

## KEKにおけるニオブ製超伝導空洞の高加速勾配化・低損失化の研究HIGH-Q AND HIGH-G R&D AT KEK FOR Nb SUPERCONDUCTING RF CAVITY

片山 領\*, 梅森 健成、道園 真一郎、  
オメット マチュー、井藤 隼人、荒木 隼人

Ryo Katayama\*, Kensei Umemori, Shinichiro Michizono,  
Mathieu Omet, Hayato Ito, Hayato Araki  
KEK: High Energy Accelerator Research Organization

### Abstract

The performance of the niobium superconducting rf cavity is dependent on the surface-heat treatments applied prior to their assembly and the cooling process employed before the superconducting transition. Recently, it has been reported that the electropolishing method at lower temperature (cold EP), baking process consisting of about 75 °C for 4 hours and 120 °C for 48 hours (2-step bake), and fast cooling procedure to the cryogenic temperature further enhance the cavity performance compared to conventional methods. If these reproducibility is confirmed to be well, higher accelerator field gradient (High-G) and lower dissipated power during the accelerating operation (High-Q) should be realized in actual superconducting accelerator systems, which have an impact on ILC project and industrial applications of superconducting rf cavities. Thus, KEK has been investigating the effects of the combination of cold-EP and 2-step bake as well as fast cooling procedure. The current status of this research will be reported below.

### 1. はじめに

本論文で 2020 年から今まで KEK で行われてきたニオブ製超伝導空洞に対する高加速勾配化・低損失化の研究成果について報告する。超伝導空洞の性能は加速電界と表面抵抗（もしくはその逆数に比例する Q 値）によって指標され、加速電界が高いほど短い距離で粒子を加速でき、Q 値が高いほど少ないエネルギー損失で空洞を運用できる。超伝導空洞の性能は母材の物性とそれに適用した表面熱処理の如何に応じて大きく変化する。数十年にわたる研究開発を経て、ニオブ製空洞に電解研磨処理 (EP: Electro Polishing) とその後の 120 °C 48 h のベーキング処理を適用することで 35 MV/m 程度の最大加速電界と  $1 \times 10^{10}$  程度の性能を安定的に発揮できることが実証されている。ただし、近年、加速効率のよい超伝導空洞の学術利用・産業利用のニーズは高まりつつあり、超伝導空洞のより一層の性能向上が望まれている。このようなニオブ製超伝導空洞の高加速勾配化・低損失化をもたらす表面熱処理として有望視されるものに、低温電解研磨処理 (cold-EP) と 2 段階のベーキング (2-step bake) がある。通常の EP では 25-30 °C で電解研磨処理が行われるが、それを 6-16 °C の温度で処理することで空洞性能が系統的に向上する傾向が生ずることが報告されている [1]。また、2-step bake は標準的な 120 °C 48 h bake の前に 75 °C 4 h の予備的な熱処理過程を加える方法であり、空洞の最大加速勾配を 20-30 %、Q 値を 10 % 程度向上できる効果があると報告されている [2]。これ以外に有用な手法として空洞の急速冷却がある。急速冷却による空洞性能の向上は以下のようにして発現さ

れる。まず第一に、超伝導空洞は実際に運転する前に空洞の母材であるニオブ材料の超伝導転移温度点まで冷却する必要があるが、冷却速度を高めるとこのとき空洞の上下の温度差を強くつけることができるようになる。これは超伝導空洞の母材にトラップされた軸方向の磁束が自然と排除される力を生み、結果として磁束トラップに起因している表面抵抗の増分を軽減できる効果を生じる (Flux-Expulsion) [3]。第二に、水素化ニオブは、ニオブ製超伝導空洞の一般的な運転温度 2 K 程度では周囲の超伝導電子の助けを借りた近接効果による超伝導状態にある。ただし、このような近接効果によって発現された超伝導状態は印加磁場の強さに応じて常伝導転移することが知られており、加速電界の強さに応じて空洞性能が低下する原因になる可能性が指摘されている [4]。そこで、空洞の冷却速度を向上させて水素化ニオブが最も活発に形成される温度範囲 80 - 120 K を早く抜け、形成される水素化ニオブの大きさや量をさらに抑制することによって、空洞性能の向上につながる可能性がある [5]。仮にこれらの表面熱処理と冷却手法の効力およびその再現性を実験的に保証できれば、国際リニアコライダー実験計画 [6] 等に代表される大規模加速器実験のコスト削減に大きな貢献がある。そこで、本研究では、実際に上記の表面熱処理と冷却方法を KEK が保有するいくつかの空洞に適用して電界性能の比較を行い、その有効性と再現性の検証を試みた。以下で詳細を記述する。

### 2. 研究方法

本研究では、KEK が保有するいくつかの空洞に異なる表面熱処理工程と冷却処理工程を適用した場合における空洞の電界性能である加速電場と Q 値の対応関係を評価し、得られた結果を比較して上記の表面熱処理と冷却

\* ryo.katayama@kek.jp

方法の効力を検証している。また、得られたデータを解析して、RF 表面抵抗を温度依存性を持つ成分 (BCS 抵抗) とそうでない成分 (残留抵抗) にそれぞれ分離し、各々のデータの電界依存性の評価・比較を行っている。本研究で試験された空洞を表 1 にまとめる。また、それらの空洞の電界性能評価試験を行う際に適用された表面熱処理と冷却工程の分類を表 2 にまとめる。以下で熱処理条件と冷却条件の詳細について説明する。

## 2.1 電解研磨とベーキング

前述の通り、本研究では、超伝導空洞の標準的な表面処理レシピとして 25-30 °C の電解研磨処理と 120 °C 48 h のベーキングが適用されている。また、これと比較するために、表面熱処理として空冷の cold EP と 2-step bake (70 °C 4 h + 120 °C 48 h) が適用されている。本研究における cold EP では、チラーと空冷によって空洞の温度を 14 °C 程度にまで抑えながら電解研磨処理が行われており、その詳細は文献 [7] で報告されている。既に文献 [7] において 2-step bake の前処理温度として 75 °C を採用した場合には cold EP + 2-step bake による空洞性能の向上は確認できなかったと報告されている。そこで、今回は新たに 2-step bake の前処理温度として 70 °C を採用している。現在、KEK では 200 W のリボンヒーターと 400 W ヒーター × 2 を搭載したジャケットを装着した状態でベーキングが行われている (1-cell ではリボンヒーターのみ使用)。この方法は簡易であるが、空洞表面にヒーターが直接接触している箇所が overheating されてしまう可能性を排除できない。空洞性能に有害な影響を及ぼす可能性のある水素化ニオブの相図を見ると 80 °C 付近の温度領域には多様な相領域が点在しており [8]、仮にベーキング中に 80 °C 以上の熱処理が行われている箇所があると上記の多様な相変化に応じて水素の拡散係数も変化し、元来 2-step bake が持っていたであろう表面水素量の低減効果が失われてしまう可能性がある。そこで、本研究では前処理温度として従来の設定温度より 5 °C 低い 70 °C を採用し、この overheating の可能性を除去することを試みている。

## 2.2 冷却と空洞の温度差、磁場環境

KEK の環境では実験の前段階でデュワーからクライオスタットへと液体ヘリウムを注入して冷却を行っていく必要がある。この場合、冷却の初期段階でヘリウムガスが蒸発してクライオスタット内部で圧力の上昇が生じる。従来はトランスファーの速度、すなわち、空洞の冷却速度を犠牲にして圧力が過剰に上がる事態を防いでいた。その結果、KEK の環境では海外研究機関と比べて遅い冷却速度と弱い空洞の温度勾配しか達成できなかった (注: 海外研究機関では実験環境のクライオスタット

がヘリウム冷凍機と直結されている)。本研究では、クライオスタットを真空引きしながら液体ヘリウムを可能な限り早く注入できるように変更し、冷却速度を従来の方法よりも大幅に向上させることに成功した。ただし、それでもなお達成できる Flux Expulsion の度合いは十分ではないため、あらかじめ前日にためておいた少量の液体ヘリウムを自然蒸発させてクライオスタットを予冷しておき、その翌日にデュワーから再度液体ヘリウムを注入して空洞を急冷して超伝導転移時に空洞の上下の温度差を強くつけられるようにしている。この二段階の冷却過程を採用することにより、海外研究機関の急速冷却の過程を KEK の環境でも模擬できるようにした。具体的には、極低温までの冷却に要する時間を 7000 → 4000 s まで短縮でき、Flux Expulsion の度合いを数倍以上向上できるようになった。この二段階の冷却過程の効力に関しては文献 [9] で報告しているので参照にされたい。本研究では、MT-5 VT6, MT-5 VT7, MT-6 VT8, R17b-VT3 と R-17b VT7 でこのような冷却過程が採用されている (注: MT-5 VT6 では冷却速度の向上は行われていない)。なお、KEK では 1-cell 空洞の場合は、上下にビームパイプヒーターを設置して人工的に温度勾配を生じさせて強い Flux-Expulsion を誘導することが可能である。また、KEK ではクライオスタットの内部に設置した磁気シールドによって空洞周辺の環境磁場はすでに数 mGauss まで減衰しているが、1-cell 空洞と 3-cell 空洞の場合は周囲に設置したコイルを用いてさらに磁場の補正を行うことが可能である。本研究では、R-8 VT1 と VT25 において、ビームパイプヒーターを用いた強い Flux-Expulsion の誘導とコイルによる環境磁場の補正が行われている。また、R-17b VT3 と VT7 でも、コイルによる環境磁場の補正が行われている。

## 3. 実験の結果

9-cell 空洞 MT-5 に異なる表面熱処理と冷却条件を適用した場合に得られた電界性能の比較プロットを図 1 に示す。KEK の環境では 2 mSV/h 以上の放射線が観測されているとき Q 値の減少が生ずる。データを見ると、MT5 VT2 の  $E_{acc} > 20$  MV/m がそのような領域である。したがって、標準処理の MT5 VT1 と MT5 VT2 は 20 MV/m  $> E_{acc}$  でのみ比較すべきであるが、この場合は特に性能の向上は確認できていない。一方で、cold EP + 2-step bake (70 °C 4 h) を適用した MT5 VT6 と VT7 を見ると、いずれの場合でも最大加速電界と Q 値の有意な向上が生じている。ただし、この MT-5 の測定結果は cold EP + 2-step bake (70 °C 4 h) と二段階の冷却過程の効力を全て含んだものである。2-step bake の効力だけ切り分けるためには、電界性能の比較を冷却条件を揃えた状態で行う必要がある。そこで、9-cell 空洞 MT-6、3-cell 空洞 R-17b、1-cell 空洞 R-8 に対して同じ冷却条件を適用して比較プロットを作成したものを図 2、図 3、図 4 に示す。ここでは、R8 VT1 のみ  $T=2.07$  K、それ以外の測定では  $T=2$  K で測定が行われている。これは、R8 VT1 が行われた 2017 年時点で使われていたシリコン温度センサーが今現在使用されている CERNOX 温度センサーと比べて 70 mK のオフセットを持っていたことによる。一般に、70 mK の違いが Q-E 曲線に与える影

Table 1: 本研究で試験した空洞の分類

空洞名	セル数	材質	アニール
MT-5	9	FG	900 °C 3 h
MT-6	9	FG	900 °C 3 h
R-17b	3	LG with High Ta	800 °C 3 h
R-8	1	FG	800 °C 3 h

Table 2: 本研究で試験した空洞試験の分類。表中に記載した「空洞に温度差をつける方法」は以下の通りである。注1は本文中で説明したクライオスタットを予冷する方法によるものである。注2はビームパイプヒーターを用いて空洞の上下に温度差をつけて強制的に強力な Flux Expulsion を誘導する方法を指している。

空洞名	試験番号	表面熱処理	冷却速度向上	空洞の上下に温度差をつける工夫
MT-5	VT1	STD EP + bake	無	無
MT-5	VT2	cold EP + 2-step bake (75 °C)	無	無
MT-5	VT6	cold EP + 2-step bake (70 °C)	無	有 (注1参照)
MT-5	VT7	cold EP + 2-step bake (70 °C)	有	有 (注1参照)
MT-6	VT9	STD EP + bake	有	有 (注1参照)
MT-6	VT8	cold EP + 2-step bake (70 °C)	有	有 (注1参照)
R-17b	VT3	STD EP + bake	無	無
R-17b	VT7	cold EP + 2-step bake (70 °C)	無	無
R-8	VT1	STD EP + bake	無	有 (注2参照)
R-8	VT25	cold EP + 2-step bake (70 °C)	無	有 (注2参照)

響が僅かであることを考慮すれば、全ての測定で 2-step bake (70 °C 4 h) による Q 値の向上が生じていることが分かる。特に Fine Grain 空洞の場合において Q 値の向上が有意に高い。これは cold EP + 2-step bake (75 °C 4 h) を適用した場合に空洞性能が一度も向上しなかったのとは対照的な結果である [7]。ただし、いずれのデータにおいても最大加速電界の増加は生じておらず、特に Large Grain 空洞では最大加速電界の低下が生じてしまっている。

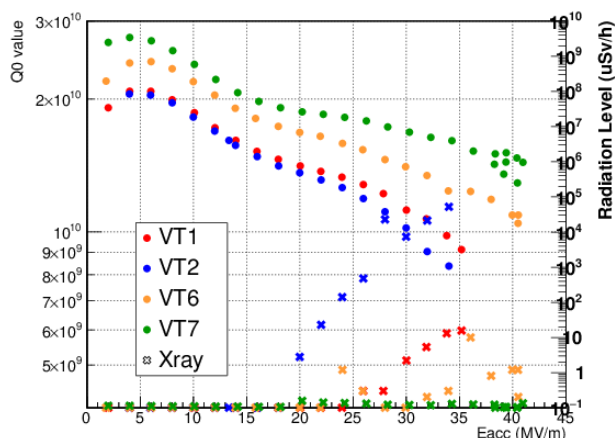


Figure 1: MT-5 空洞に異なる表面熱処理と冷却条件を適用した場合に得られる電界性能の変遷。

図 5 と図 6 に、MT-6 空洞と R-8 空洞の BCS 抵抗 ( $T=2\text{ K}$ ) と残留抵抗の電界依存性の比較を示す。高電界側のデータは表面発熱量の少ない 1-cell の R-8 空洞でのみデータ取得が行われている。ここでは、 $T=1.45\text{--}1.55\text{ K}$  から  $2\text{ K}$  まで Q-E 曲線を測定した結果から得た表面抵抗の温度依存性を  $R_s(T) = A/T \exp(-B/T) + C$  でフィットし、得られた第一項と第二項の評価値から BCS 抵抗と残留抵抗を求めた。両空洞とも cold EP + 2-step bake の処理の有無による BCS 抵抗の有意な変化は生じておらず、2-step bake の先行研究の論文で報告された電界依存性の振る舞いと異なっている [2]。一方で、cold EP + 2-step bake を施した場合には残留抵抗が有意に減

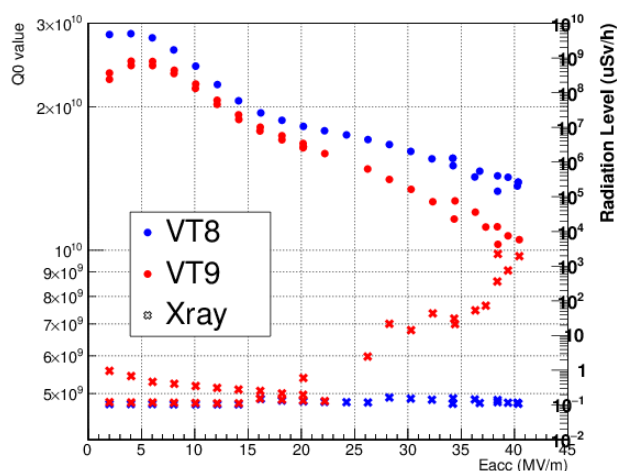


Figure 2: 2-step baking 前後の電界性能の変遷 (MT-6).

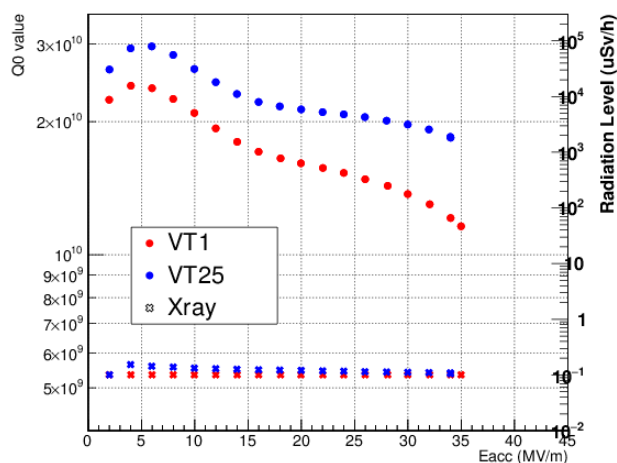


Figure 3: 2-step baking 前後の電界性能の変遷 (R-8).

少していることが理解される。

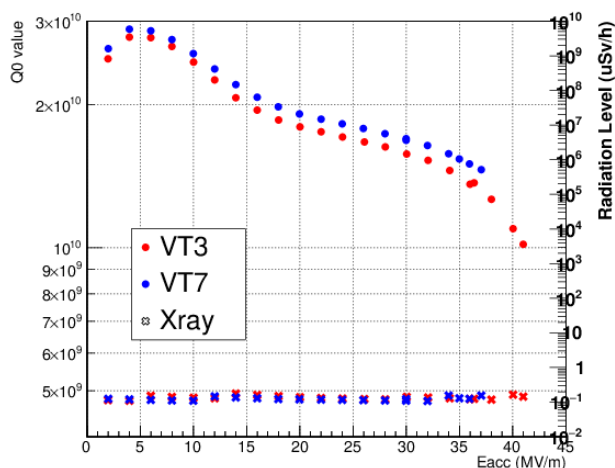


Figure 4: 2-step baking 前後の電界性能の変遷 (R-17b).

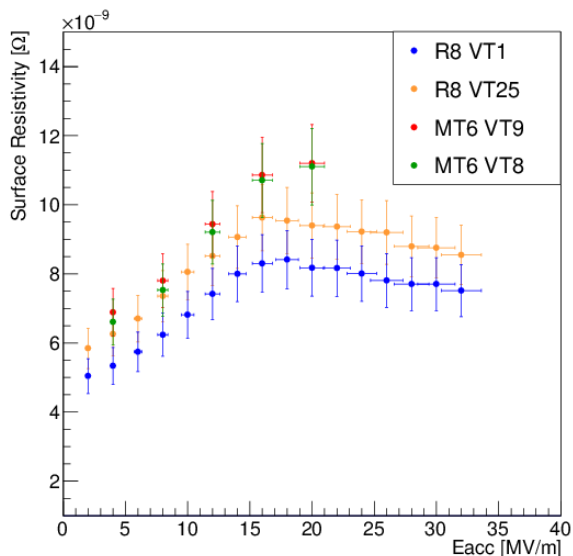


Figure 5: R8 空洞と MT6 空洞の T= 2 K 時点での BCS 抵抗の電界依存性の比較.

#### 4. まとめ

本研究では、空洞の高加速勾配化・高 Q 値化をもたらすと報告されている cold-EP + 2-step bake と急速冷却過程を KEK が保有する 1-cell, 3-cell, 9-cell 空洞に適用した場合に生じた電界性能の変化を評価し、その効力を検証した。まず 9-cell 空洞 MT5 に対して cold EP + 2step bake (70-75 °C 4 h) と冷却速度と空洞の上下の温度差を向上できる二段階の冷却過程をそれぞれ適用した場合の電界性能の比較を行った結果、2-step bake (70 °C 4 h) を施した場合に電界性能が有意に向上していることが示された。さらに、冷却の条件を揃えた場合に MT-6 空洞と R-17b 空洞と R-8 空洞の電界性能の比較を行った結果、cold EP + 2-step bake(70 °C 4 h) を施した場合に空洞の Q 値を高い歩留りで向上できていることが示された。一

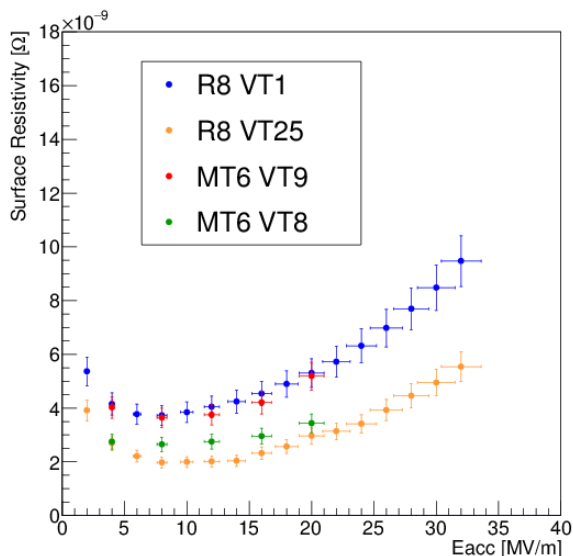


Figure 6: R8 空洞と MT6 空洞の残留抵抗の電界依存性の比較.

方で、いずれの空洞の場合でも最大加速電界の向上は確認できなかった。RF 表面抵抗の電界依存性を解析した結果、cold EP + 2-step bake(70 °C 4 h) を施した場合に残留抵抗が大きく軽減していることが確認できた。

#### 参考文献

- [1] A. C. Crawford, “Extreme diffusion limited electropolishing of niobium radiofrequency cavities”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, Vol. 849, p. 5, Mar. 2017.
- [2] A. Grassellino, A. Romanenko *et al.*, “Accelerating fields up to 49 MV/m in TESLA-shape superconducting RF niobium cavities via 75 °C vacuum bake”, arXiv:1806.09824.
- [3] A. Romanenko, A. Grassellino *et al.*, “Dependence of the residual surface resistance of superconducting radio frequency cavities on the cooling dynamics around Tc”, J. Appl. Phys. 115, 184903 (2014).
- [4] A. Romanenko *et al.*, “Proximity breakdown of hydrides in superconducting niobium cavities”, Supercond. Sci. Technol. 26 (2013) 035003.
- [5] Daniel Bafia, “High-Q/High-Eacc and ILC Cost Reduction Status”, International Workshop on Future Linear Colliders, 31. October, 2019.
- [6] T. Behnke *et al.*, “The International Linear Collider Technical Design Report”; <http://ww2.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [7] 片山領他, “KEK STF における TESLA 型 9 セル超伝導空洞の性能評価”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THPP31.
- [8] Manchester F D and Pitre J M 2000 (Materials Park, OH: ASM International).
- [9] R. Katayama *et al.*, “High-Q/high-G R&D at KEK Using 9-Cell Tesla Shape Niobium Cavities”, Proceedings of SRF’21 Proceedings, East Lansing, MI, USA (2021), MOPCAV006.