

ヘリウム液化機の昇温過程に関する検討

極低温科学センター 緒方亜里, 野島 勉
(ogata@imr.tohoku.ac.jp)

1. はじめに

東北大学研究推進・支援機構極低温科学センターは、学内の各研究室（ユーザー）に対する液体ヘリウムの安定供給を第一の使命としている。これは使用後のガスヘリウムを回収し再液化するシステムにより実現・維持されている。各ユーザーの使用料金の低減（ひいては大学全体としての研究費の効率的な使用）、さらには限られた資源（ヘリウム・電気・水）の有効活用のためには、回収率の向上に加え、液化コストの削減が重要事項となる。このため当センターでは、日頃から液化時に収集された様々なデータの解析をし、液化効率の改善を試みている。

H29 度の本誌技術ノートにおいて、時間当たりの液化量で評価した液化効率は、前回液化運転からの停止時間と相関しており、液化機内が十分冷えていると予測される約 38 時間以下（停止後の翌々日朝に相当）で、高い効率が得られることが報告された[1]。これは液化機内の真空断熱による保温効果の重要性を示すものだが、さらに理解を進めるためには、液化機が運転停止後、自然放置でどのような昇温過程をたどるかということに関する知見を得ることが次の課題となる。一方、液化運転の累積時間に応じて必要となる液化機のメンテナンスや不定期な修理において、液化機全体の温度を一旦室温へ上昇させざるを得ない状況が発生することがある。この際、上記の保温とは逆にいかに迅速に強制昇温し、メンテナンス作業に着手するかということが重要となる。これはメンテナンスによるヘリウム供給停止期間を最小限に止め、安定供給にもつながる事項である。

そこで、本稿では今年度の 7 月に行った液化機のメンテナンスの際に行われた強制昇温と、8 月の夏期停止期間での自然昇温の際に計測された液化機の温

度データより、後述する 3 つの昇温過程に関する解析を行った。これにより、より効率的な運転や安定供給につながる具体的な指標を得ることを試みた。

2. 昇温工程と測定方法

図 1 に示すよう、ヘリウム液化機は冷却用の 2 機の膨張タービンとジュールトムソン (JT) 弁、熱交換器等が配管とともに外槽に密封された構造となっている。槽内を真空引きして外界から断熱することにより冷凍運転が可能となる。今回の昇温試験では、液化運転停止後、(i)槽内を真空にしたまま放置する自然昇温（通常運転停止時と同じ状態）、(ii)槽内の断熱を窒素（熱交換）ガスにより破った後、放置する非断熱的な昇温、(iii)液化用圧縮機のみ運転して配管内に室温のヘリウムガスを循環させる強制昇温（加温運転とも呼ぶ）の 3 つの昇温過程を比較した。

(i)では、液化運転停止直後の真空度は 0.001 hPa 以下であったが、昇温とともに約 270 K で 0.05 hPa まで上昇した。これは主として槽内（特に断熱材であるスーパーインシュレーションの表面等）に低温吸着されたガスの脱離が原因と考えられる。(ii)と(iii)は連続した工程である。まず第一段階として、液化機外槽に 1 気圧換算で 90 l×3 回分の窒素ガスを入れることで真空度を 0.0013 hPa から 0.16 hPa にし自然昇温の速度を上げた。0.16 hPa という僅かな圧力上昇は投入した窒素が凝縮したためである（室温付近では 55 hPa であった）。その後約 200 K に達したところで、第二段階として液化用圧縮機を起動し、槽内各所の電磁バルブを開けることにより、ヘリウムガス循環による液化機内の加温運転を行った（配管内の圧力・流量を調節するため図 1 の概略図に示した以外に数多くのバルブが存在する）。循環時の

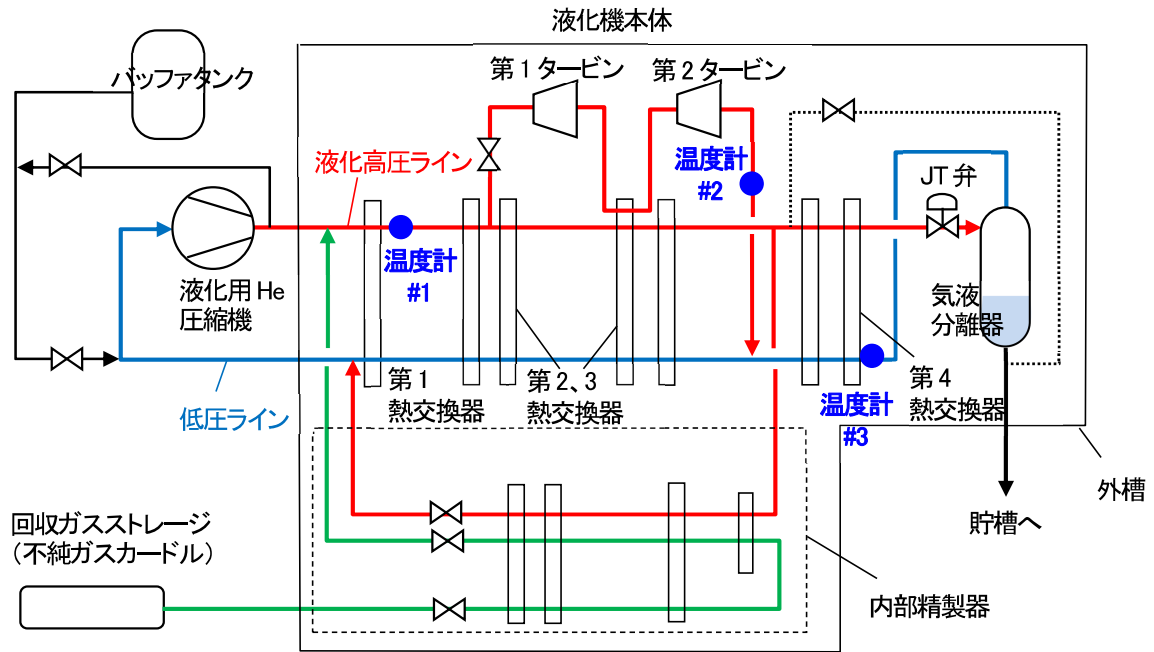


図1 液化機本体内のガス回路概略図と温度計測場所（青丸）。

圧縮機の吐出圧力は0.82MPaである。

温度計測の場所として系統図（図1）中に青丸で記した温度計#1（第1熱交付近）、#2（第2タービン出口）、#3（第4熱交付近）の温度（K）を選び、上記3過程における温度測定値と時間との関係を調べた。

3. 測定結果

3-1. 自然昇温

図2に(i)自然昇温時の各温度の時間変化を示す。ここで時間は液化運転終了直後からの経過時間を分で表す。自然昇温では、翌朝の840分後（14時間後）に温度計#1が78Kから156K、#2が43Kから131K、#3が15Kから90Kに、1500分後（25時間後）（図2中緑点線）に、それぞれ172K（#1）、162K（#2）116K（#3）まで上昇した。この時間まで、#1の温度が細かい振動をしているのは、温度の上昇とともに高圧ラインの圧力が上昇した結果、自動弁が働いて、ガスがバッファタンクに流れたためである。この流れにより温度の低い第2-4熱交換器付近のガスが温度計#1付近を通過するため一時的に温度が下がることになる。

#3の温度が最初に減少し、その後1500分までに緩やかな上昇をすることに注目したい。これは液化

運転終了後、気液分離器に残った液体ヘリウムの影響であると考えられる。気液分離器に液体ヘリウムが十分に残っているとそこからの伝導冷却と蒸発ガスによる冷却のため、温度計#3付近の領域は運転停止直後より冷やされることになる。その後、残液がなくなるとともに温度上昇を始めるが（約350分後）、温度の低い気液分離機による冷却のためその上昇は抑えられる。やがて約1500分後に気液分離機の温度が#3と同程度となり、急な温度上昇に転じるものと予測される。これは液化運転度の翌日と翌々日で、液化効率があまり変わらないという昨年度の報告

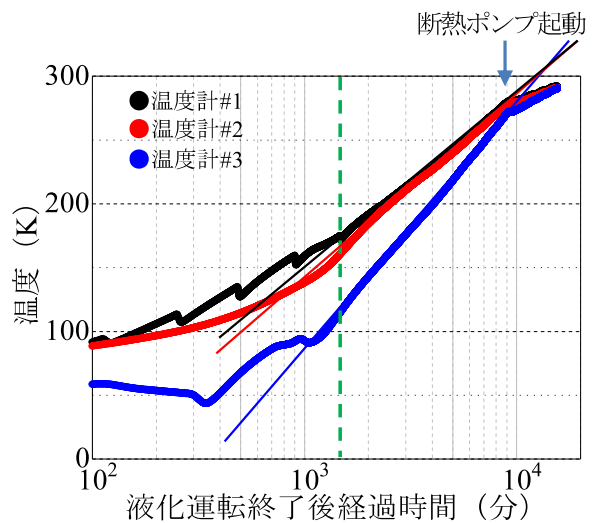


図2 自然昇温による液化機運転後の経過時間と温度の関係。

[1]ともつじつまが合う。もしこの予想が妥当であれば、当初貯槽の圧力を下げる目的でとりつけられた気液分離器が、液化機の昇温抑制にも効果があるということになる。これを装備していない液化機で初期の温度上昇がどうなるかということに今後興味が持たれる。

気液分離器による冷却の影響がほぼなくなったと考えられる1500分以降において、各温度は対数時間に対して線型の上昇を示す。これは様々な物理量の熱緩和過程に共通する現象である。今回のデータでは、液化終了後9000分あたりからグラフが折れ曲がり傾きが小さくなっている。これはこの時間に外槽内の真空度を良くするため自動で真空ポンプが動いてしまい、真空度が上がった（断熱が良くなった）ためである。この効果を見ても（図1中の外挿線）自然昇温で液化機内温度が万遍なく300K（常温）まで昇温するまでには概ね12000分（200時間、日数にして約8日）程度がかかると予測される。

3-2. N₂熱交換ガスによる昇温

上記(ii)の工程として液化機の断熱槽（外槽内）に熱交換ガスとして270ℓの窒素ガスを入れ、一定時間経過後、(iii)の工程として、圧縮機による加温運転をした場合の各温度計の時間変化を図3に示す。窒素ガス投入後、約80分後から図1でも見られた対数時間に線型な温度上昇が始まる。14時間経過した

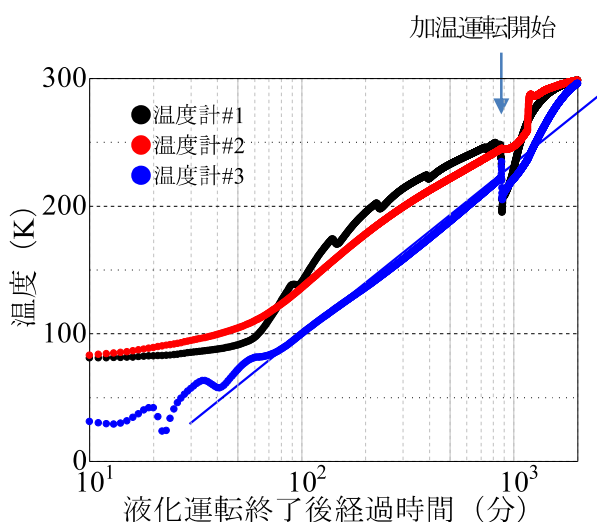


図3 N₂熱交換ガスと加温運転による温度変化。

翌朝（840分後）の温度は#1が246K、#2が243K、#3が220Kとなった。対数的な温度上昇が続くと仮定すると（図2中の青線）、このまま後の加温運転をせずに放置することで約3200分（53時間）後に300K（常温）程度まで昇温すると予測される。これは断熱真空を保ったままの自然昇温に比べ、約5倍の速度となる。しかし、室温換算で55hPaの熱交換ガスのみによる加温では、昇温速度は早くなったとはいえ、液化機内部の比熱が大きく、まだ2日以上の日数必要であることがわかる。そこで次節の加温運転を実行した。

3-3. 加温運転による強制昇温

3-2の時点から(iii)の工程として圧縮機を動かしてヘリウムガス循環による加温運転をすることで（図3の矢印以降）、24時間で#1が246Kから300K、#2が243Kから300K、#3が220Kから301Kとなった。加温運転開始（圧縮機運転後やバルブを開にした）直後に#1と#3の温度は一時的に急激に下降する。これは液化機系統内のヘリウムガスに流れがでることに起因している。#1は低圧ラインを通して流れてくる第2、第3、第4熱交換器からの温度の低いガス、#3は気液分離器からのガスによる冷却の影響を受けるためと推測される。一定時間経過後は高圧ラインから来る室温のガスによる加温効果が勝り、両者とも時間とともに上昇に転じる。

一方、#2は#1や#3のような、温度の下降がなく、かつ最も急激に温度上昇する。これは#2が他に比べ熱交換器から離れたところに位置するため、加温ガスの影響のみを受けるためと考えられる。つまりヘリウム液化機において、熱交換器の比熱は大きく、加温運転時においても温まりにくく、そこから離れた場所から先に温度上昇することが分かった。これは液化機のしくみを考えると、当たり前のことかもしれないが、今回の測定により明確になったことである。

4. 昇温過程の比較と考察

上記で得られたデータのうち、対数時間に対しほぼ線形にふるまう温度計#3の結果を各昇温過程の

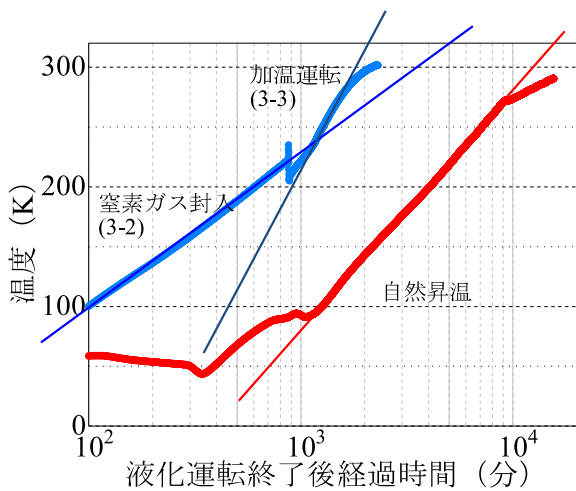


図4 自然昇温とN₂熱交換ガス+加温運転による温度(#3)の時間変化の比較

間で比較してみた(図4)。これにより昇温過程に関して以下のことが分かった。

- (1)自然昇温では液化機内が100 Kから300 Kに上昇するまでに早い箇所でも180~200時間程度かかる。
- (2)これが今回行った3-2の窒素の熱交換ガスを入れた工程では53~55時間に短縮される。
- (3)さらに200 K以上で3-3の加温運転を行うことで20時間程度の時間短縮できる。

3-2と3-3を組み合わせることで約35時間という短時間で液化機内を300 Kまで昇温することができた。これにより液化機運転日の翌々日の朝には常温になりメンテナンス等を行える状態になる。我々の液化機運転日程は平均して週に3回(通常は月・水・金)であり、月曜の液化終了後に3-2を行い、火曜に3-3、水曜にメンテナンス、木曜に液化機内真空引き・液化運転という工程を組むことで週3回の液化運転を維持することができることが確認できた。

最後に図1や図3の自然昇温過程における、約9000分(150時間)後の温度上昇速度の低下について考察する。3-1で述べたように、これは温度の上昇とともに起こる真空度の低下により、真空ポンプ(ロータリーポンプ)が自動的に作動し、再び真空度を上げたためである。この効果により対数時間に対する傾きは約半分になっている。もし吸着ガスの脱離が始まる100 K付近からターボポンプ等を用いて、高い断熱真空度を保てば、温度上昇の傾きは図3の

赤の直線より緩やかになると予想される。これは液化運転終了後、1000分(2日)以上経過した後における液化効率の上昇につながるであろう。ポンプの消費電力量とその後運転する液化時間の短縮で得する電力量との差し引きをしてみないとわからないが、最近では消費電力が0.3 kW以下という省エネのポンプもあることから、今後試してみる価値はある。

5. まとめ

液化運転終了後に計測された液化機内温度の時間変化を解析することにより、昇温過程に対する様々な考察を行った。自然昇温では、最初の1000分で気液分離器に残った液体ヘリウムが昇温の抑制に関与すること、温度は対数的な時間変化をすること、室温まで達するのに8日以上かかることが分かった。また窒素の熱交換ガス投入と加温運転と組み合わせた強制昇温では35時間(1日半)で液化機を室温まで上昇できることも分かった。これらは日常の運転で経験的に大雑把には把握していたことであるが、データ解析により数値化されたことは意義がある。

安定した寒剤の供給には装置の修理・メンテナンスも重要な作業である。作業日数が1日程度のメンテナンスであれば、今回の2工程の昇温作業により一週間の液化運転の日数を減らさずに行うことができるという情報は、今後のメンテナンスの計画策定に役立つ。今後も液化運転時、終了後に自動計測される温度や圧力のデータを様々な観点から整理し、液化効率の上昇、液体ヘリウムの安定供給に繋げていきたい。

謝辞

データの集計および加温運転には、本センター技術職員である丹野伸哉、細倉和則各氏にもご協力いただいた。ここに感謝します。

参考文献

- [1] 木村憲彰, 極低温科学センターだより No. 18 (2017) 10.