

話 題

超伝導加速空洞の高電界化に向けた研究(その2)

加藤 茂樹^{*1}, 佐伯 学行^{*1}, 沢辺 元明^{*1}, 西脇 みちる^{*1}, 早野 仁司^{*2},
両角 祐一^{*1}, 渡邊 謙^{*1}, Puneet Veer TYAGI^{*3}, 岩下 芳久^{*4}

Research on Superconducting Cavity for more High Gradient (II)

Shigeki KATO^{*1}, Takayuki SAEKI^{*1}, Motoaki SAWABE^{*1}, Michiru NISHIWAKI^{*1},
Hitoshi HAYANO^{*2}, Yuichi MOROZUMI^{*1}, Ken WATANABE^{*1},
Puneet Veer TYAGI^{*3}, and Yoshihisa IWASHITA^{*4}

Abstract

Efforts to produce high gradients in 1.3 GHz superconducting single-cell and 9-cell cavities started around 20 years ago. Many efforts and developments have been made and the TESLA technology became a baseline for cavity fabrication and surface treatment of XFEL and ILC cavities. Continuous effort for high gradient with high yield has been made to reach the ILC specification. However, the ILC goal of 35 MV/m@Q0=8E9 with 90% yield is still a little beyond the present state of the art. In our previous report, the optimization of the electropolishing facility by the chemical analysis, surface analysis and the coupon experiments have been discussed. In this report, research on the physical cleaning method, the optical observation of the cavity inner surface together with quench localization technique, the electromagnetic calculation for defect and a defect removal tool are discussed. Continuous research on gradient performance improvement of the superconducting cavity is in progress at KEK-STF.

6. 物理的洗浄法についての海外研究所との共同研究

前号報告¹⁷⁾の5節において、空洞の性能が制限される主な要因として、クエンチとフィールドエミッションがあると述べたが、この節では、これらの原因を取り除くための方法の開発を、アメリカのJLabやフランスのCEA Saclayといった海外の研究所との共同研究で行っている例を紹介する。空洞の電解研磨を行うと、研磨の反応中に、硫黄が析出することが知られている。その硫黄がもし空洞の表面に付着して、かつ電解研磨後の洗浄処理で除去できずに空洞内面に残ると、フィールドエミッションの原因となる。電解研磨の後処理として、空洞内部にある残存物質を除去するために、洗剤による洗浄や、高圧の超純水による洗浄を行っているが、現在のところ、フィールドエミッションを完全に克服したとは言い難い状況である。こういった、空洞内面の残存物質は、かなり強く空洞内面に付着している例も観察されている。こういった付着物を除去す

るために、半導体業界でのウェハー洗浄や液晶面洗浄で実績のある、スポンジによって物理的に拭き取ってしまうのが良いのではないかというアイデアに基づいて、まず試験片での実験を試みた。まず、2つのニオブ板の試験片を、前節で述べた実験室での電解研磨装置を使用して電解研磨する。1つの試験片は、超純水による1次洗浄のみを行い、もう1つ試験片は、1次洗浄の後に、スポンジで表面を拭き取る処理を追加する。一方、JLabでは、電圧を印加した針で試験片の表面を走査することによって、試験片表面にどれだけフィールドエミッションの種があるかを調べる装置がある。先ほどの2つの試験片をJLabに送り、その表面をこの装置で調べた結果を図25に示す。そこではフィールドエミッションの種は小さな三角形で示されている。左の1次洗浄のみの試験片ではたくさんのフィールドエミッターがあるのに対し、右のスポンジで拭き取りをした試験片では、よりフィールドエミッターが少ないことが判る。その基礎試験に基づいて、単セル空洞の内面をスポンジで拭き取るための試験機

*1 高エネルギー加速器研究機構

*2 高エネルギー加速器研究機構 (E-mail: hitoshi.hayano@kek.jp)

*3 総合研究大学院大学

*4 京都大学 化学研究所

を開発した。図 26 にその試験機の図面と写真を示す。折りたたみ式の構造体に 4 つのスポンジ片が取り付けられており、これを折りたたんだ状態で空洞に挿入した後、空洞内に洗剤液を導入しつつ、構造体を展開して回転させることで空洞内面を拭き取りことができる。さて、まずこのスポンジ拭き取り機による拭き取り処理が、空洞表面に対して無害であることを確認したいところである。このため、フランスの CEA Saclay 研究所と協力して、40 MV/m の電界性能が得られた単空洞を KEK に送ってもらい、これをスポンジ拭き取り機で処理し、再び Saclay に送り返して電界測定を行い、空洞の性能が劣化しないことを確認するように計画を

立てた。実際に、Saclay から空洞を送ってもらい、KEK においてスポンジ拭き取り処理を行った。しかし、Saclay から送られた空洞のビームパイプの長さが微妙にスポンジ拭き取り機の設計と異なったため、スポンジ片を固定するアルミの構造体が単空洞のアイリス部分と接触し、擦痕を残す結果となってしまった。この空洞は、確認のため Saclay に送り返して電界測定を行ったが、激しいフィールドエミッションで性能が制限された。この空洞をもう一度 KEK に送り返してもらい、局所研磨機による内面の修復を試みた。図 27 に、アルミの構造体で傷つけられた空洞内面と局所研磨と EP による修復後の写真を示す。このように、局所研磨機による研磨、さらになめらかに仕上げるための EP を行った後のアイリス部は、再び平滑な面になっていることが確認できたので、空洞を Saclay に送り返し、電界測定を行ったところ、36 MV/m まで性能が回復した。図 28 に、その時の電界測定の結果を示す。現在、この空洞をさらに電界研磨処理して 40 MV/m までの性能回復を行った後、元の計画に戻って、スポンジ拭き取り処理を再度試す計画である。また、フィールドエミッションがある単空洞を選び、スポンジ拭き取り処理を行う計画も予定している。既に述べたことだが、超伝導空洞の研究開発は、空洞製作や設備への投資が膨大であるため、ここに述べたように、既に超伝導空洞研究開発の施設を持っている他研究所との共同研究は非常に有効である。

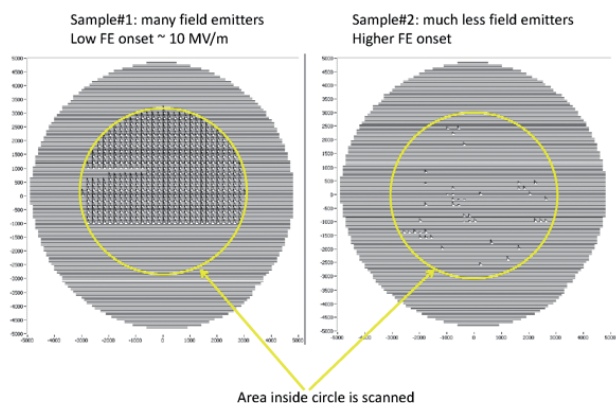


図 25 左：1 次洗浄のみを行った試験片の表面、右：1 次洗浄の後にスポンジの拭き取りを行った試験片の表面

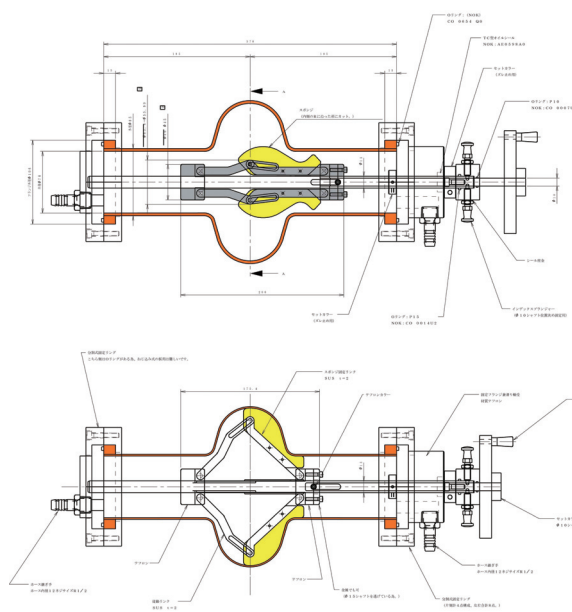
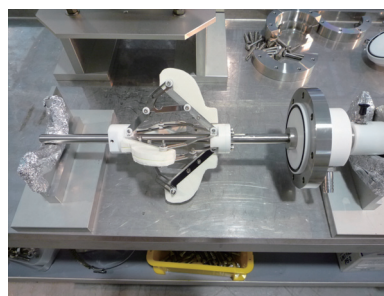
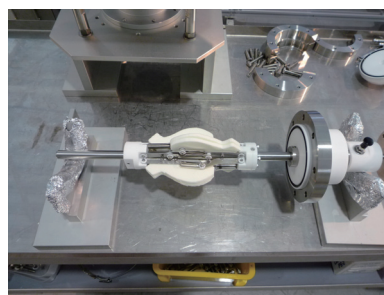


図 26 単セル空洞用の内面洗浄を行うスポンジ拭き取り機



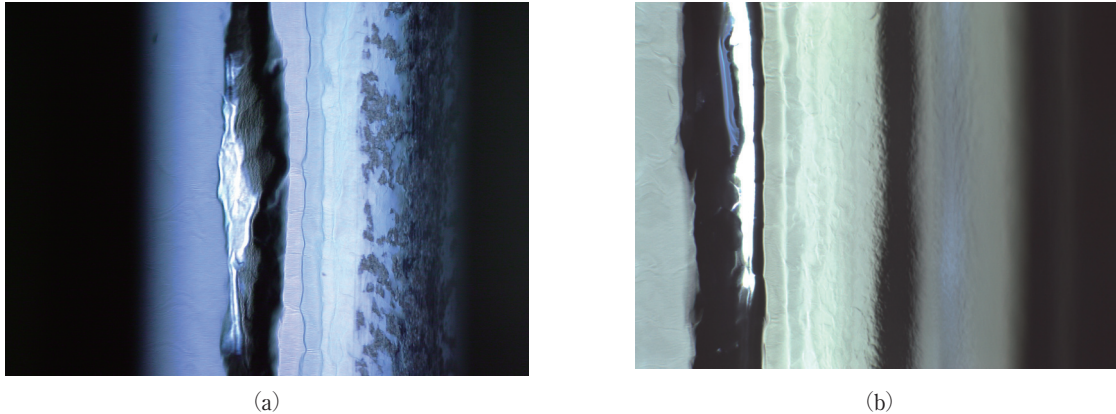


図 27 (a) アルミの構造体で傷つけてしまった空洞内面アイリス部分, 右の方に擦痕が見える. (b) 局所研磨機により研磨修復し, さらに EP を施した後の内面では擦痕は消えている. なお同様の箇所の撮影であるがカメラと照明が異なるため印象が異なる

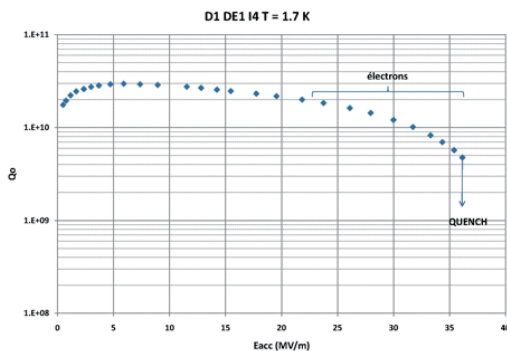


図 28 内面研磨と EP により修復した後の電界性能. 36 MV/m まで回復している

7. 内面検査カメラによって見つかった内面欠陥とシリコンラバー型取りによる欠陥形状計測

小型カメラや目視といった方法を用いた超伝導空洞内の内面検査は古くから行われてきた. 近年カメラシステムの高度化小型化に伴い, 画像の分解能が格段に向上し, これを用いる事により, これまで観測ができなかった空洞内部の小さな幾何学的な欠陥を検出できるようになった. 京都大学・KEK 間の共同研究開発により開発した小型高分解能カメラシステムでは角度分解できる特殊な照明方法を使用して鏡面である空洞内部の数 $10 \mu\text{m}$ までの大きさの幾何学的欠陥をコントラストよく捕らえる事に成功している^{18,19)}. 図 29 に内面検査カメラの構造をわかりやすく図示したイラストを示す. 直径 50 mm のアルミシリンダーの中にフォーカス調整可能な高分解能カメラと角度調整可能なミラーを内蔵させ, そのシリンダーに巻き付くよう

な短冊状の LED 照明のプラスチックライトガイドを備えている. さらに, そこで用いている短冊形光源と画像処理を組み合わせることにより, ビーム軸方向のみではあるが, 光学的に, 空洞内面凹凸の 2 次元プロファイルの計測が可能となった. この手法により得られた欠陥面角度と欠陥直径, そしてクエンチ電界との関係を図 30 に示す. これによると面角度 11 度以上の欠陥が空洞電界性能を 23 MV/m 以下に制限している様子である事がわかる. しかし, この面角度計測の方向は加速モード励振時の磁場の向きに対して直交する方向であるため, 表面付近磁場の表面形状によるエンハンスメントにより臨界磁場を超えて発熱にいたる効果を考えた場合, 情報としては不十分である. これまでは, 得られた 2 次元プロファイルを回転対称として取り扱ってきた. 測定可能な欠陥面の傾きは光源の位置と空洞形状で決まり, $\pm 20^\circ$ 以下である. また, これまでの検査結果から低電界でクエンチを起こした欠陥に見られる特徴の傾向として, 測定可能な傾きを超えた急勾配で斜面が変化する突起やピットであることが多いため, このカメラシステムでは対応しきれない状況である.

この問題を解消するために, また, 欠陥のより詳細な 3 次元プロファイルを得るために, シリコンラバーによる型取りを試みた. シリコンラバーは, 作業効率を上げるために, 短時間 (7 分で硬化開始, 30 分で完全硬化) で硬化するタイプ (Wacker Dental ADS931) を採用した. これにより形状計測時間の短縮化ができ, さらに空洞内面補修の際にも, 機械研磨, 型取り, 形状チェック, 再機械研磨といった工程が短時間で可能となった. 2 液混合した直後の固まる前のシリコンラバーを特殊な小型バケツにに入れて空洞内部に導入し,

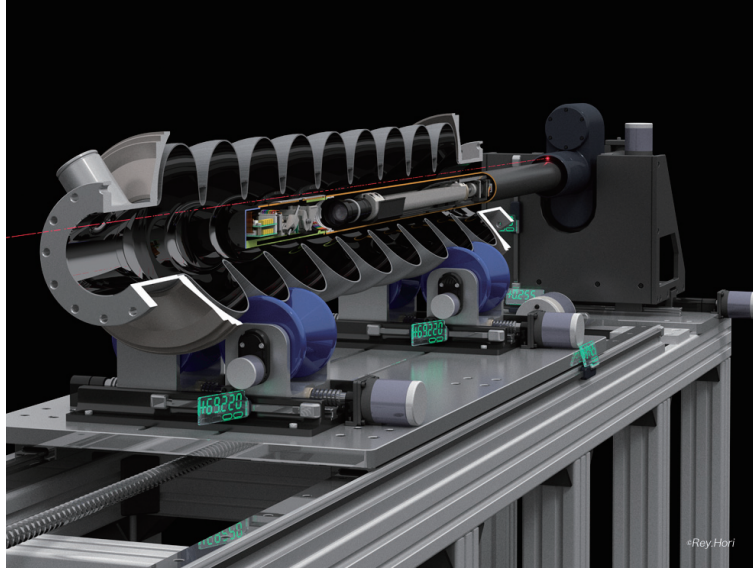


図 29 内面検査カメラの内部構造を示すイラスト

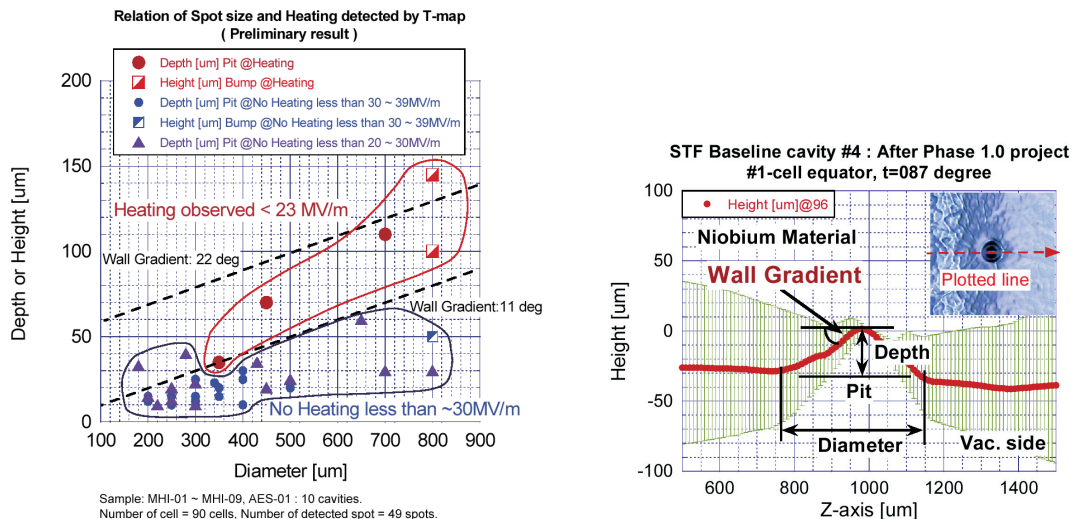


図 30 空洞内で見つかった欠陥の形状・サイズとクエンチが起こった電界強度との関係（左）。右図は左図中の形状（depth と Diameter）の定義

目的のセル箇所ではバケツを回転させてセル下部に流し込み、同時に引揚げ用の糸も垂らしておいて糸とともに固めてしまう。固まった後は空洞の外から糸を引揚げ、固まったシリコンラバーを剥がしとってくる手法である。シリコンラバーを用いることで、空洞内面の微細構造を詳細に再現することができ、また、このレプリカをスタイキャストといった高硬度かつ透過性の低いモールド材へ転写することで、レーザー顕微鏡や3次元デジタルマイクロスコープおよび接触式表面粗さ計を用いた3次元形状解析が容易に行えるようになった。この高硬度のレプリカを用いることで、機械的研磨による幾何学的欠陥除去手法において研磨のベンチテストが可能となり、研磨ツールの開発にも一役かっている。また電界測定時に装着される温度マッピ

ングの発熱箇所の同定結果との相関を調べることで、幾何学的欠陥の形状因子とクエンチが起こる電界強度との関係が詳細に分かる^{20,21)}。これは、空洞製作における許容する欠陥および傷のサイズなどの品質管理基準を定める上で非常に有用な情報となる。図 31 には米国 FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory) 研究所の AES-01 空洞の欠陥を内面検査カメラで捕らえたものを示すがこのカメラでは面角度は測定できない。図 32 に示すようにシリコンラバーによりネガレプリカを作成し、スタイキャストにより硬度のあるポジレプリカを作成した。そのレプリカをプロファイルメーターで面角度を計測した結果が図 33 である。磁場と交差する方向では面角度が 31° から 34° であったが、磁場と平行な方向では 41° というより大きな面

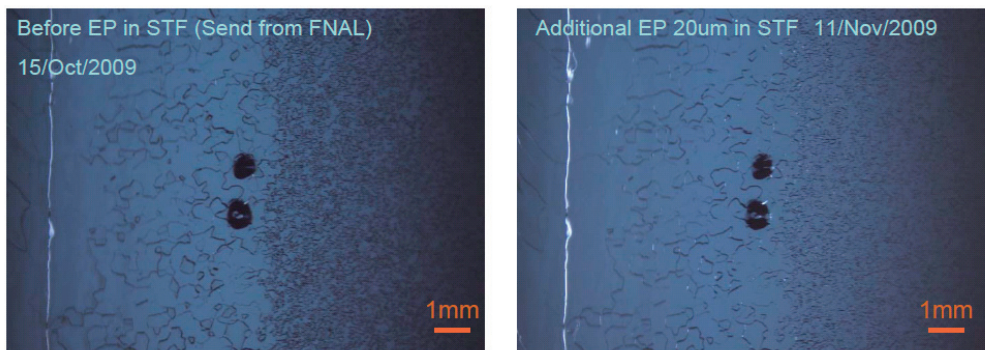


図 31 AES-01 空洞のクエンチ箇所で見つかった突起状の欠陥。急勾配であるため 2 次元プロファイルの測定が出来なかったもの。左が EP 処理前で 15 MV/m でクエンチ。右が EP により形状に変化があり 22 MV/m まで上がった

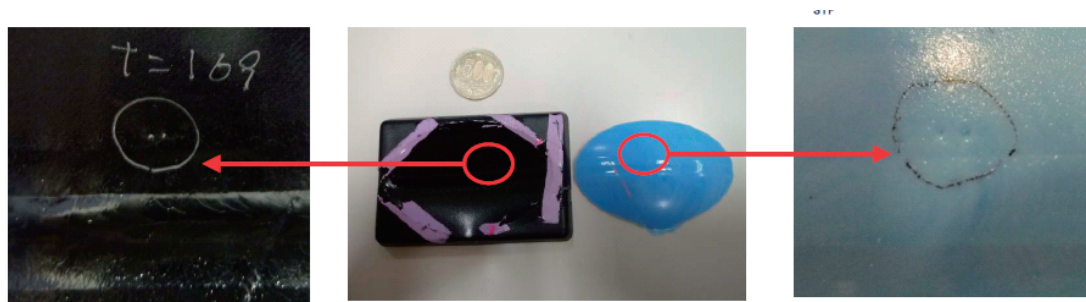


図 32 AES-01 空洞の #3 セル赤道部 168° の位置の欠陥部分内面から採取したレプリカ（左：スタイキャスト製（黒色，ポジレプリカ），右：シリコンラバー製（青色，ネガレプリカ）。この空洞は 22 MV/m でこの欠陥部分に発熱をおこしクエンチした

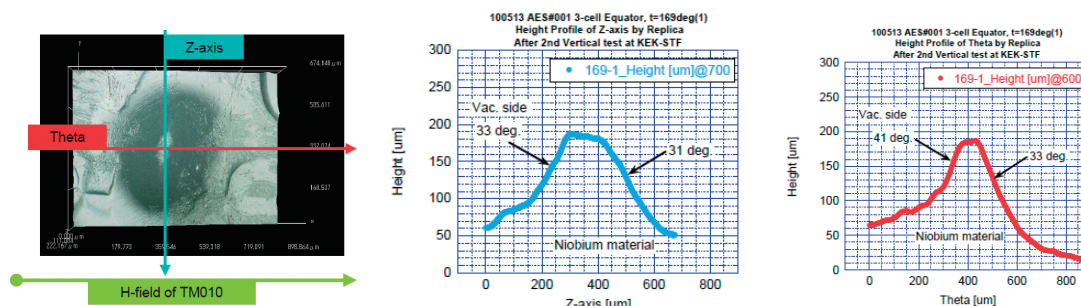


図 33 AES-01 空洞のレプリカ測定のスキャン方向（左図）。AES-01 空洞 #3 セル赤道部 168° の突起状欠陥の磁場垂直方向プロファイル（真中の図）。磁場方向に対しては 41° と非常に鋭い傾斜を持っていることが分かる（右図）

角度を持っていた。レプリカ作製を行うことで、空洞内面の状態に関する情報を非常に分かりやすく人に伝えることができ、また、その形状情報をそのままの状態で保管することが可能となった。そして、これらレプリカのサンプルを複数複製することで、欠陥に対する情報を迅速にかつ広範囲で共有することが出来るようになった。また次節で述べるように、レプリカを用いて 3 次元計測で得られたデータを CAD データへと変換することで、よりリアルな形状にて空洞表面の電磁界のシミュレーションが可能となった。

8. 表面欠陥の局所電磁場増強効果の現実的精密評価

超伝導空洞内面の表面欠陥がその周辺の電磁場を強

め、電界放出や熱的超伝導破壊を誘起する可能性があることは知られているが、現実の複雑で不規則な形状を持つ欠陥についてその局所電磁場増強効果が具体的に評価されたことはなかった。これまでは単純形状（例えば楕円球など）を仮定してその効果を論じることに止まり、現実的ではなかった。そこで、実在する欠陥の精密形状測定に基づく高忠実度の幾何形状を用いて精密な電磁場解析を行うことによって現実的で高精度に定量評価する手法を開発した^{22,23)}。ここに示す適用例は、16 MV/m で熱的超伝導破壊に至った 9 連超伝導空洞（MHI-08 空洞）の発熱箇所の内壁表面に見付かった欠陥（ピット）の磁場増強効果の算定である。シリコンラバーで表面欠陥の型を採りレーザー走査顕微鏡で詳細に形状を測り（図 34²¹⁾）、その形状測定結果に雑音除去や平滑化などの処理

を施し、点群の形 (図 35) にした後、曲面を張り (図 36) 立体化した上で別途作成した空洞模型に埋め込み (図 37)、現実の表面欠陥形状を持った空洞模型を CAD 上に構築する。欠陥による電磁場の乱れは狭い範囲に局在するので部分的な空洞形状のみで足りる^{22,24)}。その立体模型を高密度の有限要素に分割し形状を忠実に反映した有限要素模型を生成し (図 38)、この上で精密に電磁場を解析すれば (図 39) 微小な欠陥の各部の電磁場を仔細に渡って調べることができ、局所電磁場増強効果も算出できる。

欠陥の無い理想的な超伝導空洞の加速勾配は空洞表面が臨界磁場に曝され磁氣的超伝導破壊に至るまで上げることができる。高加速勾配型 (公称 45 MV/m 型) の単空洞を用いた実験結果から 1.3 GHz ニオブ空洞ではこの臨界磁場は 1900 Oe と推定できる²⁴⁾。TESLA 型 (公称 35 MV/m 型) の 9 連構造は、表面磁場と加速勾配の比 H_{sp}/E_{acc} が 42.6 Oe/(MV/m) で、加速勾配は理想的には 44.6 MV/m まで到達できる。この例では増強係数 β が 1.5 と算出されたが、空洞表面の磁場が全周的に 1.5 倍に強まり磁氣的超伝導破壊で制限さ

れるならば 29.7 MV/m ($= 44.6 \text{ MV/m} / 1.5$) まで行くが、今問題の欠陥が起こすのは磁氣的超伝導破壊ではなく、熱的 (あるいは熱磁気複合) 超伝導破壊と呼ばれるもので、様相は異なる。増強係数 1.5 で実際の制限加速勾配 16 MV/m が説明できるか否かは現在進めている熱磁気複合解析の結果を待たなければならない。

9. 内面に欠陥のある空洞の局所研磨による補修

空洞電界性能を 25 MV/m 以下の低電界に制限させ

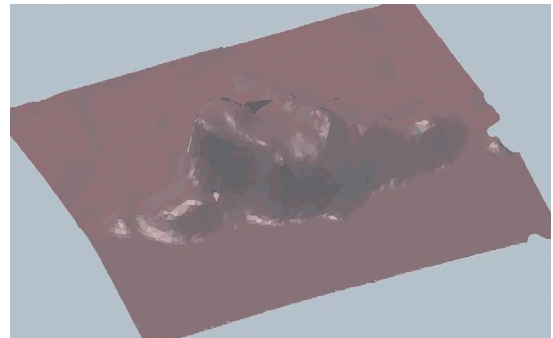


図 36 欠陥の表面模型

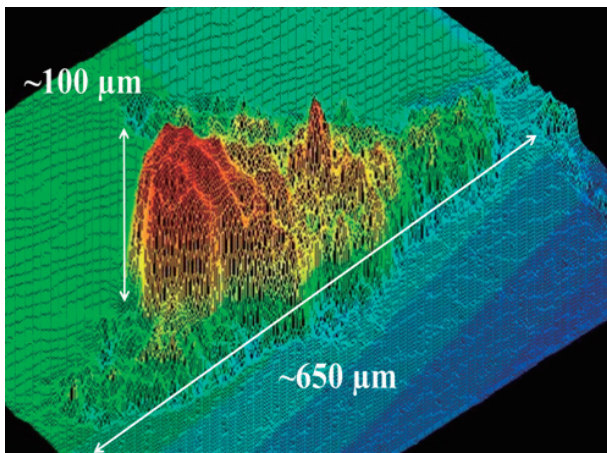


図 34 MHI-08 空洞に見つかったピット状欠陥のネガレプリカの形状測定結果

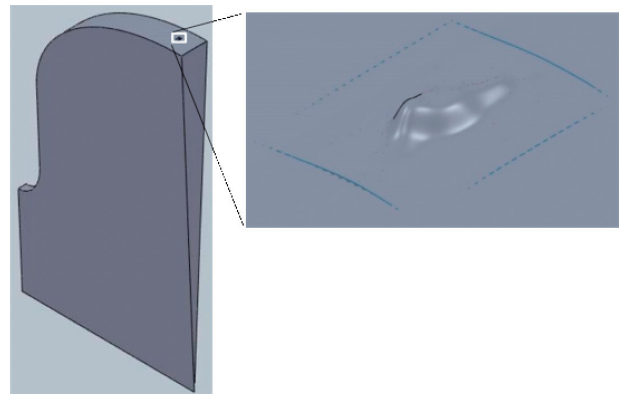


図 37 表面模型をスライスされた 1/4 セル空洞モデルに埋め込み、立体模型を構成

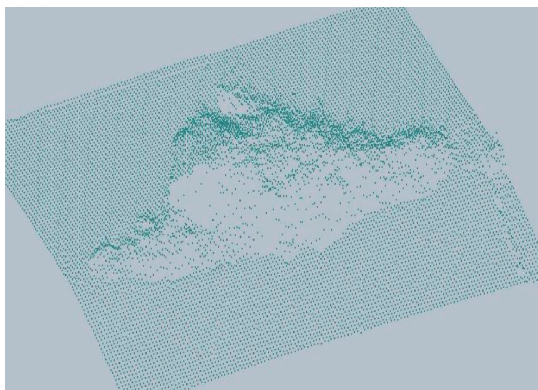


図 35 計測された欠陥を点群に変換

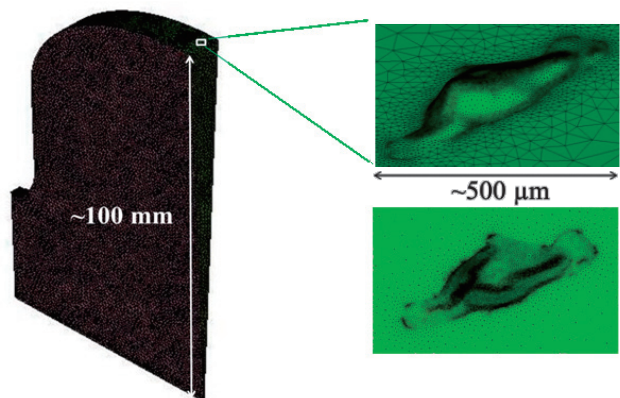


図 38 有限要素模型

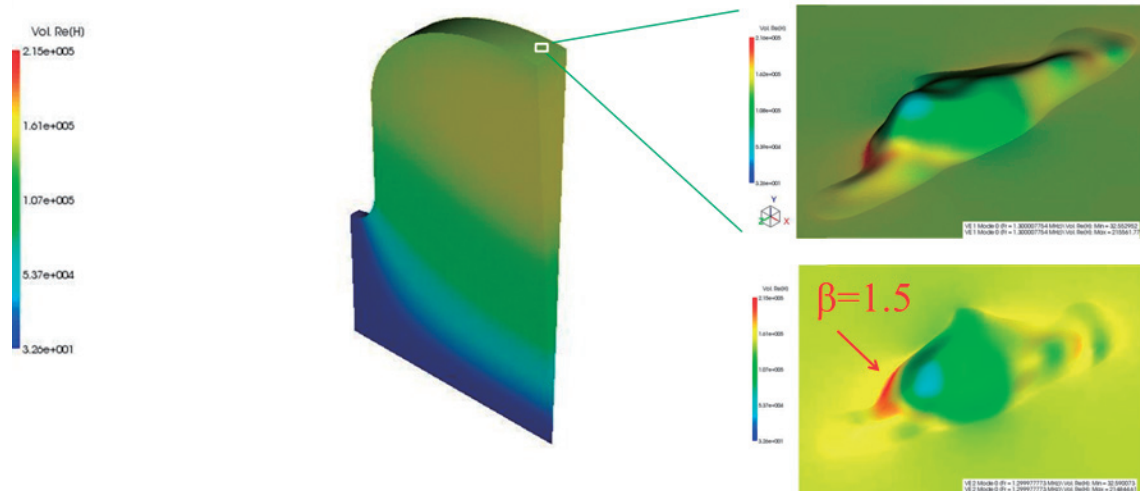


図 39 電磁場解析の結果. 増強係数 β の最大値は 1.5 と算出された

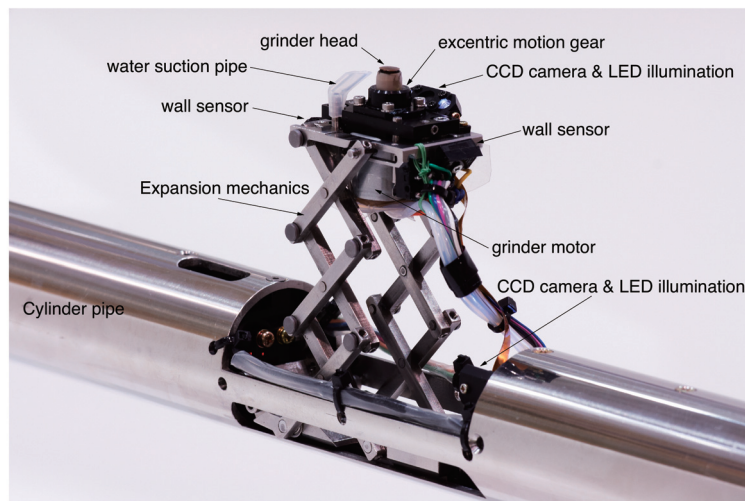


図 40 開発された局所研磨器. 研磨ヘッドの伸張機構, CCD カメラ, 照明 LED, 近接センサー, 給水パイプ, 排水パイプなどを備える. 空洞内での実際の使用時には研磨ヘッドは下向きに設置される

る要因の一つとして、数 $100\ \mu\text{m}$ という比較的サイズの大きい幾何学的欠陥によるものがある。近年、超伝導加速空洞製作における電子ビーム溶接技術の向上および空洞内面検査技術の発展に伴い、性能に有害な空洞内面の欠陥への理解が深まり、歩留まり向上に必要な要因の一つである「滑らかな空洞内面」を達成しつつある。しかし、少なくないある確率（推定 10～20%程度）で空洞内面に欠陥が出来てしまい、かつそれらの欠陥がひとつでもある事で空洞の電界性能が制限されているのが現状である。

空洞製造工程中に発生しやすい傷や電子ビーム溶接時に発生しやすいスパッターボールといった幾何学的欠陥の場合、対象となる部位を機械的・化学的研磨方法で除去することで空洞性能が改善する例はすでに知られており、周波数の低い空洞に対しては、従来市販

されているツールで対応可能であった。しかし、周波数 $1.3\ \text{GHz}$ のマルチセル空洞では、ビームパイプ・アイリス径が $80\ \text{mm}$ 程度と小さいため、それらのツールが適用できない。そのため、欠陥の除去のためにタンブラリング（パレル研磨）といった砥粒を空洞内に導入して空洞を回転させて研磨する全面研磨の方法やグラインダーを空洞内に差し入れて行う局所研磨の方法が取られてきた²⁵⁻²⁷⁾。タンブラリングの場合、対象となる欠陥のみならず空洞全体を研磨するため、欠陥を発見したタイミングにもよるが、再度の電界測定試験までに多くの表面処理工程を必要とする。また、グラインダーを差し入れる場合にはその研磨位置の正確な制御や途中研磨状態の追跡ができていなかった。他の高性能なセルには触らずに対象とする欠陥のみを正確に除去するような、空洞内面を最小の研磨範囲で局所的に

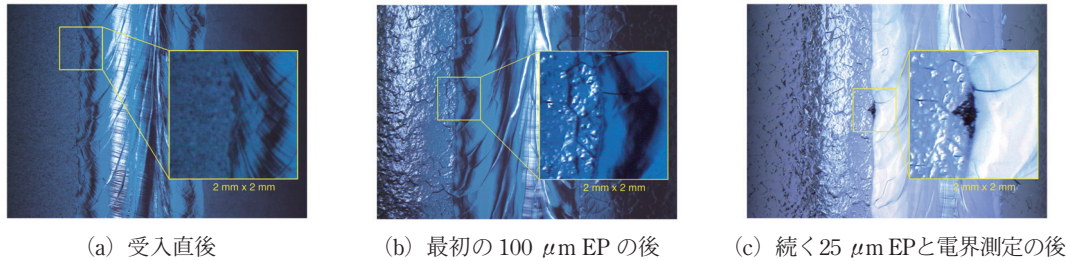


図 41 MHI-08 空洞に現れた欠陥の例. 赤道部の電子ビーム溶接シームの端に EP 処理とともに欠陥が現れた事を示す写真

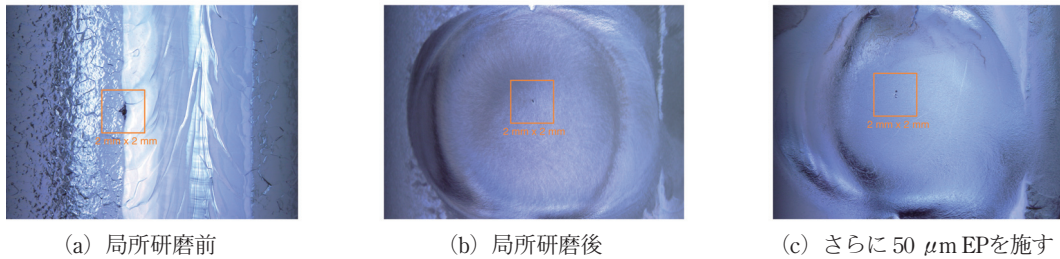


図 42 MHI-08 空洞の欠陥部分に局所研磨を行い, 研磨後にさらに EP を施してなめらかな内面に仕上げた時の写真

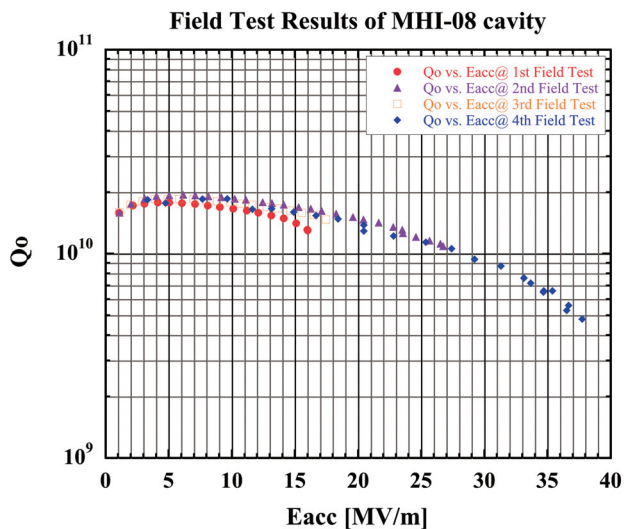


図 43 MHI-08 空洞の電界性能がステップ毎に上がっていく様子. 最初の電界試験の時に 16 MV/m だったものが, 研磨と EP を行い 27 MV/m まで上昇し, さらに EP を重ねて最終的には 38 MV/m まで上昇した

機械研磨する研磨ツールが実現すると短い表面処理工程で高い電界性能が得られる可能性が考えられ, そのために高性能な局所研磨ツールの開発が行われた. 製作された局所研磨ツールは, 数々の試験研磨の後に, 実機空洞に適用された. 2010 年 4 月までに MHI-08 空洞 (欠陥位置: 2 セル赤道部 172 度: ピット型: 16 MV/m でクエンチ), AES-03 空洞 (欠陥位置: 4 セル赤道部 306 度: パンプ型: 20 MV/m でクエンチ) の 2 空洞に対して, その開発された局所研磨器を用いて空洞内面補修が試みられた²¹⁾. 研磨には, ダイヤモンド粒コン

パウンドシート (研削用 #400, 仕上げ研磨用 #1000) と純水を用い, 他の金属粒が混じり込む事のないように注意を払った. 局所研磨器は空洞内部に挿入してから研磨モーター部がせり出すような機構となっており, 超小型 CCD カメラと小型 LED ライト照明, および給水パイプと排水パイプを備えている (図 40). 研磨モーターヘッドは一種のタッチセンサーを備えており, ヘッドが空洞内面に着床してから少し押し付け圧力をかけないとモーターの回転ができないようになっている. また, 研磨ヘッドが空洞内面の側面にふれて傷をつけないように側面に 2 個の近接センサーも備えている.

以下は研磨例である. 図 41 に示すように, MHI-08 空洞でみつかった欠陥は, 空洞の受け入れ時およびバルク EP (100 μm の大量研磨 EP) の後までは観測されず, 表面をさらに 25 μm の EP 研磨したときに現れたものである. 欠陥の位置は, 溶接シームと熱影響部との境界部分であるため, 溶接シームの盛り上がり部分を多量に研削してからようやくピット部の除去が可能となる (図 42). そのため, 補修に費やした時間は思いのほかかかってしまい, 仕上げ研磨も含めて欠陥の除去までに 5 時間程度の研磨時間を要した. その機械研磨後, 高圧水洗浄, EP (50 μm) を行ったあと, 加速電界平坦度を測定したが, 電界平坦度に変化はなかった. しかし, 最終 EP (20 μm) および各種リンス工程を経て, 電界測定を行った結果, 空洞性能は 16 MV/m から 27 MV/m まで改善した. 局所研磨箇所でのクエンチは観測されなかった. その後に, 2 回の EP を行い, 最終的には 38 MV/m を達成した (図 43).

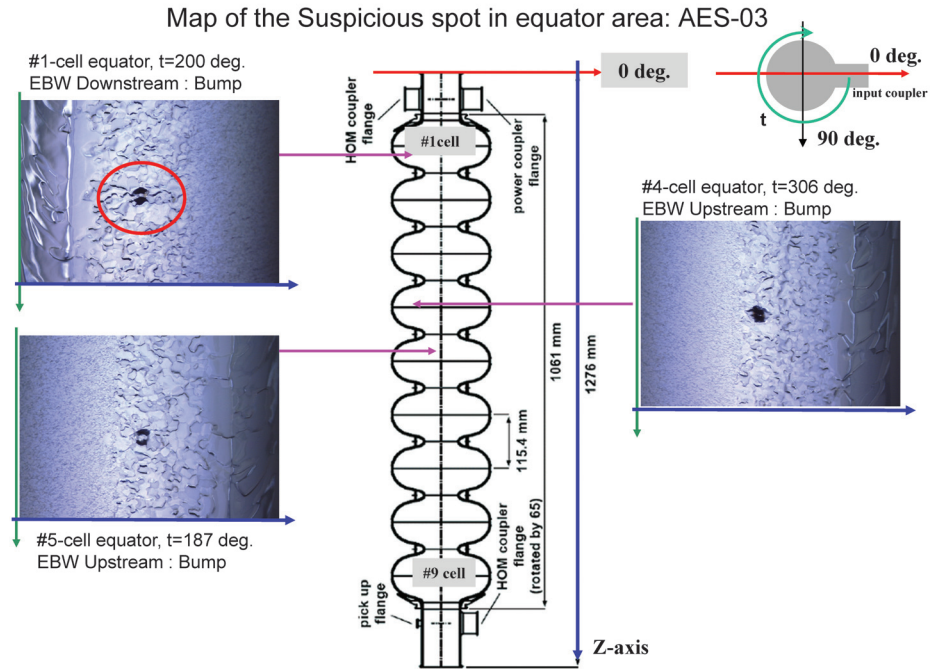


図 44 AES-03 空洞の 3 個の欠陥の箇所. KEK でこれらの欠陥の研磨を行い, EP 処理を行って仕上げ, FNAL に返却. 電界性能測定は FNAL が行った

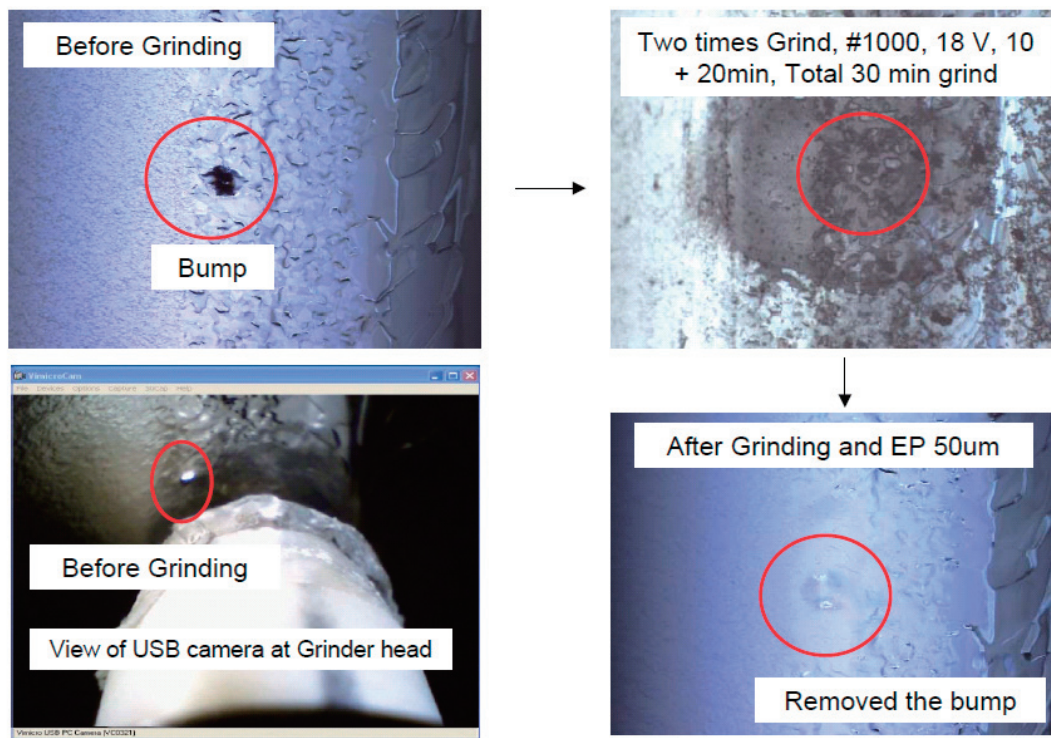


図 45 AES-03 空洞 4 セル赤道部のパンプ状欠陥の研磨例. 順次研磨して行って, 50 μm EP を行って, なめらかな表面を得たときの写真. 左下の写真は, 超小型カメラで研磨ヘッドの位置を確認しているところである

AES-03 空洞のパンプ状の欠陥は, セル赤道部の開先部から約 10 mm 離れた位置に見られ, サイズは異なるが, クエンチ箇所である 4 セル以外の 1 セルおよび 5 セルにも観測されている (図 44). これら 3 個のパン

プ状の欠陥の場合研磨は容易であり 20 分程度の研磨時間で欠陥を除去することができた. 機械研磨後, EP (50 μm), 各種リンス工程を行い FNAL に引き渡した (図 45). FNAL にて高圧水洗浄のみを行ったあと電界測定

を行った。結果、空洞性能は 20 MV/m だったものが 34 MV/m まで改善した。

このように一つあるいは少数の幾何学的欠陥によって電界性能が制限されている場合には、局所機械研磨で欠陥を除去し、かつ、その後は最終 EP のみで空洞性能が改善される例をここに 2 例示することができた。

10. ま と め

以上、いくつかの研究テーマについて解説してきたが、いずれもこれまでの先人の研究を引き継ぎ、そこに最新の技術を用いて研究を進展させようというものである。今後、内面欠陥を抑制した空洞製造方法、欠陥が発生しても対処できる局所研磨方法の高度化、電界放出を抑制するための EP 処理方法やリンス方法の最適化と高度化、などを追求し、平行して各工程の清浄度向上と厳密な清浄度管理を重ねていくことにより、超伝導空洞のさらなる高電界化への道のりが開けるものと確信している。

謝辞

本研究チームを立ち上げ、研究推進を行なっていくにあたって、高エネルギー加速器研究機構の神谷理事、高崎理事、山口 LC 推進室長には御理解と御支援をいただきここに謝意を表します。また、ILC-GDE プロジェクトマネージャーの山本明氏、ILC-GDE アジア領域長の横谷馨氏におきましては、常なる励ましの言葉を頂いており、環境安全管理室長の文殊四郎秀昭氏には表面分析においていつも貴重な意見を頂いており、ここに謝意を表します。STF 空洞グループ、そして STF の他の各グループの皆様にはこの研究の御理解とご意見を頂いており感謝いたします。

本研究の中心設備である電解研磨装置 (EP) は、高エネルギー加速器研究機構機械工学センターおよび高エネルギー加速器研究機構電解研磨設備委員会の皆様の多大なる協力のもとに建設、運用されております。機械工学センター長の上野健治氏をはじめ、舟橋義聖氏の御努力に感謝いたしております。また、建設においては (株) 野村鍍金の皆様に多大な協力を頂いており、

そして注意深い高度な運用におきましては (株) アシストエンジニアリングの皆様の協力を得ております。

また、表面分析関係の装置の製作と実験研究においては、高エネルギー加速器研究機構の野口恒行氏の強力な支援がありました。また、ToF-SIMS の計測は ULVAC-PHI 社の協力の下に行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 17) 加藤茂樹, 他:「超伝導加速空洞の高電界化に向けた研究 (その1)」, 加速器 Vol.7 No.2, 2010.
- 18) 田島裕二郎, 他:「L バンド超伝導空洞の内面検査システムの開発」, 加速器 (41-49) Vol.5 No.1, 2008.
- 19) Y. Iwashita et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 093501 (2008).
- 20) K. Watanabe, Proc. 14th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF2009), Berlin, September 2009, TUOBAU01, p. 123.
- 21) K. Watanabe et al., Repair Techniques of Superconducting Cavity for Improvement Cavity Performance at KEK-STF, Proc. 1st Int. Part. Acc. Conf.
- 22) Y. Morozumi et al, Proc. 1st Intl. Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010, WEPEC020.
- 23) Y. Morozumi, internal report,
http://lcdev.kek.jp/~hayano/surface_study/Morozumi_11062009.pdf
- 24) Y. Morozumi et al, Proc. 22th Part. Acc. Conf. (PAC2007), Albuquerque, June 2007, THOAKI03, p.2575.
- 25) K. Saito et al, Proc. 6th Workshop of RF Superconductivity (SRF93), CEBAF Newport News Virginia, 1993, srf93f01, p.372.
- 26) T. Higuchi et al, Proc. 10th Workshop of RF Superconductivity (SRF2001), Tsukuba, 2001, Pr022, p.431.
- 27) K. Saito, Proc. of LINAC2002, Gyeongju, 2002, WE104, p.534.