

EPICS を用いたヘリウム冷凍機制御システムの開発 DEVELOPMENT OF THE HELIUM REFRIGERATOR CONTROL SYSTEM USING EPICS

中西功太^{*A,B)}、小田切淳一^{A)}、小島裕二^{A)} 仲井浩孝^{A,B)} 原和文^{A)} 細山謙二^{A)} 本間輝也^{A)} 飯田隆^{C)}
Kota Nakanishi^{*A,B)}, Jun-ichi Odagiri^{A)}, Yuuji Kojima^{A)}, Hiroataka Nakai^{A,B)}, Kazufumi Hara^{A)}, Kenji Hosoyama^{A)}
Teruya Homma^{A)}, Takashi Iida^{C)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)}The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

^{C)}Hitachi Technologies and Services, Ltd.

Abstract

cERL and STF are the facilities with the superconducting accelerating cavities in KEK. These cavities work at 2K. To operate the cavity at 2K, a helium liquefier manufactured by Sulzer (TCF200) and a 2K refrigerator developed by KEK were dedicated. The control systems of the 2K refrigerator were developed. The control system of liquefaction for cERL was also replaced.

1. はじめに

KEK で運転中の STF、cERL は超伝導加速空洞を利用した加速器施設である。これらの加速器は共に 2K に冷却されたニオブ製超伝導加速空洞を利用しており、各施設の入射部、加速部にそれぞれ異なる設計のモジュールが設置されている^{[1][2]}。これらのモジュールを冷却するために、Sulzer 製ヘリウム液化冷凍機 (TCF200)(以下液化機と呼称) と、KEK で開発した 2K 冷凍機を使用している。液化機は別の用途で使用されていたものを移設して使用しており、STF、cERL それぞれの液化機の製造年は 1985 年 1988 年であり、老朽化が進んでいる。特に cERL の制御装置は移設完了後の試運転で液化運転が出来ない状態であったため、制御システムの入換えを行った。KEK で開発した 2K 冷凍機に関しては新たに制御システムが必要であったため、これらについても同時に開発を行った。

2. 冷却に関する仕様

超伝導加速空洞は運転前に室温から液体ヘリウム温度まで冷却する必要がある。空洞を含むクライオモジュールの構造体は主ニオブやステンレスなどで構成されており、冷却に伴って収縮する。同じ部品の中に温度差が出来ると、不均一に収縮し部品が変形するため、様々な問題を起こす可能性がある。主に懸念されるのはフランジ変形による接続部の漏れ、空洞支持材の変形による空洞アライメントの狂い。セラミック部品 (RF 窓、各種フィードスルー、高調波吸収体の SiC やフェライト) の割れなどである。材質が異なる部材では収縮率も異なるために問題を完全に回避する事は出来ないが、各部を均一に冷却する事でリスクを低減することができる。対策としては、冷却速度を制限し、ゆっくりと冷却する事がしばしば行われる。また、各部の温度を測定し最大温度差に制限を加えることもある。KEK では KEKB での実績に倣い冷却速度を 3K/h に設定している。また、各種金属はある程度低温になるとほとんど収縮しなくなるためゆっくり冷却するのは 100~150K までで十分である。冷却速度を設定するのは cERL では 150K までとし

ている。STF のガスリターンパイプでは液化窒素温度 (77K) までというケースもあった。最近の空洞は熱処理により水素ガスを除去しているためあまり問題にならないが、液化窒素温度から 120K の温度領域で吸蔵水素がニオブ化合物として析出する事による Q 値の劣化なども報告されていたため、目標温度以下では急冷するのが通例である^[3]。

cERL、STF のモジュールの中では cERL の主加速モジュールが最も冷却に対する要求が多いため、このモジュールの冷却を例として紹介する。cERL の主加速モジュールは 80K シールド、5K シールド、ヘリウムジャケット (2K) の各温度の流路を持つ。80K の流路には液化窒素で冷却された高調波吸収体が設置されている。高調波吸収体はフェライトで作成されているため変形により割れる可能性がある。Figure. 1 に示すように、空洞の両端に取り付けられた四角形の板の間を 4 本のロッドが支える構造となっており、このロッドが 5K の流路の一部となっている。このロッドが冷却され、そこに接続されたシールド板を冷却する構造である。空洞を支えるロッドが流路をかねているために、ここに大きな温度差が生じると空洞に変形を生じる可能性がある。2K の流路は空洞本体が設置されており、リークが起りやすい超流動ヘリウムを扱う箇所であるために従来どおり温度制御を行うものとする。

結果として、80K ラインの冷却速度を制限された温度測定点は 29 箇所であり、それらを 4 つのグループに分け、それぞれグループ内の温度差を 50K 以内に抑制する。5K ラインでは冷却速度を制限された温度測定点は 11 箇所であり、それらの各点の温度差を 50K 以内に抑制する。2K ラインでは冷却速度を制限された温度測定点は 8 箇所であり、それらの各点の温度差を 50K 以内に抑制する。これらの制限はすべて 150K 以下では解除される。それぞれの流路の冷却速度は冷媒を供給するバルブの開度によって制御されるため、ひとつのバルブの開度を制御するのにたくさんの温度計を参照することになる。

* kota.nakanishi@kek.jp

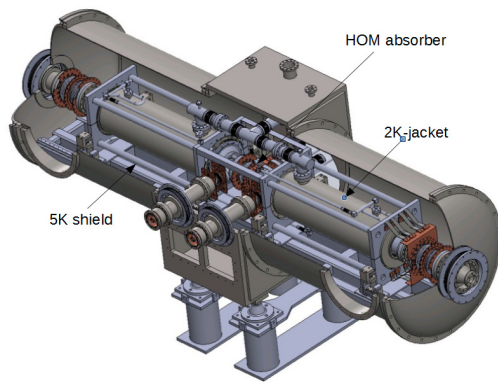


Figure 1: Cut view of cERL main linac cryomodule. The shield plates are not shown.

3. ハードウェア、ソフトウェアの選定

KEKBの冷凍機制御システムではプラント制御用のソフトウェアおよびハードウェアを使用してきたが、cERL, STFにはもう少し身軽なシステムを適用する事を検討した。これらの施設では、古い液化機を移設して利用しており、しかも単純な液化機をプラントに組み込んで操作するためメカの対応は望めない為である。具体的には、クライオモジュール冷却時に温度コントロールされたヘリウムガスをクライオモジュールに供給する事と、5Kシールドからの冷たい戻りガス(10K程度)の寒冷を回収し液化量を向上させる事の2点をバルブを個別に制御する事で実現した。また、冷却するクライオモジュールの入換えや増設などが実施される予定で、システムが頻繁に変化すること、加速器の試験設備であり、冷却屋運転の方法も試行錯誤の上決めていく必要があること等を考慮すると、運転を実施しながら制御ロジックを自分達で自由に変更できる必要があると考えた。

冷却制御の際に参照する温度計等はクライオモジュールの中にあり、管理者は空洞グループである。計測データをEPICS recordとしてグループ間で共有するのが、冷凍機グループからこれらのデータを扱う方法として簡単である。また、同じシステムからバルブ操作の信号を出力したいため、KEKで開発が進められていた横河電機製PLCにLinuxCPUを搭載し、EPICS IOCを動作させるシステムを採用した。先に導入したSTFでは入出力チャンネルへのアクセスはシーケンスCPUで行い、設定値などの変更のみをLinuxCPUから行った。cERLではシーケンスCPUは使用せず、全ての制御をLinuxCPUから直接行うように変更した。これは、演算の大部分をLinuxCPUに頼っているため、LinuxCPUが停止した際に現状維持運転をシーケンスCPUにより継続すると言う意図が実際には機能しないと判断した事と、STFで2年間程度LinuxCPUのトラブルを経験しなかった事から信頼性が高いと感じ始めたためである。液化機や2K冷凍機の運転は主にバルブの開度調整によって行われる。制御対象となるバルブは数十点であり、従来の制御システムのバルブ操作の時定数は数分のオーダーであり、ほとんどの場合、制御周期は1秒で充分である。一部のバルブ操作に関しては制御周期を0.1秒にする必要があったが、いずれにしてもLinuxCPUの能力

で充分対応可能である^[4]。

4. 冷却時の制御

STFの冷却試験の際にも2Kラインの冷却には複数の測定点が設定されており、このときはそれぞれに対してPIDの制御ループを用意し、バルブに対してはそれらの制御ループが設定するバルブ開度の最低値を設定することで対処した。しかし、この方法では、制御ポイントが切り替わる際に大きなオーバーシュートが生じることからcERLでは適用しなかった。初回の冷却では、冷却条件を事前に把握していなかったため、冷却レートが最大になりそうな測定点をあらかじめ選んでPIDコントローラで制御するか、バルブをマニュアルで操作して対応した。このため、冷却レートが安定せず冷却に非常に時間を要した。また、夜間の操作も必要となり長期的に運用することは出来ないと判断した。

STF冷却などの経験から、バルブ制御はPI制御で十分である。PI制御によるバルブの開度は次式で表される。

$$V = K_P(S - P) + K_I \int (S - P) dt$$

制御周期を Δt とすると、実際の制御では以下のようになる。

$$V_n = K_P(S - P_n) + K_I \times \Delta t \sum_{i=0}^n (S - P_i)$$

ただし、 V はバルブ開度、 S は設定値、 P は測定値である。この式の漸化式は次のようになる。

$$\Delta V = -K_P(P_n - P_{n-1}) + \Delta t K_I (S - P_n)$$

現在のバルブ開度に ΔV を加えて各測定点に対するバルブ開度要求値を求める事で、制御ポイントが切り替わる際のオーバーシュートの問題を解決することが出来る。

数多くの温度測定点に対する制御に対応したプログラムを使用した実際の冷却の様子を以下に示す。5Kラインの冷却については特に問題がなかったので省略する。

4.1 2回目冷却 (2013.11.11~)

まず80Kラインの温度変化をFigure. 2に示す。冷却を始めるとしばらくは最上流の測定点の温度が3K/hで下がり、最も温度が高い測定点との温度差が50Kになり冷却速度が制限されている。供給する冷媒の温度が低すぎる事が原因と考え、入射器クライオモジュールの80Kシールドへの冷媒の供給を止めたところ、全体に温度が下がるようになった。順調に下がっている時は3K/hで直線的に冷却できているが、施設内で液化窒素を使用した際に供給される液化窒素の温度が下がりバルブを閉めすぎて温度が上がると言う挙動を繰り返している。このため温度変化はのこぎり状になり、冷却時間も7日間を要している。

2回目の冷却試験時の2Kラインの温度変化をFigure. 3に示す。冷凍機から供給する予冷されたヘリウムガスの温度が最適化されておらず、はじめは冷たいガスを送り温度差50K以内という制約を受けて冷却速度が制限されている。その後は供給ガスの温度を調整しながら冷却を進めているが、適正な温度の設定基準を探りながらの運転となり冷却に7日を要した。冷却完了後に温度が上昇している測定点があるが、予冷用配管の温度であり冷却後は冷媒の供給ラインを変更するためであり問題ない。

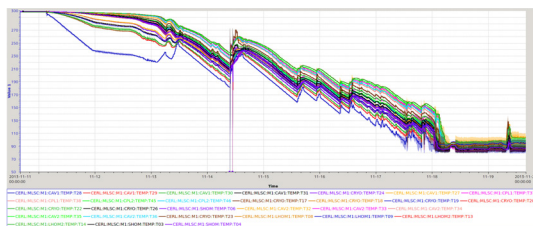


Figure 2: Trend of 2nd time cooldown of 80K line temperature is shown.

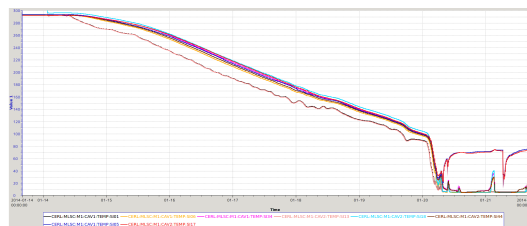


Figure 5: Trend of 3rd time cooldown of 2K line temperature is shown.

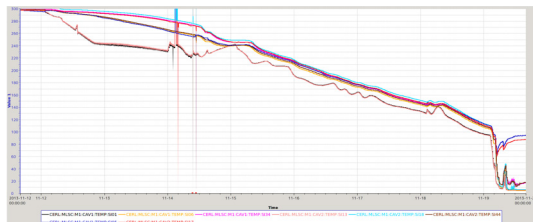


Figure 3: Trend of 2nd time cooldown of 2K line temperature is shown.

中に液化窒素の補給が無いようにする事は可能である。各測定点に対する設定温度について、3度程度のふらつきを認めるようにプログラムを変更した。その結果、長期的に 3K/h の冷却速度で全体を冷却する事が出来、冷却期間も 3 日間に短縮できた。

4.2 3 回目冷却 (2014.1.14~)

3 回目の冷却試験時の 80K ラインの温度変化を Figure. 4 に示す。この時は施設内での液化窒素の仕様を制限したので、2 回目の冷却試験時に見られたようなこぎり上の温度変化はほとんど無くなった。はじめに温度が急激に下がっているのは操作ミスによるものである。また、途中で一度温度が上がっているのはヘリウム精製機への液化窒素の自動供給が始まってしまったため、単純ミスである。施設内での液化窒素の使用を控える事で冷却は飛躍的にスムーズになり、冷却時間は 4 日間に短縮された。ただし、温度測定の影響を受けて冷却速度が 3K/h を下回っている時間がみられる。

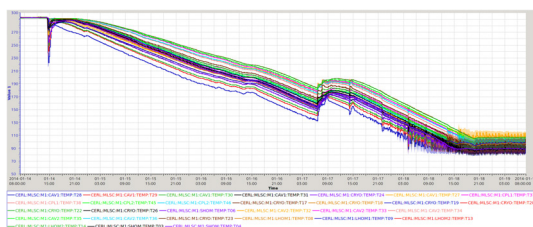


Figure 4: Trend of 3rd time cooldown of 80K line temperature is shown.

3 回目の冷却試験時の 2K ラインの温度変化を Figure. 5 に示す。冷媒の供給温度を滑らかに変化させる事で連続的に冷却を進める事が出来るようになったが、冷却速度は充分ではなく、冷却に 6 日を要した。

4.3 4 回目冷却 (2014.5.7~)

4 回目の冷却試験時の 80K ラインの温度変化を Figure. 6 に示す。途中で一回温度が上昇しているのは、ローリーから CE に液化窒素を充填する作業の際に CE の内圧が上昇したため、機器を保護するために冷媒の供給バルブが閉まったためである。冷却開始時刻または液化窒素の補給のタイミングを調整すれば、80K ライン冷却

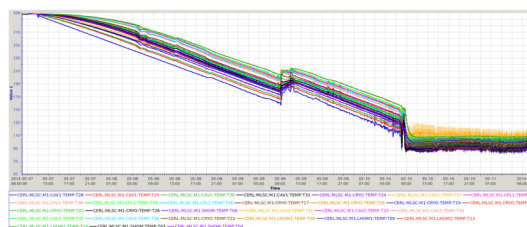


Figure 6: Trend of 4th time cooldown of 80K line temperature is shown.

液化機から供給される冷媒の温度を正確に制御する事は困難である。特に、液化機の温度変化は操作を行ってから実際に温度が変化するまで数時間かかり、温度を滑らかに制御する事が目指すと温度が下がりすぎる事を恐れて冷却に時間がかかる傾向がある。この回の冷却では、例外的供給温度が少々波打つ事は許容して安定した冷却速度を得る事を目標とした。これまで液化機で使用しているタービンの回転数を抑え目に運転していたが、この運転ではタービンを運転して温度が下がりすぎたらタービンを停止する操作に変更した。この方式であれば、液化機側の運転を機械的に実施する事も可能になりそうである。ただし、タービンの起動と停止は液化機の運転の中でも特に気を使う操作であるため、今のところ自動化はしておらず、PC 画面上に操作を促す表示が出るのみである。最も温度の低い測定点がしばしば 5K 程度の幅で振動しているが、これは冷媒の供給温度が低い際にバルブが温度制御のために開閉した結果である。現在のところ、この回の温度変化については問題がなさそうであるとの空洞グループの見解を得ている。この回の冷却試験に要した時間は 4 日間であった。

4.4 操作画面

cERL 主加速モジュール用 2K 冷凍機の操作パネルを Figure. 8 に示す。EPICS レコードの操作や表示には CSS を使用した。この画面の書くバルブのアイコンをクリックすると制御ループの設定画面がポップアップする仕組みとなっている。制御ループが多数存在しているために、GUI を用いて設定を変更したり、条件を確認したりできる事は非常に重要である。このシステムでは、GUI で制御の条件を設定し、EPICS の拡張モジュールのひ

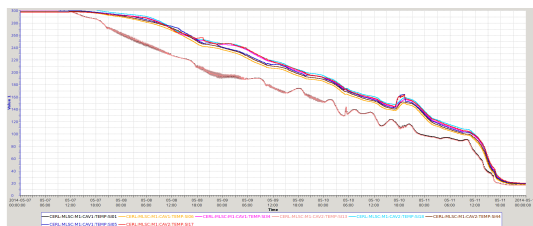


Figure 7: Trend of 4th time cooldown of 2K line temperature is shown.

とつである autosave を利用してそれらを保存している。この方法で制御ループを設定する事で、ソフトウェアの汎用性が大きく向上した。また、予備のループを用意する事もできたため、途中で運転に対する制約条件が追加や変更になった際にも柔軟に対応する事ができた。制約条件の変更は、例えば、圧力が上昇した場合にバルブを閉じるとか、供給元の冷媒の残りが少ないときには冷媒の供給量を抑えるなどである。

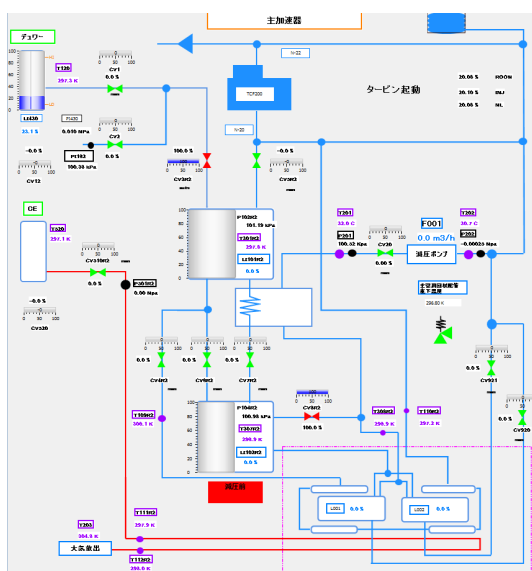


Figure 8: Main control panel for 2K refrigerator of cERL main linac.

5. まとめ

ヘリウム液化冷凍機の制御システムを EPICS を用いたものに置き換えて運転した。また、2K 冷凍機の制御システムも同じく EPICS をベースに開発した。その結果、ヘリウム液化冷凍機はデューアに液をためるだけでなく、クライオモジュールに温度制御されたヘリウムガスを供給したり、クライオモジュールからの冷たい戻りガスを回収して液化率を向上させたりする事が出来るようになった。

2K 冷凍機は他のグループの管理する測定点を含む多数の温度を参照し冷却速度を守って冷却が出来るようになった。ソフトウェアの改修と、窒素利用の制限など運転上のノウハウと組み合わせることで、クライオモジュールを効率的に冷却できるようになった。80K ラインの冷却時間は 7 日 → 4 日 → 3 日と回を追うごとに短

縮できた。2K ラインの冷却時間も 7 日 → 6 日 → 4 日と短縮する事ができた。ただし、これらの冷却時間はクライオモジュールの入換えや制約条件の変更などに依存するため、今後もこの期間で冷却できるという事を示すものではない。例えば、主加速モジュールの 80K ライン冷却時に他で窒素を使わない運用ができたのは、入射器モジュールの 80K シールドに冷却速度の制限が無く主加速モジュールの冷却完了後に急冷出来たことによる。

今後は、液化機や 2K 冷凍機の各運転モードの切り替えの自動化を進めるとともに、STF,cERL,KEKB の各施設を連携して運用していけるように制御システムを拡張していきたいと考えている。

参考文献

- [1] N.Nakamura, et al., "Present Status of the Compact ERL at KEK", Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, Dresden, Germany, Jun. 2014. MOPRO110.
- [2] A.Bosotti, et al., "S1-GLOBAL MODULE TESTS AT STF/KEK", Proceedings of the 2nd International Particle Accelerator Conference, San Sebastian, Spain, Aug. 2011. MOODA02.
- [3] H.Padamsee, et al., "RF Superconductivity for Accelerators", Wiley, 1998.
- [4] J.Odagiri, et al., "Integration of PLC with EPICS IOC for SuperKEKB Control System", Proceedings of ICALEPCS2013, San Francisco, US, Oct. 2013. MOCOBAB02.