

# KEK STF における TESLA 型 9 セル超伝導空洞の性能評価 VERTICAL TEST RESULTS OF TESLA 9-CELL SUPERCONDUCTING CAVITIES AT KEK-STF

片山 領\*, 梅森 健成, 加古 永治, 道園 真一郎,  
許斐 太郎, 井藤 隼人, 荒木 隼人

Ryo Katayama\*, Kensei Umemori, Eiji Kako, Shinichiro Michizono,  
Taro Konomi, Hayato Ito, Hayato Araki  
KEK: High Energy Accelerator Research Organization

## Abstract

Since April 2019, we have evaluated the performance of two TESLA shape superconducting RF Nb cavities at the vertical test facility of KEK-STF. Both cavities are TESLA type superconducting RF Nb cavities made of fine grain niobium with  $RRR > 300$ . One was annealed at  $750^\circ\text{C}$  for 3 hours and the other was annealed at  $900^\circ\text{C}$  for 3 hours. Both of superconducting cavities achieved the high performance, Q-value of  $2 \times 10^{10}$  and the maximum accelerated gradient of  $> 36 \text{ MV/m}$  when the standard surface treatment were applied to them. Then, additional surface treatments which were recently developed for achieving higher acceleration gradient and higher Q value were applied to two cavities. Regarding surface treatments, one is a low temperature baking of  $75^\circ\text{C}$  for 4 hours followed by  $120^\circ\text{C}$  for 48 hours, and the other is a nitrogen doping for 3.3 Pa at  $800^\circ\text{C}$  for 2 minutes in a vacuum furnace. In this paper, we will report on the cavity performance after 2-step baking or nitrogen doping.

## 1. はじめに

本論文は、2019 年初旬から KEK-STF にて実施された二台の TESLA 型 Nb 製超伝導空洞の高加速勾配化、高 Q 値化の研究成果をまとめたものである。空洞は二台とも  $RRR > 300$  の fine grain のニオブ材を用いた 1.3 GHz 楕円空洞であり、三菱重工機械システム (株) によって製造された。以降、これらの空洞を三菱テスラ三号機と五号機の頭文字をとって MT-3 と MT-5 と呼ぶ。二台の空洞は KEK において多量電解研磨が施された後、MT-3 には  $750^\circ\text{C}$  3 h のアニールを、もう片方の MT-5 には  $900^\circ\text{C}$  3 h のアニールを施している。その後、空洞の清浄化と平滑化の努力を積み重ねた結果、最終的に二台の超伝導空洞とも標準的な表面処理レシピを施した段階で  $2 \times 10^{10}$  の高い Q 値と  $36 \text{ MV/m}$  以上の高い加速電界が達成された。本研究では、この二台の空洞に対して海外研究機関で開発され、空洞の高加速勾配化、高 Q 値化が可能とされる 2-step baking [1] と窒素ドーピング (Nitrogen doping: N-doping) [2] を施し、その効力を KEK-STF のたて測定試験設備で電界性能を評価することにより検証した。参考のため、本研究で試行した空洞処理のレシピのフローを図 1 に示す。2-step baking は空洞の最大電界を大幅に向上できると報告されている空洞処理方法であり、研究の主な動機は ILC のコストダウン R&D である。一方、N-doping は空洞の Q 値を 2 倍以上に高める効果が期待できるとされる空洞処理方法であり、研究の主なターゲットは放射光設備等に代表される産業用超伝導加速空洞である。本研究で採用した 2-step baking と N-doping の処理方法の詳細は後述する。以下

で研究の背景と採用した空洞処理条件の詳細、各々の空洞で達成された電界性能の評価について述べる。

## 2. THE STUDY OF 2-STEP BAKING

### 2.1 研究の背景・動機 (2-step baking)

高エネルギー物理学の将来加速器実験計画の一つに国際リニアコライダー実験 (ILC) 計画がある [3]。重心系エネルギー  $250 \text{ GeV}$  以上で電子・陽電子ビームを正面衝突させた際に生じる素粒子間の相互作用を解析することにより、素粒子標準模型の精密検証とそれを越えた新物理探索を行える高い実験能力を持つ。その学術的意義は言うまでもないが、ILC 計画の実現には多額の費用が必要と推定されており、コスト削減の R&D が重要であるとの国際的なコンセンサスが形成されている。ILC のコストダウン R&D の中で最も有力視されるアプローチが超伝導空洞の低損失・高電界化 (High-Q, High-G) の試みである。空洞数の削減、トンネルの短縮化、運用時の電力効率の向上を通じて ILC の全体コストを有効に削減できる。その流れを受け、KEK でも近年は窒素インフュージョン [4] による空洞性能の向上など ILC のコストダウン R&D を精力的に進めている現状がある [5-7]。

近年行われた窒素インフュージョンとは別の High-Q、High-G 化の試みの中でも最も着目すべきもの一つに、米国のフェルミ研究所のグループから報告されている 2-step baking とよばれる空洞処理方法がある。通常採用される標準的な空洞処理工程に  $75^\circ\text{C}$  4 h のベーキングを追加することにより、超伝導空洞の最大加速電界を大幅に向上できるとされる。例えば、文献 [1] では、2-step baking を適用して TESLA 型超伝導空洞の最大加速電界を  $35 \text{ MV/m}$  から  $49 \text{ MV/m}$  まで向上できた例について報告されている。これは、標準的な空洞処理レシピとほ

\* ryo.katayama@kek.jp

とんど変わらない方法で空洞性能を大幅に向上できる可能性を示唆しており、ILCのコスト削減の観点から見て非常に魅力的な提案である。しかしながら、現在、フェルミ研究所を除く他の研究機関で 2-step baking の効力について十分に検証が進んでいない。そこで、本研究では、KEK-STF のため測定試験設備において空洞の電界性能を評価し、先述の二台の MT-3 と MT-5 の 9-cell 超伝導空洞に対する 2-step baking の効力を KEK で初めて実験的に検証した。

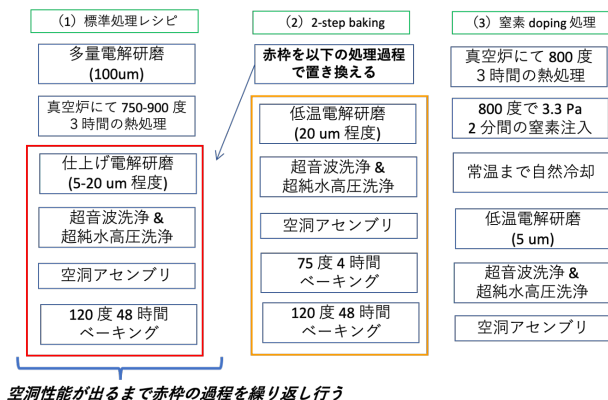


Figure 1: 超伝導空洞に対する表面処理レシピ。

## 2.2 本研究で採用した表面処理方法

以下で本研究で採用した表面処理方法の詳細について記す。まず、本研究では、2-step baking 前の電解研磨の処理工程に低温電解研磨処理 (cold-EP) を採用している。これは、KEK で採用されている標準的なレシピより低い温度設定で電解研磨を行うものである。フェルミ研究所等の海外研究機関では表面処理工程に cold-EP を採用しており、本研究でも条件をそろえることが好ましいと判断した。MT-3 と MT-5 の電解研磨時の電流密度と空洞温度の時間経過プロットを図 2 と図 3 にそれぞれ示す。赤線が電流密度、青線が空洞温度、黒線が研磨量であり、左枠が normal-EP の場合、右枠が cold-EP の場合に相当する。normal-EP を採用した場合には空洞温度は 25-30  $^{\circ}$ C 近くに達しているが、cold-EP を採用した場合にはそれは 16  $^{\circ}$ C 未満に抑えられていることが分かる。また、cold-EP の場合は normal-EP より約 4 倍の時間をかけて内面研磨が行われていることが分かる。

次に、2-step baking 時の空洞温度と真空度の時間経過プロットを図 4 と図 5 に示す。空洞温度は、9-cell 空洞の 1 セル、3 セル、7 セル、9 セルの赤道部に貼付した温度センサーを用いて評価されており、真空度は 1 セル側のビームポートに接続されたペローの先に設置されたイオンゲージを用いて評価されている。図 4 では 1 cell 側の温度が 2 時間ほど 75  $^{\circ}$ C 未満で推移している期間がある。これは MT-3 空洞の 2-step baking ではベーキング開始時に装置が故障に陥るトラブルがあったため、復旧までに時間を要したことが反映されたものである。これにより、MT-3 の 75  $^{\circ}$ C 4 h の baking 時の真空度が MT-5 の時より悪化していることが分かる。

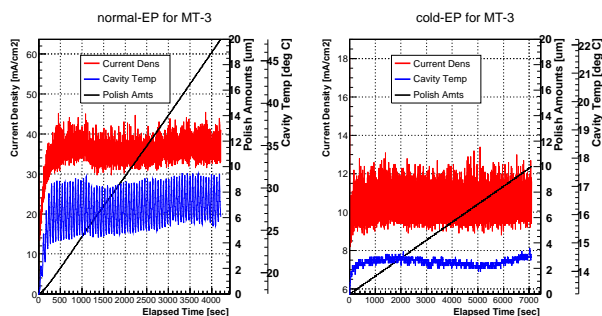


Figure 2: MT-3 の電解研磨時の電流密度と空洞温度の時間経過プロット。

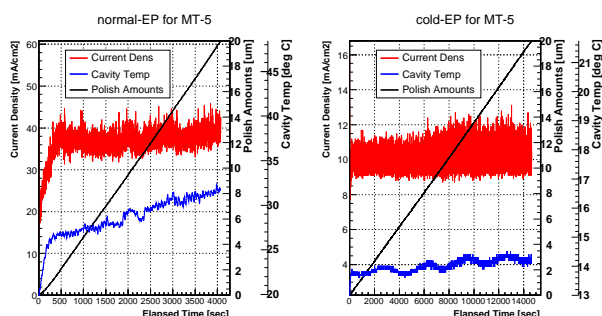


Figure 3: MT-5 の電解研磨時の電流密度と空洞温度の時間経過プロット。

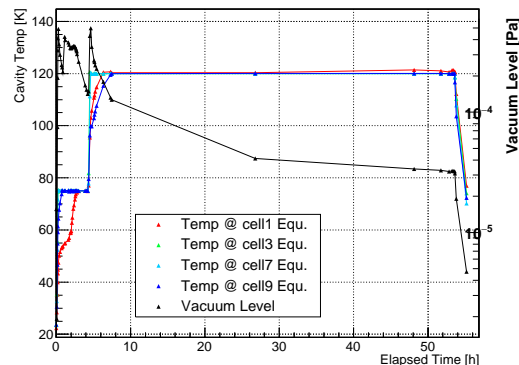


Figure 4: MT-3 の 2-step baking 時の温度と真空度の時間経過プロット。

## 2.3 2-step baking 前後の電界性能の評価

MT-3 と MT-5 空洞の電界性能の Q-E 曲線を図 6 と図 7 に示す。横軸が加速電場、左の縦軸が Q 値、右の縦軸が KEK-STF にて測定したため測定時の放射線量、赤点が 2-step baking を施した後の結果、青が標準的な空洞処理工程を施した場合の結果である。簡単のため、ここでは加速モードに対するデータのみをプロットした。Q 値が 10 % エラーを持つことを考慮すると、残念ながら、電界性能の向上を示す証拠は得られていない。2-step baking の後で MT-3 空洞の Q 値が劣化しているのは、ベーキング時に 75 度未満のベーキング期間があっ

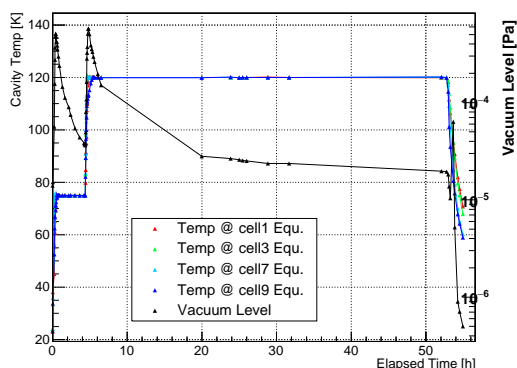


Figure 5: MT-5 の 2-step baking 時の温度と真空度の時間経過プロット。

たこと、空洞真空が MT-5 の 2-step baking 時のそれよりも悪化していたことが影響している可能性がある。一般に、他の共鳴モードに対する Q-E 曲線を解析することでセルごとの最大加速電界を評価できる。そのようにして評価したセルごとの加速電界の解析結果を図 8 にまとめる。一般に、加速電界は 5 % 程度のエラーを持つため、残念ながら現時点では海外研究機関で報告されている有意な空洞性能の向上は確認できていない。空洞の急速冷却の有無や cold-EP や baking 時の海外研究機関との条件の差異がこの違いを生んだ可能性が考えられる。

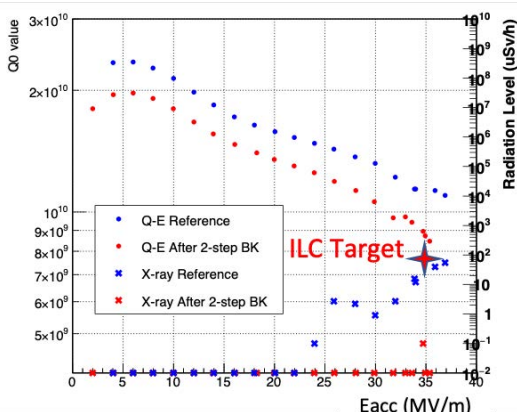


Figure 6: MT-3 の電界性能の評価。

### 3. THE STUDY FOR DEVELOPMENT OF N-DOPING CAVITY

#### 3.1 研究の背景・動機 (N-doping cavity)

KEK 応用超伝導加速器センター (CASA) は、その設立以来、超伝導加速器の産業・医療応用を目標に掲げてきた。現在、米国の Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) では、超伝導空洞を用いて電子加速を行う自由電子レーザー施設 The Linac Coherent Light Source II (LCLS-II) を保有しており、ビームエネルギーを 4 GeV から 8 GeV まで増強する計画を打ち出している (LCLS-II-HE) [8]。LCLS-II-HE の空洞の製造で鍵となる技術

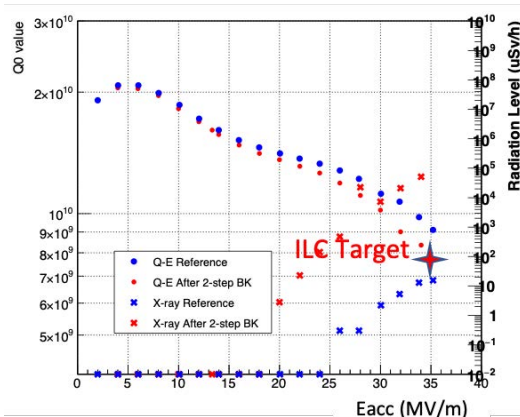


Figure 7: MT-5 の電界性能の評価。

$E_{acc,max}$ for MT3 VT Results			$E_{acc,max}$ for MT5 VT Results		
cell	$E_{acc,max}$ After	$E_{acc,max}$ Before	cell	$E_{acc,max}$ After	$E_{acc,max}$ Before
1 & 9	36.6	36.9	1 & 9	36.3	36.3
2 & 8	36.6	> 42.0	2 & 8	40.2	> 40.4
3 & 7	> 38.9	43.8	3 & 7	> 39.6	41.0
4 & 6	> 40.5	45.1	4 & 6	40.0	39.0
5	> 41.9	43.0	5	40.6	40.4

unit: MV/m

Figure 8: 2-step baking 前後の電界性能の変遷。

が N-doping である。窒素雰囲気下で空洞を高温熱処理することによって空洞内面に窒素拡散層を形成し、RF 表面抵抗を通常より 2 倍以上低減できる効果が生じる。KEK でも N-doping の研究を進めており、現在に至るまで 1-cell と 3-cell 空洞に対して空洞性能の向上が生じることを確認している [9]。ただし、LCLS-II-HE ではさらに踏み込んで 9-cell の空洞に対して N-doping を施すことを想定しており、その場合の電界性能として  $Q_0 > 2.7 \times 10^{10}$  at  $E_{acc} = 20.8$  MV/m を要求している。仮に KEK において N-doping を施した 9-cell 空洞の電界性能が LCLS-II-HE の要求水準をクリアできることを証明できれば、超伝導空洞の産業応用可能性を示すことができ、画期的となる。そこで、本研究では、9-cell の MT-5 超伝導空洞に対して N-doping を施し、KEK-STF における空洞実験によりその電界性能を評価した。

#### 3.2 表面処理方法

本研究では、KEK COI 棟の真空熱処理炉において、特に High-G 化が狙えるとされる 800 °C 2 分間 3.3 Pa の N-doping 処理を適用した。図 9 に窒素導入中の空洞の温度と真空炉の圧力の時間依存性のプロットを示す。その後、cold-EP (研磨量 5 μm) を 9-cell の MT-5 空洞に適用している。図 10 に低温電解研磨時の電流密度と温度

の時間依存性を示す。

### 3.3 N-doping 空洞の電界性能の評価

本測定で評価した空洞の加速モードに対する Q-E 曲線を図 11 に示す。赤点が N-doping を施した空洞性能の測定結果を表しており、青点が MT-5 に通常の空洞の表面処理レシピを施した場合の空洞性能を表している。星印は LCLS-II の要求水準を示す点である。本研究で処理された N-doping 空洞 (MT-5) が LCLS-II-HE の要求性能の水準をクリアしていることをはっきりと示しており、今後の N-doping 空洞の開発を進める上で大きな前進となった。

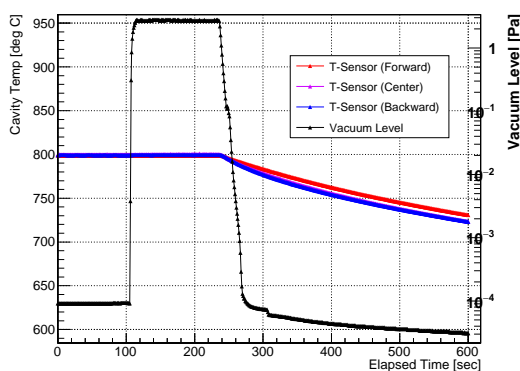


Figure 9: N-doping 処理時の真空炉中の温度と真空度。温度センサーは真空炉の前方、中央、後方に設置されている。

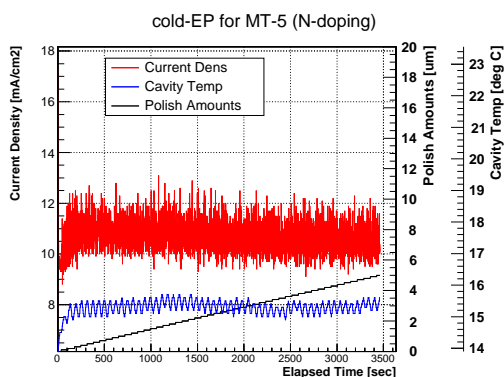


Figure 10: N-doping 空洞の電解研磨時の電流密度と空洞温度と研磨量の時間経過のプロット。

## 4. SUMMARY

本研究では、二台の 9 cell の TESLA 型超伝導空洞に対して海外研究機関で開発され、空洞の高加速勾配化、高 Q 値化が可能とされる 2-step baking と N-doping を施し、その電界性能に対する有効性を KEK-STF のたて測定試験設備で検証した。

2-step baking の効力は以下のようにして検証した。図 2 と図 3 に示す cold-EP を電解研磨の処理工程として適用し、図 4 と図 5 に示す 2-step baking を空洞に施し、そ

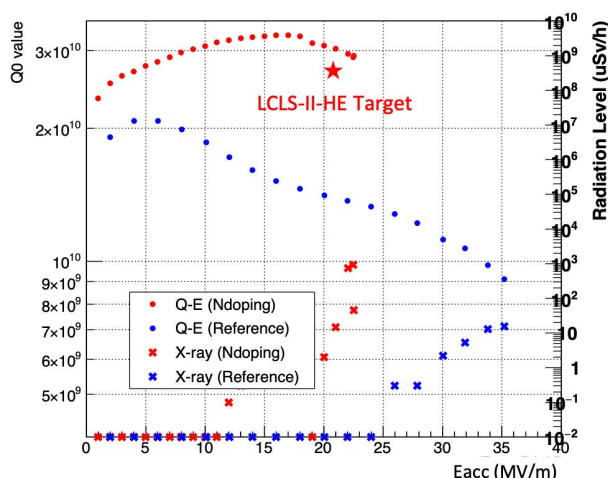


Figure 11: N-doping 空洞の電界性能の評価。

の空洞性能の変化を KEK-STF のたて測定試験設備で測定した。データ解析の結果、セルごとの加速電界の評価として図 8 のまとめを得ている。加速電界は 5% 程度のエラーを持つことを考慮すると、現時点では海外研究機関で報告されている有意な空洞性能の向上は確認できないという結果を得た。

KEK 初となる 9-cell 空洞に対する N-doping の効力は以下のようにして検証した。まず、MT-5 に対して、特に High-G 化が狙えるとされる真空炉における 800 °C 2 分間 3.3 Pa の N-doping 処理を適用した。図 9 に窒素導入中の空洞の温度と真空炉の圧力の時間依存性のプロットが示されている。その後、図 10 の cold-EP (研磨量 5 μm) を施し、その電界性能を KEK-STF のたて測定試験設備で検証した。図 11 の加速モードに対する Q-E 曲線は、本研究で処理された N-doping 空洞が LCLS-II-HE の要求性能の水準をクリアしていることをはっきりと示しており、今後の N-doping 空洞の開発を進める上で大きな前進となった。

## 参考文献

- [1] A. Grassellino, A. Romanenko, *et al.*, “Accelerating fields up to 49 MV/m in TESLA-shape superconducting RF niobium cavities via 75 °C vacuum bak”, arXiv:1806.09824.
- [2] A.Grassellino, A. Romanenko, O. Melnychuk, *et al.*, “Nitrogen and Argon Doping of Niobium for Superconducting Radio Frequency Cavities: A Pathway to Highly Efficient Accelerating Structures”, Supercond. Sci. Technol. 26, (2013), 102001.
- [3] T. Behnke *et al.*, “The International Linear Collider Technical Design Report”; <http://ww2.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [4] A.Grassellino, *et al.*, “Unprecedented quality factors at accelerating gradients up to 45 MVm<sup>-1</sup> in niobium superconducting resonators via low temperature nitrogen infusion”, Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 094004.
- [5] Kensei Umemori, *et al.*, “Study on Nitrogen-Infusion using KEK New Furnace”, 19th International Conference on RF Superconductivity (SRF 2019), Dresden, Germany,

MOP027, pp.95-98.

- [6] Kensei Umemori, *et. al.*, “Design and Commissioning of KEK New Vacuum Furnace for SRF Cavity Development”, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conference, TUPO070, pp. 496-498.
- [7] Kensei Umemori, *et. al.*, “Study on Nitrogen Infusion for 1.3 GHz SRF Cavities Using J-PARC Furnace”, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conference, TUPO071, pp. 499-502.
- [8] Marc Ross, “LCLS-II: Status, Issues and Plans”, 19th International Conference on RF Superconductivity (SRF 2019), MOFAA1, pp.1-8.
- [9] 岡田貴文 他、“J-PARC 真空炉を用いた窒素ドーブ超伝導空洞の評価”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEOL05, pp.31-35.