

夢をかなえる時代へ

— 超電導技術の電力への応用 —

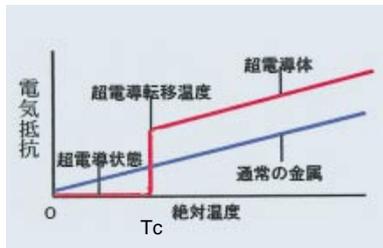
電力技術研究所 超電導・新素材チーム

1986年、高温超電導体が発見されてから、超電導は究極の省エネルギー技術として脚光を浴び、研究開発に火が付きました。この超電導技術を電力分野に応用すれば、電力の安定供給や電力機器の小型化・高効率化が可能となります。今、華々しいデビュー以来進められてきた基礎研究はひとまず終了し、実用化に向けた取り組みが進められています。折しも、21世紀に入っただけでなく、超電導体に流せる電流や超電導を維持できる磁界に限界があります。前者を臨界電流密度(J_c)、後者を臨界磁場(H_c)と呼び、第3図に示すこの3つの限界で囲まれた条件のすべてを満足しなければ超電導状態を維持できません。ここで、酸化物超電導体は金属系超電導体にくらべ、臨界温度が高いだけでなく、低温で臨界磁場が非常に高いことが分かります。

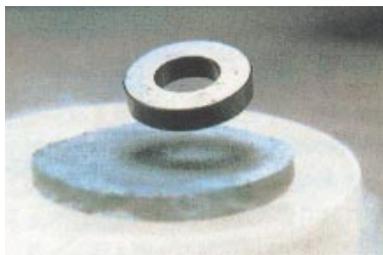
1 超電導とは

ある特定の元素や化合物を冷やしていくと、突然電気抵抗が消える現象が観察されます。超電導とはこの電気抵抗がない状態のことをいい、超電導状態になる温度のことを臨界温度(T_c)と呼びます(第1図)。超電導となる物質(超電導体)には、大別して2つのタイプがあります。ひとつは、金属を原料とした金属系超電導体と、もうひとつは1986年に見つ

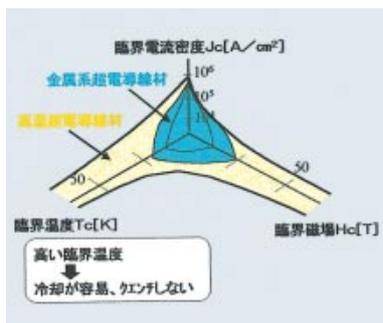
かった銅の酸化物である超電導体です。金属系超電導体は、山梨県で走行試験が進められているリニアモーターカーや、MRIと呼ばれる体の断層像が得られる医療装置に実用化されています。酸化物超電導体は、金属系に比べ臨界温度が高く、高温超電導体とも呼ばれ、産業分野への幅広い応用が期待されています。最近、金属系超電導体で従来の2倍以上の臨界温度を持つ MgB_2 も発見されています。



第1図 抵抗と温度の関係



第2図 マイスナー効果



第3図 三つの臨界

超電導現象にはもうひとつ、磁石からでる磁力線が超電導体が跳ね返すマイスナー効果と呼ばれるおもしろい特性があります。超電導体が磁石の上に浮いている写真(第2図)がよく紹介されます。

ここで、超電導状態を維持するためには、臨界温度だけでなく、超電導体に流せる電流や超電導を維持できる磁界に限界があります。前者を臨界電流密度(J_c)、後者を臨界磁場(H_c)と呼び、第3図に示すこの3つの限界で囲まれた条件のすべてを満足しなければ超電導状態を維持できません。ここで、酸化物超電導体は金属系超電導体にくらべ、臨界温度が高いだけでなく、低温で臨界磁場が非常に高いことが分かります。

2 線材開発

現在、開発が進められている高温超電導体は、銅の酸化物の結晶体で、大きく分けて、イットリウム系とビスマス系の2種類があります。

ビスマス系は、結晶同士の繋がりが良く、細い銀のパイプに粉末状の酸化物を封入して、延ばすだけで線材を作ることができますが、イットリウム系に比べ電流密度が低く、高温(液体窒素温度)の強い磁場中では、特性の低下が大きいので、送電ケーブルのような弱磁場応用に検討が進められており、現在、実証試験や小規模な実システム導入試験が可能な段階まで来ています。

一方、イットリウム系は、電流密度がビスマス系の10~100倍で、磁場中でも特性低下が少なく、現在、最も性能の高い超電導体ですが、結晶粒界が弱結合になりやすく、結晶の接合方位によっても特性が大きくなります。このため、高度な結晶配向制御が可能な気相法¹で線材開発が検討され、超電導結晶の3軸を配向制御する手法の開発により、特性的には1平方センチ当たり100万アンペア以上という高電流密度が、5~6年のうちに実現されました。しかしながら、気相法では、気体からの結晶合成となるため、結晶成長速度が非常に遅く、また線材とするには連続合成とする必要もあるため、いままでも数10m程度のものしか実現していませんでした。

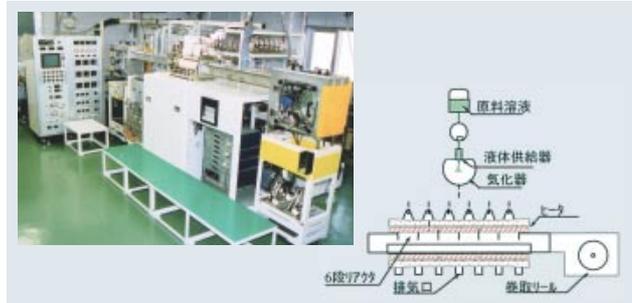
そのような中、当社では、連続合成であることを逆に利用し



第4図 100mY系CVD線材

1 気相法: 超電導体の原料を気体にして、その気体中に線材の基となる基材を通過させることによって、基材の表面に原料を結晶させる手法

て、反応領域を多段化することで、一気に100mの線材を開発しました。この線材は、CVD法²により超電導体が形成され、6段の反応室を持つことで、時間当たり10mという世界最速の合成速度を実現しており、現在は、他の手法も含め、日米で、イットリウム系での500m級の線材開発が競われています。



第5図 6段CVD装置外観と構造図

3 超電導ケーブル

超電導の電力応用の中で、高温超電導体の発見と共に最も期待が集まり、導入効果の面でも高い効果が見込まれる应用到送電ケーブルがあります。

この超電導ケーブルの狙いは、抵抗ゼロによる低損失化もさることながら、超電導のもつ高電流密度によって、ケーブルサイズを一気にコンパクトにし、既設のインフラを有効利用することで、送電線建設費の大幅なコストダウンを目指すことにあります。

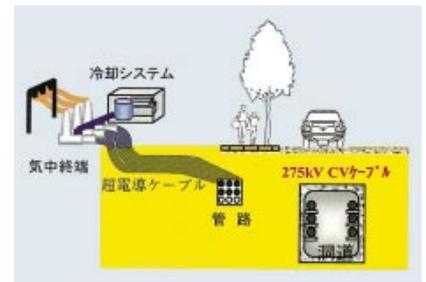
従来、都市部の送電力強化に対して、特に基幹系統となる数十万kWの大容量送電には、27万5千ボルトの超高压ケーブルを、洞道と呼ばれる地下空間を建設し、布設してきましたが、その建設には数年の時間とかなりの費用を必要とします。

超電導ケーブルでは、超高压ケーブルと同等以上の送電容量が、数分の1の大きさのケーブルで可能となるため、既設の管路を利用でき送電線建設の時間と費用を大幅に削減できます。

このような背景のもと、現在、日米欧を中心に活発

な研究開発が展開されています。第1表に超電導ケーブルの開発動向を示します。

米国Southwireのグループは、自



第6図 高温超電導ケーブルの導入効果

社構内の工場給電用に30mのケーブルを布設し実験を実施しました。日本では、平成13年度から14年度にかけ電力中央研究所横須賀研究所において、66kV-1000A、長さ100mの3相一括ケーブルの課通電試験を実施しました。一方、ヨーロッパでは、都市近郊におけるEMF等の環境対策として超電導ケーブルの開発が進められており、フランスでは、架空送電線の代替えとして大容量(1GVA)送電ケーブルの開発を目指しています。

しかし、これら超電導ケーブル開発の実現には、2つの大きな技術課題があり、うち1つに、最近非常に大きな進展がありました。

ここで、超電導ケーブルの2つの技術課題とは、

- (1)大容量・コンパクト化を可能とする線材の集合導体化技術
 - (2)極低温長尺冷却技術
- ですが、特に(1)には、交流損失の低減という問題があります。

本来、超電導は抵抗が無いため、電力損失は発生しませんが、これは、通電する電流が直流の場合であり、交流通電では、交流損失と呼ばれる損失が発生します。交流損失の原因は、超電導体が磁束を固定し、交流での磁界変化に逆らうことにありますが、実は、この磁束の固定こそが、超電導で抵抗が発生しない仕組みそのもので、超電導の交流応用は、本来矛盾した応用といえます。

第1表 超電導ケーブルの開発動向 (海外については2002年6月現在)

国	実施者	長さ (m)	電圧 (kV)	電流 (kA)	ケーブル構成	試験期間 (年)
日本	東京電力、住友電工	100	66	1	三相一括	2001~2002
	Super-GM	500	77	1	単心/単相	2003~2004
米国	Detroit Edison	120	24	2.4	単心/三相	~2002
	EPRI/(Pirelli)	50	115	2	単心/単相	1999
	Southwire	30	12.5	1.25	単心/三相	~2001
	Niagara Mohawk Power, Superpower, 住友電工	350	35	-	三相一括	2005~
フランス	EdF/(Pirelli)	50	90	2.6	単心/三相	~2002
デンマーク	NKT Research	30	36	2	単心/三相	~2001

2 CVD法 : Chemical Vapor Deposition method 化学的気相合成法

超電導ケーブルの開発は、交流電流そのものを流す応用であり、交流損失自体が熱の発生にもなるために、システム全体での性能と効率を上げるのは、この交流損失の低減が大きな問題となります。

先に述べた線材の集合導体化技術は、この交流損失低減と密接に関係し、超電導線材が、その結晶内での特性異方性から、結晶面を揃えやすいテープ状の線材となるために、積層導体となり、交流の表皮効果で、電流が導体の外側の線材に集中して流れ、負荷率が大きくなり、大きな交流損失が発生します。

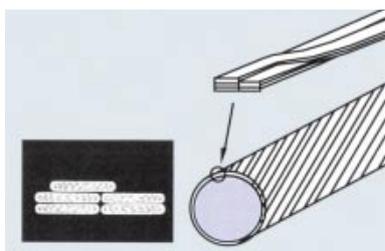
導体の交流損失を下げるには、この偏流が起きないようにすれば良く、当社では平成12年に転位導体と呼ばれるテープ線材の位置が、軸方向に内層 - 外層 - 内層へと順次入れ替わり、導体内の線材の位置で決まる電流の不均一を完全に解消し、交流損失を大幅に低減した導体の開発に成功しました。

この転位導体は、転位を構成する線材の数を増やすことにより、容易に大電流化が図れ、世界で最も低損失(超電導ケーブル開発の目標値である1W/mの1/10となる0.1W/m-1000A通電時)を実現しました。これは、現在使用されている銅の電力ケーブルに比べて、およそ1/300もの低損失導体となり、冷却動力を含めても1/6の低損失が実現されています。

現在、超電導ケーブル実用化に残されたもうひとつの課題である、極低温冷却技術の確立を目指した研究(77kV, 単相500m)を、当社が中心となり国家プロジェクトで進めています。

4 SMES (超電導電力貯蔵システム)

超電導の電気抵抗ゼロを利用して、超電導線のリング(超電導コイル)に電流を流しても電流が減衰する



第7図 転位導体の構造と断面写真



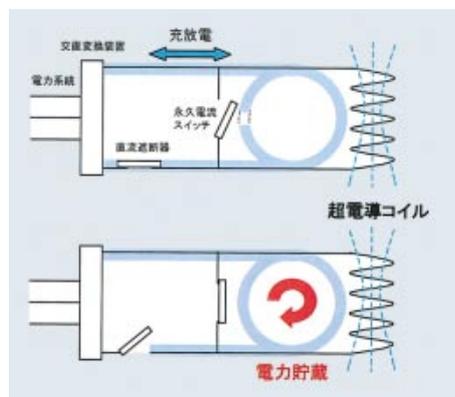
第8図 3層積層転位導体



第9図 転位導体を用いた高温超電導ケーブル

ことなく、一定の磁場を発生し続けることで磁気エネルギーとして電気を貯蔵することができます。この装置は、SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage System) と呼ばれ、短時間に大きな電気エネルギーを出し入れすることが可能であり、雷などで一時的に電圧が低下することを防止できる優れた機能や、負荷変動が大きな新幹線などの電気鉄道のピーク電力をカットする機能を持っています。既に、海外では一部導入が始まっており、今後、電力品質の安定化が求められるIT関連産業などに貢献する電力機器として期待されます。

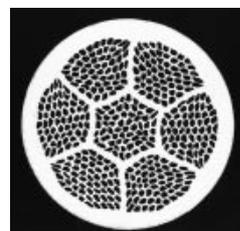
現在、従来の金属系超電導体に代わり、高い信頼性と高磁界化によるコンパクト化が可能となる高性能な酸化物超電導線材を開発し、それを用いた10MJのSMESの開発を行っています。



第10図 SMESの原理

(1) 開発した線材

高温超電導線材は、金属系超電導線材に比べ臨界温度が高いため、超電導状態が安定している信頼性の高い材料です。また、臨界磁場が非常に高く、磁場による臨界電流密度の低下がほと



第11図 線材断面写真

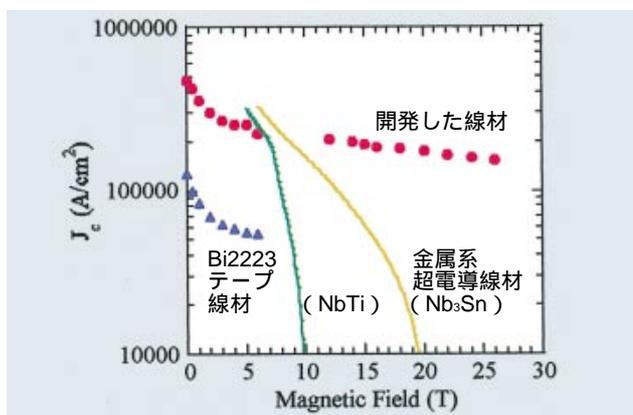
んど起きないという優れた特長があります。特に、Bi2212線材³⁾は、20K以下の温度において優れた磁界特性を持ち、また、部分溶融-凝固プロセスを用いることから線材形状を選ばないという特徴を持っています。このBi2212線材の優れた特徴に着目し、超電導原料の均質化と加工条件の最適化により、超電導フィラメントの細線化とバランス配置で、フィラメントの均一性を高め、線材内部の電流分布を均一にすることを可能とし、現在実用化されているすべての超電導線材の特性を大幅に向上した超電導線材の開発に成功しました。

第2表 開発したBi2212丸線の主な諸元

項目	諸元
直径	1.01mm
フィラメント数	889
銀比	2.7
Ic (@ 4.2K, self-field)	1062A

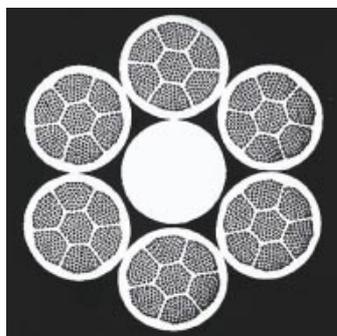
3 Bi2212線材: Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O_xからなる酸化物超電導線材

開発した線材の緒元を第2表、断面写真を第11図に示します。開発した線材の形状は、複数の線材を撚りあわせ集合化することによる大電流量化が容易な、直径1mmの丸線形状としました。この線材1本には1000A以上の電流を通電することができます。特に、10Tの高磁界下において通電特性を評価したところ、現在実用化されているすべての金属系超電導線材、ならびに超電導ケーブル用に開発が進められているBi2223テープ線材⁴の磁場特性を上回る、臨界電流密度20万A/cm²以上の特性を有し、10Tを越える高磁界中でも特性がほとんど低下することのない、高い磁界安定性を示すことを確認しました。開発した線材と



第12図 開発したBi2212線材とBi2223テープ線材、金属系超電導線材との臨界電流密度特性の磁場依存性の比較

Bi2223テープ線材、ならびに金属系超電導線材の臨界電流密度の磁場依存性を比較し第12図に示します。この線材を補強線材とともに複数本撚り合わせることで、第13図に示すような数kA級の大電流導体も製作しました。



第13図 補強線と撚り合わせて製作した導体断面

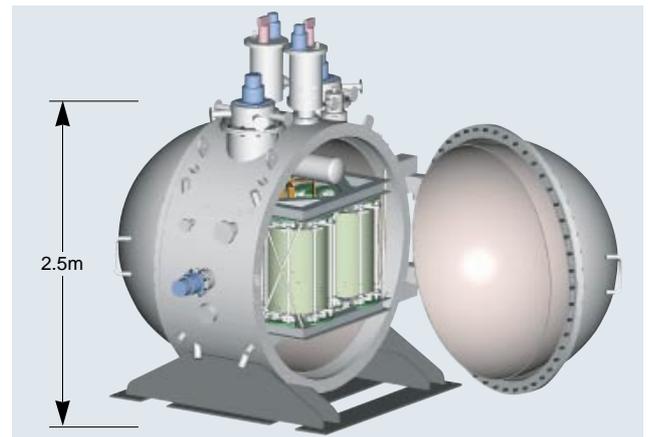
(2) 応用分野

今回開発した線材を用いれば、従来の金属系超電導線材では信頼性の面で実用化が困難であった強磁場を利用する超電導機器の開発が可能となります。強磁場を利用した超電導機器は、電力分野を始め医療や輸送分野などへの幅広い応用が可能です。特に、開発した線材は、超電導電力貯蔵装置 (SMES) や粒子加速器、核磁気共鳴 (NMR) 装置など、性能が磁場の強さで決まる装置に最適であり、これらの性能を飛躍的に向上することが期待できます。また、強磁場中での通常

とは異なる結晶成長や化学反応を利用した新しい材料開発の研究には不可欠な線材です。

(3) SMES開発

開発した線材を用いた10MJのSMESコイルを設計しました。主な緒元を第3表に、SMESシステム鳥瞰図を第14図に示します。このSMES開発コンセプトは以下の通りです。



第14図 10MJ-SMES鳥瞰図

- 高い温度マージンを活かした高信頼性設計
- 十分な電気絶縁を施したコイルの高耐電圧化による高出力化
- 高磁界設計によるコンパクト化

コイル冷却に伝導冷却、あるいは間接冷却の採用
コイルは漏洩磁場の低減とエネルギー密度の向上を図るために、ソレノイドコイル4個をそれぞれ極性を反転させて配置させるマルチポールソレノイド配置としています。コイル巻き線に使用する導体は、発生する電磁力に対して十分な機械強度を有した構造を取っています。

開発線材の特性を活かしSMESを設計すると、マグネットの高耐電圧化によりSMESの高出力化を図ることができます。また、SMESではエネルギー貯蔵密度が低いことが課題ですが、開発した導体を用いた高磁界設計によるコンパクト化でエネルギー貯蔵密度が飛躍的に向上し、コスト面でも他の競合技術と比較し優れていることが分かりました。

第3表 10MJ-SMESのコイル諸元

コイル形状・配置		4個のソレノイドコイルの極性交互反転配置
定 格	電 流	750A
耐 電	電 圧	5kV
インダクタンス		35.6H
貯蔵エネルギー		10MJ
最 大	磁 場	8.94T
コイル外形	内 半 径	0.157m
	外 半 径	0.270m
	高 さ	0.700m

⁴ Bi2223テープ線材：Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_yからなる酸化物超電導線材

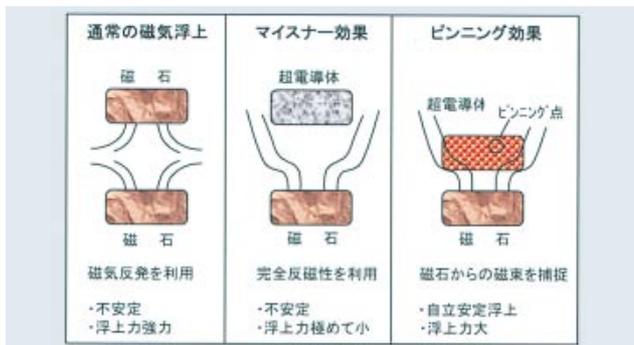
現在、SMES事業化に向けてMJ級のSMESを製作しています。SMESは他の電力貯蔵装置に比べ、負荷変動補償や瞬時電圧低下補償用途に優位性が認められるため、このMJ級のSMESにより、これらの補償動作の検証試験や繰り返し運転試験を実施する予定です。

また、経済産業省資源エネルギー庁のSMESプロジェクトにも参画しており、負荷変動補償・周波数調整用SMESのコスト低減技術開発を分担し、実用化に向けた課題に取り組んでいきます。

5 超電導フライホイール

超電導の応用としては線材がその基本となりますが、高温超電導体ではバルク体と呼ばれる大型の結晶で、磁束の固定（ピンニング）を利用した応用も検討されています。

この応用は、磁束のピンニングにより超電導体（バルク）を疑似磁石化し、永久磁石との組み合わせで、通常の磁気反発では実現しない自己安定型の浮上が可能となることです。このバルク体の浮上では、冷却以外の動力を必要とせず、磁気浮上力を左右する超電導

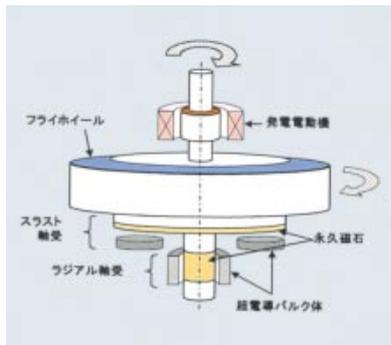


第15図 超電導による3種類の磁気浮上

体の特性次第では、非接触で摩擦損失が極めて少ない、高効率な軸受が可能となります。

この軸受をフライホイール電力貯蔵システムに適用することにより、システム全体の高効率化が図れ、長時間の電力貯蔵が可能となるため、日、米、欧で積極的に開発が進められています。

当社では、平成10年にkWh級原理検証機の開発に成功し、現在、10kWh級の実証試験が可能なシステム開発が進められております。



第16図 超電導電力貯蔵フライホイールの構造

一方、米国では、平成12年に2kWh機が完成し、現在、商用機として10kWh機の開発が進められています。

また、欧州は日本の開発に水をあけられています。軸受等の基礎研究を中心に進められています。

超電導フライホイールの開発のポイントは下記に示す2つがあります。

高浮上力を持つ磁気軸受の開発

高回転型システムの開発

これらの開発ポイントの概要と、フライホイールの開発状況を以下に説明します。

(1) 高浮上力を持つ磁気軸受

～超電導磁気軸受の開発～

超電導磁気浮上は、磁束のピンニングという超電導の量子効果（分子、原子、素粒子等の微視領域での効果）が、目に見える形で発現したもので、バルク体の内部に磁力線が捕捉・固定されることによって、バルク体自体が疑似永久磁石化され、通常の磁気浮上と同じ磁力線間の反発により浮上力が発生します。しかもこの時、磁力線自体はバルク体内部の特定の場所に捕捉、固定されるため、空間的な磁気分布が変化できず、磁気反発と吸引が同時に起こる形で、安定した磁気浮上が発現します。

この浮上力は、主にバルク体のサイズを大きくすることで向上できます。例えば直径5cmのバルク体と10cmのバルク体を比べるとその浮上力は2倍になるのではなく、4倍となります。



第17図 世界最大の超電導バルク体（直径15cm）

当社は平成10年にイットリウムを用いて世界最大となる

直径15cmのバルク体を、平成14年には磁場特性に優れたサマリウム・ガドリニウムを用いて、15cm級の大型バルク体の開発に成功しました。この製造技術を用いて高性能超電導磁気軸受の開発を行っています。

(2) 高回転型システム

～炭素繊維強化プラスチック

高強度フライホイールロータの開発～

フライホイールによるエネルギー貯蔵は、フライホイールの大きさの1乗に比例し、回転数の2乗に比例します。このため同一の貯蔵容量では、高速で回せば回すほど貯蔵エネルギー密度が高まると同時に、軸受

責務も軽減できます。

フライホイールシステムでのエネルギー貯蔵は、ロータが回転エネルギーを内部歪みという形で保持し、発生応力による破壊が貯蔵限界となるので、ロータの高強度化が出来れば、それだけ高エネルギー密度の貯蔵が可能となります。

今回開発を進めている超電導フライホイールは、ロータに高強度かつ低比重の炭素繊維を採用することにより、従来のフライホイールとは一線を画した貯蔵システムを目指しています。

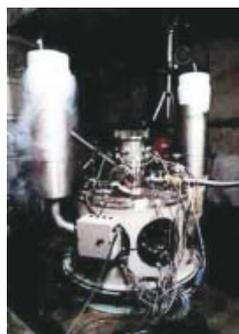
第4表 代表的フライホイール材料の特性

	材料強度 (kg/cm ²)	比重量 (gf/cm ³)
鑄 鋼	400	7.7
T i 合 金	1,000	4.3
炭 素 繊 維	3,000	1.6

(3) 超電導フライホイールシステムの開発状況

A. 1kWh超電導フライホイールの開発

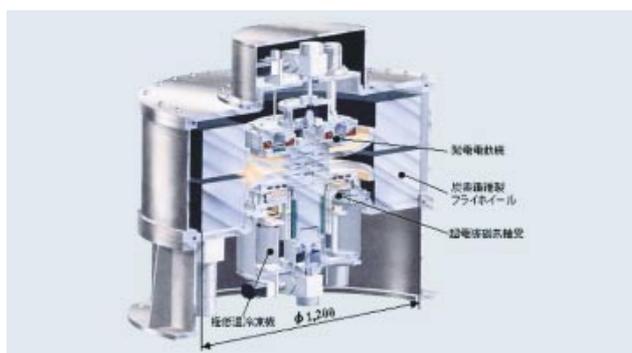
当社は上記の技術を用いて、平成10年に1kWh超電導フライホイールを開発しました。このフライホイールは直径60cmのロータを20,000rpmで回転させて1kWhのエネルギー貯蔵・放出を可能としました。



第18図 1kWh超電導フライホイール外観

B. 12.5kWh超電導フライホイールの開発

現在、当社では1kWh超電導フライホイールの次のターゲットとして、その10倍以上の貯蔵容量を持つ12.5kWh機を開発を行っています。このフライホイールは、直径1.2mのロータを10,000rpmで回転させてエネルギー貯蔵を行います。重量約600kgの回転体はフライホイール下部に設けた超電導軸受で支える構造を採ります。現在、ラジアル荷重も超電導軸受で保持する方式で計画しており、完全非接触化により軸受損失の極小化を目指します。



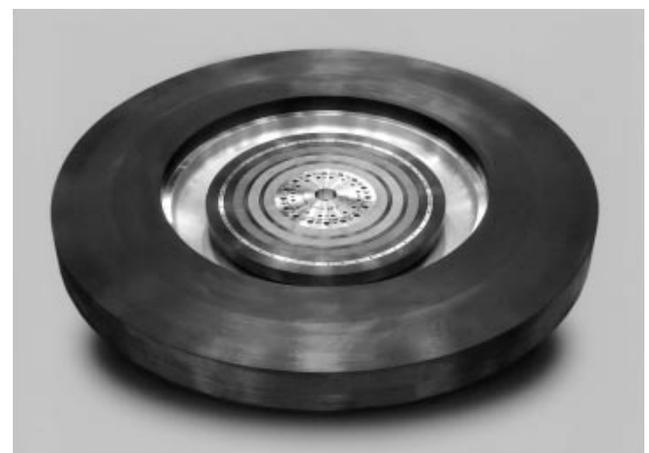
第19図 12.5kWh機の構造

12.5kWh機と1kWh機の主な相違点を下表に示しますが、大型化によりロータ強度、製造性および軸受責務等において大きな飛躍が必要となります。

第5表 1kWh機と12.5kWh機の主な相違点

項 目	1kWh機	12.5kWh機	
ロ ー タ 径	600mm	1,200mm	
回 転 部 重 量	65kg	600kg	
回 転 数	20,000rpm	10,000rpm	
ロ ー タ 構 造	縦長	扁平	
軸 受	スラスト	超電導磁気軸受	超電導磁気軸受
	ラジアル	ころがり軸受	超電導磁気軸受
冷 却 方 法	液体窒素冷却	極低温冷凍機	

また、12.5kWh機の大きな特徴は軸のない扁平型ロータを用いた点です。扁平型にすることによりロータから発生する振動を大幅に抑制でき、軸振動は1kWh機の1/5まで低減できます。



第20図 扁平型ロータ外観

現在、要素開発がほぼ完了し、来年度から次ステップである応用研究を開始し、早期に世界最大容量となる超電導フライホイールを開発を目指します。

6 おわりに

以上、当社の最新の開発成果を中心に、現在の高温超電導技術開発の現状を紹介しました。超電導フィーバーから15年余りが経過し、一時の話題性は薄れましたが、その間、超電導技術は、着実に進歩を遂げ、21世紀を迎えた今、実用化へのカウントダウンが始まろうとしています。

また、最近、C₆₀、MgB₂という新型の超電導体が続々と発見され、材料面からも大きな進展があり、今後の展開が注目されています。

20世紀初頭、オランダ人物理学者カメリン・オンネスの超電導発見から、およそ100年。超電導は、まさに1世紀の時を越え、その力を発揮する時が来たのです。