

ILC 用超伝導加速空洞冷却試験

(2 K 冷凍システム)

○小島裕二^{A)}、大内徳人^{A)}、可部 農^{A)}、近藤良也^{A)}、仲井浩孝^{A)}、中西功太^{A)}、
原 和文^{A)}、細山謙二^{A)}、野口 雅人^{B)}、吉田 純^{C)}、兼清 貴之^{C)}、一谷 隆^{D)}、
金田 知士^{E)}、佐久間 重光^{E)}、鈴木 浩一^{E)}、夏見 善雄^{F)}、小林 静^{F)}

A) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

B)マエカワ C)日立プラントテクノロジー

D)日立テクノロジーアンドサービス E)大陽日酸 F)タチバナ

1 はじめに

高エネルギー加速器研究機構では国際リニアコライダー加速器 (ILC) の組織に参加しており本機構内の超伝導加速器研究棟 (STF 棟) で超伝導加速空洞を収納する ILC 用加速モジュールの設計、製作、試験運転をおこなっている。主に我々が担当する 2 K 冷凍システムはクライオモジュール (9セル×8 台収納) の半分のハーフモジュール (9セル×4 台収納) を 2 K まで冷却する為のシステムで 1) 既設ヘリウム液化システム、2) 2 K コールドボックス、3) 減圧システム、4) クライオモジュール*で構成されている。この 2)、3) は上記低温関連企業と KEK で設計製作し、現在までに超伝導空洞の性能試験や断熱性能、負荷測定など約 2 年間で延べ 3 0 0 日の冷却運転を行ってきた。今回、上記構成機器の解説及び冷却能力試験**の結果を発表する。

* : 2008 年 1~12 月に行った Module-A (TESLA 改良型 4 台組込み) の冷却性能試験。

** : 2009 年 9 月に行ったダミー空洞 He 容器を 4 台組込んだ冷却能力試験。

2 システム概要

2.1 定常モード

図 1 にシステムの主要な構成機器を示す。

定常モード (2 K 維持運転状態) では、ヘリウム液化システム (TCF200 : 280 l/hr、600W@4.4K) で液化された液化ヘリウム (LHe) をデュワー (2000 l) からマルチ TRT (詳細は 3.1) を経由して地下トンネル内 2 K コールドボックス (詳細は 3.2) 内の 4.5K タンク (70 l) に供給される。ここで、気相の

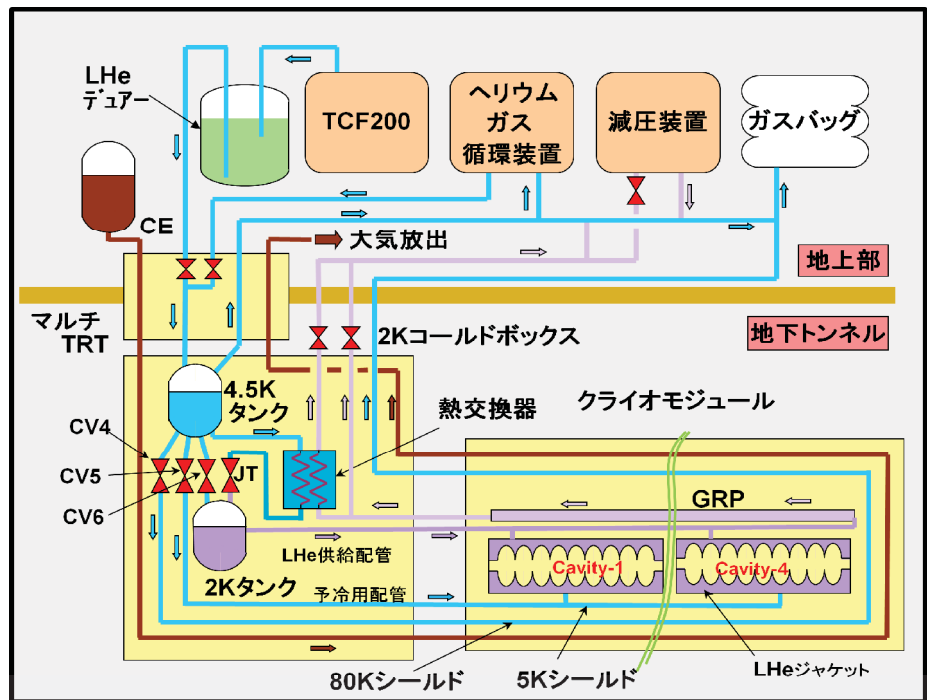


図 1 : 主要構成機器

ヘリウムガス (GHe) はマルチ TRT の GHe 配管を戻りガスバッグに回収される。(最大回収能力は 100 m³/h) 液相の LHe は 2 つに分かれ一方は CV4 からクライオモジュールの 5K シールドに流されガスバッグに回収さ

れる。もう一方はクライオモジュールからの蒸発ガスと熱交換させ、JT 弁より 2 K タンク (70 l) に供給される。この 2K タンク上部の LHe 供給配管 (φ76) からオーバーフローした LHe がさらにクライオモジュールの 4 台の空洞容器 (LHe ジャケット、16 l) に供給される。従って、2 K タンクと空洞容器の液面は同一となり一つの 2K 槽と考えることができる。この 2K 槽全体を地上部に設置された減圧装置 (詳細は 3.3) で 3kPa (1.99K) に減圧される。

蒸発した He ガスはガスリターンパイプ (GRP) を通り 2K コールドボックスの熱交換器を経て減圧装置に入る。この排気 He ガスはガスバックに回収された後、高圧精製装置で精製し中圧タンクに充填され、再び TCF200 で液化される。また、80K シールド用の LN2 は液化窒素貯槽 (CE) よりマルチ TRT のシールドを経由し各機器の 80K シールドを冷却し再びマルチ TRT を通って地上の屋外に大気放出される。

2.2 クールダウン

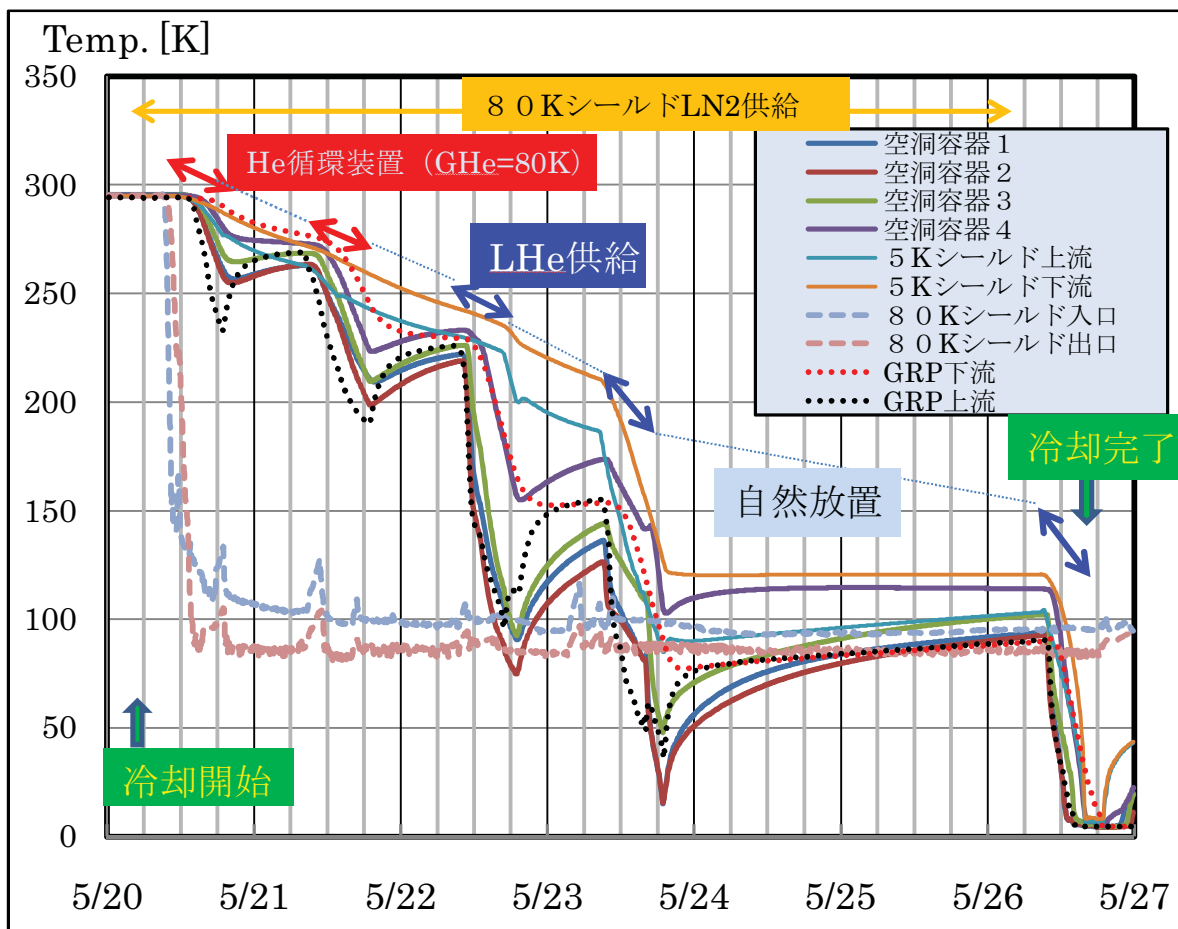


図 2 : クールダウン中の温度分布

図 2 に 2008 年 5 月に行った Module-A 冷却性能試験におけるクールダウン中のクライオモジュール内の温度変化を示す。2K コールドボックスやクライオモジュールのクールダウン (300K → 4.2K) は 1 日 8~10 時間の冷却で 4~5 日間 (自然放置 2 日 : 土、日) を要する。初めの 2 日間はヘリウム循環装置 (ヘリウムガスを液化窒素と熱交換させる装置) で 80K のヘリウムガスを最大約 20m³/h まで流し、冷却速度を調整しながら 200K~150K まで冷却する。夜間は 80K シールドのみの冷却で He 循環装置は運転しないため自然昇温している。冷却中は予冷配管ラインの CV4 も開けて各部の温度差を調整しながら行ったが図 2 でわかる様に特に GRP 上流、下流と空洞容器 4 (一番下流) の温度差は調整ができなかった。この GRP は実機仕様では複数のユニットを直列に繋ぎ大型の真空排気装置で排気するため口径を大きくし、且つ容器を支える構造体でもあるため直径 300mm、肉厚 10mm、長さ 5800mm、重さ約 500kg の配管となっている。従って、冷却中

に上流（入口）と下流（出口）での温度差がつきやすく、さらに配管の上下の温度差もあり、温度差が大きくなると配管が弓なりに変形することも観測されている。また、各空洞容器の温度制御は予冷配管に各容器入口弁を設けていないため実際は接続配管の径や長さ依存してしまい必ずしも上流側から冷えて行くわけではなく、2, 1, 3, 4の順に温度差が生じている。そこで、2日間は機器の急激な温度変化を防ぐため冷却速度は5~10K/hで行っている。そして、各温度が200K~150Kになったら循環装置を停止し、LHe デュワーから LHe を供給する直接冷却モードに移る。2日間で4.2Kまで冷却し翌日、定常モード（上記2.1）から開始できる状態にしてクールダウンは終了する。

以後は定常モードに示した様に、LHe が2K タンクと LHe 容器に充填されたら CV6 を開けたまま減圧装置を起動し、圧力制御弁を調整しながら温度が2.16K（超流動：5kPa）以下となったら CV6 は閉じ JT 弁だけで液面を維持するように開度を調整する。3kPa（1.99K）に達すると自動制御弁で圧力を一定に保たれ定常モードとなる。

3 構成機器の解説

3.1 マルチ TRT

今回使用したマルチ TRT は関連企業と KEK で共同製作されたもので、図3に製作中の写真を示す。

右側の断面写真に示す様に80K シールド（アルミ製）の上下に LN2 配管（フロー／リターン）を設置し、中心部に LHe と GHe の配管を通して、スーパーインシュレーション（SI）

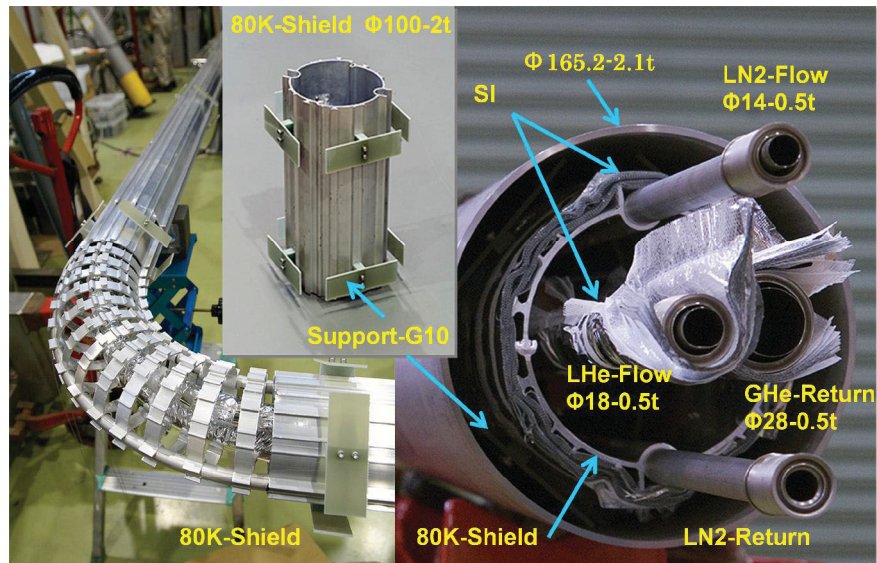


図 3：マルチ TRT（製作中）

はネット付きアルミ蒸着フィルムを80K シールドに30層、LHe と GHe は10層巻いている。ここで使用しているアルミ製シールドは写真中央でわかる様に上下はめ込み式となっており LN2 配管も溶接や半田付け等を行っていない。また、シールドの組立てが難しいエルボー部も写真左の様に短くスライスすることにより、エルボー部でも簡単に組立てることができる利点がある。さらに今回は内部配管を全て0.5tの肉厚とし配管自体の冷却重量を軽減させ、冷却時間を短縮している。このシールドは KEK の超伝導加速空洞用に開発されたものでエンドボックスとクライオスタットをつなぐシングル型（サブ TRT：LHe+LN2）と共に各種規格化され KEKB 実験で十年以上の使用実績がある。

本マルチ TRT は断熱性能試験を行っていないが、同形状の過去の実績（0.05W/m）より直線部で0.1W/m以下、両端エンドボックスのバルブポートやバイオネットジョイント部からの熱侵入を考慮しても全長約40mのマルチ TRT の4.2K系への総熱侵入量は約10W以下と予想している。

3.2 2K コールドボックス

2K コールドボックス（図1参照）はクライオモジュール側にバルブを設置していないため液やガスの分配や流量の調整機能を持たなければならない。そこで、LHe は一度4.5K タンク（70ℓ）に充填された後、CV4、CV5、CV6、JT と4つのバルブに振り分けられている。CV4経路は5K シールド用、CV5経路はクールダウン用。CV6（口径大）、JT（口径小）は2K タンク（70ℓ）の LHe 供給用に接続されている。また、LN2 供

給だけは地上部の流量調整弁を使用している。

ILC 用の超伝導加速空洞の冷却試験は定常モード (2K、3kPa) で行われるが、長時間 飽和蒸気圧力を 3kPa に保持しながら連続的に超流動 He を供給し空洞容器液面を一定に保たなければならない。そこで図 1 で示すように、LHe は 4.5K タンクから 2K タンクへ直接供給する CV6 経路 (2K までのクールダウン中のみ使用) を閉じ、JT 経路を使用する。そして、熱交換器 (図 4) を通すことにより、クライオモジュールで蒸発した 2~4 K の He ガス (GHe-IN) と熱交換させて LHe の温度を下げた後 JT 弁を通過させることにより LHe は断熱自由膨張し超流動ヘリウム生成効率 (クオリティー) を上げて 2K タンクに供給される。この熱交換器のフィン総面積は 547cm²、外管直径は 60.5mm で、2K で 30W の冷凍能力を有するように設計されている。



図 4：熱交換器

3.3 減圧装置 (真空排気ユニット)

定常モードで運転中、常に設定圧力を 3kPa に保つためには余裕のある排気速度の真空ポンプが必要である。本システムでは Edwards 社のメカニカルブースターポンプ EH1200 (1195m³/h) とロータリーポンプ E2M175 (175m³/h) の組合わせで 3 組と、EH500 と E2M80 の組合わせ 1 組を並列に接続している。この減圧装置の吸入側に自動圧力調整弁を設置し 2K 槽の内圧を一定に保っている。

減圧装置で注意しなければならないのは、負圧部の漏れ (空気の混入) と排気ガス中のオイル蒸気の除去の問題である。前者は減圧ラインの定期的なリークチェック。後者はポンプに冷却水を流したり、送風機でポンプ自体を冷却して排気ガス温度を下げ、さらにオイルフィルターを通してから回収ガスバックに戻す等の対策を講じている。また、4.2K (大気圧) からの減圧開始時には排気速度を下げなければ回収圧縮機的能力 (100m³/h) を簡単にオーバーしてしまう。そこで、ポンプの台数制御 (1 台ずつ起動) で排気するか、ポンプ吸入弁を絞って 50m³/h 以下の排気速度にしなければ、さらにポンプの温度が上昇しオイル蒸気が大量に発生しフィルターの寿命を短くすることになる。従って、4.2K (大気圧) の LHe 槽を減圧運転で 2K (3.17kPa) まで冷却する為には減圧装置を調整しながら約 2 時間かかっている。

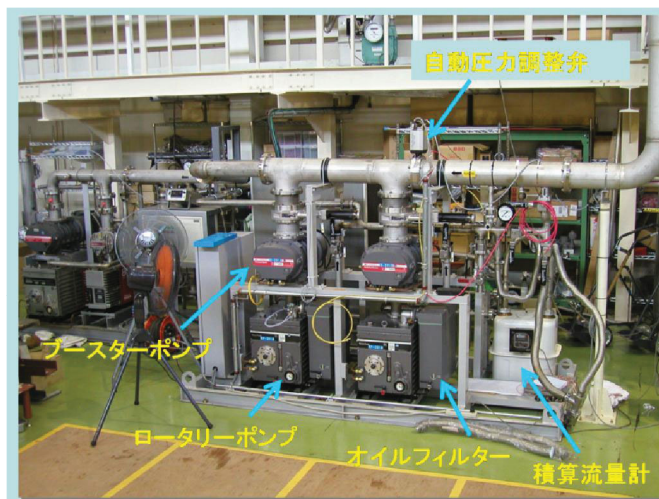


図 5：減圧装置

3.4 クライオモジュール

図 6 の写真にトンネル内の機器の配置を示す。クライオモジュール (Module-A) は直径 1m、長さ 6 m ほどの真空槽内に 4 台の空洞 He ジャケット (写真右上: TESLA 改良型) が

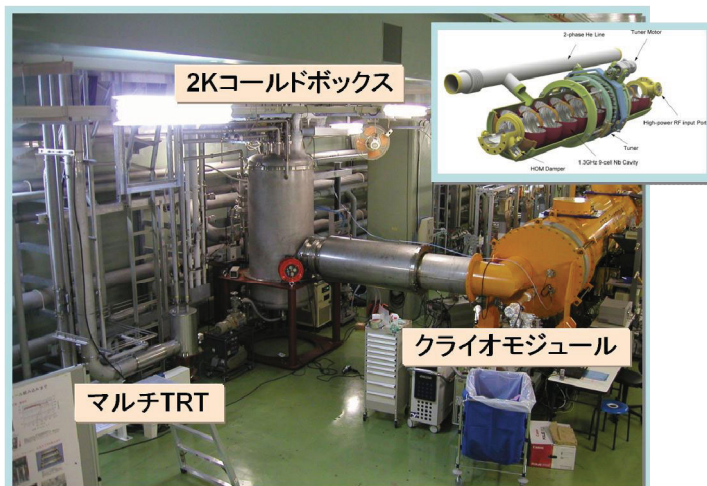


図 6：トンネル内の配置

組み込まれている。内部の断面図（図7）でわかるように GRP は上部（2 か所）の G-FRP（グラスファイバー）ポストにより支持され 5K シールド内で空洞 He ジャケットを吊り下げている。この GRP は 2.5km 間隔で配置される大型の排気装置で排気した時に圧力損失を 3mbar 以下に抑えられるように設計されている。なお且つ上記 2.2 で述べたように支持構造体でもあるため口径等が大きくなっている。従って、室温から 2K に冷却した場合、水平方向で約 15mm 収縮し、冷却中の上下温度差による変形も観測された。この GRP だけでも 515kg あり、空洞ジャケット 4 台 (410kg) よりも重くなっている。

このクライオモジュールの熱負荷（静的熱侵入）測定は供給弁（CV6、JT）を閉じた状態で減圧装置の排気流量を測定して行った。その結果、2K 冷凍システム全体の 2K 系統に侵入する総熱負荷は 9.2W、その内わけはクライオモジュール側（LHe ジャケット+インプットカプラーも含む）4.9W、2K コールドボックス側（LHe 供給配管 3.1W+2K タンク 1.2W）4.3W となった。（STF Phase-1 Activity Report 参照）

4 2K 冷凍システム冷却能力試験

4.1 試験概要

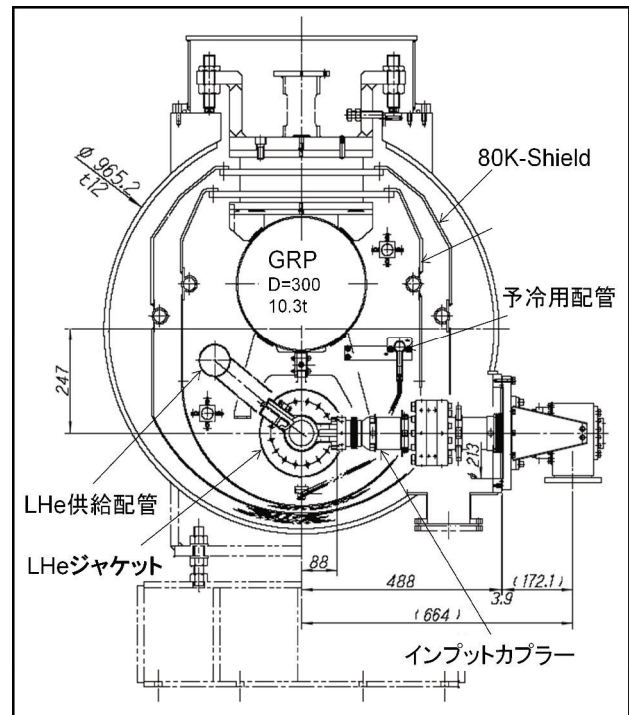


図 7：クライオモジュール断面図

このクライオモジュールの熱負荷（静的熱侵入）測定は供給弁（CV6、JT）を閉じた状態で減圧装置の排気流量を測定して行った。その結果、2K 冷凍システム全体の 2K 系統に侵入する総熱負荷は 9.2W、その内わけはクライオモジュール側（LHe ジャケット+インプットカプラーも含む）4.9W、2K コールドボックス側（LHe 供給配管 3.1W+2K タンク 1.2W）4.3W となった。（STF Phase-1 Activity Report 参照）

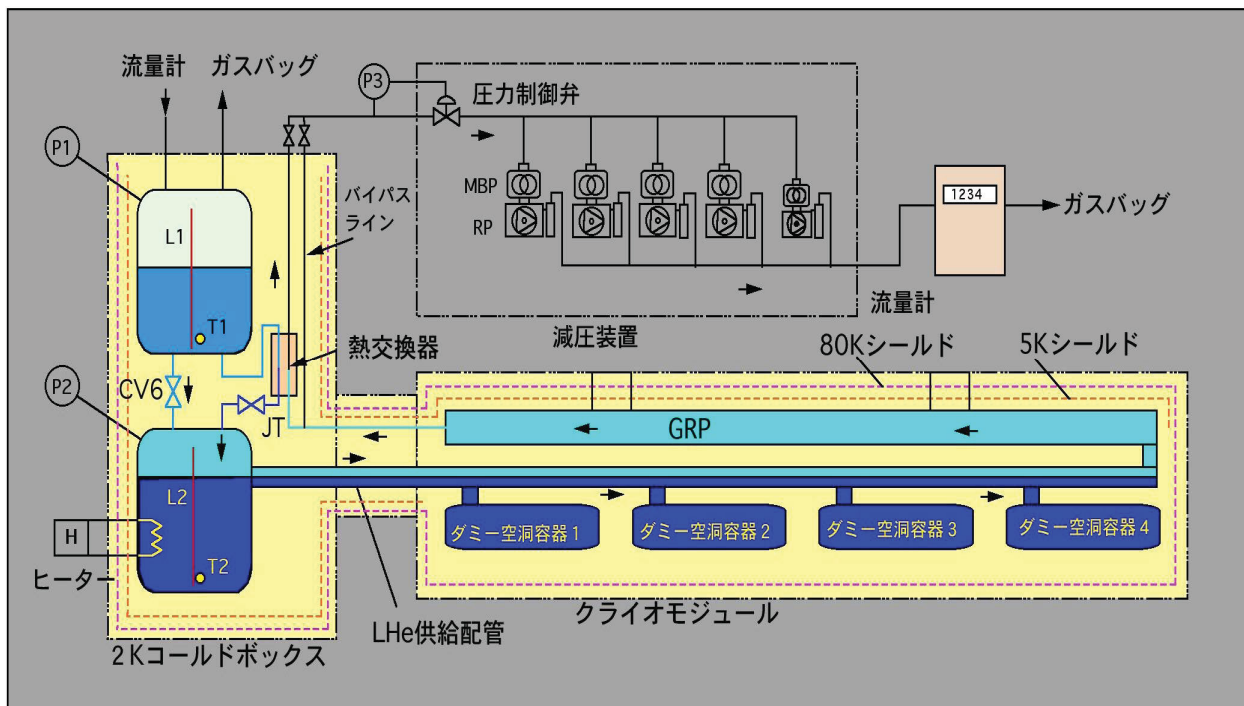


図 8：2K 冷凍システム（熱解析用）

図 7 に今回行った冷却性能試験の概要図を示す。今回測定するクライオモジュールは上記一連の実機 RF 試験を終了後 2009 年 9 月に熱解析用に以下の変更を行った。

- 1) 空洞 He ジャケットをダミー空洞容器 (30 ℓ) と交換。
- 2) インพุットカプラー (図 7 参照) は撤去。
- 3) LHe 供給配管の接続配管部に設置した熱アンカーの接触面積及び断面積を改良。
- 4) クライオモジュール内の 5K シールドは上部の熱アンカー配管部だけ残し、下部シールド板は撤去。
- 5) 減圧装置の増強 : EH1200 (1195m³/h) とロータリーポンプ E2M175 (175m³/h) 1 組を増設

上記変更に伴ってクライオモジュールの 2K 槽への静的熱侵入量は 9.2W から 3.9W に減少した。主因はインพุットカプラーからの熱侵入が無くなったことと熱アンカーの改善の効果による。また、5K シールド板の下部撤去では撤去前と、約 +0.8W の変化しかなかった。今回の測定は上記、静的熱侵入測定法ではなく液を供給しながら 2K (3.17kPa) 及び液面を一定に維持できる冷凍能力を測定することである。すなわち、空洞に RF パワーが入力され、RF ロスが変化した場合を想定している。

表 1 : 冷凍能力測定結果

4.2 冷凍能力試験及び結果

測定を行う前に 2K 冷凍システム (図 7) が定常状態であるか下記の確認を行う。

- 1) P2 の圧力が 3.0kPa 以下で安定。
- 2) 液面 L2 が 77%以上 (供給配管のほぼ中央の高さは 80%)
- 3) 真空排気装置 4 組が起動中で排気流量が 15m³/h 以下で安定。
- 4) 80K シールド及び 5K シールドの出口温度がそれぞれ 80K、5K 以下。
- 5) CV5、CV6 を全閉、JT 弁を全開。

以上を確認したら、液面 (L2) を監視しながら 2K タンクに設置されたヒーターを焚いて系内に負荷を加えてゆく。加える負荷は設計値の 30W を目標として実施した。結果を表 1 にまとめて示す。表中の負荷 (W) はヒーターの入力値 (W) に 2K システムの静的熱侵入 3.9W を加えて表示、流量は排気装置の排気流量を示している。また、表中の赤字は液面が平衡状態、青字は降下中、黒字は上昇中の測定値を表している。(液面の降下は冷凍能力不足を意味する。)

時 間	バルブ開度 JT/CV6 (%)	負荷(W)	液面 (%)	圧力 (kPa)	流量 (m ³ /h)
13:02	100/0	3.9	78.0	3.03	22.4
13:12	100/0	3.9	78.3	2.93	9.6
13:26	100/0	9.6	78.9	2.94	13.1
13:41	100/0	13.1	79.0	2.98	16.6
13:56	100/0	13.1	79.2	2.98	16.2
14:30	100/0	16.9	79.4	3.00	19.7
15:02	100/0	16.9	79.4	3.01	20.2
15:15	100/0	19.0	79.2	3.03	22.9
15:43	100/0	17.9	79.1	3.00	21.6
16:02	100/0	17.9	79.1	3.01	21.1
17:18	0/13.7	33.4	77.6	3.28	44.5
17:29	0/13.7	28.5	77.3	3.26	44.7
17:43	0/13.8	28.5	77.0	3.13	42.9
17:55	0/13.8	28.5	76.9	3.15	43.4
18:06	100/13.7	28.5	76.6	3.05	38.7
18:28	100/13.7	28.5	77.1	3.09	39.6
19:23	100/13.5	31.6	76.6	3.04	41.6
19:30	100/13.5	31.6	76.6	3.04	41.3

JT 弁単独の冷凍能力は徐々に負荷を上げて 15 : 15 の 19.0W で液面が減少し結局 17.9W で平衡状態となった。設計値の 30W に達しなかったのは熱交換器の製作過程で、配管 (直径 3.2mm 内径 1.8mm) の接続部を銀ロウがふさいでいるため設計流量に達していない可能性がある。続いて CV6 単独が 28.5W であったが、かなり蒸発量が増加し圧力も 3.28kPa (2.01K) まで上昇している。最後に JT 弁を 100%、CV6 を徐々に開けていく方法で測定した結果、目標値以上の 31.6W (3.04kPa=1.99K) で液面が平衡に達した。

5 むすび

1. 本 2K 冷凍システムはすでに 2 年間で約 300 日の運転実績ができた。
2. システム中 (図 1) の 2K コールドボックス内の熱交換器をバイパスするライン (予冷用ライン) にサーマルオシレーションが発生したため配管内に対流防止用の詰め物を挿入し対応したが、温度計や圧力ポートでも観測できない小さな振動が発生することがある。その影響で熱交換器の温度が正確に測定できなかった。
3. 2K 冷凍システムの冷凍能力は最大 31.6W (@1.99K) となり、目標の 30W 以上の能力があることを確認できた。
4. 31.6W の時 41m³/h の排気量で 3.04kPa を維持できた。減圧装置 1 組を増設したことで、制御弁の開度にまだ余裕のあることも確認できた。
5. JT バルブ単独での冷凍能力は 17.8W と設計値 30W に達しなかったが、現在、次期 2K 冷凍システム用に外管直径 89.1mm、配管直径 6mm の熱交換器を製作中である。

今後まだ 2010 年度はクライオモジュール部を交換しながら延べ 150 日ほど上記冷凍システムで冷却試験を行う予定であり、その間にも運転実績や情報を集積し今後の新システムに応用したいと考えている。