

ILC に向けた STF-2 クライオモジュールの 31MV/m での運転実証

ACHIEVEMENT OF STABLE PULSED OPERATION AT 31 MV/M IN STF-2 CRYOMODULE AT KEK

山本康史[#], 梅森健成, 江木昌史, 加古永治, 久保毅幸, 小島裕二, 許斐太郎, 佐伯学行, 宍戸壽郎, 清水洋孝, 竹中たてる, 道前武, 仲井浩孝, 中西功太, 原和文, 朴建泰, 本間輝也, 松本利広, 三浦孝子

Yasuchika Yamamoto[#], T. Dohmae, M. Egi, K. Hara, T. Honma, E. Kako, Y. Kojima, T. Konomi, T. Kubo, T. Matsumoto, T. Miura, H. Nakai, K. Nakanishi, G. Park, T. Saeki, H. Shimizu, T. Shishido, T. Takenaka, K. Umemori

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

In the Superconducting RF Test Facility (STF) in KEK, the cool-down test for the STF-2 cryomodules with twelve cavities has been done three times since 2014. In 2016, the third cool-down test was successfully done including the capture cryomodule with two cavities, used for Quantum Beam Project in 2012. In this paper, the result of the third cool-down test is presented in detail.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)内の超伝導高周波試験施設(STF)において、国際ニアコライダー計画(ILC)の仕様[1]を満たすクライオモジュール(STF-2 モジュールと呼ぶ)を用いた STF-2 計画が進められている。STF-2 モジュールには、12 台の STF タイプ 9 セル超伝導空洞、ビーム収束用超伝導四重極電磁石[2]、およびビームモニター[3]が収められており、またその上流部には 2012 年に設置された 2 空洞が収納されている入射器用クライオモジュール(Capture モジュールと呼ぶ)および RF 電子銃がある。小型冷凍機である Cold box は Capture モジュールと STF-2 モジュールそれぞれに一台ずつ設置している。Figure 1 は STF-2 加速器の完成予想図である。STF-2 モジュールの上下流のビームラインおよびビームダンプは未設置である。

STF-2 モジュールの冷却試験はこれまでに 3 回実施されている。2014 年はネットワークアナライザ等を用いた低電力試験が行われ[4]、2015 年には 5MW のクライストロンを用いた大電力試験が行われ、12 空洞中 8 空洞が ILC で要求されている運転加速勾配である 31.5 MV/m に到達していることが確認された[5, 6]。2016 年は平均加速勾配 31.5 MV/m で Vector-sum による 8 空洞同時運転を実証する[7, 8]ために 10MW のマルチビームクライストロンが整備された。Table 1 に STF-2 計画の簡単な歴史を示す。空洞や入力結合器の製造は 2010 年から始まっている。以降では 3 回目の冷却試験の結果を中心に紹介していく。なお、3 回目の冷却試験では 12 空洞中 8 空洞のみの測定となっている。

2. 空洞性能と放射線測定

3 回目の冷却試験では最初から 8 空洞全てに導波管を接続し、同時にエージングが進められ、空洞性能の再確認が行われた。2015 年に実施された 2 回目の冷却試験以降、STF-2 モジュール内は真空状態で保持されて

Table 1: History of the STF-2 Project

Date	Content
2010	Fabrication of cavities / power couplers
2011~2013	V.T. for 12 cavities / RF conditioning for 12 couplers
Jul/2013~Apr/2014	Cavity string assembly
Oct/2013~Jun/2014	Cryomodule assembly
Jul/2014	Certification for high pressure gas regulation
Oct/2014~Dec/2014	1 st cool-down test
Apr/2015~Jul/2015	5 MW klystron prepared
Jul/2015~Sep/2015	Coupler conditioning at room temperature
Oct/2015~Dec/2015	2 nd cool-down test by single cavity operation
Jan/2016~Jul/2016	10 MW klystron/Waveguide system prepared
Jul/2016~Sep/2016	Coupler conditioning at room temperature
Sep/2016~Nov/2016	3 rd cool-down test by multi cavities operation

いたにも関わらず、今回の性能確認では 8 空洞の最大到達加速勾配が一様に低下しているということがわかった。さらに Capture モジュールに収められた 2 空洞の性能も同様に下がっていることがわかった。Figure 2 の左図は Capture モジュールの 2 空洞も含めた全空洞の最大到達加速勾配の比較で、右図は前回と今回の冷却試験における最大到達加速勾配の相関図を示す(STF-2 モジュール内の 4 空洞については測定されていない)。

一方、各空洞の直近で測定された放射線量を見ると、2 回目の冷却試験時とほとんど同じか、むしろ放射線が現れた時の加速勾配(Onset gradient)は上がっていたことが判明した。これらの事実からいえることは、field emission は今回の空洞性能の劣化とは無関係であり、

[#] yasuchika.yamamoto@kek.jp

別の要因が絡んでいる可能性が高いということである。2015年と2016年の冷却試験の状況を比較・検討すると、今回の最大到達加速勾配の変化と関連する要因として以下のものが挙げられる。

- RFシステムの変更
- 過剰な入力パワー
- 地震

一番目のRFシステムの変更とは、クライストロンやモジュレータおよびLLRFシステム全般が8空洞運転を行うため完全に変更されたことを意味する。通常、異なる高周波システムの間には測定誤差が存在し、典型的には加速勾配で10%程度[9]である。二番目の過剰な入力パ

ワーとは S1-Global でも観測されたことであるが[10]、Vector-sum 運転を行う際、feedback のパラメータが適当でないと入力結合器に過大なパワーが投入されてしまい、それが原因で大きな放電が発生し、結果として空洞性能が制限されてしまう、というものである。ただし、データを見る限り今回の実験中に異常な放電は観測されていない。三番目の地震については、DESY に建設された E-XFEL の経験から推測すると最も可能性が低いものであるが[11]、クライオモジュールの輸送中の振動と地震による振動とは同一ではないと思われるため、クライオモジュールに加速度計を取り付けて振動の影響を調査する必要がある。

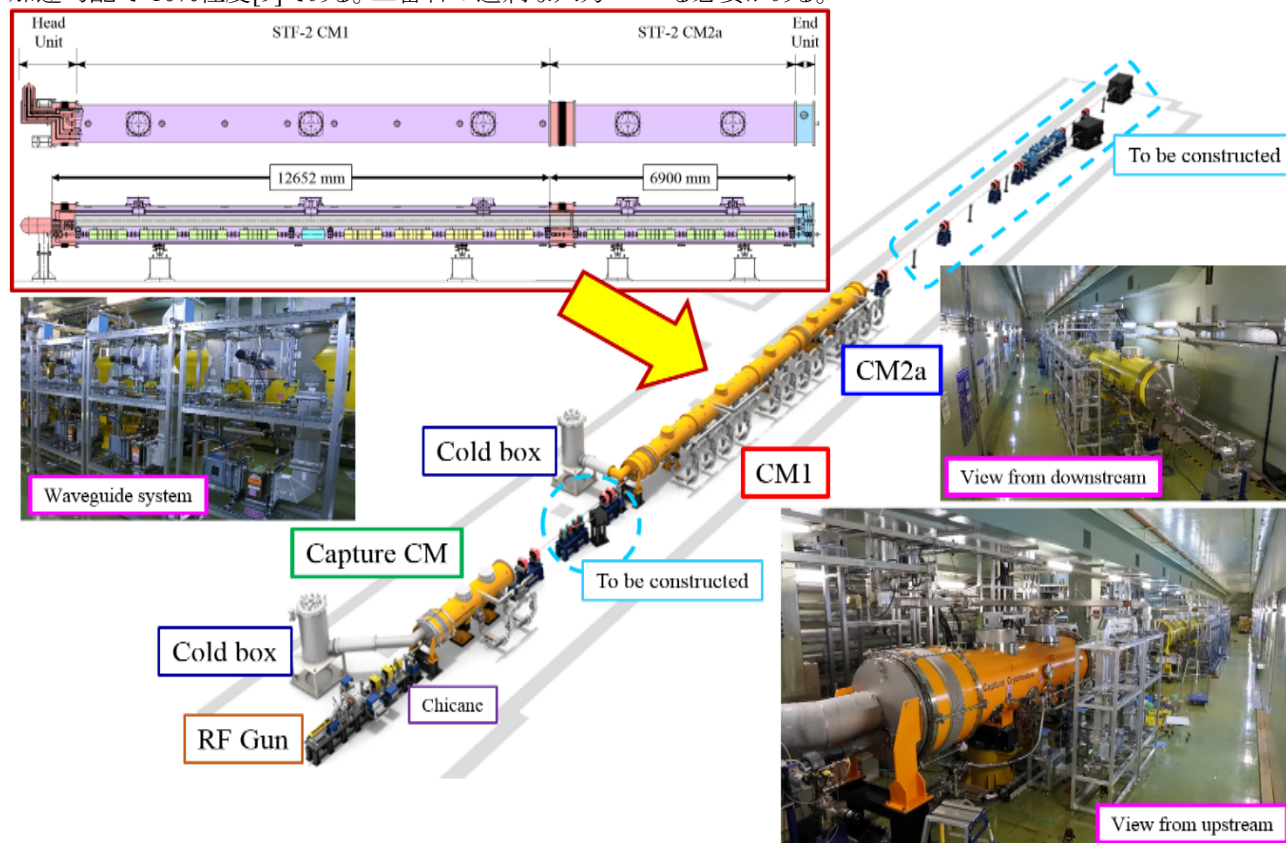


Figure 1: STF-2 Cryomodule and accelerator. The RF Gun and capture cryomodule were constructed and operated in 2012 [12]. The waveguide system is connected to two cavities in the capture cryomodule and eight cavities in the STF-2 cryomodule. The beamlines in the upstream and downstream of the STF-2 cryomodule are not constructed yet.

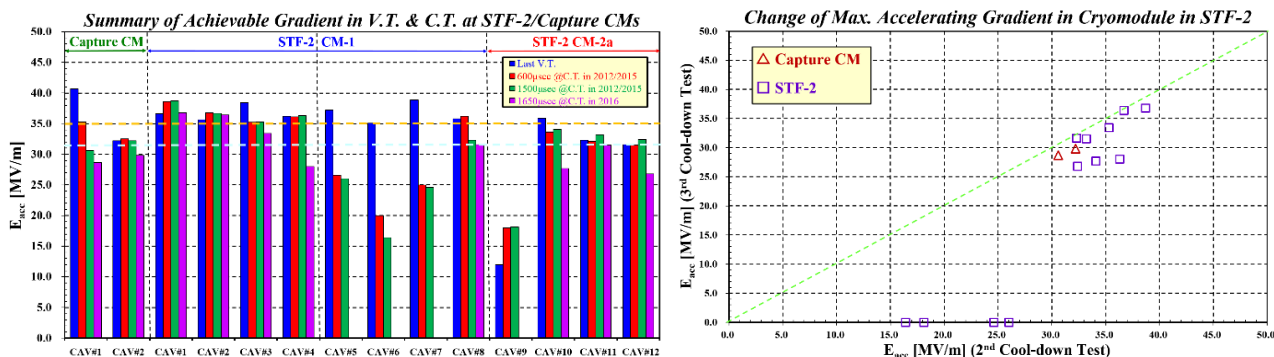


Figure 2: Summary of achievable accelerating gradient for every cavity in the capture and STF-2 cryomodules (left), and the correlation plot of achievable accelerating gradient between 2nd and 3rd cool-down test (right). Four cavities on the horizontal axis were not measured in the 3rd cool-down test.

3. ローレンツ離調の測定

高加速勾配でパルス運転を行う ILC 加速器の場合、空洞内で発生する電磁界応力による空洞の変形量が無視できず（通常は縮む方向に変化する）、空洞は自動的に離調状態となる。これをローレンツ離調 (Lorentz Force Detuning, LFD) と呼び、ピエゾ素子により空洞を伸長させることで補正する方法が一般的である。STF タイプ空洞は、機械的剛性を上げることでこの LFD の影響を極力小さく抑える設計となっており、高加速勾配における運転に対するメリットとなっている。

Figure 3 はパルス幅を徐々に短くしていった時の離調周波数の測定結果で、加速勾配は 31.7 MV/m にセットされている。同様の測定を様々な加速勾配で行い、離調周波数と加速勾配の二乗の相関関係から空洞の機械的伸張因子が得られる。Figure 4 は S1-Global[13]、Quantum Beam[14]、STF-2 モジュールまでの全空洞に対する機械的伸張因子のまとめである。図中の左側の 4 空洞は TESLA タイプのもので、これに対し STF 空洞の方は約半分の伸張性となっており、期待通り LFD の変化量が少ないことがわかる。

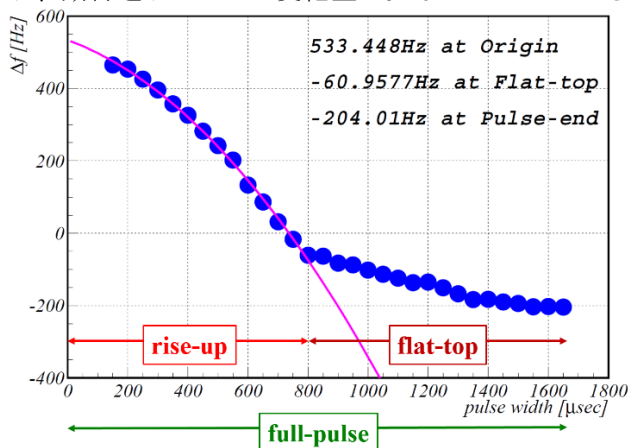


Figure 3: Example of measurement for LFD by the pulse shortening method. The purple curve is the fitting curve for all the data in the “rise-up” region.

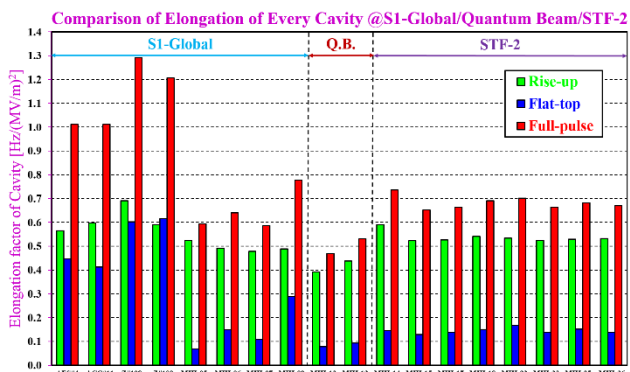


Figure 4: Comparison of the LFD for the S1-Global (w/ four TESLA cavities), the capture (named the Quantum Beam cryomodule in 2012), and the STF-2 cryomodules.

4. 熱負荷測定

通常、クライオモジュールの熱負荷測定はモジュール内で蒸発したヘリウムガスの流量から求められる。熱負荷を計算する際に、ヘリウムの 2K における蒸発潜熱として 4.2 J/l という値を用いている[15]。熱負荷測定中は、当該の空洞のみに導波管を接続し、他の空洞からの影響は排除している。Figure 5 は Cavity #1, #2, #8, #12 の最後の縦測定と今回の冷却試験における Q_0 - E_{acc} カーブおよび放射線量である。モジュール試験の結果に付けられている誤差は、静的熱負荷測定の再現性およびヘリウムガス流量の測定のばらつきから生じているもので、それぞれ 0.36 W および 3.9% となっている。また、RF duty はパルスの積分値から求められ、0.85% と見積もられた。Figure 5 を見ると、誤差は大きいものの Cavity #12 の Q_0 値は Cavity #1 に比べて高い。しかし、一方で同じ加速勾配で比した放射線量は Cavity #12 の方が桁違いに高く、互いに矛盾した結果となっている。その他の空洞も同様に Q_0 値は低くなっており、単純に空洞性能が下がっただけであるとは考えにくい。近年、空洞の温度勾配 (冷却速度) がその Q_0 値に影響を与えることがあるという実験結果が発表されており[16]、STF-2 クライオモジュールの冷却法についても一考の余地があるように思われる。 Q_0 値が一様に低い件については、次回の冷却試験において追試を行う予定である。今回の熱負荷測定は一日一空洞のペースで測定していったが、空洞周辺に取り付けられた温度計のデータを見ると、入力結合器周りの温度上昇が翌日になっても完全に下がりきっておらず、翌日に実施された別の空洞の熱負荷測定に影響を与えている可能性が高いことがわかった。今後の熱負荷測定においては、この点についても配慮する必要がある。

一方、静的熱負荷測定は今回の実験の最終日に Capture モジュールの冷却を止め、STF-2 モジュールのみの冷却に切り替える形で行われた。そうしたところ、それまでヘリウム流量の変動が激しかったのが、急に小さくなり Capture モジュールの影響がかなり大きかったことがわかった。STF-2 モジュールの静的熱負荷として 23W という結果が得られた。これには STF-2 モジュール中央部に収納された超伝導四極電磁石の効果も含まれているため、次回の冷却試験ではこの影響も排除した方法で測定を行う予定である。

5. ベクターサム運転

各空洞の熱負荷測定後、再び 8 空洞に導波管を接続し、Vector-sum による 8 空洞同時運転が行われた。通常、複数台の同時運転では LLRF 制御側で feedforward 設定によりクライストロン出力が調整され、feedback 設定によりパルスの flat-top を一定に保ち、かつ空洞側でピエゾにより LFD 補正が行われる。ピエゾに送られるパルスは適当な周波数と波高を持つ半波長のサイン波である。Figure 6 の左図は 8 空洞同時運転時の各空洞の波形である。上部の単独の青線は離調周波数の波形で、下部の青、赤、緑線はそれぞれ入力パワー、加速勾配、反射パワーの波形を表す。各空洞それぞれの平均加速勾配は図中に示されている通りであるが、Cavity #1 および #2 は 36 MV/m 近くまで到達していることを特記しておく。

昨年米国・フェルミ研究所にて、熱真空炉における空洞のアニール処理中に窒素導入を行うことで空洞性能が高い Q_0 値を保ちつつ、高加速勾配に到達できるという結果が出され[17]、ILC でも 35 MV/m 以上での運転を目指すことが議論されている。今回の 2 空洞の結果はこの可能性を実証したものであり、運転加速勾配についてはまだ議論の余地があるように思われる。同中図は上から順に 30 分に亘る同時運転での最大加速勾配、平均加速勾配、平均加速勾配のばらつき、離調周波数、を表

す。同右図は 30 分に亘って持続された Vector-sum 運転時の平均加速勾配および離調周波数の分布である。この図より、30 分の Vector-sum 運転中に平均加速勾配は 0.02 MV/m、離調周波数は 1.8Hz の変化しかしていないことがわかる。これらは ILC の要求スペックをほぼ満たすものであり、STF-2 モジュールが 31 MV/m で安定に動作したことを示し、STF-2 計画における一つの金字塔を打ち立てたことを意味する。

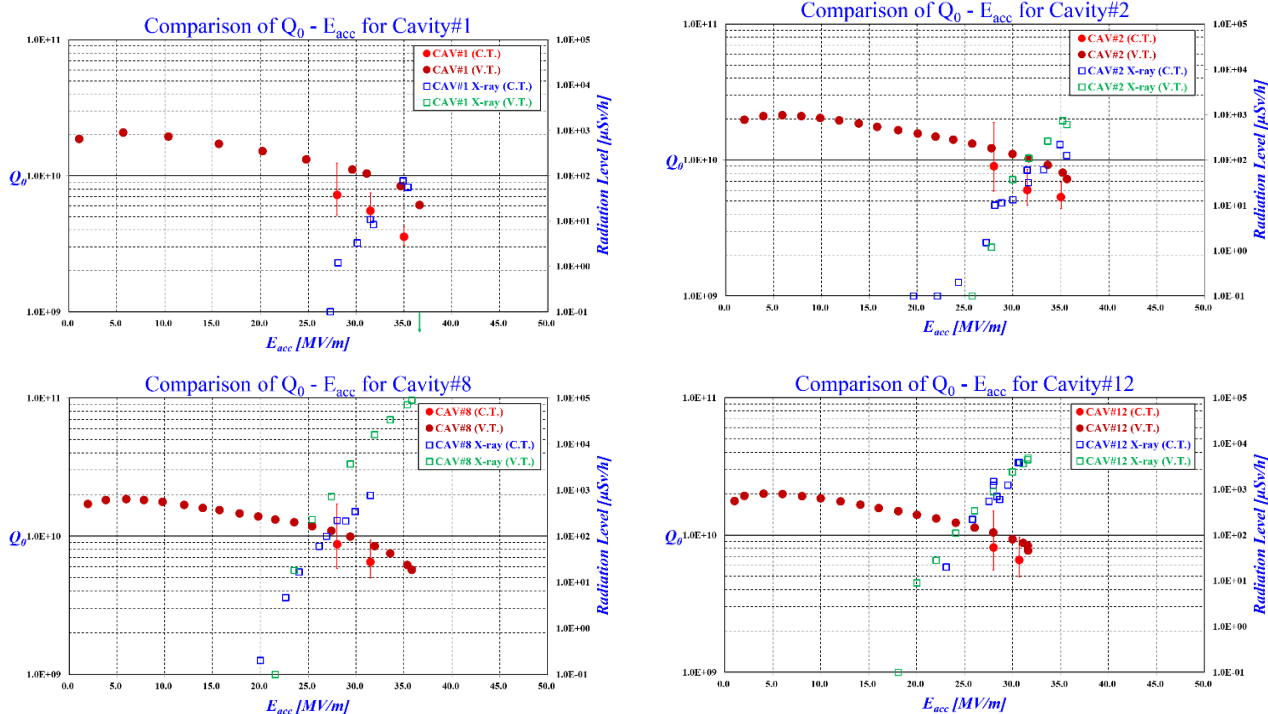


Figure 5: Q_0 - E_{acc} curves and radiation level for Cavity #1, #2, #8, and #12 in the last V.T. and the 3rd cryomodule test.

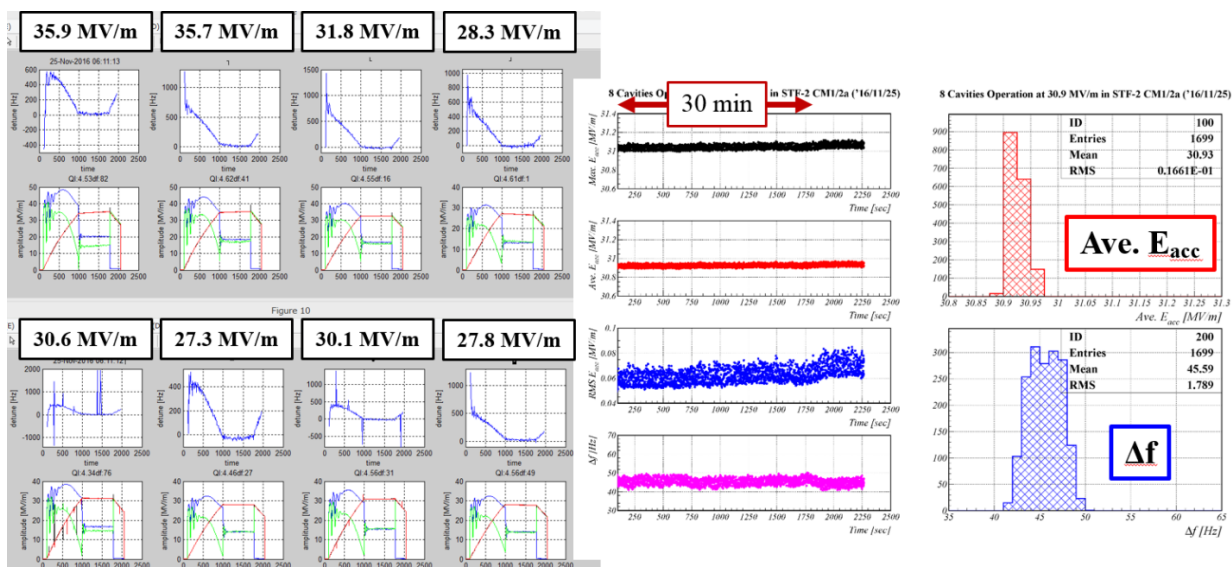


Figure 6: Left; Status of vector-sum operation with eight cavities. The detuning frequency, Δf , (blue), accelerating gradient (red), forward power (blue), and reflect power (green) are shown. Center; Trend graph for 8 cavities operation at 31 MV/m for half an hour. The Max. E_{acc} (black), the average E_{acc} (red), the root mean square of E_{acc} for the flat-top region of each pulse (blue), and Δf (purple). Right; Stability of the average E_{acc} and Δf in the vector-sum operation.

6. まとめと今後の展望

2011年から始まった STF-2 計画は、昨年実施された 31 MV/m における 8 空洞同時運転を成功させ、一つの到達点に達したといえる。STF-2 モジュールを用いた試験はまだいくつか残っているが、次回の冷却試験で実施したいと考えているのは冷却速度を変えてみる、というものである。これは最近、米国・フェルミ研究所にて LCLS-II 向けに制作されたクライオモジュールの冷却試験において、冷却速度を変えて測定したところ空洞の Q_0 値が改善した、という結果が得られているためである[18]。そしてビームラインの建設も行い、ILC と同様の運転条件によるビーム運転を実施することが最終目標となる。Table 2 は STF-2 計画のこれまでに達成した項目のまとめである。

Table 2: Achievements in STF-2 Project

縦測定での空洞性能	12 空洞中 9 空洞が 35MV/m に到達
モジュール試験での空洞性能	12 空洞中 8 空洞が 31.5MV/m に到達
スライドジャックチューナー	動作良好
ピエゾチューナー	動作良好
空洞の機械的剛性	一様で、良い傾向
LFD 補正	完璧
動的熱負荷	一様に低い
静的熱負荷	23W (ただし超伝導電磁石の影響を含む)
Vector-sum 運転	31MV/m での 8 空洞同時運転

謝辞

Special thanks are given to Y. Kondo (KEK) for the temperature monitoring system; T. Yanagimachi, S. Imada, H. Yamada, and M. Asano (NAT) for the experiment preparation, operation and recording for the STF-2 cryomodules; N. Hanaka, K. Ishimoto, and N. Numata (NAT) for the LLRF/HLRF control system; A. Hayakawa (KIS) for the maintenance of control and monitoring system for the STF-2 cryomodule operation; and the HITACHI Cryogenics group for the control and maintenance for the STF cryogenic system.

参考文献

[1] ILC Technical Design Report (2013);
<https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>

[2] V. Kashikhin *et al.*, “Compact Superconducting Magnet for Linear Accelerators”, FERMILAB CONF 14 273.

[3] A. Heo *et al.*, “Status of Cold Cavity Beam Position Monitor for STF”, Proceedings of IPAC2011, pp. 1236-1238, San Sebastian, Spain.

[4] T. Shishido *et al.*, “Assembly and Cool-Down Tests of STF2 Cryomodule at KEK”, Proceedings of SRF2015, pp. 888-892, Whistler, BC, Canada.

[5] Y. Yamamoto *et al.*, “High Gradient Cavity Performance in STF-2 Cryomodule for the ILC at KEK”, Proceedings of IPAC2016, pp. 2158-2160, Busan, Korea.

[6] Y. Yamamoto *et al.*, “STF-2 Cryomodule Performance and New Input Coupler R&D for ILC”, Proceedings of ICHEP2016, PoS(ICHEP2016)066, Chicago, U.S.

[7] S.B. Wibowo *et al.*, “Evaluation of Digital LLRF System Performance at STF in KEK”, Proceedings of IPAC2017, pp. 3992-3995, Copenhagen, Denmark.

[8] Y. Yamamoto *et al.*, “Achievement of Stable Pulsed Operation at 36 MV/m in STF-2 Cryomodule at KEK”, Proceedings of SRF2017, THYA02, Lanzhou, China.

[9] Y. Yamamoto *et al.*, “Error Estimation in Cavity Performance Test for the European XFEL at DESY”, Proceedings of IPAC2016, pp. 2128-2130, Busan, Korea.

[10] Y. Yamamoto *et al.*, “Cavity Degradation Experience at S1-Global”, TTC Meeting 2011, IHEP, Beijing, China.

[11] D. Kostin, private communication, Feb. 2016.

[12] H. Shimizu *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol.772, p26-33 (2015).

[13] Y. Yamamoto *et al.*, “Test Results of the International S1-Global Cryomodule”, Proceedings of SRF2011, pp. 615-624, Chicago, IL, U.S.

[14] Y. Yamamoto *et al.*, “Construction and Beam Operation of Capture Cryomodule for Quantum Beam Experiments at KEK-STF”, Proceedings of IPAC2012, pp. 2236-2238, New Orleans, LA, U.S.

[15] R.J. Donnelly and C.F. Barenghi, “The Observed Properties of Liquid Helium at the Saturated Vapor Pressure”, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 27, No. 6, 1998.

[16] J.-M. Vogt *et al.*, Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams, 18, 042001 (2015).

[17] A. Grassellino *et al.*, “New Breakthroughs and Future Directions in SRF Technology Research”, Talk of IPAC2017, Copenhagen, Denmark.

[18] G. Wu *et al.*, “Performance of the High Q CW Prototype Cryomodule for LCLS-II at FNAL”, Proceedings of SRF2017, FRXAA03, Lanzhou, China.