

一様スピルを得るための広帯域 RFKO システムの試作と 低圧・高圧特性試験

日大生産工(院) ○山口 輝人 日大生産工(学部) 奥川 雄太朗, 塩川 智也
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 システム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。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 システムに用いられる素子の仕様を決定し、高圧用広帯域 RFKO システムの試作と低圧及び高圧での特性試験の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]。ベアーチューンは $\nu_x=1.68$ 、 $\nu_y=1.13$ 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(カラードノイズ)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 $0.315 \sim 0.37$ (周回周波数で規格化された値)、 $2/3$ 付近では $0.63 \sim 0.685$ 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蹴角を調整した。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。

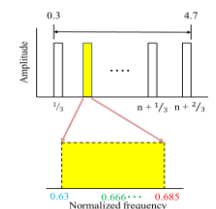


Figure 1: Multi band spectrum.

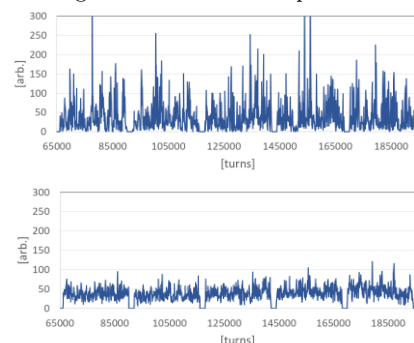


Figure 2: Simulation results with 1band (upper) and 10bands (lower).

Development of the prototype all pass network for radio frequency knockout system with a broadband to obtain A uniform spill and Low voltage / high voltage characteristic test.

Teruto Yamaguchi, Yutaro Okugawa, Tomoya Shiokawa, Tetsuya Nakanishi

3. APN の基本設計

3.1 RFKO システムの構成

RFKO システムの概略回路図を 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。

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

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

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 CL 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 CL 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。

Table1 にコネクタを含めて測定した電極の静電容量 CL 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。

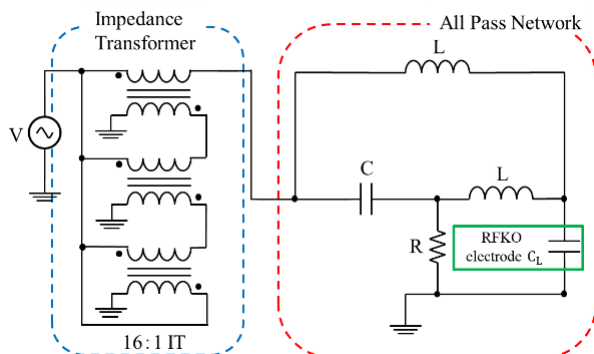


Figure 3: Circuit diagram of 16:1 RFKO system.

Table 1: Value of Each Element

F[MHz]	CL[pF]	C[pF]	L[μH]
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

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。

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

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

3.3 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 6.0μH 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 Ω , 330 Ω) を組み合わせ 100W、800 Ω 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 システムに入力電圧 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。



Figure 4:
Prototype coils.

Table 3: Specification of Coils

Wire diameter[mm]	ϕ 1.4
Coil diameter [mm]	32.9
Turn interval [mm]	2.0
Number of turns	23
Dielectric breakdown voltage [kV]	10.0
Inductance [μ H]	6.1



Figure 5: Capacitors.

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

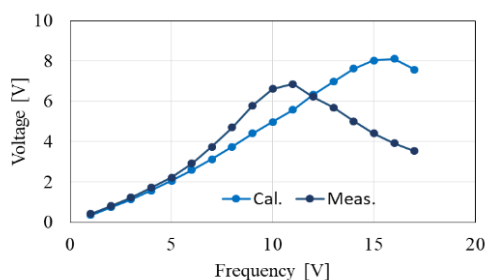


Figure 6: Voltage applied to the capacitor.

4. 試作した RFKO システムの周波数特性

4.1 実験方法

Figure 7 に最終的な装置全体のブロック図を示す。WS から出力したカラードノイズを RF スイッチでパルスにして入力する。2つの RF 信号はそれぞれアンプ、IT、APN を通して各電極に入力される。分配器を通過した位相が 180° 異なる信号がそれぞれ入力される。

今回の特性試験では Fig. 8 に示す構成で周波数特性試験を行った。電極は一電極励振用に設計製作したものを、入力信号には正弦波を用いた。アンプは広帯域アンプ(9kHz~250MHz)で最大出力 40W である。測定はアンプを使用しない場合と使用する場合について行い、方向性結合を用いた。測定した進行波と反射波から APN の抵抗の電圧を計算した。

また方向性結合器による測定の他に、Fig.9 のように FET プローブの先端につけた銅板のみをチェンバー内部に入れ、電界による誘起電圧を測定した。こちらはアンプを用いた場合についてのみ行った。

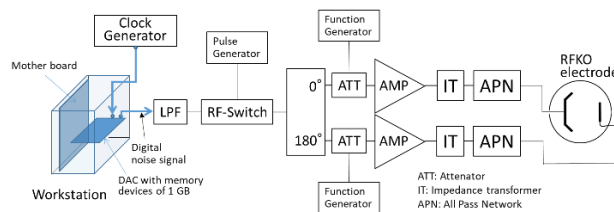


Figure 7: Block diagram of RFKO System.

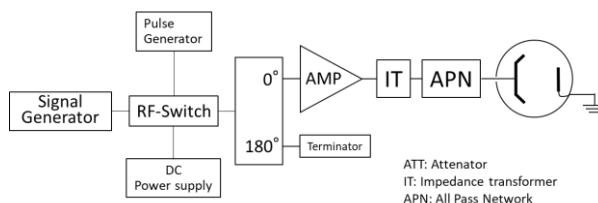


Figure 8: Block diagram of RFKO System.



Figure 9: Measurement with probe.

4.2 試作 RFKO システムの周波数特性

RFKO の周波数特性を Fig.10 に示す。同図は 1MHz のときの測定値を基準にした各周波数での電圧の変化の比率を示している。黄色のグラフはアンプを用いた場合の方結の測定値、灰色はプローブによる測定値である。どちらも 1 から 12MHz の間で電圧が増加した。このとき 8MHz 付近でピークとなった。12MHz 以降は高周波側に行くにつれ電圧が低下した。但し、方結の結果は変化が小さい。アンプを用いない場合（緑）と比較すると少し異なる傾向だった。従ってこの電圧の変化の違いはアンプから見た負荷インピーダンスが 50Ω になっていないことによるアンプの周波数特性によるものだと考える。また、プローブを用いた場合のほうが高周波側での低下が急激である。プローブ先端の誘電体と RFKO 電極の極板を支えるセラミックがチェンバー内の電界に与える影響を考慮してプローブの場所を変化したが、改善はわずかだったため、他の原因を検討している。

青色のグラフは、アンプを用いていないときの、高周波プローブ(10M Ω , 15pF)で電極電圧を直接測定した結果を基に LTSpice で計算した推測値である。すなわち、プローブのキャパシティの影響で、高周波側で測定誤差が大きくなるため、低周波側の測定値を基に、IT の浮遊容量やコアのロス抵抗を算出し、LTSpice で計算した。この結果は、12MHz 付近まではアンプありの電界測定に比べて低めで、その後は逆転する傾向にあり、方結の結果と同じ傾向にある。方結の結果と、プローブによる電界測定及び直接測定とその補正結果に十数%の誤差がある原因は調査中である。

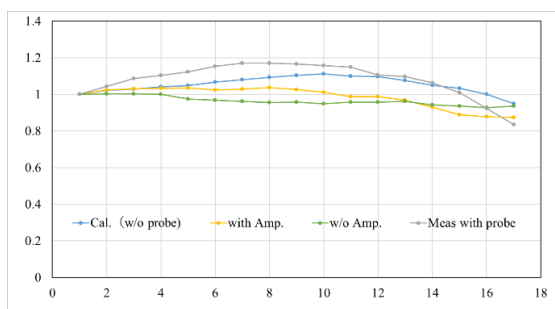


Figure 10: Block diagram of frequency characteristic test of RFKO System

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ことがわかる。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 ϕn 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。

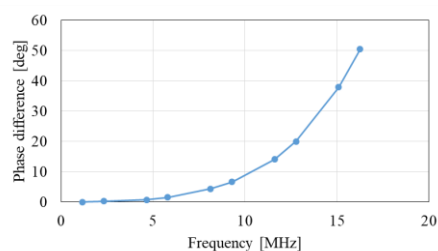


Figure 11: Frequency characteristics of phase difference.

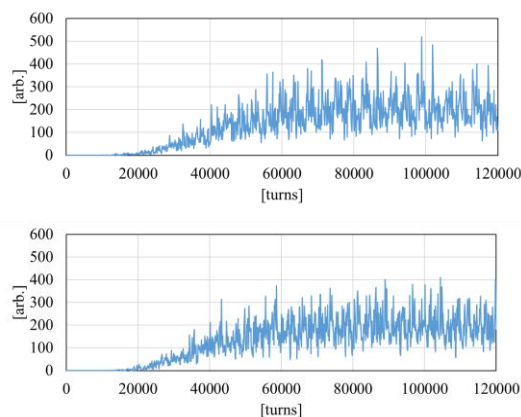


Figure 12: Simulation results without phase difference (upper) and with phase difference (lower).

6. 結論

RFKO 装置の低圧・高圧特性試験を行った。アンプを用いた場合 RFKO システムの出力特性は、アンプから見た負荷インピーダンスが 50Ω になっていないことによるアンプの周波数特性の影響を受けると考えた。方結の結果と、プローブによる電界測定及び直接測定とその補正結果の十数%の誤差の原因は調査中である。

「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, K. Tsuruha, Simulation study of beam extraction from a synchrotron using colored noise with digital filter, Nucl. Instr. and Meth., A608, (2009), pp.37-4