

超電導フライホイール蓄電の特徴と 鉄道への応用展開

浮上式鉄道技術研究部

低温システム

副主任研究員 宮崎 佳樹



発表内容

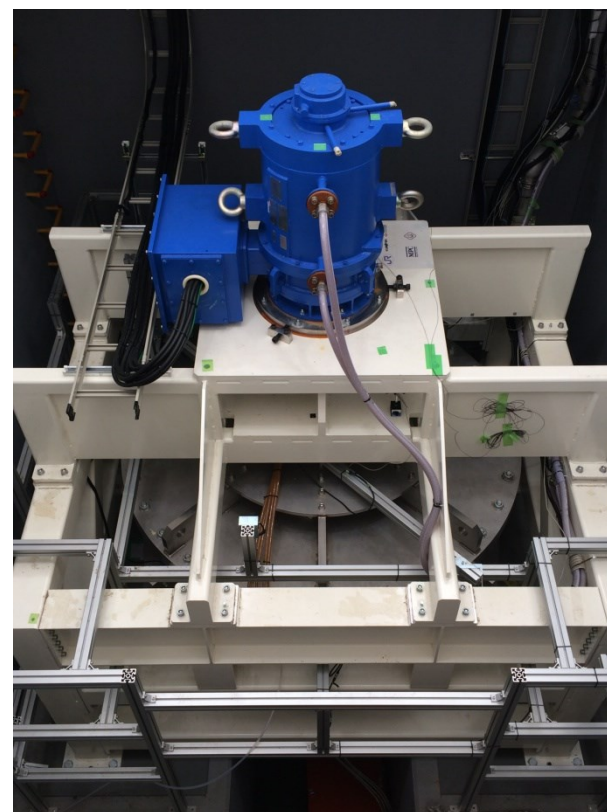
I. はじめに

II. 超電導磁気軸受

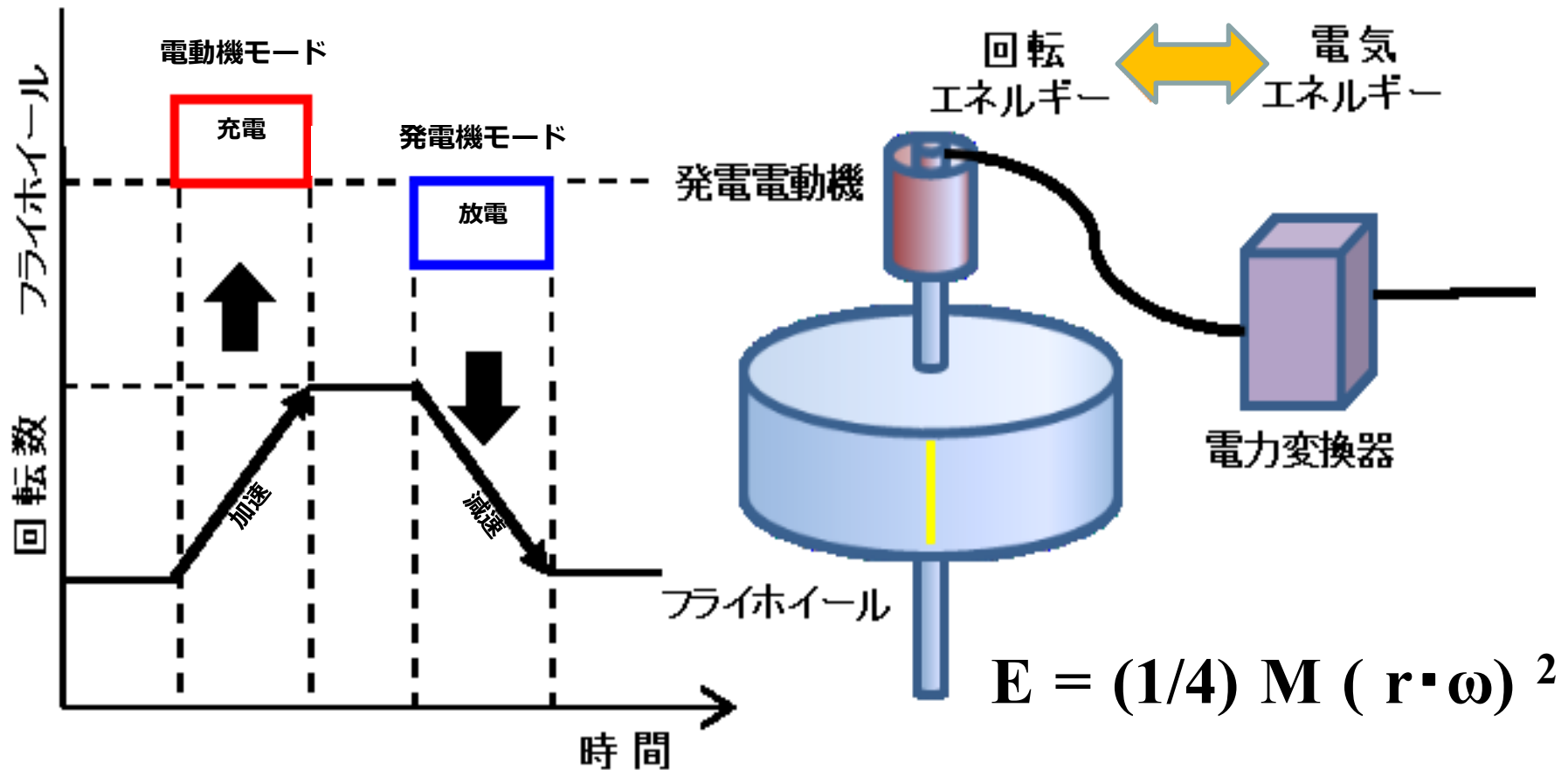
III. 実証機の構成、試験結果

IV. 鉄道への応用展開

V. 成果の活用



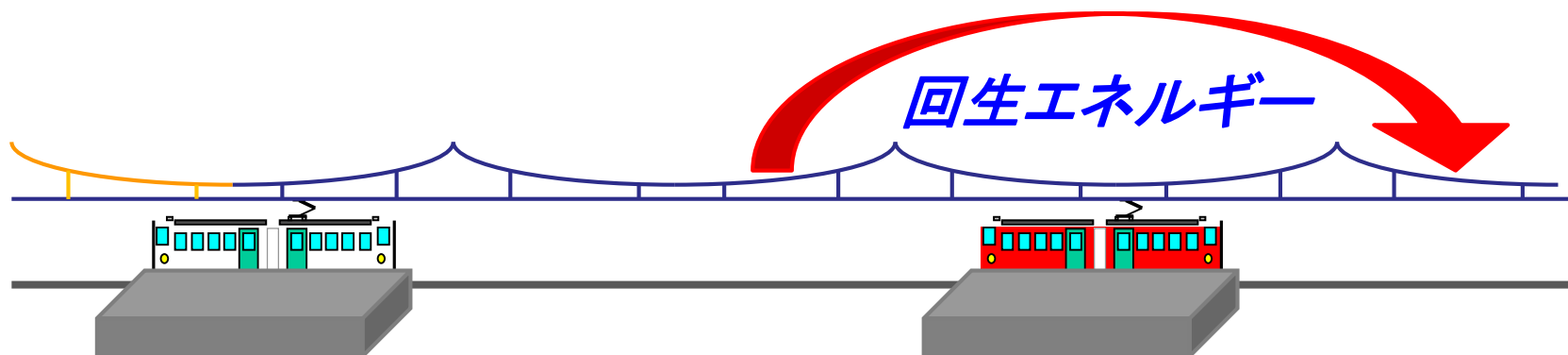
フライホイール蓄電システム



蓄えられる電力量は、フライホイールの
質量 M [kg]，直径 r [m]，回転角速度 ω [rad/s]で設計できる

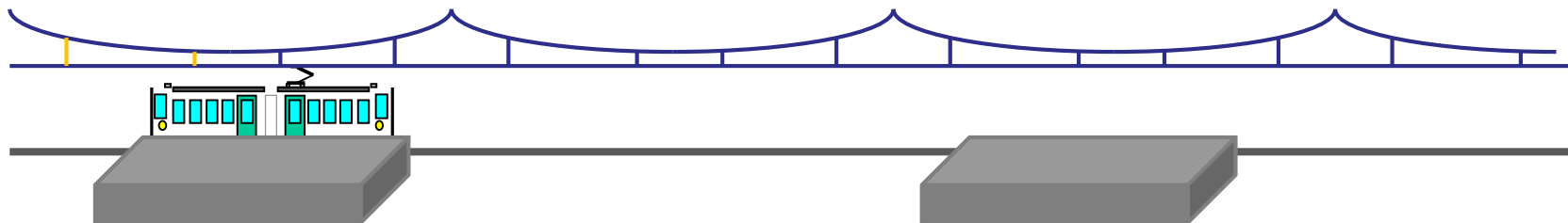
鉄道におけるエネルギー貯蔵の意義

鉄道は他の交通機関よりもエネルギー効率が低い。
理由として、回生エネルギーの利用がある。



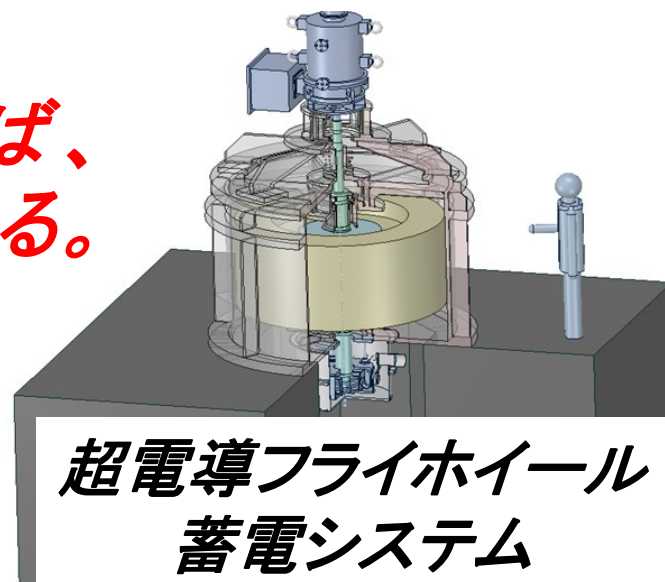
他の列車が存在しないと、

回生絞込み、**失効**



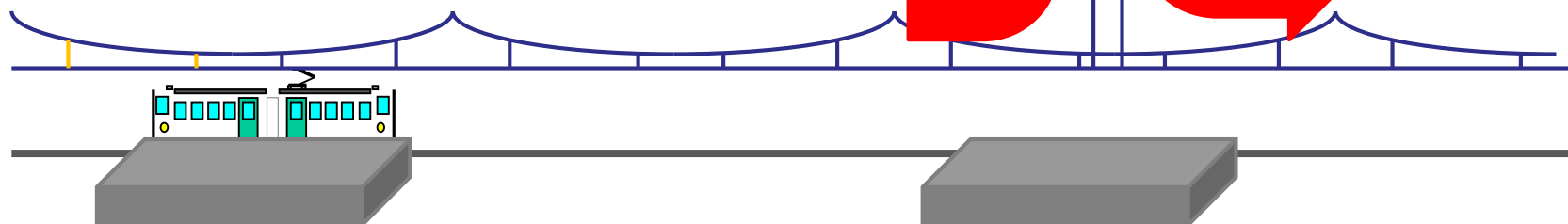
鉄道におけるエネルギー貯蔵の意義

蓄電システムがあれば、
回生電力を有効利用できる。



回生電力

貯蔵電力



各種蓄電システムの比較

	二次電池 【化学電池】	キャパシタ	フライ ホイール
充電速度	△	○	○
蓄電量	○	△	○
放電速度	△	○	○
保守性	○	○	△

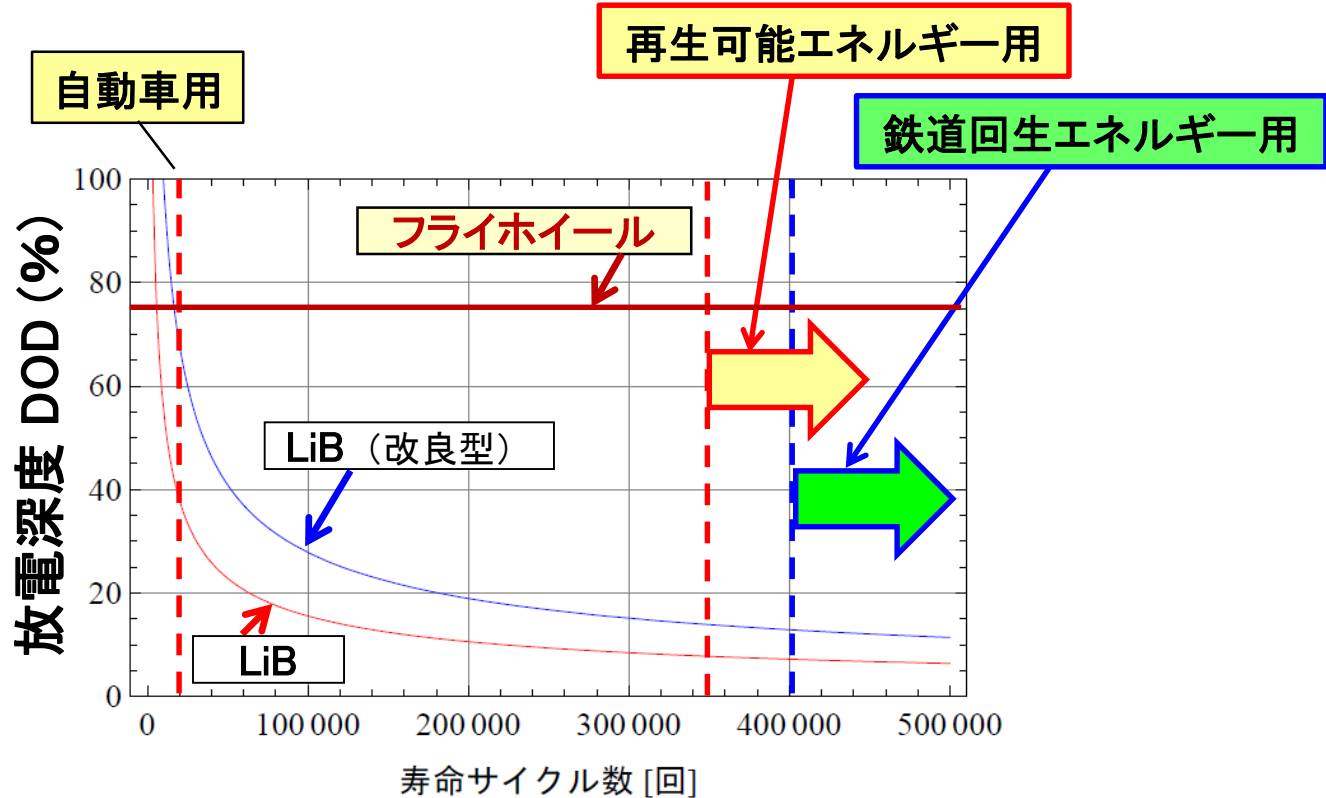


フライホイール

- ◎出力と容量を独立に設計可能
- ◎繰り返し充放電に強い(長寿命)
- ◎有害廃棄物が出ない

△機械軸受のメンテナンスが必要
⇒超電導磁気軸受を採用

リチウムイオン電池 (LiB) との比較



鉄道総研の実験式「リチウムイオン二次電池の放電深度 (DOD) による寿命予測法」

米山ら、「リチウムイオン二次電池の放電深度による寿命予測法」平成17年電気学会産業応用部門大会 Ⅲ-p.195

$$\text{寿命サイクル数} = \frac{\text{DOD 100\%の時のサイクル数}}{\text{DOD}^{1.8}}$$

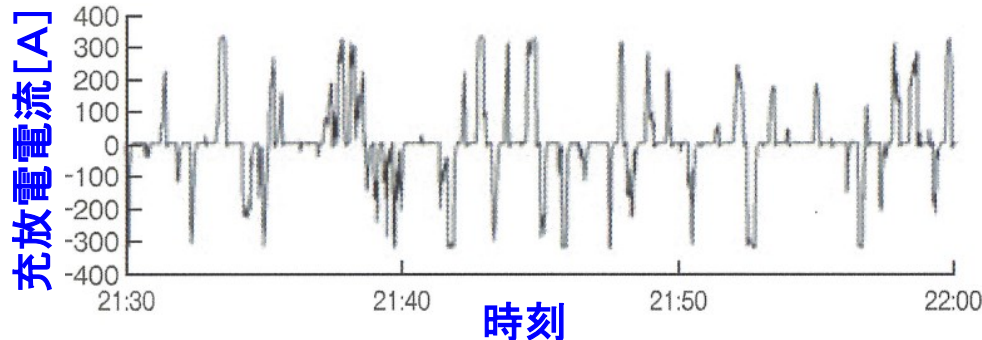
- ・LiBは放電深度を浅くして使用する必要があるため、大容量でコスト高になる。
- ・フライホイールはサイクル数による劣化が無い。

多数回のエネルギーリサイクルが求められる蓄電システム

鉄道での回生エネルギー有効活用

LiBシステムの運用例

およそ30回/30分



東武鉄道(株)越谷変電所における充放電電流計測結果例
(東芝レビューVol.69 No.8 (2014)「鉄道向け回生電力蓄電システム」)

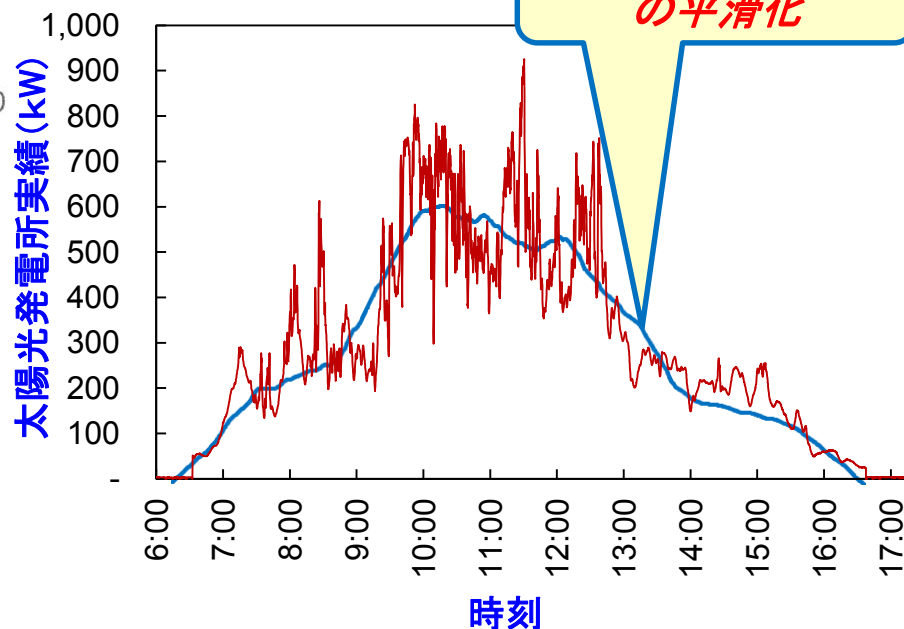
首都圏大手民鉄では1日に600回、閑散線区でも60回の充放電が必要

→ 20年用途では、40～400万回リサイクル
特性が必要

米倉山メガソーラーの出力変動



メガソーラー発電量の平滑化



平滑化のためには、1日に50～500回の充放電が必要
→ 20年用途では、35～350万回リサイクル特性が必要



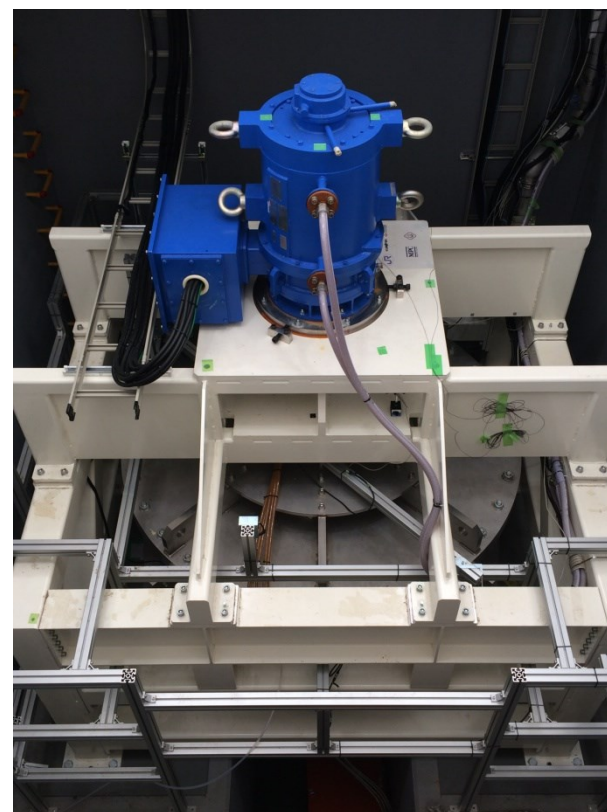
I. はじめに

II. 超電導磁気軸受

III. 実証機の構成、試験結果

IV. 鉄道への応用展開

V. 成果の活用



超電導磁気軸受

コンセプト および 仕様

- ・超電導コイルと超電導バルクの組合せによる
磁気浮上

→超電導磁気軸受の小型化で低コスト化

- ・磁気軸受部分のみ冷却

コイル:伝導冷却

バルク:希薄ヘリウムガス冷却

→液体冷媒不使用、冷却コストも低減



超電導磁気軸受

< 基本構成 >

低温容器
(内槽)

荷重支持体
(回転側)

液体窒素
不使用

冷凍機

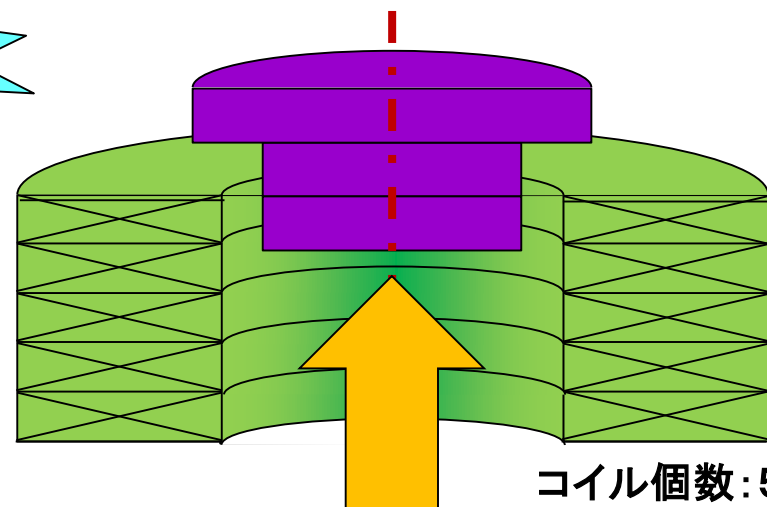
高温超電導
バルク体

高温超電導コイル
(固定側)

希薄GHe

高温超電導バルク体

浮上用 大バルク(直径:140 mm):1個
案内用 小バルク(直径: 90 mm):2個



4,000kg・f
(39.2kN)浮上

- ・冷凍機の消費電力測定
2.9 kW(25 K)、0.8 kW(50 K)
⇒実証機出力の1%以下
- ・全補機電力 8.2 kW

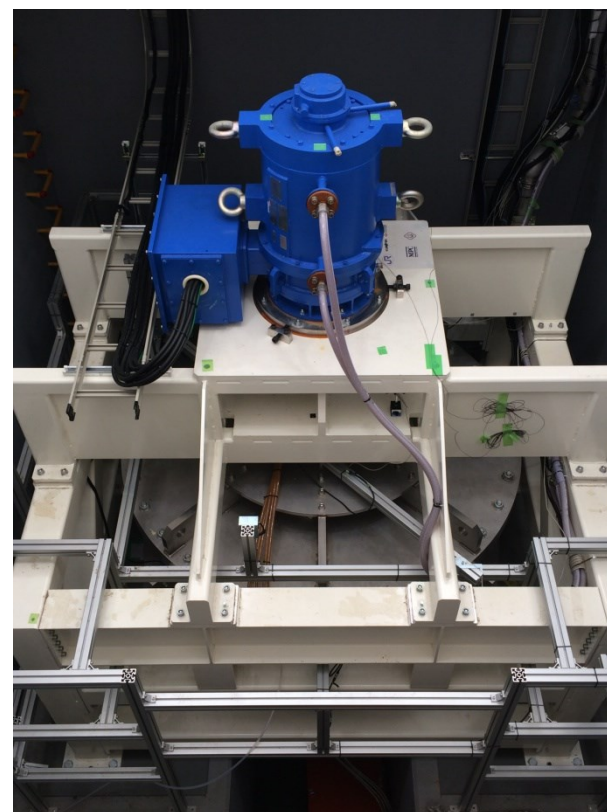
I. はじめに

II. 超電導磁気軸受

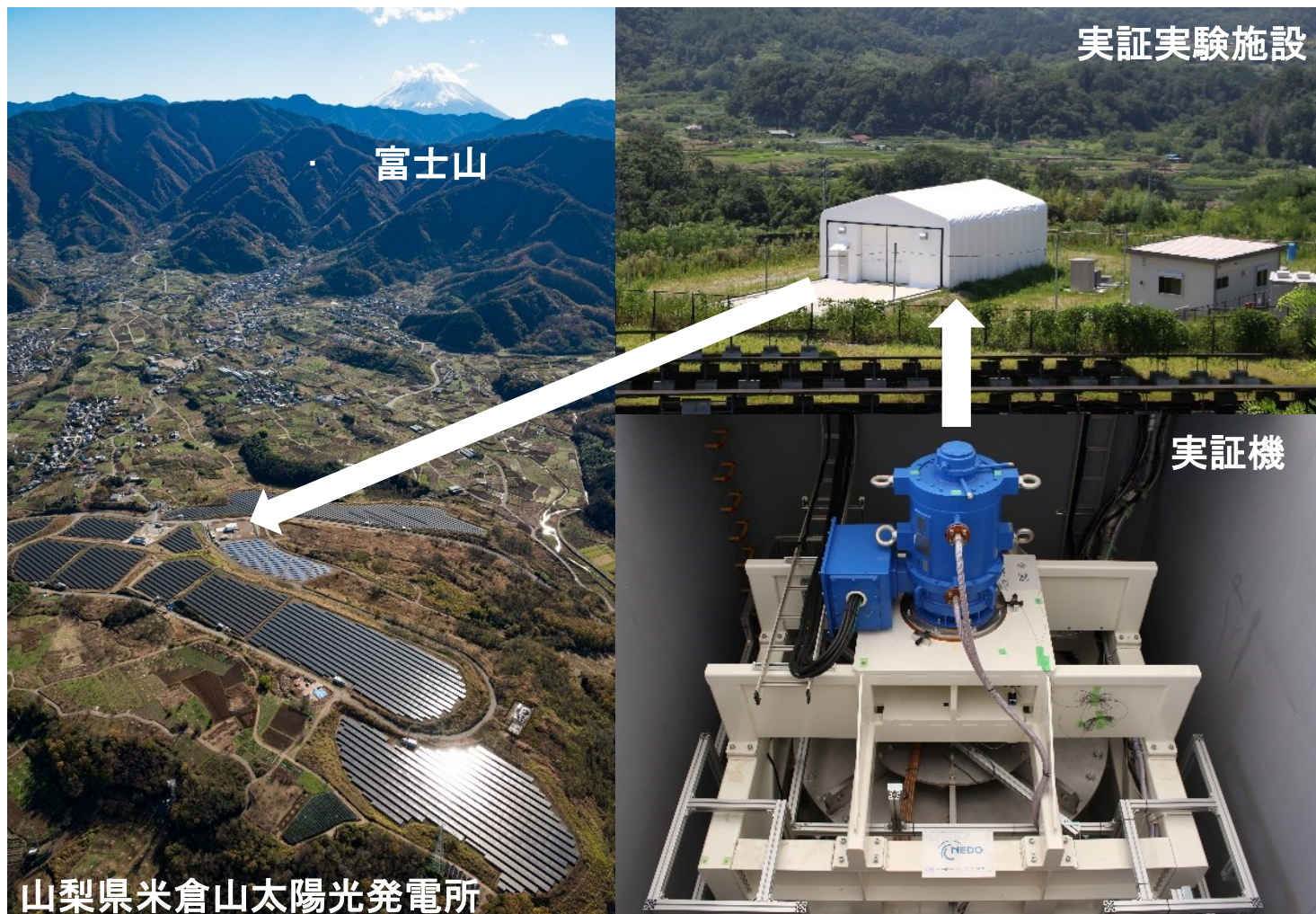
III. 実証機の構成、試験結果

IV. 鉄道への応用展開

V. 成果の活用



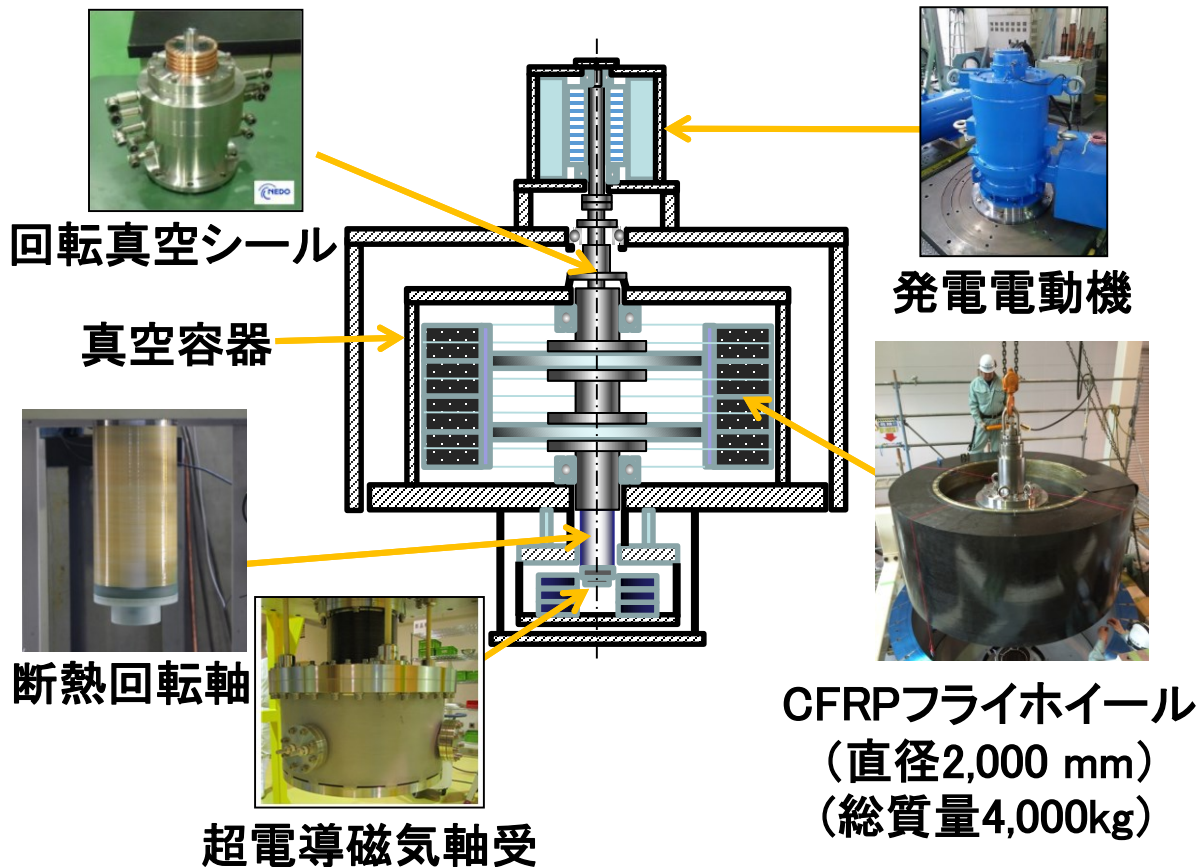
実証機の構成、特徴



超電導フライホイール実証実験施設



実証機の構成、特徴

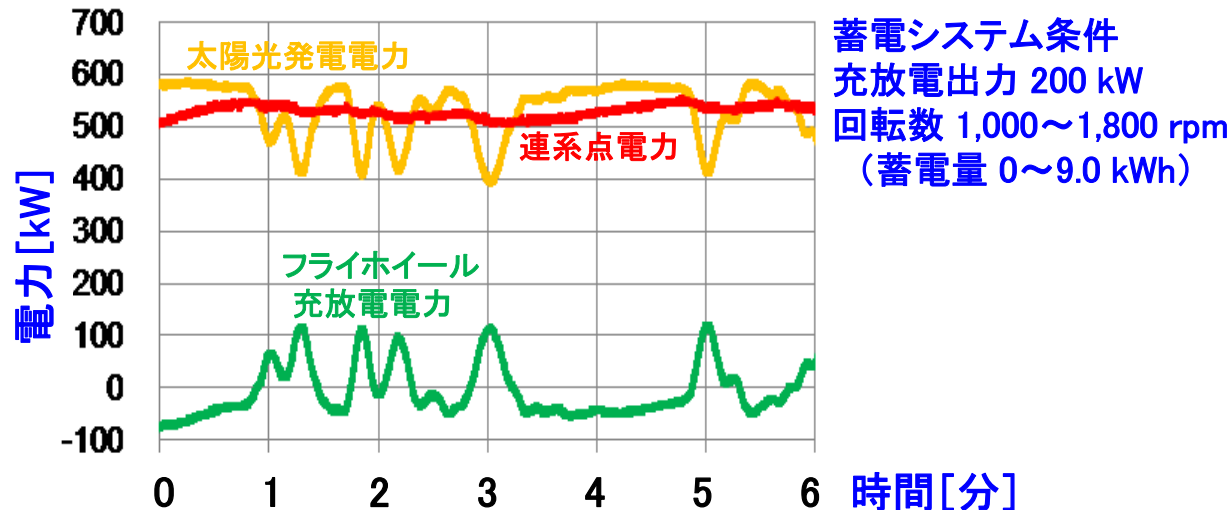
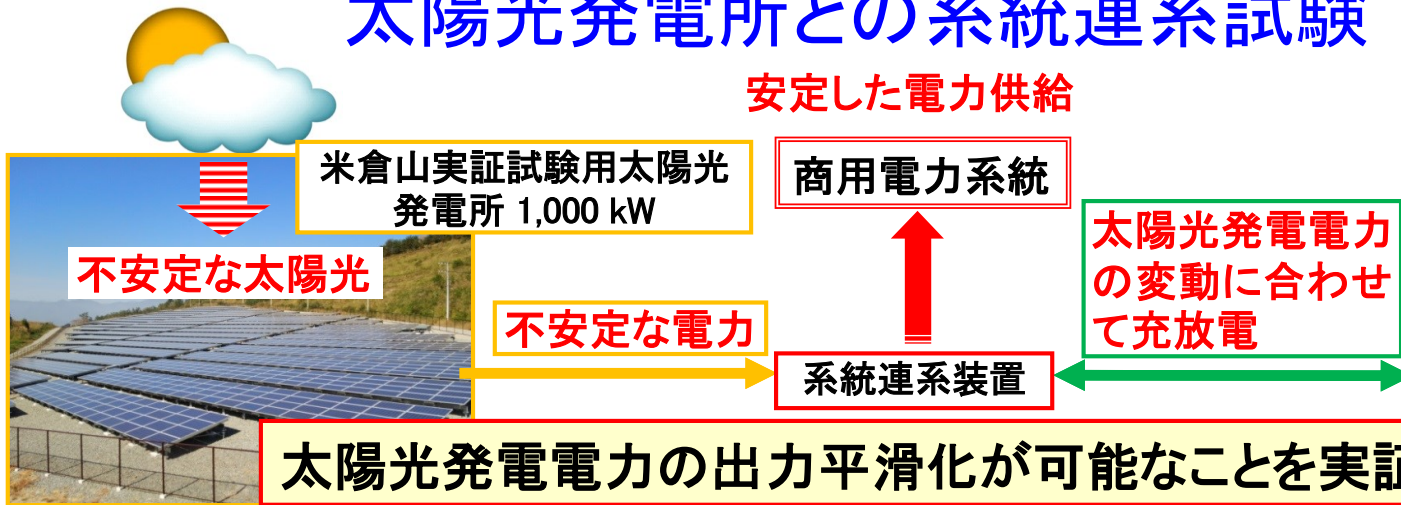


2015年 9月から実証機による実証試験開始



太陽光発電所との系統連系試験

超電導フライホイール
蓄電システム

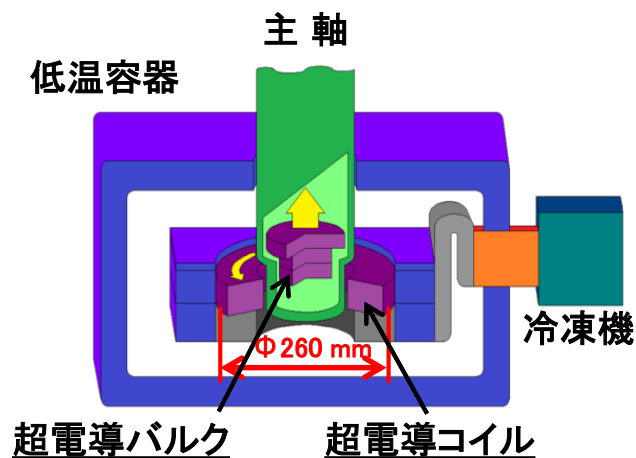


系統連系試験結果

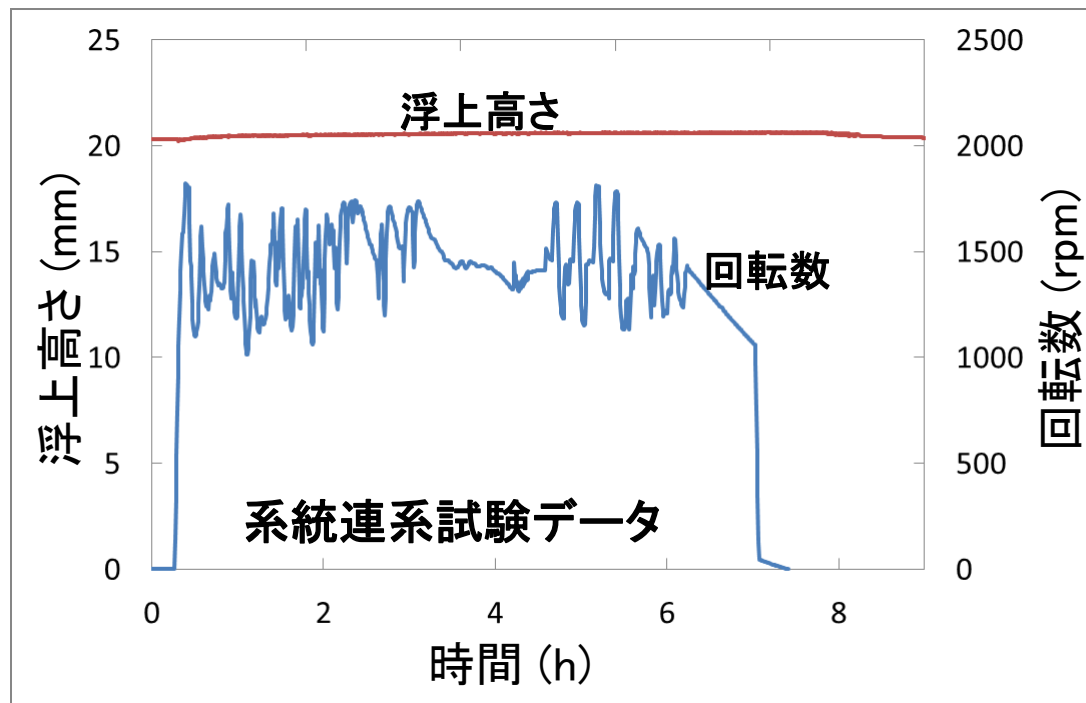
- ・充放電効率 87%を実験的に確認【NEDOプロ目標:80%以上】
⇒フライホイール蓄電システムは鉄道の回生失効対策にも有効



超電導磁気軸受の安定性検証



超電導磁気軸受模式図



- ・系統連系試験時の充放電(加減速)中も、4トン安定浮上・回転できることを実証
- ・3,000 rpmでも、4トン安定浮上・回転確認、冷却性能も問題無し

半年間の試験期間中、超電導トラブル無し 浮上時間、延べ 3,000時間超

2015年 2月でNEDO助成期間は終了



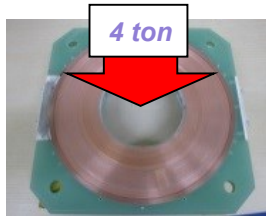
超電導磁気軸受(SMB)の信頼性検証(オフライン試験)

<目的>

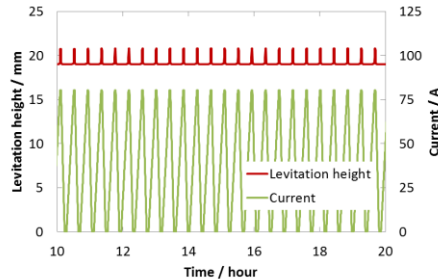
- FWのメンテ周期(1回/年)と期待寿命(20年)に対するSMBの信頼性検証

SMB疲労試験(平成28年4月~5月)

繰り返し荷重印加【励消磁】

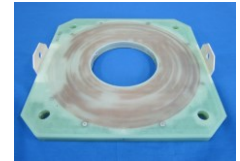
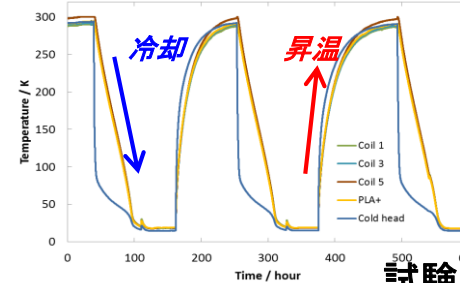


線材ストレス大
[応力10MPa、変位40μm]



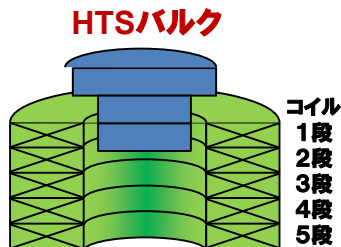
試験回数:100回実施
(想定回数20回の5倍)

繰り返し熱応力印加【冷熱サイクル】



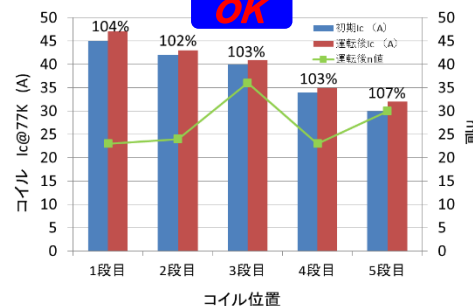
試験回数:24回実施
(想定回数20回の1.2倍)

<疲労試験結果>



$I_c > 30A$ 以上

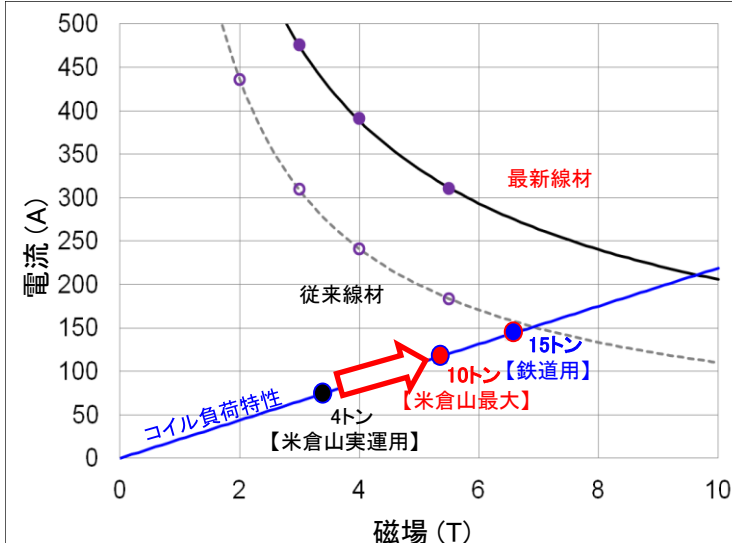
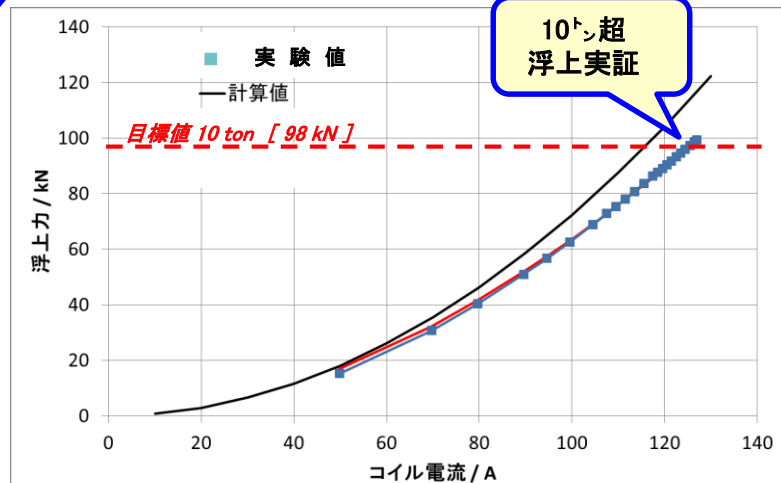
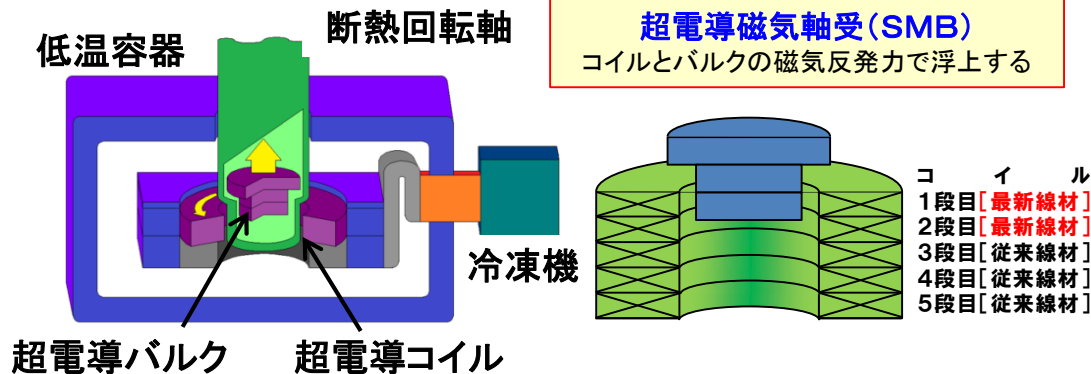
n 値 > 20 以上



⇒ I_c 、 n 値から「コイル劣化の兆候なし」

今回の疲労試験で期待寿命20年に対して、現行の運用条件ならばSMBは劣化せず構造余裕があることと、現SMB設計の信頼性の高さを検証できたと考えている。

【世界初】米倉山実証機用SMBで10トン浮上実証に成功



- ・米倉山実証機用超電導磁気軸受(SMB)で設計の最高荷重10トン浮上に成功
- ・鉄道用の大荷重化[想定荷重15トン]にも現在の設計の延長線上で対応メド

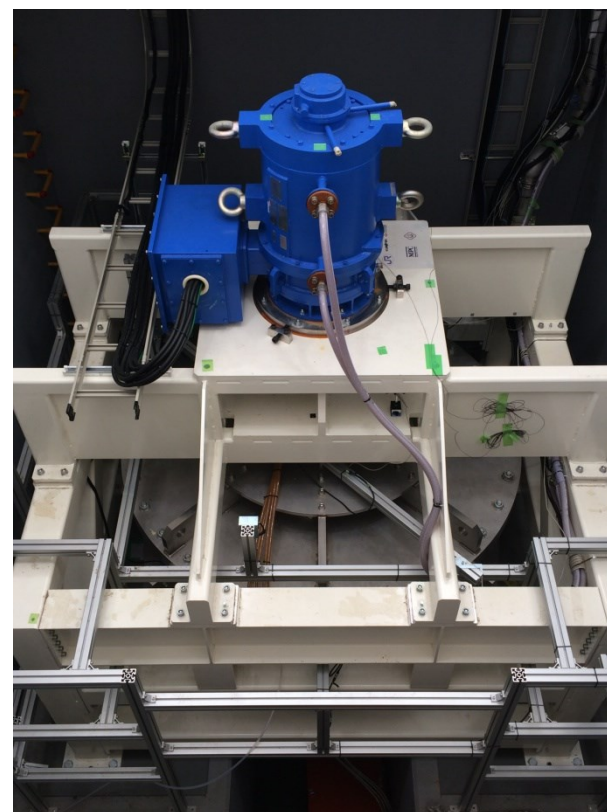
I. はじめに

II. 超電導磁気軸受

III. 実証機の構成、試験結果

IV. 鉄道への応用展開

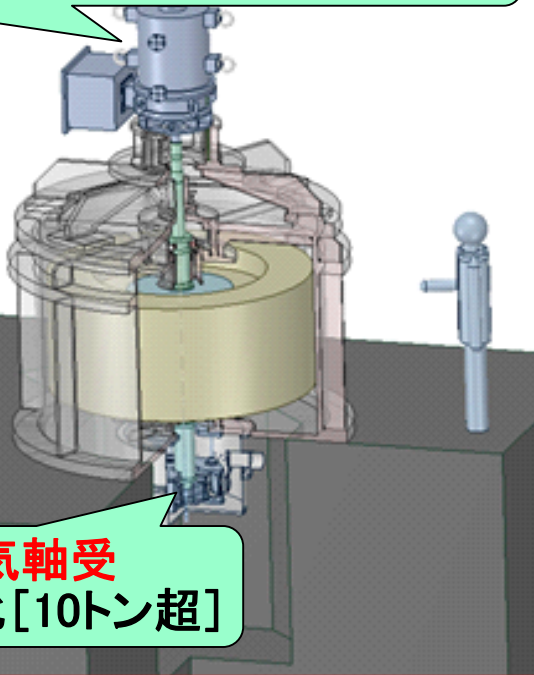
V. 成果の活用



鉄道への応用展開

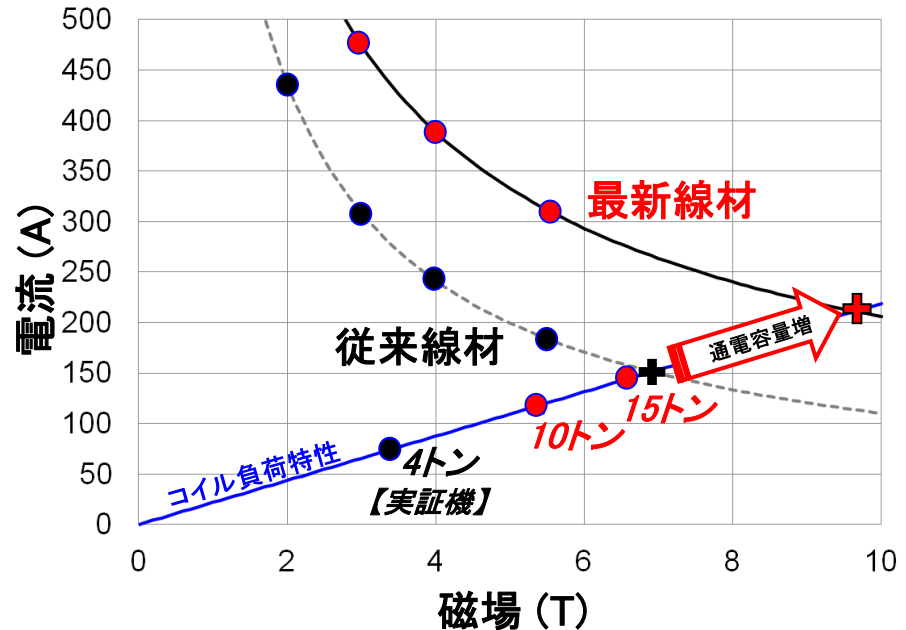
発電電動機

⇒高出力化[300kW ⇒ メガW級へ]



超電導磁気軸受

⇒大荷重化[10トン超]



超電導コイル負荷曲線と線材通電特性
(超電導コイルの大荷重化は対応可)

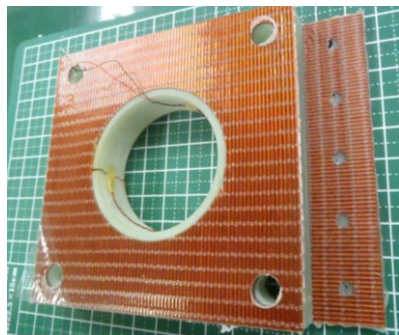
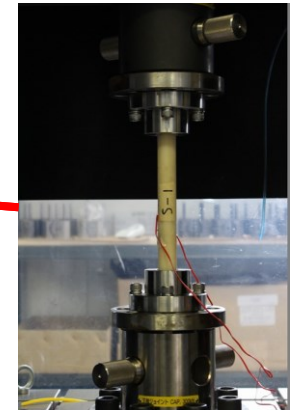
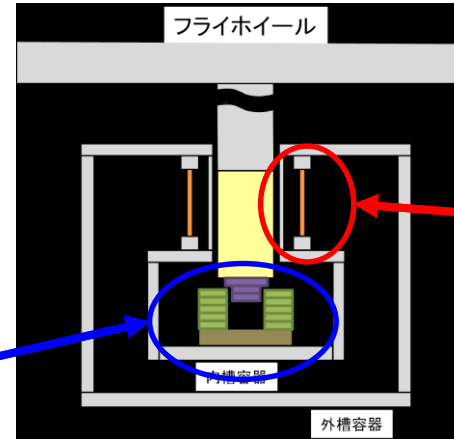
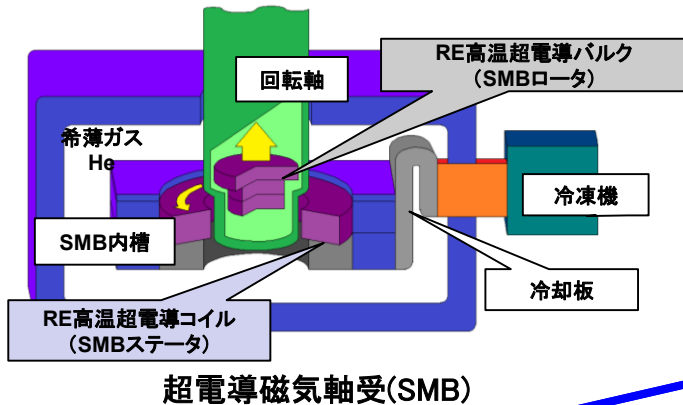
- ・鉄道用途には、充放電電力のメガW級への**高出力化**が必須
- ・フライホイール質量増により超電導磁気軸受は10トン超の**大荷重化**対応が必須



最新の**高性能線材**をコイルへ適用することで、鉄道用で想定される10トン超の大荷重浮上に対しても、現行の超電導磁気軸受構成の延長で**設計可能**

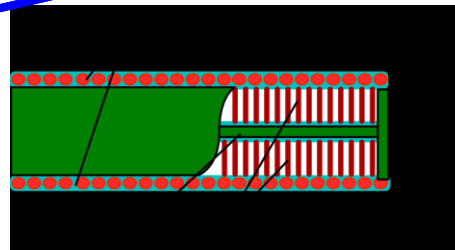
大荷重対応高温超電導磁気軸受の開発

超電導フライホイールの蓄電容量向上に向け、大荷重対応高温超電導磁気軸受の開発を進めている。

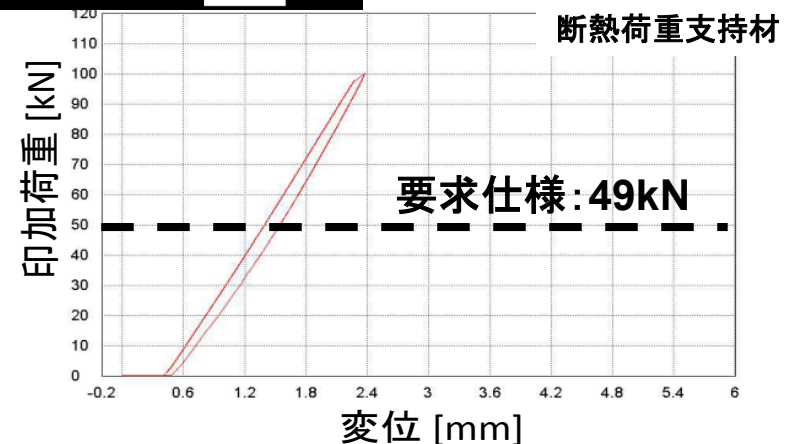


検証用試作コイル

銅すだれとコイル天板の一体化による冷却性能の向上



コイル断面模式図



荷重経験によるコイル劣化はなく、大荷重対応SMB用ステータコイルに適用可能なことを検証

大荷重対応可能な断熱荷重支持材にも目処立て

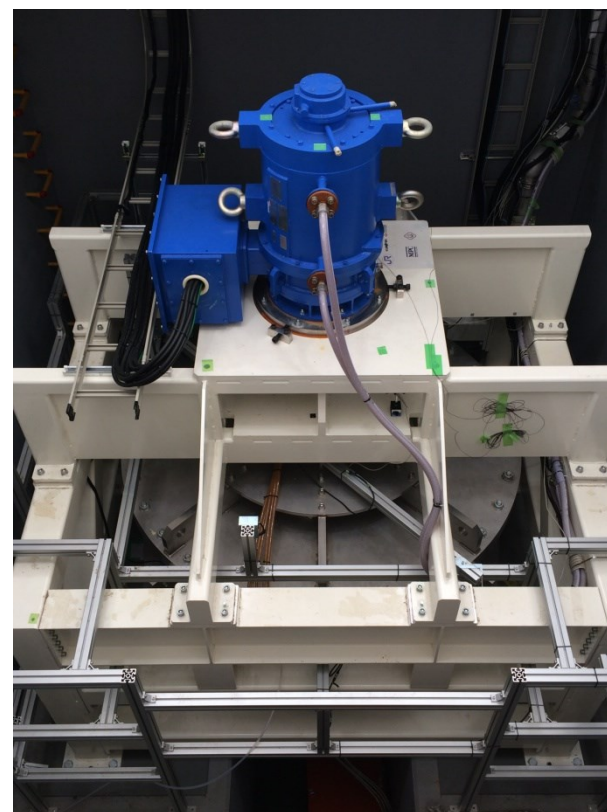
I. はじめに

II. 超電導磁気軸受

III. 実証機の構成、試験結果

IV. 鉄道への応用展開

V. 成果の活用





まとめ

- (1) 実証機 (出力300 kW、蓄電容量100 kWh)を完成させ、山梨県米倉山の太陽光発電所(出力1 MW)に設置、発電電力の出力の平滑化効果を検証。
- (2) 系統連系試験運転中も 安定浮上・回転を確認。超電導トラブルなし。浮上時間は延べ 3,000時間超。期待寿命20年に対する余裕、信頼性を確認。冷凍機の消費電力は、実証機出力の1%以下を確認。
- (3) 最新の高性能線材適用で鉄道用の10トン超の大荷重超電導磁気軸受が現行の構成の延長で設計可能なことを確認。現構成で10トン浮上実証済み。さらなる大荷重対応超電導磁気軸受の開発を進めている。



今後の取り組み

回生失効対策等に役立つ、鉄道用の超電導フライホイール蓄電の実用化にむけた設計を進めていく。



謝 辞

- この研究開発はNEDOの助成事業「次世代フライホイール蓄電システムの開発」にて、(公財)鉄道総研, クボテック(株), 古河電気工業(株), (株)ミラプロ, 山梨県企業局の5者共同で実施してきたものである。



2015年 2月で, NEDO助成期間は終了



ICEF2015にて、トヨタのミライと共にTop10に選定されました

TOP10 Innovations

Pilot & Start-up Energy Storage | No.2

Title

World's largest Superconducting Flywheel Energy Storage System test machine is developed

Organization

Railway Technical Research Institute,
Kubotek Corporation, Furukawa Electric Co., Ltd.,
Mirapro Co., Ltd., Public Enterprise Bureau of Yamanashi Prefecture (Japan)

Period

April/2015

The Railway Technical Research Institute (RTRI) has developed a superconducting flywheel energy storage system, as a next-generation power storage system, with support by NEDO. **This is the world's first superconducting magnetic bearing which uses superconducting material both for its rotor and stator, and is capable of supporting heavy weight, although it is a compact-sized system.**

The flywheel energy storage system is capable of storing energy in the form of kinetic energy by rotating a flywheel, and converting the rotating energy again to electricity. RTRI developed a superconducting magnetic bearing composed of a high-temperature superconducting coil and high-temperature superconducting bulk for the developed system. These enable the flywheel to be levitated by the superconducting magnetic bearing without contact.

It is a very practical system, which enables stable fluctuating power generation such as PV over a long period. It has been connected to a solar power system and power grid of Tokyo Electric Power Company in Yamanashi Prefecture.

GHG emissions reduction potential

Compared to hydro pumping, superconducting Flywheel Power Storage System will improve storage efficiency from 70% to 85%. With assumption that 1.2 million kW of flywheels will be deployed by 2040, the improvement by Superconducting Flywheel would bring about a 400 million kWh reduction of electricity consumption (around 200 thousand t-CO2) a year.

Innovativeness

The project is innovative in that it is the first demonstration to use superconducting material both for rotor and bearing.

Feasibility

The project demonstrates the technological feasibility of applying a superconducting magnetic material for rotor and bearing.



System configuration of demonstrated flywheel

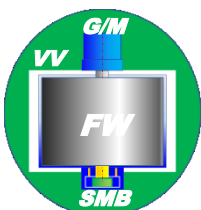
Source: Railway Technical Research Institute
(<http://www.rtri.or.jp/eng/news/pdf/nr20150415e.pdf>)

Comments by the Top10 Working Group

The first flywheel power storage using a superconducting magnet bearing.

ICEF2015





未踏科学技術協会 第21回「超伝導科学技術賞」授賞

超伝導フライホイール蓄電システム用
高温超伝導磁気軸受の開発
(平成29年4月17日)



鉄道総合技術研究所と古河電気工業が共同で開発推進中の「超伝導フライホイール蓄電システム用超伝導磁気軸受の開発」が、未踏科学技術協会が主催する「第21回超伝導科学技術賞」を受賞した。

鉄道総研・古河電工
フライホイール蓄電
実用化へ実証継続

超伝導科学技術賞 受賞式開く



表彰される鉄道総研の長嶋部長と受賞者

17日に東京都江戸川区のタワーマンション船堀で授賞式と記念講演が開く。超伝導磁気軸受として世界最大級の10トンを

超す大荷重浮上実証に初めて成功したことや、山梨県米倉山における太陽光発電電力の出力安定化効果検証などの成果が評価された。フライホイール蓄電システムは、大型の円盤を回転させることで電気エネルギーを運動エネルギーとして貯蔵する。超伝導フライホイール蓄電システムは、高速回転する大荷重の円盤を小型の高温超伝導磁気軸受が発生する強力な磁気反発力を利用して非接触支持するため、機械的な損失を抑えられる。

今回の開発成果は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の助成事業として得られたもの。高温超伝導磁気軸受の支持側の高温超伝導コイルには古河電工グループの高温超伝導線材を使用した。アルミナFRP製の断熱回転軸は鉄道総研が基本設計し、古河電工、松井鋼材グループの協力を得て製作した。断熱回転軸の高温超伝導バルク体には新日鐵住金製の大型単結晶が用いられている。

鉄道総研の長嶋賢・浮上式鉄道技術研究部長は「今後数年間は実証実験を継続していく。鉄道総研としては同技術を鉄道の回生失効対策に役立てていきたい。鉄道は運行ダイヤが決まっているので運用の計画が立てやすい。メーカーと協力しながら早期の実用化を目指す。部材の量産によるコストダウンが進めば、再生可能エネルギー分野への展開も加速する」と話した。