

## IFMIF RFQ ライナック用 175MHz RF 入力カプラーの電界強度解析

### ANALYSES OF ELECTRIC FIELD STRENGTH IN THE 175MHZ RF INPUT COUPLER

前原直#, 新屋貴浩, 蛭沢貴, 近藤恵太郎, 春日井敦, 杉本昌義

Sunao Maebara #, Takahiro Shinya, Takashi Ebisawa, Keitaro Kondo, Atsushi Kasugai and Masayoshi Sugimoto  
Rokkasho Fusion Institute, National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

#### Abstract

For the IFMIF/EVEDA prototype RFQ linac, an RF coupler with cooling functions was designed, based on a 6 1/8 inch co-axial waveguide, and the RF coupler was developed. For the RF input coupler, electromagnetic fields against beam loading and vacuum loading have analyzed by HFSS code. In case of fully coupling on beam loading, it is evaluated to be 0.3 [MV/m] at the inner conductor surface around coupler port part for the maximum electric field strength by the nominal rf power of 149 kW. For a withstanding voltage test of RFQ-body up to margin 120% of  $K_p=1.76$ , the RF power of 124 kW has to be injected with the reflected rf power of 33%. For the field strength, it is evaluated to be an equivalent to RF power of 219 kW without reflected power.

#### 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; 100 keV)、175 MHz の RFQ ライナック(0.1-5 MeV)、マッチングセクション、初段部分の超伝導 RF ライナック (5.0-9.0 MeV)と高エネルギービーム伝送系及びビームダンプ(9 MeV-125 mA CW) から構成され、125 mA 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、5 MeV まで加速するために軸長さ 9.87 m が設計され、125 mA 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 175 MHz が採用された。この加速性能を満たすためにトータル 1.28 MW 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 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 160 kW を伝送する必要があるため、最大 RF 電力 200 kW の CW 運転を目指して工学設計を行った[3]。試作した RF カプラーに対して High-Q load 回路を用いた定在波を用いて、等価的な RF 電力 200 kW に対する耐電力試験を行った[4]。昨年の六ヶ所研究所における RFQ 実機の調整試験結果、 $Q_0$  値 13100 が測定され RF 入射電力として 1.18 MW(カプラー1 台あたり RF 電力 148 kW)が必要であることが判明した。これらの結果を踏まえ RF カプラーにおけるビームローディング時(無反射)及びループアンテナで放電した場合(完全反射時)を想定した HFSS コードによる電界

強度解析を用いて行った。本稿は RF カプラーの電界強度解析について報告する。

#### 2. RF カプラー

##### 2.1 RF カプラーの概要

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。 $L=\lambda/4$  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。また高周波真空窓部とアンテナ部は、外部導体部はメタル O-リング、内部導体はマルチコンタクトを採用したフランジ接続である。このため高周波真空窓が破損した場合、分解して交換することができる。

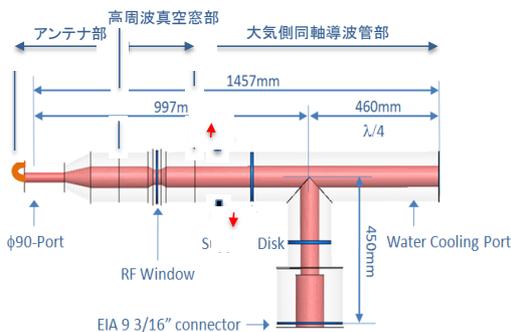


Figure 1: Schematic drawing of an RF input coupler with water-cooling port of  $\lambda/4$ .

図 2 に RF カプラー先端部の内部構造図を示す。 $L=0$  から  $L=0.14$ [m]部は RFQ への取付ポート部であ

り、外径が  $\phi 90$  と最も小さくなる部分である。 $L=0.14$  から  $L=0.23$ [m]部分 はテーパ部分で  $\phi 90$  から  $6\ 1/8$ in.同軸導波管へ  $50\ \Omega$  インピーダンスで径が大きくなっている。また  $L=0.42$  から  $L=0.50$ [m]部分 は、高周波真空窓の部分でありインピーダンスマッチング構造を設けている。

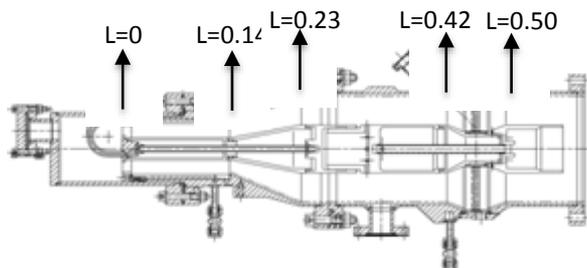


Figure 2: Internal structure of RF coupler tip part.

## 2.2 RFQ への RF 電力供給

重陽子ビームの加速に必要な RF 電力  $P_{total}$  はビームローディング電力  $P_{beam}$  と RFQ 内面損失  $P_{Cu}$  で決まる。 $P_{beam}$  は加速出力電力の  $637\ kW$  ( $\sim 4.9\ MeV \times 0.13\ A$ ) であり不変であるが RFQ 内面損失  $P_{Cu}$  は実機製作精度に大きく左右する。RFQ 本体の軸長さが  $L=9.85\ m$  と長軸に対して 18 分割 RFQ モジュールで構成されているために最悪のアクセプタンス  $Q_0$  値として  $9000$  が設定されていた。RFQ 本体のアライメント及び  $24 \times 4$  個のスタブチューナーによる調整の後、 $Q_0$  値  $13100$  が計測された。この  $Q_0$  値を用いた RFQ 内面損失  $P_{Cu}$  は SuperFish コードで得られる  $P_{Cu}^{sf}$  と比較して  $P_{Cu}=553\ kW$  と再評価した。この結果、加速に必要な RF 電力  $P_{total}$  は  $1.190\ MW$  となりカプラー 1 本当たり  $149\ kW$  が定常 RF 入射電力となる。また RFQ 内面損失  $P_{Cu}$  と等価的な RF 入射電力により RFQ の設計電界強度 ( $Kp=1.76, 24.7\ MV/m$ ) に達する。真空入射(ビームローディング無)における RF エージングでは、マージンを考慮してこの設計電界強度の約 120% までの真空 RF エージングを計画している。真空入射時には 33% の反射電力が発生する。これらを考慮するとカプラー 1 本当たり  $124\ kW$  までの真空エージングが必要となる。

## 3. 電界強度解析

### 3.1 ビームローディング時の電界強度

図 3 に RF 入射電力  $149\ kW$  を伝送したビームローディング時を想定したカプラー内部の電界分布を示す。RF 電力は完全にビームローディング電力  $P_{beam}$  と RFQ 内面損失  $P_{Cu}$  に供給され、RFQ 本体からの反射電力がない場合である。取付ポートサイズは  $\phi 90$  の内部コンダクター部分が最も高い電界となり  $0.3\ MV/m$  に達する。図 4 は内分コンダクターに沿った複素数電界強度分布を示す。EIA  $6\ 1/8$  in. の内部コンダクター表面の電界強度は、約  $0.15\ MV/m$  となり

$\phi 90$  の電界強度に比べ約 1/2 となることが判った。 $L=0.45-0.50$ [m] の部分は高周波真空窓の部分であり、インピーダンスマッチングの構造により電界強度が  $0.1\ MV/m$  に緩和されることが判った。

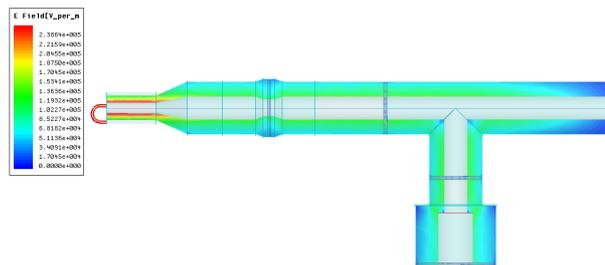


Figure 3: Electric field profile on beam loading by the nominal RF power of  $148\ kW$ . In this case, there is no reflected RF power from RFQ-body. The maximum electric field of  $0.3\ MV/m$  reaches at inner conductor surface of RF coupler port  $\phi 90$ .

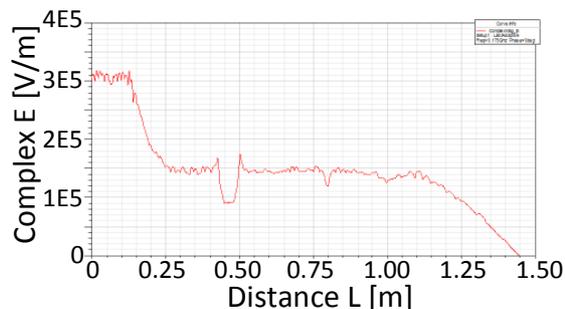


Figure 4: Complex electric field by the nominal RF power of  $148\ kW$  with no reflected RF power, full RF coupling on beam loading.

### 3.2 完全反射時の電界強度

図 5 はループアンテナで放電現象が発生し、 $50\ kW$  の RF 入射電力に対して  $50\ kW$  の反射電力がカプラーに戻った場合を仮定した完全反射時の電界強度分布を示す。進行波と反射波の合成が最も高い部分はループアンテナから  $\lambda/4$  の位置となり  $L=0.35$ [m] 近辺部のテーパ導波管と高周波窓の間となる。またループアンテナから  $\lambda/2$  の位置 ( $L=0.7$ [m] 近辺) では最も低い値となる。図 5 では  $L=0.7$ [m] 近傍で電界強度が低く、カプラーポート挿入部分 ( $L=0\sim 0.14$ [m]) が  $\phi 90$  と径が小さいためテーパ導波管の接続部分 ( $L=0.14$ [m]) で電界強度が最も高くなっていることが判る。

図 6 は完全反射時の内部コンダクターに沿った複素電界強度分布を示す。 $L=0.14$ [m] の  $\phi 90$  とテーパ導波管の接続部分では電界強度が約  $0.3\ MV/m$  に達し RF 入射電力  $149\ kW$  を伝送したビームローディング時と同じレベルになることが判った。また高周波窓の大気側 ( $L=0.5\sim 0.7$ [m]) では、反射電力がないビームローディング時と比べて減少し、 $L=0.7$ [m] のルー

ブアンテナから  $\lambda/2$  位置では、殆ど 0 MV/m 程度になることが判った。この結界から反射電力が伴う真空 RF エージングでは、高周波窓の電界強度は反射電力により緩和され、同軸導波管サイズが最も小さくなる  $\phi 90$  の内部コンダクター部に印加される電界強度の耐電圧が重要であることが判った。

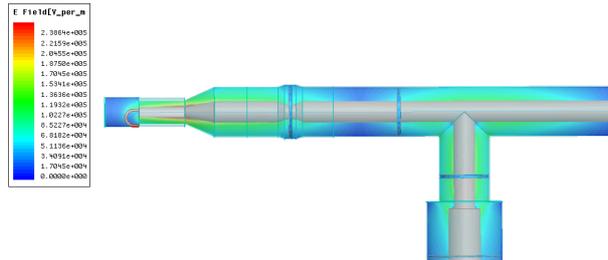


Figure 5: Electric field profile by the incident / reflected RF powers of 50 kW / 50 kW, respectively. In this case, the reflected RF power of 50% from the loop antenna due to discharge phenomenon is assumed. The maximum electric field of 0.3 MV/m reaches at the edge of  $\phi 90$  port.

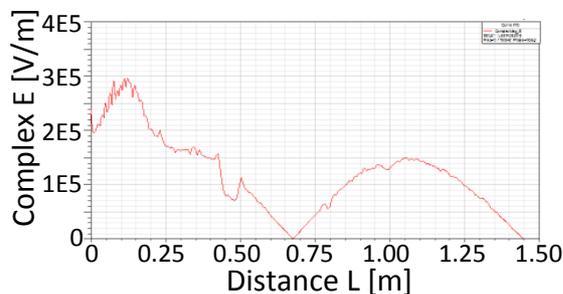


Figure 6: Complex electric field by the incident / reflected RF powers of 50 kW / 50 kW, respectively. In this case, minimum electric field locates at the  $\lambda/2$  far from loop antenna, but maximum electric field is about 0.3 MV/m reaches around the  $L=0.14$ [m] due to the small diameter.

### 3.3 真空 RF エージングの電界強度

真空入射の場合カプラーの結合度から 33%の反射電力が返ってくる。反射電力を伴う場合 RFQ 内面損失  $P_{cu}=553$  kW と等価的な RF 入射電力を供給するにはカプラー 1 本当たり 103 kW ( $\sim 553/(1-0.33)/8$ )が必要となる。また 33%の反射電力を伴う場合 RF 入射電力 83.7 kW 時には重陽子ビームを加速するビームローディング時に必要な RF 入射電力 149 kW と等価的な電界強度となる。更に 20%程度のマージンを考慮して RFQ の耐電力試験を実施するとなればカプラー 1 本当たりの 124 kW となる。この場合の電界強度は、反射電力のない RF 電力 219 kW 時の電界強度と等価的となる。これらの RF 入射電力時に最も高くなる電界強度の部分は、3.2項に示したように同軸導波管サイズが最も小さくなる  $L=0.14$ [m]近傍である。これまで 9 本のカプラーの耐電力試験として等価的

な RF 入射電力として 200~240 kW レベルの 16~18 秒 CW 運転を実証している。真空 RF エージングで要求されるカプラー 1 本当たり 124 kW は十分なガス出しを行えば可能であるが、反射電力が RF ダミーロードの許容電力の 80%に達するために十分な冷却とアーク放電のモニター及びインターロックが重要となる。

## 4. まとめ

カプラーの HFSS コードを用いた電磁界解析により重陽子ビーム 5.0 MeV-0.13 A 加速するためのビームローディングに対してカプラー 1 本当たり 148 kW の RF 入射電力が必要であり、カプラーポート取付部分における電界強度が 0.3 MV/m に達することが判明した。更に RFQ 本体の耐電力試験 ( $K_p=1.76$ ; 24.7 MV/m, マージン 120%) では、カプラー 1 本当たり 124 kW を入射する必要がある。33%の反射電力が伴うことから高周波窓近傍の電界強度は緩和され、 $\phi 90$  の内部コンダクター部に印加される電界強度の耐電圧が重要であることが判明した。この 124 kW 入射時の電界強度は、反射電力がない RF 電力 219 kW 時の電界強度と等価的となることが判明した。

## 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) pp.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); <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC10/papers/mopec061.pdf>
- [3] S. Maebara *et al.*, “Engineering design of the RF input coupler for the IFMIF prototype RFQ linac”, J. Fusion Eng. Des. **88** (2013) pp.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, pp.1140-1142; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP065.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP065.pdf)