

Radiological Sciences

放射線科学

2008.10

Vol.51

第51巻 第10号



特集

放射線防護・重粒子線がん治療・緊急被ばく医療

(第10回一般講演会・第13回公開講座)

ISSN 0441-2540



Contents

特集／放射線防護・重粒子線がん治療・緊急被ばく医療
(第10回一般講演会・第13回公開講座)

- 04 **1.「放射線防護の国際的な動きと放医研の役割」**
放射線防護研究センター 規制科学総合研究グループ 米原 英典
- 09 **2.「OpenPETの開発と可能性」**
分子イメージング研究センター 先端生体計測研究グループ 山谷 泰賀
吉田 英治、稲玉 直子、錦戸 文彦、澁谷 憲悟、村山 秀雄
- 14 **3.「肝臓がんへの取り組み
肝細胞がんに対する重粒子線治療:低侵襲・根治療法をめざして」**
重粒子医学センター病院 第一治療室 加藤 博敏
安田 茂雄、柳 剛、今田 浩史、山田 滋、溝江 純悦、鎌田 正、辻井 博彦
- 17 **4.「直腸癌局所再発に対する重粒子線治療」**
重粒子医学センター病院 第一治療室 山田 滋
柳 剛、安田 茂雄、今田 浩史、加藤 博敏、溝江 純悦、鎌田 正、辻井 博彦
- 20 **5.「環境中の放射線(能)に関する取り組み」**
放射線防護研究センター
環境放射線影響研究グループ 吉田 聡
- 25 **6.「被ばく医療における放医研の役割」**
緊急被ばく医療研究センター
明石 真言
- 30 **放射線の知識**
「中性子線照射に関する物理的な側面」
(4) 電離箱による線量測定
基盤技術センター 研究基盤技術部 平岡 武、高田 真志
- 37 **研究集会のお知らせ**
分子イメージング研究シンポジウム2008
- 38 **随想**
市川 龍資
- 39 **編集後記**



▲第10回放医研一般講演会「重粒子線がん治療と放射線防護」の講演会場の様子
('08.07.09:東京・丸ビルホールに於いて開催)本講演会は398名と多くの皆さんにご参加頂きました。また、講演会終了後には医療相談を開催しました。



▲第13回放医研公開講座「緊急被ばく医療と重粒子線がん治療」の講演会場の様子
('08.09.12.:当所・重粒子治療推進棟大会議室に於いて開催)本公開講座は会場が満席となる132名の多くの皆さんにご参加頂き盛会の内に終了しました。

▲最新の航空写真により空から眺める放射線医学総合研究所(放医研)

1.「放射線防護の国際的な動きと放医研の役割」

International Trends in Radiation Protection and the Roles of NIRS



米原 英典

放射線防護研究センター
規制科学総合研究グループ グループリーダー
米原 英典



放射線防護とは

今回の講演会でも取り上げられているように、放射線はがん治療、CTなど医療の分野で幅広く用いられています。医療だけではなく、空港での手荷物検査のように透視のためにX線が用いられていますし、我々があまり気づかないところでも様々な産業で用いられています。例えば航空機の安全のための部品の非破壊検査や自動車用タイヤを強化するための放射線照射のような工業利用、またジャガイモの発芽防止や農作物の品種改良のように農業の分野にも用いられています。放射線を直接利用しているわけではありませんが、原子力発電や原子力のための燃料を作る過程においても放射線が生じます。このように放射線は医療をはじめ様々な分野で利用され人々の生活に役立っているのですが、もし、これらの利用で事故が生じ、多量の放射線を人が浴びると、脱毛、不妊、皮膚の障害、白内障が起こることがあり、東海村でのウラン燃料加工工場で起きた事故のように最悪の場合は人が亡くなることもあります。このように比較的少量の放射線を浴びたときにおこる障害を確定的影響と呼んでいます。図1に

示すように、このような障害は、受ける放射線の量(線量と呼びます)にしきい線量があり、この線量以下では誰も障害が出ないのですが、この線量を超えるとすべての人(100%の人)にこの障害が出るという特徴があります。このような確定的影響の他に、線量とともに発症する確率が上昇するような影響があります。このような影響を確率的影響とよび、がん、白血病や遺伝的な影響があります。しかし、これらの影響は放射線を浴びた全ての人に出るのではなく、ある確率で起こるのです。その集団が受けた平均の線量が上昇するとともに、図1の赤い線で示すようにその障害が発症する確率が上昇することになります。放射線を浴びた人の子供への影響である遺伝的影響についても、この確率的影響に分類されますが、広島・長崎での原爆に被爆した人たちでの遺伝的影響は統計的に増加していることは認められていません。我々は、普通の生活においても自然の放射線を浴びていますが、そのような低いレベルの放射線では、放射線が原因で起こるがんと、喫煙、食事、大気汚染など他のがんの要因により起こるがんとを区別することが出来ない上に、様々な原因で生じるがんに比べて、放射線で起こるがんが少ないために、実際に放射線に

放射線影響の線量反応関係 確率的影響と確定的影響

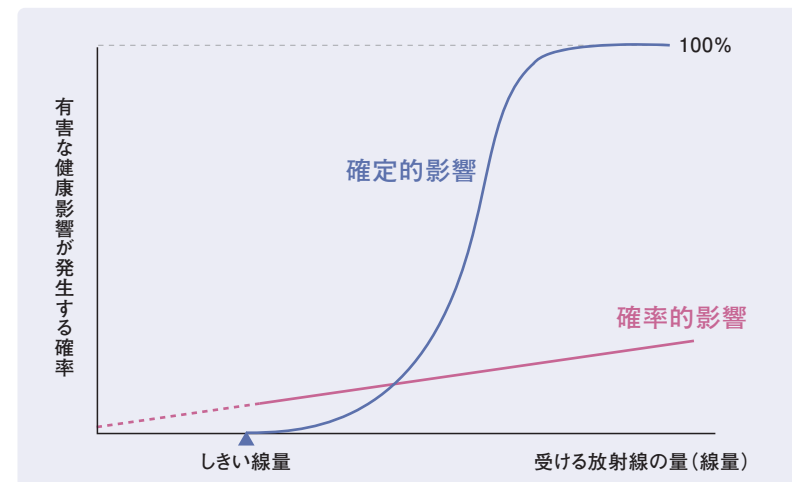


図1:放射線の有害な健康影響

よりがんの発症が増えているのかどうかは検知することができません。

このように使い方を誤ると悪い影響を及ぼすことになります。このことから放射線は諸刃の剣と呼ばれています。もし原子力や放射線の利用がそれほど有益でないとすれば、全面的に使用禁止にすることになるでしょう。しかし原子力や放射線は、人々に大きな利益をもたらすことから、それを安全に利用するために「放射線防護」の考え方や手段を用いています。現在の放射線防護の考え方では、がんなどの確率的影響は、線量が非常に小さい場合でも、図1の点線で示しているように非常に小さい確率で発症し、その確率は線量とともに比例すると仮定します。人の活動には、どんなものでもリスクが伴います。日常生活でも例えば車を運転するとか、脂肪が含まれた食品を食べるとか、水泳をするなどある程度のリスクがあると分かっているにもかかわらず、そのリスクが小さいものについては容認できるレベルであるとして受け入れています。放射線もあるレベルまではそのリスクが小さいものとして、容認できるレベルとして、それ以上の線量の放射線を受けないようにしています。そのある線量は線量限度として数値が設定されています。その限度以下であっても、不必要な放射線を受けることがないように、受ける放射線の線量は、合理的に達成できる限り低く保つという考え方をとっています。

放射線防護の歴史とその進展

放射線防護の歴史は、放射線が発見されたとほぼ同時に始まったのです。ドイツの物理学者レントゲン博士が1895年(明治28年)にX線を発見した当時、その身体への悪い影

響のことがあまり分かっていないために研究者がX線を多量に浴びてしまいました。その結果様々な障害が現れた為、1902年に浴びる放射線の量に対する制限値が初めて示され、その後放射線防護の基準は学会の中での組織的に検討されるようになりました。1928年には国際X線ラジウム防護委員会が設立され、この委員会は1950年に国際放射線防護委員会(ICRP)と名称を変え、その重要性が益々認識されるようになりました。ICRPが発行する勧告の内容は、現在までに放射線防護の基本的な考え方や基準として、多くの国で法令や指針などに取り入れられてきました。

放射線防護における情報の流れ

国の放射線防護のための法令や指針は、図2に示すような情報の流れを経て策定されます。放射線防護の基本的な考え方や基準は、世界中の大学や研究所で行われた膨大な研究成果に基づいています。この膨大な研究成果を収集して、まとめて報告書をまとめる仕事をしているのが、国連に設置された「原子放射線の影響に関する

放射線防護における情報の流れ

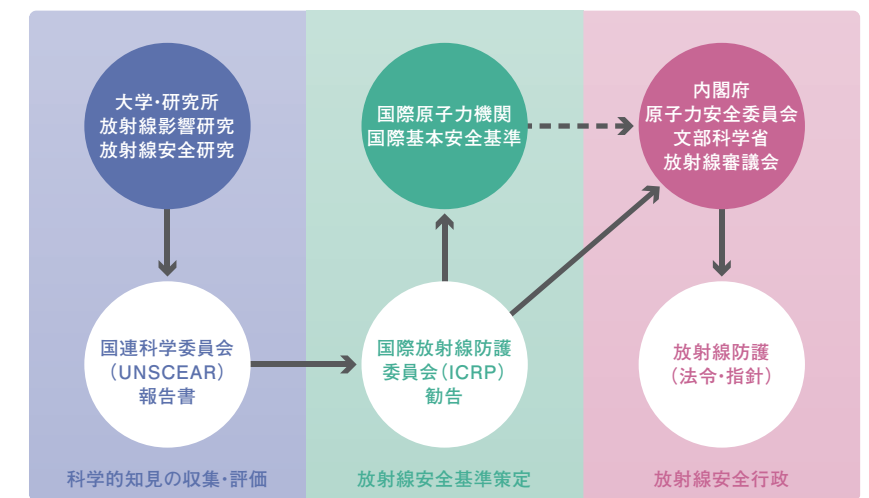


図2:放射線防護における情報の流れ

国連科学委員会」(UNSCEAR)です。主にこの委員会がまとめた報告書の内容をICRPが検討して放射線防護の考え方や基準を示すのです。主な考え方や基準は、主勧告とよばれる刊行物でまとめられて、これまで1958年、1965年、1977年、1990年に発行されてきました。我が国の放射線防護に関する現行の法令は、この1990年勧告に基づいています。2000年ごろからICRPでは、新たな科学的な知見を取り入れることやこれまでの勧告の問題点を改善するために、改訂の作業が続けられてきました。今回の改訂では、インターネットで草案を公開して意見を求めたり、アジアの意見を聞くために日本でも数回会合を開催するなどして、幅広い意見が取り入れられ、2007年に新勧告が発行されました。

最近の放射線防護の動向

ICRPの勧告で放射線防護の対象としている放射線は、1977年に出された勧告までは、人工の放射線だけにしか注目していませんでした。しかし、私たちの生活の身の回りには、人工の放射線の他にも、自然に存在する放射線や放射性物質があります。通常ではこのような自然の放射線や放射性物質は、それほど問題にならないのですが、原子力発電所や工業で用いられる放射線は、厳しい基準で規制されているので、そのレベルを考えると自然の放射線も放射線防護の観点から規制する必要があると考えられるようになってきたのです。元々地球が誕生したときには、様々な種

類の放射線を出す物質が存在していました。それらの多くは、放射線を出しながら崩壊してなくなってしまったのですが、放射線を出す性質が地球の年齢よりも長く続くものは、現在も地球に存在するのです。これらの物質を自然起源の放射性物質と呼んでいます。これら自然起源の放射線のうち、通常の生活で影響が最も大きいと考えられているのがラドン-222という放射線を出す気体です。図3に示すように、普通の地面や土、石材などを用いた建材の中には、自然起源のラジウム-226 (^{226}Ra)が存在します。そのラジウムが放射性壊変してラドン-222というガスになり空気中に出てくるのです。それらは部屋の中にたまり、その濃度が高くなる場合があります。空気中で放射性壊変しているような元素になりそれが空気中の目に見えないほど小さい塵に付着し、それを人が吸い込むことにより、呼吸器官で放射線を浴びることになります。このような高濃度のラドンを吸入すると、その影響で肺がんが増える可能性があると言うことで問

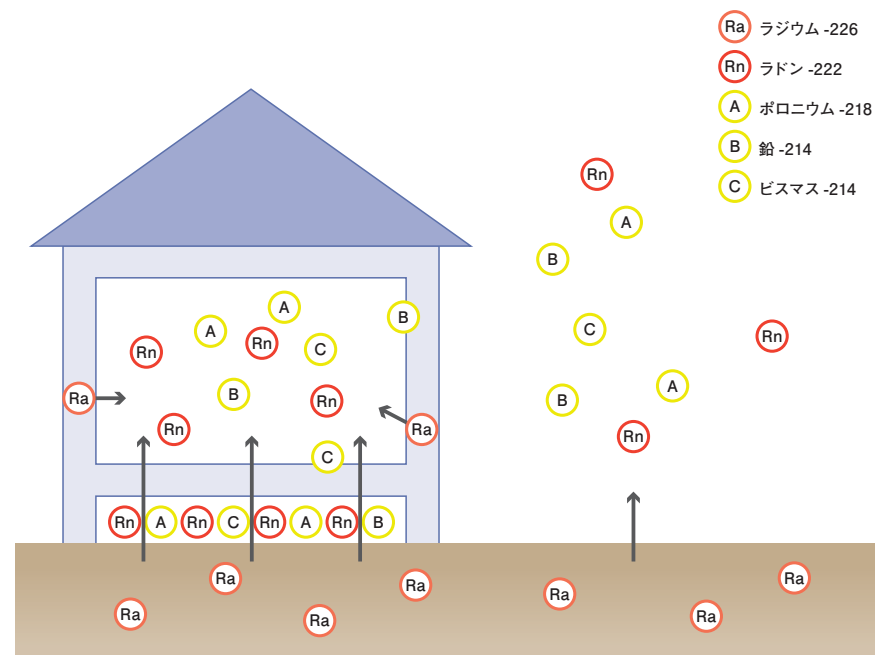


図3: 生活環境でのラドン

題になっています。特に気密性の高い家屋のある北欧では、冬場換気をあまりしないので、床の下から入ってくるラドンガスの濃度が高くなります。我が国では、床下や部屋の換気が良いことや部屋の換気が比較的良好と考えられ、ラドンの濃度が高い家屋が北欧などと比べて非常に少ないことが分かっています。

地球には、太陽や銀河系宇宙から宇宙線と呼ばれる放射線が入ってきています。地上では、大気が遮蔽をしてくれるので問題のないレベルになっているのですが、ジェット機で上空1万メートル近くまで上昇すると、その空気の遮蔽が少なくなり、日常生活よりも多少多くの宇宙線を浴びることになります。新しい放射線防護の考え方では、人工的に作った放射線とともに、このような自然の放射線についてもどのように管理するかを問題にしています。又、新しいICRP勧告では、放射線から人だけを守るのだけでは不十分で、人以外の動物種や植物種についても防護する必要があるとい

う考え方を取り入れました。この考え方を「環境防護」と呼び、どのように環境を防護すればよいかについても検討しています。

放医研における放射線防護の取り組み

放医研では、放射線の医学利用の研究のみならず、その利用に伴って必要となる緊急被ばく医療の研究や、放射線防護に必要な放射線影響の研究を総合的に行っています。中でも放射線防護研究センターでは、現在放射線防護に重要と考えられる研究のうち、放射線の感受性が高いと考えられている子供への影響に関する研究、低線量での放射線の生体影響に関する研究、自然放射線の影響、環境防護に関する研究などを重点的に行っています。また、同センターには、図4に示すような情報交換の機能を果たす規制科学総合研究グループが設置されました。放医研では、これまで50年あまりにわたり、放射線影響研究の成果を蓄積してきましたが、必ずしも

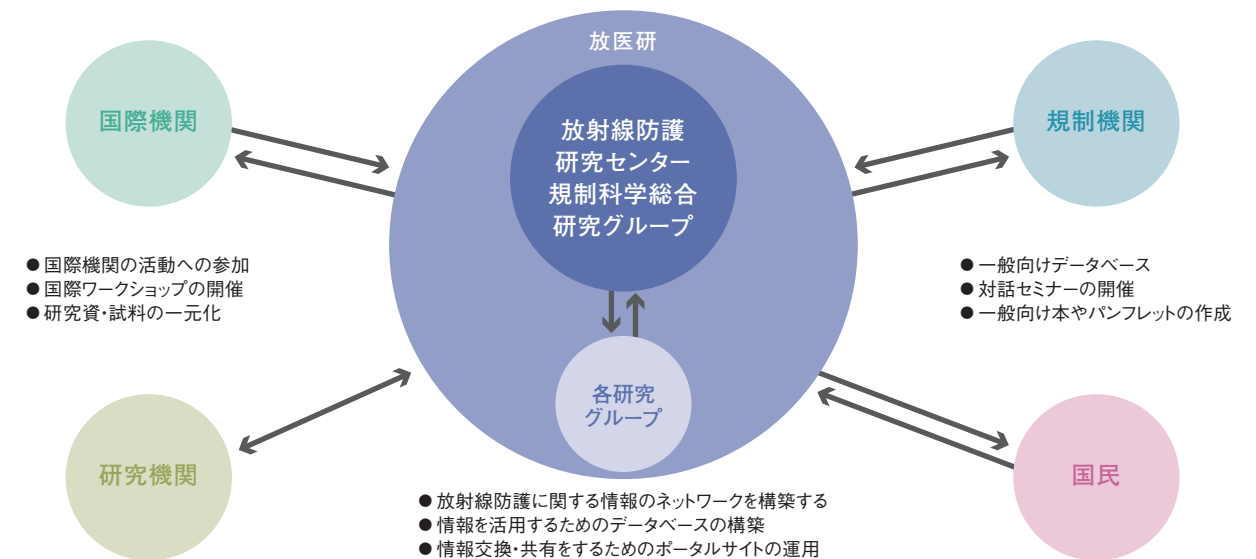


図4: 放射線防護研究センター規制科学総合研究グループの情報ハブ機能

これらの成果が、放射線の安全規制に十分に生かされてきたかどうかは分かりません。研究で得られた成果を、もっと安全規制や現場での放射線防護に生かされるように情報を国内外の関連機関に普及させる必要があります。どのような放射線をどの様に浴びたら、どのような障害が起こるのかについての正しい科学的な知見によって、放射線の安全基準が策定され、その基準に従って安全規制が実施されているのです。一般の人々は原子力や放射線の事故が起こったときに原子力や放射線に対して不安に感じる場合があります。また普通の生活においても医療放射線や自然放射線に浴びる機会が多くなってきているので、それを心配されることもあるでしょう。放射線による影響が心配するようなレベルでない場合でも、不必要な心配をすることにより、パニックを起こして新たな災害を起こしかねません。不安の原因となる放射線が全く管理しなくても大丈夫なレベルである場合もあります。放射線は、その影響を正しく理解して、必要に応じて適切に管理することが重要です。国民が、放射線について安全・安心を得るためには、最新の放射線に関する科学的な知見を正確に理解するが重要なのです。このような問題を踏まえて、放医研は、図4に示すようにUNSCEARやICRPなど国際機関との情報交換を促進するように様々な活動を行っています。特にUNSCEARに対して、我が国の研究者の研究成果や意見をとりまとめてそれらを提出する役割を果たしています。また放射線防護に関する情報を、研究機関、規制組織、国民の間でうまく情報交換が進むように、インターネットのサイトの構築やシンポジウム開催などを充実させる計画が進んでいます。国民への情報発信については、専門的な内容をわかりやすく説明することが重要です。また国民から、どんなところに疑問があって、どのように不安があるかなどの情報を得ることは今後の放射線防護の進展に生かすためにも有効です。このような情報交換を進める

ためには、一方的な説明だけでは不十分で、対話しながら相互の情報交換を行うことが重要です。その為、私達は、これまでにチェルノブイリ事故の影響、航空乗務員の宇宙線被ばく、自然放射性物質の産業利用の問題などで、対話セミナーの開催等の活動を行ってきました。

おわりに

放射線防護の考え方を全ての人に正しく理解して頂くことは、難しいと考えられます。放射線に対する不安を持つ国民に不必要な心配をしないように理解して頂くには、科学的な知見を正確に理解する必要がありますが、今後放医研でもそれぞれの問題について対話セミナーを開いて、聴衆と対話をしながらできる限り正しい理解をしていただけるような活動を行ってまいります。

最後に明治時代の物理学者でありかつ随筆家である寺田寅彦が残した言葉を紹介します。

ものをこわがらな過ぎたり、こわがり過ぎたりするのはやさしいが、正当にこわがることはなかなかむづかしいことだと思われた。

この言葉については、いろんな本で紹介されていますが、放射線に関する本では、最初に近藤宗平著、「人は放射線になぜ弱いのか」（講談社ブルーバックス）でも紹介されています。これは、寺田寅彦が随筆「小爆発二件」（1935年）の中で示した言葉で、この随筆での怖がるの対象は浅間山の爆発であるのですが、正当にこわがるということは、我々の生活に関わるいんなりリスクについても当てはまると考えられます。国民が放射線を正当にこわがることができるように、科学的に正しい、また可能な限り正確な情報を発信することが、国民の安心・安全につながると考えています。

2.「OpenPETの開発と可能性」

Research and development of an OpenPET



山谷 泰賀

分子イメージング研究センター
先端生体計測研究グループ イメージング物理研究チーム 研究員 山谷 泰賀
吉田 英治 研究員、稲玉 直子 研究員、錦戸 文彦 研究員、澁谷 憲悟 研究員、
村山 秀雄 チームリーダー



はじめに

Positron emission tomography (PET) は、放射性核種で標識した特殊な薬剤を体内に投与し、薬剤の体内分布を画像化する断層撮影法である。特に、ブドウ糖に似た性質をもつ薬剤であるフルオロデオキシグルコース (FDG) を用いた PET 検査は、全身のガン診断に有効であると大きな注目を集めている。その一方で、感度や解像度に課題が残され、各国で盛んに研究が続けられてき

た経緯がある。PET は、フッ素や炭素などの同位体である陽電子放出核種を使用し、崩壊によって180度反対方向に発生する一対の放射線(消滅放射線)を検出する。具体的には、2つの検出器で消滅放射線のそれぞれ一方を同時に計測したとき、2つの検出器を結ぶ線分(同時計数線)上に核種が存在することが分かる。画像再構成には多方向からの計測データが必要であることに加え、さまざまな方向に放出される放射線を効率よく検出するために、最近のPET装置は、図1(a)に示すように検出器をトンネル状に配置して立体角を高めているが、長いトンネル状の患者ポートは、検査中の患者の心理的ストレスを高めると共に、患者へのケアの障害にもなってきた。

これに対して我々は、図1(b)に示すように、体軸方向に2分割した検出器リングを離して配置し、物理的に開放された視野領域を有する世界初の開放型PET装置「OpenPET」を提案した¹⁾。PET装置は装置中央部が最も感度に優れる特性があるが、OpenPETは、このスイートスポットを開放化している点に特徴がある。本稿では、OpenPETの概要と発展について紹介する。

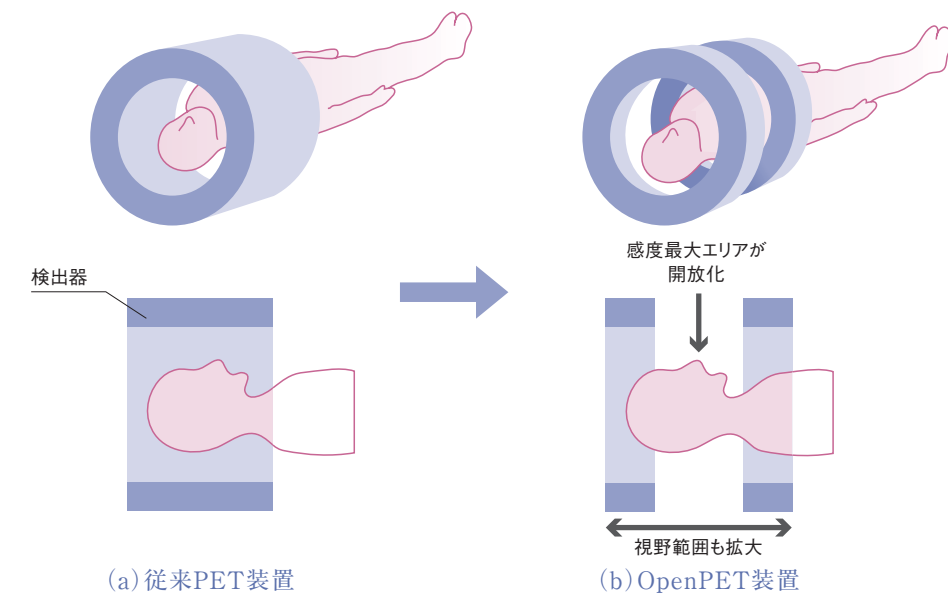


図1: 従来PET装置と提案したOpenPET装置の比較。

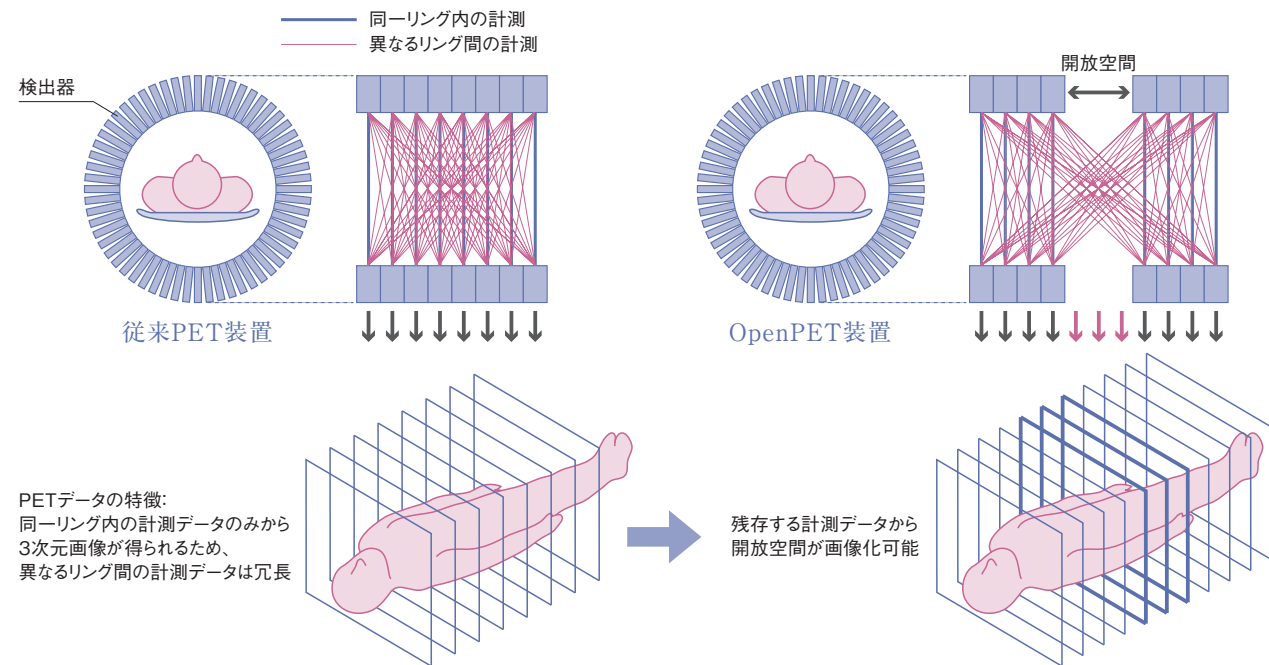


図2: PETデータの冗長性に着目したOpenPETの画像化原理

原理

開放空間からの消滅放射線は、両側に残存する検出器リング同士の同時計数により検出できる。OpenPETは、PETデータがもつ冗長性に着目した方法である。同時計数線には、同一リング内のものと、異なるリング同士のものがあるが、前者だけからでも断層画像を積層していけば3次元ボリュームが画像再構成できることから、後者の同時計数線は冗長成分とされる。従来のPET画像再構成研究では、後者の冗長成分を前者の同時計数線に加算する方法についてさかんに議論がなされてきたが²⁾、OpenPETでは、この冗長成分のみから画像化を行う新しい画像再構成問題を提示している。OpenPETの画像再構成問題は、解が一意に定まらない不完全問題に属するが^{3), 4)}、以下に示す計算機シミュレーションや実験の結果、開放化しても良好に画像化できることが分かった。物体依存の性質は残るものの、逐次近似型の画像再構成による修復効果が効いている

のではないかと予想しており、現在詳しい解析を進めている。なお、左右の検出器リング幅をそれぞれ W とした場合、体軸方向に連続した視野を持つためのギャップ G の上限は W となる。

実験結果

2台のPET装置(検出器幅15cm)を離して配置し、相互の検出器リング間で放射線を計測できると仮定した計算機シミュレーションを行い、15cm幅の開放空間が生じて画像化できることを確認した。開放空間は検出器幅に応じて拡大できる。従来のPET検出器では、検出素子の厚みの影響によって斜め入射の放射線に対する分解能が劣化する性質があるため、開放化に伴い分解能が劣化してしまう。これに対し、放医研が独自に開発した、薄い検出素子を多層に配置する3次元放射線位置(DOI)検出器^{5), 6)}を用いることにより、開放化しても高分解能を維持できることも分かった(図3)。

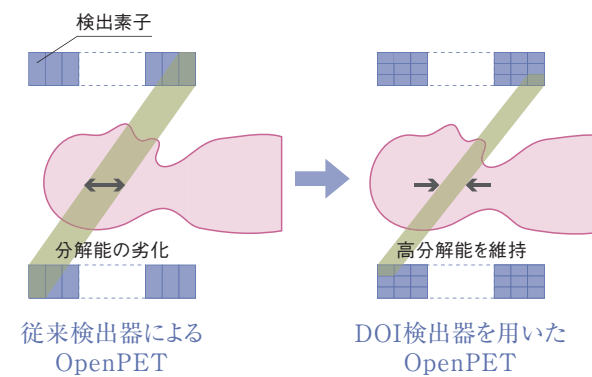


図3: DOI検出器との組み合わせによる効果。従来検出器では検出素子の厚みによって分解能の劣化を招くが、DOI検出器を用いると高分解能が維持される。

さらに放医研を中心にして開発した次世代PET試作機「jPET[®]-D4」⁷⁾を用いて、OpenPETによって開放空間の画像化が可能であることを実証した(図4)。jPET-D4は、産学連携のもと世界に先駆けて開発に成功した4層DOI検出器を搭載して、高感度と高解像度の両立を実証した頭部用試作機である。具体的には、jPET-D4は5つの検出器リングから構成されるが、健常ボランティア実験の計測データから中央の1リング分に相当する部分を欠損させ、開放空間においても良好な画像が得られることを示した。

期待される3つの応用

OpenPETは、検出器数を増やすことなく視野範囲を拡大する効果がある。つまり、体軸視野20cm程度の装置をスライドしながら全身撮影する従来方式に対して、全身を一度に診断できる装置を比較的低コストで実現できる可能性がある。全身同時視野の装置は、医薬品の開

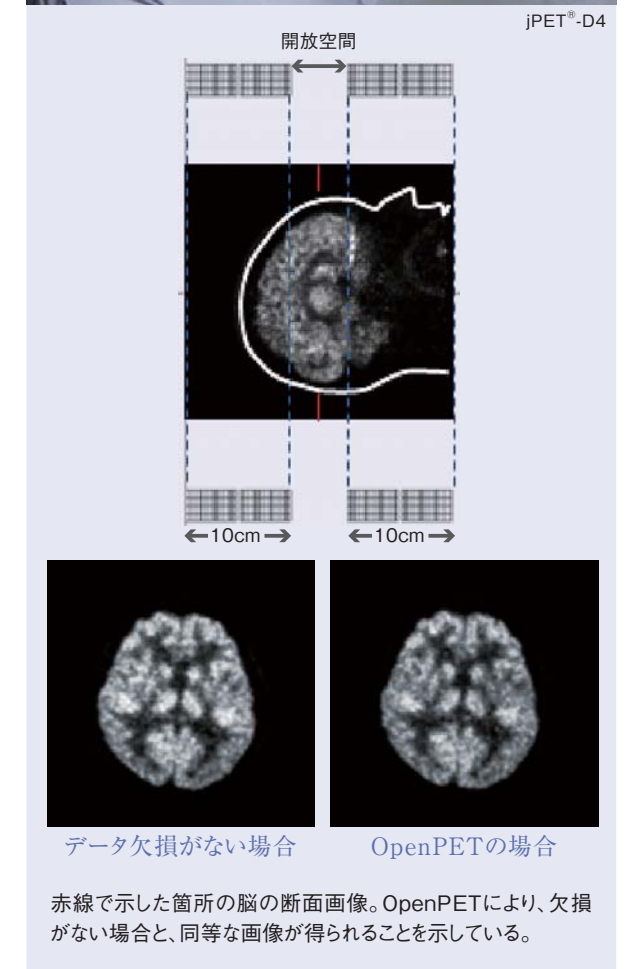


図4: 次世代PET装置jPET-D4(上)を用いたOpenPETの実験結果(下)

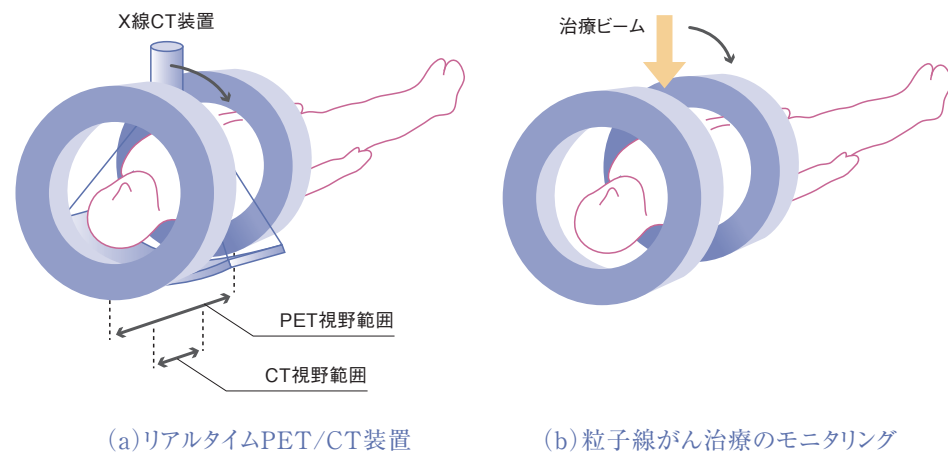


図5: 期待されるOpenPETの応用

発効率を劇的に高める方法として注目されているマイクロドーズ試験⁸⁾の推進に役立つものと期待される。マイクロドーズ試験は、医薬品開発の早期段階において、超微量の化合物を投与して、ヒトにおいて最適な薬物動態を示す開発候補の化合物を選択する方法である。

一方、検出器を分離した開放空間は、治療スペースやX線CT装置など別の診断装置の設置場所として活用でき、粒子線がん治療における治療ビームモニタリングの実現や新しいマルチモダリティ装置への応用が期待できる。具体的には、マルチモダリティ装置としてPET/CT装置が普及しているが、従来装置は、単にPET装置とX線CT装置を並べた構造であるため、同一部位を同時に撮影することができない。これに対してOpenPETを用いれば、図5(a)に示すように、開放空間にX線CT装置を設置することによって、同一部位をリアルタイムに撮影する新しいリアルタイムPET/CT装置が実現できる。ここではX線CT装置との組み合わせを例に挙げたが、現時点では撮影時間のオーダー(秒レベルのCTに対してPETは分オーダー)が異なるため、心臓など一部の対象を除けば、リアルタイムPET/CT装置の活躍は、高感度で高速な新たなPET薬剤の登場を待たな

くてはならないだろう。SPECTや蛍光イメージャーなど、他のモダリティとの組み合わせも可能である。

ところで、診断で見つかったがんに対する治療も重要である。重粒子線や陽子線による粒子線がん治療は、線量集中性が高いため、正常組織への線量を極力抑えてがん病巣に絞り

照射できる放射線治療法として注目されている⁹⁾。照射は、患者のCT画像をもとに綿密に計算された治療計画に基づいて行われるが、実際の患者体内において、毎回の照射が計画通りの線量分布になっているかを外部から経時的に確認するのはきわめて難しく、この手法は確立されていない。もし照射中に体内の標的が動いたり変形したりして治療計画からずれてしまった場合、線量分布のズレは検出できない。これに対して、ビーム照射に起因する核反応によって、照射野に沿って陽電子放出核種が生成される現象が注目されている。これまでに、対向ガンマカメラ型のPET装置を用いて、照射野を2次元画像として可視化する試みがなされている¹⁰⁾。しかし、実際のがん病巣は3次元構造であることから、ビームを通ず隙間を有し、かつ3次元の画像化が可能なPET装置が切望されてきた¹²⁾。OpenPETは、開放空間を利用してビーム経路を確保することができるため、照射野の3次元画像化を可能とし、治療精度の向上に貢献できると期待される(図5(b))。放医研重粒子線がん治療装置「HIMAC」では次世代照射システムの計画が進められている¹³⁾、現在、放医研重粒子医学センター物理学部の協力のもと、この次世代

照射システムへの適用を想定したOpenPETの検討を進めている。

さいごに

OpenPETは、まだまだアイデアの段階であるが、開放化という点で、PETの可能性を大きく広げるポテンシャルを持つ。その実現には、ハードウェアおよびソフトウェアの要素技術に加え、それらを統合するシステム研究が重要である。現在、放医研内の競争的資金である平成20年度理事長調整費(創成的研究)の支援のもと、放医研重粒子医学センター稲庭拓先生、古川卓司先生、森慎一郎先生、荻原伸一先生、野田耕司先生、吉川京燦先生、分子イメージング研究センター樋口真人先生らのご協力を頂きながら、OpenPETの実現に向けた基礎研究を進めている。OpenPETの実現および普及を通じて、国民の生活の質向上に役立てればと思う。

参考文献

- 1) T Yamaya, T. Inaniwa, S. Minohara, et al., "A proposal of an open PET geometry," *Phy. Med. Biol.*, 53, pp. 757-773, 2008.
- 2) M. Defrise, P. E. Kinahan, D. W. Townsend, et al., "Exact and approximate rebinning algorithms for 3-D PET Data," *IEEE Trans. Med. Imag.*, 16, pp. 145-158, 1997.
- 3) Orlov S. S. Theory of three-dimensional reconstruction. 1. Conditions for a complete set of projections. *Soviet Physics Crystallography* 1976: 20: 312-4.
- 4) Tanaka E and Amo Y. A Fourier rebinning algorithm incorporating spectral transfer efficiency for 3D PET. *Phys Med Biol.* 1998: 43: 739-46.
- 5) H. Murayama, H. Ishibashi, H. Uchida et al., "Depth

encoding multicrystal detectors for PET," *IEEE Trans Nuc Sci* 45, pp. 1152-1157, 1998.

- 6) N. Inadama, H. Murayama, T. Omura et al, "A depth of interaction detector for PET with GSO crystals doped with different amounts of Ce," *IEEE Trans Nucl Sci* 49, pp. 629-633, 2002.
- 7) 次世代PET開発研究会報告書 (<http://www.nirs.go.jp/usr/medical-imaging/ja/study/main.html>)
- 8) 杉山雄一, 栗原千絵子 編, "マイクロドーズ臨床試験: 理論と実践 - 新たな創薬開発ツールの活用に向けて -, " じほう, 2007, など.
- 9) 放医研ホームページ (http://www.nirs.go.jp/research/division/charged_particle/himac/index.shtml) など
- 10) Iseki Y, Mizuno H, Futami Y, Tomitani T, Kanai T, Kanazawa M. Positron camera for range verification of heavy-ion radiotherapy. *Nucl Inst Meth Phy Res A.* 2003: 515: 840-9.
- 11) Nishio T, Ogino T, Nomura K, Uchida H. Dose-volume delivery guided proton therapy using beam ON-LINE PET system. *Med Phys.* 2006: 33 (11): 4190-7.
- 12) Crespo P, Shakirin G, Enghardt W. On the detector arrangement for in-beam PET for hadron therapy monitoring. *Phys Med Biol.* 2006: 51: 2143-63.
- 13) Noda K, Furukawa T, Fujisawa T, Iwata Y, Kanai T, Kanazawa M, et al. New accelerator facility for carbon-ion cancer-therapy. *J Radiat Res.* 2007: 48 Suppl: A43-54.

肝臓がんへの取り組み

3.「肝細胞がんに対する重粒子線治療: 低侵襲・根治療法をめざして」

Carbon Ion Radiotherapy for Hepatocellular Carcinoma

重粒子医科学センター病院 第一治療室長 加藤 博敏

安田 茂雄 医長、柳 剛 医長、今田 浩史 医師、山田 滋 医長、溝江 純悦 病院長、
鎌田 正 センター長、辻井 博彦 理事



加藤 博敏



はじめに

原発性肝がんには大きく分けて肝細胞がんと胆管細胞がんがあり、94%が肝細胞がん、4%が肝内胆管がん(胆管細胞がん)です。肝細胞がんの85%は、それ自体が高度肝障害である肝硬変に発生するため、がんを治すことだけにとらわれると、肝臓自体の機能を落とし、結果的に患者さんの生命を脅かす危険があります。したがって、特に肝細胞がん(以後、肝がん)の治療には、治す力が強いこと(根治性)は勿論、肝および全身に与える侵襲が低いこと(低侵襲性)が強く求められます。

1.肝がん治療の現状

既存の治療法には大きく分けて、肝切除(手術)、肝動脈塞栓療法(TAE)、経皮的局所療法(エタノール注入療法:PEI、ラジオ波熱凝固療法:RFA、など)の3つがあります。最も治す力が強い(根治的)方法は肝切除ですが、侵襲度が高いため、がんの進行度、全身状態や肝機能の程度によって適応に限界があり、全体の35%にしか適応されていません。残り65%は肝切除の対象にならないため、その約半分の患者さんが肝動脈塞栓療法(TAE)を受けています(全体の30%)。手術より侵襲が低く、再発腫瘍や高度進行がんでも、ある程度肝機

能が保たれていれば比較的簡便で、侵襲度の加減が可能のため、肝がんには欠かせない治療ですが、TAE後に手術を行った切除標本による組織学的検討によって、単独では根治性に乏しいとの結論が出ています。近年、がんと肝実質を簡単にリアルタイムで観察できる超音波映像法の発展に伴い、肝に治療針を刺入して行う超音波映像下経皮的局所療法(PEIやRFA)が盛んに行われるようになりました。大きさが3cm以下の場合には根治的で侵襲の低い治療であることが明らかになっていますが、血管に浸潤している場合や大きさが3cmを超える場合は治療効果に限界があることも判っています。現在、経皮的局所療法の施行割合は全体の30%程度です。

以上をまとめると、35%が手術、30%が肝動脈塞栓療法、30%が経皮的局所療法です。程度には差がありますが、いずれも切ったり刺したりが必要なため侵襲的だと言わざるを得ません。侵襲性が低いと言われる経皮的局所療法でも、疼痛の問題は解決されていませんし、RFAも施行数の急増に伴い、激しい疼痛や腹腔内出血等の副作用、さらには、がんをばら撒いてしまった(播種)と考えられるような症例報告が散見されるようになってきました。

肝がんの治療では役割分担の整理が進み、一応の定常状態を得たかのように見えますが、実状は以上の如く、全体の43%を占める径3cmを超えるものに対しては、本当の意味での低侵襲・根治療法はこれまで存在していません。特に全体の40%弱を占める3cm以上10cm以下の肝がんでは積極的な治療が可能と思われるものに対しては、新たな治療法の開発、進展が待望されます。

2.放射線治療、今なぜ重粒子線か

放射線治療は正常組織に高度の障害を与えない限り、精神的・肉体的に苦痛の少ない治療であることは、高度進行がんに対して対症的姑息照射(除痛目的等)が行われてきたことから明らかです。一方、放射線が強力な

殺細胞力を持つこともまた自明の事実です。このように低侵襲性と根治性とを本質的に兼ね備えた放射線治療においては、近年、コンピュータの急激な発展に伴い治療計画と照射技術が飛躍的に進歩しており、がんの低侵襲・根治療法としての実力をいかに発揮できる時代となっています。

特に重粒子線という放射線は、通常の放射線(X線)の3倍の強さを持つ上、通常の放射線のように体内を透過せず、がんを貫いた所で止めることができ、かつ直進

性に優れているので、周囲の正常組織には可能な限り当てずに、がんを集中的に強く照射することができます。

最初に述べた通り、肝がんは元々弱った肝臓(慢性肝炎もしくは肝硬変)に次々と発生してくる可能性が高いので、狙った病巣は確実に治すこと(根治性)と、肝および全身に与える負担が軽いこと(低侵襲性)の両方を併せ持つことが、治療法には強く求められます。重粒子線治療には、これらの条件を同時に満たすことが期待されています。

3.重粒子線治療の低侵襲性の評価

重粒子線治療が肝機能に及ぼす影響について、Child-Pughスコアの治療後の変化による評価を行いました。Child-Pughスコアとは、肝機能に関する基本的な5項目についてそれぞれ1~3点の評価を行い、それを合計したもの(5点~15点)をいいます。点数が高いほど肝機能が悪いことになります。治療前に比べて、点数が低下または不変を無侵襲、1点のみ上昇を軽度侵襲(これらを合わせて低侵襲としました)、2点上昇を中等度侵

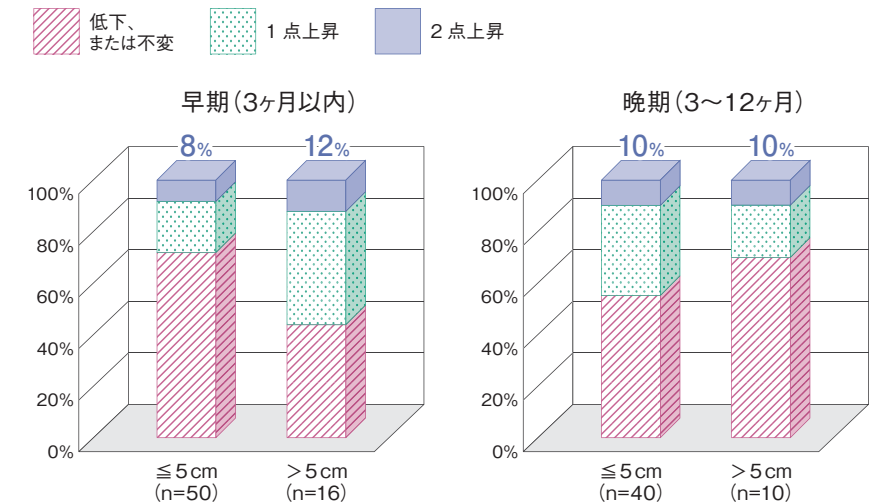


図1: 治療後のChild-Pughスコアの変化

襲、3点以上上昇を高度侵襲として検討しました。重粒子線の短期照射(4回照射、52.8Gy(X線に換算))で治療した69例で検討すると、高度侵襲は一例もありませんでした。中等度侵襲は、治療開始から3ヶ月以内の早期では、5cm以下8%、5cm以上12%、3ヶ月以降1年以内の比較的遅い時期では、5cm以下10%、5cm以上10%で、いずれの時期も腫瘍の大きさによる差はありませんでした。その他は全て低侵襲でした(図1)。

4.重粒子線治療の根治性の評価

根治性の検討は、治療後に腫瘍が再増殖しなかった割合(局所制御率)によって評価しました。重粒子線の短期照射(4回照射、52.8Gy(X線に換算))で治療した69例(3cm以上が47例(68%))で検討すると、局所再発は4例で、全て2年以内に出現しそれ以降は見られませんでした。1年、3年、5年以降の局所制御率はそれぞれ96%、94%、94%でした。腫瘍径別の検討では、5cm以下と5cm以上でほとんど差がなく、3年および5年以降の局所制御率は共に94%でした(図2)。

4.「直腸癌局所再発に対する重粒子線治療」

Current status and Perspective of Heavy ion beam therapy for patients with pelvic recurrence after primarily resected rectal cancer



山田 滋

重粒子医学センター病院
第一治療室医長 山田 滋

柳 剛 医長、安田 茂雄 医長、今田 浩史 医師、加藤 博敏 室長、溝江 純悦 病院長、
鎌田 正センター長、辻井 博彦 理事

腫瘍径別・局所制御率

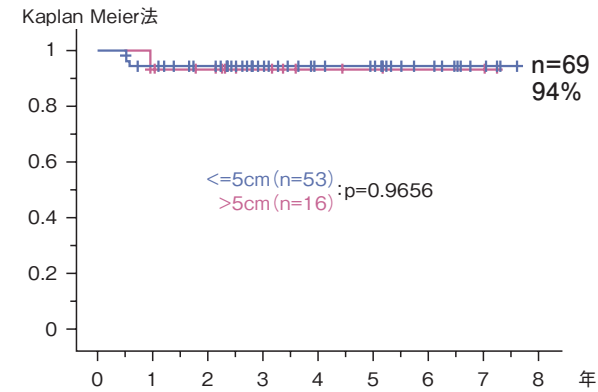


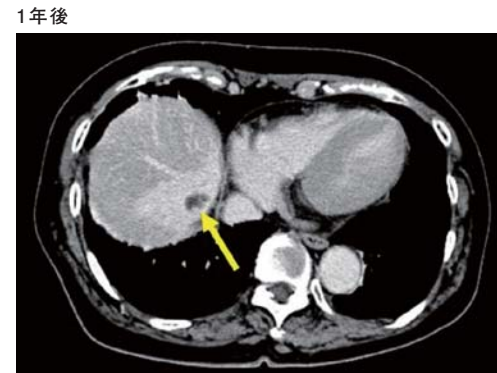
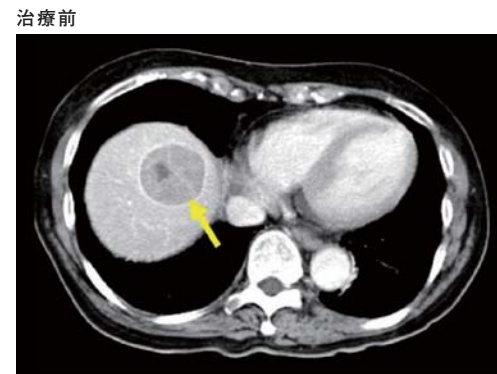
図2: 腫瘍径別に見た局所制御率

以上をまとめると、腫瘍の大きさにかかわらず、重粒子線治療を受けた患者さんの90%は肝機能面からみてほとんど侵襲を受けず、重粒子線治療を行った腫瘍の94%は治ったことになります。また、痛みを訴えた方の割合は、一過性のもも含めて5%と他の治療法に比べて非常に低率でした。このように、重粒子線治療は、放射線治療の特質である低侵襲性、根治性を最も進化させた治療であると言えます。

さいごに

肝細胞がんに対する重粒子線治療の臨床試験は1995年から開始され、10年間の研究期間を経て、2005年から高度先進医療(現在は先進医療)として実際の医療に昇格しました。現在、治療は2日間で終了し、ほぼ全員が2日目の治療終了後に退院できます。侵襲が極めて低く、ほとんど何も起こらないからです。外来治療も可能と考えられます。今後は、他治療との連携を一層深め、実績をさらに積んで肝がん治療体系の一隅を占められるようになることが目標です。

症例 76才、腫瘍径5cm
治療: 37.0GyE/2回/2日間



血中腫瘍マーカーの推移

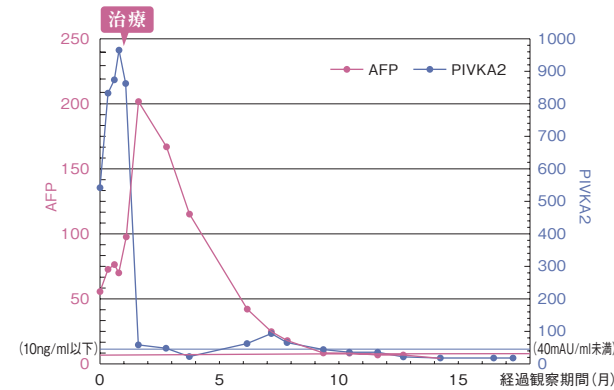


図3: 症例
37.0GyE/2回の治療を行った76才女性。径5cmの腫瘍は、元々存在した壊死部分を残してほぼ消失した。治療前に異常高値を示した2種類の血中腫瘍マーカー値も、治療後速やかに低下し、正常範囲を維持した。自覚症状を含め、明らかな副作用を認めなかった。



要旨

直腸癌切除後の骨盤内局所再発に対する重粒子線治療を施行しました。治療の対象は、骨盤内に限局する再発病変で、照射の標的体積内に消化管が含まれない病変です。2001年から2008年2月までの93人(98病巣)の患者さんについて解析しました。現在までのところ、消化管・尿路・皮膚等にgrade3以上の有害反応は皮膚で2人および消化管で1人認められましたが、それ以外には大きな障害は認められませんでした。5年の局所制御率(5年間治療した部位に再発がない割合)としては、現在治療線量として用いている73.6GyEで93%でした。1年生存率は95%、3年は68%、5年は57%と手術成績よりも良好な結果でした。重粒子線治療は患者さんに過大な負担をかけることなく治療成績を向上させることが示されました。

(*本論文では、重粒子線とは、重イオン線なかでも炭素イオン線のことを意味します。)

(Key Words: 直腸癌・局所再発・重粒子)

1) 背景

直腸癌の骨盤内局所再発は近年、術式や手術操作の改良および高リスクの直腸癌患者に対しては術前・術後治療も多く行われるようになり再発率は低下してきています。

しかし、現在でも再発率は10から30%以上と依然として高い値を維持しています^{1,2)}。再発病巣に対する治療は外科的切除が第一選択ですが、再切除後の5年生存率は30%前後、50%生存期間は25ヶ月前後です³⁾。しかし、患者さんへの侵襲が大きいことから外科的手術の適応になることは少なく、多くは放射線治療が選択されます。従来の放射線治療では単独で再発病巣に根治的な治療を行うことは困難でした。そのため抗癌剤である5FUなどを併用する放射線化学療法が行われるようになってきましたが、それでも満足すべき数字は得られていません。

直腸癌は正常の直腸粘膜と比較して明らかに低酸素であることより、放射線抵抗性であるとされています⁴⁾。このためX線などの低LET線では治療効果が低く、低酸素細胞に対しても高い殺細胞作用を示す高LET線の治療に期待がもたれました。重粒子線と同様の高LET線である中性子線を用いた直腸癌再発患者22人に対する治療結果からは、除痛効果に関し、除痛率・持続期間ともにX線治療より良好な結果が得られました。しかし、再発腫瘍は消化管など放射線感受性の高い重要臓器に隣接していることが多く、線量分布の悪い中性子線ではこのような重要臓器を照射野から外すことが困難であり十分な線量を腫瘍に照射することができませんでした⁵⁾。そこで高LET線のなかで線量分布が優れている重粒子線に期待がもたれました。

II) 直腸癌術後再発に対する炭素イオン線治療の第I/II相試験および第II相試験の概要

直腸癌術後再発に対する炭素イオン線治療は、2001年4月から第I/II相臨床試験(直腸術後0003)が開始されました。目的は、重イオン線治療に対する正常組織反応と腫瘍に対する局所反応の評価ならびに治療技術の確立で、適正線量の決定のため線量を増加させる形式を採りました。本試験は2004年2月まで行われ38人の患者さ

んが治療されました。この結果を受けて2004年4月から重粒子線の治療線量を73.6GyEに固定し先進医療として第II相試験が開始され現在も継続中です。

III) 試験治療の内容

治療の対象となる患者さんは、直腸癌切除後の骨盤内(ただし初回時の手術野に近接した骨盤周囲の軟部組織もこれに含めます)に限局する再発病変のみを有し、その再発腫瘍と消化管などの放射線感受性の高い臓器が5mm以上離れていること、および先行する直腸癌切除術で組織学的に完全に切除されていることが大きな条件です。さらには当該重粒子線治療部位に放射線治療の既往があったり、他に外科的治療の困難な合併疾患を有していたり、活動性の重複癌を有する患者さんは除かれました。炭素イオン線の線量はグレイ等価線量(GyE)で67.2GyE/16回/4週間(1回線量4.2GyE)から開始し、照射効果と安全性を確認しながら5%ずつ線量を増加し70.4GyE,73.6GyEで治療を行いました。また第II臨床試験は第I/II臨床試験の最大線量である73.6GyEを用いて治療をおこないました。

	2001/04-2004/02	2004/04-2008/02
第I/II相臨床試験	38(+3)人	
先進医療(第II相)		65(+2)

IV) 解析結果

(1) 第I/II相試験(38人)

(A) 正常組織反応

現在までのところ、消化管・尿路にgrade3以上の重篤な副作用は認められていません。しかし、皮膚では遅発反応として、腫瘍の壊死層が皮膚経路で外と交通し膿瘍を形成した患者さんが1人認められました。

(B) 抗腫瘍効果と生存率

抗腫瘍効果として局所制御率(一定期間後の重粒子

線照射野局所の腫瘍の再発あるいは再燃を認めない患者さんの割合)を検討しました。3年局所制御率で、67.2GyEで70.0%、70.4GyEで86.1%、73.6GyEで81.8%と70GyE以上では良好な結果でした。また、3年生存率は67.2GyEで36.0%、70.4GyEで60.0%、73.6GyEでは75.0%と線量が高くなるにつれて生存率の上昇が認められました。

(2) 第I/II相試験の73.6GyE治療患者さん+第II相試験(61人)

現在重粒子線治療の治療線量で用いている73.6GyEの線量で治療を受けた患者さんを解析しました。内訳は第I相試験の73.6GyE治療患者さん(13人)+6ヶ月以上治療から経った第II相試験の患者さん(48人)計61人です。

(A) 正常組織反応

現在までのところ、消化管・尿路にgrade3以上の重篤な副作用を認めていません。皮膚では、腫瘍の壊死層が皮膚経路で外と交通し膿瘍を形成し皮膚のgrade3となった患者さんが2人および吻合部再発にて腸管に潰瘍が見られた1人が認められました。

(B) 抗腫瘍効果と生存率

局所制御率は、1年で98%、3年で93%、5年で93%と5年でも再発が起こる患者さんは7%と極めて低い値で良好な結果でした。生存率は1年で95%、2年で81%、3年で68%、5年で57%でした。

(C) 治療成績の比較

以上の成績を他の施設からの報告例と比較してみました。表1は直腸癌局所再発に対する一般の放射線治療での成績です。我々の重粒子線治療の成績は他の放射線治療の成績に比較して極めて高く良好な成績と思われます⁶⁾。

次に我々の治療成績を他の施設からの手術治療の報告例と比較してみました(表2)。我々の重粒子線治療の成績は、多くの手術治療の成績に比較して同等かあるいは高く、外科的治療を受けなくても外科的治療以上の良好な成績が得られることがわかりました⁷⁾。

報告者	患者数	治療線量(Gy)	2年生存率	5年生存率	局所制御率
Ciatto S 1982	108	35-50	5%(3y)	3%	
O'Connell 1982	17	50	45%	0%	24%(2y)
Wong CS, 1991	22	45-50	27%	16%	9%(5y)
Lybert MLM 1992	76	44(6-66)	61%(1y)	13%(3y)	28%(3y)
Knol HP, 1995	50	60(12-80)	27%	8%	
Murata, 1997	17	44.8(24-69)	32.9%(1y)		53%
	18	44.2(12-60)	44.4%(1y)		46%
山田2008	61	73.6	81%	57%	93%(1y)

表1: 直腸癌局所再発に対する放射線療法の成績

報告者	報告年	患者数	1年生存率	2年生存率	5年生存率
Katou	1994	32	93%	82%	46%
Garcia-Aguilar J	1999	42	88%	62%	35%
Wanebo	1999	53	91%	62%	31%
Salo JC	1999	71	88%	75%	31%
Saitou	2003	43	91%	78%	39%
Moriya	2004	48	95%	76%	36%
山田2008	2008	61	95%	81%	57%

表2: 直腸癌局所再発に対する手術療法の成績

V) 適応拡大への試み

高度先進医療に移行し、ニーズに応えるため適応拡大にもつとめてきました。骨盤内の再発病巣は、消化管と近接していることが多く、消化管が照射野から避けられないことで不適格となり治療できない患者さんが少なくありませんでした。これらの患者さんに対しては腫瘍と消化管との間に一定の距離を保つためにスペーサーを置くことで対応しました。重粒子線治療の場合、消化管と腫瘍の距離が5mmあれば消化管を安全に照射野からはずすことが可能です。このためスペーサーをとってゴアテックスシート挿入術等を千葉大学・千葉県がんセンター・都立駒込病院・大阪大学・帝京大学ちば総合医療センターの協力にて40人に施行し良好な結果が得られています。

総括

重粒子線は患者さんに過大な負担をかけることなく治療成績を向上させることが示されました。本臨床試験に当たり、多忙な中で協力していただいた臨床研究班の先生方に深謝いたします。

参考文献

- 1) Galandiuk S, Wieand HS, Moertel CG, et al Patterns of recurrence after curative resection of carcinoma of the colon and rectum. Surg Gynecol Obstet 174: 27-32, 1992
- 2) Bozzetti F, Mariani L, Micel R, et al Cancer of the low and middle rectum: local and distant recurrence and survival in 350 radically resected patients. J Surg Oncol 62: 207-213, 1992
- 3) McCall JL, Cox MR, Wattoo DA: Analysis of local recurrence rates after surgery alone for rectal cancer. Int J Colorectal Dis 10: 126-132, 1995
- 4) Wendling P, Manz R., Thews G, et al Heterogeneous oxygenation of rectal carcinomas in humans. Advances in Experimental Medicine & Biology 180: 293-300, 1984
- 5) Eising E, Potter R, Haverkamp U Neutron therapy for recurrence of rectal cancer Strahlenther. Onkol 166: 90-94, 1990
- 6) O'Connell MJ, Child DS, Moertel CG: A prospective controlled evaluation of combined pelvic radiotherapy and methanol extraction residue of BCG for locally unresectable or recurrent rectal cancer. Int J Radiat Oncol Biol Phys 8: 1115-1119, 1982
- 7) Wanebo HJ, Antoniuk P, Koness RJ et al. Pelvic resection of recurrent rectal cancer. Dis Colon Rectum 42: 1438-1448, 1999

5.「環境中の放射線(能)に関する取り組み」

Studies on Environmental Radiation and Radioactivity



吉田 聡

放射線防護研究センター
環境放射線影響研究グループ グループリーダー
吉田 聡



1.はじめに

環境中、すなわち私たちの身の回りには、ごく普通に放射線が飛び交い、いたる所に放射線を出す物質(放射能)が存在しています。このように言うと驚く人も多いと思いますが、環境中には自然に存在する放射線があり、私たちは人類が誕生したときからこれに曝されています。また、核実験等によって人工的に作り出された放射能も環境中に存在します。これら、環境中の放射線は、通常はそれらの被ばくが問題になることは有りません。

しかし、人が受ける放射線のバックグラウンドとして正しい評価が必要である上、人の活動によってその線量が增大することがあります。

ここでは、環境中の放射線と放射能について簡単に解説するとともに、これらについての放医研の取り組みの一部を紹介します。

2.環境中の放射線とは

人や生物が周りの環境から受ける放射線のことを環境放射線と呼び、自然放射線と人工放射線に分類することができます。自然放射線の1つは、岩石や土壌にもともと含まれる放射能(自然放射性核種)に起因する放射線です。もう1つは、宇宙から飛来する放射線(宇宙線)です。人工放射線は、人によって新たに生み出されたもので、核兵器の製造と実験、原子力エネルギー生産、原子力関連事故等が起源となっています。この他、厳密には環境放射線に含まれませんが、医療や研究における放射性物質の利用や、放射線発生装置の利用も人工放射線に分類されます。

図1に一般の公衆が受ける放射線の量をまとめました。自然放射性核種による被ばくは、被ばく経路に応じて、大地放射線による外部被ばく、食品摂取による内部被ばく、大気中からの内部被ばく(ラドン・トロン)の3つに分類されています。国連科学委員会2000年報告書によると、被ばく線量(実効線量)の世界平均は、年間2.8 mSv(ミリシーベルト)であり、医療を除くと年間2.4 mSvです。日本の場合は、世界平均とはかなり異なります。ラドン・トロンによる被ばくが小さいため、医療以外の被ばく線量は年間1.6 mSvと小さくなっています。一方、医療被ばくを含めた全体の値は世界平均よりも大きくなっています。医療以外の人工放射線による被ばく、すなわち核実験や原子力利用等の寄与は通常無視できるほど小さいものとなっています。これら環境放射線や医療による被ばく線量は、人の生活形態の変化や技術の進歩によって変わって行きます。より新しく正確な値を集めて、その値の持つ意味を評価することは放医研の重要な役割の1つです。

3.自然放射性核種

地球は約46億年前に誕生したと考えられています。その誕生時に、宇宙空間に存在した様々な物質とともに、放射性核種も地球に取り込まれました。放射性核種は時間とともにその数が減少しますが、寿命(半減期)が長い一部の物質は現在でもその放射線を観測することができます。これを自然放射性核種と呼び、地表付近では岩石や土壌に含まれています。トリウムやウラン、また、カリウムの一部等が放射性核種です。例えば、日本の土壌中には1キログラム当たり2ミリグラム(2 mg/kg)程度のウランが含まれています。また、生物にとって必須であるカリウムの0.01%は放射性核種です。一方、後述する宇宙線によって大気中で生成する放射性核種もこれに分類されます。

3-1.大地放射線

地表の岩石や土壌中の自然放射性核種からは放射線が放出されます。これを大地放射線と呼びます。主としてガンマ線と呼ばれる放射線です。地表における大地ガンマ線のレベルは、地質に依存して変化します。日本の場合、自然放射性核種の濃度が低い玄武岩や安山岩が分布する地域(例えば、東北日本)では比較的低く、逆に、自然放射性核種の濃度が高い花崗岩などが広く分布する地域(例えば、西南日本)では比較的レベルが高くなっています。世界には非常に高い大地ガンマ線のレベルを示す地域があり、インド(ケララ)、ブラジル(ガラバリ)、イラン(ラムサル)などには、局所的に日本の200倍近くに達する場所も存在します。

3-2.空気中のラドンとトロン

自然放射性核種であるウランとトリウムは、放射線を出しながら他の核種(子孫核種)に変化して行きます。その過程で生成するラドンとトロンはガス状で、ほとんど他の物質と化合物を作らないため、岩石や土壌などから大気中に放出されて拡散します。ラドンは半減期が3.8日であり、半減期55秒のトロンに比べてより広く拡散します。ラドンやトロンは、大気中で別の放射性核種になります。これらの子孫核種は、いずれも化合物を作りやすいため、多くは大気中の浮遊微粒子に付着し、これが呼吸によって体内に取り込まれ、被ばく(内部被ばく)の原因になります。

ラドン、トロン、およびこれらの子孫核種の大気中濃度は、地質や気象条件などによって大きく変動します。また、屋内では、床下から拡散したり建築材料から放出されたラドンとトロンが蓄積することがあり、公衆の自然放射線被ばくの重要な要因となっています。屋内のラドン濃度は、家の材質や構造によって異なり、特に北欧など寒い国では、家屋の換気率が悪く、室内に侵入したラドンが屋外の空気希釈されないために1立方メートル

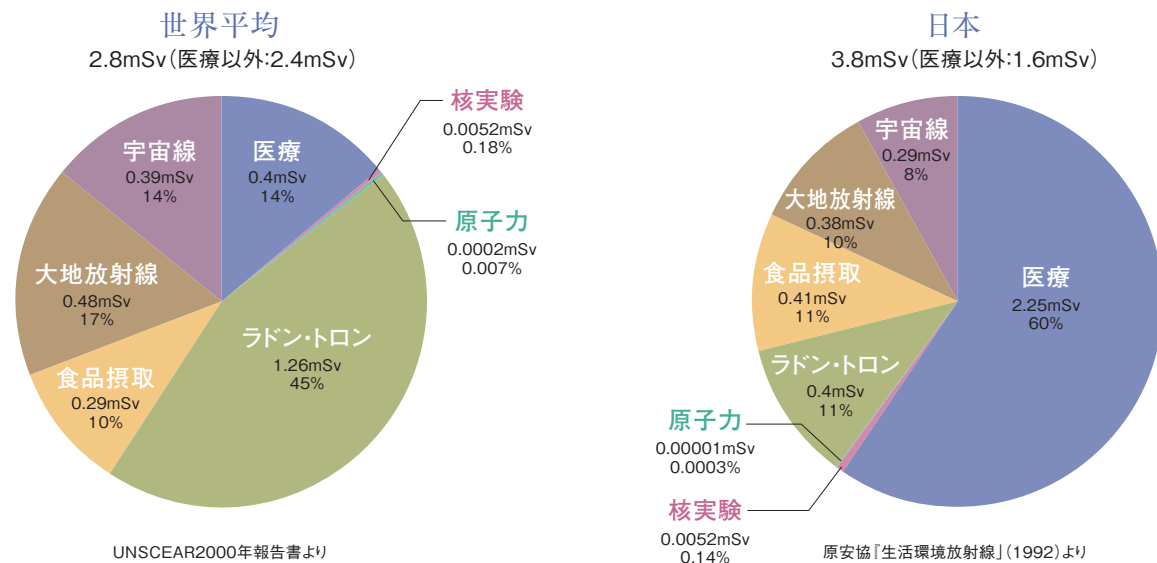


図1: 世界および日本における公衆の被ばくの実態
(国連科学委員会2000年報告書および原子力安全研究協会「生活環境放射線」(1992)を参照)

ルの空気中に 100 ベクレル (100 Bq/m³) 以上の濃度となることがあります。日本は、比較的換気の良い家屋の構造が多く、海外に比べると低いレベル (算術平均値で約 16 Bq/m³) になっています (国連科学委員会 2000 年報告書)。

3-3.自然放射性核種を含む物質の利用

私たちは放射線と放射性核種を様々な分野で利用しています。放医研ではこれらの重要性に関する研究も行っています。

産業用の原材料の中には、ウラン、トリウムおよびその子孫核種を比較的多く含む物があります。例えば、モナザイト、リン鉱石、ジルコン等です。製品としては、ラドン浴素、船底塗料、ネックレス、耐火レンガ、自動車用マフラー、衣料、研磨材、リン酸肥料等が知られていて、一般に利用されています。このような自然放射性核種を含む物質の利用に伴って発生する被ばくに関しては、現在、各国や日本の規制当局において防護のための検討がなされています。

様々な原材料等の放射性核種を分析した結果が放医研のホームページで公開されています。

自然起源放射性物質データベース
<http://www.nirs.go.jp:8080/anzendb/NORMDB/index.php>

3-4.食品や人体中の自然放射性核種

人体には飲食物を通じて様々な元素が取り込まれ、その一部は放射性核種です。この大部分は放射性カリウム等の自然放射性核種で、それらによる被ばく線量は、公衆の被ばくの 10%程度です。

4.宇宙線

宇宙空間には様々な起源の放射線 (一次宇宙線) が存在します。地球に到来する一次宇宙線は、超新星爆発

などによって発生する銀河宇宙線と太陽フレアに伴って宇宙空間に放出される太陽宇宙線に大別できます。いずれも主成分は陽子と呼ばれる粒子ですが、地球の磁場によって妨げられるため一部しか地球大気の頂上にまで到達できません。地球大気圏に達した一次宇宙線は大気と相互反応することにより、二次宇宙線を生成します。二次宇宙線の組成と強度は、緯度と高度によって変化します。また、太陽活動によっても変化します。

航空機を利用すると宇宙線の被ばく線量が増加します。二次宇宙線の電離成分の強度は、旅客機が飛ぶ高度 10 ~ 12 km 付近では海面高度の 50 倍以上、さらに宇宙空間では 100 倍以上になると考えられます。航空機の利用に伴う被ばく線量の増加を考慮しなければならぬのは、飛行時間が長い、航空機乗務員です。我が国では、航空機乗務員に対するガイドラインが示され、航空会社での取り組みが始まっています。

日本から世界各地に飛行する際の宇宙線被ばく線量を計算するためのソフトが放医研等によって開発され、ホームページで公開されています。

航路線量計算システム (JISCARD) (図2)
<http://www.nirs.go.jp/research/jiscard/index.shtml>



図2: 放医研が公開・運用している航路線量計算システム (JISCARD)

一次宇宙線と地球大気との相互作用では、幾つかの放射性核種も生成されます。これらは宇宙線生成核種と呼ばれ、自然放射性核種の一部です。

5.人工放射性核種

環境中に放出された人工放射性核種の主な起源は、大気中核実験、再処理を含む原子力利用、事故等です。

1945年にアメリカで最初の核実験が行われ、広島と長崎に原子爆弾が投下されて以来、これまでに 1,500 回近い原水爆実験が行われてきました。核実験由来の放射性核種は、放射性ストロンチウム、放射性セシウム、放射性ヨウ素など 200 以上の種類があります。これらは、特に大気圏内核実験によって大気中を地球規模で拡散し、降雨等によって地表に達し (フォールアウト)、一般公衆の被ばく源となりました。1954年~1964年の約 10 年間はフォールアウトの多い時期で、それ以降は、大気中核実験がほとんど実施されていないため、影響は桁違いに小さくなっています。

1986年4月26日に旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所で発生した事故によって、多量の放射性核種が環境中に放出されました。これによって、発電所周辺のみならず、特に北半球が広い範囲にわたって汚染されました。日本でもその影響が観測されています。

環境が汚染されると農畜産物や水産物中の放射性核種の濃度が高くなる場合があります。移行経路は様々ですが、農作物の場合は大気から農作物表面への沈着と土壌から根を通じての吸収が、海産物の場合は海水からの吸収と餌を通じた取り込み

が重要です。チェルノブイリ事故直後の周辺諸国では食物連鎖に伴う放射性核種の移行と蓄積が問題となりました。例えば、牧草に沈着した放射性核種が牛のミルク中に濃縮しました。また、地表の地衣類に蓄積した放射性核種がそれを餌とするトナカイに移行し、これを食用とする極地地方の人々の被ばく線量が増加しました。

我が国では文部科学省の「環境放射能調査研究」により全国の環境試料や食品の放射能が継続して測定されています。様々な食品の放射能濃度については、以下のサイトで紹介されています。

文科省ホームページ「環境放射線と放射能」
http://search.kankyo-hoshano.go.jp/food/servlet/food_in?pageSID=42428601

農畜産物や水産物中の放射性核種の濃度は生物の種類と核種によって異なり、環境条件によっても大きく変化します。生物によっては特定の放射性核種を特異的に蓄積するものがあり、被ばく線量の評価やモニタリングの際には注意が必要です (図3)。例えばキノコは植物に比

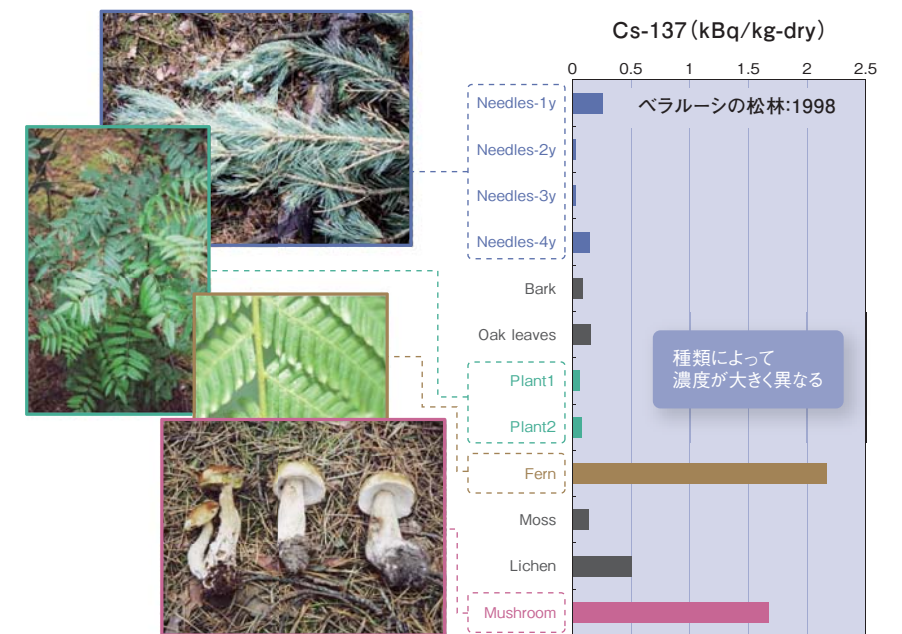


図3: 環境試料中の放射性セシウムの濃度の例 (チェルノブイリ事故の影響を受けているベラルーシの松林: Yoshidaら (2004) を参照)

べて放射性セシウムを蓄積しやすいことが知られています。日本人がキノコを食べることによる被ばく線量は、自然放射線による被ばく線量に比べると無視できるほど小さいものです。しかし、他の食品中の放射性セシウム濃度が非常に低いため、食品全体から摂取される放射性セシウムに対する寄与はおおよそ30%と高くなっています。

6.放射線の環境影響

近年の環境問題への意識の高まりと共に、放射線が環境そのものに与える影響を評価することが国際的に重要な課題となりつつあります。一般的に環境中の生物は人に比べて放射線に強いことが知られており、人が守られるような管理をしていれば環境は十分に守られると考えられています。しかし、これまで人を中心に考えてきた研究では、データが不十分である部分が多く、また、生物同士が相互作用をもつ生態系への影響についてはほとんど解っていません。放医研では、メダカ、ミミズ、トビムシ等の環境生物を飼育し、放射線の影響を明らかにするための研究を開始しています(図4)。



図4: 放射線影響試験の対象としている生物の例
(人だけでなく、環境そのものに対する影響についても研究を開始している)

7.まとめ

放医研では、放射線の医学利用はもちろんのこと、環境中の放射線を調べて、その影響を評価するための研究も行っています。これは、私たちが安全に安心して生活し、次世代により良い環境を引き継ぐために不可欠です。本解説により、それらの活動の一端を知って頂くと共に、放射線に対する理解を少しでも深めて頂ければ幸いです。

参考文献

- 1) 「生活環境放射線(国民線量の算定)」、原子力安全研究協会、原安協-231(1992)
- 2) 国連科学委員会 2000年報告書「放射線の線源と影響」、放射線医学総合研究所監訳、実業公報社(2002)
- 3) S.Yoshidaら、Journal of Environmental Radioactivity、75巻、301-313(2004)

6.「被ばく医療における放医研の役割」

—放射線被ばくはいつ起きる?—

Role of NIRS in Radiation Emergency -Emergency Medical Response and Education-



明石 真言

緊急被ばく医療研究センター
センター長
明石 真言



はじめに

放射線医学総合研究所(放医研)は放射線と人々の健康に関わる総合的な研究開発に取り組む国内で唯一の研究機関として、様々な活動を行ってきています。設立の引き金になったとされる1954年の太平洋上ビキニ環礁での核実験により放射線被ばくした第五福竜丸の乗組員と、第二次大戦中に使用された血管造影剤トリオラストにより体内に放射性物質トリウムが沈着した患者さんの健康影響調査、1972年に千葉県市原市で起きたイリディウム(¹⁹²Ir)線源による被ばく事故での線量評価と治療、1999年に茨城県東海村で起きた臨界事故での対応など放射線被ばく医療に対する取り組みはすでに30年以上にも及んでいます。

放射線による被ばく

放射線は現代の生活に欠くことが出来ません。放射線の利用は、医療における診断や治療ばかりではありません。空港での手荷物検査、航空機の亀裂やパ



図1: ジャガイモの照射装置
(放医研のホームページから)

イプの継ぎ目の検査、医療器具の殺菌、わが国で許可されている唯一の食品照射であるジャガイモの発芽防止(図1)等があります。また医療でも輸血用血液に放射線を照射しています。これは血液に含まれるリンパ球が輸血した患者さんの体組織を攻撃して副作用を起こす場合があるため、これを防止するために輸血用血液を15~50グレイ(Gy)の線量で放射線を照射しています。また放射線は私たちが住んでいるこの日常の生活空間にも非常に微量ですが存在します。自然界には天然の放射性物質があり、私たちの身体の中にも放射線を出す物質がありますし(図2)、生活空間からも放射線を浴びています。放射線以外にも我々の健康に侵襲を与えるものは多くありますが、だからといってすぐに病気になるわけではありません。私たちの身体には、放射線や外からの侵襲により壊された組織や遺伝子を修復する機構があり、このために病気ならずにすんでいます。自然界に全く放射線のない場所はない、と言ってよく、こういう場所をつくることは非常に大変です。このようにどこにでもある放射線と付き合うのに重要なことは、被ばく線量を把握する、つまりどの程度の放射線量であるか、ということ

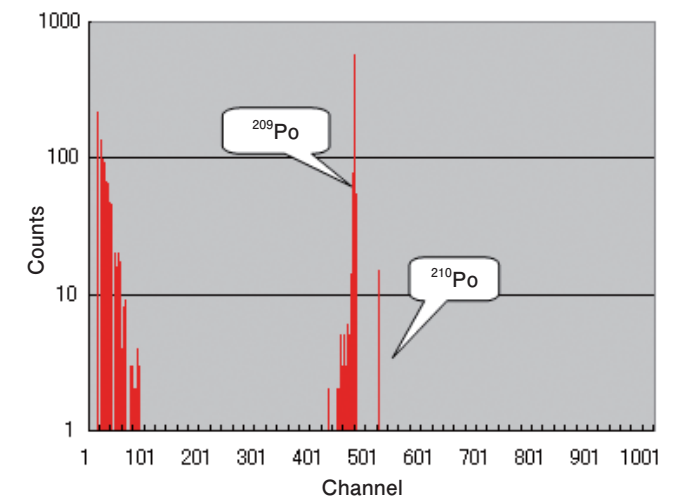


図2: 私たちの身体の中には、大変微量ですがポロニウム(²¹⁰Po)があります。この図は健康な日本人の尿中の²¹⁰Poを調べたものです。²⁰⁹Poは、わかりやすくするために後から加えたものです。

す。修復能力を超えるような放射線に被ばくをすると、障害が生じます。放射線による被ばくは、病院でX線検査を受ける時のように身体の外から放射線を受ける被ばくと、身体の中に放射性物質が摂取され、体内から組織・臓器が放射線を受ける被ばくがあります。前者を外部被ばく、後者を内部被ばくもしくは体内汚染といいます(図3)。

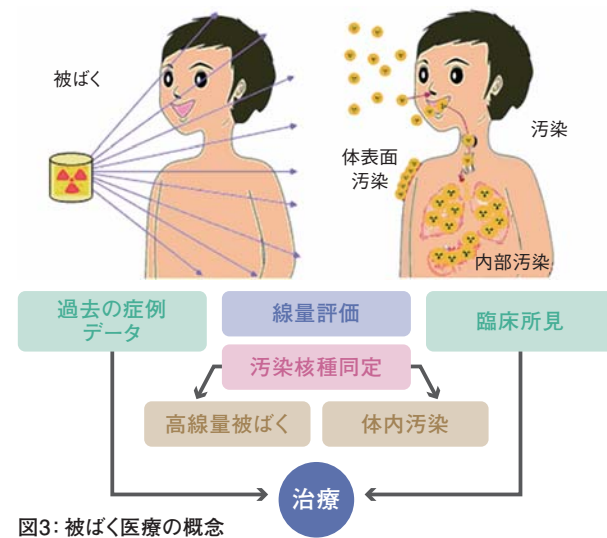


図3: 被ばく医療の概念

被ばく医療とは

万が一健康に影響が出るような放射線に被ばくをした時に行う医療を被ばく医療と言います。放射線被ばくが他の障害と違うことがあるとすれば、被ばくによる症状は、被ばく後すぐにはあられなく、自分で被ばくをしたかどうか分からないということです。つまり被ばく医療とは、主に事故などで健康に影響がおこるような放射線被ばくが生じた際、治療方針を決定するための線量評価を行い、治療を行なうことと言えます。体内に放射性物質が摂取された場合、被ばく線量を減らすために放射性物質を体外に出す治療を行います。これは医師、看護師、検査技師の他に、放射線防護・管理、放射線計測・線量評価などの専門家との協力により成り立つものです。

幸いなことにこういう事故は非常に希にしか起こりませんが、多くの分野で放射線が使われていることを考えれば、放射線被ばくはいつ何処で起きても不思議ではない、と考えざるを得ません。最近の外国で起きた事故を紹介します。中国ではタマネギ、ニンニク、リンゴ等に放射線照射が行われています。2004年10月に、中国山東省済寧市において野菜照射処理の作業中、安全ロックと線源の有無を示すライトが壊れていたの知らずに作業員2名が照射室に入り、大量のγ線(コバルト(⁶⁰Co)線源、1.4 PBq)により被ばくをしてしまいました。被ばく線量は、それぞれ20-25グレイ(Gy)、9-15 Gyであり、前者は33日目に死亡し、後者も75日目に多臓器不全で死亡しました。また2005年の夏以降に、中国黒竜江省ハルビンの集合住宅で、子供を含む4人の住民が手の腫脹、倦怠感などの症状を訴え、調べたところ放射線に被ばくしていることが確認されました。この集合住宅に住んでいた1人がゴミの中から拾ってきた金属の棒が、¹⁹²Ir (18.5 GBq)の工業用放射線源であり、被ばく線量は0.35-2.61 Gyと推定されました。4人は病院で治療を受けましたが、このうち82歳の女性が10月に死亡し、孫の13歳の少女も重症となりました。さらにこの集合住宅の住人114人が被ばくしていることも明らかになりました。この年の12月にはチリの首都サンチアゴ市の南に位置するコンセプション市(Concepción)で、作業中に非破壊検査用の線源(¹⁹²Ir、3.3 TBq)が脱落してしまいました。放射線の線源とは知らず27歳の男性が線源を左手で拾い、ズボンの左後ろポケットに入れ、被ばくをしました。全身の被ばく線量評価では1名が約1Gy、3名が0.13 Gyから0.24 Gy、また0.1 Gy以下が2名でした。被ばくした局所の線量は、線源を拾った作業員の左臀部で2,000 Gy以上と評価され、フランスの病院で皮膚移植と放射線障害の治療では世界で初めての間葉系幹細胞移植が行われました。2006年3月には、ベルギーのフリユルス(Fleurus)の滅菌照射施設で、⁶⁰Co (30 PBq)の線源が格納されて

いないことに気付かず、1名が全身に被ばくをしました。被ばく線量は4.5 Gyと推定されています。このように希ですが、世界のどこかで事故が現実起こっています。

被ばく医療体制

では、万が一我が国で事故が起きた時の対応はどうなっているのでしょうか。事故が起きた時の体制の構築も、放医研における被ばく医療の重要な仕事となっています。平成11年9月30日茨城県東海村で我が国原子力史上最悪の臨界事故が起き、尊い2名の命が失われました(JCO臨界事故)。放医研はこの事故以前から内閣府原子力安全委員会の「原子力施設等の防災対策について」と中央防災会議の「防災基本計画」の中で放射線障害専門病院とされるなど、その役割が決められていました。放射線被ばくによる障害は一臓器にとどまらない複合臓器障害であり、治療には各領域の専門家が必要です。このため外部の専門医療機関とネットワークを構築する

ことにより、広く専門家の協力が得られるようなシステムを構築していました。JCO事故時に、3名の高線量被ばく患者のうち2名が東京大学医学部附属病院並びに医科学研究所附属病院で治療が行われたのは、このネットワークという考えに基づいたものでした。このため事故時の混乱の中でもスムーズに患者の治療が行われ、このネットワークの考え方は、ドイツ等外国でも広く紹介されています。この事故の時には、放射性物質の環境への放出は殆どありませんでしたが、わかりにくく不安が大きい放射線の健康影響について、専門家を現地に派遣し住民に説明し、不安を取り除くことにも努めました。現地での住民の健康相談、診断には、現在でも医師を派遣しています。図4は原子力施設で事故が起きた時の被ばく医療体制を示したものです。東日本ブロックでは放医研が、また西日本ブロックでは広島大学が地域の第三次被ばく医療機関として対応することになっています。放医研は同時に全国の被ばく医療をまとめる役割を担っています。この被ばく医療体制は、原子力発電所等の原子

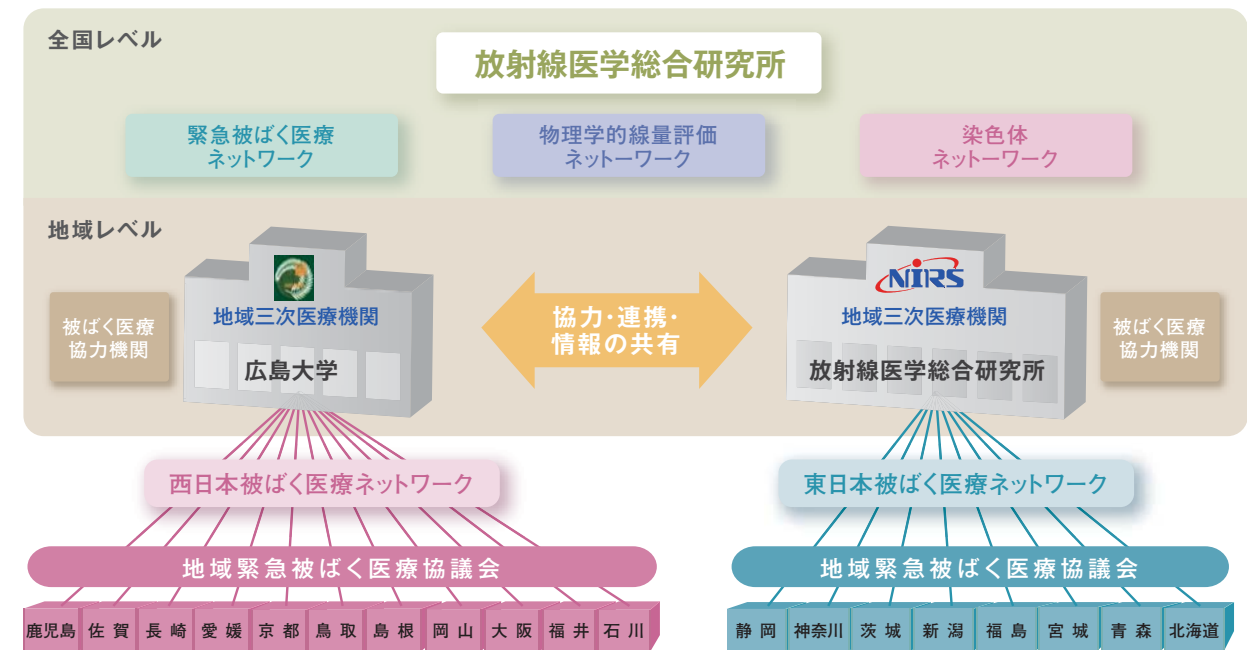


図4: 我が国の被ばく医療体制

力施設における事故のために構築されたものですが、原子力安全委員会の原子力施設防災専門部会被ばく医療分科会「被ばく医療のあり方について」（平成20年10月現在改訂中）では、「本報告書は、被ばく医療の観点から原子力関連施設での事象に限らず、放射性物質が関係した緊急事態をも視野に入れて策定した。なお、国、地方公共団体、事業者、医療関係者等は、本報告の内容を十分に参考にして、より実効性のある緊急被ばく医療体制を構築することを期待する。」また「なお、原子力施設立地地域以外において、被ばく患者への医療対応が必要となった場合には、まずその地域で救急診療として適切な対応がとられることが必要であり、次に近接の原子力施設立地地域へ搬送し、被ばく医療を実施する等対応がとられることが必要である。このため、近接の原子力施設立地地域との協力関係を構築し、平素から備えることが重要である。」（傍点筆者）とするなど、原子力施設のない地域での放射線事故においても、原子力施設立地地域との協力関係を築くことによりできるだけ迅速な対応ができることを求めています。

放医研の役割

ここで被ばく医療体制の構築とはどういうことをするのかについてももう少しで説明致します。事故が少ないと言うことはとてもいいことです。しかしながら、万が一事故が起こってしまったときに何をしていたかわからないのでは困ります。重要なことは人の教育です。一般に事故が起きたとき、119通報をすれば救急車が来ます。救急隊員は、冷静に事故に対応し速やかに患者さんを病院へ搬送します。患者を受け入れた病院は、医学の知識、技術、経験に基づいて治療を行います。もし患者さんの体表面に放射性物質が付着していたら、また体内に放射性物質が入っていたら、どうでしょうか。救急隊員や病院の医療スタッフはとまどいます。またすぐには現れな



図5、6: プルトニウムによる体内汚染の治療薬ジエチレントリアミン五酢酸(DTPA)とセシウムによる体内汚染時に使用するプルシアンブルー。我が国では未承認薬ですが、万が一のために備えて放医研で備蓄しています。

い、つまり症状がない患者さんにどういことをすべきか、病院でも困ってしまいます。放射性物質で汚染した患者さんを、速やかに病院へ搬送するために行うべきこと、また搬送に当たる救急隊員、受け入れる病院のスタッフに放射線防護などについて正しい知識と技術を身につけていただくことを目的として、定期的なセミナーや教育・訓練の機会を設けています。緊急被ばく救護セミナー（プレホスピタルコース）と緊急被ばく医療セミナー（ホスピタルコース）がそうです。また病院で患者さんの放射線量を正しく測定するために、緊急被ばく医療放射線計測セミナーも開催しています。さらに国や地方自治体が開催する原子力防災訓練に参加・指導を行い、

警察・消防等についても教育研修を行っています。被ばくや汚染をした患者さんの被ばく線量がどのくらいになるのか評価することを線量評価といいます。前述しましたように治療方針の決定にはとても重要ですが、全国の保健物理学や染色体の専門家の協力を得るためにネットワークを構築しています。さらに放射性物質による体内汚染の治療に使う医薬品の中には、我が国では承認されていないものもあります。こういう医薬品を備蓄し、緊急時には使える様にしておくことも放医研に役割の一つと考えています（図5、6）。国際的にも貢献しています。2000年にタイで起きた事故で、放置された⁶⁰Co線源により高線量の被ばくと2000年から2001年にかけてパナマの国立がんセンターで放射線治療の線量評価の誤りによる過剰照射事故では、国際原子力機関（IAEA）からの要請に応じて専門家を派遣しました。世界保健機関（WHO）においても協力を行っています。アジアに対しては、被ばく医療に関する研修会を放医研で開催するばかりでなく、アジア諸国での講習会にも講師を派遣しています。

最近の国内での対応

放医研が対応するのは大きな事故ばかりではありません。学校や企業における事故、さらには国際的な対応、放射性物質の盗難等による事件でも線量評価や健康影響についての説明を行っています。2006年にロンドンで起きたポロニウム（²¹⁰Po）による汚染事件では、汚染されたホテルに宿泊した日本人の検査を行い、2008年には盗難された¹⁹²Ir線源に対する注意をホームページに掲載しました。また同年7月7、8、9日に北海道洞爺湖で開催されたサ

ミットでは、放射線による事件・事故に対応するため職員を現地に派遣するなど、我が国の被ばく医療の中心として貢献しています。

終わりに

事故が少ないことは、裏を返せば経験が重要な役割を果たす医療の領域では負の要因です。不幸にして起きてしまった事故の症例を集め、希な事故に対応する人材と技術を維持することは不可欠です。被ばく医療に何が必要かを考え研究テーマの選択し、若い研究者や医療従事者、技術者を育てること、わが国のためだけではなく、国際的にも貢献できるような緊急被ばく医療体制作りが強く望まれています。



原子力総合防災訓練（放医研ヘリポートでの患者受入れ）



NIRS Training Course for Korean Medical Professionals on Radiation Emergency Medical Preparedness (NIRS 韓国医療従事者向け緊急被ばく医療トレーニングコース：2007年12月実施)

基盤技術センター 研究基盤技術部
放射線発生装置利用技術開発課 研究員 名誉研究員
平岡 武
放射線計測技術開発室 主任研究員
高田 真志

1.はじめに

照射のための吸収線量の絶対測定は一般に電離箱により行われるが、これはこの方法が最も便利で測定精度も高いためである。電離箱のように微少吸収体（空洞ガス）への吸収エネルギーから線量を算定する場合は、必ず Bragg-Gray の空洞理論により吸収線量が求められる。電離箱を用いたこの理論は極めて単純な式で表されるが、空洞サイズに対する物理パラメータの補正が議論されている。また電離空洞ガスの質量を知る必要がある。そこで ^{60}Co ガンマ線のような単一のエネルギーの線源に対して、正確に決定された照射線量の場でガスの質量を評価出来る。但し、その照射線量の評価には複雑な補正が含まれるため、Bragg-Gray 空洞理論を基本とした吸収線量の算定式が複雑になる。要するに電離箱を基準線量で校正する過程が必要となる。中性子の線量測定ではガンマ線が必ず混在することと、中性子で発生する二次荷電粒子の種類が多岐にわたるため線量測定が複雑になる。

ここでは、ICRU Report 45¹⁾ による中性子とガンマの全線量を算定する方法、対電離箱による中性子とガンマ線量を分離して測定する方法、電離箱の校正などについて解説する。

2.ICRU Report 45による線量算定法

ICRU Report 45 では、A-150 組織等価電離箱とメタン基準の組織等価ガスの組み合わせで中性子とガンマ線の線量を算定する方法を提唱している。以下の式番号はレポートの番号と同じであるから詳細は本文を参照されたい。

TE電離箱測定から全吸収線量の決定法

電離箱による吸収線量の測定は Bragg-Gray の関係式に従う。

$$D = \frac{Q}{m} \cdot \frac{W}{e} \cdot s_{m,g} \quad (3.1)$$

ここで、D は空洞を取り囲んだ壁の吸収線量、Q は空洞中で発生した一方の符号の電荷、m は空洞ガスの質量、W はガス中で発生した 1 イオン対を生じるのに必要な平均エネルギー、e は素電荷、 $s_{m,g}$ は電離箱壁から放出された 2 次荷電粒子に対して壁物質 m とガス g の質量衝突阻止能比である。空洞の大きさは吸収線量が伝達される荷電粒子の飛程と比較して小さく、また空洞の導入により中性子やガンマのフルエンス、さらに 2 次荷電粒子のフルエンスも影響を受けてはならない。

組織等価電離箱による中性子のドシメトリに Bragg-Gray の関係式を利用する場合、色々な物理量にスペクトル平均のような多くの補正が必要となる。そこで (3.1) 式には次の形が与えられる。

$$D = \frac{Q_n}{m} \cdot \frac{W_n}{e} \cdot (r_{m,g})_n \cdot d_T \cdot \frac{1}{1+\delta} \quad (3.2)$$

ここで、 W_n は色々な 2 次荷電粒子の混合粒子に対する平均値となる中性子ビームの W 値である。 W_n は空洞中に生ずる電荷を作るところの、電離箱の壁と中性子との相互作用により発生した種々の質量やエネルギーの 2 次荷電粒子に対して評価しなければならない。

$(r_{m,g})_n$ はガス中での吸収線量を、電離箱の壁での吸収線量に変換する係数である。もし壁とガスの元素組成が等しく、阻止能の密度効果が無視できれば $s_{m,g}$ は 1 となる。一般には壁とガスの阻止能は元素組成が同じではないから、 $s_{m,g}$ はそれぞれ異なった 2 次荷電粒子に対して評価しなければならない。大部分の中性子ビームでは、壁で発生した 2 次粒子だけが電離を作るのではなく、ガス空洞も 2 次荷電粒子スペクトルにかなりの影響をする。 $s_{m,g}$ は電離箱が Bragg-Gray 空洞と考えられる時には適用できるが、中性子線ドシメトリの場合はこの係数を $(r_{m,g})_n$ に変えなければならない。

d_T は置換係数であり、この係数は電離箱がファントム

中にあることにより出来た空洞での、中性子の散乱や吸収の相違が考慮される。空洞サイズや電離箱の他の部分の影響により、中性子エネルギーフルエンスは擾乱を生じ、その補正として集められる電荷に d_T を乗ずる必要がある。このことにより、電離箱の幾何学的中心の全吸収線量が求まる。 δ は中性子ビームの中性子とガンマに対する TE 電離箱のレスポンスの違いに対する補正である。ICRU 筋肉への中性子とガンマを加えた全吸収線量は

$$D_n + D_\gamma = D \cdot (K_t/K_m)_n \quad (3.3)$$

となる。ここで $(K_t/K_m)_n$ は基準組織 (ICRU muscle) と線量計の壁材質 (A-150 plastic) のカーマの比である。中性子ビームにより TE 電離箱に生じる電荷から求められる全吸収線量は

$$D_n + D_\gamma = \frac{Q_n}{m} \cdot \frac{W_n}{e} \cdot (r_{m,g})_n \cdot (K_t/K_m)_n \cdot d_T \cdot \frac{1}{1+\delta} \quad (3.4)$$

となる。TE 電離箱を校正することで、電離箱中のガスの質量を決定し、空洞中のガスに付与されるエネルギーの絶対値を求めることができる。将来の電離箱は、基準の中性子線場またはユーザビームを用いた中性子ビームで校正されるべきである。しかしながら、現状では大部分の放射線施設では照射線量または空気カーマでの校正が実用的である。

中性子ドシメトリではしばしば、空洞ガスの質量 m は電離箱のガンマ線校正において決定される。照射線量校正定数 N_X は次式で定義される。

$$N_X = \frac{X}{Q_c} \quad (3.5)$$

ここで、X は電離箱がない状態で中心位置での空中における照射線量、添字 c は校正 (一般に ^{60}Co ガンマ線または 2 MV X-線) を表す。m と N_X の関係は次式で与えられる。

$$m = \frac{1}{N_X} \cdot \frac{1}{A_{\text{wall}}} \cdot \frac{1}{(f_t)_c} \cdot \frac{W_c}{e} \cdot \left[\frac{(L/\rho)_m}{(L/\rho)_g} \right]_c \cdot \left[\frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_t}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_m} \right]_c \quad (3.6)$$

ここで、 A_{wall} は校正が空中で行われた際電離箱の壁やビルドアップキャップまたはステム部での吸収・散乱の補正係数である。 A_{wall} の値は ^{60}Co ガンマ線に照射された多くの市販電離箱に対して計算されている。壁とビルドアップキャップの厚さが 590 mg/cm^2 に対して求めた値は $A_{\text{wall}}=0.98$ である。電離箱の設計によってはわずかな違いが生ずる。 μ_{en}/ρ は質量エネルギー吸収係数であり、添字 t は組織を表す。 $(L/\rho)_c$ は校正線源から発生する電子の減衰スペクトルに対する制限付平均質量衝突阻止能である。e は素電荷である。

電子平衡が成立する条件下では、 $(f_t)_c$ は基準組織の照射線量から吸収線量への変換係数であり、次の式で定義される。

$$(f_t)_c = (W_{\text{air}}/e)_c \cdot \left[\frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_t}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}}} \right]_c \quad (3.7)$$

ここで、 $(W_{\text{air}})_c$ は校正線源に対して空气中に生成される 1 イオン対当りに消費される平均のエネルギーである。1 MeV 近辺のエネルギーの光子に対する組織と空気質量エネルギー吸収係数比の最新値は 1.102 である。また現在最も信頼おける $(W_{\text{air}}/e)_c$ 値は乾燥空気に対して $33.97 \pm 0.06 \text{ JC}^{-1}$ である。

3.4 式に m を代入することにより中性子ビームに照射されたファントムに置かれた TE 電離箱の読みから全吸収線量 D_T が求められる。

$$D_T = D_n + D_\gamma = M_T \cdot (\Pi k_M)_T \cdot N_X \cdot A_{\text{wall}} \cdot (f_t)_c \cdot d_T \cdot \frac{1}{k_T} \cdot \frac{1}{1+\delta} \quad (3.8)$$

ここで、 M_T は中性子ビームに照射された TE 電離箱の電位計の読み、 $(\Pi k_M)_T$ は標準温度・気圧の条件で電位計の読みから空洞中に作られる電荷 Q_n に加えられるいくつかの補正係数である。 $1/k_T$ は次式で定義される。

$$\frac{1}{k_T} = \frac{(r_{m,g})_n}{[(L/\rho)_m/(L/\rho)_g]_c} \cdot \frac{W_n}{W_c} \cdot \frac{(K_t/K_m)_n}{[(\mu_{\text{en}}/\rho)_t/(\mu_{\text{en}}/\rho)_m]_c} \quad (3.9)$$

3.8 式の補正係数 $1/(1+\delta)$ は中性子ビームの中性子とガンマに対して TE 電離箱のレスポンスの違いによる補正で、 M_T に加えられなければならない。 δ は

$$\delta = \frac{D_\gamma}{D_n + D_\gamma} \cdot \frac{h_T - k_T}{k_T} \quad (3.10)$$

となる。ここで h_T は中性子ビーム場における光子に対して取られる、 k_T と同様の定義である。普通は $h_T=1$ と仮定し、一般に k_T は 0.95 から 1 の間にある。放射線治療に用いられる中性子ビームでは、一般に D_γ は全吸収線量の 20% より小さい。そこで δ は普通 0.01 以下である。

照射線量校正定数 N_X は次式で空気カーマ校正定数に変換できる。

$$N_K = N_X \cdot (W_{air}/e)_c \cdot (1-g)^{-1} \quad (3.15)$$

ここで、 g は空気中で制動放射線として変換される 2 次荷電粒子のエネルギー割合である。グラファイト壁の電離箱に ^{60}Co ガンマ線が作る 2 次電子に対するこの値は、最新の計算では 0.003 である。 N_K を 3.8 式に代入することにより、中性子ビームにより照射されたファントムの電離箱の測定値から空気カーマ校正定数を用いて全吸収線量を決定できる。

$$D_n + D_\gamma = M_T \cdot (\prod k_M)_T \cdot N_K \cdot A_{wall} \cdot (1-g) \cdot \left[\frac{(\mu_{en}/\rho)_t}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \right]_c \cdot d_T \cdot \frac{1}{k_T} \cdot \frac{1}{(1+\delta)} \quad (3.16)$$

照射線量での校正定数により 3.8 式から全線量が算定でき、また空気カーマの校正定数により 3.16 式から全線量を決定できる。

3. 対電離箱による吸収線量評価

速中性子線とガンマ線の混合場に於て、それぞれの線量を分離測定するためには対電離箱法がある。それぞれの線量を精度良く分離測定するためには、それぞれの放射線にのみ高い感度を有する一対の電離箱を使用する

ことが望ましいが、中性子線にのみ高い感度を有する電離箱は存在しない。そこで、中性子線とガンマ線に対してほぼ等しい感度を有する電離箱としては組織等価壁 (TEP) に組織等価ガス (TEG) を充填した電離箱 (T 型電離箱と記す) と、中性子に対する感度が低い電離箱の代表としてカーボン壁 (C) に二酸化炭素ガス (CO_2) を充填した電離箱 (U 型電離箱と記す) との対電離箱がしばしば用いられる。

線量測定には T 型電離箱と U 型電離箱を対電離箱として使用するが、これらの電離箱の指示値を ^{60}Co ガンマ線で校正した値をそれぞれ R_T と R_U とすると次の関係式が得られる²⁾。

$$R_T = h_T D_G + k_T D_N$$

$$R_U = h_U D_G + k_U D_N$$

$$D_N = \frac{R_T h_U - R_U h_T}{k_T h_U - k_U h_T}$$

$$D_G = \frac{R_U k_T - R_T k_U}{k_T h_U - k_U h_T}$$

ここで D_N と D_G はそれぞれ中性子線とガンマ線の線量で、 h と k は各電離箱のガンマ線と中性子線に対する感度で、電離空洞サイズに依存する。

速中性子線またはガンマ線によって発生する二次荷電粒子の飛程に比べ、空洞サイズが十分に小さいときは、Bragg-Gray の空洞理論が適用されるため (B-G 成立空洞と記す)、 h と k の値は次式で与えられる。

$$h = \frac{(S_{gas}^{wall})_{Co-\gamma} (\mu_{wall}^{tissue})_{Co-\gamma}}{(S_{gas}^{wall})_{\gamma} (\mu_{wall}^{tissue})_{\gamma}}$$

$$k = \frac{(W/e)_{\gamma} (S_{gas}^{wall})_{Co-\gamma} (\mu_{wall}^{tissue})_{Co-\gamma}}{(W/e)_N (S_{gas}^{wall})_N (K_{tissue})_N}$$

これは理想的な場合である。空洞ガスを電離する粒子を Crosser、Insider、Starter、Stopper と発生する位

置と飛程を考えてそれぞれの寄与を球形空洞について Caswell³⁾ は計算しているが、ここでは詳細は述べない。彼の分類によれば上式は Crosser のみ寄与と考えられる。Crosser は、電離箱壁から発生した二次荷電粒子が空洞ガスを横切り、再度、電離箱壁に入射する粒子である。Insider は空洞ガス中で発生した二次荷電粒子が同じ空洞ガス中で止る粒子。Starter は、空洞ガス中で発生した二次荷電粒子が空洞ガス領域から抜け出し、電離箱壁に入射する粒子。Stopper は電離箱壁で発生した二次荷電粒子が空洞ガス中で止る粒子である。

これとは対照的に、二次荷電粒子の飛程にくらべて空洞が十分に大きい場合には (大部分は insider の寄与)、 h' と k' と記し次式となる。

$$h' = (S_{gas}^{wall})_{Co-\gamma} \frac{(\mu_{wall}^{tissue})_{Co-\gamma}}{(\mu_{gas}^{tissue})_{\gamma}}$$

$$k' = \frac{(W/e)_{\gamma} (S_{gas}^{wall})_{Co-\gamma} (\mu_{wall}^{tissue})_{Co-\gamma}}{(W/e)_N (K_{tissue})_N}$$

ここで、 S は添字で表した放射線によって発生した二次荷電粒子に対する質量衝突阻止能比、(例えば、 $(S_{gas}^{wall})_{Co-\gamma}$ は ^{60}Co からのガンマ線に対する電離箱壁の質量衝突阻止能と空洞ガスの質量衝突阻止能の比率)、 μ はガンマ線に対する質量エネルギー吸収係数、 K は中性子線に対するカーマ係数であり、 W はガス中で 1 イオン対を作るのに必要な平均エネルギーである。添字の tissue、wall、gas は、軟部組織、電離箱壁、空洞ガスを指す。

線量測定に用いられるそれぞれの電離箱の大きさは理想的には B-G 成立空洞である必要がある。しかし、反跳重イオンの飛程は短いため、特に U 型電離箱の場合は B-G 成立空洞にならないことがほとんどである。

T 型電離箱の空洞ガスに寄与する電離の大部分は反跳陽子によりもたらされる。従って、T 型電離箱のサイズは B-G 成立空洞の場合のみを考える。

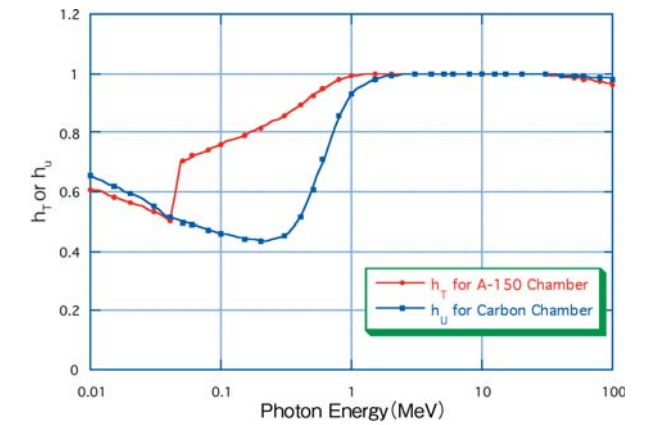


図1:T型およびU型電離箱のガンマ線に対する感度

図1に対電離箱のガンマ線に対する感度 h_T 、 h_U をエネルギーの関数として示す。ガンマ線と物質との相互作用においてコンプトン効果が優勢な領域では、両者とも 1 である。U 型電離箱の h_U は、2 MeV 以下のエネルギーで急激に感度が低下するので、混在場のガンマ線のスペクトルを十分確認する必要がある。しかし、ガンマ線エネルギーは MeV オーダーのものが多く、近似的に $h_T = h_U = 1$ と取られる。

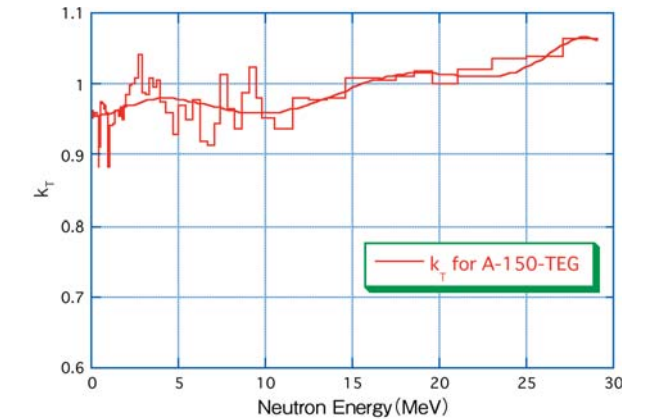


図2:T型電離箱の中性子線に対する感度

図2に T 型電離箱の中性子線に対する感度 k_T をエネルギーの関数として示す。感度は 1 より僅か小さいので、1 として計算する場合もある。図の値を多項式曲線で近似したのが実線で、その回帰係数の結果を表 1 に示す。

$Y = M0 + M1*x + \dots M8*x^8 + M9*x^9$	
M0	0.954
M1	7.4317e-05
M2	0.007054
M3	-0.0022167
M4	0.00026451
M5	-1.4856e-05
M6	3.9676e-07
M7	-4.0661e-09
R	0.67836

表1: T型電離箱の感度 k_T の回帰係数

A-150-TEG を 7 次の多項式で近似したが、目視で全エネルギーにわたり最も良くフィットしていると思われる次数である。表中で y の値が感度、x が中性子エネルギー、M が係数である。利用される平均感度の値は小数点 2 桁程度であるから、表の高次元の小さな回帰係数は回帰曲線に影響しないと考えることは間違いである。低エネルギーでは近似できても、高エネルギーになるにつれて大きく値が異なる。従って、表の回帰係数は正確に全部入力して感度特性を求めなければならない。近似式が成立するのは 29MeV 以下のエネルギーの中性子である。

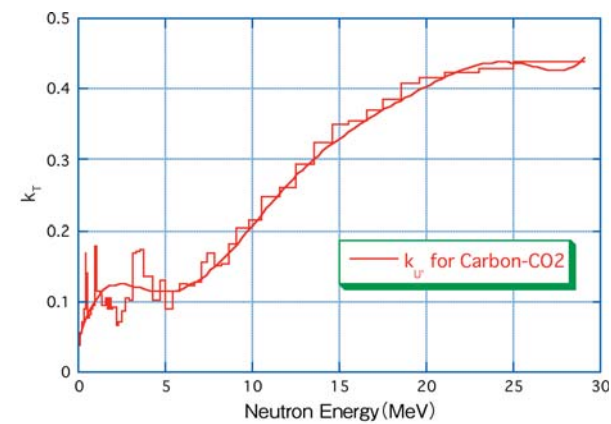


図3: B-G非成立空洞に対するU型電離箱の中性子線感度

B-G 非成立空洞に対する U 型電離箱の中性子線感度 k_U' を図 3 に示す。発生する二次荷電粒子には陽子のみ

を考慮して感度を計算した。中性子のエネルギーにより感度は大きく異なるから、中性子のエネルギースペクトルのデータが必要となる。曲線を多項式で近似し、その回帰係数は表 2 に与えてある。回帰曲線の高次元の回帰係数の取り扱いに対しては、前述した T 型電離箱の場合と同様の注意が必要である。

$Y = M0 + M1*x + \dots M8*x^8 + M9*x^9$	
M0	0.043327
M1	0.093436
M2	-0.038241
M3	0.0068124
M4	-0.00058551
M5	2.6515e-05
M6	-6.1107e-07
M7	5.6492e-09
R	0.97537

表2: U型電離箱の感度 k_U' の回帰係数

対電離箱による線量測定の問題点

対電離箱でガンマ線量を評価する場合、ガンマ線の量にもよるが、線量評価誤差は 40% 以上にも達すると言う報告もある⁴⁾。対電離箱でのガンマ線量に対する評価精度は低い。比例係数管、G-M 計数管、TLD によりガンマ線量を決定するのも一法である。

中性子線によって発生する二次荷電粒子は陽子のみを考慮して感度を計算したが、実際にはこれより重い粒子も影響する。しかし、その割合などが判明しない。便利なのにこれらは阻止能の比として影響するから、粒子の違いによる効果は比較的小さいと考えられる。但し、計算は理論的には正確に評価できるが、実際の計算には近似過程が多く含まれている。

写真 1 に一例として市販の対電離箱を示す。但し、それぞれの対電離箱のうち T 型電離箱のみの写真である。上から型番(体積)製作会社は IC-18(0.1cc)FWT、IC-17(1cc)FWT、33053 (1cc)PTW、T2 (0.53cc) Exradin である。



写真1: 市販されている対電離箱の一例

4. 治療線量に於けるトレーサビリティ体制

放射線の照射の代表である放射線治療領域の線量トレーサビリティ体制の確立や基準線量の供給には放医研が多大な役割をはたしている。1970 年 4 月の日本医学放射線学会評議員会において、放射線治療のための線量の統一の必要性とその対策としての標準センター設立の主旨説明が行われた。12 月には標準センター設立を推進するよう正式の許可があり、地区標準センター予定施設に基準となる線量計及びチェック線源の購入依頼状が発送された。1971 年 7 月の理事会で手数料など詳細が決定され、9 月の学会誌に北海道、東北北部、東北南部、北陸、関東、東京、中部、関西、中国、四国、九州の 11 カ所の標準センターで活動が開始された。その後関東、関西、九州にはそれぞれ 2 カ所のセンターを設置し、全部で 14 カ所で活動を行うことになった。標準センターはできたものの、1 次標準(国家標準)を各標準センターに定期的に供給するシステムがまだ完成していなかった。放医研の基準器となる線量計は電総研(現産総研)で年 1 回線量の依頼試験を行っていたが、電総研で全ての標準センターの依頼に応じる体制になかった。そこで 1976 年に標準線量研究会を組織し、年 1 回この研究会を開いて、この場で線量計の相互比較測定を行い、放医研の基準線量をセンターに供給した。

校正件数の増加やコバルト治療装置の減少に伴い、日本医学放射線学会の下での校正事業の継続は徐々に困難となってきた。そこで、財団法人医用原子力技術研究振興財団(以下、財団)が中心となって事業継続の方策について検討が行われた。その結果、本事業は医用原子力技術研究を推進・普及、振興するという財団の目的に合致し、財団の事業に該当するとして、日本医学放射線学会、日本放射線腫瘍学会、日本医学物理学会などの関係学会および放医研の協力のもと、財団が校正業務を事業として引き継ぐこととなり、新しい体制が 2004 年度よりスタートした。現在、校正には放医研の 111TBq の ^{60}Co 装置を使用している。昨年度 1 年間での校正線量計は 743 台、校正電離箱は 1297 件である。

財団での線量計の校正に関する問い合わせは(財)医用原子力技術研究振興財団、総務部、橋豪三、Tel.03-3504-3961、Fax.03-3504-1390、E-mail. BCF05034@nifty.com に連絡されたい。

基準電離箱の安定度

放医研では医療用線量標準センターとして活動してきた。特に、2 次標準のセンターとしての役目を担っているため、放医研で所有する 4 本の電離箱は産業技術総合研究所(産総研)の国家標準場(一次標準場)で線量の校正を毎年受けている。産総研に校正を依頼した線量計は、3 本のファーマ電離箱は応用技研製 c-110 型で、No. 2、No. 4、No. 114 と NPL Therapy Level Dosimeter の電離箱(2561)である。産総研での 20 年にわたる年 1 回の校正定数の変化から電離箱の安定度の評価を試みた⁵⁾。照射線量の平均値と標準偏差の結果は No. 2 (0.9686R ± 0.0034)、No. 4 (0.9403R ± 0.0024)、No. 114 (0.9245R ± 0.0023) と NPL (1.0815R ± 0.0035) であった。その結果全て安定度は標準偏差で 0.2 ~ 0.3 で保たれている。

フィールド線量計の安定度

電離箱線量計の安定度は基準ファーマ型電離箱の産総研での校正結果から、コバルトガンマ線に対して0.2%程度である。但し、この為には電離箱に維持・管理が重要であり、この精度を維持するためには測定に於いて温度気圧補正係数の正確な評価が必要である。組織等隔壁電離箱などフィールド線量計もほぼ産総研での校正と同程度の安定度が保たれていると考えられる。しかし、温度・気圧の安定度に十分な時間を割くなどの測定が重要である。従って、一般のフィールド線量計の安定度は0.3~0.4%と考えられる。但し、この条件を満足するためには線量計の維持・管理や測定時における細心の注意が必要である。

5.おわりに

中性子線に対する効果を判定する基準となる吸収線量の測定には、照射を対称とした領域では電離箱により算定される場合が多い。ここでは中性子とガンマの両方である全線量を測定する方法と、対電離箱により別々に測定する方法を述べた。中性子線治療などの混合場では、ガンマ線量が少なく(全線量の5%~10%が多い)、RBEも中性子が大きい。このような場合、全線量で線量を評価した方が便利であることもある。T型とU型の対電離箱に対する中性子とガンマに対する感度を計算した。しかし、感度の式からも判るように空洞ガスや壁材などの阻止能比を計算する必要がある。中性子とTE電離箱との相互作用に於て二次荷電粒子は反跳陽子が大部分を占める。しかし、他の荷電粒子が零ではない。また、U型電離箱ではカーボンイオンなど重イオン線も影響する。計算では阻止能比であると言うことで陽子のみで近似した。

空洞ガスは壁材の元素組成と等しくはないが、なるべ

く壁材に近い物質としてTEGとCO₂が用いられている。しかし、ガスフローの安定度や利便性から、空気を電離ガスとして用いることがある⁶⁾。この場合は均質電離箱にはならないから、使用法に注意する必要がある。一般的にはT型とU型の均質対電離箱とすることを推奨する。

U型電離箱で特に注意すべき点はイオンの再結合損失の補正である。詳細は除くが文献を参考にされたい。

参考文献

- 1) ICRU report 45: Clinical Neutron Dosimetry Part I: Determination of Absorbed Dose in a Patient Treated by External Beams of Fast Neutrons, International Commission on Radiation Units and Measurements, 7910 Woodmont Avenue, Bethesda, Maryland 20814 U. S. A., 1989
- 2) 平岡 武: 速中性子線線量の絶対測定、医用標準線量、第5巻、第1号、11-20,2000
- 3) Caswell, R. S.: Deposition of Energy by Neutrons in Spherical cavities, Radiat. Res., 27, 92-107, 1966
- 4) Bichsel H., Eenmaa J., Weaver K.A., and Wootton P.: Dosimetry of mixed radiation fields, in Biomedical Dosimetry Symp., Vienna 10-14 March 1975, IAEA, 1975
- 5) 平岡 武、濱野 毅、荻生俊昭、福村明史、河野耕二: 中性子線量モニタの校正と線量安定性に関する検討、医用標準線量、第8巻、2号、33-39、2003
- 6) 平岡 武、荻生俊昭: 空気をガスとした対電離箱の感度特性—TEGとCO₂ガスとの比較—、医用標準線量、第9巻、第1号、27-35,2004

次号では(5)LETカウンターによる線質測定について説明する。

研究集会のお知らせ

分子イメージング研究シンポジウム2008 —飛躍を迎えた創薬・疾患診断研究—

平成17年に始められた文部科学省「社会のニーズを踏まえたライフサイエンス分野の研究開発-分子イメージング研究プログラム-」事業も今年で4年目を迎えました。PET疾患診断研究拠点である放医研、創薬候補物質探索拠点である理研は、これまで、PETを中心としたイメージング技術を利用し、創薬プロセスの変革や疾患診断・治療評価技術の開発を先導してきました。そして、平成20年6月には「マイクロドーズ臨床試験の実施に関するガイダンス」が制定され、PETなどを用いたマイクロドーズ臨床試験を行うための社会的な基盤が整えられました。こうした中、「ファースト・イン・ヒューマン」を実現し創薬パラダイム・シフトを起こすものとして、分子イメージングに対する期待は高まるばかりです。

そこで、今回の放医研・理研共催「分子イメージング研究シンポジウム2008」では、「飛躍を迎えた創薬・疾患診断研究拠点」と題して、さらなる進化をとげている分子イメージングの諸基盤技術を紹介すると共に、臨床研究に必要な規制科学・臨床倫理の観点からの議論も充実させ、分子イメージング研究の最先端を皆様にお届けします。

日時:2008年12月14日(日)~15日(月)

主催:独立行政法人理化学研究所

独立行政法人放射線医学総合研究所

後援:文部科学省、独立行政法人科学技術振興機構、神戸市、財団法人先端医療振興財団、日本分子イメージング学会、社団法人日本薬学会、社団法人日本化学会、社団法人日本医学放射線学会、日本薬物動態学会、日本磁気共鳴医学会、有限責任中間法人日本核医学会、有限責任中間法人医薬品開発支援機構

会場:神戸国際会議場メインホール

(兵庫県神戸市中央区港島中町6丁目9番1号)

参加費:無料

(但し、パネル懇談会は一般4,000円、学生2,000円)

参加申込:事前Web登録制

※プログラム等の詳細はシンポジウムWebサイトをご参照下さい。

<http://www.nirs.go.jp/news/event/2008/mi2008/>



大学の先生はアマチュア科学者なのか 市川 龍資

北京オリンピックにおいても、過去の多くの五輪大会におけるのと同様に数々の話題を提供した。

まず、ぼくとしてはマラソンの金メダル候補の野口みずき選手が体の故障で急きょ出場できなくなったのが残念だった。彼女はぼくのいた田舎町の田舎中学（彼女の頃は新制高校になっていた）の後輩になるので、少しばかりひいきにしていたからである。あんな小さな町からオリンピック選手が出ることすら珍しいのに、金メダルまで取ったのは稀有の事件であった。今はそんなことはないが、ぼくが在学していた頃は、超軍国主義の田舎中学で老陸軍大尉がいて、全校生徒の前で「自分は天皇陛下の命により、この学校に派遣された配属将校である」と大声で宣言し、校長先生より威張っていた。天皇陛下を持ち出せば誰も対抗できない時代だったのである。日本の軍隊は政府の支配下にはなく、天皇に直属していたのである。

北京オリンピックの柔道で、谷本あゆみさんが金メダルに輝いたのも世の人の注目を集めた。ぼくには別の理由で古い記憶がよみがえった。それは谷本さんが表彰台に立った時、半白髪の大男が出てきてメダルを彼女の首にかける役目をした。その人物の名をヘーシンクとテレビが呼んでいた。それを聞いて、ぼくは東京オリンピックの時のヘーシンクだと気づいた。日本柔道は世界一だとぼく達は誰でも思っていたのに、オランダの選手ヘーシンクが日本選手を押し込んで破り、金メダルをとった。皆残念だったが、それは仕方がないとして、ヘーシンクに関して、その五輪出場資格に疑問が提起された。論議の要点は、ヘーシンクはオランダで柔道塾を開いて人々に柔道を教える営業活動をしている人であり、つまり柔道を職業として収入を得て生計をたてていたことだった。これは常識的にみて、プロでありアマチュアではない。五輪出場資格はアマチュアに限られている。この事が問題になったのである。これは各国で論議を呼んだ。くわしくは知らないが、結局オリンピック委員会で、ヘーシンクは柔道を教えて収入を得ているが、教師はアマチュアと認めるという裁定が下された。これには批判も多かつ

たが、ぼくにはどうでもよかった。そのヘーシンクが北京五輪でメダル配りの役をやっているのを見て昔を想い出したのである。

東京オリンピックの頃はぼくはウィーンとモナコとの間を仕事の関係でしばしば往復していた。モナコにはIAEAの海洋放射能研究所（今は海洋環境研究所と改称されている）があり、この研究所は同じく地中海に沿って距離も近いイタリアのフィアスケリーノという町にある海洋放射能の研究所と親しくしていた。毎年のように両方の研究者達が集って勉強会をして情報交換していた。

東京オリンピックの直後、たまたまぼくはモナコにてこの勉強会に顔を出した。昼休みの時間、近くの田舎レストランの屋外のテーブルで、その頃モナコ研におられた深井麟之助さんとフィアスケリーノ研のベルンハルト氏とぼくと三人でランチをとった。そしてワインを飲みながらヘーシンク論議をした。田舎の店だからパリの高級レストランと違って、雰囲気も親しみ易い。ウェイトレスの娘さんはワインのコルクを抜くのに、簡単なねじ式コルク抜きを差し込んで、ワインの瓶を両脚にしっかりとさみ、ズバッと一気にコルクを引き抜いた。見事な技の持ち主だった。ぼくは、ヘーシンクは柔道の教師だから柔道でお金をもらう職業をしていてもプロではなく、アマチュアだと裁定した五輪委員会を話題にした。単にワインの肴にしかただけのことである。どうでもよいことだった。ぼくは、ヘーシンクは柔道を教えることで収入を得ているのがプロでなくアマチュアというなら、大学教授は学生に教えて収入を得ているのはどう考えればよいかと言った。ヘーシンクがアマなら、大学教授もアマチュア科学者であって、プロフェッショナル科学者ではないことになると言った。ベルンハルトはなるほどそうだと賛成した。深井さんはプロの科学者はわれわれだということになると言った。皆大笑いになった。明るい地中海の陽光とかすかな潮風の香りのする心地よい昼どきだった。

ICHIKAWA RYUSHI(元放医研科学研究所)

編集後記

読者の皆様、今月号の企画と内容はいかがでしたでしょうか。多くの方々にご参加頂き、盛会のうちに終了した二つのイベントを中心に特集を組みました。7月9日に東京で開催した一般講演会「第10回重粒子がん治療と放射線防護」、9月12日に当研究所で開催した公開講座「第13回緊急被ばくと重粒子がん治療」の講演内容を基に、講師の皆様にご執筆をお願いいたしました。また好評のシリーズ「放射線の知識（中性子）」については今回も紙面を割り当てました。基礎的勉強にご活用下さい。

放射線医学総合研究所の第2次中期計画はちょうど半分の2年と6か月が経過しました。研究も佳境に入り成果もどんどん出てきています。その還元の意味も込めて「放射線科学」を使って我々の活動内容を毎月タイムリーに社会へ発信したいと思っております。今後ともより充実した紙面となるよう努めますので、引き続きご愛読頂きますよう宜しくお願いいたします。(YS)

次号予告

特集 「放医研が開発した航路線量計算システム“JISCARD”」

-飛行機で被ばくする線量を知らせるプログラム-
放射線防護研究センター 宇宙線被ばく研究チーム
保田 浩志



国際機関活動報告 原子力の平和利用 (Atoms for Peace) としての“アイソトープと放射線技術の利用” —国際原子力機関—

国際原子力機関 ヒューマンヘルス部核医学課
渡辺 直行

放射線の知識 中性子線照射に関する物理的な側面 (5) LETカウンターによる線質測定

基盤技術センター 研究基盤技術部
高田真志、平岡 武

《編集委員会》

委員長	酒井 一夫		
委員	内堀 幸夫	金澤 光隆	石井 伸昌
	白川 芳幸	小橋 元	立崎 英夫
	高田 真志	菊池 達矢	鈴木 敏和
	玉手 和彦	長谷川純崇	杉森 裕樹
	加藤 博敏	神田 玲子	
事務局	岡本 正則		

放射線科学

第51巻 第10号

2008年10月15日発行

《編集・発行》

独立行政法人 放射線医学総合研究所
〒263-8555 千葉市稲毛区穴川4-9-1
電話 043(206) 3026 Fax.043(206) 4062 Eメール info@nirs.go.jp
http://www.nirs.go.jp

(禁無断転載)

放射線科学
Radiological Sciences

第51卷 第10号

2008年10月15日発行 《編集・発行》独立行政法人 放射線医学総合研究所
〒263-8555 千葉県船毛区次川4-9-1
電話 043(206)3026 Fax 043(206)4062



<http://www.nirs.go.jp>