

IFMIF/EVEDA RFQ ライナック用 RF カプラーの耐電力試験

HIGH-POWER TESTS OF RF INPUT COUPLER FOR THE IFMIF/EVEDA RFQ PROTOTYPE LINAC

前原直^{#,A)}, 助川圭一^{B)}, 只野秀哉^{B)}, 春日井敦^{A)}, 鈴木寛光^{A)}, 阿部和彦^{B)}, 奥隆司^{B)}, 杉本昌義^{A)}
Sunao Maebara^{#,A)}, Keiichi Sukegawa^{B)}, Shuya Tadano^{B)}, Atsushi Kasugai^{A)}, Hiromitsu Suzuki^{A)}, Kazuhiko Abe^{B)},
Ryuji Oku^{B)} and Masayoshi Sugimoto^{A)}

^{A)} Aomori research and development center, Japan Atomic Energy Agency

^{B)} Hitachi Power Semiconductor Device, Ltd.

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 purpose, an RF input coupler with cooling functions was designed, based on a 6 1/8 inch co-axial waveguide, and the RF coupler was manufactured by way of trial. For the trial RF coupler, high-power tests using a high voltage standing wave on a high-Q load circuit wave were carried out, and a 200kW-14 sec CW operation were performed after four days of RF aging. No RF contact defects, unnecessary low-Q value and extraordinary outgassing were observed. This report describes the high-power tests of the RF input coupler.

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、六ヶ所村の青森研究開発センターにおいて計画¹⁻³⁾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り、8 台のRF カプラー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り、最大 RF 電力 200kW のCW 運転を目指して工学設計を行った³⁾。

この工学設計に基づき RF カプラーを試作し、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。本稿は RF カプラーの特徴を含め主要な製作技術と High-

Q load 回路を用いた定在波による最大 RF 電力 200kW の耐電力試験結果について報告する。

2. RF カプラーの製作技術

2.1 工学設計概要

RF カプラーの構造図を図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。また同軸導波管部では、RF 電力の進行波/反射波を検出する方向性結合器(結合度-60dB)を設けて日本高周波(株)が製作を担当した。

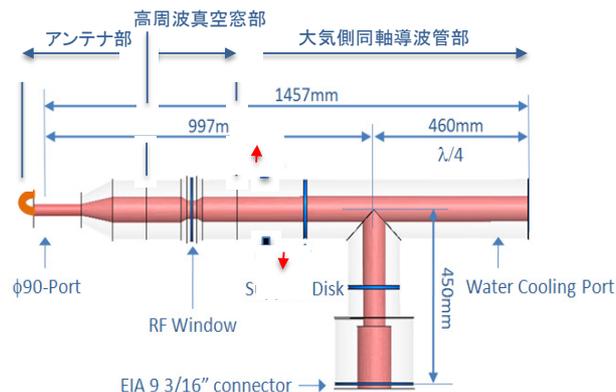


Figure 1: Schematic drawing of an RF input coupler with water-cooling port of λ/4.

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)を初

[#] Maebara.sunao@jaca.go.jp

めて採用した。セラミックと銅材との接合技術を持つ(株)日立パワーデバイス社が高周波窓部及びアンテナ部の製作を担当した。

2.2 分割型構造カプラー

図2に示すように高周波窓とアンテナ部は、高周波真空窓を交換可能とするために一体構造ではなくフランジ接続による分解型構造である。内部導体部の接続にはMC社製のRFコンタクト(LA-CUD)(図3右側写真参照)を採用し、外部導体部の真空封止には三菱電線工業(株)社製のメタルO-リング(E06875BG)を採用した。図2に示すループアンテナにキャップを設けた系においてネットワークアナライザーによるリターン損失を測定した。その結果 $S_{11} = -0.0615\text{dB}$ が得られ、一方向の伝送損失が0.7%程度となり懸念したLow Q値の存在がないことを低電力測定で確認した。

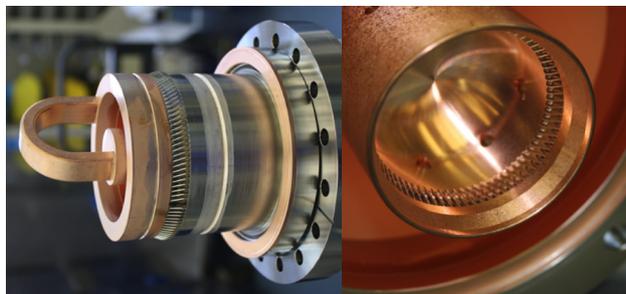


Figure 2: Photograph from outside of the antenna part and the RF window part.

2.3 RFコンタクト

図3にRFコンタクトの写真を示す。左側はRFQポート用として採用したMC社製LA-CUDS、右側は分解構造位置の内部導体に採用したLA-CUDSである。これらのRFコンタクト部から残留したガスによりRF電力伝送に影響しないかが課題の1つであり内部導体にガス引きをよくするためのφ5穴を8箇所均等に外周に設けた。

分解位置でのメタルO-リングによる真空封止に対して外部導体面の接触が耐電力的に重要な鍵となるため表面精度5μm以下を目指した。



1) RFQ port 2) Inner-conductor
Figure 3: Photograph from outside of the loop antenna part and the RF contact for the inner-conductor at joint.

2.4 ループアンテナ

図3左側にループアンテナの外観写真を示すようにループアンテナ自身の断面積 S は $S=16 \times 8\text{mm}$ 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φ4の冷却チャンネルが設けられループ先端部の曲率(内径 $r=19.5$)に従ってφ4の穴径を維持するためのR&Dが行われた。この結果常水圧で2[liter/min]以上の冷却水量を流せることを確認した。

3. RFカプラーの耐電力試験

3.1 High-Q load 回路

High-Q load回路は図4に示すようにRFカプラー、スタブチューナー及び移相器から構成される。カブ先端部とスタブチューナーの端部は短絡しているためこの間に定在波が励起される。この間のRF損失が約0.013Ωと小さいためにRF電力が蓄積される。カプラー先端部から約λ/4の位置に高周波窓材があり進行波及び反射波の電界が最大となる。今回の実験系ではRF入力電力700W程度において進行波電力50kW及び反射電力50kWとなり等価的なRF電力は200kW程度となった。

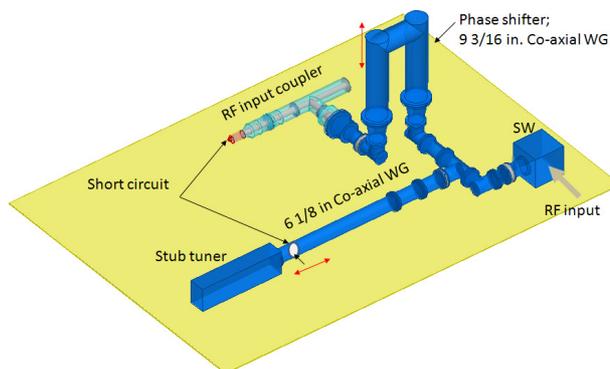


Figure 4: Illustration of High-Q load circuit.

3.2 RF エージング

図5にHigh Q load回路にRFカプラーを設置した写真を示す。高周波窓近傍の計測ポートからターボポンプ(50[liter/min])により排気を行い、ループアンテナ先端部に真空ゲージを取付けてモニターした。また高周波窓近傍のICF34に取付けたビューイングポートを介して放電の有無をビデオカメラでモニターした。高周波真空窓降段の同軸導波管部で進行波電力及び反射波電力を計測した。

RF エージングはRF入力電力のパルス幅1msec Duty サイクル50%に設定して開始した。初日に10kW、2日目に30kW、3日目に90kWそして4日目に目標の等価的なRF電力200kWまでRFエージングすることができた。

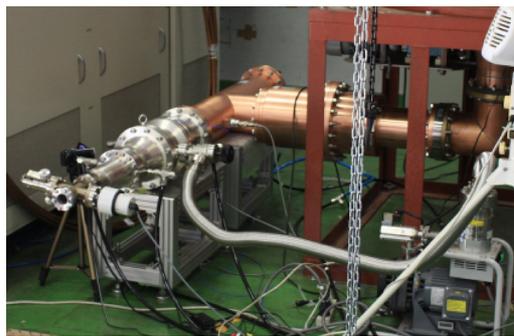


Figure 5: Photograph of the experimental setup in the High-Q load circuit.

図 6 に 4 日目の RF エージング中の真空度と等価的な RF 電力の関係を示す。ピンクが RF エージングの初期段階の真空度、青色が RF エージングにより十分に下がったときの真空度を示す。RF 電力入射によりベース真空度に変化しなかったデータは省いた。RF 電力 10kW, 90kW と 160kW レベルで RF エージングの初期段階でガス放出が測定されたが十分な RF エージング後、ほぼベースの真空度に落ち着き 200kW レベルまで RF 電力を上げることができた。また RF 電力 200kW レベルにおいてパルス幅 1msec. Duty サイクル 50%を 35 分間連続運転することができた。この間の真空度、RF 特性の異常な変化は観測されなかった。

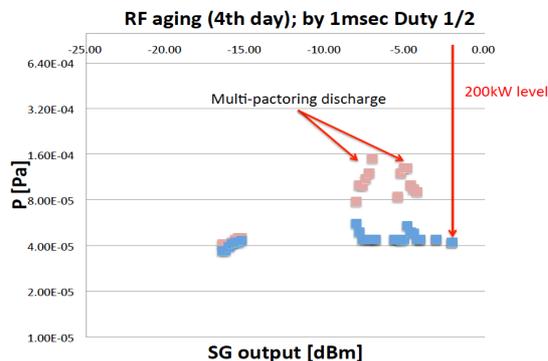


Figure 6: Vacuum pressure vs. RF power during RF aging.

5 日目にパルス幅 1msec. Duty サイクル 50%にて 200kW まで RF エージングを行った後、Duty サイクル 50%を維持したままパルス幅を 1msec.から 5msec., 10msec., 20msec., 50msec. 及び 100msec., と変えて 200kW までの RF エージングを行った後、RF 電力 200kW での定常運転を実施した。

3.3 定常運転

図 7 に定常運転した時の同軸導波管部の進行波電力、反射電力、カップラーの真空度、RF 入力電力と反射電力のモニター波形を示す。同軸導波管部の進行波電力と反射電力の DC 出力はほぼ同じ値とともに 50kW である。定常運転時の真空度 3.0×10^{-5} [Pa] も一

定であり、RF 入力部における反射電力も全く変化しないことから RF カプラーの真空側でのガス放出による RF 電力消費が無く、耐電力特性として全く問題ないこと、また 200kW までの RF 電力でも不要な Low Q 値の存在が無いことを確認できた。

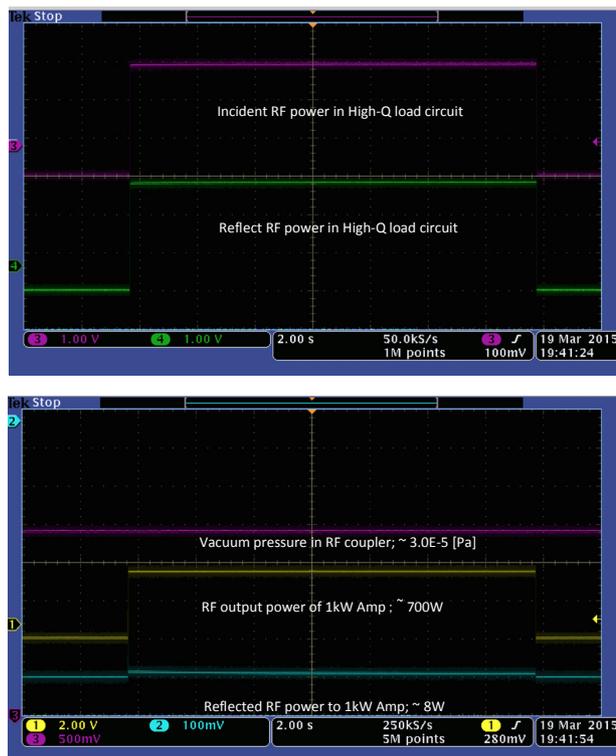


Figure 7. Waveforms on a 200kW-14sec. CW operation.

4. まとめ

(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)を初めて採用した分割型 RF カプラーの耐電力試験を行った。懸念された RF コンタクト部に残留するガス放出による耐電力の制限も無く、また不要な Low-Q 値の存在を示す RF 特性も観測されなかった。また RF エージングの初期段階において RF 電力 10kW, 50kW, 90kW 及び 160kW において特異的なガス放出が計測されたが、十分な RF エージングを行えばガス圧をベース真空度近辺まで下げることができた。この結果 5 日間の RF エージングにより 200kW-14 秒 CW 運転を実証することができ、ガス放出、耐電力及び RF 特性に全く問題ないことが判明した。

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.