

RF コープリング伝送試験のための 175MHz コープリングキャビティの工学設計 ENGINEERING DESIGN OF A 175MHZ COUPLING CAVITY FOR THE RF POWER TRANSMISSION TESTS OF RF INPUT COUPLER

前原直[#], 新屋貴浩, 春日井敦, 鈴木寛光, 杉本昌義

Sunao Maebara [#], Takahiro Shinya, Atsushi Kasugai, Hiromitsu Suzuki and Masayoshi Sugimoto

Rokkasho Fusion Institute, National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

Abstract

For the IFMIF/EVEDA accelerator prototype RFQ linac, the operation frequency of 175MHz was selected to accelerate a large current of 125mA. The driving RF power of 1.28MW by 8 RF input couplers has to be injected to the RFQ cavity for CW operation mode. For each RF input coupler, nominal RF power of 160kW and maximum transmitted RF power of 200kW are required. For this transmission RF power tests, a ridge-type coupling cavity with cooling channels was designed and manufactured, based on aluminum materials. In the engineering design by HFSS and ANSYS codes, the RF loss of 4.6% and the maximum temperature rise of 12°C were evaluated. For the manufactured coupling cavity, central frequency of 175.00MHz was successfully obtained and the bandwidth of ±14kHz was measured by Network analyzer. This report describes the engineering design of a 175MHz ridge-type coupling cavity.

1. はじめに

IFMIF は国際核融合材料照射施設(International Fusion Materials Irradiation Facility)の略称であり、核融合実証炉の構造材料や機能材を開発するための加速器ドライブによる中性子照射施設である。この IFMIF 建設のために、工学設計・工学実証活動(Engineering Validation and Engineering Design Activity; EVEDA)が日本と欧州間の幅広いアプローチ協定の基に実施されている。IFMIF/EVEDA 原型加速器¹⁾は、インジェクター(出力エネルギー; 100keV)、175MHz の RFQ ライナック(0.1-5MeV)、マッチングセクション、初段部分の超伝導 RF ライナック(5.0-9.0MeV)と高エネルギービーム伝送系及びビームダンプ(9MeV-125mA CW) から構成され、125mA の重陽子ビームを用いた加速器実験が青森県六ヶ所村の量研機構において計画¹⁾されている。

原型 RFQ ライナックの設計²⁾では、4 ベーン型キャビティが提案され、5MeV まで加速するために軸長さ 9.87m が設計され、125mA の大電流の重陽子ビームを連続運転モードで加速するために運転周波数 175MHz が採用された。この加速性能を満たすためにトータル 1.28MW の高周波電力を RFQ ライナックに入射する必要があるため、8 台の RF コープリングを介して入射される。このため 1 台あたり RF 電力 160kW を伝送する必要があるため、最大 RF 電力 200kW の CW 運転を目指して工学設計を行った³⁾。試作した RF コープリングに対して High-Q load 回路を用いた定在波を用いて、等価的な RF 電力 200kW に対する耐電力試験を行った⁴⁾。更に実機を模擬した RF 伝送試験のために 2 つのコープリングを結合するリッジ型コープリングキャビティを開発した。本稿は RF コープリングの特徴を含めコープリングキャビティの工学

設計及び製作した RF 特性結果について報告する。

2. RF コープリング

2.1 RF コープリングの概要

RF コープリングの構造図を図 1 に示す。大気側の同軸導波管部では、RF 伝送系との接続取合が EIA 9 3/16 in. 同軸導波管であり、その後ステップ導波管により EIA 6 1/8 in. 同軸導波管に変換している。L=λ/4 長の同軸導波管は、高周波真空窓の内部導体近傍を冷却するための冷却水の注入/注出用として設けた。高周波真空窓では、(株)フェローテックセラミックス社の高純度アルミナセラミックス(AM997Q)を採用している。

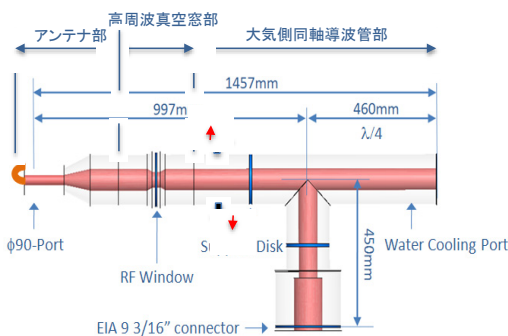


Figure 1: Schematic drawing of an RF input coupler with water-cooling port of λ/4.

2.2 ループアンテナ部

図 2 にループアンテナ部の外観写真を示す。ループアンテナ自身の断面積 S は S=16x8mm の矩形であ

り RFQ 本体の挿入距離 L は $L=45\text{mm}$ である。この挿入距離は実機寸法のアルミ製 RFQ モジュールを用いた結合度測定、3次元電磁界解析 (HFSS code) と 3次元定常熱解析 (Ansys Professional NLT code) から決定した。ループアンテナ断面には、2系列の $\phi 4$ の冷却チャンネルが設けられ 2 [liter/min]以上の冷却水量を流すことができる。

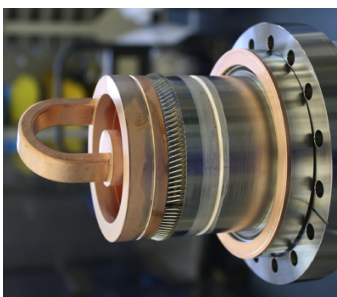


Figure 2: Photograph of the loop antenna part.

2.3 RF 伝送試験

図 3 に RF 伝送試験の構成図を示す。高周波源からの RF 電力は 1つのカップラーからカップリングキャビティに入射され、もう一方のカップラーへ結合して RF ダミーロードへ伝送される。カップリングキャビティでは、結合に際して反射電力を -20dB 以下に抑えるとともに結合部分における RF 損失による発熱を十分に冷却することが RF 特性を維持するために必要となる。2つのループアンテナ間で直接結合させた場合、ループの挿入距離 L (45mm) から約 92.5mm ($\sim 2xL$; $\lambda/4$) 程度で結合するが結合周波数は 370MHz となる。また L 結合を主とした場合ループアンテナの RF 表面損失密度が $1\text{MW}/\text{m}^2$ (RF 電力 200kW 伝送時)以上となることから C 結合を主とした RF 表面損失密度を軽減した新たなカップリングキャビティ開発が必要である。

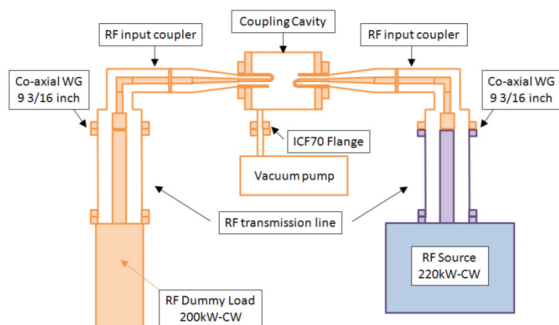


Figure 3: Schematic diagram of RF transmission tests for RF input coupler

3. 175MHz カプリングキャビティ

3.1 工学設計

図 4 に設計した 175MHz カプリングキャビティリ

ングキャビティ断面図を示す。直径 $\phi 520\text{mm}$ 幅 190mm のリッジ型のキャビティ構造である。右側にカップラー取り付け部の CF100 ポートを 2つ設け、左側のギャップ 20mm 部 (C 結合部; $\phi 190\text{mm}$) で結合させる構造である。中心部には $\phi 60\text{mm}$ のチューナーを設け、中心周波数 $\pm 500\text{kHz}$ 以上調整可能である。この構造寸法は HFSS コードを用いて解析し、ポート間(ループアンテナ部分を含む)の周波数帯域 $\pm 25\text{kHz}$ ($S_{11}=-20\text{dB}$)及び RF 損失 4.6% 程度が得られて決定した。材質は SS 鋼に銅メッキを施し冷却チャンネルを用いた構造も検討したが、簡素化した冷却チャンネルでは局所的に温度上昇が 100°C 近くなる部分があり、熱伝導度に優れたアルミニウム (A5052)を採用した。厚みは側面 47mm 、外周部は 72mm である。内面には冷却水チャンネルを埋め込んだ構造となっている。中心周波数を $175\text{MHz} \pm 250\text{kHz}$ 以内に調整するために CF253 の内面を 0.5mm 程度の精度でカット&トライを繰り返し、RF 特性をネットワークアナライザーで測定しながら中心周波数を合わせた。

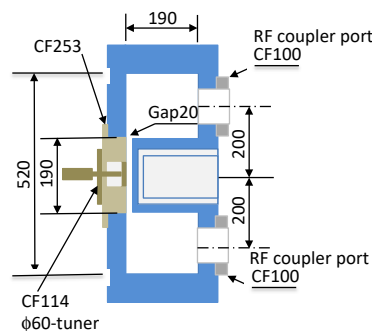


Figure 4: Illustration of 175MHz coupling cavity.

3.2 定常熱解析

図 5 は HFSS コードによる RF 電力 200kW を伝送した時の RF 表面損失密度を示す。最も高い部分で $4.8\text{kW}/\text{m}^2$ であり、カップリングキャビティ全体での RF 損失は 9.2kW となり積極的な冷却が必要となる。

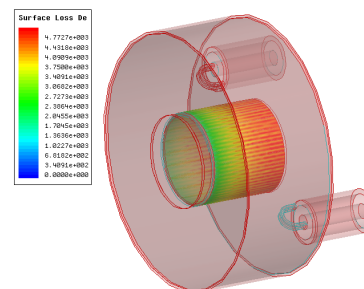


Figure 5: Illustration of RF surface loss density when RF power 200kW .

図 6 に定常熱解析結果の 1 例を示す。HFSS コードによる RF 電力 200kW を伝送した時の RF 表面損失を熱源としてカップリングキャビティを冷却した時の温度分布である。中心部の温度上昇 ΔT は 6°C 程度抑えられており、冷却チャンネルを設けていない CF253 の内面温度上昇 ΔT でも 12°C 程度に抑えられる結果が得られた。

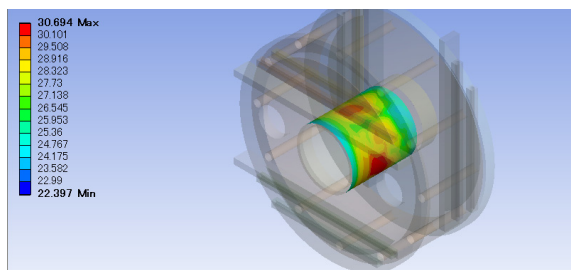


Figure 6: Steady-state thermal profile of the coupling cavity when RF power of 200kW.

3.3 RF 特性測定

図 7 に製作したアルミニウムカップリングキャビティに 2 つのカプラーのアンテナ部と高周波真空窓部を取付けた写真を示す。真空窓の大気側にはレデューサーを取付け S_{11} 及び S_{21} パラメーターを計測した。図 8 に S_{11} パラメーターの測定結果を示すように周波数 175.0MHz にて $S_{11}=-30.2\text{dB}$ が得られた。また -20dB となる周波数帯域は $\pm 14\text{kHz}$ となった。また S_{21} パラメーターは $S_{21}=-0.3381\text{ dB}$ が計測され、高周波真空窓を含めた RF 損失は 7.49% となった。1 台のカプラー自身の RF 損失は 0.7% 程度であり、カップリングキャビティ本体の RF 損失は 6.1% 程度となり解析結果(4.6%)と比べ 1.5% 大きい結果となった。この差はメッシュ精度による誤差範囲の値と考えている。

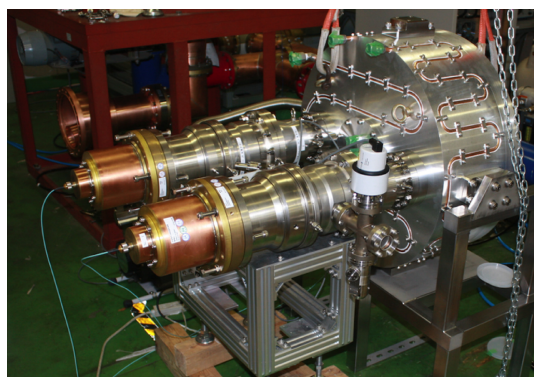


Figure 7: Photograph of Aluminium coupling cavity with antenna modules, vacuum windows and reducers.

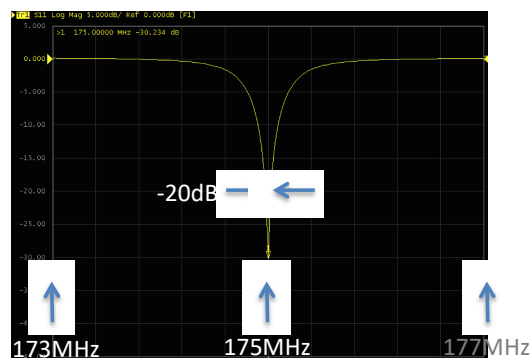


Figure 8: Measured S_{11} parameter of Aluminium coupling cavity with antenna modules, vacuum windows and reducers.

4. まとめ

RF カプラーの伝送試験のためにカップリングキャビティを設計・製作した。工学設計では、直径 $\phi 520\text{mm}$ 幅 190mm のリッジ型のキャビティ構造となり、製作では中心周波数 175MHz に合わせるために CF253 内面の厚みを 0.5mm 程度の精度でカット & トライを繰り返し、ネットワークアナライザーで測定しながら中心周波数を 175MHz に合わせることに成功した。測定した RF 特性では、175MHz において周波数帯域幅 $\pm 14\text{kHz}$ (-20dB) が得られ、カップリングキャビティ本体の RF 損失は 6.1% 程度となり 200kW 伝送時の RF 損失電力は 12kW 程度と見込まれ冷却能力としては全く問題ない値である。今後、RF 伝送試験においてカロリメトリック法による RF 損失評価を計画予定である。

参考文献

- [1] M. Sugimoto *et al.*, “IFMIF 加速器プロトタイプ建設の意義と目標課題”, J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol.7, No.2, (2010)110-118.
- [2] A. Palmieri *et al.*, “The IFMIF RFQ Real-scale Aluminum Model: RF Measurements and Tuning”, Proc. IPAC10, Kyoto, Japan, May 2010, MOPEC061, p.603 (2010); <http://www.JACoW>.
- [3] S. Maebara *et al.*, “Engineering Design of the RF Input Coupler for the IFMIF Prototype RFQ Linac”, J. Fusion Eng. Des. **88**(2013)2740-2743.
- [4] S. Maebara *et al.*, “High-Power Tests of RF Input Coupler for the IFMIF/EVEDA RFQ Prototype Linac”, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 5-7, 2015, Turuga, Japan, PASJ2015 THP065, p.1140; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP065.pdf