

## DESIGN OF AN RF COUPLER FOR THE J-PARC RFQ

Yasuhiro Kondo<sup>1,A)</sup>, Kazuo Hasegawa<sup>A)</sup>, Takatoshi Morishita<sup>A)</sup>, Fujio Naito<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy agency (JAEA)

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-08001

### Abstract

A new RFQ for the J-PARC linac is under construction for stable operation. The requirement of this RFQ is almost same as the now-operating one; the resonant frequency is 324MHz, the injection energy is 50 keV, the extraction energy is 3 MeV, peak beam current is 30 mA, and RF duty is 1.5%. In this paper, about an RF coupler for this RFQ, especially basic characteristics of the RF structure, is described.

## J-PARC RFQ用RFカップラの設計

### 1. はじめに

現在、J-PARC リニアックでは、長時間運転時のRFQの放電問題に直面している。現行RFQにおける様々な改善策により、運転の安定性の向上が期待される<sup>[1]</sup>が、より根本的な解決策として、より安定運転が可能なバックアップRFQの開発を進めている<sup>[2][3]</sup>。本論分では、この新しいRFQに用いるRFカップラについて述べる。表1にRFQの要求仕様を、表2にカップラの仕様を示す。

表1. Requirements for the J-PARC new RFQ

Particle	H <sup>-</sup>
Input energy	50 keV
Output energy	3 MeV
Output peak current	30 mA
RF pulse width	600 μs
Repetition	25 Hz
Frequency	324 MHz

表2. Parameters of the coupler

number of couplers	1
RFQ power dissipation (kW)	350
conditioning factor (x 1.2)	420
duty factor (%)	1.5
average power (kW)	6.3
beam loading (kW)	88.5
coupling without beam	1.25
target coupling	~1.5

J-PARC RFQでは、dutyはそれほど高くない（J-PARCフルスペックでもたかだか3%）ので、構造を単純化するためにも、カップラ1本によるRFフィードに変更する。（従来は2本フィード）

### 2. カップリングの等価回路による考察

ここでは、等価回路によって、ループカップラによるRFQと、同軸管のカップリングについて考察する。

図1に、RFQの電磁場構造、図2に等価回路を示す。図1で、ヴェーンをとりまく経路について、アン

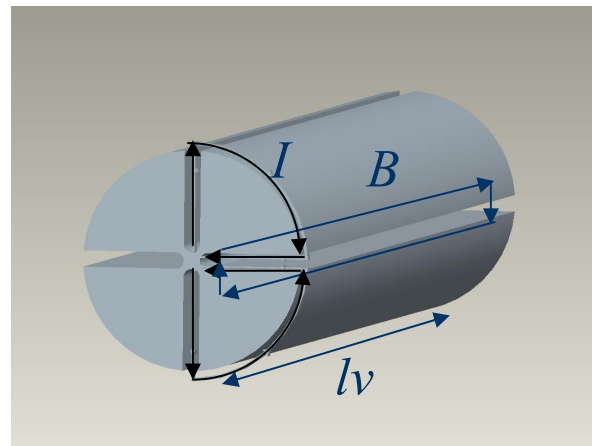


図1：RFQの電磁場構造（4重極モード、向こう側半分は省略）。

ペールの法則を適用すると、（ヴェーンの厚さ分は、ヴェーンの長さに対して小さいとして、無視する。） $B \times 2l_v = \mu_0 \times 2I$ となる。磁束を $\Phi$ 、RFQ空洞のいちょう型の部分の面積 $A$ とすると、 $\Phi = BA = \mu_0 AI /$

<sup>1</sup> E-mail: yasuhiko.kondo@j-parc.jp

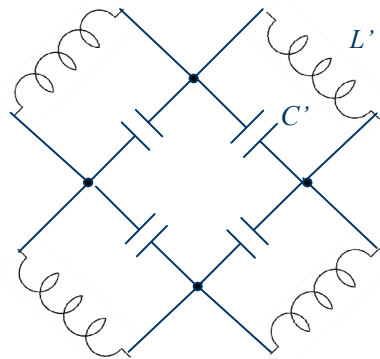


図2：RFQ 空洞の等価回路。

$l_v$ 。よって、RFQのいちよう型の部分のインダクタンス $L'$ は、 $L' = \mu_0 A I / l_v$ となる。J-PARC RFQの場合、いちよう型1つの面積はおよそ $6400\text{mm}^2$ であり、ヴェーン長さ $l_v$ は $3\text{m}$ なので、 $L' = 2.7 \times 10^{-9} \text{H}$ となる。共振周波数は $324\text{MHz}$ なので、 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C'}}$ から、 $C' = 9.0 \times 10^{-11} \text{F}$ 、トータルの $C$ は、その4倍である。RFQのQ値は、典型的には $Q_0 = 10000$ である。

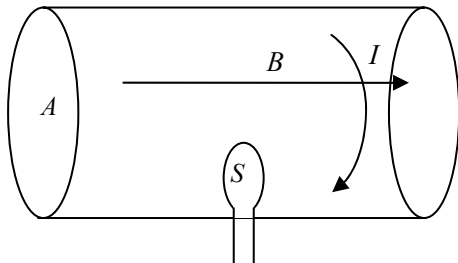


図3 カップラとの相互インダクタンス

図3において、RFQ内の磁束密度 $B$ は、 $B = \mu_0 I / l_v$ なので、カップリングループを通る磁束 $\Phi$ は、ループの面積を $S$ とすると、 $F = \mu_0 I S / l_v$ である。よって、相互インダクタンス $M$ は、 $M = \mu_0 S / l_v$ 。トランスのステップ比 $n$ は、 $n = L' / M = A / S$ となり、いちよう型の面積と、ループの面積の比になる。

図4の等価回路で、カップリング $\beta$ は、 $\beta = Q_0 / Q_{ex} = Q_0 / 2\pi f n^2 Z_0 C$ 。よって、 $\beta = 2.5$ 、 $Q_0 = 10000$ 、 $f = 324\text{MHz}$ 、 $Z_0 = 50 \Omega$ 、 $C = 36 \times 10^{-11} \text{F}$ とすると、 $n = 13$ 。  $n = A / S$ で、 $A = 6400\text{mm}^2$ のとき、 $S = 492\text{mm}^2$ 。結合部の同軸管は、WX77D相当なので、ループの差し渡しは、 $21.75\text{mm}$ 。このときループの長さは $23\text{mm}$ と計算出来る。

図5は、Micro Wave Studio(MWS)<sup>[4]</sup>で、ループ長さ $21\text{mm}$ としたときのカップリングの計算結果である。(周波数が $324\text{MHz}$ でないのは、計算時間の関係上、ヴェーン周辺のメッシュが粗いため。)

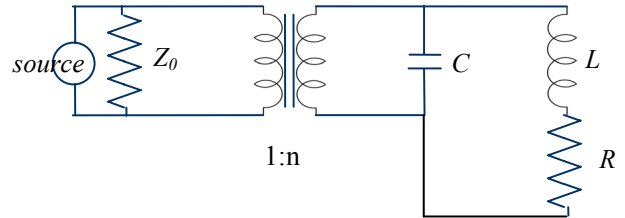


図4：カップラと空洞の等価回路。

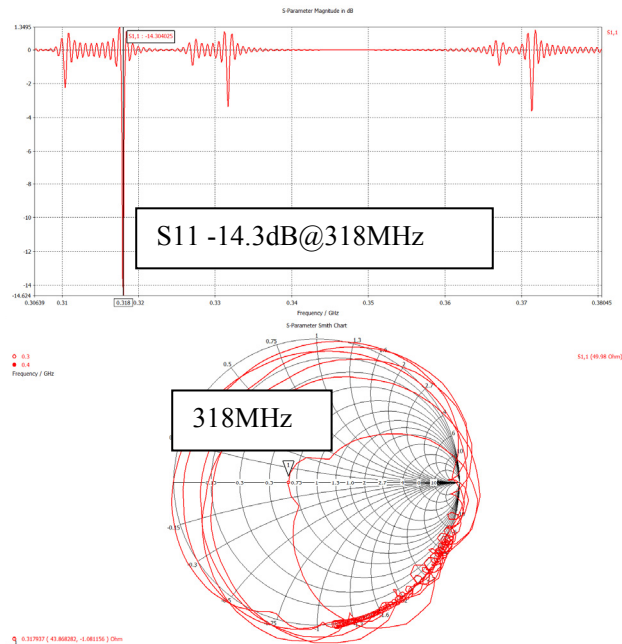


図5：MWSでのループ21mmでの計算結果。

### 3. J-PARC RFQ用カップラの基本構造

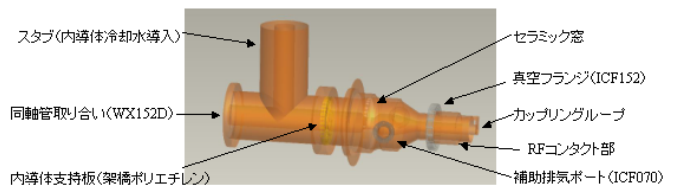


図6：J-PARC RFQ用RFカップラの基本構造。

図6に、J-PARC RFQ用カップラの基本構造を示す。同軸管との取り合いは、WX152Dであり、RFQとの取り合いは、WX77D相当を予定している。内導体の冷却水は、スタブを通して導入される。

### 4. 基本的な高周波特性

RFQまでの同軸管は、WD152D、RFQとの取り合い部は、WD77D相当なので、テーパ管で径をしぼる。一般に、テーパ管は、 $\lambda_g$ 程度の長さがあればほとんど無反射であるとされる<sup>[5]</sup>が、そのような長さ(324MHzなので、925mm)はここでは非現実的である。そこで、図7の単純化したモデル(スタブ

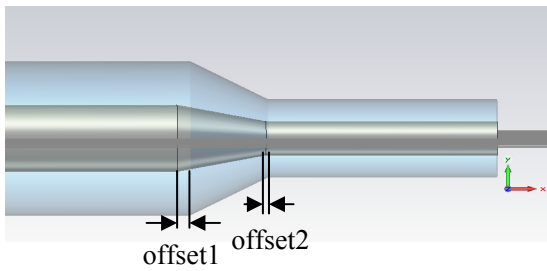


図7：テーパ部の最適化。

無) で、テーパ部の特性をMWSで調べた。

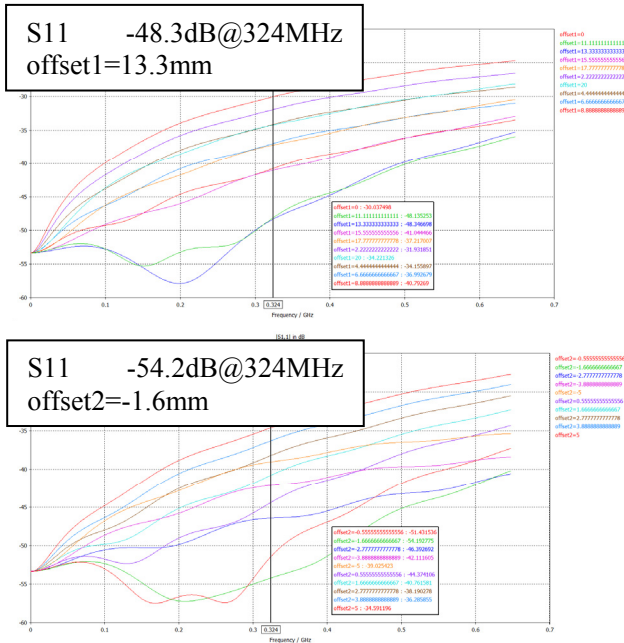


図8：上：offset1依存。offset2は0mm固定。  
下：offset2依存。offset1は13.3mm固定。

図8に示すように、offset1、offset2を適切な値にすることで、短いテーパ（65mm）でもほぼ無反射にすることが出来る。（77d同軸管～-70dB、925mmテーパ～-52dB。）さらに、J-PARC RFQのカップラでは、伝統的に、内導体冷却水をスタブを通して導入しているが、スタブは、一種の共振バンドパスフィルタとして作用するため、帯域が狭くなるため、設計に注意が必要である。スタブの特性を確認するため、図9のようなシンプルなモデルで、スタブの長さや位置依存をMWSで調べた。図10に示すように、スタブ長さ、位置の設計には注意が必要であるが、帯域は、RFQ空洞のそれと比べて十分広いと言える。さらに広帯域にするには、例えば、ループを通して内胴体冷却水を導入するなどしてスタブを廃止すればよいが、信頼性やループの製作性で疑問が残る。

## 5. まとめ

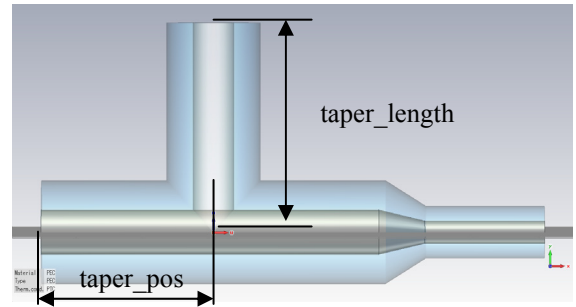


図9：スタブの最適化。

J-PARC RFQのRFカップラについて、基本的特性を確認した。実際の設計では、真空封じり用のセラミック窓や、内導体支持用架橋ポリエチレン板などの詳細なモデリングが必要であるが、本質的な問題ではない。発熱の確認や、空洞の歪みや、ビームローディングによるフィールドシフト、などの確認は必要である。

## 参考文献

- [1] H. Hasegawa, et al., “STATUS OF THE J-PARC RFQ”, in this proceedings.
- [2] T. Morishita et. al., “Engineering design of RFQ at J-PARC linac”, in this proceedings
- [3] T. Morishita et. al., “RF simulation for RFQ designing at J-PARC linac”, in this proceedings
- [4] CST Micro Wave Studio, www.cst.com.
- [5] 藤澤和男, “マイクロ波回路”, 8-5節, コロナ社, 1960.

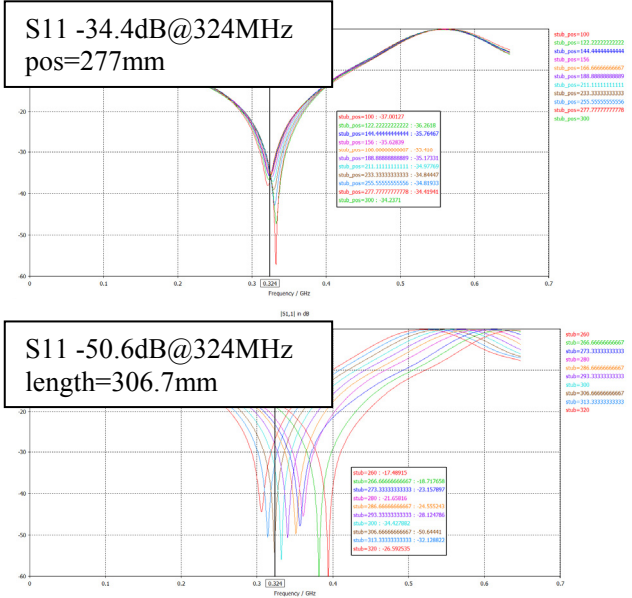


図10：上：スタブ位置依存。下：スタブ長さ依存。スタブ位置で低反射率を探し、スタブ長さで周波数を調整。