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 EVALUTION 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 Rs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 Qo= Γ/Rs 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 Eacc 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



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℃ 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 um 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℃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℃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℃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 × 10¹⁰ 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 Q₀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8/9πモード、クエンチ位置と放射線 発生位置の異なる4/9πモードおよび6/9πモード、逆に 一致する3/9πモードである。クエンチの発生原因につい て、8/9πモードはマルチパクティング、3/9π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、 4/9π モードおよび 6/9π 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: Sur | nmary of | the Ma | ximum | Eacc |
|--------------|----------|--------|-------|------|
|--------------|----------|--------|-------|------|

| Cells 1&9 | Cells 4&6 | Cell 5 |
|-----------|--|---|
| [MV/m] | [MV/m] | [MV/m] |
| 15.0 | 15.0 | 15.0 |
| 15.5 | 15.5 | 15.5 |
| 19.0 | 7.0 | 0.0 |
| 19.5 | 19.5 | 0.0 |
| 13.3 | 19.2 | 0.0 |
| 16.5 | 16.5 | 33.0 |
| 9.9 | 18.3 | 0.0 |
| 19.5 | 19.5 | 33.0 |
| | Cells 1&9 [MV/m] 15.0 15.5 19.0 19.5 13.3 16.5 9.9 19.5 | Cells 1&9 Cells 4&6 [MV/m] [MV/m] 15.0 15.0 15.5 15.5 19.0 7.0 19.5 19.5 13.3 19.2 16.5 16.5 9.9 18.3 19.5 19.5 |

| | 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° |

Table 2: Summary of Quench Points and Radiation Spots

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、Q₀は2.4×10¹⁰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.