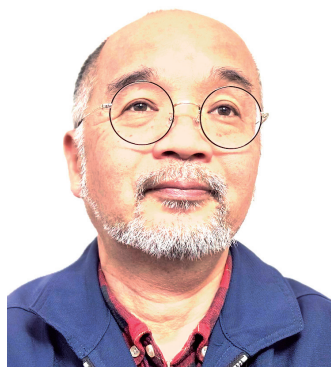


- トップコラム／京都大学 複合原子力科学研究所 教授 高宮 幸一
- 最先端の放射線治療について／〔シリーズ2〕
がん治療の新時代：粒子線治療の最新技術
- 歯科におけるX線撮影／〔第2回〕被ばく線量
- お願い／ご担当者・送付先の変更手続きについて
- 製品紹介／V-tect〈X線遮蔽メガネ〉

ト
ッ
プ
コ
ラ
ム
281



高宮 幸一

原爆と放射線防護基準

日本原水爆被害者団体協議会が2024年のノーベル平和賞を受賞しました。本稿を執筆している2025年には広島と長崎への原爆投下から80年を迎えます。この間、二度と原爆の悲劇が繰り返されないことを願いながら、多くの研究者たちが様々な側面から原爆に関する調査研究を行ってきました。これらの調査研究のひとつに線量推定システムの策定があります。線量推定システムとは、原爆の被爆者がどこで、どのような環境(周囲の建物などによる遮へいの状況)において被爆したのかという情報をもとに、個人の原爆放射線への被ばく線量を推定するためのシステムです。現在用いられている放射線防護基準は、この被ばく線量推定の結果と放射線影響研究所による疫学調査に基づいて構築されています。

最新の被ばく線量推定システムは「2002年線量推定方式(DS02)」ですが、DS02は1986年に確立された「1986年線量推定方式(DS86)」を見直し改良されたものです。見直しが必要になった理由は、広島での爆心から1.5 km以遠における中性子線量の評価に関して、実測値とDS86による計算値との間に不整合があったためです。中性子線量は熱中性子と速中性子とに分けて評価されますが、筆者らは速中性子線量評価のための実測値の取得を試みました。実測値とはいっても原爆から放出された中性子線量を直接測定することはできませんので、被ばくした試料中に中性子との核反応で生成した放射性物質を定量することで間接的に中性子線量を見積もります。速中性子の場合は銅(Cu)試料に中性子が入射してニッケル(Ni)の同位体である ^{63}Ni が生成する $^{63}\text{Cu}(n,p)^{63}\text{Ni}$ という核反応を利用しました。 ^{63}Ni は半減期が約100年と長い放射性核種であるため、現代にお

いても被ばく銅試料中に半分以上が残存しています。分析する試料には避雷針の導線や雨樋の材料として使用されていた銅を用いました。これらの被ばく銅試料からNi成分を化学分離し、 ^{63}Ni から放出される微弱な β 線を液体シンチレーションカウンターを用いて測定することで、原爆中性子によって生成した ^{63}Ni の量を見積もることに成功しました。その結果、銅試料中の ^{63}Ni の生成量は原爆の爆裂点からの距離とともに減少し、1.5 km付近以遠では一定の値になることが分かりました。つまりDS86による中性子線量評価と実測値との不整合がより明確になったのですが、不整合が生じる理由が宇宙線によるものであることがわかりました。宇宙線とは宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギーの放射線のことで、大気と核反応を起こすと二次宇宙線である中性子を生成します。この中性子は地表に存在する銅試料に一樣に入射するため、採取したどの銅試料にも極微量ですが一定量の ^{63}Ni が生成していたのです。爆裂点に近い場所で被ばくした銅試料中の ^{63}Ni の実測量についてはDS02で推定された計算値と良く一致し、最終的に速中性子の線量推定が妥当であることが実証されました。

一方でDS02の策定における熱中性子線量の評価にあたっては、被ばくした花崗岩中に生成した塩素(Cl)の同位体である ^{36}Cl の加速器質量分析法による分析や、同じく花崗岩中に生成したユーロピウム(Eu)の同位体である ^{152}Eu の極低バックグラウンド γ 線測定による分析が行われ、それぞれにおいてDS02による推定値の妥当性の評価に貢献しました。

DS02の確立後にも原爆に関する様々な調査研究が行われており、筆者も参画する「黒い雨」の降雨域の科学調査もそのひとつです。この調査のひとつとして原爆に搭載されたウランやプルトニウムを主成分とした微粒子に着目した研究を進めています。研究炉を用いたフィッシュトラック法を適用することで、環境中に残存していると考えられるこれらの微粒子を見つけ出し詳細な分析をおこなうことで、原爆が爆発してから放射性物質が環境中に拡散するまでのプロセスを解明し、原爆の影響を科学的に明確にすることを目指しています。この研究が前述のノーベル平和賞の受賞理由にもあった「核兵器のない世界の実現」につながればと思っています。

.....

たかみや こういち

京都大学 複合原子力科学研究所 教授

プロフィール●1999年大阪大学大学院理学研究科博士後期課程修了(博士(理学))、1999年京都大学原子炉実験所 COE研究員、2000年京都大学原子炉実験所 助手、2008年京都大学原子炉実験所 准教授。2023年から京都大学複合原子力科学研究所 教授。研究用原子炉を用いて環境放射能を中心とした研究を行いながら、中央管理室長として原子炉施設の安全管理にも携わっている。

最先端の放射線治療について

(シリーズ2) **がん治療の新時代：粒子線治療の最新技術**

筑波大学医学医療系 助教 森 祐太郎



近年、がん治療の分野では、放射線治療技術が飛躍的に進歩しています。特に粒子線治療(陽子線・重粒子線治療)は、粒子線の物理特性から、X線治療と比べてがんへの照射精度を担保しつつ正常組織への影響を低減することが可能となります。そのため、高齢者や基礎疾患を持つ患者に

優しい治療法として注目されています。また、治療後の人生の長い小児患者にとっても、正常組織への線量を軽減できることで、放射線被ばくによる二次がんのリスクを低減する手段として有望視されています。

粒子線によるがん治療の新時代の幕開けにおいて、筑波大学は国内で最も長い歴史と実績を持つ臨床・研究機関のひとつです。筑波大学では、1983年に本格的な陽子線治療の臨床研究を開始し、現在は2代目の陽子線治療装置で治療を行っています。2代目の装置はかれこれ約25年稼働しており、これは世界的にも類を見ない長寿な装置であります。そのため、そろそろ3代目へのバトンタッチが必要となり、2025年現在、世界的にも珍しい陽子線治療装置の更新作業が進められています。そのような筑波大学と私の関係ですが、2013年当時、筑波大学の大学院生をしておりました。するとある日、ラボの上司より「陽子線センターで臨床の医学物理グループを立ち上げるからやれ」と指令が下り、二つ返事でこの世界に飛び込みました。そこから現在まで、立場は大学教員になったものの、引き続き陽子線治療の医学物理業務に従事しており、3代目の陽子線治療装置の受入準備に明け暮れております。同時に、研究活動や学生教育にも携わっており、非常に充実した毎日を過ごせるのは幸せです。長くなりましたが、このような背景のもと、本稿では粒子線(陽子線・重粒子線)治療の最新技術を3つ紹介致します。

1) LET Optimization

現在主流となるスキャニング粒子線治療では、治療計画の立案において最適化(Optimization)技術というものをを用いて、がんへの効率的な線量投与のシミュレーションを行いますが、LET Optimizationは最適化技術の一種です。従来の最適化は、前述の通り“線量”の情報を頼りにがんへ均一な高線量を照射することを目指して最適解を計算しておりました。しかし、LET Optimizationでは“LET(線エネルギー付与)”の情報も含めた線量の最適化を行うことができます。LETとは、放射線が組織にエネルギーを与える割合を示す指標であり、LETが高いほどがん細胞へのダメージ(生物学的効果)が大きくなります。特に粒子線では、エネルギーにより

LETが変わるため、どの線質で照射したかによって物理線量は同じでも生物学的効果は変わります。LET Optimizationでは、LETの情報を加味しながら、がん細胞に対して最も効果的な照射を行うことが可能となります。理論的にはわかっていたものの、特に陽子線治療ではこれまで研究レベルでしか報告がありませんでしたが、治療計画装置の発展により、今まさにLET Optimizationによる臨床が普及しつつあります。どうぞ今後のさらなる粒子線治療の高精度化にご期待ください。

2) Multi-Ion Radiotherapy

Multi-Ion Radiotherapyは、重粒子線治療で扱う炭素イオンに加え、陽子やヘリウム、酸素など複数のイオンを組み合わせる粒子線治療を行う新たな技術です。これにより、がんの特性に応じた最適なイオン種を選択し、治療効果を向上させることが可能になります。例えば、放射線抵抗性のがんには、陽子線よりもLETの大きい酸素やネオンイオンを用いることで、がん細胞の殺傷能力の向上が期待できます。一方で、正常組織の温存が重要なケースでは、炭素イオンよりもLETの小さい陽子やヘリウムイオンを活用することで、正常組織の副作用を抑えた治療が可能になります。このように、マルチイオン治療の利点は、がんの種類や位置に応じた柔軟な治療が可能になる点です。現在、量子科学技術研究開発機構において臨床での使用が開始されており、治療成績を含めた成果報告が楽しみです。

3) FLASH Therapy

FLASH Therapyは、従来の放射線治療の線量率(約 0.03 Gy s^{-1})に比べ、1000倍以上の超高線量率($> 40 \text{ Gy s}^{-1}$)によって、正常組織への影響を大幅に抑えつつ、がん細胞を効果的に死滅させる新しいアプローチです。特に粒子線治療によるFLASH Therapyは、粒子線特有のブラッグピークを活かしながら、超高線量率照射による正常組織の保護効果を得ることができます。FLASH効果のメカニズムは現在でも多く議論されており、動物実験をはじめとする研究成果では、超高線量率照射による酸素枯渇理論や、ラジカルの反応等の放射化学的な視点から説明がなされています。FLASH Therapyの臨床導入が可能となれば、超高線量率により短時間で高い治療効果を得ることが可能となり、治療時間の大幅な短縮や患者の負担軽減が期待されています。

粒子線治療は一部が保険収載され治療の有効性・安全性が認められる中、まだまだ新しい技術の発展がある魅力的ながん治療のひとつです。今後も技術革新が進むことで、より多くの患者にとって効果的な治療が提供されることが期待されますので、ぜひ今後も粒子線治療の動向に注目していただければ幸いです。

歯科におけるX線撮影

(第2回) 被ばく線量

日本大学歯学部 歯科放射線学講座 研究特命教授 新井 嘉則



口内法X線撮影(以下:口内法)の実効線量は、下顎の前歯部で一番小さく、上顎の犬歯部の撮影で一番大きくなります。1回の撮影では実効線量(ICRP Pub.103)は1~8 μSv 程度となります。口内法で、上下の前歯部、左右上下の犬歯部、小臼歯部および犬歯部のすべての歯を撮影する場合は、14回の撮影を繰り返します。そのため、全体の被ばく線量は50 μSv 程度となり、単純撮影としては被ばく線量が大いので留意が必要です。

パノラマX線撮影(以下:パノラマ)は左右の顎関節から上下左右の歯列の全領域をカバーしており、その実効線量は10 μSv です。1枚の口内法に比較すると

被ばく線量は大きいのですが、前述のように口内法ですべての歯を撮影した場合に比較す

ると、パノラマの方が低被ばくとなります。このため、顎全体といった広範囲の診断を必要とする場合は、口内法に比較してパノラマの方が被ばく線量の点で有利となります。ただし、画質は口内法の方がパノラマより優れているので、両者の特徴を理解して適正に使い分ける必要があります。

歯科用コーンビームCT(以下:CBCT)は、診断の目的に応じて様々な大きさのFOVを使用します。1~3歯程度の診断の場合は高さ40 mm直径40 mmの非常に小さな領域(以下:小照射野)を使用します。また、上下の歯列弓のすべての歯を観察する場合は高さ80 mm直径100 mmの領域(以下:中照射野)を使用します。さらに、左右の顎関節からすべての歯を含む顎骨全体の領域を撮影する場合は高さ140 mm直径

150 mmの大きな領域(以下:大照射野)を使用します。一般に被ばく線量はFOVに対応した照射面積とmAsの積にほぼ比例して増加します。これを少しでも緩和するために、中照射野の撮影では、投影角度を360度から180度に半減して、照射時間を半分にすることが推奨されています。また、高さ140 mm直径150 mmの大照射野では、オフセットスキャンを使用し、さらに管電流を下げることによって、線量が大きくならないように留意することが推奨されています。管電流を下げることによって、ノイズ量が多くなりますが、適切に画素サイズを大きくすることで、ノイズの低減を図ることが推奨されています。実際に小照射野では非常に小さな画素サイズ(0.08 mm×0.08 mm×0.08 mm)が使用されます。中照射野では、前述より大きい0.125 mm×0.125 mm×0.125 mmが使用されます。さらに、大照

射野では、

0.32 mm×0.32 mm×0.32 mmが使用されます。この画素サイズは、MDCTと同等ですの

表 各撮影条件における実効線量

	FOV	条件	実効線量 μSv^*
口内法X線撮影	40 mm × 30 mm (照射野の直径は Φ 70mm)	60 kV, 5 mA, 0.1~0.3 s, FDD:20 cm	1~8
パノラマX線撮影**	150 mm × 300 mm	70 kV, 8 mA, 15.0 s	10
歯科用コーンビームCT**	40 mm × Φ 40mm	100 kV, 5 mA, 17.9 s	53
	80 mm × Φ 100mm	100 kV, 5 mA, 9.4 s	77
	140 mm × Φ 150mm	100 kV, 3 mA, 17.9 s × 2	251
MDCT	頭部		1800

**VeraviewX800 (モリタ製作所, 京都)

* ICRP Pub. 103

で、CBCTで大照射野を選択した場合はMDCTに比較して、空間分解能が高いといえないので留意が必要です。ただし、CBCTの小照射野を使用した場合は画素サイズが非常に小さいので、MDCTより空間分解能が高い特徴を有します。

大照射野のCBCTで適切な条件で撮影された場合は、表のように251 μSv です。MDCTが1800 μSv ですから、CBCTの方が低被ばくといえます。しかしながら、近年のMDCTの低被ばくモードによる撮影では、半分以下の被ばく線量での撮影が可能とされていますので、大照射野のCBCTとMDCTを比較すると、撮像条件によってはCBCTの方が高被ばくになる場合が想定されるので留意が必要となります。

お 願 い

ご担当者・送付先の変更手続きについて

（お問い合わせ：お客様サポートセンター）
Tel.029-839-3322 Fax.029-836-8440

弊社バッジサービスにおいて、下記3つの送付先を、それぞれ登録しております。

- ・ バッジ送付先
- ・ 外部被ばく線量測定算定報告書送付先
- ・ 請求書送付先

人事異動等でご担当者や送付先住所等に変更が生じた場合は、バッジに同封しております「登録変更依頼書」の通信欄に、変更事項をご記入の上、FAXまたは郵送にてご連絡ください。

ご担当者変更の場合はフリガナを、住所変更の場合

合は郵便番号もご記入ください。

なお、「登録変更依頼書」の右上「ご記入者名」に新しいご担当者名をご記入いただくだけでは変更の処理は行いませんので、ご注意ください。登録内容に変更が生じた場合は、早めにご連絡くださいますようお願いいたします。

登録変更依頼書

登録内容
変更理由
11月15日 (正午)

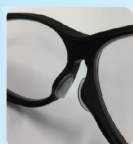
ご記入者名
TEL
FAX
内線

登録内容に変更がある場合】上記、登録内容変更後3日以内にFAX等でご連絡ください。
登録内容に変更がない場合】この用紙は返送不要です。

製品紹介

V-tect

鉛フリーレンズ使用
X線遮蔽メガネ



★鼻パッド
柔らかく、
フィット性に
優れている



★ヘッドバンド
ハードな動きにも
対応



★ズレ防止ゴム
下を向いても
ズレ落ちない



★側面遮蔽
側面にビスマス
シートを配置し、
側方散乱線を遮蔽
※製品には黒色のシートを
付属しております



V-tect の特長

- ・ 安心素材の鉛フリーレンズを採用
- ・ 側面まで覆う形状で側方からの散乱線を効果的に遮蔽
- ・ オーバークラスタイプで、メガネの上から装着可能

※弊社ビジョンバッジ (フックサイズ M・L) も装着可能です。

◆価格: 50,000円 (税込価格: 55,000円)

★鉛フリーレンズ

・ 鉛当量 : 0.45 mmPb
・ 放射線遮蔽率: 150 kVの場合93%
(照射条件)
JIST61331-3: 重防護メガネ測定
遮蔽率の測定 : ナロービーム条件

V-tectのお問い合わせ Tel: 029-839-3322

編集後記



トップコラムで広島、長崎における原爆の中性子線量再評価のため、当時建築材等に使われていた銅が中性子との核反応により放射化生成したニッケル-63を利用するお話がありました。

1999年、茨城県東海村のウラン加工工場において発生した臨界事故でも、中性子線量評価がモニタリングポストの測

定データだけでなく金属の放射化測定が行われました。そのひとつは周辺の住民環境に置かれていた指輪や金貨など、金製品中の金と中性子との核反応により生成した放射性の金-198の放射能を測る方法です。

線量評価の推定手法の進歩は素晴らしいことですが、評価法を新たに利用するような戦争や事故等が再び起きないことを強く願います。
(T. IS)

長瀬ランダウア(株)ホームページ・Eメール

<https://www.nagase-landauer.co.jp>
E-mail: mail@nagase-landauer.co.jp

■弊社へのお問い合わせ、ご連絡は

本社 Tel.029-839-3322 Fax.029-836-8440
大阪 Tel.06-6535-2675 Fax.06-6541-0931

NLだより No.569
2025年(5月号)

毎月1日発行 発行部数: 28,000部

発行 長瀬ランダウア株式会社
〒300-2686
茨城県つくば市諏訪C22街区1
発行人 浅川 哲也