

STF における TESLA-like 空洞の クライオモジュール試験

加古 永治*・佐藤 昌史・宍戸 寿郎・野口 修一
羽鳥 浩文・早野 仁司・山本 康史・渡辺 謙

Cryomodule Tests of the TESLA-like Superconducting Cavity in KEK-STF

Eiji KAKO*, Masato SATO, Toshio SHISHIDO, Shuichi NOGUCHI,
Hirofumi HATORI, Hitoshi HAYANO, Yasuchika YAMAMOTO and Ken WATANABE

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 6-m cryomodule including one of four TESLA-like cavities was assembled, and the cryomodule was installed in the tunnel for the initial test, called the STF Phase-0.5. The first cool-down of the cryomodule and high power tests of the cavity had been carried out at 2 K from October to November, 2007. The maximum accelerating gradient ($E_{acc, max}$) of 19.3 MV/m was achieved in a specific pulse width of 1.5 msec and a repetition rate of 5 Hz, (23.4 MV/m in a shorter pulse width of 0.6 msec). Compensation of Lorentz force detuning at 18 MV/m was successfully demonstrated by using a piezo tuner. The second cryomodule test for four cavities, called the STF Phase-1.0, is scheduled in July, 2008.

1. はじめに

超伝導高周波試験施設 (STF: Superconducting RF Test Facility) の建設が、現在 KEK において進められている。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し、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、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、2006 年 11 月より開始された。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、冷却試験が 2007 年 3 月末には準備完了状態となった。しかし、その後、冷却系配管からのヘリウムガスの漏洩が発覚し、その対策を行った後、2007 年 10 月～11 月に STF ベースライン超伝導空洞システム 1 台を収納したクライオモジュールの冷却試験および大電力試験が行われた。本報告では、超伝導空洞システムの概要および 9 セル空洞単体での性能試験のまとめを含め、一連のクライオモジュール試験で得られた結果について述べる。

2. 超伝導空洞システム

TESLA 型空洞に改良を施した STF ベースライン超伝導空洞システム 4 台を収納する 6 m のクライオモジュールの開発が行われている。STF ベースライン超伝導空洞システムの構成要素としては、高電界を発生しビームを加速するためのニオブ製 9 セル空洞本体 (図 1)、空洞に高周波電力を供給するための同軸型アンテナである高周波入力結合器 (図 2)、空洞

* 高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: eiji.kako@kek.jp)

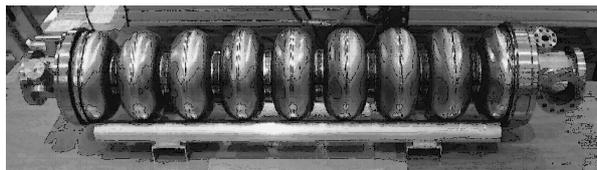


図1 TESLA-like STF ベースライン超伝導空洞（空洞およびジャケット系の剛性を TESLA 空洞より強くするために、チタン製ヘリウム槽端板を厚くする改善を行い、セル形状の再最適化、ビームチューブ径とインポートポート径の拡大などの設計変更を行った空洞である¹⁾）

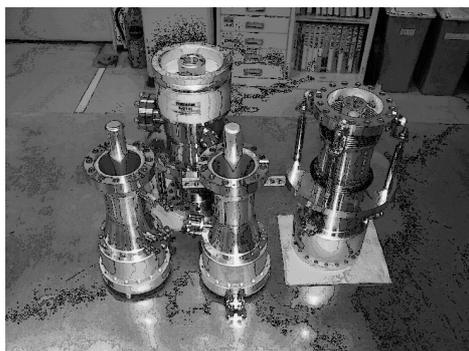


図2 高周波入力結合器，インポートカップラー（トリスタン型同軸円板セラミック高周波窓を有する低温部カップラー（前列）と常温部カップラー（後列）から構成される．空洞との結合度を可変とする機能のない，単純な構造である²⁾）



図3 高調波出力結合器，HOM カップラー（異なる広帯域特性を有する高さの違う2種類の構造をもつ高調波結合器が，空洞両端のビームチューブに電子ビーム溶接により接合される³⁾）

内を通過するビームによって誘起される有害な高調波モードを空洞外部に取り出すための高調波出力結合器（図3），および，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（図4）があり，これらが主要な開発項目である．また，その他にも，チタン製ヘリウム槽ジャケット，極低温用磁気遮蔽シールド，ニオブチタン合金製フランジ，真空シール材，加速電界モニター用カップラー，

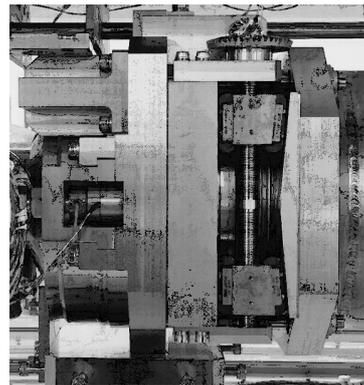


図4 周波数調整用チューナーシステム（クラオモジュール真空槽外部に設置されたステッピングモーターによりドライブシャフトを通して駆動される粗調整用スライドジャッキチューナーとパルス電圧印加により動作する微調整用ピエゾチューナーから構成される⁴⁾）

RF コネクターなど重要な構成部品がある．

3. 空洞たて測定の結果

製作された超伝導空洞は，空洞単体での高電界性能を確認するために，図5に示されるような一連の表面処理工程が施された後，たて測定と呼ばれる縦型クライオスタット内での低温性能試験が行われる．空洞開発の目標は，日本の企業により製作された空洞⁵⁾を，既存の表面処理設備を用いて準備し，性能評価を行うことにより，現在の我々の空洞製造および表面処理工程の技術レベルを確認し，さらに空洞性能を向上するための方策を明確にすることである．

2006年1月より2007年2月までの約1年間に4空洞について，総計14回のたて測定が繰り返し行われた．それらの結果のまとめを図6に示し，4空洞の最終的な高電界性能を図7に示す．全ての空洞について，内表面の研磨量の総計は，2度のバレル研磨と数回の電解研磨により，500ミクロン程度にまで到達している．図7に示されるように，達成された最大加速電界は，#2空洞において約30 MV/mであるが，その他の3空洞については20 MV/m程度であった．いずれの空洞についても，フィールドエミッション（電界放出電子）によるX線放出量は観測されるがQo値の急激な低下は見られず，クエンチ（超伝導破壊現象）によって最大加速電界が制限されており，局所的な発熱が発生するような欠陥が空洞内表面に存在していることが，推察される．

各セルの電界分布が不均一となるパスバンドモードを用いた高周波測定と空洞外表面に貼り付けた約40

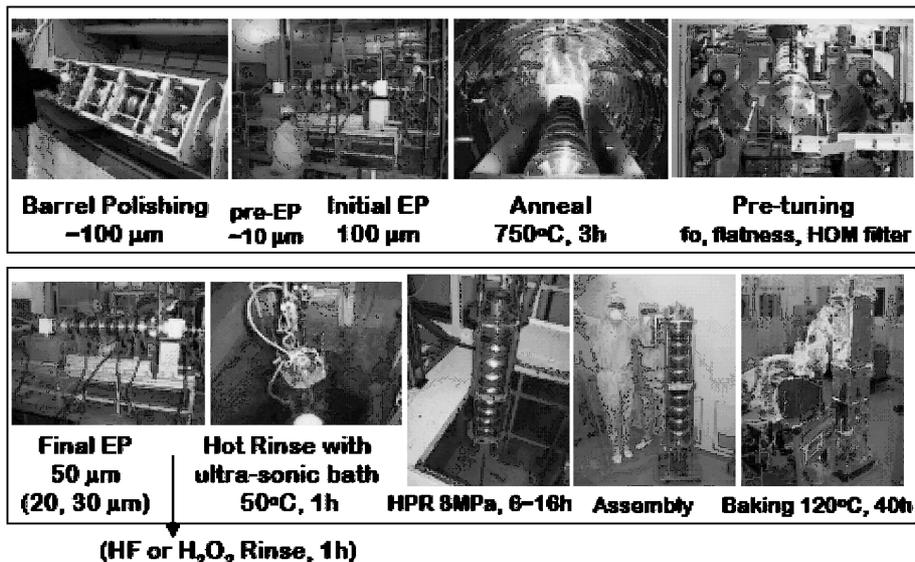


図5 空洞の表面処理工程（標準的には、遠心バレル研磨→初回多量電解研磨→真空熱処理→加速電界平坦度・周波数調整→最終少量電解研磨→温水超音波超純水洗浄→高圧水洗→クリーンルーム内組立て→真空排気→ベーキング）

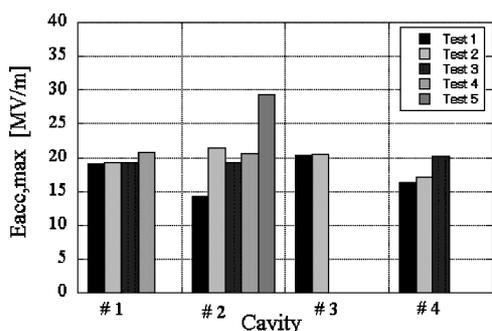


図6 4空洞について14回の測定結果のまとめ（1回のたて測定において、毎回電解研磨を含む表面処理工程が行われ、最終的に到達した最大加速電界のみを1回の測定結果として表示する）

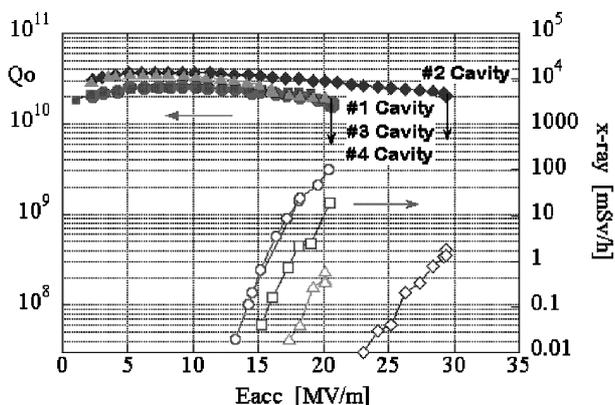


図7 4空洞の最終測定における高電界性能（加速電界と Q_0 値の関係（中塗り）および加速電界とX線放射量との関係（白抜き））

個の温度計による発熱箇所の同定から、9個の各セルについて、到達可能な加速電界が調べられた。その結果、最大加速電界が20 MV/m付近で制限されている3空洞においては、クエンチの原因となる異常発熱が赤道部付近で観測され、9個のセルのうちクエンチを引き起こしている1セルのみが20 MV/mで、その他のセルについては30 MV/m程度まで到達可能であり、最も低い到達加速電界をもつその1セルのみが、9セル空洞の高電界性能を20 MV/mに制限していることが分かった。これらの一連の実験結果から、空洞製作時の電子ビーム溶接による赤道部の接合工程での品質管理を強化することが重要であり、より滑らかな溶接ビード面を安定に得るための溶接手法の改良と作業環境の清浄化が、次の空洞製作時における性能向上を行うための必要不可欠な改善点であることが認識された⁶⁾。

4. クライオモジュールへの空洞組立て (STF-0.5)

空洞単体での性能試験を終えた空洞は、再び企業へ輸送され、図8に示されるように、磁気シールドを外側に装着したニオブ製空洞が、チタン製ヘリウム槽ジャケット内部に挿入され、TIG溶接により空洞側ジャケット端板部とジャケット円筒部が接合される。

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は、2006年秋に行われた。ヘリウム槽ジャケットを装着した空洞は外面を超純水で洗浄した後、クラス10のクリーン

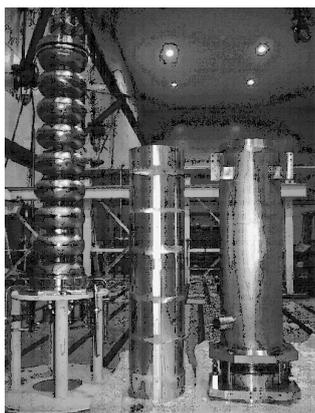


図8 左：ニオブ製9セル空洞，中：磁気シールド，右：チタン製ヘリウム槽ジャケット



図9 クリーンルーム内での入力結合器の取付け

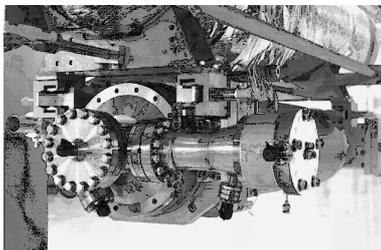


図10 He ガス回収配管に吊り下げられた空洞

ルーム内に運び込まれ，図9に示すように，空洞に入力結合器の取付けが行われ，ビームチューブにはゲート弁が取り付けられた．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10に示すようにヘリウムガス回収配管へ吊り下げられた．その後，5 Kシールドや80 Kシールドおよび各接続配管，各種温度計や高周波ケーブルなどの計測系配線が組み込まれたコールドマス全体が，特殊な挿入治具を用いてクライオモジュール内へ収納された．図11には，STFトンネル内に設置され，バルブボックスとの接続が終了し，冷却準備が完了したクライオモジュールを示す．

入力結合器は，超純水による洗浄，クリーンルーム

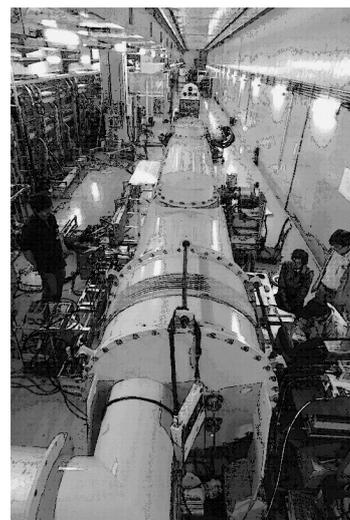


図11 STFトンネル内に設置されたクライオモジュール

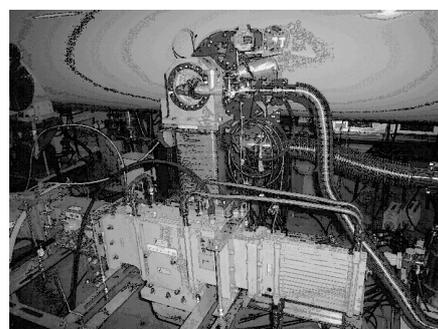


図12 大電力高周波系に接続された入力結合器

内での組み立て後，まずテストスタンドにおいて整合条件下で1 MW（パルス幅1.5ミリ秒，繰り返し5 Hz）までのエージングを50時間程度で行った後で，図9に示されるように空洞に取り付けられる．クライオモジュールに組み込まれた入力結合器は，空洞の冷却前に室温において，全反射条件でエージングを行っておくことが重要である．図12に示すように大電力高周波系導波管に接続して，250 kW（パルス幅1.5ミリ秒，繰り返し5 Hz）まで，約20時間程度かけてエージングが行われた²⁾．

5. 低電力高周波試験

約1週間かけて室温から4.2 Kまで冷却された空洞は，ヘリウム槽ジャケットに充填されている液体ヘリウムを真空排気ポンプで減圧することにより2 Kまで冷却される．クライオモジュールの冷却後，2 Kでの定常状態における空洞近辺の温度分布を図13に示す．冷却後には，まず低電力での高周波試験が行われ，負荷Q値および各種外部Q値の測定，スライド

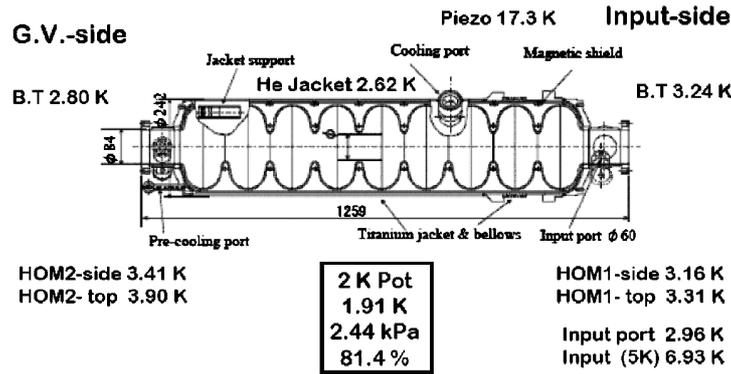


図13 2 K 冷却時における空洞近辺の温度分布（超流動液体ヘリウムの蒸気圧を 2.44 kPa で圧力制御しているとき、液体ヘリウム温度すなわち空洞セル部分は 1.9 K に、HOM カップラーなどヘリウム槽外部のニオブ部分は 3～4 K で超伝導状態に維持されている）

表 1 各アンテナの外部 Q 値の測定結果

入力結合器	1.2×10^6
モニター結合器	2.7×10^{11}
高調波モード結合器 1	4.6×10^{10}
高調波モード結合器 2	7.5×10^{13}

ジャッキチューナーおよびピエゾチューナーの動作試験，高調波モード特性の測定などが行われた。

5.1 負荷 Q 値および外部 Q 値

加速モードの負荷 Q 値は，ネットワークアナライザを用いてモニター出力電力の半値幅の測定から，また，50 W アンプおよびクライストロンを用いてモニター出力電力の減衰時間の測定からそれぞれ求められ，誤差 5 % の範囲内で 1.15×10^6 であった．この値を用いて，各アンテナの加速モードについての外部 Q 値の較正が行われ，その結果を表 1 にまとめる．入力結合器の外部 Q 値の設計値は 2.0×10^6 であるが，測定値では設計値の 60 % 程度にまで低下していたため，設計計算誤差と製作誤差を十分考慮した再検討が，次期設計時には必要である．

5.2 チューナーの周波数特性

空洞の共振周波数は，室温から 4.2 K への冷却による熱収縮により約 2 MHz 上昇し，さらに，4.2 K から 2 K まで減圧することによる圧力変化により約 350 kHz 低下する．また，実際にはより安定なパルス運転を行うために，1～2 kN 程度のテンション（+300～600 kHz の周波数変化に相当）を加えた状態での運転が行われる．これらを考慮して，室温時に空洞周波数の調整が行われるが，2 K 冷却時の空洞周波数を運転周波数に一致させるには，周波数調整機構が必ず必要である．この超伝導空洞システムでは，機械的に空

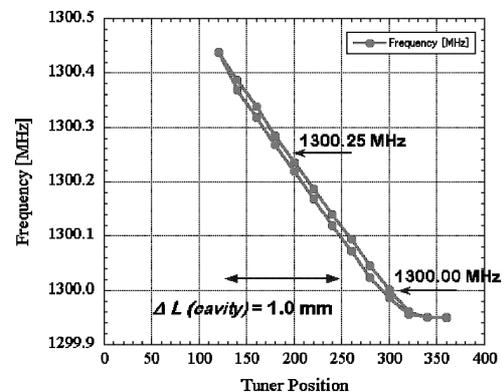


図14 スライドジャッキチューナーの周波数特性（チューナー位置と空洞共振周波数との関係．空洞全長の変化量 1 mm が，図中に示されている）

洞全長を伸縮させるチューナーとして，図 4 に示すスライドジャッキチューナーが開発された．その周波数特性の測定結果を図 14 に示す．空洞の全長変化 1 mm に対する周波数感度は，280 kHz であり，ストロークとして 3 mm 程度，すなわち約 900 kHz の周波数可変範囲を有している．ドライブシャフトを駆動するステッピングモーターは，故障時の交換の利便性から真空槽外部に設置されているため，駆動トルク不足が判明したときに，モーターの交換を簡便に行うことが可能であった．

2 K で，チューナーによる拘束力がない状態での空洞周波数は 1299.95 MHz であり，目標値の 1299.7 MHz より 250 kHz だけ高かった．大電力試験は，1300.00 MHz の運転周波数で行うつもりであったが，実際の空洞運転時を想定して，空洞に 1 kN 程度のテンションを加えた状態とするために，大電力高周波源の運転周波数を 1300.25 MHz に設定した．この周波数の修正は，室温での設定周波数の調整時に他の

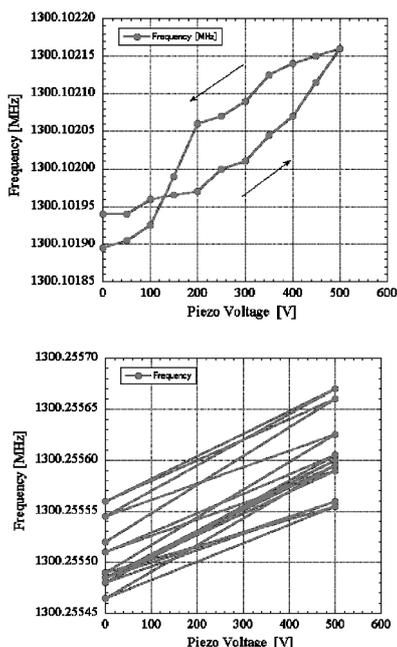


図15 ピエゾチューナーのストローク特性（ピエゾに0～+500 Vの定常電圧を印加したときの周波数変化のヒステリシスを示す。上図は1ストロークでの周波数変化が約250 Hzであり、下図は10回の繰り返しによる周波数変化の再現性のばらつきを示す）

3 空洞について、反映させた。

5.3 ピエゾチューナーの動作特性

超伝導空洞の高電界でのパルス運転においては、空洞内表面の電磁界応力によって空洞変形が引き起こされ、その結果、空洞共振周波数のずれ（ローレンツ・デチューニング）がパルス毎に発生する。これを抑制するために高剛性の空洞設計が行われ、また、このローレンツ・デチューニングを補償するために、印加パルス電圧により高速駆動するピエゾチューナーが用いられる。ここで必要とされるピエゾ素子は、最大荷重5 kN、低温でのストロークは4ミクロン程度（周波数変化で約1100 Hz）が要求される。この超伝導空洞システムに用いられた高電圧タイプ（最大許容電圧1000 V）のピエゾチューナーの動作特性が図15に示され、500 V印加時における周波数変化は250 Hzであった。また、ピエゾへの1パルスでの応答特性が図16に示されており、ドライブパルスの入力からの空洞位相変化への応答遅延時間は約0.7ミリ秒であり、パルス後には位相振動波形が観測される。

5.4 高調波モード結合器の結合特性

高調波モード結合器は、空洞内を通過するビームによって誘起される有害な高調波モードを空洞外部に取り出すために用いられ、電界と磁界の両方で結合でき

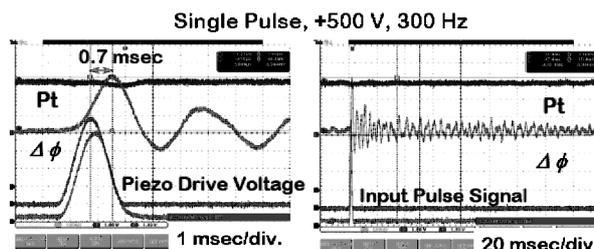


図16 ピエゾチューナーのパルス応答シグナル（上から、モニター結合器からの出力電力、入出力高周波間の位相差、パルス入力波形、ピエゾドライブ波形を示し、縦軸は任意電圧である。左図は時間幅1ミリ秒、右図は時間幅20ミリ秒であり、5 Hz 運転時には次のパルスがくるまでに位相振動は十分に減衰している）

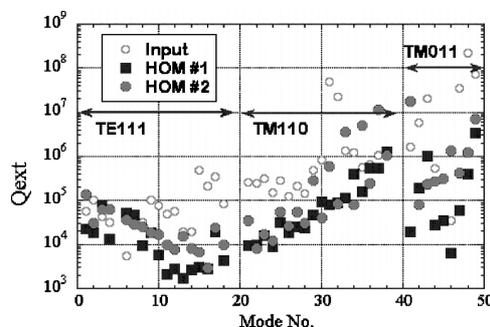


図17 高調波モードの外部Q値（高調波モード結合器1、高調波モード結合器2および入力結合器の3ポートを用いた入出力測定から得られた結果を示す。横軸は、1から18番目は2極TE111モード、21から38番目は2極TM110モード、41から49番目は単極TM011モードを示す）

る形状のニオブ製ループ型アンテナである。高調波モードのみでなく加速モードとも結合を持つため、加速モードが外部に出力されないようにノッチフィルタを有した広帯域特性をもっている。測定された高調波モードの外部Q値の結果を図17に示す。ビーム不安定性を引き起こさないようにするためには、 10^5 以下の十分な結合が要求されるが、単極モードのTM011の中には、外部Q値が 10^5 以上の高いモードが存在しており、改善を必要とすることが分かった。これは、加速モードとの結合を抑制するために、アンテナのループ方向を加速モードの磁界方向と平行にしているためであり、これを僅かにずらすことで、TM011モードとの結合が強くなり 10^5 以下に抑制することができると思われる。

6. 大電力高周波試験

低電力での高周波試験において、超伝導空洞システ

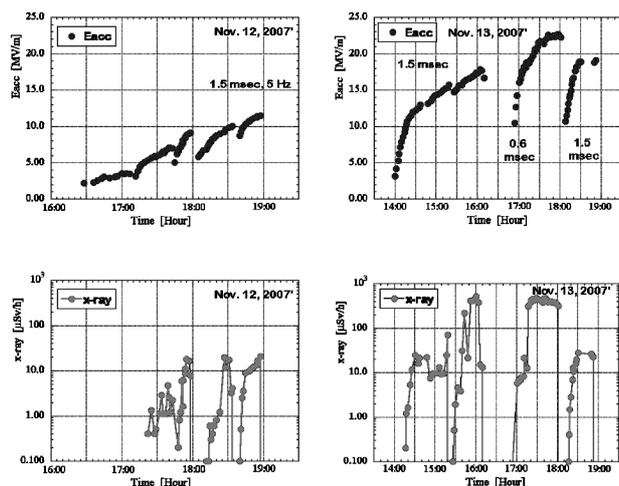


図18 空洞エージング時における加速電界（上）と X 線放射量（下）の時間変化

ムの各構成要素の性能確認が行われた後、大電力での高周波試験として、高電界発生実験が行われる。ここでは、空洞のエージングを経て、高電界での安定なパルス運転の確認、高電界での無負荷 Q 値の測定、ピエゾチューナーによるローレンツ・デチューニングの補償実験、機械振動モードの測定などが行われた。

6.1 空洞のエージング

超伝導空洞への大電力高周波の投入は、パルス幅 1.5 ミリ秒、繰り返し 5 Hz の定格パルス運転で、入射高周波電力を低電力からゆっくりと上げ、X 線放射量を観測しながら、空洞の加速電界を徐々に高くしていく。2 日間の空洞エージング時における加速電界と X 線放射量の時間変化の様子を図 18 に示す。加速電界が 5 MV/m に達したときから X 線が検出され、加速電界の上昇とともに X 線放射量が著しく増減して、次第にプロセスされていく様子が見られる。このとき、2 つの高調波結合器の 4 箇所に取り付けてある温度計で、マルチパッキング現象に起因する発熱が観測された。しかし、高調波結合器でのマルチパッキング現象は、経験的にプロセスにより容易に消滅することができ、そのレベルを一度通過すれば、再び発生することはない。最終的に、この RF プロセスにより 14 MV/m 以下では、X 線が検出されなくなったが、さらに加速電界を上げていくと、18 MV/m に達したときに X 線放射量は 700 μ Sv/h 程度まで増加し、最初のクエンチが起こった。その後、パルス幅を 0.6 ミリ秒に短くして、ショートパルスでの空洞エージングを行った結果、加速電界は 23 MV/m まで到達した。さらに再び、パルス幅を 1.5 ミリ秒に戻したときには、ショートパルスでのエージング効果により、

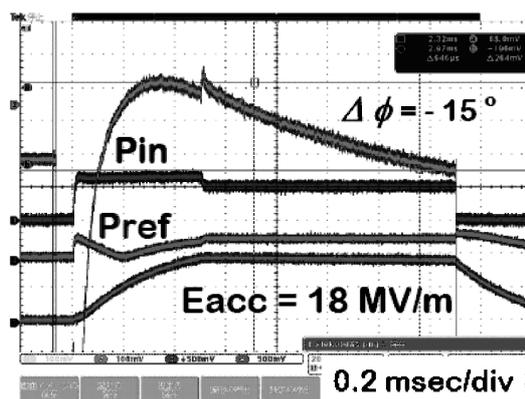


図19 18 MV/m で 1.5 ミリ秒・5 Hz 運転時におけるパルス波形（上から、空洞入力電力の位相差変化、入射高周波電力、反射高周波電力、加速電界を示す。縦軸は任意電圧であり、横軸は時間幅 0.2 ミリ秒である）

最大加速電界 19 MV/m での X 線放射量は 30 μ Sv/h 程度まで激減した。

6.2 高電界でのパルス運転

加速電界 18 MV/m で、パルス幅 1.5 ミリ秒、繰り返し 5 Hz の定格パルス運転を安定に行っているときの典型的なパルス波形を図 19 に示す。このときの入射電力 (Pin) は 140 kW であり、パルスの立ち上がりから 0.5 ミリ秒後に加速電界を一定にするために、入射電力を 100 kW (約 70%) に低下させるステップ型パルス波形を用いている。加速電界 (Eacc) は、ビーム加速を想定する 0.5 ミリ秒後から 1.5 ミリ秒まで平坦な波形のようにみえるが、実際には、電磁界応力による空洞変形でローレンツ・デチューニングが起こっており、空洞入出力電力の位相差 ($\Delta\phi$) によって観測されるようにパルスの終端では、高周波源の励振周波数と空洞の共振周波数との間に位相差で -15° のずれ (周波数で約 -140 Hz のずれ) を発生している。この周波数のずれをピエゾチューナーを用いることにより、パルス毎に補正する必要があり、後述するように、このクライオモジュール試験での重要な実験項目のひとつである。

パルス幅 1.5 ミリ秒、繰り返し 5 Hz の定格パルス運転において、19 MV/m の加速電界での安定な連続運転が確認された。また、最大加速電界は、19.3 MV/m でクエンチにより制限されることが分かった。その後、図 20 に示されるように、異なるパルス幅での運転が行われ、各パルス幅での到達できる最大加速電界が確認された。パルス幅 0.6 ミリ秒では 23.4 MV/m、0.9 ミリ秒では 22. MV/m、1.2 ミリ秒では 20.2 MV/m の最大加速電界が達成され、パルス幅を長く

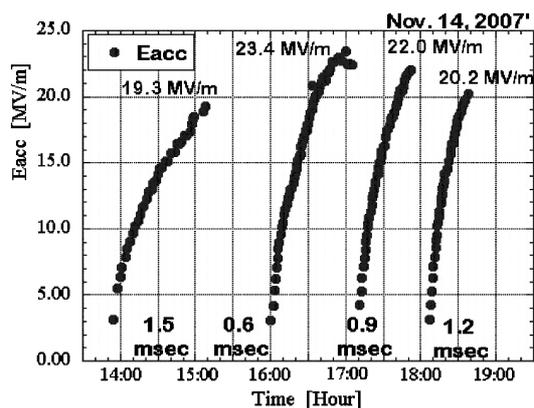


図20 異なるパルス幅での運転時における達成された最大加速電界 (横軸は、時間)

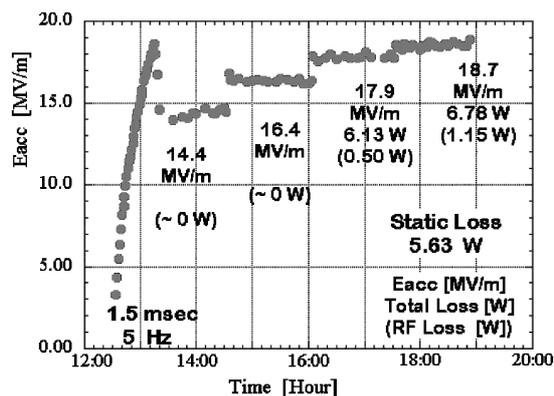


図22 He ガスの蒸発量による熱損失の測定 (横軸は時間, 縦軸は加速電界であり, 蒸発 He ガス流量から測定された全熱負荷と高周波損失による熱負荷が表示されている)

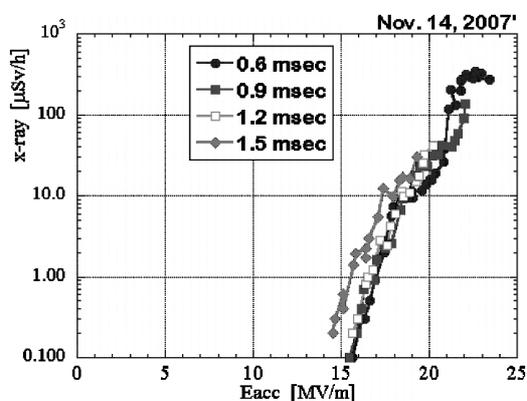


図21 異なるパルス幅での運転時における加速電界 (横軸, MV/m) と X 線放射量 (縦軸, $\mu\text{Sv/h}$) の関係

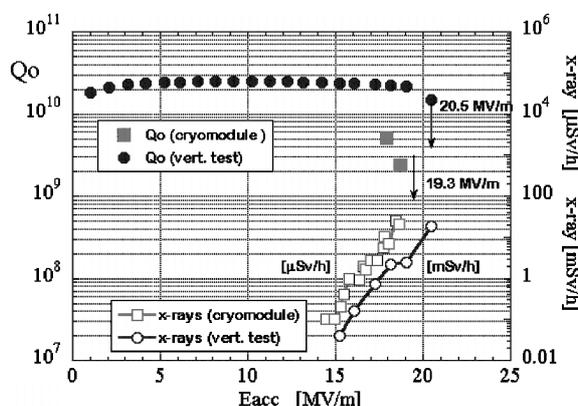


図23 たて測定およびクライオモジュール試験での加速電界と Q_0 値および X 線放射量の関係 (横軸は加速電界, 縦軸左は Q_0 値, 縦軸右は X 線放射量を示す. たて測定 (●と○) とクライオモジュール試験 (■と□) での結果を示す)

するにつれて徐々に低下している. したがって, 空洞内表面の発熱部分への熱入力量によって, 到達できる最大加速電界が制限されていると思われる. 図 21 に示されている加速電界と X 線放射量の関係から, 発熱部分への熱入力は電界放出電子の空洞表面への衝突によって発生している可能性もある.

6.3 無負荷 Q 値の測定

クライオモジュール内の超伝導空洞の無負荷 Q 値は, 高加速電界でのパルス運転時の空洞内表面の高周波損失により発生する熱負荷を, 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求められる. 図 22 は, He ガスの蒸発量による熱損失の測定結果を示している. 高周波損失のない状態での静的熱負荷 (外部からの侵入熱負荷) は 5.63 W であり, 18.7 MV/m の加速電界でのパルス運転時の高周波損失による動的熱負荷 (全熱負荷から静的熱負荷を引いた差) は

1.15 W であった. この結果から, 18.7 MV/m での空洞の無負荷 Q 値を計算することができ, たて測定の結果とともに図 23 に示されている. 達成された最大加速電界は両者は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, 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. また, 16.4 MV/m 以下の加速電界では, 動的熱負荷と静的熱負荷との差が測定精度以下となり, 正しい無負荷 Q 値を算定することが困難である.

6.4 空洞周波数のプリ・デチューニング

パルス内で加速電界が平坦となる部分での空洞の共振周波数は, 高周波源の励振周波数に較べて周波数が下がる方向に, 時間とともに徐々にずれていき, 図

19 のパルス波形で示されるように、パルスの終端では約 -15° のずれ（周波数で約 -140 Hz のずれ）を生ずる。したがって、空洞の共振周波数をあらかじめ高周波源の励振周波数からずれる周波数分だけ高く設定（プリ・デチューニング、あるいは、オフセット・デチューニングという）すれば、加速電界の平坦部でのデチューニング量をある程度に抑制することが可能である。空洞の共振周波数を一定にして、高周波源の励振周波数をパラメーターとして変化させた場合におけるプリ・デチューニングの実験結果が図 24 に示されており、デチューニング量を軽減する効果が確認された。

6.5 ピエゾチューナーによる補償実験

ピエゾチューナーを用いてローレンツ・デチューニングを有効に補償するためには、ピエゾに印加するパルス電圧を最適化する必要があり、パルスのタイミング、パルスの周波数、パルスの振幅、パルスの波形などが重要なパラメーターである。コサイン波の位相 π を始点 (0 V) として、 2π で最大振幅となるようなパルス波形を利用して、ピエゾに変形を与える。また、

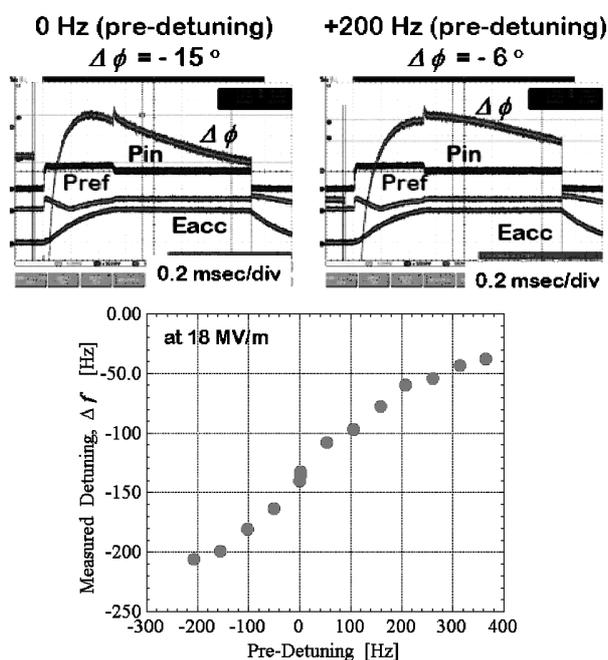


図24 運転周波数のプリ・デチューニングによるデチューニング量の抑制効果（上図のパルス波形は図 19 の脚注と同じ、左図はプリ・デチューニングなしでのパルス波形でデチューニングの位相差は -15° 、右図は $+200$ Hz のプリ・デチューニングを行ったときに位相差は -6° にまで抑制された。下図は、加速電界 18 MV/m でのプリ・デチューニング周波数（横軸）と観測されたデチューニング周波数（縦軸）との関係を示す）

低電力での動作試験で得られたピエゾ駆動パルス入力から空洞位相変化への応答遅延時間を考慮して、RF パルス以前に印加すべきピエゾ駆動パルスのタイミングが決められた。加速電界 18 MV/m におけるピエゾチューナーによるローレンツ・デチューニングの補償実験の成功例を、図 25 に示す。RF パルスより 0.7 ミリ秒前に、周波数 300 Hz、振幅 500 V のピエゾ駆動パルスを入力した場合には、観測された空洞入力電力の位相差 $\Delta\phi$ （デチューニング量）が OFF 時の -15° からほとんど平坦になるまで補償することが可能であった。また、前章で説明したプリ・デチューニングとの併用を行えば、より低いパルス電圧（振幅）での補償が可能であるため、ピエゾ素子本体の負荷を軽減することができる。

6.6 機械振動モードの測定

5 Hz でのパルス運転時の機械振動モードの測定結

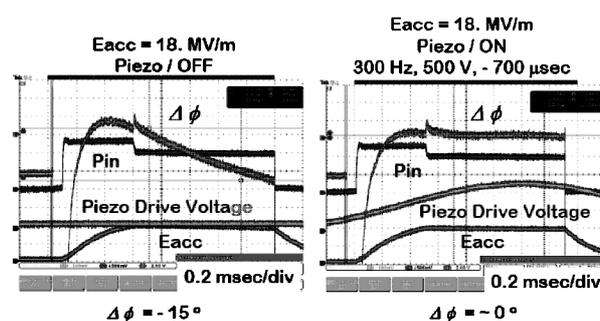


図25 18 MV/m で 5 Hz 運転時におけるピエゾチューナー OFF 時（左）と ON 時（右）のパルス波形（上から、空洞入力電力の位相差変化、入射高周波電力、ピエゾドライブ電圧、加速電界を示す。縦軸は任意電圧であり、横軸は時間幅 0.2 ミリ秒である）

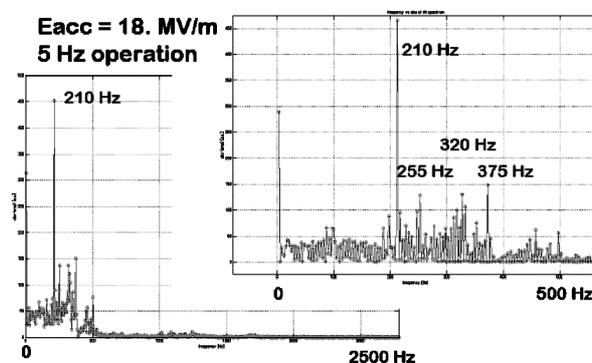


図26 加速電界 18 MV/m で、 5 Hz パルス運転時の機械振動モードの測定結果（縦軸は任意強度、横軸は振動モードの周波数を示し、右上は $0 \sim 500$ Hz 部分の拡大図である）

果を図 26 に示す. ピエゾ素子を空洞の機械振動のセンサーとして用いて, その出力電圧シグナルを FFT 解析した結果である. 図において 210 Hz にピークがみられるのは, 空洞全体がビーム軸方向に振動する 1 次のモードと考えられ, その計算モデルの結果と一致する周波数である. また, 高次の振動モードが 255 Hz, 320 Hz, 375 Hz にもみられるが, 500 Hz 以上の高い周波数成分には顕著な振動モードが観測されなかった.

7. 4 空洞連結による組み立て (STF-1.0)

1 空洞による大電力試験終了後, クライオモジュールはすみやかに室温にまで加温され, トンネルから地上部に移動して, 解体作業が行われた. 取り出された 1 空洞は待機状態にあった他の 3 空洞とともに, 図 27 に示すようにクリーンルーム内で, 入力結合器の取付けおよび 4 空洞の連結作業が行われ, その後, 4 連化された空洞は He ガス回収配管へ吊下げられた.

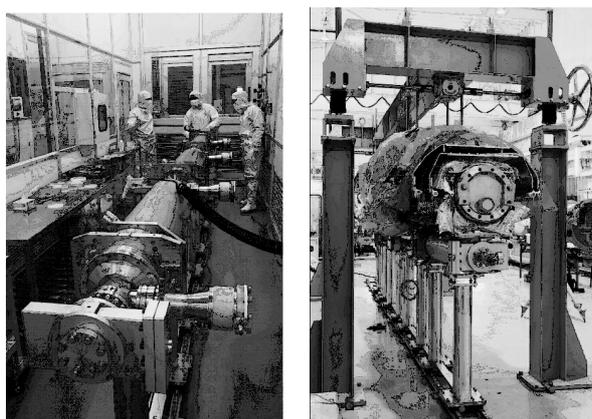


図 27 左: クリーンルーム内の 4 空洞連結作業, 右: He ガス回収配管への吊下げ作業

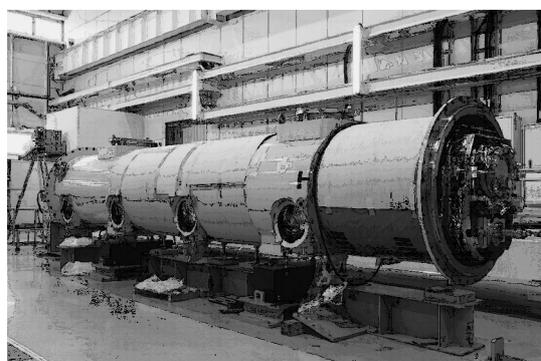


図 28 TESLA-like STF ベースライン超伝導空洞 4 台の組み込みが完了したクライオモジュール

4 空洞を収納したクライオモジュール (図 28) は, 2008 年 3 月に完成し, 4 月にトンネルに設置され, 5 月末より冷却がすでに開始しており, 今後 4~5 ヶ月間かけて, 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 が遂行される.

8. ま と め

このクライオモジュール試験において, たて測定からの著しい空洞性能の低下は見られず, 加速電界 19 MV/m での定格パルス運転を長時間, 安定に行うことが確認された. また, この加速電界での Piezo チューナーによるローレンツ・デチューニングの補償制御に成功し, 超伝導空洞システム全体としての機能が十分に発揮されていることが実証された. 次に予定されている 4 空洞でのクライオモジュール試験においては, より高い加速電界での運転が可能である空洞が含まれており, ILC 仕様 (運転加速電界, 31.5 MV/m) により近い運転実績が得られる予定である.

謝辞

STF での超伝導空洞のクライオモジュール試験を行うにあたり, クライオモジュールグループの土屋清澄および大内徳人の両氏, 低温グループの細山謙二, 仲井浩孝, 小島裕二, 原和文, 中西功太の各氏, 大電力高周波源グループの福田茂, 明本光生, 竹中たてる, 松下英樹の各氏, 低電力高周波制御グループの道園真一郎および松本利広の両氏, 各担当者皆様の多大なるご協力を得ました. この紙面をお借りして, 改めて感謝致します.

参考文献

- 1) 野口修一 他, 「STF ベースライン超伝導システムの開発」, 第 3 回加速器学会プロシーディング, 仙台, p. 133 (2006).
- 2) 加古永治 他, 「STF ベースライン超伝導用大電力高周波入力結合器」, 第 3 回加速器学会プロシーディング, 仙台, p. 136 (2006).
- 3) 渡辺 謙 他, 「ILC ベースラインのための超伝導空洞の高調波モードに関する研究」, 第 3 回加速器学会プロシーディング, 仙台, p. 877 (2006).
- 4) S. Noguchi, “Review of New Tuner Designs”, SRF '07, Peking University, Beijing, China, WE303 (2007).
- 5) K. Sennyu, *et al.*, “Design and Fabrication of Superconducting Cavities for STF”, PAC '07, Albuquerque, NM, USA, p. 2674 (2007).
- 6) E. Kako, *et al.*, “Vertical Test Results on the STF Base-line 9-cell Cavities at KEK”, SRF '07, Peking University, Beijing, China, WEP10 (2007).