

ヘリウム再凝縮装置・無冷媒マグネットの 立ち上げ・運用を経験して

瀬川 耕司 / 京都産業大学 理学部物理科学科 教授 (研究分担 B01)

この記事は、気軽に読めるものをということで依頼をいただいたが、トポロジーに関係する気のきいた記事など私に書けるわけもないので、2010年から2015年までのだいたい5年間で全6台のヘリウム再凝縮装置・無冷媒マグネットシステムの立ち上げ・運転をした貴重な経験をまとめ、ここで共有してみようかと思う。

そもそも低温が物性実験にとって非常に重要であることは言うまでもない。温度による擾乱によって室温では見えない現象が低温では現れ、物理の本質がよりよく見えるようになるからである。その低温を実現するにはヘリウムが不可欠であり、従来の低温実験系（クライオスタット）では外部から液体ヘリウムを定期的に供給し、そこをベースとしてより低温を実現していて、これは現在でも広く使われている。

物性実験に使われるこの方式のクライオスタットでは、1) 多くは2-5日に一度ヘリウムの継ぎ足しが必要、2) 同じ敷地内にヘリウムの再凝縮のできる施設があり、そこにつながるヘリウム回収ラインがあること、が現実的には必須となる。そこで次世代のクライオスタットとして、a) 蒸発するヘリウムを実験装置内で再凝縮して利用する再凝縮装置付きシステム、b) そもそも液体ヘリウム槽を持たず、冷凍機直結で冷却を行う無冷媒システム、の2種類が作製され、研究者・学生の負荷を減らすことができるようになっていく。

私の所属していた大阪大学産業科学研究所にあった安藤陽一先生の研究室では、2010年2月ごろから上記a)の再凝縮装置を次々に導入し、当初約60 m²の実験室で最大4台のシステムが同時に稼働するようになった。内訳は、1) Oxford社製14 Tマグネットのデュワーを再凝縮装置が組み込まれたものに換装したIntegraACというシステム 2) Quantum Design社の再凝縮装置付きPPMSシステム、3) 同じくQuantum Design社製だが既存の磁化測定システムMPMSに再凝縮装置を後から取り付けたもの、4) Cryomagnetics社製の14 Tマグネットシステムに後から同様に再凝縮装置を取り付けたもの、である。4台の再凝縮装置はいずれもパルス・チューブ式で1)のみ住友重機械製、残り3台はCryomech社製である。後者については装置から伸びるチューブをクライオスタットのトランスファーポートに挿したままで運用する(写真1)。パルス・チューブ式の冷凍機は



写真1: Cryomech社製再凝縮装置の外観。右下に見えているチューブをクライオスタットに挿して運用する。

ほとんどメンテナンスせずに運転し続けることができる利点がある（コンプレッサー等には必要）。実際に5年間運転して全く問題は生じなかった。

再凝縮装置を使い始めてまず印象に残ったのは、冷凍機が常に全力を出しているわけではない、ということである。再凝縮がうまく機能した場合は蒸発するヘリウムをすべて再液化できているということなので、ヘリウム槽内の圧力は下がる。これが大気圧より低くなると空気を吸い込んで危険を生じるため、圧力を維持するためにヒーターで冷凍機が働かないようにする仕掛けが必要なのである（ちなみにCryomech社の純正システムでは温度計をモニターするようになっていたが、これはあまり効率が良くないので圧力計による方式にすぐに改造した）。そして測定のために励磁などをすると大抵の場合ヘリウムの蒸発は再凝縮の能力を超え、液体ヘリウムが減少してしまうことが避けられない。PPMSに付属するシステムでは非測定時にヘリウムガスをボンベから供給することで補充する方式をとっていたが、蒸発量の大きい14 Tマグネットでは補充のためのヘリウムトランスファーは再凝縮装置のない場合よりは回数がずっと少なくなるが、依然として必要であった。

再凝縮できなかったヘリウムガスは逃さずに回収するのは当然なのだが、なるべく実験室にとどめておくに越したことはない。そこで試行錯誤した結果、4台のクライオスタットのヘリウム槽を何らかの形でつなげておくという運用に落ち着いた。低温センターから液体ヘリウムを持ってくるためのヘリウム容器からも1日に2リッター程度の液体ヘリウムが蒸発するが、それもヘリウム槽とつなげて利用することにした。その結果としてマグネットの運転がしばらく休止する時には液体ヘリウムを溜め込む、といった運用をすることができた。さかんに実験が行われていて他の装置からヘリウムの蒸発がある場合には2-3日ほど待てば液体ヘリウムレベルが十分に回復する、という具合である。結論としては、再凝縮装置は数が増えれば増えただけ効率良く運用することができる、ということになる。

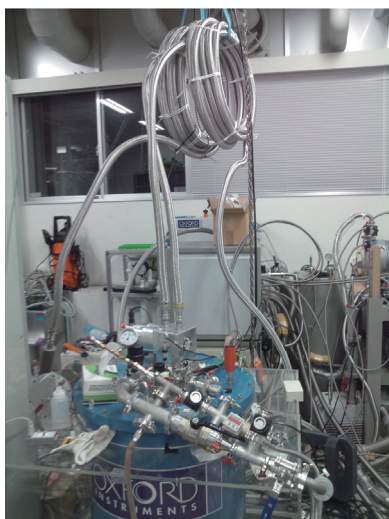


写真2: Oxford社のIntegraACの外観。再凝縮装置は内蔵されている。文中では触れていないがベランダに高圧ヘリウムチューブを出していたらやはりリークしたため、交換したチューブは室内に吊して運用することにした。

これらの装置には、パルス・チューブ式の冷凍機の駆動のためにガスに圧力差をつけるコンプレッサーが欠かせない。このコンプレッサーから約20気圧の高圧ヘリウムガスを満たした12-20mの長さの金属チューブが2本、クライオスタットに向かってのびることになる。コンプレッサーについては最初の3年間ほどはトラブルに多く見舞われた。まずは冷却水からのスケールである。2010年ごろはちょうど近くの建屋で耐震改修工事が行われていた関係で、冷却塔から冷却水に炭酸カルシウムなどのスケールと呼ばれる成分が混入してしまったり、それがCryomech製のコンプレッサーCP2800の冷却水配管内に析出して冷却が行われなくなってしまった。これを酸性の洗浄剤で洗い流したところ、なんとか熱交換は復活したのだが、取りきれなかった洗浄剤の蒸気が換気口から室内に侵入してヘリウムガスチューブに穴を開けてしまった（チューブまるごと交換）。それだけではなく、わずかに残った洗浄剤のせいで特に悪くなかった住友重機械製のコンプレッサーF-70の熱交換器にリークが生じてしまい、こちらは送り返して修理になってしまった。

実験室内のパルス・チューブ型冷凍機については事実上選択肢がCryomech社と住友重機械工業、の2社の製品になる。この2社のコンプレッサーに対する基本的な方針は大きく異なっている。住友重機械についてはコンプレッサーの完成度が高く、めったなことではトラブルを起こさないというのが私の印象である。対してCryomech社の方は、かなりトラブルが起きやすいのだがサポートが迅速で電子メールを本社に送るとすぐに対応してもらえ、とにかく自力でなんとかしたい場合に実験装置をほとんど止めずに修理できることが多い。

こうして再凝縮装置の運転を安定的に行えるようになったが、2013年度から研究室に順次導入された無冷媒システムは冷凍機ヘッドやコンプレッサーは再凝縮装置と同様であるものの、クライオスタットの構造が

全く異なっていた。導入されたのは2台で、Oxford社製の無冷媒希釈冷凍機システムTritonと、1.4 Kまでの測定が可能な8 TマグネットシステムTeslatron-PTである。

まずなかなか慣れなかったのは、無冷媒システムには真空槽が一つしかないことである。液体ヘリウムを使うクライオスタットでは、真空槽は外側と内側の二つがあるのが普通である。それが一つしかないということは、システム全体の冷却を熱交換ガスに任せて後で真空引き、という手順が通じないということであるため、無冷媒システムでは常にヘリウムガスを循環することになる。このように、クライオスタットを無冷媒化するというのは根本的に構造を変えることになり、簡単な改造では太刀打ちできない。逆に言えば既存のシステムをほぼそのまま活用できるという点では再凝縮装置の方に圧倒的な利がある。

しかし、試料の冷却に若干時間がかかるなどの欠点を考えに入れても、液化ガスがあらわに存在しないという無冷媒システムの利点は非常に大きいと感じた。私自身はマグネットクエンチを3度ほど経験したのだが、近くにいてもクエンチ自体に気づくことがないのには驚いた。今後時間はかかるかもしれないが実験用クライオスタットは無冷媒システムに置き換わっていくことと思う。

最後に、再凝縮装置・無冷媒クライオスタットの運用にあたっては、1) 冷却水の質は重要、2) 熱交換器の洗浄には酸性の薬剤を極力避ける、3) 高圧ヘリウムガスチューブを腐食させない、という点に注意しておきたい。私個人の印象ではやはり将来の主役は無冷媒マグネットであり、再凝縮装置は過渡期の技術のように感じる。このような時期にこの手で立ち上げと運用に携われたのは幸運であつたし、苦勞も多かったが幸せな時間であつた。安藤陽一先生をはじめ関係する方々に深く感謝したい。

著者紹介



せがわ こうじ

1971年東京都生まれ。94年京都大学理学部卒業、96年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。05年博士（理学）。(財)電力中央研究所主任研究員、大阪大学産業科学研究所助教・准教授を経て2015年から現職。