

## 超伝導空洞の High-Q の実現に向けての研究開発

### DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING RF CAVITIES TOWARDS HIGH-Q OPERATION

梅森健成<sup>#, A)</sup>, 井上均<sup>A)</sup>, 植木竜一<sup>A)</sup>, 加古永治<sup>A)</sup>, 許斐太郎<sup>A)</sup>, 久保毅幸<sup>A)</sup>, 阪井寛志<sup>A)</sup>, 清水洋孝<sup>A)</sup>, 仙入克也<sup>B)</sup>, 土屋清澄<sup>A)</sup>, 寺島昭男<sup>A)</sup>, 原博史<sup>B)</sup>, 増澤美佳<sup>A)</sup>, 道前武<sup>A)</sup>, 柳澤剛<sup>B)</sup>, 山中将<sup>A)</sup>, 渡辺勇一<sup>A)</sup>, Kensei Umemori<sup>#, A)</sup>, Hitoshi Inoue<sup>A)</sup>, Ryuichi Ueki<sup>A)</sup>, Eiji Kako<sup>A)</sup>, Taro Konomi<sup>A)</sup>, Takayuki Kubo<sup>A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>A)</sup>, Hirotaka Shimizu<sup>A)</sup>, Katsuya Sennyu<sup>B)</sup>, Kiyosumi Tsuchiya<sup>A)</sup>, Akio Terashima<sup>A)</sup>, Hiroshi Hara<sup>B)</sup>, Mika Masuzawa<sup>A)</sup>, Takeshi Dohmae<sup>A)</sup>, Tsuyoshi Yanagisawa<sup>B)</sup>, Masashi Yamanaka<sup>A)</sup>, Yuichi Watanabe<sup>A)</sup>

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

<sup>B)</sup> Mitsubishi Heavy Industries Mechatronics Systems (MHI-MS)

#### Abstract

High-Q operation is desirable for CW operation of superconducting RF cavities to reduce 2K cryogenic load. For that aim, following issues are important; reduce ambient magnetic field, suppress flux trapping on cavity surface during transition, optimized cavity surface processing and selection of materials. Nitrogen doping is one promising method and applied to single-cell cavities at KEK. Results of vertical tests are obtained. Flux trapping experiments had been started by control of cooling procedure and ambient magnetic field. A single-cell and 9-cell cavities were made from large grain niobium sheet at KEK-CFF and cavity performances were compared with fine grain cavities.

#### 1. はじめに

超伝導空洞は少ない電力で高い加速勾配を得られることがメリットであるが、一方で He 温度を維持するための He 冷凍機の運転に大きな電力を要するという側面がある。High-Q 運転を行うということは、空洞の Q 値を高い状態、つまり空洞の表面ロスが少ない状態で運転を行うことであり、He 冷凍機の負荷を減らす事に繋がる。リニアコライダーのようなパルス運転のみならず、ERL や CW-FEL のような連続(CW)運転の加速器において特に大きな効果が得られる。

最近では LCLS-II の実現に向けて、FNAL(Fermi National Accelerator Laboratory)を始めとするアメリカの研究所を中心に high-Q 運転を実現するべく様々な研究がなされている。窒素ドーピングによる BCS 抵抗の低減や、磁場環境および冷却方法の最適化による磁束トラップの抑制などにより超伝導空洞の表面抵抗の低減に成功している。

KEK においても high-Q 運転に向けて、同様の研究を進めており、一連の研究の進捗状況について本論文にて紹介する。

#### 2. 超伝導空洞の表面抵抗

超伝導空洞の表面抵抗は以下の式で表される。

$$R_s = R_{BCS}(T, E_{acc}) + R_{res}(T, B_{trap}, E_{acc})$$

このうち  $R_{BCS}$  は温度に指数関数的な依存を示し BCS 抵抗と呼ばれる。また  $R_{res}$  は残留抵抗と呼ばれ、温度依存性は非常に弱く、冷却を進めて行くとこの抵抗値に落ち着く。

近年提唱されている窒素ドーピングの手法は、空洞表面に窒素を拡散させることにより表面状態を改善し、BCS

抵抗を低減させるものである。L バンド空洞は 2.0K 付近で運転されることが多いが、これまでの表面処理方法では 2.0K で 10nΩ 程度だった BCS 抵抗を数分の一に減らすことができる[1]。

また、残留抵抗の項は、主にはニオブ材の材質に起因するものと考えられてきたが、最近の研究により、材質よりもむしろ冷却の際に超伝導状態に移行する際の磁場のトラッピングによるものであるという事がわかってきた[2]。空洞周辺磁場を減らし、磁場をトラップしにくい冷却方法を適用することで残留抵抗値を下げる事が可能である。なお、冷却時に磁場をどの程度トラップするかの感度が、ニオブ材の材質や表面処理方法等に依存する。

#### 3. 窒素ドーピング

FNAL, Jefferson lab, Cornell 大学の用いている窒素ドーピングの手法およびパラメーター[1, 3, 4]を参考にして、KEK においても L バンド単セル空洞に窒素ドーピングを施し、EP(電解研磨)により表面を削ってから、縦測定による性能評価を行った[5]。

##### 3.1 実験セットアップ

窒素ドーピングは 800 度、3 時間の熱処理の最後に数 Pa の窒素を導入して、空洞表面に窒素を拡散させる。熱処理には KEK 機械工学センターの9セル空洞用の大型真空炉または単セル空洞用の小型真空炉を用い、それぞれに窒素導入用のラインを構築し窒素ドーピングを行った。アメリカの研究所の用いているパラメーターを参考に、以下の3通りでの窒素ドーピングを試みた。

- 1) 800deg, 3h+3.3Pa N-dope, 2min + 800deg, 6min
- 2) 800deg, 3h+5.5Pa N-dope, 20min + 800deg, 30min
- 3) 800deg, 3h+2.7Pa N-dope, 20min + 800deg, 30min

なお 1)と 2)には小型真空炉を用いて、東京電解製の fine grain の Nb 板から製作した単セル空洞に窒素ドー

<sup>#</sup> kensei.umemori@kek.jp

プを行った。3)には大型真空炉を用いて、ULVAC 製の fine grain の Nb 板から製作した単セル空洞に窒素ドーブを行った[6]。

以下、典型的な例として 3)のパラメーターでの窒素ドーブの様子ならびに縦測定結果を示す。Figure 1 に大型真空炉を、また Figure 2 に窒素ドーブの際の温度および真空度の履歴を示す。



Figure 1: A furnace for 9-cell cavities, which were used for Nitrogen-doping.

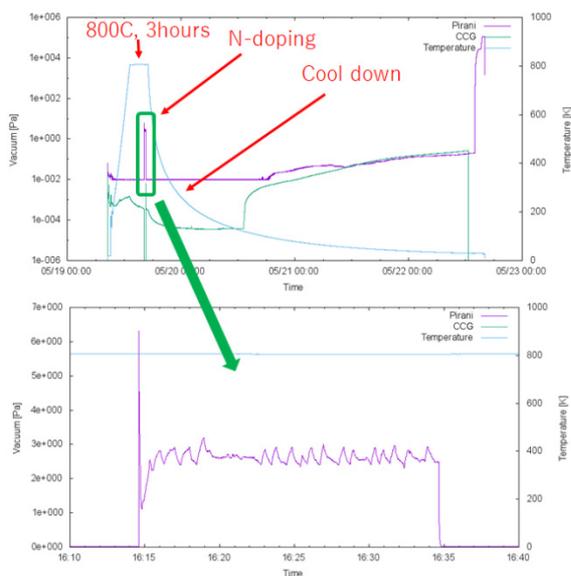


Figure 2: History of vacuum pressure and temperature during Nitrogen doping with parameter 3). Bottom plot is expansion during doping.

### 3.2 KEK における縦測定結果

Table 1 にこの空洞の履歴を示す。通常の処理方法での Q 値ならびに加速勾配を確認してから、3)のパラメーターにて窒素ドーブを行った。5~15 $\mu$ m の EP を施し、空洞表面の研磨量を変えながら、KEK-STF にて縦測定を実施し性能評価を行った。

Figure 3 に  $R_s$ -1/T カーブ、ならびに Figure 4 に Q-Eacc カーブを示す。

Table 1: History of the Cavity, Which is Used for Nitrogen Doping with Parameter 3)

2015/Feb	VT1 before Nitrogen doping
2015/Mar	Nitrogen doping with parameter (3)
2015/Jun	EP(15 $\mu$ m), HPR, Assembly, Baking $\rightarrow$ VT2
2015/Jun	EP(15 $\mu$ m), HPR, Assembly, Baking $\rightarrow$ VT3
2015/Dec	EP(5 $\mu$ m), HPR, Assembly $\rightarrow$ VT4
2016/Mar	HPR, Assembly $\rightarrow$ VT5 (FNAL)

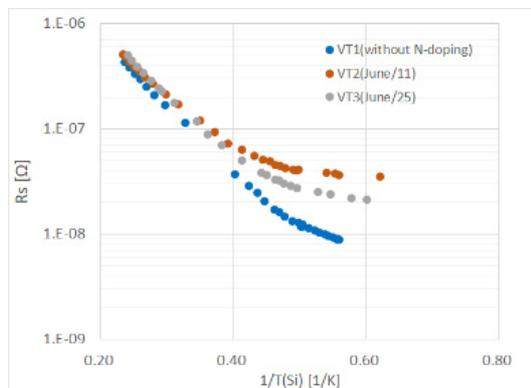


Figure 3:  $R_s$ -1/T curve of the Nitrogen doped cavity, on which doping was applied with parameter 3).

残念ながら残留抵抗が非常に大きい結果となっており、予想していたような空洞 Q 値の向上は見られなかった。加速勾配が大きく下がるのは、窒素ドーブを行った空洞に共通のものである。

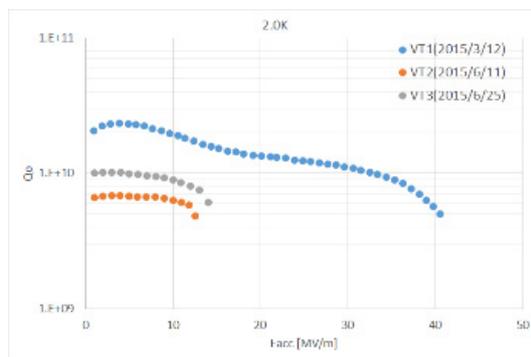


Figure 4: Q-E curve of the cavity at 2.0 K

1)および 2)のパラメーターで窒素ドーブを行った空洞に関しても、程度の差こそあれ同様に Q 値の劣化が見られており、EP による研磨量を変えていっても、通常処理の空洞の Q 値を超えることはできなかった。

窒素ドーブをした空洞は、超伝導に転移する際に周囲の磁場を取り込む感度が通常処理の場合より数倍高い事が知られており[7]、磁場環境のあまり良くない KEK-STF の場合は、磁場トラップによりかえって残留抵抗が大きくなってしまったのではないかと疑われた。

### 3.3 FNAL における縦測定結果

上記 KEK にて測定を行った空洞を FNAL に輸送して縦測定を行った。FNAL の縦測定システムは、磁気シールドの強化により磁場が抑制されていること、またコイルを用いて磁場のキャンセリングを行う事ができるため、良

い磁場環境での測定が期待できる。

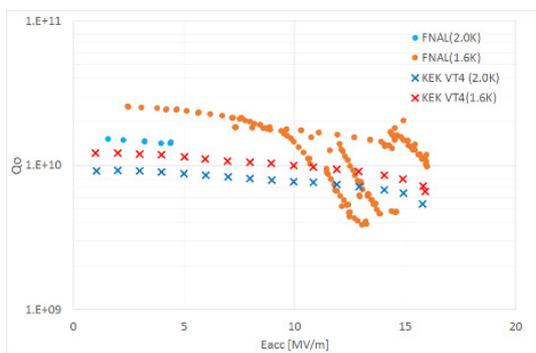


Figure 5: Vertical test results performed at FNAL and KEK, for the cavity doped with parameter 3).

Figure 5 に FNAL での縦測定の結果を示す。KEK での測定よりは改善が見られるものの、窒素ドープの空洞に期待されるような Q 値の向上はやはり今回も見られず、残留抵抗が大きいという結果が再現された。

この結果により、Q 値の劣化の原因は磁場環境の影響によるものではないことが確認された。どうやら正常な窒素ドープ表面が構築されていない可能性が高い。その理由として疑われるのは、真空炉の真空排気システムである。アメリカの研究所の場合は、クライオポンプを用いているのに対し、KEK では拡散ポンプを使用している。

#### 4. Flux trapping 実験

前述したように、残留抵抗値は磁場トラップからの寄与が支配的である事がわかってきている。また、縦測定においては空洞の上下に温度差をつけて冷却する事により磁場をトラップしづらくする事ができる。冷却方法の最適化を図る事で残留抵抗値を下げて、空洞 Q 値を向上させることが可能である。

KEK においても Figure 6 のようなセットアップを構築し、実験を始めたところである。

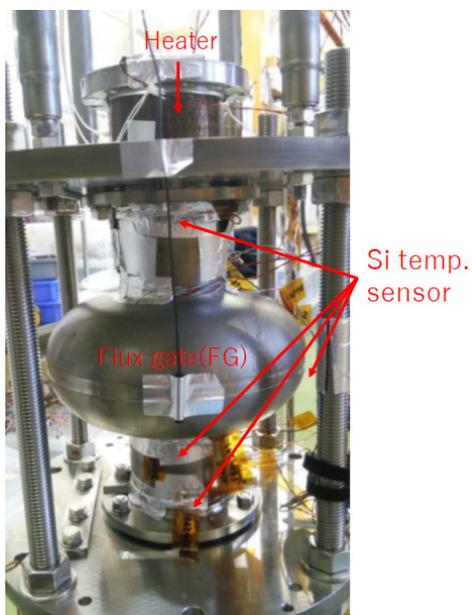


Figure 6: Setup for flux trapping experiments.

Flux gate sensor を空洞赤道部に設置して、空洞表面での磁場強度を観察する。また、Si 温度計を用いて空洞表面の温度勾配を測定している。冷却しながら赤道部表面での磁場強度を観測した一例を Figure 7 に示す。超伝導に転移する際に、空洞から磁場が押し出されてきて、変動しているのが見られる。この測定ではまだうまく見られていないが、空洞の磁場がうまくはじき出されると、超伝導への転移後の空洞外表面での磁場が大きく観測され、高い Q 値での測定が期待できる。

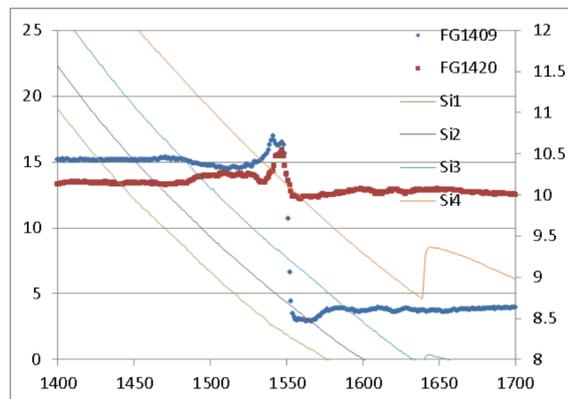


Figure 7: Example of observed flux expulsion during transition to superconducting state.

KEK での磁場トラップの実験は始まったばかりであり、サポート器具等からの磁場の影響などを含め、測定システムの検証を行っている。またコイルも製作されており、磁場の制御も含めて今後研究を進めて行く予定である。

#### 5. Large Grain 空洞

Nb 製超伝導空洞は、通常は fine grain とされる数 10 $\mu$ m の結晶粒界からなる Nb 板から製作されるが、ここでは large grain と呼ばれる数 cm~数 10cm の大きな結晶粒界からなる Nb 板からの空洞製作とその測定結果について報告する。

Large grain 空洞のメリットは、fine grain 空洞と比較して高い Q 値を得やすいという点にある。結晶粒界が少ない分 magnetic flux を取り込みにくいという説もあるが、詳細はまだよく理解されていない。

KEK-CFF(Cavity Fabrication Facility)におけるこれまでの空洞製造の経験を生かして、large grain の単セル空洞ならびに large grain の 9 セル空洞を製作し、以下に述べるように処理・測定を実施し性能評価を行った。

##### 5.1 Large Grain 単セル空洞

Large grain 単セル空洞の製作と測定に関しての詳細は、引用文献[8]にある。一連の表面処理を行った後、縦測定により性能評価を行った。測定結果については Figure 8 に示す。約 45MV/m の加速勾配が得られ良好な結果であった。1.5 K 以下まで冷却するとほぼ残留抵抗値が見えるようになるが、1回目の縦測定結果では、 $1 \times 10^{11}$  に近い非常に高い Q 値が得られ有望な結果が得られた。ただし2回目以降の測定では、測定のたびに Q 値が下がって行く傾向が見られている。磁場環境がコントロールできていない事が、再現性に乏しい理由ではないかと考えている。

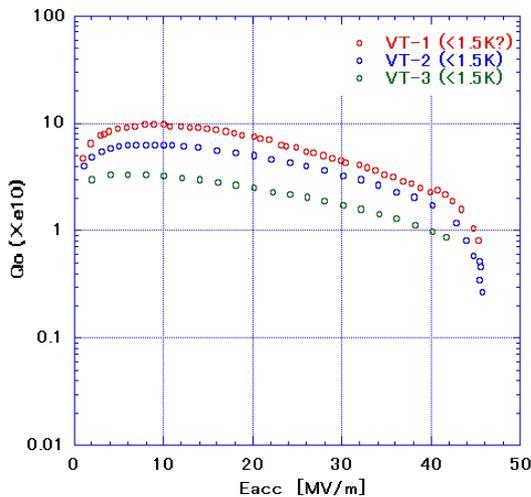


Figure 8: Vertical test results for large grain single-cell cavity at less than 1.5 K.

## 5.2 Large Grain 9セル空洞

Large grain 単セル空洞の有望な結果を受けて、9セル空洞の製作を行った。詳細については、引用文献[9]に述べられている。こちらで一連の表面処理を行った後に、縦測定により性能評価を行った。

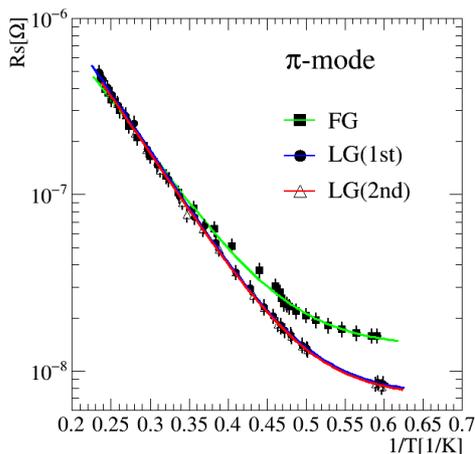


Figure 9:  $R_s$ - $1/T$  curve for large grain 9-cell cavity.

測定結果については  $R_s$ - $1/T$  カーブを Figure 9 に示す。残留抵抗は  $7\text{n}\Omega$  程度であり、fine grain の 9 セル空洞よりも低い値が得られた。 $Q$ - $E_{acc}$  カーブについては Figure 10 に示す。2回縦測定を行ったが、2回とも3セル赤道部の発熱で性能が制限されていた。3セル赤道部付近に2ヶ所疑わしい場所があり、片方は1回目の測定後の局所研磨できれいにしたが効果が無かったことから、もう一方の欠陥により制限されていたと考えられる。研磨が難しい場所ではあるが、局所研磨をして次回の縦測定に挑む予定である。パスバンドの測定から、その他のセルは  $30\text{MV/m}$  以上の加速勾配に到達できる事がわかっており、次回の測定にて良い結果が得られるのではないかと期待されている。

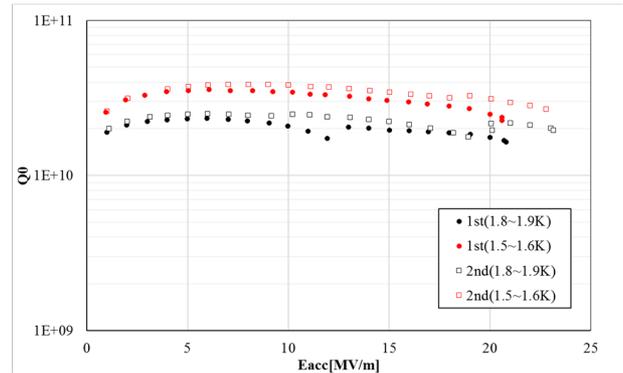


Figure 10: Vertical test results for large grain 9-cell cavity.

## 6. まとめ

超伝導空洞の High-Q 運転に向けての開発研究は世界的に積極的に進められており、ここ数年の進化は目覚ましいものがある。KEK においても様々な開発研究を進めて来ている。まずは、BCS 抵抗の改善が見込める窒素ドーピングを試みたが、残念ながら  $Q$  値の向上には繋がらなかった。磁場トラップも high-Q のために理解すべき重要な項目であり、研究を始めた。窒素ドーピングならびに磁場トラップについては今後研究を進め、high-Q の実現に向けて理解を深める。Large grain 空洞については、単セル、9セルともに製作され、処理をした後に縦測定にて性能評価が行われ、fine grain の Nb 材による空洞よりも高い  $Q$  値が得られる傾向にあることが確認された。

## 7. 謝辞

KEK からの空洞を受け入れ、縦測定を引き受けていただいた FNAL 超伝導空洞グループの皆様へ深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] A. Grassellino et al., Supercond. Sci. Technol. 26 (2013) 102001 (6pp).
- [2] S. Posen et al., Journal of Applied Physics 119 (2016) 213903.
- [3] M. Ge et al., MOPB084, SRF2015, Whistler, Canada (2015).
- [4] A. Palczewski et al., LINAC2014, Geneva, Switzerland, p736 (2014).
- [5] K. Umemori et al., IPAC2016, Busan, Korea, p2154 (2016).
- [6] K. Umemori et al., THAA04, SRF2015, Whistler, Canada (2015).
- [7] D. Gonnella et al., MOBA03, SRF15, Whistler, Canada (2015).
- [8] T. Kubo et al., IPAC2014, Dresden, Germany, p2519 (2014).
- [9] 道前武 他、本プロシーディングス MOP017.