

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)}, 片山領^{B)}

Hiroki Yamada^{#, A)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Masahiro Yamamoto^{B)}, Hayato Araki^{B)}, Ryo Katayama^{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]。これらの真空中に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 Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) 特注のアルミガスケットを 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スケットに変更し、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低温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。Figure 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クリーンルームの使用に適しておらず、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 の左側に現在採用しているテフロンコーティング銀メッキボルトの廃棄予定の写真を載せる。複数回の使用によりボルトの下部にメッキが剥がれ素地の部分が出ているのが写真からわかる。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同トルクでも軸力が変わった影響で破断する可能性もある。ボルトの材質や強度、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る。

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



Figure 2: (Left) Discarded Teflon-coated silver-plated bolt (SUS316L), (Right) View of axial force measurement with washers in position.

またスプリングワッシャーについても調べた。我々は普段スプリングワッシャーをボルトとワッシャーの間に入れて使っているがスプリングワッシャーは接地面を傷つけたり、緩み止めの効果に懐疑的な考えがあったりと思いたくないという意見が以前からあった。Figure 3 上部左に新品と中古のボルトと上部右にワッシャーの新品と中古の物の比較を載せる。両方とも右側が新品だが、左側と比較しても傷がはっきりとわかる。Figure 3 下部に新品と 1 回使用と 10 回使用のスプリングワッシャーを載せる。一度の使用で塑性変形が起き、10 回の使用では効果があまりなさそうな形状に見え、高頻度で廃棄しなくてはならないと思われる。超伝導空洞に使用する場合、温度変化による緩みが少ないものが理想的である。実際どれだけ緩んでいるのか不明な点が多かったため、今回は低温測定後のボルトの緩みと、スプリングワッシャーやその代替品の軸力測定、パーティクル測定を行った。



Figure 3: (Upper Left) From the left used bolt, new bolt. (Upper Right) Upper is spring washer, from bottom the left used washer, new washer. (Bottom) From left: 10 times used spring washer, once time used spring washer, new spring washer.

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。表面処理には両素材に二硫化モリブデン潤滑剤を塗布した物、株式会社 SDC 田中に BUMAX ボルトを SDC クリーンボルトと同じ処理をしてもらった物、そして中古品ではあるがフェルミ国立加速器研究所(Fermi)の低温測定で使用されている電解研磨された SUS316L のスタッドボルトとシリコンブロンズナットの組合せの計 4 種類に、普段使っている SUS316L のテフロンコーティング銀メッキボルトの廃棄予定の物も測定する。二硫化モリブデン潤滑剤は現在も別箇所で使用されており、記録に残すために測定することにした。SDC クリーンボルトは「SDC 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[8]」という広告文で、クリーン環境の使用に相応しいと考え、高強度の BUMAX のボルトと同じ処理をすれば高軸力でゴミが出にくいボルトになるのではと考え、株式会社 SDC 田中に加工をお願いした。Figures 2, 4, 5 に全ボルトの写真を載せる。Figure 2 の右側にメッキがない位置ナットが来るようにワッシャーで調節した時の写真を載せる。

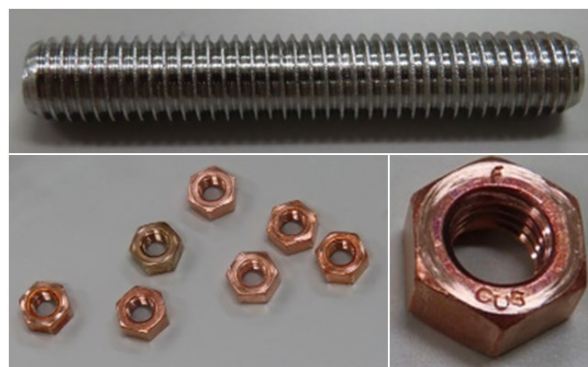


Figure 4: (Top) Electro polished SUS316L stud bolt. (Bottom) silicon bronze nuts.



Figure 5: (Left) BUMAX bolts with clean bolt treatment. (Right) Bolts coated with molybdenum disulfide lubricant.

2.2 緩み止めナット

今回の試験では SUS316L で統一したかったが SUS304 と SUS316L が混ざった測定となった。そのため、素材による違いを確かめる必要があった。用意したナットは一般的な形状のナット(SUS304, SUS316L, 電解研磨された SUS316L)、BUMAX 緩み止めナット、SUS304 (フランジナット、くさびナット、スカートナット、フリクションリング付きフランジナット)、SUS316L のステイブル E ナット

の計 9 種類を用意した。Figure 6 右側に測定したナットの裏表の画像、左側に測定機器の画像を載せる。測定機器には裏から SUS304 のボルトを差し込み前側から緩み止めナットはめることをしないと計測できなかった。これらのナットを選んだ理由としては、緩み止め機能があり接地面に傷をつけなさそうでワッシャーが一枚減らせるようなものを選んだ。ワッシャーが一枚減らせれば、作業中に落としてしまい作業時間の増加のリスクを減らせる可能性があると考えたからである。BUMAX 緩み止めナットとくさびナットはねじ山の特殊形状が緩み止め効果を生むとの説明であった。スカートナットは「スカート加工を施すことで軸に対して垂直あるいは横からかかる外力、振動や急速繰り返し停止、非回転によるゆるみを防止。」と記載されており、座面部分に空洞を作る加工をしてある[9]。Figure 7 の一番左がスカートナットでその右がフランジナットであるが、座面にねじ山がなく空洞があるのがわかる。フリクションリング付きフランジナットは各社色んな名称の商品で販売しており、「フリクションリングのバネ作用により雌ねじ部に摩擦が生じ、ゆるみ止め効果が発生します。」と書いてある。Figure 7 の左から 3 つ目がフリクションリング付きフランジナットである。Figure 7 の一番右のステイブル E ナットは双和製作所オリジナルの商品で「ねじ部自身で振動を吸収するため弛まない」と記載がある[10]。



Figure 6: (Left) View of axial force measurement. (Right up) Front side of each nut. (Right bottom) Backside of each nut.

2.3 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. 8 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を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 分間待つてから値を読んだ。



Figure 7: From left back side of skirt nut, back side of flange nut, flange nut with friction ring, stable E-nut.

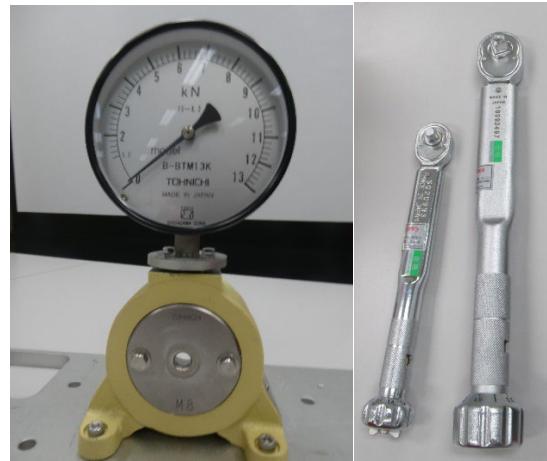


Figure 8: (Left) Hydraulic axial force meter. (Right) Preset type torque wrench.



Figure 9: Photo of particle measurement at ISO class 4 (class 10).

2.4 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. 9 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。全ての測定物は測定前に超純水のための超音波洗浄を行い、ISO class 4 で一晩中乾かした物を使用する。イオンガン、測定物、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。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ボルト全体を吹くように注意した。ナットはボルト穴が重点的に当たるように注意しながら心がけた、しかしエアに飛ばされないように親

指と人差し指でしっかり掴まんでいたため手袋のパーティクルの可能性があるので参考程度である。

3. 測定結果

今回の軸力の結果は去年行った結果と合わせて記載をする[11]。SUS316LとBUMAXの未加工品、銀メッキ、テフロンコーティング銀メッキ、SUS316LのSDCクリーンボルトである。

3.1 軸力測定

軸力測定の判断材料として軸力計の説明書にあったEquation (1)からトルク係数を計算した平均値を記載する。

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

K: トルク係数, T: 締め付けトルク, d: ボルト呼び径, N: 軸力。

Figure 10 に BUMAX ベースの軸力結果を示す。最も期待していた SDC クリーンボルトと同じ処理をBUMAX ボルトに施した物は処理前より大きくトルク係数が上がり BUMAX の性能を完全に損なう結果となった。また二硫化モリブデン潤滑剤のトルク係数はその他の加工とあまり変わらない結果となった。

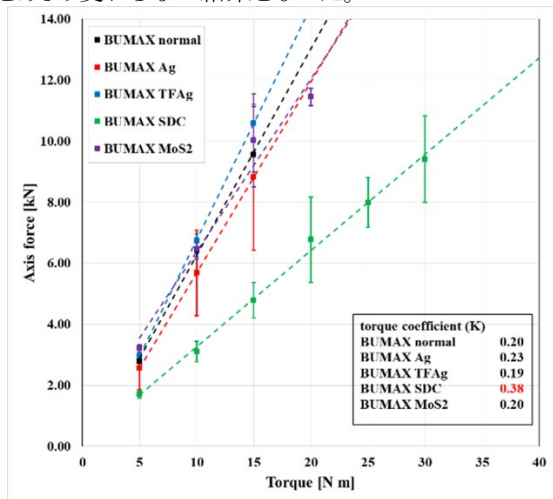


Figure 10: Graph of axial force and torque only BUMAX base bolts (horizontal axis: tightening torque, vertical axis: axial force).

Figure 11 に SUS316L ベースの軸力結果を示す。フェルミで使われていた電解研磨された SUS316L スタッドボルトとシリコンブロンズナットの組合せは未加工品の SUS316L のボルトナットのセットと同じとなり軸力が上がらない組合せであった。それが理由かフェルミでは約 38 N・m のトルクで締めている。二硫化モリブデン潤滑剤は他の加工ほどではないが、トルク係数が下がる結果で、焼き付き防止やリーク防止という意味では役に立っていたと言える。またワッシャーが一枚足りないが、本番と同じ組み合わせであるスプリングワッシャーを入れるとトルク係数が若干下がった結果になった。

Figure 12 に各研究所で現在使用しているボルトのグラフを示す。KEK ではテフロンコーティング銀メッキ SUS316L、European Organization for Nuclear Research (CERN)では銀メッキ BUMAX でメッキの剥がれによるゴ

ミの混入リスクよりも軸力を上げリークを起こさない選択をしており KEK では 30 N・m のトルクで、CERN では念のため 35 N・m のトルクである、逆に Fermi ではメッキ剥がれが起こらないが軸力が不足、約 38 N・m という更に高トルクで締めているがそれでも KEK や CERN とは大きく軸力の差が開いている。また Fermi ではリークが起きているという話もあり、少なくとも Fermi 以上の軸力が必要ということが分かった。

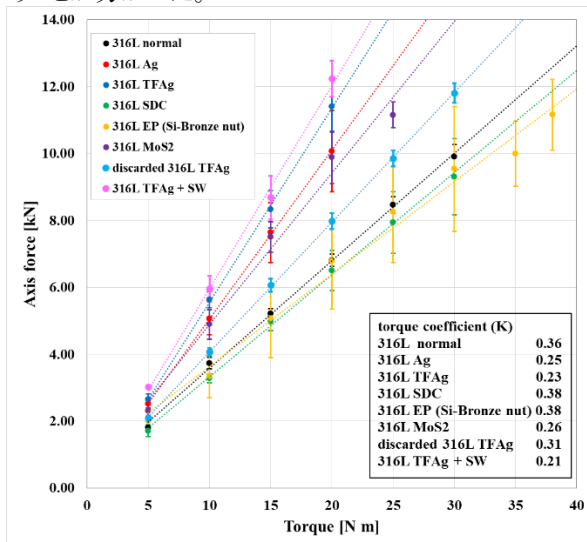


Figure 11: Graph of axial force and torque only SUS316L base bolts.

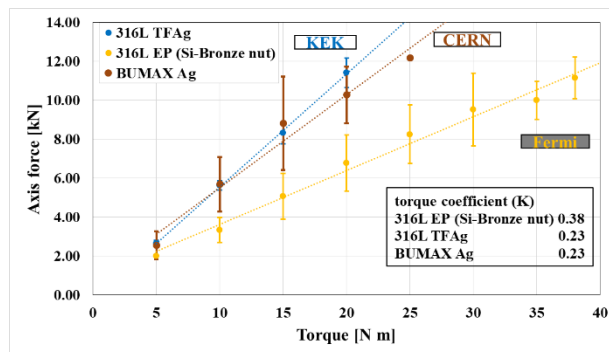


Figure 12: Graph of axial force and torque of bolts currently used in each laboratory.

Figure 13 に SUS316L の未加工品、新品と廃棄予定のテフロンコーティング銀メッキの結果を示す。廃棄予定のものは少しメッキの効果が残っている結果にはなったが性能としては大きく下がっているため、素地が見えてきたら廃棄する方が良さだろう。

Table 1 に緩み止めナットのトルク係数の平均値の表を記載する。SUS304 と SUS316L の違いは通常ナットの二つや、BUMAX とくさびナット (Fabric Wedge) から SUS304 の方が SUS316L よりトルク係数が下になる傾向があり、同じ形状なら SUS316L の場合は締め付けトルクを上げないといけない予想ができる。期待していた電解研磨された SUS316L ナットが未加工品と比べてトルク係数が上がり、これなら未加工品の方が良いという結果になった。スプリングワッシャーの代替品を考えるなら、ス

Table 1: Torque Coefficient (K) of an Untreated SUS304 Bolt Tightened with the Each Nut

SUS304 normal	0.38
SUS316L normal	0.44
SUS316L normal Electro polished	0.65
BUMAX Fabric Stop	0.61
SUS304 Fabric Wedge	0.53
SUS304 Flange	0.46
SUS304 skirt	0.67
SUS304 Friction ring Flange	0.54
SUS316L stable E	0.36
SUS316L spring washer & normal nut	0.34

テーブル E ナットが近いものという結果で、これはバネのような弾性のお陰と思われる。この結果から商品によってトルク係数の差があり、スプリングワッシャーを変えたとした際はしっかりと軸力測定を行わないとリークを起す可能性があることがわかった。我々に必要なのは温度変化での緩みがない事なので冷却試験が重要になる。

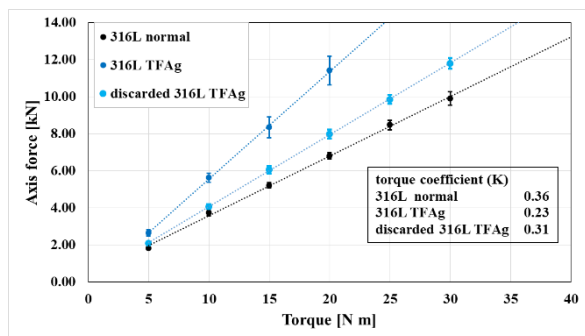


Figure 13: Graph of axial force and torque before and after coating process and discarded bolt.

3.2 パーティクル測定

Table 2 にクリーンボルト加工をした BUMAX ボルトと電解研磨 SUS316L スタッドボルトとシリコンブロンズナットのパーティクル測定の全粒子径のカウント数の総数の平均値を以前の測定結果 [11] と合わせて示す。BUMAX クリーンボルト加工は他の BUMAX と比較して少ないカウント数で、求めていた結果となった。また電解研磨された SUS316L スタッドボルトからは中古の影響か加工してあるボルトの中では一番パーティクルがあった。ナットから多くパーティクルが出ているが、後述する他製品のナットと比較して少し少ない程度で大きく差はなかった。

Table 3 に緩み止めナットのパーティクル測定の結果を全粒子径のカウント数の総数の平均値を示す。先述した通り手袋のパーティクルの可能性があるので参考程度の結果である。ねじ山を重点的に吹いているのでどれも似たような結果になった。大きく差があるわけではないのでどれも問題なく使用できると思われる。

Table 2: Average of the Sum of Counts of Each Particle size for Each Bolt

SUS316L untreated	53.3
SUS316L silver plated	20.3
SUS316L Teflon coated silver plated	7.0
SUS316L SDC clean bolt	3.7
BUMAX untreated	77.3
BUMAX silver plated	20.6
BUMAX Teflon coated silver plated	9.7
BUMAX SDC clean bolt treatment	10.0
SUS316L Electro polished stud bolt	32.5
silicon bronze nut	56.0

Table 3: Average of the Sum of Counts of Each Particle Size for Each Nut

SUS304 normal	76.0
SUS316L normal	58.3
SUS316L normal Electro polished	76.3
BUMAX Fabric Stop	105.7
SUS304 Fabric Wedge	126.3
SUS304 Flange	69.7
SUS304 skirt	116.0
SUS304 Friction ring Flange	113.3
SUS316L stable E	75.7

3.3 締めトルク戻しトルク測定

Figure 14 右側に低温測定後に測定をした空洞の写真、下に使用したデジタルトルクレンチの写真、左側に 12 本の締めトルク戻しトルク測定結果を示す。低温測定前に全てのボルトは 30 N・m で締めている。締める方向のトルクはデジタルトルクレンチをピークホールドモードで測定し、回ったと思ったところで止めている。一本を除きどれも 30 N・m を下回っており、冷却による緩みがあるということが分かる。戻しトルクに関しては平均値が 21.1 N・m であり、これがスプリングワッシャーの能力なの

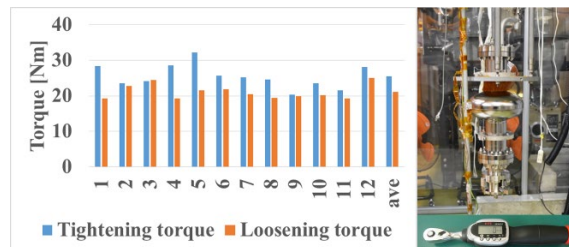


Figure 14: (Left) Graph of tightening torque vs. reversing torque. (Right upper) Single cell cavity after vertical test. (Right bottom) Digital Torque Wrench.

で代替品を探す際の基準となる。まずは今回使った緩み止めナットの冷却試験から行うことにする。

4. まとめと今後の展望

今回測定で最も期待していたBUMAXのクリーンボルト加工がパーティクル測定では良好だったが軸力測定で未加工のSUS316Lボルトとほぼ同じトルク係数になってしまい、採用は難しい結果になった。

他の研究所のボルトの素材と加工を知ることができたが、どこもリークを起こしたくないという気持ちが強く、必要最低限の軸力は分からなかったのも、しばらくは現状の組み合わせのまま高いトルクのまま組み立てを行うことになった。今回様々な測定を行ったが軸力も高く、ボルトの強度も高く、パーティクルが余り出ない組み合わせはテフロンコーティング銀メッキされたBUMAXという去年と同じ結論になった。

今後としてはメッキ剥がれがなくパーティクルが出なく軸力も上がる加工を引き続き探す予定である。ただし軸力が上がりすぎると耐力、引張強度を上回る可能性もあるので軸力と強度をしっかりと査定しなくてはならない。

スプリングワッシャーの代替品に関しては、低温測定においては温度変化による緩みが最も大きいので、加熱と冷却による戻しトルク試験を重点的に考慮する。

参考文献

- [1] Y. Yamamoto *et al.*, “Report on the Operation of STF-2 Cryomodules for ILC”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 29 - Sep. 01, 2023, THP58.
- [2] H. Padaesee *et al.*, “RF Field Emission in Superconducting Cavities”, in Proc. of the 3rd Workshop on RF Superconductivity, Argonne National Laboratory, IL, USA, Sep. 14-18, 1987, pp. 251-272.
- [3] Y. Yamamoto *et al.*, “High Gradient Cavity Performance in STF-2 Cryomodule for the ILC at KEK”, in Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, May 8-13, 2016, pp.2158-2160.
- [4] H. Sakai *et al.*, “Field emission 抑制のための超伝導空洞組立のクリーン作業改善に向けて” Proc. PASJ2017, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 444-448.
- [5] H. Sakai *et al.*, “Development of modified slow pumping system”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 29 - Sep. 01, 2023, TUP29.
- [6] M. Omet *et al.*, “Efforts to improve the assembly work of SRF cavities in the clean room to suppress field emission”, in Proc. PASJ2022, Kitakyushu (Online meeting), Oct. 18-21, 2022, pp. 184-187.
- [7] K. Umemori *et al.*, “Improvement of magnetic condition for KEK-STF vertical test facility toward high-Q study”, in Proc. of SR2017, Lanzhou, China, Jul. 17-21, 2017, pp. 444-447.
- [8] SDC Tanaka Inc.
<http://www.sdc-tanaka.co.jp/html/product-clean.html>
- [9] C. Miyata *et al.*, “ゆるみ防止機能付きナット:スカート付きナットの提案”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, vol. 55, The Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 55, no. 518, pp. 2611-2617 (1989).
- [10] SOHWA SEISAKUSHO CO., LTD .,
<https://sohwa-e-nut.com/images/catalog/e-nut.pdf>
- [11] H. Yamada *et al.*, “超伝導空洞の組み立てに使用するボルトの調査”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 29-Sep. 1, 2023, pp. 657-660.