

RECENT RESULTS OF PERFORMANCE TESTS OF SUPERCONDUCTING ACCELERATING CAVITY AT STF FOR ILC

Yasuchika Yamamoto ^{#,A)}, Eiji Kako^{A)}, Masato Satoh^{A)}, Toshio Shishido^{A)}, Shuichi Noguchi^{A)}, Hitoshi Hayano^{A)}, Ken Watanabe^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tshukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

Abstract

S1-Global project [1] is being carried out at KEK-STF (Superconducting rf Test Facility) in 2010, in which eight L-band 9-cell cavities are used and tested for ILC (International Linear Collider). Within them, four cavities are delivered from KEK, two from DESY and two from FNAL. A series of vertical tests was started using five cavities (MHI#5-#9) from Dec/2008 and was finished on Nov/2009. After the decision, which MHI#5, #6, #7 and #9 cavities were selected, MHI#8 reached 38MV/m at fourth vertical test. However, the radiation level was still high and Q_0 was lower than ILC specification. For the field emission, various tests have been tried at STF and the cause become gradually clear and clear. Recently, two new Japanese vendors completed the cavity fabrication and they were measured at STF. One cavity of two reached 35MV/m without any HOM coupler, which is an encouraging result. On the other hand, as the international collaboration between KEK and IHEP, one Low Loss cavity was sent from IHEP to KEK, measured and inspected at STF. In this report, the recent results for these cavities are presented in detail.

国際リニアコライダー計画のための超伝導加速空洞の STF における性能試験の最新結果

1. はじめに

本機構内にある超伝導高周波試験施設 (Superconducting rf Test Facility, 以下 STF と略す) にて行われている国際リニアコライダー計画 (International Linear Collider, 以下 ILC と略す) のための超伝導空洞の性能試験は 3 年目に入った。空洞性能は徐々に上がってきているものの、依然として ILC の求めているスペックには到達していない。これにはいくつか原因があり、その内の一つは空洞製作時に行われる電子ビーム溶接の技術がまだ ILC のレベルに到達していないことが挙げられる。国内のあるメーカーでこれまでに製作された空洞は全部で 11 台 (MHI#1~#11) あり、その内の一台 (MHI#8) が加速勾配で 38MV/m に到達したのが最高の結果である。しかし、この空洞は最初の性能試験後にセルの溶接部に大きな欠陥 (defect という) が突然現れ、これを開発されたばかりの局所研磨機で除去することで性能が回復したという経緯があり (後述)、本来の意味で ILC の求めているレベルに達していないことは明らかである (ILC では 2 回の性能試験で加速勾配が 35MV/m 以上、 Q_0 が 0.8×10^{10} 以上に到達することが求められている)。

もう一つの問題は、依然として未解決の field emission による Q_0 の低下である。これに対しては、STF で様々な試みがなされてきて、原因がどこにあるのか次第に明らかになりつつある。現在試されているのは、特殊な洗浄液を浸けた布でビームパイプや高調波減衰器を磨く、というものである。これは

海外の研究所でもすでに試されていることで、効果があるという報告が出ている。

昨年度から国内の別のメーカー二社が空洞製作に参入してきて、それぞれ空洞を完成させ、今年度 STF で初めての性能試験を行った。その内の一台が高調波減衰器が無いものの、35MV/m という結果を出し、また field emission の影響も極端に少なかったため、非常に励まされる結果となった。

海外の研究所との共同研究も盛んに行われており、例えば中国高能物理研究所 (IHEP) とは空洞を KEK に輸送し、STF にて性能試験を行うという計画を遂行した。結果も良好で、今後さらなる共同計画が進む予定である。

2. これまでに測定されてきた空洞

STF でこれまでに測定された空洞は以下のとおりである。

- MHI#5-#11 (#5-#9 は S1-Global のための空洞で、#10 と #11 は S0 計画のための空洞である)
- HIT#1 (新規参入メーカーによる空洞)
- TOS#1 (新規参入メーカーによる空洞)
- IHEP#1 (IHEP の製作した Low Loss 型空洞)
- AES#1 (STF の縦測定設備の立ち上げに使用するため FNAL から借りてきた空洞)

MHI#5 と #6 は 2 番目のバッチに相当し、最初のバッチである #1-#4 号機に比べ電子ビーム溶接の技術が向上し、空洞性能も上がった。しかし、各性能試験において空洞がクエンチを起こす度に毎回同じ場所に発熱が現われたため [2]、まだ溶接技術が不十分であることも判明していた。これに対して、3 番

[#] yasuchika.yamamoto@kek.jp

目のバッチである#7-#9号機にはこのような毎回発熱を起こす場所は現われず、#5、#6号機に比べて溶接技術がさらに向上したことが分かった。ところが、4番目のバッチである#10と#11では、セルの赤道部の溶接時に、従来の突き合わせからインロー構造に変更したことで、電子ビーム溶接のパラメータが大きく変わり、性能がやや下がってしまった。したがって、インロー構造による条件下で今後さらに最適なパラメータを模索していく必要がある。

HIT#1は新規参入メーカーによる空洞で高調波減衰器が付いていないなどの特徴があるが、初めての性能試験でいきなり35MV/mに到達し、今後も大いに期待を抱かせる結果となった。一方で、TOS#1の方は製作時に時間的余裕が無く、不十分な条件下で電子ビーム溶接を行ったせいで、ビードが相当不安定な状態となり、一部は穴が開いてしまうというトラブルに見舞われてしまった。穴の補修を行い何とか完成に漕ぎつけ、性能測定を行ったものの案の定結果は芳しくないものに終わった。不完全な状態で製作に入ると、大きな代償を支払わされる、という良い教訓である。

中国の高能研究所との国際協力研究で、一台のLow Lossタイプの空洞をKEKに発送しSTFにて性能測定を行う、という計画が今年度から始まり、すでに最初の結果が出ている。目標は20MV/m(Q_0 は不問)で、結果もほぼ同じレベルに達したため、合格となったが、表面処理方法やその後の洗浄方法についてまだまだ課題が多いという結論になり、今後の共同計画の進め方を改めて議論する必要があるというのである。

また、これら以外にMHI-A号機と呼ばれている低コスト化を実現した空洞も完成しており、今秋性能試験が行われる予定である。赤道部の溶接については#10、#11号機と同等である。さらに来年度からはPhase-2計画の第1クライオモジュールに用いられる9台の空洞(いずれもMHI製)の性能試験も行われる予定で、ほぼ毎週のように表面処理と性能試験が繰り返される状況となる。

3. 個々の空洞の性能について

3.1 MHI#8号機の場合

この空洞は計4回の性能試験を行っており(通常は3回が最大である)、4回目の測定で国内最高記録である38MV/mという加速勾配に到達した(図1)。この結果に到る間には実に様々な試みがなされたので、以下で詳述したい。

最初の性能試験は2セルの赤道部での発熱に因るクエンチで性能が制限されたため、実験後にその場所を光学カメラで覗いてみたところ、それまで何も見られなかった場所に大きなdefectが見つかった(図2)。性能試験前にはたかだか20 μ mの電解研磨を行っただけであるが、かなり深そうなピットのように見えたので、開発されたばかりであったが局所

研磨機を用いて除去することを試みた。この作業は慎重に進められ、最終的にこのdefectを除去することに成功した。

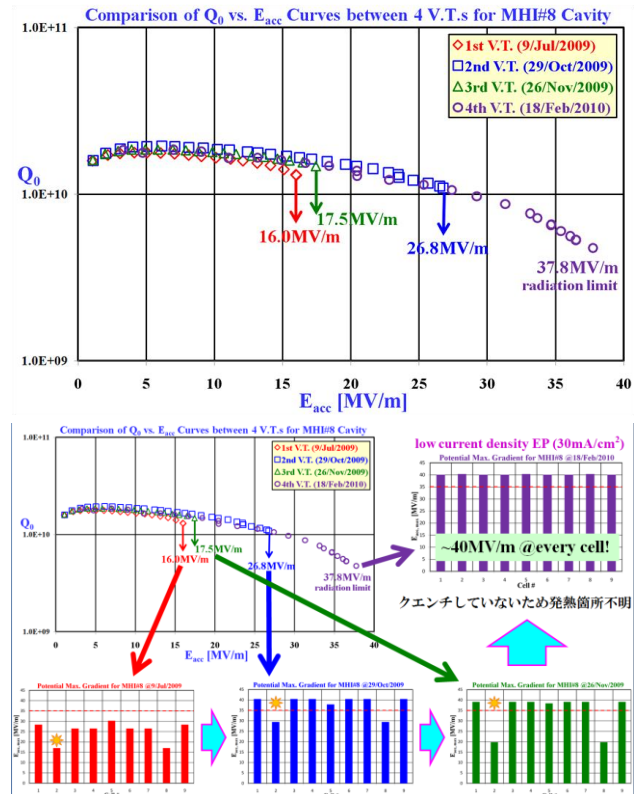


図1: MHI#8の4回の性能試験における Q_0 - E_{acc} カーブとパスバンド測定の結果。



図2: MHI#8の最初の性能試験後に2セルで見つかった大きなdefect。ビード端と熱影響部との境にある。

局所研磨後の2回目の性能試験では最高到達加速勾配が16MV/mから27MV/mへ上がり、クエンチ時の発熱箇所も同じ2セル内ではあったものの1回目とは異なる場所であった。この場所は赤道部から30mm程離れた所にあり、光学カメラで覗いてみたところバンプ状の小さいdefectが見つかった。局所研磨機がまだ未熟なものであったため、この場所は研磨出来ず、3回目の表面処理に回すことになった。

これまでと同様 20 μm の電解研磨を行った後、3 回目の性能試験を行ったところ、原因不明の理由により加速勾配が 18MV/m に下がってしまった。この 3 回の測定で π モードのクエンチの際に発熱していたセルは全て 2 セルであったが(図 3)、場所はいずれも異なっていたため、最初に見つかった大きな defect の影響では無い。

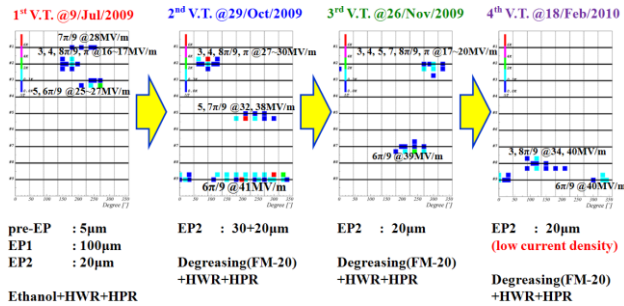


図 3 : MHI#8 の 4 回の性能試験における温度マッピングの結果の変遷。

3 回目の性能試験の後で、STF では初の試みとなる低電流密度の電解研磨を実施することにした。通常、電解研磨時の電流密度は 50mA/cm² であるが、低電流密度の場合は 30mA/cm² 程度で実施される。図 4 にこれまでのパラメータとの比較を示す。

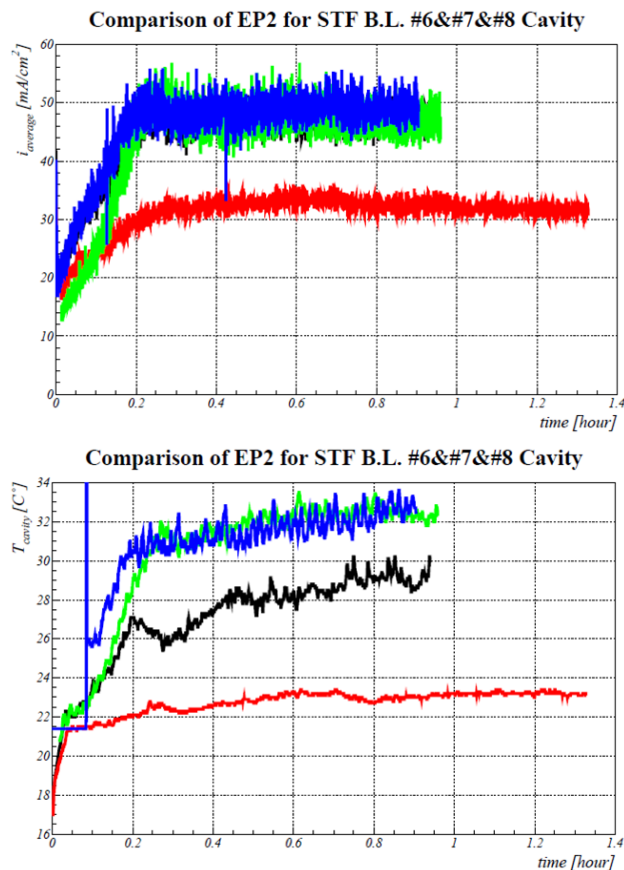
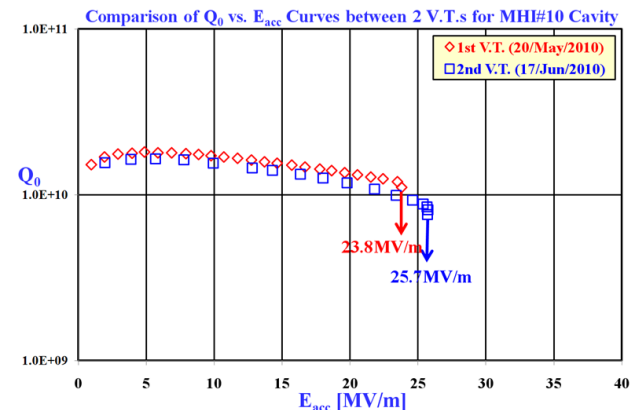


図 4 : MHI#8 で試された低電流密度による電解研磨 (赤色) と従来の方法(それ以外の色)との比較。上が電流密度の、下が空洞内の電解液温の時間経過を示している。低電流密度になると空洞内の液温も下がり、制御が

し易くなるというメリットがある半面、研磨時間もそれに応じて長くなるため、作業終了時刻は延長される。この表面処理の後、4 回目となる性能試験を行ったところ過去最高の結果となる 38MV/m に到達した。ただし、STF での成功例はこの一例のみで、今後さらにデータを重ねていき、低電流密度に因る効果を吟味していく必要がある。

3.2 MHI#10 号機の場合

この空洞は納品後の内面検査の段階で多くの defect が見つかっており、またそれらがビード上に分布していたため、これまでに無かった傾向を示していたが(通常はビード上ではなく、その周辺の熱影響部と呼ばれる場所に分布する)、サイズが小さいので悪影響を与えるものではないと判断し、通常の前処理の後、性能試験に臨んだ。ところが、予想に反して二度の性能試験で共に同じ場所(1セル)が発熱を起こし(図 5)、その場所にまさに defect(図 6)が集中していたため、それらが問題であるという結論に至った(最初の性能試験では偶然一致していたものと判断していた)。また、9セルにも発熱箇所が現れ、その近くにも defect が見つかったため、1セルと同様の理由であることが疑われた。



Transition of heating location for MHI#10

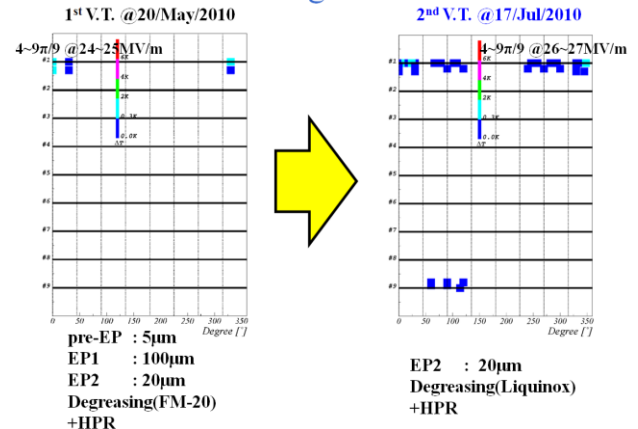


図 5 : MHI#10 の二回の性能試験における Q_0 - E_{acc} カーブと温度マッピングの結果(一回目と二回目)で反応している抵抗の数が異なるのは、局所的に重点的モニターを行っていたことによる。



図6：MHI#10の受け入れ段階から見つかった defect で発熱箇所の中心付近にあったもの。従来のパターンとは異なり、ビード上にあるのが特徴である。

局所研磨を実施する前に、これらの defect がどのような形状をしているのか、特殊な溶液による型取りを行って調査することにした。その結果、発熱中心にあった defect が単純な凸凹ではなく、もっと複雑なカルデラのような形状をしているということが判明した。このような形状は光学カメラでは識別できず、疑わしそうな defect についてはレプリカを作成して、3次元的な形状を詳細に調べる必要があることが示された。また、この調査と同時にレプリカがどの程度の再現性を持って取られているか調べるため、同じ defect について3回型取りを行い、それらを3次元解析にかけて比較した。その結果、互いの形状に大きな差異は無いが、細かい所は異なっており、高さ方向の再現性としては20 μm 程度であることも分かった(図7)。

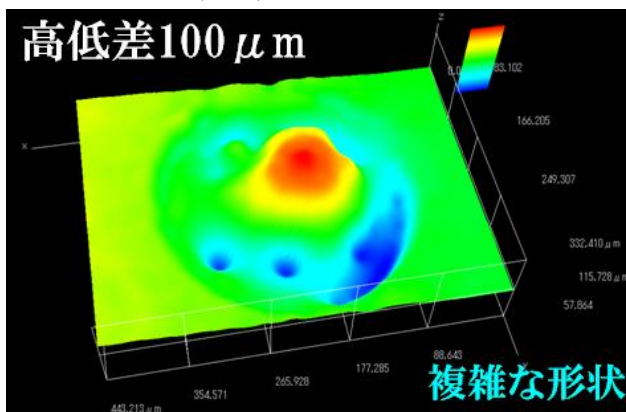


図7：MHI#10の1セルに見つかった defect のレプリカ作成後の3次元解析の結果。

2回目の性能試験後にスポンジ研磨材により、ビームパイプ部から手を空洞内へ挿入し、1セルの赤道部を直接磨くことにした。局所研磨機は場所が限定的なため広範囲を磨くには効率的で無いと判断し、このような手法に頼ることになった。しかし、研磨速度は早く、かつ問題となっている領域のビードを完全に消滅させることが出来た。磨いていく途

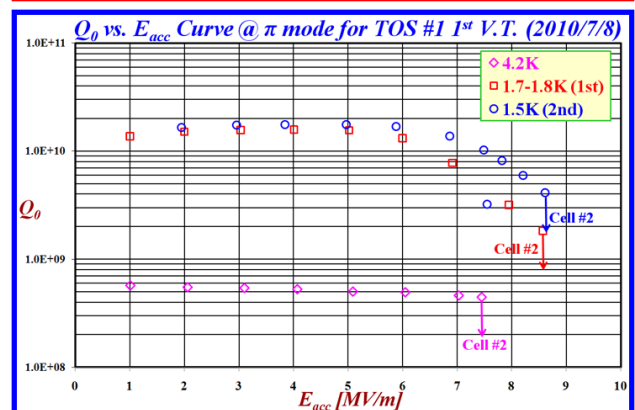
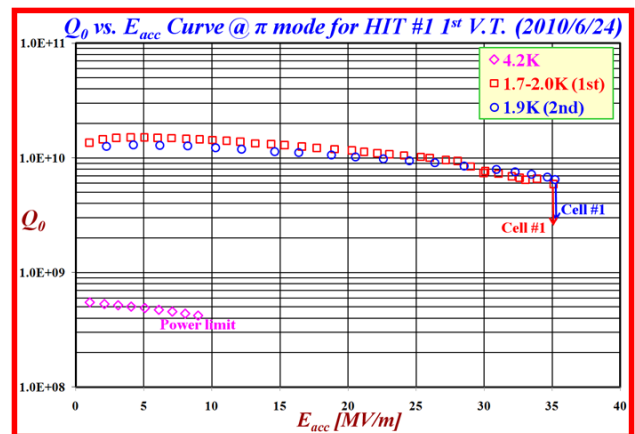
中で中から別の新しい defect が出現するという事件も起こったが(これも初めてのことであり)、それらも含めて完全に除去することが出来た。仕上げには局所研磨機も用いた。9セルに現れた発熱箇所も同様に手による局所研磨を行った。この空洞は夏明けに3回目の性能試験を行う予定で、どのような結果が出るのか期待される。

3.3 HIT#1, TOS#1, IHEP#1 の場合

これら3台の空洞はいずれも高調波減衰器が付いておらず、製作時の困難さがかなり軽減されている。しかし、セルの赤道部及びアイリス部の溶接条件はMHI空洞とは異なっており、どのような結果が得られるか興味があった。

一度だけの測定のため、判断材料としては乏しいが、HIT#1が最初の測定で35MV/mに到達し、今後も大いに期待の持てる結果となった。また、測定中にクライオスタットの上面でモニターしている放射線量もこれまでで最も少なく、何らかの理由があるように思われる。一方、TOS#1の方は9MV/mと結果は芳しいものではなかったが、製作時の度重なるトラブルを考慮すると、当然であったと言えよう(図8)。

IHEP#1は高能研が自力で完成させたLow Lossタイプの空洞で、電子ビーム溶接からプリチューニングや表面処理などを全て行った後で、STFに持ち込み性能試験を行った。結果は20MV/mで、目標を満足するものではあったが、放射線も相当多く今後課題を残す結果となった。



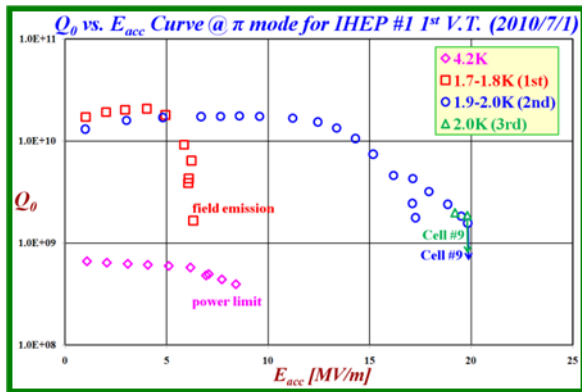


図8：新規参入メーカーによる2空洞の結果と国際協力研究の一環で性能試験を行った IHEP 製 Low Loss タイプ空洞の結果。

4. まとめ

これまでに STF で測定されてきた全空洞の性能試験の最良結果を示す(図9)。一見して明らかのように、未だ ILC の要求する性能は出ていないが、加速勾配についてはようやく手の届く領域に達しつつある。MHI 空洞は4バッチ目で改善が見られなかったものの、HIT 空洞が今後の空洞製作に期待を抱かせる結果をもたらしてくれたので、空洞製作技術にまだ改善の余地は残っているものと思われる。

field emission については早急な対処が求められており、原因の一つと考えられるビームパイプ周辺部を何らかの物理的な接触(たとえばクリーンルーム用のクロスなど)でもって洗浄する方法を試そうとしているところである。また、電解研磨後の空洞内部を如何に速やかに洗浄するか、という点についても同時に改良が進められており、複数の対処法による問題解決が図られているところである。

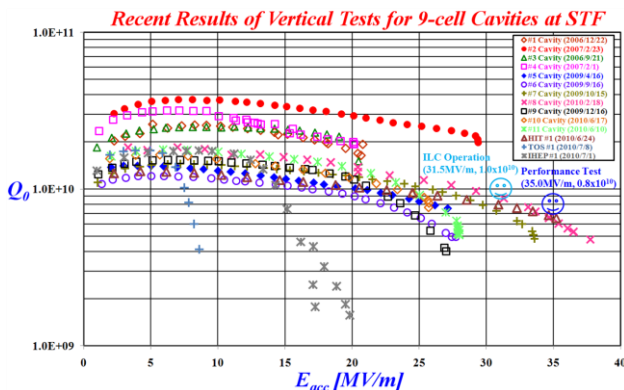


図9：全空洞の最良結果と最大到達加速勾配。

謝辞

以下の方々に篤くお礼申し上げます。
 沢辺元明氏(KEK)、
 仙入克也氏、原博史氏 (三菱重工業株式会社)、
 鈴木隆房氏 (株式会社野村鍍金)、
 梅澤裕明氏 (東京電解株式会社)、
 岡田照和氏、飯竹真之氏(株式会社ケーバック)、
 中村光一氏、田崎直氏、塚田文彦氏
 (株式会社アシストエンジニアリング)、
 浅野峰行氏、今田信一氏、柳町太亮氏
 (日本アドバンステクノロジー株式会社)

参考文献

- [1] E. Kako, et al., 「S1-Global における TESLA 改良型超伝導空洞のクライオモジュール試験」、第7回日本加速器学会年会プロシーディング、姫路市(2010)、WEPL05
- [2] Y. Yamamoto, et al., 「ILC に向けた高電界空洞性能試験の KEK-STF における最新結果」、第6回日本加速器学会年会プロシーディング、東海村(2009)、TOACC02