

EXPLORATION OF PERFORMANCE LIMITATION OF 9-CELL CAVITY PROCESSED IN KEK AR EAST 2ND EXPERIMENTAL HALL

Kenji Saito ^{#,A)}, Fumio Furuta ^{A)*}, Taro Konomi ^{B)}, Fumiaki Yasuda ^{C)}

^{A)} KEK Accelerator Lab

1-1 Oho, Tsukuba city, Ibaraki prefecture, 305-0081

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies, High Energy Accelerator Sciences

^{C)} The Graduate School of University of Tokyo, Physics Department

Abstract

So far our 9-cell cavity performance is often suffered from field emission. We are investigating our facilities at the KEK AR East 2nd experimental hall. We examined two points of view post EP/BCP cleaning and particle contamination. Particle contamination problem has been found in our HPR system, cavity assembly, and vacuum evacuation procedure. We have taken cures against these problems. We will report about these problems and the cured results on cavity performance in this paper.

KEK-AR 東第 2 実験棟での 9 セル超伝導空洞の性能制限要因の探索

1. はじめに

我々は、ILC 1TeV のエネルギー増強を目的に、ILC のベースライン形状(TESLA 形状)とは異なる高電界空洞形状(Ichiro 形状)で、45MV/m 以上の高電界を目指して空洞開発を進めている。単セル空洞では 50MV/m が達成されており、この形状の高電界性の原理実証に成功している。目下、9 セルの開発に集中している。現状は図 1 の右下図に示すように、Jlab との共同研究で 40MV/m @Q=0.8E+10 まで性能を達成している[1]。

一方 KEK ではこの半年、9 セル空洞試験は図 1 に示すように、20MV/m 以下の低い加速電界に制限さ

れている。その多くは、10 -15MV/m の低い onset フィールドの X 線発生を伴うフィールドエミッションである。9 セル空洞は、電解研磨・化学研磨の一次洗浄の後、AR 東第 2 実験棟の設備を使って、高圧洗浄(HPR)、組立、真空排気、空洞性能試験を行っている。Jlab の測定に比べ、KEK の結果は頻りにフィールドエミッションで制限されるので、これら設備上の問題が疑われる。今回、その問題点を明らかにするためにゴミ汚染の観点からパーティクルカウンターで処理工程をつぶさに調べ、原因探索を行った。また、この調査で発覚した問題点について全対策を施した後、9 セル空洞を処理し、性能変化を調べた。本論文ではこれらの結果を報告する。

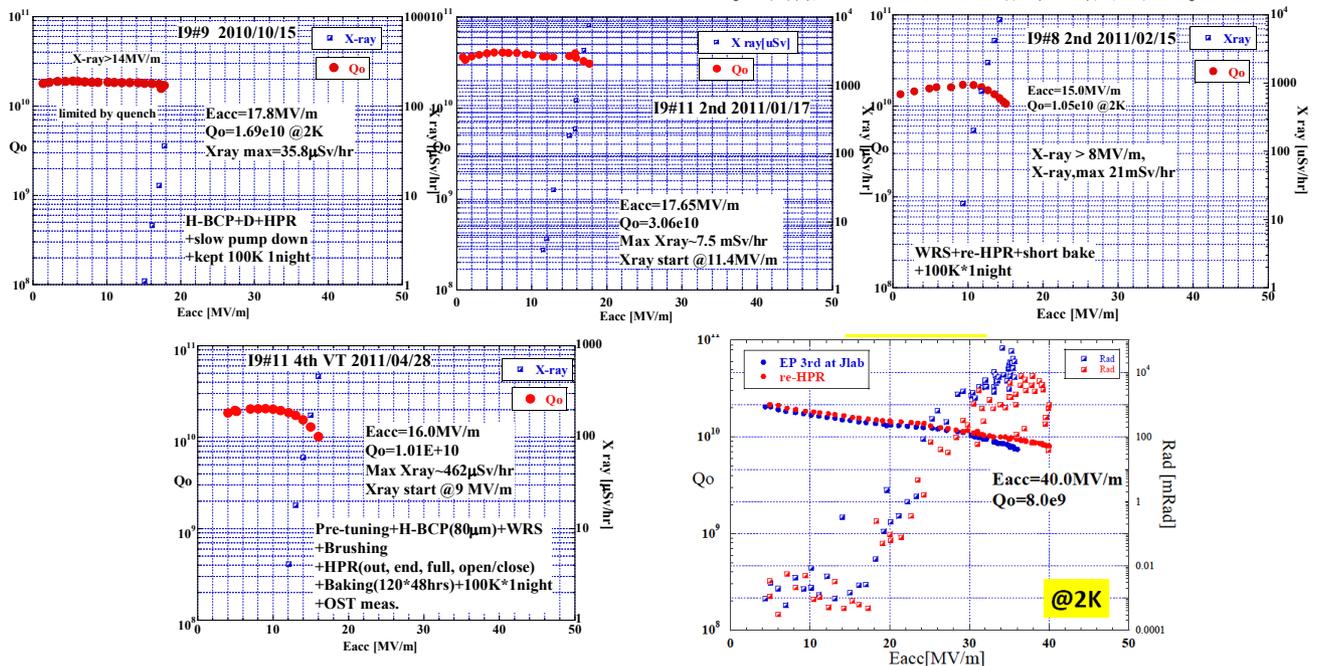


図 1: この半年間の我々の 9 セル空洞性能と Jlab との共同研究による 9 セル空洞の到達点

[#]kenji.saito@kek.jp

* KEK からコーネル大学に移動

2. 試験方法

空洞の性能は一般的に、空洞の製作、表面処理、空洞組立、真空排気、空洞性能評価法など非常に幅広い要因が関与する。しかし、ここではフィールドエミッションと言う事で、ゴミ汚染の観点から調査する。AR 東第 2 実験棟で行っている各工程をパーティクルカウンターでつぶさに調べ、問題が発覚すれば対策を施す。ゴミの調査には RION KC-21A パーティクルカウンターを使用する。発覚した問題と空洞の性能の一対一対応を見るには、個々の対策毎に空洞性能測定を行うのが理想的であるが、非常に時間がかかる。ここでは発覚した全ての問題に対策を施した後、空洞性能評価を行うことにした。9 セル空洞を処理して 9 セル空洞の性能の流れがどう変わるかを見ることで、設備・方法上の問題かどうかを判断する。

3. 調査・問題点・対策

3.1 HPR 室のゴミ環境

HPR 装置を大きな高クリーン室に置くと設備上コスト高になる。我々の HPR の設計思想は、クラス 1000 程度の環境下に HPR 装置を置き、HPR は上にクリーンブースを載せた小さなクリーンボックス(クラス 10)とノズルを常設した受け箱の嵌め合い構造の中で行い、環境ゴミが空洞に侵入するのを防ぐという考えである。HPR が終われば、クリーンボックスから空洞を取り出すときに空洞の下側に付けたバルブを封じることで空洞内外をアイソレートする。

こうした設計思想なので HPR 室のゴミ環境がそれほど良くないが、今回その環境ゴミ測定を行った。結果を図 2 に示す。環境測定では 0.1~0.15 μm の大きさのゴミの数が 10L 当たり 0.5 個、同様に 0.15~0.2 μm が 2 個、0.2~0.3 μm が 0 個、0.3~0.5 μm が 1.5 個、0.5 μm 以上が 6 個、全体で 10L 当たり 10 個であった。このゴミサイズと数の分布は ISO 規格でクラス 3 に対応する。親しみ深い USA 規格ではクラス 100 に対応する。

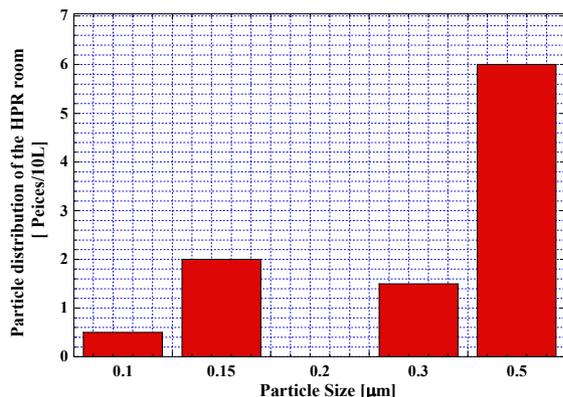


図 2: HPR 室の環境ゴミ測定

しかし、この実験で HPR 中にゴミの侵入を確認した。アイソレーションを完全にするために、HPR 中に清浄な空気を空洞内に流すようにした。こうすることで、例えば HPR 室の玄関ドアを開けたままで HPR しても空洞内にはゴミの侵入がないことが確認された。Clean air flow で空洞内のゴミ環境が完全にアイソレートできるようになった。

3.2 HPR 工程に置ける環境ゴミ侵入とその対策

我々の HPR 工程を以下に示す。

- 1) 空洞をクリーンボックス内のターンテーブル上にセットする、
- 2) 空洞下部に付けたバルブを開ける、
- 3) クリーンボックスを約 1300mm モータで持ち上げる、
- 4) クリーンボックスを 90 度回転する、
- 5) クリーンボックスをノズルの立っているボックスに嵌め合いにするために、クリーンボックスを 1300mm 下げる、
- 6) HPR を開始(クリーンボックスは上下運動、ターンテーブル回転)・終了
- 7) クリーンボックスを 1300mm 持ち上げる、
- 8) 空洞を-90 度回転、
- 9) クリーンボックスを 1300mm 降ろす、
- 10) クリーンボックスを開いて、空洞下部のバルブを閉じる、
- 11) 空洞をクリーンボックスから取り出す。

図 3 にこれらの工程中に 9 セル空洞内に侵入するゴミの測定結果を示す。空洞を HPR 位置に移動するまでと HPR が終わって空洞を取り出す工程で環境ゴミが侵入することが分かる。HPR(模擬)では Clean air flow を使ったので環境ゴミの侵入がない。問題は、HPR の後工程でのゴミ侵入をどう食止めるかである。

この問題を解決するために、クリーンボックスに小さな窓を付けた。図 4 に示すように HPR が終わると HPR 位置でその窓から手を差し込んで空洞下部に付けたバルブを閉めるようにした。窓を開けることで環境ゴミの侵入を心配したが、図 5 に示すように空洞内へのゴミの侵入はなかった。これで、

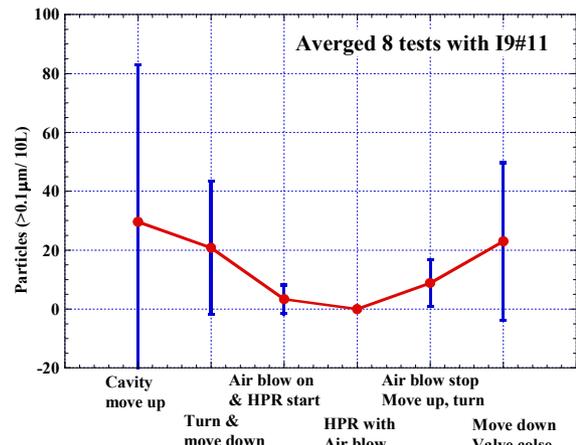


図 3: HPR 工程での環境ゴミの侵入測定

HPR のどの工程でも空洞内への環境ゴミの侵入を防ぐことができるようになった。



図 4: クリーンボックスのアクセス窓からバルブ操作

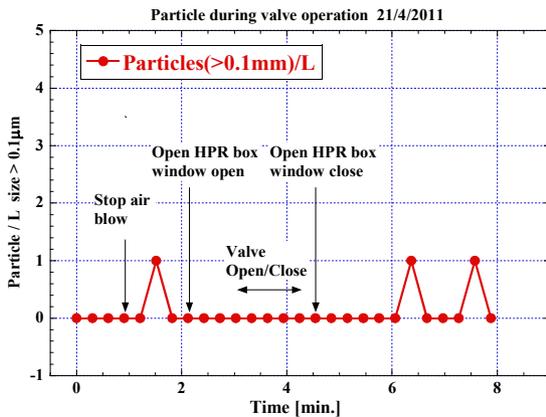


図 5: クリーンボックス窓からのバルブ操作によるゴミの発生測定

3.3 空洞組立エリアの環境ゴミ測定

我々のクラス 10 の空洞組立エリアの環境ゴミ測定を行った。2 時間連続でパーティクルカウンターを動かして測定したが、 $0.1\mu\text{m}$ 以上のゴミは全く測定されなかった。空洞組立エリアは全く問題ないとの結論を得た。

3.4 空洞組立中のゴミ汚染

我々のこれまでの伝統的な空洞組立法では、組立に使用するボルト、ナット、ワッシャ類を使用前に洗浄せずに再利用して来た。一方、Jlab ではボルト・ナットからたくさんゴミが出るので、使用前に超音波洗浄、エアブローなどかなり気を配っている[2]。我々の伝統的組立法でどのくらいのゴミの侵入があるかを測定した。空洞のトップフランジの組立中に空洞内のトップフランジ付近でゴミ測定した。この試験では、MO フランジを持つ ISE#3'単セル空洞を使用した。ボルトの材質はアルミ合金、ナットとワッシャは SUS である。シールには銅ガスケットを使った。測定結果を図 6 に示す。ボルト締め付け時に非常にたくさんのゴミが侵入することが分かった。 $0.1\mu\text{m}$ 以上のゴミが全体で 240 個測定された。この測定法ではパーティクルカウンターの吸気口を空洞内部に設置しており、その吸気によりゴミが吸

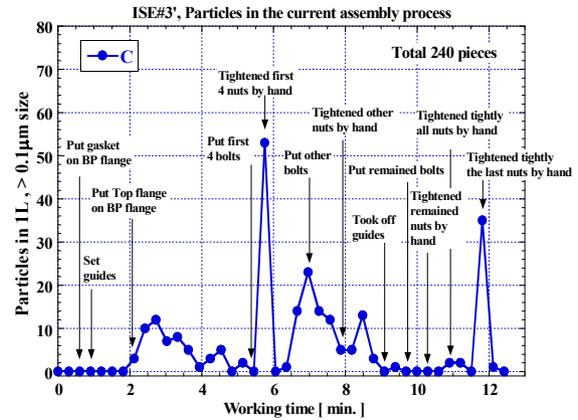


図 6: 伝統的組立法での侵入ゴミの測定

い込まれる。したがって実際の組立よりも過大評価されると考えられる。しかし、伝統的組立法ではゴミ侵入の大きなリスクがあることがわかる。

ボルト・ナットの超音波洗浄がゴミ侵入を防ぐのにどの程度効果あるか調べた。上の試験で使ったボルト・ナット・ワッシャを 5 分間水で超音波洗浄し、クラス 10 のクリーンルームで乾燥して、再度空洞を組立た。この空洞のトップフランジ組立中の測定結果を図 7 に示す。ゴミの総数は、32 個で一桁減った。

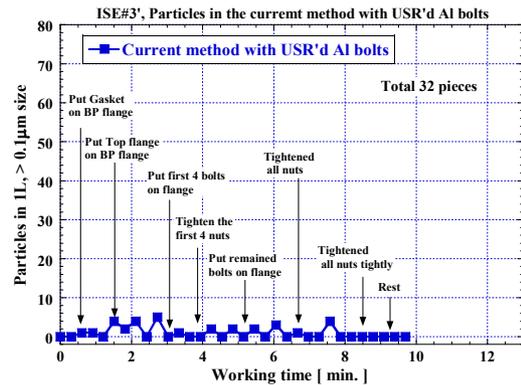


図 7: アルミ合金ボルト、SUS ナット・ワッシャの超音波洗浄効果

今回使った MO 単セル空洞では 1.5mm 厚の外径 108mm、内径 90mm の銅ガスケットを使っている。ガスケットは加工時の残留応力によって多少振れ、フランジにセットした段階で隙間がある可能性がある。クランプでフランジを押さえてその隙間を減らせれば、ゴミの侵入を減らせるかも知れない。そこでこの方法を適用して空洞トップフランジ組み立て時のゴミの数を測定した。この時、アルミ合金のボルト、SUS 製のナットとワッシャは超音波洗浄せずに再利用した。結果を図 8 に示す。測定されたゴミの数は 34 個でボルト・ナットを超音波洗浄した場合と同程度になった。

これまでゴミの侵入を防ぐのに効果のあった、ボルト類の超音波洗浄とクランプ法を組合せたらどこまでゴミの侵入を防げるかを調べた。結果を図 9 に示す。ゴミの総数は、16 個まで減ったが、完全には防ぎ切れないことが分かった。

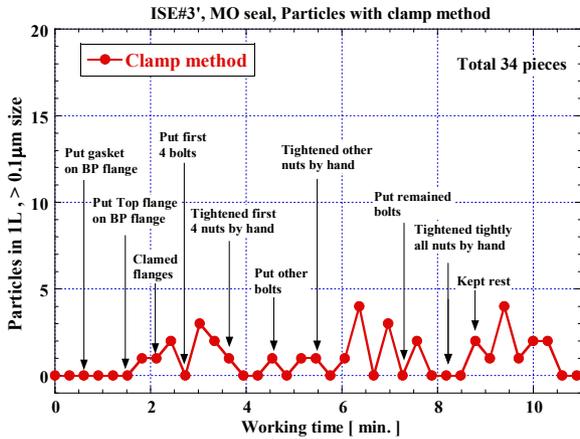


図 8: クランプ法でのゴミの侵入

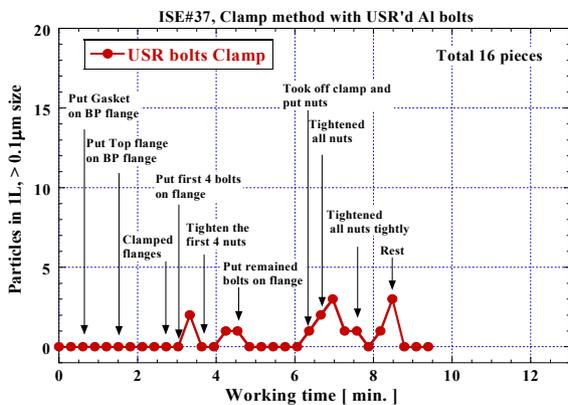


図 9: ボルト類の超音波洗浄、クランプ法の組合せた場合のゴミの侵入

Jlab ではアルミ合金ボルトが SUS よりもたくさんのゴミを出すとされている。これまでと同様の測定法でそれを確認する試験を行った。結果を図 10 に示す。Jlab の指摘通り、アルミ合金の方が約 2 倍のゴミを出すことが分かった。

図 10 の試験結果の中に、Clean air flow を使った場合の結果を含めた。この方法で、ゴミの侵入を完全に防げることが示唆される。

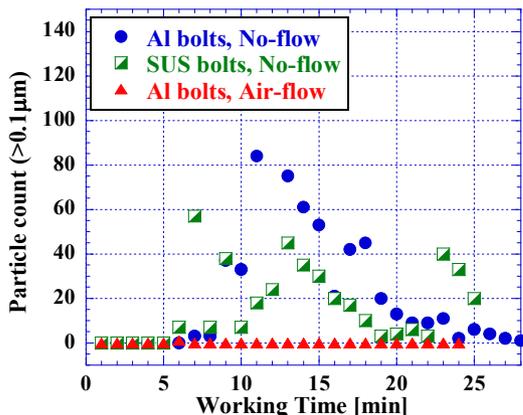


図 10: アルミ合金と SUS の侵入ゴミ数の違い

空洞組立中に清浄な空気を空洞内に流す Clean air flow が非常に有望そうなので、それを詳しく調べた。インジウムシールする我々のスタンダードな単セル空洞と MO シールする ISE#3'単セル空洞の二つで試験した。シールは従来のインジウムシールと銅ガスケットの 2 種類である。また、4 人の worker による個人差をも調べた。結果を Table 1 に示す。インジウムシールの場合も MO 空洞ほどではないが、ゴミの侵入が確認された。また、アルミ合金ボルトの使用は SUS ボルトの場合よりも多くのゴミの侵入が観測される。Clean air flow 使った場合、worker に関係なく侵入ゴミの数が 10 個以下となった。Clean air flow は、侵入ゴミの数を他の方法に比べて圧倒的に減らせること、またそれは worker に左右されないことが分かった。

表 1: Clean air flow 法の効果

Worker	Current method with Sat alloy bolts	Current method with stainless bolts	Clean air flow with Sat alloy bolts
A	698 (In seal)	73 (In seal)	0 (MO Cu)
B	575 (MO Cu)	333 (MO Cu)	7 (MO Cu)
C	2239 (MO Cu)	424 MO (Cu)	1 (MO Cu)
D	123 (In seal)	27 (In seal)	7 (MO Cu)

3.4 真空排気システムからのゴミの侵入

これまで、空洞の真空排気について、一般論としてバルブ操作の時にゴミが出る等のことは知っていたが、我々の真空システムをチェックしたことはなかった。一方、Jlab では空洞内表面が濡れている状態で空洞組立に入るので、Slow evacuation を得ない理由もあるが、真空を速く引くと乱流が起きて空洞にゴミが侵入するとして Slow evacuation を行っている[2]。真空バルブ操作によるゴミの発生、Slow evacuation とは逆に Fast evacuation による空洞内へのゴミの侵入を調べた。

図 11 に我々の 9 セル空洞の真空排気システムを示す。図にはスペースの都合上単セル空洞が示されている。空洞の Input port の中にパーティクルカウンターの吸口を設置し、図に示した五つのバルブについて操作時に空洞の所で何個のゴミがカウントされるか調べた。測定結果を表 2 に示す。バルブと空洞間の距離によるので相対値の議論すら難しいが、確かにバルブ操作で空洞にゴミが入って来る事は確認できた。

バルブ操作では、言うまでもなく空洞にもっとも近いバルブに気を付けなければならない。空洞内にゴミを入れないためには、真空排気ライン側が空洞より低圧で空洞バルブを開けば良いと思われる。その方法について Input port でゴミの数を測定した。結果を表 3 に示す。排気ラインの真空度が 710mBar から 6.2E-2mBar の色々な真空圧で空洞バルブ①を

開いたが、空洞側でゴミは観測されなかった。

次に、Fast evacuation による空洞側でのゴミの発生を調べるために一度空洞および真空排気ラインを上記の真空圧まで排気した後、③のスクロールバルブを閉じ、スクロールポンプ側を一気圧にした後、再度スクロールポンプを作動させながらバルブ③をいきなり開けた。表 3 に示すようにどの真空度でも空洞側で有意なゴミの発生が観測された。この結果は、Slow evacuation の有効性を支持する。

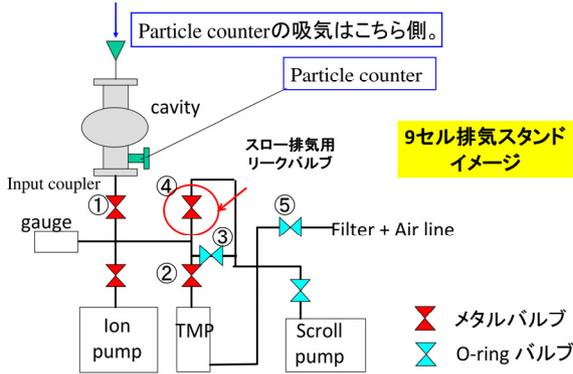


図 11: 我々の 9 セル空洞の真空排気システム

表 2: バルブ操作時に空洞に侵入するゴミの数

Location	Averaged number of particle (>0.1 μ m)	Max.	Min.
(1) Input coupler metal valve	15.4	22	1
Input coupler bellows push/pull	1.6	3	0
(2) Turbo head metal valve	7.2	17	1
(3) Scroll valve	13.2	33	0
(4) Slow evacuation valve	3.4	7	0
(5) Needle valve	14.2	29	3

表 3:バルブ操作と Fast evacuation によるゴミ発生

Opened the input coupler metal valve(1) at a vacuum pressure of the evacuation line		Opened the scroll top valve(3) suddenly at a vacuum pressure of the cavity
Vacuum pressure [mBar]	Particles> 0.1 μ m	Particles > 0.1 μ m
710	0	9
650	0	11
500	0	2
6.1E-2	0	7

4. 対策を施した後の空洞性能

上に述べた問題について全ての対策を施した。そして図 1

に示した I9#11 空洞の 4 回目の測定の後、この空洞を AR 東第 2 実験棟の設備を使って再洗浄処、Clean air flow を使った空洞組立、Slow evacuation による真空排気を行い、再測定した。測定結果を図 12 に示す。空洞の加速電界は、ハードクエンチで 26.8MV/m に制限されたが、X 線の onset は 20MV/m 以上に上がった。また、X 線量もかなり下がった。本報告では、スペースの関係上 9 セル空洞に絞って報告したが、ISE#3' #4' の MO 単セル空洞でも、この改善された方法でフィールドエミッションに悩まされて空洞性能の流れが、9 セル空洞と同じように変わった。

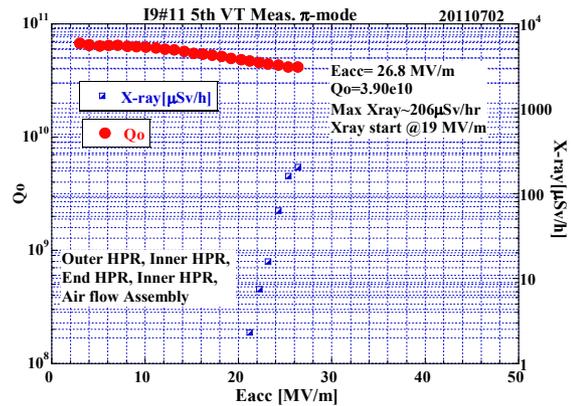


図 12: 全ての問題点を解決した後の空洞性能結果

5. まとめ

この半年間、AR 東第 2 実験棟での 9 セル空洞の性能は、10 -15MV/m の低い onset フィールドから始まる X 線の発生、フィールドエミッションに悩まされていた。設備・方法をつぶさに調べた結果、その主原因は空洞組立で使用するボルト類からのゴミの侵入、また真空排気でのゴミの侵入にあったと考えられる。

この調査を通じて、現在 Jlab でやっている空洞組立法(ボルト類の徹底洗浄、エアブロー)や真空排気法(slow evacuation)を納得することが出来た。しかし、我々はさらに信頼度を高めかつ簡単な方法として Clean air flow 法が非常に有効であることを見つけた。この方法は、大きな高クリーンルームを必要としないことや、空洞組立に worker 依存性が少ないことから、超伝導空洞組立に大きな性能・コスト効果が期待できる。

参考文献

- [1] F.Furuta, et al., "KEK/Jlab による ICHIRO-9 セル空洞での 40MV/m 達成",本加速器学会年会, MOMH03, Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011
- [2] G.Rongli, Private communication