

第82回

鉄道車両における冷却技術

はじめに

冷却技術は、鉄道車両の空気調和の重要な要素です。ここでは、客車冷房の技術進歩の歴史を振り返りながら、冷却の仕組みや今後の課題について考えてみます。一方、超電導磁気浮上式鉄道では、超電導磁石を極低温に保つための冷却技術が不可欠であり、今日まで技術開発を続けてきました。そのような超電導磁石の冷却技術や、その技術を在来鉄道へ応用する取り組みについても紹介します。

鉄道車両空調の始まり

「あすも40℃近い気温、体温以上の危険な暑さ」。2018年の夏はこんな表現をニュースでよく耳にしました。夜も連日の熱帯夜で、冷房なしで過ごすことができなくなってしまいました。私たちの生活に不可欠なこの冷房、鉄道車両に搭載されたのはいつごろからでしょう



図1 あじあ号

か？ 昔は、庶民の憧れの製品を「三種の神器」とよんでいました。今では死語かもしれません。1950年代後半の神武景気の三種の神器は「白黒テレビ、洗濯機、冷蔵庫」、その後高度成長期となった60年代半ばには「カラーテレビ、クーラー、自家用車」がこれに代わりました。国内で冷房が人々の身近な存在になっていくのは、このころからだわかります。わが国では1934年、当時の南満州鉄道の特急「あじあ号(図1)」に採用された蒸気噴射式冷房装置(後述)が初の鉄道車両冷房でした¹⁾。この列車は世界ではじめて列車全体に空調装置を採用したことで、世界的にも注目されました。

国内では、鉄道省(のちの国鉄→現JR)が、1936年に特急「燕」へ投入した食堂車に試験的に搭載され、翌年営業に供された冷房装置が最初でした。当時は冷媒にジクロロメタン(CH₂Cl₂)を用いていました。民鉄では、やはり1936年7月に南海鉄道(現、南海電気鉄道)でも2両編成車両に試験的に搭載されました¹⁾。当時の新聞には、「試運転良好、外気温が35℃の盛夏の時分も満員電車で27℃の爽涼さが楽しめるだろう」とあります²⁾。記事から性能を読みとると、20馬力(=14.7kW)、床下置き、車内温度が23℃を下回ると自動的にスイッチが切れるON-OFF制御だったようで、外気温から約5~6℃冷やせたようです。その後戦時中に車両冷房の導入は一旦途絶えます。というのもこうした冷房装

置は戦艦などの火薬庫や弾薬庫の冷却や潜水艦に振り向けられたからです。

一方、世界ではじめて鉄道車両へ冷房を導入したのは1884年のアメリカだといわれています¹⁾³⁾。当時は冷却材として氷を搭載したもので、持続的に冷気を作り出す本格的な冷房装置としては、同じくアメリカで1924年にアンチソン・アンド・トペカ&サンタフェ鉄道の試験導入、1929年にボルチモア&オハイオ鉄道が蒸気噴射システムを組み込んだのが始まりです。このような空調装置は、以後食堂車を中心としてアメリカの各鉄道に普及していきました。欧州では第二次大戦前はほとんど冷房車はなかったようですが、1950年代からスペインやイタリアの特急車両が冷房付車両として登場します¹⁾。

鉄道車両における冷房装置の普及は、食堂車、特急、長距離列車などの特別車両を中心としていましたが、国内では1959年に名古屋鉄道が通勤列車に冷房装置を投入¹⁾、その後数年で徐々に一般に普及していきました。まさに高度成長期の三種の神器であったわけです。

冷却の仕組み

古代エジプトでは素焼きの壺つぼを団扇うちわであおぐという巧妙な方法で冷気を得ていました⁴⁾。夏に道路などに水をまくと涼しくなる打ち水と同じ原理です。わたしたちが現在利用している冷房装置

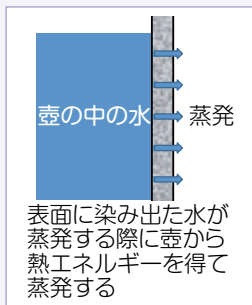


図2 素焼きの壺による冷却作用

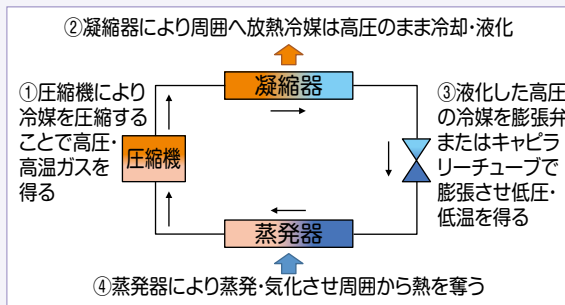


図3 蒸気圧縮式サイクルの原理



図4 最近の冷房装置の例 (提供：三菱電機)

も基本的には古代エジプトの素焼きの壺^{つぼ}や打ち水と同じ原理で冷熱を得ています。水が液体から気体に変化(相変化)するには、液体に働く分子間力に打ち勝って気体になるためのエネルギーが必要です。このエネルギーは気化熱とよばれています。図2のように素焼きの壺^{つぼ}は多孔質のため、中の水は徐々に壺^{つぼ}の表面に染み出します。表面に染み出た水が蒸発する際に、壺^{つぼ}から熱エネルギーを得て蒸発します。熱エネルギーを奪われた壺^{つぼ}の温度は下がり、中の水を冷却します。外から団扇^{うちわ}であおぐことで、水の蒸発を促進しているのです。水が水になる際にもやはり氷の分子間力に打ち勝つためのエネルギーが必要で、こちらは融解熱とよべます。融解熱や気化熱のように物質が相変化をする際に必要な熱エネルギーを潜熱とよんでいます。

素焼きの壺の冷却効果は、中の水が蒸発しきってなくなってしまえばそれで終わりですが、サイクル運転により連続的に機械仕事を行い、低温を得ることができるようにしたものが冷凍機です。

アメリカの鉄道やあじあ号に採用された冷房装置は「蒸気噴射式サイクル¹⁾」とよばれるもので、これは冷凍機の蒸発器に水を入れ、蒸発器内の空気を蒸気エジェクターを用いて吸引して真空状態を作り出すことで、低温の水を蒸発させ、蒸発潜熱によって水を冷却するものでした。冷媒として水を使うため安全ですが、蒸気を供給する必要があり、効率が低いことから現在は用いられていません。

今日の冷凍機の最も一般的な冷凍サ

イクルは蒸気圧縮式サイクル⁵⁾⁶⁾です。蒸気圧縮式サイクルの原理を図3に示します。主な構成要素は圧縮機、凝縮器、膨張弁(またはキャピラリーチューブ)、蒸発器および冷媒が循環する環状流路です。理想的な蒸気圧縮式サイクルでは、①圧縮機により冷媒を圧縮することで高圧・高温ガスを得ます。②次に、凝縮器により周囲へ放熱することで冷媒は高圧のまま冷却・液化します。③液化した高圧の冷媒を膨張弁またはキャピラリーチューブで膨張させることで低圧・低温を得ます。④これを蒸発器により蒸発・気化させることで周囲の熱を奪います。低圧となったガスは再び圧縮機により圧縮されます。

最近の冷房装置と冷媒の課題

初期の冷房装置の冷媒には水やメチレンクロライド(強力な溶解力と高い安定性をもつ有機溶剤)などが用いられましたが、その後人体に無害で爆発・引火の危険がないことなどから、フロンが急速に普及しました。冷媒の条件⁵⁾としては、

- ・蒸発しやすいこと
- ・蒸発するときに奪う熱量(潜熱)が大きいこと
- ・化学的に安定で不活性であること
- ・引火・爆発性がないこと
- ・人体に無害であること
- ・安価に入手できること

などで、フロンはこれらを満たす非常に優れた冷媒だったのですが、オゾン層を破壊する物質であることがわかり、すでに製造が中止されています。代わって登場

した代替フロンは、二酸化炭素の数千倍という規模で地球温暖化に影響を及ぼすことがわかっており、直近では2016年10月のモントリオール議定書の第28回締約国会議において、代替フロンの削減目標が合意されています⁷⁾。日本を含む先進国は、代替フロンの使用量を2036年までに85%削減しなければいけません。このような動きから、冷媒として、用途により炭化水素系物質、アンモニア、炭酸ガス冷媒など、いわゆる自然冷媒が利用されていますが、フロン類に替わる冷凍効率の高い新冷媒の開発が急務となっています。

現在の冷房装置(図4)の冷房能力は、とくに都市部におけるラッシュ時には1両あたり40~50kWが必要とされています⁸⁾⁹⁾。搭載スペースの制約があるため、冷凍能力の向上、小型化、省エネなどが技術開発の方向性ですが、上記のような新冷媒への対応が求められています。

超電導リニアに用いられる超電導磁石の冷却

超電導コイルを冷凍する車載冷凍システムや、極低温状態を維持するクライオスタット(低温容器)は超電導磁石の重要な構成要素です。断熱が良くない空間が冷やしにくいと同様に、超電導コイルを冷却するためには、クライオスタットの高い断熱性能が求められます。熱の伝わり方には「対流」「伝導」「輻射^{ふく}」がありますが、それぞれに対し、クライオスタットでは、容器内を真空にして対流を防止する、高強度で熱の伝わりにくい材料を

用い断面積をできるだけ小さくすることで伝導を抑える、多層断熱材とよばれる中間層を設けることで輻射を低減するなどの対策をしています。これらの工夫により、超電導磁石の熱侵入量は着実に低減しました。外部からの熱侵入量を極力少なくし、侵入熱により蒸発したヘリウムを冷凍機を運転して再び液化して使うようにすれば、高価なヘリウムを外部に放出することなく循環して使用できます。

超電導リニアに車載される超電導コイルは極低温(-269℃)の液体ヘリウムで直接冷却されています。液体ヘリウムは低温で熱を吸収して蒸発するため、冷凍システムを用いて圧縮、放熱、膨張弁(JT弁)での液化により、再び超電導コイルを冷却します。開発初期は冷凍機の重量、容積が大きく車載が難しかったのですが、その後の研究開発により車載冷凍機の性能が向上し、実験車両のML-500RやMLU001には冷凍機付超電導磁石が搭載されました。

これに先立って車載用小型冷凍機として3種類の冷凍サイクルで試作が行われました。クロードサイクル冷凍機、スターリング-JT(ジュール-トムソン)冷凍機、GM(ギフォード・マクマホン)-JT冷凍機です(図5)。それぞれの冷凍機には効率や信頼性・耐久性の点で一長一短がありますが、MLU001の超電導磁石が製作された時点では、効率が高いことや車載冷凍機としてのまとまりがよいことなどが理由となり、クロードサイクル冷凍機が選択され搭載されました¹⁰⁾。

一方、スターリング-JT冷凍機とGM-JT冷凍機は蓄冷式冷凍機とよばれ、内部

には蓄冷材が組み込まれています。この蓄冷材には、極低温で大きな熱容量を有することが要求されます。ほとんどの物質は低温になるほど比熱が小さくなるために、極低温での蓄冷材の性能も低下し、冷凍機の到達温度が制約されていました。ところが希土類元素を使用した蓄冷材は低温でも比熱が大きく、これをブレイクスルーとして、これらの冷凍機の最低到達温度や極低温領域における冷凍能力、効率が向上しました。とくにGM-JT冷凍機はその高い信頼性や車載時のレイアウトのしやすさなどのため、現在主流の冷凍機となっています。

高温超電導磁石の冷却

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可能と考えられています。

したがって、超電導リニア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り熱的安定性が向上し、超電導磁石の信頼性向上が期待できます。運転温度が50K程度まで上昇すれば、現在ヘリウムの冷却に用いられている2段のコールドヘッド(冷却部)をもつGM-JT冷凍機に代わって、構造のより簡単な1段のコールドヘッドのみの冷凍機(単段冷凍機)で冷却することも可能です。単段冷凍機を用いることができれば、クライオスタット(低温に保つ容器)の構造の簡素化も期待されます。

パルス管冷凍機

このような単段冷凍機には、先述したスターリング冷凍機、GM冷凍機などがありますが、同じ蓄冷器を用いた冷凍機にパルス管冷凍機があります。スターリング冷凍機やGM冷凍機の場合には、ディスプレイサ(ピストンのようなもの)が動くことで冷凍機シリンダー内のヘリウムガスを圧縮・膨張させます。パルス管冷凍機ではこのディスプレイサの役割を図6に示すようなシリンダー(「パルス管」と称す)内のヘリウムガスが担っています。このようにパルス管冷凍機は、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。

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タイミング(位相)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よばれる位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¹¹⁾。

さらに、鉄道総研では高温超電導磁石用に、パルス管冷凍機2台を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を低減し、冷凍能力、効率を向上させた冷凍システムを開発しました(図7)。

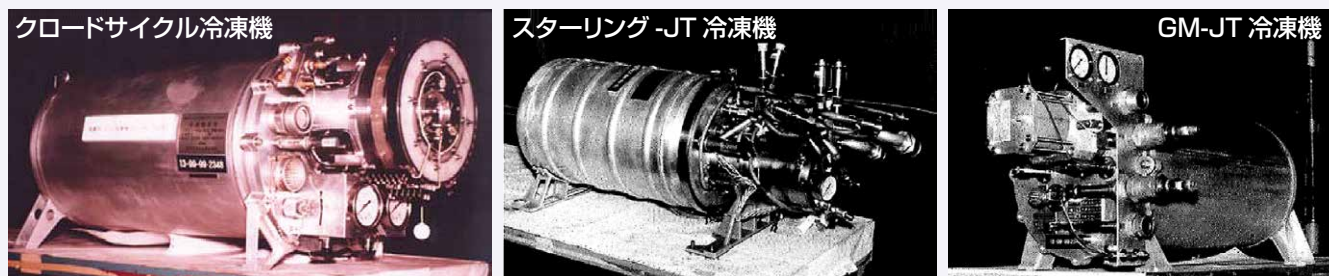


図5 車載用小型冷凍機

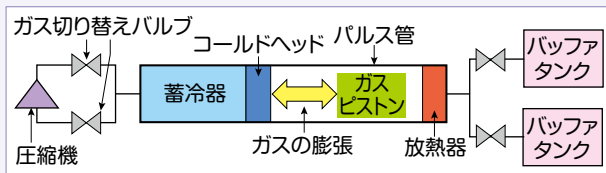


図6 アクティブバッファ方式パルス管冷凍機

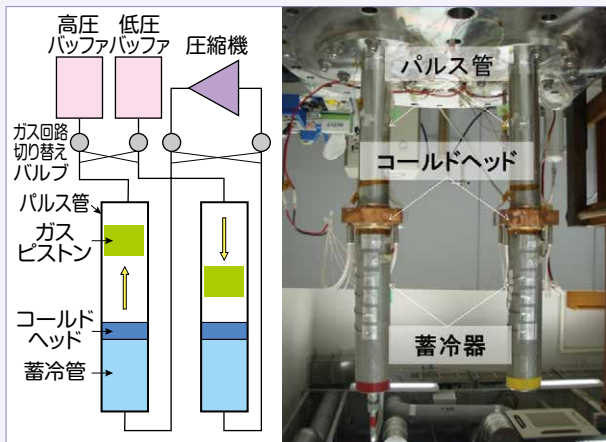


図7 並列パルス管冷凍機

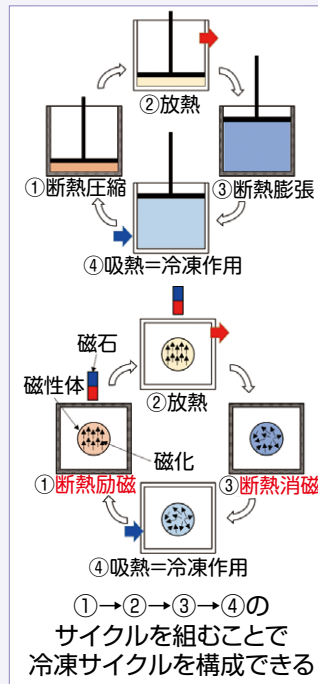


図8 磁気ヒートポンプの原理



図9 1.4kW磁気ヒートポンプ試作機

がワインクーラに磁気ヒートポンプを搭載したデモを行っています。鉄道総研でも、国内最大となる1.4kW級の磁気ヒートポンプ試作機(図9)を開発し、

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。パルス管冷凍機2台を並列運転することにより、50Kで冷凍能力170W、COP(効率の指標となる値)0.023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得ています¹²⁾。

このような省メンテナンスな冷凍機は超電導を利用したシステムの運用には非常に重要であり、超電導磁石以外にも、現在開発を進めている超電導フライホイール蓄電システムなどの超電導アプリケーションにも応用が期待できます。

室温磁気ヒートポンプ

話題を室温に戻して、最後に室温磁気ヒートポンプについて紹介します。磁気ヒートポンプとは、ある種の磁性体に磁場変化を与えた場合に、磁性体内部で温度変化が生じる「磁気熱量効果」を利用したヒートポンプです。蒸気圧縮式サイクルでは、圧縮され放熱した冷媒は、膨張過程で低温を生成します。低温となった冷媒は冷却対象から熱を奪い、冷

凍能力を発現します。一方、磁気ヒートポンプで圧縮に対応するのは磁性体の励磁(磁性体に磁場を与えること)であり、この過程で磁化にともない磁性体の温度は上昇します。膨張に対応するのは消磁(磁性体から磁場を除くこと)で、この過程で磁性体の温度が下降します(図8)。

磁気ヒートポンプは、冷媒にフロンや代替フロンガスを用いない新しいヒートポンプであり、蒸気圧縮式サイクルと比較して次のような特徴をもっています。

- ①オゾン層破壊や温暖化に関わる物質を用いないため、環境にやさしい。
- ②可燃性のイソブタンや高圧のCO₂などを用いず、安全である。
- ③高効率化が可能であるとともに装置がコンパクトにできる。
- ④コンプレッサーを用いないため、振動、騒音が少ない。

磁気ヒートポンプ技術は、室温においては比較的新しい技術ですが、実は極低温と深い関係があります。先述のスターリング冷凍機やGM冷凍機の冷凍能力が十分でなかった当時、これらの冷凍機では到達困難な極低温を作る方法として用いられてきました。最近の研究開発では、2015年にアストロノーティクス社とBASF、ハイアール

磁気ヒートポンプ技術の大型冷凍・冷房装置への適用可能性を示しました。さらなる小型化・軽量化を進めるとともに、冷凍性能および効率の向上を目指して研究開発を続けています。

(宮崎佳樹/浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室)

文献

- 1) 車両冷房1989—車両冷房の歴史とシステムを探る—、鉄道ファン、Vol.29, No.340, 1989
- 2) 大阪朝日新聞、昭和11年7月9日、1937
- 3) 向田幸一郎、真宅正博、副島廣海：今後の車両冷房装置、JREA、Vol.11, No.6, p.4, 1968
- 4) 萩原宏康：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
- 5) 冷凍技術と生活研究会：冷凍技術の科学、日刊工業新聞社、2012
- 6) 平田哲夫、岩田博、田中誠、石川正昭、西田耕作：基礎からの冷凍空調、森北出版、2007
- 7) 経済産業省、環境省：特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律(オゾン層保護法)の一部を改正する法律案御説明資料、2018
- 8) 小柳良文：最近の車両用空気調和装置-2階建て車両用AU729形空気調和装置の紹介-、三菱電機技報、Vol.78, No.12, pp.59-62, 2004
- 9) 笹井雄太、雨宮靖佳：通勤ラッシュ時の冷房能力を改善した車両空調システム、東芝レビュー、Vol.64, No.9, pp.49-52, 2009
- 10) 長嶋賢：やさしい超電導リニアモーターカーのお話(その3)〜クライオスタットと車載冷凍システム〜、超電導Web21、2011年10月号、2011
- 11) 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
- 12) 宮崎佳樹、池田和也、水野克俊、長嶋賢、高橋貞亮、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.377-381, 2013