

# ヘリウムプロセスを用いた ERL 主加速超伝導空洞の性能回復試験 THE TEST OF THE HELIUM PROCESSING FOR THE ERL MAIN LINAC SUPERCONDUCTIVE CAVITY.

篠江憲治<sup>#,A)</sup>, 阪井寛志<sup>A)</sup>, 梅森健成<sup>A)</sup>, 江波和宏<sup>A)</sup>,  
沢村勝<sup>B)</sup> 江木昌人<sup>A)</sup> 古屋貴章<sup>A)</sup>

Kenji Shinoe<sup>#,A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>A)</sup>, Kensei Umemori<sup>A)</sup> Kazuhiro Enami<sup>A)</sup>,  
Masaru Sawamura<sup>B)</sup>, Masato Egi<sup>A)</sup>, Takaaki Furuya<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

## Abstract

We have manufactured the cave of the performance which ERL requires in vertical measurement. However, when it modularizes and includes in beamline, performance degradation has happened. Recovery from this performance degradation is our present subject. We performed the helium process as the method of cavity performance recovery reported partly, and tried performance recovery of a cavity. As a result of having performed the helium process, recovery from cavity performance degradation was seen and having removed the emitter in the helium process was checked.

## 1. はじめに

3GeVクラスを目指す次世代放射光源 ERL(大 ERL)においては超低エミッタンス大電流ビーム(100mA)を安定に加速&減速するため、空洞として空洞損失の少ない超伝導空洞が用いられる。特に ERL 用の超伝導空洞としては、いかに高い加速勾配(15~20MV/m程度が目標)にてなおかつ空洞損失の少ない状態(Q値  $> 1 \times 10^{10}$ )を維持できるかが、ERL 実現の鍵となる。我々は、大 ERL 用に 100mA もの大電流(最大 600mA)の回収を可能とする独自に開発した 9セル空洞[2]にて、縦測定と呼ばれる性能評価試験にて図 1(左)に示すように最大加速勾配 25MV/m、また、15MV/mにて Q 値  $> 1 \times 10^{10}$  を実現し、ERL の要求を満たす空洞を実現した[3]。その性能を実現した 2 空洞を 2012 年度は KEK にて建設が行われた Compact ERL(cERL)[4]のビームラインに、モジュール化した後に組み込んだ所、2 空洞とも、図 1(右)に示すように 10MV/m から Q 値の劣化が発現するとともに、強烈な放射線を発生することとなった[5,6]。縦測定により、空洞自身に欠損はないことは確認されているが、組立時において、微小な埃、異物の混入による空洞内面での電解放出(field emission)による多大なエネルギーロスが起こったと考えられる。さらにはビーム運転により劣化が進んだ結果(図 1(右))も現在得られており[7]、この性能劣化の回復が本 cERL 主空洞モジュールの当面の課題となっている。

このような field emission による Q 値劣化は KEKB の超伝導空洞[8]やアメリカ Jlab にある CEBAF 用超伝導空洞加速器[9]など、昔から顕著に見られており、field emission の抑制は超伝導空洞の歴史が始まって重要な課題となっている[10]。

<sup>#</sup> kenji.shinoe@kek.jp

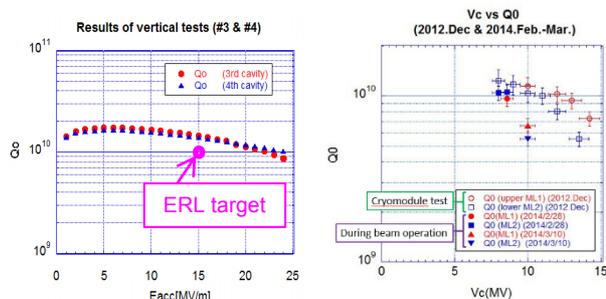


Figure 1: (Left) Performance result of two cavities in vertical measurement. A horizontal axis shows an acceleration slope (Eacc) and a vertical axis shows Q value (Q0). (Right) Cavity performance degradation due to full-assembly - (open circles and squares,) during beam operation - (solid circles squares and triangles).

そのため、この field emission による空洞性能劣化の回復は今までいくつかの方法がなされてきた。特に設置後に与える process 方法として 1 つ目は high power pulse processing(HPP)であり、2 つ目は Helium processing が提案されている。まず 1 つ目の HPP は従来の運転電圧に対し、ミリ秒 (ms) 以下のより高い電圧をかけて、放電をコントロールすることで、表面状態を良くする方法である。我々の空洞でも現在 HPP の効果が見られており、長期運転中の空洞劣化をある程度抑えている。[7]これに対し、2 つ目の He processing は冷却中の空洞に He ガスを  $10^{-2} \sim 10^{-4}$  Pa 程度導入した上で、高い field をかけて放電を増幅することによって、emission 源を除去するものである。実際に CEBAF の cryomodule で He processing が行われており、最近では C100 cryomodule で平均して 9.3MV/m で field emission が出していた空洞が 13.1MV/m まで回復したなど、HPP に比べて、大きな効果が得られている[11]。このよう

に He processing は HPP に比べ、大きな効果が期待されているが、詳細な mechanism が分かっていない。

本研究の目的は、我々独自で開発した X-ray mapping system[1]を用いることで縦測定スタンドにて x-ray profile の pattern を測定し、そこから今まで理解の進んでいない He process 中の課程を理解することであり、最終的に空洞性能劣化回復が可能なかを理解することである。

## 2. Setup

図2は縦測定中の setup である。cERL 中での field emission を模擬するため、我々は cERL で採用した ERL-model-2 空洞の形状と同じ2号機を用いて測定を行った。

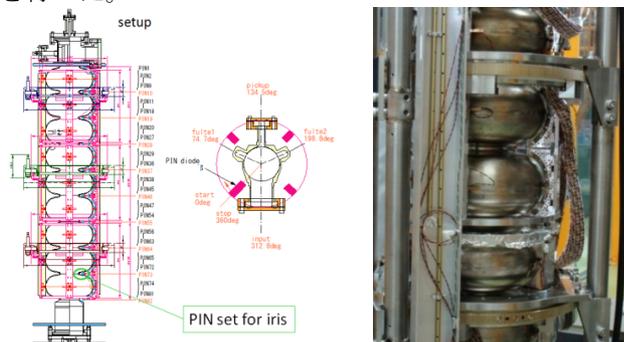


Figure 2: (Left) Layout of Si PIN diodes. (Right) X-ray Mapping system mounted on the cavity.

表1が本空洞のパラメータである。[]内は TESLA 空洞の値である。100mA の ERL 実現のため、ERL 空洞は HOM 削減を重視しており、EURO-XFEL などに使用される TESLA 空洞に比べ、 $E_{peak}/E_{acc}$  が、1.5 倍高くなっており、これにより field emission が出やすくなる可能性がある。このように field emission がしやすいことを考え、我々は field emission 測定に特化した空洞診断装置を開発した[1]。

Table 1 : Parameters for KEK-ERL Model-2 Cavity

Frequency	1.3GHz	Coupling	3.8 %
Rsh/Q	897 $\Omega$	Geom.Fac.	289 $\Omega$
$E_{peak}/E_{acc}$	3.0[2.0]	$H_{peak}/E_{acc}$	42.50e/(MV/m)

図2(左)がその詳細である。空洞の1列に86個の carbon 温度計と93個の PIN diode を並べ、それを 2K He 中で回転させ、空洞全体の温度と X-ray の profile を測定可能としている。これにより、特に我々は今まで測定できなかった X-ray mapping profile を用いて、field emission の分布を測定し、それと simulation と合わせることで、field emission site の同定を行うことが現在可能となった[12,13]。この X-ray mapping から process の様子を詳細に調べる。これと同時に top flange には Aloka の radiation monitor をつけて field emission 量も測定した。

## System for He processing

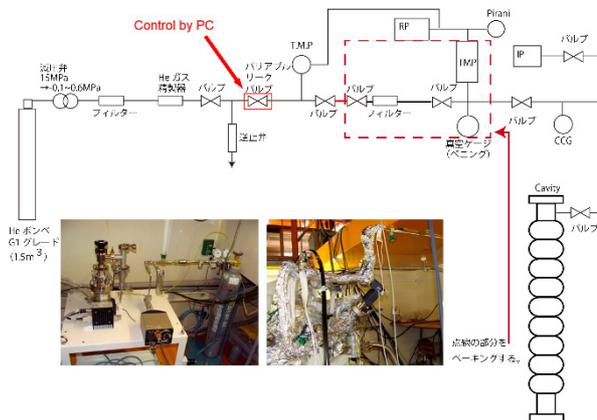


Figure 3: Setup of He line for He processing.

次に He process を行うための He 導入ラインを作成した。図3は縦測定に設置した He 導入ラインの様子である。He はボンベから 0.01um の filter を通して、クリーンなガスを維持するように気を付けている。特に He 以外のガスが混入し、空洞性能劣化が system 上、起こらないように配管は電解研磨したものを用いた上で、縦測定前に配管は 200°C 程度 24 時間 baking を行ってから測定を行った。He の圧力は  $10^{-1}$  Pa まで読めるようにペニングゲージを用意すると同時に、空洞直前の常時設置している CCG でモニターしている。その上流にバリアブルリークバルブを用意し、He の圧力を remote でコントロールする system を設けた。

## 3. Results of vertical tests

本2号機を用いて縦測定を行った。表2はその縦測定の履歴である。高圧ガス対策も行った cERL cryomodule 用の prototype として製作された2号機空洞には、表2にあるように合計11回の縦測定を行っている。cERL cryomodule 作成前に適切な表面処理と、空洞アセンブリにより、まず1回目～3回目の縦測定によって、 $Q_0 > 1 \times 10^{10}$  で 15MV/m で要求を満たすと同時に最終的に 25MV/m 以上の高い加速勾配が確認されたので、cERL main linac cryomodule の制作を開始した[10]。その後この空洞は縦測定スタンドに保持されていたが、cERL cryomodule での性能劣化を受けて、6回目の縦測定以降は、本空洞で再度空洞アセンブリや process 方法の回復を行うことを主に行った。本文では主に He process を行った7、8、10回目の結果を述べる。

Table 2: History of Vertical Tests and Surface Treatments

	Surface treatment etc.	Aim of VT
1 <sup>st</sup> test	EP(100 μm), Annealing, EP2(20 μm), Baking HPR,	Performance check
2 <sup>nd</sup> test	EP(20 μm), Baking HPR,	Performance check
3 <sup>rd</sup> test	Warm-up	Check Q-value after warm-up
4 <sup>th</sup> test	HPR (assembly input and bottom flanges)	HPR study
5 <sup>th</sup> test	Keep with vacuum condition	Check reproducibility (same with 4 <sup>th</sup> )
6 <sup>th</sup> test	Ar purge (No flange assembly)	Check Ar purge procedure
7 <sup>th</sup> test	(Warm up)	System check of He processing (0)
8 <sup>th</sup> test	(Warm up)	Study on He processing (1)
9 <sup>th</sup> test	Flange disassembly and assembly	Check dust contamination from re-assembly procedure
10 <sup>th</sup> test	(Warm up)	Study on He processing (2)
11 <sup>th</sup> test	HPR (assembly all flanges)	HPR study

7<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup> vertical test results

7回目の測定にて He を空洞に始めて導入し、2Kでの縦測定を行った。まず、He 導入により、空洞性能が劣化しないことを確認したのちに、He processing を開始した。

図4が He process 前後での Q vs Eacc(加速勾配)のグラフである。He は 10<sup>-4</sup> Pa 程度まで入れ、field を上げていったところ、radiation の変化が見られた。He

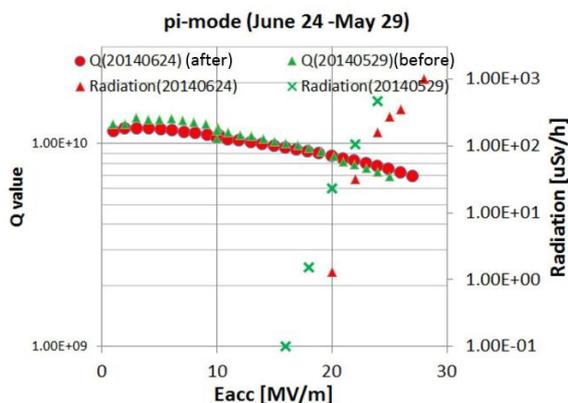


Figure 4: Q0 vs Eacc plot before and after He-processing. Green(Red) plots shows the Q-E results before(after) He processing on left vertical axis. Right vertical axis shows the radiation by Aloka.

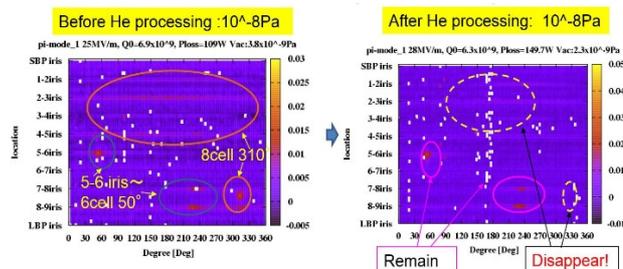


Figure 5: X-ray mapping profile before and after He processing. One emitter disappeared on 8cell 310°.

の圧力が He process 後は 10-8 Pa 程度までは戻らなかったため、一度 warm up したのちに 8 回目の縦測定にて同じ空洞真空にて、測定しなおしたものを図4では載せている。Process の効果により、field emission の onset が回復していた。He process 前後の x-ray mapping を plot したものが、図5である。図5は 25MV/m あたりでの X-ray mapping での profile であり、He processing の後では 8cell 310° に関していた radiation trace(180° 対面の 1-4cell の broad な分布も 8cell 310° と関係していることは simulation と今までの実験結果から分かっている。[13,14])が無くなっていったのがわかる。

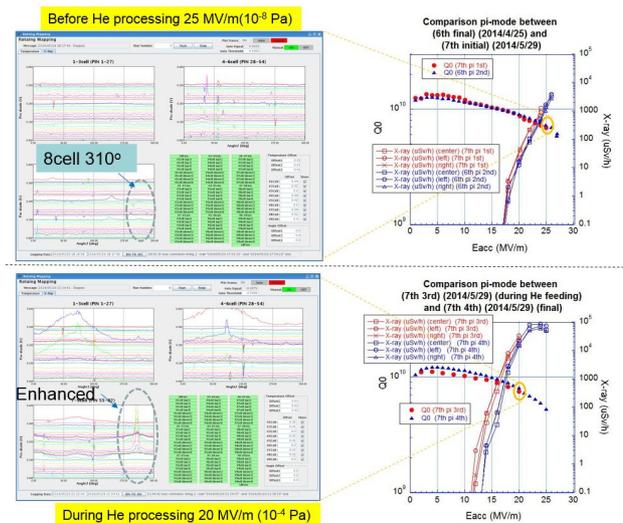


Figure 6: Top (bottom) figures show the Q-E curve with x-ray mapping profile before (during) He processing.

7回目の縦測定中の He process 最中の測定の履歴をもう少し詳しく説明する。図6(上)が He process 前の縦測定の結果とその時の X-ray mapping(25MV/m)である。また図6(下)が He process 最中で縦測定の結果とその時の x-ray mapping(20MV/m)の様子である。上述したように He process 中は圧力を 10<sup>-4</sup> Pa 程度に keep して field を上げていった処、まず、x-ray の onset が He process 前に比べ、下がる傾向がみられた。そのまま x-ray profile を測定したところ、図6(下)に見られるよ

うに 8cell 310°に見られた radiation trace (対面も含めて)が enhance しているのがわかった。この後、そのまま field を上げていくと radiation の減少が見られ、結果的に図 5 に示すように x-ray profile での 8cell 310°に 関係する field emission source が局所的に電圧増大因子を大きくし、process が進んだものと思われる。

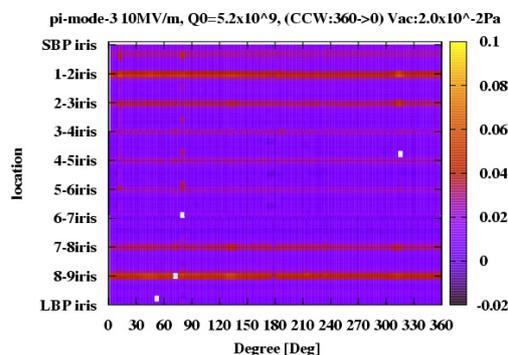


Figure 7: X-ray mapping profile of  $2 \times 10^{-2}$  Pa pressure at 10MV/m.

もう一つの He process 中の測定結果を示す。8 回目の縦測定時に図 7 は He 圧力を  $10^{-2}$  Pa 以上に上げた時の x-ray mapping の様子である。急に真空を悪くしたところ、radiation が図 7 に見られるように突然全面から放射されるようになった。Top flange の radiation monitor は振り切れ、Q 値も減少し、10MV/m しか keep できない状態になった。He 導入により真空がより悪い状態にした場合には空洞全体がプラズマ状態になり、radiation が全面的に放射されたものと思われる。この状態での process も試みたが、残念ながら、エリアモニターにより、radiation の ITL がかかり、total でこの状態を keep した時間は 50 分程度であった。この後、x-ray mapping を測定したが、radiation trace の変化はなく、1 時間程度での全面 He processing では process が進まなかった。

このように He process としては  $(1)10^{-4}$  Pa 程度に圧力を維持し、加速電圧を上げて局所的に field emission 源を enhance させる場合(Enhance mode)。(2) $10^{-2}$  Pa 程度にまで圧力を上昇させ、field が 10MV/m と低いながらも全面に radiation を放射させる場合(All surface mode)。の 2 通りあることがわかったが、今回の測定では(1)の He 導入により局所的な emission 源の  $\beta_{FN}$  を enhance させることで空洞内面の emitter が process していることがわかった。

#### 10<sup>th</sup> vertical test results

この空洞にて、モジュールアセンブリ作業を模擬し、その reassembly の効果を 9 回目の縦測定で見たところ、field emission の onset が 18MV/m から 10MV/m まで減少していることがわかった。我々の空洞 reassembly 作業の問題点が判明したと同時に 1

#### He processing (2)

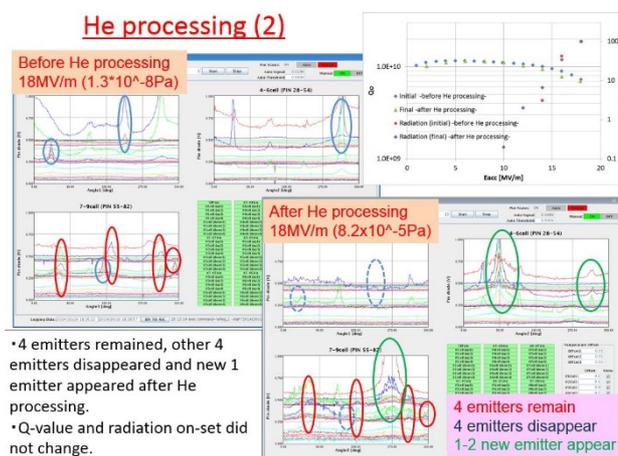


Figure 8: x-ray mapping profile before and after He processing on 10<sup>th</sup> vertical test.

0 回目の縦測定で He process により、再度この emission 源の除去が可能かどうかを試みた

図 8 が 10 回目の He process 前後の縦測定の結果の比較である。8 個見られていた field emission 源のうち、”enhance mode”により、4 つの emitter を減らすことが可能であった。残念ながら、空洞の 5 セル目あたりに 1 つ emitter を増やすことにもなり、He process の結果として onset は変化しなかったが、多数の emitter が He process により除去されていることが x-ray mapping により、わかった。

#### 4. Summary

ERL 用 9cell 空洞の 2 号機を用いて空洞性能劣化の回復試験を行った。特に独自の X-ray mapping system を用い、縦測定スタンドにて、X-ray profile の pattern を測定し、そこから今まで理解の進んでいない He process 中の process による回復を詳細に調べた。縦測定スタンドに新たに He 導入ラインを構築し、He process による空洞性能劣化回復試験は 2 回行った。He process の結果としては劣化した性能の回復が見られ、X-ray mapping により emitter が He process により除去されていることが明確になった。

今後はモジュールでの He process を進めるためにまずは入力カップラー単体での He process 試験を行い、これが問題なければ cERL main linac cryomodule での He process 試験を行っていく予定である。

#### References

- [1] H. Sakai *et al.*, “Cavity diagnostics using rotating mapping system for 1.3 GHz ERL 9-cell superconducting cavity”, IPAC2010, Kyoto, Japan, p.2950 (2010).
- [2] K. Umemori *et al.*, “Design of L-band superconducting cavity for the energy recovery linacs”, APAC’07, Indore, India, p.570 (2007).
- [3] K. Umemori *et al.*, “Vertical Test Results for ERL 9-cell Cavities for Compact ERL Project”, IPAC2012, New Orleans, USA, p.2227 (2012).

PASJ2015 WEP046

- [4] R. Hajima *et al.* (ed.), KEK Report 2007-7/ JAEA-Research 2008-032 (2008) [in Japanese].
- [5] H. Sakai *et al.*, “High Power CW Tests of cERL Main-Linac Cryomodule”, SRF’13, Paris, France, p.855 (2013).
- [6] E. Cenni *et al.*, “Field Emission Measure during cERL Main Linac Cryomodule High Power Test in KEK”, SRF’13, Paris, France, p.678 (2013).
- [7] H. Sakai *et al.*, “Measurement of the Cavity Performances of Compact ERL Main Linac Cryomodule during Beam Operation”, in these proceedings, SRF2015, (2015).
- [8] S. Mitsunobu *et al.*, “Status of KEKB Superconducting Cavities”, SRF2007, Beijing, China (2007).
- [9] C. E. Reece *et al.*, “Improvement of the Operational Performance of SRF Cavities via *in situ* Helium Processing and Waveguide Vacuum Processing”, PAC97, Vancouver, Canada (1997).
- [10] R. Latham, “High Voltage Vacuum Insulation, 1<sup>st</sup> Edition”, Academic Press.
- [11] M. Drury, “Helium Processing C100 Cryomodule in the CMTF” TTC meeting, March 24 -27, 2014, Hamburg, Germany (2014).
- [12] E. Cenni *et al.*, “Field Emission Simulation of KEK-ERL 9-cell Superconducting Cavity”, IPAC2012, New Orleans, USA, p.295 (2012).
- [13] E. Cenni, Doctor thesis, The graduate University for Advanced Studies (2013).
- [14] E. Cenni *et al.*, “Vertical test results on KEK-ERL 9-cell L-band Superconducting Cavity”, SRF’11, Chicago, USA, p.789 (2011).