

並列パルス管冷凍機による 高温超電導磁石冷却システムの開発

宮崎 佳樹* 池田 和也*
水野 克俊* 長嶋 賢*

Development of Multiple Cryocooler with Pulse-tubes for High-temperature Superconducting Magnets

Yoshiki MIYAZAKI Kazuya IKEDA
Katsutoshi MIZUNO Ken NAGASHIMA

It is thought that the temperature range for operation of high-temperature superconducting (HTS) magnets is 20K to 50K, if superconducting (HTS) magnets are made from rare earth materials. Therefore we have examined by tests the practicability of applying a pulse tube cryocooler which has advantages of simple structure, high reliability and their excellent maintainancability to cooling systems of onboard HTS magnet of Maglev. When the two pulse-tube cryocoolers (the multiple active buffer pulse-tubes) are operated in the reverse phase mode, the cooling power of over 100W was achieved at the temperature of 50K, and the coefficient of performance (COP) of the multiple active buffer pulse-tube cryocoolers increased by 1.6 times compared with that of the pulse-tubes operated in the same phase mode. Furthermore, as an attempt to improve the cooling power, the regenerator materials were changed for examination.

キーワード：パルス管冷凍機，アクティブバッファ，高温超電導，超電導磁石，極低温

1. はじめに

RE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る。

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ことにより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る。運転温度が50K程度まで上昇すれば、単段冷凍機で冷却することも可能となる¹⁾。

このような単段冷凍機には、Gifford-McMahon（ギフォード-マクマホン：GM）冷凍機やスターリング冷凍機、あるいはパルス管冷凍機などがある。これらの冷凍機のうち、現在最も普及しているのはGM冷凍機であり、現在試験されている磁気浮上式鉄道用超電導磁石にもこのGM冷凍機が搭載されている。

GM冷凍機は、低温空間にディスプレイサと呼ばれる可動部を有し、定期的なディスプレイサのメンテナンスのために冷凍機を停止する必要があるが、冷凍機として

低温部に可動部の存在しないパルス管冷凍機を用いれば、必要なメンテナンスはすべて室温空間のみとなり運用面で大きな利点となる。単段冷凍機にできれば、低温空間の構成も簡素化され、低コスト化も期待される。効率に関してもGM冷凍機に匹敵する値が得られている²⁾。さらに、複数のパルス管冷凍機を1台の圧縮機で運転することができれば、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。

本報告ではアクティブバッファ型パルス管冷凍機2台と、1台の圧縮機、1組のアクティブバッファタンク、1組のガス切替えバルブユニットで構成された冷却システムについて検討を行なった。

2. 磁気浮上式鉄道用超電導磁石の冷却システム

磁気浮上式鉄道用超電導磁石は、1つの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る。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、液体ヘリウムおよびGM-JT冷凍機が搭載されている。高温超電導コイルならば冷凍機による伝導冷却が可能であり無冷媒化は大きな利点であるが、

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

そのためには冷凍機を複数配置し、冷却点を増やすことが有効である。その際、複数の冷凍機を1つの圧縮機で運転することができれば、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。

本研究ではGM型パルス管冷凍機の中では最も効率の高いアクティブバッファ型パルス管冷凍機の並列運転を検討した。図1に並列パルス管冷凍機によるHTS磁石冷却の概念図を示す。

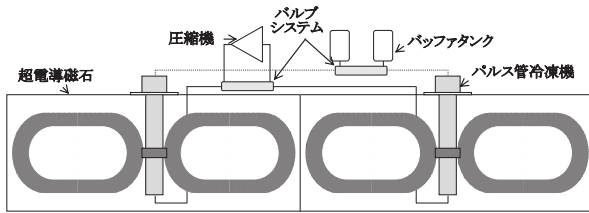


図1 HTS磁石冷却の概念図

3. 50 Kにおける並列パルス管冷凍機試験

3.1 試験装置概要

図2に並列パルス管冷凍機試験装置のシステム構成、図3に並列パルス管冷凍機を示す。2本のパルス管冷凍機を1台の圧縮機で運転する構成であり、アクティブバッファタンクに関しても、高圧、低圧のもの1組で共用している。

冷凍機は、冷凍能力200W@80K級の市販パルス管冷凍機をベースとして製作した。圧縮機には住友重機械工業製CSA-71Aを用いた。流路の切り替えには空圧バルブを用いて、冷凍機単体運転試験、並列運転試験を行い、蓄冷器内部の蓄冷材は、ステンレスメッシュ、鉛球を、50Kで最適な構成としている。冷却ステージにはヒータが設置されており、無負荷の状態から徐々に熱を加えることにより冷凍能力を評価する。

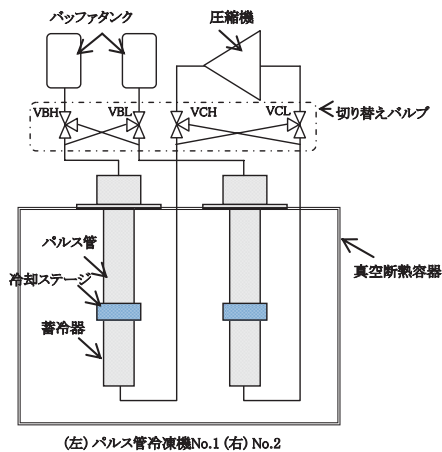


図2 並列パルス管冷凍機試験装置のシステム構成

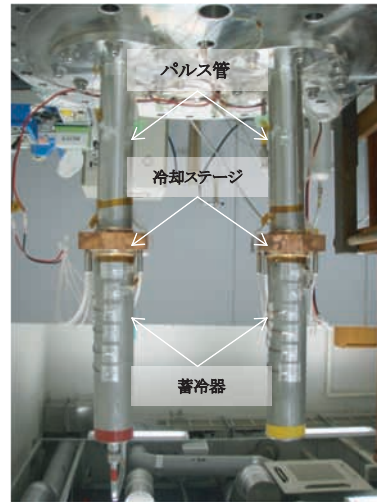


図3 並列パルス管冷凍機

3.2 バルブシーケンス

図4に一般的なアクティブバッファ型パルス管冷凍機のバルブシーケンスを示す。バルブは圧縮機高圧及び低圧(VCH, VCL)と、高圧及び低圧バッファタンク(VBH, VBL)の計4ヶ所である。

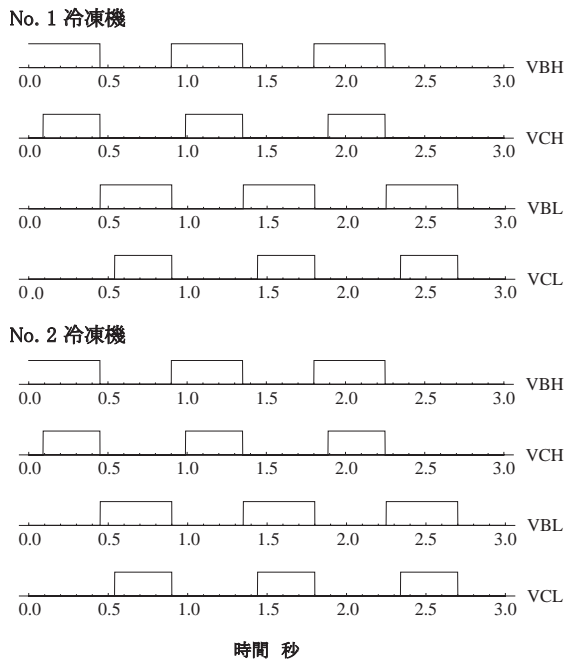
図4には横軸を時間として白枠でバルブ開のタイミングを示している。初めに高圧側の圧縮機とバッファタンクが時間差で開き、高圧と入れ替わりで低圧の側の圧縮機とバッファタンクが開く。パルス管冷凍機の並列運転では、両冷凍機のバルブシーケンスを同一とした運転(以下、同相運転と表記)と、一方の冷凍機のバルブシーケンスを逆転させた運転(以下、逆相運転)の2通りの運転について検討した。

3.3 冷凍能力評価試験結果

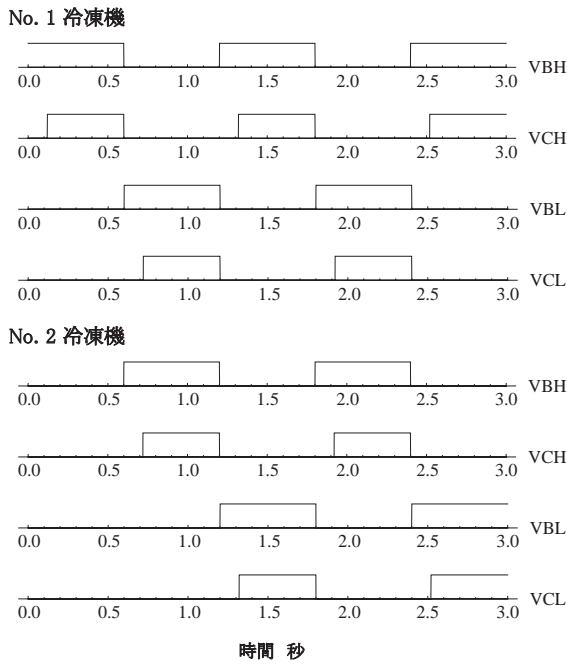
表1に50Kにおけるパルス管冷凍機単体運転および、パルス管冷凍機2基を用いた並列同相、逆相運転の試験結果を示す。冷凍能力については、冷凍機の冷却ステージが50K以上および以下で熱平衡となるヒータ負荷を、その温度の冷凍能力とし、その2点の冷凍能力から内挿法(直線内挿)により50Kの冷凍能力を評価した。並列運転時の冷凍能力は、冷凍機2基の合計値である。COPに関しては、圧縮機の消費電力で冷凍能力を除することで評価した。

試験結果は、逆相運転が最も冷凍能力が高く、同相運転は単体運転に対しても大幅に冷凍能力が下がっている。同相運転ではパルス管冷凍機が2基並列接続されており、圧縮機に対する冷凍機の合計容積が大きく、同じ質量流量では十分な圧力振幅を得られなかったことが冷凍能力低下の原因であると考えられる(図5)。

(a) 逆相運転では、バルブタイミングが冷凍機ごとに180°ずれている。そのため、常に圧縮機側の高圧、低圧バルブともに半開になっているような状態で、



(a) 同相運転シーケンス



(b) 逆相運転シーケンス

図4 アクティブバッファ型パルス管冷凍機のパルプシーケンス例

圧縮機負荷が均一になり、低圧、高圧とも圧力変動が抑えられる(図6)。その結果、バルブや配管での圧力損失が低減されることに加え、圧縮機から送られるヘリウム流量も増加し、膨張仕事に使われるヘリウムの質量流量が増加したために、冷凍能力およびCOPが向上したと考えられる。

4. 並列パルス管冷凍機の解析

4.1 解析モデル

同相、逆相運転の運転モードについて数値解析を行い、これら運転方法による冷凍能力の違いの原因を検証した。

比較的計算の容易な断熱モデルを基本³⁻⁵⁾とし、動作ガスの運動量保存、連続の式および壁面との摩擦は考慮していない。境界条件は、パルス管部分のみ断熱条件とし、その他の計算区間は等温条件となっている。

図7に解析モデルを、表2に各計算領域の温度条件を示す。なお、パルス管部分に関しては、実際の計算では計算領域をさらに複数に分割しており、パルス管の温度分布も考慮したモデルとなっている。

表1 50 Kにおける冷凍能力およびCOP

運転モード	運転周波数[Hz]	冷凍能力[W]	COP
単独運転	1.6	99.7	0.0130
並列同相	0.9	65.1	0.0085
並列逆相	1.2	119.1	0.0160

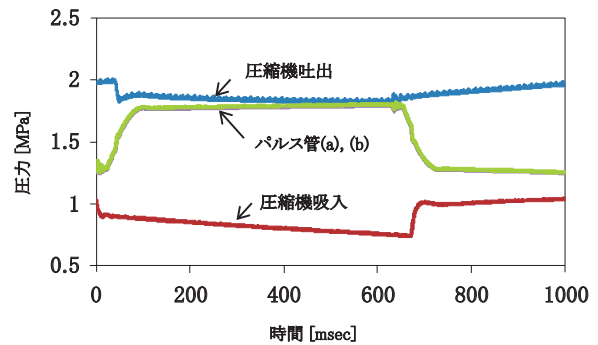


図5 同相運転時の圧力波形(試験)

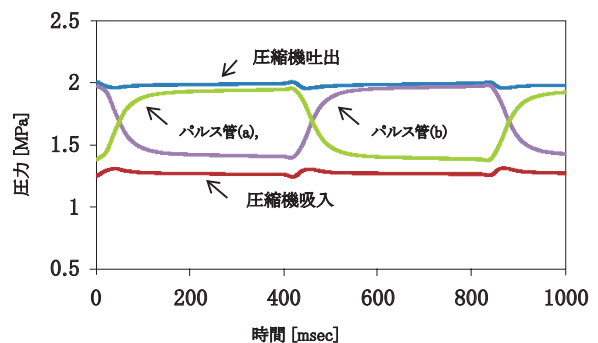


図6 逆相運転時の圧力波形(試験)

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

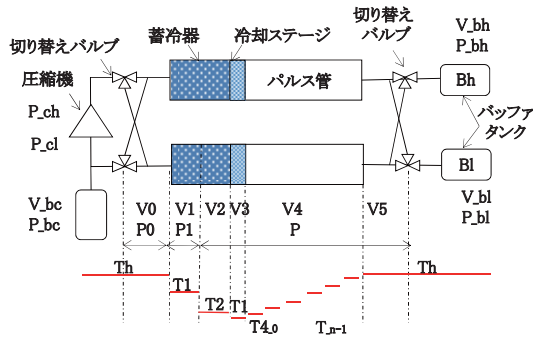


図7 並列パルス管冷凍機の解析モデル

表2 各計算領域の温度条件

	記号	温度 [K]
Comp. (high pressure)	ch	300.0
Comp. (low pressure)	cl	300.0
Buffer (comp.)	bc	300.0
Buffer (high)	bh	300.0
Buffer (low)	bl	300.0
Connecting tube (comp.)	0	300.0
Regenerator (high temp.)	1	237.5
Regenerator (low temp.)	2	112.5
Cold end	3	50.0
Pulse tube	4	variable
Connecting tube (buffer)	5	300.0

図7の表記はP: 圧力, V: 体積, T: 温度, M: ガス質量, w: 質量流量とし, Thは室温 (300 K), Tlは低温端 (50K) である。また V2~5 の計算区間は圧力一定であるので添え字無しで P で一括して表記している。

動作ガスは理想気体とし, 状態方程式および連続の式が任意の計算領域 i に対して成立するものとする。

$$PV_i = M_i RT_i \quad (1)$$

$$\frac{dM_i}{dt} = w_i - w_{i+1} \quad (2)$$

パルス管部分の計算領域に関しては, 計算の簡略化のためパルス管壁面との熱交換はないものとしたので, エネルギー方程式は以下ようになる。

$$C_v \frac{d(M_i T_i)}{dt} = C_p (w_i T_i - w_{i+1} T_{i+1}) \quad (3)$$

ここで C_v: 等積比熱, C_p: 等圧比熱である。

圧力損失は各バルブおよび, 蓄冷器の圧縮機側と中間で発生するとした。圧損区間における質量流量には以下の式を用いた⁶⁾。

・バルブにおける質量流量

$$w_i = \begin{cases} \alpha \sqrt{(P_i^2 - P_{i-1}^2)} & (P_i > P_{i-1}) \\ -\alpha \sqrt{(P_{i-1}^2 - P_i^2)} & (P_{i-1} > P_i) \end{cases} \quad (4)$$

・蓄冷器における質量流量

$$w_i = \beta (P_i^2 - P_{i-1}^2) \quad (5)$$

ただし, α, β はそれぞれバルブ, 蓄冷器特有の値である。単体運転時の実験結果をもとに α および β を決定した。冷凍能力の算出に関しては, 1 サイクルあたりのパルス管冷温側からのガスの流出入の積算から仮想ピストンの体積を求めて PV 仕事を算出している。さらに PV 仕事から蓄冷損失 W_{loss} を差し引くことで冷凍能力とした。蓄冷損失には以下の式を用いた⁷⁾。

$$W_{loss} = I_e C_p (T_h - T_l) \oint |w_4| dt \quad (6)$$

I_e は蓄冷器非効率であり, 今回の解析では 0.005 とした。また, 簡易的な冷凍機の解析では冷凍機に流出入するガス圧を固定して冷凍能力を求める場合が多いものの, このモデルだと, 単純に冷凍機の台数と冷凍能力が比例してしまうため, 本研究にはそぐわない。そのため圧縮機に関しても, 実機に合わせたモデリングを行っている。

4.2 解析による運転モードの比較

運転周期, バルブシーケンス, ヘリウム封入圧をそろえた条件で同相と逆相運転の比較を行った。このような条件での解析は, パルス管内部の圧力波形の比較には適しており, 運転モードによる性能の差を定性的に理解するのに有効であると考えられる。解析条件として, 運転周波数 1.2Hz, ヘリウムの封入圧 1.9MPa とした。同相, 逆相運転それぞれの, 解析による圧力波形 (圧縮機高低圧, パルス管内部圧力) を図 8, 9 に示す。

図 8 の同相運転時には, バルブの開閉によってパルス管内部の圧力が変化するのに伴い, 圧縮機側の圧力も大きく変動していることがわかる。一方, 図 9 の逆相運転ではバルブタイミングがパルス管ごとに 180° ずれているため, 常に圧縮機側の高圧, 低圧バルブともに半開になっているような状況である。そのため圧縮機負荷が均一になり, 低圧, 高圧とも圧力変動が極めて小さくなっている。パルス管内部の圧力振幅は同相, 逆相運転共にほぼ同じであった。冷凍能力, 圧縮機仕事および圧縮機仕事あたりの冷凍能力の比較を表 3 に示す。

冷凍能力および圧縮機仕事あたりの冷凍能力いずれにおいても 180° 逆相運転が優れている結果となった。冷凍能力が向上した理由は, 圧縮機の圧力変動が小さくなったために, バルブや蓄冷器における圧損が小さくなり, ヘリウムの流量が増加したためである。また, 圧縮機の高圧差が大きくなるほど, 圧縮機の負荷は増加する。

そのため、同相運転ではパルス管の圧力振幅に対して圧縮機の圧力振幅が過大になっており、冷凍機全体の効率が低下している。以上の結果は、同相運転と逆相運転の実験結果を支持している。

表3 同相および逆相運転時の冷凍能力

	同相運転	逆相運転
冷凍能力 (W)	99	131
圧縮機動力 (W)	2218	1817
冷凍能力/圧縮機動力	0.045	0.072

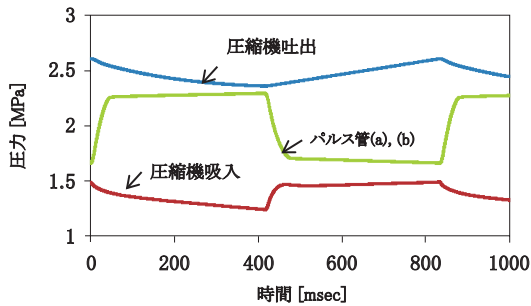


図8 同相運転時の圧力波形（解析）

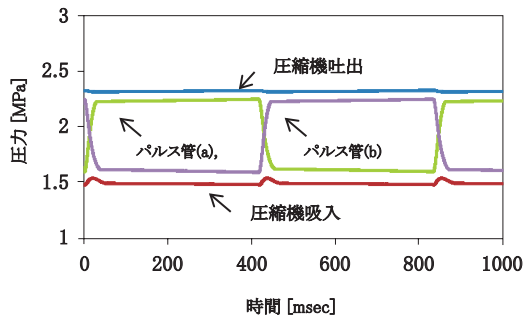
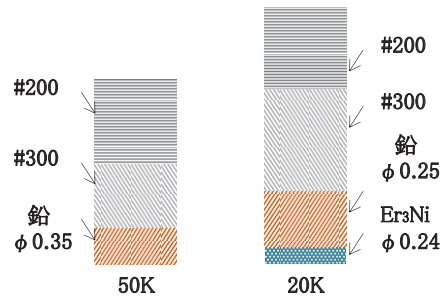


図9 逆相運転時の圧力波形（解析）

5. 20K 冷凍能力試験

5.1 蓄冷材構成の変更

高温超電導磁石の運転温度と想定される20K~50Kにパルス管冷凍機を適用するため、20Kでの運転を目指した蓄冷材構成の最適化を試みた。図10に50Kおよび20Kにおける蓄冷材の構成を示す。50Kと比較すると、20KではSUSの比熱が小さくなるため、冷媒であるヘリウムガスの冷熱を蓄える機能が低下する。そのため、20Kでは、極低温で比熱の大きな鉛の比率を高める必要がある。蓄冷材温度が20Kのとき、熱交換を行うヘリウムガスの温度は20K以下であるため、実際にはさらに低い温度で大きな比熱をもつ蓄冷材が望まれる。そこで、蓄冷器の低温側に極低温で大きな比熱を有する磁性蓄冷材 (Er₃Ni) を採用し、3.3W の能力を得た。



	#200	#300	Pb φ 0.35	Pb φ 0.25	Er ₃ Ni
20K	38.7%	38.7%		17.4%	5.2%
50K	50.0%	35.0%	15.0%		

図10 蓄冷材の構成（左：50K, 右：20K表内数値は体積比率を表す）

5.2 ダブルインレットライン

さらなる冷凍能力の向上を目指し、ダブルインレットライン（“絞り”を設けたガス配管）を追加した。ダブルインレットラインを追加することで、パルス管低温端での圧力振動とガス変位の位相を調節することにより、質量流量あたりの冷凍能力を増大させることが可能となる。本アクティブバッファ型パルス管冷凍機にダブルインレットラインを追加した冷凍機の概略を図11に示す。

図12に、蓄冷材としてSUS+鉛にEr₃Niを追加し、蓄冷材構成比を20Kに最適化した場合およびこれにダブルインレットラインを追加した場合の冷凍能力について示す。図から、ダブルインレットラインの追加により、20Kにおける冷凍能力が飛躍的に向上したことがわかる。さらに、COPについても改善されており、アクティブバッファ型パルス管冷凍機へのダブルインレットラインの追加が有効であることがわかった。

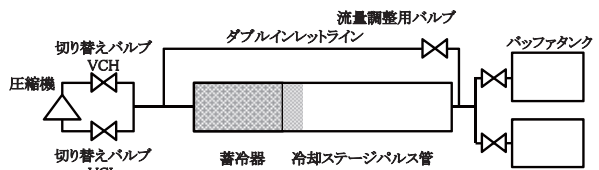


図11 アクティブバッファ型パルス管冷凍機へのダブルインレットラインの追加

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

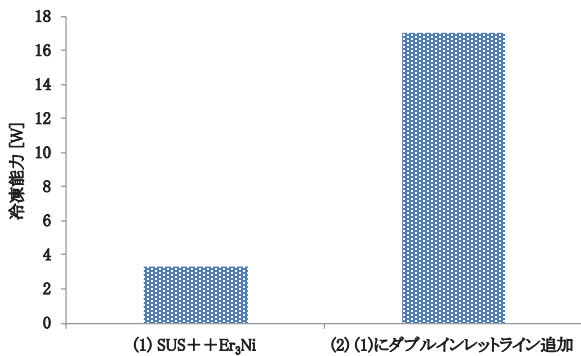


図 12 20K におけるパルス管冷凍機の冷凍能力

一般的に、パルス管冷凍機にダブルインレットラインを追加した場合、位相調節が可能になる一方、ダブルインレットラインの絞りにより圧力損失が生じる。それにも関わらず冷凍能力が向上するのは、蓄冷器での圧力損失の低減効果が大きいと考えられている。そのため、実質冷凍能力に対する効率を低下させずに、冷凍能力を向上することができると考えられている⁷⁾。

一方、本アクティブバッファ型パルス管冷凍機では、冷凍能力とともにCOPも向上した。本冷凍機が他の方式のGMパルス管冷凍機に比べて効率が高いのは、圧縮機側の切り替えバルブが開く少し前のタイミングで、バッファタンク側のバルブを開き、パルス管内の圧力を圧縮機側の圧力に近づけることで、圧力損失の低減ができるからである。アクティブバッファ型では各バルブの圧力損失を抑えつつ、ダブルインレットのメリットを最大限に引き出していると考えられる。

6. まとめ

磁気浮上式鉄道用に高温超電導磁石が搭載された場合の冷却システムとして、信頼性向上が期待できるパルス管冷凍機の並列運転適用について検討した。

50Kにおける並列運転では、2基のパルス管冷凍機を

逆相モードで運転することによって、圧縮機の負荷およびバルブにおける圧力損失が大幅に低減され、同相運転よりも冷凍能力、効率が向上した。

20Kにおける冷凍能力を向上するため、蓄冷器の蓄冷材に磁性蓄冷材を採用し、3.3Wの冷凍能力を得た。さらに、ダブルインレットラインを追加することによって、17Wの冷凍能力を得ることができ、効率についても大きく改善することができた。

本研究の一部は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 長嶋賢, 宮崎佳樹, 小方正文, 笹川卓, 岩松勝: RE系線材の浮上式鉄道用高温超電導磁石への適用検討 (2) - 超電導磁石の重量見積もり -, 第77回2007年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 No.176, 2007
- 2) 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: 65 K, 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 No. 43, pp 143-149, 2008
- 3) 水野克俊, 池田和也, 長嶋賢, 平井靖夫, 高橋貞充: 並列パルス管システムの開発, 低温工学 No. 46, pp 569-574, 2011
- 4) 山下巖, 濱口和洋, 香川澄, 平田宏一, 百瀬豊: スターリングエンジンの理論と設計, 山海堂, 1998
- 5) S. Zhu, Y. Kakimi and Y. Matsubara, "Investigation of active-buffer pulse tube refrigerator", Cryogenics No. 37, pp461-471, 1997.
- 6) 松原洋一: クライオクーラ [1]- 極低温冷凍機の基礎 -, 低温工学, No. 41, pp351-358, 2006
- 7) 松原洋一: クライオクーラ [2]- 極低温冷凍機の基礎 -, 低温工学, No. 41, pp420-427, 2006
- 8) 萩原宏康 編著低温工学概論 超伝導技術を支えるもの, 東京電機大学出版局, 1999