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

-回路シミュレータ(LTspice)を用いた等価回路解析-

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ニング法がある。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 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 (Radio Frequency Knockout: RFKO)装置を用いて、 セパラトリクスの大き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、高周波用インピーダン ストランスフォーマー(IT)²⁾、APN (All Pass Network) で構成されており、セパラトリクス 内での周回ビームの拡散に用いる。周波数帯は 1~17MHz を必要とする 3) 4)。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 カインピーダンスをRとしたとき、消費される 電力は V²/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 IT が用いられる。 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 いと効率が低下することがわかったので、比透 磁率の高いファインメットコアを使用しLを大 きくすると低周波側では改善がみられたが、高

ため、IT の等価回路を考え、回路シミュレータ (LTspice)を用いて回路解析を行った。

周波側ではさらに悪化した。その原因を調べる

日大生産工(大学院) ○西原 亮輔 日大生産工 中西 哲也

本論文は、LTspice を用いた回路解析結果に ついて述べる。

2 IT の原理

Fig.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 が印加されたとすると B に V がかか る。この時、巻き数が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。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。



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

Study on impedance transformers in RFKO – Equivalent circuit analysis using a circuit simulator (LTspice) – Ryousuke Nishihara,Tetuya Nakanishi 高周波プローブ(10MΩ, 11pF)を用いて測定を 行った。入力電圧 Vin 及び出力(負荷)電圧 Vout の測定箇所は Fig.1 に示してある。高周波源の 電圧は IT の入力インピーダンスと電源の内部 抵抗 50Ω に分圧されるため、入力電圧の測定は IT の入力インピーダンスの測定と等価である。 この高周波プローブを用いた方法はインピーダ ンスの整合が取れないという問題があるが、信 号源の出力電圧を直接測定し、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 のケーブルが十分短いためであると考えられる。

4 回路解析結果

25:1ITの等価回路をFig.2に示す。LTspiceでは コイルに使用しているコアのロス抵抗Rp [Ω]、コ イルのインダクタンスL [H]はLCRメーターによ る測定値を用い、周波数に応じて設定している。 コイルの浮遊容量は各々のLに並列に接続した。 電源電圧2[V]、電源の内部抵抗Rs 50[Ω]、浮遊容 量Cp [F]は周波数によらず一定とし、負荷抵抗Rl は25:1ITの場合1250[Ω]である。更に、結合係 数kの設定はLTspice内のSPICE Directiveで行 っており、1MHzのとき0.999とした。



Fig.2 Equivalent circuit of 25:1IT

LTspiceを使用し、コイルの浮遊容量を変化させたときの等価回路解析結果をFigs.3、4に示す。 Fig.3に示す入力電圧はコイルの浮遊容量を変化させると、高周波側で少し低下していることが分かる。Fig.4に示す出力電圧は6MHz以降で一致しない結果が得られた。また、測定値では5MHzに対して10MHzにおける値の方が低下しているが、解析では10MHzまで値は上昇し、10MHz以降で低下している。コイルに考慮している浮遊容量の値を増加させることで10MHzでの値の低下が見られ、測定値に近づいているが15~20MHzで大きく低下する結果となった。

回路解析において浮遊容量を考慮しなかった 場合、10MHz以降で出力電圧は低下しない。そ のため、出力電圧悪化の要因としてコイルの浮遊 容量の影響が解析において確認されたが、矛盾が 生じている部分もあり、今後、検討する必要があ る。

また、25:1ITにはフェライトコアを4個使用 するが、それぞれのコアによって解析で考慮して いるロス抵抗やインダクタンスの値が異なって いる。今回の解析では、コアの各値はすべて同じ であるとして解析を行っているため、今後、考慮 する必要があると考える。



Fig.3 Calculated results of input voltage vs. frequency as a function of stray capacitance



Fig.4 Calculated results of output voltage vs. frequency as a function of stray capacitance

5 まとめ

浮遊容量を考慮し、回路シミュレータ(LT spice)を使用することにより測定値に近い結果 が得られた。しかし、10MHz以降において出 力電圧が大きく低下する結果となっているため、 更に検討が必要である。

[参考文献]

- 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
- 2) Chris Bowick, "RF CIRCUIT design", ELSEVIER,p.180-183
- **3)** Tetsuya Nakanishi, Nuclear Instruments and Methods A621 (2010) 62
- 4) Akio Shinkai, et al., Nuclear Instruments and Methods A 769(2015) 16-19