

## RFKO システム用 APN の提案

日大生産工 ○中西 哲也

### 1. まえがき

粒子線がん治療装置の主加速器であるシンクロトロンからのビーム取出し法として高周波ロックアウト (RFKO) 方式が使われている。この方式は周回粒子に横方向の高周波電界を与えてベータトロン振動を大きくして取出す方法であり、ビームon/off制御を高速にできる利点がある。しかし、高周波の周波数バンドが狭いと取出しビーム (スピル) 強度の変化が大きくなる問題がある。その解決法として周回ビームをバンチングする方法があるが、ビームon/off制御が遅くなる問題が新たに生じる<sup>2)</sup>。

これらの問題を解決する方法として幅広い周波数帯を含む高周波信号を使用する方法を提案し、原理実証試験に成功している<sup>3)</sup>。このような広帯域高周波電圧をRFKO電極に与えるために、電極を回路の一要素としたAll Pass Network (APN)を使う。また、高電圧が必要となるため高周波トランスを用いる。結果的にAPNの入力インピーダンスは大きくする必要があり、電極の静電容量も大きいことから高域側で電圧が低下する。

本研究はこのようなAPNをRFKOシステムで用いる場合の適用方法について検討したものである。また、高域側の電圧低下を改善する方法として、電極と並列にコイルを接続することにより等価的Cを低減する方法についても述べる。

### 2. 広帯域RFKOシステムによるシンクロトロンからのビーム取出し

シンクロトロンを周回する粒子は進行方向と垂直方向にベータトロン振動をしており、取出すためにはその振幅を増大する必要がある。その方法として、ベータトロン振動数に等しい周波数の高周波電界を粒子に与え共鳴させることにより振幅を増大するRFKO法がある。振動数は周回する粒子の振幅により異なるため、RFKOの信号源としてはその周波数成分を含んだ信号とする必要がある。Fig. 1はそのような信号を用いてビームシミュレーションした結果である。信号はデジタルホワイトノイズからデジタルフィルタ法を用いて必要な周波数帯を含む信号を作り出した。このような信号を

カラーノイズ (CN) と呼ぶ。一共鳴周波数帯だけではFig. 1の1バンドに示すようにスピルの強度変化が大きい。

筆者はこのスピルの変化を小さくする方法として、ベータトロン振動数の高調波成分も含めた信号 (マルチバンドCN) を用いる方法を提案した。Fig. 1に10の共鳴周波数帯を含めた信号による結果を示すが、スピルの変化は明らかに小さくなるのが分かる。

1/3共鳴を用いた取り出しでは、共鳴周波数は以下の式で表される。

$$f = \left( n \pm \frac{1}{3} \right) f_0$$

ここで、 $n$ は整数、 $f_0$ は粒子の周回周波数である。上記10バンドでは $n=0\sim5$ とした周波数付近のバンドを用いた。重粒子線 (炭素) 装置では、 $f_0$ は約3.5 MHzで各バンド幅としては100kHz以下である。

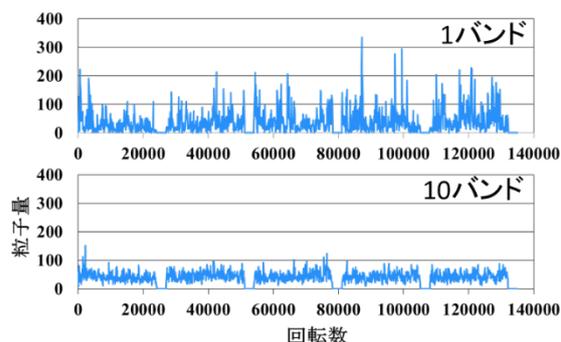


Fig. 1 1バンドと10バンドの場合のスピルの変化

### 3. 通常のAPNの周波数特性

Fig. 2は通常のAPN回路であり、回路シミュレータLTspiceの入力画面である。以下の条件のときに入力インピーダンスは周波数に関係なくR1に等しくなる。

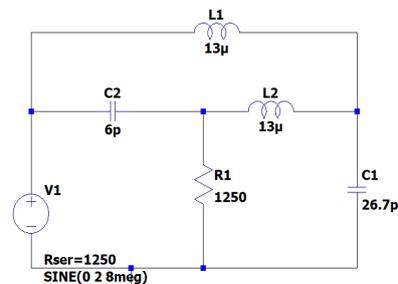


Fig. 2 通常のAPN回路

$$L1 = L2 = \frac{C1 R1^2}{2}, \quad C2 = \frac{C1}{4} \quad (1)$$

このとき、入出力電圧比は下式で表される。

$$F(\omega) = \left[ 1 + \frac{j\omega C1 R1}{2} + \frac{(j\omega C1 R1)^2}{4} \right]^{-1} \quad (2)$$

この式は、 $1 \gg \omega C1 R1$ のとき出力電圧は周波数に関係なく入力電圧に等しくなることを示し、APNの名前通りの特性が得られる。しかし、RFKOシステムでは以下に述べるようにこの条件が満たせない。

Fig. 2のC1はRFKO電極の静電容量で、図中の値はPOP実験を行った若狭湾エネルギー研究センター(WERC)の電極と構造を同じくしたプロト機の静電容量である。またR1=1250Ωは、前段の高周波トランスで電圧を5倍(インピーダンスは25倍)に昇圧することを前提にした値で、必要な電極電圧は決まっているためR1は大きいほど消費電力を小さくでき、高周波アンプの負担も小さくできる。必要な周波数帯は、バンド数を10とすると炭素線がん治療装置に用いられるシンクロトロンでは0.8~16.3 MHz、小型陽子線シンクロトロンでは1.6~37.5 MHzである。これはF(ω)=1となる条件を満たさない。そのため、L1, L2, C2は入力インピーダンスの変化を考慮しながら出力電圧ができるだけ一定となるように調整した。以下にR1=1250Ω、800Ωの検討結果について述べる。

### R1=1250Ω

Figs. 3, 4はプロト機の静電容量で計算した電極電圧Vcと入力インピーダンスZinの周波数特性である。電圧は1Vが理想値で、Zinは1250Ωで規格化した絶対値である。式(1), (2)で計算した値を用いた場合、Zinは周波数に関係なく一定であるが、電圧は大きく変化することが分かる。橙色はL1=L2の条件で最適化した結果である。電圧は16 MHzで0.53Vに低下しているが、

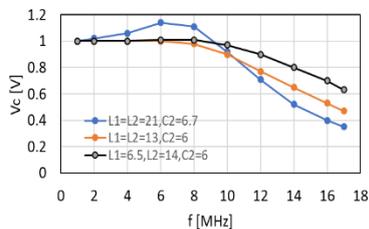


Fig.3 f vs. Vc (R1=1250Ω)

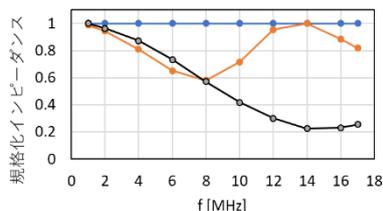


Fig.4 f vs. Zin (R1=1250Ω)

Zinは0.6以上であり、入力電流と電圧の位相差から全周波数にわたって実数部が支配的である。このパラメータはPOP試験用に試作した回路とほぼ同じであり、高周波アンプに接続して問題なく動作している。ちなみに、POP試験では必要な周波数帯は1から14 MHzであった。これに対して、L1とL2を独立に変化させて最適化した結果を黒線で示すが、電圧は16MHzで0.7に改善しているが、Zinは0.2程度まで減少しており、アンプに接続したときに発振等が起こる可能性がある。

### R1=800Ω

Figs. 5, 6に計算した周波数特性を示す。全てにおいて特性は改善している。図には陽子線への適用を考慮して24MHzまでの特性を示した。

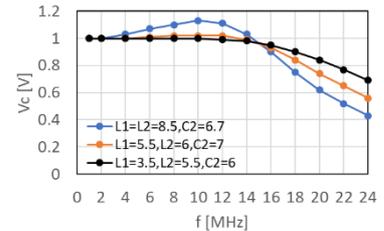


Fig.5 f vs. Vc (R1=800Ω)

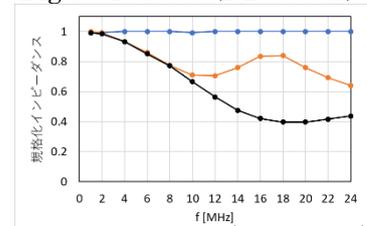


Fig.6 f vs. Zin (R1=800Ω)

4. 電極容量を等価的に小さくする方法  
電極電圧の周波数特性が高域側で悪化する原因は、 $\omega R1 C1$ が1よりも十分に小さくないことであることは前章で述べた。R1を小さくすることは高周波アンプ出力を大きくするため、C1を回路的に小さくする方法を提案する。

電極に並列にコイルを接続すると、そのインピーダンスは下式で表せる。

$$Z = \frac{1}{j\omega C \left( 1 - \frac{1}{\omega^2 LC} \right)} \quad (3)$$

この式は、共振周波数よりも高い周波数では( )内は正の1以下の値となり、等価的にはキャパシティブとなりC1よりも小さい静電容量となることを示す。周波数が低くなるほど等価的Cは小さくなり、回路的には平坦な周波数特性が得られやすくなる。ただ、必要な最大周波数で等価的Cを決めたとき、それ以外の周波数ではCが変化するため、その変化に合わせてL1, L2を変える必要がある。そのため、Lに直列にCを接続する。そのインピーダンスは下式で与えられるが、Cと同様に周波数が低くなるほど等価的Lは小さくなるのがわかる。

$$Z = j\omega L \left( 1 - \frac{1}{\omega^2 LC} \right) \quad (4)$$

C2に関しては周波数特性への影響は小さいため補正はしない。回路図をFig.7に示す。

炭素線シンクロトロンへの適用を考え、C1を16 MHzで等価的に半減するパラメータを計算する。R1=1250Ωとする。まず、通常のAPN回路で0.5C1として平坦な周波数特性を求めた結果をFig.8に示す。このときL1=L2=8μH、C2=3pFであった。4%高い領域があるが、18 MHzでは2%の低減でしかない。

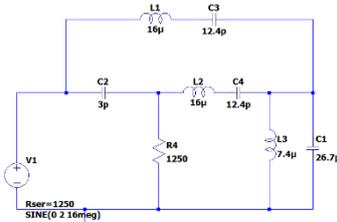


Fig.7 等価的 C 低減回路

C1を等価的に半減するために(3)式の括弧内が16 MHzで0.5となるL3を計算すると7.4μHとなる。L1, L2については、通常回路の先の値を2倍にする必要があり、それらの値から計算した直列CはC3=C4=12.4 pFであった。

この回路で計算した周波数特性をFig.8に橙線で示す。16 MHzでは0.5C1の通常回路の値と一致しているが、LC回路なのでBPFのような特性になる。12 MHz付近で電圧は少し低下しているが、8~16 MHzまで平坦に近い分布が得られている。しかしFig.9に示す入力インピーダンスから下限は9 MHz程度と思われる。

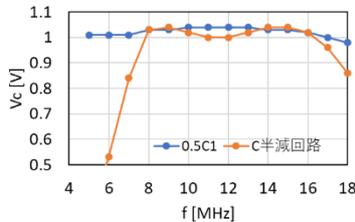


Fig.8 C 半減回路の電圧特性

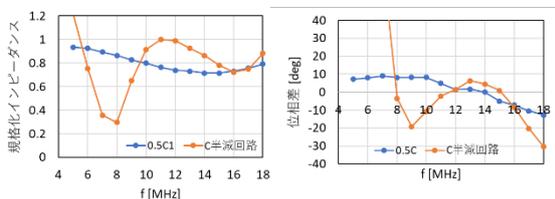


Fig. 9 C 半減回路の Zin と位相差の特性

## 5. 実験結果

R1=800ΩのAPN回路を試作し電極電圧の周波数特性を測定した。コイル用のフェライトコアは米国Fair-Rite社の67 Materialを使用した。このコアは比透磁率が30程度だが30MHz程度までほぼ一定で、損失抵抗係数

も小さい。Fig.5内に示した値を目標に製作したが、LCRメータで測定したインダクタンスは10MHzでL1=5.23μH、L2=5.77μHであった。C2は6.2pFであった。それらのパラメータで計算した結果と測定結果をFig.10に示すが、非常によく一致している。1, 2MHzの測定値はインピーダンス不整合による測定誤差を考慮して1~2%増やして1とした結果を図示している。

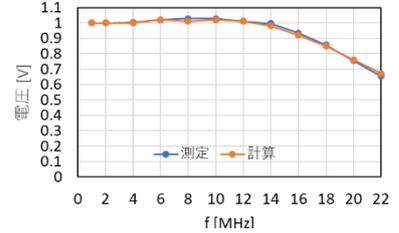


Fig. 10 R1=800Ωの電圧特性の計算値と測定値

Fig.11は等価的C半減回路の測定結果と計算結果である。回路のコイルは上述したコアを使用した。L, C共に目標値にほぼ等しい値が得られた。Fig.11の計算値はFig.10の橙線と同じデータである。測定値が計算値と異なる領域があるが、原因は検討中である。

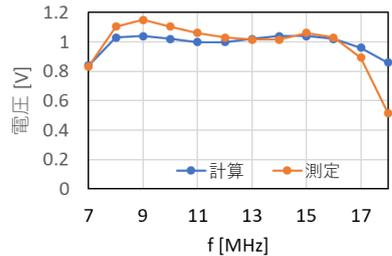


Fig. 11 C 半減回路の計算値と測定値

## 6. RFKOシステムにおけるAPN回路の使い方

RFKOシステムの消費電力はAPNの入力インピーダンスZinで決まる。しかし、Zinが大きいほど高域側の電圧は低下する。その補正方法としては、周波数に対する電圧低下の割合を考慮してCN信号のスペクトル強度を高域側ほど大きくする方法や、前章で述べた電極C低減回路を併用する方法が考えられる。本章では炭素線と陽子線治療装置に対してAPNの用い方について述べる。

粒子線がん治療装置の効果的な照射方法としてスポットスキニング法がある。この方法は、患部を数万ブロックに分けて、それぞれに必要な線量を照射する方法であるが、シンクロトロンでの加速ビームを有効に利用するために深さ方向の位置を変える際に射出ビームのエネルギーを変える。その可変範囲は炭素線では140~400 MeV/u、陽子線の場合は70~250 MeVである。

エネルギーが変わると粒子の周回周波数が変わるため、高周波電界の周波数も変える必要がある。取出し中のチューン（一周当たりのベータトロン振動数）はエネルギーに関係なく同じであるためである。炭素線の場合のエネルギーに対する10バンドの周波数帯をFig.12に示す。Fig.13にRFKOシステムを示すが、マルチバンドCNはデジタルデータを予め計算してWS内のDACに保存し、外部クロックで出力する<sup>3)</sup>。エネルギーを変えたときのCNデータは、クロック周波数が任意に設定できない場合は信号のサンプリング周期を変えて計算しておく、エネルギー変更中にDACのデータを書き換えるか複数のDACを使用すればよい。

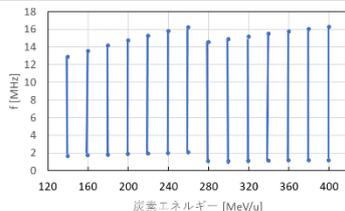


Fig. 12 エネルギー vs. 周波数帯

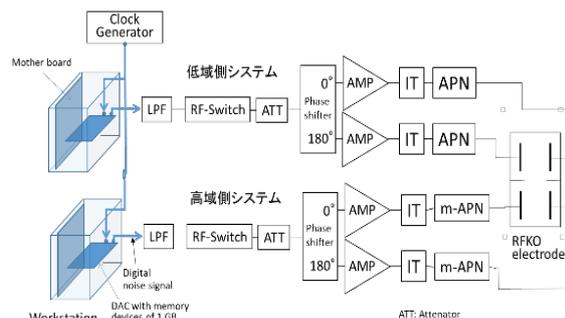


Fig. 13 2種類のAPNを使用する場合のRFKOシステム

### 炭素線装置への適用

前段ITの電圧昇圧比が1:4では16 MHzで電圧は7%低下する程度であり(Fig. 5)、Zinもプロト機の実績を考えると問題ないと考えられ炭素線にはこれだけで対応できる。ただし、高周波アンプの必要パワーは1:5に比べて1.56倍に増える。また、周波数特性を完全に平坦にCN信号で補正する場合、各バンドの周波数での理想値に対する電圧比を計算し、CNデータを計算する際にそれらの逆数を各バンドの振幅に掛けて計算すればよいが、Fig. 5の分布の場合、電圧比が1以上になる周波数帯もあることからアンプのパワーは1%程度増やすだけである。1:5の場合、16.3 MHzで53%に低下する。この低下をCN信号で補正する場合、アンプのパワーは1.63倍にする必要があり、メリットはない。実際にはITも含めた特性を用いる必要がある。

一方、新たに提案した回路を併用する方式は次のようになる。9MHzまでは通常型、

9~16.5MHzは提案型とすればよい。本方式ではそれぞれ5バンドの信号を発生させ、2つの電極に印加する(Fig.13)。この場合、両者ともR1=1250Ωとすることができ全周波数帯で平坦な電圧分布が得られるためアンプの全パワーは変わらない。さらに、電極が2つになるので、電極の静電容量を小さくでき、設計はより容易になる。

### 陽子線装置への適用

10バンドの信号は最大周波数が37 MHzとなるため難しいが、電圧昇圧比を1:4とすると22 MHzで電圧は65%に低下する。それを許容すると160~250MeVでは6バンド、120~140MeVでは7、100MeVでは8、70MeVでは9の使用が可能である。バンド数が少ないとスピルの強度変化は大きくなるが、周波数特性が平坦な場合、6バンドでは強度変化の標準偏差は24%増える程度である。800ΩAPNの電圧分布をCN信号で補正した場合、アンプのパワーは1.28倍必要となる。陽子は炭素に比べて電荷数対質量比は2倍で且つエネルギーも低いため、アンプとしては問題ないと思われる。

また、電圧昇圧比を1:3とすれば、さらに多くのバンド数が適用できるが、高周波トランスの検討が必要である。

### 7. まとめ

RFKOシステムへの適用を目的としたAPNの周波数特性の計算結果と試作機の測定結果について述べ、それらの結果を基にAPNの適用方法について述べた。炭素線治療装置にはR1=800Ωなら一台で対応できるが、高周波アンプへの負担を軽減するためには提案したC半減回路を併用する方式が有効である。

### 参考文献

- 1) L.Falbo, "ADVANCED ACCELERATOR TECHNOLOGY ASPECTS FOR HADRON THERAPY", Proc. of HIAT 2012, Chicago, IL USA, pp. 156-162.
- 2) T. Furukawa, et al., "Characteristics of fast beam switching for spot scanning", Nucl. Inst. and Meth, A503 (2003), pp.485-495.
- 3) T. Shiokawa, et al., "Slow beam extraction method from synchrotron for uniform spill and fast beam switching using an RF knockout method of multi-band colored noise signal--POP Experiment and Simulation", Nucl. Inst. and Meth, A5 1010 (2021) 165560.