

ラジオロジー

放射線医療と市民のみなさんを結ぶ広報誌

45

2025年

特集◎重粒子線がん治療の最前線

群馬大学医学系研究科腫瘍放射線学
大野 達也 (おおの たつや)

■世界の街角から
MR-linac Consortium 2024 シンガポールに参加して
千葉大学大学院医学研究院MR画像誘導即時適応
放射線治療学寄附講座 恒田 雅人 (つねだ まさと)

■My Hobby
ラグビー観戦に思う
一般社団法人日本画像医療システム工業会 (JIRA)
瀧口 登志夫 (たきぐち としお)

患者さんに

やさしい放射線医学を求めて…

ラジオロジー(Radiology)とは放射線科学のことです。

ラジオロジーは体の中を切らず診るための科学です。エックス線写真からはじまり、日々に進歩しています。

日本ラジオロジー協会

「みえる・わかる・なおる」をテーマとして放射線科学は医療に幅拡く貢献しております。

[特集]

重粒子線 がん治療の最前線

群馬大学医学系研究科腫瘍放射線学
大野 達也 (おおの たつや)

はじめに

日本では、がんと診断された方のおよそ4人に1人が放射線治療を受けており、その技術は近年著しく進歩しています。照射精度の向上により治療成績も改善されつつあり、これからの超高齢社会においては、痛みを伴わず身体への負担が少ない放射線治療の重要性が一層高まっています。

重粒子線治療は、放射線治療の中でも先進的な技術の一つであり、日本が世界をリードしている分野でもあります。

本稿では、重粒子線がん治療の基礎知識、国内の治療体制、臨床的な有用性、そして今後の展望について解説します。

重粒子線とは

従来の放射線治療では、엑스線や電子線が体外から照射されます。一方、「重粒子線」とは、ヘリウムより重い原子番号を持つ原子核のイオンビームを指します。日本では主に炭素イオンが使用され、「炭素イオン線」とも呼ばれます。

また、水素の原子核を加速した「陽子線」と重粒子線を合わせて「粒子線治療」と総称されることがあります。本稿では、重粒子線=炭素イオン線として説明を進めます。

重粒子線の3つの特長

(1) 線量の集中性が高い

重粒子線は、体内で停止する直前でエネルギーを一気に放出する「ブラッグピーク」と呼ばれる現象を示します。腫瘍の形状に合わせてこのブラッグピーク部分を拡大して照射することにより、標的への線量集中性は高まり、周囲の正常組織への線量は低く抑えることが可能です(図1)。

(2) 高い生物効果

ブラッグピーク領域では、エネルギーが高密度に付与されるため、がん細胞のDNAに対して致死的な二本鎖切断を効率的に引き起こします。엑스線では主に一本鎖切断が生じるため、同じ線量でも重粒子線の方が2~3倍高い生物学的効果を発揮するとされています。とくに、遺伝子変異を持つ細胞や、低酸素環境下で増殖するなど엑스線抵抗性の腫瘍に対しても、重粒子線は有効であることが多くの基礎研究で示されています[1,2]。

(3) 短期間で治療が可能

重粒子線治療は、少ない照射回数・短期間で治療が完了するのも大きな特徴です。たとえば、頭頸部や骨軟部腫瘍では16回・4週間、前立腺癌や膵臓癌では12回・3週間、早期肺癌や肝臓癌では4回・1週間の照射が一般的です。さらに、肺や肝臓では1~

2回照射、前立腺癌では研究段階ながら4回照射も実施されています。治療期間の短縮は、患者さんの早期社会復帰を可能にし、治療施設としても多くの患者さんに対応できるというメリットがあります。

国内治療体制

日本では、1994年に医用専用加速器を用いた本格的な重粒子線治療が放射線医学総合研究所(現在の量子科学技術研究開発機構、QST)で開始されました[3]。この治療法は、多分野のがん治療医によって構成された臓器別検討班で実施された臨床試験の成果を受け、2003年に高度先進医療(現在の先進医療)として承認されました。

その後、兵庫県立粒子線医療センター、群馬大学、九州国際重粒子線がん治療センター、神奈川県立がんセンターが重粒子線治療を開始し、国内の稼働施設は5つとなりました。稼働施設の増加を受けて、2014年4月にはJapan Carbon-Ion Radiation Oncology Study Group(J-CROS)が組織され、多施設共同研究の体制が整備されました。

J-CROSの初期活動として、さまざまな疾患における施設横断的な治療成績が後向き観察研究としてまとめられました。2016年の診療報酬改定では、根治的切除が適応できない骨軟部腫瘍に対する重粒子線治療の保険適用が認められ、国内での重粒子

図1 一方向からの照射による相対線量

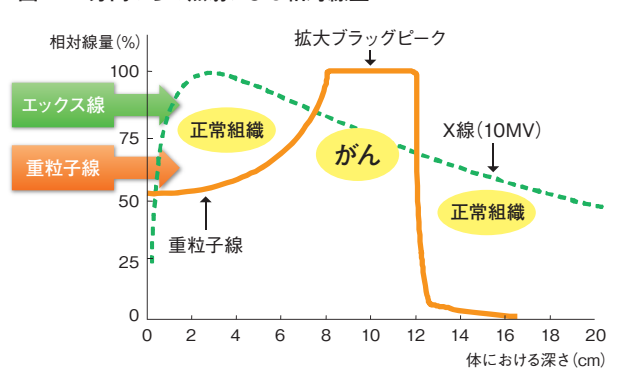


表1 重粒子治療が適応となる疾患と医療制度

これ以外の疾患に対して臨床試験が実施されることがある。

部位	病状 (*根治的切除不能なもの)	先進 医療	公的医療保険			
			2016	2018	2022	2024
頭頸部	口腔・咽喉頭の扁平上皮がんを除く			○		
肺	早期(5cm以下、リンパ節転移なし)					○
	局所進行期	○				
食道	I期	○				
肝臓	肝細胞がん(4cm以上)*				○	
	上記以外	○				
	肝内胆管がん*				○	
膵臓	局所進行性*				○	
大腸	術後骨盤内再発*				○	
子宮	頸部腺がん*				○	
	頸部扁平上皮がん、悪性黒色腫					○
前立腺	転移なし			○		
骨軟部	骨や軟部から発生したがん(肉腫)*		○			
転移	肺、肝臓、リンパ節のいずれかに限局	○				

線がん治療の大きな節目となりました。

その後、先進医療は2016年度から前向きレジストリとして実施され、訪問調査の受け入れ、施設間で統一された治療方針や説明同意文書、全症例の登録などが行われています。また、重点的な評価が求められる臓器や病態については、医療経済評価も含めた多施設共同の前向き試験(先進医療B)が行われています。

さらに、2018年には大阪重粒子線センター、2021年には山形大学が治療を開始し、国内の施設数は7施設となりました。

これまでにJ-CROSで実施された臨床研究の結果は報告書としてまとめられ、日本放射線腫瘍学会を通じて厚生労働省に提出され、評価されています。その結果、公的保険適用疾患は徐々に拡大しています(表1)。

臨床的な有用性

(1) エックス線抵抗性がんへの有効性

がんは発生部位や病理組織型によって多様に分類され、それぞれがエックス線に対する感受性にも違いがあります。こうした違いは、遺伝子レベルの変異や低酸素状態など、腫瘍の生物学的背景に起因すると考えられており、これまで多くの研究が行われてきました。

たとえば、腺がん、腺様嚢胞がん、悪性黒色腫、肉腫、直径5cmを超える大きながんなどは、エックス線での治療が困難なケースも少なくありません。重粒子線は、がんの種類にかかわらず高い生物学的効果(致死的なDNA損傷)を発揮する特性があり、こうしたエックス線抵抗性がんに対しても効果を示します。

現在、重粒子線治療の適応としては、頭頸部の腺がん、腺様嚢胞がん、悪性黒色腫、粘表皮がん、体幹部の脊索腫、軟骨肉腫、骨肉腫、軟部肉腫、膵臓がん(主に腺がん)、大腸がん術後再発(腺がん)、前立腺がん(腺がん)、子宮頸部腺がんなどがあります。図2に治療例を示します。

(2) 肺や肝臓への安全性

肺や肝臓の放射線治療では、照射される線量の大きさだけでなく、照射される体積にも細心の注意が必要です。重粒子線は、ブラッグピークと呼ばれる特性により、標的部位の直後で線量が急激に低下するため、標的以外の正常組織への影響を最小限に抑えることが可能です。

特に、肺がんや肝臓がんの患者さんでは、喫煙の影響で既に肺機能が低下していたり、肝炎や肝硬変により肝機能に障害がある場合も多く、これらの臓器に照射される線量と体積を極力減らすことが治療上重要です。

たとえば、肺への照射後に中等度以上の放射線肺臓炎(ステロイド治療が必要なレベル)を発症するリスクは、エックス線では10~20%とされていますが、重粒子線では5%以下に抑えられているという報告があります[4-6]。

また、腫瘍が大きくなるほど正常組織に及ぶ線量も増加するため、線量集中性の高い重粒子線の優位性は、腫瘍が大きいほど顕著になります。これは、治療の安全性と有効性の両面から見て、重粒子線の大きな利点といえるでしょう。

(3) 消化管や神経に対する安全性

消化管や神経は、高線量の放射線による影響に特に注意が必要な臓器です。消化管に過度な線量に加わると、潰瘍や出血、穿孔(消化管に穴があくこと)といった重篤な合併症が生じる可能性があり、神経では麻痺など深刻な障害を引き起こすことがあります。

このような重要臓器が腫瘍の近くに存在する場合、放射線の照射範囲を精密にコントロールする必要があります。重粒子線は体内での直進性に優れ、照射範囲を限定しやすいため、消化管や神経を避けながら腫瘍を高精度に狙う治療が可能です。たとえば、頭頸部がんにおいて視神経を回避する照射や、腹部・骨盤部の腫瘍で消化管を外す必要がある場合などにおいて、重粒子

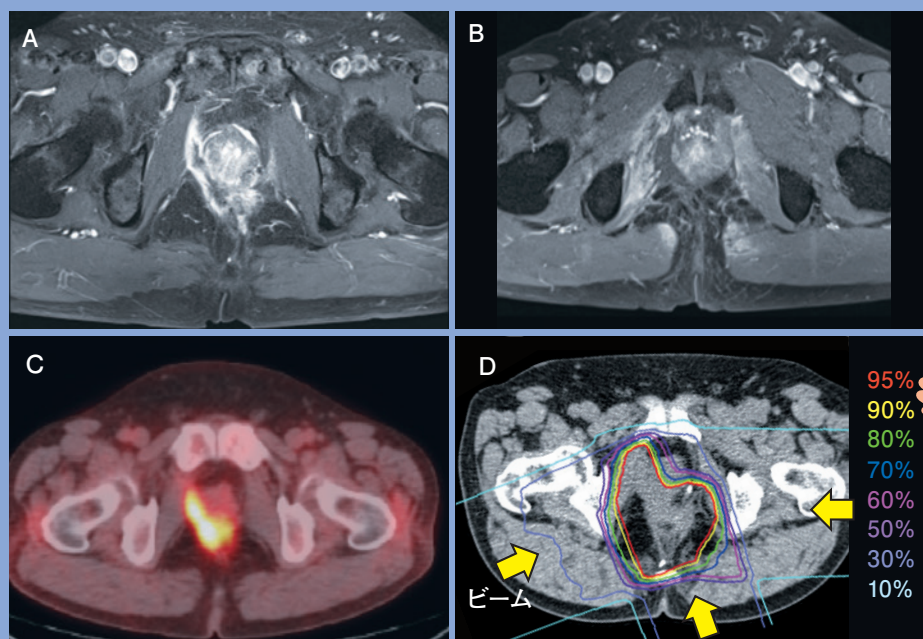


図2 重粒子線治療例

直腸癌術後の骨盤内再発例

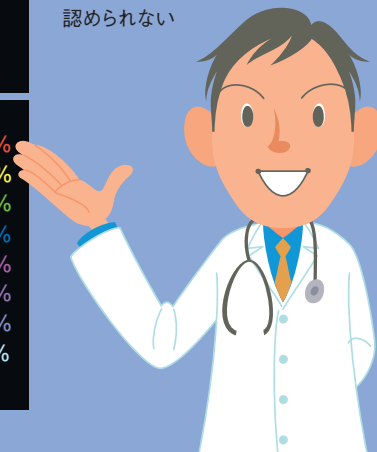
A. 重粒子線治療前 MRI(Gd造影)

B. 重粒子線治療後1年 MRI(Gd造影)

C. 重粒子線治療前 FDG/PET-CT

D. 重粒子線治療の線量分布

治療から4年経過した現在も再発は認められない



線の高い照射精度が有効に働きます。

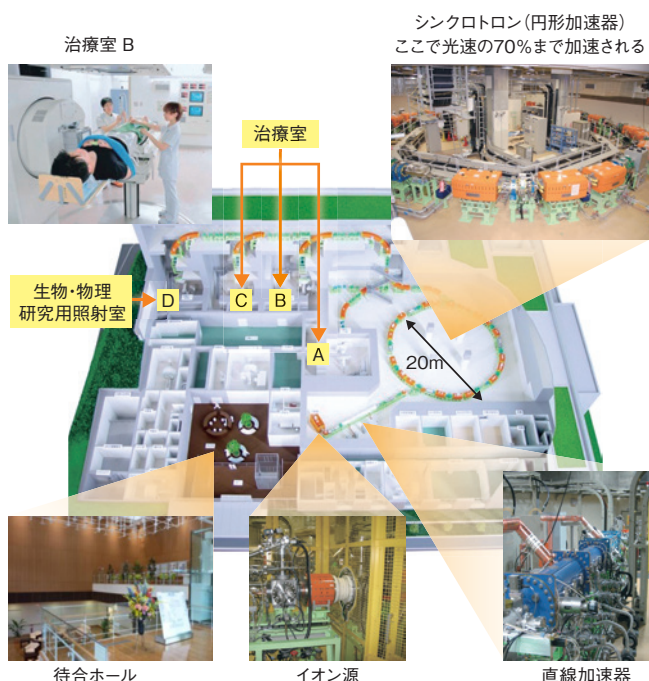
腫瘍と重要臓器の間に5mm程度の距離が確保できれば、比較的安全に治療が行えるとされています。しかし、消化管や神経と腫瘍が広く接している、あるいは腫瘍が既に浸潤しているような場合には、重粒子線であっても安全な照射が困難であり、治療の適応外となるケースもあります。

課題と今後の展望

(1) 照射装置の小型化と低コスト化

通常の엑스線治療装置は「リニアック」と呼ばれ、電子を加速し、それを金属に衝突させることで発生する엑스線を治療に利用しています。一方、重粒子線治療装置では、電子の約2万倍以上の質量を持つ炭素イオンを高速で加速するため、はるかに大規模な加速器が求められます。たとえば、群馬大学に設置されている重粒子線治療装置では、加速器の中核となる「シンクロトロン」と呼ばれる円形加速器だけでも、その直径は20メートルに達します(図3参照)。

図3 群馬大学重粒子線医学センターの照射装置



大型装置の存在は普及の妨げとなる要因の一つであり、その解決に向けて、QSTでは装置の小型化に関する研究開発が進められています(図4参照)。QSTでは、小型の重粒子線治療装置を「量子メス」と位置づけ、炭素・酸素・ヘリウムといった複数のイオンを使用可能にするための研究を進行中です。現在、第4世代となる新たな加速器がQSTにて建設されています。

加速されたイオンビームを患者さんに照射する際、近年では「回転ガントリー」と呼ばれる装置を用いる施設も増えています。回転ガントリーは、任意の角度からビームを照射できるという利点がありますが、その構造は非常に大規模で、大きさは10メートル以上、重量はおよそ300トンにもなります。これに対し、「アップライト照射システム」は、患者さんを立位または座位で固定し、患者さん自身の位置を回転させることで、さまざまな角度からの照射を可能にする技術です。従来の固定照射システムを発展させた、新たな照射法として注目を集めています(図5参照)。

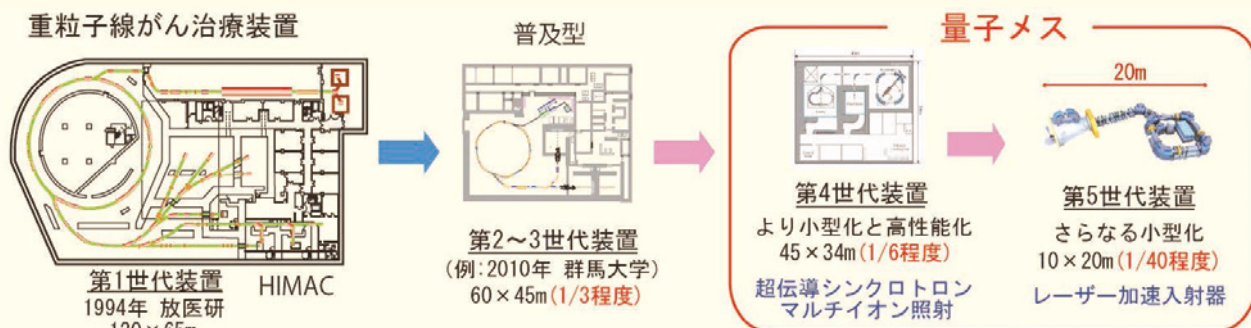
(2) 治療の高度化

国内ではこれまで、体幹部腫瘍に対する呼吸同期照射、標的近位部の線量を低減する積層原体照射、スキャンニング照射、さらには超電導電磁石を用いた回転ガントリーなど、重粒子線治療の高度化を目指した研究が放射線医学総合研究所(放医研)を中心に進められ、各医療施設へと実装されてきました。また、群馬大学では、照射室内に設置されたCTを活用し、画像誘導による重粒子線照射法の開発が行われています。これらは主に、治療用ビームの「線量」を精密に集中させる技術の向上を目的としています。

一方で、重粒子線が示すブラッグピーク領域では、高密度なエネルギー付与により、「線質」と呼ばれる放射線の質的な分布が治療効果に影響を及ぼす可能性が注目されつつあります。今後は、炭素・酸素・ヘリウムといったイオンの種類に応じて、「線質」も含めた照射分布の最適化に向けた研究開発が、世界的に加速すると見込まれます。

現在のがん治療では、局所治療と全身治療を組み合わせる集学的治療が標準となりつつあります。重粒子線の短期間照射スケジュールに加え、抗がん剤、免疫療法、手術療法との併用を視野に入れた治療法の確立と科学的根拠(エビデンス)の構築には、放射線治療に限らず、他領域のがん治療専門家との連携が不可欠です。

図4 重粒子線照射装置の小型化に向けた開発



量子科学技術研究開発機構 HPより引用: <https://www.qst.go.jp/site/qst-kakushin/39695.html>

(3)国際連携と人材育成

表2に、現在稼働している世界の重粒子線治療施設を示します。稼働中の施設は全18か所にのぼりますが、このほかにも、アメリカ、韓国、アラブ首長国連邦、フランスなどで新たな施設の整備が進められています。国内外で重粒子線治療への関心が高まる中、施設数の増加に伴い、関連分野の人材育成はますます重要となっています。

こうした背景のもと、2013年よりQSTや群馬大学を中心に、「国際重粒子線がん治療研修コース」という短期研修プログラムが実施されています。これまでにアジアや欧米から、放射線治療医、医学物理士、生物研究者など、延べ600名を超える研修生を受け入れてきました。大学院の留学生として研究したり、月から年単位で現場研修を受け入れるなど、日本は人材育成の面でも国際的に重要な役割を担っています。

図5 重粒子線の様々な照射方法

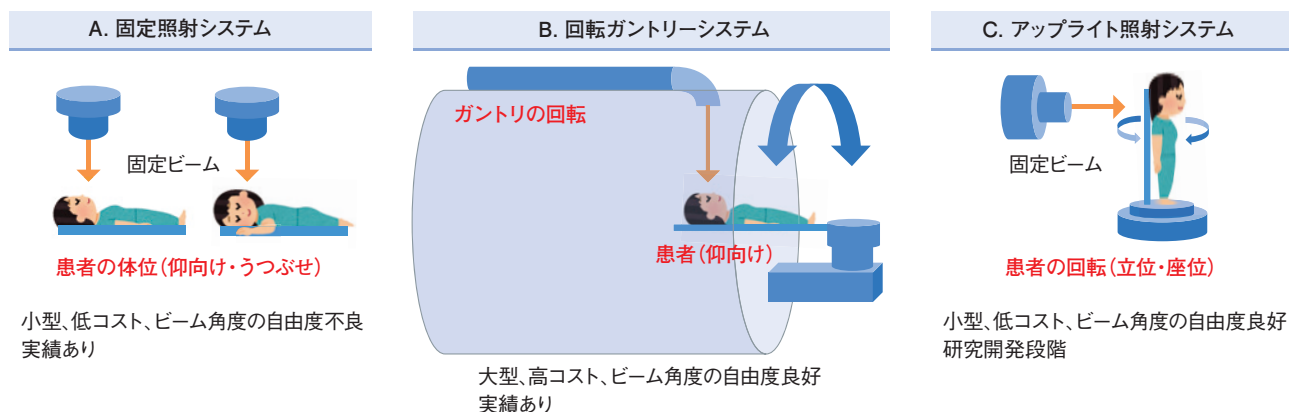


表2 世界の重粒子治療稼働施設

番号	国	開始年	施設名(都市名)	イオン種
1	日本	1994	放射線医学総合研究所/QST病院(千葉市)	炭素
2	日本	2002	兵庫県立粒子線医療センター(たつの市)	炭素、陽子
3	中国	2009 *2019(再始動)	中国科学院近代物理研究所(蘭州) * Lanzhou Heavy-Ion Cancer Treatment Center(蘭州)	炭素
4	ドイツ	2009	ハイデルベルグ大学(ハイデルベルグ)	炭素、陽子
5	日本	2010	群馬大学重粒子線医学センター(前橋市)	炭素
6	イタリア	2011	The National Center for Oncological Hadrontherapy(パヴィア)	炭素、陽子
7	日本	2013	九州国際重粒子線がん治療センター(鳥栖市)	炭素
8	中国	2014	Shanghai Proton and Heavy Ion Center(上海)	炭素、陽子
9	ドイツ	2015	マールブルク大学(マールブルク)	炭素、陽子
10	日本	2015	神奈川県立がんセンター(横浜市)	炭素
11	日本	2018	大阪重粒子線センター(大阪市)	炭素
12	中国	2019	Wuwei Heavy-Ion Cancer Treatment Center(武威市)	炭素
13	オーストリア	2019	MedAustron(ウィナー・ノイシュタット)	炭素、陽子
14	日本	2021	山形大学東日本重粒子センター(山形市)	炭素
15	台湾(中国)	2022	台北榮民総医院(台北市)	炭素
16	韓国	2023	延世大学医療院(ソウル)	炭素
17	中国	2025	Zhejiang Cancer Hospital Heavy Ion Medical Center(杭州市)	炭素
18	中国	2025	Fujian Medical University Union Hospital(福州市)	炭素、陽子、BNCT

文献

- Loeffler JS, Durante M. Charged particle therapy-optimization, challenges, and future directions in cancer. Nat Rev Clin Oncol. 2013;10(7):411-24. doi:10.1038/nrclinonc.2013.79.
- Durante M, Orecchia R, Loeffler JS. Charged-particle therapy in cancer: clinical uses and future perspectives. Nat Rev Clin Oncol. 2017;14(8):483-495. doi: 10.1038/nrclinonc.2017.30.
- Kamada T, Tsujii H, Blakely EA, et al. Carbon ion radiotherapy in Japan: an assessment of 20 years of clinical experience. Lancet Oncol. 2015;16:e93-e100.
- Kubo N, Suefuji H, Nakajima M, et al. Clinical results of carbon ion radiotherapy for inoperable stage I non-small cell lung cancer: A Japanese national registry study (J-CROS-LUNG). Radiother Oncol. 2023;183:109640. doi: 10.1016/j.radonc.2023.109640.
- Kubo N, Suefuji H, Nakajima M, et al. Five-year survival outcomes after carbon-ion radiotherapy for operable stage I NSCLC: A Japanese national registry study (J-CROS-LUNG). J Thorac Oncol. 2024;19(3):491-499. doi: 10.1016/j.jtho.2023.10.016.
- Huang BT, Lin PX, Wang Y, et al. Developing a prediction model for radiation pneumonitis in lung cancer patients treated with stereotactic body radiation therapy combined with clinical, dosimetric factors, and laboratory biomarkers. Clin Lung Cancer. 2023;24(8):e323-e331.e2. doi: 10.1016/j.clcc.2023.08.007.

世界の街角から

MR-linac Consortium 2024

シンガポールに参加して

千葉大学大学院医学研究院MR画像誘導即時適応放射線治療学寄附講座 恒田 雅人(つねだ まさと)

2024年11月13日から15日までシンガポールで開催されたMR-linac Consortium 19th Annual Consortium Meetingに参加しました。私にとって初めての渡星となりました。シンガポールに行くことを“渡星”ということを書きながら知りました。この国際会議には世界20か国以上・50施設超の医療機関から合計250人のElekta Unityのユーザーが参加していました。会場では、MR画像誘導即時適応放射線治療に関する最先端の研究やアウトカムが報告されました(図1)。特に、Diffusion-weighted imagingやT1 mappingといった機能的MR画像を用いた治療効果の早期予測、画像バイオマーカーによる個別化治療戦略に注目が集まっていました。さらに、Radiation Therapy Technologist主導によるワークフローや、シミュレーションを省略した“sim-free”ワークフローなど、治療の迅速化と効率化への取り組みが進められていました。私は、MR linacの品質管理に関して論文を報告していたことから、QAQCに関連する少人数の会議に参加する機会をいただきました。ノンネイティブイングリッシュを駆使して、今後の品質管理機器やそれを用いた品質管理手法、新しい治療技術に関して議論を行いました。会議中は、アンケート(投票システム)を活用しながら、「なぜその投票をしたのか、どのように考えているか」を3時間みっちり話し合いました。また、会期中にディナーも開催されユーザー間の交流ができたと思います(図2、3)。



図1: 会場内の様子

入れたものです(図4)。もう1箇所、旅行好きな私が楽しみにしていたのは、チャンギ空港にある自然と最先端技術が融合したランドマーク“レイン・ボルテックス(Rain Vortex)”です(図5)。世界一高い屋内の滝として知られており、ガラスと鉄骨で構成されたトラス型のドーム中央から水が流れ落ちる設計です。滝の周囲の屋内庭園には、約2,000本の木々と10万本以上の低木が植えられているそうです。今回の出張では見て回れなかった観光地をはじめ、シンガポールの魅力を見つけるため再度渡星を決意しました。



図2: MR linac Consortiumのロゴ付きのスイーツ



図3: 大阪公立大学の先生方と
帰りにバシャリ



図5: チャンギ空港にある
レイン・ボルテックス

My Hobby

ラグビー観戦に思う

一般社団法人日本画像医療システム工業会(JIRA)
瀧口 登志夫(たきぐち としお)

いつ頃からだったのか？

気がつけば白黒テレビの前に座り、土砂降りの雨の中泥んこになりながら楕円球を必死に追いかける選手たちを応援するようになっていた。横縞のジャージーに身を包む両軍選手に交じって真っ白なユニフォームで毅然と笛を吹きゲームを統率するレフェリーの姿も印象的であった。就職して工場実習を終えた日に、実習職場の責任者を交えた会議が催され、製造部長その人がかつて日本選手権決勝や大学選手権決勝のレフェリーを務めておられたM氏であったことに、ある種感激を覚えた。思わず、「引退されたと伺いましたがもう笛はふかれないのですか」と実習とは無関係な質問をしてしまった。



なんでこんなにラグビー観戦が好きになったのか？

おそらく日本ラグビーの黎明期に大学でラグビー部の一員だった祖父の遺伝子だろう。いまでもそ伝統校の最たるものと言われる早稲田大学が初めて対外試合をおこなった相手チームの先発に祖父の名前が記録されている。祖父とラグビー談義に花を咲かせた、といったことがなかったのがとても悔やまれる。

遺伝子の影響はともかくとして、ラグビーというスポーツの持つ魅力に惹かれていることに間違いはない。結果、ほぼ毎年大学選手権決勝や旧トップリーグ・現ラグビーリーグワンの各試合の観戦をはじめ、日本代表のテストマッチやワールドカップでの戦いの応援に足を運ぶようになった。

極めつけは会社の命によりチームオーナーとして、「イーグルスの一番のファンになる」と宣言するに至っている。

なぜラグビーに魅了されるのか？

これはこのスポーツの持つ戦略性に尽きる。2015年9月19日英国ブライトンで行われたワールドカップイギリス大会での日本対南アフリカの試合で、日本は劇的な逆転勝利を挙げた。

それまでの四半世紀を超えるラグビーワールドカップの歴史の中でたった一勝しかしておらず、大方の予想では日本の勝利を期待こそすれ確信していた人は少なかったはず。にもかかわらず勝利することができた背景には、多くの周回準備と練り上げられた戦略・戦術の愚直な実行があった。日く、試合日程が確定した日から試合当日までの2年にわたり、その日その試合でどのように勝利するかのシナリオを作り、



ラグビーW杯2015 対南ア戦

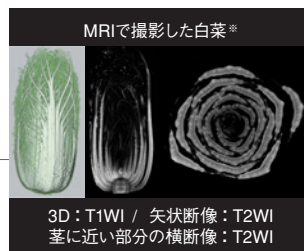
そのシナリオを実現できる選手の能力を定め、そのポテンシャルを持った選手を選抜し、能力を向上させるに足るトレーニングを施し、その作戦を実行するための精神力を養う。準備の中には、選手と共に試合会場を下見し当日の雰囲気や予め経験させ、当日のレフェリーをテストマッチの審判として招聘してジャッジの癖を体験させる、なども含まれていたという。このような背景があったればこそその勝利ではあるが、最大の要因はやはり選手の力によるのだろう。ラグビー憲章が掲げる5つの価値観「品位」「情熱」「結束」「規律」「尊重」に裏付けされた選手の献身が、背景となった周到な準備の下見事に花開いた瞬間、埋め尽くしていた観客を魅了しその大歓声がブライトンスタジアムに響き渡った。これぞラグビー観戦の醍醐味である。

最後に、選手諸君、これからも多くの人々に感動を届けてください。私はこれからも応援に心血を注ぎます。



ラグビーリーグワン
横浜キャノンイーグルス
公式マスコット「カノンちゃん」と

編集後記



今号『ラジオロジー』をご覧いただき、ありがとうございました。本特集では、大野達也先生に「重粒子線がん治療の最前線」についてご解説いただきました。「重粒子線って何？」と思われる方も多いかもかもしれませんが、重粒子線はがん治療において非常に効果的な放射線治療法のひとつです。重粒子線の特徴をはじめ、臨床的な有用性や設備などについて、わかりやすくご紹介いただきました。「世界の街角から」では、恒田雅人先生より、シンガポールで開催された「MR-linac Consortium 2024」の報告を通じて、放射線治療に用いられる最先端機器「MR-linac」の国際的な医療技術の交流の様子をお届けしました。また、シンガポールの名所紹介もありました。「My Hobby」では、瀧口登志夫会長からラグビー観戦の魅力を語り、スポーツから学ぶ戦略や人材育成のヒントに触れる内容となりました。医療・技術・人のつながりを感じる一冊となった今号と思います。次号もどうぞご期待ください。

JRC広報委員

※右上白菜画像：MRIは薄い葉の描出は得意ではありませんが、茎や肉厚の葉脈の部分はいずれに描出できます。分解能を上げて撮影すると葉脈もくっきりと描出できています。



監修 公益社団法人 日本医学放射線学会
<https://www.radiology.jp/index.html>

発行 一般社団法人 日本ラジオロジー協会
〒101-0052 東京都千代田区神田小川町3-8
神田駿河台ビル7F
TEL 03-3518-6111 / FAX 03-3518-6139
<https://www.j-rc.org/>

発行日 2025年8月25日 第23巻 第2号 通巻45号

本誌の複製、掲載の記事・画像の転載、複製、改変等は禁じられています。
ご意見、お問い合わせなどがございましたらJRC事務局 (office@j-rc.org) まで
メールでお寄せください。