

CONSTRUCTION AND BEAM OPERATION OF CAPTURE CRYOMODULE FOR QUANTUM BEAM EXPERIMENTS AT KEK-STF

Y. Yamamoto[#], M. Akemoto, S. Fukuda, K. Hara, H. Hayano, T. Homma, E. Kako, H. Katagiri, Y. Kojima, Y. Kondo, T. Matsumoto, H. Matsushita, S. Michizono, T. Miura, H. Nakai, H. Nakajima, K. Nakanishi, S. Noguchi, T. Shidara, T. Shishido, T. Takenaka, N. Toge, K. Tsuchiya, K. Watanabe, S. Yamaguchi, A. Yamamoto, K. Yokoya, M. Yoshida,
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

Abstract

Construction of capture cryomodule for Quantum Beam Project [1] has started since September, and finished by the end of December in 2011 at KEK-STF. Two cavities (MHI-12, -13), which reached ILC specification (0.8×10^{10} at 35MV/m) at the vertical test [2], were installed into a short cryomodule with improved input couplers. Slide-Jack tuner was attached at different position (center or end of helium jacket) for each cavity same as S1-Global [3]. From February 2012, this cryomodule was cooled down to 2K, and the high power test started including check of the cavity/coupler/tuner performance, LFD measurement, LFD compensation by Piezo, dynamic loss measurement and so on. From April, the beam commissioning started with a small beam current and the maximum beam energy of 40MeV. During the beam commissioning, two cavities are being operated stably without any trouble at the accelerating gradient of 15-20MV/m. In this report, the test results of various performances at the Quantum Beam Project will be presented in detail.

KEK-STF における量子ビーム実験のためのキャプチャークライオモジュールの建設とビーム運転

1. はじめに

KEK-STF で量子ビーム実験に使用されるキャプチャークライオモジュールの建設が2011年9月から始まり、12月に終了した。このクライオモジュールには2台の超伝導9セル空洞(MHI-12, -13)が導入されており、それらは縦測定(空洞単体性能試験)でいずれも ILC の要求するスペックを満たしている。また、2010年に行われていた S1-Global 実験でその入熱量が問題となっていた入力結合器も改良され、新たに導入されている。空洞の周波数調整機構は S1-Global の時と同様に、ヘリウムジャケット中央部と端部の2カ所に1台ずつ取り付けられ、運転時の動作比較が行えるようになっている。2012年2月からクライオモジュールの冷却が開始され、2K到達後に低電力試験、高電力試験、熱負荷測定等を経て、4月からビーム運転が始まった。高電力試験を通じて一台の空洞性能が、縦測定時に比べて25%程も劣化していることが判明したが、運転勾配は20MV/mのため深刻な影響は与えなかった。現在、ビーム運転が日夜行われているが、キャプチャークライオモジュールは安定に動作している。本学会では、量子ビーム実験のためのキャプチャークライオモジュールの建設状況から性能試験やビーム運転時の状態などを詳細に報告する。

2. 量子ビーム(Quantum Beam)計画とクライオモジュールの建設

STFにて2011年から建設が始まった量子ビーム計画とは、電子ビームを2台の超伝導空洞が入ったクライオモジュールで40MeV程度まで加速し、下流側に設置された検出器内でレーザーと衝突させて(レーザーコンプトン散乱)そこから発生したX線を様々な実験に用いる、ということを目적으로している。

クライオモジュールの建設は2011年10月から始まり、年内に終了した。2010年に行われた S1-Global ではビームを用いない運転であったため、空洞のアライメントはあまり重視されずにクライオモジュールに組み込まれたが、今回はビームを通すため、ILCスペックに倣って300 μ m以下の精度で組み込まれた[4](実際には100 μ m程度であったが、常温での測定結果である)。また、ビーム実験は定常的に行われるため、本機構の KEK B-Factory 加速器のように高圧ガス法に則って液体ヘリウムのシステムを合法的に製作・設置する必要があった[5]。図1は2台の超伝導空洞の連結(Cavity String Assembly)後の様子、アライメントの様子、クライオモジュールに組み込まれて、トンネルに設置するまでの様子、を示してある。

[#] yasuchika.yamamoto@kek.jp



図1：超伝導空洞の連結時の様子（左上）、アライメントの様子（右上）、クライオモジュールに組み込まれる様子（左下）、STFトンネルへの設置（右下）。

3. 冷却からハイパワーテストまで

3.1 冷却からビーム運転までの流れ

クライオモジュールの冷却からビーム運転開始までの流れは以下にある表1に簡単にまとめられている。日程がかなり過密である理由は、定常的なビーム運転を行うために県庁の放射線検査の認可を受ける必要があり、その日程が事前に決められていたからである。

表1：冷却からビーム運転までの流れ

2月20日～	クライオモジュールの冷却
3月6日～16日	低電力試験
3月22日～4月11日	高電力試験 (熱負荷測定を含む)
4月12日～	ビーム運転開始

3.2 低電力試験の結果

ネットワークアナライザを用いた低電力試験の主な目的は周波数調整機構（チューナー）が正常に動作するかどうかを確認することにある。さらに、量子ビーム計画では、ビーム運転を行うため空洞の周波数は正確に 1300.000MHz にセットされなくてはならない。また、チューナー駆動のリモートコントロールシステムについては S1-Global 計画ですでに導入されており、今回は特に問題なく動作した。図2に空洞周波数とチューナーモーターの回転数との相関図をそれぞれの空洞に関して示す。

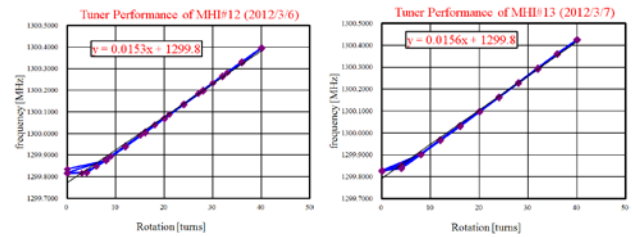


図2：チューナー駆動試験の結果。空洞周波数とモーターの回転数との相関図である。両空洞共、1300.000MHz にセット可能であることが分かる。

低電力試験では、チューナー駆動以外に可変入力結合器の結合度が、高周波の運転条件から要求される数値にセット出来るかどうかを確認する必要がある。500μsec の rise-up 時間に対して、最適な結合度は Q_L (負荷 Q) でいうと 3.0×10^6 である。図3は両空洞の Q_L の可変範囲を挿入長で表している。図から明らかなように MHI-12 の可変入力結合器は最適値にわずかに到達せず、最終的には導波管系に装備されている phase shifter で調整することになった。最適値に到達しなかった理由は、MHI-12 の可変カップラを挿入すると、チューナーの負荷（ロードセンサーの値）に変化が見られたため、無理な力が空洞にかかっているものと判断し、それ以上押し込むことを止めた、ということである。

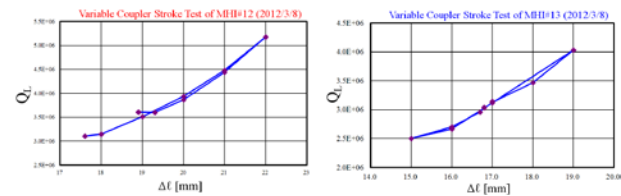


図3：可変カップラの可変範囲。最適値は、 $Q_L = 3.0 \times 10^6$ である。

3.3 空洞性能と劣化の理由

低電力試験に続いて、直ちに高電力試験が実施され、クライオモジュール試験における最大加速勾配を確認するために空洞のコンディショニングが行われた。その結果、MHI-13 は縦測定時の性能をほぼ維持していた(32MV/m)が、MHI-12 の方は性能がかなり劣化していた(41 → 31MV/m)。図4に、S1-Global と量子ビームで用いられた空洞の縦測定とクライオモジュール試験での最大到達加速勾配を示す。S1-Global に用いられた MHI-05 の空洞性能が劣化しているのは、LLRF のフィードバックシステム[6]が正常に働かず、無理な入力パワーがカップラに投入されたことで、大放電が発生し、何らかの金属（おそらく銅であると思われる）が空洞の方に飛んでしまい、それが原因で性能劣化が起こったものと考えられている。しかし、今回起こった MHI-12 の劣化については、原因が全く理解できておらず、今後の最重要の研究課題である。実は、同様の現象は、DESY や FNAL でも発生しており、世界の各研究所

における共通の頭痛の種となっている。MHI-12 については STF-2 計画が終了次第、内面検査を行い原因調査にあたる予定である。

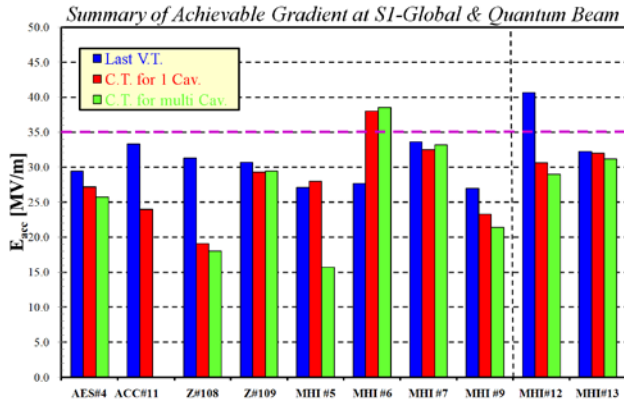


図4：S1-Globalと量子ビームで用いられた空洞の縦測定とクライオモジュール試験における最大到達加速勾配の比較。何台かの空洞の性能が劣化していることが分かる。逆に性能が向上している空洞もわずかに存在する。

3.4 ローレンツ離調(LFD)の測定

空洞の LFD の測定は STF-1 以来、パルスカット法(pulse-shortening method)が用いられており、S1-Global からはさらに自動化プログラムで測定が行え

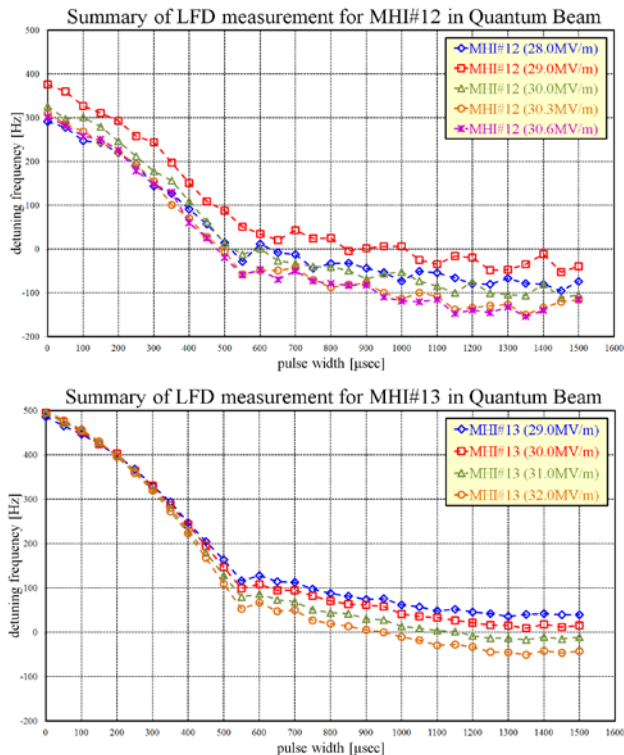


図5：MHI-12 および-13 空洞の様々な加速勾配における LFD の測定結果。flat-top で MHI-12 の測定データにばらつきがあるのは microphonics の影響である。

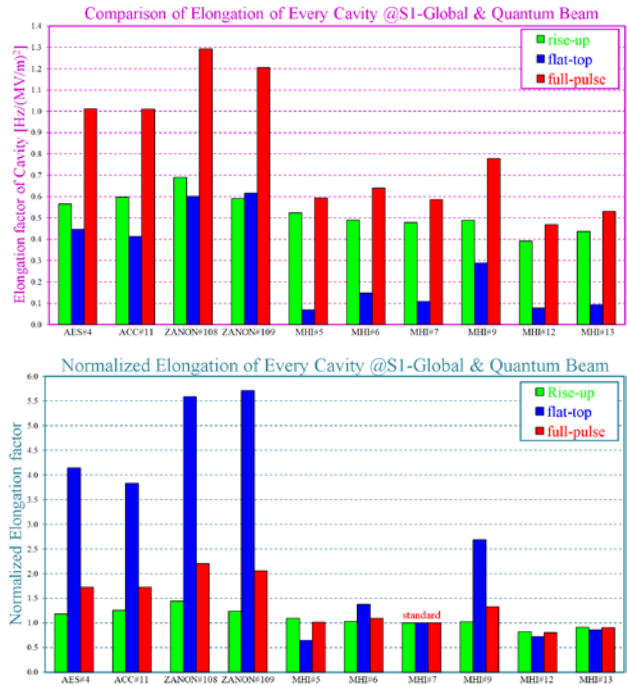


図6：S1-Global および量子ビーム計画に用いられた全空洞の rise-up, flat-top, full-pulse 領域における elongation factor の比較 (上図) と MHI-07 の結果に対して規格化した比較 (下図)。MHI 空洞はエンドグループの構造が外国製空洞とは大きく異なっているため、LFD の影響が小さい。MHI-12 および-13 の値が小さいのはクライオモジュールへの拘束条件が異なっているためであると考えられる。

るようになった。図5に示すのは、MHI-12 および-13 空洞の、様々な加速勾配における LFD を 50µsec ステップで表示したグラフである。空洞の変位量の評価法として、 $\Delta f = k \cdot E_{acc}^2$ (k :elongation factor [Hz/(MV/m)²]) の関係式を用いて行うのが一般的である。図6に示すのは、S1-Global および量子ビーム計画に用いられた全空洞の elongation factor の比較である。

3.5 ピエゾ素子による LFD の補正

一般に、LFD の影響を補正するには piezo素子を用いる方法が採用されている。STF では、STF-1 以来 piezo にサイン波状のパルス電圧を RF パルスの前に加えることにより空洞にわずかな変形を与え、LFD を補正する方法が取られている。piezo 駆動のパラメータは全部で4つあり、それぞれ piezo の駆動周波数、piezo 電圧のオフセットおよび高さ、パルスをかけるタイミング、である。図7に piezo 素子による LFD 補正の結果を示す。flat-top 領域での離調周波数の大きさは、peak-to-peak で両空洞共 60Hz 程度である。

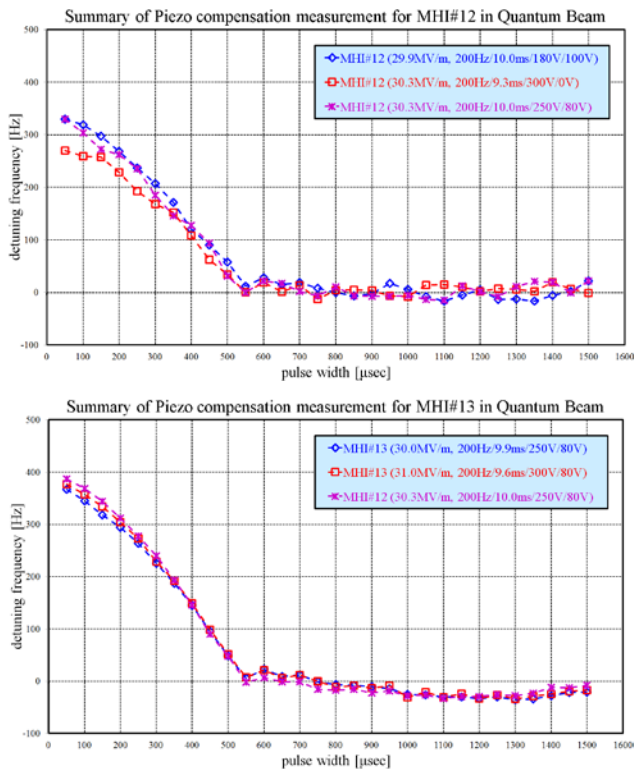


図7：ピエゾ素子によるLFD補正の結果。枠内の括弧内にある数値は左から、加速勾配、ピエゾ駆動周波数、ピエゾへのパルスタイミング、ピエゾ電圧の高さ、ピエゾ電圧のオフセット、である。

3.6 熱負荷測定の結果

空洞の熱負荷測定はクライオモジュールの冷却状態に強く依存するため、量子ビーム実験の運転形態では安定な測定条件を作り出すのが難しい状況である。通常、クライオモジュール内の各部の温度が安定になるのは木曜日の午後から金曜日にかけてのため、この間に行う必要がある。前期の運転ではMHI-12の単独の測定だけが成功したため、その結果を図8に示す。それによると、最後の縦測定と比べて30MV/m辺りの Q_0 に大きな劣化は見られていないようである。ただし、先に述べたように加速勾配は大きく劣化してしまっている。一方、空洞を離調させて測定を行う入力結合器の部分の熱負荷は2本の入力結合器でたかだか0.1W程度となっており、S1-Globalから劇的な改善を遂げた。これは、主に外導体の銅メッキの厚さを薄くしたことに因る。

4. クライオモジュールのビーム運転

量子ビーム計画のビーム運転は4/12から始まり、7/13で前期の運転を終了した[7]。この間に様々な問題が発生したが、2空洞共に安定な運転が行えて、ビーム加速がスムーズになされた、という点は素晴らしい成果であった。運転勾配こそ各空洞で20MV/mであるが、今後のSTF-2 (STF-2ではILCの運転条件である平均加速勾配31.5MV/mの運転を

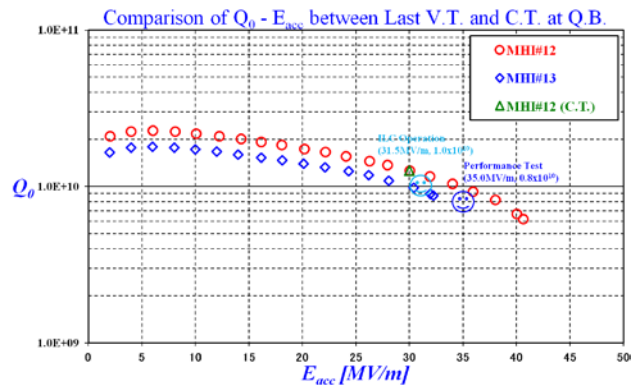


図8：MHI-12の熱負荷測定の結果。最後の縦測定と比べると、 Q_0 に劣化は見られない。

表2：前期の運転中に起こった出来事

4/12	ビーム運転開始。 (両空洞は20MV/mで運転)
4/13	ビームがビームダンプまで到達。
4/19	Low Level 制御の方でフィードバックをかける。
4/28~5/13	一時的シャットダウン。
5/14	再冷却開始。
5/25	空洞のコンディショニング開始。
6/7	両空洞共に性能劣化が起こっていない事を確認。
6/13	MHI-12を15MV/mに、MHI-13を25MV/mにセット(アンバランス運転)。
7/3	ビーム調整中に空洞のどこかにビームが当たっていたようで真空悪化を招く。
7/4	空洞がクエンチしたにも関わらず Q_L インターロックが作動せず、常伝導の状態でしたらしく運転していた。
7/5	落雷による停電発生のため、真空系が全てダウンする。復旧に一日以上費やす。
7/6	停電により昇温されたため、空洞のコンディショニングを行う。
7/13	放射線検査終了。無事合格。前期の運転終了。

目指している) に向けての第一歩としては十分意義深い事である。以下にある表は今年度前期の運転中に起こった出来事を簡単にまとめたものである。

4.1 7/3に起こった真空悪化について

空洞グループがモニターしている真空計の位置は、空洞の上下流ビームパイプ、カプラ、カプラ内導体の4ヶ所である。この内、カプラ真空はハイパワー

の高周波が通るとレベルが高くなるが、ビームパイプの真空には何の変化も見られない、というのが量子ビーム加速器の運転時の状態である（ビーム電流が少ないので真空の方まで影響が出てこない）。逆に言うと、ビームパイプの真空に何らかの変化が見られる場合は、何か異常な出来事が発生していると判断できる。7/3 に起こった出来事はまさにこのケースで、空洞の下流側の真空に異常な増加が観察された。後にこれはビーム調整中に、ビームを横方向に振ったことによりハローが空洞のどこかにヒットしていたことによるということが判明した。図9はこの時の真空のトレンドグラフである。

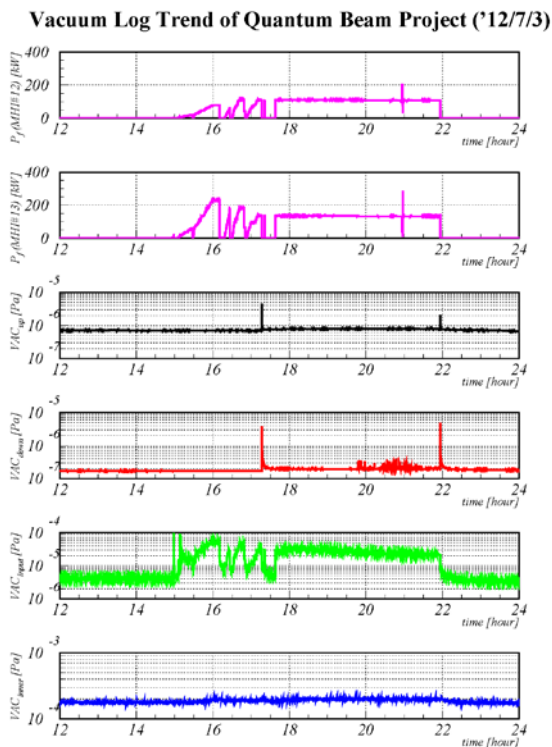


図9：ビーム調整中にビームの一部が空洞のどこかにヒットしていたことにより空洞下流側の真空レベル（赤色）が悪化した。カプラ真空は緑で示されている。17時過ぎと22時に上下流の真空が一瞬跳ねているように見えるのは、クライオモジュール両端のゲート弁の開閉を行っているためである。

4.2 7/4 に起こったクエンチについて

続く7/4には超伝導空洞を取り扱う者にとって想像を超えるような事態が発生した。空洞がクエンチを起こしているにも拘らず、高周波のハイパワーが10分以上も投入され続け、運転されていたのである（通常、空洞がクエンチを起こすと Q_L のインターロックがかかり、高周波は投入出来なくなるが、この時はどういうわけかインターロックが作動しなかった）。パルス運転であったために究極的な惨事

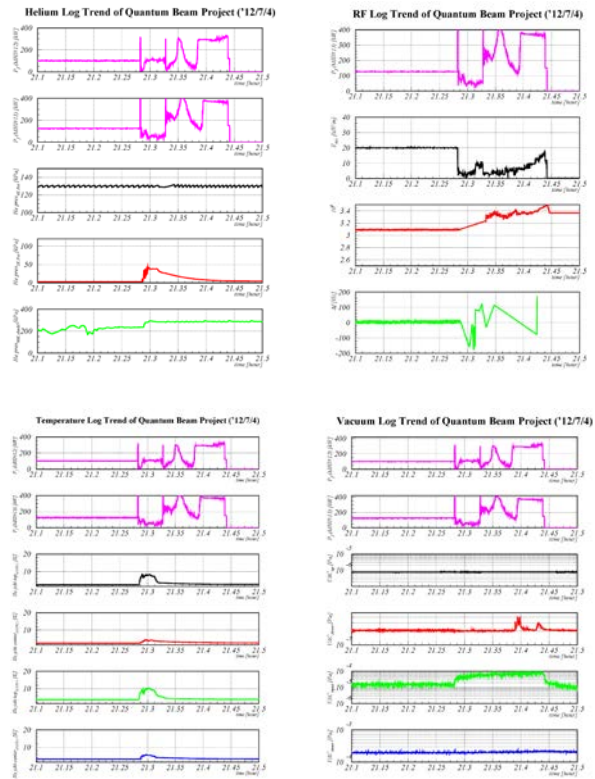


図10：空洞がクエンチを起こしていた際に、インターロックが作動せず、そのままハイパワーを投入して運転されていた際の様子。ヘリウム（左上）、高周波（右上）、温度（左下）、真空（右下）、の順に表示している。ヘリウム圧力の定常状態は3kPaで、空洞温度の定常状態は2Kである。

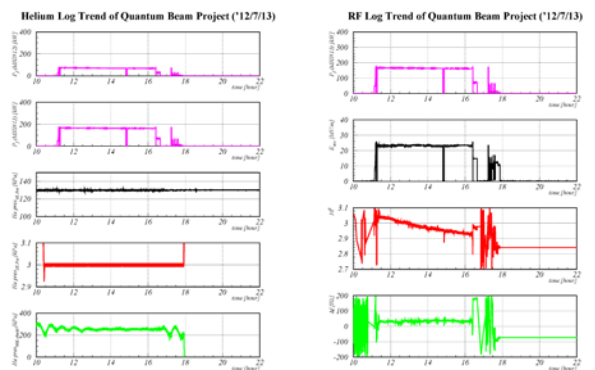


図11：放射線検査中の空洞と冷凍機の運転状態。右図の赤色のグラフは Q_L のトレンドであるが、4時間以上に亘って徐々に減少している。この現象は STF-1 の時から観測されていたもので、おそらく導波管系のどこかで熱の影響があるためと理解されている。

は免れたものの、一歩間違えると空洞性能の劣化を引き起こしかねず、インターロックは2重3重に仕掛

けておかないといけない、という認識を新たにした。図 1 0 はこの時のトレンドグラフで、ヘリウム、高周波、温度、真空、の各部の様子が示されている。

4.3 7/13（前期最終日）の運転状態について

7/13 は 2012 年の前期運転の最終日で、この日に県庁からの放射線検査を受験した。この間も空洞は安定に動作しており、冷凍機も含めて全く問題が無かった。安定な運転状態の例として、この日の運転状態を図 1 1 に示す。

謝辞

日頃より STF にて諸々の作業に従事されている方々にこの場をお借りしてお礼申し上げたい。K-VAC の岡田氏、飯竹氏、村崎氏、NAT の浅野氏、今田氏、柳町氏、関東情報サービスの早川氏、酒井氏、には日々の作業において大変お世話になっており、皆様の助力が無ければ量子ビーム計画は全く運営が出来ない状況である。また、ヘリウム冷凍機の運転・管理・維持を行って下さっている日立グループの方々にも毎日遅くまで作業をしていただき感謝しております。

参考文献

- [1] <http://kocbeam.kek.jp/project/beam.html>
- [2] Y. Yamamoto et al., The 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug 2012, THLR03.
- [3] Y. Yamamoto et al., SRF11, Chicago, U.S., Jul 2011, THIOA01.
- [4] ILC Reference Design Report (<http://www.linearcollider.org/about/Publications/Reference-Design-Report>)
- [5] <http://www.khk.or.jp/english/index.html>
- [6] T. Miura et al., IPAC11, San Sebastian, Spain, Sep 2011, MOPC155.
- [7] K. Watanabe et al., The 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug 2012, WEPL01.