

レシプロ式 M1610 ヘリウム液化機回顧

吉本佐紀

千葉大学 理学部

概要

千葉大学では平成 21 年度予算で設備更新が決まり新機器の導入が予定されております。これに伴い現在のヘリウム液化装置がその役目を終えます。平成 8 年 3 月導入から平成 21 年 12 月までの 14 年間尽くしてくれた液化装置の運転状況の特徴について整理しましたので報告いたします。

1 装置構成内容とスペック

現有装置の構成内容およびスペックは下表の通りになります。

表 1. 装置構成機器

液化機	PSI-M1610
液化用圧縮機	PSI-RSJ
回収用圧縮機	東亜潜水 YS-85V
貯槽	500 L
長尺ポンプ	470 m ³
ガスバッグ	15 m ³

表 2. 運転データ 2009 年

年間稼働時間	1,702 h
年間液化時間	1,487 h
平均液化能力	16.5 L/h
年間液化量	23,883 L
年間供給量	17,843 L
通算稼働時間	13,376 h

資料によると液化能力は導入当初 40L/h 程度出たようです。最終年の今期は 8 月初旬に 20.1L/h を出したのを最後にその後は 20L/h を越えることはなく、能力の低下が深刻な状況となっています。また、更新工事期間中の利用停止を考慮したと思われる需要量の増加もあり液化量が初めて 20,000L/年を超えました。

2 起動から定常までの状況

起動から液化が始まる定常状態までの運転状況についての特徴を整理してみました。

2.1 オーバースピードトリップ

起動時に自ら速く回り過ぎて規定回転数上限を越えて安全停止機能がはたらいてしまいます。これをオートモードからマニュアルモードにして回転数を指定してやることで回転し過ぎを回避しています。マニュアルモードで回転数をコントロールできることからブレーキエンジンは機能しているようです。

2.2 JT 弁開度による貯槽内圧の上昇

起動から冷却が進みある TE-A という部位の温度が 200K まで冷却されると JT 弁が開きます。JT 弁が開くことで三重管から貯槽へガスが流れ込み貯槽にある液を蒸発させます。蒸発したばかりのガスは非常に温度が低いため、この蒸発ガスは液化機内部の冷却に利用されます。当初勉強不足もありこの効果を理解しておらず、貯槽残量がわずかな状態から液化機を起動して、なかなか予冷が完了せず「液化不能による He 利用停

止」宣言までして大騒ぎになってしまったことがありました。この時は 100L の小分け容器から貯槽へ逆移送して液量をかせぎ事無きを得ました。

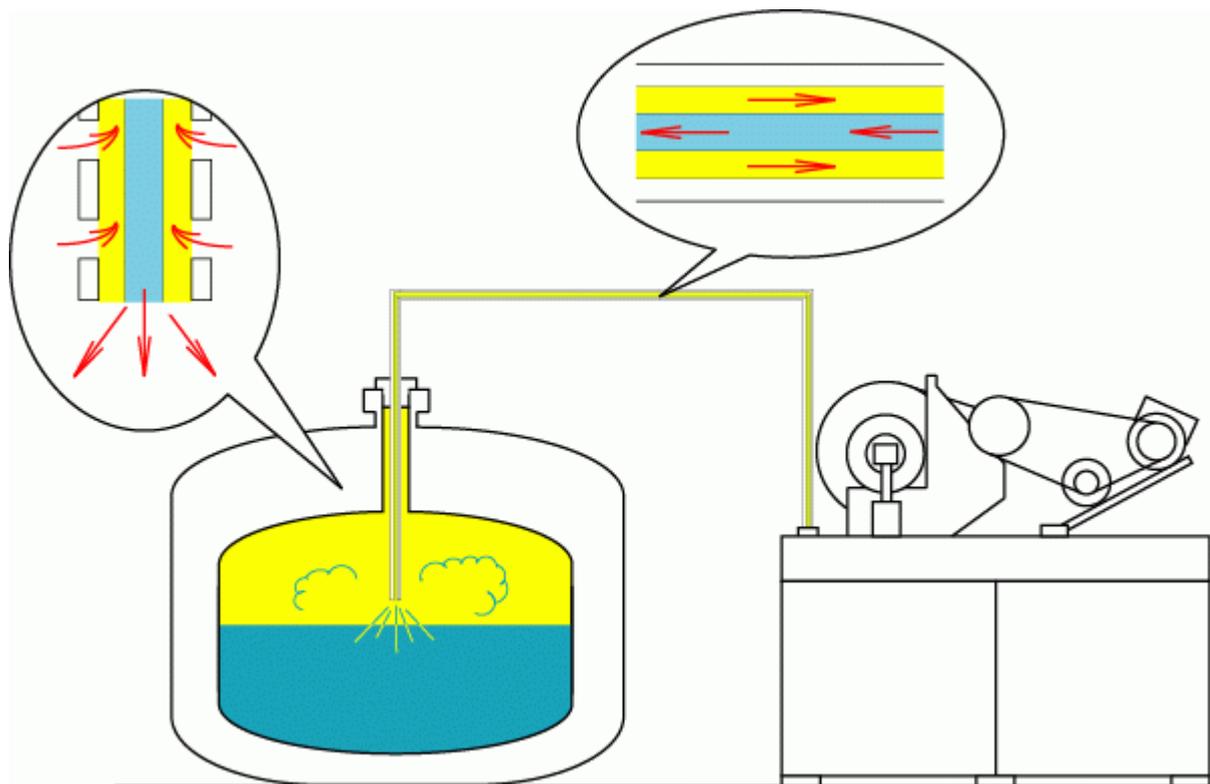


図.1 貯槽・三重管イメージ図

この液化機の運転では各段階においてバルブの開閉や温度コントロールなどを自動で制御してくれるオートモードがあります。しかし状況によっては手動による調整が必要な場面があります。TE-A=200K 到達での JT 弁を開く動作ではバルブの開度が大き過ぎるよう流入量多過によると思われる過剰蒸発で貯槽内圧が急激に上昇します。オートモードのままにしておくと貯槽内圧が上昇し続け安全弁から噴出してしまいます。このため JT 弁の開度を少し締めて微調整しています。締め過ぎると流量不足で冷却に余計な時間がかかってしまうので、貯槽内圧を確認しながら開度調整（11psi を超えないギリギリのあたり）を行なっています。この液化機に対して貯槽のサイズ（500L）が小さ過ぎるのかもしれませんが、つまり JT 弁からの熱いガスの流入量に対する蒸発ガスの膨張を緩衝させる容量が足りないのかもしれませんが、採用当初こういった特徴を知らず安全弁から激しく白煙が噴出してとても動揺したのを思い出します。



図 2. 貯槽の内圧計

[単位 : psi]

2.3 内部精製器冷却過程の工夫

内部精製器のガス流通経路は流量の多い V603（下図参照）を経由するラインで冷却過程が行なわれ、冷却が完了すると流量の少ない V602 を経由する定常ラインに切り替わります。この定常ラインに切り替わった段階で、せっかく冷却した内部精製器が昇温してしまう場面があります。当初この現象は運転過程での一場面であって、まあこういうものなのだと思いついていましたが、ヒーターの故障により、内部精製器の冷却過程を見直す場面があり、そこで偶然今回の効果的な操作を発見するに至りました。温度上昇の原因は、①内部精製器が十分冷えていない、②冷媒であるガスの流れが停滞する場面がある の 2 点です。

①：V635 を絞って流量規制

内部精製器の冷却は温度センサー（右図：TE-C、TE-D）で測り、ある到達温度（TE-C=220K、TE-D=26K）で冷却過程を完了します。しかし、この後の過程でガスの流れが止まってしまうと温度がみるみる上昇していきます。これはおそらく内部精製器にはある程度の熱容量があり、測定部位が到達温度まで冷やされていても、本体はまだ冷え切っていないものと考えられます。

そこで冷却する過程において、下流にある V635 を絞って冷媒のガス流量を減らします。すると冷却速度が遅くなり、ゆっくり時間をかけて冷えていきます。これにより内部精製器全体が芯から冷え、ガスの流通が止まっても温度上昇を抑制する効果が得られます。

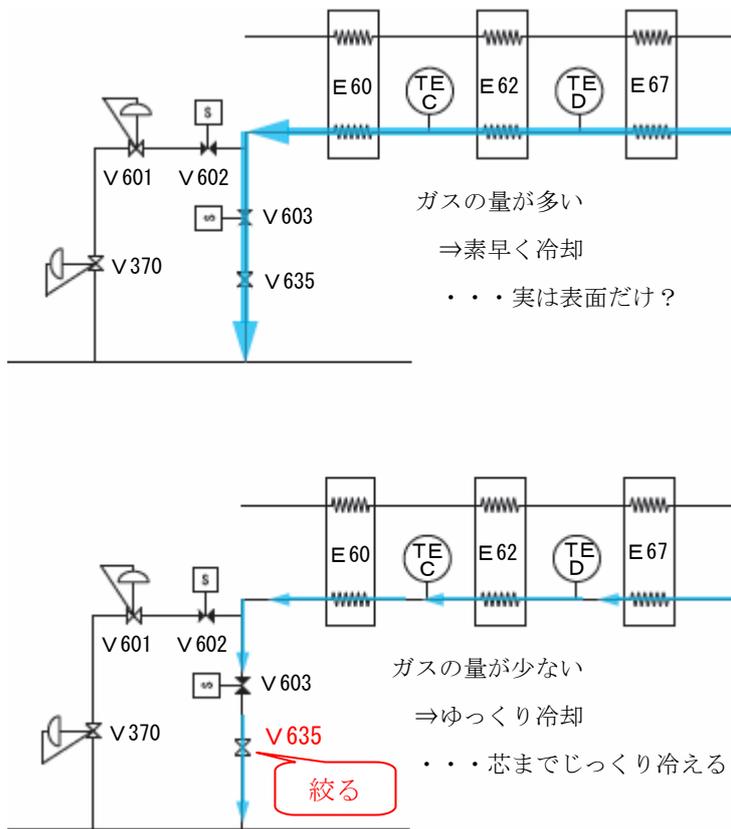


図3. 内部精製器フロー略図（冷却過程）

②：V339 を開いて圧抜き

冷却が完了すると流通経路が V602 を経由するラインへ切り替わります。このラインでは減圧弁 V370 が設定圧までガスの圧力を落として2次側へ流しています。しかし2次側が V370 の設定圧よりも高い圧の状態がおり、ガスを流すことができない場合があります。そのためガスが停滞してしまい低温状態を維持できず、温度上昇してしまいます。

そこで V370 の2次側の圧を落とすために放出弁 V339 を開けて回収ラインへガスを逃がします。2次側の圧が V370 の設定圧よりも小さくなるとガスが流れだします。ガスが流通することで冷ガスが供給され内部精製器の温度が維持されます。

根本的には2次側の圧が高くなってしまいう原因を取り除いて解決するのがベストですが単純に圧を抜くという手段でうまく行きました。

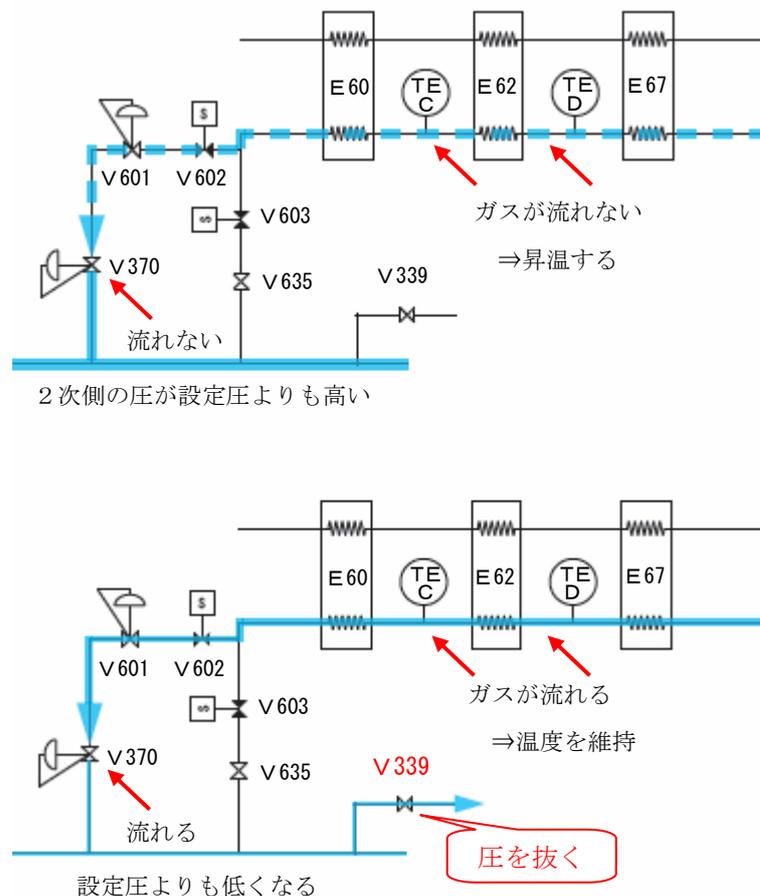


図4. 内部精製器フロー略図（定常過程）

起動から定常状態になるまでの運転状況をグラフで比較してみるとバルブ操作による効果が非常に良くわかります。下図は横軸が時間（3分ピッチ）で縦軸は各部位の温度や圧力等を示した運転状況グラフです。

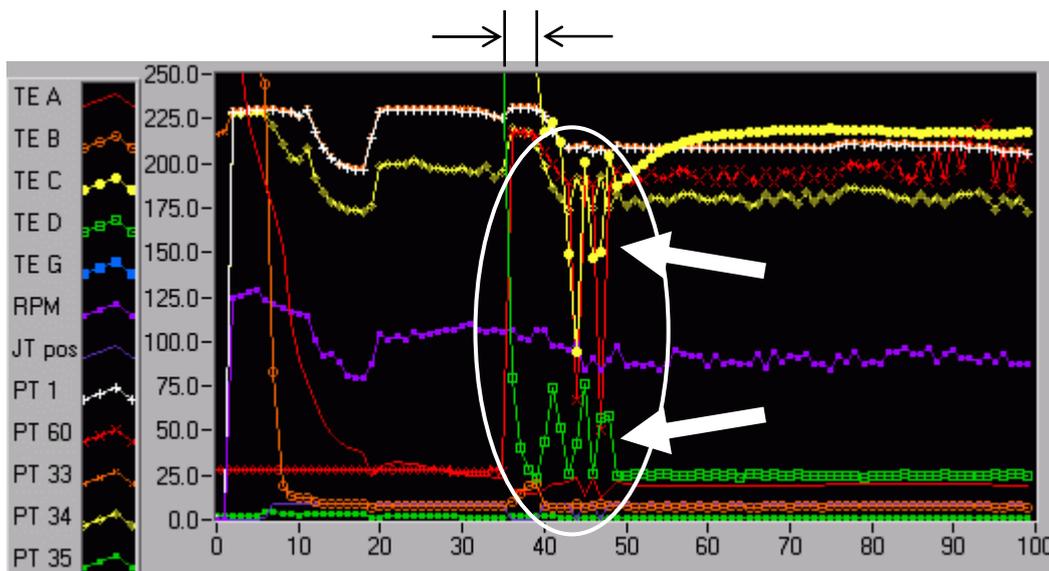


図5. 運転状況トレンドグラフ（従来の運転状況）

上図は何も操作していない従来の運転状況です。内部精製器冷却後に温度バランスを崩して TE-C、TE-D が激しく上下しています。上述の通りこれはガスが停滞することで冷却効果を失い TE-D は温度上昇し、TE-C は逆に温度降下します。これは TE-C、TE-D の各部位の温度が熱伝導により相互に影響しあったものと思われます。TE-C が 60K まで過剰に冷却されると再生（リセットのようなもの）が入り TE-C は正常範囲まで温度上昇します。しかし、なおもガスが流れず TE-C、TE-D の温度が熱伝導してしまう状況が続くと再び再生を繰り返します。3 回前後繰り返した後、ガスが V370 を流れ始めますと、熱交換が機能し始め TE-C、TE-D それぞれが温度を維持し定常状態へと落ち着きます。

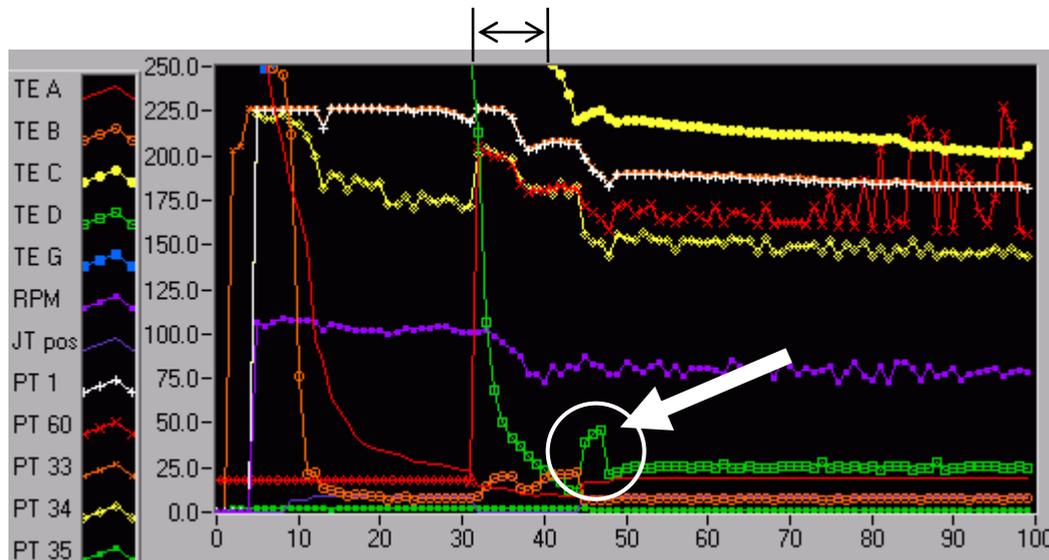


図6. 運転状況トレンドグラフ（①の操作をした運転状況）

前項①のバルブ操作をした時の運転状況です。冷却に時間をかけているので芯までしっかり冷え、上側のグラフのような温度のブレは見られません。ただ V370 をガスが流れられず、内部精製器内にガスが滞ってしまう時間帯があり、ここで微妙に TE-D 部位の温度上昇が見られます。グラフ中央上面を見ると TE-D のラインが降りてきてしばらく後に TE-C のラインが降りてきています。これは内部精製器の冷却過程に入ると

まず TE-D 部位がすぐに冷却され、時間を追って TE-C 部位が冷却されてくるという事を表しています。注目点はこのタイムラグで、上下のグラフを比較すると TE-D のラインと TE-C のラインの幅が上のグラフに比べて下のグラフはだいぶ広がっています。これは①のバルブ操作により、それだけ冷却に時間をかけているということを示しています。

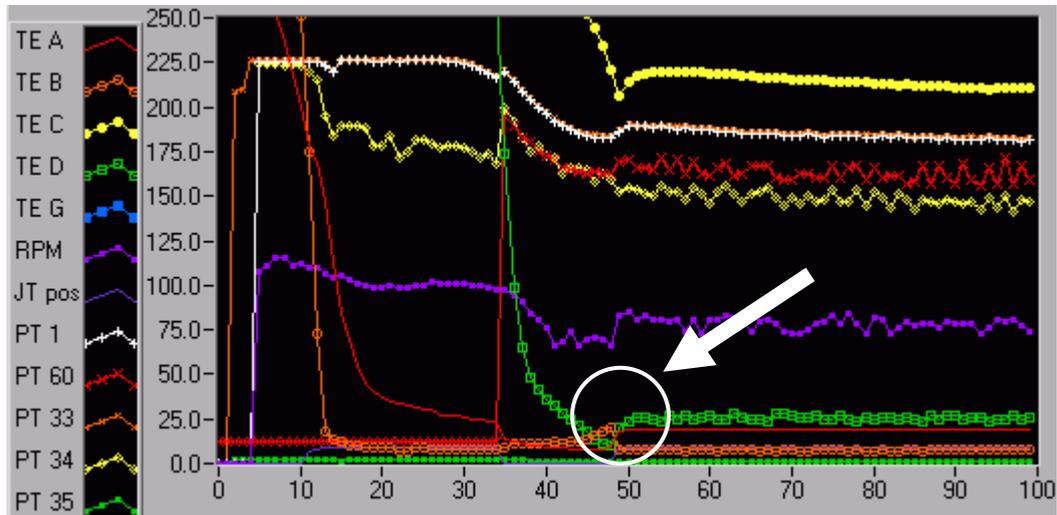


図 7. 運転状況トレンドグラフ (①②両方の操作をした運転状況)

①②両方のバルブ操作をした運転状況です。TE-C、TE-D の温度ブレがなくすんなりと定常状態へ落ち着いています。減圧弁 V370 の 2 次側の圧を冷却過程に並行して抜いておいたため、冷却過程完了後 V370 を経由するラインへ切り替わった時にすぐにガスが V370 を流れることができます。ガスの停滞がないため内部精製器の温度上昇も見られません。グラフの曲線も当初の激しく上下していたものと比べると、とても滑らかなものとなっています。

定常状態へ至るまでのトータルの所要時間を比べると、当初の運転状況では冷却は速いものの温度バランスを崩してモタついています。一方、改善した運転状況では冷却過程に時間は割いているもののすぐに定常状態へ落ち着いています。概して従来の何も操作をしない運転よりもバルブ操作を行なった運転のほうが速く定常状態になっている結果となりました(下表参照)。勿論、運転に影響を与える他の要素がいろいろ絡んできますので単純な比較はできませんが。

表 3. 冷却過程の所要時間

平均所要時間 [単位：分]	運転日数間隔 中 1 日		運転日数間隔 中 2 日		運転日数間隔 中 3 日	
	従来	操作	従来	操作	従来	操作
内部精製器の冷却過程	13.6	31.2	14.7	34.0	15.3	35.2
冷却過程完了～定常まで	37.8	5.2	38.1	4.5	34.7	5.3
起動～定常まで	120.1	103.6	143.3	129.3	156.1	143.9

※ 従来：バルブ操作しない従来運転データの平均 (2007,2008)

※ 操作：①②バルブ操作した運転データの平均 (2009)

3 定常運転での状況

つづいて定常状態での運転状況についての特徴を整理してみました。

3.1 液化速度

右図は統計を取り始めてからの液化速度の推移状況です。大局的に見て一方的に減少している傾向は特に見られません。特徴的なのは2005年頃に20L/h未満であったのが2006年春頃から20L/h以上に上昇しているところです。これは運転方法を見直し一回の運転をなるべく長時間運転にする試みが寄与していると思われる。短時間運転を高頻度で行うよりも一回にまとめて長時間運転を行うほうが良いようです（詳細は2006.名古屋大学総合技術研究会：低温技術分科会 4-2「製造単価にみる液化運転の考察」を参照）。その後も長

時間運転のスタイルは変えずに継続的に行っております。また、2009年春に絶頂期を迎え30L/hに迫る能力を出しています。その後秋から15L/h前後まで急激に調子を落としています。能力低下があまりにも厳しいため最終液化運転まで残り3カ月の時点でオーバーホールに踏み切り、クリーニング・消耗品の交換を行いました。その後やや調子を戻しましたがやはり老朽化の影響なのか2009夏以降20L/hを越えることはありませんでした。まるで設備更新が行われることを察知したかのような不調ぶりで何ともやりきれない気分になりました。最後の最後まで手がかかるなあと思いつつ、オーバーホールは実は嬉しかったです。

液化速度の算出方法は単純に液化量を液化時間で割ることで算出しています。例えば液化量200L、液化時間10hであれば $200 \div 10 = 20\text{L/h}$ としています。液化運転の途中で汲み出しがあった場合は汲み出しに伴う蒸発ロス量を汲み出し量の0.2倍、基準液化速度を20L/hとし、この蒸発ロス分を時間ロスとして補正計算しています。例えば、100L容器に80Lを3回汲んだ場合は途中汲み出し合計240Lで、 $240 \times 1.2 = 288\text{L}$ 使用とし $288 - 240 = 48\text{L}$ 分余計に蒸発させているので48L分の液化時間を時間ロスとしています。つまりこの3回の汲み出しがなかったならばこの時間ロス分速く液化運転が終了できたという考えです。時間ロスは $48\text{L} \div 20\text{L/h} = 2.4\text{h}$ となります。液化時間が20.0hだとすると $20.0 - 2.4 = 17.6\text{h}$ と液化時間を補正します。液化量が350Lだったとしますと $350 / 17.6 = 19.88\text{L/h}$ となるわけです。ただし、前述の通り汲み出しにかかる蒸発ロス量を汲み出し量の0.2倍と仮定していることや時間ロスの計算に使う基準液化速度を20L/hと仮定していることから補正計算は近似的で正確なデータは取れない状況です。上図では途中汲み出しが一切ない運転データのみ（推定値データを排除して実測データのみ）を選んでプロットしてみました。

2007.10から2009.04にかけてクリアランス操作実験やエンジン回転数操作実験を行ったこともあり、運転条件がいろいろ変わったためか隣り合うデータの値が激しく上下していると思われる。

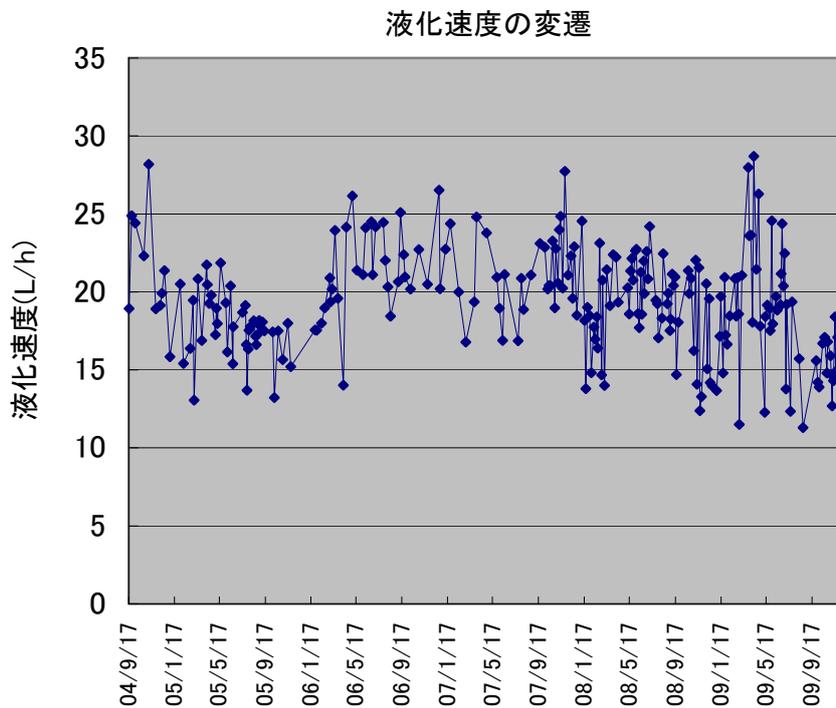


図8. 液化速度の変遷

3.2 戻りガス温度操作

熱交換を終え液化機から液化用圧縮機へ向かう配管に結露が目立つようになり、梅雨の時期や夏季の雨天の日は特に結露がひどく配管の下がビショビショに濡れてしまう状況でした。配管下に軒樋（雨だれを流す半円状のトレイ）を設置してバケツに結露水を集めて対応していました。当初これは老朽化による熱交換不良が次第に顕著になったものなのだろう仕方ないと考えておりました。

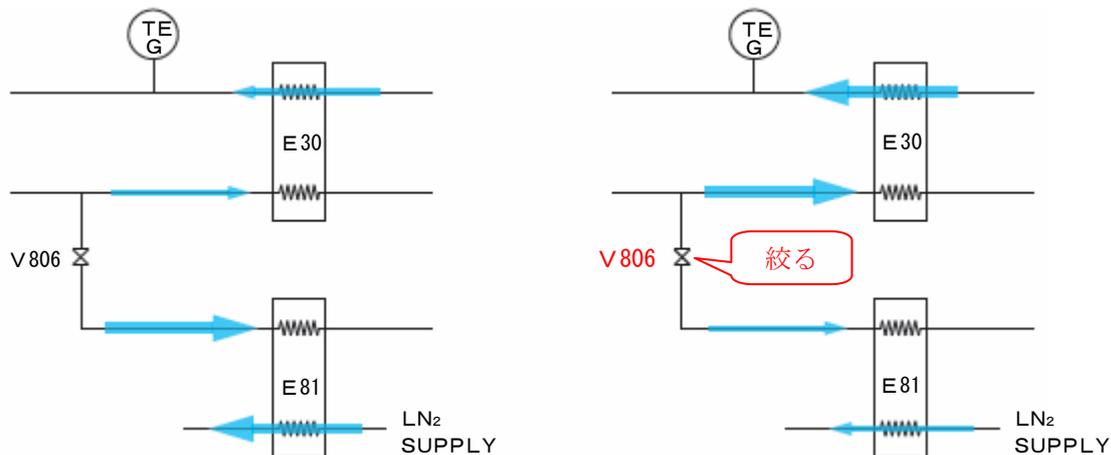
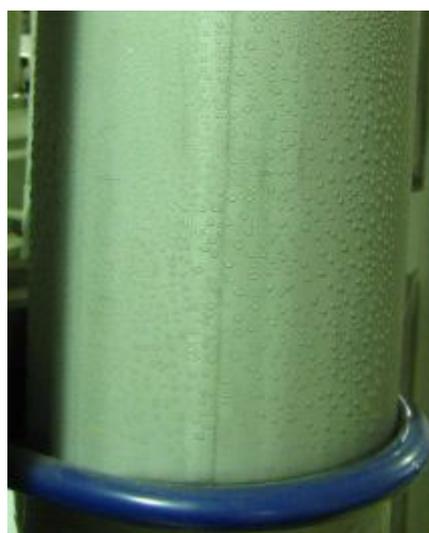


図 9. 最外側熱交換器略図

液化機へ入ってきたガスが最初に熱交換する箇所が E30 という熱交換器ですがこの熱交換器と平行して E81 という液体窒素による熱交換器があります。E30 と E81 とへ向かうガスの流量調整をしているのが V806 というバルブです。この V806 を操作して液化用圧縮機へ戻るライン上にある E30 への流量を増やしてやると、E30 での熱交換が活発になり外へ向かうガスの温度が上昇します（TE-G が上昇）。流量バランスが設置当初の設定よりずれてきたのかもしれませんが。バルブ操作で微妙に調整するだけで解決できるとは思っていませんでした。



V806 操作前：結露が凍っている



V806 操作後：大幅に結露が減っている

図 10. 配管の結露の様子

写真は冬季 12 月における液化用圧縮機への戻りラインの配管の結露の様子です。操作前は配管内を通るガスが冷た過ぎ結露部分が凍結しています（TE-G=262K）。V806 バルブ操作によって戻りガスの温度が上昇し（TE-G=270K）結露がかなり減少しました。

3.3 液体窒素の使用量

ヘリウム液化運転において予冷に使用している液体窒素の使用量は長い間不明瞭なままでした。供給元である液体窒素貯槽はヘリウム液化機専用ではなく学内の利用者が液取りも行っているため、CEの貯蔵メーターではまったく利用量を量ることはできません。そこで下写真のように液化機から蒸発して出てくる排気窒素ガスを検量することを行ってみました。



図 11. 窒素ガス流量を量っている様子

想像以上に流量があり、特に予冷の段階では液体窒素の蒸発量がとても多く直接ガスメーターにつなげてしまうと冷ガスによってガスメーターが凍り付いてしまうため、ホースを 20m 巻きつけたものを水に浸し熱交換させています。巻きつけた塊は水に浸すと浮き上がってくるため重りを上から置いています。

表 4. 液体窒素の使用量

平均値 [液換算量]	定常までの使用量 [L/h]	定常時の使用量 [L/h]	He 1 L 液化に 費やす使用量[L]
既設圧縮機	34.2	27.9	2.3
移設圧縮機	39.2	30.0	2.2
全データ	37.0	29.2	2.2

※ 2009 年運転データより

ガスメーターの変化量にその日の平均気温から膨張率を加味し液換算量を求めました。表を見ると液化用圧縮機の種別によって多少の差があります。既設圧縮機の方が移設圧縮機に比べて 1 時間当たりの液体窒素使用量が少ない傾向です。しかし、ヘリウム 1 L 液化するのに費やす液体窒素使用量は逆転し既設圧縮機の方が微妙に多くなっています。既設圧縮機と移設圧縮機では液化速度に差があり（移設圧縮機のほうが液化速度が出る）、これが響いているためだと思われます。いずれにしてもヘリウム 1 L 液化に対して液体窒素を 2.0L 以上も費やしているのは驚きでした。

3.4 貯槽満タン

貯槽が満タンに迫った状況においてなおも運転を続けると入力圧・吐出圧の低下、各部位の温度変化が見られます。下図は運転終盤に貯槽が満タン付近になったため運転を停止したときの状況です。

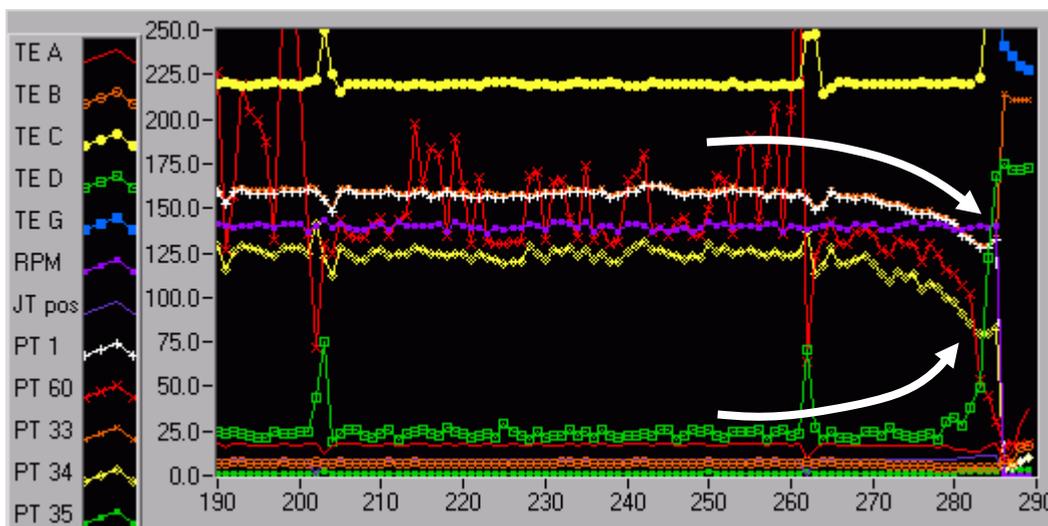


図 12. 運転状況トレンドグラフ（貯槽満タンの運転状況）

グラフでは確認しにくいのですが JT 弁の直前部分で温度を図っている部位の TE-B の温度は徐々に降下し液温付近まで冷えてきます（通常 7K 台が 4K 台まで降下）。貯槽の液面が極めて高いため三重管を戻ってくる冷ガスもほとんど温度上昇せずにダイレクトに冷気を TE-B の部位に与えているものと思われます。実は液が逆流しているということもあるのでしょうか。入力圧 (PT-1) が降下し、内部精製器の TE-D 部位の温度に上昇が見られます。これはどういうことなのでしょうか。

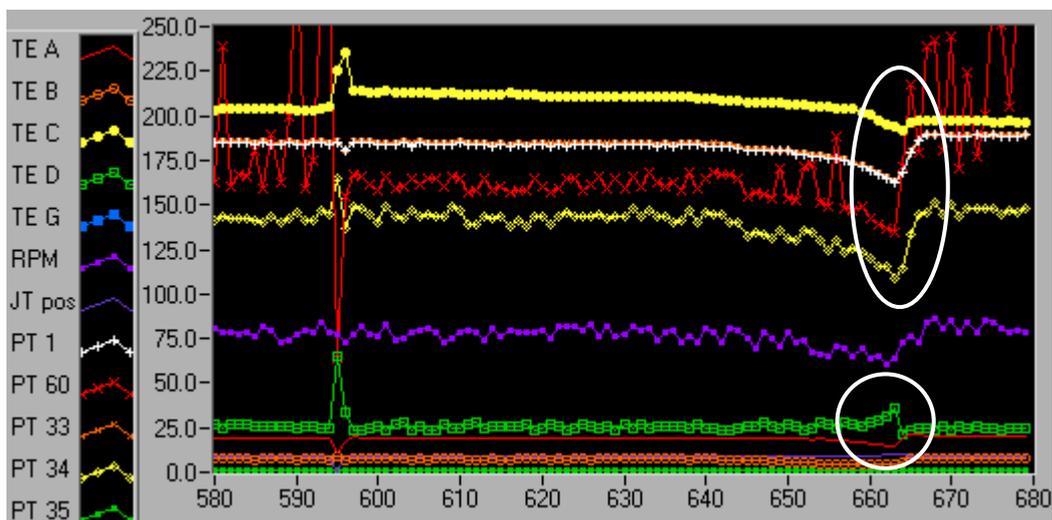


図 13. 運転状況トレンドグラフ（貯槽満タンで汲み出しを行った運転状況）

貯槽満タンの状況の時にちょうど空容器の返却があったのでその容器へ液を汲んで貯槽の液面を下げてみました。意図していた通り圧力低下や温度の変化が平常の状態へ戻っています。現行の 500L 容器では空近くまで使い込んでしまったり、上記のように満タンになってしまったり目一杯な状況です。新規で導入する容器は 2 倍の 1,000L ですので使い勝手がだいぶ楽になりそうです。

3.5 エンジン回転数操作実験

どのように運転すれば液化速度が出るのかいつも考えておりました。エンジンバルブのクリアランス操作実験はやりがいのある面白い実験でしたが、実はエンジン回転数操作実験も行っておりました。これは運転のモードをオートモードから手動モードに変えて強制的に任意の回転数を指定します。データ不足のため未完成ですが、もう装置がないため完成することはできないので今ここで紹介いたします。

右図データは 2008 初夏のデータで 2 台ある圧縮機のどちらのデータともきれいな規則性が見られます。その後もデータ取りを行ったのですが液化機が調子を崩したのか原因は不明ですがデータが全く規則性が見られないバラバラなものとなってしまいました。クリアランス操作実験においても途中から不調なデータばかり出るようになったことを踏まえるとこの頃から液化機が調子を崩し始めたのかもしれない。エンジンバルブのクリアランス操作実験に深入りし過ぎてデータを取る機会を逸してしまった感があります。もう少し早い時期にまとめてやっておくべきでした。

図を見ると平均回転数を上げていくと液化速度も比例して上昇しています。しかし 140RPM をピークに急降下し 160RPM では 10.0L/h ほどしか出ていません。これは面白いですね、機械のオートモードが必ずしも最適化されているわけではなく調節次第では能力をより多く引き出すことができるということです。ちなみにオートモードでの運転では回転数は概ね 80RPM 前後であり、140RPM という速度は普段見慣れているものよりもはるかに速く稼働部に過剰に負担がかかっていないのかとても心配になりました。回転数 160RPM に至っては速過ぎて今にも壊れそうでとても見てられない状況でした。

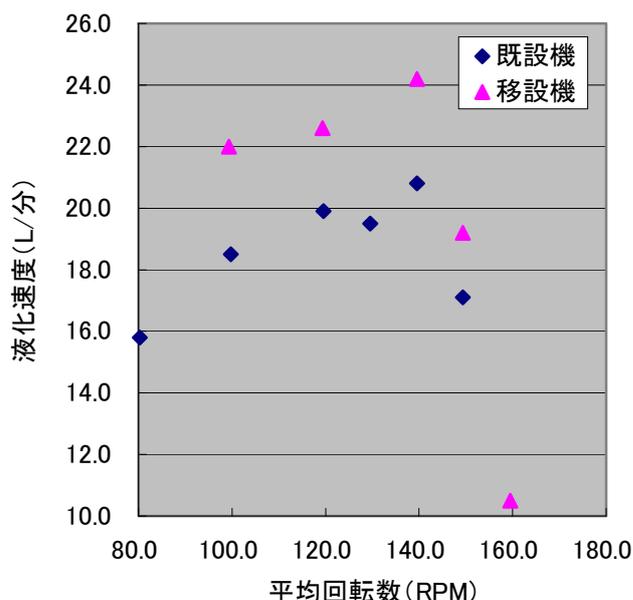


図 14. エンジン回転数に対する液化速度

4 おわりに

この原稿をまとめている 1 月初旬現在、工事がいよいよ始まり撤去作業が既に完了しました。液化室の中心に鎮座していた液化機がいとも簡単に撤去されていく様子はなんとも寂しいものがありました。私がこの液化機の面倒を見たのはわずか 6 年間でしたがトラブルなどは得るものが多くとても勉強になりました。よく尽くしてくれました、お疲れ様でした。

参考文献

- [1] 吉本 佐紀 “製造単価にみる液化運転の考察” 平成 18 年度名古屋大学総合技術研究会 極低温技術研究会報告集 P.5-8
- [2] 吉本 佐紀 “エンジンバルブクリアランスが液化効率へ与える影響の検証” 平成 20 年度京都大学総合技術研究会 報告集第 I 分冊 P.276-277



図 15. 搬出される液化機