

超伝導空洞の組み立てに使用するボルトの調査

STUDY OF BOLTS USED TO ASSEMBLE SUPERCONDUCTING CAVITY

山田浩気^{#, A)}, 阪井寛志^{B)}, 山本将博^{B)}, 荒木隼人^{B)}

Hiroki Yamada^{#, A)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Masahiro Yamamoto^{B)}, Hayato Araki^{B)}

^{A)} NAT, ^{B)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

One of the things to be careful about when assembling a superconducting cavity is the contamination of dust that causes field emission. At KEK, superconducting cavities and vacuum parts are assembled in a clean room (ISO class 4). In addition a simple clean booth is installed for clean assembly of superconducting cavities, and a slow pump system is used to control dust while pumping. As a result, we were able to suppress field emission and realize high gradient operation. On the other hand, there are still improvements to be made, and this time we will focus on the bolt. Until now, we used silver-plated stainless steel bolts to prevent seizure and galling, but there was also concern about the possibility of dust contamination due to peeling of the plating. In this paper, we will report that we have investigated bolts that can be used in clean rooms and also prevent seizure and galling.

1. はじめに

KEKのSTF棟ではILCのための基本技術を確認するために、クライオモジュールの大電力試験による性能試験や、空洞性能試験が行われている[1]。これらの真空に関する作業工程中に空洞内部にパーティクルが混入することでフィールドエミッションによる空洞性能の劣化が起こる[2, 3]。パーティクルの理由は様々な要因があるためクリーン環境を整備する必要があり、尚且つ作業も細心の注意を払う必要がある。パーティクルの混入を極力少なくするために、様々な対策や原因究明を行っている[4-6]。今回は組み立てに使用するボルトについて述べる。

超伝導空洞に使用するボルトを選定する上で重要なことが3つある。1つ目は非磁性であること。磁性体である鉄のボルトを使ってしまうと超伝導状態に転移する際の残留磁場が表面抵抗を増加させてしまうため、周りの部品には非磁性であるチタンやステンレスを使用しており、ボルトに関してはステンレスで透磁率が特に低いSUS316Lを使用している。[7]

2つ目は高強度であること。空洞を組み立てる時に最も高い軸力が必要な箇所はDESY特注のアルミガasketをM8のボルトで30 N・mの高トルクで締めている。もともとこの箇所はヘリコフレックスを使用していたが発塵が多かったためアルミガasketに変更し、空洞側が柔らかいニオブチタン製フランジということや縦測定時は外側が超流動ヘリウムなのでスーパーリークを防ぐ為に高トルクで締めている為、高強度のボルトが必要である。

また別の箇所では、SUS316L(強度区分 A4-70)の六角穴付ボルト(M6)を20 N・mのトルクで締めているが頻繁に穴の潰れが起きている、Fig. 1にその写真を載せる。潰れの理由のほとんどがリークを起こさないように強固に締め付けたせいである。素材の強度不足が原因なら現在の強度区分 A4-70より強度を上げる必要がある。

3つ目はステンレス製のボルトナットを繰り返し付け外しによって起こる焼き付きカジリを防ぐため、メッキやコー

ティング等の表面処理を施したものを使用すること。しかし一般的な対処法である二硫化モリブデン潤滑剤はパーティクルの元であり、メッキやコーティングは簡単に剥がれやすくパーティクルとして空洞内部に混入する可能性がある。Figure 2に現在採用しているテフロンコーティング銀メッキのメッキ前のボルト、メッキ後の未使用のボルト、複数回の使用によりメッキが剥がれたボルト、メッキが剥がれて長期間放置されたボルトの写真を載せる。写真からわかるように、複数回使用によりメッキが剥がれている箇所がある。このような箇所があった場合はここからメッキが剥がれる可能性があるため、廃棄してゴミ混入のリスクを無くすようにしている。



Figure 1: Hex socket head bolt with broken socket hole (strength class A4-70).

以上3点のうち非磁性は材質に注意していれば問題ないが残りの2点は調べないと不明な点が多く、リークを起こしたくないという考えから必要以上の強いトルクで締め付けてボルトの劣化を早めていた可能性がある。また表面処理によって軸力も変わるため、ボルトの材質・表面処理の組み合わせによる締め付けトルクと軸力の関係、そしてゴミの出にくさを調べる必要があった。今回は2種類のボルトの素材と4種類の表面処理を施した計7種類ボルトを用意し、軸力測定とパーティクル測定、SEMによる表面観察を行ったのでその結果を述べる。

[#] nat-hiro@post.kek.jp



Figure 2: From the left: normal bolt, new, used several times, and used several times and left in the air for a long time Teflon-coated silver-plated bolt (SUS316L).

2. 測定方法

2.1 用意したボルト、表面処理

今回の試験ではM8×45のボルトを使用する。ボルトの素材はオーステナイト鋼の SUS316L(強度区分 A4-70)と、SUS316L 材を使用し熱処理を行わず加工硬化された材質の BUMAX (強度 88)という 2 種類のボルトを使用する。BUMAX はベースの SUS316L より強度が高い・透磁率が低い・摩擦係数が低いと性能に関しては全てにおいて優れている。表面処理には未処理・銀メッキ・テフロンコーティング銀メッキと 3 種類と、素材は SUS316L のみの株式会社 SDC 田中の SDC クリーンボルトを使用する[8]。このボルトは「S D C プラズマ表面硬化処理を施すことにより、潤滑剤を全く使用せずに焼付固着を防止し、メッキのような剥離もない」という広告文で、クリーン環境の使用に相応しいと考え今回の測定に取り入れた。Figure 3 に全ボルトの写真を載せる。



Figure 3: (Upper) From left: normal, silver-plated, Teflon-coated silver-plated, SDC clean bolt (SUS316L). (Bottom) From left: normal, silver-plated, Teflon-coated silver-plated, (BUMAX).

2.2 軸力測定

軸力計には油圧式のものを使用する、測定で使用した機材を Fig. 4 に載せる。軸力計下部の穴に手前側からワッシャーを入れたボルトを差し込み、反対側からナットを入れて締めつける。ワッシャーとナットは共に SUS316L 製を使用した。アナログ式のメーターなので 2 人の人間が目測で小数点二桁まで読む。プリセット型トルクレンチを使用し、5~30 N・m の範囲で 5 N・m 刻みで締めて軸力を計測した。なお軸力計の上限が 13 kN であるため超えそうな場合は途中で測定を切り上げる。設定トルクで締めた際に軸力計の指針が下がっていく事象があったため、締めた後 1 分間待ってから値を読んだ。



Figure 4: (Left) Hydraulic axial force meter. (Right) Preset torque wrench.

2.3 パーティクル測定

ISO class 4 (class 10)のクリーンルームでの測定器の写真を Fig. 5 に載せる。パーティクルカウンターは 28.3 l/min の吸引量で、0.1 μm, 0.15 μm, 0.2 μm, 0.25 μm, 0.3 μm, 0.5 μm, 0.7 μm, 1.0 μm の 8 種類の粒径を測定できるものを使用する。イオンガンから吹き出すエアは 0.7 MPa に設定されたコンプレッサーから供給され、イオンガンのエア供給口の直前に濾過精度 0.0015 μm のガスフィルターを取り付けてある。全てのボルトは測定前に超純水のみで超音波洗浄を行い、ISO class 4 で一晩中乾かした物を使用する。イオンガン、ボルト、パーティクルカウンターの吸引口の位置を固定して 1 分間イオンガンで吹いたものをそれぞれのボルト 3 本ずつ測定した。イオンガンで吹くときはエアがボルトから外れないように注意しながらボルト全体を吹くように心がけた。

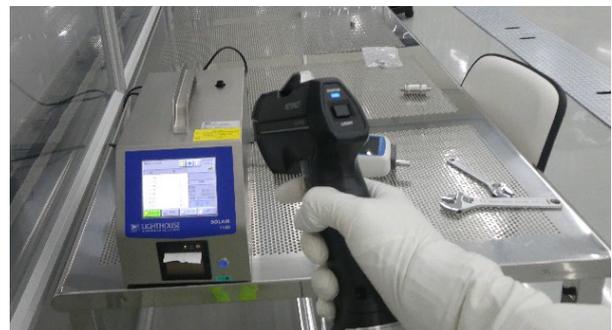


Figure 5: Photo of particle measurement at ISO class 4 (class 10).

3. 測定結果

今回の測定では軸力とパーティクル測定は未使用ボルトをそれぞれ 3 本ずつ使い、SEM は 1 本で行った。

3.1 軸力測定

Figure 6 に軸力結果を示す。素材が SUS316L のボルト(黒)に注目するとテフロンコーティング銀メッキボルト

(紫)が最も軸力を上げるコーティングで、銀メッキ(赤)も SUS316L なら効果がある。一方で SDC クリーンボルト(緑)の表面処理は軸力を上げる効果が無いように見える。次に BUMAX の場合は素材の摩擦係数が低いせいもあり、軸力は高い順にテフロンコーティング銀メッキ(ピンク)・未処理(水色)・銀メッキ(茶色)という結果になった。また全ての BUMAX ボルトは SUS316L のテフロンコーティング銀メッキボルトより高い軸力を示した。

また、軸力計の説明書にあった数式(1)からトルク係数を計算した平均値を載せる。K: トルク係数, T: 締め付けトルク, d: ボルト呼び径, N: 軸力。算出されたトルク係数からボルトの大きさに関わらず、大まかな必要軸力や必要トルクが計算できる。例えば SUS316L のテフロンコーティング銀メッキ M8 を 30 N・m で締めていた時の軸力を計算すると約 16.3 kN となり、今後のボルト査定の一つの基準になる。

$$K = T / (d \cdot N) \quad (1)$$

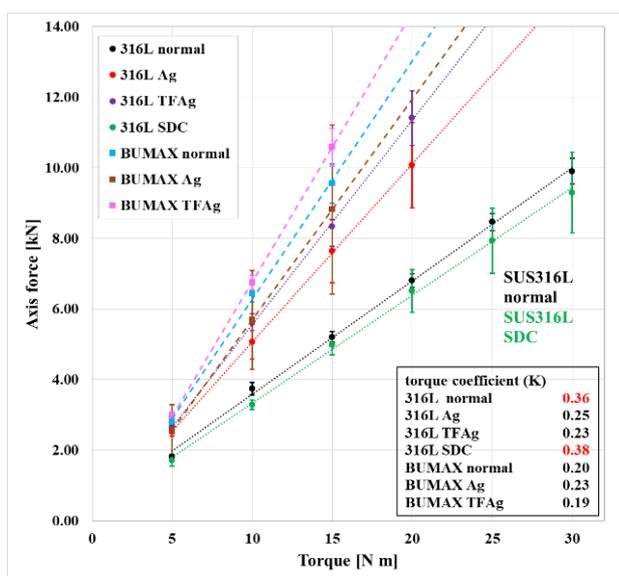


Figure 6: Graph of axial force and torque (horizontal axis: tightening torque, vertical axis: axial force).



Figure 7: From the left: Teflon-coated silver-plated bolt (SUS316L), Teflon-coated silver-plated bolt (BUMAX), SDC clean bolt (SUS316L) after measurement.

Figure 7 に測定後のテフロンコーティング銀メッキの

SUS316L と BUMAX の写真(一番左・真ん中)を載せる。目視でわかるくらいに締結部分のメッキが剥がれており、すべてのボルトで確認できた。写真はないが銀メッキも同じ結果で、写真一番右の SDC クリーンボルトは目立ったものがなかった。また写真はないが未処理のボルトも何も確認はできなかった。両方のメッキ処理のボルトで同じ試験を複数回行えばメッキは剥がれていき、軸力が下がっていき最終的には未処理のボルトと同じになると予想される。

3.2 パーティクル測定

Figure 8 に各ボルト一本ずつの各パーティクル数の総和を示す。SUS316L と BUMAX に素材による差は未処理には少し見られるが、他の表面処理の物を見ると違いは全くパーティクルを抑えられている様子がみられるので、未処理でのクリーンルームの使用は控えた方がいい。SDC クリーンボルトが最もパーティクルが少ないボルトではあるが、テフロンコーティング銀メッキ・銀メッキ共にクリーンルーム内での使用は総数がほぼ 20 カウント未満ということもあり問題ないレベルである。なおこの測定は全て未使用品であるため、複数回使用の締結時によるメッキ剥がれがある場合の検証が必要と思われる。

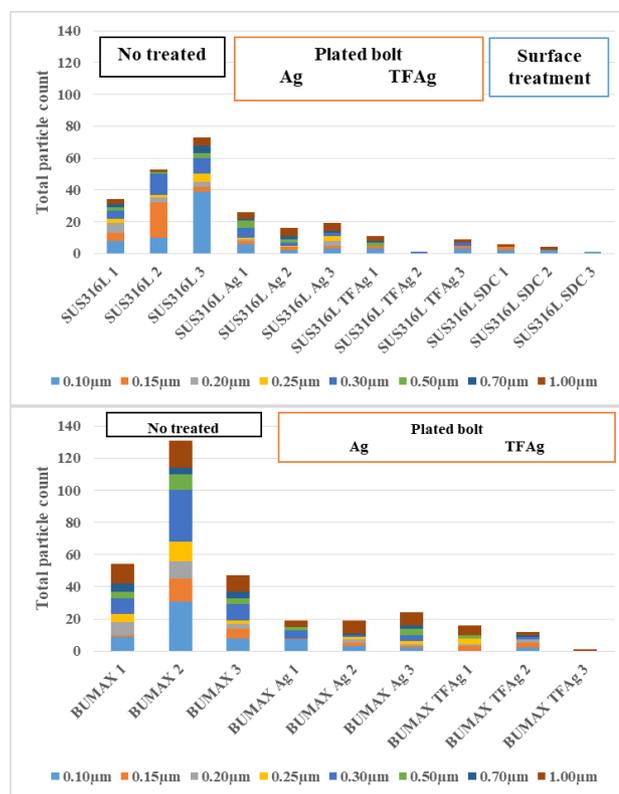


Figure 8: Total particle count for all bolts (Top: SUS316L bolts, Bottom: BUMAX bolts).

3.3 SEM 画像

Figure 9 に撮影した SEM 画像を載せる。表面が綺麗なのが SDC ののがわかる。またメッキをした 316L と BUMAX の表面を比べると差が無いことがわかる。

Figure 10 に軸力測定前後の SDC クリーンボルトの SEM 画像を載せる。目視ではわかりにくかったがナット

側の SUS316L が融着しているように見える。これは 30 N・m の高トルクで締め付けているせいだと思われる。

Figure 11 に軸力測定前後の銀メッキボルトの SEM 画像を載せる。目視でもわかっていたが締結部分のメッキの剥がれが明確である。ここからゴミの混入の可能性があると考えると代替品を考える必要がある。

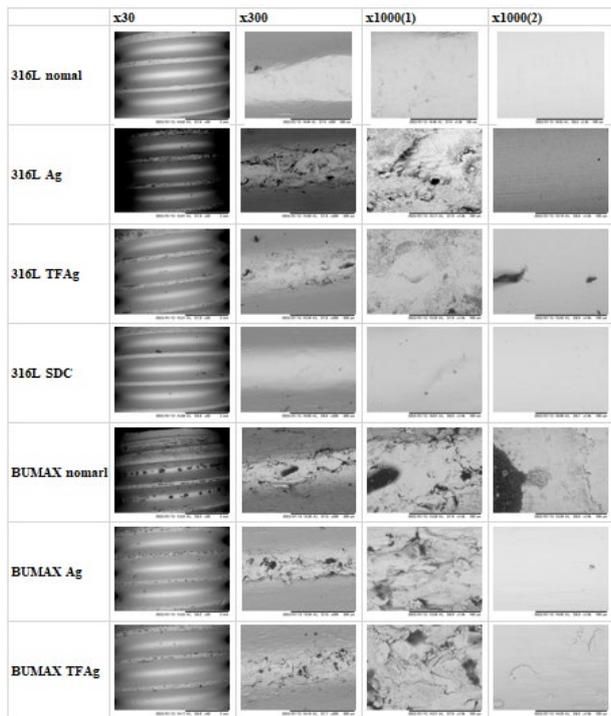


Figure 9: SEM images of all bolts (magnification 30, 300, 1000)

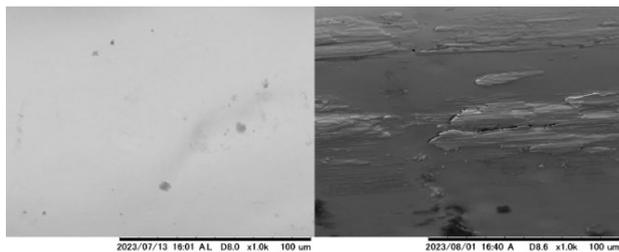


Figure 10: SEM image of SDC clean bolt before (left) and after (right) axial force measurement (magnification 1000).

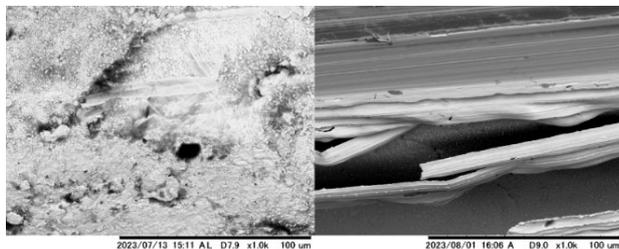


Figure 11: SEM image of silver-plated bolt before (left) and after (right) axial force measurement (magnification 1000).

4. まとめと今後の展望

今回測定で不明瞭だった表面処理と軸力の関係が明確にできた。軸力が高くなる表面処理を行ってなお六角穴が潰れるほど強いトルクで締めていたという現状が理解でき、リークを起こさないための必要最低限の軸力とその時の締め付けトルクの再検討に繋がることのできた。SDC クリーンボルトに関しては、ゴミが最も出にくくメッキ剥がれの心配がないボルトとして魅力的ではあるが我々の使用環境では通常より高い軸力も必要と予想されるので、現段階ではトルク管理を必要としない箇所での使用が主になるだろう。

今後は測定で得られたトルク係数を基に、各箇所の現段階での軸力を計算し、トルク管理の見直しを行う。特に各箇所の DESY 特製アルミガスケットの必要軸力を調査し直す必要がある。現段階での情報としては、DESY のテストでは電解研磨した SUS316L ボルトに CuNiSi(キュプロニッケル)製のナットで試験したということしかないので情報を集める必要がある。また別の試験としては 2 つの銀メッキボルトは複数回締結を行った時の軸力の変化の検証や、パーティクルが出やすくなるのかという検証をすればボルトの廃棄時期についての目安ができる。あとは作業者の負担が減るような対応を行う、例えばテフロンコーティング銀メッキ BUMAX ボルトに変え必要トルクを下げるように改善する。

以上とは別に軸力が上がって繰り返し使用してもパーティクルが出にくい表面処理で未検討のものもあるので引き続き検討を行う予定である。

参考文献

- [1] Y. Yamamoto *et al.*, “Report on the Operation of STF-2 Cryomodules for ILC”, Proc. of PASJ2023, THP58 (2023).
- [2] H. Padaese *et al.*, “RF Field Emission in Superconducting Cavities”, Proc. of the 3rd Workshop on RF Superconductivity, Argonne National Laboratory, IL, USA, 1987, pp. 251-272.
- [3] Y. Yamamoto *et al.*, “High Gradient Cavity Performance in STF-2 Cryomodule for the ILC at KEK”, Proc. of IPAC’16, Busan, Korea, p.2158 (2016).
- [4] H.Sakai *et al.*, “Improvement for Clean Assembly work about Superconducting RF Cavity & Cryomodule to Suppress Field Emission” Proc. of PASJ2017, Sapporo, Japan (2017).
- [5] H.sakai *et al.*, “Development of modified slow pumping system”, Proc. of PASJ2023, TUP29 (2023).
- [6] M. Omet *et al.*, “Efforts to improve the assembly work of SRF cavities in the clean room to suppress field emission”, in proc. of PASJ2022 (2022).
- [7] K. Umemori *et al.*, “Improvement of magnetic condition for KEK-STF vertical test facility toward high-Q study”, in proc. of SR2017, TUPB028, (2017).
- [8] SDC Tanaka Inc.
<http://www.sdc-tanaka.co.jp/html/product-clean.html>