

DEVELOPMENT OF RF ACCELERATING CAVITY FOR THE POSITRON DAMPING RING AT SuperKEKB

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 of SuperKEKB based on the nano-beam scheme. We present a 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 main rings with extremely low trip rates. In this paper, we present results of low-power RF measurements and high-power tests of the prototype cavity.

SuperKEKB 陽電子ダンピングリング用高周波加速空洞の開発

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 DR のデザイン・パラメータの一部を示す。DR の加速構造の設計においては、以下の基本条件を課した：

1. 加速モード周波数は主リングと同じく 508.887MHz。
2. 長期安定運転の実績があり、十分な Higher-Order-Mode (以下、HOM) 減衰機構を備えた加速構造をベースとする。
3. RF 区間内のビーム軸方向に 3.8 m の領域 (ベローズ、ゲートバルブ、テーパ管は含まず) に収まること。
4. 全加速電圧の定格を 1.4MV とする (但し、最低でも 1.6MV まで拡張可能であること)。

上記第 4 項目については、Coherent Synchrotron Radiation (CSR) による単バンチ不安定性を抑える目的で、要求加速電圧が初期の 0.26 MV から 5 倍以上になった。さらに、加速構造の設計を検討し始めた当初は CSR 効果の見積りに不定性があり、1.4MV を定格としたものの、それでは不十分である可能性が指摘されていた^[1]。

我々は、CSR 効果の見積りに不定性があること、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に注目し、KEKB 加速器での長期安定運転の実績のあるアレス空洞^[2, 3]をベースにして、最大 2 MV の全加速電圧を保証し、且つ、すべての関係する HOM を十分に減衰させる機構を備える 3 連空洞構成 (図 1) を提案・設計した^[4]。

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、HOM 導波管ロード、溝付ビームパイプ (Grooved Beam Pipe ; 以下、GBP)^[5]である。本加速構造は、これらをブロックのように組み立てる方式である。

限られた RF 区間 (全長 5360mm) に加速空洞 3 台、テーパ管、ベローズ、ゲートバルブを設置するため、

以下の工夫を行った：

- 加速空洞間の GBP の共有化
- GBP で TM、TE 両モードを吸収 (アレス空洞の GBP は TE モードのみを吸収)
- GBP の連結部にはフランジを用いない構造を採用
- HOM 導波管ロードの HOM 吸収体としてタイル形炭化珪素 (SiC)^[6, 7]を採用 (アレス空洞の場合は、タイル形 SiC よりも大きい砲弾形 SiC^[7]を用いている)

本加速構造では、各加速空洞内の電磁場に独立性があり、加速空洞セルの個数が可変である一方、全体としては機械的に 3 台 1 体型であり、いわば「マルチ・単セル空洞」であることが特徴である。

前回の報告^[4]では、本加速構造の全体像と各コンポーネントの説明、及び、結合インピーダンスと加速モードの連成振動効果に関するシミュレーション結果を示した。今回の報告では、2011 年度に製作した DR 用加速空洞本体 (以下、DR 空洞) の試験機について、低電力 RF 測定と大電力試験の結果について述べる。

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

* tetsuo.abe@kek.jp

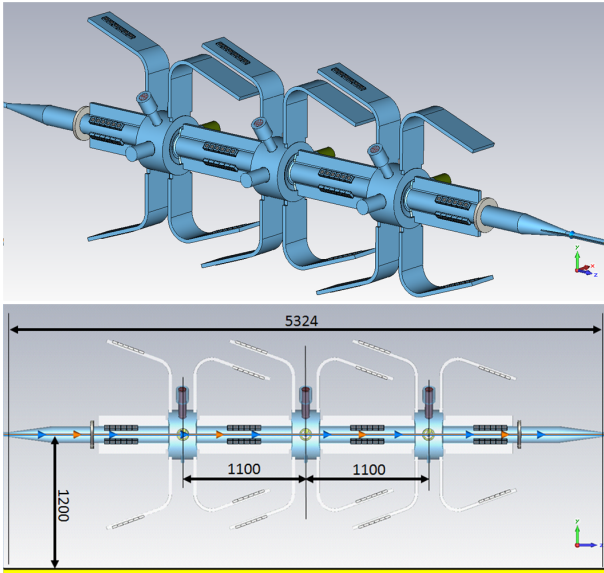


図 1: DR 用加速構造の全体図 (電磁場シミュレーション用ソリッドモデル)。青色は真空領域。灰色は SiC タイル。黄色は加速器トンネルの床面。下図内の矢印は、ビームを示す。

2. DR 空洞試験機

DR 空洞の概念図 (電磁場シミュレーション用ソリッドモデル) を図 2 に示す。DR 空洞は、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。高い電磁場にさらされる部分の形状と冷却系はアレス空洞と同じとした。これにより、1997 年度に実施したアレス空洞試験機の限界性能試験の結果を用いることができ、DR 空洞の定格として 0.7 MV / 空洞 (壁面損失電力: 約 130kW)、努力目標として 0.8 MV (壁面損失電力: 約 180kW) を定めた。

空洞の材質は、フランジと GBP 連結部を除き、高純度の無酸素銅 (高い電磁場にさらされる部分はクラス 1(C1011-C1)^[8]) である。DR 空洞には、アレス空洞同様、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。DR 空洞は、チューナ関連部を除いて水平・垂直方向に鏡面对称であり、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。

DR 空洞は、ひとつの円筒と 2 枚の端板から構成され、それらを最終的な工程で各ポートと共にろう付けする構造になっている。我々は、2011 年度に DR 空洞の試験機を製作した^[9]。

3. 低電力 RF 測定とシミュレーション

RF 空洞の開発・製作において、ネットワークアナライザを使った低電力 RF 測定を行い、結果が予想通りであることを確認することは必須である。ここでは、加速

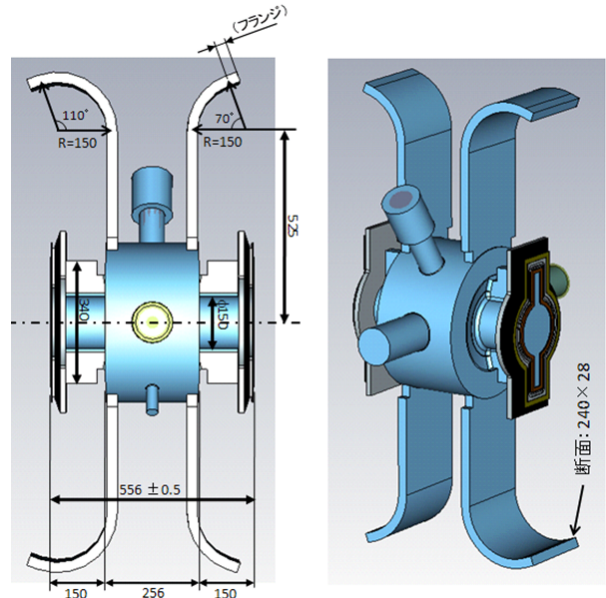


図 2: DR 空洞 (電磁場シミュレーション用ソリッドモデル)。

モード周波数、内部 Q 値、入力結合器の外部 Q 値に関する測定、及び、シミュレーションの結果を示す。尚、入力結合器^[10]と可動チューナは KEKB 加速器 / アレス空洞の運転で使用したものを再利用し、運転時と同じセットアップ (チューナ位置は 15 mm 内側のホームポジション) とした。

3.1 加速モード周波数

図 3 に加速モード周波数の測定結果、及び、シミュレーション結果を示す。本測定は空洞のろう付け前に行ったもので、円筒と 2 枚の端板はボルト締めにてクランプした。ここで、加速モードの内部 Q 値が理論値の半分以上出ることを条件に、締め付けトルクを決めた。また、各ポートと可動チューナ (いずれもモックアップ)、HOM 導波管 (直管部のみ) もクランプして取り付けした。測定では、入力結合器に導波管-同軸変換器を取り付けポート 1 とし、DR 空洞端板に取り付けたピックアップ (同軸アンテナ) をポート 2 とした。そして、2 つの S パラメータ: S_{11} 、 S_{21} で同じ周波数になることを確認しながら測定を進めた。

シミュレーションでは、本測定時の状態を厳密に再現したソリッドモデルを使った。シミュレーション・ソフトウェアは CST MICROWAVE STUDIO^[11] (以下、MWS) を使い、メッシュとしては曲面 4 面体を使った。図 4 に、曲面 4 面体で表現した本ソリッドモデルの例を示す。加速モード周波数は、 $\arg S_{11}$ の共振周波数付近での振る舞いから求めた (例えば、文献^[12]参照)。曲面 4 面体を使った本計算では、メッシュが粗い場合 (例えば、図 4(a)) でもメッシュが細かい場合 (例えば、図 4(b)) でも結果が殆ど変わらず、曲面 4 面体メッシュによる計算の収束性の良さがうかがえる。

測定結果は 509.191MHz (内部真空・物温 30^[13] に換算)、シミュレーションからは 509.374 MHz であり、その差は僅かに 0.036% であった。

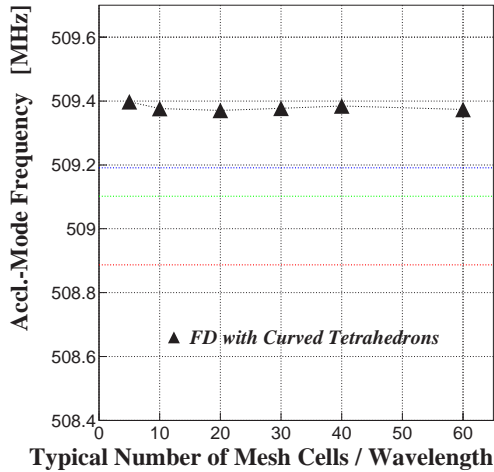


図 3: 加速モード周波数のシミュレーション結果をメッシュサイズの関数として表示 (三角形プロット)。青色の線は対応する測定値。緑色の線は周波数調整後の測定値。赤色の線は目標周波数 (508.887 MHz)。

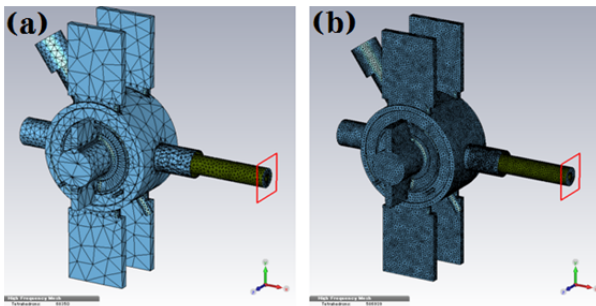


図 4: 電磁場シミュレーション用ソリッドモデルを曲面 4 面体で分割した図。曲面 4 面体セルの典型的な大きさが、(a) 波長の 5 分の 1 の場合、(b) 波長の 40 分の 1 の場合。赤い四角はシミュレーション上のポート 1 を示す。

DR 空洞には、アレス空洞と同じく、一方の端板の内表面に 2.5 mm の高さの土手があり、それを削ることにより周波数を最大 700 kHz 弱下げることが出来る。今回は、周波数調整のための削り代を 0.4 mm 削り、シミュレーションの予言 (−100 kHz) とほぼ同じ −90 kHz であることを測定により確認した。この周波数調整後の目標周波数 (508.887 MHz) との差は約 200 kHz であったが、可動チューナで十分調整可能な範囲であるため、更なる周波数調整は行わなかった。

尚、空洞のろう付け前後の周波数変化は 2 kHz と測定誤差内であり、ろう付けにより周波数が変わらないことも確認した。

3.2 内部 Q 値 (Q_0)

入力結合器のカップリング・ループの角度 (以下、ループ角度) の関数として測定結果を図 5(a) に示す。ここで、測定値は S_{11} より求めた (例えば、文献^[14]の 409 ページ辺りを参照)。また、空洞の物温 20 換算で示している。定数でフィットした結果は、29186。1%の測

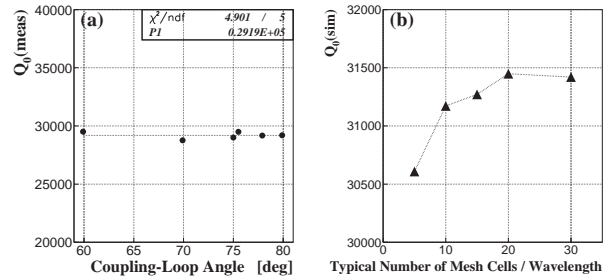


図 5: 内部 Q 値。(a) ループ角度の関数としての測定値 ($Q_0(\text{meas})$) と定数フィット値。(b) 測定時の状態を厳密に再現したソリッドモデルを用いて計算した結果 ($Q_0(\text{sim})$) を、曲面 4 面体の典型的なサイズの関数として表示。

定誤差を仮定した χ^2 / 自由度 は 0.98 であり、 Q_0 がループ角度に依存しない事実と合っている。また、測定時の状態を厳密に再現したソリッドモデルを使って固有モード解析により Q_0 理論値を計算した。ここで、100%IACS の電気伝導率 (5.80×10^7 S/m) と表面無欠陥を仮定した。結果は図 5(b) に示すように 31420 である (曲面 4 面体の典型的なサイズが波長の 30 分の 1 の場合の結果)。従って、測定値はこの理論値の 93%あり、DR 空洞試験機の Q_0 は十分な値であることを確認した。

3.3 外部 Q 値 (Q_{ext})

入力結合器の Q_{ext} についても、測定とシミュレーションの結果を比較した。ここで、測定値は S_{11} より求めた (例えば、文献^[14]の 409 ページ辺りを参照)。また、クロスチェックとして、上記の Q_0 測定値から求めた値:

$$Q_{\text{ext}} = \frac{Q_0}{\beta} \quad (1)$$

と比較し、両者の差を図 6 の黒丸プロットの上下エラーバーの大きさに反映させた (殆ど見えないくらい小さい)。ここで、結合度 β はリターンロスから計算した。

シミュレーションに関しては、2通りの独立な方法で行った。ひとつは図 6 の青色三角形プロットで、MWS を使った周波数領域計算である。メッシュは図 7(a) にあるような曲面 4 面体を用い、 $\arg S_{11}$ の共振周波数における傾きから Q_{ext} を求めた (例えば、文献^[12]参照)。もうひとつは図 6 の赤色四角形プロットで、GdfidL^[15] を使った固有モード解析と時間領域計算を組み合わせた方法である^[16]。GdfidL では 6 面体メッシュしか使えないが^[17]、PC クラスタ上での大規模並列計算が可能のため、非常に小さいメッシュサイズで計算を行える。ここでは、入力結合器のカップリング・ループ付近で 0.5 mm サイズ、カップリング・ループから離れるに従って大きくし、最大メッシュサイズを 4.0 mm とした (図 7(b))。GdfidL によるシミュレーションの第 1 ステップとして、入力結合器の同軸管の長さと同境界条件 (電氣的短絡、または、磁氣的短絡) を空洞の同調が取れるように設定し、固有モード・ソルバーにて加速モードを求めた。次に、第 2 ステップとして、入力結合器の同軸管の境界条件を吸収境界条件に変え、先に求めた加速モードを初期フィールドとして時間領域計算を 40 サイクル行う。こ

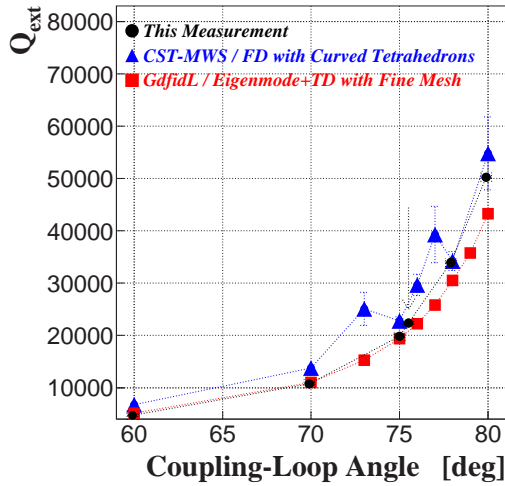


図 6: 入力結合器の外部 Q 値をループ角度の関数として表示。ループ角度 0 (90) は最大 (最小) 結合に対応。黒色の丸プロットは測定データ。青色の三角形プロットは、MWS を使い $\arg S_{11}$ の共振周波数周辺での変化から計算した結果。赤色の四角形プロットは、GdfidL を使い固有モード解析と時間領域計算から求めた結果。

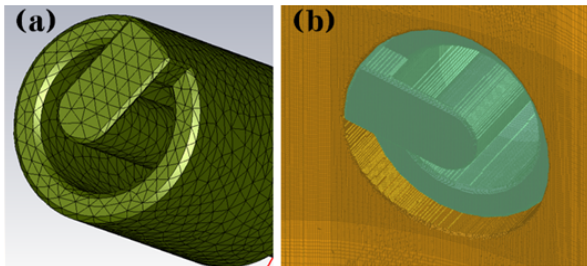


図 7: 入力結合器のカップリング・ループ付近のメッシュ。(a) 曲面 4 面体 (MWS)。 (b) ファインメッシュ 6 面体 (GdfidL)。同軸管内導体の外径は 33.4 mm である。

の時の入力結合器ポートにおける出力電力履歴の例を図 8 に示す。そして、第 3 ステップとして、20~40 サイクルの間の出力電力の平均値 (P_{rad}) と 30 サイクルの時点での空洞内電磁場エネルギー (U_{em}) から Q_{ext} を、

$$Q_{ext} = \omega \frac{U_{em}}{P_{rad}} \quad (2)$$

で求める。ここで、 ω はモードの角周波数である。

図 6 において、MWS の結果は、メッシュが比較的粗いせいか、ふらつきが見られる。GdfidL の結果はループ角度 75 以下ではよく合っている一方、ループ角度 75 以上では、僅かではあるが、系統的にずれている (原因については考察中)。結論としては、ふたつのシミュレーション結果は測定結果と合っており、 Q_{ext} についても問題の無いことを確認した。

尚、運転時の Q_0 がおよそ 24000 と予想していたため、大電力試験の際のループ角度を 75.5 (低電力測定での結合度が 1.3 強) に設定した。

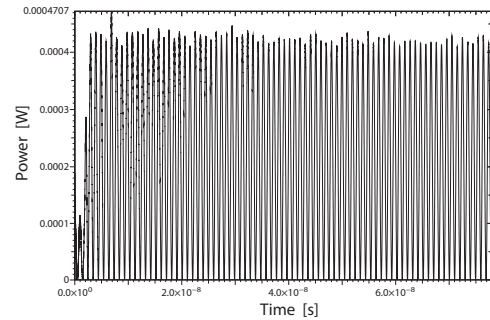


図 8: 入力結合器ポートから出て行く高周波電力を 40 サイクルまで計算した結果の例。

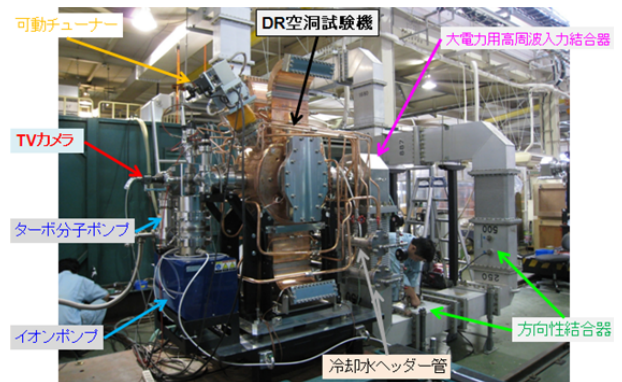


図 9: 大電力試験のセットアップ。

4. 大電力試験

4.1 セットアップ

DR 空洞試験機を地上の放射線シールド内に設置し (図 9)、1MW (最大) 連続波出力のクライストロンからの高周波電力を、入力結合器を通じて DR 空洞試験機に投入した。真空排気は入力結合器と反対側のポートから行い、ターボ分子ポンプとイオンポンプを併用した。空洞冷却水は定格の毎分 150L 程度を流した。

尚、低電力 RF 測定時と同様、入力結合器と可動チューナーは KEKB 加速器 / アレス空洞の運転で使用したものを再利用した。入力結合器については、耐マルチパクタ用微細溝付 [18] を使用した。

4.2 エージング

図 10 に 2012 年 6 月から 7 月の間に行ったエージング履歴を示す。空洞電圧 V_c は、空洞への入力電力 (P_{in}) と空洞からの反射電力 (P_{ref}) の測定値から、以下の式により求めた:

$$V_c = \sqrt{R_{sh} \times (P_{in} - P_{ref})} \quad (3)$$

ここで、

$$R_{sh} = (R_{sh}/Q_0) \times Q_0 \quad (4)$$

$$Q_0 = \beta \times Q_{ext} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1 + \sqrt{P_{ref}/P_{in}}}{1 - \sqrt{P_{ref}/P_{in}}} \quad (6)$$

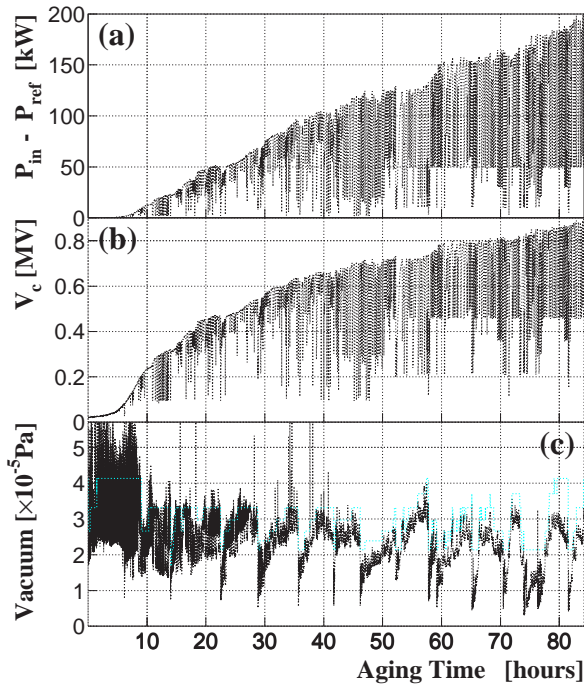


図 10: エージング履歴 (10 秒おきの値)。(a) 空洞への入力電力 (P_{in}) から反射電力 (P_{ref}) を引いた電力の履歴 (P_{ref}/P_{in} は 1% 程度以下)。(b) 空洞電圧 (V_c) の履歴。(c) 真空圧力の履歴。本エージングでは、空洞内の真空圧力が基準値 (水色の線) より低い場合に入力電力を上げ、高い場合は入力電力を下げるようコンピュータで自動制御した。本図では、DR 空洞試験機へ高周波電力を投入した時間の内、目標電力に向けて入力電力を上げようとしている場合 (入力電力が設定した目標電力より低い場合) のみを考慮している。

である。また、 Q_{ext} と R_{sh}/Q_0 は高周波にさらされる面の形状にのみ依存するので、それぞれ、低電力 RF 測定、シミュレーションで得た値を用いた。

最終的には、実質 84 時間のエージングで、努力目標である 0.8 MV を大きく上回る空洞電圧 : 0.896 MV (空洞入力電力 : 約 200 kW) まで到達した^[19]。途中、 $V_c = 0.8$ MV 辺りから隣接する一般区域での放射線量が規制値に近づいたため、頻りに放射線量を測定すると共に、放射線シールドを段階的に増強しながらエージングを進めた。

エージング中の空洞内真空度は、空洞電圧を上げて行ったにもかかわらず、徐々に良くなっていった (図 10(c))。また、入力結合器の反対側に取り付けた TV カメラ (図 9) で観測された空洞内の連続的発光も、徐々に暗くなっていった。これらのことから、着実にエージングが進んでいったことがわかる。

5. まとめ

最大定格 2MV の全加速電圧を保証し、すべての関係する HOM を十分に減衰させる機構を備える 3 連空洞構成の加速構造を提案・設計し、2011 年度、その加速

空洞本体の試験機を製作した。

加速モード周波数、内部 Q 値、入力結合器の外部 Q 値に関する低電力 RF 測定を行い、シミュレーションによる結果とよい一致を得た。

2012 年 6 月から 7 月にかけて、本試験空洞の大電力試験を行い、空洞電圧 0.9 MV 近く (空洞入力電力 : 約 200 kW) まで到達した。今後、定格空洞電圧である 0.7 MV、及び、努力目標である 0.8 MV における安定性試験 (空洞電圧を一定にした連続運転試験) を行う。

今回の試験で得た情報 (細かい寸法の変更や、架台-冷却水パイプの干渉、冷却不足の箇所等) は、2012 年度製作中の実機 1 号機へフィードバックする。

参考文献

- [1] 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.
- [2] T. Kageyama *et al.*, in Proceedings of the 1st Asian Particle Accelerator Conference (APAC 98), Tsukuba, Japan, 1998 (KEK Preprint No. 98-45).
- [3] K. Akai *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 499, 45 (2003).
- [4] 阿部 哲郎 他、「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」、第 8 回日本加速器学会年会 (2011 年) (Paper ID: TUPS131)。
- [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 セラミックの高周波誘電特性の制御」、第 8 回日本加速器学会年会 (2011 年) (PaperID: TUPS137)。
- [7] Y. Takeuchi *et al.*, KEK-PREPRINT-97-36, PAC'97, 1997.
- [8] アレス空洞はクラス 1 でなく C1011 製である。この点はアレス空洞と DR 空洞で異なる。
- [9] 2011 年度、加速空洞本体の他に、HOM 導波管ロードと GBP の試験機をそれぞれ 1 台ずつ製作し、現在試験中である。
- [10] F. Naito *et al.*, in Proceedings of the 1st Asian Particle Accelerator Conference (APAC 98), Tsukuba, Japan, 1998 (KEK Preprint No. 98-44).
- [11] <http://www.cst.com/>
- [12] T. Abe *et al.*, "RF Accelerating Structure for the Damping Ring of the SuperKEKB Injector," *In the Proceedings of 1st International Particle Accelerator Conference: IPAC'10, 2010* (PaperID: WEPE087).
- [13] 空洞冷却水の温度が 30 のため、DR 空洞本体 (円筒と端板) は 30 換算の寸法で加工した。
- [14] Edward L. Ginzton, "Microwave Measurements," Literary Licensing, LLC.
- [15] <http://www.gdfidl.de/>
- [16] <http://www.gdfidl.de/HowTos/External-Q/index.html>
- [17] DR 空洞のループ角度は 90 に近いため、結合度関係の精密なシミュレーションを行いたい場合は、デカルト座標に基づく 6 面体メッシュよりも、4 面体メッシュの方が有利である。
- [18] T. Abe, T. Kageyama, H. Sakai, Y. Takeuchi and K. Yoshino, "Multipactoring suppression by fine grooving of conductor surfaces of coaxial-line input couplers for high beam current storage rings," Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 102001 (2010).
- [19] 一般区域の放射線安全規制から、 $V_c = 0.896$ MV の保持時間を約 10 秒に制限した。