

IFMIF/EVEDA 原型 RFQ 加速器の RF コープリャー開発

DEVELOPMENT OF RF INPUT COUPLER FOR THE IFMIF/EVEDA PROTOTYPE RFQ LINAC

前原 直^{#,A)}, Palmieri Antonio^{B)}, 市川 雅浩^{A)}, 高橋 博樹^{A)}, 鈴木 寛光^{A)}, 杉本 昌義^{A)}
 Sunao Maebara^{#,A)}, Antonio Palmieri^{B)}, Masahiro Ichikawa^{A)}, Hiroki Takahashi^{A)},
 Hiromitsu Suzuki^{A)} and Masayoshi Sugimoto^{A)},

^{A)} Aomori research and development center, JAEA, Aomori-ken, 039-3212, Japan

^{B)} INFN-LNL, I-3520 Legnaro(PD), Italy

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. As the RF input coupler engineering design, magnetic field strength and RF loss due to the RF driven etc., based on a 6 1/8 inch co-axial waveguide were calculated. This report describes the engineering design of the RF Input Coupler for the accelerator prototype RFQ.

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[1]。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されている[2]。

原型 RFQ ライナックの設計では[3,4]、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 インพุットコプラーを介して入射される。

この RF コープリャーの工学設計では、RF 特性、RF 損失、カップリングファクター及びキャビティの磁界分布は、HFSS コードを用いて 3 次元電磁界解析を行い、またビームローディング時のカップリングファクターは、イタリア国立原子核物理学研究所・レニャーロ研究所が持つ実機寸法のアルミ材 RFQ モジュールを用いて、カップリング測定結果から評価を行った。

2. RF インพุットコプラーの設計条件

8 台の RF コープリャーは、RFQ の軸方向の 4 か所に分けて配置され、各配置場所では、左右対称に 2 つの RF コープリャーがセットされる。軸方向の各配置場所では、2 つの RF コープリャーにより磁場強度として 3100, 3400, 3800 と 4100[A/m] の励磁が要求されている。またカップリングファクターは、ループアンテナのビーム軸に対する回転(0-90°)あるいはループアンテナの RFQ キャビティへの挿入距離により調整することが求められている。

図 1 に RF インพุットコプラーの概略図を示す。RFQ 本体には $\phi 90\text{mm}$ のポートに RF コープリャーとのインターフェースとして ISO100 の固定フランジが設けられ、RF コープリャー側のフランジには回転フランジとすること。また RF 伝送系と RF コープリャーとのインターフェースは EIA 規格の 9 3/16 インチ同軸導波管フランジの取合いである。RF コープリャーは更にビーム中心軸から径方向に 2000mm 以内で設計することが条件として与えられている。

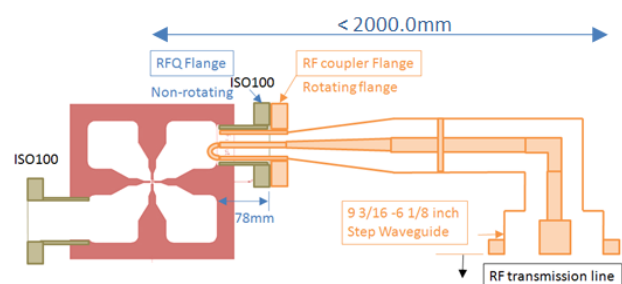


Figure 1: Schematic drawing of an RF input coupler.

[#] maebara.sunao@jaea.go.jp

表 1 に十分な RF コンデショニングを施した後の RF カプラーの目標実証値を示す。

Table 1: Target performance

Requirement	Target value	Comment
Nominal frequency	175MHz	
Duty cycle	100%	Pulsed operation possible
Max. transmitted power	200kW	Full reflection to be withstood up to 100μs
Nominal power	153kW	To be used to dimension the RF couplers
Max. reflected power in operation	20kW	Value that each coupler has to withstand during RFQ operation with no beam
Line impedance	50Ohm	RF network impedance
Max. power lost in the coupler	0.5%	Insertion loss
Max. reflected power from the coupler	1%	$ S_{11} ^2=0.01$ for any frequency in the interval [174MHz,176MHz] on matched load

3. RF インプットカプラーの工学設計

3.1 RF インプットカプラーの構成

図 2 に 6 1/8 インチ同軸導波管をベースに設計した $\lambda/4$ 長の冷却水ポート付 RF カプラーの概略図を示す。この冷却水ポートは、定常運転時における高周波窓とサポートディスクの内部導体部分の RF 損失(約数 10W レベル)を積極的に冷却するために設け、冷却水ポート端部から冷却水を注入して戻りを取り出す構造である。この端部は、外部導体と内部導体が電気的にショートしたプレートを設けているため、非放電的な反射電力が発生した場合、 $\lambda/4$ 長の冷却水ポート内の電界分布はゼロとなる。この RF カプラーの設計では、9 3/16 インチのインターフェース面から $\phi 90$ のポート部分(ループアンテナを除く)間の電力反射率は、周波数 174-176MHz 範囲内で 0.01%以下であることが HFSS コードによる 3 次元電磁界解析で得られた。

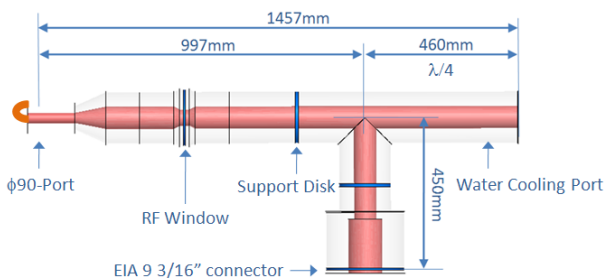


Figure 2: Schematic drawing of an RF input coupler with water-cooling port of $\lambda/4$.

3.2 RF カプラー先端部の冷却チャンネル

RF 損失が増加する $\phi 90\text{mm}$ ポート部分の RF カプラー先端部では、外部導体、ループアンテナ、内部導体を冷却するために冷却チャンネルを設けた(図 3 参照)。外部導体に注入され冷却水は、外部導体の外周を流れてループアンテナ、内部導体の中心部を経由し戻り、内部導体の表面下を冷却してループアンテナ、外部導体外周を流れて取出される。ループアンテナの断面寸法は 8 x 16mm、最少半径は 19.5mm であり、その銅材に $\phi 4\text{mm}$ の 2 つの冷却チャンネルを設けている。

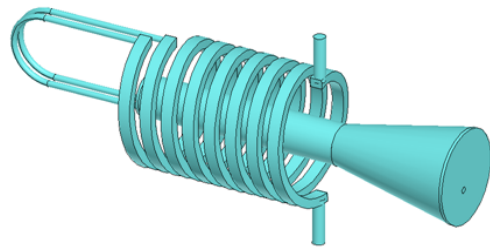


Figure 3: Schematic drawing of cooling channel at the RF input coupler tip.

3.3 カップリングファクターの測定

ループアンテナを RFQ キャビティに挿入した場合、RF 損失やキャビティの電磁場の歪みを抑制するために挿入距離 L を必要最小限にする必要がある。このためループアンテナの挿入距離に対するカップリングファクターの評価を行った。低電力測定用ループアンテナとして挿入距離 $L=73, 48, 45, 40$ および 27mm を試作し、1つのアンテナを実機寸法のアルミ材 RFQ モジュール(図 4)に挿入し、カップリングファクターを測定して 5MeV-130mA ビーム負荷時のカップリングファクターの評価を行った。

測定値からのビーム負荷時の換算は下記のように求めた。① 8つの RF カプラーから入射；測定値の 8 倍 ② Q_0 値の補正；実機の最小許容値/アルミ材 RFQ の測定値(9000/3600)③ビーム負荷時； $1/1.85 = 1 / (750\text{kW}(\text{Cavity}) + 637\text{kW}(\text{Beam loading})) / 750$ ④磁界の補正； $3600^2[\text{A/m}]$ 銅材/ $4300^2[\text{A/m}]$ アルミ材；Supper fish code による計算値を採用。これらの補正を行った 5MeV-130mA ビーム負荷時のカップリングファクターの結果を図 5 に示す。ループアンテナの挿入距離 $L=40\text{mm}$ と 45mm の場合、アンテナ回転角 0° のときカップリングファクターは 1.06 と 1.26 となった。 $L=45\text{mm}$ のとき、パーターベーション方法による電磁界の歪み測定により、アンテナの設置が軸対称であることから $\pm 1\%$ 以下になると評価し、マージンを考慮してループアンテナの挿入距離 $L=45\text{mm}$ を採用することを決定した。



Figure 4: Photograph of real size aluminum RFQ module; the axial length of 9.78m-long.

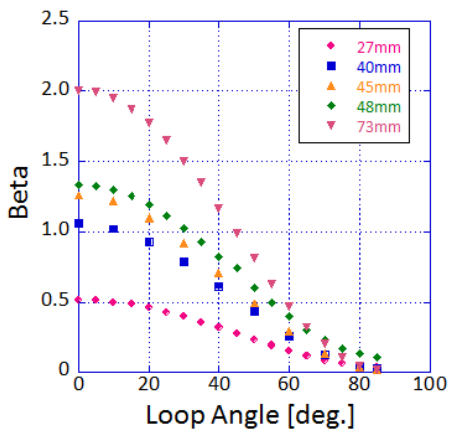
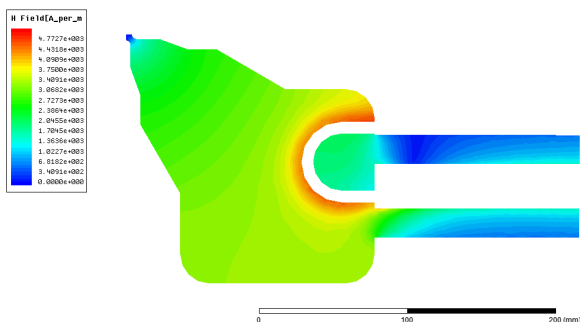


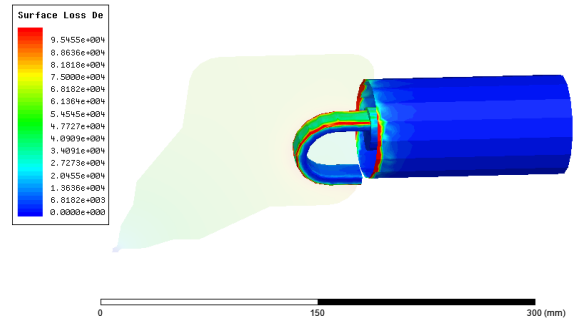
Figure 5: Evaluation of beta (RF coupling) on beam loading in the IFMIF/EVEDA prototype RFQ; beta vs. loop angle for the inserted depth of 27, 40, 45, 48 and 73mm.

3.4 磁場強度と RF 損失の解析

図 6 に L=45mm のループアンテナを挿入し、RF 電力 153kW を入射した場合の RFQ キャビティの磁界分布(a)とループアンテナの表面 RF 損失密度(b)の HFSS コードによる解析結果を示す。ベーン間の磁界強度は、3300[A/m]が得られ設計条件を満たしている。またループアンテナ RF 損失は表面 RF 損失密度から 100-200W となる事が判明した。



(a) Magnetic field profile around the loop length of L=45mm



(b) RF loss density profile on the loop length of 45mm
Figure 6: Magnetic field analyses by HFSS code: (a) magnetic field strength around the loop length of L=45mm and (b) RF loss density on the loop antenna on the RF power of 153kW.

3.5 RF カプラーの試作

図 7 に工学設計に基づき試作した RF カプラー先端部モジュールの写真を示す。水圧 0.3MPa にて 5 リッター/分以上の冷却水流量を実証した。ループアンテナの RF 損失評価(100-200W レベル)の約 15 倍以上の熱除去が可能である。

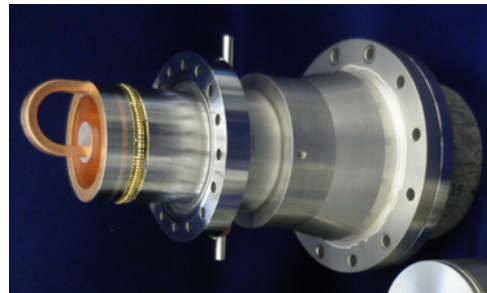


Figure 7: Photograph of the fabricated RF coupler tip module.

4. まとめ

定常化 RF インプットカプラーとしてループアンテナに冷却チャンネルを設けた工学設計を行い、2つの RF カプラーを製作した。現在イタリア国立原子核研究所レニャーロ研究所へ輸送して、無負荷での 2 時間の RF 伝送試験に向けて準備を進めている。

参考文献

- [1] IFMIF-CDA Team (Ed.) M. Martone, "IFMIF Conceptual Design Activity Final Report", *ENEA Frascati Report*, RT/ERG/FUS/96/17 (1996).
- [2] A. Mosnier, et al., "The Accelerator Prototype of the IFMIF/EVEDA project", IPAC10, Kyoto, May 2010, MOPEC056, p.588 (2010); <http://www.JACoW.org>.
- [3] M. Comunian, A. Pisent, E. Fagotti, "The IFMIF/EVEDA RFQ: Beam Dynamics Design", LINAC'08, Vancouver, Sept. 2008, MOP036, p.145(2008); <http://www.JACoW.org>.
- [4] A. Palmieri, et al., "The IFMIF RFQ Real-scale Aluminum Model: RF Measurements and Tuning", IPAC10, Kyoto, Japan, May 2010, MOPEC061, p.603 (2010); <http://www.JACoW.org>.