理研 He 液化機における安全弁吹出しとタービントリップゼロを目指して

奥野広樹*[1]、段塚知志*[1]、小田嶋豊*[1]、鶴間しづほ*[1]、大島昌也*[2]、伊勢龍之介*[2]

[1] 理化学研究所　仁科加速器研究センター、[2] 日本空調サービス

1. 始めに

理研和光キャンパス内にある He 液化機(スイス Linde 社製の TCF50、液化能力 200 L/h) は、稼働開始から 2011 年 3 月末で満 10 年を迎える。この 10 年間で順調に液体ヘリウムの供給量も伸び続け、現在では、年間 10-11 万リットルに至っている。しかしながら、この液化機は、液化運転起動後、定格に達するまでに、安全弁吹出し及びタービントリップというトラブルが顕著にみられていた。表 1 に安全弁吹出し、タービントリップの発生率を示すとともに、計 3 回の対策によってどのようにこれらの発生率が推移したかを示している。対策は主に運転制御シーケンスの変更である。2008 年 8 月からの 1 年間においては、安全弁の吹きだしは全運転日の 26%起きており、T1 トリップは 48%となっている。2009 年に主に T1 タービントリップへの対策(対策 1)が施され、その後の約 1 年では、タービントリップは 6%と激減した。一方、安全弁の吹出しについては、2010 年 11 月に対策(対策 2)が施され、その後 1 度も安全弁の吹きだしは起きていない。その一方でこの対策の直後から今まで殆どトリップすることの無かった第 2 タービンが全運転日の 8%ほど起きるようになった。これに対し原因を調査し 2011 年 1 月初めに対策(対策 3)を施し、まだ運転日が少ないので何とも言えないが、その原因は除去されたと確信している。以後、本稿においては、2 章で液化機の概要を述べ、安全弁吹出しやタービントリップ等のトラブルが生じる原因となっている事情について説明する。以下、3，4，5 章においては、過去 3 回に渡って施された対策の意図と対策前後での液化機内の状態の変化を説明し結論に至る。

表 1：理研(和光)のヘリウム液化機のトラブルの発生率と対策の時期

	2008/8/1 - 2009/8/11	Aug. 2009	2009/8/12 - 2010/11/1	Nov. 2010	2010/11/2 - 2010/12/28	Jan. 2011	2011/1/5- 2011/1/19
安全弁	50/195 = 26%		59/238 = 25%		0/25 = 0%		0/8 = 0%
T1 trip	94/195 = 48%	対策 1	15/238 = 6%	対策 2	0/25 = 0%	対策 3	0/8 = 0%
T2 trip	0/195 = 0%		0/238 = 0%		3/36 = 8%		0/8 = 0%

2. 液化機の予冷における不安定要因

図 1 に液化機内と貯槽の主要流路を示す。通常は、液体ヘリウム貯槽の中に、30-60%程度の液体ヘリウムが溜まった状態で液化機を起動する。液化機は 2 台のタービンが仕事をする事により寒冷が発生して、順次設計温度まで各部が冷えて行くが、予冷の初期段階においては、CV3175 の JT バイパス弁を開き、流路を確保するため、貯槽へつながる供給及び戻り配管は冷えない。液化機がある程度冷えた段階で貯槽との接続が行われるが、貯槽内の温度は液体ヘリウム温度 4 K 近傍である為、この接続は、液化機が十分冷えてから、例えば T2 の出口温度で 60 K -30 K になってから行わなければ、貯槽に暖かいガスヘリウムが入り、液体ヘリウムが蒸発してしまう。一方、貯槽と液化機間の配管、具体的には CV3165 から貯槽までの供給配管及び貯槽から CV3290 を経由する戻り配管は、暖かいままである。その配管内のガスの温度は時と場合によるが、一般的には 150K-220K と推定され、実際、液化機が冷えてきて貯槽と接続する際には、液化機の状態を不安定にする要因となる。図 2 に実際の液化機の予冷の時のトレンドグラフの一例を示す。貯槽の戻り温度と T2 タービン出口温度がプロットされている。T2 タービン出口の温度が単調に減少していく一方で、貯槽の戻り温度については、大きなピークが２つある。一つ目のものは、戻りの弁 CV3290 開き、貯槽内の圧力制御を開始した事により、戻り配管内のガスが一気に出てきて一時的に 180 K 程度まで達しているものである。圧力制御の設定値は 0.024MPa であり、この時

の運転では貯槽内の圧力は 0.032 MPa 程度であり、勢いよく戻り配管内のガスが液化機の方に戻っていると示唆される。逆に起動時の圧力が 0.024 MPa 以下の場合は戻り弁を開けただけでは当然ガスは排出されない。全ての配管内の暖かいガスが放出されるのは、CV3170 と CV3165 が開いてからである。図 2 中の戻り温度の 2 番目のピークはそのタイミングであり、液化機と貯槽内接続配管に本格的な流れが出来始める時である。T2 タービン出口温度が数 10 K になっている状態で、一時的とは言え 200 K 近いヘリウムガスが液化機内を通過する事になりこれが液化機の予冷を不安定にしているというのは容易に推測できるものであり、以下述べる 3 つの対策の主眼は、ほとんどがこの暖かいガスをどうやって液化機本体に影響を与えずに抜くかというところにある。また、起動開始時の貯槽内の圧力や液化機内の温度は、毎回運転の状況により違ってくる。土日の休日明けの月曜日の運転は火曜日から金曜日の運転に比べて液化機内の温度も上昇しておりかつ、貯層の圧も高い。また、貯層の圧は、液体ヘリウムの汲みだし作業が行われていれば下がってくる。この様に運転初期の条件がさまざまである事もこのトラブルの解決を難しくしている要因の一つである。

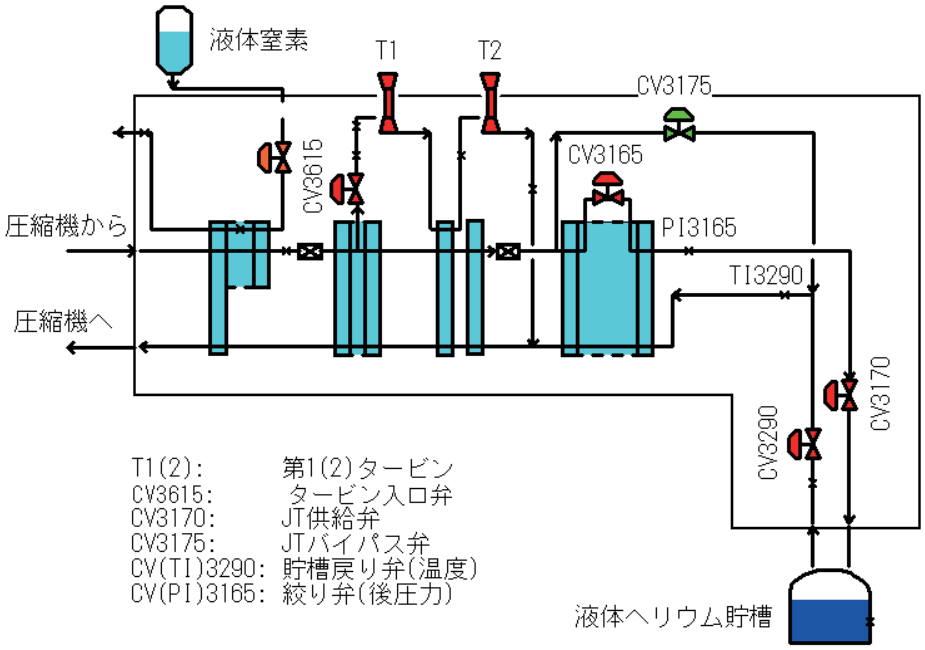


図 1：ヘリウム液化機貯槽

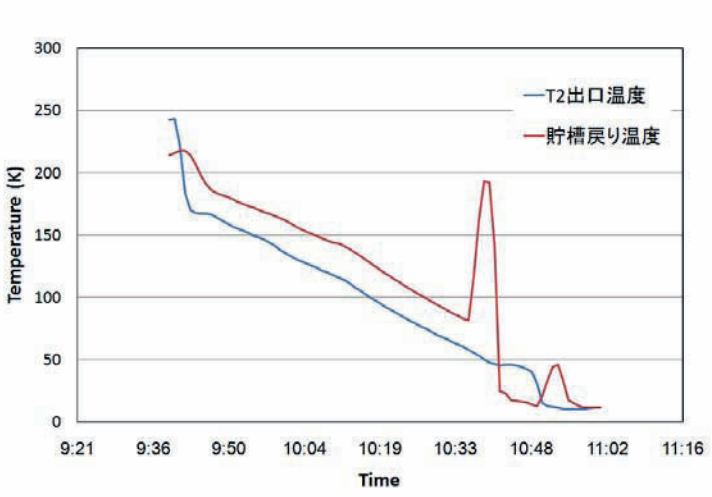


図 2：液化機予冷時での T2 出口温度と貯槽戻り温度の推移

3. 対策１：T1 トリップ

T1 の定格での回転数は 4650 rps で、トリップする回転数は 4800 rps である。タービン回転数の設定値は、予冷時には、図 3 に示すように液化機内の冷却進行に応じて変更される。タービン回転数は、ブレーキガスの流量によって調整されているが、タービンを流れる流量や温度等の条件によって容易に変動する。これまで T1 のトリップは、この液化機の予冷時にタービンの回転数が外的な擾乱により高い方に推移して 4800 rps を超えトリップするというのが殆どであった。予冷時の設定値と実際の回転数の振れ幅から考えるに、4650 rps の設定値で 150 rps 増加するとトリップしてしまうというのは、少し厳しすぎると言う判断から、予冷時は今まで 4650 rps と設定していたところを 4300 rps に設定して、予冷が終了した段階で 4300 rps から 4650 rps にゆっくり変化させると言う事にした。図はその変更を施した前後の予冷時の T1 回転数の推移である。これにより、予冷時に T1 の回転数が設定値よりずれたとしてもトリップするほどでは無くなり、先述の通りタービントリップの発生率が 48%から 6%に減少した。タービントリップの発生が 0 となっていない理由は、運転の初期条件によっては、擾乱が大きすぎて T1 の回転数が 4800 rps を超えてしまったものと思われる。擾乱をどうやって減らしていくかについては、4 章の対策 3 の処で詳しく述べる。

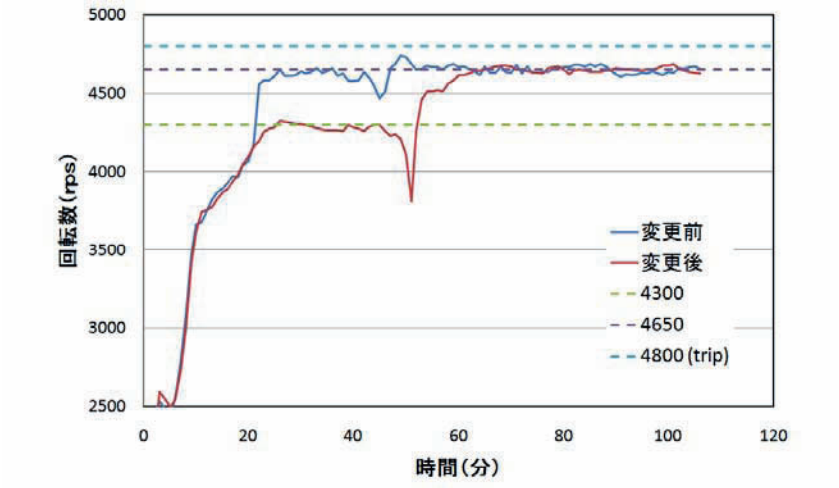


図 3：T1 回転数の設定値の変更

4. 対策２：安全弁吹出し

安全弁が吹くと言うのは、その弁が付いている配管の圧力が吹出し設定値以上になったと言う事になるが、今回の場合、吹出す安全弁はいつも同じであり、予冷中に吹出すタイミングもいつも同じであった。いつも吹出す安全弁は、図 1 内の CV3165 と CV3170 の間の配管についているものであり、吹出すタイミングは、CV3165 が PI3165=0.4 MPa の圧力制御を開始して、液化機と貯槽を接続してヘリウムの流れを作り始めようとする時である。この時、予め CV3170 は 20%開いている。図 4a)に安全弁が吹いた時の CV3165 と PI3165 の圧力のトレンドを示す。CV3165 により PI3165 の圧力制御 (SV=0.4 MPa) は、T2 出口の温度が 30K 以下になった時に始まるが、グラフの示す通り、CV3165 が一旦開くと、圧力が上昇し弁が閉まる方向に働き、全閉となるが、圧力上昇が治まらず、吹き出し圧力(約 1.6 MPa) まで上昇し、安全弁が吹く。平均 5-6 回、多い時で 10 回程度吹いた後、圧力が落ち着き、その後は正常な圧力制御がおこなわれる。上述の CV3165 が全閉になっても圧力が下がらないということは、CV3165 から入ってきた冷たいガスが CV3170 の下流まで流れて行かず、液封と同等な事が起きていると考えられる。現在 20%開けてある CV3170 が物理的には開いているが、この冷たいガスを流すには開度が足りないということであり、これを解消するためには、単純に CV3170 の開度を増やせばよい。実際 CV3165 の開度を 50%に増やした時の弁開度と圧力の推移を図 4b)に示す。20%開度の時と違って、過度な圧力上昇も無くスムーズに圧力制御が開始されている事がわかる。2010 年 11 月にこの対策を講じたがこれ以降安全弁の吹出しは起きていない。

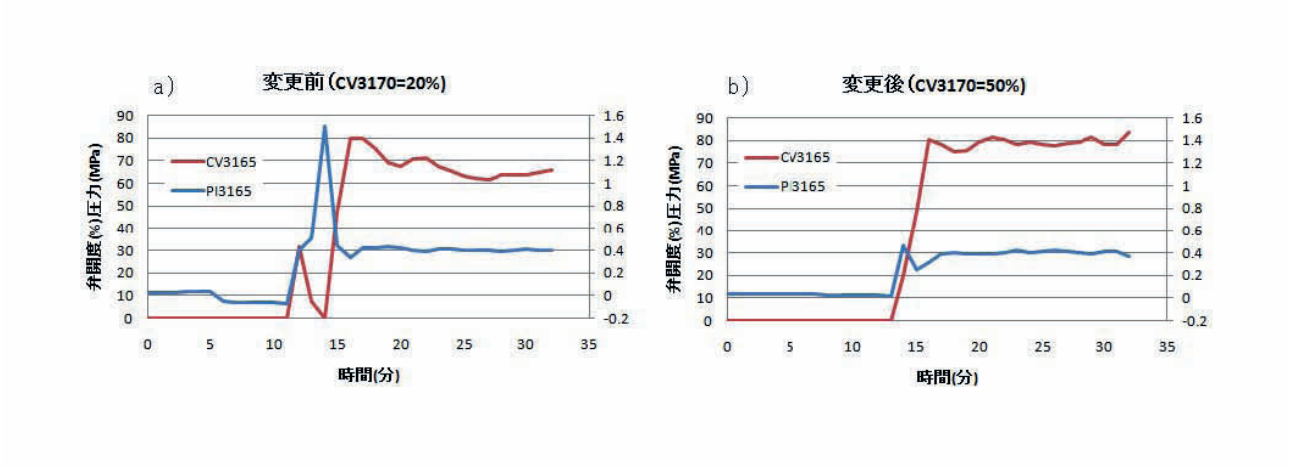


図 4: CV3165 による PI3165 の圧力制御開始時の急激な圧力上昇の解消。1 分間トレンドの為、最高値が見えにくくなっている。

5. 対策３： T2 トリップ

前章で述べた対策２を施す事によって、安全弁の吹出しは完全に納まったが、新たに T2 トリップが起きるようになった。この T2 トリップは、運転開始時の貯槽圧力が低め(0.024 MPa 以下)の時に起る。貯槽圧力が低いところから運転を開始した場合の T2 出口温度と貯槽戻り温度を、CV3170=20％ の時と 50％の時を比較して、図 5 に示す。図 5a)が CV3170=20%の時であるが、T2 出口温度が 30K 以下から液化機と貯槽とのガスの流れが始まるが、その流れが始まった後から暖かいガスが、じわじわと流れ始め、戻り温度がじわじわ上がり、最大 100 K まで行った後、急激に温度が低下して液化が始まっている。T2 の回転数は T2 出口温度が 20 K 以下になった段階で、その設定値が 3600 rps から 3000 rps に変更になるため、擾乱により回転数が多少変動しても、トリップ回転数 3700 rps に達することは無い。実はこの時には、大方、液化が始まる際に CV3165 の激しいハンチングが起きるが、これについては本稿では詳細は語らない。一方図 5b)は CV3170=50%の時だが、温ガスが一気に流れ始め、戻り温度が一気に 180K まで上昇している事がわかる。これの影響を受け T2 出口の温度が 30K から上がり始めている。この状況では、T2 回転数の設定値は、3000 rps へと下がる事は無く、3600 rps のままであり、かつ、この温度上昇の影響だと思われるが、回転数が 100 程度上がりトリップ設定 3700 まで上昇しトリップする。これは、接続配管の内部の温かいガスは、なるべく液化機の温度が高いうちに吐き出ししてしまう必要性を示唆するものである。そのため表 2 に示すように CV3290 戻り弁による貯槽内圧力制御を開始するタイミングと CV3165 の圧力制御開始のタイミングを全体的に早めることとした。2011 年 1 月 19 日現在、この設定にして運転データを蓄積しているところであるが、現在、T2 のトリップは生じていない。実際、研究会が行われる 3 月 17 日 18 日においては、より詳細なデータと共にこの対策 3 の是非を議論する事が可能である。

表２　制御パラメータの変更

項目	貯槽圧力制御開始温度 CV3165　　制御
対策前	60 K　　30 K
対策後	90 K　　60 K 注)

注）CV3165 の圧力制御の設定値は、0 MPa から約 10 分かけて最大値 0.4 MPa まで上昇するように設定されている。

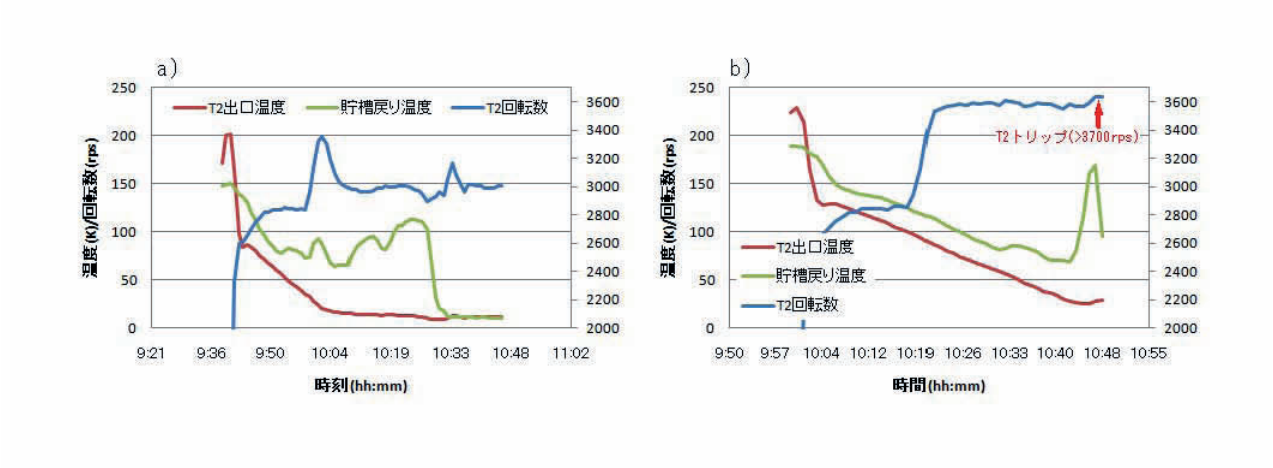


図 5 : 液化機起動開始時の貯槽内圧力が 0.024MPa 程度の時の T2 出口温度、T2 回転数、貯槽戻り温度。a) が CV3170=20% の時、暖かいガスの抜けが良く無い時の各量の推移を表し、b) が CV3170=50%で暖かいガスの抜けが良い時の各量の推移を示す。1 分間トレンドであるため、T2 トリップの時の回転数がはっきり読み取れないが、5 秒トレンドでは、実際に 3700 rps を超えている事を確認している。

6. 謝辞

このトラブル対策については、大陽日酸の信時氏、熊木氏にシーケンス変更及び液化機内部で起きている現象について議論していただいた。この場を借りてお礼を申し上げたい。

7. 結論

2011 年 3 月末で満 10 年を迎える理研（和光）内のヘリウム液化機が長年抱えていた、安全弁の吹き出し及びタービントリップの原因を詳細に調査し、運転パラメータを変更する事により、これらが回避できる事を示した。