

超電導技術を支える冷却システム



いけだ かずや

池田 和也

浮上式鉄道技術研究部(低温システム 主任研究員)

はじめに

鉄道車両用主変圧器の巻線に、高温超電導線材を適用することによって、軽量化および効率向上を図る研究開発を行っています。

超電導状態の巻線に直流電流を流す場合は、巻線の抵抗は限りなく0となりますので、抵抗による熱は発生しません。しかし交流電流を流した場合には、磁場変動による超電導体自身に起因するヒステリシス損失等の交流損失による熱が発生します。そのため発生する熱を吸収するために冷却システムが必要となります。

冷却システムを構成する機器の中でも、代表格はなんといっても冷凍機です。冷凍機は超電導応用にはなくてはならない必須の機器であり、しかも鉄道車両に搭載させるようなものには、高い信頼性、優れたエネルギー効率、小型軽量化、使いやすさが求められます。

小型冷凍機はGMサイクルやスターリングサイクルによる冷凍機として、各種超電導応用に供与されていますが、最近では低温部に可動部を持たないことから、軽量、低振動、長寿命冷凍機としてパルス管冷凍方式が適用されるようになってきました¹⁾。

ここでは、冷却システム概要、冷凍機全般についての話、パルス管冷凍機を使用した冷却システム及びパルス管冷凍機の冷却原理について説明し、最後に高温超電導主変圧器 (HTS 主変圧器) に搭載する目的で開発を進めてきた、アクティブバッファ方式パルス管冷凍機について進捗状況を簡単に紹介します。

いろいろな冷却システム

物体を冷却するためには、冷却したい物体を冷却したい温度の環境下に置いておけばよいことになります。図1にいろいろな冷却システムを例として示します。超電導コイルを臨界温度以下に冷却するた

めには、臨界温度以下の冷媒に浸してやるのが最も簡単な方法で、このような冷却方法を浸漬(しんじ)冷却といいます。これは液体ヘリウムや液体窒素といった冷媒をバッチ式(1回の冷却毎に寒剤を注入する方法)に注いで、冷媒の蒸発潜熱によって熱を奪う方式です²⁾。冷凍機冷却による研究・開発が十分でなかったとき、宮崎実験線を走っていたリニアモーターカーの超電導コイルはこの方式で冷却していました。

次に、蒸発してガス化した冷媒を冷凍機によって再液化し、熱は超電導コイルの容器の外で除去する、閉サイクルの方式があります。これを再凝縮冷却といいます。さらに、冷凍機直接冷却と呼ばれる、超電導コイルと各種冷凍サイクルの冷凍機で低温に維持されている冷却面を直接接触させて熱を除去する方法があります。山梨実験線のリニアモーターカーで試験的に使用された超電導コイルはこの方式で冷却されました。

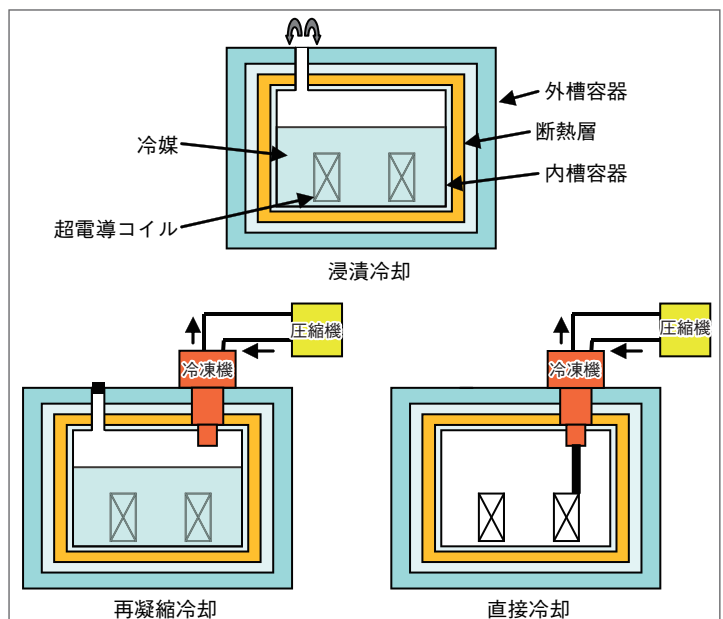


図1 いろいろな冷却システム

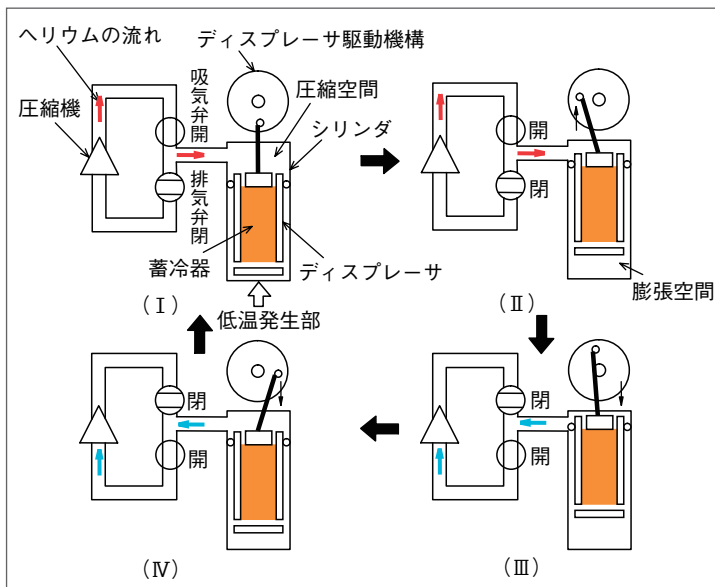


図2 GM冷凍機の動作

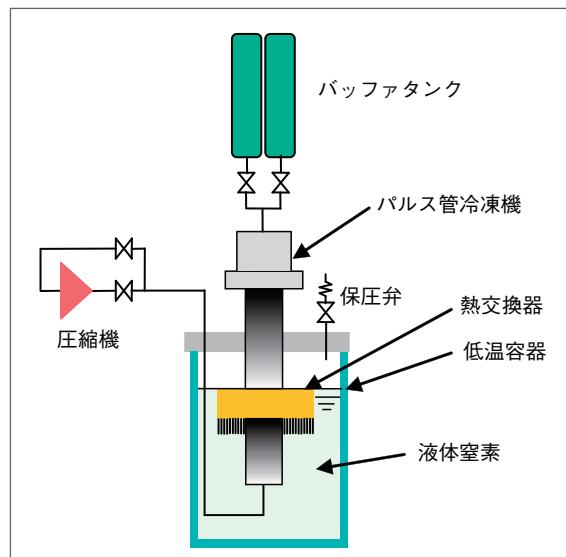


図3 パルス管冷凍機による冷却システム

冷凍機による冷却

最も広く用いられている冷凍機を利用した冷却方式は、流体の相変化に伴う吸熱（液体から気体に変化する際の蒸発潜熱等）を利用したものになります。一般的に冷蔵庫や空調に使われているものがこれにあたります。

相変化を伴わない気体の膨張によって冷凍を発生させる冷凍機には、比較的大型の液化装置などに利用されているブレイトンサイクル冷凍機やクロードサイクル冷凍機があります。気体膨張機構に高回転のタービンを使用していることから、タービン液化機と呼んだりすることもあります。山梨実験線車両基地にある地上据え置きヘリウム液化機がこれにあたります。

また、蓄冷器（熱を蓄えるもの。風邪をひいたときにつけるガーゼを重ねたマスクと同じ役割と考えて差し支えありません）と気体間の熱交換を利用する蓄冷器式冷凍機には、スターリング冷凍機、GM冷凍機、パルス管冷凍機などがあります。蓄冷器式冷凍機は比較的小さい小型冷凍機で、ヘリウム温度（4.2K）領域では数Wの、窒素温度（77K）領域では数百Wの冷凍能力のものが対象となります。

現在最も広く利用されている蓄冷器式冷凍機はGM冷凍機です。この冷凍機はその構造が簡単で、低温になる部分に駆動部が少ないことから、信頼性が高いという特徴を持っています。そのため、高真空排気装置としてのクライオポンプやMRI用の超電導マグネットの放射シールド冷却などに多く使われています。現在山梨実験線を走行している車両に搭載されているヘリウム、窒素液化・凝縮用冷

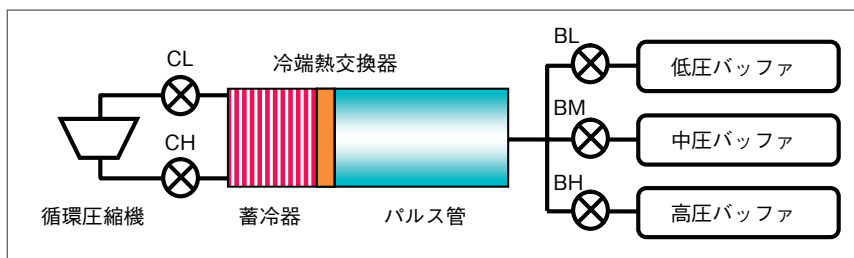


図4 パルス管冷凍機（3バッファ方式）

凍機もGM冷凍機です。図2にGM冷凍機の動作図を示しておきます。圧縮機の高低圧配管に周期的に動作する開閉バルブを設け、ディスプレーサ駆動機構の制御によって開閉タイミングを決め、サイモン膨張という原理によって寒冷を発生させます。

パルス管冷凍機冷却システム

パルス管冷凍機による冷却システムは、パルス管冷凍機、循環圧縮機、それらを接続するフレキシブルチューブ、そして冷凍機内部に封入されたガスの圧力や速度を制御する機構が基本構成になります。使用目的、あるいはアプリケーションによって、追加で必要になってくるものが変わってきます。

冷凍機本体はパルス管、蓄冷器（蓄冷材）、冷端熱交換器（冷えるところ）で構成され、冷端熱交換器から冷熱を取り出して使用します。冷端熱交換器は銅などの熱伝導率の良い固体を用いたり、コイル状に巻いたパイプを使用したりします。冷凍機を運転中、その内部では、冷媒としてのガス圧力と速度が変化しているだけで機械的に動いているものはありません。ガス圧力や速度を制御する機構にはさまざまな方式がありますが、我々はアクティブバッファ

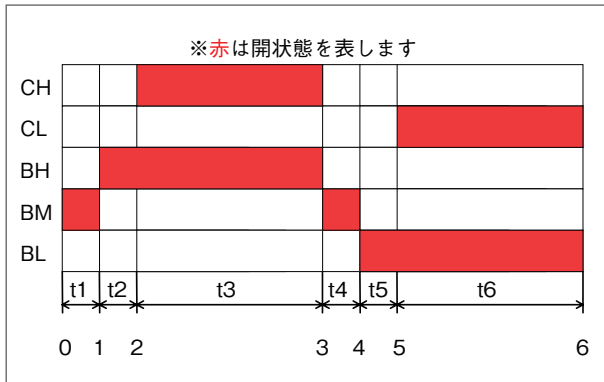


図5 バルブシーケンス

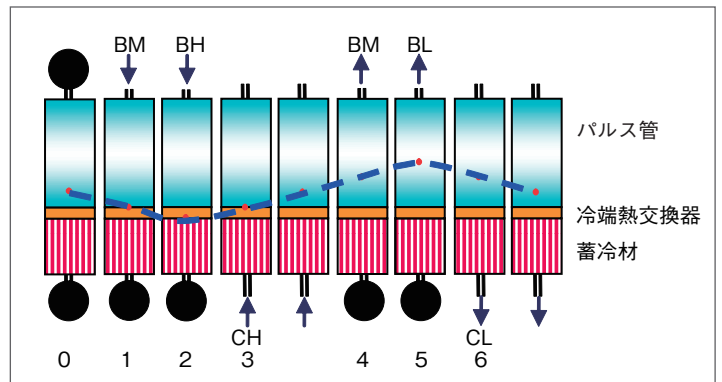


図6 ガスの変位

型という方式を選択しました。これについては次項で説明します。図3はアクティブバッファ型パルス管冷凍機を使用したHTS主変圧器冷却システムの一例です。

HTS主変圧器では、冷凍機の冷端熱交換器に、生け花で使用される剣山のようにフィン（針）がたくさん取り付けられた熱交換器を冷端熱交換器に接触させています。フィンをたくさんつけているのは超電導コイルから発生する交流損失を代表とする最大熱負荷に見合った伝熱面積をとるためです。この形状・方式はHTS主変圧器冷却システムの基礎試験から実証してきたものです。

冷凍機によって冷却されたフィン周辺にはサブクール液体窒素（大気圧の沸点より低い温度の液体窒素のこと。水を例にとると、水の大気圧での沸点は100℃ですので、通常飲料に使用する水はサブクール水と云えます）が生成され落下します。液体窒素貯槽内に熱負荷（主変圧器の場合、交流を通电されたコイル）があれば、熱負荷周辺の液体窒素は暖められて上昇します。同一容器内に、落下する部分と上昇する部分があれば、その流体は対流していると云い、熱負荷を自然対流によって冷却することになります。

冷凍機の冷端熱交換器に冷却させたいもの（被冷却体）を接触させる技術は、冷凍機直接冷却の技術が必要となります。直接冷却の場合、被冷却体（剣山型熱交換器）と冷凍機冷却面（冷端熱交換器）との熱伝導をよくし、効率よく被冷却体を冷やせるかが重要となります。この接触面の熱抵抗をいかに小さくするかで温度差の低減を図ります。そのため、接触面にインジウムのような柔らかい熱伝導の高い金属を挟んだり、低温で熱伝導率の高いグリース（アピエゾングリース等）を塗って、接触熱抵抗を小さくする工夫をします。

本冷却システムにおける研究開発では、この接触面にハンダを流し込むことによって、大幅な接触熱抵抗の低減策を得ることができました。

パルス管冷凍機の動作

図4～図6⁴⁾を使って、アクティブバッファ方式パルス管冷凍機の動作を説明します。図4は図3とほとんど同じですが、中間圧力のアクティブバッファタンクをひとつ追加しました。

初期条件としてパルス管冷凍機内には1MPaのガスヘリウムが、低圧バッファにも同じく1MPaのガスヘリウムが、中圧バッファには1.5MPaの、高圧バッファには2MPaのガスヘリウムが封入されているものとします。CL, CH, BL, BM, BHの各バルブは閉まっています。なお、以下に箇条書きで示した(1)から(6)は、図5、図6中の1から6に対応しています。

- (1) 中圧バッファ開閉バルブBMが開くことによって、冷凍機の封入圧力が上昇します。もともとの冷凍機封入圧よりも中圧バッファ圧のほうが高いので、図6の青い点線が少し下方（圧縮機側）に移動します。
- (2) BMバルブを閉めて、高圧バッファ開閉バルブBHを開きます。さらに冷凍機の封入圧は上昇し、図6の青い点線はさらに下方に移動します。
- (3) BHバルブは開いた状態で、循環圧縮機の吐出バルブCHを開くことによって冷凍機の封入ガスを高圧バッファに戻します。これにより青い点線は少し上方（バッファ側）に移動します。
- (4) CHバルブ、BHバルブを閉め、BMバルブを開きます。冷凍機封入ガスが中圧バッファに戻っていき、青い点線はさらに上方に移動します。
- (5) BMバルブを閉めて、低圧バッファ開閉バルブBLを開きます。またさらに青い点線は上方に移動します。
- (6) BLバルブは開かせたままで、循環圧縮機吸入バルブCLを開きます。ガスは圧縮機に吸入され、青い点線は下方に移動します。

この青い点線はガスの変位振動を表しており、ピストンあるいはディスプレイサと考えれば、図6の4、5はまさ

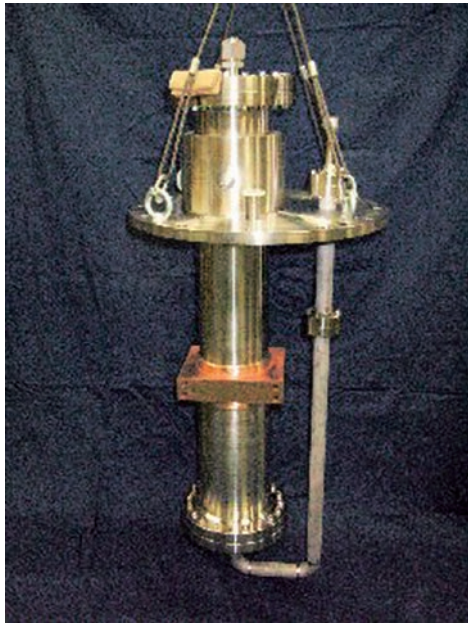


図7 製作したパルス管冷凍機

に膨張変化となり寒冷を発生させることが想像できます。

アクティブバッファ方式パルス管冷凍機のアクティブバッファタンクと開閉バルブ類は、ガスの圧力振動と変位振動の位相差を調整する機構であり、よい性能を得るためには、圧力振動と速度(変位)振動の間に90°の位相差ができることが理想となります。上図において、振動中心からプラス側(上方)に変位している場合にガスが膨張し、マイナス側(下方)に変位しているときに圧縮するように調整できれば、プラス側で吸収した熱が効率よくマイナス側に運ばれることになり、冷却が実現します。

開発したパルス管冷凍機と能力向上策

図7、表1に試作したパルス管冷凍機の外観図及び仕様を示します。目標とした温度65Kでの冷凍能力1kWは達成できたものの、冷凍の効率を表す指標となる成績係数(COP: Coefficient of Performance 冷凍能力/所要動力)は目標の半分にも至りませんでした。この成績係数は大きくなればなるほど所要動力は小さくて済み、すなわち最も重量の高む循環圧縮機の容量を小さくすることができることから、冷却システムの軽量化の指針となります。

その後、さまざまな改良を加え、図8に示すレベル(COPが0.037)まで開発は進んでいます。

おわりに

現在研究開発を進めている、超電導主変圧器用の冷却システムを中心に、概要、様々な冷却方式、冷凍機について紹介しました。

あるものを冷却するためには、その冷却したい温度に

表1 試作冷凍機の仕様

冷凍機方式	パルス管冷凍機
位相制御方式	アクティブバッファ
冷媒	ヘリウムガス
設計圧力	3.0MPa
常用圧力	2.5MPa
充填圧力	1.9MPa
設計温度	20~350K
冷凍能力	1kW at 65K
冷凍機重量(本体のみ)	約90kg

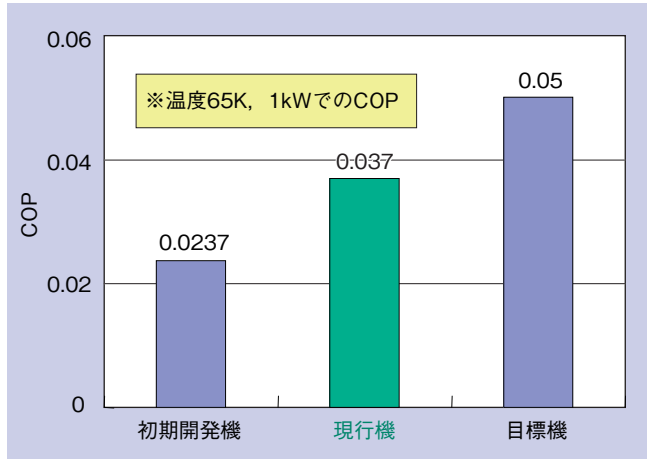


図8 冷凍機改造によるCOPの向上

よって、最適な冷却方式があります。この場合の「最適」とは、コスト、信頼性、環境負荷等々のパラメータによって既存の概念、システム、そして構成機器も変わってきます。例えば車両の空調にしても、何を最重要にするかによって「最適」の考え方は変わってきます。コストを考えるととんでもない話ですが、冷凍機伝導冷却であってもかまわない場合もあるかもしれません。

超電導技術をささえる冷却システムというタイトルで話しを進めてきましたが、何を「最適」にするかによっては、「エアコン」という常温冷却システムに適用することも可能ではないかと考えます。

なお、高温超電導主変圧器冷却システムの研究開発の一部は国土交通省の補助金によって行われました。RRR

文献

- 1) 鉄道総研報告：パルス管冷凍機による超電導主変圧器用冷却システムの開発，平成19年9月
- 2) オーム社：超電導エネルギー工学，ISBN4-274-20281-X
- 3) 東京電気大学出版局：低温工学概論，ISMN4-501-61730-6
- 4) Naoko Takagi, Tomohiro Yoshida, and Sumio Kobayashi, Proceedings of The 13th International Stirling Engine Conference, 2007, P164-168