

医療現場で活躍する加速器

赤田 虎太郎

1 加速器はどこで使われているのか？

加速器とは、電子や陽子などの電荷を帯びた荷電粒子を加速させる装置の総称です。そもそも加速器という言葉聞いたことがない人もいるでしょうが、実は、加速器は色々なところで使われています。少し古い統計ですが、2019 年において、加速器は日本に約 1800 台もあります [1]。意外と多いと感じるのではないのでしょうか。そしてそのうちの 75%は、ある専門機関で使われています。どこだと思いますか？物理の研究機関かと思われたかもしれませんが、正解は、**意外にも医療機関**なのです。

ということで今回は、医療機関において加速器がどのように使われているかについて調べたので、その中から 3 つの話題についてお話したいと思います。

2 リニアック治療

リニアック治療とは、がんの放射線治療の一種です。放射線治療は、手術(物理的に癌細胞を除去)や化学療法(抗がん剤などを投与)と並んで、三大治療法の一つです。エネルギーの高い粒子や電磁波(つまり放射線)をがん細胞に照射することにより、がん細胞の DNA を破壊する方法です。放射線治療には、大きく分けて外照射と小線源治療があります [2][3]。小線源治療は、放射線を出す物質を体内に入れて治療します。外照射は体の外から放射線をあてる治療です。外照射のなかでも、主にあてる粒子の種類によって名前がついています。その一つが**リニアック治療**で、この治療では、**X 線**(電

磁波)や電子線を体の外から照射します。**X 線**や電子線をどうやって作るのか。ここで加速器の登場です。リニアック (linac) は線形(まっすぐな)加速器のことです。このリニアックでは、直線状の空間において、電子銃から放出された熱電子に高電圧をかけることで電子を加速させ、高エネルギーの電子線として取り出す、もしくはその電子を金属に当てることで高エネルギー X 線を取り出すことをしています。リニアックは国内で 1000 台以上使われています。

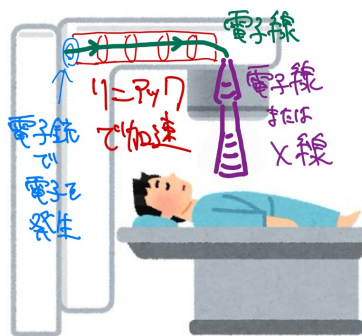


図 1: リニアック治療の概念図

3 粒子線治療と BNCT

粒子線治療と BNCT(ホウ素中性子捕捉療法)とは、リニアック治療と同様、がんの放射線治療のうち、外照射の一種です。**粒子線治療**には、陽子を用いた**陽子線治療**と、炭素イオン ($^{12}\text{C}^{6+}$) などのイオンを用いた**重粒子治療**があります。**BNCT**は中性子を用いています。BNCT は少し特殊な治療法です [4]。BNCT では、照射する中性子の他にホウ素 (^{10}B) という高い中性子吸収能力を持つ物質を含むホウ素薬剤を用いています。詳しくは [4] を参照してほしいですが、このホウ素薬剤を投与すると、ホウ素ががん細胞に集まり、その状態で中性子を照射することで、が

ん細胞をピンポイントに高エネルギー粒子で攻撃することができます。

上のどの治療法においても、**がん細胞に高エネルギーの粒子や電磁波をぶつけて損傷を与えよう**という、放射線治療のコンセプトは共通しています。

では、加速器の活躍する場はどこか。リニアック治療と同様、**陽子線や炭素線を加速させるために**、加速器が使われています。用いられている加速器は、主にシンクロトロンやサイクロトロンです(参考文献にあげた筑波大学の BNCT に用いられる陽子加速器は直線型のようです。他にも色々な加速器の方式があります)。

陽子を作るには水素ガスを、炭素イオンを作るにはメタンガスを用います。イオン源と呼ばれる場所で、水素ガスやメタンガスを原子まで分解し、さらにそこから電子を剥がして陽イオンにします。その後電荷を持ったイオン粒子や陽子たちをシンクロトロンやサイクロトロンなどの加速器にいれ、加速させ取り出すのです [5]。

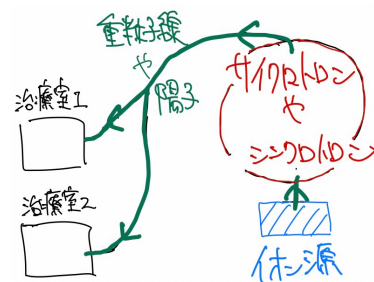


図 2: 粒子線治療の概念図

ここまで注意深く読んでいただいた方は、加速器の説明において、BNCT で照射するはずの**中性子が全く登場していない**という違和感に気づかれたかと思います。上に挙げたどの方式の加速器にしろ、基本的に加速される粒子は電荷を持っており、「**電場で加速さ**

せ、**磁場で曲げる**」ことを行っています。逆に言えば、電荷を持たない中性子は上のような加速器では加速・制御できないのです。BNCT で用いる中性子線は、加速器で加速させた陽子を標的物質にぶつけ、そこから放出される中性子を利用しています。

また、粒子線治療で用いる陽子線や炭素イオン線は、リニアック治療で用いる X 線や電子線と比べ、**体内に照射された際の放射線量の深さ依存性が異なります**(図 3)。リニアック治療では、体表面に近いところに線量のピークがきます。対して粒子線治療では、線量のピークががん病巣になるように調整できます [6]。これが粒子線治療の強みの 1 つです。また、BNCT では、がん細胞に集まっているホウ素と、照射された中性子が反応することで放射線が放出されるので、他の治療法に比べよりがん細胞に選択的に放射線を当てられます [4]。

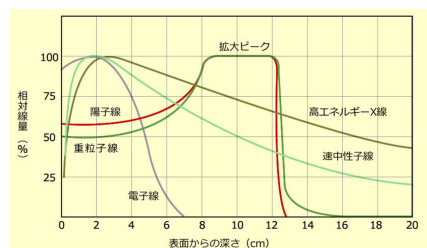


図 3: 各種放射線の線量分布 (出典 [6])



図 4: BNCT における中性子とホウ素の反応 (出典 [4])

2024 年 9 月時点で、粒子線がん治療施設 (= 陽子線と重粒子線) は全国に 26 箇所あります [7]。また、2024 年 1 月時点で、BNCT の実施が可能な医療機関は 5 箇所あります [8]。

4 FDG-PET 検査

最後に、がんの存在の診断に用いられる**FDG-PET 検査**について書きたいと思います [9]。よく CT 検査と同時に行われるので、調べると FDG-PET/CT 検査と出てきたりします。

FDG-PET 検査は、 ^{18}F -FDG という、ブドウ糖のヒドロキシ基の一つをフッ素の放射性同位体である ^{18}F で置換した薬剤が用いられています。 ^{18}F -FDG はブドウ糖に似ているので、体内に投与するとブドウ糖を必要としているところに多く集まります。また、 ^{18}F -FDG は放射性同位体が含まれているので、放射線を放出しています。 ^{18}F -FDG 投与後に放射線を検出する特殊なカメラを用いて全身を撮影すると、ブドウ糖が必要で ^{18}F -FDG が多く集まっているところが濃い画像が撮れます。一般に、正常な細胞よりもがん細胞の方がより多くのブドウ糖を必要としているので、**がん細胞があるところが濃く映し出され、がん細胞が存在するか視覚的にわかる**のです。ただし、他よりも多くのブドウ糖 (とそれに似た ^{18}F -FDG) が集まっている原因はがん細胞に限らないので、濃く映し出されたところが確実にがんであるということではない、という点には注意が必要です。

やはりここでも、加速器が活躍しています。先ほどまでの例では、「治療のために照射する粒子を加速する」、ということをしていました。今回は、「**放射性同位体 ^{18}F を作る**」のに一役買っています [10]。

ここで使われている加速器はサイクロトロンです。イオン源から出るヒドリド H^- をサイクロトロンで加速させた後、電子を 2 つ剥ぎ取って陽子にして標的にぶつけます。標的は水ですが、ただの水ではなく、天然中にわずかしかな存在しない酸素の安定同位体 ^{18}O が構成要素である、 H_2^{18}O です。陽子 ^1_1p と酸素同位体 $^{18}_8\text{O}$ が反応して、中性子

^1_0n と、得たかったフッ素の放射性同位体 $^{18}_9\text{F}$ が生成されます。ここで加速器が使われた理由は、**高エネルギーの粒子を別の粒子にぶつけて反応を起こさせたいから**です。

後はフッ素の放射性同位体 $^{18}_9\text{F}$ をブドウ糖に置換反応させてくっつけければ目的の ^{18}F -FDG が得られます。

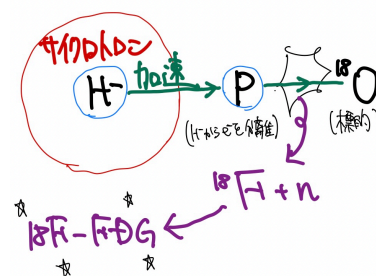


図 5: ^{18}F -FDG 作成の概念図

このように、加速器は、高エネルギー粒子を作り、別の粒子にぶつけ反応させることで、**放射性同位体をつくる目的**でも使われています。

5 まとめ

医療現場における加速器の活躍を紹介してみました。加速器が、人命を救う医療現場でも活躍していることを実感していただき、より身近なものに感じていただけたら幸いです。

参考文献

- [1] 日本アイソトープ協会. 放射線利用統計. 2019.
- [2] がん情報サービス. 放射線治療の種類と方法. https://ganjoho.jp/public/dia_tre/treatment/radiotherapy/rt_03.html. 2023.
- [3] 国立がん研究センター希少がんセンター. 放射線治療. <https://www.ncc.go.jp/jp/rcc/treatment/radiotherapy/index.html>. 2024.
- [4] KEK. 次世代がん治療 BNCT、KEK は加速器技術で貢献. <https://www.kek.jp/ja/topics/202404161720>. 2024.
- [5] 兵庫県立粒子線医療センター. 粒子線治療について. <https://www.hibmc.shingu.hyogo.jp/ion/index.html>.
- [6] 兵庫県立粒子線医療センター. 粒子線治療について -X 線治療と粒子線治療の違い-. <https://www.hibmc.shingu.hyogo.jp/ion/difference.html>.
- [7] 医用原子力技術研究振興財団. 日本の粒子線治療施設の紹介. <https://www.antm.or.jp/information/clinic/>. 2024.
- [8] 医用原子力技術研究振興財団. ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT). <https://www.antm.or.jp/information/bnct/>. 2024.
- [9] 国立国際医療センター. FDG-PET/CT とは. <https://www.hosp.jihs.go.jp/s037/010/010/pet.html>.
- [10] 岡山画像診断センター. ^{18}F -FDG ってどうやって作っているの? <https://www.youtube.com/watch?v=MARrukGgNyE>. 2022.