

ヘリウム液化冷凍機の連繋運転と制御システムの自動化

大畠洋克、飯田真久

高エネルギー加速器研究機構

低温工学センター

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

低温工学センターではセルンとの LHC 加速器建設協力の一環として、工作センター、加速器研究施設、素粒子原子核研究所の協力の下に、LHC に設置する強収束超伝導マグネットの開発を行っている。

今回、このマグネットの低温試験を行う上で必要な液化冷凍システムを構築した。これは予算及び建設期間が限られた条件の下で、既存の 2 基の液化冷凍機を連繋運転することで液化能力を改善したものである。この報告書では、連繋システムの構成、改造、性能試験について述べる。

尚、このシステム構築は技術系職員が中心になって行ったものである。

1. はじめに

低温工学センターでは、加速器科学・物理科学研究における、低温・超伝導機器開発研究などに液化ヘリウムを供給する業務を行う一方で、CERN で建設中の LHC に設置する強収束超伝導四極電磁石の開発を行っている。この超伝導電磁石の開発は、工作センター、加速器研究施設、素粒子原子核研究所の協力のもとに、当センターで行われているものである。

センターには、液化能力 300 リットル / 時の液化能力を持つ液化機(TCF200)と 150 リットル / 時または 300W の能力を持つ液化冷凍機(CB20)が各々 1 基づつ設置されている。これまでセンターハの業務としては液化ヘリウムの供給が主であったため、前者の液化機を液供給専用として稼働させてきた。1996 年度から LHC 加速器建設協力に対する覚書が両研究所間で取り交わされ、1m モデルによる開発研究が開始され、そのための専用機として旧 AMY 検出器用の液化冷凍機をセンターに移設して使用することとなった。又、これは TCF200 が故障した場合の液供給用のバックアップ機としても使用できる。

モデルによる開発が順調に進み、1999 年度からプロトタイプ(実機と同寸法)による開発研究に移行するにしたがって、現状の設備を従前のまま使用していくことに限界があることが分かった。すなわち、1m モデルマグネットを冷却、試験をするだけであるならば、移設した液化冷凍機が持つ能力で十分対応できる。しかし、7m のプロトタイプと実機を試験(クエンチ試験)するためには液化能力が十分でない。新規に 300 リットル / 時程度の能力を持つ液化冷凍機を

新設するか、現有設備を有効活用して要求に対応するか二者択一である。

前者の方法を取れば能力は十分であるし、試験項目に添って最適のシステムを構築することが可能であり、理想的かつ魅力的である。しかし、新たに数億円の経費と新設のための時間(最低 2 年間)及び運用させるための高圧ガス保安法による手続き(新規書類作成)を必要とする。そこで、我々が選択した方法は、現有の 2 基の設備を有効活用し、連繋運転をすることによって、液供給業務と LHC マグネットの開発研究を両立させることであった。これによって、大幅な経費の節減と時間を短縮することができた。

この報告書では、今回開発した連繋システムの構成、同システムの改造ならびに性能試験の結果について報告する。

2. センターの低温機器システム

低温工学センターの高圧ガス設備の概略機器フロー図及び機器配置を図 1 及び図 2 に示す。

LHC マグネット冷却用に設置されている高圧ガス機器は次のとおりである。

- ・第四低温棟液化冷凍機(液化能力 150L/時、又は 300W)
- ・LHC マグネット試験用 1.8K クライオスタッフ
- ・2400L 液化ヘリウムデュワー
- ・循環圧縮機(風量 2253Nm³/時)
- ・中圧精製器(処理能力 100Nm³/時)
- ・中圧タンク(貯蔵能力 570Nm³)
- ・精製器用液化窒素貯槽(7069L)
- ・回収圧縮機(回収能力 100Nm³/時)
- ・回収ヘリウムガスカーボル(貯蔵能力 1086Nm³)
- ・高純ヘリウムガスカーボル(貯蔵能力 965Nm³)
- ・クライオスタッフ 1 . 8 K 冷却用減圧ポンプ

連繋運転の為の 2400 L デュワー送液用及びユーザー供給用の高圧ガス機器は次のとおりである。

- ・第二低温棟液化機(液化能力 300L/時)
- ・3000L 液化ヘリウムデュワー
- ・循環圧縮機(風量 2900Nm³/時)
- ・高圧精製器(処理能力 180Nm³/時)
- ・両液化機、精製器用液化窒素貯槽(12270L)
- ・回収圧縮機 2 台(回収能力 180Nm³/時、

210Nm³ / 時)

- ・回収ヘリウムガスカーボル (貯蔵能力 1440Nm³ × 2, 1800Nm³)
- ・高純ヘリウムガスカーボル (貯蔵能力 1440Nm³)
可搬式ヘリウムガスボンベ (貯蔵能力 1070Nm³ × 2, 1080Nm³)

又、第二及び第四低温棟に設置してあるヘリウムデュワー間は、連繋運転の為に新たに製作したトランスマーケティングによって接続されている。TCF200 で液化されたヘリウムは、いったんデュワーに貯液された後、第四低温棟にあるデュワーに液送される。これは、連繋運転による CB20 で液化したヘリウムと一緒に LHC マグネットの試験に供用される。

図には示していないが、クライオスタット、減圧ポンプ及びヘリウムデュワーは回収ガスラインに接続され、減圧及び蒸発したヘリウムガスはガスバックを通じて回収圧縮機にて回収用ヘリウムガスカーボルに充填される。回収されたヘリウムガスは、精製器を通して純度を高め、高純ヘリウムガスカーボルに充填、もしくは液化機にて再液化される。

ユーザーへの液供給用トランスマーケティングは 2400L 及び 3000L デュワーに設置され、必要に応じてどちらからでも液供給が可能になっている。これは一方の液化機が故障等により運転が出来ない場合のバックアップとして機能している。

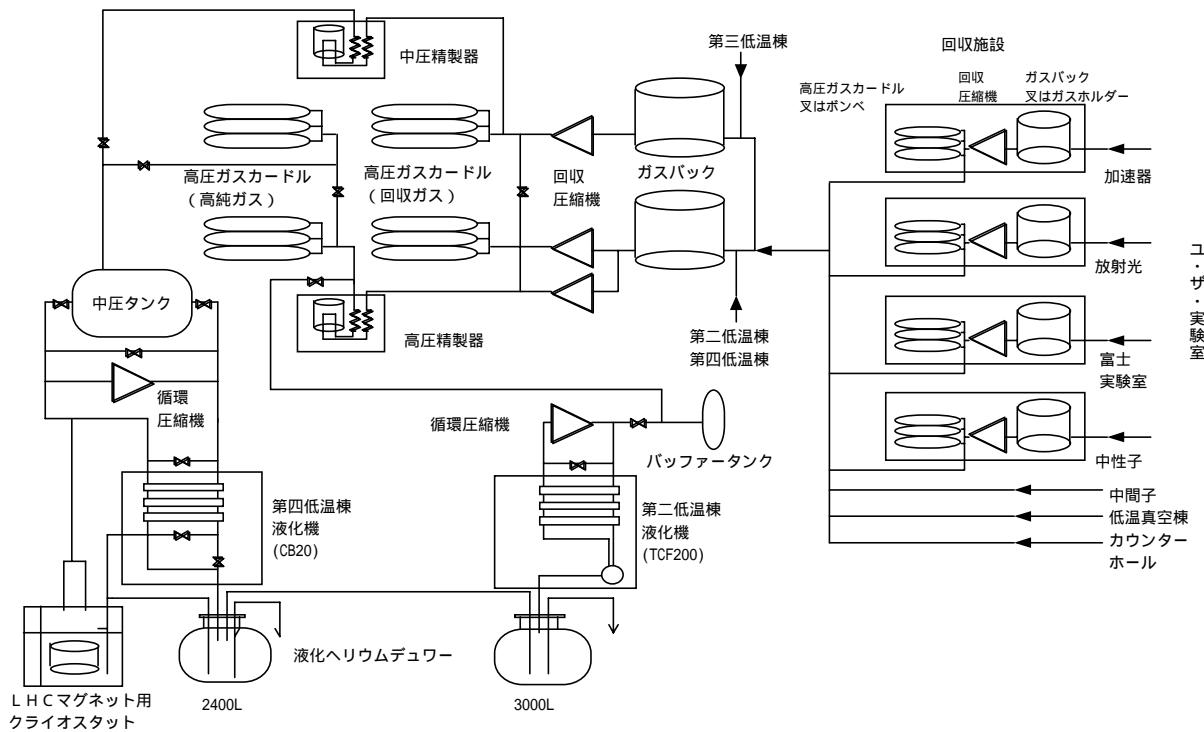


図 1 : 低温工学センター高圧ガス機器概略フロー

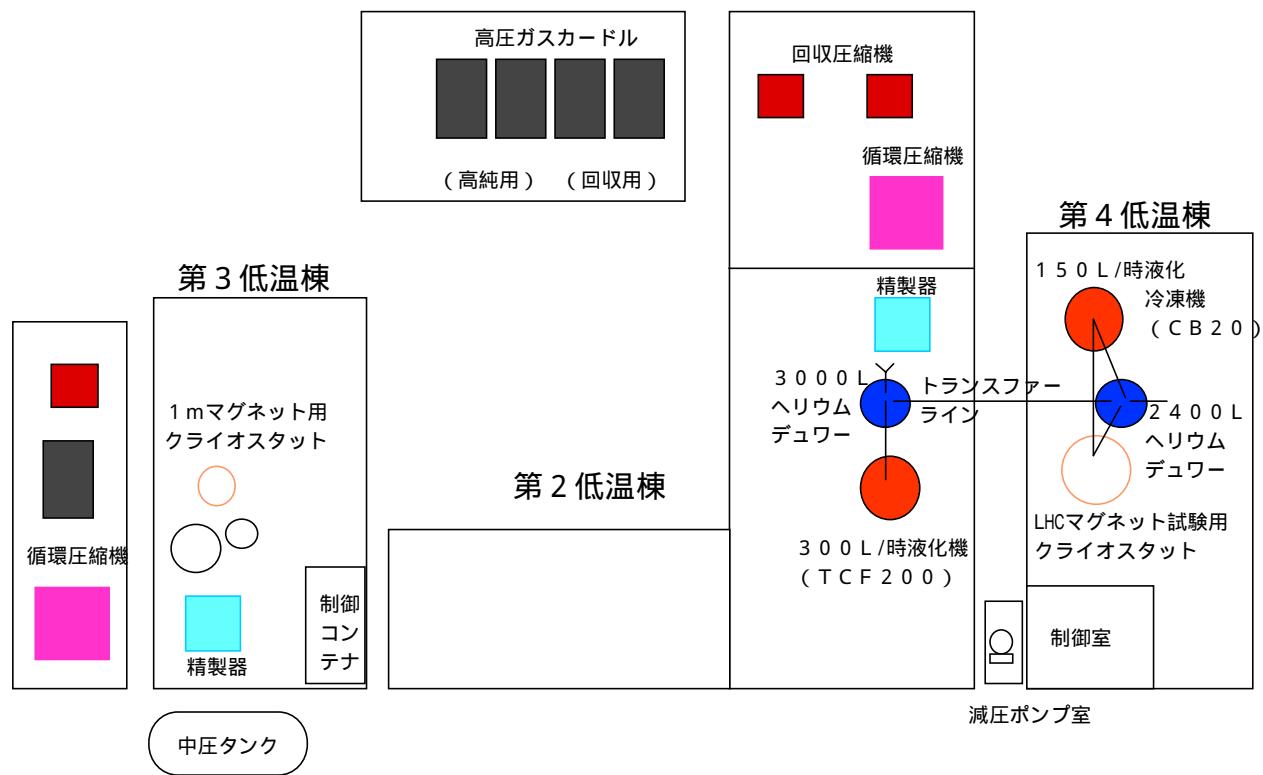


図2：低温工学センター施設配置図

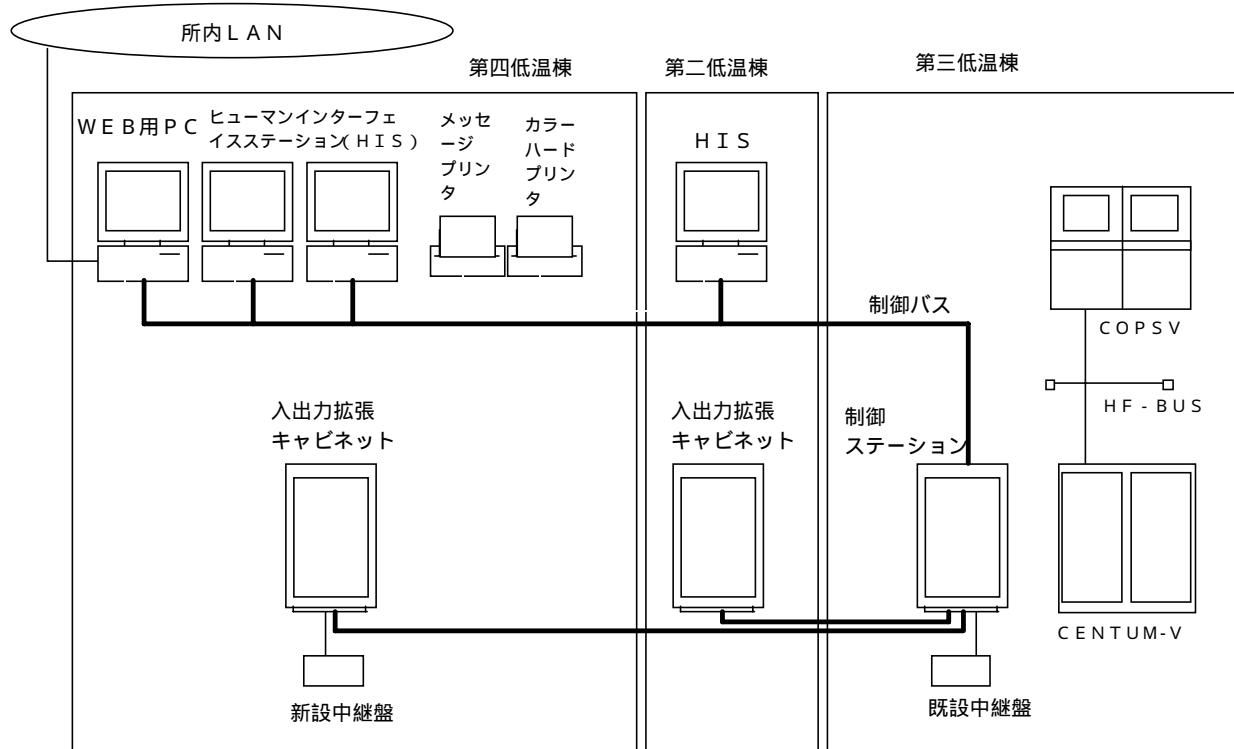


図3：新制御計算機 CENTUM CS3000 システム配置図

3. システムへの要求事項及びその検討

LHC マグネットの性能試験を行うための液化冷凍機とクライオスタッフへの要求性能は以下の通りである。

試験スケジュールの為の要求

- ・マグネット冷却から励磁試験、磁場測定、加温までの期間を 4 週間とする
- (内訳) クライオスタッフ真空置換及び系内循環精製、マグネット冷却(常温から 4.2K) : 一週間
- 4.2K から 1.8K 冷却及び励磁 (クエンチ) 試験 : 一週間
- 磁場測定 : 一週間
- 加温運転 : 一週間

注) 期間内の土日は運転しない。

試験のために要求される冷凍機の性能とクライオスタッフへの要求

- ・クライオスタッフの内圧の抑制と冷却時のエンタルピー軽減の為、電磁石クエンチ後の液温上昇を 4 K 以下にするように貯液量を最適化する。但し、高圧ガス設備として保安法に基づく最小肉厚は確保する。
- ・電磁石クエンチ後の目標再冷却時間を 6 時間以下になるよう、再冷却に必要な冷凍能力を確保する。
- ・少ない人員で 24 時間運転を繰り返すには無理が生じるため、マグネットを常温から 4.2K まで冷却(初期冷却)する以外は 1 日 16 時間(8 時間勤務 2 交代制)の運転に押さえる。

その他

- ・限られた人員で運転が可能な事。
- ・限られた予算に収まるようにすること。
- ・マグネット試験スケジュールを考慮し、短期間にシステムを完成すること。

及び 対する液化機への要求

液の消費量は、励磁試験(クエンチ試験)時が最も多いでこれについて必要液化量を考える。

液化機への要求は励磁試験を 1 日 2 回として 1 日あたり 5000L 程度の液化能力が必要になった。

(内訳)

- ・1.9K 冷却に必要な液化ヘリウム量は 1400L × 2
- ・クエンチ後に放出された液化ヘリウム量(全貯蔵エネルギーが液化ヘリウム内に放出されると想定) 300L × 2
- ・クライオスタッフへの熱侵入による蒸発量 1200L
- ・ユーザーへの供給に日 1000L 程度

結果として、現在保有する液化冷凍機(第二低温棟液化機が 300L/時、第三低温棟液化冷凍機が 150L/時)をトランスファーラインで接続し、連繋して運用すれば十分の能力を持ち、尚且余力があるためにユーザーへの液化ヘリウムの供給も行えることが解った。

に対する要求

第二低温棟液化機は旧式のため手動によるバルブ操作で運転をしなければならない。2 台の液化冷凍機を同時に運転、監視をすること、特に起動時から液化定常運転までは技術と注意が必要であり、低温工学センター内の人員だけでは負担が重い。そこで、負担の軽減をするためには第二低温棟の液化機の運転を自動遠隔操作出来るようにする事が必須である。そこで、手動バルブから自動バルブへ改良し、圧力等の情報を制御器へ送り、二台の液化冷凍機を集中監視化させ、尚且運転を自動化し、又、各運転条件に合わせた制御プログラムを組む。こうすることで監視業務に集中することができるため、負担の軽減が可能になる。

以上の事を考慮し、連繋運転に必要な制御システムを検討した結果、横河電機製分散処理制御システムセンタム CS3000 を採用した。これは 1m マグネット冷却用液化冷凍機(移設前に第三低温棟で試験を行った)で使用した制御機の後継機種であり、互換性と共に、制御器の制御点数が格段に増大している。こうすることで 2 台の液化機を同時に監視制御が可能になる。

又、後継機種であることで制御プログラム等の移植作業を比較的容易に行うことが出来、新規プログラム作成方法も前機種を踏襲しているため、これまでプログラム開発を行ってきた低温工学センター職員の手で作成することができる。こうすることでプログラム設計、作成等にかかる経費を大幅に削減することが出来た。

4. システムへの要求事項及びその検討

4.1 ハードウェア

連繋運転システムのハードウェアの設計と構築に際して、以下の事項に留意し、作業を行った。

機器の配置

- ・第三低温棟から第四低温棟に機器を移設する際、設置後の配管工事のコストを抑えるため現有配管ができるだけ利用した。さらに、新規の配管は高さ方向のスペースを有効に利用し、後日点検並びに作業に支障がないように機器の配置を設計した。

- ・第四低温棟内に設置する制御室を中二階にして、一階部と天井部を実験準備用のフリースペースとして確保した。

両液化機の連繋運転とマグネット試験用クライオスタッフとの整合性

(1) 運転圧力からの各機器の検討

第二低温棟液化機用コールドボックス(TCF200)は、気液分離槽を持ち液化ヘリウムを単相流で第二低温棟ヘリウムデュワー(HD900)に液送している。第二低温棟液化機用圧縮機の吸入運転圧力は 0.06MPaG なので、コールドボックス(TCF200)内のバルブの C V 値の関係から第二低温棟ヘリウムデュワー(HD900)の内圧は 0.04MPaG までしか上げることができない。そ

こで、第四低温棟ヘリウムデュワー(R95)は0.03MPaG、クライオスタッフ(CS800)は0.02MPaG、第四低温棟コールドボックス(CB20)出口圧力は0.01MPaGの圧力で運転を行えるように、新規バルブのC V値を設計した。

(2) 圧縮機の吸入圧力による吸入配管の口径の検討

今回、第四低温棟液化冷凍機用圧縮機(C10)からコールドボックス(CB20)間の距離が移設に従い10mから300mに延長されたため、配管の圧力損失(0.005MPa以下)を抑えるため、延長部の吸入配管の口径を125Aから150Aに変更した。

(3) 第二-第四低温棟ヘリウムデュワー間を繋ぐトランスマルチラインの検討

- バイオネットの数を出来るだけ少なくし、立ち上がり及び立ち下がりを最小限に抑え長さを30m以内にし、熱侵入量を出来るだけ少なくするようにトランスマルチラインの設計を行った。
- 現有設備の機器構造(プラットホーム等)を有効利用した配管配置及び既存のトップフランジ接続ポートを利用した合理的な配置になるように設計した。

第二低温棟液化機(TCF200)の自動化

- ##### (1) 調整弁の検討
- コールドボックスの入出口弁を手動弁から自動調整弁に変更した。
 - ポジショナーを空空変換器から電空変換器へ変更した。

(2) 自動化に必要な入出力信号の割付けおよび結線

これまで使用されていたタグ名と入出力結線番号を統一させ、混乱を起こさない様にした。

新制御計算機(CENTUM CS3000)における入出力点数検討

自動化における入出力点数をリストアップし、将来的な点数増加を考慮し、下記の様に割付を行った。

第二低温棟 AI=32(0)、AO=16(2)、DI=64(25)、DO=64(34)

第三低温棟 AI=32(9)、AO=16(7)、DI=64(10)、DO=64(53)

第四低温棟 AI=106(7)、AO=32(2)、DI=64(14)、DO=64(6)

(未使用)

新制御計算機の現状の割付点数 = 旧制御計算機3台

現状の割付点数は新制御計算機の最大割付点数の約半分(リモートI/O等の追加により新たに現設備相当の遠隔監視、遠隔操作並びに自動制御が可能)

高圧ガス申請に対して以下の書類を作成した。

- 機器一覧表
- 高圧ガスフローシート
- 機器配置図
- 配管図

ユーザーへの液供給用トランスマルチチューブの設計

第四低温棟へ送るトランスマルチラインの増設に因って第二低温棟ヘリウムデュワー(HD900)のユーザーへの液供給用トランスマルチポートが二口から一口になった為、一つのポートから二つのデュワーにトランスマルチ出来るようにユーザー液供給用トランスマルチチューブの設計を行った。また、バックアップとして第四低温棟ヘリウムデュワー(R95)からもユーザーへの液供給が出来るようトランスマルチチューブの設置を行った。

制御機 - 機器間の信号確認

制御機 - 機器間の誤配線等を確認するため、機器側から模擬信号を入れ信号確認を行った。

4.2 ソフトウエア

連繋運転システムのハードウエアの構築と並行して、ソフトウエアの設計と構築を以下の手順で行った。

- 必要入出力点数のリスト作成
- 既存プログラムの整理を行い、新制御計算機(CENTUM CS3000)への移植
- エンジニアリングループ図の設計と作成
- 第二低温棟液化機の自動制御プログラムの設計と作成
- 連繋運転制御プログラムの設計と作成
- 制御およびモニターのグラフィック画面作成
- 励磁試験時の電磁石電源と高圧ガス機器のインターロックの作成
- 自動運転パラメータのチェックおよび制御システムのチューニング
- 自動制御プログラムのバグ出し

以上の作業スケジュールは以下の通りであった。

- 1999年9月～1999年12月 連繋運転システムの設計、高圧ガス申請書類類の作成
- 2000年1月～2000年3月 移設、配管工事、高圧ガス完成前事前検査、完成検査書類作成
- 2000年6月～2000年8月 第二低温棟液化機(TCF200)の自動化(ハードウエア)
- 1999年9月～2000年9月 ソフトウエアの設計と構築

5. 連繋運転システムおよび自動運転システムの性能確認試験

連繋運転システムおよび自動制御システムの性能を確認するために以下の試験を行った。

5.1 運転モードの説明(図4、5参照)

以下の自動運転モード(1)単独運転モード、(2)連繋運転モード、(3)マグネット冷却運転モード(4)マグネット加温モードについて説明する。

(1) 単独運転モード

第四低温棟液化冷凍機単独で運転を行い、マグネットが5K以下に冷却されていて液の消費の少ない磁場測定試験時に用いられる運転モード

(2) 連繋運転モード

第二低温棟液化機と第四低温棟液化冷凍機の連繋で運転を行い、マグネットが50K以下に冷却されていて液の消費の多いトレーニング試験時に用いられる運転モード

(3) マグネット冷却運転モード

マグネットを300Kから4.5Kまで冷却する運転モードで、マグネットの温度が50K以上は第四低温棟液化冷凍機単独で寒冷ガスにより冷却を行い、50K以下からは連繋運転で液化されたヘリウムにより冷却を行い、クライオスタット(CS800)に貯液するモード

(4) マグネット加温モード

マグネットに内蔵されたヒーターを用いて1.9Kから300Kまでヒーター加温する運転モード

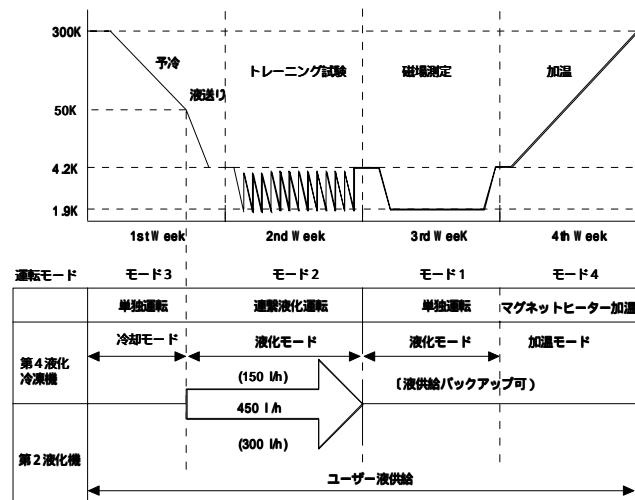


図4(b): 試験スケジュールと運転モードの関係図

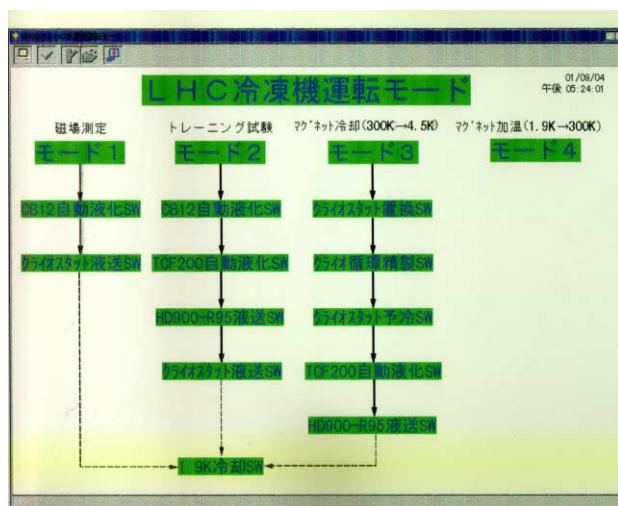
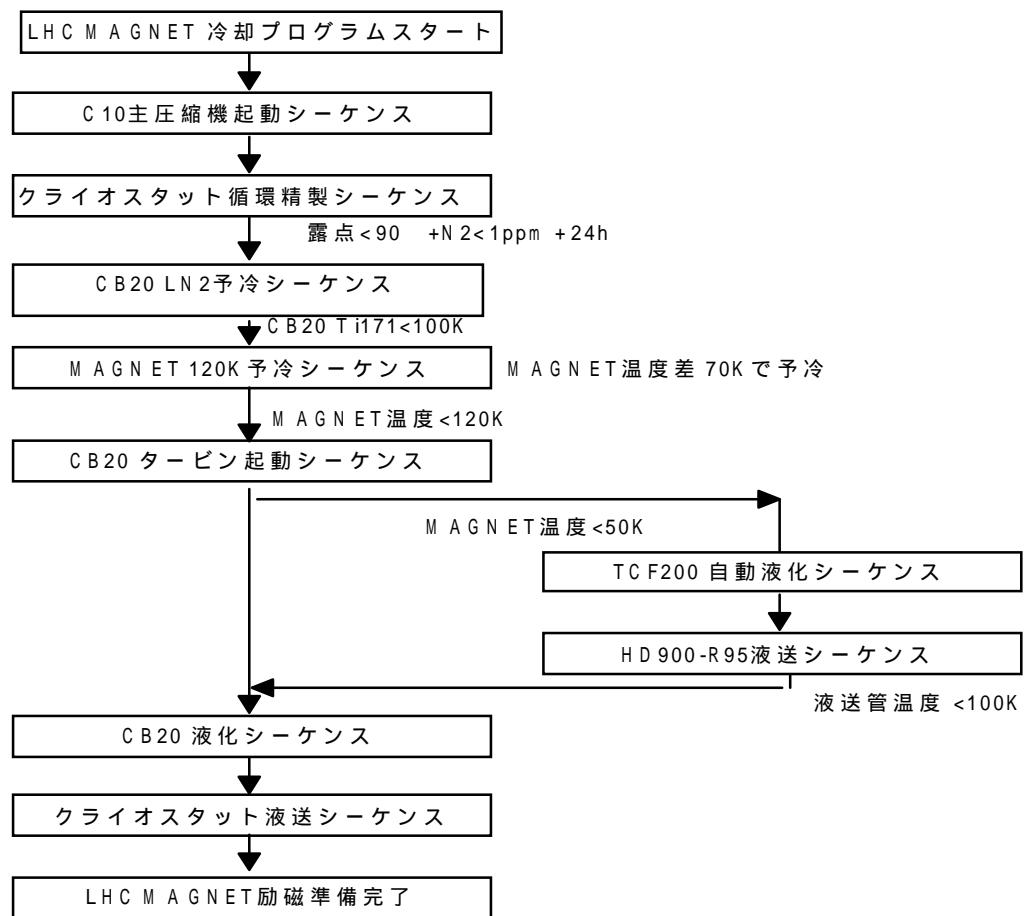
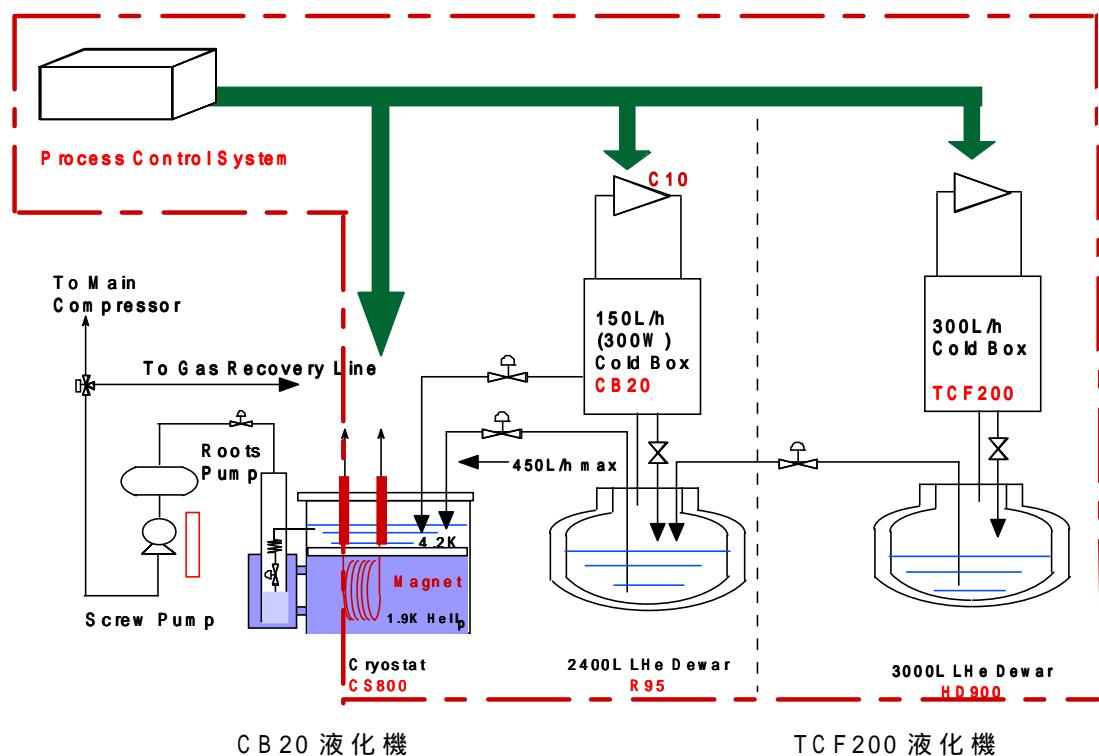


図4(a): 制御計算機のモニター画面



自動運転流れ図（モード3）

5図：連繋運転システムの概略フロー図（上図）と自動運転フローの一例（下図）

5.2 連繋運転時の液化能力運転

連繋運転により液化能力が設計値である 450 リットル／時を達成できるかどうかの確認試験を行った。

確認試験は以下の方法で行った。

・第二低温棟ヘリウムデュワー(HD900)と第四低温棟ヘリウムデュワー(R95)の差圧を 0.01MPa、送液弁の開度を 40%固定で第二低温棟液化機と第四低温棟液化冷凍機の連繋運転を行い、各々の液化能力の測定を行う。

・試験結果

第二低温棟ヘリウムデュワー(HD900) 平均 124L/h

第四低温棟ヘリウムデュワー(R95) 平均 338L/h

以上の結果、図 6 に示すように連繋運転により合算した液化能力は設計値を越える 462 リットル／時であることが確認できた。

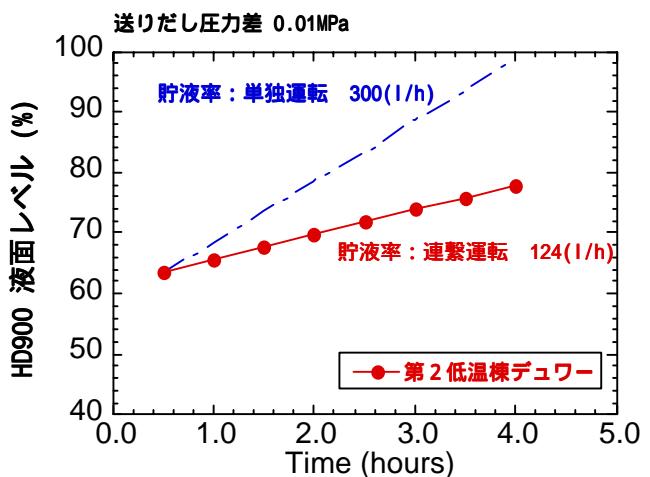
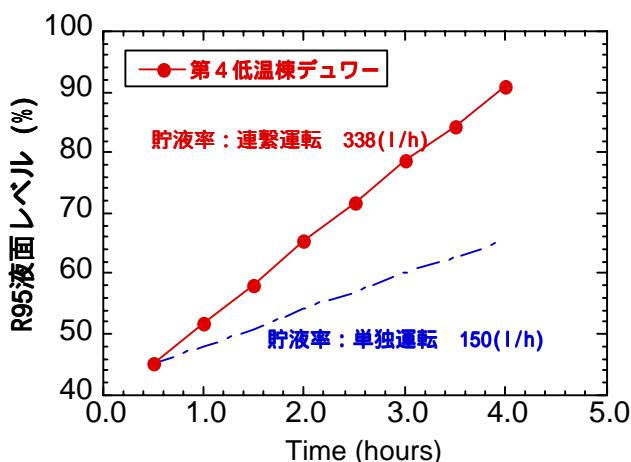
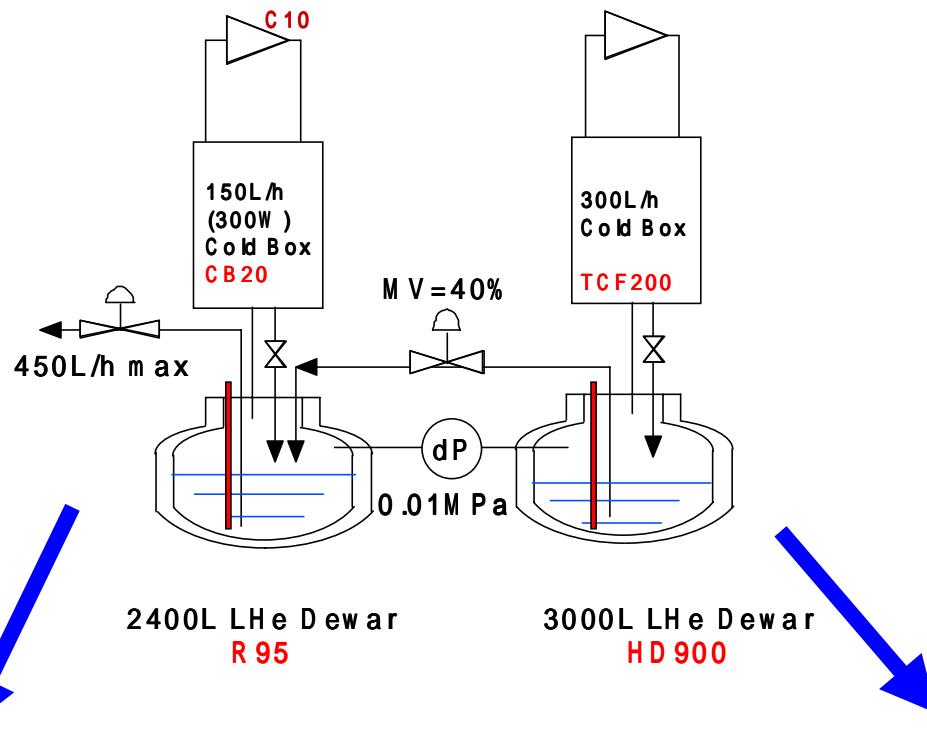


図 6：液化能力性能試験

5.3 マグネット冷却試験

試験用クライオスタッフを接続し、実際にマグネットを冷却し、以下の項目についてシステムの性能確認試験を行った。

(1) マグネット冷却試験(300K から 4.2K 冷却)

第四低温棟液化冷凍機単独運転により 50K まで冷却し、その後第二低温棟液化機を立ち上げ、連繋運転により液送りを行い、4.2K まで冷却すると同時に、クライオスタッフに貯液した。

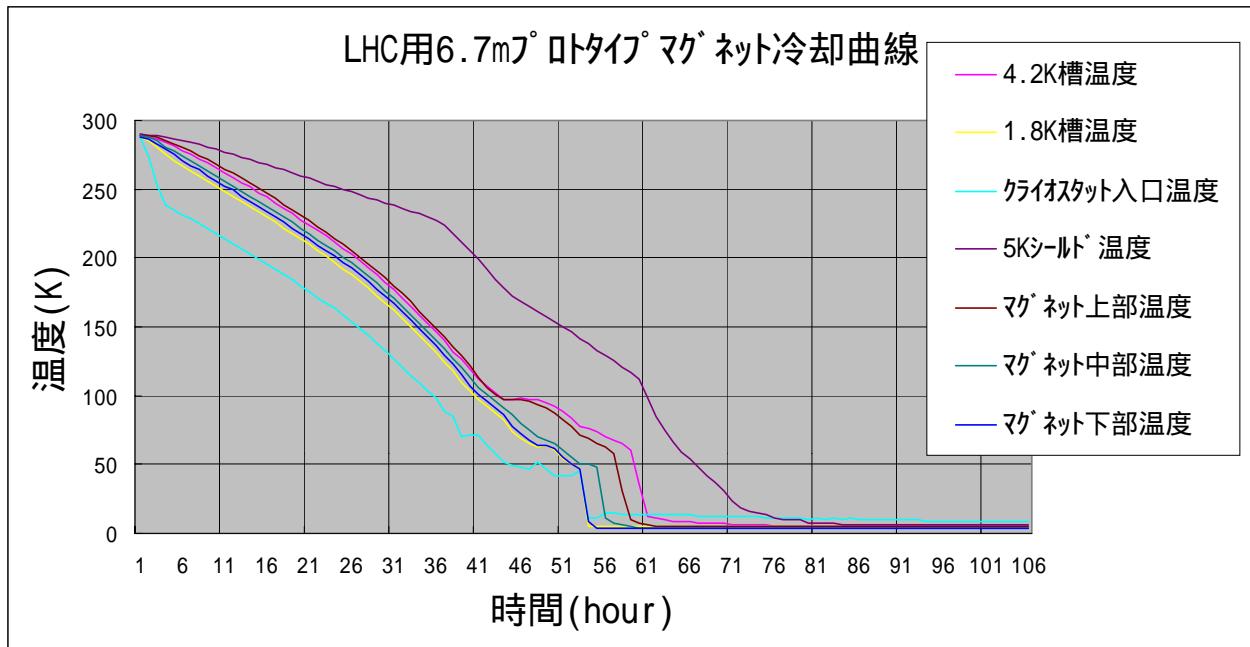


図 7 : マグネット冷却試験(300K 4.2K)

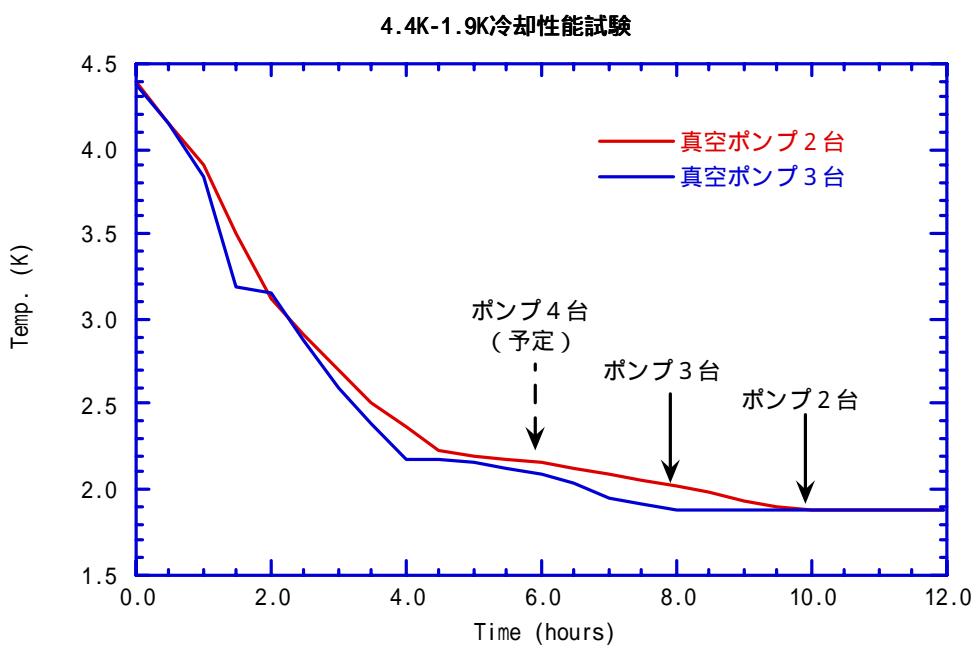


図 8 マグネット冷却試験(4.2K 1.9K)

冷却時間は図7に示すように設計要求の80時間以内であった。

(2) マグネット冷却試験(4.2Kから1.9K冷却)

1.9K超流動ヘリウム温度まで冷却するために、超流動ヘリウム発生熱交換器用減圧排気系を駆動し、マグネットを1.9Kまで冷却した。冷却時間は図8に示すように3セットの排気系を駆動して約8時間であった。排気系をさらに1台増設する予定であるので、設計どおり6時間で冷却できる見込みである

(3) トレーニング試験

連繋運転モードによりマグネットのクエンチ試験を行った。マグネットのクエンチによる液の蒸発で消費量が大幅に増えるので、連繋運転で液を確保する必要がある。この試験によりトレーニング試験を最大3回/日行えることが確認できた。

(4) 定常冷却試験

磁場測定時には、液の消費が少ないので、第四低温棟液化冷凍機単独運転で十分である。今回の試験で、単独運転で必要な液が確保できることが確認できた。

(5) 加温試験

4.2Kから室温までのマグネットの加温が自動でできることが確認できた。

まとめ

- (1) LHC用超伝導電磁石試験用の冷却システムを、現有設備を有効に活用した連繋システムにより、経費を節減し、約半年間(実質工事期間は3ヶ月)の短期間で完成した。
- (2) ハード及びソフトの設計、構築をほぼ二人で行った。
- (3) 各運転モードの自動運転プログラムが正常に動作することを確認した。
- (4) 2台の液化機連繋運転で450L/H以上の液化能力を達成した。
- (5) 循環精製運転を含めて、6.7tマグネット(質量約10t)の300Kから4.5Kまでの冷却が1週間以内(実質5日間)にできることを確認した。
- (6) 4.5Kから1.9Kまでの冷却が真空ポンプのフル装備で6時間以内にできる見通を得た。
- (7) 国内では初めてであろう二台連繋液化冷凍機システムを完成した。
- (8) 2001年3月から実機と同寸法のプロトタイプマグネットの冷却を行い、順調に試験中である。
- (9) 今後の課題として、クエンチ等の自動処理の改善を引き続き行っている。

謝辞

とても大変な仕事でしたが、このような開発の機会に巡り会え、責任のある仕事を私たち技官にまかせて頂いた低温工学センターの方々に感謝します。



第二低温棟 液化機室



第二-第四低温棟ヘリウムデュワー間
トランスマーケティング



第四低温棟マグネット試験設備