

一様スピルを得るための広帯域 RFKO システム用 APN の試作

DEVELOPMENT OF THE PROTOTYPE ALL PASS NETWORK FOR RADIO FREQUENCY KNOCKOUT SYSTEM WITH A BROADBAND TO OBTAIN A UNIFORM SPILL

山口輝人[#], 西原亮輔, 加藤久暁, 小林大二朗, 塩川智也, 中西哲也

Teruto Yamaguchi[#], Ryosuke Nishihara, Hisaaki Kato, Daijiro Kobayashi, Tomoya Shiokawa, Tetsuya Nakanish
College of Industrial Technology, Nihon University

Abstract

Radio Frequency Knock Out (RFKO) method has been used for a beam extraction from a synchrotron used in a heavy particle cancer therapy. In a conventional RFKO device, an RF electric field with a narrow bandwidth of several 10 kHz is used. The beam simulation showed that an extracted beam intensity becomes uniform by using an RF electric field with a wide band. In order to realize this system, we developed a broadband RFKO system. The RFKO system consists of Impedance Transformer (IT) and All Pass Network (APN). The APN consist of a resistor, coils, and capacitors. It was found that 90~100% the ideal voltage is generated in RFKO electrode.

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様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。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、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、高圧用広帯域 RFKO 装置の試作と特性試験を行った結果について報告する。

2. シミュレーション

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た[4]。ベアチューンは $\nu_x=1.68$ 、 $\nu_y=1.13$ であり、周回周波数は 3.483 MHz である。シンクロトロン内を周回する粒子のベータトロン振動数は幅を持っている。その周波数帯を含む高周波電界を RFKO 電極に加えると、すべての周回粒子は拡散される。しかし、その周波数帯だけでは、一様なスピルが得られないことが後で述べるシミュレーション結果から分かる。Figure 1 に示すマルチバンドスペクトルは、各バンドでベータトロン振動数幅以上の幅を持たせた CN(カラーノイズ)である。このようなスペクトルを有する CN は、デジタルフィルター法で計算し、蹴角として用いた[5]。1 バンドの周波数帯はチューンが 1/3 付近では 0.315~0.37 (周回周波数で規格化された値)、2/3 付近では 0.63~0.685 とした。1 バンドの場合 1/3 付近のみ、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。ビームの運動量幅はシミュレーションを簡略化するために 0 とした。

Figure 2 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 に相当するが、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様になっていることが分かる。

[#] cite18014@g.nihon-u.ac.jp

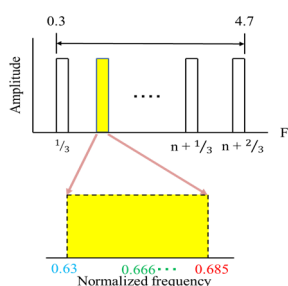


Figure 1: Multi band spectrum.

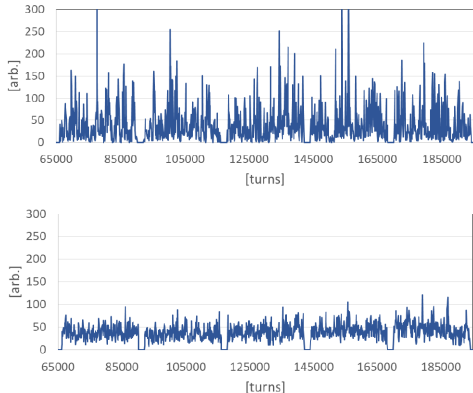


Figure 2: Simulation results with 1 band (upper) and 10 bands (lower).

3. APN の基本設計

3.1 RFKO 装置の構成

RFKO 装置の概略回路図を Fig. 3 に示す。RFKO 電極、APN、IT、で構成されている。RFKO 電極は 2 枚の並行平板から構成されるため、等価的にキャパシタンスとなる。従って電極単体では、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、RFKO 電極を APN の一部として組み込むことで、入力インピーダンスを周波数に依らず一定保つことができる。但し、以下の条件を満たす必要がある。

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

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。

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

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

理想的な APN の入力インピーダンスは R となり、 R にかかる電圧と C_L にかかる電圧は等しくなる。入出力電圧比を一定に保つには $1 \gg \omega C_L R$ を満たす必要があるが、実際の C_L は小さくなく、電極と回路を接続する N 型コネクタ、変換コネクタの静電容量も無視できず、更に回路と電極をつなぐリード線により、周波数によっても変わる。

APN の入力インピーダンスを R としたとき、 R で消費される電力は 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。しかし、 R が大きいほど IT と APN の周波数特性は悪化する。これまでの実験結果から、IT の変換比は 1:16、 $R=800 \Omega$ とした。

Table 1 にコネクタを含めて測定した電極の静電容量 C_L とその値を用いて、式(1)で計算した C と L を示す。これらの値を用いて LTSpice による回路解析を行ったが、1~17 MHz を通した特性としては同表の最後に示した値が適当であった。

Table 1: Value of Each Element

F[MHz]	C_L [pF]	C [pF]	L [μ H]
1	21.3	5.33	6.82
10	23.8	5.10	7.62
17	25.3	6.33	8.10
Final Values		4.7	6.0

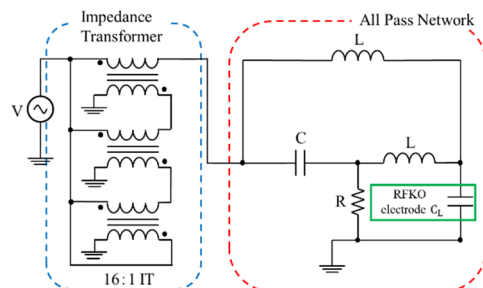


Figure 3: Circuit diagram of 16:1 RFKO system.

3.2 APN の必要電圧の計算

ビームシミュレーションで計算された 1 ターン当たり 40 個の蹴り角 θ を 5000 ターン分使って実効値を計算し、それを基に RFKO 電極の実効電圧を求めた。これらの計算は炭素線、陽子線それぞれについて行った。ここで、蹴り角は 1 回の取り出しが総粒子数の 1% となる値である。

蹴り角 θ と RFKO 電極の電界との間には、蹴り角が極めて小さいため $\tan \theta \sim \theta$ と近似できることから、以下のような関係となる。

$$E = \frac{V_d}{d} = \frac{A(T + E_0)}{ZL} \left\{ 1 - \frac{E_0^2}{(T + E_0)^2} \right\} \theta \quad (4)$$

A: 質量数、Z: 電荷数、d: 電極間の距離、
L: 電極の長さ、 E_0 : 核子あたりの静止エネルギー、
T: 核子あたりの運動エネルギー (炭素線の場合 400MeV/u、陽子線の場合は 270 MeV)

RFKO 電極間電圧は、電磁界解析ソフト Poisson で計算したギャップ中心付近の電界と、その時用いた電極間電圧の関係から求める。それぞれの計算結果と計算に使用した蹴り角を Table 2 に示す。この結果をもとに実際に使用する素子を選定した。但し、スポットスキニング照射では、深さ方向によって取り出し粒子数は変わり、これらの値は最も多くの粒子を取り出すときに必要となる値で、最初の 1~2 秒後には、必要な電圧は急に減少する。

Table 2: Required Voltage By Beam

	Peak value [V]	Effective value [V]
Kick angle	4.49E-06	9.73E-07
Carbon	2474	559
Proton	872	197

3.2 APN の各素子の検討

まずコイルについて述べる。Table 2 に示した炭素線の実効電圧を使用し、LTspice を用いて解析した結果、コイルに流れる電流は 1.77 A であった。銅線内を電流が均一に流れるとすると、温度上昇を考慮した線径は $\phi 0.95$ となる。しかし、高周波での表皮効果を考慮して 2 倍程度の余裕を持たせ、コイルの線径は $\phi 1.34$ とした。既製の銅線で最も近いものが $\phi 1.4$ であるため、線径を $\phi 1.4$ に決定した。

耐圧に関しては、Table 2 のピーク電圧に耐えられなくてはならない。ターン数が 23 であることから線間電圧は 215V となり、使用する銅線の絶縁破壊電圧 10 kV より充分小さい。

この値を基に、APN に必要な $6.0\mu\text{H}$ のコイルを設計した。製作したコイルを Fig. 4 に、仕様を Table 3 示す。

次に抵抗について述べる。炭素線の場合、RFKO 電極には 559[V] の実効電圧が印加されることで、抵抗部にも同じ電圧が加わるため、そこでの消費電力は 390 W となる。炭素線対応では最初の試験機としては規模が大きくなるため、抵抗に対しては陽子線対応とする。陽子線の場合は RFKO 電極には 197 V 加わり、消費電力は 50W となる。従って、消費電力 50 W の抵抗 2 個 ($470\Omega, 330\Omega$) を組み合わせ $100\text{W}, 800\Omega$ とした。

耐圧は、500 V の抵抗を 2 個直列に接続することで 1kV 程度である。Table 2 に示した陽子線のピーク電圧は 872V であるため問題ないと考えた。

最後にコンデンサについて述べる。選定したコンデンサを Fig. 5 に、その仕様を Table 4 に示す。Figure 6 は RFKO 装置に入力電圧 1 V を印加したときの、APN のコンデンサにかかる電圧である。同図から APN の入力電圧 4 V の 2 倍の電圧がコンデンサにかかることが分かる。これは、コンデンサにかかる電圧と負荷抵抗に加わる電圧の位相差により生じる。従って、耐圧が 7 kV のコンデンサを二個直列に接続した。これにより Table 1 に示した静電容量と大きく異なるが、LTSpice による解析と測定から、必要周波数帯において静電容量がこれほど変わっても出力特性に大きな影響が出ないことを確認した。

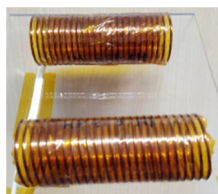


Table 3: Specification of Coils

Wire diameter [mm]	$\phi 1.4$
Coil diameter [mm]	32.9
Turn interval [mm]	2.0
Number of turns	23
Dielectric breakdown voltage [kV]	10.0
Inductance [μH]	6.1

Figure 4: Prototype coils.

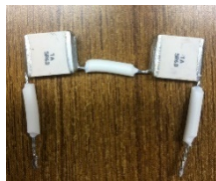


Table 4: Specification of Capacitors

Length [mm]	10.5
Width [mm]	9.5
Thickness [mm]	4.5
Capacitance [pF]	5.6
Withstand voltage [kV]	7

Figure 5: Capacitors.

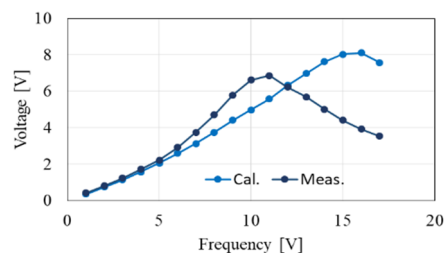


Figure 6: Voltage applied to the capacitor.

4. 試作 RFKO 装置の周波数特性

4.1 APN の周波数特性

APN 単体の周波数特性の測定値及び解析値を Fig. 7 に示す。入力電圧は 1 V とし、IT が接続された場合は入力側が 800Ω になることから、電源の内部抵抗 50Ω とあわせて 800Ω となるように、入力側に 750Ω の抵抗を取り付けた。測定は高周波プローブ ($10\text{M}\Omega, 15\text{pF}$) を用いて電極電圧を測定した。解析はプローブを考慮し RFKO 電極に抵抗とキャパシタンスを並列に接続したものと、プローブを除いたものについて行った。

高周波側で測定値は 1 V から約 50% 低下しているが、プローブを考慮した計算値と一致しており、プローブを除いた解析値は 1 に近い値のため、この低下はプローブのキャパシタンスによるものだと考える。6 MHz から 12 MHz の間ではプローブを考慮した解析値に対し測定値が最大で 7% 低い。この違いは解析に用いる等価回路に考慮していない条件があると考え検討している。プローブを除いた解析値は、1~17 MHz を通して 1 V に近い値になっており、実際の出力電圧もこのような分布になっていると考える。5 MHz 以降に最大 20% 程度大きくなって、15 MHz 以上では 1 以下になる。この原因は、17 MHz では $\omega C_L R = 1.6$ となり、高周波側で $1 \gg \omega C_L R$ が満たされていないことによる考えられる。

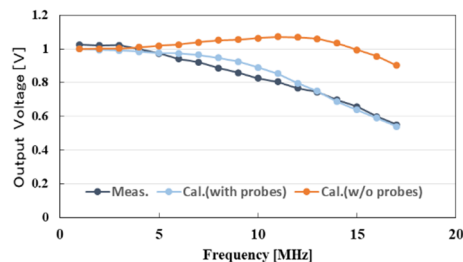


Figure 7: Measurement and analysis results (APN).

4.2 IT の周波数特性

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。日立金属株式会社のファインメットコアを 2 個積層して 1 つのコアとし、10 kV 耐圧のケーブルを 1 次側と 2 次側それぞれ 6 巻したトランスを 3 個組み合わせて 16:1 としている。Figure 8 に IT の周波数特性の測定値及び解析値を示す。測定は IT の出力側に 800Ω の抵抗を接続し、高周波プローブを用いた。解析に使用したコアのロス抵抗 R_p は 1 MHz の測定値にカタログ

から読み取った比透磁率を用いて必要周波数帯での値を計算した。結合係数 K と浮遊容量 C_p は、測定結果と一致するような値にした。 K は $K:0.998(1\text{ MHz})\sim 0.998(17\text{ MHz})$ 、 C_p は 4.4 pF 一定とした。APNと同様にプローブを考慮した場合と除く場合について行った。

測定値の高周波側での出力電圧の低下は、APNと同様にプローブの影響である。測定値とプローブを考慮した解析値は差が3%以内で一致した。従って、実際はプローブを除いた計算値のように、必要周波数帯で約3.5V一定となると考える。

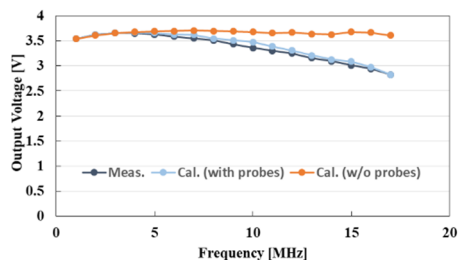


Figure 8: Measurement and analysis results (IT).

4.3 RFKO 装置の周波数特性

Figure 9 に IT, APN, RFKO 電極を組み合わせて試作した広帯域 RFKO 装置を示す。実際の RFKO 電極はシンクロトン内にあり、N 型コネクタで外部と接続される。従って今回の試作機は電極との接続に N 型コネクタと変換コネクタを使用した。測定は APN 側のコネクタ両端にプローブを接続した。測定結果と解析結果を Fig. 10 に示す。測定値は APN, IT と同様にプローブの影響により高周波側で低下する。6~12 MHz で測定値と解析値は一致せず、その差は最大で 13%となる。第 4.1 と 4.2 節で述べたように IT と APN 単体でも同様の傾向が見られ、それらの結果に関係していると考えられる。結果として、実際には橙色で示す分布に近い電圧分布が得られていると考える。

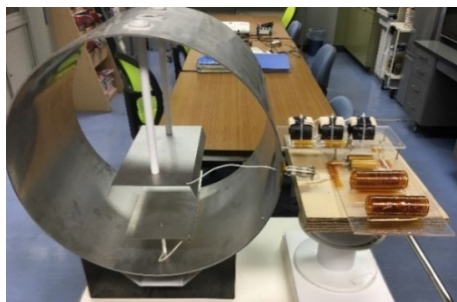


Figure 9: Broad band RFKO system.

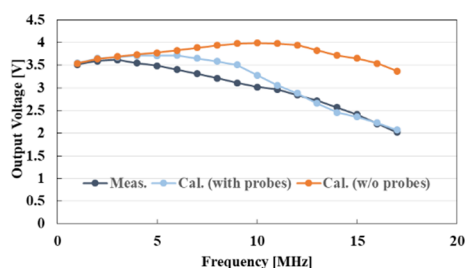


Figure 10: Measurement and analysis results (RFKO).

5. 周波数に対する位相変化がビームへ与える影響

使用する周波数帯は 1~17 MHz と広帯域であるため、信号電圧と電極電圧の位相差は周波数により変化する。LTSpice で解析した位相差を Fig. 11 に示す。周波数が高くなる程、位相差が大きくなるのがわかる。この位相差を考慮したビーム取り出しシミュレーションは蹴角の計算においてデジタルフィルター法ではなく $\cos(\omega_n t + \phi_n)$ から CN を作成しその後 ϕ_n にバイアスを加えた。各バンド内での位相差は 1° 程度なので一定とした。Figure 12 上図は位相差を考慮していない場合、下図が位相差を考慮した場合のシミュレーション結果である。位相差を考慮した場合にスパイルが大きく変化することはなく、影響はないと考えられる。

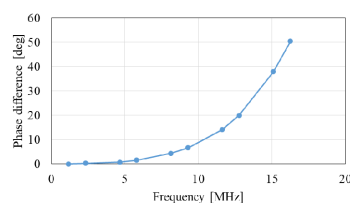


Figure 11: Frequency characteristics of phase difference.

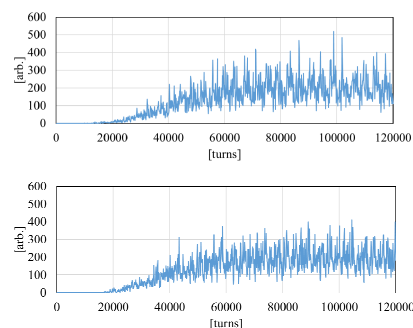


Figure 12: Simulation results without phase difference (upper) and with phase difference (lower).

6. 結論

実際の使用を考慮した広帯域 APN 回路の試作と、APN 単体及び IT と組み合わせた RFKO 装置での特性測定を行った。試作した RFKO 装置の電極には、理想値に対して 90~100%の電圧が生じた。

参考文献

- [1] L.Falbo, "Advanced Accelerator Technology Aspects for Hadron Therapy", Proceedings of the HIAT, Chicago, IL USA, 2012, pp. 156-162.
- [2] Tetsuya Nakanishi, "Dependence of a frequency bandwidth on a spill structure in the RF-knockout extraction", Nuclear Instruments and Methods, A621, (2010), pp. 62-67.
- [3] Bowick., "Matching to coaxial feedlines", RF CIRCUIT design, 2008, pp. 180-183.
- [4] T.Furukawa *et al.*, "Design of Synchrotron at NIRS for Carbon Therapy Facility", Proceedings of the APAC Gyeongju, Korea, 2004, pp. 420-422.
- [5] T. Nakanishi *et al.*, "Simulation study of beam extraction from a synchrotron using colored noise with digital filter", Nucl. Instr. and Meth., A608, (2009), pp.37-41.