

電力貯蔵用超伝導フライホイールの要素開発研究

Development on Component Parts of Superconducting Flywheel for Energy Storage System

技術本部	南 正 晴 ^{*1}	佐々木 一之 ^{*2}
高砂製作所	河 島 裕 ^{*3}	
原動機事業本部	鎌 田 敏 弘 ^{*4}	
中部電力株式会社	長 屋 重 夫 ^{*5}	

電力貯蔵用超伝導フライホイール開発に当り、キーコンポーネントである高温超伝導磁気軸受とCFRPフライホイールに関して1kWh小型モデル機のそれぞれの実寸大要素について解析をベースに試作し、その性能検証を行った。磁気回路の最適化を図った高温超伝導磁気軸受を用いることにより、重量80kgfのロータが安定に10mm浮上することを確認した。また、フライホイールについては、マルチリング構造及び部分球面支持ディスクを採用することにより、φ600CFRPリングが11800rpmで安定に回転することとその発生応力が解析とほぼ対応することが確認でき、1kWh超伝導フライホイール開発のめどを得た。

The full-sized components of 1 kWh superconducting flywheels such as high temperature superconducting magnetic bearings and CFRP flywheels were manufactured on the basis of analysis, and their performance were tested. By optimizing a magnetic circuit of permanent magnets, it was confirmed that a rotor weighing 80 kgf was levitated stably at the position of 10mm from the bearing surface with high temperature bulk materials. Furthermore, using a multi-ring construction and its supporting disk with the partially spherical shape, it was verified that a CFRP flywheel of 600 mm diameter was rotated stably at the speed of 11 800 rpm and stress was almost the same as the analysis, so the prospect of the development of a 1 kWh superconducting flywheel was realized.

1. ま え が き

電力貯蔵用フライホイールシステムは、長寿命、高エネルギー密度、高効率期待できる点に特徴があり、昼夜電力の平準化やピーク電力補償用として、将来の電力貯蔵システムとして期待さ

れている。

近年、新技術として非接触・自己制御性を有する高温超伝導磁気軸受が出現し、従来の機械式軸受（油、水、玉軸受等）や、電動型磁気軸受では損失が大きく実用化に至っていなかったものが、その実現性が期待されるようになったこと⁽¹⁾、また、比強度が大幅

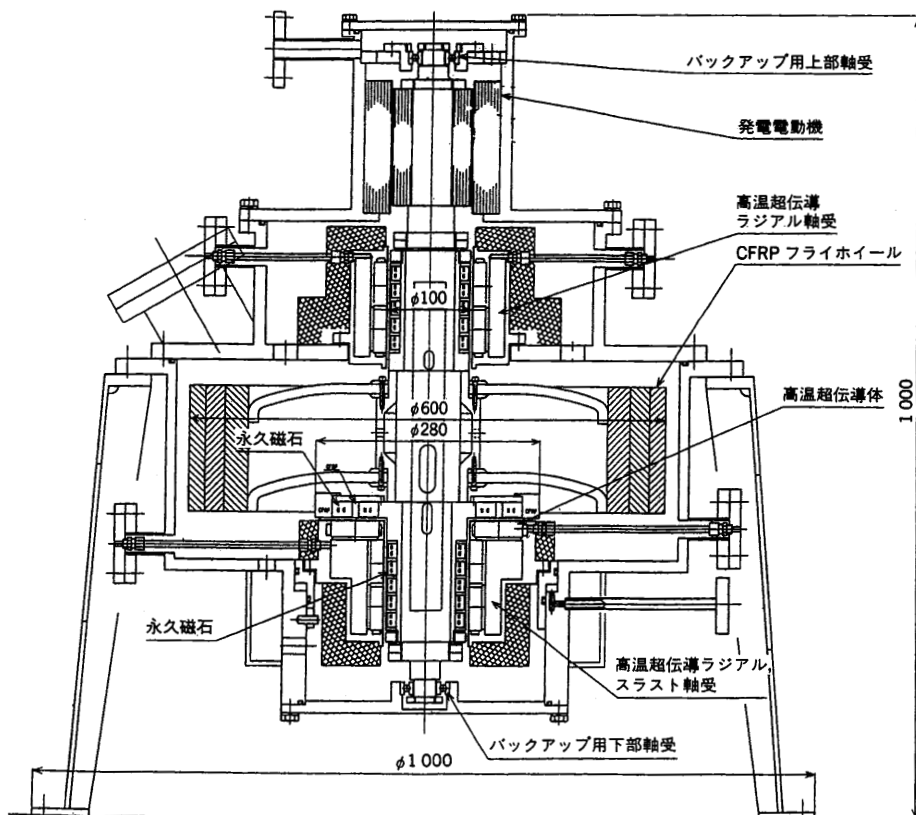


図1 1kWh電力貯蔵超伝導フライホイール装置概念図 高温超伝導磁気軸受CFRPフライホイールを用いた1kWhフライホイール装置。 Conceptual drawing of 1kWh superconducting flywheel for energy storage system

*1 高砂研究所応用物理研究グループ主務

*2 高砂研究所構造研究室

*3 高砂製作所新製品・新事業開発総括グループ主務

*4 原動機技術センター新製品開発部技術開発課

*5 電力技術研究所超電導グループ副主査

表1 1 kWh 超伝導フライホイールの主要仕様
Principal specification of 1 kWh superconducting flywheel

エネルギー蓄積体	半径方向に応力低減3層CFRPフライホイール
常用回転数範囲	10 000~20 000 rpm
エネルギー蓄積量	最大: 1.35 kWh, 待機: 0.35 kWh
エネルギー入出力装置	2.2 kW 誘導型発電電動機+双方向電力変換装置
充電/放電電力	2 kW
回転体支持軸受	高温超伝導スラスト(下部)及びラジアル磁気軸受(上, 下部)
高温超伝導体冷却	液体窒素による浸せき冷却
風損低減/断熱	装置内を高真空化: 1×10^{-4} Torr 以下

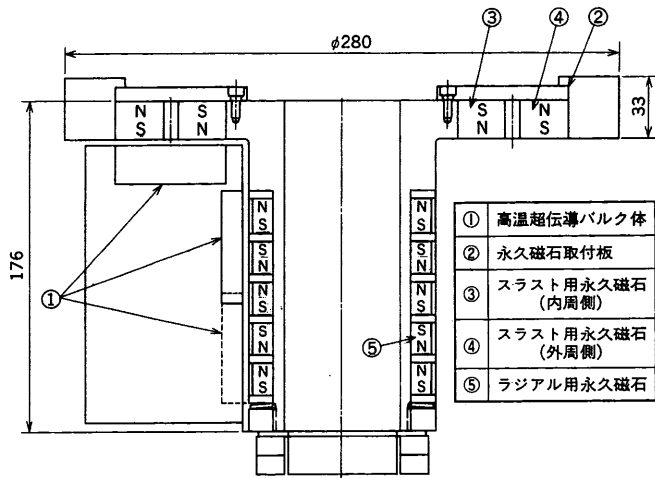


図2 高温超伝導磁気軸受 磁気回路解析により永久磁石配置の最適化を図った高温超伝導磁気軸受を示す。
Assembly of high temperature superconducting magnetic bearings

に大きいCFRP材の実用性が見いだされるようになってきたこと等により、国内外でフライホイールに関する開発研究が積極的に進められている⁽²⁾。

現在、中部電力(株)、三菱重工業(株)では、前報⁽³⁾で報告の小型回転モデル試験を踏まえ、1 kWh 電力貯蔵用フライホイールシステムの開発に取り組み中であるが、本報では、そのキーコンポーネントとなる高温超伝導磁気軸受とCFRPフライホイールの要素開発試験の現状と将来展開について紹介する。

2. 1 kWh 高温超伝導磁気軸受フライホイールシステム

図1に、現在計画中の1 kWh 超伝導フライホイール装置の概念図を、表1に主要仕様を示す。

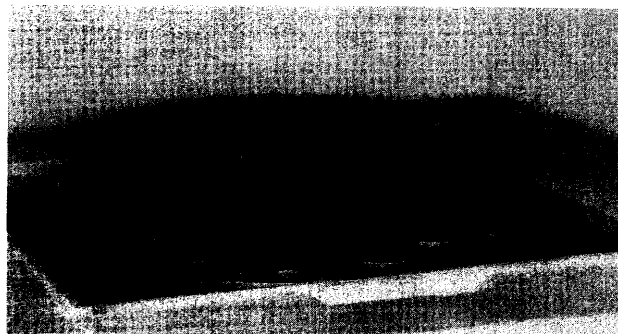
CFRPフライホイールリングをCFRP支持ディスクでロータに結合し、ロータ重量約80 kgfを高温超伝導スラスト軸受で支持するとともに、上記フライホイールリングの上下に高温超伝導ラジアル軸受を配置している。

3. 高温超伝導磁気軸受要素開発

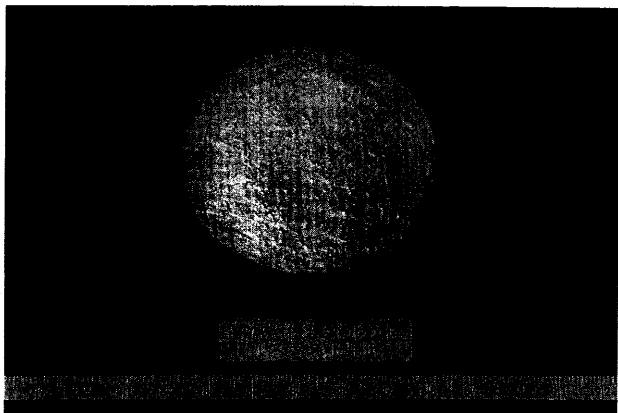
3.1 基本構造

図1の1 kWh用超伝導フライホイールの実寸大軸受要素構造を図2に示す。

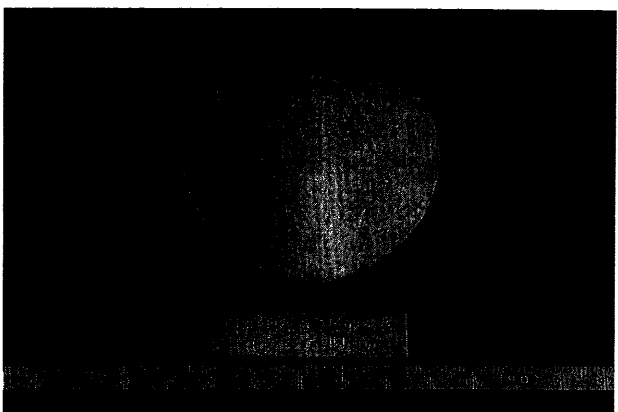
スラスト軸受は、2個のCFRPリングと、一方の端面が磁性体から成る永久磁石取付板で構成される内外周部の凹部に、内外周の磁石を互いに異なる極となるように円周方向に分割した永久磁石を組込んで構成されるスラストカラーと、円周方向に等間隔に



(a)スラスト用高温超伝導磁気軸受 (φ290×L33)



(b)スラスト用高温超伝導バルク体 (φ60×L20)



(c)ラジアル用高温超伝導バルク体 (φ60×最小厚さL10)

図3 高温超伝導磁気軸受外観 スラスト用高温超伝導磁気軸受の浮上状態及びスラスト/ラジアル用バルク体の外観を示す。
Photograph of high temperature superconducting magnetic bearings

直径60 mm、厚さ20 mmのY系超伝導体 $YBaCu_3O_{7-\alpha}$ を埋込んだ軸受ホルダを対向させ構成される。

ラジアル軸受は、軸方向に同極反発するように永久磁石リングを組込んだロータと、円周方向に2列に直径60 mm、厚さ10 mmの上記と同材質の超伝導体を埋込んだ軸受ホルダを対向させ構成される。

なお、永久磁石及び超伝導体の形状、配置については、磁場解析により最適化を図っており、永久磁石については低温磁場特性の良好なPr-Fe-Bを用いている。

3.2 試作

図3に、試作した高温超伝導磁気軸受の外観を示す。(a)は、永久磁石を組込んだスラスト軸受カラーが、高温超伝導体と対向し、磁気反発力で浮上している状態を示す。(b)は、そのときに用いられている高温超伝導バルク体で、(c)は、ラジアル用高温超伝導バ

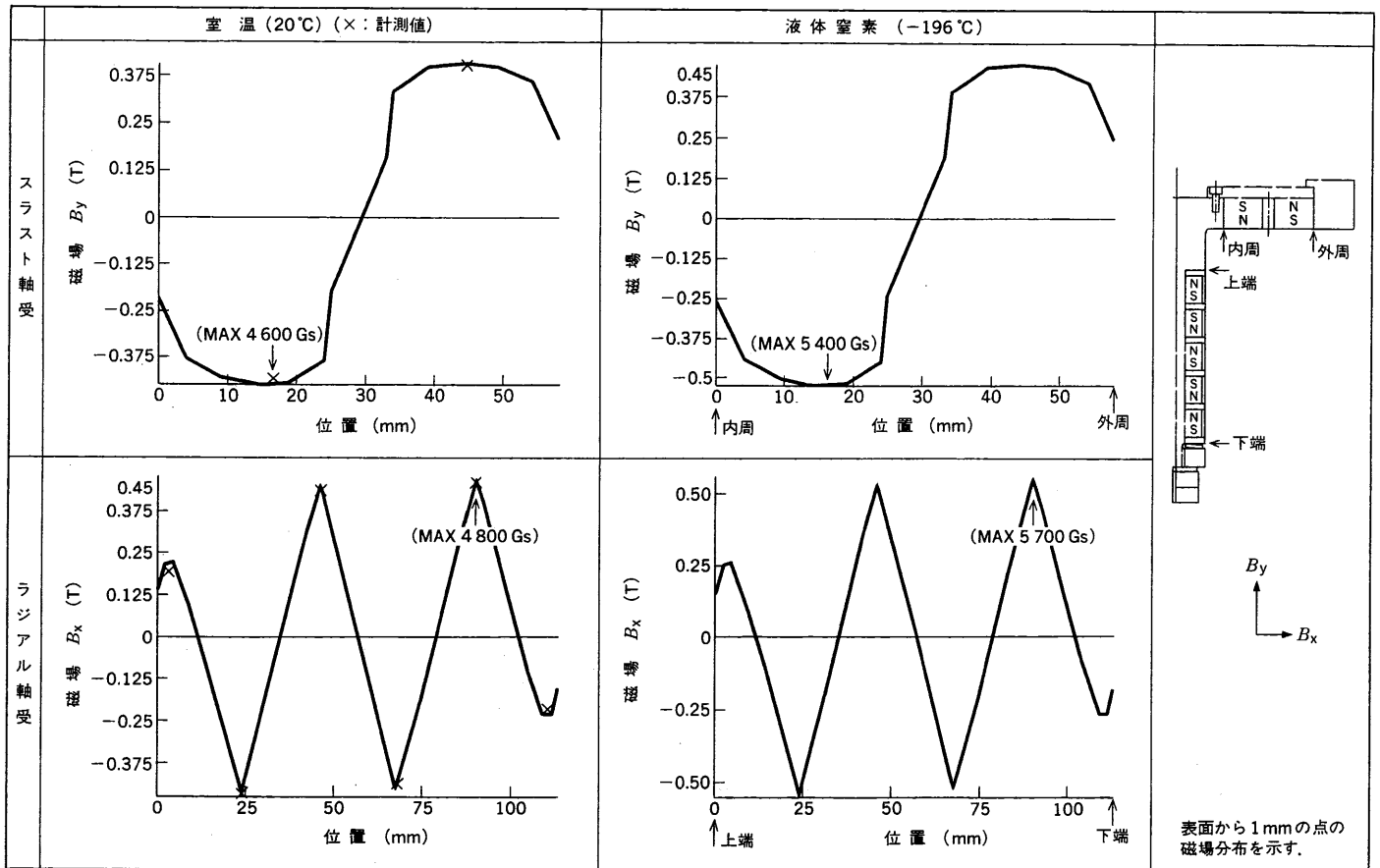


図4 永久磁石磁場解析 室温及び液体窒素温度における永久磁石磁場分布解析結果を示す。
Magnetic field analysis of thrust and radial permanent magnets

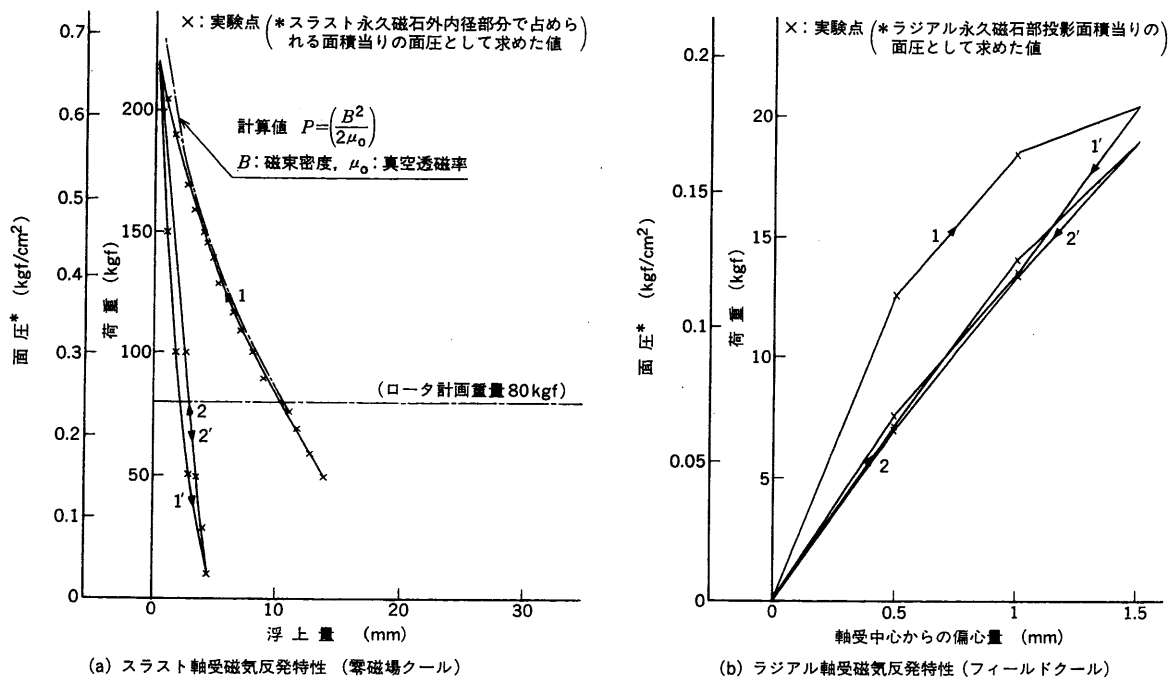


図5 高温超伝導磁気軸受磁気反発特性試験結果 ロータ計画重量80kgfの負荷に対し、10mm浮上(図中の数字：1→1'→2→2'の順に負荷)している。
Test results on magnetic repulsion characteristics of high temperature superconducting magnetic bearings

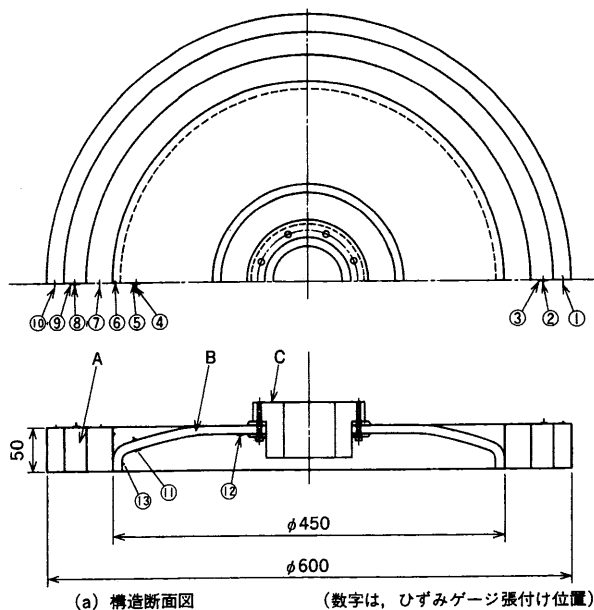
ルク体で、いずれも溶融法にて、温度勾配を一方向に与え、単一結晶として成長製造している。

3.3 試験結果

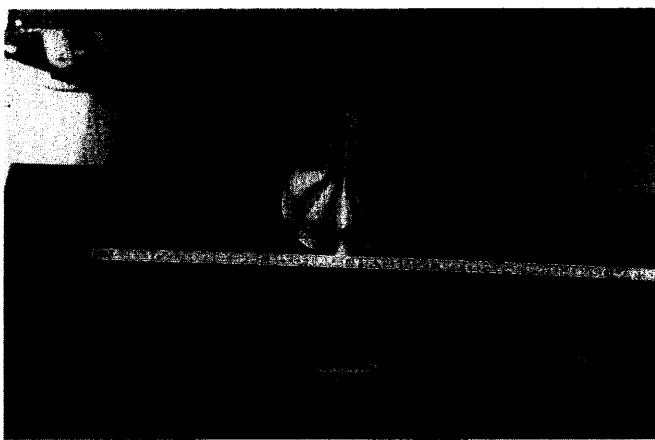
図4に、永久磁石磁場解析結果を示す。計測値とほぼ対応しており、作動環境の-196℃では軸受表面から1mmの点で、スラス

ト軸受で最大5400Gs、ラジアル軸受で最大5700Gsが得られている。

図5(a)に、スラスト軸受磁気反発特性試験結果を示すが、零磁場クール条件で負荷した場合、最大磁気反発力230kgf(面圧0.7kgf/cm²)が得られ、またロータ計画重量80kgf負荷の場合10



(a) 構造断面図 (数字は、ひずみゲージ張付け位置)



(b) 試作モデル外観 (φ 600×φ 450×L 50)

図6 CFRP フライホイールモデル マルチリング及び部分球面支持ディスクを用いた応力低減型 CFRP フライホイールを示す。
Model of CFRP flywheel

mm 浮上し、計算値とほぼ対応することが確認できた。図 5 (b) に、ラジアル軸受磁気反発特性試験結果を示すが、フィールドクール条件で、18.5 kgf/mm の軸受剛性 (投影面圧当りでは、0.165 kgf/cm²・mm) を確認できた。

本結果を踏まえ、回転特性評価を行い実用化を図る予定である。

4. CFRP フライホイール要素開発

4.1 基本構造

図 1 の 1 kWh 用超伝導フライホイールの CFRP フライホイールと同一径 (外径 600×内径 450 mm) で厚さが約 1/3 (50 mm) の CFRP フライホイールモデルの構造を図 6 (a) に示す。

CFRP フライホイールリング A には、大きな周方向応力が作用するため、フィラメントワインディング成形し強度向上を図るとともに、内周から外周側に周方向弾性率を増大させたマルチリング構造を採用し、半径方向発生応力の低減を図っている。

また、フライホイールリングは、半径方向に変形するため、支持ディスク B は、この変形に追随させ、接着構造から成るフライ

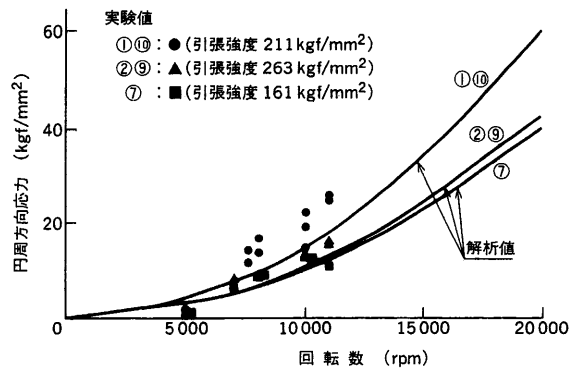


図7 CFRP フライホイールモデルスピントスト結果
11 800 rpm までの回転検証並びに応力解析値と実測値の対応確認 (○内の数字は、図 6 (a) のひずみゲージ位置に対応) を示す。
Spin test results of CFRP flywheel model

ホイールリングとの接合部に圧縮応力が作用するように工夫する必要がある。このため部分球面形状とし、かつ弾性率の小さな疑似等方 CFRP 積層材を採用し、ボス C に結合させる構造とした。

4.2 フライホイール試作及び試験結果

図 6 (b) に示す CFRP フライホイール試作モデルをスピントスタに組み込み、回転試験を実施した。

回転数 11 800 rpm で安定に回転し、そのときの CFRP フライホイールリングに発生する応力計測値は図 7 に示すように、解析値とほぼ対応していることが確認できた。

図 7 に、CFRP 部材の引張強度を示すが、上記応力値から推定して、1 kWh 超伝導フライホイールの最大回転数 20 000 rpm は達成可能と考えられ、今後検証予定である。

5. む す び

1 kWh 超伝導フライホイール装置用実寸大高温超伝導磁気軸受を試作し、本装置のロータ計画重量 80 kgf を 10 mm 浮上できる十分な負荷能力を確認できた。

また、もう一つのキーコンポーネントとなる CFRP フライホイールについて、マルチリング及び部分球面支持ディスク構造により発生応力の低減を図り、実寸大の CFRP フライホイールにて、11 800 rpm までの回転検証を行い、1 kWh 超伝導フライホイール試作開発のめどを得た。

本成果をベースに、1 kWh 超伝導フライホイールシステムの試作検証を行い、100 kWh 級プロトタイプ機の開発を経て、単機容量 1 MWh×10 基の 10 MWh 超伝導フライホイールシステムの開発に進む予定である。

参 考 文 献

- (1) Nagaya, S. et al., The Study of the High-Tc Superconducting Flywheel of the Energy Storage System, Proc. of 1995 IWS (1995) p.158
- (2) Higasa, H. et al., Technical Problems of Superconducting Magnetic Bearing and Construction of Flywheel Power Storage System, Proc. of ISS'93 (1993) p.1 231
- (3) 南ほか, 電力貯蔵用高温超伝導磁気軸受フライホイールの開発研究, 三菱重工技報 Vol.33 No.1 (1996) p.50