

RECENT RESULTS OF PERFORMANCE TESTS FOR L-BAND 9-CELL CAVITY AT KEK-STF

Y. Yamamoto[#], H. Hayano, E. Kako, S. Noguchi, T. Shishido, K. Watanabe

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

Abstract

Vertical tests for ILC have been carried out since 2008 at KEK-STF. Measured cavities are from MHI-05 to MHI-22, and MHI-12, -13, -17 and -21 reached the ILC specification of 0.8×10^{10} at 35MV/m [1]. The MHI cavity was added into the “qualified vendor” for the cavity yield. These four cavities (12, 13, 17 and 21) had no defect on every EBW (Electron Beam Welding) seam of equator, but not iris and beampipe. On the other hand, the other cavities had a few or several defects on EBW seam. Especially, defect on the EBW seam of the equator is the worst case, and cavity performance is limited “certainly”. MHI-10, -15 and -16 cavities were limited at the low gradient by this kind of defect. As for iris region, MHI-14 had large defect at the iris between cell #8 and #9, and the performance was limited by the heavy field emission with “explosive event”. However, after the locally mechanical grind for this defect, the cavity performance was drastically improved with no field emission at 37MV/m. In this paper, the recent progress of the cavity performance at KEK-STF will be reported with the “detailed” defect analysis.

KEK-STF における L バンド 9 セル空洞の性能試験の最新結果

1. はじめに

KEK-STF では ILC のために開発された L バンド (1.3GHz) 9 セル空洞の性能試験 (縦測定) が 2008 年以来、継続的に行われてきた。これまでに測定された空洞は 20 台以上にのぼり、性能も世界的な水準に達しつつある。空洞の性能評価及び性能向上のために開発されたツールが、温度マッピング/X線マッピング装置[2]、内面検査装置[3]、内面局所研磨装置である。これらのツールを駆使した結果、空洞性能を制限する主たる要因が電子ビーム溶接のビード上に存在する微小な欠陥(defect)であることが判明した。特に、セルの赤道ビード上に存在する defect は空洞を必ずクエンチに至らせるため、内面検査装置で見つかったものは局所研磨装置により必ず除去される必要がある。KEK-STF では、defect を持った空洞もそれを除去することによって、性能を大いに向上させることに成功している。また、defect そのものの研究も行われており、特殊な硬化剤により defect のレプリカを作成し[4]、レーザー顕微鏡などによりその形状解析を行うことが可能になった結果、defect の形状とクエンチフィールドとの間に相関が認められることも判明した。本学会では KEK-STF における縦測定の最新結果と空洞性能を制限する有害な defect の性質について報告する。

2. 空洞性能試験 (縦測定) の最新結果

2.1 MHI 空洞の結果

現在、STF では量子ビーム実験[5]が行われており、そこに MHI-12 および MHI-13 空洞 2 台がクライオモジュールに組み込まれた状態でビーム運転されて

いる。将来は、さらにその下流側に 8 台の空洞が入った ILC 用クライオモジュールが設置される予定で、そこに組み込まれる空洞の縦測定が日々行われている。性能目標は ILC スペックに到達することであり、そこに到達するために機械的局所研磨 (後述) を行い、少なくとも縦測定の段階では ILC スペックに到達することを目指している。図 1 は MHI-12 から MHI-22 までの最良の Q_0 vs. E_{acc} カーブを示す。また、図 2 は MHI-01 から MHI-22 までの縦測定毎の最大到達加速勾配を示す。表 1 は MHI-12 から MHI-22 までの測定結果の簡単なまとめである。STF-2 用として使用される空洞の内、まだ目標に到達していない空洞は MHI-18, MHI-20, MHI-22 の 3 台で、これらは 9 月から再測定を行う予定である。MHI-16 は最大加速勾配が 34MV/m で目標にわずかに及んでいないが、性能を制限している理由が特殊なものであったため、再測定を行わずにヘリウムジェット溶接へ進めることにした。

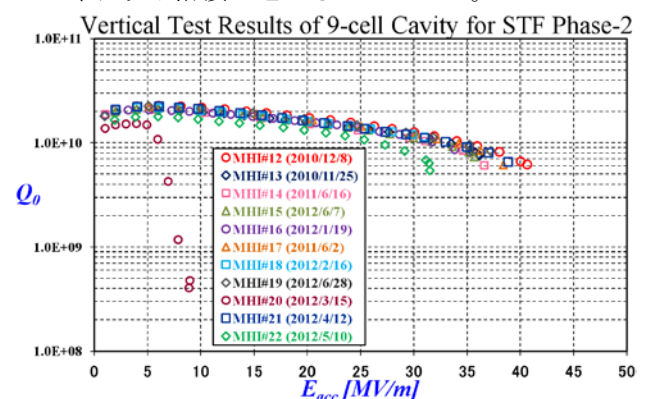


図 1 : 量子ビーム及び STF-2 用空洞の最良の Q_0 vs. E_{acc} カーブ。35MV/m で Q_0 が 0.8×10^{10} を超えることが目標である。

[#] yasuchika.yamamoto@kek.jp

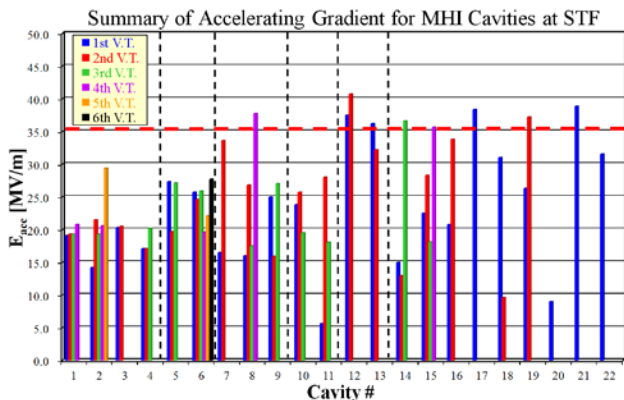


図2：MHI-01 から MHI-22 までの縦測定毎の最大到達加速勾配。加速勾配の目標値は 35MV/m である。

表1：MHI-12 から MHI-22 までの最良結果のまとめ。太字で書かれた空洞は局所研磨を行わずに表面処理だけで ILC スペックに到達した空洞を表す。

Cavity	Max. E_{acc} [MV/m]	Q_0 at Max. E_{acc}	Q_0 at 35MV/m	# of V.T.
MHI#12	40.7	6.2×10^9	9.3×10^9	2
MHI#13	36.2	7.5×10^9	8.6×10^9	2
MHI#14	36.6	6.1×10^9	8.4×10^9	3
MHI#15	35.7	7.3×10^9	8.1×10^9	4
MHI#16	33.8	8.6×10^9	-	2
MHI#17	38.4	6.1×10^9	8.5×10^9	1
MHI#18	31.0	1.1×10^{10}	-	2
MHI#19	35.3	8.1×10^9	9.1×10^9	2
MHI#20	9.0	4.8×10^8	-	1
MHI#21	38.9	6.6×10^9	9.1×10^9	1
MHI#22	31.5	5.4×10^9	-	1

2.2 HIT, TOS および In House(Made in KEK)の結果

2010 年から MHI 空洞以外に新たに 2 社(HIT と TOS)が空洞製作に加わり、3 社態勢となった。また、KEK 所内でも新たに電子ビーム溶接機を導入し、独自に空洞製作に着手している。空洞製作において先行する HIT と TOS の 2 社はすでにそれぞれ 2 台の空洞を製作し、STF にて表面処理や性能試験等を行っている。ここでは、2012 年 7 月の時点で国内最高記録を達成した HIT-02 空洞の結果を紹介する。

HIT 社製[6]の 2 台目の空洞である HIT-02 は 1 回目の縦測定で 35MV/m に到達したもののフィールドエミッションの影響が強く、 Q_0 値としては ILC スペックに及ばなかった。事前に行われた内面検査の結果、アイリス部のほぼ全てに通常の欠陥(defect)とは異なる奇妙な模様が多数観察され、このために

フィールドエミッションの影響は避けられないであろう、という予測があり、実際にその通りであった。縦測定後の内面検査でも同様の模様が残っており、電解研磨等では除去できないものであると判断し、独自に開発した機械研磨法で全てのアイリス部を徹底的に研磨した。その後、50 μ m の電解研磨を挟んで再度、内面検査を行い、特に問題となりそうな対象物が見られなくなったため、通常の手順に従い 2 回目の縦測定に臨んだ。2 回目の縦測定では、途中でクエンチや放射線の出現が全く無い状態で 41MV/m に到達し、そのフィールドでも放射線が全く観測されない、という STF 史上最高の結果となった。図3は一連の縦測定時の空洞性能と放射線量であり、図4はアイリス部に見られた奇妙な模様、及びそれに対する局所研磨時の様子である。

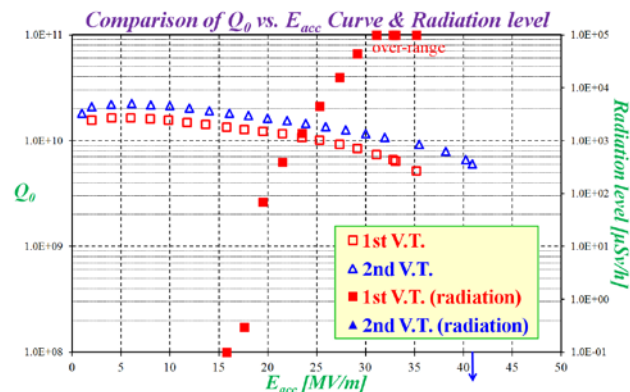


図3：HIT-02 空洞の 2 回に亘る縦測定時の Q_0 vs. E_{acc} カーブと放射線量。横軸の 41MV/m のところにある下向きの青矢印は、このフィールドまでは放射線が観測されなかった、ということを意味する。

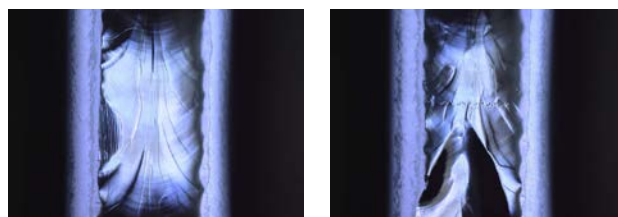


図4：HIT-02 空洞内のアイリス部に観測された奇妙な模様とその機械的局所研磨の様子。

一方、TOS 社[7]の空洞も 1 台目の結果を受けて、製造工程を大幅に見直し、多くの R&D を経て、2 台目(TOS-02)を完成させた(ただし、高調波結合器は付いていない)。2 台目の結果は 31V/m であり、かつ、こちらも放射線が非常に少なかった。その後、局所研磨および電解研磨を挟み 2 回目の縦測定に臨

んだところ、今度は 35MV/m に到達した。1 台目の結果から劇的に改善したことで、他社製造の空洞も ILC スペックに到達できる可能性を示したものである。

KEK は初号機(KEK-00)として電子ビーム溶接をほぼ外注した空洞を製造し(こちらも高調波結合器は付いていない)、STF にて一度縦測定を行った[8]。結果は、29MV/m であり、放射線は多少出ていたものの比較的良い結果であり、今後に期待を抱かせるものとなった。

3. 各空洞の履歴

3.1 MHI-15 号機の場合

MHI-15 号機は電解研磨を行う度に新しい defect が出てきて、それが原因で空洞性能が制限され、それを除去しては再測定を行うというサイクルを繰り返すことになった。3 回目の縦測定の間では、いわゆる爆発現象(後述)が起こり、空洞性能が大幅に劣化してしまっていたが、その後の調査でアイリス部に新たな defect が現われている事を確認し、これを除去して再測定を行ったところ、4 回目ようやく ILC spec に到達した。新しく出てきた defect の場所は、赤道部、アイリス部、赤道から少し離れた場所、と多岐に亘り、有害な defect について実に多くの有用な情報をもたらしてくれた。図 5 に各縦測定における Q_0 vs. E_{acc} カーブを示す。図 6 に各縦測定における放射線量の履歴を示す。また、図 7 には各縦測定時に観測された温度マッピングの結果と、縦測定後の内面検査で発熱箇所から見つかった defect の画像を示す。

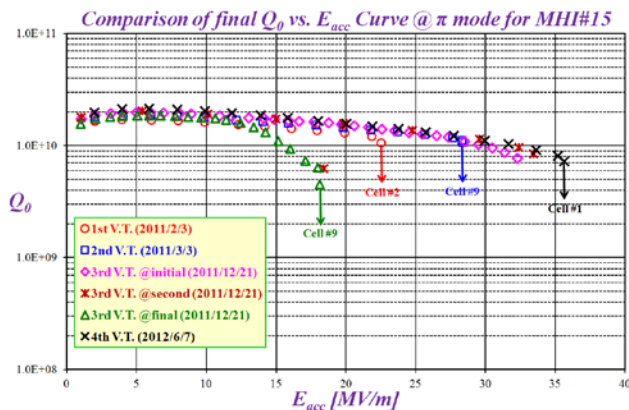


図 5 : MHI-15 空洞の 4 回に亘る縦測定時の Q_0 vs. E_{acc} カーブ。3 回目の縦測定では、途中まで 33MV/m 辺りに到達していたが(ピンク色のダイヤモンド印と茶色の雪印)、その後爆発現象が発生し、空洞性能が大幅に劣化してしまっていた(緑色の三角印)。

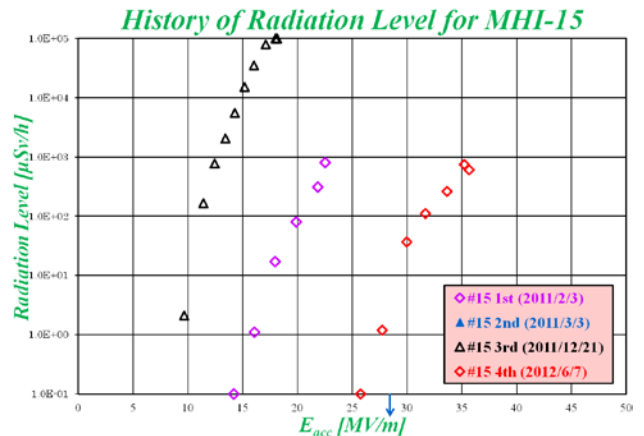


図 6 : MHI-15 空洞の各縦測定における放射線量の履歴。3 回目の縦測定では爆発現象が起こり、放射線量が過去 2 回の縦測定に比べて激増していることが分かる。

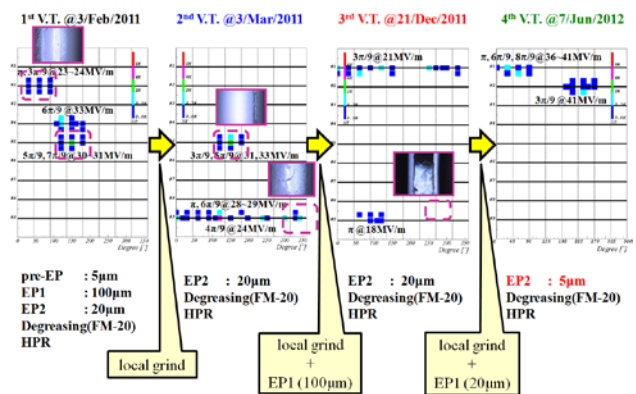


図 7 : MHI-15 空洞の全縦測定における温度マッピングの結果とその後の内面検査で見つかった defect の位置関係。1 回目と 2 回目は赤道ビード上、あるいはビード近くの defect で制限され、3 回目はアイリスのビード上の defect で制限された。

3.2 MHI-14 号機の場合

MHI-14 号機は 1 回目の縦測定の間で爆発現象が起こり、その後の内面検査で Cell#8-#9 間のアイリス部から大きな defect が出現している事が分かった。当時は、これが本当に空洞性能を制限しているものなのかどうか判断がつかなかったため、局所研磨を行わず、もう一度 20 μ m の電解研磨だけを行い、2 回目の縦測定に臨んだ。ところが、2 回目の縦測定でも 1 回目と全く同様の爆発現象が観測され、発熱箇所や放射線が強く出ている場所も同様であったため、この defect が問題を起こしているものと確信し、除去することに決定した。局所研磨の後、100 μ m の電解研磨を行い、その後もう一度内面検査で異常な箇所が無い事を確認した後、3 回目の縦測定を行った。結果は 37MV/m に達し、かつ放射線も全く観測されない、という非常に良い結果であった。アイリス部に現われる defect も、無視できない

程度である場合は、空洞性能を著しく制限してしまう、という好例である。図8は3回の縦測定における Q_0 vs. E_{acc} カーブを、図9には同じく3回の縦測定での放射線量を示す。

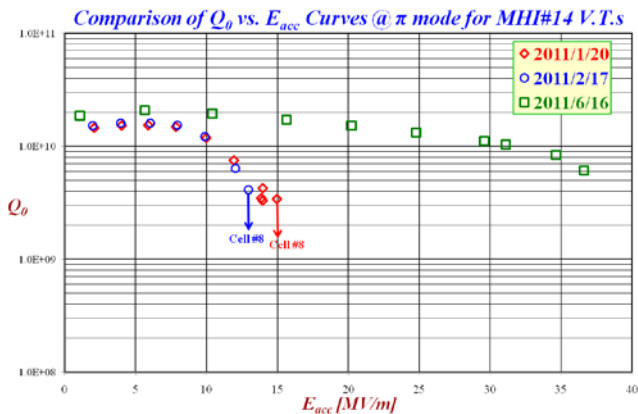


図8：MHI-14 空洞の3回に亘る縦測定時の Q_0 vs. E_{acc} カーブ。1回目と2回目では全く同じ爆発現象が起こり、空洞性能が大幅に劣化してしまった。

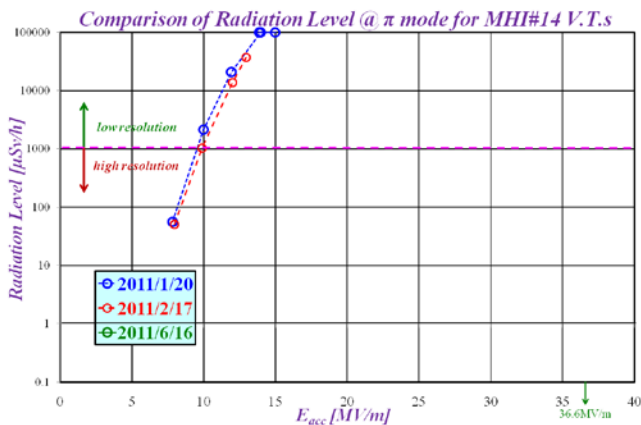


図9：MHI-14 空洞の各縦測定における放射線量の履歴。局所研磨の後、3回目に行われた縦測定ではMHI 空洞としては最も少ない放射線量を観測した。

3.3 MHI-17 号機の場合

MHI-17 号機は、縦測定前の内面検査で有害な defect が全く見つからず、測定前から期待を抱かせる空洞であったが、実際にその通りの結果となった。図10はその結果であるが、放射線はパワーライズの途中から出てきてはいたが、徐々にプロセスされていき、最後は 35MV/m で 100 μ Sv/h 程度と大分減少した。有害な defect は全く無いにも関わらず放射線が出ており、この原因は今後の研究課題である。しかし、少なくとも空洞性能としては ILC スペックに到達しているの、それほど深刻な問題ではないであろう。有害な defect を持たない空洞（他に MHI-12, -13, -21 もそうであるが）は、ILC スペックに簡単に到達する、という事実は今後の空洞開発において重要な示唆を与えてくれる。

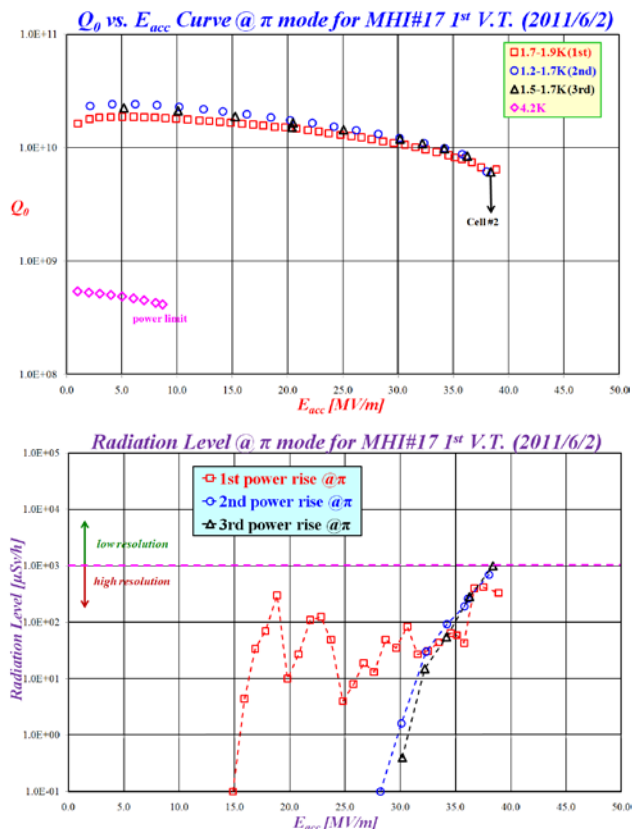


図10：MHI-17 空洞の Q_0 vs. E_{acc} カーブ（上図）と放射線量（下図）。1回目のパワーライズでは放射線量に増減が見られ、プロセスが進んでいる様子が分かる。2回目以降に変化は見られない。

4. 爆発現象

爆発現象についてはこれまでも言及してきたが、ここでまとめておきたい。定義は以下のとおりである。

- 測定中に突然、 Q_0 値が劣化する
- 測定中に突然、加速勾配が劣化する
- 測定中に突然、放射線量が激増する

これらは単独で起こることもあれば、複数の事が同時に起こることもあり、単純な現象ではない（たとえば Q_0 値は下がっても、加速勾配は元のままである、ということもある）。また、爆発が出現するタイミングも全く予測できない状況で起こるため、防ぐ手立てが無い、というのが実情である。図11に MHI-14 号機の1回目と2回目の縦測定の結果を示すが、いずれも最初のパワーライズの途中で性能が急に劣化している様子が分かる。同時に放射線も急増しており、空洞の様子が激変してしまっている様子が窺える。

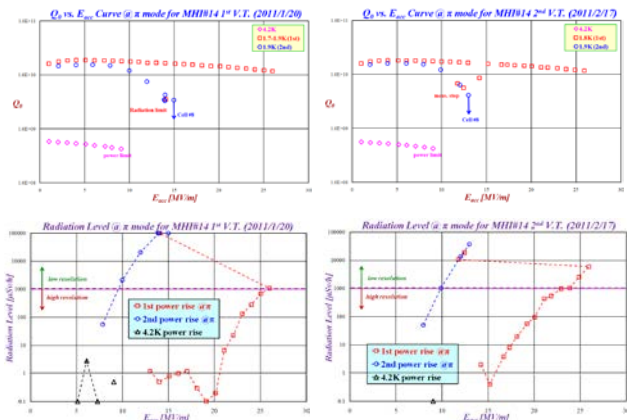


図 1 1 : MHI-14 空洞の 1 回目と 2 回目の縦測定時の Q_0 vs. E_{acc} カーブと放射線量。いずれも途中で爆発が起り、性能が劣化している様子が分かる。

図 1 2 は 2 回目の縦測定時の温度マッピングの結果と、1 回目の縦測定後の内面検査ですで見つかった Cell#8-#9 間にある defect の画像である。温度マッピングから判明した発熱箇所は X 線マッピングによる X 線強度の強い領域とも良い一致を示しており (図 1 2 の中下図)、明らかにフィールドエミッションにより放出された電子が衝突することで生じている発熱であると解釈される。見つかった defect に対し特殊な硬化剤によるレプリカを作成し (後述)、レーザー顕微鏡により観察してみたところ、凸形状であることが判明した。しかも、高さが $80\mu\text{m}$ 程度もあり、実際に素手による触感でもこの事は確認された。何故このような形状の構造物が、アイリス部に形成されるに到ったのかは未だに解決を見ていないが、他の空洞でも同様の defect が何度か出現している事を考えると、空洞製造時に何らかの問題を抱えていた、と考えるのが自然なようである。

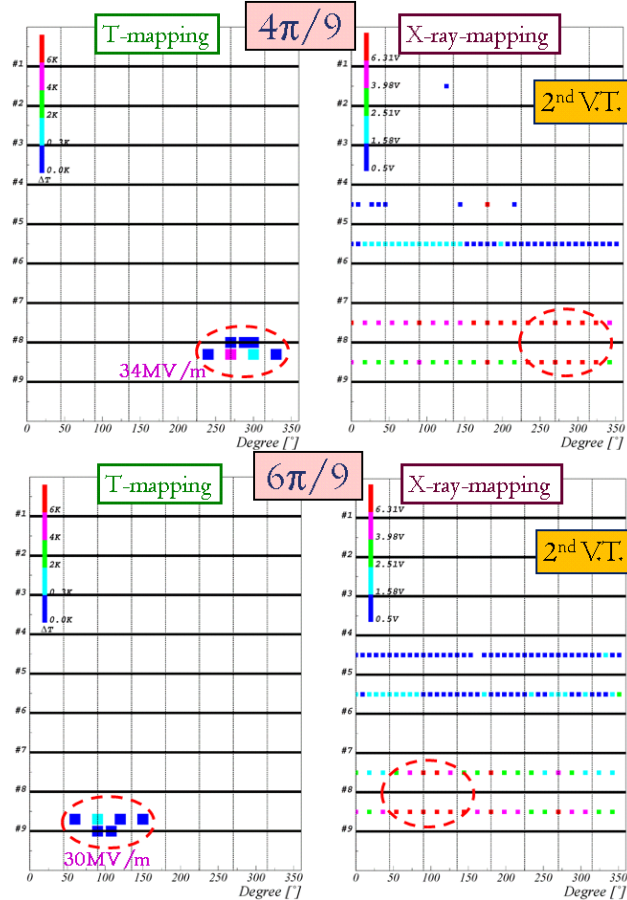
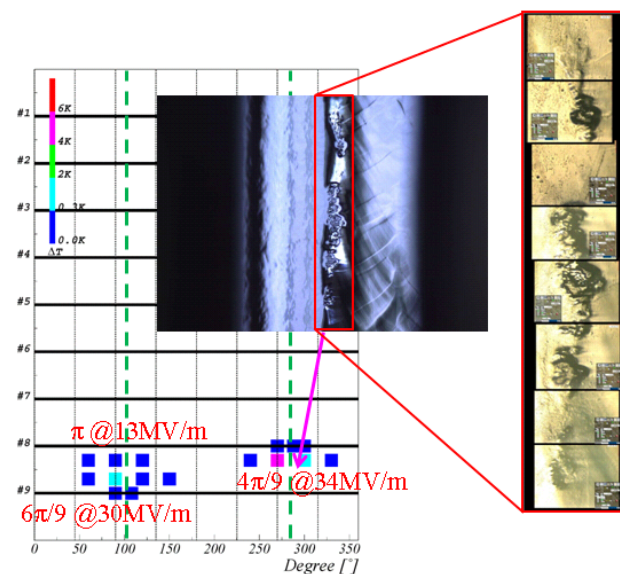


図 1 2 : MHI-14 空洞の 2 回目の縦測定時の温度マッピングと内面検査で見つかった defect との相対位置 (上図)。赤枠で囲まれた画像はレーザー顕微鏡によるものである。中央図と下図は温度マッピングと X 線マッピングによる相関図で、 π モード以外のパスバンドで測定した結果 (π モードは最も加速されやすいモードのため、X 線マッピングの結果があまり鮮明にならない)。

5. 局所研磨の効果

有害な defect は機械的な局所研磨法により除去することが、空洞性能を大幅に引き上げる最も確実な方法である。STF では MHI-08 号機から局所研磨が導入され、その効果が確認されていたが、その後に行われた一連の縦測定で有害な defect が電解研磨では除去出来ないということが判明すると、積極的に用いられるようになった。これまでに局所研磨を実施した空洞は 9 台に上り、そのほとんどで効果が実証されている。表 2 はそのまとめであり、多くの空洞においてその効果が認められ、また研磨箇所も多岐に亘っていることが分かる。また、図 1 3 には局所研磨機とその効果が画像で示されている。

表 2 : 局所研磨を実施した空洞の一覧。>はそれ以上の勾配に達している可能性が高い、ということの意味する。セクション 3.1 で述べたように MHI-15 は局所研磨を数回実施している。

Cavity	Change of E_{acc} [MV/m]	Problematic location
MHI-08	16 → 27	Equator at cell #2
MHI-14	13 → >37	Iris between cell #8-#9
MHI-15	23 → >33	Equator at cell #2
MHI-15	29 → >36	Equator at cell #9
MHI-15	18 → >36	Iris between cell #8-#9
MHI-16	21 → >34	Equator at cell #1
MHI-19	26 → 37	Iris between cell #5-#6 Beampipe (top)
TOS-02	31 → >38	Equator at cell #7
TOS-02	38 → >39	Away from equator of cell #8
HIT-02	>35 → >41	Every iris & Beampipe

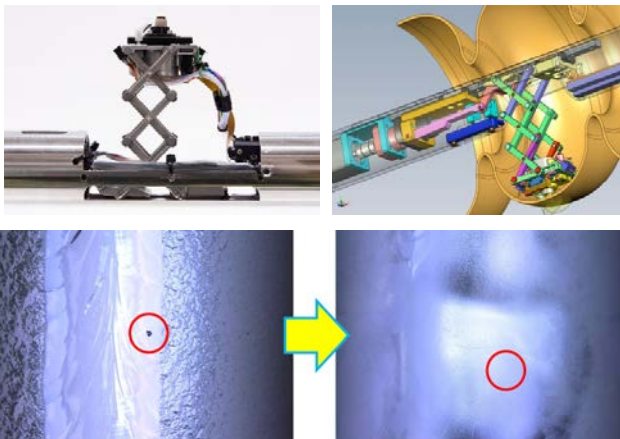


図 1 3 : 局所研磨機とその効果を示す写真。

6. 有害な defect の分類とその性質

STF で観測された有害な defect は以下の 4 種類に分類される。

- I. 赤道ビード上にあるもの
- II. アイリスビード上にあるもの
- III. エンドセルとビームパイプとの間のビード上にあるもの
- IV. ビードの端、あるいはビードから離れた場所にあるもの

それらの写真を図 1 4 ~ 1 7 に示す。この中で、特に有害な defect が赤道ビード上にあるものである。これは空洞性能を必ず制限してしまうため、局所研磨で完全に除去する必要がある。その次に有害なものはアイリスビード上にある defect で、これもひどいフィールドエミッションを引き起こすため、必ず除去される必要がある。ただし、フィールドエミ

ッションは程度に依るので、発生したからといって、必ずしも空洞性能が ILC スペックに到達しない、というわけではない。エンドセルとビームパイプの間のビード上にある defect は深刻そうに見えるが、フィールドエミッションがひどくなる場合とそうでない場合があり、よく理解されていない。ビードから離れた場所にある defect はビード上にあるものに比べると、比較的深刻な問題を引き起こさないが、除去されるべきものではある。レプリカ法による形状解析ではバンプ形状であることが分かっており、おそらく電子ビーム溶接中のスパッタボールであると考えられる。

図 1 8 は、MHI-05 から-22 までの全空洞で観察された有害な defect の有無をまとめたものである。この表を見ると、有害な defect の有無がそのまま空洞性能に強く影響を及ぼしている事がはっきり分かるであろう。defect-less な空洞を製作することが非常に重要である、という証拠である。

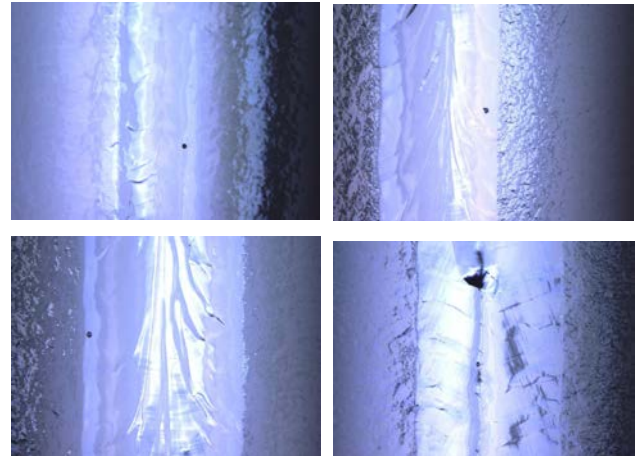


図 1 4 : 赤道ビード上にある defect の写真。MHI-05 (左上), MHI-15 (右上), MHI-16 (左下), TOS-02 (右下) で見つかった例。これらは最も有害な defect である。

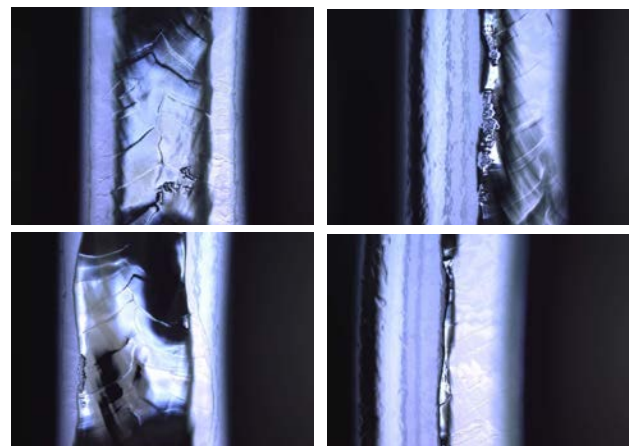


図 1 5 : アイリスビード上にある defect の写真。MHI-09 (左上), MHI-14 (右上), MHI-15 (左下), MHI-18 (右下) で見つかった例。これらはひどいフィールドエミッションを引き起こす。

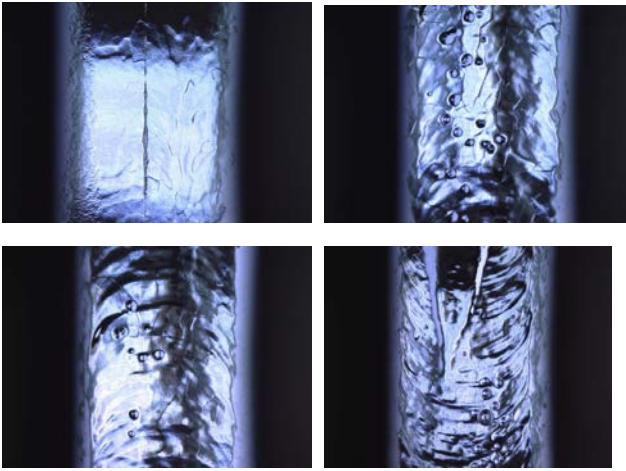


図 1 6 : エンドセルとビームパイプとの間のビード上にある defect の写真。MHI-11 (左上), MHI-18 (右上), MHI-19 (左下), MHI-21 (右下) で見つかった例。時にフィールドエミッションがひどくなる場合もあるが、必ずそうなるわけでもなく、よく理解されていない。

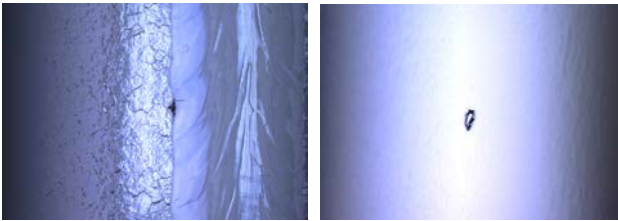


図 1 7 : ビード端、またはビードから離れた場所にある defect の写真。MHI-08 (左), TOS-02 (右) で見つかった例。ビードから離れた場所にある defect は図 1 4 にある defect に比べるとそれほど有害ではない。

	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
I	■				■	■					■	■						
II		■			■					■	■			■	■	■	■	■
III			■				■							■	■		■	■
IV				■							■							

図 1 8 : MHI-05 から-22 までの有害な defect(前ページの I, II, III, IV に対応)の有無をまとめた表。黄色で示された空洞は局所研磨を行わずに ILC スペックに到達した空洞を表す。MHI-21 には有害に見える defect がいくつか散見されたが、深刻な問題を引き起こさずに ILC スペックに到達することが出来た。

STF で観測された defect に対して、その形状を調べるために通常、特殊な硬化剤を用いてレプリカを作成する方法が採用されている。これは歯医者で歯の型を取る際に行っている方法と全く同じものである。これにより 100 μ m 程度のサイズの defect の型を取ることが可能になっている。通常レプリカは、ある defect に対して 2~3 個作成し、その平均値を取ることによってサイズ(直径)および深さあるいは高さを

決定する。こうすることで、レプリカ作成時の系統誤差の影響を見積もることが出来る。サイズに対しては、その誤差は 10 μ m 程度であるが、深さ(あるいは高さ)に対しては、25 μ m 程度となっている(いずれも peak-to-peak の値)。図 1 9 はレプリカを作成する一連の流れを写真で示している。図 2 0 は作成したレプリカに対して、レーザー顕微鏡による形状解析を行った結果が示されている。

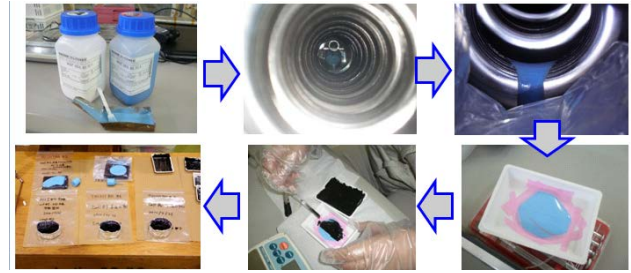


図 1 9 : 有害な defect に対してレプリカを作成する一連の流れ。二液混合の特殊な硬化剤を混ぜ合わせ、空洞内の defect のところへ流し込み、硬化後に別の硬化剤に再転写し、レプリカが完成する。

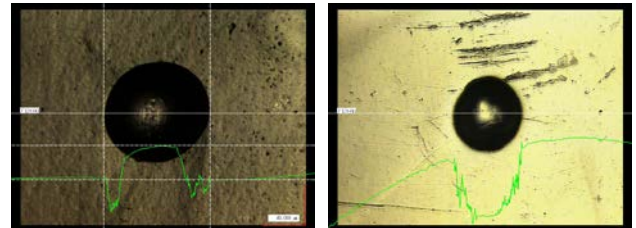


図 2 0 : 作成したレプリカをレーザー顕微鏡で形状解析した結果。右側の画像はピットと呼ばれる通常の凹型の defect で、左側はカルデラ[9]と呼ばれる中央付近は盛り上がっていてその周辺は凹んでいるという、より複雑な形状の defect。赤道ビード上にある defect にはカルデラタイプのものが多いことが経験的に知られている。

赤道ビード上にある defect (Type I) に対しては、そのサイズおよび深さ(あるいは高さ)とクエンチフィールドとの相関を求めることが出来る。図 2 1 に示した図は STF にてこれまで作成されたレプリカから求めた defect の形状とクエンチフィールドとの相関図である。これらのデータ点に対して、直線フィッティングを取ることで、35MV/m における defect の形状がどの程度のものであるならば存在が許されるのか、という指標を得ることが出来る。それによると、35MV/m ではサイズは約 100 μ m 以下、深さ(あるいは高さ)は約 30 μ m 以下、でなければならない、ということが分かる。さらにフィッティングを外挿すると、2 つの直線が横軸とほぼ一点で交わっている事実に気がつく。その点は 43MV/m 辺りであるが、この 2 つの直線が横軸と一点で交わっているように見える、という事実は興味深い

(defect が完全に無くなる場合はサイズも深さも $0\mu\text{m}$ なので、物理的には2つの直線は横軸と一点で交わっていなければならないはずである)。現時点ではレプリカのサンプル数が限られており、統計的な誤差の範囲にあるかもしれないが、偶然であるかどうかも含めて、今後注視すべき事項である。

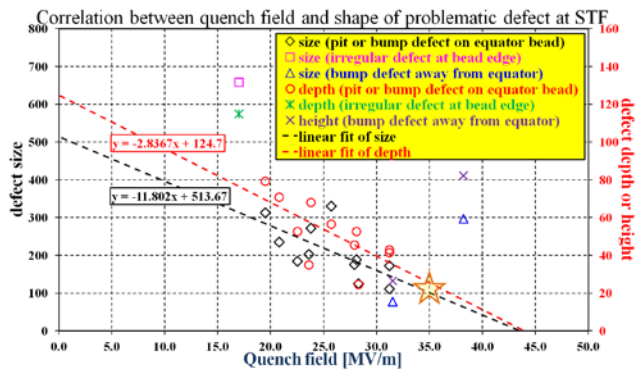


図 2 1 : 赤道ビード上にある defect に対してそのサイズ (直径) 及び深さ (あるいは高さ) とクエンチフィールドとの相関図。グラフ中の黒の点と直線、赤の点と直線、がそれぞれサイズ (左軸) と深さ (右軸) に対応している。defect が存在しない場合の物理的要請から、2 つの直線は横軸のどこかで一点で交わる必要がある。

7. まとめと今後の予定

STF では 2008 年以降、25 台に上る空洞を測定してきた。S1-Global[10]以降の一連の R&D を経て、有害な defect の区別が行えるようになり、かつ、局所研磨を積極的に導入することによって、ILC スペックに到達する空洞が数多く出てきた。今後は、空洞生産の歩留まりを向上させるために、主に KEK 内で製作する予定の空洞に対して製作法の改善を行い、全体的な性能向上へと結び付けていきたい、と考えている。最終的には、局所研磨を全く使わずに簡単に ILC スペックに到達できる空洞を大量生産することが目標となる。

謝辞

日頃より STF にて諸々の作業に従事されている方々にこの場をお借りしてお礼申し上げたい。K-VAC の岡田氏、飯竹氏、村崎氏、NAT の浅野氏、今田氏、柳町氏、アシストエンジニアリングの中村氏、塚田氏、北嶋氏、関東情報サービスの早川氏、酒井氏、には日々の作業において大変お世話になっており、皆様の助力が無ければ STF は全く運営が出来ない状況である。また、電解研磨設備における責任者である本機構化学センター所属の沢辺氏には、電解研磨のスケジュールやその方法について、こちらの希望を毎回聞いて下さり、大変感謝しております。

STF 空洞の製造には多くの関係者が関わっており、とても全員の名前を挙げることは出来ないが、三菱重工の仙入氏、原氏、人見氏、奈良氏、日立製作所の渡辺氏、綿貫氏、面川氏、東芝の太田氏、戸坂氏、山田氏、高崎氏、には特に感謝申し上げたい。空洞の原材料であるニオブの供給に関しては、東京電解の梅澤氏に特に感謝申し上げたい。

参考文献

- [1] ILC Reference Design Report (<http://www.linearcollider.org/about/Publications/Reference-Design-Report>)
- [2] Y. Yamamoto et al., TTC Meeting 2011, Milano, Italy, Feb 2011. (<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=3087>)
- [3] Y. Iwashita et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 093501 (2008).
- [4] H. Hayano et al., TTC Meeting 2010, FNAL, U.S., Apr 2010. (<https://conferences.fnal.gov/ttc10/index.html>)
- [5] Y. Yamamoto et al., IPAC12, New Orleans, U.S., May 2012, WEPPC014.
- [6] T. Watanuki et al., The 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug 2012, THPS091.
- [7] T. Ota et al., The 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug 2012, THPS077.
- [8] T. Saeki et al., The 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug 2012, THPS089.
- [9] Y. Yamamoto et al., LINAC10, Tsukuba, Japan, Sep 2010, THP018.
- [10] Y. Yamamoto et al., SRF11, Chicago, U.S., Jul 2011, THIOA01.