

「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」
中間評価報告書

平成15年8月

新エネルギー・産業技術総合開発機構、産業技術総合研究所
技術評価委員会

目 次

はじめに	1
分科会委員名簿	2
審議経過	3
評価概要	4
技術評価委員会におけるコメント	7
技術評価委員会委員名簿	8
第1章 評 価	
1．プロジェクト全体に関する評価結果	1-1
1．1 総論	
1．2 各論	
2．個別テーマに関する評価結果	1-17
2．1 超電導軸受要素技術	
2．2 超電導軸受応用技術	
3．評点結果	1-26
第2章 評価対象プロジェクト	
1．事業原簿	2-1
2．分科会における概要説明資料	2-2
参考資料1 評価の実施方法	参考資料 1-1

はじめに

新エネルギー・産業技術総合開発機構、産業技術総合研究所においては、被評価プロジェクト毎に当該技術の外部の専門家、有識者等によって構成される技術評価分科会を技術評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの技術評価を行い、評価報告書案を策定の上、技術評価委員会において確定している。

本書は、「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」の中間評価報告書であり、第7回技術評価委員会（平成15年2月10日）において設置された「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」（中間評価）技術評価分科会において評価報告書案を策定し、第9回技術評価委員（平成15年8月20日）に諮り、確定されたものである。

平成15年8月
新エネルギー・産業技術総合開発機構、産業技術総合研究所
技術評価委員会

「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」

中間評価分科会委員名簿

(平成 15 年 6 月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	長谷川 淳	北海道大学 大学院工学研究科 教授
分科会 委員	稲葉 陽二	日本大学 法学部 教授、日本政策投資銀行 設備投資研究所 研究顧問
	片岡 直昭	北陸通信ネットワーク株式会社 代表取締役社長
	金光 陽一	九州大学 大学院工学研究院 教授
	田島 進	日経 BP 社 編集委員室 主任編集委員
	松下 照男	九州工業大学 副学長
	森 俊介	東京理科大学 理工学部 教授

敬称略、五十音順

審議経過

- 第1回 分科会（平成15年4月15日）
 - 公開セッション
 - 1．分科会の公開について
 - 2．評価の在り方と評価の手順について
 - 3．評価の分担及び評価報告書の構成について
 - 4．プロジェクトの概要
 - 非公開セッション
 - 5．プロジェクトの個別テーマの詳細について
 - 6．コメント、質疑応答(全体について)

- 現地調査（平成15年4月24日）
 - フライホイール電力貯蔵用超電導軸受装置

- 第2回 分科会（平成15年6月17日）
 - 公開セッション
 - 1．評価の進め方について
 - 2．評価報告書（案）の審議及び確定

- 第9回 技術評価委員会（平成15年8月20日）

評価概要

1. 総論

1) 総合評価

本プロジェクトは、高温超電導バルクの特徴を生かした波及効果の大きい開発であり、要素技術の開発・改良、システム技術上の問題抽出とその解決などの面で、開発成果は着実に上がっている。

大容量の貯蔵システム（MWh級のシステム）による負荷平準化が実用化することへの期待は大きいですが、このような大容量の貯蔵システムのニーズ（規模および導入時期）については検討を要する。

UPS（無停電電源装置）に応用する無接触技術等の要素技術は着実に成果を上げており、競合技術のハードルはあるものの、実用化は可能と考える。しかし、UPS等ではエネルギー、地球環境対策としての効果は限定的であり、将来の大容量化への展開を求めることは重要である。また、超電導の特性を活かした最適設計に向けて吟味が必要である。

高温超電導の応用範囲の拡大と見れば、今後のバルク応用が重要であり、波及効果も期待できるため、NEDO事業に相応しいものと考えられる。バルク材の応用箇所を軸受に設定したことは妥当である。

早期実用化に向けたシナリオの再検討が必要であり、実用化についての評価は、今後のシナリオ再構築の如何によるものと言える。

2) 今後に対する提言

今後の進め方については、経済・社会環境の変化と他の環境・エネルギー技術の進歩を踏まえて見極めるべきである。大容量の負荷平準化用という原点に立てば重要であるが、導入は後年にシフトするものと考えられる。UPS等一般産業用として有用であり、当面、小規模フライホールの開発を期待する。ただ必ずしも超電導が最有力と言うことではなく、超電導技術の他の用途を視野に入れた展開も期待される。一方、本技術のニーズについて広い視点からの調査が必要であるが、無接触軸受の応用範囲の拡大も期待され、今後も基礎研究を継続していくことは重要である。

しかし、社会的ニーズが不透明なままでは大規模な次期フェーズに進むべきではなく、将来の可能性の見極めが必要である。

2. 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

電力の安定供給とコスト低減、地球温暖化防止への寄与、増大する負荷変動の吸収等に対応する超電導フライホイール電力貯蔵技術への期待は高い。超電導技術は、電力技術のみならず製造業、冷却産業等他業種技術を大きく変える等、将来に大きな可能性や波及効果を持つ技術であり、また現時点ではわが国の超電導技術は欧米に対して一日の長がある。さらに、関連研究開発課題は、極めて挑戦的で、また大きな研究

投資を必要とするリスクの高いものであり、民間の研究開発努力に委ねることは未だ適切ではない。従って、基礎技術が確立できるまでの間、国が政策的かつ戦略的に研究開発を推進すべきであり、NEDO がこうしたプロジェクトを立ち上げたことは、高く評価できる。

一方、今後 UPS 等の小容量、短時間の負荷変動への対応策としての開発を行う場合、現状の構造が必ずしも超電導技術を生かし切るものではなく、最適な構造の検討が必要である。将来、大容量、長時間用途の装置開発にも応用可能であり、エネルギー利用効率の向上、地球環境対策となるものとしての位置付けの整理が不可欠である。また、画期的な新材料である高温超電導体の研究を、これからも基礎から応用まで広範に継続していくためには、本プロジェクトのような実用化研究は有効であるが、新材料が実用に供することができるかを調査する基礎研究の側面もあることを認識する必要がある。

2) 研究開発マネジメントについて

各参加主体との開発分担も適切であり、社会・経済環境の変化に応じて中間目標設定や開発目標を見直す等の柔軟な対応をとっている。研究開発計画については第1フェーズにおいて得られた成果をもとに達成目標を掲げており、妥当な計画であったと評価できる。しっかりした報告書作りや定期的な意見交換がなされ、確実に成果を蓄積してきていることは、円滑にマネジメントされている証であり、高く評価できる。

しかし、情勢変化に伴う中長期的な開発目標の見直しにより、負荷平準化用だけでなく早期実用化可能な UPS 等にも目標を据えたことは致し方ないが、目標については今後ともより一層議論を深めるべきである。

3) 研究開発成果について

要素技術および応用技術とも、計画通りの成果を上げている。高温超電導バルクによる円筒型スラスト軸受の載荷力密度の目標値を達成し、超低回転損失を実証したこと、また高性能フライホイールを完成させ 12,000rpm までの安定回転を実現したことは、特に高く評価される。さらに、超電導体の基礎特性の向上、フライホイールの円盤部に用いられる CFRP の加工技術等の研究成果は、技術の汎用性が高く評価に値すると考える。

しかし、10MWh 級フライホイールの実現には、さらなる高度な研究開発を必要とする。また特に、産業応用等における早期実用化のために UPS 用システムとして開発する場合には、その目的に合致した最適設計が必要である。広く応用を考えると、磁気回路の磁場の不均一さによる超電導バルク材における損失、軸降下の現象等については、理論的な研究を進めるとともに、より性能の向上を図るべきである。

研究成果について多数の論文発表が行われているが、革新的技術においては研究成果・技術動向などの情報発信が非常に重要である。より一層の特許取得、論文発表等に努めるべきである。

4) 実用化、事業化の見通しについて

今後の開発により一般産業用として有用な 10kWh、100kWh 級システムの見通しが得られると、電力自由化が進められている中で需要家側の瞬時電圧低下対策用 UPS 等として実用化される可能性がある。低コスト、小型化を目標としたさらなる最適設計が必要ではあるとはいえ、一般産業用の実用化は比較的容易であると考えられる。

MWh 級の負荷平準化用については、さらに数段の開発ステップが必要であり、まだ実用化の明確な見極めについて言及できる段階にはない。経済状況の変化により導入時期も後年にシフトすると考えられるため、需要予測を再考慮しつつ、適用分野の再整理をも含めた実用化に向けた開発ステップ、シナリオについて見直しが必要である。

しかし、一般産業用、負荷平準化用のいずれも、既に実用化された種々の競合技術がある。既存技術に対して優位性を発揮するには、具体的なコスト低減のための方策とそれを実現するための対応を明確にする必要があるが、単なるコスト競争ではなく、独自の特徴を強調する実用化の方向が重要である。

技術評価委員会におけるコメント

第9回技術評価委員会(平成15年8月20日開催)に諮り、了承された。技術評価委員から以下のコメントが出された。

一般産業用のUPS(無停電電源装置)は既にマーケットができているため、国が開発を支援する必要性は低いのではないかと。むしろ本来の負荷平準化という大きなターゲットに向かって、社会情勢等も踏まえ、どう進めていくのか考えていかなければいけないだろう。

アウトカムで特許が1件しか出てこないため、技術開発型の取り組み方や目標等について疑問が残る。

技術評価委員会委員名簿

委員長	小野田 武	日本大学 総合科学研究所 教授
	伊東 弘一	大阪府立大学大学院 工学研究科 教授
	稲葉 陽二	日本大学 法学部 教授
	内山 明彦	早稲田大学 理工学部 教授
	大西 優	鐘淵化学工業株式会社 常務取締役
	黒川 淳一	横浜国立大学大学院 工学研究院 教授
	小柳 光正	東北大学大学院 工学研究科 教授
	曾我 直弘	独立行政法人 産業技術総合研究所 理事
	富田 房男	放送大学 北海道学習センター 所長
	西村 吉雄	大阪大学 フロンティア研究機構 特任教授
	架谷 昌信	名古屋大学大学院 工学研究科 教授
	平澤 洽	東京大学 名誉教授
	真鍋 正巳	株式会社デンソー 常務取締役

(合計 13名)

(敬称略、五十音順)

第 1 章 評価

1. プロジェクト全体に対する評価

1.1 総論

1) 総合評価

本プロジェクトは、高温超電導バルクの特徴を生かした波及効果の大きい開発であり、要素技術の開発・改良、システム技術上の問題抽出とその解決などの面で、開発成果は着実に上がっている。

大容量の貯蔵システム（MWh 級のシステム）による負荷平準化が実用化することへの期待は大きいですが、このような大容量の貯蔵システムのニーズ（規模および導入時期）については検討を要する。

UPS（無停電電源装置）に応用する無接触技術等の要素技術は着実に成果を上げており、競合技術のハードルはあるものの、実用化は可能と考える。しかし、UPS 等ではエネルギー、地球環境対策としての効果は限定的であり、将来の大容量化への展開を求めることは重要である。また、超電導の特性を活かした最適設計に向けて吟味が必要である。

高温超電導の応用範囲の拡大と見れば、今後のバルク応用が重要であり、波及効果も期待できるため、NEDO 事業に相応しいものと考えられる。バルク材の応用箇所を軸受に設定したことは妥当である。

早期実用化に向けたシナリオの再検討が必要であり、実用化についての評価は、今後のシナリオ再構築の如何によるものと言える。

< 肯定的意見 >

本プロジェクトは、高温超電導バルクによる、無損失に近い、円筒型スラスト軸受を実現できる確証を得たことにより、今後の同バルクの応用展開にとって重要なマイルストーンとなる。

10kWh 規模のフライホイールについては、その商品の技術的・経済的競争力を再検討の上早急に製品化すべきである。

UPS、鉄道等の負荷変動補償装置への利用による、エネルギー利用効率の向上、地球環境対策への貢献は限られているものの、本技術が将来大容量、長時間用途にも応用可能であること、永久磁石や CFRP 製造産業、真空技術関連産業、超電導用低温冷却を含めた冷却産業、発電電動機や電力交換機等の電力関連産業など幅広い波及効果が望めることを勧告すれば、本事業を実施することは妥当である。

超電導を実際の省エネルギー、環境負荷低減に活用するための開発として、要素技術の開発成果は着実に上がっていると評価できる。電力需要の増加は今後過去ほどの成長はしないとしても、送電の安定化に寄与する重要技術である点は疑いない。また、無接触軸受は機械系の基本的な要素技術であるので、波及効果も大きい点はもっと強調すべきである。

UPS の事業化は実現への見通しが可能であろう。しかし競合技術が多く、かつ顧

客側の規模・性能・コスト要求などが多様な基本的にニッチな市場であるだけに、本製品が事業として成功するには多くのハードルがある。

将来の有望な技術としての超電導技術の実用化プロジェクトは NEDO が行う事業にふさわしく、極めて時宜を得たものといえる。また、中でもバルク材を用いた超電導軸受の応用に設定したことも、これまでにない新しい超電導技術であることから、可能性を広げる意味からも適切であったといえる。そして第 1 フェーズでの目標値をこの第 2 フェーズで一部達成でき、また達成できる見通しが得られたことも、事業が妥当であったことを示すものである。

高温超電導体の特徴を生かした従来にはない電力貯蔵システム開発の意義は大きい。実用化までに多くの課題を解決しなくてはならないが、本プロジェクトに参加した各研究機関は、要素技術の開発・改良、システム技術上の問題抽出とその解決などの面で、着実に成果を上げている。

電力用の MWh 級システムへ繋がる技術として、また産業用にも有用な 10kWh、100kWh 級システムを実現できる技術として、本研究開発は大きな意義があり、十分な成果を上げていると評価する。

本事業の研究開発は、戦略的かつ政策的に推進すべき重要課題であり、継続的に推進する必要がある。研究開発マネジメントも概ね適切であり、また研究成果も着実にあがっている。実用化の見通しは、今後の研究開発の進展と実用化に向けたシナリオ再構築の如何によるが、可能性は高い。技術的波及効果は極めて高いと評価する。

<問題点・改善すべき点>

本プロジェクトの長期目標は Phase 以前に策定されたものである。このような長期的な開発目標は社会・経済情勢の変化にあわせて、機敏に調整し、その結果を開発計画に明確に反映すべきである。電力事業分野で大容量のフライホイール電力貯蔵システムの導入をどの程度計画しているかを再調査する必要がある。

UPS、鉄道等の負荷変動補償装置などの用途は短時間の負荷変動に対応するものであり、日負荷平準化などの大容量、長時間用途とは異なり、必ずしも高温超電導フライホイール電力貯蔵装置の特性を生かしきるものではないようにおもわれる。また、UPS や鉄道等の負荷変動補償装置などの用途は、個別ユーザーの電力品質の維持には貢献するものの、国民経済的にみて、エネルギー利用効率の向上、地球環境対策への貢献は限られている。従って、UPS などの小容量、短時間の負荷変動への対応策としての高温超電導フライホイール電力貯蔵装置の開発をあえて国が行うにあたっては、将来、大容量、長時間用途の装置開発にも応用可能であり、エネルギー利用効率の向上、地球環境対策となるものとして位置付ける必要がある。

本技術の適用対象が競合技術の多い UPS に限定されている結果、本技術開発の有効性が単なるコスト優位性のみになってしまった印象を受ける。本来は、超電導

の応用による少ない消費エネルギーで無接触軸受を実現できることで、競合技術のない適用対象 - たとえば、高速高効率タービンや小型精密ジャイロなどへの波及の視点をもっと強調すべきである。

技術的な目標値はクリアしているが、全ての部分で理論的に理解できているわけではないので、解析をきちんと行い、現象の理解を目指す必要がある。それにより、今後の展開において予測を可能とし、また最適化についての指針が得やすくなるとともに、より性能の向上が期待される。

負荷平準用の大型電力貯蔵システムに対するニーズは、経済情勢の変化により緊急性が乏しくなりつつある。開発した技術を、社会的ニーズにマッチした画期的な製品に結びつけるために、次のフェーズに入る前に、もう一度、応用目標を再検討すべく議論を深めるべきである。

早期の実用化に向けたシナリオについては、目標となる産業応用等の用途について再検討が必要である。本事業での研究開発は、負荷平準化用のシステムに向けた研究開発のステップであるという原点を大切にしないと、研究開発全体の整合性、説得性に齟齬をきたす恐れがある。

2) 今後に対する提言

今後の進め方については、経済・社会環境の変化と他の環境・エネルギー技術の進歩を踏まえて見極めるべきである。大容量の負荷平準化用という原点に立てば重要であるが、導入は後年にシフトするものと考えられる。UPS 等一般産業用として有用であり、当面、小規模フライホールの開発を期待する。ただ必ずしも超電導が最有力とすることではなく、超電導技術の他の用途を視野に入れた展開も期待される。一方、本技術のニーズについて広い視点からの調査が必要であるが、無接触軸受の応用範囲の拡大も期待され、今後も基礎研究を継続していくことは重要である。

しかし、社会的ニーズが不透明なままでは大規模な次期フェーズに進むべきではなく、将来の可能性の見極めが必要である。

< 今後に対する提言 >

H16 年度までに、10kWh 級のフライホールの技術課題をすべてクリアーして、H17 年度から新たに、本プロジェクトの成果を十分に生かして、しかも商業化可能な新製品（小規模フライホールなど）の開発プロジェクトを企画推進されることを希望する。

本プロジェクトは、技術開発としては次段階へ進めるのに十分は潜在価値を有していると認められるが、そのためには経済・社会環境の変化と代替エネルギー技術、省エネルギー技術など他の環境・エネルギー技術との兼ね合いを十分に考慮した評価を行う必要がある。

無接触軸受は機械の基本的要素技術であることから、本技術がシーズとしてどのような分野で期待されるものであるのか、広い視点からの調査がもう一度必要である。

第 2 フェーズにおいてすべきことは今後の予定にあらかた盛り込まれているので、その部分でのきちんとした検討をすべきである。一方、この事業において具体的な開発の目標が、当初の負荷変動補償用からすぐに応用可能な無停電電源用に変えられた。このため装置全体としては最適条件から外れたものとなっている。また無停電電源用としても、その分野で必ずしも超電導技術が最有力ということではない。以上はこれまでの状況の変化からしかたのないところである。しかしながら、超電導技術にはさらに別の可能性もあると期待され、今回の第 2 フェーズまでの技術的な積み上げをさらに活かすために、次の第 3 フェーズでは超電導技術の可能性をさらに広げられるプロジェクトを検討すべきである。

本プロジェクトは、高温超電導体の最初の応用システムを目指したものだが、現状ではまだ基礎研究が主体と思われる。未知の分野なので、これからも基礎研究を継続していくことは重要だが、応用目標（あるいは社会的ニーズ）が曖昧なまま、さらに大規模な実証試験に進むべきではない。

現行フェーズを当初計画通り H16 年度まで実施することにより、10kWh、100kWh 級システムの見通しが得られることは、需要家側における瞬時電圧低下

対策など一般産業用としても有用であり、十分評価に値すると考えられる。一方、MWh 級システムの必要性は、電力自由化や分散型電源の動向等を考慮すると、導入時期が後年にシフトすることも考えられるが、先ず 10kWh、100kWh 級システムの技術蓄積、実用化への研究開発を着実に実施し、その成果を活かし MWh 級システムの研究開発につなげていく事が妥当である。

本プロジェクトは、負荷平準化用システムの実用化に向けた基礎研究であるとの原点に立ち返れば、着実な研究成果をあげてきており、また技術的波及効果も高いものとなっている。負荷平準化用との原点を重視して、研究開発を続ける必要がある。しかし、実用化に向けたシナリオについては再検討が必要である。特に、早期の実用化を目指した産業応用等の可能性については、必ずしもラジアル型軸受に拘らずに最適システム構成を検討すべきである。研究開発投資の果実を可能な限り早期に社会に還元するため、早期の実用化についても検討が必要なことは論を待たない。しかし、それを追求するあまりに当該研究開発の原点を曖昧にする見直しは、慎重を期する必要がある。

1.2 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

電力の安定供給とコスト低減、地球温暖化防止への寄与、増大する負荷変動の吸収等に対応する超電導フライホイール電力貯蔵技術への期待は高い。超電導技術は、電力技術のみならず製造業、冷却産業等他業種技術を大きく変える等、将来に大きな可能性や波及効果を持つ技術であり、また現時点ではわが国の超電導技術は欧米に対して一日の長がある。さらに、関連研究開発課題は、極めて挑戦的で、また大きな研究投資を必要とするリスクの高いものであり、民間の研究開発努力に委ねることは未だ適切ではない。従って、基礎技術が確立できるまでの間、国が政策的かつ戦略的に研究開発を推進すべきであり、NEDO がこうしたプロジェクトを立ち上げたことは、高く評価できる。

一方、今後 UPS 等の小容量、短時間の負荷変動への対応策としての開発を行う場合、現状の構造が必ずしも超電導技術を生かし切るものではなく、最適な構造の検討が必要である。将来、大容量、長時間用途の装置開発にも応用可能であり、エネルギー利用効率の向上、地球環境対策となるものとしての位置付けの整理が不可欠である。また、画期的な新材料である高温超電導体の研究を、これからも基礎から応用まで広範に継続していくためには、本プロジェクトのような実用化研究は有効であるが、新材料が実用に供することができるかを調査する基礎研究の側面もあることを認識する必要がある。

< 肯定的意見 >

高温超電導体バルク材は、優れた機能を有することが証明されつつある。本プロジェクトにより、回転損失ゼロに近い優れた特性を有することを実フライホイール軸受で実証することは、バルク材の応用展開上たいへん有意義である。特に小型の軸受の実現性は高いことが実証できつつある。

UPS、鉄道等の負荷変動補償装置への利用による、エネルギー利用効率の向上、地球環境対策への貢献は限られているものの、本技術が将来大容量、長時間用途にも応用可能であること、永久磁石や CFRP 製造産業、真空技術関連産業、超電導用低温冷却を含めた冷却産業、発電電動機や電力交換機等の電力関連産業など、幅広い波及効果が望める、ことを勘案すれば、本事業を実施することは妥当である。

本事業は、超電導技術の大規模な適用として意義が高い。現象から具体的な応用へ確実に近づいている。これにより、超電導送電の実現が近づくものと考えられる。超電導技術は将来に大きな可能性をもつ技術であり、とくに高温超電導体が発見されて 15 年が経過して、その超電導特性が応用可能なレベルに達した現在、その応用の可能性が具体的に見えてきている。とくに、現時点ではわが国の超電導技術は欧米に対して一日の長があり、しかもわが国は国際標準化技術委員会において、幹事国という有利な立場にある。しかしながら、超電導技術は、過去におい

てそうであったように、多くの要素的研究に支えられていることから、経済的に不況な現時点のわが国においては民間企業が自力によって開発することは極めて難しく、このままではせつかくのわが国の技術が欧米の後塵を拝することになる。したがって、国策としても超電導技術の後押しをすることが肝要であると考えられ、NEDO がこうしたプロジェクトを立ち上げたことは、高く評価できる。

画期的な新材料である高温超電導体の研究を、これからも基礎から応用まで広範に継続していくためには、本件のような実用化研究は重要である。とくに、材料単体ではなくさまざまな周辺技術を開発する本件は、高温超電導の応用可能性を机上論でなく、実際に検証できるのでその意義は大きい。

超電導技術は、電力技術のみならず製造業、冷却産業等他業種技術を大きく変える可能性がある。また、長い開発期間と多額の研究開発予算を要するなど、民間ベースでは開発リスクが大きい。このため、国及びNEDO が関与して研究開発を行うことは妥当である。今後の電力自由化、分散型電源の導入増加による負荷平準化・電力品質への影響に対し、電力貯蔵装置は重要な役割を果たすと考えられる。超電導フライホイール電力貯蔵装置は貯蔵効率・耐久性などの面で優れた特徴を有していることから、研究開発の意義は大きい。

情報化社会、高齢化社会の進展に伴い、電気エネルギーへの依存度は今後とも増大すると予想される。電力の安定供給とコスト低減、地球温暖化防止への寄与、増大する負荷変動への対応等に的確に対応するための技術として電力貯蔵技術への期待は大きく、特に需要地域近傍に設備できる電力負荷平準化技術として、フライホイール電力貯蔵技術は期待度が高く、戦略的に取り組むべき重要な課題である。高効率のフライホール電力貯蔵技術の確立には超電導軸受技術がその根幹を支える技術として不可欠であり、本事業の研究開発目的は妥当なものである。また、この研究開発課題は、極めて挑戦的で、また大きな研究投資を必要とするリスクの高い技術開発課題であり、民間の研究開発努力に委ねることは、未だ適切ではない。したがって、基礎技術が確立できるまでの間は、国が政策的かつ戦略的に研究開発を推進すべきであり、NEDO の事業として取り組むことは妥当である。

秒、分、時間単位の充放電時間を想定した、高温超電導バルク軸受利用 10kWh から 100kWh 級フライホイールの開発はニーズと実現性が高い。

< 問題点・改善すべき点 >

本プロジェクトの最終目標としている 10MWh 級フライホイール開発の必要性については、再度、エンドユーザの意向を十分に反映した開発計画が必要である。UPS、鉄道等の負荷変動補償装置などの用途は短時間の負荷変動に対応するものであり、日負荷平準化などの大容量、長時間用途とは異なり、必ずしも高温超電導フライホール電力貯蔵装置の特性を生かしきるものではないようにおもわれる。また、UPS や鉄道等の負荷変動補償装置などの用途は、個別ユーザーの電力品

質の維持には貢献するものの、国民経済的にみて、エネルギー利用効率の向上、地球環境対策への貢献は限られている。従って、UPSなどの小容量、短時間の負荷変動への対応策としての高温超電導フライホール電力貯蔵装置の開発をあえて国が行うにあたっては、将来、大容量、長時間用途の装置開発にも応用可能であり、エネルギー利用効率の向上、地球環境対策となるものとして位置付ける必要がある。なお、CO₂削減については、本技術が水力などの再生可能エネルギーや原子力とあわせて用いる事が重要であり、高温超電導フライホール電力貯蔵装置の開発が単独でCO₂削減効果を持つものではないことは注記すべきである。換言すれば、CO₂削減対策としての本技術は、代替エネルギー開発と一体をなすものと認識すべきである。

UPS以外の応用分野における本技術の位置付けを視野に含めるべき。

本プロジェクトは新材料の発見が起因になったシーズ型応用研究であるため、緊急の社会的必要性に応じたものとは必ずしも言えない。新材料が実用に供することができるかどうかを調査する基礎研究は重要と考えるが、現段階ではこれ以上システム設計に深入りすべきではない。

負荷平準化用電力貯蔵装置としての実用化を最終目標に定めた場合の基礎技術としては、高温超電導バルク固定子と永久磁石によるラジアル型軸受は説得力があり、かつその技術開発が戦略的かつ政策的に重要であることは理解できる。しかし、開発目標の見直しに伴い産業応用等への早期実用化をも視野に入れることになった結果、特に産業応用等での早期実用化の面では、ラジアル型軸受をなぜ採用するのかについて、説得力が乏しい。本事業では、負荷平準化用を中心に据える当初の研究開発原点を重視するとともに、産業応用等での実用化可能性については、ラジアル型軸受に必ずしも限定せず、アキシヤル型軸受をも視野に入れた検討を実施する必要があるのではないかと考える。

2) 研究開発マネジメントについて

各参加主体との開発分担も適切であり、社会・経済環境の変化に応じて中間目標設定や開発目標を見直す等の柔軟な対応をとっている。研究開発計画については第1フェーズにおいて得られた成果をもとに達成目標を掲げており、妥当な計画であったと評価できる。しっかりした報告書作りや定期的な意見交換がなされ、確実に成果を蓄積してきていることは、円滑にマネジメントされている証であり、高く評価できる。

しかし、情勢変化に伴う中長期的な開発目標の見直しにより、負荷平準化用だけでなく早期実用化可能なUPS等にも目標を据えたことは致し方ないが、目標については今後ともより一層議論を深めるべきである。

< 肯定的意見 >

各参加主体との開発分担も適切であり、事業を遂行する上での社会・経済環境の変化に応じて実施内容を変更し、中間目標を設定、また早期実用化検討を追加するなど、柔軟な対応をとっている点は、前向きに評価できる。

本プロジェクトが開発以来確実に成果を蓄積しつつある点は、研究開発マネジメントが確実に機能している証左である。

応用のターゲットが電力貯蔵用であったことは、米国で起こった電力危機のような大きな社会的問題に対応する技術開発という点からすると、社会的には明確な目標をもったものであると評価できる。その具体的なものとして取り上げられたものがバルク超電導体を用いたフライホイール用電力貯蔵用超電導軸受の技術開発であり、超電導の応用としてはこれまでになかったタイプのものである。このことは超電導の応用の可能性を広げる上で有効であり、しかも超電導材料として実際に高温・高磁界で使用でき、優れた特性が達成されつつあるイットリウム系バルク超電導体であったことは現実性からしても妥当な選択であり、高く評価できる。

研究開発計画については、超電導技術に関して第1フェーズにおいて得られた成果をもとに達成目標を掲げており、妥当な計画であったと評価できる。

多くの研究機関、企業が参加しつつも、精密なドキュメンテーション作りと定期的な意見交換がなされており、円滑にマネジメントされている。

日本国内の総力を挙げて行うプロジェクトを目的、目標を明確にし、実施・管理をおこなっている。又、時勢の対応を図り研究目標の変更を実施しており、妥当であると考えられる。

最終目標を10MWh級の負荷平準化用システムの実用化に定めた上で、その開発ステップとして100kWh級システムの技術確立を目指して、要素技術としての超電導軸受の高性能化と応用技術としての10kWh級システムの製作・運転研究を目標とすることは、リスクの高い先導的技術開発を推進する視点から極めて妥当である。また、開発スケジュールは無理や無駄がなく定められ、実施されており、研究開発実施体制も本事業の推進にとって適切である。

中間評価は、その評価結果からプロジェクト後半の開発目標を修正できるならば、社会からの要求を満たす製品開発により繋げる上で有効な手段となる。

<問題点・改善すべき点>

大型システムの開発では多くの研究課題を抱え、製品試作を繰り返さなくては目標を達成できないことがしばしば起こりうる。このプロジェクトでもそのような状況にあるが、研究費や時間的な制約から、それまでの研究成果が即実証できていないようである。柔軟に研究内容の変更をできる開発システムが必要である。また、社会情勢から長期目標の修正を余儀なくされる場合は、研究期間途中であっても大胆にプロジェクトを中断して、新たな目標に向かってプロジェクトを再開すべきであろう。

本事業の終了後、商業化のために民間へ技術移転が迅速に図れる体制が必要であるが、そうした体制が整えられているか否かを判断するにはより一層の研究開発の進展を要し、現状では明確となっていない。

UPS 開発プロジェクトが成功の見通しを持った後、どのような技術課題を解決すれば次の応用に拡張できるかの視点がやや不足している感がある点に問題を感じる。具体的には、本軸受は目標回転数が 12,000rpm であるが、発電機の定格は 15,600rpm であり、さらに事業原簿によれば外国では 40,000-50,000rpm を目標とする研究開発が存在する。これらをどのように視野に入れるか。UPS が目標であるなら確かに開発目標が 15,000rpm で十分であっても、無接触軸受、というの本技術のポテンシャルはもっと高い点におかれて良いと考える。

具体的に開発の目標となったのが当初は負荷変動補償用であったが、途中で経済的不況の影響で、すぐに応用可能なものとして目標が無停電電源用にも据えられた。こうした予定の変更は社会情勢の変化からしかたがないものかとは思えるが、装置全体としては最適条件から外れたものとならざるを得ない。また無停電電源用としたことも、その分野で超電導技術が必ずしも最も有望ということではなく、苦しい競争をしなければならなくなる可能性もある。元来、超電導技術にはさらに別の可能性もあると期待されることから、もっと広い視野で応用の可能性を試せるプロジェクトとすべきであった。第 2 フェーズではそうした大幅な予定変更はできないので、次の第 3 フェーズでは当初の負荷変動補償用を目指すことと合わせて、超電導技術の可能性をさらに広げられるプロジェクトを是非検討すべきである。

目標については、今後ともより一層、議論を深めるべきである。

研究開発投資が目に見える形で実用化という成果を生み出すように、推進されている研究開発成果の早期実用化を求められることは当然のことである。本事業においてもこのために開発目標の見直しがなされ、産業応用等への適用可能性と課題の明確化が盛り込まれており、UPS としての実用化が検討されている。産業応用等の面でフライホイール電力貯蔵技術の実用化を目指すという方向性は、重要

かつ妥当である。しかし、産業応用等での実用化のターゲットを UPS 等にのみ力点をおき定めると、本事業で研究開発の中核となっているラジアル型軸受を適用するシステムが最適となるか否かについて疑念が生まれざるを得ない。早期実用化のターゲットに、100kWh 級等の、最終目標とした水準よりも小型の負荷平準化用システムも含めるべきではないかと考える。

3) 研究開発成果について

要素技術および応用技術とも、計画通りの成果を上げている。高温超電導バルクによる円筒型スラスト軸受の載荷力密度の目標値を達成し、超低回転損失を実証したこと、また高性能フライホイールを完成させ 12,000rpm までの安定回転を実現したことは、特に高く評価される。さらに、超電導体の基礎特性の向上、フライホイールの円盤部に用いられる CFRP の加工技術等の研究成果は、技術の汎用性が高く評価に値すると考える。

しかし、10MWh 級フライホイールの実現には、さらなる高度な研究開発を必要とする。また特に、産業応用等における早期実用化のために UPS 用システムとして開発する場合には、その目的に合致した最適設計が必要である。広く応用を考えると、磁気回路の磁場の不均一さによる超電導バルク材における損失、軸降下の現象等については、理論的な研究を進めるとともに、より性能の向上を図るべきである。

研究成果について多数の論文発表が行われているが、革新的技術においては研究成果・技術動向などの情報発信が非常に重要である。より一層の特許取得、論文発表等に努めるべきである。

< 肯定的意見 >

高温超電導バルクによる円筒型スラスト軸受の超低回転損失を実証できたことは、この材料を応用していく上で重要な知見である。また、10kWh 級のフライホイールの基本構造を提案し、その構造で高速回転できることを実証している。これは大型フライホイールを開発するうえで、その基本構造を決定し、開発を進めるうえで有用な成果となる。

実用化、事業化の観点からみた研究開発成果の評価を行う段階には達していないように思われるが、個別テーマ毎に着実な進展がみられ、概ね妥当と評価する。超電導磁気無接触軸受という開発目標に確実に接近している。また、コスト評価もなされており、電力貯蔵装置としてのフィージビリティは期待ができるものとなっている。

載荷力密度の目標値 $10\text{N}/\text{cm}^2$ を達成したことは高く評価できる。また載荷力当たりの回転損失を大幅に低減し、 $2\text{mW}/\text{N}$ の目標値を達成できる見通しが得られたことも評価できる。さらに、予荷重を与えることによって軸降下を大きく抑えることに成功している点も評価できる。

ワインディングの成形に当たって加工・組立技術の向上により同心度、真円度が 0.03mm の高性能フライホイールを完成させ、制御方法を改善して、実際に回転試験において 12,000rpm までの安定回転を実現したことは高く評価される。

要素技術および応用技術とも、計画通りの成果を上げている。高載荷力の高温超電導体バルクを自由な形状で焼結できるようになったことは、他の応用分野の開拓にも期待できる。高速回転フライホイール技術についても、さまざまな分野で波及効果が期待できる。

フライホイール電力貯蔵のキーテクノロジーである超電導バルク体、永久磁石の性能向上等を実施し、それらの技術を集結した、超電導軸受関連技術及びシステムとしてのフライホイール軸制御技術について当初計画通りの成果が得られていると考える。また、超電導体の基礎特性の向上、フライホイールの円盤部に用いられる CFRP の加工技術等の研究成果は、市場の拡大性があり、フライホイール作成以外にも応用される技術であると考えられ、技術の汎用性が高く評価に値すると思う。

超電導軸受要素技術開発においては、10kWh 級システム用軸受に関して、載荷力向上については目標載荷力密度を達成するとともに、回転損失低減については目標達成の直前までできており、着実に成果を上げている。

超電導軸受応用技術開発においては、フライホイール本体の高性能化と制御型磁気軸受の最適化等により回転数 12,000 rpm を達成し、制御型磁気軸受の渦電流損失を低減する等の成果をあげ、10kWh 級システム（運転試験装置）の製作に目途をつけている。

<問題点・改善すべき点>

当面の目標を UPS におく場合は、既存のフライホイールまたはバックアップシステムとの比較により、低コスト、小型化を目標とした最適設計が必要である。

本プロジェクトの成果を直接 10MWh 級フライホイールに結びつけることはできない。さらなる高度な研究開発を必要とする。

実用化に向けてのプロトタイプを試作し、長時間運転に十分耐えうる、耐久性を実証するための課題を明確化する必要があるが、そのためにはさらに成果が必要である。

コストとのせめぎあいがあるとは言え、回転速度 6,000rpm は必ずしも超電導を必須としない領域と考える。

磁気回路の磁場の不均一さによる超電導バルク材における損失については、極めて小さくなったということから、数値解析は行われていないが、将来のいろいろな分野への応用の可能性を考えたとき、理論的に結果を説明できるようにしておくべきであり、こうした理論的解明により、一層の性能の向上を図るべきである。軸降下の現象について、磁束クリープモデルを用いた解析・検討を完了し、大方の実験結果の理論的説明を望む。

第 2 フェーズの残りの期間において、回転状態での軸降下について詳細に検討し、また提案があった過冷却温度変化法についてもぜひ実現させることを希望する。応用技術の内、システム設計（設計コンセプト）に関しては、応用ターゲットとの関連で、検討の余地が残っているように思える。たとえば、UPS 用途を早期実用化ターゲットとして挙げるのであれば、既存のフライホイール製品に対して十分に競争力のある画期的なシステムをシミュレーション・レベルで提案する必要がある。

100kWh 級システムの見通しを早急に明らかにし、ロードマップへ反映すべき。研究成果について多数の論文発表が行われているが、革新的技術においては実用化までの研究期間が長く、着実な研究推進の面から研究成果・技術動向などの情報発信が非常に重要であるため、より一層の特許取得、論文発表等に努めるべきである。

産業応用面での実用化に関しては、データセンター用 UPS への応用を中心に検討しているが、他の用途、例えば 100kWh 級の負荷平準化用などについても、その可能性を検討すべきではないか。負荷平準化用と UPS とでは、システムとして要求される性能が全く異なることから、システムの最適構造が異なる可能性が高いことに留意する必要がある。

4) 実用化、事業化の見通しについて

今後の開発により一般産業用として有用な 10kWh、100kWh 級システムの見通しが得られると、電力自由化が進められている中で需要家側の瞬時電圧低下対策用 UPS 等として実用化される可能性がある。低コスト、小型化を目標としたさらなる最適設計が必要ではあるとはいえ、一般産業用の実用化は比較的容易であると考えられる。

MWh 級の負荷平準化用については、さらに数段の開発ステップが必要であり、まだ実用化の明確な見極めについて言及できる段階にはない。経済状況の変化により導入時期も後年にシフトすると考えられるため、需要予測を再考慮しつつ、適用分野の再整理をも含めた実用化に向けた開発ステップ、シナリオについて見直しが必要である。

しかし、一般産業用、負荷平準化用のいずれも、既に実用化された種々の競合技術がある。既存技術に対して優位性を発揮するには、具体的なコスト低減のための方策とそれを実現するための対応を明確にする必要があるが、単なるコスト競争ではなく、独自の特徴を強調する実用化の方向が重要である。

< 肯定的意見 >

当面の目標を UPS におく場合には、実用化・事業化は比較的容易であろう。しかし、既存のフライホイールまたはバックアップシステムとの比較により、低コスト、小型化を目標としたさらなる最適設計が必要である。

構造が比較的簡単で、使用する材料も大量生産によるコスト削減が可能であり、どのような用途に利用可能かの基礎調査も終了しており、ただちに実用化、事業化には結びつかないものの、概ね実現可能なプランであると認められる。

実用化が遠くない視野に入るようになった。

これからの 2 年間の事業によりきちんと確認する必要があるが、これまでの技術的進展の度合いと今後の進め方の考え方から判断して、実用化の見通しは得られると期待する。

電力システムが分散化しつつあり、今後、風力や太陽光など不規則、不安定な自然エネルギー電源が増えてくれば、系統安定化のための電力貯蔵システムに対するニーズは基本的には高まっていくことと思う。現在は明確にターゲティングできないとしても、電力貯蔵用フライホイールの基礎研究を継続する意味は十分にある。

現行フェーズを当初計画通り H 1 6 年度まで実施することにより、一般産業用として有用な 10kWh、100kWh 級システムの見通しが得られることは、電力自由化が進められている中、需要家側で瞬時電圧低下対策等として実用化される可能性があり、十分評価に値すると考える。

MWh 級負荷平準化用フライホイールシステムについては、本事業によって 100kWh 級システムに関して開発見通しを得た後にも、その製作と運転試験、実証システムの製作と運転試験という数段の開発ステップが必要であり、まだ実用

化の明確な見極めについて言及できる段階にはない。しかしながら、100kWh 級システムについては、技術的には本事業により実現化可能となると見込まれることから、適用分野を UPS 等の産業応用に限定せず、負荷平準化用として適用をも視野におけば、コストの如何にもよるが、実用化の可能性は高い。また、本事業の研究開発に関連するノウハウは、技術波及効果が高い。

<問題点・改善すべき点>

10MWh 級の実現には、さらに5年間のプロジェクトを数回繰り返さなくてはならないようである。この目標とするシステムに対する需要予測には未知の要素を多く含んでいる。次 Phase プロジェクトで製品開発を完了できる程度の目標に設定変更すべきである。

大容量・長時間用途、小容量・短時間用途、いずれも、すでに実用化されたさまざまな競合技術があり、既存技術との具体的なコスト低減のための方策とそれを実現するための対応が不明確。標準化、大量生産でコスト低減をはかる場合は市場、機器のスペックを絞り込む必要がある。

競争相手の多い市場であるので、単なるコスト競争に陥らないような独自性が強調できるような実用化が望ましい。例えば、事故時のリスクに対してアドバンテージがあるのか、待機時間での省エネルギー性に特徴があるかなど。

事業化については、さらに目的に応じた最適化を図る必要がある。それによって一層、高性能の機器が実現できる可能性がある。また、超電導技術の真の有効利用のためには、もっと広い用途も考えるべきで、一層のニーズの掘り起こしが大切である。

情勢の変化に対応して、つねに目標を再検討し、設計仕様をフレキシビリティに見直すことが必要である。もし、現時点で明確な需要が見えないのなら、大規模な実証試験に進むべきではなく、要素技術の確立と基礎データの収集を進め、それに基づいてシステムのシミュレーション研究を充実すべきである。

MWh 級システムの必要性は、電力自由化や分散型電源の動向等を考慮すると、導入時期が後年にシフトすることも考えられる。当面は 10kWh、100kWh 級システムの技術蓄積、実用化への研究開発を当初計画どおり H 16 年度まで着実に実施し、その成果を活かし MWh 級システムの研究開発を行うべき。

規制緩和により早い速度で進展している電気事業の構造変化を踏まえて、フラールホイール電力貯蔵システム適用分野の再整理をも含め、本事業に引き続く実用化に向けた開発ステップ、実用化シナリオについて、見直しが必要である。

2. 個別テーマに関する評価

2.1 超電導軸受要素技術

1) 成果に関する評価

載荷力向上技術に関しては、Y系バルク材で、開発目標値であった 10 N/cm^2 を超える載荷力密度を過冷却環境下で達成しており、高く評価でき、さらに希土類超電導バルク材の導入による載荷力密度の向上も期待される。回転損失低減技術に関しては、載荷力あたりの回転損失目標水準 2 mW/N を達成する目前の 2.5 mW/N を達成するとともに、最終目標を達成できる見通しを得たことは、高く評価できる。軸降下については、過冷却法、予荷重法ともに効果の可能性を見出している。

しかし、磁気回路の磁場の不均一さによる超電導バルク材における損失、および軸降下の現象については、理論的な研究を進めるとともに、より性能の向上を図るべきである。また、軸降下低減技術については、試験装置の問題で長時間のクリープ・データが得られていないが、長時間のデータ収集が必要である。

< 肯定的意見 >

高温超電導バルク材のセグメント化および永久磁石の大型化を実現できたことにより、直径 300mm 、負荷容量 0.1MPa 程度までの円筒型スラスト軸受の実現の見通しがたった。新たな用途開発に繋がる成果である。

制御も含め、実現できた点は意義が大きいと評価する。

載荷力密度として 10N/cm^2 を達成するという目標に対して、磁気回路の高磁場・最適化及び 67K への過冷却の導入によって目標をクリアしたことは評価できる。さらに Sm-123 等、希土類超電導バルク材の導入による載荷力密度の向上も期待される。

載荷力当たり 2mW/N の回転損失を達成するという目標に対して、回転損失は磁気回路の周方向磁場分布を均一にすることによって当初は載荷力当たり 15mW/N 程度であったものを 2.5mW/N にまで大幅に減じ、目標値の達成の見通しを得たことは高く評価できる。その見通しの根拠として、交流損失の数値解析を行い、現在の損失が超電導バルク体の分割によるトラップ磁場の不均一による磁気回路内の渦電流損失であることを明確にしており、それを低減する方法について具体的提案があった。

軸が時間とともに降下する現象をいかに食い止めるかという点については、現在、静止状態ではあるが、予荷重を与えることで軸降下を大きく抑えることに成功している。この点については評価できる。

載荷力向上、回転損失低減については、順調に成果を得ている。

100kWh 級システム用の前段となる 10kWh 級システム用超電導軸受により、最終目標値達成に向け、成果が着実に得られていることは評価できる。

載荷力密度の目標値については、過冷却法により、最終目標値 10N/cm^2 に達したことは評価できる。なお、 10kWh 級システム用の超電導軸受の性能としては、設

計値 3.5N/cm^2 に対し、2 倍以上の載荷力を有していることが確認されたので、十分な性能を有していると考え。

回転損失の目標値については、 2 mW/N の目標値に対して 2.5 mW/N と近い数値を得ているが、その発生メカニズムが解析的に明らかになりつつあるので、今後の対策に生かされることが期待できる。

軸降下については、過冷却法、予荷重法ともに効果の可能性を見出している。載荷力向上技術に関しては、Y 系超電導バルクの高品質化によって、 10kWh 級システムの超電導軸受の開発目標値であった 10 N/cm^2 を超える載荷力密度を、過冷却環境下で達成したことは、高く評価できる。

回転損失低減技術に関しては、 10kWh 級システム用の軸受について、磁場バラツキに起因する回転損失の低減に成功し、 100kWh 級システム用の軸受における載荷力あたりの回転損失目標水準 2 mW/N を達成する目前の 2.5 mW/N を達成するとともに、 100kWh 級のシステムにおいて最終目標を達成できる見通しを得たことは、高く評価できる。

軸降下低減技術に関しては、試験装置の関係から 3 時間という短時間の静止試験であったとはいえ、過冷却法および予過重法が有効な対策であることを立証し、 10kWh 級運転試験装置に適用可能であることを明らかにしたことは、評価できる。

< 問題点・改善すべき点 >

超電導材料は現在高価である。本プロジェクトで目指す用途以外の用途開発により、バルク材の需要を増やし、材料を安価にしなければ、結局この材料は使われなくなるのではないかと危惧する。

より高い回転速度への適用を目指してほしい。

ここでは第 2 フェーズにおいてこれまでに着手しておくことが妥当であったと思われる事項について記述する。したがって、残りの 2 年間での改善を期待する。

磁気回路の磁場の不均一さによる超電導バルク材における損失については、極めて小さくなったということから、数値解析は行われていないが、将来のいろいろな分野への応用の可能性を考えたとき、理論的に結果を説明できるようにしておくべきであり、そうした理論解析を通して一層の性能の向上を図るべきである。

軸降下の現象については、基本的に磁束クリープによる現象であるという判断は間違っていないと思われるが、理論的に説明できるようにすべきである。きちんと理論予測ができるようになっていないと、極めて長時間にわたる運転が可能かどうかの判断がつかないためである。特に軸降下の単純な磁束クリープ的な振る舞いからの外れがどのような原因によるものなのかなどの解析が重要である。

軸降下低減技術については、試験装置の問題で長時間のクリープ・データが得られていない。実用時までには十分な安定性を達成するためには、長時間のデータ収集と、本システムにおける磁束クリープ・メカニズムの解明が必要である。

軸降下については、長期実験を行い、現状の技術で問題がないことを確認する必

要がある。

2) 今後に対する提言

提案されている磁気回路内の渦電流損失低減法および過冷却温度変化法の実現、回転状態での軸降下の厳しいチェックを、是非進めるべきである。軸降下についての理論的理解が進んだ段階では、過冷却の温度パターン、予荷重の値などについての最適設計が必要である。システム設計とも関連するが、載荷力向上について、さらに高いレベルを追求する事も重要である。

高温超電導バルク磁気軸受は、日本が世界をリードしている優れた技術である。軸受形状の調査研究を進め、この超電導軸受の特長を生かした新たな用途を広げる研究開発を行うべきである。さらに超電導バルク材の用途と需要を増やすための研究を行うべきである。

< 今後に対する提言 >

高温超電導バルク磁気軸受は日本が世界をリードしている優れた技術である。この軸受の負荷容量(現在の目標 0.1MPa)を、油潤滑すべり軸受の負荷容量(2MPa)や電磁石型スラスト磁気軸受の負荷容量(0.4MPa)に近づける新たな軸受形状の調査研究を行い、さらに超電導バルク材の用途と需要を増やすための研究を行うべきである。

対象が競合技術の多いUPSに限定されている結果、本技術開発の有効性が単なるコスト優位性のみになってしまった印象を受ける。本来は、超電導の応用による少ない消費エネルギーで無接触軸受を実現できることで、競合技術のない適用対象 - たとえば、高速高効率タービンや小型精密ジャイロなどへの波及の視点をもっと強調するべきである。

磁気回路内の渦電流損失を低減する方法が提案されているが、ぜひそれを実現すべきである。なお、磁石の分割はトランスのコアで実際に行われている手法であるが、力学的観点から困難が予想される。ここでは添加物等による電気伝導度の低下が有効な方法であるので、材料的に可能であるかどうか検討すべきである。

回転状態での軸降下の厳しいチェックが必要である。

提案があった過冷却温度変化法については、磁束クリープの実験及び理論解析で超電導電流密度の変化を抑える優れた効果が確認されているので、ぜひ実現させるべきである。

軸降下についての理論的理解が進んだ段階で過冷却の温度パターン、予荷重の値などについての最適設計が必要である。

システム設計とも関連するが、載荷力向上について、さらに高いレベルを追求する事も重要である。装置の小型化や高性能化を引き出す可能性さらには、新規応用分野を開拓できる可能性などについても検討すべきである。

軸降下について、早急に10kWh級軸受を用いた長期試験を実施し、100kWh級軸受の技術への応用を図る必要がある。その場合、予算上の制約が生じた場合、100kWh級軸受は解析手法により推定することもやむを得ないと考える。

特に載荷力向上対策に関して、適用可能性を検討している R E 系超電導バルクによって、さらなる性能向上が立証されることを期待する。

2.2 超電導軸受応用技術

1) 成果に関する評価

ラジアル型超電導軸受による 10kWh 級試験装置の各構成要素技術が整い、実現に見通しを得たことは評価できる。フライホイール本体・軸制振技術に関しては、CFRP リング成形技術、アルミハブ製作技術および加工・組立技術の高度化により、世界最大の貯蔵エネルギーを有するフライホイールを 12,000 rpm という高速で回転させることに成功したことは、特筆的に評価できる。超電導軸受の高性能化については、システムの信頼性確保のための制御法、安全性のため非常時バックアップ技術であるタッチダウン制御法を開発し、さらに軸受関連部材の応力下でのクリープ特性を評価しており、評価できる。

しかし、これまでは各構成技術を個別に試験して性能を確認・評価した段階である。超電導軸受を含めたシステムとして検証するためのさらなる研究開発が必要である。ただし、将来の MWh 級システムのためには、製造技術の確立、安全性の確保等に相当大きな課題があるので、強い社会的ニーズがあるかどうかについて慎重な再検討が必要である。

< 肯定的意見 >

フライホイール本体製作法の開発、本体と回転軸の結合法の開発、能動ラジアル磁気軸受の新たな制御法の研究などにより、大型フライホイールの回転系の基本構造が確立されつつある。

高速回転体の軸受は基本的な要素技術であるが、磁気無接触軸受は、リニアモーターカーと同様、高度な制御が必要な分野である。軽量化と高速化の要求を入れると剛性がどうしても犠牲になりやすい。これに対して、様々な工夫により開発が進められている。

10kWh 級運転試験装置では液体窒素流路を作ってバルク超電導体の表面温度を 4K 近く下げることを実現し、また温度分布を解析して最高で 95 程度に抑えられることを明らかにし、長時間運転が可能であることを確認した。そして永久磁石ユニット部分の接着・嵌合構造について機械的に安定なものを実現できた。以上の各部分要素の問題解決は今後の試験装置の製作において有効である。

フライホイール本体については、ワインディングの成形条件を検討し、成形した後の加工・組立技術の向上により同心度、真円度が 0.03mm の高性能フライホイールを完成させた。また、軸制振に関しては、従来の制御手法を改善し、ゼロパワー制御に位相進み補償制御を組み合わせ、さらに安定化フィルターを用いて定格回転数(15,860rpm)まですべての振動モードで安定であることが解析で明らかにされた。こうした上で実際に回転試験を行い、12,000rpm までの安定回転を実現したことは評価される。また、制振用磁気軸受にホモポラ磁極を採用することにより磁場変動が抑えられることから、損失が大幅に低減できることが確認されたことは評価する。

超電導軸受の高性能化については、システムの信頼性の確保のために、低次元化モデルを用いた制御法を開発し、また安全性のため非常時バックアップ技術としてタッチダウン制御法を開発した。さらに、軸受関連部材の応力下でのクリープ特性を評価し、大気中と真空中での違いがないことなどを明らかにした。こうした一連の成果についても評価される。

運転試験装置、フライホイール本体、制振技術、CFRP のクリープ実験等、順調に成果を出している。

ラジアル型超電導軸受による 10kWh 級試験装置の各構成要素技術が整い、実現に見通しを得たことは評価できる。特に、機械的な成立性の判断のキーポイントとなる回転制御に目処を付けたことにより、システム実現に向けて大いに前進したものと言える。

10kWh 級試験装置用の直径 1m フライホイールを有する回転試験装置により、定格 15,860rpm に対し、12,000rpm までの試験に成功し、定格回転達成に目処を付けたと考える。

回転損失低減を考慮した、制御型磁気軸受の開発を実施している。

10kWh 級運転試験装置に関しては、クライオスタットの冷却性能の確保、回転永久磁石の強度の確保等、各種の検討課題を解決して、詳細設計を完了し、本研究開発の着実な進展に貢献している。

フライホイール本体および軸制振技術に関しては、CFRP リング成形技術、アルミハブ製作技術および加工・組立技術の高度化によって、世界最大の貯蔵エネルギーを有するフライホイールを 12,000 rpm という高速で回転させることに成功したことは、特筆的に評価できる。

超電導軸受高性能化に関しては、制御型軸受による回転体システムの信頼性および安全性を確保するために新しい制御アルゴリズムを開発し、その有効性を立証したこと、および軸受関連部材のクリープ特性把握のため真空中でのクリープ試験をも実施して、500h 程度までは雰囲気による差は認められないことを立証したことは、評価できる。

< 問題点・改善すべき点 >

まだフライホイールを定格回転数まで回せていない。所定の充電量を確保する定格回転数まで確実に運転できるような、十分な安定性を有する回転体 - 磁気軸受の制御法、さらにその安定性を評価する方法について、さらなる研究開発が必要であろう。安全上および最適設計の資料として、スピントスターを用いたフライホイールの破壊試験を繰り返し実施し、破壊回転数の推定精度を確認しておく必要がある。

今回は、制御に関してはなお試算の段階であったように思われる。非線形のある対象に対し線形制御がどこまで対応できるのかなど、興味深い課題があるが、これらは本プロジェクトの問題点というより、研究論文に対する質問という位置付

けになる。

フライホイール本体は 10kWh 級実証試験装置ですら、相当困難な技術的課題があったとのこと。将来、MWh 級のシステムへスケールアップするときに製造技術の確立や、安全性の確保に、相当大きな課題があると考えます。もし、強い社会的ニーズがあるのであれば、そうした困難な課題にも挑戦すべきだと思うが、逆に明確なニーズが見えないのであれば、これらは無駄な努力になってしまう。現時点では、これ以上、システム設計、実証試験に深入りするべきではない。

これら各構成技術は個別に試験を行って確認したものであり、超電導軸受を含む総合した検証を実施していない。

2) 今後に対する提言

応用技術研究に関しては、社会や市場のニーズとシステム全体の設計思想に関する議論を深めるべきである。特に、産業応用等における早期実用化のために UPS 用システムとして開発する場合には、その基本構造について再吟味する必要があり、最適設計により十分な価格競争力・技術競争力を有していることを実証すべきである。

今後も様々な課題が出ると思われるが、諸外国の目標を上回るだけの水準を目指し、多くの応用分野のシーズとなることを望む。また、本プロジェクトを当初計画通り遂行することが大型システムへの適用の門戸を開くものとなるから、10kWh 級試験装置の試験を十分に行い、入口の基礎を固めることが肝要である。

< 今後に対する提言 >

小容量で短時間充放電用のフライホイールの最適設計により、十分な価格競争力・技術競争力を有していることを実証すべきである。その後は、その知見をもとに、競争力のある製品開発をメーカー主体で行うべきであろう。さらに、本研究で実現可能となるサイズ以下の高温超電導軸受を応用できる製品開発をメーカー主体で実施し、NEDO はその事業化を支援すべきである。

今後も様々な課題が出ると思われる。15,000rpm の領域だけでなく、諸外国の目標を上回るだけの水準を目指し、多くの応用分野のシーズとなることを望む。

現実の回転中の回転体の熱は放射以外には除去できないので、実際に温度分布が解析の通りになっているのかを確かめる必要がある。

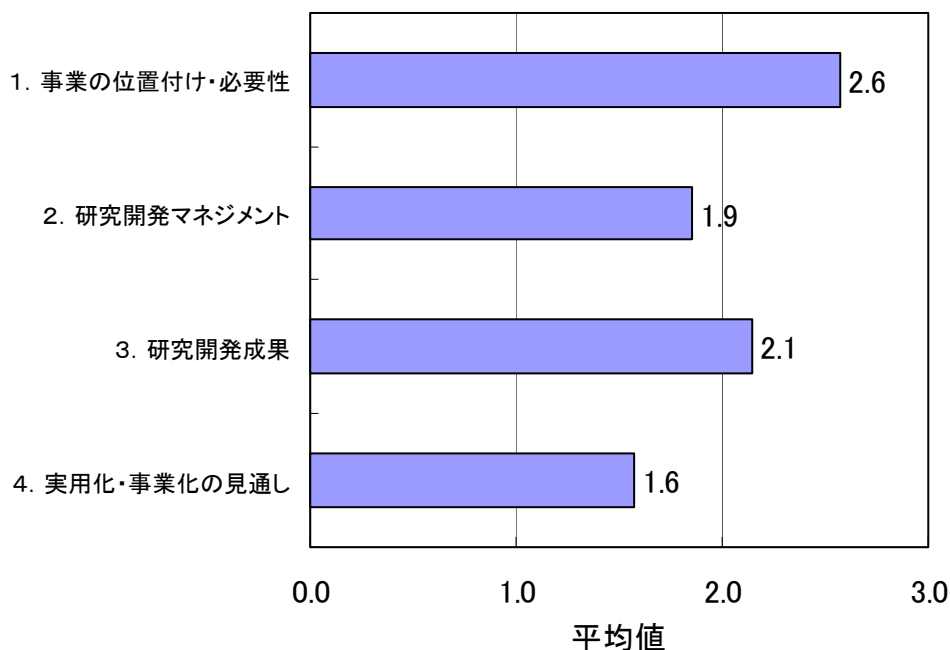
軸制振技術及び高性能フライホイール実現のための今後の課題として上げられている事項について、きちんと対応が必要である。

繰り返しになるが、応用技術研究に関しては、社会や市場のニーズとシステム全体の設計思想に関する議論を深めるべきである。

今プロジェクトを当初計画通り H16 年度まで遂行することで、大型システムへの適用の門戸を開くものとなると考えられる。10kWh 級試験装置の試験を十分に行い、入口の基礎を固めることが肝要である。

本研究開発事業の今後の目標が、当初の方向性の通り負荷平準化用システムとなる場合には関係ないが、産業応用等における早期実用化のため UPS 用超電導フライホイールシステムを開発する場合には、その最適設計について検討する必要がある。

3. 評点結果



評価項目	平均値	素点（注）						
		B	B	A	A	B	A	A
1. 事業の位置付け・必要性について	2.6	B	B	A	A	B	A	A
2. 研究開発マネジメントについて	1.9	C	B	B	B	B	B	B
3. 研究開発成果について	2.1	A	C	B	B	B	A	B
4. 実用化・事業化の見通しについて	1.6	C	C	B	B	D	A	B

（注）A = 3 , B = 2 , C = 1 , D = 0として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

< 判定基準 >

(1) 事業の位置付け・必要性について

- ・非常に重要
- ・重要
- ・概ね妥当
- ・妥当性がない、又は失われた

(2) 研究開発マネジメントについて

- ・非常によい
- ・よい
- ・概ね適切
- ・適切とはいえない

(3) 研究開発成果について

- A ・非常によい
- B ・よい
- C ・概ね妥当
- D ・妥当とはいえない

(4) 実用化・事業化の見通しについて

- A ・明確に実現可能なプランあり
- B ・実現可能なプランあり
- C ・概ね実現可能なプランあり
- D ・見通しが不明

第2章 評価対象プロジェクト

1 . 事業原簿

次ページに当該事業の推進部室及び研究実施者から提出された事業原簿を示す。

「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発プロジェクト」

事業原簿

目 次

0 . 概要	1 - 3
. 事業の目的・政策的位置付けについて	
1. NEDO の関与の必要性・制度への適用性	4
1.1 NEDO が関与することの意義	4
(1) 本プロジェクトの経緯	4
(2) 本プロジェクトの効果	5
(3) NEDO の関与の必要性	5
(4) 国際動向から見た研究開発の必要性	6
1.2 実施の効果（費用対効果）	7
1.2.1 概要	7
1.2.2 地球環境面への効果	8
1.2.3 産業面への効果	10
(1) 超電導バルク材及び超電導軸受の応用分野	10
(2) 超電導フライホイール要素技術の波及効果	15
(3) 超電導フライホイールの産業面への寄与	16
2. 事業の背景・目的・位置付け	18
2.1 事業の背景・目的・意義	18
2.1.1 事業の背景	18
(1) 社会経済的背景	18
(2) 研究開発上の背景	19
2.1.2 事業の目的及び意義	20
2.2 事業の位置付け	21
2.2.1 政策的位置付け	21
2.2.2 研究開発上の位置付け	22
添付資料：各国のフライホイール開発状況	23
. 研究開発マネジメントについて	
1. 事業の目標	26
1.1 技術開発の方針	26
1.2 本事業の目標	26
1.2.1 超電導軸受要素技術	26
1.2.2 超電導軸受応用技術	27
1.3 目標の設定根拠	27
2. 事業の計画内容	28
2.1 研究開発の内容	28

2.1.1 事業全体の計画内容	28
2.1.2 研究開発項目の内容	30
(1) 超電導軸受要素技術	30
a. 載荷力向上技術	30
b. 回転損失低減技術	31
c. 軸降下低減技術	31
d. 超電導軸受試験技術	32
(2) 超電導軸受応用技術	33
a. 超電導軸受運転試験	33
b. フライホイール軸制振技術	35
c. フライホイール本体の高性能化・高品質化	35
(3) 超電導軸受高性能化の研究開発（産総研）	36
2.2 研究開発の実施体制	37
2.3 研究開発の運営管理	39
添付資料：各委員会の活動状況	41
3. 情勢変化への対応	42
4. 今後の事業の方向性	43
5. 中間・事後評価の評価項目・評価基準、評価手法及び実施時期	43
. 研究開発成果について	
1. 事業全体の成果	44
2. 研究開発項目毎の成果	45
2.1 超電導軸受要素技術	45
2.1.1 載荷力向上技術	45
2.1.2 回転損失低減技術	50
2.1.3 軸降下低減技術	54
添付資料：軸降下線図	63
2.1.4 超電導軸受試験技術	64
2.2 超電導軸受応用技術	73
2.2.1 超電導軸受運転試験	73
(1) 10kWh 級運転試験装置	73
(2) 10kWh 級運転試験	78
2.2.2 フライホイール軸制振技術	81
2.2.3 フライホイール本体の高性能化・高品質化	87
2.3 超電導軸受高性能化の研究開発（産総研）	91
添付資料 1：特許、論文等の状況	94
添付資料 2：特許、論文発表等（産総研）	97

. 実用化、事業化の見通しについて	
1. 実用化、事業化の見通し	98
1.1 電力用負荷平準化用途	98
1.1.1 実用化の見通し	98
1.1.2 事業化までのシナリオ	100
1.2 その他の産業応用用途	102
1.2.1 国内外のフライホイール使用状況	102
1.2.2 超電導フライホイールの応用分野	105
1.2.3 早期実用化について	108
添付資料1：フライホイールの市場動向とニーズについて	113
添付資料2：2010年におけるデータセンターの無停電電源市場の分析	116
添付資料3：UPS用超電導フライホイールの概念	120
2. 今後の展開	122
参考資料1：研究開発に利用している主な装置・施設のリスト	124
参考資料2：用語集	126

概要 (NEDO)

作成日 平成 15 年 3 月 14 日

制度・プログラム名	革新的温暖化対策技術プログラム						
事業(プロジェクト)名	フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発	PJコード	E00011				
事業担当推進部室	新電力技術開発室						
事業の概要	電力分野で実現期待度の大きいフライホイール電力貯蔵システム実用化のため、大型化に適した超電導バルク材を用いたラジアル型超電導軸受の技術開発を行うとともに、システムに必要となるシステム要素技術課題を明らかにする。						
1. 事業の目的・政策的 位置付けについて 【NEDO が関与する意義】 【実施の効果(費用対効果)】 【事業の背景・目的・位置付け】	電力の負荷平準化および電力コストの低減は CO2 排出削減による地球温暖化対策としても重要であり、超電導フライホイールによる電力貯蔵技術開発の意義は大きい。超電導技術開発はその革新性ゆえ新規の産業分野創出が期待されるものの、いまだ革新的技術でありリスクが高く、長期間の多大な資金を必要とする。 このため国、NEDOとして支援していく意義は大きい。						
2. 研究開発マネジメントについて 【事業の目的】	1. 超電導軸受要素技術 100kWh 級超電導軸受にて載荷力密度 10N/cm ² 、回転損失 2mW/N の達成を目指すとともに、軸受要素技術の見通しを得る。 (中間目標) 目標値への達成方策を提示。 2. 超電導軸受応用技術 10kWh 級運転試験装置を試作し、軸受・回転体システムの信頼性を検証し、システム上の課題を抽出。 (中間目標) 構造図及び軸受制御技術の課題と対策を提示。						
【事業の計画内容】	主な実施事項	H12	H13	H14	H15	H16	
	超電導軸受要素技術	—	—	—	—	—	
	超電導軸受応用技術	—	—	—	—	—	
	技術調査研究	—	—	—	—	—	
【開発予算】	(単位: 百万円)	H12	H13	H14	H15	H16	総額
	一般会計 (当初)						
	(実績)						
	特会(電多) (当初)	216	290	330	320	(未定)	(未定)
	(実績)	191	257	—	—	—	—
	特会(石油) (当初)						
	(実績)						
	特会(エネ高) (当初)						
	(実績)						
	総予算額(計) (当初)	216	290	330	320	(未定)	(未定)
	(実績)	191	257	—	—	—	—
【開発体制】	経済産業省担当原課 運営機関 プロジェクトリーダー 委託先 共同研究先	産業技術環境局研究開発課 新エネルギー・産業技術総合開発機構 所属 (財)国際超電導産業技術研究センター 氏名 腰塚直己 (財)国際超電導産業技術研究センター 東工大、東大、慶大、名大、茨城大、日大					
【情勢変化への対応】	○効率的運営による実施内容の変更(H14.3) ○基本計画に中間目標追加(H14.3) ○早期の実用化を意識した性格にすべく軸降下対策検討等含む基本計画の変更(H15.3)						
【今後の事業の方向性】	過去に実施された評価なし。H15, 16は 10kWh 級運転試験装置の完成と 100kWh 級軸受における目標値達成に注力し100kWh 級超電導フライホイールシステムの技術的見通しをつける。						

<p>3. 研究開発成果 (写真、図、表の使用可) (要素技術含む)</p>	<p>1. 超電導軸受要素技術</p> <p>○ 載荷力 10kWh 級軸受モデルで 目標の載荷力密度 10N/cm² を達成した。100kWh 級軸受モデルにおいて最終目標を達成するためには過冷却法が有効であることが分かった。</p> <p>○ 回転損失 10kWh 級軸受モデルで 2.5mW/N を達成した。100kWh 級モデルでは解析により 2.3mW/N の値を求めることができた。回転損失の低減には渦電流の抑制と超電導バルク体の配置が重要であることが分かった。</p> <p>○ 軸降下 軸降下に対する過冷却法、予荷重法の有効性を確認した。軸降下量は3時間後で 100 μm を達成した。</p> <p>2. 超電導軸受応用技術</p> <p>○ 10kWh 級運転試験装置 装置の詳細構造図及び運転試験施設の計画図を作成した。今後 H15 に 10kWh 級運転試験装置を完成させる。</p> <p>○ 軸制振とフライホイール 本体 軸制振において非線型ゼロ パワー制御、安定化フィルター 採用によりローターの弾性振動を安定化させる技術を開発した。また、フライホイール本体のフィラメントワインディング作成技術の最適化により、高速回転可能な均一なフライホイールを製作した。</p> <div data-bbox="981 705 1380 963" data-label="Image"> </div> <p style="text-align: center;">10 kWh 級運転試験</p> <p>3. 技術調査 フライホイール関連の国内外動向調査を行った。フライホイール事業の市場調査により、市場の急拡大が判明。また、超電導フライホイールの当面の適用性を調査した結果、今後成長が見込まれるデータセンターUPSが有力。</p>												
<p>(特許・論文等について 件数を記載)</p>	<p>特許 1件 論文 36件 特許名「磁気軸受装置」 光洋精工(特願 2001-344788) 発表箇所: 低温工学、電気評論、日本応用磁気学会、 International Symposium on Superconductivity ,Physica C 等</p>												
<p>4. 実用化、事業化の 見通し</p>	<p>産業応用用途として、無停電電源(UPS)、風力等電力変動平準化電源、電気鉄道用等に応用可能。 (当面の最有力はデータセンター用UPS) 電力負荷平準化用途として、数ステップ(MWh 級、10MWh 級)の開発により電力負荷平準化へ。</p>												
<p>5. 評価に関する事項 【評価実施時期】 【評価項目・評価基準】</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%; border: none;">評価履歴</td> <td style="width: 35%; border: none;">実施時期</td> <td style="width: 50%; border: none;">15年度 中間評価実施予定</td> </tr> <tr> <td style="border: none;"></td> <td style="border: none;">評価項目・基準</td> <td style="border: none;">標準的評価項目・評価基準</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">評価予定</td> <td style="border: none;">実施時期</td> <td style="border: none;">17年度 事後評価実施予定</td> </tr> <tr> <td style="border: none;"></td> <td style="border: none;">評価項目・基準</td> <td style="border: none;">標準的評価項目・評価基準</td> </tr> </table>	評価履歴	実施時期	15年度 中間評価実施予定		評価項目・基準	標準的評価項目・評価基準	評価予定	実施時期	17年度 事後評価実施予定		評価項目・基準	標準的評価項目・評価基準
評価履歴	実施時期	15年度 中間評価実施予定											
	評価項目・基準	標準的評価項目・評価基準											
評価予定	実施時期	17年度 事後評価実施予定											
	評価項目・基準	標準的評価項目・評価基準											

概要 (産総研)

作成日 平成 15 年 3 月 14 日

事業(プロジェクト)名	フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発	PJコード	E00011				
2. 研究開発マネジメントについて 【事業の目的】	超電導軸受と制御型軸受で支持されるフライホイールシステムの安全性信頼性確保のための制御型軸受の最適な制御手法の開発を行う。また、フライホイールローター材 CFRP の真空中でのクリープ特性評価と劣化機構の解明を行う。						
【事業の計画内容】	主な実施事項	H12	H13	H14	H15	H16	
	超電導軸受高性能化						
	軸受関連部材のクリープ特性評価						
【開発予算】	(単位:百万円)	H12	H13	H14	H15	H16	総額
	特会(電多)	(当初) 44	70	70	51	—	—
	(実績)	44	70	70	—	—	—
3. 研究開発成果	<p>a.超電導軸受高性能化 制御型磁気軸受での PID 制御の調整の困難さを解消する PID 包含 LQ 制御法の検討を行った。剛体モードと弾性モードの信頼性の高い制振アルゴリズムの探索であり、今年度までに軸の剛体モードと曲げモード制御を実現した。 さらに、非常時の保護軸受の負担を軽くする非線形制御の制御アルゴリズムの開発を行った。非常時に保護軸受に接触する外力を受けても安定に制御が継続できる制御法であり、基礎実験によりアルゴリズムを検証した。</p> <p>b.軸受関連部材のクリープ特性評価 真空雰囲気に対応できる CFRP 用のクリープ試験機を新たに開発した。24h 程度の短時間クリープ試験の結果、静的引張破断応力では 24h 程度以上の寿命を持つものと考えられた。また、静的引張破断応力の 90%の応力負荷における 500h 程度の長時間クリープ試験の結果、大気中と真空中で明確な差は認められていない。</p>						
(特許・論文等について)	特許 1件、論文 3件、口頭発表 7件						

・事業の目的・政策的位置付けについて

1. NEDO の関与の必要性・制度への適用性

1.1 NEDO が関与することの意義

(1) 本プロジェクトの経緯

フライホイール電力貯蔵装置は、従来のエネルギー貯蔵装置と比べて貯蔵効率が
高く、大容量高速のエネルギー制御が可能、長寿命であり対環境性が良好であるな
どの特長を有しているが、従来はその機械的軸受損失により短時間用途に限られて
きた。しかし、軸受に高温超電導体を使った超電導磁気軸受を用いることにより、
軸受損失の大幅な低減が図られ、フライホイール電力貯蔵技術は、高効率の太陽
光・風力等新エネルギー出力安定化装置、鉄道等の負荷変動補償装置、無停電電源
装置(UPS)などの短時間用途だけでなく、長時間用途の日負荷平準化用などの電
力貯蔵装置への適用が可能となる。このため、高温超電導フライホイール電力貯蔵
技術は、導入されることにより安定的かつ低廉な電力供給の確保および省エネルギ
ー・CO₂ 排出量削減に資する電源多様化支援および負荷平準化技術となる。

このように大きなメリットを持つ高温超電導フライホイール電力貯蔵装置に対
し、システムの実現性及び実現に向けての課題を明らかにすべく、平成 7 年度から
資源エネルギー庁により「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」プロジェ
クトがスタートした。平成 8 年度から「ニューサンシャイン計画」へ移管された後、
平成 11 年度まで要素技術(回転制御を含めたフライホイール及び高温超電導材と
永久磁石を組み合わせた高温超電導磁気軸受)に関する研究を行うとともに、要素
技術の集合体である 0.5kWh の小型システムモデルの製作・運転を行い回転制御、
振動安定性、回転損失、安全性などの技術課題について評価を行った。また、回転
制御の研究のため 10kWh を想定し能動型磁気軸受を使用したフライホイールシ
ステムの製作を行った。

平成 11 年 3 月に産業技術審議会評価部会(平成 11 年 3 月実施)のプレ最終評
価を受けた。その結果、同研究開発では、ラジアル型高温超電導軸受機構の開発な
ど各要素研究の成果として多くのものが得られたものの、実用化、大型化に向けま
だ数ステップの研究開発が必要な基礎研究の段階であり、今後の研究開発におい
ては高温超電導フライホイールシステムを応用問題の一つに置いて、超電導材料を
応用した超電導磁気軸受単体の載荷力、低損失化等の性能の高度化を図ることが第
一に考えられる。また、これらの高性能化を実証するための一環として、10kWh 級
中型モデルの超電導化によるラジアル型超電導軸受の実現可能性の検証も必要で
あると評価を得た。

このため、本プロジェクトでは、フライホイール電力貯蔵システム用として大型
化に適したラジアル型超電導軸受に関し、載荷力向上、回転損失低減、軸降下低減
などの技術開発に取り組むとともに、超電導軸受による 10kWh 級システムの製
作・運転試験を行いシステムとしての開発課題を明らかにすることを目的として実

施することとした。

(2) 本プロジェクトの効果

我が国では、これまで電力の品質が非常に高いレベルに確保されてきたが、分散電源の導入拡大、電力変動の大きな負荷の増加等により電力系統がますます複雑な構成をとることとなり、電力品質や供給信頼度へ影響が及ぶことが懸念される。将来、電力系統の安定度や品質の低下が深刻化する事態が発生すると、半導体メーカーなどをはじめとする多くの工場、企業等へ多大な影響が及ぶことになり、生産性や製品の品質の低下、価格上昇、ひいては日本企業の国際競争力の低下など、日本経済へマイナス影響が及ぶことが危惧される。

これらに対し、高温超電導フライホイール電力貯蔵システムを適用することにより、同システムを日負荷平準化対策用とすれば、揚水代替となることによる省エネ効果により CO2 削減効果が期待できる。また、新エネルギー出力安定化装置、鉄道等の負荷変動補償装置、無停電電源装置 (UPS) としても電力品質の維持に貢献し、国民経済の安定的発展に寄与するとともに、エネルギーの利用効率の向上により地球環境対策にも貢献することができる。

地球温暖化問題は我々の社会に与える影響の大きさや深刻さから、喫緊に対応すべき課題であり、大気中への温室効果ガス、特に CO2 の排出抑制が求められている。しかし、CO2 の発生は、人類の経済活動に伴うエネルギー消費に起因することが大きく持続的な経済成長やエネルギーの安定供給という課題にも同時に配慮し取り組むことが必要である。そのためエネルギーの消費を抜本的に改善することにより CO2 の排出抑制に資する技術開発を推進する必要がある。

さらに、本プロジェクトで得られる技術開発成果は、低損失で高荷重が支持できる超電導軸受の特長を活かした鉄道用負荷変動補償装置や一般産業用の回転機器用超電導軸受技術が確立し、海外市場を含め大規模な普及が見込まれる。その際、超電導バルクだけでなく永久磁石や強化繊維プラスチック (CFRP) の製造産業、真空技術関連産業、超電導用低温冷却を含めた冷却産業、発電電動機や電力変換器等の電力関連産業などで、新しい産業分野が誕生するなど産業創生効果が期待できる。

(3) NEDO の関与の必要性

電力は経済活動および国民生活双方にとって必要不可欠なエネルギーであり、需要に応じて必要な供給力を確保していくことが、電力分野に課せられた課題である。

一方、CO2 排出削減による地球温暖化の防止や電力コストの低減に対する要求が高まっており、今後の電力関連技術は、このような視点に対応したものを重点的に進めるべきである。

超電導技術を応用する高温超電導フライホイール電力貯蔵技術の推進は、高効率な電力貯蔵システムの実現を通じて、上記の視点に應えるものであり、国の電力政

策と方向性は合致しており、優先度は高い。

また、本技術開発は革新的温暖化対策技術プログラム（平成 14 年 2 月 経済産業省策定）の革新的エネルギー利用システム技術開発に位置付けられており、2010 年時点において革新的技術の導入・普及がなされ、京都議定書に定められた CO₂ の削減目標である 1990 年比 6%削減に寄与するものである。

一方、超電導技術開発は、未だ革新的技術に位置付けられる段階であり、長期間にわたって巨額を投じる必要があることから、リスクが高い事業でもあり、民間による競争的な技術開発の進展は望めないのが実情である。従って、国および NEDO が主体となって本事業を実施し、民間企業等の能力を活用しつつ実用化に繋がる技術基盤を確立する必要があると判断される。

また、高温超電導フライホイール電力貯蔵技術開発は大学、研究機関、電力会社、メーカーが保有する多様な技術を統合していくことが必要であり、これまでも国および NEDO が主導的役割を担って開発を推進してきた経緯がある。今後とも効率的な技術開発を進める観点から、引き続きリーダーシップを発揮することが期待されている。

さらに、超電導技術は、その革新性ゆえに他産業を含め新規の産業分野創出等の波及効果が期待されており、この点からも積極的に支援していく意義は大きい。

(4) 国際動向から見た研究開発の必要性

超電導軸受を用いないフライホイールエネルギー貯蔵システムは、世界的な電力自由化の影響で、時間毎の電力格差が広がっていることや、分散電源の増加に伴う電力品質への対応の必要性からそのニーズが高まっており、特に欧米では電力品質改質事業に適用できることから多くの開発者がプロトタイプの開発ないし製品としての出荷を行っている。この様な状況の中で、欧米においても負荷変動補償、無停電電源装置（UPS）に適用可能で電力品質向上に寄与する高温超電導フライホイール電力貯蔵技術に着目しており、あいついで国家プロジェクトがスタートしており、試作機の製作が計画されている。

このような状況の中で世界に先駆けて将来の日負荷平準化を想定しながら、無停電電源装置（UPS）負荷変動補償装置として高温超電導フライホイールシステムの早期実用化を図ることは国内の市場を欧米に席卷されないためにも重要である。

また、電力系統の安定化、電力品質維持、新規産業分野創出による国民経済の安定的発展を図り、さらに、日負荷平準化対策として実用化された場合には CO₂ 削減効果により地球温暖化問題に寄与する。

この様に、国際競争の点、地球環境問題への点からも超電導フライホイール電力貯蔵技術開発を国の支援のもと実施することは重要である。

1.2 実施の効果（費用対効果）

1.2.1 概要

本プロジェクトでは、長期的には電力の負荷平準化や負荷変動補償装置として、また短中期的には、無停電電源装置や自然エネルギー源の脈動平準化に使うフライホイール電力貯蔵システムの実現を目指し、その基盤技術の確立を図ることを目的としている。現在、CO₂ ガス濃度の増大に伴う温暖化が地球規模の課題となっており、また、情報社会化の急速な進展による電力消費の増大が見込まれる中で、省エネルギーや再生可能エネルギーの関心が高まり、電力貯蔵による電力の有効利用のニーズが増している。昼夜間の電力負荷の平準化を行うために揚水発電が大きな役割を果たしているが、高いエネルギー貯蔵効率（85%）及び高いエネルギー貯蔵密度を有しているフライホイール電力貯蔵システムが実現すれば、変電所等への分散配置が可能となり、電力の有効利用に大きな寄与をするものと予想される。NEDOによる調査によれば、2040年頃に120万kW導入されると想定して、エネルギー削減量として4億kWh/年、CO₂削減量5万t-C/年が予測されている。また、電力設備コスト削減についても、超電導フライホイール電力貯蔵の導入により、2040年には0.2%の負荷率の改善がなされ、1000億円以上の設備投資削減効果が試算されている。また、フライホイール電力貯蔵システムは、装置の構成部品として環境汚染をもたらす材料を使用しないことから、環境保全に寄与するシステムである。

短中期的には、データセンター等の無停電電源装置（UPS）への応用が注目される。従来、鉛電池を使用したUPSが広く使用されてきたが、近年、寿命が長く、産業廃棄物を出さないフライホイール電力貯蔵が注目され、数kWh容量のシステムの商用化が進んでいる。機械軸受や磁気軸受を使用したもので、これらは回転損失が大きいためにエネルギー保持に多くの電力を必要とする。超電導フライホイール電力貯蔵システムは、回転損失が冷凍機損失を入れても従来の一桁程度になることが予想され、待機電力の大幅な削減をもたらすものと期待される。

本プロジェクトでは、超電導軸受要素技術とともに10kWh電力貯蔵システムの開発を行うが、それはフライホイール本体、制御型磁気軸受、発電電動機、電力変換機、タッチダウン軸受、真空容器等の構成要素から成る。

フライホイール本体には、エネルギー密度向上のためにカーボン繊維を用いているが、本システムに適用可能な高強度、高均質フライホイールの開発は、カーボン繊維を回転機に利用する際の複合材料の設計技術とともに、その成形・加工技術を確立させ、カーボン繊維の新たな市場を開拓するものである。

制御型磁気軸受は、超電導軸受で回転体を支えた重量物を高速で安全に非接触回転させるために不可欠な技術である。制御型磁気軸受単独では、高速工作機械用電動機などに実用化されていたが、回転体の重量はせいぜい数10kgであり、数100～数1000kgの重量物を高速で回転させた例はない。また、制御にともなう回転損失低減技術が強く要請される。これらの技術は、制御型磁気軸受のさらなる重量物

への適用拡大と省エネルギーを推進しよう。

さらに、発電電動機、電力変換機、タッチダウン軸受、真空容器、冷却技術、それぞれについても、目標達成を図るためには改良、改善が必要であり、これらの技術向上は、超電導電力機器だけでなく広く産業機器の性能向上に有用である。

このように、フライホイール電力貯蔵システムの実現および開発にともなう派生技術は、電力の有効利用、省電力化、コスト削減、電力安定供給に止まらず、新規産業創出等にも大きく寄与するものと考えられる。

1.2.2 地球環境面への効果

(1) 省エネ効果、CO₂削減効果

超電導フライホイールは発電設備ではないため、直接的に省エネルギー・CO₂削減に寄与するわけではないが、負荷平準化を行うことによって発電設備全体の運用の効率が向上し、間接的に省エネルギー・CO₂削減効果を発揮する。

電力貯蔵による負荷平準化技術としては、既に揚水発電が実用化されているので、揚水発電に替えて超電導フライホイールを導入した場合には、超電導フライホイールのエネルギー貯蔵効率が揚水発電のそれを上回る分(70%～85%)だけ更に省エネ、CO₂削減が図られるという考え方で効果を試算された結果を表1.2.2-1に示す。120万kWが導入量される2040年頃には、年間に4億kWh(原油換算で10万kl)の省エネルギー、5万t-CのCO₂削減に効果があると予想される。

表 1.2.2-1 超電導フライホイールの省エネ、CO₂削減効果

年度	2020	2030	2040
超電導フライホイール 導入積算量 (MW)	150	630	1210
エネルギー削減量 (億 kWh/年)	0.5	2.1	4.0
CO ₂ 削減量 (千 t-C/年)	6	25	48

出典：「超電導技術の実用化可能性及び導入効果等の調査」平成12年3月，NEDO

なお、超電導フライホイールは揚水発電と違って需要地に近い配電用変電所等に設置できるので、揚水発電に比べて送変電設備の増強および送変電損失を軽減できるという更なる効果もある。

また、定量的評価は難しいが、超電導フライホイールにより負荷平準化を行った場合、深夜の化石燃料の発電比率が低い時間帯(23時～翌朝7時頃)の電力を貯蔵して、化石燃料の発電比率が高い時間帯(9時～17時頃)に発電するため、負荷平準化によるCO₂排出削減効果も期待される。(図1.2.2-1、表1.2.2-2)

(2) コスト削減効果ほか

負荷平準化によるコスト削減効果は、1%の負荷率改善によって 1400 億円の年経費削減、5800 億円の設備投資削減効果があると試算されている（「電気事業審議会基本政策部会電力負荷平準化対策検討小委員会中間報告」平成 9 年 12 月）。表 1.2.2-1 の導入量を想定した場合、超電導フライホイール導入により 2040 年の負荷率は 0.2%改善されると試算される。

廃棄物の観点からは、超電導フライホイールは機械の回転エネルギーの形で電力を貯蔵する方式であるので、電力の貯蔵・放出に伴う化学変化が一切なく、かつ、装置の構成部品として環境汚染につながる材料を使用しないことから、地球環境の保全に寄与するシステムと言える。

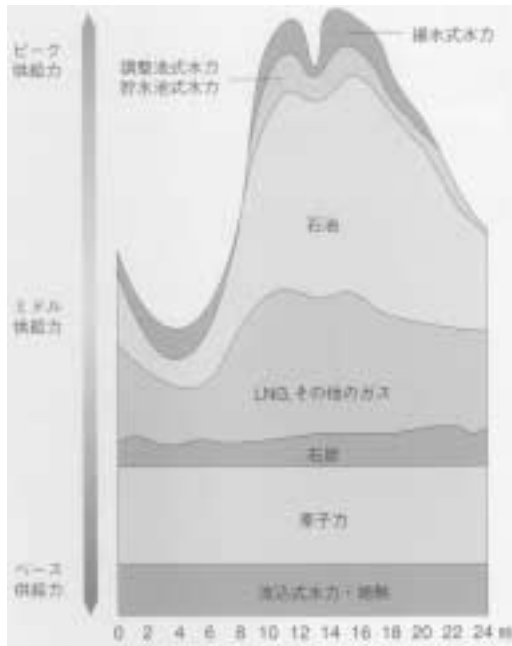


図 1.2.2-1 電源の組み合わせ

出典 「電気事業の現状」2001-2002
電気事業連合会

表 1.2.2-2
昼夜別の CO2 排出原単位の格差

時間帯	CO2 排出原単位 (g-C/kWh)
昼間 (8~22 時)	103
夜間 (22~8 時)	83

出典 「電気事業審議会基本政策部会電力負荷平準化対策検討小委員会中間報告」平成 9 年 12 月

1.2.3 産業面への効果

(1) 超電導バルク材及び超電導軸受の応用分野

a. 超電導バルク材の応用について

本プロジェクトでは、10kWh級及び100kWh級の超電導軸受への応用の観点から、軸受構造に対応した比較的複雑な形状（瓦形、蒲鉾型等）を有する樹脂含浸処理大型超電導バルクの開発を進めている。さらには、10kWh級運転試験装置という超電導バルクの応用研究においてこれまでに例を見ない大きな規模のシステムに組み込み、その運転試験を行うことにより、超電導バルクの実使用環境における長期耐久性及び信頼性を評価する。これらのことから、本プロジェクトが超電導バルク材そのものの性能向上だけでなく、フライホイール用軸受という実応用への一つの取り組みであることが理解されよう。すなわち、本プロジェクトは他の超電導バルク材の実応用開発を進めるための手本として位置付けられ、それら応用開発に大きなインパクトをもたらすものと考えられる。

超電導バルク材の応用は、大きく分けると「磁場応用」と「導体応用」の二つに分類される。さらに、磁場応用については、超電導バルク材のピン止め効果による永久磁石等の安定浮上を利用する「磁気浮上応用」と、超電導バルク材のピン止め点に磁場を捕捉させて強力磁石（超電導バルク磁石）として用いる「磁石応用」に分けられる。現在、開発が検討されている応用技術を表1.2.3(1)-1に示す。

「磁気浮上応用」の代表例として、本プロジェクトでも研究開発に取り組んでいる超電導軸受が先ず挙げられる。超電導軸受の応用は電力貯蔵用フライホイールだけでなく、姿勢制御用フライホイール、圧縮機、低温ポンプ、ターボ分子ポンプ等、多岐にわたっている。これらについては、後に詳しく述べることとする。

ピン止め効果を利用した浮上では、磁場分布が変化しない方向には摩擦（すなわち、電磁力）が発生しないため、同じ極を向く永久磁石を敷き詰めたガイドレールを敷設すれば、摩擦の無い搬送装置の製造が可能である。とりわけクリーンな環境が必要とされる、半導体工場の搬送装置への応用が考えられている。また、中国では、この原理を磁気浮上列車に応用する試みも行われている。

表1.2.3(1)-1 超電導バルク材の応用技術

磁場応用		導体応用
磁気浮上応用	磁石応用	
軸受 〔フライホイール、圧縮機、 低温ポンプ、ターボ分子ポンプ〕 搬送装置 磁気浮上列車 超電導電動機（回転子）	磁気分離装置 磁気浮上列車 超電導電動機（界磁） 分析装置用磁場発生装置 磁化装置（永久磁石等）	電流リード 限流器

超電導バルク材に変動磁場を加えると、ピン止め効果のため電磁力が発生する。この原理を応用した電動機の開発も進められている。超電導バルク材を回転子に用

い、固定子巻線で回転磁界を発生させると、それにほぼ同期して超電導バルク回転子が回るといふものである。従来の電動機よりも、コンパクトで大きな出力が得られるものと期待されている。

次に、「磁石応用」について説明する。既にGd系超電導バルク材において、液体窒素温度で3.3Tを発生する超電導バルク磁石が開発されている。これは、一般的な永久磁石の表面磁場よりも1桁ほど大きな値である。さらに最近、含浸強化を施したY系超電導バルクにおいて、29Kで17.24Tの捕捉磁場が得られている¹⁾。現在最も注目を浴びている「磁石応用」は、磁気分離装置である。超電導バルク磁石は強力な磁場を有するだけでなく、大きな磁場勾配が得られる。磁化Mの磁性体に作用する電磁力(F)は、磁場(H)の勾配に比例する。

$$F_z = M_z \frac{dH}{dz}$$

よって、超電導バルク磁石を用いれば、比較的磁化の小さな物質にも大きな電磁力を及ぼすことができる。この原理により、高性能の磁気分離装置の実現が可能であり、河川や湖沼の水浄化を目的とした磁気分離装置開発が盛んに進められている。

電動機の界磁に超電導バルク磁石を適用することが考えられている。電動機のトルクは、界磁により発生する磁束密度と電機子電流の積に比例する。このため、界磁を永久磁石や常電導コイル(0.5T程度)から、超電導バルク磁石に置き換えることにより、大きな出力を達成出来ることになる。このような高トルク電動機は、船舶推進や電車の直接ドライブ用電動機として適していると考えられる。

磁気浮上列車に利用されているレーストラック型超電導コイルを、超電導バルク磁石に置き換えるという考えも提案されている。また、分析装置用磁場発生装置、磁化装置等、コンパクトかつ高磁場を必要とする技術への適用が期待されている。

「導体応用」としては、低温超電導コイルの電流導入部(電流リード)への、適用開発が行われている。これは超電導バルク材において、超電導状態では電気抵抗がゼロであるうえ、熱伝導が低いという性質を活かした応用である。熱侵入が抑えられるので、冷凍機冷却によるヘリウムフリーの低温超電導電磁石が実現している。また、電力用送電線に過電流が流れたとき、超電導-常電導転移等の現象を利用して機器の保護を行う、限流器への応用開発も進められている。

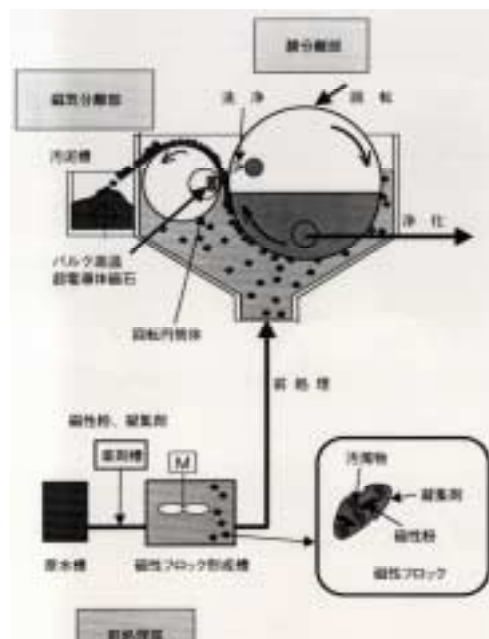


図1.2.3(1)-1 超電導バルク材の磁気分離装置への応用例²⁾

超電導バルク材の応用の一例として、磁気分離装置の概要を図1.2.3(1)-1に示す²⁾。

以上述べてきたとおり、超電導バルク材は多方面への応用の可能性を有している。本プロジェクトにおける複雑形状の樹脂含浸超電導バルク材作製技術や、軸受に組み込んだ性能及び信頼性評価が、他の超電導バルク材応用開発をも加速していくものと期待される。

b. 超電導軸受の応用について

超電導軸受は、永久磁石を埋め込んだ回転子(永久磁石磁気回路)と、超電導バルク材から成る固定子で構成される。本プロジェクトにて研究開発を進めている、ラジアル型超電導軸受の原理を図1.2.3(1)-2に示す。回転子は超電導バルク材の磁束ピン止め効果により安定浮上するが、円周方向の磁場分布を均一にすることで、ほぼフリーな回転が可能となる。一般的に、永久磁石やコイルを用いた磁気浮上では、何らかの制御を行わなければ安定な支持は困難である。ピン止め浮上の場合、外部からの制御を全く与えることなく安定支持することが可能であり、他には無い超電導バルク材特有の技術と言えよう。

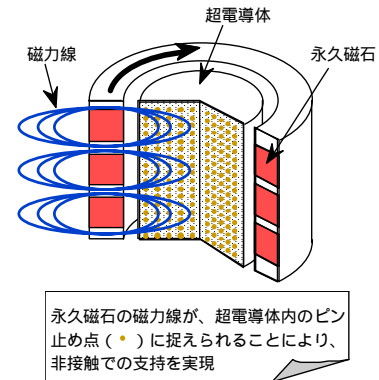


図1.2.3(1)-2 ラジアル型超電導軸受の原理³⁾

超電導軸受は非接触支持であり機械的摩擦損が無いため、高速回転機器への適用が有望視されている。また、軸受部の摩滅も無く、機械式軸受を用いる場合に比べてメンテナンス頻度も少なく済むので、運用時に発生する廃棄物量も少なくなり、環境にも優しい技術と言える。ただし、液体窒素温度程度(約 77K)まで冷やさねばならないという制約条件があるため、冷却し易い環境での使用が必須となる。これらのことを考慮したうえで、フライホイール電力貯蔵装置以外の超電導軸受の有望な応用技術について、以下に記述する。

・低温ポンプ

液化天然ガス(LNG、温度：約 113K)を圧送するための、LNGポンプへの適用が考えられる。従来はLNGを潤滑剤とした玉軸受を使用されており、頻繁にメンテナンスを行わねばならず回転速度にも制限があったが、磁気軸受の採用により高速回転及びメンテナンスフリーを実現したという報告がある(図1.2.3(1)-3参照)

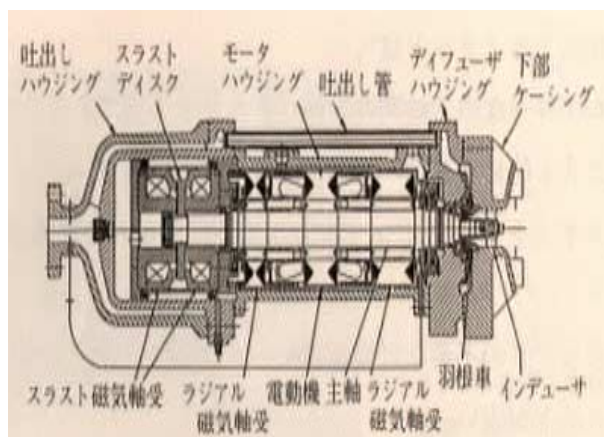


図1.2.3(1)-3 磁気軸受を用いたLNGポンプ⁴⁾

磁気軸受のように外部からの制御を行うことなく、冷却のみで高速安定回転が得られる可能性がある。元々低温環境下での使用であるため、冷却負荷はそれ程大きくないものと推察される。

次世代エネルギー源の一つとして水素が期待されているが、液体水素（温度：約20K）として利用するのが効率的である。この液体水素の輸送や供給に、超電導軸受型低温ポンプが有効であると考えられる³⁾。この場合、超電導軸受のためだけの冷却は、全く不要である。

・極低温圧縮機

磁場閉じ込め核融合実験装置や超電導発電機等に用いるヘリウム液化装置には、極低温の圧縮機が必要である⁵⁾。磁気軸受を用いることにより、25kW、100,000rpmのヘリウム遠心圧縮機を実現した例がある⁶⁾。本例の場合、圧縮機の入口温度は約80Kであり、十分超電導軸受を利用出来る温度環境にある。従って、超電導軸受の適用により、高速安定回転の実現が期待出来る。

・ターボ分子ポンプ

ターボ分子ポンプは、軸流タービン翼を高速回転させて排気する真空ポンプであり、 1×10^{-8} Pa程度の高真空を得るため、半導体製造装置、加速器、表面分析装置等の技術分野で使われている。ターボ分子ポンプに磁気軸受を採用することにより、クリーン化、低振動化、メンテナンス頻度低減、長寿命化等が可能となった⁵⁾。超電導軸受を用いることで、外部からの制御を行うことなく、高速安定回転出来ると期待される。液体窒素等による冷却が必要であるが、冷却による空気分子のトラップ効果が、高真空化に寄与するという利点も有る。

・人工衛星姿勢制御用フライホイール

人工衛星はその姿勢を決定し固定する外部要因が無い場合、例えば何らかの原因で自転しても、これを阻むものは何も無い。これでは人工衛星と地球との交信や、火星等の観測に支障をきたすことになる。そこで、人工衛星にフライホイールを搭載し、人工衛星の自転と同じ方向に回転することで、人工衛星の自転のエネルギーをフライホイールの回転エネルギーに変換して人工衛星の自転を抑える、姿勢制御技術が利用されている。実際には、3台のフライホイールを搭載して、これらの回転軸を互いに直角なx、y、z軸方向に向けて固定し、フライホイールの回転を上手く調整することによって、人工衛星の姿勢を任意に制御することを可能にしている⁴⁾。超高真空である宇宙空間では固体間摩擦が著しく増大することから、早くから磁気軸受による非接触支持が検討されており、フランスの地球資源探査衛星SPOTや、旧ソ連の宇宙ステーション ミールにおいて実用化されている⁵⁾。また、アメリカのNASAでは2004年頃の搭載に向けて、永久磁石軸受と転がり軸受を併用したシステムの研究開発が進められている（図1.2.3(1)-4）⁷⁾。

人工衛星姿勢制御用フライホイールの軸受に、超電導軸受を適用するアイデアがある。導入のメリットは、これまで述べてきた応用技術と同様、磁気軸受のように外部制御を行うことなく、冷却のみで高速安定回転可能なことである。宇宙空間の平均温度が3Kという極低温であることから、冷却に全く問題無く、超電導軸受の適用が有望視されている。既にアメリカのヒューストン大学において、研究開発が進められている⁸⁾。

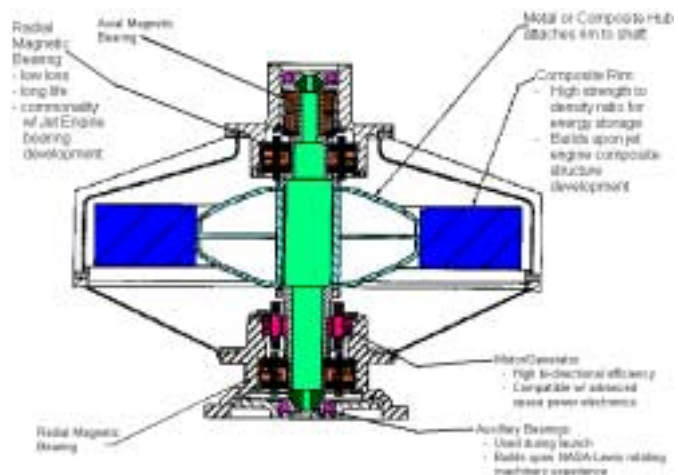


図1.2.3(1)-4 NASAで開発中の人工衛星姿勢制御用フライホイール⁷⁾

・その他

これまで述べてきた代表例以外にも、ヒートポンプ用圧縮機⁵⁾、石油精製やウラン濃縮のための遠心分離器等への応用の可能性がある。

以上に記載してきたとおり、超電導軸受は様々な産業分野における応用の可能性を秘めており、これらの分野をますます発展させていくためのキーテクノロジーの一つであると言える。従って、本プロジェクトでの超電導軸受技術の研究開発成果が、上述の応用分野に甚大な波及効果を与えることが期待される。

参考文献

- 1) Masaru Tomita and Masato Murakami: “High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K”, NATURE, **42** (2003) 517.
- 2) 村上雅人: 「超電導新時代」, 工業調査会, (2001).
- 3) 松永晃治, 村上雅人: 日本マリンエンジニアリング学会誌, **37**, 5 (2002) 19.
- 4) 日本機械学会 編: 「磁気軸受の基礎と応用」, 養賢堂, (1995).
- 5) 電気学会 磁気浮上応用技術調査専門委員会 編: 「磁気浮上と磁気軸受」, コロナ社, (1993).
- 6) H. Asakura: “Cryogenic Engineering Conference / International Cryogenic Materials Conference Abstract Booklet”, p. AB4 (1991) 11.
- 7) (財)国際超電導産業技術研究センター: 「平成12年度 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務報告 フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」, (2001).
- 8) Y. Zhang, Y. Postrekhin, K. B. Ma and W-K. Chu: “Reaction wheel with HTS bearings for mini-satellite attitude control”, Supercond. Sci. Technol. **15** (2002) 823.

(2) 超電導フライホイール要素技術の波及効果

超電導フライホイールの主な構成要素は、超電導軸受のほかにフライホイール本体、制御型磁気軸受、発電電動機、電力変換器、タッチダウン軸受、真空容器などがある。構造的には、アウターロータ型の高速回転機であるという特徴を持つ。

フライホイール本体については、軽量・高速化を図って貯蔵エネルギー密度を高めるために、カーボン繊維を用いている。カーボン繊維はこれまで船舶や航空機などの交通機関など非回転機器への利用が主体であったが、フライホイールにおいて、初めて本格的な回転機の強度部材として用いられ、精密な成型・加工技術が要求される。現状では、フライホイールリングと回転軸を締結するハブがネックとなって、カーボン繊維の強度限界ギリギリまで活用するまでに至っていないが、フライホイール開発が進むにつれ、それも解決され、将来的には繊維自体の強度向上を図って更なるエネルギー密度向上を追求する必要性が生じてくる。このように、フライホイール開発はカーボン繊維を回転機に利用する際の複合材料の設計技術とともに、その成型・加工技術を確立させ、カーボン繊維の新たな市場を開拓するとともに、材料開発のインセンティブを与える。

制御型磁気軸受は、超電導軸受で回転体重量を支えたトンオーダーの重量物を音速の数倍の高速で安全に非接触回転させるために不可欠な技術である。これまで、制御型磁気軸受単独では高速工作機械用電動機やターボ分子ポンプなどに実用化されてはいるが、ロータの重量は数10kgどまりであり、これほど高速・重量物に実用化された例はない。しかも、フライホイールでは、制御に伴う回転損失低減技術が厳しく要求され、制御のロジックを含めた低損失化技術が開発されなければならない。これらの技術により、制御型磁気軸受の応用は更なる重量物への適用拡大と省エネルギー化が推進される。

フライホイールの発電電動機は、従来にない高速回転の要求とともに、稼働中の高効率と非稼働中（空転待機中）の低損失という相反する性能を要求され、新しいタイプの発電電動機の開発が必要となる。かつ、アウターロータ型の構造となるため、アウターロータ型発電電動機の大型機への適用の道を拓くことになる。

電力変換器は、新型電池電力貯蔵やSMESとも共通のパワーエレクトロニクス技術であるが、そのうちでも可変速制御技術に属する。したがって、風力発電や可変速揚水などの可変速機器への技術波及が予想され、パワーエレクトロニクス市場の拡大によってコスト低減に繋がっていくことが期待される。。

超電導軸受の異常時にフライホイールを安全に停止させる役割を持つタッチダウン軸受は、従来の転がり軸受の限界であるDN（直径×回転数）値が100万を超えるような性能を要求され、現状のタッチダウン軸受では対応できない。このため、新しいタイプのタッチダウン軸受の開発を促し、広く高速回転機における安全性確保に寄与する。

そして、低温技術、真空技術は超電導に共通の基盤技術である。超電導フライホイールという新たな分野が出現したことにより、新たな側面からの技術改良が進み、

超電導電力機器に求められる信頼性確保に結びついていく。

このように、フライホイール要素技術は、既存材料の新たな応用分野を切り開いたり、既存技術であっても従来の仕様を超えた新たな性能向上を求めるため、これらの技術開発を活性化させて、ひいてはそれらの成果が新規産業創出を促していく効果がある。

(3) 超電導フライホイールの産業面への寄与

超電導フライホイールが完成したときに、それはどういう分野で産業面に寄与するかを述べる。下記の通り、その応用分野が広いことが分かる。

無停電電源

停電のほとんどは雷等による 1～2 秒以下の瞬時電圧低下によるものであり、この時コンピューター等が誤作動する恐れがあり、この対策として無停電電源が半導体工場、データセンター、電話線会社、病院、大型ビル等で使用されている。その無停電電源の多くはバッテリー式のものが多い。しかしながら、最近超電導式ではないが比較的高速回転型のフライホイール装置が半導体工場、データセンターに導入され始めている。超電導フライホイールはエネルギーロス低減と超高速回転によるコンパクト化が狙いとなり、環境に優しい無停電電源と言えるであろう。

負荷平準化用電源

超電導フライホイールの最終的目標は日負荷平準化用の 10MWh 級であり、実現すれば近郊の変電所に一ヶ所当たり数基設置されることが目論まれている。この実現のためには大型（500 級）の超電導軸受の開発のみならず大型フライホイール体、大型回転軸振動制御、専用の発電電動機と変換機等の開発が必要であり、10 年以上の年月が必要と考えられている。この程度の大きさになると非接触でフライホイール体を浮かす方法は超電導式でなくてはならない状況となる。

エネルギー貯蔵効率は 80%以上（8hr 充放電）を目論んでおり、これが達成できれば揚水等の競合システムを凌ぐことになり、省エネルギー化に貢献するとともに、コンパクトで環境負荷が小さい点で（近郊型の）分散電源として有望である。

自然エネルギーによる電力変動平滑化への応用

太陽、風力等の自然エネルギーを利用して発電する場合に電力変動が発生するが、それを平滑化して周波数や電圧変動を低減し、電力の品質を向上させたり、さらに無駄なくエネルギーを蓄積して総合利用効率を上げるためにエネルギー貯蔵装置を併設することが有効となる。この候補としてはバッテリー式も考えられるが、充放電の回数が多くなり、寿命の問題が生じるため、フライホイール方式が有力となる。この時、超電導式にすればエネルギーロスが少ない分、省エネルギーとなり、発電コストが低減できる。

鉄道用電源

電車はすみやかに加速し、定常走行に移り、そしてすみやかに減速することを繰り返している。加速する時に大きな電力を必要とし、減速するときに熱エネルギーを捨てていることになる。減速時の熱エネルギーを再利用する形で蓄え、加速の時にそのエネルギーを利用することが考えられる。加減速の回数が多くなれば充放電の回数も多くなるわけでやはりバッテリーよりもフライホイール方式の方が有力となる。実際、昭和 56 年に京浜急行がフライホイール式電車線電力蓄勢装置 (25kWh/1.8MW) を導入し、省エネ化を図っている。

さて超電導フライホイールの導入については前節と同じようなことが言える。特に、規模の大きな (例えば数十 MW 級以上) フライホイールのニーズがあれば超電導式のメリットを生かせるであろう。

自動車への応用

自動車業界では環境対策車の開発に注力しており、そのひとつとして化石燃料系エンジンとバッテリーとのハイブリッドエンジンを搭載した車が市場に投入され、その普及が目論まれている。ここでバッテリーの代わりにフライホイールを使用し、しかも積極的にブレーキングエネルギーを蓄え、加速時に消費するという省エネハイブリッドエンジン車というものが考えられる。ここで適用するフライホイールは軽くてコンパクトでアイドリング時のエネルギーロスが少ないことが望まれるため、必然的にフライホイール体はファイバー製として磁気軸受等で非接触化して高速回転するタイプが必要となろう。更に言えば超電導化して更にコンパクトでロスを低減化すれば技術面では理想である。

参考文献：平成 13 年度 超伝導エネルギー・環境応用に関する調査
社団法人 未踏科学技術協会

2. 事業の背景・目的・位置付け

2.1 事業の背景・目的・意義

2.1.1 事業の背景

(1) 社会経済的背景

近年、大気中の CO₂ ガス濃度の増大にともなう地球温暖化が深刻な問題となっており、これを世界的に規制する京都議定書が定められ、その実施が義務付けられている。また、本格的な情報化時代に入り、IT 関連の電力消費が膨大になると予測されている。従来、経済成長には CO₂ ガス放出をともなうエネルギー消費の増大が不可欠であった。今後、持続的な経済成長を維持しつつ、地球温暖化や環境汚染を抑制するためには、革新的な再生可能エネルギー技術、省エネルギー技術の開発が急務となっている。

電力の有効利用法としては、電力貯蔵により夜間電力を貯えて昼間に使用するいわゆる日負荷平準化が知られており、現在、揚水発電所が大きな役割を果たしている。しかし、その効率は 70%程度であり、これより高い効率をもつ大型の電力貯蔵施設が変電所等に設置可能となれば、電力の有効利用に大きな威力を発揮することになる。小、中型の電力貯蔵設備であっても、工場等において電力料金が廉価な時間帯の電力を貯蔵し、必要時に使用することが可能になれば、製造コストの低減に大きく寄与するものと考えられる。

再生可能エネルギーとしては、特に風力発電の成長は目覚ましい。欧米においてその普及が進んでいるが（ドイツでは設備容量が現在約 1000 万 kW）我が国においても温暖化対策の一貫として 10 年後に 300 万 kW の導入が目標とされている。しかし、風力発電は、風の強弱によって発電量が大きく変化するので、火力発電所の出力を調整して送電網に流れる電気量を一定にしているが、それにも限界があるために普及の頭打ちが懸念されている。電力貯蔵は、その脈動平準化に大きく寄与することが明らかにされており、この問題の解決に大きく寄与する可能性がある。

また、高度情報化社会への移行にともない、金融、経済、産業、文化、娯楽のあらゆる場にコンピュータ/インターネットが使用されている。その中で、サーバやルータを一括管理する大型のデータセンターが数多く稼働、建設されている。これらの施設では瞬時の停電であっても甚大な被害をもたらすことから、それを保護する無停電電源装置（UPS）が不可欠であり、その需要はますます増大している。鉄道、放送、通信、病院、半導体製造工場等々においても、停電や電圧低下等の影響は極めて大きく、安定電源を維持するための電力貯蔵装置の必要性が増している。UPS には、従来、鉛電池等が用いられていたが、これには寿命や維持費の問題だけでなく、近年の環境問題の高まりによる廃棄物処理が大きな課題となっており、代替えの電力貯蔵技術の進展が望まれている。

(2) 研究開発上の背景

フライホイールの回転エネルギーを利用した電力貯蔵は、そのエネルギー貯蔵密度が高いこと、高速繰り返し充放電が可能、維持が容易、高寿命などの利点をもつことから、近年、数 kWh 規模の比較的小型の電力貯蔵装置が UPS として商用化されている。データセンターや半導体工場用として米国やドイツのベンチャー企業が販売している機械式軸受や磁気軸受を使用したフライホイール型 UPS である。しかし、問題点の一つは、軸受として機械軸受や磁気軸受を用いる限り、無負荷状態の回転損失が数〜数 10%/h と大きく、回転エネルギーの保持に多くの電力を必要とすることである。また、比較的回転損失が少ない磁気軸受のみでは、その載荷力に限界があり、より大型のフライホイール電力貯蔵装置を実現することが困難である。現在のデータセンターの規模は電力消費量が大変大きく 1 万 kW 程度のもので普通になっており、その中で UPS 関連の消費が半分弱を占めるとされている。これをいかに低減するかが今後の大きな課題である。フライホイール UPS については、大型化による高効率化と回転損失の低減が課題である。また、電力系統の負荷平準や負荷変動補償に使用する上でも、この二つの課題が大きく、従来の機械式や磁気軸受ではその解決が困難であった。その中で、1986 年に高温超電導が発見され、90 年頃には ISTEK 等において従来の強力磁石よりはるかに強い発生磁界をもつ超電導バルク体が開発された。永久磁石回転子と組み合わせた超電導軸受はフライホイール電力貯蔵用軸受として強い載荷力をもたらすことが期待され、活発な研究が開始された。回転損失についても、その値が 0.1%/h 程度と磁気軸受より一桁程度小さくなるということがいくつかの機関で報告されて、本格的な開発の契機となった。

我が国では、東京電力/日立/ISTEK グループ及び四国電力/三菱電機/セイコーエプソングループが先駆的な研究を開始し、次いで、中部電力/三菱重工グループ等が研究を開始した。1995 年には将来の負荷平準化等への応用を目指した研究開発が通産省(現経産省)/NEDO のプロジェクトとして四国総研を中心として開始された。軸受の構造としては、一般に超電導バルクと永久磁石回転子の対向面法線が軸動径方向にあるラジアル型と軸方向のアキシャル型が存在するが、このプロジェクトの成果として、大型化にはラジアル型の方が適していることが明らかにされた。軸受の大型化の際に永久磁石回転子と超電導固定子の対向面積を増す必要がある。ラジアル型であれば、永久磁石回転子を縦長とすればよく、その半径をアキシャル型のように大きくする必要がないので、高速回転遠心力による回転子の破壊を避けることが可能となるからである。また、10kWh 用の超電導軸受要素技術の確立、システムとして課題を明らかにするために 0.5kWh 電力貯蔵システムの製作、運転試験が実施された。以上が、本プロジェクトの 2000 年度開始当時の状況である。

NEDO プロジェクト以外の最近の内外動向について簡単に触れると、中部電力グループは、当初アキシャル型により 1.4kWh システムの開発を行い、現在はアキ

シャル、ラジアル両方式を組み合わせた方式により冷凍機冷却方式の超電導バルク体を使用して、10kWh システムの開発を進めている。外国では、米国のボーイング社 / アルゴンヌ研グループにより SPI (Superconductivity Partnership Initiative) プログラムの一環として開発が行われている。軸受として永久磁石同士の反発により浮上力をもたせ、アキシャル型超電導軸受により横方向の変動を制御する方式である。10kWh システムの要素開発を行った後、現在、35kWh システムの開発を進めている。ドイツにおいてもピラー社が中心となり、政府からの資金援助を受けて、10kWh 容量の超電導フライホイール電力貯蔵システムを開発している。これらは、いずれも比較的短期の目標としては UPS 市場への参入を狙ったものと考えられる。

2.1.2 事業の目的及び意義

本プロジェクトの目的は、フライホイール電力貯蔵システム用として大型化に適したラジアル型超電導軸受に関し、載荷力向上、回転損失低減、クリープ低減等の技術開発に取り組み、100kWh 級フライホイール電力貯蔵システム用超電導軸受の技術的見通しを得るとともに、フライホイール電力貯蔵システムに必要なシステム要素技術課題を明らかにすることである。

目的は二つに大別される。一つは、超電導軸受要素技術に関するもので、現在開発中のラジアル型軸受が載荷力、回転損失、磁束クリープによる軸降下の点で、将来の電力用大型システムへのステップとなり、また次世代 UPS 候補としても期待される 100kWh 級フライホイール電力貯蔵システムに適用可能か否かを明らかにすることである。もう一つは、ラジアル型超電導軸受を用いた実用規模の 10kWh 級のシステムを実際に製作・運転して、電力貯蔵システムとしての有用性や能力を実証し、課題を明らかにすることである。

本研究開発によって、目標とする載荷力、回転損失、軸降下抑制法の開発に成功すれば、100kWh 級超電導軸受の技術的見通しが得られ、低損失大型フライホイール電力貯蔵システム実現への展望が大きく開けるであろう。また、10kWh 試験機の回転損失が従来のフライホイール電力貯蔵システムと比べて真に低いことを実証できれば、それは回転機械における画期的なシステムの実現といえる。

本プロジェクトで試作するラジアル型 10kWh システムでは、回転体の軸振動制御に能動型磁気軸受を使用するが、これは超電導軸受だけでは剛性力、減衰力の点で、高速回転による回転体のアンバランス変形や地震等の予期せぬ外乱による不安定化の抑制に不十分であることによる。従って、フライホイールの高速安定システムの開発にはその軸振動制御方法に加えて、フライホイール本体の真円度・均質性の改善等、超電導軸受以外の周辺技術の開発も重要である。

軸受は基本的に電動モータ等の回転機器に不可欠のものであり、非接触・低損失の超電導軸受はフライホイール電力貯蔵用だけでなく幅広い応用の可能性がある。超電導軸受要素技術として開発される回転損失低減等の技術、さらに 10kWh 試験

システム製作の過程で開発される能動型磁気軸受による回転体の軸振動制御技術や高強度・高均質フライホイール作製技術は、これらの回転機器の性能向上に役立ち、産業用機器への大きな波及効果をもたらすものと考えられる。

2.2 事業の位置付け

2.2.1 政策的位置付け

国の超電導技術プロジェクトは第2期科学技術基本計画（平成13年3月20日閣議決定）の中に位置付けられており、この基本計画の実施に当たっては重要政策としてア)科学技術の戦略的重点化イ)優れた成果を生み出すための科学技術システムの改革、および、ウ)我が国の科学技術活動の国際化を図ることを掲げている。

この中で科学技術の重点化に関し特に、環境分野、エネルギー分野などの重要性が謳われており、超電導技術は、電気機器応用において、CO₂の削減に関連して環境分野及び省エネ・エネルギーの高度利用に関連してエネルギー分野に関連する。また、科学技術基本計画に示された重要政策が的確、着実に具現化されるよう総合科学技術会議が運営されているが、この会議は重点分野推進戦略専門調査会を設置し分野別推進戦略各案（平成13年9月21日）をとりまとめられた。

この案の中で環境分野の中に地球温暖化研究として温室効果ガス抑制技術開発が示されており、超電導機器技術開発が示されている。またエネルギー分野においては、供給、輸送、変換、消費のエネルギー・トータルシステムの変革をもたらす研究開発が重点領域であると定められており、この中で超電導技術についてはおよそ10年後からの導入開発を目標として、高効率な電力貯蔵等の技術確立を目指すことが盛り込まれている。

さらに、達成すべき政策目的について研究開発の整理をすべく平成14年度研究開発プログラムが作成された。本プロジェクトである超電導フライホイールは、環境分野における「革新的温暖化対策技術プログラム」にて実施されており、また、エネルギー分野における高効率な電力貯蔵技術である。

一方、国家産業技術戦略における「電力分野産業技術戦略」（平成12年3月、資源エネルギー庁）では、電力自由化・規制緩和の対応のためには、コスト低減技術の開発のほか、分散型電源や電力貯蔵技術、情報技術の活用による新たな電力供給システムの技術開発が重要であるとされている。この中で超電導フライホイールは超電導電力貯蔵装置として示されている。

さらに経済産業省資源エネルギー庁では平成13年に自由化環境下で最適な電力供給システムを検討する「新電力供給システム技術検討会」が設置され、新しい電力供給システムの技術開発戦略について検討されている。その中で今後分散電源の更なる普及が見込まれるが、分散電源の系統連携を容易にし、分散電源や制御技術等を活用した新しい電力ネットワークにより、電力の安定供給、ニーズに応じた電力品質の選択、需要家利便性向上、環境性能の向上が実現可能になると考えられる。従ってこの様なシステムを構成するため機器技術として電力貯蔵装置（SMES、二

次電池等)の応用技術、小型安易なUPSの開発等が上げられている。超電導フライホイールは、瞬停、瞬時電圧低下対策および電力貯蔵技術として有効である。

2.2.2 研究開発上の位置付け

本プロジェクトは、平成11年度まで行われた「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」の第2フェーズとして実施されているものである。前フェーズでは、負荷平準化を想定した10MWh級の大型の超電導フライホイールにはラジアル型軸受が適している事が明らかにされた。その成果を受け本フェーズではラジアル型超電導軸受の性能向上に主眼をおきつつ、フライホイールシステムで必要となるシステム開発課題を明らかにするために行うものである。

本プロジェクト以外の開発動向として、国内の中部電力グループは、軸受にアキシャル型とラジアル型を組み合わせた超電導軸受を使用したフライホイールシステムを開発している。目的は超電導フライホイールとディーゼル非常用発電機と組み合わせた目標容量25kWhの瞬停～長時間停電補償装置の開発である。海外では、米国のSPIプログラムにてボーイング社が中心となり負荷変動補償、UPS用として超電導フライホイールの開発が行われている。軸受は永久磁石の反発力と超電導体によるラジアル方向の軸制御を併用したタイプである。

欧州でも、UPS装置など販売しているドイツのピラー社が中心となって政府の資金援助を得て10社程度によるコンソーシアムを形成し超電導フライホイールの開発を実施している。目的はUPSと電圧、周波数安定化など電力品質向上、停電補償用であり、目標容量は12kWh/2MWである。このプロジェクトでは、軸受はアキシャル型を採用した12kWhのプロトタイプを製作中である。各国のフライホイール開発状況を添付資料に示す。

本プロジェクトで採用しているラジアル型超電導軸受は独自の技術であり、ラジアル型軸受のみで浮上力を得るのは新規性がある。さらに、ラジアル式軸受は小型のものから大型のものまで汎用性は高く、また、本プロジェクトで製作・運転試験を行う10kWh級超電導フライホイールシステムは、世界初の成果となる公算が大きく、実用化に向けて大きく前進する。

添付資料：各国のフライホイール開発状況

(1) 欧州のフライホイール開発状況

	国	企業・団体名	トピックス	現状
H T S 軸 受 け 利 用	ドイツ	FZK-Karlsruhe	高温超電導体の軸受け技術とフライホイール本体の技術開発の双方を実施。0.3kWh、50,000rpmのものを目標に研究中。	R & D 進行中
		Pillar	Dynastoreプロジェクトとして、目標 12kWh を技術開発中	R & D 進行中
	イギリス	Cambridge University	British Nuclear Fuelにより提供されたフライホイールを用いた実験を行い各種工業用途での軸受けへの適用を研究。	R & D 進行中
	イタリア	CISE	15Whクラスの小型のデモ装置を製作した。1998年にENELの再編によりENELに吸収。	休止
非 H T S 軸 受 け 利 用	ドイツ	IFZ-Juelich	永久磁石軸受け利用。0.5kWh/50kW で回転数40,000rpmのものが目標。	R & D 進行中
	デンマーク	Riso National Centers	フライホイールのメカニカルな技術のR&Dを実施。	R & D 進行中
	ドイツ	Magnet-Motor、SIEMENS	地方の電鉄での回生制動吸収用のフライホイールの研究中。	R & D 進行中
	オランダ	Centre for Construction and Mechatronics	自動車などのボールベアリングを用いたフライホイールの研究を行っている。オランダの交通機関と共同で、5.5kWh,300kWを開発中。	R & D 進行中
	スイス	ASPES Engineering AG	電力品質市場を目標にしたフライホイールを開発中。	R & D 進行中
	オランダ	Hitec Power Protection	1.5kWhの産業用無停電電源装置としてフライホイール装置を販売。	商用商品販売
	ドイツ	RWE/Pillar	出力1650kWで、16,500kW秒(4.58kWh)のエネルギーを貯蔵できる装置を販売中。	商用商品販売
	イギリス	Urenco	電力品質改善を目的に、5kWhのフライホイールを販売中。Boeing, ANLのフライホイールのお手本にもなっている。	商用商品販売

HTS：高温超電導

(2) 北米のフライホイール開発状況

	国	企業・団体名	トピックス	現状
H T S 軸 受 け 利 用	アメリカ	Argonne National Lab.	2.25kWh超の電力貯蔵能力を持つフライホイールシステムの開発。	R & D 進行中
	アメリカ	Boeing Phantom Works	1998年より10kWhのフライホイール開発を目指して、エネルギー省のSPの第2フェーズに参入中。	R & D 進行中
	アメリカ	Texas Center for Superconductivity	ヒューストン大学の研究センター。研究室スケールのフライホイールを対象とした、高温超電導ベアリングの研究中。電力用途と、宇宙用途の両方を研究中。	R & D 進行中
非 H T S 軸 受 け 利 用	アメリカ	Penn State Composites Manufacturing Technology Center	ペンシルバニア州立大学の研究センター。フライホイールの回転体の研究を実施。	R & D 進行中
	アメリカ	NASA/US Flywheel	宇宙用フライホイールのR&Dを実施中。	R & D 進行中
	アメリカ	Active Power/Caterpillar	1.8kWhの鋼製のフライホイール無停電電源装置を販売中。	商用商品販売
	アメリカ	Beacon Power	2kWh複合ファイバー製のフライホイール無低電源装置を販売中。	商用商品販売
	アメリカ	ACUMENTRICS Corporation	1kWh程度の電力品質改質用およびパルス電源用フライホイールシステムを市販中。	商用商品販売
	アメリカ	AFS Trinity Power Corporation	ローレンスリバモア国立研究所とタイアップして、44,000 rpmの高速回転の0.5kWh程度の複合材料系のフライホイール無停電電源を開発。	商用商品販売
	アメリカ	Precise Power Corp	0.16kWh相当の比較的小さなフライホイール無停電電源装置を販売。	商用商品販売
カナダ	Flywheel Energy Systems, Inc	石川島播磨重工、光洋精工ともアライアンスを結んでフライホイールシステムを開発。	R & D 進行中	

HTS：高温超電導

(3) アジアのフライホイール開発状況

	国	企業・団体名	トピックス	現状
HTS 軸受け利用	日本	NEDO、国際超電導産業技術研究センター、石川島播磨重工業、光洋精工、四国総合研究所、電力中央研究所、ISTEC、新日本製鐵、セイコーエプソン、日本精工、三菱電機、東京電力	10MWh用高温超電導磁気軸受けを用いた負荷平準化フライホイールを目指した日本の国プロジェクトは、1999年までの第1フェーズを完了して、第2フェーズに進行中。	R & D 進行中 R & D 進行中
	日本	中部電力・三菱重工業	充放電電力量1kWhの小型モデルを開発し、1999年に実験を行っている。現在は13kWhのものを研究開発中。	R & D 進行中
	韓国	Korea Atomic Energy Research Institute	YBCOによる高温超電導磁気軸受けのプロタイプの研究を行っており、65Wh、20,000rpmの装置を試作	R & D 進行中
非HTS 軸受け利用		京浜急行・三菱電機	1981年に15kWh、750kWの縦軸のフライホイールを試作、1988年には横軸型の25kWh、3000kW（出力時）のフライホイールシステムを逗子フライホイールポストに設置	実用
		沖縄電力・東芝	1996年から近傍の工場の負荷変動による電力系統動揺の吸収を目的に、出力26500kVA、58kWhのフライホイールシステムを設置	実用
		日本原子力研究所・三菱電機・東芝・日立製作所	1985年より、核融合実験設備JT-60用のコイル励磁用電源、および加熱用電源として361～1167kWh程度の電力貯蔵機能を持つフライホイール式交流発電機設備を導入	実用

HTS：高温超電導

・ 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

1.1 技術開発の方針

本プロジェクトは、1995年度より5年間実施されたNEDOの委託による「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発」の成果を基礎に、大型化に適したラジアル型超電導軸受技術を開発するとともに、フライホイール電力貯蔵試験システムを製作し、運転試験を通してシステムとしての課題を明らかにすることを目的としている。

超電導軸受要素技術としては、載荷力向上、回転損失低減が大きな課題であり、それぞれ目標値を設定して特性向上を図る。回転損失の低減には磁気回路の磁場の不均一性が大きく寄与すると考えられており、均一磁気回路の作製法の開発を行う。さらに、超電導バルク固定子の捕捉磁場の周方向不均一性による回転損失についてもその寄与を明らかにする。磁束クリープによる軸降下も重要課題であり、その現象の解明およびその低減法について対策を提案する。超電導バルク材としては、量産品の入手の容易さの点で現在Y系バルクが使われているが、Sm系等の軽希土類系バルクの捕捉磁場はY系よりも大きく、載荷力や軸降下の点で有利と考えられており、軸受に使用可能な大型化を目指した研究を実施する。

運転試験システムについては、10kWh級の電力貯蔵システムを製作するが、高重量フライホイールを高速かつ安定に回転させることは超電導軸受だけでは困難であり、能動型磁気軸受を併用することにより横方向の軸振動を制御する方針である。この磁気軸受の使用は通常回転損失の増大をもたらすので、危険速度以外ではその働きを極力少なくする必要がある。磁極構造や制御方法を改善し低損失化、省電力化に向けて努力する。また、フライホイールの材料にはCFRP(炭素繊維強化プラスチック)を使用するが、高速回転の際には強力な遠心力による素材の不均一変形が生じ、軸の不安定振動の原因となる。従って、フライホイール本体の高均質化に向けて製作法の改善を図る考えである。

フライホイール電力貯蔵は、従来の機械式や磁気軸受を使用したものでは低損失、大型化の両条件を満たすシステムを実現することが困難であった。本プロジェクトは、超電導軸受要素技術および周辺技術を含めた電力貯蔵システム技術の研究開発を通して、実現可能であることを実証することを基本方針とする。

1.2 本事業の目標

1.2.1 超電導軸受要素技術

100kWh級フライホイールシステムに利用可能な直径300mm級の超電導軸受の開発に向け、6,000rpmにおいて載荷力密度10N/cm²、回転損失2mW/Nの達成を目指すとともに、軸受要素技術の見通しを得る。

(中間目標) 載荷力密度 $10\text{N}/\text{cm}^2$, 載荷力当たりの回転損失 $2\text{mW}/\text{N}$ を達成するための方策を提示する。

1.2.2 超電導軸受応用技術

100kWh 級フライホイールシステムと相似な 10kWh 級運転試験装置を試作し、運転試験による軸受・回転体システムの信頼性を検証するとともにシステム上の課題を抽出する。特に 超電導フライホイールシステムの早期実用化に不可欠な軸降下抑制対策の効果を 10kWh 級運転試験装置で検証し、実用化のための課題を明らかにする。

(中間目標) 中間評価時点では 10kWh 級運転試験装置構造図及び軸受制御技術の課題と対策を提示する。

1.3 目標の設定根拠

昼夜間の電力需要の格差を低減し、発電設備を効率的に運用するための日負荷平準化用フライホイール電力貯蔵システムは、10MWh級の容量が必要となるが、大型化へ向けた技術開発は段階的に実施されるべきものである。本プロジェクトでは、実用化の前段階として負荷変動補償用やUPS等の産業応用への波及効果を期待して100kWh級システムを想定した超電導軸受要素技術の研究開発を行う。なお、超電導軸受の型式は大型化への対応に優位性を持つラジアル型とする。

また、100kWh級システムと相似である10kWh級システムを製作・運転し、軸受・回転体システムとしての信頼性を検証する。

以下に今回設定した開発目標の根拠を示す。

(超電導軸受の載荷力密度)

10MWh級フライホイール電力貯蔵システムの概念設計では、定格回転数 $4,775\text{rpm}$ で、直径6m、厚さ1.6mのフライホイールを持つロータ総重量は93tと試算される。軸受ステータ側直径を0.78mと見積られていることから、超電導軸受の載荷力密度 $15\text{N}/\text{cm}^2$ 以上が達成されれば軸受長さ2.7mで自重を支持することが可能であり、実用化の見通しがほぼ得られることとなる。

実用化の前段となる1MWh級システムの概念設計では、直径3m、厚さ1mのフライホイールを持つロータ総重量は13tと試算されており、軸受ステータ側直径は290mmである。 $10\text{N}/\text{cm}^2$ の載荷力密度を仮定した場合、軸受長さ1.4mで支持することができ、1MWh級システムの実現は可能である。また、 $10\text{N}/\text{cm}^2$ の載荷力密度を有する超電導軸受を用いる場合、100kWh級システム構築は十分に達成される。

そこで、本プロジェクトでは100kWh級システムに適用可能であり、また1MWh級システム実現の見通しが得られる性能として、軸受載荷力密度 $10\text{N}/\text{cm}^2$ を目標値とする。

(超電導軸受の回転損失)

超電導軸受の回転損失は回転数と載荷力密度の増加に対して増加する特性を持つ。フェーズ1では載荷力密度 2.6N/cm^2 に対して、単位載荷力あたりの回転損失 2mW/N の実現がなされた。

今回の回転損失の目標値としては 10N/cm^2 の載荷力密度下で、単位載荷力あたりの回転損失 2mW/N を達成することとした。

この目標値が達成できれば、上記概念設計の 10MWh 級および 1MWh 、いずれのフライホイール電力貯蔵システムにおいても損失量が貯蔵容量の1%以下となる。また、これは高荷重を受ける超低損失の超電導軸受技術の確立にもつながるものである。

(超電導軸受の軸降下量)

フライホイール運転中にロータが少しずつ(運転初期の方が大)下がる傾向があるが、その時の軸降下量の許容値はシステムの設計思想により変わるものである。また、軸降下の原因となる磁束クリープ現象がまだ十分解明されていない状況につき、今回は特に目標数値は設定していない。但し、 10kWh 級運転試験装置では今回のシステム設計上降下量が大きいと不具合が生ずる恐れがあるため 運転試験中は 0.3mm 以下の軸降下量にするべく 各種対策を講ずることとする。

(超電導軸受応用技術開発)

高荷重を支える超電導軸受は、単段の軸受要素を複数組み合わせる多段形式となる。超電導軸受要素技術開発で検証される単段の軸受性能だけでは、軸受多段化の影響や軸振動と熱擾乱が避けられない実システムでの性能を正確に予測することは不可能である。このため、実際にフライホイールを回転させた状態での性能試験を行い、軸受単体試験との差異およびその原因を明らかにする。さらに、長期の運転試験により軸受・回転体システムの信頼性を検証するとともにシステム上の課題を明らかにする。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

2.1.1 事業全体の計画内容

超電導軸受の性能向上を目指した研究開発を行うとともに、超電導軸受の応用として有望なフライホイール電力貯蔵システムの実証用モデル(貯蔵容量 10kWh 級)を開発し運転性能の検証を行う。各研究開発項目は以下のとおり。

(1) 超電導軸受要素技術

フライホイール電力貯蔵システムに利用可能な、高載荷力で低損失なラジアル型超電導軸受を実現するため、永久磁石を用いた均質で高い磁場の発生技術、超電導

軸受に適した高電流密度を持つ大型超電導バルク体の作製技術、永久磁石と超電導バルク体の最適な構成技術の研究開発を行う。また、軸降下量低減化のため、磁束クリーブ等の詳細説明を行い、過冷却法と予荷重法による対策技術の研究開発を行う。併せて軸受性能の検証試験を行う。

(2) 超電導軸受応用技術

構造的に 100kWh 級システムと相似な 10kWh 級システムを製作・運転し、回転システム固有の振動現象の解明とフライホイールシステムの運転試験並びに軸降下量の低減策検証試験を行う。併せて振動に対処する省電力制御型磁気軸受技術等の研究開発も行う。

表 2.1.1-1 予算の年度毎の推移

研究開発項目	12年度	13年度	14年度	15年度	16年度	計
1. 超電導軸受要素技術						
(1) 載荷力向上技術	40	47	35	59	→	
(2) 回転損失低減技術	44	45	19	55	→	
(3) 軸降下低減技術	10	10	21	23	→	
(4) 超電導軸受評価試験	27	55	41	45	→	
2. 超電導軸受応用技術						
(1) 超電導軸受運転試験	10	50	91	86	→	
(2) フライホイール 軸制振技術	40	24	19	20	→	
(3) フライホイール本体 の高性能・高品質化	15	16	34	22	→	
3. 技術調査研究	15	10	10	10	→	
				中間評価		
開発費（百万円）	191	257	270	(320)		

(3) 計画変更点

- ・当初、要素技術の中に軸受特性解析技術の研究テーマを入れ、載荷力、回転損失等を統合する解析コードを整備することを計画したが、文献調査の結果それぞれの解析コードがまだ不十分であることが分かり、統合化は中止し、それぞれの解析コードを充実させる方向で推進することとした。
- ・当初、回転損失の目標(2mW/N)は回転損失測定装置を製作して測定することで計画していたが、予算節約の観点より、回転損失の解析手法を高度化して解析により達成を目指すことにした。

2.1.2 研究開発項目の内容

(1) 超電導軸受要素技術

a. 載荷力向上技術

超電導軸受の載荷力を向上させるためには、大型、高性能、かつ、軸受構造に対応した形状の超電導バルク材が必要となる。まず、10kWh級運転試験装置の超電導軸受に対応したY系超電導バルクを作製し、これに経時変化対策としてのエポキシ系樹脂の真空含浸処理を施した後、捕捉磁場分布測定等を行い、軸受への適用性及び健全性を評価する。次に、これらのY系超電導バルクを用いて10kWh級超電導軸受モデルを試作し、「d. 超電導軸受試験技術」における載荷力及び回転損失評価試験に供する。これらの研究成果を踏まえ、軸受用Y系超電導バルクを10kWh級運転試験装置に組み込み、運転試験を通して、長期耐久性ならびに実用性を評価する。

一方、100kWh級フライホイール用超電導軸受に関しても、軸受に対応したY系超電導バルク単体の作製、エポキシ系樹脂含浸、捕捉磁場分布測定等を行い、軸受への適用性及び健全性を評価する。その後、100kWh級超電導軸受モデルを試作し、「d. 超電導軸受試験技術」に供する。

Sm系、NEG系等のRE系超電導バルクは、単体でY系よりも優れた超電導特性を有し、超電導軸受への適用も期待されている。そこで、軸受への適用を想定して、RE系超電導バルクの研究開発を実施する。熱処理条件、雰囲気等の合成条件最適化により、比較的大型のRE系超電導バルクを、安定に製造出来る技術を開発する。性能は、捕捉磁場分布等により評価する。その後に、超電導軸受に対応した形状のRE系超電導バルクの作製に向けて検討を行う。

載荷力向上のためには、永久磁石磁気回路(回転子側)の高磁場化及び軸方向磁場勾配の急峻化を図らなければならない。磁場強度及び勾配を最適化するためのシミュレーションに基づき、10kWh級運転試験装置の超電導軸受モデルに対応した、外径180mm級の永久磁石磁気回路を開発する。同永久磁石磁気回路は前述の超電導軸受モデルとともに、「d. 超電導軸受試験技術」の載荷力ならびに回転損失の評価試験に供する。これらの評価試験結果、ならびに耐熱性、機械強度等も考慮して、10kWh級運転試験装置に組み入れる永久磁石磁気回路の設計、製作を行う。

100kWh級フライホイール用永久磁石磁気回路に関しても、10kWh級と同様に、まず磁場強度及び勾配を最適化するためのシミュレーションを行う。その結果に基づいて、100kWh級超電導軸受モデルに対応した、外径300mm級の永久磁石磁気回路を試作、開発し、100kWh級超電導軸受モデルと組み合わせて「d. 超電導軸受試験技術」にて評価する。

b. 回転損失低減技術

(a) 事業における位置付け

超電導軸受の重要な性能の一つとして回転損失が極めて小さい事が期待される。この回転損失低減の要因として第1フェーズの研究により磁石の磁場バラツキの影響が主要因である事が指摘された。しかし、この磁場バラツキの要因分析については殆ど未検討であった。よって本フェーズでは磁場バラツキの要因について磁石、磁気回路の系統的な影響を磁場解析シミュレーション及び具体的な磁気回路作製による検証の2つのアプローチから確認・検証する。

(b) 目標

磁場バラツキと回転損失の定量的な関係は理論的にも解明されていないので、磁場バラツキに関する具体的な数値目標は設定せず、第1フェーズの磁場バラツキレベルのさらなる低減化を検討する。(回転損失自体の目標値はd.に記載)

(c) 計画内容

平成12～14年度にかけて180磁気回路の磁場解析および磁気回路作製を行う。まず磁場解析では磁気回路シミュレーションにより磁石セグメント間の接着層の影響、磁石セグメント相互の特性バラツキの影響等の磁場バラツキ要因抽出を行う。平成13年度では磁気回路を構成する各磁石セグメントのバラツキ要因を確認するため専用の磁石金型を設計製作して汎用磁石金型と比較検証する。また磁石をセグメントにすることによる影響を確認するため、大型一体リング形状磁石の設計、製作を実施してセグメント磁石との比較検証についても実施する。

以上の検討により総合的に回転損失に及ぼす磁場バラツキの要因を調査、確認してさらなる損失低減化の方向性を得る。

c. 軸降下低減技術

(a) 事業における位置付け

載荷力、回転損失と並ぶ超電導軸受のもう1つの重要な性能である軸降下防止対策の技術を確立する。軸降下は、従来軸受にはない超電導軸受特有の特性であり、システムの構成要素として応用する場合、その降下量を低減する技術を確立しておく必要がある。フェーズ1の成果として、予荷重法と過冷却法による軸降下防止策が提案されており、本プロジェクトではこれらの手法の有効性を確認する。

また、RE系超電導体は臨界電流密度-外部磁場特性においてピーク効果を持つことから、超電導軸受への適用性が優れているものと考えられ、超電導軸受用途を考慮した大型 RE系超電導バルクを試作してピーク効果が磁束クリープ特性に及ぼす影響を評価し、軸降下低減への有効活用の可能性を検討する。

(b) 目標

現状は軸降下の原因となる磁束クリープ現象等の確認、ならびにその対策の提案のみがなされているに過ぎない。このため、本研究では目標数値を設定せず、定量的な分析も含んで、過冷却法及び予荷重法の有効性に関する評価を実施する。

(c) 計画内容

平成 12 年度に減圧式超電導体過冷却装置を製作する。過冷却装置を製作後、軸降下低減対策として期待されている過冷却法及び予荷重法についてその相乗効果の確認試験も含めて、Y系超電導バルクレベルでの試験を行い、有効性を評価する。

その有効性を確認後、平成 14 年度に冷凍機式超電導体過冷却装置を製作する。その過冷却装置を使用して直径 180mm 級超電導磁気軸受で、温度を減圧式より下げた場合と初期温度に温度降下を与えた場合等の過冷却試験を行い、有効性を評価する。

また、最終年度に RE系超電導バルクを試作して軸降下低減への有効活用の可能性を検討する。

d. 超電導軸受試験技術

(a) 事業における位置付け

本研究では本フェーズで製作する超電導軸受が所要の性能を発揮しているかを確認する。運転試験機で評価する直径 180mm 級超電導軸受の試験機については、フェーズ 1 で開発済みである。しかし、今回の目標である 100kWh 級システム用超電導軸受の評価に向けて、さらに大型の直径 300mm 級の超電導軸受を評価できる試験機が必要である。このため、超電導軸受の既存載荷力試験機の流用方法ならびに測定技術を確立する。

(b) 目標

本フェーズで製作した直径 180mm (10kWh 級運転試験機用) 超電導軸受および 100kWh 級超電導軸受の試験を行い、載荷力、軸降下量、回転損失の評価を実施する。

(c) 計画内容

超電導軸受載荷力評価試験

平成 12 年度と 13 年度に製作する直径 180mm 級超電導軸受の特性試験を、既

存載荷力試験機を活用して行い、載荷力と軸降下量を評価する。

平成 12 年度に既存載荷力試験機の、直径 300mm 級超電導軸受への流用可否と方法を検討する。その検討結果を踏まえて、平成 15 年度に製作予定の 100kWh 級超電導軸受の特性試験を行い、載荷力と軸降下量を評価する。

また、中間評価の目標に対しては、100kWh 級超電導軸受で載荷力密度 10N/cm² を達成するための方策を提示する。最終目標に対しては、100kWh 級超電導軸受の載荷力密度 10N/cm² が、フライホイールシステムに利用可能な状態かの技術見通しを検討する。

超電導軸受回転損失評価試験

回転損失測定については、既存の回転損失試験機に直径 180mm (10kWh) 級超電導軸受モデルをセットアップし、6,000rpm までの安定回転ができるように試験機を調整する。その後、6,000rpm から 4,200rpm までの回転減衰特性を超電導軸受負荷を変化させて取得し、計算で超電導軸受部の回転損失を明らかにする。

100kWh級超電導軸受の回転損失評価及び回転損失低減対策

本プロジェクトでは100kWh級超電導軸受の回転試験装置の製作は行わないこととしたため、数値解析により回転損失の評価を行う。先ず10kWh級(直径180mm級)超電導軸受の回転損失評価試験結果を、上手く再現出来るように解析手法の高精度化を行い、高精度化後の解析手法により100kWh級超電導軸受の回転損失を評価する。また、目標値(載荷力あたりの回転損失:2mW/N以下)達成に向けて、回転損失低減対策の立案ならびに実験又は解析による検証を行う。

(2) 超電導軸受応用技術

a. 超電導軸受運転試験

(a) 事業における位置付け

超電導軸受の実証試験評価をするため、構造的に 100kWh 級システムと相似な 10kWh 級運転試験装置について、システム検討、設計、製作、据付組立てを行い、運転試験の実施・評価を行う。超電導軸受を回転機器に応用するためには、実使用下での運転試験により長期的な検証を行うことが必要である。

(b) 目標

フェーズ 1 で製作した中型回転制御試験装置を活用して、本プロジェクトで開発した超電導軸受を内部に組み込み、運転試験を行う。また、試験場所については、フェーズ 1 の小型モデルの運転試験に使用したテストピット、運転制御室など(四国総合研究所松山 F W 研究センター内)を有効活用する。試験は、超電導軸受にフライホイールを含む実際の回転荷重をかけた状態で軸受性能試験を行い、載荷力、損失、軸降下等の性能を検証するとともに、1 年程度の運転により、軸受システム

の信頼性を検証する。また運転試験により、次項で行うフライホイール軸制振技術で開発する振動安定性解析手法の評価を行う。

(c) 計画内容

10kWh 級運転試験装置

10kWh 級運転試験装置は構造的に 100kWh 級システムと相似なものとし、これを製作・運転することで回転システム固有の振動現象の解明を行う。また、SMB に起因した軸降下量の低減試験を行うことができるものとする。

10kWh 級システムは図 2.1.2-1 に示すように直径 1m 程度の CFRP 製フライホイール本体をロータに締結し、全体の重量はラジアル型 SMB により支持する構造とする。ロータは中空円筒（アウターロータ型）で、中空ロータ内部に発電電動機とラジアル型 SMB を有し、軸振動を抑制するため制御型磁気軸受（AMB）がロータ上下に配置される。回転部分は風損による貯蔵エネルギーロスを低減するため真空中で運転する。

以上の回転システムの成立性を検討するため、クライオスタット冷却性能、ロータ温度分布、回転永久磁石の強度、ロータ軸系の内部減衰および磁気軸受に起因した不安定振動などについて理論的に検討し、運転試験の結果と比較評価を行い、100kWh 級システムの検討に反映する。

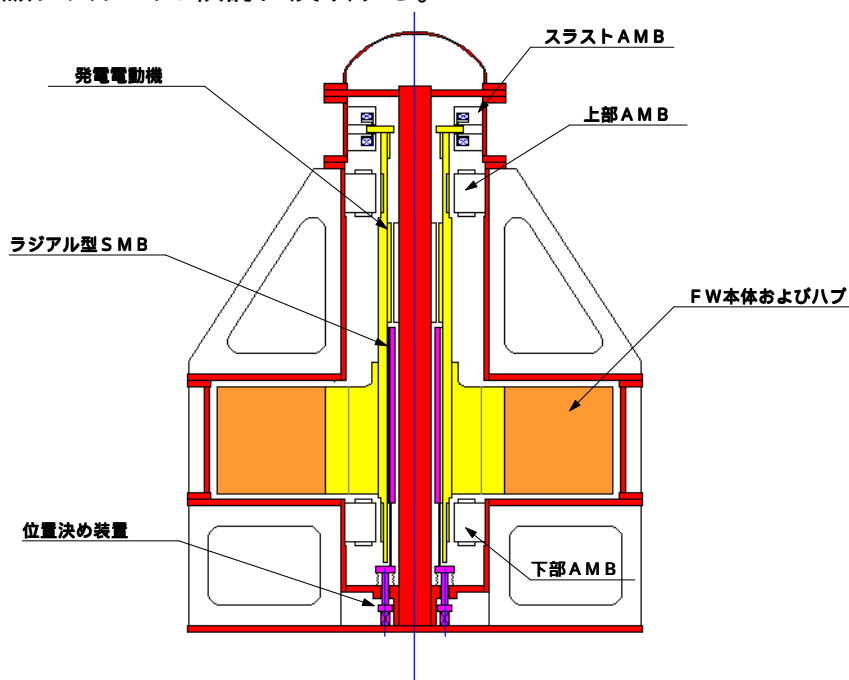


図 2.1.2-1 10kWh 級運転試験装置の基本構造案

10kWh 級運転試験

平成 14 年度までに 10kWh 級運転試験のための施設（場所：四国総合研究所松山 FW センター内）の設計を行う。平成 15 年度に施設を製作し、10kWh 級運転試験装置を松山 FW 研究センターに据付する。また、試験の実施・評価に必要な試験内容を検討する。平成 16 年度から試験を行う。試験では載荷力、損失、軸降下等の性能を検証するとともに、軸受システムの信頼性を検証する。

また、最終目標に対しては、運転試験面からみた、100kWh フライホイールに向けての課題を抽出する。

b. フライホイール軸制振技術

平成 7 年～平成 11 年度の第 1 フェーズの研究開発では、フライホイールの軸振動を抑制する AMB に関して以下の課題があることが明らかになった。

ロータの弾性振動を共振させない技術

ロータ側に発生する渦電流による損失（発熱）低減技術

本研究ではこれらの解決のため、第 1 フェーズの研究開発で製作した中型回転制御試験装置を用いて、次の項目の研究を行う。

磁極形状と磁気軸受の制御手法の最適化による損失低減技術の開発

ロータ側に発生する渦電流は貯蔵エネルギーのロスになるばかりでなく、ロータの発熱原因となる。真空中で運転されるロータ軸系は冷却が困難であるため、AMB による渦電流を低減する磁極構造および制御手法などについて検討を行う。

ロータの弾性振動抑制技術の開発

CFRP 製であるフライホイール本体は高速回転時の半径方向の伸びが大きいため、ロータとフライホイールを締結するハブはこれに追従するように柔構造となる。これにより、ロータ軸系全体ではロータ単体が弾性振動するほかにハブが変形する弾性振動が新たに生じるため、AMB による弾性振動の抑制が難しい課題となる。この問題を解決するため、ロータの弾性振動の振動安定性を高める制御手法およびロータ構造について検討を行う。

中型回転制御試験装置による確認試験

上述、の対策の効果を確認するため、第 1 期研究開発で製作した中型回転制御試験装置などを用いて試験を実施し、評価する。

c. フライホイール本体の高性能化・高品質化

平成 7 年～平成 11 年度の第 1 フェーズの研究開発では、高周速で安定に回転する FRP フライホイール本体を設計製作するためには次の課題があることが明らかになった。

均一な品質の FRP リングを成形する技術

真円度や同軸度など回転体に要求される厳しい形状精度を確保する加工・組立て技術

FRP リングと回転軸とを締結するハブ構造の開発

本研究ではこれらの解決のため、次の項目の研究を行い、フライホイール本体の設計・製作技術を確立する。

FW (Filament Winding) 法による FRP リング成形条件の最適化

マンドレル (型) への繊維巻き付け時の温度・巻き付け速度、巻き付け後の硬化温度条件などを最適化する方法について検討する

大型マルチリング製作技術の開発

高周速で安定にフライホイール本体を回転させるには、本体が高い寸法精度に加工されていることが必要である。しかし、周方向にのみ繊維強化されている FRP リングは、加熱による樹脂硬化時の残留応力を持っているために、外周を機械加工すると外周が除去されたことによる残留応力の再配分によって加工した量以上の寸法変化が発生してしまう。この寸法変化を考慮した加工方法の検討を行なう。

ハブ構造の開発

フライホイール本体の高速回転時に FRP リングの大きな伸びに追従し、なおかつ自身が破壊しないハブが必要である。FRP リングを用いたフライホイールに適したハブの構造や材料について検討する。

(3) 超電導軸受高性能化の研究開発 (産総研)

a. 超電導軸受高性能化

非接触で支持される巨大高速フライホイールによる電力貯蔵システムの実用化に対しては、システムの非常時事故や地震に対する安全性と信頼性の確保は重要な技術開発の一つであるが、本システムでは、安全性と信頼性確保には制御型軸受が重要な役割を果たす。そこで、制御型軸受の信頼性の向上、**耐震**性能と非常事故時バックアップ性能の向上化を目指して新しい制御法を開発する。制御アルゴリズムとして、1)現状の比例積分微分フィードバック (PID) 制御法に加えて、剛体モードと弾性モードの低次元モデル化による線形二乗最適 (LQ) 制御を同時に行う PID 包含 LQ 制御法、2)非常時の保護軸受の負担を軽くする、磁気軸受の非線形磁気力を考慮した非線形制御の制御アルゴリズムの開発、さらに、3)地震卓越周波数域で有効であると考えられる波動制御法および地震加速度を制御情報に利用するフィードフォワード制御法を開発する。これらのアルゴリズムを軸受試験装置により制御性能の検証実験を行う。

b. 軸受関連部材のクリープ特性評価

本プロジェクトにおけるフライホイールシステムでは、ロータ本体は真空中で高

速運転、すなわち高応力負荷状態で長時間運転される上に、20年程度の長期間にわたるメンテナンスなしでの運用が予定されている。フライホイールのロータ材料として想定されているCFRPは、かなり一般的に用いられるようになってきてはいるが、真空中といった特殊環境で、しかも高負荷、長期間といった過酷な条件で使用されている例は見当たらず、そのような特性を調べた報告も見当たらない。それ故、CFRPの特殊環境での長時間の使用における材料力学的特性の変化を把握しておくことは、本プロジェクトにおいて非常に重要なことと考えられる。そこで、本サブテーマにおいては、できる限り長期にわたる真空中でのCFRPのクリープ特性の評価を行うとともに、特性改善に資するために繊維-マトリックス界面の劣化機構について解明することを目的としている。

工程表

項目	平成12年度	平成13年度	平成14年度	平成15年度	平成16年度
超電導軸受高性能化	29,415	41,793	41,079	30,450	
	← 制御アルゴリズムの開発と実験装置製作及び予備実験 →			← 制御検証実験 →	
軸受関連部材のクリープ特性評価	14,762	27,712	28,426	21,040	
	← 真空中クリープ試験装置の製作 →		← CFRPの真空中クリープ試験 →		← 加速試験法の検討と評価 →

2.2 研究開発の実施体制

本研究は、経済産業省産業技術環境局研究開発課が政策担当原課となって新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託により、（財）国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）が再委託先の協力を得て実施しているものである。

2.2.1 概要

本研究は、平成12年度にNEDOが、企業、民間研究期間、独立行政法人、大学等（委託先から再委託された研究開発実施者を含む）から公募によってISTECを選定し、超電導分野で幅広い学識経験を有すプロジェクトリーダーとして腰塚直己氏を選出し、プロジェクトリーダーの指揮下において再委託者及び共同研究者等からなる研究体を構築し、研究開発を実施している。これにより各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルを最大限活用し、効率的な研究開発の推進を図っている。

プロジェクトリーダー：腰塚 直己

財団法人 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 盛岡研究所 所長代理

共同研究先と実施内容

- 東京工業大学 : フライホイールの実用化研究
フライホイールの応用分野の調査ならびに、求められる技術および解決すべき課題等の検討を行う。
- 東京大学 : 超電導軸受の回転損失解析手法の高度化の研究
超電導軸受の回転損失試験結果を、精度良く再現できる解析手法について研究開発を行う。
- 慶応大学 : 超電導軸受の回転損失低減対策に関する研究
フライホイール電力貯蔵用超電導軸受について、回転損失低減のための諸方策を検討・評価する。
- 名古屋大学 : 軸受用 R E 系超電導バルク作製プロセスの研究
フライホイール軸受用のバルク超電導体を開発するため、優れた J_c -B 特性をもつ大型の R E 系バルク超電導体の材料研究を行う
- 茨城大学 : 内部減衰に起因した自励振動の研究
ロータの内部減衰により発生する不安定振動について検討し、振動安定化のための諸方策を検討・評価する。
- 日本大学 : スピルオーバー不安定現象の研究
磁気軸受の制御により発生するロータの弾性モードの不安定振動（スピルオーバー）に有効な制御則を検討し、評価する。

2.3 研究開発の運営管理

(1) NEDO 及び超電導技術開発検討会

本プロジェクトにおいて政策的意義を持つ研究開発プロジェクトの運営管理に多大の経験を有する NEDO が全体の運営管理を実施している。

NEDO においては、担当理事のもと、新電力技術開発室が、他の超電導プロジェクトを含めた技術開発事業を運営している。本プロジェクトにおいては室長の指揮下でプロジェクト基本計画の策定、開発動向の掌握、進捗管理、予算計画等プロジェクト運営管理に係るマネージメントをプロジェクトリーダーと密接に連絡をとり実施している。

さらに、NEDO 内に、産官学の有識者を集めた超電導技術開発検討会（委員長：正田 英介 東京理科大学教授）を設け、超電導技術開発の方向性、各超電導プロジェクトの位置付けと方向性などの審議を行うとともに、個々の超電導技術開発プ

プロジェクトに関する研究開発方針の審議、成果のレビュー、問題解決のための方策の検討、並びに技術情報の共有化を進めており、そこで得られた助言等をもとに、プロジェクト全体の運営の効率化、効率的推進を図っている。

(2) プロジェクトリーダー（PL）及び ISTE C

プロジェクトリーダー及び ISTE C は日常的な研究開発マネジメントと共に、以下の推進委員会、技術委員会、幹事会及び技術打ち合わせを開催し、幅広い意見を聴取し、本プロジェクト研究員と緊密なコミュニケーションを図り、研究開発推進・取り纏めを実施している。（添付資料参照）

研究開発推進委員会

本プロジェクトの開発責任者及び ISTE C が効率的推進のために、関連する各分野の専門家に委員を委嘱し、適宜研究結果および計画を報告し、聴取した意見を研究推進に反映している。

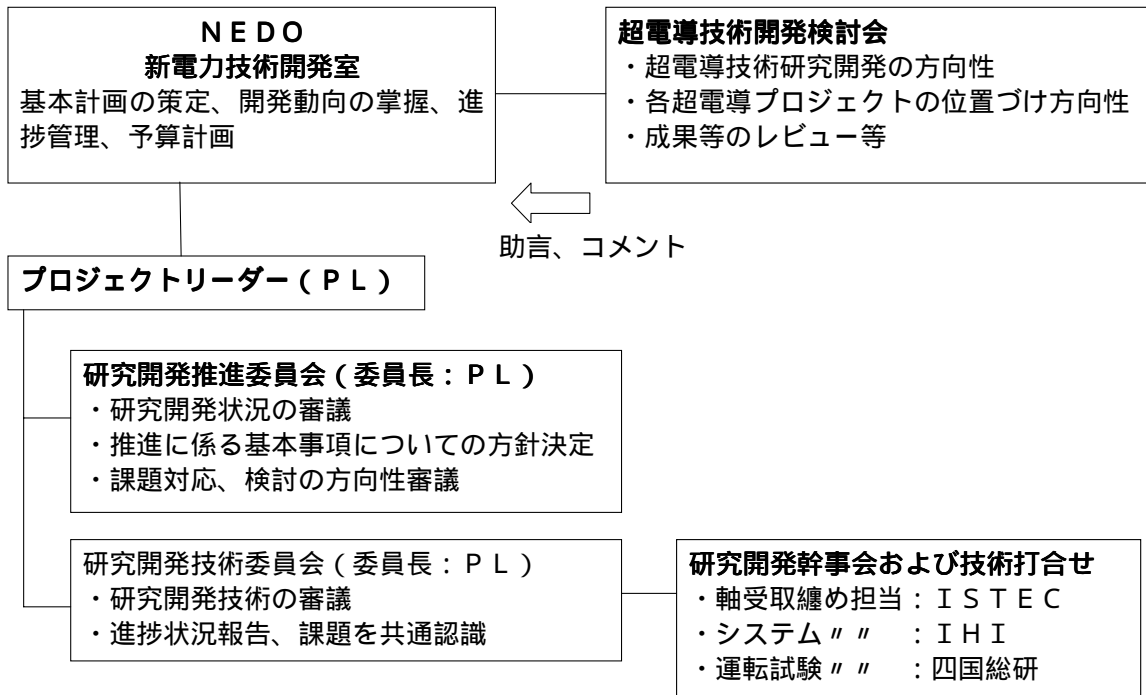
研究開発技術委員会

プロジェクトの開発推進のため、再委託者の取り纏め担当に随時集まってもらい、進捗状況を報告し、課題等を共通認識し、今後の実施方針を検討する。

研究開発幹事会及び技術打ち合わせ

本プロジェクト内での課題解決に向け、適宜頻繁に ISTE C 及び再委託先の幹事または関係するメンバーが集まり、ディスカッションを行っている。

これによりタイムリーに対策を打ってきている。



運営管理の体制図

添付資料：各委員会の活動状況（平成 14 年 2 月現在）

(1) 研究開発推進委員会

年月日	主な議題等
13.2.16	<ul style="list-style-type: none"> ・平成 12 年度の研究開発成果と進捗状況 ・平成 13 年度の実施計画
14.2.28	<ul style="list-style-type: none"> ・平成 13 年度の研究開発成果と進捗状況 ・平成 14 年度の実施計画
14.10.17	<ul style="list-style-type: none"> ・平成 14 年度の研究開発成果と進捗状況 ・今後の研究予定 ・中間評価について

(2) 研究開発技術委員会

年月日	主な議題等
12.12.4	<ul style="list-style-type: none"> ・平成 12 年度の研究開発状況 ・研究予算削減への対応について
13.4.16 (幹事会)	<ul style="list-style-type: none"> ・10kWh 級運転試験装置の基本仕様 ・10kWh 級超電導軸受の作製手順 ・100kWh 級超電導軸受の研究の進め方
13.10.1 (幹事会)	<ul style="list-style-type: none"> ・10kWh 級超電導軸受の研究状況と今後の進め方 ・100kWh 級フライホイールの概略設計
13.10.22	<ul style="list-style-type: none"> ・平成 13 年度の研究開発状況 ・今後の研究開発の方向性とスケジュール
14.2.18 (幹事会)	<ul style="list-style-type: none"> ・平成 13 年度の研究開発成果 ・平成 14 年度の計画
14.3.19 (幹事会)	<ul style="list-style-type: none"> ・10kWh 級超電導軸受の性能予測 ・10kWh 級運転試験内容について
14.4.2 (幹事会)	<ul style="list-style-type: none"> ・超電導フライホイールの開発課題と対策 ・超電導フライホイールの開発シナリオ
14.4.16 (幹事会)	<ul style="list-style-type: none"> ・データセンターの無停電電源市場 ・200mm フライホイール本体開発の検討
14.7.18	<ul style="list-style-type: none"> ・平成 14 年度の研究開発状況 ・今後の研究予定 ・中間評価について
14.9.5 (幹事会)	<ul style="list-style-type: none"> ・10kWh 級運転試験装置用超電導軸受の冷却について ・100kWh 級超電導軸受の寸法について
14.11.8 (幹事会)	<ul style="list-style-type: none"> ・中間評価対応について ・10kWh 級超電導軸受の作製の問題点と対策
14.12.9 (幹事会)	<ul style="list-style-type: none"> ・10kWh 級運転試験装置用の超電導軸受作製について
14.12.24 (幹事会)	<ul style="list-style-type: none"> ・10kWh 級運転試験装置用超電導軸受の冷却について
15.1.14 (幹事会)	<ul style="list-style-type: none"> ・10kWh 級運転試験装置用クライオスタット部分モデルの製作について

3. 情勢変化への対応

3.1 効率的運営による実施内容の変更

予算節約の観点より効率的運営を目指し、以下の2点を変更・実施することになった。

回転損失の目標(2mW/N)は回転損失測定装置を製作して測定するのを止めて、回転損失の解析手法を高度化して解析により達成を目指すことにする。

軸受解析手法の統合化は調査の結果、世の中にある載荷力等個々の解析手法がまだ一定のレベルに達していないため本フェーズで統合化するのは時期尚早と判断し、既存の解析手法を改良する等して、評価していくこととした。

3.2 中間目標追加による基本計画の変更

中間評価を実施するにあたり、中間目標を以下のとおり、追加設定することになった。

超電導軸受要素技術においては超電導軸受にて載荷力密度10N/cm²、載荷力当たりの回転損失2mW/Nを達成するための方策を提示することを中間目標とする。

超電導軸受応用技術においては10kWh級運転試験装置の構造図及び軸受制御技術の課題と対策を提示することを中間目標とする。

3.3 早期実用化対応による基本計画の変更

本プロジェクトは将来の大型日負荷平準化用超電導フライホイールを目指し、その前々段階として開発を進め、その要素技術を波及効果として産業応用に使われることを期待してスタートした。一方、社会情勢の変化により研究開発の早期実用化への要求が高まったため、早期実用化のための課題検討、技術課題である軸降下対策に取り組むべく基本計画の変更を検討した。

変更内容

研究開発の目的

「本技術の産業分野等への早期実用化を図るための適用可能性と課題を明確にすることを目的とする。」を追加

研究開発の目標

「[最終目標] 特に、超電導フライホイールシステムの早期実用化に不可欠な軸降下抑制策の効果を10kWh級運転試験装置で検証し、実用化のための課題を明らかにする。」を追加。

4. 今後の事業の方向性

以下に本プロジェクトにおいて今後注力したい点を記載する。

4.1 載荷力

100kWh 級超電導軸受モデルを平成 15 年夏までに試作し、四国総研所有の載荷力試験機により試験・評価を過冷却等各種対策を盛り込みながら実施し、最終的に載荷力 10N/cm² の達成を目指す。

4.2 回転損失

現在の解析コード、解析モデルを更に改良し、平成 14 年度に提示した回転損失低減の各種方策を盛り込んで、最終的に 100kWh 級モデルでの数値計算により、回転損失 2mW/N の達成を目指す。

4.3 軸降下

引き続き、10kWh 級の回転損失試験機及び四国総研所有の載荷力試験機により、軸降下の特性試験及び軸降下低減試験を行い、その結果を 10kWh 級超電導軸受運転試験機に反映し、8 時間程度の運転時間における軸降下量を計測する。最終的に 100kWh 級超電導軸受において、産業応用等に実用化するための軸降下に関する課題を抽出する。

4.4 10kWh 級超電導軸受運転試験

平成 15 年夏までに 10kWh 級超電導軸受運転試験機を組立て、工場試験を実施した後、平成 15 年度末までに松山試験場に移設する。平成 16 年度始めより各試験を実施し、最後には解体し、超電導軸受等の部品に関する劣化状況を試験・評価する。最終的にシステムとして実用化するための課題を抽出・整理する。

5. 中間・事後評価の評価項目・評価基準、評価手法及び実施時期

平成 15 年度 中間評価実施予定

平成 17 年度 事後評価実施予定

・研究開発成果について

1. 事業全体の成果

主要な研究開発項目について総括的な成果を述べる。

(1) 超電導軸受要素技術

載荷力

超電導バルク体部の高品質化、過冷却化及び磁気回路の高磁場化により10kWh 級軸受モデルでは 目標の載荷力密度 10N/cm^2 を達成した。今後 100kWh 級モデルでもこれまでの成果を応用し、有効な過冷却法をさらに推し進めて目標値を達成する。

回転損失

10kWh 級軸受モデルでは 2.5mW/N まで達成することができた。100kWh 級モデルでは机上検討により 5.6N/cm^2 の載荷力条件で 2.3mW/N の値を求めることができた。考察の結果 渦電流を流れ難くするような永久磁石磁気回路の構造及び超電導バルクの配置方法が重要であることが分かり、今後この検討に注力し、解析モデル上で目標 (2mW/N) 達成を図る。

軸降下

過冷却法、予加重法による軸降下を測定したところ 両者とも効果があることが分かり、3 時間後で $100\ \mu\text{m}$ 程度の軸降下が認められた。今後実用化に向け、更なる低減が期待できる次のような方策を推進する。

- ・初期冷却温度をより低い温度に過冷却した場合の軸降下
- ・載荷力保持開始後の温度低下による軸降下

(2) 超電導軸受応用技術

10kWh 級運転試験装置

載荷力、回転損失、軸降下の検討結果及び超電導軸受の温度解析結果等の統合・調整を図り、製作可能な構造図を提示することができた。また運転試験施設の青写真も作成することができた。今後 スケジュールを厳守して、世界初の 10kWh 級超電導フライホイール完成させる。

軸制振とフライホイール本体

軸制振の課題は(a)ロータの弾性振動を安定化させ、ロータ側に発生する渦電流による損失(発熱)を低減すること並びに(b)フライホイール本体の高速回転時アンバランス変動であることが分かった。

課題(a)の方策として非線形ゼロパワー制御と安定化フィルターを用いた結果、高速まで安定した特性を示した。

課題(b)の方策として大型フィラメントワインディング成形条件の最適化及び大型マルチリング製作技術の開発を実施し、高速回転が可能な均一な品質のフライホイールを製作する技術を開発することができた。

以上により中型回転制御試験装置を用いて 12,000rpm までの回転を達成した。今後 AMB 等の調整を図り、更なる高回転化を目指す。

(3) 技術調査

超電導、非超電導に関わらず、フライホイール関連の国内外動向調査を行った。(添付資料 P.23-25 参照) 米国、欧州、日本と広く開発が行われている。特に超電導フライホイールの開発は、米国、ドイツ、日本が熱心である。

また、フライホイール事業の市場調査を行ったところ、ここ数年間で急速に市場が拡大していることが分かった。

さらに超電導フライホイールの当面の適用性を調査した結果、今後成長が見込まれるデータセンターUPS が有力であることが分かった。(添付資料 P.113-121 参照)

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 超電導軸受要素技術

2.1.1 載荷力向上技術

(1) 軸受用Y系超電導バルクの開発

a. 10kWh級超電導軸受用Y系超電導バルクの開発及び評価

10kWh級運転試験

装置の超電導軸受に対応した、Y系超電導バルクの形状、寸法等を検討し、外径123.2mm、内径93.2mm、高さ60mmの円筒を周方向に8等分割した瓦形にすることとした。瓦形Y系超電導バルクの厚さ

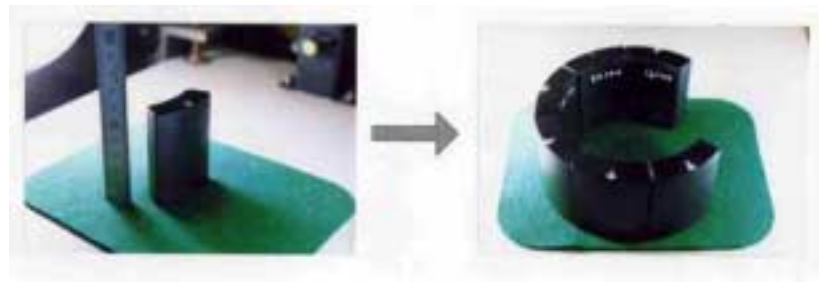


図2.1.1(1)-1 10kWh級軸受用瓦形Y系超電導バルクの外観¹⁾

方向がc軸となるように結晶成長させることにより、これらを円筒状に組んだときc軸が径方向を向くようにした。軸受用瓦形Y系超電導バルクの外観を図2.1.1(1)-1に示す¹⁾。この超電導バルクには、性能の経時変化予防、機械的特性改善及び長期使用時の耐久性向上を目的に対策として、エポキシ系樹脂の真空含浸処理を施した。

軸受用瓦形Y系超電導バルクの軸受への適用性及び健全性を評価するため、液体窒素温度における捕捉磁場分布等の測定を行った。一般的に、捕捉磁場の値が大きく、分布形状が一山で対称なものほど、性能の良い超電導バルクとされる。これまで約50個の瓦形Y系超電導バルクについて測定した結果、捕捉磁場の最大値は0.4～0.7Tで、概ね良好な分布形状を示した。

10kWh級運転試験装置用超電導軸受の作製に先立ち、比較的良好な捕捉磁場分

布を示した瓦形Y系超電導バルク8個を選定しこれを円筒状に配置して、10kWh級超電導軸受モデルの固定子を作製した。超電導バルク外表面と永久磁石磁気回路内周面とのギャップは1.8mmである。この軸受モデル固定子は、「d. 超電導軸受試験技術」における載荷力及び回転損失評価試験に供された。

10kWh級運転試験装置用超電導軸受固定子は、基本的には上記軸受モデルを軸方向に5段積み重ねた形となる。すなわち、8個の瓦形Y系超電導バルクを円周上に配置したものを、さらに5段積み重ねることにより（計40個の超電導バルクで）構成される。現在、瓦形Y系超電導バルクの準備と、同軸受固定子の構成、組立て方法等の検討を進めているところである。

b. 100kWh級超電導軸受用Y系超電導バルクの開発及び評価

100kWh級フライホイール用超電導軸受に関しては、本プロジェクトにおいては、

同軸受を軸方向に縮小した軸受モデルについて作製・評価することとしている。そこで、先ず100kWh級超電導軸受モデルに対応した、Y系超電導バルク単体の試作・評価を行った。寸法、形状等を検討し、外径208mm、高さ100mmの円筒を、周

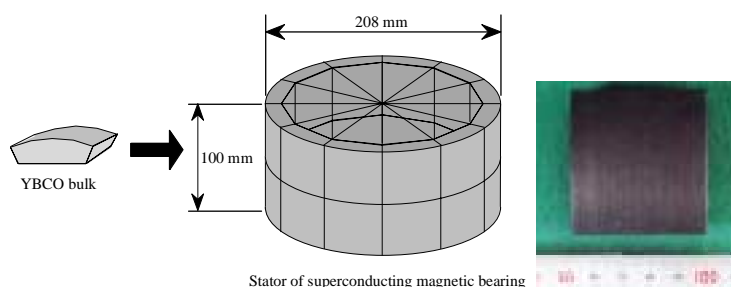


図2.1.1(1)-2 100kWh級軸受用蒲鉾型Y系超電導バルク²⁾

方向12等分割、軸方向2段積みで構成する、蒲鉾型Y系超電導バルクを試作した（図2.1.1(1)-2）²⁾。これについても、10kWh級と同じ理由で、エポキシ系樹脂の真空含浸処理を行った。その後、液体窒素温度における捕捉磁場分布を行った結果、最大値が0.82～0.86Tのほぼ一山という良好な分布が得られた（ホール素子と最頂部のギャップ：1mm）。測定結果の一例を図2.1.1(1)-3に示す²⁾。

今後、さらに100kWh級超電導軸受の寸法等を検討し、同軸受モデルを試作して、「d. 超電導軸受試験技術」での試験・評価に供する予定である。

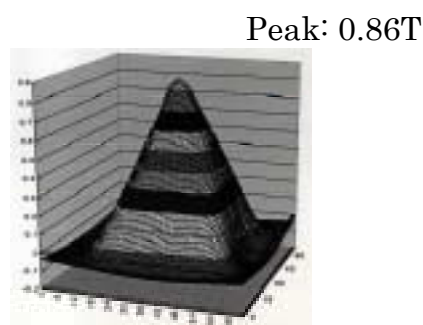


図2.1.1(1)-3 100kWh級軸受用超電導バルクの捕捉磁場分布²⁾

(2) RE系超電導バルクの超電導軸受への適用可能性研究

低酸素分圧下で合成したSm系、NEG (Nd-Eu-Gd) 系等のRE系超電導バルクはY系よりも優れた超電導特性を示すことから、超電導軸受へ適用することにより載

荷力向上が期待できる。また、RE系超電導体は磁場-臨界電流密度特性にピークを有することから、軸降下抑制にも威力を発揮するものと思われる。そこで、軸受への適用を目指し、大型のRE系超電導バルクについて合成技術の研究開発を実施した。これらの系の超電導バルクはY系に比べ作製時にクラックが入り易いため、バルクサイズを段階的に大きくしながら大型化のための技術確立を進めた。

Sm系バルクは、Sm系123相、Sm系211相、Pt、Ag₂Oの各粉末を混合して円柱状にプレス成形し前駆体を作製した。これをO₂分圧1%のAr気流中で溶融法により結晶成長を行った。合成したバルク体は酸素気流中300~400 でアニール熱処理を行った。その後、樹脂と金属リングで補強をし、77Kの静磁場着磁により捕捉磁場分布の評価を実施した。

38サイズで条件の最適化を行った結果、単一ピークの円錐状の磁場分布が得られ、健全な擬似単結晶が合成できていることが確認できた。繰り返し合成によるバラツキ評価では、バルク表面で1.4~1.6Tの捕捉磁場が得られることがわかった。

これは、同寸法のY系超電導バルクに比べて約4割高い値であることが確認された。

次に、サイズを60として大型化により生じる問題点の有無を調査した。強度確保の点から、酸化銀(Ag₂O)の添加量を

38サイズでの15wt%から20wt%へ増加して合成を行った。その結果、大型化により合成時にSm123相のSmとBaの置換が起こりやすくなり、試料中央部の臨界温度T_cが大きく低下する問題のあることが判明した。種々の検討の結果、合成時の溶融温度を高くするか溶融時間を長くすることで38バルクと同等の高いT_cが得られることがわかった。これにより、バルク表面で2.07Tの捕捉磁場磁場分布が得られ(図2.1.1(2)-1)、60サイズについても健全な擬似単結晶の製造プロセスに目途を付けることができた。

NEG系バルクについては名古屋大学と共同して行った。出発組成のNd:Eu:Gd比率が1:1:1となるように、NEG123相、Nd422相、Eu211相、Gd211相、Pt、CeO₂、Ag₂Oの各粉末を混合し、Sm系と同様にO₂分圧1%のAr気流中で溶融法により合

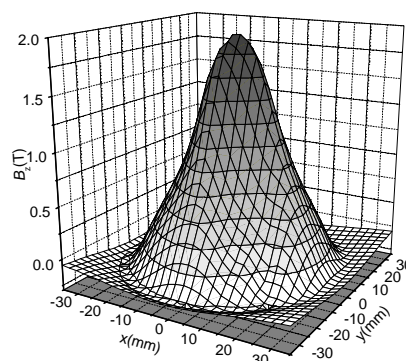


図2.1.1(2)-1 60Sm系バルクの捕捉磁場分布 $B_{\max} = 2.07 \text{ T}$ (77K)

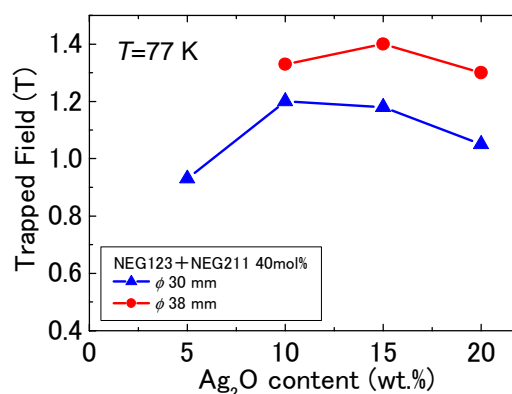


図2.1.1(2)-2 NEG系バルクの捕捉磁場の銀添加量依存性

成した。18バルクで超電導特性の評価を行った結果、高い臨界温度 $T_c=95\text{K}$ と臨界電流密度 $J_c = 60,000 \text{ A/cm}^2$ (77K, 0T)を得られることが確認できた。

NEG系バルクはSm系に比べて合成が難しく、報告されている最大の径は 22 となっている。径を段階的に大きくしながら合成を行い、現在のところ、38までクラックを生じることなく擬似単結晶を成長させることに成功している。38バルクについて捕捉磁場分布を測定したところ、Sm系と同様な単一ピークの磁場分布が得られ、NEG系バルクの健全性が確認できた。試料表面における捕捉磁場としては、38バルクで1.4T(77K)、28バルクで8.2T(20K)が得られている。

また、バルク径を増加させたときの捕捉磁場の Ag_2O 添加量依存性を調べた(図2.1.1(2)-2)。径が30から38に増加すると、捕捉磁場が最大となる最適な Ag_2O 添加量が高濃度側へシフトすることがわかる。これより、更なる大径化に向けて材料強度の点で必要になるとと思われる銀添加量の増加が捕捉磁場についても有利な傾向にあることがわかった。

(3) 磁気回路の高磁場化及び最適化の研究

超電導磁気軸受の載荷力は、永久磁石の発生する磁場がバルク超電導体にトラップされ、そのピンニングにより発現する。載荷力の強度は永久磁場の強度とその勾配に比例する。そのため載荷力向上には、永久磁石の磁場強度と強度勾配を最適化することが重要である。

検討対象の磁気回路形状は10kWh、100kWh級に適用する公称寸法 180、300の2種類であり、それぞれについて最適化の検討をしているが、以下300磁気回路の検討結果を中心に述べる。手法としては磁場解析シミュレーション計算後、磁気回路モデルを作製してその磁気回路性能を確認検証している。

まず、磁気回路シミュレーションについて述べる。永久磁石材質は減磁界、耐熱性を考慮してNEOMAX-44H材質を決定選定した。磁場強度に起因する主パラメータは磁石段積み数、磁石径方向長さ、ヨークと磁石との寸法比等であり、これらについて表2.1.1(3)-1の各条件で磁場シミュレーションを実施した。解析に用いた300磁気回路のモデル図の1例を図2.1.1(3)-1に示す。この結果に基づき、表2.1.1(3)-2の磁気回路を作製することとした。

表2.1.1(3)-1 300磁気回路シミュレーション解析条件

パラメータ	計算条件
磁石段積み数	5, 6, 7
磁石径方向長さ (mm)	20, 25, 30
ヨークと磁石との寸法比 (%)	10, 15, 20
磁気回路部分全厚み (mm)	98

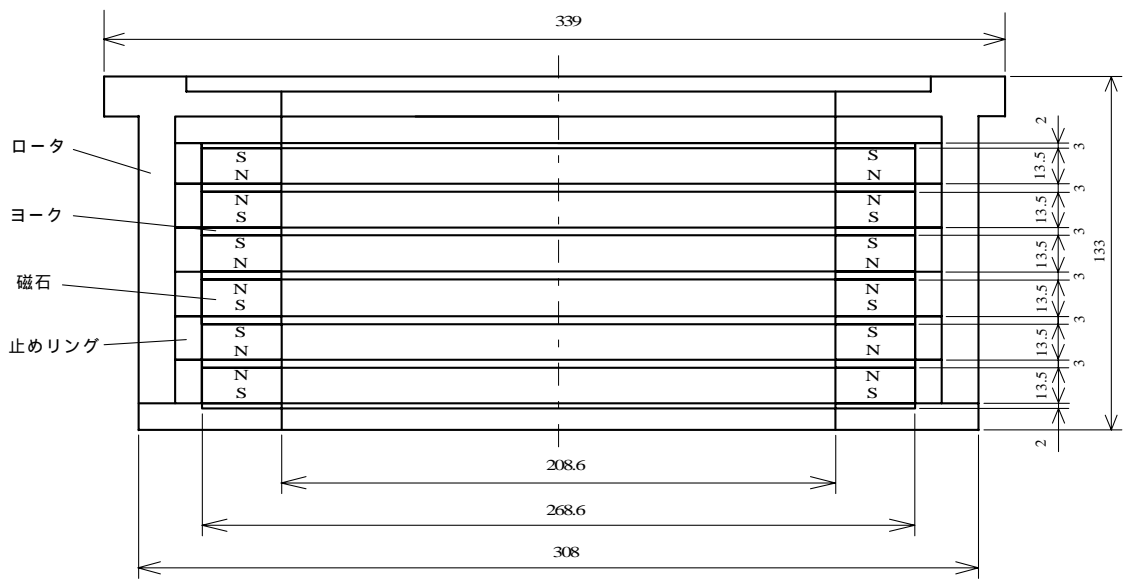


図 2.1.1(3)-1 解析に用いたモデル図の 1 例

表2.1.1(3)-2 300磁気回路仕様

パラメータ	仕様
磁石段積み数	6
磁石径方向長さ (mm)	30
磁石厚み (mm)	13.5
ヨーク厚み (mm)	3.0
ヨークと磁石との寸法比	0.1818

表2.1.1(3)-3 300磁気回路の磁場強度

測定位置	磁場強度 (T)
第1ピーク	0.71
第2ピーク	1.20
第3ピーク	1.11
第4ピーク	1.12
第5ピーク	1.07
第6ピーク	1.14
第7ピーク	0.66

表2.1.1(3)-3に各ピークの磁場強度の測定結果をまとめた。本磁場測定により最大磁場として1.1から1.2Tの磁場強度が得られ、磁場解析シミュレーション結果の妥当性を確認できた。本仕様にて作製した磁気回路を図2.1.1(3)-2に、実測磁場の測定例として第2ピークの測定結果を図2.1.1(3)-3に示す。



図2.1.1(3)-2 300磁気回路
(X - 1315)

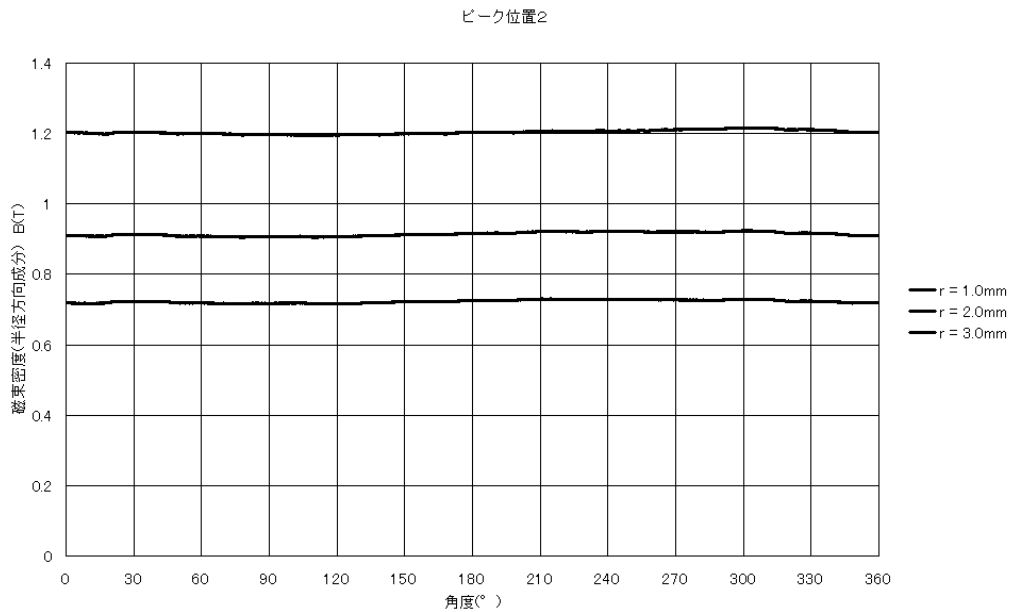


図2.1.1(3)-3 300磁気回路 (X - 1 3 1 5) 磁場測定

参考文献

- 1) K. Matsunaga, M. Tomita, N. Yamachi, K. Iida, J. Yoshioka and M. Murakami: “ YBCO bulk of the superconducting bearings for a 10 kWh flywheel”, Supercond. Sci. Technol. 15 (2002) 842.
- 2) K. Matsunaga, N. Yamachi, M. Tomita, M. Murakami and N. Koshizuka: “ Characterization of YBCO bulk superconductors for 100 kWh flywheel”, submitted in Physica C, Proc. ISS2002.
- 3) (財)国際超電導産業技術研究センター: 「平成13年度 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務報告 フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」, (2002).

2.1.2 回転損失低減技術

(1) 研究成果

平成12年度から平成13年度にかけて 180磁気回路回転損失低減のため磁場バラツキ低減に関する研究を実施した。平成13年度には磁場バラツキの大幅な低減化が期待できる一体磁石型リングの製作を新たに試験してそれをを用いた磁気回路の作製についても合わせて実施している。さらに10kWh運転試験装置の仕様を満足するため、磁気回路に採用する部材の機械強度も考慮した磁気回路を作製しその磁気特性を確認検証している。

10kWh試験機使用に耐えうる機械強度確認検討の為、平成12年度一般仕様(左)と平成13年度機械強度考慮仕様(右)をあわせて比較検討している。

ロータ材質	SUS304N2	SNCM-447
ヨーク材質	SPCC	SS400
磁石リング厚入シロ	70 μm	200 μm

回転損失に影響する磁気回路の磁場バラツキ要因は以下の項目が考えられる。

- * 磁石素材の特性バラツキ
- * 磁石分割品の加工・寸法バラツキ
- * ヨーク材質特性・寸法バラツキ
- * 磁石止めリング・ホルダ寸法バラツキ
- * 分割磁石の組立てバラツキ（同軸ズレ・角度ズレ・分割時接着ギャップ等）
- * 着磁バラツキ
- * 焼きバメ・圧入後のヨーク材磁気特性変化

この中の要因として主要因と考えられる磁石素材のバラツキ低減、磁石分割に伴うバラツキ（磁石分割品の加工・寸法バラツキ、分割磁石の組立てバラツキ）について検討した。磁石素材バラツキについては素材内バラツキが大きいことが分かってきたので、素材作成用の専用のプレス成型金型を設計・作製した。プレス成型金型については分割磁石形状（12分割品）が切り出して作製できる角型素材成型金型及び12分割を組立て後の大型リング形状が得られるリング一体成型金型の2種類の金型を設計・作製した。また磁気回路の加工及び組立て方法についても専用の組立てジグを考案して加工、組立てバラツキの低減化を検討した。

磁気回路の形状については300の磁気回路検討と同様に磁石寸法、段積み数、磁石とヨークの寸法比等をパラメータとして最適磁気回路構成を算出し実際の磁気回路作製によりその磁気回路を検証することにした。

a. 一体リング磁石の作製

従来大型のリング磁石は作製困難であり、台形セグメント状の磁石を接着したのちに、リング形状に内外径加工をして磁気回路用に供していた。この製法では磁石バラツキの影響と磁石接着部分の磁場低下が避けられない。特に接着剤混在による磁場低下は急峻であり、回転損失に大きく影響することが予想される。今回プロジェクトにおいて新たにこの一体成形磁石の工程について、一体専用金型を設計製作してリング磁石を作製する事を検討した。この大型成形品をヒビ、割れ等なく高密度に焼結できる製造プロセスをトライした結果、以下のような180磁気回路用一体成形リング磁石が作製できた。（図2.1.2-1）



図 2.1.2-1 180mm 磁気回路用リング一体磁石の焼結体写真

作製したリング磁石のリング素材のバラツキを見るため、上下面の円周方向 8ヶ所、計 16ヶ所の焼結密度と磁気特性を測定した。焼結密度は 7.57 から 7.60 と理論密度 7.60 の 99.6～100%と全ての抽出サンプル磁石において高い焼結密度が得られた。磁気特性についても $\pm 1\%$ の極めて均一な磁気特性の磁石が得られた事が明らかである。

b. 180 磁気回路の磁場分布

平成 13 年作製した機械強度特性を考慮した 180 磁気回路の仕様を表 2.1.2-1 にまとめる。使用した磁石材質は全て NEOMAX-44H である。表 2.1.2-2 に製作した 3 台の磁気回路の磁場バラツキを実測した測定データまとめた。代表例として図 2.1.2-2 に磁気回路 F の写真を示す。

表 2.1.2-2 に示すように平成 12 年度検討した通常プロセスによる 3 台の磁気回路の平均磁場バラツキは 3.9%であったが、平成 13 年度の専用金型、専用ジグ等により作製した 3 台については平均で 2.1%のバラツキとなりその比として約 1/2 (53.8%) に大幅に低減できた事になる。

一般に回転損失は磁場バラツキの 2～3 乗に比例する事が知られている。よって今回の検討結果から回転損失 W は従来の中から 1/4 (28.9%) または 1/8 (15.6%) と大幅に低減化出来たものと推定される。

表 2.1.2-1 製作磁気回路の仕様

磁気回路 D			
磁石仕様		ヨーク仕様	
段積み数	3 段 1 2 分割	段積み数	4 段
磁石高さ (mm)	1 5 . 0	中央ヨーク高さ (mm)	5 . 0
		端ヨーク高さ (mm)	2 . 0

磁気回路 E			
磁石仕様		ヨーク仕様	
段積み数	4 段 1 2 分割	段積み数	5 段
磁石高さ (mm)	1 2 . 2 5	中央ヨーク高さ (mm)	2 . 0
		端ヨーク高さ (mm)	2 . 0

磁気回路 F			
磁石仕様		ヨーク仕様	
段積み数	4 段一体リング	段積み数	5 段
磁石高さ (mm)	1 2 . 2 5	中央ヨーク高さ (mm)	2 . 0
		端ヨーク高さ (mm)	2 . 0

表 2.1.2-2 磁場測定データまとめ

	磁気回路	磁石段積み数	周方向 磁石分割	磁場バラツキ (%)	平均バラツキ (%)
H 1 3 年度	D	3	1 2 分割	- 3 . 0	2 . 1
				+ 2 . 2	
	E	4	1 2 分割	- 2 . 2	
				+ 1 . 5	
	F	4	一体リング	- 2 . 3	
				+ 1 . 4	
H 1 2 年度	A	3	1 2 分割	- 4 . 2	3 . 9
				+ 3 . 0	
	B	3	1 2 分割	3 . 4	
				+ 4 . 3	
	C	4	1 2 分割	4 . 1	
				+ 4 . 2	



図 2.1.2-2 磁気回路F (200× 126.8×89mm)

(2) 達成度

10kWh 級フライホイールに適用される 180 磁気回路を種々のパラメータ条件におけるシミュレーションを実施しその結果に基づき最適磁気回路を作製した。作製した磁気回路の磁場を測定した所、第 1 フェーズよりもかなり磁場強度バラツキの少ない磁気回路が作製できた。

なお本磁気回路の回転損失については別途記載されているように十分な回転損失低減が実現出来たことが確認できている。

(3) 今後の方策：

今回作製した 180 磁気回路は 10kWh 級運転試験装置の 1/5 のモジュールでの研究結果である。また実試験装置に組み込むに適合する条件についてはほとんど検討がされていない。よって今後は 10kWh 実試験装置に組み込む具体的諸条件を織り込んだ 5 モジュール分の実寸法での最適磁気回路を作製して、試験実機にて確認・検証する必要がある。

2.1.3 軸降下低減技術

超電導軸受(SMB)における磁束クリープによる軸降下の定量的分析を行った。また、軸降下低減対策として提案されている過冷却法、予荷重法、および両者を併用した場合の評価を行った。なお、今回報告の過冷却法は過冷却温度が一定の場合で、過冷却温度を下げる過冷却法の研究は今後行う予定である。

以下に、これまでの研究開発で得られた研究成果と目標に対する成果達成度を示す。

(1) 研究成果

a. 軸降下の特性把握

平成 12 年度に減圧式液体窒素過冷却装置を製作し、既存載荷力試験機で 10K までの過冷却試験が可能となった。その載荷力試験機を図 2.1.3-1 に示す。試験を行う超電導体部と永久磁石部は当初バルクレベルで行う予定であったが、実際の SMB で特性把握が可能となったため、直径 180mm 級の既存 SMB と本フェーズで製作した SMB で行った。本フェーズで製作した SMB の仕様を表 2.1.3-1 に示す。

以下に、本フェーズで製作した SMB の軸降下の特性試験結果を示す。軸降下量の測定ケースは、載荷力が 1,200N 一定、800N 一定、400N 一定の 3 ケースと、低減対策が対策無しをベースとして、過冷却 (10K) の有無と予荷重(載荷力最大値)の有無を組み合わせた下記 4 ケースの、計 12 ケースを行った。測定時間は 3 時間で行った。

対策無し (予荷重、過冷却とも無し)

過冷却有り (10K)

予荷重有り (予荷重が載荷力最大値 (1,823N))

過冷却法 (10K) と予荷重法(予荷重が過冷却 (10K) 時の載荷力最大値 (2,678N))との併用法

この試験結果を、載荷力と変位との関係、変位の時間変化、軸降下量の時間変化、対策案と 3 時間後の軸降下量について、図 2.1.3-2 ~ 5 にそれぞれ示す。軸降下および各対策の低減効果について、以下のことが確認できた。なお、他 SMB についても同様の試験を行った結果、各低減対策を含めて、軸降下の傾向は同様な結果を得た。このことから、以下に示す結果内容は軸受の仕様を変更しても反映できると判断できる。

- ・軸降下量は対策の有無にかかわらず、一定保持載荷力が大きいほど大きいことがわかった。
- ・過冷却法の効果は、一定保持載荷力が大きいほど軸降下の抑制効果が大きく、逆に一定保持浮上力が小さいと軸降下の抑制効果が小さいことがわかった。これは、超電導体温度が低いほど超電導体の特性が向上するためである。このことから、載荷力一定の条件では、超電導体初期冷却温度が低いほど軸降下量が低減できると推定できる。また、図 2.1.3-5 に 3 時間後の軸降下量を対策ごとに比較、図示しているが、過冷却無し時の最大載荷力に対して約 22%以上の載荷力で、過冷却法の方が対策無しに対して軸降下量を低減できている。
- ・予荷重法の効果は、一定保持載荷力に対する予荷重量が大きいほど (予荷重量に対する一定保持載荷力が小さいほど) 軸降下を抑制できることが確認できた。逆に一定保持載荷力に対する予荷重量が小さいと軸降下の抑制効果が小さいことがわかった。ただし、一定保持載荷力に対する予荷重量を大きく与えると軸降下

の方向が反転して軸上昇する状態があり、その状態は予荷重量を大きく与えるほど大きくなることが確認できた。これは、予荷重を与えると変位を予荷重法なしの場合と逆方向に操作することになり、超電導体外部の磁場変化の方向が逆転するため超電導体内に載荷力向上に寄与する成分とその逆方向の成分との遮蔽電流が混在するためと判断する。この両者が磁束クリープによってそれぞれ減衰することで、総和として軸降下や逆方向の軸上昇という現象として現れていると判断する。

- ・過冷却法と予荷重法を併用した場合には、過冷却すると超電導体のヒステリシスが弱まるため、ヒステリシス性を利用した予荷重法の効果も小さくなってしまい、併用による特徴的な効果は見られなかった。また、前述の予荷重法および予荷重法と過冷却法との併用では、軸降下低減を越えて軸上昇が発生し、軸降下と軸上昇との混在から複雑な挙動を示すことがわかった。
- ・対策無しおよび過冷却時の軸降下の時間変化は概ね時間の対数に比例する。しかし、予荷重を含んだ場合は上述のように軸降下の成分と軸上昇の成分とが混在するため単純な近似はできない。
- ・また、これまでの試験で得られた軸降下量には、超電導軸受自体の軸降下量だけでなく、試験機の温度特性、特に超電導軸受を支持するロッドの熱収縮の影響が含まれているのがわかった。従って、この影響を十分に低減し、より精度あるSMB自体の軸降下特性の把握が必要である。また、試験時間は現在3時間にとどまっており、各対策とも長時間での検証が必要である。
- ・この対策としては、冷凍機による過冷却が効果的である。このため、平成14年度に冷凍式過冷却装置を製作中であり、今後、精度ある軸降下特性の把握ができる見通しにある。

b. 軸降下低減対策の評価

軸降下低減対策として提案されている過冷却法（過冷却温度一定）、予荷重法、および両者を併用した場合について、3時間での軸降下の定量的な把握と、各対策の軸降下の低減効果を確認することができた。予荷重法および予荷重法と過冷却法との併用では、軸降下と軸上昇との混在から複雑な挙動を示すことがわかったため、より長時間の特性把握が特に必要である。過冷却法については、超電導体初期冷却温度が低いほど軸降下量が低減できることを確認できた。過冷却法での軸降下は、概ね載荷力保持時間に対数的に変化するため、載荷力保持後一定時間たった後はその降下量は非常に小さくなるといえる。

しかし、各対策後も3時間で100 μm 程度（800N一定保持）の軸降下が認められるため、長時間の運転を想定するシステムの軸降下低減対策としては、まだ改善が必要である。この改善策として今後、冷凍機式過冷却装置で特性把握試験を行うのが、載荷力保持開始（磁束トラップ）後に超電導体温度を低下させる方法の過冷却法試験である。この温度低下の効果についてはすでに発表されたものがあり、前

プロジェクトではこの手法により遮蔽電流密度の減衰に顕著な低減効果があることが確認されている⁽¹⁾⁽²⁾。この方法の過冷却試験は軸降下量がほぼゼロと、大幅な低減が期待できる。現在、この試験を行うため、冷凍機式過冷却装置(超電導体部)を製作中である。今後は冷凍式過冷却装置を用いて、

- ・初期冷却温度をより低い温度に過冷却した場合の軸降下
- ・載荷力保持開始後の温度低下による軸降下

について、特性把握および低減効果の比較・評価を平成15年度から実施する予定である。

(2) 目標に対する成果達成度

「軸降下の定量的分析および対策案とその有効性を評価する」との目標に対し、過冷却法(過冷却温度一定)、予荷重法、および両者を併用した対策の分析・評価を計画通り行った。また、軸降下量低減対策として非常に有望と思われる過冷却法について、特性把握と評価を行う準備が計画通り整ってきている。

参考文献

- 1) 船木和夫, 住吉文夫, 超伝導工学の基礎 多芯線導体, p.278, 産業図書
- 2) ISTEK, 新日本製鐵(株), 平成11年度 NEDO 委託業務成果報告書「高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発 高温超電導材の研究開発」, p.47

表 2.1.3-1 供試超電導軸受： 180mm 級ラジアル型超電導軸受

a . 平成 13 年度製作 超電導軸受用 永久磁石部の仕様

型番	使用永久磁石	段数	(PM+ヨーク) 寸法	ロータ材
磁気回路 E	NEOMAX-44H (周方向 12 分割)	4 段	外径： 160.0mm 内径： 126.8mm 高さ：H 59.0mm	<u>SNCM-447</u>

b . 平成 12 年度製作 超電導軸受用 超電導体部の仕様

使用超電導体	超電導体寸法	クイット材質	備考
Y 系超電導バルク (周方向 8 分割)	外径： 123.2mm 内径： 93.2mm 高さ：H 60.0mm	SUS304	樹脂含浸処理

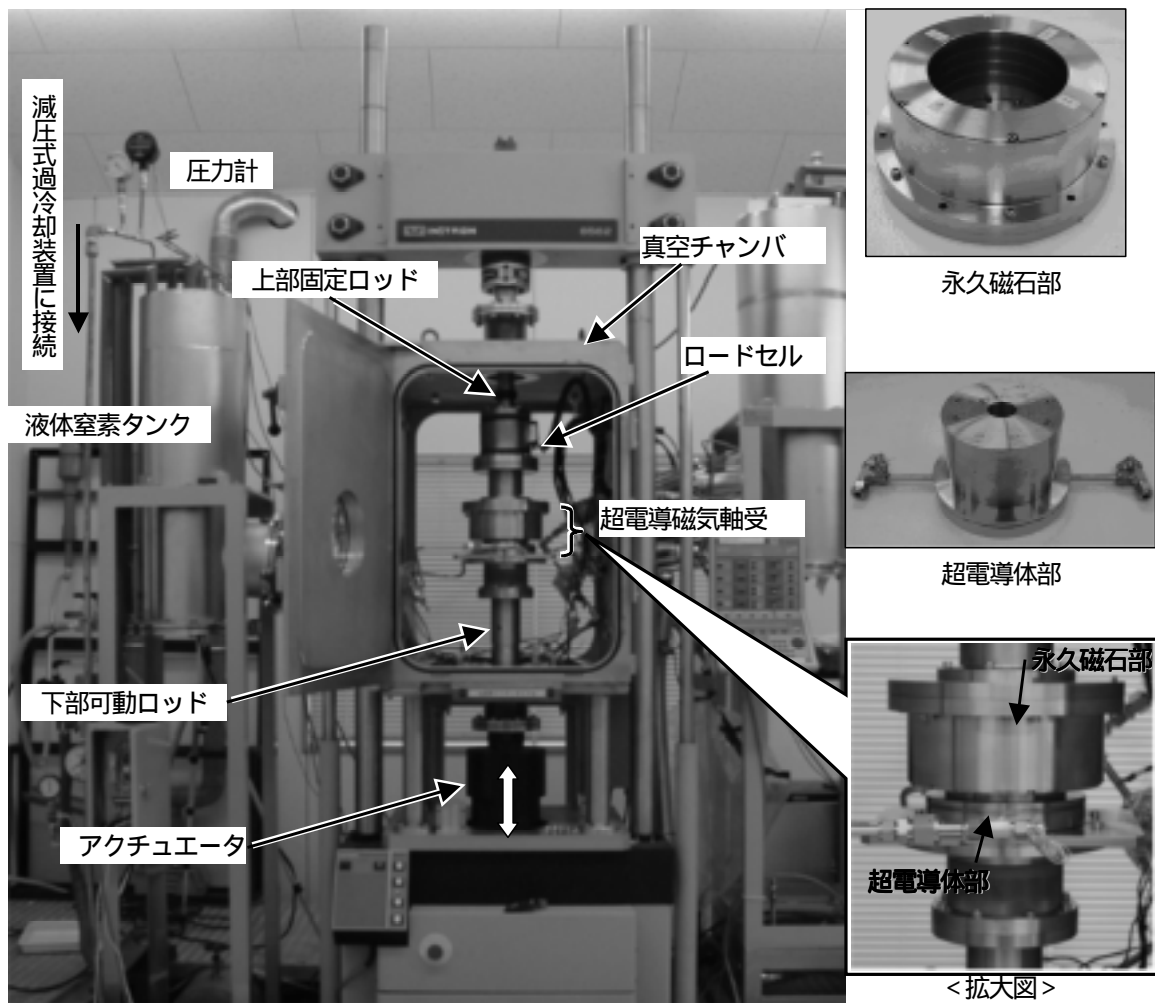


図 2.1.3-1 載荷力試験機

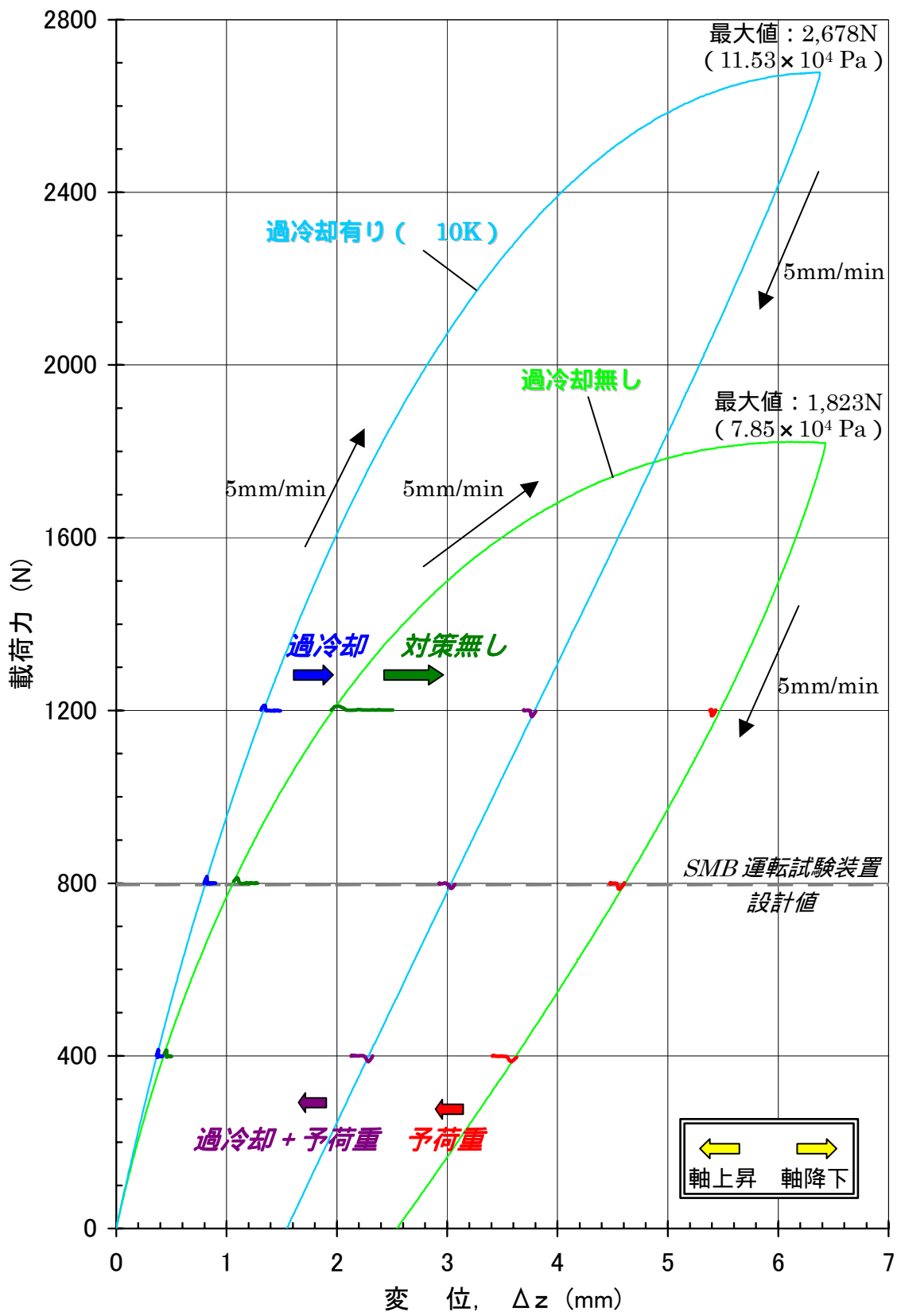
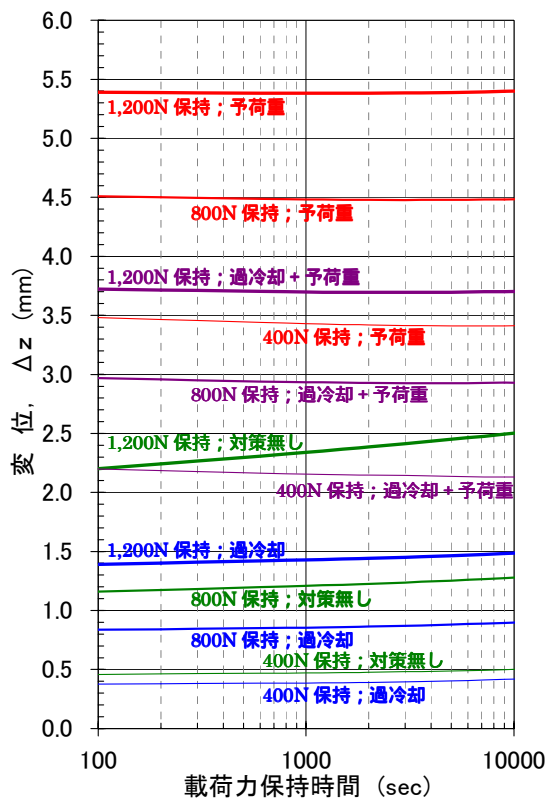
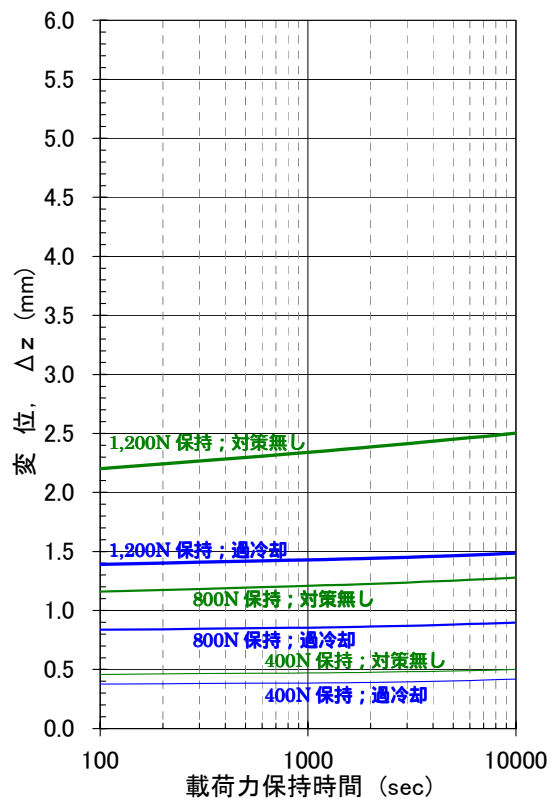


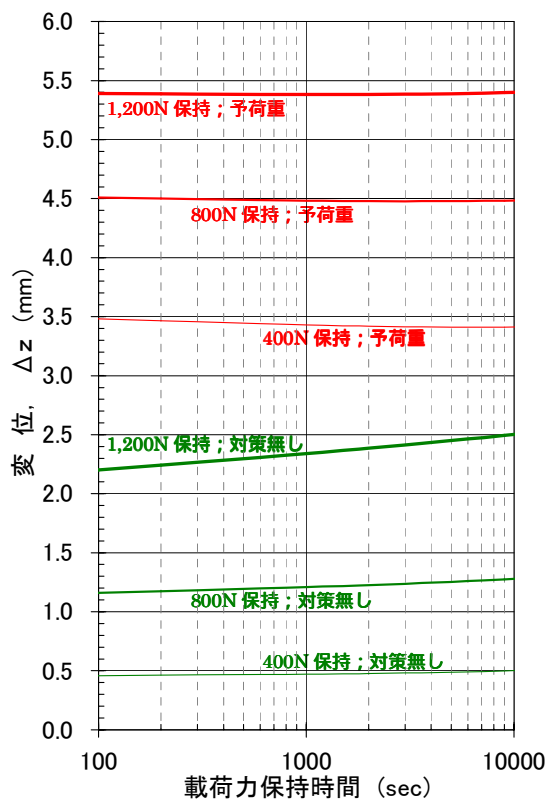
図 2.1.3-2 軸降下試験結果 (載荷力 - 変位、載荷力一定 3 時間保持)



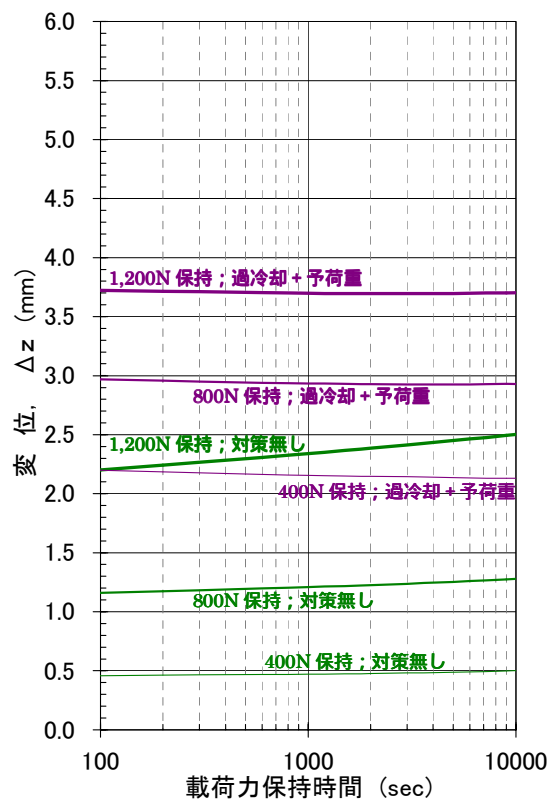
(1) まとめ



(2) 対策無しと過冷却

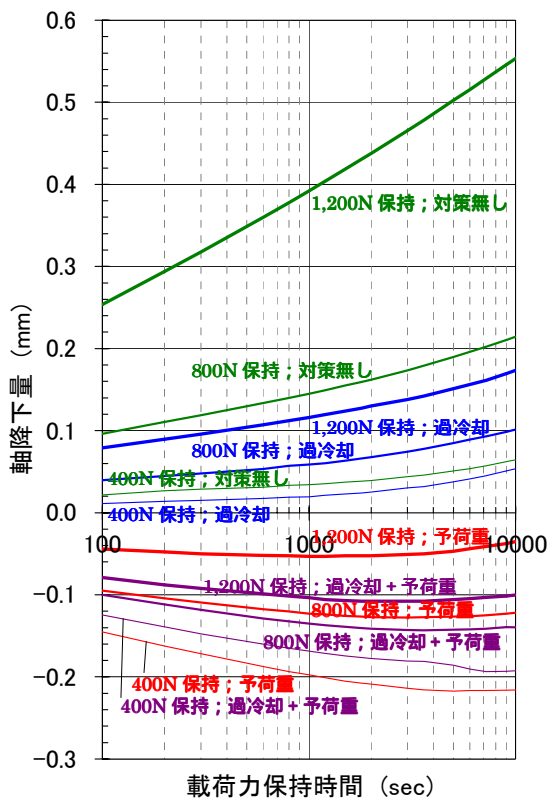


(3) 対策無しと予荷重

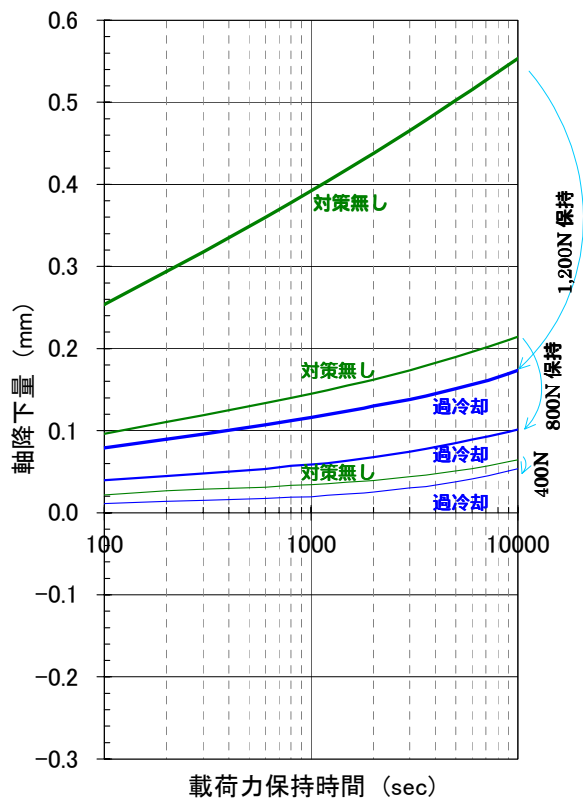


(4) 対策無しと過冷却 + 予荷重

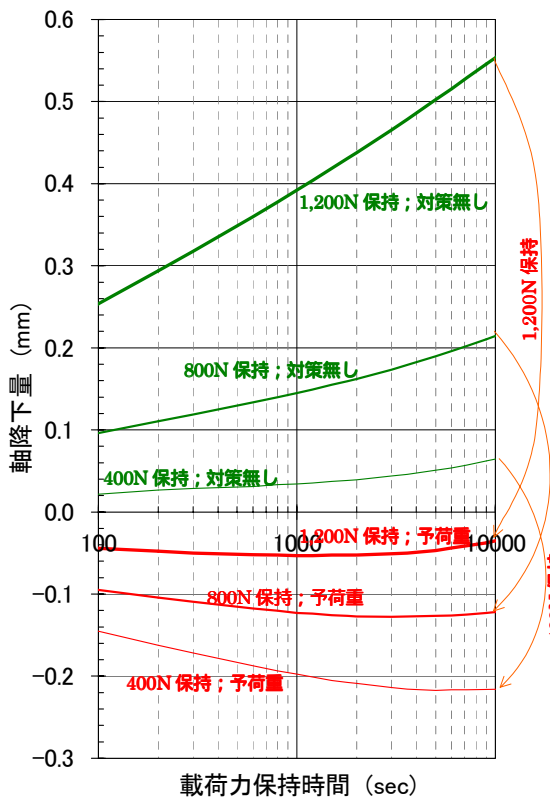
図 2.1.3-3 軸降下試験結果 (変位 - 載荷力保持時間 (対数))



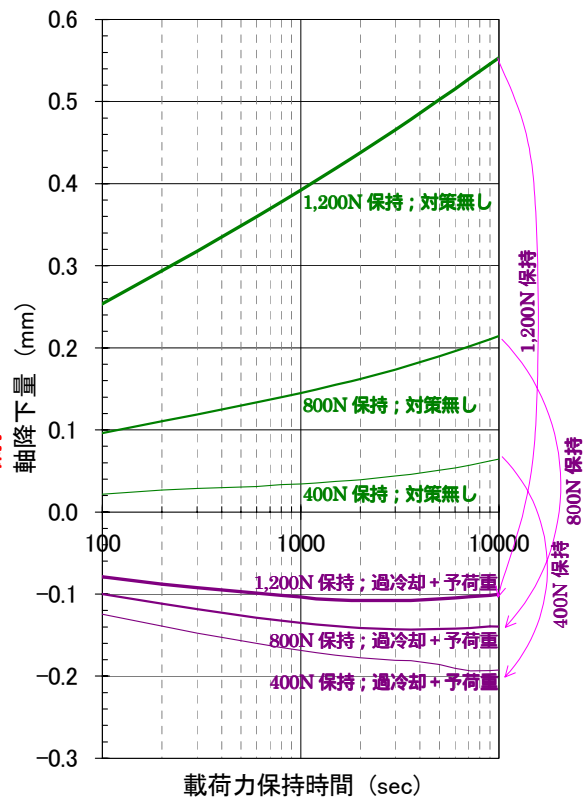
(1) まとめ



(2) 対策無しと過冷却



(3) 対策無しと予荷重



(4) 対策無しと過冷却 + 予荷重

図 2.1.3-4 軸降下試験結果 (軸降下量 - 載荷力保持時間 (対数))

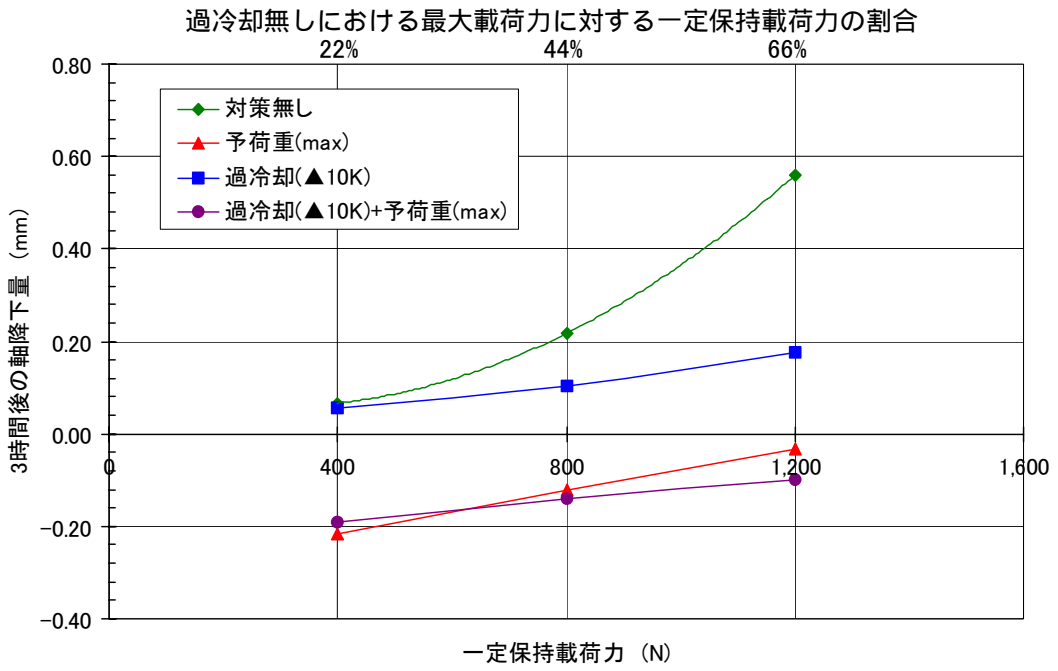
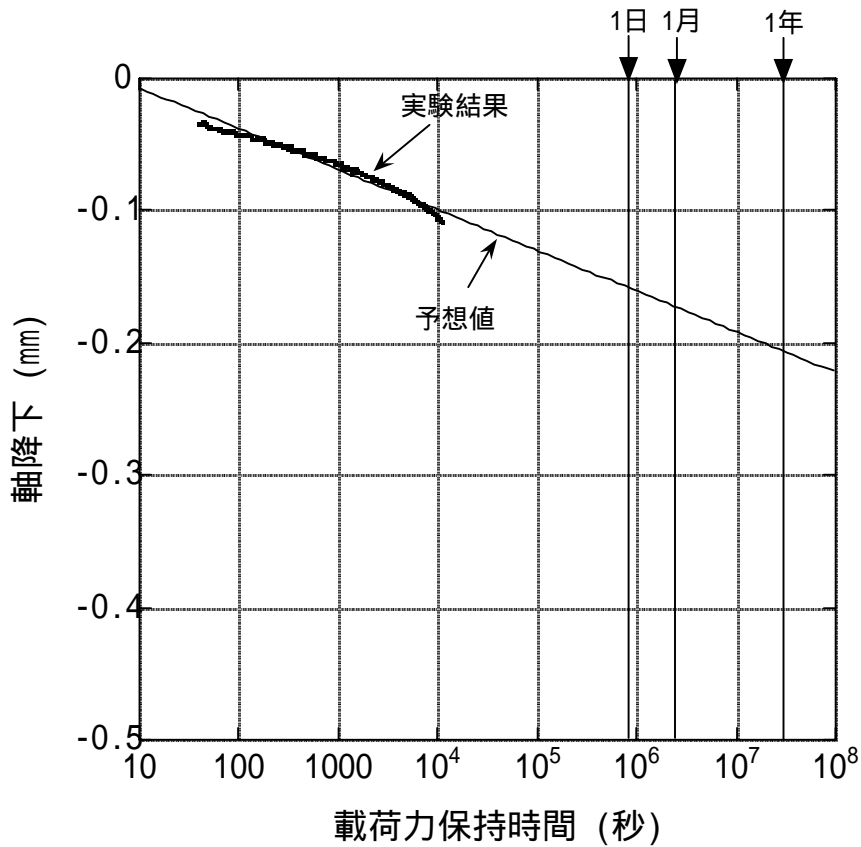


図 2.1.3-5 3 時間後の軸降下量

添付資料：軸降下線図

磁気回路Dの軸降下試験（対策無し、静止時）結果から、対数関数にて外挿した結果を参考までに示す。超電導フライホイールを実用化するためには、今後さらに予荷重法や過冷却法等の検討を進め、軸降下の抑制を図る必要がある。



2.1.4 超電導軸受試験技術

(1) 超電導軸受載荷力評価試験

平成 12 年度と 13 年度に製作した直径 180mm 級超電導軸受の特性試験を、既存載荷力試験機を活用して行い、載荷力と軸降下の評価試験を行った。また、100kWh 級システム用の直径 300mm 級超電導軸受の載荷力評価試験を行う準備を行った。

以下に、これまでの研究開発で得られた研究成果と目標に対する成果達成度を示す。

a. 研究成果

(a) 直径 180mm 級超電導軸受の載荷力評価試験

表 2.1.4-1 に示す平成 12 年度に試作した超電導体部と平成 12 および 13 年度に試作した永久磁石部 6 回路とをそれぞれ組み合わせた直径 180 ラジアル型超電導軸受について、既存の超電導軸受載荷力試験機（図 2.1.3-1）で載荷力評価試験を行った。

このうち 10kWh 級超電導軸受運転試験機用として、平成 13 年度に超電導体部と永久磁石部のギャップやロータ材質等を変更して試作した永久磁石部 3 回路（表 2.1.4-1，磁気回路 D、E、F）について載荷力試験を行った結果を以下に示す。

載荷力試験を行った結果を図 2.1.4-1 に示す。

永久磁石の段数（4 段、3 段）と載荷力特性の関係は、載荷力のピーク位置が 4 段での約 8.8mm に対して 3 段では約 6.4mm と、約 2.4mm 程度縮まり、4 段の磁気回路が 3 段のものより小さな変位で同等以上の載荷力と軸方向の剛性が得られた。これは永久磁石の段数の増加等による効果であると考えられる。

載荷力試験により得られた載荷力の最大値を表 2.1.4-2 に示す。載荷力密度は最大値で $7.50 \sim 7.85 \times 10^4 \text{Pa}$ （載荷力 1,743 ~ 1,823N）となり、運転試験機の設計値の $3.43 \times 10^4 \text{Pa}$ （ 0.35kgf/cm^2 ）を満足できる結果を得た。

しかし、本フェーズの 100kWh 級超電導軸受の目標値である $10 \times 10^4 \text{Pa}$ に達成していないため、載荷力密度の向上策として有効な過冷却法を活用し、▲10K の過冷却で確認試験を行った。その結果、載荷力密度は最大値で $10.55 \sim 11.53 \times 10^4 \text{Pa}$ （載荷力 2,450 ~ 2,678N）と、過冷却を行わない場合に対して 1.4 倍程度まで向上し、目標達成の可能性を得た。

また、磁束クリープによる軸降下試験を行った。このうち現時点の計画で超電導軸受運転試験機用に近い仕様の組み合わせケース（磁気回路 D）についての試験結果を以下に示す。試験は、運転試験機の設計値 $3.43 \times 10^4 \text{Pa}$ 相当の荷重 800N 一定保持で 3 時間の降下状態を測定した。この結果の変位の時間変化、軸降下量の時間変化を図 2.1.4-2、-3 にそれぞれ示す。

この結果、3 時間で、対策なしでは約 0.15mm の軸降下となったが、過冷却（10K）法採用で軸降下を約 0.05mm に抑制できた。この軸降下は概ね載荷力保持時

間に対数的に変化しているため、3 時間後からの軸降下は 10 時間経過で前述の約半分の軸降下量に低下すると考えられる。また、予荷重法を採用した場合は、3 時間で軸降下が約 0.05mm と低減できたが、軸上昇の後に軸降下に変化する結果となった。このため、システムへの運用を考えるには、まだ長時間試験での検証が必要である。なお、以上の結果は永久磁石が既存試験機に固定されて、回転しない状態での値である。

(b) 100kWh 級システム用直径 300mm 級超電導軸受の載荷力評価試験

直径 300mm (100kWh) 級超電導軸受の評価試験用として、既存載荷力試験機の流用を検討した結果、載荷力試験に活用できる見通しを得た。ただし、回転磁束ムラを模擬した非回転での模擬回転損失試験はスペース面等から不可能である。今後、現在製作中の直径 300mm (100kWh) 級超電導軸受の載荷力試験を平成 15 年度から行い、評価を実施する予定である。

中間評価の目標「100kWh 級超電導軸受で載荷力密度 $10 \times 10^4 \text{Pa}$ を達成する方策を提示すること」に対する対応を以下に示す。直径 180mm (10kWh) 級超電導軸受の載荷力特性を評価し、▲10K の過冷却によって過冷却を行わない場合の約 1.4 倍に当たる最大載荷力密度 $11.53 \times 10^4 \text{Pa}$ を達成することができた。また、永久磁石の磁場が超電導軸受運転試験装置用として予定されている磁石 NEOMAX-39SH と同等以下の NEOMAX-38H を用いた磁気回路 F においても ▲10K の過冷却によって最大載荷力密度 $11.05 \times 10^4 \text{Pa}$ と $10 \times 10^4 \text{Pa}$ 以上を達成した。このことから、方策として過冷却法を採用すれば、直径 180mm 級より好ましい磁気回路を選択する直径 300mm (100kWh) 級超電導軸受は、目標の載荷力密度 $10 \times 10^4 \text{Pa}$ を達成できると推定できる。

b. 目標に対する成果達成度

計画とおり、平成 12 年度と 13 年度に製作する直径 180mm 級超電導軸受の特性試験を行い、載荷力と軸降下量を評価できた。

中間評価の目標「100kWh 級超電導軸受で載荷力密度 $10 \times 10^4 \text{Pa}$ を達成する方策を提示すること」に対しては、中間評価(プレ評価)が早まったことと、100kWh 級超電導軸受の試験が平成 15 年度であることから、100kWh 級超電導軸受での提示には至らなかった。しかし、直径 180mm (10kWh) 級超電導軸受の載荷力特性を評価して、過冷却法を方策として提示することができた。

表 2.1.4-1 180mm 級超電導軸受用永久磁石部と超電導体部

(1) 平成 13 年度製作 超電導軸受用 永久磁石部の仕様

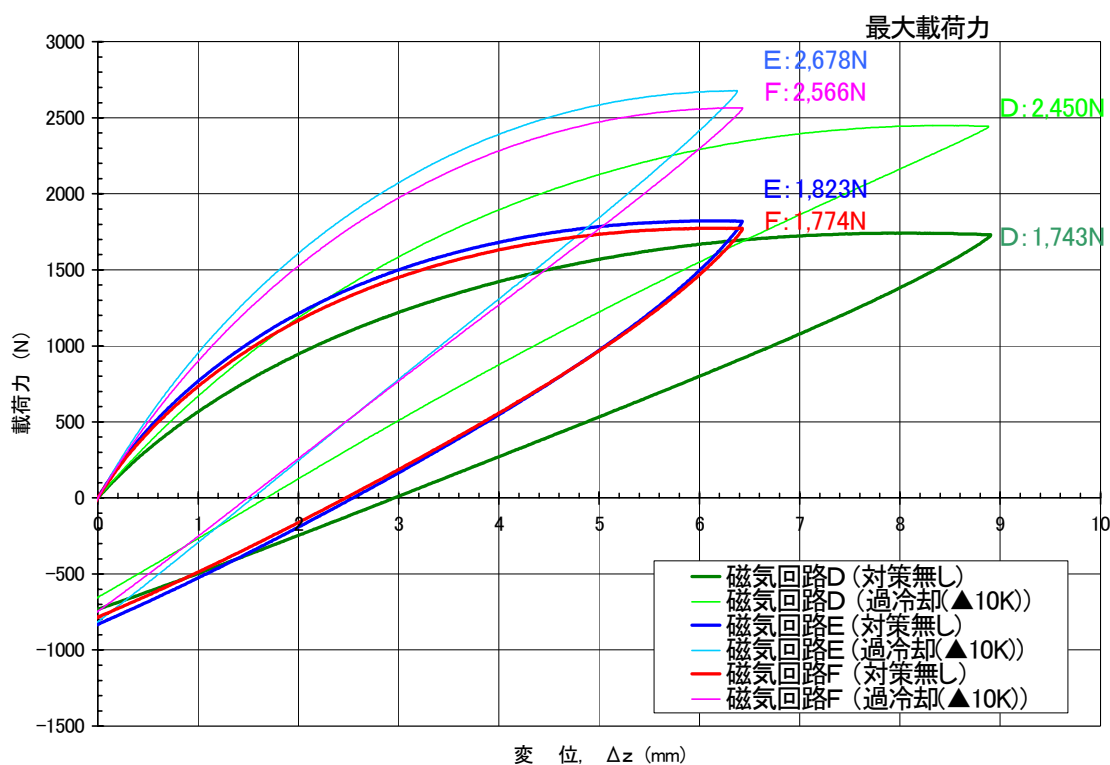
型番	使用永久磁石	段数	(PM+ヨーク) 寸法	ロータ材
磁気回路 D	NEOMAX-44H (周方向 12 分割)	3 段	外径： 160.0mm 内径： 126.8mm 高さ： H 59.0mm	SNCM-447
磁気回路 E		4 段		
磁気回路 F	NEOMAX-38H (周方向一体型)			

(2) 平成 12 年度製作 超電導軸受用 超電導体部の仕様

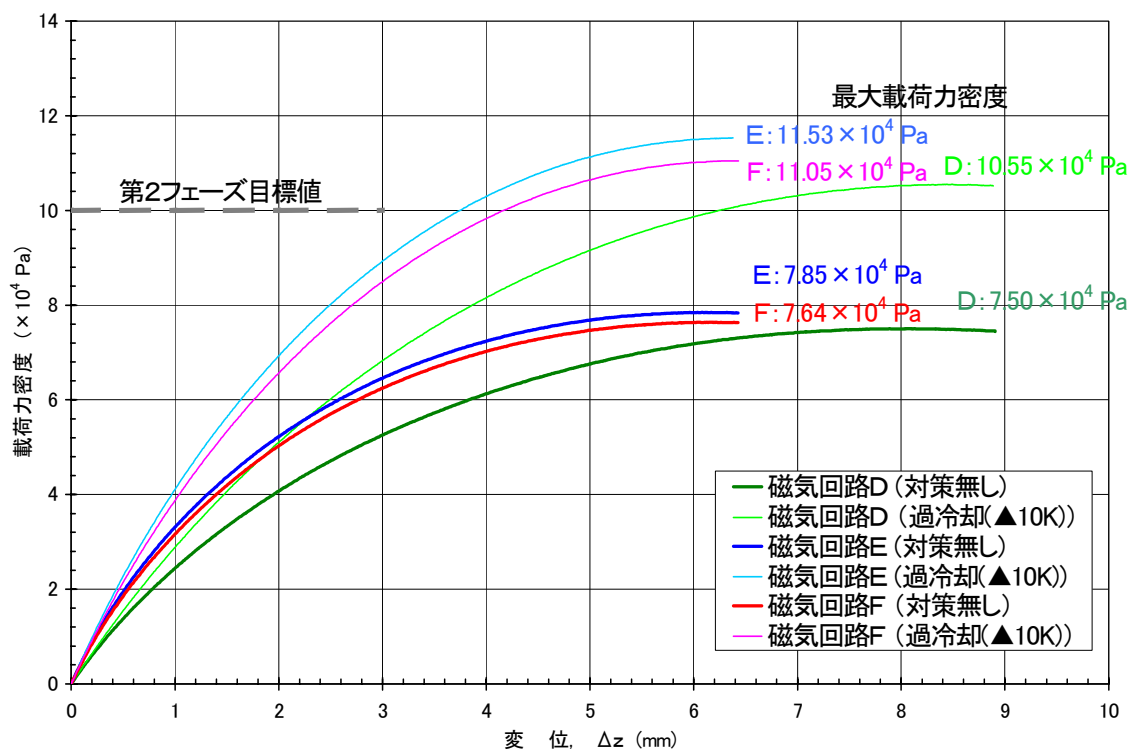
使用超電導体	超電導体寸法	クイックアウト材質	備考
Y 系超電導バルク (周方向 8 分割)	外径： 123.2mm 内径： 93.2mm 高さ： H 60.0mm	SUS304	樹脂含浸処理

表 2.1.4-2 180mm 級超電導軸受の最大載荷力試験結果(移動速度: $v=5\text{mm/min}$)

使用超電導体部	使用永久磁石部		最大載荷力 (最大載荷力密度) 括弧 [] 内は 10K 過冷却した場合
	型番	段数	
平成 12 年度製 Y 系超電導バルク (周方向 8 分割)	磁気回路 D	3 段	1,743 N (7.50×10^4 Pa) [2,450 N (10.55×10^4 Pa) : 10K]
	磁気回路 E	4 段	1,823 N (7.85×10^4 Pa) [2,678 N (11.53×10^4 Pa) : 10K]
	磁気回路 F	4 段	1,774 N (7.64×10^4 Pa) [2,566 N (11.05×10^4 Pa) : 10K]



(1) 载荷力



(2) 载荷力密度

図 2.1.4-1 平成 13 年度製 PM 部 (D,E,F) での载荷力試験結果
(移動速度: $v=5$ mm/min)

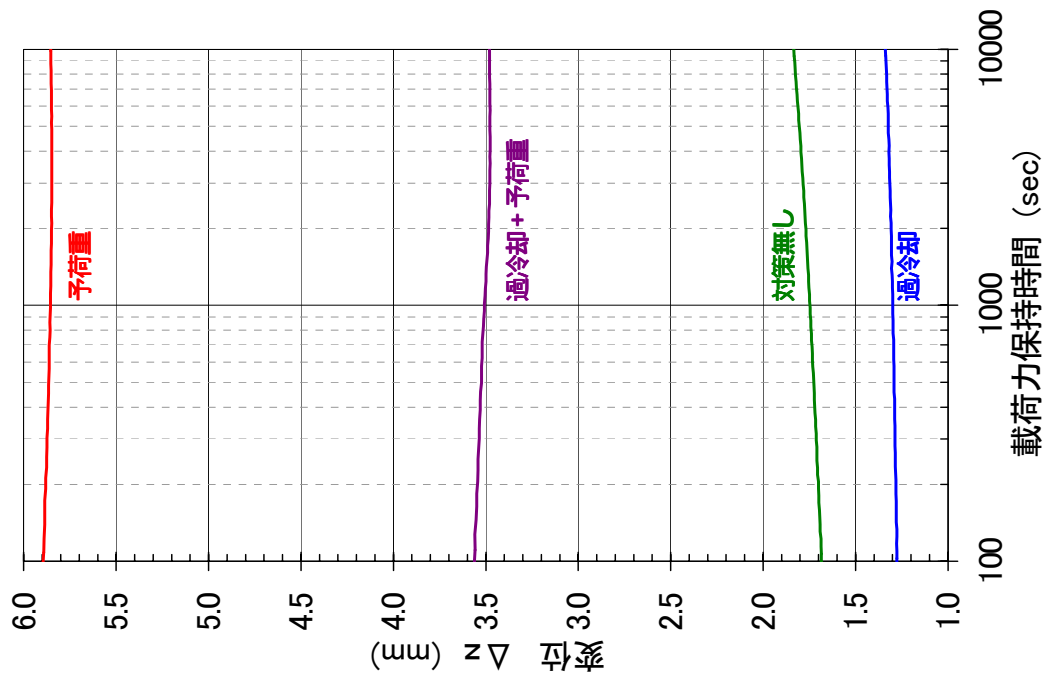
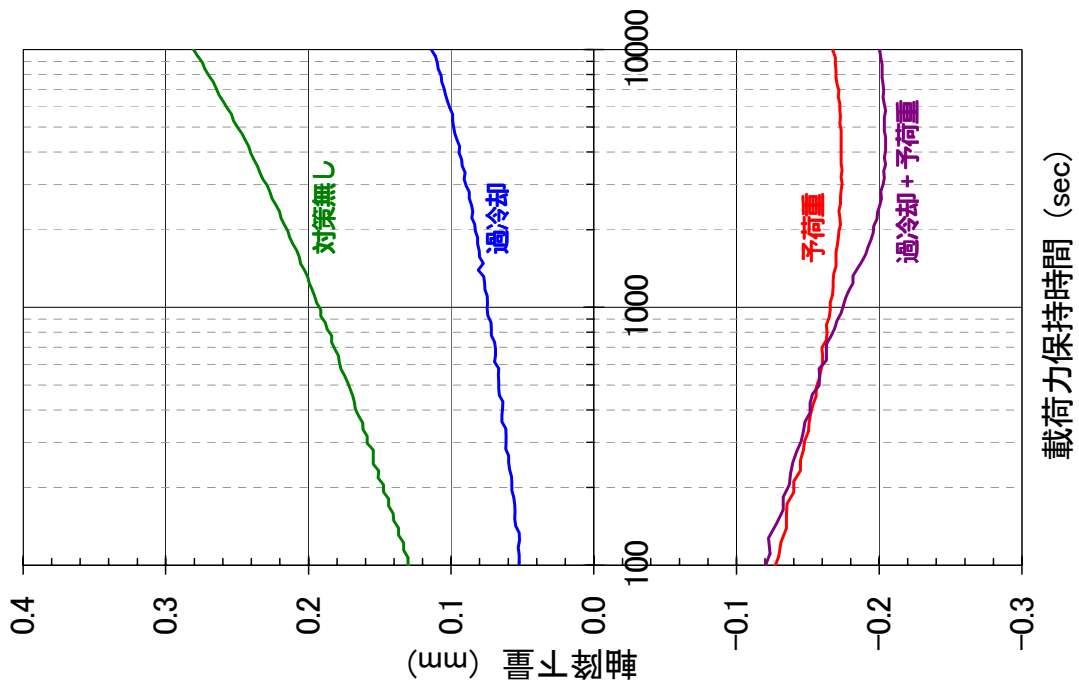


図 2.1.4-2 800N 一定保持時の変位の時間変化(磁気回路 D) 図 2.1.4-3 800N 一定保持時の軸降下量の時間変化(磁気回路 D)

(2) 超電導軸受回転損失評価試験

使用した試験機を図 2.1.4(2)-1 に示す。制御型磁気軸受 (AMB) で非接触支持し誘導モータで回転できる回転体下部に超電導軸受の磁気回路を固定している。誘導モータにて 6,000rpm まで回転させた後、誘導モータを停止しフリーランで 4,000rpm までの回転減衰特性を計測できる。一方、クライオスタットに内蔵された超電導軸受 (SMB) はロードセルを介して昇降軸に固定され、回転体下部の磁気回路周辺の任意の位置に位置決めできる構造である。本装置は真空環境に配置され、外部からクライオスタットへ液体窒素を供給できるシステムである。

測定方法は、超電導軸受を冷却しない状態での損失と超電導軸受を冷却し任意の負荷を与えた状態での損失を比較して、その増加分を超電導軸受の損失とみなしている。この装置の最大の特徴は超電導軸受に任意の負荷を与えられることで、回転体を制御型軸受で非接触支持することにより実現している。超電導軸受の負荷を変化させると制御型磁気軸受部分の状態も変化して磁気軸受部の回転損失が変わる可能性があるが、前フェーズでの別の実験から回転体の回転振れが変化しない限りその影響はほとんどないことが確認できている。

装置の主な仕様と測定条件を表 2.1.4(2)-1 に示す。超電導軸受の磁気回路としては、平成 12 年度に測定した磁気回路 (RaPMC) と平成 13 年度に測定した磁気回路 (RaPMF) である。超電導軸受の負荷は、0 から 800N であることがわかる。

2 種類の磁気回路で測定した回転損失結果を比較した結果、磁気回路の周方向の磁束の不均一性を改善した後者 (リング型) の方が、回転損失が小さいことが明らかとなったので、これ以降は磁気回路 (RaPMF) について測定結果を述べる。

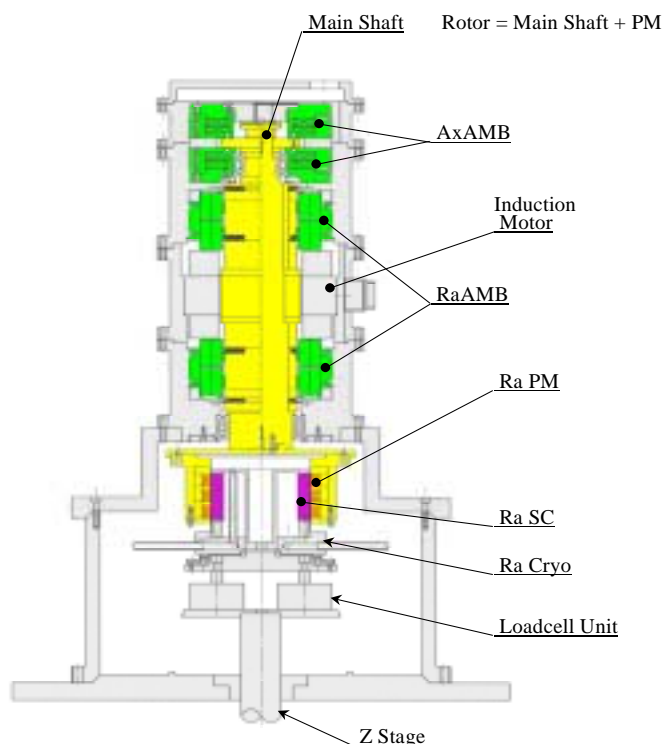


図 2.1.4(2)-1 回転損失試験機

表 2.1.4(2)-1 回転損失試験機的主要仕様と測定条件

Rotor	Length of Rotor	504 mm
	Diameter of Rotor	100 mm (max. of Main Shaft) 238 mm (max. of PM Unit)
	Mass of Rotor	40 kg
SMB	Permanent Magnet	Nd Type(RaPMC 又は RaPMF)
	Superconductor	YBCO(RaSCS) Load:0 ~ 800N
	Cooling Method	Field Cooling
AMB	Bias Current of RaAMB	1.5 A (Material of Rotor Core : Amolphas)
	Bias Current of AxAMB	1.0 A
Pressure		Less than 2.67Pa (0.02Torr)
Rotation Speed		6,000rpm 4,200rpm

図 2.1.4(2)-2 は、800N までの初期負荷までの諸条件で測定した 6,000 4,000rpm の回転減衰特性の一例である。この結果から、6,000rpm での各部軸受損失と初期負荷の関係を示したのが図 2.1.4(2)-3 である。この図から、負荷増大につれて軸受損失も増加する傾向が明らかとなった。負荷 800N での超電導軸受部（クライオスタットを含まない超電導体(SC)部分)の回転損失を外挿で求めた結果は 2W である。この結果から単位負荷あたりの超電導軸受の回転損失は 2.5mW/N であることがわかった。この値は、磁気回路の周方向の磁束の不均一性を改善する前の磁気回路（RaPMC：分割型リング）での計測結果 10mW/N と比較して、大幅に改善されたことが明らかとなった。

但し、上記結果は本プロジェクトでの目標値 2mW/N までには至っていない。対策としては、リング磁気回路の更なる周方向磁束密度の不均一性向上と磁気回路内部で発生する渦電流損の低減が考えられる。前者については、これまでの効果はあったものの今後の更なる改善は困難である。一方、後者については、これまで実際に実験を実施していなかった。しかし、平成 13 年度に実施した解析結果から負荷を増加させると回転損失も増加すること、そしてその原因が分割型超電導体から受ける回転永久磁石内部で発生する渦電流損であることが明らかとなった。また、その対策方法として、永久磁石内部の渦電流損を低減させるために永久磁石を積層構造にすることが考えられる。今後、その対策を施し、実験的に確認できれば超電導軸受の回転損失を低減できる見込みがある。

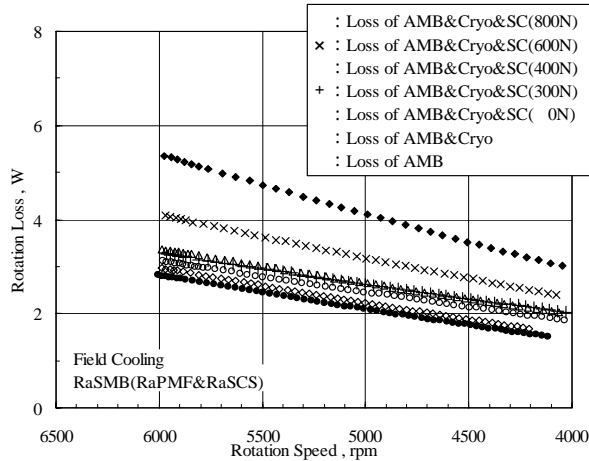


図 2.1.4(2)-2 回転損失特性

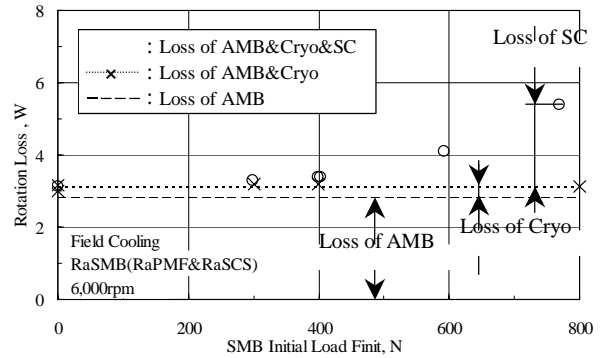


図 2.1.4(2)-3 回転損失 - 初期負荷特性

(3) 100kWh級超電導軸受の回転損失評価及び回転損失低減対策

a. 100kWh級超電導軸受の回転損失解析

本プロジェクトでは100kWh級超電導軸受の回転試験装置の製作は行わないため、数値解析により回転損失を評価することとしている。数値解析手法に関しては、先ず10kWh級（直径180mm級）超電導軸受の回転損失評価試験結果を、上手く再現出来るように高精度化を行う。高精度化した解析手法を用いて、100kWh級超電導軸受の回転損失を求める。当初は永久磁石磁気回路（回転子）の周方向不整磁場が超電導バルク（固定子）に及ぼす影響のみ考慮していたため、ロータ荷重増大に伴う回転損失増加の説明に困難を来していた。その後の検討により、ロータ荷重がかかった状態では、超電導バルク分割配置に伴い永久磁石磁気回路に誘導される渦電流の影響が、比較的大きくなることが分かって来た。

数値解析の概略手順は次のとおり。

永久磁石磁気回路の磁場の計算

超電導バルクの誘導電流の計算（電流ベクトルポテンシャル法）

$$\text{支配方程式： } \mu_0 \dot{T}_n + \frac{\mu_0}{4\pi} \mathbf{n} \cdot \int_{SC} \dot{T}_n \nabla' \frac{1}{R} dS' = -\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{E} - \mathbf{n} \cdot \mathbf{B}, \quad \nabla \times T_n \mathbf{n} = \mathbf{J}$$

ここに、 T_n ：電流ベクトルポテンシャル、 \mathbf{E} ：超電導バルク部分の電界、 \mathbf{B} ：超電導バルク部分の磁界、 \mathbf{J} ：超電導バルクの誘導電流。

超電導バルクの作る磁場 \mathbf{B}_{SC} とベクトルポテンシャル \mathbf{A} の計算

$$\text{支配方程式： } \mathbf{B}_{SC} = \int_{SC} \mathbf{J} \times \nabla \frac{1}{R} dV, \quad \mathbf{A} = \int_{SC} \frac{\mathbf{J}}{R} dV$$

永久磁石磁気回路の渦電流、ブレーキ力の計算（ベクトルポテンシャル法）

$$\text{支配方程式： } \frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = \sigma (\dot{\mathbf{A}} + \nabla \Phi), \quad \mathbf{J}_{PM} = \sigma_{PM} (\dot{\mathbf{A}} + \nabla \Phi), \quad \mathbf{N} = -\int_{PM} \mathbf{r} \times (\mathbf{J}_{PM} \times \mathbf{B}_{SC}) dV$$

ここに、 \mathbf{J}_{PM} ：永久磁石磁気回路の渦電流、 σ_{PM} ：永久磁石磁気回路の導電率、

N：永久磁石磁気回路に働くトルク（ブレーキ力）。

回転損失の計算

$$\text{支配方程式： } I\dot{\omega} = N, \quad P = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{I\omega^2}{2} \right) = I \frac{\partial \omega}{\partial t} \omega$$

ここに、I：ロータの慣性モーメント、P：回転損失。

現在、ロータ荷重増大に伴う回転損失増加という実験結果を定性的に説明出来るようになり、定量的にもオーダーレベルでは比較的良い一致を見ている。

まだ、精度の不十分な段階ではあるが、100kWh級超電導軸受モデルの回転損失の解析を試みた。解析に用いた軸受固定子はY系超電導バルクにより構成される、外径205mm、内径175mm、高さ100mmの円筒形である。回転子の方は、内径208.6mm、外径268.6mm、高さ100mmの円筒を、永久磁石7段積み構造とした。計算の結果、5.6N/cm²の載荷力条件で6,000rpmの回転時に、載荷力当たりの回転損失として2.3mW/Nという値が求まった。未だ実験結果との比較検討が不十分な段階であり、今後実験結果との照合、さらには解析精度の向上を図っていく必要がある。

b. 目標に対する成果達成度および今後の進め方

本プロジェクトでは、載荷力当たりの回転損失を2mW/N以下にすることを目標としている。現在、10kWh級軸受モデルにて2.5mW/Nが達成されており（「2.1.4(2)」参照）、後もう一步の回転損失低減が必要である。

軸受回転損失は発生メカニズムによって、次の二つに分類される。

- ・永久磁石磁気回路の周方向磁場分布不均一による超電導バルクのヒステリシス損
- ・超電導バルク分割配置に伴う永久磁石磁気回路の渦電流損

超電導バルクのヒステリシス損については、一体型永久磁石の適用等、低減対策はかなり進んでいる（「2.1.2」参照）。他に有望と考えられるのは、超電導バルク温度の液体窒素温度からの過冷却や、Y系よりも超電導特性の良いRE系超電導バルクの適用等である。永久磁石磁気回路の渦電流損に関しては、未だ十分な対策がとられていない。現在、渦電流を流れ難くするような永久磁石磁気回路の構造、超電導バルクの配置方法や接合技術の検討を進めている。

今後引き続き、100kWh級超電導軸受での回転損失を正しく評価出来る解析手法の開発、上記回転損失低減対策の検討を実施する。回転損失低減対策の検証方法としては、前述のとおり100kWh級超電導軸受の回転試験装置の製作を行わないことから、比較的小規模な実験と数値解析を組み合わせることで評価することにより、目標達成の目処を得ていくこととしたい。

2.2 超電導軸受応用技術

2.2.1 超電導軸受運転試験

(1) 10kWh 級運転試験装置

詳細設計された 10kWh 級システムの基本仕様を表 2.2.1-1 に示す。また、回転部分の基本構造を図 2.2.1-1 に示す。

回転部では、直径 1m の CFRP 製フライホイール本体を全長 1m のロータに締結し、回転部全体の重量 403kg をラジアル型 SMB により非接触で支持する構造である。ロータは中空円筒（アウターロータ型）で、中空ロータ内部に永久磁石同期発電電動機とラジアル型 SMB を有し、軸振動を抑制するため制御型磁気軸受（AMB）がロータ上下に 1 台ずつ配置される。回転部分は風損による貯蔵エネルギーロスを低減するため真空中で運転する。電力貯蔵量は回転数が 15,860 rpm で 10kWh である。

上記のほかに真空ポンプ、ラジアル型 SMB に液体窒素を供給する LN2 自動供給システム、補助軸受であるタッチダウン軸受（ZCAB）およびその駆動装置・給油装置で構成される。第 1 期研究開発では従来の転がり軸受を用いていたため、その DN 値（直径×回転数）の制約から直径の小さい

表 2.2.1-1 10kWh 級運転試験装置の基本仕様

ロータ内側に設置せざるを得なかった。このため、タッチダウン軸受を設置した固定部の剛性が不足し、タッチダウン軸受として十分な機能を発揮しないことがわかった。そこで 10kWh 級運転試験装置では ZCAB（Zero Clearance Auxiliary Bearing）を用いる。ZCAB はロータの周方向にローラ 8 個を配置し、それぞれのローラを転がり軸受で支持

定格回転数		15,860 rpm ^{*1}
貯蔵容量		10 kWh 級
回転体	重量	403 kg FRPリング : 125 kg ハブ : 55 kg 主軸 : 223 kg
	全長	1,000 mm
	回転慣性	$2.61 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$
発電電動機	容量	10 kW
	形式	永久磁石同期型（ティースレス）
	加速時間	約 3 時間
SMB	載荷力密度	0.35 kg/cm ² （設計値） SC 体: $\phi 123.2 \times \phi 93.2 \times 60$ （5 段）
	形式	ラジアル方式
	ギャップ	1.8 mm
AMB	スラストラジアル補助軸受	PID 制御 ゼロパワー制御 ZCAB
真空度		1×10^{-3} Torr

*1: FRPリングのみで 10 kWh 貯蔵の場合には 17,200 rpm

するため DN 値を小さくすることができる。これにより ZCAB は剛性の大きいロータ外側の構造体に設置可能となっている。

クライオスタット冷却性能およびロータ温度分布解析

ラジアル型 SMB の高温超電導体（SC 体）はクライオスタット内に格納され、

液体窒素で冷却される。液体窒素の温度上昇は SC 体の載荷力性能の低下につながるため、クライオスタットへの熱侵入を抑制する必要がある。これは主にロータからの輻射によるものと室温部分からの熱伝導による熱侵入であるため、クライオスタットを含めたロータ全体の温度分布解析を行いクライオスタットの冷却性能を検討した。

図 2.2.1-2 にクライオスタット部の解析モデルを示す。解析条件は液体窒素による SC 体の冷却を 3 時間の後、ロータを 3 時間で定格回転数まで昇速、定格回転数にて 1 時間保持、その後 3 時間で減速・停止するものである。熱源は発電電動機、AMB の渦電流によるロータ側の発熱および風損である。AMB によるロータ側の発熱量は 240W/台 (@定格回転数)とした。これは次項に記載するフライホイール軸制振技術において中型回転制御試験装置にて測定された値の 1/2 である。図 2.2.1-3 に SC 体表面 (ロータ側) 温度が最高になる時の温度分布を示す。最下部の SC 体は外部からの熱伝導により温度が上昇する傾向にあるが、最下部の SC 体の下面に液体窒素の流路を設けることで、SC 体の表面温度は液体窒素温度から +2K 以内になることがわかる。また、ロータが最高温度となる時の温度分布を図 2.2.1-4 に示す。AMB 発熱量は 240W/台である。240W/台とすることで AMB のロータ側最高温度は 95 程度となり、温度的には運転可能と思われる。中型回転制御試験装置で計測された 480W/台は損失の大きいヘテロポーラ磁極を用いた場合である。10kWh 級運転試験装置はホモポーラ磁極とすることで 240W/台程度になると予想している。この詳細については次項のフライホイール軸制振技術で述べる。

回転永久磁石の検討

SMB に使用する回転永久磁石はロータ内面に焼きばめにて締結するため、回転永久磁石のロータへの組み付け時および回転時の強度評価を行う。

回転永久磁石の断面図と平面図を図 2.2.1-5 に示す。構造は半径方向に 3 層になっており、内側から、磁石と磁石の上下に取付けられたヨークで形成される部分 (全 15 段)、その外側の磁石止めリング、そして最外周のロータからなる。磁石は上から見ると扇形に 12 分割された構造となっており、隣り合う磁石は接着剤により接着されている。

解析では以下の項目について検討した。

- 1) ロータ組込み後に磁石に過大な圧縮応力が作用しないか。
- 2) 回転時に各嵌め合部が離れ、磁石ユニットが脱落することがないか。
- 3) 回転時に各部材に過大な応力が作用しないか。
- 4) 上記の点を満足し、かつ製作 (焼きバメ) 時にできるだけ隙間を大きく取れるはめ合い代の決定。

解析は図 2.2.1-6 に示すように 2 種類の断面をモデルとし、汎用コード ABAQUS を用い、2 つのステップに分けて実施した。最初のステップでは、焼き嵌めを行ったときの弾性解析を行った。次に第 2 ステップとして、要素全体に定格回転数に相

当する遠心力荷重を与えた解析を実施した。

解析による検討の結果、1)～4)の検討項目を満たす条件として、磁石止めリングとロータとの焼きバメ代が $146\mu\text{m}$ と見出された。また、製作終了時にはヨークに働く圧縮応力が一番高くなるが、降伏応力以下 ($25\text{kgf}/\text{mm}^2$) であり、製作可能であることが示された。更に、定格回転時においても各はめ合い部分には圧縮応力が作用しているため脱落しないことが確認できた。上記を含め、検討項目に従って各部分の応力を検討した結果を表 2.2.1-2 に示す。

表 2.2.1-2 各部に発生した応力の評価

	最大応力 [kgf/mm ²]	降伏応力 [kgf/mm ²]	判定
ヨーク圧縮応力 (製作時)	23.4	25.0	OK
磁石圧縮応力 (製作時)	19.2	74.95	OK
リング引張応力 (回転時)	31.8	35.2	OK
接着部引張応力 (回転時)	2.4	3	OK

ロータの内部減衰および磁気軸受に起因した不安定振動

ロータ軸系の内部減衰に起因した自励振動に関しては、ロータ単体についての知見があるだけで、フライホイールのように複数の軸が締結されたロータ軸系について研究された例はない。締結部分には摩擦などによる構造減衰が内部減衰として存在すると考えられるため、締結部分あるいは軸に内部減衰がある場合についてパラメータスタディを行っている。今後、試験結果との比較などから内部減衰による振動の傾向を明らかにする予定である。

また、磁気軸受では制御周波数から若干高い固有振動数が発振するスピルオーバー不安定振動が発生する場合がある。この不安定振動を回避するために、スピルオーバーする振動を考慮した制御系の設計を検討している。本制御手法が有効であると思われる場合には 10kWh 級運転試験装置にて試験を行い有効性を確認する。

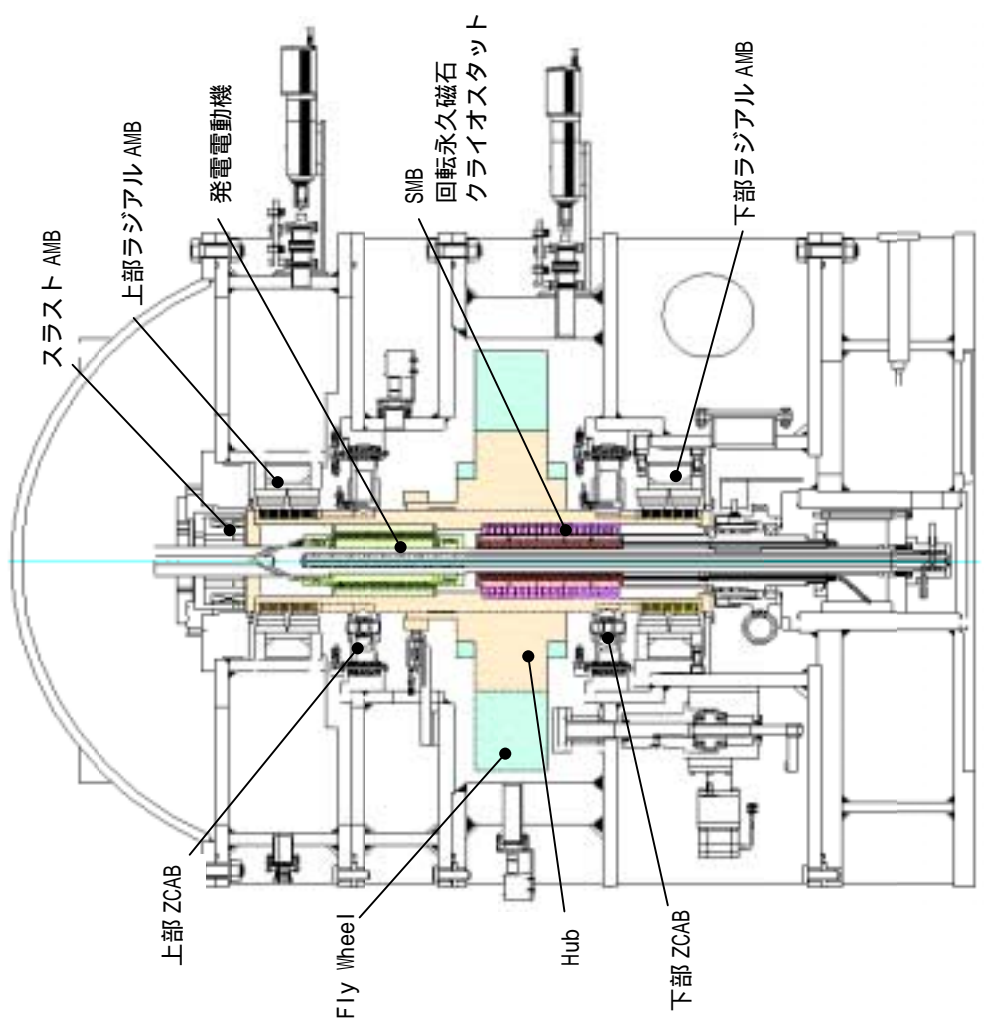
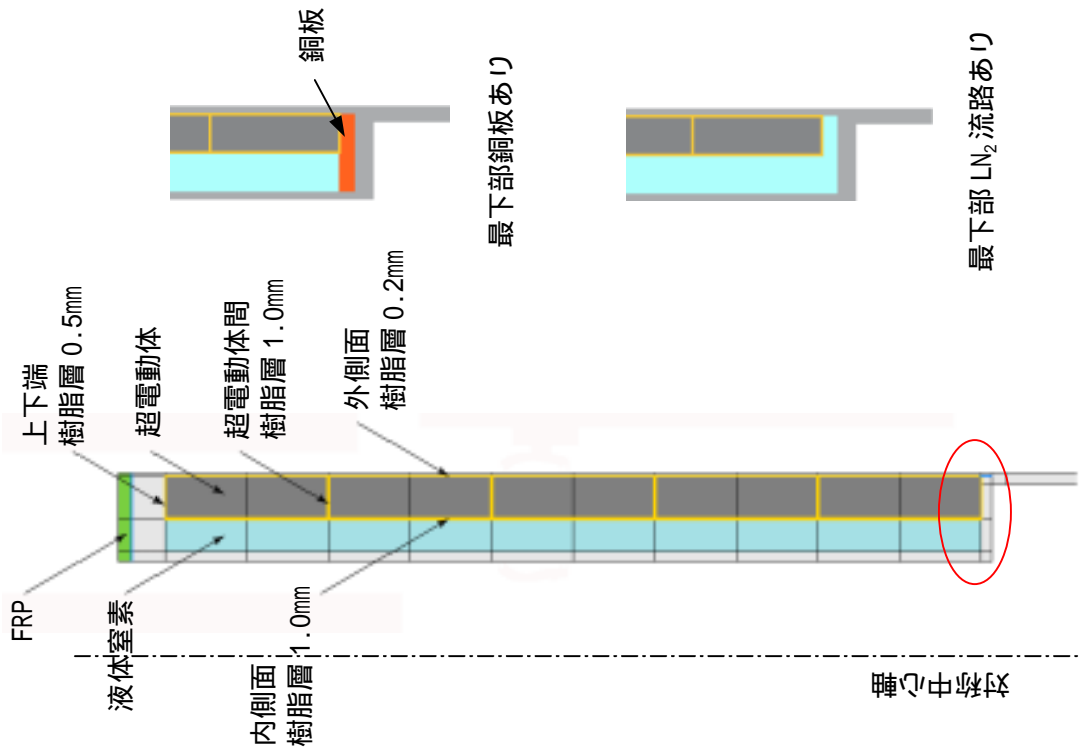


図 2.2.1-1 10 kW h 級運動試験装置

図 2.2.1-2 クライオスタット部温度解析モデル

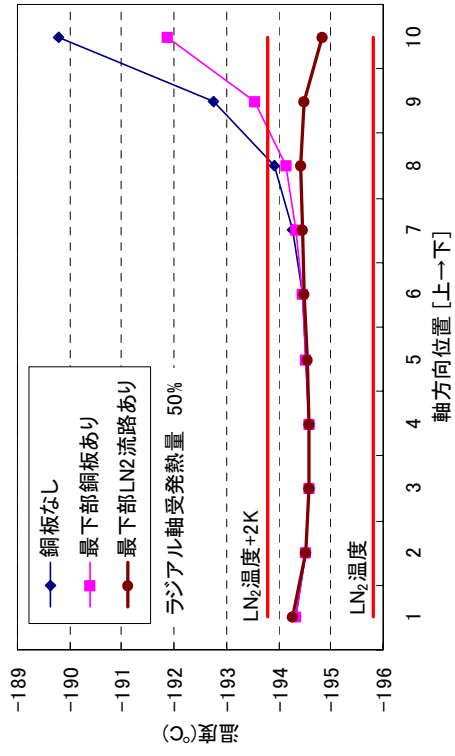


図 2.2.1-3 SC体表面温度分布

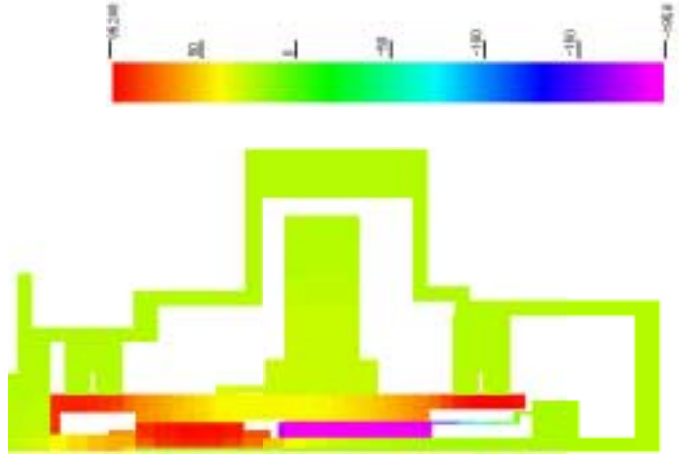


図 2.2.1-4 ロータ温度分布解析結果

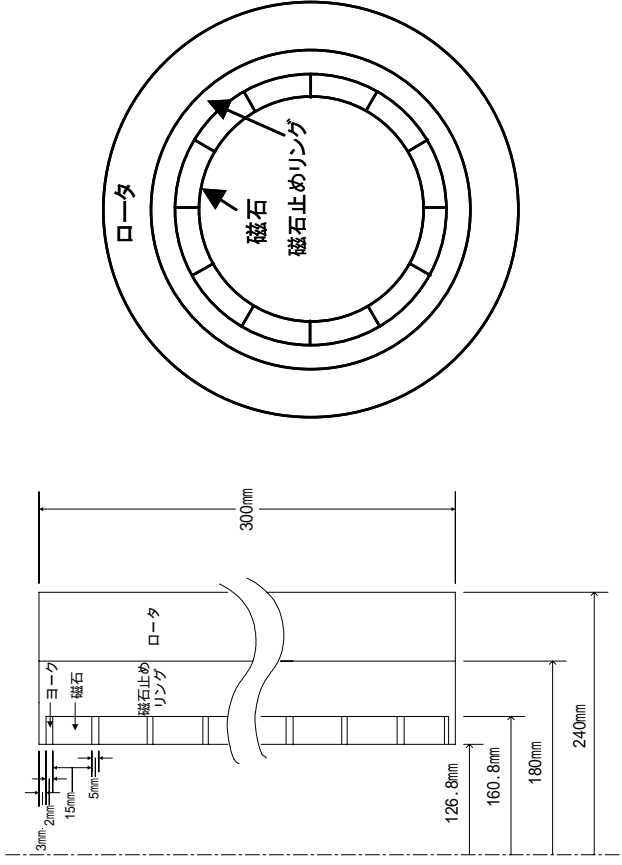


図 2.2.1-5 回転永久磁石の構造

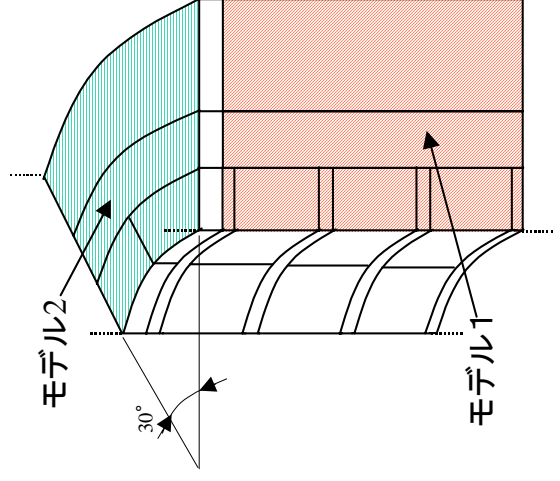


図 2.2.1-6 解析モデル

(2) 10kWh 級運転試験

10kWh 級運転装置の試験場所を四国総合研究所松山 FW 研究センターとすれば、小型モデルの運転試験に用いたテストピットなど現状の設備を有効活用できる。これを踏まえ、次のとおり試験施設追加工事の設計を実施した。

10kWh 級運転試験装置を既設テストピットに設置可能か否かの検討が必要であり、施設概略設計において 10kWh 級運転試験装置設計をもとに構造解析を行った。その結果、装置本体等設置時の重量密度 44.4kN/m^2 に対し、地反力が 118kN/m^2 と十分な地耐力があることが確認でき装置設置可能との見通しを得た。

10kWh 級運転試験装置側の設計から、松山移設時には試験装置運搬上の問題などから、装置本体を現地組み立てする必要があることが分かった。このためには、搬入から据付・調整等の作業において、図 2.2.1(2)-1 に示した走行クレーンや風雨避け設備が必要である。そこで、試験施設の詳細設計では、この追加設備も考慮して、10kWh 級運転試験装置側の詳細設計の進捗に併せて、次の工事について詳細に検討して設計を実施した。

テストピット側及び運転制御室側への機器類の配置検討と必要工事

機器搬入と本体組立て、据付・調整に必要な門型走行クレーンや風雨除け設備
電源設備等の追加工事

この結果、図 2.2.1(2)-2 に示した松山の既設施設に試験装置を適切に設置できることを確認するとともに、表 2.2.1(2)-1 に概要を示したように運転試験施設追加工事の内容を明確にすることができた。

以上の設計をもとに、平成 15 年度には、試験施設追加工事を実施する予定であり、10kWh 級運転試験装置の松山 FW 研究センター試験施設への受入準備の見通しが得られた。

表 2.2.1(2)-1 運転試験施設追加工事の概要

項目	工事の概要	
テストピット側 試験施設追加工事	定盤設置工事	本体設置用の定盤 (2300mm×2300mm) テストピット床上高 400mm、据付水平レベル精度 1/1000 程度
	テストピット内改造工事	定盤下ダクト埋戻し 機器設置床面補強 等
	門型走行クレーン追加工事	揚程 6m(地上高 4.5m) 走行 13m、横行 6m 電動走行、電動ホイスト 2.8t 等
	風雨除け設備追加工事	縦 10m×横 16m×高さ 6m 伸縮型、耐風雨 等
運転制御室側改 装等工事	インバータ盤及び抵抗器等の設置工事	盤設置個所リフト改造、盤据付 抵抗器設置床改装 等
	運転監視制御装置等設置工事	盤設置個所リフト改造、盤据付 等
電源関係設備等 工事	管路・ケーブル布設等工事	テストピット～運転制御室間(約 30m)などの 管路・ケーブル布設 等
	電源廻り設備工事	運転制御室電源新設 分電盤新增設等

試験場所：四国総合研究所 松山FW研究センター
(愛媛県松山市勝岡町1163)

【現状】



- 運転制御室
- テストピット

【竣工後】

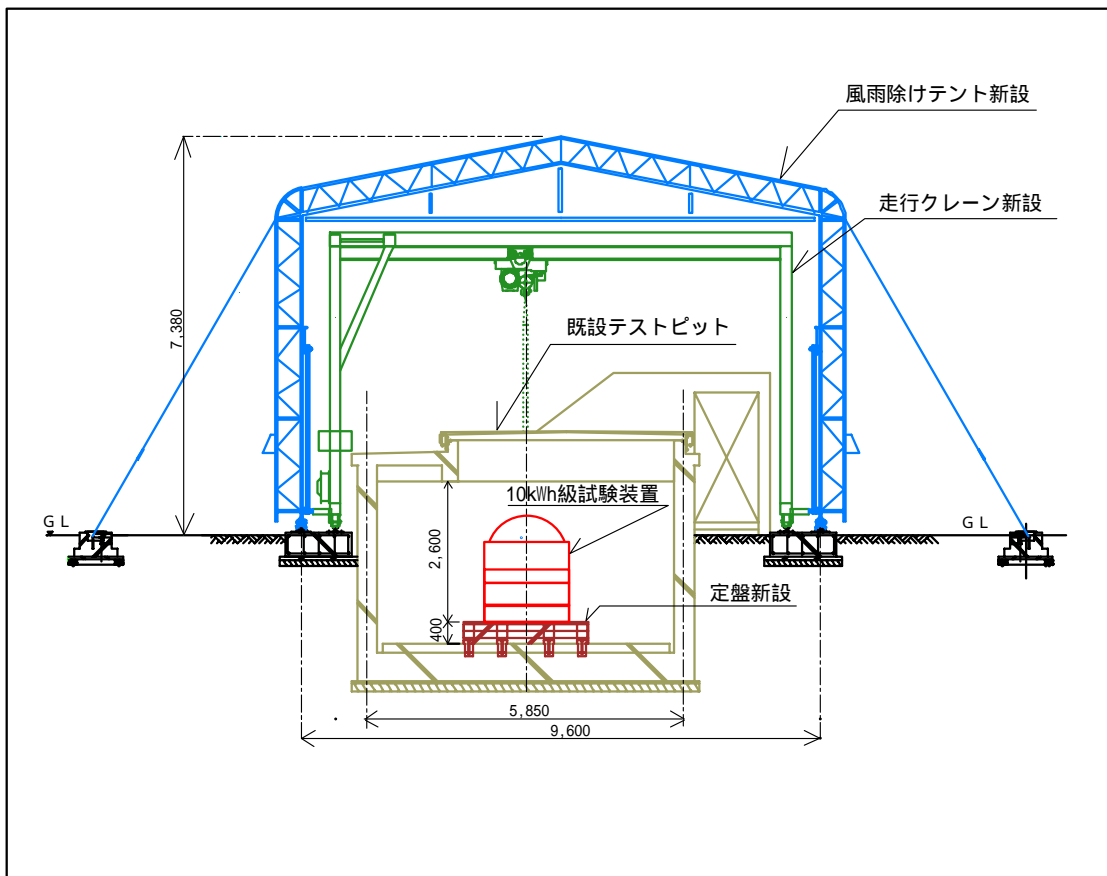


図 2.2.1(2)-1 10kWh 級運転試験のための試験施設追加工事の概要

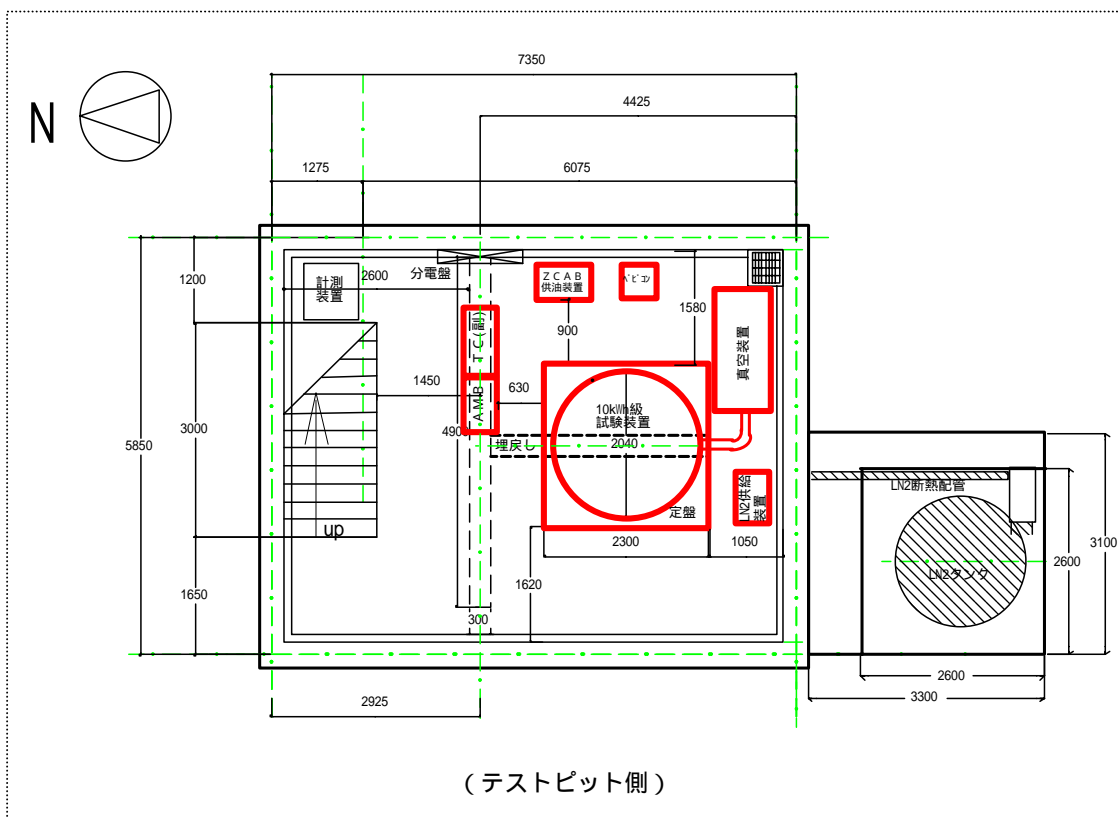
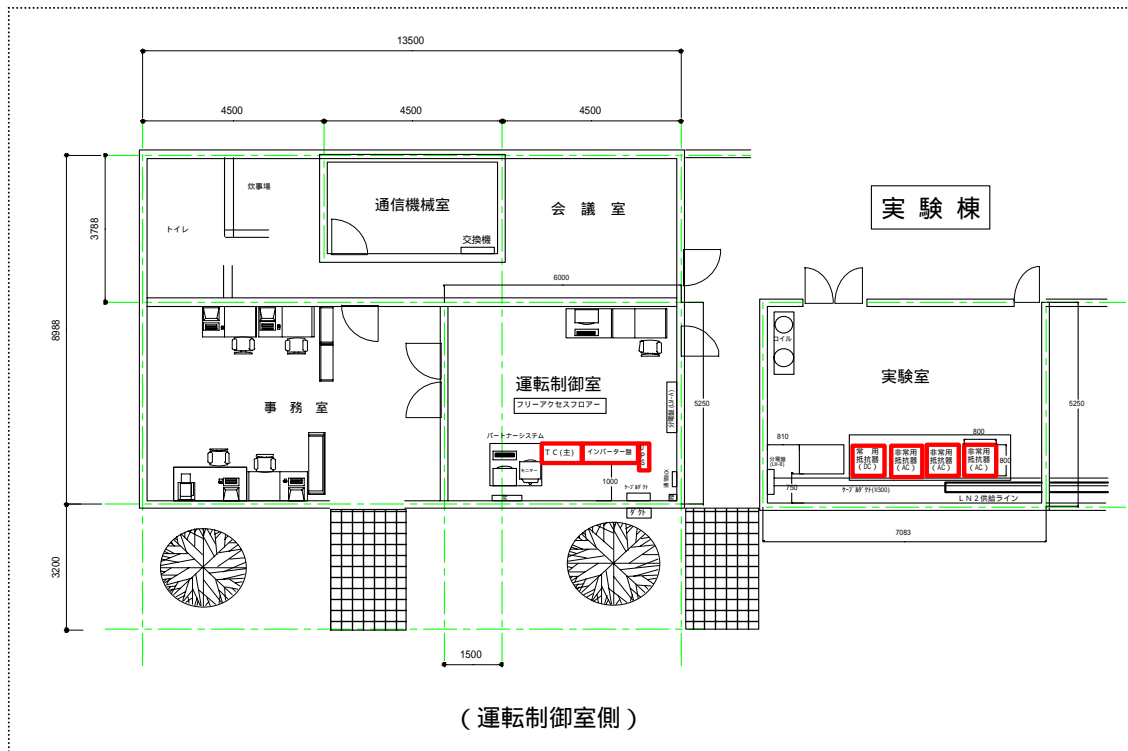


図 2.2.1(2)-2 10kWh 級試験装置の運転試験施設への配置

2.2.2 フライホイール軸制振技術

平成7年～平成11年度の第1フェーズの研究開発では、フライホイールの軸振動を抑制するAMBに関して以下の課題があることが明らかになった。

- (1) ロータの弾性振動を安定に抑制する技術
- (2) ロータ側に発生する渦電流による損失（発熱）低減技術

本研究ではこれらの解決のため、第1フェーズの研究開発で製作した中型回転制御試験装置を用いて、次の項目の研究を行う。

(1) 磁極形状と磁気軸受の制御手法の最適化による損失低減技術の開発

ロータ側に発生する渦電流は貯蔵エネルギーのロスになるばかりでなく、ロータの発熱原因となる。真空中で運転されるロータ軸系は冷却が困難であるため、AMBによる渦電流を低減する磁極構造および制御手法が必要である。

磁気軸受の制御手法としては従来からPID制御があるが、これはバイアス電流を必要とするためバイアス電流による磁界が常に発生している。ロータは回転することでこれによる変動磁場をうけるため、ロータ内部には磁場変動を打ち消すように渦電流が発生する。この問題を解決するために、バイアス電流を必要としない非線形ゼロパワー制御を適用する。これはロータが遠のいた磁極だけに電流を流す方法である。バイアス電流が不要なため、渦電流の低減のみならず省電力な磁気軸受にもなる。欠点としては、使用する電磁石をON-OFFするのでコントローラは必然的にデジタル方式となることであるが、最近のDSP(Digital Signal Processor)の高速化により、制御可能である。

磁極構造では、従来型のN極、S極をロータの周方向に配置したヘテロポーラ型磁極に対して、N極、S極をロータの軸方向に配置したホモポーラ型とすることで、回転損失が約1/2になる結果を要素試験により得ている。また、磁極を小型化することで制御帯域が広がることも試験により判明している。従って、必要な制御帯域を確保できるように磁極を小型化し、損失の低減にはホモポーラ磁極を採用することがフライホイールでは必要である。

(2) ロータの弾性振動抑制技術の開発

CFRP製であるフライホイール本体は高速回転時の半径方向の伸びが大きいいため、ロータとフライホイールを締結するハブはこれに追従するように柔構造となる。これにより、ロータ軸系全体ではロータ単体が弾性振動するほかにハブが変形する弾性振動が新たに生じるため、AMBによる弾性振動の抑制が困難なものとなる。

図2.2.2-1(a)に弾性振動の制御の目的で一般的に行われる位相進み補償器を示す。これは剛体振動に対しては前述したゼロパワー制御を用い、ハブ1次、2次およびロータ曲げ1次振動についてはそれぞれの固有振動数付近の変位信号を微分して位相を進めることで減衰を与えるものである。これに対し、図2.2.2-1(b)では曲げ1次振動については安定化フィルターに変更している。これらの相違を図2.2.2-2

に制御コントローラの伝達関数を比較して示す。安定化フィルターを用いることで1kHz 付近（曲げ1次固有振動数付近）で位相は位相進み補償器と同程度でゲインが低下していることがわかる。これにより、磁気軸受に電流を供給するPWM アンプの電流変化速度のリミット以内で必要な減衰を付加することが可能である。

(3) 中型回転制御試験装置による確認試験

前述の非線形ゼロパワー制御と安定化フィルターを用いて第1フェーズの研究開発で製作した中型回転制御試験装置を用いて12,000rpm までの回転試験を実施した。AMBの磁極には小型ヘテロポラ磁極を用いている。

12,000rpm から発電電動機を停止させ、フリーラン試験にて回転数の時間変化から回転損失を求めた。試験結果より12,000rpm での損失は600W で、これより定格回転数での損失を予測すると900W となる。ただし、この損失には、ラジアルAMBの損失以外にスラストAMBの損失、発電電動機の損失および風損による分が含まれているので、これらを考慮するとラジアルAMB1台あたりの損失は約430W/台となる。前述の2.2.1(1)10kWh 級運転試験装置の項でロータの温度分布を求めた際に使用したラジアルAMBの損失はこの値に約10%の安全率を見込んだ値である。また、10kWh 級運転試験装置ではAMBの磁極を小型ホモポラ磁極とすることでAMB損失は約220W/台になると予想している。

図2.2.2-3に解析で求めた固有振動数と減衰比を計測結果と比較して示す。固有振動数は解析と実験でほぼ良い対応を示している。減衰比に関しては1%以下の減衰比を計測しているため測定誤差が大きいと思われるが、解析結果は減衰比の回転数による変化傾向をとらえている。解析では現状のコントローラでは205rps（1,230rpm）以上で減衰が負（不安定）となっているが、コントローラの調整により定格回転数まで安定となる見込みである。

また、フライホイールを高速回転させる上で問題となるものに、遠心力によりフライホイール本体が半径方向に不均一に伸びることによるアンバランス変動がある。図2.2.2-4(a)に高速回転に伴うアンバランス変動により、軸振動が増加してきたため7,000rpm にて試験を中止した例を示す。図2.2.2-4(b)は今回の試験結果である。図(a)では70rps（4,200rpm）から軸振動が増加しているのに対し、図(b)では軸振動は120rps（7,200rpm）以上ではほぼ一定になっている。これは、今回の試験に用いたフライホイール本体の加工精度を上げたことによる成果である。

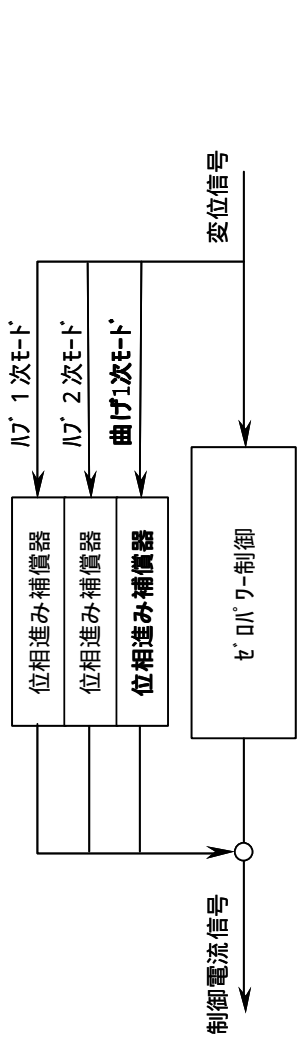
フライホイール本体のアンバランス変動の原因としては加工精度以外にも種々考えられるため2.2.3項のフライホイール本体の高性能化・高品質化の研究にて安定した技術となるように取り組んでいる。

【軸制振技術の課題と方策】

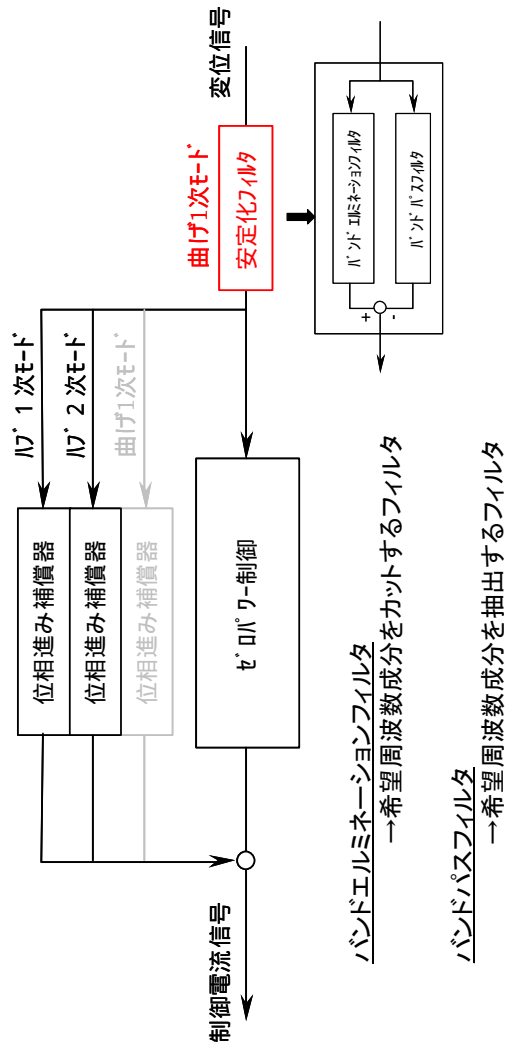
今までの研究で得られた課題は以下のとおりである。

- (1) ホモポーラ磁極に非線形ゼロパワー制御を用いた場合に磁気軸受の損失は現状より低減されると予測されるが、更なる低損失化が必要である。
- (2) ハブの弾性振動の固有振動数がロータ曲げ振動のそれに比較的近いためにスピルオーバー振動を抑制しにくい。

以上の方策として、(1)についてはNカット制御により対応する。(2)はロータ曲げ固有振動数を高めるためにロータ長を可能な限り短くする。また、両者に共通する対策として、高速回転では制御ゲインを低下させるゲインスケジュール制御などで対応する。



(a) ゼロパワー+位相進み補償(D制御)



(b) ゼロパワー+D制御+安定化フィルタ(S

F)

図 2.2.2-1 制御手法の比較

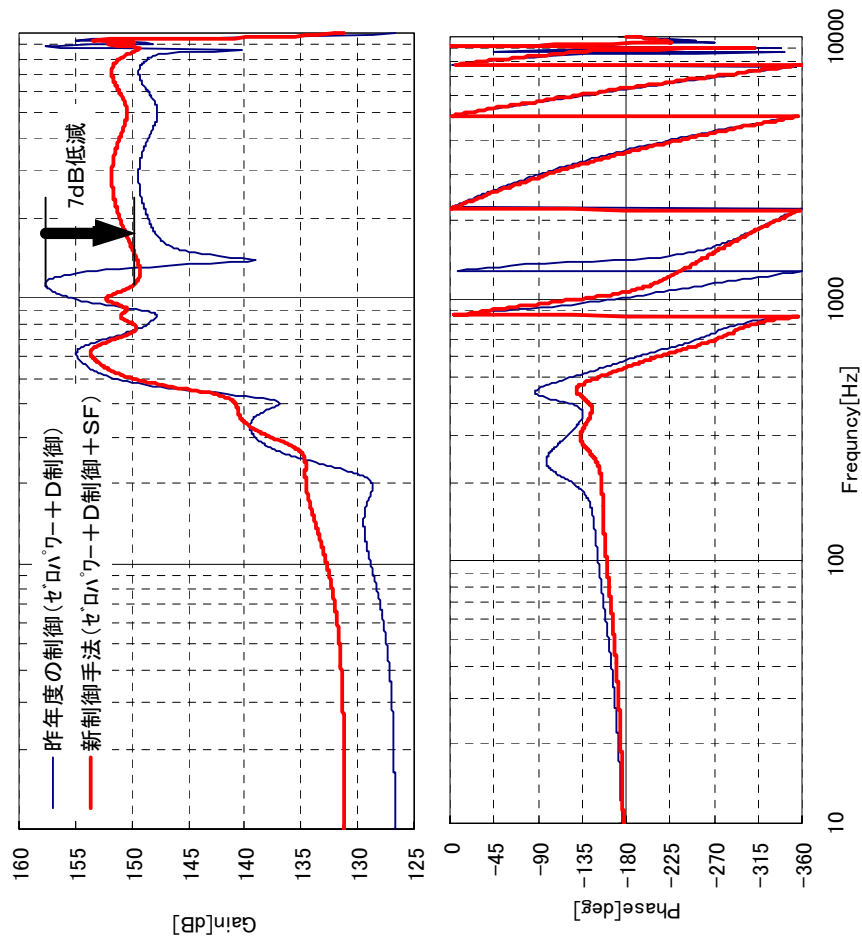
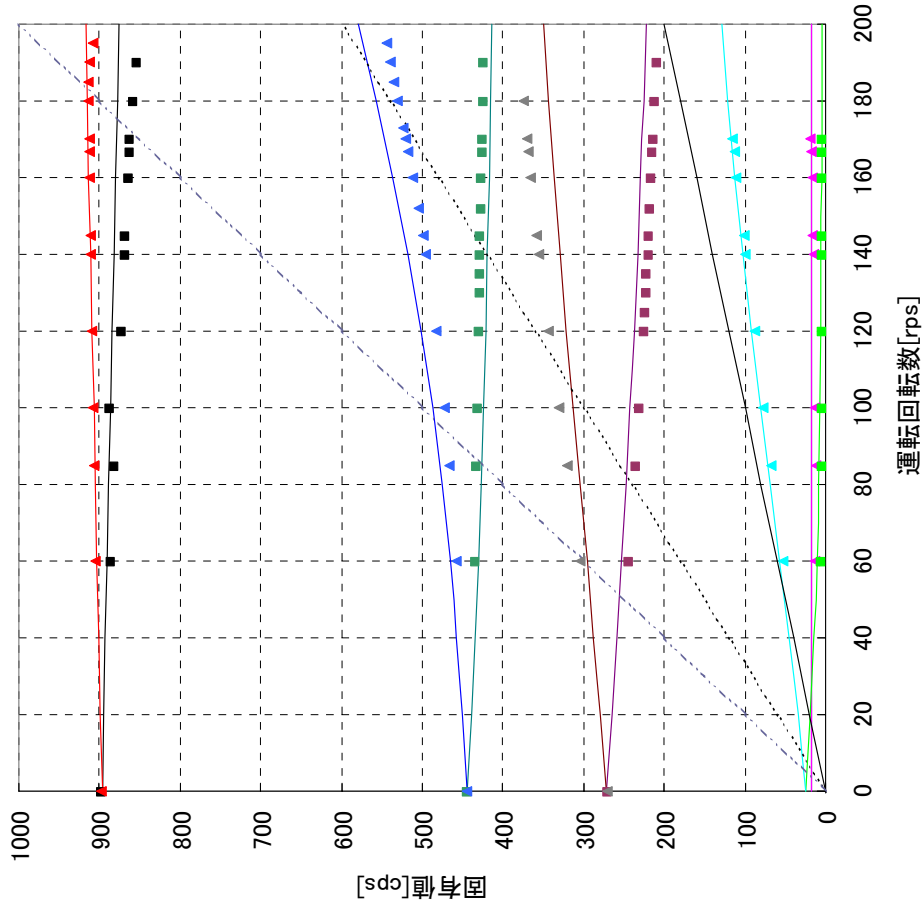
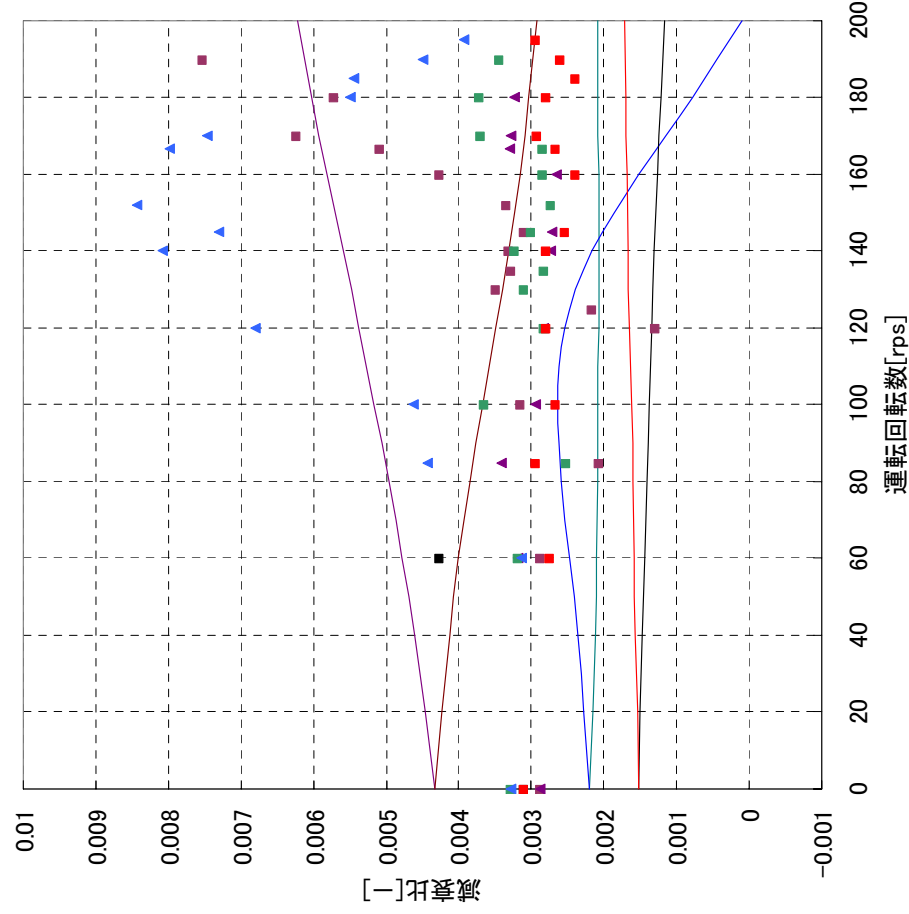


図 2.2.2-2 コントローラ伝達関数の比較

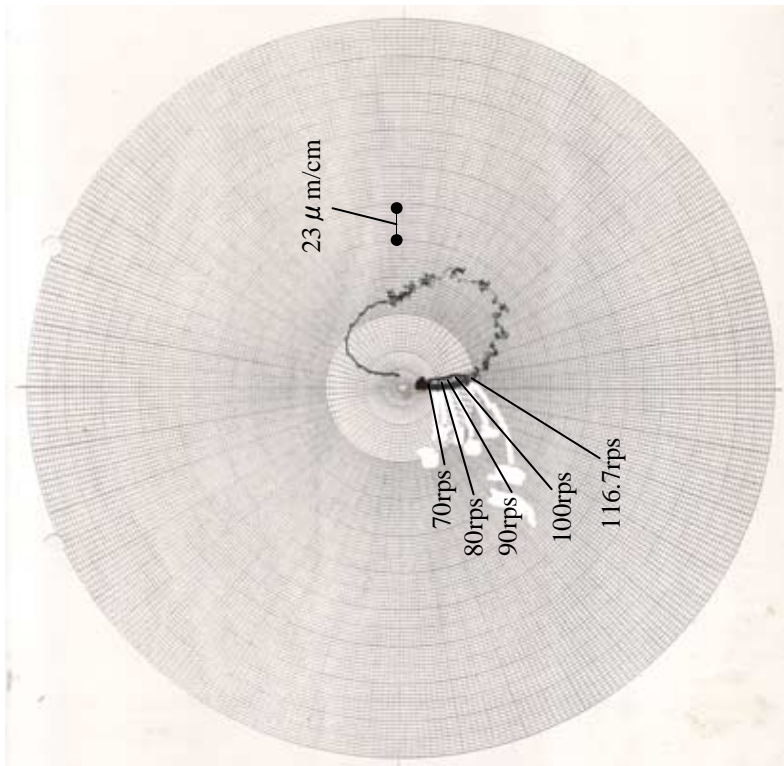


(a) 固有振動数

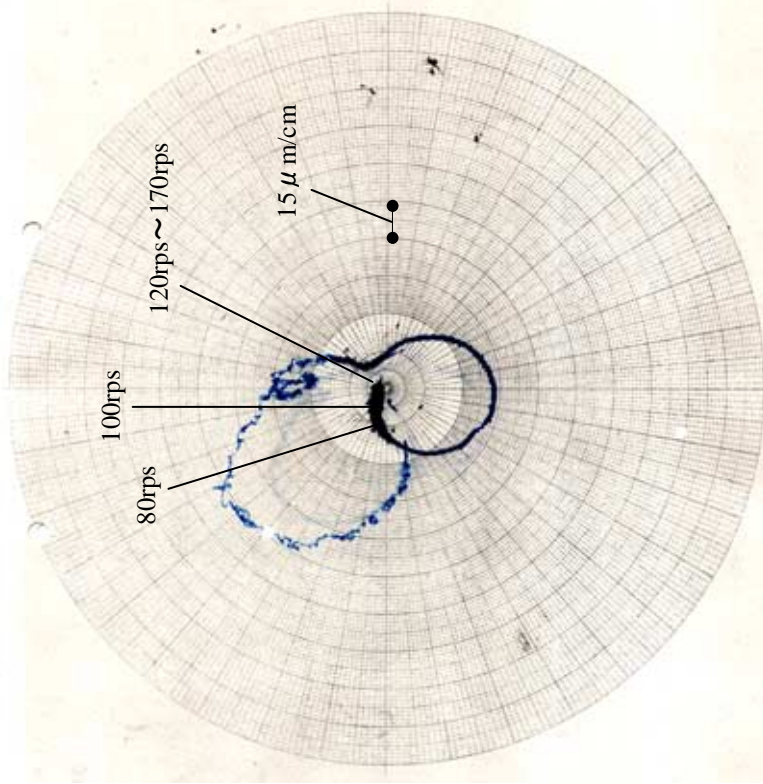


(b) 0近傍の減衰比

図 2.2.2-3 安定性解析と実測結果



(a) ロータ上部のポーラ円 (アンバランス変動あり)



(b) ロータ上部のポーラ円 (アンバランス変動なし)

図 2.2.2-4 高速回転に伴うアンバランス変動

2.2.3 フライホイール本体の高性能化・高品質化

高速回転時のフライホイールには極めて大きな応力が発生するため、フライホイールをどれだけ高速に回転させることができるかは、フライホイール材料の強度に依存する。CFRP は比重が小さく、繊維方向に高い強度を有するために、高速に回転することで大きなエネルギーを蓄えることができる。しかし、超高周速で安定に回転する大型 FRP フライホイール本体を設計・製作するためには、均一な FRP リングを成形する技術、真円度や同軸度など回転体に要求される厳しい形状精度を確保する加工・組立て技術、FRP リングと回転軸を締結するハブ構造の開発について大きな課題があることが第 1 フェーズの研究開発で明らかになった。そこで第 2 フェーズにあたる本研究では、フィラメントワインディング法によるリング成形条件の検討、ハブ構造の検討、ワインディング後の機械加工による変形の検討、高品質化のための研究として樹脂含浸装置の開発、さらにスピンテスターを用いた回転試験による回転体としての性能確認を行った。

フライホイール本体の製作工程を図 2.2.3-1 に、本研究で製作した本体の外観を図 2.2.3-2 に示す。FRP リングは複数の薄肉リングを圧入で組み立てたマルチリング構造である。したがって、フィラメントワインディングで成形したそれぞれの FRP リングは外周加工の後に圧入、端面加工を行いマルチリングに組み立てる。さらに別途機械加工で製作した金属製ハブを液体窒素で冷却して FRP マルチリング内に挿入する（冷やしばめ）ことでフライホイール本体が完成する。

(1) 大型フィラメントワインディング成形条件の最適化

フィラメントワインディングの成形において考慮すべき主な条件は、樹脂やマンドレルの温度、繊維巻付けの角度・速度・張力、樹脂の硬化温度条件などである。樹脂粘度の温度による変化は大きく、樹脂含浸槽やマンドレルの温度が低いと樹脂含浸が不十分となる。（品質の低下）しかし、温度が高すぎるとワインディング中に樹脂の硬化が進んでしまうなどの問題が生じる。糸幅（糸の種類や本数、張力で決まる）を元に、どの程度のピッチで巻き付けるかを設定する。巻き付け速度を増すと巻付け時間が短くなるが、繊維の毛羽立ちによる糸切れ、樹脂の含浸不良の原因となる。また、巻付け時の糸の張り具合によって繊維体積含有率が変化する。

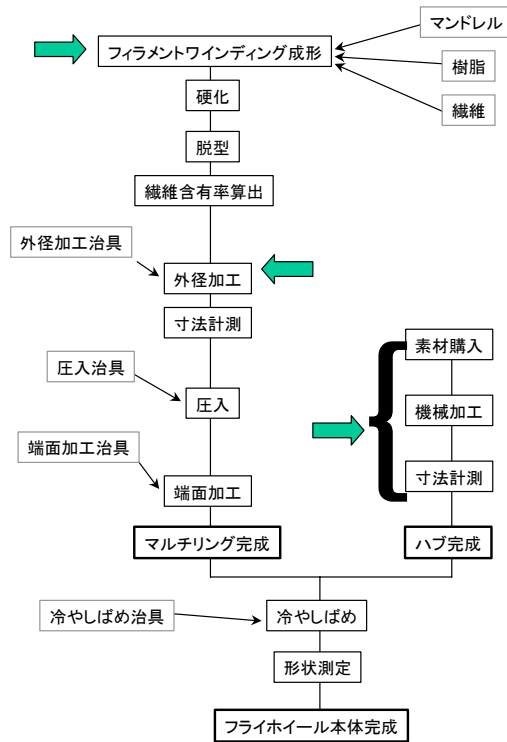


図 2.2.3-1 フライホイール本体の製作工程

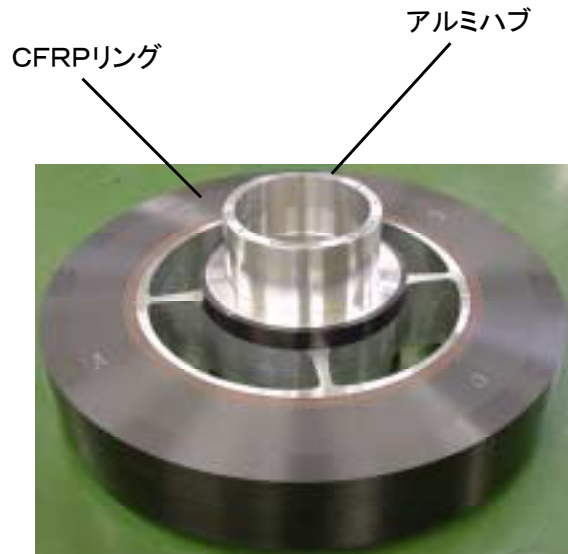


図 2.2.3-2 製作したフライホイール本体の外観

巻き付け後硬化炉に入れて加熱硬化する際には急激に温度を上昇させると樹脂の粘度が低下しすぎて巻き付けた繊維が動き、繊維の並びが不均一になる場合もある。また樹脂の硬化収縮によるクラックの発生が発生する場合もある。

繊維に樹脂を含浸させる段階は、FRP の品質を左右する最も重要なプロセスである。加えて大型フライホイールを高品質に成形するためには、繊維の巻き付け中に樹脂の硬化が進むことが無いようにして、長時間に渡り安定したワインディング

を行う必要がある。そこで、これまでのフライホイール成形のノウハウを生かした高品質樹脂含浸槽を新たに設計・製作した。

(2) 大型マルチリング製作技術の開発

CFRP の熱膨張率は繊維方向には小さく（ほぼゼロ）、繊維と直角方向には大きいという異方性を有している。したがって、フライホイールリングのような周方向に繊維強化された FRP リングを加熱硬化の後に室温まで冷却すると、リング全体は熱膨張により縮もうとするが周方向の繊維が邪魔をして縮むことができない。その結果、リングの半径方向には引張、周方向には引張（内周側）と圧縮（外周側）の残留ひずみが発生する。このような FRP リングをマルチリング組立てのために外径加工すると、外径が除去されたことにより残留ひずみが再配分されて寸法が変化し、リングの内径と外径は加工しろ以上に小さくなっていくので高い精度が要求されるフライホイールリングの加工は極めて難しい。本研究では、加工時の寸法変化をあらかじめ予測して加工治具の寸法や目標寸法を決定することにより、0.03mm の同心度・真円度を持つ FRP マルチリングを加工することができた。

(3) ハブ構造の開発

高周速の回転に耐えるハブ構造の開発は、FRP フライホイールの大きな技術課題のひとつである。すなわち、FRP は繊維方向に強く大きな伸び（1.5～2%）に耐えるが、FRP リングの内径も高速回転時には同じだけ伸びるので大きな伸びに追従してなおかつ自身が破壊しないハブ（軸とリングの締結部品）が必要である。本研究では、回転時に発生する応力が低いハブの構造について検討を行った。

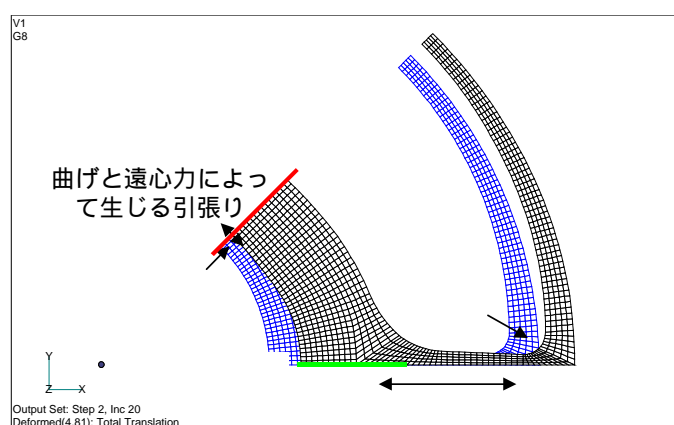
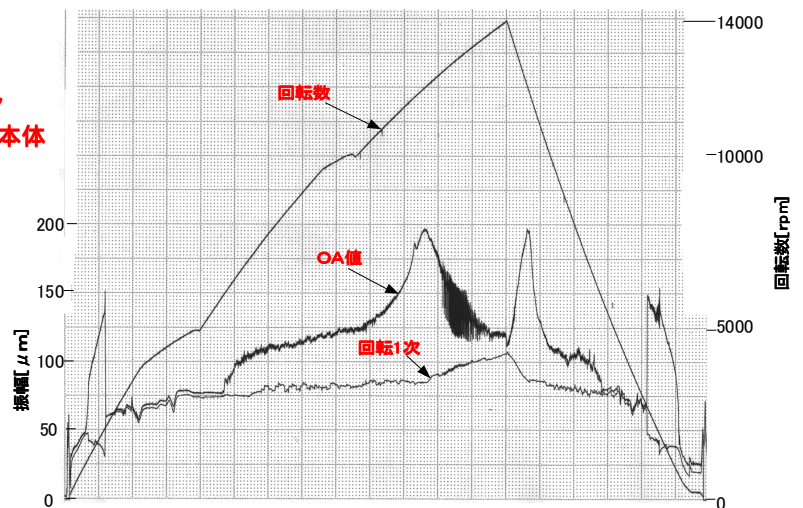
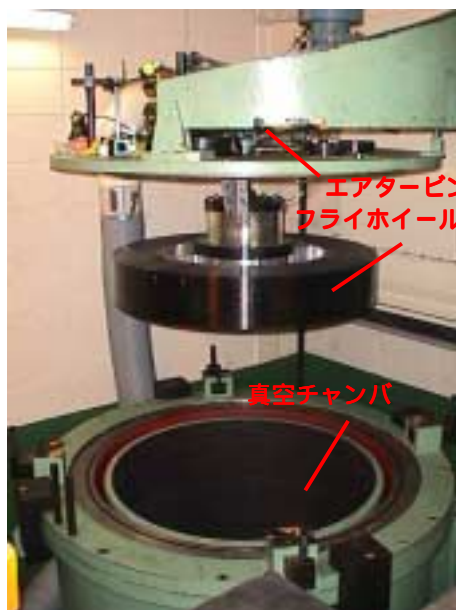


図 2.2.3-3 真っ直ぐなスポーク形状の場合の変形図

平成7年年度～平成11年度の第1フェーズの研究で用いた真っ直ぐなスポーク構造では曲げや遠心力のために、図2.2.3-3の部、部、部の応力が高い構造となっていた。特に部には曲げの影響により大きな応力が発生していた。これを改善するために、4本のスポーク形状を改良して曲げを緩和する方法を検討した。スポーク形状を斜めにすることにより、アルミハブ外側円筒部の伸びは大きくなり、FRPリングに対する変形追従性は改善された。しかし発生応力は改善できず、真っ直ぐなスポーク形状が適切であることがわかった。

以上のマルチリング製作法の検討、ハブ構造の検討を実施した後に製作したフライホイール本体を用いて回転試験を実施した。試験状況と結果を図2.2.3-4に示す。14,000rpmまでの回転試験を通して回転1次成分の軸振動と位相に急激な変化はなく、安定して回転している。アルミハブ内周部の最大応力発生部にはひずみゲージを貼り付けたが、回転試験前と直後でひずみ測定値に変化はなかった。以上により、回転数14,000rpm(周速733m/s)までの範囲の回転が可能になったことがわかった。



(a)テスト状況

(b)テスト結果(時刻暦チャート)

図2.2.3-4 スピンテスト状況と結果

2.3 超電導軸受高性能化の研究開発（産総研）

(1) 超電導軸受高性能化

a. PID 包含 LQ 制御

弾性モードの振動抑制に制御型軸受で位相進み制御による減衰力の増加を図る場合、高周波領域での利得の増大による不安定化を導きやすい。そこで、制御系の信頼性の向上を図るため、弾性モードの合理的な低次元化モデル化による最適制御則を開発した。曲げ1次モードまで考慮できる3質点モデルを用いる。軸受系は位相進み補償器によって安定化させ、そのサーボ剛性を利用して有限要素解析で分布定数系のモード成分を求め、その後、集中定数系のモード系と一致するようにモード行列の修正を行い、物理座標系の質量行列と剛性行列を導出する。この系に線形二乗最適（LQ）制御を適用する。制御実験結果を図 2.3-1 に示す。PID 制御のみでは共振振幅が見られる一次曲げモードが低次元化モデル LQ 制御を併用することで振幅が十分低減できることが確認できた。

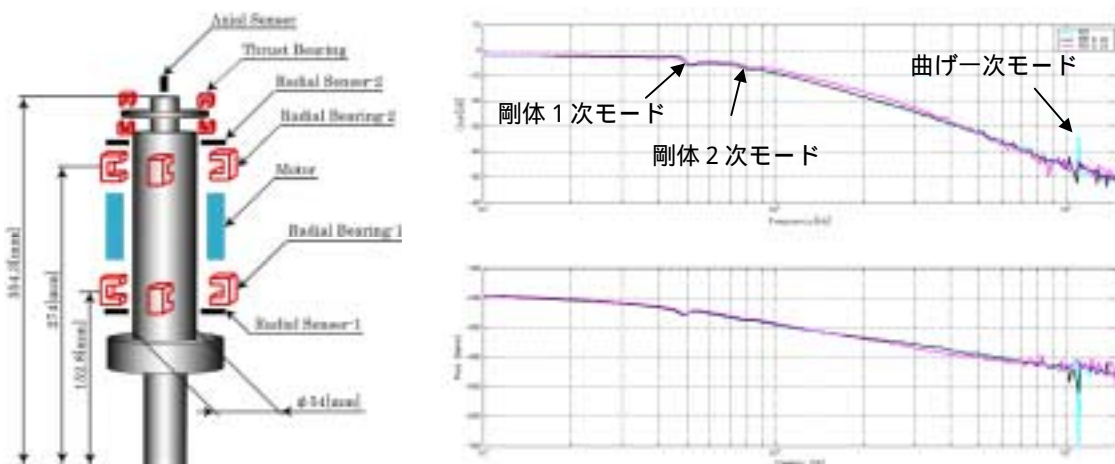


図 2.3-1 試験ロータ軸と制御応答

b. 非線形制御

機械式補助軸受に接触しても安定な制御力を電磁石で発生させるため、電流の二乗に比例し、ギャップの二乗に逆比例する非線形磁気力特性を考慮する制御則を開発した。剛体モード振動を対象として、この非線形力を考慮できる安定な制御則をリアプノフの直接法で導いている。この制御アルゴリズムはゼロバイアス電流制御と同じであり、制御力は、軸変位と反対側の電磁石に電流を流して吸引力を作用させ、軸変位の方向の電磁石には電流を流さない。計測している変位によって電流を流す電磁石を制御プログラムで切り替える。

図 2.3-2 に変数の定義図と 6600rpm における制御応答を示す(試験装置は図 2.3-1 の場合とは異なる)。対向する電磁石の一方のみ制御電流が作用して安定な制御を行っていることが確認できる。

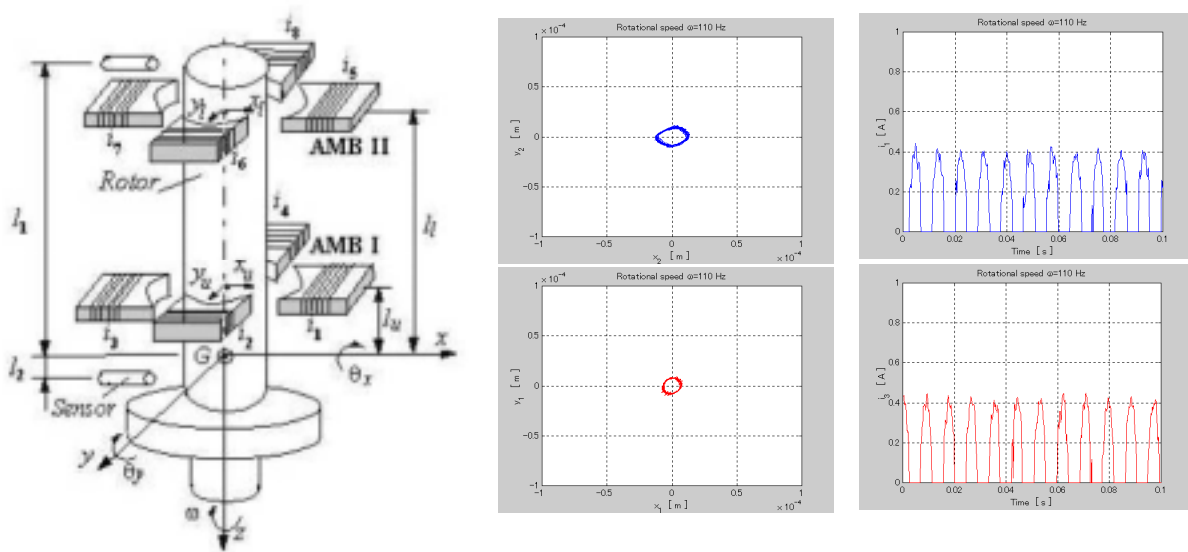


図 2.3-2 ロータ軸構造と制御応答（6600rpm）

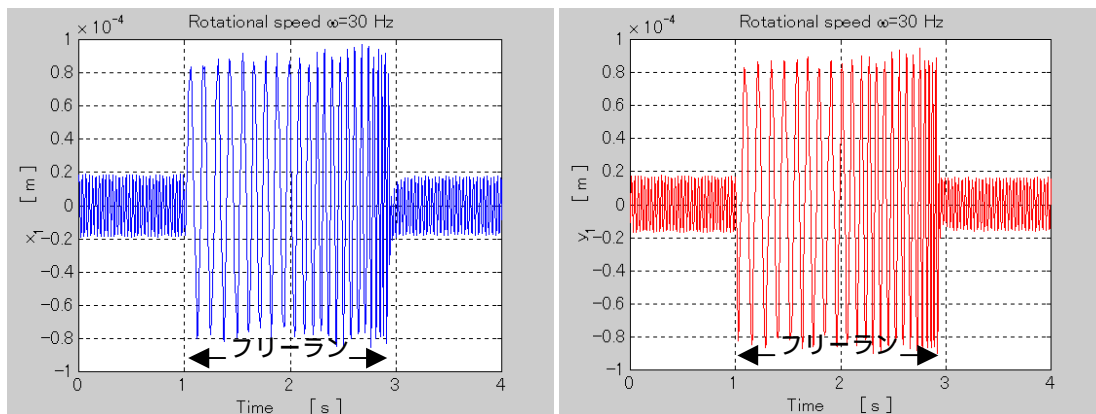


図 2.3-3 フリーラン（タッチダウン）制御

図 2.3-3 にタッチダウン応答を示す。制御をオフしてフリーラン（タッチダウン状態）後、制御オンとすると安定な回転状態が即時に実現することが確認できた。

c. フィードフォワード制御

仮想的波動伝搬系のオンラインシミュレーションによって波動吸収する波動制御手法を考案し、ねじり振動系と梁で予備的に制御手法の確認実験を行った。

(2) 軸受関連部材のクリープ特性評価

本フライホイールシステムにおいては、ロータの構成材料である炭素繊維はロータの円周方向に繊維軸が並ぶように作製され、非常に高い引張応力が繊維軸方向に負荷されることになる。そこで、本研究では繊維軸方向の引張クリープ試験を行う。

通常のクリープ試験機では、試料を真空状態にすることができない。そのため、

まず雰囲気を変えて真空 ($10^{-2} \sim 10^{-3}$ Torr) にしてクリープ試験を行うことができる装置の検討、作製を行った。クリープ試験機にはいくつかの方式があるが、長期の試験であること、また材料試験におけるばらつきを考慮してある程度試験本数を増やす必要があることから、複数同時試験ができ構造がシンプルになる、重りによる定荷重負荷方式を採用することにした。試料は炭素繊維数千本の束で構成されるストランド試料を用い、アルミタブへ接着剤で固定したものを試験片とし、試験装置の作製を行った。

まず大気中で負荷を変化させて 24h 程度の短時間のクリープ試験を行った。61.74kgf では 3 本中 2 本が 24h 以内に破断しなかった。これは静的な引張試験の平均の破断荷重(平均値 60.4kgf、試験数 27)よりも大きな値であり、引張試験に改善の余地があることを示唆しているが、ばらつきを考慮すると静的引張破断応力では 24h 程度以上の寿命を持つものと考えられる。

次に、長時間のクリープ試験を行うにあたり、設定荷重は静的な破断荷重の 90% 以上である約 56kgf とし、上述のようにペローズ等の影響を考慮しつつ、これに近い値となるように重りを負荷して真空中及び大気中において 500h 超の長時間クリープ試験を行った。試料破断もしくは試験終了までの時間を図 2.3-4 に示す。現在のところ、試験数が少なく、上記条件における 500h 程度のクリープ試験の結果、大気中と真空中で明確な差は認められていない。今後、500h 以上の長時間の試験を行っていく。

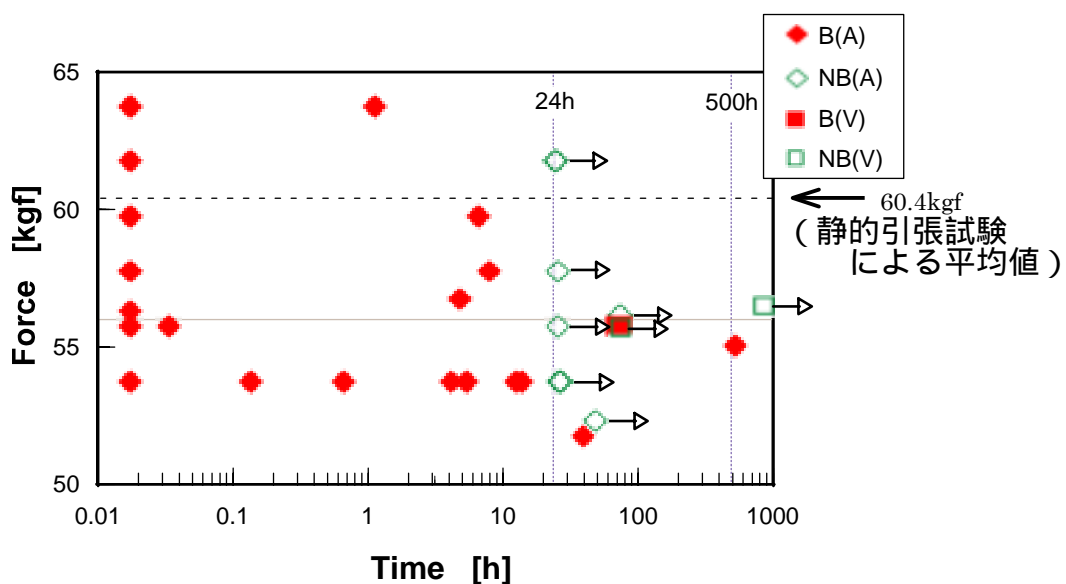


図 2.3-4 負荷荷重と破断（もしくは試験終了）までの時間の関係
 B:破断、NB:未破断、(A):大気圧中、(V):真空中

添付資料 1 : 特許、論文等の状況 (平成 15 年 2 月現在)

(件)

年度	1 2、1 3	1 4	1 5	1 6	累 計
特 許	1	0			1
論文等	2 3	1 3			3 6
計	2 4	1 3			3 7

[特許]

名 称	出願会社	出願年月	出願番号
磁気軸受装置	光洋精工(株)	1 3 年 1 1 月	特願 2001 - 344788

[論文等]

年月	発表形態または発表先	発表題目	発表者
13.6	超電導技術動向報告会	フライホイール電力貯蔵用超電導軸受の開発現状	ISTEC
13.6	低温工学 (6 月号)	エネルギー問題とフライホイール電力貯蔵	ISTEC
13.6	第 5 回電気学会 パルク高温超電導体応用動向調査専門委員会	フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術の研究開発について	ISTEC
13.7	3 rd International Workshop on Processing and Applications of Superconducting (RE)BCO Large Grain Materials	YBCO Bulk of the Superconducting Bearing for 10kWh Flywheel	ISTEC
13.7	四国電力グループ 第 3 8 回 研究発表会	フライホイール電力貯蔵用超電導軸受の軸降下低減技術の研究	四国総合研究所
13.8	電気評論 (8 月号)	軸降下低減技術検討及び超電導軸受載荷力評価試験	四国総合研究所
13.9	14 rd International Symposium on Superconductivity (ISS 2001) , Physica C	Present Status of R&D on Superconducting Magnetic Bearing Technologies for Flywheel Energy Storage System	ISTEC
		Fabrication and Evaluation of Superconducting Bearing Module for 10kWh flywheel	
13.9	国際フロンティア産業メッセ 2001 超電導テクノロジーフェア	フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発	ISTEC

13.11	第22回SRL研究報告会 「急浮上する高温超電導技術」	10kWh 級フライホイール用超電導軸受モジュールの作成及び試験	ISTEC
13.11	第2回 日韓応用超電導・低温工学ワークショップ	R&D on Superconducting Bearing Technologies for Flywheel Energy Storage System	ISTEC
13.11	日本応用磁気学会誌 (11月号)	高温超電導と磁性その応用	ISTEC
13.12	電気学会リニアドライブ研究会 第8回 磁気浮上系における 連成問題調査専門委員会	フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術の研究開発	ISTEC
		軸降下低減技術検討及び超電導軸受載荷力評価試験	四国総合研究所
		中型フライホイール用制御型磁気軸受	光洋精工
13.12	超電導Web21(12月号)	フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発の目指すもの	ISTEC
		フライホイールとは	
		フライホイールの動向について	
		軸受用バルク超電導体の現状	石川島播磨重工業
14.1	未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会 第51回 ワークショップ	超電導フライホイールの開発状況について	ISTEC
14.3	第49回 応用物理学関係連合講演会	(Nd-Eu-Gd)-Ba-Cu-O 溶融バルクの作成とその捕捉磁場特性	イムラ材料開発研究所
14.3	未踏科学技術協会 超伝導エネルギー・環境応用に関する調査報告書	超伝導軸受型フライホイールエネルギー貯蔵と環境	ISTEC
14.5	超電導技術動向報告会	フライホイール電力貯蔵用超電導軸受の開発	ISTEC
14.6	International Cryogenic Materials Conference	Progress of Superconducting Bearing Technologies for Flywheel Energy Storage System	ISTEC
14.7	四国電力グループ 第39回 研究発表会	フライホイール電力貯蔵用超電導軸受の軸降下低減技術の研究(第2報)	四国総合研究所

14.9	2002年秋季第60回 応用物理学会学術講演会	(Nd-Eu-Gd)-Ba-Cu-O 溶融 バルクの捕捉磁場特性の組成 依存性	イムラ材 料開 発 研 究 所
14.11	超電導Web 21 (11月号)	フライホイール電力貯蔵用超 電導軸受技術研究開発の現状	ISTEC
		フライホイール電力貯蔵とは	四国総合 研究所
14.11	15 rd International Symposi- um on Superconductivity (ISS 2002), Physica C	Characterization of YBCO bulk superconductors for 100kWh flywheel	ISTEC
		One-piece Ring Nd-Fe-B Permanent Magnets and its Performance for Radial Type Superconducting Mag- netic Bearing	住友特殊 金属
		Field trapping capability of melt-proceed(Nd-Eu-Gd)-Ba- Cu-O bulk superconductors	イムラ材 料開 発 研 究 所
		Suppression of Rotor Fall for Radial-type High-Tc Superconducting Magnetic Bearing	四国総合 研究所
14.11	低温工学 (「バルク超電導材料の基礎 と応用」特集号)	超電導フライホイール開発の 現状	ISTEC
		ラジアル型超電導軸受におけ るロータ降下の抑制	四国総合 研究所
14.11	第23回SRL研究報告会 「本番を迎える高温超電導技 術」	100kWh 級フライホイール用 軸受に対応したY系超電導バ ルクの評価	ISTEC

添付資料 2 : 特許、論文発表等 (産総研)

【H12FY】

(特許) 1 件

・「振動エネルギー吸収装置」,「西郷宗玄」,「特願 2001-020197」,「2001.1.29 申請」

(論文) 0 件

(口頭発表) 3 件

・「複合材料中の繊維分散状態が引張特性に及ぼす影響」,「澤田吉裕、藤田和宏」,「第 8 回ファイラーシンポジウム」,「2000.11」

・「炭素・黒鉛材料のインピーダンス測定」,「塩山洋、藤田和宏、澤田吉裕」,「第 27 回炭素材料学会年会、北九州」,「2000.12」

・「繊維配置が不均一なモデル複合材料の破壊挙動に及ぼすマトリックスの影響」,「廣澤慶文、田中基嗣、北條正樹、落合庄治郎、中西洋一郎、澤田吉裕、藤田和宏」,「第 30 回 FRP シンポジウム、京都」,「2001.3」

【H13FY】

(特許) 0 件

(論文) 3 件

・「Torsional Vibration Suppression by Wave Absorbing Control Using Imaginary System」,「M. Saigo, N. Tanaka, D. H. Nam」,「Journal of Sound and Vibration」,「Accepted to be published」

・「Energy Absorption of Impact Damage in CFRP Laminates with Different Lay-up Sequences」,「I. Nagai, T. Tanaka, M. Hojo and S. Ochiai」,「Mat. Sci. Res. Int. STP-2」,「2001」, pp.271-275

・「Effect of Cross-Sectional Textures on Transverse Compressive Properties of Pitch-Based Carbon Fibers」,「K. Fujita, Y. Sawada and Y. Nakanishi」,「Mat. Sci. Res. Int., vol. 7」,「2001」, pp. 116-121

(口頭発表) 4 件

・「仮想的波動吸収制御による曲げ振動抑制」,「西郷宗玄、菊島義弘」,「日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2001, 東京」,「2001.8」

・「フレキシブルロータの磁気軸受による制御」,「信太秀夫、渡辺亭、背戸一登、西郷宗玄」,「日本機械学会関東支部講演会、千葉」,「2002.3」

・「Energy Absorption of Impact Damage in CFRP Laminates with Different Lay-up Sequences」,「I.Nagai、T.Tanaka、M.Hojo and S.Ochiai」,「International Symposia on Material Science for The 21st Century」,「2001.5」

・「プラスチックの極低温機械的特性評価」,「永井功、田中裕子」,「日本材料学会 第 50 期学術講演会」,「2001.5」

・ 実用化、事業化の見通しについて

1. 実用化、事業化の見通し

1.1 電力負荷平準化用途

1.1.1 実用化の見通し

(1) 実用化時のイメージ

a. 実用化時期、設置場所

本プロジェクトで超電導軸受の高性能化が図られて 100kWh 級フライホイールシステム用軸受の見通しが立つとともに、MWh 級システムに適したアウターロータ構造を 10kWh 級システムにより検証できるため、MWh 級システムの実現に向けた基礎技術が揃うことになる。

引き続き 100kWh 級システム、MWh 級システムと順次、大容量化のステップを踏んでいけば、最終的に電気事業の日負荷平準化用途に適用できる 10MWh 級システムが実現され、2010 年代半ば頃から先ず MWh 級の市場参入が考えられる。

電力負荷平準化を目的とした電力貯蔵システムは、極力、需要地に近い所に設置することが、エネルギーの流れから望ましく、また、昼間の 8 時間程度の間、発電をすることから出力としては 1,000kW 程度となる。したがって、10MWh 級システムは規模的に配電用変電所(変圧器容量 7.5~30MVA)に設置するのが適当であり、超電導フライホイール 1 台で一般家庭の約 1 千戸分相当の電力量を貯蔵・供給するようなイメージ(図 1.1.1-1)となる。

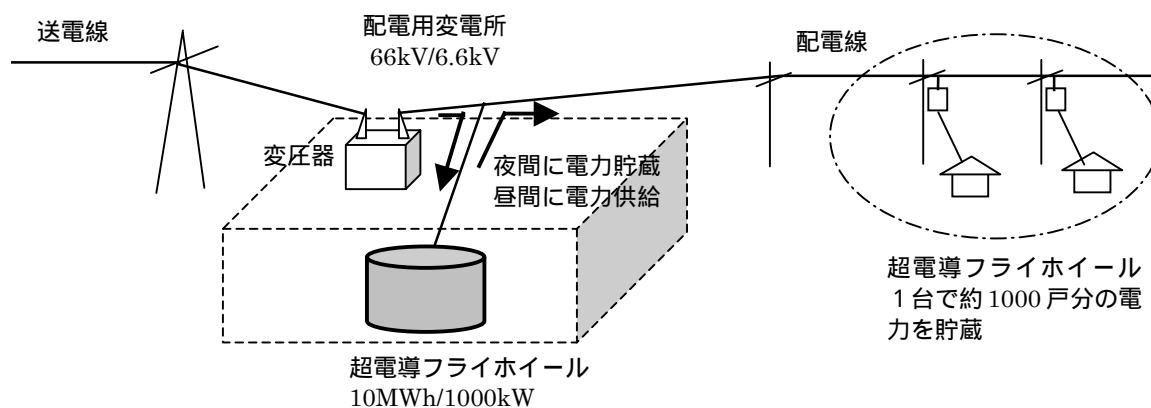


図 1.1.1-1 負荷平準化用超電導フライホイールの実用化イメージ

b. 市場

総合エネルギー調査会/総合部会/需給部会(2001年7月)の報告によれば、2010度の電源設備における揚水発電の比率は約11%となっている。(表1.1.1-1)この比率がその後も維持されるものとする、毎年の増分発電設備の約11%が揚水発電を含む電力貯蔵システム全体の新規開発量となる。電力貯蔵システムとしては既存技術である揚水発電の他に、最近ではNAS電池などの新型電池電力貯蔵も実用化されはじめている。超電導フライホイールは、これらの電力貯蔵システムに比べてエネルギー貯蔵効率が高いことから、実用化されれば次第に導入比率を高めていくと予想されるが、仮に2020年頃に電力貯蔵システムのうち20%が超電導フライホイールになると仮定すると、その頃の年間の増分発電設備量は約500万kWと想定されるので、超電導フライホイール導入量は年間10万kW(500万kW×0.11×0.2)、300億円規模の市場に成長すると見込まれる。

表 1.1.1-1 年度末発電設備容量の推移と見通し(万kW)

年度	1999		2010 (基準ケース)	
		構成比率		構成比率
火力	13434	59.9	15343	57.6
原子力	4492	20.0	6185	23.2
水力 一般	2002	8.9	2070	7.8
揚水	2431	10.8	3001	11.3
地熱	52	0.2	59	0.2
計	22410	100	26657	100

出所 「今後のエネルギー政策について」2001年7月
総合エネルギー調査会/総合部会/需給部会

(2) 波及効果

a. 成果から期待できる関連分野へのインパクト

超電導技術の応用分野は、電力分野では発電機、送電ケーブル、変圧器、限流器が、また、産業分野では磁気分離、電動機、強磁場応用などが考えられている。

本事業で開発される超電導軸受は液体水素の輸送・供給用の低温ポンプに、また、超電導バルクは磁気分離、バルク浮上のリニアモーターへの波及が予想される。

また、本事業により開発される超電導フライホイールは、高温超電導バルクを利用した初めての本格的な機器になると考えられ、超電導技術の産業応用への展開促進が期待される。

b. 当該分野の研究開発を促進する波及効果

液体窒素領域におけるイットリウム系高温超電導バルク材に対する要求仕様が明確化されたことから、希土類元素系高温超電導材料の開発を活発化させている。

1.1.2 事業化までのシナリオ

a. 開発ステップ

最終目標である負荷平準化用 10MWh 級システムまでには、現状の 10kWh 級から 3桁大きくする必要がある。しかし、CFRP 製フライホイールの大きさは 10kWh 級では直径 1m であるが、10MWh 級では直径 5~6m に大径化するとともに、周速も 800m/s から 1,500m/s 程度へと高速化を図っていく必要があるため、一気に大容量化することは難しく、数種のステップが必要となる。

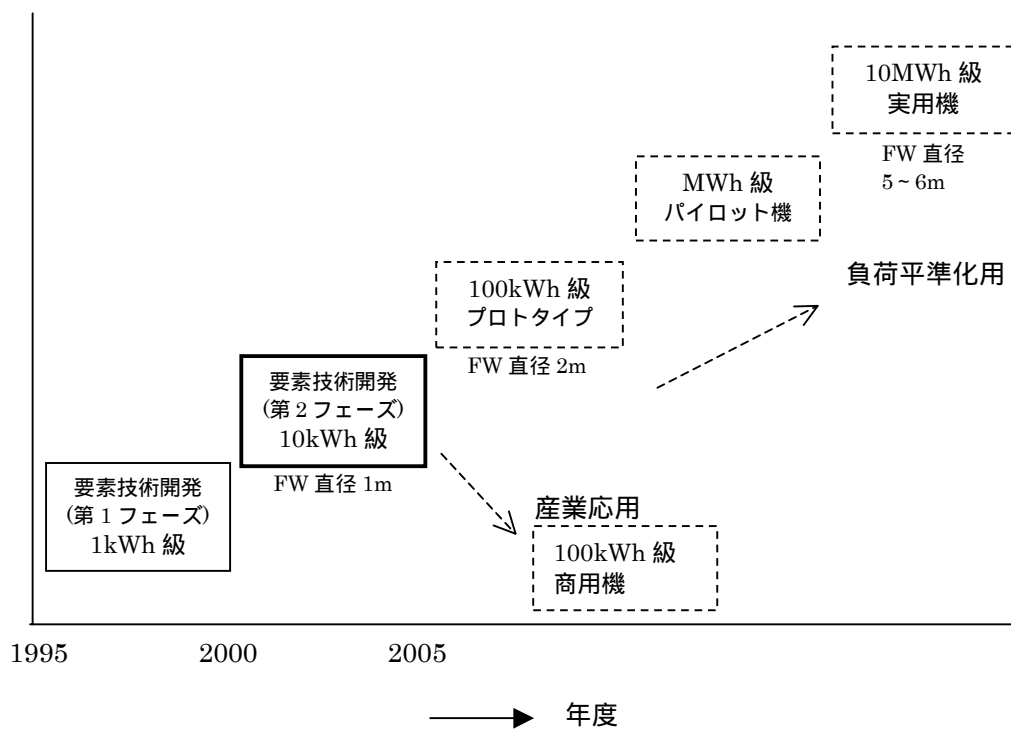
100kWh 級システムの技術が確立できればフライホイール径は 2m となり、10MWh 級の約 1/2 のスケールに近づくので、10MWh 級実現の目処がほぼ見通せるようになる。100kWh 級では数分の発電であれば数千 kW の出力を取り出せるので、データセンター用無停電電源装置としてなど産業用途への展開が開ける。

b. コスト

超電導フライホイールと競合する技術としては、既存技術である揚水発電、実用化が始まったばかりの NAS 電池等の新型電池電力貯蔵がある。超電導フライホイールがこれらの代替として導入するためには、建設コストが同等以下にならない。揚水発電の建設コストが約 20 万円/kW (8 時間発電) であるから、これに超電導フライホイールを分散設置できることによる送変電設備増強の軽減効果、エネルギー貯蔵効率が高い効果などを考慮しても高々 2 倍程度以下でないと導入されないと考えられる。

幸い、超電導フライホイールは比較的構造が簡単で、かつ、使用する超電導材料に直接大電流を流すわけではないのでコスト低減を図りやすい。また、電力変換器は SMES や NAS 電池などのパワーエレクトロニクス技術を活用できる。

超電導フライホイールの使用材料のうち、現状で最も高価なものは超電導バルク材であるが、これは現状では具体応用製品がなく、研究開発用に細々と受注生産がなされているため、kg 当たりの価格は数百万円にのぼっている。しかし、今後、バルク材の応用製品が出現して大量生産技術が確立されれば、原料に高価なものが含まれていないので価格は劇的に低減していくものと考えられ、システムの建設コストは前記限界コスト以下に下がるものと期待される。



1.2 その他の産業応用用途

1.2.1 国内外のフライホイール使用状況

フライホイールはこれまで広い範囲での応用が検討されており、いくつかの用途では実際に使われている技術である。フライホイールの利点は、充放電サイクルに関して制約がほとんどないこと、また電力変換効率が高いところにある。これまで検討されている、あるいは実際に使われているフライホイールの用途は、次のようなものがある。

【電力用途】

- ・電力負荷平準化
- ・電力系統制御 / 負荷変動補償
- ・自然エネルギー対応
- ・電力品質対策

【産業・特殊分野用途】

- ・核融合研究施設電源
- ・電気鉄道用
- ・電気 / ハイブリッド自動車
- ・宇宙用

などである。フライホイールの各種用途について、表 1.2.1-1 にまとめる。

これらの用途の内、いくつか実際にフライホイールが利用されている事例を挙げると、次の通りである。

(1) 電力系統安定化・動揺吸収

沖縄電力において、電力系統の周波数安定化のため ROTES と呼ばれる、200MJ (55.5kWh) 26MW のフライホイール発電機を導入。夜間の周波数調整能力の確保と、拓南製鉄所の電気炉の負荷変動を吸収し系統周波数への影響を抑える目的で設置されている。

(2) パルス負荷電源

日本原子力研究所の核融合実験設備 JT-60 では、核融合実験設備への短時間の大量電力供給のため、フライホイール効果を持つ交流発電機を利用している。フライホイール発電機は、すべて合わせると3台あり、3台の発電機の総容量は110万kVA、蓄積放出エネルギーは3台あわせて8GJ(2,200kWh)。最も大きなフライホイール発電機は4GJ(1,100kWh)の貯蔵容量を持つ、フライホイール本体は直径6,600mm、軸方向長2,400mm、総重量640tで、回転数は420~600rpmである。

(3) 電気鉄道用フライホイール

京浜急行逗子線でフライホイール実機が導入されている。これは、回生制動により列車の運動エネルギーが架線に戻され架線の電圧が上昇した場合、回生制動が失効するばあいがあり、ブレーキの性能維持が目的である。京浜急行のフライホイールは、蓄勢エネルギーが 25kWh、蓄勢時で 1,800kW、放勢時で 3,000kW の電気的入出力の定格となっている。

モーリシャスの首都ポート・ルイスに導入された新しい軌道交通システムでは、車体側にフライホイールを搭載している。車両は 1 両編成で座席定員 20 名、総定員 34 名の大きさである。

(4) 電力品質対応用

1 秒未満のごく短い時間での電圧低下である、瞬時電圧低下（瞬低）減少は、電圧の 20%以上の低下が 200m 秒以上継続すると、計算機などの電子回路、水銀灯などの照明、インバータ電動機が停止する。このため、工場での生産停止、製品の劣化、データセンターでのサーバー等の停止、故障の危険性がある。このような瞬低の発生は、日本の電気協同研究の調査では、年間平均 5 回、また、米国の IEEE の報告では、年間平均 16.3 回としている。国内の調査では、1 回あたりの瞬低被害額が多いのは半導体産業で、1 億円 / 回、他の産業でも概ね数百万円 / 回 ~ 数千万円 / 回被害額が想定されている。

この対応として、米国勢の Active Power-Caterpillar や、欧州勢の Urenco、Pillar、Hitec などが、瞬低対策を中心とするフライホイールシステムを開発している。また、超電導軸受けを利用した Boeing のフライホイールも瞬低を含む電力品質市場を狙っているといわれ、現在 35kWh の装置を開発中である。これらの中には、短い時間帯であるがカバーできる電力需要は 1,500kVA 近くになるものがあり、また非常用発電機と連動した装置も売り出されている。

この市場は 2000 年頃から急激に立ち上がりつつあり、欧米では電池を使わない UPS として人気があり、Active Power 社は計算機用バックアップを中心に世界で 300 ~ 400 台程度の販売実績があると見積もられている。

また、独 Pillar 社は 1998 年より出荷を初め、2001 年 1 月時点で 383 台を販売しており、フライホイールの市場がワールドワイドに急拡大している。

表 1.2.1-1 フライホイールの各種用途

	負荷平準化用	電力系統制御/負荷変動補償	自然エネルギー対応	電力品質対策	核融合研究施設電源	電気鉄道用	電気/ハイブリッド自動車	宇宙用
目的	電力需要の日間の変動を平準化する応用	系統の安定化や負荷変動の影響を排除する応用	自然エネルギー、特に風力の変動の影響を排除する応用	瞬低や停電対策として無停電電源としての応用	パルスの電力負荷への対応	電気鉄道の加速、減速時のエネルギーの充放電	自動車の減速エネルギーの有効利用	衛星の姿勢制御を兼ねた電力貯蔵利 用
現状	研究開発段階	研究開発段階、一部実用化	研究開発段階	商用化段階	実用化段階	研究開発段階、一部実用化	研究開発段階	研究開発段階、一部実用化
重要な仕様	充放電エネルギーは～10MWh、充放電時間は各々～8時間	出力は～数十MVAr、充放電サイクルは数秒～数十秒	電圧対策としては10～20秒の充放電、出力200kW以上	出力～2MW、放電時間10秒～数分で	出力100MW以上、充放電サイクル10秒以内	出力2MW以上、充放電時間30秒前後(貯蔵容量25kWh)	出力数十kW以上、放電時間数秒	出力数kWまで
超電導軸受け用冷凍機負荷と真空ポンプ動力の許容値	10MWh～1.2MWのケースでは、40kW以下に抑える必要性あり。	SVC SVGと同等とするには、50kWh～20MW フライホイールで1800kW程度以下にする必要性あり。	SVC SVG並みにロス低減することは不能。10kWh～3600kWのフライホイールでは、200kW以内が必須	一般の無停電電源装置なみのロスに抑えるには、50kWh～2000kWの装置では、100kW以下		25kWh～2000kW フライホイールで、回生制動の有効利用が成立するためには、15～30kW以内は必須	小型のため超電導軸受けの必要性小	小型のため超電導軸受けの必要性小
競合技術	揚水発電、電池電力貯蔵(NAS、バナジウムレドックスフロー、亜鉛臭素、Regenesys)	電池電力貯蔵(NAS、バナジウムレドックスフロー、Regenesys)、SMES(超電導エネルギー貯蔵)、SVC(静止型無効電力補償装置)	電池電力貯蔵(NAS、バナジウムレドックスフロー)、SMES、コンデンサ	電池電力貯蔵(鉛蓄電池、亜鉛臭素、NAS、バナジウムレドックスフロー)、DVR(コンデンサ)、マイクロ SMES	中規模 SMES	電池、電気二重層キャパシタ、SMES	電池(ニッケル水素、リチウム二次電池)、電気二重層キャパシタ	ニッケル水素、リチウム二次電池、電気二重層キャパシタ

1.2.2 超電導フライホイールの応用分野

超電導フライホイールの用途として、今後、新たに有望と見られるものは以下の用途である。

(1) 自然エネルギー対応電源

風力発電をはじめとする、自然エネルギー電源の問題点の一つは、電氣的出力をコントロールしにくいことにある。特に風力発電は、自然の風の状態に大きく左右されて出力が変動すること、また、シェアの大きい誘導発電機タイプでは、発電出力が上がると無効電力を大量に消費し、以下のような理由で電圧の乱高下が激しくなるという特徴を持っている。

- ・ 通常の風の強弱
- ・ 風の方向の変化
- ・ 風車の羽根の位置による影響
- ・ 危険風速に達した場合の発電停止

最近では風力の出力変動は規則性のないホワイトノイズであり、長時間の出力の平滑化は大きな貯蔵容量が必要になり、コストが嵩むことが懸念される。このため、風力の出力変動に伴う電圧問題に関しては、短時間の出力変動に対しては有効電力（フライホイールの蓄積エネルギーの出し入れ）出力の変化で吸収し、長時間の変動に対しては無効電力制御で電圧のみを制御する方法が考えられる。この際に必要な容量は、定常的な短時間の出力脈動を抑制するためには風力容量の 10～20%、発電可能風速を超えたりして急速に風力出力がなくなるケースでは 100%の容量が必要となる。本土のウインドウファームの規模は平均的に 20MW 程度と考えられるので、定常的な変動吸収としてウインドウファーム毎に 2,000-3,000kW 程度の容量が必要と考えられる。また、島嶼では、2, 3 本の風力が急速に停止するケースを考えると 3,000kW 程度の出力が必要と考えられる。

また、島嶼地域では、風力発電の急停止に備えて、ディーゼル発電機の立ち上げまでの時間をフライホイールでつなぐことが考えられる。100kWh-3,000kW の場合には 2 分出力が継続可能なため、ディーゼル起動に必要な時間は定格的に稼げると考えられる。

(2) 電気鉄道用

欧州は日本同様通勤に鉄道を利用する習慣があり、旧来の鉄道を増強するケースが出ている。Urenco 社では、フライホイールの市場として、電気鉄道に注目している。

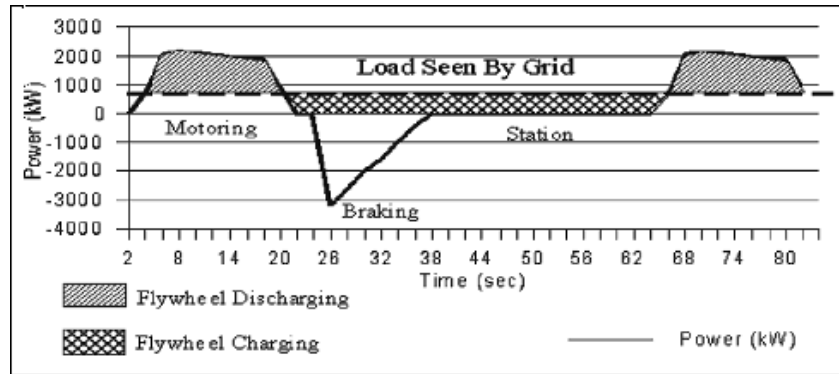


図 1.2.2-1 Urenco 社による電鉄の充放電パターン

図 1.2.2-1 の電鉄の運転パターンでは、回生制動の回収量は 14 秒×800kW 程度、すなわち 3kWh 程度である。この場合、フライホイールの変換器・電動/発電機の往復の効率を 85%と考えると捨てずに有効活用できる電力量は 1 回のブレーキングで 2.55kWh である。回生エネルギーをより吸収しようと考えた場合には、15.3kWh×3,000kW の容量が必要となる。このため、既存のフライホイールでは 3 台程度必要になり、これを一括化するためには 20kWh 以上の容量のフライホイールが必要となる。

(3) データセンター用バックアップ電源

データセンターは、インターネット用サーバーを専用に格納するビルないしフロアを指す。データセンターは、ユーザーのインターネット事業用のサーバーをアウトソーシングして管理する事業で、サーバーラックに 2, 3 台のサーバーを格納して、図書館のように並べて集中管理するシステムである。事業用サーバーに関しては、その停止によるユーザーの機会損失コストが非常に大きく、証券取引では 1 時間に 5,000 万ドル~7,000 万ドルの被害になるという米国での調査事例もあり、非常に高い電力供給信頼度を要求する。

このため、一般にデータセンタービルでは、100kW 未満の分散型の UPS (無停電電源) と 100kW 以上の集中型 UPS ないし非常用電源の組み合わせのような 2 重のバックアップをしているほか、電力供給系統も 2 ルートを確認し、一方を予備として常時持っているケースが大多数である。データセンターの電力需要は 1~2kW/m² 程度とされており、1,000m² のデータセンターでは 2,000kW 程度のバックアップ装置が必要となる。

表 1.2.2-1 データセンター向けバックアップ電源の比較

	フライホイール	鉛 UPS	レドックスフロー	NAS 電池
定格	1000~3000kW/50~100kWh	2000kW	1000k W / 過負荷時 2000kW/1000kWh	1000k W / 過負荷時 2000kW/8000kWh
運転	常時待機し、停電時に最長 2 分間放電し、非常用発電 機立ち上げ	常時待機し、停電時は電池 の充電電力を放電	常時待機し、停電時は 電池の充電電力を放電	昼夜充放電運転を行 い、停電時は電池の残 存充電電力を放電
瞬低回避能力	2000kW	2000kW	2000kW	2000kW
停電バックアップ 能力	2000kW:無制限	2000kW:30 分程度	1000kW:1 時間	1000kW:運転断面に より0~7 時間
寿命	20年	3年に一度電池交換	10年	15年
初期コスト	10 万円/kW+非常用発電 機 10 万円/kW	20 万円/kW	17万円/kW	25 万円/kW
初期コストの均等 化年経費(金利 5% 想定)	1.6 万円/kW年	5.6 万円/kW年	2.2 万円/年	2.4 万円/年
ランニングコスト	0.5 万円/kW年	0.7 万円/kW年	0.7 万円/kW年	-0.6 万円/kW年
トータル年経費	2.1 万円/kW年	6.3 万円/kW年	2.9 万円/kW年	1.8 万円/kW年
注釈	常時通電ロスを6%と見込 む。昼間電力 10 円と想定。	常時通電ロスを8%と見込む。 昼間電力 10 円と想定。	常時通電ロスを8%と見 込む。昼間電力 10 円と 想定。	常時通電ロスを8%と 見込む。一方、深夜電 力 4 円、昼間電力 10 円、負荷平準化時の貯 蔵効率 80%による電気 料金削減効果を勘案。

ところで、表 1.2.2-1 はデータセンター用バックアップ電源を考えた場合の、競合技術とフライホイールのコストの比較である。フライホイールが 10 万円 / kW で実現する場合には非常用電源との組みあわせでも、ライフサイクルで考えた場合には既存の UPS の 1 / 3 となるのがわかる。一方、新型電池では、NAS 電池が深夜電力を充電し、昼間の電力をカットする負荷平準化運転をすれば、単価 25 万円 / kW となればフライホイールよりも見かけ上安くなる。ただし、放電後から次の充電までに時間はバックアップする電力がなくなっているため、停電に対する備えとしては不備が残ることになる。

従って、フライホイールは、データセンター向け集中型バックアップ装置として、極めて魅力的な電源となる。

1.2.3 早期実用化について

超電導フライホイール開発は現在第2フェーズの3年目を終了したところであり、ここまで長期的な観点から将来の負荷平準化用電源を目標に実施してきている。しかしながら、ここにきて早期市場投入の要求が強まったため、新ためて技術課題及び市場性を調査し、早期実用化の検討を行った。

(1) 超電導フライホイールの技術開発状況

超電導フライホイールの開発は世界各国で行われており、その中で日本と米国が進んでいる。米国では国プロの一環でボーイング社が10kWh級の要素開発を終了させ、この度35kWh級装置の商業化を狙って、新たに開発がスタートしている。

日本では10kWh級装置と100kWh級超電導軸受の開発を実施しているがやはり装置システム上の課題として高速回転軸振動制御、超電導軸受の軸降下抑制等が大きな課題となっている。しかしながらこれらの課題を1~2年後に克服して、世界で初めて10kWh級装置を製作・運転したときには、従来式フライホイールの商品化で出遅れている日本が超電導フライホイールの実用化に向かって1歩も2歩もリードすることになる。

また、この方式は日常生活でも使っている原理であり、しかも環境に優しいとなれば国民から期待される製品になるのは間違いない。

(2) 超電導フライホイールの魅力

超電導フライホイールは超電導軸受を用いない従来式フライホイールよりも電気ロスが少なく、コンパクトで低コストの電力貯蔵装置に成り得る。その理由は次の通り。

- ・ 完全な非接触軸受となり、しかも超電導軸受特有の自己制御特性により待機時間中等の電気ロスを大幅に低減できる。
- ・ 超電導軸受特有の自己制御特性により、定格回転数を大幅に増大できる可能性があり、その分コンパクトとなり、コスト低減にもつながる。

フライホイールは元来有害物質のないクリーンな製品であり、従来式フライホイールがここ数年、海外ではUPSとして電池市場に食い込み、急拡大している。このフェーズで上記特長を確認出来れば超電導フライホイールは競争力のある製品と位置付けることができよう。

もちろん、後述の超電導軸受の軸降下の課題に対する見通しを持つことが前提条件である。

(3) 超電導フライホイールの潜在市場

超電導フライホイールは将来の負荷平準化用電源以外にも工場、ビル等の

無停電電源、風力等自然エネルギーによる電力変動の平滑化電源、ブレーキングエネルギーを再利用する鉄道及び自動車用電源等広範囲の応用が考えられる。

今後、国の施策により 2010 年度までに 300 万 kW の風力発電を導入する目標が掲げられたこと、また、民間では IT の進展によりデータセンター等のバックアップ電源ニーズが増大することから、超電導フライホイールの早期実用化のニーズは高いと考えられる。

今後、当面の主な潜在的市場は、次の通り。

風力対応

2005 - 2010 年、風力が年間平均 40 万 kW のペースで増大する可能性がある。この 10% が潜在需要とすると、4 万 kW、3,000kW フライホイールが国内では年産 13 台程度となる。1 台 3 億円とすると国内で年間約 40 億円、世界ではその 5 倍とすると年間 200 億円の潜在市場である。

データセンター対応

現在の市場のほとんどは鉛電池で占められているが、近年、独、米国等のメーカーが従来式フライホイールを高効率型に改良し、無停電電源の市場に食い込み始めている。しかしながら、大きなものでも出力は 1,600kW で持続時間 10 秒程度のものであり、海外ではデータセンターに導入されているが、日本では半導体工場の一部導入されたがデータセンターでは皆無である。やはり超電導化して出力のみならず持続時間を大幅に延ばすことが求められよう。

2005 ~ 2010 年頃、図 1.2.3-1、-2 のように、年間のバックアップ電源のニーズは、1,500kW 機で国内では年産 85 ~ 170 台程度になり、2010 年に近づくほど需要が増加すると考えられる。3,000kW 機では、国内では年産 42 ~ 85 台程度の市場と見られる。同じく 1 台 3 億円とすると、2010 年頃で国内 250 億円、世界 1,300 億円規模の潜在市場があることになる。

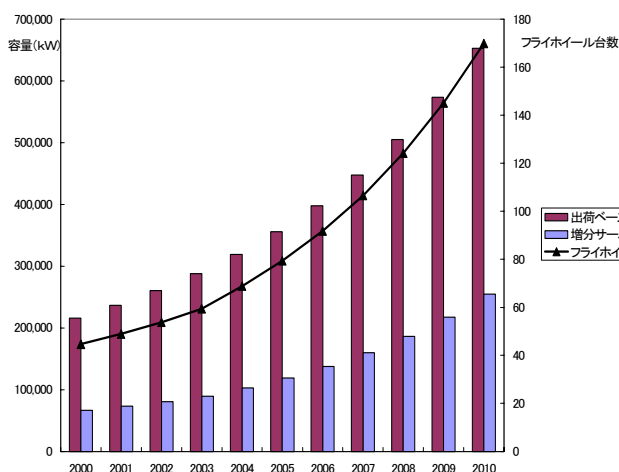


図 1.2.3-1
サーバーのバックアップ電源市場(国内)

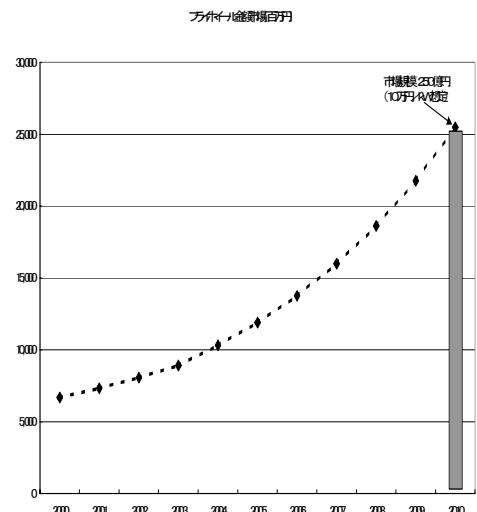


図 1.2.3-2
フライホイール市場規模(国内)

従って、合計すると超電導フライホイールに関する風力とデータセンター対応の潜在市場は国内約 300 億円/年、世界約 1,500 億円/年となる。

ここでは、市場が大きい方のデータセンター用無停電電源についてさらに調査し、早期実用化についてより具体的な検討を行ってみた。

データセンター用無停電電源の条件

データセンターの電源系統は常用予備切替方式やスポットネットワーク方式が採用され、強化されることになるが、いずれにしてもコンピュータに影響を与える 0.01 ~ 0.1 秒以下の瞬低を防ぐことは不可能である。

また、地震、火災、その他による広域の長時間停電にも対応出来なければならない。

従って、データセンター用の無停電電源系統は 0.01 秒以内で立ち上がり、少なくとも数十分以上持続せねばならない。この要求を最も効率良く達成するのが最初の 2 分間程度を超電導フライホイールで持たせ、後を非常用 D/G に繋ぐという方法である。なぜ 2 分かという D/G の起動に失敗することも考慮すると最低でも 1 分かかり、また D/G 再起動に必要なエネルギー供給を考えるとその程度は必要である。

また、大型のデータセンターは 1 万 kW 以上になるため、それにも対応できる超電導フライホイールの規模を考えて、データセンター用 UPS は 50 ~ 100kWh / 1,500 ~ 3,000kW を数台置くという考え方が適当であろう。

逆に現在の無停電電源の主流である鉛電池は持続時間 10 分程度であり、非常用 D/G を必ず設置するデータセンター用としてはオーバースペックである。また、鉛電池は特定有害産業廃棄物に指定されており、廃棄処理が必要となる。従って新世紀に相応しい無停電電源が期待されることになる。

(4) 超電導フライホイール実用化のための主要課題

現フェーズで超電導軸受の載荷力、回転損失及び高速回転制御等の目標を達成しても実用化に向かい必ず残る課題は次の通り。

超電導軸受の長時間軸降下抑制

定期点検のインターバル期間中は一定量の軸降下以下（常識的には十分の数 mm から数 mm/6 ~ 12 ヶ月）に抑える必要があり、このための対策と実証試験。

フライホイール回転体の大型化に対する品質保持

さらに、大型のフライホイールを高速回転可能にするための均質向上技術開発と回転試験。

回転体破壊時の安全確認

CFRP 回転体が破壊する時の現象解明と破壊時の安全性確認（真空容器の防護

構造開発が必要になるかも。)

コスト低減

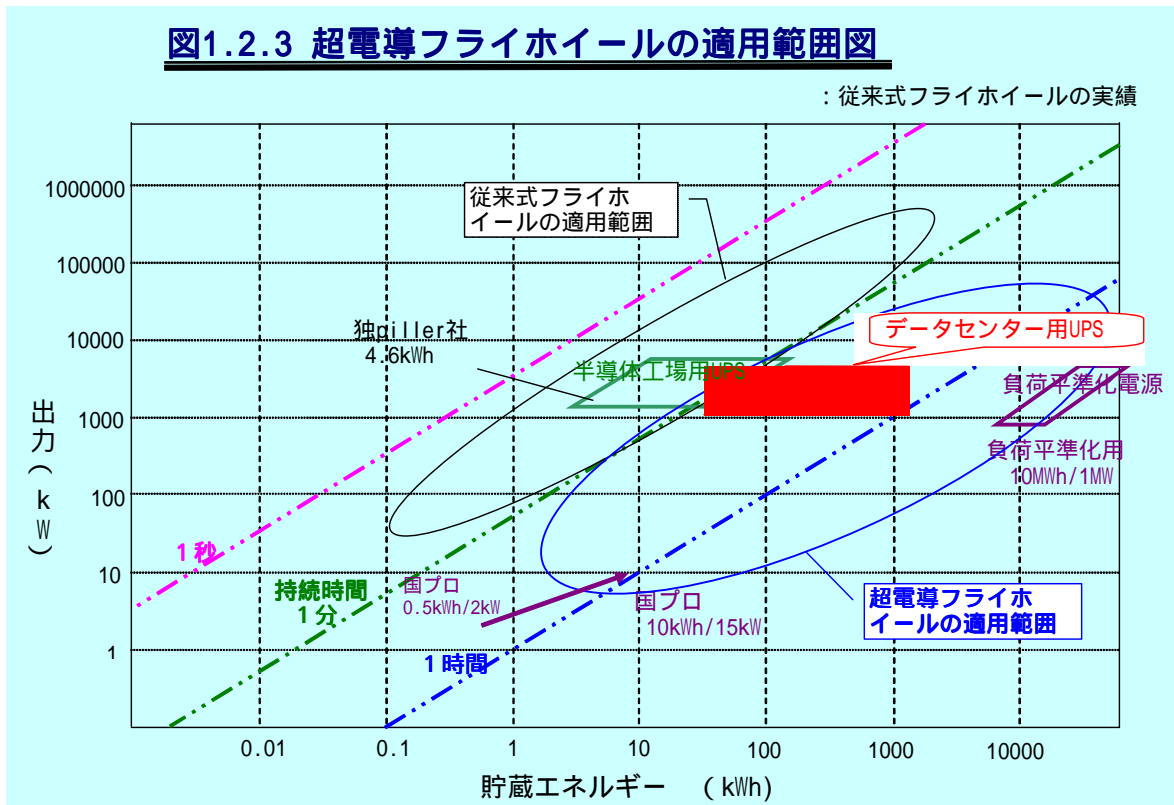
コスト低減を考慮したシステムのフィージビリティスタディーを実施。一般的にはコンパクトにすることが有効。その結果により 現在の基本構造を多少変更することも有り得る。

なお、超電導バルク材の価格は現在 2,000 円 / グラム相当であるが、ある社に 2010 年に 100kWh 級フライホイール用バルク材を年間 10 台分発注するとしたらどのぐらいの見積になるか検討してもらったところ 1/10 になるという回答が得られた。この程度になれば、超電導バルク材の費用は年間の消費電力節約代で吸収できるというストーリーが成立し、ユーザーに対する説得力が生じる。

(5) 超電導フライホイールの適用範囲

今回データセンター用には 50 ~ 100kWh / 1,500 ~ 3,000kW 程度が適当としているが、エネルギー貯蔵容量に対して電気出力をあまり大きくすると電動発電機の縦方向が長くなるため、ロータの径に比してロータ軸方向が長くなり、これは軸振動の観点からあまり好ましくない。従って、超電導フライホイールは出力のみをむやみに大きくするのは得意な方向ではなく、定格出力時の持続時間が数十秒から 10 時間程度の範囲が適用範囲と考えている。従って、秒オーダーの短時間大出力を得意とする SMES とは性格が異なり、超電導を用いた電力貯蔵装置としての 2 者はその特徴を生かした活用がなされていくものと考えている。

超電導フライホイールの適用範囲のイメージを下図 1.2.3 に示す。



添付資料1：フライホイールの市場動向とニーズについて

(1) バックアップ電源装置の市場構造変化への対応

100kWh フライホイールより一桁貯蔵容量が小さい 10kWh 以下の商用化した、コンベンショナルなフライホイールの市場化は 1997 年頃から始まり、2000 年ころから本格的に市場が拡大している。欧州のフライホイールトップメーカーの Pillar 社、米国のフライホイールのトップメーカーである Active Power 社も、OEM 販売を強化して年産 100～150 台程度の生産体制に入りつつある。その他、海外にはディーゼル非常用発電機とセットで販売している Hitec 社、原子力燃料濃縮用の遠心分離器の回転技術を応用した Urenco 社などのメーカーがあり、年産数百台オーダーの市場に成長していると見られる。

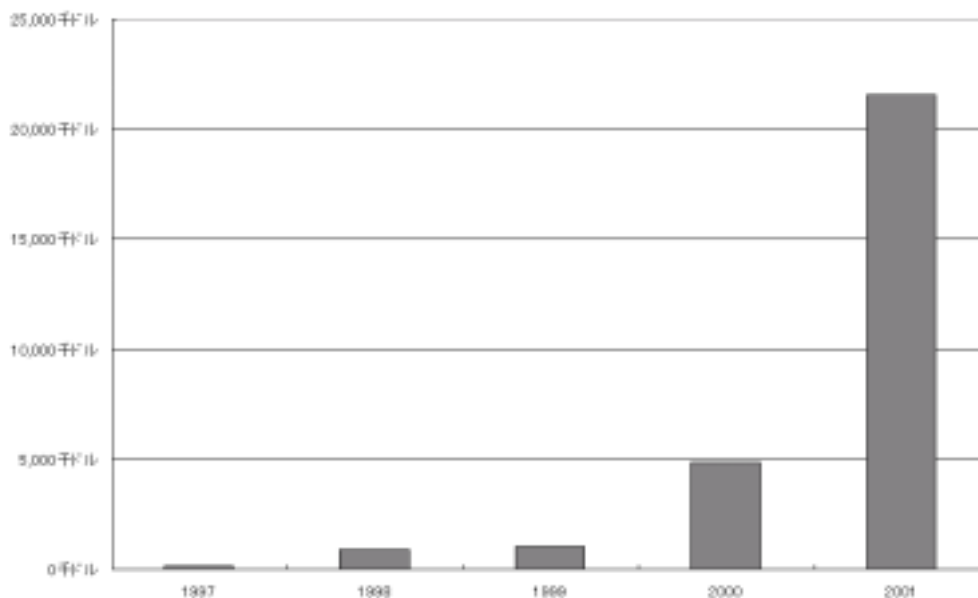


図1 Active Power 社の売り上げ高成長
(同社 2001 年 Annual Report より作成)

世界の商用フライホイールの導入台数実績は、2001 年レベルでは国内メーカーの 100kVA 以上の鉛蓄電池による UPS (無停電電源) の導入台数 (電気日日新聞社調査) に匹敵していると推定され、図のフライホイール側の出荷実績成長曲線を見ると、Active Power、Pillar の主要 2 社の出荷実績 (kVA ベース) は、まもなく日本における大型 UPS 市場を超えると見られる。このように、無停電電源市場におけるフライホイール市場が急成長を遂げている理由は、

- ・数年毎に鉛蓄電池を交換し、初期コストの 70% 程度のコストがかかる一般の UPS

- に比べてフライホイールは後年度負担がほとんどない。
- ・ 温度動作環境に関しては電池に比べて裕度が高い。
 - ・ 半導体回路を 2 度通り常時給電している電力の 5%以上をロスしている UPS に比べて、現状のフライホイールでも常時ロス是一般的に低い。
 - ・ 非常用発電機と組み合わせることにより、瞬低から長時間停電までカバーできる。UPS は電池に蓄積された電力を消費すると以降はバックアップ不能になる。
 - ・ 鉛蓄電池の廃棄を考えるとフライホイールの方が環境に対してやさしい。

といった背景があるものと見られる。

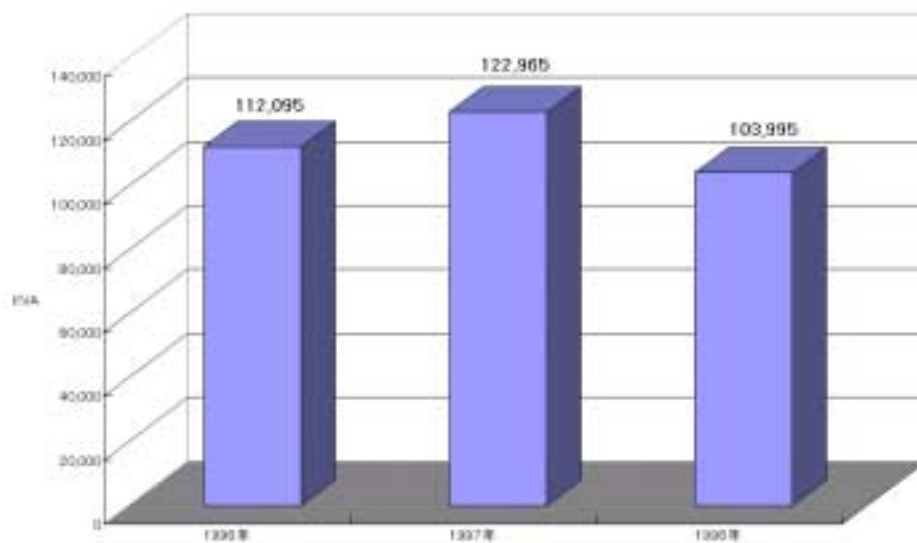


図2 国内の100kVA以上のUPSの出荷実績
(参照：電気日日新聞社 重電機シェアより作成)

現状では、国内の100kVA以上のUPSの販売実績の大部分は国内向けであり、UPS産業の国際競争力は弱く、世界のバックアップ電源市場は、単純な電力需要の比で考えても日本の10倍以上はありと推定され、バックアップ電源市場における国際競争力確保の面での新たなフライホイール開発が重要である。

(2) 100kWh フライホイールのニーズ

既存のフライホイールに関しては、電力貯蔵容量が小さいため、1,500kVAクラスのバックアップが限界で、例えば瞬低対策に必要な半導体工場ではラインレベルのバックアップ装置となる。また、サーバーを集中管理するデータセンターでは、床面積あたりの電力需要1~2kWを考えると500m²~1,000m²の規模のデータセンターをバックアップできる規模となる。半導体工場はクリーンルーム環境を維持

するため工場レベルのバックアップ装置のニーズがあり、また 1,000m² を超えるデータセンターではセンター全体のバックアップを考えると、もう一桁大きなフライホイールのニーズが出てくる。フライホイール特有のライフサイクルコストの安さ、あるいは、環境への影響の小ささを考えると、いずれも 100kWh 級大型フライホイールへのニーズが出てくると考えられ、特に世界市場を見たバックアップ電源装置産業の競争力確保の面からは、その開発が望まれる。

添付資料 2 : 2010 年におけるデータセンターの無停電電源市場の分析

1 . データセンターとは

データセンターは、インターネット用サーバーを専用に格納するビルないしフロアを指す。データセンターは、ユーザーのインターネット事業用のサーバーをアウトソーシングして管理する事業で、下記の図 1 のようにサーバーラックに 2 , 3 台のサーバーを格納して、図書館のように並べて集中管理するシステムである。

事業用サーバーに関しては、その停止によるユーザーの機会損失コストが非常に大きく、証券取引では 1 時間に 5,000 万ドル~7,000 万ドルの被害になるという米国での調査事例もあり、非常に高い電力供給信頼度を要求する。

このため、一般にデータセンタービルでは、100kW 未満の分散型の UPS (無停電電源) と 100kW 以上の集中型 UPS ないし非常用電源の組み合わせのような 2 重のバックアップをしているほか、電力供給システムも 2 ルートを確保し、一方を予備として常時持っているケースが大多数である。

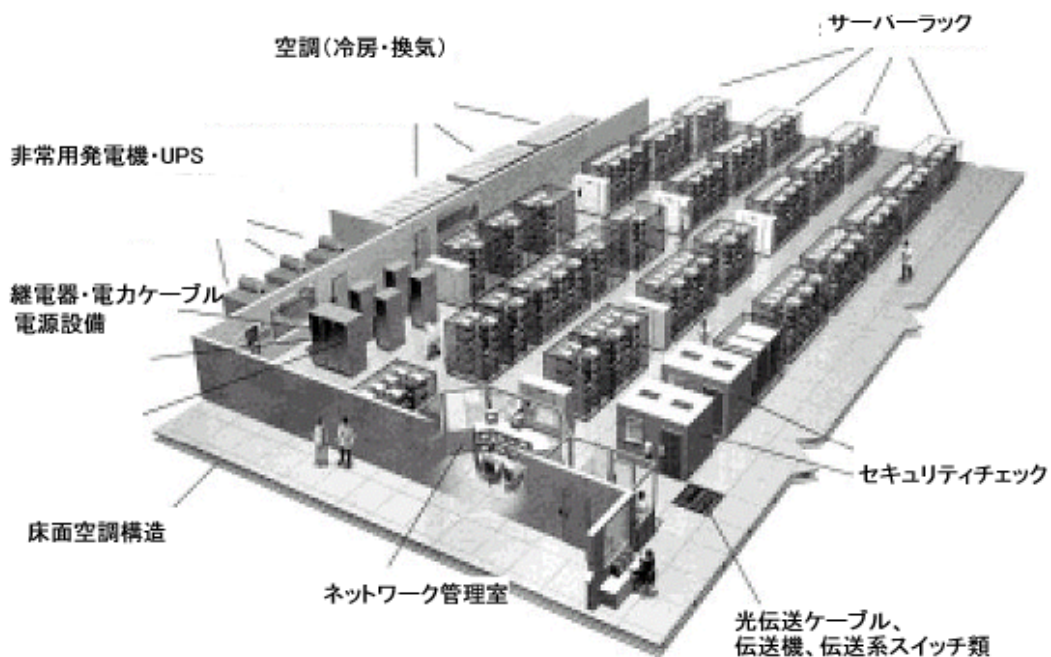


図 1 データセンターの構造

2 . サーバー需要

データ通信の増大に伴い、インターネット用サーバーの出荷が増えている。サー

パーには大きく分けて2系列があり、パソコンをベースにするPCサーバーと、ワークステーションをベースにするミッドレンジサーバーがある。

1999年度まで発表されている(社)日本電子工業振興協会における出荷統計(一部メーカーが除かれている)あるいは情報技術系メディアの情報を総合すると、2000年時点でのPCサーバー、ミッドレンジサーバーの出荷台数はおおよそ次のように推定される。

PCサーバー 33万台(1999年度のPC出荷台数は335万台なので1割がサーバー用となる)
ミッドレンジサーバー 15万台

また、近年の平均的な出荷の伸び率はPC系が年率20%、ミッドレンジサーバーが年率5%程度であるため、出荷ベースでは2010年までの市場は図2のように増えていくと推定されている。(最近、IT不況の影響で、2005年あるいは2010年までのデータ通信市場の伸び率は数年前よりもやや弱気で年率20%程度を予想する向きが多い)

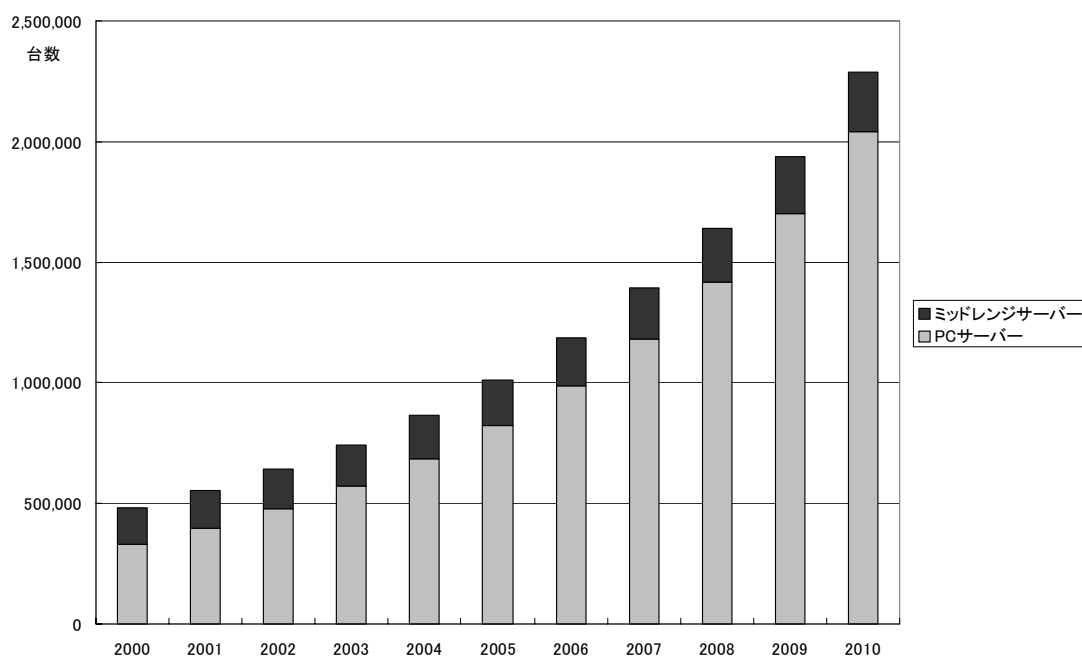


図2 サーバー市場

3. バックアップ電源のニーズ

サーバー専用機の大部分はデータセンタービルで管理される(ユーザーサイドのサーバーは専用機よりもPCなどの汎用機が兼ねると仮定することと同じ意味)と仮定して、2010年でのバックアップ電源市場を予測する。

バックアップ電源の規模予測では、次のような想定を置いている。

- ・サーバーの必要なバックアップ容量はPCサーバー200W、ミッドレンジサーバーが1,000Wとする。
- ・サーバーの寿命は4年とする。したがって、4年前の出荷台数と容量の積と現在の出荷台数と容量の積との差分が、その年のバックアップ容量の増分市場(図3の増分サーバー容量に相当する容量)と考える。
- ・フライホイールは、停電から非常用発電機立ち上げ(通常は30秒)あるいは系統切替(最長で1分程度)までの時間を確保できる仕様とし、容量50kWh、出力1,500kWと考える。データセンターのフロアの電力需要は、一般に1kW/m²程度(通常のビルの20倍程度の需要密度)であるとされるので、このフライホイール1台で1,500m²のデータセンターをバックアップできることになる。

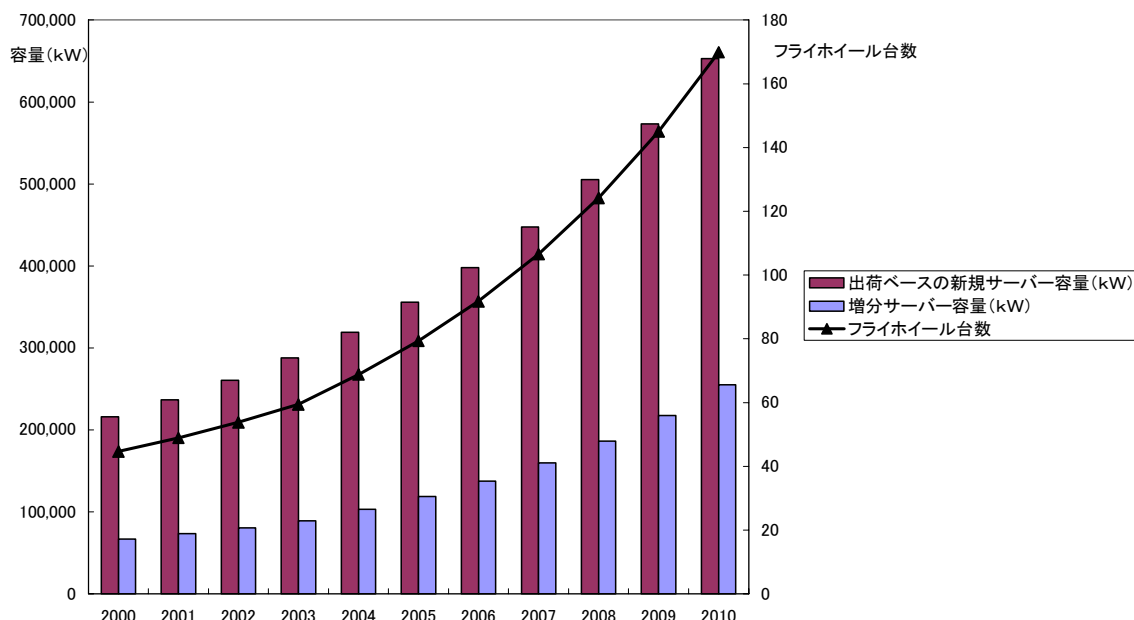


図3 サーバーのバックアップ電源市場

4 . 市場分析結果

図3から、データセンターの集中型UPSの市場は、現状で6.7万kW、2010年には25万kW程度であると推定された。なお、電気日日新聞社が「重電機シェア」でまとめている100kW以上のUPSの市場データでは、現在のUPS市場は10～12万kW程度、うち計算機関係に使われているのが9～10万kWとされており、現状の足下値としては妥当な数字と考えられる。

2010年の25万kWの市場規模は、1,500kWのフライホイールで考えた場合、図3にあるように年産170台規模である。また、この時点でのフライホイールUPSの価格を10万円/kW（30分程度バックアップ可能な電池UPSの半額とする）と仮定すると、市場規模は図4にあるように年産250億円程度と推定される。

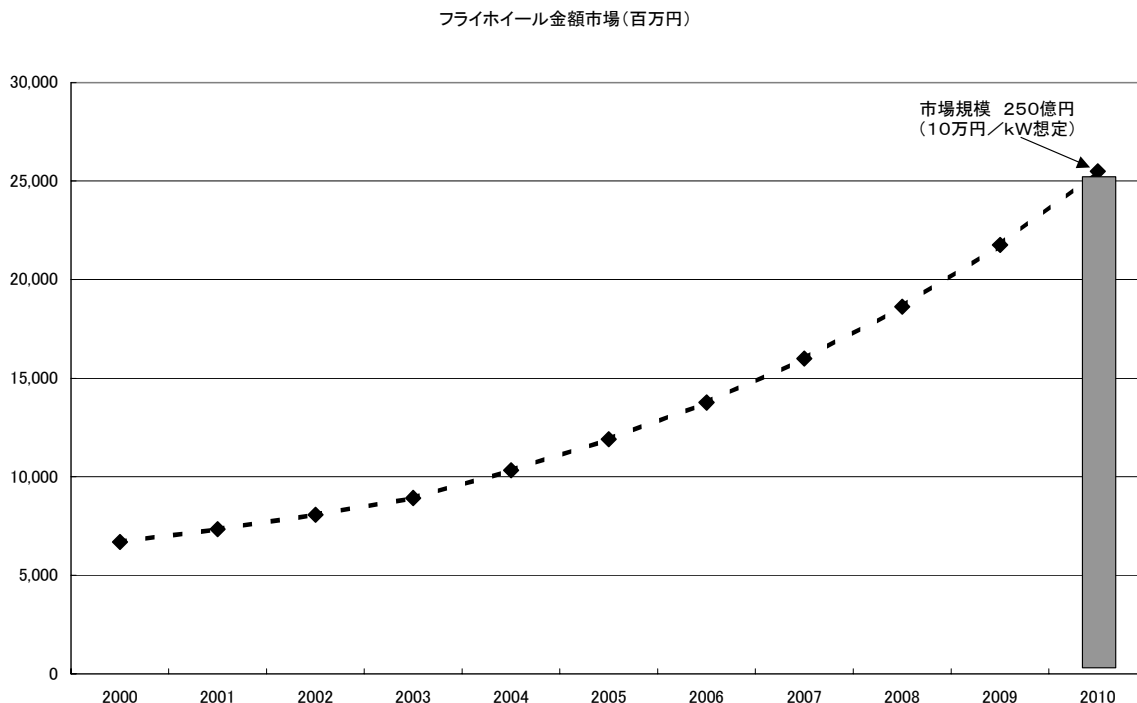


図 4 フライホイール市場規模

添付資料3：UPS用超電導フライホイールの概念

1. 目的

第2フェーズの研究開発で検討している100kWh級電力貯蔵用フライホイールに使用する高温超電導体(205×175)を用いてUPS(出力:3,000kW)とした場合のコストの見積もりを行う。

2. UPSフライホイールの構造および電力貯蔵量

図1にUPSフライホイールの構造を示す。表1にその諸元を示す。また、図2は固有振動数解析を行った結果である。最高回転数はハブの曲げ1次の危険速度(130rps)以下とする必要がある。また、ハブの曲げ1次の固有振動数はロータとハブの締結剛性に依存する。今回の解析では締結剛性を強く設定しており、これ以上締結剛性を大きくしてもハブの曲げ1次危険速度の上昇は少ない。

従って、実際の締結剛性は本解析で用いた値よりも小さくなると予想され、危険速度は低下する。このように、ハブの曲げ1次固有振動数は締結剛性あるいはハブの設計により影響を受けるため、定格回転数の決定はより詳細な検討が必要であるが、安全率を30%程度見込むと60kWh程度(保証値ではない)の貯蔵量となる。

表1 UPS用フライホイールの諸元

		ロータ外径	備考
		Φ450	
電力貯蔵量	(kWh)	60	
回転数	(rpm)	5460	7080 rpm: @100kWh
フライホイール直径	(m)	2	内外径比 0.6
フライホイール高さ	(m)	0.514	
ロータ長さ	(m)	3.02	M/G長さ 1.32m
全体重量	(kg)	4881	
FWリング重量	(kg)	1664	
ハブ重量	(kg)	667	
ロータ重量	(kg)	1706	
その他	(kg)	844	SMB用,M/G用PM,電磁鋼板
フライホイール周速	(m/s)	574	741m/s: @100kWh
電磁鋼板周速	(m/s)	129	167m/s: @100kWh
SMB仕様			
SC寸法	(mm)	Φ205×Φ175	
SC高さ	(mm)	800	
載荷力密度	(kgf/cm ²)	0.95	
PM寸法	(mm)	Φ206.6×Φ310	PM: 30mm, 止めリング: 20mm

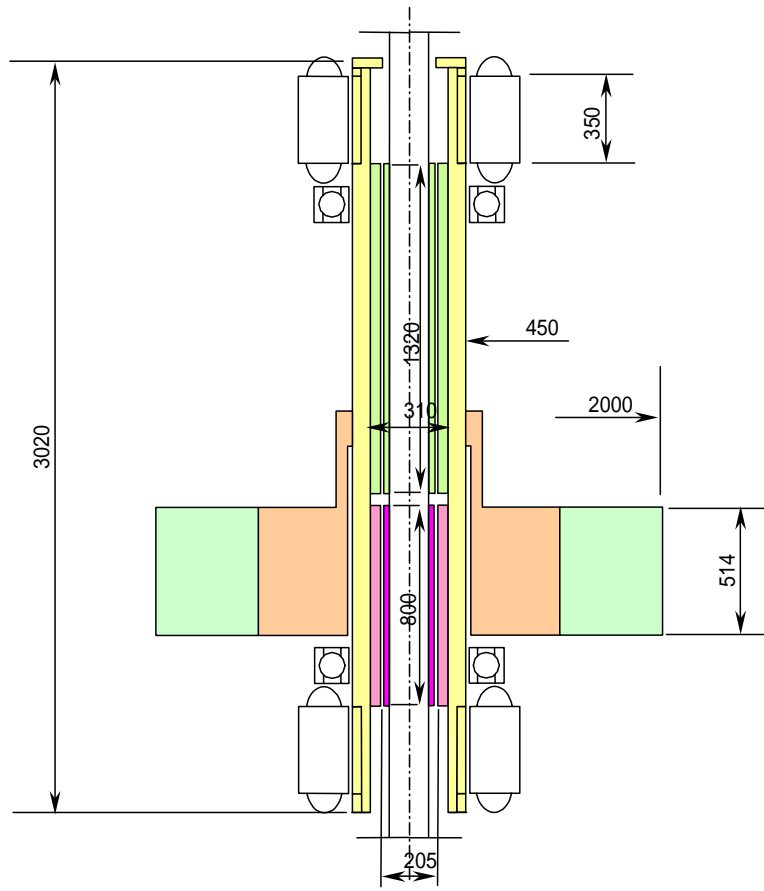


図1 UPS用フライホイール

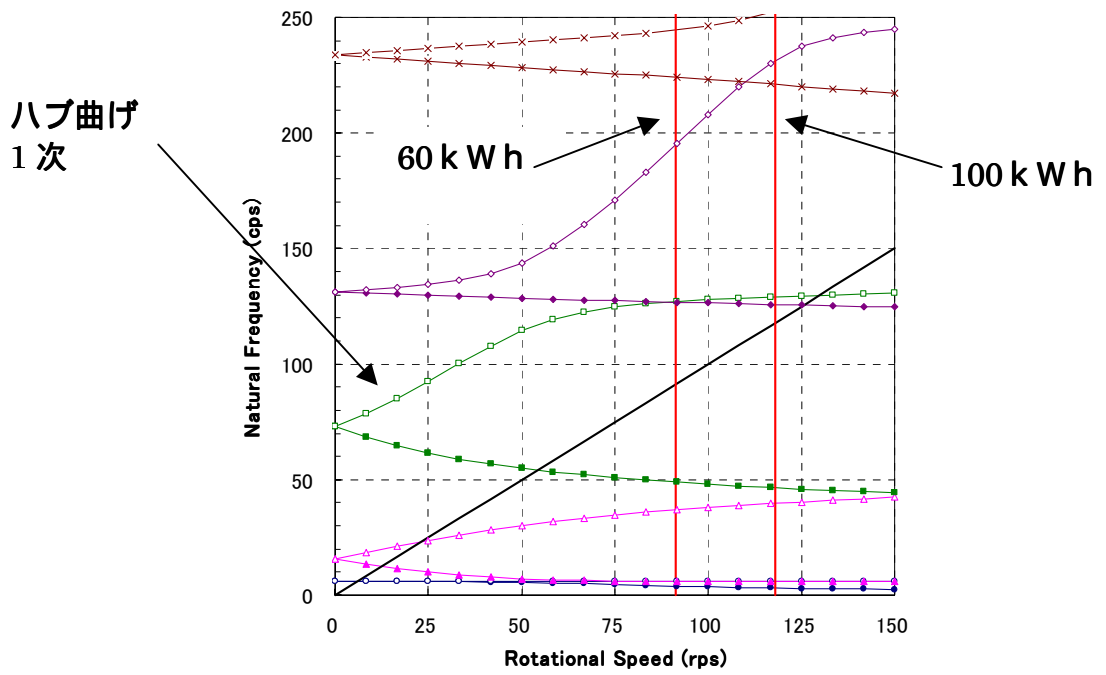


図2 固有振動数解析

2. 今後の展開

今後長期的に要請される省エネルギー化や電力安定供給に応える上で、電力の日負荷平準化や負荷変動補償、系統安定化の技術が重要であり、それには貯蔵容量が MWh 級の高効率電力貯蔵施設の実現が大きな役割を果たすものと期待されている。一方、電力貯蔵への短中期的なニーズとしては、高性能、低消費電力の無停電電源装置 (UPS) や風力発電等の脈動平準化技術の実用化がある。現在、情報化の急速な進展にともない、データセンター等の建設が活発に行われており、このような施設に不可欠な UPS の省電力化、小型化、低コスト化等への要求が増している。

本プロジェクトにおいては、100kWh 級のフライホイール電力貯蔵装置用の超電導軸受技術の開発、および 10kWh 級の試験装置の製作、運転試験を行い、超電導フライホイール電力貯蔵装置の適用性実証を行うことを目的としている。従って、本プロジェクト終了時には、10～100kWh 容量をもつ超電導フライホイール電力貯蔵システムの課題と見通しが得られる予定である。比較的大型のデータセンター用の UPS としては、1.2.3 の早期実用化の項で述べたように、1,000～3,000kW の電力を 1～2 分供給することが可能な 100kWh 級の電力貯蔵装置を並列設置することが適切と考えられている。従って、次のフェーズの開発目標としては、100kWh 級の電力貯蔵システムの実現が有力候補と考えられる。

100kWh 級のシステムの実現には、超電導軸受技術のさらなる向上とともに、大型高均質フライホイール本体や高性能発電電動機の作製技術、軸受冷却技術等、周辺技術の開発も重要である。

超電導軸受については、載荷力や軸降下の問題が残ると思われるが、Sm 系等の軽希土類バルク材料の実用化が進み、これが問題解決に大きく寄与するものと考えられる。もう 1 つの問題は、軸受固定子に使用する超電導バルクの価格が高いことであろう。これについては、量産化により現在の 1/10 程度以下になることが見込まれており、全体システムの中で、軸受製作コストの割合は大幅に低下するものと考えられる。

フライホイール本体については、その直径が 10kWh の場合のほぼ 2 倍の約 2m となることが予想される。このように大きい CFRP フライホイールを均質に製作することは容易ではなく、製造装置を含めた新たな技術課題の発生が予想されるが、本プロジェクトではこの技術について豊富な知見を得ており、課題の克服は可能であろう。

高性能発電電動機に関しては、小型、高出力化が要請されるが、現在、開発が進んでいる超電導発電電動機の適用も一つの選択肢と考えられる。これには、軸受用の冷却システムを発電電動機の冷却にも使えるという利点がある。

軸受の冷却については、実用化段階では、液体窒素浸漬冷却ではなく、取り扱いが容易で、低温化により性能向上が図れる冷凍機冷却方式が採用されることになろう。システム全体の低消費電力化を図るために、冷凍機の性能向上を期待したい。

電力の負荷平準化や系統安定化に使用する MWh 級のシステム開発には、100kWh

級システムの実現が前提となる。超電導軸受だけでなく、前述した種々の周辺技術のレベル向上および技術革新が必要とされる。しかし、近年の材料やシステム制御技術の進歩は目覚ましく、現状では困難とされる技術も 10 年以内には新たなブレークスルーが生じる可能性が高く、MWh 級の大型システムの実現も期待できよう。

以上

参考資料 1：研究開発に利用している主な装置・施設のリスト（15年2月現在）

[今フェーズ（H12年度～）取得分]

装置・施設名	取得年月	取得金額 (千円)	設置個所
ボア径 300mm 超電導磁石	H13.3	15,855	(財) I S T E C
樹脂含浸処理用真空炉	H13.12	2,192	"
3次元高精度磁場測定装置	H12.11	4,969	住友特殊金属(株)
減圧式過冷却装置	H12.10	893	(株)四国総合研究所
F W本体用高品質樹脂含浸装置	H14.2	3,360	石川島播磨重工業(株)
A M B 磁極特性試験装置	H14.1	3,675	"
A M B コントローラ	H13.3	18,993	光洋精工(株)

[前フェーズ（H7～H11年度）取得分]

装置・施設名	取得年月	取得金額 (千円)	設置個所
磁場分布解析装置	H8.2	8,921	(財) I S T E C
磁石対向用磁場測定装置	H11.1	4,456	"
A C 回転磁界特性測定装置	H10.10	16,538	(株)四国総合研究所
回転動特性試験用 3次元磁場測定装置	H10.11	11,445	"
小型モデル実験用ピット	H10.2	14,280	"
小型モデル用遠制装置一式	H10.5	13,125	"
小型モデル運転用液体窒素タンク	H10.3	4,410	"
小型モデルインバータ用無停電電源装置	H10.3	2,363	"
小型モデル用計測装置	H10.3	11,346	"
小型モデル高速データ収録装置	H10.7	3,494	"
N O L リング成形用マンドレル・試験治具	H8.9～ H9.2	1,689	石川島播磨重工業(株)
小型スピテスター	H9.3	45,186	"
F W成形装置	H10.3	46,522	"
F W硬化炉	H10.2	10,815	"
中型スピテスター	H10.2	101,640	"
F W成形試験用マンドレル・治具 他	H10.9～ H11.1	10,898	"
中型 F W 成形用金型	H11.5～9	6,427	"
低損失 A M B 装置	H9.2	14,965	"
計測・解析データ処理装置	H9.10	21,525	"
省電力型磁気軸受	H11.2	7,254	"

2相発信器・ベクトルモニター	H11.2	6,848	"
中型回転制御試験装置	H11.3	106,923	"
中型ロータ部品	H12.1	13,305	"
回転損失測定試験機・測定装置一式	H8.3～ H10.11	59,032	光洋精工(株) H14.7 (株)四国総合研究所
タッチダウン軸受試験機用計測器	H10.1	3,895	光洋精工(株)
消費電力低減試験機	H10.11	19,812	"

参考資料 2： 用語集

[あ]

アウターロータ型フライホイール

超電導軸受が内部に配置された中空円筒型主軸を有するフライホイール。

インナーローター型フライホイール

超電導軸受が内部に配置されていない中実主軸を有するフライホイール。

Y(イットリウム)系超電導材

Y系超電導材は、臨界温度が9.2 Kであり、液体窒素温度(77 K)で超電導状態になる物質。本研究の超電導軸受は、Y-Ba(バリウム)-Cu(銅)-O(酸素)からなる酸化物超電導材を使用している。

A M B (Active Magnetic Bearing)

制御型磁気軸受。回転体を電磁石の磁気力により非接触で支持し、振動制御の目的で用いられる。回転体の半径方向、軸方向の振動制御に用いられるA M Bをそれぞれラジアル型A M B、スラスト(アキシャル)型A M Bと呼ぶ。

S M B (Superconducting Magnetic Bearing)

超電導(磁気)軸受。超電導体と永久磁石との間に生じる浮上力(載荷力)により回転体を非接触で支持する軸受。

本研究で使用しているラジアル型S M Bは、円筒状の超電導体部と永久磁石を僅かの間隔ではめ合わせ、円筒面で対向させたタイプのS M Bであり、永久磁石部の直径が小さくても軸方向に延ばすことで面積を稼げるため、回転数が速くても重量が支えられる特徴がある。

一方、アキシャル型S M Bは、円盤状の超電導体部と永久磁石を平面的に対向させたタイプのS M Bであり、高速回転のためには永久磁石部の直径を小さくする必要があるが、この場合、対向面積が小さくなり大きな重量は支えられない。

F R P (Fiber Reinforced Plastics)

繊維強化プラスチック。エポキシ樹脂等の樹脂を炭素繊維やガラス繊維等の繊維で強化した材料。密度は鋼の3分の1以下だが繊維方向の引張に強く、軽くて強いという特徴を持つ。本研究のフライホイール本体には、C F R P (Carbon FRP：炭素繊維強化プラスチック)を使用している。

[か]

回転損失試験機

超電導磁気軸受部の損失を測定するための試験機。A M Bで支持された回転軸にS M B用回転永久磁石を取り付け、所定の回転数まで加速後、フリーラン状態での回転減衰時間を測定できる。減衰時間より求めた全軸受部の回転損失から、超電導磁気軸受部の回転損失を計算により求めることができる。

過冷却法

高温超電導材は、液体窒素温度よりも低温にする(過冷却)ことにより、臨界電流が向上し、ピン止め力も増加するため、液体窒素温度で超電導磁気軸受を一度動作させた後さらに温度を下げると、載荷力向上、磁束クリープ低減の効果が期待できる。

クライオスタット

被冷却物(超電導コイルなど)を収納して、その重さと発生する力などを支持できる断熱支持構造を持った開放又は密閉構造の低温を保持する装置。

K(ケルビン)

絶対温度の単位。0 Kは約 -273°C であり、1 Kの差は摂氏温度での1度の差に等しい。液体窒素温度(77 K)は約 -196°C である。

高温超電導体

銅酸化物のセラミックを中心とした超電導体で、古くから知られる金属系の超電導体(現在では低温超電導体とも呼ばれる)に対して、より高温(25 K以上)で超電導状態を示す。安価な液体窒素の温度(77 K)でも超電導状態になることから、産業応用等が期待されている。

[さ]

載荷力

高温超電導体に永久磁石を近づけると、超電導体は超電導体内に侵入しようとする磁束を捕捉して侵入できないようにする(ピン止め効果)。この時に超電導体と永久磁石の間に反発力が生じる。この反発力を載荷力という。

また、軸受載荷力(超電導軸受が支持する荷重)を、超電導体部(ラジアル型軸受では、円筒形固定子の外側側面、すなわち永久磁石磁気回路回転子に対向した面)の面積で除した数値を載荷力密度という。

磁気回路の最適化

磁気浮上力を大きくするためには、磁束密度をできるだけ大きくする必要がある。そのため、磁束の通る回路(磁気回路)の構造、すなわち磁石及びヨークの寸法について、コンピュータシミュレーションにより磁束密度が最大になるような最適値を求めること。

磁束クリープ・軸降下

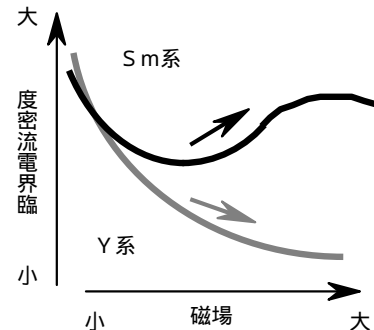
ピン止め点の存在する超電導体で、ピン止めされている磁束が熱擾乱によって、ある確率でピン止め点から動く現象を磁束クリープという。この現象によってフライホイールでは時間と共に軸降下が生じる。軸降下量は時間に対して対数的に変化し、時間と共に軸降下速度は遅くなる。

磁場ピーク効果

Y系以外のRE系超電導バルクでは、図のように外部磁場の増加とともに臨界電流密度が極大となるピーク効果を示す。

クリープによる載荷力低下とSm系超電導体による低減メカニズム

イットリウム (Y) 系	サマリウム (Sm) 系
クリープにより超電導電流の低下	クリープにより超電導電流の低下
↓	↓
載荷力低下による軸降下	載荷力低下による軸降下
↓	↓
超電導体を受ける磁場分布変化	超電導体を受ける磁場分布変化
↓	↓
臨界電流密度低下によりクリープを助長	臨界電流密度増加によりクリープを抑制



樹脂含浸

バルク超電導体の機械的特性向上を目的として、エポキシ系樹脂を真空中でバルク体に含浸する手法。エポキシ系樹脂がバルク体表面に開口した微小クラックを通してバルク内部に浸透することにより、機械的特性が改善される。また、バルク体表面をエポキシ系樹脂で覆われることで、冷却時の熱衝撃緩和、表面保護等の効果が有り、長期使用における耐久性向上が期待される。

スピントスター

フライホイール本体単体の性能を評価する回転試験装置。フライホイール本体の回転数を徐々に上昇して破壊させ、そのときの回転数や計測データからフライホイール本体の機械的強度等を評価する。

[た]

タッチダウン軸受

常時使用するSMBやAMBが異常で使えなくなった場合に、バックアップとして使用する軸受。本研究の10kWh級フライホイール運転試験装置では、高速回転体を扱うことから、ZCABと呼ばれる特殊な機構をもった転がり軸受を採用している。

チャンバー

減圧、酸化性、還元性、不活性ガス等の雰囲気制御するための真空容器。

超電導体

ある条件の下で電気抵抗がゼロとなる物質。ある条件とは臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度を超えない範囲を指す。超電導体は、完全導電性、完全反磁性(マイスナー効果)、磁束の量子化、ジョセフソン効果などの他に類を見ない特性を示すため、省エネルギー技術など様々な応用が期待されている。また、高温超電導は25K以上に臨界温度をもつ物質で、主に銅酸化物系材料である。

T(テスラ)

磁束密度の SI 単位。1T=10⁴G (G:ガウス)

[な]

[は]

ハブ(hub)

F R P 製のフライホイール本体とロータを接続する部分。車輪のリム・スポークに相当する部分。

バルク(bulk)超電導体

塊(バルク)の状態の超電導体をいう。通常、Y系超電導材は、直径 5~10cm、厚さ数 cm 程度の円盤(円柱)状に焼成され、これをバルク(あるいはペレット)とよぶ。バルク超電導体は、電磁誘導の原理で、一旦電流を誘導できれば、冷やしている限り電気抵抗ゼロで電流が流れ続けるため、強い磁場を発生する磁石として使える。

ピン止め効果

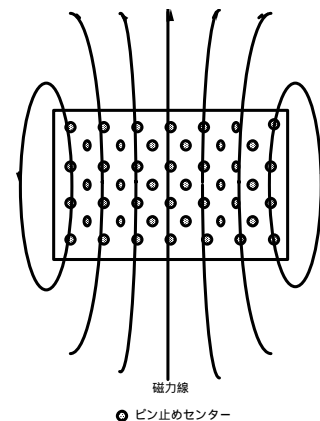
高温超電導体に外部磁場を印加した場合、ピン止め点(ピン止め効果を得るため超電導体内に導入される析出物、結晶粒界等の不均質部分)によって、侵入しようとする磁束を捕捉すること。

負荷平準化

電気の需要は昼夜間、季節間等で大きく変動するが、電力の供給設備は最大使用電力に見合ったものが必要になるため、電力需要の変動幅が大きくなると設備の利用率や効率が低下する。負荷平準化は、電力負荷を需給のタイトな時期(夏季、平日、昼間等)から、緩やかな時期(夜間、休日等)に移行させることにより、負荷の平準化を図るものであり、これを進めることは、省エネルギー、CO₂の排出抑制等に資するものとして重要である。

捕捉磁場分布

常温のバルク超電導体に外部から磁場を印加したままで、超電導状態になる温度まで冷却(磁場中冷却)した場合、右図のように磁場がピン止め点に捕捉される。この捕捉磁場の場所による分布を磁場センサで計測した結果が捕捉磁場分布であり、バルク超電導体の代表的な性能評価方法の一つである。この分布形状が対称な一山分布で頂が高い時、一般的に良好なバルク超電導体とされる。逆に、内部に欠陥等の存在するバルク超電導体は、分布に谷や歪みが見られ、頂も低くなる。



捕捉磁場を向上させるためには、臨界電流密度を高くし、バルクのサイズを大きくすることが有効である。また、低温にすると臨界電流密度が向上するため、捕捉磁場も大きくなる。ちなみに、世界最高レベルの磁場強度を示す Nd-Fe-B 系永久磁石の磁場強度は約 0.5T、ピックアップエレキバンに用いられている磁石は約 0.13T であり、バルク超電導体では、条件を選べば 10T を超える磁場を捕捉させることも可能である。

ホール素子

磁場センサの一種であり、バルク超電導体の捕捉磁場分布の計測によく用いられる。電流を流している半導体に磁場がかかった時、それらと直行する方向に起電力が発生するというホール効果を利用したセンサであり、発生起電力から磁場の値を測定する。バルク超電導体の捕捉磁場測定では、液体窒素温度程度で使用するため、極低温にも適用可能なホール素子(動作温度範囲：-269 ~ +100)を用いている。

[ま]

[や]

予荷重法

最初に所定の荷重以上の負荷を一度与えた(予荷重)後、所定の荷重に戻してから使用すると、磁束クリープ低減効果が期待できる。

[ら]

臨界温度(T_c)

温度上昇に伴い超電導状態(電気抵抗ゼロ)から常電導状態(電気抵抗を生じる)へと相転移する温度のこと。

臨界電流密度(J_c)

超電導体に電気抵抗なしに流せる最大電流密度をいう。超電導体の工学的応用の可能性は、いかに高い臨界電流密度を達成できるかにかかっていると看做して過言ではない。

RE(レアアース)系超電導材

Y(イットリウム)の代わりに Sm(サマリウム)、Nd(ネオジウム)-Eu(ユーロピウム)-Gd(ガドリニウム)等の希土類(レアアース)を使用した超電導材。磁場ピーク効果により高磁場領域まで高い臨界電流密度を保てることから、超電導軸受として優れた特性を有するものと期待される。

[わ]

2．分科会における概要説明資料

本資料は、第1回分科会において、プロジェクト実施者がプロジェクトの概要を説明する際に使用したものである。

「フライホイール電力貯蔵用
超電導軸受技術研究開発」

プロジェクトの概要

- 1) 基本計画について
- 2) 成果概要について

プロジェクトの概要

- 1) 基本計画について

新エネルギー・産業技術総合開発機構
新電力技術開発室

事業の背景・目的・位置づけ

《 NEDOの事業としての妥当性 》

1. 背景

社会的背景

- ・ 質の高い電力の安定供給維持
- ・ 風力等、増大する変動負荷への対応
- ・ CO₂削減による地球温暖化防止
- ・ 電力コストの低減
- ・ 電気エネルギーの有効な利用

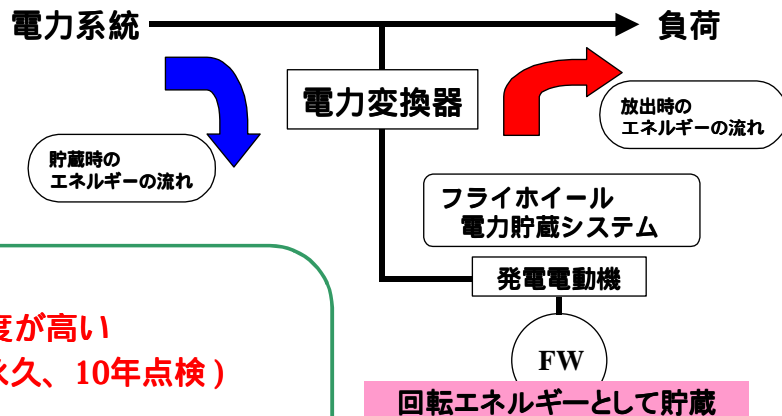
- ・ 負荷変動補償
- ・ 瞬時電圧低下対応
- ・ CO₂ 排出量削減に資する電力負荷平準化技術

電力貯蔵技術が期待されている

3

2. 電力貯蔵技術

フライホイール電力貯蔵システムの基本構成



長所

- ・ 貯蔵エネルギー密度が高い
- ・ 長寿命 (FW部半永久、10年点検)
- ・ 環境に優しい
発生ガス、有害産業廃棄物の発生なし
- ・ 優れたエネルギー蓄積放出特性
短い充電時間充放電の繰り返しに強い

短所

- ・ 現在の機械式軸受では回転損失が大きい
停電補償時間は1分程度まで

4

3. 軸受回転損失低減技術

超電導軸受

高温超電導バルク固定子と永久磁石による引力を利用するため、非接触で回転損失が少ない軸受が可能となる。

特徴

- ・強い載荷力

電力貯蔵装置の大型化を可能とする

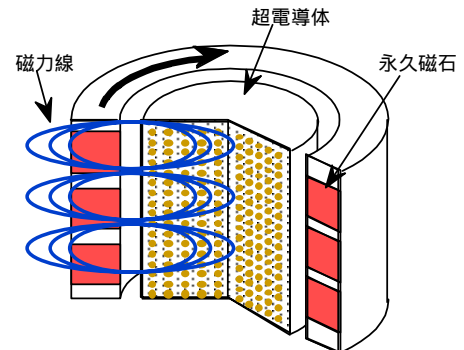
- ・低い回転損失、低消費電力

機械式軸受、磁気軸受の1/100 ~ 1/10

但し、

技術的にはまだ未完成、開発費用大、リスクが大きい

軸受概念図



永久磁石の磁力線が、超電導体内のピン止め点(●)に捉えられることにより、非接触での支持を実現

NEDOの事業

社会的背景から進めるべき視点

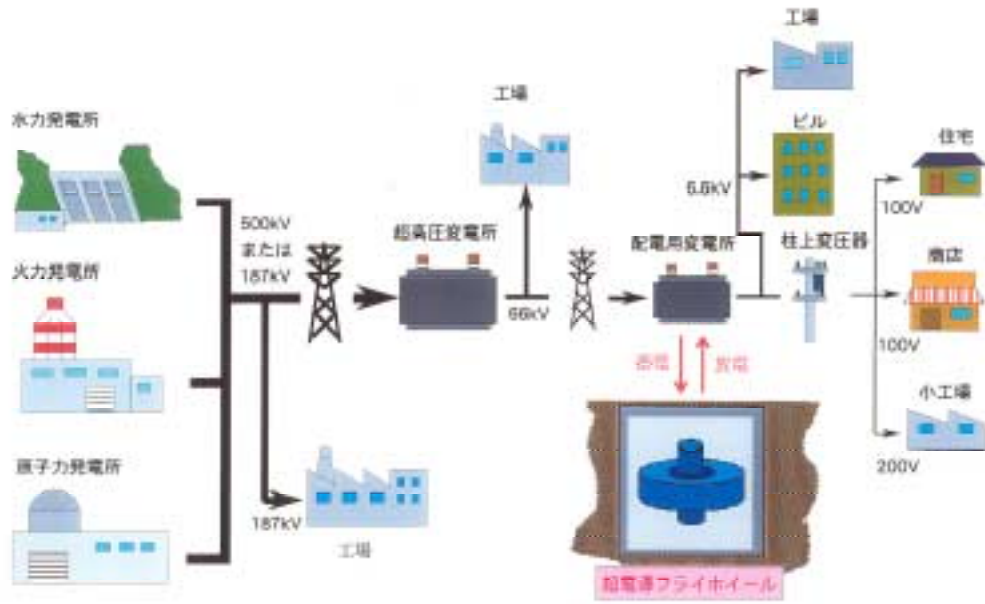
- ・ CO₂ 排出削減による地球温暖化防止
(革新的温暖化プログラム)
- ・ 電力コスト低減
- ・ 電力品質・供給信頼度の維持

本研究開発は

- ・ 未だ革新的技術でありリスクが大きい。
- ・ 長期間にわたって巨額を投じる必要が有り
- ・ 民間による競争的な技術開発には、まだ課題が多い。
- ・ 革新性ゆえに新規産業分野波及効果が期待できる。

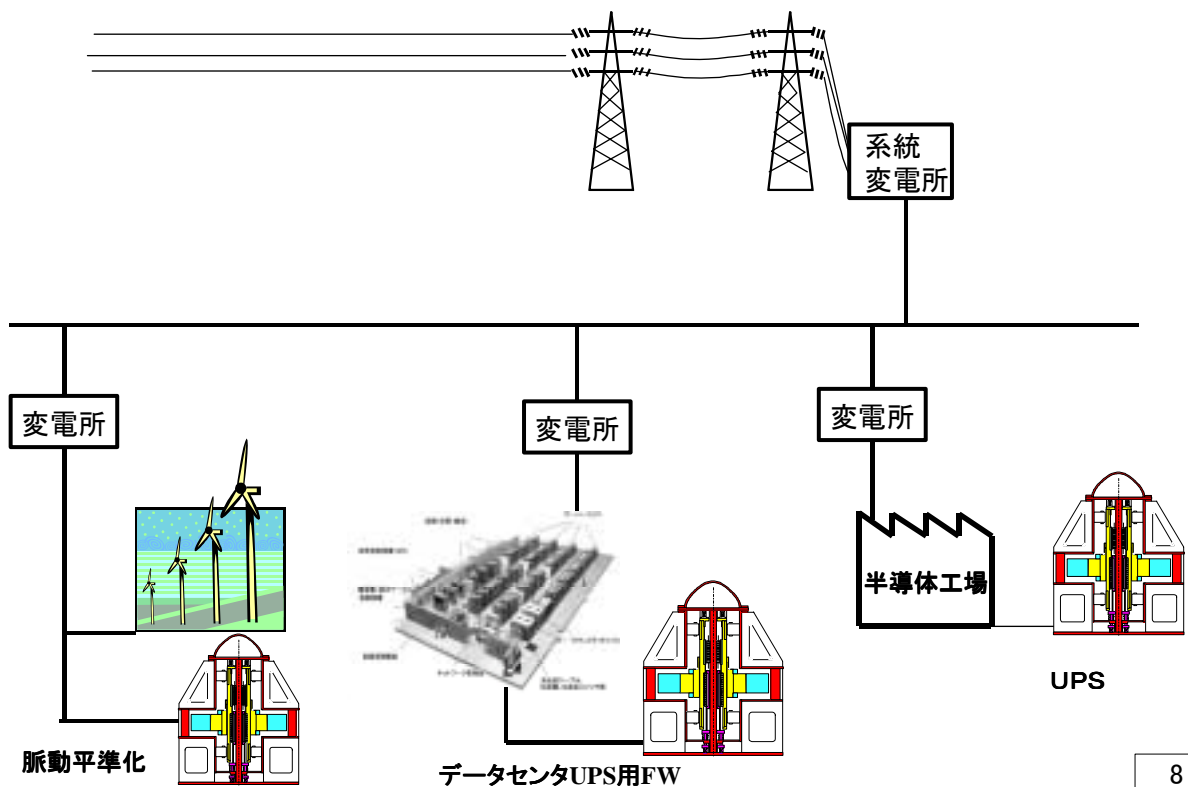
政策的促進が必要

負荷平準化用電力貯蔵装置設置

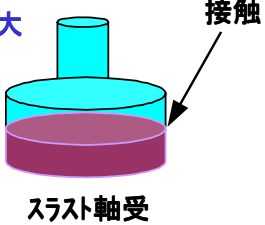
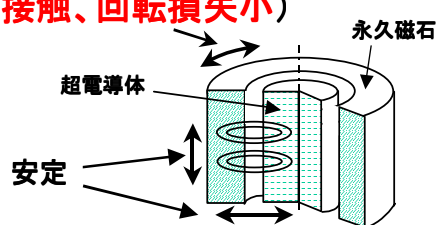


将来の設置イメージ

超電導フライホイールの適用箇所

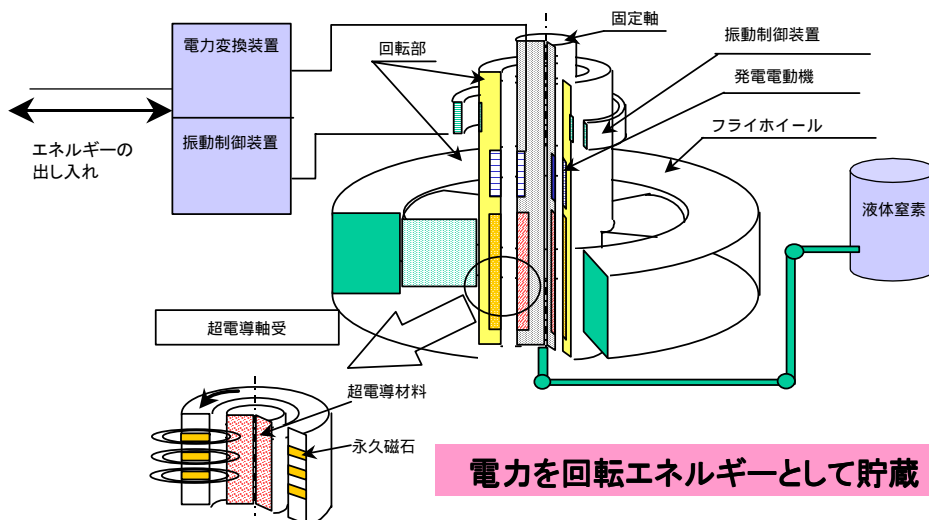


フライホイールエネルギー貯蔵装置の比較

	機械式フライホイール エネルギー貯蔵装置	超電導フライホイール エネルギー貯蔵装置
軸受 形式	<p>機械式軸受</p> <p>回転損失 大</p>  <p>スラスト軸受</p>	<p>超電導磁気軸受 (非接触、回転損失小)</p> 
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・長寿命 ・大容量高速制御 ・対環境性良好 ・軸受損失のため短時間(秒～分)用途限定 	<ul style="list-style-type: none"> ・長寿命 ・高効率(発電機、変換器) ・大容量高速制御 ・対環境性良好 ・軸受損失が小さいため秒～時間オーダーまで適用可能

9

超電導フライホイール電力貯蔵装置システム概念図



システムの特徴

- ・高効率
- ・高速応答
- ・廃棄物を出さず対環境性良好
- ・長寿命

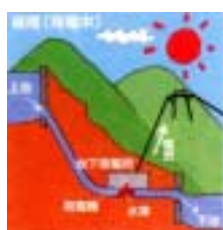
10

各電力貯蔵装置比較

	定速式揚水式 水力発電	高温超電導 フライホイール	二次電池 (NAS電池)
エネルギー密度 (エネルギー貯蔵部) KWh/m ³	~1	~320	~140
システム効率(%)	65~70	~85	79 (50kWシステム)
応答時間 0→100%	数分	~1秒	数秒
寿命	30年以上	30年(目標)	15年以上
その他	山間部限定	載荷力向上必 要	300℃ 高温運転 ヒータ設置

11

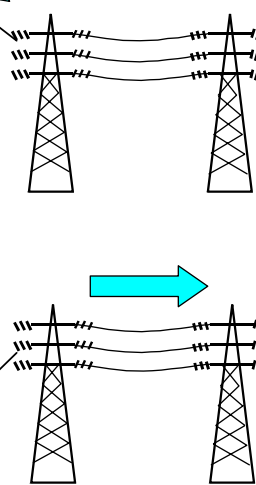
実施の効果



揚水発電所
貯蔵効率
65~70%



火力発電所



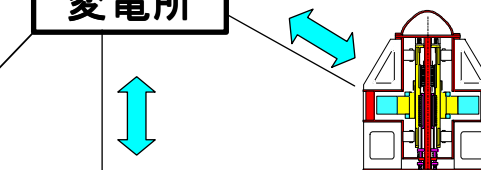
【貯蔵効率】

揚水発電所 < 超電導フライホイール電力貯蔵装置
貯蔵効率 約15%分の発電電力を有効に使用できる。

【CO₂削減効果】 6 (2020年度)
単位: 千t-C/年 25 (2030年度)
48 (2040年度)

※ 導入量 2016 ~ 2020年の初期導入量は、
電力貯蔵設備新設分の10%、その後20%

超電導フライホイール電力貯蔵装置
貯蔵効率 約85%

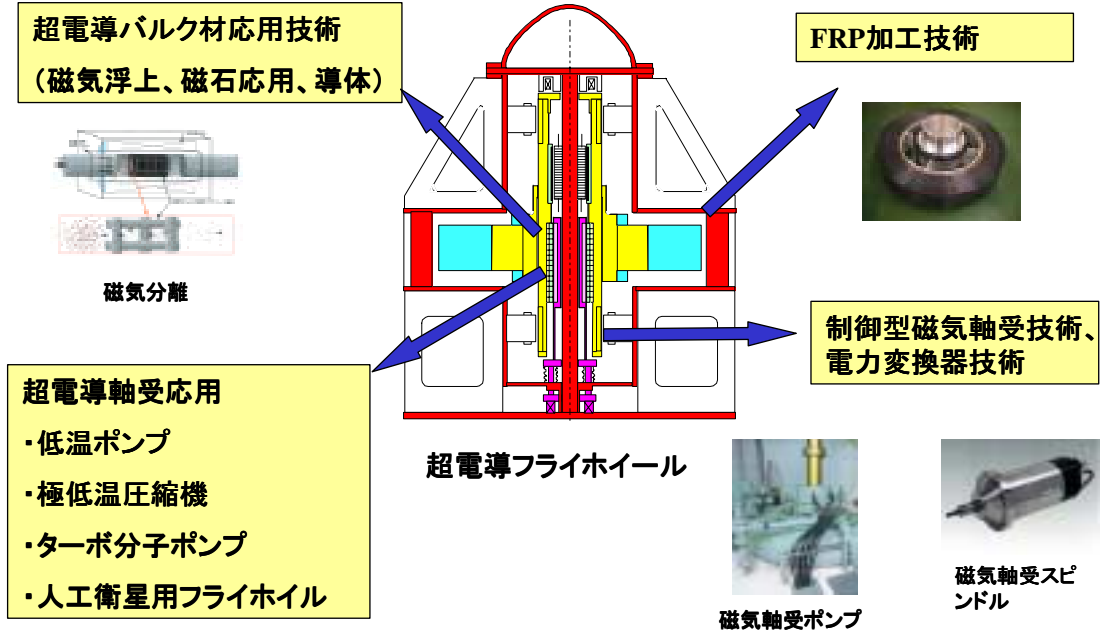


需要地

12

実施の効果

産業面への効果



13

超電導フライホイールの内外研究開発状況

国内

- ・ 中部電力 : 12.5kWh級システム開発
小規模向けの電力貯蔵装置として、工場停電時非常用電源装置が可動稼働するまでの補完装置として開発中

海外(主要プロジェクト)

- ・ 米国
DOE SPI (Superconductivity Partnership Initiative)
ボーイング社/アルゴンヌ国立研究所 10kWhシステム開発
負荷変動補償、UPS用として開発 35kWh開発開始中
- ・ ドイツ
政府援助によりピラー社が中心となり 10社の企業体を形成し実施
12kWh/2MWのプロトタイプを開発中
停電時の補完装置、UPS、PQ



14

第1フェーズ 高温超電導フライホイール開発(H7~H11)

目的：配電用変電所に設置することを想定した日負荷平準化対策としての10MWh級のシステムについて要素技術開発

項目	開発内容および成果
超電導磁気軸受	<ul style="list-style-type: none"> 超電導体と永久磁石を組み合わせた浮上・非接触の軸受開発 大型に有利なラジアル型軸受の考案
フライホイール本体	<ul style="list-style-type: none"> 高速回転に耐えるフライホイール円盤の開発 直径400mm、直径1000mmのFRPフライホイール開発
モデル製作 ・運転試験	<ul style="list-style-type: none"> 直径400mmの0.5kWh超電導フライホイール製作・運転試験実施 直径1000mmの10kWh級フライホイール回転試験実施



← 0.5 kWh 小型超電導
フライホイール試験装置

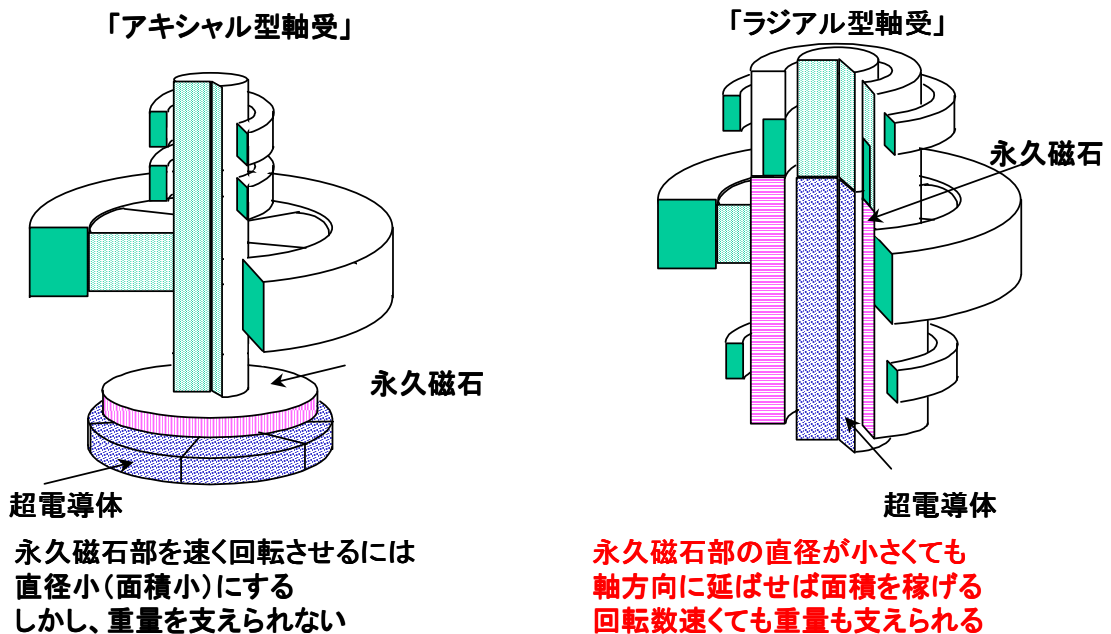
10 kWh 級 中型
フライホイール試験装置 →



15

第1フェーズ 高温超電導フライホイール開発(H7~H11)成果

大型化に有効なラジアル型軸受の考案



大容量化に有利であることを検証

16

第1フェーズ 超電導フライホイール開発プレ最終評価より

(超電導電力応用技術・高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発評価委員会H11.3)

実用化までには、数ステップの研究開発が必要な基礎的な段階

次フェーズへの提言



第2フェーズ開発で取り組むべき開発の内容

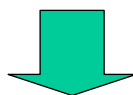
- ・フライホイールを応用問題の一つとして超電導材料を応用した超電導磁気軸受単体の高機能化・実用化に主眼をおいて実施
- ・超電導軸受の高性能化を実証するため10kWh級中型モデルの超電導化による実証

17

第2フェーズ (H12~H16)

フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発

電力分野で実現期待度の大きいフライホイール電力貯蔵システムの実用化には高温超電導バルク材料を用いた超電導軸受技術の確立が必要である。



将来の負荷平準化を想定し大型化に有利なラジアル型超電導軸受技術開発を進める。

18

超電導フライホイール電力貯蔵システム技術開発プロジェクト

期 間	目 標	内 容・成 果
第Ⅰフェーズ (平成7年 ～平成11年)	10MWh級の電力貯蔵システムについて実現可能性の評価・課題の明確化を目的とした要素研究	・0.5kWh級システムの試作・運転研究 ・ラジアル型超電導軸受の考案
第Ⅱフェーズ (平成12年 ～平成16年)	・フライホイール電力貯蔵システム用として有利なラジアル型超電導軸受の高性能化 ・100kWh級フライホイールシステムに必要な要素技術課題を明らかにする。	・100kWh級用超電導軸受の高性能化 ・10kWh級システムの製作・運転研究

19

「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」

基本計画

	最終目標
超電導軸受要素技術	載荷力密度10N/cm ² 、載荷力当たりの回転損失2mW/Nの性能を持つ100kWh級フライホイールシステムに利用可能な超電導軸受要素技術の技術見通しを得る。
超電導軸受応用技術	100kWh級フライホイールシステムで必要となる開発課題をシステム側の視点から明らかにする。

20

研究開発の内容

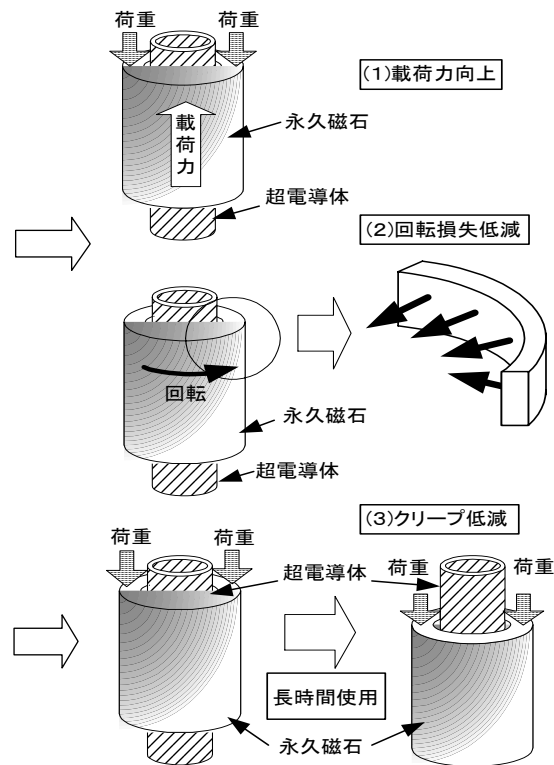
①超電導軸受要素技術

高載荷力で低損失なラジアル型超電導軸受

- ・ 永久磁石を用いた均質で高い磁場の発生技術
- ・ 超電導軸受に適した高電流密度を持つ大型超電導バルクの作製技術
- ・ 永久磁石と超電導バルク体の最適な構成技術

軸降下量低減化

- ・ 磁束クリーブ等の詳細説明
- ・ 過冷却法、予荷重法
- ・ 軸受性能検証試験

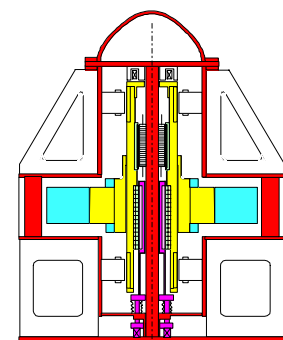


21

②超電導軸受応用技術

- ・ 構造的に100kWh級システムと相似な10kWh級システムを製作・運転

- ・ 回転システムの振動現象の解明
- ・ フライホイールシステムの運転試験
- ・ 振動に対処する省電力制御型磁気軸受技術



10kWh級運転試験機

100kWh級フライホイールシステムで必要となる開発課題をシステム側の視点から明らかにする。

22

基本計画の変更

- ・中間目標の設定
- ・産業応用等の早期実用化への適用可能性と課題を明確にする。

	中間目標	最終目標
超電導軸受要素技術	載荷力密度10N/cm ² 載荷力当たりの回転損失 2mW/Nを達成するための 方策を提示	載荷力密度10N/cm ² 載荷力当たりの 回転損失2mW/Nの性能を 持つ100kWh級超電導軸受技術の 見通しを得る。
超電導軸受応用技術	10kWh級運転試験装置の 構造図提示 軸制御技術の見通しを得る。	100kWh級システムで必要となる 課題を明らかにする。 特に早期実用化のための軸降下 の抑制効果を10kWh級運転試験 装置で検証する。

23

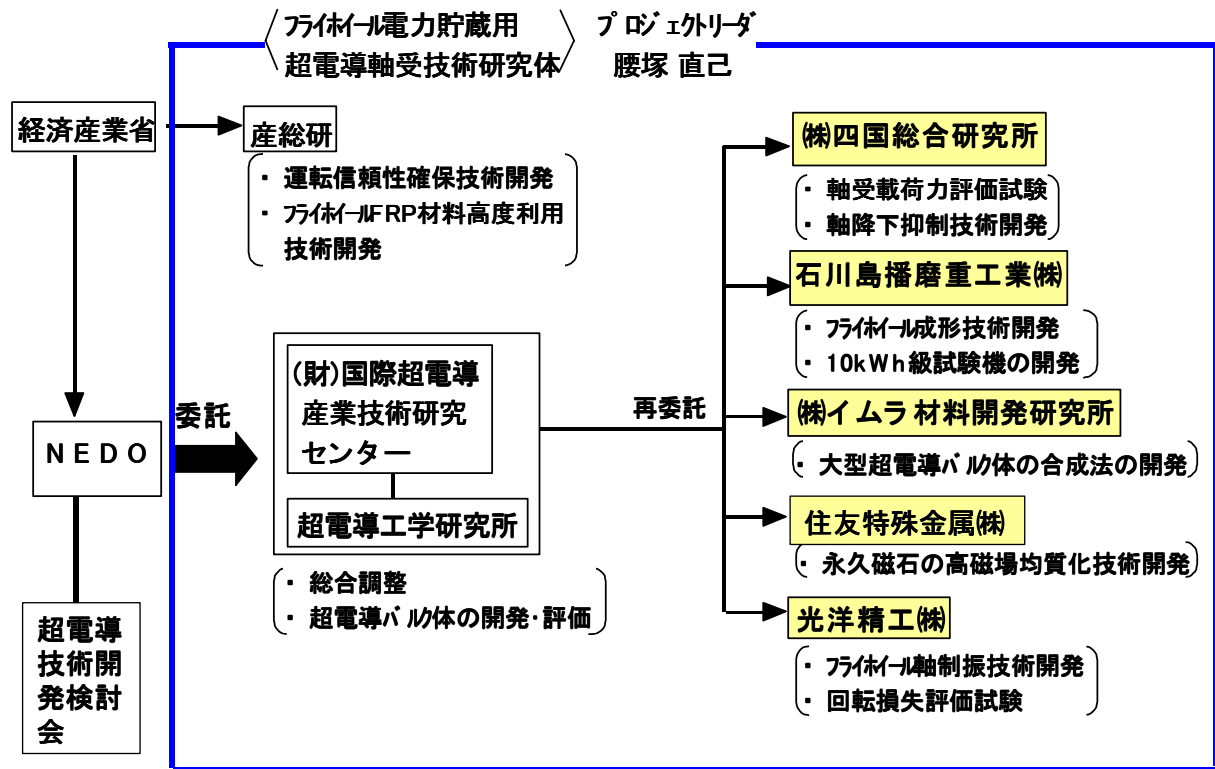
研究開発スケジュール

単位：百万円

	H12年度	H13年度	H14年度	H15年度	H16年度
1. 超電導軸受要素技術				中間評価	
(1) 10kWh級(φ180)軸受検討	軸受最適化研究				
(2) 100kWh級(φ300)軸受検討		軸受検討、要素部設計・製作			試験・評価
2. 超電導軸受応用技術					運転試験
(1) 10kWh級超電導軸受運転試験		設計		製作・組み立て	
(2) フライール本体・軸制振技術開発	10kWh級試作・評価		100kWh級フライール本体検討		
3. 技術調査研究	フライール電力貯蔵技術及びその他関連技術の最新動向調査				
予算	216	290	330	320	
累計	216	506	836	1156	

24

研究開発実施体制



25

プロジェクトの概要

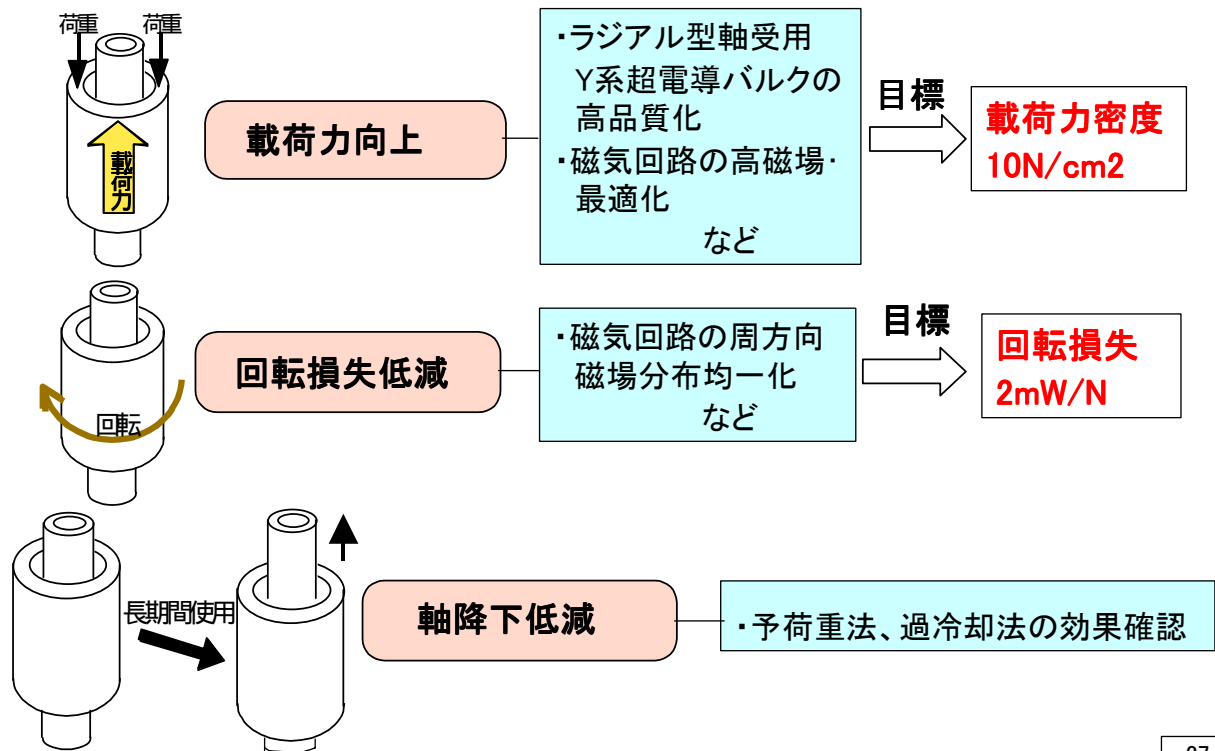
2) 成果概要について

(財)国際超電導産業技術研究センター

26

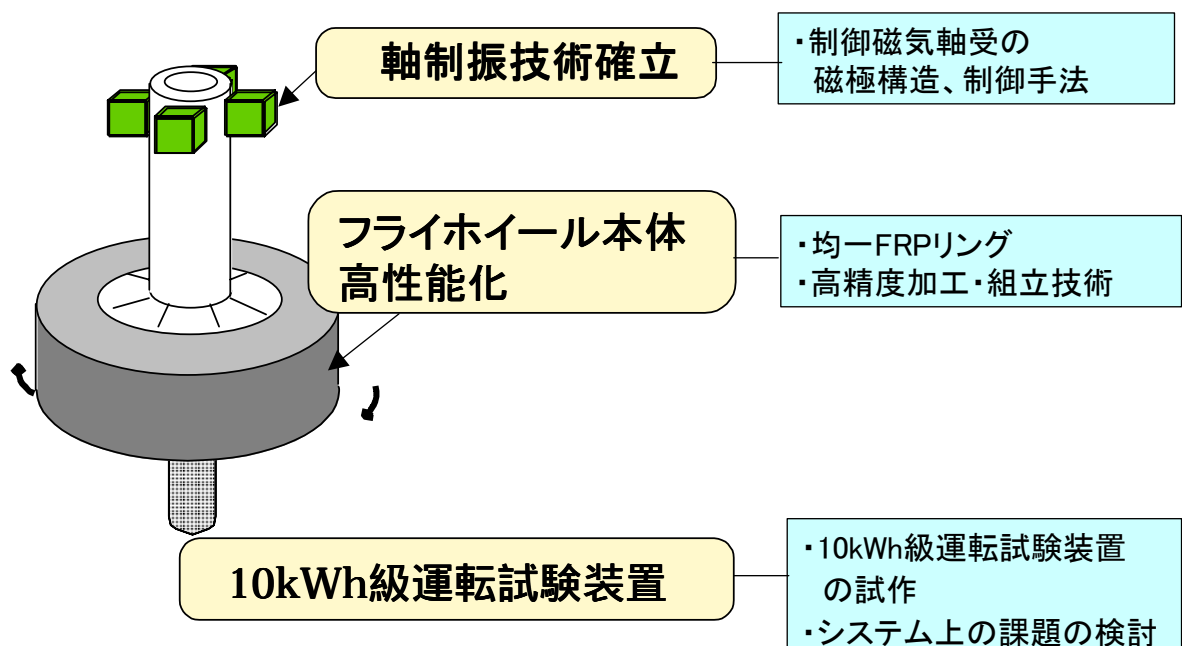
研究開発課題 (1 / 2)

1. 超電導軸受要素技術



研究開発課題 (2 / 2)

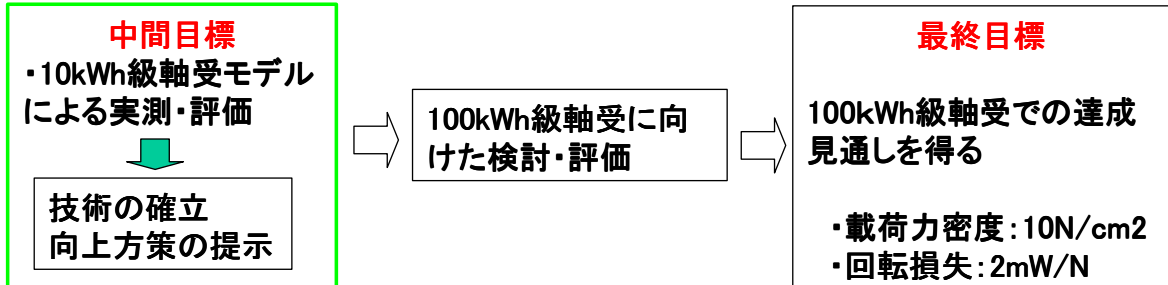
2. 超電導軸受応用技術



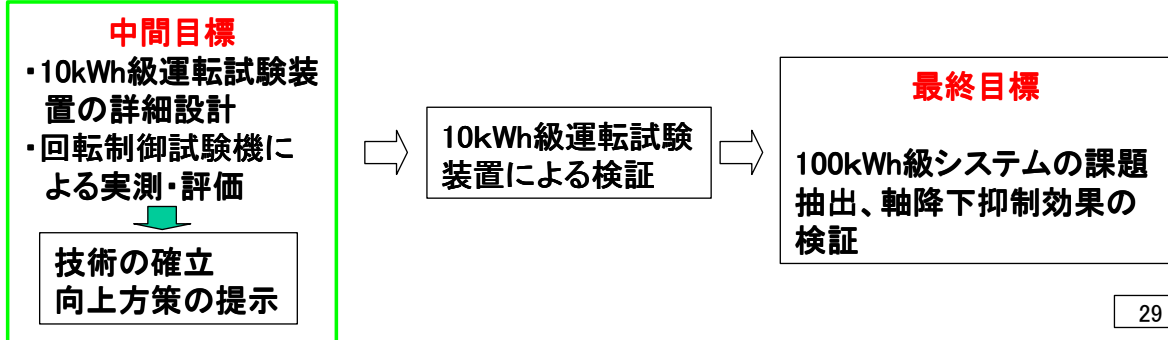
研究開発のステップ

10kWh級軸受と100kWh級軸受は相似形のため、10kWh級で技術の確立を図り、これに基づいた検討・評価により100kWh級の実現の見通しを得る。

1. 超電導軸受要素技術(載荷力、回転損失、軸降下)

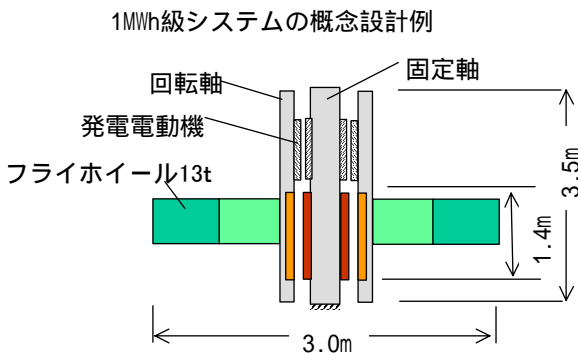


2. 超電導軸受応用技術(10kWh級運転試験装置、軸制振とフライホイール本体)



研究開発目標の設定根拠

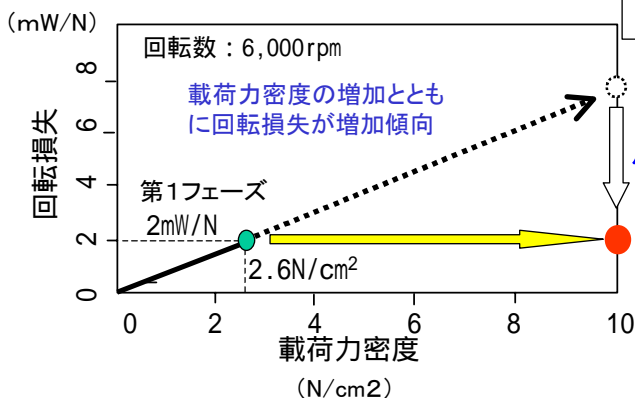
[載荷力密度]



第1フェーズにおいて、1MWh級システムの実現可能性を検討した結果、回転軸構造面(超電導軸受長<回転軸長の1/2)より、必要な載荷力密度は10N/cm²

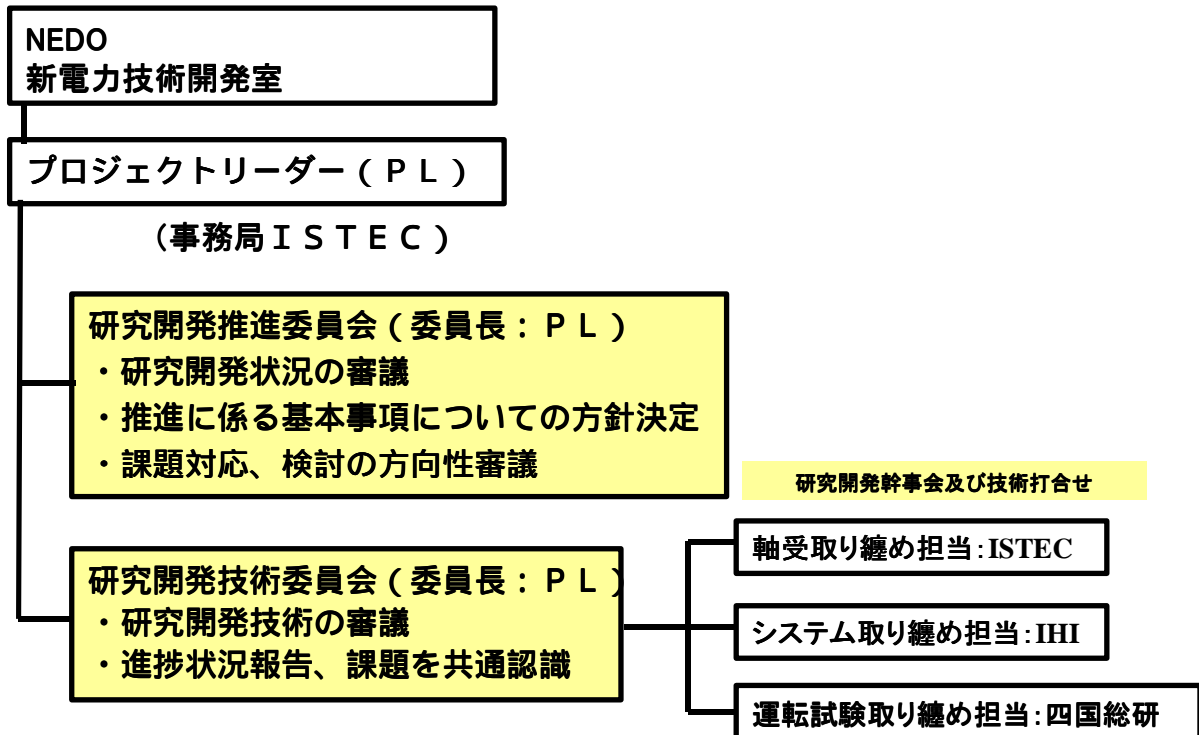
軸受部は規模にかかわらずほぼ相似形であるため、100kWh級で載荷力密度**10N/cm²**の見通しを得ることができれば、1MWh級以上に適用可能。

[回転損失]



項目	損失 (%)
電力変換器	10
発電電動機	2
超電導軸受回転損失	0.4
風損	0.1
制御型磁気軸受、真空ポンプなど	2.5
計	15

運営管理の体制図



情勢変化への対応状況

効率的運営による実施内容の変更 (H14.3)

100kWh級軸受対応として、回転損失の目標値(2mW/N)を実機を試作せずに解析的に達成するため、東大、慶大と共同研究を開始し、解析手法の高精度化をはかる。

○基本計画に中間目標を設定(H14.3)

- ・超電導軸受にて載荷力密度10N/cm²、載荷力あたりの回転損失2mW/Nを達成するための方策を提示する。
- ・10kWh級運転試験装置の構造図および軸受制御技術の課題と対策を提示する。

○基本計画に早期実用化検討を追加

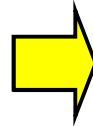
早期実用化に向けて産業分野等への応用可能性を検討する。

成果の概要（超電導軸受要素技術開発）

成果

1. 載荷力向上

- (1)軸受用Y系超電導バルクの高品質化
- (2)磁気回路の高磁場化及び最適化
- (3)RE系超電導バルクの超電導軸受へ適用可能性検討
- (4)100kWh級軸受の検討



- ・10kWh級軸受にて
載荷力密度10N/cm²を達成
- ・過冷却法の有効性を実証
- ・100kWh級軸受にて超電導
バルクと磁気回路の試作・
評価

2. 回転損失低減

- (1)磁気回路の周方向の磁場分布均質化
- (2)10kWh級磁気回路用一体成形
リング状磁石の開発
- (3)100kWh級軸受の解析評価及び回転
損失低減対策検討



- ・10kWh級軸受にて
回転損失2.5mW/Nを達成
- ・2mW/Nを達成するために
渦電流抑制法を提示

3. 軸降下低減

- (1)過冷却法、予荷重法の効果確認



- ・10kWh級運転試験装置に
適用可

33

成果の概要（載荷力向上）

第1フェーズ：載荷力密度5N/cm²

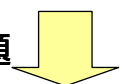
第2フェーズ：以下により超電導バルク及び磁気回路の高性能化をはかり
載荷力を向上

- ・軸受用Y系超電導バルクの高品質化（品質評価方法の確立）
- ・磁気回路の高磁場化および最適化



- ・10kWh級軸受モデルで載荷力密度10N/cm²を達成（過冷却67K）
（相似形状を持つ100kWh級にて目標達成見込み）

第2フェーズにおける今後の課題



- バルク特性向上方策について検討（過冷却の軽減）
- ・形状Y系超電導バルクの特性向上（瓦型→薄銻型）
- ・高特性材料のRE系超電導体の適用可能性検討

10kWh級軸受用Y系超電導バルク（瓦型）



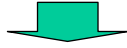
34

成果の概要（回転損失低減）

第1フェーズ：回転損失2mW/N

第2フェーズ：載荷力向上に伴う回転損失増加を以下により低減

- ・磁気回路の周方向の磁場分布の均質化向上
(磁場バラツキ3.9%→2.1%)
- ・10kWh級磁気回路用一体成形リング状磁石の開発



・10kWh級軸受モデル(載荷力密度10N/cm²)で回転損失2.5mW/Nを達成

第2フェーズにおける今後の課題

磁気回路用リング一体磁石

目標(2mW/N)達成のための回転損失低減方策として渦電流抑制方策を検討

- ・磁気回路の構造変更
- ・バルク配置の最適化 など



35

成果の概要（軸降下低減）

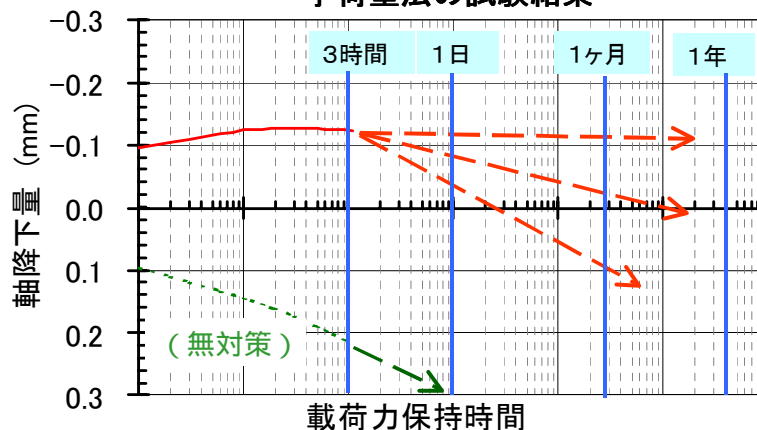
第1フェーズ：予荷重法、過冷却法による軸降下防止策の提案

第2フェーズ：10kWh級軸受モデルで予荷重法、過冷却法の効果を確認

第2フェーズにおける今後の課題

10kWh級運転試験装置により長時間特性等を把握し、実用化のための課題を明確化

予荷重法の試験結果



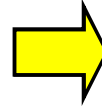
36

成果の概要（超電導軸受応用技術開発）

成果

1. 10kWh級運転試験装置

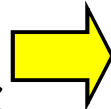
- (1) 10kWh級運転試験装置の試作
- (2) システム上の課題の検討



運転試験装置の詳細設計完了
試験施設の概念設計完了

2. フライホイール軸制振技術の確立

- (1) フライホイールロータの弾性振動を安定に制御する技術の確立
- (2) ロータ側に発生する渦電流損失の低減技術の確立



・12,000rpm 到達
目標回転数15860rpm
第1フェーズの限界9,600rpm
・軸制振の課題と対策の提示

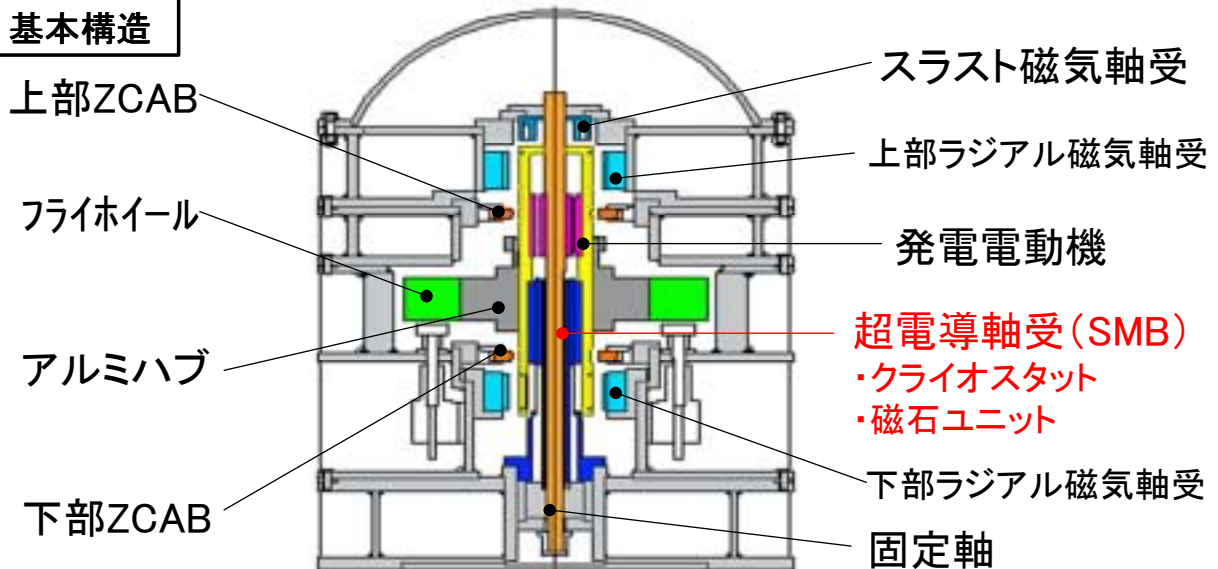
3. フライホイール本体の高性能化

- (1) 均一な品質のFRPリング成形技術の確立
- (2) 高精度のフライホイール本体の加工・組み立て技術の確立

37

成果の概要（10kWh級運転試験装置）

基本構造



基本仕様

目標回転数	15860rpm
回転体重量	403kg
フライホイール直径	1m
発電電動機	15kW
真空度	1×10^{-3} Torr

第2フェーズにおける今後の課題

システム上の課題の抽出・検討

38

成果の概要（フライホイール軸制振技術）

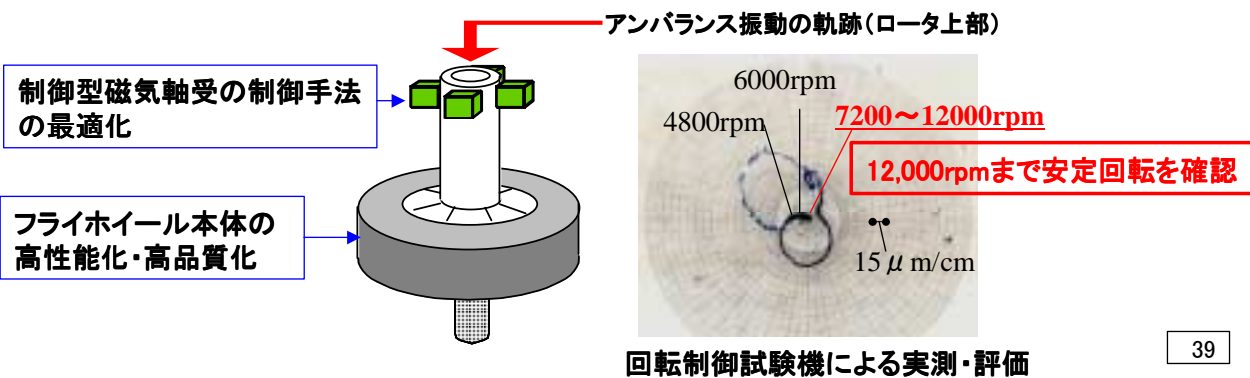
第1フェーズ: 軸振動を抑制する制御型磁気軸受に以下の開発課題が判明

- ・ロータの弾性振動を安定に抑制する技術
- ・ロータ側に発生する渦電流による損失(発熱)低減技術

第2フェーズ: 制御型磁気軸受の磁極構造と制御手法の最適化等により、12000rpmまでの安定運転を達成(第1フェーズの限界9,600rpm)するとともに制御型磁気軸受の渦電流損失を低減(従来型の約1/3)

第2フェーズにおける今後の課題

制御特性の向上などにより、振動抑制効果を高めるとともに、制御型磁気軸受の更なる低損失化を目指す。



39

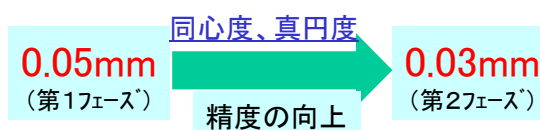
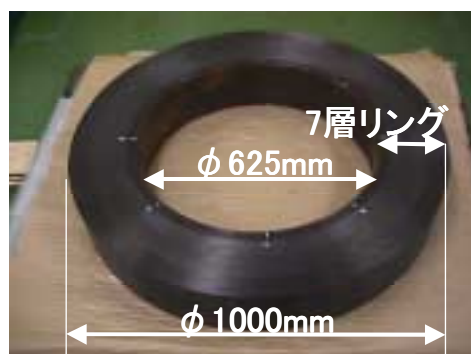
成果の概要（フライホイール本体の高性能化）

第1フェーズ: フライホイール本体を高周速で安定に回転するためには、更なる高性能化、高品質化が必要

第2フェーズ: フライホイール本体の加工精度の向上により高速回転時におけるアンバランス変動を抑制(12000rpmまでの安定運転を達成)

第2フェーズにおける今後の課題

フライホイール本体の更なる大型化(100kWh級: 直径2m)に伴う欠陥、および成形不良の抑制方法について検討



40

特許、論文等の件数（H15年2月現在）

（件）

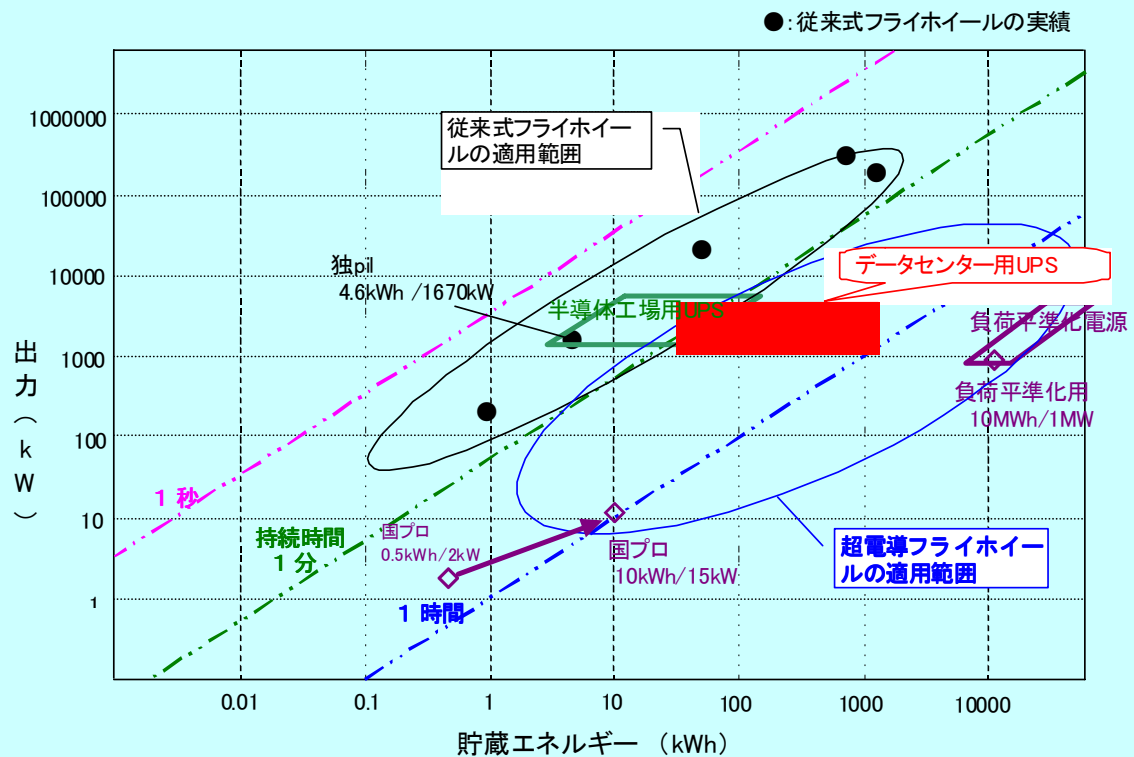
年度	12～13	14	15	16	累計
特許	3 (2)	0			3 (2)
論文等	23	13			36
計	26	13			39

注1：（）内は、産総研分で、内数

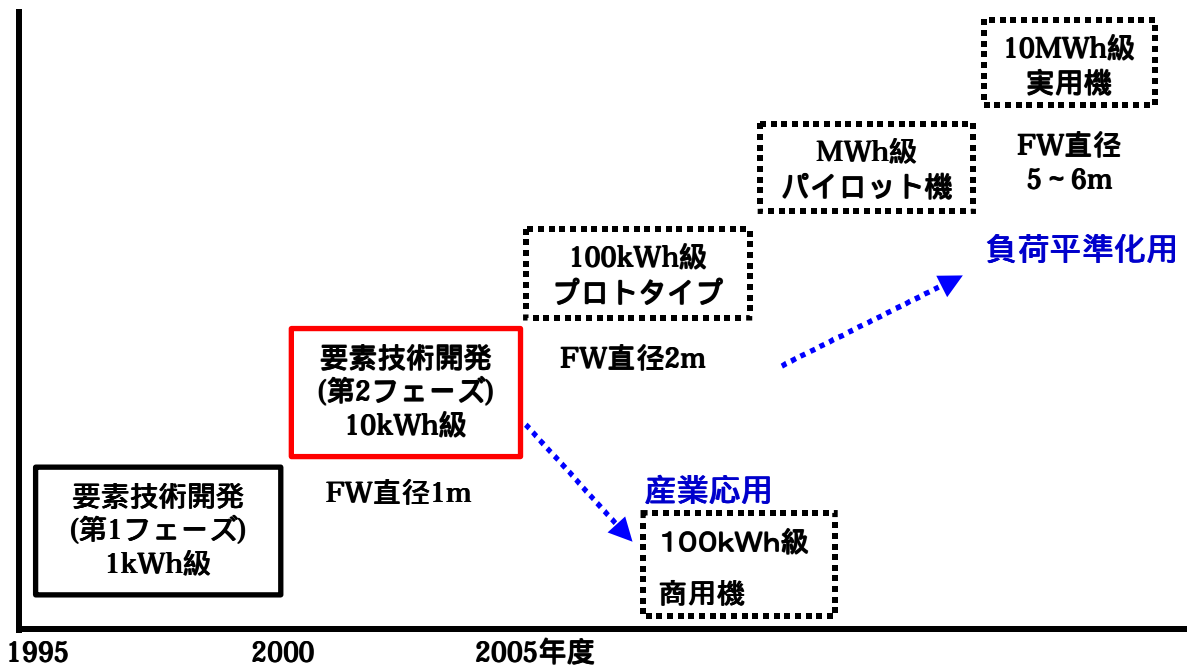
注2：論文等の主な内容

- ・ISS等の国際会議や国内の学会等での論文発表
- ・ISTECのHP上に掲載の超電導Web21への投稿
- ・超電導技術動向報告会等での講演
- ・新聞発表

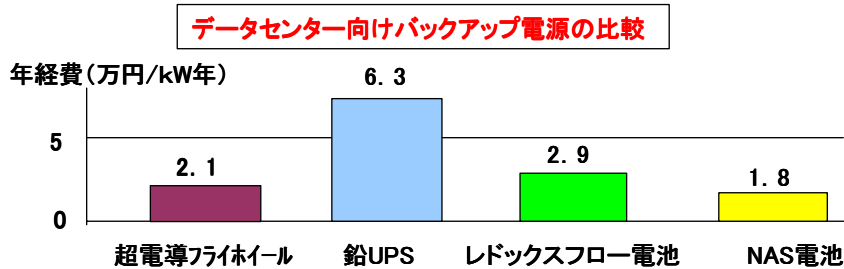
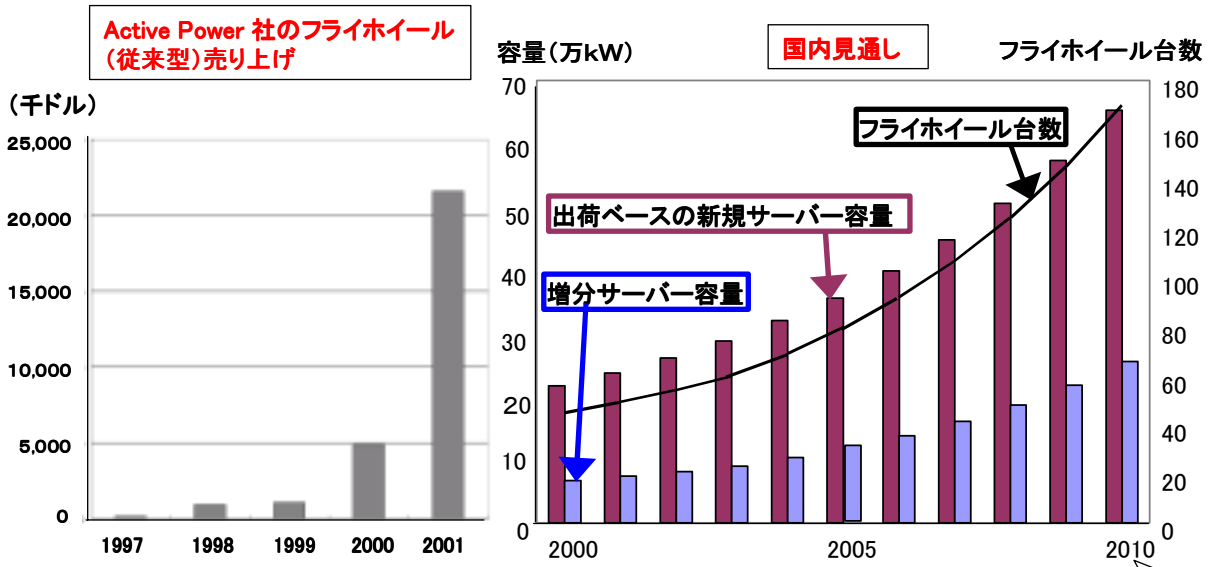
超電導フライホイールの適用範囲図



超電導FWの開発ステップ



フライホイール市場規模



2010年の
フライホイール
推定市場規模
約250億円

データセンター用UPSへの応用

バックアップ電源容量	2000kW／1000m ² (データセンター床面積)
フライホイールUPS	
出力／容量	1000～3000kW／50～100kWh
運転	常時待機、停電時最長2分間放電し、非常用発電機立ち上げ

電池型UPSとの比較(鉛電池、レドックスフロー、NAS電池等)

- ・大出力短時間バックアップの点で有利
- ・長寿命(20年)
- ・トータルコストが低い
- ・メンテナンス、火災、廃棄等で優位

実用化の見通し

本プロジェクトの目標

1～10MWh級電力負荷平準化用フライホイールの基盤技術開発を目標として
今フェーズでは100kWh級フライホイール超電導軸受技術の見通しを得る。

1～10MWh級フライホイールにはまだ数ステップの技術開発が必要



途中成果の早期実用化を図るため、数10～100kWh級フライホイールを開発し、
データセンタ等産業分野へのUPSとしての適用を図る。



今フェーズで100kWh級フライホイール超電導軸受の技術的見通しが得られる見込み。



今フェーズ後、

- ・100kWh級フライホイール本体(直径2m)の開発
- ・超電導軸受の長時間運転特性の把握と対策

など、実用化に向けた課題解決により、2010年前後には実証試験を経て市場に投入できる見通し。

成果のまとめと今後の進め方(1/2)

1. 超電導軸受要素技術

成果

10kWh級軸受モデルで以下を達成

載荷力密度: 10N/cm² 更なる向上方策としてバルク性能向上法を提示

回転損失: 2.5mW/N 更なる低減方策として渦電流抑制法を提示

軸降下: 予荷重法、過冷却法の効果確認

中間目標達成

最終目標達成に向けた課題として以下を実施

1. 軸受特性の改善方策の検討

載荷力向上: RE系材料等バルク性能向上方策の検討

回転損失: 磁気回路の渦電流損失低減方策の検討

2. 100kWh級超電導軸受の評価

載荷力: 100kWh級超電導軸受モデル試作による試験評価

回転損失: 解析手法を高度化し解析による評価

100kWh級超電導軸受の技術的見通し達成

47

成果のまとめと今後の進め方(2/2)

2. 超電導軸受応用技術

成果

10kWh級運転試験: 詳細設計完了、部品製作開始

軸制振とフライホイール本体: 制御特性、製作技術向上により12000rpm回転を達成し、軸制振技術の見通しを得た。

中間目標達成

最終目標達成に向けた課題として以下を実施

1. 軸制振技術の確立

軸制振: 振動抑制効果の向上、制御型磁気軸受の更なる低損失化方策の検討

フライホイール本体: 100kWh級フライホイール(直径2m)の加工精度向上方策の検討

2. 10kW級運転試験機の製作・試験

部品製作、組立、調整、運転試験によりシステムとしての課題を明確化

100kWh級システムで必要となる課題の明確化
10kW級運転試験機で軸降下の抑制効果を検証

48

参考資料 1 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施要領」(平成13年5月制定)に基づいて技術評価を実施する。「技術評価実施要領」は、以下の2つのガイドラインに定めるところによって評価を実施することになっている。

- 総合科学技術会議にて取りまとめられた「国の研究開発評価に関する大綱的指針」(平成13年11月内閣総理大臣決定)
- 経済産業省にて取りまとめられた「経済産業省技術評価指針」(平成14年4月経済産業省告示)

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、産業技術総合研究所における技術評価の手順は、以下のように被評価プロジェクト毎に分科会を設置し、同分科会にて技術評価を行い、評価報告書(案)を策定の上、技術評価委員会において確定している。

- 「技術評価委員会設置・運営要領」に基づき技術評価委員会を設置
- 技術評価委員会はその下に分科会を設置

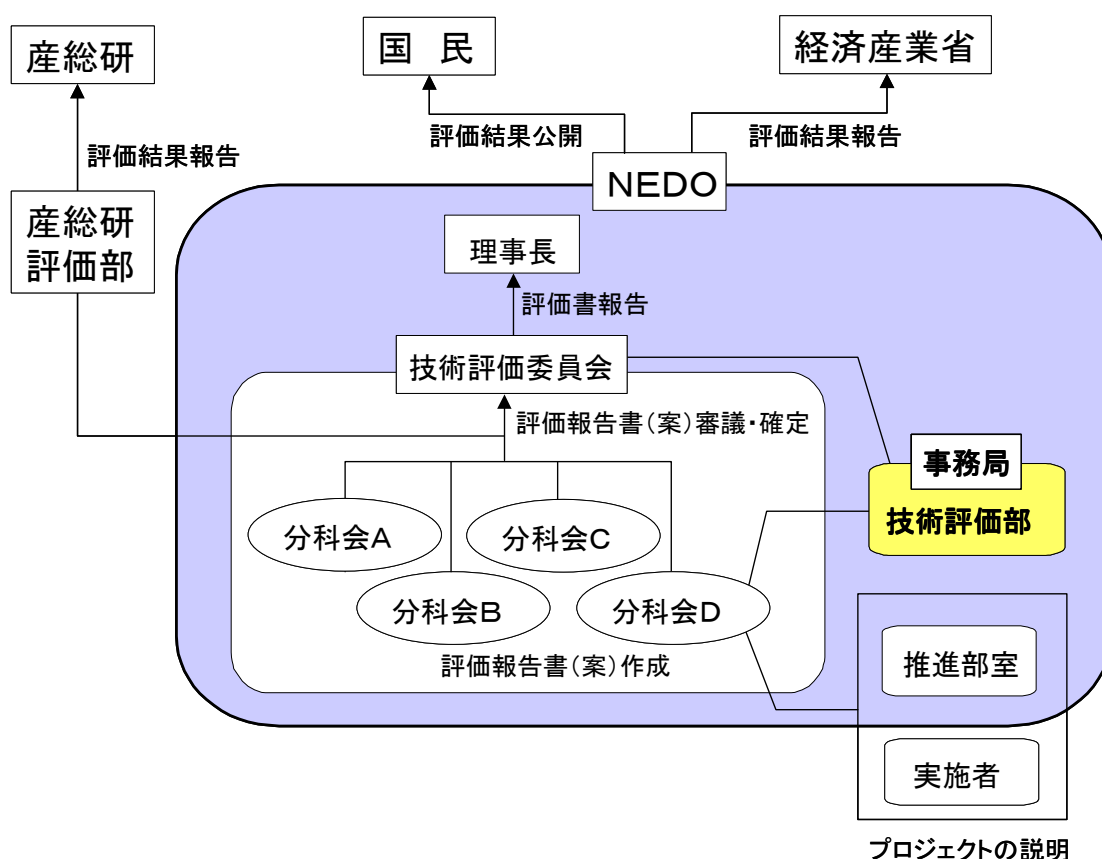


図 1 評価手順

1．評価の目的

評価の目的は、

- 研究開発に対する経済的・社会的ニーズの反映
- より効率的・効果的な研究開発の実施
- 国民への施策・事業等の開示
- 資源の重点的・効率的配分への反映
- 研究開発運営管理機関、研究開発実施機関の自己改革の促進

とされている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画と比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

2．評価者

実施要領においては、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行うこととされているとともに、分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮した選定を行うこととされている。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とすることとしている。

これらに基づき、分科会委員名簿にある7名が選任された。

なお、本分科会の事務局については、新エネルギー・産業技術総合開発機構技術評価部評価業務課と産業技術総合研究所評価部が担当した。

3．評価対象

平成12年度に開始された「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」プロジェクトを評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部室である新エネルギー・産業技術総合開発機構 新電力技術開発室、産業技術総合研究所、及び以下の研究実施者から提出された事業原簿、プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

4．評価方法

分科会においては、当該事業の推進部室及び研究実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、研究実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

5．評価項目、評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、技術評価委員会による『各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格、中間・事後評価の別等に応じて、各分科会において判断すべきものである。』との考え方に従い、第1回分科会において、事務局が、技術評価委員会により示された「標準的評価項目・評価基準」(参考資料1 - 7頁参照)をもとに改訂案を提示し、承認されたものである。

プロジェクト全体に係わる評価においては、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義や実用化への見通し等について評価した。各個別テーマに係る評価については、主にその目標に対する達成度等について評価した。

評価項目・評価基準

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) N E D Oの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（プログラム）制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の選定基準等に適合しているか。
 - ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、N E D Oの関与が必要とされる事業か。
 - ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか（知的基盤・標準整備等のための研究開発の場合を除く）。
- （注）独立行政法人化後においては、N E D Oの中期目標・中期計画に適合しているかについても評価する。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 社会的・経済的背景及び研究開発の動向から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 技術動向調査等に基づき、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 目標達成のために、具体的かつ明確な開発目標を設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施者の事業体制の妥当性

- ・ 目標を達成する上で、事業体制は適切なものか。
- ・ 各研究開発実施者の選定等は適切に行われたか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携 and / or 競争が十分に行われる体制となっているか。

- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（活用・実用化の想定者）に対して、成果を普及し関与を求める体制を整えているか。

(4)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、計画見直しを適切に実施しているか。
- ・ 社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。

3．研究開発成果について

(1)目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。

(3)特許の取得

- ・ 特許等（特許、著作権等）は事業戦略に沿って適切に出願されているか。
- ・ 外国での積極的活用が想定される場合、外国の特許を取得するための国際出願が適切にされているか。

(4)論文発表・成果の普及

- ・ 論文の発表は、質・量ともに十分か。
- ・ 成果の受け取り手（活用・実用化の想定者）に対して、適切に成果を普及しているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4 . 実用化、事業化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。

(2)波及効果

- ・成果は関連分野への技術的波及効果及び経済的波及効果を期待できるものか。
- ・プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発を促進するなどの波及効果を生じているか。

(3)事業化までのシナリオ

- ・コストダウン、導入普及、事業化までの期間、事業化とそれに伴う経済効果等の見通しは立っているか。

標準的評価項目・評価基準

【本標準的項目・基準の位置付け（基本的考え方）】

本項目・基準は、研究開発プロジェクトの中間・事後評価における標準的な評価の視点の例であり、各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格、中間・事後評価の別等に応じて、各分科会において判断すべきものである。

なお、短期間（3年以下）又は少額（予算総額10億円未満）のプロジェクトに係る事後評価については、以下の「3.」及び「4.」を主たる視点として、より簡素な評価項目・評価基準を別途設定して評価をすることができるものとする。

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・特定の施策（プログラム）制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の選定基準等に適合しているか。
- ・民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか（知的基盤・標準整備等のための研究開発の場合を除く）。

（注）独立行政法人化後においては、NEDOの中期目標・中期計画に適合しているかについても評価する。

(2) 事業目的の妥当性

- ・社会的・経済的背景及び研究開発の動向から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・技術動向調査等に基づき、戦略的な目標が設定されているか。
- ・目標達成のために、具体的かつ明確な開発目標を設定しているか。
- ・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。

- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施者の事業体制の妥当性

- ・ 目標を達成する上で、事業体制は適切なものか。
- ・ 各研究開発実施者の選定等は適切に行われたか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携 and / or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（活用・実用化の想定者）に対して、成果を普及し関与を求める体制を整えているか。

(4) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、計画見直しを適切に実施しているか。
- ・ 社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。

3 . 研究開発成果について

(1) 目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。

(2) 成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。

(3)特許の取得

- ・特許等（特許、著作権等）は事業戦略に沿って適切に出願されているか。
- ・外国での積極的活用が想定される場合、外国の特許を取得するための国際出願が適切にされているか。

(4)論文発表・成果の普及

- ・論文の発表は、質・量ともに十分か。
- ・成果の受け取り手（活用・実用化の想定者）に対して、適切に成果を普及しているか。
- ・一般に向けて広く情報発信をしているか。

4．実用化、事業化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。

(2)波及効果

- ・成果は関連分野への技術的波及効果及び経済的波及効果を期待できるものか。
- ・プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発を促進するなどの波及効果を生じているか。

(3)事業化までのシナリオ

- ・コストダウン、導入普及、事業化までの期間、事業化とそれに伴う経済効果等の見通しは立っているか。

5．その他

知的基盤・標準整備等のための研究開発に特有の評価項目

- ・成果の公共性を担保するための措置、或いは普及方策を講じているのか（JIS化、国際規格化等に向けた対応は図られているか、一般向け広報は積極的に為されているか等）。
- ・公共財としての需要が実際にあるか。見込みはあるか。
- ・公共性は実際にあるか。見込みはあるか。