

温度可変インサートを用いた自動温度制御

極低温科学センター/金属材料研究所 野島 勉 (t.nojima@tohoku.ac.jp)

1. はじめに

近年、MPMS や PPMS (Quantum Design (QD) 社製) 等に代表される、自動物性測定装置が市販されるようになり、決まった物理量 (例えば磁化、電気抵抗、熱輸送特性、比熱等) の 2 K 程度までの低温実験が比較的容易にできるようになってきた。これらの自動測定装置の魅力は、制御用に提供された PC のアプリケーション (QD 社の場合は MultiVu) を用いて、温度、磁場の変更と物理量測定を繰り返すプログラム (Sequence) を作成し実行すれば、目的の実験が自動で行えることであろう。このため、温度制御 (ヘリウムガスのフロー制御や液体ヘリウムの減圧) や磁場制御 (磁場スweepや永久電流モード設定) に関する基本的な低温技術を熟知しなくても実験を進めることができる。何よりも PC が夜通し測定してくれるため、時間的効率だけでなく、液体ヘリウムの利用効率も良い。最近では MPMS や PPMS の装置内に、既存のオプションにはない独自の測定機構や外部測定系 (例えば圧力セルや高次高調波輸送特性機構等) を組み込み、元々の温度、磁場制御機能のみをうまく活用する実験例も数多く見かける[1]。

一方、磁場中での低温実験を行う装置として、超伝導マグネットと温度可変インサート (Variable Temperature Insert: VTI) を組み合わせたシステム (例えば Oxford 社、Cryomagnetics 社、Cryogenic 社、ジェック東理社製等々) も広く普及している。図 1 にセンター内にある 9T 超伝導マグネット+VTI システム (Cryomagnetics 社製) の概要を示す。このシステムの利点はその汎用性の高さであろう。VTI では、基本的にデュワーから試料空間内に吸入されるヘリウムによる冷却 (VTI 吸入口にあるニードルバルブ

により流量調節) と VTI 底のヒーターによる加熱のバランスによって温度調節をする (より高精度で温度制御するには測定試料近くにもう一つヒーターと温度センサーを取り付けて VTI 底と試料の 2 か所で制御する)。ニードルバルブの開閉操作やその度合いに応じて、ヘリウムフロー式の冷却やヘリウムため込み式の冷却 (4 K 以下でポンピングをする冷却)、といった変化に富んだ実験スタイルが可能となる。また実験条件に応じて選べる超伝導マグネット、マグネット電源、温度コントローラの選択の自由度も高い。超伝導マグネットの仕様にもよるが、購入費用も比較的低予算に抑えられるし、もし研究室内に

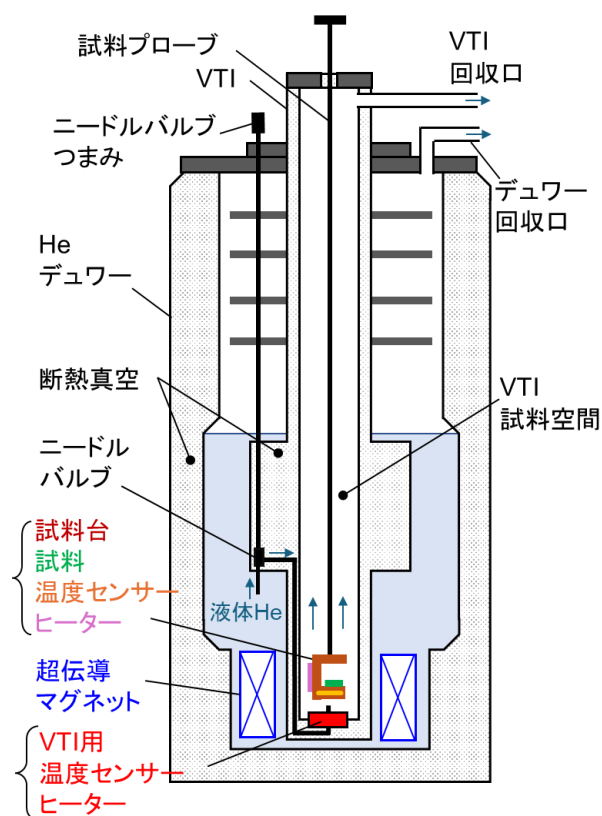


図 1. 温度可変インサート (VTI) の概略図。

使用していない温度コントローラやマグネット電源があればそれらを流用してシステムを構築できるという利便性もある。

しかし、多くの場合、超伝導マグネット+VTI システムでは、温度・磁場制御に関して、実験者の熟練や労力を必要とする場合が多い。通常、市販の温度コントローラ、磁場電源を使って直接手で操作するか、それら用に自作した PC 制御プログラム、もしくはメーカーが提供するプログラム（専用の実行ファイルや、LabVIEW や Python といった制御ソフトウェアに組み込めるサブルーチン）を使って PC 入力により操作することになるが、特に温度制御に関しては、温度領域、それに伴うニードルバルブの開閉具合によって、温度コントローラの PID 条件やヒーターレンジ設定を変えることが必要となる。単純に、ある温度範囲を往復するようなルーチンの測定をしたい場合には、この操作が煩わしい場合も出てくる。またルーチンの測定でなくても、冷却（昇温）速度を一定にした再現性の高い実験の需要は常にあ

るだろう。

そこで本稿では、VTI を用いた、労力の少ない（半）自動温度制御を目指して、センター内で培ってきた手法の一例を紹介する。MPMS や PPMS 等の自動測定機器を使用する環境のない方や、VTI を使って低温実験を始める方には実験の手がかりとして、VTI を使ってすでに似たような手法を構築されている方には、自身の技術の再確認用として、目を通していただければ幸いである。

2. 装置に追加する準備品

300 K から 2 K といった広範囲の温度制御を可能にするための肝となるのが、VTI 試料空間内部にニードルバルブを通して流れるヘリウム流量の制御である。筆者が VTI を使い始めた頃は、(i)ヘリウムデュワーの回収口に 1/3 psi 程度（約 2-3 kPa）の一方弁付けて弱く加圧し、回収ラインに繋いだ VTI 内の試料空間との差圧を利用してヘリウムフローを作る手法（ここでは差圧法と呼ぶ）、(ii)ロータリーポンプ（もしくはドライポンプ）で VTI の試料空間をフルにポンピングしながら、負圧下でヘリウムフロー強

制的に作る手法（負圧法）を用いていた。前者は 300 K - 10 K 程度まで有効であるが、試料温度が 10 K 以下で VTI 底に液体ヘリウムがたまり始めると温度が制御不能になるという欠点があった。後者は 2 K 以下までの低温に達することができるものの、100 K - 150 K 付近の高温で VTI のヒーターが限界に達してしまうため、高温ではニードルバルブを閉じたり、ポンプを止めて差圧法に移行したりする手間があった。さらに両手法ともニードルバルブの開閉度合や温度コントローラの PID 条件を経験に基づいて絶妙に調整する必要があり、これが初めて VTI を使う人へのバリアとなっていた。そこで

- ・ニードルバルブの開閉度をわかりやすい指標で固定化すること
- ・ポンプは常時 ON にして、手動バルブ操作を最小限に抑えること
- ・VTI 内のヘリウム流量もしくは圧力を数値化して調整すること

の方針のもと、装置の回収口に図 2 のような配管系を追加した。これによって得られる試料空間の圧力やヘリウム流量の数値情報が、結果的に温度制御の（半）自動化に向けて役立つものとなった。

この配管系作製用に新たに準備したものを以下に挙げる。

- (1) マスフローコントローラ（He 用に校正）1 台
- (2) ピラニーゲージ 1 台
- (3) ブルドンゲージ（ ± 0.1 MPa）1 個

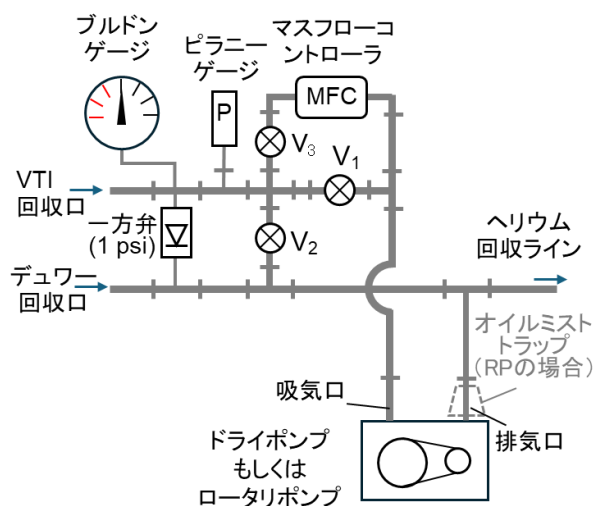


図 2. VTI とデュワーの回収ラインに追加した配管系。

- (4) バルブ（ホールバルブで十分） 3 個
- (5) 一方弁（クラック圧 1 psi $\cong$ 7 kPa）1 個
- (6) ドライポンプ（250 L/min）1 台

これらをつなぐ配管はNW フランジ（クロスとティー）、ねじ込み接手（PT1 インチ、1/2 インチ）、フレキ管（NW25 や NW16）、真空ゴム管等を使って自作した。(1)のマスフローコントローラは、流量 200 cc/min - 10000 cc/min 程度の制御範囲を持ち、PC で通信可能な外部電圧源で制御可能なもの（現状では堀場エステック社の SEC-N100 を使用）[2]、(2)のピラニーゲージは通常の空気校正したものを用いた。(5)の一方弁は後述するよう 4 K 以下からの昇温過程で試料空間の圧力上昇を防ぐために必要不可欠である。(6)のポンプ（現状では檜山社 NeoDry15e を使用）は 100 - 250 L/min の排気能力を持つものであればロータリーポンプを用いても構わない。ただしその場合、回収ラインの汚染を防ぐため排気口にオイルミストトラップ、吸気口にリークバルブ（回収ラインと接続）をつける必要がある。

温度の制御性や安定性は、VTI 底にある既設の温度センサーとヒーターだけでなく、試料台に温度センサーとヒーターをとりつけ、2 か所で制御すると各段に良くなる。当センター所有の VTI（Cryomagnetics 社製と Oxford 社製がある）では VTI 既設の温度センサーはセルノック抵抗、ヒーターは 25 Ω （25 W）である。試料台には同じくセルノックス抵抗とヒーター（50 Ω , 50 W の抵抗器 AP851 50R）を取り付けた（温度センサーは 1.4 K - 300 K で校正されたもの、ヒーターは 25 - 50 Ω （25 W - 50 W）の規格で、接触面積が十分取ればなんでも良い。以前はヒーターを 0.1 mm ϕ のマンガン線で作作していた）。温度コントローラは 0.5 W - 50 W レンジ（50 Ω ）もしくは 0.25 W - 25 W レンジ（25 Ω ）のヒーター出力に対する PID 制御と Ramp（温度スweep）機能を有することが必要とされる。筆者らは試料用として Crycon 社 54 型もしくは 24 型、VTI 用として Cryocon 62 型もしくは Lake Shore 社 350 型を使っているが上記の機能があれば機種を選ばない。

3. 300 K - 10 K の範囲での大気圧温度制御

実験の最低温度が 10 K まででよければ、以下の手順で比較的簡単に（設定温度と流量調整のみで）300 K から最低温まで温度制御できる。

3-1. 試料挿入

VTI に試料を挿入するとき VTI 温度を 270 K に設定（温度コントローラで PID 制御）した場合について述べる（VTI の挿入温度は 200 K までなら違ってよい。それ以下はニードルを詰まらせる原因になるので推奨しない）。ニードルバルブを全閉の状態を試料（プローブ）を挿入し、試料空間をパージした後、

- (a) バルブ操作（開閉）により図 3 のようなガスラインを作り、VTI 温度を 240 K に設定、マスフローコントローラを 700 cc/min 程度の流量に設定し VTI 中でフロー開始
- (b) 試料温度を 300 K に設定（1 K/min の Ramp 制御）
- (c) ニードルバルブを全開（多くの場合、1 回転で十分）。

といった操作をする。試料温度が 300 K、VTI 温度が 240 K で安定したら、マスフローコントローラを操作して、VTI 中のヘリウム流量を温度コントローラのヒーター出力の許容値の範囲内で上昇させる（当センターのプローブではヒーターまでの配線が 0.2 mm ϕ と細めであるため、試料用ヒーターの出力の許容値は最大 5 W（316 mA）とし、その時の適切な流量を 1000 cc/min とした）。これで測定の温度に関

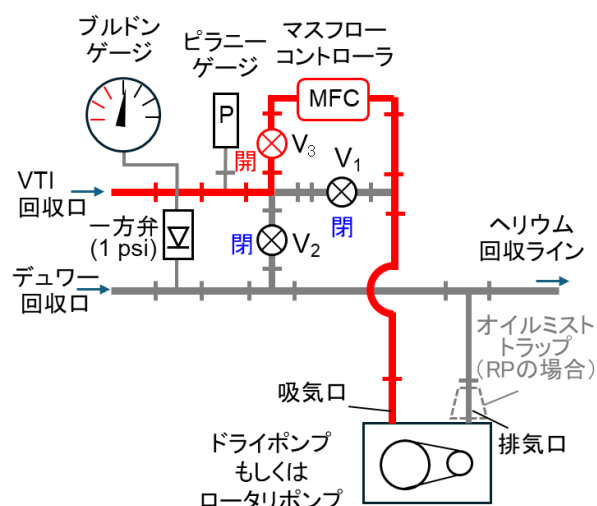


図 3. 大気圧下で温度制御する場合のガス回路（赤）。

する準備ができたことになる。

3-2. 降温過程（大気圧：300 K → 150 K 以下）

測定の準備（計測プログラム等の実行）ができたから、試料用温度コントローラ（Ramp モード）の設定温度を 10 K、VTI 用温度コントローラ（Ramp モード）の設定温度を 8 K に変更すると、試料温度が 10 K になるまで、追加作業なしで Ramp 設定した一定の Ramp（冷却）速度をほぼ保ちながら温度が減少する。この時、試料空間の圧力はニードル全開でも回収圧（～1 気圧）で維持され、10 K 以上では液体ヘリウムが VTI 中にたまることはない。

センターで使用している試料プローブでは、試料温度：VTI 温度 = 10 : 8、試料温度の Ramp 速度：VTI 温度の Ramp 速度 = 10 : 8 と設定すると、試料温度に対し Ramp 速度 1 K/min 以下での制御が十分可能である。VTI 中に挿入するプローブの試料台の熱容量が大きい場合、この比率を 10 : 8 より離れたものにするといよい（1 K/min より大きな冷却速度を持った制御は、ヘリウム流量、ヒーターレンジを共により大きく（1000 cc/min 超、50 W レンジ）することで得られるが、この場合 10 K での制御性は落ちる。自動測定という目的から外れるため本稿では省略する）。

ヘリウム流量が一定の場合、温度の制御性は温度コントローラの PID の設定値に左右される。これらの値は測定プローブごとに多少違ったものとなるが、経験的に 100 K において ±5 mK 以下の安定性が得られるような値を見つけると、それらは 10 K – 300 K の範囲で適用できること場合が多い（PID の具体的な設定方法はここでは省略するが、分からない場合は相談していただくことも可能である）。

3-3. 150 K ↔ 10 K の温度制御（大気圧）

試料温度が一旦 150 K 以下になったら、マスフローコントローラでヘリウム流量を 700-800 cc/min に変更すると、その後は 10 K と 150 K の範囲内での昇温・降温（1 K/min 以下の Ramp 速度）が試料と VTI の設定温度を 3-2 で述べたような比率で変えるだけで自由に行えるようになる。LabVIEW 等を使って、試料の設定温度と Ramp 速度を入力したら、自動的

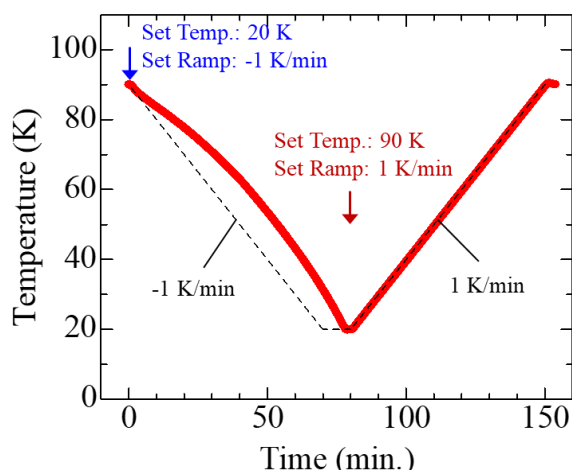


図 4. 大気圧のガスフロー中（図 3）で 90 K → 20 K → 90 K の自動温度制御を行った例。点線はプログラミングされた設定温度の時間変化、赤点が実際の試料温度を示す。

に試料用および VTI 用温度コントローラへ、それぞれの設定値が送信されるプログラムさえ別途作成すれば、測定は簡単に自動化されることになる（図 4）。

3-4 昇温過程（大気圧：150 K → 300 K）

150 K 以上の温度域において 1 K/min 程度の Ramp 速度で上昇させる場合、3-3 での 700 cc/min の流量に対し、5 W のヒーターでは制御の限界が来る。Ramp 速度を落とすか、ヒーターレンジを 50 W まで上げれば 150 K 以上でも制御はできるが、やはり 300 K までの間に限界が来る場合がある（発熱量が大きくて危険でもある）。これは試料台や VTI 底部の熱容量が温度とともに上昇するためである（格子比熱が T^3 に比例して大きくなることが影響している）。

そこで、150 K 以上の温度設定をする場合、マスフローコントローラの設定を 200 K で 0 cc/min となるよう 500 cc/min (150 K) → 200 cc/min (180 K) → 0 cc/min (200 K) のように変化させると、5 W のヒーターレンジを保ちつつ流量操作のみで昇温速度を保ったまま（不連続な温度変化なしに）300 K に達することができる。3-2 の降温時は冷却のため流量を大きくするが、昇温時は加熱のため流量を小さくする（ヒーターの効果を最大限に生かす）という非対称な操作となることを認識することが重要である。

また、急な温度上昇により VTI 内の圧力上昇が心配されるが、これは配管系にある一方弁が解消して

くれる。さらにVTIの内圧の微増は、ヘリウム吸入を抑えるため、結果的にニードルバルブ全開でも時間経過とともに圧力が回収圧に落ち着くことになる（つまり安全に制御される）。

4. 300 K–2 Kの範囲での温度制御（負圧制御）

液体ヘリウムの大気圧における沸点である 4.2 K 以下に温度を下げたい場合、ヘリウムを流しながら試料空間を負圧にする必要がある。このため、3.の手法で全開であったニードルバルブを絞り、ポンピングするという操作がどこかで必要となる。この付加的な操作のため、温度変化（冷却、昇温速度）の連続性が失われることが多々ある（実際、発売初期の旧式 MPMS や PPMS でも 4.2 K 以下は冷却方法がフロー式からため込み式に切り替わるため、そこで温度制御に待ち時間が生じていた）。これを防ぐため、以下に述べるよう、ニードルバルブの開閉度を一定にしたまま 4.2 K 以下と 4.2 K 以上の間を連続的に行き来できる条件を検討した。

4-1. 大気圧フロー制御から負圧制御への切り替え

まず、3-2の手法により、大気圧（回収圧）下で試料温度を 10 K – 300 K の任意の温度（ヘリウムが液体のまま吸入されない条件）で一定になるよう PID 制御した後、

(a) ニードルバルブを全閉

(b) 図 5 のようなポンピングラインに切り替えを行い、VTI 内の試料間を最低圧（5 Pa 程度）までポンピングする。その後、

(c) ニードルバルブを僅かに開けて、VTI 内試料空間の圧力が大気圧校正のピラニーゲージで約 7 Torr（約 900 Pa）を示すように調節

という操作を行う。(b)の操作後、少しの温度上昇、(c)の操作後、少しの温度下降が起きるが、温度コントローラのPID制御が働いていればすぐに設定値に戻る。負圧になっても大気圧の場合と実質的なヘリウム流量には大差ないので3-2と同じPID値を流用できる。

ピラニーゲージの動作原理（ガスの熱伝導度の変化によって真空度を測定する）のため、大気圧校正

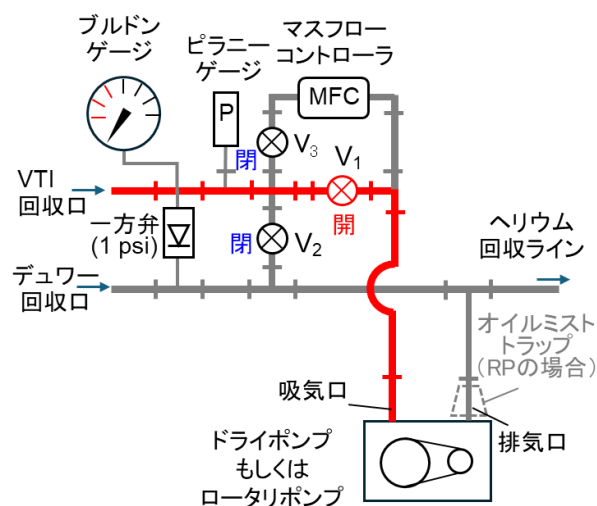


図 5. 負圧下（フルポンピング）で温度制御する場合のガス回路（赤）。

したピラニーゲージの示す圧力は実際のヘリウムの圧力とは違うことに注意したい（実際はより低圧になっており、0.7 Torr 程度と推測される）。しかし、ここでは圧力の目安さえわかればよいので絶対値の違いは問題とならない。また設定した約 7 Torr の表示値は、10 K 以上においては試料や VTI の温度変化にほとんど依らない（上記で任意の温度といったのはこのためである）。これはガス圧を調節するニードルバルブのニードル部の温度が常に液体ヘリウム温度になっているためである。以上により、4 K 以下までの温度制御の準備ができたことになる。

4-2. 150 K ↔ 2 K の温度制御（負圧）

以上の操作後、150 K 以下になったら、試料用および VTI 用の温度コントローラそれぞれの設定温度と Ramp 速度を、3-2 と同様にセットするだけで、2 K と 150 K の範囲内での昇温・降温（1 K/min 以下の Ramp 速度を保つ）を自由に行うことができる。ただし、100 K で設定した PID の値は、10 K 以下では有効に機能しないため、降温過程では 10 K – 20 K の間、昇温過程では 9 K – 10 K の間の温度で、別の PID 値（4 K で校正した値で十分）に変える必要がある。ここでも LabVIEW 等を使って、試料の設定温度と Ramp 速度を入力したら、試料用および VTI 用の温度コントローラへそれぞれの設定値が送信され、かつ指定の温度で PID 値を切り替え送信する仕様のプ

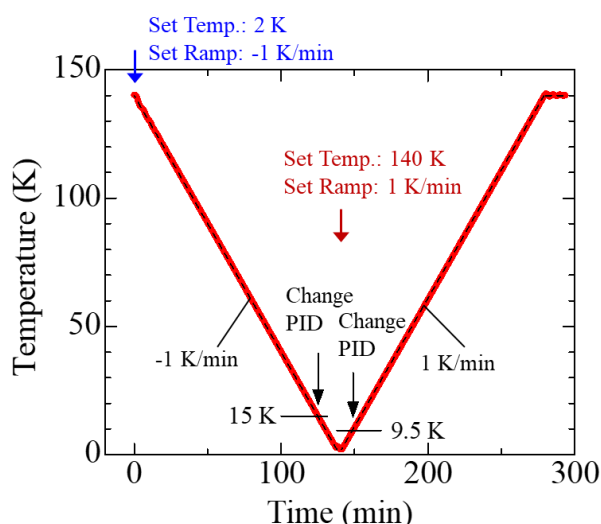


図 6. フルポンピング状態 (図 5) で 140 K → 2 K → 140 K の自動温度制御を行った例。点線はプログラミングされた設定温度の時間変化、赤点が実際の試料温度を示す。降温時 15 K、昇温時 9.5 K で PID 値の自動変更を行っている。

プログラムをつくることにより、測定は自動化される (図 6 に温度の制御例を示す)。

4-3 昇温過程 (負圧→大気圧 : 150 K → 300 K)

4-2 の設定では、1 K/min 程度で温度上昇させる場合、3-3 の場合と同様、試料温度が 150 K 前後になると 5 W のヒーターでは制御の限界が来る。そこでガス回路を図 5 から図 3 に変え、のマスフローコントローラ (700 cc/min に設定したまま) を通したポンピングに切り替え、その後回収圧になったら流量を 0 cc/min に設定すると昇温は続けられる。この手動バルブ操作 (V_1 と V_3) により VTI の試料空間の圧力が上昇し始めるが、3-2 の場合と違ってニードルバルブが絞られているため、その上昇速度はかなり遅い。よって温度の PID 制御で十分に追従でき、温度の不連続な変化は生じない (圧力は 200 K くらいまでに回収圧まで徐々に上昇する)。このようにして 300 K まで昇温できる。

150 K から 300 K の途中で再び冷却したい場合は、目標の試料温度と VTI 温度、それぞれの Ramp 速度を 3-2 と同様な比率で設定し、マスフローコントローラの流量を 1000 cc/min に増やすことで冷却に移行できる。2 K 以下の低温にしたい場合、4-1 に述べたよう 150 K - 10 K の任意の温度で図 3 から図 5 へ

の手動バルブ操作 (V_1 と V_3) が必要である。

5. 手動バルブ操作不要の温度制御 (300 K ↔ 3 K)

3. で述べた方法では手動バルブ操作を必要とせず、1 K/min 以下の Ramp 速度であればマスフローコントローラの設定値 (PC で通信可能な外部電圧で制御を想定) の変更のみで任意の温度に制御できるが、安定的に制御できる最低温度が 10 K とやや高い。一方、4. で述べた負圧 (ポンピング) の方法では 2 K 以下まで到達できるものの昇温時 150 K 前後で図 5 から図 3 のガス回路 (降温時はその逆) に変更するための手動バルブ操作を必要とする。これ自身は大した手間ではないが、例えば深夜や不在時に 150 K を通過して 2 K まで降温、もしくは 300 K まで昇温する状況になった場合、安全のため 150 K で測定を止めて翌朝まで待たなければならなくなる (完全な自動制御にならない)。

これを解決する方法の一つは、VTI 試料空間を直接ポンピングするためのバルブ (図 2、3、5 中の V_1) を電磁弁に変えて PC 制御で開閉することであろう。ただし、これは機器構成や制御プログラムをより複雑にする (電磁弁用に PC 制御可能な DC24 V 電源もしくは AC100 V リレーが必要になる) ため、この方式はまだ採用していない (今後採用予定)。

図 2 のセットアップの範囲内でかつ新たなバルブ操作なしという条件で、最低温度が 4.2 K 以下となる温度制御方法を探すため、300 K で 4-1 の (c) までの設定をした後、図 3 のガス回路に切り替え (マスフローコントローラを 700 cc/min に設定)、ポンピングを続けるとどこまで低温になるか試してみた (これは 3-3 と状況は似ているが、ニードルバルブが絞られているところが違う)。この場合、VTI 試料空間のポンプによる排気速度は、マスフローコントローラ的气体インピーダンスに律速されてしまう。実際、到達圧力は今回のセットアップでは 5 kPa $\approx$ 38 Torr (ブルドンゲージでの絶対圧) となり、2.5 K までは下がるものの 2 K 以下 (24 Torr 以下が必要) には到達しなかった。ニードルバルブを絞って流量を下げると、試料空間の圧力も下がるため、温度も下ると期待したが、今度は冷却能力が落ちてしまい、それ

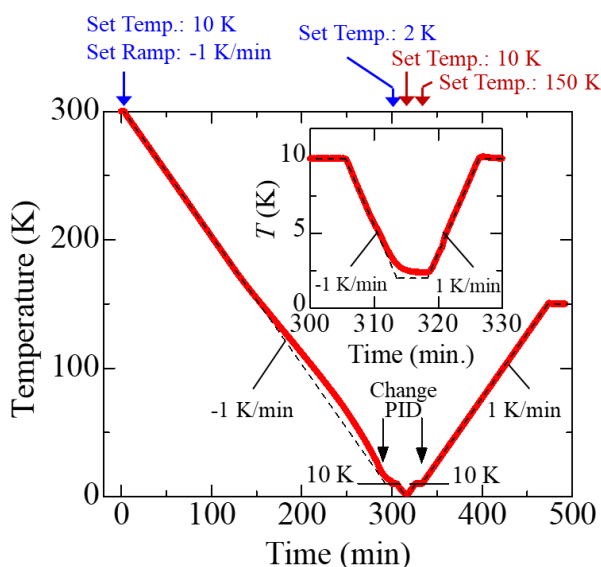


図 7. マスフローコントローラ経由のポンピング状態 (図 3) で 300 K → 10 K → 2 K → 10 K → 150 K の自動温度制御を行った例。点線はプログラミングされた設定温度の時間変化、赤点が実際の試料温度を示す。降温時 10 K、昇温時 10 K で PID 値の自動変更を行っている。

ほど温度は変わらない。4-1 の(c)において空気校正ピラニゲージで 7 Torr となるように設定したが、今回使用したプローブでは 4 Torr (到達温度が 2.3 K) くらいが限界ではあった (それ以下では逆に最低温度が上がる)。よって、もし最低温度が 2.5 K ~ 3 K 程度でよい場合は、この方法は有効と言える。マスフローコントローラの流量設定を、

- ・ 300 K から 150 K への降温時 : 1000 cc/min
- ・ 最低温と 150 K の間 (降温、昇温) : 700 cc/min
- ・ 150 K から 300 K の昇温時 : 0 cc/min

という条件で変更するプログラムを作れば、温度調節は広い温度範囲で自動化されることになる (図 7 に温度の制御例を示す)。

5. 制御用プログラム

ここまで、温度の (半) 自動制御のための、ハード面の機器構成やそれらの設定について述べてきた。実際にこれらが機能すれば、操作を手動 (または PC から手動入力) で行うだけでも測定はかなり楽になる。さらに MPMS や PPMS で用いられているような Sequence (操作手順の) プログラムがあると便利であろう。3.~5. で述べた手順の内、少なくとも手動バルブ操作を含まない過程は自動化できる。このため

には、LabVIEW や Python 等 (昔は N88 Basic や Visual Basic であった) のプログラミング言語を用いて Sequence 実行プログラムを作ることが必要となる。

ここでは紙面の都合上、その詳細は省かせていただくが、Sequence 実行プログラムは、温度コントローラ (2 台)、マスフローコントローラ、磁場電源の各機器へコマンド送信とデータ受信 (温度、磁場、流量の設定値送信と現在値の受信) をするサブルーチン (LabVIEW ではサブ VI と呼ばれる) を、実験目的の物理量計測のサブルーチンとともに作っておき、これらそれぞれ順を追って実行するような (サブルーチンを統合した) 設計とすればよい。現在当センターでは、

- ・ 設定温度、Ramp 速度
(具体例 : Set Temp, 100K 1K/min)
- ・ 設定磁場、磁場スweep速度、永久ループ有
(具体例 : Set Field, 5T, 0.1T/min, ON)
- ・ 物理量、温度、磁場測定
- ・

等々の実験の手順に関する情報を書いたテキストファイル (Sequence ファイル) を 1 行ずつ読み込んで、文字列 (例えば 'Set Temp' や 'Set Field') を判別した後、それらと紐づけされたサブルーチンが順次実行される Sequence プログラムがすでに構築されつつある。この自動測定システムこれにより、実験の時間的効率、ヘリウムの利用効率は格段に向上している。

6. まとめ

市販の VTI を使って、あまり手間をかけずに (ニードルバルブの開閉度を固定し、ガス流量だけを制御して)、ほぼ一定の冷却・昇温速度 (Ramp 速度) で温度調節する手法を、ハード面に中心に紹介してきた。MPMS や PPMS では VTI のニードルバルブに相当するものとして Thermal Impedance が取り付けられており、ヒーターによる流量の制御ができる[3, 4]。これに加えて図 2 の V_1 に相当するバルブが電動可変バルブになっていることが、温度制御の自動化に重要な寄与を与えている[4]。今回の VTI を使った温度制御では、ヘリウム入り口のニードルバルブの開閉度は固定して、代わりに出口のマスフローコン

トローラで流量制御するという部分が新たなアイデアとなる。もちろん V_1 を PPMS と同じように電動可変バルブに変えると、より低い (2K 以下の) 到達最低温度やより早い Ramp 速度を実現する自動温度制御が可能である。今後さらに整備を進めたい。

前述した通り、今回導入したセットアップ (VTI と配管系) を自動測定システムとして機能させるためには、ソフト面 (各機器の制御プログラムや Sequence プログラム) の充実も必要となる。何かの機会があれば、こちらについても紹介したい。

本稿で紹介した圧力やヘリウム流量の数値は、あくまでもセンターが所有する VTI と測定プローブに対するものである。違う会社、もしくは違う設計の VTI ではそれらの値は大小関係に同じ傾向はあるものの、全く同一ではない。本稿での値はあくまでも制御方法の目安値として取り扱っていただきたい。

謝辞

VTI を使った測定条件の導出は、当センター (野島研) 所属の学生である、佐久間翔梧、白井宏尚、工藤英鉄、高野俊一、川上俊輔、各氏の実験過程で得られた情報に基づくものである。また LabVIEW を使った自動測定プログラムの開発には、大内拓、圓山快応、弘内遼太郎、千葉尋斗の各氏 (以上野島研)、塩貝純一氏 (金研塚崎研、現大阪大学) の多大な寄与があった。ここに深く感謝したい。

参考文献

- [1] 壁谷 典幸, 水上 雄太, 東北大学 極低温科学センターだより No. 24 (令和 5 年 12 月), 技術ノート: 極低温理学部の共同利用機器 (MPMS・PPMS) の保守と利用の要点.
- [2] SEC-N100 はデジタル式マスフローコントローラであるが, より安価なアナログ式マスフローコントローラで十分である (本稿における試験は他の実験目的で購入したものを流用した).
- [3] Quantum Design, Magnetic Property Measurement System, Hardware & Software Reference Manual.
- [4] Quantum Design, Physical Property Measurement System, Hardware Manual.