

# SPRING-8 次期計画における 1.8GHz 高調波加速空洞用モデルカップラーの製作 MODEL COUPLER FOR THE 1.8GHz HARMONIC CAVITY FOR SPRING-8 II PROJECT

持箸晃\*, 恵郷博文, 藤田貴弘  
Akira Mochihashi\*, Hiroyasu Ego, Takahiro Fujita  
JASRI/SPRING-8

## Abstract

In SPRING-8 II project, lengthening electron bunches by a harmonic cavity is considered to compensate decrease of Touschek lifetime due to lower beam emittance. Because required accelerating field to lengthen the bunch sufficiently is about 21MV/m, the harmonic cavity is needed to be a superconducting cavity. To optimize the input/reflection power of the coupler, we have considered changing the coupling value for different beam current conditions by moving the coupler rod. We have designed the coupler model and calculated the coupling value for different length of the coupler rod. By the simulation, we have confirmed that required coupling value can be obtained by changing the rod length. Also we have developed aluminum model couplers which can change inner rod length. We have measured rf characteristics of the couplers by using a model cavity, and the agreement between the measurement and the simulation is very good.

## 1. はじめに

SPRING-8 では、電子ビームの更なる高輝度化を目指した次期計画の検討<sup>[1]</sup>が進行している。一方で、電子ビームの低エミッタンス化に伴う Touschek 寿命の減少が懸念されている。低エミッタンス化に伴う Touschek 寿命の減少を補償する方法として、高調波加速空洞によって電子バンチ長を伸長させ、Touschek 効果を緩和することが検討されている。通常、高調波空洞の周波数は主加速空洞の周波数 (SPRING-8 では 508.58MHz) の整数倍が採られるが、本検討では 3.5 倍 (1780.03MHz) の周波数を想定しており、高調波空洞により伸長バンチと圧縮バンチを同時に蓄積できる。バンチ伸長のために必要な高調波空洞における加速勾配は 20MV/m 程度であるため、高調波空洞は超電導空洞である必要がある。この空洞を用いた場合に、蓄積ビーム電流値に対して最適なバンチ伸長条件における入力・反射電力条件を最適化するため、同軸型入力カップラーのアンテナを可動させ、カップリングを可変にすることを検討している。

以下、高調波空洞を用いた場合のバンチ伸長についてを第 2 章に、カップリング可変のモデルカップラーを 3次元高周波シミュレーターを用いて設計・計算した結果を第 3 章に、アルミニウム製モデルカップラーを製作し、モデル空洞に取り付けて高周波特性を測定し、シミュレーション計算との比較の結果を第 4 章に述べる。

## 2. 高調波空洞によるバンチ伸長

高調波空洞がある場合の電子ビームが見る RF 電圧は以下で与えられる<sup>[2]</sup>。

$$V(\phi) = V_c \sin(\phi + \phi_s) + V_h \sin(n\phi + \psi) \quad (1)$$

ここで  $V_c, V_h$  は主/高調波加速空洞による RF 電圧、 $n$  は高調波次数、 $\phi_s$  は synchronous phase、 $\psi$  は主/高調波電場の位相差である。

(1) の元にある電子ビームは以下の式で表わされるシンクロトロン振動をする。

$$\ddot{\phi} + \frac{\Omega_0^2}{V_c \cos \phi_s} (V(\phi) - V_r) = 0 \quad (2)$$

\* mochi@spring8.or.jp

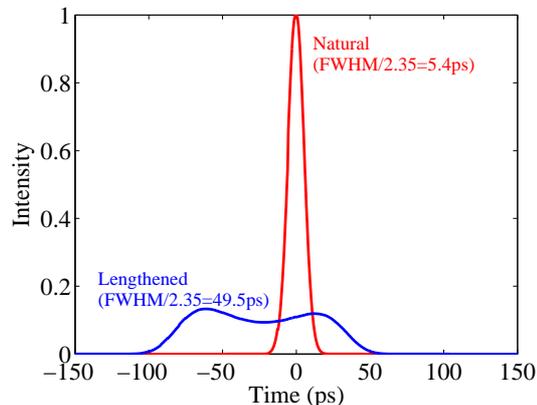


Figure 1: Natural bunch profile and lengthened bunch profile by the harmonic cavity.

ここで  $\Omega_0$  はシンクロトロン振動数、 $V_r$  はシンクロトロン放射によるエネルギー損失である。(2) で表わされるシンクロトロン振動を行う電子バンチの電子密度分布  $\Psi$  は以下で与えられる。

$$\Psi(\phi) \propto \exp\left(\frac{-eV_c \Upsilon^2(\phi, \phi_s)}{2\pi h \eta \beta^2 E \left(\frac{\sigma_p}{p}\right)^2}\right) \quad (3)$$

ここで  $h$  は harmonic number、 $\eta$  は slippage factor、 $E$  はビームのエネルギー、 $\frac{\sigma_p}{p}$  はビームの momentum spread であり、また  $\Upsilon$  は以下で与えられる。

$$\Upsilon^2(\phi, \phi_s) = \frac{1}{V_c} \int_0^\phi (V(\phi) - V_r) d\phi \quad (4)$$

高調波次数を  $n = 3.5$  とし、高調波電圧の振幅・位相を変えて電子バンチを最も伸長できる条件を式 (3) により求めた。結果を figure 1 に示す。Figure 1 では、主加速電圧  $V_c = 16\text{MV}$ , radiation loss  $V_r = 10\text{MeV}$ , ビームエネルギー  $E = 6\text{GeV}$ , momentum spread  $\frac{\sigma_p}{p} = 0.15\%$  とした。Figure 1 を見ると、高調波空洞によりおよそ 9 倍

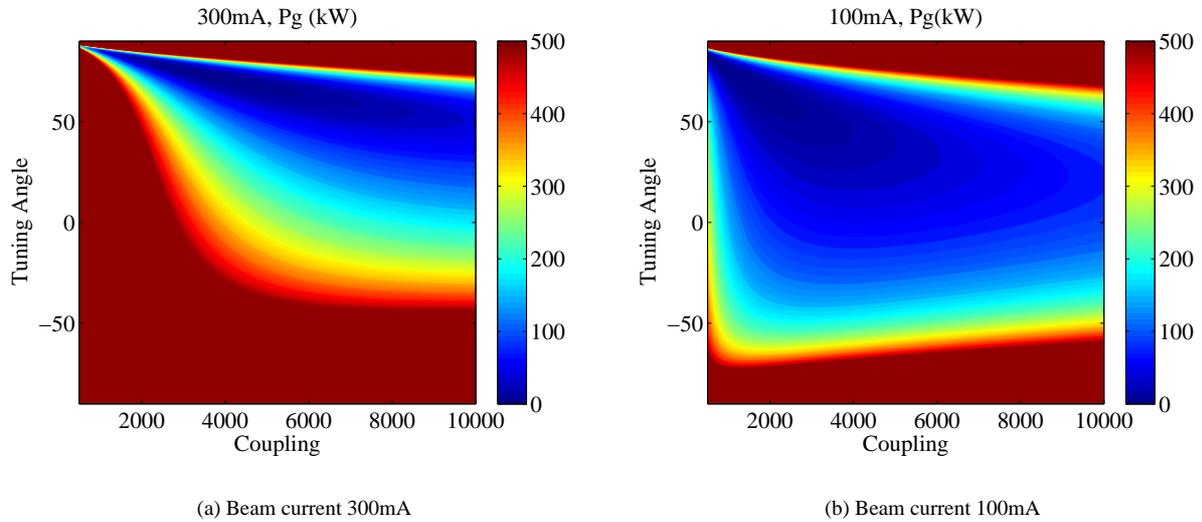


Figure 2: Contour plot of input power for the harmonic cavity in maximum bunch lengthening condition. Power above 500kW is painted by brown.

のバンチ長になっていることが分かる。このときの高調波空胴電圧は 3.55MV であり、高調波空胴のビーム軸に沿った長さ  $d = \frac{c\pi}{f_h} = 8.42 \times 10^{-2} \text{m}$  ( $f_h$  は高調波空胴周波数 1.78003GHz) を考慮し、2 空胴のシステムを想定すると、1 空胴当たりの加速勾配は 21MV/m となるため、高調波空胴は超電導空胴である必要があることが分かる。

### 3. モデルカップラーの設計

#### 3.1 カップリング値可変範囲

高調波空胴によってバンチを最も伸長させることができる条件における高調波空胴への入力パワーを見積もった。計算では、高調波空胴の  $R_s/Q_0$  は 80 とし、 $Q_0 = 1.0 \times 10^9$  (2K での運転を想定) とした。ビーム電流 100mA, 300mA における空胴への入力パワーを (カップリング値, チューニング角) に対して計算した結果を figure 2 に示す。ビーム電流 100mA, 300mA において入力パワー最小となるカップリング値はそれぞれ 1170, 3520 となり、ビーム電流によって最適なカップリング値が大きく異なることが分かる。ビーム電流に対して最適なカップリング値を計算した結果を figure 3 に示す。Figure 3 では、microphonic 対策としてカップリング値の最小値を 500 と定めた。Figure 3 より、ビーム電流 0~300mA を想定した場合、2K 運転でのカップリング値の変更範囲は 500~3500 程度であることが分かった。

#### 3.2 カップラーの基本設計

前提としてカップラー出力側の外導体の内径を 50mm として検討を行った。同軸管の内/外導体の半径を  $a, b$ 、波長を  $\lambda$ 、表皮厚さを  $\delta_s$ 、比誘電率を  $\epsilon_r$  とすると、同軸管の単位長さ当たりの損失  $\alpha_c$  は以下で与えられる [3]。

$$\alpha_c = 13.6 \frac{\delta_s \sqrt{\epsilon_r} \left(1 + \frac{b}{a}\right)}{\lambda b \ln \frac{b}{a}} \quad (5)$$

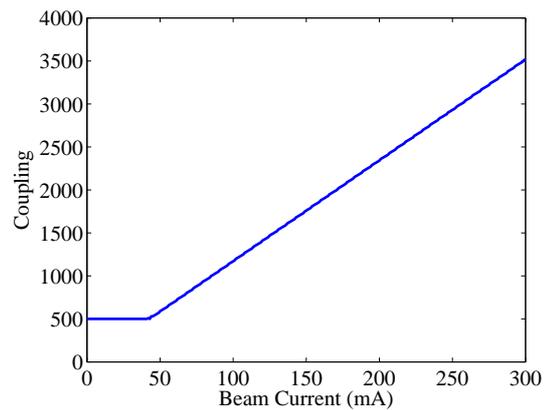


Figure 3: Variation of coupling value for various beam current in maximum bunch lengthening condition.

2K の場合の電気伝導度を  $\sigma = 1.39 \times 10^{19} [1/\Omega\text{m}]$  とした場合 (1.78GHz, 残留抵抗 2nΩ, BCS 抵抗 20nΩ に相当)、内導体半径と損失の関係を figure 4 に示す。内導体半径が 6.9mm の場合に損失が最小となり、同軸管のインピーダンスは 77Ω である。この結果から、カップラーの出力側の内/外導体半径を 7/25mm として設計を行うこととした。

設計したモデルカップラーの概形を figure 5 に示す。カップラー入力側は 50Ω とし、カップラー内にテーパ部を設けてインピーダンス変換をしている。また内導体のサポートとしてテフロン板を用いた。カップリング値を可変とするため、出力側内導体を着脱可能とし、長さの異なるロッドを取り付けることができるようにした。以上の設計を踏まえて、空胴にモデルカップラーを取り付けた際の高周波特性を 3 次元シミュレーター (CST Studio) を用いて評価した。シミュレーターの評価では、モデル空胴の形状にカップラーを 2 つ取り付けたモデルを用いた。シミュレーションに用いたモデル空胴/カッ

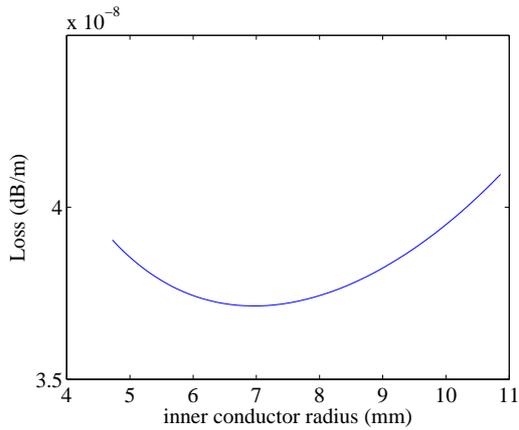


Figure 4: Power loss dependence on the inner conductor radius for 2K operation.

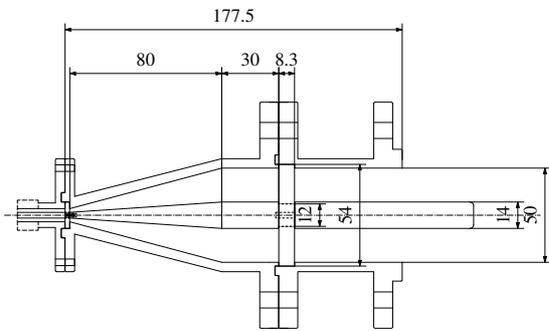


Figure 5: Schematic drawing of designed 1.78GHz coupler.

プラーの概形を figure 6 に示す。

まずカップラーのロッド先端がビームダクト内壁と同じ位置にある場合について、カップラーの位置（空洞のビーム軸方向中心からの位置）をスキャンし、カップリング値を求めた結果を figure 7 に示す。結果、空洞中心より 95mm の位置でのカップリング値は 5400 となり、この値は前章で求めた最大カップリング値よりも大きいため、ロッド長を短くすることでカップリング値を最適な状態に調整することができる。この結果から、カップラーの取り付け位置は空洞中心より 95mm の位置とすることにした。次にロッドの長さを変えてカップリング値の変化を計算した。2K 運転時におけるロッド先端位置（空洞内壁とロッド先端の距離）に対するカップ

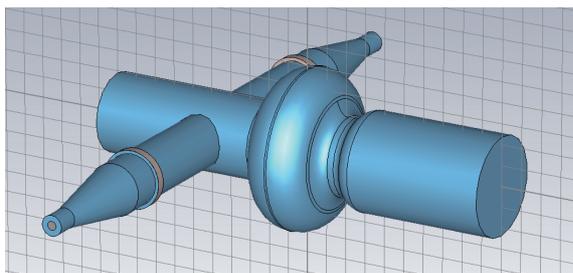


Figure 6: Simulated model of the 1.78GHz cavity and couplers.

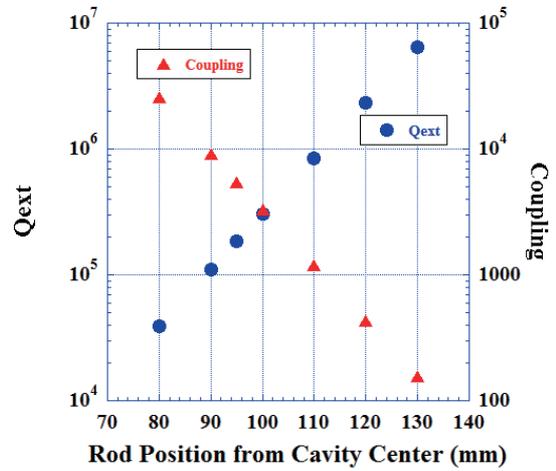


Figure 7: Dependence of  $Q_{ext}$  and coupling on the coupler position.

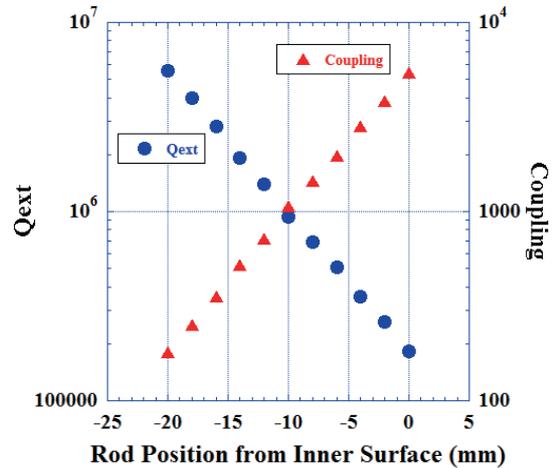


Figure 8: Dependence of coupling on the rod position.

リング値を figure 8 に示す。この結果から、カップリング値可変範囲 500~3500 を実現するためには、ロッド先端がそれぞれ空洞内壁より 14.1~2.7mm 退避した位置にあればよいことが分かった。

#### 4. モデルカップラーの製作と試験結果

以上の検討を元に、高調波加速空洞用モデルカップラーを製作した。モデルカップラーの写真を figure 9 に示す。外導体はアルミニウム製、内導体は銅、また入力ポートは N コネクタ形状とした。このモデルカップラーをアルミニウム製高調波モデル空洞に取り付け、各種高周波特性をネットワークアナライザーを用いて測定した。

モデルカップラーの内導体が空洞内壁より 9.5mm

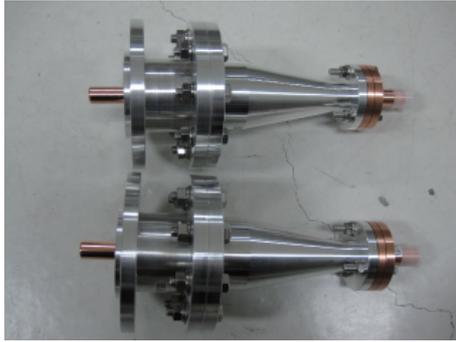


Figure 9: Photograph of the model couplers.

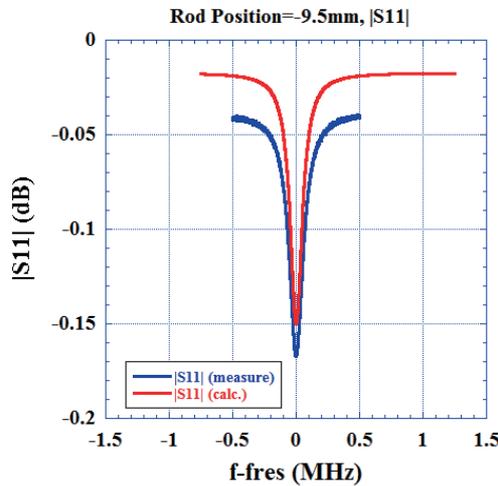


Figure 10: Measurement and calculation of  $|S_{11}|$  for coupler port.

退避した場合の、2つのカップラーポートについて  $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$  を測定した結果を figure 10,11 に示す。Figure 10,11 を見ると、 $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$  とともにシミュレーション結果は測定結果を良く再現していることが分かる。他の内導体位置における  $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$ ,  $|S_{22}|$  についても、シミュレーション結果は測定結果を良く再現できた。

カップラーが2個の場合、空洞への入力パワー  $P_0$  と反射パワー  $P_R$  の比は、2個のカップラーのカップリング値が等しいとすると以下で与えられる。

$$\frac{P_R}{P_0} = 1 - \frac{\frac{4\beta(1+\beta)}{(1+2\beta)}}{1 + Q_L^2 \left( \frac{\omega}{\omega_a} - \frac{\omega_a}{\omega} \right)^2} \quad (6)$$

ここで  $\beta$  はカップリング値、 $Q_L = \frac{Q_0}{1+2\beta}$  は loaded Q,  $\omega_a$  は共振周波数である。 $|S_{11}|$ ,  $|S_{22}|$  の測定結果から式 (6) を用いてカップリング値を解析し、シミュレーション結果と比較した結果を figure 12 に示す。Figure 12 を見ると、シミュレーション結果は測定結果を良く再現していることが分かり、設計通りの可変カップリング値を得られることを確認できた。

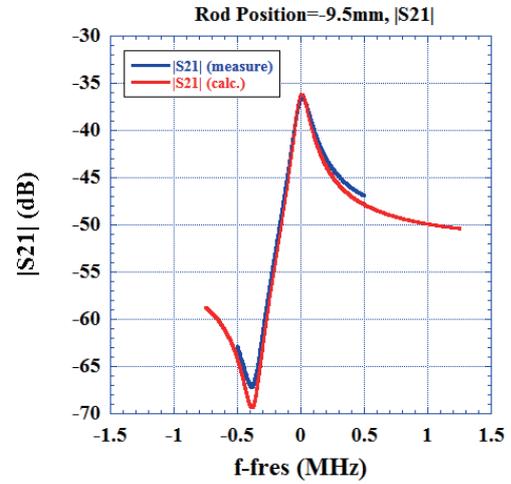


Figure 11: Measurement and calculation of  $|S_{21}|$  for coupler ports.

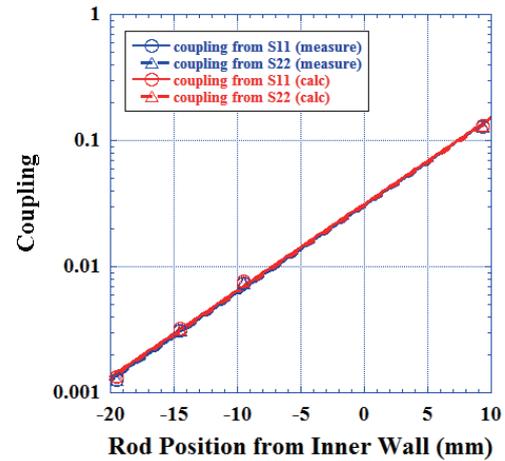


Figure 12: Measured and simulated coupling for different rod positions.

## 5. まとめ

SPRING-8 次期計画における電子ビームの低エミッタンス化に伴う Touschek 寿命の減少を補償するため、高調波空洞を用いて電子バンチを進行方向に伸長させることが検討されている。電子バンチを十分に伸長させるために必要な高調波空洞電圧勾配は、2空洞使用する場合においても1空洞当たり 21MV/m となるため、高調波空洞は超電導空洞である必要がある。2K で高調波空洞を運転する場合、電子ビームを最も伸長できる条件での空洞の入力・反射パワーを計算した。結果、ビーム電流によって最適なカップリング値が大きく異なることが明らかとなった。このため、カップリング値が可変であるカップラーを検討することにした。カップリング値の変

更の方法は、同軸形状の内導体の空洞への突き出し量を変化させることでカップリング値を変更することとした。3次元電磁場解析シミュレーターで計算を行い、内導体の突き出し量を変化させることで2K運転時に必要とされるカップリング値の可変範囲を実現することができることを確認した。また、内導体ロッドを着脱して空洞へのロッド突き出し量が可変なアルミニウム製モデルカップラーを設計・製作し、アルミニウム製モデル空洞に取り付けて高周波特性を測定したところ、設計したカップリング可変範囲を実現できていることが分かった。

## 参考文献

- [1] [http://www.spring8.or.jp/ja/about\\_us/whats\\_sp8/spring-8\\_II/top.html](http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/spring-8_II/top.html)
- [2] A. Hofmann and S. Myers, CERN ISR-TH-RF/80-26.
- [3] Peter A. Rizzi, "Microwave Engineering" (Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632) p.185.