

SPring-8-II 高次モード減衰型高周波加速空洞の開発

DESIGN OF A HOM-DAMPED RF CAVITY FOR THE SPRING-8-II STORAGE RING

恵郷博文^{#, A)}, 渡辺順子^{B)}, 木村諭^{B)}, 佐藤潔和^{B)}

Hiroyasu Ego^{#, A)}, Junko Watanabe^{B)}, Satoshi Kimura^{B)}, Kiyokazu Sato^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)} Toshiba Corporation

Abstract

A beam-accelerating RF cavity with a new HOM-damping structure was designed in order to suppress coupled-bunch instabilities in the SPring-8-II storage ring which is planned to have ultra-low emittance and supply X-rays approaching diffraction limit. Four straight sections for installing RF cavities are limited to about 4 m each in the ring and massive types of cavity with waveguides or pipes extracting HOM power are impossible to be used. The TM₀₂₀ mode is selected as a beam-accelerating mode in the new cavity since it has a high Q-value and a shunt impedance sufficient for beam acceleration and brings a compact HOM-damping structure to the cavity. Two slots are cut on the cavity inner-wall along the magnetic node of the TM₀₂₀ mode and materials absorbing RF waves are fitted into them. The slots work as HOM dampers without affecting the RF properties of the TM₀₂₀ mode. A full-scale model cavity of aluminum alloy was fabricated and RF properties of its resonant modes were measured. The close agreement between the measurements and the design values was obtained and the feasibility of the damping structure was proved.

1. はじめに

X線回折限界光源を目指して SPring-8 蓄積リングを極低エミッタンスリングに改造することが SPring-8-II 次期計画として検討されている。蓄積ビーム電流は 100mA で現在の蓄積リング^[1]と同じであるが、ビームエネルギーは 8GeV から 6GeV へ下げられる。偏向電磁石及び挿入光源によるエネルギー損失は計 5MeV、量子寿命等を考慮した必要加速電圧は 7MV である。また、加速周波数は 508.58MHz から 508.768MHz へ変更することが検討されている。蓄積リングの低エネルギー化、蓄積リングのラティスの変更に伴い、高周波加速空洞の高次共振モード (Higher-order mode; HOM) の結合インピーダンスに起因するバンチ間不安定性 (Coupled-bunch instability; CBI) が問題となる。そこで CBI を抑制するため、結合インピーダンスの高い HOM を減衰させる高周波加速空洞の開発が進められている。次期計画蓄積リングにおいて 4カ所の加速空洞収納スペースは各約 4 m に制限されるため、7MV の加速電圧を生成する空洞必要台数を考慮すると、HOM 取出用導波管や拡張パイプなどを用いた減衰方法^[2-4]は長さや占有体積が大きくなるため使用できない。チョークモード空洞も非常に優れた HOM 減衰構造を持つ^[5]。空洞外周を取り巻くように減衰機構があるため、収納長を短くできるが、チョーク構造を避けて空洞へ高周波を入力する方法が難しい。そこで、シンプルかつコンパクトな構造で効率的に HOM 減衰を行う新型加速空洞を設計した。この空洞のビーム加速共振モードは、通常の加速空洞と異なり、TM₀₂₀ モードである。HOM 減衰機構として加速空洞内に 2つのスロットが TM₀₂₀ モードの軸対称磁

場の節に沿って設けられており、スロット内に高周波吸収体が収納される。これにより専用の導波管やパイプを用いることなく、コンパクトな収納長で HOM 減衰を達成させる。また、この空洞には真空状態を維持したまま、導波管との結合度を変えることができるカップラー^[6]を用いる。これにより加速ビーム電流の値によらず、常にビーム負荷に整合させて電力反射を抑えた大電力運転が可能となる。

本論文では、第 2 章で空洞の構造と加速性能、HOM 減衰機構の設計について述べ、第 3 章で高周波性能を確認するために製作したアルミモデル空洞について、第 4 章で測定した高周波特性について報告する。

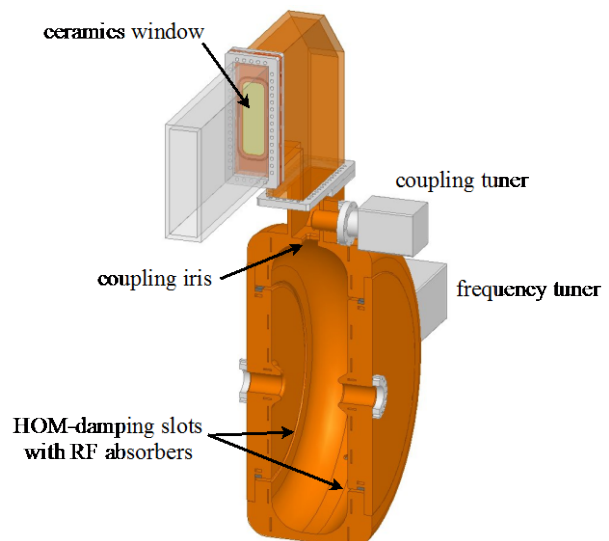


Figure 1: Structure of the new HOM-damped cavity.

[#] ego@spring8.or.jp

2. 設計

2.1 空洞構造

Figure 1 に空洞の構造計画図を示す。空洞はφ70mm ビームパイプ部にノーズコーンを持つリエンタラント型である。材質は電気伝導率が良く、高真空が期待できる無酸素銅とする予定である。加速空洞内部には幅 10mm、深さ 40mm の2つのスロットが TM020 モードの軸対称磁場の節に沿って設けられており、各スロット内には高周波吸収体（幅 20mm、厚さ 10mm）が接合される。また、大電力運転時の空洞膨張による周波数変化や加速ビームのリアクタンス成分を補正するために周波数チューナーが1台設けられる。

大電力高周波は WR-1500 立体回路により空洞へ供給されるが、空洞の真空封止には SPring-8 で開発した導波管部で締結するセラミックス窓を用いる (Figure 2) [7]。これは銅板に開けた R 付矩形アイリスに低損失アルミナ(誘電損失 < 0.0001)を接合したもので、セラミックス破損時には窓のみ簡便に交換可能である。コンパクト化と透過帯域を広げるために高さを 100mm に矮小化しているため、窓と空洞間は 100mm 高の導波管回路で構成する。導波管と空洞は、臨界結合となるサイズで空洞に設けたアイリスで接続される。導波管との結合度はアイリス近傍に設置した可動プランジヤーにて変更することができる (2.4 項参照)。



Figure 2: Ceramics window.

2.2 TM020 加速モード

シミュレーションコード MAFIA、CST STUDIO[®] 及び HFSS[®]を用いて空洞の高周波特性を解析し、内面形状を最適化した。Figure 3 に空洞の内面形状と TM020 加速モードの電磁場分布を示す。青矢印が電場を表し、赤矢印が磁場を表す。円周状スロットは磁場の節の位置にあるため、スロット付近及び内部には磁場はなく、電場がスロット入口に存在しているが、スロットと電場は平行であるため、電場もスロットへ侵入することができない。よって、高周波吸収体をスロット内に収蔵しても TM020 モードは減衰されない。Table 1 に高周波特性を示す。本体の材質を銅とした場合、TM020 モードのシャントインピーダンス R_a は 6.8MΩ、無負荷 Q 値 Q_a は 60,300、 R_a/Q_a は 113Ω で、900kV までの加速電圧を想定している。 R_a/Q が低い値になっているが、蓄積リングにてイオントラップによる不安定性を回避するために設けるバンチギャップで生じる過渡的加速

電圧変調^[10]を小さくする効果を持つ。空洞長は 400mm 程度となるため、4カ所の 4m 直線部に余裕をもって複数台の空洞を収納することができる。

Table 1: RF Properties of the TM020 Mode

Shunt impedance (R_a) [MΩ]	6.8
Unloaded Q (Q_a)	60,300
R_a/Q_a	113
Accelerating voltage [kV]	900

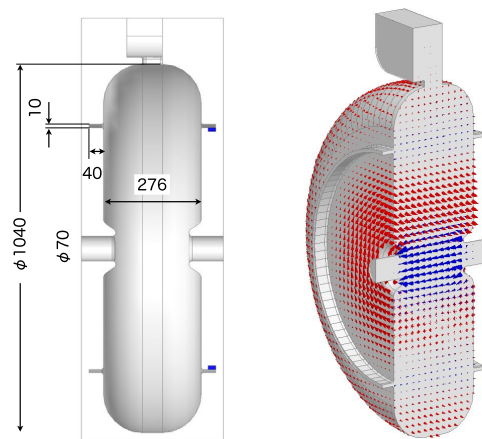


Figure 3: Inner shape of the cavity and the TM020 field distributions. Blue and red arrows show electric and magnetic fields, respectively.

2.3 高次モードの減衰

ビームとの結合インピーダンスが高く、CBI を引き起こすモノポールやダイポールモードの磁場は TM020 モードと異なり、スロットへ侵入するため、内蔵した高周波吸収体により大きく減衰する。その例として TM011、TM110 モードの電磁場分布を Figure 4 に示す。両モードの磁場がスロット内へ侵入していることがわかる。シミュレーションで得た、ビームパイプのカットオフ周波数 (TM モード: 3.3GHz) 以下の共振周波数を持つモノポール、ダイ

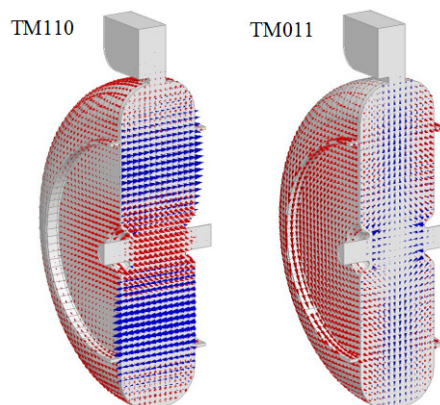


Figure 4: Field distributions of the TM011 and TM110 modes.

ポールモードのインピーダンス分布と Q 値を Figure 5 に示す。黒点は高周波吸収体のない場合、赤点は吸収体のある場合を表す。この計算では吸収体の電気伝導率を $5.8S/m$ とした。TM020 モードを除く多くの共振モードにおいて Q 値が高周波吸収体によって減衰するため、空洞内にトラップされるモノポールモード及びダイポールモードのシャントインピーダンスは大きく減少する。

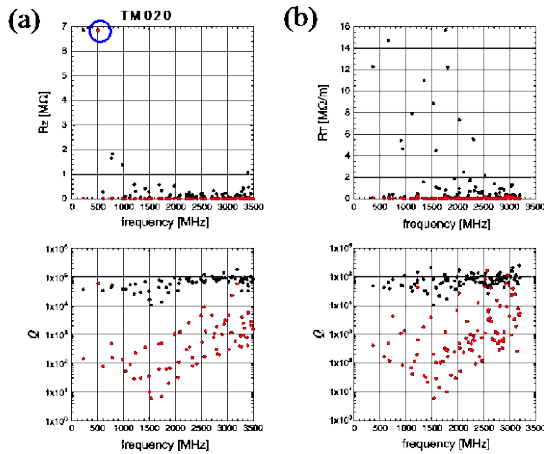


Figure 5: Impedance and Q distributions of (a) monopole modes and (b) dipole modes of the cavity.

2.4 結合度可変カップラー

空洞へ電力供給するために高周波入力カップラーを用いるが、これまでのカップラーは最大ビーム負荷に合わせた結合係数固定タイプの同軸ループ型^[11]で、立ち上げ時や定格のビーム電流運転を行わない場合、不要な電力反射を生じていた。本空洞には真空封止状態を維持し、ビーム負荷の変化に応じて結合度を変えることができる可変結合機構を採用する。Figure 6 にカップラーの構造図を記す。銅製の可動プランジャーがカップリングチューナーとして、この空洞アイリス前の導波管に設置され、導波管内に長く挿入すると磁場がプランジャーに巻き付くようになる。これによりアイリスとプランジャー間の磁場エネルギー密度が大きくなる。その結果、空洞の TM020 モードはアイリスを通じて導波管と磁場結合するので、結合度も大きくなる。 $\phi 70mm$ のチューナーをチューナー軸・アイリス間の距離を $70mm$ に設置した場合の結合度とチューナー挿入長の関係も Figure 6 に示した。結合度は 4 程度まで任意の値に設定することができる。チューナー位置が $0mm$ の場合、アイリスは臨界結合しているので結合度は 1 となる。これによりチューナーを挿入しなければ、加速ビームの無い空洞で電力反射無く、加速電場を発生させることができる。結合度の最大値は、チューナー径の大きさ、位置によって変わる。カップラーの外部導波管回路への最適結合度は、空洞内壁の高周波ロス P_c とビーム負荷 P_b の比で決まり、

$\beta=1+P_b/P_c$ である。SPRING-8-II でのビーム加速運転では、最大結合度は約 2 (空洞 12 台で 7MV 運転する場合、 $P_c=50kW$ 、 $P_b=42kW$) となるので、チューナーによって必要な結合範囲はカバーされ、大電力運転を停止することなく、変化するビーム負荷に追従しながら整合運転が可能となる。

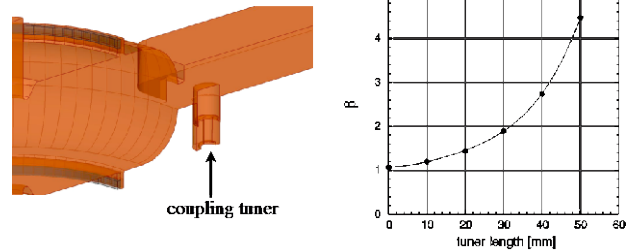


Figure 6: Structure of the coupling tuner and the dependence of coupling on a tuner projection length.

2.5 熱構造解析

最大加速電圧として $900kV$ の運転 (空洞 8 台での $7MV$ 運転) を想定しており、約 $120kW$ の高周波電力を空洞へ投入する必要がある。この電力で空洞が健全に運転できるかシミュレーションコード ANSYS^[6]を用いて評価した。Figure 7 は $125kW$ 運転の熱構造解析結果で、空洞本体の温度と相当応力の分布を表す。ただし、空洞内部は真空、外部は大気として大気圧の影響も考慮しているが、高周波吸収体の選択と接合方法が確定していないため HOM 吸収電力による熱負荷は含んでいない。解析の結果、最大上昇温度は約 $47^\circ C$ 、相当応力の最大値は無酸素銅の 0.2% 耐力に対して $1/10$ 以下である。よって $900kV$ 加速運転は構造強度に関して問題ないと考えられる。

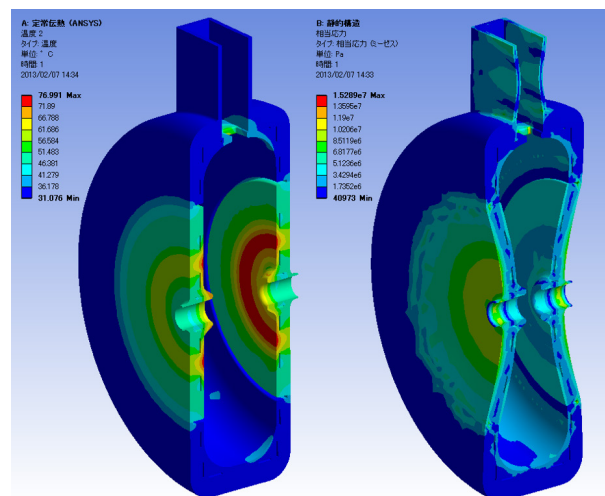


Figure 7: Distributions of temperature and von Mises stress in operation at an RF power of $125 kW$.

3. モデル空洞の製作と高周波性能測定

設計した空洞の高周波性能を確認するためにアルミ合金 A5052 (電気伝導率測定値: $1.99 \times 10^7 \text{S/m}$) を母材に用いて実寸大モデルを製作した。

3.1 空洞本体

Figure 8 に製作したアルミモデル空洞の写真、Figure 9 に組立図を示す。高周波吸収体を着脱できるようにするため、固定用リングを用いて、ノーズコーンを加工した端板を本体にボルトで締結する構造とした。円筒状の高周波吸収体は製作コストが高いため、板状 (20mm×10mm×54mm) の吸収体を用いた。1つのノーズコーン端板には、外周に沿って 36 個の吸収体を専用クランプで固定した。空洞内面の加工表面粗さは Ra0.6、ノーズコーン端板は Ra1.4 である。空洞の共振周波数を調整できるように周波数チューナー (φ70mm 可動プランジヤ) も取り付けられた。

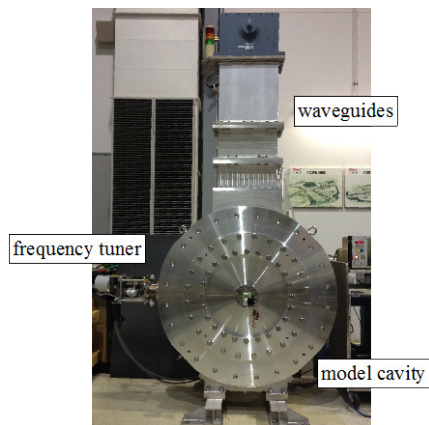


Figure 8: Model cavity of aluminum alloy.

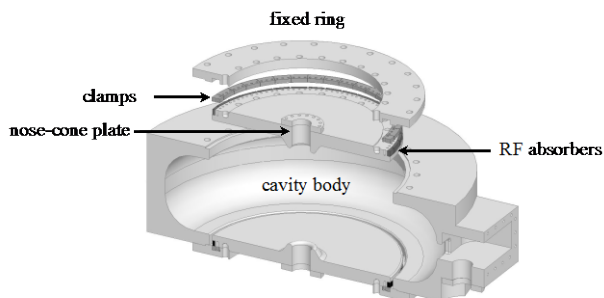


Figure 9: Cut-off view of the model cavity and assembly.

3.2 高周波吸収体

炭化ケイ素 (SiC) 及びフェライトを高周波吸収体として試験した。HOM 減衰にはスロットへ漏れ込む磁場、迂回電流を減衰させなければならないため、電場の誘電損失にて高周波吸収を行う SiC^[12] は、本空洞に適さない。しかし、SiC には導電性を持つものがあり^[12]、2.3 項のシミュレーションで用いた

電気伝導率に近い値を持つコバレントマテリアル社製 CERASIC-BE^[13] を使用した。焼成時の厚さによって電気伝導率が変化するため、表面粗さを整えながら上記サイズで 10S/m となるように製作した。電気伝導率は四探針法にて測定し、誘電率はアジレントテクノロジー社製誘電体プローブ 85070E を用いて測定した。誘電率の測定結果を Figure 10 に示す。誘電率は 8.5 前後、誘電損失は小さい。この SiC を両側スロットに収納してデータを測定した。

フェライトは TDK 社製の Ni-Zn 系の HF70^[14] を使用した。B-ファクトリーの超伝導空洞では同社の IB-004 が用いられ、良好な高周波吸収性能が実証されている^[15, 16]。しかし、IB-004 は現在入手不能であるため、空洞の HOM 周波数帯域 (0.2~3GHz) で μ' の高い HF70 を用いた (Figure 11)。試行として入手した数が少なかったため、フェライトは片側スロットのみ収納し、反対側のスロットは吸収体の無い状態で測定した。

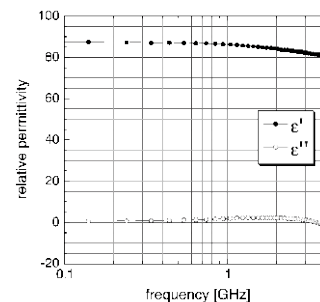


Figure 10: Frequency characteristics of relative permittivity of CERASIC-BE.

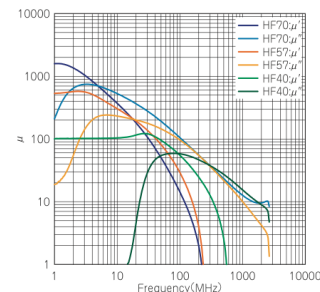


Figure 11: Frequency characteristics of relative permeability of HF70^[14].

4. 測定結果

4.1 加速モード

スロット有無による TM020 モードの高周波特性を Table 2 に示す。共振周波数は本体温度 30°C、空洞内真空状態での換算値を表す。スロット無、及び、SiC 収納スロットの場合、 Q 値は共にシミュレーション計算値 (35,300) の 94%で、SiC 収納スロットによる劣化はほとんど見られない。しかし、フェライト収納スロットの場合は約 4%、 Q 値が低下し

た。フェライトを用いる場合は、スロットの形状やフェライト配置の調整や修正を行い、この Q 値の低下を改善する必要がある。周波数チューナーが空洞内面位置で共振周波数が約 508.52MHz となっており、ほぼ設計値 (508.58MHz) であった。

Table 2: RF Properties of the TM020 Mode in the Model

	Without slot	With Slots and SiCs	With Slots and ferrites
Frequency [MHz]	508.32	508.52	508.52
Unloaded Q	33,100	33,000	31,700
coupling	0.66	0.69	0.66

4.2 高次モード

Table 3 にインピーダンスの高い代表的な HOM の高周波特性 (共振周波数 [MHz] / Q の順) 測定値を示す。吸収体収納スロットにより Q 値が下がっている。特にフェライト HF70 で非常に良く減衰されている。フェライトでの測定では TM120 モードの同定ができなかった。シミュレーションを行うと片側のみフェライトを収納したことで電磁場が大きく歪んでいるようである。

Table 3: RF Properties (frequency [MHz] / Q) of Some HOMs with a High Impedance

	Without slot	With slots and SiCs	With slots and ferrites
TM010	226.3 / 6,000	224.2 / 700	217.4 / 30
TM110	366.0 / 17,100	364.9 / 3,200	366.7 / 30
	366.6 / 16,700	365.2 / 3,600	
TE111	581.1 / 5,800	575.0 / 600	575.1 / 80
	581.8 / 14,600		
TM011	608.1 / 3,800	593.1 / 300	589.0 / 60
TM120	664.1 / 36,200	660.5 / 600	*1

*1: not to be identified.

4.3 カップラー結合度

Figure 12 にモデル空洞で測定したカップラーチューナーによる TM020 モードの結合度変化を表す。Figure 6 のシミュレーションと比べると、アルミ合金母材による無負荷 Q 値が低下しているため全体的に結合度も小さくなっているが、チューナーの挿入によって結合度は大きくなっていった。無負荷 Q 値を銅母材に換算すると 1.7 倍となるので、ほぼシミュレーションどおりの結合度が得られている。

4. まとめ

ビーム加速モードとして TM020 モードを用いる HOM 減衰型加速空洞を設計し、モデル空洞にて高周波性能を測定した。TM020 モード磁場の節に沿っ

て開けたスロットに高周波吸収体を収めることによって、加速モードにほとんど影響なく、HOM の Q 値を大きく減衰させることができた。これにより新設計のコンパクト HOM 減衰機構は有効に作用することが確認できた。現在、高周波吸収体の接合方法、HOM 吸収に伴う熱構造解析、空洞の加工・組立方法の検討を行いながら大電力プロトタイプ機の製作を進めている。

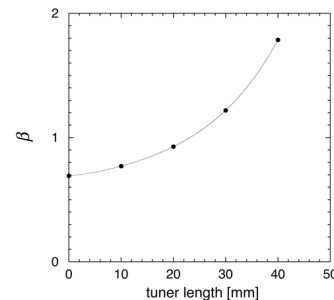


Figure 12: Coupling dependence of the TM020 mode on a tuner length in the model cavity.

5. 謝辞

高周波吸収用導電性 SiC の製作にあたり、コバレントマテリアル (株) 安藤正博氏、山路信多郎氏にご尽力いただきました。ありがとうございました。この研究開発は、独立行政法人理化学研究所及び公益財団法人高輝度光科学研究センターによる SPring-8 高度化計画の一環として行われました。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Takao, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013, p.302.
- [2] T. Kageyama, et al., Proceedings of the Particle Accelerator Conference 97, Vancouver, May 12-16, 1997, p.2902
- [3] T. Furuya, et al., Proceedings of the Particle Accelerator Conference 97, Vancouver, May 12-16, 1997, p.3087.
- [4] M. Izawa, et al., Proceedings of the Particle Accelerator Conference 97, Vancouver, May 12-16, 1997, p.2989.
- [5] T. Shintake, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.31, 1992, p.1567.
- [6] H. Ego, Nucl. Instr. And Meth. A 516, 2006, p.74.
- [7] H. Ego, et al., Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Aug. 8-11, 2012, p.154.
- [8] <http://www.cst.com>, <http://aetjapan.com>
- [9] <http://ansys.jp>
- [10] S Sakanaka, Proceedings of ERL07, Daresbury, May 21-25, 2007, p.41.
- [11] <http://www.toshiba-tetd.co.jp/product/category/microwave/coupler.htm>
- [12] Y. Takeuchi, et al., Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010, p.544.
- [13] <http://www.covalent.co.jp/jpn/products/semicon/cerasic.htm>
- [14] http://www.tdk.co.jp/emc_guide/jemc_basic_06.pdf
- [15] T. Tajima, et al., Proceedings of the Particle Accelerator Conference 97, Vancouver, May 12-16, 1997, p.3090.
- [16] T. Tajima, KEK Report 2000-10 A, 2000.