

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 IMPROVEMENT FOR CLEAN ASSEMBLY WORK ABOUT SUPERCONDUCTING RF CAVITY & CRYOMODULE TO SUPPRESS FIELD EMISSION

阪井寛志^{#,A)}, 梅森健成^{A)}, 加古永治^{A)}, 許斐太郎^{A)}, 沢村勝^{B)},
篠江憲治^{A)}, 野上隆史^{A)}, 古屋貴章^{A)}, 本田融^{A)},
Hiroshi Sakai^{#,A)}, Kensei Umemori^{A)}, Eiji Kako^{A)}, Taro Konomi^{A)}, Masaru Sawamura^{B)},
Kenji Shinoe^{A)}, Takashi Nogami^{B)}, Takaaki Furuya^{A)}, Tohru Honda^{A)}
^{A)} KEK, ^{B)} QST

Abstract

We usually encountered the degradation of the superconducting RF cavities on the cryomodule test even though the performance of these cavities was good on the vertical test. In reality, the degradation of Q-values of two cavities of cERL main-linac were observed after cryomodule assembly in KEK [1]. Some dust and invisible particles might enter the cavity and generate field emission during the assembly work. Field emission is the most important cause of this degradation. It is crucially important not to degrade the cavity performance for not only vertical test but also the cryomodule operation after string assembly work of the cryomodule. In this paper, first we show what work produced the field emission source during assembly work of the cryomodule construction in detail. Next we introduce some trials for the improved clean assembly work to SRF cavity by re-examining our clean assembly work and considering the elaborated clean work in the other laboratory, like EURO-XFEL in DESY, to overcome the degradation by field emission.

1. はじめに

我々は次世代光源 ERL 用に超低エミッタンス大電流ビーム(100mA)を安定に加速&減速するために、ERL 用の CW で運転可能な超伝導空洞の開発を行ってきた。特に ERL 用の超伝導空洞としては、いかに高い加速勾配(15~20MV/m 程度が目標)にてなおかつ空洞損失の少ない状態(Q 値 > 1×10^{10})を維持できるかが、課題であった。我々は、ERL 用に 100mA もの大電流(最大 600mA)の回収を可能とする独自に開発した 9 セル空洞[2]にて、縦測定と呼ばれる性能評価試験にて図 1 (左) に示すように最大加速勾配 25MV/m、また、15MV/m にて Q 値 > 1×10^{10} を実現し、ERL の要求を満たす空洞を実現した[3]。その性能を実現した 2 空洞を 2012 年度は KEK にて建設が行われた Compact ERL(cERL)[4]のビームラインに、モジュール化した後に組み込んだ所、2 空洞とも、図 1(右)に示すように 10MV/m から Q 値の劣化が発現するとともに、強烈な放射線を発生することとなった[1,5]。縦測定により、空洞自身に欠損はないことは確認されているが、組立時において、微小な埃、異物の混入による空洞内面での電界放出 (field emission) による多大なエネルギーロスが起こったと考えられる。この性能劣化の回復が本 cERL 主空洞モジュールの当面の課題となっている。このような縦測定で性能が出ていた超伝導空洞がクライオモジュールに組み立てた後に劣化する現象は世界中で問題になっている。

本 proceedings では、cERL 主空洞モジュールでの組み立て工程をもう一度見直し、どの組み立て工程が field emission の原因かを検討する。その後、超伝導空洞の組み立てによって性能劣化を起こさない particle free な組み立てを行うためのクリーン化のテスト結果を示すとともに、今後のモジュール組み立て時に対する我々の改善方法を紹介する。

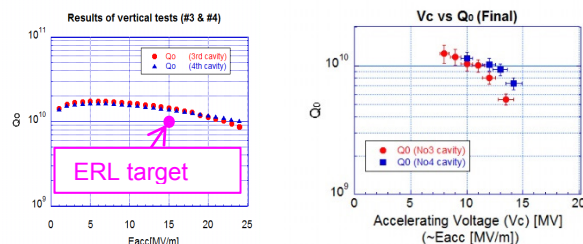


Figure 1: (Left) Performance result of two cavities in vertical measurement. A horizontal axis shows an acceleration slope (Eacc) and a vertical axis shows Q value (Q_0). (Right) Cavity performance of two cavities in the cryomodule after cERL beamline installation. In white red circle and a blue square, the performance evaluation test result after the module inclusion in 2012. A horizontal axis shows accelerating voltage (V_c) (it is almost the same as an acceleration slope), and a vertical axis shows Q value (Q_0).

2. cERL 主空洞モジュール組立からの考察

ビームラインには空洞単体で行った性能試験を行った後、実際ビームを通す時に必要な HOM ダンパーや大電力パワーを送る入力カップラーなどの他の重要コンポーネントが付けるために、再度クリーンルーム内にて組立て直す必要がある。この作業を

[#]hiroshi.sakai.phys@kek.jp

string assembly と呼ぶ。その際、何回か行うリークチェック時の真空引きやパージ作業などの作業が空洞性能劣化に影響しないかが問題となる。さらに最終的に cERL のビームラインにモジュールを接続する際はその現場でローカルクリーンブースを使用し、クリーンルーム内と同じ接続作業を行うことになり、そこでの組み立て作業および真空作業も空洞内に埃を持ち込んでいないかが極めて重要になる。これら空洞と直接アクセスを行う作業工程がモジュール化後の field emission による空洞性能劣化を引き起こす可能性が高いと考えられる。

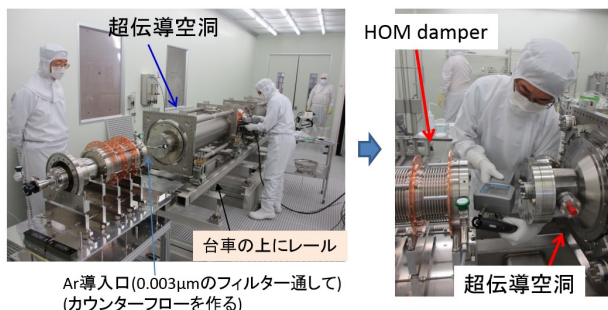


Figure 2: String assembly work of cERL main linac cryomodule.

図2は空洞のモジュールアセンブリに向けた string assembly の作業の様子である。組立は ISO class 4 の中で行われる。我々の組み立てでは一度縦測定で取り付けたフランジを一度、外し、再度図2右に見られるように他のコンポーネントに接続し直す必要がある。その際にゴミを空洞内に持ち込まないことが重要となる。まず、組立前に一度空洞内にパージ作業を行うが、その時、我々はサブミクロンの埃の混入を防ぐフィルターを介してガスの流量コントロールを行っている。しかし、パージの流量が多い場合はフィルターから先にある配管などのゴミが移動する可能性がある。実際に STF でのクライオモジュールの組み立てでも誤って圧力差のある場所で Ar gas のパージ作業を行い、一瞬大きな流れが発生した可能性があり、その結果として、パージした近くの空洞のモジュールでの性能が field emission により、劣化する例が見られている[6]。ゴミなどの移動がないよう微小な流量などで真空引きやパージのコントロールをする必要がある。

またこれとは別に組立時には図2に見られるように外からのゴミが入るのを防ぐための空洞内部からカウンターフローを流している。カウンターフローはフィルターを介しており、そのフローは particle free であることを確認しているが、その流量を変えた際のゴミ混入の可能性の検証を行う必要がある。このように真空&パージ作業時および組立時のガス流量のコントロールによる性能劣化の確認が重要である。これに対する改善については4章で述べる。

組立でさらに重要なのは、ゴミが接続場所に近い場所になくすることである。外したねじからのダストは

最大のゴミの元である。我々は図2右のように取り外したネジの穴からのゴミをパーティクルカウンターで測定し、それが0になるまで、十分に ion gun で blow するが、このようにゴミが出るコンポーネントをいかに減らすかが課題である。

我々のネジはクリーンな環境下で使用するために銀メッキネジを使用しているが、この銀メッキネジを取り外した際の埃の量と通常 SUS のネジの場合の取り外し時のゴミの量を比較してみた。図3がその2つのネジを取り外した際のネジからのゴミの量の比較である。パーティクルカウンターとしては0.1 µm レベルが測定可能な RION 社のものを使用した。銀メッキネジと SUS ネジは超音波洗浄済みのものを ion gun で blow し、基本 particle が0の状態にしたものをナットにつけ外しを行い、その着けた際、および外した際のパーティクルの量を測定したのが図3の結果である。それぞれ2つのネジを2回取り外しを行った際のパーティクルの量を測定したものである。外した際に多くのゴミが出る傾向は同じであり、まずはこれが、string assembly 時のゴミのもととなっている。ただし、SUS のネジに対し、銀メッキネジはカウント数で最大10倍もの違いがあることが分かった。メッキが剥がれ、それが大量のゴミ源になると予想される。銀メッキネジは潤滑油を使用できない真空かつクリーン環境でネジが噛まないための措置であるが、今後の string assembly での field emission の大元となる可能性が高いため、このネジ部の改善は必要である。EURO-XFEL[7]ではネジは SUS316L を用いているのに対し、ナットを CuNiSn (キュプロニッケル) を用いてネジの取り外しのゴミの削減+ネジが噛まないような措置を行っており、そのような改善が今後、必要である。

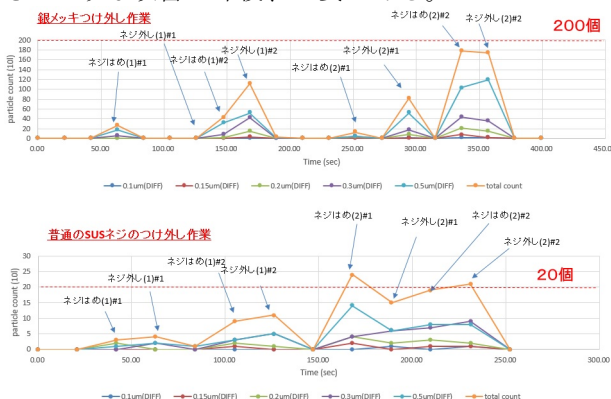


Figure 3: (Top) Measured particle trend during connecting and disconnecting of silver-plated screw in ISO class 4 clean room. (Bottom) Measured particle trend during connecting and disconnecting of SUS screw in ISO class 4 clean room. Both were measured by 0.1 µm particle counter (RION).

もう一つの懸念事項はクリーンルーム外での作業である。我々はクリーンルーム外で図4のように組立時はローカルクリーンブースを用いた。この作業の際に ISO class 5 程度のクリーン度をローカルクリーンブースに検討したが、このクリーンブースが

果たして超伝導空洞のクリーン作業に十分な環境であったのかどうかは疑問であった。



簡易クリーンブース(class 5程度)を用意。 空洞とゲートバルブ接続

Figure 4: Assembly work of cERL main linac in local clean boose.

そこで、我々は作業に使ったクリーンブースと string assembly に使ったクリーンルーム(ISO class 4)の清浄度測定を $0.1 \mu\text{m}$ レベルで再測定した。図 5 がその測定の比較である。

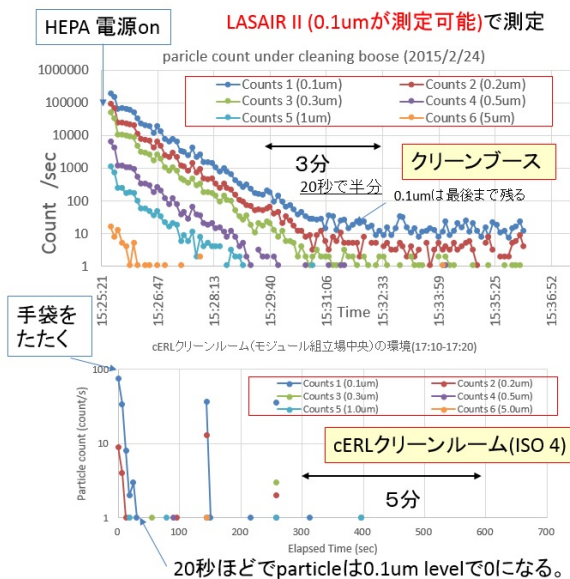


Figure 5: (Top) Measured particle trend in clean boose of cERL main linac. local clean boose. (Bottom) Measured particle trend in ISO class 4 clean room of cERL main linac in KEK. Both were measured by $0.1 \mu\text{m}$ particle counter (LASAIR II).

図 5 上は図 4 で用いたクリーンブースに電源を入れ、立ち上げたときから particle がどのように変化しているかを測定したものである。図 5 下はそれに対し、string assembly に用いた ISO class 4 の cERL 用のクリーンルーム内で、手袋を大きく叩き、敢えてゴミを出した後のパーティクルカウンターで測定の変化を見たものである。両方とも $0.1 \mu\text{m}$ レベルが測定できる LASAIR II というパーティクルカウンターを用いて測定した。その結果、cERL のクリーンルームでは 20 秒ほどで particle のカウントが $0.1 \mu\text{m}$ レベルでも 0 count/s に到達したのに対し、我々のクリーンブースでは、6 分程度たってようやくカウントが収まった。さらに $0.3 \mu\text{m}$ レベルでは 0 だと思われていたクリーンブースだが、 $0.1 \mu\text{m}$ は最後まで 10 count/s 程度残っている結果となった。我々のクリーン

ンブースは $2\text{m} \times 2\text{m} \times$ 高さ 2.4m のブースであるが、上面に 0.5m^2 の 2 枚の HEPA filter を置いた簡易のクリーンブースであり、クリーンルームとは違い様流が作成できず、乱流を起している。さらに十分な換気能力がないこともあり、 $0.1 \mu\text{m}$ レベルはずっとクリーンブース内に存在することがわかった。このようにローカルブースの改善もモジュール組立の課題である。その改善に向け、まずは次節で示す KOACH を用いたテストを行った。

3. KOACH を用いた加速器室内でのローカルクリーンブースの清浄度測定

近年このようなローカルクリーン環境作成に ISO class 1 レベルで実現する装置として KOACH が提供されている[8]。ULPA より filter 性能のいい独自の FERENA filter により、 $0.1 \mu\text{m}$ レベルのきわめて高い清浄度を提供するだけでなく、そこから出てくるコヒーレントな一様流を向かい合わせで使うことで、その間の空間を open な環境で ISO class 1 の清浄度環境を実現するというものである。このような極めて高い清浄度をローカルで実現する KOACH は我々のローカルクリーンブースの改善にうってつけである。そこで図 6 に示すようにまず、KOACH T-500 を用いて cERL の加速器の真空作業を模擬し、実際に現場にて十分な清浄度を確保できるかを測定した。

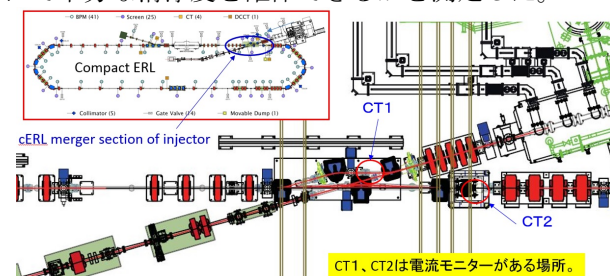


Figure 6: New clean boose setting positions named as CT1 and CT2 at cERL merger section.

このクリーン作業は実際に 2 か所の電流モニター (CT1,CT2) のセラミックが運転中に discharge し、それが field emission を作る可能性があるとのことで、その生成を防ぐために 2015 年に取り換え作業を行う予定であり、その作業に必要なクリーン環境生成をこの KOACH を用いて行った。実際には時間の都合上、CT の交換には至っていないが、このクリーン環境の測定は十分に行えた。図 7 にまず CT1 の場所での setup を示す。電磁石間に CT1 が据え付けられているが、その間は 500mm のスペースである。マージャー部は入り組んだ場所であり、本来の KOACH の仕様である向かい合わせの設置ができず、この場所では図 7 左にみられるようにアルミのサポートを別途用意し、真上に 2 台の KOACH のフィルターをなるべくビームラインに近づくように置き、ビームライン上での清浄度の確保を試みた。フィルターからビームラインまでは 300mm の距離である。

また、この一様流を keep すべく、2 台の KOACH の隙間がないように設置し、なおかつ、他の部分からのゴミが来ないようにビームラインの接続フランジ部以外の電磁石などは帯電しないシート（静電クリスタル）で養生した。その後図 7 右に見られるように清浄度のある手袋と腕のカバーを装着し、パーティクルカウンターでローカルクリーンブース内のパーティクルを測定した。

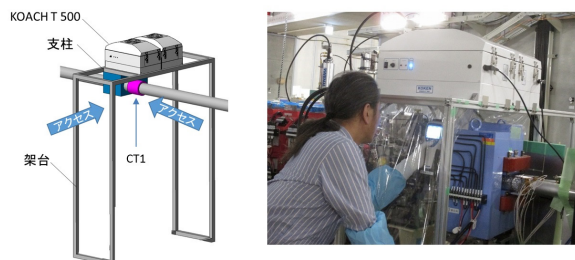


Figure 7: Setup of new clean boose set at CT1 position at cERL merger section.(Left) conceptual design (Right) picture of setup.

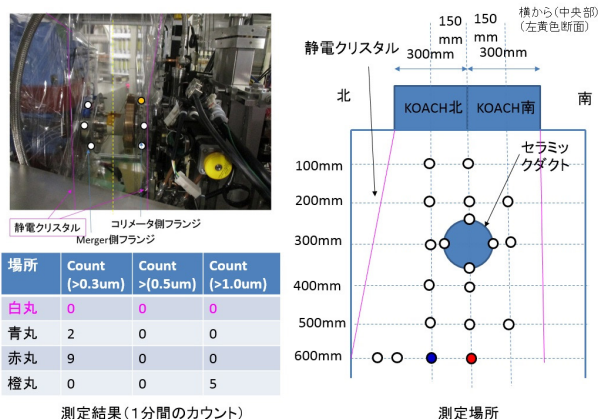


Figure 8: Measurement results of particle count in the new clean boose set at CT1 position.

図 8 はその CT1 に置いたローカルクリーンブースでの清浄度の測定結果である。この測定ではハンディの $0.3 \mu\text{m}$ レベルが測定できるパーティクルカウンターを用いた。まず、図 8 の左上写真の中央の黄色のラインに沿って、図 8 右に示すように 100 mm 毎に mapping を取った。上流からの flow のおかげで KOACH から 500 mm 離れた場所まで $0.3 \mu\text{m}$ level で 1 分間のカウントが 0 を keep していることがわかったが、 600 mm 離れた場所では $0.3 \mu\text{m}$ のパーティクルで最大 9 カウントのパーティクルが測定された。清浄度が 500 mm 程度まで保たれており、KOACH の電源を on してから、特に 10 秒程度で清浄度は 0 カウントになり、ビームライン上での作業には十分な清浄度を保っているといえる。 $0.1 \mu\text{m}$ レベルでも測定を行ったが 300 mm の高さの場所で 1 分間に 5 カウント程度測定されたが、今までの local clean boose に比べて十分な清浄度が得られていることがわかった。問題は図 8 左上の写真で養生した静電クリスタルの周りで橙丸のポイントでは 1 分間で 5 カウント

のパーティクルがカウントされており、今後この養生やシーリングの仕方を改善することが課題である。

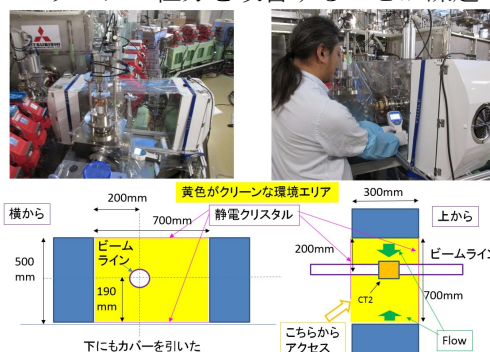


Figure 9: Setup of new clean boose set at CT2 position at cERL merger section.(Bottom) schematic setup of this clean boose (Top) picture of setup configuration.

次に CT2 の場所と同じく KOACH T-500 を用いてローカルクリーンブースを作成した。図 9 がその setup である。この場所では従来の KOACH の仕様である filter を向かい合わせで置くことが可能であった。そこで、この KOACH の特徴である対向流を利用し、ビームラインのコンポーネントを片側に寄せて、そちらの清浄度を確保し、もう片側からアクセス作業をするような setup を模擬した。なお、今回は open ではなく、図 9 の下にあるように上下左右を静電クリスタルで養生し、同じく電磁石などのコンポーネントがクリーンブースから直接見えないような環境を用意した。

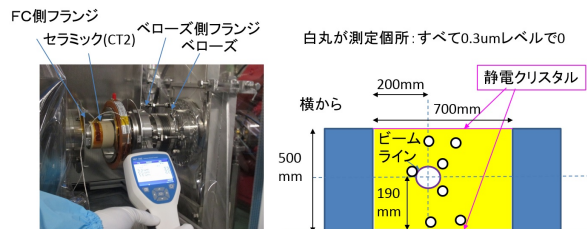


Figure 10: Measurement results of particle count in the new clean boose set at CT1 position.

図 10 が図 9 の CT2 の場所での測定結果である。この測定でもハンディの $0.3 \mu\text{m}$ レベルが測定できるパーティクルカウンターを用いた。まず、セラミックの場所の周りの環境を図 10 右の白丸に示すように mapping を取った。測定したすべての場所で 1 分間で $0.3 \mu\text{m}$ レベルで 0 カウントであった。また図 10 左に示すように各フランジやコンポーネントの周りを測定したが、同じく $0.3 \mu\text{m}$ レベルで 1 分間で 0 カウントであった。 $0.1 \mu\text{m}$ レベルでの測定も行ったが真ん中では $0.1 \mu\text{m}$ レベルで 1 分間で 0 カウントであり、養生の近くでも $0.1 \mu\text{m}$ レベルで 5 カウントレベルであった。CT2 の setup 環境下では養生もうまくいっていたと思われるが、それとは別に KOACH の性能が十分に発揮されて十分なクリーン環境が生成されていたと思われる。

KOACHの電源をoffした際の加速器の普段の状況下では1分間で $0.3\mu\text{m}$ レベルで6400カウントであり、このような埃の清浄化がKOACHを用いて、CT1,CT2に見られるような限られたスペースにて、ローカルに非常に清浄度の高い環境を提供可能であることが分かった。

4. 更なる field emission 抑制に向けた改善

KOACHを用いてクリーンなローカルクリーンブースの提供が可能となったため、今後これを用いて、モジュールアセンブリを行った後の空洞性能劣化改善の評価を行う予定である。このモジュールアセンブリの改善の確立のために図11に示すように我々はKEKに横測定スタンドを構築した。この現場での組み立ておよび真空作業に同じくKOACHを用いた新たなローカルクリーンブースを用意し、性能評価を行う予定である。



Figure 11: Picture of new horizontal test stand.



Figure 12: Picture of slow pumping system for EURO-XFEL.

2章で述べたようにcERL string assemblyのもう一つの問題点は真空&ベント作業の改善である。問題であるゴミの動きを起こさないslowなpumpingやventingが重要であり、図12に示すようにEURO-XFELではslow pumping & venting systemを作成している[9]。今年度にKEKではslow pumping & venting systemを構築する予定である。特にflowの流れやスピードにより、pumping中およびventing中でどれくらいのパーティクルが出てくるかを真空中のパーティクルモニター[10]を用意する。この測定をしながら、flow controlの制御パラメータを設定する予定

である。さらにこの流量コントロールのoptimization後にslow pumping & venting systemのprototypeを作成し、最終的には図11で見せた横測定スタンドでpump systemを用いた性能評価試験を行っていく予定である。

5. まとめ

Field emissionの抑制のため、cERL主空洞クライオモジュールの組み立て工程の見直しを行った。改善ポイントとしては、ネジの取り外しから来るゴミの削減のほか、pumping & venting systemの見直し、ローカルクリーンブースの見直しなどが挙げられた。その一つであるローカルクリーンブースの改善として、新たにKOACHを用いてクリーンなローカルクリーンブースを作成し、実際のcERLの加速器環境下でのクリーン測定を行ったところ、 $0.3\mu\text{m}$ レベルで毎分0カウントの非常にクリーンな環境を現場に作成することが可能であることがわかった。今後このクリーンブースを用いて、KEKにある横測定スタンドでの組み立て工程の改善を試みるとともに、slow pumping systemの構築を行い、field emissionの抑制に向けた改善を行っていく。

謝辞

興研(株)の神庭はるか様、前田信哉様、和田剛様、佐藤卓広様、西村佳明様には、クリーンブースの $0.1\mu\text{m}$ レベルの測定を一緒に行っていただきました。非常に感謝いたします。また、サンテックの小泉歐兒様にはRIONの $0.1\mu\text{m}$ レベルのパーティクルカウンターをお借りしました。感謝いたします。

References

- [1] H. Sakai *et al.*, "High Power CW Tests of cERL Main-Linac Cryomodule", SRF'13, Paris, France, p.855 (2013).
- [2] K. Umemori *et al.*, "Design of L-band superconducting cavity for the energy recovery linacs", APAC'07, Indore, India, p.570 (2007).
- [3] K. Umemori *et al.*, "Vertical Test Results for ERL 9-cell Cavities for Compact ERL Project", IPAC2012, New Orleans, USA, p.2227 (2012).
- [4] R. Hajima *et al.* (ed.), KEK Report 2007-7/ JAEA-Research 2008-032 (2008) [in Japanese].
- [5] E. Cenni *et al.*, "Field Emission Measure during cERL Main Linac Cryomodule High Power Test in KEK", SRF'13, Paris, France, p.678 (2013).
- [6] Y. Yamamoto *et al.*, "High Gradient Cavity Performance in STF-2 Cryomodule for the ILC at KEK", IPAC2016, Busan, Korea, p.2158 (2016).
- [7] C. Madec *et al.*, "The Challenges to assemble 100 Cryomodule for E-XFEL", SRF'13, Paris, France, p.816 (2013).
- [8] 興研(株); <http://www.koken-ltd.co.jp/>
- [9] M. Boehnert *et al.*, "Particle Free Pump Down and Venting of UHV Vacuum Systems", SRF'09, Berlin, Germany, p.883 (2009).
- [10] (株)ウィックス; <http://www.wexx.jp/>