

1. はじめに

筆者がエレクタに入社したのは2005年1月ですが、その時にリサーチフィジックス(当時はメディカルフィジックス部)を立ち上げて、放射線治療に関する物理サポート・アカデミックサポート(論文、学会発表など)を開始しました。リニアックの動作原理やエレクタのリニアックの特徴についてスライドを使って口頭で説明する機会が多いですが、解説記事を書くのは、関西のかたろう会会誌<sup>1</sup>に引き続き、これが2回目です。かたろう会では、エレクタのリニアックの特徴を講演させていただき、そのあと、記事をまとめましたが、今回の記事は2回に分け、まず最初に医療用リニアックについて解説し、次回はエレクタのリニアックの設計思想をご紹介します、さらに IGRT, VMAT についても概説したいと思います。

2. リニアック内部の構成

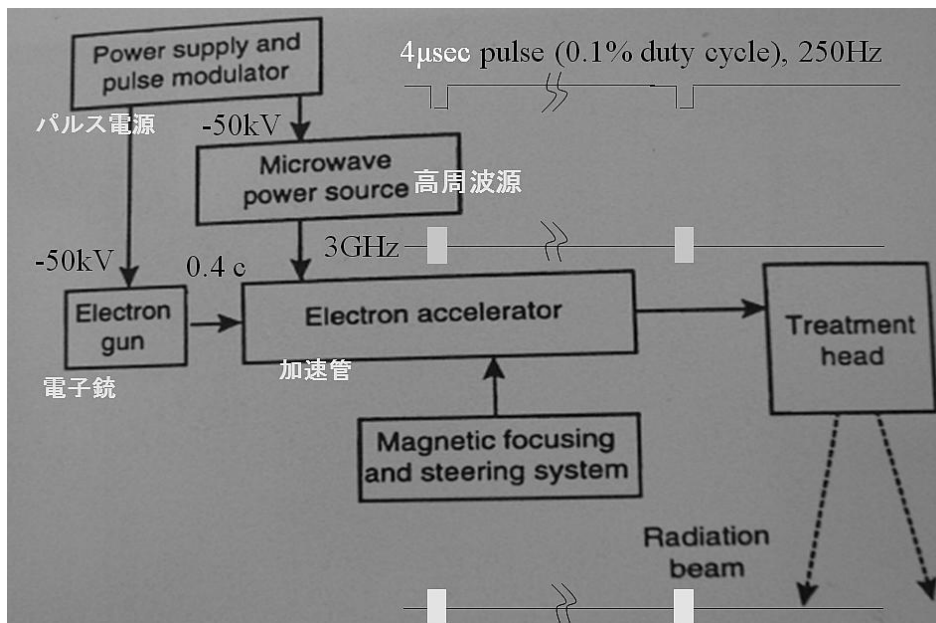


図1 リニアックの内部構成<sup>2</sup>

図1 にリニアックの内部構成を示します<sup>2</sup>。電子銃のフィラメントから熱電子が飛び出し、50 kV の直流電圧で加速されると、速度が光速の 0.4 倍になります。これは高校物理で習った  $\frac{1}{2} m v^2 = e V$  というエネルギー保存則で計算すれば、わかります。この 0.4 c という初速度を持った電子が加速管に注入され、同時にマイクロ波の高周波源で生成された高周波電界が加速管に導入されます。この結果、加速管内で電子が加速され続けて、加速管の出口で治療に使える高いエネルギーを持った電子を得ることができます。加速された電子を照射ヘッド内のターゲットに衝突させれば、制動

輻射の原理で、X線を得ることができます。一般に、電子が加速度運動すると電磁波を放射します。たとえば、シンクロトン放射光はこの原理で説明できる物理現象ですが、急速に電子が減速した場合に出るX線を制動輻射X線と呼びます。

パルス電源で生成された 50 kV のパルスの幅は約4マイクロ秒で、約 4 ミリ秒に1発の割合で作られます。パルス電源内部のコンデンサを充電しておき、サイラトロンで急激にショートさせます。この時、コンデンサに接続されたトランスに流れる電流が急激に遮断され、ファラデーの電磁誘導の法則に従い、50 kV の高電圧パルスが発生します。典型的な回路を図 2 に示します。図 1 で示した 50 kV というパルス電圧は、高周波源としてマグネトロンを用いた場合で、クライストロンでは 100 kV 必要です。

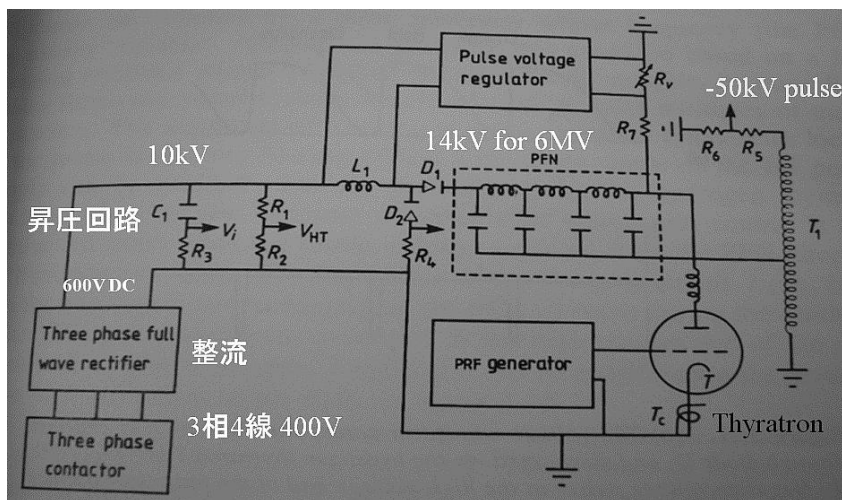


図 2 パルス電源の回路<sup>2</sup>

図3で、マグネトロンの原理を説明します<sup>3</sup>。中心のフィラメント電極（陰極）と周囲の陽極の間に高圧パルスを印加して電子を陰極から陽極に移動させます。この時、磁石で直流磁界を使って、高校物理で習ったフレミングの左手の法則で、電子の進む向きを変えることにより高速に電極間の空間で回転させます。陽極壁表面には、高周波渦電流が流れるので、その電流の周波数と陽極壁で形成される高周波共振構造の共振周波数をうまく一致させれば、大きなエネルギーを持つ高周波の共振電流を得ることができます。ここに、アンテナを設置すれば、その大きな電流を電磁波として送信でき、これはレーダーから家庭用電子レンジにまで広く使われています。なお、加速管に導かれた電磁波は、電界と磁界を持っていますが、電子を加速するのは、このうちの電界です。

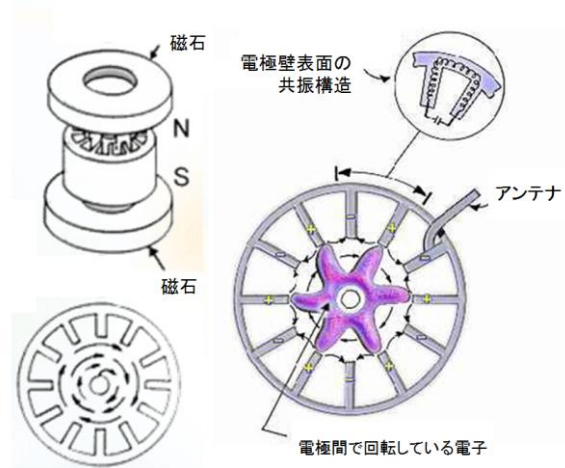


図3 マグネトロンの動作原理<sup>3</sup>

次に、加速管についてその動作原理を説明します。医療用リニアックでは加速用電界としてマイクロ波の高周波電界を使いますが、なぜ直流の電界ではだめなのでしょう？図4に、原研東海に設置された 20 MV 静電加速器の外観を示します。静電加速器は、直流の電界を使って加速しますので、パルスではない直流の高エネルギー電子ビームを生成することができますが、到底病院向きではない大きさであることがわかります。



図4 20 MV 静電加速器の外観(原研東海)<sup>4</sup>

図5に進行波加速器の原理を示します<sup>5</sup>。電子(白い球で表現)が進行波(正弦波で表示)と一緒に左から右に移動して、加速される様子を示しています。電子は白い球で表示された位置より右側にいれば、左向きのクーロン力を受けて減速します。逆に白い球で表示された位置より左側にいれ

ば、右向きのクーロン力を受けて加速します。つまり、この図の白い球が集まっている位置で、電子が安定します。この図で書いた正弦波は、進行波であり、左から右側に移動していきますので、電子はこの図で示された安定位置にしながら、進行波と歩調を揃えて、左から右に移動することになります。参考文献5で示されたURLでは、加速管内の電子輸送のアニメーションを見ることができます。

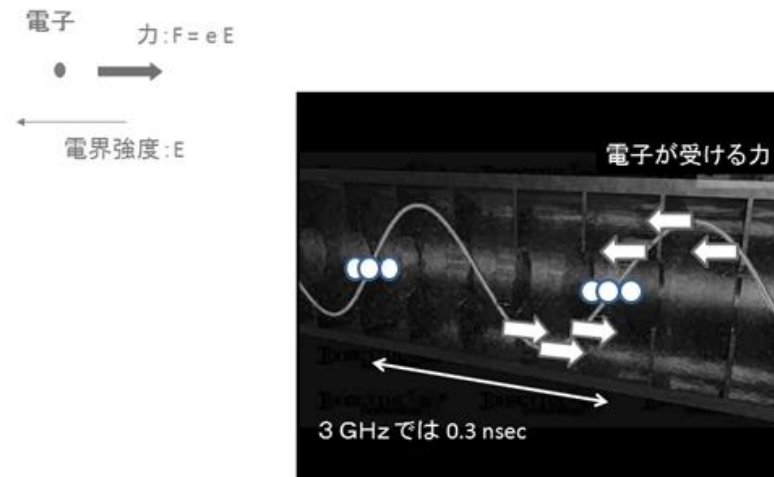


図5 進行波加速管の動作原理<sup>5</sup>

図6に進行波加速管の断面を示します。加速管内では、電子と進行波の移動速度は同じですので、電子の運動エネルギーを増大させるためには、進行波の移動速度を徐々に増加させる必要があります。円筒金属管である導波管内にディスクを挿入し、そのディスクの間隔を変えることで、進行波の移動速度を徐々に増加させることができます。定在波加速器は、もう少し複雑ですが、基本的な考え方は、進行波加速器と同じです。

導波管(円筒金属)内部にディスクを入れてディスクの間隔を変えると、高周波の波面の移動速度(位相速度) $v_p$ を変えることができる。

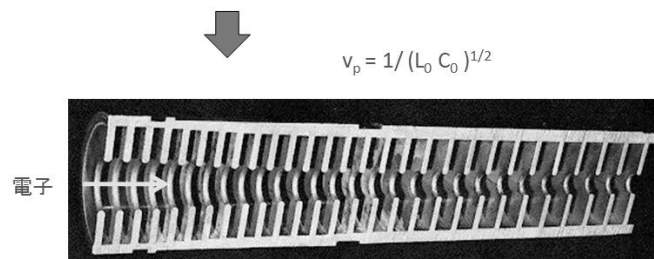


図6 進行波加速管の断面

### 3. まとめ

医療用リニアックの主要構成要素である電子銃、パルス電源、マグネトロン、進行波加速管について解説しました。わかりにくい点があれば、それは筆者の説明が不十分だからだと思います。遠慮なく冒頭に記載のメールアドレスまでご連絡ください。

#### 文献

1. 依田、「エレクタのリニアックシステム:装置構成から IGRT、VMAT まで」、放射線治療かたろう会誌第16号
2. D. Greene, P. C. Williams, Linear Accelerators for Radiation Therapy, CRC Press, 1997.  
[http://www.amazon.co.jp/gp/reader/0750304766/ref=sib\\_dp\\_pt#reader-link](http://www.amazon.co.jp/gp/reader/0750304766/ref=sib_dp_pt#reader-link) で本の一部が読めます。
3. <http://www.microtechfactoryservice.com/magnetron.html>
4. <http://www.aesj.or.jp/awards/2008/2008-115-116.pdf>
5. [http://www.ionactive.co.uk/multi-media\\_video.html?m=8](http://www.ionactive.co.uk/multi-media_video.html?m=8)  
[http://www.ionactive.co.uk/multi-media\\_video.html?m=8](http://www.ionactive.co.uk/multi-media_video.html?m=8)