

超伝導空洞における50 MV/m 高電界の達成

KEK 加速器研究施設

古田 史生

furuta@post-cbandlc.kek.jp

2006年2月16日

1. はじめに

KEK を拠点とする ILC-WG5-Asia は、2006年1月現在、三つの新しい形状の単空洞で45 MV/m 超の高電界を達成した。Cornell 大学が設計・製作し、KEK が表面処理を行った Reentrant 型単空洞 (RE) JLAB/DESY が設計し、KEK が製作した Low Loss 型単空洞 (LL) さらに LL 形状をベースに KEK が設計・製作した ICHIRO 単空洞 (IS 後述) の三種である。RE 型空洞は、Cornell 大で2004年末に46 MV/m を達成したが、Cornell 大がそれとは別の RE 空洞を KEK に送り、KEK が表面処理を施し、2005年7月に47 MV/m を達成した。KEK はこの空洞に高圧超純水洗浄処理を追加し、52.3 MV/m の世界記録を樹立した。その後、KEK は LL 空洞で47.3 MV/m、IS 空洞で51.4 MV/m を達成し、ILC 計画の高電界空洞の開発に拍車をかけている。

2. KEK における空洞開発

20年の歴史を持つ KEK の超伝導空洞開発では、高純度ニオブ材の開発と電解研磨法を主体とする独自の空洞表面処理技術、空洞製作技術によって、単空洞での高電界世界最高記録を塗り替えてきた。KEK は図1に示すように、1994年に清浄表面の製作技術として高圧超純水洗浄 (HPR) を実用化し、フィールドエミッション問題の長い歴史に王手をかけた。HPR により高電界を30 MV/m から40 MV/m に改善し、40 MV/m へのブレークスルーをもたらした。さらに、2005年新しい空洞形状の採用によって十年來の壁であった40 MV/m の限界を破り、50 MV/m の加速電界を達成し、二度目のブレークスルーを成し遂げた。

50 MV/m の実現は、2001年に KEK の斎藤健治が提唱した40 MV/m に対する理論限界説の再解釈と、それに基づく新形状の空洞設計による。斎藤によれば、図1に見られる

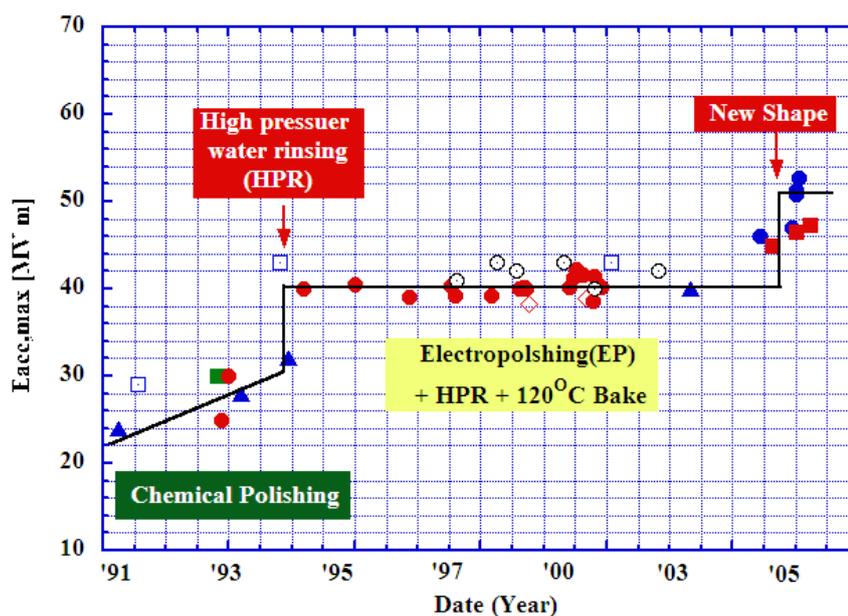


図1: KEK における空洞 R&D での二度のブレークスルー

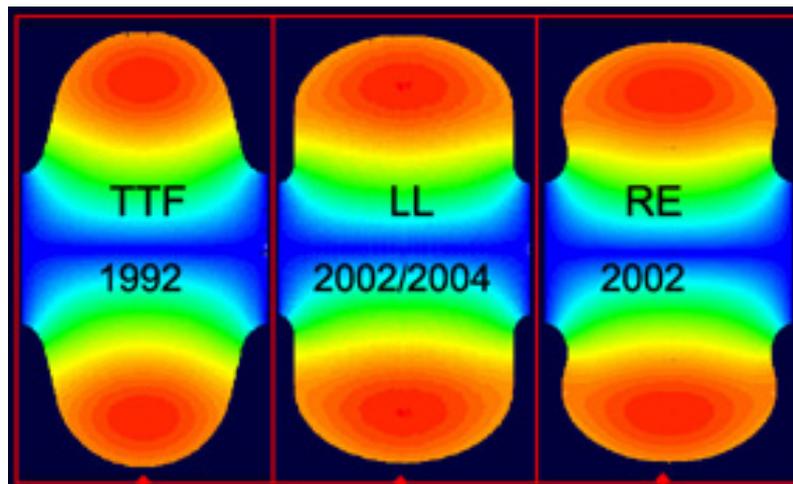


図 2：空洞セル形状の比較（TTF=TESLA Test Facility）

表 1：空洞パラメータの計算値

	TESLA	Low Loss	Reentrant	Ichiro Single
$Diameter$ [mm]	70	60	60	61
E_p / E_{acc}	2.0	2.36	2.21	2.02
H_p / E_{acc} [Oe/MV/m]	42.6	36.1	37.6	35.6
R/Q [W]	113.8	133.7	126.8	138
G [W]	271	284	277	285
$E_{acc} \max$ [MV/m]	41.1	48.5	46.5	49.2

TESLA 形状での 1994 年来の 40 MV/m の制限は、ニオブ超伝導特性（高周波臨界磁場）に由来する理論限界であり、その値は 1750 Oe である。それを考慮して、空洞最大表面磁場 (H_p) と空洞中心軸上の加速電界 (E_{acc}) の比、 H_p / E_{acc} 、が小さくなるように空洞形状を設計すれば、この理論限界の中でも 50 MV/m 近い高電界が期待できると提案した。これは、フィールドエミッション対策を重視し、最大表面電場 (E_p) と加速電界の比： E_p / E_{acc} が小さい形状を選択してきたこれまでの設計概念に変更を迫るものであった。この提案に基づいて 2002 年、Cornell 大で RE 形状を、JLAB/DESY では LL 形状の空洞を設計した。図 2 に TESLA 形状と LL 形状、RE 形状を、表 1 にそれぞれの空洞パラメータの計算値を比較する。LL、RE 形状では H_p / E_{acc} が TESLA 形状に比べ 15% ほど小さく、結果その分だけ高い電界（ ~ 47 MV/m）を達成できると予想される。

3. 50 MV/m 空洞の達成

ILC に向けて、2004 年 11 月に KEK で 1st ILC Workshop が開かれ、5 つのワーキンググループ (WG) を立ち上げた。空洞開発を受け持つ ILC-WG5-Asia は KEK の齋藤健治をリーダーに、2005 年 3 月までに LL、RE の新形状単空洞による 45 MV/m の実証、2005 年 9 月までに 9 連空洞で 45 MV/m 達成を目標にスタートした。この開発計画では、

まったく実績のない段階で大胆にも 45 MV/m の高電界を目標にしており、世界は aggressive と批判的であった。KEK でも、WG5 のメンバーの多くは常伝導空洞から参加しており、当時超伝導空洞には何のアイディアも持ち合わせず、この計画は正に「齋藤教」であると冗談を言われていた。私もちょうどこの時期に WG5 に参加し、初めて超伝導空洞開発に足を踏み入れた。その時から現在にいたるまで、KEK の WG5 における空洞開発は私を含めた新人教育の場ともなり、様々なトラブルを克服しながらの歩みであった。しかし、トラブルは空洞表面処理のコントロールミスや、空洞アセンブルの失敗、RF ケーブルを含めた空洞性能測定システム周りの故障といった初歩的なもので、致命的なものではなかった。単空洞での 45 MV/m 高電界の実証が、目標の 2005 年 3 月から 7 月にずれこんだが、その原因は、新人教育やしばらく休止していた空洞開発の再立ち上げに時間を要したためである。

これらのトラブルを克服し、表面処理から測定にいたるまでミスがないと確信して臨んだのが、2005 年 7 月 29 日の RE 空洞に対する 8 回目の測定であった。私は、このことを一生忘れないだろう。空洞に再度、電解研磨と高圧超純水洗浄を施し測定したが、40 MV/m でクエンチした。依然として 40 MV/m の壁を越えられなかった。「齋藤教はやっばしまやかしか！」一瞬その思いが過った。しかし、

ドラマは翌日起きた。私は、このバリアーは超えられるかも知れないという予感があり、翌7月30日、液体ヘリウムを追加し再測定を行い、40MV/m付近でのプロセッシングを丹念に行った。その結果、ついに40MV/mの壁を破り47MV/mに到達することに成功した。翌31日(日)朝、斎藤さんがやって来て、達成感を共有した。そのとき、斎藤さんに「君が45MV/mの新しい世界を切り開いたんだぞ。」と言われた。研究の本当の面白さ、ほのかな自信を感じた瞬間だった。その後、米国 Snowmass での 2nd ILC Workshop があり、スケジュールの都合上9月になってしまったが、LL 空洞に対しても同様に電解研磨+高圧超純水洗浄の再表面処理を行い測定した結果、46.5MV/mを達成した。また、その後の再処理で47.3MV/mを達成した。さらにRE 空洞の再測定では52MV/mを達成した。46MV/mの達成では Cornell 大に先を越されたが、単空洞での世界記録を樹立した。このRE、LL 空洞による新形状空洞によって40MV/mの壁を破ることができるという実証をなし、50MV/mの高電界の新たなブレークスルーの現場に運よく立会い、身の震える感動をした。後述するが、新たに作成したIS 空洞でも今年1月に51.4MV/mを達成し、新形状の単空洞すべてで、45MV/mの高電界という目標を達成した。図3にRE、LL、IS 空洞の電界測定結果を示す。KEKで設計したLL 空洞に ICHIRO と名付けた。これは、設計当初から51MV/mの達成を意識したもので、イチローの背番号にちなんでいる。ここに来て、大胆な ICHIRO 空洞のシナリオは、話が旨過ぎる程よくまとまった。現場は決して楽とはいえないが、自分自身が高電界の世界記録を頻繁に発信できることが何よりもエキサイティングである。

4. 9 連空洞の開発と性能試験

LL 空洞、RE 空洞での45MV/m実証試験と並行してKEKではILC実機モデルとなる ICHIRO 9連空洞の製作を進めた。 ICHIRO 形状はLL 形状をベースにKEKの両角祐一が改良したもので、KEK 周辺の中小企業をベースに製作した。ちなみに、この ICHIRO 形状の9連空洞製作の途中で、同じ ICHIRO 形状の単空洞も製作することになり、Ichiro-Single cavity という事よりIS 空洞と名づけた。

土曜はもちろん、日曜日にもしばしば研究所に出勤しながら、われわれは数ヶ月かけ4台の ICHIRO-9 連空洞を製作した。もちろん、これはわれわれのみならず、製作にたずさわった企業の協力の賜物である。最初の1台がKEKに到着した日の喜びは格別であった。KEK-WG5 表面処理レシピ(後述)を施し、1台目の性能試験を2005年7月に行った。このときは非常に厳しいマルチパクティング(MP)で制限され、到達最大電界は21MV/mであった(図4)。MP 現象は単空洞でも起こり、通常20~25MV/m付近の壁となる。この壁はクエンチを意図的に繰り返し、空洞表面に対するエージングを行なうことで、越えることができる。これを空洞に対するプロセッシングと呼び、25MV/m付近の壁を越えると一気に40MV/m超の高電界に到達する。プロセスしても37MV/m付近でクエンチしてしまったり、MP によってフィールドエミッションカレントが引き起こされて、45MV/mに到達できないこともある。9連空洞におけるMPのプロセッシングは単空洞よりも厳しいことが予想され、MPの低減は重要課題の一つといえる。

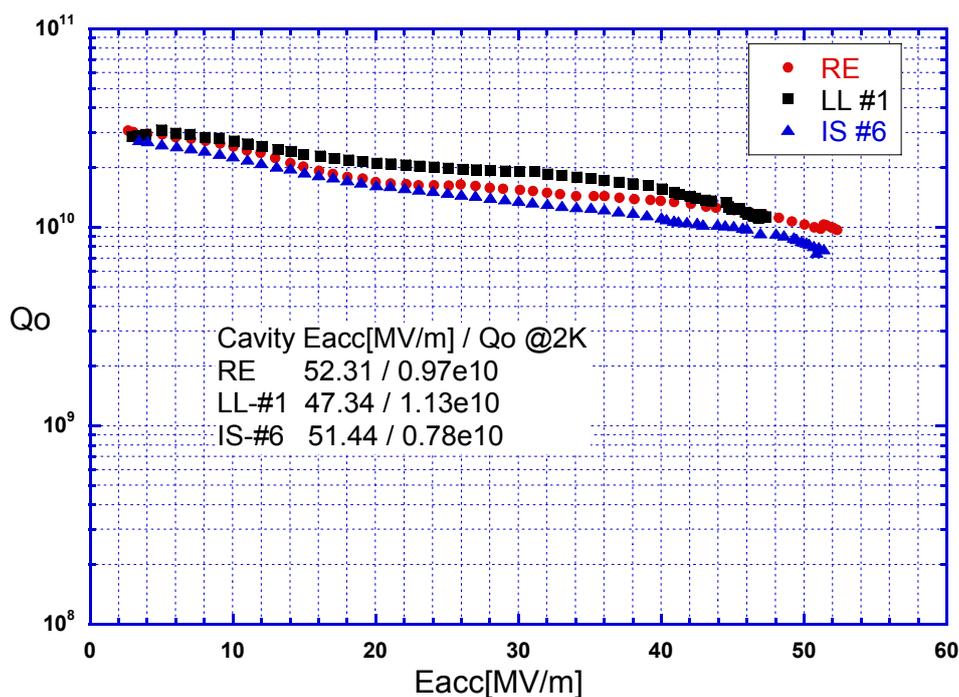


図3: RE、LL、IS 空洞の結果

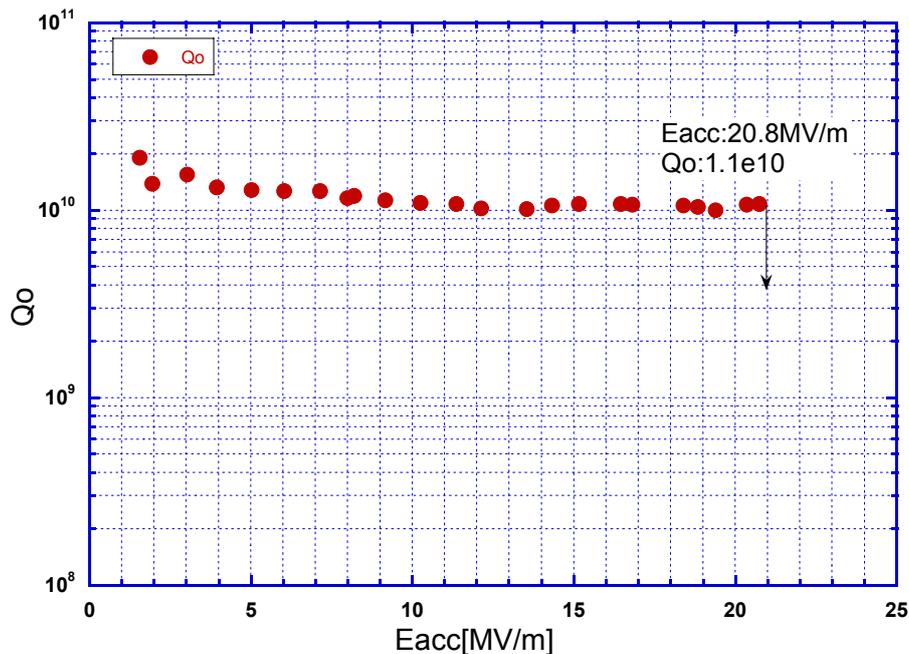


図4：9連空洞1台目の第1回測定結果

2005年7月段階で、われわれは単セル空洞の45 MV/mの実証はもちろん9-cellでの45 MV/mの実証にはいたらず、ILC Internal Reviewを7月27日に迎えた。

そのような状況から、このReview委員会では「単空洞での45 MV/m高電界実証に集中せよ」との勧告が出された。この勧告に従ってWG5は単セル空洞での45 MV/mの実証、表面処理方法の信頼性の確立、MP現象の低減を新たな目標に再スタートした。9連空洞にはこれらの研究結果をフィードバックすることにした。私自身は「45 MV/mは出る」と信じて進んで、上に述べた7月29-30日のRE空洞における47 MV/mの達成にたどり着いた。これは、このReview委員会のまさに二日後であった。

5. 単空洞による試験

(1) 高電界の再現性試験と水質の影響

RE、LL空洞での高電界達成後、すぐに次のステップへ向かった。まず、高電界性能の再現性を試験した。この試験では、空洞表面処理のどのステップまで戻って評価するか議論があったが、最終表面処理から一つずつ戻りながら性能測定をすることにした。空洞に高圧超純水洗浄処理のみを追加した試験から始めた。その結果、RE、LL両空洞で高電界性を再現できた。ここで、再現性と一口に言っても、この試験には測定後の空洞の分解作業に始まり、表面処理、運搬、組み立て、真空排気、測定といった一連の工程すべての信頼性が含まれる。この試験結果で、自分のスキルがアップしているという自信が得られた。

この頃から空洞測定に対して「次回、性能が出るだろう

か」という不安な気持ちから、「次の測定ではどんな結果が出るか」という楽しみの気持ちに変わったのを覚えている。

さて、高圧洗浄処理に関しては、他の研究所では超純水を使用することがベストと信じられている。しかし、超純水装置のメンテナンス費は三年で新設備が買えるほど高い。もし純水の使用が可能であれば、ILCのような大型プロジェクトでは大きなコスト削減が期待できる。KEKではそのような考えで純水を使った高圧洗浄を試みて、40 MV/mレベルまでは二、三例の肯定的結果を得ている。そこでわれわれは45 MV/mの高電界に純水が使えるかを調べるために、空洞性能と水質の相関を系統的に調べた。この水質に関するR&Dは、業界の常識への挑戦である。

われわれは超純水と純水を比較するパラメータとしてTOC (Total Organic Carbon) とバクテリア数にスポットを当てた。この二つを選んだ根拠は、これらがMPやFEの種になりうると考えられているからである。一連の測定において、超純水ではTOCは10~20 ppb、バクテリアは0~1個、純水ではTOCは100~800 ppb、バクテリアは30~1000個であった。超純水はわれわれが電解研磨と高圧超純水洗浄を行う(株)野村メッキでの値、純水の値はKEKにある純水装置のものである。37 MV/m付近までの性能に対しては純水と超純水とで差がないことを確認できたが、残念ながら40 MV/m以上では純水に分が悪い。また、純水高圧洗浄した空洞を再度、超純水で高圧洗浄を施すと性能が回復することが確認できた(図5)。水の影響は確かにあるが、差はわずかであるとの結論に達した。今後、純水装置に対する改良を加えてTOCとバクテリアレベルを下げ、さらにR&Dを進める予定である。

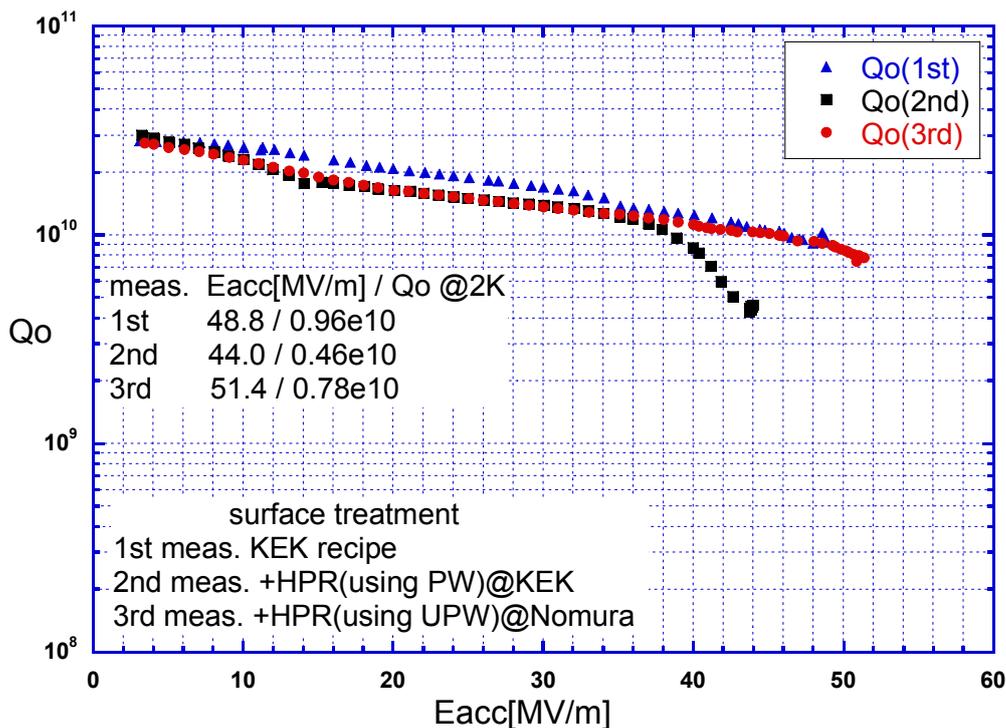


図5：超純水（UPW）と純水（PW）を使用したHPRの影響（IS#6空洞の結果より）

(2) KEK レシピの確認

単空洞試験に路線変更した後、われわれはIS空洞7台を製作した。最初の1台（IS#1）は工業レベルの溶接試験に使用したセルを利用した。次の3台（IS#2,3,4）は、ICHIRO 9-セル空洞製作中に電子ビーム溶接に失敗して途中で製作を中止した空洞からセル部を切り出して製作した。この4台の試験には工業レベルの赤道部溶接の信頼性試験の意味合いが含まれる。残り3台（IS#5,6,7）はKEK 機械工作センターで、これまでの実績に基づいて製作した。工作センターでの赤道部溶接法は、ICHIRO 9-セル空洞とは異なる。このようにEBWが単一の方法でないのは、空洞の製作発注が入札になること、今回の空洞製作発注で出来るだけ多くの企業を育てたいとの目論見による。KEK 所内製作の単セル3台ではKEKの溶接法の信頼性試験が含まれる。これらの空洞にKEK-WG5 レシピと呼んでいる表面処理を施し、最初の測定で45MV/mの加速電界がどれ程の歩留りで得られるかを調べた。

これまでにREやLLで45MV/m以上の高電界達成したが、それは何度も空洞の表面処理をやり直した後で得られた結果である。(1) そのような高電界が新品の空洞にKEK-WG5 表面処理レシピを施して一発で達成出来るか、また、(2) 達成できたとして如何なる歩留りで得られるかを調べる、これが単空洞試験の最初の目的であった。IS#1は落下による破損で使用不能となり、IS#2からIS#7の都合6台の試験となった。

空洞はNb板をプレス、トリム加工した半球を二つ向かい合わせて電子ビーム溶接（EBW）し、ビームパイプとフランジをEBWして製作される。その後に表面処理としてまず遠心バレル研磨（CBP）と呼ぶ機械研磨によって大きな表面の欠陥を除去し、かつ溶接シームを滑らかにする。さらに化学研磨（CP）でCBP時の砥粒による汚染表面を軽く除去（ $\sim 5\mu\text{m}$ ）し、CBPやCP工程でニオブ中に吸蔵した水素を脱ガスするために真空熱処理（ 750°C 、3時間）を行い、その後電解研磨（EP）で $80\mu\text{m}$ 除去して滑らかな表面を作り、最後に高圧超純水洗浄を施して清浄表面を得る。その後ベーキング（ 120°C 、48時間）真空排気をして空洞性能試験に移る。このCBPからベーキングまでの空洞表面処理をKEK-WG5 レシピと呼ぶ。このレシピは、TRISTAN時のとは異なる。TRISTANでは $80\mu\text{m}$ のEPを施した後、真空熱処理を施し、さらに仕上げとして $10\mu\text{m}$ のEPを施したので、EP工程が二回含まれる。KEK-WG5は表面処理コスト削減を狙って、一回のEP処理にしている。

当初、IS#2で37MV/m、IS#3で31MV/mと最初の二台では高電界は達成されなかった。われわれは毎朝、小ミーティングを行い進行状況などの確認を行っているが、IS#4の試験予定日の朝はミーティング時に緊張感が漂い、高電界が出ないことに対する不安や、出るはずの性能が出ないという苛立ちなどで殺気だった雰囲気だった。私自身も結果がどうあれ測定時の失敗は許されないという緊張感を持っていた。その日の夕方IS#4で45.1MV/mを達成し、KEK-WG5 レシピ一発で45MV/mを達成した最初のデータを得た。

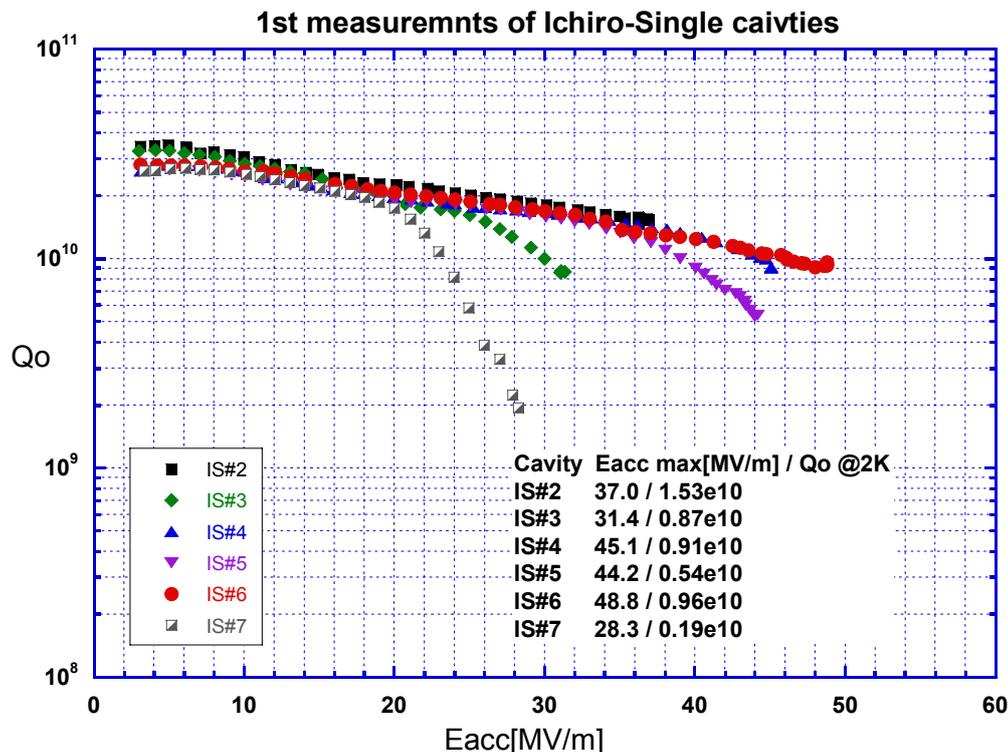


図 6 : IS 空洞 6 台の初回測定結果

その後、IS#5 で 44.2 MV/m、IS#6 では 48.8 MV/m と連続して高電界を達成し、グループ内の士気も上がった。最後の IS#7 は 28 MV/m と低い性能であったが、これは EP 液の劣化の問題やアクシデンタルな FE の発生などの問題を含み、単空洞での今後の R&D の課題提起となった。

まとめると試験結果は工業レベルの EBW の空洞 3 台の内 1 台、KEK 所内製作の 3 台の内 2 台、合計 6 台中 3 台で 45 MV/m の性能を得た。残りの 3 台はフィールドエミッションやクエンチによって 28 ~ 37 MV/m に制限された(図 6)。(1) の目標設定はクリアできた。(2) の目標設定には 85% の歩留り(ILC BCD での目標)を期待したが、50% に終わった。今後の課題は、残り 3 台の空洞で何故 45 MV/m を達成できなかったのかを調べ、歩留りを 100% にすることである。

現在、表面処理を追加して残り 3 台の IS 空洞で高電界を達成することと、MP や FE の低減に有効な表面処理方法の確立を目標に単空洞 R&D を進めている。さらに、それらをフィードバックし 9 連空洞 4 台の測定の準備をしている。

6. おわりに

この一年間で 80 回以上の単空洞性能測定を行った。40 MV/m の壁を破る昨年 7 月末までで、測定に失敗したものを含め約 30 回、その後今年 1 月までに 50 回以上の測定を重ねた。その中で三種類の形状の単空洞で 45 MV/m 超の高電界性能を達成し、これからいよいよ 9 連空洞での実証に力を注ぐ予定である。

世界でのわれわれの新形状空洞の位置づけであるが、2005 年 8 月に Snowmass で開かれた 2nd ILC Workshop で LL、RE 空洞の高電界性能が認められ、アルタネティブ(ACD)として加えられた(表 2)。現在の ILC 空洞のベースデザイン(BCD)は TESLA 形状であるが、今後のわれわれの 9 連空洞 R&D の進展によって LL、RE 形状を ACD から BCD に変更させることを、われわれは目標にしている。

表 2 : ILC 空洞の BCD と ACD

	Cavity Shape	E_{acc} max	E_{acc} operation
BCD	TESLA	35	31.5
ACD	LL,RE	41	36

ILC-WG5-Asia では短期・長期滞在の海外からの研究者を受け入れながら国際的に空洞 R&D を進めている。WG5-Asia は議論と実験結果の蓄積を重視するグループである。よし悪しどちらも含め、空洞性能試験において毎週のように新しいデータが生まれ、その度ごとに議論を重ね、細かな方向修正を行いながら進めるという非常にエキサイティングな毎日を楽しんでいる。私は体力に自信があるつもりであったが、WG5 の中で生き残るには体力はもちろん、着想力と集中力を身につけなければいけないことを実感している。われわれのグループは WG5 -Exciting-Asia と名づけてよいくらい生きのよいグループであり、今回の原稿を書いている間にも何度もデータのアップデートを重ねる必要があった。さらに今現在も 9 連空洞、単空洞の試験は続いており新たなデータを日々取り

続けている状態である。願わくばさらに多くの人がこのグループに参加して力となってくれることを期待している。今後のわれわれのデータに期待していただくとともに、様々な意見、批評をいただき、さらに質の高い研究を行いたい。私自身も ILC を背負って立つ研究者に早く成長できるよう努力したい。

謝辞

WG5-Asiaの活動はKEKの低温工学センターや機械工作センターに支えられており、ここに感謝の意を表します。昨年の11月頃からは空洞の数が増えるとともに、われわれのスキルもそれに追いつき、毎日のように空洞測定を行い、多い時には週4回も測定を行った。これらを支えてくれたのが低温工学センターの液体ヘリウム供給体制であり、われわれは常に液体ヘリウムの必要量を安定に入手でき、空洞測定を効率よく行うことができた。また機械工作センターには、単に物作りだけでなく、アイデア提供など様々な助言・協力をいただいた。これらのセンターの支えなくしては、われわれのR&Dを集中して進めることは不可能である。

参考文献

<http://lcdev.kek.jp/ILC-AsiaWG/WG.php?wg=WG5>