

試作した APN 回路の周波数特性

日大生産工(院) ○ 新井 冬樹

日大生産工 中西 哲也

1.はじめに

癌治療のひとつに放射線治療があり、そ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、その電極は平行平板で出来ている。周波数帯は 1MHz~20MHz までの高周波を必要とする[3]。その際、この範囲の周波数で一定電圧を電極にかける必要がある。しかし RFKO 電極のみだと等価的にコンデンサなので、入力インピーダンスが周波数によって異なる。そのため電極を All-pass-network (APN) の一部として用いて、周波数の値に関わらず入力インピーダンスを一定にして出力電圧が一定になるようにする。今回は、APN 回路を試作し、周波数特性を測定し、計算結果と比較した。

2. APN の原理

Fig. 1 は、若狭湾エネルギー研究所の論文に記載されていた APN 回路である[4]。この回路はブリッジ T 型回路と並列回路を合わせた回路である。 C_L は RFKO 電極の静電容量に相当する。この回路の入力インピーダンス Z は次式で与えられる。

$$Z = \frac{R - \omega^2 RLC + j\omega RL - \omega^2 C_L L(R - \omega^2 RLC + j\omega L)}{1 - 2\omega^2 CL + j\omega C_L(R - 2\omega^2 RCL + j\omega L - j\omega^3 L^2 C)} \dots (1)$$

$C = C_L/4$ 、 $L = C_L R^2/2$ の関係を用いると $Z=R$ となり、周波数に関わらず、インピーダンスが一定となる。また、入出力電圧比の伝達関数は V を入力電圧、 V_1 を C_L の電圧とすると V_1/V の式は

$$\frac{V_1}{V} = [1 + j\omega L \frac{1 + j\omega C_L R/2 + (j\omega)^2 L C_L/2}{R + j\omega L + (j\omega)^2 L C_L R/2} + (j\omega)^2 L C_L/2]^{-1} \dots (2)$$

となり、前述した条件を当てはめると

$$\frac{V_1}{V} = [1 + j\omega \frac{C_L R}{2} + \frac{(j\omega C_L R)^2}{4}]^{-1} \dots (3)$$

となる。 C_L の値が極めて小さければ、入出力電圧比は周波数に関わらず一定になることが分かる。

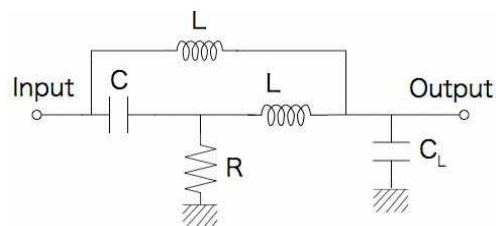


Fig.1 APN circuit

3.入出力電圧比の測定

APN の試作

試作した RFKO 電極の静電容量は 14.0pF である。APN の測定は今回が初めてなのでその RFKO 電極を使わず、値が正確に分かっている市販のコンデンサを使用した。その容量は 15.0pF である。また抵抗は、16:1 インピーダンストランスフォーマーを使用するため、ケーブルの特性インピーダンスの 16 倍にあたる 800Ω を使用した。先の関係式から計算した値を Table.1 (設計) に示す。C に関しては、市販の製品は 4.0pF だったのでそれを使用した。L に関しても自作したので、Table.1 に示すように設計と多少異なる値となった。この程度の違いでは殆ど影響を与えないことを計算で確認した。試作した回路を Fig.2 に示す。



Fig.2 Photograph of the APN circuit

Table.1 Parameter of APN circuit

	設計	実際
C_L (pF)	15.0	15.0
R (Ω)	800	800
C (pF)	3.75	4.0
L (μH)	4.8	4.11

測定方法

APN 回路の入出力電圧比の測定は、整流回路の付いた高周波プローブを用いて行った。プローブの出力はデジタル電圧計で測定した。またプローブの入出力特性は、測定レベルや周波数によって異なるため、それらの特性を測定し、実際の測定

値を校正した。

計算結果

Mathematica を用いて、入出力電圧比と入力インピーダンスの周波数特性を算出した。用いたパラメータは Table.1 (実際) に示す値である。また、 C_L を変えた場合とプローブの内部静電容量 (4pF) が測定に影響を与えた場合の周波数特性も算出した。計算結果を Fig.4 と Fig.5 に示す。図中の 15pF (+4pF) は、プローブの静電容量が 4pF と考えられるため、それを考慮して、 $C=19.0\text{pF}$ として計算したものである。また、7.5pF と 19.0pF は比較するために、参考値として載せている。

Fig.4 において 15.0pF の入出力電圧比は徐々に上がっていき 15MHz 付近で最大になり、その後下がっていく特性である。またプローブの影響によりその変化は、より大きくなる事が分かる。一方、入力インピーダンスは高周波側で多少下がっているが、これは C と L の値が、設計値と多少異なっている為である。

Fig.4 より入出力電圧比は、 C_L が大きくなるとピークも大きくなる事が分かる。これは、一定の条件になる為には、 $\omega C_L R \ll 1$ でなければならないが、本 C_L では周波数が大きくなると、成り立たなくなる為、このような結果になったと考えられる。

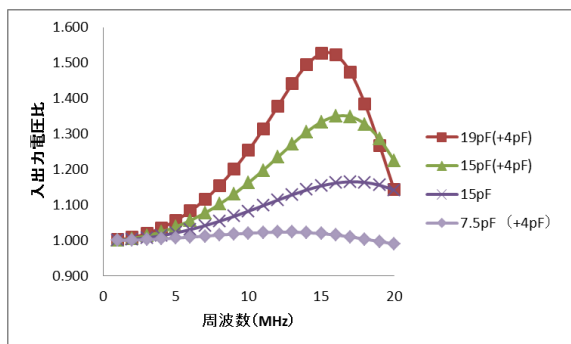


Fig.4 Ratio of input and output voltages

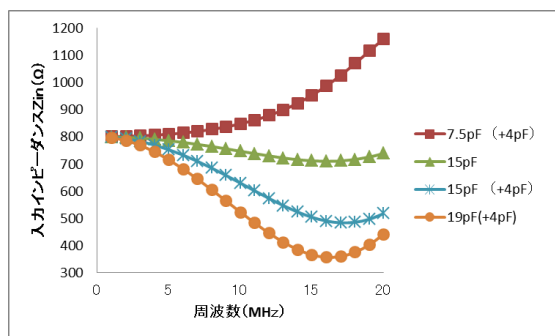


Fig.5 Input impedances

測定結果

入出力電圧比を測定した結果を Fig.6 に示す。計算結果 (Fig.4) と比べると、プローブの静電容量を考慮した計算結果と同じ傾向を示していることが分かる。Fig.4 にあるプローブの影響を受けて

ない場合の 15pF のグラフと影響を受けた場合の 15pF (+4pF) を Fig.5 の電圧比 V_{RF}/V_{in} (15pF) と比較すると、後者の方が測定値に近い結果となっている。その為、プローブが測定の際影響があると判断した。従って RFKO 電極を用いた測定でも、プローブの静電容量を考慮した評価が必要となる。また C_L が小さいほどピーク値の大きさが小さくなり、7.5pF では一定に近い結果を得られた。15.0pF と 19.0pF の違いは計算値ほど大きくないが、その原因は不明である。

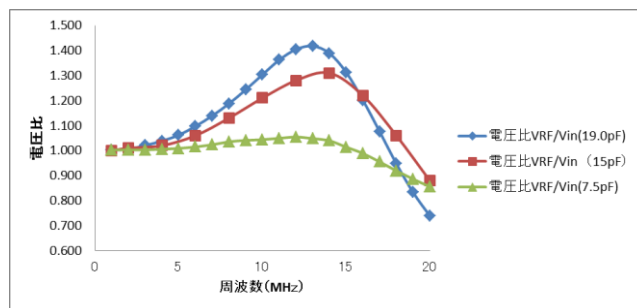


Fig.6 Measured ratio of input and output voltages

4.まとめ

試作した RFKO 電極の静電容量に近い市販のコンデンサを用いて APN 回路を試作し入出力特性を測定した。測定結果は計算結果とほぼ同様の傾向を示したが、プローブの静電容量 (4pF) が大きく影響することが分かった。その為、今後の実験ではプローブのことを考慮した補正をしなければならない。また、RFKO 電極の静電容量を大きくすると、入出力電圧比は大きくなり、入力インピーダンスは小さくなる事が分かった。

[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,pp.44・74 (2004)
- [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, p.51(2006)
- [3]澤野智和：日本大学生産工学部電気電子工学科平成 21 年度要旨集,p.228(2009)
- [4]Tetsuro Kurita, 他：“Proceedings of EPAC” ,pp.1771-1772(2006)