

9セル超伝導加速空洞の表面処理と性能評価試験

THE SURFACE TREATMENT AND THE PERFORMANCE EVALUATION FOR 9-CELL SUPERCONDUCTING CAVITY

津村周作^{#,A)}, 梅森健成^{A,B)}, 片山領^{A,B)}

Shusaku Tsumura^{#,A)}, Kensei Umemori^{A,B)}, Ryo Katayama^{A,B)}

A) SOKENDAI, B) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Research at the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) focuses on niobium superconducting cavities. In this study, a 1.3 GHz nine-cell cavity, manufactured from fine-grain niobium plate and designed for high-pressure gas safety regulation, is being examined. This cavity undergoes a series of standard surface treatments, including electropolishing, annealing, ultrasonic cleaning, high-pressure ultrapure water cleaning, and baking. Performance evaluations, concentrating on Q-values and acceleration gradients, are conducted at the KEK superconducting RF test facility. A series of the surface treatment and the results of vertical tests are presented.

1. はじめに

現在、高エネルギー加速器研究機構(KEK)において、1.3 GHz 9-cell 超伝導加速空洞の開発が進行中である。より良い性能を持った空洞を開発することは加速器開発の上で重要である。その障害の一つとなるのが、空洞赤道部に生じた欠陥であり、これはクエンチの発生要因となる。さらに、空洞アイリス部にダストが存在しているとフィールドエミッションによる性能劣化も考えられる。空洞電解研磨やアニーリングといった表面処理手法はそのような表面を達成するために行われる過程であり、最適化が繰り返されている。

今年、高圧ガス保安法に準拠して製造された KEK-6 と呼ばれる空洞に対して、標準的な空洞表面処理を施し、縦測定を行った。KEK-6 は Fine-grain の粒度の細かいニオブから製造された 9-cell 超伝導空洞である。図 1 にその概形を示す。表面処理の流れとしては電解研磨 (EP)、高圧超純水洗浄 (HPR)、超音波洗浄、アニーリングなどを行うとともに、周波数調整および内面検査が実施された。



Figure 1: Apparatus of KEK-6.

2. 超伝導空洞の性能評価方法

空洞の性能は加速勾配と Q 値によって評価される。Q 値とは、表面抵抗 R_s の逆数に比例する値で、空洞の形状によって決まる因子 Γ を用いて $Q_0 = \Gamma/R_s$ と表される。この2つのパラメータをプロットすることにより、空洞の性能を評価することができる。

先に述べたように、これらの空洞性能パラメータを改善させるためには、空洞内面が滑らかで清浄に保たれている必要がある。そのため、表面処理は性能改善のために有効な手段の一つとなる。表面処理を行った空洞の性能評価のために縦測定を行った。

縦測定において、空洞は縦型クライオスタットに挿入され、信号発生器およびアンプによって生成された高周波電力を空洞内に入力する。空洞からは反射波および透過波が出力され、この入力電力、透過電力、反射電力、共振周波数および decay time を測定することで加速勾配 E_{acc} および無負荷 Q 値(Q_0)を評価することが可能となる。

特にセルごとの空洞性能評価には、Passband モードの解析が用いられる。Passband モードの測定では、各セルの内部の表面磁場と電場の強さを変えることができ

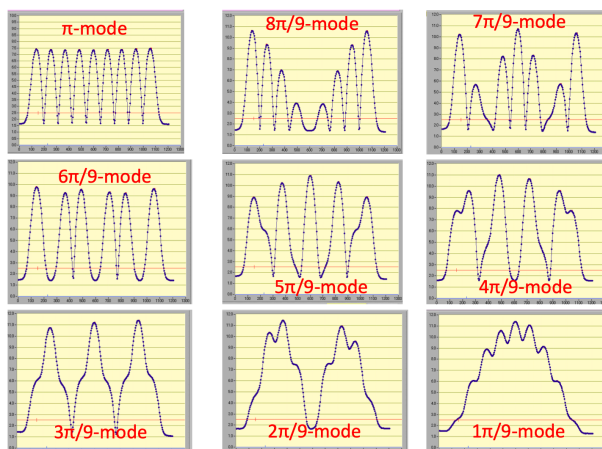


Figure 2: On-axis Electric field for passband mode[1].

[#] stsumura@post.kek.jp

る。Passband の全モードの軸上電場の分布を図 2 に示す。Passband モードを総合的に解析し、その結果に応じた対策を講じることにより、加速勾配の向上やフィールドエミッションの軽減を行うことができる。

3. 表面処理

3.1 表面処理の流れ

今回、KEK-6 に対して図 3 のような流れで表面処理を行った。

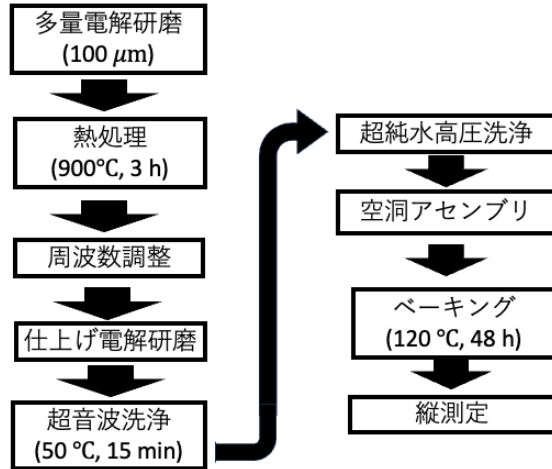


Figure 3: Flow of surface treatment.

3.2 多量電解研磨(EP-1)

滑らかな表面を形成するために行われるのが電解研磨である。この過程において、49%フッ化水素と 98%硫酸を 1:9 の割合で混合させた電解研磨液(EP 液)を空洞内に注入し、電極間に電圧を印加しながら表面を研磨する。電解研磨の際の平均電流密度と、空洞内の温度および研磨量を図 4 左図に示す。平均電流密度と空洞内の温度を変化させると、研磨の反応速度が変化する。今回、多量電解研磨のパラメータとして、平均電流密度は 40 – 50 mA/cm²、空洞内温度は 25-30°C 程度に保つように調整した。

3.3 高温熱処理

多量電解研磨により空洞表面には水素が吸蔵されているとともに、空洞製造の際の応力がかかった状態になっている。これらを取り除くために 900 度に昇温された真空炉内において 3 時間アニーリングを行った。その後は自然降温により冷却した。

3.4 仕上げ電解研磨(EP-2)

前工程の際に空洞内に生じたコンタミを除去し、清浄な表面を形成するために、再度 EP を行い空洞表面 20 μm を研磨した。パラメータは図 4 右図に示されている。今回の処理においては、平均電流密度は 30 – 40 mA/cm²、空洞内温度は 25 - 30°C を保つように設定された。硫化物の生成を抑制するために、多量電解研磨の際よりも平均電流密度を小さくして、研磨速度を低下させている。

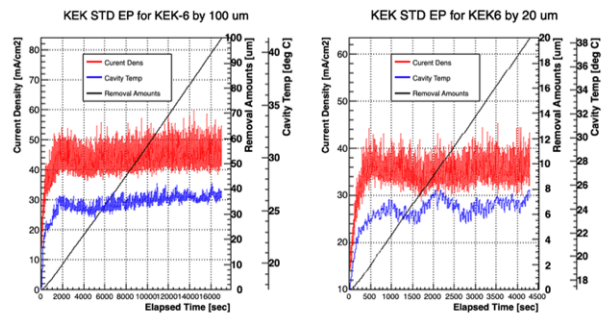


Figure 4: Current density, cavity temperature and removed amount of EP-1(left) and EP-2(right).

3.5 超音波洗浄

電解研磨の際に空洞表面に付着した硫化物を除去するために、FM20 と呼ばれる中性洗剤を空洞内に入れ、超音波洗浄を行った。水温は 50°C であり、洗浄時間は 15 分ほど行った。

3.6 空洞アセンブリ

アセンブリの際は、空洞内にダストを入れないために、クリーンルームにおいて作業を行う。

3.7 ベーキング

空洞にヒートジャケットを取り付け、120°C で 48 時間加熱した。この際、空洞の cell-1, 3, 7, 9 に対してそれぞれセンサーを取り付け、温度をモニターした。図 5 に各セルの温度および真空度を示す。

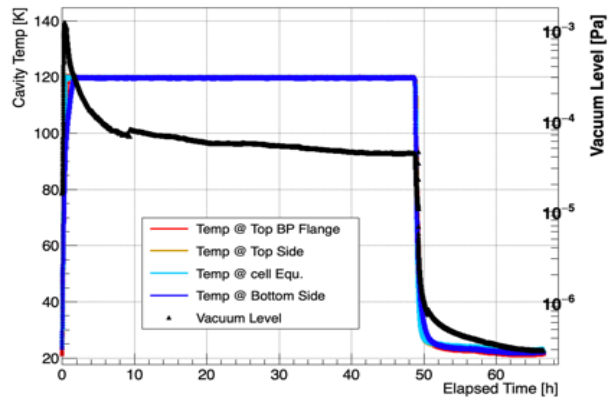


Figure 5: Temperature and vacuum level during baking process.

4. 性能測定結果

4.1 縦測定セットアップ

縦測定にあたり、X-線センサーと温度センサーを空洞外面に取り付けた。クライオスタットへと挿入し、液体ヘリウムを減圧することで温度を下げた。これにより空洞内の温度は 2K まで冷却された。

4.2 π モード測定

今回の π モードにおける縦測定の結果を図 6 に示す。今回爆発現象と見られる反応が確認され、この直前での最高加速電場は 16 MV/m、最大到達 Q 値は 2.4×10^{10} であった。また、クエンチに達するまでは、放射線はほとんど検出されなかった。爆発現象とは、放射線量の大幅な増加に伴い、突然 Q_0 値の劣化、加速勾配の劣化が生じる現象を指す[2]。今回、爆発現象が起こった後再度 π モードでの測定を行ったところ、放射線が 9.0 MV/m をオンセットとして大きく増加し、最大加速電場、 Q 値ともに悪化した。X-ray map を見ると、爆発現象が起きた段階で Iris-2, 3 及び Iris-4, 5 付近に広くシグナルが観測されていることがわかった。爆発現象が起きた後の測定では、主に Iris-5, 6 の 190° 付近で放射線が発生していた。

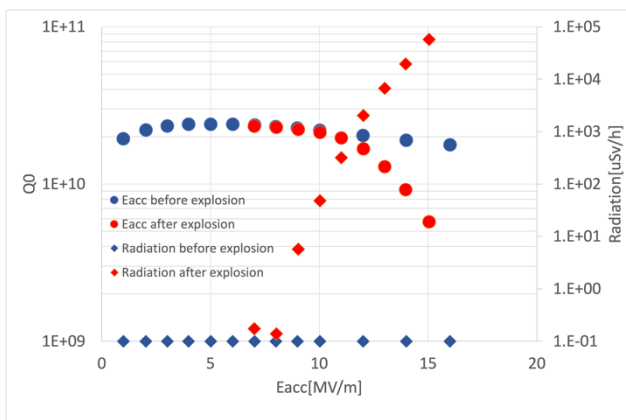


Figure 6: Accelerating gradient (Eacc), Q_0 value and radiation of initial π mode.

4.3 それ以外のモード

π モード以外のモードの Q - E カーブを図 7 にまとめた。いずれのモードにおいても、放射線量が大きく増加しており、それに伴って性能が大きく悪化していることが見てとれる。唯一、 $8/9\pi$ モードにおいてはクエンチに達する直前まで放射線発生が観測されなかった。

4.4 全モードまとめ

今回の測定の最大加速勾配及びクエンチの発生した位置をまとめたものを表 1 および表 2 に示す。温度センサーで見た際のクエンチの位置と、X-ray センサーで見た際の放射線発生位置との関係から、主に次の3つのグループに分けられる。それは、クエンチが生じるまで放射線の見られなかった $8/9\pi$ モード、クエンチ位置と放射線発生位置の異なる $4/9\pi$ モードおよび $6/9\pi$ モード、逆に一致する $3/9\pi$ モードである。クエンチの発生原因について、 $8/9\pi$ モードはマルチパッキング、 $3/9\pi$ モードについ

てはフィールドエミッションであることが推測されるが、 $4/9\pi$ モードおよび $6/9\pi$ モードに関しては今回の結果からは推定するための証拠が少ない。表面処理を行うことで性能改善が図れるか確かめるために、再度性能評価試験を行う予定である。

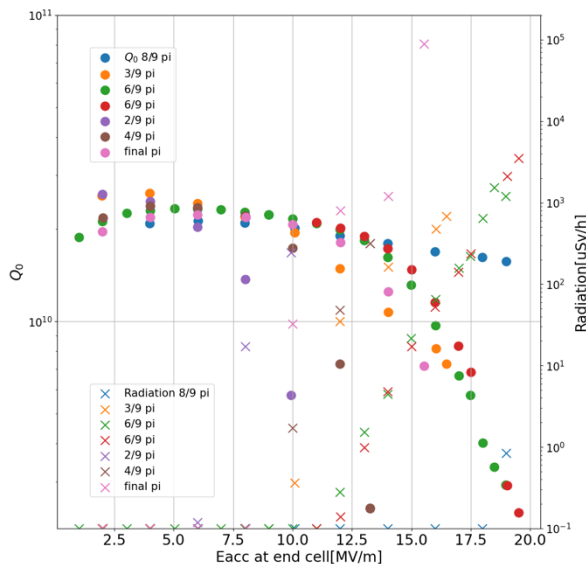


Figure 7: Eacc at end cell, Q_0 value and radiation of other modes.

Table 1: Summary of the Maximum Eacc

	Cells 1&9 [MV/m]	Cells 4&6 [MV/m]	Cell 5 [MV/m]
π initial	15.0	15.0	15.0
π final	15.5	15.5	15.5
$8/9\pi$	19.0	7.0	0.0
$6/9\pi$	19.5	19.5	0.0
$4/9\pi$	13.3	19.2	0.0
$3/9\pi$	16.5	16.5	33.0
$2/9\pi$	9.9	18.3	0.0
Eacc, max	19.5	19.5	33.0

Table 2: Summary of Quench Points and Radiation Spots

	Performance Limitation	Radiation
π initial	Radiation Limit	Explosion
π final	Radiation Limit	Iris-1,2/2,3/4,5/5,6
8/9 π	Quench at Cell-9 210°,342°	No radiation (Multipacting)
6/9 π	Quench at Cell-6 198°-240°	Iris-5,6 100°-120°
4/9 π	Quench at Cell-6 198°-240°	Iris-5,6 110°-130°
3/9 π	Quench at Cell-5 270°-300°	Iris-5,6 300°-320°
2/9 π	Radiation Limit	Iris-5,6 110°-130°

5. まとめ

KEK-6 の表面処理および縦測定性能評価の概要について報告を行った。標準的な表面処理である、多量電解研磨、高温熱処理、仕上げ電解研磨等を行い、縦測定による性能評価試験を行った。性能評価試験の際、爆発現象と考えられる現象により、大幅な性能劣化が生じた。爆発現象が生じる前の最大加速電場として 16 MV/m が得られ、 Q_0 は 2.4×10^{10} に達した。再度標準表面処理を実施し、性能評価試験を通じて空洞性能の改善が見られるか確かめる予定である。

謝辞

本研究において、高エネルギー加速器研究機構応用超伝導加速器イノベーションセンター (iCASA) の方々に、ご指導と貴重なご助言を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Kensei Umemori, Asian School on Superconductivity and Cryogenics for Accelerators 2017 December 14, SC Cavity.
- [2] Y.Yamamoto, Proceedings of the 9th annual meeting of PASJ 2012.