

STF たて測定システムにおける空洞性能試験の履歴

RECORD OF CAVITY PERFORMANCE IN VT SYSTEM AT STF

浅野峰行^{#,A)}, 今田信一^{A)}, 山田浩気^{A)}, 泰中俊介^{A)}, 石原将治^{A)}, 梅森健成^{B)} 加古永治^{B)}
Mineyuki Asano^{#,A)}, Shin-ichi Imada^{A)}, Hiroki Yamada^{A)}, Shunsuke Tainaka^{A)}, Shoji Ishihara^{A)},
Kensei Umemori^{B)} and Eiji Kako^{B)}

^{A)} Nippon Advanced Technology (NAT)

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Vertical tests of superconducting cavities have been continued to confirm their cavity performances at a cryogenic temperature in the Superconducting RF Test Facility (STF) at High Energy Accelerator Research Organization (KEK). The vertical tests of 9-cell superconducting cavities for the STF2 accelerator cryomodules finished in the end of 2014. The recent vertical tests after 2015 have been carried out for the purpose of research and development in several cavities made from different niobium materials to compare various surface treatment methods. The record of vertical test results from 2015 till 2018 are summarized in this paper.

1. はじめに

KEK の STF 棟では、2008 年にたて測定設備を構築し、低温での空洞性能を確認するためのたて測定が始まった。2014 年末までは、Fig. 1 に示すように、KEK 内の加速器のクライオモジュールに内蔵される超伝導空洞のたて測定を実施してきた[1, 2]。2015 年以降は、主に、新しく製造した超伝導空洞のたて測定や、異なる表面処理による研究開発を目的とするたて測定を実施している。

本発表は、2015 年以降のたて測定結果の履歴を報告するとともに、たて測定中に発生したトラブルも併せて報告する。

Cryomodule	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
S1-Global		4台					
Q-Beam (Capture cryomodule)			2台				
cERL	たて測定設備完成			3台			
				2台			
STF2-CM1				9台			
STF2-CM2a							4台
STF2-CM2b							4台

Figure 1: Period of vertical tests of SC cavities assembled in cryomodules.

2. STF たて測定システムの概要

STF たて測定設備エリアは、Fig. 2 に示すように、超伝導空洞の共振周波数を加速器の運転周波数に一致させ、全てのセルで効率よくビーム加速させるために各セルの電場強度を一律に調整するプリチューニング室とたて測定の RF 制御を行う制御室、クリーンルームで組み立てた超伝導空洞を吊り下げ、各種センサの取り付けを行うスタンド、たて測定を実施するために床下ピット内に約 4m のたて型クライオスタットが 2 台、RF 投入時に

発生する放射線を防ぐための鉄製シールドがある。液体ヘリウムは、1 回のたて測定で 2000 リットルを使用している。

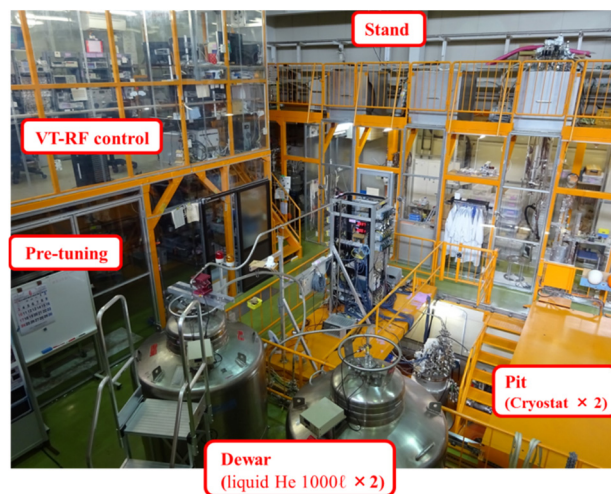


Figure 2: Vertical test-stand area.

たて測定の基本的なスケジュールは、Fig. 3 に示すように 1 週間かかる。月曜日は、前週にクリーンルームで組み立てた真空引きを行った空洞を真空封止し、スタンドに移動して吊り下げ、ダクト配管と接続し、ダクト配管の真空を良くするためにベーキングを数時間行う。火曜日は、ダクト配管の真空が空洞側の真空より良い状態で真空封止しているメタルバルブを開け、空洞内の真空引きを行い、各種センサを取り付け、クライオスタット内に空洞を移動する。水曜日は、液体ヘリウムを使用して、空洞をニオブの転移温度である 9.23K 付近まで冷却し、超伝導状態へ転移する時の残留磁場の排除状況測定する Flux expulsion を実施する。木曜日は、1000 リットルの液体ヘリウムのデュアーを 2 本目に交換後、再び冷却し、クライオスタット内に液体ヘリウムを十分な液面まで溜め、2K から 1.5K の範囲に温度を下げるために減圧を行い、Q₀-E 測定を実施する。金曜日は、クライオス

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

タット内に残っている液体ヘリウムをヒーターによって蒸発させ、土・日曜日にかけて、クライオスタート内の温度を常温になるまで昇温させる。次の月曜日は、空洞をスタンドに戻し、各種センサと真空部品を取り外し、次のたて測定の前準備に移行する。

曜日	作業内容
月	スタンドに空洞吊り下げ ダクト配管のベーキング
火	空洞の真空メタルバルブOPEN 各種センサ取付 クライオスタートに空洞移動
水	冷却、Flux expulsion測定 (液体He 1000t 使用)
木	冷却、He液溜め、減圧、 Q_0 -E測定 (液体He 1000t 使用)
金	He液蒸発
土	昇温
日	昇温
月	スタンドに空洞移動 真空部品取り外し

Figure 3: Weekly schedule of a standard vertical test at STF.

たて測定システムの概略図を Fig. 4 に示す[3]。測定する高周波電力は、入射電力 P_{in} 、反射電力 P_{ref} 、透過電力 P_t 、プローブ電力 P_{probe} である。信号発生器から出力された高周波電力をドライバーアンプ(最大 400W)で増幅し、方向性結合器から取り出した入射電力 P_{in} と透過電力 P_t の間に PLL (Phase Lock Loop) が組まれている。両方の出力を周波数変換器に通した後に 1MHz の位相検出器で位相差を検出する。位相差から変換された出力電圧を Feedback controller 経由で信号発生器の DC-FM 変調ポートに入力し、空洞の共振周波数を追尾する。真空システムは、ロータリーポンプ 2 台とメカニカルブースターポンプ 2 台を使用してクライオスタート内のヘリウム圧力の減圧を行う。ポンプの排気は、ヘリウム回収用配管につながっており、液体ヘリウムを再度生成するために再利用される。

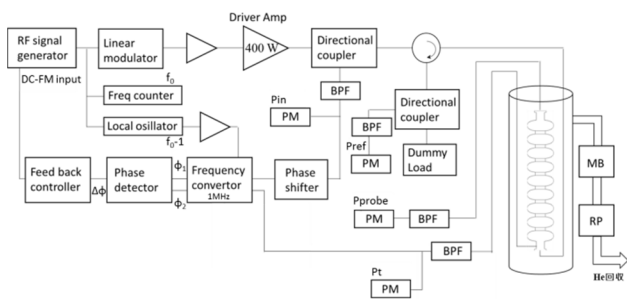


Figure 4: Schematic diagram of RF measurement system for a vertical test.

空洞で消費される電力 P_0 は Eq. (1) で表される。

$$P_0 = P_{in} - P_t - P_{ref} - P_{probe} \quad (1)$$

負荷 Q 値である Q_L は、空洞の共振周波数 f_0 と空洞の蓄積エネルギーが半分に減衰する時間である decay time ($\tau_{1/2}$) を用いて Eq. (2) で表される。

$$Q_L = \frac{2\pi f_0 \tau_{1/2}}{\ln 2} \quad (2)$$

空洞性能を評価するための加速勾配 E_{acc} と無負荷 Q 値である Q_0 は、以下の式で算出できる。 Z は、空洞固有の形状パラメーターであり、 Q_t は、各測定モードのスタンダードデータ測定で算出される。

$$E_{acc} = Z \times \sqrt{P_t Q_t} \quad (3)$$

$$Q_0 = \frac{P_t Q_t}{P_0} \quad (4)$$

3. 2015 年以降のたて測定の実績

2015 年以降のたて測定での主な取り組みを Fig. 5 に示す。2014 年末でクライオモジュールに搭載するための超伝導空洞のたて測定が終了し、2015 年以降は、グレインサイズが異なるニオブ材料から製作した空洞やシームレス空洞等の新規に製造した空洞のたて測定、空洞性能向上の R&D として、 Q_0 値の増加を目指した N-dope 処理や Q_0 値の増加と同時に加速勾配も増加する事に期待できる N-infusion 処理[4]を施した空洞のたて測定を行っている。窒素処理は、2015 年の 2 月から、KEK 内にある拡散ポンプを使用した真空炉で実施した。その後、窒素処理は、加熱中の空洞表面の清浄性が空洞性能に影響を与えるために、クライオポンプとターボ分子ポンプを搭載したオイルフリーの真空排気システムをもった J-PARC の真空炉で 2017 年 5 月から始まった。2018 年の 6 月からは、KEK の COI 棟内にクライオポンプとターボ分子ポンプを備えた真空炉を構築し、窒素処理を実施している。また、これらの窒素処理を実施すると、残留磁場の影響が受けやすくなるために、空洞の周囲をソレノイドコイルで覆い、残留磁場の補正を行っている。Flux expulsion 測定は、空洞の上部ビームパイプにヒーターを巻き付けて、ヒーターの強さを変えながら、空洞自体に温度差をつけ、空洞が超伝導状態への転移時に磁束をどのくらい排除するのかを測定している[5]。たて測定では、転移温度前に残留磁場が最小になる様に調整し、空洞の温度差が最大になる様に調整して、転移時に磁束を最大限排除させた後に、ヘリウム液を十分に溜めて、たて測定を行っている。

年月	イベント内容
2015年2月	KEKの真空炉でN-doping開始
2016年3月	取付センサにフラックスゲートを導入 (残留磁場測定)
2016年10月	1セル空洞にソレノイドコイル導入 (残留磁場調整)
2017年3月	Flux expulsion測定開始 (ヒーターで空洞に温度差をつけた転移温度の磁場測定)
2017年5月	J-PARC真空炉でN-doping開始
2017年7月	J-PARC真空炉でN-infusion開始
2018年3月	3セル空洞にソレノイドコイル導入 (残留磁場調整)
2018年6月	KEK COI棟の真空炉でN-infusion開始

Figure 5: Special topics related to vertical tests since 2015.

2015 年以降のたて測定を実施した回数を Fig. 6 に示す。たて測定を行った超伝導空洞は、1 セル空洞、1.5 セル空洞、3 セル空洞、9 セル空洞がある。N-dope と N-infusion は、1 セル空洞と 3 セル空洞を使用して実施している。また、7 月中旬から 8 月中旬にかけては、KEK 内で液体ヘリウムを生成している低温センターがメンテ

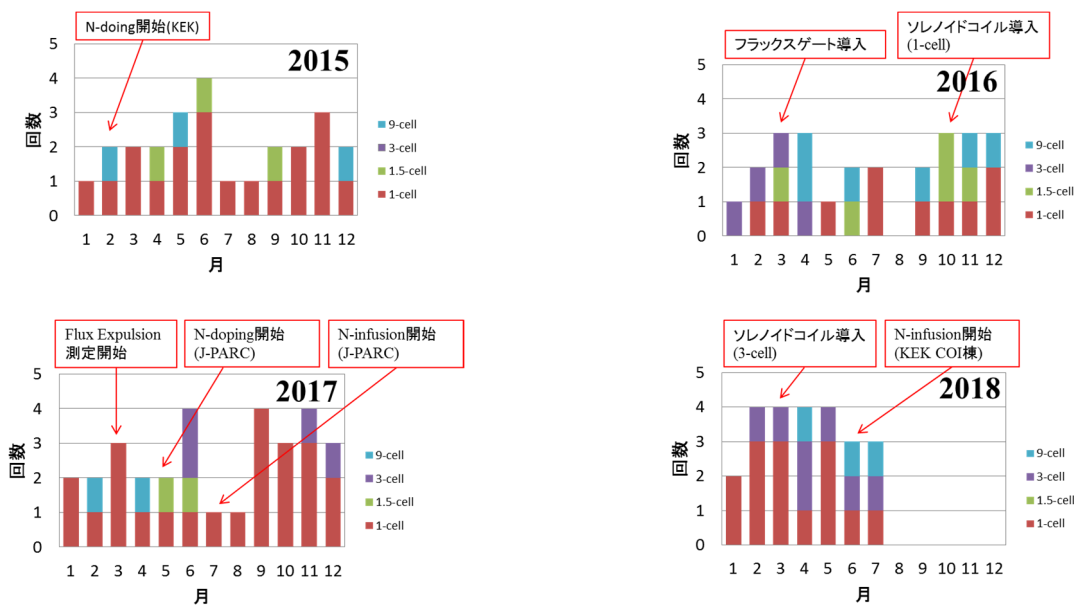


Figure 6: Number of vertical tests per month from 2015 till 2018.

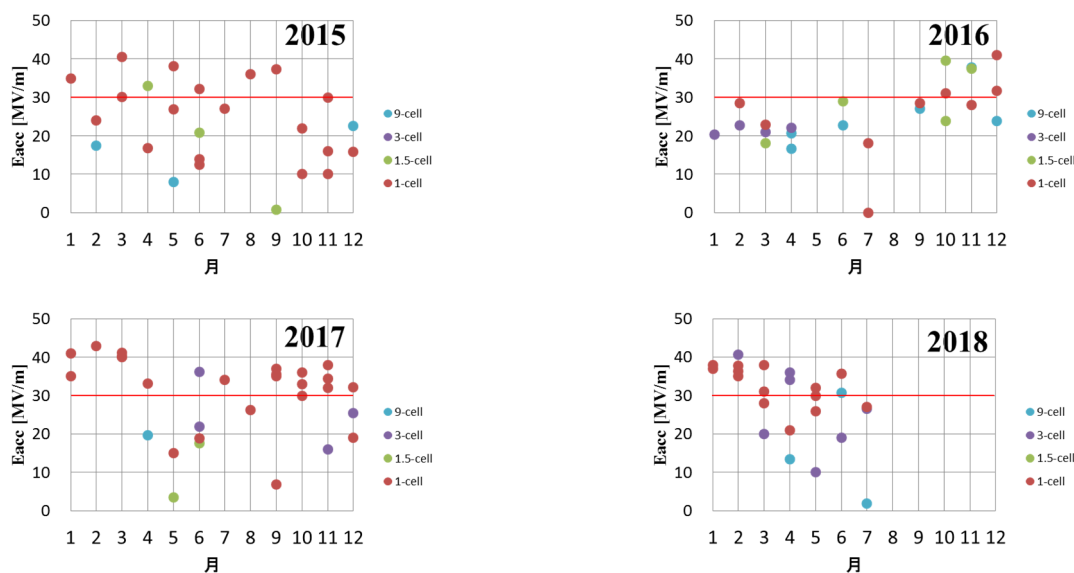


Figure 7: The maximum accelerating gradients at 2.0 K in each month from 2015 till 2018.

ナンス期間中のために液体ヘリウムが供給できず、たて測定を実施していない。2015年と2016年は、たて測定の回数が25回であったが、2017年に31回に増加し、2018年は、7月末の段階で24回実施している。そのため、最近では、ほぼ1週間に1回の測定を行っている。

2015年以降の空洞温度が2K時の最大加速勾配をFig. 7に示す。2015年は、最大加速勾配の値が10MV/mから40MV/mの間にばらけていたが、年々30MV/m以上に安定してきている。

4. 2015年以降に発生したトラブル

2015年以降のたて測定に関連して発生したトラブルについて報告する。

4.1 チラーの故障

2016年の12月にクライオスタット内を真空引きするための真空ポンプ冷却用チラーが動作しなくなった。原因としては、チラーの老朽化が考えられ、故障前からファンモーター用インバーターのエラーが頻発していた。暫定的な対応として、STF棟内にあるクライストロン用の冷却水をホースで延長させ、真空ポンプのチラー用冷却配管に接続して、真空ポンプの冷却を行った。その後、故障したチラー本体を新品に交換した。

4.2 クライオスタットの真空リーク

2017年の4月にクライオスタット内の真空リークが発生し、減圧しても温度が目標温度まで下がらなくなり、回収したヘリウムは、不純物が増加した。原因としては、ク

ライオスタット天板にあるフィードスルーのケーブル抜き差しによる老朽化と一部のフィードスルーの溶接の不具合が確認され、フィードスルーの交換を行った。また、真空ポンプ用のメインバルブの軸部分からもリークが確認された。メインバルブの軸からのリークは、真空ポンプの近くにある事から、ポンプの振動や開閉を繰り返す事による老朽化が考えられる。これらのリーク箇所は、リークテストで場所を特定した。その際に行ったフード法の様子を Fig. 8 に示す。また、Fig. 9 に示す真空ポンプのメインバルブのリークはスニッファ法で特定し、軸固定ボルトの増し締めで応急対応し、後日、バルブを新品に交換した。また、たて測定中に温度を一定に自動制御するためにモーター駆動のバタフライバルブを追加した。クライオスタットのビルドアップ測定によるリークレートは、リーク発生時には $0.750\text{kPa}/\text{min}$. であったが、バルブ交換後には $0.063\text{kPa}/\text{min}$. に改善された。



Figure 8: He leak check of the vertical cryostat by hood method.

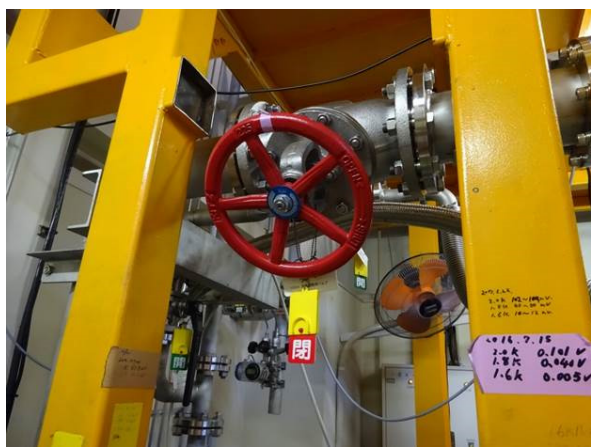


Figure 9: Main valve for He-gas pumping. Here, the leak has occurred.

4.3 トランスファーチューブのブロック

2017 年の 5 月以降に液体ヘリウムのデュアーに挿入したトランスファーチューブが途中で凍結するブロックが頻発するようになった。デュアーに挿入したトランスファーチューブの様子を Fig. 10 に示す。ブロックの原因は、良くわかっていないが、クライオスタット内のリーク発

生後、冷却前に実施している 5 分間のビルドアップ測定開始時期と発生時期が一致している。これまでに 5 分間のビルドアップ測定を 41 回行い、ブロックが 39 回発生している。ビルドアップ測定実施前は、ほとんどブロックは発生していない。2 分未満のビルドアップ測定は 5 回実施したが、ブロックは発生していない。ブロックした場合は、トランスファーチューブを一度引き抜き、ヒートガンで霜を取り除いた後に、再度挿入する。再挿入後のビルドアップ測定は行っておらず、ブロックも発生していない。ビルドアップ測定は、トランスファーチューブの流量調整バルブを全閉状態で実施しており、液体ヘリウム側の冷たい大気圧とクライオスタット側の常温の 0kPa の差圧により、ある程度の時間が経過すると、液体ヘリウム側の冷気が漏れ出してきて、トランスファーチューブ内を凍結させている可能性がある。今後は、ブロックの可能性が低い 1 分間のビルドアップ測定を実施していく。



Figure 10: Transfer tube line after insertion into helium dewar.

4.4 クライオスタットの損壊

2017 年の 9 月に第 1 クライオスタット内を大気からヘリウムに置換するための真空引き中にクライオスタットの内壁が変形し、磁気シールドが押しつぶされるトラブルが発生した。原因は、クライオスタットの真空断熱槽内部を常時、真空引きを行っているが、落雷による停電後の復旧時に真空ポンプの電源を入れ忘れ、真空断熱槽の真空度が徐々に悪化していき、翌週の真空引き中にクライオスタット内と真空断熱槽の差圧により、薄肉の内壁に外圧がかかり変形した。クライオスタット内の変形した磁気シールドの様子を Fig. 11 に示し、空洞吊り下げ部分に巻きついた磁気シールドの一部の様子を Fig. 12 に示す。現在行っているたて測定は、磁気シールドが真空断熱槽内部に設置されている内蔵型の第 2 クライオスタットを使用して実施している。問題発生後に、真空断熱槽の真空値と真空ポンプの電源の ON/OFF 状態のインターロックをクライオスタット用の真空ポンプに導入した。第 1 クライオスタットの真空断熱槽の内壁は修理を行ったが、磁気シールドの修理はまだ行っていない状態である。



Figure 11: Dented magnetic shield inside the vertical cryostat after the trouble.



Figure 12: Broken magnetic shield wrapped around the cavity hanging parts.

参考文献

- [1] T. Shishido *et al.*, “Status of the cryomodule consisting of 1.3 GHz 9-cell superconductive cavities for STF-PHASE 2”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, (2014).
- [2] T. Yanagimachi *et al.*, “Vertical test results of 9-cell SC cavities for STF2-CM2B”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, (2015).
- [3] T. Shishido “超伝導空洞の性能評価”, OHO’14, Tsukuba, Japan (2014).
- [4] T. Kubo “Physics of superconducting cavity: towards realizations of high-Q and high gradient cavities”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, (2017).
- [5] K. Umemori *et al.*, “Development of superconducting RF cavities towards high-Q operation”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, (2016).

5. まとめ

STF 棟のたて測定システムでは、これまでにたくさんのたて測定を実施し、2015 年以降のたて測定の実施回数と 2K での最大加速勾配の履歴をまとめた。最近では、ほぼ 1 週間に 1 回の測定にも対応している。また、たて測定中に発生した最近のトラブルをまとめた。今後も、STF たて測定システムを使用して、超伝導空洞の性能向上を目指したたて測定を引き続き実施していく予定である。