

CRYOMODULE TESTS OF THE TESLA-LIKE SUPERCONDUCTING CAVITIES AT KEK-STF

Eiji Kako¹, Shuichi Noguchi, Hitoshi Hayano, Toshio Shishido, Masato Sato, Ken Watanabe, Yasuchika Yamamoto
KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

Construction of STF (Superconducting RF Test Facility) is being carried out at KEK. The STF-Baseline superconducting cavity system, which includes four TESLA-like 9-cell cavities, input couplers and frequency tuners, has been developed for the future ILC project. A cryomodule including one of four TESLA-like cavities was assembled, and the first cryomodule test, called the STF Phase-0.5, was carried out in November, 2007. The second cryomodule test for four cavities, called the STF Phase-1.0, has been started in July, 2008. One cavity achieved the maximum accelerating gradient (Eacc,max) of 28 MV/m in a specific pulse width of 1.5 msec and a repetition of 5 Hz. Compensation of Lorentz force detuning at 28 MV/m was successfully demonstrated by a piezo tuner and pre-detuning.

STFにおけるTESLA-like空洞のクライオモジュール試験

1. はじめに

STF (Superconducting RF Test Facility) の建設が現在KEKで進行中である。このSTF計画での主な目的は、平均加速電界31.5 MV/mでの運転が可能となるような高電界を発生する超伝導空洞8台を内蔵するクライオモジュールを開発することにより、国際リニアコライダー計画 (ILC: International Linear Collider) に用いる主線形加速器の工業化設計を推進し、その量産製造技術を確立することにある。その第1段階として、異なる2種類のタイプの超伝導空洞各4台を収納するクライオモジュール2台の建設が、STFフェーズ1.0として計画された。我々のグループは2005年4月より、STFベースライン超伝導空洞システム4台の開発を開始し[1]、高調波結合器を含む9セル空洞本体、入力結合器、周波数チューナーなどの主要構成要素の設計・製作を経て、単体での性能確認試験までを予定通り約2年間で終了した。クライオモジュールへの超伝導空洞システムの組み込みは、計画当初の4空洞から1空洞へSTFフェーズ0.5として変更になり、その冷却試験が2007年11月に行われた[2]。1空洞による最初の大電力試験終了後、クライオモジュールから取り出された空洞は、待機状態にあった他の3空洞とともに4連結化され、4空洞を収納したクライオモジュールが2008年3月に完成した。その後、5月末に冷却試験が開始され、当初の目的であった4空洞による大電力試験を行うSTFフェーズ1.0が、現在進行中である。本報告では、これまでに行われた2空洞の大電力試験で得られた結果について述べる。

2. ベースライン超伝導空洞システム

空洞・ジャケット系の剛性をTESLA空洞より強く改善したニオブ製9セル空洞を図1に示す。また、高周波電力を空洞に供給するための入力結合器、空洞に軸方向の荷重を加えることにより変形を与えて共振周波数を制御する周波数チューナーを図2に示す。これらが、超伝導空洞システムの主要構成要素となる。



図1: TESLA-like STFベースライン超伝導空洞



図2: 大電力高周波入力結合器 (左)、スライドジャッキチューナーとピエゾチューナーから構成される周波数調整機構 (右)

¹ E-mail: eiji.kako@kek.jp

3. クライオモジュール試験（1空洞） —STFフェーズ0.5

超伝導空洞1台（#3空洞）のみを組込んだSTFフェーズ0.5のクライオモジュール組立てが、2006年秋に行われた。チタン製ヘリウム槽ジャケットを装着した空洞は、クラス10のクリーンルーム内で入力結合器の取付けが行われ、クリーンルーム外のクライオモジュール組立てエリアでは、空洞へのチューナー類の取り付けやアライメントが行われた後、空洞は図3に示すようにヘリウムガス回収配管へ吊り下げられた。完成したクライオモジュールはSTFトンネル内に設置され、最初の大電力試験が行われた。高加速電界でのパルス運転時の無負荷Q値（ Q_0 ）の測定が、ヘリウムガス回収系に設置されている室温部の流量計を用いて液体ヘリウムの蒸発量を測定することによって行われ、その結果が図4に、たて測定での Q_0 値と加速電界の関係とともに示されている。達成された最大加速電界は両者ほぼ同程度であるが、たて測定時の結果に較べてクライオモジュール試験での Q_0 値が低下しているのは、急激に増加しているX線放射量の観測から電界放出電子による高周波損失の増加が原因と考えられる。

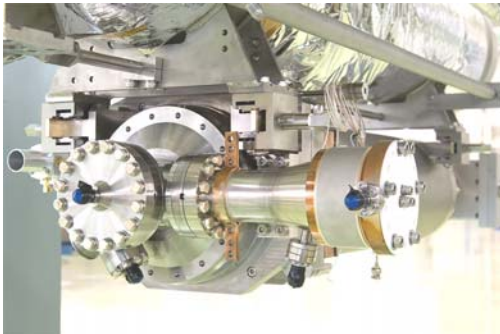


図3：ヘリウムガス回収配管への設置が完了したSTFフェーズ0.5用の1空洞

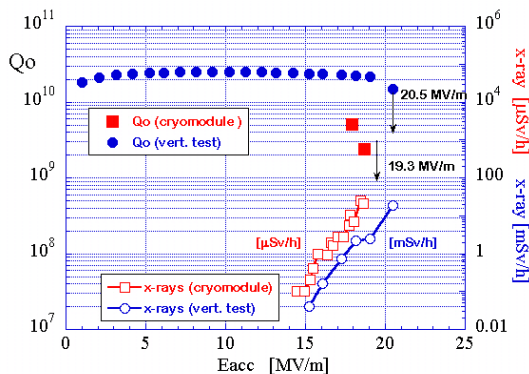


図4：#3空洞での Q_0 値と加速電界との関係およびX線放射量の加速電界依存性（赤色はクライオモジュール試験、青色はたて測定での結果を示す。）

4. クライオモジュール試験（4空洞） —STFフェーズ1.0

4空洞のクリーンルーム内での組立て作業およびクライオモジュールの組立て作業の様子を図5に示す。完成後にSTFトンネル内に設置された4空洞を内蔵するクライオモジュールを図6に示す。冷却されたクライオモジュールは、空洞1台ごとに個別の大電力試験を行った後で、4空洞を同時に運転する総合試験が予定されており、2008年7月には、#2空洞1台についての大電力試験が行われた。

高電界でのパルス運転においては、空洞内の電磁界応力による変形でローレンツ・デチューニングが起こり、高周波源の励振周波数と空洞の共振周波数との間にずれが発生する。この周波数のずれは、図7に示されるように、空洞出力電力の位相変化（ $\Delta\phi$ ）によって観測され、空洞の加速電界の増加とともに増大していく。この周波数のずれをピエゾチューナーとプリ・デチューニングを併用することにより、パルス毎に補正する必要がある。

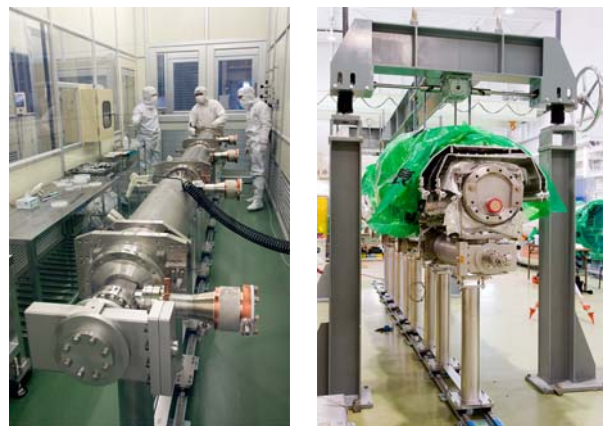


図5：クリーンルーム内での4空洞の連結作業（左）、ヘリウムガス回収配管への取り付け作業中の連結4空洞（右）



図6：STFトンネル内に設置されたクライオモジュール。4空洞の入力結合器にはドアノブ型導波管変換器が取り付けられ、1空洞には高電界試験のための大電力高周波システムが接続されている。

#2 空洞において達成された最大加速電界 28 MV/m でのパルス波形が図 8 に示されており、デチューニングの補正を行わない場合 (左図) では、パルスの終端で位相差が -40° 程度、約 25% の加速電界の低下が観測されている。右図には、ピエゾチューナーとプリ・デチューニングによる補正 [3] を行った場合の成功例が示されており、加速電界の低下が数%程度にまで抑制されている。

#2 空洞における Q_0 値測定の結果を図 9 に示す。パルス内でのデチューニングによる加速電界の低下を考慮してデューティを求め、また平均加速電界として計算を行い、測定点のプロットを行った。たて測定に較べて Q_0 値が低下している理由としては、#3 空洞と同様に電界放出電子が原因と考えられる。X線放射量が 25 MV/m 以上で飽和しているように見えるのは、パルス後半における加速電界の著しい低下の影響と推察される。

たて測定とクライオモジュール試験での最大加速電界の比較を図 10 に示す。#2 空洞および #3 空洞では、たて測定とほぼ同等の最大加速電界がクライオモジュール試験でも達成されており、9 月から行われる #1 空洞および #4 空洞でも同様な結果が得られることが期待される。

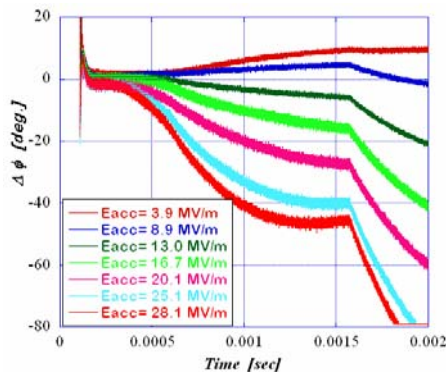


図 7：観測された空洞デチューニング量 (基準位相に対する空洞位相の変化量) の加速電界依存性

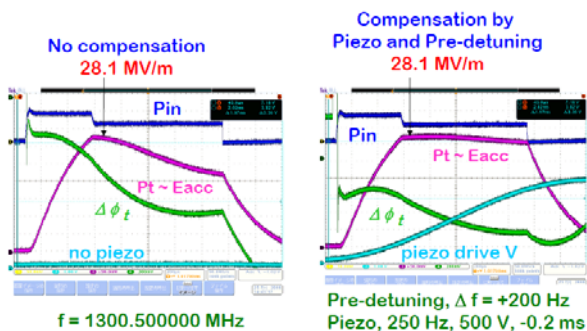


図 8：達成された最大加速電界 (左は、プリ・デチューニングおよびピエゾなしでのパルス波形。右は、プリ・デチューニングを $+250$ Hz、ピエゾを 250 Hz, 500 V で 0.2 ミリ秒前に駆動した場合のパルス波形を示す。)

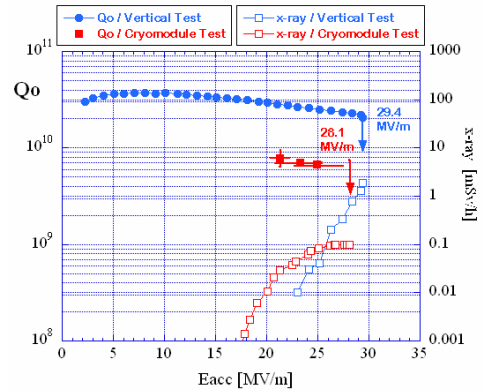


図 9：#2 空洞での Q_0 値と加速電界との関係および X 線放射量の加速電界依存性 (赤色はクライオモジュール試験、青色はたて測定での結果を示す。)

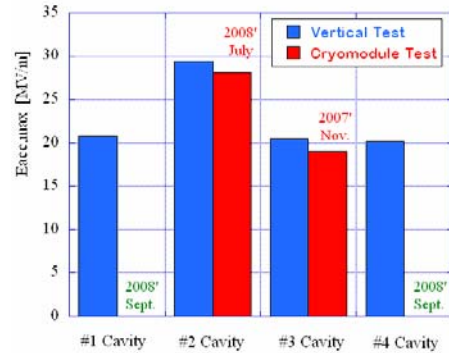


図 10：たて測定とクライオモジュール試験での達成された最大加速電界の比較

6. まとめ

- 4 台の TESLA-like 空洞を内蔵するクライオモジュールが完成し、その冷却試験および大電力試験が行われた。
- 1 空洞において、28 MV/m の最大加速電界が達成され、高電界での安定なパルス運転が確認された。
- プリ・デチューニングとピエゾチューナー駆動によるローレンツ・デチューニングの補償制御の有効性が、28 MV/m の高電界において実証された。

参考文献

- 野口修一、他、“STF ベースライン超伝導空洞システムの開発”，第 3 回加速器学会プロシーディング、仙台市、2006 年、p 133。
- 加古永治、他、“Cryomodule Tests of the TESLA-like Superconducting Cavity in KEK-STF”，加速器学会誌「加速器」Vol. 5, No. 2, 2008 (117-126)。
- 山本康史、他、“STF ベースライン空洞におけるローレンツ・デチューニングの観測とモデル計算との比較”，第 5 回加速器学会プロシーディング、東広島市、2008 年、FO19。