

広帯域高周波電界を使ったシンクロトロンからの
ビーム取出しビームシミュレーション結果と高周波回路素子の試作

日大生産工 ○山口 輝人, 加藤 久暁, 小林 大二郎 日大生産工(院) 西原 亮輔
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、ビーム取出しを行う。この方法はビームの on または off の切替時間は 1ms のオーダーと報告されており、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。これに対して中西研究室では、別の方法である QAR 法の研究の中で、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ビームシミュレーションで見出した[2]。その時に必要な周波数帯は、約 1~17MHz であり、そこに 10 個の共鳴帯が含まれている。

本研究では、RFKO 取出しにおいて、共鳴周波数帯が 1 個含まれるスペクトルと、10 個含まれるスペクトルでビームシミュレーションを行い、その違いを明らかにした。そこで得られた蹴り角から、RFKO 電極に必要な電圧を求めた。その結果を基に、RFKO 回路素子の設計を行った。本論文では、それらの結果について述べる。

2 広帯域 RFKO 装置によるビーム取出し

RFKO 取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。一般的にはセパトリ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ビーム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ほど一様性が良くなった。Fig.1 は 1 個の共鳴周波数帯と、10 個の共鳴周波数帯でビームシミュレーションを行った結果である。同図から明らかに 1 バンドに比べ 10 バンドで取出されるビーム強度が一樣になることが分かる。

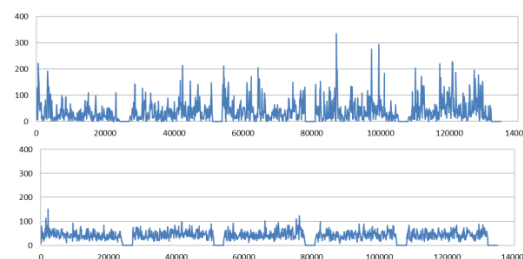


Fig.1 Simulation results with 1 band (upper) and 10 bands (lower).

3 RFKO 装置

Fig.2 に RFKO 装置の概略回路図を示す。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 が用いられる。APN には、RFKO 電極がキャパシタンス C_L として組み込まれている。理想的な APN では、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。APN の入力インピーダンスを R としたとき、また 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。一方、高周波電源と 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。

Simulation result on beam extraction from a synchrotron with a wide band high frequency electric field and make of high frequency circuit elements

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

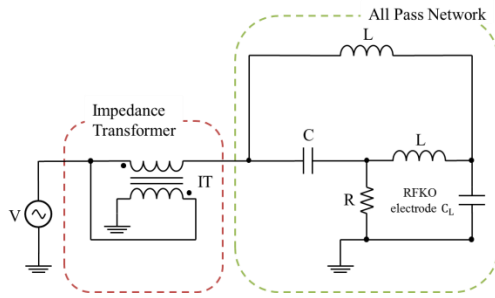


Fig.2 Circuit diagram of RFKO system

4 RFKO 電極電圧の計算

ビームシミュレーションで計算された 1 ターンごとの蹴り角 θ から電界を計算した。それを基に RFKO 電極の実効電圧を求めた。回転数は 24000 ターンであり、その蹴り角の実効値は、ターンごとの θ の二乗和の平方根で求めた。ピーク電圧は其中最も大きなものを用いて計算した。これらの計算は炭素線、陽子線それぞれの場合について行った。

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。

$$E_1 = \frac{V_d}{d} = \frac{A(T + E_0)}{ZL} \left\{ 1 - \frac{E_0^2}{(T + E_0)^2} \right\} \theta \quad (1)$$

ここで A : 質量数、Z : 電荷数、d : 電極間の距離(0.13m)、L : 電極の長さ(0.3m)、 E_0 : 核子あたりの静止エネルギー(938MeV/u)、T : 核子あたりの運動エネルギー、 θ : 電極出口における粒子軌道とビーム軸のなす角とする。また、核子あたりの運動エネルギー T は、炭素線の場合 400MeV/u、陽子線の場合は 270MeV である。

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。Poisson の計算結果によると、電極間電圧が 500V のとき、中心付近の電界は 3854V/m であった。上記電界を発生する電極間電圧は 500V に電界の比をかければよい。結果的にそれぞれの実効電圧とピーク電圧は Table1 のようになった。参考までに蹴り角の実効値を示している。

Table1 RFKO Electrode Voltage

	蹴り角の実効値[rad]	実効電圧[V]	ピーク電圧[V]
炭素線	2.01E-06	1185	4952
陽子線		417.6	1745

5 APN に使用するコイルの設計

APN は、コイル、コンデンサ、抵抗から構成されている。コンデンサと抵抗は Table1 の仕

様を満足する製品が市販されているので、本論文では市販されていない製作する必要があるコイルについて述べる。

LTspice による回路解析の結果、炭素線を用いる場合、Table1 の実効電圧と APN の周波数特性を考慮すると、コイルに流れる電流は必要周波数帯で平均して 1.77A である。銅線内に電流が均一に流れるとすれば、熱上昇を考慮した線径は $\phi 0.95$ となる。しかし、高周波による表皮効果で電流が銅線の表面に集中し、抵抗値が上昇し発熱することを考慮し、2 倍程度の余裕を持たせると、線径は $\phi 1.34$ となる。よって、既製の銅線で最も近い $\phi 1.4$ に決定した。

コイルに必要なインダクタンスは $6.0 \mu H$ である [4]。決定した線径とインダクタンスを用いて、Helical Coil Calculator という Web 上の計算サイトを利用し、仕様を決定した。その仕様を Table2 に示す。耐圧に関しては、Table1 のピーク電圧に耐えられるものでなくてはならない。ターン数が 23 回であることから線間電圧は 215[V]となり、Table2 に示す絶縁破壊電圧よりも充分小さい。従って、今後この値を基に高耐圧コイルの試作を行う。

Table2 Specifications of coil

直径[mm]	32.9
線径[mm]	1.4
ターン間隔[mm]	2.0
ターン数[回]	23
絶縁破壊電圧[kV]	10.97

6 結論

広帯域 RFKO 装置の実機対応の試作のために、RFKO 電極電圧の計算を行った。その結果から、APN のコイルに求められる仕様を検討した。今後は決定された仕様のコイルを試作する予定である。さらに APN を試作し、周波数特性を測定し、実用化に向けて完成を目指す。

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] R.Nishihara, T.Nakanishi, et al., Proceedings of PASJ ,2017