

RFKO 装置におけるインピーダンストランスフォーマーに関する研究

STUDY ON IMPEDANCE TRANSFORMER IN RFKO SYSTEM

西原亮輔#, 中西哲也

Ryosuke Nishihara#, Tetsuya Nakanishi
Nihon University, College of Industrial Technology

Abstract

A slow beam extraction method from a synchrotron, QAR method, has been proposed using an RFKO device and a fast quadrupole magnet. Experiments consideration and an equivalent circuit analysis are studied with Impedance Transformers (IT) used for the RFKO. The ITs of transformation rate of 16:1 and 25:1 was made and the frequency characteristics was measured. Results shows that input impedance and load voltage are reduced in a lower and a higher frequency regions. They are improved with a higher permeability of the core in the lower frequency region. However they are not improve in a higher frequency region with the higher permeability. Equivalent circuit analysis shows that the electric loss of the core may be affected.

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 QAR 法が提案されている[1]。QAR 法は beam extraction method using a fast Quadrupole magnet Assisted by RFKO の略で、高速四極電磁石 (FQ) と高周波ノックアウト装置 (Radio Frequency Knockout : RFKO) を用いて、セパトリクスの大さを高速で変化させることによりビームを取り出す方法である。RFKO システムは RFKO 電極、IT (Impedance Transformer)、All Pass Network (APN) で構成されており、セパトリクス内での周回ビームの拡散に用いる。周回ビームを一様に拡散するために必要な周波数帯は、1 ~ 17 MHz である[2][3]。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 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インピーダンス変換器 (インピーダンストランスフォーマー: IT) [4] が必要となる。

これまでの研究では、変換比を大きくすると低周波側と高周波側で特性が低下する問題があった。等価回路解析から ωL が十分に大きくないとそのような特性になることがわかったので、フェライトコアを複数重ねて L を大きくすると低周波側では改善がみられたが、高周波側ではさらに悪化した。その原因を追究するべく、IT の等価回路について見直しを行った。また、2 種類のコアを使用した IT を試作し、特性測定を行った。

本論文は、2 種類のコアを用いた IT の試作と特性測定結果、巻線長による特性への影響、MATHEMATICA を用いた等価回路解析について検討した結果について述べる。

2. IT の原理

Figure 1 に IT 回路のインピーダンス変換比 4:1 の回路図を示す。IT 回路において、信号源から電圧 V が印加されるとすると B に V がかかる。この時、巻き数と同じであると誘導起電力により A に B と同じ V が誘起される。そのため負荷には信号源 V を加えた $2V$ がかかる。

次にインピーダンス変換について考える。抵抗から $I/2$ の電流が流れたと仮定すると A に $I/2$ の電流が流れ、 B に誘導起電力が生じて同じ $I/2$ の電流が流れる。よって電源に流れる電流は I となり、電源から見た抵抗を $R (= V/I)$ とすると負荷抵抗は $4R$ となる。従って負荷抵抗 $4R$ は入力側から見た時 R に変換されることがわかる。フェライトコアを使用したトランスを増やすことで変換比を上げることができる。

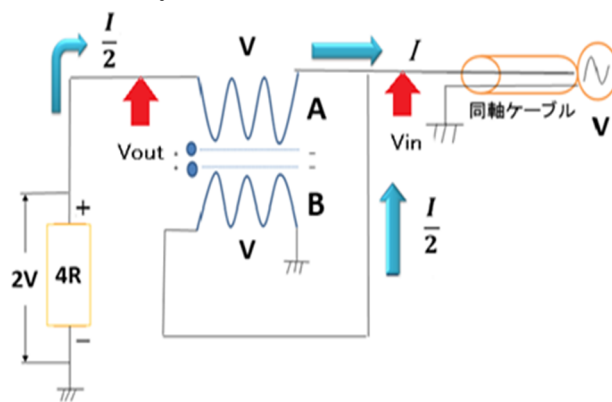


Figure 1: Circuit diagram of 4:1 IT.

3. 周波数特性の測定方法

IT の入出力電圧を高入力インピーダンスの高周波プローブ (10M Ω , 11pF) を用いて測定を行った。入力電圧 V_{in} 及び出力 (負荷) 電圧 V_{out} の測定箇所は Figure 1 に示してある。高周波源で電圧は入力インピーダンスと電源の内部抵抗 50 Ω に分圧されるため、入力電圧の測定は入力インピーダンスの測定と等価である。この方法はインピーダンスの整合が取れないという問題がある

が、信号源の出力電圧を使ってプローブの特性を測定し、影響がないことを確認した。これは対象波長に比べてプローブのケーブルは十分短いためであると考えられる。

4. 2種類のコアを用いたITの試作

コアの比透磁率の大きさが特性にどのような影響を与えるか検討を行うために2種類のコアを使用してITの試作を行った。コアは日立金属株式会社「ファインメット®」(Figure 2 左)、及び Fair-Rite Products Corp.

「43Material」(Figure 2 右)である。ファインメットコアと43Materialの周波数に対する比透磁率(カタログ値)をTable 1に示す。ファインメットコアは43Materialに比べ、測定周波数(1~20 [MHz])において高い比透磁率が得られていることが分かる。



Figure 2: FINEMET and 43 Material core.

Table 1: Permeability with the Frequency (Two type cores)

Frequency [MHz]	FINEMET	43Material
1	3900	620
5	1500	400
10	800	250
15	600	190
20	420	150

5. 周波数特性の測定結果

測定は、16:1と25:1ITで行った。ファインメットコアを使って試作したITをFigure 3に示す。ファインメットコアと43Materialをそれぞれ用いた16:1、25:1ITの測定結果をFigure 4、Figure 5に示す。Figure 4に示す16:1ITでは、ファインメットコアを使用したITの低周波側における周波数特性が、43Materialを使用したITに比べ特性が良いことが分かる。しかし、ファインメットコアでも入出力電圧は理想値($V_{in} = 1V$, $V_{out} = 4V$)より約10%低下していた。ただし、入出力電圧比は、理想値に近い4であった。比透磁率がTable 1のような値のとき、このような結果になることは等価回路解析で確認している。一方、高周波側における特性は比透磁率の大きいファインメットコアを使用したITの方が悪化している。この結果については、次章で述べるようにコアのロス抵抗が影響し

ていると考えられる。

次に、Figure 5に示す25:1ITでは、ファインメットコアを用いても1MHzで25%の低下が見られ、43Materialでは更に大きな低下となっている。また、高周波側でも16:1ITに比べ大きく低下する結果となった。この原因は16:1IT同様、次章で述べるコアのロス抵抗が影響していると考えられる。



Figure 3: Photograph of IT (4:1 ~ 25:1).

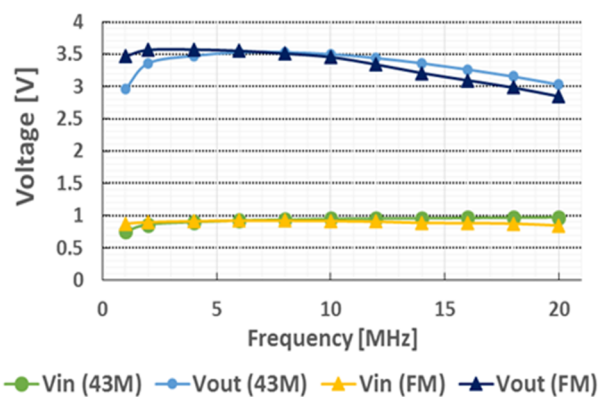


Figure 4: Frequency characteristics of 16:1IT.

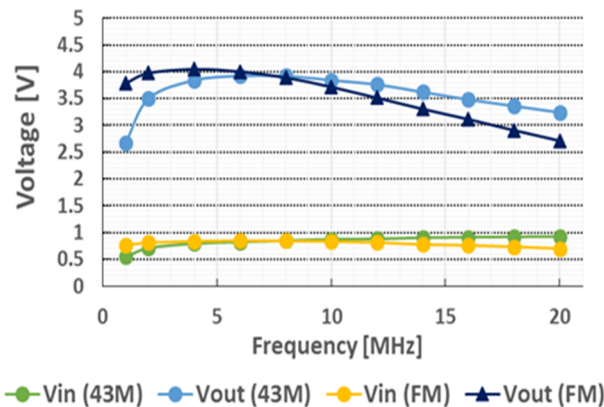


Figure 5: Frequency characteristics of 25:1IT.

高周波側での特性悪化の原因として、コアに使用する巻線の浮遊容量が考えられる。ファインメットコアは43Materialに比べ大きさが2倍程度になるため、巻き数は同じでも巻線長は長くなる。そのため浮遊容量による影響を検討すべく、巻き数を変化させたITの特性測定を行った。その結果をFigure 6に示す。巻き数を少なく

していくと低周波側ではより悪化し、高周波側ではそれらの差は小さくなるが、改善は見られなかった。この結果より、高周波側での特性悪化は巻線長によるものではないと考えられる。

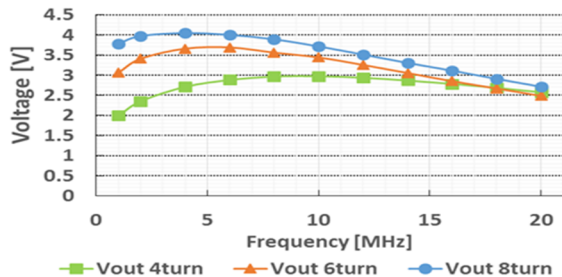


Figure 6: Frequency characteristics with the number of turns (FINEMET 25:1IT).

6. 等価回路解析

Figure 7 に 9 : 1IT の回路図を参考までに示す。Figure 8 には、その等価回路を示す。変換比率を上げた 16 : 1IT、25 : 1IT はコアの段数を増やすことで作ることができる。Figure 8 において RI は 9 : 1IT の場合 450Ω である。等価回路解析では結合係数 k も考慮した。

変換比率を上げることにより IT の周波数特性が悪化するため、変換比率を上げた 25 : 1IT について等価回路解析を行った。その結果を Figure 9 に示す。同図に示す○マーカー曲線(紺色)は Figure 5 に示す 43Material の測定結果と同じである。△マーカー曲線(橙色)は R_p の測定値を使用して計算した結果である。使用した具体的な値を同図上段に記載している。ここで、結合係数 k は入出力電圧比の測定結果と一致するように 1MHz で 0.998、10MHz で 0.987、20MHz で 0.985 に設定した。同図より、低周波側では出力電圧の測定値と計算値の傾向は大体一致しているが、高周波側では測定値と計算値の差が大きくなるのが分かる。この違いをいろいろなパラメータを変化させて検討を行った。その結果、同図下段の値とすることで□マーカー曲線(黄緑色)で示すように測定値とほぼ一致する結果が得られた。この結果より、測定値とは異なるがコアのロス抵抗が周波数特性に影響していると考えられる。これについては、今後の検討課題である。

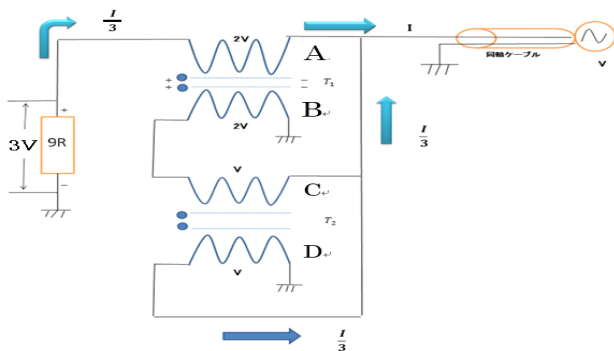


Figure 7: Circuit diagram of 9:1IT.

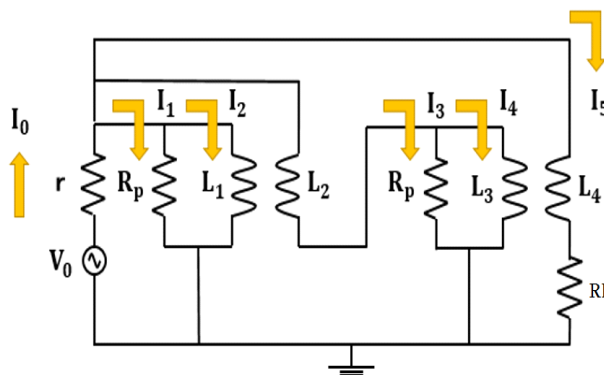


Figure 8: Equivalent circuit of 9:1IT.

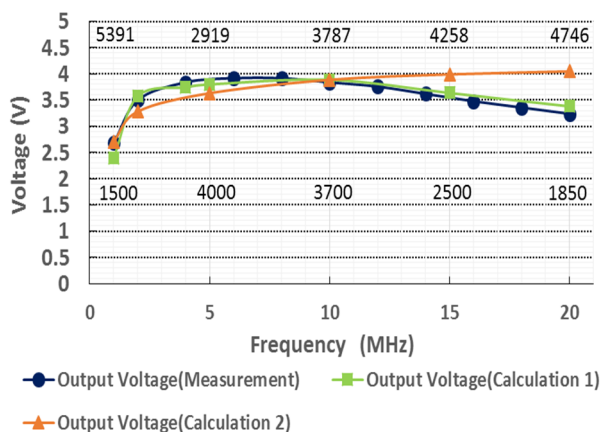


Figure 9: Calculated results of 25:1IT.

7. まとめ

低周波側における IT の特性はコアの比透磁率によって改善され、高周波側ではコアのロス抵抗が影響していると考えられる。巻線の浮遊容量の影響は見られなかった。コアのロス抵抗については今後、詳細検討が必要である。

- [1] T. Nakanishi, T. Furukawa, K. Yoshida, K. Noda, Nucl. Instr. and Meth. A553(2005) 400.
- [2] Tetsuya Nakanishi, Nuclear Instruments and Methods A621 (2010) 62.
- [3] Akio Shinkai *et al.*, Nuclear Instruments and Methods A 769(2015) 16-19.
- [4] Bowick., "RF CIRCUIT design", ELSEVIER, p.180-183.