

Operational Status of the He Cooling System for RIKEN SRC

Hiroki Okuno, Kazunari Yamada, Takeshi Maie, Kumio Ikegami, Masayuki Kase, Yasushige Yano

A) RIKEN, Nishina Center for Accelerator-based Science
2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

Abstract

理研のRIBF[1]の最終段加速器である超伝導リングサイクロトロン (SRC) は、2005年夏に磁石部分が完成し、2006年末に無事ファーストビームを取り出すことに成功した。[2] この超伝導磁石に5000リットルの液体ヘリウムを貯蔵して、超伝導電磁石を4.5Kに保つ為にヘリウム冷凍系は、4.5Kステージで1000Wもの冷凍能力を持つものである。この冷凍機は2005年夏から稼動を開始し、磁石の断熱真空のトラブルの為に約5ヶ月間の中断はあったが、2007年7月末まで冷凍を行なった。本論分では、冷凍システムの概略を述べた後、磁石を予冷のパフォーマンス、予冷完了後の運転維持の為に言っている事を述べる。最後に我々が今直面している、長期運転時に見られる冷凍機の閉塞問題について述べる。

理研SRC用ヘリウム冷却システムの運転状況

1. He冷却システムの概要

図1にSRC用ヘリウム冷凍システムの概略を示す。この冷凍システムは主に4基の100m³のヘリウムリザーバタンク、3基のヘリウム圧縮機、1基のヘリウム冷凍機からなる。4基のバッファタンクは20気圧まで昇圧可能なため、5000リットルの液化ヘリウムが十分貯蔵できるようになっている。4基のうち1基は圧縮機運転時の圧力調整用に用いられる。圧縮機3台のうち1基はバックアップである。吐出圧は1.69MPaで風量は74g/sである。ヘリウム冷凍機は、1000W、60Kステージで4000Wの冷凍能力を持つ。磁石系の4Kステージへの熱浸入は400W程度であり、蒸発した液体ヘリウムのガスは4.5Kのままで冷凍機に戻される必要があるが、一部の蒸発ガスは、電流リード冷却のため室温まで戻す必要があり、その流量は3g/s必要である。冷凍能力は磁石と接続して使用する前に単体運転の試運転が行なわれ、上記の仕様が満足していることが確認されている。

冷凍機内部を図2に示す。冷凍機は主に4つのタービンと7つの熱交換器、低温弁、吸着器、それらを結ぶ配管、計装制御機器から成る。吸着器は主に系内の窒素を取り除く80K吸着器と水素を取り除く20K吸着器がある。圧縮機で圧縮された室温のガスヘリウムは2つの熱交換器を通過し70K程度まで冷やされて吸着器内を通過する。この吸着器は2筒切り替え式になっている。その後、第1タービン内で寒冷が発生される。第1タービン後、冷媒は二つの流路に分岐する。一つは磁石の80Kシールドに使われ、第2&3タービン内で寒冷を発生させた後、戻りの流路に行き、熱交換器内で行きの流路内の冷媒と熱交換しながら室温へもどり冷凍機の外へ出てくる。今ひとつは第4-7熱交内で冷却され、超臨界タービンである第4タービン内を通過してJT弁内で液化される。JT弁は2つあり、一つは磁石に液体ヘリウムを供給する流路に設置されているものであり、もう一つは冷凍機内の液溜め直前に設置されているものである。液溜め内の液体ヘリウムの液位がバランスす

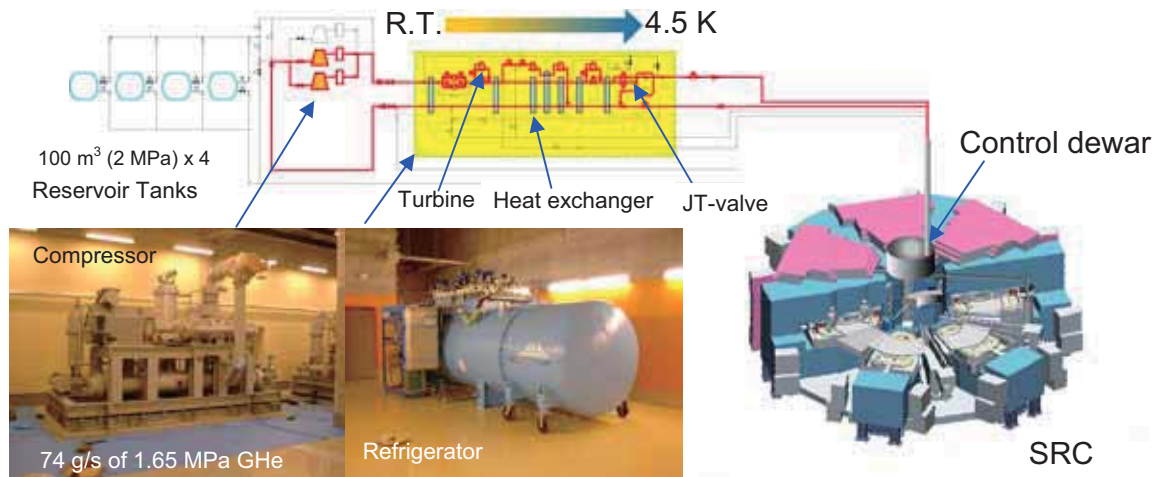


図1: SRCヘリウム冷却系の概要

る様に、貯槽内のヒーターが炊かれ、そのヒーター出力により余剰冷凍能力を知ることが出来る。磁石へ供給された液体ヘリウムが蒸発して戻ってくる低温ヘリウムガスと冷凍機内の液溜からのヘリウムガスは集合して、冷凍機内の戻り配管へと導入され、行きと戻りのガスと熱交換しながら室温になり、冷凍機外部へと出て行く。今述べた配管は冷却系内が定常状態に達した時に能力が最大限発揮できるように配管径、弁のCV値が最適化されている。そのため、予冷の際に使用されるバイパス弁が各所に取り付けられており、予冷の際流量が取りやすくなっている。

冷却すべき超伝導磁石は主コイル、超伝導トリムコイル、そして超伝導偏向電磁石 (SBM) である。主コイルは浸漬冷却であり主コイル容器はリード線配管、泡抜き管、圧抜き管によってコントロールデュア内部の2000 Lの液溜めと繋がっている。この液溜めは主コイルより上にあるため、液溜め液体ヘリウムがあり、泡抜き管が正常に機能していれば主コイルが液体ヘリウムに浸かっている事が担保される。一方超伝導トリムコイルは間接冷却のコイルである。パンケーキ巻のコイルをサンドウィッチしているアルミ合金に取り付けられた冷却管内を流れる2相流ヘリウムによって冷却される。ヘリウム冷凍機の液体ヘリウムは一旦超伝導トリムコイルを冷却した後、コントロールデュア内の液体ヘリウム貯槽に溜められる。超伝導トリムコイルの安定な冷却の為に、このヘリウム流量が十分あることが必要である。そのためヘリウム貯槽内で超伝導トリムコイル冷却後の液体ヘリウムの流量をコップ式流量計でモニターしている。SBMは入射用の偏向電磁石であり、エポキシ含浸された超伝導コイルを用いている。この磁石への液体ヘリウムは超伝導トリムコイルと並列な流路によって供給される。SBM自体も液溜めを持っており、それが液位を示す事により超伝導コイルが液体ヘリウムに浸されている事が担保されている。

磁石で蒸発したガスヘリウムのその殆どは低温状態を保ったまま、冷凍機に戻される。一部は電流リードガス冷却の為に使われ室温まで戻り、圧縮機の吸い込み口まで直接導入される。

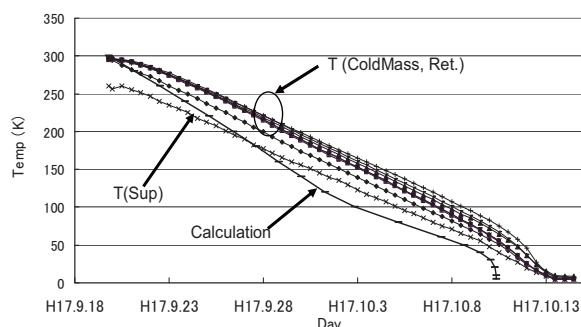


図3：SRCの初期冷却

3. 磁石の予冷と貯液

予冷すべき超伝導電磁石のコールドマスの総重量は約140トンである。図3に初めて超伝導磁石を冷却した際の冷却カーブを示す。簡単な計算では21日と見積もられたが、23日程度で冷却された。磁石の予冷では、殆どの場合、磁石が室温以下、ある程度冷えた状態から始める事が多い。そのためまず、冷凍機単体で起動して冷凍機を予冷した後、磁石と接続する。この際冷凍機内部では、主に以下の様な制御が自動でなされている

- ・ 各タービンの回転速度制御
- ・ T1, T4排圧制御
- ・ T4の入口弁制御
- ・ JTバイパス弁の開度制御
- ・ 戻り流路のWarm returnから Cold returnへの切り替え
- ・ シールドヒータ、液溜めヒータの制御
- ・ シールド差圧制御

冷媒の循環流量を決めるT1及びT2の入口弁の開度は、状況に即して、手動で決めているが、10K/日の冷却速度を保つようにしている。冷却が進みJTバイパス弁が閉まり戻り流路の切り替えが済み、戻り温度が5K位になると液化が始まる。液化は貯蔵されているヘリウムガスバッファタンクが減り始めたり、主コイル容器の温度が5K程度で一定になったところから察する事が出来る。液が容器を満たされ始め

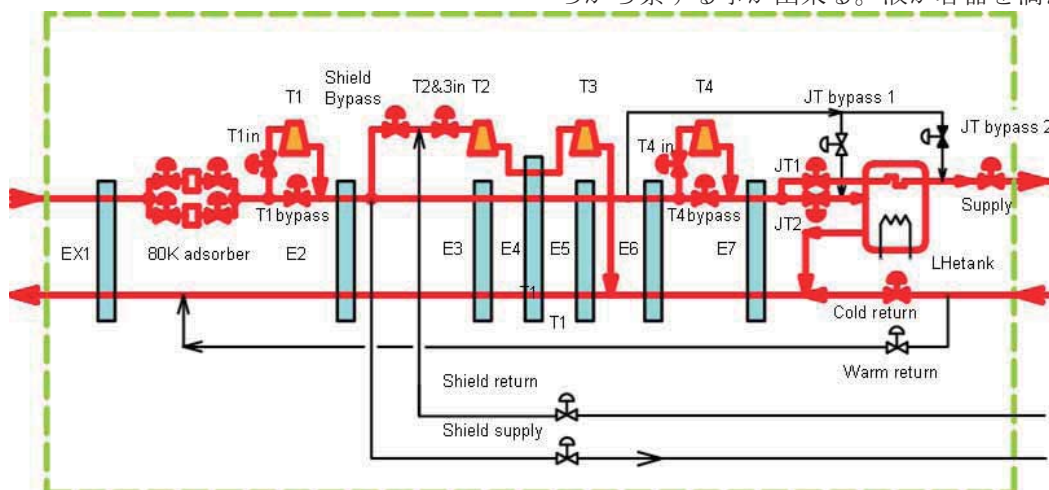


図2: He冷凍機の内部

たら泡抜き間の弁を開けることを忘れてはならない。液化は約100リットル/hのペースで進む。液化が進み、コントロールデュア内の液体ヘリウム貯槽に液が見え始めたら、予冷管から液体ヘリウムを供給していたのを、貯槽に直接液を供給するラインや、超伝導トリムコイルSBMの冷却ラインに切り替える。その際、液面が10%近く下がるが、これは、切り替え前が液体ヘリウムをしたからわき上げさせているので、液位が多く見えていたためと思われる。

流路を切り替えた後冷凍基側の供給弁を40%程度まで絞り始め、冷凍機液溜め内もヒーターも作動し始める。それにより冷凍機は液化モードから冷凍モードに移行して全体的に冷凍機の温度は下がる。その後電流リードのガスを流して液面維持モードへ移行する。

4. 運転維持

加速器本体が運転している際、主な負荷変動は、主コイルを励磁又は減磁する際に超伝導トリムコイル支持板に生じる渦電流損失による発熱である。最大100W x 2時間となる。サイクロトロンは、運転中変化が無い場合、このような負荷変動が生じるのは加速器の立ち上げの時と停止の時のみである。それでも、多少の負荷変動があり、液面はゆっくりと変化するため、液面の変化に応じて、磁石へのヘリウム供給弁を1時間に1回自動的に微調している。多少の手動介入はあるものの、大体49~50%の範囲に上手く納まっている。励磁と減磁の際にはこの自動制御をオフにして手動によって供給弁を調整するようにしている。この際、液面は生じる液体ヘリウムの泡によって通常より上がって見えるそのため、液面の変化を追って調整してしまうと逆に液面を余計擾乱させてしまう。先ほど述べた超伝導トリムコイルの戻りの流量を一定になるように調整するのが良い事がわかっている。

系内の異常にいち早く気付く為に、ヘリウム制御室に常時最低1名のオペレーターが常駐し、冷凍システムの状態を監視している。オペレーターは1日2回現場を見回り点検している。液面磁石の温度、電流リードの冷却ガス流量、電圧、超伝導トリムコイルの戻り液体ヘリウムの流量等、100個程度の数値が常時コンピュータで監視され、値が正常範囲を超えるとアラームが出るようになっている。

5. 長期運転における冷凍能力の低下

現在この冷凍システムは液面維持モードに移行してから、一ヶ月程度になると徐々に冷凍系内を循環している冷媒流量が低下して行き、2ヶ月も経つと液面が維持できない程度まで落ち込んでしまうという問題を抱えている。流量が低下する影響で運転当初は74K程度だった吸着器の温度も最終的には90Kにも達し、吸着器内に一旦吸着された窒素不純物も出てきてしまい、危険な状態になりかねない。当初80K吸着器の問題かと思いき、再製を行なったが、現状は変わらなかった。どうも不純物の水が悪さをし

ている可能性がある。系内の不純物は現有のガス分析装置では精度が出ないため、我々は露点を計測して水の不純物濃度をモニターする事とした。液面維持や昇温時の露点の変化を見て原因と対策を調査する予定である。

参考文献

- [1] Y. Yano, "RI Beam Factory Project at RIKEN", in *Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications*, Tokyo, 2004, pp. 169-173.
- [2] H. Okuno, et al., "Operational Status of the He Cooling System for RIKEN SRC", in *this proceedings*.

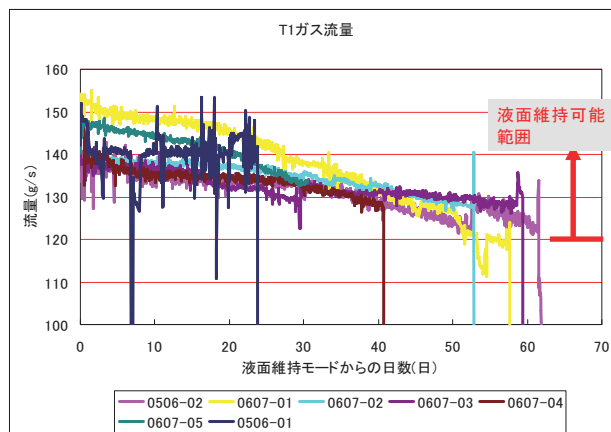


図4: He冷凍機内循環冷媒量の減少