

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

音波で冷やす冷凍機

熱音響冷凍機は音波によるエネルギー変換を利用した冷凍機のことです。超電導応用機器冷却用の冷凍機として期待が高まっています。本稿では、この冷凍機構や現在の技術状況を概説するとともに、並列運転による性能・効率向上など最新の研究成果などを紹介します。



宮崎 佳樹
Yoshiaki Miyazaki
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室
副主任研究員
【専門分野】 低温工学



池田 和也
Kazuya Ikeda
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室
主任研究員
【専門分野】 低温工学

熱音響現象

日本で最も古くから知られていた熱音響現象には、上田秋成の怪奇小説「雨月物語」に「吉備津の釜」として登場する釜鳴り現象があります。岡山県にある吉備津神社では、釜の音の強弱・長短などで吉凶を占う神事が、現在も行われているそうです¹⁾。

この釜鳴り現象は、神職が祝詞をあげた際に、湯の入った大きな鉄釜に乗せた甑こしきに巫女が玄米みこを一合ほどまくと、70Hzほどの音が鳴るというもので、米と蒸気などの温度差により生じる熱音響現象であると考えられています²⁾。熱音響現象とは、管の一端を加熱すると内部に音が発生したり、管内に音を入れると管内で冷凍作用が発生したりする現象で、熱と音波との間でお互い

にエネルギーをやりとりする際にこのような現象が生じます。このような熱音響現象は、他ではレイケ管(☞参照)やボンボン船といったものがあります。また、常温と極低温の間の大きな温度勾配で生じるタコニス振動(☞参照)は、液体ヘリウムの簡易な液面検知に利用できますが、実験中に振動が生じると液体ヘリウムの蒸発量が増加するため、低温では嫌われる現象です。これらはいずれも熱エネルギーを音のエネルギー(振動)に変換するもので、これをサイクルとして動力を取り出すものに、スターリングエンジンや熱音響自励振動エンジンなどがあります。

一方で、音(振動)を熱に変換する熱音響機器としては、スターリング冷凍機、ギフォード・マクマホン冷凍機

☞ レイケ管

1859年にオランダのレイケにより報告されたレイケ管はガラスなどのパイプの中に金網を入れた最も簡単な熱音響自励振動系です。金網をバーナーの炎で加熱し、十分に熱くなったところで加熱をやめると数秒後に音が鳴り始め、しばらくして音が鳴り止みます。

☞ タコニス振動

液体ヘリウムが入った断熱容器に、室温側をゴム膜などで綴とじた細長いパイプを入れると、ゴム膜が振動する現象が生じます。

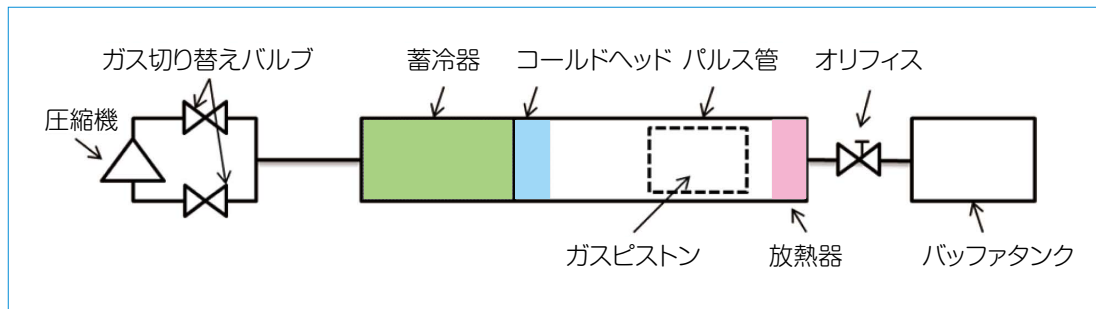


図1 オリフィス方式パルス管冷凍機

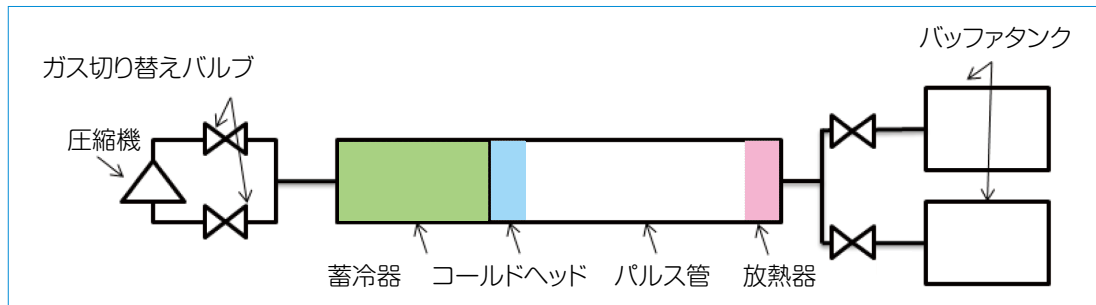


図2 アクティブバッファ方式パルス管冷凍機

(以降「GM冷凍機」と記す), パルス管冷凍機, 熱音響冷凍機など, 蓄冷器を用いた冷凍機があります。本稿では, これらの熱音響冷凍機のうち, 磁気浮上式鉄道用高温超電導磁石への適用を目指して開発しているパルス管冷凍機について, 解説します。

パルス管冷凍機の原理

パルス管冷凍機の基本構成を図1に示します。従来のGM冷凍機の場合には, ディスプレーサー(ピストンのようなもの)が動くことでシリンダ内のヘリウムガスを膨張させます。パルス管冷凍機ではこのディスプレイサーの役割をシリンダー(「パルス管」と称す)内のヘリウムガスが担っています。このヘリウムガスの役割は, パルス管内に点線で示されるようなガスピストンを想定することにより, その基本的動作原理を理解することができます。ガスピストンとはパルス管内に常に存在しているガスのことで, あたかも伸縮

する固体ピストンのように作用することから, この名前が付けられました。

圧縮機から供給される定常流ガスを, ガス切り替えバルブで回路を変更することにより, パルス管内には周期的な圧力振動が生じます。放熱器は圧縮仕事により発生した熱を系外へ放出します。蓄冷器は低温端で吸収した熱を蓄積する熱交換器としての役割を果たしています。ガスピストンは圧縮機からの圧力によりパルス管内で伸縮し, 圧縮→放熱→膨張→吸熱の一連の冷凍サイクルを形成します。最も冷える部分はコールドヘッド(または冷却ステージ)と呼ばれます。このときガスピストンが膨張仕事をして冷凍を発生させるためには, 圧力とガスピストンの位置が最適な位相をとることが必要です。図1の方式のパルス管冷凍機は, オリフィス方式と呼ばれており, バッファタンクに接続する配管にあるオリフィス(絞り)により, 位相を調整しています。

一方, アクティブバッファ方式パルス管冷凍機は, 4つのバルブでガスの高低圧の切り替えと位相の調整を行います。その際4つのバルブの開閉タイミングを調整することでバルブを通過する際のガスの圧力損失を低減することができ, パルス管冷凍機中最も効率のよい方式とされています。アクティブバッファ方式パルス管冷凍機の基本構成を図2に示します。

パルス管冷凍機は, 低温空間に可動部を持たないため軽量, 低振動であり, 構造が簡素でメンテナンスが容易であるというメリットがあります。

並列パルス管冷凍機

パルス管冷凍機は, “低温部に可動部を持たない”ことを最大の特徴としていますが, それゆえヘリウムガスの変位と圧力変化の位相調節に制約があり, 従来のGM冷凍機よりも効率や冷凍能力に課題がありました。しかし, アクティブバッファ方式と呼ばれる位

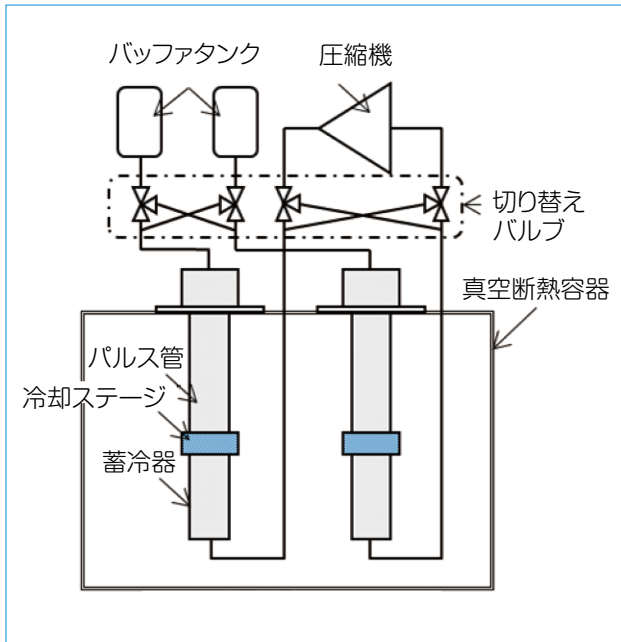


図3 並列パルス管冷凍機試験装置

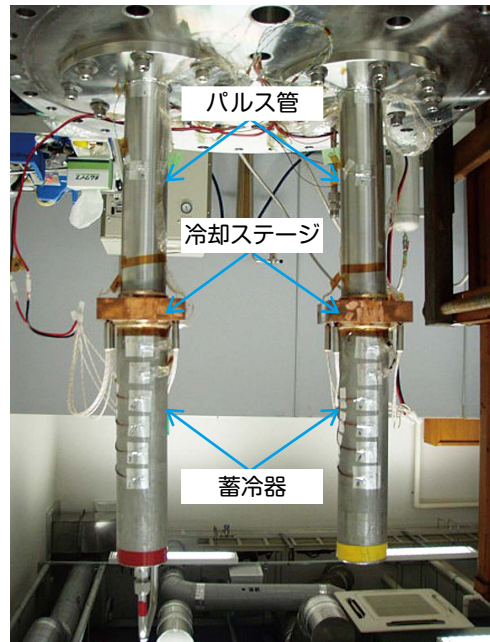


図4 並列パルス管冷凍機

相調節機構の考案により、効率に関してもGM冷凍機に匹敵する値が得られています³⁾。

さらに、パルス管冷凍機2基を1台の圧縮機で運転し、それぞれのパルス管の高低圧ガスの切り替えタイミングを逆にすることで、圧縮機の負荷および高低圧ガス切替バルブにおける圧力損失が大幅に低減され、冷凍能力、効率が向上することがわかりました。

図3に並列パルス管冷凍機試験装置のシステム構成、図4に並列パルス管冷凍機を示します。バッファタンクに関しても、高圧、低圧のもの1組で共用しています。このような構成とすることで、圧縮機のメンテナンスコストも最小限に抑えることが可能になるなどのメリットもあります。圧縮機性能に対して、パルス管容積を最適化した並列パルス管冷凍機の冷凍能力およびCOP（効率の指標となる値）を、同パルス管冷凍機を単体運転した際のものと比較して図5に示します。パルス管冷凍機2基を並列運転することにより、

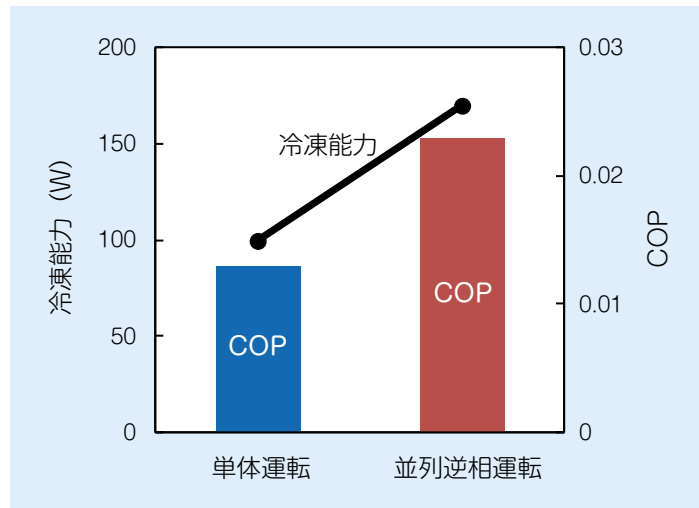


図5 パルス管冷凍機の並列運転による冷凍能力とCOPの向上

50Kで冷凍能力170W、COP0.023を達成し、50K領域における冷凍能力、COPともに、従来のGM冷凍機と比較して非常に高い性能を有するパルス管冷凍機となりました⁴⁾。

高温超電導磁石用冷却システム

希土類系高温超電導線材を用いた超電導コイルは、20K～50K付近で安

定した高磁場を発生する超電導磁石として運用できる可能性があると考えられています。

磁気浮上式鉄道用超電導磁石は、真空断熱容器の内部に4つのコイルが内蔵されており、これらのコイルを均等に冷却する必要があります。現在試験されている磁気浮上式鉄道用には低温超電導線材が用いられており、冷却に

は液体窒素，液体ヘリウムが必要です。車載用超電導磁石にはそれらの寒剤およびリザーブタンクや，窒素液化冷凍機，ヘリウム液化のためのGM-JT（ジュール・トムソン効果を用いた液化方式（☞参照））冷凍機が搭載されています。

液体ヘリウムで冷却する温度では物質の比熱がとても小さいのですが，磁気浮上式鉄道用超電導磁石に高温超電導線材を用いれば，超電導コイルおよび構成部材の比熱が飛躍的に大きくなる温度で超電導磁石を運転することができるため，熱的安定性が向上するため，超電導磁石の信頼性の向上が期待できます。運転温度が50K程度まで上昇すれば，現在ヘリウムの液化に用いられている2段のクールドヘッドを持つGM-JT冷凍機に代わって，構造のより簡単な単段冷凍機で冷却することも可能です⁵⁾。単段冷凍機を用いることができれば，低温空間の構成も簡素化され，低コスト化も期待されます（図6）。

並列パルス管冷却システムを用いた高温超電導磁石の冷却の概念を図7に示します。並列パルス管冷却システムは，アクティブバッファ型パルス管冷凍機2基と，1台の圧縮機，1組のアクティブバッファタンクおよびガス切り替えバルブユニットからなります。これらの要素のうち可動部をもたないパルス管冷凍機本体のみが低温空間に位置しています。

☞ ジュールトムソン効果

気体が断熱管路の絞り部分を通過すると膨張します。通過前後でエンタルピー（流体の持つエネルギー）は変化しませんが，圧力降下・体積膨張にともない温度変化が生じます。気体が膨張する際に分子間力に対して仕事をするためです。

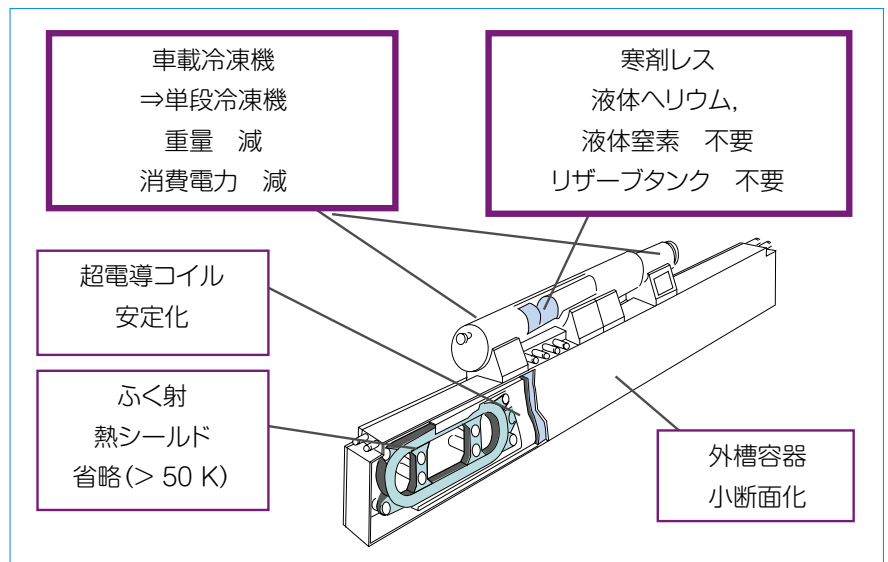


図6 高温超電導磁石のメリット

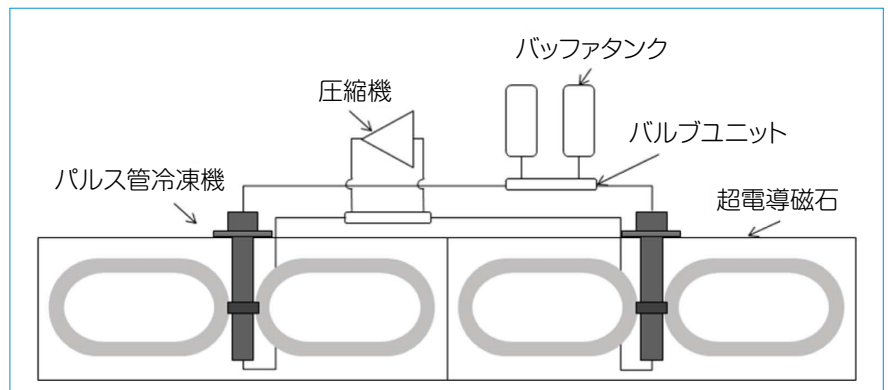


図7 並列パルス管冷却システムによる高温超電導磁石の冷却

おわりに

2基のアクティブバッファ方式パルス管冷凍機と1台の圧縮機で構成する高温超電導磁石冷凍システムを逆相並列で運転することにより，非常に高い性能を有する冷却システムとなりました。

本冷凍機は，これまでの浮上式鉄道用高温超電導磁石冷凍だけの用途にとどまらず，各種超電導機器のふく射熱シールド冷却用の冷凍機などとしても，十分な能力を有しています。

本研究開発の一部は国土交通省の補助金を受けて実施しました。RRR

文献

- 1) 吉備津神社ホームページ：<http://kibitujinja.com/about/index.html>
- 2) 富永昭著：熱音響工学の基礎，pp.9-12, 1998
- 3) 池田和也，長嶋賢，岩松勝，宮崎佳樹，三条大輔，吉岡治夫，高木直子：65K, 1kW級アクティブバッファ方式パルス管冷凍機の開発，低温工学，43巻4号，pp.143-149, 2008
- 4) 宮崎佳樹，池田和也，水野克俊，長嶋賢，高橋貞充，平井靖夫：並列パルス管冷凍機を用いた車載超電導磁石冷却システムの開発，低温工学，48巻7号，pp.143-149, 2013
- 5) 長嶋賢，小方正文，水野克俊，荒井有気，長谷川均，笹川卓：希土類系高温超電導線材を用いた浮上式鉄道用超電導磁石の構成，鉄道総研報告，25巻3号，pp.17-22, 2010