

GM冷凍機を使用した、トップロード式／ボトムロード式クライオスタット(違い・必要な装置)



左写真がGM冷凍機の冷却ヘッドです。

冷却ヘッドをクライオスタットに組み込みます。

1ST(ファースト)ステージ

この部分はおよそ40K程度に冷却されます。

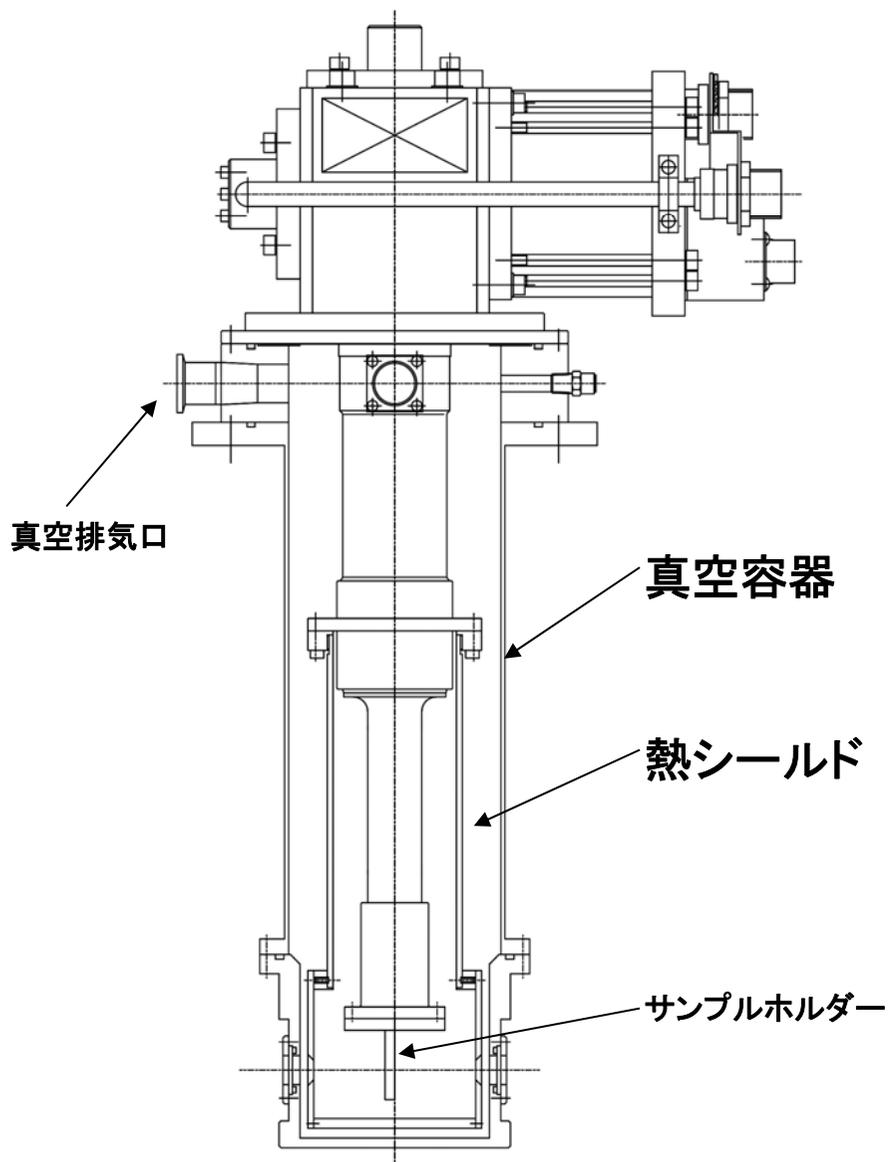
2ND(セカンド)ステージ

この部分が4.2K以下に冷却されます。

構築するクライオスタットの熱負荷によって冷却能力を選択します。

バリエーションとして、0.1W、0.4W、0.5W、1W、1.5Wなどがあります。

たとえば2NDステージにヒーターを取り付け、1Wのジュール熱を発生した時、4.2Kで温度を維持する場合、4.2K時/1Wの冷却能力があるとしています。



左図面が一般的なボトムロードクライオスタットの形状となります。
 (図面は光学実験用) サンプルを交換する場合、下側の真空容器を外しますので、ボトムロード式と呼称しています。

冷凍機ヘッドには真空容器、1STステージには熱シールド(銅またはアルミニウムが一般的)

2NDステージにはサンプルホルダー等が設置されます。

冷却装置は外部からの熱を遮断する構造になっています。

1. 固体熱伝導

クライオスタットを構築する材料は主に金属を使用しますが熱伝導率が悪いステンレスなどを使用します。

(冷却する部分は熱伝導率のよい無酸素銅などを使用)

2. ガスによる熱伝導

ガスによる熱伝導を遮断するため、一般的によく知られている魔法瓶と同じ様に真空断熱をします。

3. 熱放射

たき火などにあたっている場合、顔(露出している部分)が非常に熱く感じられる事があります。これは熱を電磁波で放射していて電磁波の振動エネルギーにより物体の分子が振動し熱を発する為です。

熱放射を防ぐ場合、高温側と低温側に間に遮蔽版を設置する事で、熱放射を小さくすることができます。左図の熱シールドがこれに相当します。

クライオスタットを真空排気する場合、真空排気装置を使用します。一般的に真空度を $1 * 10^{-2}$ Pa以下まで真空排気しますと、ガスによる熱伝導が無視出来るくらい小さくなります。そのため現在では広く普及しているターボ分子ポンプを使用して真空排気を行っています。

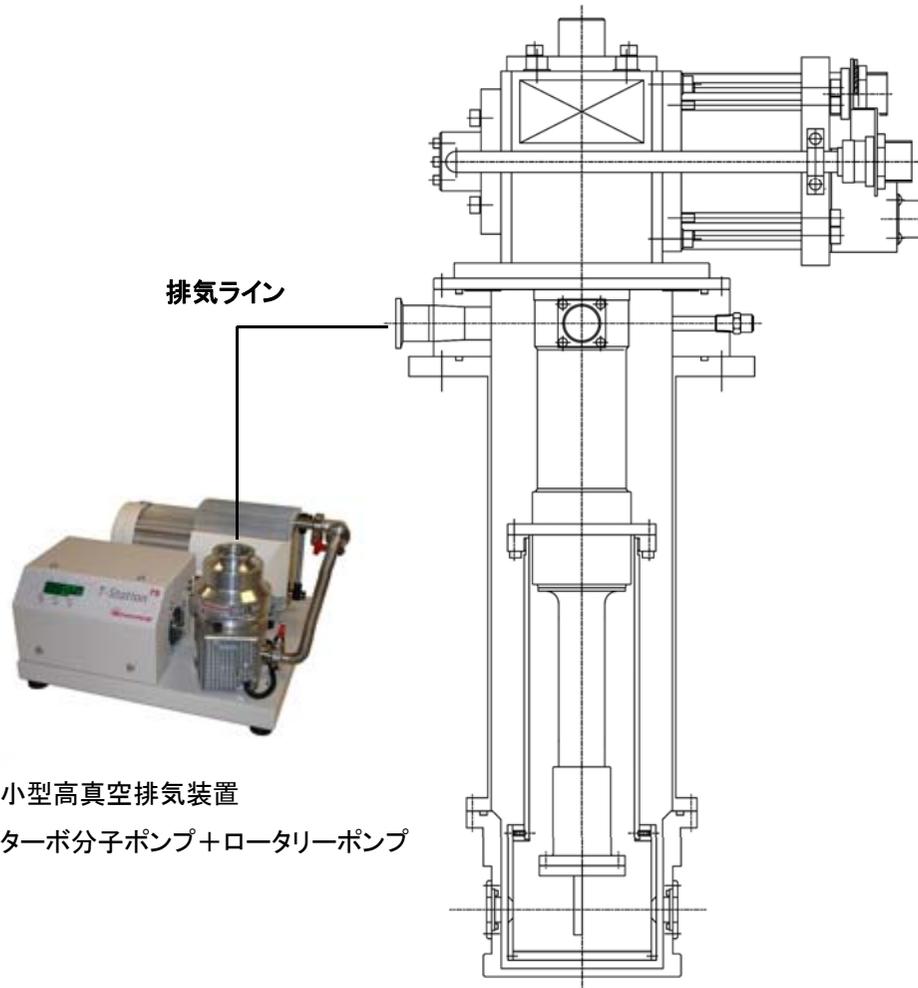
GM冷凍機は極低温になりますとガスをトラップするクライオポンプとして使用されています。

そのため暫定的に、ターボを使用しないでロータリーポンプ単体で初期排気を行い冷却をする場合もありますが、十分に水分等が除去されない場合があります。サンプルにコンタミとして付着する場合がありますので十分な真空断熱とピュワーな環境を生成するためターボ分子ポンプなどを使用した真空排気を推奨致しております。

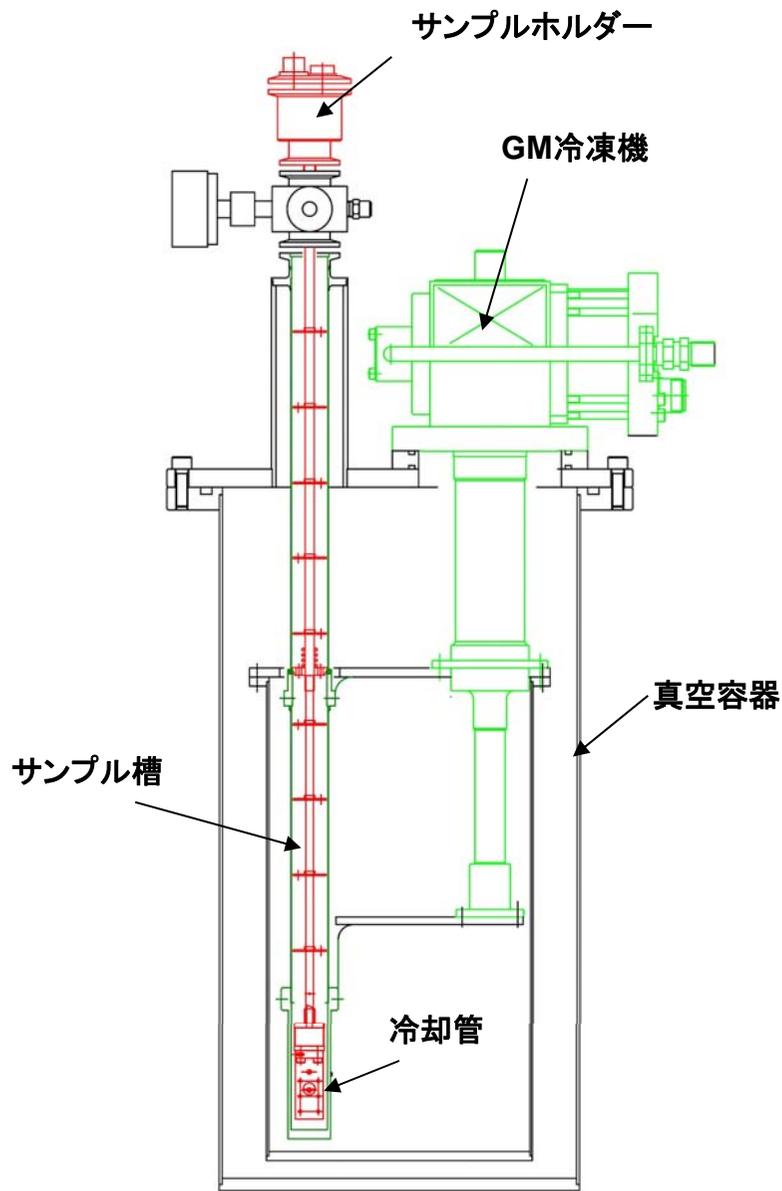
左写真の高真空排気装置はターボ分子ポンプとロータリーポンプが直結された小型システムです。

ロータリーポンプの排気速度が小さい為、容積の小さい真空容器などを排気する場合に用いられます。

ボトムロード式は構造がシンプルであるため、広く使用されていますが、サンプル交換時、**室温状態で真空を壊す(ブロー)必要があります。**



小型高真空排気装置
ターボ分子ポンプ+ロータリーポンプ



左図面が、トップロード式クライオスタットの形状となります。

GM冷凍機は冷却専用として使用され、真空槽とサンプル槽は、おのおの独立した空間となっています。

GM冷凍機の2NDステージはサンプル槽の冷却管に熱接触しています。

サンプル槽にはヘリウムガスをキャリアガスとして挿入しサンプルホルダーをガス伝導で冷却します。

サンプルの交換はクライオスタット上部のフランジを取り外し、引き抜く構造となっています。そのため、トップロード式と呼称しています。

また、ヘリウムガスを流しながらサンプルホルダーを冷凍機を可動させたまま交換する事も可能です。

(サンプルに水分が付着する場合がありますので、水分付着防止構造も可能)

ボトムロードの場合、サンプルホルダーが2NDステージに施工されていますので、最低到達温度は冷凍機の冷却能力に依存します。

トップロードの場合、冷却管が4.2K以下に冷却されると、キャリアガスとして注入された、ヘリウムガスが液化され冷却管の中(サンプルホルダーの回り)に溜まり始めます。ある一定時間経過後、上部からロータリーポンプなどを使用してサンプル槽を減圧しますと、蒸気圧曲線に沿って液体の温度が下がります。およそ温度は1.3~1.5K程度となりますが、液化量や排気装置の排気量によって保持時間・最低到達温度が変わります。

トップロード方式はサンプル交換をする場合、真空ブローさせる必要がなく液体ヘリウム減圧により1.5K程度の極低温を生成する事が可能ですがやや構造がボトムロードに比べて複雑になり、減圧用ポンプなども必要となります。

サンプル槽にヘリウムガスを注入する場合、ロータリーポンプなどを使用して、空気を一旦排気する作業が必要となります。空気を混入したまま冷却を開始しますと、サンプルに水分が付着したり、冷却される部分で水分が固化しサンプルホルダーが固まってしまう(抜けなくなる)事などがあります。空気をヘリウムガスに交換する作業をパージ作業と呼びますが通常、このパージ作業を2~3回程度繰り返します。そのため、前記しました直結型真空排気装置を併用しますと操作性が悪く、ロータリーポンプ単体を別途用意した方が、操作性が向上します。

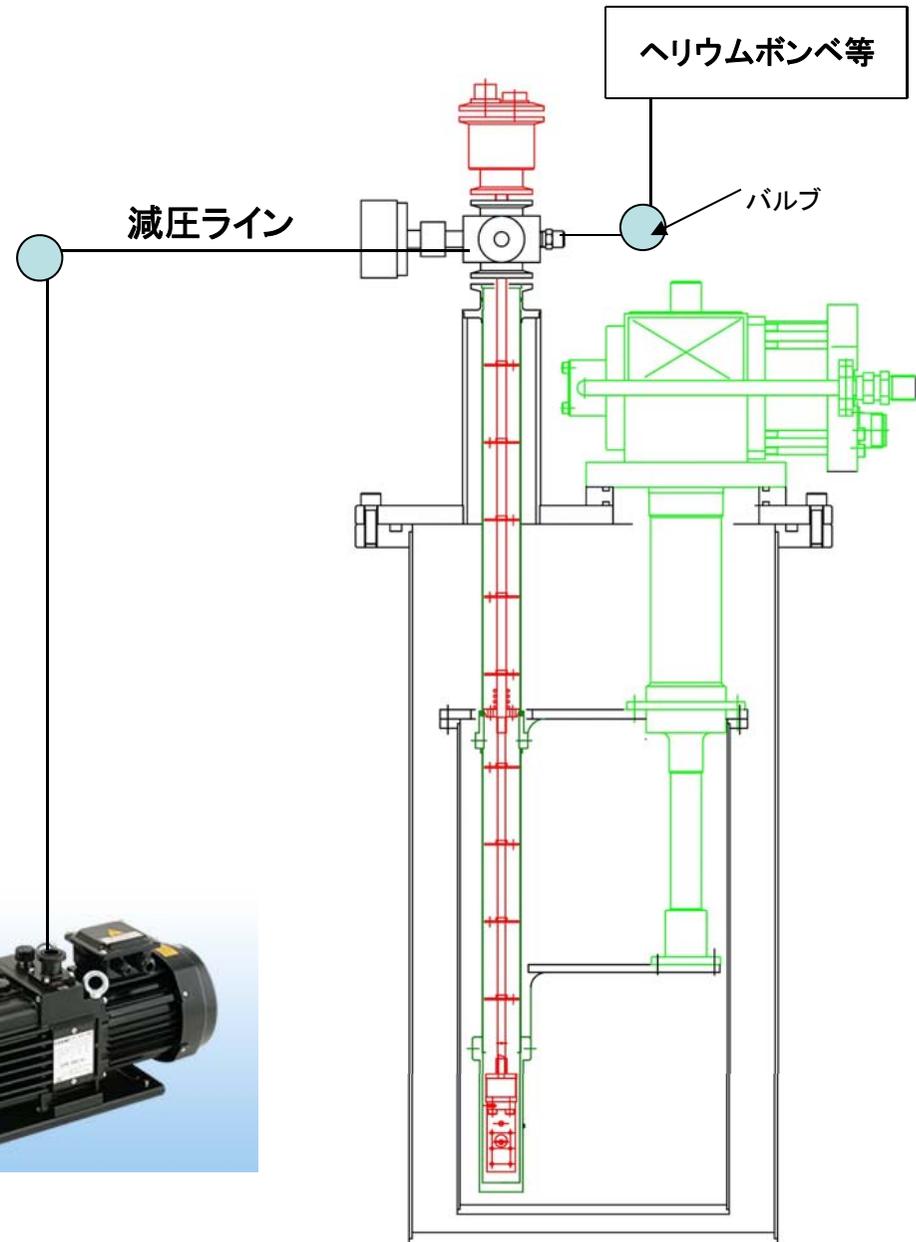
(直結型真空排気装置は通常ターボ分子ポンプとロータリーポンプが同時に起動するケースが多く、大気圧から排気を繰り返すパージ作業は直結型真空排気装置では操作が難しくなります。)

また、ヘリウムを減圧する場合、ロータリーポンプの排気量として150~200L/min以上が望ましく、(1.5K時の液体ヘリウムの蒸気圧は500Pa程度なのでロータリーポンプが適当。

到達真空度より排気量が重要です)

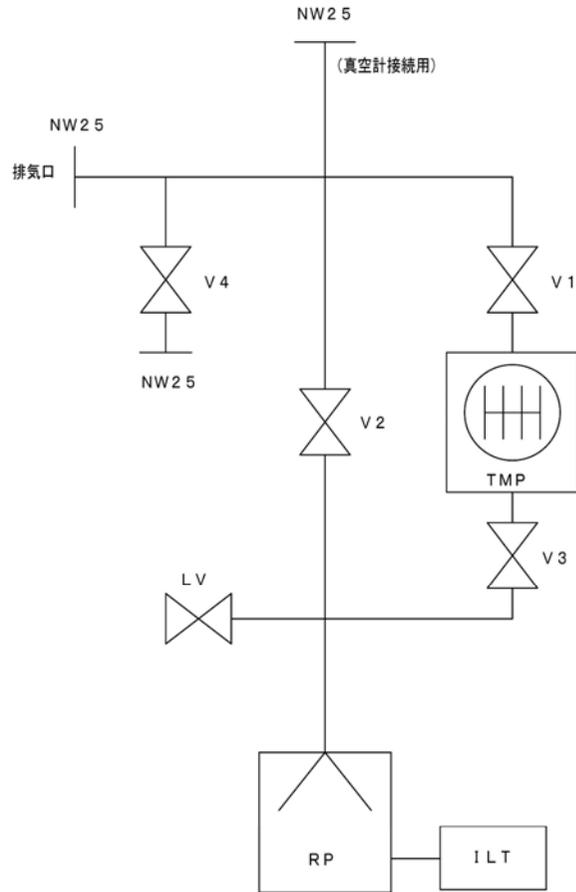
小型高真空排気装置のロータリーポンプでは十分に減圧が出来ず、ターボ分子ポンプも使用出来る真空度に達しません。

また、仮に起動しても規定回転数に上がらない場合、自動リークする機種もありますので、注意が必要です。





中型高真空排気装置
 (ロータリーポンプが比較的排気量の大きい物で構成されています。)

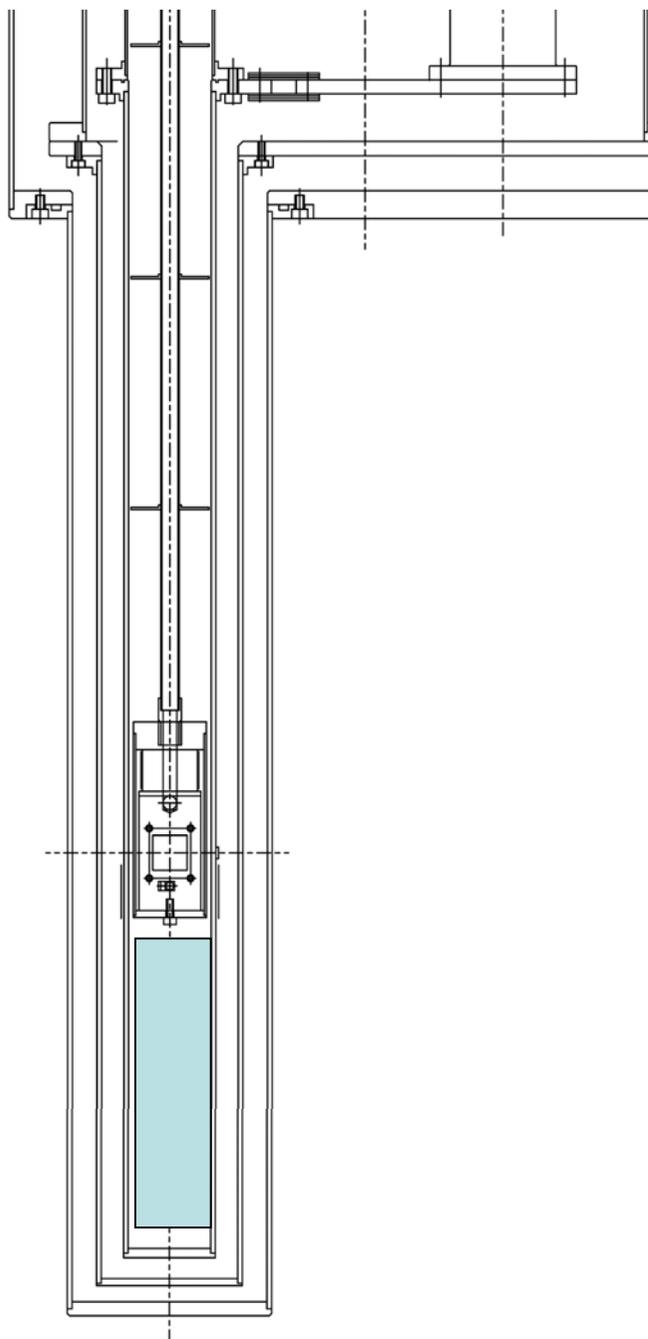


機種によってターボ分子ポンプを回転させたまま、真空槽を粗引き排気出来る様に配管された排気システムもあります。(左写真は弊社製排気システム)

左のブロック図のV1,V3を閉めた状態でV2を開け粗引きを行った後、V2を閉めV4からヘリウムガスを注入します。

このような、排気ラインを構築した排気システムを使用すれば、クライオスタットの真空排気、ヘリウムガスパージ液体ヘリウム減圧などを1台で操作する事が可能となります。

その他、真空計も必要となります。



1Kポットについて

サンプル槽容量を増やし、1.5K台の温度を長時間維持させる構造にすることも可能です。

(便宜的に1K台の液体ヘリウムをリザーブするため1Kポットと呼んでいます)

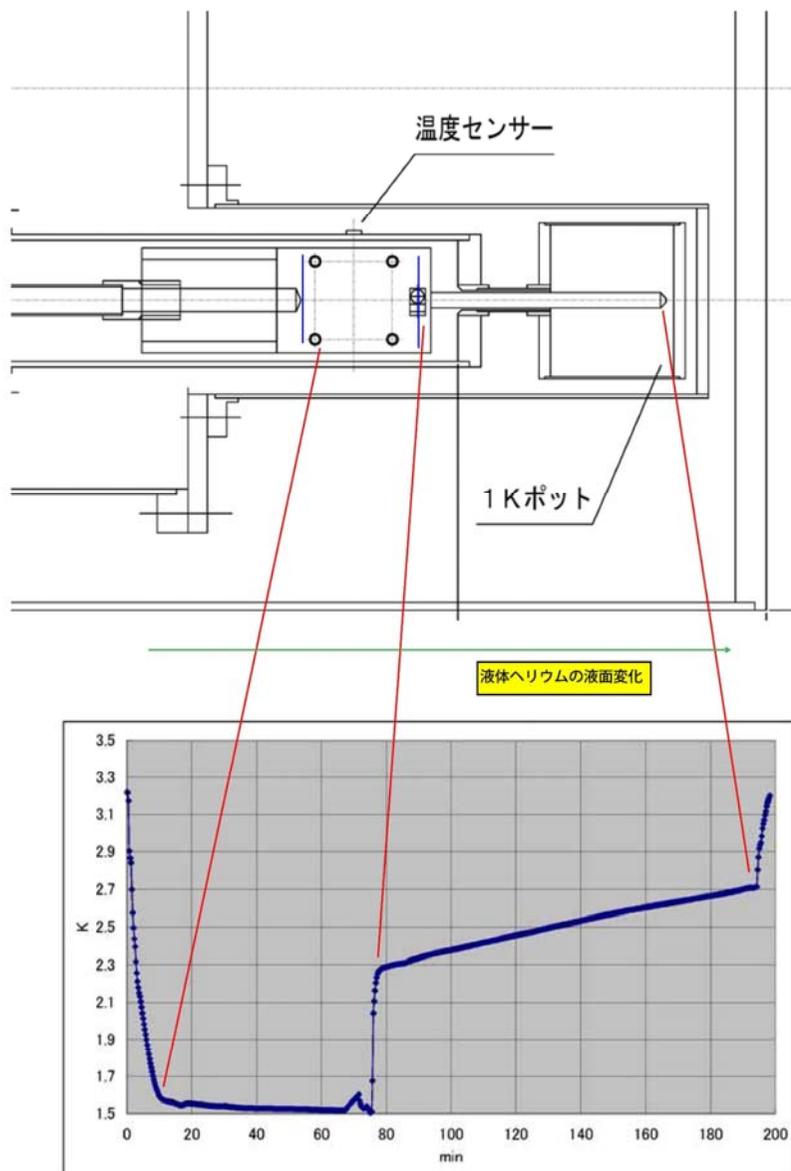
但し、冷却能力の小さいGM冷凍機を使用しますと液化させる時間が長く成りますので、ポット容量は実験時間に合わせる必要があります。

また、サンプルホルダーの温度をコントロールさせる場合、通常、テール部またはサンプルホルダーに施行したヒーターによって温度を上昇させますが、サンプルホルダーに液体ヘリウムが直浸している場合、ジュール熱によって、液体ヘリウムが蒸発してしまい、ホルダーの温度がなかなか上がりません。

(ヘリウムも消費します)そのため、1.5~3K程度の温度を変化させる場合、蒸気圧をコントロールするで、サンプルホルダーの温度を変化させる方法が一般的です。

(最も簡単な方法は排気口にバルブを施行し、バルブの開度で排気量を調整)

マスフローコントローラーなどを使用し自動的に温度をコントロールさせる事も可能ですが、有る程度の設備が必要と成ります。



参考

左図の様な構造にした場合、最低到達温度の保持時間が短くなりますが、少ない液化量で2.3K以上の保持時間を長くする構造とすることも可能です。

GM冷凍機単体の最低到達温度はトップロードクライオスタットの場合、約3.6~3.9K程度となります。(冷凍機によって異なります)
2.3K~4K程度の温度をターゲットにし、比較的長い実験を行う場合に適した構造となります。

液体4Heは減圧をしますと温度が下がりますが、2.17Kになると超流動状態に相転移を起こします。すると液体ヘリウムは重力に逆らい排気管の壁を伝わり昇って行きます。(フィルムフロー)

排気管の温度が2.17K以上の場所まで昇った時、超流動が壊れ液体が急激にガス化します。真空排気を続けても、この現象を繰り返す事になり、ロータリーポンプの排気量は一定の為、それ以上冷却する事が出来なくなります。

そこで、排気管を細くして、フィルムフローを少なくする事で、蒸発ガスが少なくなり、保持時間を稼ぐ事が出来ます。

(最低温度が犠牲になりますが...)

温度コントローラー(温度センサーを含む)



高真空排気装置(真空計を含む)



ヘリウムガス置換・減圧用ロータリーポンプ

(トップロードクライオスタット使用の場合)

必要な機器

GM冷凍機 (右コンプレッサー)



水冷仕様の場合は冷却水が必要