

目次

- 0. はじめに
 - 緊急昇温/冷却モード
 - 制御ループと制御システムの構成
- 1. 冷凍の原理と基本的な冷凍サイクル
 - 1-1 超伝導と液体ヘリウム
 - 1-2 寒冷の発生
 - 気化線熱による冷却 (凝縮冷却機)
 - 断熱仕事膨張による冷却 (膨張エンジン)
 - 断熱自由膨張による冷却
 - 1-3 理想的な液化サイクルと冷凍サイクル
 - 理想的な液化サイクル
 - 理想的な冷凍サイクル (カルノー-サイクル)
 - 1-4 基本的な実用の液化サイクル
 - ジュール-トムソン液化サイクル
 - クロード液化サイクル
 - 1-5 ヘリウム冷凍装置
 - 液化機と冷凍機
 - 液化冷凍混合モード
 - 1-6 代表的なヘリウム冷凍機
 - クロード型ヘリウム冷凍機
 - 分離ブライトン型ヘリウム冷凍機
 - 実用のヘリウム冷凍機
- 2. ヘリウム冷凍機の実際
 - 超伝導加速空洞ヘリウム冷凍装置 (6.5 kW at 4.4 K)
 - 2-1 超伝導加速空洞
 - 2-2 冷凍負荷とヘリウム冷凍装置の冷凍能力
 - 2-3 超伝導加速空洞ヘリウム冷凍装置のシステム構成
 - 2-4 ヘリウム冷凍装置の冷凍サイクル
 - 2-5 超伝導加速空洞ヘリウム冷凍装置の主要構成機器
 - ヘリウム循環圧縮機
 - 熱交換器
 - 膨張タービン
 - 液化窒素循環装置
 - 2-6 超臨界タービンによる冷凍能力の向上
 - 2-7 ヘリウム冷凍機の効率
 - 2-8 冷凍システムの運転モードと制御
 - 冷凍システムの運転モード
 - 初期冷却モード
 - 液化運転モード
 - 定常運転モード
- 3. 超流動ヘリウム冷凍機
 - 3-1 超流動ヘリウム冷凍機の必要性
 - 3-2 超流動ヘリウムの性質と生成
 - 3-3 超流動ヘリウム冷凍機の構成
 - 3-4 実用の超流動ヘリウム冷凍機
 - 室温排気ポンプ
 - 低温排気ポンプ
- 4. SSC ヘリウム冷凍システム
 - 4-1 SSCヘリウム冷凍システムの構成
 - ヘリウム液化サイクル
 - 4 K ヘリウム冷凍サイクルと液化ヘリウム循環サイクル
 - 20 K 輻射シールド冷凍サイクル
 - 4-2 超伝導マグネットの冷却方式
- 0. はじめに
 - 近年、超伝導技術の高エネルギー加速器、核融合装置等の大型装置への応用が本格化しており、これらを液化ヘリウム温度まで冷却保持するための大型ヘリウム冷凍/液化装置が世界中に数多く建設されている。米国フェルミ国立加速器研究所 FNAL では世界で最初の直径 2km の超伝導陽子シンクロトロン Tevatron (1000 GeV) を完成させ 1983 年より営業運転を行なっている。旧西独の電子シンクロトロン研究所 DESY では直径 1.6 km の陽子-電子衝突リング HERA (820 GeV x 30 GeV) の陽子用の超伝導加速器が完成し試運転を開始している。本研究所の電子-陽電子衝突リング TRISTAN (32 GeV x 32 GeV) でもビームエネルギーの増強用に超伝導高周波加速空洞、衝突点でのビームの収束用に超伝導四極マグネットが建設され稼働している。土岐の核融合研究所では超伝導ヘリカル装置の建設が、米国のテキサスではリング周約 87 km 超伝導大型加速器 SSC (Superconducting Super Collider) (20 TeV x 20 TeV) の建設が進められている。またスイスにあ

る欧州合同原子核研究所 CERN では円周約27 kmの陽子-陽子衝突リング LHC (Large Hadron Collider) (10 TeV x 10 TeV) の建設が計画されているが、この計画では NbTi 超伝導マグネットを 2 K の超流動ヘリウムで冷却して 10 T の実現を目指す。これらの計画を実現するためには高性能の超伝導マグネットのシステムの開発と同時に高い信頼性をもつ高性能のヘリウム冷凍システムの開発が必須である。

本講義では、ヘリウム冷凍機の基本原則についての簡単な解説を行なった後、TRISTAN 超伝導高周波加速空洞用のヘリウム冷凍システム (6.5 kW at 4.4 K) を実例として、実際のヘリウム冷凍装置の機器の構成、機能、運転について議論する。さらに将来の展望として 1.8 K 超流動ヘリウム冷凍システムと SSC のヘリウム冷凍システムについて解説する。

1. 冷凍の原理と基本的な冷凍サイクル

1-1 超伝導と液化ヘリウム

寒剤として使用することが出来る各種ガスの液体の温度 (三重点から臨界温度) を図 1-1 に示

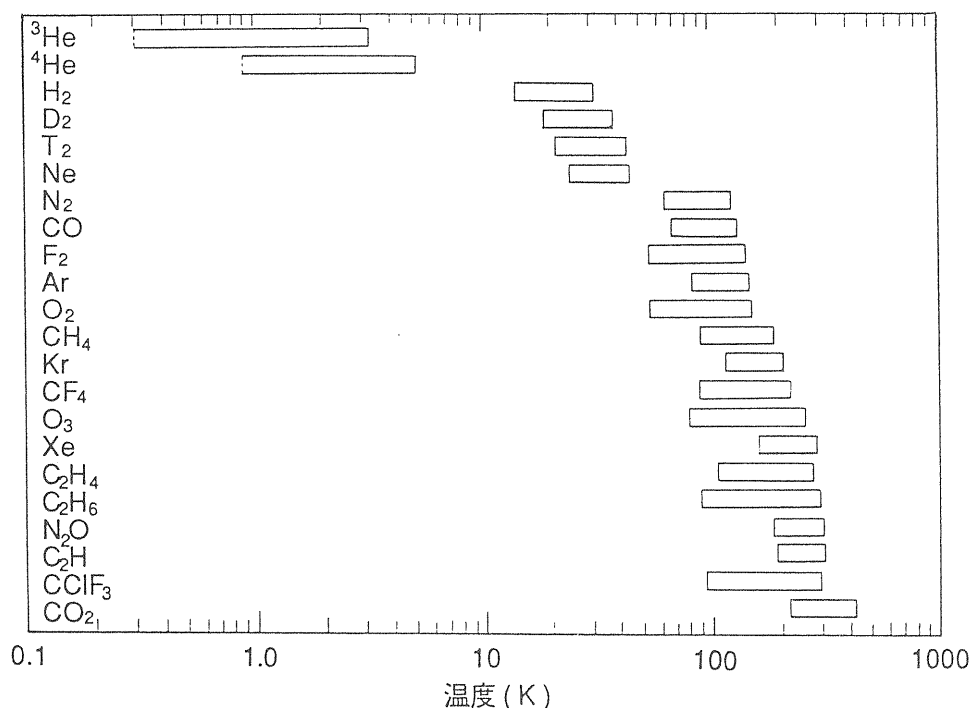


図 1-1 各種ガスの液体の温度 (三重点から臨界温度)

す。水素は 13.8 K でが固化してしまうので、この温度以下では液化ヘリウムだけが唯一寒剤として利用可能である。ヘリウムの臨界温度 5.3 K と水素の三重点 13.8 K のあいだにギップがあるため、加圧したヘリウムを減圧した水素で冷却するだけではヘリウムの液化は不可能で、カマリン-オネスは減圧した水素で予冷したヘリウムをジュール-トムソン膨張させることにより始めてヘリウムの液化に成功した。

現在、実用の超伝導マグネットに使用されている NbTi 合金と Nb₃Sn 化合物の超伝導線材の臨界電流、臨界磁場、臨界温度を図 1-2 示す。図より明らかな様に、これらの超伝導材は、液化ヘリウムによる冷却が必須であり、これらの液化ヘリウムを能率よく生成するヘリウム冷凍機なしには超伝導技術の広範な利用は不可能となる。現在盛んに研究が進められている高温超伝導体を利用した超伝導機器では液化窒素温度領域での運転が期待されるが、その場合には寒剤として液化窒素が利用されることになる。

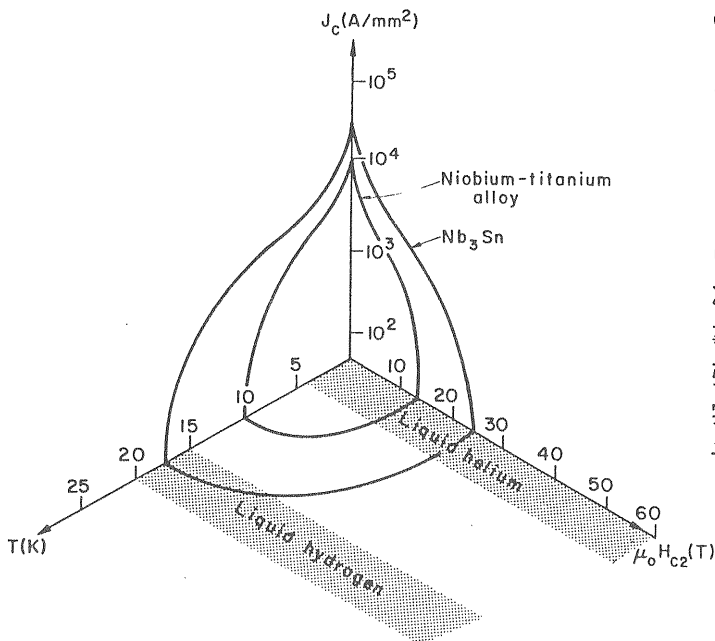


図1-2 実用超伝導材 (NbTi, Nb₃Sn) の臨界電流、磁場、温度 (Ref. 4)

1-2 冷凍の発生

気化潜熱による冷却 (凝縮冷凍機)

家庭で使用されている電機冷蔵庫やクーラーではフロン等の冷媒ガスを用いた凝縮冷凍機が使用されている。この冷凍機では室温での圧縮により容易に凝縮-液化するフロンガスの気化潜熱を利用して冷却をおこなう。図1-3にこの冷凍機の動作の様子を示す。冷媒ガスであるフロンは圧縮機で圧縮され、圧縮中に発生した熱を放熱器で冷却した後、凝縮器に送られる。凝縮器の中の高圧

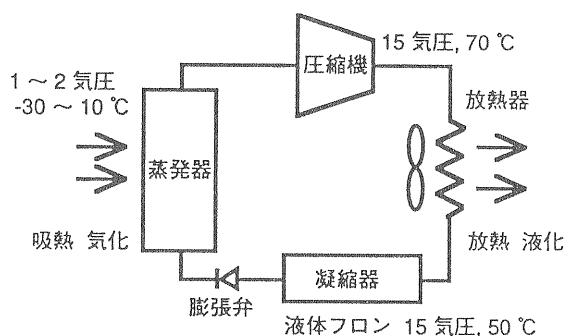


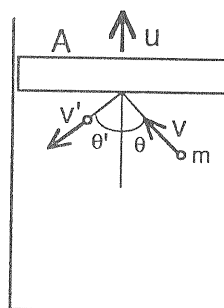
図1-3 凝縮冷凍機の動作原理

の液化フロンは膨張弁を通して低圧の蒸発器へ送られ、そこで冷蔵庫の中の肉や野菜から熱を奪って気化する。

ここで議論した凝縮冷凍機は構造が簡単で効率も良いが、残念ながら室温で圧縮により液化し、さらに、われわれが必要とする低温で蒸発するという特性を持つ冷媒ガスは存在せず、極低温の冷凍をおこなうには、膨張エンジンのように断熱仕事膨張やジュール-トムソン弁による断熱自由膨張による冷却が利用される。これらの方法による寒冷の発生の仕組みについて、直感的な気体の分子論的な方法により考察する。

断熱仕事膨張による冷却 (膨張エンジン)

ピストンの中で膨張する気体を考える。膨張する気体がピストンに対して仕事をすると温度が下がるが、この機構について気体の分子論的観点から考察する。図1-4で示す様にピストンを備えた断熱されたシリンダーの中のガス分子のピストンの壁面との衝突運動を考える。分子が止まっている壁に弾性的に衝突するときは速度の垂直成分の大きさは変わらない。ところがピストンをガス分子の速さより充分小さい速さ u で動かすなら、衝突で分子の垂直成分が減少し、分子の運動エネルギーが減少し、結局分子の温度が下がることになる。単位面積、単位時間あたりの分子運動エネルギーの全損失は dE/dt で与えられる。ここで $1/3 n m v^2$ は分子論で圧力 P を表すので、ピストンの断面積を A とすると、単位時間あたりの分子の



$$u \ll v$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2 \cdot u$$

$$P = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2$$

$$P A u = F u$$

図1-4 断熱仕事膨張による冷却の原理

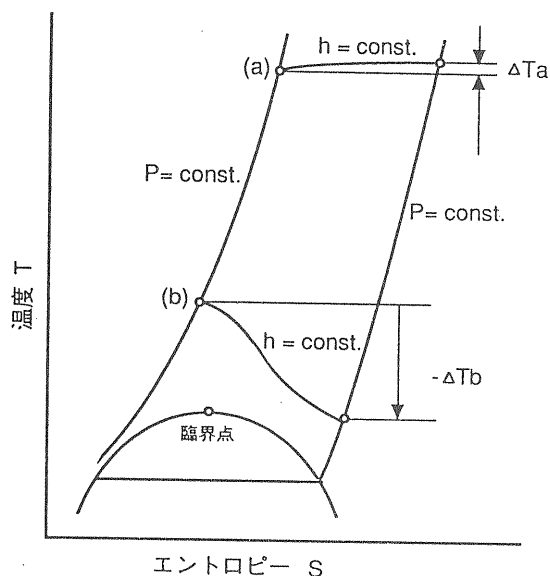


図1-5 等エンタルピー膨張による
ガスの温度変化

運動エネルギーの減少は仕事率 F_u になる。ターボ式の膨張エンジンの場合には回転するタービンの羽根が上記のピストンに対応して、ガス分子が衝突により運動エネルギーを失って温度が下がることになる。

断熱自由膨張による冷却

高圧ボンベの中の炭酸ガスを大気中に急激に放出、膨張させるとガスの温度が下がり固体の炭酸ガス、即ちドライアイスが生成される。このよう

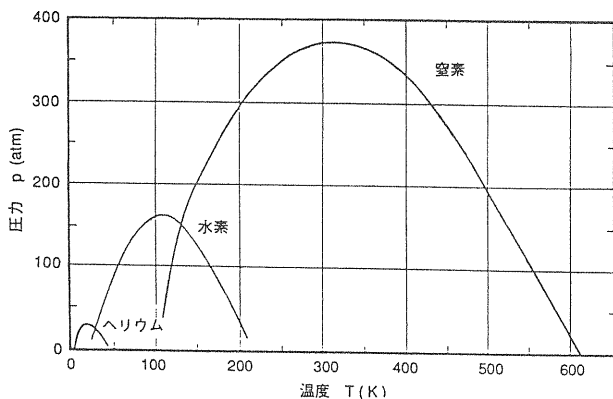


図1-6 窒素、水素、ヘリウム
のジュール-トムソン効果の逆転曲線

に高圧のガスを断熱自由膨張すると温度が下がる現象はジュール-トムソン効果と呼ばれ低温の発生に利用されている。

ジュール-トムソン弁での断熱自由膨張は熱力学的にはエンタルピーが変化しない等エンタルピー過程であり、 $T-S$ 線図の等エンタルピー曲線で表現される。図1-5で模式的に示す様に温度が高い(a)の場合には等エンタルピー曲線は図で示す様に僅かながら右上がりになり、断熱自由膨張で加熱されることを意味する。一方、温度が低い(b)の場合には右下がりになり冷却されることを意味する。このように断熱自由膨張で加熱から冷却に変わる温度を逆転温度と呼び、断熱自由膨張を開始する圧力の関数で、逆転曲線として表される。図1-6にヘリウム、水素と窒素の逆転曲線を示す。ヘリウムについての詳細な逆転曲線を図1-7に示す。図中の曲線に囲まれた内部が冷却の領域で、窒素の場合には常温での断熱自由膨張で冷却効果が期待できるが、ヘリウムの場合には約35K以下に予冷しなければ断熱自由膨張で温度が下がらないことを示している。

図1-8に分子間に働くポテンシャルの様子を分子間距離の関数として模式的に表す。気体の分子論的な解釈では、ジュール-トムソン膨張による膨張ガスの冷却は、ガスの膨張に伴う平均の分子間距離の変化による分子間に働く相互作用のポテンシャル-エネルギーの変化分が分子の運動エネルギーの変化、即ち温度の変化を与えるものと解釈される。最初の状態の平均分子間距離が相互作用ポテンシャルの底までの距離より短い、長いにより、温度変化が、ある場合には冷却になり、ある場合には加熱になることが理解できる。

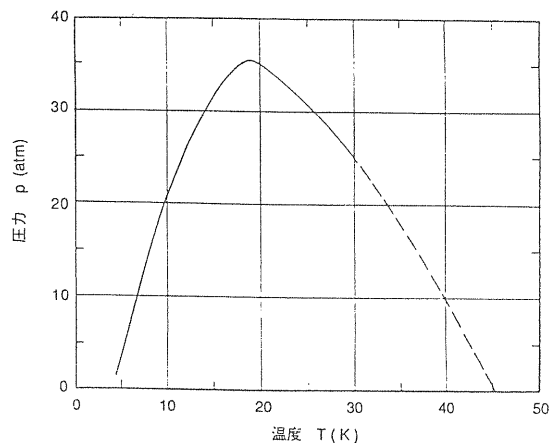


図1-7 ヘリウムのジュール-
トムソン効果の逆転曲線

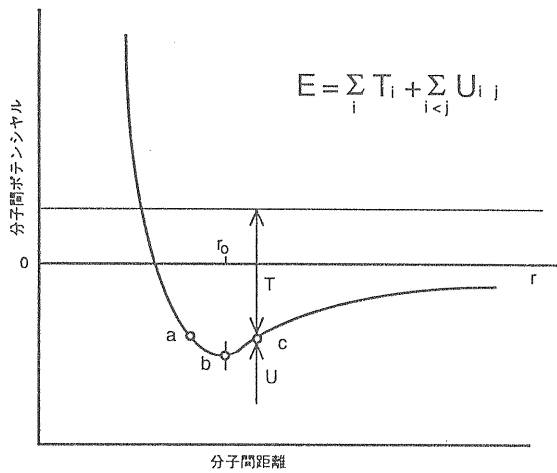


図 1-8 分子間ポテンシャルの距離依存性

1-4 理想的な液化サイクルと冷凍サイクル

理想的な液化サイクル

理想的な液化過程として図 1-9 で示す等温圧縮と断熱仕事膨張過程の二つの可逆過程から構成される過程を考える。この液化システムでは理想的な圧縮機と理想的な断熱仕事膨張を行なう膨張エンジンを仮定しており、状態 (1) から状態 (2)

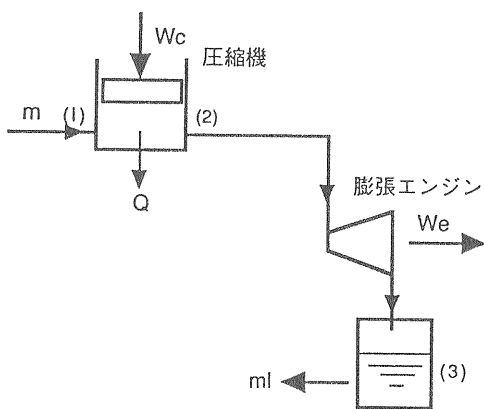


図 1-9 理想的な液化サイクル

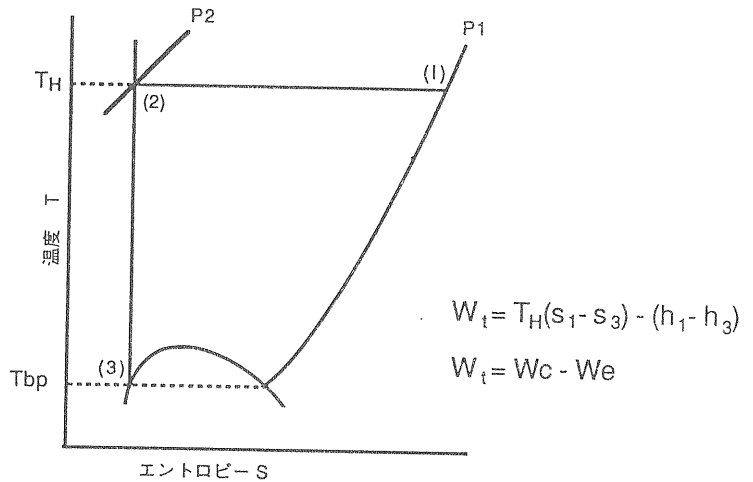


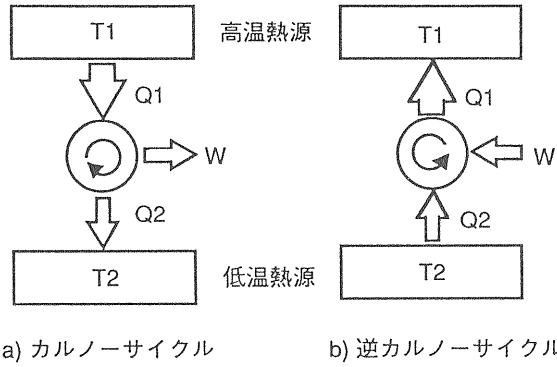
表 1-1 窒素、水素、ヘリウムの液化に必要な電力

	T (K)	(Wh/L)
N2	77.4	173
H2	20.4	231
He	4.2	236

への圧縮は可逆な等温圧縮で状態 (2) から完全な液相の状態 (3) へは可逆な断熱仕事膨張である。膨張エンジンで発生する仕事を有効に利用すると考えると、液化に必要な仕事 W は状態 (1) と (3) のエンタルピー h とエントピー s で表される。表 1-1 で、この式を用いて計算した窒素、水素、ヘリウムの液体を 1 L 生成するのに必要な電力を示す。実際問題として、この方法は 1) (2) の非常に圧力の高い状態に圧縮できないことと、2) そのような非常に圧力の高い状態から可逆な断熱仕事膨張を行なうことができない、ことにより実際には実現が不可能である。そこで以下で議論する実用的な液化の方法が考えられる。

理想的な冷凍サイクル

理想的な冷凍サイクルとして理想気体のカルノーサイクルの逆サイクルを考える。図 1-10 に温度 T_1 の高熱源と T_2 の低熱源間で運転する理想気体のカルノーサイクルとそれを逆に運転した



1 サイクルあたりの正味の仕事 W

$$W = Q_1 - Q_2$$

熱機関の効率 (thermal efficiency) η

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$Q_1/Q_2 = T_1/T_2$$

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

逆カルノーサイクルの COP (coefficient of performance)

$$\text{COP} = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

図 1-10 カルノーサイクルと逆カルノーサイクル

逆カルノーサイクルを示す。カルノーサイクルでは温度 T_1 の高温熱源から熱量 Q_1 を受け取って、温度 T_2 の低温熱源へ Q_2 を放出し、外部へ仕事 W をする。逆サイクルでは外部から仕事 W を加えて低温熱源から熱量 Q_2 を奪って高温熱源へ熱量 Q_1 を放出することになる。

カルノーサイクルをする熱機関の効率 η は熱源の温度 T_1, T_2 だけで決まる。同様に逆カルノーサイクルの冷凍機では、冷却能力 Q_2 と冷凍に必要な仕事 W の比 COP (coefficient of performance) は熱源の温度だけの関数となる。

表 1-2 冷凍機の COP (coefficient of performance)

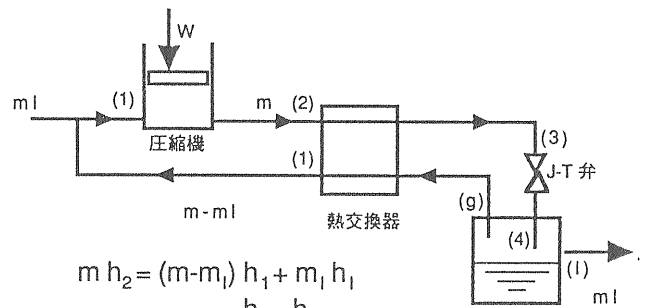
	T (K)	COF (理想)	COF (実機)	% カルノー
N ₂	77.4	0.35	0.1~0.16	28~45
H ₂	20.4	0.073	0.013~0.025	17~34
He	4.2	0.014	0.0013~0.0058	9.3~30

表 1-2 に高温部を室温 300 K とした場合の液化窒素、液化水素、液化ヘリウム温度での理想的な冷凍サイクル及び実用的な冷凍サイクルの冷却効率さらに%カルノーと呼ばれる実用的な冷凍サイクルの冷却効率を理想サイクルの効率の百分率で表した値を示す。

1-4 基本的な実用の液化サイクル

ジュール-トムソン 液化機

図 1-11 でジュール-トムソン液化機のフローと T-S 線図での液化サイクルを示す。この液



$$m h_2 = (m - m_l) h_1 + m_l h_1$$

$$y = m_l / m = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_l}$$

$$\frac{W}{m} = T(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)$$

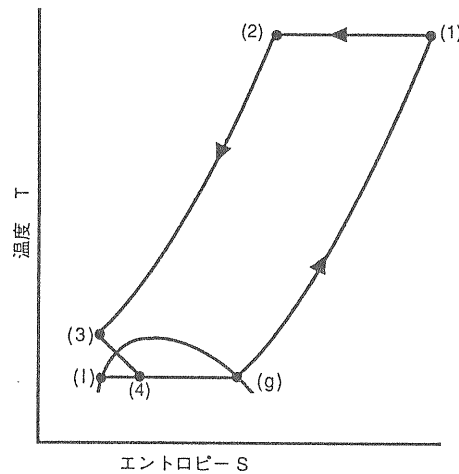


図 1-11 ジュール-トムソン液化サイクル

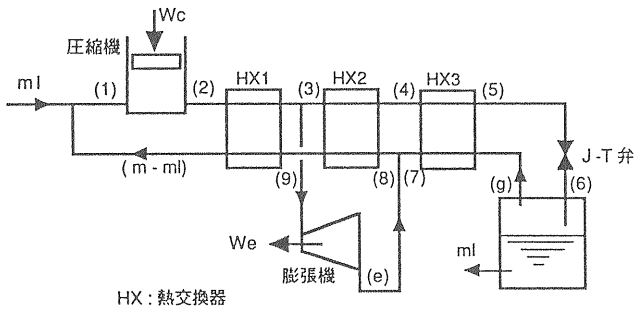
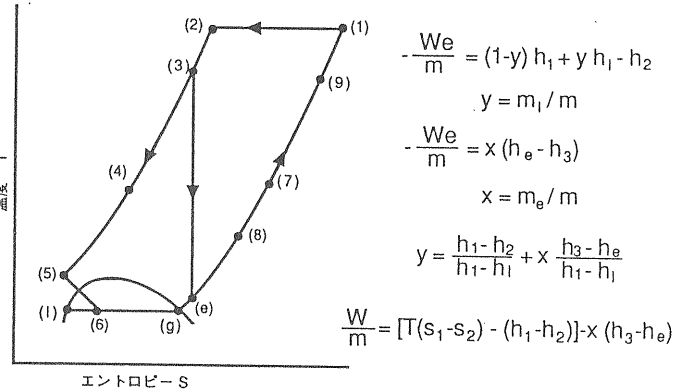


図 1-12 クロード液化サイクル



$$-\frac{W_e}{m} = (1-y) h_1 + y h_1 - h_2$$

$$y = m_l / m$$

$$-\frac{W_e}{m} = x (h_e - h_3)$$

$$x = m_e / m$$

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_l} + x \frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_l}$$

$$\frac{W}{m} = [T(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] - x (h_3 - h_e)$$

化機はジュール-トムソン効果により液化を行なう液化機で、圧縮機の他に、熱交換器とジュール-トムソン弁から構成される非常に簡単な液化方法であるが、この装置が働くためには、ジュール-トムソン弁の入り口での圧縮ガスの温度が逆転温度以下に冷却されていないと行かない。

理想的な熱交換器、ジュール-トムソン弁から構成される系内のエンタルピーの保存則を適用することにより、液化率 y が計算できる。圧縮機での圧縮過程が理想的な等温過程であると仮定すると、単位液化量あたりの必要仕事量 W/m を計算することができる。

クロード液化機 (クロード液化サイクル)

図 1-12 でクロード液化機のフローと T-S 線図での液化サイクルを示す。この液化機では最終段のジュール-トムソン弁での断熱自由膨張を逆転温度以下で行なうために、予冷の膨張エンジンが使用されている。圧縮機の等温圧縮過程、膨張エンジンでの断熱仕事膨張、さらに理想的な熱交換器を仮定すると、前述のジュール-トムソン液化機と同様な方法で、液化率 y と単位液化量あたりの必要仕事量 W/m が計算できる。

1-5 ヘリウム冷凍装置

液化機と冷凍機

液化機と冷凍機は基本的にシステムの構成は全く同じであるが運転の形態が異なる。即ち、液化

機の場合には、生成された液化ガスはシステム外へ取り出されて消費され、その蒸発ガスは常温の戻りガスとしてとして液化システムに戻る。そのため冷たい蒸発ガスの持つ寒冷をシステムに回収することが出来ない。ところが冷凍機の場合には、蒸発ガスは冷たいまま冷凍システムに戻されるため、その寒冷を熱交換器を通してシステムが完全に回収することができる。

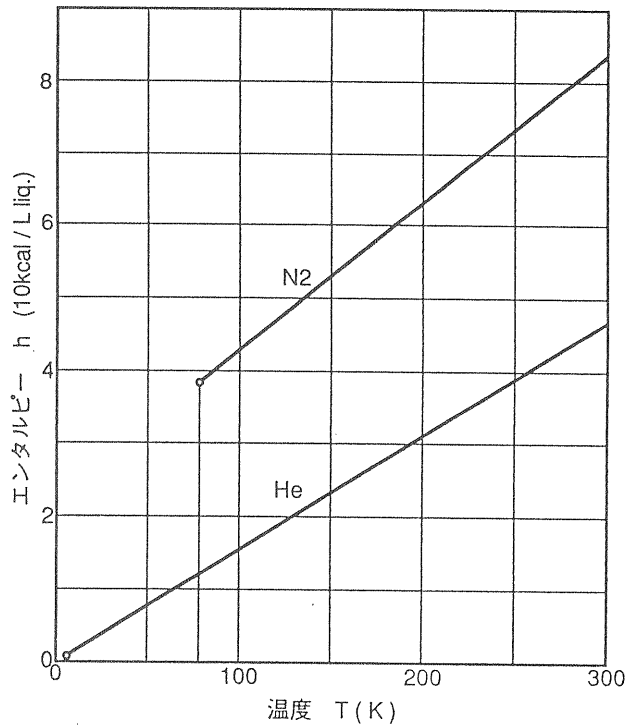


図 1-13 ヘリウムと窒素の液体 1 L 当りの気化潜熱と顕熱

図1-13にヘリウムと窒素の単位液化体積あたりの気化潜熱と顕熱の温度変化（エンタルピー）を示す。窒素の場合には気化潜熱と蒸発ガスの室温までの顕熱の大きさがほぼ同じ位であるのに対して、ヘリウムの場合には気化潜熱が顕熱の大きさに比べて非常に小さいことが分かる。

通常、良く設計されたヘリウム液化冷凍機では単位時間あたりの液化量と冷凍能力の間ではおよそ1 L/hrが3Wが対応している。すでに議論したように液化ヘリウムの気化潜熱は非常に小さく、1 L/hrの液化ヘリウムの気化潜熱は僅か約0.7Wの冷却能力しか産み出さない。このことは100 L/hrクラスの液化冷凍機を液化機として運転して100 L/hrの液化ヘリウムを生成すると、それにより約70Wの冷凍能力しか得られないことを意味する。ところが、これを冷凍機として運転すると、戻りガスの寒冷を有効に回収利用するために約300Wの冷凍能力を引き出すことができる。このようにヘリウム冷凍システムでは冷たい戻りガスの持つ寒冷の回収がいかに大切かが良く理解できる。

液化冷凍混合モード

ヘリウム液化機と冷凍機の違いついて議論をしたが、実用の超伝導マグネットをヘリウム冷凍機で冷却の場合には、マグネットの冷却に必要な液化ヘリウム温度での冷凍能力の他にマグネットへ電力を供給するための電流リードの冷却用の蒸発ヘリウムガスが必要となる。加速器用の高磁場マ

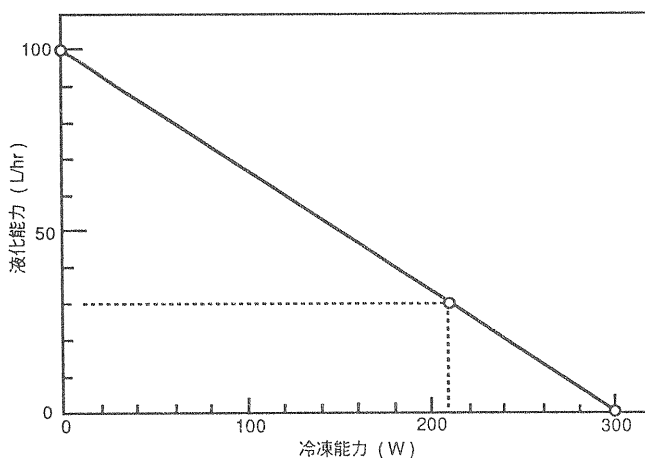


図1-14 ヘリウム冷凍機の液化冷凍能力

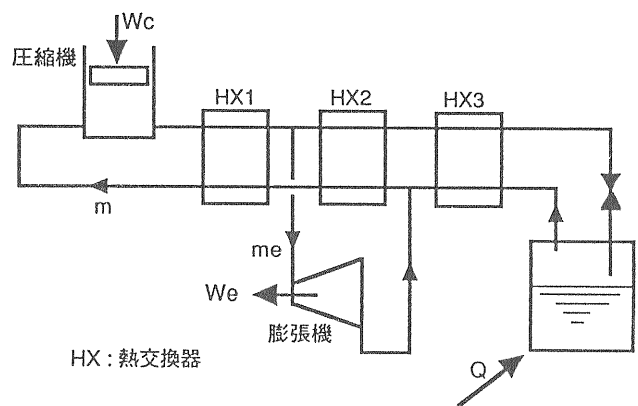


図1-14' クロード冷凍サイクル

グネットの様に大電流マグネット(5000A~8000A)では、これらの電流リードの冷却に必要なガスの量が液化ヘリウム換算で10~16 L/hrとなり、冷凍機を冷凍機モードと液化モードの混合のモードで運転する必要がある。図1-14で液化/冷凍機(100 L/hr, 300 W)の液化率-冷凍能力の特性を表す。通常、液化モードでの液化率と冷凍モードでの冷凍能力を直線で結んだ特性が利用される。図で示すように液化率30 L/hrを必要とする混合モード運転の場合には冷凍能力として約210 Wが利用できることになる。

1-6 代表的なヘリウム冷凍機

クロード型ヘリウム冷凍機

図1-14'にクロード-冷凍機のシステム-フロ

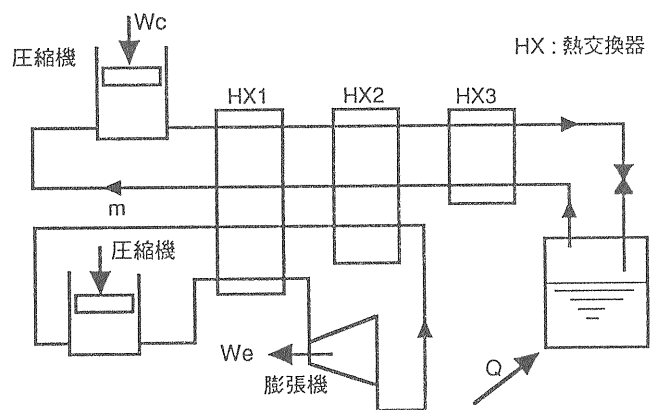


図1-15 分離ブライトンヘリウム冷凍サイクル

ーを示す。システムの構成は図1-12の液化機の場合と全く同じであるが、液化機では液化されたヘリウムをシステム外に取り出すので戻りのガスの流量が減少するが、冷凍機では熱負荷の冷却による全ての蒸発ヘリウムガスは戻りガスとして冷凍機へ戻る。

分離ブライトン型ヘリウム冷凍機

図1-15に分離ブライトンサイクルの冷凍機のシステムフロー図を示す。この冷凍機ではブライトン-サイクルと呼ばれる独立した圧縮機、熱交換器、膨張エンジンからなる予冷サイクルとジュール-トムソン液化サイクルから構成される複合のサイクルである。この冷凍機は構成が複雑になるが、不純物やマグネットのクエンチ時の急激な圧力変動に弱い膨張タービン回路をジュール-トムソン回路から分離できる利点を持つ。

実用のヘリウム冷凍機

これまでの議論を簡単にするため、1台の膨張エンジンを持ったヘリウム液化/冷凍機を考えてきたが、実用機では通常システムの液化/冷凍の効率を上げるため液化窒素による約80 Kの予冷回路と複数台の膨張エンジンが使用されている。

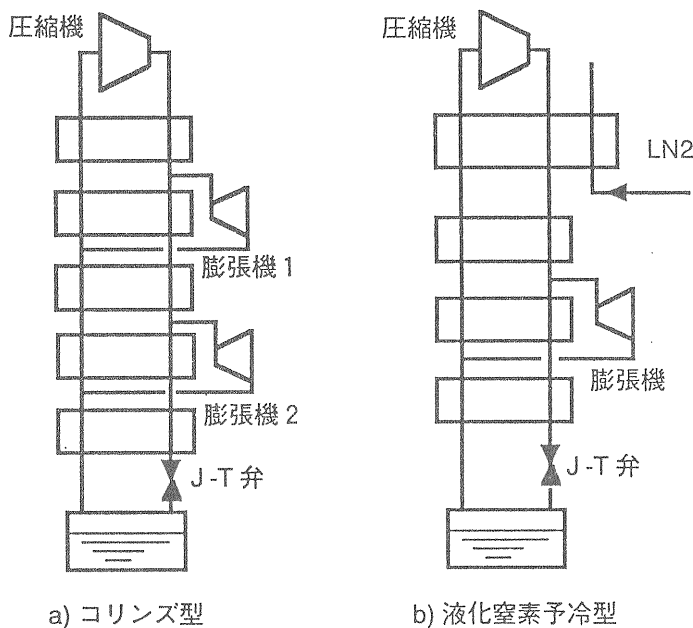


図1-16 多段予冷型冷凍サイクル

図1-16 a)に膨張エンジン2台のコリンズ型のヘリウム冷凍機を b)に液化窒素の予冷回路をもつ冷凍機を示す。通常、冷凍液化能力 100 L/hr or 300 W の液化/冷凍機では 80 K の液化窒素の予冷回路と2台の膨張エンジンから構成されている。大型のヘリウム冷凍装置では 80 K の予冷用の2台を含めて合計7台の膨張エンジンをもつ装置もある。

2. ヘリウム冷凍機の実例

超伝導高周波加速空洞 ヘリウム冷凍装置 (6.5 kW at 4.4 K)

大型ヘリウム液化冷凍システムの実例として、高エネルギー物理学研究所の TRISTAN 電子-陽電子衝突型加速器の超伝導加速空洞装置 (5 連の空洞 32 台) 冷却用の 6.5 kW のヘリウム冷凍液化装置を例に取り上げて実際のシステムの構成、制御、運転の方法、4 年間にわたる営業運転時の故障例等の実際の運転の様子についての記述する。

2-1 超伝導加速空洞

ヘリウム冷凍システムに話を進める前に冷凍負荷である超伝導加速空洞について簡単に説明を行なう。

図2-1に高エネルギー物理学研究所の TRISTAN リングで電子-陽電子ビームの加速に使用されている共振周波数 500 MHz の超伝導加速空洞装置を示す。超伝導加速空洞は厚さ約 1.5 mm の純ニオブ製で、5 連の加速空洞 2 台が機械的に接続されて横型のクライオスタットに収納され、約 830 L の液化ヘリウムにより浸漬冷却されている。ビームの加速に必要な約 100 kW の高周波電力は、高周波電力供給ポートにより5連の加速空洞に供給されビームの加速に使用される。クライオスタット内の圧力変動や機械的な振動等は空洞を変形させて空洞の共振周波数を変動させるが、この変動は空洞の端部に取付けたピエゾ圧電素子チューナーにより空洞の長さを微妙に調節することにより補正する。

空洞内表面での高周波損失は空洞内に発生する加速電場強度 E_{acc} の二乗と空洞の表面抵抗 R に比例する。通常、空洞の特性は Q 値で評価され

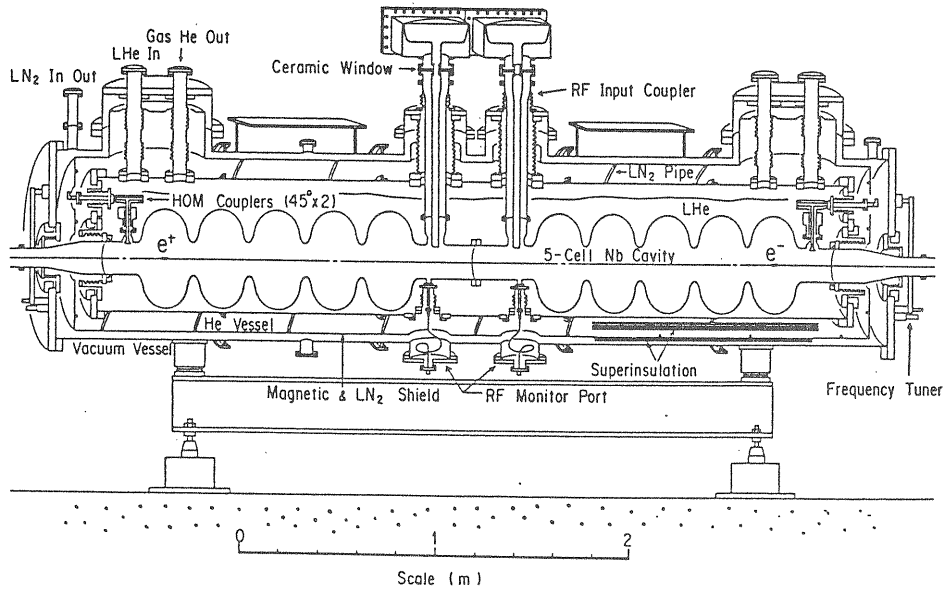


図 2-1 TRISTAN 超伝導加速空洞装置

るが、この値は表面抵抗の逆数に比例するので、 Q 値が高ければ空洞での高周波損失が低くなる。TRISTAN で使用されている 500 MHz の超伝導加速空洞の場合、その運転温度 4.2 K 付近では、その Q 値が約 10^9 と銅製の空洞と比較して約 10000 倍の高い値となる。即ち、その表面での

高周波損失が常伝導の空洞に比較して約 $1/10000$ と非常に小さくなり、少ない高周波電力で高い加速電場を空洞内部に作り出すことができることになる。

2-2 冷凍負荷とヘリウム冷凍装置の冷凍能力

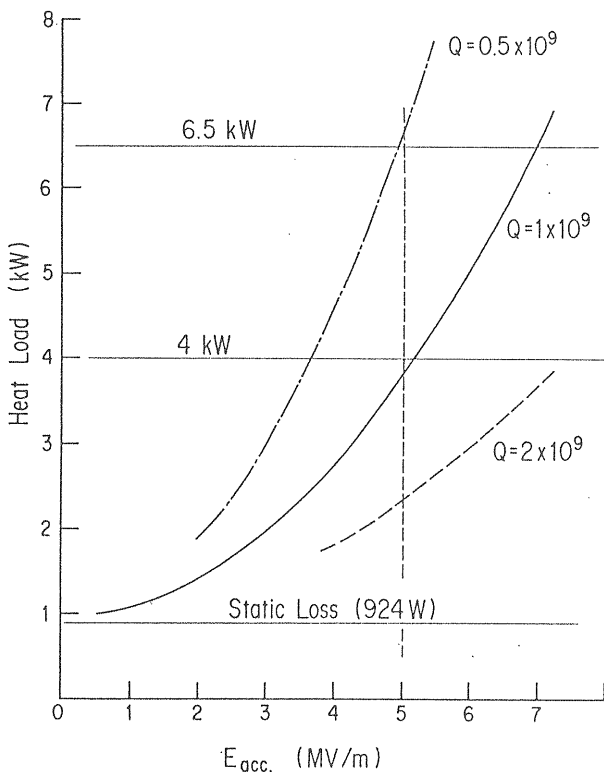


図 2-2 TRISTAN 超伝導加速空洞ヘリウム冷凍機の冷凍負荷の加速電場 E_{acc} 依存性

図 2-2 に予想されるヘリウム冷凍システムの冷凍負荷（高周波損失と静的熱負荷）の加速電場 E_{acc} の依存性を示す。図では超伝導空洞の Q 値をパラメータとして 5 連の超伝導加速空洞 32 台の高周波損失の加速電場 E_{acc} の依存性とクライオスタットやトランスファーラインの静的な熱負荷を示す。超伝導加速空洞の設計加速電場 E_{acc} を銅製の空洞の約 3 倍の 5 MV/m として、 Q 値を 1×10^9 とすると、全システムの全熱負荷は静的な熱負荷の約 1 kW を含めて約 3 kW となる。本ヘリウム冷凍システムは冷凍能力が 6.5 kW あるので、約 50% のマージンを持つことになる。今後、超伝導空洞制作技術の進歩により、 $E_{acc} = 7$ MV/m での運転が可能になれば、 $Q = 1 \times 10^9$ の場合には、全熱負荷は 6.5 kW となる。幸いなことに、現在 TRISTAN リングに設置運転している超伝導加速空洞の Q の平均値は $Q = 1.5 \times 10^9$ と設計値より高く、全熱負荷は約 3 kW と約 100% のマージンで運転していることになる。長期の連続運転の前には全加速超伝導空洞の Q 値の測定を行なって、その値の経年変化を測定している。

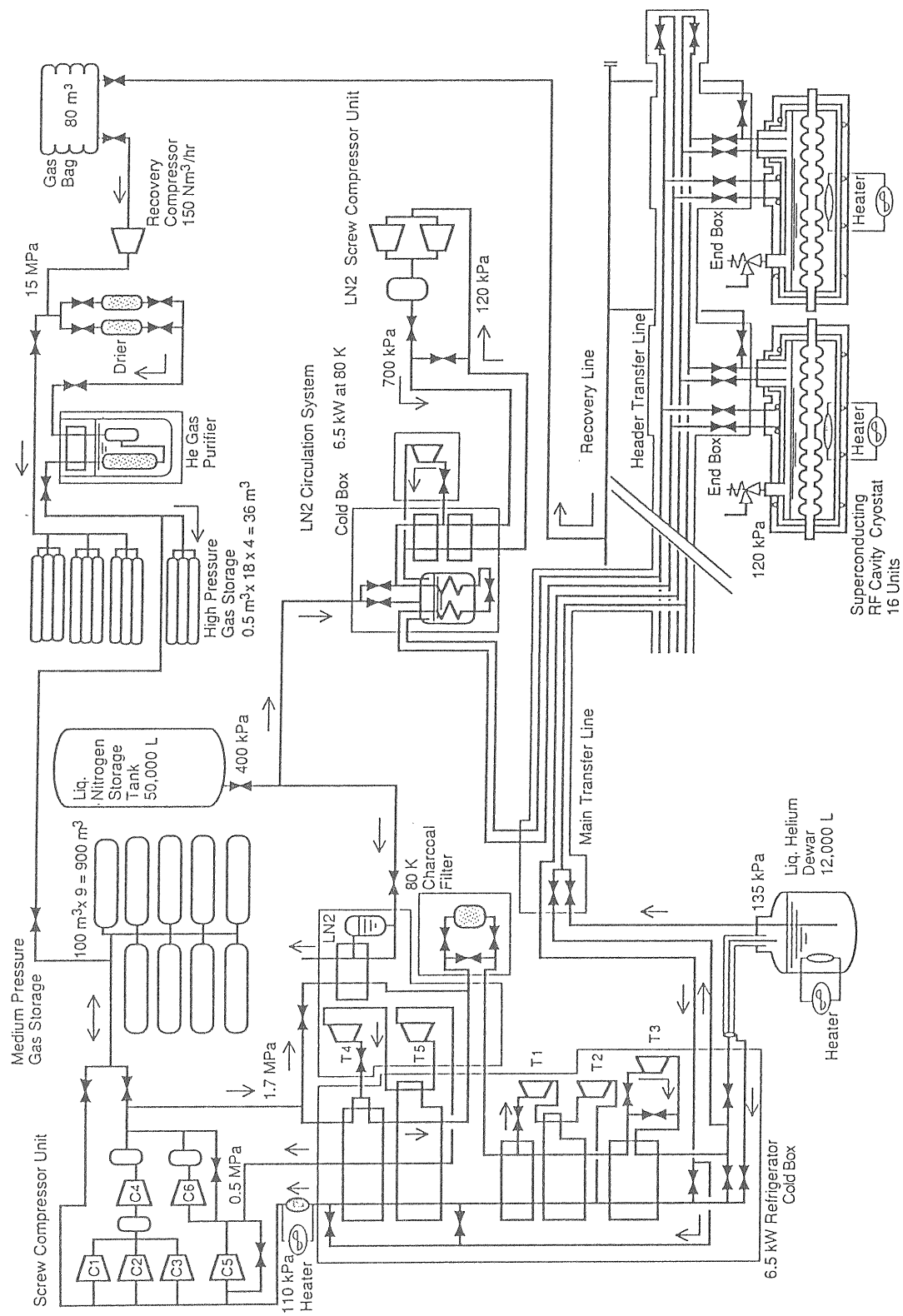


図 2-3 TRISTAN 超伝導加速空洞冷凍システムフロー

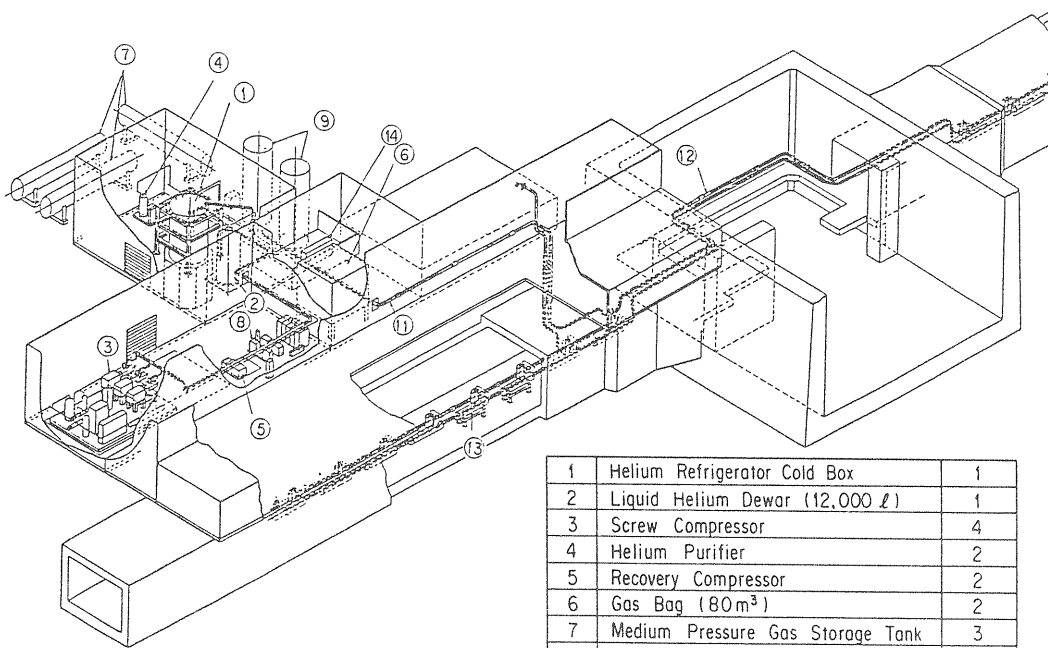


図 2-4 TRISTAN 超伝導加速空洞
冷凍システムの配置図

1	Helium Refrigerator Cold Box	1
2	Liquid Helium Dewar (12,000 l)	1
3	Screw Compressor	4
4	Helium Purifier	2
5	Recovery Compressor	2
6	Gas Bag (80 m ³)	2
7	Medium Pressure Gas Storage Tank	3
8	Air Compressor	2
9	Liquid Nitrogen Storage Tank	2
10	Cold Evaporator	1
11	Main Transfer Line	1
12	Header Transfer Line	1
13	Superconducting RF Cavity Cryostat	16
14	Control panel	1

KEKの超伝導加速空洞装置は、現在まで約4年間、総運転時間約20000時間の営業運転を行っており、その間に行なったQ値の測定結果では、著しい劣化は観測されていないが、今後の長期の運転で、非常に繊細な空洞の表面が汚染され、Q値が下がることも考えられる。その場合には、超伝導空洞表面での高周波損失が増加して冷凍能力のマージンが減少することになる。

2-3 超伝導加速空洞ヘリウム冷凍装置のシステム構成

図 2-3 に超伝導加速空洞ヘリウム冷凍システムのフローを 図 2-4 にその配置を示す。冷凍機室、循環圧縮機室、制御室から成る地上の建屋には本冷凍システムの主要機器である冷凍装置コールドボックス（熱交換器、膨張タービン、流量制御弁、及びそれらを接続する配管等が収納されている断熱真空容器）、12000 L 液化ヘリウムデュア、循環圧縮機等の圧縮機が設置されている。

合計 6 台のスクリー式圧縮機から構成されるヘリウム圧縮機ユニットで約 17 bar に圧縮された

ヘリウムガスは冷凍装置コールドボックスへ送られ、そこで膨張タービンで生成される冷たいガスや冷たい蒸発ガスにより冷却され最終的にジュール-トムソン弁で断熱自由膨張して液化され 12000 L 液化ヘリウムデュアに溜められる。

12000 L 液化ヘリウムデュア内の液化ヘリウムは全長約 380 m のトランスファーラインにより、地下 11 m の全長約 200 m の TRISTAN トンネルの直線部に配置した 16 台の超伝導空洞クライオスタットへ供給され、超伝導空洞の冷却に利用される。超伝導空洞の冷却に利用された後の冷たい蒸発ガスは全量トランスファーラインを通して冷凍装置コールドボックスへ戻され、そこで寒冷が回収される。

トランスファーラインは断熱性能の優れたアルミ蒸着したポリエステルフィルムの多層真空断熱構造で、トランスファーラインの主要な部分は断熱特性を向上させるため図 2-5 に示す様に液化窒素で冷却する 80 K の断熱シールド構造になっている。

トランスファーラインおよび超伝導空洞クライオスタットの 80 K の輻射断熱シールド用の液化

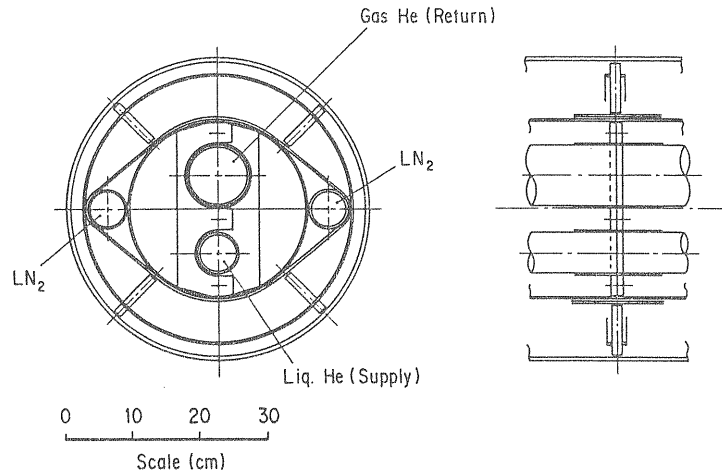


図 2-5 トランスファーラインの断面

窒素は液化窒素循環装置により供給される。

冷凍システムの初期冷却に必要な液化窒素は屋外の 50000 L の窒素貯槽から供給される。

高圧低温活性炭吸着方式のヘリウム精製装置は本ヘリウム冷凍サイクルのオフラインの装置として設置されており、運転終了時にガスバッグ経由で回収された不純ヘリウムガスを精製するために使用される。

2-4 ヘリウム冷凍装置の冷凍サイクル

本冷凍機は基本の冷凍サイクルとしてクロード型を採用し、超伝導空洞の予冷や緊急予冷時に使用するための液化窒素予冷ループを持つと同時に冷凍能力の増強のためにジュール-トムソン弁の直前に超臨界タービンを配置している。図 2-6 a, b に冷凍能力がそれぞれ 4 kW, 6.5 kW の場合のヘリウム冷凍サイクルの T-S 図を示す。冷凍能力

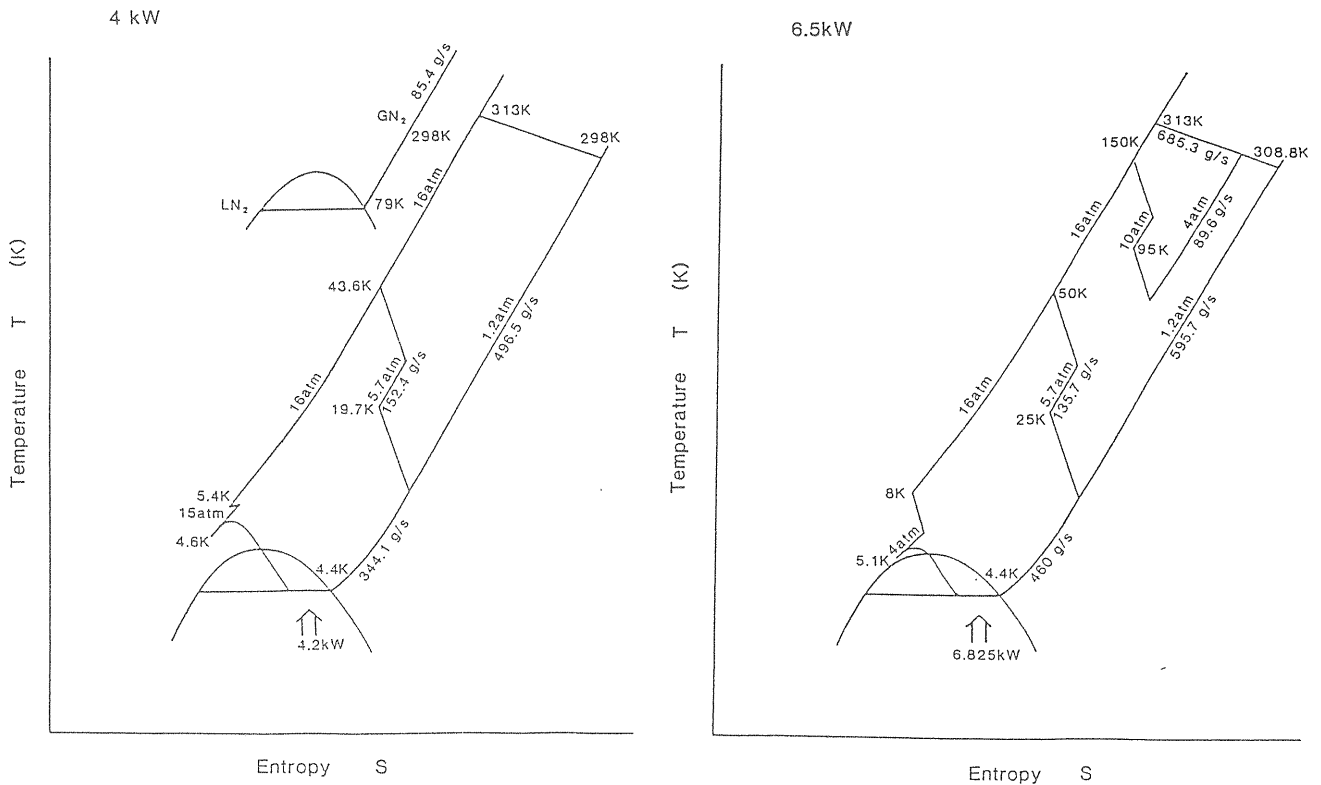


図 2-6 TRISTAN 超伝導加速空洞ヘリウム冷凍機の T-S 図 (a) 4 kW (b) 6.5 kW

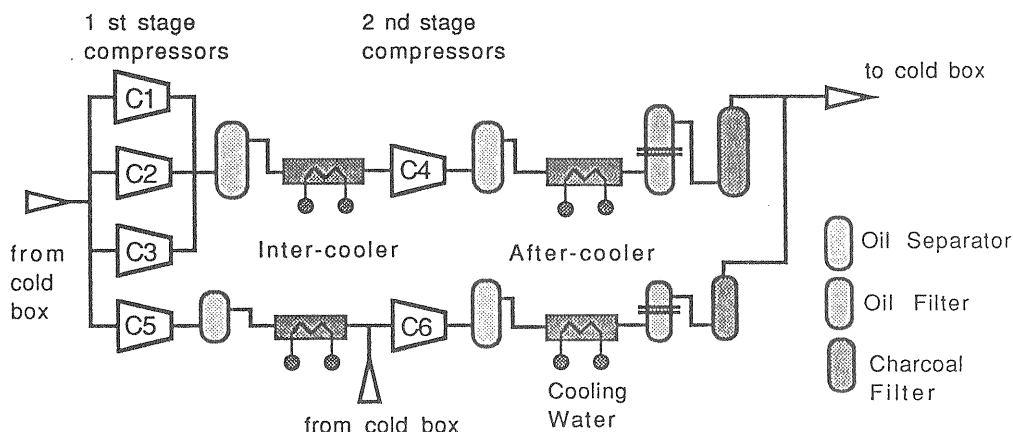


図 2-7 ヘリウム循環圧縮機の構成

4 kW の冷凍サイクルは 80 K 予冷に液化窒素を使用し、2 基の膨張タービン T1, T2 だけを運転した場合で、冷凍能力 6.5 kW の冷凍サイクルは、冷凍能力の増強用の超臨界タービン T3 と液化窒素の消費を低減する為の 80 K の膨張タービン T4, T5 も同時に運転している。この冷凍システムの冷凍能力の設計値は、超臨界タービンの効率を 60 % として 4.4 K で 約 6.8 kW である。

2-5 超伝導加速空洞ヘリウム冷凍装置の主要構成機器

ヘリウム循環圧縮機

ヘリウム圧縮機として信頼性の高い、油噴入式のスクリー型圧縮機を採用することとし、汎用

機として数多くの実績をもつ機種で、最大の風量をもつローター径 320 mm の MYCOM 320 型の組み合わせ（低段 3 台、高段 1 台）を主圧縮機として、ローター径 250 mm の MYCOM 250 型 2 台を 80 K タービン膨張機用の圧縮機として採用した。図 2-7 に圧縮機ユニットの構成を示す。低段の C1, 2, 3 の圧縮機で約 5 bar まで圧縮された中間圧のヘリウムガスは油分離タンクで圧縮過程で噴入された油分が分離された後中間冷却器で冷却されて高段圧縮機へ送られそこで約 17 bar まで圧縮される。この圧縮ガスはまず油分離タンクで油分が分離される。その後、冷却水で冷却された後、2 段のフィルターで油滴分が取り除かれる。最後に、活性炭フィルターでヘリウムガス中の油の蒸気分が取り除かれて冷凍機コールドボックスに送られる。プロセスヘリウムガス中の油分は熱

表 2 - 1 循環圧縮機の主要なパラメーター

	1st stage		2nd stage	
	C1,C2,C3	C5	C4	C6
number of compressor	3	1	1	1
flow rate (Nm ³ /hr)	10,820	1,397	10,820	3,738
inlet pressure (kPa)	100	100	517	400
outlet pressure (MPa)	0.517	0.40	1.90	1.97
roter diameter (mm)	320	250	320	250
roter length (mm)	530	352	355	280
roter speed (rpm)	2,950	2,950	2,950	2,950
isothermal efficiency (%)	49.9	47.7	51.0	46.5
input power (kW)	373 x 3	127	913	423
fabricator	Mayekawa			
type	oil flooded screw compressor			
	320 L	250 L	320 S	250 S

交換器に付着して熱交換器の性能を劣化させると同時に配管中のフィルターの目詰まりを起こすことになるので、長期間の安定した運転を実現するためにはヘリウムガス中の油分を十分に除去する必要がある。

表 2-1 に圧縮機ユニットの各構成圧縮機の風量、吸入／吐出圧力、ローター径、回転速度、モーター電力、圧縮効率（等温効率）等の主要なパラメータを示す。

熱交換器

熱交換器は戻りの冷たい蒸発ガスや膨張エンジンで生成された貴重な寒冷を回収するために必要となる、ヘリウム冷凍機の重要な構成要素である。通常、ヘリウム冷凍機ではコンパクトで大きな伝熱面積を持つ、アルミニウムのシートで作られた伝熱板等の部品を電気炉の中でロウ付して組み立てられる、アルミ-プレートフィン-タイプの熱交換器が使用されている。

膨張タービン

膨張エンジンとして気体軸受けのターボ式が使用されている。表 2-2 に膨張タービンのローター径、回転速度、入口／出口の圧力、断熱効率等の主要パラメータを示す。膨張タービンは高速回転するために通常の回転機器に使用されているボールベアリング等の接触型の軸受は使用できず、気体軸受が使用されている。膨張タービンでプロセスガスから取り出された仕事はローターに直結したブロアーでヘリウムガスを加圧加温して、熱として消費される。

膨張タービンの効率は実際に膨張タービンが取り出すことができる仕事と理想的な断熱仕事膨張で取り出す仕事の比で評価する断熱効率で表す。

液化窒素循環装置

液化ヘリウムトランスファーライン及び超伝導加速空洞クライオスタットの 80 K 断熱輻射シールドの冷却用の液化窒素は液化窒素循環装置により供給される。

深さ 11 m の地下トンネル内に設置され 16 台の超伝導加速空洞クライオスタットの 80 K 断熱輻射シールドには並列に液化窒素が供給される。このように配管の途中で高低差のある並列の負荷を安定に、しかも経済的に冷却するために液化窒素の循環装置を採用した。直接的な方式として液化窒素ポンプによる循環方式が考えられるが、長期運転の信頼性と運転時の経済性を考慮して、室温部にガスの圧縮機を持ち熱交換器で循環ガスを液化する循環方式を採用した。この装置は基本的には屋外の液化窒素貯槽から寒冷の供給を受けて運転されるが、膨張タービンを運転することにより再液化装置として運転され、外部からの液化窒素の供給を必要としない自立運転が可能となる。本装置では超伝導空洞クライオスタットの予冷時や圧縮機の故障等の緊急時には屋外の液化窒素貯槽からの液化窒素を直接供給して冷却を行なう。

2-6 超臨界タービンの開発と冷凍能力の向上

ジュール-トムソン弁で 7 K の 17 bar の高圧の

表 2-1 膨張タービンの主要なパラメータ

		T1	T2	T3	T4	T5
flow rate	(g/s)	135.7	135.7	135.7	89.6	89.6
inlet pressure	(MPa)	1.58	0.57	1.60	1.60	1.0
outlet pressure	(kPa)	570	120	400	1000	400
inlet temperature	(K)	50.0	25.0	8.0	150	95
isentropic efficiency	(%)	75	75	60	60	55
output power	(W)	8,774	6,099	3,020	7,270	7,571
gas bearing						
thrust			static			
journal			dynamic			
rotor speed	(rpm)	140,000	74,000	50,000	150,000	150,000
rotor diameter	(mm)	35	55	35	35	35
fabricator			Hitachi			

ヘリウムを断熱自由膨張させる場合を考える。この膨張過程はヘリウムの T-S 曲線の等エンタルピー曲線上の 17 bar の等圧線上の 7K からドームの中の 1.2 bar の等圧線に向かって変化することに対応する (図 2-8 参照)。この膨張過程では温度が一旦上昇した後、下降し最終的にドームの中に入り液化に到る。ジュール-トムソン弁の代わりに膨張の最終過程が気液混合相であるドームに入る、所謂ウェット-エンジンと呼ばれる膨張エンジンを取付けて断熱仕事膨張を行なう場合には等エンタルピー膨張の場合のように途中での温度の上昇がないので液化量が増加することが容易に理解できる。上記のウェット-エンジンとしてはレシプロ式の膨張エンジンが実用機として使用されているが大型のターボ式の膨張機では使用実績はない。これはターボ式の場合には膨張過程に液が生成されタービンの羽根に付着して回転のバランスを崩す可能性があるということと、膨張過

程での相変化に伴う急激な体積変化に対応する高性能のタービンの羽根の設計が難しいということによる。そこでジュール-トムソン膨張の直前で超臨界タービンによりドームの上で、まず断熱仕事膨張を行ない、圧力を 4 bar まで下げた後に、ジュール-トムソン弁で断熱自由膨張する方式が採用される。この超臨界タービンの採用により冷凍能力を著しく増強することが可能となる。

超臨界タービンの開発は本ヘリウム冷凍システムの建設計画の開始と同時に KEK と日立製作所と共同で始められ、工場での回転性能、起動停止試験による機械的安定性の確認と常温での性能試験を行なった後、さらにヘリウム冷凍機に設置して実機での部分負荷での性能試験を行なって、仕様条件でのタービン効率 70% を確認した。最終的に、超臨界タービンの設置によりヘリウム冷凍機のヒーター負荷による冷凍能力は 4.2 kW から 8.2 kW に飛躍的に増大するした。超臨界タービ

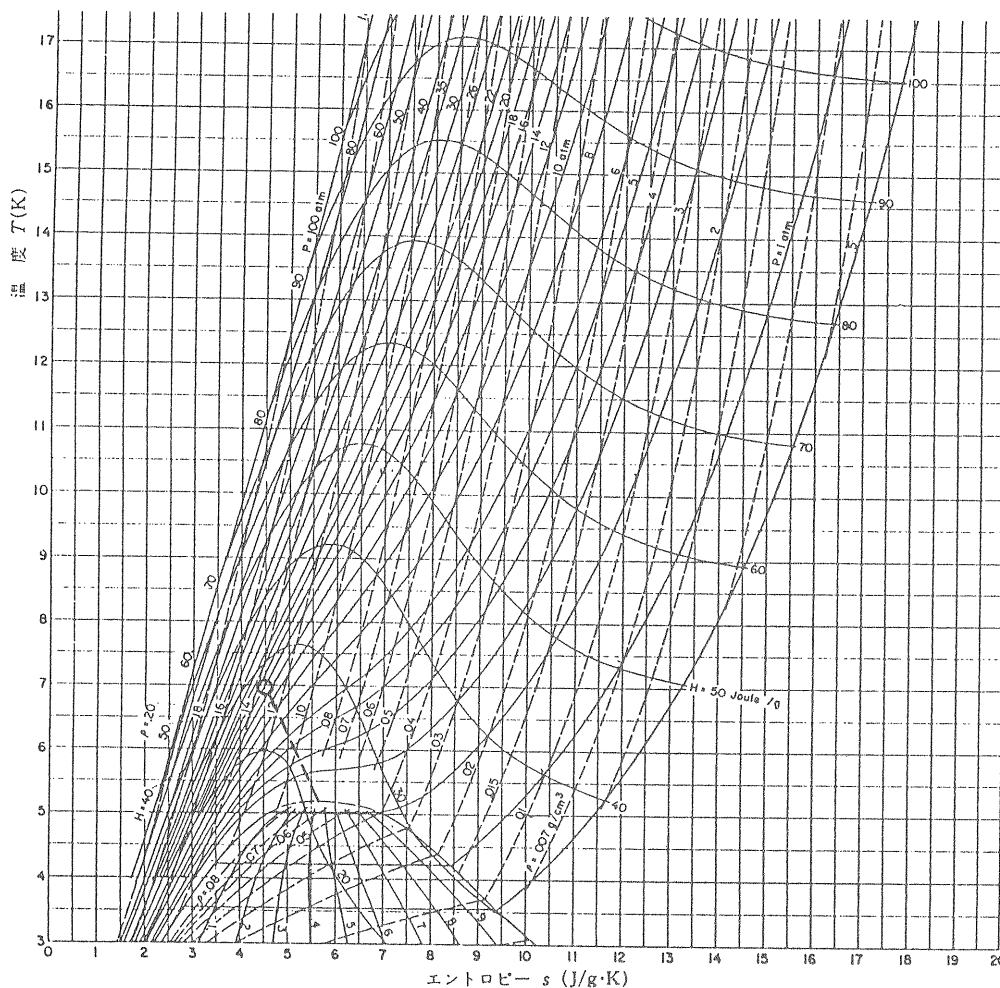


図 2-8 ジュール-トムソン膨張と超臨界タービンによる断熱仕事膨張

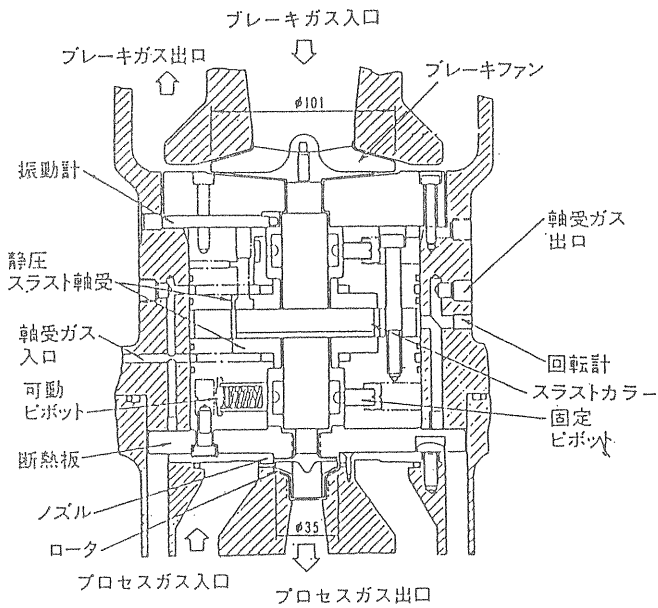


図 2-9 超臨界タービンの構造

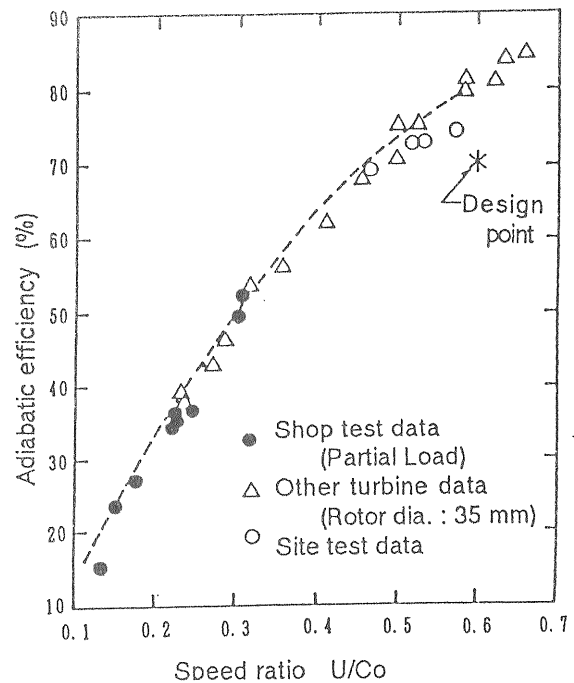


図 2-10 超臨界タービンの断熱効率

横軸はローター速度 U / ヘリウムガス速度 Co

の構造を図 2-9 に断熱効率を図 2-10 に示す。

2-7 ヘリウム冷凍機の効率

大型のヘリウム冷凍機では超臨界タービンを採用することにより冷凍機の効率を著しく改善できる事が確かめられたが、ここでヘリウム冷凍機の効率を決定する要因について考える。本冷凍機の冷凍効率は 12000 L のヘリウムデュアー内のヒーターに供給される電力から決定した冷凍能力と冷凍機の運転に必要なヘリウム圧縮機ユニットの消費電力及び冷却水のクーリングタワーの消費電力等の運転に必要な全電力から、本冷凍システムの %カルノーを計算すると、約 23 % となった。

一般的に使用されている 100 L/hr クラスのヘリウム液化/冷凍装置の %カルノーは約 10 ~ 15 % であり、特別に設計された高性能な大型のヘリウム冷凍機では 30 % に達する装置もある。

ヘリウム冷凍機の効率を決定する支配的な要因として、

- (1) ヘリウム圧縮機の効率
- (2) 膨張タービンの効率
- (3) 熱交換器の効率

が考えられるが、大型のシステムでは (2) と

(3) は比較的 to 高性能なもの が得られるが、(1) の圧縮機の効率はヘリウムガスが単分子で圧縮しにくいことに起因してあまり高くない。本ヘリウム圧縮機ユニットの様に複数台の圧縮機から構成される場合はできるだけ等温圧縮に近ずけるために圧縮の中間段で水冷する方式を採用しているが、それでも等温効率が 50 % 台とあまり高くない、将来に開発の余地をのこしている。

2-8 超伝導加速空洞冷凍システムの

運転モードと制御

冷凍システムの運転モード

超伝導加速空洞ヘリウム冷凍システムには、次の運転モードがある。

- 1) 初期冷凍モード
- 2) 液化運転モード
- 3) 定常運転モード (超伝導加速空洞運転モード)

- 4) 緊急昇温/冷却モード

これらの運転モードについて次に簡単な説明を行なう。

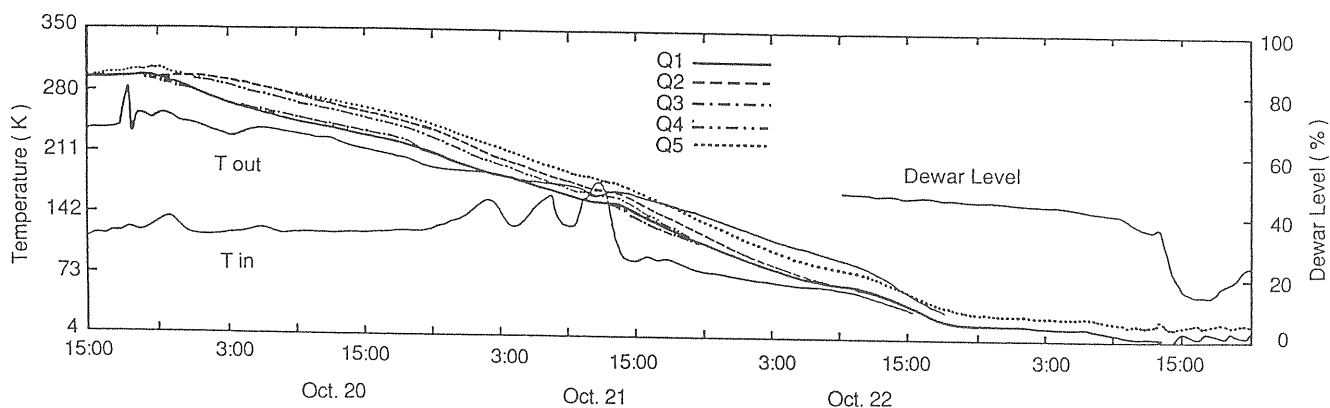


図 2-11 超伝導加速空洞の初期冷却特性

初期冷却モード

超伝導加速空洞を室温から液化ヘリウム温度に冷却するための運転モードで次の手順で冷却が行なわれる。16 台のクライオスタットに収納された 5 連の超伝導加速空洞 32 台は（総冷凍重量約 1000 kg x 16）は、冷凍機コールドボックス内の液化窒素予冷ラインにより約 80 K に冷却されたヘリウムガスにより並列に冷却される。図 2-11 に超伝導加速空洞の初期冷却特性を示す。ここで Q1 ~ Q5 は空洞内各部（図 2-13 に温度計の取付け位置を示す）の温度を、Tin, Tout はクライオスタットへの供給及び戻りのヘリウムガス温度の変化を示す。クライオスタット内の温度が 200 K 以下になった時点で、膨張タービン T1, T2 を起動して、供給ヘリウムガスの温度を下げ、更に冷却を続ける。クライオスタット内の温度が 5 K になったら、クライオスタットへの冷却ヘリウムガスの供給を停止して、12000 L ヘリウムデ

ューアへの液化運転に切り替え、各クライオスタットの冷却は 12000 L ヘリウムデュアアの液化ヘリウムを供給して行なう。この段階で冷凍液化能力を増強する為に超臨界タービン T3 を起動する。なお 80 K 予冷用の膨張タービン T4, T5 は液化窒素の消費を抑える為に、膨張タービン T1, T2 が起動した直後に起動する。

液化運転モード

液体ヘリウム温度まで冷却が終了した超伝導加速空洞クライオスタットに液化ヘリウムを所定の液面レベルまで溜める運転モードでヘリウム冷凍システムは主に液化モードで運転される。図 2-12 に超伝導加速空洞への液化ヘリウム供給運転特性を示す。ここで L1, L8, R1, R8 でそれぞれ TRISTAN トンネル内の代表的なクライオスタット（トンネル直線部の左右の #1, 8）内の液化ヘリウムの液面レベルを示す。最初 L 側のクライ

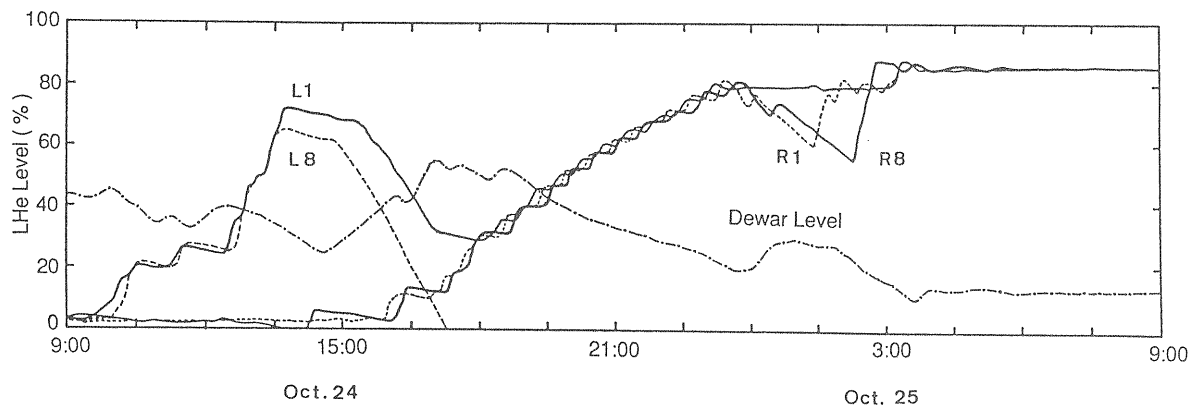


図 2-12 超伝導加速空洞への液化ヘリウム供給特性

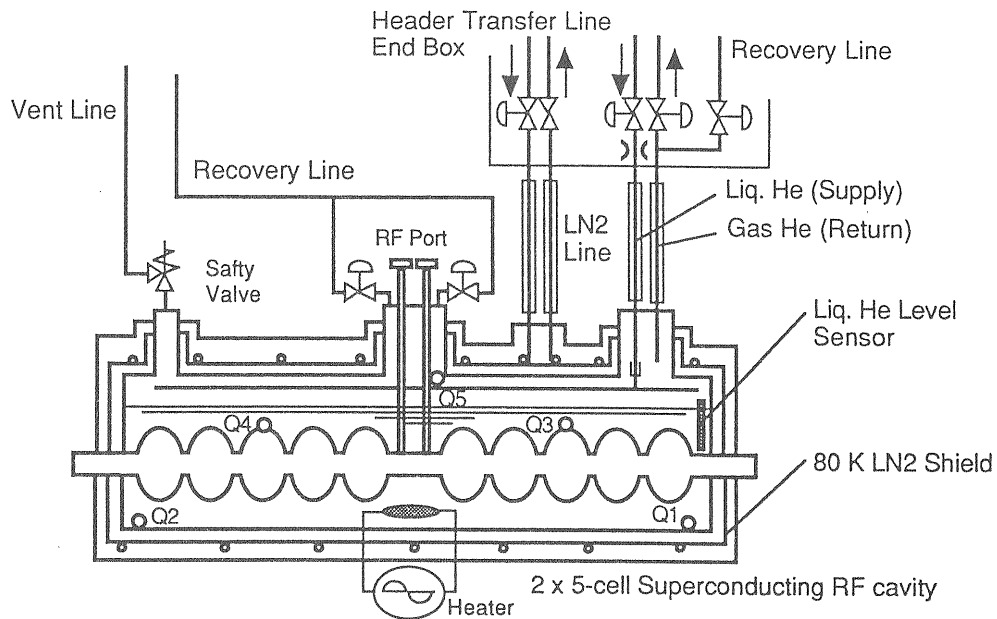


図 2-13 超伝導加速空洞クライオスタットフロー図

オスタット8台に液化ヘリウムを充填していたが、途中でL8の超伝導加速空洞の真空中にリークが発生したので、L8への液化ヘリウムの供給を停止し、チェックと修理の為に、クライオスタット内のヒーターにより、ただちに加温を開始した。L側の他のL1～L7のクライオスタットの液面はトンネル内でのリークチェック等の作業を安全に行なう為に、30%に下げている。リークチェック等の作業の終了後、L8以外の15台のクライオスタットの液面を所定の液面レベルに上昇させた。途中でヘリウム冷凍機から遠いR側のクライオスタットの液面（R1～R8）が落ち込んでいるが、これは12000Lヘリウムデュアーの内圧が所定の1.35 barか1.15 bar低下したことによる。

ヘリウムデュアーの内圧を1.35 barに昇圧することにより液面の制御性は回復された。16台のクライオスタットに収納された5連の超伝導加速空洞32台を室温からヘリウム温度まで冷却するのに約4日間、所定の液面まで液を充填するのにさらに1日を必要とする。超伝導空洞の冷却速度は空洞およびクライオスタットの温度の不均一による熱歪があまり大きくなるように制限されている。

定常運転モード

次に述べる方法で超伝導加速空洞を収納したクライオスタット内の液化ヘリウムの液面レベルと

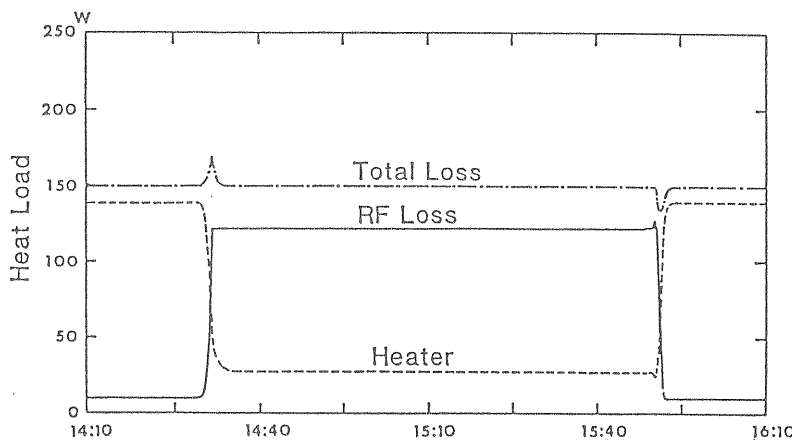


図 2-14 クライオスタット内のヒーターによる超伝導加速空洞の高周波損失の補正

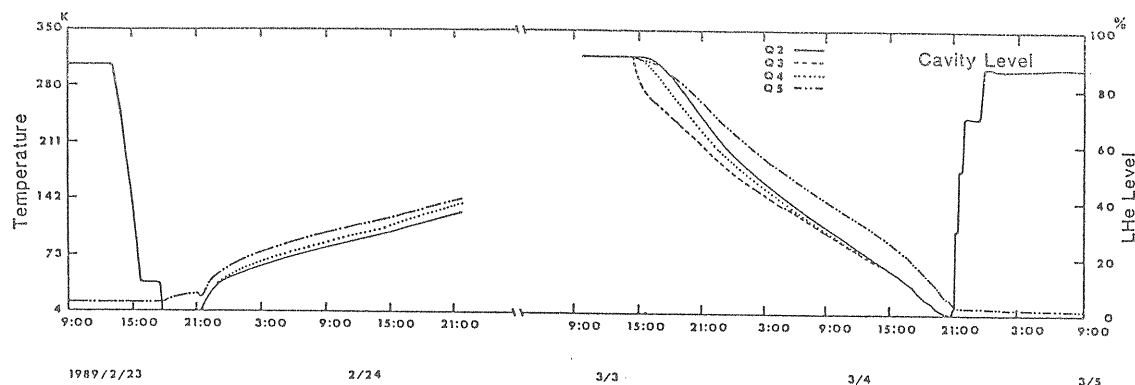


図 2-15 超伝導加速空洞の緊急昇温/冷却特性

内圧を一定に保持し、高周波電力の供給を受けて超伝導加速空洞内に加速電場を発生させ、ビームの加速を行なう運転モードでヘリウム冷凍システムは冷凍モードで運転される。

図 2-13 に超伝導空洞クライオスタットまわりのフローを示す。16 台のクライオスタットの液化ヘリウム槽の液面レベルは、内部に取付けた超伝導液面計により測定され、超伝導空洞の運転に必要な所定の液面レベル（約 830 L）に保たれるようにヘッダー-トランスファーラインに設置されている 16 台の液化ヘリウム供給調節弁により、各クライオスタット独立に PID ループ制御される。

超伝導加速空洞表面での高周波損失は、TRISTAN リングの電子-陽電子ビームの加速時の加速電場 E_{acc} の変化に伴いビームの入射時の約 10 W からエネルギーの頂上の約 120 W まで約 2 分間で変化し、その後、約 1.5 時間最大負荷の状態を衝突実験のために保持される。この一連の冷凍負荷の変動はクライオスタットの内圧の変化を引き起こし、空洞を变形による共振周波数を変化させることになる。そこでクライオスタット内の圧力変動を低く抑えるために、空洞内の電場 E_{acc} を測定し、空洞表面の高周波損失を計算により求めて、ヘリウム冷凍機側から見た冷凍負荷を時間的に一定になるよう、超伝導空洞クライオスタット内の電気ヒータ出力を制御する。図 2-14 は加速器運転時の高周波損失の時間変化をクライオスタット内の電気ヒーターの制御して補正した実例を示す。

超伝導加速空洞装置及びヘリウム冷凍システム内の液化ヘリウムの量は、12000 L デュアーに内蔵された電気ヒーターによりデュアーの液面が

一定になるように制御され、自動的に一定に保たれる。

このようにして超伝導加速空洞用のヘリウム冷凍システムは定常運転状態になると、クライオスタットの液面制御用の流量制御弁を機械的に動かす以外は電気的な制御を行なうだけで加速器のビーム運転に対応することになる。

緊急昇温/冷却モード

運転中に、16 台の中のある超伝導空洞装置が故障等により、修理や交換が必要な場合に、それ以外の超伝導加速空洞装置を定常運転モードに保ちながら、故障した超伝導加速空洞装置だけを冷凍システムから切り離し室温までクライオスタット内の加温ヒータで昇温させる、また、修理等が終了した場合には、冷凍システムと接続して、液化ヘリウムの供給をうけて冷却し、所定の液面レベルまで液化ヘリウムを注入する運転モードでヘリウム冷凍システムは液化と冷凍の混合モードで運転される。図 2-15 に超伝導加速空洞の緊急昇温/冷却特性を示す。昇温に約 3 日間、冷却および液の充填に約 1.5 日を必要とする。

制御ループと制御システムの構成

超伝導加速空洞ヘリウム冷凍システムの自動運転に必要な制御は単独の複数の制御ループで行なわれている。代表的な制御ループを次に示す。

1) 液面制御ループ

：超伝導加速空洞クライオスタット、ヘリウム冷凍装置 80 K 予冷用の液

化窒ボトル、12000 L 液化ヘリウム
デュアーの液面制御。

2) 圧力制御ループ

: 循環ヘリウムガス、超伝導加速空
洞クライオスタット内圧、12000 L
液化ヘリウムデュアーの内圧、超臨
界タービンの出口圧力の制御。

3) 温度制御ループ

: 80 K 予冷用ヘリウムガス出口、タ
ービン膨張機軸受けガス出口温度の
制御。

上記制御を行なう為の制御システムは、分散型
制御システムであるプロセス制御用計算機「日立
ユニットロール EX 1000」を中心に構成されてい
る。制御システムは図 2 - 16 の構成図で示され
るように 5 台のコントローラと 5 台のオペレータ
コンソールが全長約 3 km のデータハイウェイに
より接続されている。このヘリウム冷凍システム
制御システムはゲートウェイによって TRISTAN
加速器制御用の計算機 (HIDEC-80E) と接続され
ており、加速器コントロール室の加速器制御用
のコンソールでヘリウム冷凍システムの運転の状
況をモニターすることが可能である。超伝導加速

器ヘリウム冷凍システムの計測、制御 (アナログ
入出力点数 714 点、デジタル 入出力点数 648
点、制御ループ 114 ループ) は 5 台のコントロ
ーラにより制御され、運転とモニターは 5 台のオ
ペレータコンソールにより行なわれる。制御用計
算機では、従来の制御盤に取付けてある調節計、
指示計、警報器、スイッチ、記録装置等の機能を
CRT のカラー画面上で、各計器そのままのイメ
ージで表示、操作出来るようになっている。本制
御システムでは、ほとんど全ての計測データは制
御用計算機のハードディスクに記録され、必要に
応じて計測点のトレンドを画面上に編集表示する事
ができる。これらのデータは 2 日毎にフロピーデ
スクに記録し、保存する。

2-9 運転形態と運転体制

本ヘリウム冷凍システムの運転は、TRISTAN
の運転スケジュールに合わせて行なわれるが、全
システムを室温からの初期冷却し、ビームが加速
可能な定常状態にする為約 1 週間、定常状態か
ら冷凍システムを完全に停止するまでに約 3 日間
必要となるので、運転スケジュールの合間の短い
停止期間には冷凍システムを止めることができな

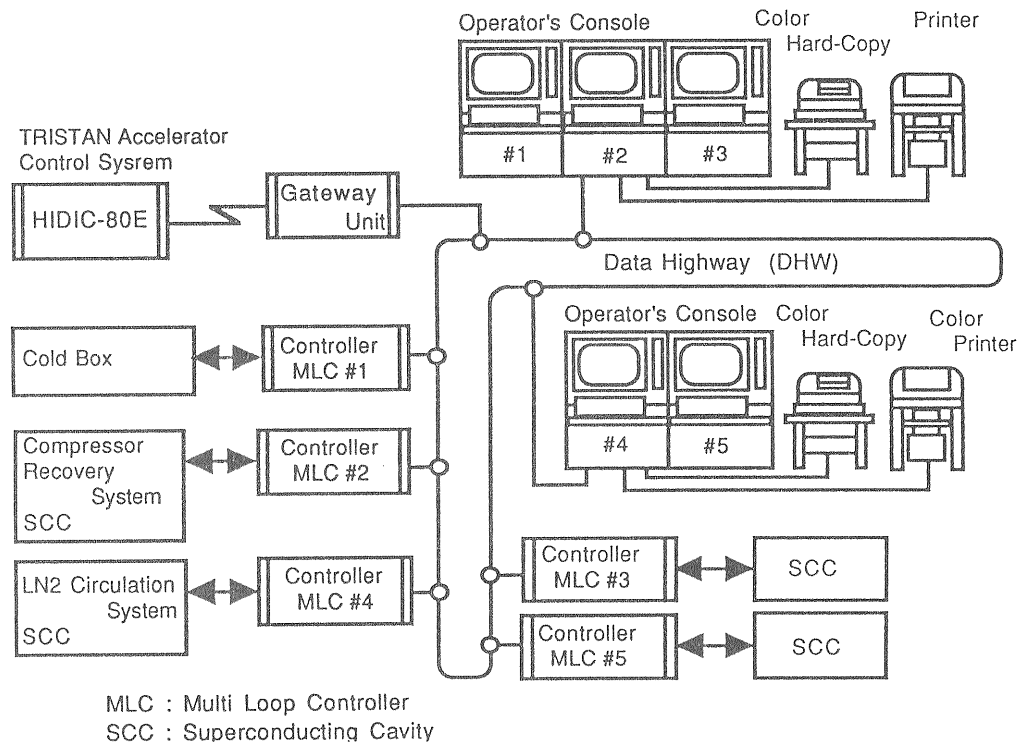


図 2 - 16 超伝導加速空洞ヘリウム冷凍装置制御システム

い。そこで運転の期間は1月から6月までの6カ月間と10月から12月までの3カ月の年2回の連続運転があり、合計約9カ月間（約6500時間）の運転を行なうことになる。1月および8,9月の停止期間を利用して全システムの保安自主検査及び保安検査、循環圧縮機の活性炭の交換等のシステムの点検、補修を行なう。

冷凍システムの運転期間中は、保安係員（KEKの職員）1名と運転員（会社からの派遣員）2名計3名が常時ヘリウム冷凍機室に隣接した制御室で運転監視を行なっているが、定常運転状態では、制御用計算機の自動制御ループで完全な自動運転が行なわれているので、運転員の主な業務は監視点検である。保安係員は15名で12時間交代のシフトで、運転員は9名で8時間交代のシフトを行なっている。

3. 超流動ヘリウム冷凍機

3-1 超流動ヘリウム冷凍機の必要性について

通常のヘリウム冷凍装置では超伝導機器の冷却用に1.2 barの液化ヘリウム、即ち、この圧力での液化ヘリウムの沸点に対応した4.4 Kの冷却温度が広く利用されている。この圧力は、運転中にヘリウム圧縮機の吸入側が負圧になることによる不純ガスの混入を防ぐために、ヘリウム冷凍システムの戻りガスの熱交換器や配管中での圧力損失分を考慮した場合の最低の液化ヘリウム槽内圧である。この冷凍温度をこの温度以下に下げするためには戻りガスの圧力を低下させる必要があるが、そのために特別に設計された熱交換器やヘリウム循環圧縮器が必要となる。

超伝導マグネットや超伝導空洞等の超伝導機器の性能を決定する臨界電流や表面抵抗の値はそれらの運転温度を下げることにより著しく改善されることが知られている。これらの超伝導機器はそれらの性能を引き出すために3 K付近の温度で運転されることがある。また、特別に高い磁場を発生する必要があるマグネットや1 GHz以上の高い周波数で運転される超伝導空洞の場合にはこれらの冷却に1.8 K付近の超流動ヘリウムが使用されている。さらに超流動ヘリウムには通常のヘリ

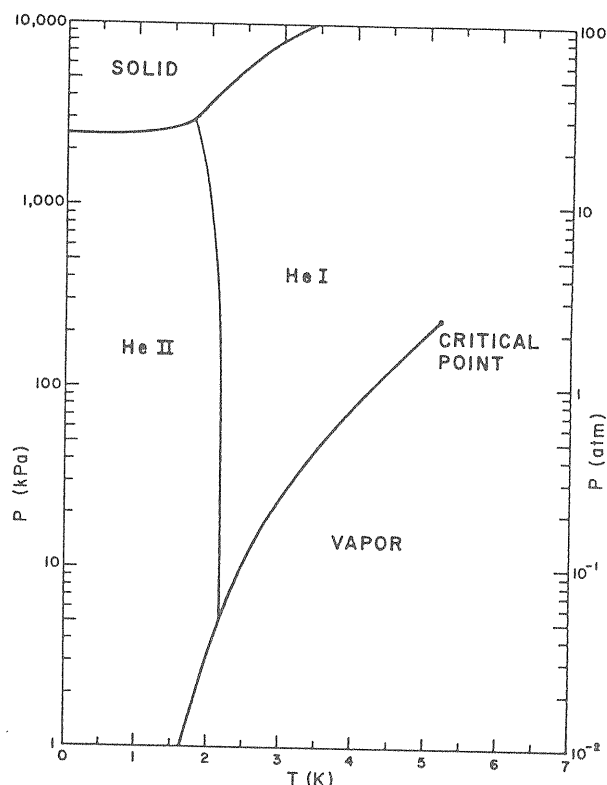


図3-1 ${}^4\text{He}$ の状態図 (Ref. 4)

ウムに比べて熱伝導率が非常に高いために冷媒として優れた特性を有している。今後、これらの超伝導機器の本格的な実用化が予想されるが、その場合には高性能な超流動ヘリウム冷凍機が必須になるとと思われる。ここで簡単に超流動ヘリウム冷凍機についての解説を行なう。

3-2 超流動ヘリウムの性質と生成

液化ヘリウム ${}^4\text{He}$ を減圧していくと温度 $T_\lambda = 2.17\text{ K}$ (λ 点) 圧力37.9 mmHgで相転移が起こり超流動ヘリウムとなる。図3-1にヘリウム ${}^4\text{He}$ の相図を示す。この相図より明らかなように通常のヘリウムHe Iから超流動ヘリウムHe IIへ変わる転移温度は圧力にあまり依存せずほぼ一定である

通常、超流動ヘリウムを生成する方法として、次の方法が利用されている

- 1) 液化ヘリウム ${}^4\text{He}$ の減圧
- 2) 磁気冷凍装置

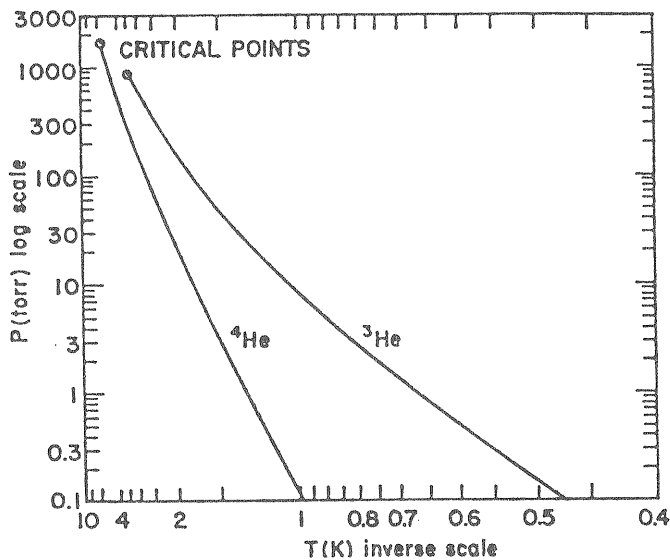


図 3-2 ^4He と ^3He の飽和蒸気圧と温度の関係 (Ref. 6)

2) の磁気冷凍装置による方法は小型の装置が試作されておりその実用性が証明されているが、大型の装置としての実績はなく今後、実用化に向けての開発が期待される。ここでは1) の液化ヘリウム ^4He の減圧による方法について議論することにする。図 3-2 に、横軸に温度の逆数を取り縦軸に飽和蒸気圧の log で表した、ヘリウム ^4He と ^3He の温度と蒸気圧の関係を示す。図より明らかなように飽和蒸気圧は温度の逆数の指数関数に比例して減少していることが分かる。温度 1.8 K の ^4He を得るには圧力を 12.5 mmHg に減圧する必要があり 1.3 K の場合には 1.2 mmHg と非常に低圧に減圧する必要がある。 ^3He の場合には 1.8 K で 103 mmHg、1.3 K では 28.4 mmHg と ^4He に比べて蒸気圧が高く減圧が容易である。 ^3He は天然のヘリウム中に $1/10^6$ 程度の微量に含まれるが、これらを分離して利用することは非常に困難である。実験等で使用されている ^3He は原子炉に於ける原子核反応、Li と中性子の反応で生成される三重水素の崩壊、で作られているが非常に高価であり大量に使用することはできない。

3-3 超流動ヘリウム冷凍機の構成

実用的な超流動ヘリウム冷凍機の簡略化されたフローを図 3-3 に示す。この冷凍システムは液

化ヘリウムを生成する 1) 通常のヘリウム液化機と、2) その液化ヘリウムを排気して超流動ヘリウムを生成する冷凍機部の大きく分けて二つのシステムから構成されている。

超流動ヘリウムの生成に必要な 1.2 bar, 4.4 K の液化ヘリウムは 1.8 K 超流動ヘリウム槽からの蒸発戻りガスで熱交換器を通して冷却され J-T2 で 0.016 bar の超流動槽へ断熱自由膨張する。超伝導機器等の冷却により発生した蒸発ヘリウムガスは排気ポンプによりはぼ 1 bar まで圧縮されて循環圧縮機の吸入側に戻され循環ガスとして液化ヘリウムの生成に利用される。

図 3-4 にヘリウムの T-S 線図を示す。図中に予冷用の熱交換器を通さず直接に約 4.2 K から (1) と熱交換器で約 2.2 K まで予冷してから (1') ジュール-トムソン弁 J-T2 で等エントロピーで 1.8 K 0.016 bar まで膨張した場合の断熱自由膨張の様子を示す。超流動冷凍機の冷凍能力は (2), (2') と (v) のエンロピー差と温度から計算され、それぞれ約 15 J/g と 21 J/g

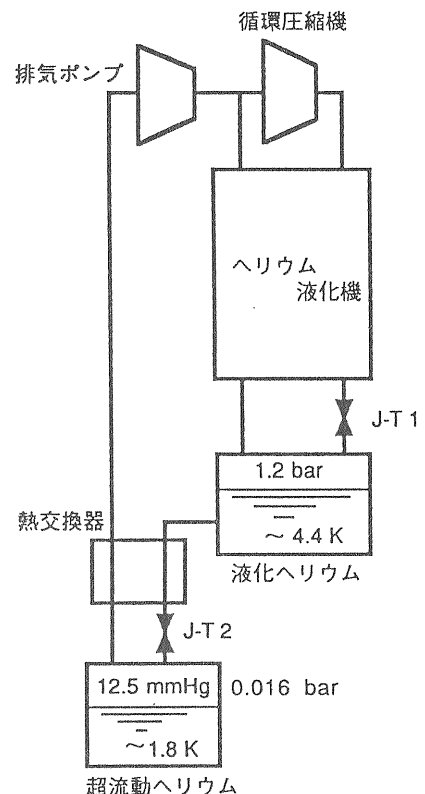


図 3-3 超流動ヘリウム冷凍機の構成

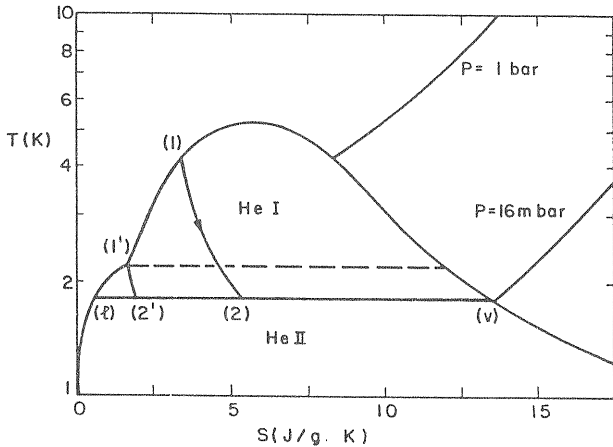


図 3-4 超流動領域の⁴He の T-S 線図 (Ref. 4)

となり、予冷用の熱交換器を使用することにより約 30% 冷凍能力が改善されることが分かる。

以上の議論より、1.8 K で約 20 W の冷凍能力を得るためには 1 g/s の蒸発ヘリウムガスを 0.016 bar (12.5 Torr) で排気する必要があるが、標準状態での 1 g/s のヘリウムガスが約 5.6 L/s で、12.5 Torr では約 340 L/s (20400 L/min) となることを考えると、非常に大型の排気ポンプが必要となる。実験室規模の冷凍能力 10 W クラスの小型の装置では、ロータリ-ポンプとメカニカル-ブスターポンプを組み合わせた排気装置が利用されている。

3-4 実用の超流動ヘリウム冷凍機

現在までに、超伝導マグネットや超伝導高周波加速空洞の冷却用に冷凍能力が 300 W クラスの 1.8 K の超流動冷凍機数台が建設され営業運転されてきた。ここでは代表的な冷凍機を例に実際の超流動冷凍機について解説する。

300 W, 1.8 K 超流動ヘリウム冷凍機 I 室温排気ポンプ

西独のリンデ社が、超伝導空洞の冷却に製作した冷凍能力 300 W at 1.8 K の冷凍システムを図 3-5 に示す。この冷凍システムは図 3-3 で説明したシステムと同じで、基本的には 4.2 K の液化機と 1.8 K の冷凍装置から構成されている。1.8 K の超流動ヘリウム槽からの 18 g/s 蒸発ガスは、超流動冷凍装置の予冷用の熱交換器を通った後、

4.2 K のヘリウム液化機の熱交換器で寒冷を回収されて室温のガスとして 8 段の排気装置で 1 bar まで圧縮され液化機の循環圧縮器へ戻される。このシステムでは戻りガスの圧力損失を約 6 mbar と設計しているが、これだけの大流量の低圧のガスを低圧力損失で通す熱交換器を製作するのは大変である。

300 W, 1.8 K 超流動ヘリウム冷凍機 II 低温排気ポンプ

仏の L'Air Liquide 社が中規模トカマク装置 Tore Supra II の超伝導マグネットの冷却用に製作した冷凍能力 300 W at 1.8 K の冷凍システムを図 3-6 に示す。この超流動冷凍装置では 18 個の総重量約 50 ton の NbTi 超伝導トロイダル-コイルを 1.8 K, 1 bar の加圧超流動ヘリウム He II p で冷却するための 1.75 K の超流動冷凍ループの他に、1.8 K の超伝導マグネットを断熱シールドするための 4 K の冷凍ループを有している。18 個の超伝導コイルは図で示す様に 6 個をユニットとして、超流動ヘリウムの優れた熱伝導能力を利用して

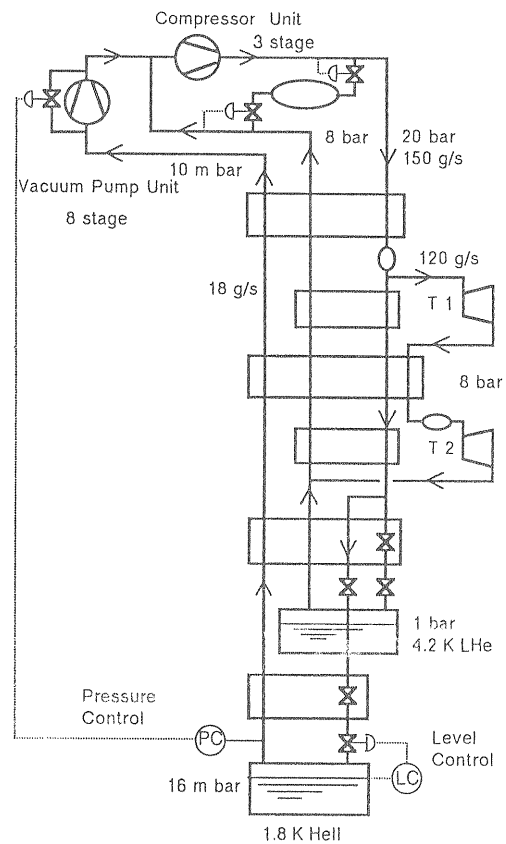


図 3-5 300 W at 1.8 K 超流動ヘリウム冷凍機
- 室温排気ポンプ (Ref. 10)

HeII, 1.75 K 槽の熱交換器を通して間接的に冷却される。HeII, 1.75 K 槽からの 14 g/s, 14 m bar の蒸発ヘリウムガスは予冷用の熱交換器を通過して二段の低温圧縮機（低温排気ポンプ）CP1, CP2へ送られ、そこで80 m bar まで圧縮されて、室温の二段の排気ポンプへ送られそこで1 bar まで加圧されて4.2 K のヘリウム液化冷凍装置の循環圧縮機へ戻る。このシステムでは低温排気ポンプにより大風量の低圧の蒸発ヘリウムガスを極低温部で、取り扱いが簡単な圧力まで圧縮してしまうので熱交換器や室温部でのポンプが小型になる利点があるが、低温圧縮機での圧縮過程で温度がなうことができない。

この超流動ヘリウム冷凍機で使用されている極低温で作動する低温圧縮機は本冷凍装置のために仏の L'Air Liquide 社により特別に開発されおり、常温部からの侵入熱を出来るだけ低減し高性能化を図るために軸受けに磁気軸受けを採用し、駆動用に液化窒素で冷却した高周波モーターが使用されている。

この装置は最終的には 1.75 K で 320 W の冷却能力が得られて、長期間の営業運転を行ない低温圧縮機の実用性を実証した。

現在、米国のヴァージニア州の CEBAF 研究所では高エネルギーの原子核物理の研究用に連続ビームの電子リニアック (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) の建設が行なわれている。この加速器では 1.5 GHz で運転されるニオブ製の 338 台の空洞を 2.0 K に冷却する冷凍能力 4.8 kW の超流動ヘリウム冷凍装置が必要となる。この装置では 0.03 bar のヘリウム約 237 g/s を 4 段の低温圧縮機で一気に 1 bar まで排気圧縮するが、この装置として前述した仏の L'Air Liquide 社が Tore Supra II の超流動冷凍機用に開発し、その実用製が実証されている低温圧縮器と同じタイプの大型の低温圧縮機が採用されている。この超流動ヘリウム冷凍装置は建設が終了して試運転を開始する予定である。

4. SSC ヘリウム冷凍システム

4-1 SSC ヘリウム冷凍システムの構成

超伝導大型加速器SSC は周長約 87 km の地下トンネル内に設置した総数約10000 台の超伝導電磁石からなる 2 台の超伝導リングで構成されており、入射器用の円周約 11 Km の HEB (High Energy Booster) の超伝導リングの冷却用の 2 台を含めて 12 台の大型ヘリウム冷凍により冷却を行なう。現在 FNAL で稼働中の約 1000 台の超伝導マグネットで構成されている Tevatron が円周約 6 km であるので、SSC は Tevatron と比較してマグネットの個数では約 10 倍、加速リングの周長では約 28 倍となる超大型の超伝導装置である。これら二つの超伝導加速リングのおおよその単位長さ当りの冷凍負荷は Tevatron のヘリウム冷凍の冷凍能力が約 24 kW で円周が約 6 km であるので 4 W/m であるのに対して SSC では全冷凍能力が液化ヘリウム温度での換算で約 100 kW でリング周長が約 180 km であるので約 0.6 W/m と Tevatron の場合の約 1/7 以下の極めて小さい値となっているが、これは図 4-1 に示す様に 20 K の輻射シールドを持つ熱断熱特性に優れたクライオスタットを始めとする高性能の低温機器の開発により初めて実現可能となる。

表 4-1 に SSC 冷凍システムの基本的なパラメ

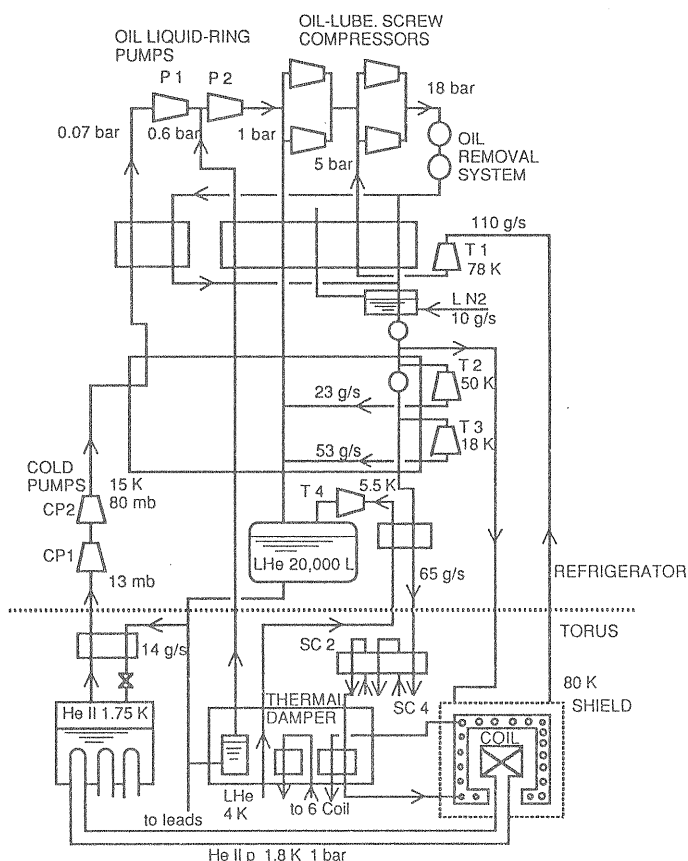


図 3-6 300 W at 1.8 K 超流動ヘリウム冷凍機
—低温排気ポンプ (Ref. 11)

表 4 - 1 SSC ヘリウム冷凍システムの

基本パラメーター

超伝導コイルの運転温度	4.35 K max
冷凍機運転温度	4.1 K nom, 4.0 K min.
全冷凍システムの冷凍負荷	
4.15 K 冷凍負荷	54.3 kW
内訳	
シンクロトロン輻射	17.7 kW
ビームロス	4.1 kW
静的な熱負荷	19.5 kW
その他	6.9 kW
速い励時による(HEB)	6.1 kW
4.15 K 液化	290 g/s
20 K 冷凍負荷	97 kW
84 K 冷凍負荷	660 kW
液化ヘリウム保有量	2.3×10^6 L
ヘリウム冷凍機冷凍能力	Normal Full
4.15 K 冷凍機	5200 W 6500 W
4.15 K 液化機	28 g/s 35 g/s
20 K 冷凍機	9600 W 4400 W
液化窒素プラント	400 ton / day 4200 g/s

ターを示す。図 4-2 に 1 台の SSC ヘリウム冷凍システムの基本的な構成のブロック図を図 4-3 にフローを示す。ヘリウム冷凍システムは基本的には液化ヘリウムを生成する液化機、超伝導マグネット冷却用のヘリウム冷凍機、20 K の輻射シールド冷却用の冷凍機と三つの機能を持つ液化及び冷凍サイクルから構成されている。

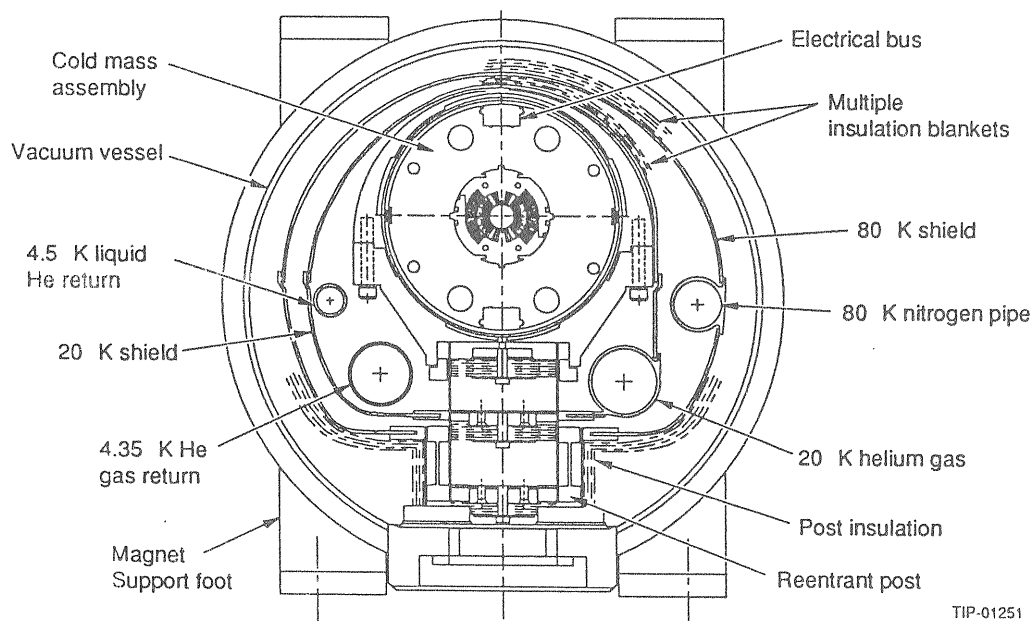


図 3-7 SSC Dipole マグネット-クライオスタットの断面図 (Ref. 12)

ヘリウム液化サイクル

ヘリウムの循環圧縮機 C1, C2 と膨張タービン T1, T2 から構成される典型的なクロード型ヘリウム液化サイクルで液化率の向上を目的に最終段に Tevatron の 24 台の サテライト冷凍機 (1kW) に採用されて長年の運転実績のあるレシプロ式の ウェット-エンジンが採用されている。ここで生成された液化ヘリウムは 60000 gal. (230000 L) の貯槽に溜められ、必要に応じて循環冷凍サイクルに送られる。

4 K ヘリウム冷凍サイクルと液化ヘリウム循環ポンプ

この冷凍サイクルは前述のヘリウム液化サイクルから液化ヘリウムの供給と 20 K の冷凍サイクルからと 80 K での液化窒素からの寒冷の供給を受けて運転される。冷凍能力の増強を行なうために最終段に超臨界タービン E2 が採用されている。

この冷凍サイクルの最終段には約 800 台の超伝導マグネットの強制冷却用に大量の液化ヘリウム (408 g/s) を送るためのの液化ヘリウム循環ポンプが取付けられている。循環ポンプにより圧送された液化ヘリウムは subcooler で冷却され SSC の二つのリングの全長約 4.32 km の 4 つの string に送られる。

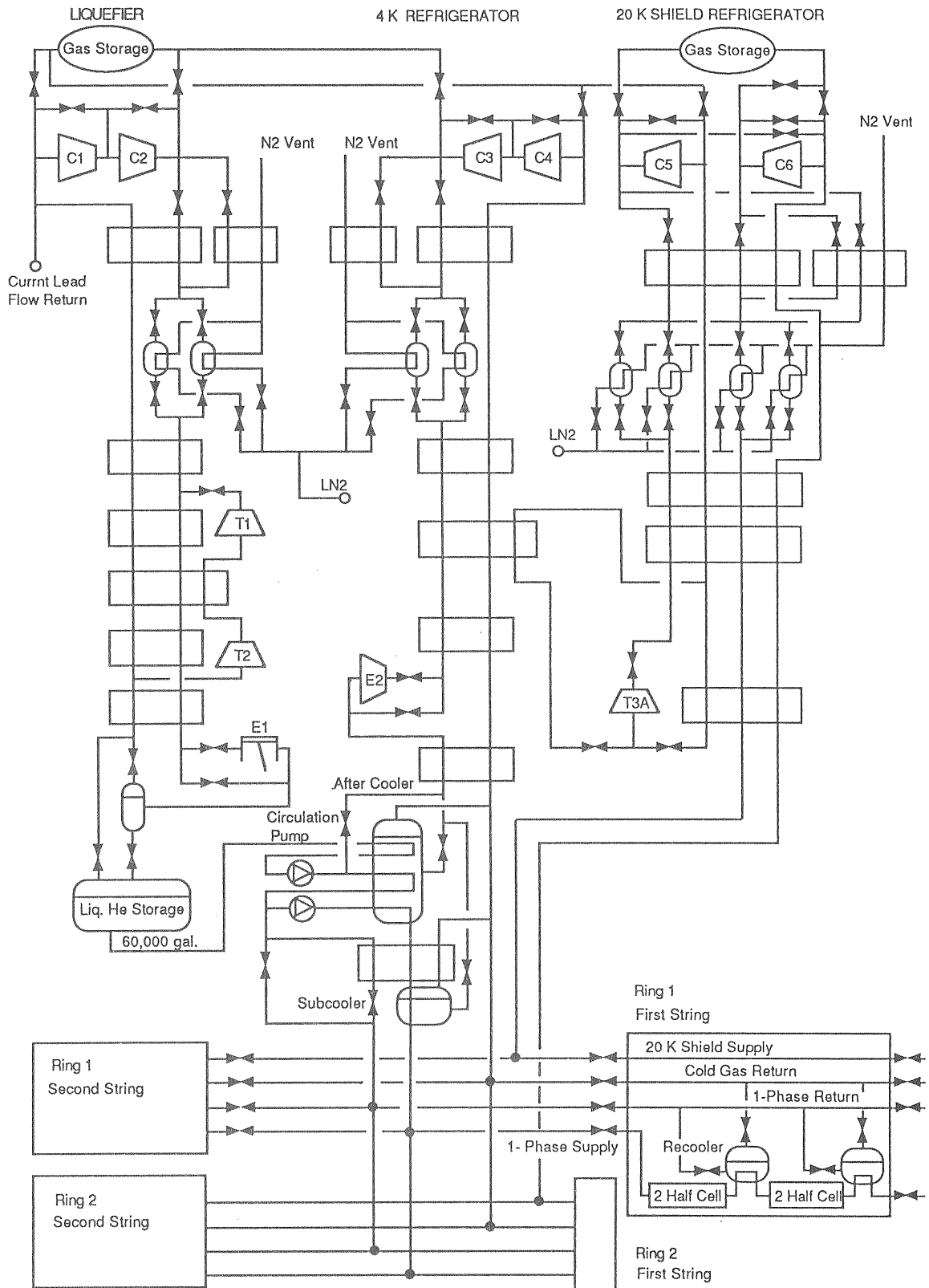


図 3-9 SSC ヘリウム冷凍システムフロー

20 K 輻射シールド冷凍サイクル

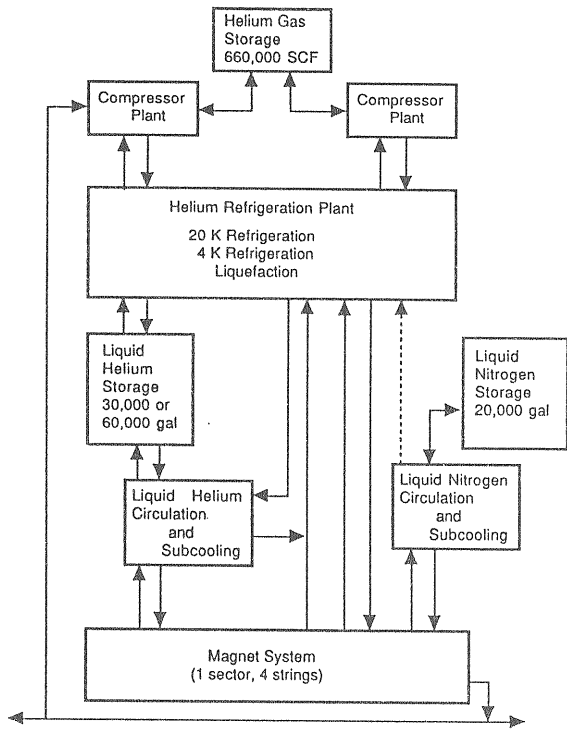


図 3-8 SSC ヘリウム冷凍システムの構成図

2 台のヘリウムの循環圧縮機 C5, C6 と膨張タービン T3A から構成される分離ブライトン型サイクルで超伝導マグネットの 20 K 輻射シールド冷却用の寒冷を発生するブライトン-サイクルとその寒冷を総全長約 17 km に供給するための循環サイクル (200 g/s) から構成されている。

4-2 超伝導マグネットの冷却方式

図 4-4 に超伝導マグネットの冷却の様子を示す。超伝導マグネットは 5 台の dipole (長さ約 15 m、冷却重量約 10 ton) と 1 台の quadrupole (約 6 m 冷却重量約 1.6 ton) と 1 台の補正コイルや safety Lead やクエンチ時の緊急放出弁等を収納する spool piece で加速リングの最小単位である 1/2 cell を構成する。

1 台のヘリウム冷凍機が受け持つ超伝導マグネットは全長約 8.64 km の 2 台の SSC リング (ring #1, #2) の 1/10 周部分でヘリウム冷凍機は

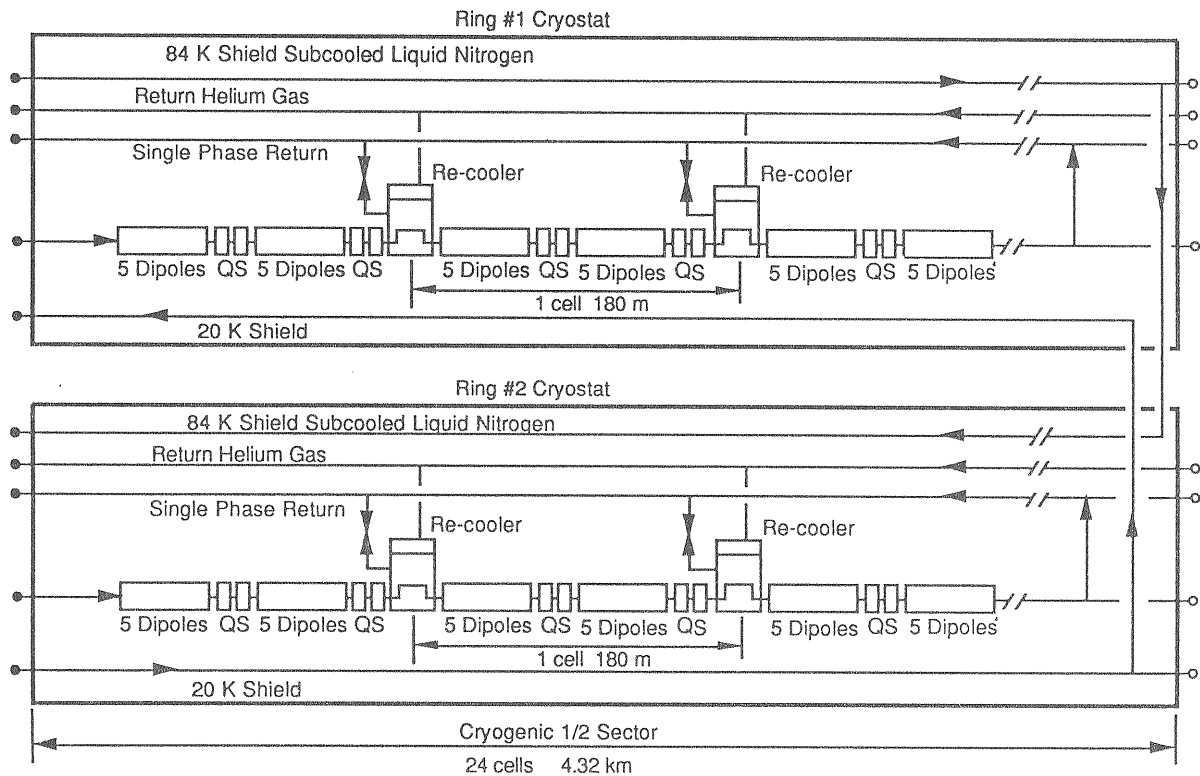


図 3-10 SSC 超伝導マグネットの冷却方式

中央に配置されており、4 K ヘリウム冷凍サイクルの液化ヘリウム循環ポンプにより圧送された流量 408 g/s の単相の subcooled ヘリウムは4つに分流され 24 cell から構成される4つの全長約 4.3 km の string に供給される。各 string の超伝導マグネットは大流量100 g/s, 4.15 K の圧力約 4 bar の単相の subcooled ヘリウムにより強制冷却される、各マグネットの冷凍負荷はそれぞれ dipole 3 W, quadrupole 0.9 W, spool piece 2.2 W でこれらのマグネットを冷却することにより単相の subcooled ヘリウムの温度が上昇するが、これは全長180 m の1 cell 毎に配置してある熱交換器 re cooler により冷却して温度を下げてる。各 string の両端で単相の subcooled ヘリウムは戻りの単相ヘリウムになりクライオスタット内部の戻り配管を通して4 K ヘリウム冷凍サイクルの循環ポンプの吸入側に戻される。単相の subcooled ヘリウムの冷却に必要な液化ヘリウムはこのラインから re cooler へ供給される。re cooler からの蒸発ヘリウムはクライオスタットのヘリウムガス戻りラインを通して4 K ヘリウム冷凍サイクルに戻る。

20 K 輻射シールドの冷却用の 100 g/s 2.5 bar のヘリウムガスは各マグネットの20 K での冷凍負荷、それぞれ dipole 5.1 W, quadrupole 2.7 W, spool piece 10.5 W の冷却用に20 K 輻射シールド冷凍サイクルから ring #1 の 20 K 輻射シールド-ラインに供給される ring の両端で ring #2 の 20 K ラインに接続されそれを通して20 K 輻射シールド冷凍サイクルの戻りラインに接続される。

80 K 輻射シールド-ラインには各マグネットの 80 K での冷凍負荷はそれぞれ dipole 37 W, quadrupole 26 W, spool piece 58 W を冷却するために750 g/s, 5 bar, 84 K の subcooled の窒素が液化窒素循環装置により供給される。尚これに必要な液化窒素は敷地内の 400 ton/day の空気分離プラントにより生産供給される

参考文献

一般的な教科書

- 1 田沼静一 編集 実験物理学講座 1 5 低温 共立出版 1974
- 2 信貴豊一郎 監修 低温工学ハンドブック 内田老鶴園新社 1982
- 3 堂山昌男 訳 F.W.Seare and G.L.Salinger 熱力学-統計熱力学 共立出版 1979
- 4 Steven W. Van Sciver, Helium Cryogenics, Plenum Press, New York and Rondon, 1986
- 5 R Barron, Cryogenic System, McGraw-Hill Book Company, New York, 1966
- 6 K.D.Williamson, Jr. and F.J.Edeskuty, Liquid Cryogens volume II, CRC Press, Inc., Florida, 1983

超伝導加速空洞ヘリウム冷凍装置

- 7 K. Hara et al., Cryogenic System for TRISTAN RF Superconducting Cavity, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 33, Plenum Press, New York, 1986, p615.
- 8 K. Hosoyama et al., Cryogenic System for TRISTAN RF Superconducting Cavity, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 35, Plenum Press, New York, 1988, p933.
- 9 K. Hosoyama et al., Cryogenic System for TRISTAN RF Superconducting Cavity, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 37, Plenum Press, New York, 1988, p683.

1.8 K 超流動ヘリウム冷凍機

- 10 A.Sellmaier, R. Glatthaar and E. Kliem, Helium Refrigerator with a Capacity of 300 W at 1.8 K, Proceedings on Third International Cryogenic Engineering Conference, Berlin, 1970
- 11 Guy M. Gistau, Operational Experience with the 1.75 K TORE SUPRA Refrigerator, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 35, Plenum Press, New York, 1990

SSC ヘリウム冷凍装置

- 12 J.R.Sanford and D.M.Matthews, Site-Specific Conceptual Design of the Superconducting Super Collider, Superconducting Super Collider Laboratory, July 1990