

クライオジェニクスおよび クライオモジュール

1. はじめに

クライオジェニクス (cryogenics) とは、ギリシャ語の「寒い、寒冷」という意味の言葉 "κρυος (kryos, cryos)" と「生み出す、出産」という意味の言葉 "γεννησις (gennese)" の合成語で、低温を発生させるための学問や技術を指す。「低温学」や「低温工学」あるいは「低温物理学」と訳されるが、「低温工学」の英訳は "cryogenic engineering" となることが多い。ところで、「低温」とはどの温度領域を指すのかは分野によって変化し、統一した定義はまだ決まっていないようであるが、ここでは超伝導現象を生じさせることができるような温度領域を「低温」と定義する。したがって、リニアコライダーで使用される超伝導高周波加速空洞や超伝導電磁石を冷却する温度領域を対象とし、具体的には液体窒素あるいは液体酸素の温度以下の領域を指す。

OHO'14 のクライオジェニクスの講義では、リニアコライダーに関係する「クライオジェニクス」と「クライオモジュール」(cryomodule) の 2 つの項目を主に紹介する。「クライオモジュール」は一般的には「クライオスタット」(cryostat) と呼ばれる低温を維持するための容器のことであり、特にリニアコライダーの超伝導高周波加速空洞や超伝導電磁石などの加速器用の超伝導機器を内蔵している低温容器を「クライオモジュール」と呼んでいる。これらの 2 つの項目は超伝導高周波加速空洞などの加速器用超伝導機器と密接な関係があり、加速器を超伝導化する場合に必要な知識である。

次節ではクライオジェニクス (冷却システム) と超伝導高周波加速空洞との関係を説明し、第 3 節では超伝導高周波加速空洞を超伝導状態に維持するためのクライオモジュールの構造や原理について記述する。第 4 節では空洞の冷却に必要なヘリウムの液化についてその原理を述べ、ヘリウムのもう 1 つの液相である超流動ヘリウムと

その性質について第 5 節で簡単に解説を行う。また、高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設で稼働している 2 K 超流動ヘリウム冷却システムについて第 6 節で紹介する。第 7 節では、低温に関わる安全について重要な事項を述べる。最後に、第 8 節でこの講義のまとめを行う。

2. 超伝導高周波加速空洞の冷却

2.1. 超伝導高周波加速空洞の運転温度

リニアコライダーで電子および陽電子を加速するために使われる超伝導高周波加速空洞 (Fig. 1) は、共振周波数が 1.3 GHz、運転温度は 2 K である。この空洞はニオブ (Niobium; Nb) でできている。ニオブの超伝導転移温度は 9.25 K であるので、空洞をこの温度以下に保てば十分であるが、実際には 2 K まで冷却する必要がある。同じようにニオブでできている共振周波数が 509 MHz の KEKB 用超伝導高周波加速空洞は 4.4 K で冷却されている。

超伝導高周波加速空洞からの発熱量 (空洞損失または高周波損失) は空洞の表面抵抗に依存し、この発熱量が冷却システムへの熱負荷となる。Fig. 2 に、共振周波数が 1.3 GHz と 509 MHz のそれぞれの超伝導高周波加速空洞の表面抵抗の温度変化を示す。空洞の表面抵抗は、超伝導理論に基づく BCS 抵抗と、金属格子の欠陥や不純物による残留抵抗の和で表される。BCS とは、超伝導の理論的な考察を行った Bardeen, Cooper および Schrieffer の 3 名の研究者の頭文字に由来して

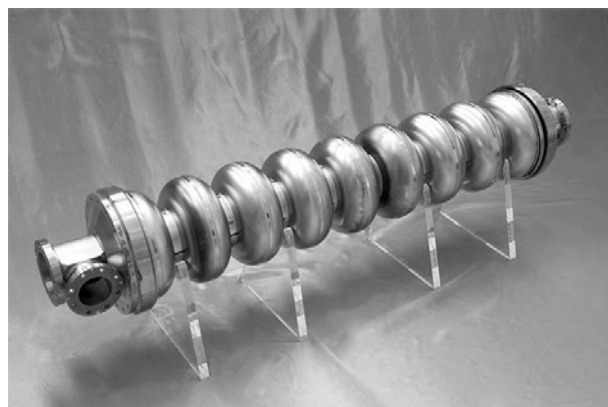


Fig. 1 ニオブ製超伝導高周波加速空洞

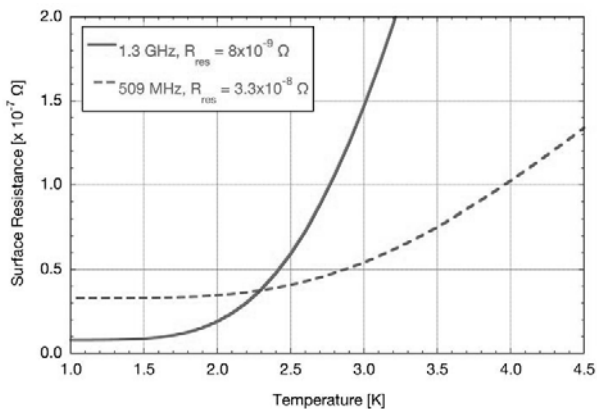


Fig. 2 超伝導高周波加速空洞の表面抵抗

いる。この図からわかるように、超伝導高周波加速空洞の運転温度による表面抵抗の変化は、空洞の共振周波数が高くなるほど大きくなる。したがって、冷却システムへの熱負荷をできるだけ小さくするためには、共振周波数が高い空洞ほど、より低い温度で運転する必要がある。KEKBの空洞は4.4 Kでも表面抵抗がそれほど大きくなりませんので4.4 Kでの運転が可能であるが、リニアコライダの空洞は3 K以下の温度で運転しなければ冷却システムへの熱負荷が増大し、より大規模な冷却システムが必要となる。そこで、後述する超流動ヘリウムの熱的な利点を利用するためにも、運転温度を2 Kとしている。

2.2. 超伝導高周波加速空洞の冷却

物体をある温度に冷却するためには、その温度の物質（冷媒）に接触させる必要がある。熱伝達を考慮すると、その温度の液体の中に冷却したい物体を入れておくことが確実かつ効率が良い（浸漬冷却）。Fig. 3に融点および沸点の低い物質を示した。融点と沸点の間の温度領域がその物質の液相に対応している。ヘリウムについては、後述するように、0 Kでも高圧でなければ固体にならない

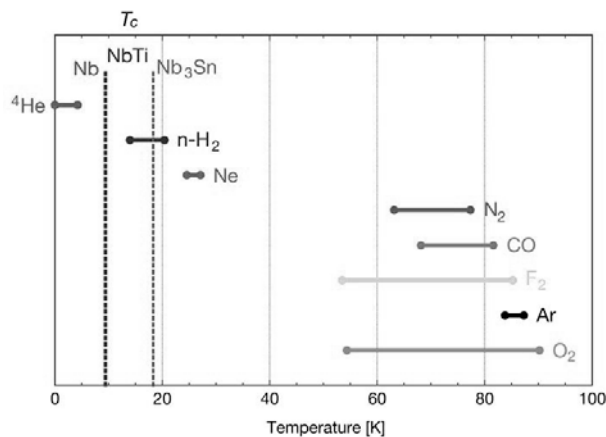


Fig. 3 主な物質の融点と沸点および超伝導材料の超伝導転移温度

ために、融点を便宜上0 Kとして記載してある。また、図中には、ニオブおよび超伝導電磁石に使用される超伝導材料の超伝導転移温度も一緒に示してある。

ニオブでできている超伝導高周波加速空洞を2 Kに冷却するためには、Fig. 3からわかるように、冷媒としてはヘリウム以外に適切な物質はない。ヘリウムの次に融点の低い水素でも、ニオブの超伝導転移温度よりも高い。したがって、以下の議論では、ニオブでできた超伝導高周波加速空洞を液体ヘリウムを用いて冷却することを考える。

2.3. 液体ヘリウムによる空洞冷却

超伝導高周波加速空洞を2 Kに冷却するためには、Fig. 4のヘリウム冷却システムの概要図に示すように、まず、通常のヘリウム液化冷凍機で液体ヘリウムを生成する。ヘリウム液化冷凍機はカタログ製品として市販されているが、2014年9月現在で、ヘリウム液化冷凍機を製造・販売している会社は、世界で2社しかない。Fig. 4から分かるように、2 Kヘリウム冷却システムでは、2種類のヘリウム冷凍機を用いるため、このヘリウ



Fig. 4 ヘリウム冷却システムの概要

ム冷凍機を 4.5 K ヘリウム冷凍機と呼ぶ。4.5 K ヘリウム冷凍機からは 4.5 K の液体ヘリウムのほかに、後述するようにクライオモジュールの 80 K 熱放射遮へいの冷却に使用する 40 K のヘリウムガスも生成する。

4.5 K ヘリウム液化冷凍機で生成した液体ヘリウムは、2 K ヘリウム冷凍機に送られて 2 K の超流動ヘリウムの生成に用いられるほか、次節で述べるようにクライオモジュールの 5 K 熱放射遮へいの冷却にも使用する。2 K ヘリウム冷凍機で生成した 2 K 超流動ヘリウムはクライオモジュールの二相ヘリウム供給配管を経由して、超伝導高周波加速空洞のヘリウム容器へ供給され、空洞の温度を 2 K に保つ。

3. クライオモジュール

3.1. 伝熱のモード

熱の伝わり方には次の 3 つのモードがある。

- 伝導 (conduction)
- 対流 (convection)
- 放射 (radiation)

放射は「ふく射」とも呼ばれている。リニアコライダーのクライオモジュールのように、容器内部を効率よく 2 K の低温に保つためには、これらの 3 つのモードによる外部からの熱侵入をできるだけ減らすことが重要となる。

伝導による熱侵入を減らすためには、熱伝導率の小さい材料を使用することである。クライオモジュールで使われている構造材料で主なものは、金属ではステンレス鋼、非金属では G-10 のようなガラス繊維強化プラスチック (glass-fiber reinforced plastic; GFRP) などである。また、室温から低温部を直接接続する配管は、できるだけ厚さを薄くして伝熱面積を小さくようにする。

対流は、気体や液体、すなわち、流体が温度による密度差で流動し、熱を伝えるモードであるので、流体が存在する場合にしか生じない。したがって、ある空間で流体が動かないように断熱材でその空間を埋めるか、あるいは、その空間から流

体を排除すれば、その空間での対流は生じない。後者は真空断熱 (vacuum insulation) と呼ばれ、リニアコライダーのクライオモジュールもこの真空断熱を利用している。クライオモジュール内の対流を防ぐために、真空を保持する部分を断熱真空槽 (insulation vacuum vessel) と呼ぶ。

物体間はそれぞれの物体の温度の 4 乗の差に比例した放射による熱伝達を行う (熱放射)。したがって、2 K の超伝導高周波空洞が 300 K の物体を「見て」しまうと、空洞への熱侵入量は非常に大きなものとなる。また、熱放射は物体間が真空中でも生じる。したがって、室温部分と 2 K の部分の間にその中間の温度部分を設けることによって熱放射による熱侵入量を減らすことができる。これを「熱放射遮へい」 (thermal radiation shield) と呼ぶ。また、熱放射遮へいだけではなく、熱放射に対する反射率が高く、熱伝導率の小さな材料 (例えば、アルミニウムを蒸着したポリエステルフィルム) をお互いが接触しないように重ねたスーパーインシュレーション (super insulation; SI) も広く用いられている。スーパーインシュレーションは多層断熱材 (multi-layer insulation; MLI) と呼ばれ、英語では後者のほうが一般的である。各層が接触すると熱的に短絡状態となり、多層にする意義が失われてしまう。各層が接触しないようにするために、網状のプラスチックや不織布などをスペーサーとして各層の間に挟み込む。スペーサーが網状になっているのは、断熱真空を実現する際にインシュレーション間の空気を排気しやすくするためである。スーパーインシュレーションの層数は物体間の温度差や物体間の距離 (スーパーインシュレーションを設置できる間隙) にもよるが、例えば、室温と液体窒素温度間で約 30 層、液体窒素温度と液体ヘリウム温度間で約 10 層程度である。複数層のスーパーインシュレーションを配管やタンク周りに取付ける場合、海苔巻きのように、スーパーインシュレーションの端部をもう片方の端部の上に重ね合わせてはならない。これは、下の層の最外面 (一番温度が高い面) が上層の最下面 (一番温度が低い) と接触してしまい、熱的に

何の効果もなくなってしまう。この場合には、押むときに両手を合わせるように、両端部の最下面同士を合わせるようにする。

このように、リニアコライダー用の超伝導高周波加速空洞や超伝導四極電磁石を 2 K に保持するためのクライオモジュールは、これらの 3 つの伝熱モードを考慮して、室温から 2 K の温度領域への熱侵入をできる限り小さくするように設計されている。

3.2. クライオモジュールの構造

Fig. 1 に示した超伝導高周波加速空洞は、Fig. 5 に示すように、その外側にヘリウム容器 (helium tank) が溶接されており、空洞とヘリウム容器の間に超流動ヘリウムを満たして空洞を 2 K に保つ。超流動ヘリウムはヘリウム容器に接続されている二相ヘリウム供給配管によって、ヘリウム冷却システムから供給される。通常の液体とは異なり、超流動ヘリウムは核沸騰や膜沸騰を起こさないために、空洞で発生した熱は二相ヘリウム供給配管内の気液自由界面での蒸発潜熱として除去される。

ヘリウム容器の付いた空洞は、Fig. 6 に示すように、ガス回収パイプ (gas return pipe; GRP) と呼ばれるステンレス鋼の配管に吊り下げられ、4.5 K の液体ヘリウムで冷却された 5 K 熱放射遮へいと 40 K のヘリウムガスで冷却された 80 K 熱放射遮へいで囲われている。熱放射遮へいはアルミニウムできており、各熱放射遮へいに熱接触しているアルミニウム管に液体ヘリウムおよび

ヘリウムガスを流して冷却している。高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設で運転しているクライオモジュールでは、80 K 熱放射遮へいを 40 K のヘリウムガスではなく、77 K の液体窒素で冷却している。

クライオモジュールの断熱真空槽と 80 K 熱放射遮へい、80 K 熱放射遮へいと 5 K 熱放射遮へい、それに 5 K 熱放射遮へいとヘリウム容器の間には、それぞれスーパーインシュレーションを設けて、熱放射による熱侵入を減らしている。また、クライオモジュール内は真空ポンプで真空を保ち、対流による熱侵入を防いでいる。

リニアコライダーでは電子あるいは陽電子を確実に加速するため、ビームラインと呼ばれる電子あるいは陽電子が飛ぶ軌道を 1 本の直線状に保持する必要がある。そのために、クライオモジュール内に設置されている 9 台ないし 8 台の超伝導高周波加速空洞も、ガス回収パイプに吊り下げる前後で 1 本の直線上に並ぶように調整する (アライメント、alignment) 必要がある。また、空洞やガス回収パイプなどは、室温から 2 K まで冷却される間に熱収縮と呼ばれる形状の変化を起こす。各空洞に高周波電力を供給するために、入力結合器と呼ばれる機器を室温部から空洞まで挿入して空洞と接続する必要があるが、この熱収縮によって入力結合器の室温部分と空洞との接続部で位置のずれが生じてしまう。そこで、インバー (Invar; 不変鋼) と呼ばれる熱収縮の小さい合金の棒でガス回収パイプの中心からの各空洞間

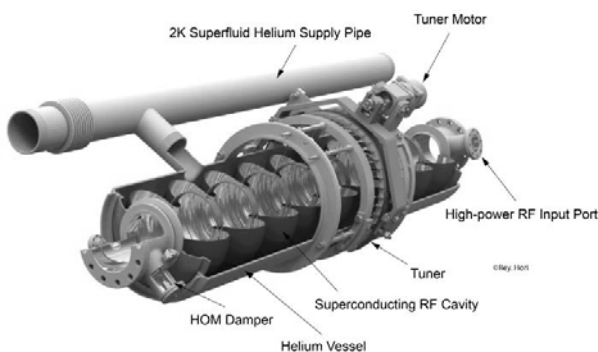


Fig. 5 超伝導高周波加速空洞と周辺機器

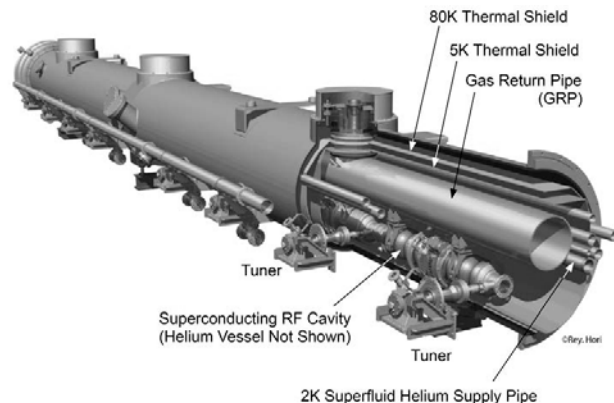


Fig. 6 クライオモジュールの構造

の位置を固定し、熱収縮で入力結合器が壊れないようにしてある。

3.3. サポートポスト

超伝導高周波加速空洞とそれを吊り下げているガス回収パイプ、5 Kおよび80 K熱放射遮へいは、サポートポストと呼ばれる特殊な構造をした支柱でクライオモジュールの断熱真空槽に取付けられる。

Fig. 7 にフェルミ国立加速器研究所 (Fermi National Accelerator Laboratory; Fermilab, FNAL) で設計されたサポートポストの概念図を示す。空洞やガス回収パイプなどの機器の荷重を支えるのはガラス繊維強化プラスチック G-10 の円筒で、断熱真空槽とガス回収パイプそれぞれと接続するためのステンレス鋼の板、5 Kおよび80 Kの熱放射遮へいを取り付けるためのアルミニウム板が冷やしばめによって G-10 の円筒に固定されている。G-10 の円筒内部にもそれぞれの板に対応した円板が取付けられており、内部の円板間に

もスーパーインシュレーションが設置されている (Fig. 8)。

リニアコライダーでは、1 台のクライオモジュールの長さが 12.6 m となっており、Fig. 9 に示すように、3 台のサポートポストで空洞やガス回収パイプ、2 つの熱放射遮へいを断熱真空槽から吊り下げている。前述のように、冷却による熱収縮でガス回収パイプなどが変形するため、中央部に取付けられたサポートポストは断熱真空槽に固定されているが、他の 2 台のサポートポストは、ビームライン方向に動けるような構造になっている。

3.4. 液面計

後述するように、クライオモジュール 12 台を繋げたものを「クライオストリング」(cryo string) と呼ぶ。クライオストリングの一番最後のクライオモジュールでは、Fig. 10 に示すように端部で二相ヘリウム供給配管がガス回収パイプに接続されているが、最後のクライオモジュールまで超流

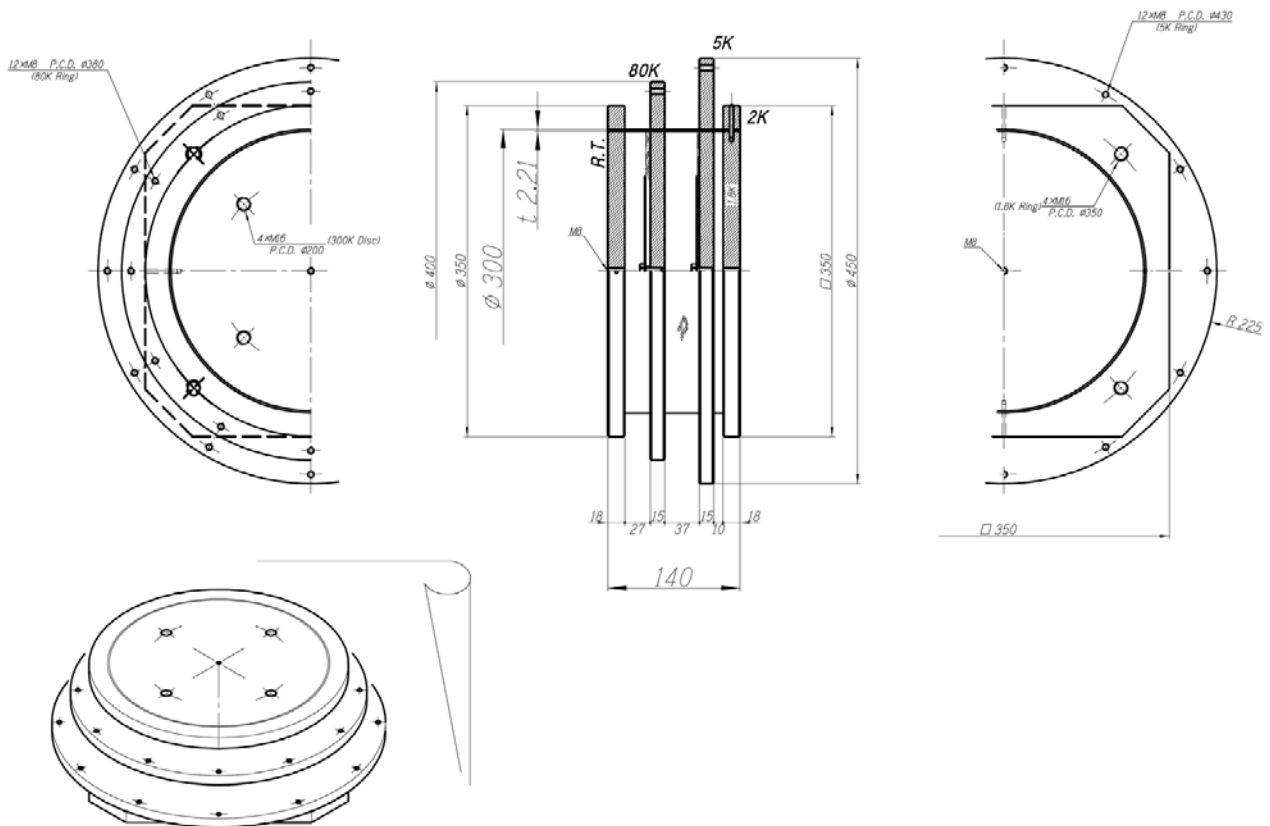


Fig. 7 サポートポスト概念図

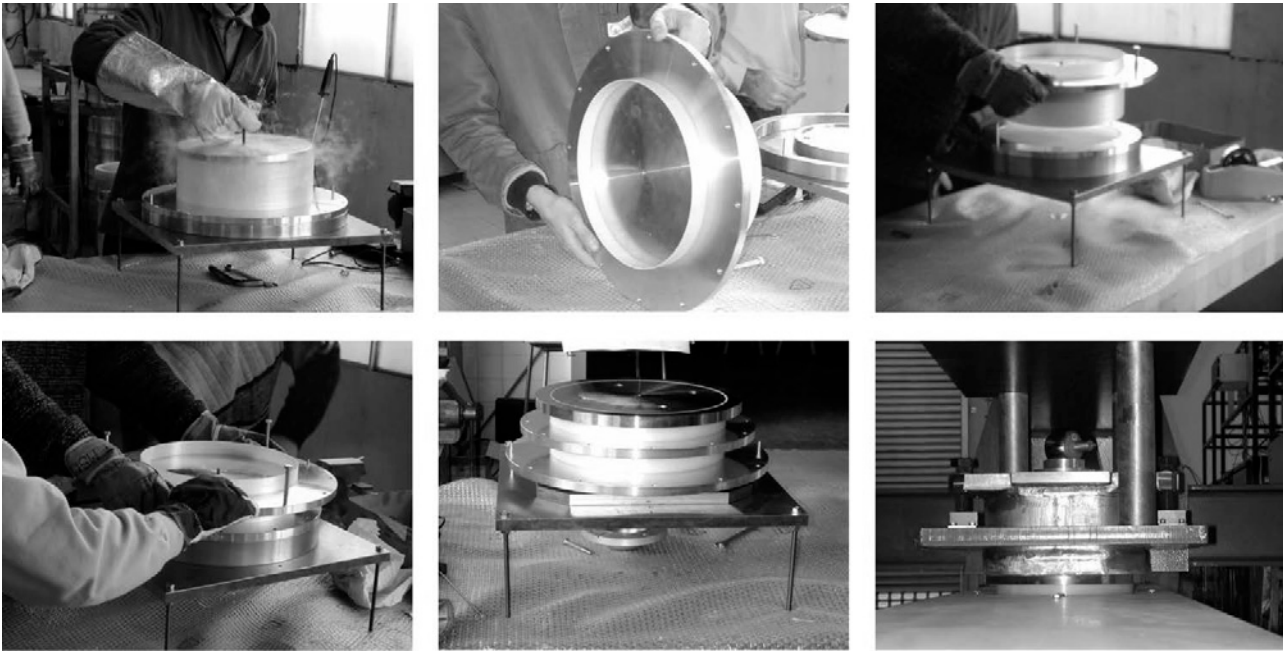


Fig. 8 サポートポストの組立[1]

動ヘリウムが供給されているかどうかを確認するために、供給配管と回収パイプの間に超伝導液面計を設置するためのポットが取り付けられている (Fig. 11)。

超伝導液面計は、1本の超伝導線 (NbTi 合金など) が液体ヘリウムに浸っている部分だけが超伝導状態になって電気抵抗が実質的に 0 になることを用いたものである。液面計全体が液体ヘリウムに使っていない場合の超伝導線の電気抵抗と、液体ヘリウムに浸かっている部分の電気抵抗が 0 になって、全体の抵抗が減少した割合から、超伝導線のどの位置まで液体ヘリウムに浸かっているか (絶対長さ、または、全体の長さに対する百分率) を検出できる。クライオモジュール内の液面計の位置を予め測定しておけば、液面計の出力からクライオモジュール内の液体ヘリウムの高さが分かる。

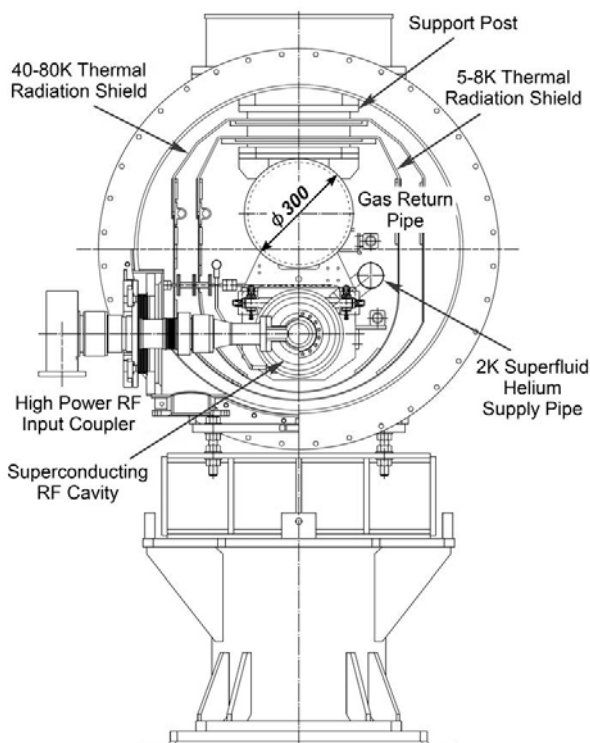


Fig. 9 クライオモジュール断面

3.5. ILC のクライオモジュール

国際リニアコライダー (International Linear Collider; ILC) の技術設計報告書 (Technical Design Report; TDR) [2]では、クライオモジュールを2種類使用する。1つは「A型」(Type A)と呼ばれるもので、1台のクライオモジュールの中に超伝導高周波加速空洞が9台収納されている。もう1つは「B型」(Type B)と呼ばれ、空洞8台と超伝導四極電磁石1台が収納されている。Fig. 12にB型クライオモジュールの概要を

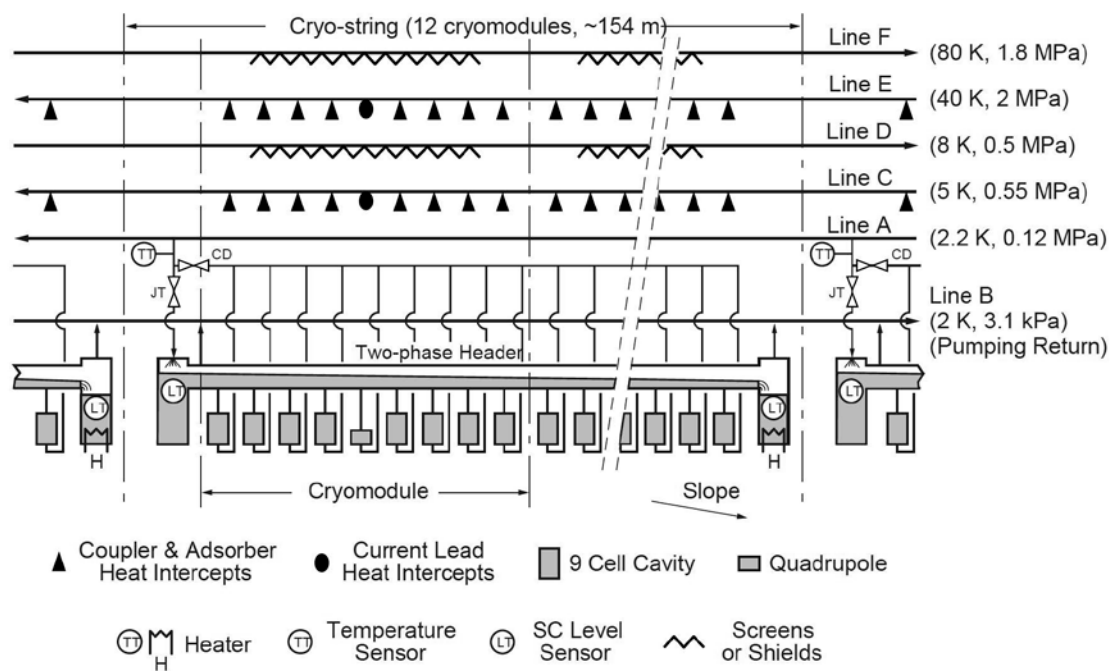


Fig. 10 ILC 主線形加速器の冷却方法[2]

示す。クライオモジュールの中央に1台の超伝導四極電磁石が吊り下げられている。A型クライオモジュールでは、この超伝導四極電磁石の代わりにもう1台の超伝導高周波加速空洞が吊り下げられている。また、Fig. 13に示すように、1台のB型クライオモジュールの両端に2台のA型クライオモジュールを接続したものを「主線形加速器ユニット」(Main Linac unit; ML unit)と呼び、主線形加速器ユニットを4基接続したもの(クライ

オモジュール12台)を「クライオストリング」(cryo string)と呼ぶ。Fig. 10は、このクライオストリング1基の冷却系を図式化したものである。さらに、クライオストリングを13基接続したもの(主線形加速器ユニット52基、クライオモジュール156台)を「クライオユニット」(cryo unit)と呼ぶ。配置によってこれらの数値は多少変化するが、基本的にはヘリウム冷却システム1組でこのクライオユニット1基を冷却する。

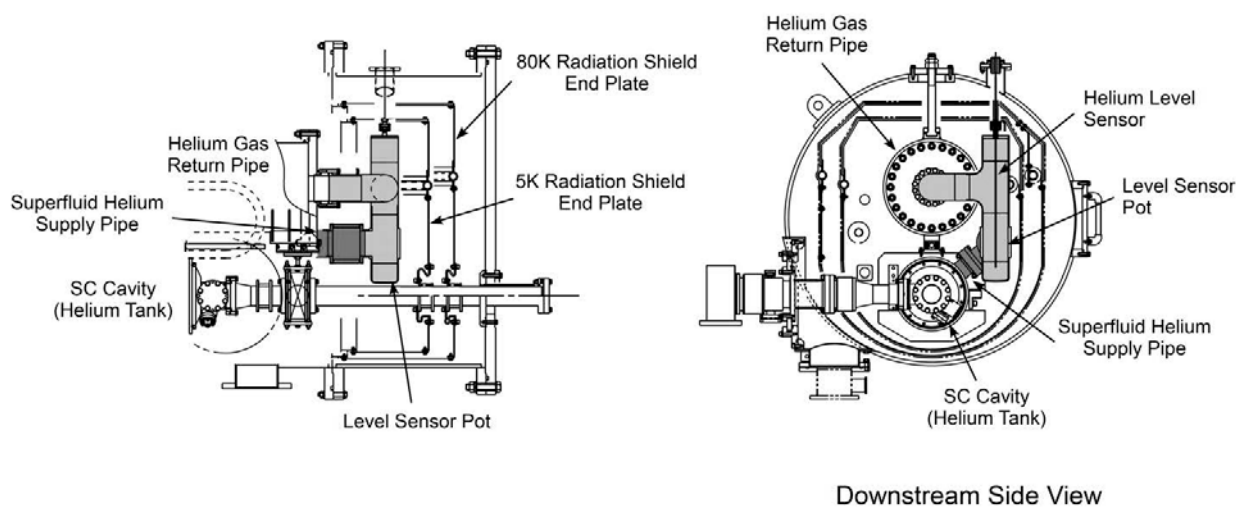


Fig. 11 ヘリウム液面計ポット

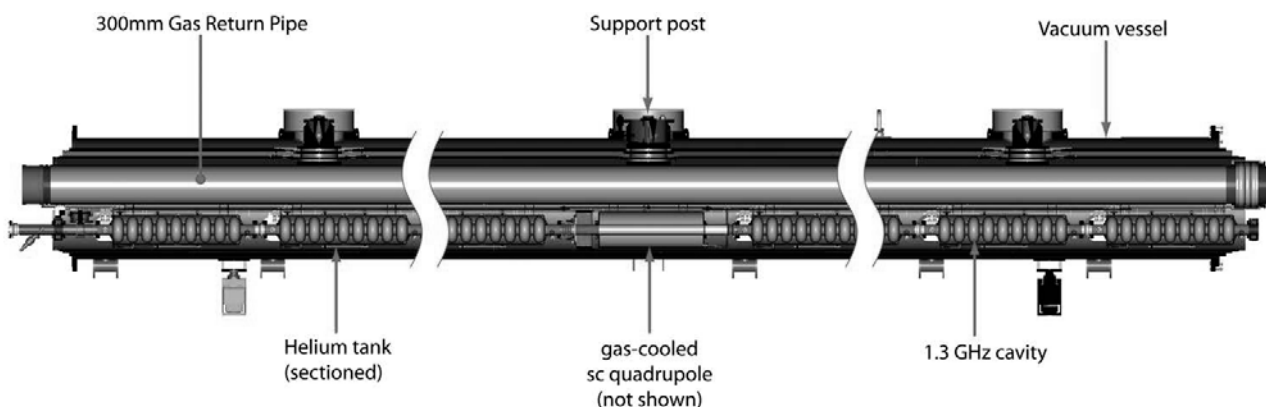


Fig. 12 Type B クライオモジュールの断面[2]

日本に ILC を建設する場合、基本的には平地に約 31 km もの長いトンネルを設置するのは不可能であるので、国土の約 73% を占める山岳地帯に建設することになる。Fig. 14 に、平地 (Klystron Cluster Scheme; KCS) あるいは山岳地帯 (Distributed Klystron Scheme; DKS) に ILC を建設する場合の配置図を示す。日本の場合は、下

の山岳地帯の場合に対応する。ILC の全長に亘って 10 基のヘリウム冷却システムを配置し、それぞれの冷却システムが約 2.5 km の長さに対応するクライオモジュールを冷却する。ただし、2 つの冷却システムを同じ場所に設置するところもあるので、実際に 10 基のヘリウム冷却システムが設置されるのは 6 か所である。

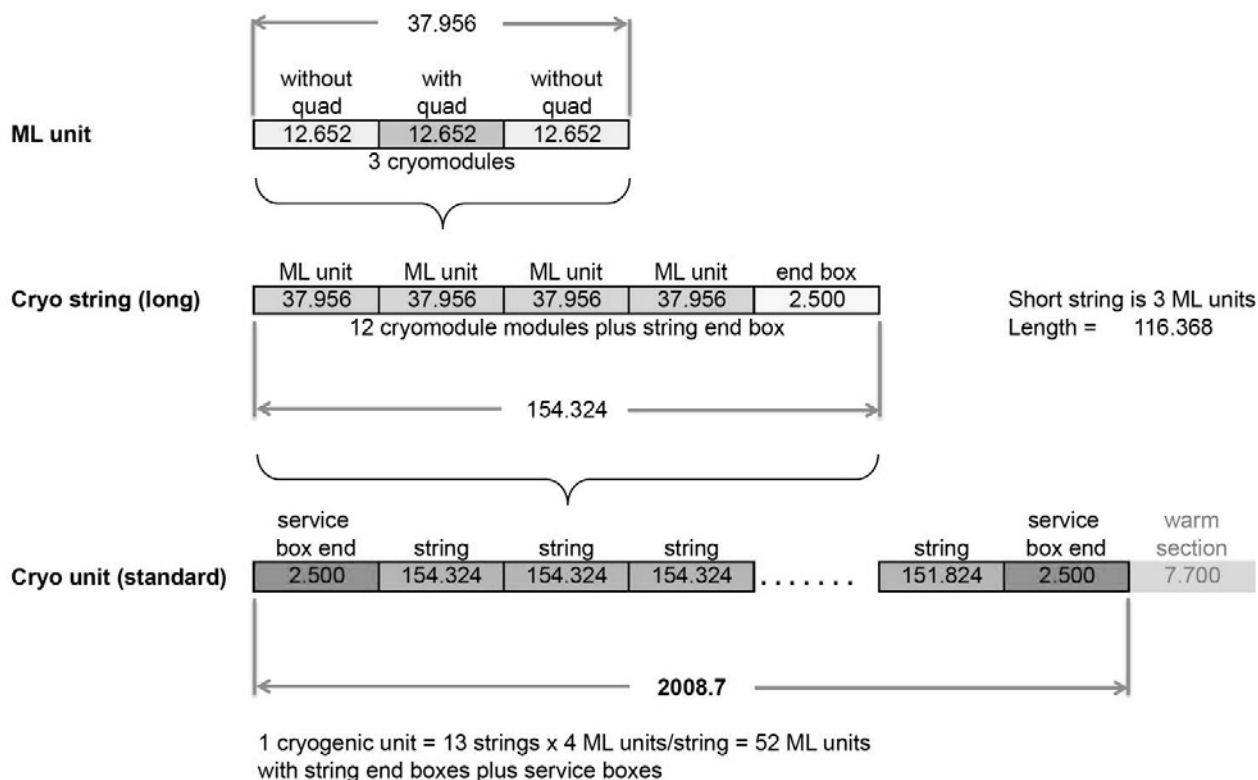
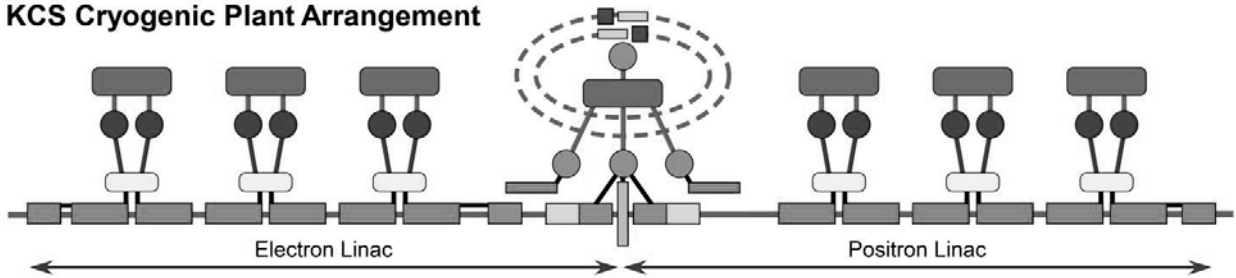


Fig. 13 クライオモジュールの構成[2]

KCS Cryogenic Plant Arrangement



DKS Cryogenic Plant Arrangement

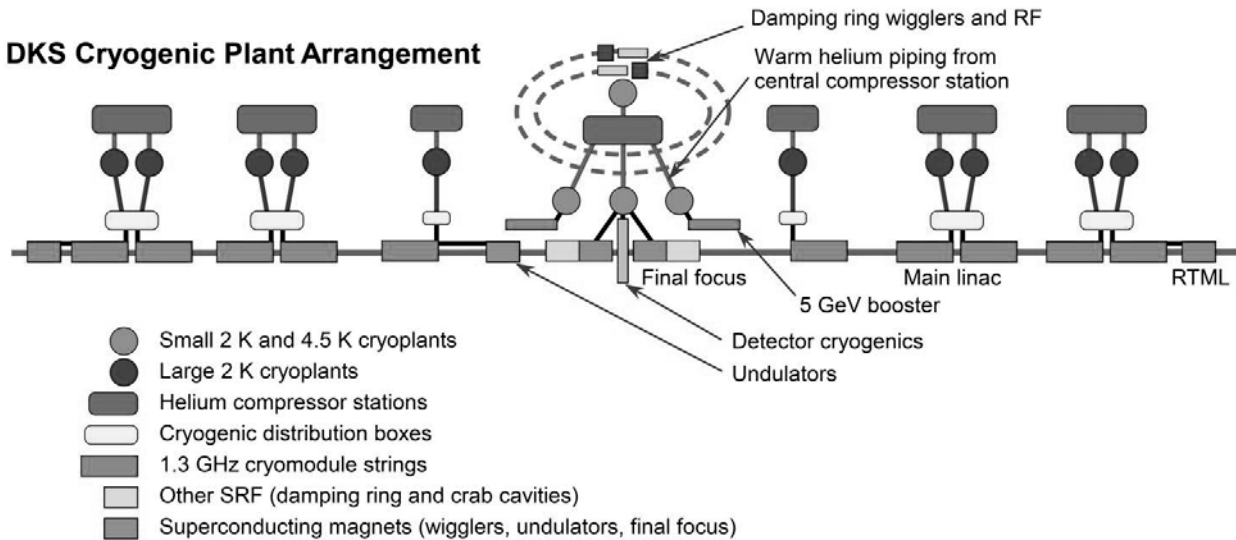


Fig. 14 ヘリウム冷却システムの配置[2]

4. ヘリウムの液化

4.1. 液化の原理

一般的に、気体を液体にする（液化）ためには、室温の気体を圧縮（compression）し、他の冷たい物質と熱交換したり、断熱膨張（adiabatic expansion）をしたりして徐々に温度を下げ、最終的に等エンタルピー膨張（isenthalpic expansion）をして気体の一部が液体となり、残りの部分は冷たい気体のままとなる。この過程を横軸にエントロピー（ s ）、縦軸に温度（ T ）を取った T - s 線図（ T - s diagram）に表すと Fig. 15 の K - G - J - H_4 - K のサイクルを行うことになる。後述するように、気体の圧縮は等温圧縮（isothermal compression）を行うのが理想的であるが、実際には Fig. 15 の K - G 間のように、圧縮によってエントロピーは減少するが、気体の温度は上昇する。圧縮された気体は熱交換器などによって等圧

線（isobar）に沿って温度が低下し、図中の点 G から点 J へ変化する。熱交換器によって圧縮気体の温度を下げるため、気体の一部は途中で膨張器（expansion engine）あるいは膨張タービン（turbo-expander）によってそれ自身の温度を下げ、熱交換器の低圧側に戻る。理想的な断熱膨張は等エントロピー変化（図中の G - I ）であるが、

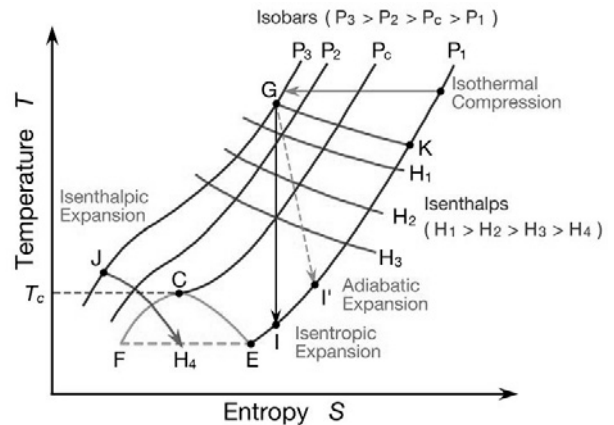


Fig. 15 液化の T - s 線図[3]

実際には完全な断熱は不可能であるので、膨張中に若干エントロピーが増大し、T-s 線図では G-I の酔うな変化をする。Fig. 16 には、液化に関する様々な熱力学的変化を T-s 線図上に示してある。

もっとも単純で理想的な液化サイクルは、逆カルノーサイクル (reversed Carnot cycle) である。T-s 線図では、Fig. 17 に示すように、等温圧縮と等エントロピー膨張、等温膨張および等エントロピー圧縮で構成される四角形となる。液化のためには、この四角形の底辺が気液共存領域である「ドーム」(dome) と交わっていなければならない。ヘリウムの高温側の温度を 300 K、低温側の温度を 4.5 K とすると、ヘリウムの液化に必要な最大圧力は 61.3 GPa となり、実現は不可能である。したがって、実際にヘリウムを液化するためには、熱交換器 (heat exchanger) と呼ばれる 2 種類の温度の異なる流体間で熱のやりとりをする装置や膨張機 (expander, expansion engine) と呼ばれる圧縮気体を膨張させながら内部エネルギーを外部に取出す装置を用いて、実現可能な圧力まで圧縮して液化を行う。

4.2. ジュール・トムソン効果

日常的な経験として、圧縮した気体を大気中に放出すると (例えば、殺虫剤や制汗剤のスプレー)、放出された気体と圧縮した気体が入っていた容器が冷えることを知っている。これは、日常的には、小さい穴や多孔質物質を通して気体を断熱的に膨張させると、気体の温度が下がることが多いからである。この現象は「ジュール・トムソン効

果」(Joule-Thomson effect) として知られている。圧縮された気体が細孔を通して自由膨張をする熱力学的過程は膨張の前後でエンタルピー (enthalpy) が変化しないため、等エンタルピー膨張と呼ばれる。T-s 線図上では、等エンタルピー線 (isenthalp) に沿った変化で表される。

理想気体の場合には、等エンタルピー膨張によって温度は変化しない。したがって、ジュール・トムソン効果は理想気体と実在気体との違いが温度変化として出現したものである。ジュール・トムソン効果によって、実在気体の膨張前後で温度が変化するが、必ずしも膨張後に温度が下がるわけではない。物質の種類や膨張前の温度によっては、膨張後に温度が上がる場合もある。エンタルピーが一定の下での圧力変化に対する温度変化率をジュール・トムソン係数 (Joule-Thomson coefficient) と呼ぶ。この係数が正の場合には、膨張後に温度が上がり、負の場合には温度が下がる。ジュール・トムソン効果によって温度が上がる場合と下がる場合の境界の温度、すなわち、ジュール・トムソン係数が 0 になる温度を「逆転温度」(inversion temperature) と呼ぶ。Fig. 18 に示すように、横軸に温度、縦軸に圧力を取ると、逆転温度の圧力依存性は曲線で表され、この曲線を「逆転曲線」(inversion curve) と呼ぶ。図中ではジュール・トムソン係数を μ で表している。この曲線の内側 ($\mu > 0$) の領域では、等エンタルピー膨張によって温度が下がり、外の領域 ($\mu < 0$)

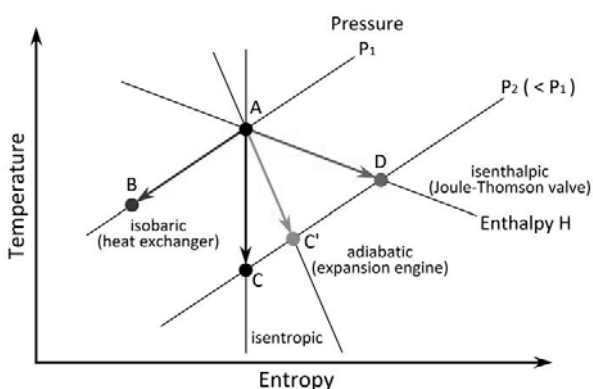


Fig. 16 様々な熱力学的変化[4]

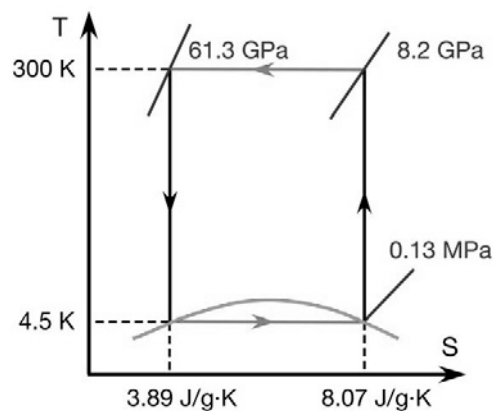


Fig. 17 カルノーサイクルによるヘリウムの液化[4]

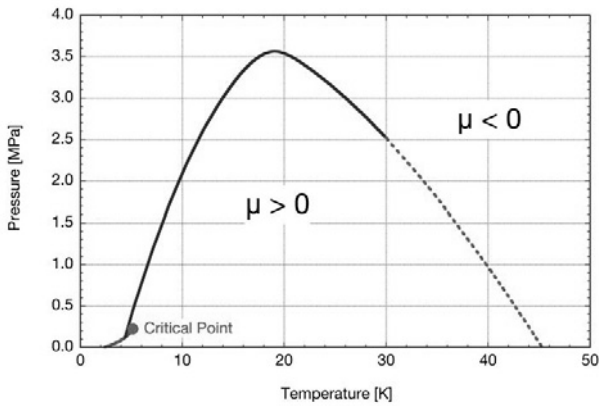


Fig. 18 逆転曲線

では、逆に、等エンタルピー膨張によって温度が上がる。ヘリウムは、室温ではこの逆転曲線の外側の領域に対応するので、等エンタルピー膨張で温度を下げることはできない。したがって、ジュール・トムソン効果によってヘリウムの温度を下げるためには、その他の手段でヘリウム気体の温度を逆転温度以下に冷却する必要がある。

4.3. ヘリウムの液化

ヘリウムの液化サイクルで、一番構造が簡単なものは、ジュール・トムソン・サイクル (Joule-Thomson cycle) またはリンデ・サイクル (Linde cycle) で、Fig. 19 に示すように、ヘリウム気体を圧縮するための圧縮機と熱交換器、等エンタルピー膨張を行うためのジュール・トムソン弁または J-T 弁 (Joule-Thomson valve; J-T valve) のみで成り立っている。Fig. 20 には、このサイクルの T-s 線図を示してある。図中の番号は、Fig. 19 の番号に対応している。実在する圧縮

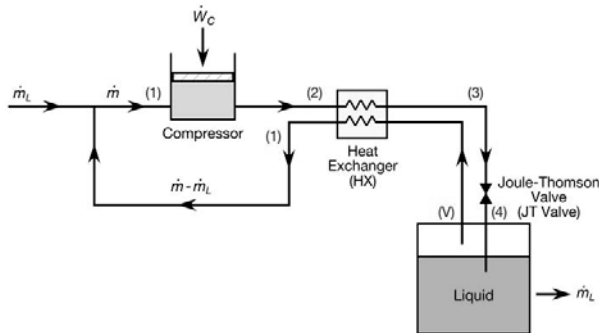


Fig. 19 ジュール・トムソン (リンデ)・サイクル [5]

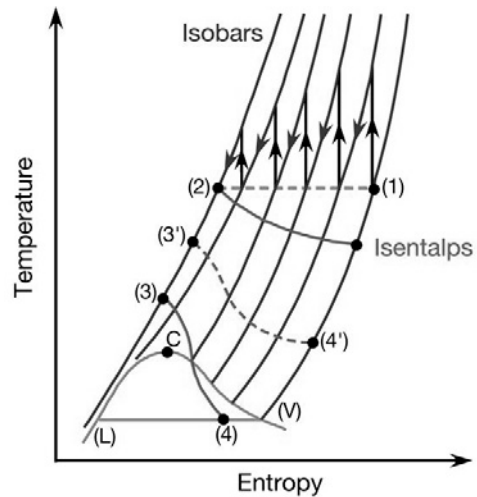


Fig. 20 ジュール・トムソン (リンデ)・サイクルの T-s 線図 [5]

機で等温圧縮を行うのは不可能であるので、実際の圧縮は何回かに分けて少しずつ圧縮し、圧縮した気体を冷却することを繰り返して、理想的な等温圧縮に近づけている。

1 台の熱交換器で、圧縮したヘリウム気体をヘリウムの逆転温度以下まで冷却するのは難しいので、実際のヘリウム液化冷凍機では、Fig. 21 のように、熱交換器をいくつか直列に配置して、できるだけ熱交換効率を向上させ、また、圧縮したヘリウム気体の温度を下げるために膨張機を導入して、液化の効率を向上させたクロード・サイクル (Claude cycle) などが考案されている。クロード・サイクルの T-s 線図を Fig. 22 に示す。もちろん、実際のヘリウム液化冷凍機では、効率を向上させるために、膨張機も 1 台だけではなく、

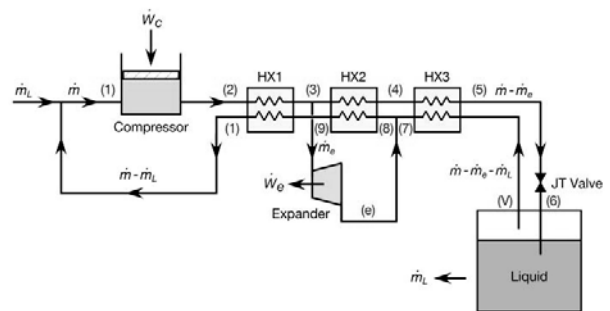


Fig. 21 クロード・サイクル [5]

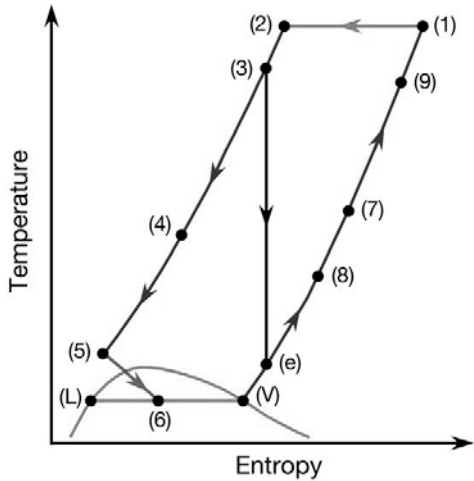


Fig. 22 クロード・サイクルの T-s 線図 [5]

複数台導入したり、圧縮機で圧縮したヘリウム気体を最初に液体窒素で冷却するなどの、様々な改良が行われている。

4.4. トランスファーライン

液化したヘリウムや液体窒素をクライオモジュールに供給するためには、クライオモジュールまでの途中の配管内でできるだけ外部からの侵入熱による蒸発を防がなければならない。そのためには、クライオモジュールと同じように、3つのモードによる伝熱を減らす構造を持った特別な配管が必要となる。この低温流体用の配管を「トランスファーライン」(transfer line)と呼ぶ。Fig. 23 に液体ヘリウムと液体窒素を1本の多重配管で供給するトランスファーラインの断面の一例

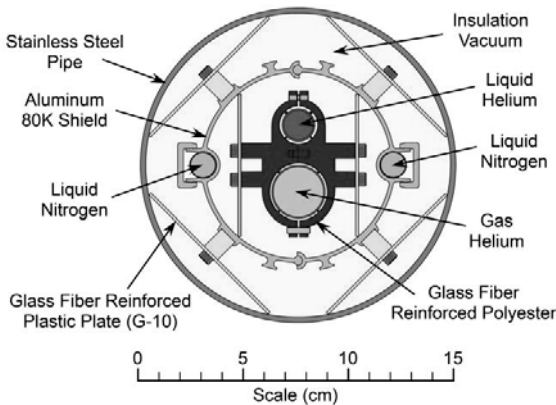


Fig. 23 多重管トランスファーライン

を示す。トランスファーライン内は断熱のために真空中に保たれている。液体ヘリウムや液体窒素が流れる内部の配管は薄肉になっており、熱伝導による伝熱面積を減らしている。また、内部の配管の位置を保持するための支持部品は、ガラス繊維強化プラスチックなどの熱伝導率の低い材料を用いている。さらに、80 Kの熱放射遮へいを採用し、熱放射遮へいの冷却には液体窒素を用いている。

5. 超流動ヘリウム

5.1. ヘリウムの相図

ヘリウムの相図(状態図)を Fig. 24 に示す。ヘリウムが通常の物質と異なる点は、

- 0 Kでも 2.5 MPa 以下の圧力では固相にならない
- 液相が 2 種類ある
- 固相・液相・気相の三重点が存在しない

である。

高温側の液相は他の物質の液相と同じように粘性を持つ液体で、通常、液体ヘリウムといえば、この相を指す。もう1つの液相と区別する場合には「He I」と表記する。低温側の液相は「超流動ヘリウム」(superfluid helium)と呼ばれ、「He II」と表記する。これら2つの液相の境界線を「ラムダ線」(λ -line)と呼び、ラムダ線と飽和蒸気圧曲線の交点を「(下の)ラムダ点」((lower) λ -point)と呼ぶ。融解曲線との交点もあり、「上のラムダ

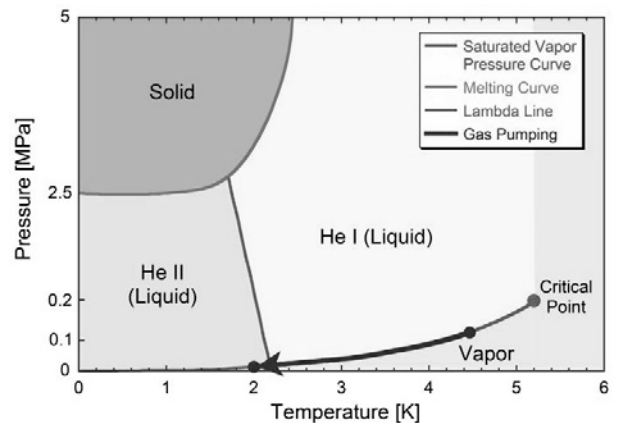


Fig. 24 ヘリウムの相図 (状態図)

点」と呼ばれるが、通常、「ラムダ点」といえば「下のラムダ点」を意味する。2つの液相も別な相であると定義すれば、上下それぞれのラムダ点も広義の意味での三重点であり、この場合は、ヘリウムには2つの三重点が存在することになる。

5.2. 超流動ヘリウムの性質

5.2.1. 超流動性

超流動ヘリウムの特異な性質の1つは、超流動ヘリウムという名前が示すように、通常の流体ではその粘性のために流ることができないような微小な穴や隙間でも流ることができることである。これを「超流動性」(superfluidity)と呼ぶ。ヘリウムの超流動性のために、ヘリウム自体が固体面に形成した吸着膜(数原子分の厚さ)の中でも流ることができる。これを膜流れ(film flow)と呼び、超流動ヘリウムが接している固体面はもちろんのこと、液面近くの固体面でも、この膜流れによって液体に接している場合と同じ熱伝達を行うことができる。

一方、この超流動性によって、室温や通常の液体ヘリウム温度では漏れていなかった微小な空間でも、超流動ヘリウムになった途端に漏れ始めることがある。これを「スーパーリーク」(superleak)と呼ぶ。超流動ヘリウム温度にならなければ漏れが見つからないため、超流動ヘリウムを扱う場合のみに生じる厄介な問題の1つである。

5.2.2. 超熱伝導

超伝導高周波加速空洞の冷却に超流動ヘリウムが用いられる理由の1つに、超熱伝導(super thermal conductivity)がある。超流動ヘリウムの見かけの熱伝導率は銅の100倍以上であり、局所的に発熱があっても直ぐに熱が拡散してしまうため、核沸騰(nuclear boiling)や膜沸騰(film boiling)などの局所的な気化は起こらない。He IからHe IIへの相転移を観察していると、He Iでは容器内面で核沸騰が起こり、液体内に気泡が見られるが、He IIへ転移した途端に核沸騰が消滅

し、液相の存在や気液界面の位置が分からなくなるほどHe IIは静かな状態となる。

超伝導高周波加速空洞からの発熱は、二相供給配管内の気液界面での蒸発によってのみ除去され、最終的にヘリウム冷却システムへの熱負荷となる。超熱伝導のために、空洞のヘリウム容器内では沸騰を起こさないで、ヘリウム容器内にはヘリウムの気相が存在せず、超流動ヘリウムのみとなる。

6. 超流動ヘリウム冷却システム

6.1. 超流動ヘリウムの連続生成

前節で超流動ヘリウムを減圧することによって生成させることを述べたが、リニアコライダーの運転は長期間に亘って連続して行われる。したがって、超伝導高周波加速空洞の冷却も連続して行う必要がある。

超流動ヘリウムの連続生成は、Fig. 25に示すような機器を用いて実現することができる。He Iの温度を熱交換器によって下げた後、ジュール・トムソン弁に供給する。通常のヘリウムの液化と同様に、ジュール・トムソン弁による等エンタルピー膨張によってHe Iの一部は超流動ヘリウムに変換され、残りはその温度の気体になる。ジュール・トムソン弁下流側の温度は、真空ポンプに

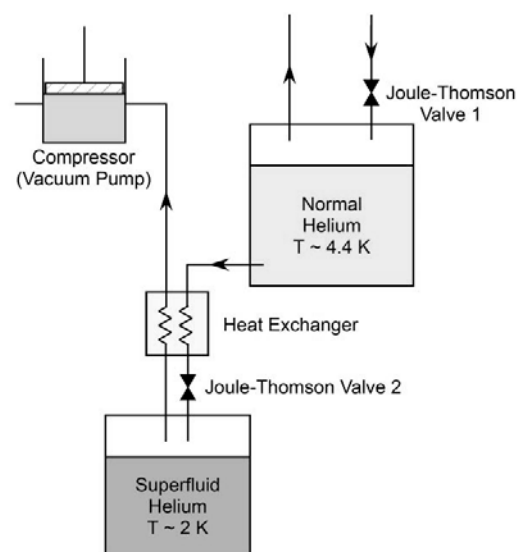


Fig. 25 超流動ヘリウムの連続生成[5]

よって減圧している圧力によって一意的に決まる。

6.2. STF 棟

高エネルギー加速器研究機構では、リニアコライダー用の超伝導高周波加速空洞や高周波源、超流動ヘリウム冷却システムの研究開発を超伝導リニアック試験施設棟 (Superconducting Radio Frequency Test Facility; STF) で行っている。

STF 棟で超伝導高周波加速空洞を冷却するための 2 K ヘリウム冷却システムの概要を Fig. 26 に示す。通常のヘリウム液化冷凍機で 4.4 K の He I を生成し、2 K ヘリウム冷凍機へ供給する。2 K ヘリウム冷凍機では、減圧と熱交換器およびジュール・トムソン弁によって 2 K の超流動ヘリウムを連続生成し、He I および液体窒素と共にクライオモジュールへ供給する。クライオモジュール

ルの 80 K 熱放射遮へいは液体窒素で冷却し、蒸発した窒素ガスはトランスファーラインを通して地上部へ送られ、大気に放出する。5 K 熱放射遮へいは He I で冷却し、蒸発した冷たいヘリウムガスは温度が上がらないようにトランスファーラインを通して地上のヘリウム液化冷凍機に戻し、熱交換器によってその寒冷を回収する。He II から蒸発したヘリウムガスは、クライオモジュール内のガス回収パイプおよび 2 K ヘリウム冷凍機の熱交換器を通り、ヘリウムガス減圧装置 (真空ポンプ) で大気圧まで圧縮される。

2014 年 9 月現在の STF 棟の配置を Fig. 27 に示す。キャプチャー空洞と呼ばれる超伝導高周波加速空洞 2 台が入ったクライオモジュールと、ILC の B 型クライオモジュールと同仕様のクライオモジュール CM-1 (空洞 8 台および超伝導四極電磁石 1 台) および空洞が 4 台が入ったクライオ

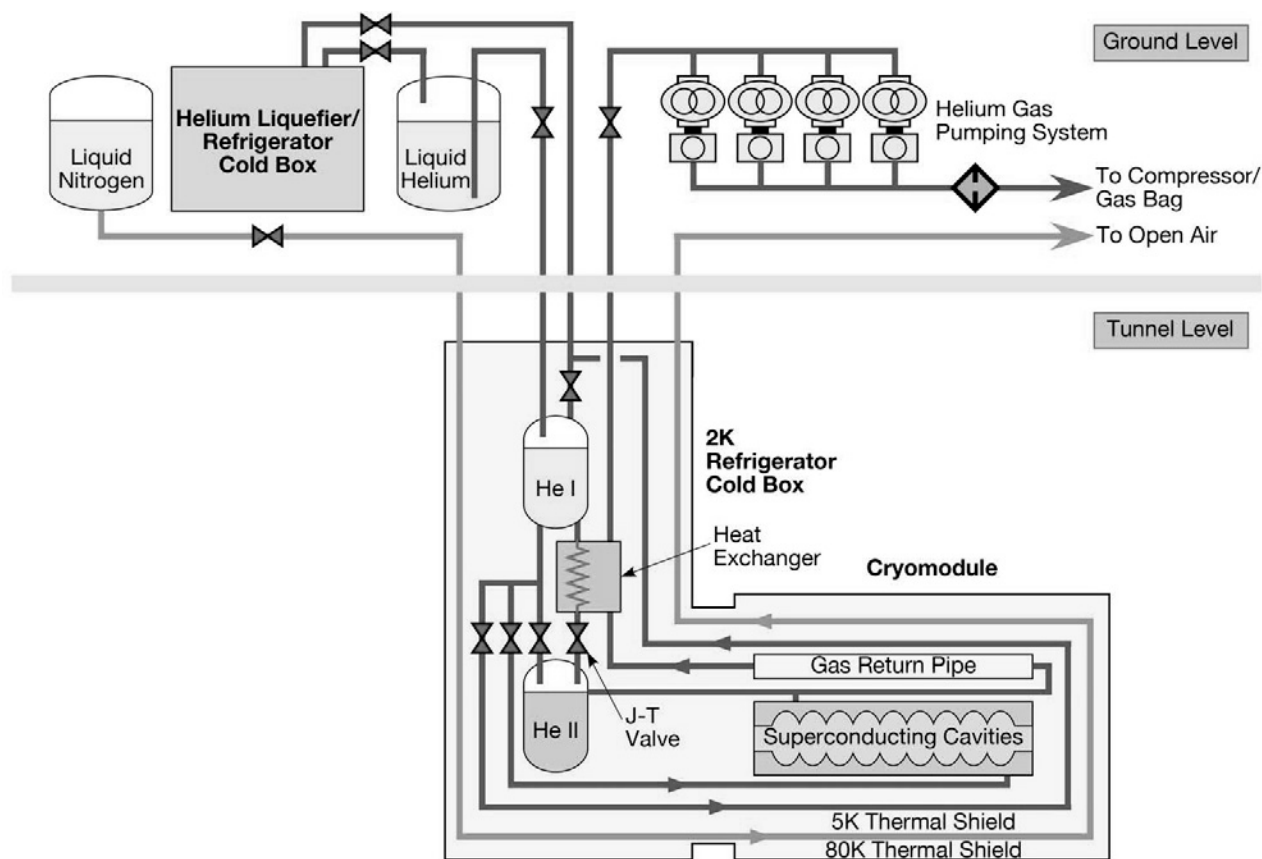


Fig. 26 STF 棟 2K ヘリウム冷却システム概要

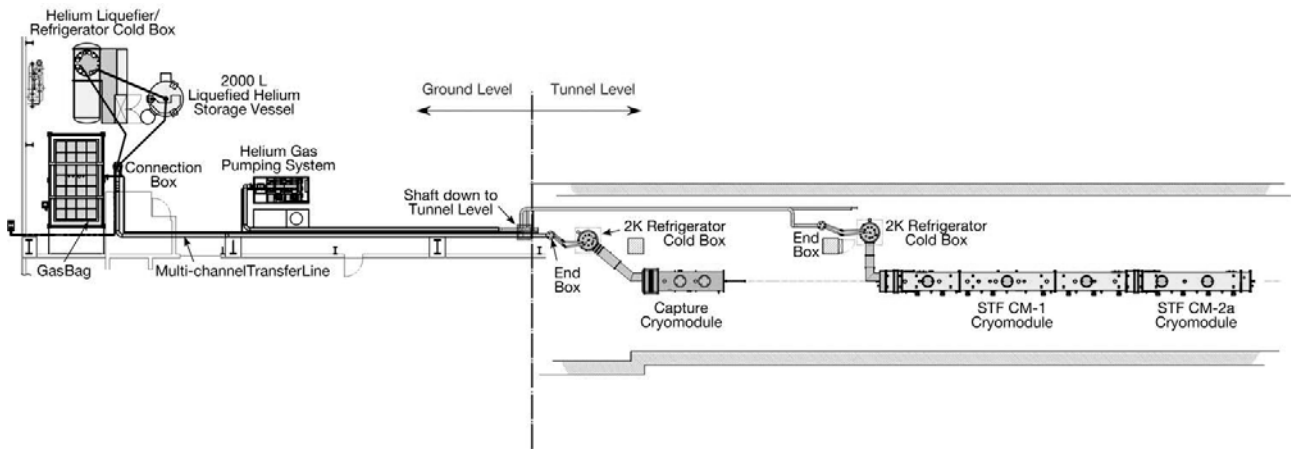


Fig. 27 STF 棟配置図

モジュール CM-2a が設置されている。クライオモジュール CM-1 と CM-2a は連結されており、2 K ヘリウム冷凍機 1 台でこの 2 つのクライオモジュールを冷却する。地上部にはヘリウム液化冷凍機が設置されている。この液化冷凍機が単位時間

当たり生成できる液体ヘリウムの量（液化率）は約 250 L/h である。また、ある温度で吸収できる熱負荷（冷凍能力）は 4.4 K で約 600 W である。生成した液体ヘリウムは、2000 L の液化ヘリウム貯槽に一旦溜めておく。また、液化窒素貯槽やへ

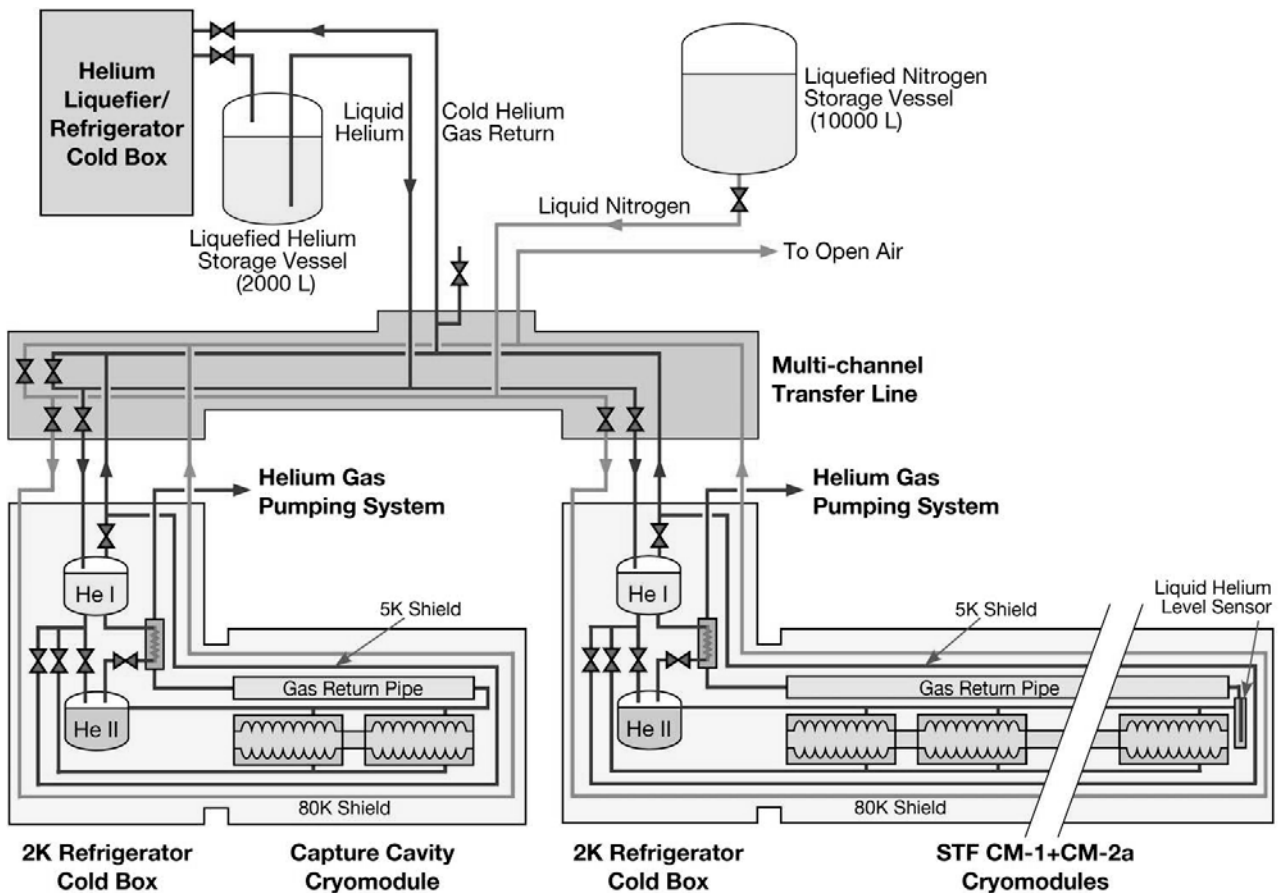


Fig. 28 STF 棟ヘリウム冷却システムフロー図

リウム圧縮機なども地上部に設置されている。一方、クライオモジュールや2 Kヘリウム冷凍機は地下トンネル内に設置されている。2 Kヘリウム冷凍機には、地上部から高性能トランスファーラインを通してHe Iと液体窒素を供給し、熱交換器とジュール・トムソン弁によって2 Kの超流動ヘリウムを生成する。ここで生成した超流動ヘリウムは各クライオモジュールに供給される。STF棟のヘリウム冷却システムの概要をFig. 28に示す。2 Kヘリウム冷凍機とクライオモジュールの接続にも、超流動ヘリウムの蒸発を抑えたトランスファーラインが用いられている。Fig. 29にSTF棟で採用されている接続部のトランスファーラインの断面を示す。基本的な構造はクライオモジュールと同じである。

2 Kでの冷凍能力は、実質的にはHe Iを減圧する真空ポンプの排気能力で決まる。STF棟では、2 Kでの熱負荷が比較的小さいため、ヘリウムガス減圧装置として、低圧で排気速度の大きいメカニカルブースターポンプと、メカニカルブースターポンプの背圧ポンプとして油回転真空ポンプを組み合わせたものを使用している。超伝導高周波加速空洞やクライオモジュールの数が増えて、冷却システムへの2 Kでの熱負荷が大きくなる場合には、これらのポンプの数を増やすことで対応することができる。真空ポンプの油をヘリウム圧

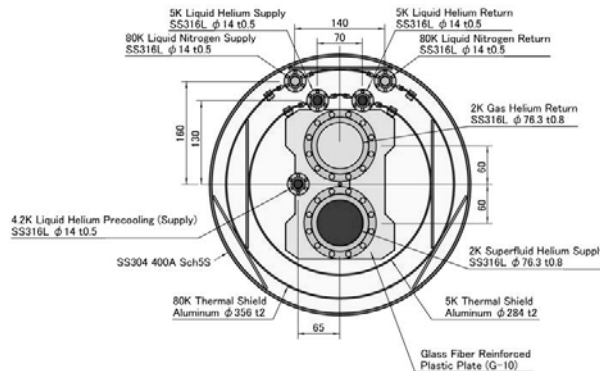


Fig. 29 STF 接続トランスファーライン断面

縮機の油と同じものにすれば、ポンプから排気されたヘリウムガスを直接ヘリウム液化冷凍機のヘリウム圧縮機へ戻すことができ、効率よく再液化することができる。

6.3. 超流動ヘリウム冷却システムの大型化

ILCのTDRでは、使用する超伝導高周波加速空洞の数は約15000台、クライオモジュールとしては約1750台になる。山岳地帯におけるヘリウム冷却システムに要求される仕様(Table 1)では、ヘリウム冷却システム1基当たりの冷凍能力は2 Kで2.3 kW、4.5 Kで19 kWである。表中で、2つの数値が並記されているものは、右側の数値が山岳地帯の場合に対応する。したがって、2 Kで2.3 kWもの熱をメカニカルブースターポンプで

Table 1 ILCの熱負荷とヘリウム冷却システムの仕様[2]

		40–80 K	5–8 K	2 K
Predicted module static heat load	(W/module)	75.04	10.82	1.32
Predicted module dynamic heat load	(W/module)	58.80	5.05	9.79
Number of cryomodules per cryogenic unit		156 / 189	156 / 189	156 / 189
Non-module heat load per cryo unit	(kW)	0.7 / 1.1	0.14 / 0.22	0.14 / 0.22
Total predicted heat per cryogenic unit	(kW)	21.58 / 26.40	2.61 / 3.22	1.87 / 2.32
Efficiency (fraction Carnot)		0.28	0.24	0.22
Efficiency in Watts/Watt	(W/W)	16.45	197.94	702.98
Overall net cryogenic capacity multiplier		1.54	1.54	1.54
Heat load per cryogenic unit including multiplier	(kW)	33.23 / 40.65	4.03 / 4.96	2.88 / 3.57
Installed power	(kW)	547/669	797/981	2028 / 2511
Installed 4.5 K equiv	(kW)	2.50 / 3.05	3.64 / 4.48	9.26 / 11.47
Percent of total power at each level		0.16	0.24	0.60
Total operating power for one cryo unit based on predicted heat (MW)			2.63 / 3.24	
Total installed power for one cryo unit (MW)			3.37 / 4.16	
Total installed 4.5 K equivalent power for one cryo unit (kW)			15.40 / 19.01	

取り去るためには、膨大な数のポンプが必要となり、必要な電力や設置場所、費用を考えると、不可能ではないが非現実的である。ある程度以上の冷凍能力が必要となる場合には、Fig. 30のような「低温圧縮機」(cold compressor)を導入する。これは低温・低圧のヘリウムガスを低温で圧縮し、熱交換器での熱交換効率を向上させると共に、室温部での圧縮機(真空ポンプ)を減らすことができる。Fig. 31には、超流動ヘリウム冷却システムでの圧縮機の構成例を示す。また、Fig. 32には「欧

州原子核研究機構」(European Organization for Nuclear Research; CERN)の「大型ハドロン衝突型加速器」(Large Hadron Collider; LHC)で使われている低温圧縮機の写真を示す。LHCの超流動ヘリウム冷却システムの規模がちょうどILCの冷却システムとほぼ同じため、Fig. 33に示すLHCの冷却システムと同じものがILCでも建設されることになる。

7. 低温での安全 [13]

7.1. 凍傷

クライオジェニクスに関係した人体への障害の1つが凍傷(frostbite)である。凍ったものや低温の物体に触れた皮膚が損傷し、最悪の場合は、その部分が壊死する。ヘリウム冷却システムでは、液体ヘリウムや液体窒素用の貯槽や配管は断熱されており、通常では凍傷を起こすような低温部分は露出しないようになっている。しかし、ヘリウム冷却システムやクライオモジュールの異常で安全装置(安全弁や破裂弁)が作動したり、構造上どうしても断熱が十分にできない配管な

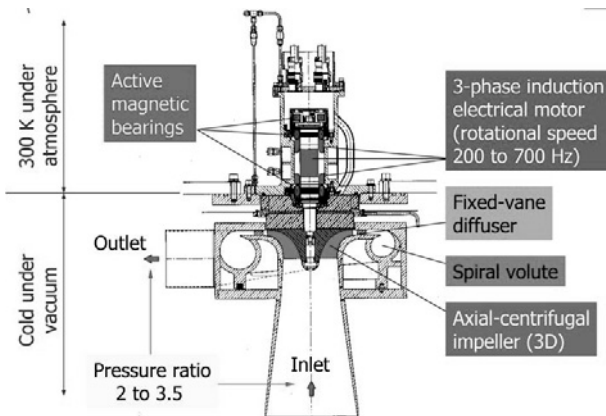


Fig. 30 低温圧縮機の概略[6]

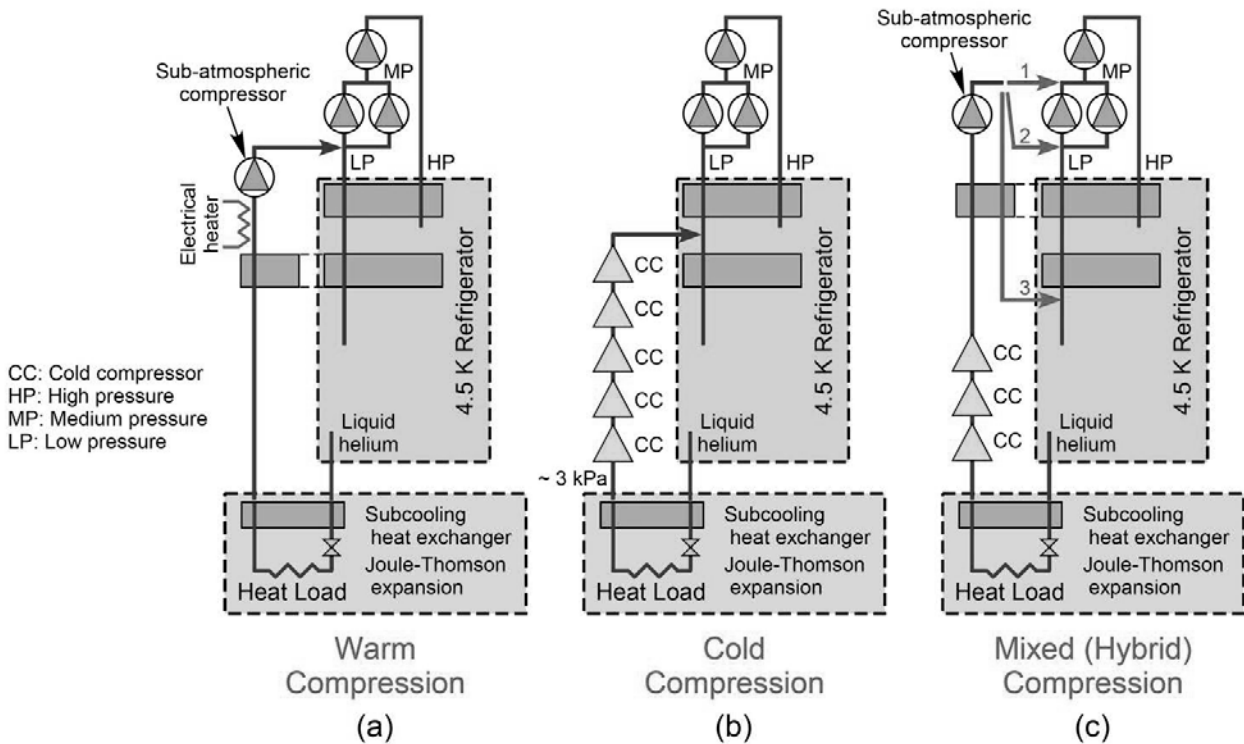


Fig. 31 超流動ヘリウム冷却システム圧縮機[7]

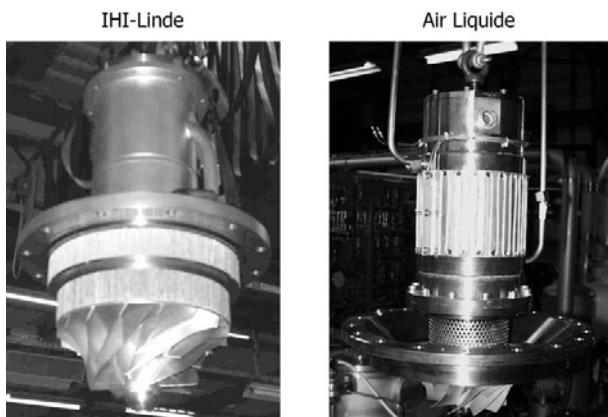
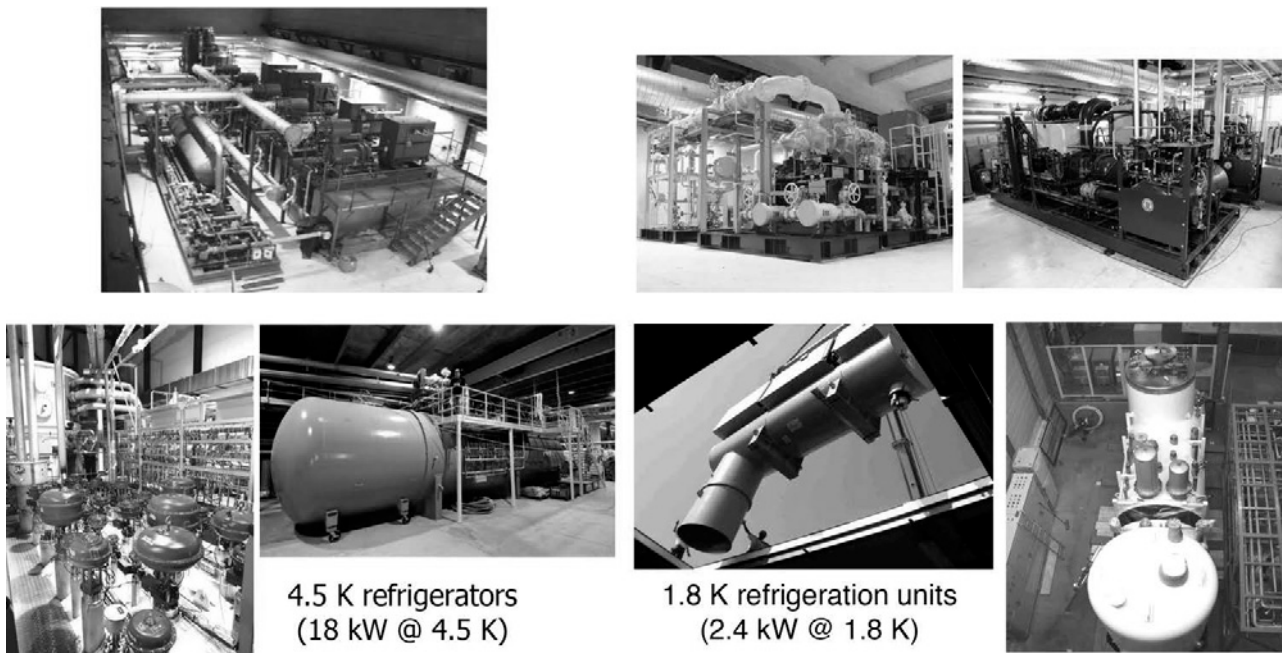


Fig. 32 CERN-LHC の低温圧縮機[6]

どでは、凍傷を起こす可能性がある。特に汗などで皮膚の表面がぬれている場合には、皮膚と低温の固体面が凍り付き、身体を低温部分から離すことが困難になる。液体ヘリウムや液体窒素をあつかう場合や、低温になっている機器に近づく場合には皮製の手袋を着用する。軍手など、編んだ繊維できているものは、逆に低温流体が毛細管現象で手袋の中に染み込んでくるため、凍傷になる可能性が非常に大きくなるので、使用してはならない。

7.2. 酸素欠乏（窒息）

クライオジェニクスに関わる傷害で、非常に危険なものが酸素欠乏（anoxia）による窒息（asphyxiation, suffocation）である。窒素や酸素、ヘリウムなど、多くの気体は無色透明であるので、窒息の危険を認識しづらい上、窒息によって、脳に障害を起こしたり、最悪の場合は死に至る。加速器トンネルなど閉じられた空間内で液体ヘリウムや液体窒素が大量に蒸発すると、大気中の酸素濃度が低下する。酸素濃度（通常の空気では約 21 %）の低い気体を吸い込むと、体内の酸素が肺から体外へ吸い出され、一方、呼吸によって酸素をより多く取り込もうとするため、低酸素濃度の気体をさらに肺の中へ吸い込むことになる。これによって、極めて短時間で窒息を起こす。また、酸素欠乏によって意識を失った人間を安全な場所まで引きずり出すのは意外と大変であるので、酸素欠乏症になった人を救出する場合には、二次被害にならないように、呼吸器具など十分な装備が必要となる。ちなみに、化学兵器や伝染病の対処の際に使われるガスマスクは単にフィルターがついているだけなので、酸素欠乏の環境では役に立たない。



4.5 K refrigerators
(18 kW @ 4.5 K)

1.8 K refrigeration units
(2.4 kW @ 1.8 K)

Fig. 33 CERN-LHC のヘリウム冷却システム[6]

ヘリウム冷却システムやクライオモジュールの安全装置が作動して冷たいガスが大気中に放出されたり、あるいは配管の継ぎ目やフランジから低温の液体やガスが漏れている場合、それがヘリウムである場合は、液体ヘリウムは直ぐに蒸発し、たとえ温度が低くても周りの空気よりは軽いいため、空間内の上部に滞留する。一方、窒素の場合には、液体あるいは低温のガスの場合は空気よりは重く、床の上に滞留する。したがって、ヘリウムの漏れの場合には姿勢を低くすれば窒息せずに避難することができるが、窒素の場合は姿勢を低くすることはむしろ危険である。

8. まとめ

リニアコライダの超伝導高周波加速空洞を冷却するためのクライオジェニクスとクライオモジュールについて、基礎的な内容を述べた。また、ILC に向けた研究開発の一環として、KEK の STF 棟に設置されている超流動ヘリウム冷却システムおよびクライオモジュールを紹介し、ILC で建設されるヘリウム冷却システムの概要についても説明を行った。

リニアコライダ用のクライオジェニクスおよびクライオモジュールについて、主な仕様策定や概念設計は行われているが、特に低温圧縮機を採用した 2 K ヘリウム冷凍機に関しては、また詳細設計が行われていない。この講義を通して、リニアコライダのクライオジェニクスやクライオモジュールに興味を持つ人が増え、より性能の良いヘリウム冷却システムやクライオモジュールができるようになることを期待している。

参考文献

- [1] C. Pagani, “Current Cryomodules and Changes for ILC”, 2005 International Linear Collider Physics and Detector Workshop and Second ILC Accelerator Workshop, Snowmass, USA (2005)
- [2] The International Linear Collider, *Technical Design Report, Volume 3, Part II* (2013)
- [3] 田沼静一 編集:「実験物理学講座 15 低温」共立出版 (1974)
- [4] Ph. Lebrun, “An Introduction to Cryogenics”, CERN/AT 2007-1 (2007)

- [5] S. W. Van Sciver, *Helium Cryogenics*, Plenum Press (1986)
- [6] Ph. Lebrun, “Cryogenic refrigeration for the LHC”, Magnet Technology for Fusion Training School, Cadarache, France (2009)
- [7] Ph. Lebrun and L. Taviani, “Technology of superfluid helium”, European Graduate Course in Cryogenics, Helium Week, Geneva, Switzerland (2010)

参考図書

低温工学全般についての参考書：

- [8] 小林俊一, 大塚洋一:「物理工学実験 7 低温技術 第 2 版」東京大学出版会 (1987)
- [9] 田沼静一 編集:「実験物理学講座 15 低温」共立出版 (1974)
- [10] 低温工学協会関西支部 訳:「低温工学ハンドブック」内田老鶴園新社 (1982)
- [11] 低温工学協会 編:「超伝導・低温工学ハンドブック」オーム社 (1993)
- [12] R. Barron, *Cryogenic System*, McGraw-Hill (1966)
- [13] B. A. Hands (Ed.), *Cryogenic Engineering*, Academic Press (1986)
- [14] Van Sciver, S. W., *Helium Cryogenics*, Plenum Press (1986)
- [15] Ph. Lebrun, “An Introduction to Cryogenics”, CERN/AT 2007-1 (2007)
- [16] U. Wagner, “Refrigeration”, CERN-2004-008 (2004) 295

超流動ヘリウムについての参考書：

- [17] S. J. Putterman, *Superfluid Hydrodynamics*, North-Holland (1974)
- [18] R. J. Donnelly, *Experimental Superfluidity*, University of Chicago Press (1967)
- [19] I. M. Khalatnikov, *An Introduction to the Theory of Superfluidity*, W. A. Benjamin (1965)
- [20] D. R. Tilley and J. Tilley, *Superfluidity and Superconductivity*, 2nd ed., Adam Hilger (1986)
- [21] F. London, 井口家成 訳:「超流体 II -超流体ヘリウム-」講談社 (1975)
- [22] 山田一雄, 大見哲巨 著:「新物理学シリーズ 28 超流動」培風館 (1995)

File: OH014_Cryogenics2.doc

Revision 2: 20140821