



Association for Nuclear Technology in Medicine

医用原子力だより

第26号

30 周年



創立 30 周年を迎えて

公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団

理事長 垣添 忠生

医用原子力技術研究振興財団は、1996年3月26日に設立許可を受け、東京・虎ノ門の雑居ビル7階にある17坪の事務所の一室で産声をあげました。設立当初、私は評議員を務め、2002年からは理事として、そして2014年には第3代理事長を拝命し、微力ながら組織の発展に尽力してまいりました。財団がこれまで歩んでまいりました道程を顧みますと、必ずしも穏やかなときばかりではなく、大きな荒波にもまれたことも幾度となくありました。特に、2011年3月11日の東日本大震災と福島第一原発事故後は、原子力関係、電力関係の企業からの寄附が激減するなど、当財団も大きな危機に見舞われました。

そのような数々の難局を乗り越えることができ、30周年を迎えられましたのも、初代理事長の森亘先生、第2代目の平尾泰男先生はじめ多くの先生方のご尽力、そして関係者の皆様方の温かいご理解とご支援のお蔭と心から感謝の意を表したいと存じます。

さて、わが国のがん医療はこの30年ほどの内に大きな変化を遂げました。先ず、5年生存率がもうじき70%超すだろう、つまりがんは治る病気になってきたということです。それはとりも直さず、「働きながらがん治療を受ける」、いわゆる就労の問題が派生してきますし、がん患者や家族が受ける差別や偏見が緩和されることにも繋がります。

この間に2006年にはがん対策基本法が、2013年にはがん登録法が成立しました。この二つの法律に護られて、わが国のがん医療は大きく変貌を遂げました。全国にがん拠点病院が指定され、五大がんのみならず、小児がん、希少がん、AYA世代のがんなどにも光が当てられる様になりました。

一方、がんは年齢と共に増加する傾向がありますから、超高齢社会に入ったわが国では、超高齢のがん患者の増加も著しく、この人達に対する身体にやさしいがん治療が求められることになりました。

また、がんは遺伝子の異常により発生する細胞の病気であることから、がんのゲノム医療の進歩は目を瞠るものがあります。少しお金はかかりますが、がんゲノムのパネル検査も保険適応され、ゲノム異常にピッタリ合う薬があれば、すばらしい治療効果をあげることもできるようになりました。

医療の進歩と人口の高齢化は必然的に医療費の高騰を招きます。わが国が世界に誇る国民皆保険制度を如何に守っていくか、という難しい問題はありますが、がん医療は更に進歩していくことは間違いありません。

このようながん医療を取り巻く情勢の中にあつて、財団は原子炉や加速器等から発生する粒子線等による先端のがん治療、各種放射線による疾病の診断ならびに治療等、医用原子力技術の研究を推進し、普及を図ることを目的として活動してまいりました。「放射線」は、それを浴びることによる発がんなどの健康被害や、核兵器や原子力施設の事故などによる環境への放射性物質の放出によって、五感で感じられないまま放射線を浴びてしまうという不安や懸念から、国民の理解と支持を得ることが難しい側面もあります。しかしながら、医学、医療の分野においては、安全に利用する技術の開発によって、低侵襲で極めて有用性の高い医療技術として、がんをはじめとする各種疾患の診断・治療に広く利用されています。物理的な要素の高い技術であることから、近年、社会に多くの便益をもたらすコンピューターやIT技術とも親和性が高く、ともにその進歩を早めてきました。私たちは、このような医用原子力技術が、多くの人びとの健康増進や福祉向上にすばらしい恩恵をもたらすものとして評価していただけると自負しております。そして、この技術の普及・振興を図ることは、私たちの公益的な大切な使命と認識しております。

財団は、これらの活動を遂行していく上で、活かせる能力、専門性、経験を豊富に備えており、その人材・能力を礎に着実に経験と実績を積み重ね、そして何より皆様のお力添えを得て、様々な事業展開をし、大きな成果をあげてまいりました。以下、私たちの代表的ないくつかの取組をご紹介します。

1. 粒子線がん治療

粒子線がん治療は、国内で26か所(重粒子線:6か所、陽子線:19か所、重粒子線と陽子線の両方:1か所)の施設が運用中であり、さらには東京都立駒込病院で、都心では初めての陽子線治療施設の導入が計画されています。今後は、保険適用の対象疾患のさらなる拡大や医師、医学物理士等の人材育成面での基盤拡充も強化していくことが重要となっています。技術開発においては、高度化と普及加速の新たなブレイクスルーとして、機器・装置のさらなる小型化・低価格化、照射法の高度化等に目標がおかれています。なかでも、重粒子線治療については、量子科学技術研究開発機構(QST)において第4世代量子メス実証機開発へ向けた計画が着々と進みつつあり、マルチオン治療の臨床研究が鋭意進められています。これらの技術が完成すると「切らずに治すがん治療」が実現するものと期待されます。

国際重粒子線がん治療研修コース International Training Course on Carbon-ion Radiotherapy (ITCCIR)は、海外の粒子線がん治療施設、病院、大学、研究機関等の医師・医学物理士・放射線技師等を対象に、国内の関係機関(QST、群馬大学)との共同主催で年1回、会期6日間の日程で実施してまいりました。2012年度に開始して以降年々参加者が増加し、第13回(2025年度)までに世界の27か国・地域の204の施設や機関から延べ750人の参加者が受講し、大きな成果を残してきました。

本事業は、わが国が世界有数の粒子線大国として国際貢献を果たしていく上で大変意義深く、重要な事業といえます。重粒子線がん治療は、治療患者数や治療成績の点でわが国が世界を牽引する先端医療技術であり、国際社会からの期待も大いに高まっています。わが国としても、その優れた医療技術を世界に普及させることは技術先進国としての責務であると同時に、日本発の医療産業の創生として国力の向上に大きく資するものであります。特に海外への展開を推進するためには、機器・装置および施設の建設と運用の一体的推進体制とともに、それを担う人材育成が重要な鍵を握っていることから、この事業の実績が大きな貢献となっているといえます。

2. ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT)

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) に関しては、かつてその研究開発の進展に向けた取組に実

務上多くの困難がありました。特に、当時は原子炉を利用しなければならず、その運用や安全管理に多大な労力と制約を伴いました。このような状況を背景に、法人組織を作り業務を円滑に実施できるようにしたいとの関係者の思いが大きな動機となって財団設立が実現されたという経緯があります。

その後2005年には、日本中性子捕捉療法学会が発足し、2010年頃には、わが国で世界初の医療用加速器 BNCT システムが開発され、実用化への大きな一歩を踏み出しました。2020年には、国内2施設で、切除不能な局所進行又は局所再発の頭頸部がん対象の保険診療が開始されることとなりました。さらに現在では、脳腫瘍や皮膚疾患の領域などで適応拡大に向けた臨床研究が進められており、新たに導入開始に向けた準備中・計画中の施設や新規プロジェクトも数件あることが公表されています。また、治療装置の技術開発および薬剤の開発も進展し、薬事申請における治療ガイドラインの作成、人材育成等の多くの課題に対しても確実な前進をみせています。最近のデータ（PTCOG）によると、国際的にもアジアや欧州での加速器型 BNCT システムの導入が進み、世界全体で29のプロジェクト（臨床利用18、研究専用11）が進行しています。

財団は、ここに至る過程において、学会をはじめとする国内の関係機関が相互に連携し、大局的な立場から取り組んでいくことが極めて重要であるとの認識から、過去に研究助成、委員会活動、人材育成、普及啓発等所要の事業活動を実施してまいりました。2024年に一般社団法人となった日本中性子捕捉療法学会が臨床、研究、教育の枢要な組織として成長し、安定した基盤を築いた現在は、同学会への支援・協力を通じて、その活動を側面から支えるべく、今後も必要に応じた推進活動を実施していくこととしています。

3. 放射線治療の精度向上および品質管理

放射線治療がその真価を正当に評価され、広く普及するための基盤を強化するためには、患者に寄り添った安全で信頼できる医療技術として、治療計画および線量管理を適切に実施し、機器に係る物理・技術面で治療の質の維持・向上に取り組むことが肝要です。財団では、わが国の医療施設等における放射線治療用線量の品質管理の適切な実施を支援するため、治療用線量計校正ならびに郵送調査による治療用照射装置の出力線量測定をはじめ、周辺分野の各種事業を実施してまいりました。

2004年4月より開始した**治療用線量計校正事業**は、2008年には、独立行政法人製品技術評価基盤機構（NITE）によって計量法校正事業者認定制度（JCSS）の登録事業者の認定を受け、放射線治療分野における二次標準機関としてJCSS 標章付校正証明書発行を行っています。この証明書により医療施設等が正しいプロトコルにより線量を評価した場合、その線量が国家標準につながる信頼性を有することが保証されます。その後2012年度より、従来の照射線量単位（空中校正）から世界的な標準である水吸収線量単位（水中校正）による校正体系の提供へ移行し、また、2018年度には電位計と電離箱の分離校正システムの提供も開始しました。現在では、全国850件以上の施設（2024年までの過去3年間の実績）が本事業による校正を実施するまでに至っています。

放射線治療装置の加速器本体の**出力線量測定事業**は、2007年11月より開始しており、2024年までの過去3年間の実施施設は、580件を数えております。がん診療連携拠点病院および一般病院で使用する放射線機器において、放射線治療装置からの出力線量を第三者として正確に評価するため、ガラス素子線量計による郵送調査を行い、測定報告書を発行しています。本事業の開始によって、わが国が国際的な標準である外部評価システムをもつ国として認められることになりました。これまでに照射野条件およびウェッジ条件の測定実施等内容の充実化を図ってきており、各医療施設の品質管理への意識向上に貢献しています。さらに電子線条件での測定（2019年開始）およびIMRT 郵送調査（2020年開始）についても実施施設の拡大を図っています。

この他、「線量校正センターニュース」の発行等により広報活動を実施しています。また、オンライン手続で24時間申し込みが可能となるWEB校正申込システムを導入し、常に高品質の校正サービスを適正な価格で提供できるよう努めています。今後も医療施設の品質管理への意識の向上にともない、運用方法の改善や測定機材の整備に努め、利用者の要請に機動的に対応を図ってまいります。

4. 各種事業

ここまで財団事業の主要なものをご紹介いたしました。この他にも、人材育成においては、**粒子線がん治療に関する人材育成セミナー**を2014年に開始し、各施設での治療および運営に係わる従事者（医師、医学物理士、診療放射線技師等）はじめ関連産業等で所要の役割を担う多くの人材を育成してまいりました。**放射線医学オープンスクール**は、2008年度より開始し、医学部のみならず医療系および理工学系等の幅広い分野の大学生等を対象に、大学では学ぶ機会の少ない放射線医学の面白さ・素晴らしさに触れる機会を提供してまいりました。講義・施設見学を中心に、これまでに、17回、33施設で実施し、延べ497名の学生の参加を得てきました。

普及啓発事業では、**市民向け公開講演会**を2004年から年1回無料開催してきました。各医療施設等の協力を得て既に2024までに20回開催し、延べ8,955人の参加者へ情報提供してきました。この他、**広報誌「医用原子力だより」**、小冊子等の出版物等を発行し、医用原子力技術の普及啓発を進めてきました。

産業の育成面では、**機器・設計・建設等各分野の企業の技術者の参画による粒子線がん治療等に関する研究会**を設け、技術情報の共有・交換の場の提供を行ってまいりました。さらに、**調査分析および技術支援事業**を、国、研究機関、地方自治体等より受託し、数多くの実績を積み上げてまいりました。

5. 将来展開としてのリニアック校正

さて、最後に財団の将来展開に大きく関わってくる**リニアック校正**について記したいと思います。先述の計測校正事業は、財団の収益の基盤を構成し、その大部分を占める極めて重要な基幹事業です。

線量計校正は、コバルト60線源を装備したガンマ線照射装置を利用して実施されていますが、近年のリニアックや線量計製造およびそれらを用いた計測技術の向上により、高エネルギーX線を高精度で照射・計測することが可能となり、リニアック校正により放射線治療の線量計測精度の向上が期待できるようになりました。

加えて、コバルト60線源の交換費用が大幅に高騰してきている現状があります。今後もさらに大幅な値上がりが見込まれ、また供給の不安定化リスクを抱えている側面もあります。当然ながら、線源交換費用の高騰は、校正料金の値上げに直結してしまいます。

上記の2つの理由から、財団では、2028年頃と想定される次回の線源交換を行わず、リニアック校正に移行することを計画しましたが、民間企業の参入等の情勢変化により、財団の事業化への準備も当初の計画よりさらに加速させて進める必要性が出てまいりました。

今後、できるだけ早期にリニアック校正の事業化を実現し、技術面、費用面でも安定的に実施できるよう引き続き努力してまいります。ただし、組織としては、収益基盤の変化の過程で舵取りの難しい局面を迎える時期もあることも十分に認識しております。私どもの財団は、医用原子力技術の普及・推進という大きな使命と活動理念を掲げており、リニアック校正に対しても非営利・公益的組織の立場で私どもに求められている重責を果たしていく所存です。私どもがその責務を全うするためには、引き続き皆様の温かいご理解とご支援が不可欠です。どうぞ変わぬご指導、ご支援を賜りますようお願い申し上げます。

祝 辞

創立 30 周年に寄せて

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 (QST)

理事長 小安 重夫



公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団が創立 30 周年を迎えられましたこと、誠にありがとうございます。心よりお祝い申し上げます。

医用原子力技術研究振興財団と QST は放射線医学や重粒子線治療の分野で緊密な連携をとりながら共に歩んで参りました。1996 年 3 月に、重粒子線がん治療及び原子炉を利用したホウ素中性子捕捉療法を普及・推進するため当時の科学技術庁と厚生省が共管する公益財団法人として設立された医用原子力技術研究振興財団は、以来 30 年にわたり、医療用放射線に関わるさまざまな活動を行うことで、わが国の放射線医学・粒子線治療の発展に貢献してこられました。この間、QST も相互補完的なパートナーとして財団と協力して活動して参りました。

私ども QST は、国立研究開発法人として量子科学技術分野の新しい技術を開発していくという役割を担っています。研究が進むにつれて、その成果を国内に広く普及展開する必要が生じます。場合によっては、本来の研究開発以外に多くのエフォートを割かざるを得なくなり、社会から期待される普及展開業務と、組織として集中すべき本来の研究開発業務との間に矛盾や対立が生じることがあります。

医用原子力財団には、そのような隔たりを埋め、研究活動を側面から支える役割を担っていただけてきました。たとえば、計測校正事業は、QST との関係における代表的な事業化例と考えられますし、人材育成、普及啓発等の面でも同様に貢献していただいています。

放射線治療線量の計測校正事業においては、QST を中心に日本医学放射線学会がおこなってきた全国の病院で放射線治療に使用されている線量計の校正事業を、財団が引継ぎ発展させて下さいました。QST は財団への技術供与や、校正施設貸与だけでなく、共同研究もさせていただいています。この活動は財団のガラス線量計を用いた治療用出力線量測定事業につながり、現在もリニアックを用いた線量計校正技術の開発を共同でおこなっています。このように QST の研究基盤と財団の事業運営機能が有機的に結びつくことで、財団は全国の医療施設における放射線治療品質の均てん化と国際水準の確立に大きく貢献してこられました。

粒子線治療の普及に向けた調査分析事業も挙げられます。この事業では、共同で調査・分析などをおこない、重粒子線がん治療法の社会経済的コスト評価に関する調査や、重粒子線がん治療施設導入計画の動向調査などが行われました。さらに、粒子線がん治療に関する人材育成セミナー、放射線医学オープンスクール、および国際重粒子線がん治療研修コース (ITCCIR) の開催など、次世代を担う医系学生向け教育、一般市民への普及啓発においても、財団は QST の理念と成果を社会へと橋渡しする役割を担っていただいております。このように財団と QST は互いの強みを補完し合いながらパートナーの関係を構築していくことで社会へ貢献して参りました。

最近では短寿命核種を用いた各種疾病の診断や治療に期待が高まっています。この点に関しても、利用研究の推進と国民への啓発普及、関係組織間の連絡調整、また、治療実施のための調査・研究など、医用原子力技術研究振興財団に期待する役割は大きなものであり、この分野の活動の益々の発展を期待しております。

共に協力して歩んできた医用原子力技術研究振興財団が創立 30 周年を迎えられたことは私どもにとっても大変嬉しいことです。今後とも、量子科学技術研究を担う QST と、その成果を社会に広げる医用原子力技術研究振興財団が互いの強みを生かしながら連携を深め、量子科学技術、放射線医学や重粒子線治療の分野の発展と国際貢献に寄与することを期待しています。

改めて、創立 30 周年、誠にありがとうございます。

祝 辞

創立 30 周年に寄せて

公益社団法人 日本放射線腫瘍学会 理事長
千葉大学大学院医学研究院 画像診断・放射線腫瘍学 教授
宇野 隆



公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団が、このたび創立 30 周年を迎えられましたことを、心よりお祝い申し上げます。長年にわたり、放射線医学、とりわけ粒子線がん治療をはじめとする放射線治療の進歩と普及に寄与してこられた貴財団のご功績に、深甚なる敬意を表します。節目の年にあたり、このように広報誌を通じてお祝いの言葉をお届けする機会を頂戴しましたことを、大変光栄に存じます。

貴財団は創立以来、原子炉や加速器をはじめとする先端的な科学技術を医療へと結びつけ、我が国の医用原子力技術の発展に長く寄与してこられました。粒子線がん治療などの高度医療の発展を支え、また研究推進、人材育成、社会への丁寧な情報発信と、多方面にわたる活動を着実に積み重ねてこられたことは、公益財団としての使命を誠実に果たしてこられた証であり、その歩みは多くの医療者や研究者にとって確かな支えとなっています。人々の健康を守る基盤をつくるという、目に見えにくい部分にこそ真価がある仕事を、30 年の長きにわたり継続してこられたことに深い敬意を抱いております。

とりわけ、放射線治療の根幹を成す計測・校正の分野において、貴財団が国内で唯一の第三者認定機関として果たしてこられた役割は、大変大きなものがあります。治療の質と安全性を左右する線量の正確性を、中立かつ高度な専門性にに基づき確保してこられたことは、臨床現場に計り知れない安心をもたらしています。患者さんが治療を受ける際に覚える「見えない信頼」は、こうした地道な取り組みによって支えられており、私も医療者としてその意義を日々実感しております。貴財団の取り組みと活動は、まさに日本の放射線治療の強固な基盤となっていると言えるでしょう。

超高齢社会を迎え、がん医療を取り巻く環境が大きく変化する中で、医用原子力技術が果たす役割は今後ますます重要になります。粒子線がん治療や中性子捕捉療法が進歩、核医学診断・治療の精度向上、そして高精度放射線治療のさらなる発展など、原子力科学に根ざした医療は、患者さんの生活の質を高め、治療の選択肢を広げる力を持っています。これらの技術が適切に、そして安心して国民に届けられるためには、信頼できる計測・品質管理と、将来を見据えた研究基盤づくりが欠かせません。その中心に貴財団が存在されていることは、医療界全体にとって大きな支えとなっています。

日本放射線腫瘍学会としても、放射線治療の質をさらに高め、より多くの患者さんへ安全に届けるために、貴財団との連携をこれまで以上に重視しております。医療者・研究者・社会を橋渡しする貴財団の役割は、日本の放射線医療の未来を考える上でますます重要となることでしょう。私もまた、志を同じくする立場として協力を深め、健全で持続可能な放射線医療の発展に一層寄り添ってまいりたいと考えております。

30 年という節目は、これまでの歩みを振り返るとともに、次の世代へ知と技術を引き継ぐ新たな出発点でもあります。貴財団が、今後もわが国の医用原子力技術を先導する存在として、さらなるご発展を遂げられますことを心より祈念し、お祝いの言葉とさせていただきます。

創立 30 周年、誠におめでとうございます。

事業活動報告

◆第 21 回市民向け公開講演会

「重粒子線がん治療の実際と今後の可能性」

令和 8 年 1 月 24 日（土）「はまぎんホールヴィアマール」（横浜市）にて第 21 回市民向け公開講演会「重粒子線がん治療の実際と今後の可能性」を一般市民 220 名の参加者を得て、神奈川県立がんセンターとの共同開催により実施いたしました。

垣添忠生理事長による開会のあいさつで始まり、続いて神奈川県立がんセンター病院長の酒井リカ先生より、同センターが取り組む重粒子線治療の特長や魅力がわかりやすく紹介されました。

第 I 部の特別講演では、量子科学技術研究開発機構 QST 病院長の石川仁先生が登壇し、放射線治療医としての歩みを交えながら、保険適用疾患が段階的に拡大してきた経緯について話がありました。さらに、治療期間が短く患者負担が軽減される点や、量子メス実証機開発および臨床研究を通じた新たな適応拡大への取り組みについても説明され、重粒子

線治療の将来展開の可能性が示されました。

第 II 部の一般講演では、神奈川県立がんセンターの専門分野の医師が登壇し、中井川昇先生から前立腺がん、腎がんに対する選択肢としての重粒子線治療の有効性が示され、戸塚雄一郎先生からは膵臓がん・肝臓がんに対して有効な選択肢となることや、早期発見の大切さも紹介されました。さらに、加藤弘之先生がその他のがん種について述べ、チーム医療の連携および重要性が伝えられ、質疑応答では市民からの質問に丁寧に回答しました。最後に古瀬純司総長が閉会のあいさつを行い、講演会は盛会のうちに終了しました。

今回の第 21 回講演会では、重粒子線治療に関する最新の知見が情報提供され、一般市民の意識の高まりがみられました。今後も、地域医療への貢献がさらに進むことが期待され、高い関心と期待が感じられる講演会となりました。

－プログラム－

開会挨拶

公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 理事長
神奈川県立がんセンターの紹介

垣添 忠生

神奈川県立がんセンター 病院長

酒井 リカ

第 1 部 特別講演

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 QST 病院長

石川 仁

第 2 部 一般公演

「重粒子線が変えるがん治療：前立腺がんから腎がんへの新たな展開」

神奈川県立がんセンター 泌尿器科部長

中井川 昇

「重粒子線で挑む膵臓がん・肝臓がん治療」

神奈川県立がんセンター 消化器内科肝胆膵 医長

戸塚 雄一郎

「その他部位と重粒子線治療」

神奈川県立がんセンター 放射線治療科部長

加藤 弘之

質問コーナー

神奈川県立がんセンター 放射線治療科部長

加藤 弘之

閉会挨拶

神奈川県立がんセンター 総長

古瀬 純司



公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団
理事長 垣添 忠生 開会挨拶



国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 QST 病院
病院長 石川 仁 特別講演



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
総長 古瀬 純司 閉会挨拶



講演会会場の様子

◆放射線医学オープンスクール～概要～

第 17 回目となる本年度は、国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構（QST）との共同主催、そして医学物理若手の会の共催により実施し、猛暑の中でしたが、13 校・31 名の参加がありました。以下に参加した津上光輝さんつがみこうきの見学記録を掲載します。

放射線医学オープンスクールに 参加して

大阪大学
医学部 医学科 4 年 津上 光輝



今回私がオープンスクールに参加した理由は、大学の講義で放射線治療学を学んだことをきっかけ

に、臨床と研究の両面で最先端を走る QST でどのように治療が行われているのかを直接見学したいと考えたためです。また、実際に放射線治療やその研究に携わる先生方、同じく放射線治療学に関心を持つ学生と対面で交流し意見を交わす絶好の機会だと思い、参加を決意しました。

1 日目

初日は研修棟での講義と施設見学から始まりまし

た。最初に QST 病院副院長の若月先生から、QST の沿革や将来像について丁寧にご説明いただき、放射線治療をより身近にするために一般公開など多様な取り組みを行っていることを学びました。地域医療との連携や次世代研究者の育成にも積極的に取り組んでいる姿勢は、放射線医学が社会全体に開かれた

プログラム

● 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 (QST)
千葉県 千葉市

－ 2025年8月21日 (木) －

講義 ・施設概要・紹介 若月 優 先生
・画像診断の進歩 (CT と MRI)
尾松 徳彦 先生
・放射線治療の役割 瀧山 博年 先生

施設見学 (HIMAC、新治療研究棟)

懇親会

－ 2025年8月22日 (金) －

講義 ・核医学 東 達也 先生
・粒子線治療における物理の役割
稲庭 拓 先生
・緊急被ばく医療 梨木 りみ 先生

被ばく医療実習

グループディスカッション 医学物理若手の会

特別講演 「重粒子治療の現状と将来像」
石川 仁 先生

現地集合・現地解散

学問であることを強く印象づけました。

続く尾松先生の講義では、画像診断の進歩、とくにCT・MRIの歴史と展望を拝聴しました。X線発見から始まるCTの意外な発明の経緯、MRI初期の半日にも及ぶ長時間撮像から現在の十数分で済む高解像度画像への進歩は大変印象的でした。医療技術がわずか数十年でここまで飛躍的に進歩したことに大変驚きました。

1日目最後は瀧山博年先生による「がん治療における放射線治療の役割とキャリア形成」についての講義でした。放射線治療はがん治療の三本柱の一つであり、臓器横断的にあらゆるがん治療に携わる特性ゆえに、多様なバックグラウンドが思わぬ形で活きることを学びました。瀧山先生が消化器外科としてキャリアを培った経験を活かし、CGでOAR遮

蔽用スパーサーの形状を外科チームに伝えることで治療を円滑に進められたエピソードは特に印象深く、多様なバックグラウンドを持つことの威力を強く感じました。

講義後はQST施設を見学しました。中でも最も印象に残ったのは、HIMAC（重粒子線がん治療装置）です。治療室の奥にそびえる巨大な回転ガントリー、地下二階に広がる加速リングを有するその規模は圧巻でした。治療だけでなく多様な実験にも対応できる設計であることを知り、技術力の高さを改めて感じました。さらに、粒子線治療の課題である建設費と広大な用地を克服すべく、小型加速器の開発が進められていることを知り、今後導入ハードルが下がる未来に期待が膨らみました。

夕方からの懇親会では、医師志望者に限らず医学物理を目指す学生とも交流し、互いの興味やキャリアについて議論できたことが大きな刺激となりました。QST病院の先生方からも放射線治療医として歩むまでの具体的な道筋や、学生のうちに取り組むべきことなど貴重な助言をいただきました。この懇親会は将来自分が歩むキャリアを計画するうえで非常に学びになる大変貴重な機会であったと強く感じました。

2日目

二日目は講義、グループディスカッション、被ばく医療実習が行われました。

最初の講義では東達也先生から核医学セラノスティクスについて学びました。これまで海外原子炉に依存していたRI供給の課題や、国内で製造可能なアスタチンを用いた α 線核種新薬の開発が最終段階にあること、さらに診療報酬への反映など制度面の進展を知り、今後の発展に大きな可能性を感じました。

続いて稲庭拓先生から粒子線治療における物理の役割についてご講義いただき、ビーム形成に必要な緻密な研究がHIMACの技術を支えていることを理解しました。

その後、石川仁病院長から重粒子線治療の現状と将来像について伺い、保険適用の拡大や副作用の少なさ、短期間通院などの利点に加え、座位治療や加

速器小型化など革新的な研究が進行中であることに強い印象を受けました。最先端研究が患者のQOLを高める治療法として現実のものになりつつある姿に、大変期待したい思いになりました。

グループディスカッションでは、参加した医学系学生と放射線治療に興味を持ったきっかけや今後の展望について活発に意見交換を行い、大学でも同様の議論を試みたいという意欲が湧きました。

最後に梨木りみ先生による緊急被ばく医療の講義を受け、東海村JCO臨界事故における対応など、QSTならではの実践的な知見を学ぶことができました。講義後の実習では緊急被ばく医療施設を見学し、被ばく患者の創部を想像以上の強度で長時間洗浄する除染作業を体験し、実地医療の厳しさを実感しました。

まとめ

今回のオープンスクールを通じ、放射線治療学の現状と将来展望、さらにQSTならではの被ばく医療について深く学ぶことができました。また、多様なバックグラウンドを持つ先生方や同世代の仲間との交流を通じ、放射線医学への理解とモチベーションを一層高める貴重な機会となりました。今後はポリクリで指導いただく先生方と議論を重ね、臓器横断的な治療を行う放射線治療学が他科とどのように連携していくのか、学びをさらに深めていきたいと考えています。

最後になりますが、放射線医学オープンスクールを運営して下さった医用原子力技術研究振興財団の先生方、貴重な講義をして下さったQSTの先

生方、活発なディスカッションを企画して下さった医学物理若手の会の笠松先生をはじめ、準備から当日運営まで尽力下さった皆さまに心より御礼申し上げます。

◆国際重粒子線がん治療研修コース 2025

2025年11月17～22日、第13回「国際重粒子線がん治療研修コース（International Training Course on Carbon-ion Radiotherapy）2025」（以下、「ITCCIR」という）を開催しました。

前半3日間を国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構（以下、QSTという）主催、後半3日間を群馬大学重粒子線医学研究センター主催として、当財団が事務局を担いました。さらに（北から）北海道大学病院陽子線治療センター、山形大学医学部東日本重粒子センター、筑波大学附属病院陽子線医学利用研究センター、神奈川県立がんセンター、大阪重粒子線センター、兵庫県立粒子線医療センター、九州国際重粒子線がん治療センターの7機関に後援となっただき、企画運営や講演の協力など、大きなご支援・ご協力をいただきました。

また、アルフレッサファーマ(株)（広告）、安西メディカル(株)、住友重機械工業(株)、東芝エネルギーシステムズ(株)、Normandy Hadrontherapy、(株)日立ハイテク、(株)ビードットメディカル、レイサーチ・ジャパン(株)の8社からご協賛・広告をいただき、研修コース運営全体の経済的支援をいただいたことで、受講料の軽減もでき、さらに前回同様に企業セミナーを開催することで、ご協賛各社の情報をこれまで以上に詳



QST・大会議室にて



群馬大学・重粒子線医学センターにて

しく受講者に伝えることもできたと思われま

1. 受講者とプログラム

ITCCIR2025では、海外受講者の定員を35名として募集を開始したところ、募集締切り前に定員に達しました。受講者の所属機関の属する国別で、韓国、中国、台湾、カナダ、米国、オーストラリア、オーストリア、フランス、ルクセンブルク、スウェーデン、日本の11ヵ国・地域から応募があり、ルクセンブルクから新規参加がありました。また、今回は日本人研究者の参加を促すため特別枠を設けたところ、お一人参加いただいたため、計36名となりました（直前に3名が不参加で、最終的に33名）。このほかに企業からの聴講者が5名、群大パートでは群大への留学生11名以上が参加しました。QSTと群大を除き、受講者の派遣機関及び企業聴講者の企業数は、合計で25機関・社となりました。

受講者の職業を見ると、過去とほぼ同じ傾向で、右図のとおり放射線腫瘍医や医学物理士等が中心となっています。

プログラムは、イントロダクション、生物、物理、臨床、診断、トピックス、施設見学、ケーススタディ、粒子線施設紹介を柱として、トピックスで陽子線、BNCTやFLASHもカバーし、また、QSTにおける見学ツアーの内容も充実したものとなりました。

一方、群大では、臨床の講座とセットでケーススタディを今回も3講座行い、双方向での理解をより深めるものになったと思われま

群馬のプログラムでは、千葉から群馬への移動日の20日に、1週間のプログラム中盤でのリフレッシュも兼ねて、伊香保温泉に案内するイベントも目

玉となっており、実際にこのイベントを楽しみにしていた受講者が大勢いたようです。熊の目撃情報もあったため、夕方散歩に出られる人は例年より少なかったようですが、紅葉、温泉、日本料理などを堪能して、このイベントは高評価でした。

職業	人数
1. Administrator	0
2. Biologist	0
3. Clinical Educator	0
4. Diagnostic Radiologist	0
5. Medical Dosimetrist	0
6. Medical Oncologist / Surgeon / Urologist	1
7. Medical Physicist	11
8. Medical Physicist Professor	4
9. Nuclear Medicine Physician	0
10. Nurse / Nurse Practitioner	0
11. Patient Advocate / Medical Coordinator	0
12. Physician Assistant (PA)	0
13. Physics Engineer	2
14. Postdoctoral Fellow	0
15. Radiation Oncologist	7
16. Radiation Oncologist Professor	3
17. Radiation Therapist / Technologist / Technician	2
18. Resident / Fellow	0
19. Student / Grad Student	2
20. Others	1
合計	33

2. 優秀講師の表彰について

今回も講座ごとのアンケート結果を集計して、評価の高かった講師への表彰が行われました。評価項目は、内容、時間管理、理解しやすさ、講習スタイルで、受講者の評価点の合計と平均値を用いて、コースディレクターによる協議及び総合評価の結果、最終的に次のとおり決定されました。瀧山先生は前回に引き続き最優秀賞となりました。

- 最優秀賞 -

瀧山 博年 先生

演題「Locally recurrent Colorectal cancer」

- 優秀賞 -

尾池 貴洋 先生

演題「Dose, LET, and beyond」

篠藤 誠 先生

演題「Dose escalation with Carbon Ion
Radiotherapy and Multi-ion Radiotherapy」

- 奨励賞 -

今井 礼子 先生

演題「Carbon ion radiotherapy for bone and soft
tissue sarcomas」

稲庭 拓 先生

演題「Biological models in CiRT」

Maria Varnava 先生

演題「Dose-volume constraints in carbon ion
radiation therapy」

- コースディレクター賞 -

小西 輝昭 先生

演題「Why Microbeams? Advantages in Radiation
Biology」

村田 和俊 先生

演題「Gyne」

岡東 篤 先生

演題「Urological cancer」

上記の受賞された講師の先生方に限らず、貴重

な時間を割いてご準備、ご講演いただいた全ての講師の皆様にご改めて御礼申し上げます。

3. 今後の展望について

2023年度にオンサイト対面式を再開して、今回は3回目となります。コロナ禍にWeb開催方式という選択肢が増えたものの、海外の関係者の中には重粒子線がん治療に関する興味と、日本へ行きたいというモチベーションが未だあり、ITCCIRへのニーズがあることも改めて分かりました。

一方で、事業実施の環境は厳しくなっています。海外からの観光客の増加や、円安などによる諸物価の高騰など、ホテルやバスなどロジ面の運営が益々厳しい状況です。そのため開催規模（定員）を大きくすることは少し難しい課題です。

さらに受講者からの様々な要望を新たに取り上げていこうとすれば、コストはさらに増大しますし、関係者の負担もさらに増えると想像されます。参加費は受講料、交通費、宿泊費、飲食費、テキスト代等パッケージで21万円としましたが、3年連続の値上げとなっています。新たなニーズへの対応（翻訳システムの試用等）と、そのコスト・負担も念頭に入れながら、プログラム構成を含めて、受講者、講演者、企業、主催者にとってより良い、現実的な解決策を探っていくしかないと思われまます。

◆令和7年度「粒子線がん治療に関する人材育成セミナー・入門コースおよびアドバンスコース

当財団では、将来にわたって医用原子力技術を担い継承していく人材育成のため、専門的知識・技術を必要とする粒子線治療施設の人材育成事業として、平成26年度より粒子線がん治療に関する人材育成セミナー（入門コース、専門コース）を開催してきました。これまで、入門コースは上半期の夏、専門コースは下半期の冬に開催してきました。

令和7年度の入門コースは下記要領にて開催し、27名の方が受講されました。全国各地から関連施設だけでなく、新規導入を検討されている施設、関連企業の技術職などが参加されていました。

◇入門コース開催概要

開催日：令和7年7月19日（土）

場 所：ステーションコンファレンス東京
東京都千代田区丸の内1-7-12
サピアタワー 6F

(1)粒子線治療の基礎知識

遠藤真広 医用原子力技術研究振興財団
常務理事

(2)粒子線治療の流れとQ A

佐藤弘史 九州国際重粒子線がん治療セン
ター 医療技術部長

(3)粒子線治療の看護

村田亜季 量子科学技術研究開発機構
QST 病院

(4)放射線治療の基礎知識

佐々木良平 神戸大学医学部附属病院
放射線腫瘍科教授

(5)陽子線治療の実例

村山重行 静岡県立静岡がんセンター
陽子線治療科部長

(6)重粒子線治療の実例

宮坂勇平 群馬大学 重粒子線医学研究セ
ンター 助教

アンケートで受講者の関心や要望を読み取ると、受講者の属性、関心度、関心項目、参加のきっかけなどはそれぞれ異なりますが、各療法（陽子線・重粒子線）の統計データで見た違い、BNCTやFLASHなどへの興味、治療計画など技術的関心が高いことがわかりました。

入門コース受講者が、引き続き専門コースを受講するケースも多かったのですが、専門コースは金土2日間あり、さらに専門性が高いこともあって、全国から参加される受講者には少し参加しづらいところがありました。今般、重粒子線施設・陽子線施設などの新規導入件数が減り、専門コースの役割も一定程度果たしたものと推測され、時代のニーズに応える新しいコースに発展させていくことが望ましい

と考えて、最新技術と臨床成果をコンパクトにまとめて「アドバンストコース」として組み直して実施することとしました。令和8年1月31日（土）に初回が開催されています。

◇アドバンストコース開催概要

開催日：令和8年1月31日（土）

場 所：AP 東京丸の内
東京都千代田区丸の内1-1-3
日本生命丸の内ガーデンタワー 3F

(1)主催者挨拶

遠藤真広 医用原子力技術研究振興財団
常務理事

(2)画像を用いた患者自動位置決めと呼吸同期照射

森慎一郎 量子科学技術研究開発機構 量子
医科学研究所 グループリーダー

(3)FLASH 研究の最新動向

皆巳和賢 大阪大学 大学院医学系研究科
国際交流推進戦略部 准教授

(4)陽子線治療の最新治療成績

水本斉志 筑波大学附属病院 陽子線医学
利用研究センター 准教授

(5)BNCT の歴史と現況

小野公二 大阪医科薬科大学
BNCT 共同臨床研究所 所長

(6)重粒子線治療の最新治療成績

塩山善之 九州国際重粒子線がん治療セン
ター センター長

◆粒子線がん治療等に関する施設研究会

本研究会では、国内外における放射線がん治療等に関する医療情報、研究・技術開発動向、ならびに関連法令、技術基準の動向などの現状、将来の見通し、課題・対策などに関して、講演会および施設見学会（2回）を通じ情報交流を行っています。

— 令和7年2月28日（金）実施

令和6年度第3回研究会（講演会）—

MEETING SPACE AP 東京丸の内（東京都千代田区）において講演会として開催し、建設、設計、

装置メーカー等から 14 名の参加がありました。

- (1) 「核医学治療 - 放射能でがんが治るんです」
金沢大学 副学長
絹谷 清剛 先生
- (2) 「都市型重粒子線治療施設の立ち上げ、ふり返り」
大阪重粒子線センター 主任部長 放射線治療
専門医 鈴木 修 先生

— 令和 7 年 6 月 3 日 (火) 実施

令和 7 年度第 1 回研究会 (見学会) —

社会医療法人明陽会 成田記念陽子線センター
(愛知県豊橋市) において陽子線治療装置の見学会
として開催し、建設、設計、装置メーカー等から
17 名の参加がありました。

成田記念陽子線センター 事務長 大東信幸氏の
挨拶および「施設の概要」についての説明後、セン
ター長 芝本 雄太先生の講演「当院におけるス
キャニング陽子線治療の現状と展望」があり、続い
て院長 柳 剛 先生より「当院の陽子線治療 -
膵臓癌と肝臓癌を中心に -」の講演がありました。

その後、陽子線治療装置 PROTEUS ONE (超伝
導シンクロサイクロトロン、220 度回転ガントリー、
ペンシルビームスキャニング照射装置) などを見学
しました。

— 令和 7 年 11 月 1 日 (土) 実施

令和 7 年度第 2 回研究会 (見学会) —

兵庫県立粒子線医療センター附属 神戸陽子線セ



神戸陽子線センター 加速器



神戸陽子線センター CT 撮影室



神戸陽子線センター 大人用照射室



神戸陽子線センター
小児に配慮したスタッフルーム

ンター（兵庫県神戸市）において、小児がんに重点をおいた陽子線治療施設の見学会として開催し、建設、設計、装置メーカー等から16名の参加がありました。

はじめにセンター長 徳丸 直郎先生の挨拶後、放射線技術科長 清水 勝一先生より「粒子線治療に携わって、四半世紀」の中で、兵庫県立粒子線医療センター並びに神戸陽子線センターについて、講演がありました。沿革および建屋・装置の詳細から、治療方法、（小児がんの治療患者数は日本で1位）および隣接する兵庫県立こども病院との連携など、具体的な内容の説明がありました。その後、シンクロトロン（粒子加速器）、照射室（小児用、大人用）、回転ガントリー、および小児用にリラックスできる工夫がされた待合室等を見学しました。

◆計測校正事業

1. 治療用線量計校正の実施状況

校正事業は令和6年度末で20年、コバルト線源更新から3年が経過しました。また、令和5年度より線量計校正の依頼形態が分離校正へ完全移行され、以降、安定して実施されております。令和7年度も同様の傾向となっており、年度実績も同程度になることが見込まれます。

分離校正では、電位計と電離箱は、それぞれの校正に対して校正定数が与えられるため、任意の組み合わせで使用可能です。

分離校正における電位計校正では、日本医学物理学会が発行する「放射線治療用線量計に用いられる

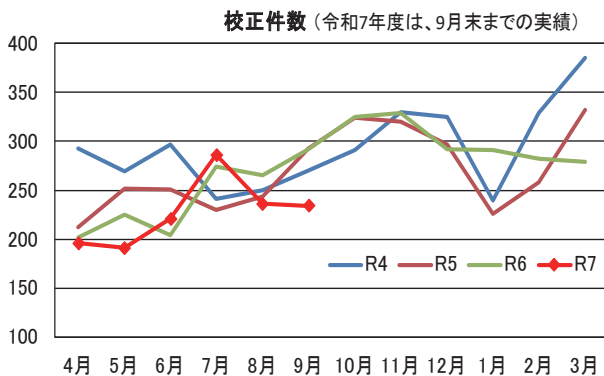


図1. 月別校正実施状況

表1. 年間校正数（分離校正開始のH30以降、（）内の数値は対前年比。H30～R4は一体・分離校正の合計。R5以降は分離校正のみ。R7は9月末迄。）

年度	電位計	電離箱			校正件数
		① 円筒	② 平行平板	合計	
H30	967 (0.926)	1,664	836	2,500 (0.993)	3,336 (0.984)
R1	716 (0.740)	1,521	779	2,300 (0.920)	3,079 (0.923)
R2	626 (0.874)	1,562	745	2,307 (1.003)	3,052 (0.991)
R3	437 (0.698)	1,296	598	1,894 (0.821)	2,492 (0.817)
R4	456 (1.043)	1,809	856	2,665 (1.407)	3,521 (1.413)
R5	212 (0.465)	1,687	776	2,463 (0.924)	3,239 (0.920)
R6	200 (0.943)	1,716	772	2,488 (1.010)	3,260 (1.006)
R7	90 (0.450)	718	323	1,041 (0.418)	1,364 (0.418)

電位計のガイドライン」に準拠した電位計が校正対象となります^(注)。

電位計校正は令和5年度 of 分離校正の完全移行後、年間200台程度で落ち着いています。令和7年度の電離箱校正の件数につきましては、若干の減少が見受けられます。

月別の校正実施状況（令和4年度から令和7年度9月末まで）を図1に示します。

分離校正を開始した平成30年度から令和7年度9月末までの年度別校正数を表1に示します。

令和4年度は前年度の休止による減少分が増加要因となり、安定して供給を行った結果、年度実績は過去最多となりましたが、令和5年度は、申込み状況がコロナ禍以前に戻りました。図1が示すように例年、前半が少なめで後半が増加傾向になっていることから令和7年度も同様の傾向が予想されますが、年間校正件数は例年に比べ僅かに少な目となる見込みです。

2. 出力線量測定の実施状況

令和6年度は、線量計校正のウェブ受付に加え、出力線量測定についてもウェブ受付を開始しまし

表2. 出力線量測定の間年実施数 (令和7年度は9月末迄、右列年度 Total は平成19-24年度を含む。)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	H19-R7 (Total)	
施設数	213	183	212	282	232	231	133	2612	
拠点病院数	140	124	132	180	151	145	83	1801	
ビーム数	4MV	142	111	108	185	140	140	85	1597
	6MV	290	261	286	424	357	393	231	3448
	10MV	267	230	231	371	286	317	174	3141
	15MV	7	8	4	7	3	3	3	95
照射野条件 ※2	5 × 5	137	87	63	121	89	89	25	1442
	15 × 15	41	15	15	22	22	16	3	378
	20 × 20	101	79	56	102	59	44	28	1217
	25 × 25	26	15	6	29	14	12	9	234
ウェッジ条件 ※2	15°	30	21	16	17	27	5	13	458
	30°	32	21	18	30	28	14	5	473
	45°	11	6	4	11	11	5	3	180
	60°	43	19	9	22	17	13	12	309
Total	1127	873	816	1341	1053	1051	591	12972	
電子線エネルギー条件 ※6	4MeV	3	5	15	13	9	20	7	72
	5MeV	1	0	0	1	0	1	0	3
	6MeV	16	26	34	65	54	57	33	285
	8MeV	0	0	2	1	1	4	0	8
	9MeV	12	32	38	49	54	51	42	278
	10MeV	1	0	3	1	0	2	0	7
	12MeV	8	18	19	26	33	38	18	160
	14MeV	0	0	0	1	0	1	0	2
	15MeV	5	13	10	11	19	24	10	92
	16MeV	0	1	2	3	1	3	5	15
	18MeV	1	3	2	8	9	11	6	40
20MeV	0	0	0	3	0	3	5	11	
22MeV	0	0	0	1	0	0	1	2	
Total	47	98	125	183	180	215	127	975	
照射装置数	Elekta	64	53	69	81	70	76	80	709
	MITSUBISHI	5	1	2	6	2	0	17	98
	SIEMENS	21	20	12	14	11	2	0	279
	TOSHIBA	3	0	0	0	0	0	0	77
	Varian	147	135	138	212	154	164	78	1850
その他	38	41	47	52	63	57	47	438	
Total	278	250	268	365	300	299	222	3451	

- ※1: 平成19年度は、11月から3月までの5ヵ月間の実績を示す。
- ※2: 平成22年度より、照射野条件およびウェッジ条件での測定を開始した。
- ※3: データ解析結果が不適切で再測定実施の場合は、再測定前の分はカウントしていない。
- ※4: 平成25年度以降、実施しているがカウントしていない条件別ビームあり。(表5参照)
- ※5: 平成28年度以降、ビーム数にTomoTherapy およびCyberKnifeの測定カウントを含む。(表6参照)
- ※6: 令和1年11月より、電子線治療装置の出力線量測定を開始した。

表3. 令和4年度から令和6年度 3年間の実施施設数

	3年間の合計実施施設数(延べ数)	753	施設
内訳	がん診療連携拠点病院	467 (367)	施設
	拠点病院以外の病院	286 (256)	施設

※ ()内は複数回実施の施設を1施設とした場合の施設数を示す。

表4. 3年間の実施回数別の内訳

	がん診療連携拠点病院				拠点病院以外の病院			
	1回	2回	3回	4回	1回	2回	3回	4回
実施回数	1回	2回	3回	4回	1回	2回	3回	4回
施設数	295	44	24	3	236	13	6	1
合計	367				256			

表5. 拠点病院の年度別実施施設と新規実施数 (H26年度～R6年度)

年度(拠点)	実施	内 新規	新規/実施
H26	113	74	65.5%
H27	129	50	38.8%
H28	104	29	27.9%
H29	103	18	17.5%
H30	149	31	20.8%
R1	140	23	16.4%
R2	124	9	7.3%
R3	132	7	5.3%
R4	180	10	5.6%
R5	151	6	4.0%
R6	145	6	4.1%

表 6. 拠点病院以外の年度別実施施設と新規実施数
(H26 年度～ R6 年度)

年度 (拠点以外)	実施	内 新規	新規 / 実施
H26	34	27	79.4%
H27	34	26	76.5%
H28	36	20	55.6%
H29	49	24	49.0%
H30	54	32	59.3%
R1	73	40	54.8%
R2	60	20	33.3%
R3	80	36	45.0%
R4	104	27	26.0%
R5	85	18	21.2%
R6	89	19	21.3%

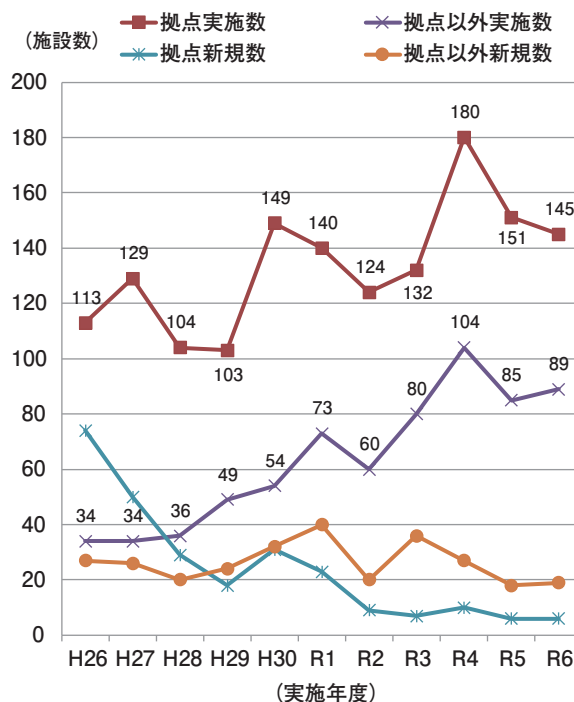


図 2. 年度別実施施設数と新規施設数の実績

た。現在、順調に稼働して安定した供給が行えており、実施施設数も前年比と同等の数値が示されています。また、3年に1度の実施が推奨されていることから令和3年度と比較してみても若干の増加が見受けられました。

令和7年度9月末の時点では、3年サイクル（令和4年度）の同時期の比較でも同等の件数を実施しております。出力線量測定の実施数を表2に示します。

出力線量測定 of X線の条件別での申し込み状況は、エネルギー別校正条件と照射野条件、ウエッジ条件、TomoTherapy および CyberKnife となっており、電子線での申し込み状況は、各エネルギー別の組み合わせとなっております。特に電子線の申し込み件数は、増加傾向にあります。令和2年2月より開始した1条件単位、4条件単位および混在での申し込み形態により、1施設当たりの申し込み条件数は、1～24条件と申し込み条件数も多様化しています。令和7年度末では、施設数280施設、条件数は1,350条件前後を見込んでいます。

令和4年度から令和6年度までの3年サイクル間で実施した拠点病院および拠点病院以外の施設数およびその内訳を表3および表4に示します。

厚生労働省ウェブサイト掲載（令和5年4月1日

更新）のがん診療連携拠点病院の施設数は404施設でした。令和4年度から6年度までの3年間で拠点病院の当財団での出力線量測定の実施施設数は367施設であり、未実施（もしくは別の第三者機関での評価を実施など）の拠点病院は37施設の見込みです。

拠点病院および拠点病院以外の実施施設数および新規実施施設数の年度別集計を表5、6および図2に示します。

拠点病院および拠点病院以外の実施施設数はおよそ3年周期に則って増加傾向になっています。なお、令和4年度はコバルト線源更新後に伴う一時的な申し込み増加により年度実績が増加していますが、令和5年度以降は、例年並みに戻っています。近年、申込施設数はある程度落ち着いてきており、新規申し込み施設数も拠点病院、拠点病院以外の病院それぞれで10施設前後となっています。令和7年度もこの状況が継続される見込みです。

また、令和3年以降 TomoTherapy と CyberKnife の依頼状況については、TomoTherapy が30件程度、CyberKnife が10件程度で推移しています。

当財団では、令和2年4月より IMRT（強度変調放射線治療）郵送調査の第三者評価について事業を開始し、年間10件程度を計画して実施しております。

す。令和5年度は年間17件実施しましたが、令和6年度は11件実施しており、令和7年度も10件弱の実施を見込んでいます。

治療用線量計校正、出力線量測定、IMRT 郵送調査のお申し込み方法については、財団ウェブサイト「放射線治療品質管理」の治療用線量計校正事業をご参照ください。

3. 施設名公表について

第三者評価機関として活動している当財団では、治療用線量計校正および出力線量測定を実施した施設の承諾を得た上で公表することにより、放射線治療の安全性が担保されるように努めております。令和7年度は9月中旬に財団ウェブサイトにて公表しました。

治療用線量計校正実施施設の施設名公表数を図3に示します。

治療用線量計校正の公表は、過去3年間（令和4～6年度）での公表といたしました。

校正を実施した医療関係859施設（研究・教育施設およびメーカー等医療関係外を除く）を対象として、公表の同意が得られた施設について施設名公表を行いました。また、令和4～6年度とも不同意は無く全施設の公表となりました。

出力線量測定実施施設の公表施設の内訳は拠点病院378施設、一般病院202施設であり、都道府県別内訳を表7に示します。

出力線量測定は、3年以内に1度実施することが推奨されており、過去3年間の令和4年度から令和6年度までの対象となる実施施設数では580施設（がん診療連携拠点病院378施設、一般病院202施設）の全ての施設に同意いただきました。

また、令和6年度の新規での申し込み施設数は

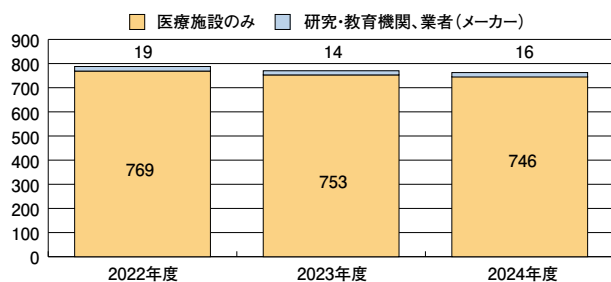


図3. 治療用線量計校正実施施設名公表数

表7. 対象施設数580施設の都道府県別内訳

北海道	24	長野県	9	岡山県	11
青森県	7	富山県	8	広島県	13
岩手県	9	石川県	7	山口県	11
宮城県	8	福井県	5	徳島県	5
秋田県	8	愛知県	33	香川県	6
山形県	7	岐阜県	11	愛媛県	6
福島県	10	静岡県	18	高知県	3
東京都	55	三重県	9	福岡県	19
神奈川県	31	大阪府	48	佐賀県	4
埼玉県	24	兵庫県	23	長崎県	8
千葉県	19	京都府	13	熊本県	11
茨城県	8	滋賀県	8	大分県	6
栃木県	9	奈良県	8	宮崎県	6
群馬県	10	和歌山県	6	鹿児島県	10
山梨県	3	鳥取県	4	沖縄県	5
新潟県	10	島根県	4		

25施設（拠点病院6施設、拠点病院以外の病院19施設）でした。

4. 今後の展望

線量計校正と出力線量測定の受付、および証明書や報告書の電子交付がウェブシステムへ移行したことにより、線量校正センターの業務時間外でもお申し込みが可能となりました。

出力線量測定では、電子線条件の依頼の増加が見込まれております。当財団では、より円滑な業務を行うため、人員および環境整備に努め、準備を進めております。

リニアック校正の準備作業は順調に進んでおりますが、JCSS 認証申請など校正サービスの開始までには、今暫く時間が必要となっております。開始時期など詳細が分かりましたら財団ホームページ等でお知らせいたします。なお、コバルト校正につきましては、2030年頃までサービスを継続していく予定です。

さらに陽子線治療および小線源治療への対応についても現在検討しております。

注) 当財団ウェブサイト「受け入れ電位計一覧（電位計単体 JCSS 校正）」を参照。

放射線治療とがん免疫、そして、 免疫チェックポイント阻害剤を用いた 免疫放射線治療

福島県立医科大学
医学部 放射線腫瘍学講座
教授 鈴木 義行



はじめに

1998年から約2年間、私は放射線医学総合研究所重粒子医科学センター病院（現・量子科学技術研究開発機構 QST 病院）で、レジデントとして中野隆史先生のご指導のもと、婦人科腫瘍・眼腫瘍グループに所属し、重粒子線治療・陽子線治療・小線源治療について学びを深めました。特に、重粒子線治療がもたらす局所効果の強さを強く印象づけられました。

2000年末、中野先生は母校である群馬大学医学部放射線医学講座の教授に着任され、翌2001年、私も群馬大学に戻るようになりました。先生は就任直後から、群馬大学に重粒子線治療施設を導入するために奔走しており、2005年頃には建設が決定しました。

私はそれまで、低酸素細胞増感剤、がん遺伝子と放射線感受性、など、放射線治療の局所効果の増強を目指した研究を続けていました。しかし、重粒子線治療や高精度放射線治療の発展を目の当たりにし、「局所制御が当たり前となる時代が近い」と確信し、局所制御率を高める研究よりも、最終的な予後（生存）を左右する“転移”を減らすための併用治療の研究が最重要だと考えるようになりました。ちょうどその頃、高校時代からの親友が「スウェーデンのカロリンスカ研究所に、がん免疫の研究をするために留学する」との連絡をくれました。「帰国したら一緒に放射線治療とがん免疫の研究を始めよう！」と約束し、2007年に彼が帰国したのを機に、私自身も研究テーマを一新し、放射線治療とがん免疫の研究を始めました。

放射線治療とがん免疫

現在では、高精度放射線治療が全国に普及し、粒子線治療の適応も広がり、多くの腫瘍で高い局所制御が期待できるようになりました。そのため、転移しにくい腫瘍や、抗がん剤などで転移を抑えられている場合には、生存率の大きな改善が認められています。一方で、転移しやすい腫瘍や、転移を十分に抑えられていない場合には、放射線治療だけで生存率を改善するのは難しいのが現状です。つまり、「転移をどう抑えるか」が、放射線治療の最重要な課題となりました。

私たちはこれまでの基礎研究やトランスレーショナル研究で、放射線治療ががん特異的なリンパ球を増加させること（Ref1）、がん組織（腫瘍）の微小環境を変化させること（Ref2）、免疫チェックポイント阻害剤（immune checkpoint inhibitor: ICI）を併用することで放射線治療の局所効果が増強すること（Ref3）、などを報告してきました。また、これまでに、多くの研究者より、放射線治療によって全身的な抗腫瘍免疫が強まることが示され、免疫療法を併用すること（免疫放射線治療）で、免疫治療、放射線治療のそれぞれの効果が増強し、局所制御率、生存率のさらなる改善や、放射線治療の適応拡大が期待できることが明らかとなっています。特に、周囲臓器の耐容線量の制約で十分な線量を照射できない疾患では、免疫放射線治療による遠隔転移抑制効果に加え、放射線治療が誘導するがん免疫による放射線治療の増感効果も注目されています。

非特異的免疫賦活剤、免疫細胞治療、そして、免疫チェックポイント阻害剤 (ICI) へ

私が放射線治療医になった1995年当時は、ソニフィラン[®] やピシバニール[®] といった非特異的免疫賦活剤が保険適用薬として臨床で使われていました。特にソニフィラン[®] は、効能・効果として「放射線療法の直接効果の増強」が認められていました。ただ、現場では「効果が“あるかもしれない”」という程度の印象で、アブスコパル効果のような劇的な効果は見た記憶がありませんでした。

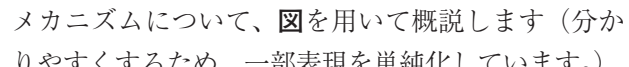
2007年に、私ががん免疫の研究を始めた頃には、非特異的免疫賦活剤に代わり、免疫細胞治療（養子免疫療法）が注目され、世界的に臨床試験が行われていました。私も都内のクリニックと連携し、群馬県内の病院で免疫細胞治療を始めました。免疫細胞治療の効果は限定的でしたが、放射線治療が同時に行われた、局所再発と腹膜播種をきたした胃がん術後症例で、アブスコパル効果を伴う著しい効果が認められたこともあり (Ref4)、私自身はその有効性に大きな可能性を感じ、群馬大学でも臨床試験として免疫細胞治療を用いた免疫放射線治療の臨床試験を計画しました。諸事情により、開始直前で中止となってしまい、その後、ICIが大きな注目を集めて登場したことをきっかけに、免疫放射線治療はICIを併用する新しい方向へと進んでいきました。

ICIの先駆けである抗CTLA-4抗体薬の一つであるイピリムマブ（ヤーボイ[®]）は、2011年には米国FDAから悪性黒色腫に対する約30年ぶりの新薬として承認されました。2011年は、ネイチャー誌で“Cancer immunotherapy comes of age（免疫治療の時代が来た）!!”と、免疫治療時代の到来が高らかに宣言された年でもあります。イピリムマブに続いて、抗PD-1抗体薬の一つであるニボルマブ（オプジーボ[®]）は、2014年に世界に先駆けて日本で保険適用となりました。その後は、ご承知の通り、次々と新しいICIが開発され、また、適応を広げ、現在に至っています。

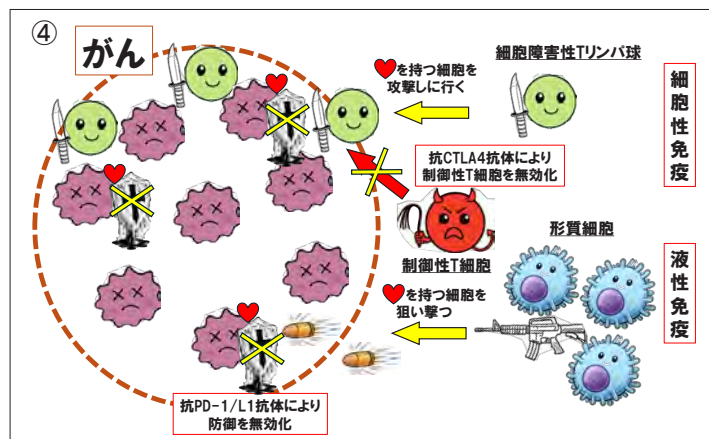
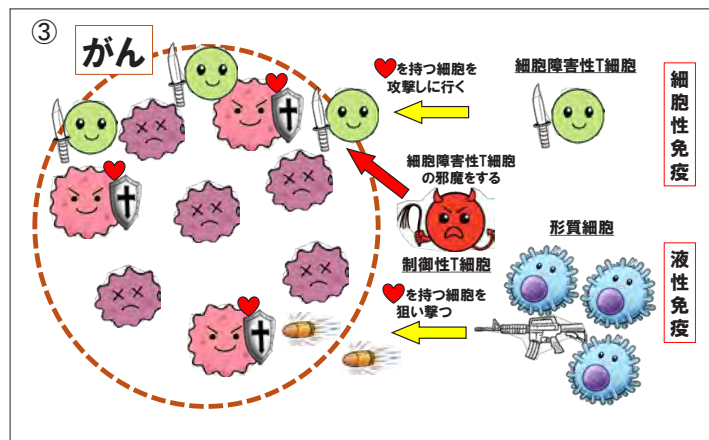
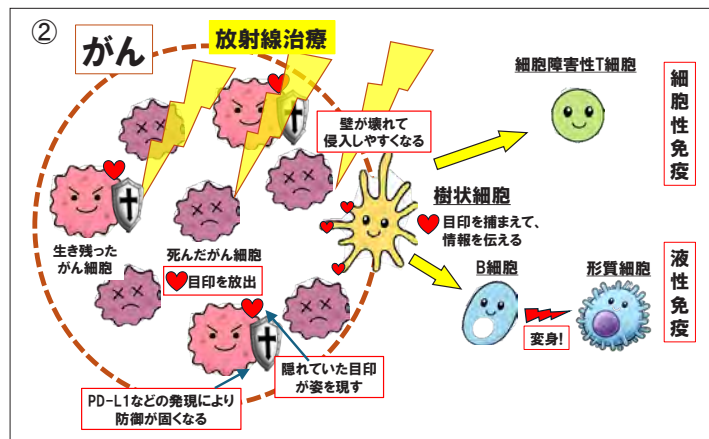
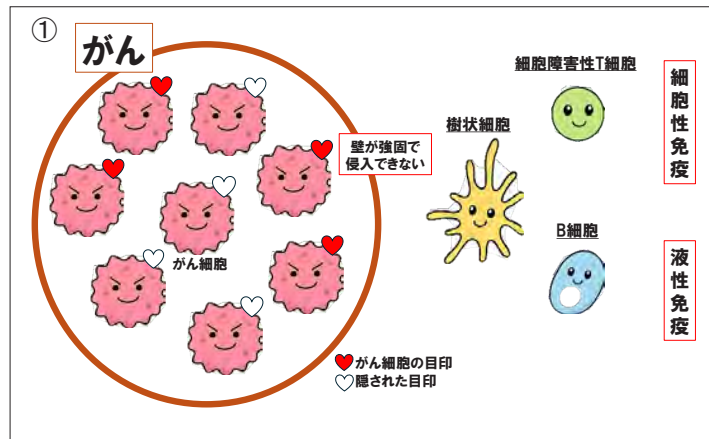
免疫放射線治療（放射線治療+ICI）のメカニズム

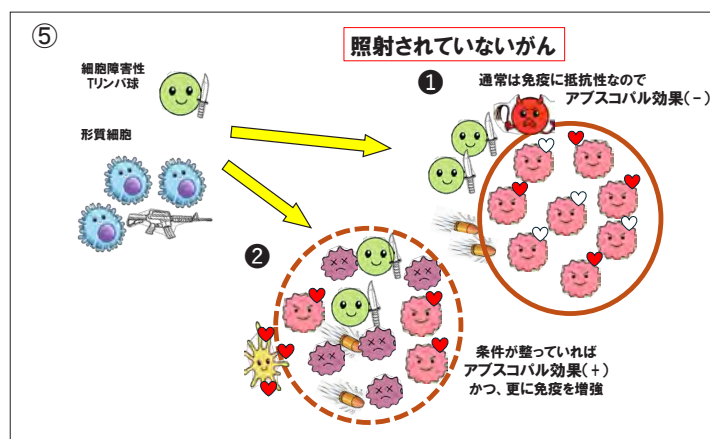
放射線治療とICIの併用については、2012年にニューイングランド医学雑誌で重要な症例報告が発表されました (Ref5)。イピリムマブが効かなかった多数の遠隔転移病巣を持つ悪性黒色腫患者の一つの病巣だけに、28.5Gy/3回の定位照射を行った

ところ、全身の腫瘍が縮小し（アブスコパル効果）、末梢血中のNY-ESO1（がん抗原）に対する抗体価の上昇も確認されたのです。これは放射線治療とICIの併用によってアブスコパル効果が“期待できる”ものになったことを示すもので、免疫放射線治療の可能性を強く認識する契機となりました。

ここで、ICIを用いた免疫放射線治療が効果を示すメカニズムについて、を用いて概説します（分かりやすくするため、一部表現を単純化しています。）

- ① がん細胞は、正常組織には無い、特有の「目印」を持っています。しかし、多くの場合、それを隠して、がん細胞を攻撃する免疫細胞の一種である細胞障害性T細胞（cytotoxic T cell：CTL）の攻撃から逃れています。また、免疫細胞は防御壁によりがん組織の内部には入って行けません。そもそも、がん細胞に対する攻撃力も持っていません。（もともと持っている免疫細胞もありますが、ここでは割愛します。）
- ② 放射線治療でがん細胞が死ぬと、その目印が放出されます。また、防御壁が崩れ免疫細胞ががん組織内に侵入しやすくなります。放出された目印は、免疫細胞の一種である樹状細胞に捕まり、その情報が解析され、CTLやB細胞に伝えられます。B細胞はがん細胞を攻撃できる形質細胞に変身します。また、放射線により、隠れていた目印が姿を現して、CTL、形質細胞が攻撃できるようになります。しかしながら、生き残ったがん細胞はPD-L1を発現して、CTLからの攻撃を防御できるようになります。
- ③ 形質細胞は、血液中に「がん細胞だけを狙って攻撃する物質（抗体）」を放出します。抗体が上手くがん細胞に届けば、その細胞を倒すことができます。一方、CTLはがん組織に入り込み、生き残ったがん細胞を攻撃します。しかし、別の免疫細胞である制御性T細胞（regulatory T cell：Treg）が邪魔したり、がん細胞のPD-L1発現により、CTLはがん細胞を倒すことができなくなってしまいます。
- ④ 抗CTLA-4抗体薬によりTregを無効化したり、抗PD-1 / L1抗体薬によりがん細胞のPD-L1発現を無効化したりすることで、CTLは生き残ったがん細胞を攻撃できるようになります。つまり、ICIは放射線治療の局所効果を高める役割を果たします。





⑤ 照射されていないがん組織は、通常は①のように免疫の働きに抵抗性なため、アブスコパル効果は起こりません。しかし②のように、免疫細胞が組織内に侵入でき、がん細胞が目印を示しており、Treg がいない、PD-L1 (防御) を発現していない、あるいは抗 CTLA-4 抗体薬、抗 PD-1 / L1 抗体薬が併用されている——といった条件が揃っている場合は免疫細胞が攻撃でき、“アブスコパル効果”が認められることになります。免疫放射線治療というアブスコパル効果ばかりが目されがちですが、実際にアブスコパル効果が現れる確率が高くないのは、このような理由によるものです。

※図は ChatGPT (無料版) にて作画

免疫放射線治療の臨床での成果

すでに幾つかのがん種で、ICI を用いた免疫放射線治療が局所制御率を高め、転移を抑制し、生存率の改善につながる事が確認されています。例えば、2017 年には、III 期の非小細胞肺癌に対して根治的な化学放射線治療を行った後に、抗 PD-L1 抗体薬であるデュルバルマブ (イミフィンジ®) を用いた地固め療法を加えることによって、生存率が有意に改善することが示されました (PACIFIC 試験、Ref6)。さらに 2024 年には、子宮頸がんにおいても、従来の化学放射線治療に抗 PD-1 抗体薬であるペムプロリズマブ (キートルーダ®) の同時併用 + 地固め療法を加えることにより、生存率の有意な改善が報告されました (KEYNOTE-A18 試験、Ref7)。それぞれ、2017 年、2024 年に日本でも保険適用となっています。これらの他にも、現在、様々ながん種や条件下において、多くの免疫放射線治療の臨床試験

が進められており、今後の成果に大きな期待が寄せられています。

私たちも 2018 年から、進行・再発胃がんに対する 3 次治療としての緩和的放射線治療 (22.5Gy/5 回、2 Gy 分割等価線量換算値 (α / β 比 = 10 : EQD2₁₀) = 27.2Gy) に続くニボルマブの逐次併用療法第 1/2 相臨床試験 (CIRCUIT 試験) を行い、比較的良好な生存期間と非常に良好な局所制御率 (85% @ 1 年、72% @ 3 年) を報告しました (米国放射線腫瘍学会・ASTRO2024 で発表)。また、後方視的な解析ではありますが、福島県立医科大学附属病院で放射線治療を受けた悪性黒色腫患者について、治療の前後 3 か月以内に ICI が投与された患者の局所制御率を調べたところ、症例数や観察期間は十分とは言えないものの、十分な線量 (EQD2₁₀ ≥ 50Gy) が投与された場合の 2 年局所制御率は 80% を超え、姑息的・緩和的な線量 (EQD2₁₀ < 40Gy) でも 30% 以上の 2 年局所制御率が確認されました (日本放射線腫瘍学会・JASTRO38 で発表)。胃がんに対する 27Gy、悪性黒色腫に対する < 40Gy は、いずれも今までの常識では腫瘍の制御が難しい低線量であり、この結果は ICI による放射線増感効果によるものと考えています。近年では、免疫放射線治療により、放射線の線量を下げられる可能性があるかどうか注目されており、私たちの結果もその可能性を示唆するものと考えています。

免疫放射線治療の有害事象 (副作用)

ICI が登場した当初は、これまでの抗がん剤と全く違う有害事象、いわゆる “irAE (immune-related Adverse Events) : 免疫関連副作用” による重篤な有害事象が大きな話題となりましたが、現在では、

注意深く診察すればほとんどが対処可能であり、むしろ、高齢者でも安全に使用できると考えられています。

ICIを用いた免疫放射線治療でも、当初は重篤な有害事象の発生が懸念されていましたが、既に多くの臨床試験で重篤な有害事象はプラセボ群と同等であることが示されています。また、2022年に発表されたShaらによるICI単独治療とICIを用いた免疫放射線治療の臨床試験のメタ解析にて、放射線治療の上乗せによる重篤な有害事象の増加は認められないことが示されています(Ref8)。また、傍証として、ICI、特に抗PD-1抗体薬は血中半減期が平均約3週間と長く、更には、継続して使用すると体内に蓄積しICI投与を中止した後も長期間残存しますので、ICIでの治療中に増大した腫瘍に対する姑息・緩和的放射線治療など、医師が意図していない(認識していない)形で免疫放射線治療が行われた患者さんも少なくないと考えられますが、これまで、この様な患者における有害事象は問題になっていません。

最近、頭頸部がんにおいて、シスプラチンを用いた化学放射線療法と抗PD-1抗体薬であるトリパリマブを用いた免疫放射線治療の比較試験で、効果が非劣勢(有害事象は免疫放射線治療が少ない)との報告がされました(Ref9)。シスプラチンは化学放射線治療で頻用されていますが、リンパ球減少や腎障害といった臨床的な対応を要する有害事象が高頻度で認められます。ICIはその様な有害事象が少なく、シスプラチンの代替になるのであれば臨床的に大きな意義があります。今後、人口減少が進むなかでも、後期高齢者のがんは増加し、その多くで放射線治療が選択されると予測されています。つまり、有害事象の強い抗がん剤を使えない患者が増えていくことから、比較的安全性の高い免疫チェックポイント阻害薬を用いた免疫放射線治療への期待は、今後ますます高まっていくと考えています。

課題

もちろん、残念ながら失敗に終わった臨床試験も数多くあります。例えば、頭頸部がん(上咽頭癌を除く)に対する根治的放射線治療にICIを追加した臨床試験はほとんどが失敗に終わっています(2025年12月時点)。また、ICIを逐次使用したPACIFIC試験(上述)は成功しましたが、同じ患

者群に対して同時併用を試みたPACIFIC2試験は失敗に終わっています(Ref10)。一方で、最近では胆管がんや頭頸部扁平上皮がんにおいて、術後高リスク患者を対象とした術後免疫放射線治療で有望な結果が報告されています(Ref11, 12)。これらの結果が、疾患そのものの特性によるものなのか、照射範囲や総線量・1回線量など治療法によるものなのか、腫瘍量の影響なのか、あるいは患者側の要因によるものなのか、まだ多くの検討課題が残されています。その上で、免疫放射線治療が有用な患者の選択が重要な課題であることは言うまでもありません。

おわりに

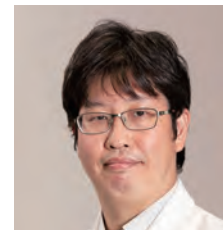
ICIの登場によって放射線治療患者の予後は改善しており、今後も免疫放射線治療の適応は拡大していくと確信していますが、ICIは周術期への応用も進んでおり、これまで根治的放射線治療が選択されていた症例でも、手術が選択されるケースが増えています。さらに、抗体薬物複合体(antibody-drug conjugate: ADC)などの有害事象が少なく効果に優れる分子標的薬、ICIを含む多剤併用薬物療法、などの開発によって、薬物療法のみで完治(CR)に至る症例も増えており、その結果、放射線治療による局所制御率と生存率が必ずしも直結しない状況が生まれています。このように、放射線治療を取り巻く環境は決して楽観視できるものではなく、放射線治療医も“生存率”を意識した新しい治療法の開発を進めていく必要があると考えています。

参考文献

- 1) Suzuki Y, et al., Cancer Res, 2012.
- 2) Sato H, et al., PLoS One, 2014.
- 3) Yoshimoto Y, et al., PLoS One, 2014.
- 4) Sato H, et al., Clinical Case Reports, 2017.
- 5) Postow M, et al., N Engl J Med, 2012.
- 6) Antonia SJ, et al., N Engl J Med, 2017.
- 7) Lorusso D, et al., Lancet, 2024.
- 8) Sha CM, et al., Radiother Oncol, 2020.
- 9) The DIAMOND Study Group, JAMA, 2025.
- 10) Bradley JD, et al., JCO, 2025
- 11) Uppaluri R, et al., N Engl J Med, 2025.
- 12) Xiao H, et al., JAMA Oncol, 2025.

難治性心臓不整脈に対する放射線治療 / 重粒子線治療

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
QST 病院
副病院長 若月 優



放射線治療は、1895年にレントゲン博士が「X線」を発見した直後からがん治療に用いられてきました。現在、日本における放射線治療の患者数は約30万人と推定され、全がん患者の約30%が放射線治療を受けています。

かつては緩和的な放射線治療が中心でしたが、2000年以降、コンピューター技術の進化に伴い治療技術は急速に高度化しました。強度変調放射線治療（図1）や体幹部定位放射線治療（図2）など、腫瘍に高線量を集中させ、周囲の正常臓器への影響を最小限に抑える高精度放射線治療が開発され、多くの腫瘍に対して根治的な治療が可能となり、適応範囲が拡大しています。

一方、がん以外の疾患に対する放射線治療は、古くから翼状片やケロイド、甲状腺眼症などの増殖性疾患、さらに三叉神経痛などの神経疾患に対して行われてきました。その中で、近年新たな適応として

心臓不整脈に対する放射線治療が注目されています。現在、多くの国で臨床試験が進行しており、日本でも複数の施設から報告がなされています。心臓不整脈に対する放射線治療は、新世代の治療法として大きな注目を集めています。

[心室性不整脈の治療動向]

日本の三大死因は「悪性新生物」「心疾患」「脳血管疾患」とされています。現在、死因別では「悪性新生物」が最も多く、人口10万対で315.6となっています。一方、「心疾患」は近年急速に増加しており、人口10万対で190.7と第2位を占めています（図3）⁽¹⁾。

特に「心疾患」の中で不整脈に着目すると、臨床的緊急性が極めて高いものに致死性心室不整脈（心室頻拍・心室細動 [VT/VF]）があります。我が国における心臓突然死は年間約7万人と推定され、こ

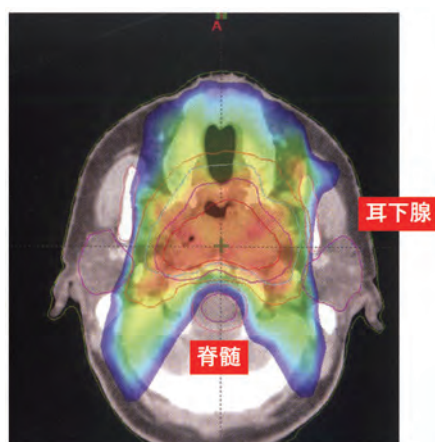


図1：強度変調放射線治療 上咽頭癌に対する強度変調放射線治療の線量分布図。耳下腺や脊髄などの正常臓器を避けて腫瘍へ放射線治療を集中している

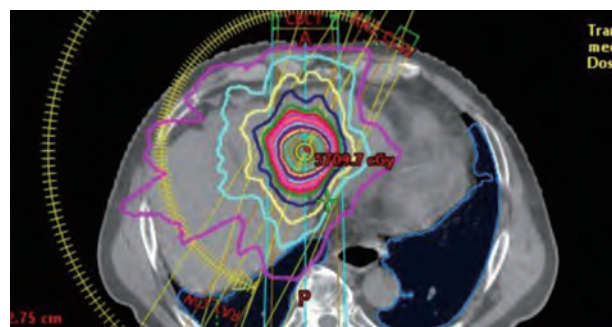


図2：体幹部定位放射線治療 肝細胞癌に対する体幹部定位放射線治療の線量分布図。回転照射を用いており、腫瘍に集中して高線量を投与している。

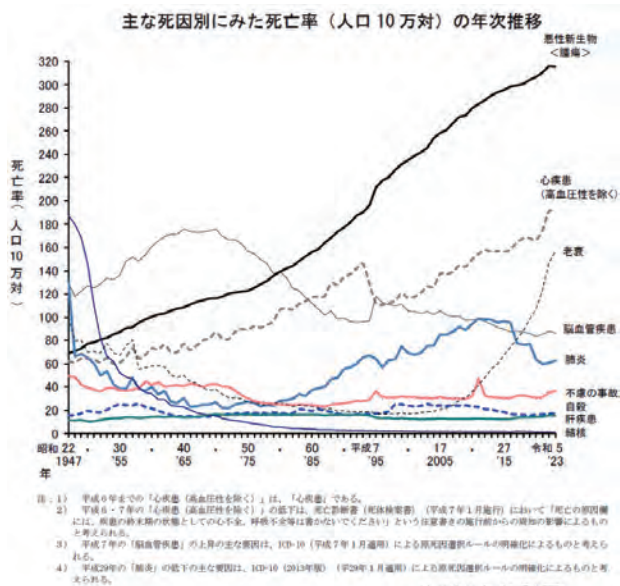


図3：文献1より引用。主な死因別にみた死亡例（人口10万対）の年次推移をみると、悪性新生物が最大であるが、心疾患が急速に増加している。

文献1より引用

れは1日200人、約7.5分に1人が命を落とす計算になります。突然死予防には植込み型除細動器（ICD）が有用とされてきましたが、その頻回作動はQOLの低下のみならず、生存率の低下にもつながります。

ICD作動回数を減らすためには、抗不整脈薬とカテーテルアブレーションの併用療法が有効です。しかし、抗不整脈薬は時間の経過とともに効果が減弱するほか、重篤な副作用により継続困難となる場合があります。また、カテーテルアブレーションは心外膜基質病変に対して内膜アプローチでは有効性が乏しく、外膜アプローチは高度な技術を要します。そのため、従来とは異なる新規不整脈治療の開発が重要な課題とされています。

カテーテルアブレーションとは「不整脈の起源となる部位をターゲットとし、不整脈基質および電気回路を焼灼する治療」を意味します。熟練した施設では良好な成績が報告されていますが、実施に際しては以下のような要件があります。

- 1) 静脈麻酔による全身麻酔、2) 非侵襲的陽圧換気、
- 3) 鼠径部局所麻酔下でのカテーテル挿入、4) 心房細動誘発のための高用量イソプロテレノール負荷、
- 5) 手技時間3～4時間、6) 治療後の数時間安静、7) 尿道カテーテルの挿入、8) 3～4泊の入院が必要

残念ながら、侵襲度が低い治療法とは言えず、高

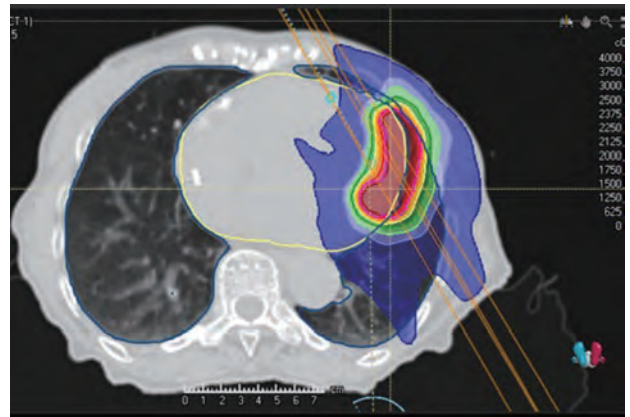


図4：心室頻拍の原因領域に対して放射線治療の線量分布図。

齢者・がん患者・フレイル患者にアブレーション治療を提供する際には臨床的制約となります。さらに、周術期における心タンポナーデ、食道狭窄、横隔神経麻痺など、重大な合併症も依然として問題です。

【心室性不整脈に対する高精度放射線治療法の開発】

近年、心臓不整脈に対する新たな治療法として、高精度放射線治療が注目されている。東海大学と量子科学技術研究開発機構（旧放射線医学総合研究所）では、約20年前からアブレーション不応の心外膜基質病変に対するアプローチとして、放射線体外照射による不整脈治療の基礎研究を進めてきた。網野らは炭素イオン線を用いた動物モデルにおける放射線電気生理学的研究を行い、抗不整脈効果の機序の一つとしてコネキシン蛋白の発現亢進が関与する可能性を報告した。このことから、放射線による抗不整脈効果は「焼灼」ではなく、「照射」に伴う放射線の生物学的効果に起因する可能性が示唆され、心臓不整脈に対する放射線治療の有効性が示された⁽²⁾。

これらの基礎研究を背景に、米国ワシントン大学では臨床応用が開始された。がん治療において急速に進化した体幹部定位放射線治療（SBRT）技術を応用することで、隣接する正常臓器への被ばくを最小限に抑えつつ、標的部位に高線量を正確に集中照射することが可能となった。2017年、ワシントン大学では「X線体外照射により心室不整脈基質をわずか15分で焼灼する」という新世代治療が実施され、その成果は循環器領域におけるトップニュースとして報告された⁽³⁾。Cuculichらは、難治性心室頻拍（VT）患者5名に対し、体外からX線を用いたSBRTによるアブレーションを施行し、1年間に

わたる抗不整脈効果を確認した⁽³⁾。この治療は、心室頻拍の原因部位に対して1回大線量(25Gy)を投与することで不整脈を制御する方法である(図4)。

その後、拡大研究としてENCORE-VT試験(Phase I/II)が実施され、VT患者18名(全19名)に対する高い安全性と抗不整脈効果が証明された⁽⁴⁾。一方で、懸念事項として、照射後3か月の胸部CTで照射野に一致する左肺野の線維化が観察されたことが報告されている。本邦では、2019年に東海大学において、ワシントン大学と同様のプロトコルを用いたSBRTによるVT治療が行われ、良好な経過が得られている⁽⁵⁾。

[難治性心房細動に対する放射線治療の動向]

難治性心房細動に対する放射線治療の研究開発も進展している。本邦における心房細動患者数は加齢とともに増加し、2020年には100万人を超えた。有病率は80歳代以上で男性4.4%、女性2.2%と報告され、患者数は約170万人と推定される。心房細動は左房内血栓形成による脳梗塞発症リスクを5倍に高め、5年生存率は30%未満と極めて低い。また、脳梗塞のみならず心不全の増悪や心室細動への移行による突然死の可能性も有している。

心房細動に対する標準治療は薬物療法およびカテーテルアブレーションであるが、これらで根治が困難な難治性心房細動患者が一定数存在する。このような背景から、心房細動(AF)を対象とした高精度放射線治療の臨床成績が報告されている。しかし、心室性不整脈に対する治療成績と比較すると、十分な効果は得られていない⁽⁶⁻⁸⁾。その要因として、心房は心室に比べて筋層が薄く、複雑な構造を有することが推測される。

本邦においても、国立がん研究センターから心房細動に対する高精度放射線治療の報告がなされており、今後の研究によるさらなる成果が期待される⁽⁷⁾。

[心不全患者に対する放射線治療]

近年、心臓に対する放射線治療において、非常に興味深い研究報告がなされている。従来、心疾患に対する放射線治療は主に不整脈治療の研究開発に焦点が当てられてきたが、心不全患者に対する放射線治療の有効性を示唆する報告が登場している⁽⁹⁾。

Pedersonらは、マウス心不全モデルにおいて心臓への放射線照射を行い、左室駆出率(LVEF)の有意な増加と拡張末期容積の減少を示した。さらに、

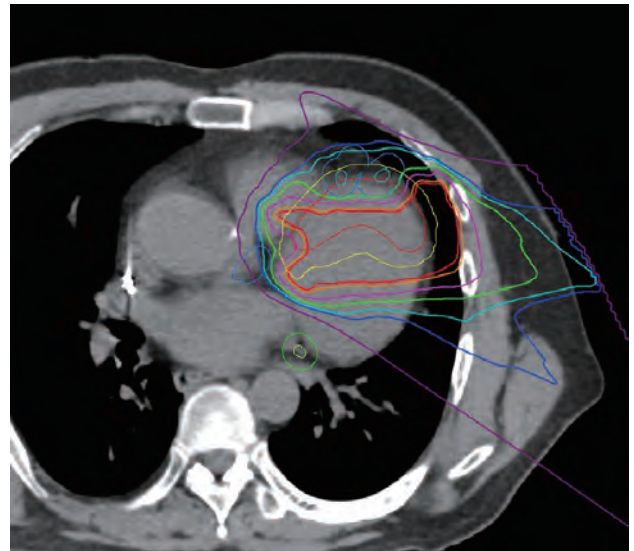


図5：心室頻拍に対する重粒子線治療の線量分布図。2門の重粒子線治療で冠動脈への線量を低減することにより安全に心室への照射を施行可能としている。

心室頻拍(VT)に対して25Gyの心臓放射線治療を受けた心筋症患者においても、同様に左室拡張末期容積の減少とLVEFの改善が確認された。

これらの結果は、心臓に対する放射線治療が心臓リモデリングを抑制する可能性を示唆しており、将来的に心不全患者に対する新たな治療選択肢となる可能性を示す重要な知見である。

[心臓不整脈に対する重粒子線治療の研究開発]

炭素イオン線治療は、強力ながん制御能に加え、治療後のQOLが高い最も優れた低侵襲がん治療法の一つである。日本では、放射線医学総合研究所(現・量子科学技術研究開発機構)において1994年6月から臨床導入され、現在では世界16施設、国内7施設で治療が行われている。国内では2016年より保険適用が開始され、骨軟部腫瘍、前立腺癌、膵臓癌、肝細胞癌、早期肺癌など多くの腫瘍性疾患に適応されている。しかし、非腫瘍性疾患への治療はこれまで行われていなかった。

2017年、心室性不整脈に対する重粒子線治療の臨床応用を目指した前段階研究として、放射線医学総合研究所において「炭素線照射を受けた縦隔腫瘍患者における心筋の興奮伝導特性」について検討が行われた。肺癌患者8例を対象に、照射前後のホルター心電図解析を実施した結果、上室・心室不整脈は4例で改善し、増悪例は認められなかった。さらに、星状神経節への照射を受けた6例では、心拍

変動解析において交感神経緊張の亢進が横ばいまたは抑制され、不整脈基質および自律神経系の修飾に起因する抗不整脈作用の可能性が示唆された。5年間のフォローアップでは心合併症は認められず、6例は癌死、2例は生存していた⁽¹⁰⁾。

2022年には、量子科学技術研究開発機構 QST 病院において、世界で初めて致死性心室不整脈に対する炭素イオン線（重粒子線）による不整脈放射線治療が実施された（図5）。炭素イオン線治療は、体幹部定位放射線治療（SBRT）と比較して高い線量集中性を有し、周囲臓器への影響を最小限に抑えることが期待される。従来、炭素イオン線を用いた基礎研究は報告されていたものの、治療方法の制約から臨床応用は困難であった。しかし、近年、回転ガントリーや高速スキニング照射などの新技術の開発により、炭素イオン線による心臓不整脈治療の臨床応用が可能となった。現時点では開発初期段階であるが、今後の発展が期待される。心室頻拍に対する治療は世界各国で臨床試験が進行しており、一般臨床への展開が大きく期待されている。

[最後に]

心疾患に対する放射線治療は、致死性不整脈である心室頻拍に対する高精度放射線治療として、臨床応用に向けた研究開発が世界的に進展している。さらに近年では、不整脈治療にとどまらず、心臓リモデリングを抑制することによる心不全治療への応用可能性も示唆されており、今後さらなる発展が期待される。

1. 厚生労働省. 令和5年（2023）人口動態統計月報年計（概数）の概況.
2. Amino M, Yoshioka K, Tanabe T, Tanaka E, Mori H, Furusawa Y, et al. Heavy ion radiation up-regulates Cx43 and ameliorates arrhythmogenic substrates in hearts after myocardial infarction. *Cardiovasc Res*. 2006;72 (3) :412-21.
3. Cuculich PS, Schill MR, Kashani R, Mutic S, Lang A, Cooper D, et al. Noninvasive Cardiac Radiation for Ablation of Ventricular Tachycardia. *The New England journal of medicine*. 2017;377 (24) :2325-36.
4. Robinson CG, Samson PP, Moore KMS, Hugo GD, Knutson N, Mutic S, et al. Phase I/II Trial of Electrophysiology-Guided Noninvasive Cardiac Radioablation for Ventricular Tachycardia. *Circulation*. 2019;139 (3) :313-21.
5. Amino M, Kabuki S, Kunieda E, Yagishita A, Ikari Y, Yoshioka K. Analysis of depolarization abnormality and autonomic nerve function after stereotactic body radiation therapy for ventricular tachycardia in a patient with old myocardial infarction. *HeartRhythm Case Rep*. 2021;7 (5) :306-11.
6. Bonaparte I, Gregucci F, Di Monaco A, Troisi F, Surgo A, Ludovico E, et al. Phase II Trial of LINAC-Based STereotactic Arrhythmia Radioablation (STAR) for Paroxysmal Atrial Fibrillation in Elderly: Planning and Dosimetric Point of View. *J Pers Med*. 2023;13 (4) .
7. Shoji M, Inaba K, Itami J, Hamada M, Okamoto H, Iwasa T, et al. Advantages and challenges for noninvasive atrial fibrillation ablation. *J Interv Card Electrophysiol*. 2021;62 (2) :319-27.
8. Qian PC, Azpiri JR, Assad J, Gonzales Aceves EN, Cardona Ibarra CE, de la Pena C, et al. Noninvasive stereotactic radioablation for the treatment of atrial fibrillation: First-in-man experience. *J Arrhythm*. 2020;36 (1) :67-74.
9. Pedersen LN, Valenzuela Ripoll C, Ozcan M, Guo Z, Lotfinaghsh A, Zhang S, et al. Cardiac radiation improves ventricular function in mice and humans with cardiomyopathy. *Med*. 2023;4 (12) :928-43 e5.
10. Amino M, Yoshioka K, Shima M, Okada T, Nakajima M, Furusawa Y, et al. Changes in arrhythmogenic properties and five-year prognosis after carbon-ion radiotherapy in patients with mediastinum cancer. *Ann Noninvasive Electrocardiol*. 2018;23 (1) .

東芝の重粒子線治療装置 —さらなる普及に向けて—

東芝エネルギーシステムズ株式会社
 パワーシステム事業部 粒子線事業技術部
 プロジェクト第一グループ マネジャー 亀田 大輔



はじめに

1994年、放射線医学総合研究所（現量子科学技術研究開発機構、以下QST）で最初の重粒子線治療が開始されてから30年余りが経過しましたが、世界で稼働する重粒子線治療施設は17（国内7、海外10）に留まっています。なかなか普及が進まない要因のひとつに、重粒子線治療装置の巨大さがあります。東芝は、自社の超伝導技術を基軸に、この巨大な装置の小型化に正面から取り組んできました。2011年、QSTに高速ビームスキヤニング照射システムを最初に納入してから今日まで、国内3施設（QST病院、神奈川県立がんセンター、山形大学医学部東日本重粒子センター）、海外では、韓国3施設（延世大学校医療院、ソウル大学病院、及びアサンメディカルセンター）、及び、アラブ首長国連邦1施設（クリーブランドクリニックアブダビ）から受注し、装置を提供しています（図1）。「医用原子力だより」30周年記念号に寄せて、東芝の重粒子線治療装置の開発実績、海外展開、および、さらなる普及に向けた取り組みについてご紹介します。

開発実績

東芝の重粒子線治療装置の開発は、2006年、QSTの次世代照射システム開発研究において、高速スキヤニング照射システム、及び、X線装置とロボットアーム型治療台を用いた自動位置決めシステム等の開発を行ったことからスタートしました。2011年、それらを実装した治療室システム（水平・垂直ポート、2室）をQSTの新治療棟に納入しました。これにより、従来用いていたコリメーターやボラスを必要とせずに患者さん一人一人のがんの形状に合わせて線量集中性の高い治療が可能となりました。また、呼吸などで動く臓器に対しても、斜めX線装置、ビームゲーティング機能、高速リスキャン機能を組合せることで、動いている臓器をその場で狙い撃ちするIGRT（Image guided

radiation therapy）を可能にしました。

QSTに納入した治療室システムを基本とし、2015年、神奈川県立がんセンターに重粒子線加速器を含む重粒子線治療装置一式（水平ポート2室、水平・垂直ポート2室）を納入しました。各治療室には、他施設に先駆けて自走式In-room CTが搭載されました。加速器は、QSTが開発を推進し、群馬大学重粒子線医学センターに国内最初に導入された普及型シンクロトロンを基本として、高速スキヤニング照射で必須となるビームエネルギー多段制御やビーム強度変調制御の技術開発、及び、実機への実装を行いました。

他方、QSTの豊富な知見と東芝の超伝導技術を融合して世界初の超伝導回転ガントリーの開発を行い、東芝は2016年、その初号機を擁するガントリー治療室システムをQSTに納入しました。これにより、従来の常伝導電磁石を用いた回転ガントリーに比べて大幅な小型化を達成し、360度の任意の方向からの重粒子線治療を実用化しました。

さらなる小型化に向けて、東芝は照射システムの長さ（スキヤニング電磁石入口からアイソセンターまでの距離）を従来の9mから3.5mに大幅に縮小する開発を行いました。これは、新規開発したスキヤニング電磁石、また、その電磁石を高速にドライブするために新たに製作したスキヤニング電源、さらに、それまで11段階だったエネルギー多段制御を600段階とする加速器制御技術を確立し、照射ポートで大きなボリュームを占めていたレンジシフト機器を撤去したことなどで、この小型化が可能となりました。そして、この照射システムを超伝導回転ガントリーに適用することで、初号機よりもさらに小型化を進めた超伝導小型回転ガントリー（以下、小型回転ガントリー）の開発に成功しました（図2）。

これらの開発成果を山形大学医学部東日本重粒子センターに初めて実装し、2021年に水平ポート1室、2022年に小型回転ガントリー1室で治療が開始さ

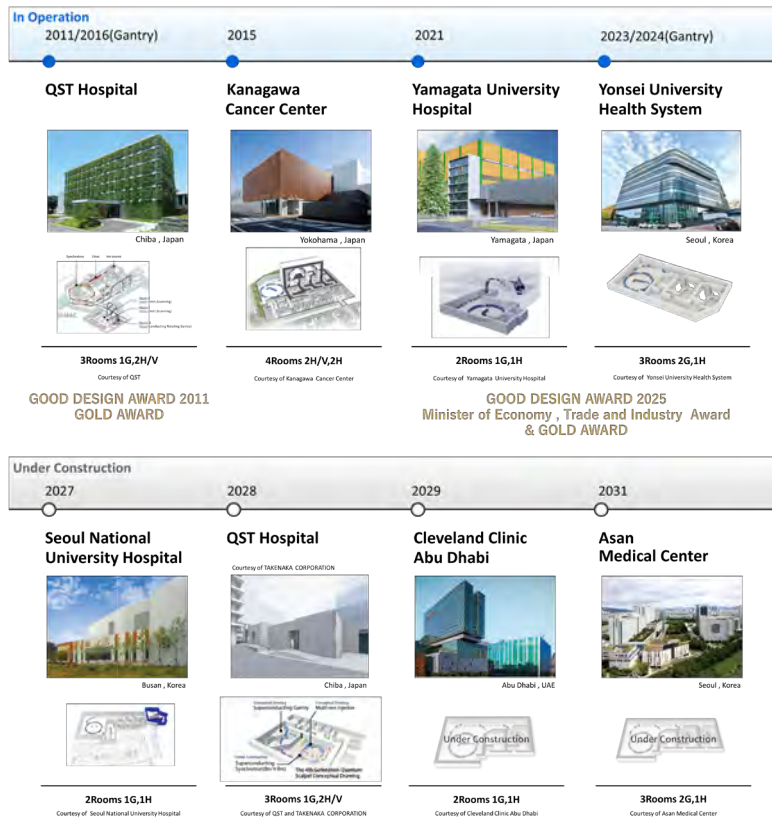


図1 東芝重粒子線治療装置の実績

れました。本施設では、これら治療室をシンクトロンと異なるフロアに配置することで重粒子線施設としては非常にコンパクトな建屋設計（45m × 45m）が可能となり、病院内で総合的な医療サービスを患者さんに提供する環境が実現しました。

海外展開

東芝の海外展開は、2018年、韓国延世大学校医療院において、水平ポート1室、また、他施設に先駆けて2室の小型回転ガントリーを備える重粒子線治療装置の導入に着手したことからスタートしました。韓国初の重粒子線施設ということで、許認可対応、現地施工、保守体制といった新しい課題に直面しましたが、現地パートナーと連携してひとつひとつ課題をクリアし、2023年に水平ポート、2024年に1機目の小型回転ガントリー、2025年に2機目の小型回転ガントリーを順に納入しました。

2020年には、韓国ソウル大学病院において、釜山近郊に既に建設済みだった建屋を利用し、東芝の重粒子線治療装置を導入するというプロジェクトに着手しました。シンクトロン、水平ポート1室、電源などは既設建屋のレイアウトに合わせて設置し、小型回転ガントリー1室は建屋を増築して設置しました。また、照射システムの長さはそのままに、照

射野サイズを従来仕様の20cm × 20cmから30cm × 40cmに拡大した先進スキニング電磁石の開発をはじめ、線量率増大のための制御技術、また、炭素イオンとヘリウムイオンのビームを切り替えて供給するマルチイオン制御システムの開発を行っています。2026年現在、主要機器の据付がほぼ完了し、先進システムの実装に向けた準備を進めています。

最近では、2025年3月にアラブ首長国連邦のクリーブランドクリニックアブダビと水平ポート1室、小型回転ガントリー1室の機器供給を行う契約を結びました。また、つづく4月には韓国アサンメディカルセンターと先進システムを備える水平ポート1室、及び小型回転ガントリー2室の機器供給、据付調整、保守までの契約を結びました。

さらなる普及に向けて

国内では、7つの重粒子線施設が稼働し、公的保険の適用も段階的に拡大されるなか、1994年から2024年までの累計で約5万人の患者さんに重粒子線治療が行われてきました。その間、患者さんの生活の質（Quality of Life）の維持や、治療期間がX線や陽子線と比べて1/3程度の短さ、といった重粒子線治療の有用性が認識されてきました。一方、国内のがんの罹患者数は年間で約100万人と言われて

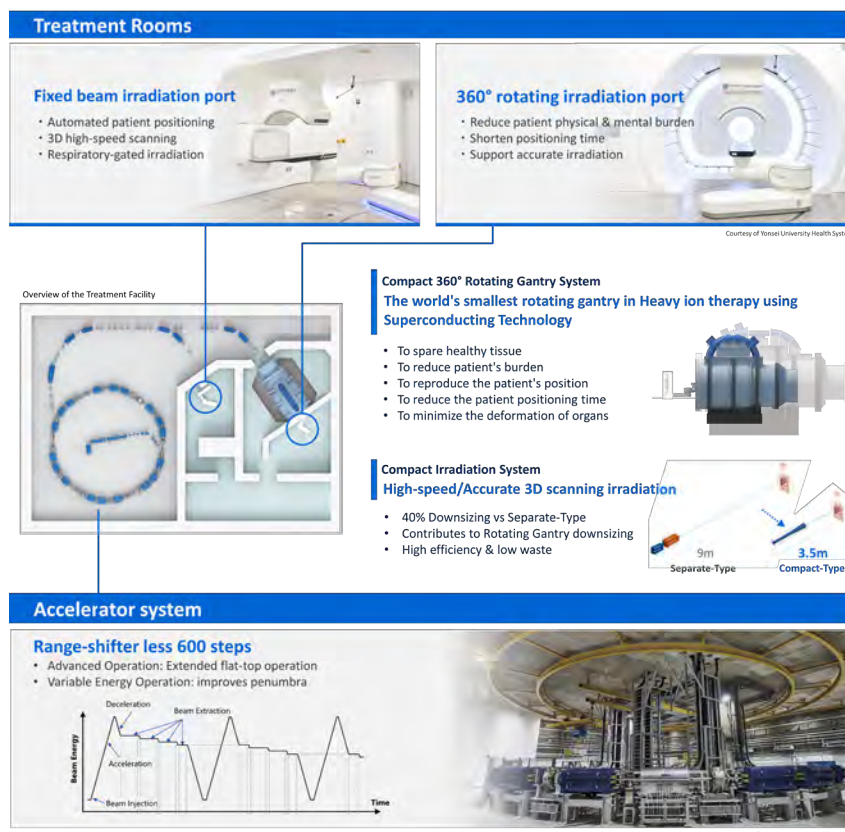


図2 装置の基本構成と小型化の実装技術

参照 <https://www.global.toshiba/jp/products-solutions/heavy-ion.html>

おり、そのうち、重粒子線治療が適用される患者さんは2024年時点で年間6000名弱（0.6%程度）に留まっています。少子高齢化で10年後の生産年齢人口ピークが60歳代となる国内社会において重粒子線治療の適用がさらに必要となるでしょう。海外先進国でも似たようなことが予想されます。

現在、重粒子線治療のさらなる普及を目指し、QSTで量子メスプロジェクトが進められています。本プロジェクトでは、重粒子線装置で最も大きなコンポーネントであるシンクロトロンを従来の直径20mから約8m四方まで小型化することで装置全体の大幅な小型化を実現します。東芝は、そのようなシンクロトロンの心臓部となる超伝導電磁石ユニットの開発を行っています。現在、その製造を進めており、2026年は既存施設に併設された新建屋に据付を行う予定です。2028年には超伝導シンクロトンによる治療が開始される計画です。今後、この小型の超伝導シンクロトンを実用化することで、これまで敷地の制限や建屋コストのために導入をあきらめていた病院、また、施設老朽化によりリプレースを計画している病院にも、重粒子線治療装置を提供する新しい機会が生まれると期待しています。

近年では、MRI、コーンビームCTといったイメー

ジング技術を駆使した高精度放射線治療や、即時適応放射線治療が主流となってきています。最近、座位・立位での治療システムも実用化されつつあります。このような動向を捉えて、重粒子線治療装置のアップグレードを行うことも今後の重要課題です。

また、重粒子線治療装置の導入、品質保証、運転保守について従来の放射線治療とは異なる部分も多くあり、病院関係者の理解を得るのに多くの時間がかかるケースもあります。さらなる普及のためには、ユーザーと連携して、重粒子線治療装置の国際的な理解や標準化を進める取り組みを推進していくことも課題として認識しています。

結びに

今年は、東芝が2006年に重粒子線治療装置の開発に着手してから、ちょうど20年目の年となります。巨大な重粒子線治療装置を小型化するという課題に正面から取り組み、QSTをはじめ、各施設のパートナーと課題をひとつひとつクリアしてきました。この先、さらなる普及に向けて新たな課題が待ち受けていますが、この歩みを様々なパートナーと共に続けていきたいと思っています。

中部国際医療センターの目指す陽子線治療について

中部国際医療センター
陽子線がん治療センター
施設長 不破 信和



1 中部国際医療センター陽子線治療センターのご紹介

中部国際医療センターの前身は木沢記念病院で、1913年以來100年以上に亘って、この地域の基幹病院として発展してきました。2022年1月に新築移転し、名称も中部国際医療センターと改称されました(図1)。その理由は「医療水準の高さから世界中から患者が集まる病院作りを理念とし、今まで以上にがん治療に注力したい」との山田實紘理事長の思いからであり、陽子線治療はその一環として導入されました。



図1 中部国際医療センター本院と陽子線がん治療センター

当院は国内では20番目の陽子線治療施設です。Varian社製世界最新の装置(ProBeam 360°)であり、日本初の導入となります。図2に装置の外観、図3に治療室を示します。加速器は国内初の超電導サイクロトロン装置であり、消費電力が大幅に軽減されています。照射野の形成方法はspot scanning方式のみであり、従来の装置よりspotサイズが小さく、より優れた線量分布を得られるだけでなく、高速scanningのため治療時間の短縮が可能です。照射野は25cmx25cmであること、また照射野確認のためのcone beam CTで得られる像は高い解像度を有しており、実用性の高い装置です。

2 当院の陽子線治療の特徴について

当院ならではの治療としては、進行頭頸部がんに対する動注併用、もう一つは進行膀胱がんに対する温熱療法併用です。

頭頸部がんは、腫瘍の近傍には眼球、脳などの重要な臓器が多く集まっており、高線量の投与は最新の陽子線治療といえども、重篤な障害の発症の可能性はあります。私達は頭頸部がんへの動注治療、特に浅側頭動脈からの動注治療に豊富な経験を持っています。陽子線治療と併用することで、治療成績の大幅な改善を目指すと同時に陽子線照射の範囲を小さくするだけでなく、線量を減らすことにより、5年後、10年後の障害軽減に努めたいと考えています。

進行膀胱がんは予後の悪い代表的な悪性腫瘍です。陽子線治療あるいは重粒子線治療でも治療成績の改善は残念ながら十分ではありません。最近の研究では膀胱がん温熱療法を併用することで生存期間が約6ヶ月延長するとされています⁽¹⁾。膀胱がん6ヶ月延長することは容易なことではありません。温熱療法は膀胱がん以外にも大きな肝がん、肝内胆管がん、肉腫への適用を考えています。RF誘電加熱は脂肪組織が発熱し易い特徴があり、脂肪肉腫には特に有効であると考えています。

3 陽子線治療の今後の役割について

優れた線量分布は晩期障害の軽減だけでなく、生存率の改善にも貢献します。頭頸部がん而言えば、頸動脈への線量軽減はその後の脳梗塞などの発症の軽減に、また咽頭収縮筋への線量軽減は誤嚥を防ぎ、死亡率も低下させるはずで

胸部では、放射線治療による肺障害、また心障害の軽減は生存率改善に直結します⁽²⁾。肺がん、食道がんに対する陽子線治療は局所制御の改善のみで

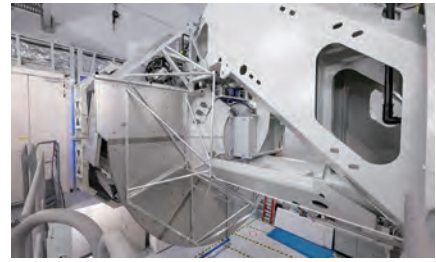
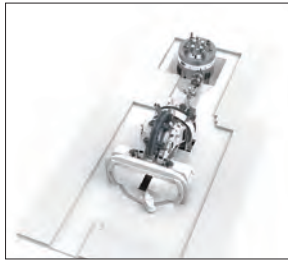


図2 サイクロトロンとガントリー 超電導サイクロトロン 回転ガントリー



図3 治療室

なく、上記の障害、特に心臓への障害の軽減は長期生存者の QOL 維持に大きな役割を果たすと思われる。

免疫チェックポイント阻害剤 (ICIs) の登場は肺癌、食道がんの治療戦略に非常に大きな影響を与えています。手術不能進行食道がんでは化学療法と ICIs の治療が第一選択となっており、また進行肺癌では化学放射線治療後の ICIs 治療が標準治療として定着しています。今後の方向性として放射線治療と ICIs を含め化学療法の同時併用も検討されています。In vivo ではありますが、心臓が照射された場合、ICIs と放射線治療との同時併用は重篤な心障害を発症しやすいとの報告があり⁽³⁾、心臓への線量を可及的に低減できる陽子線治療の役割は今まで以上に重要になることは明白です。

米国での陽子線治療の対象例はこの10年で大きく変化しています。以前は前立腺がんが半数を占めていましたが、現在は大幅に低下しています⁽⁴⁾。増えている疾患は頭頸部がん、縦郭の悪性リンパ腫、乳がんなどです。後2者は心臓への線量軽減がその理由と思われる。

翻って我が国はどうでしょうか。陽子線治療、重粒子線治療例の半数以上が前立腺がんです。患者数の多さ、保険収載されていることがその主な理由と推察できますが、粒子線の有効活用という視点からは、とても残念な現状と言わざるを得ません。現在、

小児がんは保険適用されていますが、長期生存が期待出来る AYA 世代への適用拡大も、二次発がんも含めた晩期障害の低減という視点から検討されるべきではないでしょうか。因みに米国では AYA 世代は陽子線治療を強く推奨する疾患群 (group1) に入っています⁽⁵⁾。

陽子線に限らず粒子線治療の導入、その維持には高額な費用が必要です。採算面において現状はとても厳しいものがあり、陽子線治療の普及に大きな障壁になっていることは明白です。諸外国での治療費からみて、我が国の治療費が適正であるか否かについて、費用対効果も含め、もう少し議論を深めるべきではないでしょうか。

文献

- 1 Astrid van der Horst, Eva Versteijne, Marc G H Besselink, et al. The clinical benefit of hyperthermia in pancreatic cancer: a systematic review. *Int J Hyperthermia*. 2018;34:969-979.
- 2 Nielsen KM, Offersen BV, Nielsen HM, et al. Short and long term radiation induced cardiovascular disease in patients with cancer. *Clin Cardiol*. 2017;40:255-261
- 3 Du S, Zhou L, Alexander GS, et al. PD-1 Modulates Radiation-Induced Cardiac Toxicity through Cytotoxic T Lymphocytes. *Thorac Oncol*. 2018;13:510-520.
- 4 William F Hartsell, Charles B Simone 2nd, Deborah Godes, et al. Temporal Evolution and Diagnostic Diversification of Patients Receiving Proton Therapy in the United States: A Ten-Year Trend Analysis (2012 to 2021) From the National Association for Proton Therapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2024;119:1069-1077.
- 5 <https://www.astro.org/ASTRO/media/ASTRO/Daily%20Practice/PDFs/ASTROPBTModelPolicy.pdf>

筑波大学における陽子線治療施設の現状



筑波大学
陽子線医学利用研究センター
教授 榮 武二

1. はじめに

筑波大学における陽子線治療の歴史は1980年の粒子線医療科学センターの設立からスタートする。1番目の施設は速中性子治療と陽子線治療の研究のために作られたが、実際に臨床利用まで研究が進んだのは陽子線治療であった。その後、2001年に筑波大学附属病院に専用加速器と治療施設が完成し、2025年の3番目の施設へと臨床応用が続けられている。この間、臨床研究から高度先進医療、保険収載へと陽子線治療のがん治療における立ち位置が進化してきた。延べ治療患者数は約9,000名、現在1日60名を超えるがん患者の治療が継続されている。本報告では、これまでの施設の概要と陽子線治療装置に残されている課題について述べる。

2. 1番目、2番目の陽子線治療施設

1番目の治療施設は、(現)高エネルギー加速器研究機構(KEK)の500 MeV陽子ビーム(治療の場合デグラダにより250 MeVに減速)を利用して作られ1983年4月にがん治療の臨床研究が始まった。治療専用の加速器ではなく物理実験用の加速器群の途中のビームラインを利用してKEKと筑波大学の共同研究として施設が作られた。図1は照射施設の平面図と立面図である。照射方向は2方向固定であり、当時世界で最初の垂直ビームラインを実現するために地下に照射室が作られた。この施設で、呼吸同期照射法、プロトンCTなどの研究、多くの種類のがんに対する陽子線治療の臨床研究が行われた。

2番目の治療施設は、場所を附属病院に移し、治療専用の加速器とともに照射方向を自由に設定で

表1 新装置の主な仕様

イオン源	マイクロ波イオン源
入射器	RFQライナック、3.5MeV
加速器	シンクロトロン
加速エネルギー	70-230MeV, 99ビーム
ガントリー、回転範囲	コークスクリュー型2基、360度
コース切り替え時間	25秒以下
照射野	30cm×40cm
スキャンニング速度	8m/s, 10m/s
呼吸同期	体表検知呼吸ゲート式、マーカー追跡

きる回転ガントリー2基が作られた。治療開始は2001年9月で、1番目の治療施設に引き続き臨床研究の位置づけであり最初は患者の費用負担なしで始まった。1番目の停止から2番目の開始まで、約半年、治療は休止された。当然、治療再開は少ない患者数で始められ1年目は年間150人程度であったが、高度先進医療、保険収載が認められ最終的には年間550名程度の治療が行われてきた。9時から17時の加速器運転体制で運用されていたが、最終的にはシフトにより、夜間の延長治療が可能な運用が行われてきた。

3番目の治療施設への移行は、治療を継続した状態で行う方針としたため、既存の装置を使いながら、隣接する敷地に新しい治療装置を立ち上げ2025年9月から新施設での治療が開始された。2025年12月末までに旧施設での治療が終了する予定で移行が進んでいる。当初、移行期間の治療患者数を減らす予定で計画を立てたが、来院患者数の増加のためこ

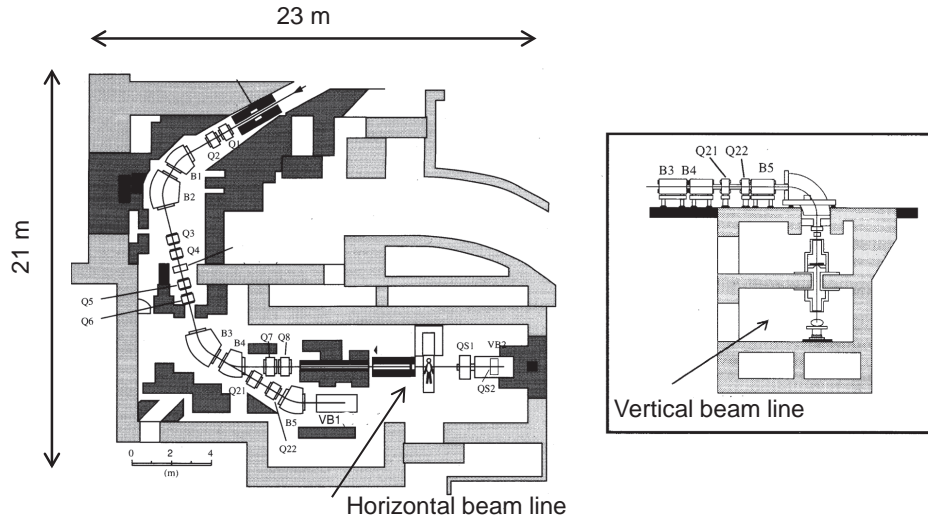


図1 1番目の施設の平面図と立面図

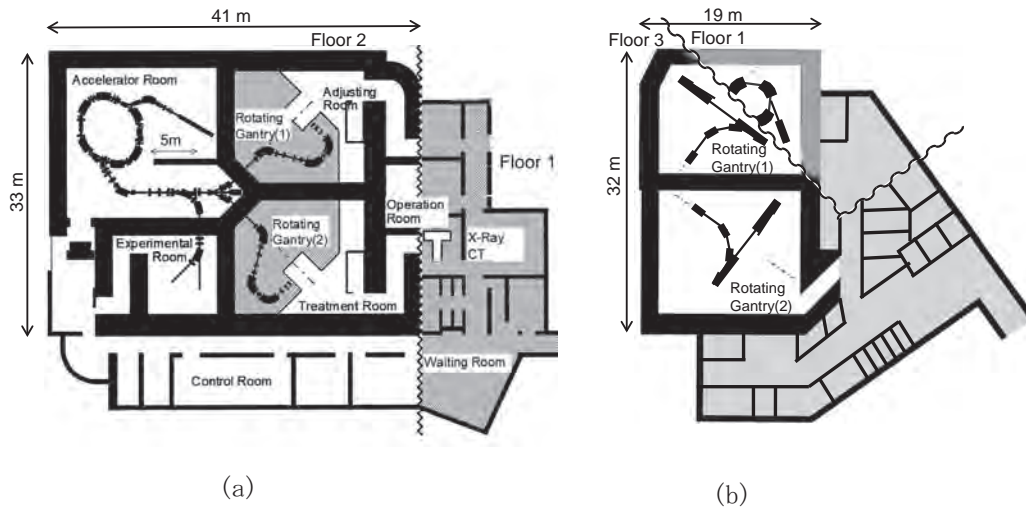


図2 2番目 (a)、3番目 (b) の施設の平面図

の移行期間の患者数は通常の10～20%増加で運用している。

3. 新しい陽子線治療施設

新しい施設は建屋面積の制限があり、遮蔽壁内の面積を小さくするため照射室の下に加速器室がある縦置き構造を採用している。図2に2番目の施設と新施設の比較を示す。遮蔽体の面積は約半分に削減された。治療室は2室で、1室にはウォルト・ディズニー・ジャパン株式会社の支援により小児の治療用の壁紙の提供を受けた。

照射方法は、2番目の施設のブロードビーム法からスキャンニング照射法に変わり、これまで必要であった患者固有のボラス・コリメータの準備は不要となった。照射時間は2倍を超える場合が考えられるが、ロボスト最適化と強度変調が可能になることにより、線量分布の制御の自由度は格段に上がっている。照射室の切り替え時間が短縮されたが、治療の流れの中で時間を要する部分も残されており、治療効率を上げるワークフローの改良は必要と考えられる。治療計画で設定されたシナリオ（照射位置のずれ、レンジ誤差、動きなど）に必要なマージン

が3次元的に計算され、照射野の過剰な拡張は自動的に制限される。一方、リスクのある臓器が隣接する照射野については設定により標的の線量が確保されるためリスク臓器側の辺縁線量が高めに設定される場合がある。ワーストシナリオに対する線量制約と従来の線量制約の関係を理解しつつ治療計画の方針が決められるべきであり、これらの新しい線量分布の情報を活かして臨床成績に繋げるのが治療計画の課題である。

新装置の主な仕様を表1に示す。最大エネルギーは230MeVで、70MeVまでの99種類の設定が可能である。飛程の間隔は、高エネルギー側で当初6mmが提案されたが、最適化計算で1.5mm程度の飛程変化（レンジ精度）を実現できる3.35mmの間隔に変更された。これにより、ビーム出射口にmm単位のレンジシフターを設置することなく前立腺の治療が可能となった。スキャンニング照射では、体表の照射を行う場合に最低エネルギーよりも短い飛程を使うので、水等価厚4cmのレンジシフターを照射口に設置する必要がある。当初提案されたレンジシフターは患者の体表から離れた位置に設置する方式であり、体表の薄い標的の照射の場合、ペナンプラが非常に大きくなることが予想されたため、可動型のレンジシフターを新たに設置可能とした。この装置については後述の課題が残っている。

4. 陽子線治療装置の課題

筑波大学の場合、呼吸で動く臓器については、体表の動きから作ったゲート信号による呼吸同期照射を使う予定である。この場合、スキャンニング中の標的の動きが想定されるため、その干渉効果（インタープレイ効果）を評価して治療を行うべきであり、深部での多重塗（ペイント）の基本的効果の検証は行いつつある。実臨床例で条件が悪くなる場合が想定されるため測定および評価の充実が課題である。

前述のレンジシフターに関して、条件によってペナンプラが大きくなる現象を抑えるために最低エネルギーをできるだけ下げる方法が考えられる。低エネルギーでのビームロスの増加、真空窓での散乱

によるビーム径の増大などの問題があり最適化が必要である。新たに設置した近接レンジシフターは、ガントリー角度に依って着脱時にリスクがあり、伸縮が困難になる場合があり実用性を向上させる工夫が課題となっている。

加速器・ビームラインの調整は本来、散乱を除いた条件でアイソセンター付近で細い平行ビームになるようにすべきであり、治療計画システムのビームモデルはエネルギーに対して不連続的なビームの変形に対応していない。実際のビーム形状を測定すると、アイソセンターから少し離れたところで不連続的な変形が見られる。ビーム調整の方法か治療計画システムのビームモデルの改良を検討すべきである。回転ガントリーの角度に依りビーム形状の楕円が回転する現象も原理的に避けられないが、システムの中で変化を考慮できない。

ビーム調整により照射室毎のビームデータが必要かについては、まずは同一データで治療を開始したのが十分な確認が必要である。

位置合わせ後にガントリーを回転するときに、カウチを一旦退避する必要がある場合で発生する。カウチと照射口の干渉に関する設計も、使いやすい状態とは言えない。

5. まとめ

2025年現在、陽子線治療装置の新設計画を見ると、遮蔽建屋の建設コストが従来の2倍から3倍に高騰している。この治療の収支モデルは、これまでの経験から大きく赤字側に変化することになる。加速器と照射装置、特に回転ガントリーを小型化できなければ同様の治療装置を新設することは難しいと考えられる。一方、既設の治療装置を新しいものに入れ替える場合は、それまで継続していた治療を2年程度休止しなければならない。今回の筑波大の治療を止めない更新のケースは高騰前にぎりぎり間に合ったが、今後は新設も入れ替えも、装置側の技術革新と治療法の再検討がなければ、シナリオが書けない状況になった。照射装置の小型化、座位照射などの検討が進むことが解決策となると考えられる。

第 21 回日本中性子捕捉療法学会学術大会の報告

長崎大学 大学院医歯薬学総合研究科 医学部
分子標的医学分野・分子標的医学研究センター
教授 益谷 美都子



この度、「第 21 回日本中性子捕捉療法学会学術大会」の大会長を拝命し、令和 7 年 7 月 25 日（金）・26 日（土）の 2 日間、長崎大学 医学部 記念講堂・良順会館にて開催いたしましたのでご報告いたします。

日本中性子捕捉療法学会（JSNCT: Japanese Society of Neutron Capture Therapy）は、日本中性子捕捉療法研究会として発足し、2003 年に第 1 回学術集会在京都大学原子炉実験所小野公二教授（現大阪医科薬科大学 BNCT 共同臨床研究所所長）によって開催されました。2005 年に第 2 回を筑波大学松村 明教授が開催され、その後第 3 回より日本中性子捕捉療法学会と改名されて毎年学術集會を開催しております。さらに、2024 年 1 月には一般社団法人となり、2025 年の学術集會は法人として開催する二回目の、また初めての九州での学術集會となりました。

JSNCT は、中性子捕捉療法（NCT）及びこれに関連する医学、生物学、化学、薬学、工学等諸領域の集学的学問体系を基盤として、研究の連携及び促進を図り、学術の発展と医療への展開とこれに寄与する人材の育成を目指しております。本邦で先導して進められてきた原子炉での中性子照射体系を用いたホウ素中性子捕捉療法（BNCT, boron neutron capture therapy）の研究から加速器を用いた中性子照射体系への研究展開を本学会は長年支えてきており、2020 年の再発頭頸部癌での保険収載以降、脳腫瘍や皮膚疾患の領域で適応拡大に向けた検討が進みつつあります。国際的にもアジアや欧州での加速器型 BNCT システムの導入も行われつつあり、今後の医療展開が大いに期待される所であり、国際的な見地からの BNCT の医療展開の協働も求められている所です。第 21 回の学術大会ではテーマを「Expanding Horizons for NCT」といたしました。たいへん暑い中の開催でしたが、国外か

らの 30 名に及ぶ方々を含む 315 名がご参加下さいました。

今回、プログラムは 6 つのシンポジウム、一般口演セッション 5 つ（25 演題）、ポスターセッション 6 つ（57 演題）、ランチョンセミナーとポスターショートプレゼンを組み入れ、例年のように一同が会する会場で学際的な論議が行われました。シンポジウムでは、生物系として、伴侶動物 BNCT によるがん治療実現に向けた課題と取り組み、患者さんの検体を用いたリバーstransレーショナルリサーチに向けた取り組み、臨床系では加速器型 BNCT による頭頸部、脳腫瘍（髄膜腫・膠芽腫）、皮膚腫瘍等の適応拡大への現状と課題、展望の討議が行われました。物理工学系では BNCT の照射場における先端放射線計測の開発研究について、リアルタイム中性子計測、中性子混在場におけるガンマ線検出などの最新の研究紹介があり、熱心な討議が行われました。化学系では BNCT の新規薬剤の分子設計の最前線についてセラノスティクス用化合物や新たなホウ素キャリアの設計の紹介と討議が行われました。ガイドラインのシンポジウムでは、策定が進められているホウ素中性子捕捉療法用中性子照射装置の「中性子ビーム特性評価ガイドライン」をテーマとして、物理工学、生物、臨床からの解説と討議があり、医薬品医療機器総合機構の木村俊成先生には規制科学における本ガイドラインの意義についてご講演いただき、さらに BNCT の開発関連の企業 6 社からの指定コメントもいただきました。このガイドラインは BNCT の臨床の適用拡大や普及について重要なものであり、学会員の理解を深める意義があったと思われます。また、BNCT 施設が長崎にないことから、例年の施設見学の時間を用い、Horizon session 1 として九州地域における量子医療推進拠点構想と展望について産総研の坂本 満先



学術大会会場の様子



ポスターセッション



閉会式での優秀ポスター賞発表



運営スタッフ一同

生に発表いただき、続けて Horizon session 2 として ICNCT (国際中性子捕捉療法学会) President の松村 明先生と IAEA 協働センター (岡山大学) の井川和代先生に座長をお願いいたし、英語での国際セッションを企画いたしました。アジア、欧州からご参加いただいた Dr. Chinorat Kobdaj (Suranaree University of Technology)、Dr. Pier Luigi Mauri (ITB-CNR)、Dr. Yuan-Hung Wu (Taipei Veterans General Hospital)、Dr. Yuan-Hao Liu (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics) と座長の先生方に BNCT の基礎と臨床の開発状況を含め、研究の発表をいただき、世界の動向に catch up し、学術交流と熱い議論の機会となりました。1 日目セッション終了後短時間ながら、長崎大龍踊部による長崎の伝統的な龍踊 (じゃおどり) を堪能いただき、西洋医学の祖であるポンペ医師を記念した学内のポンペ会館においての懇親会で歓談交流いただきました。

大会後の翌日には市内の長崎新聞文化ホールに場所を移し、「知って欲しいがんの治療法 BNCT- ホウ素中性子捕捉療法-」の市民公開講座を開催いたしました。大阪医科薬科大学粟飯原輝人先生と福岡の中野由美子様との和やかな司会のもと、BNCT とは何か、具体的な BNCT の治療の現状や看護について先生方にわかりやすく説明いただきました。2025 年は原爆 80 周年の年でもあり、学内医学部ではちょうど原爆の記念展も開催されており、市民の方にも中性子とはなじみ深い言葉ですが、医療応用という視点から理解を深めていただく機会となりました。

本学術大会がそのテーマである「Expanding Horizons for NCT」の一つの契機となり、今後さらに中性子捕捉療法の研究と理解の裾野が広がっていくことを願っております。会場を提供していただいた本学関係者の皆様、運営委員長の井上 周先生、プログラム委員長の今道祥二先生、運営委員、査読

7月25日 金 第1日目		7月26日 土 第2日目	
長崎大学医学部 記念講堂	長崎大学医学部 良順会館	長崎大学医学部 記念講堂	長崎大学医学部 良順会館
8:00			
9:00	8:30-10:00 ポスター貼付開始	30分 8:30-9:00 ポスター ショートプレゼン 座長：石合 正道	8:30-16:00
9:00		50分 9:01-9:51 一般口演④ 臨床 G4-1～G4-5 座長：中井 啓、栗飯原 輝人	
10:00	10:00-13:00 ポスター閲覧	70分 9:52-11:02 シンポジウム④ 物理 BNCTの照射場における 先端放射線計測の開発研究 S4-1～S4-3 座長：田中 浩基、呼 尚徳	
10:00		10分 Coffee break	
10:00		60分 11:12-12:12 シンポジウム⑤ ガイドライン 中性子ビーム特性評価ガイドライン で広がるBNCTの新境地 S5-1～S5-9 座長：井垣 浩、熊田 博明	ポスター閲覧
11:00		60分 12:18-13:18 ランチョンセミナー2 座長：柏原 大剛 演者：中村 哲志 共催：(株)ハイメディアック	
11:00		40分 13:24-14:04 総 会	
12:00		10分 Coffee break	
12:00		40分 14:14-14:54 一般口演⑤ 臨床・物理 G5-1～G5-4 座長：川端 信司、竹内 稜彦	
13:00	50分 13:00-13:50 ポスター説明	70分 14:55-16:05 シンポジウム⑥ 化学 BNCTの未来を拓くホウ素薬剤 ～分子設計の最前線～ S6-1～S6-4 座長：中村 浩之、切畑 光純	
14:00	13:50-18:20 ポスター閲覧	40分 16:06-16:46 一般口演⑥ 生物・医学 G6-1～G6-4 座長：道上 宏之、今道 祥二	16:00-16:55 ポスター撤去
14:00		16:47-16:57 閉会式	
15:00			
15:00			
16:00			
16:00			
17:00			
17:00			
18:00			
18:00			
19:00	18:30-20:00 懇親会 会場：宇内（ボシベ会館）		

本学術大会プログラム

委員の先生方、長崎大学と学外の運営スタッフの方々、さらに本大会に遠方からもご参加いただき、切磋琢磨の有意義な議論を展開して下さった皆様、協賛企業などのご協力とご尽力を賜りました全ての関係の皆様はこの場を借りて心より感謝を申し上げます。次回は京都大学複合原子力科学研究所の

田中浩基教授のもと、令和8年7月30日～8月1日に京都にて開催されます。さらに多くの研究者の方々が集い、中性子捕捉療法の医療としての展開とこれを支える学際的研究、さらに人材育成の推進に役立つことを願っております。

事務所所在地・アクセス

◆本部

〒 103-0001

東京都中央区日本橋小伝馬町 7-16

ニッケイビル5階

TEL : 03-5645-2230 FAX : 03-3660-0200

E-mail : info@antm.or.jp

- 交通：・地下鉄日比谷線「小伝馬町」下車、2番または4番出口から徒歩約2分
- ・JR 総武線快速「馬喰町」下車、2番出口から徒歩約5分
 - ・JR 山手線 / 地下鉄銀座線「神田」下車、東口から徒歩約10分



◆線量校正センター

〒 263-0041

千葉県千葉市稲毛区黒砂台 3-9-19

TEL : 043-309-4330 FAX : 043-309-4331

E-mail : info-kosei@antm.or.jp

- 交通： JR 総武本線「稲毛駅」下車 東口から徒歩 10 分



◆当財団開催の講演会・セミナー等の年間予定

2026年(令和8年)	5月	粒子線がん治療等に関する施設研究会(見学会)
2026年(令和8年)	7-8月	粒子線がん治療に関する人材育成セミナー・入門コース
2026年(令和8年)	8月	放射線医学オープンスクール(1泊2日)
2026年(令和8年)	10月	粒子線がん治療等に関する施設研究会(見学会)
2026年(令和8年)	11-12月	国際重粒子線がん治療研修コース(ITCCIR)
2026年(令和8年)	12月	公開講演会
2027年(令和9年)	1-2月	粒子線がん治療に関する人材育成セミナー・アドバンストコース
2027年(令和9年)	2月	粒子線がん治療等に関する施設研究会(講演会)

※実際の開催日は前後する可能性があります。

粒子線がん治療関連書籍等のご紹介



・小冊子「体によさしい粒子線がん治療」(2024年7月版)

小冊子の前半では、粒子線がん治療に関して、その概要、また公的保険の適用範囲および治療費についてもやさしく解説しています。後半では、Q&A形式で、よくある質問(10問)に対する回答を掲載しており、国内の粒子線施設の問合せ先や問合せ方法についても記載しています。

A5版 26頁 1冊：300円(税込み、送料実費)
発行者：公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団



・「がんの放射線治療と物理学の役割」(2024年8月発行)

現在日本人の最大の死因はがんです。しかし過去50年間でがんの放射線治療の技術は日々進歩し、がん罹患した患者のうち治癒するがん患者の割合は2/3へと増えています。1970年代に登場したCTの発展により病巣の広がりを高い精度で診断できるようになり、1990年代後半に登場した高精度放射線治療によって治療成績が劇的に向上しました。そしてこれらの技術は物理学の知見によって進歩してきました。本書では放射線治療と物理学の結びつきについて解説しています。

A5版 122頁 1冊：2,750円(税込み)
著者 公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団
常務理事 遠藤 真広
出版社(問合せ先)：医療科学社



・「強度変調粒子線治療ガイドライン」(2026年1月発行)

粒子線治療において、スキヤニング照射法の発展型である強度変調技術を用いた治療適応は、X線を用いた高精度放射線治療の弱点をカバーし、X線による放射線治療の臨床的な限界を打ち破る可能性を秘めた治療方法です。本ガイドラインでは、重粒子線治療と陽子線治療で標準的に実施される強度変調技術の医学物理的な定義や名称、施設要件、治療計画法、臨床的な有効性を客観的に記載して、今後の強度変調粒子線治療の技術的な評価や保険収載および加算の際にその根拠となればと考えています。

B5版 76頁 1冊：3,850円(税込み)
編集 国立がん研究センター研究開発費 秋元班
出版社(問合せ先)：金原出版

当財団では、賛助会員および施設研究会会員の皆様の会費および事業収入によって、事業活動を行っておりますが、今後さらに活動内容の充実・拡大を図るため、法人個人を問わず広く寄付金等によるご支援を募っております。ご協力いただきました寄付金・協賛金等は、特定の事業に使用するものや医用原子力技術の推進および普及全般のため、適切かつ有効に活用させていただきます。

今年度、協賛金をいただいた個人・団体・企業様 (50音順)

令和8年1月現在
安西メディカル株式会社 株式会社ビードットメディカル
住友重機械工業株式会社 東芝エネルギーシステムズ株式会社
Normandy Hadrontherapy 株式会社日立ハイテク
レイサーチ・ジャパン株式会社

ご協力くださった皆様に感謝申し上げます。

「医用原子力だより」 第26号

令和8年3月発行

編集・発行

公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団

〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町7-16
ニッケイビル5階

電話 (03) 5645-2230 FAX (03) 3660-0200

E-mail : info@antm.or.jp

URL : https://www.antm.or.jp

