

# SUMMARY OF VERTICAL TESTS OF SUPERCONDUCTING CAVITY FOR THE ILC AT KEK-STF

Y. Yamamoto<sup>#</sup>, H. Hayano, E. Kako, T. Kubo, 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 STF-2 have finished successfully using MHI-14 through MHI-22 last year. Every other cavity except for MHI-16 attained above 35 MV/m in the accelerating gradient. In vertical tests, it is the first time at KEK-STF that every cavity to be used in the cryomodule attained above 35 MV/m. From the detailed data analysis of the vertical tests, it becomes clear that the heating cell at the quench concentrates on the cells #1, #2 and #9. And, the cavity performance does not depend so much on the condition of the Electro-Polish (EP) and rinsing process as expectations. As one example, the result of the vertical test without the degreasing process will be reported. On the other hand, as the collaboration project between KEK and Peking University, one large grain 9-cell cavity was measured a few times to study the performance of the large grain. This cavity has the high  $Q_0$  of about  $3 \times 10^{10}$  at the low gradient.

## KEK-STF における ILC のための超伝導空洞の性能試験のまとめ

### 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。来年度行われる STF Phase-2 (STF-2) 計画のための 9 台の空洞を用いた一連の縦測定が昨年終了した。一台の空洞を除く 8 空洞が ILC の要求性能[1]である 35 MV/m 以上に到達し、2015 年に行われるクライオモジュール試験にてビーム運転時の要求性能である 31.5 MV/m (平均加速勾配) で運転が行える期待が高まっている。縦測定合格後のクリーンルームでの空洞連結作業はすでに始まっており、9 月中に終了する予定である。

空洞の縦測定前に通常、電解研磨(EP)による表面処理、中性洗剤と超音波システムによる表面洗浄(Degreasing)、最後に高圧水洗(HPR)が行われるが、これらのプロセスが空洞性能にどれほどの寄与を及ぼしているのか、を調査する試験も行われている。実際に ILC の建設が始まる際には、作業時間は人件費となってコストに影響を及ぼすため、出来るだけ簡略化されたプロセスになっていることが求められる。空洞性能が比較的簡単に達成できるようになった後は、このようなコストダウンに向けた R&D が主体的に行われるようになるであろう。

### 2. 縦測定の最新結果

昨年までに STF-2 における CryoModule-1(CM-1)用の全空洞の性能試験は終了し、9 空洞の内、8 空洞が 35 MV/m を超える結果となり、空洞性能達成に関しては一定のレベルに到達したものと考えられる[2]。図 1 は量子ビーム及び STF-2 における CM-1 用空洞の最良の  $Q_0$  vs.  $E_{acc}$  カーブである。また、図 2 は上記空洞に加えて、メーカーとの共同研究で製

作された MHI-C および HIT-02 の 2 空洞の最高到達加速勾配が示されている。MHI-16 を除く全空洞が 35 MV/m を超えている。一方、 $Q_0$  値に関してはスペックを満たしていないものが多いが、この理由及び対処法については最後に触れたい。最大加速勾配で空洞性能を制限している理由は、RF の投入パワーが許容値(~250 W)を超えていることに因るものがほとんどであり、 $Q_0$  値を改善させることによって最大加速勾配はまだ増加する可能性が高い。ちなみに、MHI-12 から MHI-22 までの平均の最大加速勾配は 36.8 MV/m である。

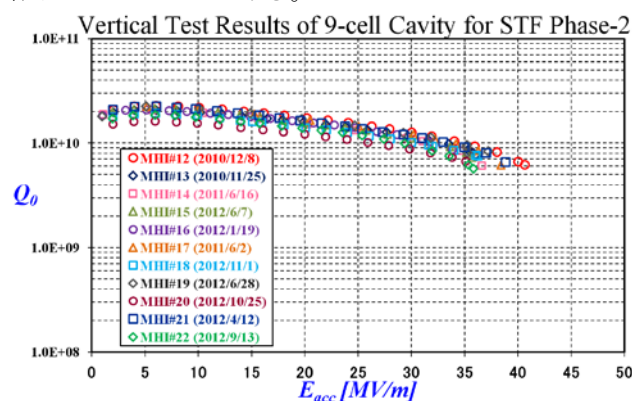


図 1 : 量子ビーム及び STF-2 における CM-1 用空洞の最良の  $Q_0$  vs.  $E_{acc}$  カーブ。35 MV/m で  $Q_0$  が  $0.8 \times 10^{10}$  を超えることが目標である。MHI-16 を除いて、いずれの空洞も 35 MV/m を超えている。

<sup>#</sup> yasuchika.yamamoto@kek.jp

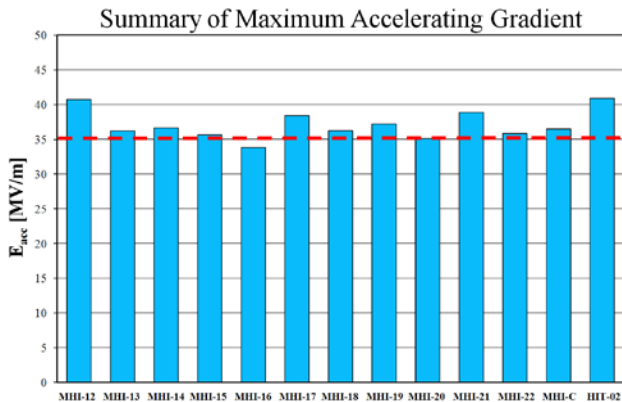


図2：MHI-12 から MHI-22, MHI-C, HIT-02 の縦測定における最高到達加速勾配。加速勾配の目標値は 35 MV/m (赤い点線) である。MHI-C (後述) および HIT-02 はメーカーとの共同研究で製作された空洞である。

### 3. 最近の取り組み

#### 3.1 製造工程を簡略化した空洞の性能試験

MHI-C はメーカーとの共同研究で製作された空洞であるが、これまでの製法とは大きく異なり、将来の量産化を意識した方法が試された。具体的には、レーザー溶接の導入、多ダンベル連続溶接、などであるが、製法についての詳細は[3]にあるので、ここではその性能試験の結果に焦点を絞る。図3はこの空洞に対して行われた4回の縦測定の結果である。安定的に 36 MV/m 以上に達しており、よい性能を示しているといえる。3回目の縦測定までは Cell #1 のある場所が発熱を起こし、クエンチしていたが、4回目では Cell #2 に発熱箇所が移動した。一方、放射線量に関しては、1回目では field emission の影響により大きかったが、その後アイリス部の局所研磨 (後述) を実施したところ、2回目では全く出てこなくなった。

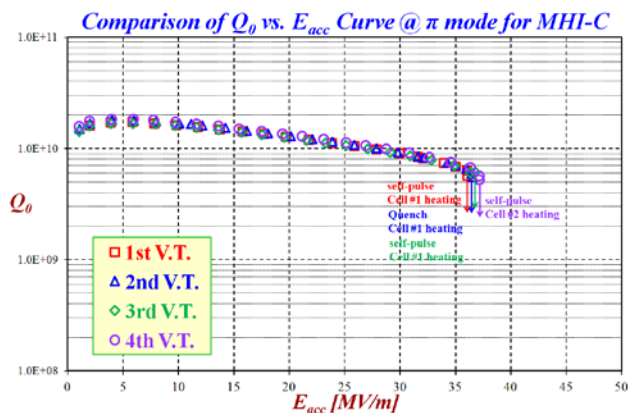


図3：MHI-C 空洞の4回に亘る縦測定時の  $Q_0$  vs.  $E_{acc}$  カーブ。3回目の縦測定までは Cell #1 で、4回目では Cell #2 で発熱が起こり、性能が制限された。安定的に 36 MV/m 以上に到達する性能のよい

空洞である。

#### 3.2 アイリスの局所研磨の実施

空洞のアイリス部に局所研磨を実施すると、その後の縦測定において放射線量が激減する、ということが HIT-02 空洞で判明し、昨年の学会にて報告された[4]。その後、何台かの空洞で同様の現象が確認され、電解研磨だけでは放射線量を軽減するには不十分である、という認識を得た。図4は、このことを明確に表している結果で、電解研磨だけを実施した空洞では 35 MV/m において放射線量が 100  $\mu$ Sv/h 以上であるのに対し、アイリスを研磨した空洞では同じ加速勾配で 100  $\mu$ Sv/h 以下となっているのが分かる。さらに、放射線が全く観測されない空洞もあり、電解研磨だけを実施していたのでは、到底このレベルに達しないものと思われる。この実験結果を裏付けるような追加的調査は行われていないが、おそらくはアイリス部の細かい構造(ミクロンオーダー以下と思われる)が放射線量と密接に繋がっているものと理解される。STF では現在、放射線量の多い空洞に対しては、アイリス部の局所研磨が積極的に用いられている。

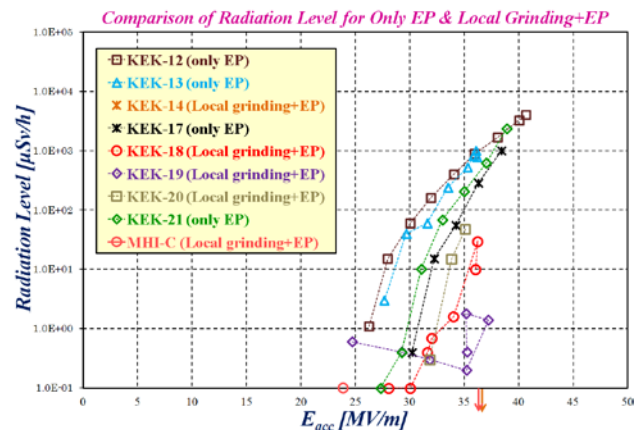


図4：電解研磨のみを行った空洞と局所研磨も取り入れた空洞との放射線量の比較。電解研磨のみを行った空洞の放射線量は 35 MV/m で 100  $\mu$ Sv/h 以上であるのに対し、局所研磨も実施した空洞では 100  $\mu$ Sv/h 以下である。さらに、MHI-14 および MHI-C については全く観測されなかった (下向き矢印)。

#### 3.3 国際共同研究による空洞の性能試験

PKU-04 は北京大学にて製作された TESLA タイプの空洞で、Large Grain のニオブ材が用いられている。KEK との国際共同研究の一環で、この空洞の表面処理、および性能試験を STF にて複数回行うことになった。通常、STF にて行われる全ての作業をこの空洞に対しても行った。すなわち、受け入れ検査、EP1(100  $\mu$ m)、アニール、内面検査、プリチューニング、EP2(20  $\mu$ m)、縦測定、再内面検査、等である。図5は2回目と3回目の縦測定の結果 (左軸)、およびその時の放射線量 (右軸) の比較である。この空洞に対しては、1回目と2回目および2回目と3

回目の縦測定の間でそれぞれ局所研磨が実施され、Cell #3に見つかった2つの defect が除去されている。

図5において7 MV/m 辺りの  $Q_0$  値が Fine Grain 空洞に比べて高いという Large Grain 空洞に特有の現象が見られる (図3と図5を見比べてほしい)。この特長のため、Large Grain のニオブ材を ILC に使用すればエネルギー効率が改善する、という期待がある。しかし、機械的強度が Fine Grain のニオブ材に比べて若干低下する、という事実も判明しており、実際に使用するまでにはいくつか R&D を経る必要がある。

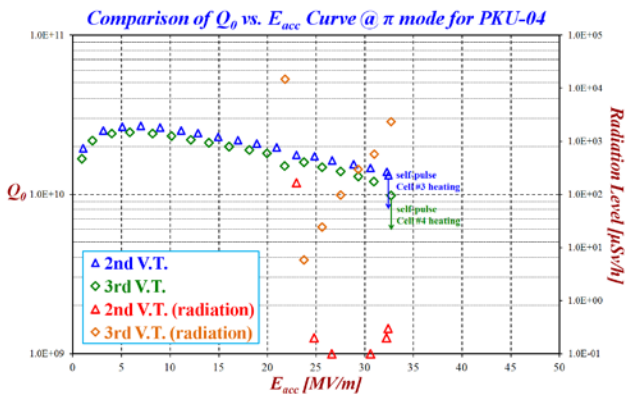


図5 : PKU-04 空洞の2回目と3回目の縦測定の結果。左軸に  $Q_0$  vs.  $E_{acc}$  カーブ、右軸に放射線量を示す。Large Grain 空洞に特有の高い  $Q_0$  値の特長が見られる。2回目の縦測定放射線量はほぼ 0  $\mu\text{Sv/h}$  であった。一方、3回目の縦測定では field emission の傾向が見られる。

### 3.4 表面処理工程を簡略化した空洞の性能試験

空洞の表面処理については、実に多くのパラメータが存在し、それらの効果を逐一把握していくのは非常に困難である。同様の表面処理において、その効果を何度も確認しないと、本当に効果があるのかどうか判別出来ないからである。しかし、STF 完成当初に比べると最近の表面処理工程はかなり簡略化されており、時間短縮が図られている。これは、実際に ILC を建設するためにはコストを削減する必要があり、そのために作業時間も出来る限り短縮する必要があるからである。表1は STF 当初と最近の表面処理工程に関する比較である。数年前と比較して、最近の処理工程は時間的に大分短縮されていることが容易に見てとれる。

表1 : STF 当初と最近の表面処理工程に関する比較

C.Y.	2008~2009	2012~2013
EP	20~50 $\mu\text{m}$ (> 1 hrs)	2~5 $\mu\text{m}$ (< 15 min.)
Degreasing	60 min.	15 min.
Brushing	Skipped	Done
HPR	~600 min.	370 min.
Baking	100 $^{\circ}\text{C}$ /48 hrs.	140 $^{\circ}\text{C}$ /44 hrs.

通常、STF では電解研磨の後に、一次水洗 (90分)、Degreasing、高圧水洗、の順で洗浄作業が進んでいくが、この中の Degreasing をスキップした場合にどのような影響が出てくるかを調査する実験を MHI-C 空洞を用いて行った。3回目の縦測定までは通常の作業手順で行われ、4回目の表面処理を行う際に Degreasing がスキップされた結果を図6に示す。上図が  $Q_0$  vs.  $E_{acc}$  カーブで、下図が放射線量である。ILC の要求性能を達成するためには、35 MV/m における放射線量が 1  $\text{mSv/h}$  以下であり、またアイリスの局所研磨を実施した空洞に対してはさらに桁低い 100  $\mu\text{Sv/h}$  以下である必要がある、ということが経験的に分かっている。今回の Degreasing をスキップした結果はこれを満足するもので、Degreasing の効果に疑問符が付く結果となった。もちろん、まだ一例のみであるため今後、同様の処理を行った縦測定を複数回実施し、実例を積み重ねていく必要がある。しかし、表面処理工程にはまだ簡略化できる余地がありそうで、作業手順の最適化を再検討する時期に来ているのかもしれない。

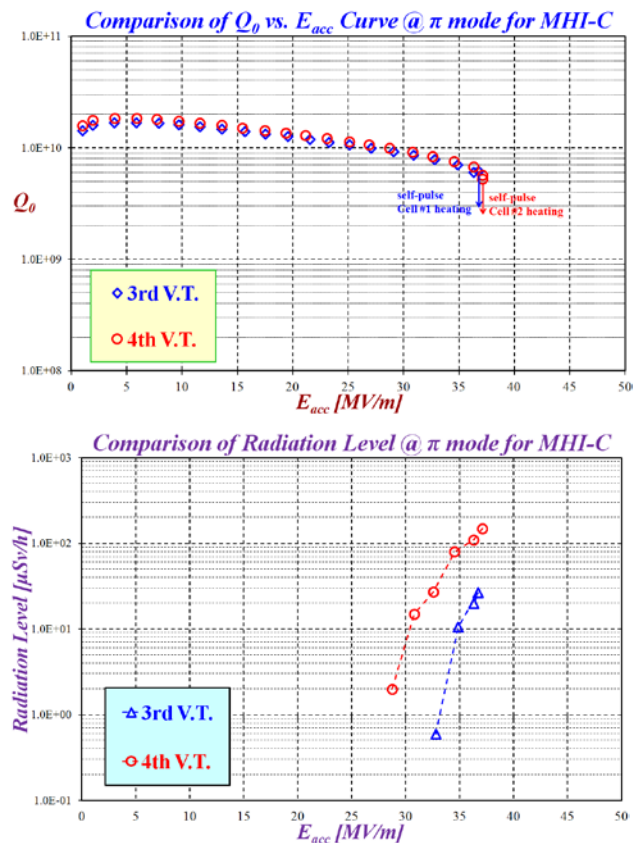


図6 : MHI-C 空洞に対して実施された Degreasing をスキップした場合と通常の場合との縦測定結果の比較。3回目が通常の作業手順で行った場合で、4回目は Degreasing をスキップした場合に相当する。 $Q_0$  vs.  $E_{acc}$  カーブ (上図) には特に変化が見られない。放射線量 (下図) には若干の増加が認められるが、依然として許容レベル (35 MV/m で 100  $\mu\text{Sv/h}$  以下) であり大きな影響を受けていないことが分かる。



#### 4. 縦測定データの詳細な解析結果

縦測定データの詳細な解析を行った結果、いくつか面白い事実が判明したので、一部をここに紹介する。

図7は温度マッピングにより判明した $\pi$ モードのクエンチ箇所(セル)を示したものである。上図の横軸は各セルの番号で、縦軸はそこでクエンチが起こった回数を表している。下図は温度マッピングによるクエンチの位置である。全データ数は48回で、縦測定中にクエンチが起きなかったものについては除外されている。これを見ると、両エンドセル(Cell #1 および#9)にクエンチが集中しており、さらにCell #2にもクエンチが多く起こっていることが分かる。一方で、Cell #3 から#8 に到るセンターセルではクエンチはあまり起きておらず、統計的に明らかな偏りが認められる(Cell #6 についてはクエンチが全く起こっていない)。ちなみに、DESY 研究所のデータにも同様の傾向が見られ[5]、偶然による一致とは考えにくい。この結果の意味するところは俄かには分からないが、セルの赤道部の溶接についてはセンターセルとエンドセルとでは肉厚が異なるため、溶接条件は必ずしも同じではない。また、エンドセルに対してはビームパイプが溶接されるが、この溶接はやや特殊な条件で行われるため、何らかの影響が残る可能性はある。実際に、エンドセルとビームパイプ間の溶接不良が原因で field emission が発生したと思われる現象が過去に STF で観測されている[4]。これらの事実からエンドセルはセンターセルとは異なる性格を持つ、と考えるても何ら不思議ではない。

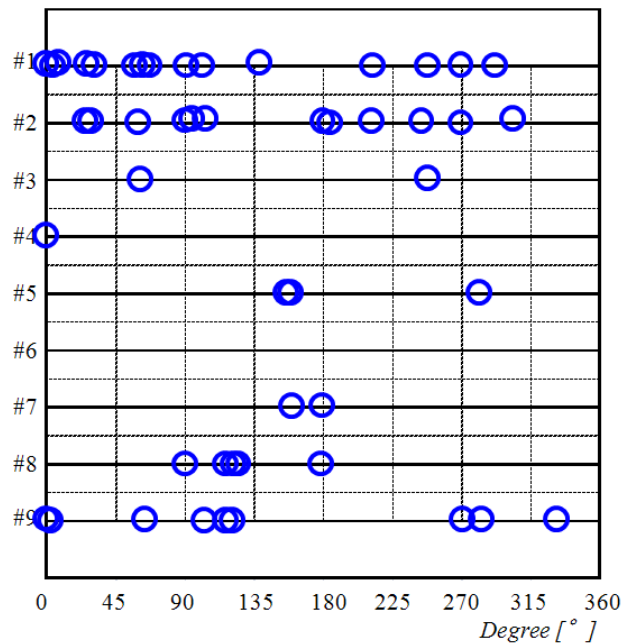
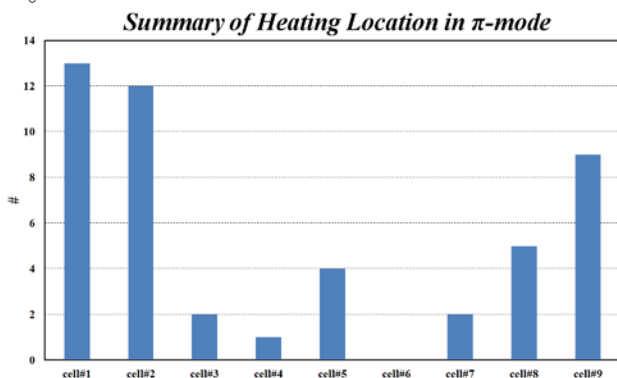


図7：縦測定のパモードにおけるクエンチの際の発熱箇所(セル)のまとめ。上図が各セルにおけるクエンチ回数、下図が温度マッピングによるクエンチ箇所を示す(横軸の0°の位置が入力結合器のある角度)。両エンドセル(Cell #1 および#9)および Cell #2 にクエンチが集中している。一方、角度領域に関しては顕著な差は見られず、比較的満遍なくクエンチが起こっているようである。

#### 5. まとめと今後の予定

昨年の時点で、空洞の性能達成については壁を突破したものと見られるので、今後はより簡略化された表面処理を目指すことや、新規に製作された空洞をなるべく1回の縦測定で ILC スペックに到達させるなどの R&D が主になっていくものと思われる。また、冒頭で触れたが、STF の縦測定用クライオスタット内の残留磁場が海外の研究所に比べて高く(典型的に 20 mG 以上)  $Q_0$  値のマーヅンが少ないことが問題となっており、これを解消するため磁気シールドを強化することを検討中で、今年度中に実施する予定である。

#### 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、NAT の浅野氏、今田氏、柳町氏、植木氏、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、三菱重工業の仙入氏、原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。北京大学の K. Liu 氏、J. Hao 氏に Large Grain 空洞の貸与に対して感謝申し上げたい。

## 参考文献

- [1] ILC Technical Design Report  
(<https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>)
- [2] 山本 康史, 27pHA-03, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 2013 年 3 月.
- [3] F. Inoue et al., TTC Meeting 2012, J-Lab, U.S., Nov/2012.  
(<https://www.jlab.org/indico/conferenceDisplay.py?confId=24>)
- [4] 山本 康史, THLR03, 第 9 回日本加速器学会年会, 大阪大学, 2012 年 8 月.
- [5] F. Schlander et al., ILC-HiGrade-Report-2012-002-1, DESY, Hamburg, Germany, Oct/2012.