ISSN 2186-5647

P-35

重粒子がん治療装置におけるシンクロトロンの RFKO 装置の APN 回路の研究

日大生産工（学部）　○栗栖　皐貴　日大生産工（学部）　飯倉　雅也
日大生産工　中西　哲也

1 まえがき

近年，QOL（Quality of Life）の高いがん治療方法として，重粒子線がん治療装置が注目を浴びている．従来の放射線治療と異なり，がん患部周辺の正常な細胞への影響を低減しつつ，がん細胞に粒子線を照射させることにより、がんを根治する事ができる．

この装置に関して，今まで以上に正常細胞への照射を低減する方法として，Fig.2 に示すようなスポットスキャニング照射法がある．この方法は，がん細胞を数千区間に区分けし，1 区間ずつ粒子線を高速に照射する事により，Fig.1 に示す従来のブロードスポット照射法に比べ，大幅に正常細胞への照射を低減する事が可能である．

これに適したビーム取り出し方法として，QAR※法[1]が提案されている．この方法は，RFKO（Rf-knockout）電極によってビームを拡散し，PQ（Pulsed Quadrupole-magnet）によってビームを取り出す方法である．

このRFKO装置は高周波電界により，粒子を拡散させる装置で，2つの電極から構成される．しかし，RFKO電極単体では等価的にはコンデンサであり，周波数によって入力インピーダンスが変化してしまう．この問題を回避する為に，RFKO 電極を APN（All-Pass-Network）の一部として使用し，入力インピーダンスを周波数に依らず一定に保ちつつ，入出力電圧比を一定になるようにする．また必要な周波数帯域は，放射線医学総合研究所で設計された普及型重粒子シンクロトロンの場合，シミュレーションの結果より，約 1［MHz］～17［MHz］の高周波電界が必要とされる[2]．

※ QAR : beam extraction method using a fast Quadruple magnet Assisted by RFKO

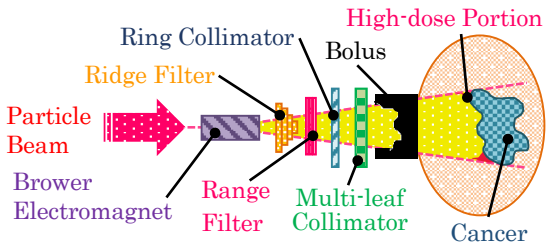

Fig.1 Broad beam irradiation method

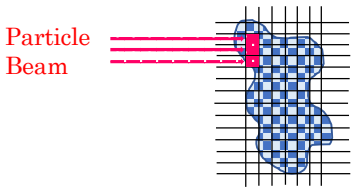

Fig.2 Spot scanning irradiation method

2 原理

Fig.3 は，若狭湾エネルギー研究所で研究されていた APN 回路[3]を基に，改良を加えた APN 回路である．

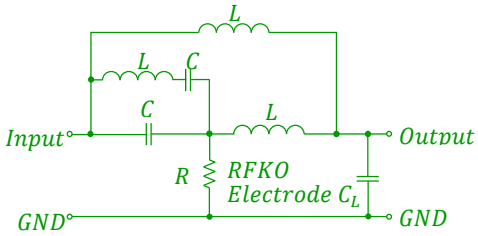

Fig.3 Improved APN circuit

従来型は，C に並列の $L-C$ 直列がない．従来型では，以下の条件を用いると，入力インピーダンスは一定になるが，回路の入出力電圧比が一定に出来ないという問題があった．

$$C=\frac{C_L}{4}\quad ,L=\frac{C_L R^2}{2}\cdots(1)$$

これを回避する為に，従来型と異なり，この回路の入力インピーダンスは完全に$Z=R$となる条件は導き出せなかったが，以下の条件では近似的に一定になる．

$$C=\frac{C_L}{4}\ or\ C=\frac{C_L}{8},L=\frac{C_L R^2}{2}\cdots(2)$$

また，この時の$V_{0ut}\ /\ V_{in}$つまり入出力電圧比（伝達関数）$F(\omega)$は，$1\ll\omega C_L R$の時，

$$F(\omega)\cong 1\cdots(3)$$

Study of an APN circuit of an RFKO device
in a synchrotron for heavy ion cancer therapy

Kouki KURIUS, Masaya IIGURA, Tetsuya NAKANISHI

となる．

3　計算結果

Mathematica を用いて，入力インピーダンス及び，入出力電圧比を用いて計算を行った．APN 回路に用いた，$R = 800\,[\Omega]$のときのパラメータは，Table 1 に示した通りである．尚，改良型のコンデンサの条件としては，計算結果から良い周波数特性が得られた，$C = C_L / 8$ を採用した．抵抗値 $R = 200, 450, 800, 1250\,[\Omega]$ の 4 種類に対して，入力インピーダンスを計算した．ここで，R は大きいほど，消費電力を低減出来る．

Table 1 Parameter of APN circuit

	従来型	改良型
$C_L\,[pF]$	25.1	25.1
$C\,[pF]$	6.28	3.14
$L\,[\mu H]$	8.03	8.03

先ず，従来型APN回路の入出力電圧比をFig.4に示す．この結果より抵抗値が上がるにつれ，入出力電圧比は一定でなくなり，特に $R = 1250\,[\Omega]$ では約 60 [%] 悪化していることが分かる．

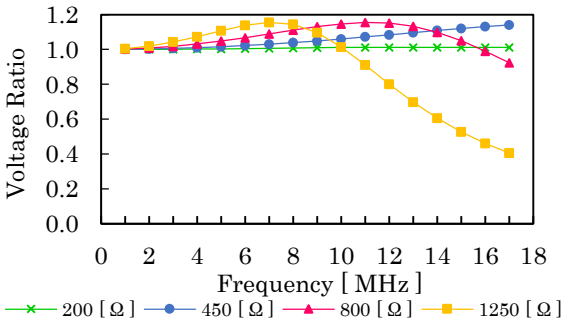

Fig.4 Calculated Voltage Ratio (Conventional)

次に，改良型 APN 回路の入力インピーダンスの計算結果を Fig.5，入出力電圧比を Fig.6 に示す．これらの結果より，抵抗値 $R = 800\,[\Omega]$ のとき，入出力電圧比は，従来型回路の場合，0.92～ 1.15 の変化があるのに対し，改良型は，0.99～ 1.12 と変化が小さいことが分かる．このことから，改良型ではより安定した入出力電圧比が得られると言える．入力インピーダンスに関しては，11 [MHz] 以上で僅かな変化が見られたが，概ね一定であることが分かる．

抵抗値 $R = 1250\,[\Omega]$ のとき，入出力電圧比は，従来型回路の場合，0.40～ 1.15の変化があるのに対し，改良型は，0.6～ 1.12 と変化が改善されている．このことから，より高い抵抗値でもより安定した入出力電圧比が得られたと言えるが,実用的には変化が大きすぎるので回路パラメータの更なる改善が必要となる．また,入力インピーダンスに関しては，9 [MHz] 以上で大きく悪化しており，これいついては改善が必要である．

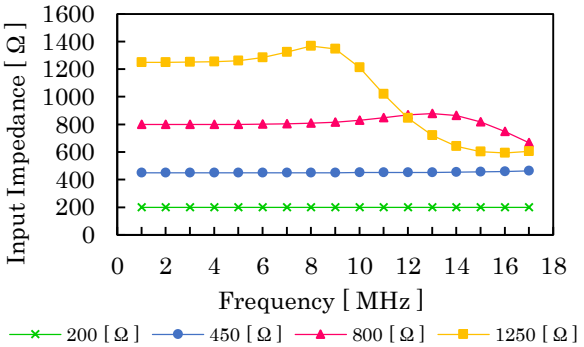

Fig.5 Calculated Input Impedance (Improved)

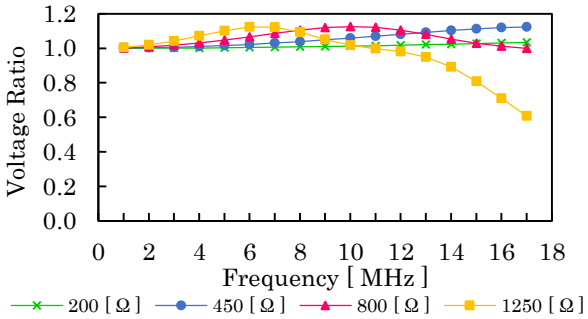

Fig.6 Calculated Voltage Ratio (Improved)

4　まとめ

従来型APN回路と比較すると，改良型APN回路は入出力電圧比の周波数特性は大きく改善された．しかし，$R = 1250\,[\Omega]$ では，入出力電圧比,入力インピーダンス共に周波数特性は実用的であり，$R = 800\,[\Omega]$ までに関しては，従来型と比較して，QAR法に適した回路が設計できたといえる．今後，$R = 1250\,[\Omega]$ でも所定の特性が得られるように，検討が必要である．

[参考文献]

1) T.Nakanishi, T.Frukawa, K.Yoshida, K.Noda, “Slow beam-extraction method using a fest Q-magnet assisted by RF-knockout”,Nuclear Instruments and Method.A553,(2005)p.400-406.

2) 田代雅嗣，中西哲也，シンクロトロンの周回ビームを拡散させるための断続的スペクトルを用いた高周波源に関する検討，第44回日本大学生産工学部学術講演会概要集, (2011) p.239-242.

3) Tetsuro KURITA, 他 ,Proceeding of EPAC,(2006),p.1771-1772