

# 基礎研 レポート

## 放射線によるがん治療の高度化 放射線医療の現状（後編）

保険研究部 主席研究員 篠原 拓也  
(03)3512-1823 tshino@nli-research.co.jp

### 0—はじめに

[前稿\(前編\)](#)では、放射線の仕組みや、それをを用いた検査・診断の概要をみていった。X線などの放射線を用いれば、体内の様子を画像でみることができ、診断のスピードや正確性の向上につながる。

本稿は、主に、放射線治療をテーマとする。放射線治療は、手術、化学療法とともに、がんの治療法として確立している。これらの3つの治療法には、それぞれ特徴があり、がん治療にはその特徴を生かすことが必要となる。

放射線治療は、19世紀末に始まった。1895年のレントゲンによるX線の発見から間をおかず、1899年にはX線照射による皮膚がんの治癒が達成された<sup>1</sup>。これが、最初の放射線治療成功事例とされる。そして、20世紀には、放射線や原子力に対する研究の進展とともに、放射線治療も進歩していった。これまでに、放射線発生装置や放射線治療計画装置など、治療のためのさまざまな機器が開発されており、現在では、放射線治療は重要ながん治療法の1つと位置づけられている。

ただし、日本では、諸外国に比べて、放射線治療の実施割合が低いとされる。本稿を通じて、読者に、放射線治療への関心と理解を深めていただければ、幸いである。

<sup>1</sup> スウェーデンのスチンペックが、72歳の女性の鼻にできた基底細胞がんを、35回のX線分割照射で治癒させた。（「放射線治療の歴史」伊丹純(RADIOISOTOPES, 公益社団法人日本アイソトープ協会, 2011年(60巻) pp385-392)より、筆者がまとめた。）

## [目次]

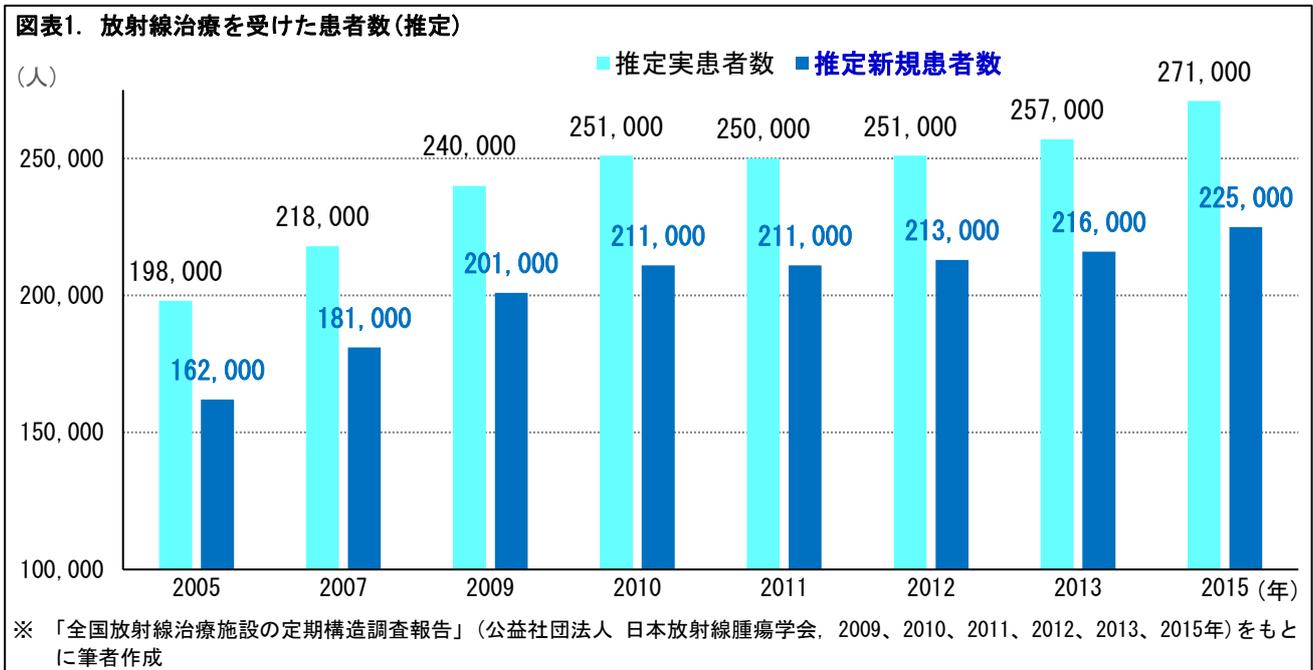
<b>0—はじめに</b> .....	1
<b>1—放射線治療の実施状況</b> .....	3
1   放射線治療は徐々に増えている .....	3
2   日本は欧米に比べて放射線治療の実施割合が低い .....	3
3   放射線治療に対して、患者はさまざまな不安を持っているとみられる .....	3
<b>2—放射線治療によるがんの治療</b> .....	4
1   放射線治療の目的は、根治だけではない .....	4
2   放射線治療は臓器の温存ができる .....	5
3   放射線治療と他の治療法を組み合わせることもある .....	5
4   放射線治療はがん以外の治療にも行われる .....	6
<b>3—放射線治療はなぜ効くのか</b> .....	7
1   放射線が DNA に与える作用には直接作用と間接作用がある .....	7
2   放射線照射後のがん細胞と正常細胞の応答の違いが治療のカギ .....	7
3   細胞分裂を繰り返す組織ほど放射線の影響を受けやすい .....	9
4   放射線治療においては、正常組織の照射が耐容線量未満となるよう考慮する .....	9
5   放射線治療には、専用の設備や施設が必要 .....	11
6   放射線ごとに体の深部に達する線量は異なる .....	11
<b>4—放射線治療の分類</b> .....	12
1   放射線治療は、外部照射、小線源療法、内用療法に分けられる .....	12
2   通常の外部照射では、照射部位などに応じて、照射方法が使い分けられる .....	13
3   外部照射の技術革新が進み、高精度放射線治療が行われるようになっている .....	15
4   小線源療法の腔内照射は高線量、組織内照射は低線量で行われる .....	16
5   内用療法は、病気の種類ごとに、放射性同位元素が使い分けられる .....	17
<b>5—放射線治療計画の策定</b> .....	17
1   放射線治療では、綿密な治療計画を立てる .....	17
2   放射線治療に必要な総線量は、がんの種類によって異なる .....	18
3   放射線の方向、形、分布の設定には、2つの方法がある .....	19
<b>6—放射線治療装置</b> .....	19
<b>7—放射線治療の有害事象</b> .....	21
1   急性期反応は、回復することが一般的 .....	21
2   晩期反応は、回復困難な場合が多い .....	22
3   放射線が人体に与える影響には、確定的影響と、確率的影響がある .....	22
<b>8—おわりに（私見）</b> .....	23

## 1—放射線治療の実施状況

そもそも放射線治療は、いま、どのくらい行われているのだろうか。まず、治療数の現状からみていくこととしたい。

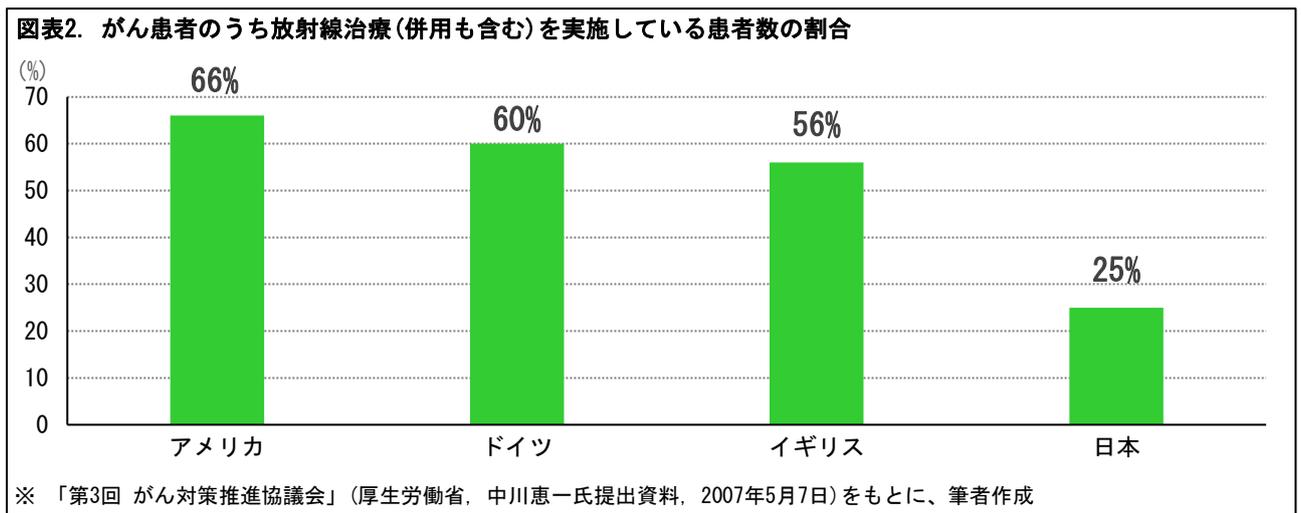
### 1 | 放射線治療は徐々に増えている

放射線治療の実施状況をみておこう。放射線治療を受けた患者の数は、年々、増加している。2015年には、患者数が271,000人、そのうち225,000人が新規に放射線治療を受けたと推定されている。



### 2 | 日本は欧米に比べて放射線治療の実施割合が低い

放射線の治療の実施数を、欧米主要国と比べてみよう。次のグラフにあるとおり、日本は、欧米に比べて放射線治療の実施割合がかなり低いことがわかる。



### 3 | 放射線治療に対して、患者はさまざまな不安を持っているとみられる

日本で放射線治療の実施割合が低い理由として、患者がさまざまな不安を持っているためとみられ

ている。不安には、被曝に関する漠然とした不安をはじめ、治療の後遺症に対する不安、機械や治療室に対する不安、治療効果に関する不安など、さまざまなものがあげられる。

**図表 3. 放射線治療に関する不安**

1. 被曝に関する漠然とした不安	放射線そのものに対する先入観から、放射線治療と、被爆や原子爆弾のイメージが重なることなどが影響して生じる、漠然とした不安
2. 治療の副作用(有害事象)に対する不安	放射線治療を受けることで副作用(有害事象)が生じる可能性に対する不安
3. 治療の後遺症に対する不安	「皮膚が赤く腫れるのではないか」「照射の傷跡がずっと残るのではないか」といった、治療後に、身体の変化が生じる可能性に対する不安
4. 機械や治療室に対する不安	なじみのない機械に身をゆだねる不安、機械の大きさに圧倒されて感じる不安、機械だけが置かれた治療室の冷たいイメージに感じる不安など
5. 治療中の隔離に対する不安	治療室が閉ざされた空間であり、その場に1人だけで取り残されるという治療状況に対する不安
6. 医療過誤に関する不安	「必要以上に照射されていないか」「正常な部分に悪影響があるのではないか」といった操作の安全性に疑いを感じて生じる不安
7. 病気が進行しているという不安	「放射線治療をしなくてはならないほど病態が進行しているのか」といったとらえ方で、病気の進行に対して感じる悲観的な懸念
8. 治療効果に対する不安	「治療効果が現れるのだろうか」「完全に治るのだろうか」といった、放射線治療の効果に対する不安

※ 「がん放射線治療パーフェクトブック」唐澤久美子・藤本美生編(学研メディカル秀潤社、2016年)を参考に、筆者作成

放射線治療においては、治療とともに、こうした患者の不安を解消することが重要となろう。そのためには、医療関係者と患者のコミュニケーションがポイントとなる。たとえば、不安軽減のために、精神医学で行われる精神療法を用いた患者へのアプローチがとられている。

あわせて、一般の人にとって、放射線治療に対する知識や関心を高めることが有効となるだろう。次章以降では、放射線治療について、概観していく。

## 2—放射線治療によるがんの治療

放射線治療は、がんの治療の中で、どのような位置づけとなっているのだろうか。本章では、まず、がんの治療に放射線を用いることについて、目的や、他の治療法との関係などをみていく。

### 1 | 放射線治療の目的は、根治だけではない

ひとくちに、放射線でがんを治療するといっても、その目的には、さまざまなものがある。

#### (1) 根治照射

一般に、遠隔転移のない限局性のがんに対する放射線治療では、根治が目的とされる。

#### (2) 準根治照射

原発巣の状態や遠隔転移などにより、根治・治癒が目指せない場合もある。その場合、局所の腫瘍や転移巣を制御して、生存期間の延長やQOL(Quality of Life, 生活の質)維持・改善を目指して放射線が照射される。

#### (3) 緩和照射

腫瘍自体や遠隔転移から生じるさまざまな症状・疼痛を緩和するために、放射線が照射される。

#### (4) 予防照射

手術や化学療法などの治療後に、腫瘍が再発、転移することを防ぐ目的で放射線が照射される。特

に、乳がんでは、リンパ節転移を予防するために、領域リンパ節への照射が行われることがある。また、肺がんのうち、限局型の小細胞肺がんでは、初期治療で完全寛解が得られた場合、脳転移を防ぐ目的で、脳に対して、予防的全脳照射が行われる<sup>2</sup>。

#### (5) 緊急照射

がんの種類によっては、急速に全身状態が悪化し、緊急に治療が必要となるものもある。このようながんで、放射線治療が行われるものが緊急照射である。

主に、骨や脊髄への転移による骨折や脊髄圧迫、脳への転移による頭蓋内圧亢進、上大(じょうだい)静脈症候群(肺がんなどに伴う上大静脈の閉塞・狭窄(きょうさく))により、心臓に血液が戻れなくなる症状)に対して行われる。いずれも、緊急に治療を行わなければ、生命の危険や、不可逆的な麻痺などの恐れがある。激しい疼痛を伴うことが一般的で、その緩和の観点からも、緊急照射が必要とされる。

## 2 | 放射線治療は臓器の温存ができる

放射線治療は、手術、化学療法(抗がん剤治療)とともに、がんの3大治療法と呼ばれている。ただし、3つの治療法には、それぞれ特徴があり、治療にはその特徴を生かすことが必要となる。それぞれの違いを簡単にみていこう。

### (1) 放射線治療は、手術と異なり、患者の負担が小さい

放射線治療が手術と異なる点は、患者の負担が小さいことや、治療する臓器の形態や機能が温存されることといえる。こうしたことから、放射線治療の場合、原則として、入院の必要はない。仕事や学校を休まなくても、通院によって治療を続けることができる。

### (2) 放射線治療は、化学療法と異なり、病巣に集中した治療ができる

放射線治療が化学療法と異なる点は、病巣に集中的な治療を行うことができることといえる。一般に、がんの病巣が限局的な場合、放射線治療が有効となる。そして、血液がんやリンパ節のがんなど、病巣が全身に広がっている場合、抗がん剤による化学療法の治療効果が高まるとされる。

また、化学療法では、吐き気、食欲不振、倦怠感、下痢、手足のしびれ、脱毛といった全身に悪影響が生じることがある。放射線治療でも悪影響は起こるが、有害反応は、放射線を照射した部位を中心に現れる。全身的な有害反応は生じにくいとされる。

図表 4. がんの3大治療法比較

	手術	化学療法	放射線治療
対象	局所	全身	局所
臓器	摘出	温存	温存

※ 「患者さんと家族のための放射線治療 Q&A 2015 年版」公益社団法人 日本放射線腫瘍学会編(金原出版, 2015 年)をもとに、筆者作成

## 3 | 放射線治療と他の治療法を組み合わせることもある

放射線治療は、単独で実施されることもあれば、手術や化学療法と組み合わせられて行われることもある。ここでは、単独療法と併用療法についてみていこう。

<sup>2</sup> 進展型小細胞肺がんや、非小細胞肺がんでは、生存期間の延長効果が明らかでないこともあり、予防的全脳照射は標準治療とされていない。

## (1) 単独療法

放射線治療の単独療法は、限局したがんが主な対象となる。頭頸部がん、食道がん、肺がん、子宮頸がんなどの早期がんが対象となる。他にも、低リスクの前立腺がん、低悪性度の悪性リンパ腫などが対象となる。また、進行がんであっても、患者の年齢や全身状態からみて、患者の身体が手術などの負担の大きい治療には耐えられない、と判断される場合、単独療法がとられることがある。

## (2) 併用療法(集学的治療)

手術との併用、化学療法との併用についてみていこう。

### (a) 手術との併用

放射線治療を行うタイミングによって、術前照射、術中照射、術後照射の3つに分けられる。

#### (a-1) 術前照射

手術前に、がん病巣や周囲浸潤組織のがん細胞に放射線を照射する。目的として、次のものがある。

- ・手術で切除した組織の切り口にある、がん細胞がすべて取り除かれやすくなるようにするため
- ・切除不能や切除できるかどうか、ボーダーライン上にある病変を切除可能にするため
- ・手術中の操作で腫瘍が散布して、遠隔転移が起こることをコントロールするため

術前照射は、食道がん、膵臓がん、直腸がんなど、多くのがんで行われる。

#### (a-2) 術中照射

手術中に切開した状態で、腫瘍部を目視して、直接、放射線を照射する。術中照射の多くは外部照射で行われるが、小線源用のアプリケータを設置して小線源治療を行うこともある。実施にあたり、放射線治療室を併設した専用の手術室、または手術室から放射線治療室への患者の移動が必要となる。

術中照射は、かつては、膵臓がんでよく行われていたという。近年は、高精度放射線治療が普及したこともあり、その実施数は大きく減少している。

#### (a-3) 術後照射

手術で切除しきれずに残ったがん細胞を死滅させて、がん再発の可能性を下げる目的で、放射線を照射する。頭頸部がん、乳がん、肺がん、食道がんなど、さまざまながんで行われる。

### (b) 化学放射線療法

抗がん剤と放射線治療を併用する治療法は、「化学放射線療法」と呼ばれている<sup>3</sup>。抗がん剤を投与する時期として、放射線治療前、放射線治療と同時、放射線治療後の3つがあり、病状等に応じて選択する。

抗がん剤と放射線治療を併用する目的として、主に、4つのものがあげられる。

- ・放射線治療の効果を高めるため
- ・他臓器への転移を防ぐため
- ・抗がん剤により腫瘍の体積を縮小させて、放射線治療を実施しやすくするため
- ・抗がん剤が届きにくい中枢神経系領域に放射線治療を行うことで治療効果を高めるため

## 4 | 放射線治療はがん以外の治療にも行われる

放射線治療は、主として、がんに対して行われるが、それだけではない。がん以外でも放射線治療

<sup>3</sup> 放射線治療を分子標的薬や内分泌療法薬と併用することも行われている。

が行われるケースがある。手術ができない場所の治療、手術に大きな危険が伴う場合の治療、手術のみでは再発しやすい場合の治療などである。たとえば、ケロイドを手術した後の再発予防、有効な治療法がない場合の血管腫、脳や脊髄の動静脈奇形<sup>4</sup>などの治療法として用いられる場合がある。

### 3—放射線治療はなぜ効くのか

放射線治療は、なぜ効くのだろうか。本章では、そのメカニズムを簡単にみていくこととしたい。

#### 1 | 放射線が DNA に与える作用には直接作用と間接作用がある

放射線は、がん細胞の核の中にある DNA に損傷を与える。DNA に損傷を与える作用には、直接作用と間接作用の2つがある。

##### (1) 直接作用

直接作用は、放射線が DNA に当たって、直接傷つけるというもの。DNA は二重らせん構造、すなわち2本の鎖でできている。放射線の種類によって、鎖への作用の仕方は異なる。

X線の照射では、2本のDNAのうち片方だけが断ち切られることが多い、といわれる。この場合、切られなかったもう片方のDNA鎖を用いて、修復が行われる。

一方、陽子線や重粒子線の照射では、DNAを2本とも切断することがある。この場合、「非相同末端結合」と「相同組換え」という、2種類の修復方法がありうる。

— 非相同末端結合は、いつでも機能するが、修復エラーが生じることがある。修復エラーは、細胞死につながる。

— 相同組換えによれば、DNAを正確に修復することができる。ただし、次節でみる細胞周期のうち、合成期(S期)から分裂準備期(G2期)の間でしか、相同組換えは起こらない。<sup>5</sup>

##### (2) 間接作用

間接作用は、放射線が細胞内の酸素に当たって活性酸素<sup>6</sup>に変え、この活性酸素がDNAを傷つけるというもの。放射線が、DNAの近く(2ナノメートル以内<sup>7</sup>)に存在する水分子に作用すると、活性酸素ができる。間接作用には、水分子の存在が欠かせないことになる。

一般に、光子線(X線、γ線)と電子線の照射では、直接作用と間接作用の両方がみられる。損傷の比率は、大体、直接作用：間接作用=1：2といわれ、間接作用のほうが大きいとされている。

一方、陽子線、重粒子線は、直接作用が中心とされている。

#### 2 | 放射線照射後のがん細胞と正常細胞の応答の違いが治療のカギ

放射線照射に対する細胞や組織の応答として、「回復(Recovery)」、「再分布(Redistribution)」、「再増殖(Repopulation)」、「再酸素化(Reoxygenation)」の4つがあげられる。これらは、放射線治療の4Rと呼ばれている。この4Rを生かして、分割照射による放射線治療が行われている。

<sup>4</sup> 動脈から毛細血管を経由しないで、直接静脈につながり、塊となる状態。

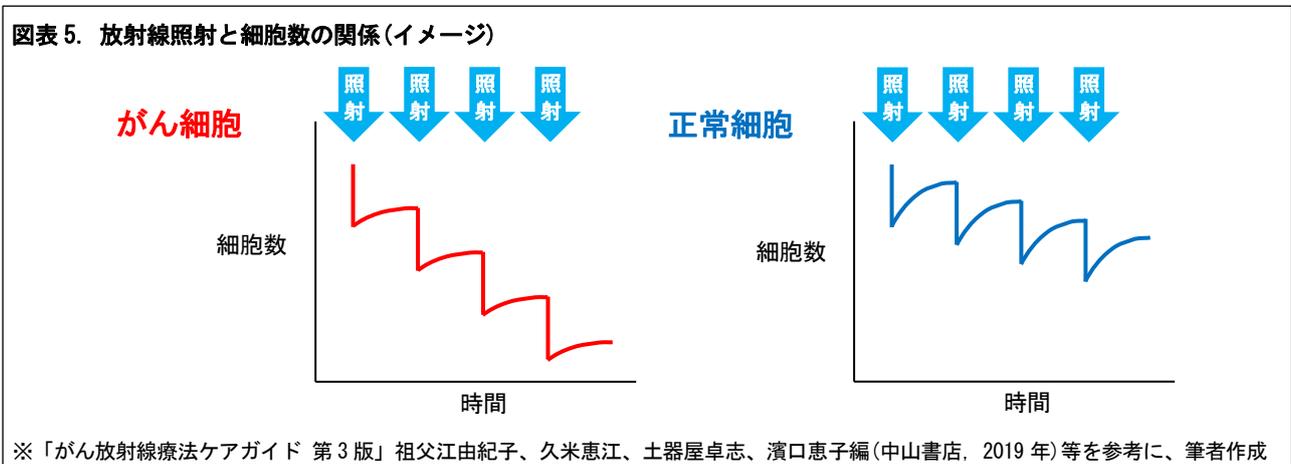
<sup>5</sup> 次節でみるとおり、S期からG2期にかけて、放射線に対する抵抗性が高まるとされる。これは、相同組換えによる正確な修復が原因と考えられている。

<sup>6</sup> 本来、活性酸素は生体にとって有害であるが、それを、がん細胞のDNAの損傷に用いている。活性酸素の辞書での説明は次の通り。「通常の酸素に比べていちじるしく化学反応を起こしやすい酸素。一重項酸素・超酸化物イオン(スーパーオキシド・イオン)の類。生体内で有害な過酸化脂質の生成に関与する。」(「広辞苑 第七版」(岩波書店)より)

<sup>7</sup> 1ナノメートル=10億分の1メートル。

(1) 修復スピードの違いを治療に生かす（「回復」の活用）

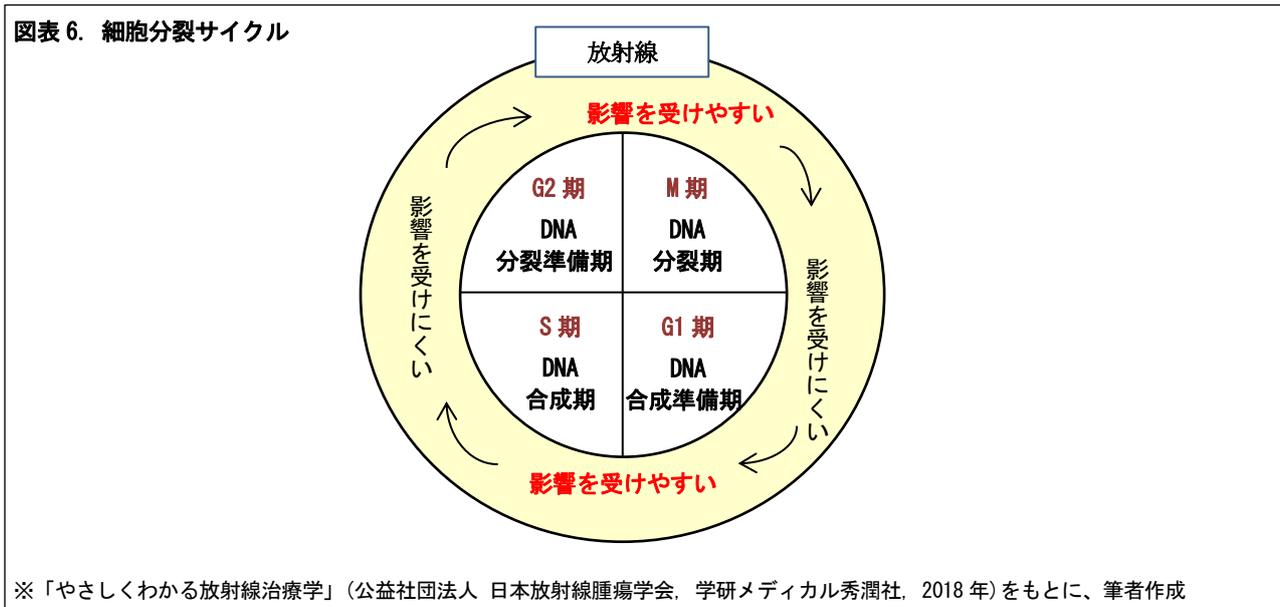
通常、正常細胞は、がん細胞よりも早く修復される。分割照射では、この修復までの両者の時間差を利用する。一度、放射線を照射した後、正常細胞は修復できたが、がん細胞はまだ修復できていないときに、次の放射線を照射する。こうすることで、正常細胞への影響を抑えつつ、がん細胞を死滅させることができる。



(2) 細胞分裂サイクルを治療に生かす（「再分布」・「再増殖」の活用）

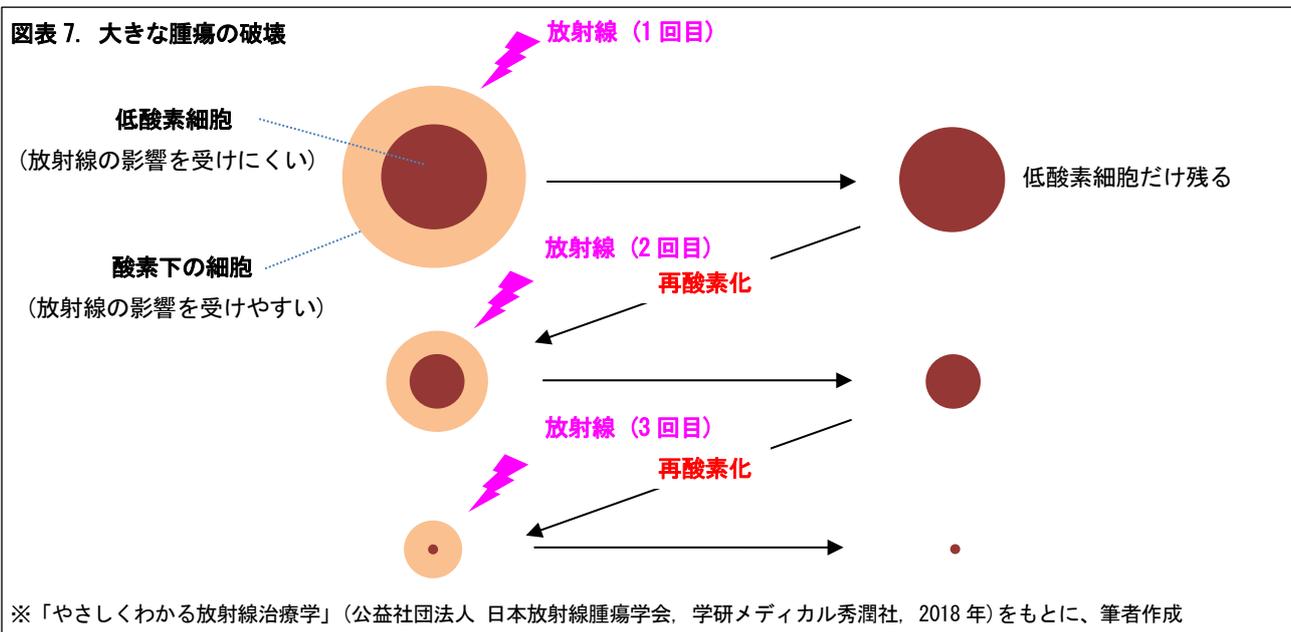
一般に、細胞分裂は、合成準備期(G1期)→合成期(S期)→分裂準備期(G2期)→分裂期(M期)→……のように、4つの期を巡回して進んでいく。このうち、G1期からS期にかけてと、G2期からM期にかけての時期は、放射線による影響を受けやすい。このため、これらの時期にある細胞に、放射線が照射されると、DNAが傷つきやすい。傷ついたDNAが修復できなければ、細胞は死滅することとなる。

放射線を照射した直後は、細胞分裂サイクルの同調が生じている。その後一定の時間が経つと、さまざまな細胞周期に分散していく。分散後に、再び照射すれば、影響を受けやすい細胞が傷ついて死滅する。このようにして、細胞分裂サイクルを生かして、分割照射が行われている。



(3) 大きな腫瘍を徐々に破壊する（「再酸素化」の活用）

大きな腫瘍では、中心部のがん細胞に酸素が届かず、壊死状態となっている<sup>8</sup>。腫瘍の表面の細胞が照射によって破壊されると、それまで届いていなかった奥の方に血管が伸びて、がん細胞内の酸素の供給量が増える。これにより、がん細胞が放射線に反応しやすくなる。このように、分割照射により、表面のがん細胞から少しずつ損傷を加えていくことで、最終的に、がんの中心部まで破壊できる。



### 3 | 細胞分裂を繰り返す組織ほど放射線の影響を受けやすい

同じ放射線を照射しても、その影響は組織によって異なる。放射線の影響の受けやすさは、「放射線感受性」と呼ばれる。放射線感受性は、細胞分裂を頻繁に繰り返す組織ほど高いとされる。

**図表 8. 正常組織の放射線感受性**

	内容	例
恒常的細胞再生系	常に分裂を繰り返し、新しく再生された細胞と同数の細胞が脱落している組織	皮膚、腸上皮、骨髄、精巣
血管・結合織	組織や臓器を構成している血管や結合組織	血管
緊急的細胞再生系	通常は分裂停止しているが、障害を受けると、分裂増殖して再生する組織	肝・腎上皮、唾液腺、甲状腺上皮
非細胞再生系	分裂停止し、障害を受けても再生しない組織	筋肉、脳、脊髄

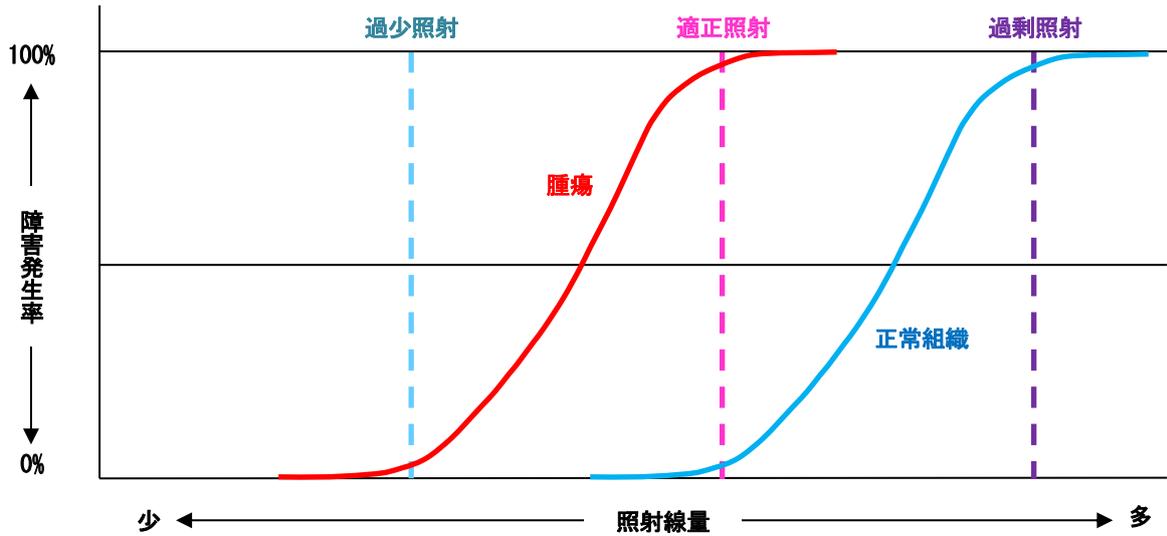
※「やさしくわかる放射線治療学」(公益社団法人 日本放射線腫瘍学会, 学研メディカル秀潤社, 2018年)をもとに、筆者作成

### 4 | 放射線治療においては、正常組織の照射が耐容線量未満となるよう考慮する

放射線治療を計画するうえでは、腫瘍と正常組織の照射線量による影響の違いが重要となる。照射する放射線の線量を増やしていくと、どちらの細胞も障害発生率は上昇していく。ただし、その上昇の仕方は同じではない。それぞれの上昇は、S字カーブとして描かれるが、一般には、両者は乖離している。腫瘍細胞の障害発生率が高く、正常組織細胞の障害発生率が低い線量が、適正照射となる。

<sup>8</sup> 脳腫瘍のうち、悪性神経膠芽腫(こうがしゅ)は、代表的な例。

図表 9. 放射線治療の線量の考え方



※ 「やさしくわかる放射線治療学」(公益社団法人 日本放射線腫瘍学会, 学研メディカル秀潤社, 2018年)をもとに、筆者作成

適正照射を決めるには、副作用を生ずる可能性を踏まえて、正常組織がどれだけの線量まで耐えられるかを把握しておく必要がある。これは、「耐容線量」と呼ばれる。耐容線量は、組織ごとに異なる。通常は、下表のように、5年間で5%に副作用を生ずる線量や、50%に副作用を生ずる線量で表示される。

この表によると、目の水晶体、肺、腎臓は、耐容線量が低いことがわかる。このため、頭頸部や胸部・腹部に放射線を照射する場合には、これらの臓器への照射を少なくすることが必要となる。

図表 10. 正常組織の耐容線量 (例)

	5年間で5%に副作用を生ずる線量	5年間で50%に副作用を生ずる線量	判定基準
骨(顎関節)	60Gy	72Gy	著明な開口障害
皮膚	50Gy (100cm <sup>2</sup> に照射)	65Gy (100cm <sup>2</sup> に照射)	毛細血管拡張
脳	45Gy	60Gy	壊死、梗塞
脊髄	50Gy (10cmに照射)	70Gy (10cmに照射)	脊髄炎、壊死
目の水晶体	10Gy	18Gy	手術を要する白内障
網膜	45Gy	65Gy	失明
肺	17.5Gy	24.5Gy	肺炎
心臓	40Gy	50Gy	心外膜炎
食道	55Gy	68Gy	臨床的狭窄、穿孔
胃	50Gy	65Gy	潰瘍、穿孔
小腸	40Gy	55Gy	閉塞、穿孔、瘻孔
大腸	45Gy	55Gy	閉塞、穿孔、潰瘍、瘻孔
直腸	60Gy	80Gy	高度の直腸炎、壊死、瘻孔、狭窄
肝臓	30Gy	40Gy	肝不全
腎臓	23Gy	28Gy	臨床的腎炎
膀胱	65Gy	80Gy	症候性の膀胱萎縮・体積減少

\* 照射する範囲の体積に応じて耐容線量が異なる臓器もある。この表では、臓器全体に照射したケースの耐容線量を示している。  
Gy(グレイ)は、吸収線量の単位(前編参照)。

※ 「がん放射線療法ケアガイド 第3版」祖父江由紀子、久米恵江、土器屋卓志、濱口恵子編(中山書店, 2019年)をもとに、筆者作成

## 5 | 放射線治療には、専用の設備や施設が必要

放射線治療では、人工放射線を作って照射する設備や施設が必要となる。こうした設備や施設の設置は大病院が中心となる。2015年に放射線治療を行った施設は、全国で846施設と推定されている<sup>9</sup>。

このうち、特に、陽子線や重粒子線を治療に用いる場合、粒子を大型の円形加速器で作る必要があるため、サイクロトロンやシンクロトロンといった大規模な施設が必要となる。たとえば、炭素イオン線治療のために、放射線医学総合研究所が所有している施設は、サッカーのピッチに相当する広さがあるといわれている。2020年には全国で、陽子線治療施設は17、重粒子線治療施設は6つとなっている。

図表 11. 陽子線・重粒子線治療施設 (2020年6月1日現在)

陽子線治療施設 (17施設)	千葉県柏市	国立がん研究センター東病院
	兵庫県たつの市	兵庫県立粒子線医療センター
	静岡県長泉町	静岡県立静岡がんセンター
	茨城県つくば市	筑波大学附属病院
	福島県郡山市	一般財団法人脳神経疾患研究所附属 南東北がん陽子線治療センター
	鹿児島県指宿市	一般財団法人メディポリス医学研究所 メディポリス国際陽子線治療センター
	福井県福井市	福井県立病院
	愛知県名古屋市	名古屋市立西部医療センター
	北海道札幌市	北海道大学病院
	長野県松本市	社会医療法人財団慈泉会 相澤病院
	岡山県津山市	津山中央病院
	北海道札幌市	社会医療法人禎心会 札幌禎心会病院
	大阪府大阪市	医療法人伯鳳会 大阪陽子線クリニック
	兵庫県神戸市	兵庫県立粒子線医療センター附属神戸陽子線センター
	愛知県豊橋市	成田記念陽子線センター
	奈良県天理市	社会医療法人高清会 高井病院
	京都府京都市	京都府立医科大学附属病院
重粒子線治療施設 (6施設)	千葉県千葉市	国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所病院
	兵庫県たつの市	兵庫県立粒子線医療センター
	群馬県前橋市	群馬大学医学部附属病院
	佐賀県鳥栖市	九州国際重粒子線がん治療センター
	神奈川県横浜市	神奈川県立がんセンター
	大阪府大阪市	大阪重粒子線センター

※ 「先進医療を実施している医療機関の一覧」(厚生労働省ホームページ)をもとに、筆者作成

## 6 | 放射線ごとに体の深部に達する線量は異なる

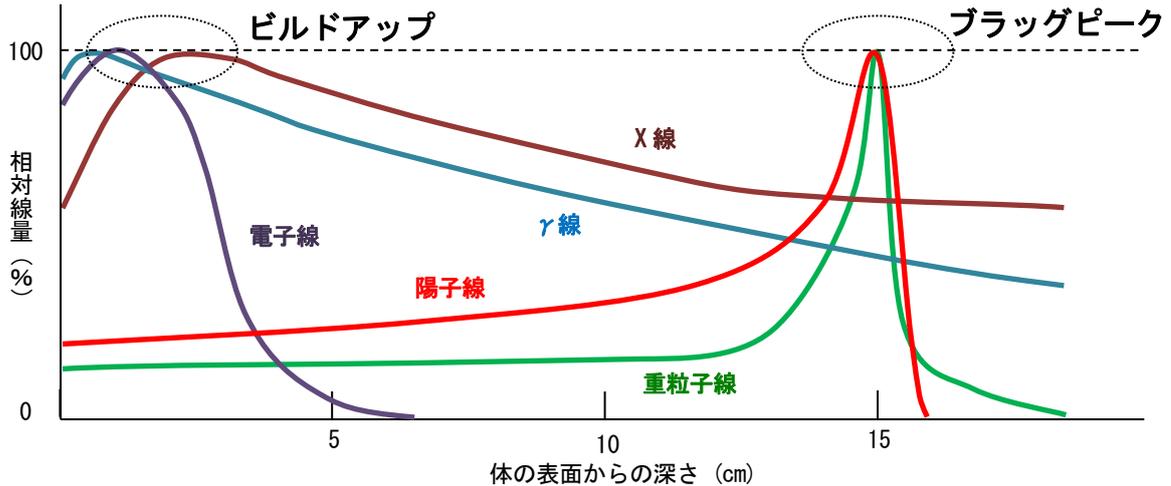
放射線の線量は、体の表面から深部に入るにつれて変化する。線量の最大値を100%としたときの、各深部での線量の比を「相対線量」という。体の表面からの深さに応じた相対線量の推移を表すと次のグラフのようになる。

X線や電子線は、体の表面から少し奥に入ったところに、線量のピークがある。これは「ビルドアップ」と呼ばれる。一方、陽子線や重粒子線は、体の表面から一定の深さに達したあたりに、線量のピークが急に出現する。これは、「ブラッグピーク」と呼ばれる。

放射線治療では、ビルドアップやブラッグピークといった特徴を、上手に用いることがカギとなる。

<sup>9</sup> 「全国放射線治療施設の2015年定期構造調査報告(第1報)」(公益社団法人 日本放射線腫瘍学会)より。

図表 12. 放射線の種類による体内の到達度の違い



※「患者さんと家族のための放射線治療 Q&A 2015 年版」(公益社団法人 日本放射線腫瘍学会, 金原出版, 2015 年)をもとに、筆者作成

#### 4—放射線治療の分類

ここからは、さまざまな放射線治療について、代表的なものを分類してみたい。

##### 1 | 放射線治療は、外部照射、小線源療法、内用療法に分けられる

ひとくちに放射線治療といっても、その種類は多い。大きくは、身体の外側から放射線を当てる外部照射と、内側から当てる小線源療法、内用療法に分けることができる。

###### (1) 外部照射

外部照射は、身体の外側から腫瘍に放射線を当てる方法で、放射線治療のなかで最も多く実施されている。外部照射で最もよく使われるのが X 線である。治療で使うものは、検査で使うものよりもエネルギーが高い。また、皮膚や体の表面に近い腫瘍に対しては、電子線が用いられる。

身体の内側から深い位置にあつて、通常の X 線では効きづらい腫瘍には、陽子線や重粒子線が用いられるケースもある。

###### (2) 小線源療法

小線源とは、カプセル、ピン、管、ワイヤーなどに密封された放射性同位元素のことをいう。小線源を管として子宮等のがん病巣付近に挿入する腔内照射と、小さなシード状のカプセルとして組織内に刺入する組織内照射などが小線源療法と呼ばれ、身体の内側から放射線を照射する。

子宮頸がんや、前立腺がんの治療などで用いられることが多い。

###### (3) 内用療法

内用療法の場合、まず放射性同位元素を含む放射性薬剤を、経口薬や静脈注射の形で、体内に取り込む。そして、その放射性薬剤が、がんの病巣に集まる性質を利用して、放射性同位元素が出す放射線を体の内側から照射する。この治療法は、放射性薬剤とがん病巣の関係を活用する。このため、がんの種類ごとに、使用すべき放射性薬剤が決まっている。

ここで、3つの治療法について、治療後の放射線の残存状況を見てみよう。

外部照射の場合、放射線が患者の体を通過すると、がん細胞などの細胞分裂を止める影響は残るが、放射線そのものが体に残るわけではない。したがって、放射線治療を受けた患者から、家族や周囲の人に放射線の影響が広がることはない。

小線源療法の場合、腔内照射では、治療が終了して管を除去した後は、患者の体内に放射線は残らない。一方、組織内照射では、患者の体内に放射性同位元素が留置される。ただし、その放射線は弱く、時間経過とともに低減していく。通常は、家族や周囲の人への影響については安全性が確認されている。しかし、留置直後は影響が強い。このため、医師の指示に従うことが必要となる。

内用療法の場合、治療を受けた患者の尿や体液などから一定期間、放射性同位元素が出てくる。このため、一般に、治療後数日間は専用の病室から外に出ることはできず、家族との面会も不可となる。

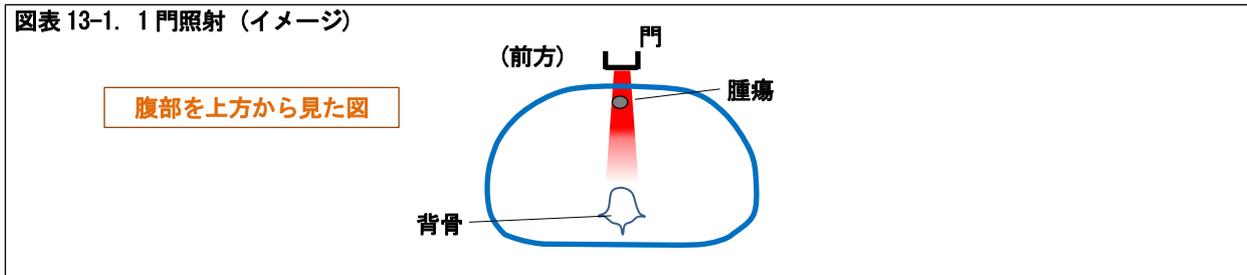
## 2 | 通常の外部照射では、照射部位などに応じて、照射方法が使い分けられる

照射する放射線の本数、角度、種類などの違いにより、通常の外部照射には、さまざまな照射方法がある。ここでは、代表的な照射方法をみていこう<sup>10</sup>。

### (1) 1門照射

1つの方向からの照射法で、皮膚表面やそれに近い部位に用いる。皮膚がんや、ケロイドの治療などで用いられる。

図表 13-1. 1門照射 (イメージ)

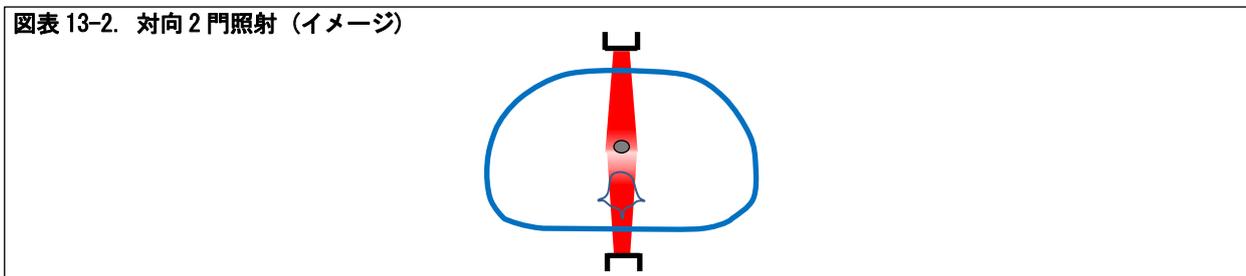


※「患者さんと家族のための放射線治療 Q&A 2015 年版」(公益社団法人 日本放射線腫瘍学会, 金原出版, 2015 年)を参考に、筆者作成 (図表 13-2~5 も同様)

### (2) 対向2門照射

放射線治療において、従来、最も一般的に用いられてきた方法とされる。治療対象の腫瘍を挟み込むように、ビームを配置して照射する。このため、全体に均一な治療を行なうことができる。骨転移、リンパ節転移、全脳照射などの治療で用いられる。

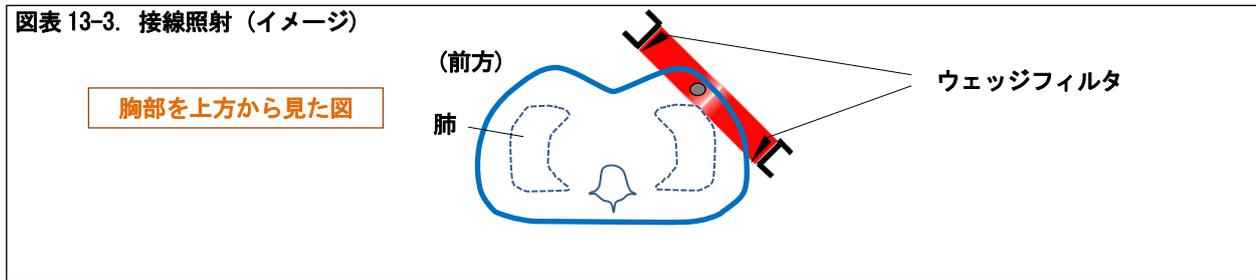
図表 13-2. 対向2門照射 (イメージ)



### (3) 接線照射

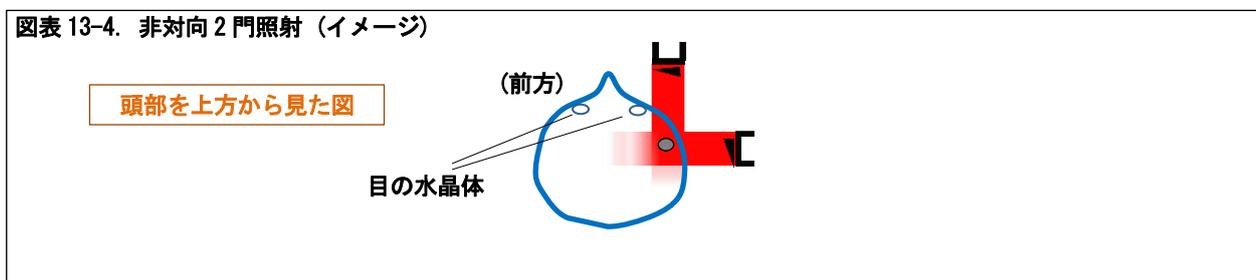
<sup>10</sup> 「患者さんと家族のための放射線治療 Q&A 2015 年版」(公益社団法人 日本放射線腫瘍学会, 金原出版, 2015 年)をもとに、筆者がまとめたもの。

対向2門照射の特殊なタイプに位置づけられる。放射線の広がり部分を重ね合わせるように角度を調整することで、肺などの正常組織への線量を低減させる。「ウェッジフィルタ」という吸収体を用いることで、線量を均一にすることができる。乳房、胸壁、肋骨などの治療で用いられる。



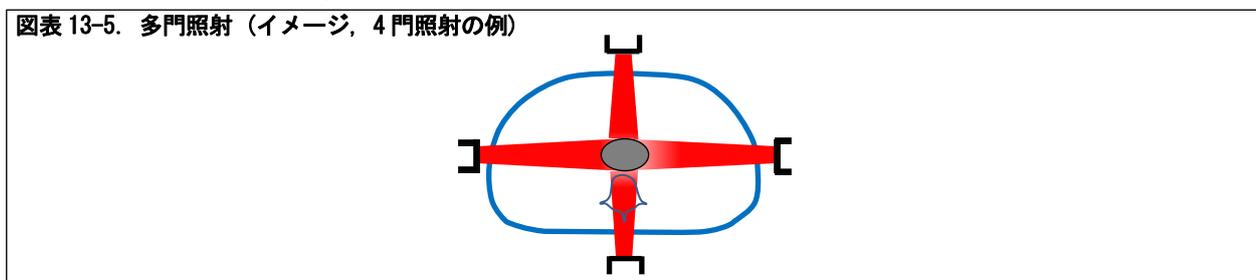
#### (4) 非対向2門照射

主に頭頸部などの偏在性の腫瘍に用いられる照射法。ウェッジフィルタを用いて、線量を均一にすることが多い。上顎や耳下腺などの治療で使用される。



#### (5) 多門照射

複数の方向から照射することで、放射線が集中する中心部以外の線量を抑えることができる。守らなくてはならない臓器への影響を抑えつつ照射する方法として、腹部、骨盤、食道など、多くの部位の治療で用いられている。



#### (6) 3次元原体照射

腫瘍の形に合わせて、線形加速器(リニアック)の照射する範囲の形をコンピュータ制御で常に変化させて、腫瘍に集中した放射線の投与が可能な照射法。照射野を腫瘍の形状に合わせるために、「マルチリーフコリメータ」という、“絞り装置”が用いられる。多門照射や、回転照射(門を回転させながら行う照射)が行われることもある。

#### (7) 全身照射

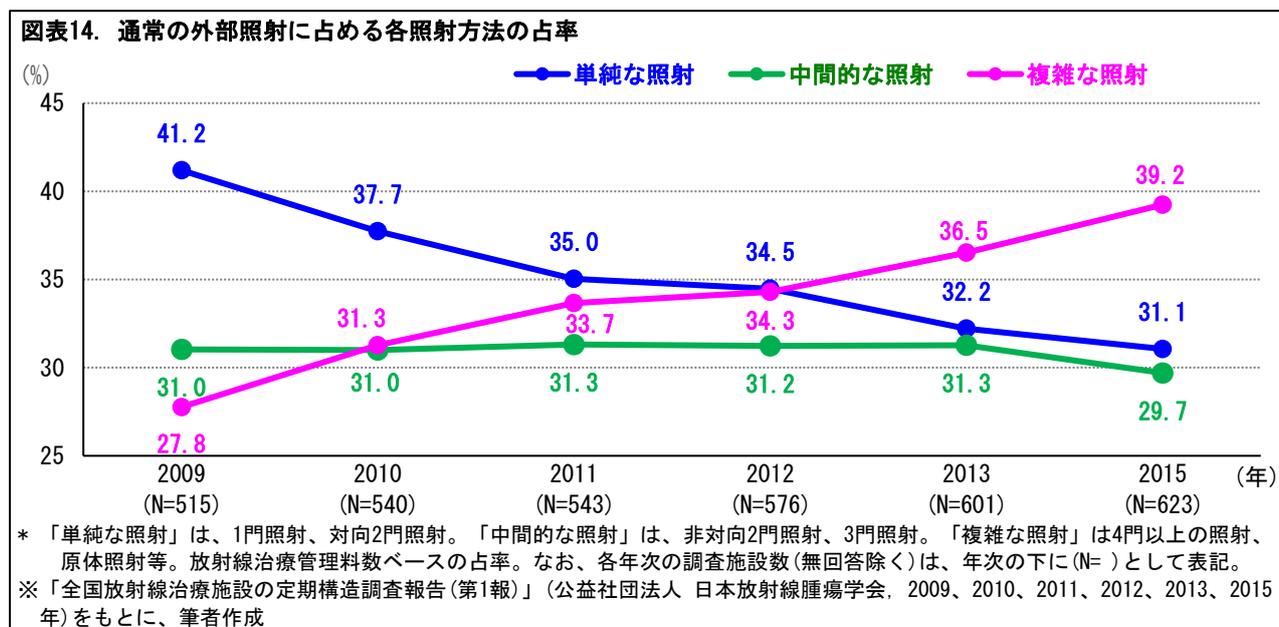
骨髄移植(造血幹細胞移植)の前処置として行われる。放射線によって全身のあちこちに潜む白血病細胞を根絶することや、移植された細胞を異物として拒絶しないことを目指す。

#### (8) 組織や臓器全体の照射

照射対象となる組織や臓器により、全リンパ組織照射 (Total Lymphoid Irradiation, TLI)、胸腹部照射 (Thoraco-Abdominal Irradiation, TAI)、全骨髄照射 (TMI) などの照射方法の種類がある。

なお、(7) 全身照射や、(8) 組織や臓器全体の照射においては、放射線感受性の高い臓器 (目の水晶体、肺、腎臓など) に対して、線量を削減するための遮蔽 (しゃへい) 処置が必要となる。

各照射法の占率の推移をまとめると、次のグラフの通りとなる。単純な照射 (1 門照射や対向 2 門照射) が減る一方、複雑な照射 (4 門以上の多門照射や 3 次元原体照射) が増えていることがわかる。



### 3 | 外部照射の技術革新が進み、高精度放射線治療が行われるようになっている

近年、外部照射の技術革新が進み、腫瘍にピンポイントで放射線を当てる高精度放射線治療が行われるようになっている。簡単にみていこう。

#### (1) 定位放射線照射 (STI <sup>11</sup>)

小さな標的に対して、多方向から高エネルギーの放射線を照射することで、腫瘍部分に高い線量を集中させる。体を固定する装置を用いて照射精度を高めることで、腫瘍にピンポイント照射を行う<sup>12</sup>。その一方で、正常組織への線量は、大きく低減することができる。孤立性肺がん、肝臓がん、脳腫瘍などの治療で用いられる<sup>13</sup>。

#### (2) 強度変調放射線治療 (IMRT <sup>14</sup>)

ビームごとの強度を変えて、複数方向から X 線を照射する。複数のビームを組み合わせることで、腫瘍の形に合わせた照射ができる。その結果、隣接する正常臓器に対する線量を、著しく低下させる

<sup>11</sup> STI は、Stereotactic Irradiation の略。

<sup>12</sup> 照射中心における固定精度については、頭部では 2 ミリメートル以内、体幹部では 5 ミリメートル以内であることが求められる。

<sup>13</sup> 日本では、STI を、大線量を 1 回照射する定位手術的照射 (SRS) と、分割して照射する定位放射線治療 (SRT) に区分することもある。しかし、国際的には区分されていない。日本の診療報酬点数表でも、SRS と SRT の区別はない。

<sup>14</sup> IMRT は、Intensity Modulated Radiation Therapy の略。

ことが可能となる。なお、IMRT では、放射線治療計画装置(RTPS<sup>15</sup>)というコンピュータを用いたインバースプランニング(次章にて詳述)を行って、照射する放射線の計画を立てることが不可欠となる。こうした高度な技術を要するため、現在のところ、治療できる医療施設は限られている。

### (3) 画像誘導放射線治療(IGRT<sup>16</sup>)

精度の高い放射線治療を行うために、治療直前または治療中に撮影した画像を用いて、その画像をもとに治療位置を補正する。撮影装置付きの治療装置を用いて、CT 画像またはX線画像をもとに、照射が行われる。

### (4) 強度変調回転放射線治療(VMAT<sup>17</sup>)

IMRT のうち、放射線を放出する照射ヘッドを含む「ガントリ」といわれる部分を回転させながら、行う照射法をいう。IMRT のように、照射ごとにいちいち患者を静止させる必要がないため、照射に要する時間を大幅に短縮することができるという。

### (5) 陽子線治療

粒子線は、前章でみたとおり、体の表面から一定の深さに達したあたりに、線量のピークが急に出現する「ブラッグピーク」という性質を持つ。腫瘍の体表面からの深さを、このブラッグピークに合わせることで、正常組織への有害事象を減らしながら、がん細胞を死滅させることができる。

### (6) 重粒子線治療

一般に、重粒子線治療で用いられるのは、炭素イオンの粒子であり、陽子線よりも明瞭なブラッグピークを持つ。このため、正常組織への影響を極力抑えつつ、強いエネルギーでがん細胞を死滅させることができる。ただし、重粒子線の発生には、シンクロトロンという大規模な施設が必要となる。

## 4 | 小線源療法の腔内照射は高線量、組織内照射は低線量で行われる

小線源療法は、放射性同位元素を用いて、身体の内側から照射を行なう。この治療法は、放射線治療の黎明期に主流となっていた治療法で、第2次世界大戦前には、がんの根治治療として、ほとんど唯一の治療法とされていた。

### (1) 腔内照射

子宮、食道、気管などの腔内に、小線源を挿入する。小線源とは、カプセル、ピン、管、ワイヤーなどに密封された放射性同位元素をいう。

### (2) 組織内照射

小線源を刺入などの方法で、組織に埋め込む。

### (3) モールド照射

皮膚や粘膜上の表在性の腫瘍に対して、モールドという小線源を配置したアプリケータを密着させて照射する。口腔がんを含む頭頸部がんの治療に用いられる。機能の温存や、整容性(容貌・外見のこと)の保持をはかることができる。

一般に、腔内照射には高い線量の放射線が用いられる。特に、子宮頸がんの治療では、RALS<sup>18</sup>(遠隔

<sup>15</sup> RTPS は、Radiotherapy Treatment Planning System の略。

<sup>16</sup> IGRT は、Image-Guided RadioTherapy の略。

<sup>17</sup> VMAT は、Volumetric Modulated Arc Therapy の略。

<sup>18</sup> RALS は、Remote After Loading System の略。

操作式治療装置)が用いられ、施術者の被曝を防いでいる。治療に要する照射の時間は、数分間程度であることが一般的である。放射性同位元素として、イリジウム-192 や、コバルト-60 が用いられる。

一方、組織内照射には低い線量の放射線が用いられる。前立腺がんの治療では、放射性同位元素を密封した小さなシード状カプセルを複数、腫瘍部位に刺入留置する。照射期間には、数日間照射するものから、永久照射のものまである。放射性同位元素として、ヨウ素-125 や、金-198 が用いられる。

## 5 | 内用療法は、病気の種類ごとに、放射性同位元素が使い分けられる

内用療法は、放射性薬剤とがん病巣の関係を活用する。このため、病気の種類に応じて、用いられる放射性同位元素が決まっている。主な治療を、いくつかみていこう。

### (1) 甲状腺機能亢進症(バセドウ病等)

甲状腺にはヨウ素が集まりやすい。そこで、経口薬として、放射性同位元素のヨウ素-131 を含む薬剤を体内に入れる。治療後は、専門病室に1週間入院することが必要となる。

### (2) がんの骨転移に対する疼痛緩和

骨転移のある腫瘍部位は、骨の代謝が進んでいるため、カルシウムが多く取り込まれる。そこで、カルシウムに似た性質を持つストロンチウムを用いて治療を行う<sup>19</sup>。注射薬として、ストロンチウム-89 を静脈注射で体内に入れることで、腫瘍部位に放射線を照射する。

### (3) 悪性リンパ腫

悪性リンパ腫の細胞表面には、CD20 抗原というタンパク質がある。このタンパク質に、特異的に結びつく抗 CD20 抗体という物質がある。そこで、この抗 CD20 抗体に、放射性同位元素を結合させたものを注射薬として、静脈注射する。放射性同位元素としては、イットリウム-90 が用いられる。

### (4) 去勢抵抗性前立腺がんの骨転移

注射薬として、ラジウム-223 を含む薬剤を静脈内に投与する、放射性同位元素は、カルシウムの代謝が亢進している骨転移部位に集積し、高エネルギーの $\alpha$ 線が放出される。 $\alpha$ 線が骨転移部分に作用することで治療ができる。

## 5—放射線治療計画の策定

放射線治療には、事前の計画策定が欠かせない。その内容を概観してみよう。

### 1 | 放射線治療では、綿密な治療計画を立てる

放射線治療を行う場合、治療効果を高めつつ、有害事象を減らすことがポイントとなる。そこで、治療の前に、綿密な治療計画を立てることが不可欠となる。

近年は、その計画策定にあたり、CT 検査による「CT シミュレーション」が行われることが一般的となっている。CT シミュレーションでは、まず、患者に実際の放射線治療の寝台と同様の台に寝てもらい、照射する部位を CT 撮影する。そして、CT 画像をもとに、治療すべき腫瘍の範囲や、被曝を避けるべき正常臓器を定める。必要な場合には、PET 検査や MRI 検査を行って、その画像を参照したり、医師の所見を参考にしたりする。そのうえで、放射線を照射する範囲、放射線の角度、本数、強さなどを計算して決めていく。なお、計算の際は、患者の年齢、体力、併用する治療法なども加味される。

<sup>19</sup> カルシウムとストロンチウムは、いずれも元素周期表上、アルカリ土類金属に属している。

従来、照射する範囲等を、医師が手計算で決めていた。近年は、放射線治療計画装置(RTPS)と呼ばれるコンピュータの導入が進んでおり、これを用いて行われることが多くなっているという。

## 2 | 放射線治療に必要な総線量は、がんの種類によって異なる

放射線治療計画では、さまざまな項目について、治療内容を計画していく。少し、みていこう。

### (1) 照射時の姿勢

放射線治療では、予定した照射範囲に、正確に放射線を照射する必要がある。そこで、照射部位に応じて、照射時の姿勢が決められる。その際、照射中に照射部位が動かないように、固定具が用いられることもある。また、分割照射では、毎回、照射時に同じ範囲の照射ができるよう、皮膚や固定具に印が書かれる。患者には、入浴時などに、皮膚に書かれた印をこすって消さないことが求められる。

### (2) 照射範囲

照射範囲は、原則として、対象の腫瘍全体をカバーするように設定される。その際、目視では捕捉できない腫瘍の広がり、呼吸や心拍等に伴う位置の変動、患者の固定や照射機器に関する精度などをマージンとして含める必要がある<sup>20</sup>。一方、腫瘍の近くにある正常組織への照射は極力避けなくてはならない<sup>21</sup>。両者が重複する場合には、どちらを優先するか、慎重に検討する必要がある。

また、具体的な治療計画として、まず設定した照射範囲全体に照射し、その後、明らかに腫瘍がある範囲だけに追加の照射を行なうことで、領域に応じて線量に差を設けることも行われている。

### (3) 総線量と照射回数

放射線治療では、総線量が重要な要素となる。治療に必要な総線量は、がんの種類によって異なる。放射線感受性が高いがんは、少ない線量でも、がん細胞を死滅させることができる。一方、感受性が低いがんは、治療に多くの線量が必要となる。その結果、周囲の正常細胞への有害事象も大きくなる恐れがある。

図表 15. 各がん腫の治療に必要な線量

	がん (例)	総線量
放射線感受性 ↑ ↓	悪性リンパ腫、精巣腫瘍	30~40Gy
	肺の小細胞がん	45~55Gy
	頭頸部、食道、子宮頸部などの扁平上皮がん	60~70Gy
	乳房、前立腺、肺、直腸、子宮体がんなどの腺がん	70~80Gy
低 (放射線が効きにくい)	骨肉腫、甲状腺がん、悪性神経膠腫、悪性黒色腫	80Gy 以上

\* 60Gy 以上照射するには工夫が必要で、実際には困難な場合もある。

※「患者さんと家族のための放射線治療 Q&A 2015 年版」公益社団法人 日本放射線腫瘍学会編(金原出版, 2015 年)をもとに、筆者作成

### (4) 照射回数

患者の病状、体力、併存疾患の有無、患者が希望する治療期間に応じて、分割して照射する回数は

<sup>20</sup> 肉眼で確認できる「肉眼的腫瘍体積」に、臨床的に進展が疑われる部分を加えて「臨床的標的体積」とする。これに、呼吸や心拍等に伴う位置の変動のマージンを加えて、「体内標的体積」とする。さらに、患者固定の精度や照射機器の精度を踏まえたマージンを加えて、「計画標的体積」とする。

<sup>21</sup> 標的の近くにある正常組織は「危険臓器」と呼ばれる。これに、変動のマージンや精度のマージンを加えて、「計画危険臓器体積」が決定される。計画危険臓器体積は、計画標的体積と重なることがある。

異なる。また、放射線治療を行うのが、通常の直線加速器なのか、トモセラピーやサイバーナイフといった特殊な機器なのかによっても、分割回数に違いが出る可能性がある。

### 3 | 放射線の方向、形、分布の設定には、2つの方法がある

放射線治療計画では、標的範囲に、放射線をどの方向から、どういう形で当てるか、標的範囲に当たる放射線の分布をどうするか、といった具体的な項目について決める必要がある。これには、大きく2つの方法がある。

#### (1) フォワードプランニング

放射線の方向と形を決めて、その結果、放射線の分布がどうなるのかを計算する方法。均一な放射線を用いるリニアック等の通常の照射では、このような計画が行われる。

#### (2) インバースプランニング

放射線の分布を先に決めて、それを実現するために放射線の方向と形を不均一に変化させる。強度変調放射線治療(IMRT)では、不均一な放射線を照射することが可能となる。そこで、放射線の分布を先に決めることができる。なお、実際の計画策定では、放射線治療計画装置(RTPS)という専用のコンピュータを用いた計算が行われる。

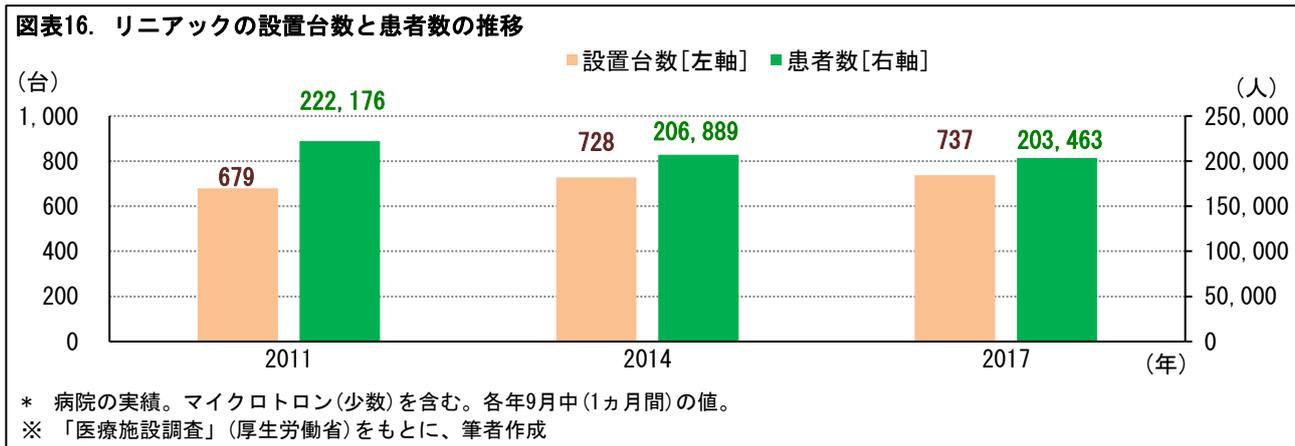
## 6—放射線治療装置

放射線治療には、放射線を照射するためのさまざまな装置が用いられる。簡単に、みていこう。

#### (1) 普及型リニアック

1門照射、2門照射、多門照射などの基本的なX線照射を行なう場合に使用される普及型の装置。直線加速器で加速された電子が、ターゲットの金属板に衝突して、X線を発生させる。このX線を治療に用いる。現在、日本の放射線治療で、最も汎用的に使用されている装置とされる。

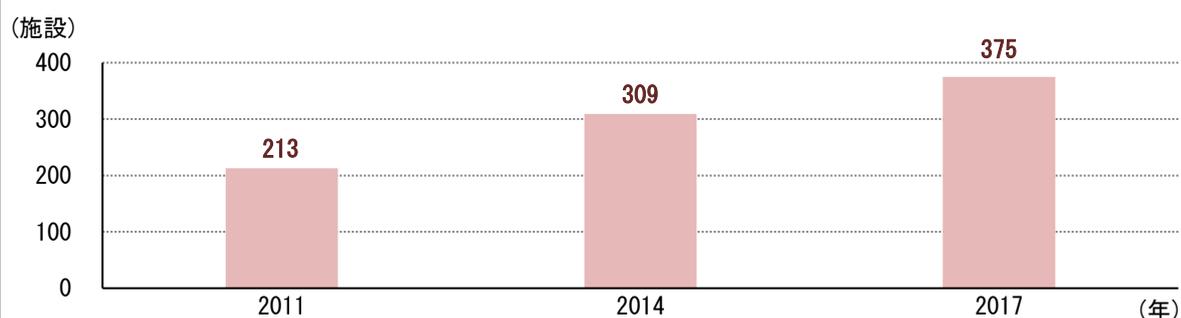
近年、設置台数は増えている一方、患者数は減少している。今後は、高精度のIMRTやIGRTの増加とともに、高精度・高機能型リニアックに移行していくものとみられる。



#### (2) 高精度・高機能型リニアック

IMRT、IGRT、VMATといった高精度のX線治療を行なう装置。複雑な病巣の形態に応じて、線量集中が可能であり、周囲の正常組織への過剰照射を防ぐことができる。リニアックとCT装置が一体化している。近年、高精度放射線治療として、IMRT等を行う医療施設の数、徐々に増加している。

図表17. IMRT等の高精度照射の実施施設数の推移



\* 病院と一般診療所の合計。各年9月中(1ヵ月間)の値。  
 ※ 「医療施設調査」(厚生労働省)をもとに、筆者作成

(3) トモセラピー

CT装置において、検査のためのX線発生装置に替えて、小型の直線加速器を設置した構造をしている。治療用の高エネルギーのX線を出しながら寝台が動く。このため、全身照射や全リンパ組織照射を効率的に行うことが可能となる。

(4) サイバーナイフ

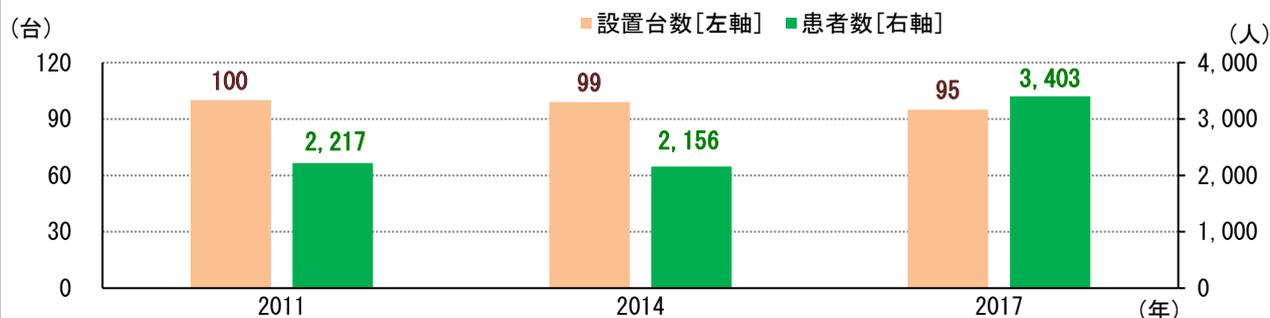
定位放射線照射を行なうための装置。高精度の産業用ロボットアームの先端に、小型の直線加速器を搭載している。このロボットアームが、身体の周囲を自由に動くことで、腫瘍への集中的な治療を可能としている。仮に、治療中に、呼吸に合わせて患者の身体が動いても、病巣を追尾してX線を照射する機能(追尾機能)を持っており、複雑な形態の病巣に対しても効率的な治療が可能とされている。

(5) ガンマナイフ

頭部に対して、定位放射線照射を行なうための装置。頭部を覆うヘルメット型の構造物の中に、201個のコバルト-60線源が設置されている。この線源から出る多数のγ線を、脳内の病巣に集中的に照射する。治療の際は、局所麻酔をかけたうえで、頭蓋固定フレームで頭部を固定することで、CTやMRIの画像で病変に正確に照射する。

近年、サイバーナイフとガンマナイフの設置台数は、あわせて100台程度で推移している。患者数は、2017年に増加している。

図表18. サイバーナイフとガンマナイフの設置台数と患者数の推移



\* 病院と一般診療所の合計。各年9月中(1ヵ月間)の値。  
 ※ 「医療施設調査」(厚生労働省)をもとに、筆者作成

## (6) 陽子線治療装置

サイクロトロンまたはシンクロトロンという、円形加速器<sup>22</sup>で作られる陽子線を用いて、治療が行われる。陽子線には、身体の一定の深さで、線量が高くなるブラッグピークという特徴がある(第3章参照)。そこで、このブラッグピークを腫瘍部位に一致させることで、正常組織への線量を抑えつつ、腫瘍部位に線量を集中することができ、効果的な放射線治療が可能となる。

## (7) 重粒子線治療装置

シンクロトロンで作られる重粒子線を用いて治療が行われる。陽子線治療装置と同様、ブラッグピークを用いた効果的な治療ができる。重粒子線は、陽子線よりも、ブラッグピークでの線量の上昇が明瞭であるため、正常組織への線量抑制と、腫瘍への線量集中のメリハリの効いた治療効果を上げることができる。

## (8) ホウ素中性子捕捉療法装置

まず、体内にホウ素化合物を投与する。腫瘍にホウ素が集積した段階で、エネルギーの低い中性子<sup>23</sup>を腫瘍に照射する。細胞内でホウ素と中性子が核反応して、 $\alpha$ 線が発生する。この $\alpha$ 線は、飛行距離が短い(0.009 ミリメートルほど)ため、主に腫瘍細胞だけに障害をもたらす。なお、ホウ素中性子捕捉療法は、新たな放射線治療法として期待されているが、まだ研究段階にあり、本格的な実用化までには時間を要するとみられている。

## 7—放射線治療の有害事象

医療で行われる治療には、多くの場合、副作用などの有害事象が付随する。放射線治療の場合も、放射線が正常細胞に当たることで、一定の有害事象が出る。有害事象は、大きく、急性期反応と晩期反応に分けられる<sup>24</sup>。

### 1 | 急性期反応は、回復することが一般的

通常、放射線治療を開始してから、2、3週目以降に急性期反応が生じる。正常細胞のうち、活発に分裂・増殖するもの、分裂・増殖の期間が長いもの、幼若・未分化なものほど、悪影響が出やすくなる。主な影響は、母細胞の減少・機能障害などで、治療終了後に一定期間を経て回復することが一般的となる。

急性期反応は、粘膜、皮膚、骨髄、腸上皮、生殖腺などにみられる。

<sup>22</sup> サイクロトロンは、一様な磁場を発生させる電磁石とその磁場の中に入れられた加速電極からなる。荷電粒子の軌道は螺旋(らせん)形となる。高エネルギーを得るには磁石を大きくする必要があるが、それには限界がある。シンクロトロンは、磁場をエネルギーの増加に合わせて時間とともに変化させ、軌道半径を一定に保ちながら、粒子を加速させる。荷電粒子の軌道は円形となる。一般には、直径7メートル以上の円形加速器が用いられる。1つのシンクロトロンだけでは、到達エネルギーに限界があるため、何段かの円形加速器で、次々とエネルギーを上げていく「ブースター方式」がとられる場合もある。このため、一定規模の施設が必要となる。

<sup>23</sup> 熱中性子または熱外中性子のこと。中性子は、運動エネルギーに応じて、冷中性子、熱中性子、熱外中性子、低速中性子、中速中性子、高速中性子、超高速中性子(運動エネルギーが小さいほうから並べたもの)に分類される。

<sup>24</sup> 照射による発がん(二次がん)の可能性もゼロではない。しかし、喫煙や不健康な生活、発がんウイルス感染などと比較すると、発がんの確率はかなり小さいとされる。近年の放射線治療では、正常細胞への照射を抑制しているため、発がんのリスクは極めて小さいとされる。

## 2 | 晩期反応は、回復困難な場合が多い

晩期反応は、照射後数ヵ月以上経ってから生じる。主な症状は、組織の繊維化や血行障害などで、非可逆的で回復困難な場合が多い。

晩期反応は、萎縮、難治性潰瘍、瘻孔、繊維化、瘢痕化などとして現れる。

## 3 | 放射線が人体に与える影響には、確定的影響と、確率的影響がある

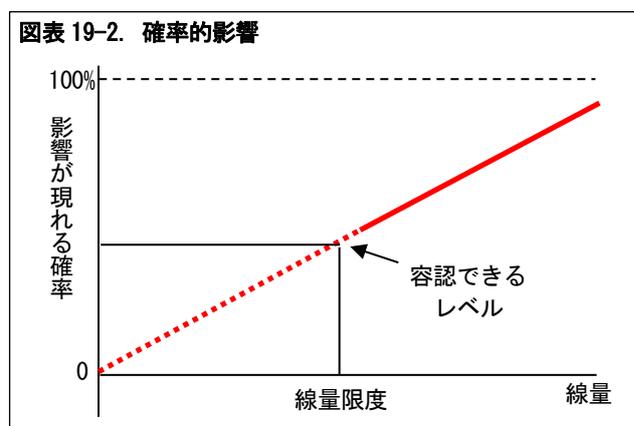
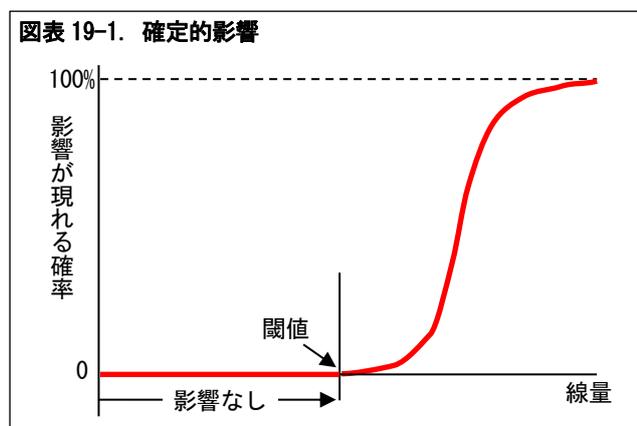
放射線が人体に与える影響には、さまざまなものがある。影響が出現の仕方として、大きく、確定的影響と確率的影響の2つの種類に分けられる。

### (1) 確定的影響

線量を横軸、影響が出る確率を縦軸にとると、S字カーブとなる。照射する線量が、ある閾値(しきいち)を超えると、影響が現れる確率が急上昇する。線量がさらに増えると、影響が高率で出現するようになる。確定的影響の例として、脱毛、血球減少、皮膚炎(紅斑、落屑)、白内障、不妊などがある。臓器障害の多くは、確定的影響に該当するといわれる。

### (2) 確率的影響

特に閾値はなく、照射する線量と影響が出る確率の間に明確な関係はみられない。一般的には、線量が多いほど影響が出る確率が上昇するが、そこには確率的な要素が入り込み、「線量が少ないから絶対に出現しない」とか、「線量が多いから必ず出現する」などとは言い切れない。容認できるレベルの線量を、線量限度として設定する。確率的影響の例として、がんや白血病、遺伝的影響があげられる。



※「がん放射線療法ケアガイド 第3版」祖父江由紀子、久米恵江、土器屋卓志、濱口恵子編(中山書店、2019年)等を参考に、筆者作成

放射線治療の実施においては、これら2つの影響を踏まえて、有害事象の回避や軽減が行われる。実際の放射線治療では、第3章で述べた「5年間で5%に副作用を生ずる線量」等を、リスク臓器の耐容線量の基準として設定して、これを超えないように、治療計画を立てることが一般的とされている。<sup>25</sup>

<sup>25</sup> 「やさしくわかる放射線治療学」(公益社団法人 日本放射線腫瘍学会, 学研メディカル秀潤社, 2018年)をもとに、筆者がまとめた。

## 8—おわりに（私見）

前稿（前編）と本稿の2回に分けて、放射線医療を巡るさまざまなトピックスを概観してきた。放射線医療が、高度画像診断や、がんの高精度治療などを通じて、現代の医療の基盤をなしていることを、感じ取っていただけたかと思う。

本章では、まとめとして、放射線医療について、筆者の私見を述べることにしたい。

### 〔1〕 定期的に放射線等の画像検査を受けて、健康管理に生かそう

現在の医療では、放射線などを用いた画像検査・診断が頻繁に行われている。たとえば、人間ドックでは、胸部単純X線撮影や、バリウム・発泡剤などの造影剤を用いる胃部X線透視検査、腹部の超音波検査などが行われている。

これらの画像検査により、体内の臓器や組織の状態を視覚的にとらえることができるとともに、早期に腫瘍を見つけて、必要な処置につなげることもできる。

放射線を用いた検査では、ごく少量の被曝は避けられない。この被曝量は、健康面に支障を及ぼすものではないとされている。定期的に放射線等の画像検査を受けて、その結果を、以後の健康管理に生かしていくことが、これからの予防医療のあるべき姿といえるだろう。

### 〔2〕 形態や機能が温存でき、通院治療が可能であるなど、放射線治療の利点を理解しよう

放射線治療は、手術と異なり、臓器・組織の形態や機能が温存できる。また、化学療法と違って、治療後の有害反応は、通常、照射した局所にとどまり、全身的なものにはならない。そして、こうしたことから、原則として入院は不要であり、仕事や学校を続けながら、通院で治療ができる。

放射線治療の技術は、徐々に、高度化している。現在は、IMRT や IGRT など、腫瘍にピンポイントで正確に高エネルギーの放射線を照射し、周囲の正常細胞への照射を極力減らすことが可能となっている。こうした技術革新は、今後のがん治療を大きく変えていくものと考えられる。

しかし、残念ながら、日本は、欧米に比べて、放射線治療を受ける患者の割合がかなり低い。放射線に対する、患者や家族の不安感や恐怖感が根強いものと考えられる。

もし仮に、自分や家族が、患者として放射線治療を受けることになった場合には、医師の説明をよく聞いて、正確な知識をもとに不安感を減らしていくことが大切ではないかと考えられる。

### 〔3〕 放射能をむやみにこわがって、放射線医療を忌避するのはやめよう

放射線には、色も音も臭いもない。このため、被曝しても人間の五感で感じ取ることはできない。日本では、第2次世界大戦中の広島、長崎での原子爆弾による被爆や、2011年の東日本大震災での原子力発電所事故による放射能漏れや土壌汚染を通じて、放射能は恐ろしいものという意識が一般の人に浸透しているものと思われる。

放射能被曝が、恐れるべきものであることに、疑いの余地はない。しかし、放射能をただむやみにこわがって、放射線を利用した検査や治療を忌避することは、現代の高度な医療技術の恩恵を放棄することにつながってしまう。

放射能に対する恐れを、いったん横に置いて、虚心坦懐に、実際の姿を眺めることが求められる。そのことが、放射線医療を、健康維持や病気の治療に、上手に活用するための第一歩となろう。

## 【参考文献・資料】

(下記1~8の文献・資料は、包括的に参考にした)

1. 「やさしくわかる放射線治療学」公益社団法人 日本放射線腫瘍学会監修(学研メディカル秀潤社, 2018年)
2. 「がん放射線療法ケアガイド 第3版」祖父江由紀子、久米恵江、土器屋卓志、濱口恵子編(中山書店, 2019年)
3. 「患者さんと家族のための放射線治療 Q&A 2015年版」公益社団法人 日本放射線腫瘍学会編(金原出版, 2015年)
4. 「知っていますか? 放射線の特性と画像原理 -すべての医療従事者(事務職員、看護師、技師、研修医、医師)のための放射線科ガイドナース-」今西好正編著(医療科学社, 2013年)
5. 「癌の画像診断、重要所見を見逃さない -全身まるごと!各科でよく診る癌の鑑別とステージングがわかる」堀田昌利著(羊土社, 2018年)
6. 「希望の最新医療 奇跡の放射線治療 -脳腫瘍・頭頸部癌・肺癌・乳癌・食道癌・肝細胞癌・膵臓癌・前立腺癌・子宮頸癌・悪性リンパ腫 ほかに-」桜の花出版 取材班編(桜の花出版, 2016年)
7. 「がん治療を支えるチーム医療 -診療放射線技師-」熊谷孝三著(PILAR PRESS, 2009年)
8. 「がんの時代」中川恵一著(海竜社, 2018年)

(下記の文献・資料は、内容の一部を参考にした)

9. 「放射線治療の歴史」伊丹純(RADIOISOTOPES, 公益社団法人 日本アイソトープ協会, 2011年(60巻) pp385-392)
10. 「広辞苑 第七版」(岩波書店)
11. 「全国放射線治療施設の定期構造調査報告(第1報)」(公益社団法人 日本放射線腫瘍学会, 2009、2010、2011、2012、2013、2015年)
12. 「第3回 がん対策推進協議会」(厚生労働省, 中川恵一氏提出資料, 2007年5月7日)
13. 「がん放射線治療パーフェクトブック」唐澤久美子・藤本美生編(学研メディカル秀潤社, 2016年)
14. 「先進医療を実施している医療機関の一覧」(厚生労働省ホームページ)  
<https://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/isei/sensiniryu/kikan02.html>
15. 「医療施設調査」(厚生労働省)