

補助事業番号 2021M-183  
補助事業名 2021年度 液体水素供給網の高度利用に基づいて低炭素・高安定電力システムを実現する大容量電力貯蔵装置（SMES）の開発研究 補助事業  
補助事業者名 上智大学 理工学部 機能創造理工学科 谷貝剛

## 1 研究の概要

水素利用はCO<sub>2</sub>削減の切り札として注目されており、気体の1/800の体積になる液体状態での貯蔵が有力候補になっています。水素利用促進が進む中、マイナス253℃の液化に使われた膨大なエネルギー、いわゆる“冷熱”は有効に利用されていません。一方で、電力システムの低炭素化には、太陽光・風力発電の導入拡大が急務ですが、変化の速い電力の変動成分を長期間メンテナンスフリーで安定化する技術は発展途上です。超電導電力貯蔵装置(SMES)は、冷熱を有効利用し、かつ高効率で電力変動を抑える効果が期待できます。大容量のSMESを液体水素で冷却して電力変動を安定化する実証試験は他に例がなく、世界初の試みになります。

## 2 研究の目的と背景

地球温暖化対策に有効な技術はいくつも存在しますが、中でも水素タービン発電、燃料電池発電は、CO<sub>2</sub>を排出しない電源で、大変魅力的です。しかし、信頼性の高い分散電源としてさらなる普及を目指すためには、コンパクトに貯蔵できる液体水素（20K, -253℃）供給網の整備が課題です。再生可能エネルギー発電も低炭素化に有効である一方、天候に左右されるため電力システムが不安定になります。その安定化には、高周波の変動を大容量で補償する装置が必要ですが、劣化する事無く、メンテナンスフリーで動作する装置は存在しないため、開発の必要があります。液体水素利用に付加価値を付けて普及を促し、同時に高品質な電力供給ができれば、CO<sub>2</sub>排出減少に大きく貢献できることになります。

液体水素冷却の超電導電力貯蔵装置（SME）が大容量化できれば、液体水素を燃料としてだけでなく、冷媒として使えるため、水素利用に付加価値が得られます。さらにSMESによってこれまで困難だった大容量の電力の高周波成分を安定化できれば、再生可能エネルギー導入促進につながるため、水素・超電導電力貯蔵・再生可能エネルギーを組み合わせたCO<sub>2</sub>フリーな水素社会が実現できます。

本事業では、サプライチェーン構築・発展で入手可能となる液体水素の冷熱を有効活用すべく、液体水素温度で超電導特性を示すMgB<sub>2</sub>線材を使って、速い電力変動をメンテナンスフリーで補償し続ける電力貯蔵装置（SMES）を実現する技術開発を目指します。社会実装に適するMJクラスの大容量貯蔵化は未だ例がないため、大容量のコイル用導体と、SMESの基幹装置である超電導マグネット開発・実証を通じて、その実現に道筋を付け、将来の低炭素社会実現に貢献することを目指します。

### 3 研究内容

#### (1) kA級大容量MgB<sub>2</sub>導体の開発

(<https://gaiya8165.wixsite.com/website/projects-2>)

MgB<sub>2</sub>素線は、直径約0.83mmで細いため、1本あたり100A程度の電流しか流せません。これはMgB<sub>2</sub>という材料が、曲げ加工に弱いため、細くすることで曲げ歪みを最小化し、超電導特性の劣化を防ぐ効果があります。従って、kA級の導体開発には、少なくとも10本以上の素線にできるだけ均一に電流が流れるよう撚り線し、薄く曲げ易い導体を設計して製作、その性能を評価する必要があります。これまでの研究で、幾何学的な形状だけから推定される超電導特性が劣化しないものであっても、実証試験で得られる特性はある程度の劣化が避けられない事も分かっています。そのため、それを考慮に入れて、最大限素線の特性を発揮できる設計および製作技術の確立を目指しました。

図1は、微分幾何学に基づく空間曲線理論を用いて設計した導体の歪み解析結果と、実際に製作した導体を示しています。2層構造の薄いラザフォード導体構成を採用し、24本の素線を用いて撚りピッチ110mmで製作すると、超電導生成熱処理前の曲げ歪み許容値である6%を下回る4.54%である事が分かり、その通りに製作された様子がわかります。

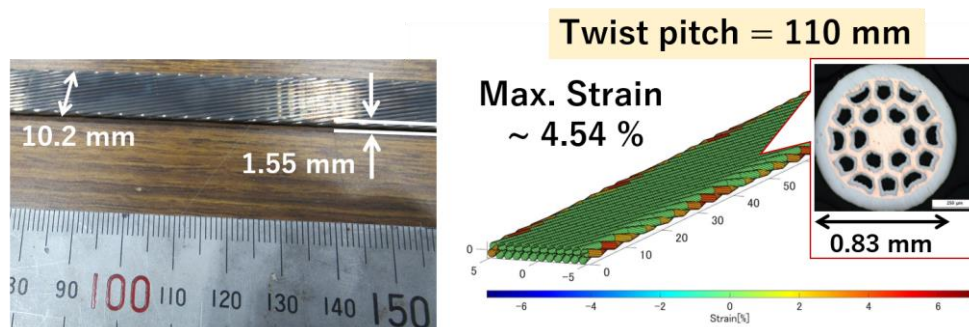


図1 MgB<sub>2</sub>素線を24本使用した導体設計と製作の結果

#### (2) MgB<sub>2</sub>大容量導体と電力貯蔵マグネット性能の調査

##### ① kA級大容量MgB<sub>2</sub>導体の特性に関する調査研究

(<https://gaiya8165.wixsite.com/website/projects-2>)

製作したkA級導体は、将来的にコイル形状に巻き線して電力貯蔵動作を確認しますが、その前に直線の導体を使って、マグネットとして使用したときと同じ環境に晒し、その特性が設計通りかどうかを確認する必要があります。本事業では、共同研究者である核融合研の平野直樹教授の協力の下、製作したkA級導体の一部を625mmの長さで切り出し、導体試験装置にマウントして防爆の必要が無い、4.2Kの液体ヘリウムに浸ける事で冷却し、10kAまで流せる電源につないで様々な磁場を加えて、その特性を調査しました。実際の通電条件は液体水素温度である20Kですが、線材メーカーから提供されたI<sub>c</sub>-B-T特性（任意の磁場・温度条

件で超電導電流がどのくらい流せるかを示したデータベース) を活用し、20Kでの特性を推定しました。

その結果、4.2K、3Tの磁場中で5 kA近い特性を確認することができました。これは、実際の電力貯蔵マグネットの運転条件である、20K、2T付近に換算すると、1.5kAに相当するため、定格電流1kAの設計が正しかった事を意味しています。図2は、導体試験装置の全体概要であり、図3が磁場強度に対する導体の臨界電流特性を示したものです。

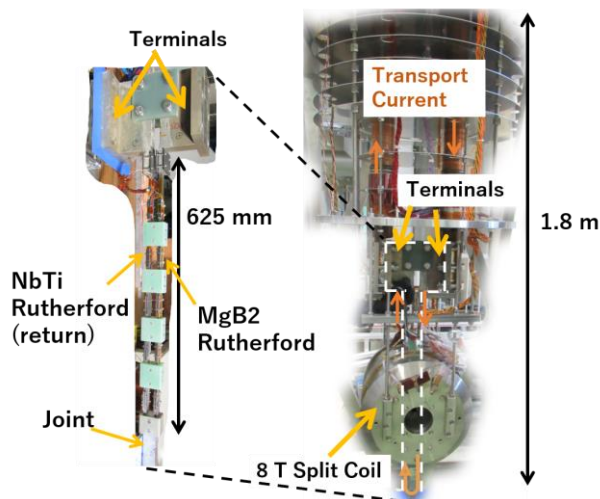


図2 導体試験装置の全体概要

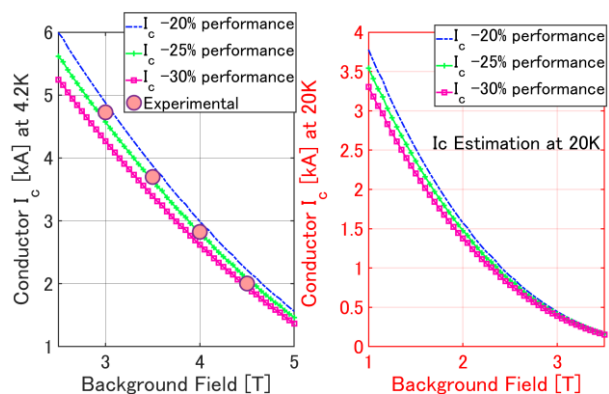


図3 様々な磁場中での導体臨界電流評価結果

## ②10kJ級MgB2電力貯蔵マグネットの液体水素冷却動作試験

(<https://gaiya8165.wixsite.com/website/projects-2>)

先行研究において、内径400mm、外径606mm、高さ11mmのダブルパンケーキコイルを合計3つ製作済みです。これらは定格電流600Aで設計され、図4のように3つ積層しても10kJの容量であるため、本グループが社会実装の目安としているMJクラスの貯蔵容量よりも小型になります。しかし、このサイズでも液体水素の間接冷却で通電試験した例がないため、本事業で直流・交流連続零次試験を行いました。図4の右は、液体水素の液溜めから液体がマグネットに向かって流れ出し、数多くの銅板を介して熱を奪うことで冷却する間接冷却部分を拡大したものです。液体の循環は、蒸発ガスが液溜めの上部に向かって吹き出すことで、液面を押し下げる効果をうまく利用して、ポンプなどの動力なしに液体をつぎ足すだけで循環させられる、サーモサイフォン方式を採用しています。これは、高エネルギー加速器研究機構の榎田康博教授の協力の下、先行研究で用いた小型の冷却系を改造した装置で、外径606mmのマグネットを冷却しつつ、蒸発ガスの漏れを漏れなく液溜めや外部回収系に導く工夫がなされています。図5は、3積層マグネットと、サーモサイフォン方式液体水素間接冷却装置の全体像、および冷却の概念図です。

図6は、液体水素実験の外観と、電源の限界である50A/secの高速600A連続通電試験の結果

です。予想外のコイル間接続抵抗によって、ジュール熱が発生し、長時間の通電こそできませんでしたが、600Aでも4サイクルの通電が問題なく行えることが確認できました。MgB2線材を用いて設計した導体とマグネットが、液体水素冷却でも設計通り、かつ安全に運用できる事を示した、世界初の成果になります。

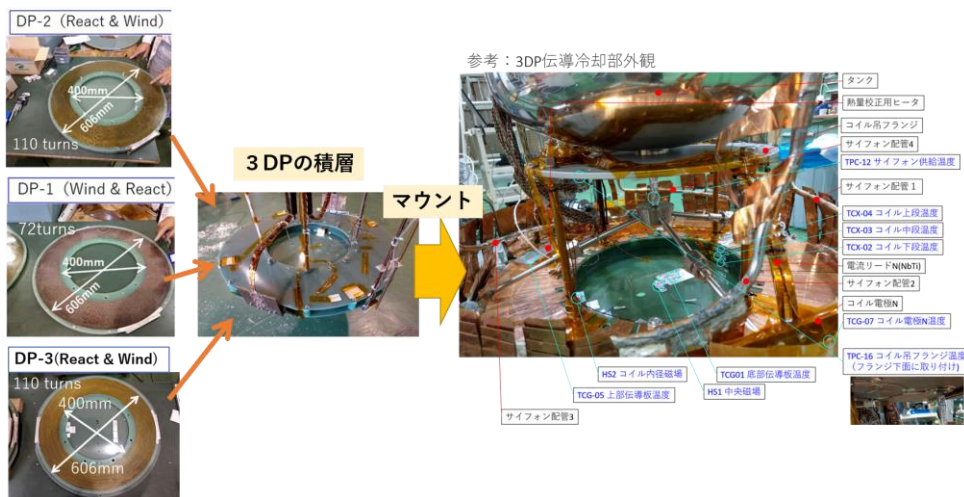


図 4 定格 600A, 10kJ 容量の SMES コイルと液体水素間接冷却系へのマウント

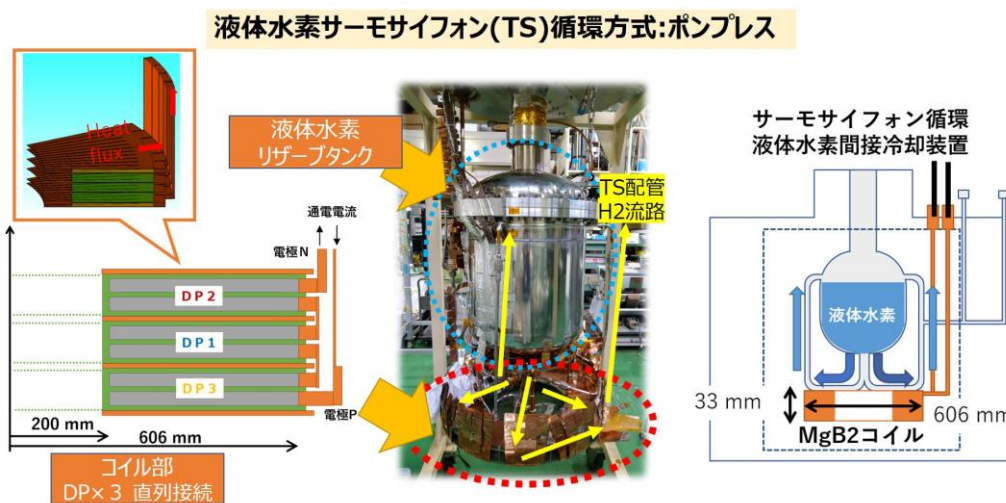


図 5 600A 定格、10kJ 容量の SMES システムの外観



定格600A, 50A/s(電源の最速掃引)

### 伝導板の温度変化

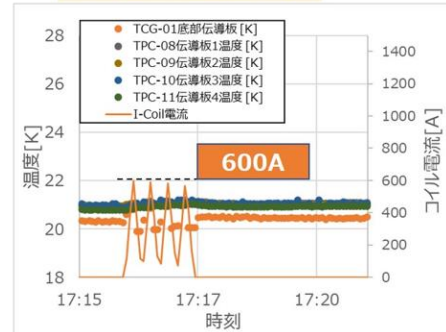


図6 液体水素試験の外観と 50A/sec, 600A の連続励磁試験の結果

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

例えば半導体工場では、瞬間的に電圧が下がることで、数億円の損害が出ていましたが、低温超電導体であるNbTiを用いて製作された5MJ容量の電力貯蔵装置 (SMES) を、液体ヘリウムで冷却して運用することによって、その損害を長期間にわたって未然に防いだ実績があります。これに匹敵する容量のMgB2 SMES開発をひとつの目標値とすると、先行研究で製作した10 kJ容量のSMESを液体水素冷却で運用可能であること、さらに大容量のマグネット製作を可能にするkA級の導体設計・通電に成功した事は、今後発展する液体水素供給網をうまく利用しながら自然エネルギー由来の不安定な電力を安定化してユーザーに供給できる、低炭素化に貢献する新しいシステムとして提案できる可能性を示したことになります。2050年のカーボンフリーに向けて、極めて大きな貢献が期待できます。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

事業実施者である上智大学理工学部教授 谷貝 剛は、これまで一貫して超電導の大型応用に従事してきました。超電導体は、直流電流に対しては完全に抵抗がゼロ、交流で用いても極めて低損失な、夢の省エネルギー材料です。大電流の流せる導体を製作してマグネットを製作すると、強磁場発生から電力貯蔵まで、魅力的な応用が実現します。しかし、極低温への冷却が必須である事から、これまで限られた用途でしか受け入れられませんでした。本事業において、MgB2という日本で発見された、液体水素で冷却できる材料を用いて、自然エネルギーからの不安定な発電を安定化できる電力貯蔵装置 (SMES) の実証ができたことは、冷却のコストを実質ゼロにしつつ、CO2を多く排出している電力システムの低炭素化に大きく貢献できる可能性を示す事ができました。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

### 国際学術誌

- (1) T. Yagai, et al, IEEE Transaction on Applied Superconductor vol. 32, No. 6, (2022)  
DOI: 10.1109/TASC.2022.3154339
- (2) T. Komagome, et al, IEEE Transaction on Applied Superconductor vol. 32, No. 6,  
(2022) DOI: 10.1109/TASC.2022.3166718

### 国内学会誌

- (1) 谷貝 剛 他、低温工学学会誌 56巻5号 (2021) p. 269-279.

## 7 補助事業に係る成果物

### (1) 補助事業により作成したもの

<https://gaiya8165.wixsite.com/website/projects-2> (URL)

### (2) (1) 以外で当事業において作成したもの

該当無し

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 上智大学理工学部（ジョウチダイガク リコウガクブ）

住 所： 〒102-8554

東京都千代田区紀尾井町7-1

担 当 者： 教授 谷貝 剛（キョウジュ ヤガイ ツヨシ）

担 当 部 署： 上智大学学術情報局研究推進センター（ジョウチダイガク ガクジュ  
ツジョウホウキョク ケンキュウスイシンセンター）

E - m a i l : tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

U R L : <https://gaiya8165.wixsite.com/website>