

RF ACCELERATING STRUCTURE FOR THE POSITRON DAMPING RING OF THE SuperKEKB INJECTOR

Tetsuo Abe*, Tatsuya Kageyama, Hiroshi Sakai, Yasunao Takeuchi, Kazuo Yoshino
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

A positron damping ring (DR) is under construction to meet the requirement of the low-emittance positron-beam injection to the main ring (MR) of SuperKEKB based on the nano-beam scheme. We present our latest design of the radio-frequency (RF) accelerating structure for the DR, which consists of "multi single cell," and can supply 2 MV accelerating voltage at maximum. This structure is based on the normal-conducting accelerating cavity system ARES, where 32 ARES cavities had been successfully operated at the KEKB MRs with extremely low trip rates.

SuperKEKB 入射器における陽電子ダンピングリング用高周波加速構造

1. はじめに

SuperKEKB 加速器においては、低エミッタンス陽電子ビーム入射を実現するためにダンピングリング (DR) が導入される。表 1 にデザイン・パラメータの一部を示す。加速モード周波数は KEKB 主リングと同じであるため、KEKB 加速器で安定運転の実績のあるアレス (ARES) 常伝導加速空洞 (定格加速電圧: 0.5MV / 空洞) [1] をベースとして、0.5MV の全加速電圧を定格とする加速構造の設計を進めた [2]。しかし、その後、Coherent Synchrotron Radiation (CSR) による Microwave instability を抑える目的で、より高い加速電圧が要求された [3]。最終的に要求された全加速電圧は 1.4MV である [4]。我々は、CSR 効果の見積りに理論的な不定性があること、及び、要求された加速電圧に対してハードウェアとして余裕を持った設計をする必要性のあることから、最大 2MV の全加速電圧を保証する 3 連空洞構成 (図 1) を採用した。

本加速構造を構成する主なコンポーネントには大きく分けて 3 種類ある: 加速空洞本体、Higher-Order-Mode (以下、HOM) 導波管ロード、溝付ビームパイプ (Grooved BeamPipe; 以下、GBP) [5] である。ここで、限られた RF 区間 (全長 5360mm) に空洞 3 台、テーパ管、ベローズ、ゲートバルブを設置するため、空洞間の GBP を共有化した。また、GBP の連結部にはフランジを用いない構造とした。全体としては 3 台 1 体型であり、いわば「マルチ・単セル空洞」であることが本加速構造の特徴である。

以下、加速空洞本体 (第 2 節)、HOM 減衰機構 (第 3 節) 及び、GBP の連結構造 (第 4 節) について述べる。また、RF 区間全体に関する問題として、結合インピーダンス (第 5 節) と加速モードの連成振動効果 (第 6 節) について、シミュレーション研究の結果を示す。

2. 加速空洞本体

図 2 に示す様に、加速モードとして 508.887MHz の TM_{010} モードを連続的に励振するためのピルボックス型空洞である。材質は、フランジや GBP 連結部等を除

表 1: DR のデザイン・パラメータ (抜粋)

Energy	1.1	GeV
Number of bunches / ring	4	
Circumference	135.5	m
Maximum stored current	70.8	mA
Maximum bunch current	8	nC
Energy loss per turn	0.091	MV
Horizontal damping time	10.9	ms
Injected-beam emittance	1700	nm
Equilibrium emittance (h/v)	41.4 / 2.07	nm
Total cavity voltage	1.4	MV
Equilibrium bunch length	6.5	mm
RF frequency	508.887	MHz
Momentum compaction factor	0.0141	
Chamber inner diam. (norm. cell)	32	mm

き、高純度の無酸素銅 (加速モード電場に大きくさらされる部分はクラス 1) とし、定格加速電圧は空洞あたり 0.7MV (壁面損失電力: 約 130kW) とした。アレス空洞の定格加速電圧は空洞あたり 0.5MV であるが、1997 年度に KEK/AR 加速器の西トンネル直線部にて実施したアレス空洞試験機の高電力試験の結果に基づき、空洞あたり 0.7MV を定格とした。

ピルボックス型空洞には、上下に HOM 導波管それぞれ 2 本ずつ、可動チューナポート (ICF203 フランジ使用) 1 つ (水平方向からの角度: 55°)、可動チューナ用ビューポート (ICF70 使用) 1 つ、入力結合器用ポート (ICF203 フランジ使用) 2 つ (内 1 つを排気ポートとして使用)、GBP の連結部 2 箇所、加速モード測定用モニター・ポート (ICF34 使用) 4 箇所が付く。本空洞は、チューナ関連部を除いて左右・上下に鏡面对称であり、また、HOM 導波管を除いてビーム軸方向に鏡面对称な形状である。

3. HOM 減衰機構

本加速構造は、アレス空洞と同じく、2 種類の HOM 減衰機構を備えている。ひとつは上下に伸びる HOM 導

* tetsuo.abe@kek.jp

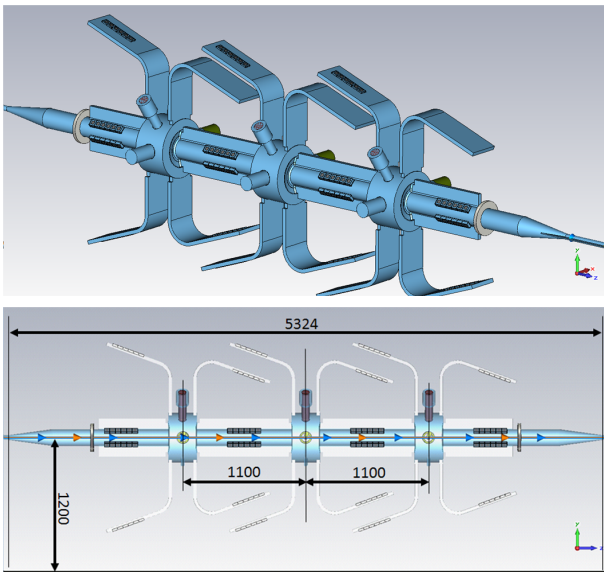


図 1: RF 区間における加速構造の全体図 (RF シミュレーション用ソリッドモデル)。

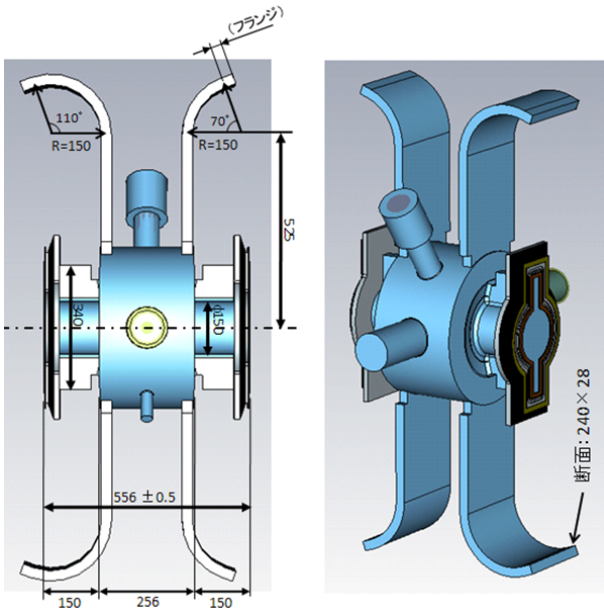


図 2: 加速空洞本体 (RF シミュレーション用ソリッドモデル、及び、GBP 連結構造の概念図)。

波管で、高次の TM 単極モードと垂直方向偏極の TM 双極モードを減衰させる。もうひとつは GBP であり、水平方向偏極の TM 双極モードを減衰させる。HOM 吸収体としては、アレス空洞の GBP で用いたものと同じ SiC 形炭化珪素 (材質: CERASIC[®]-B; 以下、SiC) [6] を用いる。

3.1 HOM 導波管ロード

図 3 に示す様に、内寸法 240mm × 28mm の断面の SUS 製矩形導波管に、SiC タイル 6 枚を 1 セットとした HOM 吸収体 1 式を E 面の中央に装填した構造を持つ。ここで、SiC タイルの表面を E 面内側へ 12mm 突き出

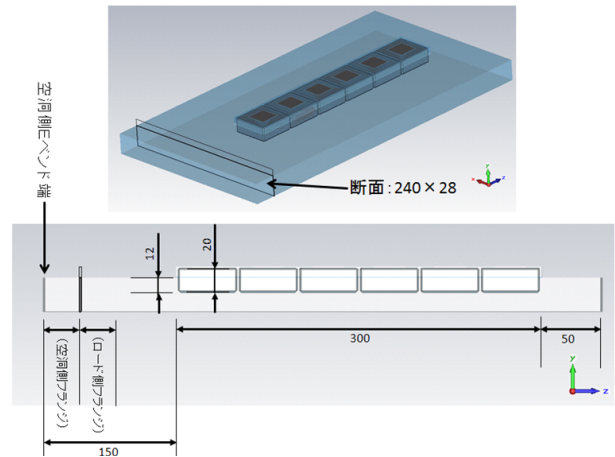


図 3: HOM 導波管ロード (RF シミュレーション用ソリッドモデル)。

した。

TM モードの遮断周波数は、GBP に関しては 1.5 GHz だが、RF 区間外 (テーパ管の外側) の円形ダクト (内径: 40mm) では 5.7 GHz であるため、本ロードに対しては 6GHz くらいまでの広帯域にわたって十分な性能が要求される。図 4 に、CST MW STUDIO (以下、MWS)^[7] の周波数ドメイン・ソルバーを使用して計算した、HOM 導波管ロード単体での反射係数を示す。1GHz から 6GHz までほぼ 0.2 以下の十分な吸収性能を得ている。1GHz 以下に関しては、問題となる TM_{011} モードに対応する周波数 (0.76GHz) で可能な限り小さい反射となるよう、SiC タイル表面の E 面内側への突き出し距離を調整した結果、12mm とした。

SiC タイルは、SUS 製の枠をろう付けした銅板にろう付けし、その SUS 製の枠を HOM 導波管ロードに溶接する。

GdfidL^[8] を使った時間領域有限差分計算のシミュレーションにより、本ロードでの最大 HOM 吸収パワーは導波管あたり約 30W 程度であることがわかっている。アレス空洞で使用した SiC タイルは、テストスタンドでの実験より 1 式あたり 1kW 以上のパワー吸収能力のあることが実証されており (但し、1.25Hz の単一周波数に対して) 本 HOM 導波管ロードでの HOM 吸収パワーはそれよりも遥かに小さい^[4]。

3.2 溝付ビームパイプ

図 5 に示す様に、SUS 製の GBP に SiC タイル 4 式を溶接する。ここで、溶接する SiC は HOM 導波管ロードに用いるものと同じである。さらに、ビームパイプ両端に連結構造を溶接する。本溝 GBP は、TE モードの他、空洞間を行き来する高次 TM モードを吸収する減衰器の役割を果たす。

GdfidL を使った時間領域有限差分計算のシミュレーションより、最大 RF 吸収パワーはパイプあたり約 300W である。これは SiC タイル 4 式に対する値であるが、テストスタンドで実証した 1kW 以上のパワー吸収能力よりも十分低い^[4]。

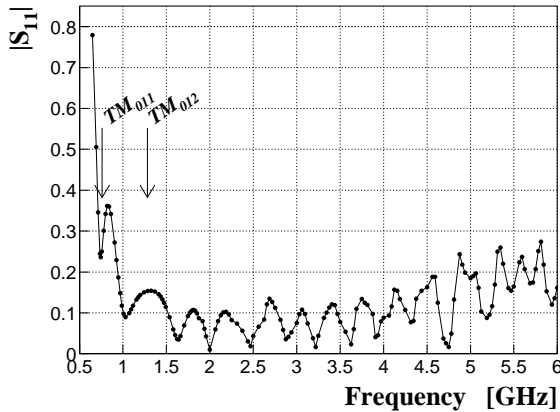


図 4: HOM 導波管ロード単体に対する反射係数 ($|S_{11}|$) のシミュレーション結果。

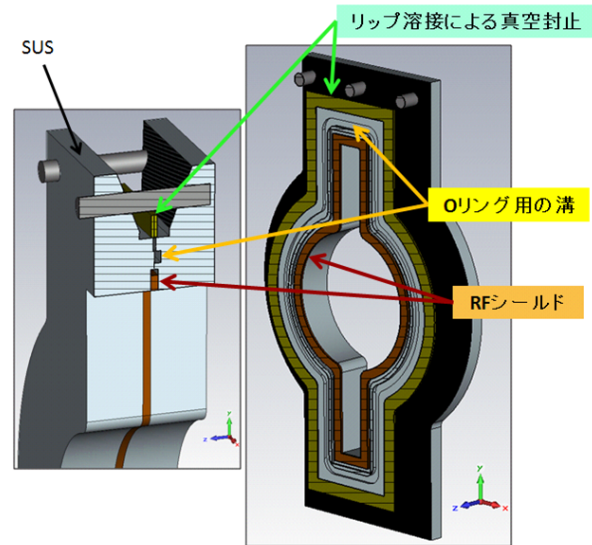


図 6: 溝付ビームパイプの連結構造 (概念図)。

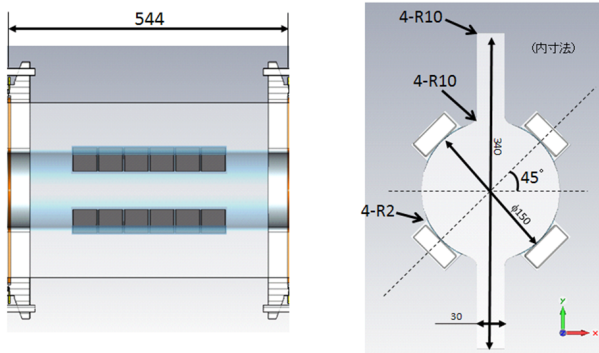


図 5: SiC タイル形 HOM 吸収体を装填した溝付ビームパイプ (RF シミュレーション用ソリッドモデル)、及び、接続構造の概念図。

4. 溝付ビームパイプの連結構造

図 6 に示す様に、最外部でリップ溶接により真空を封止し、最内部に十分な RF コンタクト能力を持つ RF シールドを有する構造を持つ。ここで、RF シールドとしてフィンガー型またはガスケット型を検討中である。仮真空封止の目的で、溶接つばと RF シールドの間に O リング用の溝を設けている。本構造は、アレス空洞の結合空洞と貯蔵空洞の連結部の構造を基にしている。本連結部は溶接後に面出し加工を行い、連結面はビーム軸に対して高い垂直度を出す必要がある。

5. 結合インピーダンス

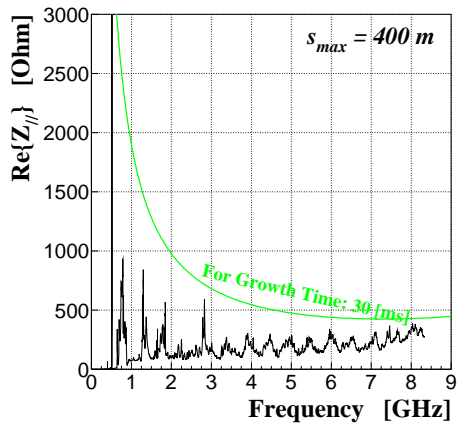
本加速構造は、空洞 3 台 (最大) 及び内径 150mm から 40mm へのテーパ管 2 本があるため、結合バンチ不安定性 (Coupled Bunch Instability; 以下、CBI) を引き起こすインピーダンス源となりうる。そこで、関係する加速構造全体のソリッド・モデルを作成し (図 1)、それに対して GdfidL による時間領域有限差分法計算を行い、第一原理的に RF 区間全体の結合インピーダンスを求めた。ここで、デフォルトのメッシュサイズは 2.0 mm、ビーム軸付近や細かい構造の箇所は 0.5 mm のメッシュ

サイズとした。生成されたメッシュ・セルの個数は約 10 億個、使用したメモリは約 6GB である。この条件で、PC クラスタ上の 128 個の計算コアを用いた並列計算を実行し、長距離ウェークポテンシャルを求め^[9]、そのフーリエ変換でインピーダンスを計算した。計算結果を図 7 に示す。RF 区間の HOM インピーダンスによる結合バンチ不安定性の増大時間は、DR の放射減衰時間 (進行方向: 5ms、水平・垂直方向: 10ms) より十分遅いことが確認できた。

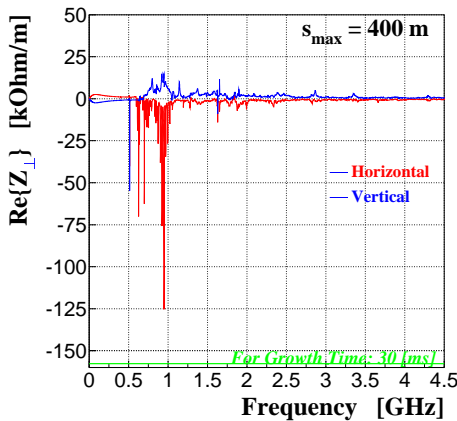
6. 加速モードの連成振動効果

加速空洞では、周波数チューナや入力結合器の存在により、水平方向の幾何学的対称性が破れている。このため、加速モード (TM₀₁₀) に水平方向偏極の TM 双極モードが混合し、GBP 内 TE モードと結合する。また、GBP は、内径 150mm の円形ダクトと内寸法 30mm 340mm の断面の矩形導波管を重ね合わせた構造をしているため、TM₀₁ モードの遮断周波数は 1.5 GHz と加速モード周波数 (508.887MHz) より十分高いが、TE モードに関しては最低の遮断周波数が 575MHz と加速モード周波数に近い。以上のことから、GBP 内の TE モードを介した加速モード間の連成振動効果が無視できないのではないかと指摘がなされた^[10]。我々は、この効果を数値シミュレーションにより見積もった。

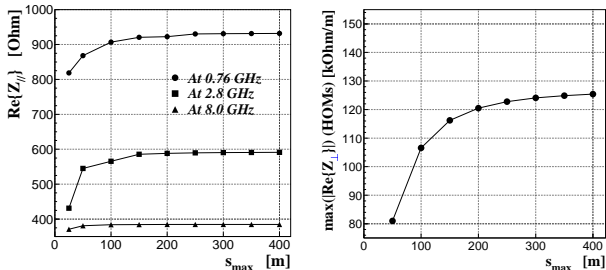
まず、簡単のため、図 8 にあるような 2 連空洞系を考える。ここで、ふたつの空洞の間面に電氣的短絡 (E-short)、または、磁氣的短絡 (H-short) の対称面を設定し、それら 2 つの対称面に対してそれぞれ加速モード (基準振動) の周波数を計算する。そして、その差 (加速モード間の結合度に比例) をとって連成振動効果を見積もる。本来 SiC は損失のある材料として扱うべきだが、計算時間が長くなってしまったため、無損失近似を用いた。SiC での損失を考慮すると空洞間を行き来する高周波は減衰し、無損失で解いた結果より結合度 (周波数差) は小さくなるはずなので、無損失近似の使用は問題無いと考える。



(a) 進行方向の結合インピーダンス。



(b) 水平・垂直方向の結合インピーダンス。



(c) 計算したウェークポテンシャルの距離の関数として (進行方向)、(d) 計算したウェークポテンシャルの距離の関数として (水平・垂直方向)。

図 7: RF 区間全体の結合インピーダンス。30ms の増大時間 (Growth time) に相当する CBI の閾値を周波数の関数として重ねた。ウェークポテンシャルは 400m まで計算したが ($s_{max} = 400\text{ m}$)、(c), (d) より $s_{max} = 400\text{ m}$ で十分であることがわかる。

加速モード周波数を計算するための固有モード・ソルバーとしては、MWS と GdfidL の 2 つを使い、計算結果を比較した。MWS では固有値解法アルゴリズムとして Jacobi-Davidson 法を用い、6 面体メッシュと完全境界近似 (曲面を正確に近似できる) を使った。ここで、デフォルトのメッシュサイズを 30mm とした (細かい構造付近

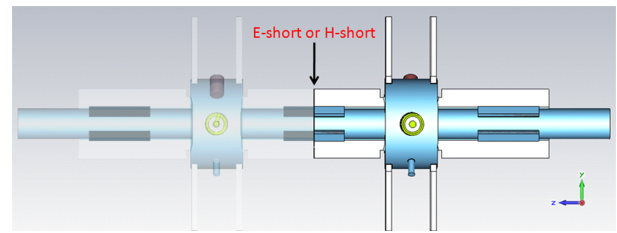


図 8: 2 連空洞系。

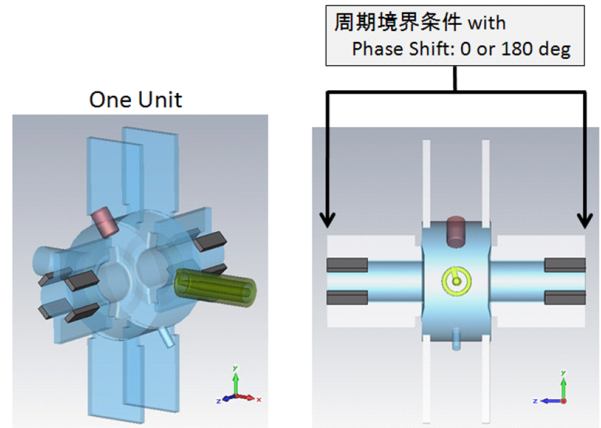


図 9: 無限個の空洞系。

では、より細かいメッシュが自動生成される)。GdfidL では、固有値解法アルゴリズムとして Tuckmantel の方法が用いられている。ここでも 6 面体メッシュであるが、MWS の完全境界近似のように滑らかな曲面近似はできないものの、PC クラスタ上の大規模並列計算により、デフォルトのメッシュサイズを 2mm まで小さくできた。図 10-(a) に、計算結果を周波数チューナの位置 (15mm がホームポジション) の関数として示す。MWS と GdfidL でモード周波数の計算結果に 3MHz 程の差があるが、これは曲面の近似法の違いによると思われる。図 10-(b) に示す様に、ふたつの周波数の差は 10Hz 程度ある。これは加速モードの Q 値の典型的な幅である 20kHz^[11] よりも遥かに小さい。周波数の差に関して MWS と GdfidL とで結果がよく合っていることから、数百 MHz の周波数同士の引き算から求めた僅かな差 (10Hz 程度) は数値計算の誤差ではなく、物理的なものであることがわかる。

次に、図 9 にあるように、ひとつの空洞の上下流に周期境界条件を課し、無限個の空洞系に対して加速モードの 0 モードと π モードの周波数の差を求めてみる。図 10-(c) と (d) にその結果を示す。周波数の差は 2 連空洞系に対する結果のおよそ 2 倍である。

3 連空洞系の場合の連成振動効果は、2 連空洞系と無限個空洞系の間と考えられ、加速モードの連成振動効果は無視できる程小さいことがわかる。

7. まとめと今後

最大定格 2MV の全加速電圧を保証する 3 連空洞構成の加速構造を設計した。本構造は、すべての関係する HOM を十分に減衰させる機構を備えている。RF 区間

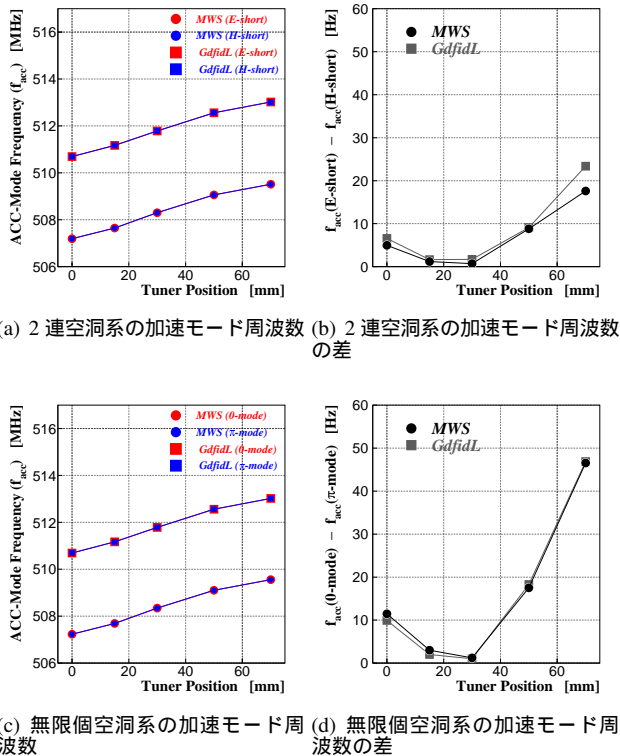


図 10: 加速モードの連成振動効果。

全体の HOM インピーダンスによる結合パンチ不安定性の増大時間を数値シミュレーションにより求め、放射減衰時間よりも 3 倍以上遅いことがわかった。また、加速モードの連成振動効果を異なるシミュレーション・ソフトウェアで評価した結果、十分無視できることを確認した。

機械的な構造に関する問題点として、溝付ビームパイプにおける連結構造の RF シールドの具体形が課題として残っている。

2011 年度には、空洞本体、HOM 導波管ロード、溝付ビームパイプをそれぞれ 1 台ずつ、試験機を製作する。2012 年度に実機空洞 1 号機を、2013 年度に実機空洞 2 号機を製作する予定である。そして、2014 年度秋に予定されているダンピングリング立ち上げ時には、中央空洞の場所にダミーダクトを入れた空洞 2 台構成（定格全加速電圧：1.4MV）でスタートする。その後、必要に応じて、実機空洞 3 号機の製造・インストールを行う。

参考文献

[1] T. Kageyama et al., in Proceedings of the 1st Asian Particle Accelerator Conference (APAC 98), Tsukuba, Japan, 1998 (KEK Preprint No. 98-45).

[2] T. Abe, T. Kageyama, H. Sakai, Y. Takeuchi and K. Yoshino, "RF Accelerating Structure for the Damping Ring of the SuperKEKB Injector," *In the Proceedings of 1st International Particle Accelerator Conference: IPAC'10, Kyoto, Japan, 23-28 May 2010*, pp WEPE087.

[3] M. Kikuchi et al., "Design of Positron Damping Ring for Super-KEKB," *In the Proceedings of 1st International Particle Accelerator Conference: IPAC'10, Kyoto, Japan, 23-28 May 2010*, pp TUPEB054.

[4] The 16th KEKB Accelerator Review Committee, February 07-09, 2011: <http://www-kekb.kek.jp/MAC/2011/>.

[5] T. Kageyama, "Grooved beam pipe for damping dipole modes in RF cavities," KEK-PREPRINT-91-133, 1991.

[6] 竹内 保直 他, 「HOM 吸収体で使用する SiC セラミックスの高周波誘電特性の制御」、本 proceedings (PaperID: TUPS137).

[7] <http://www.cst.com/>

[8] <http://gdfid.de/>

[9] 1 日で約 80m 進む。

[10] 赤井 和憲 (KEK)、私信。

[11] 加速モードの無負荷 Q 値は約 30000 より、 $508.887 \text{ MHz} / 30000 \approx 20 \text{ kHz}$ 。