

RF DESIGNS OF RF INPUT COUPLER FOR RFQ LINAC IN THE IFMIF-EVEDA ACCELERATOR

Sunao Maebara

IFMIF development Group, Directorates of Fusion Energy Research, JAEA
Shirakata Shirane 2-4, Tokai-mura, Ibaraki-ken, 319-1195

Abstract

In the preliminary design of prototype RFQ linac in the IFMIF/EVEDA, a coupled cavity type 9.78m-long RFQ is proposed to accelerate deuteron beam up to 5MeV. The operation frequency of 175MHz was selected to accelerate the large current of 125mA in CW mode at the conceptual design phase. The driving RF power of 1.3MW has to be injected to the RFQ cavity, and a stable CW injection without RF breakdown is essential to attain the required availability. It is designed to employ the input coupler system with multi-drive loop antennas connecting to co-axial waveguides. As the validation works, it is planned to measure the coupling factors of the loop antenna with varied insertion-depths using RFQ test module and to test the RF power capability of 41/16- and 6 1/8-inch RF windows using a high-Q load circuit. The RF designs of the RF-input coupler system for the IFMIF RFQ linac are presented with the simulation results of RF losses of RF couplers using the 41/16- and 6 1/8-inch co-axial waveguides and RF windows.

IFMIF-EVEDA加速器系におけるRFQライナック用RFカプラーの高周波設計

1. はじめに

国際核融合材料照射施設 (IFMIF) は、250mAの重陽子イオンビームを40MeVまで加速して、液体リチウムに入射し、ストリッピング反応により生成する14MeVの中性子 (中性子束: 約 10^{14} n/cm²s) を連続運転 (CW) で核融合実証炉材料に照射して試験する施設である。250mAの重陽子イオンは大電流であるために1つのビームラインとして125mAを加速し、2つのビームラインから構成されるCW加速器システムの開発を目指している [1-2]。

昨年7月に国際熱核融合実験炉のブローダアプローチ (ITER-BA) の一環としてIFMIFの工学実証工学設計活動 (EVEDA) が日欧協力の基に開始された。IFMIF-EVEDAの加速器技術開発では、入射器 (出力100keV-140mA) 高周波四重極ライナック (RFQ: 100keV-5MeV) 及び超電導ライナック (半波長共振器タイプ: 5MeV-9MeV) の開発を行い、ITER-BAサイト (青森県、六ヶ所村) で工学実証試験を行う。このIFMIF/EVEDAでは、RFQライナックのRFカプラーの開発、加速器全体の制御システム及び建屋建設が日本タスクであり、本報告書は、RFQライナックのRFカプラー開発の伴うRF設計について述べる。

2. RFQライナックの設計概要

RFQライナックの設計は、大電流の125mAの重陽子イオンビームを加速するために、運転周波数として低い周波数の175MHzが選択され、また5MeVまで加速するために9.78mの4ベーン型長軸RFQ開発がイタリア原子核物理学国立研究所 (レグニャロ研究所) のチームが担当して進められている。表1にRFQライナックの設計パラメータを示す。

表1 4ベーン型175MHzRFQの設計パラメータ

RFQ parameters	
Frequency [MHz]	175
RFQ Length [m]	9.78
Particle	Deuteron
Input Current [mA]	130
Input Emittance [RMS Norm]	0.25mm mrad
Input Energy [keV]	100
Output Energy [MeV]	5.0
Kilpatrick factor	1.8
Max vane voltage [keV]	130
Transmission [%]	95.0
Beam Power Loss [kW]	637
RF Power Loss by SF code [kW]	500
RF Feed Power [kW]	1300

RF電力としてトータル1.3MWの安定入射が要求され、RFQ本体には、φ90mmの8つのポートが準備されている。RF源は出力200kW級の8本の四極管が採用され、9 3/16インチ同軸導波管でRFカプラーへ伝送される。

ループアンテナ先端部の設計条件は、与えられたRFQ断面にループアンテナを取付け、RF電力160kWを入射した場合、磁界強度H[A/m]が3100となること、またマッチング状態で $|S_{11}|^2=0.01$ 以下となることが与えられている。

3. RFカプラーの設計概要

RFカプラーの構成案を図1(a)と図1(b)に示す。RFカプラーは、伝送系の9 3/16インチ同軸導波管をインタフェース取合として、ステップ導波管により6 1/8インチへ変換され、バンド導波管、高周波真空窓を介して、RFカプラーポートへ接続される。

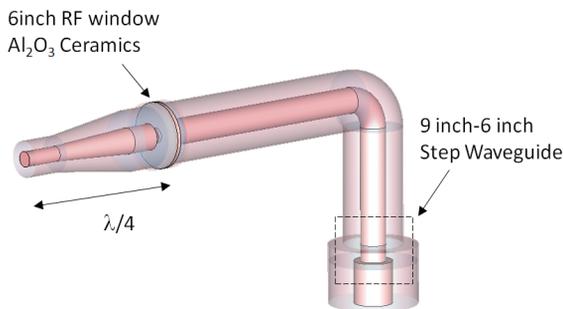


図1(a) 6 1/8 インチ同軸導波管を採用したRFカプラーの構成

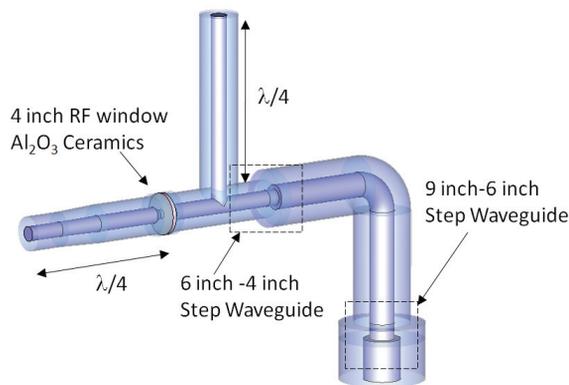


図1(b) 4 1/16 インチ同軸導波管を採用したRFカプラーの構成

図1(b)は $\lambda/4$ 長の冷却ポート付であり同軸導波管のサイズが小さくなることにより、内部導体やループアンテナ先端部の冷却を積極的に行うために用いる。図1(a)案または図1(b)案のどちらのRFカプラーを採用するかは、RFカプラー全体のRF損失評価及び高周波真空窓のマルチパクタリング放電の発生状況によって決定する。

4 1/16インチ系及び6 1/8インチ系の高周波真空窓では、伝送RF電力がそれぞれ30-50kWと150kW-300kWの範囲でマルチパクタリング放電が発生する解析結果[3]があり、原科研にてHigh-Q load circuit (共振器回路)を用いた検証実験を行い、マルチパクタリング放電の頻度がCW運転に適するかどうか判断して決める予定である。

4. RFカプラーのRF損失評価

図1(a)に示す 6 1/8 インチ同軸導波管の系に冷

却ポート有無、また図1(b)の4 1/16 インチ同軸導波管の系に冷却ポート有無について、伝送系のインタフェースの部分からループアンテナの先端部を除く50Ωインピーダンス部分のRF損失を解析した。外部導体及び内部導体の材料は純銅とし、高周波真空窓材はアルミナ ($\tan \delta = 0.001$) を仮定した。また高周波真空窓は、次項に述べるようにアルミナ挿入によるインピーダンス不整合を調整するためにアルミナ近傍の外部導体及び内部導体の寸法を変えて最適化している。

図2に6 1/8 インチ同軸導波管の系における S_{11} パラメータを示す。冷却ポート有無の S_{11} パラメータをそれぞれ赤と青のラインで示す。冷却ポート装着した場合、冷却ポートが無い場合に比べ周波数帯域が狭くなるが、 $S_{11} = -20\text{dB}$ 以下の条件でも $\pm 15\text{MHz}$ 以上あり、周波数帯域に関して問題ないことが判明した。

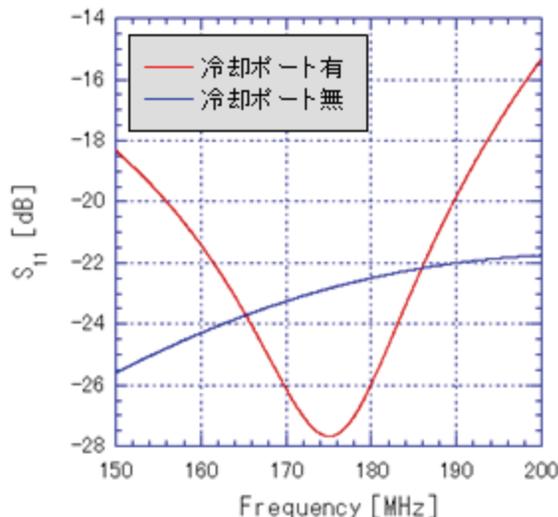


図2 6 1/8 インチ同軸導波管の系における S_{11} パラメータの解析結果

6 1/8 インチ及び4 1/16 インチ同軸導波管の系に $\lambda/4$ 長の冷却ポート有無について、RF損失と反射係数の解析結果を表2に示す。表2ではRF損失(S_{21} パラメータ)が少ない順に並べており、冷却ポート有の方が無い場合に比べてRF損失が小さいことが判る。これは冷却ポートの長さが $\lambda/4$ であり、反射が打ち消されてRF損失が軽減されるからである。6 1/8 インチの系でのRF損失は、最大伝送電力を200kWと仮定した場合、冷却ポート有無で0.56kWと1.2kWとなる。また4 1/16 インチ系では、同軸導波管径が小さくなることから、それぞれ0.98kWと1.77kWと6 1/8 インチ系より高くなる解析結果が得られた。

表2 RFカプラーのRF損失と反射係数の解析結果

	S_{21} [dB]	S_{11} [dB]
1. 6 1/8" W/G with Cooling Port	-0.012dB(0.28%)	-27.7dB(0.17%)
2. 4 1/16" W/G with Cooling Port	-0.021dB(0.48%)	-25.0 dB(0.32%)
3. 6 1/8" W/G without Cooling Port	-0.026dB(0.60%)	-23.0 dB(0.50%)
4. 4 1/16" W/G without Cooling Port	-0.039dB(0.89%)	-21.0 dB(0.80%)

5. 高周波真空窓の設計

図3に高周波真空窓設計案の構成図を示す。セラミックス材はアルミナを採用し、純度99.5%以上で周波数175MHzにて誘電率9.9、誘電損失($\tan \delta$)が 5×10^{-4} 程度以下を期待している。厚みはRF損失を抑えるために厚み6mm程度とし、 10^{-7} [Pa]程度の真空度に耐えるろう付け技術が必要である。アルミナの外部部だけでなく内部導体の中にも冷却チャンネルを設け、RF損失の熱負荷を除去できる構造である。アルミナの真空面には10nm程度のTiNコーティングを施し、マルチパクタリング放電の抑制を試みる。アルミ近傍の外部導体は径が大きくし、内部導体の径は小さくして、アルミナ挿入によるインピーダンスの整合を図っている。表4に6 1/8インチ及び4 1/16インチ系における高周波真空窓の S_{11} と S_{21} パラメータの解析結果を示す。

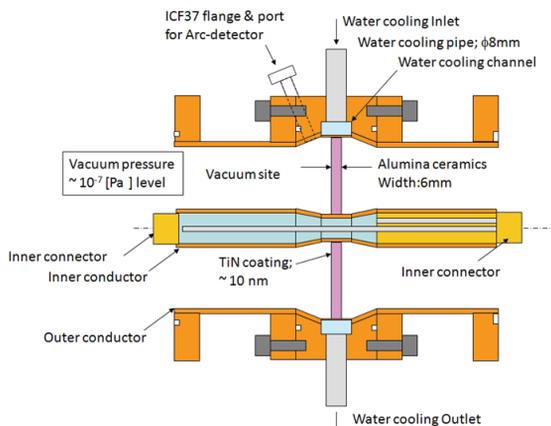


図3 高周波真空窓の構成図

表4 高周波真空窓の S_{11} と S_{21} パラメータの解析結果

	S_{11} [dB]	S_{21} [dB]
Standard Type (41/16")	-20.2492 dB	-0.04222 dB (0.967%)
Improved Type1 (4 1/16")	-69.1685 dB	-0.00109 dB (0.025%)
Standard Type (6 1/8")	-20.2521 dB	-0.04181 dB (0.958%)
Improved Type 1 (6 1/8")	-67.7353 dB	-0.00065 dB (0.015%)
Improved Type2 (6 1/8")	-42.5623 dB	-0.00104 dB (0.024%)

高周波真空窓の解析では、誘電損失 ($\tan \delta$) の値を175MHzにおける実測値が現在ないため0.001と仮定した。表のStandard Typeは、アルミナ挿入による50Ωインピーダンス整合を考慮しない設計であり、Improved Type 1はインピーダンス整合を考慮した設計である。また6 1/8インチ系のImproved Type

2は、誘電損失は多くなるがろう付け不具合による電界集中を避けるために、内部導体との接合面の厚みを10mmとし、外部導体の接合面の厚みを6mmとしたアルミナ断面が台形とし、インピーダンス整合を考慮した設計である。インピーダンス整合を考慮したアルミナ近傍の設計を行うとRF損失を約1/4に軽減でき、仮に 5×10^{-4} 程度の誘電損失が期待できると200kW伝送時の高周波真空窓のRF損失は125W程度となることが判明した。

6. まとめ

4 1/16インチ及び6 1/8インチの同軸導波管を採用したRFカプラーの高周波設計を行った。6 1/8インチの同軸導波管を採用した場合、 $\lambda/4$ 長の冷却ポートを取付けた場合でも周波数帯域として ± 15 MHzと十分な帯域が得られ、RF損失は、200kW伝送した場合、0.56kWとなることが判明した。またアルミナを採用した高周波真空窓のRF設計を行い、アルミナ近傍の外部導体及び内部導体の寸法を変えて50Ωインピーダンス整合を取る場合、取らない場合に比べて、約1/4に軽減できることが分かった。

IFMIF用RFQライナックは連続運転 (CW) で駆動するため、ループアンテナ先端部の熱膨張による挿入距離の変化を0.5mm以下に抑制することが要求されている。このためループアンテナ先端部は、冷却チャンネルを設けた構造設計が必要であり、往復の冷却チャンネルを設けるためにループ断面：幅16mm、厚み8mmにおける結合度の解析を進めている。現在、ループアンテナ挿入距離7mmにて、結合度の設計条件 ($|S_{11}|^2=0.01$ 以下) を満たす初期解析結果が得られている。

今後、6 1/8インチ系のRFカプラーにおける冷却を行った場合の熱解析を進めるとともに、6 1/8インチ系及び4 1/16インチ系高周波真空窓におけるマルチパクタリング放電の発生頻度に関する検証実験を原科研のHigh-Q Load circuit (共振回路) を用いて検証実験を行い、6 1/8インチ系RFカプラー若しくは4 1/16インチ系RFカプラーを採用するかを決定する。

参考文献

- [1] T.E. Shannon, et al., "Conceptual design of the international fusion materials irradiation facility (IFMIF)", Nucl. Mater. 258-263(1998)106-112.
- [2] T. Kondo, et al., "IFMIF, its facility concept and technology", Nucl. Mater. 258-263(1998)47-55.
- [3] K. Sakamoto, et al., "Numerical study of RF discharge caused by secondary electron emission", J. Phys. D: Appl. Phys. 22(1989) 1840-1 847.