

重粒子線がん治療装置における RFKO システムに関する研究

－ 広帯域 RFKO システムの最適化と試作 －

日大生産工(院) ○西原 亮輔 日大生産工(学部) 加藤 久暁, 小林 大二朗, 山口 輝人
日大生産工 中西 哲也

1 はじめに

重粒子線がん治療におけるビーム照射に最も適した方法としてスポットスキニング法がある。照射したい部分を数千ブロックに分けてビームを照射するため、高速制御が必要であり、それを目的としたシンクロトロンからのビーム取り出し法として RFKO (Radio Frequency Knockout) 法が幾つかの施設で用いられている[1]。RFKO 法は周回粒子のベータトロン振動数に応じた高周波電界をビーム進行方向と垂直な方向に加えることで振幅を増大させ、ビーム取り出しを行う。この方法はビームの on または off 時間は 1 ms のオーダーと報告されており[1]、その時間はビームをバンチングすることによるものと考えられる。これに対して筆者らは、バンチングさせなくても共鳴周波数帯を複数含む広い周波数帯域で RFKO 装置を用いることによって、出射ビーム強度が一樣になることをシミュレーションで示した[2]。その時の必要な周波数帯は、1~17 MHz であり、そこに 10 個の共鳴帯が含まれていた[2]。この必要周波数帯全てにおいて RFKO 電極に一定の電圧を印加するために、APN (All Pass Network) が用いられる。APN の入力インピーダンスを R としたとき、消費される電力は V^2/R で表されることより、APN の入力インピーダンスが高ければ高いほど電力損失を小さくすることができる。一方、高周波源と APN のインピーダンス整合のために IT (Impedance Transformer) [3] が必要となる。

本研究は広帯域 RFKO 装置全体の実現性を検討することを目的としている。本論文ではビーム取り出しシミュレーション結果について述べた後、LTspice を使用して最適化を行った結果と共に、シミュレーションより得られた必要電圧から RFKO 装置に用いられる素子の仕様を決定した

結果について報告する。

2 広帯域 RFKO 装置によるビーム取り出し

RFKO 取り出しにおいて粒子のベータトロン振動数は振幅により異なるため、単一の周波数では全ての粒子を拡散することができない。そこで、周波数に幅を持たせたカラードノイズ (CN) を使用する。一般的にはセパトロクス内のチューン幅に相当する周波数幅の CN を使用する。しかし、この周波数帯域のみでは出射ビーム強度は筆者らのシミュレーション結果では一樣にならず、周波数幅を広くする程、一樣性が良くなった。[2]

Fig.1 は 1 個の共鳴周波数帯 (1 バンド: 上図) と、10 個の共鳴周波数帯 (10 バンド: 下図) でシミュレーションを行った結果である。同図は 5 回の取り出し例を示しており、各 100 回転の間に取り出された粒子数をプロットしたもので、1 回の取り出し時間は 7 ms だが、図の横軸は回転数で示している。1 回の取り出し粒子数は全粒子数の約 1% で、1 バンド、10 バンド共に同じになるようにキック角を調整した。同図から分かるように 1 バンドに比べ 10 バンドで取り出されるビーム強度が一樣になっていることが分かる。シンクロトロンのラティスは NIRS で設計された重粒子線治療用のコンパクトシンクロトロンを使用し、ベアーチューンは $v_x=1.68$ 、 $v_y=1.13$ であり、周回周波数は 3.483 MHz である[4]。ビームはシミュレーションを簡略化するために運動量幅 0 の DC ビームとした。1 バンドの周波数帯はチューンが 1/3 付近では 0.3~0.43 (周回周波数で規格化された値)、2/3 付近では 0.57~0.7 である。1 バンドの場合 1/3 のみ。10 バンドは 1/3 付近から 4(2/3) 付近までを使用し、周波数は約 1 MHz から 17 MHz となる。

Study on RFKO system in Heavy Particle Line Cancer Treatment Device

－ Optimization and prototyping of broadband RFKO system －

Ryosuke Nishihara, Hisaaki Kato, Daijiro Kobayashi, Teruto Yamaguchi, Tetsuya Nakanishi

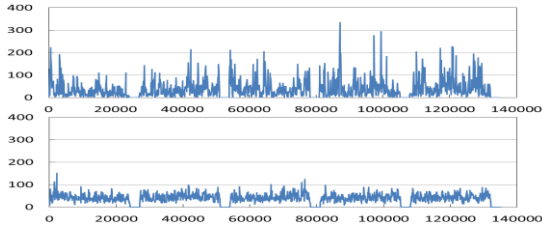


Fig.1 Simulation results with 1 band (upper) and 10 bands (lower).

3 RFKO システムの構成

Fig.2 に RFKO 装置の概略回路図を示す。APN、IT、RFKO 電極で構成されている。RFKO 電極 (C_L) は 2 つの電極から構成される。RFKO 電極単体では等価的にコンデンサであり、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ために、RFKO 電極を APN の一部とすることで、入力インピーダンスを周波数に依らず一定に保つことができる [5][6]。但し、以下の条件が必要となる。

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

一方、入出力電圧比(伝達関数) $F(\omega)$ は、(1)式の条件を適用したとき、(2)式となる。また $1 \gg \omega C_L R$ の場合、(3)式となり入出力電圧比は周波数に関わらず一定となる。

$$F(\omega) = \left[1 + \frac{j\omega C_L R}{2} + \frac{(j\omega C_L R)^2}{4} \right]^{-1} \quad (2)$$

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

Impedance Analyser を用いて、 C_L を測定した結果を、Table 1 に示す。電極から測定器までのリード線長は 25cm であったが、高周波のため周波数により変化した。ここで、電極間電圧を間接的に測定するため、 C_L に対し直列に 250pF を接続することを考えた。

これまで IT のインピーダンス変換比は 25 : 1 ($R=1250 \Omega$) までの実験を行ってきた。しかし、 C_L の変化が大きいので、25 : 1 では満足できる特性が得られていない。そのため、今回は 16 : 1 ($R=800 \Omega$) として設計した。Table 1 の L と C は、それと C_L の合成容量 (C_L') と $R=800 \Omega$ から計算したものである。それぞれの L と C の組み合わせで APN の特性を解析した結果、17 MHz での L と C のとき、最も良い特性が得られた。従って、これらの要素を用いて APN を試作した。

Table 1 Value of each element

f [MHz]	C_L [pF]	C_L' [pF]	L [μ H]	C [pF]
1	15.7	14.8	4.7	3.7
10	17.9	16.8	5.4	4.2
17	20.3	18.8	6.0	4.7

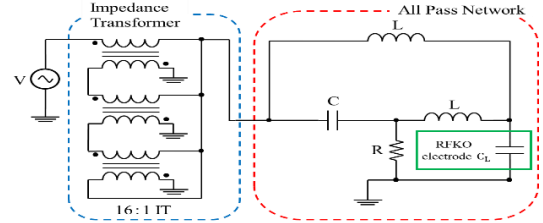


Fig.2 Circuit diagram of 16:1 RFKO system.

4 広帯域APNの周波数特性

800 Ω APN の特性を LTspice (ver.12) を使用し、回路解析を行った。解析には、Table 1 に示した周波数に応じた RFKO 電極の静電容量と直列に接続した 250pF のコンデンサの合成容量と 17 MHz での C と L の値を使用した。また、電源の内部抵抗を 50 Ω とし、入力電力は 1V とした。解析結果を Fig.3 に示す。同図から分かるように APN の入出力電圧は 10 MHz 以下であれば、おおよそ一定であることが分かる。しかし、周波数が高くなると出力電圧は増大した。15 MHz で約 13% の増大となった。この原因として、17 MHz では $\omega C_L R = 1.6$ となり 1 以上となるため、出力電圧が一定とならないと考える。

この結果をもとに、試作した APN の測定を行った。初めに入力電圧測定結果を Fig.4 に示す。測定値、解析値共に一致する結果が得られているため、入力インピーダンスは一定となっていると考える。

次に、出力電圧の測定結果を Fig.5 に示す。同図中には Fig.3 に示した解析結果も示している。測定値に対して計算値が大きく異なっていることが分かる。この原因として、測定に使用した高周波プローブ (10M Ω , 11pF) の静電容量が RFKO 電極に対して無視できないためであると考えられる。そのため、測定部にプローブを考慮し解析を行った。その結果を Fig.5 に示す。測定値に近い傾向の変化が得られているため、実際には高周波プローブを考慮しない場合の出力電圧が得られていると考えられる。ここで、今回の測定で 250pF は使用しなかったが、解析によると、違いは図のマーカー程度のものであった。ちなみに、電源電圧は負荷

により僅かに変化し、 800Ω の場合17 MHzで10%程度増大するため、それらの値で補正を行った。

ここで、RFKO装置として組み込んだとき、APNの入力側は等価的に入力インピーダンス 800Ω の信号源とみなすことができる。上記の条件で計算を行うと異なる結果となる。この結果については次章で述べる。

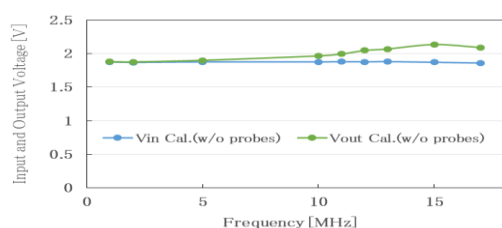


Fig.3 Analysis results w/o probes.

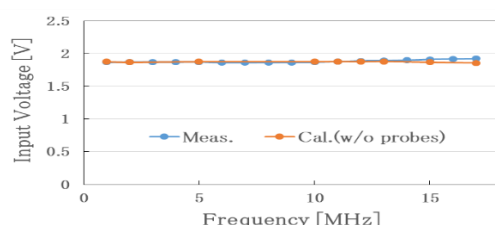


Fig.4 Measurement and analysis results (Input voltage).

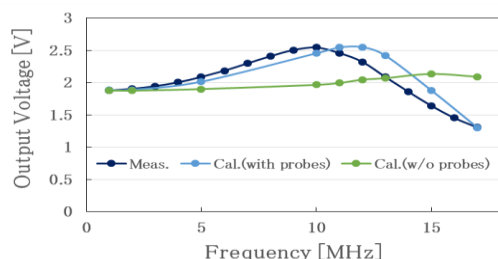


Fig.5 Measurement and analysis results (Output voltage).

5 広帯域 RFKO 装置の周波数特性

まずは低電圧モデルを試作し、測定を行った。Fig.6 に試作した RFKO 装置を示す。コイルの形状は巻き線間の浮遊容量を低減するため、一定の間隔を開けた巻枠に巻いた。巻き線径 0.5mm 、コイル径 31mm 、巻き数は 19 回である。コイルは渦電流の影響を避けるためにアクリル板に取り付け、金属板から遠ざけた。

IT は APN の負荷抵抗が 800Ω であることから、変換比 16:1 とする。日立金属株式会社「ファインメットコア」を 2 個積層して 1 つのトランスとし、それを 3 個組み合わせて 16:1 としている。また、必要周波数帯におけるファインメットコアの比透磁率を Table 2 に示す。

Fig.7 に IT の周波数特性測定及び解析結果を示す。入力電圧は 1V とした。高周波側での出力電圧の特性劣化は高周波プローブのキャパシタンスによるものであり、実際には同図にある高周波プローブを考慮した解析結果に近い傾向であることから、約 3.7V を維持していると考えられる [7]。ここで出力電圧が 4V でない理由は、電源から見た IT の入力インピーダンスが 50Ω になっていないことにより、入力電圧が 1V 以下になっていることが原因として考えられる。

Fig.8 に IT、APN、RFKO 電極を組み合わせた RFKO 装置の測定及び解析結果を示す。解析は 16:1 IT と 800Ω APN を組み合わせ、RFKO 電極部の電圧を出力電圧として計算している。電源の入力電圧は 1V とし内部抵抗は 50Ω である。また、紺色の測定結果は高周波プローブを用いて行ったものであり、橙色と重なっているが青色は同条件で行ったものである。この結果から計算と実験結果は、一部領域で差異が見られるが、ほぼ同様の傾向が得られた。緑色は高周波プローブを取り付けない場合の計算結果であるが、先の結果より実際には、この電圧が発生していると考えられる。また、APN 単体で入力側が内部抵抗 800Ω としたときの解析結果を橙色で示すが、RFKO 全体を考えた結果とほぼ一致しており、全体の周波数特性は APN の周波数特性で決まっていると考えられる。

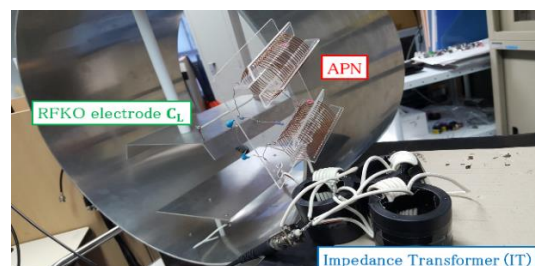


Fig.6 Model RFKO system.

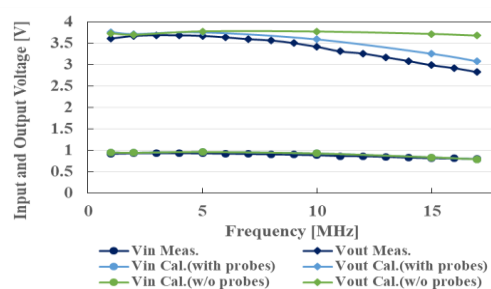


Fig.7 Measurement and analysis results (IT).

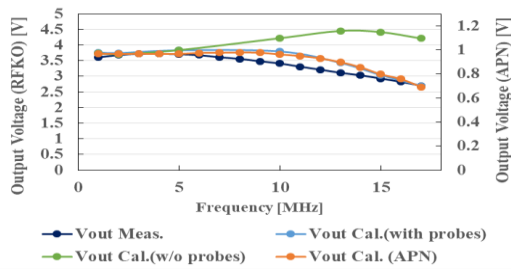


Fig.8 Measurement and analysis results (RFKO system).

Table 2 Permeability with the Frequency (FINEMET)

f [MHz]	1	5	10	15	17
Permeability	2800	850	550	450	400

6 高圧対応素子の設計

RFKO 装置によるビーム取り出しシミュレーションより炭素線、陽子線それぞれの電圧は Table 3 に示す値が必要である。

炭素線の実効電圧を使用し、1 MHz 及び 17 MHz のとき、APN の各素子に流れる電流を LTspice を用いて解析した結果を Fig.8 に示す。電源の内部インピーダンスは 800Ω とした。周波数が増えることで電流値が変化しているが、これは APN の入力インピーダンスが変化したことによるものであると考えられる。

コイルに流れる電流を必要周波数帯で 1 MHz 間隔で計算し、平均すると 1.77A であった。銅線内を電流が均一に流れるとすると、温度上昇を考慮し線径は $\phi 0.95$ となる。しかし、高周波での表皮効果により電流は表面を流れるため、2 倍程度の余裕を持たせると、コイルの線径は $\phi 1.34$ と決定される。既製の銅線で最も近いものが $\phi 1.4$ であるため、線径を $\phi 1.4$ と決定した。

この値を基に、APN に必要な $6.0\mu\text{H}$ のコイルを設計すると、コイル径 32.9mm、ターン数 23 回、ターン間隔 2.0mm とすることで $6.1\mu\text{H}$ のコイルを製作することができる。

次に、抵抗について考える。RFKO 電極には 1184V の電圧が印加されることより、抵抗部にも同じ電圧がかかるため、そこでの消費電力は 1740W となる。必要な抵抗は既製品として存在するが、最初の試験機としては規模が大きくなるので、陽子線 270MeV 対応とする。陽子線の場合、RFKO 電極には 418V の電圧が印加されるため、消費電力は 218W である。この結果より、既製品において検討すると定格電力 50W の

抵抗 150Ω 、2 個と 100Ω 、5 個を直列に接続することで、陽子線に対応することができる。

電圧は放電を避ける必要があることからピーク電圧として考える。炭素線を使用したときのピーク電圧は 4950V であるが、コイルとコンデンサは耐圧 10kV のものを使用する。また、抵抗は陽子線対応としたが、耐圧としては、耐圧 800V 抵抗を 7 個直列に接続することで 5.6kV なのでピーク電圧よりも高いものである。

今後、この設計を基に高耐圧 APN 回路及び RFKO 装置の製作、測定を行う。

Table 3 Required voltage by beam.

beam	peak value [V]	effective value [V]
heavy particle	4951.7	1184.9
proton	1745.3	417.6

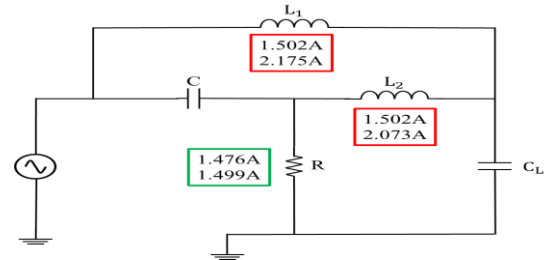


Fig.8 Current analysis result flowing in the element (heavy particle beam).

7 結論

広帯域 RFKO 装置を実現するために、広帯域 APN 回路の最適化と RFKO 装置の試作、測定を行った。その結果、両装置共に解析で予想されていた結果とほぼ同じ傾向が得られていることが分かった。この結果を基に、実際の使用を考えた高耐圧 APN 回路及び RFKO 装置の製作、測定を行う予定である。

[参考文献]

- [1] L.Flbo, in: Proceedings of the HIAT, Chicago, IL USA, 2012, pp. 152-162.
- [2] Tetsuya Nakanishi, Nuclear Instruments and Methods A621 (2010) 62.
- [3] Bowick., "RF CIRCUIT design", ELSEVIER, p.180-183
- [4] T.Furukawa et al., Proceedings of the APAC Gyeongju, Korea, 2004, pp. 420-422.
- [5] 東京電機大学, 入門回路理論, 東京電機大学出版局, 2005, p. 161.
- [6] Tetsuro Kurita, et al., Proceedings of EPAC, pp.1771-1772(2006).
- [7] R.Nishihara, T.Nakanishi, 平成 29 年電気学会全国大会講演論文集, 富山, 2017, pp. 43-44.