

京都大学桂キャンパス極低温施設での密閉式冷却塔の凍結トラブル

○多田康平^{#, A), B)}、西崎修司^{A), B)}

^{A)}京都大学 大学院工学研究科 附属桂インテックセンター

^{B)}京都大学 環境安全保健機構 低温物質管理部門

概要

京都大学桂キャンパス極低温施設には、ヘリウム液化供給システムの複数の被冷却機器の水冷のため、密閉式冷却塔が設置されている。令和5年1月下旬の寒波の際に密閉式冷却塔の複数の部品が凍結破損した。一時的には被冷却機器を運転できない状況に陥ったが、応急措置とその後の修理対応によってヘリウム損失などの重大な問題に発展することなく復旧させることができた。本稿では、凍結破損の状況、応急措置と修理対応、今後の対策等について述べる。

1. はじめに

京都大学桂キャンパス極低温施設は、桂キャンパス所属の部局（おもに大学院工学研究科）に対して、液体ヘリウム、液体窒素および窒素ガスを供給している。近年の年間供給量としては、液体ヘリウムが約2万リットル、窒素（液体窒素および窒素ガス）が液体換算で約25万リットルとなっている。

桂キャンパスに設置されているヘリウム液化供給システムのうち液化用ヘリウム圧縮機（Kaeser, DSD201）、ヘリウム液化機（Linde, L140）、回収用ヘリウム圧縮機（加地テック, WH5A-15G）の稼働には水冷を要するため、ヘリウム液化供給システムには、密閉型冷却水循環設備（空研工業, KMC-40S、以下「密閉式冷却塔」と呼ぶ。）が組み込まれている。ヘリウムの液化および回収の要となる複数の機械が水冷を要するため、ひとたび密閉式冷却塔が稼働できなくなると学内のヘリウムサイクルに多大な影響を与えることになる。

2. 密閉式冷却塔の仕組みと構造

図1に我々の密閉式冷却塔の概略図を示す。（一部の部品や配管等は省略してある。）この図を用いて、密閉式冷却塔の仕組みと構造を概説する。

冷却塔とは、被冷却機器を冷却するための流体（我々の施設の場合は冷却水）を冷却しながら、この冷却水を被冷却機器へ循環的に送り込む設備である。密閉式冷却塔の場合は、冷却水は密閉配管の中で循環し、基本的に外気と直接触れ合わないため、冷却水や配管内が汚染されにくいという利点がある。

循環水ポンプによって被冷却機器へ送り出された冷却水は、機器を冷却した際の熱交換によって温められて密閉式冷却塔へ戻ってくる。銅管でできたコイルと呼ばれる熱交換器の中を流れるあいだに、冷却水はコイル管壁を介して外気と熱交換し、冷却される。散水ポンプを用いて散布水を散布し、送風機で強制的に誘引された外気と散布水が接触することで散布水の蒸発が促進され、その気化熱を利用して、冷却水を冷却する効率を高めている。さらに、コイルの周囲は充填材と呼ばれる構造物で覆われており、散

布水と外気が効率よく接触するよう、表面積が大きくなるように工夫されている。散布水は密閉式冷却塔の下部水槽に開放的に溜められている。日常的な蒸発などによって散布水量が少なくなると上水道から自動的に給水し、逆に降雨などによって散布水量が多すぎると自動的にオーバーフロー配管から水を排出することで、常に一定量の散布水が溜められるようになっている。

冷却水は密閉配管内を循環しながら、水温の上下を繰り返している。この温度変化に伴う冷却水の比体積や圧力の変化を吸収するため、密閉式冷却塔の最上部に膨張タンクが設置されている。冷却水の比体積の増加や圧力の上昇が起こると、それに応じて膨張タンクの水位が上昇する。上昇しすぎた水はオーバーフロー配管から自動的に排出される。一方、冷却水の比体積の減少や圧力の下降あるいは日常的な蒸発などによって膨張タンクの水位が下降すると、上水道から自動的に給水される。膨張タンクのメンテナンス等のときには、手動バルブで強制的に排水することもできる。

外気温の低い冬期に銅管コイル内で冷却水が凍結膨張すると、コイルが破損するおそれがある。この破損を予防するため、コイルの出入口にバイパスラインを設け、凍結防止ポンプを設置している。この凍結防止ポンプを稼働させることで、コイル内で冷却水を循環させ、熱負荷をかけた状態にすることで、コイル内での冷却水の凍結とそれに伴うコイルの破損を防ぐことができる。

3. 寒波の状況と密閉式冷却塔の被害

図2に令和5年1月下旬の京都市の気温のグラフを示す。実線は桂キャンパス（京都市西京区）のヘリウム液化供給システムのヘリウム長尺カードルの温度計の実測値、破線は気象庁のホームページ [1] から取得した京都市の気温データである。両者の間に数度程度の違いはあるものの、全体的なトレンドは一致している。1月の標準的な京都市の気温としては、最低気温が0-5℃程度、最高気温が5-10℃程度である。寒波が到来したのは令和5年1月24日（火）であった。桂キャンパス周辺ではこの日の午後3時ごろから激しく吹雪き、数時間もたないうちに雪が積もった。通勤通学者の帰宅時間帯に重なり、路線

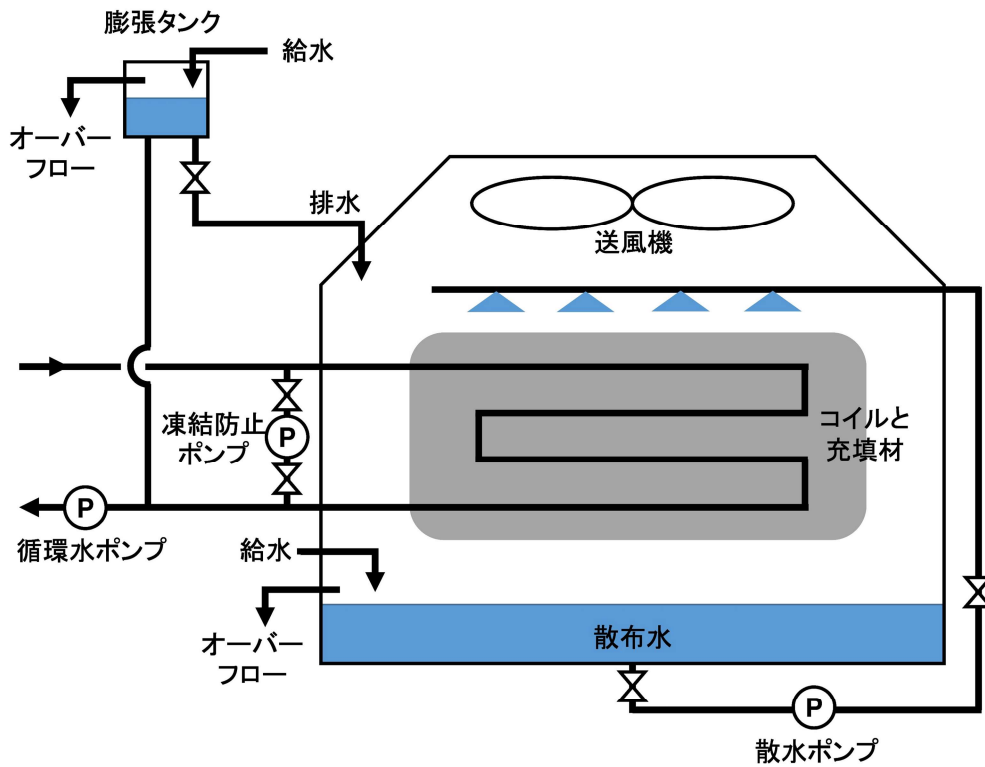


図1. 密閉式冷却塔の概略図

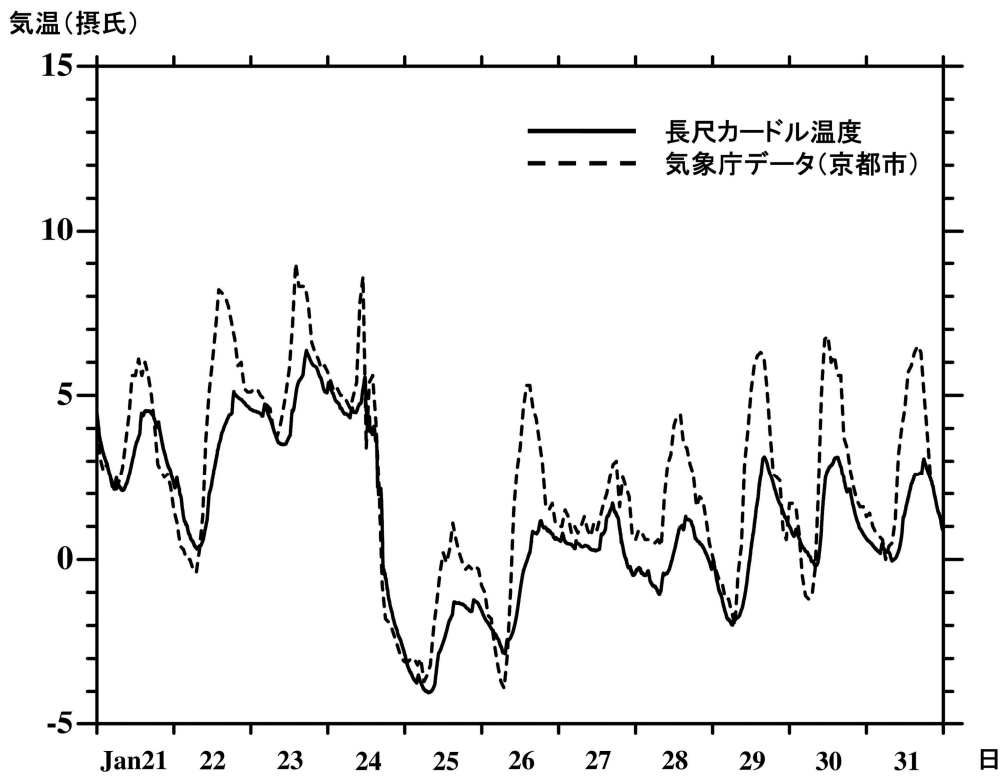


図2. 令和5年1月下旬の京都市の気温のグラフ

バスやJR西日本などの公共交通機関に大幅な遅延や運転見合せのトラブルが続出して、帰宅困難者もいたという話を聞いている。図2のグラフから、1月24日(火)の午後には5°C程度であった気温が、1月25日(水)の朝までに-4°Cまで低下したことがわかる。1月25日(水)は、ほぼ終日氷点下の気温であったが、その後数日かけて徐々に気温が標準的なものへ回復した。桂キャンパス周辺では、この寒波のときに積もった雪が全て無くなったのは2月初めであったと記憶している。

寒波到来までの密閉式冷却塔の凍結対策としては、12月下旬から循環水ポンプを手動運転モードで強制的に稼働させ、冷却水を被冷却機器と密閉式冷却塔との間で循環させ続ける措置を講じていた。散水ポンプと凍結防止ポンプについては、自動運転モードのままで特に対策は講じていなかった。

1月24日(火)までは、循環水ポンプ、散水ポンプともに問題なく稼働し、回収用ヘリウム圧縮機を運転することができた。ところが1月25日(水)には散水ポンプが過負荷のため異常停止した。液化運転時以外では、散水ポンプは、回収用ヘリウム圧縮機の運転時に既定の温度まで冷却水温が上昇したときだけ稼働するため、散水ポンプが停止している間に凍結してしまったものと考えられた。回収用ヘリウム圧縮機の1回の運転は短時間(約30分間)であるため、外気温の低い冬には、散水ポンプが稼働しなくても回収用ヘリウム圧縮機を水冷することができた。そのため、散水ポンプの状況を確認して過負荷異常をリセットすることをなおざりにしていた。

1月26日(木)の午後5時頃から液化運転を試みた。上述の散水ポンプの過負荷異常をリセットしていなかったため、散水ポンプが稼働せず、冷却水が高温(約96°C)となりタービンの温度異常でヘリウム液化機が緊急停止した。まず、散水ポンプの過負荷異常をリセットして、散水ポンプが稼働できる状態に復旧させた。加えて、密閉式冷却塔の凍結防止機能を手動運転モードで稼働させ、凍結防止ポンプも稼働させた。この状態で再度の液化運転を試みたが、今度は冷却水量不足の異常が発生したため、このままでは液化運転をおこなうことはできなかった。

1月26日(木)の午後7時頃に液化運転を中止して密閉式冷却塔を確認したところ、以下の問題が発生していることがわかった。まず、散水ポンプのケーシングに亀裂が入っており、散布水がそこから漏れていた(図3)。また、凍結防止ポンプが破損しており、冷却水がそこから漏れていた。さらに、保温とラッキングがなされていたものの、上水道から膨張タンクおよび下部水槽へ給水する水道管が凍結しており、不足した水を補えなかった。散水ポンプおよび凍結防止ポンプについては、ポンプ内に残っている水が凍結して氷になったときの体積膨張で破損したか、あるいは、凍結している状態で無理に稼働させようとしたときに破損したか、のどちらかであろうと考えられた。図1に示すように、凍結防止ポンプは冷却水配管にバイパスして設置されているので、この凍結防止ポンプが破損したことで冷却水が漏れて減少し、上水道の水道管の凍結により給水もできな



図3. 散水ポンプのケーシングの亀裂から散布水が漏れている様子



図4. 折損した膨張タンク下部配管

ったことから、液化運転の際に冷却水量が不足したと考えられた。銅管コイルの破損の有無については、この時点では分からなかった。

4. 応急措置

散水ポンプは、ケーシングに亀裂が入っていたものの、手動運転モードで稼働させることができた。理由は分からないが、停止時と比べて稼働時のほうが亀裂からの散布水の漏れが明らかに少なかったため、散水ポンプについては、手動運転モードで強制的に稼働させ続けることにして散布水の減少に努めた。下部水槽に溜められている散布水が減少して不足してしまっているのではないかと危惧したが、散布水に外部から水を補給したところオーバーフロー配管からの排水が確認されたので、散布水は不足していないと判断した。

破損した凍結防止ポンプからの冷却水の漏れに関しては、凍結防止ポンプの両側に設置されているバルブ(図1参照)を閉止して、冷却水配管から凍結防止ポンプを切り離すことにより止めることができた。冷却水が不足した問題に対しては、上述の通り、膨張タンクが冷却水配管につながっているため、膨張タンクを通して冷却水を補給することを試みた。この

作業の途中、膨張タンクから手動で排水する配管に力がかかり、この配管を折損してしまったため、一時的に膨張タンクに水を溜められなくなった(図4)。手持ちの安全弁に付属していたテーパネジ部を保護するキャップの直径が、偶然、膨張タンクの下部配管と一致したため、このキャップを流用することにした。配管にこのキャップをはめ、ホースバンドで固定して、膨張タンクからの排水を止め、再び膨張タンクに水を溜められるようになった(図4)。上水道から給水することができなかつたので、別の凍結していない散水栓からホースを引き回し、膨張タンクを通して冷却水配管へ給水した。給水速度を高めるために、散水栓からの給水に加えて、我々の建物の給湯室から湯を汲み、バケツリレーでも給水した。日付が変わった1月27日(金)の午前1時ごろまでには安定的に循環できるだけの冷却水量を回復して、回収用圧縮機を稼働できるようになったため、ガスバッグをはじめとする回収系統からのヘリウムガス放出を免れた。

以上の応急措置により、散布水および冷却水を循環できるようになり、ヘリウムの液化運転および回収運転をおこなえるようになった。応急措置後最初の液化運転は1月27日(金)から1月28日(土)にかけて問題なくおこなうことができた。再度の冷却水量不足を避けるため散水栓からホースによる膨張タンクへの給水はそのまま続けることとした。また、循環水ポンプと散水ポンプは手動運転モードで常時稼働させ続け、これらのポンプの凍結や凍結による破損を避けるよう努めた。1月30日(月)午後までには、上水道から給水する水道管の凍結が解消し、膨張タンクおよび下部水槽へ自動的に給水できる状態に戻ったため、散水栓からのホースによる給水をやめた。

5. 修理対応

1月31日(火)午後に業者殿に密閉式冷却塔の状況を確認して頂いた。散水ポンプ・凍結防止ポンプ・膨張タンク下部配管は交換や修理が必要という判断であった。銅管コイルについては、一部充填材を取り外して簡易点検したところ問題は見られなかったが、全体的に充填材を取り外して点検したほうがよいということであった。

散水ポンプは、ケーシングに亀裂が入っていても稼働させることができたが、運転負荷などにより亀裂が広がった場合に稼働できなくなる可能性を考え、可及的速やかに交換することとした。ポンプの納期の都合や年度をまたいだスケジュール調整の難しさはあったものの、4月19日(水)に散水ポンプ交換工事を実施した。散水ポンプの定格電流は200Vで3.3Aであり、実際に交換後の新しいポンプでは2.8A程度の電流が流れているが、交換前の破損したポンプでは1.5A程度しか流れていなかったため、やはり異常な状態で辛うじて散布水を循環させていたのだと後で認識した。膨張タンク下部配管については、6月27日(火)に交換して頂き、復旧できた。

凍結防止ポンプについては、やはりポンプの納期



図5. 充填材を取り外して銅管コイル周辺の点検等をしている様子

等の都合でスケジュール調整が難航したが、10月25日(水)に交換工事を実施した。同日に、経年的に劣化していたエア抜き弁の交換や充填材をすべて取り外しての銅管コイルの点検作業もおこなった(図5)。寒波到来から半年以上も大きな問題なく冷却水を循環できていたのでコイルに問題はないと予想してはいたが、実際にコイルに破損や漏水等の問題がないことを業者殿に確認して頂いて安心できた。充填材は、経年的にカルキ等が付着している可能性があったため取り外した際に高圧洗浄して頂き、あまり劣化が進んでいないということで再度取り付けた。散布水を溜めている密閉式冷却塔の下部水槽には経年的にヘドロ等が堆積し、普段から数年ごとに高圧洗浄のメンテナンスを業者殿にお願いしている。この時にも堆積物が溜まっており、また、充填材の脱着の際にカルキ成分等が落下した可能性があったため、充填材を取り付けた後に下部水槽も高圧洗浄して頂いた。

寒波による被害発生から半年以上経過してしまっ

たが、ヘリウムガス損失や学内のヘリウムサイクル停止といった重大な問題に発展することなく、冬が来る前に全ての修理をおこなうことができた。なお、今回の寒波被害に関しては、国立大学法人総合損害保険（国大協保険）を利用することも検討し、報告書等を作成、提出していたが、桂キャンパスでの損害額が免責金額の範囲内であったため、結果的には保険金を受け取ることは叶わなかった。

6. 今後の対策

今回のトラブルを経て、密閉式冷却塔の仕組みと構造をより深く理解し、それを踏まえ凍結防止策を講じなければならない、と意識を新たにした。第2節で述べた密閉式冷却塔の仕組みと構造については、実は従前から理解していたのではなかった。そのため第4節で述べた対応も、現場で密閉式冷却塔の構造や動作状況を見ながらその場しのぎの応急措置を講じ、辛うじて危機を脱したに過ぎない。そして応急措置のあとで、取扱説明書やインターネットで調べたり、工事の際に業者殿に教えて頂いたりして、密閉式冷却塔の仕組みと構造について理解を深めることとなった。今後は、今回のトラブルを契機に理解した密閉式冷却塔の仕組みと構造を踏まえて、「どこが損傷を受けると何ができなくなり、その結果ヘリウム液化供給システムにはどのような影響が出るか」を考えながら維持管理に務めていく。

我々の密閉式冷却塔は平成18年に設置され、故障や劣化のために設置当初のように働かなくなった機能もある。配管の凍結を防止するための一部のヒーターも3年前から働かなくなっているが、修理費用の高額さのために現状ではそのままになっている。この状況で、密閉式冷却塔の凍結を防止するためにはポンプ類を常時運転し熱負荷をかけ続けることが良いと判断し、この冬は、令和5年12月下旬から、循環水ポンプ・散水ポンプ・凍結防止ポンプのすべてを手動運転モードで強制的に稼働させ続けている。本稿で報告した令和5年1月の寒波ほどの環境を経験していないため、その効果については十分に分からないところもあるが、本稿を執筆している令和6年2月時点では凍結トラブルは生じておらず、安定的に密閉式冷却塔を稼働できている。正常に働かない密閉式冷却塔の機能については、予算や優先順位を考慮しながら、可能なタイミングで修理を検討したい。

今回の寒波では、保温材による保温とラッキングがなされているにも関わらず、上水道から給水する水道管も凍結してしまった。この水道管の凍結に対しては、すでに紹介されている[2]「凍結防止ソケット」（サーモエレメントを内蔵し、周囲の温度が下がると自動で少量の水を排出して凍結を防止する器具）の使用を検討している。

トラブルが生じる前に適切に維持管理して密閉式冷却塔を稼働させ続けることが本来あるべき姿だが、万一密閉式冷却塔にトラブルが生じて稼働できなくなった場合にも学内のヘリウムサイクルを止めないことが最重要であると考えている。有り難いことに、桂キャンパスではヘリウム液化供給システムを更新

できるはこびとなり、令和6年11月の完成を目指して手続を進めている。この更新では、おもに液化系統（ヘリウム液化機・液化用ヘリウム圧縮機・液体ヘリウム貯槽など）を増設して二重化する計画で、密閉式冷却塔も1基増設する。結果、システム全体としては現有のものと合わせて密閉式冷却塔を2基保有する体制となる。京都大学吉田キャンパスではすでにヘリウム液化供給システムが二重化されているが[3, 4]、桂キャンパスでも同様にシステムを二重化することで学内のヘリウムサイクルの安定化に寄与できると考えている。

謝辞

本稿で報告した密閉式冷却塔の凍結トラブルでは、業者殿には比較的タイトなスケジュールで部品交換や修理の工事を実施して頂いた。環境安全保健機構低温物質管理部門および施設部環境安全保健課機構事務掛の関係者には、技術的および事務的なサポートをして頂いた。桂キャンパスのヘリウム利用者には密閉式冷却塔の修理工事の度に一時的なヘリウム利用制限にご協力を頂いた。ここに心からの感謝を申し上げる。

参考文献

- [1] <https://www.data.jma.go.jp/stats/ctrn/index.php>
- [2] 大城 秀治、“冷却塔の凍結トラブルについて”、大阪大学大学院工学研究科技術部報告集、**9**, 34-35 (2023).
- [3] 大塚 晃弘、“新しく導入されたヘリウム液化・供給システム”、京都大学低温物質科学研究センター誌、**4**, 7-9 (2004).
- [4] 大塚 晃弘、“吉田キャンパス液体ヘリウム関連設備の更新”、京都大学物性科学センター誌、**28**, 23-27 (2016).