

浮上式鉄道と使用材料



中 島 洋*

The Materials on Magnetically Levitated High Speed Trains

Hirōshi NAKASHIMA

1. はじめに

高速で安全な大量輸送機関の最も有望な方式として、国鉄では、この 10 数年来超電導磁石を用いた誘導反発式磁気浮上式鉄道の開発をすすめてきている。その一つの実証の場として、宮崎県日向市に約 7 km の実験線を建設して、高速浮上走行の実験を繰り返し行い、着々と成果を上げていることはすでに知っておられる方も多いと思う。

この超電導磁石を利用した浮上式鉄道の最も大きな特徴は、走行する車両と地面との距離（空隙）が約 10 cm 程度保持することができることと、推進に同じく超電導磁石を利用した地上一次のリニアシンクロナスマータを採用していることから、従来のように車輪の摩擦に頼ることなく上記の空隙を保ちつつ推進力を伝達し、高速で走行できることである。従つて、同じ軌道の不整条件（理想的な軌道状態からのずれ）に対して、より高速で安定して走行し得る可能性を持つている。

実際にこれまでの実験の結果、昭和 54 年に実験車 ML 500 による走行実験で 517 km/h という世界記録を達成している。また、その後の乗客スペースを考慮した車両 MLU 001 によつて、400 km/h の走行を確認すると共に約 300 km/h の速度で、有人走行を繰り返し行つており、各所の有識者に試乗していただき好評を得ている。

このような浮上式鉄道で、もつとも特異な技術分野は、何といたつても超電導磁石に関する技術である。周知のように、超電導を維持するためには約 4 K (−269°C) という極低温度を保つことが必要条件となり、そのための冷却が課題となる。この冷却を行うには、液体ヘリウムを使用する必要があるが、ヘリウムの資源上の問題および日本における価格の面から、将来システムにおいて使用したヘリウムを使い捨てにすることは許されない。

従つて、国鉄における浮上式鉄道の開発においては、その当初から車上に搭載した冷凍機によつてヘリウムを外部に放出しないクローズドなシステムを構成することを前提として進めてきている。

このために、浮上式鉄道の開発には、超電導磁石（超電導コイルおよび極低温容器）とこれを冷却するための冷凍機およびこの両者を含めた冷凍システムの構成方法の三つが重要な開発課題となつている。

本文には、浮上式鉄道と使用材料という命題をいただいたが、ここでは浮上式鉄道全般の紹介と共に、材料面では超電導技術関係に焦点を絞つて述べる。

2. 浮上式鉄道の紹介

2.1 推進と浮上の原理

図 1 は、宮崎実験線における車両と軌道の断面構成を示す。浮上式鉄道は原理的には推進のためのリニアシンクロナスマータと浮上案内のための誘導反発及び誘導案内の組合せで構成されている。

リニアシンクロナスマータは、推進案内用の地上コイル群に地上電源（サイクロコンバータ）より、速度に応じた周波数の 3 相電流を流すことによつて、移動磁界を発生せしめ、この移動磁界に同期して超電導磁石が移動し、結果的に車両が走行するものである。

車両の浮上は、同じく浮上用の地上コイル（常電導）との間の電氣的な反発力で行われる。推進案内用の地上コイルと異なつた点は、推進案内用が地上に配置された電源と接続されているのに対して、浮上用は、それぞれの地上コイルが個々に閉じたループであり、外部と一切電氣的に接続されていないことである。車両が走行する

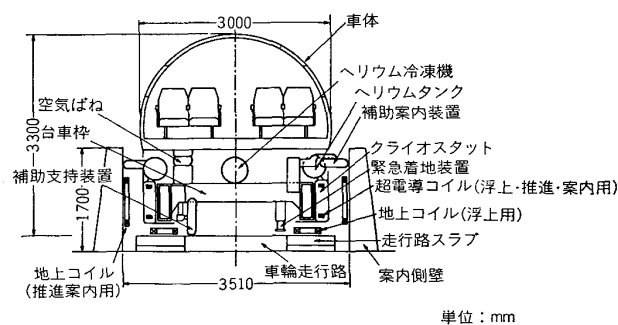


図 1 実験車 MLU 001 の断面構成

昭和 60 年 9 月 9 日受付 (Received Sep. 9, 1985) (依頼解説)

* 鉄道技術研究所 (Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways, 2-8-38 Hikari-cho Kokubunji 184)

と、浮上用の地上コイルの上を超電導コイルが通過し、そのとき地上コイルに磁束が入り込むために、一時的に電流が誘起され、この電流と車上の超電導コイルとの間に反発力が発生し浮上力となる。従つて、浮上力は車両が走行することによつて初めて発生するものであり、ちようど飛行機の翼の特性に似ている。

車両の案内は、浮上と同じ原理によつて行つているが異なつている点は、車両が軌道の真中を走行しているときは案内力を発生する必要がないことから、車両が軌道の中央からずれたときのみ、そのずれ量に比例して中央に戻すような力が発生するように、左右の推進案内用地上コイルを電氣的に接続をしていることである。車両が中央にあるときは、案内用の電流がゼロであることから、ヌルフラックス方式と呼ばれている。この案内に用いる地上コイルは、上記の推進用のリアシンクロナスマータに使用する地上コイルと同一のものである。

写真 1 は現地に使用している車両 (MLU 001 の三両編成の状態) を、また写真 2 は上に説明した地上側のコイルの取り付け状態を示す。

図 2 は、二両編成状態における車両の側面図を示しているが、図 1 と組み合わせて見ることにより、超電導磁石の配置の様子がわかる。図のように超電導コイルは縦型に配置したレーストラック形状のコイルで、推進案内用の地上コイルと対向した位置に配している。

2.2 開発の経緯

浮上式鉄道の開発は、昭和 45 年に将来の鉄道のある



写真 1 MLU 001 の外観

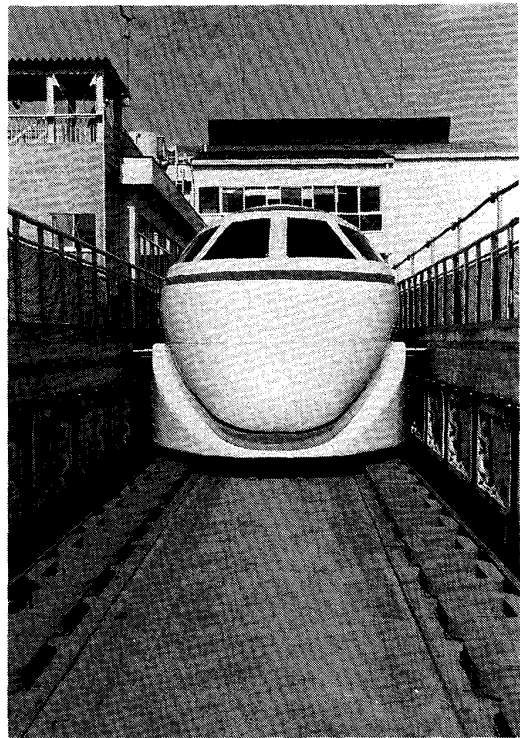


写真 2 地上コイルの設置状況

べき姿として低公害性が重要な条件となるという見通しのもとに、昭和 41 年に米国のパウエル・ダンビィ両氏が概念提案した方式を見直し、当時急速に発展しつつあつた超電導磁石を用いた本方式の開発に着手することになつたものである。

当初の研究は、昭和 45 年の基礎試験装置から始まり、定置の超電導磁石を固定し、浮上用の地上コイルを円板上に乗せて回転せしめ、浮上力の確認を行つた。その後、実際に実験車両を走行させて確認するシステムに移行し、昭和 47 年には、国鉄 100 周年を記念して ML 100 による走行実験を行つた。これらの成果をもとに昭和 52 年 4 月に、高速走行実験による実証の場を宮崎県日向市の実験センターに移行した。

その後の主な経過としては、昭和 54 年 12 月に 517 km/h の世界記録を達成し、続いて上記の MLU 001 形の有人を考慮した車両に変更して実験をすすめており、これまでに 3 万 km 以上の走行を記録している。

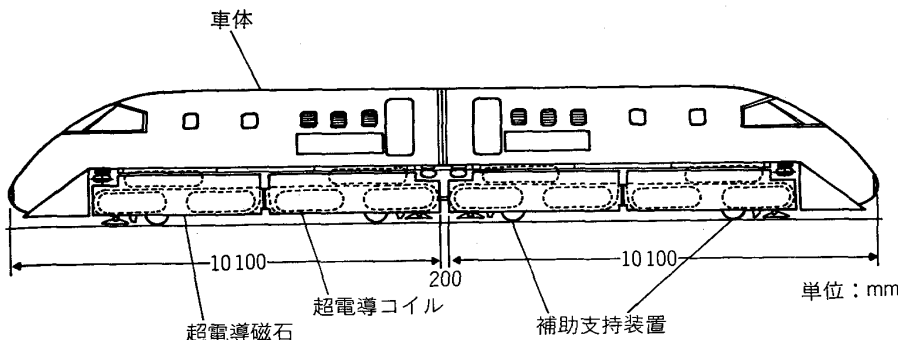


図 2 MLU 001 の側面図 (2 両連結時)

こうした開発にあわせて、超電導磁石を冷却するための車載用冷凍機の開発も精力的に進めてきた。開発当初は車上に搭載する冷凍機の可能性を疑問視する声もあつたが、最近では実験車において繰り返し実証できる段階になつている。

2.3 実験車両

実験車両は、図2に示してあるが、現設備の全車両を連結すると3両編成での走行が可能となつている。3両を連結した状態では全長が約30mであり、各車両の幅は3m、高さは3.3mで流線形をした軽量のアルミニウム合金製の車両である。車両は、人が乗つて乗心地など各種の調査をできるように内部には座席が設けてある。3両の中の両端の車両には、それぞれ8席、中間車には16席、全体合計では32席の座席を取りつけた構成としている。

超電導磁石は台車枠と呼ばれる枠組みの上に取り付けられており、台車枠と車体とは空気ばねで結ばれている。また誘導反発形であるために、低速度の時にはゴムタイヤによつて車体を支持する構造としており、上下支持用と左右案内用車輪とが設けられている。停止および低速度時にはこの車輪を油圧によつて押し出しており、高速度時には引き込める構造である。

超電導磁石については、次に詳細に説明するが、各車両に8個の超電導コイルを搭載しており、この8個のコイルでもつて、約10tの車両を支えることになる。計測用の浮上高さ計なども非接触で測定するために、高速走行時には、地上側と接触するものは全くない構造となつている。

つぎに、超電導磁石および冷凍機などについて、その概要を紹介するとともに、使用している材料について紹介する。

3. 超電導磁石

浮上式鉄道の最も重要な設備の一つである超電導磁石は、超電導コイルとこれを低温に冷却するための極低温容器(クライオスタット)とから構成される。

実験車 MLU 001 に搭載している超電導磁石の概念図を図3に示す。図に示すように、下部に二つの超電導

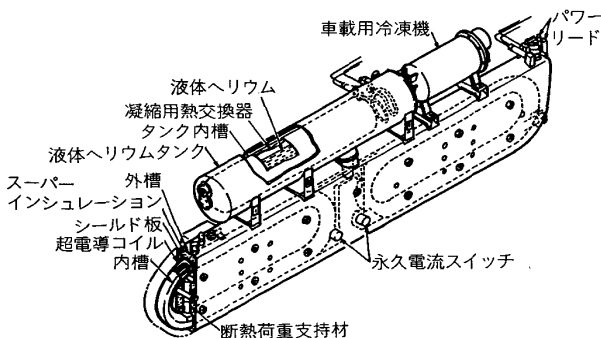


図3 超電導磁石概念図

コイルを配置し、上部に液体ヘリウムタンクを配置している。超電導コイルは、内槽と呼ぶ筒型の容器内に収納されており、この内槽と超電導コイルの周りの空間に液体ヘリウムが供給される構造となつている。また、図中右側に示す位置に冷凍機が取り付けられており、この冷凍機によつて内部のヘリウムガスが液化され、封じ切つた状態でヘリウムガスを外部に放出することなく運用できるようになつている。

以下にそれぞれの要素について材料面からの問題点などを中心に述べる。

3.1 超電導コイル

使用している超電導コイルの代表的な例の諸元を表1に示す。表に示すように、起磁力は700kA(電流値700A×1000ターン)と非常に強力な磁石で、コイル部断面での平均電流密度は183A/mm²とかなり高い値を確保している。

使用している超電導線材は最も一般的なNbTiによる線材で、ファイナルチのツイスト線で、銅比(線材の銅/NbTi重量配分比)が2のものを採用している。最近では銅比が約1のものが開発の対象となつている。

超電導コイルは、レーストラック形状に巻線処理をしたのちに、真空含浸法によつてエポキシ系の樹脂を含浸させ固めたもので、一度型枠から外した後に補強を加えてから内槽をその周辺に溶接により組み上げて製作している。補強材および内槽は、磁界の影響を避けることと低温容器としての使用材料に関する法的制約からステンレス鋼 SUS 304L を全面的に採用している。

3.2 断熱荷重支持材

浮上式鉄道の車体を浮上・案内または推進させるための力はすべて電磁気的なものであり、上記の超電導コイルに加わることになる。従つて、台枠または車体にこの力を伝達することが必要となる。ただし、超電導コイルとの間には約300Kの温度差があり、これらの間の断熱方法は重要な課題となる。そのため、この力を伝達するための断熱荷重支持材はクライオスタットの設計上重要な役割を有する。断熱荷重支持材に使用する材料と構造が、その性能を大きく左右することになり、当然のこととして強度が大きく熱伝導率が小さい材料が望まれることになる。図4はこの断熱荷重支持方式として採用されている一つの例であるが、構造的には限られた空間内で伝熱距離を大きくとれるように工夫したものである。図に示す例は、直径の異なる複数の円筒を同心円状に配

表1 超電導コイルの代表例

項目	諸元	備考
1. 寸法	1700×500 mm	レーストラック型
2. 最大起磁力	700 kA	
3. 巻回数	1000 ターン	
4. 電流密度	183 A/mm ²	
5. 質量	97 kg	
6. 蓄積エネルギー	532 kJ	

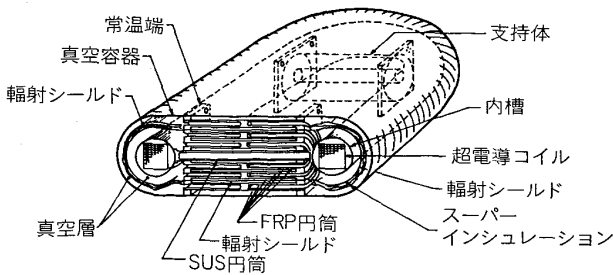


図 4 断熱荷重支持方式の例

置し、隣り合う円筒の端部同士および中央部同士を交互に結合したものであり、最も内側の円筒を超電導コイルの内槽に、外側の円筒を外槽に接続することによつてあらゆる方向の力を支持できる構造としたものである。

このような断熱荷重支持材に使用している材料は、現在ではほとんどすべてが繊維強化プラスチック (FRP) である。各種の材料について熱伝導率と強度の特性の比を比較すると FRP は優れた特性を有しており、金属ではステンレス鋼の特性が優れている。そのために共に断熱荷重支持材として従来から良く使用されているが、前者の方が特性的には勝っており最近では実績が積まれるにつれて定着してきている。また共に低温になるほど熱伝導率が低下するという歓迎すべき特性を有している。

採用している FRP としては、ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) と炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が対象となつている。これは、低温領域において CFRP の方が熱伝導率が小さくなるため、液体窒素温度以上を GFRP、以下を CFRP という使いわけをしばしば行つている。

3.3 パワーリード

浮上式鉄道に使用する超電導磁石は、走行時はいわゆる永久電流状態にて使用している。磁石を励磁するには地上に設置した励磁電源に磁石のパワーリードを接続し、励磁したのちに内部の永久電流スイッチを閉じる。この後は励磁電源とは全く縁を切ることになる。このパワーリードは超電導磁石の設計上、熱侵入の大小を大きく左右する要素である。

現在使用しているパワーリードは、通電時に発生したガスヘリウムをパワーリードの導体の冷却に使用し、発熱によつて温度が過剰に上昇しないように設計している。

このパワーリードに使用する材料の選択と構造の決め方が重要な事柄となり、材料面では電気抵抗が小さく、かつ熱伝導率の低いことが要求されるが、この条件にびつたり合う材料は無いのが現状であり、実際の設備ではりん脱酸銅などを採用している。現在超電導磁石の熱侵入約 2W の中に占めるパワーリードによる熱侵入の割合は磁石によつて異なるがおおむね 2~3 割程度となつている。

3.4 その他

超電導磁石は、内槽と外槽の間を高度の真空中に保つ必要があり、そのために使用する材料も強度が十分で気密性が高いものであること、組立時の溶接性が優れていることなどが必要条件となる。こうした点からも内槽には専らステンレス鋼 SUS 304L が採用されるが、外槽は外部から大気圧をうける外圧容器となり、内側に補強を入れにくいこともあり、撓みを少なくする対策から比較的厚い材料を用いることが多く、従つて、材料もアルミニウムを採用することが多い。

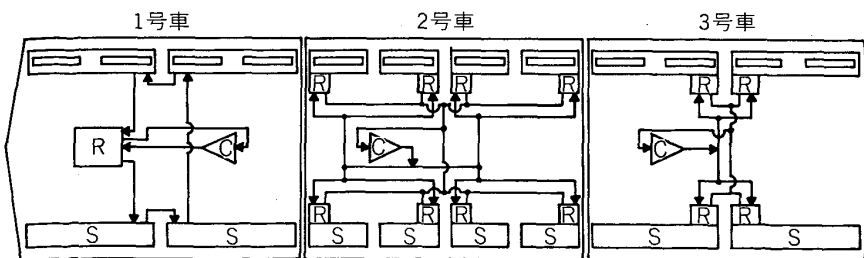
また、浮上式鉄道では磁界変化の内槽への影響を少なくする目的で、外槽には電気抵抗の小さい材料を使用することが望ましいが、強度部材としては必ずしも両立しないために現実には構造材料としては A 5083 アルミニウム合金を使用し、さらに外側に A 1100 などの純アルミニウムを重ねるような構成としている。

また、内槽と外槽の間は、種々の配管で結合されているが、中間でアルミニウムとステンレス鋼を真空気密を保ちつつ接合することになり、特殊なジャンクションを必要としている。具体的には常温側においてアルミニウムとステンレス鋼の摩擦圧接によるジャンクションを使用し、それぞれを溶接で接合している。

4. 車載用冷凍機

浮上式鉄道車両の車上に搭載する車載冷凍システムの構成は、開発の中心的課題であつたために実験車両においても種々の構成方法を比較調査している。図 5 は実験車両 MLU 001 の 3 両分の冷凍システムの構成を示したものである。

冷凍機内で発生したミスト (液体ヘリウムとガスヘリウムの混合状態で 4.3~4.4 K 程度の温度) は磁石内の凝縮用の熱交換器に送り込まれ、磁石内のガスヘリウムはこの凝縮用熱交換器の外部で凝縮液化する。磁石の熱



S: 超電導磁石 C: 圧縮機 R: 冷凍機

図 5 MLU 001 の車載冷凍機器の配置

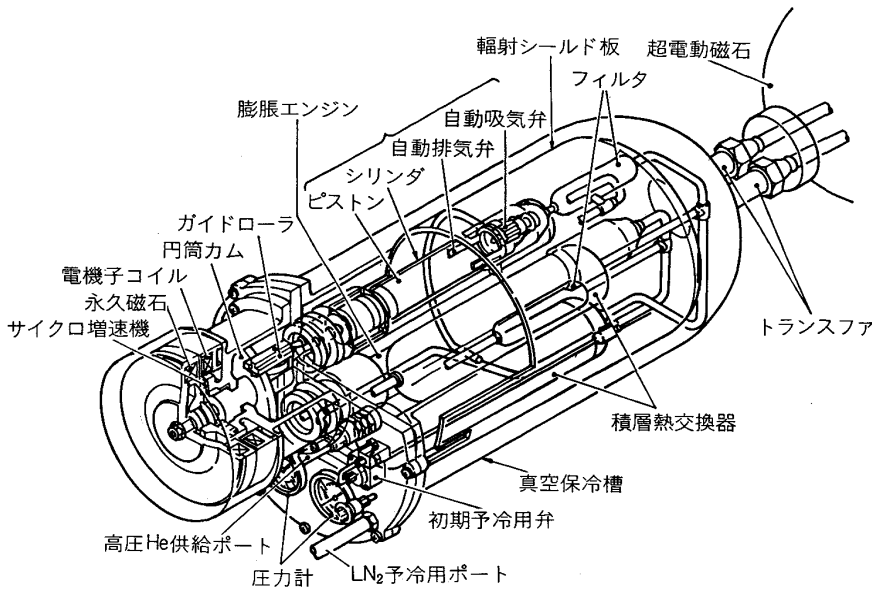


図 6 車載用冷凍機概念図

侵入量が多いと内槽内のヘリウムの圧力が上昇し、凝縮用熱交換器で凝縮するヘリウム量が多くなり、結果的に磁石の熱侵入とバランスした圧力で一定に保たれることになる。

磁石と冷凍機の配置組合せ方には種々の構成方法がある。当初は車上に1台の冷凍機を配置し、低温配管によって複数の磁石を冷却する方式(1号車)から試行をはじめたが、現在では磁石ごとに小型の冷凍機を分散する方式(2・3号車)が定着してきている。さらにこの考え方が進み冷凍機を磁石の外槽内に組み込むことにより一層の軽量化をはかる方向に進んでいる。

図6は、MLU 001の3号車に搭載した冷凍機の概略の構成を示す。本冷凍機は、クロードサイクル冷凍機であるが、このほかにスターリングサイクル冷凍機をも一部に搭載して試験を行っている。

冷凍機は、主要要素として熱交換器と膨脹エンジンがあげられる。それぞれが細かい分野において特殊な材料を必要とするものであり、次にその概要を説明する。

4.1 熱交換器

現在クロードサイクル冷凍機の内部に使用している熱交換器は、新たに開発した積層板型の熱交換器であり、その構成を図7に示す。積層板型の熱交換器の特徴は、対向流形のガスの流れに直角方向に金属の伝熱板とFRPのスペーサを交互に多数配し、両者を流路間の気密を保ちつつ接着材で接着したものである。

伝熱板としては、熱伝導率が良く軽量のアルミニウムを使用し、スペーサとしては熱伝導率の悪いFRPを使用し、かつ接着断面積をできる限り少なくするように努力している。両者の接着材は、低温でも耐えられるようなエポキシ系のものを使用している。もしも単一の材料で熱伝導に著しい方向性を有するものがあれば、こうした複雑な構成に頼らなくても済むことになる。

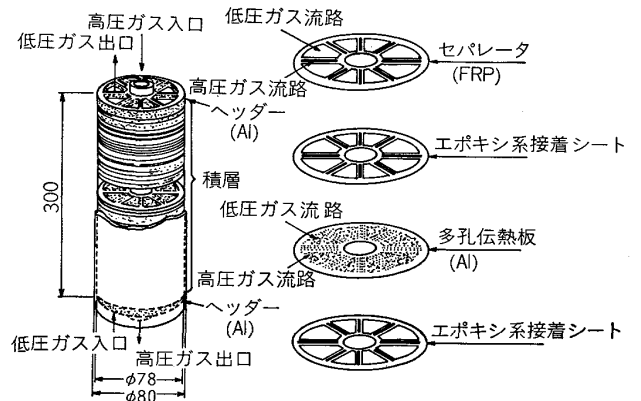


図 7 積層板形熱交換器の構成

なお、最近の冷凍機ではこうした熱交換器の内部に次に述べる膨脹エンジンを組み込み、全体の容積効率を高くする努力を払っている。

4.2 膨脹エンジン

膨脹エンジンは、高圧のガスに膨脹仕事を行わせ、低圧で低温のガスを発生させるための最も重要な機構部で、冷凍機の低温領域では唯一の可動部となる。車載用に開発した膨脹エンジンの特徴は、小型化を図るために、吸入・排気のタイミングをすべてピストンの動きによって自動的に行う特殊な弁を開発していることである。これらの機構部は特に低温部において油などの潤滑材が一切使用できないことが設計上の悩みとなり、そのため主としてテフロン系の材料によって摺動部の発熱を押し返している。弁の座に用いるシール材も同様である。膨脹部のシリンダーは磁石と同様にステンレス鋼 SUS 304L が主流であり、ピストンには熱伝導によるロスを少なくするために主にベークライトなどが用いられる。

4.3 その他

冷凍機としてこの他にスターリングサイクル冷凍機を

搭載しているが、この冷凍機では蓄冷器を使用している。この蓄冷器に要求される基本的な特性として低温における熱容量が大きいことが挙げられる。そのために 20 K 程度を対象とする蓄冷器では鉛の小球を用いる。他の材料の中では鉛の比熱が低温において比較的大きいためであるが、それでも 10 K 近くになると十分でなくなり、一般にスターリングサイクル冷凍機では 15 K 以下の冷凍はジュール・トムソンループを使用することになる。

より特殊な例として、現在国鉄では科学技術庁の振興調整費を受けて、直接 4 K 冷却が可能なスターリングサイクル冷凍機の開発を行っている。この場合には、上記の条件により適した材料として GdEr, GdErRh などの希土類元素による化合物を用いている。これはこれらの材料が 20 K 以下において比熱が大きくなる特異点を持つていることを有効に利用しようとするものである。これまでに 4 K レベルの冷凍が可能であることを実証しており、今後冷凍機としてまとめる予定である。

5. その他設備

以上、主に超電導とその冷却について焦点を絞って記してきたが、その他に浮上式鉄道の車両と軌道の面から材料について紹介しておく。

5.1 車体関係

車体に要求されることは、まず第 1 に軽量であることと十分な強度を有することである。この課題はほとんどすべての場合に必要な条件であり、基本的には航空機の機体に対する要求と同じである。従って、前記の台枠および車体はアルミニウム合金が主体である。浮上式鉄道の場合には、強磁性体は好ましくないという条件が加わるが、軽量構造の車体を作る上からの制約とはなっていない。

また、複合材料も魅力ある材料であり、ハニカムや CFRP による構造材料は車体の各所に使用されている。

5.2 軌道関係

前述のように軌道は、鉄筋コンクリートで構成された高架上に地上コイルを並べた構成となっている。このコイルは主としてアルミニウム合金による線材をモールド材 (SMC) で固めたものであり、耐候性の高いことが重要な課題となっている。また推進案内用の地上コイルでは、耐絶縁特性の高いことが特に要求される。

軌道に関連して特殊な条件として、鉄筋または使用す

るボルトなどの材料には非磁性または磁性の弱いことが望まれる。従来の強磁性体に代わり得る材料として高マンガン鋼が試験的に使用され、よい結果を得ている。

6. おわりに

浮上式鉄道の紹介とともに使用している材料面について記した。特に、本鉄道の最も特徴的な設備である低温関係の内容を中心として紹介してきたが、必ずしも現在使用している材料で満足できているわけではなく、たとえば、電気伝導度と熱伝導度のように自由に特性の選択組合せができないために、悩みつつ折衷案としてまとめている場合が多い。従って、多くの部分で新しい材料の出現によつて設計方法と性能が大幅に改善されることが十分に考えられ、材料面での新しい情報に期待するところは大きい。

今後とも、浮上式鉄道の開発にいつその御支援をいただければ幸いです。

文 献

- 1) 奥 猛, 京谷好泰, 佐貫利雄: 超高速新幹線 (1971), [中公新書]
- 2) J. R. POWELL and G. R. DANBY: ASME Paper 66-WA/RR-5 (1966)
- 3) 京谷好泰: 科学の実験, 30 (1979) 7, p. 25
- 4) 京谷好泰: 日本機械学会誌, 84 (1981) 746, p. 12
- 5) 笠井浩三, 有馬一堯: 日本機械学会誌, 83 (1980) 742, p. 1121
- 6) 田中 寿: 鉄道技術研究資料, 37 (1980) 5, p. 196
- 7) 岩花武彦, 藤本 健: 鉄研報告, 1171 (1981), p. 153
- 8) 中島 洋, 関口晴夫, 鈴木栄司, 岩崎一夫, 鈴木幸男, 戸来年樹: 鉄研報告, 1171 (1981), p. 194
- 9) 石塚素義, 岩花武彦, 岩元雅民, 荻原宏康, 京谷好泰, 北野良幸, 木村 浩, 佐々木拓二, 寺崎政男, 中島 洋, 山田忠利: 低温工学, 16 (1981) 5
- 10) 中島 洋: 鉄研報告, 917 (1973), p. 67
- 11) 中島 洋, 戸来年樹: 鉄研報告, 1171 (1981), p. 173
- 12) 岩花武彦, 根本薫: 鉄研報告, 1134 (1980), p. 103
- 13) 中島 洋, 戸来年樹, 関口晴夫, 鈴木栄司, 岩崎一夫: 鉄研報告, 1134 (1980), p. 120
- 14) 岩花武彦, 藤本 健: 鉄研報告, 1134 (1980), p. 92
- 15) 京谷好泰: 機械の研究, 3 (1982), p. 34
- 16) Y. KYOTANI: Rail International, 4(1981), p. 155
- 17) 田中 寿: 日本の科学と技術 (超電導), 23 (1982) 216, p. 44 [科学技術館]