



# 「原子カワンプoint」

あなたに伝えたい放射線の話 (12)

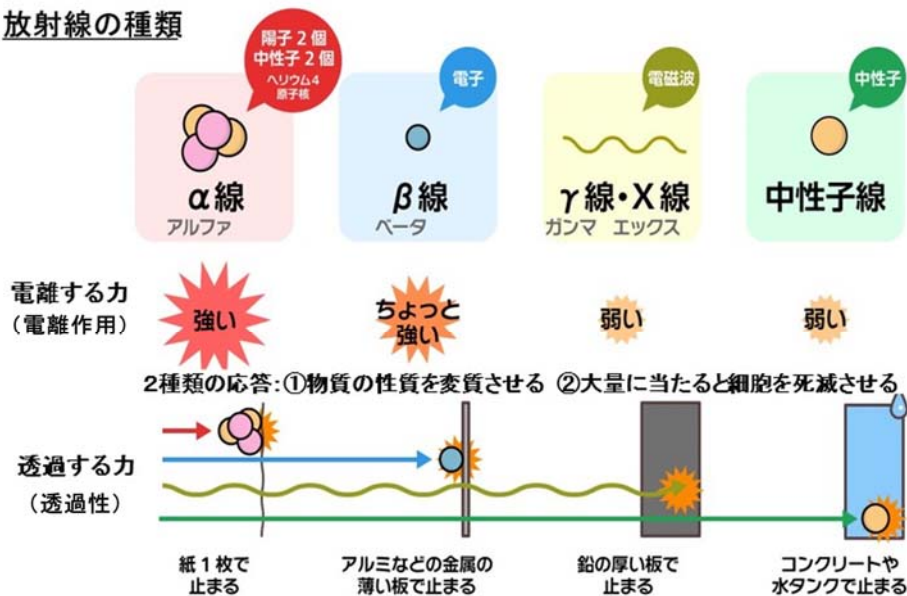
放射線の性質と利用例—その3：放射線の電離作用—

応答②「大量に当たると細胞を死滅させる」



- 生き物は、動物も植物も微生物も、すべて細胞からできています
- 細胞の中には、遺伝情報を記録している物質 (DNA) が含まれており、生きるために必要なタンパク質の生成や増殖する指令、を与える重要な役割を果たしています
- 放射線は少ない量であっても DNA を傷つけますが、大量になると DNA にできた傷の修復ができなくなり、細胞が死滅します
- この「細胞を死滅させる」放射線の性質が、さまざまな分野で利用されています
  - ①がん細胞の治療
  - ②注射器などの滅菌
  - ③ジャガイモの芽止め
  - ④害虫の駆除
- 上述分野で照射する放射線量は、数グレイ (Gy) ~数十キログレイ (kGy) の範囲です

## 放射線の種類



(参考:放射線いろいろ—Higgs Tan)



**放射線博士:** 上記の図を見てください。放射線は物質を通過する際、その物質を構成している原子にエネルギーを与えて電子を弾き飛ばします。これを電離する力 (電離作用) といいます。この力によって、①物質の性質を変質させる、②大量に当たると細胞を死滅させる、ことができます。

前回のコラムでは「物質の性質を変質させる」力について解説しました。今回は、大量の放射線が「細胞を死滅させる」力に注目し、人の健康に害を及ぼす「がん

細胞、ジャガイモの芽<sup>i</sup>、注射器などに付着した細菌、および害虫」を退治する武器として、放射線が有効に利用されている事例を紹介します。



リケジョさん：「放射線が当たると細胞が死滅する仕組み」について教えてください。



放射線博士：その前に先ず「細胞の構造」を見てみましょう。下記の図1を見て下さい。

すべての生物（動物、植物、微生物<sup>ii</sup>）のからだは、細胞膜につつまれた細胞からできています。そして、すべての生物は、少なくともひとつ以上の細胞から成り立っています。細胞とは生物の身体をつくる小さな部屋のようなものです。細胞に放射線が当たると、放射線、および細胞を構成する原子からたたき出された電子がそれぞれ、細胞の中をでたらめに走り回り、細胞内小器官（遺伝情報を含む「核」など）に傷をつけます。その結果、細胞が自己増殖できなくなったり、生体に不可欠なタンパク質をつくることができなくなったりして、最悪の場合には細胞が死んでしまいます。そして、この細胞死が起こる頻度に大きく影響するのが「放射線の強さ」です。細胞は、大量の放射線にあたると「死滅」するのです。

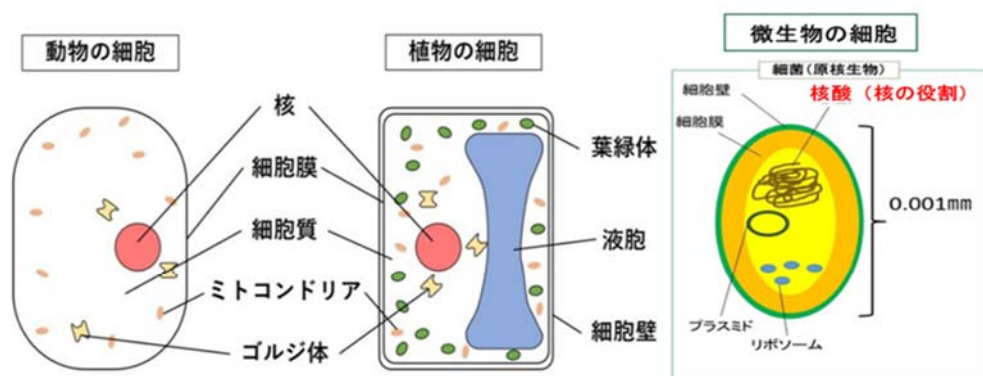


図1 (a). 動物と植物の細胞図  
引用：単細胞生物・多細胞生物  
(中2生物)かめのごブログ

図1 (b). 細菌の細胞図  
引用：農林水産省資料  
(細菌とは何ですか?)



リケジョさん：もう少し具体的に説明してもらえますか？



放射線博士：それでは下記の図2を見て下さい。生き物に、放射線が少し当たって、照射された細胞がわずかに死亡する限りにおいては、残りの細胞だけで十分に組織や臓器の働きを維持することができ、個体への影響は現れません。しかし、放射線の量がもう少し増えて、死亡する細胞の数が増えると組織や臓

<sup>i</sup> ジャガイモの芽には天然の毒である「ソラニン」や「チャコニン」が多く含まれています。双方ともに、一定量以上接種することで腹痛などの食中毒症状を引き起こすといわれています。

<sup>ii</sup> 微生物とは、一般的に「小さい生物」という意味で、寄生虫、カビ、酵母、細菌、ウイルスなど多くの種類があります。ただし、ウイルスは細胞膜を持たずタンパク質と核酸 (DNA・RNA) から構成され、細胞の外で自ら増えることができないことから無生物といわれることもあります。

器の機能が一時的に衰えると、臨床症状が出てきます。その場合でも、正常な細胞の数が元に戻る可能性は高く、症状の回復が期待できます。ただし、これにも限界があります。生き物は種類によって放射線の感受性が異なっています。そのため一概に、「これだけの量の放射線を浴びると・・・」とはいえませんが、退治しようとする「がん細胞、ジャガイモの芽、注射器などに付着する菌、害虫」にそれぞれ、大量の放射線を当てることによってねらった細胞を死滅させることができるのです。

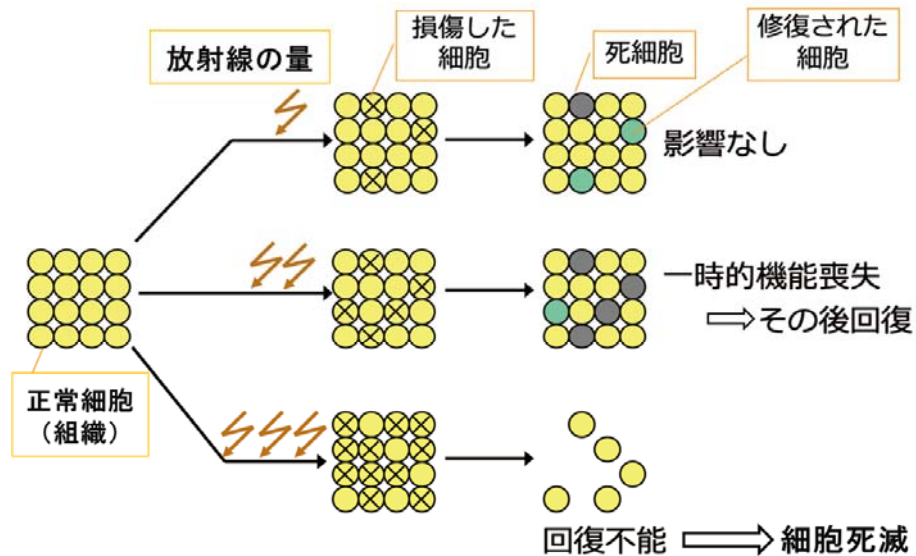


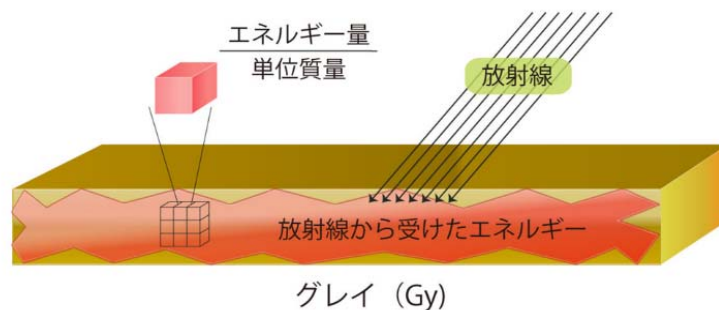
図2. 放射線量の多少による生物への影響イメージ  
参考:放射線の基礎知識と健康影響(環境省のハンドブック)



リケジョさん: それでは、「がん細胞、ジャガイモの芽、注射器などに付着する細菌、害虫」を退治する武器として放射線を利用する場合には、実際、どのくらいの量の放射線が照射されるのですか？



放射線博士: その質問に答えるためには、まず、放射線の量を表す「グレイ (Gy)」という単位について説明を行う必要があります。下記の図3を見て下さい。



「もの」が単位質量あたりに放射線から受けるエネルギー量  
1キログラムあたり1ジュールで1グレイ(Gy)

追記: 人は、全身を放射線被ばくすると、被ばく量が7~10グレイに及ぶと、ほぼ100パーセントの人が死亡するといわれています。

図3. グレイ(Gy)とは？

(引用: 排出放射性物質影響調査「用語解説」グレイとシーベルト)

グレイ (Gy) とは、「もの (物質)」が、単位質量あたりに放射線から受けるエネルギー量を示す単位であり、吸収線量と呼ばれます。物質 1 キログラム (kg) あたりに 1 ジュール<sup>iii</sup> (エネルギーを表す単位) のエネルギーを放射線から受けたということを意味しています。



リケジョさん：わたしたちの生活における放射線の利用量はどのくらいなのでしょう？



放射線博士：北陸原子力懇談会が、「ほくげんこんライブラリ」の中で放射線の利用例と線量と題して「放射線の利用例と線量の関係表」を掲載しています。下記の表 1 を見て下さい。

表 1. 放射線の利用例と放射線量 (単位: グレイ「Gy」)

$10^8$ Gy	人工衛星の電子部品や原子炉用電線などの信頼性や耐久性の評価、寿命の予測
$10^7$	超耐熱性炭化ケイ素繊維の製造
$10^6$	プラスチック・ゴム製品の加工、改質 (生分解性ハイドロゲルなど)
$10^5$	医療器具や食品容器の滅菌 (20~50 kGy)
$10^4$	香辛料・食肉魚介類の殺菌 (1~10 kGy)
$10^3$	熱帯果実などの検疫殺虫 (100~500 Gy)
$10^2$	ジャガイモなどの芽止め、放射線育種 (~100 Gy)
$10$	輸血用血液製剤のリンパ球不活化 (15~50 Gy)
$1$	ヒトの致死線量 (全身急照射の $LD_{50/60} = 4$ Gy)
$1$	放射線がん治療 (X線では一度に 2 Gy ずつ、合計数十 Gy)
$0.1$	これ以下の線量では、生物への照射効果が見られない
$10^{-2}$	X線透視、X線CT、核医学検査
$10^{-3}$	自然界の放射線
	空港の手荷物検査、胸部X線撮影

追記: 害虫を根絶するための方法のひとつに「不妊虫放飼法」があり、沖縄でウリミバエの根絶に成功した際の線量は 60~70 Gy でした。

「参考: ほくげんこんライブラリ(暮らしの中の身近な放射線)」

同表の中で、「がん治療」から「滅菌」までの赤い文字で示した利用例は、すべて放射線の生物効果を利用するものです。同表を見ると、「放射線による細胞の死滅」効果を利用する「がん治療が 2~10 グレイ (Gy)」、「ジャガイモの芽止めが ~100 グレイ (Gy)」、「注射器などの滅菌が 20~50 キログレイ (kGy)」、「害虫の駆除が 60~70 グレイ (Gy)」の放射線が照射されていることがわかります。放射線の生物効果を利用するためには、レントゲン検査や空港の手荷物検査と比べて格段に大きな量の放射線を必要とすることがわかりますね。



リケジョさん：「細胞を死滅させる性質」を利用するにあたっては「放射線の安全管理を十分に行う必要があるということですね。



放射線博士：その通りです。わが国の法令では、放射線や放射性物質は管理区域以外の場所で使用することができないように定められています。そして、管理区域内およ

<sup>iii</sup> 1 ジュールは約 0.24 カロリーであり、標準大気圧 (1 気圧) で 20℃ の水 1 グラムを約 0.24℃ 上昇させるエネルギーに相当します。

び管理区域外の環境のモニタリングが厳密に行われており、作業者と公衆の放射線安全が厳しく守られています。

それでは最後に、大量の放射線が「細胞を死滅させる」力に注目し、「がん細胞の治療、ジャガイモの芽止め、注射器などの滅菌、および害虫の駆除」に利用されている内容について整理しておきましょう。

#### (1) がん細胞の治療：



がんは、健全な細胞がなんらかの原因で異常な細胞に変わり、それが急激に増えていくものです。がん細胞のように増殖の盛んな細胞ほど放射線の影響を受けやすいのです。そこで、がん組織に的をしばって放射線をあてれば、効率的にがん細胞を殺すことができます。放射線を用いる治療法は、外科手術や制がん剤による化学療法とともに広く使われています。

(詳細は後述の解説を参照ください。)

#### (2) ジャガイモの芽止め：



世界中では多くの国でいろいろな食品の放射線照射が行われています。しかし、日本で認められているのは、ジャガイモに放射線をあてて、発芽を抑えることだけです。実は、発芽すると芽の基底部に有毒な物質が生じてしまうのです。現在、発芽防止の目的でコバルト-60のガンマ線をあてる技術が、北海道で実用化されています。もちろん、ガンマ線をあててもジャガイモが放射能をもつことはありません。

#### (3) 注射器などの滅菌：



日本も含め、世界中で、さまざまな医療用具（注射器、手術用手袋、メスなど）にコバルト-60のガンマ線をあてて、滅菌が行われています。従来使われているガス滅菌法、高圧蒸気滅菌法に比べ、優れた点（①温度上昇をあまり伴わない、②有害残留物の心配がない、③最終包装形態で滅菌処理できる、④滅菌工程の管理が極めて容易である、⑤同一滅菌条件、同一滅菌効果で多量の製品が連続して滅菌処理できる。）が多く、急速に普及しています。現在は、ガンマ線だけではなく加速器で発生した電子線も利用されています。

#### (4) 害虫の駆除：



害虫の駆除では、人工ふ化させた害虫のオスのさなぎに、適当な量の放射線をあててやると、その成虫はメスと交尾することはできるが、受精させることはできなくなります。このようなオスの成虫を、自然界の害虫の集団に繰り返して放ってやると、メスが野生の健全なオスと交尾する機会が少なくなり、受精卵ができる割合が減っていくので、ついに害虫集団が絶滅するようになります。日本でも、この方法を用いて、沖縄県と奄美諸島に生息する「ウリミバエ」の絶滅に成功しました。



リケジョさん：「放射線には細胞を死滅せる性質がある」と聞いた時には「怖い」という気持ちが湧いてきました。でも、今では、「放射線は豊かな生活に欠かせない必需品」、とっています。  
博士、いろいろ教えてくれてありがとうございました。

(原産協会 人材育成部)

## 「総説：放射線によるがん細胞の治療」

がんは、健康な組織にかこまれたなかに存在していますが、適当な量の放射線をあてることにより、がんの細胞だけを死滅させ、普通の細胞に影響をほとんど与えずに治療することができます。

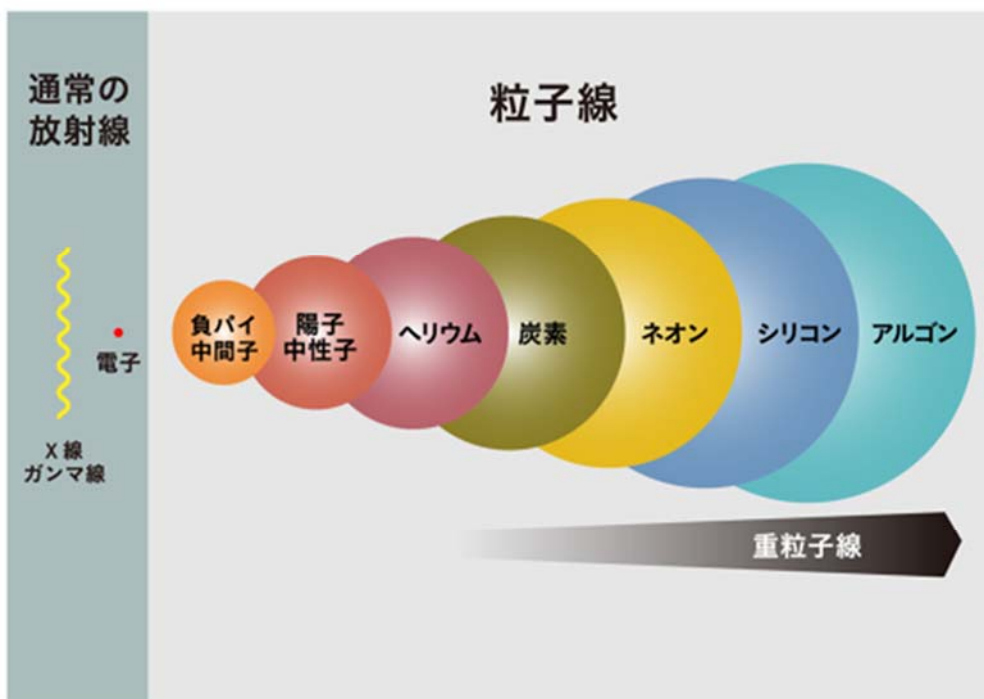
これまでの治療では、コバルト-60 から出るガンマ線を、細いビーム状にしぼって、体の外からがんの部分に集中的にあてる方法が多く用いられてきました。現在は、放射線を使った最新療法として、以下の2つの方法が注目されています。

- (1) 重粒子線治療：陽子や炭素の粒子放射線を病巣に照射する方法で、正常細胞へのダメージを最小限に抑えつつ、がん細胞を攻撃します。
- (2) ホウ素中性子補足療法 (BNCT)：ホウ素をがん細胞に取り込ませ、中性子線を低エネルギーで照射することで、がん細胞だけを選んで破壊します。

以下に順を追って解説します。

## 「解説 1：重粒子線療法とは？」

放射線の中で電子より重いものを粒子線、ヘリウムイオン線より重いものを重粒子線と呼びます(下記の図参照)。

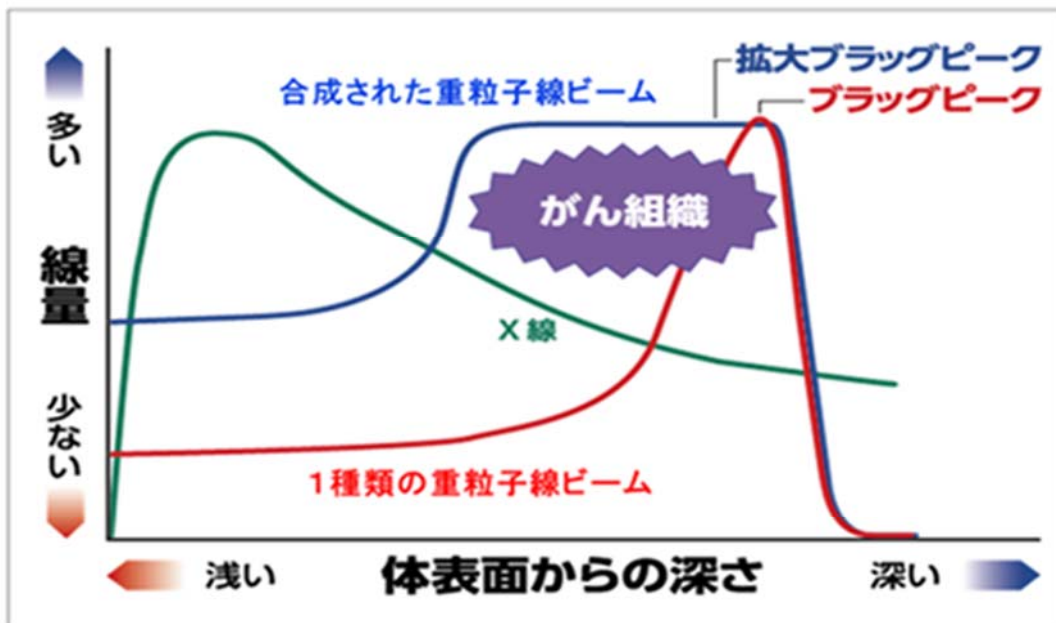


重粒子線がん治療最前線(原子力産業新聞)

重粒子線療法とは、この重粒子線を活用した放射線治療法です。がん治療に対しては、特に、炭素イオン線が活用されています。具体的には、炭素原子をイオン化して光の速度の約 70%まで加速し、体の深部のがん細胞に当てて、これを消滅させます。

この技術は、量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所が、世界に先駆けて実運用に成功したものであり、1994年から2016年5月までに15,000名以上の患者が治療を受けています。

放射線療法について話をする場合には、最初に、利用する放射線によって体内の線量分布が異なることを説明する必要があります（下記の図参照）。



### 重粒子線とX線の体内線量分布

(参考: 国立がん研究センターが運営する公式サイト「がん情報サービス」)

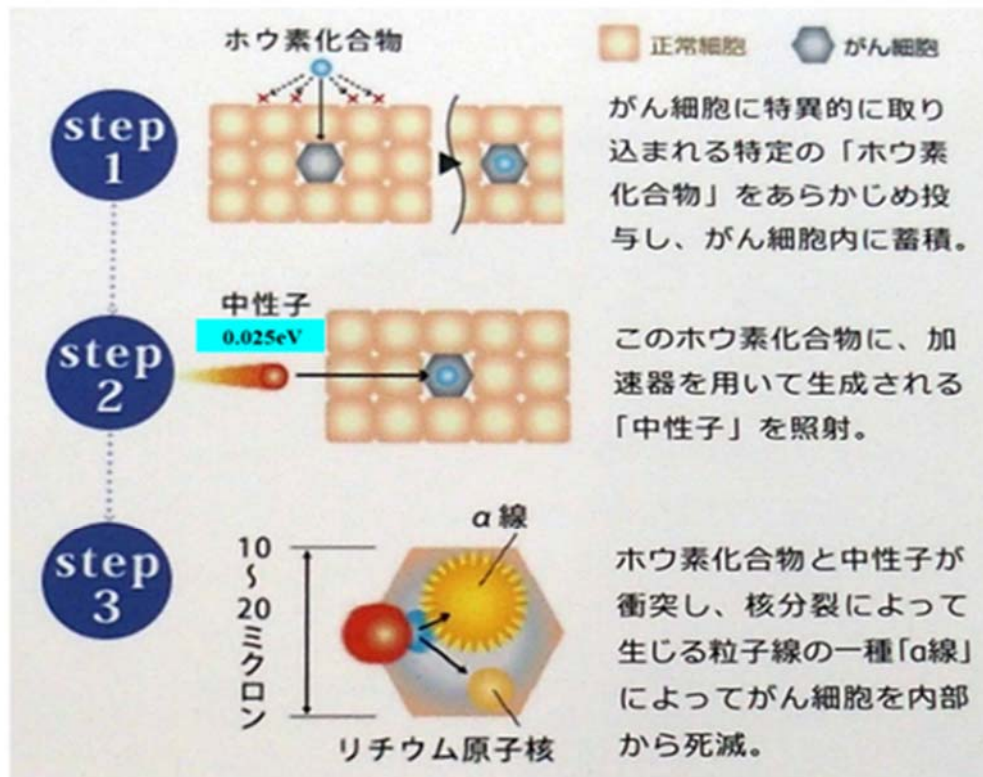
(1) 従来のX線を使った放射線治療では、体の表面近くで放射線量が最大となり、それ以降は体内に入るに従って放射線量が徐々に減少することがわかります。このことから、一方向からのX線照射で、体の奥にあるがん細胞に十分なダメージを与えようとする、体表面近くの正常細胞も、大きなダメージを受けることになります。これを避けるため、できるだけ弱いX線をいろいろな方向から照射して、体表面近くの正常な細胞が受ける放射線量を減らす工夫がなされています。

(2) これに対して、重粒子線は、体の表面近くではエネルギーを放出せず、狙ったがん細胞だけに高い放射線量を与える特徴があります。この現象は、発見者の名をとって「ブラッグ・ピーク」と呼ばれています。通常、がん細胞が集まってできる「がん病巣」は、深さ方向に厚みを持った塊として存在します。そのため、実際のがん治療においては、ブラッグピークを重ね合わせて「拡大ブラッグピーク」を形成し、がんの塊全体を狙って照射する方法がとられています。

重粒子線療法には、まるで将棋の桂馬のように途中にある臓器などを飛び越して、がんの塊だけに放射線を照射してそれ以外には照射しないという優れた特性があります。

## 「解説 2：ホウ素中性子補足療法とは？」

昨今、エネルギーが低い熱中性子を患部にピンポイントで照射し、そこでがん細胞に集まる性質を備えたホウ素薬剤を活性化させるがんの根治療法（BNCT と呼ぶ）が、手術・抗がん剤・放射線（X線）・免疫療法に次ぐ「第5の治療法」として注目されています（下記の図参照）。



(参考：がん情報サイト「オンコロ」BNCTについて知っておきたい4つのこと)

がん細胞は、急速な細胞増殖を維持するため、糖やアミノ酸を取り込む必要があります。この性質に注目して、がん細胞が自発的に取り込む、「ホウ素化合物（例えばボロノフェニルアミン「BPA」という物質）」が開発されました。このBPAを患者にあらかじめ投与しておけば、時間とともにがん細胞内に蓄積します（これが上図のステップ1です）。

次に、体の外からこのホウ素化合物を狙って、エネルギーの低い熱中性子（0.025 エレクトロンボルト）を照射します。ここで注意しなければいけないのは、①正常な細胞では、熱中性子は、ほとんど影響を与えず通過していきませんが、②エネルギーの高い速中性子が含まれていると、正常細胞と衝突して悪影響を及ぼす可能性があるということです（これが上図のステップ2です）。

最後に、がん細胞に取り込まれたホウ素化合物は、熱中性子と反応してアルファ線とリチウム原子核を放出、がん細胞に衝突してこれを破壊するのです。このときアルファ線とリチウム原子核が飛ぶ距離は、おおむね細胞1個分と極めて短く、がん細胞周囲の正常細胞に悪影響を及ぼす可能性はほとんどありません（これが上図のステップ3です）。

そして、2020年5月20日には、BNCTが保険適用になり早速（同年5月26日）、総合南東北病院（福島県郡山市）において、BNCTによる世界初のがん治療が行われました。