

# SuperKEKB 陽電子ダンピングリング用高周波加速空洞の大電力試験 HIGH POWER TESTING OF THE RF ACCELERATING CAVITY FOR THE POSITRON DAMPING RING AT SUPERKEKB

阿部 哲郎<sup>\*A)</sup>、竹内 保直<sup>A)</sup>、影山 達也<sup>A)</sup>、坂井 浩<sup>A)</sup>、吉野 一男<sup>A)</sup>  
Tetsuo Abe<sup>\*A)</sup>, Yasunao Takeuchi<sup>A)</sup>, Tatsuya Kageyama<sup>A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>A)</sup>, Kazuo Yoshino<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

## 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 have proposed and developed a radio-frequency (RF) accelerating structure for the DR, which can supply 2 MV accelerating voltage at maximum with three accelerating cavities to be installed in a limited space, forming “multi single cell” structure. This structure is based on the higher-order-mode (HOM) damped structure of the normal-conducting accelerating cavity system ARES<sup>[1]</sup>, where 32 ARES cavities had been successfully operated at the KEKB main rings with extremely low trip rates. Last fiscal year, we made the first production-version cavity (hereafter called cavity No.1) based on the development of the prototype cavity (hereafter called prototype). In this paper, we present results of low-power and high-power tests of the cavity No.1, compared with the results of the prototype.

## 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（以下、DR）が導入される。Table 1 に DR のデザイン・パラメータの一部を示す。我々は、DR の要求を十分に満たす加速構造を提案し<sup>[2]</sup> (Fig. 1、Table 2)、試験用空洞（以下、試験機(prototype)）の製作、及び、大電力試験を行った<sup>[3]</sup>。今回の報告では、試験機の製作・試験の結果に基づき 2012 年度に製作した実機 1 号機空洞（以下、1 号機(cavity No.1)）について、低電力 RF 測定の結果、及び、大電力試験の結果等について述べる。

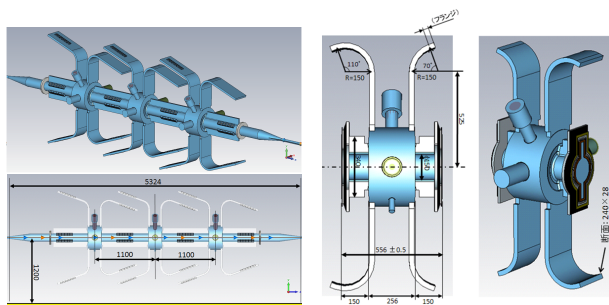
Table 1: Design Parameters of the DR

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

## 2. 電解研磨

試験機では空洞内表面に対して、ろう付け前に酸洗クロメート処理を施したが、1 号機の両端板の高周波にさらされる面に対しては<sup>[4]</sup>、酸洗クロメート処理の代わりに、電解研磨処理を施した（エッチング量：約 40 μm）。

\* tetsuo.abe@kek.jp



(a) Overall view. The blue (gray) region indicates vacuum (HOM absorbers). The arrow shows the direction of the beam.

(b) Accelerating cavity without HOM waveguide loads.

Figure 1: Accelerating structure of the DR (solid model).

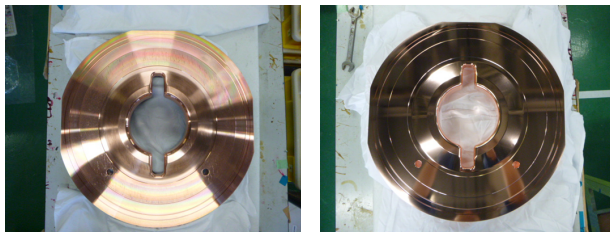
Table 2: Design Parameters of the Accelerating Cavity

Accelerating-mode frequency	508.887	MHz
Cavity voltage (spec.)	0.7	MV
Cavity voltage (challenge)	0.8	MV
$R_{sh}/Q_0$	150	$\Omega$
$Q_0$	~ 30000	

Figure 2 に、電解研磨前後の端板の写真を示す。電解研磨により、表面粗度： $R_a$  ( $R_y$ ) は約 1.5 μm (約 8 μm) から約 0.2 μm (約 1 μm) と大きく改善し、鏡面となった。尚、試験機と 1 号機を比較して、大電力の高周波性能に関する違いは、当該電解研磨のみである（電気設計、及び、空洞本体冷却水系は同じ）。

## 3. 低電力 RF 測定

ここでは、加速モード周波数、及び、内部 Q 値に関する測定、及び、シミュレーション結果を示す。尚、入



(a) Before electro-polishing ( $R_a \cong 1.5\mu\text{m}$ ,  $R_y \cong 8\mu\text{m}$ ) (b) After electro-polishing ( $R_a \cong 0.2\mu\text{m}$ ,  $R_y \cong 1\mu\text{m}$ )

Figure 2: Endcap of the cavity No.1.

力結合器<sup>[5,6]</sup>と可動チューナは試験機で用いたものを再利用し、加速器運転時と同じセットアップ(チューナ位置は15mm内側のホームポジション等)とした。

### 3.1 加速モード周波数

ネットワークアナライザを使い、加速モード周波数を下記工程段階にて測定した:

- 1 周波数調整削り前(空洞内部:空気)
- 2 周波数調整削り後、空洞本体のろう付け前(空洞内部:空気)
- 3 空洞本体のろう付け後、出荷前(空洞内部:窒素)
- 4 大電力試験のセットアップ中(空洞内部:窒素)
- 5 大電力試験開始直前(空洞内部:真空)

ここで、測定した周波数は、物温 30<sup>[7]</sup>・内部真空に換算した。また、上記 1~5 の番号は、以下、測定番号(Measurement Number)として引用する。Figure 3 に加速モード周波数の測定結果を示す。測定セットアップ及び測定方法は試験機の時と同じである<sup>[3]</sup>。

測定番号 1 は最初の周波数測定である。この状態に対するシミュレーションの予言は 509.374 MHz であり<sup>[3]</sup>、今回の測定値との差は 0.019% である。試験機の時当該周波数差: 0.036% と合わせて、加速モード周波数を決める寸法をシミュレーションのみから決定出来る事がわかる。測定番号 2 は、周波数調整のための削り代(一方の端板の高い磁場にさらされる面に 2.5mm の高さの土手がある)を必要量削った後で、シミュレーションの予言: -386 kHz に対し、1号機では -372 kHz であった(試験機の時、シミュレーションの予言が -100 kHz、測定値が -90 kHz)。また、ろう付け前後(測定番号 2 と 3 の比較)での周波数変化は 32 kHz と少なく(試験機の時 2 kHz)、最終的には仕様の 508.887 ± 0.100 MHz を満たした。

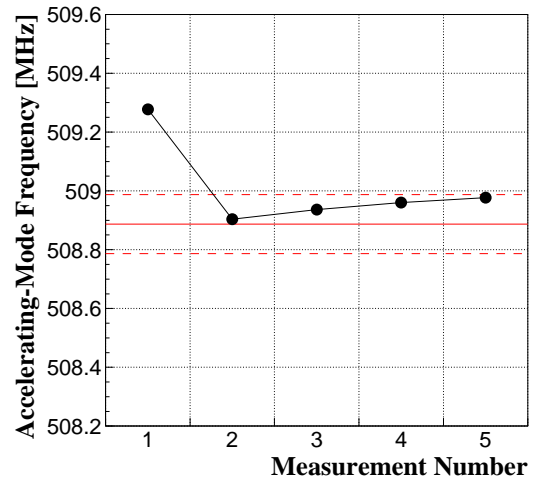


Figure 3: Measurements of the accelerating-mode frequency. The horizontal solid and dashed lines indicate a target frequency and its range ( $\pm 100$  kHz), respectively.

### 3.2 内部 Q 値

加速モードの内部 Q 値(以下、 $Q_0$ )を入力結合器のカップリング・ループの角度(coupling-loop angle。以下、ループ角度。)の関数として測定した結果を Fig. 4 に示す。ここで、測定値は入力結合器の  $S_{11}$  より求め、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、30506。1%の測定誤差を仮定した  $\chi^2 / \text{自由度}$  は  $2.565/7 = 0.366$  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数値計算した  $Q_0$  理論値は 31420 である<sup>[3]</sup>。ここで、電気伝導率は 100% IACS ( $5.80 \times 10^7$  S/m)、及び、表面無欠陥とした。1号機の場合、 $Q_0$  測定値は理論値の 97% あり、端板の電解研磨により試験機の時値(93%<sup>[3]</sup>)より有意に改善していることを確認した。尚、Fig. 5 に、当該固有モード解析により得られた加速モードの表面電磁場強度を示す。

## 4. 大電力試験

### 4.1 セットアップ

1号機のセットアップの様子を Fig. 6 に示す。本セットアップは試験機の大電力試験時の最終形態と、下記の除いて同じである:

- チューニング位相を得るための空洞入力波信号と空洞ピックアップ波信号、及び、インターロック用空洞反射波信号の伝送路
  - 空洞から(低電力 RF 制御系のある)制御室まで約 70m の同軸ケーブルで信号を伝送していたが、試験機の時には 30 年以上前に床下のピットを通じて敷設した同軸ケーブルを使用していた(現在は、その上に様々な実験機器がある)。制御室で観測した信号にふらつきがあったため<sup>[8,9]</sup>、1号機では、新たに地上で敷設した同軸ケーブルを用いた。

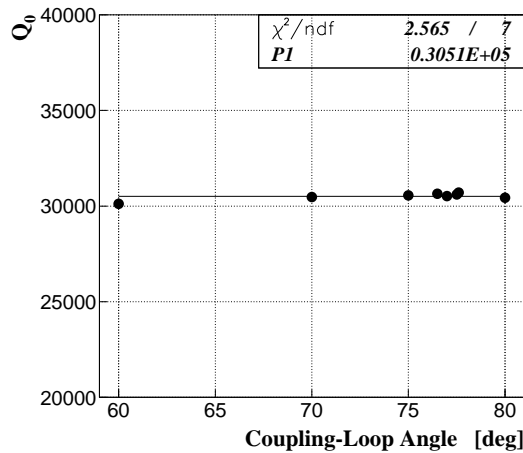
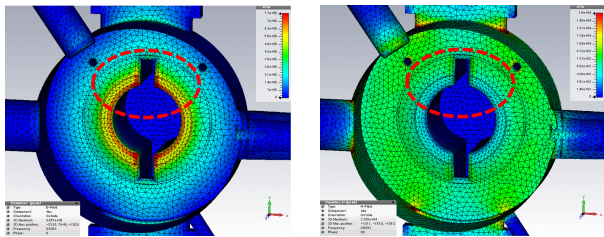


Figure 4: Unloaded quality factor ( $Q_0$ ) measured as a function of the coupling-loop angle of the input coupler with the movable tuner at its home position (15mm inside). The horizontal line indicates a result of fitting with a constant.



(a) Electric field strength. (b) Magnetic field strength.

Figure 5: Surface-field strengths for  $V_c = 0.7$  MV, shown together with the curved tetrahedral meshes used to estimate the theoretical  $Q_0$ . The region inside the red dashed ellipse is to be observed with the TV camera 2 shown in Fig. 6(a).

- 空洞電圧（以下、 $V_c$ ）を計算するための空洞入力波と空洞反射波の RF 電力測定法
  - 当該ふらつき問題のため、パワーセンサーを空洞間近の方向性結合器に直結し（Fig. 6(a) 参照）、パワーメータ（これも空洞間近に設置）の測定値をデジタル信号として、カテゴリ 6 のイーサネットケーブル（約 70m）経由で制御室内のコンピュータに取り込むようにした。

上記対策により、当該ふらつき問題は解決した。

試験機の大電力試験時と同様、508.887 MHz の大電力高周波は 1MW（最大）連続波出力のクライストロンで発生させ、導波管・入力結合器を通じて 1号機に投入した。また、真空排気は入力結合器と反対側のポートから行き、ターボ分子ポンプ（排気量：300 L/s）とスパッタイオンポンプ（排気量：400 L/s）を併用した。空洞冷却

水は約 130 L/min を流した。入力結合器と可動チューナは、試験機の大電力試験で用いたものを再利用した。

## 4.2 エージング

Figure 7 に 1号機のエージング履歴を、試験機と共に示す。試験機の時と同様、空洞電圧  $V_c$  は、空洞への入力電力（以下、 $P_{in}$ ）と空洞からの反射電力（以下、 $P_{ref}$ ）の測定値から、以下の式により求めた（但し、1号機では前述の通り、空洞間近に設置のパワーセンサーで測定）：

$$V_c = \sqrt{R_{sh} \times (P_{in} - P_{ref})} \quad (1)$$

ここで、

$$R_{sh} = (R_{sh}/Q_0) \times Q_0 \quad (2)$$

$$Q_0 = \beta \times Q_{ext} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1 + \sqrt{P_{ref}/P_{in}}}{1 - \sqrt{P_{ref}/P_{in}}} \quad (4)$$

であり、 $P_{in} - P_{ref}$  は RF 電力により測定した壁面損失電力、 $\beta$  は入力結合器の結合度で、エージング開始前の低電力にて  $\beta = 1.33$ （強結合）となるようにループ角度を調整した。また、入力結合器の外部  $Q$  値（ $Q_{ext}$ ）と  $R_{sh}/Q_0$ （ $R_{sh}$  はシャント・インピーダンス）は高周波にさらされる面の形状にのみ依存するので（つまり、温度や表面欠陥には依存しない）、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。本エージングでは、特に問題無く、仕様である 0.7 MV を大きく上回る空洞電圧：0.9 MV まで到達した。

試験機と比較して、1号機のエージング履歴には下記の特徴がある：

- エージング初期から真空度が良い
- トリップ頻度が少ない（Fig. 7 における黒線の濃度が違うことでわかる）

1号機と試験機で大電力高周波に関係する違いは端板の電解研磨のみなので、上記は電解研磨の効果である。尚、自動エージングのパラメータが違いため、 $V_c = 0.9$  MV に到達するのに要した時間の単純比較は出来ない。

空洞内部を見る手段としては、試験機の大電力試験時には、排気ポートから空洞内部の入力結合器を観察するために設置した TV カメラ（以下、TV カメラ 1）のみであった。1号機の大電力試験では新たに、ビームポートから空洞内部（端板）を観察するための TV カメラ（以下、TV カメラ 2）を設置した（Fig. 6(a) 参照）<sup>[10]</sup>。Figure 8 に、 $V_c = 0.82$  MV（ $P_{in} - P_{ref} = 156$  kW）（Fig. 7(b) のエージング期間中）において空洞反射波レベルのインターロック（以下、反射インターロック）が作動した時の当該カメラ映像の例を示す。空洞内放電による閃光が走り、反射波レベルが閾値を超えて、インターロックが作動したことがわかる。但し、当該閃光がどこから発生したかは、この映像だけからは判別出来ない。Figure 9 の例では、TV カメラ 2 で見ている端板上の輝点（連続的に発光）のひとつが、反射インターロック作動時に「噴火」したものである。再立ち上げ後には、「噴火」した位置に輝点は見られなくなった（Fig. 8(b) 参照）。



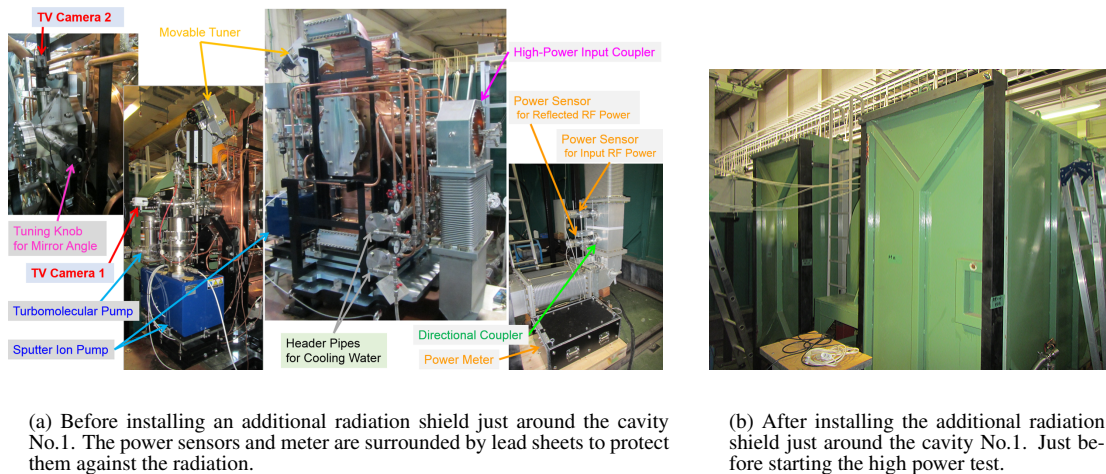


Figure 6: Setup of the high power test for the cavity No.1, surrounded by a radiation shield wall with a height of 2.4 m and a circumference of 24 m.

TVカメラ1及びTVカメラ2で観察した限りでは、空洞トリップ時の空洞内現象に特定の傾向(特定の箇所からの放電が多い等)は見られなかった。尚、TVカメラで観測されるこれらのような異常発光は、エージングが進むにつれて、少なくなっていた。

#### 4.3 内部 $Q$ 値の空洞電圧依存性

空洞電圧が高くなると空洞本体の温度が上がるため、 $Q_0$  値(または、シャント・インピーダンス)は劣化する。エージングで  $V_c = 0.9$  MV に到達した後に行った測定により得られたデータを Fig. 10 に示す。 $Q_0$  値の劣化の度合いは、 $V_c = 0.2$  MV ( $P_{in} - P_{ref} = 8.5$  kW) と比較して、 $V_c = 0.7$  MV ( $P_{in} - P_{ref} = 109$  kW) で 5.3%、 $V_c = 0.8$  MV ( $P_{in} - P_{ref} = 145$  kW) で 6.8% と小さく、空洞本体が十分に冷却されていることがわかった。

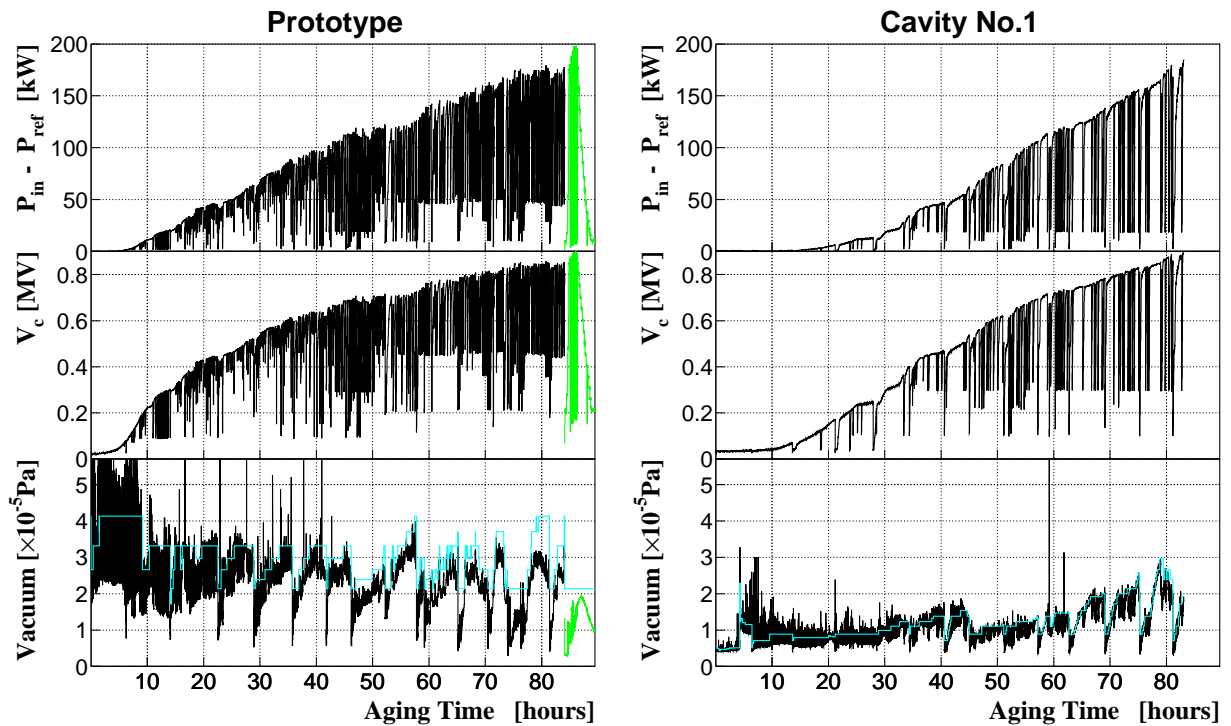
#### 4.4 安定性試験

Figure 7(b) で示したエージングで  $V_c = 0.9$  MV 到達後、一定の  $V_c$  を保持して、安定性の試験を行った。ここで、インターロックが作動した場合、その原因が空洞にあるのか、それとも他ににあるのか(例えば、低電力 RF 制御系やクライストロン)を知ることが必要である。我々は、Fig. 11 にあるように、508.887 MHz の生信号を直接オシロスコープで見ても、インターロック作動の原因を特定した。但し、クライストロン出力レベル(Output Level from the Klystron) は RF リニア検波器を通して見る。また、チューニング位相(Tuning Phase) は、位相

検波器のモニター用出力である。全てのオシロスコープにおいて、トリガー信号は RF スwitch のオン(TTL 出力 LO) からオフ(TTL 出力 HI) でかけた。Figure 11(a) で示した例は、手動で RF スwitch をオフにした時の波形である。トリガータイミングで低電力 RF 制御系(以下、LLRF) の出力波がゼロになり、空洞ピックアップ波の振幅には、空洞の負荷  $Q$  値(約 15000) による減衰時定数(約  $10\mu$  秒)が見えている。一方、Fig. 11(b) の反射インターロックが作動した例では、TVカメラにて当該インターロック作動時に空洞内放電が観測された。この場合の特徴は、空洞ピックアップ波が、負荷  $Q$  値による減衰時定数よりもはるかに短い時間で減衰することである。空洞以外が原因で反射インターロックが作動した例として、Fig. 11(c) を示す。RF スwitch が切れる(インターロックが作動する)  $3\mu$  秒程前から、クライストロン入力に変化が無いにもかかわらず、クライストロン出力が有意に下がり、同時に空洞からの反射波が大きくなっている。この場合は空洞以外が原因で RF スwitch が切れたので、空洞ピックアップ波には負荷  $Q$  値による減衰時定数が見えている。

まず、 $V_c = 0.80$  MV を保持する試験を行った。本試験は日中のみ行ったため、それぞれの日の立ち上げ時には  $V_c = 0.85$  MV まで一旦上げ、そこで 30 分間  $V_c = 0.85$  MV を保持後、その日の試験終了時刻まで  $V_c = 0.80$  MV を保持した。これを 5 日間行い、 $V_c = 0.80$  MV を保持した全時間は約 30 時間半、その間にインターロック作動は反射で 1 回のみであった。その時の

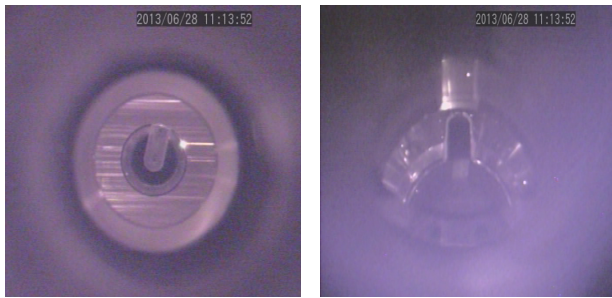




(a) Prototype-cavity aging performed from June to July, 2012. The green lines show data taken on the last day of this high power test to acquire calibration data of the RF-power measurements. This calibration data together with the calorimetric-power data have been used to re-calibrate the data which are shown in black here and were presented in [3], because of the fluctuation problem on the transmitted RF powers from the cavity to the control room.

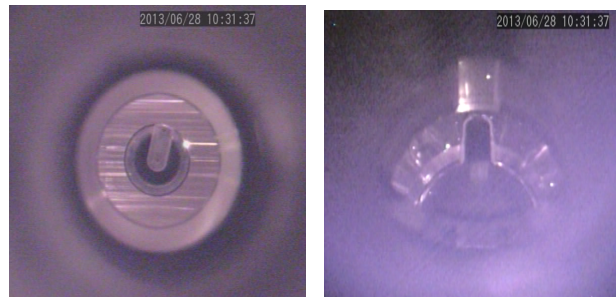
(b) Cavity No.1 aging performed from June to July, 2013.

Figure 7: Aging histories until  $V_c$  reached 0.9 MV with data points recorded every ten seconds plotted. Data with holding the input RF power and data for tuning the control system or klystron are excluded here. The light blue lines indicate the reference vacuum pressure specified in the automatic aging by computer control. If the vacuum pressure is higher than the reference, the power is slightly stepped down until the vacuum pressure becomes lower than the reference, and then the power is slightly stepped up as long as the vacuum pressure is lower than the reference.



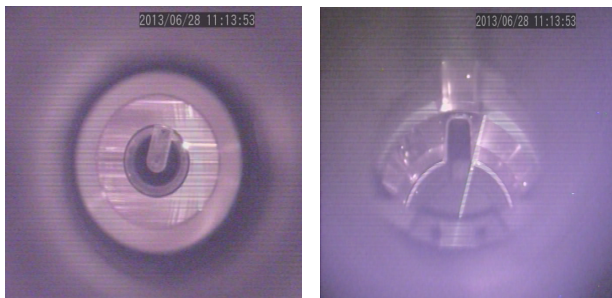
(a) Image of the TV camera 1 (1 second before the interlock worked).

(b) Image of the TV camera 2 (1 second before the interlock worked).



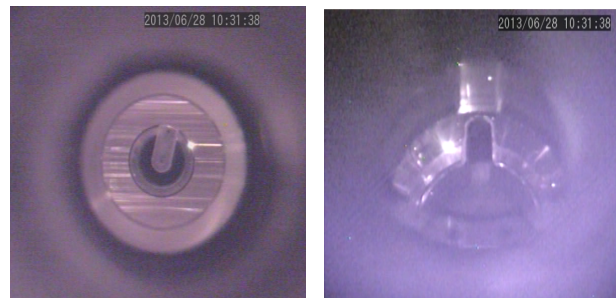
(a) Image of the TV camera 1 (1 second before the interlock worked).

(b) Image of the TV camera 2 (1 second before the interlock worked).



(c) Image of the TV camera 1 (just when the interlock worked).

(d) Image of the TV camera 2 (just when the interlock worked).



(c) Image of the TV camera 1 (just when the interlock worked).

(d) Image of the TV camera 2 (just when the interlock worked).

Figure 8: Example of the TV video images when the interlock by the reflected power worked. This interlock worked at 11:13:53 on June 28, 2013, where a lightning was observed. The TV camera 2 sees the region inside the red dashed ellipse shown in Fig. 5.

Figure 9: Example of the TV video images when the interlock by the reflected power worked. This interlock worked at 10:31:38 on June 28, 2013, where one of the bright spots exploded. The TV camera 2 sees the region inside the red dashed ellipse shown in Fig. 5.

オシロスコープ波形は Fig. 11(b) に酷似しており、TV カメラにて異常発光は観測されなかったが、空洞内放電による事象と判定した。

次に、 $V_c = 0.85$  MV を保持する試験を行った。同様に、 $V_c = 0.90$  MV を 30 分間保持後、その日の試験終了時刻まで  $V_c = 0.85$  MV を保持した。これを 3 日間行い、 $V_c = 0.85$  MV を保持した全時間は約 18 時間、その間にインターロック作動は反射で 2 回あったが、その 2 回とも、オシロスコープ波形は Fig. 11(c) に酷似しており、TV カメラにて異常発光も観測されなかったため、本期間中は空洞が原因のトリップは無かったと判定した。

次に、 $V_c = 0.90$  MV を保持する試験を行った。この場合は、 $V_c = 0.92$  MV を 30 分間保持後、その日の試験終了時刻まで  $V_c = 0.90$  MV を保持した。これを 3 日間行い、 $V_c = 0.90$  MV を保持した全時間は約 14 時間半、その間にインターロック作動は反射で 5 回あった。

その内の 2 回はオシロスコープ波形が Fig. 11(c) に酷似しており、その他の 3 回は Fig. 11(b) に酷似していた。従って、本期間中、空洞が原因のトリップは 3 回と判定した。

最後に、限界性能を調べる目的で、 $V_c = 0.95$  MV を保持する試験を行った。 $V_c = 0.95$  MV は現在の放射線申請上の上限値であるため、それ以上空洞電圧を上げることは出来ない。本大電力試験の最終 2 日間でこれを行い、 $V_c = 0.95$  MV (入力電力: 約 212 kW、壁面損失電力: 約 210 kW、空洞本体表面の最高温度: 約 80 ) を合計約 8 時間、途中反射インターロック作動が 2 回あったが、特に問題無く保持出来た。2 回の反射インターロックの内の 1 回はオシロスコープ波形が Fig. 11(c) に酷似しており、他の 1 回は Fig. 11(b) に酷似していた (TV カメラ 2 により空洞内放電も観測された)。従って、本期間中、空洞が原因のトリップは 1 回と判定した。

尚、Figure 12 に、 $V_c = 0.80, 0.95$  MV 一定保持試験

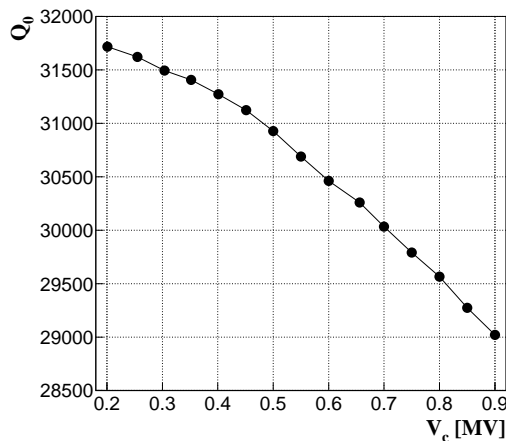


Figure 10: Unloaded quality factor measured as a function of the cavity voltage using Eq. (3), where the flow rate of the cooling water in the cavity body was about 130 L/min.

を行った期間より、それぞれ 1 日分の履歴を抜粋して示す。

#### 4.5 放射線量率

最後に、 $V_c = 0.9\text{MV}$  を目指してエージング中の放射線量率を Fig. 13(a) に示す。1 号機では試験機に比べて放射線量率が有意に低いことがわかり、ここでも電解研磨の効果が見えている。

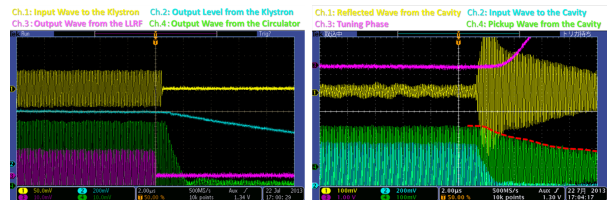
また、本試験中に放射線量率の下がっていく様子を Fig. 13(b) に示す。

### 5. 結論

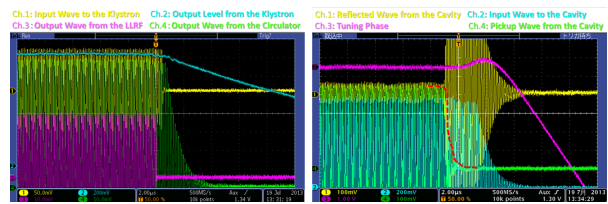
最大定格 2MV の全加速電圧を保証し、すべての関係する HOM を十分に減衰させる機構を備える最大 3 重連構成の加速構造を提案・設計・製造した。試験機空洞 (2011 年度製作、2012 年度試験) の開発・試験の結果を基に、2012 年度、実機 1 号機を製作した。そして、2013 年 6 月から 7 月にかけて大電力試験を行い、空洞電圧の仕様 (0.7MV) 及び、努力目標 (0.8MV) を大きく上回る 0.95 MV (空洞への入力電力: 約 212kW、壁面損失電力: 約 210kW、空洞本体表面の最高温度: 約 80) まで到達した。また、今回の安定性試験より、空洞電圧: 0.8 MV にて安定に稼働することを確認した。さらに、限界性能試験として、放射線申請上の上限である空洞電圧: 0.95 MV まで上げて保持したが、加速空洞としての高電界的・熱的性能限界は観測されなかった。

実機 1 号機では新たに、端板の高周波にさらされる面に対して電解研磨を施したが、試験機空洞 (電気設計、及び、空洞本体冷却水系は実機 1 号機と同じで、電解研磨無し) の測定・試験との比較から、下記に挙げる当該電解研磨による明らかな改善が得られた:

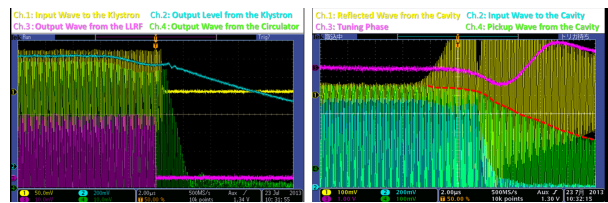
- 高い  $Q_0$  値
- エージング中の真空度が良い
- エージング中の空洞トリップ頻度が少ない
- 発生する放射線量率が低い



(a) When the RF switch was turned off manually.



(b) When a discharge inside the cavity occurred.



(c) When the output from the klystron suddenly changed.

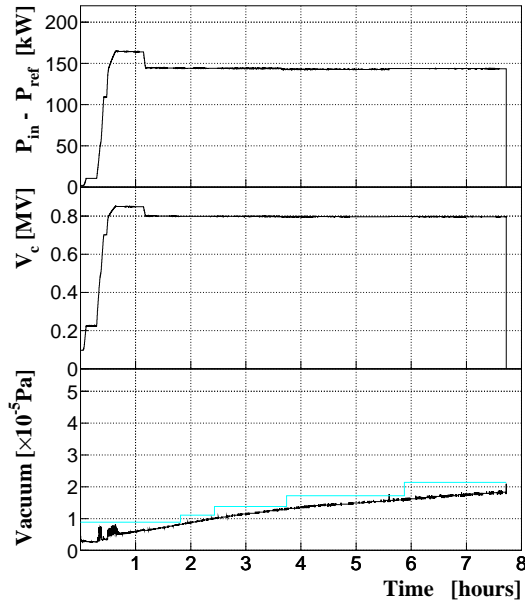
Figure 11: Waveforms of the oscilloscopes displayed with a time span of  $20\ \mu\text{s}$  ( $2\ \mu\text{s}/\text{div}$ ). The red dashed curves indicate the envelope of the pickup wave from the cavity No.1. The output from the circulator (toward the cavity) is almost equivalent to the output from the klystron.

今後は、HOM 導波管と溝付ビームパイプを含む全体組立試験を行う。また、DR 加速器トンネルにおけるインストール・アライメント手順を確立する。

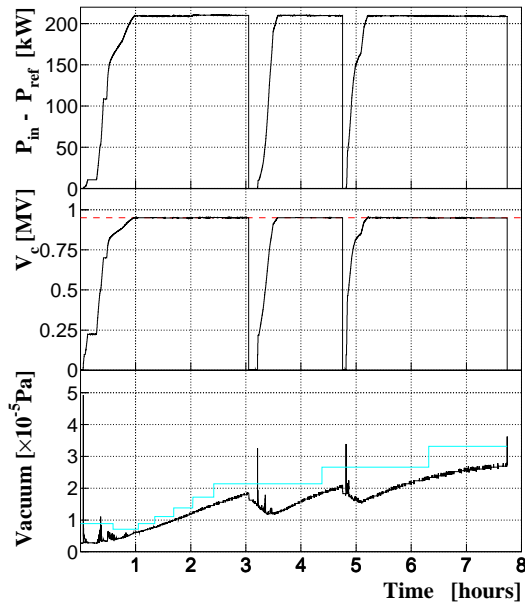
#### 参考文献

- [1] T. Kageyama, et al., 1st Asian Particle Accelerator Conference (APAC 98), Tsukuba, Japan, 1998 (KEK Report No. KEK-PREPRINT-98-45).
- [2] T. Abe, et al., "RF Accelerating Structure for the Positron Damping Ring of the SuperKEKB Injector", presented at the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2011 (Paper ID: TUPS131).
- [3] T. Abe, et al., "Development of RF Accelerating Cavity for the Positron Damping Ring at SuperKEKB", presented at the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2012 (Paper ID: THLR06).
- [4] DR 用空洞本体は、ひとつの円筒と 2 枚の円形端板 (いずれも無酸素銅クラス 1) をろう付けする構造になっている。
- [5] F. Naito, et al., in Proceedings of the 1st Asian Particle Accelerator Conference (APAC 98), Tsukuba, Japan, 1998 (KEK Preprint No. 98-44).



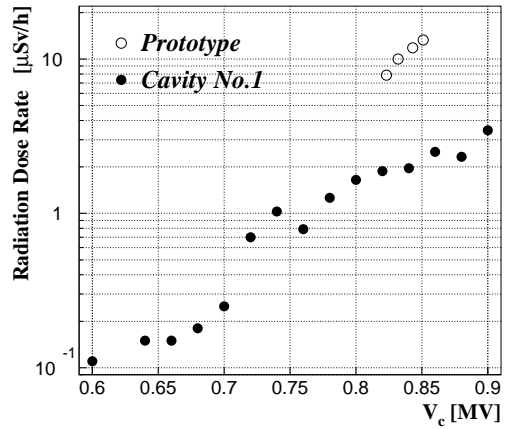


(a)  $V_c = 0.80$  MV holding test.

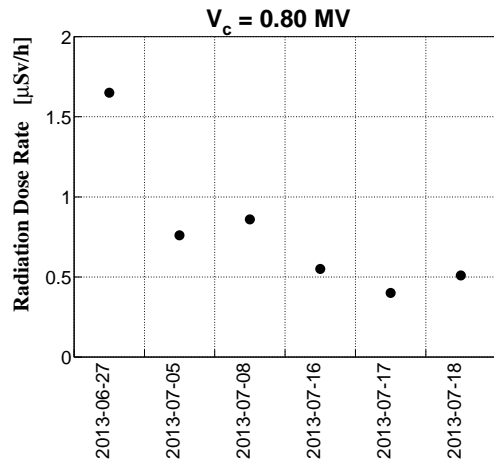


(b)  $V_c = 0.95$  MV holding test performed on the last day of the high power test of the cavity No.1. The red dashed line indicates  $V_c = 0.95$  MV which is the highest cavity voltage permissible by the current radiation control.

Figure 12: One-day histories with the same format as shown in Fig. 7, except that all data points recorded every one second are plotted. Each history starts around 9:15 and ends at 17:00 on each day.



(a) As a function of the cavity voltage, for the prototype (open circles) and cavity No.1 (closed circles), during the aging shown in Fig. 7. In the both cases, the radiation shield was fully installed as seen in Fig. 6(b).



(b) At  $V_c = 0.80$  MV, as a function of day, for the cavity No.1. The leftmost plot is a measurement before  $V_c$  reached 0.9 MV, and the other plots are after  $V_c$  reached 0.9 MV.

Figure 13: Radiation dose rate measured at the same position about 2 m away from the cavity No.1.

- [6] T. Abe, et al., "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).
- [7] 空洞冷却水（入側）の温度が 30 のため、DR 用加速空洞本体（円筒と端板）は 30 換算の寸法で加工した。
- [8] Tetsuo Abe, "Normal Conducting Accelerating Cavities for the MRs and DR of SuperKEKB", presented at the 18th KEKB Accelerator Review Committee, <http://www-kekb.kek.jp/MAC/2013/Report/Abe.pdf>
- [9] この問題のため、試験機では安定性試験を行わなかった。
- [10] ビーム軸線上は放射線量率が高いため、鏡をビーム軸線上に置いて観察するようにした。著者のひとり（坂井浩）の考案・設計による。