

RFKO 装置におけるインピーダンストランスフォーマー(IT)の研究

－2 種類の回路の周波数特性と測定方法の考察－

日大生産工(学部) ○西原 亮輔 日大生産工(学部) 伊賀 隼也
日大生産工 中西 哲也

1 はじめに

重粒子線がん治療において効果的なビーム照射法としてスポットスキャン法がある。この照射法を行うには高速制御が必要であり、それに適したビーム取り出し法として QAR 法が提案されている¹⁾。QAR 法はパルス四極電磁石と高周波ノックアウト(RFKO)装置を用いてビームを取り出す方法である。RFKO 装置は高周波によって周回粒子に力を加えて拡散させる装置である。周波数帯は 1～20MHz を必要とする。一般に高周波電源と RFKO との接続には特性インピーダンス 50Ω の同軸ケーブルを用いるため、それらのインピーダンス整合と昇圧のためにインピーダンストランスフォーマー(IT)が用いられる²⁾。

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。回路理論から ωL が十分に大きくないと効率が低下す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。伝達特性の測定はインピーダンス整合を考え方向性結合器を用いていたが、試しに高入力インピーダンスのプロープで直接測定を行ったところ、低周波側での入出力電圧比は悪くないことが分かった。

本論文は測定方法の違いによる伝達効率の差異についての理由を明らかにするとともに、別回路の試作・実験結果について述べる。

2 IT の原理

Fig.1 に IT 回路 A、Fig.2 に IT 回路 B³⁾ のインピーダンス変換比 9 : 1 の回路図を示す。IT 回路 A において、信号源から電圧 V が印加されるとすると D に V が加わる。この時、巻き数が同じであると誘導起電力により C に D と同じ V が誘起される。そのため B には誘導電圧と信号源を足した $2V$ が誘起される。これが同様にして A にも誘起され負荷には信号源 V

を加えた $3V$ が加わる。

次にインピーダンス変換について考える。抵抗から $I/3$ の電流が流れたと仮定すると A に $I/3$ の電流が流れ、B に誘導起電力が生じて同じ $I/3$ の電流が流れ、C からの誘導起電力により D にも $I/3$ 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 $9R$ となる。従って負荷抵抗 $9R$ 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。

Fig.2 に示す IT 回路 B においては、信号源から電圧 V が印加されたと仮定すると A、B それぞれに V が加わる。A、B、C、D の巻き数は同じであるため C、D それぞれに電圧 V が誘起される。C、D に誘起された電圧 V と信号源を足した $3V$ が負荷の電圧となる。インピーダンス変換は IT 回路 B と同様である。

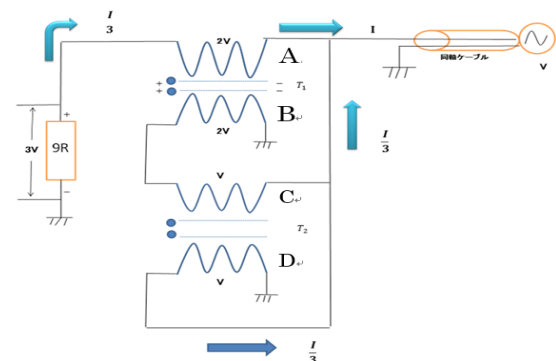


Fig.1 9:1 Impedance transformer with type A

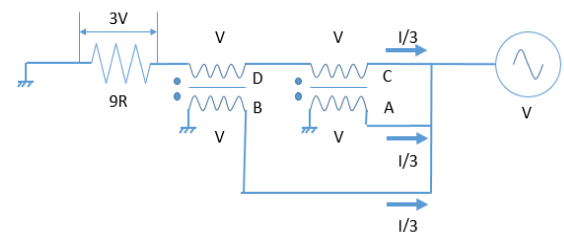


Fig.2 9:1 Impedance transformer with type B

Study on impedance transformers in RFKO
－ Frequency Characteristics with Two Types and
Study on Different Measuring methods －
Ryousuke Nishihara, Junya Iga, Tetuya Nakanishi

3 周波数特性の測定方法

方向性結合器を使った測定システムのブロック図を Fig.3 に示す。周波数を変化させ、入射波 V_f と反射波 V_r を測定する。入射波と反射波の比を Γ で表すと、IT への入力電力に対する負荷で消費される電力比(伝達効率)は次式で表される。

$$\text{伝達効率} = (1 - |\Gamma|^2) \times 100 \quad [\%] \cdots \textcircled{2}$$

$$\Gamma = V_r / V_f \cdots \textcircled{3}$$

この方法では IT に測定器を接続しても、IT から見たインピーダンスは 50Ω なので実際の使用状態と同じ状態で測定が可能である。伝達効率は入力インピーダンスが 50Ω であれば 1 である。

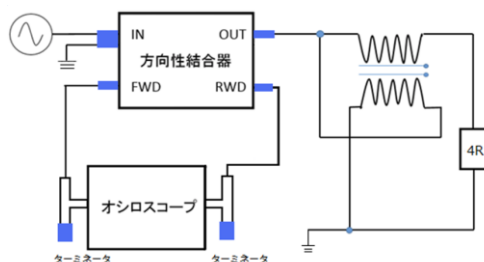


Fig.3 Block diagram for measurement

これに対して IT の入出力電圧比を直接測定する方法として高入力インピーダンスの高周波プローブを使う方法がある。この方法はプローブを接続することにより $10M\Omega$ の抵抗と $15pF$ のコンデンサが回路に加わるため、インピーダンスの整合が取れないという問題がある。今回、信号源の出力電圧を使ってプローブの特性を確認した結果、インピーダンス不整合の影響は小さいと思われるので参考までに測定した。

4 測定結果

Fig.4 に IT 回路 A、Fig.5 に IT 回路 B の伝達特性測定結果を示す。Fig.4 からわかるように方向性結合器、プローブを用いて測定を行った時の結果が異なっている。方向性結合器を用いた時、 $6MHz$ 以下において伝達効率が悪化した。それに対してプローブを用いた場合、低周波側では効率が改善されたが高周波側において効率が悪化した。

IT 回路 B においては方向性結合器、プローブ共に低周波側での効率改善という結果が得られたが、 $10MHz$ 以降の伝達効率に異常が見られた。Fig.5 の方結の結果から回路 B は低周波側ではインピーダンス整合が取れているが、周波数が増加するにつれて整合が取れなくなると言える。

Fig.6 に IT 回路 A, B の周波数に対する入力電圧の関係を示す。電源の内部インピーダンスは 50Ω であり、IT の入力インピーダンスが 50Ω のとき IT の入力電圧は $1V$ になるように電源を設定した。回路 A の入力電圧が $6MHz$ 以下において低下しているが、Fig.4 に示した特性を裏付ける結果である。回路 B に

についても低周波側での入力電圧が $1V$ に近いことから整合が取れているが、周波数が増加するにつれて電圧が急激に低下しており、インピーダンスが急減していることを示す。Fig.5 のプローブ測定において $10MHz$ 以上で異常な結果となった原因もこのことによると思われる。

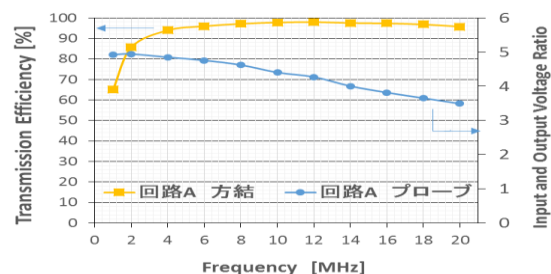


Fig.4 Transfer characteristic (IT Circuit A)

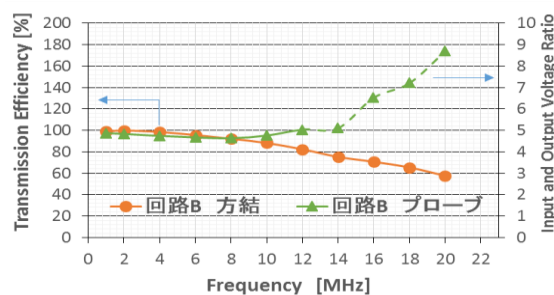


Fig.5 Transfer characteristic (IT Circuit B)

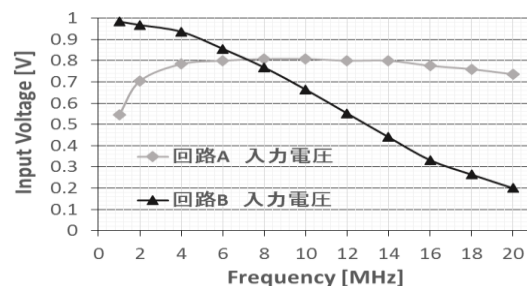


Fig.6 Transmission Efficiency and Input Voltage

5 まとめ

2 種類の IT を試作・実験したが、共に伝達効率の大幅な改善には至らなかった。両回路共に入力インピーダンスが変化していることが考えられ、今後、原因の究明が必要である。

【参考文献】

- 1) www.sp5ddj.pl/Transformatory%20szerokopasmowe.pdf
- 2) T.Nakanishi, et al., "Slow beam-extraction method using a fast Q-magnet assisted by RF-knockout", Nuclear Instruments and Method. A533, (2005) p.400-406
- 3) Chris Bowick, "RF CIRCUIT design", ELSEVIER, p.180-183