

フライホイール蓄電装置向け超電導磁気軸受の開発

Development of Superconducting Magnetic Bearing for Flywheel Energy Storage System

中尾 健吾*
Kengo Nakao

笠原 甫*
Hajime Kasahara

畠山 英之*
Hideyuki Hatakeyama

松岡 太郎*
Taro Matsuoka

向山 晋一*
Shinichi Mukoyama

〈概要〉

国内では脱炭素社会を目指す機運の高まりから、太陽光、風力エネルギーなど再生可能エネルギーの積極的な採用が加速してきている。これらの不安定な発電システムと組み合わせて電力システムを安定化させる用途や電気鉄道の回生失効対策用途に、急速な電力の入出力が可能なフライホイール(FW)蓄電装置の開発を、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)プロジェクトにおいて進めてきた。FW蓄電装置は電力を高速回転体の運動エネルギーとして蓄積し、必要に応じて回転力を再び電力に変換するものであり、古河電工は、REBCO(Rare Earth $Ba_2Cu_3O_y$)高温超電導コイルと高温超伝導バルク体を組み合わせた超電導磁気軸受(SMB)の開発により4 tonのロータを非接触で浮上・回転させることに成功した。本論文ではこのSMBの設計手法・試作・性能試験の結果を報告する。

1. はじめに

平成24年度より古河電工では、NEDOプロジェクトにより電力システム安定化用蓄電装置としてフライホイール(FW)蓄電装置を、公益財団法人鉄道総合技術研究所、クボテック株式会社、株式会社ミラプロ、山梨県企業局と共同で開発してきた^{1), 2)}。現在、実証試験施設が完成し山梨県米倉山大規模太陽光発電所と本装置との連系試験中である。

FW蓄電装置は、電力を回転体(ロータ)の運動エネルギーとして蓄積するもので、化学反応を利用する二次電池とは異なり、充放電による化学的な劣化が生じないメリットがあり、長期間の安定な運用が可能な実効性の高い装置である。更に、二次電池では規模に応じて蓄電容量と出力が決まるため、高出力を得るには大容量の二次電池が必要となるが、FW蓄電装置ではロータサイズと発電電動機の出力を独立に設計可能なため、高出力・小容量、低出力・大容量などの組み合わせが可能である。他にも残量の管理が容易であることや有害廃棄物を出さないなどのメリットがあげられる^{3), 4)}。本プロジェクトで作製した実証機は、4 tonのロータ(直径2 m)を回転させ回転速度を加減速し充放電を繰り返し、その出力は300 kWとなり世界最大級の装置となる。更に、大容量化をめざし10 tonのロータを浮上させて1 MWの出力を有するフラグシップモデルの設計(将来機仕様)も行った。

古河電工は超電導磁気軸受(SMB)の開発を担当した。SMBを利用することでロータを浮上させて回転させ、軸受け部での

摩擦によるエネルギーロスと機械的な摩耗に伴うメンテナンスコストを抑えることを目指した。

今回開発したSMBは、ステータ側にREBCO高温超電導コイル(超電導コイル)をロータ側にREBCO高温超電導バルク(超電導バルク)を用いており、超電導コイルに通電することで生じる磁界を超電導バルクのシールド効果で押しのける反発力を浮上力としている。ステータ側とロータ側の両方に超電導を用いることで4 tonの大質量の浮上を可能としている。しかし、回転するロータ側を非接触で冷却する必要があり、本SMBでは超電導バルクの冷却を希薄ヘリウムガスの伝熱により行っている。

本稿ではSMBの設計から作製、SMB単体での試験とFW蓄電装置へ組み込んだうえでの性能試験の結果について報告する。

2. SMBの設計

SMBの設計は、超電導コイルが生じる磁界で4 tonないし10 tonの浮上が可能であること、浮上して反力がかかっても構造的に耐えられること、浮上に必要な超電導電流を流せるよう冷却できることの3つについて設計し、解析を行うことでその妥当性を検討することで行った。ここでは超電導コイルの基本設計、構造設計、伝熱設計について報告する。

2.1 超電導コイルの基本設計

SMBに利用する超電導コイルは、平面的に超電導線材を巻きつけたパンケーキコイルを2枚組み合わせたダブルパンケーキ型超電導コイルを超電導コイルモジュールとして用いている。この超電導コイルモジュールを積層させてSMBで用いる

* 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

超電導コイルとしている。図1に超電導コイルモジュールの写真と超電導コイルモジュールと超電導バルクを組み合わせたSMBの概念図を示す。

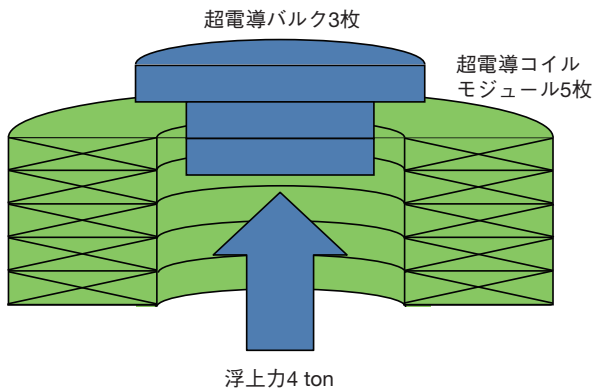
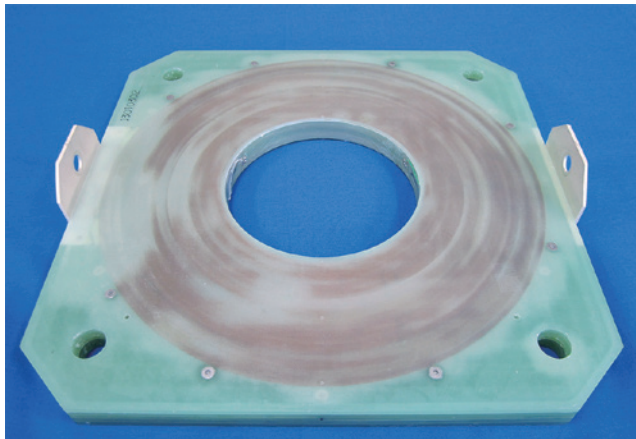


図1 超電導コイルモジュール(上)とSMBの概念図(下)
Superconducting coil module (upper) and image of SMB (under).

超電導バルクの大きさは大型化が容易ではないので、ある程度決まってしまう。このため超電導コイルを超電導バルクの大きさに合わせて設計している。まず、超電導バルクの大きさから浮上に必要な磁界の大きさを算出し、電流ターン数を求め、超電導コイルの大きさを計算した。4 ton 浮上の実証機仕様では、超電導コイルモジュールを5個用いて超電導バルクを大小3枚組み合わせれば必要な4 tonの浮上力が得られると見積もった。大小2種類のバルクを用いるのは大きい超電導バルクで反発する浮上力を得て、コイルの内径に入りこむ小さい超電導バルクがコイル中心方向への案内用とするためである。超電導バルクと超電導コイルは同軸上に存在するが、変位があった場合にそれを押し戻す力が生じる構造を目指した。

次に、その超電導コイルと超電導バルクを組み合わせて浮上高さ20 mm・通電電流75 Aとして電磁界解析を行った。その結果を図2に示す。この結果からコイルに通電する電流に対する浮上力が計算できる。浮上力は磁場の二乗に比例することが知られており^{5),6)}、本条件における通電電流と浮上力の関係を図3に示した。図に示したとおり4 ton浮上に必要な通電電流が74 Aであることが分かる。

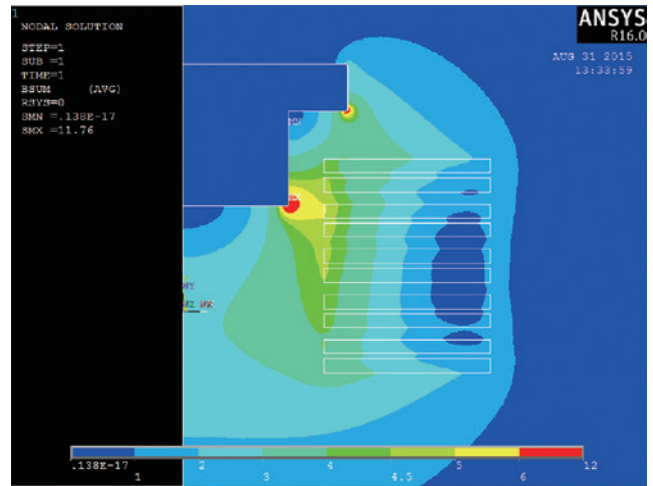


図2 超電導コイルモジュール5枚と超電導バルク3枚での電磁界解析結果
Electromagnetic analysis result at 5 superconducting coil modules and 3 superconducting bulks.

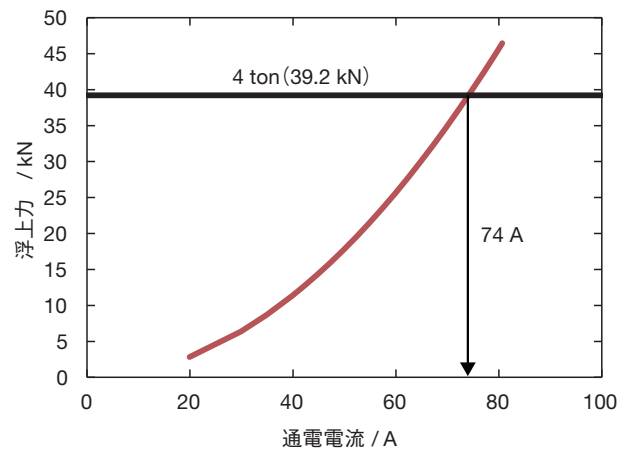


図3 超電導コイルモジュール5枚と超電導バルク3枚での発生浮上力の通電電流依存性
Current dependence of levitation force at 5 superconducting coil modules and 3 superconducting bulks.

超電導線材には超電導状態のまま抵抗なく流せる電流の限界が存在し、臨界電流 (I_c) と呼ばれている。 I_c は温度と磁界に応じて変化することが知られており、その特性を図4(上)に示す。同じ温度では磁界が増えるほど I_c は低下し、同じ磁界では温度が低いほど I_c は高くなっている。(上)で示した電磁界解析の結果より、通電電流あたりの超電導コイルの最大経験磁場が求まるので図4(下)のように超電導線材の I_c 特性のグラフと合わせるとその交点から超電導コイルの I_c が求まる。図から50 K (-223°C, 0 K = -273°C)における超電導コイルの臨界電流は98 Aであり、浮上に必要な74 Aを上回っている。よって、本超電導コイルは50 Kにおいて4 tonの浮上が可能であると見積もれる。

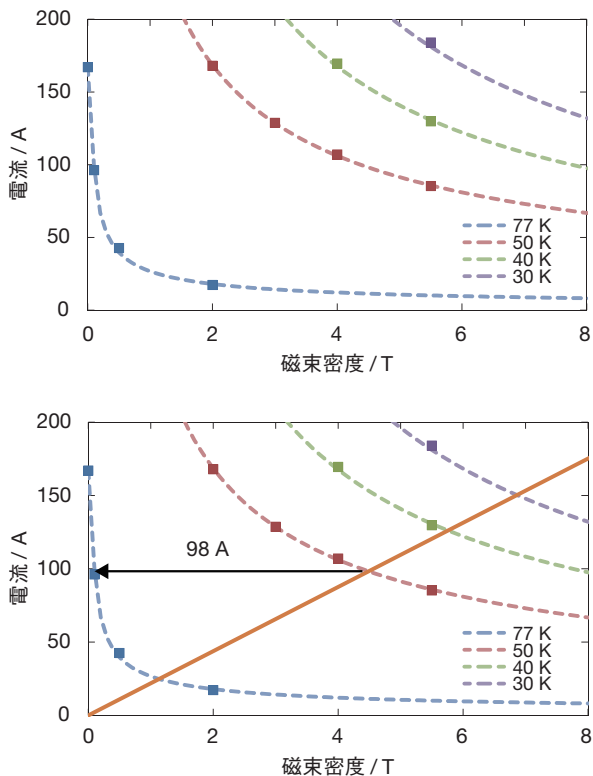


図4 超電導線材の I_c - B 特性(上)と超電導コイルモジュール5枚・50 Kにおける I_c 特性(下)
 I_c - B property of superconducting wire (upper) and I_c property of superconducting coil at 50 K and 5 superconducting coil modules (under).

また、本プロジェクトでは、最終目標を10 tonのロータを浮上させることとしているので10 ton浮上させる超電導コイルの設計(将来機仕様)も行っている。そこで、図5のように10 tonの荷重を浮上可能なダブルパンケーキ型超電導コイルを7枚と超電導バルク4枚を使用したSMBを設計した。超電導コイル7枚の場合の通電電流と浮上力の関係と通電電流と経験磁場の関係を図6に示す。10 ton浮上に必要な通電電流は101 Aとなり、40 Kの超電導コイル I_c が116 Aである事から40 Kで10 tonを浮上可能だと予想できる。4 ton浮上させる場合の50 Kと比較して10 ton浮上させる場合は40 Kと運用温度を低くする必要があり、冷却コストが増えるが、10 ton浮上させた場合のほうがFW蓄電装置としての能力が2.5倍に大きくなるため、出力に占める冷却電力の割合は低くできると予測している。

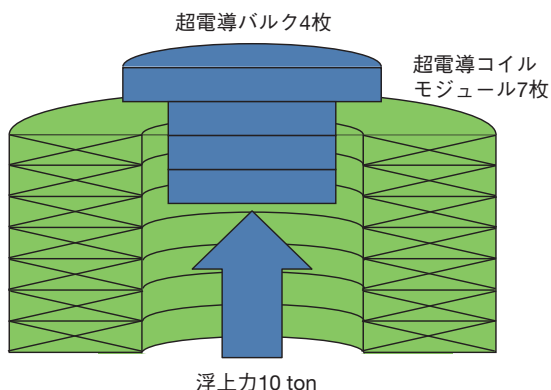


図5 10 ton浮上仕様のSMBの概念図
 Image of SMB 10 ton levitation version.

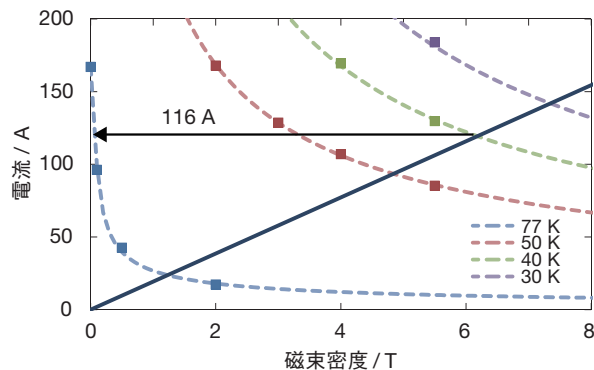


図6 超電導コイルモジュール7枚・40 Kにおける I_c 特性
 I_c property of Superconducting coil with 7 superconducting coil modules at 40 K.

2.2 超電導コイルの構造設計

超電導コイルはロータの大荷重を支えるために大きな反力を受ける。そこで、超電導コイルにかかる応力を想定したうえで構造設計を行い、構造解析によりその設計を検証した。将来機仕様では10 tonのロータを浮上させることを想定していることから、4 tonの耐力が必要な実証機についても10 tonの耐力を持つ構造を設計し構造解析により検証を行った。コイルについては、高い強度を持たせるためにYOROI - coil (Y-based Oxide Superconductor and Reinforcing Outer Integrated coil) 構造を用いている⁷⁾。

解析に用いたSMBの構造を図7に示す。SMBは実証機仕様の場合は5枚の超電導コイルモジュールを、将来機仕様の場合は7枚の超電導コイルモジュールを積層した構造をとるが、その間には冷却のための伝熱板として銅板を挟み込んでいる。また、ダブルパンケーキ型超電導コイルは中心部にFRP製の内筒をもち、そこから超電導線を巻きつけ外側に外枠を設けた構造となっている。また、コイル内の中敷や線材間に含浸したパラフィンなども考慮している。これらの構造に対し、電磁界解析の結果から得られる各部にかかる応力と変位を算出した。そのうえで、各部の変位の大きさを評価し、応力と材料の耐力比較を行った。条件的に厳しいと考えられる10 ton浮上の将来機仕様では、電磁力による変位は最大で0.17 mmであり、問題となるような変位は見られなかった。また、各部の応力を耐力で割った負荷率を表1に示す。最大で15%程度と十分な耐力を持っていることからこの設計で十分な耐力があると言える。同様に4 ton浮上の実証機仕様では最大の変位が0.04 mmであり、耐力も最大で5.9%との解析結果が得られた。

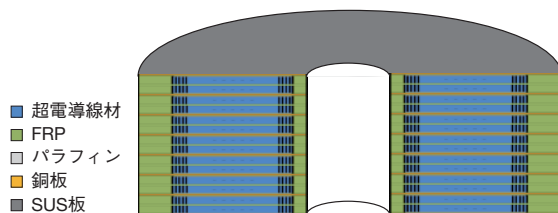


図7 解析に用いた構造モデルの概念図
 Conceptual diagram used at structural analysis.

表1 各部の応力を耐力で割った負荷率
Load factor (Stress divided by proof stress) of various part.

応力/耐力	径方向	軸方向	周方向
SUS板 (%)	1.1	2.1	2.3
内筒FRP (%)	13.1	3.2	1.7
外筒FRP (%)	3.2	8.2	1.7
蓋/中敷きFRP (%)	8.5	1.7	2.0
銅板 (%)	15.1	8.0	4.4

2.3 伝熱設計

超電導コイルを超電導状態で運転するには低温に維持する必要がありますが、運転目標温度を30 Kとしている。電磁解析の項にて5枚の超電導コイルと3枚の超電導バルクを使用した場合、4 ton 浮上は50 Kにおいて十分な I_c を取れることを確認したが、フライホイール装置に万一停電などが生じて冷凍機が停止しても、ロータが停止する30分間にわたり50 K以下の温度を維持し浮上を続けられるように熱設計に余裕を設けているためである。超電導コイルの冷却には、冷凍機からコイル部分への伝熱設計と外部からの熱侵入を低減する断熱設計が重要となる。特に、10 tonの荷重に耐えられるよう強固な構造としているため、低熱侵入と荷重支持力を両立する構造とする必要がある。今回、支持構造や、材料の選定を慎重に行い、低熱侵入のクライオスタットの設計に成功した。そのクライオスタットについて熱解析を行い、超電導コイルや超電導バルクの温度を推定した。その結果を図8に示す。超電導コイルの温度は17 Kから18 Kと十分冷却できており、温度分布も1 K以内に収まっていることから十分な伝熱を保持していることが分かる。また、ロータ側に位置し、ヘリウムガスによる間接的に冷却される超電導コイルについても22 K程度となっており、ヘリウムによる伝熱により冷却されつつ、外部からの熱侵入を抑えられていることが解析で明らかにできた。このように、超電導コイル・超電導バルクともに30 K以下を満たすことが可能である結果となり、設計の妥当性が解析により示すことができた。

3. 超電導コイルの通電試験

実際にSMBを作製するにあたり、超電導コイルモジュールを1枚試作し、その特性を調べた。これにより、線材のコイル化において性能の変化などの問題がないかを確認した。また、得られた I_c を電磁界解析で求めた予測 I_c と比較し、電磁界解析の正確性を検討することとした。具体的には液体窒素中77 Kでの I_c と伝導冷却による50 Kでの I_c を測定した。

3.1 液体窒素中77 Kでの I_c 測定

液体窒素中での I_c 測定は、超電導コイルモジュールを液体窒素が気化した低温の窒素ガス中で徐々に冷却し、最終的に液体窒素に浸けて77 Kまで冷却した。超電導コイルは抵抗なく電流が流れるため、 I_c 以下の電流では電圧は十分小さいが、電流が増すにつれて徐々にコイルへかかる電圧が上昇していく。ここではコイルの電圧が70 μ Vを越えた電流を I_c と定義した。線材と異なり、コイルではインダクタンスがあることから通電電

流を変化させると電圧が生じてしまう。そのため、 I_c 測定で電流を増やす際は電流を一定値まで増加させた後、しばらくその電流で維持することで各電流値での電圧を測定した。その結果を図9に示す。37 Aで電圧が70 μ Vを超えることから I_c は37 Aとなり、解析値の36 Aと近い値となっている。

3.2 伝導冷却による50 Kでの I_c 測定

超電導コイルモジュールを50 Kまで冷却し、 I_c 測定を行った。冷却は冷凍機による伝導冷却で行い、測定のために準備した専用のクライオスタット内で冷却することで行った。50 Kへの温度調整は冷凍機へ電熱線ヒータを設置し通電することで行っている。低温における伝導冷却での I_c 測定は77 Kの液体窒素中と比較して電流が大きくなり、通電リードなど常伝導部分での発熱やコイルのインダクタンスによる発熱、電圧が生じた際の発熱が大きくなる一方で冷媒の気化による潜熱による冷却が期待できないことから高い伝熱性を保持することで温度を一定に保つ必要がある。

50 Kでコイルの I_c を測定した結果を図10に示す。160 Aで電圧が70 μ Vを超えることから I_c は160 Aとなることが分かる。この結果は解析値の149 Aと近く、解析が妥当であったと判断できる。

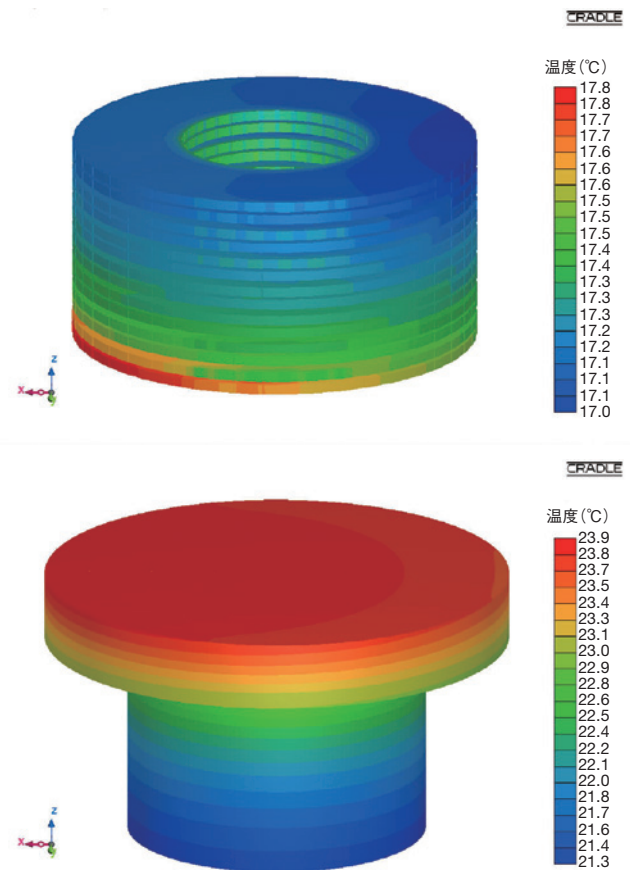


図8 超電導コイル(上)と超電導バルク(下)の熱解析結果
Temperature distribution of superconducting coil (upper) and Superconducting bulks (under).

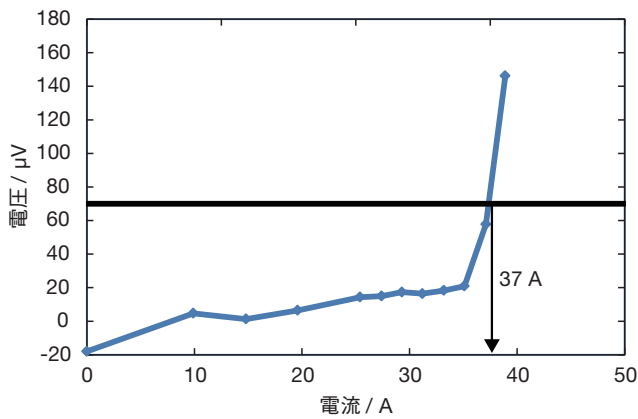


図9 超電導コイルモジュールの液体窒素中 (77 K) での I_c 測定結果
 I_c test result of superconducting coil module in LN2 at 77 K.

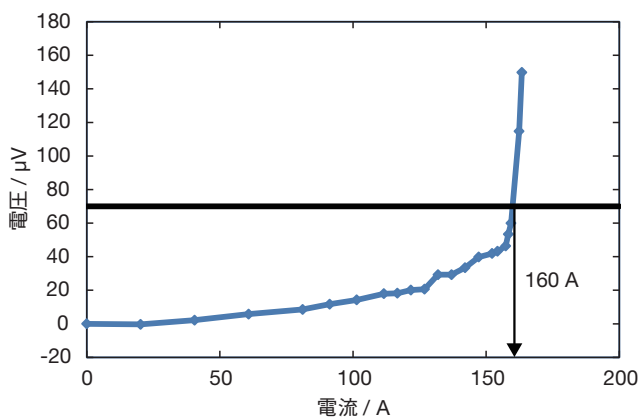


図10 超電導コイルモジュールの50 K伝導冷却時の I_c 測定結果
 I_c test result of superconducting coil module by conduction cooling at 50 K.

これは超電導コイルモジュール1枚での結果であり、超電導コイルモジュールの枚数が増えるにつれて、磁場が大きくなることから I_c は低下し、解析では超電導コイルモジュール5枚では101 Aまで低下すると求められるが、実証機に対する設計・解析では4 ton浮上に必要な電流は74 Aであり、浮上は可能であると考えられる。

この結果を受けて、残りのコイルとフライホイール装置に組み込むためのクライオスタットを作製し、SMBの試作を行うこととした。

4. SMB単体での通電試験

次に、SMBとして用いる本番用のクライオスタットへ超電導コイルを導入し、超電導バルクを含んだシャフトと組み合わせて冷却試験と通電試験を行った。通電試験については、生じる反力をシャフトと連結した可動板をロードセルへ押し付けることでその応力を測定することにより浮上力を測定し、4 tonの浮上力を実際に得られるかを確認した。

4.1 SMBの冷却試験

SMBの冷却試験では、真空断熱のための外槽とコイル容器

内を真空にしてから冷却を開始し、コイルが冷却された時点でヘリウムガスをコイル容器内へ導入し、超電導バルクも冷却した。その冷却曲線を図11に示す。70時間程度でコイルが冷却され、その後、ヘリウムガスを入れてバルクの冷却を開始し15時間程度で冷却が完了する。温度が直線的に低下しているのは、温度が高い場合は冷凍機的能力も高い一方で熱容量が大きく、温度が低下するにつれて冷凍能力が下がる一方で熱容量が低下するためである。最終的に超電導コイルは18 K程度まで冷却できており、超電導バルクもヘリウムガスを入れることで22 Kまで冷却されており、SMBの運転目標温度の30 K以下まで到達することが確認できた。また、これらの温度は伝熱解析の結果とも一致している。このように超電導コイルと超電導バルクを冷却できたことにより、ヘリウムガスによる伝熱とロータやクライオスタット本体への断熱性が高いことを示しており、ヘリウムガス冷却が良く機能し、断熱性の高い材料選択が成功していると考えられる。

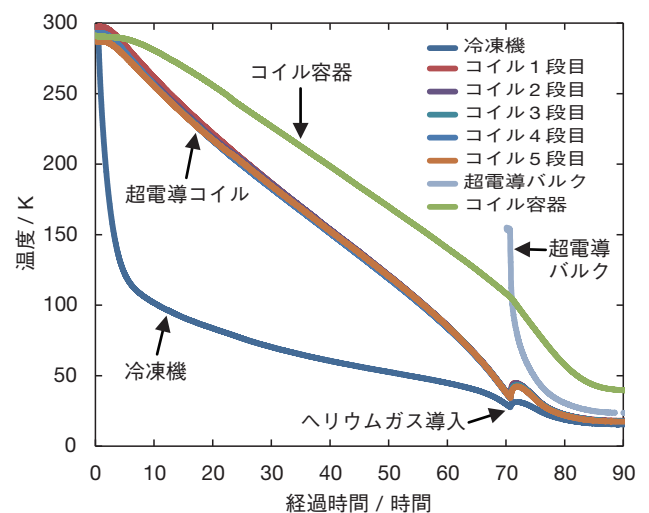


図11 超電導コイルと超電導バルクなどの冷却曲線
 Cooling curve of superconducting coil and superconducting bulk.

今回、作製した実証機では、冷媒を用いず冷凍機で冷却するため、冷却時間が80時間程度かかっているが、必要に応じて液体窒素などの冷媒で予冷を行えば時間を短縮することも可能だと考えている。

4.2 通電浮上試験

SMBの冷却に成功したことから、超電導コイルへの通電と浮上力の測定を行った。まず、超電導状態のまま計画どおりの電流を流せるかについて確認し、また、電磁界解析どおりの浮上力が得られているかについて確認することで行った。実験は実用運転温度とされる30 Kと運転上限温度である50 Kにて行った。

4.2.1 30 Kでの通電浮上試験

冷凍機で冷却を行うと、コイル温度が18 K程度まで冷却可能であるが、性能試験のため、冷凍機へ取り付けたヒータに通電することでコイル温度を30 Kに維持して試験を行った。通電電流と実測した浮上力解析で求めた浮上力の関係を図12に

示す。

76 Aにおいて4 ton (39.2 kN) の浮上力が得られることが分かる。また、実測した浮上力は解析値に近く、電磁界解析の妥当性が示された。実測値が解析値を下回るのは超電導バルクが完全に磁束をはじくことができず、僅かに磁束が侵入しているためだと考えられる。

4.2.2 50 Kでの通電浮上試験

30 Kでの試験と同様に、冷凍機に取り付けたヒータに通電することでコイル温度を50 Kとして通電浮上試験を行った。通電電流を実測した浮上力を図12に示す。実測した浮上力は30 Kの場合と比較してやや低くなっているが、通電電流を増やし、80 Aとすることで4 tonの浮上力が得られていることが分かる。このように、運転上限温度としていた50 Kにおいても4 tonの浮上が可能であることを示すことができた。

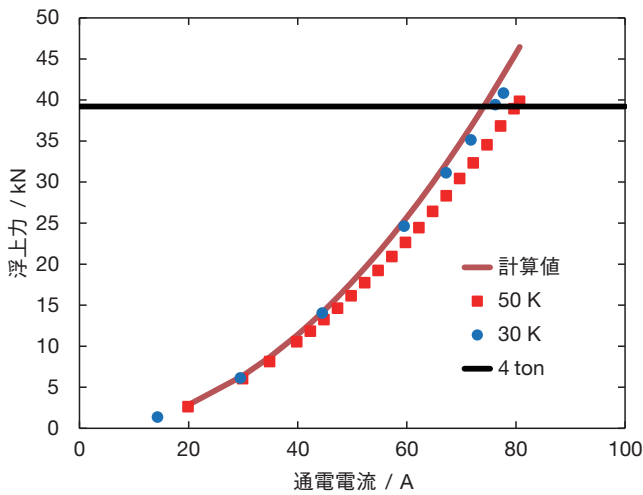


図12 30 K, 50 Kにおける浮上力と通電電流の関係
Current dependence of levitation power at 30 K and 50 K.

30 K, 50 Kにおける実測浮上力を解析値で割った値の通電電流依存性を図13に示す。励磁中は電流が増加するのに伴い、値が小さくなり、解析値からずれていくことが分かる。これは通電電流が大きくなり、大きな磁界がかかるに従い、超電導バルクへの磁束の侵入が多くなり、超電導バルクが完全に磁束をはじいている状態を想定している解析値との乖離が大きくなるためである。更に、減磁中は電流が減るのに伴い解析値からのずれが大きくなることから、一旦侵入した磁束は磁界を減らしても抜けずに残っていることが示唆される。コイルに取り付けているホール素子から通電停止後も磁場が出ていることも分かっており、超電導バルクに磁束が侵入して一部が磁化していると考えられる。30 Kの値と50 Kの値を比較すると、50 Kにおいて、解析値との乖離が大きいことから磁束の侵入量が大きいことが分かる。これは温度が高いほど超電導バルクの臨界電流が小さくなることで磁束の侵入量が増えるためだと考えられる。磁束の侵入は浮上力の変化をもたらしているが、一旦侵入した磁束の変化が少ないことから、入った磁束はその後安定すると考えられる。後述するFW装置への組み込み後の通電浮上

試験では、300時間以上にわたって浮上高さが変化しないことを確認している。

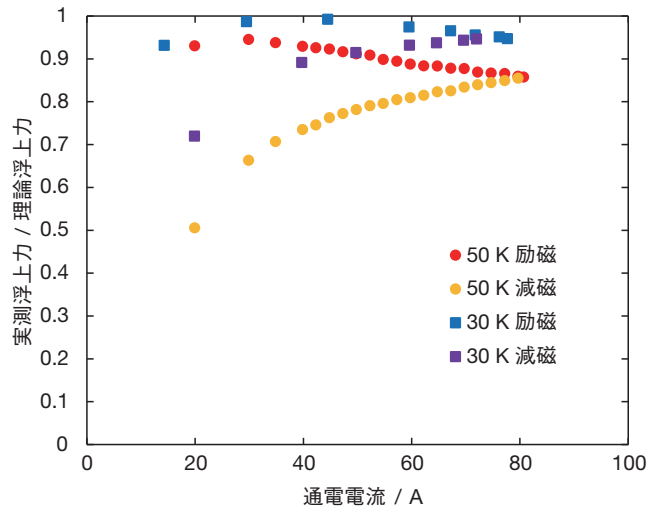


図13 30 K・50 Kにおける浮上力の解析値と実測値の比と通電電流の関係
Current dependence of measured power divided by calculated power at 30 K and 50 K.

このように、SMBの単体試験にて4 tonの浮上力が得られ、運転上限温度である50 Kにおいても問題なく浮上が可能であることが確認できた。

5. FW蓄電装置へ組み込み後の性能試験

2015年4月からFW蓄電装置へSMBを組み込み、4 tonのロータを実際に浮上させる試験を行った。FW蓄電装置へ導入後はバルク温度が測定できず、浮上力の測定はロータの浮上高さの測定に変わる。FW蓄電装置へ組み込み後の浮上高さと同通電電流の関係を図14に示す。非通電時でも浮上高さが19 mmあるのは超電導コイルと超電導バルクの距離が19 mmとなる箇所にタッチダウンベアリングを置き、非通電時はそこへ接地しているためである。76 A以下では浮上高さはほとんど変化していないが76 Aを越えた時点で浮上し、電流の増加と共に浮上高さが高くなっていることが分かる。76 Aで浮上した後は1 A増大するごとに1 mm浮上高さが変化しているが、解析において浮上高さを1 mm変化させると必要電流が1 A程度変化することと一致する。また、76 A以下の電流値で浮上高さが僅かに変化しているのは、徐々に生じている浮上力が4 tonのロータがタッチダウンベアリングに設置することで生じる歪が緩和していくためである。

このように、76 Aの通電で浮上していることから、超電導バルクは30 K以下まで冷却されていると考えられる。超電導バルクを含むシャフトは、4 tonのロータと接続されており、超電導バルクの冷却に用いるヘリウムガスもロータ部の常温空間を持つが、高い断熱性を維持し超電導バルクの冷却に影響がないことが分かった。

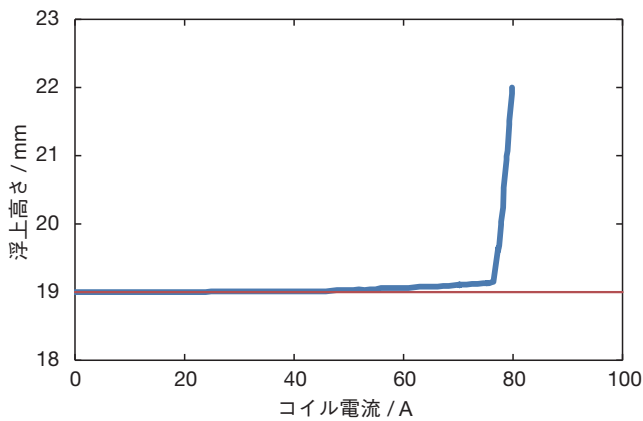


図14 浮上高さとの関係
Current dependence of levitation height.

2015年9月には、実証試験のために米倉山大規模太陽光発電所へ移設し、延べ1500時間にわたり非接触浮上を達成している。図15に浮上高さとの時間依存性を示す。連続して300時間以上にわたり浮上高さを制御範囲内に収められていることが分かる。また、これまでで合計20回以上の冷却と昇温を繰り返しても大きな劣化はなく浮上可能であることや、ロータを高速で回転させた場合においても浮上高さやコイルの冷却に問題がないことも確認している。

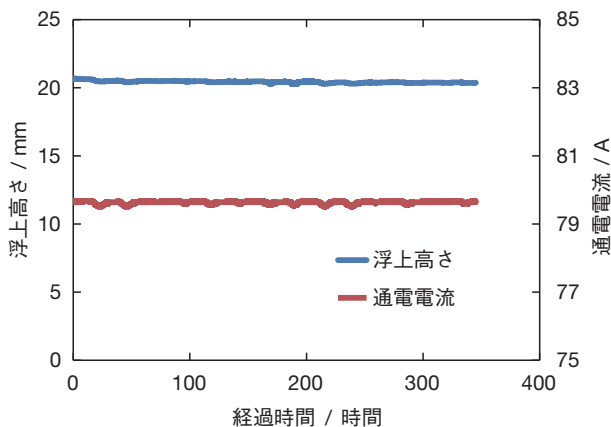


図15 浮上高さとの時間変化
Time dependence of levitation height and coil current.

このことから、SMBは、設計・解析どおりに性能を発揮し、高い安定性・信頼性を発揮できていると考えている。

6. おわりに

今回作製したSMBは、50 Kにおいて4 ton浮上する仕様のものである。解析では10 tonの浮上も可能であると示すことができ、大容量化も可能である。解析を用いることで試作機を作ることなく実証機用のSMBを作製する事ができたのは、今後のコイル開発にも適応可能な技術が確立できたと考えている。

また、今回、50 Kで運転可能であることを示すことができたが、強磁場を利用する超電導応用機器としては高い運転温度

となる。高温での運転は冷凍機の消費電力が小さくなるだけでなく、比熱が大きいことから熱的な安定性が向上する。特に冷凍機が停止するなどの異常時における温度上昇は比熱が大きければ小さくなるため、高温での運転は事故などへの対応がしやすいというメリットがある。

このように、高温でも強磁場の発生が可能な超電導線材と超電導コイルを通して、高温超電導の応用機器への適応を目指している。

謝辞

この研究開発はNEDO助成事業「次世代フライホイール蓄電システムの開発」にて実施したものである。また、フライホイールの実証実験は、公益財団法人鉄道総合技術研究所、クボテック株式会社、株式会社ミラプロ、山梨県企業局と協同で実施したものである。特に、SMBの開発にあたり、鉄道総研の長嶋賢部長、山下知久主任研究員、小方正文室長ら同グループの方々の助言いただき、感謝いたします。

参考文献

- Ogata, et al.: "Demonstration Machine of flywheel energy storage system using superconducting magnetic bearing" Abstracts of CSJ Conference 91, (2015) 116 (in Japanese).
緒方正文ら:「超電導フライホイール蓄電装置実証機の開発状況」第92回2015年度春季低温工学・超電導学会講演概要集(2015)116.
- S. Mukoyama, et al.: "Development of REBCO HTS Magnet of magnetic Bearing for Large Capacity Flywheel Energy Storage System," Physics Procedia 65 (2015) 253-256.
- H. Seino, K. Nagashima, Y. Tanaka and M. Nakauchi: "Study of the Magnetic Bearing Consisting of Coupling of Superconductors Applicable to Support Bearing of Flywheel Energy Storage System," RTRI REPORT, Vol.22 No.11 (2008) 35-40.
清野寛, 長嶋賢, 田中芳親, 中内正彦:「フライホイール用高温超電導バルク体の磁気軸受けの基礎検討」鉄道総研報告Vol.22 No.11 (2008) 35-40.
- K. Nagashima, et al., "Force Density of Magnetic Bearings Using Superconducting Coils and Bulk Superconductors," Quarterly Report of RTRI, Vol. 49 No.2 (2008) 127-132.
- K. Nagashima, Y. Iwasa, K. Sawa, M. Murakami, "Controlled levitation of bulk superconductors" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.10 (2000), No.3, pp.1642-1648.
- O. Ozaki, T. Kiyoshi, S. Matsumoto, J. Fujihira, and H. Wada, "Development of a Magnetic Force Booster" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.14 (2004), No.2, pp.1663-1665.
- S. Nagaya, et al., "Development of High Strength Pancake Coil with Stress Controlling Structure by REBCO Coated Conductor" Applied Superconductivity, IEEE Transactions on Vol.23, Issue 3, (2013) 4601204.