

「医療分野における加速器・ビーム利用」

平成 21 年 2 月

平成 27 年 12 月改訂

日本原子力学会

加速器・ビーム科学部会

放射線がん治療の技術進歩について

世界有数の長寿国となったわが国では、がんがその死因の第一となっています。近年がん治療には手術による外科治療，抗がん剤による化学治療，放射線治療があります。正常組織への損傷が少なく，抗がん剤による副作用もない放射線治療への期待が高まっています。今後 4 人に 1 人にがんが致命症となり，2 人に 1 人が放射線治療を受けると言われています。がん治療に使われる放射線は，X 線，電子線，陽子線，炭素線，中性子線などがあります。一般的に，人体の健全な臓器が大量の放射線を受けると致命的な損傷を受けますが，最近の放射線治療では大量の放射線をがん細胞にだけ集中して照射する技術が進歩したため，健全な臓器の損傷を最小限にとどめ，がんの治療が行えるようになり，広範に普及するようになりました。

一般的に，放射線を吸収する線量の単位で，4 グレイ¹の放射線を人の健全な臓器が受けると 60 日以内に 50%の人が亡くなるという致命的損傷を生じるといわれています。放射線によるがん治療では，場合によっては数十グレイもの高い放射線量を使用することがありますが，がん細胞に集中させる技術が進歩したことにより，このような高い線量を使用しても安全に治療ができるようになり，がん治療に多大な貢献ができるようになりました。

粒子線治療の原理

人体が放射線を受けると，細胞の遺伝子が壊れ，正常な活動が阻害されます。つまり，放射線は人体にとっては基本的に有害です。その放射線をがんにのみ当てるようにして，健全な組織に当てないようにコントロールできれば，がん細胞のみを壊す，つまりがん治療することができるようになります。この技術について少し詳しく説明します。

人体に与える放射線の影響は放射線の種類によって異なります。放射線が直接遺伝子に衝突して原子分子レベルで組織を壊すことを直接効果といいます。また，放射線が生体中の水（H₂O）を分解して生成する，OH ラジカルという活性な分子が，化学反応で遺伝子を壊すことを間接効果といいます。陽子線や炭素線など重い粒子の放射線のことを粒子線といい，特に陽子よりも重い粒子を重粒子線と呼びます。X 線，電子線などの放射線は間接効果が支配的ですが，粒子線では直接効果の寄与が大きくなります。すなわち放射線の種類によって，人体へのエネルギー付与の分布が異なってきます。その様子を図 1 に示します。図 1 の縦軸は人体が吸収する放射線量

¹グレイとは，放射線に当たった物質が吸収するエネルギー量（吸収線量）を示す単位。1 グレイとは，物質 1 kg あたりに吸収された放射線のエネルギーが 1 ジュールであることをあらわす。

を示し、横軸は人体の皮膚からの深さを示しています。X線や電子線のエネルギーは基本的に人体の表層で多く吸収され、深くなると減衰していきます。これに対して、陽子線や炭素線などの粒子線は、エネルギーにもよりますが表層ではほとんど吸収されず、人体の特定の深さで集中してエネルギーを付与し、人体が吸収する線量はシャープなピーク²を形成します。照射する粒子線のエネルギーが高いほどそのピークも深くなります。図中に腫瘍の位置を矢印で示したように、このピークが丁度がんの位置にくるように粒子線のエネルギーを調整することにより、がん細胞にだけ集中的に放射線のエネルギーを吸収させることができます。したがって陽子線や炭素線などの重い粒子の放射線は人体の内部にあるがんの治療に適しています。図2に手術しにくいがんへの粒子線治療の結果の例を示します。

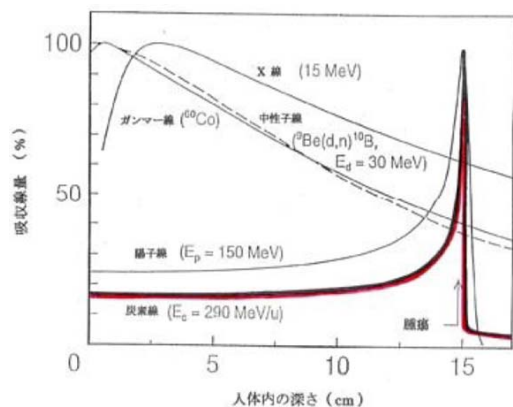


図1 放射線の種類による人体への影響の比較

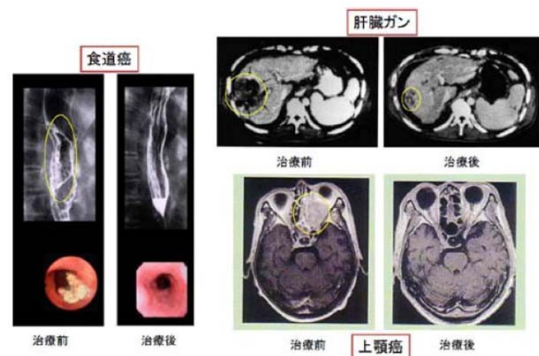


図2 粒子線による治療例

粒子線による放射線治療装置（シンクロトロン）

放射線治療の放射線は加速器で発生させます。加速器にもその形によって、直線で加速する、線形加速器（ライナック）の他、円周上で加速する、サイクロトロンやシンクロトロンと呼ばれる装置があります。陽子線によるがん治療にはシンクロトロンやサイクロトロンが、重粒子線の場合にはもっぱらシンクロトロンが使われます。その代表的な装置、放射線医学総合研究所の重粒子線（主に炭素線）加速用シンクロトロン（略称 HIMAC）の平面図を図3に示します。



図3 重粒子線シンクロトロン HIMAC 平面図

² ブラッグ[Bragg]ピーク

この分野の我が国の技術レベルは世界のトップクラスで、平成 27 年 12 月現在、我が国では稼働中の粒子線がん治療施設が 14 ヶ所にあります。これらの施設では既に数多くの治療実績が上がっていて、年間約 5000 名のがん患者が治療を受けています。原子力技術は医療分野でも大きな社会貢献を果していると言えます。

X線による放射線治療装置（ライナック）

X線による放射線治療にはライナックと呼ばれる線形加速器が使われています。がん治療用のX線ライナックは、現在、世界に1万台以上、日本に1千台近く普及しています。その外観と構造を図4に示します。赤い筒が加速管と呼ばれる機器で、ここでX線を発生します。その下流にマイクロリーフコリメータという自動位置決め装置があり、X線をがんの位置に正確に合わせて照射できるようになっています。予めコンピュータ断層撮影（CT；Computerized Tomography）でがんの位置を正確に確認した上で、治療計画をたて、複数の方向から異なる形のX線を照射して、がんの細胞に最大のエネルギーが吸収されるようにして、深部がんの治療を可能にしています³。

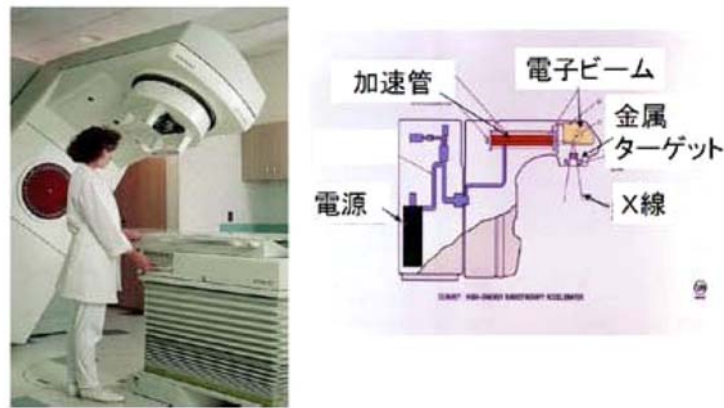


図4 がん治療用のライナック

ホウ素中性子捕捉治療（BNCT）法

予めがん細胞にのみ ^{10}B （ホウ素 10）を吸収させておき、これを熱中性子で照射すると、 $^{10}\text{B} + \text{n}$ （中性子） \rightarrow ^7Li （リチウム 7 原子核） $+$ α （アルファ線）という原子核反応が生じます。発生した数 MeV のアルファ線や ^7Li ががん細胞の DNA を破壊します。これらの高エネルギー粒子が体内で飛ぶ距離は 10 ミクロン程度であり、これは人間の細胞の大きさとほぼ同じであるため、がん細胞の核だけを破壊し、隣の正常な細胞にはダメージを与えないので、がん細胞だけを選択的に殺すことができます。この方法を BNCT（Boron Neutron Capture Therapy；ホウ素中性子捕捉治療法）と呼びます。正常細胞への影響が小さく、京都大学研究用原子炉 KUR や日本原子力研究開発機構の研究炉 JRR-4 で優れた治療成績が得られています。特に熱中性子よりも少々エネルギーの高い「熱外中性子」を利用することによって深部がんも開腹や開頭手術をしないで治療できるようになり、症例数が増加しています。今後ガントリーなどを使った多方向照射など、さらなる治療法の改善や最適化によって深部がんの治療成績がより向上すると期待されます。

³ 強度変調放射線治療（IMRT）という

注目すべきことは、BNCT 法では治療時に ^{10}B を吸収していない正常細胞には 10 グレイ程度の影響しか与えずに、正常組織内に浸潤した浸潤がんや、臓器に多く発生した多発がんなどの難治がんに対して治療効果が期待できるということです。今後、より良い ^{10}B 含有薬剤の開発ともあいまって、より広範な治療が期待されます。特に最初のがん治療で X線などの放射線治療を受けた後のがんが再発した患者に対しても、BNCT であれば前の治療で 50~70 グレイの高線量を付与された部位に対しても再照射が可能となり、再発がんに対する治療法としても期待されています。また、皮膚がんについては、深部細胞に殆ど影響を与える事なく治療できます。

ただし、この治療法はまだあまり普及しておらず、その理由のひとつは、これまで原子炉でしかできなかったためです。原子炉よりも小型の加速器で適切な量・質の中性子を発生できれば、病院での治療も可能になります。現在、京都大学原子炉実験所でメーカーが小型サイクロトロンを用いた中性子源を開発中であり、また他の方式の加速器を用いた開発研究も進行中です。なお、BNCT は粒子線治療用の加速器に比べて比較的小型の加速器で実現可能であるため、治療費は粒子線治療よりも低く抑えられると見込まれています。

放射線診断技術

放射線による診断技術も著しく進歩しています。最近、最も普及している診断装置は、X線 CT です。図 5 にその外観を示します。この装置では小型の X線発生装置と検出器が患者さんの体の周りをらせん状に回転して、内部構造の 3次元画像を作成します。最新の装置では回転とデータ処理が高速化し、秒単位で動く肺がんなどの動画像が得られるようになっています。これは 4次元 CT と呼ばれています。もうひとつ、最近注目されている新しい診断技術に陽電子放出トモグラフィ (PET ; Positron Emission Tomography)があります。これは陽電子 (ポジトロン) と呼ばれる放射線を発する放射性同位元素をブドウ糖に組み込んで患者さんに投与し、それを新陳代謝の活発ながん細胞に集中させます。そこで発生するポジトロンが生体中の電子と結合して出す、二つのガンマ線を検出器で測定して、がんの形を画像化するものです。PET で検出された 5 mm のがんの画像の一例を図 5 に示します。最近では X線 CT と PET を組み合わせた PET-CT という豪華な装置も開発されています (図 6)。なお、ポジトロンを放出する放射性同位元素は、サイクロトロンからのイオンビームを使って製造されています。



図 5 X線 CT 装置

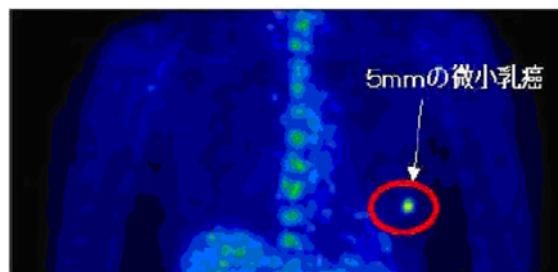


図 6 PET によるがんの画像例

医学物理について

ここまでご説明した放射線医療の科学技術は、新しい「医学物理」という分野を形成していま

す。医学物理は科学技術のみでなく、臨床現場での治療計画、治療の品質保証、安全管理等も含まれます。この業務を専門的に担う職種を医学物理士と呼びます。欧米では多くの医学物理士が臨床現場で活躍し、また研究機関・企業と連携して新科学技術の開発も行っています。アメリカではその数は 5 千人を超えています。日本では優秀な診療放射線技師が多数、臨床現場にて重要業務を担っていますが、欧米における医学物理士の役割までは与えられていません。日本の医学物理士はまだ 900 名程度です（認定医学物理士：861 名 2015.5.31 時点）。

アメリカでは約 40 年掛けて、医学物理の科学技術が自主開発され、その普及とともに医学物理士の人口も増えてきました。我が国における放射線医療をさらに発展させるには、医学物理分野の科学技術開発の発展が不可欠です。医療現場に医学物理士のような物理・工学に長けた人材が参入するよって、高度な医療器械、装置は真に医療側にとって使いやすいものとなります。X 線発生用の小型線形加速器、MRI を始め、日本発の医療装置は、かつて全世界を席卷していましたが、医療制度の制約もあってその後の開発に遅れをとり、欧米による改良品にとって替わられて来ています。この意味でも医学物理士の活躍が大いに期待されます。本学会でも関連の多くの科学技術成果が報告され議論されています。これらの成果が様々な形で、放射線医療に貢献できることを期待しています。

以上