

# 放射線検査・治療と 医学物理士の役割

令和2年8月27日現在

鹿児島現代物理勉強会

御願 悟志

# PET検査とは

- **Positron Emission Tomography**  
(陽電子放出断層撮影) の略
- 放射能を含む薬剤を用いる核医学検査の一種。
- 放射性薬剤を体内に投与し、その分析を特殊なカメラでとらえて画像化する。
- がんは、実際に腫瘍（できもの）ができたり、体に変化が起きてから見つかることが多く、がん細胞の成長がある程度進んでからでないと発見しにくい。
- 早期発見のため、検査薬を点滴で人体に投与することで、特殊な検査薬で「**がん細胞に目印をつける**」というのがPET検査の特徴である。

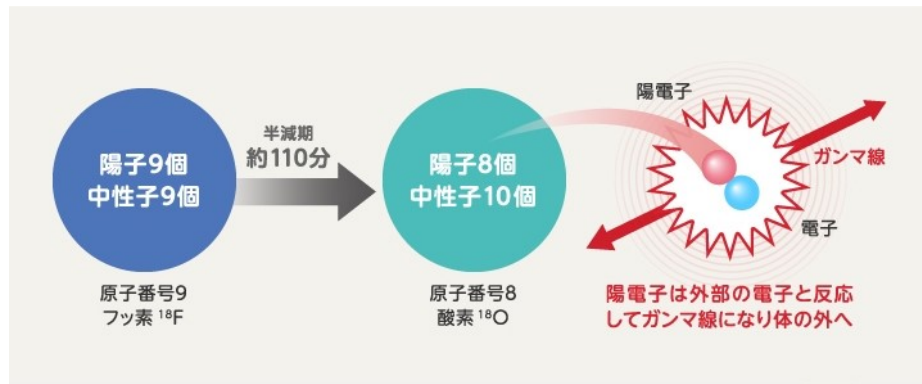
# PET検査の原理（仕組み）（1）

- がん細胞が、正常細胞に比べて3～8倍のブドウ糖を取り込む性質を用いる。
- ブドウ糖に近い成分のフッ素フルオロデオキシグルコース（FDG）検査薬を体内に注射すると、ブドウ糖と同様にグルコーストランスポーターの働きにより細胞に取り込まれFDG6リン酸に変化するが、それ以降の解糖系基質とはならず、解糖系で代謝されないので細胞内に蓄積される。
- （FDG）は、陽電子（ポジトロン）を放出する。
- 陽電子（正の電荷を持つ電子と同じ質量を持つ反粒子）が周囲の電子と結合して消滅するときに180°の方向に放出されるガンマ線を検出することにより細胞の活動状態を画像化できる。
- 物質粒子と反物質粒子の対消滅現象を積極的に活用した検出方法である。

# PET検査の原理（仕組み）（2）

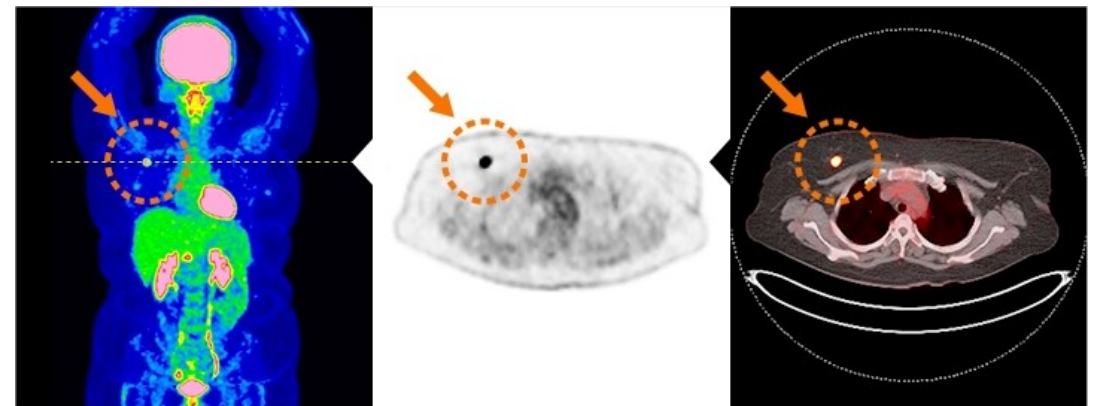
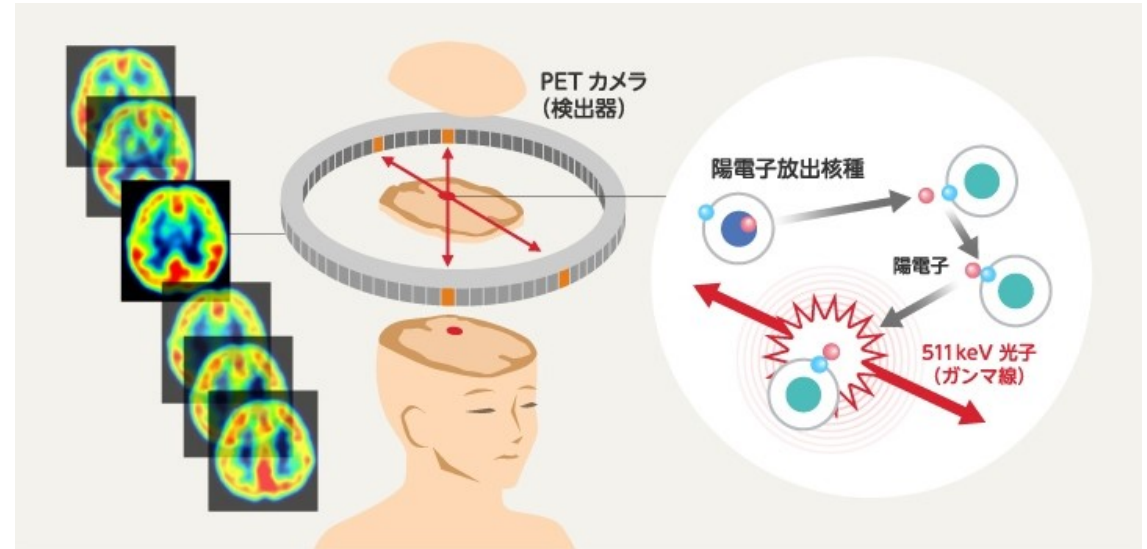
- PETはポジトロン放出核種で標識された放射性薬剤を静脈投与し、1時間後にPETカメラで全身を撮影（20-30分）する。
- 陽電子放出源を取り囲むリング状の検出器システムが、2個の光子を同時に検出して放出源の位置を同定し、その領域のカラー断層画像を作成する。
- PETは陽電子放出核種を代謝活性のある化合物に組み込むため、組織機能に関する情報が得られる。
- standard uptake value (SUV) は、病変の代謝活性を示す。
- 典型的にはSUVが高いと、色の強度が増す。
- FDGの集積度は腫瘍細胞の増殖速度、悪性度、腫瘍細胞量と相関し、悪性リンパ腫は悪性腫瘍の中でも特にFDGの集積を示す。

# PET検査の原理（仕組み）（3）



フッ素 $^{18}\text{F}$ から酸素 $^{18}\text{O}$ への変化

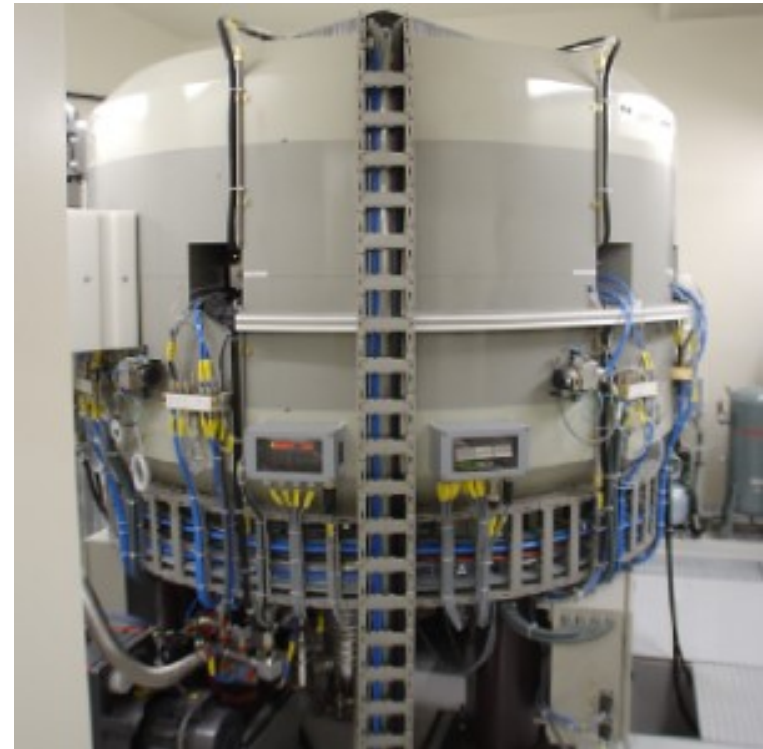
|              |          |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |
|--------------|----------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| アミノ酸から酸素への変化 |          |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           | He<br>2  |          |          |          |          |          |
| H<br>1       |          |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           | B<br>5    | C<br>6   | N<br>7   | O<br>8   | F<br>9   | Ne<br>10 |          |
| Li<br>3      | Be<br>4  |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           | Al<br>13 | Si<br>14 | P<br>15  | S<br>16  | Cl<br>17 | Ar<br>18 |
| Na<br>11     | Mg<br>12 |                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           | Ga<br>31 | Ge<br>32 | As<br>33 | Se<br>34 | Br<br>35 | Kr<br>36 |
| K<br>19      | Ca<br>20 | Sc<br>21        | Ti<br>22  | V<br>23   | Cr<br>24  | Mn<br>25  | Fe<br>26  | Co<br>27  | Ni<br>28  | Cu<br>29  | Zn<br>30  | Ga<br>31  | Ge<br>32  | As<br>33  | Se<br>34  | Br<br>35  | Kr<br>36  |          |          |          |          |          |          |
| Rb<br>37     | Sr<br>38 | Y<br>39         | Zr<br>40  | Nb<br>41  | Mo<br>42  | Tc<br>43  | Ru<br>44  | Rh<br>45  | Pd<br>46  | Ag<br>47  | Cd<br>48  | In<br>49  | Sn<br>50  | Sb<br>51  | Te<br>52  | I<br>53   | Xe<br>54  |          |          |          |          |          |          |
| Cs<br>55     | Ba<br>56 | La-Lu<br>57-71  | Hf<br>72  | Ta<br>73  | W<br>74   | Re<br>75  | Os<br>76  | Ir<br>77  | Pt<br>78  | Au<br>79  | Hg<br>80  | Tl<br>81  | Pb<br>82  | Bi<br>83  | Po<br>84  | At<br>85  | Rn<br>86  |          |          |          |          |          |          |
| Fr<br>87     | Ra<br>88 | Ac-Lr<br>89-103 | Rf<br>104 | Db<br>105 | Sg<br>106 | Bh<br>107 | Hs<br>108 | Mt<br>109 | Ds<br>110 | Rg<br>111 | Cn<br>112 | Nh<br>113 | Fl<br>114 | Mc<br>115 | Lv<br>116 | Ts<br>117 | Og<br>118 |          |          |          |          |          |          |



浜松ホトニクス株式会社HPから

# FDG とは

- **フッ素18(18F)標識デオキシグルコース(FDG)**
- FDG とは、F-18(フッ素)とDG(デオキシグルコース:ブドウ糖に非常によく似た糖の一種)の2つの部分から成り立っている。
- F-18(フッ素)はサイクロトロンで作られ、合成装置でDG と合体される。



# FDGの製造

- F(フッ素)はサイクロトロン(加速器)を用いて製造するが、初期投資コストとランニングコストが共に高額のため、PET 検査を行っていてもサイクロトロンを所有する病院は少ないのが現状。
- FDG は短時間で減衰(半減期110分)してしまうという性質を持ち、精度の高い安定した検査を行うためには、検査施設でサイクロトロンを所有し検査直前に合成・精製することが理想的。
- 現在、最も広く利用されているPET薬剤の[18F]FDGは、ブドウ糖によく似た物質をポジトロン核種の18Fで標識した放射性薬剤で、糖代謝が盛んな部位に多く集まることから、悪性腫瘍やブドウ糖をエネルギー源とする脳の神経活動の評価に使われている。

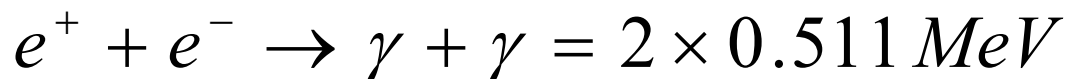
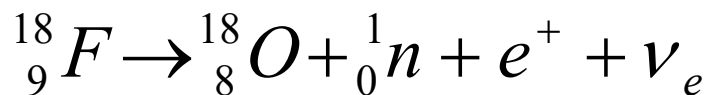
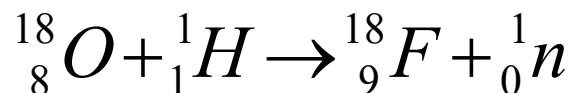
# $\beta$ + 壊変 ( 1 )

- フッ素の放射性同位体である F-18 は、原子核から陽電子を放出し、自分は原子番号の 1 つ小さい酸素の安定同位体 O-18 に変化する。
- F-18 の陽子 1 個が陽電子と中性子になり、陽電子が飛び出し、中性子が残る。結果として陽子が一つ減り、中性子が一つ増える。
- 放出された陽電子は奇妙な運命をたどる。
- 周囲に存在する陰電子(これは軌道電子でも何でもいい)とすぐに 1 対 1 で合体し、電氣的に中和されて、消える。両者の持っていたエネルギーは電磁波として放出される。
- これを消滅放射線といい、同じ量のエネルギー(0.511MeV)を持った 2 本の電磁波がきっちり 180 度逆の方向に向かって直進する。
-

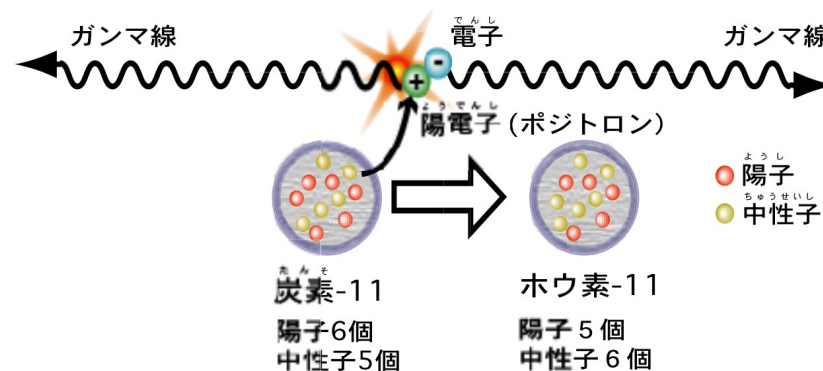


## $\beta$ + 壊変 (2)

- 電磁波は透過性が高いため、体内にある F-18 から発生する消滅放射線は、体を突き抜ける。これを体外でつかまえば、発生源となる F-18 の空間的な居場所を正確に割り出すことができる。
- フッ素 F18 の半減期が 2 時間弱 (110 分)

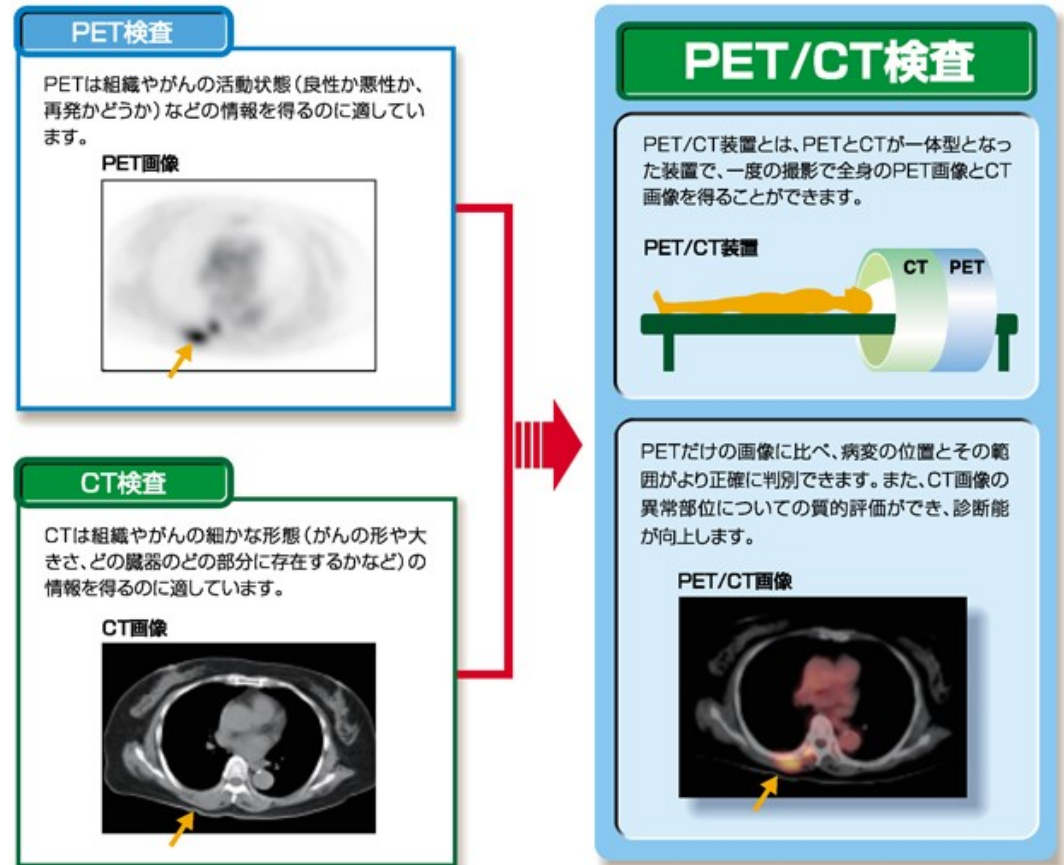


- この原理を核医学診断に応用したものが PET (positron emission tomography) 検査であり、近年急速に普及した。
- $\beta$ +壊変はさほど珍しいものではなく、環境中の自然放射線の中にも、消滅放射線は検出される。



# PET-CT検査

- PET-CTは、PETで得た機能情報（がん細胞の活動状況）を、CTで得た解剖学的情報（臓器の形をしっかりと映し出す）に重ねる、最先端の検査。
- 現在は、CT一体型のPET-CT装置による、PET画像とCT画像の融合診断が主流。
- 1回の検査による全身被曝は3ミリシーベルト程度。PET-CTの場合で～10ミリシーベルトである。



# PET検査の流れ（まとめ）

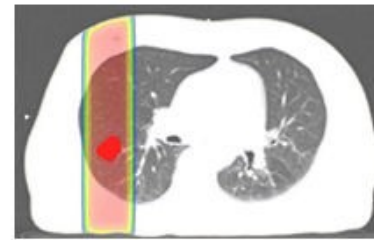
- 核医学検査では、極微量の放射線を出す放射性同位元素（アイソトープ・ $^{18}\text{F}$ ）を標識した薬（放射性医薬品・ $^{18}\text{F}$ -FDG）を静脈に注射して、病気の診断をする。
- 体の中に入った放射性医薬品は、糖代謝の活発な臓器、腫瘍や炎症部位に集まり、陽電子を放出する。陽電子は放出されるとすぐに近くの電子（陰電子）に結合して消滅し、 $\gamma$ （ガンマ）線というX（エックス）線と似た放射線を出します。体の中から出てくるこの $\gamma$ 線を特殊な撮影装置（PET-CT装置）でとらえて、放射性医薬品の分布を写真にする。
- PET-CT装置は非常に精度が高いため、投与する放射性医薬品はほんのわずかであっても、病気を診断する事が出来る。
- FDG-PET検査は、悪性腫瘍の早期発見、病期診断、治療法の選択、治療効果判定等に応用される。
- その他、脳疾患（てんかん）、虚血性心疾患、炎症性疾患などにも有用である。
- しかし一方で、糖代謝の亢進が高くない腫瘍ではFDG集積が低い場合や、活動性炎症や肉芽組織へのFDG集積亢進が腫瘍診断の妨げとなる場合もあり課題として残される。

# 放射線治療

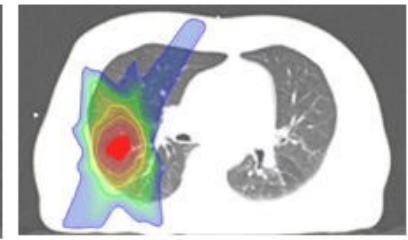
X線を照射する従来の方法ではあるが、X線の照射の仕方を高度にコンピュータ制御することで、精度の高い患部以外の照射量を極力抑える放射線治療が可能になって来ている。(保険適用範囲)



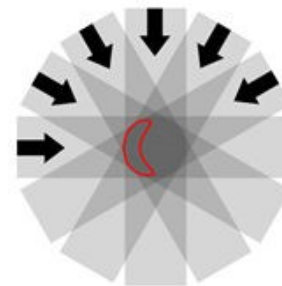
従来の方法



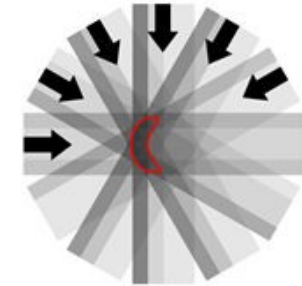
定位放射線治療



3次元原体放射線治療



強度変調放射線治療



九大HPより

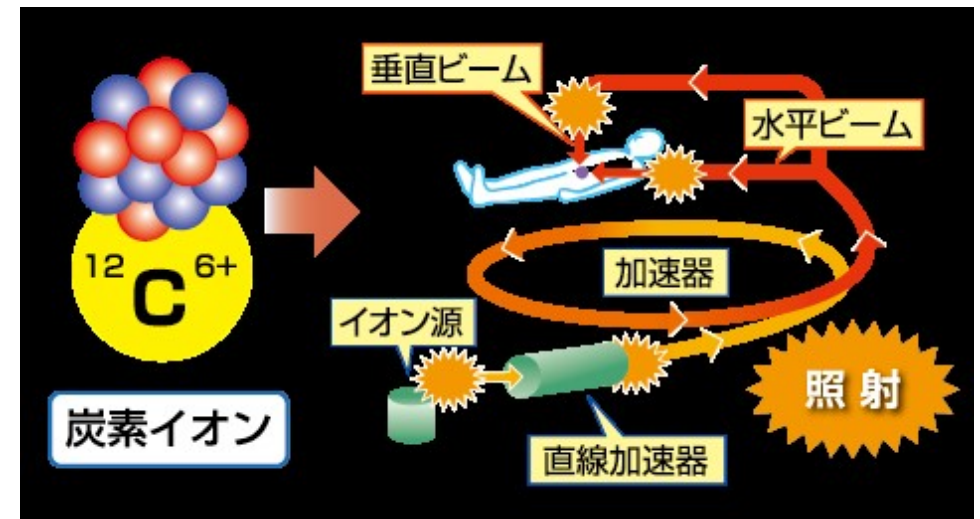
# 粒子線治療（1）

- X線やガンマ線は、電磁波の一種。
- 陽子線、速中性子線、重粒子線（炭素、ネオン、アルゴン等）は、粒子線と呼ばれる。
- 放射線とは一般に電離能力を持った高エネルギー粒子の流れ（線束）。
- 光は最もよく知られた放射線の1つ。
- 特に波長の短い（エネルギーの高い）光をX線・ $\gamma$ 線と呼びます。これらは、電離作用を起こすことから放射線治療に用いられる。
- 粒子線は高エネルギー粒子の流れで、やはり放射線の1つ。
- 粒子とは原子を構成している電子や原子核のことを言う。
- 高エネルギー電子の流れは他の粒子線と区別され、電子線。
- 高エネルギー原子核の流れは単に粒子線。
- 現在、治療に用いられる原子核は、水素原子核と炭素原子核。

# 粒子線治療（2）



現在使われている粒子線は、  
水素原子核(陽子)と炭素原子核

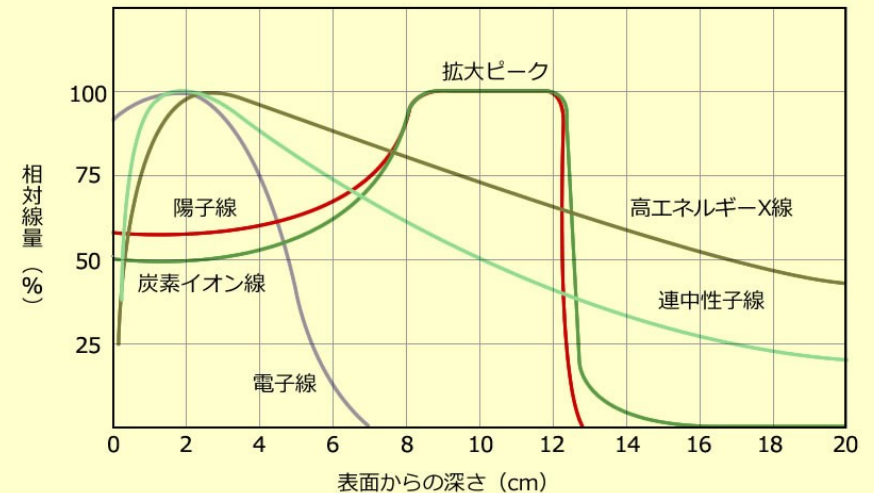


炭素原子核を光速の70%まで加速する。

# 粒子線治療（3）

- 粒子線は体の中まで入り込み、止まる。止まるときに一番多くエネルギーを落とすので、がんの深さでビームが止まるようにすれば、がんに集中して照射が行える。がんより浅いところや深いところに正常臓器があっても、避けることができる。
- いろいろな方向からビームを入れなくてもよいので、少量の放射線が当たる正常臓器の範囲がX線に比べて少ないのも粒子線の強み。

各種放射線の線量分布



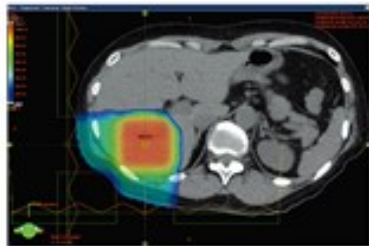
欧米では、成長不全を可能な限り防ぐためにも、小児放射線治療の第一選択に陽子線治療が選ばれる。



# 陽子線治療

## 陽子線治療

陽子線は病巣でとまります



色の濃淡が放射線量を示す

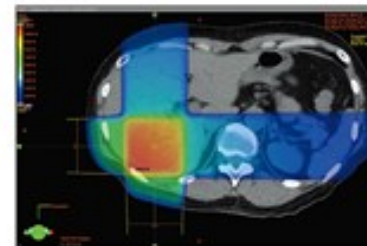
照射エリア

陽子線



## X線治療

X線は病巣を突き抜けます



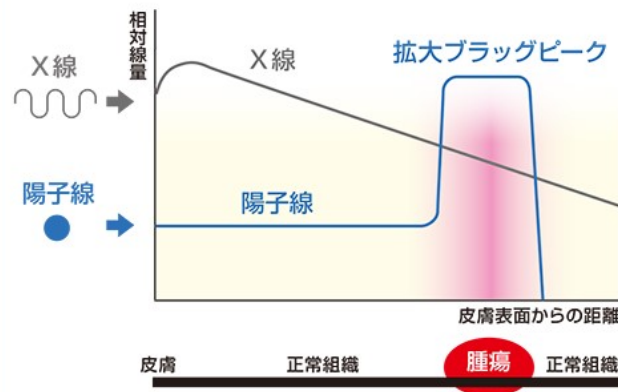
色の濃淡が放射線量を示す

照射エリア

X線



## X線と陽子線の深部特性

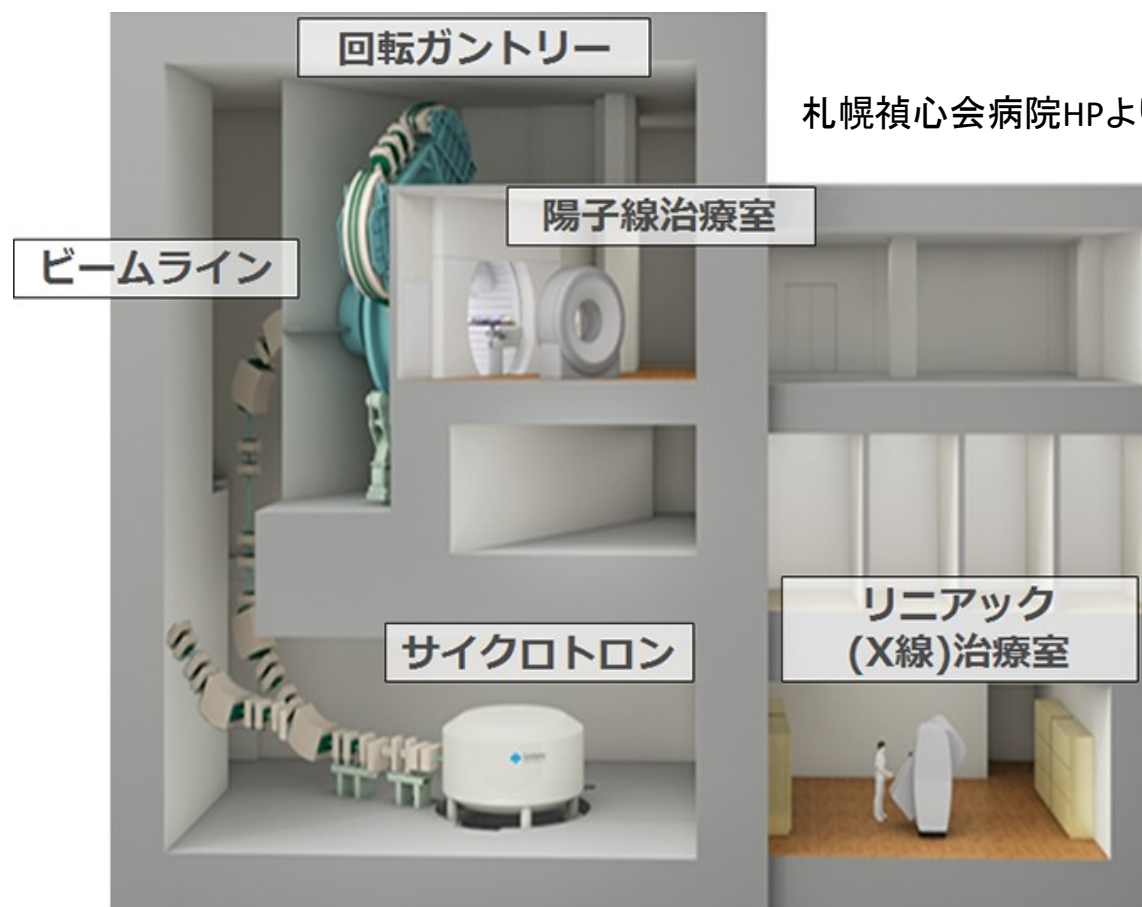
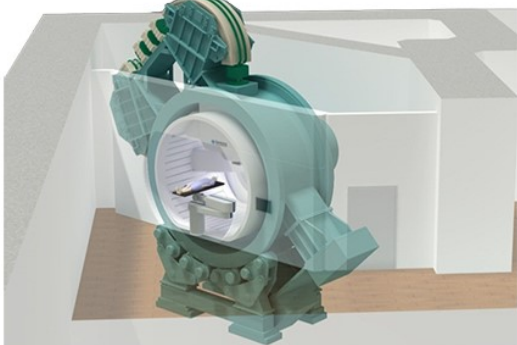




# 陽子線治療施設



サイクロトロン



札幌禎心会病院HPより

回転ガントリー

陽子線治療室

ビームライン

サイクロトロン

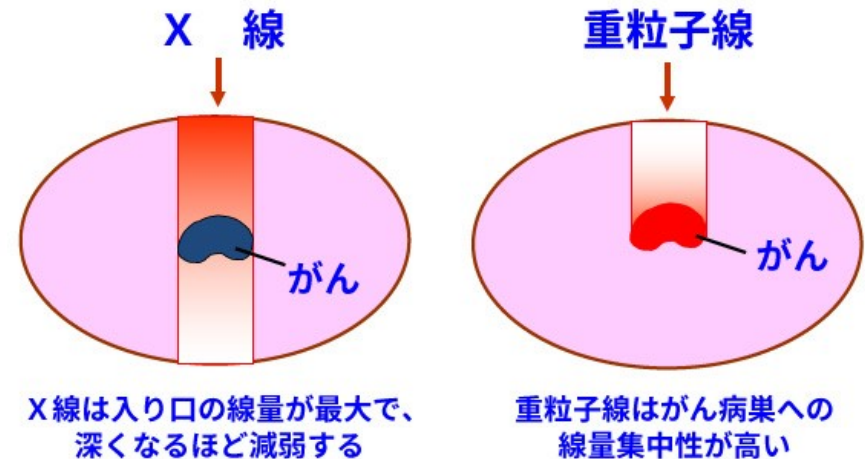
リニアック  
(X線)治療室

# 重粒子線治療の特徴（1）

- 1.体内で高線量域（ブラッグピークという）を形成するので、従来のX線よりもがん病巣に狙いを定めた照射が容易。その分周囲の正常組織への影響が少ない。
- 2.ピーク部分の生物効果（細胞致死作用）は、X線や陽子線より2～3倍大きい性質があり、従来のX線に抵抗性を示すがんにも有効。
- 3.つまり、重粒子線の生物効果（細部致死効果）は体表面近くでは小さく、深くなるほど大きくなりピーク部分で最大になるという特徴がある。
- 従って、重粒子線のピーク部分を病巣の位置とサイズに合わせてやれば、病巣は周囲の正常組織より物理的にも生物学的にも大きな線量（影響）を与えることが可能になる。

陽子より12倍重い炭素粒子を用いるため、線量集中性と生物効果の両面において、がん治療に適した性質を有する。

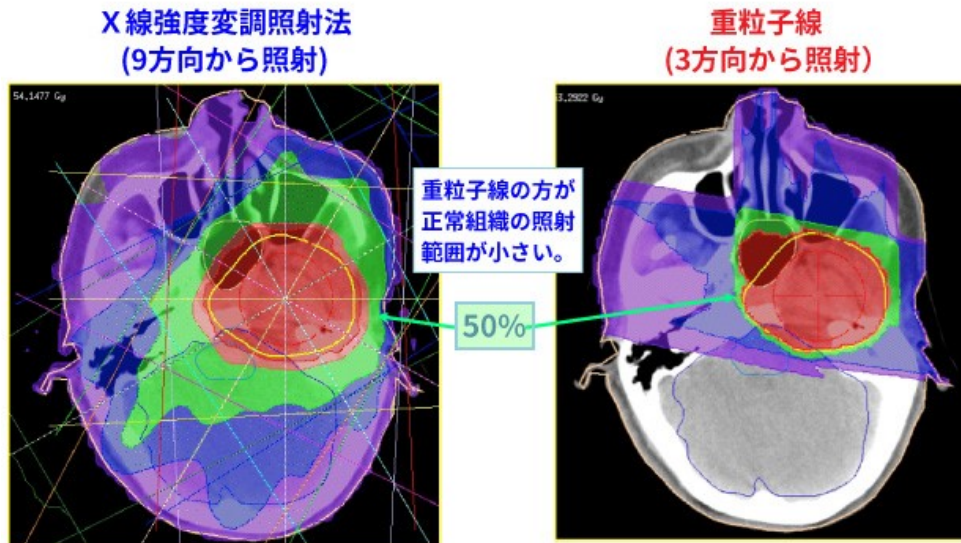
X線と重粒子線の線量分布の比較



QST病院HPより

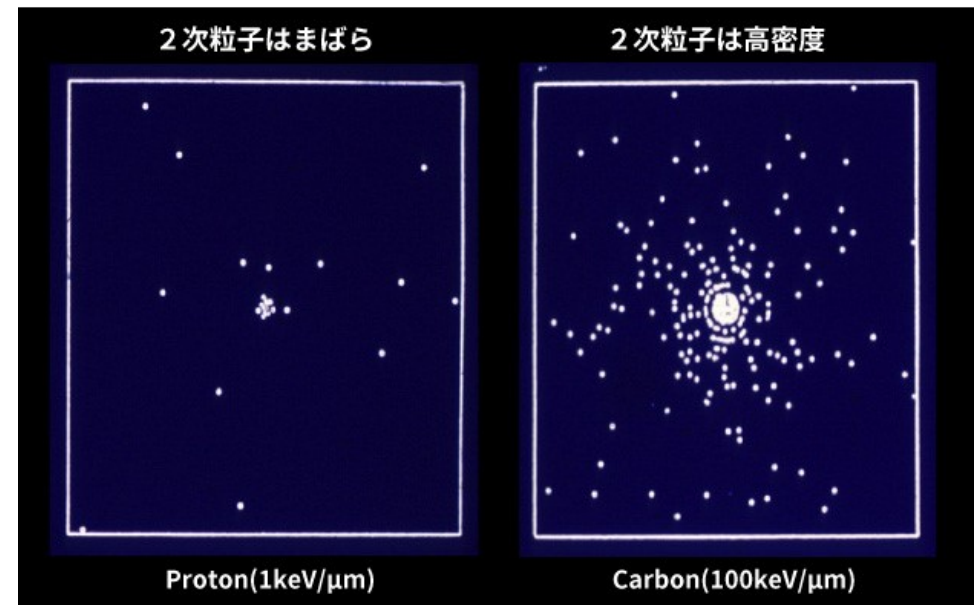
# 重粒子線治療の特徴（2）

X線と重粒子線の線量分布の比較(頭蓋底腫瘍)



線量分布 赤: 96%, 緑: 50%, 青: 30%, 紫: 10%

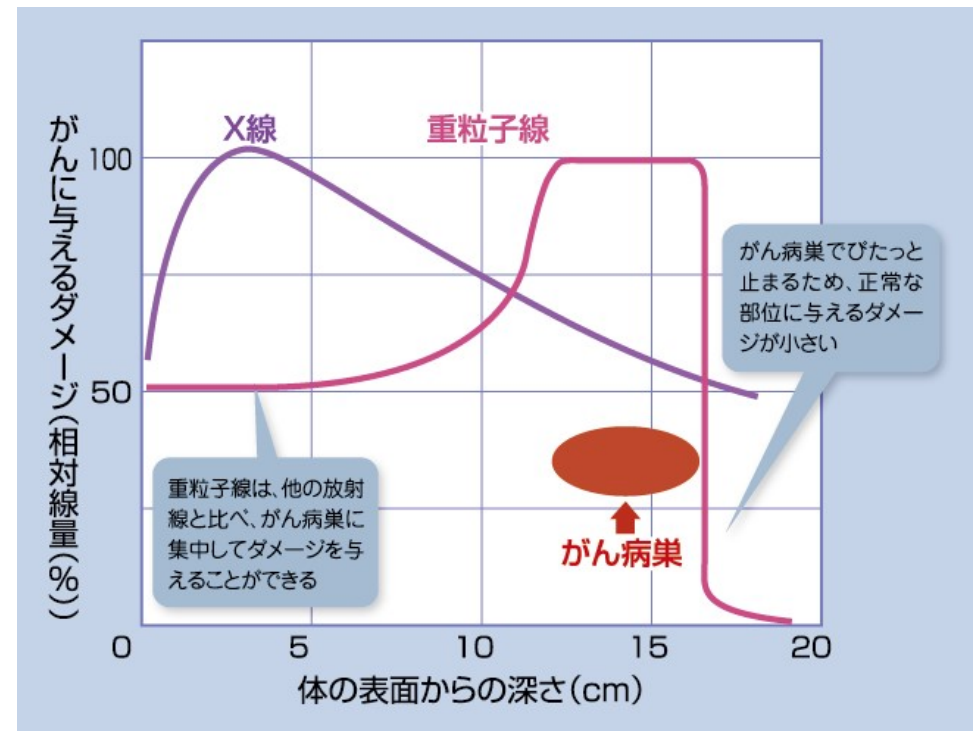
照射により発生する2次粒子の分布は、重粒子線(炭素線)が陽子線より高密度であり、そのぶん生物作用(細胞致死効果)も大きくなる。



QST病院HPより

# 重粒子線治療の特徴（3）

- 炭素イオンを光の速さのおよそ70%まで加速した「重粒子線」をからだの奥のがん細胞に照射します。
- からだの深いところにある“がん”のみを集中的に照射、その手前や奥など周りの正常な細胞を傷つけにくいため、副作用が少なくなる。
- 重粒子線は、X線や陽子線などによる放射線治療と比べて、がんを殺傷する能力が強いため、今までの放射線治療が効きにくかった肉腫など難治性のがんにも効きます。





# 医学物理士とは（１）

- 医学物理士とは、放射線を用いた医療が適切に実施されることを目的とし、
- ①医学物理学の専門家としての観点から貢献する医療職。
- ②医学物理学の学問を発展させる研究及び人材育成に貢献する研究教育職。
- 放射線診療において、放射線物理学的な諸問題を解決する職。
- 特に高度な放射線治療にはなくてはならない存在である。
- 日本で高度な放射線治療が進まなかった背景に、放射線腫瘍医の不足と共に医学物理士の不足があったと考えられている。
- 医学物理士は、国際労働機関（ILO）の国際標準職業分類ISCO-08においてMedical Physicist「物理学に関連する科学的知識を医療の分野に応用する職業」と規定されている職。
- 日本では「放射線医学における物理的および技術的課題の解決に先導的役割を担う者」と定義。

# 医学物理士とは（２）

- 放射線治療分野における医学物理士の業務は、エックス線や粒子線を利用する放射線治療における装置開発、物理的品質管理などを通して副作用を抑え、がんを効果的に制御することをもって健康に寄与すること。
- わが国の医学物理士一人当たりの国民数は165,000人。
- （英国の3倍、米国の2倍以上）
- 専従・専任で業務に従事している者は25%と少ない。
- 一週間当たりの医学物理業務日数は1日未満が37%と回答。十分な放射線管理ができていない状況。
- 放射線治療の誤照射、放射性医薬品の過剰投与などの医療事故が報告され、**医学物理士の養成と適正配備が望まれる。**
- 一般財団法人医学物理士認定機構が認定する。
- 医学物理士認定試験を受験するには、医学物理士認定機構が定める大学院カリキュラムを修了することが推奨される。