

解 説

超伝導加速空洞試験設備 (STF) における
クライオモジュール冷却試験

大内 徳人*¹・仲井 浩孝*²・小島 裕二*²・近藤 良也*²・土屋 清澄*²・寺島 昭男*²
中西 功太*²・原 和文*²・東 憲男*²・久松 広美*²・細山 謙二*²

Cooling tests of the cryomodules at superconducting RF test facility (STF)

Norihito OHUCHI*¹, Hiroataka NAKAI*², Yuuji KOJIMA*², Yoshinari KONDOU*²,
Kiyosumi TSUCHIYA*², Akio TERASHIMA*², Kota NAKANISHI*², Kazufumi HARA*²,
Norio HIGASHI*², Hiromi HISAMATSU*² and Kenji HOSOYAMA*²

Abstract

KEK has been constructing the Superconducting RF Test Facility (STF) with aiming at a center of the ILC-R&D in Asia from 2005. In this project, KEK targets manufacturing and operational experiences of the RF cavity and cryomodule toward the ILC, and two cryomodules have been developed. These cryomodules are 6 meter long and have 4 nine-cell cavities in each cryostat. The designs of the cryomodules are based on the TESLA Type-3 (TTF-3) at DESY, however, each cryostat has the different type of cavities, TESLA-like type and Low-Loss type. The tests of the cryomodules were performed in two steps. In the first test, measurements of the cryogenic performances of these cryomodules were the main objective. One nine-cell cavity was assembled in each cryomodule and cool-down of the two cryomodules was performed, individually. In the second test, the four TESLA-like cavities were assembled in the cryomodule as complete integration. Cool-down of the cryomodule to 2 K was successfully completed, and thermal performances of the cryomodule and cooling capacity of the cryogenics system were studied in detail. In this paper, we will report the design of the cryomodules and the thermal performances at these cold tests.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構は、アジアに於ける線形衝突型加速器用 (International Linear Collider: ILC) 超伝導加速空洞システム開発のセンターを目指して、超伝導加速空洞試験設備 (STF) の建設と 9 セル空洞 4 台を収納する長さ 6 m のクライオモジュールの開発を行ってきた¹⁻⁴⁾。STF の建設及びクライオモジュールの設計は 2005 年より開始され、2006 年 11 月よりクライオモジュールの組立を行い、2007 年 10 月には 9 セル空洞 1 台を組み込んだ状態で冷却試験を完了した。現在、4 台の超伝導空洞をクライオモジュールに組み込み冷却試験を行っている。本報告では、このクライオモジュールの熱的及び機械的な設計を述べ、低温試験で得ることが出来た 2 K 冷却クライオモジュールの熱特性について報告を行う。

2. STF クライオモジュールの設計

2.1 システム設計

クライオモジュールのパラメータ及び断面形状を表 1 と図 1 に示してある。クライオモジュールの熱設計及び機械設計はドイツ DESY 研究所で開発された TTF-3 クライオモジュール⁵⁾を基本として行われた。KEK では、このクライオモジュールの組立、空洞アライメント及び冷却に関する技術の習得、更に図 2 に示すように KEK で開発してきた 2 種類の超伝導空洞 (TESLA-like cavity と Low-Loss cavity) が試験できるように、各クライオモジュール (Module-A, Module-B) に 4 台の超伝導空洞を収納し全体として 8 台の超伝導空洞を冷却運転できるシステムの開発を行ってきた。

*¹ KEK, 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: norihito.ohuchi@kek.jp)

*² KEK, 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization

2.2 機械設計

加速器空洞は外径240 mm 長さ 1070 mm のヘリウム容器 (TESLA-like 空洞) に組込まれる。超伝導空

表1 STF クライオモジュール設計パラメータ

| | Module-A | Module-B |
|-----------------------|------------|----------|
| 超伝導空洞タイプ | TESLA-like | Low-Loss |
| 超伝導空洞個数 | 4 | 4 |
| 超伝導空洞ヘリウム容器外径 | 240 mm | 236 mm |
| ヘリウム容器フランジ間距離 | 1258.6 mm | 1272 mm |
| 真空容器長さ (SS400) | 5515 mm | 5950 mm |
| 真空容器外径 | 965.2 mm | 965.2 mm |
| ガス回収配管長さ (SUS316L) | 5832 mm | 5830 mm |
| 冷却重量, kg | | |
| 4 空洞 | 410 | 500 |
| ガス回収配管 | 515 | 520 |
| 5 K 熱輻射遮蔽板 (A1050) | 190 | 195 |
| 80 K 熱輻射遮蔽板 (A1050) | 220 | 225 |
| 2 K ヘリウム供給管 (SUS316L) | 50 | 50 |

洞を冷却する 2 K の超流動液体ヘリウムはヘリウム容器と空洞間に溜められ、1 台の超伝導空洞容器が保有する液体ヘリウムの体積は約 15.5 リットルである。図 1 に示すように、超伝導空洞容器は外径 318.5 mm 肉厚 10.3 mm のステンレス配管 (Gas Return Pipe) の下部に支持されている。このガス回収配管は約 300 mm の内径を持つが、これは現在 ILC で設計されている約 2.5 km 間隔で配置される冷却プラント間の配管を流れる蒸発ヘリウムガスの圧力損失を 3.0 mbar 以下に抑えるために設計された。また、このガス回収配管は超伝導空洞を機械的に支持する背骨の働きを持つ。現在設計が進んでいる ILC 用クライオモジュールでは、ガス回収配管の下に 9 台の超伝導空洞が取り付けられ、3 本のサポートポストで真空容器から支持される。STF クライオモジュールではガス回収配管は、クライオモジュールの長さが 6 m と ILC で計画されているモジュールの約半分の長さとなることから 2 本の G-FRP (Glass-Fiber Reinforced Plastic) 製のサポートポストで真空容器から支持されている。サポートポスト間の距離は、Module-A と Module-B に於いて各々 3153 mm と 3009 mm で、ガス回収配管及び空洞容器の重量によるたわみが 50 μm 以下になるように設計されている。

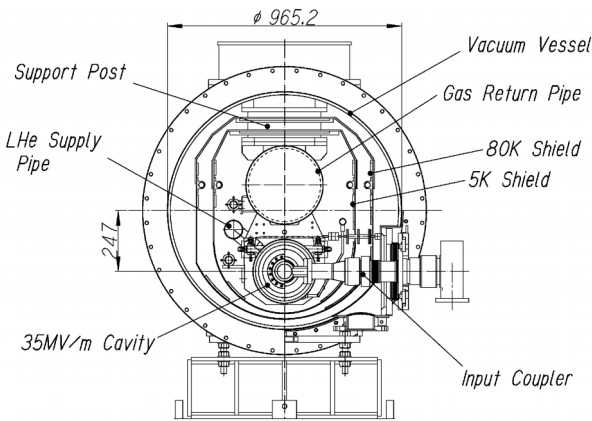


図1 TESLA-like 空洞を組込んだ STF クライオモジュール断面図

超伝導加速空洞には RF 電力を供給するための入力カップラーが取り付けられている。ここで問題となるのが、この様な長尺の構造体を冷却した場合の熱収縮である。入力カップラーの室温側は真空容器に固定され、低温側は 2 K に冷却されたビームパイプに接続されている。ガス回収配管は、室温からの冷却に伴い約 15 mm 熱収縮する。この長さの変化に伴ってヘリウム容器が変位した場合、室温部を真空容器に固定した入力カップラーを破損する危険性がある。この為、図 3 に示すように超伝導空洞ヘリウム容器支持部にスライド機構を持たせ、又空洞容器間の距離は長尺のインバルロッドで固定することにより熱収縮の影響を極力小さくしている。インバルロッドの熱収縮率は 0.04% であり、冷却による STF クライオモジュール

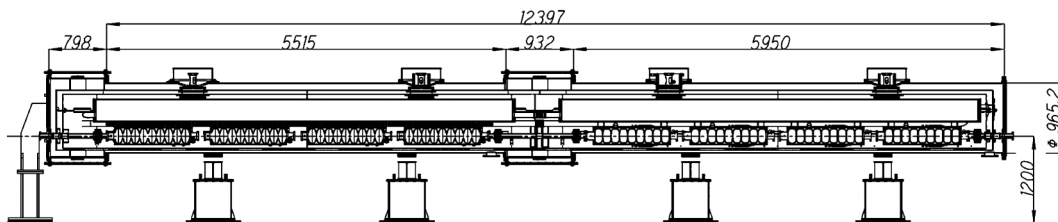


図2 クライオモジュール軸方向断面図 (Module-A は左側, Module-B は右側に相当する)

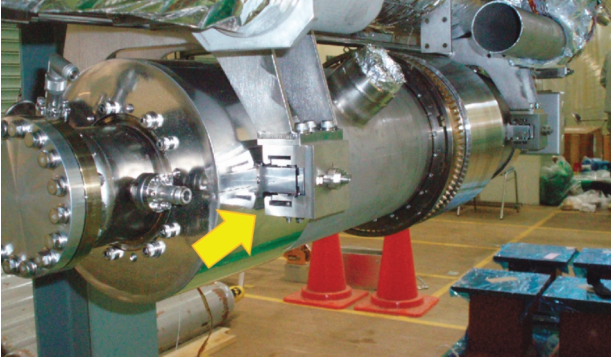


図3 Low-Loss 空洞ヘリウム容器とスライド支持機構 (空洞容器スライド支持機構は矢印で示してある)



図5 4台の TESLA-like 空洞が組込まれたクライオモジュール

表2 STF クライオモジュール1台の熱負荷 (計算値, W)

| | 2 K | 5 K | 80 K |
|--------------|------|------|------|
| 熱輻射 | ~0 | 1.69 | 30.1 |
| サポートポスト (2本) | 0.24 | 1.54 | 10.8 |
| ビームパイプ | 0.01 | 0.06 | 0.37 |
| 温度計信号線 | 0.08 | 0.55 | 0.42 |
| 合計 | 0.33 | 3.84 | 41.7 |

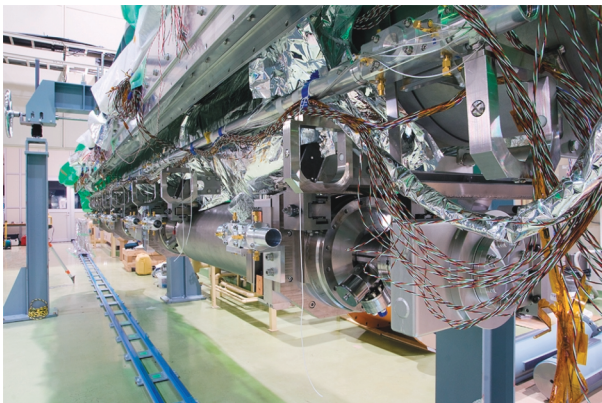


図4 ガス回収配管下に組まれた4台の TESLA-like 空洞

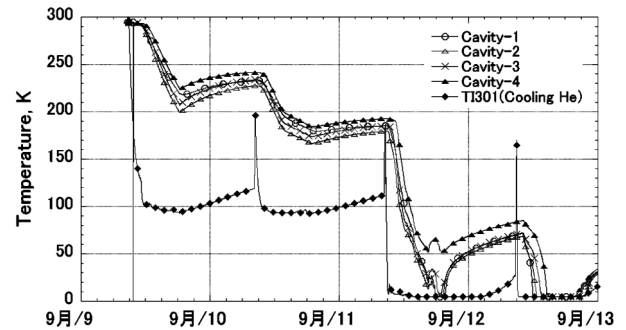


図6 超電導空洞冷却時の温度変化 (○: #1 空洞, △: #2 空洞, ×: #3 空洞, ▲: #4 空洞, ◆: 2 K コールドボックスでの空洞冷却ヘリウムガス温度)

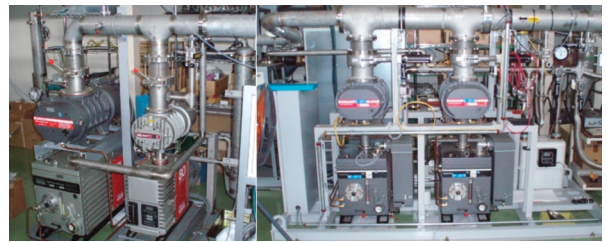


図7 2 K 冷却用減圧ポンプシステム

内での空洞容器の位置変化は 1.4 mm 以下に抑えられている。この熱収縮の影響はガス回収配管をサポートする G-FRP-ポストに対しても同じで、ガス回収配管をサポートする2本のポストのうち一方は真空容器に固定されているが、他方はスライド機構を持っている。サポートポスト間の距離は 3153 mm であるが、冷却中に測定されたサポートポストの移動量は 9.4 mm であった。

2.3 熱設計

超伝導加速空洞は、2 K の飽和蒸気圧超流動ヘリウム (設計圧力 3.2 kPa) で冷却され運転される。クラ

イオモジュール内に於いて 2 K の温度となるのは空洞ヘリウム容器、供給配管及びガス回収配管である。この 2 K 部分への侵入熱を低減するために、真空容器内に 80 K と 5 K の熱輻射遮蔽板を取付けている。又、室温部と 2 K 部を接続しているサポートポスト、入力カップラー及びビームパイプには熱輻射遮蔽板からサーマルアンカーを取っている。表2にクライオモジュール内コンポーネントの熱負荷 (計算値) を示す。熱輻射の計算では、室温から 80 K 遮蔽板への熱流量を 1.5 W/m², 80 K 遮蔽板から 5 K 遮蔽板へ

は 0.1 W/m^2 とした。ビームパイプからの侵入熱は、室温のクライオモジュール端板からの伝導による侵入熱である。又、この表には超伝導空洞の構成要素である周波数チューナ、入力カップラー及び RF ケーブルの熱負荷は示していないが、これらについては熱測定 の章で述べる。

3. クライオモジュールの冷却・加温

3.1 冷却

2007年10月～2008年3月にかけて、TESLA-like 空洞1台を組込んだクライオモジュール A と Low-loss 空洞を1台組込んだクライオモジュール B の冷却試験を行った。この初期試験に於いて、各超伝導空洞を 2 K まで冷却して RF 運転ができることを確認し、又今後行われる複数個の超伝導空洞が組込まれたクライオモジュールの試験の準備として 2 K システムの許容熱負荷量の測定を行った⁶⁾。この試験で、2 K 冷凍システムは 2 K で 30 W の負荷に対応できることを確認した。2008年5月からは、4台の TESLA-like 空洞をクライオモジュール A に組み込み冷却試験を行っている。図4、5に4台の超伝導空洞をガス回収配管に取付けた状態、及びコールドマスが真空容器に挿入された状態を示す。

図6に4台の空洞が組込まれたクライオモジュール A の室温からの冷却の様子を示す。図には4台の空洞のヘリウム容器温度と冷却ヘリウムガスの温度変化が示してある。

超伝導空洞の冷却は昼間のみ行われ、夜間は保冷状態とした。超伝導空洞の室温から 200 K まで冷却は 90 K のヘリウムガスを循環することにより行い、それ以下の温度には液体ヘリウムを直接用いて冷却した。90 K ヘリウムガスによる冷却では、4台の空洞を室温から 180 K まで冷却するのに循環ガス流量 1.7 g/s で 22 時間要した。又、その後4台の超伝導空洞を 4 K まで冷却し、空洞ヘリウム容器に液を溜め込むのに2日かかっている。この間の冷却に要した液体ヘリウムは約 1600 リットルである。2 K への冷却は、液体ヘリウムを減圧することにより行われた。図7に使用した減圧ポンプシステムを示す。減圧ポンプシステムは、4組のロータリーポンプとメカニカルブースターポンプで構成され、2 K の液体ヘリウムの飽和蒸気圧である 3 kPa では $1300 \text{ m}^3/\text{h}$ の排気能力を持つ。図8には、2 K 冷凍機内 2 K 液体ヘリウム槽の温度変化と圧力変化を示している。減圧ポンプを作動後、約2時間で液体ヘリウムの温度を 2 K 近くまで冷却している。2 K への冷却は、室温から 4 K までの冷

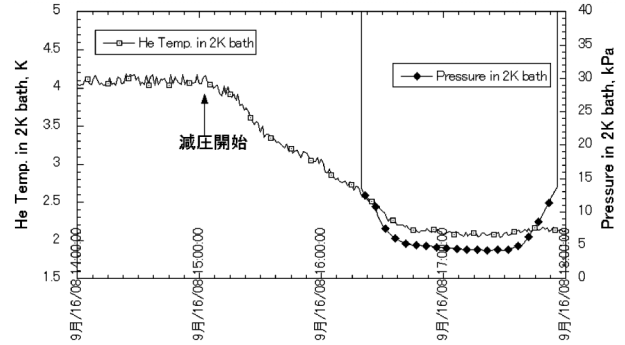


図8 4 K から 2 K への冷却 (◆ : 2 K コールドボックス内 2 K ヘリウム槽内ヘリウム圧力, □ : 2 K ヘリウム槽内ヘリウム液温度)

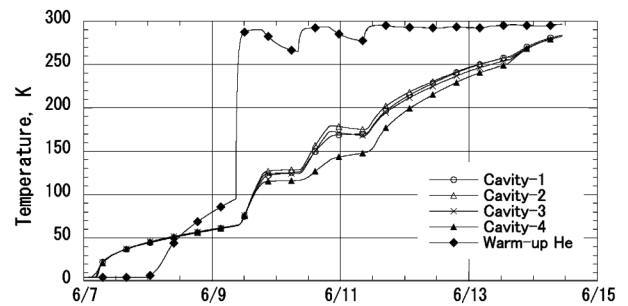


図9 超伝導空洞加温時の温度変化 (○ : #1 空洞, △ : #2 空洞, × : #3 空洞, ▲ : #4 空洞, ◆ : 2 K コールドボックスでの空洞加温ヘリウムガス温度)

却に引き続いて行われ、クライオモジュール内には完全に冷却されていない部分が残っていたために、圧力・温度共に定常状態になるには更に1日必要であった。図8に示すように、2 K 槽内の液体ヘリウムも 4.2 kPa まで減圧されているが、3 kPa 以下には下がっていない。定常運転時では、液体ヘリウムは温度 1.93 K, 圧力 2.87 kPa に制御された。

3.2 加温

4台の超伝導空洞を組込んだクライオモジュールの加温は2回行われた。図9には6月7日～6月15日にかけて行われた超伝導空洞加温時の温度変化を示してある。6月7日、8日の両日は室温からの熱負荷のみの自然加温により超伝導空洞を昇温している。6月9日、10日は室温のヘリウムガスを循環し、11日からは室温の窒素ガスをシステム内に流すことにより空洞を室温まで昇温した。循環ヘリウムガス量は約 1.0 g/秒 で、又空洞温度が 180 K 以上の時に流した室温の窒素ガス量は 9.2 g/秒 であった。

4. クライオモジュール熱負荷測定

超伝導空洞を 2 K に冷却した後、クライオモジ

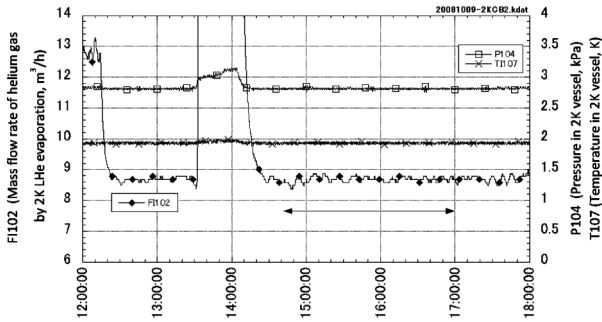


図10 2 K 部への熱負荷測定時の蒸発ガス量及び圧力・温度状態 (◆: 蒸発ヘリウムガス流量, □: 2 K 槽圧力, ×: 飽和蒸気圧液体ヘリウム温度)

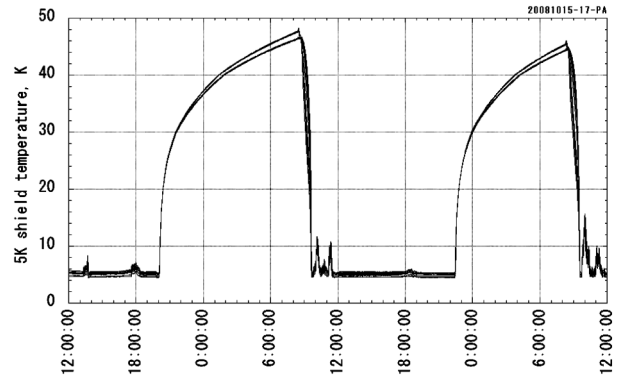


図11 5 K 熱輻射遮蔽板温度上昇 (遮蔽板に取り付けられた 12 か所の温度変化, 温度計は PtCo 抵抗温度計)

ジュール内の 2 K, 5 K 及び 80 K 部への定常熱負荷の測定を行った。以下, 4 台の空洞冷却時の熱負荷測定結果について述べる。

2 K 部への侵入熱の測定は, 液体ヘリウムの蒸発量を測定することにより行った。熱負荷測定時, 5 K 及び 80 K の熱輻射遮蔽板は十分に冷却されて安定な状態にあり, また入力カップラー及び周波数チューナなどの熱負荷源となるコンポーネントも十分に冷却されて温度変化はなかった。図 10 に熱負荷測定時の液体ヘリウムの蒸発量及び圧力・温度を示した。蒸発量の測定が行われたのは図中矢印で示された時間範囲である。この時の平均的な状態として, 温度 1.94 K, 圧力 2.81 kPa, 蒸発ガス流量 8.67 m³/h (0.40 g/s) であった。上記の圧力及び温度における液体ヘリウムの蒸発潜熱は 23.07 J/g⁷⁾であり, これらデータより 2 K 部への熱負荷は 9.2 W と計算される。この熱負荷は, 2 K 冷凍機及び 2 K 冷凍機とクライオモジュールを接続している配管部での熱負荷を含んでいる。2 K 冷凍機及び接続配管部での熱負荷は同様の方法で測定され, 各々 1.2 W と 3.1 W であることがわかっている。クライオモジュール単体での熱負荷は, 9.2 W からこれらの熱負荷を差し引いた 4.9 W であると考えられる。

5 K 及び 80 K 遮蔽板への熱負荷は, 熱輻射遮蔽板の冷却停止後の温度上昇を測定することにより求めた。図 11, 12 に各遮蔽板の温度上昇を示す。5 K 熱輻射遮蔽板への熱負荷測定は, 80 K 遮蔽板の冷却を行った状態で (他のコンポーネントの温度変化が無い状態で行った。5 K 遮蔽板の温度は 12 点測定され, 図 11 に示すように冷却停止後の温度変化の再現性は非常に良い。冷却停止後 30 分間の遮蔽板全体の平均温度上昇は, 初期温度が 6.7 K の場合 22.9 K となり, 遮蔽板全体の冷却重量が 190 kg であるので, 熱負荷を計算すると 8.2 W となる。

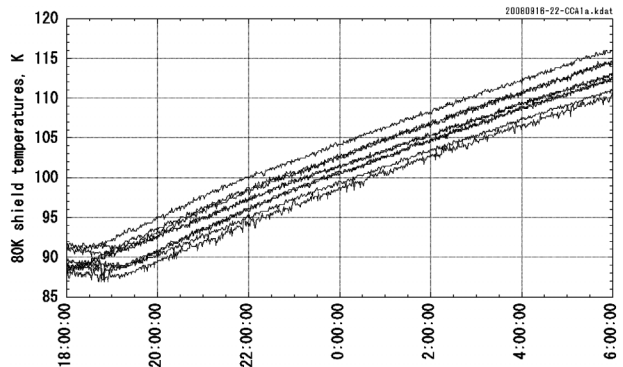


図12 80 K 熱輻射遮蔽板温度上昇 (遮蔽板に取り付けられた 12 か所の温度変化, 温度計は CC 熱電対温度計)

80 K の遮蔽板は熱容量が大きいため, 5 K 遮蔽板と比較して温度の上昇は緩慢である。この遮蔽板についても 12 点の温度測定を行い, 冷却停止後の 90 分間の温度上昇は初期温度が 89.45 K の場合 92.76 K であった。冷却重量が 220 kg であることから, この時の熱負荷を計算すると 64.9 W となる。

5. クライオモジュール内温度分布からの熱負荷の評価

前章で各温度レベルの包括的な熱負荷について報告した。これに対し, 測定したクライオモジュール内温度分布から各コンポーネントの熱侵入量を計算することができる。定常冷却時の温度分布を表 3 に示す。表 4 には, この温度分布から計算された各コンポーネントの熱負荷を示す。各温度レベルへのコンポーネント熱負荷の合計は, 液体ヘリウムの蒸発量及び遮蔽板の温度上昇から得られた熱負荷と比べて比較的良く一致している。

2 K への熱負荷について, サポートポストからの侵

表3 定常冷却時の各部の温度

| | |
|-----------------------|---------|
| 空洞冷却液体ヘリウム温度 | 1.94 K |
| 5 K 熱輻射遮蔽板 | 5.11 K |
| 80 K 熱輻射遮蔽板 | 85.4 K |
| 入力カップラー 80 K 温度アンカー位置 | 101.3 K |
| 入力カップラー 5 K 温度アンカー位置 | 12.7 K |
| サポートポスト 80 K 温度アンカー位置 | 85.4 K |
| サポートポスト 5 K 温度アンカー位置 | 5.15 K |
| ガス回収配管上面温度 | 3.82 K |
| ガス回収配管下面温度 | 2.02 K |

表4 4 空洞クライオモジュールの熱負荷 (計算値, W)

| | 2 K | 5 K | 80 K |
|------------|------------|------|------|
| RF ケーブル | 2.48 | 0 | 7.92 |
| Piezo ケーブル | 1.68 | 0 | 0 |
| 温度計信号線 | 0.08 | 0.55 | 0.42 |
| 入力カップラー | 0.17 | 5.98 | 6.56 |
| チューナシャフト | 0.48 | 0 | 0 |
| ビームパイプ | 0.01 | 0.14 | 0.70 |
| 熱輻射 | ~0 | 1.69 | 30.1 |
| サポートポスト | (0.24) | 1.54 | 10.8 |
| 合計 | 4.90(5.14) | 9.90 | 56.5 |

入熱を括弧付で示している。これはガス回収配管下面の温度が 2.02 K まで冷却されており、蒸発ガスの測定にはサポートポストからの侵入熱が殆ど影響しないことからこのような記述とした。合計値で括弧のない値はサポートポストからの侵入熱を含まない値である。蒸発ガスから計算した熱負荷と温度分布から計算したコンポーネントの熱負荷の合計は共に 4.9 W となり、各コンポーネントの侵入熱が正しく評価できたと考えられる。従って、2 K 部への熱負荷は RF ケーブル及び Piezo ケーブルを通じた伝導による侵入熱が全体の 80% を占めることになり、この侵入熱の低減が必要となる。この侵入熱低減はケーブルに適切なサーマルアンカーを取付けることにより達成できると考えられ、この検討・確認は、来年度実施予定のクライオモジュールの冷却試験で実験的に行う。

5 K への熱負荷では、入力カップラーからの熱負荷が大きい。これは表 3 に示すように、5 K 及び 80 K のサーマルアンカー部の温度が設計値より高く、RF

ケーブルと同様、入力カップラーについてもサーマルアンカーの再検討が必要である。

6. ま と め

高エネルギー加速器研究機構で開発を行っている ILC 用超伝導加速器空洞クライオモジュールを建設し、4 台の空洞を組み込んだクライオモジュールの 2 K までの冷却に成功した。熱負荷測定の結果より、2 K への熱負荷の大半が超伝導空洞に接続されたケーブル類からの侵入熱であることが確認され、サーマルアンカーの再検討が必要なことが判明した。今後、サーマルアンカーの詳細な検討・改造を行い、2009 年度に行うクライオモジュールの冷却試験で実験的にその性能確認を行う予定である。冷却システムについては、2 K で 30 W までの熱負荷に対応できることが確認できたが、システム全体としては改善すべき点も明らかになった。

これらの結果は今後のクライオモジュール設計及び冷却システムの高性能化に反映させ、より良い STF システムへと改造して行く予定である。

謝辞

本解説を纏めるにあたり、超伝導空洞グループの野口修一、加古永治、山本康史、宍戸寿朗、渡辺 謙、佐藤昌史、斎藤健二、東 保男、佐伯学行、古田史生、早野仁司の各氏、ILC-GDE-PM の山本明氏に協力を頂いたことを感謝致します。

参考文献

- 1) K. Tsuchiya, *et al.*, "Cryomodule Development for Superconducting RF Test Facility (STF) at KEK", EPAC'06, Edinburgh, pp. 505-507.
- 2) T. Semba, *et al.*, "Manufacture and Assembly of the 6 Meter-Long Cryomodules for Superconducting RF Test Facility (STF) at KEK", PAC '07, Albuquerque, pp. 2674-2676.
- 3) E. Kako, *et al.*, "Cryomodule Tests of the STF Baseline 9-cell Cavities at KEK", MOPP131, presented at EPAC '08, Genoa, Italy, June 23-27, 2008.
- 4) T. Saeki, *et al.*, "The First Measurement of Low-Loss 9-cell Cavity in a Cryomodule at STF", MOPP029, presented at EPAC '08, Genoa, Italy, June 23-27, 2008.
- 5) C. Pagani, *et al.*, "The TESLA Cryogenic Accelerator Modules", TESLA Report 2001-36.
- 6) S. Kanda, *et al.*, "First Test Results of ILC/STF Cryogenic System at KEK", MOPD014, presented at EPAC'08, Genoa, Italy, June 23-27, 2008.
- 7) HEPACK is a computer program for calculating the thermo-physical properties of helium of CRYODATA, INC.