

ACHIEVEMENT OF ILC SPECIFICATION IN THE STF 9-CELL SC CAVITIES AT KEK

Toshio Shishido¹, Eiji Kako, Shuichi Noguchi, Hitoshi Hayano, Yasuchika Yamamoto, Ken Watanabe

KEK, High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

It was decided that SC cavity should be adopted in a basic technology of ILC in 2004. The research and development of 1.3 GHz 9-cell SC cavities was started in 2005. The MHI_12 and the MHI_13 cavities made for quantum beam experiment were able to meet ILC specifications for the first time in November 2010. In particular, the MHI_12 cavity was able to accomplish $E_{acc,max} = 40$ MV/m for the first time in Japan in 9-cell SC cavities where beam acceleration is possible. Furthermore, the MHI_14 and the MHI_17 cavities made for STF-2 experiment were able to attain ILC specifications in June 2011. After the MHI_12 cavity, four of six cavities satisfied ILC specifications.

ILC 要求仕様を初めて達成した 9 セル超伝導空洞

1. はじめに

ILC (International Linear Collider) には超伝導空洞を採用すべきであるという 2004 年の勧告を受け、2005 年より 1.3 GHz 9 セル超伝導空洞の研究開発を開始した。STF-1 計画としてまず 4 台の空洞が製作され、横型クライオスタットに組み込み、2K での大電力パルス試験が行われた。

その後、この初期型超伝導空洞の試験結果を基に改良型超伝導空洞 5 台が製作された。その内の 4 台と、アメリカ FNAL の 2 台、ドイツ DESY の 2 台、計 8 台の空洞を用いて S1 グローバル計画が実行された。

現在量子ビーム計画と STF-2 計画が進行中である。2010 年 11 月から 12 月にかけて、量子ビーム計画のために製作された MHI_12、MHI_13 空洞では国内で初めて ILC 要求仕様($Q_0 > 1.0 \times 10^{10}$ @31.5 MV/m、 $Q_0 > 0.8 \times 10^{10}$ @35 MV/m)を満たす空洞性能を達成出来た。特に MHI_12 空洞は、1996 年に単セル空洞で最大加速電場 40 MV/m を達成して以来 15 年目にして、ビーム加速可能な 9 セル超伝導空洞としては国内で初めて最大加速電場 40 MV/m を達成出来た。

さらに 2011 年 6 月には、STF-2 計画のために製作された MHI_14、MHI_17 空洞でも ILC 要求仕様を達成出来た。

2. KEK-L バンドグループでの研究開発史

2005 年より ILC 用 1.3 GHz 9 セル超伝導空洞の研究開発を開始した。しかし我々は、ドイツ DESY を中心に進められていた TESLA (TeV Energy Superconducting Linear Accelerator) 計画用 1.3 GHz 単セル超伝導空洞の研究開発を 1991 年には既に開始していた^[1]。単セル空洞の性能試験は比較的容易なため、表面処理工程でのパラメータ変更が空洞性能にどう反映されるか、データを蓄積するには都合

が良い。数多く行われた空洞単体性能試験 (縦測定) から高加速電場達成のために必要な工程として 1) 空洞表面処理としては電解研磨、2) 750 °C でのアニール、3) 超純水高圧水洗、4) クラス 10 クリーンルームでの空洞組立、5) 電解研磨と 100 °C ベーキングを併用する、この 5 つが重要である事を明らかにした^[2]。また、電解研磨を行う場合、ニオブ材の残留抵抗比 RRR (\propto 熱伝導率)と最大加速電場の間に明確な関係は見られない事、すなわち TESLA 形状空洞では RRR に因らず最大加速電場が 40 MV/m 程度に制限される可能性が示唆された。

達成された最大加速電場をまとめると次の通りである。1993 年には三菱重工製単セル空洞で 30 MV/m、9 セル空洞で 12 MV/m、1996 年には KEK 工作センターで製作された単セル K_14 空洞で 40 MV/m を達成した。図 1 に縦測定結果を示す。

1995 年以降共同研究に参加した東芝、三菱電機、住友重機、野村鍍金、CERCA/ペシネジャポン、日

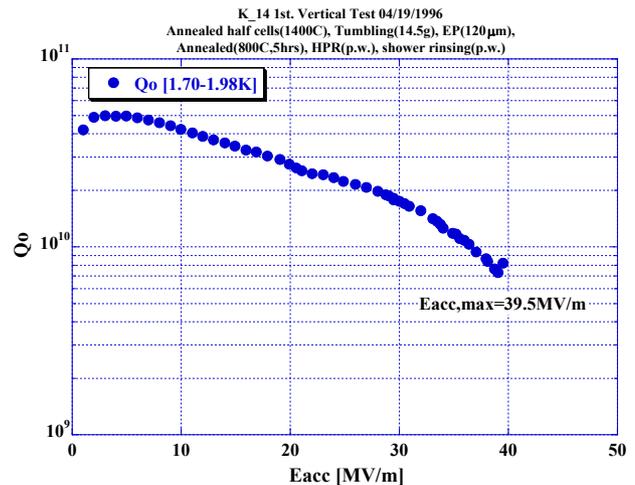


図 1 : 単セル K_14 空洞 1 回目の縦測定結果

¹ E-mail: shishido@post.kek.jp

立の各社が製作したそれぞれの空洞においても 24~30 MV/m が達成された。多セル空洞の研究開発も同時に行っており、1997 年には東芝製 3 セル空洞で 30 MV/m、1998 年には三菱重工製 3 セル空洞で 25 MV/m、CERCA/ペシネジャポン製 3 セル空洞で 17 MV/m を達成した。

2000 年からは J-PARC 用 972 MHz、 $\beta=0.725$ 9 セル超伝導空洞の研究開発を開始した。2004 年にはこの空洞 2 台を組み込んだ横型クライオモジュールを 2K に冷却して大電力パルス試験を行い、最大加速電場 12 MV/m を達成した^[3]。この時の経験は、ILC 計画におけるクライオモジュール試験において非常に役立つ事となった。

その他、研磨材を空洞内に入れ、空洞を自転と共に公転運動させる事で空洞内面、特に赤道溶接部を簡単かつ高速研磨が可能になる遠心バレル研磨の研究開発が挙げられる^[4]。遠心バレル研磨により、自転のみのバレル研磨に比べ研磨速度は 10 倍以上、4 時間で 30 μm の研磨が行える様になった。

3. ILC 用 1.3 GHz 9 セル超伝導空洞の研究開発

3.1 STF-1 計画 ; MHI_01~MHI_04 空洞

2005 年の開発開始時に掲げた目標は、それまでの経験と実績を考慮して次の通りである。

(1) 加速電場 25 ± 5 MV/m を目標とする

9 セル空洞の場合、最大加速電場のもっとも低いセルに因って全体の最大加速電場が制限されてしまう。そのため各セルを高い品質レベルで製作しなければならない。単セル空洞では高頻度で 30 MV/m ~ 40 MV/m の高加速電場を達成出来ていたが、9 セル空洞の製作個数、表面処理及び性能測定の実績は単セル空洞のそれに比べて非常に少なかった。そのため、25 MV/m を現実的な目標と定めた。

(2) 空洞の標準的な表面処理工程を確立する

単セル空洞での標準的な処理工程を基に、当初採用された工程は次の通りである。遠心バレル研磨 (~100 μm) → Pre-EP (5~10 μm) → EP-I (100 μm) → アニール (750 °C, 3hrs) → EP-II (20~50 μm) → 温水超音波洗浄 (50 °C, 1 時間) → 高圧水洗 (8 MPa, 16 時間) → 組立 → ベーキング → 空洞単体性能試験 (縦測定)。これを基準工程として開始し、新たな処理工程も順次試験する事にした。空洞性能に反映されるか否かでその処理工程の必要、不要を判断する。

(3) ビーム加速可能なモジュールを作り上げる

高性能な空洞を作り上げる事は勿論であるが、超流動液体ヘリウム温度で全ての機器類がきちんと動作し、ビーム加速が可能なモジュールを作り上げる事が最重要開発目標である。

2005 年度から 2006 年度に製作された MHI_01 ~ MHI_04 空洞は、2006 年 2 月より 2007 年 2 月まで

の 1 年間に総計 14 回の縦測定が行われた。図 2 に MHI_01~ MHI_04 空洞 4 台の縦測定結果を示す。目標であった 25 MV/m は MHI_02 空洞の 5 回目、STF-1 計画における最後の縦測定において初めて達成された。

その後 MHI_01~MHI_04 空洞は横型クライオスタットに組み込まれ、2K での大電力パルス試験が STF-1 計画として行われた^[5]。

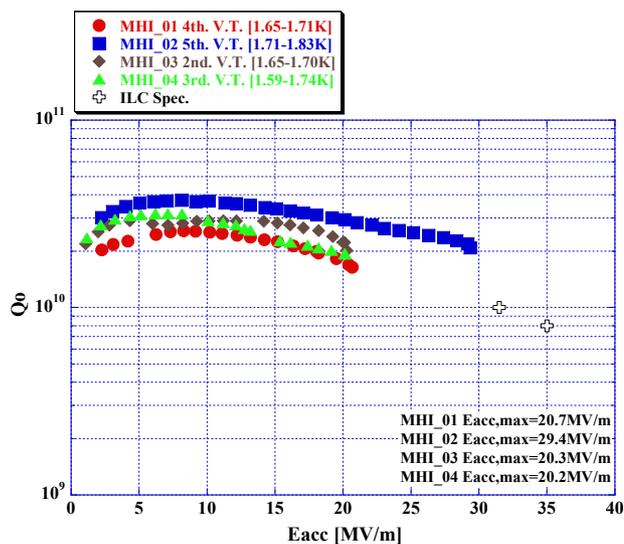


図 2 : MHI_01~ MHI_04 空洞の縦測定結果

3.2 S1 グローバル計画 ; MHI_05~ MHI_09 空洞

S1-グローバル計画用 MHI_05~MHI_09 空洞が製作された。これらの空洞には STF-1 からの改善として、1)空洞製作時の品質管理強化と作業環境の清浄化、2) 単極高調波モード TM011 との結合を改善するために HOM カプラーの取り付け角度変更とビームパイプ径の縮小、が施されている。

S1-グローバル計画は、KEK から 4 台の空洞を STF-1 計画で使用したクライオスタットに、アメリカ FNAL から 2 台、ドイツ DESY から 2 台の空洞をイタリア INFN の設計、製作したクライオスタットに組み込み、計 8 台の空洞で 2K での高加速電場の実証試験を行う計画である^[6]。

MHI_05~MHI_09 空洞では、STF-1 計画からのフィードバックとして、遠心バレル研磨を処理工程から削除した。高速研磨が可能になったとはいえ、100 μm の研磨に前後の工程を含め 5 日程かかる事、主に赤道部溶接欠陥の除去のために行われていたが、電子ビーム溶接の最適化を行った事で滑らかな溶接面が得られる様になったからである。

新たな表面処理工程として、過酸化水素水リンス、エタノールリンス、弗酸リンスを試してみたが、縦測定結果に明確な差は現れなかったため現在行っていない。

2008 年には STF 棟に次々と設備が整ってきた^[7]。空洞性能に大きく影響する電解研磨処理は外注に出しており、処理を終了してから KEK に運搬し組立開始するまでに 3 時間程かかっていたが、電解研磨

装置が STF 棟内に設置された事で、処理が終わるとただちに隣接するクリーンルーム内で組立工程に移れるようになった。

工程における改善点として、精密部品洗浄剤 FM20 を使用して電解研磨後の空洞内面の超音波洗浄や真空部品の洗浄を行う様にした。クリーンルーム内での作業工程を逐一パーティクルカウンターで監視して、粒子が多く出る工程を調べあげた。その結果、まず作業前にクリーンルームの床と作業台の清掃を行う事にした。組立前に、使用するボルト類、真空部品、工具、空洞の開口部周辺をイオンガンを使用して清浄化を行う事にした。ウェアも短期間で洗濯済みの物に交換、使用する手袋も粒子の少ないタイプに切り替えた。これらの地道な改善により電界放出電子（フィールドエミッション）による空洞性能の低下という事象は減少した。

温度マッピング装置により空洞性能を制限する発熱箇所の特特定が可能になり^[8]、空洞内面検査装置により発熱箇所にある表面欠陥の観測が可能になった^[9]。表面欠陥のレプリカを作成して、その形状解析を行う事により、欠陥のサイズや形状の分析が可能になった。またその欠陥を修正する局所研磨装置も開発された^[10]。図3にこれらの装置を示す。

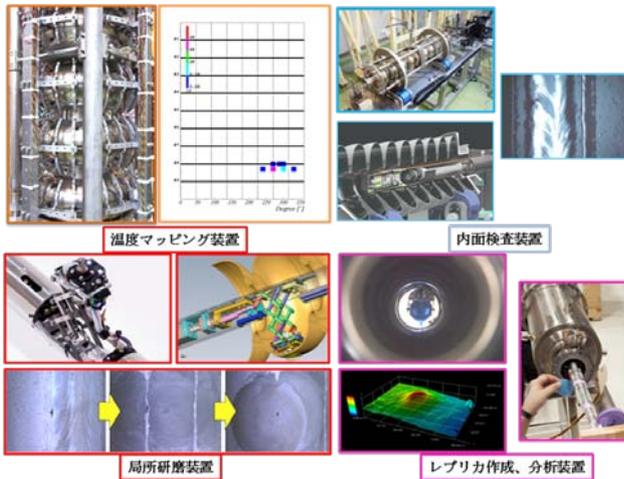


図3：空洞高性能化に必要な各種装置

電子ビーム溶接の最適化、処理工程における改善、そして空洞高性能化に必須であるこれらの装置を十分に活用した事で、MHI_05~MHI_09 空洞性能は MHI_01~ MHI_04 空洞に比べ飛躍的に向上した。図4に MHI_05~ MHI_09 空洞5台の縦測定結果を示す。

得られた表面欠陥のデータと縦測定の結果を組み合わせる事により、幾何学的欠陥の形状と最大加速電場の関係が分かってきた。これまでに縦測定が行われた MHI_01~MHI_09、AES_01、AES_03 の9セル空洞、ERL_01、ERL_02 の2セル空洞、計13空洞、103セルの内面検査から見つかった欠陥の幾何学的形状と得られた最大加速電場の関係を図5に示す。欠陥が勾配11度線以下に位置するなら空洞性能にはあまり影響がない事が分かった^[11]。また勾配11度線以上に位置する欠陥については局所研磨を行う事にした。

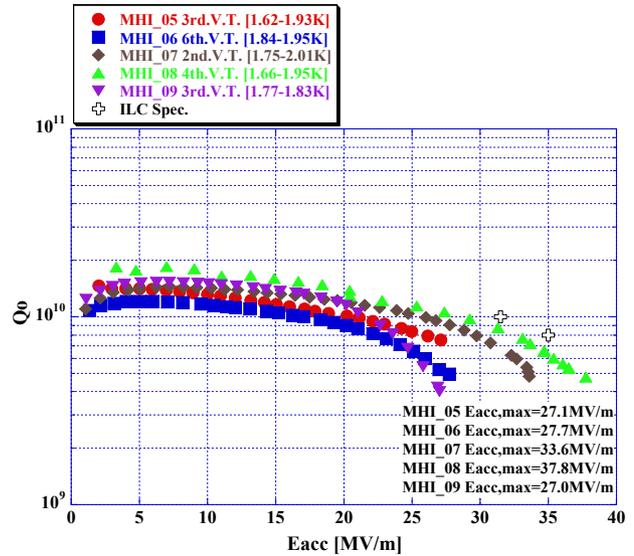
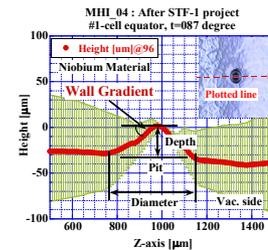


図4：MHI_05~MHI_09 空洞の縦測定結果



Relation of Spot size and Heating detected by T-map (Preliminary result)

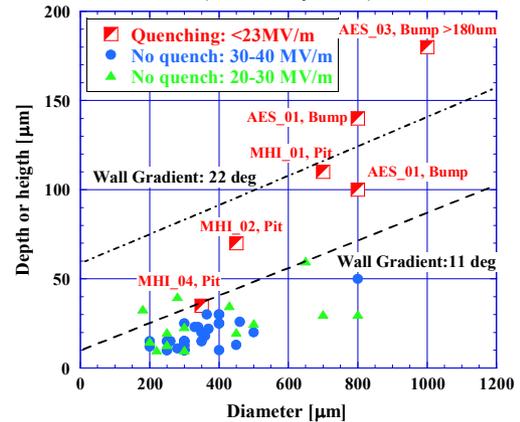


図5：幾何学的欠陥の形状と最大加速電場の関係

3.3 S0 計画から量子ビーム計画へ

S0 計画用 MHI_10、MHI_11 空洞が製作された。これは赤道溶接部をこれまでの突き合せ構造から印ろう構造に変更して製作された初めての空洞である。印ろう構造になったため S1-グローバル用空洞と赤道部電子ビーム溶接条件が変わってしまった。各々3回の縦測定を行い、最終結果は MHI_10 空洞；Eacc,max = 19.5 MV/m、Qo = 1.1*10¹⁰、MHI_11 空洞；Eacc,max = 18.1 MV/m、Qo = 1.7*10⁹であった。

続いて量子ビーム計画として実際にビーム加速に

使用される MHI_12、MHI_13 空洞が製作された。赤道溶接部は印ろう構造である。事前に行われた内面検査で赤道部の欠陥が MHI_12 空洞で 1 か所、MHI_13 空洞で 3 か所みつかったが、図 5 から問題のないレベルと判断された。また、アイリス部及びビームパイプ部には欠陥は見つからなかった。この結果から高性能が期待されたため、細心の注意を払って表面処理、組立が行われた。図 6 に MHI_12 空洞 1 回目縦測定の結果を示す。

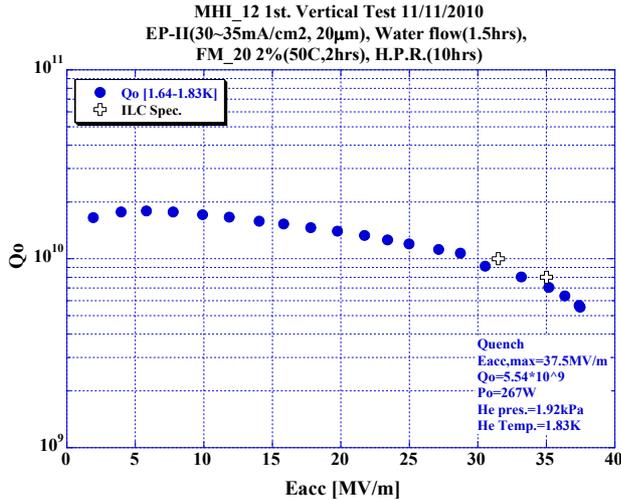


図 6 : MHI_12 空洞 1 回目の縦測定結果

得られた結果は予想通りであったが、ILC 要求仕様を満たせなかったため、再処理(EP-II 10 μm ; 通常 20 μm)して 2 回目の縦測定を行う事になった。MHI_13 空洞は、1 回目の縦測定から ILC 要求仕様を満たす事が出来た。

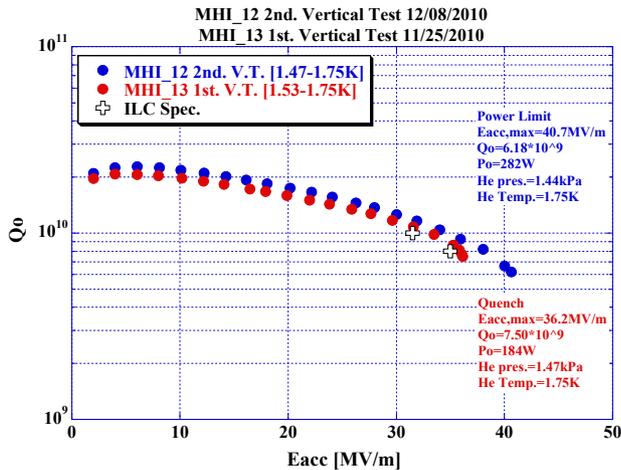


図 7 : ILC 要求仕様を満たした MHI_12、MHI_13 空洞の縦測定結果

MHI_12 空洞 2 回目の縦測定では ILC の要求仕様を満たすと共に、単セル K_14 空洞で達成して以来 15 年目にして、ビーム加速可能な 9 セル超伝導空洞としては国内で初めて最大加速電場 40 MV/m を達成出来た。図 7 に ILC の要求仕様を満たした縦測定結果を示す。この 2 空洞は量子ビーム計画用横型

クライオスタットへの組み込み準備が進行中である。

この時点での標準的な処理工程は次の通りである。Pre-EP (5 μm)→EP-I (100 μm)→アニール (750 °C, 3 時間)→低電流密度 EP-II (<40 mA/cm²; 20 μm)→温水超音波洗浄 (FM20 2%, 50 °C, 1 時間)→超純水高圧水洗 (8 MPa, 10 時間)→組立→ベーキング (100 °C, 48 時間)→空洞単体性能試験

3.4 STF-2 計画 ; MHI_14~MHI_22 空洞

量子ビーム計画に続いて STF-2 計画が進行中である。2011 年 6 月中旬までに、STF-2 計画用空洞 9 台の内、MHI_14 から MHI_17 空洞までの縦測定が行われた。その結果、MHI_14 空洞は 3 回目、MHI_17 空洞は 1 回目の縦測定にて ILC の要求仕様を達成する事が出来た。

処理工程の変更点として、MHI_17 空洞では、FM20 を使用した温水超音波洗浄時間を 15 分に短縮した。MHI_14 空洞は、2 回目の縦測定後の内面検査にて 8-9 アイリス部に傷が見つかり、局所研磨にて修正を施した。また、先に測定が行われた MHI_17 空洞の結果を踏まえ FM20 を使用した温水超音波洗浄時間を 15 分に、さらに超純水高圧水洗を 7 時間に短縮した。図 8 に ILC の要求仕様を満たした MHI_12、13、14、17 空洞の縦測定結果を示す。

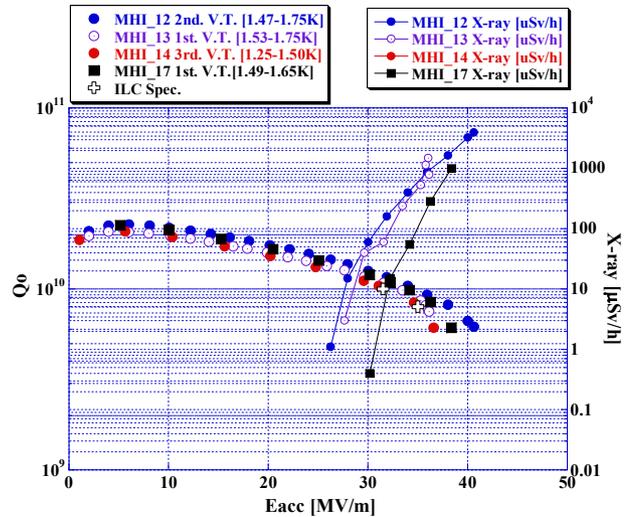


図 8 : ILC 要求仕様を満たした 4 空洞の縦測定結果

MHI_14 空洞では X 線が全く観測されず、また MHI_17 空洞でも少なかったのは注目すべき点である。これらの空洞処理に使用された電解研磨液へのニオブ溶け込み量は 10 g/L である。従来、ニオブ溶け込み量 9 g/L の液では空洞性能の劣化が起こると言われてきたがこの認識を覆す結果となった。また 3.3 で述べた標準処理工程で、FM20 と超純水高圧水洗時間を短縮しても問題ない事が明らかになった。

MHI_15 空洞は 2 回目の縦測定にて Eacc,max = 28.3 MV/m、Q₀ = 1.1*10¹⁰ を達成した。

MHI_16 空洞は 9 セル赤道部に存在する欠陥のために Eacc,max = 20.8 MV/m に制限された。この 2 空洞も ILC 要求仕様を満たす事を目標に再測定を行う予定である。

4. 空洞高性能化の要因

MHI_12 空洞以降に製作された 6 台の内 4 台で ILC 要求仕様を満たす事が出来た。さらに MHI_12 空洞はビーム加速が可能な 9 セル空洞としては国内で初めて最大加速電場 40 MV/m を達成した。高性能を実現させた要因は以下の様に考えられる。

(1) 電子ビーム溶接技術の向上

MHI_01~ MHI_04 空洞の測定結果から空洞性能を制限する原因は、主に電子ビーム溶接部での表面欠陥であると理解した。欠陥を減らすために溶接部の事前検査、清浄化処理、パラメータの変動に対して安定領域の広い溶接条件の探し出し、溶接環境の整備、清浄化を行った事で欠陥のない滑らかな溶接が可能になった。

(2) STF 棟の設備整備

STF 棟で空洞表面処理が行える様になり、処理終了後、隣接するクラス 10 クリーンルームでただちに組立工程へ入れる様になった。

(3) 測定装置の整備

内面検査装置や温度/X線マッピング装置が整備され、空洞性能と欠陥の形状との関係が理解された。局所研磨装置により空洞性能を制限する欠陥を事前に除去する事が可能になった。

(4) 表面処理、部品洗浄、組立工程の改善

空洞内面の超音波洗浄や部品洗浄に精密部品洗浄剤 FM20 を使用する、作業前にクリーンルームの清掃を必ず行う、組立時にイオンガンで部品の清浄化を行う、粒子の少ない手袋を使用する、ウェアは短期間で交換するといった変更により、クリーンルーム内環境が改善された。

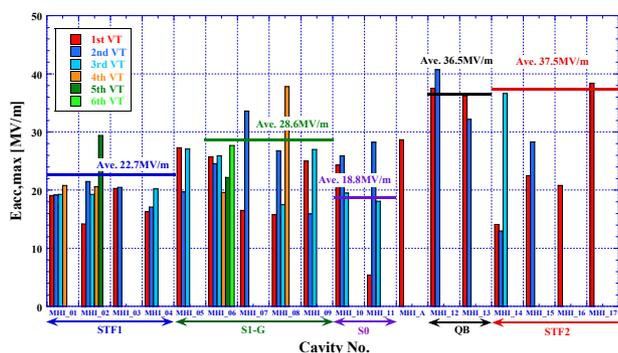


図 9：縦測定で得られた最大加速電場のまとめ

図 9 に各空洞毎の縦測定で得られた最大加速電場のまとめを示す。MHI_A 空洞は、新しい製作工法の検証と確立のために製作された試験空洞である。

MHI_05 から MHI_17 空洞、日立製 9 セル HIT_01 空洞、東芝製 9 セル TOS_01 空洞、ERL 入射器用 2 セル ERL_01 から ERL_03 空洞まで、我々が行った全ての縦測定結果は、ドイツ DESY のデータベースに登録され公開されている^[12]。

5. まとめ

量子ビーム計画用 MHI_12、13 空洞、STF-2 計画用 MHI_14、17 空洞で ILC 要求仕様を満たす性能を達成出来た。MHI_12 空洞以降製作された 6 台の内 4 台で ILC 要求仕様を達成出来たのは着実な進歩である。特に MHI_12 空洞は、1996 年に TESLA 計画用 1.3 GHz 単セル超伝導空洞で 40 MV/m を達成して以来 15 年目にして 40 MV/m に到達した、日本国内で初めてのビーム加速可能な 9 セル超伝導空洞である。高性能化の要因としては電子ビーム溶接技術の向上と溶接環境の改善、STF 棟内での空洞表面処理設備とクリーンルームの整備、組立工程における地道な改善があげられる。

謝辞

空洞の製作に関して三菱重工(株)の仙入克也氏、表面処理に関して野村鍍金(株)の鈴木隆房氏、STF 棟での表面処理に関して KEK 放射線センターの沢辺元明氏の多大なるご協力に感謝いたします。

さらに、日本アドバンスドテクノロジー(株)、ケーバック(株)およびアシストエンジニアリング(株)の皆様には、組立工程、低温性能測定、内面検査、表面処理において惜しみないご協力を得ましたので、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 第 1 回超伝導リニアック研究会報告集 KEK Proceedings 98-12、第 2 回超伝導リニアック研究会報告集 KEK Proceedings 99-25、第 3 回超伝導リニアック研究会報告集 KEK Proceedings 2000-23.
- [2] 加古永治 博士論文“高電界応用のための L バンド超伝導加速空洞システムの開発に関する研究” 2010 年度。
- [3] E. Kako, et al., “Pulsed Operation of 972 MHz Prototype Cryomodule for ADS Superconducting Linac”, Physica C 441(2006) p220.
- [4] 樋口玉緒 博士論文“新しい機械研磨と電解研磨による水素吸蔵を起こさない超伝導空洞の表面の処理法の開発” 2002 年度。
- [5] E. Kako, et al., “Cryomodule Test of four Tesla-like Cavities in the Superconducting Test Facility at KEK”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, Vol.13, 041002 (2010).
- [6] 山本康史, 他 “KEK-STF における ILC に向けた S1-Global 計画のクライオモジュール試験の結果” 本研究会。
- [7] STF Group, “STF Phase-I Activity Report”, KEK Report 2009-3 (2009).
- [8] Y. Yamamoto, et al., “Summary of Results and Development of Online Monitor for T-mapping /x-ray-mapping in KEK-STF”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan (2010) p3371.
- [9] Y. Iwashita, et al., “Development of High Resolution Camera for Observation of Superconducting Cavities”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 093501 (2008).
- [10] K. Watanabe, et al., “Repair Techniques of Superconducting Cavities for Improvement Cavity Performance at KEK-STF”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan (2010) p2965.
- [11] 渡邊謙 “空洞縦測定-最近の結果” LC 技術検討会 2011 年 1 月 11 日 発表資料。 http://lcdev.kek.jp/LCoffice/OfficeAdmin/IMAGES/Performance_Cavity_vertical_test.pdf
- [12] http://tesla-new.desy.de/cavity_database/rf_tests/