

ヘリウム液化機と運転制御システム

宮内 幹雄^{a)}、近藤 裕^{a)}、敦賀 将太^{a)}、池田 博^{b)}

^{a)}筑波大学研究基盤総合センター技術室（低温部門）、

^{b)}筑波大学数理物質科学研究科物性・分子工学専攻（低温部門）

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

ヘリウム液化機の制御システムには大陽日酸製デジタル計装システムを採用している。液化機の自動運転からヘリウム液化装置の監視画面の管理を行っている。またこのシステムは運転プログラム等の変更が可能である。本報告では筑波大学におけるヘリウム液化装置及び運転制御システムについて紹介する。

キーワード：ヘリウム液化機

1. はじめに

低温部門ではヘリウム液化機を運転し学内に低温物性実験等に使用する寒剤として液体ヘリウムの供給を行っている。原料ガスであるヘリウムガスはリサイクルシステムで賄っているため低温部門にはヘリウム液化機の他に回収システムを有している。それらを総じてヘリウム液化装置と呼ぶ。制御システムでは液化機自動運転及びヘリウム液化装置の監視画面の管理を担う。

制御システムには大陽日酸株式会社が開発したデジタル計装システムを採用している。総合監視システム及びヘリウム液化装置制御システムのプロセスコントローラーの機能を持つデジタル計装システムではヘリウム液化機の運転から全系の監視を一つのシステムで行うことが可能である。

1997年にヘリウム液化装置の更新時に当システムは導入された。当初のシステムはワークステーションによる設定とVME (Versa Module Europe) 装置

から構成され装置は大型なもので取り扱いが不便だった。その後 Windows-PC からの設定が可能となり取り扱いが容易になり、2008年4月にはVMEから省スペース型のEzMPICS II (Easy Multi Performance Integrated Control System) にシステムが更新された。以下にヘリウム液化装置の運転制御システムについて説明する。

2. ヘリウム液化装置概要

ヘリウム液化装置のフローを図1に示す。設備の概要は次の通りである。

学内で実験に使用されたヘリウムガスは当センターのガスバックへ回収される。ガスバックの容量は60 m³である。回収されたガスは回収圧縮機で圧縮し高圧ドライヤーで水分除去した後カードルに充填しストックする。回収圧縮機の処理量は80N m³/hr、カードルの最高充填圧力は14.7 MPa、カードル貯蔵能力は2880 N m³である。

液化は液化用圧縮機で圧縮したガスを液化機コールドボックスの液化系に送り込み液化する。液化用圧縮機は吐出圧力1.6 MPa、処理量1500 N m³/hrの油冷式スクリュウ圧縮機である。液化のためのガスはカードルのガスを中圧乾燥器で2.5 MPaに降圧し液化機コールドボックスの内部精製系へと送られる。内部精製器において不純物を除去した精製ヘリウムガスは液化の原料ガスとして液化系に供給される。ヘリウム液化機の液化能力は内部精製使用時で150 L/hrである。液化機コールドボックス内に製造された液体ヘリウムは三重管トランスファーチューブで内容量4000 Lのヘリウム貯槽に移送・貯蔵し供給に備える。

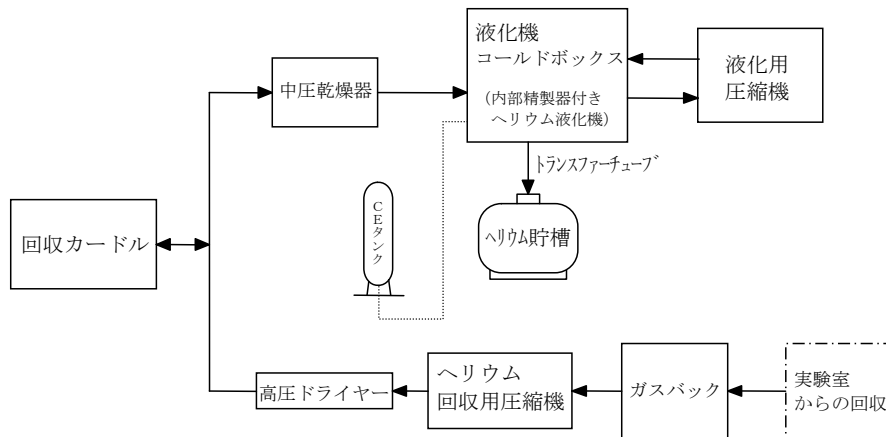


図1. ヘリウム液化装置フロー

なお、このヘリウム液化装置のガスバックを除く設備全体が高圧ガス製造設備である。高圧ガス保安法のもと茨城県へ許可申請を行い第一種製造事業所として許可を受けている。さらに毎年茨城県による立ち入り検査（保安検査）に合格することで液体ヘリウムの製造業務を継続することができる。

3. 運転制御システムの基本構成

ヘリウム液化装置の制御システムの構成内容について説明する。図2はシステムの基本構成図である。大きく分けるとヘリウム液化装置、液化機制御盤、端末のパソコンからなる。液化機制御盤には入出力ボードと EzMPICS II (CPU) が収納されている。入出力ボードとはフィールドであるヘリウム液化装置間を結ぶアナログ入力 (AI)、アナログ出力 (AO)、デジタル入力 (DI)、デジタル出力 (DO) の4種の入出力機器のことである。ボードの入出力信号の仕様は以下の通りである。

AI	: 入力レンジ 4 ~ 20 mA / 入力点数 28 点 接続機器: 圧力・温度・回転数・液面計
AO	: 出力レンジ 4 ~ 20mA / 出力点数 16 点 接続機器: バルブ操作
DI	: 入力接点 DC24V / 入力点数 24 点 接続機器: 接点信号・機器運転状態
DO	: 出力接点 オープンコレクタ / 出力点数 17 点 接続機器: 電磁弁・ランプ・緊急停止

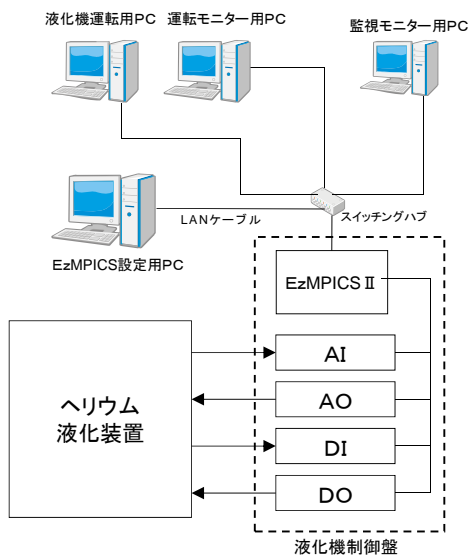
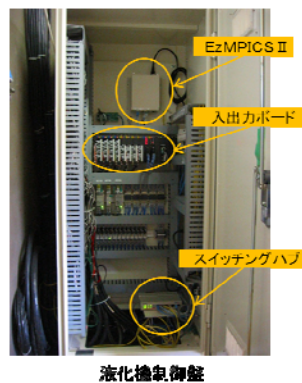


図2. 制御システム構成図と制御盤



液化機制御盤

各入出力ボードは EzMPICS II に接続し、監視画面表示管理および液化機の運転制御プログラムの処理を行わせている。

EzMPICS II の端末にはデジタル計装のプログラム設定用 PC、液化機運転用 PC、運転モニター用 PC、監視モニター用 PC として 4 台のパソコンを LAN で接続している。

4. ヘリウム液化のしくみ

液化機の運転プログラムの説明の前にヘリウム液化のしくみ、300 K のヘリウムガスが 4.2 K の液体ヘリウムになるまでの過程を簡単に説明する。図3は液化機を簡略化したものである。

圧縮機から吐出した 300 K、1.6 MPa のヘリウムはまず①77 K の液体窒素で冷却される。約 80 K まで冷却されたヘリウムは熱交換器を通り②タービンに送られる。毎秒 4400 回転するタービンでは断熱効果を効率的に行いタービン出口温度において約 12 K まで冷却される。最後に③J-T 弁のジュールトムソン効果により気液状態で液化される。気体部分は熱交換器を戻り再液化に回される。液化は各熱交換器を段階的な温度平衡を保ち冷却効果を上げ連続的に液化を行う。

また本来の液化機には内部精製が内蔵され回収ガスを精製し液化機へのヘリウムガスとして供給される。内部精製では低温凝縮精製に必要な寒冷を液化ラインから引き込み、精製—加温再生—再冷却の過程を繰り返し運転する。

以上の内容は液化機が定常液化運転における運転の過程である。通常の液化運転では各熱交換器の温度平衡に到達させるための予冷運転が必要となる。室温からの運転で約 4 時間、連続運転で 1 時間の予冷運転ののち定常状態になる。これら予冷運転から定常運転への運転制御をデジタル計装システムで行う。次に制御プログラムについて述べる。

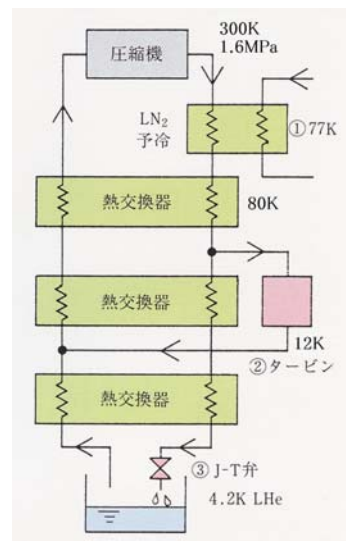


図3. ヘリウム液化機

5. 運転制御プログラム

運転制御プログラムはシーケンス制御で行われデジタル計装ソフトのシーケンステーブルに記入し実行される。シーケンステーブルを作成するには初期条件として機器定義を行う。機器定義にはアナログ入出力、デジタル入出力および内部アナログ・デジタル信号をユーザタグとして定義する。ここで定義しない限りシーケンスプログラム等に使用することはできない。入出力設定は入出力ボードの各スロット番号にユーザタグ名を割り振り設定する。内部アナログ信号 (IA) の設定は変数として取り扱われ設定値の入力等に使用する。内部デジタル信号 (ID) の設定は状態変化の on-off 信号として定義する。表 1 はアナログ入力 (AI) の設定の一部である。機器名称については後述の監視画面系統図を参照のこと。

表 1. アナログ入力 (AI) 設定

No.	ユーザタグ名	機器名称
0	SICA111	T1回転数
1	SICA121	T2回転数
2	TIC105	80K AD入口温度
3	TI110	T1入口温度
4	TIA111	T1ブレイキ温度
5	TIA121	T2ブレイキ温度
6	TIC130	T2出口温度
7	TI170	LHe貯槽戻り温度
8	TI172	気液分離戻り温度
9	T14051	IMPUCカードル温度
10	TIS402	精製He出口温度

シーケンステーブルは運転内容別に細分化している。図 4 は全自動運転(シーケンス名称: F1-1) と全自動停止 (F1-2) の構成図である。全自動運転の構成はスタート後、圧縮機起動 (F2-1) が動作する。圧縮機運転が静定すると次に液化機運転 (F3-1) 及び内部精製器運転 (F4-1) が平行動作始め、最後に各運転状態が静定し液化機は定常運転へと入る。全自動停止 (F1-2) の構成はスタート後液化機停止 (F3-2) と内部精製器停止 (F4-2) のシーケンスが同時に動作始める。各運転が停止後、圧縮機停止 (F2-2) のシーケンスにより圧縮機が停止して終了する。他にインターロックとして液化機緊急停止条件と圧縮機緊急停止条件のシーケンスが動作する。

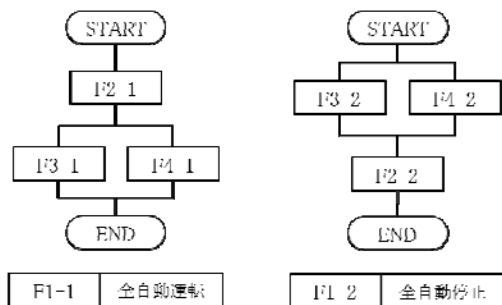


図 4. シーケンス構成図

図 5 は圧縮機起動のシーケンステーブルである。図中にシーケンステーブルの各部名称を示す。テーブル上側 A が条件部、下側 B が操作部である。条件と操作を個々に並べ条件の組み合わせでどの操作を行うかを記述している。D の条件部タグ名称欄に操作の条件となるタグを入力し、F の条件部ルール欄に条件を設定する。条件として成立するものには "y"、否であるものには "n" を入力、無関係のものは空白とする。操作部は E の操作部タグ名称欄に操作するタグを入力し、条件成立時に行う操作を G の操作部ルール欄に設定する。操作部タグを ON する場合には "y" を OFF する場合には "n" を入力する。シーケンステーブルはルール番号順に順次実行する。実行周期は 1 秒である。

条件に使用するタグ名は、外部デジタル入出力の状態、内部デジタル信号の状態、タイマの状態、アナログ値の比較を条件式として登録したのちタグ名に識別子 (=・<・>) を設定し使用する。操作に使用するタグ名は外部デジタル入出力信号状態の操作、内部デジタル信号状態の操作、タイマ操作、アナログ値の操作を操作式として登録し使用する。現在、条件式 132 項目、操作式 177 項目を登録し運転に使用している。

制御プログラムはシーケンス制御とともにフィードバック制御プログラムを使用する。フィードバック制御は、現在の状態を検出してから出力量を決定するという方法である。バルブの出力部に PID ユニット、入力レベル判定ユニットやランプ設定ユニット等のフィードバックプログラムを組み込み出力信号の制御を行う。このように、シーケンス制御機能とフィードバック制御機能とを連動させることにより、運転制御プログラムを動作させている。

D 条件部タグ名称欄		C ルール番号																		
条件	タグ名	ルールNo.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	F2-1 START	実行許可フラグ	n	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
2	COMPING	He圧縮機運転	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
3	T1-2MPa.FLG	T1-2MPa停止フラグ	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
4	T2-1.ST	タイマ1 停止状態	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
5	T2-1.LUP	タイマ1 アップ状	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
6	F2-1.AC0000.LT	LPGC2052-0.2MPa	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
7	F2-1.AC0001.GE	PSV2001-30%	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
8	F2-1.AC0002.GT	LPGC2051.PV1.119	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
9	F2-1.AC0003.LT	LPGC2051.PV1.121	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
10	T2-1.2.ST	タイマ2 停止状態	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
11	T2-1.2.LUP	タイマ2 アップ状	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
12	T2-1.3.ST	タイマ3 停止状態	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
13	T2-1.3.LUP	タイマ3 アップ状	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
14	F2-1.AC0004.GT	LPGC2001.PV1.30%	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
15	F2-1.AC0005.GE	GIC2001-70%	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
16	F2-1.AC0006.GE	PSV2001-88%	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
17	T2-1.4.ST	タイマ4 停止状態	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
18	T2-1.4.LUP	タイマ4 アップ状	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
19																				
20																				
E 操作部タグ名称欄																				
G 操作部ルール欄																				
1	COMPON.P	He圧縮機起動指令	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
2	F2-1.AC0000	LPGC2502.MV=100%	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
3	LPGC2052.CS.L	吸入圧コントロー	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
4	F2-1.AC0001	LPGC2052.SV=LPGC20	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
5	F2-1.AC0002	RP LPGC2052.SP=200	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
6	F2-1.AC0003	IA0009=1.165	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
7	MV2501A.UINT.AT.L		y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
8	MV2501A.UINT.MV.ON		y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
9	MV2501A.H	LOAD弁用電磁弁	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
10	MV2501B.UINT.AT.L		y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
11	MV2501B.UINT.MV.ON		y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
12	MV2501B.H	UNLOAD弁用電	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
13	LPGC2051.DV.L	LPGC2051.S.DMV	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
14	F2-1.AC0011	RP2 LPGC2051.SP=1	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
15	F2-1.AC0004	IA0003=95%	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
16	T2-1.1.RUN	タイマ1 RUN	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
17	LPGC2051.CS.L	LPGC2051 カスケード	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
18	F2-1.AC0005	LPGC2051.SV=LPGC20	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
19	F2-1.AC0006	RP LPGC2051.SP=100	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
20	F2-1.AC0007	IA0005=1.2	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
21	T2-1.2.RUN	タイマ2 RUN	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
22	T1-2MPa.FLG.H	T1-2MPa停止フラグ	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
23	T2-1.3.RUN	タイマ3 RUN	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
24	LPGC2001.GS.L	LPGC2001 カスケード	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
25	F2-1.AC0008	RP LPGC2001.SP=400	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
26	F2-1.AC0009	IA0009=30	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
27	COMPON.H	He圧縮機停止フラグ	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
28	T2-1.4.RUN	タイマ4 RUN	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
29	COMPONAL.H	運転異常	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	
30	F2-1.AC0010	IA0009=70	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	

図 5. 液化機のシーケンステーブル

6. 運転操作・監視端末

運転操作・監視用PCのアプリケーションソフトにはLabviewを使用している。画面構成は運転画面、個別計器画面、アラームイベント画面、トレンド画面、系統図画面からなる。運転画面からはシーケンスを起動し全自動運転・停止から個別の運転操作を行う。個別計器画面では圧縮機、液化機1、液化機2、内部精製の4種類の画面に分けられ、必要ときマニュアルでバルブの操作や電磁弁のON・OFFを行うことが可能である。アラームイベント画面は異常発生時の発生時間、異常発生ユーザタグ、異常内容について表示する。トレンド画面は圧縮機系、液化系、タービン系、内部精製系、回収ガス系の表示画面を持ち、温度、バルブ開度、液面、回転数等の時間変化をグラフ表示する。図6に液化系の運転トレンドを示す。図に示す通りAの予冷運転の時は大きく状態が変化しBの定常運転では安定状態のグラフになっていることがわかる。図7は内部精製系のトレンドである。Cの予冷運転後、D:精製運転-E:加温再生-F:再冷却の状態が把握できる。我々はこれらトレンド画面を常に監視し予冷運転から定常運転へさらには定常運転において異常がないか見極めトラブルの早期発見へ繋げている。

最後に監視画面系統図を図8に示す。この画面によりヘリウム液化装置全体の情報を入手することができる。各部の説明と動きは次の通りである。

①ガスバックは回収量に合わせて表示が上下する。
 ②回収圧縮機運転、③高圧ドライヤー再生、④中圧乾燥器再生、⑥液化用圧縮機運転、⑩タービン回転は状態を色識別する。彩色は運転中が緑、停止中が赤である。⑦のバルブは開閉状態及び開度、⑧の電磁弁は開閉状態を開るとき緑、閉止のとき白で表示する。⑤は回収カードルの圧力値で⑪はタービンの回転数を表示する。下部の⑫は内部精製の運転状態

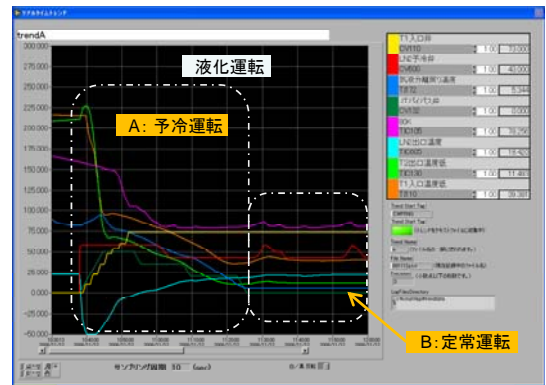


図6. 液化系予冷と定常状態のトレンド

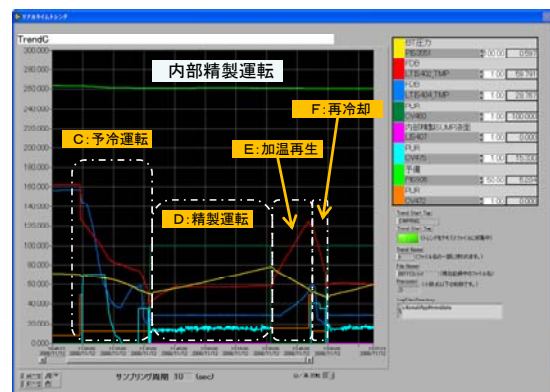


図7. 内部精製系トレンド

を点灯させる。またアナログ表示は表示点数が多いので、温度に対し黄、圧力に対し青、バルブの開度に対し白として色分別することで機器の状態把握を容易にしている。

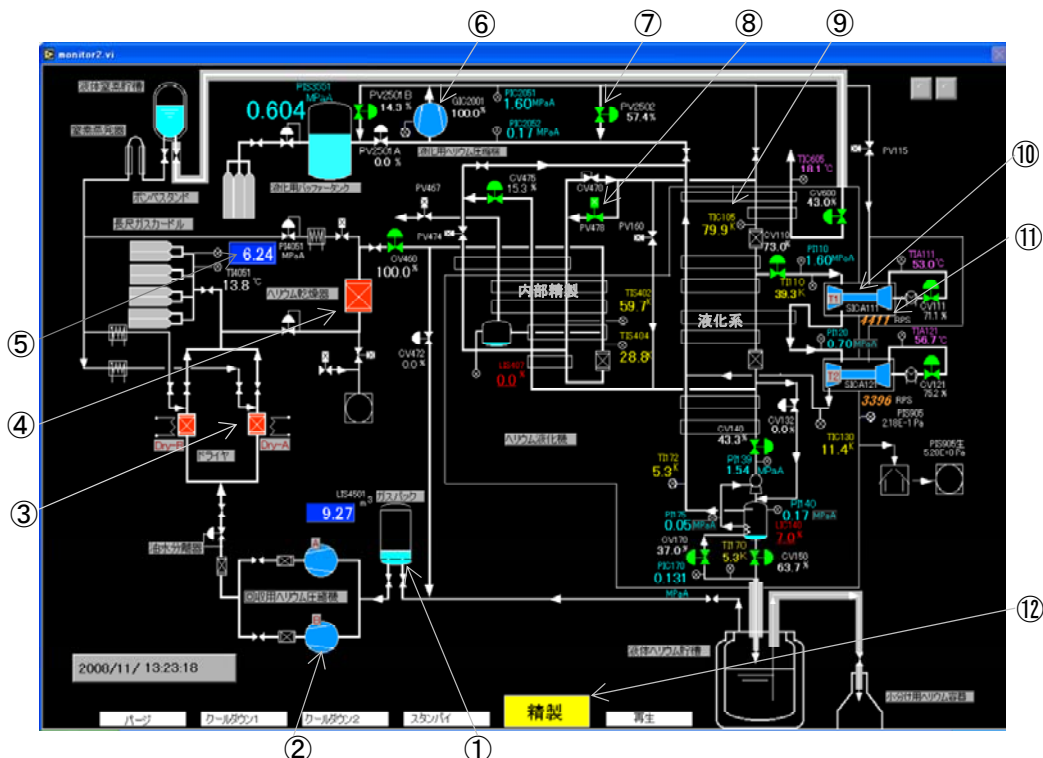


図8. 監視画面系統図

7. まとめ

ヘリウム液化装置の制御システムである大陽日酸開発のデジタル計装システムはオープンシステムである。ゆえに液化機の運転プログラムの変更が可能なのが特筆できる。これまでにシーケンス変更やフィードバックプログラムの改良を行い、また設定温度等の変更など様々な改善を行いヘリウム液化機の安定化を計ってきた。これは低温部門の役割である学内への液体ヘリウムの安定供給へと結び付いてきた。これからも運転制御システムを最大限に活用し安全且つ定常的な液体ヘリウムの供給に努めたい。

8. おわりに

このシステムの監視画面は設備全体の状況の入手として高圧ガス設備の保安管理上便利であるが、この情報を過信することは禁物である。あくまでも監視画面は参考値であり基本的な状況は現場にあることを忘れてはいけない。バルブ操作においても同様に現場との連携のもと操作することが高圧ガス設備の安全確保の原則である。

Control system for helium liquefier

Mikio Miyuchi^{a)}, Yutaka Kondo^{a)}, Shota Tsuruga^{a)}, Hiroshi Ikeda^{b)}

^{a)} Cryogenics division, Technical Service Office of Research Facility Center for Science and Technology, University of Tsukuba,

1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577 Japan

^{b)} Materials Science (Cryogenics division), University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577 Japan

The cryogenics division, Research Facility Center for Science and Technology, supplies the liquid helium as liquid refrigerant to the laboratories in the university we operate helium liquefier. The control system for the helium liquefier takes liquefaction machine automatic driving and the management of the monitor of the helium liquefier. In this report we introduce the control system for helium liquefier.

Keywords: helium liquefier