



Photo Masaki Abe

## *Index*

放射線治療の進歩 ～いかにして前立腺がんを治せるようになったか～……塩見 浩也	1
放射線について – 改めて先人に学ぶ – ……………青山 伸	6
[コラム] 19th Column 【コロナと喫煙】……………中川 恵一	11
医療法施行規則の改正は現場にどのような インパクトを与えていますか？……………山口 一郎、藤淵 俊王	12
[放射線道場の喫茶室] 第4回 夢の放射線治療 ……………鴻 知己	17
[サービス部門からのお願い] 2019年度「個人線量算定管理票」のお届けについて ……………	19

# 放射線治療の進歩

## ～ いかにして前立腺がんを治せるようになったか ～



塩見 浩也\*

### はじめに

放射線治療は、手術、抗がん剤と並ぶがん治療の三大治療法の一つである。しかし、日本では放射線治療に対する期待は手術に比べて小さいものであった。日本は、世界唯一の被爆国であることで、放射線に対して悪いイメージを持っていることも原因の一つであろう。また、日本では胃がんなど放射線が効きにくいがんが多かったことも事実である。実際、30～40年前までの放射線治療では、治癒できる疾患は限られ、姑息的治療が主な使用法であった。このため他に治療法がなくなり、放射線治療しか残されていないような場合に、「仕方なくやる治療」という程度の認識で放射線治療が行われることもあった。いまだにこのような認識をもつ患者がいるだけでなく、医師のなかにも同様の認識をもっているものもある。

しかし、一方で近年では「ピンポイント治療」、「先進医療 粒子線治療」などが報道、インターネット等で広く認知されるようになり、放射線治療について過大な期待をもつ患者も多い。放射線治療は、手術、抗がん剤治療と同じく得意不得意があり、限界もあるが、先人の努力によりこれらの限界が引き上げられ、少ない副作用で高い効果が得られるようになってきている。本稿では、最近の放射線治療事情につき、放射線治療技術の向上により劇的に治療法が変化した前立腺がんの外部照射を例に解説を行う。

### 前立腺がんとは

前立腺は男性にのみ存在する生殖機能に関わる

臓器で、膀胱の出口にあり尿道を取り囲むように存在している。この前立腺に発生するがんが前立腺がんである。前立腺がんは、がんのなかでは、比較的ゆっくりと進行するとされているが、進行するとリンパ節や骨などに転移する。

日本での前立腺がんの罹患率はずっとあまり高くなかったが、近年もっとも増加しているがんの一つである。日本での罹患数は、1980年は4千人程度であったが、2000年には2万人程度、2019年には8万人程度と予測されている。死亡数も2019年には年間1万3千人程度に達すると予測されている<sup>1)</sup>。前立腺がんがこれほどまでに増えている原因としては、日本人の高齢化、食生活の欧米化などが考えられているが、PSA (Prostate Specific Antigen: 前立腺特異抗原) 検査の普及により発見されやすくなったこともある。PSAは前立腺から分泌される物質で、前立腺がんのマーカーとして使用される。米国では1980年代後半からPSA検査が普及し、前立腺がんの早期発見が可能となった。これにより、進行がんや転移がんで見つかることが減り、根治を目指した治療を受けられる患者が多くなった。

### 前立腺がんの治療

現在(2020年)では、前立腺がんの治療方法として、「手術」、「放射線治療」、「内分泌(ホルモン)療法」、「PSA監視療法」など、さまざまな方法がある。治療法は、がんの進行度、悪性度、全身状態、年齢などを考慮し選択する。経過観察のみ行う監視療法は、進行が遅い前立腺がん特有の方法である。

\* Hiroya SHIOMI 彩都友誼会病院

がんが前立腺内あるいはその近傍に限局しており根治を目指す場合、手術または放射線治療が選択される。手術も近年の技術的進歩により、腹腔鏡やロボット手術など低侵襲化している。放射線治療にも、放射線を外部から照射する外照射だけでなく、小線源を用いた内部照射もあり、治療法は多岐にわたる。現在では、放射線治療は根治的治療として認められているが、そこに至るには長い歴史があった。

## 放射線治療を行う場合

がんの放射線治療の基本的な考え方は、がん周囲の正常組織への線量を抑えつつ、がんにはできるだけ多くの放射線を照射することである。多くの線量を照射すればがんを制御できる可能性は高くなると考えられている。

前立腺がんに対する放射線治療では、前立腺全体(場合により精嚢も含めて)に放射線を照射する。前立腺周囲には、直腸、膀胱、大腿骨などの正常組織が存在する。直腸、膀胱へ高線量が照射されると、粘膜炎や潰瘍となり、出血を起こすと下血、血尿となる。副作用が強い場合、人工肛門や尿路変更の手術が必要になることもある。大腿骨頭への線量が高くなると、大腿骨頭壊死、骨折を引き起こし重度の場合、人工関節などが必要となる。

前立腺には高線量を照射しつつ、副作用を最小限にするために、さまざまな工夫がなされてきた。

## 1980年ごろの放射線治療

1975年に発行された「放射線医学入門」(立入弘著)<sup>2)</sup>では、放射線治療に関する記述で、疾患を効果別に4つに分類している。1)放射線治療が外科手術より優れているもの(ホジキン病、喉頭がんなど)、2)放射線治療と外科手術が対等の価値をもつもの(乳がん、子宮体がんなど)、3)放射線治療を適応とはするが、姑息的な意味しか期待し得ぬもの(上咽頭がん、食道がん、肺がんなど)、4)放射線治療がほとんど効果を持たぬか、あるいはむしろ禁忌とされるもの(転移性腫瘍、前立腺がんなど)、である。当時は、手術の治療成績も現在よりも悪く、2)の手術と対等とされるものも、

多くは治癒困難であったと推測される。

前立腺がんは、4)の放射線治療の禁忌の扱いであった。PSA検査もなく、画像診断が未発達(CTが日本に初導入されたのは1975年)のため、肛門から直腸診により診断を行っていた。早期発見が困難で骨転移で発見されることが多かったため、もし現在の治療技術があったとしても、多くの場合は手術や放射線治療ではなく、ホルモン療法を選択せざるを得なかったと思われる。

放射線治療を行うとしても、前立腺の位置を同定することすら困難で、さらに、体内の深い位置にある前立腺に低エネルギー放射線では十分な線量を投与することも難しかった。また、この時代の放射線治療では、照射範囲も基本的には四角形で、手動で三角や丸の鉛ブロックを配置することで整形することもあった。このため直腸や膀胱を避けながらの照射はほとんど不可能であった。

## 2000年ごろ

PSA検査が普及したことで、前立腺がんの早期発見が可能となり、CT、MRIなど画像診断の普及により、がんの進展範囲も正確に把握できるようになった。放射線治療を行う際にもあらかじめCTによる計測を行い、前立腺の位置を正確に把握するとともに、治療計画コンピュータにより事前に正確な放射線の線量分布を計算できるようになった。

リニアックには、マルチリーフコリメータ(MLC)が装備され、これを用いることでコンピュータ制御によりターゲットに合わせた不整形照射野を簡単に作成できるようになった(図1)。三次元原体照射と呼ばれる、多方向からのターゲットに合わせた照射ができるようになったため、放射線の集中度が高くなった。その結果、放射線治療で前立腺がんの根治を目指せるほどの高線量を照射することが可能となった。

同時にこの時期には、定位放射線照射(Stereotactic Irradiation: STI = いわゆるピンポイント治療)や後述の強度変調放射線治療(Intensity Modulated Radiation Therapy: IMRT)、画像誘導放射線治療(Image-Guided Radiotherapy: IGRT)という新しい概念が次々と提唱され、放射線治療技術が飛躍的に向上することとなる。

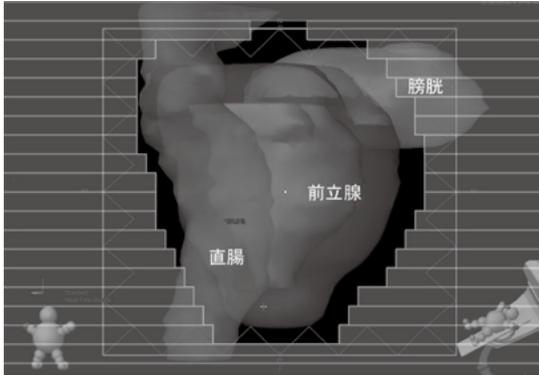


図1 マルチリーフコリメータ(MLC)の使用例  
中央部分が前立腺。MLCを調整することで形状に合わせた照射が可能となる。この角度からの照射では膀胱は、ある程度避けられるが、直腸へは照射されてしまう。

### 強度変調放射線治療 (IMRT)

コンピュータ制御によりMLCを制御し、多方向から強さや形の違う放射線を照射することで病巣部の形状と合致した最適な線量分布を得る照射方法(図2)。使用する線束が不均一な強度をもつ。照射方法を逆計算するインバースプランという最適化が用いられる。

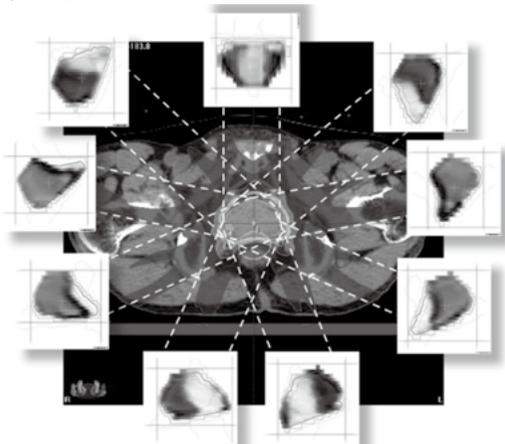


図2 前立腺がんに対するIMRTの例

この例では9方向から不均一な照射を行い、前立腺部に均一な線量分布を作成している。線量分布が直腸部分で逆凹型になり、直腸を避けて照射することができる。

### 画像誘導放射線治療 (IGRT)

照射直前あるいは照射中に医用画像を用いて照

射時の位置決め精度を高めるための技術。従来の放射線治療では、患者の皮膚にマジックペンでマーキングを行い、技師がこれをもとに位置合わせを行っていた。しかし、体内の臓器は日々位置を変えることもあり、位置精度の面で限界がある。IGRTでは、患者の解剖学的情報やマーカーから患者の位置を正確に計測することで照射マージンを小さくでき、正常組織への無駄な照射を大幅に減らせる。画像取得のためには超音波、X線、CT、MRIなどさまざまな方法が用いられている。

### 現在 (2020年)

前立腺がんに対する放射線治療では、IMRTが用いられることが一般的となっている。IMRTはターゲットに対して過不足ない照射が可能で、前立腺がん、頭頸部がん、脳腫瘍などに対してよく使用されている。なかでも症例数が多く、技術的にも比較的簡単な前立腺がん治療は圧倒的に多い。

前立腺がんに対して高線量を照射しても、IMRTを用いることで、大幅に副作用を減らせるという報告があり<sup>3)</sup>、また、日本国内でも2008年より保険適応となったことで、前立腺がんに対するIMRTは一気に普及した。

IMRT自体も進歩した。IMRTを行うためには不均一な線量強度で多方向から照射を行う必要がある。IMRTの初期には、MLCを用いていくつかの形状の線量分布を静的に作成し、同一方向から何度も照射することでこれを行っていた(step and shoot法)。このため治療時間が長くなるという欠点があった。その後常にMLCを動かしながら動的に不均一な照射を行う方法(sliding window法)が開発され、治療時間の短縮と線量分布作成の自由度が増した。さらに現在では、多方向から照射する代わりにガントリを回転させながら、同時にMLCを動かしつつ照射を行う方法(VMAT: Volumetric Modulated Arc Therapy)が主流になってきている。この方法では、1回の治療が2~3分で終了する。

IGRTも現在の放射線治療ではもっとも重要な技術の一つである。放射線治療では、あらかじめ位置的誤差を考慮に入れて照射を行う。誤差は、治療計画作成時と治療時との差や、治療中の体動な

ど患者側の要因、装置の照射誤差など多岐にわたる。前立腺は、呼吸性移動の大きい肺や肝臓、蠕動運動のある消化管などと比較すれば動きの小さい臓器である。それでも、直腸内の便やガス、膀胱内の尿量、心理的緊張による肛門付近の筋肉の収縮等により、1 cm以上も動く場合がある。治療計画を作成するときに、たまたま大きく動いた状態であれば、前立腺ではなく、周りの臓器ばかりが照射される可能性がある。IGRTを用いて、治療直前に前立腺の位置を計測できれば、誤差の少ない安全な治療となる。IGRTは、照射の直前に用いられることが多いが、治療時間が長い場合は治療中にも計測を行い修正しながら照射することもある。

このような技術に支えられ、前立腺がんに対する放射線外部照射は多様化している。通常は毎日1回ずつ30～40回程度の照射を行うが、最近では前立腺がんの状態によっては5～15回程度で治療が完結する方法もあり、治療期間も短縮している。

## 粒子線治療

2018年4月から前立腺がんや頭頸部がんなどが保険適応になったことで、陽子線や炭素イオン線などの粒子線を用いた治療も広く行われるようになってきている(図3)。粒子線治療の特徴はブラッグピークをもつことである。X線では、どの方向から照射しても1方向からの放射線のみでは、前立腺よりも周辺臓器への線量のほうが高くなる。このために、多方向からの照射が必要だった。

しかし、粒子線治療ではブラッグピークを前立



図3 陽子線治療 加速器室(シンクロトロン)  
大阪陽子線クリニック提供



図4 粒子線治療の線量分布

左右からの単純な2門照射であるが、ブラッグピークが前立腺部にあり、大腿骨への線量は低い。膀胱、直腸の線量も低く抑えられている。

腺に設定することで、少ないビーム本数で安全に治療を行える。陽子線治療による前立腺がんの照射例を示す(図4)。たった2方向、左右からの照射である。膀胱、直腸のみに着目すれば、X線でもこのような照射を行ったほうがよい線量分布といえる。しかし、X線でこのような照射を行えば、大腿骨への線量が高くなり大腿骨骨折などを引き起こす。粒子線治療ではブラッグピーク以外の部分の線量は低く、大腿骨への線量は問題のないレベルで抑えられる。単純な照射であるが、膀胱、直腸の線量を最小限に抑えることにより、副作用のさらなる低減が期待されている。

## 将来展望

このように、40年前には禁忌とされた前立腺がんの放射線治療が、現在では少ない副作用で根治を目指せる治療となった。同様に転移性腫瘍など以前は治療困難であった疾患も、IMRTやIGRT、定位照射を用いることで、現在では放射線治療の大変良い適応となっている。

最近の約40年間の放射線治療の進歩は物理技術的な進歩によるところが多かった。しかし、最近ではこれまでの発想とは全く異なるアプローチも注目を集めている。

## FLASH照射

現在の放射線治療では高性能化にともない、時間あたりの照射線量(線量率)も高くなる傾向に

あり、高性能の装置であれば1分間に20Gy程度を照射できる。一般に同じ線量を照射する場合、高線量率であるほど効果も副作用も強いとされている(線量率効果)。ただ、臨床的にはその差は軽微で、外照射においては線量率を考慮に入れて線量を増減するようなことは行われていない。

FLASH照射とは、その名の通り「フラッシュ」のように瞬時に照射を行う照射方法である。前述の20Gy/分という線量率は、0.3Gy/秒程度であるが、FLASH照射では40~100Gy/秒の超高線量率で照射を行う。このような超高線量率で照射を行うと、腫瘍に対する効果はそのままに、正常組織へのダメージは低減されるという報告がある<sup>4)</sup>。現在は、動物実験の段階であるが、最近ではFLASH照射の予想外のメリットが次々と報告されている。

FLASH照射によって、大きなマージンで照射しても正常組織へのダメージは軽度になり、治療自体も瞬時に終了してしまうのであれば、これまでの照射技術は不要になるのかもしれない。今のところ、詳細なメカニズムは不明であるが、今後の研究が待たれるところである。

### 免疫放射線療法とアブスコパル効果

放射線治療は、基本的には局所治療であり、効果も副作用も照射した範囲のみに生じる。しかし、ごく稀に治療部位から離れた位置にある腫瘍が縮

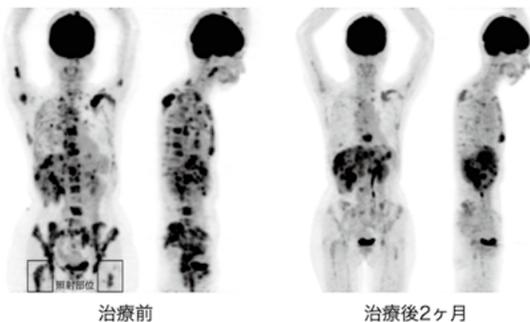


図5 筆者の経験したアブスコパル効果の例 (PET画像)

44才女性 乳がん 骨転移多数。除痛のため両側大腿骨に放射線治療を行った。2ヶ月後のPETで多くの部分の腫瘍縮小を認めている。他に新たな治療は行われておらず、アブスコパル効果によるものと思われる。胸骨、肝の転移は増大している。他部位とは性質の異なる腫瘍であった可能性がある。

小することがある。このような現象をアブスコパル効果という(図5)。1953年にMoleらにより初めて命名されたが、発現頻度が極めて低いことからほとんど注目されてこなかった。しかし、近年免疫チェックポイント阻害薬が登場し、放射線治療と併用することで、アブスコパル効果が高確率で発現することが報告され注目を集めている<sup>5)</sup>。

いまのところ、その機序や、どのような治療パラメータが関係しているのかなど、不明な点は多いが、放射線が全身免疫活性化のきっかけになる可能性がある。全く新しい放射線治療の利用方法となるかもしれない。

### おわりに

この40年の間に放射線治療は技術的な進歩により、真の意味でのがん治療の3本柱の一つになった。禁忌と言われた前立腺がんさえ、現在では完治させるのが当たり前になっている。次の10年、20年の間に、さらなる進歩があるかもしれないし、現在では思いもよらないような新しい放射線の使い方が発見されるかもしれない。放射線治療の未来は明るい。

### 参考文献

- 1) 国立がん研究センターがん対策情報センター <http://ganjoho.jp>
- 2) 立入弘 著：放射線医学入門 第9版 1975年 南山堂
- 3) Zelefsky MJ, Zvi Fuks, Laura H, et al.: Clinical experience with intensity modulated radiation therapy (IMRT) in prostate cancer. Radiat Oncol, 55, 241-249, (2000)
- 4) Favaudon V, Caplier L, Monceau V, et al: Ultrahigh dose-rate FLASH irradiation increases the differential response between normal and tumor tissue in mice. Sci Transl Med, 6, 245ra93, 2014.
- 5) Postow, M.A., et al, N. Engl. J. Med., 366, 925~931, 2012.

### 著者プロフィール

1994年、大阪大学医学部医学科卒。医学博士。スタンフォード大学、クリーブランドクリニック等を経て彩都友誼会病院、都島放射線科クリニックなどで診療に従事 大阪大学放射線治療学教室研究生 専門は高精度放射線治療、臨床放射線物理。

# 放射線について－改めて先人に学ぶ－

青山 伸\*

## はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災とその津波による東京電力福島第一原子力発電所の事故は、未曾有の被害を及ぼした点で起こしてはならない事故であった。備えの至らなさに加え、適切とは言えない対応が重なったことにより、原子力への支持が著しく失われ、安全の確認に膨大な資源と時を費やすこととなった。さらに、事故により放出された放射線・放射能が個人と社会にどのような影響を及ぼすのか、どのように対処すべきかについても一貫した取組が見られず、ここでも専門家不信、科学者不信に至った。助ける側にあるべき人も助けられる側になった大災害に起因することとは言え、着実に乗りこえなければならない。

地元のみならず全国的に多くの人々を襲った放射線についての不信を大まかに整理すると次のとおり。

- ① UNSCEARやICRPといった放射線防護に関係する機関は、核兵器や原子力、放射線の利用を進めようとしている側で、中立ではなく、影響を過小評価するのではないか。
- ② 例え少量であっても放射線の影響は重大ではないのか。

もともと取っ付きにくい放射線について、あれこれ違うことを言われ、判らないというより騙されているのではないかの思いを深くしてしまうと、健全な科学の発展と適切な防護の実現に負の影響を及ぼすと考えられる。本稿では、現在の専門家の考えから遡って、取組の発展過程を再考するとともに、今起きている科学と規制の課題とは何かについて考えるきっかけを提供したい。

## 放射線の理解：放射線審議会の基本的考え方

放射線審議会は、放射線障害防止に係る技術的基準の斉一化を図るには、関係行政機関との共通理解を形成することが前提としている。2018年1月にまとめた「基本的な考え方」では、次の項目を含む基本的事項を示している。

### ① 国民生活と放射線

▶ 自然界に放射線・放射性物質は広く存在している。我が国では、自然放射線<sup>\*1</sup>からの被ばくとして、一人当たり実効線量<sup>\*\*2</sup>で年間平均2.1mSv<sup>\*\*3</sup>を受けると評価されている。大地放射線の地域差や食習慣の違い等によって、一人ひとりが受ける線量には幅がある。

#### ※1 自然放射線

(中略) 自然放射線の源は、宇宙線、大地からの放射線、体内の放射能およびラドンガスである。自然放射線は地域や場所により変動し、高度の高い地域や高緯度地域では宇宙線の寄与は大きく、その地域の大地に含まれる放射性物質の量により大地からの放射線の寄与は変わる。世界には、中国の陽江、インドのケララ、イランのラムサルなど、日本より2倍から10倍ほど自然放射線が高い地域がある。中国やイ

ンドにおける疫学調査などから、これまでのところ、がんの死亡率や発症率の顕著な増加は報告されていない。

#### ※2 実効線量

ICRPにより定義されている防護量の一つで、人に対する放射線防護の目的のみに用いられる線量。防護量には実効線量と等価線量がある。ある臓器の等価線量(Sv)は、臓器平均吸収線量に臓器あるいは組織が受けた影響の放射線の種類による違いを考慮するための放射線加重係数を乗じて得られる。実効線量(Sv)は、さらに、臓器あるいは組織の組織加重係数を乗じて全身被ばく相当に換算した線量である。実効線量では、外部被ばくによる影響と内部被ばくによる影響を同等に扱うことができる。これらの量は標準人ファントムと計算モデルを用いて算出するもので、実際に計測することができない。

#### ※3 年間平均2.1mSv

公益財団法人原子力安全研究協会、「新版 生活環境放射線(国民線量の算定)(平成23年12月)」、157頁より

▶ また、国民生活や社会的活動に貢献する放射線利用として医療放射線を代表とする人工放射線<sup>\*\*4</sup>がある。医療では、(中略)かなり高い線量を照射する行為もある。これは、放射線によって多少の有害反応が生じ

\* Shin AOYAMA 弊社 特別顧問

たとしても、疾患の治療あるいは症状の緩和というメリット<sup>\*5</sup>の方が大きいと考えられているからである。

※4 人工放射線

人間の活動により造り出された放射線。(以下略)

※5 メリットとデメリット

従来、放射線防護の考え方は、リスクや便益、コストといった用語を用いて説明されてきた。しかし、(中略)本文書内では、可能な限り、メリット(特定の個人あるいは集団にとって有益なこと)あるいはデメリット(メリットの逆)といった一般的な用語を用いることとした。

②放射線の人体への影響

▶放射線被ばくによる健康影響は、放射線防護の観点から確定的影響(組織反応)<sup>\*6</sup>と確率的影響<sup>\*7</sup>に大別される。確定的影響には、しきい線量<sup>\*8</sup>と呼ばれるしきい値があり、特異的に感受性が高い個人を除いて、それを超える被ばくがない限り発症することはない。他方、確率的影響は、低線量域の影響が明確でないため、線量がゼロでない限りリスク<sup>\*9</sup>(がんや遺伝性影響の発生確率の程度)はゼロではないと放射線防護体系では見なしている(LNTモデルについては後述)。具体的には、がんと遺伝性影響<sup>\*10</sup>が確率的影響と考えられており、それ以外はすべて確定的影響に分類される。なお、確率的影響は、実験科学上の根拠を基にした生物反応ではなく、放射線防護体系を構築する上で創出された考え方であることに注意すべきである。

※6 確定的影響

(中略) 確定的影響は、しきい線量があり、しきい線量を超える大きな線量を被ばくした場合には影響の重篤度が増大するような影響をいう。臓器・組織を構成する細胞の細胞死に基づく影響である。

※7 確率的影響

(中略) 確率的影響は、しきい線量は無く、線量の増加に伴って影響の発生確率が増大するような影響をいう。

※8 しきい線量

しきい線量は影響が現れる最低の線量をいう。ICRPは、2007年勧告において、全身ガンマ線被ばく後の成人の臓器および組織に関わる影響の1%発生率(放射線感受性には個人差があるため、個人ではなく集団における発生率)と死亡に対する急性吸収線量のしきい値の推定値を更新し、取りまとめている。

確定的影響のしきい線量の単位については、物理的な線量単位であるGy(吸収線量)で表すのが慣例である。(以下略)

※9 リスク

一般的には、「危害の発生確率およびその危害の程度の組合せ」と解釈されている(ISO/IEC Guide 51)。一方、放射線防護分野では、国際放射線防護委員会(ICRP)が1950年代にリスク概念を導入して以来、「ある特定の有害な結果の確率」、より端的には「がん・遺伝性影響の発生や死亡の可

能性」の意味に用いてきた。これは、ICRPが目指す放射線防護とは、「組織反応が防止され、かつ確率的影響のリスクが容認できるレベルに制限されるように、電離放射線への被ばくを制御する」ことを意味するからである(ICRP 103, para B4)。

※10 遺伝性影響

放射線の影響が被ばく者本人ではなく子孫に及ぶ影響。(中略) ショウジョウバエやマウスの実験では放射線による遺伝性影響が証明されているが、これまでの広島・長崎の原爆被爆生存者をはじめとする疫学調査では人では遺伝性影響は確認されていない。

なお、ICRPでは、遺伝性影響をより慎重に取り扱う観点から、マウスの実験データを基に遺伝性影響のリスクを推定し、それらの値は生殖腺の組織加重係数に反映されている。

▶確定的影響のうち、最も低い線量で生じる可能性があるのは、男性の精子数低下に伴う一時的不妊と、妊娠初期の被ばくによる胚死亡・奇形発生であり、いずれも、しきい線量は100mGy<sup>\*11</sup>程度と推定されている。(以下略)

※11 しきい線量を記載する上での留意事項について

男性の一時的不妊および妊娠初期の被ばくによる胚死亡・奇形発生のしきい線量は、それぞれ睾丸および胚・胎児の吸収線量である。しきい線量を示す場合、死亡と罹病の別、罹病にあっては対象となる臓器および組織を明確にする必要がある。

▶確率的影響の一つであるがんについては、広島・長崎の原爆被爆生存者をはじめとして、様々な集団に対する疫学調査が行われている。多くの調査において、線量とともに罹率・死亡率が増加することが確認されているが、およそ100mSv以下の、いわゆる低線量における影響の有無について<sup>\*12</sup>は、現在の科学的知見からは明確になっていない。(以下略)

※12 100mSv以下の、いわゆる低線量における影響の有無について

ICRPは2007年勧告において、「がんリスク推定に用いる疫学的方法は、およそ100mSvまでの線量範囲でのがんのリスクを直接明らかにする力を持たないという一般的な合意がある。」との見解を示している。

▶遺伝性影響についても、原爆被爆者の子どもや小児期に放射線治療を受けた患者の子ども等に対して疫学調査が行われているが、これまでに遺伝性の疾患が増えたというヒトでの証拠は得られていない。

▶放射線防護では、確定的影響の発生を防止し、確率的影響のリスクを合理的に減少させ容認できるレベルに抑えることを目的とする。

③放射線防護の前提としてのLNTモデル

▶がんおよび遺伝性影響については、しきい線量の存在が判明していない。そこで、放射線防護を考える上

で、低線量域の線量反応関係として、LNT (Linear Non-Threshold) モデル<sup>※13</sup>を仮定として採用している。これは、線量に比例して過剰リスクが増加することを仮定した統計モデルである。

※13 LNT モデル

ある一定の線量の増加はそれに正比例して放射線起因の発がん又は遺伝性影響の確率の増加を生じるとする線量反応モデル。直線しきい値なし仮説ともいう。

▶低線量域におけるLNTモデルは科学的に証明された真実として受け入れられているものではなく、線量とリスクの関係を直線近似で表すものであるが、放射線防護の施策はこのモデルに基づいて展開される。ICRPは、低線量域での放射線防護に係る「慎重な基礎 (prudent basis)」としてLNTモデルを採用している。このアプローチは、ICRPのみならずIAEA、世界保健機関 (WHO) 等の国際機関においても基本となっている。(以下略)

▶LNTモデルは精緻な予測モデルではなく、とくに低線量における不確かさが大きいため、わずかな線量を多数の人々が受けた状況において、LNTモデルを用いて被ばくにより増加が見込まれるがんや遺伝的疾患の症例数を計算することは避けるべきである。

▶LNTモデルを採用する限り、いわゆる安全と危険の境界を定めることはできない。健康影響の有無ではなく、影響発生の可能性を定量的に評価し管理するリスクベースの考え方が必要になる。

上記に関する補足

①自然放射線

我が国の平均年間実効線量とされている2.1 mSvの出

典である公益財団法人 原子力安全研究協会、「新版 生活環境放射線 (国民線量の算定) (平成23年 (筆者注: 2011年) 12月)」には、1992年 8月に刊行された旧版があり、そこでは年平均1.5mSvとされている。旧版と新版の違いは、経口摂取される食品のうち、主に魚介類に含まれるポロニウム-210などの評価が進んだことによる。

世界の自然放射線については、原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) の2008年報告が最新で、平均の年実効線量で2.4mSvとされている。これらの比較を表1に示す。

UNSCEARの報告では、算出方法や定義に若干の変化があるものの、1988年から、1993年、2000年、2008年と4回にわたり、2.4mSvと確認されている。この間の算出方法や定義の変化については、多田順一郎氏の解説「実効線量を理解するために」(Isotope News2014年6月号Tracer) が詳しい。

UNSCEARが最初に出した1958年報告から1962年、1966年、1972年までは、生殖腺、骨細胞と活性骨髄の3組織が重要と捉えられ、吸収線量が評価されていた。1977年には肺全体が加えられ、それぞれ概略年平均1 mSvに相当する100 mrem程度の数値が示されていた。

1982年には、個別組織・器官の被ばくから身体全体の線量を算出する実効線量当量が導入され、年平均2.0 mSvとされた。1988年に値が20%大きくなったのは、人口の緯度分布を取り入れたこと、室内のγ線についての空気吸収線量の評価が向上したこととラドン-222の崩壊物質の短寿命核種が室内調査により明らかになったことによると示されている。

高線量地域としては、1958年報告からインドのケララとブラジルのガラパリが挙げられてきたが、2008年報告

表1 我が国と世界の平均年間実効線量

線源/形態	生活環境放射線 (1992年)	新版 生活環境放射線 (2011年)	UNSCEAR 2008年報告		
	平均年間実効線量 (mSv)		典型的な線量の範囲		備考
吸入 (ラドンガス)	0.59	0.48	1.26	0.2-10	幾つかの住居では線量はよりはるかに高い。
外部 (大地から)	0.38	0.33	0.48	0.3-1	幾つかの場所では線量はより高い。
経口摂取	0.22	0.99	0.29	0.2-1	
宇宙放射線	0.29	0.3	0.39	0.3-1	緯度とともに線量は高くなる。
合計	1.5*	2.1*	2.4	1-13	かなり大きな人口単位で10-20mSvを受ける。

\*比較のため数字をまるめている。

ではガラパリの記載がない。都市化と人口移動により線量が下がり、高線量地域ではなくなったとみられる。

UNSCEARでは、福島第一原子力発電所の事故対応もあって、年間の公衆被ばくを更新していないが、2019年に着手を決定している。早期の成果を期待したい。

②人体への影響

放射線利用のデメリットは人体への影響である。放射線は、1895年のレントゲンによるX線の発見、1898年のキュリー夫妻によるラジウムの発見以来、直ちに透視、疾病の診断・治療をはじめ様々な場面で適用が試みられ、1896年にはX線障害の発生病例が、1900年にはラジウムによる障害が報告されている。

時間・距離・遮へいの防護3原則は、米国でX線実験室を開設し、自らX線皮膚炎を患ったウォルフラム・フックスにより、実に1896年に提唱されている。1913年のドイツ・レントゲン協会による施術防護のガイドライン以降、各国で防護の動きがあり、1928年には国際放射線医学会議において、国際放射線防護委員会(ICRP: International Commission on Radiological Protection)の前身である国際X線・ラジウム防護委員会(IXRPC: International X-ray and Radium Protection Committee)が国際標準策定のために設立されている。IXRPCとICRPにおける防護体系の発展過程については、ロジャー・クラーク氏らの解説ICRP Pub.109がある。大まかな発展の流れを表2に引用する。

90年にわたる放射線防護の歴史は、必要に応えるための格闘の歴史と言っても良い。X線、ラジウムを扱う従事者を守るため、どうすれば線量を下げられるか、どの線量まで浴びても良いか、から始まり、原子爆弾や核実験の放射性降下物(フォールアウト)による被ばくに対する公衆と環境の防護、原子力利用と事故への対応、医療の高度化などで課題は尽きることがない。

とくに、原子爆弾、核実験、ビキニでの第五福竜丸の被ばくなど従事者ではない公衆の被ばくについては、我が国や核兵器国のみならず世界の大きな課題であることがUNSCEARの1958年報告にも如実に表れている。

表2 ICRP勧告の歴史的展開

分析された因子	初期の勧告	これまでの勧告	現在の勧告
検討された被ばく状況	医療における従事者の被ばく	すべての従事者の被ばく、次いで人類のすべての被ばく	すべての種のすべての被ばく
防護すべき対象	人の防護のみ	人が防護されているので環境も防護されていると仮定	環境が防護されていることの実証
放射線被ばくについての既知の影響と防護の目的	確定的影響を防止する	加えて確率的影響を避ける	加えて非標的効果の可能性を認識する
防護の倫理的基礎	「生命を尊ぶ」という美德の倫理	功利主義的な倫理に重きを置く	義務論的倫理学をより強調する
防護方法	実的な防護方法の助言	線量限度の適用、次いで最適化の適用	線量拘束値とリスク拘束値の下での防護の最適化

結論の冒頭に採択された全般的結論は次のとおり。

54. 人類の電離放射線による被ばくは、現在のところ、主に自然線源、医療・産業活動および核爆発による環境汚染から生じている。産業、研究、および医療応用では、人口の一部のみが被ばくするが、自然線源および環境汚染では人口全体が被ばくする。(中略) 委員会は、人々の集団への照射を最小限にするように設計されたすべての措置は、人間の健康のためになると結論付ける。そのような措置には、一方では平和使用のための医療、産業その他の応用に起因する不必要な被ばくの回避と、他方では核兵器の爆発による環境汚染の停止が含まれる。委員会は、これらすべての放射線源を効果的に管理するための検討には、委員会の所掌の外にある国内での決定と国際的な決定が含まれることを認識している。

この結論に至る議論の過程では、2案が提案されそれぞれ否決されている。ソビエト社会主義共和国連邦が提出し、チェコスロバキアが修正してアラブ共和国連合が賛成した「核実験と熱核実験を停止し、委員会が核兵器の試験を直ちに停止すべきとの結論を得られるようにすべき」との案と、インドが提出し修正を受け入れ、ブラジル、フランス、日本、米国も賛成した「有害な影響の故に世界規模での汚染レベルの全般的な上昇を許容することは好ましくなく、そのような上昇を引き起こすいかなる活動も避けるべきとの結論に、報告書の物理的・生物学的データは導く。核実験は、現状ではそのような上昇をもたらす主たる発生源である。」との案である。

科学的な知見を取りまとめるUNSCEARにおいては、設立当初から科学を超えた課題(トランスサイエンス)の議論に耐えうる科学的成果の提供に、社会的重圧と知識の欠乏感の下で取り組んでいたと推察される。

③LNTモデル

放射線の遺伝性影響については、線型の線量応答関係(LNT: Linear Non-Threshold)が「確実」と1950年代には考えられていたが、体細胞への影響については、1958年のUNSCEAR報告では、次のように「あるかもしれない」とされていた。55(a) どんなに少量の放射線でも有害な遺伝性影響の原因となり、また体細胞への影響もあるかも知れない。ICRPが明確にLNTモデルを採用したのは、1966年に公表されたPub.9の勧告

であり、同時に線量限度も導入されている。(文頭括弧は段落番号)

(7)(中略) 委員会は、放射線防護の目的には、線量効果関係が直線的であるという仮定、および、線量が積算的に作用するという仮定にかわる実際的な代案を持っていないし、しきい値が存在しないとする仮定、および、すべての線量には完全な加算性があるという仮定は正しくないかもしれないということは知っているが、このような仮定によって危険を過小評価することになるおそれはないことに満足している。現在のところ、これに代る何らかの仮説を立てるのに役立つ知見は得られていない。

(37)(中略)。公衆の個々の構成員および集団の計画された被曝に対しては、「線量限度」(Dose Limit) という用語の使用を委員会は勧告し、制御されていない線源からの計画されない被曝に対しては「対策レベル」(Action Level) という用語を勧告する。

(43) 公衆の構成員に対する線量限度を放射線作業員に対して定められたものよりどれだけ低くすべきかは、一般に容認されるような数値では量的に表すことのできない諸要因によって決められる。しかし、計画の目的には、公衆の構成員の線量限度を放射線作業員の値の1/10に決めることが適切と考える。現在この点についての放射線生物学上の知見が十分でないので、この係数の大きさにはあまり生物学的意義をもたせるべきではない。

Pub.9に至るまでの間には公衆の許容線量をはじめ、様々な展開があった。例えば、先程のUNSCEARの1958年報告検討の前提となったICRPの1954年勧告の1956年改定では、原子力利用に伴い廃棄物処分や放射性物質の放出が考えられることから、配偶子の受ける被曝について自然放射線のレベルに制限することが慎重としている。

全体的な合意ができるまで、自然バックグラウンドに加えてすべての線源から配偶子が受ける放射線量を、現在地上で居住している地域の自然バックグラウンドのオーダーに制限することが慎重である。

低線量におけるLNT仮説(線量応答として直線しきい値なしを仮定する)については、従来から、誤りであるという意見がある。フランス科学アカデミーや米国保健物理学会がこれを表明している。低線量の被曝は健康に良いというホルミシスや見つかっていないもののしきい値はあるとの説がある。LNT仮説は妥当と確認されていない。また近年では、米国科学アカデミーの原子放射線の生物影響報告(BEAR 1956, 1960)は、ねつ造、陰謀との説がみられるが、あたらな模様だ。

一方、放射線防護のシステムを構築する上でLNTモデルを採用することは、実務を過たないという点で優れた選択と考えられる。

## まとめ

ICRPの2007年勧告では、X線とγ線については同じ低線量でも分割して小さな線量で被曝する場合は、一度に被曝する場合に比べて影響は半分になる、すなわち線量・線量率効果係数(DDREF)を2とみなすという1990年勧告で導入された考えを踏襲しているものの、さらに、検討を進めている。同様に2007年勧告では、組織荷重係数のうち生殖腺については1990年勧告に比べ大幅に小さな値を採用している。原爆被災者のデータから遺伝性影響が明らかになってきたことによる。リスク評価に継続して取り組んでいる証左である。

最後に、ICRPの2007年勧告の作成にあたり、ロジャー・クラーク委員長(当時)が提唱した防護対策水準(PAL: Protective action levels)について紹介する。ラドンを除く自然放射線は、年間実効線量1 mSv程度なのでこれを基準に上側の20 mSv、100 mSvと下側の0.01 mSvを目安の拘束値として、線量の「程度」に応じてどのような対応をするかを決めて行くというものである。線量限度の峭壺に嵌まっていた浅学非才の身としては、PALの哲学が理解できず、強硬に反対して非を感じなかったが、今、福島事故からを想うとき、統合された「程度」の世界の必要性を強く感じている。(図1) 幸い、国際放射線防護学会(IRPA: International Radiation Protection Association)のロジャー・コーツ 会長が関連の試みをまとめているとのこと、公表され次第、紹介したい。

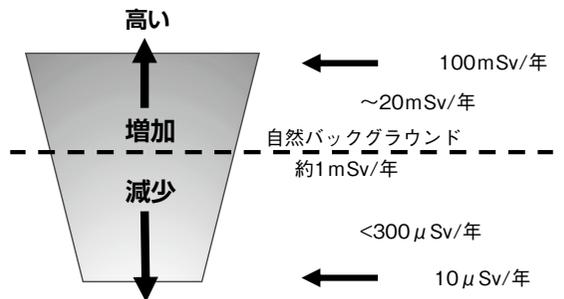


図1 防護対策水準(PAL)の考え方と拘束値



中川 恵一

東京大学医学部附属病院

## コロナと喫煙

世界中がコロナウイルスに恐怖しています。5月18日の時点で、日本での感染者数は16,161人で、768人がこの感染症で亡くなっています。世界では、480万人超の人が感染して、総死亡数は約32万人にも上っています。

日本での感染が始まった2月、私も季節性のインフルエンザ程度かと、たかをくくっていました。まさか、こんなことになるとは全く想像だにしていませんでした。自分で膀胱がんを見つけたときと同様、晴天の霹靂です。

このウイルスが怖いのは、感染力や致死率が高いだけではありません。感染しても8割方が軽症あるいは無症状ですむ反面、重症化する人も一定の割合でいる点です。このウイルスの「ロシアブルーレット」的な面が私たちを不安に駆り立てます。

さらに怖いのは、この病気で亡くなる場合、発症から死亡までが非常に早い点です。イタリアのデータでは平均でわずか8日間。日本中に衝撃を与えた志村けんさんの場合でも、発症から10日あまりで帰らぬ人となりました。

しかも、隔離された状態で治療が行われるため、家族や友人と最期の時間を過ごすこともかかないません。人生に、突然の終幕が降ろされることになるわけです。さらに、火葬場で故人の骨を拾うことも困難です。

志村けんさんもこのウイルス感染で亡くなりました。志村さんの死をめぐり、見過ごせないのがたばこの影響です。たばこというと、がんや脳卒中、心筋梗塞などのリスクとして知られますが、新型コロナの重大リスクであることもわかってきました。今回はがんを離れて、たばこと新型コロナの影響について考

えます。

その根拠となるのが、2月に米医学誌ニューイングランドジャーナルに発表された論文です。中国の感染者1,099人を調査し、そのうち重症化したのは173人で、喫煙者が16.9%、以前に喫煙していたのが5.2%でした。

こうした人と非喫煙者を比較すると、重症化リスクは約1.7倍になります。人工呼吸器や集中治療室を必要としたり、亡くなったりするリスクは約3.2倍に上りました。

志村さんは2016年に肺炎を患うまで多いときで1日に3箱を吸うヘビースモーカーだったと報じられています。当時65歳。仮に少なく見積もって、20歳から45年間、40本を吸い続けたとすると、1日の本数と喫煙年数の積で示される喫煙指数は1,800。700超でがんや慢性の肺疾患のリスクが高くなりますから、志村さんが肺疾患を持っていたとしても不思議はありません。

慢性肺疾患の人は、新型コロナ以外のウイルスや細菌の肺炎を起こしやすく、重症化しやすい。しかも一度発症すると、再び肺炎になりやすいこともわかっています。こうしたことが重なって、志村さんは負の連鎖により、命を失ったと思えてなりません。

スペインやイタリアなど欧州でも、新型コロナによる死者が増えましたが、欧州のECDC（欧州疾病予防管理センター）も「喫煙者が新型コロナウイルスに感染すると、重症化リスクが高い」と発表。WHOも同様の警告を鳴らしています。

この4月から飲食店は原則禁煙ですが、既存店の一部では喫煙が可能ですが、しかし、喫煙スペースは密閉、密集、密接が重なる「3密」の場そのもので、リスクを助長することになります。その点からも禁煙が大切です。

# 医療法施行規則の改正は 現場にどのようなインパクトを与えていますか？

山口 一郎\*1、藤淵 俊王\*2

改正医療法施行規則が2020年4月に施行され、医療安全に放射線安全の観点が追加されました<sup>1)</sup>。COVID-19への対応でも放射線診療の重要性と難しさが改めて認識されたところだと思いますが、皆様の周辺で放射線安全に役立つ変化はありましたでしょうか？

## 医療用放射線の利用に係る安全な管理のための研修の在り方について

今回の改正により、医療スタッフへ医療用放射線の利用に係る安全な管理のための研修が義務付けられました。「医療被ばくの基本的な考え方」、「放射線診療の正当化」、「医療被ばくの防護の最適化」、「放射線の過剰被ばくその他の放射線診療に関する事例発生時の対応等」、「放射線診療を受ける者への情報提供」という項目に対して、それぞれ関係するスタッフに定期的な研修が求められています。医療機関で放射線を取り扱うスタッフは、医師、看護師、診療放射線技師をはじめ様々ですが、全ての職種が教育機関で放射線防護の専門教育を受けてきたというわけでもありません。研修担当者は日々進歩する診療への対

応や他の医療安全に関する研修など多くの業務がある中で、効果的にかつ効率的な研修の実施が求められます。医療機関の規模によっても関連する検査の種類は大きく異なり、また職種によっても放射線防護教育の受講経験は様々です。そのため一概に定型化した研修というのは効果的でないのかもしれない。

研修を受講する医療スタッフは、そもそも医療被ばくのどのようなことに興味や関心があるのか、自分自身の職業被ばくには関心があっても、放射線の専門用語が並ぶだけで疲弊されてしまうかもしれません。しかし今回の研修は、医療業界全体の医療放射線の意識を改革し質を上げるチャンスであり、関連する多くの職種を巻き込み協働で作業することが今後の放射線診療の発展につながりそうです。

## 患者を守る前に医療従事者自身を守る必要はないですか？

この医療法施行規則の改正は医療安全の視点から患者側の安全の確保が目指されています。一方、患者さんを守るためには、医療従事者も守られる必要があるでしょう。医療

\*1 Ichiro YAMAGUCHI NPO法人放射線安全フォーラム

\*2 Toshioh FUJIBUCHI 同上

関係の皆様の同僚では放射線防護はうまく  
いっているのでしょうか？

厚生労働省の「眼の水晶体の被ばく限度の  
見直し等に関する検討会」では、医療従事者  
の受ける線量が相対的に高いことや医療分野  
での放射線管理の課題が議論されました<sup>2)</sup>。

このため、2018年5月に開催された第91回  
日本整形外科学会では「整形外科医の医療被  
曝の現状と対策」と題するシンポジウムが開  
催されています。このシンポジウムでは、皮  
膚がん罹患し、労災認定を受けた整形外科  
医が「整形外科医が医療被曝により皮膚癌に  
罹患した経験－労災認定から手術、職場復帰  
まで－」と題した講演を行いメディアでも取  
り上げられていました。

このシンポジウムを企画なさった青森県立  
中央病院の伊藤淳二先生は、「整形外科の職  
業被曝」を特集とした臨床整形外科55巻2号  
を編集され、この号では放射線安全に関する  
興味深い記事が掲載されています。「整形外  
科医の超局所慢性被曝による染色体異常」で  
は、整形外科医の方々の職業被ばくによる染  
色体異常が報告されています<sup>3)</sup>。「整形外科  
医の末梢血リンパ球では、二動原体染色体お

よび環状染色体などの不安定型染色体異常が  
他の医療職者よりも高頻度に認められ」、「さ  
らに、安定型染色体異常である転座も高頻度  
であった」とのことです。また、「整形外科  
医師における放射線職業被曝に関する実態調  
査－自己記入式アンケート調査からの検討」  
では、整形外科医の職業被ばくによる放射線  
障害の状況などが調べられており、慢性放射  
線障害として、手指の爪の変色、変形を来し  
ている割合は37名/110名と高く、そのうち約  
6割が右母指に変化を来し、4名ががん切除  
術を受けていたことが明らかにされていま  
す<sup>4)</sup>。図に示すように照射野の中に術者の指  
が入ることも想定されるようです。歯科放射  
線診療での口内法撮影でフィルム保持を援助  
なさる歯科衛生士の方でも、このような局所  
被ばくが考えられることもあるでしょう。

整形外科医の方々に現れたこれらの放射線  
障害は放射線部門からの警告にもかかわらず、  
それを聞き入れることがなかった整形外科医  
の無関心によりもたらされたのでしょうか？

「低侵襲脊椎手術における職業被曝の実態  
と対策」では、診療放射線技師への啓発の必  
要性が述べられています<sup>5)</sup>。「照射時間によ

図につきましては著作権の都合により割愛しておりますのでご了承ください。  
本誌印刷版をご覧ください。

#### 図 整形外科のIVR中に術者の指が照射野に入っている例

手外科におけるX線透視下手術の例が示されており、「対象が小さいため術者の手指の直接被曝が避けられない」と説明されています。

出典：石垣大介. 手外科手術における手指職業被曝と対策. 臨床整形外科. 55(2), 149-153. 2020.

る被曝量の相違は、医療従事者の意識によって最も差が生じやすい因子の1つで「術者のみならず放射線技師への啓発や、各手技における具体的な照射方法の指示など綿密なコミュニケーションも大切である」とされ、「術者のみならず助手や看護師、また放射線技師などにおいても、放射線被曝の認識が大切であることを強調したい」とまとめられています。「X線透視による脊椎外科医の職業被曝の実際 未固定遺体より学ぶ」でも診療放射線技師への啓発の必要性が述べられています<sup>6)</sup>。

このように整形外科医からは放射線部門のコミュニケーション活動の問題点が指摘されています。2020年度から、放射線診療を行う医療機関では医療放射線安全に関する研修が義務づけられるようになりました。原子力災害後の放射線に関する研修は、福島県内で保健師、臨床心理士、コミュニケーターと地域の方々で作り上げられ、参加者の気持ちを動かし、かつ楽しめる放射線学習会（必要に応じ

て年齢別の定量的なリスク推計も利用され、機能していましたが、それらと同様に、参加者に満足を与えるものになっているのでしょうか<sup>a)</sup>？

「眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会」では、日本放射線技術学会の研究班のデータを元に医療機関の部門別・職業別の放射線被ばく状況が議論され、内視鏡室の看護師で線量が高いことが改めて認識されました。患者のケアに献身的である場合には、頭頸部の線量計による計測では一月間で10mSvに達することもあるようです<sup>b)</sup>。皆様の職場ではいかがでしょうか。医療安全部門の看護師の中にはIVR（Interventional Radiology）に従事した経験を持つ方もおられますので、放射線の研修の企画に関して、ぜひ、医療安全部門ともご相談頂ければと思います。

---

### 看護学生は放射線に関する教育にどう反応するか？

---

厚生労働省の第2回 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会では、内視鏡室に勤務する看護師の眼の水晶体の被ばく線量の実態調査の結果が示されました。その結果では内視鏡室の看護師では半数が年間20mSvを超える眼の水晶体の等価線量となっていました。この結果を看護師や看護学生はどう受け止めるのでしょうか？

国立保健医療科学院での医療安全に関する研修で放射線を扱う際には、医療従事者のデータも示しますが、放射線のことが苦手な看護師でも自分の結果と比べて関心を持って見て頂いています。講義での観察では看護学部 of 学生も同様に衝撃を持って受け止めており、患者のケアに貢献したい看護師の気持ちの葛藤を

a 都内で行われた例です。

[https://ndrecovery.niph.go.jp/?record\\_id=1156](https://ndrecovery.niph.go.jp/?record_id=1156)  
保健福祉職員向け原子力災害後の放射線学習サイト



b このような曝露が続くと電子スピン共鳴法を用いた線量推計法であるin vivo EPR tooth dosimetryでも生成されたラジカルが検出可能になると考えられます。

[https://ndrecovery.niph.go.jp/trustrad/invivo\\_EPR/](https://ndrecovery.niph.go.jp/trustrad/invivo_EPR/)



思いやり、悩む看護師に対して放射線安全管理スタッフが適切に援助しているか危惧されていました。医療放射線防護連絡協議会が開催した第41回「医療放射線の安全利用フォーラム」でも会場の整形外科医から医療機関での放射線安全対策への懸念が呈されていました。

さて、放射線に関わるあなたは放射線に曝露する業務に懸念を持つ同僚に貢献できていますでしょうか？

---

### 患者とのコミュニケーションでさらに工夫は必要でしょうか？

---

日常の臨床での意志の決定は容易ではないでしょう。日本診療放射線技師会の関係者の方々から頂いたご意見をご紹介します。放射線診療に関して、診療放射線技師の方々からも、「それが本当に必要な検査であるのか疑問に思うことがある」、「医師の検査オーダーに対して必要か疑問を感じることはあるが、最終責任は医師にあり、技師として線量管理を適切に行いたい。」「無駄な検査、目的に対し過剰な検査プロトコルの選択がある。」「当院ではDRL（診断参考レベル：Diagnostic Reference Level）2015を逸脱した線量設定が高くなっている古い装置があるがなかなか更新されない。」といったご意見を頂いています。

放射線リスクへの対応に関しても、「病院施設での統一見解ができていない。」「診療放射線技師も個人見解の差があります。」「被ばく線量におけるリスクモデルより余命損失期間を算出できますが、医療被ばくで用いることが適切か判断に迷います。」「院内で共有する情報はありません。共有（国レベル）できるリスク情報・認識が欲しいです。」「検

査を受ける前の段階で、患者の意思決定に診療放射線技師が関わるのは、ケースによってはできると思います。例えば、CT検査による胎児被ばくについて医師や患者から求められた場合の線量推計。」「行為の正当化は医師が行うべきだと思います。医師が適切に判断できるような情報（線量、リスクなど）を提供したいと思います。」「検査目的から他のモダリティーを選択すべき事例や造影CT検査でも動脈相を追加した方が良い事例など経験した。」などの意見が寄せられています。

チームとして機能するための取り組みが求められますが、この中で患者とのコミュニケーションも重要となるのではないのでしょうか。

---

### 患者として貢献できそうですか？

---

医療サービスを利用する側では、この課題にどのように貢献できるのでしょうか？第5回医療放射線の適正管理に関する検討会では、患者会側から、以下の意見が述べられていました。

#### ○大井参考人

「大井です。先ほどの説明の中でフットスイッチといろいろあったと思うのですが、患者さんが被ばくするのは、動けば撮影回数がふえて、ふえてくるという問題があると思うので、それをどう抑えるかということの一つだったと思うのです。ただ、先生方や技師の方たちが中に入られると、またそれも被ばくすることになったりする。イギリスのNICEなどでは医療を評価していこうということで、国民も参加してAll.Canというプロジェクトの中では、例えば子供たちが動かないでいられる方法はないかということで、

CTの中にフィルムでジャングルの絵を書いたりして、子供が楽しんでその時間を過ごせるようにしようとか、違った形の工夫に取り組まれて、そこに国民の目線が入ってくる、子供の目線が入ってくるということがあると思うので、患者の被ばくをできるだけ抑えていく、あるいは医療者の被ばくを避けていくということの中で、ぜひそういった、もっと総合的な議論の中で検討をいただけたらと思いました。」

国民の目線を入れていくという観点では、日本診療放射線技師会の放射線被ばく相談員講習会のフォローアップセミナーでは患者会側から医療機関が患者に示す資料に関していくつか具体的な提案がありました。ご興味のある方は、こまえアレルギーの会にお尋ねください<sup>6</sup>。医療放射線防護連絡協議会では第39回「医療放射線の安全利用」フォーラムで、「医療放射線安全の基本であるコミュニケーションの充実のため、患者さんが「もらって嬉しい」説明文を作成します。」との内容のワークショップを開催しています。皆様の係わりが、医療放射線の利用をよりよいものとしていくのではないのでしょうか。

このような患者への対応の質の改善を図ることを目的とした医療機関における体制整備の観点では、診療報酬の検討が必要との意見も日本診療放射線技師会の研修会では寄せられていました。放射線管理の観点から、放射線治療病室加算や画像診断管理加算<sup>3</sup>がこれ

までに制度化されています。医療機関での放射線管理をより充実させるために、診療報酬に関してさらなる検討は必要でしょうか？

## 謝 辞

本原稿の作成にあたり日本診療放射線技師会の放射線被ばく相談員分科会と日本放射線公衆安全学会の協力を得ています。

## 参考文献

1. 厚生労働省：医療法施行規則の一部を改正する省令(厚生労働省令第21号). 2019
2. 厚生労働省. 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 報告書. 2019
3. 船尾 陽生, 石井 賢. 低侵襲脊椎手術における職業被曝の実態と対策. 臨床整形外科 55(2) 143-148. 2020.
4. 浅利 享・他. 整形外科医師における放射線職業被曝に関する実態調査－自己記入式アンケート調査からの検討. 臨床整形外科 55(2) 121-26. 2020.
5. 船尾 陽生, 石井 賢. 低侵襲脊椎手術における職業被曝の実態と対策. 臨床整形外科 55(2) 143-148. 2020.
6. 山下 一太. X線透視による脊椎外科医の職業被曝の実際－未固定遺体より学ぶ. 臨床整形外科 55(2)133-141. 2020.

## 著者プロフィール



山口 一郎

1989年 大分医科大学医学部医学科卒業。東京都立墨東病院で臨床研修後、東京都江戸川区と足立区の保健所で勤務。国立公衆衛生院の専門課程を経て、1998年から国立公衆衛生院放射線衛生学部に勤務。2002年に組織変更に伴い国立保健医療科学院となる。放射線衛生に関する研究と研修に従事。

c <https://komaekubo1234.kokosil.net/ja/place/0001f00000000000020000003f0296>  
こまえアレルギーの会



放射線道場の喫茶室  
第4回

夢の放射線治療  
鴻 知己



1934年（昭和9年）、新設3年目の大阪大学（初代総長は長岡半太郎）理学部物理学科で八木秀次主任教授（八木アンテナの発明者；前任東北大工学部長；後に阪大理学部長、阪大総長、等）に請われ、京都帝大講師から転じた湯川秀樹講師は、原子核内で構成要素（陽子と中性子）が堅く結合しているのは、質量の大きさが当時知られていた2種の素粒子、電子と核子（陽子と中性子）の中間となる未知の素粒子が力の媒介（放出・吸収）を行っていることによるものとの構想を得、翌1935年「中間子論」として発表した。1947年に英人パウエルが宇宙線中にそれを見つけ、湯川は1949年のノーベル物理学賞を単独受賞した。1939年、32歳で京都帝国大学教授（理学部物理学科）に任じられていて、当時は滞米中（コロンビア大学@NY）であった。日本人として第1号となるノーベル賞受賞に、国中が歓喜に包まれた。敗戦後5年も経たない時期で、まだ連合軍の占領下にあったが、全日本人に勇気を与える快挙であり、このニュースによって多くの秀才が理論物理に集まってきた。政府（文部省）は、京都大学に全国大学の共同利用研究施設第1号となる「基礎物理学研究所（基研）」をつくって、その功績を称えた。

湯川の間接子（中間子）は、その後「パイオン」とか「 $\pi$ 中間子」と呼ばれるようになり、基礎理論の発展によって、今日では、 $u$ -クォークと $d$ -クォークの結合体が見做されている。加速器の開発・発展に伴い、パイオン（ $\pi$ ）の生成は次第に容易となり、電

荷を正・負・中とする3種類があることや、電荷の有無により寿命が異なることなど、本性の理解も進んでいった。今日では“身近な放射線粒子”の一つという感じになっている。

1954年にこの国が原子力の平和利用開始を決断したことで、旧帝大を中心とする主要大学に原子核工学/原子力工学の学科・専攻が整備され、またそれを補完する形で、原子核理学や放射線基礎医学の講座も続々と整備されていった。

1969年から東北大学の放射線基礎医学教室（栗冠正利教授）、1972年から東京大学の放射線基礎医学教室（岡田重文教授）で助教授職にあった坂本澄彦東北大学名誉教授（前・東北放射線科学センター理事長）は、度々の米国留学で、パイオンを使った放射線治療に関心を抱き研究対象としていた。

湯川は、1970年に定年を迎えたが、その4年後に前立腺癌を患った。自らが発見に関わったパイオンの医学利用に深い関心を寄せていたこともあり、愛弟子の中村誠太郎日大教授（湯川が東大物理学科で併任教授を務めていたときの助教授）に仲介を依頼し、坂本に話を聞いた。パイオンは、媒質透過に伴っての媒質へのエネルギー付与の特性（ブラッグ曲線）が、癌治療に極めて好都合なのであった。

自身の癌をパイオンで治療を試みたいと言う恩師の願いを叶えられなかった中村は、湯川と共に、有望と思われる若手研究者の発掘と研究の支援に乗り出した。読売新聞などの協

力を得て「中間子科学振興会」を立ち上げ、中村が会長を務めた。

助成を受けた“当時の若手”の中には、坂本澄彦（東北大）を含め、辻井博彦（北大）、中川恵一（東大）、近藤 誠（慶應大）、丹羽太貫（京大）など、今日高名を誇る先生方が名を連ねている。選抜派遣されたMD（医学博士）の先生方の数は延べで50をこえるといわれている。当時は、パイオン治療の研究が出来る施設は、800MeV陽子線形加速器を擁するアメリカ・ロスアラモスのLAMPF（ロスアラモス中間子物理研究施設）とスイス・チューリッヒ郊外のSIN（スイス原子核研究所：現・PSI=Paul Scherer Institute）だけであり、中川はLAMPFを選び、近藤はPSIを選んだ。辻井はスイスとロスアラモスの両方にそれぞれ1年留学した。また、坂本はアメリカ・カリフォルニアのLBL（ローレンス・バークレイ放射線研究所）やカナダ・バンクーバーに在る高エネルギー加速器研究所TRIUMF（三大学共同中間子研究施設を意味する）で研究を行っていた。丹羽はスタンフォード大学の新設SLAC（全長2マイルの世界最大の電子線形加速器）に学んでいる。

残念ながら、パイオン治療は、当時（1970年代初期）の期待に反して、放射線治療の主役とはなり得なかった。陽子を先ず高エネルギー（通常100MeV以上）まで加速して標的物質に当て、その反応生成物からパイオンを選択し、それを更に加速するなど“整形”するので、パイオン1個の“値段”（生産コスト）が高いものとなるが、それ以前の問題として、がん治療に必要とされる十分な数（ビーム強度）を得るのが絶望的に困難なのであった。加えて、制御の難しい中性子をバックグラウンドに多量抱え込むことも大きな問題で

あった。（陽子でなく）電子を介する生産法では、加速器は安くなるが、パイオンの収率は更に低下する。

湯川の死去（1981年）から38年を経た現在（2019年）では、専門誌が「放射線治療」の特集号を組んでも“パイオン治療”が取り上げられることはなくなっている。70年代に夢と思われた“究極の放射線治療”は、主役を“パイオン”から“重粒子”に替え、今日“先端放射線治療”の役を担っていると言える。

中・高・大学と慶應一筋の近藤は、1年の研修でパイオンに見切りをつけたが、辻井は帰国後北大から筑波大に転じ、KEKのブラスター・シンクロトロン500MeV陽子を利用する「陽子線利用医学研究施設」での施設長や、放射線医学総合研究所（元科学技術庁・現QST）の「重粒子医科学センター」で病院長やセンター長を務め、“重粒子治療”のパイオニアとなった。現在は（公益財団法人）医用原子力技術研究振興財団の代表理事・副理事長である。

古巣の大学病院で放射線治療も責任者を続ける傍ら、市民社会に向けての放射線やがんについての啓発活動（講演や執筆）にも情熱を燃やす、という点で中川と近藤はよく似たキャリアを歩んでいる。また、中川はカトリックの暁星出身であり、辻井も北大時代から仏教界の某団体で名を知られる存在であったと聞く。

因みに重粒子線の医学利用（がん治療）を世界で最初に提案したのはサイクロトロンを発明したローレンス教授（カリフォルニア大バークレー）の高弟R.ウィルソンといわれている。ウィルソンは後にフェルミ国立加速器研究所（FNAL）の所長を務め、そこでも加速器の医学利用に努めていた。

サービス部門からのお願い

## 2019年度「個人線量算定管理票」のお届けについて

平素より弊社のガラスバッジサービスをご利用くださりまして誠にありがとうございます。  
2019年度の「個人線量算定管理票」は、第4・四半期を含む計画使用期間（2020年3月）のガラスバッジの測定結果報告書出力時点で作成し、個人線量算定報告書と共にお届けしております。

この度、2020年7月1日現在で「個人線量算定管理票」をお届けしていない方に対しては、返却されていない計画使用期間に「未返却」と表示させていただきます、お届けする予定です。

お届けする時期は7月中旬を予定しております。

なお、使用期間の終了したガラスバッジがまだお手元にございましたら、早急にご返却くださいますようお願いいたします。



## 編集後記

- 新型コロナウイルス感染症に罹患された方々、ご家族・関係者の皆様には謹んでお見舞い申し上げますとともに、1日も早いご快復を心よりお祈り申し上げます。
- 新型コロナウイルスの感染拡大により、4月16日に全都道府県に対し『非常事態宣言』が発出されました。それに伴い私たちの生活は大きく変わり、『非常事態宣言』が解除されたとしても、しばらくは感染症対策を念頭に置いた生活を継続する必要があるようです。急な変化には戸惑いや抵抗を覚えますが、身の回りの人を守るためには、少しずつ慣れていくしかないのかもしれませんが、1日でも早く新型コロナウイルスの流行が収束することを願っております。
- さて、今月号の巻頭は彩都友誼会病院の塩見浩也先生に『放射線治療の進歩』と題して、前立腺がんの放射線治療の技術向上とその歴史について分かり易く解説していただきました。前立腺がんの罹患者数は2020年ごろを境に男性のがんでは胃がんを抜いて、1位になると予想されています。男性がん1位の治療の一つとして、ますます技術が進歩することを願うばかりです。
- 中川恵一先生のコラム『コロナと喫煙』の中で志村けんさんの死が取り上げられています。私の世代にとって志村けんさんは、おそらく生まれて初めて夢中になったお笑いタレントです。長きにわたりTVで見続けたその人の悲報は、私たちに衝撃を与えました。志村けんさんの死によって、新型コロナウイルスの“重篤化の速さ”を実感された方も多かったのではないのでしょうか。コロナとの闘いは人類が古くから直面してきた自然界からの挑戦に対する応戦であり、この戦いを通じて多くの犠牲を払いました。ですが、期せずして在宅勤務の普及などの副産物もあり、新たな進歩がみられた点については前向きにとらえたいと思います。最後に志村けんさんのギャグで締めたいと思います。だっふんだ!! (Y.N.)

## FBNews No.523

発行日/2020年7月1日

発行人/細田敏和

編集委員/新田浩 小口靖弘 中村尚司 金子正人 加藤和明 青山伸 河村弘

谷口和史 岩井淳 高橋英典 中本由季 廣田盛一 四方田章裕

発行所/株式会社千代田テクノ

所在地/〒113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル

電話/03-3816-5210 FAX/03-5803-4890

<http://www.c-technol.co.jp/>

印刷/株式会社テクノサポートシステム

—禁無断転載— 定価400円(本体364円)