



Association for Nuclear Technology in Medicine

医用原子力だより

第22号



放射線治療学と共に歩んだ道 —君は変わっていますね—

医用原子力技術研究振興財団 評議員会会長
大阪大学名誉教授
井上 俊彦

卓上の古生代魚の化石が私に語りかける。数多くの仲間と群游した過去の時間があったことを。そして何が消え、残ったのは何か。

ここ数ヶ月の間に、3冊の良書を読んだ。一つは「疫病と世界史上・下」(ウイリアム・H・マクニール著、佐々木昭夫訳、中公文庫)。ペスト、スペイン風邪、チフス、天然痘のパンデミックな繰り返し(手段と伝播速度)と人類に及ぼした変化(人口・労働力減少)を学んだ。もう1冊は、「新型コロナの科学パンデミック、そして共生の未来へ」(黒木登志夫、中公新書)。COVID19の第3波までの1年間の動きが的確に解説されていた。そして過去2年間に、国内第6波を経験した。2022年1月13日現在、国内の感染者数は181万人、死者1万8千人。世界では、3億17百万人の感染者と551万人の死者が報じられる。歴史的に人の大量移動が馬から船・鉄道・飛行機へと変化するに従い、パンデミックは広範かつ高速になった。単に国内に限ることなく、地球規模で対応しなければならない。すでに地域によっては、コロナ禍による飢餓が問題になり始め、温暖化対策に併せて飢餓対策が近い将来地球規模の大きな課題となる恐れがある。将来を見据えた視点が大切である。

私の小学生時代は焦土と化した戦後の松山市で始まった。1946年4月に松山市立番町国民学校に入学した。入学したのは10名弱であった。番町小学校卒業時には1学年4クラス180名に膨れ上がった。「1000万人飢餓説」、「物価の急騰」、「貧乏人は麦飯を食え(発言の本意は別にあった)」を通過して、「もはや戦後ではない」と言われた時代を体験した。物のない時代であった。

1964年大阪大学卒業後、1年間のインターン生活を終え、私は大学院の面接試験に臨んだ。試験官から、「君は変わっていますね。放射線医学でも、放射線治療を研究したいとは」と言われた。癌の放射線治療など学問分野では無いとばかりの云われようであった。

有効な抗癌剤が少しずつ出始めた。すると今度は、故・立入弘教授が私に「今に放射線治療は消えてしまいますよ。方向転換したほうが良いのではないですか」と言われた。放射線治療はお先真っ暗ですよと言われたようなものであった。私が放射線治療を始めた時代、国内の放射線治療専任医は50名程度であると教えられた。国内の患者総数も把握されていなかった。米

国の Rubin 教授からの国内放射線治療の現状（1970 年当時）についての問い合わせに恩師の故・重松康教授は回答することが出来なかった。厚生省班会議重松班のデータに基づく 1980 年の放射線治療患者推計値 3 万 7 千人が最初である。1990 年以後、JASTRO（日本放射線腫瘍学会、1988 年設立）による構造調査がおこなわれた。1990 年 7 万人、2000 年 12 万人、2005 年 16 万人、2007 年 18 万人と予想通りの増加を示した。その勢いで 2015 年には 40 万人に上ると予測した。しかし 2009 年以降、新規患者数は横ばいで推移し、2010 年 21 万人、2017 年 23 万人で、予想より 18 万人低下した。当初、国内放射線治療受診率を欧米の 50% に近づけ、少なくとも最低 40% に乗せることを目論んだ。しかし、試算は見事にはずれ、現状は従来通り 23% の低率にとどまっている。

私はある講演で、「放射線治療分野の宅地開発業者です」と自己紹介した。経歴を振り返ると、院生 2 年目に米国から帰国早々の故・重松講師の下で治療グループの再立ち上げ、その後のリニアック、イリジウム-192 線源、ラルストロン導入に関わった。院生 3 年目は松阪中央病院放射線治療部門を立ち上げた。1975 年には新設の近畿大学付属病院放射線治療部門の立ち上げをお手伝いした。1977 年には初代部長として、大阪府立成人病センター放射線治療科を整備した。1990 年に大阪大学医学部バイオメディカル教育研究センター集学放射線治療学研究部門教授に就任し、国内の大学医学部に初の放射線治療学を独立させた。退官後も 2007 年にがんの放射線治療に特化した独立開業型の都島放射線科クリニックを院長として立ち上げた。その続きで、芦屋放射線治療クリニックのぞみのお手伝いをした。

放射線医学総合研究所の重粒子線治療の計画部会委員長として、山下孝副委員長と当初（1993 年）から企画運営に参加した。年 2 回開催の委員会で計 70 件ばかりのプロトコルを審査した。2000 年以降、ネットワーク会議副委員長として阿部薫・海老原敏両委員長の下で審議のお手伝いをした。重粒子線治療の数多くの臨床応用に役立つ立派な成果の上がった課題がある一方、臨床に生かされることなく不可の烙印を押した研究課題もあった。京都大学原子炉研究所では小野公二教授が熱心に取り組みされたホウ素中性子捕捉療法（BNCT）の医療開発研究に、原子炉医療委員会（1993～）・審査委員会（2014～）・倫理委員会（2015～）の委員として審議に加わった。BNCT の頭頸部難治癌への適応拡大に効果的な示唆を与えたことは大きな喜びであった。

医用原子力技術研究振興財団にも、研究助成選考委員（2003～2010）、評議員（2006～）として参加した。ところで当財団の設立は故・畠中担教授の BNCT の支援が動機であった（松岡玲子：中性子捕捉療法のパイオニア。医用原子力だより . 3 号, p.23, 2006）。放医研の重粒子線治療の臨床研究が軌道に乗るにつれ、支援の比重は BNCT から重粒子へ移行した。近年、BNCT が原子炉利用から加速器治療に変化し、臨床・基礎研究者が急増し新局面を見せ始めた。さらに核医学分野でも新規の治療核医学が台頭してきた。ともにそれまで不十分とされてきた生物学的線量分布の検討が始まり、より科学的な今後の発展が期待される。本財団としてもこれらの研究の未来投資に再支援への舵を取ることが求められる。

「君は変わっていますね」と言われて始まった私の放射線治療医として歩んだ 56 年を振り返ると、がんの放射線治療はごく当たり前の世界へ進化した。そして私自身は嬉しいことに多くの臨床家の中に埋もれてしまった。今は「私は何も変わっていない」と云える。しかし、かつて言われた通り変わっていたから、私は次々と国内の放射線治療分野の先端に触れ続ける機会に恵まれたとも云える。もうしばらく傍目八目を決め込みたい。

事業活動報告

◆第17回共催講演会 「心と体にやさしい重粒子線がん治療」

令和3年12月4日（土）、JR九州ホール（福岡市博多区）において、第17回医用原子力技術研究振興財団講演会「テーマ：心と体にやさしい重粒子線がん治療」が公益財団法人佐賀国際重粒子線がん治療財団（SAGAHUMAT）との共催で開催しました。

今回の講演会は、新型コロナウイルス感染拡大の防止措置を講じたうえで、会場190名の参加者に加え、Webオンライン（最大視聴数117名）でのハイブリッド開催で実施しました。

第一部「特別講演」では、当財団の垣添忠生理事長が登壇し「人はがんとどう向き合うのか」をテーマに「がんとはどのような病か、どうとらえるべきか」「医療とは何をするものであるか」「人間とはどのような存在か」などについて、第二部「講演」では、九州国際重粒子線がん治療センターの塩山善之センター長が「重粒子線がん治療について」と題して、重粒子線がん治療の概要について講演を行いました。その後の座談会では、「重粒子線がん治療の体験談」を九州国際重粒子線がん治療センターの寺嶋広太郎先生とご自身ががん患者で治療経験者の岩尾雅子氏が、ご自身の体験談などを交えて参加者に重粒子線治療について紹介しました。

プログラム

- 挨拶 中川原 章 （公益財団法人 佐賀国際重粒子線がん治療財団 理事長）
挨拶 辻井 博彦 （公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 代表理事・副理事長）
- 特別講演
「人はがんとどう向き合うのか」
垣添 忠生 （公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 理事長）
- 講演
「重粒子線がん治療について」
塩山 善之 （九州国際重粒子線がん治療センター長）
- 座談会
「重粒子線がん治療の体験談」
寺嶋 広太郎 （九州国際重粒子線がん治療センター診療副部長（膵臓がん担当医））
治療経験者 岩尾 雅子 氏



共催講演会チラシ



中川原章理事長（SAGAHUMAT）



辻井博彦副理事長



垣添忠生理事長



塩山善之九州国際重粒子線がん治療センター長



座談会
寺嶋広太郎九州国際重粒子線がん治療センター診療副部長と岩尾雅子氏

◆放射線医学オープンスクール ～概要～ 放射線医学オープンスクールに参加して

医師のキャリアパスを考える
医学生の会

代表 妹尾 優希



令和3年8月16日から30日にかけて、オンラインにて医用原子力技術研究振興財団主催、医学物理若手の会、医師のキャリアパスを考える医学生の会の共催により、「第13回放射線医学オープンスクール～きいてみよう！放射線医学のこと～」が、開催されました。例年では、医療に関心のある医療系や理工学系の学生が、放射線医学の最先端の現場見学や、第一線で活躍される先生方の講義を実施していた本オープンスクールは、今年は、新型コロナウイルスの感染拡大に伴い、8月16日（月）～30日（月）に【第Ⅰ部】オンデマンド配信と、8月30日（月）15:00-16:30に【第Ⅱ部】オンライン・トークイベントのライブ配信の2部構成にて実施しました。

オープンスクール初の試みとなるオンラインでの企画には、医学生、放射線学科や物理学科を専攻する学生を含む123名の申込者がオンデマンド配信を視聴し、オンライン・トークイベントには45名の方が参加しました。

まず、【第Ⅰ部】のオンデマンド配信では、量子科学技術研究開発機構 QST 病院医長の瀧山博年先生による「放射線医学の最先端を知る～放医研の表と裏をお見せします～」、医学物理若手の会による「医学物理士の一週間－医学物理士の魅力」、医学生の会による「医学生からみた放射線医学 イメージや疑問点」の、3つの発表動画が配信されました。

瀧山先生の発表動画では、重粒子線を中心とした放射線治療を用いた最新の治療とその研究が行われている放射線医学総合研究所の部署や、一緒に勤務される研究者の方々についてご紹介いただきました。発表動画から、放射線医学総合研究所では、放射線治療や診療に携わる医師、理工学、化学、物理工学、生物学など、様々な分野の研究者が協働し

て、ディスカッションを重ね、放射線や放射線医学に関する研究を行っていることを知ることができました。医学物理若手の会の、平島英明さん、恒田雅人さん、金城優志さん、田中創大さんによる発表動画では、医学生にはあまり馴染みのない医学物理士の方の日常について、1週間のスケジュール表などを用いてわかりやすく説明いただきました。

医学生からは、現役医学生20人に放射線治療・診断、大学で行われている放射線医学の授業、放射線医のキャリアについてどのようなイメージを持っているかインタビューをした結果をまとめた動画を発表しました。【第Ⅱ部】オンライン・トークイベントでは、モデレーターの量研機構 QST 病院の若月優先生、パネラーの瀧山博年先生、京都大学医学部附属病院放射線治療科の伊良皆拓先生に、インタビュー結果を元に、放射線医のキャリアに対する疑問点について質問をさせていただきました。

【第Ⅱ部】オンライン・トークイベントでは、量研機構 QST 病院副院長の辻井博彦先生に開会のご挨拶いただいた後に、瀧山先生、伊良皆先生、医学生の会の鬼澤知恵さんによるオンデマンド配信動画のキーポイントについてお話しいただきました。

瀧山先生は、放射線医師のキャリアや放射線医師としての「患者さんとの関わり方」や「よい医師像」についてお話しいただきました。キーノートでは、まず最初に患者さんと接し、適切な専門家へ紹介する役割を担う、かかりつけ医師、検査を主にする医師、治療を主にする医師、治らない病気を見る終末期の医師の4つのタイプに分けてそれぞれ、どのように患者さんと接するのが理想的かについてお話しいただきました。瀧山先生のお話では、放射線診療科の医師のように主に検査をする医師であっても、全く患者さんと接しないということはなく、患者さんに分かりやすく病状について話すことが求められるそうです。また、患者さんと接する機会が他のタイプの医師と比較して少なくとも、検査画像の初見をただ説明するのではなく、画像から得られる情報から家族のことや仕事を考慮しレポートに記載することで、治療を行う担当医を介して患者さんのサポートをすることができる、とお話しされていま



した。このお話を伺うまで、私は、放射診療医はただパパッとパソコン画面に映し出される画像に印をつけていくように機械的に医療業務を行っているイメージを持っていたので、画像のその先に想像力を働かせなくてはならず、より想像力や共感力が必要なことを知り驚きました。また、瀧山先生は、ガンなど長期的に治療が必要な病気の診断を受けた患者さんが、告知後から受け入れるまでに辿る5つの経過を紹介されました。患者さんの紹介をする医師、紹介される医師は、自分の受け持つ患者さんがどのフェーズにいるかを考慮した上で、治療プランの説明や治療の選択の説明をする必要があるそうです。

伊良皆先生には、医学物理士を目指した経緯、放射線技師と医学物理士の仕事やキャリア形成の違いについてお話いただきました。伊良皆先生の専門である、医学物理士は、放射線治療の品質や安全を担保する業務、その研究開発、とその促進と向上に必要な人材教育の3つがあるそうです。対して、診療放射線技師は、患者さんに接し照射を行う資格があり、医学物理士には患者さんを照射する資格はないそうです。恥ずかしながら、毎年夏に千葉県鴨川市の亀田総合病院にて開催されていたサマーキャンプ@亀田で何度か放射線技師さん、医学物理士さんとお話したことはあったのですが、違いや業務内容について詳しくは分かっておらず、わかりやすく説明いただけてとても勉強になりました。伊良皆先生は、医学物理士の業務のやりがいについて、医療業務は命に関連し責任感のある放射線医学の現場に携われること、研究開発は将来の放射線医学をより発展する一角に携われるワクワク感、教育業務はこの2つの魅力を後輩に教えることができる点とお話

されていました。以前、研修先の病院候補として大規模な放射線治療科のある病院を見学した際に、研究員として勤務されている医学物理士の方とお話し、なんとなく楽しそうにお仕事されているなど感じた理由が、先生のお話を伺って納得できました。

<女性の働きやすさについて>

医学生の方で行ったインタビューの結果では、医学生は「放射線専門医は他の科と比べ、女性医師にとって働きやすい、」というイメージを持っていることがわかりました。このことについてパネラーの先生方に尋ねると、瀧山先生は「基本的に休みを取りやすく、基本的に日中業務のみで夜中に呼び出されることはないため、性別を問わず働きやすい」とお話しされていました。これについて、若月先生も「コロナ禍ということもあり、様々な病院施設がオンラインの読影を積極的に取り入れる傾向にある。そのため長時間勤務ができない女性医師、また子育てを昼間にして夜中に読影をするという働き方も可能となっている」とお話しされていました。また、その他にも、病院側の利益も大きく放射線科の設備を大きくしたい医療施設は多い反面で、放射線を専門とする医師不足がボトルネックとなっている背景から、放射線専門医の雇用需要はかなり高いそうです。先生方のお話を聞きながら、家庭との両立をさせたいと考える医師にとっては、良いことづくしの理想的な職場環境だと感じました。

<無駄な放射線診療の使用とは？>

参加者より、実際に放射線診断が医療費に占める割合や、放射線診断の適切/不適切を分ける基準について質問が寄せられました。医学生の方が行ったインタビューの中にも、「近年、画像診断の無駄な使用が多く医療費増加の根源となっている」、「身体初見を怠る医師を作ってしまう」など、無駄使いを懸念する辛口な意見が寄せられていました。

この質問に対して、若月先生は「近年、医療機器の発達により、画像診断の使用頻度は増加傾向にあるが、放射線科が医療費に占める割合は4%前後と決して多くない。また、医療費の増加分の中でも3%と大きな割合を占めていません」とお話しさ

れていました。私も、医療費の圧迫の一因には、日本では医用画像診断機器の普及が進んでいることが背景にあると考えていたので、お話しを伺い驚きました。さらに、無駄な放射線の使用について瀧山先生は、「がん患者さんのケースでは病状が知りたいから毎月検査したいという方もいるが、過剰な検査をしてしまうと保険を切られてしまい、保険診療ができなくなってしまう為、できない。こういった背景があるため、がんの種類に合わせて、緩やかに進行するものは年1回、比較的進行の速いものは3ヶ月に1回と決まった回数で検査を行っています」とお話しされていました。また、瀧山先生は、どうしてもと言う患者さんには、自費で検査を行う場合があるが、こういった場面でいかに患者さんに納得してもらえる説明ができるかが医師としての技量が問われるところであると話しされていました。

本放射線医学オープンスクールでは、オープンスクール初の試みとなる、オンラインでのイベント開催に参加させていただき貴重な経験をさせていただきました。実際に施設を見学はできなかったのは残念ですが、こうして現役医学生の中の放射線医のキャリアの漠然としたイメージをインタビューを通して探り、実際の放射線医の先生方から現場のお話をじっくり伺うことで、自分の理想的なキャリアを見つめ直す貴重な機会をいただきました。また、本オープンスクールのオンデマンド配信とオンライン・トークイベントで先生方のお話しを伺ったことで、放射線医は放射線という目に見えず、一般の方が「なんとなく不安」に感じてしまうものを取り扱う為、患者さんとのコミュニケーションの取り方により細やかな配慮が必要で、信頼関係の構築や共感力が必要な専門科なのだと感じました。

このような貴重な学びの場を提供して下さった皆様に、この場を借りて心よりお礼申し上げます。

◆国際重粒子線がん治療研修コース 2021

当財団は、2021年11月29日から12月12日まで2週間の日程でInternational Training Course on Carbon-ion Radiotherapy（国際重粒子線がん治療研修コース、以下、「ITCCIR」という）2021を

開催しました。今年度は、昨年に引き続きコロナ禍の影響でウェブオンライン開催にて実施することになりました。参加料金は、1名1万円という参加し易い金額に設定しました。

開催にあたり、住友重機械工業（株）、東芝エネルギーシステムズ（株）、（株）日立製作所、レーザーチ・ジャパン（株）、（株）ビードットメディカルの5社から協賛をいただきました。

ITCCIRは、粒子線施設、施設建設中・計画中の医師・医学物理士・放射線技師・生物研究者等を対象にした国際的な重粒子線がん治療に関する研修コースです。

ITCCIRは、当財団をはじめ神奈川県立がんセンター、九州国際重粒子線がん治療センター、群馬大学重粒子線医学研究センター、筑波大学陽子線医学利用研究センター、兵庫県立粒子線医療センター、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（以下、量研機構という）、大阪重粒子線センターが共同主催者となり、粒子線がん治療の先進国である我が国の国際貢献の一端を担うことを目的として開催され、当財団は毎年事務局を担っています。

今年度で第9回目になるITCCIRは、韓国、中国、台湾、タイ、インド、インドネシア、オーストラリア、ギリシャ、ドイツ、スペイン、米国、日本の12カ国・地域、44の研究機関・施設から総勢106名が参加しました。

2012年から2020年までの参加者の累計では、579名に達しました。これを国別でみると、韓国、中国、台湾、タイ、インド、ニュージーランド、マレーシア、インドネシア、オーストラリア、ロシア、アラブ首長国連邦、サウジアラビア、オーストリア、ギリシャ、ノルウェー、スウェーデン、フランス、イタリア、スペイン、ドイツ、オランダ、米国、そして日本の23カ国・地域に亘ります。参加者は、粒子線施設建設中、粒子線施設計画・検討中を問わず参加しています。

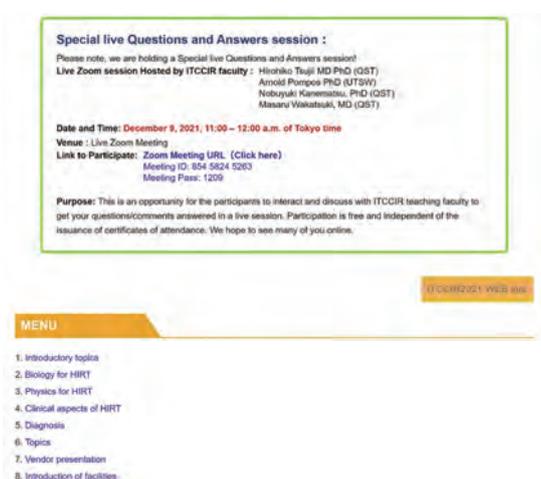
今年度の研修は、量研機構、群馬大学及び関係協力機関の講師による対面講義ではなく、参加者がITCCIRのトレーニングウェブサイトアクセスし、ストーリーミング配信による講義動画を視聴するオンデマンド講義になります。講義動画を視聴す



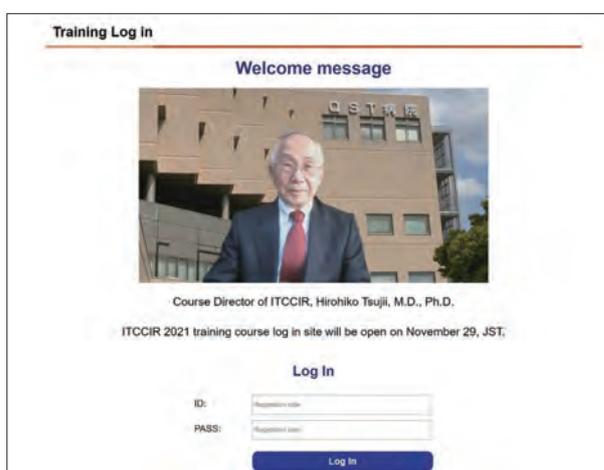
ITCCIR 2021 HP



トレーニングメニュー



ライブセッション Q&A



Welcome message 動画

するためには、参加者は予め ITCCIR のホームページから参加登録をして、トレーニングを受けるための ID とパスワードを取得する必要があります。

トレーニングプログラムは、イントロダクション、生物、物理、臨床、トピックス、ベンダープレゼンテーション及び粒子線施設紹介（日本）の7カテゴリーに分かれ、参加者はインターネットに接続し、ITCCIR のウェブサイトアクセスすれば、興味のある講義動画をいつでも、どこからでも、何回でも視聴することができます。

トレーニングプログラムは、より現場で行われている内容に近づけ、単に重粒子線だけでなく陽子線や他の治療方法と比較や粒子線施設の立上げ時の課題等も加えるなど参加者が知りたい内容となっ

ています。また、ドイツ GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung、米国 UT Southwestern、韓国 Yonsei Cancer Center、米国 Mayo Clinic の外国人講師による専門的な講義動画もトレーニングプログラムとして構成されています。今年度のプログラムの特徴として、参加者が講義動画を視聴後、Chat 機能を使い質問し、講師がその質問に回答するシステムを初めて採用したことが挙げられます。

参加者は、ITCCIR のトレーニングウェブサイトアクセスし講義動画を視聴後、講義を5段階 (Excellent、Very good、Good、Average、Poor) から評価することができ、講義をプログラムメニューの中からカテゴリーに関係なく 10 講義以上を視聴し、トレーニングコース全体の評価をすると

参加証明書を申請することができます。申請者には後日、事務局から参加者証明書が送付されます。

11月29日、ITCCIRのトレーニングウェブサイトをオープンしました。参加者数は106名ですが、このうち何人がトレーニングウェブサイトにアクセスしてくるか心配していましたが、アクセスログを見てみると、ログイン数179、動画講義の視聴数679と多くの参加者がアクセスしていました。今年度から採用した講義に対して質問ができるQ&A chat機能にも74名がアクセスし3つの質問が投稿され、トレーニング初日には上出来であったと感じました。

その後、11月30日から12月8日までの日々のログイン数の平均は80、動画講義の視聴数の平均は300ぐらいですが、視聴数が600を超える日もありました。

12月9日、ITCCIR講師とトレーニング参加者がZoom Meetingを使い、オンラインで質疑応答を行う「Special Live Questions and Answers Session」が今回初めて実施されました。ライブミーティングは、日本時間午前11:00から始まったにもかかわらず、アジアを中心に、中国、台湾、韓国、タイ、オーストラリア、アメリカ、日本から24名が参加し活発な議論が交わされました。

12月12日、2週間にわたる研修を終えトレーニングウェブサイトをクリックすることになりましたが、ログイン総数1,202、動画視聴数4,739、質問投稿数が64ありました。この結果は、参加者106名が2週間で11回以上トレーニングにログインし、イントロダクション、生物、物理、臨床、トピックス、バンダープレゼンテーション、粒子線施設紹介を含む講義を40回以上計算上見たこととなります。

今年度の研修は、ウェブオンライン開催に加え、講師と参加者によるオンライン・ライブミーティングという初めての試みを実施しましたが、成功裏に終了することが出来ました。

◆令和3年度「粒子線がん治療に関する人材育成セミナー（特別編）」

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）を開催しています。

令和3年度は、新型コロナウイルス感染拡大の影響により、特別編としてオンラインで開催し、64名が受講しました。

遠藤真広常務理事の挨拶の後、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構量子生命・医学部門量子医科学研究所の兼松伸幸講師から「粒子線治療計画装置の基礎と実装」に関する講演と国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構QST病院山田滋講師から「がんに対する量子メス開発における臨床の現状と将来」に関する講演を計2時間実施しました。

◆粒子線がん治療等に関する施設研究会

当財団では、粒子線がん治療施設を主とした放射線医療施設の普及に係る課題・対策の分析・検討に資するとともに、専門知識を有する人材育成をはじめ関連産業の育成・発展に寄与することを目的に、粒子線がん治療等に関する施設研究会を設置しています。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、将来見通し、課題・対策などに関して、講演、施設見学、意見交換を通じ情報提供しています。令和3年は、下記のとおり2回開催いたしました。講演内容の詳細は、当財団ウェブサイトに掲載し参加者以外にも広く公開しました。

— 令和3年度第1回研究会（オンライン講演会） —

開催日：令和3年6月11日（金）

講演：

(1) 「AIの放射線治療への応用」

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
量子生命・医学部門

物理工学部 治療システム開発グループ
グループリーダー 森 慎一郎 先生

(2) 「九州国際重粒子線治療センターの現状と未来」

公益財団法人 佐賀国際重粒子線がん治療財団
九州国際重粒子線がん治療センター

センター長 塩山善之 先生

参加者：54名

— 令和3年度第2回研究会（オンライン講演会） —

開催日：令和3年11月16日（火）

講演：

(1) 「FLASH研究の現状と今後への期待」

キヤノンメディカルシステムズ株式会社

治療事業部

オンコロジー事業推進担当 大石 悟 先生

(2) 「湘南鎌倉総合病院附属先端医療センターの
現状と将来」

医療法人沖縄徳洲会 湘南鎌倉総合病院

臨床研究センター

副センター長 富吉勝美 先生

参加者：51名

◆計測校正事業

1. 治療用線量計校正の実施状況

令和2年度は、年度初めから新型コロナウイルスの感染拡大防止対策による影響で、前半の校正実施状況は6割程度でしたが、緊急事態宣言解除後、校正実施件数の増加に努め、前年度と同等の実績を保持できました。また、令和3年度は、当財団が線量計校正の標準場として使用する、量子科学技術研究開発機構内のコバルト60線源の更新が令和4年1月中旬から3月末まで行われる予定であり、その間、コバルト線源を使用する電離箱校正は休止します。

なお、分離方式による電位計校正は、引き続き申し込みを受け付けいたします。コバルト60線源更新後は、線源更新前より1日当りの校正件数は増加し、安定した供給が行えるようになります。

平成30年度の提供開始以降、電位計校正は3年に1回以上の校正実施が推奨されていることから、当財団が行う年間の電位計校正台数は年々減少しています。また、電離箱の申し込み数および校正件数も減少傾向にあります。この傾向は分離校正への完全移行後に落ち着くと思われます。

令和3年度11月末までの年度別校正数を表1に示します。

また、平成29年度より、特定二次標準器のバッ

クアップ器を常備することで、多少の増減はありますが、年間を通して月ごとの実施件数は、一定の範囲内で安定しています。

月別の校正実施状況（平成30年度4月から令和3年度11月末まで）を図1に示します。

令和2年度は、新型コロナウイルス感染拡大防止対策への対応により、年度前半は少なく、後半で校正件数の増加が見られます。

また、例年、年度前半は少なめであるのに対し、令和3年度の前半は申し込みが大きく増加しました。これは前年度未実施の施設の繰り越しでの依頼があったためです。

令和3年度の後半2月、3月は前述のとおり線源更新のため、休止となるため年度実績は前年度を大きく下回ることとなります。

2. 分離校正の実施状況

平成30年度7月より提供開始した分離校正は、令和3年度11月末で3年5か月経過しました。

令和2年度の分離による電離箱校正の実施割合は全体の46%で、前年度比では14%の増加でした。令和3年度11月末時点では全体の62.6%、前年度比では16.6%増加しています。分離校正への移行は順調といえます。電位計校正では、令和2年度実績86台に対し、令和3年度11月の時点で77台の実施でほぼ前年度と同等の実績が見込まれます。電位計校正台数は、一体校正の申し込みの減少に伴って縮小傾向にあります。分離校正への完全移行後は、年間150台程度の実施で、当財団が校正頻度の3年間で行う電位計校正の合計台数は450台前後に収束すると思われます。

現在、電位計製造メーカーでも電位計校正が行われており、その校正後の電位計と組み合わせて使用する電離箱の校正を当財団へ依頼する場合は、組み合わせ対象となる電位計の型式、シリアルNo.、校正実施日をご連絡いただく必要があります。校正を依頼するユーザーが組み合わせる電位計を所有していることを確認の上、電離箱校正の受付を行います。

なお、治療用線量計校正の申し込み手順などは、当財団ウェブサイト「放射線治療品質管理」の治療

表 1. 年間校正数（水吸収線量校正開始の平 24 以降。
（）内の数値は対前年比。平 30 以降は一体・分離校正の合計。令 3 は 11 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	①/②	
令3	339 (0.542)	1,041	497	1,538 (0.667)	2,095	2,035 (0.667)
令2	626 (0.874)	1,562	745	2,307 (1.003)	2,097	3,052 (0.991)
令1	716 (0.740)	1,521	779	2,300 (0.920)	1,953	3,079 (0.923)
平30	967 (0.926)	1,664	836	2,500 (0.993)	1,990	3,336 (0.984)
平29	1,044 (1.005)	1,647	871	2,518 (1.007)	1,891	3,389 (1.01)
平28	1,039 (0.968)	1,646	854	2,500 (0.994)	1,927	3,354 (0.991)
平27	1,073 (1.190)	1,648	868	2,516 (1.200)	1,899	3,384 (1.192)
平26	902 (0.866)	1,354	742	2,096 (0.879)	1,825	2,838 (0.875)
平25	1,041 (1.136)	1,528	857	2,385 (1.134)	1,783	3,242 (1.135)
平24	916 (1.087)	1,350	753	2,103 (1.058)	1,793	2,856 (1.049)

用線量計校正事業を参照ください。

3. 出力線量測定の実施状況

令和 2 年度は線量計校正と同様にコロナウイルス感染防止対策の影響により、実績は 184 施設と前年度より少なめでした、令和 3 年度はコバルト線源の更新期間の休止に伴い、年度実績は減少する見込みです。

平成 28 年 8 月より、TomoTherapy および CyberKnife の 1 条件のみの出力線量測定の受付を開始しました。他の治療装置の校正条件と組み合わせて申し込む施設もあり、令和 2 年度の申し込み数は、それぞれ 25 件および 7 件で、令和 3 年度は 11 月末までに、それぞれ 13 件および 6 件であり、僅かながら年々増加傾向にあります。

また、既存の X 線の出力線量測定に加え、令和 1 年 11 月より電子線治療装置の出力線量測定の供給を開始しました。申込方法は X 線と電子線の混在も可能で、条件数は 1 条件単位で受付ます。

料金体系も 1 または 2 条件の場合は 1 条件単位での料金、3 または 4 条件の場合はセット料金での申し込みが可能です。

出力線量測定の実施頻度は、3 年に 1 回以上の実施が推奨されており、令和 3 年度は、平成 30 年度に 2 回目の出力線量測定を実施した 203 施設が 3 回目サイクルの実施対象となります。

平成 30 年度から令和 2 年度までの 3 年間で実施した施設数およびその内訳を表 2 および表 3 に示します。

表 2. 平成 30 年度から令和 2 年度の 3 年間の実施施設数

	3 年間の合計実施施設数	601	施設
内訳	がん診療連携拠点病院	413 (319)	施設
	一般病院	188 (162)	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。

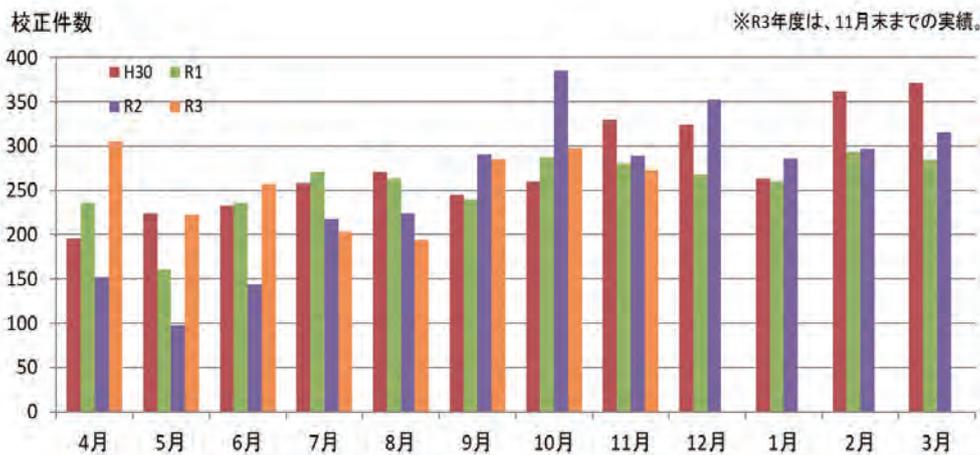


図 1. 月別校正実施状況

表3. 3年間の実施回数別の内訳

実施回数	がん診療連携拠点病院				一般病院			
	1回	2回	3回	4回	1回	2回	3回	4回
施設数	262	26	28	3	137	22	3	0
合計	319				162			

厚生労働省ウェブサイト掲載（令和2年4月1日付）のがん診療連携拠点病院の施設数は400施設でした。平成30年から令和2年度までの3年間では413施設であり、当財団での出力線量測定が未実施（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94施設となります。

令和3年度11月末までの出力線量測定の実施数を表4に示します。

また、平成25年度以降で測定実績はありますが、表4にカウントしていない条件別ビーム数、平成28年度より受付を開始しましたTomoTherapy、CyberKnifeの依頼状況を表5および表6に示します。

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いたしました。令和2年度の実績は2件でした。また、令和3年度は7件の実施予定となっています。

IMRT 郵送調査のお申し込み方法など財団ウェブサイトに掲載しておりますのでご参照ください。

4. 施設名公表について

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について、施設名公表を行っており、令和3年度は10月上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2に示します。

治療用線量計校正では、令和1年度および令和2年度の2年間で校正を実施した877施設（医療施設836施設、研究・教育施設およびメーカー等41施設）のうち医療関係以外の施設を対象外とした842施設より、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、各年度別の医療施設および研究・教育機関、

メーカー等、全体での医療施設の施設名公表率は、令和1年度では97.3%、令和2年度では96.9%でした。今回の公表対象施設のうち、どちらの年度とも治療用線量計校正を実施した施設数は608施設でした。

出力線量測定実施施設の施設名公表数を図3に、都道府県別内訳を表7に示します。

出力線量測定では、過去3年間の平成30年度から令和2年度までの対象となる実施施設数477施設（がん診療連携拠点病院323施設、一般病院154施設）の全ての施設に同意いただきました。

また、令和2年度の新規での申し込み施設数は29施設（拠点病院9施設、一般病院20施設）でした。

なお、施設名公表については、当財団ウェブサイト「放射線治療品質管理」の治療用線量計校正事業または治療用出力線量測定事業の各ページを参照ください。

5. 今後の展望

線量計校正では、令和5年4月より、一体校正の受付を終了し、分離校正へ完全移行いたします。

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。

当財団ウェブサイトにて分離校正の対象となる「受け入れ電位計一覧（電位計単体 JCSS 校正）」が掲載されております。

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。

なお、令和3年11月1日以降に一体校正を実施した施設へ校正証明書の発送時に分離校正への移行のご案内を同封し、周知をはかりました。

出力線量測定では、電子線条件およびIMRT 郵送調査の依頼増加が見込まれております。当財団では、人員および環境整備に努め、準備を進めております。

さらにガンマナイフ治療および小線源治療への対応についても検討しています。

表 4. 出力線量測定の間年実施数

(令和3年度は11月末迄。右列年度 Total は平成19 - 24年度を含む。)

		H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3	H19-R3 (Total)
施設数		71	145	163	140	152	203	213	183	124	1646
拠点病院数		57	113	129	104	103	149	140	124	68	1178
ビーム数	4MV	46	90	100	87	103	115	142	111	78	1017
	6MV	76	150	173	187	179	263	290	261	164	1921
	10MV	92	152	189	183	178	235	267	230	140	1902
	15MV	6	8	11	5	11	8	7	8	1	76
照射野 条件	※2 5 × 5	63	115	142	117	119	147	137	87	41	1096
	15 × 15	20	37	50	18	45	36	41	15	7	307
	20 × 20	42	128	134	90	93	133	101	79	34	962
	25 × 25	17	12	26	16	19	17	26	15	2	166
ウェッジ 条件	※2 15°	35	57	45	41	34	43	30	21	13	393
	30°	40	60	54	36	42	31	32	21	15	393
	45°	18	13	20	17	20	15	11	6	3	149
	60°	23	15	23	20	33	41	43	19	7	243
Total		478	837	967	817	876	1084	1127	873	505	8625
電子線 エネルギー 条件	※6 4MeV	-	-	-	-	-	-	3	5	13	21
	5MeV	-	-	-	-	-	-	1	0	0	1
	6MeV	-	-	-	-	-	-	16	26	24	66
	8MeV	-	-	-	-	-	-	0	0	2	2
	9MeV	-	-	-	-	-	-	12	32	21	65
	10MeV	-	-	-	-	-	-	1	0	2	3
	12MeV	-	-	-	-	-	-	8	18	16	42
	15MeV	-	-	-	-	-	-	5	13	10	28
	16MeV	-	-	-	-	-	-	0	1	1	2
	18MeV	-	-	-	-	-	-	1	3	2	6
	20MeV	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0
22MeV	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	
Total		0	0	0	0	0	0	47	98	91	236
照射 装置数	Elekta	12	28	36	28	39	49	64	53	48	381
	MITSUBISHI	6	12	8	3	3	2	5	1	2	73
	SIEMENS	12	34	32	23	14	27	21	20	8	248
	TOSHIBA	4	13	7	6	6	3	3	0	0	77
	Varian	63	95	125	113	118	154	147	135	71	1175
	その他	5	8	9	12	22	31	38	41	25	197
Total		102	190	217	185	202	266	278	250	154	2151

※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、再測定前の方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数あり。(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。

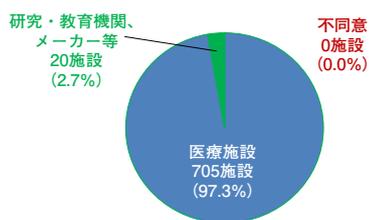
表 5. 実施しているが、表4にカウントしていない条件別ビーム数 (R3年度は11月末迄)

年度	ビーム数 (校正条件)			照射野条件
	8MV	14MV	18MV	8cm × 8cm
H25	1	1	1	
H26	2		1	1
H27	1			
H28	9			
H29	6			
H30	7			
R1	9			
R2	7			
R3	4			
累計	46	1	2	1

表 6. TomoTherapy および CyberKnife での出力線量測定の依頼状況 (R3年度は11月末迄)

年度	TomoTherapy		CyberKnife		Total
	1条件のみ	別条件と同時	1条件のみ	別条件と同時	
H28	3	2	3	1	9
H29	6	10	1	3	20
H30	10	8	1	6	25
R1	11	8	3	4	26
R2	12	13	2	5	32
R3	10	3	2	4	19
累計	52	44	12	23	131

(令和1年度対象施設数：725 施設)
医療施設：705 施設、研究・教育機関・メカ等：20 施設



(令和2年度対象施設数：731 施設)
医療施設：709 施設、研究・教育機関・メカ等：22 施設

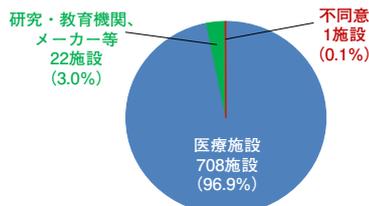


図2. 治療用線量計校正実施施設の施設名公表数

(平成30年度から令和2年度までの過去3年間の対象施設数：477 施設)



公表施設の拠点病院・一般病院の内訳

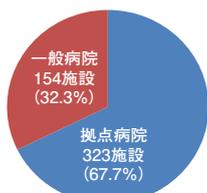


図3. 出力線量測定実施施設の施設名公表数

表7. 対象施設数477施設の都道府県別内訳

北海道	21	大阪府	46
青森県	6	兵庫県	23
岩手県	7	京都府	12
宮城県	7	滋賀県	7
秋田県	7	奈良県	6
山形県	7	和歌山県	5
福島県	9	鳥取県	4
東京都	44	島根県	2
神奈川県	22	岡山県	5
埼玉県	17	広島県	10
千葉県	15	山口県	2
茨城県	10	香川県	4
栃木県	6	愛媛県	4
群馬県	10	徳島県	4
山梨県	3	高知県	4
新潟県	8	福岡県	17
長野県	7	佐賀県	4
富山県	10	長崎県	7
石川県	4	熊本県	8
福井県	5	大分県	5
愛知県	30	宮崎県	1
岐阜県	7	鹿児島県	9
静岡県	14	沖縄県	4
三重県	8		

粒子線治療の保険適用拡大について

公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団

1. はじめに

陽子線治療は平成13年7月1日より、重粒子線治療は平成15年11月1日より、それぞれ先進医療^{*1}として、およそ20年にわたり実施されてきました。令和3年12月2日に開催された第105回先進医療会議の議題「令和3年度先進医療技術の実績報告等について」の参考資料1によれば、陽子線治療、重粒子線治療の先進医療Aでの年間実施件数は、それぞれ1,285件、683件に達し、粒子線治療（ここでは、陽子線治療と重粒子線治療の総称として粒子線治療と呼ぶ）として捉えた場合、実施件数は全23種の先進医療Aの技術の中で第1位であり、全体の約4割を占めました。

一方、粒子線治療に対する公的保険の適用については、平成28年度及び平成30年度の二回の診療報酬改定を経て、陽子線治療を小児腫瘍（限局性の固形悪性腫瘍に限る。）、手術による根治的な治療法が困難である限局性の骨軟部腫瘍、頭頸部悪性腫瘍（口

腔・咽喉頭の扁平上皮癌を除く。）又は限局性及び局所進行性前立腺癌（転移を有するものを除く。）に対して根治的な治療法として行った場合、また重粒子線治療を手術による根治的な治療法が困難である限局性の骨軟部腫瘍、頭頸部悪性腫瘍（口腔・咽喉頭の扁平上皮癌を除く。）又は限局性及び局所進行性前立腺癌（転移を有するものを除く。）に対して根治的な治療法として行った場合、それぞれ点数加算の対象とされてきました。

また令和4年2月9日開催の第516回中央社会保険医療協議会（中医協）総会では、新たに陽子線治療に対し、大型の肝細胞癌、肝内胆管癌、局所進行性膀胱癌又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）について、また重粒子線治療に対しては、大型の肝細胞癌、肝内胆管癌、局所進行性膀胱癌、大腸癌術後局所再発又は局所進行性子宮頸部腺癌に係るもの（いずれも切除不能のものに限る）について、それぞれ保険導入を行うとの答申がなさ



図1 厚生労働省ウェブサイト「先進医療の概要について」

https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/iryuhoken/sensiniryoo/index.html
 (ここより先進医療会議のページにリンクが張られており、会議資料等が閲覧できます)

* 1：承認日時点では先進医療の前身である高度先進医療

れました。

この結果、令和4年3月4日厚生労働省告示第五十四号「診療報酬の算定方法の一部を改正する件」により、令和4年4月1日よりこれらの疾患が新たに保険適用される運びとなりました。

そこで本稿では、厚生労働省の公開資料を基に、令和4年度診療報酬改定に伴う粒子線治療の保険適用拡大について、先進医療会議での経緯、保険適用範囲および負担額ならびに今後の課題について紹介いたします。

2. 先進医療会議での経緯

厚生労働省のホームページでは、先進医療の概要について図1の通り紹介されています。そのポイントとしては、将来的な保険導入のための評価の実施が前提であること、そのために当該技術と保険診療との併用（いわゆる混合診療）が、厚生労働大臣が定める評価療養として特別に認められていること、の二点があげられます。

先進医療に係る技術の評価は、先進医療会議で実施されます。特に保険導入のための評価は、先進医療を実施する保険医療機関からの実績報告に基づき、診療報酬改定の時期に先立ち行われるのが通例です。最近では、令和3年12月2日および翌年1月6日に第105回および第106回先進医療会議がそれぞれオンライン開催され「先進医療技術の科学的評価等について」という議題の資料が公開されてい

ます。

図2には、第105回先進医療会議資料から「令和4年度診療報酬改定に向けた先進医療の保険導入等及び施設基準の見直しイメージ」を示します。先進医療会議では、それぞれの技術ごとに、「十分な科学的根拠がある」、「一定の科学的根拠がある」、「科学的根拠無し」の三つのうちのどれに該当するかという形で評価が行われます。その結果は中医協に報告され、前二者については医療技術評価分科会（医技評）での保険導入可否の検討を経て、中医協より厚生労働大臣に答申がなされ、保険収載や先進医療の告示等へ反映されます。

では、粒子線治療について、このたびの先進医療会議での評価結果はどのようなものだったのでしょうか。粒子線治療に対しては、評価の検討にあたり先進医療技術に一律に提出が求められている実績報告等に加え、公益社団法人日本放射線腫瘍学会が提出した「先進医療として実施した粒子線治療と既存の放射線治療との比較」という報告書がエビデンスとして使用されました。以下に令和4年1月6日に開催された第106回先進医療会議の資料「先一5」を掲載します。この会議の議事録はまだ公表されておりませんが、第516回中医協総会で示された資料「個別改定項目について」を見る限り、概ね資料「先一5」に示す事務局案に従って評価がなされたものと考えられます。

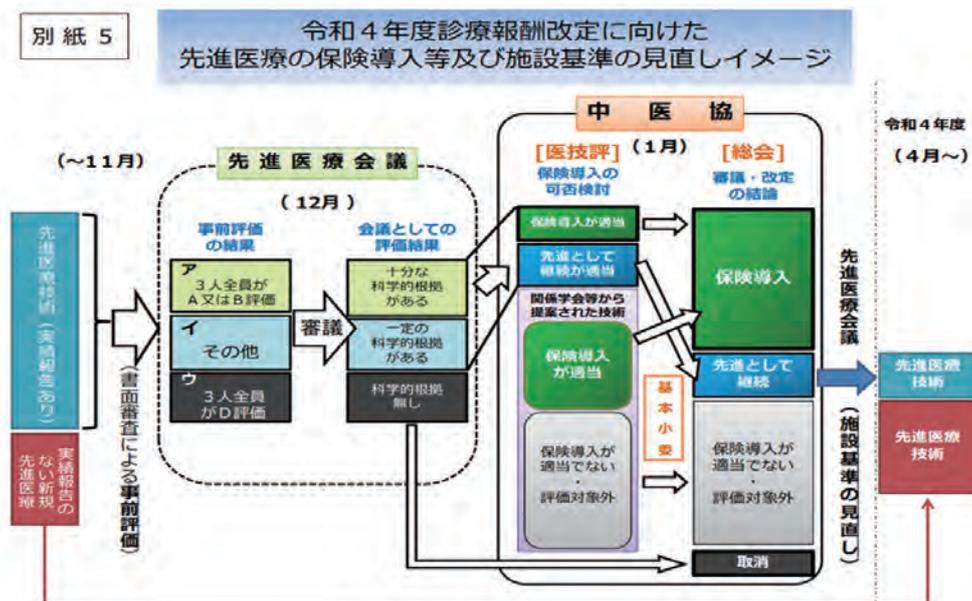


図2 「令和4年度診療報酬改定に向けた先進医療の保険導入等及び施設基準の見直しイメージ」
(第105回先進医療会議 資料 先一3-1より抜粋)

粒子線治療に対する科学的評価について (案)

1. 背景

- 第 105 回先進医療会議(令和3年12月2日開催)において、診療報酬改定に向けた粒子線治療の科学的評価として、全適応症を対象としたものについては、総合 IIb^{*2}と評価がされたところ。
- 他方で、事前評価において、
 - ・一部の適応症について一定の科学的根拠があるが、科学的根拠の乏しいものも存在する。
 - ・適応症毎にエビデンスが検討されるべきであり、有効性・安全性等の評価が十分なものから、順次検討すべき。等の指摘がされていることを踏まえ、適応症毎のエビデンスを、第 106 回先進医療会議において検討することとした。

2. 検討にあたり使用するエビデンスについて

- 日本放射線腫瘍学会 (以下、「学会」という。)より提出がされた「先進医療として実施した粒子線治療と既存の放射線治療との比較」(以下、「報告書」という。)においては、適応症毎に解析結果がまとめられている。

※ 解析結果の要約として、別添のとおり、適応症毎に「問」と「回答」が作成されている。

3. 粒子線治療に対する適応症毎の評価について(案)

- 今般、学会より提出された報告書の内容を踏まえ、以下のとおり評価し、医療技術評価分科会へ送ることとしてはどうか。

- ① 既存治療 (X 線治療等) と比較して、生存率等の臨床的アウトカムの改善が明示的に示された以下の適応症については、「十分な科学的根拠があるもの」として、評価することとする。

- ・ 大型の肝細胞癌
- ・ 肝内胆管癌
- ・ 局所進行膵癌
- ・ 大腸癌術後局所再発

- ・ 局所進行子宮頸部腺癌 (重粒子線治療のみ検討対象)
※ いずれも、切除不能のものに限る。

- ② 既存治療 (X 線治療等) と比較して、生存率等の臨床的アウトカムの改善が明示的に示されず、引き続きエビデンスの集積が望ましいと考えられるその他の適応症については、「一定の科学的根拠があるもの」として、評価することとする。

- 先進医療会議における評価結果を医療技術評価分科会へ送り、審議の結果、保険適用が妥当とされた適応症については、先進医療告示から削除することとしてはどうか。

- また、その他の適応症については、先進医療 A 又は先進医療 B として継続することとしつつ、今後の対応方針について改めて議論することとしてはどうか。

【学会より提出された報告書「先進医療として実施した粒子線治療と既存の放射線治療との比較」より抜粋】

問：原発性肝癌 (肝細胞癌、肝内胆管癌) において既存の X 線を用いた放射線治療と比較して粒子線治療は有用か？

- ・ 小型の肝細胞癌 (平均 2.2cm) に対する粒子線治療は、同病態での SBRT と比較して、生存率において差が見いだせなかった。
- ・ 大型の肝細胞癌 (平均 7.2cm) に対する粒子線治療は、同病態での TACE + 3DCRT と比較して、生存率において優越性が示唆された。
- ・ 肝内胆管癌に対する粒子線治療は、X 線治療 (3DCRT および SBRT) と比較して、生存率において優越性が示唆された。

問：胆道癌 (肝内を除く) において既存の X 線を用いた放射線治療と比較して粒子線治療は有用か？

- ・ 胆道癌 (肝内を除く) に対する粒子線治療は、X 線治療 (3DCRT、IMRT および SBRT) と生存

* 2 : 3 名の評価者の事前評価結果で、主担当が C 評価であり、副担当の評価 1 人以上が A 又は B 評価である技術。(ただし、D 評価がある場合を除く。) ここで A、B、C および D は、それぞれ、「十分な科学的根拠を有する」、「一定の科学的根拠を有する」、「科学的根拠が十分でなく、継続することが適当」および「取り消すことが適当」との評価を指す。

率において差が見いだせなかった。

- ・非切除肝門部領域癌に対する粒子線治療は、X線治療（3DCRT、IMRT および SBRT）と生存率において差が見いだせなかった。

問：切除不能・局所進行膵癌において既存の X 線を用いた放射線治療と比較して粒子線治療は有用か？

- ・切除不能・局所進行膵癌に対する粒子線治療の成績は、同病態での X 線治療と比較して、有効性において良好であり、有害事象も少なかった。

問：食道癌に対して粒子線治療は X 線治療と比べて優れているか？

- ・食道癌に対する粒子線治療は、X 線治療と比べて生存率の明らかな改善は見いだせなかったが、心肺毒性を減少させる治療として期待できる。

問：大腸癌術後局所再発において既存の X 線を用いた放射線治療と比較して粒子線治療は有用か？

- ・大腸癌術後局所再発に対する粒子線治療は、X 線治療よりも、有効性において優れていると考えられた。

問：原発性肺・縦隔腫瘍において既存の X 線を用いた放射線治療と比較して粒子線治療は有用か？

- ・リンパ節転移のない早期肺癌に対する粒子線治療は、既存の X 線を用いた放射線治療と比較し、良好な局所制御および生存率を得ることに加え、有害事象の発生を低下させる。
- ・局所進行非小細胞肺癌に対する粒子線治療は、X 線を用いた放射線治療と比較して、同等の生存率を有し、かつ重度放射性肺臓炎の発生を低下させることが可能である。
- ・縦隔腫瘍に対する粒子線治療は、長期的な有害事象の発生を低下させることが期待される。

問：腎癌に対して既存の X 線を用いた放射線治療と比較して粒子線治療は有用か？

- ・原発性腎癌に対する X 線を用いた放射線治療（体幹部定位放射線治療：SBRT）と比較して、粒子線治療は少なくとも同等の治療成績が期待できる。
- ・特に、大型の腎癌でも治療効果が認められており、これまで X 線 SBRT の適応外とされていた症例に対する治療オプションとなることが期待される。

問：Stage II - III（UICC 分類第 7 版）筋層浸潤性膀胱癌に対して既存の X 線を用いた放射線治療と比較して粒子線治療は有用か？

- ・Stage II - III（UICC 分類第 7 版）筋層浸潤性膀胱癌では、病変が単発もしくは複数でも病変が限局しており、中間評価の病理学的評価で明らかな残存を認めない症例に対して X 線と同等の治療成績が期待できる。

問：婦人科癌（局所進行子宮頸部腺癌、大腫瘍径の局所進行子宮頸部扁平上皮癌、婦人科領域悪性黒色腫）において、既存の X 線を用いた放射線治療と比較して粒子線治療は有用か？

- ・局所進行子宮頸部腺癌に対する重粒子線治療は、同病態での X 線治療と比較して生存率において優越性が示唆された。
- ・大腫瘍径（6.0cm 以上）の局所進行子宮頸部扁平上皮癌に対する重粒子線治療は、同病態での X 線治療と比べ、生存率において差が認められなかった。
- ・婦人科領域の手術非適応悪性黒色腫に対する重粒子線治療は、X 線治療と比べ生存率において優れている可能性が示唆された。

問：悪性神経膠腫に対し、陽子線治療の治療成績が、従来の X 線を用いた放射線治療と同等か？

- ・悪性神経膠腫のうち膠芽腫に対しては、陽子線治療の成績は従来の X 線を用いた放射線治療の成績と同等と推定される。

問：髄膜腫に対し、陽子線治療の治療成績が、従来の X 線を用いた放射線治療と同等か？

- ・髄膜腫に対して陽子線治療の成績は従来の X 線を用いた放射線治療の成績と同等と推定される。

問：少数転移性腫瘍（転移性肺腫瘍、転移性肝腫瘍、リンパ節転移）において既存の X 線を用いた放射線治療と比較して粒子線治療は有用か？

- ・少数転移性肺腫瘍に対する粒子線治療は、同病態での SBRT と有効性、安全性において良好な傾向であったが、明らかな差は見いだせなかった。疾患別検討でも明らかな差は見いだせなかった。
- ・少数転移性肝腫瘍に対する粒子線治療は、同病態での SBRT と比較して、局所制御率において優越性が示唆された。疾患別に検討した大腸癌の肝転移でも優越性が示唆された。また、SBRT の適

応とならない 5 cm を超える病変に対する粒子線治療は、5 cm 以下の病変に対する治療と同等程度に有効で安全であると考えられた。

- ・リンパ節転移に対する粒子線治療は、同病態での SBRT、IMRT と有効性、安全性において良好な傾向であったが、明らかな差は見いだせなかった。疾患別検討でも明らかな差は見いだせなかった。

【ここまで第 106 回先進医療会議 資料「先—5」】

3. 保険適用範囲および患者負担額

前述の通り、中医協より、陽子線治療については、大型の肝細胞癌、肝内胆管癌、局所進行膵癌又は大腸癌術後局所再発に係るもの、重粒子線治療については、これらの 4 つに加え、局所進行子宮頸部腺癌に係るもの（いずれも切除不能のものに限る）の保険導入を新たに行うことが答申されました。では、令和 4 年度診療報酬改定では、粒子線治療についての具体的な取扱いはどうなったのでしょうか？令和 4 年厚生労働省告示第 54 号（診療報酬の算定方法の一部を改正する件）別表第一（医科点数表）によれば、粒子線治療の診療報酬の算定は次に依ります。

MOO1-4 粒子線治療（一連につき）

- 1 希少な疾病に対して実施した場合
 - イ 重粒子線治療の場合 187,500 点
 - ロ 陽子線治療の場合 187,500 点
- 2 1 以外の特定の疾病に対して実施した場合
 - イ 重粒子線治療の場合 110,000 点
 - ロ 陽子線治療の場合 110,000 点

注 1 別に厚生労働大臣が定める施設基準に適合しているものとして地方厚生局長等に届け出た保険医療機関において、別に厚生労働大臣が定める患者に対して行われる場合に限り算定する。

- 2 粒子線治療の適応判定体制に関する別に厚生労働大臣が定める施設基準に適合しているものとして地方厚生局長等に届け出た保険医療機関において、粒子線治療の適応判定に係る検討が実施された場合には、粒子線治療適応判定加算として、40,000 点を所定点数に加算する。
- 3 別に厚生労働大臣が定める施設基準に適合しているものとして地方厚生局長等に届け出た保険医療機関において、放射線治療を担当する専従の医師が策定した照射計画に基づく医学的管理を行った場合には、粒子線治療医学管理加算として、10,000 点を所定点数に加算する。

また、令和 4 年 3 月 4 日保医発 0304 第 1 号（診

療報酬の算定方法の一部改正に伴う実施上の留意事項について（通知）の別添 1（医科点数表）には、適用疾患等について次のような記載があります。

MOO1-4 粒子線治療（一連につき）

- (1) 重粒子線治療とは、炭素原子核を加速することにより得られた重粒子線を集中的に照射する治療法であるものをいう。
- (2) 陽子線治療とは、水素原子核を加速することにより得られた陽子線を集中的に照射する治療法であるものをいう。
- (3) 重粒子線治療は、手術による根治的な治療法が困難である限局性の骨軟部腫瘍、頭頸部悪性腫瘍（口腔・咽喉頭の扁平上皮癌を除く。）、手術による根治的な治療法が困難である肝細胞癌（長径 4 センチメートル以上のものに限る。）、手術による根治的な治療法が困難である肝内胆管癌、手術による根治的な治療法が困難である局所進行性膵癌、手術による根治的な治療法が困難である局所大腸癌（手術後に再発したものに限る。）、手術による根治的な治療法が困難である局所進行性子宮頸部腺癌又は限局性及び局所進行性前立腺癌（転移を有するものを除く。）に対して根治的な治療法として行った場合のみ算定し、数か月間の一連の治療過程に複数回の治療を行った場合であっても、所定点数は 1 回のみ算定する。
- (4) 陽子線治療は、小児腫瘍（限局性の固形悪性腫瘍に限る。）、手術による根治的な治療法が困難である限局性の骨軟部腫瘍、頭頸部悪性腫瘍（口腔・咽喉頭の扁平上皮癌を除く。）、手術による根治的な治療法が困難である肝細胞癌（長径 4 センチメートル以上のものに限る。）、手術による根治的な治療法が困難である肝内胆管癌、手術による根治的な治療法が困難である局所進行性膵癌、手術による根治的な治療法が困難である局所大腸癌（手術後に再発したものに限る。）又は限局性及び局所進行性前立腺癌（転移を有するものを除く。）に対して根治的な治療法として行った場合のみ算定し、数か月間の一連の治療過程に複数回の治療を行った場合であっても、所定点数は 1 回のみ算定する。
- (5) 「1」に規定する希少な疾病とは、小児腫瘍（限局性の固形悪性腫瘍に限る。）、手術による根治的な治療法が困難である限局性の骨軟部腫瘍及び頭頸部悪性腫瘍（口腔・咽喉頭の扁平上皮癌

を除く。)、手術による根治的な治療法が困難である肝細胞癌(長径4センチメートル以上のものに限る。)、手術による根治的な治療法が困難である肝内胆管癌、手術による根治的な治療法が困難である局所進行性膵癌、手術による根治的な治療法が困難である局所大腸癌(手術後に再発したものに限る。))又は手術による根治的な治療法が困難である局所進行性子宮頸部腺癌のことを指し、「2」に規定する「1」以外の特定の疾病とは、限局性及び局所進行性前立腺癌(転移を有するものを除く。)のことを指す。

- (6) 粒子線治療について、位置決めなどに係る画像診断、検査等の当該治療に伴う一連の費用は所定点数に含まれ、別に算定できない。
- (7) 「注2」の粒子線治療適応判定加算は、当該治療の実施に当たって、治療適応判定に関する体制が整備された保険医療機関において、適応判定が実施された場合に算定できるものであり、当該治療を受ける全ての患者に対して、当該治療の内容、合併症及び予後等を文書を用いて詳しく説明を行い、併せて、患者から要望のあった場合、その都度治療に関して十分な情報を提供すること。なお、患者への説明内容については文書(書式様式は自由)で交付し、診療録に添付すること。
- (8) 「注3」に規定する粒子線治療医学管理加算は、粒子線治療に係る照射に際して、画像診断に基づきあらかじめ作成した線量分布図に基づいた照射計画と照射時の照射中心位置を、三次元的な空間的再現性により照射室内で画像的に確認・記録するなどの医学的管理を行った場合に限り算定する。
- (9) 粒子線治療の実施に当たっては、薬事承認された粒子線治療装置を用いた場合に限り算定する。

これらの告示等に従い、1点=10円で計算した場合、粒子線治療の診療報酬(医療費)は、陽子線、重粒子線の種類によらず、上記の(5)に記載されている希少な疾病に対して実施した場合、最大237万5千円となりそれ以外の特定の疾病(限局性及び局所進行性前立腺癌(転移を有するものを除く。))に対して実施した場合、最大160万円と算定されます。

窓口で患者の支払う金額は、公的保険制度により

多くの場合このうちの1ないし3割に相当することから、それぞれ多くて71万2千5百円、48万円となります。また高額療養費制度により、窓口で支払った額が所得に応じて決められた上限額を超えると、超過分は公的医療保険が負担してくれます。例えば、年収が約370万円~約770万円の方の場合、毎月の上限額は次の通り計算されます。

$$80,100 \text{ 円} + (\text{医療費} - 267,000 \text{ 円}) \times 1\%$$

この場合、一連の粒子線治療のみを同じ月内で実施したとすれば、実質的な自己負担額は希少がんに対し約10万円余り、それ以外の対象疾患で9万3千円余りになると試算できます。さらに世帯合算や多数回該当といった負担軽減のしくみもあります。詳しくは被保険者証に記載されている公的医療保険にお問い合わせください。

保険適用前の先進医療ではおよそ300万円程度の自己負担を必要としていたことを考えれば、これらの疾患に対する粒子線治療の保険適用拡大は、患者にとって大きな福音になると言えます。

4. 今後の課題

今般、新たに陽子線治療で4疾患、重粒子線治療で5疾患に対して保険適用の拡大がなされる運びとなりました。同時に、それ以外の疾患は引き続き先進医療の枠組みの中で継続されると考えられ、保険導入のための評価に足りる、施設横断的な科学的エビデンスの蓄積および解析の継続が課題となることでしょう。

国立がん研究センターの推計によれば、「がん罹患では、2015-2019年の年平均罹患数は男性57万人、女性は41万人である一方、2035-2039年平均では男性は64万人、女性は53万人と推計され、罹患数は男性で13%、女性で29%増加する見込み」とされています。保険適用拡大によりがん治療の選択肢は広がりましたが、粒子線治療の恩恵を受けられるのは、まだそのごく一部と言えましょう。

こうした課題を解決するには、関係する医療機関が一体となって症例数を積み重ねていくとともに、治療装置の小型化や低コスト化を通して粒子線治療装置が普及し、専門人材育成と相まってがんの標準治療の一つとして認められ社会実装が進んでいくことが重要です。わが国が世界に先導する医療技術の一つとして、粒子線治療の今後のさらなる発展のために、より一層の関係機関の協力や支援が望まれるところです。

COVID-19 による我が国の放射線治療診療への影響

広島大学 大学院 医系科学研究科 放射線腫瘍学
教授 永田 靖



はじめに

日本放射線腫瘍学会では2020年よりCOVID-19アドホック委員会（宇野隆委員長）を立ち上げ、現在までにJASTRO COVID-19特設サイトの立ち上げや「COVID-19パンデミック下におけるJASTRO提言」の策定を行い、また定期的なWEBINER開催（中村聡明先生担当）と定期的な全国実態調査（玉利慶介先生担当）を行ってきた。

現在（2022年1月）は、国内で最初のコロナ感染者が発生してほぼ2年が経過し、新たなオミクロン株（感染性は高いが、重症化率は低いとされている。）による猛烈な第6波が襲来しつつある時期である。広島県では、全国に先駆けて「まん延防止等重点措置」が発令され、飲食店の営業時間規制と酒類提供禁止が指導されている。

本項では、2020/5、2020/7、2020/11、2021/2、2021/6の過去5回の国内実態調査結果（表1）を経て、これまでのコロナ禍の放射線治療診療への影響を検討する。

1. 患者数の推移について

コロナ禍は全国すべての放射線治療診療に種々の影響を与えた。最も著明な影響が患者数である。数度にわたる「緊急事態宣言」や「まん延防止等重点措置」によって、地域間の患者移動が制限された事による影響や、病院内各診療部門の制限による患者受診控え、手術制限、検査制限、検診控え、等の影響が考えられた。

表2は今回のJASTRO全国アンケートに回答した放射線治療医の施設における放射線治療患者数の

例年との比較であるが、例年と変化ないとしている施設は約50%で、時期によっては異なるが約25-41%の施設で減少したと回答された。また逆に例年より増加したとの回答が4-17%あった。

2021年6月の第5回調査では、初めて年間患者数比較調査が行われた。その結果（表3）では、2020年は2019年と比較して全国の放射線治療新患者数や総患者数はほとんど不変であった。また放射線治療医の実感と患者実数との関連（表4）をみると、2021年6月時点で患者が減ったとする施設は、総患者数比（2020/2019）が低く、逆に2021年6月時

表1. 全国放射線治療部門実態調査回答施設数の推移

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
時期	2020/5	2020/7	2020/11	2021/2	2021/6
回答数	566	261	253	206	244
回答施設数	545	239	243	201	238

表2. 放射線治療患者数の変化に対する現場感覚

	5月 (%)	7月 (%)	11月 (%)	2月 (%)	6月 (%)
減っている	41.2	36.4	25.5	27.9	30.7
増えている	4.0	5.0	12.8	12.9	16.8
変わらない	54.8	58.6	61.7	59.2	52.5

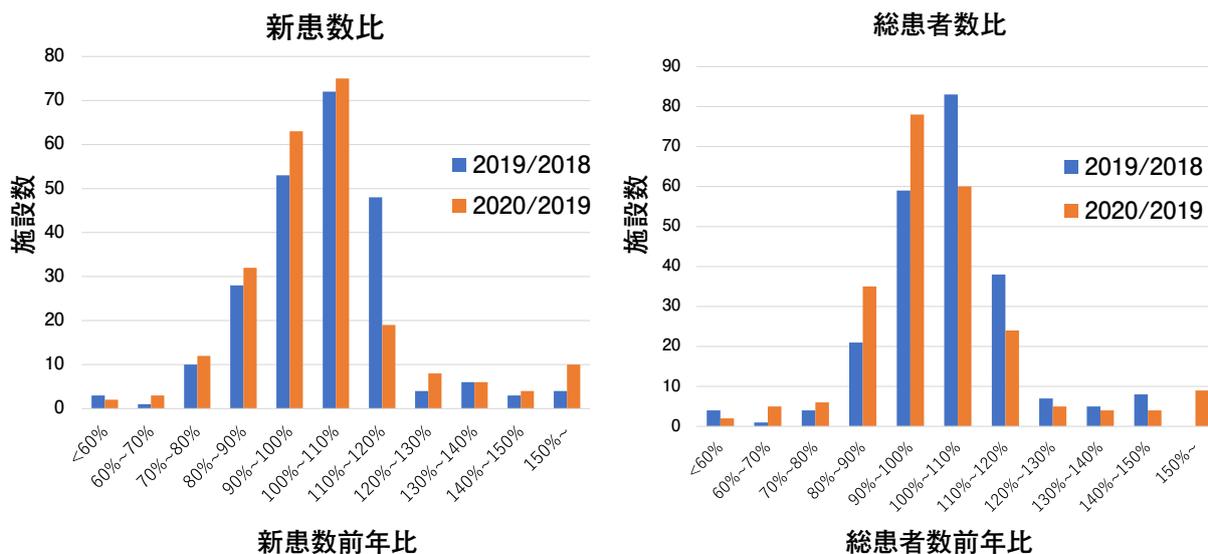
患者が減った施設はやや増加、一方で患者が増えた施設が増加。

表3. 2018、2019、2020年の年間放射線治療患者数の推移

年	新患者数			総患者数		
	2018	2019	2020	2018	2019	2020
合計	77,012	79,118	79,226	90,683	94,357	93,384
回答施設数	232	235	235	230	233	233

全施設の合算でみると、2019年に比べ、2020年の新患者数と総患者数に大きな増減はない。

表 4. 2019/2018 と 2020/2019 の年間患者数比較



2019年に比べ2020年で110-120%の施設の減少、90-100%の施設の増加、150%以上の施設が増加。

点で患者数が変わらない、ないし増えたと回答した施設の総患者数比（2020/2019）は変化がなかった。やはり、現場の実感と治療患者実数の変化には大きな解離はなかった。

これは過去の5回の調査で常に約30-40%の放射線治療医は放射線治療患者数が前年より減少したと感じていたが、全国規模で調査してみると患者数減少は顕著ではなく、治療総患者数は前年とほぼ不変であった。これは、総治療患者数の多い施設では患者数の増減が少なく、総治療患者数の少ない病院での患者減少が多く、全体の患者数は前年と比較して、ほとんど変化していなかったと考えられる。総治療患者数の少ない病院ほど、患者減少はわずかでも実感としては大きく減少した印象を放射線治療医が受けたのではなかろうか？また患者数の増加か？、減少か？、不変か？といった主観的調査は、個人差が大きい可能性がある。また国内治療新患総数がやや増加し、国内治療患者総数がやや減少と解離した理由は、同一患者に対する複数回照射（例えば骨転移等の緩和照射において）が減少したためではないかと推察される。

放射線治療部門の受けた影響については表5にまとめられる。初期には治療患者数を制限した施設も多かったが、次第にその施設数は減少した。放射線

治療後経過観察期間を延長していた施設も次第に元へ戻している。寡分割照射の積極的採用は次第にその比率は増加している。また入院患者と外来患者との治療時間を分けている施設は約30%でほぼ一定であった。BCPも約30%程度の施設で採用されていた。医療スタッフの2チーム制を採用する施設は一時より減少しているようである。三密を避ける目的でカンファレンスの規模縮小は約40%で維持されていた。

2. 患者の地域間格差について

放射線治療患者数の増減については地域間格差が著名で、和歌山県、静岡県、佐賀県、神奈川県、茨城県、秋田県、福井県では前年比10%以上の新患者数増加が見られた。逆に滋賀県、山形県、沖縄県、石川県、高知県、香川県、大分県では前年比10%以上の新患者数減少が見られた。その他、北海道や千葉県、埼玉県、兵庫県、福岡県ではやや増加し、東京都、大阪府、広島県、新潟県ではやや減少した。

東京都で減少して、その周囲の神奈川県や千葉県、埼玉県で増え、大阪府で減少して兵庫県で増えたのは、従来は見られた県境を超えた患者移動が減少したのではないかと推測される。これは、東京圏（東京、神奈川、千葉、埼玉）や大阪圏（大阪、兵庫、京都）

表 5. 全国放射線治療部門診療現場へのコロナ禍の影響

	5月 (%)	7月 (%)	11月 (%)	2月 (%)	6月 (%)
治療患者数を削減	16.9	5.9	2.5	4.0	0.8
治療患者数を今後削減予定	2.8	1.7	0.8	0.5	0.4
治療後経過観察間隔の延長	43.9	33.6	25.5	27.4	19.3
寡分割照射の積極的採用	32.3	34.7	38.9	39.8	39.0
外来入院患者の治療時間帯の区分	28.6	32.6	31.3	35.3	29.4
複数治療装置の集約化	2.8	2.9	3.3	4.0	2.9
部門内対策会議の実施および文書化	51.6	59.8	59.7	58.7	57.5
BCP（事業継続計画）の策定	23.3	30.1	34.6	32.3	32.4
医療スタッフの2チーム体制	12.1	8.4	7.4	6.5	5.0
カンファレンス規模縮小	55.2	45.2	40.7	46.3	41.6

寡分割照射は、依然として積極的に採用されている。
治療後経過観察間隔延長が減少傾向。

表 6. コロナ禍で積極的に寡分割照射が採用されている対象臓器

	11月 (%)	2月 (%)	6月 (%)
なし	52.3	52.2	51.3
乳癌	38.7	36.8	41.0
緩和照射	24.3	35.8	33.3
前立腺癌	19.8	16.4	27.4
頭頸部癌	2.9	1.5	2.6
肺癌	2.1	2.5	1.7
脳腫瘍	2.5	0.5	2.6

前立腺癌、乳癌でやや増加。
緩和照射で増加傾向。

でまとめるとほぼ前年と同程度であったことから推測される。

地方においても増加した県と減少した県があり格差が見られた。この原因については、各県の個別事情があると思われる。

今回の調査では、欧米で指摘されるような、手術環境の悪化により従来手術されていた患者さんが放射線治療適応となったかどうかについては不明である。

3. 寡分割照射について

乳癌や前立腺癌については、寡分割照射においても通常照射とほぼ同等の治療効果が証明されている。また骨転移などに対する緩和照射においても、寡分割照射でほぼ同等の鎮痛効果が証明されている。ただ、現状の健康保険診療点数制度においては、寡分割照射法を用いると総診療報酬が低下するために、未だに通常照射法が多く用いられている現状がある。コロナ禍においては、患者病院受診回数を削

減することによって、患者コロナ感染リスクも減少し、従来以上に寡分割照射が推奨される状況であった。表6によると依然として寡分割照射法を採用していないとする施設が約50%あるが、乳癌や前立腺癌、緩和照射で積極的に寡分割照射法を採用している施設が次第に増加している現状であった。

4. 放射線治療部門内におけるコロナ感染者について

コロナ禍で職員の感染により放射線治療部門の業務停止に至った施設は、50日間休止が1施設、5日間休止が1施設、3日間休止が1施設、1日間休止が4施設という結果であった。

職員の感染であるが、放射線腫瘍医については現在までに感染報告はなく、表7のように技師、看護師、事務職員の感染が報告された。

放射線治療患者の感染については表8のような頻度であった。

これらの数字の解釈は難しいが、少なくとも国内の大多数の放射線治療施設においては、現在までに感染制御が成功し、大きな診療への影響を回避できているものと考えられる。

5. おわりに

今回のコロナ禍については、全く想定外の事であった。地震や津波、火事等による防災訓練は行ってきたが、パンデミックな状況については誰もが想定していなかったことと思われる。国内放射線治療関連スタッフの努力により、「放射線治療を受ける

表 7. 放射線治療部門職員におけるコロナ患者発生状況

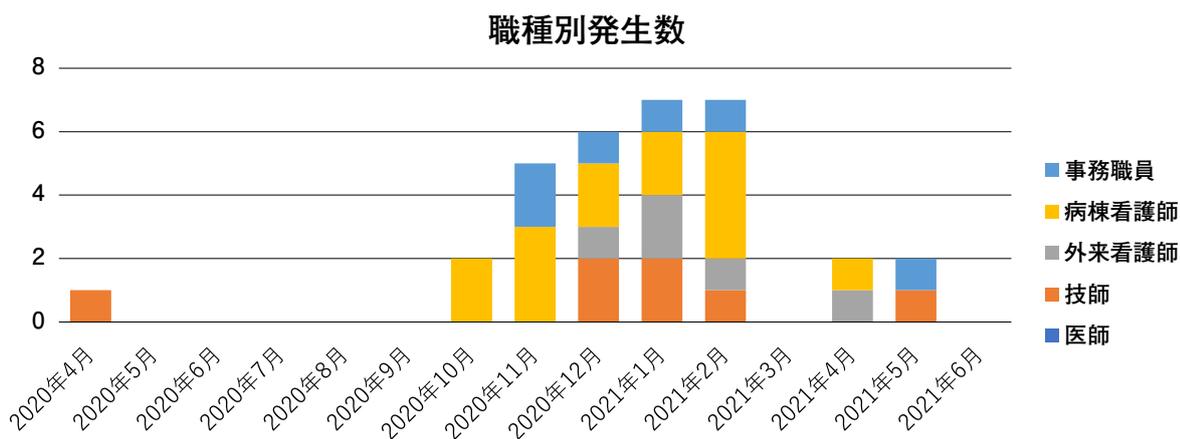
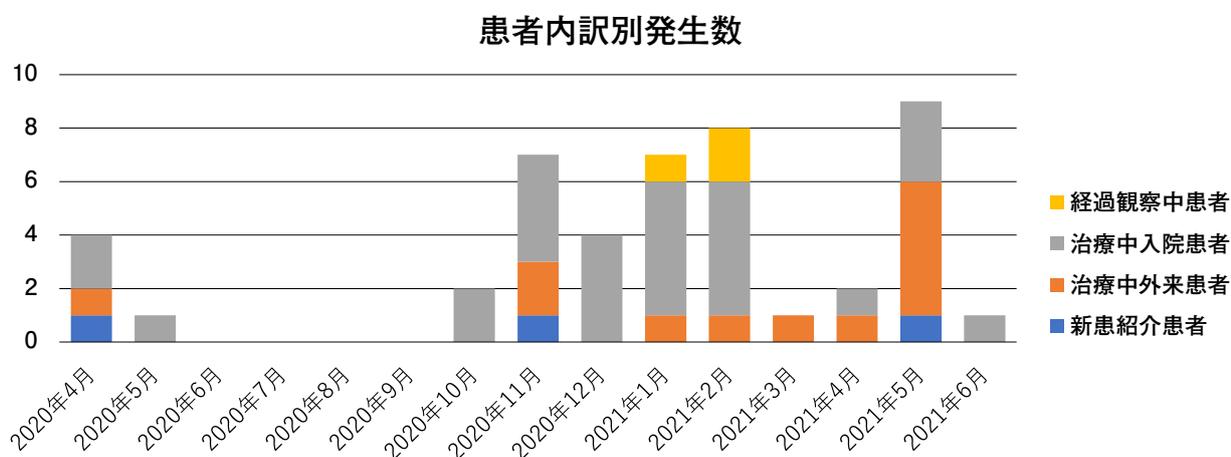


表 8. 放射線治療対象患者におけるコロナ患者発生状況

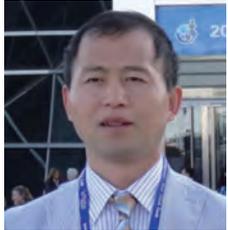


べきであった患者さんが放射線治療を受けられない。」様な事態は、現在までのところ回避できているものと思われる。我が国のコロナ対策が成功であったのか失敗であったのかはコロナ禍終了後に検

証されると思われるが、放射線治療担当スタッフは最後まで手を緩めることなく、現在の感染防御体制を継続すべきと考える。

重粒子線治療とマイクロ RNA 投与の併用で 膵がん増殖抑制効果が向上

量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門 量子医科学研究所
重粒子線治療研究部 粒子線基礎医学研究グループ
崔 星



【研究開発の背景と目的】

膵がんは5年生存率が10%未満と最も生存率が低い難治性がんの一種です。早期の発見が難しく、放射線治療をはじめとする現在のがん治療に対して非常に抵抗性を示します。最近の報告によると、局所進行膵がんに対する放射線治療を単独、または化学療法と組み合わせた場合の治療成績は、2年生存率が約20～30%ですが、量研では局所進行膵がんに対する重粒子線（炭素線）治療と抗がん剤（ゲムシタビン）の併用治療を行い、2年全生存率は約60%と良い成績が得られています。しかし、膵がんの克服に向けては、さらなる治療成績の向上が必要であり、より効果的な治療法の開発が求められています。

(miRNA) を用いた核酸抗がん薬の研究開発が行われています。miRNAはタンパク質に翻訳されない20～25塩基長の1本鎖RNAで、ヒトでは2,500種を超えるmiRNAが報告されています。miRNAは、ほかの遺伝子の発現を調節する役割を担っており、がん抑制因子およびがん促進因子となる遺伝子の発現を調整するmiRNAもあります。

miRNAの一種であるmiRNA-200cは、がん幹細胞の発生を促すとされる上皮間葉転換の活性化に関わるWNTシグナル伝達抑制やZEB1/2やBMI1遺伝子発現を抑制し、さらに低酸素環境下のがん幹細胞維持因子を抑制することにより腫瘍の増殖、浸潤、転移の阻害に関与するとされています(図1)。

近年、新たながん治療戦略としてマイクロRNA

miRNA-200cは、上皮間葉転換を促進するWNT

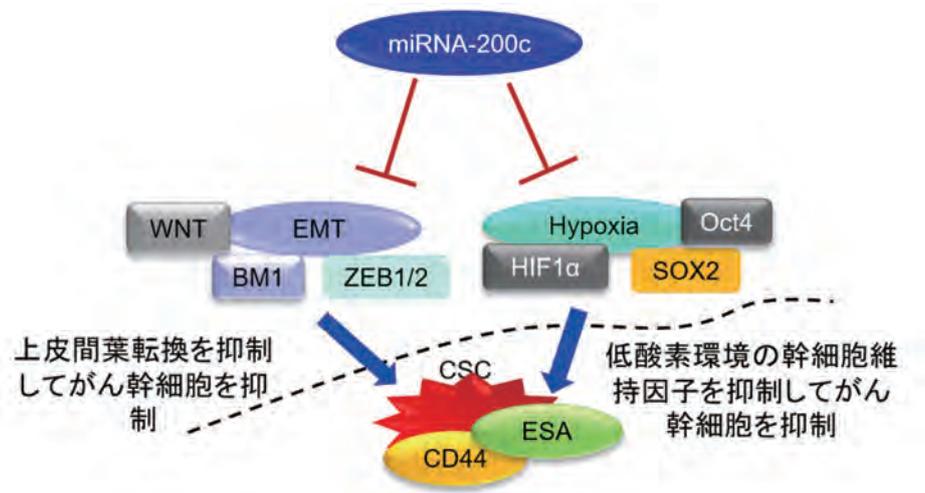


図1 miRNA200cによってがん幹細胞（CSC）が制御される仕組み

PK45細胞 (CD44+/ESA+)

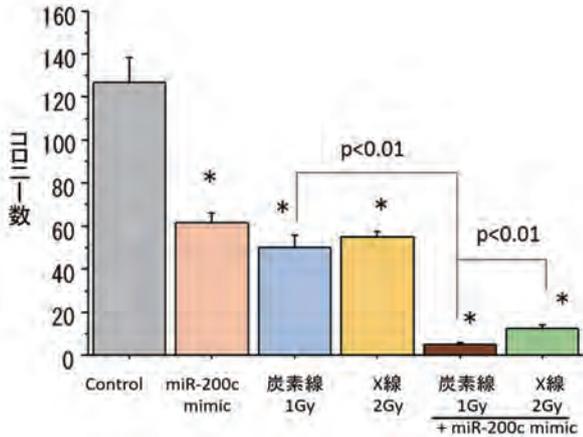


図2 コロニーアッセイの結果

シグナル伝達抑制、ZEB1 や BMI1 遺伝子発現抑制、そして低酸素環境下のがん幹細胞維持因子 HIF1 α 、SOX2、Oct4 などの抑制によって、幹細胞を抑制するとされています。

また、乳がん、膵がんなど、いくつかの種類のがんで放射線感受性を高めることが細胞実験で示されています。そこで本研究では、重粒子線（炭素線）とマイクロ RNA を用いた核酸抗がん薬の併用治療が、より効果的な膵がん治療法となり得るかを検討するための基礎的研究として、miRNA-200c 模倣物

の併用によって膵臓がんの重粒子線に対する感受性が高まるかを細胞実験と動物実験で調べました。

【研究の手法と成果】

1) 放射線または miRNA-200c 模倣物単独、および両者の併用による膵がん幹細胞増殖能への作用

実験には、難治性がんの特性をよりよく反映した細胞として、がん幹細胞マーカーである細胞表面分子の CD44 および ESA 陽性のヒト膵がん細胞株 (PK45) を用いました。放射線と miRNA-200c 模倣物を併用する場合は、miRNA-200c 模倣物 (10nM) を添加後、X 線または重粒子線を照射し、その後に一定数の細胞を培地に播種して培養しました。細胞に対して作用する程度が同じになるよう、X 線は 2Gy、重粒子線は 1Gy を照射しました。

形成されたコロニー数を算出した結果、重粒子線と miRNA-200c 模倣物を併用した場合のコロニー数は、重粒子線、X 線、miRNA-200c 模倣物それぞれの単独処理した場合と比べて顕著に減少し、X 線と miRNA-200c 模倣物を併用した場合と比べても少なくなりました (図2)。

2) 膵がん移植モデルマウスを用いた重粒子線照射または miRNA-200c 模倣物単独、および両者の併用効果の比較

膵がん細胞 (PK45) を移植したマウスに対して、重粒子線 (30Gy) または miRNA-200c 模倣物 (10 μ g) 単独、および重粒子線 (15Gy) と miRNA-200c 模倣物の併用治療を行いました。miRNA-200c 模倣物

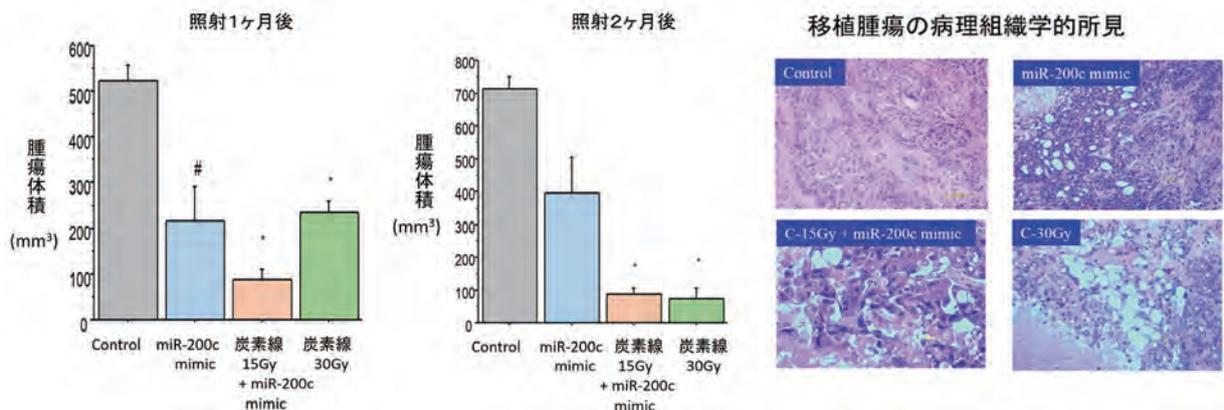
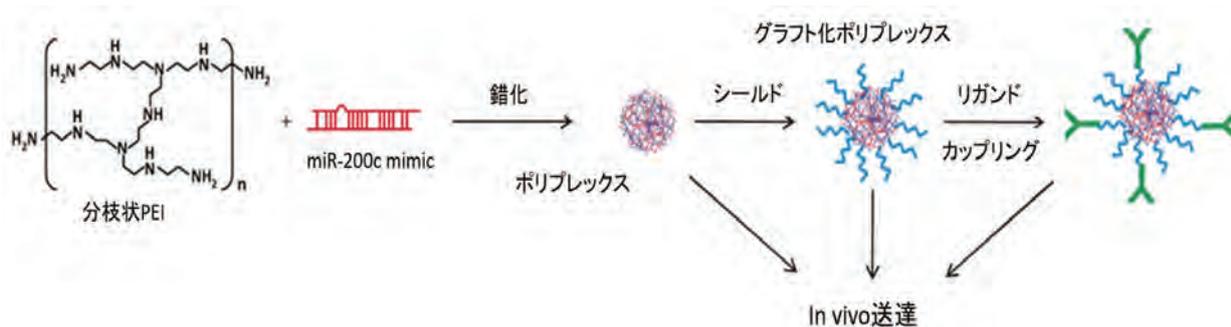


図3 膵臓がん移植腫瘍の増殖抑制



Höbel et al Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol 2013 から改編

図 4 miRNA-200c 模倣物とポリエチレンイミン (PEI)⁴⁾ の複合体から形成されるナノ粒子

とポリエチレンイミン (PEI)⁴⁾ の複合体からなるナノ粒子を注射器で腫瘍に直接投与しました。併用治療では、重粒子線を 1 回照射後、その翌日から 2 週間の内に 4 回に分けて miRNA-200c 模倣物 (計 10 μ g) を投与しました。

照射 1 か月後の腫瘍体積は、miRNA-200c 模倣物単独と重粒子線 (30Gy) 単独は同程度だったのに対し、重粒子線 (15Gy) と miRNA-200c 模倣物の併用の場合では著しく減少しました。また、併用の場合と重粒子線単独の場合とで、腫瘍細胞の壊死、空洞化、および線維化といった病理所見が同様に認められました (図 3)。

重粒子線と miRNA-200c 模倣物の併用治療では少ない線量で短期間に腫瘍増殖が抑制され、高線量の重粒子線照射単独の場合と同様の病理組織学的所見が認められたことから、miRNA-200c 模倣物は膀胱がんに対する重粒子線の放射線感受性を高める効果があることが示唆されました。

【今後の展開】

本成果は、重粒子線を用いた膀胱がんに対する、より効果的な治療の実現に向け、核酸抗がん薬の併用という新たな治療法の開発に繋がる基礎的知見です。

現在、マイクロ RNA を高分子の生体性適合性材料であるポリマーやウイルスベクターやリポソームなどに組み込んで患部に届ける薬剤送達システムの開発が盛んに行われています。ポリエチレンイミン (Polyethylenimine, PEI) 非脂質のカチオン性ポリマーで、in vitro (試験管内) と in vivo (生体内) の両方において、核酸 (DNA または RNA) を細胞に導入する試薬として使用されています。ウイルスベクターやリポソームによる導入方法に比べて免疫応答を引き起こさず、安価でありながら核酸の導入効率も高い特徴があります。本研究のマウスの実験で、miRNA-200c 模倣物を含んだポリエチレンイミン (PEI) の複合体からなるナノ粒子 (図 4) を腫瘍内に投与し、移植したヒト膀胱がん細胞に miRNA-200c を送達することによって、がん細胞の放射線感受性が高まったと考えられます。

これらのことから、いずれ miRNA を腫瘍に送達するシステムを臨床試験に応用できるようになると考えられます。重粒子線と miRNA の併用治療の臨床応用を目指して、進行度の異なる膀胱がんモデル動物を用いて miRNA-200c の投与条件を検討するなど、さらに研究を進めていきたいと考えています。

誰でも受けられる陽子線がん治療実現に向けた、超小型装置の開発進捗状況

株式会社ビードットメディカル
代表取締役社長 古川 卓司



株式会社ビードットメディカルは国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所（以下、放医研）発ベンチャー企業である。当社は長年研究者として重粒子線治療（陽子線治療と同じ粒子線治療の一種）装置の開発・臨床運用双方の経験を合わせ持つメンバーで設立された。放医研で中心的役割を務めていた創業メンバーは、粒子線治療の普及推進を目的に、導入施設やメーカーに対して技術支援を行ってきた。しかし、研究者という立場での活動には制約が多く、サポートできる範囲に限界があったことから、「自ら粒子線治療普及促進に貢献したい」という想いで当社の設立に至った。当社は粒子線治療の中でも多くの患者に貢献できる陽子線治療に着目し、超小型陽子線がん治療装置の開発に取り組んでいる。本稿では陽子線治療の概要、同装置の概要及び今後の展望について述べる。

1. 陽子線治療の概要

1.1 陽子線治療の特徴

陽子線治療は、水素の原子核である陽子を最大で光速の約60%まで加速した「陽子線」を用いた放射線治療の一種である。一般的に放射線治療といえばX線治療が広く知られていることから、陽子線治療の特徴をX線治療と比較しながら説明する。

X線は体表面付近で線量が最大となり、体内を進むにつれてその威力が徐々に弱まっていくという特性を持つ。そのため、X線で体内のがん病巣に十分なダメージを与えようとすると、周辺の正常な細胞にも大きなダメージを与えてしまう。一方、陽子線は体表面付近では線量が低く、止まる直前に線量が最大となる。この「止まる」直前に線量がピークに達する性質をブラッグピークと呼ぶ（図1）。

陽子線治療は、がん病巣の大きさや深さに合わせてピーク位置を調節することにより、正常な細胞へ

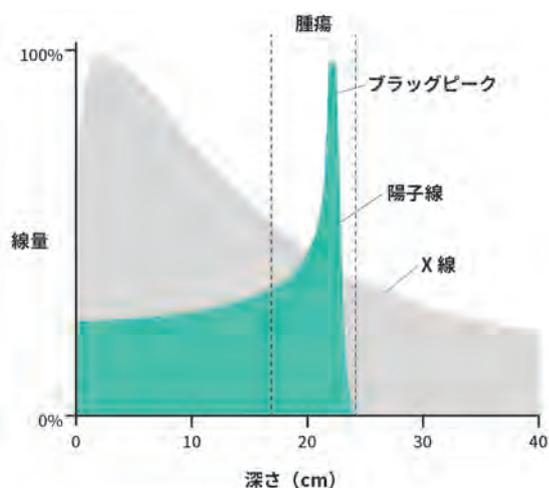


図1. 線量分布の比較

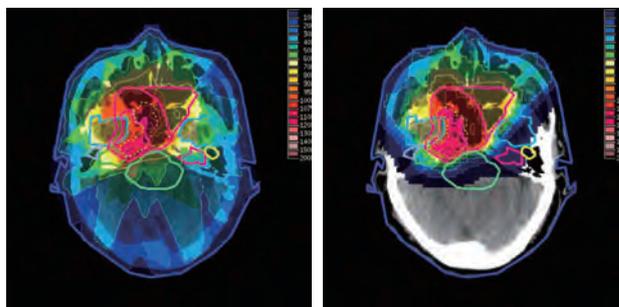


図2. 線量集中性の違い^[1] 左：X線、右：陽子線

頭頸部の腫瘍に放射線治療を実施した例。色の付いている範囲は放射線が照射された箇所。X線と比較して、陽子線はピンポイントに照射されていることがわかる。

のダメージを最小限に抑え、がん病巣に効率的に線量を集中させることができる（図2）。これは治療効果が高く副作用が少ないため、患者 QOL（生活の質）を維持できる治療法であるといえる。

1.2 陽子線治療の臨床成績

表1にX線と陽子線の治療成績の比較を示す。早期肺がん、切除不能膵臓がん、局所限局性前立腺がんについて、陽子線治療はX線治療よりも良い成績が得られている。特に難治性がんの代表格である膵臓がんは2年生存率50%と、X線治療より2倍以上良い成績が得られている。

表1. X線と陽子線の治療成績の比較

	肺がん（I期）	膵臓がん	前立腺がん
	3年生存率	2年生存率	10年生存率
X線	76% ^[2]	20% ^[4]	71% ^[6]
陽子線	85% ^[3]	50% ^[5]	80% ^[6]

2. 陽子線治療を取り巻く環境

2.1 陽子線治療の現状

陽子線治療はがん治療の選択肢として拡大し始めている。2022年度診療報酬改定での保険適用に向けて、厚生労働省は医療技術評価分科会で、新たに4つのがんについて陽子線治療の保険適用が妥当だとまとめた。すでに保険適用となっている小児腫瘍、前立腺がん、骨軟部腫瘍、一部の頭頸部がんに加えて、大型の肝細胞がん、肝内胆管がん、局所進行膵臓がん、手術後に局所再発した大腸がんが今年4月から保険適用となる見込みだ。

2021年6月に閣議決定された『経済財政運営と改革の基本方針2021』では陽子線治療を含む粒子線治療の推進について言及されている。「(前略)装置の小型化・低コスト化の潮流を踏まえ、病院の特徴や規模など、地域の状況に十分配慮した上で、診療の質や患者のアクセスの向上を図るため、具体的な対応策を検討する」と定められ、世界有数のがん大国である日本が国を挙げて粒子線治療の普及に踏み出している。

2.2 陽子線治療の課題

優れた臨床成績をもつ陽子線治療だが、現状ごく

一部の患者しか受けられておらず、誰もが受けられるがん治療の一種であるとは言い難い。普及を妨げる原因は巨大な装置にあり、高さ約10m、重さ約200tと医療機器の中でも圧倒的に大きい。そのため、装置導入にはテニスコート程の広いスペースの確保と専用建屋の新設が前提となり、このような大がかりな装置を導入できる施設は全国的にも決して多くない。

当社は800を超える放射線治療施設に向けて独自のアンケート調査を行い、約300施設から回答を得た。その結果、陽子線治療の優れた特性は認知されているものの、導入における障壁はやはりコストの高さとスペースであり、その障壁が解消されれば装置導入を検討したいという回答が半数近くに上った。

3. ビードットメディカルの提案

3.1 装置開発コンセプト

当社は陽子線治療の普及を目指し、圧倒的に小型化された陽子線治療装置を提案する。具体的には、従来の陽子線治療装置に比べて高さを約1/3、重さを約1/10まで削減し、普及しているX線治療装置と同規模のサイズを目指している。これが実現できれば、X線治療装置からの置き換えとして陽子線治療装置を導入することが可能になる。（現在の日本国内のX線治療室数：約1,000治療室、陽子線治療室数：38治療室（19施設））

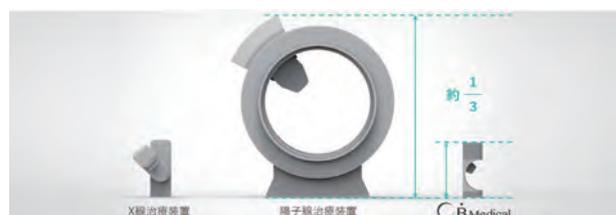


図3. サイズ比較 左：X線治療装置、中：従来の陽子線治療装置、右：当社超小型陽子線治療装置

3.2 装置の小型・低価格化を実現する非回転ガントリー

従来の陽子線治療装置では、患者に対して360度任意の方向から陽子線ビームを照射する回転照射装置（以下、回転ガントリー）が採用されている。回

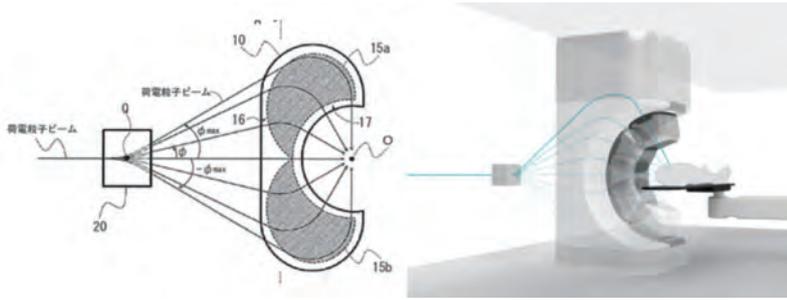


図4. 左：非回転ガントリーの原理（特許 6364161 号）、
右：非回転ガントリーを利用した治療イメージ



図5. 2021年6月に原理実証を実施した超伝導偏向電磁石の外観

転ガントリーでは高速な陽子線を曲げるために巨大な電磁石が複数必要であり、それらを支える架台も大型でなければならない。この構造により回転ガントリーは200t近い重さとなり、物量分コストが高くなる。また、回転させるための広い設置スペースも必要となる。

そこで筆者は、従来の仕組みとは全く違う画期的な「非回転ガントリー（商願 2021-84240）」を考案した。

図4に、「非回転ガントリー」の原理と治療のイメージを示す。具体的には、「非回転ガントリー」内に照射角度を変えるための振分電磁石とその下流に磁場分布を最適化した偏向電磁石を設置している。加速器で加速された陽子線は、振分電磁石を通過し、偏向電磁石に様々な角度から入射する。偏向電磁石で陽子線を曲げることで巨大な回転機構を持つことなくアイソセンタに向けて多方向からの集中

照射を実現する。この偏向電磁石に超伝導技術を用いることで更なる小型化を実現した。

2021年6月には、自社で設計製造した超伝導偏向電磁石（図5）の冷却による超伝導転移を確認し、通電試験において強磁場の発生を確認した。これにより本システムの主要部分の原理実証が完了している。

3.3 高精度照射技術：呼吸同期スキャンニング照射

開発中の装置はコンパクトでありながら、高精度な照射方法であるスキャンニング照射法^{[7]、[8]}を採用している。スキャンニング照射法ではスキャンニング電磁石を用いてビーム位置を移動させながら細いビームで腫瘍を塗りつぶすように照射を行うため、複雑な形をした腫瘍にも正確な照射が可能である。一般的にスキャンニング照射法は呼吸に伴い動く臓器（肺、肝臓、膵臓など）に弱いという課題があるが、



図6. 左：X線ばく射による透視イメージ 中：呼吸同期スキャンニング照射のイメージ 右：2021年8月に行ったスキャンニング電磁石の通電試験風景

当社は呼吸の影響を受ける腫瘍にも対応可能な呼吸同期照射（図6）を組み合わせることで、この課題を克服する。2021年8月には、陽子線治療装置用スキャニング電磁石の開発に無事成功した。

これらの技術は、放医研で重粒子線治療装置の開発において培った技術^[8]が基礎となっている。筆者は呼吸同期スキャニング照射の臨床運用に世界で初めて成功し、2012年に文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞した。

4. 今後の展望

4.1 陽子線治療の展望

今日、二人に一人ががんになると言われている。そのうち1/3は働き世代であり、QOLを維持し、社会生活と両立できるがん治療が求められている。通院で治療可能な放射線治療の中でも、陽子線治療は副作用や二次がんの発生率が低く、現代において魅力的な選択肢と言える。近年医師や患者からの期待も高まってきており、今後保険適用の拡大も見込まれている。2020年時点で世界111施設ある粒子線治療施設は、2025年には186施設にまで増加すると予測されており、北米やアジアを中心に世界中でさらなる広がりが期待される^[9]。

4.2 当社の展望

2022年1月現在、開発装置の原理実証に向け、大阪大学核物理研究センターへの搬入・据付が完了している。今後はビーム試験の結果をもとに薬機申請へ進み、2022年秋には薬機承認を取得する見込みである。

当社の小型装置であれば、これまで陽子線治療の導入が困難であった都市部や、コストを理由に検討を断念していた病院への導入を実現できる。加えて、国内のみならず海外でも陽子線治療の普及を加速させ、世界中誰でも陽子線治療が受けられる時代を創っていく。

参考文献

- [1] Taheri-Kadkhoda, et al: Radiation Oncology, 2008 3:4
- [2] Nagata, et al: Int. J. Radiation Oncol Biol Phys, 2015 93
- [3] Ohnishi, et al: Int. J. Radiation Oncol Biol Phys, 2019 106
- [4] Schellenberg, et al: Int. J. Radiation Oncol Biol Phys, 2011 81
- [5] Hiroshima, et al: Radiotherapy and Oncology, 2019 136
- [6] Liu, et al: Clinical Genitourinary Cancer, 2020 19
- [7] Furukawa, et al: MedPhys, 2010 37:11
- [8] Furukawa, et al: MedPhys, 2010 37:9
- [9] Proton Therapy World Market Report & Directory Edition 2021, MEDraysintell



図7. 左：偏向電磁石搬送の様子、右：装置据付の様子

粒子線治療施設

◆各粒子線施設の近況報告

神戸陽子線センターの紹介

神戸陽子線センター

副島 俊典



1. はじめに

神戸陽子線センターは2017年12月に小児がんに重点を置いた陽子線施設として開設されました。2018年3月から小児の陽子線治療を開始していますが、全国トップレベルの小児陽子線治療の症例数を誇っています。小児がん治療のモデルケースとなる施設になるよう日々研鑽しています。

2. 治療実績

2017年12月から2021年3月までに合計566例の患者を治療しています。そのうち20歳以上の患者は388例(68.6%)で、兵庫県内の患者が285例、その他の近畿地方の患者が75例、中四国の患者が22例、九州の患者が2例、その他が4例です。疾患別には前立腺がんの患者が最も多く237例(41.9%)、その他では骨軟部腫瘍62例、頭頸部腫瘍37例、肝胆膵腫瘍20例、食道がん13例、肺がん10例と続きます。20歳未満の患者は177例(31.3%)で、兵庫県内の患者が85例、その他の近畿地方の患者が51例、中四国の患者が23例、九州の患者が7例、その他が11例と広い範囲から患者さんをご紹介いただいています。疾患別には中枢神経腫瘍99例、神経芽腫19例、ユーイング肉腫ファミリー腫瘍15例、横紋筋肉腫13例、血液リンパ腫瘍12例などです。

3. 小児病院に隣接した陽子線治療施設としてのモデルケース

当センターは小児がん拠点病院である兵庫県立こども病院とは渡り廊下でつながっており、緊密な連携をとって小児がんの陽子線治療に当たっています。化学療法との同時併用は兵庫県立こども病院で入院の上治療に当たることができますし、神戸陽子線センターに常勤の麻酔科医がいますので、鎮静患者の治療も安心して治療できるような体制をとっています。治療室は2室用意されており、そのうちの

1室をお子さんたちの治療に当て(図1)、治療環境に配慮しています。



図1. 神戸陽子線センターの小児用の陽子線治療ガントリー

小児患者が快適に治療できるように配慮されています。海の中に入って行くようなイメージの照射室になっています。

4. 多職種カンファレンス、治療スケジュール会議

神戸陽子線センターでは小児症例全例で放射線治療計画用のCTを撮像する前に放射線腫瘍医、麻酔科医、看護師、診療放射線技師、医学物理士、事務が集まってカンファレンスを行っています。その際、患者の病歴や全身状態、性格などもスタッフで共有し、どのように固定するか、治療上の注意はどうかなどを検討することにしてしています。

また、鎮静患者やその他の覚醒下の患者をどのような日程で照射するか調整するためにスケジュール会議を行っています。その会議によって1日の鎮静による照射患者通常4名、最大6名までの治療に対応できるようにしています。多職種での検討により、スタッフ間の情報共有がスムーズになるので、今後も続けていきたいと考えています。

5. 全脳全脊髄照射

全脳全脊髄照射は陽子線治療が最も有効な治療法のひとつです。甲状腺機能低下、心肺機能低下や不妊、二次がんなどの晩期合併症の発症率を減らすために陽子線治療は非常に有益です。神戸陽子線センターでは2019年10例、2020年14例の全脳全脊髄照射を行っています。当初ブロードビームで開始しましたが、現在は Intensity Modulated Proton

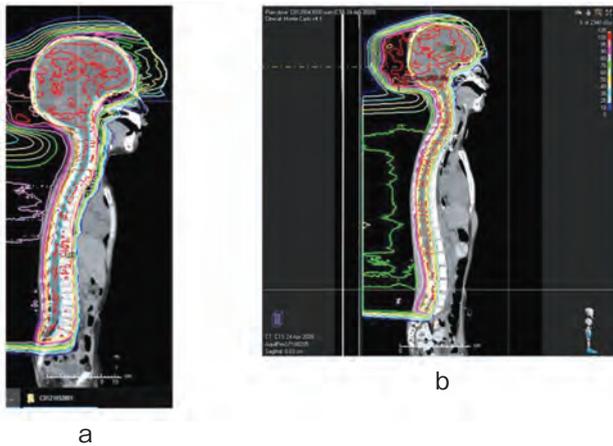


図 2. 神戸陽子線センターでの全脳全脊髄照射の線量分布。
 a : 10 歳未満の症例で椎体全体を含んだ全脳全脊髄照射。
 b : 10 歳以上の症例で椎体全体を含まずに脊髄にマージンを取った全脳全脊髄照射。

Therapy ; IMPT を用いたスキューニングで治療に当たっています (図 2)。当センターでは 10 歳未満の患者は椎体を PTV に含めていますが、10 歳以上では無理に椎体を含めてはしません。全脳全脊髄照射は陽子線治療が有効であることは間違いないので、日本全国で全脳全脊髄照射は陽子線治療でという流れが広がることを期待しています。

6. 麻酔器

陽子線治療は中性子を発生しやすいのが問題となります。ペースメーカーなどの Cardiac Implantable Electronic Devices (CIEDs) に不具合を起こしやすいことはよく知られており、JASTRO が作成し

た植込み型心臓電気デバイス (CIEDs) 装着患者に対する放射線治療ガイドラインにおいても陽子線治療は高リスクと記載されています。神戸陽子線センターでは患者監視モニターの誤作動が経験され、中性子による誤作動の可能性があります。麻酔器に関しても中性子による誤作動の可能性があります。神戸陽子線センターでは電子機器を極力含まない構成にしています。今後麻酔科医とタイアップする施設はこの点を熟知して麻酔機器や患者モニターをそろえる必要があると考えています。

7. AYA (Adolescent and Young Adult) 世代のがん

小児がんと同様に AYA 世代のがんについても放射線治療後の二次がんや妊孕性温存目的で陽子線治療は有効です。しかし、20 歳未満で発症した小児がんが陽子線治療の保険適応になるのに対し、20 歳以上の AYA 世代のがんに対しては保険診療が行われません。神戸陽子線センターでは年取にあわせた減額制度も作って対応するようにしています。

8. スペース挿入

照射したい病巣と問題となる正常組織が近接している場合、陽子線を用いても正常組織への線量低減が十分にできず、目的とする根治的な照射線量を投与できないこともあります。そこで腫瘍と正常組織の間のスペースを空けるための技術、スペース挿入術などが行われます。体内に挿入する物質として吸収性の素材も神戸大学と兵庫県立粒子線医

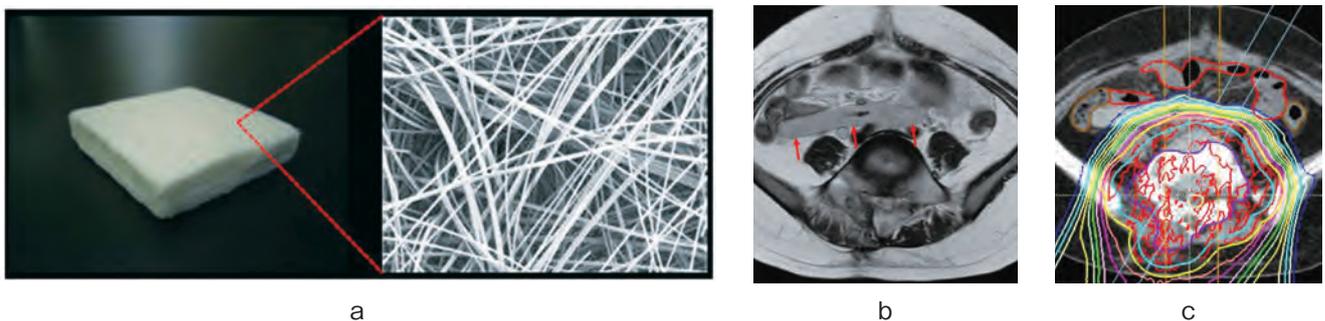


図 3. a : 神戸大学と兵庫県立粒子線医療センターとメーカーが共同開発した吸収性スペース。ポリグリコール酸 (PGA) 縫合糸を不織布状に加工しています。
 b : 第 5 腰椎全体に浸潤し脊柱管内にも進展がみられたユーイング肉腫例。椎体前面の腸管が問題になることが予想され、スペースを留置した。スペース留置後の CT 像で、腸管が腹側に排除されています。
 c : スペース留置によって線量分布上も腸管がほとんど照射されていないことがわかります。

療センターと企業との共同開発で製品化され、保険
 取載もされています。小児がん領域にも使用され、
 消化管の近傍の腫瘍にスパーサーを挿入すること
 によって、腫瘍に十分な処方線量が入られるよう
 にすることができます（図3）。

9. 治療装置

神戸陽子線センターの陽子線治療はブロードビーム
 での治療とスキヤニングによる治療の両方の技術
 を使うことができるのが特徴です。多機能ノズルを
 使用することによってブロードビームとスキヤン
 ニングビームの照射の切り替えができるのですが、ス
 キヤニングでの治療の際にも multileaf collimator
 (MLC) を使用することができますので、放射線治
 療計画の際にリスク臓器 (OAR) の線量低下に役
 立つようになっています（図4）。

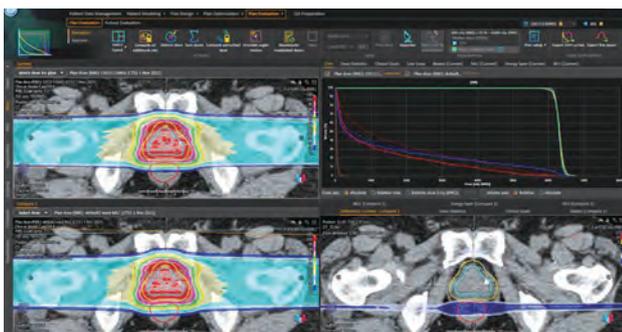


図4. 前立腺がん陽子線治療での multileaf collimator (MLC) の有無での線量分布の違い。左上の図が MLC を使った線量分布。左下が MLC を使っていない線量分布。右下の図がその差分で、MLC を使った方が直腸の線量が少なくなっているのがわかります。右上の DVH では赤の直腸の DVH で、MLC を使った実線の DVH 曲線が MLC を使っていない点線の DVH 曲線に比べ、線量が少ないことがわかります。

10. さいごに

神戸陽子線センターは小児病院に隣接した陽子線
 治療施設のモデルケースになるよう努力していま
 す。また、成人がんの治療も積極的に行っています。
 今後も患者さんのメリットになるような治療を行
 うべく、努力していきたいと考えています。

BNCT (ホウ素中性子捕捉療法) の現状と 将来展望

大阪医科薬科大学

関西 BNCT 共同医療センター

大阪医科薬科大学 総合医学講座

放射線腫瘍学教室

二瓶 圭二



はじめに

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、中性子とホ
 ウ素の核反応を利用したがんの治療法である。1932
 年の中性子発見を受けて BNCT のアイデアが考案さ
 れたのが 1936 年、その後米国で臨床研究が開始され
 たのが 1951 年であり、すでに 70 年が経過している。
 ^{10}B (ホウ素) 原子核による低速中性子 (熱中性子)
 の捕獲に伴う反応、 $^{10}\text{B}(n, \alpha) ^7\text{Li}$ によって放出され
 る α 粒子と Li (リチウム) 原子核は細胞径程度の飛
 程を持ち有効範囲が極めて限局されていること、ま
 た、非常に大きい殺細胞効果を持つために、この核
 反応が生じた細胞のみが破壊される（図1）。

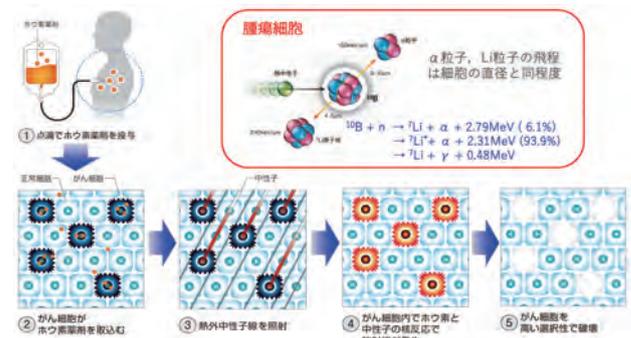


図1. BNCT (ホウ素中性子捕捉療法) の機序

種々の放射線の殺細胞効果は X 線のそれとの比
 較 (RBE; Relative Biological Effectiveness) で表
 されるが、BNCT における α 粒子と Li 原子核は重
 粒子線治療で使われている RBE 2 ~ 3 の炭素イ
 オン線のさらに 2 倍程度の殺細胞効果を有してい
 る。したがって、通常の X 線治療には抵抗性のある
 X 線感受性の低い腫瘍細胞にも有効である。さら
 に、X 線治療では低酸素状態の腫瘍細胞の破壊
 に難渋し、それらの細胞が再発の芽になるとされ
 ているが、BNCT の粒子は低酸素状態を全く問題に
 しない点も特長である。そこで、腫瘍細胞に選択
 性よく集積するか、あるいは腫瘍組織に選択的に

滞留する¹⁰B薬剤（BPA; boronophenylalanine または BSH; boronocaptate）と中性子照射を組み合わせると、腫瘍細胞（腫瘍組織）選択的な放射線治療が可能になる。このような特性から、周囲に浸潤傾向のある腫瘍や通常の放射線治療後の再発腫瘍も治療の対象とすることができる。研究用原子炉からの中性子ビームを用いた BNCT の初期臨床成績が優れた結果を示すことが報告され、また、加速器中性子 BNCT システムの開発、さらに治験の実施と、BNCT はこの 20 年程度の成果でようやく世間の耳目を集めるに至った。本稿では、原子炉中性子による BNCT での臨床成績と高度化の試行を踏まえて、加速器 BNCT に至った過程、加速器 BNCT の成果、そして今後の課題と展望を述べる。

原子炉 BNCT の高度化

BNCT は¹⁰B 原子核に捕獲されやすい低速の熱中性子ビームを照射することから始められた。しかし、熱中性子は深達性に乏しいという弱点があった。5 cm の深部では表面の 10% まで減弱する。そのため、BNCT 臨床研究の最初の対象であった悪性神経膠腫では全身麻酔の開頭下に腫瘍を露出して照射を行う術中照射が不可欠であった。加えて、中性子照射を病院外の研究炉が設置されている施設で行う必要があったことも、臨床研究の大きな制約になっていた。そこで、1996 年京都大学原子炉実験所（現複合原子力科学研究所）では熱中性子よりもややエネルギーの高い熱外中性子が利用できるよう設備の改造を行った。熱外中性子は¹⁰B 原子核との反応確率が熱中性子と比較して桁違いに小さいが、照射されると体内で熱中性子に変化し、¹⁰B 原子核とうまく反応する。熱中性子のピークは 2-3 cm の深部にあるため、脳腫瘍でも中性子照射のために開頭術を行う必要がない。熱外中性子の本格的な利用は 2001 年からはなったが、技術改良の効果は大きく、臨床研究が急速に進展した。

原子炉 BNCT の臨床成績

熱外中性子ビームの利用による最大の成果は、再発頭頸部がんに対する BNCT に世界で初めて成功したことである¹⁾。この成功は世界の臨床 BNCT の歴史を大きく動かした。唾液腺がん、肉腫を含む再発頭頸部悪性腫瘍に対する熱外中性子を利用した原子炉 BNCT を実施した 26 例の治療成績に関

する報告において²⁾、奏効割合は、完全奏効（CR）12 例（46%）、部分奏効（PR）10 例（39%）、増悪 3 例（12%）、評価不能 1 例（3%）であった。また、生存期間中央値は 13.6 ヶ月（1-72 ヶ月）、6 年全生存割合（OS）は 24% で、有害事象は一過性の粘膜炎のほか、数例に脳壊死や骨髄炎をみとめた。2001 年から 2007 年に国内で原子炉 BNCT を実施された再発頭頸部悪性腫瘍 62 例（扁平上皮癌 33 例、悪性黒色腫 11 例、その他 18 例）に関する報告では³⁾、生存情報が確認できた 53 例の経過観察中央値は 18.7 ヶ月で、BNCT 6 ヶ月後に評価した治療効果は、CR28%、PR30% であった。また、生存期間中央値は 10.1 ヶ月、1 年および 2 年 OS はそれぞれ 43%、24% であった。BNCT 後 1 ヶ月の急性期有害事象はいずれも許容範囲内であったが、長期経過観察で頸動脈出血による死亡が 3 例報告されている。

次に、2002 年から 2007 年まで原子炉 BNCT を実施した再発悪性神経膠腫 22 例の成績を紹介する⁴⁾。BNCT 後の生存期間中央値は、10.8 ヶ月（95% 信頼区間（CI）、7.3-12.8 ヶ月）であった。再発悪性神経膠腫の予後はクラスに分類（RPA クラス分類）されており、基礎となるクラス毎の生存率曲線が報告されている⁵⁾。この報告のデータのクラス 3+7（予後最悪クラス）と BNCT 群の同クラスの成績を比較すると、生存期間中央値は 4.4 ヶ月（95% CI: 3.6-5.4）対 9.1 ヶ月（95% CI: 4.4-11.0）で、BNCT 群が優れていた⁴⁾。

大阪医科薬科大学のグループは、高悪性度再発髄膜腫に対する原子炉 BNCT 44 例の長期成績について報告している⁶⁾。経過観察期間中央値 26 ヶ月（6.4-103）において、BNCT 後の生存期間中央値は 29.6 ヶ月（95% CI: 16.1-40.4）、無増悪生存期間中央値は 13.7 ヶ月（95% CI: 68.7-169.4）とこれまでの報告より良好であった。BNCT 後の放射線脳壊死については、Grade 2 が 34.1%、Grade 3 が 13.6% に認められたと報告されている。再発髄膜腫は、すでに手術や根治的放射線治療を複数回実施されていることが多く、再手術や再照射による病勢コントロールに難渋していたが、原子炉 BNCT の経験により、治療成績の改善が期待される。

加速器 BNCT システムの開発

原子炉による BNCT は、上述のように再発悪性神経膠腫や再発頭頸部癌などに対して実績を積み上

げたが、原子炉やその照射システムを医療機器とすることは不可能であり、原子炉を使う限り BNCT を一般医療として普及させることができないのは明らかであった。さらに、原子炉は設置できる場所の制約と設備の維持管理が大きな負担となる点も障害になるため、原子炉に替わる中性子源の開発を目的に、2007年に BNCT 用の加速器中性子照射システムの開発が始まった。

中性子の生成には、加速陽子をさまざまな金属と衝突させるのが一般的である。そのため、加速器、ターゲット金属、陽子エネルギー、電流など相互に関連する要素があり、世界では複数の加速器 BNCT の開発プロジェクトが進行中または計画中である。現状、京都大学原子炉実験所の BNCT 研究グループと住友重機械工業株式会社が共同開発したシステム (BNCT30) のみが臨床試験 (治験) を経て承認を得るに至っている (承認後販売名; NeuCure) (図 2)。このシステムでは、サイクロトロンで陽子を 30MeV に加速しベリリウムのターゲットに当てて中性子を照射する。また、ステラファーマ株式会社が開発したホウ素薬剤の BPA (SPM-011) の承認 (承認後販売名; ステボロニン) をうけて、2020年6月から「手術不能の局所進行および再発頭頸部癌」に対する BNCT の保険診療が認められた。現在、本学および南東北病院の 2 施設が本システムを有しており、保険診療を実施している。再発悪性神経膠腫については治験開始が先行していたものの、より長い観察期間が必要であったため承認申請に向けた医薬品医療機器総合機構 (PMDA) との相談が現在進行中である。

加速器 BNCT の臨床成績

上述の加速器中性子照射システム (BNCT30) とホウ素薬剤 BPA (SPM-011) を用いた BNCT の安全性と忍容性を調べる第 I 相臨床試験が、再発悪性神経膠腫を対象として 2012 年に開始され、続けて手術不能局所進行あるいは再発頭頸部癌を対象とした治験も開始された。

再発悪性神経膠腫の第 II 相治験 (JG002)⁷⁾ は、ペバシズマブの前治療歴がなく、標準治療の放射線治療 + テモダールによる治療歴を有する再発悪性神経膠腫を対象としたオープンラベル単群試験で、BNCT 施行 1 年後の生存率を主要評価項目とし、目標症例数は 24 例であった。2016 年 2 月か

ら 2018 年 6 月まで、膠芽腫 24 例を含む再発悪性神経膠腫 27 例が登録された。再発膠芽腫における 1 年 OS および生存期間中央値は、それぞれ 79.2% (95% CI: 57.0-90.8)、18.9 ヶ月 (95% CI: 12.9-) であった。この成績は、国内のペバシズマブによる臨床試験の結果と比較して良好である。再発神経膠芽腫は極めて予後不良な病態であり効果的な治療が待ち望まれている。前述のように現在申請承認に向け PMDA との相談が進行中であるが、BNCT の有用性を早急にかつ科学的に証明する必要があると考える。

頭頸部領域においては、再発扁平上皮癌および再発/局所進行非扁平上皮癌に対する治験 (JHN002) が実施された⁸⁾。2016 年 6 月から 2018 年 2 月まで、21 例が加速器 BNCT を受け、治療効果は、CR 24%、PR 48% と良好であった。また、観察期間中央値 22.2 ヶ月において、2 年 OS は 85% (95% CI: 61-95) であった。この治験の成績を基に、2020 年 6 月 1 日付で再発または局所進行頭頸部癌に対する BNCT が保険適応となった。

高悪性度再発髄膜腫に対する加速器 BNCT の医師主導治験は、無作為化第 II 相比較試験として 2019 年に開始された。予定登録数は 18 例で昨年登録が終了し、今後 3 年間の経過観察が必要である。試験完遂後の治療成績の評価と、その後の保険収載が期待される。

BNCT の課題と将来展望

原子炉では上記のほかにさまざまな悪性腫瘍に対して BNCT が試みられてきた。頭頸部癌に続き、これまでに実績のある悪性神経膠腫や再発悪性髄膜腫の保険適応の早期実現が期待されるとともに、他の領域に対する今後の適応拡大を視野に入れた臨床研究を推進する必要がある。

そのためにも解決しなければならない課題がいくつかある。まず、技術的な課題として、空間的および時間的に効率的な中性子照射システムの開発が挙げられる。単位時間当たりの中性子量の増強である。これにより治療時間短縮や多方向照射、分割照射などの可能性が開け、また深部線量分布の改善が期待される。また、より効果的な新たなホウ素薬剤の開発が待たれる一方、今後も BPA による BNCT が発展するためには、BPA の腫瘍および正常組織における動態予測の研究が重要である。たとえば、FBPA-PET によるホウ素濃度の予測は、物理線量

推定の精度向上につながり、正確な生物学的等価線量の計算の基礎となる。特に正常組織に対する生物学的等効果係数は、現状一部の組織とホウ素化合物で決められているのみで、今後の適応拡大にはさらなる研究が必要である。X線や粒子線治療と比較すると、BNCTは細胞選択的治療という特性上線量分布の評価に不確実性を伴うが、これらの物理学的・生物学的研究の深化によって、BNCTの臨床成績が理論的に裏付けられ、より高精度の放射線治療として発展することが可能になると考える。

まとめ

BNCTは中性子発見から長い歴史を経て、ようやく本格的に臨床導入されるに至った。これまで実施施設が限られていたこと、主に再発症例を対象としてきたことなどから、まとまった前向きなデータがなかったが、BNCTの普及、発展のために今後はより質の高い臨床データの創出と、技術開発や生物学的アプローチによる理論的裏付けを強化する2つの方向性が必要である。

関西 BNCT 共同医療センターについて

大阪医科薬科大学は、早くから京都大学複合原子力科学研究所と連携し原子炉を利用した臨床研究を重ね、BNCTの実用化に向けた取組みを先導してきた。そのような背景から、BNCTが研究から臨

床へと展開される時期に併せて2018年6月、世界初の教育機関附属施設として関西BNCT共同医療センターが開設された。当センターは、先述の再発悪性神経膠腫や高悪性度再発髄膜腫の治療を実施し、現在は保険診療となった再発頭頸部癌に対するBNCTの臨床実績を蓄積している。一方、PETを利用した線量計算の精度向上、照射方法の多様化を目指した技術開発など、課題解決に向けた物理医学的および生物学的な研究、また研修プログラムによる人材育成など、BNCTの臨床研究および教育の中核拠点としての役割を担うべく多岐にわたる活動を行っている(図2)。

参考文献

- 1) Kato I, Ono K, Sakurai Y, et al. Effectiveness of BNCT for recurrent head and neck malignancies. *Appl Radiat Isot* 2004; 61:1069-73.
- 2) Kato I, Fujita Y, Maruhashi A, et al. Effectiveness of boron neutron capture therapy for recurrent head and neck malignancies. *Appl Radiat Isot* 2009; Jul; 67(7-8 Suppl):S37-42.
- 3) Suzuki M, Kato I, Aihara T, et al. Boron neutron capture therapy outcomes for advanced or recurrent head and neck cancer. *J Radiat Res* 2014; 55(1):146-53.
- 4) Miyatake S, Kawabata S, Yokoyama K, et al. Survival benefit of boron neutron capture therapy for recurrent malignant gliomas. *J Neurooncol* 2009; 91:199-206.
- 5) Carson KA, Grossman SA, Fisher JD, et al. Prognostic factors for survival in adult patients with recurrent glioma enrolled onto the new approaches to brain tumor therapy CNS consortium phase I and II clinical trials. 2007; 25(18):2601-6.
- 6) Takai S, Wanibuchi M, Kawabata S, et al. Reactor-based boron neutron capture therapy for 44 cases of recurrent and refractory high-grade meningiomas with long-term follow-up. *Neuro Oncol* 2021; May 13; Online ahead of print.
- 7) Kawabata S, Suzuki M, Hirose K, et al. Accelerator-based BNCT for patients with recurrent glioblastoma: a multicenter phase II study. *Neurooncol Adv* 2021; May 20; 3(1):vdab067.
- 8) Hirose K, Konno A, Hiratsuka J, et al. Boron neutron capture therapy using cyclotron-based epithermal neutron source and borofalan (^{10}B) for recurrent or locally advanced head and neck cancer (JHN002): An open-label phase II trial. *Radiother Oncol* 2021; Feb; 155:182-187.



図 2.

- a) 大阪医科薬科大学関西 BNCT 共同医療センター
- b) NeuCure (加速器 BNCT システム)
- c) BNCT 照射室

第 17 回日本中性子捕捉療法学会学術大会の報告

新松戸中央総合病院高精度低侵襲治療センター
伊丹 純



本来は2020年の7月に17回学術大会を熱海市のKKRホテル熱海で開催する予定でしたが、コロナ蔓延の状況下で開催を断念せざるを得ませんでした。その当時はすでに皆がある程度Zoomなどを使ったWeb開催にも慣れつつあったことで、開催を強行できたのですが、日本中性子捕捉療法学会という、少人数で活発な討論が行われる学会にはWeb開催は適さないのではと思われ、鈴木実会長や幹事の先生方とも相談し学術大会の1年延期を決断しました。わたくしは、個人的に2021年4月には1年早期に国立がん研究センターを退職することに決めておりましたので、国立がん研究センター退職後に開催ということになりそうだったので、国立がん研究センター中央病院放射線治療科医長の井垣浩先生に全面的なご協力をいただけるということで、そのまま大会長を続けさせていただくこととなりました。

しかし、2021年も同様なコロナ蔓延状況下でありましたが、緊急事態宣言再発令の1日前の2021年7月10日から7月11日に何とか滑り込みで、熱海市のKKRホテル熱海においてLiveとWebのミックスで1年遅れて第17回日本中性子捕捉療法学会を開催することができました。我が国における加速器BNCTの急激な展開を考えるとたとえWeb形式になろうと今年の学術大会の開催は必須であると考えられたのです。ところが、2021年7月3日の学会開催1週間前に開催予定地の熱海で土石流災害が発生し多くの住民の方々がお亡くなりになられ、7月10日にもまだ行方不明の方々の捜索が行われておりました。学会開催も危ぶまれたのですが、熱海

市に問い合わせると学会会場周辺は全く問題なく、是非予定通りの開催をお願いしたいとのことでした。WebとLiveのミックスとはいえ、学会開催も地元には少しは還元され復興の一助になるのではないかと考え、予定通り7月10日から11日にLive開催とWeb配信を施行することができました（オンデマンド配信は7月19日から31日）。KKR熱海の部屋からは沖合を遊弋する巡視船も見られ、土石流の犠牲者の方々の捜索されているのだと気付かされました。土石流の犠牲者の方々のご冥福を心よりお祈りいたします。

本学術大会のテーマとしては「Neutron Capture Therapyを日本から世界へ」とさせていただきました。まさに加速器BNCTの臨床はほとんど日本の独壇場となっております。従来の原子炉でのBNCTでは、治療患者数も限られ、多くの患者を登録しての臨床試験は難しいと思われれます。病院に設置された加速器BNCTシステムにより、より多くの患者を体系的に治療することで、科学的なBNCTの優位性を我が国から発信していくことが、今後のBNCTの国際的な展開に大きく影響してきます。今年はまさにその大きな局面を迎えていると言えましょう。

この学会では新参者の私ですが、毎年の学術大会を拝聴しておりますと、新たな分野を開拓し、前人未到の道を進む気概にあふれた素晴らしい研究者のみなさまの報告にあふれており、活発な、時には怖いような過激な討論もあり、本当に勉強になりました。正に「人と同じことはやらない」という科学の王道です。しかし、こと一旦臨床医学に話題が移り

ますと、どうしても患者数を増やしてBNCTは既存治療と比較して統計学的に有意に優れているのかという問題をクリアせねばならず、「他人と同じこと」をやって同一治療での患者数を稼ぐ必要があります。従来の当学会で少しばかり不足していた視点も重要なのではと思われた次第です。更に実際的な問題として、BNCTの保険診療の適応を拡大していくためにも、BNCTの優位性を統計学的にしっかり示していかなければなりません。こういうことはアングロサクソンが得意で、どうも日本人は比較的不得意な分野で、かくいうわたくしも全く不案内であります。

すでに、我が国では住友重工の開発したサイクロトロンベースのBNCT加速器と治療計画装置、更にステラファーマのBPAが一部の頭頸部悪性腫瘍に適応となっております。それに対して国立がん研究センター中央病院では、CICISの直線加速器ベースのBNCT加速器と、同じくステラファーマのBPAが用いられて皮膚の悪性黒色腫および血管肉腫に対して治験が進行中です。今の状態がこのまま続けば、各々の加速器で同じ疾患に関して別々の治験をしながら適応を広げていかざるを得ません。今後、他の加速器メーカーが進出したとしても同様な治験をする必要があるのでしょうか？しかも、現状では、使用するホウ素担体化合物はステラファーマのBPAがすべてに用いられています。もし、一つのBNCT加速器である疾患に対して薬事承認や保険収載が認められれば、自動的に他のBNCT加速器でも当該疾患の薬事承認や保険収載が可能になるという体制の確立がBNCTの展開に重要であることは明らかです。例えば、通常のX線直線加速器では、個々の機械で治験が別に行われることはありません。疾患単位でBNCTの保険収載が可能となれば、どのBNCT加速器で治療することも可能となり、患者にとって大きな裨益となります。

このようなことを考え、本学術大会では、薬事審査の総元締めである厚労省からは中井清人医薬生活衛生局医薬安全対策課長（当時）、および医薬品医療機器総合機構からは石井健介医療機器審査第一部長をお招きし貴重なお話を賜りました。一刻も早く学会として、BNCT加速器の持つべき基本要件を明らかにし、それを満たせばVendorにかかわら



ず早急に薬事承認が得られるように、更には加速器Vendorにかかわらず、BNCT適応疾患に対して診療報酬が請求できるようになる道があることがわかりました。ますます当学会の力を結集して前に進むことが重要と思われました。

プレナリーセッションでは、新たな適応疾患の可能性、新規薬剤の開発、BNCT治療計画、Compound biological effectiveness (CBE) 値の見直し、頭頸部がんに対するBNCT保険診療の初期経験などが報告され、まさにBNCT臨床に直結する問題が活発に議論されました。シンポジウムでは「BNCTの機器開発促進と適応拡大に向けて」というテーマで、まさに加速器BNCTの薬事承認、保険収載の議論が展開されました。

もう一つ、BNCTで大きな懸案事項として、F-BPA PETの臨床導入があります。F-BPA PETはBPAを用いたBNCTのTheranosticsとしてすでに大きな意義が証明されていますが、その薬事承認および保険収載の見通しは立っておりません。少なくとも、F-BPA PETでの腫瘍のSUV (standard uptake value) が低いものは、BPAの腫瘍集積が十分でなくBNCTの適応とはなりません。病理学的にLAT-1アミノ酸トランスポータの免疫染色で、LAT-1を発現する腫瘍はBPAが集積することがある程度予測可能ですが、腫瘍内へのホウ素集積の定量値はF-BPA PETで得られたSUVから計算するのが唯一の方法です。また、F-BPAの製造の際の収率向上も大きな課題です。企業共催セミナーでは、F-BPA PETのBNCTにおける重要性のデー



タが臨床的側面から論じられ、収率向上への確かな道筋も報告され、F-BPA PET の治験が組上に載るも近いことが感じられました。

また、同様に企業共催セミナーでは、長時間の中性子照射に耐えるリアルタイム中性子モニターが取り上げられ、その市販にむけてちかくちかくと前進していることが報告されました。現状の加速器 BNCT では、電流値から中性子数を計算する方式がとられていますが、中性子数を直接計測することが重要であります。更に、多くの中性子モニターが中性子の嵐のなかで非常に寿命が短いのに対し、報告された線量計は、長時間の中性子照射でも劣化がないことが示されております。電流値ではなく、直接中性子数を計測し、その値で照射時間を決定するという BNCT 加速器の理想に向かって大きな一歩が踏み出されたといえましょう。

一般演題でも、加速器 BNCT の臨床成績とともに、新たな BNCT 薬剤の開発、投与方法の改善、正

常組織の耐容線量、熱中性子のリアルタイム計測法、BNCT の放射線生物学、F-BPA PET などが報告され、BNCT の国際学会での演題より更に深く論じられている分野が多く、やはり日本で発展をとげている技術なのであるとの感を深くいたしました。日本中性子捕捉療法学会学術大会を聞いていれば、それだけで世界の最も先端の知識が入手できる稀有な学会であるのです。

プレナリーセッション2、シンポジウム1、教育口演1、企業共催セミナー4、一般演題51題の多くの演題が発表されました。まったくのおまけでしたが、大会長講演で、国立がん研究センター中央病院における CICS 社製の BNCT 加速器導入の顛末と治験開始までの苦闘を漫談調に報告させていただきました。とにかく新しい技術の開発には、想像を絶する苦難が伴う、しかし、人を信じてともに戦えば必ず未来が拓けるということを強調させていただきました。

熱海の学会場においていただいた学会員の方々には熱海の海を見ながら温泉を堪能いただけたことと思います。

この学術大会の開催は、国立がん研究センター中央病院放射線治療科の井垣浩先生、中村哲志先生、その他諸先生、更には長崎大学大学院医歯薬総合研究科の益谷美都子先生、今道祥二先生のご尽力により初めて可能となりました。また、多くの協賛企業の方々のご支援の賜物であります。ここに深く感謝いたします。ありがとうございました。

今回は2022年10月29日から30日にかけて筑波大学熊田博明先生がつくば国際会議場で開催されます。その時は学会員の皆様と直接お目にかかり、お話しができることを祈っております。

お知らせ

◆当財団発行の小冊子・テキスト等のお知らせ

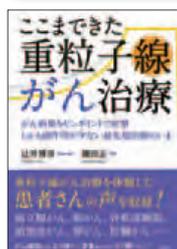
当財団では、粒子線治療（陽子線・重粒子線）に関する以下の小冊子・書籍・テキストを頒布しております。購入希望の方は、メール・電話にて、当財団までお問い合わせ下さい。



・小冊子「体にやさしい粒子線がん治療」(改訂版)

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、国内の粒子線施設への問合せ先や問合せ方法についても記載しています。(令和3年11月改訂・発行)

A 5版カラー 26頁 1冊：300円(税込・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



・書籍「ここまできた重粒子線がん治療」

本書は、重粒子線がん治療について、患者さんや一般の人にわかりやすく、やさしく解説した案内本です。各部位別がんの解説や治療を受けた患者さんの貴重な体験記も多く掲載しており、最新の知見や技術動向も出来得る限り盛り込んでおります。(平成29年5月発行)

A 5版カラー 275頁 1冊：2,200円(税込・送料実費)
著者：辻井博彦、鎌田正 取扱者：公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団

* 内容は、「今や国民病になった、がんという病気」「重粒子は放射線がん治療の大きな武器となる」「患者さんに優しい重粒子線がん治療」「重粒子線は、治療が難しいがんにも立ち向かう」「重粒子線治療を受けて患者さんたちの声」「重粒子線治療は、さらに前へ」で構成しています。



・テキスト「粒子線がん治療に関する人材育成セミナー入門コース」(改訂版)

粒子線がん治療に関わっている初心者、また今後関わっていききたい方々を対象にしたセミナー「入門コース」用のテキストです。(平成26年7月発行)

A 4版カラー 64頁 1冊：5,000円(税込・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

* 内容は、「粒子線治療の基礎」・「粒子線治療装置」・「粒子線治療の流れとQ A」・「粒子線治療の実例」の4章から構成されており、一般の方々、さらに医療機器関連企業担当者、先進医療保険販売担当者、放射線治療分野の初任者、看護師、専門学校生、大学生等向けにわかりやすく説明したテキストです。



・テキスト「粒子線がん治療に関する人材育成セミナー専門コース」(改訂版)

粒子線がん治療に関わる医師、診療放射線技師、医学物理士、関連技術者等の新規育成と定期的なフォローアップ教育を含めた専門性の高い内容を扱う方々を対象にした人材育成セミナー「専門コース」用のテキストです。(平成28年7月発行)

A 4版カラー 246頁 1冊：10,000円(税込・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

* 内容は、「粒子線治療の概要」・「がんの診断と治療」・「粒子線治療物理」・「放射線生物学概要」・「粒子線治療装置」・「粒子線治療の流れとQ A」・「粒子線治療(陽子線・重粒子線)の実例」・「建屋設計と放射線管理」の8章から構成されており、粒子線がん治療に関わっている医師・診療放射線技師・医学物理士等をはじめ医療機器関連企業技術者、建築関連企業設計技師、大学院生・看護師、専門学校生、大学生等向けにわかりやすく説明したテキストです。

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は、医用原子力技術の推進および普及のため適切かつ有効に活用させていただきます。

今年度、寄付をいただいた個人・団体・企業様^(50音順)
令和4年1月現在

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
株式会社日立製作所
ビードットメディカル
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22号

令和4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 : http://www.antm.or.jp

