浮上式鉄道に要求される材料特性

鈴木 栄 司*

1. は じ め に

現在、わが国で開発が進められている超電導に関連したプロジェクトの一つに磁気浮上式鉄道が挙げられる。この浮上式鉄道に用いられている材料は、従来の鉄を主体にした鉄道システムとは大幅に異なった特性が要求されている。

ここでは超電導磁石を主体に浮上式鉄道に対してどのような材料特性が要求されているのかを述べることにする。

2. 浮上式鉄道の基本構成

浮上式鉄道の概念としては、図1に示されるように地上には推進用コイルと浮上用コイルが配置され、車両側にはこれら地上コイルに対向した形で超電導磁石が取り付けられている。

地上の推進コイルと車上の超電導磁石はリニアシンクロナ

図1 浮上式鉄道の概念(側壁浮上方式)。

スモータを構成している。すなわち電源である電力変換装置から推進コイルに周波数可変の三相交流を流すと、超電導磁石のN, S間の距離である極ピッチの2倍に対応した長さの波長を持つ移動磁界が形成され、それが車両の位置および速度に同期するように制御されている。さらに通電電流の大きさを変えることにより、加速や減速の強さを調整することも可能である。

浮上用コイルは個々のコイルが独立した閉ループのコイルであり、走行する車両がこの浮上用コイルのそばを通過する時に、車上の超電導磁石の磁界が鎖交するので浮上コイルには電流が誘起される。その結果、浮上コイルと車上の超電導磁石との間に電磁氣的な力である浮上力が生み出されるわけである。従来のシステムでは、この浮上コイルは0の字をした形で走行路の水平面に置かれる方式(対向浮上方式)だったが、最近のシステムでは8の字形のコイルをガイドウェイの側壁上に推進コイルと重ねて配置する構成(側壁浮上方式)となっている。

車両は車体および台車より構成されており、台車の両側には超電導磁石が一对搭載されており、超電導磁石に作用する推進、浮上および案内の電磁氣的力は台車に伝わり、さらにアンカー、空気ばねなどを經由して車体に伝達されるしくみになっている。

車上の超電導磁石は、図2に示されるように上半分の円柱形部分が液体ヘリウムの入ったタンク部であり、下半分の長方形部分がコイル部でありNbTiでできた超電導線を多数回巻いた形の超電導コイルが内蔵されている。

超電導コイルは内槽と呼ばれる容器状構造物の内部に固定されており、周りをタンク部から落ちてきた液体ヘリウムにより浸漬冷却されており、いわゆる超電導状態を保持している。内槽を覆う形で外槽と呼ばれる容器状のものがあ

* 鉄道総合技術研究所研究室長(〒185 国分寺市光町2-8-38)

Materials Requirements for Maglev; Eiji Suzuki (Railway Technical Research Institute, Kokubunji)

Keywords: magnetic levitated ground transportation system, superconducting magnet, cryogenic refrigerator, linear motor, ground coil, light weight body, carbon fiber reinforced plastic, magnetic shield, materials for Maglev

1995年11月6日受理

図2 超電導磁石の構造。

かかる電磁気力は内槽-荷重支持材-外槽と經由して台車に伝わることになる。さらに液体ヘリウムタンク部にはヘリウム冷凍機が付いており、超電導磁石内部で蒸発したヘリウムガスを再度液化させる役割を果たしている。

浮上式鉄道の超電導磁石に要求される性能としては、

- (1) 電磁気的な推進・浮上・案内力を有効に発生するために十分な起磁力と安定な特性を有すること。
 - (2) 電磁気的な特性を良好にするために、超電導コイル中心から外槽表面までの距離をできるだけ小さくすること。
 - (3) 浮上走行する車両に搭載するために、できるだけ軽量であること。
 - (4) 可能な限り熱侵入量が小さいこと。これは冷凍機の小型化にも結びつく。
 - (5) 走行中の変動磁界や機械的振動といった外乱に対して、十分な強度と安定性を確保すること。
 - (6) 内部の真空や液体ヘリウムを長期にわたって保持できる気密性を有すること。
 - (7) 地上から浮上した非接触の状態で運用されるので、電源と切り離しても超電導コイルに電流が流れ続ける、いわゆる永久電流状態を安定して保持すること。そのために磁石状態にしたり、消したりの操作ができるスイッチ(永久電流スイッチ)を有すること。
- などがあげられる。

(7)にあげた永久電流スイッチは、超電導線とヒータ線を沿わせるように巻いた構成となっており、永久電流スイッチをOFFにするときは、このヒータ線に通電することにより超電導線の温度を上げて常電導化させ、有限の抵抗値をもたせ、一方スイッチをONにするときは、ヒータ線への通電を止めると超電導線が周りの液体ヘリウムにより自然に冷却されるので超電導状態となって電気抵抗が0となるのを利用したものであり、熱式スイッチと呼ばれている。

3. 材料面からみた浮上式鉄道の特徴

前述したように、浮上式鉄道を構成する機器といっても、車両、ガイドウェイ、電力変換設備、地上コイル、情報信号系と実に多彩な分野にわたっているので一概に述べることはできないが、最近の材料開発が超電導機器に関連したものが多くことおよび約50 K付近以下で材料の熱物理的性質が大きく変化することなどから、ここでは浮上する側の車両、その中でも重要コンポーネントと言われる超電導磁石、冷凍機を主体にして、そこで用いられている材料がどのような条件を満たすべきなのかを述べることにする。

(1) 軽量である

浮上式鉄道は当然浮上して走行するので、超電導磁石はもちろんのこと、車体、台車その他車上のものすべてが軽量であることが要求される。これらは航空機と似た事情である。軽量化には材料自体に比重の小さいもの(表1)を採用するとともに、ハニカム構造やジェル構造といった構造面からの軽量化対策も有効である。

宮崎の実験線で走行実験に供せられていたMLU002の車体については、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)、Al合金(A5083)が多用されていた。また車内の一人掛け用の椅子はCFRP製のものは約8 kgであり、航空機用よりもむしろ軽くなっていた。しかし車両火災の反省から、現在のMLU002N(図3)の車体については、全アルミニウム合金製

表1 軽量材料の比重。

材 料	アルミニウム	チタン	マグネシウム	FRP
比 重	2.7	4.5	1.7	1.3-2.0

図3 宮崎実験線の車両 MLU002N。

(A5083, A7003, A7N01)のセミモノコック構造としている。また台車もアルミ合金が大半であるが横梁などにはCFRPが使用されている。MLU002Nは長さが22 m、高さ3.7 m、幅3 mであり、新幹線車両の長さより少し短いが重量は約20トンと1/3以下に軽量化されている。

超電導磁石(図2)の外槽も軽量化の点の他、強度があり、真空を保つ溶接性の点からAl合金(A5083)が使われているが、軌道の地上コイルに面する側には地上コイルからの変動磁界を遮蔽する意図から、電気抵抗の低い純アルミ系(A1070)が望ましいので、板厚を厚くしたり両材質をクラッド材にしたものを使用している。さらに台車側の外槽については、超電導磁石全体の剛性をあげるためにリブが放射状に入ったハニカム構造として軽量化との並立をめざしている。

(2) 低温で機械的強度を有する

超電導磁石中の荷重支持材は極低温に保たれた超電導コイルに働く強力な電磁力を支持するとともに、それを常温部である台車に伝えることにより、車両は浮上走行し加減速ができることになる。また超電導磁石の液体ヘリウムタンク内槽を支えている荷重支持材部や冷凍機内の支持部材なども振動や重力に耐えるような強度が必要である。これらの力を受け持つ部材は、極低温においても必要な機械的強度を有することが要求されるとともに、一見これとは矛盾する軽量で熱伝導率が低いといった条件も満たさねばならない。

一般には、ほとんどの金属材料は低温になるとともに、引張強度、降伏点、硬さなどは漸増するが、伸びなど延性は低下する。超電導磁石における低温用構造材として最も重要な因子と言われるのは、低温における機械的強度と熱伝導率の大小および低温脆性の有無である。

低温脆性については、ある温度(遷移温度)以下では単純な結晶面または結晶粒界に沿って割れが生じて、脆性破壊が起こる現象のことであり、体心立方格子金属(鉄、鋼など)に特有なものである。そのために結晶構造が面心立方格子であるアルミニウム、銅、オーステナイト系ステンレス鋼は低温脆性を持たないので極低温用材料として広く使用されている。

浮上式鉄道の超電導磁石においても、極低温で強度を必要とする内槽や液体ヘリウム容器、冷凍機の熱交換器カバーおよび前述の台車へ力を伝える役割の荷重支持材などには、溶接性、断熱性の点や高圧ガス法規の規定からSUS304Lが使用されている。

(3) 熱伝導率が大きいものと小さいものを使い分ける

熱伝導率の大きい材料と小さい材料を、それぞれ使用目的に応じて選ぶことが重要である。

一般に熱伝導率は図4に示されるように、金属、非金属を問わず一般的に温度の低下とともに減少する傾向にあるが、アルミニウム、銅、銀などの良導体は逆に増加し、10から30 Kにおいて最大値を示す。ステンレス鋼では合金元素の

図4 各種材料の熱伝導率⁽¹⁾。

比重和の大きいものほど熱伝導率は小さい。一方繊維強化プラスチック(FRP)の断熱性能は金属より優れている。

(i) 熱伝導率の小さいものを要求される分野

浮上式鉄道の超電導磁石でも、内部の超電導コイルやタンク部を液体ヘリウム温度(約4.2 K)に保持する必要がある。低熱侵入、軽量化および強度の面と相まってFRPが使用されており、低温領域にカーボン繊維強化プラスチック(CFRP)を、常温領域にガラス繊維強化プラスチック(GFRP)を使う場合が多かったが、最近では全温度領域において、これらより強度が高く熱伝導率の低いアルミナ繊維強化プラスチック(AFRP)を使用することが多くなっている(図5)。

(ii) 熱伝導率の大きいものを要求される分野

熱伝導率の大きい材料を必要とされる所としては、輻射熱シールド板がある。これは輻射熱を遮蔽する意図から光沢性があり、熱伝導率が高いことが要求されると同時に、軽量な点や地上コイルからの変動磁界を遮蔽する効果も必要であるので、従来は純アルミニウム(A1050)系が用いられていた。しかし内槽と輻射熱シールド板が磁界中で相対的に振動するとシールド板に渦電流が誘起され、さらに内槽表面にも生じた渦電流により、内部の液体ヘリウムを蒸発させるという現象が発生することが判明したので、一部の超電導磁石では、シールド板の材質として電気伝導率が悪いが熱伝導率が良いという相矛盾する条件を満たすために、特殊なCFRP材を用いている。

(iii) 熱伝導率の大きさを組合せた分野

熱伝導率の大小を使い分けている機器としては、車上のヘリウム冷凍機の熱交換器があげられる。内部構造としては、

図5 断熱用材料の熱伝導率⁽²⁾.

多数の孔のあいたAl板を積層としたものであり、ガスの流れ方向には熱伝導が悪く、熱交換壁の方向には熱伝導が良い全体がコンパクトで高性能なものとなっている。

また永久電流スイッチにおいても、熱伝導率が支配している事項としてONまたはOFFのスイッチングに要する時間がある。スイッチそのものは前述したように、超電導線とヒータ線をFRP製巻き枠に巻き付けた後エポキシ樹脂で一体化した構造となっている。全体のモールドを薄くするとONは速いがOFFが遅くなり、逆に厚くするとOFFは速いがONが遅くなり、どちらの動作時間も短くするにはヒータの大きさとからんで工夫が必要である。

(4) 電気伝導度が高いものと低いものを使い分ける

一般に金属系導電材料の電気抵抗は温度が低下するにつれて減少する。室温付近では絶対温度 T に比例するが、さらに低温ではもっと急激(T^5)に減少する。しかし30 K以下ではこの減少率は小さくなり、10 K以下では残留抵抗を示してほとんど一定値をとる。この残留抵抗値は材料中の不純物の不均質性に大きく左右され、純粋なもの程小さい⁽³⁾。

(i) 高電気伝導度の要求される分野

浮上式鉄道用超電導磁石の中で、電気伝導度の高い材料を用いる必要のある分野は、励磁用のパワーリードがあげられる。これは超電導コイルを励磁したり消磁する際に電源と接続し電流を通电するためのものであり、通电中の発熱を小さくさせるとともに、できるだけ熱侵入量を減らすために、高電気伝導度でかつ低熱伝導率のものが要求される。このような相矛盾する条件を満たす理想的な材料はないが、現実的に

は磷脱酸銅がこれらの条件にやや近いので用いられている。さらに構造的にも非通电時の熱侵入量を下げるために、パワーリードの断面積を通电する電流の大きさの割には小さな細いパイプ状の導体構造にして、通电時のみ内部で蒸発した低温のヘリウムガスを流すことにより、大電流が通电可能となっている。

また超電導線において、超電導フィラメントが埋め込まれた安定化母材の性質としては、電気伝導度が高いばかりでなく熱伝導率も大きいことが必要であり、不純物の少ない無酸素銅(OFHC)の特級クラスの銅が用いられている。銅と超電導フィラメント(NbTi)の断面積比は超電導磁石を軽量化する意図ともからんで順次小さくなり、MLU002N用超電導磁石のもので1.0または1.5である。ただし単純に母材の銅を減らして軽くするだけではなく、フィラメント自体を極端に細くすることにより、超電導状態の安定性を確保するようになっている。

別の例として最近の研究から走行時における地上コイルからの電磁気的外乱により、超電導コイルを収納したステンレス製の内槽での渦電流による発熱を低く抑えるために、内槽表面に電気伝導度の非常に高い銅やアルミニウムをメッキしたり張り付けたりして対処している。これらの材料は磁界中で用いられるので、磁気抵抗効果の小さいものが要求される。

使用環境が低温ではないが、高電気伝導度を要求される分野として推進コイルおよび浮上コイルの導体があげられる。これらは取付作業性などから軽量化も考慮して電気アルミニウム線が使われている。また宮崎の実験線の終端には、一部

の超電導磁石がフェイルした時の車両の逸走を防止するために、最終ブレーキ区間として電気伝導度の高いアルミ板を軌道上に並べ、そこに車両が突入したときに誘起される渦電流により、車両の制動ができるようにしている。

(ii) 低電気伝導度の要求される分野

超電導磁石において永久電流スイッチについては、OFF時の抵抗値を高くすることにより、励磁・消磁時間を短くできかつその際使用する液体ヘリウム量も減らせるので、安定化母材としては電気伝導度の低いキュプロニッケル(CuNi)が用いられている。ただし超電導状態の外乱による安定性保持には、超電導コイルの場合よりさらに工夫が必要となる。

他の例としては、超電導磁石が万一故障した際に支持論が出るまでの間、車両質量を支えながら走行路を高速で転がる転動輪と呼ばれる金属性の車輪を備えている。この材質としてはアルミニウムなどでは、軽量は良いとしても超電導磁石の近くで回転することに伴う渦電流が生じ熱応力が大きくなるので、低電気伝導度であるステンレス鋼が使われている。さらにこのような故障時に、超電導磁石が保有していたエネルギーを外部で消費させるために、超電導コイル両端を結ぶ形で保護抵抗器が設置されている。この保護抵抗器の材質としては、電気抵抗値が高くかつ耐熱性が要求されるので、ステンレス鋼(SUS304)が用いられている。

また車両が通過した際に、磁気抗力の一つである地上のガイドウェイの鉄筋に生じる渦電流をなくすために、普通鋼よりも電気伝導度が約1/5程に低い高マンガン鋼を使ったり、鉄筋間の結束方法を工夫したりしている。

(5) 非磁性のものと強磁性のものを使い分ける

(i) 非磁性のものが要求される分野

超電導磁石を使用している浮上式鉄道においては、車上、地上設備を問わず、強磁性材料は超電導磁石の磁界との相互作用のために電磁力(吸引力)を受けることになる。もしそれが地上に有ると、走行抵抗(磁気抗力)にもなる上に発生する磁場分布に悪影響を及ぼすので好ましくない。すなわち一般的には、透磁率が低くしかも組織が安定している材料が要求される。

オーステナイト系ステンレス鋼である SUS304, 316は低温用非磁性鋼として低温脆性も示さず引張強度も高く、溶接の容易さともからんで一般的に多用されている。ただし温度サイクルや歪により強磁性相への変化の恐れが有ることや被切削性が良くないこと、降伏点が比較的低いといった欠点も有している。浮上式鉄道においても強度、非磁性の両面から超電導磁石の内槽をはじめとして、常温部でも台車の機器、配管その他多くの分野にステンレス鋼が使用されている。

チタン合金は強度が高く軽い(比重4.5)ことや耐腐食性が優れ透磁率が小さいために、浮上式鉄道のような強磁場中での使用に適していると考え、過去にはヘリウム圧縮機内の機

械部品や、台車下部の緊急着地シューの一部にその断熱性が良い点を考慮して使われたこともあるが、反面高価で加工性が良くないために現在は支持脚装置の一部で使用されているのみである。

質量をあまり気にしなくて良いガイドウェイの鉄筋などには、経費的にステンレス鋼よりも安い高マンガン鋼が非磁性鋼(比透磁率1.02)として用いられており、走行抵抗の低減に寄与している。また鉄筋の代わりに FRP 筋の入ったコンクリートの開発も進んでいる(4)。

(ii) 強磁性材料を要求される分野

強磁性体を逆に積極的に用いている分野としては、車内の磁気シールドがあげられる。磁気シールドは磁力線が磁性体に集まる性質を利用するもので、そのシールド性能は高透磁率で飽和磁束密度の高い材料ほど効果がある。

浮上式鉄道では純鉄系やケイ素鋼板が強磁性磁気シールド材料として車体の床面に使われており、同時に荷重を受け持つ構造材料としての役割も持っている。軽量化を考慮して車体の場所毎に板厚を変化させたり、その接合方法や配置方法に工夫している。また台車上の電磁弁その他の部品に対して超電導磁石からの磁気を遮蔽するために、箱状の鉄板でそれらを囲う工夫もしている。磁気シールドについては、超電導の性質である完全反磁性を利用したものとして高いシールド効果が期待でき、軽量化の点でも有利な酸化物系高温超電導体の板を用いた研究も現在進められている。

(6) 溶接性が良い

超電導磁石などの極低温機器は、内部を高真空中に保ち極低温の液体ヘリウムを溜める必要があるため、微少なヘリウムなどのリークも許されず内外とも溶接構造となっている。このために材料の選択にあたっては、溶接性が重要な要因となる。一般論としてオーステナイト系ステンレス鋼については溶接性は良好だが、炭素量の低いものを選んで靱性の低下を避ける必要がある。またアルミ合金の溶接性では A5083 が最も優れている。

前述したように、超電導磁石の内槽や冷凍機の熱交換器にはステンレス鋼が、また冷凍機も含んだ外槽は軽量化の点も考慮してアルミ合金がそれぞれ溶接構造材として使用されている。これら両者間を貫通する形で多数の配管が配置されており、配管途中でステンレス鋼とアルミ合金間を接合する必要がある。そこは気密保持とリークに対する高い信頼性が要求される所である。実際の超電導磁石では、その部品として摩擦圧接品(ジョックスジョイント)を採用しており、超電導磁石を製作する上で不可欠なパーツと言える。

(7) 低温での比熱が小さい、大きい

比熱の大小は極低温材料で重要な性質である。すなわち超電導磁石を予冷する際に使う液体ヘリウムなどの冷媒の消費量はこの値によって決まるので、この面からは比熱が小さい

方が良いが、他方車載冷凍機の分野では逆に低温での比熱の大きいものが要求されている。

浮上式鉄道の開発当初から、超電導磁石中で気化したヘリウムガスを大気に放出させずに再度液化させるシステムを車上のクローズした系で構成することを目指してきた。車載用の冷凍機は超電導磁石と同様に軽量小形であるとともに、高効率で信頼性の高いことが特に要求される。現在使用されている冷凍機の種類としては、スターリングサイクル式冷凍機とギフォードマクマフオンサイクル式冷凍機であり、いずれの冷凍機にも熱の蓄熱と放出を繰り返す蓄冷器と呼ばれる重要な部品を内蔵しており、そこで使用される材料(蓄冷材)は十分な熱容量を有すること、すなわち低温で単位体積当たりの比熱が大きいことが要求される。

通常の金属ではデバイ温度 θ_d (銅 310 K, 鉄 430 K) の $1/5$ あたりの温度から急激に比熱が落ち始めるが、鉛は θ_d がずっと低く 86 K であり低温での比熱は他の金属と比較して一桁大きい⁽⁵⁾。これらの理由から 2 段膨張式の冷凍機の場合、80 K ステージでの蓄冷材として銅のメッシュを、20 K ステージには鉛の小球といった熱容量の大きいものを選んできた。ただし鉛でも 20 K 以下になると比熱が小さくなるので、それ以下の温度では特殊な希土類元素(Er_3Ni など)を使用した材料(図 6)を組み込んだ冷凍機が開発された結果、飛躍的に効率が上がり 8 kW の入力で 10 W (at 4.5 K) 以上の能力のあるものも実用化されている。

(8) 低温における熱収縮が小さい

一般に温度が下がると抗張力は増加するが、伸びが極めて小さくなるのでむしろなる。このためにゴムやビニールなど

図 6 低温域における蓄冷材の比熱⁽⁶⁾。

は完全に柔軟性がなくなり割れてしまうので、極低温における絶縁材やシール材としては使用できず、それらに対してはテフロン、ナイロン、ポリイミド、FRP、セラミックスなどが用いられている。

また超電導磁石中の永久電流スイッチは、一般に E ガラスを強化繊維としたエポキシ樹脂製の巻枠に超電導線のある張力を確保しながら巻き付ける構造となっているが、液体ヘリウム中では巻枠自体の収縮のために張力が低減し、性能面で劣化する可能性が指摘されている。これらについては冷却収縮歪が超電導線のそれより小さかったり、負の値をとる材料を用いることが望ましく、超高分子量ポリエチレン(ダイニーマなど)、石英ガラスなどが適用できると考えられる⁽⁷⁾。

さらに高圧のガスを吸入しそれを膨張させて低温を得るヘリウム冷凍機においては、内部にピストンとシリンダーの組合せを有しているが、そこでのシール性能と磨耗特性が重要である。ガス中に不純物が入ると、それらが凍って熱交換器などに詰まるので摺動用シール材としては、無潤滑で使用する必要があり、テフロン(PTFE)複合材で形成したリップと O リングまたは金属ばねからなる弾性体を組合せたものが一般的である⁽⁸⁾。ピストン自体は外部からの熱侵入を極力小さくするとともにステンレス製のシリンダーの熱収縮とほぼ同じ小さな収縮率を持つ断熱性の高いフェノール樹脂系複合材(ベークライト)を用いることが一般的である。

(9) 耐久性のある高分子材料

(i) 低温用 FRP

前述した繊維強化プラスチック(FRP)は極低温下において高強度、低熱収縮(SUS304 の約 $1/2$ 以下)を示し、かつ熱伝導率が小さく、軽量、非磁性であるために浮上式鉄道用超電導磁石の荷重支持材をはじめとして極低温構造材料として多用されている。低温用 FRP で最も問題となるのは、繊維強化材とマトリックス樹脂との熱収縮の差であり、温度変化が大きいときや冷却と昇温の繰り返し回数が多い場合、両者の界面に歪が生じ亀裂、剥離が発生することになる。したがって歪の少ない樹脂の選択と繊維の界面処理が非常に重要となる。マトリックス樹脂については極低温用としてはエポキシ樹脂が主に使用されている。エポキシ樹脂は絶縁性、腐食性、機械的特性、接着強度が優れ、成形時の硬化収縮が他の樹脂に比べ小さいことなどが長所であり、超電導コイルを製作する際にも、多数回レーストラック状に巻いた超電導線をお互いの絶縁を保持しながら一体化するために真空含浸法と呼ばれる方法で用いられている。

これら複合材料の疲労限界を把握するために、超電導磁石の荷重支持材を対象として疲労試験を現在行っているところである。

(ii) 地上コイル用モールド樹脂⁽⁹⁾

地上コイルは電流を流す導体(アルミニウム線)とそれを封止する絶縁モールド材からなるが、鉄の構造材を有しない空

地上コイルは大量かつ長期間に亘って使用されるものなので、耐久性とともに製造コストの低減が極めて重要である。コスト低減に関しては、浮上コイルに対して前述の SMC に代わり、DCPD(ジシクロペンタジエン)樹脂を常温・常圧で型に流し込む反応射出成形(RIM=Reaction Injection Molding)による製作も試行しているところである。さらに耐久性に関しては、地上コイルは屋外のコンクリートに長期間取り付けられた状態になるので、耐アルカリ性なども考慮に入れる必要がある。

(1) 複合機能に適した材料

(2) 高温超電導体の応用

近年液体窒素温度で超電導を示す、いわゆる酸化物超電導体が発見されて種々の応用が考えられているが、浮上式鉄道への適用分野としては

- (1) 車内の磁気シールドへの適用
- (2) 超電導磁石のパワーリードへの適用による熱侵入低減
- (3) 合金系超電導線材に代わる線材化した酸化物超電導体をコイルとして用い(または酸化物超電導体のバルクそのものを磁石として用いる), 液体窒素で冷却した磁石への応用.

さらに冷媒を用いず, 冷凍機のための冷却による超電導状態を利用した強磁場の実現

- (4) 走行時の電磁気的外乱に伴う内槽での渦電流発熱低減のために磁石内部に高温超電導体を使って変動磁界をシールドさせる方策などへの応用

- (5) 新しい浮上機構への応用

などが考えられる。(3)の実現には超電導線材の電流密度の向上と線材加工技術が欠かせないが, それらをクリアできれば, 液体ヘリウムの代わりに液体窒素を用いれば良く, 冷凍機系の現状技術の簡略化にも結びつくので, 磁石構成上における技術的なネックはないものと思われる。

5. ま と め

浮上式鉄道に要求される材料特性について簡単にまとめた。現在の所, 浮上式鉄道の特に極低温関係で用いられている材料としては, 軽量, 断熱性能, 強度, 非磁性の面から, 金属材料ではステンレス鋼, アルミニウム合金が主体であり非金属材料では繊維強化プラスチックが用いられることが多い。

現在各所で超電導技術やそれと密接に関連した極低温技術を支える材料の開発, 改良が進められており, 今後とも性能の大幅な改善と革新が期待される場所である。浮上式鉄道実用化へ向けた開発に対して皆様のご指導, ご協力をお願いしたい。

文 献

- (1) R. P. Reed and A. F. Clark: *Materials at Low Temperatures*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, (1983), p. 154.
- (2) 安田 純, 岩崎康彦, 西嶋茂宏: 低温工学, **26**(1991), 108.
- (3) 相山義道, 近藤弘一: 超低温技術, **10**, No. 22 (1973), 45.
- (4) 中島 洋, 寺内伸雄, 大野 薫, 小田和裕, 涌井 一, 鈴木正夫, 吉川高雄: 日本金属学会会報, **31**(1992), 211.
- (5) 緒方俊夫: 低温工学, **26**(1991), 18.
- (6) 橋本魏洲: 第49回春季低温工学・超電導学会予稿集, B1-1, (1993), p. 29.
- (7) 上条弘貴, 根本 薫, 鹿島俊弘: 第50回秋季低温工学, 超電導学会予稿集, E1-6 (1993), p. 105.
- (8) 服部仁志: トライボロジスト, **37**(1992), 630.
- (9) 吉川高雄, 相原直樹, 佐藤 勉, 諏訪 博: 鉄道総研報告, **8**, No. 10 (1994, 10), 35.
- (10) 鈴木栄司: JREA, **31**(1988), 18068.
- (11) 佐藤敏美, 季 瑞, 大西 淳, 金沢克明, 浅見 宏: 住友重機械技報, **43**, No. 128 (1995, 8), 1.
- (12) 奥村嘉賀男: ISTEC ジャーナル, **6**, No. 1 (1993), 35.
- (13) 石川圭介: 高圧ガス, **29**(1992), 335.
- (14) 石川圭介, 平賀啓二郎: 日本金属学会会報, **20**(1981), 692.
- (15) 日本科学技術振興財団: 極限・材料科学技術講座, (昭和55年12月).