

RFKO 電極の最適化

日大生産工(院) ○ 新井 冬樹

日大生産工 中西 哲也

1. はじめに

現在、がんの治療方法のひとつとして、放射線治療がある。その治療法の中に重粒子線治療がある[1]。患部への効果的な照射方法としてはスポットスキニング法がある。これに適したシンクロトロンからのビーム取り出し方法として、QAR 法が提案されており、パルス四極電磁石と高周波ノックアウト (RFKO) 装置を用いる[2]。

RFKO 装置は高周波によって周回粒子に力を加えて拡散させる装置であり、その電極は2枚の金属板で出来ている。対象としている装置では、約1 MHz ~ 17 MHz の周波数帯が必要となる。今回はその電極の最適化を行ったので報告する。

2. RFKO 電極の最適化と静電容量

ビームに均一の力を与えるためには、電界が一樣な領域が必要である。その領域を有効電界領域という。筆者らは普及型重粒子線シンクロトロンへの適用を目的としており、その領域は幅が中心距離から水平方向に±6.4cm以上、垂直方向に±1.1cm以上であり、電界の一樣性は10%とした。その領域が得られる最小の電極形状を電磁界解析ソフト Poisson で求める。

一方、RFKO 電極の静電容量は RFKO システムにおいて重要なパラメータである。今回、電界分布計算を行うと同時に静電容量を次の関係から求める。

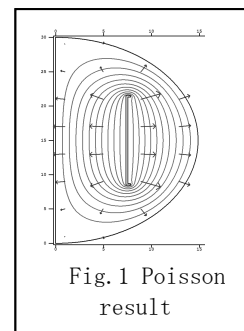
$$C = 2W/V^2$$

ここで、W は単位長さあたりの静電エネルギー (Joules/cm)、V は電極電圧である。エネルギーは Poisson で求める。

2-1 平板型 RFKO 電極

上述した有効電界領域が得られる電極の最適化を行った。電極は半径15cmの真空チ

ャンバーにあるとした。計算において、電極は中心に対して左右対称であるため右半分で行った。同時に、計算は2次元計算であるため無限に長い電極として仮定されている。この時の電極及び電界の様子を Fig.1



に示す。図中の矢印は電界の方向であり、線は等電位面である。

中心から電極までの距離を一定として、電極の幅を変化させて計算を行った。その結果を Fig.2 に示す。図の横軸を電極の幅とし、縦軸は有効電界領域の水平方向の長さとした。また、垂直方向に関しては、どの条件も全て満たしているため、水平方向のみとした。

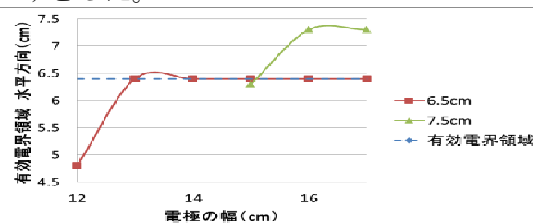


Fig.2 Uniform region vs. electrode width

中心からの距離が6.5cmの場合、電極の幅13cm以上ではほぼ一定で仕様を満足している。これは、電極が有効電界領域の水平方向の長さに近いいため、この値以上に広がることができないためである。中心からの距離7.5cmは電極の幅が15.0cm以上必要であることが分かった。これらの結果から最適な電極形状は、中心からの距離6.5cm、幅は13cmであることが分かった。

次に、この電極形状の静電容量を Poisson の結果から次のように求めた。電圧 V が 500V の場合、静電エネルギー W は 6.6×10^{-8} (Joules/cm) であった。この時の単位長さあたりの静電容量を先の式から計算すると、

0.5(pF/cm)となる。しかし、この時の計算は全体の半分を計算しただけであり全体としてはCが直列に2つ繋がっているものと等価である。そのため、全体の静電容量は半分となり約0.25(pF/cm)となる。実際の長さは30cm程度であるため、全静電容量は7.5pF程度になる。

2-2 円弧状 RFKO 電極

円弧状の電極について真空チャンバーを半径13cmとして円弧状のRFKO電極の最適化を行った。電極及び電界の様子は円弧角 130° の例をFig.3、円弧角 80° の例をFig.4で示す。

中心から電極までの距離を一定として、電極の幅を変化させて計算を行った。ここで、電極までの距離は円弧の弦までの距離である。その結果を円弧角が 130° の例をFig.5、円弧角が 80° の例をFig.6に示す。 130° では、中心からの距離6.5cmの場合、9.1cm以上は、ほぼ一定で仕様を満足している。中心からの距離7.5cmの場合、RFKO電極の幅は12.2cm以上を必要とする。電極の幅が9.1cmと7.2cmで水平方向の有効電界領域の長さが大きく異なる。この現象を考察するため、Fig.7に中心から電極の間の電界分布を示す。電界分布は徐々に強くなっていき、ピーク値を境に減少する分布になっていることが分かる。9.1cmではピーク値が中心の値の丁度10%になっている

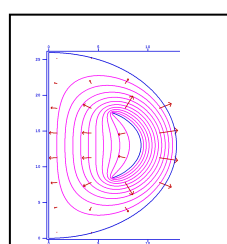


Fig.3 Poisson result (130°)

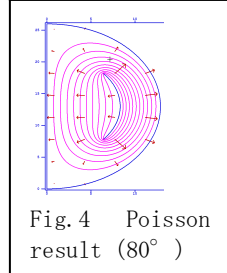


Fig.4 Poisson result (80°)

から、有効電界領域は広く取れる。これに対して7.2cmの場合は、そのピークが10%以上になっているため、有効電界領域は大きく狭くなっていることが分かる。一方、 80° では距離が6.5cmの場合に電極の幅が10.1cm~11.6cmの間のみ満足する結果となった。

このとき其々の円弧角での最小の電極幅において中心から電極先端までの距離

は 130° の場合9.4cm、 80° の場合8.4cmであった。これらの結果から、中心から先端までの距離が少ないほうが小型化できるため、後者が最適であるとした。

この電極形状の静電容量を求めた。電圧Vが500Vの場合、静電エネルギーWは平板型と僅かに異なるが 6.3×10^{-8} (Joules/cm)であった。全静電容量は、平板型とほぼ同じ7.5pF程度になる。

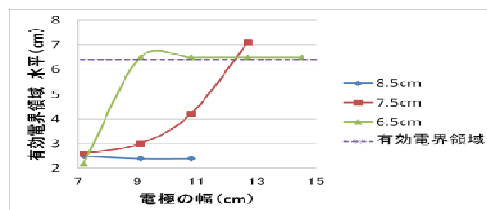


Fig.5 Uniform region vs. electrode width ($\theta=130^\circ$)

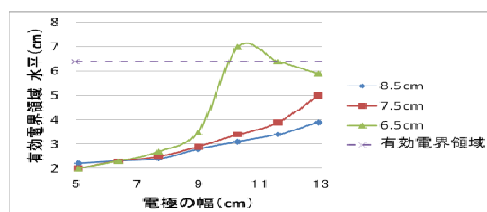


Fig.6 Uniform region vs. electrode width ($\theta=80^\circ$)

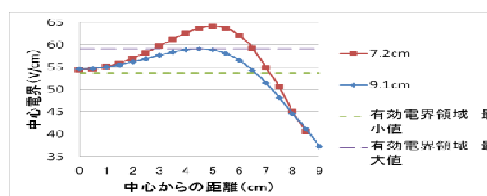


Fig.7 Electric field distributions ($\theta=130^\circ$)

3. まとめ

RFKO電極の形状を平板型と円弧状で比較した結果、円弧状の方がチャンバーや電極を小さく出来ることが分かった。また、中心からの距離は、有効電界領域の水平方向の距離に近い方が良いことが分かった。

[参考文献]

- [1] 辻井博彦、遠藤真広：「切らずに治すがん 重粒子線治療がよくわかる本」、コモンズ(2004)、p44~74.
- [2] 中西哲也、他：日本大学生産工学部第39回学術講演会電気電子部会、2006、p 51.