

RFKO 装置における広帯域 APN 回路の最適化

OPTIMIZATION OF APN CIRCUIT WITH A WIDE BAND IN RFKO SYSTEM

西原亮輔[#], 加藤久暁, 小林大二郎, 山口輝人, 中西哲也

Ryosuke Nishihara[#], Hisaaki Kato, Daijiro Kobayashi, Teruto Yamaguchi, Tetsuya Nakanishi

Nihon University, College of Industrial Technology

Abstract

A beam simulation has shown that a uniform spill structure can be obtained in RFKO extraction using a broadband frequency spectrum. In order to realize this method, we optimized a wideband 800 Ω APN circuit used in the RFKO system. A prototype wideband RFKO system using the 800 Ω APN has been build and the frequency characteristics have been measured. The measurements showed that the characteristics expected by analysis in the required frequency band can be obtained for the input / output voltage ratio and input impedance.

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、1~17MHz 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 APN の開発を行い、RFKO 装置の全体の実現性を検討することを目的としている。IT の変換比を 16:1 とし、そのときの APN の負荷抵抗は 800 Ω となる。APN の回路パラメータの最適化にあたっては RFKO 電極を接続するリード線の長さによる電極インピーダンスの変化や、コイルの浮遊容量を考慮し LTspice を用いて回路の最適化を行った。これらの解析結果、実験結果と共に、RFKO 装置全体を試作し、同様に解析、測定を行っ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、一様性が良くなった。[2]

Figure 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。

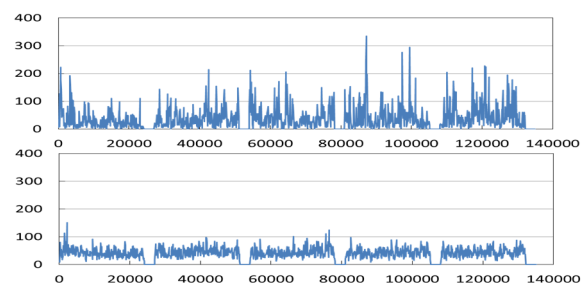


Figure 1: Simulation results with 1 band (upper) and 10 bands (lower).

[#] ciry16006@g.nihon-u.ac.jp

3. RFKO 装置の構成

Figure 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。Figure 3 に実際の RFKO 装置を示す。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、(2)式で表される。また、この式に(1)式の条件を適用したとき、 $1 \gg \omega C_L R$ の場合、入出力電圧比は周波数に関わらず一定となる。

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

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

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 25 [cm]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 250 [pF] を接続することを考えた。Table 1 の L と C は、それと C_L の合成容量(C_L')と $R = 800$ [Ω] 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	4.74	3.7
10	17.9	16.8	5.38	4.2
17	20.3	18.8	6.01	4.7

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棒に巻いた。巻き線径 0.5 [mm]、コイル径 31 [mm]、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 800 [Ω] 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。

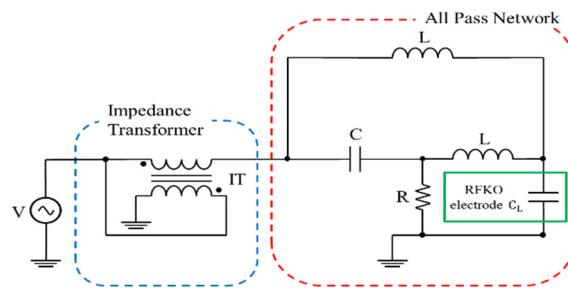


Figure 2: Circuit diagram of RFKO system.

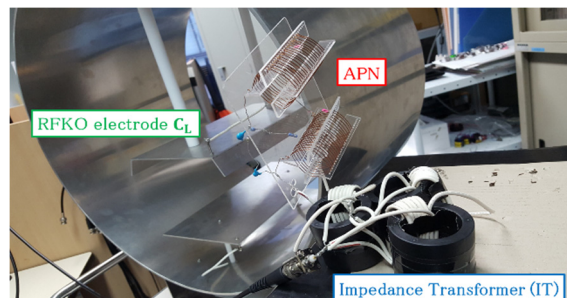


Figure 3: RFKO system.

4. 広帯域 APN の周波数特性

800 Ω APN の特性を LTspice(無償版)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 250 [pF] 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。解析結果を Figure 4 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 Figure 5 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 Figure 6 に示す。同図中には Figure 4 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(10 [M Ω], 11 [pF])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 Figure 6 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 250 [pF]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、800 [Ω]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ている。

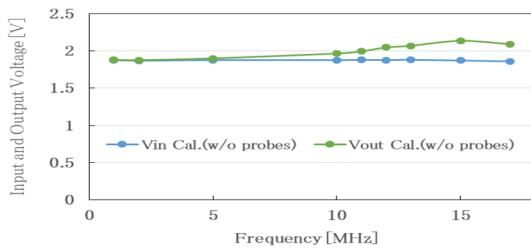


Figure 4: Analysis results w/o probes.

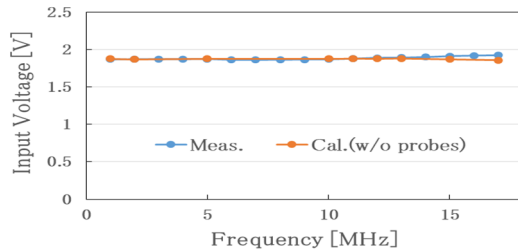


Figure 5: Measurement and analysis results (Input voltage).

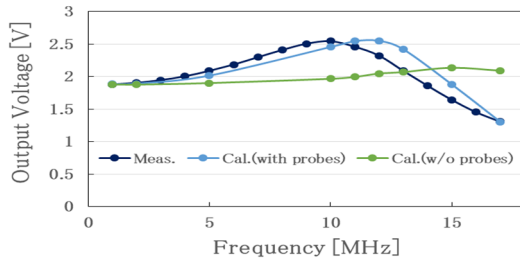


Figure 6: Measurement and analysis results (Output voltage).

5. 広帯域 RFKO 装置の周波数特性

Figure 7 に IT の周波数特性測定及び解析結果を示す。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。高周波帯での出力電圧の特性劣化は高周波プローブによるものであり、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、実際には約 3.7 [V]を維持していると考えられる[7]。

Figure 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。出力電圧の測定値では Figure 7 に示した IT の測定値の変化にほぼ一致している。また、プローブを考慮した場合の解析結果についても、ある周波数帯での差異が見られるが、おおむね傾向として同じであることが分かる。

従って、実際の RFKO 電極の電圧は Figure 8 に緑色で示した計算値になっていると考えられる。但し、高周波側での増加の割合は Figure 6 に示す値より数%高い値を示している。今回使用した LTspice は無償版であるため、計算精度は不明であり、今後、それも含めて、より実

用的な回路で特性改善を行う。

Table 2: Permeability with the Frequency (FINEMET)

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

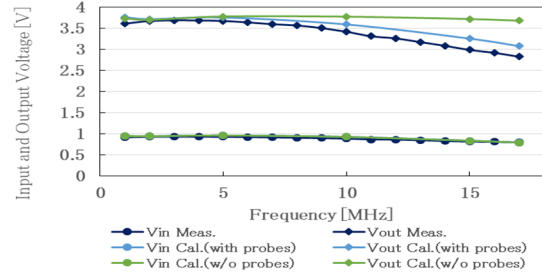


Figure 7: Measurement and analysis results (IT).

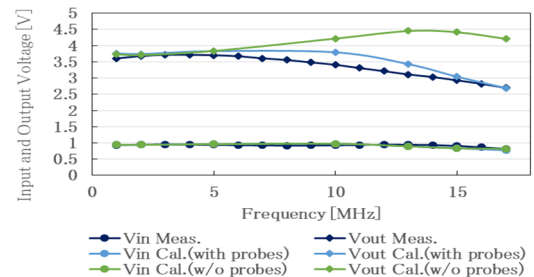


Figure 8: Measurement and analysis results (RFKO system).

6. 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。しかし、計算精度を含め、今後、詳細に検討する必要がある。

参考文献

- [1] L.Filbo, 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, 東京電気大学出版局, 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" Proceedings of the H29 The Institute of Electrical Engineers of Japan, Toyama, May. 15-17, 2017, pp. 43-44.