

# 重粒子線がん治療装置の実現に向けた最新技術

## Latest Technologies for Heavy-Ion Radiotherapy Systems for Cancer Treatment

小野 通隆      矢澤 孝      平田 寛

■ONO Michitaka      ■YAZAWA Takashi      ■HIRATA Yutaka

東芝は、ヘルスケア事業の柱の一つに“診断・治療”を位置づけており、この中で次世代重粒子線がん治療装置を開発している。これまでに独立行政法人放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療施設の整備に参画し、先進技術を開発してきた。この中の代表的な技術としては、高速3次元スキャン照射、患者自動位置決め、及び治療情報システムがあり、更に次世代重粒子線がん治療装置の実現に向けた最新技術として、超電導磁石を搭載した小型回転ガントリや呼吸同期照射などの開発も進めている。

これらの先進技術及び最新技術は、重粒子線がん治療が世界の標準的な治療となるために欠かせない技術であり、その一部は、現在建設中の地方独立行政法人 神奈川県立病院機構 神奈川県立がんセンターの重粒子線がん治療施設 i-ROCK に導入されている。

Toshiba has been focusing efforts on diagnosis and treatment as one of the pillars of its healthcare business. As part of these efforts, we are engaged in the development of heavy-ion radiotherapy systems for cancer treatment. We have been participating in the development of heavy-ion radiotherapy facilities for the National Institute of Radiological Sciences (NIRS) and have developed the following core technologies: (1) a high-speed three-dimensional (3D) scanning irradiation method, (2) a patient positioning system to perform highly precise irradiation, and (3) a treatment management system. We are also developing the following new technologies for the next-generation heavy-ion radiotherapy system: (1) a rotating gantry equipped with superconducting magnets, and (2) an X-ray imaging system for respiratory-gated irradiation.

These advanced technologies, which are crucial for the establishment of heavy-ion radiotherapy as a global standard for cancer treatment, have been adopted in the development of a heavy-ion radiotherapy facility called i-ROCK (Ion-beam Radiation Oncology Center in Kanagawa) at the Kanagawa Cancer Center.

### 1 まえがき

今日、がんは国民病となり、日本人の死亡原因の約1/3を占めるようになった。そこでわが国では、巨額を投じて「第3次対がん10か年総合戦略」を推進している。がんの撲滅は、その予防や、早期発見、早期治療などが有効と言われている。また、がんの治療法は、外科療法(手術)、化学療法(抗がん剤)、及び放射線療法に大別されるが、放射線療法は身体的負担の軽減や高い生活の質(QOL: Quality of Life)を実現する治療法であり、特に高齢化が進むわが国では、身体への負担が小さい重粒子線がん治療が注目され始めている。

重粒子線がん治療<sup>①</sup>は、光速に近い速さに加速された炭素イオンビームを照射してがん細胞にダメージを与える治療法で、細胞破壊力が強く、X線などでは治りにくいがんにも高い効果を発揮すると言われている。更に、重粒子線の持つ物理的な特徴により、がん細胞にピンポイントで照射できるので、正常細胞へのダメージを抑え、副作用などの身体への負担を少なくできる画期的な治療法と考えられている。また、X線や陽子線など他の放射線治療に比べて、照射回数が大幅に少なく治療期間が短いので、QOL維持の観点からも優れていると考え

られる。

重粒子線がん治療装置では、超電導や、核融合、加速器など、東芝のエネルギー事業分野の一つである原子力事業で培われた多くの先進技術が役だっている。

当社の超電導や加速器の技術は、2013年の“ヒッグス粒子”発見におおいに貢献した実績がある。そして、重粒子線がん治療装置は、エネルギー事業分野で開発された先進技術を医療分野に適用した新規事業創出の取組みの代表例である。

独立行政法人放射線医学総合研究所(以下、放医研と略記)では、重粒子線がん治療装置HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)を1994年に設置し、更に2010年には次世代の重粒子線がん治療の実現を目指して新治療研究棟<sup>②</sup>を設置している。

当社は、20年以上にわたって放医研のHIMACの整備に参画することで、重粒子線がん治療装置に必要な技術を深耕してきた。現在もこの施設の高度化が進められており、当社と放医研とは今も協力関係にある。

また、2011年度には、地方独立行政法人 神奈川県立病院機構 神奈川県立がんセンター(以下、神奈川県立がんセンターと略記)の重粒子線がん治療施設 i-ROCK (Ion-beam Radia-

tion Oncology Center in Kanagawa) 向けの装置を受注した。当社として重粒子線がん治療装置一式の建設に携わる最初の施設であり、2015年度の治療開始に向けて、現在整備が進行中である。

ここでは、これらの施設に導入されている当社の差別化技術や次世代重粒子線がん治療装置の実現に向けた最新技術などについて述べる。

## 2 重粒子線がん治療装置を支える差別化技術

重粒子線がん治療施設の概要を、i-ROCKの鳥瞰(ちょうかん)図である図1に基づいて述べる。

治療に用いられる重粒子は炭素イオンであり、イオン源で生成される。その後、炭素イオンは直線状の線形加速器で光速の約10%の速度まで加速され、主加速器であるリング状のシンクロトン加速器に入射する。そして、シンクロトン加速器の主リング内を0.7秒で約百万回周回する間に光速の約70%まで加速された後に、シンクロトン加速器から出射し、高エネルギービーム輸送系で各治療室に導かれる。図1の例では、治療室として4部屋が用意されており、それぞれの治療室には水平方向あるいは垂直方向の固定照射ポートが設置されている。治療照射では、照射ビームである炭素イオンのエネルギーを変えることで患者体内への飛程、すなわち照射ビームの到達距離を変えている。また、照射する粒子数を変えることで照射ビームの線量をコントロールしている。

このような、重粒子線がん治療装置に導入されている当社の差別化技術を以下に述べる。

### 2.1 高速3次元スキャンニング照射

差別化技術の一つは、放医研と当社が開発した高速3次元スキャンニング照射方式である。照射ビームをがん病巣に照射

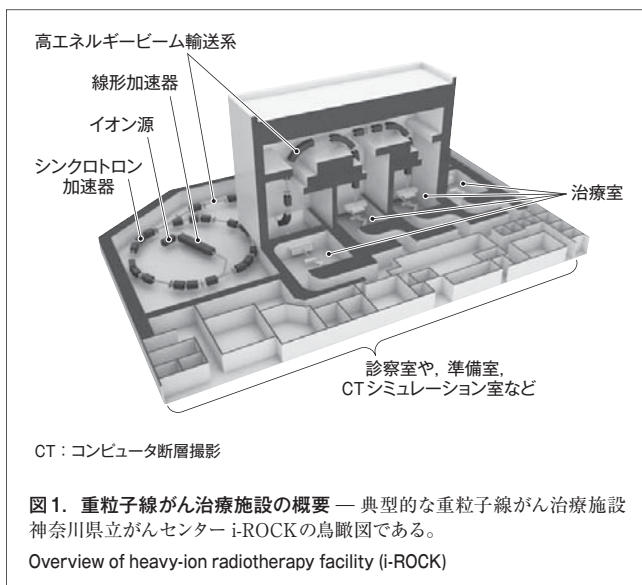


図1. 重粒子線がん治療施設の概要 — 典型的な重粒子線がん治療施設 神奈川県立がんセンター i-ROCKの鳥瞰図である。  
Overview of heavy-ion radiotherapy facility (i-ROCK)

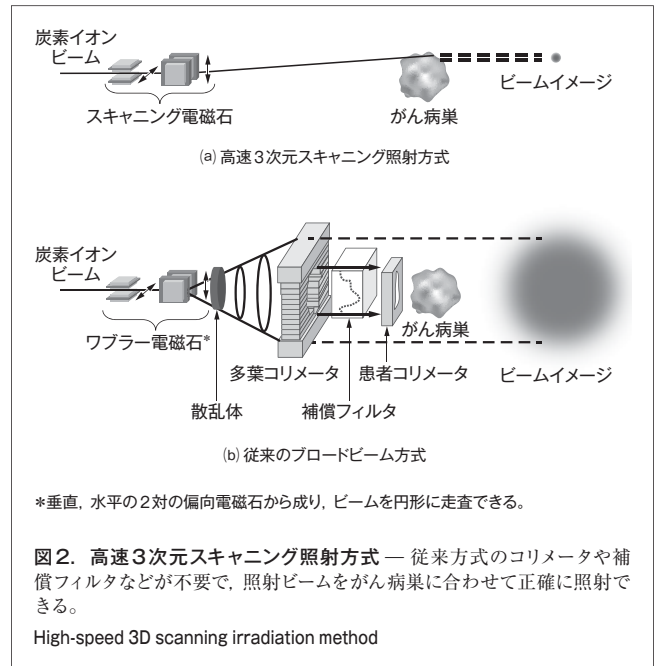


図2. 高速3次元スキャンニング照射方式 — 従来方式のコリメータや補償フィルタなどが不要で、照射ビームをがん病巣に合わせて正確に照射できる。  
High-speed 3D scanning irradiation method

する方式を図2に示す。図2(a)が高速3次元スキャンニング照射方式である。比較のために、図2(b)には従来のブロードビーム方式も示してある。

高速3次元スキャンニング照射方式は、治療室に導かれた細い照射ビームを高速に動かすことで、がん病巣の形に合わせて走査するように照射する方法である。これに対してブロードビーム方式は、いったん照射ビームを拡大した後に、多葉コリメータや補償フィルタを用いてがん病巣の形状に合わせる方法である。高速3次元スキャンニング照射方式の主な利点は、次のとおりである。

- (1) 高い利用効率 ブロードビーム方式のようにがん病巣の形状に合わせて照射ビームの一部をカットする必要がないため、むだなく照射ビームを利用できる。
- (2) 高い照射精度 照射ビームを上下左右に走査することで、複雑な形状のがん病巣に合わせて正確に照射できる。
- (3) 高い自由度 呼吸により移動する部位でも位置の変化を捉えて照射ビームの走査を制御することで、正確にがん病巣を照射できる。
- (4) シンプルな装置構成 ブロードビーム方式のようにコリメータや補償フィルタなどを用意する必要がないため、部品点数を少なくできる。

最新の装置では、照射ビームのエネルギーは、シンクロトン加速器で11段階に変化させて調整している。また、エネルギーの微調整はレンジシフタと呼ばれる板状のフィルタで行っている。将来的には、このエネルギー可変段数を200段階レベルまで増やすことで、レンジシフタを用いずに、より質の高い照射ビームを得る計画である。

## 2.2 患者位置決め

治療室では、がん病巣に対して正確にビーム照射するためには、治療照射の前に位置決めを精度よく行う必要がある。また、位置決めにかかる時間は、治療室の利用時間の多くを占めており、患者の負担低減や治療室の効率的な運用を図るためには、高精度な位置決めを短時間で実施することが重要である。当社の位置決めの特長は、ロボットアーム型治療台を用いた患者位置決めシステムを採用している点である。ロボットアーム型治療台は、7関節を持つ水平多関節型であり、可動域が大きい。このため、患者治療台の周囲に大きな自由空間を確保でき、位置決め用のX線透視装置の設置や医療スタッフの動線を確保できる。また、この位置決めシステムでは、あらかじめ撮影したCT（コンピュータ断層撮影）装置による参照画像と治療室のX線透視装置で撮影した画像との位置ずれ量に基づいて自動位置補正を行うことで、高精度で高速な位置決めを実現している。

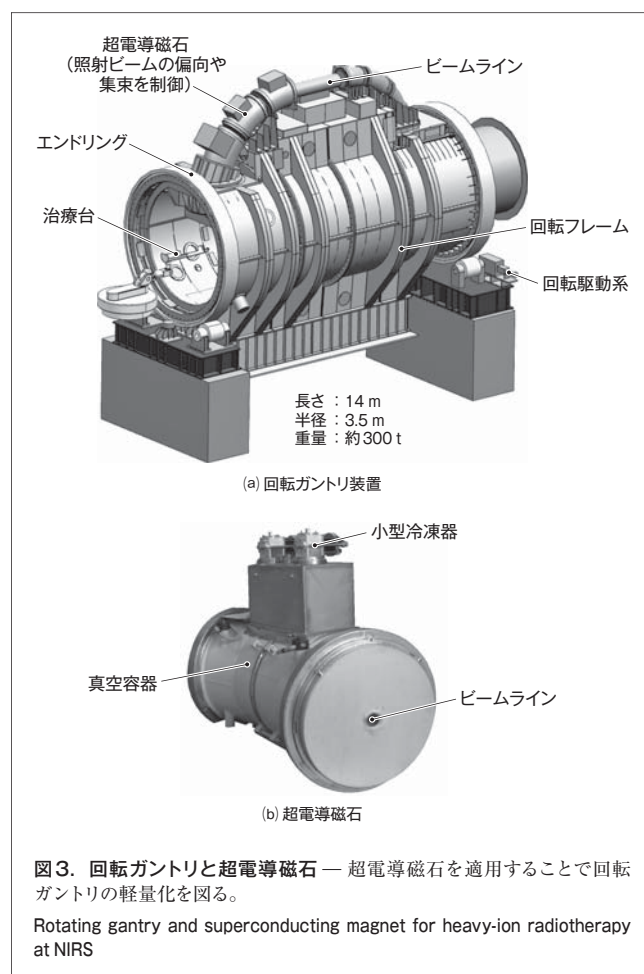
## 2.3 治療情報システム

重粒子線がん治療装置のソフトウェア面での特長は、治療に関わる多くのスタッフが業務を円滑に進められるように支援を行う治療情報システムである。治療情報システムは、患者の受付から治療照射までの一連の治療の流れの中で、スタッフ全員がリアルタイムに患者情報を共有することで、各スタッフの業務効率を向上させるものである。また、治療部位及び治療計画の異なる様々な患者に対して、最適なタイミングで、より多くの患者が治療を受けられるようにスケジューリングする機能も備えている。この治療情報システムは、今後の重粒子線がん治療を効率的かつ安全に進めるために不可欠なものになると考えられる。放医研では現在、5治療室で年間1,000人規模の患者を治療しており、TMS（Treatment Management System）という治療情報システムで管理している。このシステムは、近い将来には、6治療室に拡張される。

## 2.4 超電導磁石を搭載した回転ガントリ<sup>(3)</sup>

回転ガントリは、照射ポートを直近の高エネルギービーム輸送系も含めて回転することで、重粒子線を360度任意の方向から照射できる機器である。水平及び垂直だけの固定ポートからの照射に比べて治療範囲が大きく広がるため、治療対象部位の拡大が期待できるとともに、患者を傾ける必要がないので、患者の負担軽減にもつながる。特に治療では、強度変調粒子線照射と呼ばれる多方向でかつ1スライス面で強度を調整して照射する方式への拡張が可能になる。

陽子線がん治療施設では、回転ガントリの普及が進んでおり、重粒子線施設でも適用が期待されている。海外では、既に建設実績があるが、重量600tの巨大な機器であり、これが普及を阻害している。重粒子は陽子と比べて質量が大きく、粒子を照射ポートに導くビームラインの偏向電磁石の曲率が大きくなるため、結果として大型の構造物でビームラインを支持す



る大重量の装置となってしまう。

当社は、2013年に放医研 新治療研究棟の治療室G用に回転ガントリ室の建設を受注した。特長は、超電導磁石を適用することで回転ガントリの軽量化を実現できることである。回転ガントリの概略を図3(a)に、搭載する超電導磁石を図3(b)に示す。超電導磁石には、特殊形状を実現する巻線技術や液体ヘリウムなどの冷媒を用いずに冷却する、当社独自の技術が使われている。これにより回転ガントリの重量は、従来型の約1/2に低減できる。現在、2016年の治療開始を目指して、建設を進めている。

## 3 実施設への適用

### 3.1 放医研 新治療研究棟

放医研の重粒子線医学センター病院は、重粒子線がん治療で設備及び医療の両面で世界をリードしている。

その主要設備であるHIMACは、世界で初めての重粒子線がん治療を行うために作られた重粒子線がん治療装置（加速器施設）であり、前述したように1994年に運転を開始して以降、今日に至るまでに8,200件を超える重粒子線がん治療の



実績がある。

当社は、HIMACの建設に協力し、また2010年に竣工(しゅんこう)した新治療研究棟では、整備主体メーカーとして取り組んだ。放医研は、更なる治療技術の向上と広範な普及を目指すこともミッションとしており、新治療研究棟には、2章で述べた先進技術が導入されている。新治療研究棟の地下2階には、治療エリアが配置され、三つの治療室や、二つのCTシミュレーション室、固定具室などで構成されている。三つの治療室のうち、治療室E及び治療室Fと呼ばれる2室には、水平及び垂直の固定ポートが用意され、それぞれ2011年5月及び2012年9月から治療を開始した。いずれも高速3次元スキヤニング照射専用の治療室であり、前述の位置決めシステム、治療情報システムも導入されている(図4)。これらの治療室では、2013年度までに約430件の治療実績を積み、今後は前述の回転ガントリ室を備えた治療室Gが加わり、更なる伸展が期待される。

### 3.2 神奈川県立がんセンター<sup>(4)</sup>

神奈川県立がんセンターでは、国内で5番目の重粒子線がん治療施設となるi-ROCKの建設を進めている。当社は、2011年12月にi-ROCK向けの重粒子線がん治療装置一式を受注した。治療室は全部で4室あり、水平及び垂直の固定ポート室が2室、水平の固定ポート室が2室である。また、高速3次元スキヤニング照射方式及びブロードビーム照射方式の両方式に対応している。

重粒子線がん治療は、診断から始まり、治療計画作成、治療照射、予後観察までが一連のフローとなっている。当社は、これらをまとめて使いやすいシステムとするため、加速器や、照射系、治療室内機器、診断機器などのハードウェアを構築するとともに、治療情報システムや治療計画システムなどのソフトウェアとの連携を図っており、放医研で築き上げられた多く



図4. 放医研新治療研究棟の治療室 — 高速3次元スキヤニング照射専用の治療室で、ロボットアーム型治療台による位置決めシステムや治療情報システムも導入されている。

Treatment room in new treatment facility at NIRS



図5. i-ROCKの全景 — 神奈川県立がんセンターの敷地内に建設され、2015年度の治療開始を予定している。

i-ROCK facility at Kanagawa Cancer Center

の技術が深耕される施設となる。現在、建屋(図5)への機器の搬入、機器設置、調整が進められている。2015年度中に治療を開始する予定である。

## 4 次世代に向けた取組み

ここでは、次世代の重粒子線がん治療装置の実現に向けた最新技術の開発と、重粒子線がん治療装置の普及に向けた取組みについて述べる。

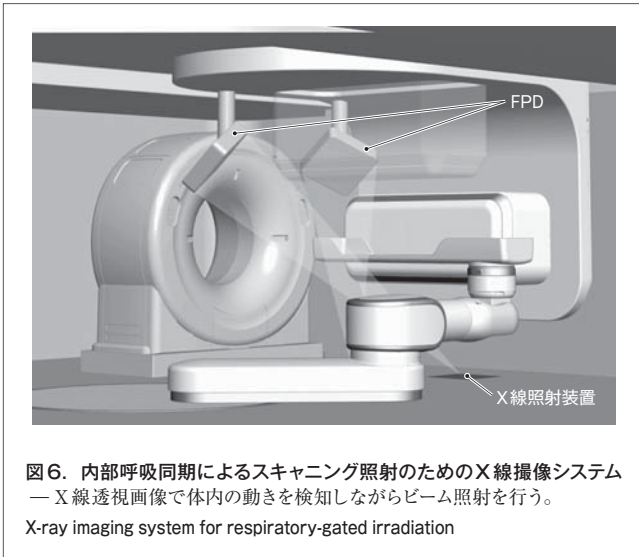
### 4.1 次世代に向けた最新技術の開発

**4.1.1 動く臓器への対応** 呼吸に伴って移動する肺や肝臓などの患部に対しては、呼吸同期による高速スキヤニング照射を実施する。これには、外部呼吸同期方式と内部呼吸同期方式の2種類がある。

外部呼吸同期方式では、患者の体表面に取り付けたLED(発光ダイオード)などを用いて呼吸に伴う往復動作を信号化し、設定したしきい値のタイミングをゲートとしてビーム照射が行われる。照射システムは、十分な高速化を図っているため、動く患部に対しても照射領域中の照射線量の均一性が確保される。

内部呼吸同期方式では、X線透視画像で体内の動きを検知しながらビーム照射を行う。治療照射中のX線動画により、体内に埋め込んだマーカの位置あるいはマーカを使わずに病巣そのものの位置をリアルタイムに評価し、対象領域に患部が入ったことを判断してビーム照射を行う。このシステムのイメージを図6に示す。動画用としてのX線撮像システムは、床面下の一对の斜めX線照射装置とこれらのX線を検出する一对のFPD(フラットパネルディテクタ)で構成されている。

放医研では、呼吸同期によるスキヤニング照射の臨床試験が実施される予定であり、その後先端医療へと移行する。



i-ROCKにも、呼吸同期によるスキャンニング照射装置が組み込まれている。

**4.1.2 レーザイオン源の開発** 治療照射に必要な炭素イオンの生成には、現在電子サイクロトロン共鳴 (ECR) と呼ばれるプラズマ型のイオン源が使われている。当社では、次世代に向けてレーザーイオン源 (LIS) の開発に取り組んでいる<sup>(5)</sup>。LISは、固体の炭素ターゲットにレーザーを照射して炭素イオンを生成する方式であり、治療に必要な6価の炭素イオンを直接生成できるため、ECRのように電荷変換装置を必要としない。また、高密度のイオン群が得られることも特長であり、装置の小型化や省エネルギー化が期待できる。

LISについては、既に社内での原理実証試験が完了している。2014年度には、国立大学法人 山形大学医学部との共同研究で、信頼性も含めて実装置に近い実証研究に取り組んでいる。

**4.1.3 超電導技術の採用** 超電導技術については、既に回転ガントリの小型化のために偏向電磁石の超電導化が進められており、次の段階として主加速器への適用が検討されている。偏向用及び集束用の電磁石に超電導を採用することで、周長が現在約60mある主加速器リングを約1/2の長さまでまで小型化できる。冷却設備を含めたシステム全体の設計にはまだ時間が掛かるが、重粒子線がん治療装置の普及のためにも超電導化による小型化は重要な技術となる。超電導磁石の開発では、超電導体に、MRI (磁気共鳴イメージング) 装置やシリコン単結晶引上げ装置などで広く使われているニオブチタン線材を用いるのが有力であるが、将来を見越した高温超電導線材の適用についても検討を行っている。

#### 4.2 普及に向けた取組み

これまで述べてきたように、当社は、放医研の施設に携わることで技術を深耕し、i-ROCKの建設でフルターンキーの治療施設の実績を得ている。これらの開発や、装置設計、建設、

試験などの経験を通して、様々な最新技術の開発はもとより、建設期間の短縮や、調整試験の合理化、運転コストの削減など、普及に向けた様々な改善を行っている。

また、国内で今後普及する施設に対しては、2章で述べた超電導回転ガントリの適用を視野に入れて検討を進めており、次世代重粒子線がん治療装置の普及モデルとしての完成形を目指している。

## 5 あとがき

当社の重粒子線がん治療装置に関して、現状の技術とその実施への適用や将来に向けた最新技術の開発などについて述べた。がんは、様々な医療の発達で、もはや不治の病ではなく適切な予防や、早期発見、早期治療などにより克服できるとさえ考えられている。当社は、今後も革新的な技術を開発するとともに施設整備の実績を重ね、重粒子線がん治療装置を国内外へ広く普及させることで、ひとりでも多くの人に治療の機会を提供していく。

## 文 献

- (1) Tsuji, H. et al. Carbon-Ion Radiotherapy. Japan, Springer, 2014, 312p.
- (2) 白井敏之 他. 次世代重粒子線がん治療システムの現状と将来 - 新治療研究棟における3次元スキャンニング照射臨床試験の開始 -. 放射線科学. 55, 1, 2012, p.20 - 33.
- (3) Iwata, Y. et al. Design of a superconducting rotating gantry for heavy-ion therapy. Phys. Rev. Special Topics - Accelerators and Beams. 15, 044701, 2012, p.1 - 14.
- (4) 神奈川県立がんセンター. “重粒子線治療施設 (i-ROCK)”. 神奈川県立がんセンター web サイト. <<http://kcch.kanagawa-pho.jp/newcenter/i-rock.html>>, (参照 2014-10-14).
- (5) 佐藤耕輔 他. 東芝の加速器技術と重粒子線治療用加速器の小型・高性能化へ向けた取組み. 東芝レビュー. 68, 1, 2013, p.11 - 15.



小野 通隆 ONO Michitaka, Ph.D.

ヘルスケア社 ヘルスケア医療推進部 粒子線治療事業開発部長、博士 (工学)。粒子線治療装置の事業推進に従事。日本原子力学会、電気学会会員、低温工学・超電導学会理事。Healthcare Medical Business Promotion Div.



矢澤 孝 YAZAWA Takashi, Ph.D.

ヘルスケア社 ヘルスケア医療推進部 粒子線治療事業開発部主幹、博士 (工学)。粒子線治療装置の事業推進に従事。電気学会、低温工学・超電導学会会員。Healthcare Medical Business Promotion Div.



平田 寛 HIRATA Yutaka

電力システム社 原子力事業部 粒子線プロジェクト部長。粒子線治療装置の事業推進に従事。日本加速器学会、日本機械学会会員。Nuclear Energy Systems & Services Div.