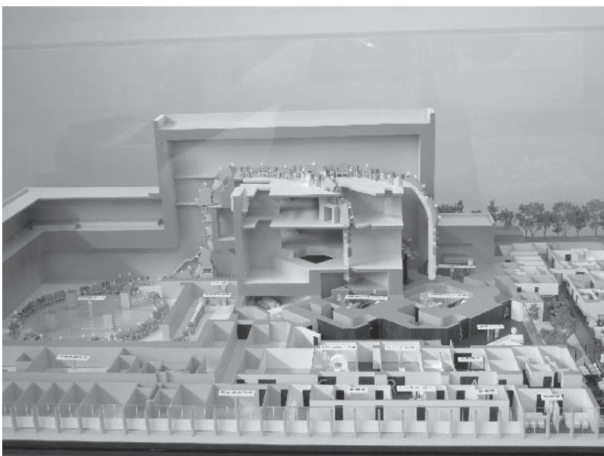


図5 SAGA-HIMAT 重粒子線がん治療施設の模型．

により，もし治療室Aの水平照射コースの照射機器が故障して利用できなくなった場合でも，治療室Bの水平照射コースが同じビーム条件で利用できるようになっている．この治療室Aでは，水平と45度ラインの照射コースの両方を備えていて，大きなマルチリーフコリメータをそれぞれ備えるのは不可能である．このため，図7に示すように，一つのマルチリーフコリメータを移動し，水平と45度の両照射コースで利用できるようにしている．このような45度照射コースの利用により，患者への照射角度の自由度が増し，患者が

同じ体位であっても，3又は4方向からの照射が可能になり，皮膚線量や腫瘍の傍にある重要臓器に入る線量の低減がしやすくなると考えられる．これは回転ガントリーを採用しない場合の選択肢として重要であると考えている．又，治療室はデザインにも気をつけて，出来るだけ患者さんに和らいだ気持ちになってもらうように配慮してデザインしている（図8）．

4.4 医療情報システム

ここまでの説明は主に加速器を中心にしたハードウェアに関する話題であったが，このハードウェアを使って効率良く治療を行うためには，情報システムにより，照射装置，治療計画装置，画像診断装置などが有機的に結ばれている必要がある．そのために治療RIS（Radiology Information System），PACS（Picture Archiving and Communication System），HIS（Hospital Information System）を整備して，今回の治療施設をスムーズに運営出来る様にする必要がある．ここでHISは電子カルテの機能を持つとともに医事会計事務手続きを行う機能を持ち，最近の病院では一般的に利用されるようになってきたソフトウェアシステムである．又，PACSは医師がX-CT，MRI，PET/CT等の画像に基づいて診断をする為に利用される．さらに，治療RISは放射線治療を効率的に行うために必須かつ中心的な役割を担うソフトウェアシステムで，照射及びそ

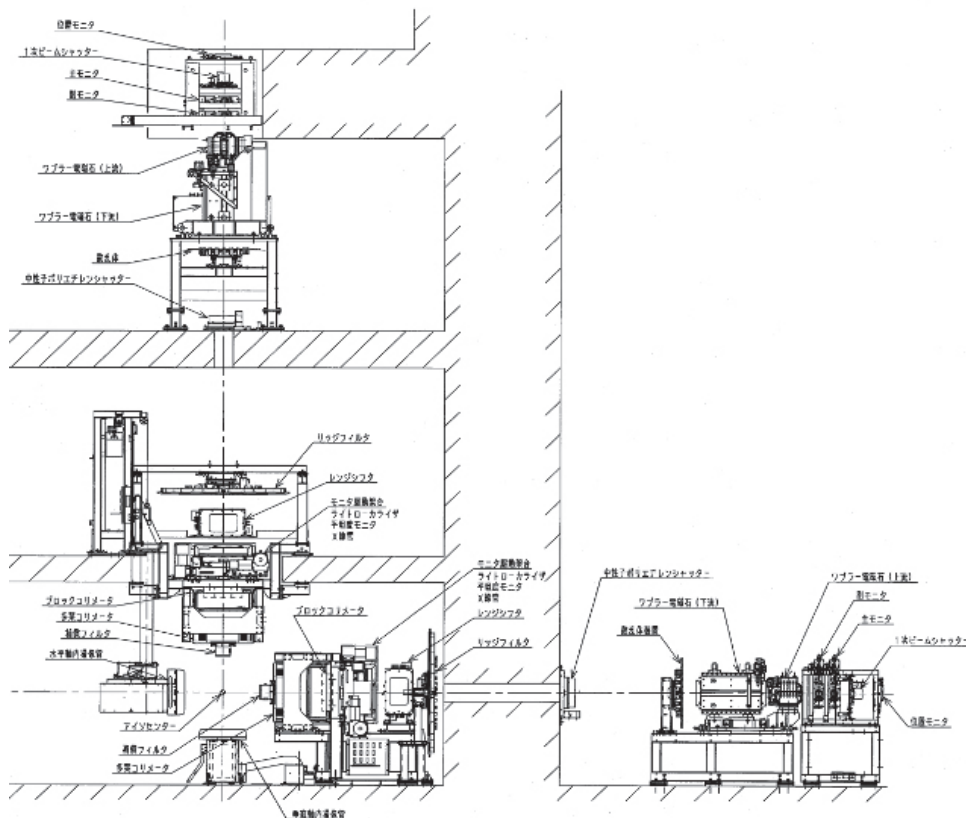


図6 B治療室水平・垂直コースの照射機器配置図.

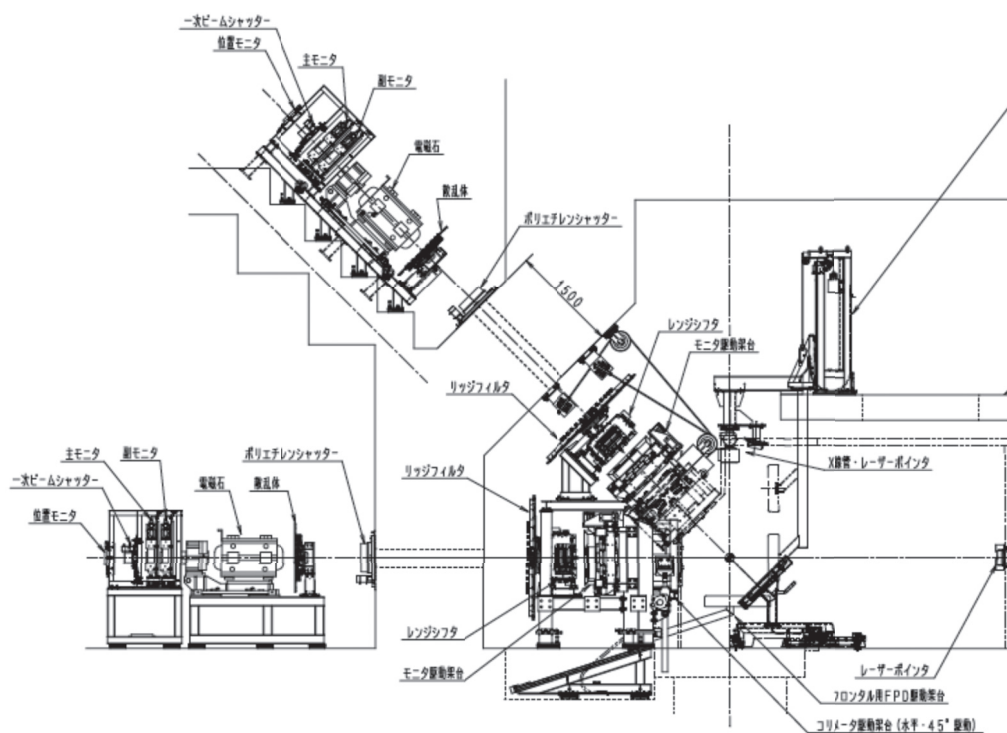


図7 A治療室の治療台を中心にした(45°・水平)コースの照射機器配置図.



図8 A治療室の完成予想図.



図10 2012年2月中旬の建築現場の状態で、最後のコンクリート打ちの時。建設現場の右上の線路が新幹線の新鳥栖駅から伸びている線路。



図9 地盤改良法の写真。深層混合処理工法による地盤改良を行ったところが円形状に白っぽくなっている。2011年4月初めの建設現場風景。右奥が新鳥栖駅。



図11 新鳥栖駅から見た施設の完成予想図。

他の準備作業に関するスケジューリングの機能、治療データ管理、照合機能を持つシステムである。これらの複数のシステムが旨く連携して動くようにして初めて、安全で効率の良い照射施設の運営をする事が出来るようになる。現在、この医療情報システムに関する構想が最終的に固まった段階で、これから SAGA-HIMAT での治療運用フローに基づいてその詳細に関して具体化する作業に入ろうとしている。

5. 建設の現状及び今後のスケジュール

建物の建設は2011年1月27日の起工式でスタートした。これに先だって、鳥栖の建設現場での地盤調査を行った。この結果、地下5～8 m 付近に N 値（地盤の強度を現す値、標準貫入試験値）が 30 程度の地層があり、ここを支持層とする深層混合処理工法による地



図12 民家のある西側から見た施設の完成予想図。

盤改良を行って、建物の基礎としている（図9）。これ以外の工法としては杭基礎も考えられるが、この場合は深さ 12～19 m の N 値が 50 程度の地層を支持層にする必要があり、両者のコストと工期を考慮して今回の工法を採用した。建設の現状は図10のようになっていて、コンクリート打ちは完了している。図11は新鳥栖駅から SAGA-HIMAT の治療施設を見た場合の完成予想図で、図12は民家のある西側から見た施設の完成予



図 13 イオン源の工場でのビーム試験.

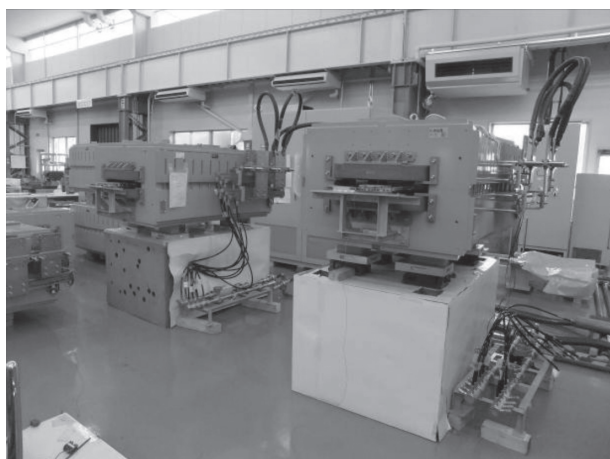


図 14 シンクロトロン線の偏向電磁石の磁場測定の様子.

想図である.

装置に関しては殆どの機器は製作が完了しており、搬入前の機器単体の動作テスト等が行われている。図 13 は工場でのイオン源のテストをしている写真であるが、すでに要求される C^{4+} のビーム強度を確認できていて、3月上旬にはハイパワーテストが完了したリニアックと共に搬入する予定である。

又、マグネット類についても磁場測定が終わった物から順序に搬入を開始している。図 14 はシンクロトロン線の偏向電磁石の工場での磁場測定の様子である。

照射系の機器に関しても工場での動作試験を精力的に行っている。図 15 は A 室で 45 度ラインと水平で共用するマルチリーフコリメーターの駆動機構の動作試験を行っている際の写真である。3 月からは機器の搬入据え付けがほぼ毎日の様に予定されており、5 月いっぱい、すべての機器が搬入・設置される予定である。これに続いて、個々の動作試験を行い、全体の組み合

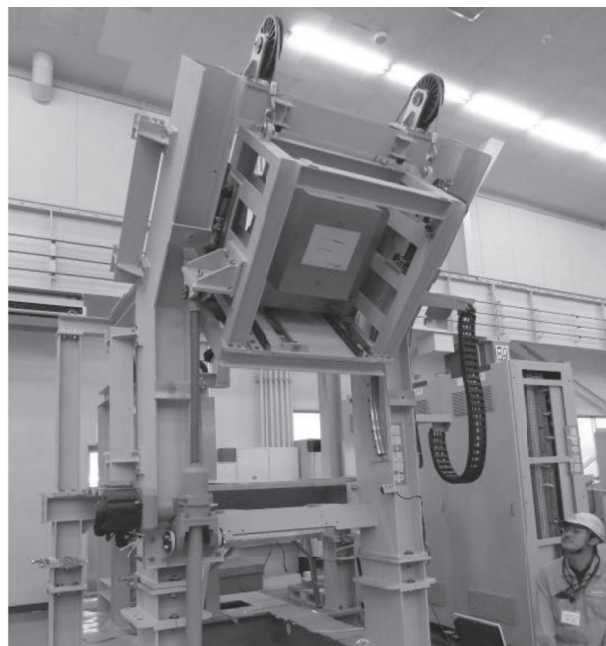


図 15 A 室共通マルチリーフコリメーターを乗せて、45 度ラインと水平ラインの位置間の切り替え駆動機構.

わせ試験を 2012 年 12 月頃に予定している。2013 年初めには加速器のビームテストを開始して、その同年には治療開始の予定である。

6. 謝 辞

加速器及び照射系の設計にあたっては放医研・物理工学部の方々に議論に加わっていただいた事を感謝いたします。本計画の施設の建設は九州重粒子線施設管理株式会社が担当しており、建設の資料等については甲斐慎一郎、嶋田昭彦の両氏及び大成建設の山田隆則氏にお世話になりました。三菱電機（株）には治療装置全体の設計製造を永澤勇一氏のマネジメントによって行ってもらっています。又、公益財団法人・佐賀国際重粒子がん治療財団の十時忠秀理事長初め北村信、工藤祥、岡村國助、堀田東洋、馬場慎一郎、落合康宣、松枝啓之の各位が著者と共にこのプロジェクトの推進をしています。又、佐賀県健康福祉本部・粒子線治療普及グループの各位の広報その他の熱心なサポートに感謝いたします。

参考文献

- 1) 九州国際重粒子線がん治療センター，事業計画 Ver.2.0, Jan, 29, 2010
- 2) M. Endo, et al., SAGA-HIMAT, May 2010, PTCOG49
- 3) M. Kanazawa, et al., SAGA-HIMAT project for carbon ion radiotherapy, Sep. 2011, JKMP-AOCMP2011