

【産業競争力懇談会 2022年度 プロジェクト 最終報告】

【超電導で拓くカーボンニュートラル社会】

2023年2月9日

産業競争力懇談会 **COCN**

【エクゼクティブサマリ】

1. 本プロジェクトの基本的な考え方

(1) 超電導のカーボンニュートラル貢献と産業競争力強化

超電導は低温下では電気抵抗がゼロのため、環境保全と経済発展に資するソリューションであり、水素の冷熱活用との相性が極めて良い。2050年のカーボンニュートラル実現に向け、水素社会への移行が検討されており、海外で製造した安価な水素の輸入が検討されている。水素の輸送形態としては液体水素、アンモニア、メチルシクロヘキサン（MCH）等が検討されており、IRENA（International Renewable Energy Agency）の2022年レポートによれば、パイプライン輸送が難しい我が国では輸送距離約4000km以下では液体水素がコスト的に有利と分析されている。

本プロジェクトでは、液体水素が国内に集約貯蔵されることを想定し、ふんだんにある液体水素の冷熱を利用した超電導応用がカーボンニュートラルに貢献している姿を検討した。

また、近年、米国・欧州で新たな超電導の活用（小型核融合炉、航空用軽量モータ、大型洋上風力発電機など）への投資が活発化していることを踏まえ、欧米・中国に大きく後れをとるリスクが顕在化しているとの危機認識から、超電導応用において、欧米・中国に対する国内産業の優位を構築し、日本国としての持続的発展に資する姿についても検討した。

(2) 水素社会における液体水素の冷熱利用

液化天然ガス（LNG）では、冷熱は必ずしも十分な活用がされないまま社会インフラの整備が進み、国内のLNG冷熱の利用率（冷熱利用したLNG量/全LNG使用量）は約20～30%に留まっている。これからインフラ構築する液体水素では、輸送/貯蔵のために液化に要したエネルギーを最大限に回収し、無駄なく有効に利活用するため、社会全体で冷熱の利用方法をあらかじめ計画し設計すべきである。本プロジェクトでは液体水素の冷熱をあますことなく活用する観点からも検討した。

2. 検討の視点と範囲

本プロジェクトは①成長シナリオ策定、②超電導機器の経済合理性・CO₂削減効果調査、③共通技術調査の3つのタスクフォースを組成し、以下の視点と範囲で、検討を実施した。

表1 検討の視点と範囲

タスクフォース	検討の視点	検討の範囲
成長シナリオ策定	・カーボンニュートラル貢献 ・産業競争力強化	液体水素の冷熱を活用した超電導による成長シナリオの提案
超電導機器の経済合理性、CO ₂ 削減効果	・導入メリットと経済合理性 ・CO ₂ 削減効果	代表的な超電導応用機器（電力機器、医療装置、一般産業向け機器、核融合機器）の調査
共通技術	・各機器共通技術の横断調査 ・注力ポイントの抽出	中心となる技術（線材・集合導体・コイル・冷却）の現状レベル調査、要求レベルとの比較評価、注力ポイント評価

3. 検討結果

(1) 成長シナリオ策定

以下の2つのコンセプトからなる成長シナリオを策案した。図1にこれらのイメージを示す。

①水素・超電導コンプレックス

水素社会において、液体水素の集約貯蔵拠点に、水素を広く利活用するコンプレックスが形成され、そのなかに液体水素の冷熱で冷却した超電導装置が提供するベネフィット(磁場、大電流、放射光、ビーム、中性子など)を利用した新たな価値・プロダクトを創生する産業体の構築が進む姿を描いた。

②超電導発電機を利用した再生エネルギーの広域連系

再生エネルギー大量導入時の季節間変動への対応に、液体水素によるエネルギー貯蔵と水素発電を用いるとともに、液体水素の冷熱を活用した超電導発電機により国内電力系統を広域連系する姿を描いた。超電導の電気抵抗ゼロの性質により、系統全体のインピーダンスを下げられ、送電インフラ増強を軽減し、コスト面で大きなメリットが得る可能性があると考える。



図1 広域再エネ連系構想と水素・超電導コンプレックスのイメージ図

(2) 超電導機器の経済合理性・CO₂排出量削減効果の調査の結果

超電導発電機や水素コンプレックス構想で採用が見込まれる各種超電導応用機器のCO₂排出量の削減ポテンシャルの調査例を調べ、超電導を適用するメリットと併せて整理した。

(3) 共通技術調査の結果

液体水素の冷熱を利用した高温超電導機器を構成する鍵となる「線材」「集合導体」「コイル」「冷却」について、技術の現状と要求レベルとの比較・対照、産業競争力強化の観点で注力すべき技術を検討して整理した。

4. 産業競争力強化のための提言および施策

今年度は成長シナリオの策案を中心に検討を実施した。個々については、検討を要するが、水素社会における冷熱と超電導の利活用は、今後、世界中で検討が始まるものと考えられ、他国に先駆けた検討と社会実装を進めることが産業競争力の観点から重要と考える。

次年度の検討でさらに深堀し、提言すべき内容に反映することを前提に、現時点のプレ提言を以下にまとめる。

- ・水素社会における冷熱の利活用の仕組み、および超電導を利活用した社会インフラを日本が先導して構築するとともに、これらのインフラパッケージを海外輸出することで国内の雇用を創出し、同時に、新たな輸出産業力強化を押し進めること
- ・将来の社会インフラ構築には、新たな人材の育成が急務な状況にあり、個別企業のモチベーションだけでは難しいため、産業界と大学・国研が連携して中長期視野に立った人材育成の機会の創出とモチベーションの向上を押し進めること
- ・成長の青写真を本プロジェクトで描いた後、産官学連携による国家プロジェクトで運用まで見据えた技術開発を行い、特区等での実規模実証を進めることで必要な技術と人材を育成、実用化と社会実装を進めること

上記を確実に推進するため、官民が以下の役割で連携して進めることが望ましいと考える。

官：国家プロジェクトによる開発枠組の構築と推進、特区等における実規模実証および国内インフラ整備/パッケージ輸出の推進

民：冷熱を利用した持続可能な産業を創出するための魅力的なエコシステムの構築

5. 次年度に向けた課題

本プロジェクトは2年間の取組を計画する。次年度に向けた課題を以下にまとめる。

- ・提案する再エネ広域連系構想の具体化検討（新規課題レベルの研究が必要。進め方含めて課題）
- ・「カーボンニュートラルへの貢献」「産業競争力強化」視点での成長シナリオの成立性検討
- ・効果的な注力ポイントの抽出、製造/運用コストの評価（検討継続）
- ・ベンチマーク深堀による経済合理性樹立の方策検討
- ・産業競争力強化のために国として研究開発に注力すべき共通技術の抽出、開発計画の提案

以上

【目 次】

1. プロジェクトの背景と目的	4
1. 1. プロジェクトの背景	4
1. 2. プロジェクトの目的	6
2. 本プロジェクトの進め方	7
3. 成長シナリオ策定	9
3. 1. 成長シナリオの検討結果	9
3. 2. 次年度に向けた検討上の課題	14
4. 超電導機器の経済合理性・CO ₂ 削減効果の調査	15
4. 1. 検討結果	15
5. 共通技術	21
5. 1. 超電導導体技術の現状	21
5. 2. 冷却技術の現状	23
5. 3. 今後の共通技術の研究開発に向けて	24
6. 産業競争力強化のための提言および施策	27
7. まとめ	29
APPENDIX-1	
APPENDIX-2	
APPENDIX-3	
APPENDIX-4	
APPENDIX-5	

【プロジェクトメンバー】

#	区分	企業・大学・法人名	氏名
1	PJ リーダー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	来栖 努
2	TFA リーダー	株式会社日立製作所	和久田 毅
3	TFA サブリーダー	三菱電機株式会社	殿岡 俊
4	TFB リーダー	三菱電機株式会社	野元 一宏
5	TFB サブリーダー	株式会社日立製作所	青木 学
6	TFC リーダー	国立大学法人 京都大学	雨宮 尚之
7	TFC サブリーダー	国立大学法人 新潟大学	福井 聡
8	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	中村 英之
9	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	柳 寛
10	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	龍頭 啓充
11	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	小柳 圭
12	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	伊藤 智庸
13	メンバー	三菱電機株式会社	荒金 淳
14	メンバー	三菱電機株式会社	三浦 英明
15	メンバー	三菱電機株式会社	長谷川 満
16	メンバー	株式会社日立製作所	安藤 竜弥
17	メンバー	株式会社日立製作所	田中 秀樹
18	メンバー	古河電気工業株式会社	坂本 久樹
19	メンバー	古河電気工業株式会社	中崎 竜介
20	メンバー	古河電気工業株式会社	山野 聡士
21	メンバー	株式会社フジクラ	大保 雅載
22	メンバー	岩谷産業株式会社	辻上 博司
23	メンバー	住友電気工業株式会社	小林 慎一
24	メンバー	住友電気工業株式会社	永石 竜起
25	メンバー	国立大学法人 九州大学	宮崎 寛史
26	メンバー	国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構	岩田 佳之
27	メンバー	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	古瀬 充穂
28	メンバー	学校法人 関西学院大学	大屋 正義
29	メンバー	国立大学法人 東京大学	寺尾 悠
30	メンバー	大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所	平野 直樹
31	メンバー	大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所	芦川 直子
32	メンバー	国立研究開発法人 物質・材料研究機構	菊池 章弘
33	アドバイザー	一般財団法人 電力中央研究所	秋田 調

34	アドバイザー	国立大学法人 東京大学	大崎 博之
35	アドバイザー	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	岡田 道哉
36	アドバイザー	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構	矢部 彰
37	アドバイザー	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構	岡田 満利
38	アドバイザー	国立研究開発法人科学技術振興機構	眞子 隆志
39	オブザーバー	三菱電機株式会社	畑 寛一
40	オブザーバー	キヤノン株式会社	古川 靖之
41	オブザーバー	キヤノンメディカルシステムズ株式会社	中井 宏章
42	オブザーバー	株式会社日立製作所	仙波 智行
43	オブザーバー	国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構	白井 敏之
44	オブザーバー	国立研究開発法人 理化学研究所	小野 通隆
45	COCN 担当実行委員	株式会社東芝	斉藤 史郎
46	COCN 担当企画小委員	三菱電機株式会社	金枝上 敦史
47	COCN 担当企画小委員	トヨタ自動車株式会社	佐藤 桂樹
48	COCN 企画小委員	株式会社地球快適化インスティテュート	岩田 一
49	COCN 企画小委員	富士通株式会社	大久保 進之介
50	COCN 企画小委員	株式会社日立製作所	菊地 達朗
51	COCN 企画小委員	ENEOS 株式会社	中山 慶祐
52	COCN 事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	山口 雅彦
53	COCN 副事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	土肥 秀幸
54	COCN 副事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	五日市 敦
55	COCN 副事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	武田 安司
56	プロジェクト事務局	東芝エネルギーシステムズ株式会社	久米 直人
	— 以上 —		

【本文】

1. プロジェクトの背景と目的

1. 1. プロジェクトの背景

超電導は冷却さえ出来れば電気抵抗がゼロのため、環境保全と経済発展に資するソリューションであり、水素の冷熱活用との相性が極めて良い。近年の高温超電導技術の進歩により、液体水素の冷熱（沸点：20K）で冷却する高温超電導機器を、実用レベルとして検討できるようになった。水素社会に貢献する超電導の特徴とポイントを図 1-1 に示す。

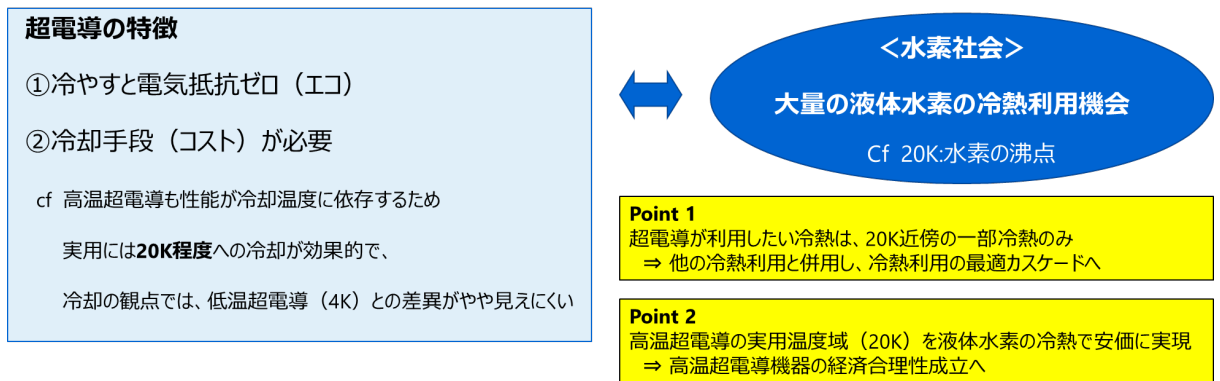


図 1-1 水素社会への超電導の貢献

2050年のカーボンニュートラル実現に向け、水素社会への移行が検討されており、海外で製造した安価な水素の輸入が検討されている。水素の輸送形態としては液体水素、アンモニア、メチルシクロヘキサン（MCH）等が検討されており、IRENA（International Renewable Energy Agency）の2022年レポートによれば、パイプライン輸送が難しい我が国では輸送距離約4000km以下では液体水素がコスト的に有利と分析されている。液体水素と相性のよい超電導技術で、カーボンニュートラルへの貢献を検討する。

一方、近年、米国・欧州では、超電導技術の新たな活用（小型核融合炉、航空用軽量モータ、大型洋上風力発電機など）への投資が活発化している。特に米国の核融合スタートアップでは政府予算に加え、民間資金約2千億円が投入される計画で、主要コンポーネントである高温超電導コイルの技術が大きく向上しようとしている。さらに欧州でも核融合スタートアップが高温超電導コイルの開発を進め、また加速器用高温超電導技術を高度化するため1千億円超の予算投入をEUに働きかける産学連携の動きが計画されつつある。中国においても中国製造2025で超電導が重点のひとつに定められ、高温超電導や交流応用といった新たな超電導応用に挑戦する企業が増えている。

超電導を応用した実用化されている製品例を表 1-1 に纏める。このうち超電導業界の最大市場であるMRI磁石の領域では、海外企業がシェアの大半を占めている。これは、素材、機器、システムそれぞれの企業間におけるQCD要求の摺り合せが不足し、最終顧客への訴求が不足したこと

表 1-1 超電導を応用した実用化された製品

実用化された製品
<p><u>医療用画像診断MRI</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 低温材料中心で、超電導最大の市場。MRI自体の市場規模は51.9億ドル/年^{※1}。病院の診断で日常的に使用されており、感度は磁界強度に比例するため、超電導で高磁界を発生させることで診断精度向上に貢献。 <p><u>核磁気共鳴分光装置 (NMR)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 低温材料中心で、MRIに続く市場規模。装置の市場規模は5億ユーロ/年^{※2}以上。既に研究施設を中心に広く普及しており、化学、製薬産業の品質管理及び研究開発に利用する必須の技術となっている。 <p><u>シリコン単結晶引き上げ装置</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 低温材料中心で、高磁界をシリコン融液に印加することで対流が抑制され、結晶中の酸素濃度制御による結晶の高品質化に貢献。高品質シリコンは高性能半導体デバイスに必須であり、IT機器のサプライチェーンに必須の技術。 <p><u>粒子線がん治療装置</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 患者への負担が少ない放射線治療の、粒子線を使った治療装置で粒子の加速に利用されている。国内で毎年約6,500人以上^{※3}が治療で利用。陽子線や重粒子線ガントリーへの低温材料の適用例が増加。 粒子加速器は医療用放射性同位元素の製造装置や基礎科学研究にも使用されている。 <p><small>※1 7 Magnetic Resonance Imaging Market Size, Share & Trends Analysis Report By Architecture, By Field Strength, By Application (Brain & Neurological, Vascular, Cardiac, Breast), By End Use, And Segment Forecasts, 2020 - 2027 Grand View Research, Inc.49</small> <small>※2 欧州CONNECTUS https://www.connectus.com/market.html</small> <small>※3 文部科学省 医用電子技術研究開発推進 がん治療用粒子線ガントリーへの低温材料の適用例増進2019年度報告書47http://www.anim.or.jp/05_treatment/info/yaussisen-kanja_2019.pdf</small></p>

実用化された製品
<p><u>超電導リニア (磁気浮上鉄道)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 低温材料を用いた超電導電磁石が2027年営業開始予定のリニア中央新幹線で利用される。新たなモビリティの誕生に貢献。我が国独自の技術。 <p>その他製品：雨雲レーダー、磁気センサー(分析機器、資源探査)、VSM (振動試料型磁力計) でも実用化。</p>

研究開発用機器における利用
<p>科学技術進展のため、機器として極限の性能を発揮。超電導の市場としても一定規模 (8.45億ユーロ[※]) がある。</p> <p><u>物理学</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 素粒子物理学・原子核物理学の粒子加速器用高磁場超電導磁石、超電導加速空洞、検出器用超電導磁石 核融合のプラズマ閉じ込め用の超電導電磁石 <p><u>天文学</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 電波天文学における超電導遷移端検出器 (TES) を利用した超高感度受信機 <p><u>検出器 (要素デバイス)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 超電導遷移端検出器 (TES)、超電導トンネル接合(STJ)は究極の性能を持ち、最先端科学に必須 <p><small>※1 欧州CONNECTUSから発表の2011年の値</small></p>

(出展：NEDO 2020年成果報告書「戦略策定調査事業/高温超電導の将来像想定とボトルネック課題の検討」)

が大きな要因と考えられる。また電力機器の分野では、超電導化に向けた複数の国家プロジェクト（発電機、電力ケーブル等）が進められてきたが普及には至っていない。これは、超電導電力機器を単独導入する場合、冷却に必要なコストや、冷却源喪失による運用停止等のリスク・対策コストが、導入のベネフィットに見合わないと判断されたことが主な要因と考えられる。これらの経緯もあり、国内では、超電導分野への大型の政府予算投入は関が高い状況になっている。

上記状況のもと、国内産業として、競争領域の個別活動だけでは、欧米・中国に大きく後れをとるリスクが顕在化していることを課題認識するとともに、今後、水素社会で大量の液体水素の貯蔵が必要となることを想定し、液体水素の冷熱を有効活用した超電導応用が、経済合理性をもって、カーボンニュートラルにも貢献している姿を、産業界の協調領域の取組として検討することとした。

1. 2. プロジェクトの目的

本プロジェクトでは、輸入した液体水素が国内サイトに貯蔵されることを想定し、液体水素の冷熱を有効活用した超電導応用が、経済合理性をもって、カーボンニュートラルに貢献している姿を検討する。

2050年カーボンニュートラル社会の実現に貢献すべく、官・学の協力も得て、成長シナリオ（産業化/事業化）、成長のための枠組み、注力ポイントについて、国への提言としてまとめることを目的とする。

また検討にあたっては、競争領域の個別活動だけでは、今後、欧米・中国に大きく後れをとるリスクが顕在化しているとの危機認識から、超電導応用製品において、欧米・中国に対する国内産業の優位を構築し、日本国としての持続的発展に資することも目的とする。

2.本プロジェクトの進め方

背景を踏まえ、本プロジェクトでは、成長シナリオと、その経済合理性・CO₂削減効果、およびそれを実現するための技術の3つの観点で検討を進めるべく、産学連携による以下の3つのタスクフォース（TF）を組成した。

TF-A:成長シナリオ策定

TF-B:超電導機器の経済合理性・CO₂削減効果の調査

TF-C:共通技術調査

各タスクフォースの検討の視点と範囲を表 2-1 にまとめる。

表 2-1 各タスクフォース (TF) での検討の視点と範囲

タスクフォース	検討の視点	検討の範囲
<TF-A> 成長シナリオ策定	<ul style="list-style-type: none"> ・産業競争力強化 ・カーボンニュートラルへの貢献 	<ul style="list-style-type: none"> ・液体水素の冷熱を活用した超電導を利用する社会インフラ ・シナジー効果が期待される医療、核融合等での超電導応用
<TF-B> 超電導機器の経済合理性・CO ₂ 削減効果の調査	<ul style="list-style-type: none"> ・カーボンニュートラルへの貢献 ・海外/国内案件のPEST分析 ・競合とのベンチマーク ・目標定量化とアクションプラン 	<ul style="list-style-type: none"> ・回転機（発電機，モータ，同期調相機） ・電力ケーブル ・磁気エネルギー貯蔵システム ・粒子線治療装置 ・核融合 ・誘導加熱装置
<TF-C> 共通技術調査	<ul style="list-style-type: none"> ・各機器共通技術の横断的評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・線材技術、集合導体技術、コイル技術 ・冷却技術、液体水素寒冷利用環境

また2年間のプロジェクトを想定して、図 2-1 のロードマップと成長ステップとをそれぞれ想定した。

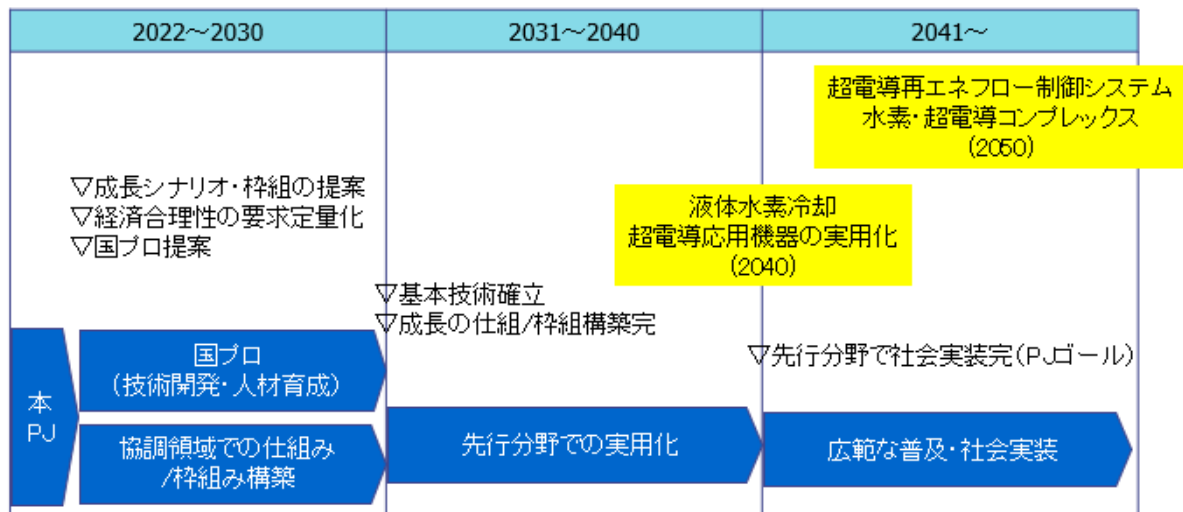


図 2-1 想定するロードマップと成長のステップ

3. 成長シナリオ策定

3. 1. 成長シナリオの検討結果

タスクフォース A では、(1) で述べる社会課題に関して以下の検討範囲および検討の視点にもとづいて成長シナリオの検討を進めてきた。検討結果を以下にまとめた。

<検討範囲>

- ・液体水素の冷熱を活用した超電導を利活用する社会インフラ
- ・シナジー効果が期待される医療、核融合等での超電導応用

<検討の視点>

- ・カーボンニュートラルへの貢献
- ・産業競争力強化

(1) タスクフォース A が認識する社会課題

2050 年カーボンニュートラル達成に向けては、あらゆる部門での高効率化、低損失化が重要と言われており、経済産業省「グリーン成長戦略」によれば、電力部門の脱炭素化は大前提とされ、かつ、非電力部門においては電化、水素化、二酸化炭素(CO₂)回収、および、蓄電池活用による対応が示されている。

我が国において、電力部門の脱炭素化に向けた有力なシナリオの一つは再生可能エネルギー(RE)の大量導入である。日本電機工業会(JEMA)の「2050CN 実現へのロードマップ」によれば、電源における RE の構成比率は 53%と例示され、また日立東大ラボ「Society 5.0 を支えるエネルギーシステムの実現に向けて(第四版)」では、RE 構成比率 100%のシナリオも検討されている。RE の中でも特に変動性再生可能エネルギー(VRE)の電源に占める比率が増加すると、電力系統には解決すべき様々な課題が生じることが様々な資料で示されている。

例えば電力広域的運営推進機関(OCCTO)は、第 55 回調整力及び需給バランス評価等に関する委員会資料 3「『再エネ主力電源化』に向けた技術的課題及びその対応策の検討について」において、VRE の増加に伴って系統に対する同期化力、慣性力、電圧維持等の「アンシラリーサービス機能」の不足が課題となることを示している。また、前述の日立東大ラボは、VRE の増加に伴いその出力制御に莫大な蓄電システムが必要となり、かつ、電力貯蔵の必要期間が季節間変動の調整にまで拡大することを述べている。さらには、低炭素社会構築に向けた再生可能エネルギー普及方策検討会は、「低炭素社会構築に向けた再生可能エネルギー普及方策について(提言)」において、VRE の増加に伴い、電力系統の安定化がこれまでより困難になることを前提に、電力系統に要求する電力品質はこれまでより下げているのではないかとする議論を展開しているが、一方で、我が国の電力需要家には従来と同等かそれ以上の電力品質(電力品質という言葉が意味する具体的内容は需要家により異なる)を要求するものが全体の 17%ほどは存在することも示している。

このように、電力部門においては、VRE の増大によって、その出力調整、系統の安定性、電力品質、ひいてはレジリエンス等に課題が生じ、その解決はカーボンニュートラル実現にとって不可欠なものとなっている。

非電力部門では、「グリーン成長戦略」によれば、カーボンニュートラル実現に向けた対応は電化が基本となり、それゆえ、個別の電気機器の高効率化は冒頭に述べた通り、継続的に重要な課題であり続ける。一方、直接加熱のための熱源や製鉄プロセスなどに代表されるような、電化に適さない産業分野においては、水素を用いたプロセスへの転換も求められるとされている。また、これらの取り組みによってもなお避けられない化石燃料利用に対しては、CO₂の回収・再利用による対応が必要となるが、一例として、日立東大ラボは年間数億トン規模(たとえば電力部門でのRE構成比率100%のシナリオにおいては年間約4億トン)でのCO₂回収が必要との試算をしている。

本プロジェクトは、上述の課題を2050年カーボンニュートラル達成へ向けた社会課題ととらえ、タスクフォースAは、以降の節において我が国の成長のためにこれら社会課題の解決に、前章までに述べた、水素社会、とりわけ輸送・保存媒体としての液体水素との親和性の高い超電導技術が貢献するシナリオ、さらには産業競争力強化に資するシナリオを構築して提案する。

(2) 電力部門: 広域再エネ連系構想と超電導再エネフロー制御システム(仮称)

電力部門で超電導がカーボンニュートラルに貢献する姿として、電力機器の低損失化によりCO₂削減する直接的な貢献に加え、超電導同期発電機の導入により系統安定性を改善し大量の再生可能エネルギーの導入を支援する間接的な貢献についても提案する。これを実現するために、以下の『広域再エネ連系構想』を提案する(詳細はAppendix-1参照)。

『広域再エネ連系構想』は、国内に偏在する風力発電等の再生可能エネルギーポテンシャルを広域連系して利用することにより電力需給バランスの短時間の凹凸を均すとともに、液体水素を製造して蓄積し、必要に応じて超電導同期発電機を介して系統に電力供給することで、広域の電力需給バランス調整を可能にする仕組みである。変動性再生可能エネルギーをいったんエネルギーバッファの水素に変換して集約利用することにより、電力の需給バランス調整を容易にするものであり、このエネルギー貯蔵システムを備え超電導同期発電機を介して電力供給を行うシステムを、『超電導再エネフロー制御システム(仮称)』(Renewable Energy Flow Control System by using a Superconducting Apparatus)と呼ぶことにする。

『超電導再エネフロー制御システム(仮称)』は、

- 1) 系統の安定化(慣性力・同期化力の供給と低インピーダンス化による系統安定度の改善)
- 2) 系統の電力需給バランス調整
- 3) 季節間エネルギー貯蔵(エネルギー安全保障)

の機能を有する。超電導再エネフロー制御システム(仮称)の概念図を図3-1に示す。

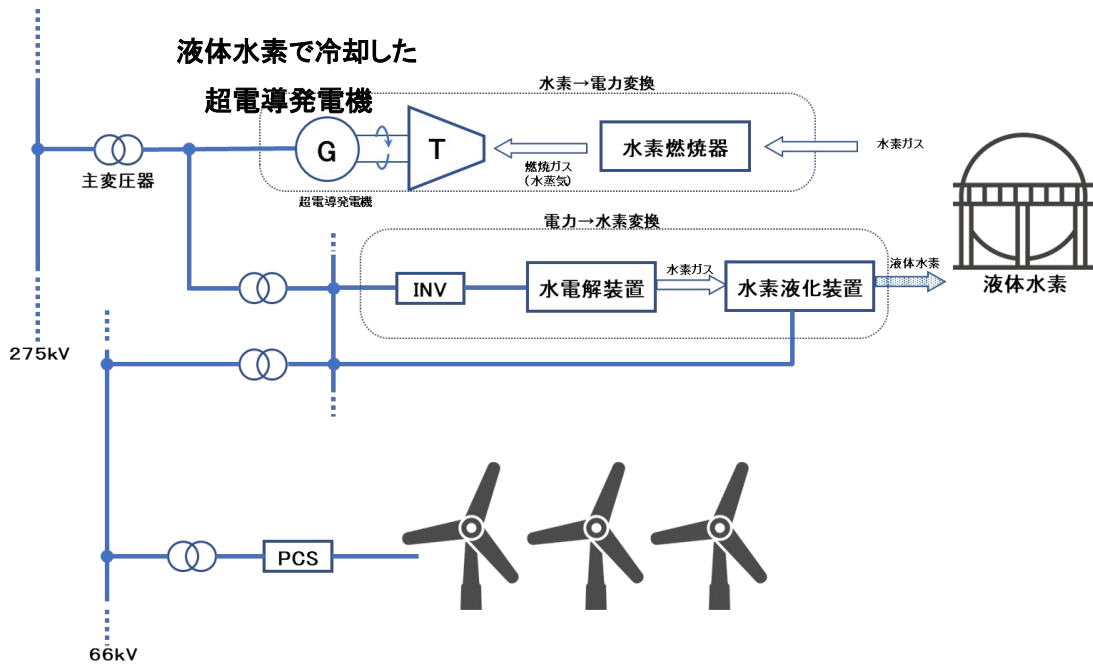


図 3-1 超電導再エネフロー制御システム（仮称）の概念

電力広域的運営推進機関（OCCTO）ではカーボンニュートラルに向け再エネ大量導入とレジリエンス強化のために広域連系システムのマスタープランが検討されている。国内の再生可能エネルギーのポテンシャルは北海道、東北および九州地方に偏在しており、首都圏、関西および中部地方の電力大需要地へ送電するためには、システムの同期安定性を改善する系統容量の増強（系統の低インピーダンス化）が必要とされている。

系統の低インピーダンス化は発電機を低インピーダンス化しても実現できること、および発電機の低インピーダンス化は、無効/有効電力の送電距離と送電量を増やすことから広域系統連系において望ましいこと、さらに送電インフラ増強を軽減しコスト面で大きなメリットが得られる可能性があることから、『超電導再エネフロー制御システム（仮称）』の導入による系統増強のコンセプトを提案する。

発電量が天候に依存する再生可能エネルギーは季節間貯蔵が必要であり、エネルギー安全保障の観点からも大量の水素を国内備蓄しておくことは有用である。一般に、超電導電力機器には冷却のコストが必要になることに加え、冷却源喪失による運用停止等のリスクがあり単独装置として導入が進まない面があったが、次項で述べる液体水素の広範な利活用のなかに位置付けることで、それらはほぼ解消可能と考える。

(3) 非電力部門：水素・超電導コンプレックス構想

水素は複数の形態（液体水素、アンモニア、MCH 等）で輸入・貯蔵されることが検討されているが、液体水素による貯蔵は、超電導および冷熱利用との組合せにより新たな価値を創出することができる。本提案では、将来のエネルギーシステムの姿として、常に一定量の液体水素が国内の集積地に備蓄される姿を想定する。水素の液化・貯蔵にはその水素が有するエネルギーの約 3

割を必要とすることから、液体水素によって得られる極低温という特殊環境および冷熱ポテンシャルを最大限活用することが肝要であり、ここに以下のようなプロセスまたは産業を集約した水素コンプレックスの構築を提案する（詳細は Appendix-2 参照）。

- 1) 水素ガスを原材料として直接利用するプロセスまたは産業
- 2) 液体水素の冷熱を直接または間接的に利用するプロセスまたは産業
- 3) 液体水素の冷熱を利用した超電導機器を利用するプロセスまたは産業
- 4) 超電導電力機器によって実現される高品質電力を利用するプロセスまたは産業
- 5) 超電導加速器によって提供されるビームまたは放射線を利用するプロセスまたは産業

水素コンプレックスとは、液体水素の冷熱（極低温環境、冷熱エネルギー）を段階的に利用する冷熱カスケード利用およびプラントから排出される排熱の回収利用の組み合わせることにより、コンプレックス全体での熱効率の改善と、液体水素の冷熱利用によって超電導装置を導入しやすくすることで、超電導装置が提供するベネフィットを享受する産業集合体である。

超電導装置が提供するベネフィット(磁場、大電流、放射光、ビーム、中性子など)により新たな価値やプロダクトの創生が期待され、いわば超電導コンプレックスと呼べる集合体の形成も期待できる。このように液体水素を中心とし超電導の利点を活用した産業集合体のことを水素・超電導コンプレックスと呼ぶことにする。

これを実現するためには、液体水素陸揚げ、貯蔵、利用する設備に加え、その液体水素の冷熱を域内に分配して利用するインフラの構築が不可欠である。例えば域内での極低温環境、冷熱エネルギー利用として

- 1) 20K 未満： 液体水素を排熱源とした冷凍機冷却（超電導加速器、量子コンピュータ等）
- 2) 20K： 液体水素冷却（超電導発電機）
- 3) 20K-60K： 水素ガスもしくはヘリウムガスの循環冷却（一般超電導機器、ネオン等分離回収）
- 4) 63K： 固体窒素（潜熱利用）
- 5) 65-80K： 液体窒素循環冷却（超電導ケーブル、空気分離）
- 6) それ以上： 窒素ガスなどによる循環冷却（常電導ケーブル冷却 CO2 分離回収など）

などが考えられ、熱輸送媒体の循環系統と熱交換器による熱的ネットワークインフラの構築等が鍵となる。このコンプレックスの概念を世界に先駆けて社会実装し、また、パッケージ化して輸出することは日本の産業競争力向上にも大きく資すると考える。

超電導再エネフロー制御システム(仮称)

再エネを液体水素&液体空気で貯蔵し超電導発電機により発電

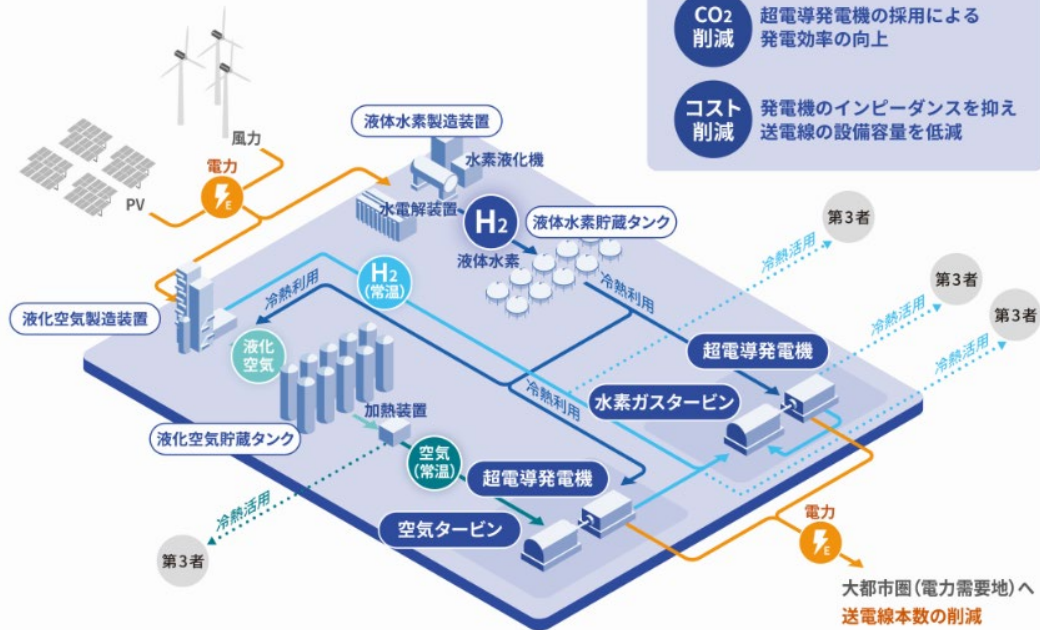


図 3-2 超電導再エネフロー制御システム (仮称) のイメージ図 (APPENDIX-1 参照)



図 3-3 広域再エネ連系構想と水素・超電導コンプレックスのイメージ図

3. 2. 次年度に向けた検討上の課題

広域再エネ連系構想は、超電導同期発電機に関するこれまでの知見をベースに検討しており、大量の再生可能エネルギーとともに系統に導入される場合の具体的な効果等は、それ自体が新規の研究課題になり、本提案の検討を進めるにあたっての課題となる。

次年度に向けた検討課題を以下にまとめる。

(1) 提案する再エネ広域連系構想の具体化検討

- ・ 超電導同期発電機の系統導入による送電距離拡張効果、系統容量改善効果の定量評価
- ・ 超電導再エネフロー制御システム（仮称）を系統に接続すべき最良地点、設備容量の検討
- ・ 水素燃焼タービンまたは燃料電池を電力源とするモータに関する開発状況の調査と、それを踏まえた超電導同期発電機的设计
- ・ 高温超電導による超電導発電機の技術成立性と経済合理性の検討

(2) 「産業競争力強化」「カーボンニュートラルへの貢献」視点での成長シナリオの成立性検討

- ・ 上記（1）の検討を進め、並行して両視点での確認を行う。

4. 超電導機器の経済合理性・CO₂削減効果の調査

4.1. 検討結果

タスクフォース B では、以下の対象とする超電導機器の経済合理性を調査すべく、下段の検討の視点にもとづいて調査を進めた。また、超電導機器導入による CO₂ 削減効果と導入メリットに関する調査を実施した。結果を以下にまとめる。

<対象とする超電導機器>

- ・ 回転機（発電機，モータ，同期調相機）
- ・ 電力ケーブル
- ・ 磁気エネルギー貯蔵システム（SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage）
- ・ 粒子線治療装置
- ・ 核融合
- ・ 誘導加熱装置

<検討の視点>

- ・ 2050 年カーボンニュートラルに向けての超電導機器のメリット，期待効果は何か
- ・ 欧米・アジアにおける海外市場と国内市場において開発体制や予算規模で違いがあるのかどうか。違いがあるとしたらどのような要因（政策，技術等）によるものか
- ・ 超電導機器の経済合理性もしくは機能優位性を明らかにし，また競合する超電導以外の方式に対抗する場合の課題は何か
- ・ 経済合理性および機能優位性の向上のためのキーパラメータは何になるか，その定量的目標と実現に向けたアクションはどうか

（1）国内プロジェクトの整理、および海外の動向の動向調査

超電導に関する国内プロジェクトを整理（図 4-1）し、海外プロジェクトの動向（表 4-1）をまとめた。再エネの普及率やエネルギーインフラ環境も開発投資規模に影響を与えることから、政治・社会・経済・技術を含めたマクロ分析を実施し、俯瞰的に状況をまとめ、各種検討において参照できるようにした。（APPENDIX-3）

（2）CO₂ 排出量の削減効果、および超電導機器導入のメリット

CO₂ 排出量の削減効果および超電導を適用するメリットを整理した（表 4-2）。CO₂ 排出量削減効果は超電導機器投入の効果の試算値（公開資料）を基にした。削減効果の大きい機器は、産業用モータや発電機で、CO₂ 削減ポテンシャルは、世界規模で、それぞれ年間 2000 万 t 以上（国内はこのうちの約 8%（産業用モータ）、約 2%（発電機））と報告されている。

(3) 競争力強化のための注力ポイントの絞り込み、改善策検討

本プロジェクトは、液体水素の冷熱を利用した高温超電導発電機をはじめとする高温超電導機器により構成される産業競争力強化策を提案している。これらの社会実装に向けては多くの課題が想定されるが、ここでは競争力強化のための注力ポイントとして、技術面に絞り込んだうえで、提案コンセプトの鍵となる『高温超電導発電機』と、各種の高温超電導機器に共通する技術課題となる『高温超電導コイル』の2点を抽出し、共通技術調査を進めるタスクフォースCと共有した。以下に補足する。なお、技術面以外の注力ポイントの整理については今後の検討課題とする。(タスクフォースCではこれらに加え、冷却技術についても検討を実施している。)

①高温超電導発電機

液体水素の冷熱を利用した高温超電導発電機は、本プロジェクトが提案する『広域再エネ連系構想』および『超電導再エネフロー制御システム(仮称)』の鍵となる。

過去、超電導発電機については、液体ヘリウムおよび低温超電導線を用いた超電導発電機の開発プロジェクト Super-GM(1988~1999年 70MW モデル機試作による検証)において、多くの検討が体系的に進められた。この技術資産を最大限に有効活用し、当時の超電導発電機に高温超電導を適用した場合の検討を進めることが合理的であり、注力ポイントのひとつとして抽出した。

②高温超電導コイル

液体水素の冷熱を利用した各種高温超電導機器に共通する技術課題として、高温超電導コイルの実用化が挙げられる。タスクフォースCで調査を進めているとおり、高温超電導線はテープ線材(図4-2)が主流となっており、フラットワイズ方向には曲げやすいが、エッジワイズ方向や任意方向には曲げにくく、丸断面の線材に比べて巻線の自由度が小さい。このため多数ターンや複雑な巻線形状のコイルを製作する際にはノウハウが必要となっており、曲げやすさの改善策が求められている。様々な用途の、様々な形状の高温超電導コイルの製造を可能にする技術確立が競争力強化に必須と考え、注力ポイントのもうひとつとして抽出した。

高温超電導 (HTS) 低温超電導 (LTS)

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024					
	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3	R4	R5	R6					
発電機		超電導発電機 基盤技術 (NEDO) 大型超電導発電機の設計																							液体水素冷却 発電機 (NEDO)						
モータ									船舶用モータ内蔵 ポッド推進システム (NEDO) 3MW超電導モータ		大出力超伝導回転機器 キーハートの開発 (JST) 船舶用20MW超電導モータ										次世代電動推進システム 研究開発 (NEDO) 航空機用電動推進システムの 基盤研究とシステム化研究										
ケーブル		交流超電導電力機器 基盤技術 (NEDO) Bi系ケーブルを用いた3kA通電 と限流器基盤技術開発							高温超電導ケーブル実証 (NEDO) Bi系ケーブルの系統実証試験			安全性信頼性 実証 (NEDO) ケーブルの安全性・ 信頼性実証									電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発 ・運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発 ・高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 ・高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発										
MRI									産学イノベーション加速事業 先端計測分析技術・機器開発 (JST) Bi系脳用3TMRI											高温超電導実用化 促進技術開発 (NEDO)										未来医療を実現する医療機器 システム研究開発 (AMED) 高温超電導コイル基盤技術開発 高磁場コイルシステム研究開発	
粒子線治療装置												加速器用高温超電導マグネット開発 (JST)																高機能・高効率・小型 加速器システム開発			
磁気エネルギー 貯蔵システム (SMES)		超電導電力貯蔵 システム (NEDO) SMESのコスト低減のための 要素技術開発				超電導電力ネットワーク 制御技術 (NEDO) SMESの実系統連携試験 Y系コイルの開発					超電導電力機器 技術開発 (NEDO)					Y系線材を用いた SMES、ケーブル、変圧器開発															
核融合												JT-60SA超電導コイル (QST)																	ITER超電導コイル (QST)		
								核融合炉用導体開発 (NIFS) 導体および接続方法の開発																							

図 4-1. 超電導機器に関する主な国内プロジェクト

表 4-1 対象超電導機器に関する海外状況

<p>発電機</p>	<p>(風力用) 【欧州】 Eco-Swing プロジェクト (3.6MW) 【米国】 DOE による低温超電導を用いたプロジェクト (15MW)</p> <p>(航空機用) 【欧州】 ASCEND ※1 プログラム (Airbus) 【米国】 3MW 超電導発電機開発 (NASA)</p>
<p>モータ</p>	<p>(船舶用) 【欧州】 4MW 級モータ開発 (Siemens) 【米国】 36.5MW モータ開発 (AMSC) 【中国】 1MW モータ開発</p> <p>(航空機用) 【欧州, 米国】 1.4MW 級界磁超電導モータ (NASA)。全超電導モータ開発</p>
<p>電力ケーブル</p>	<p>【欧州】 Essen AmpaCity プロジェクト (1km, 10kV)。Best Path 洋上風力から陸上への送電システム開発 (30m, DC320kV) 【米国】 シカゴプロジェクト (5km, 20kV) 【中国】 上海運転開始 (1.2km, 35kV), 深圳運転開始 (10kV) 【韓国】 Shingal 運転開始 (1km, 23kV, 154kV)</p>
<p>粒子線治療装置</p>	<p>【欧州】 HITRI+, SEEIIST, iFAST ※2 プロジェクトによる重粒子線用超電導シンクロトロン研究開発 【米国】 陽子線超電導サイクロトロン開発 (VARIAN), 陽子線用回転ガントリー用超電導電磁石プロトタイプおよび陽子線用超電導電磁石開発 (LBL) 【中国】 陽子線用超電導サイクロトロンプロトタイプ開発</p>
<p>磁気エネルギー 貯蔵システム</p>	<p>【欧州】 電磁推進用 0.8MJ パルス電源開発 【米国】 瞬時電圧低下補償 μ SMES (1~3MW), D-SMES 商品化</p>
<p>核融合</p>	<p>【欧州】 原型炉・商用炉への大型トカマクロードマップ。小型炉球状トカマクの開発 (Tokamak Energy) 【米国】 小型炉開発 (Commonwealth Fusion Systems)</p>
<p>誘導加熱装置</p>	<p>【欧州】 ビスマス系超電導コイルを用いた産業用誘導加熱装置の商業販売 (Zenergy)</p>

※1 ASCEND: Advanced Superconducting & Cryogenic Experimental powertrain Demonstrator

※2 HITRI+: Heavy Ion Therapy Research Integration

SEEIIST: South East European International Institute for Sustainable Technologies

iFAST: Innovation Fostering in Accelerator Science and Technology

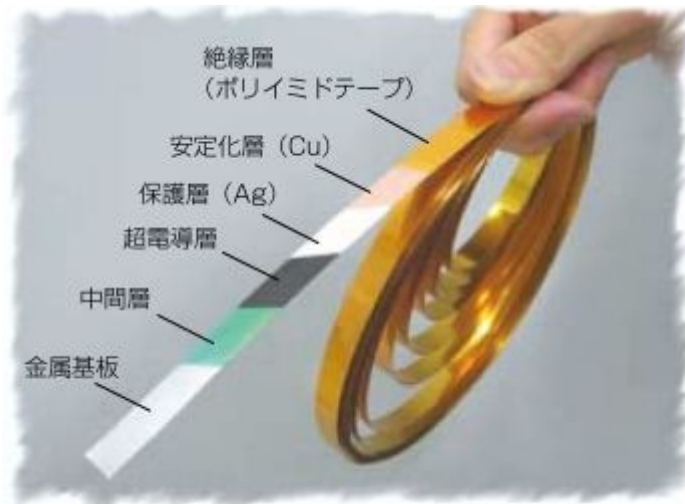
表 4-2 対象超電導機器の CO₂ 排出量の削減効果および超電導適用のメリット

機器	市場規模 (2030 年までの累積額)	CN 貢献度 (世界の CO ₂ 排出量の 削減効果)	超電導適用のメリット (=うれしさの軸)
発電機 (風力用)	国内 28 億円 海外 3,304 億円 [A4]	286 万 tCO ₂ /年 [B3]	発電コスト低減 (単機大容量化, 発電機軽 量化)
発電機 (航空機用)	—	IATA/ATAG ※2 CN 戦略 [A2]	高密度化, 小型軽量化
発電機 (産業用)	火力・水力・原子力タービ ン発電機発電量 (2050 年) 国内 750TWh 海外 35,208TWh [A1]	2200 万 tCO ₂ /年 [A1]	高密度化, コンパクト
モータ (産業用)	国内 899 億円 海外 11,199 億円 [A4]	2100 万 tCO ₂ /年 [A1]	高密度化
電力ケーブル	国内 1,047 億円 海外 3,993 億円 [A4]	84 万 tCO ₂ /年 [A1] 9.5 万 tCO ₂ /年 (2030 年) [A5]	大容量, コンパクト 損失低
磁気エネルギー 貯蔵システム	—	170~190 万 tCO ₂ /年 [A5]	長寿命, 瞬時大容量出力 [H1]
粒子線治療装置	国内 420 億円 海外 420 億円 [A4]	—	小型化, 建設コスト低減 [I26]
核融合	—	9.2-11.3g-CO ₂ /kWh [J6]	高磁場が必要
誘導加熱装置 (産業用)	国内 162 億円 海外 535 億円 [A4]	35~96 万 tCO ₂ /年 [K1] [K2] [K3] [K4]	省エネ (ガス燃焼炉に対し て約 60%の省エネ化) [K1]

※1 []は APPENDIX-4 出典 No

※2 IATA: 国際航空運送協会 (International Air Transport Association)

ATAG: 航空輸送行動グループ (Air Transport Action Group)



Y系超電導線材外観

図 4-2 高温超電導線のテープ線材例（出典：フジクラ技報）

4. 2. 次年度に向けた検討上の課題

本年度の検討結果を踏まえ、次年度に向けた検討上の課題を以下にまとめる。

（1）効果的な注力ポイントの抽出の継続、製造/運用コストの評価

- ・水素の冷熱を利用した高温超電導機器の競争力強化の観点で、注力ポイントの抽出を継続する。多くの超電導機器とのシナジー効果を考慮して、産業競争力向上の観点で、効果的な注力ポイントを抽出する。
- ・競合優位性の観点で、製造コスト低減のための検討に加え、液体水素の冷熱活用も含めたシステムおよび運用面でのコスト検討も行う。

（2）ベンチマーク深堀による経済合理性樹立の方策検討

- ・海外に対する日本の優位性を確立するうえで、知財戦略や規制合理化も競争力強化につながることや、海外では開発投資のスケールメリットが出る可能性もあり、海外ベンチマーク評価の深堀りを進めることで、経済合理性を得るための方策を探る。

5. 共通技術

5. 1. 超電導導体技術の現状

(1) 線材技術

応用機器の開発が可能な水準の特性・長さが得られる線材は、Bi2223 多心テープ線材、Bi2212 多心線材、RE123 薄膜テープ線材、MgB₂ 多心線材である。Bi2223 多心テープ線材の長所は実証された長期信頼性、Bi2212 多心線材の長所は円断面による等方性、RE123 薄膜テープ線材の長所は良好な磁界下臨界電流特性、MgB₂ 多心線材の長所は円断面による等方性と低製造コストである。

ウェリントン・ビクトリア大学において各種線材の臨界電流特性が測定され、データベースとして公開されている (<https://htsdb.wimbush.eu/>)。このデータベースから抽出した RE123 薄膜テープ線材と Bi2223 多心テープ線材の臨界電流(臨界電流が一番小さくなる磁界方向での幅 10 mm あたりの値)を表 5-1 に示す。より詳細な調査結果は APPENDIX-5 図表 3~11 を参照されたい。

表 5-1 RE123 薄膜テープ線材と Bi2223 多心テープ線材の臨界電流
(臨界電流が一番小さくなる磁界方向での幅 10 mm あたりの値)

種類	製造者・名称等	測定年	I _c , min (A/cm)					
			77.5K-0T	65K-1T	50K-2T	30K-3T	30K-5T	20K-7T
RE123	AMSC Amperium® Type 8502-350 coil formulation	2019		217.48	259.87	372.79	240.74	
RE123	AMSC Amperium® Type 8700 cable formulation	2017		235.83	286.24	402.85	269.86	293.29
RE123	AMSC Amperium® Type 8702 non-magnetic cable formulation	2017			259.64	367.76	249.57	270.49
RE123	Fujikura FESC	2021	495.06		615.47	1488.17	1162.09	1444.89
RE123	Fujikura FYSC	2021	728.26	467.34	688.52	1168.97	861.23	1010.62
Bi2223	InnoST	2019		46.2	87.98	576.81	348.65	
RE123	Samri	2019	385.71	310.29	532.59	975.7	674.38	721.06
RE123	Shanghai Superconductor High Field Low Temperature	2022	578.29	316.01	514.72	1177.53	913.53	1078.22
RE123	Shanghai Superconductor Low Field High temperature	2022	654.406	238.202	345.022	586.221	467.243	579.05
RE123	STI Conductus®	2016		209.2	349.08	742.826	573.7	
RE123	SuNAM HAN4200	2017			137.93			
RE123	SuNAM SAN4200	2017		149.61	175.31	274.23	192.86	222.32
RE123	SuperOx GdBCO	2021	378.81	156.25	209.26	346.13	263.22	324.73
RE123	SuperOx YBCO	2021	509.73	340.46	640.37	1209.87	915.95	1077.43
RE123	SuperPower Advanced Pinning	2021	380.6	244.74	419.45	1009.5	698.62	843.89
RE123	THEVA Pro-Line	2019	404.58	230.37	315.26	488.04	358.84	396.43

(2) 集合導体技術

高温超電導線材単線の臨界電流は数十から数百アンペア程度に限られ、大電流容量が要求される場合には、線材を集合した集合導体が必要となる。タービン発電機の界磁巻線および電機子巻線、風力発電用発電機の電機子巻線、超電導磁気エネルギー貯蔵装置、航空機用回転機の電機子巻線などでは、集合導体の必要性が高い。

断面が円形の Bi2212 多心線材、MgB₂ 多心線材については、低温超電導線材と同様に矩形導体やラザフォードケーブル(図 5-1(a))のような集合導体を構成できる。

RE123 薄膜テープ線材の集合導体は、スパイラル導体、Roebel(ロエベル)ケーブル、スタック導体と類別できる。スパイラル導体は、断面が円形の金属コアのまわりにテープ形状の RE123

薄膜テープ線材をスパイラル状に多層に巻き付けた導体で、等方な機械・電磁特性をもった導体である。任意の方向に曲げられることはコイル化の際の大きな利点であり、フラットワイズ方向以外の曲げが難しいという RE123 薄膜テープ線材単線の欠点を克服できる。CORC®導体(図 5-1 (b))がスパイラル導体の代表例である。国内では、京都大学が、銅複合多心 RE123 薄膜テープ線材を用いて、交流で使ったときに発生する交流損失が小さく、多心化による局所的欠陥や局所的常電導転移に対するロバスト性低下を抑制した SCSC ケーブル (図 5-1 (c)) というスパイラル導体の研究開発を進めている。Roebel ケーブル (図 5-1 (d)) は、導体電流密度を高くし易いが、フラットワイズ曲げ以外の曲げは困難で、鞍型などの立体形状のコイルに巻くことは難しい。スタック導体は、銅やアルミニウムなどの構造部材の中に積層した RE123 薄膜テープ線材を挿入した集合導体で、構造上、小さなコイルを巻くことは難しく、核融合装置用導体としての開発例がほとんどである。

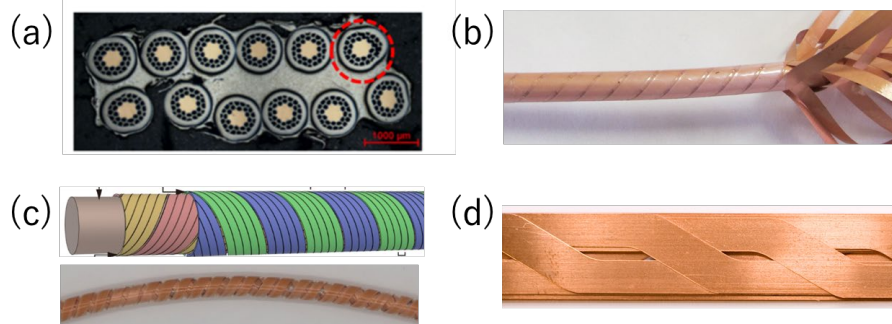


図 5-1 集合導体：(a) MgB₂ ラザフォードケーブル，(b) RE123 CORC®導体，
(c) RE123 SCSC ケーブル，(d) RE123 Roebel ケーブル

(3) コイル技術

Bi2223 多心テープ線材や RE123 薄膜テープ線材の単線を用いて製作されたコイルのほとんどが、パンケーキコイル、レーストラックコイル、レイヤー巻きソレノイドコイルといった、主にフラットワイズ曲げで巻くことができるコイルである。応用機器の概念設計例もレーストラックコイルなどを用いたものが多いが、機器として、必ずしも最適な設計とはなっていない可能性がある。

集合導体のコイル化技術には、単線のコイル化技術は異なった部分もある。スパイラル導体は任意の方向に曲げられ立体形状コイルを巻くのに適しており機器応用に向けたポテンシャルは高く、CORC®導体を用いた Canted cosine theta マグネットの製作が報告されている。Roebel ケーブルについては、変圧器用のレイヤー巻きソレノイドコイルの製作例がある。MITにおいて製作・試験されたトロイダル磁界モデルコイルでは、200 本以上の RE123 薄膜テープ線材を積層し、金属プレートにらせん状に切った溝に入れ込んだ含浸しており、後述する不完全絶縁コイルである。

高温超電導コイルをクエンチ（熱暴走）から保護するための技術として、無絶縁コイルや不完全絶縁コイルというコイル技術が開発され、高磁界マグネットのインサートコイルなどに有効に適用されている。しかし、クエンチ時に電源からの電流供給を遮断しても、内部では制御できない分布で電流が流れ続け、これによりコイルが焼損してしまうこともあり得る。また、変動／交流励磁には適さないなどの短所もある。

(4) 超電導導体概念設計

線材技術と集合導体技術について、現状技術水準と要求技術水準を比較・対照するために、Super-GMの同期発電機（70 MW級モデル機）の界磁巻線用導体の概念設計を行った。Super-GM実機の低温超電導界磁巻線の運転温度が4.2 Kであったのに対して、高温超電導の高い臨界温度と水素社会における液体水素寒冷利用の可能性を鑑み、運転温度は20 Kおよび40 Kを想定した。導体概念設計結果の代表例を表5-2に、全ての設計結果をAPPENDIX-5図表32~36に示す。

RBCO薄膜テープ線材の場合、CORC®型ケーブル、SCSCケーブル、Roebelケーブルのいずれを用いても、現状技術水準の線材を用いて、20 K運転の低速応A機・低速応B機・超速応機の界磁巻線用導体が成立し得る。MgB₂多心線材の場合、磁界中での臨界電流が十分大きくなく巻線全体を構成する導体はできないが、ハイブリッド巻線の低磁界部を分担する導体は成立し得る。

臨界電流特性が良好なRE123薄膜テープ線材については、より高い温度での利用可能性を見極めるため、SCSCケーブルを例にとり、運転温度を40 Kとした場合の導体概念設計を行った。界磁電流最大値における負荷率が大きくなるものの、低速応A機・低速応B機・超速応機のいずれについても、40 K運転の界磁巻線用導体が設計し得る。

表5-2 Super-GMの同期発電機（70 MW級モデル機）の界磁巻線用導体の概念設計の代表例

	Super-GM LTS	REBCO CORC®型	REBCO SCSC	REBCO SCSC	REBCO Roebel	MgB ₂ 低磁界部のみ
界磁電流連続定格値	3000 A	3900 A	3000 A	3000 A	3000 A	3000 A
界磁電流最大値	3600 A	4600 A	3600 A	3600 A	3600 A	3600 A
界磁巻線最大磁場	4.8 T	4.8 T	4.8 T	4.8 T	4.8 T	4.8 T
運転温度	4.2 K	20 K	20 K	40 K	20 K	20 K
導体種類	矩形導体	CORC®型ケーブル	SCSCケーブル	SCSCケーブル	Roebelケーブル	矩形導体
導体形状	6 mm × 3.6 mm	コア直径5.2 mm 外直径5.95 mm 層数5	コア直径3.8 mm 外直径5.2 mm 層数9	コア直径3 mm 外直径5.3 mm 層数15	12 mm × 0.6 mm (線材間の隙間無視)	6 mm × 3.6 mm
導体断面積	21.6 mm ²	27.8 mm ²	21.12 mm ²	22.15 mm ²	7.2 mm ²	21.6 mm ²
導体電流密度	139 A/mm ²	139 A/mm ²	142 A/mm ²	135 A/mm ²	416.7 A/mm ²	139 A/mm ²
導体臨界電流	8.5 kA@4 T, 5.5 kA@7 T	9750 A@5 T	7054 A@4.8 T	3953 A@4.8 T	9000 A@4 T	5334 A@2 T
線材形状	0.39 mm φ d _f = 9.7 μm	4 mm × 0.11 mm モノフィラメント	2 mm × 0.057 mm w _f ~ 200 μm	2 mm × 0.057 mm w _f ~ 200 μm	6 mm × 0.1 mm 「グザグ」、モノフィラメント	0.6 mm φ d _f = 100 μm
線材数	72	15	41	61	12	42
備考		外直径は0.1 mmの絶縁含む	Striationによりlc75%に低下	Striationによりlc75%に低下	線材間の隙間無視 集合化lc低下考慮	ハイブリッド巻線の2 T以下を分担

* 導体電流密度は界磁電流連続定格値に対する値、導体断面は絶縁なしの状態

5. 2. 冷却技術の現状

高温超電導コイルの冷却に関しては、小型冷凍機による伝導冷却（5-数十 K）、液体窒素循環冷却（65-77 K）、液体ネオンによるサーモサイフォンやヒートパイプ（27-30 K）、固体窒素冷却（10 K）、気体ヘリウムの循環冷却（10 K）、液体水素による浸漬冷却やサーモサイフォン（20 K）などの報告例がある。65 - 77 K では磁界下における高温超電導線材の臨界電流が十分大きいとはいえないため、液体窒素冷却を適用できる応用機器は限られる。小型冷凍機による伝導冷却は、小型の直流励磁コイルの冷却には適しているが、大型コイルや交流損失が発生するコイルへの適用は難しい。気体ヘリウムの循環冷却は、大型コイル、熱負荷の大きなコイルを4.2 Kの液体ヘリ

ウム温度に比べて高い温度領域で冷却するための、現時点での唯一の実用的な技術である。

高温超電導コイルは、広い温度領域での利用が可能となるので、各種の冷媒の特性について知ることが重要である。そこで、気体ヘリウム、液体水素、液体ネオン、液体窒素、液化天然ガスの1気圧における沸点、臨界点、密度、潜熱、粘性係数、比熱を APPENDIX-5 図表 42 に示す。

Super-GM の 70 MW 発電機では、NbTi 超電導線を用いた界磁コイルを回転子に組み込み液体ヘリウムで冷却し、定格回転・発電に成功している。回転子への極低温液体の導入、回転部のシール、回転状態でのコイルの冷却など、液体ヘリウムを液体水素に置き換える際に、参考になる技術は多い (APPENDIX-5 図表 45~48)。

低温超電導におけるケーブル・イン・コンジット導体は、コンジットと呼ばれる金属管に低温超電導線材を撚り合わせたケーブルを収納し、コンジットに超臨界ヘリウムを循環させる。このような技術を強制冷却という (APPENDIX-5 図表 49~51)。強制冷却は、ヘリウム使用のままで、あるいは、超臨界ヘリウムを超臨界水素に置き換えて、高温超電導コイルに適用できると考えられる。

このほか、高エネルギー物理学研究用の粒子検出器用マグネットにおいては、ヘリウムによる間接冷却を用いたアルミニウム安定化導体がいれた。このマグネットではヘリウムが循環するチャンネルと超電導線は離れた位置にあり、アルミニウムを介した熱伝導で超伝導線は冷却される。この冷却技術も、ヘリウム使用のままで、あるいは、ヘリウムを水素に置き換えて、高温超電導コイルに適用できると考えられる。

表 5-3 に冷媒と冷却方式別に現状技術の状況をまとめた。

表 5-3 冷媒と冷却方式の組み合わせとそれぞれの現状技術の状況

	液体	間接冷却	気体冷却	超臨界強制冷却
ヘリウム	●現状技術成熟	●現状技術あり	●現状技術成熟	●現状技術成熟
窒素	●現状技術成熟	●有効性なし	●有効性なし	●有効性なし
水素	●報告例あり ●熱伝達特性データあり	●報告例あり	●現状技術なし	●現状技術なし
ネオン	●報告例あり	●現状技術なし	●現状技術なし	●現状技術なし

5. 3. 今後の共通技術の研究開発に向けて

(1) 現状技術水準と要求技術水準の比較・対照

5. 1. (4) において、Super-GM の同期発電機 (70 MW 級モデル機) の界磁巻線用導体の概念設計を行い、電流・電流密度・温度・集合導体構成に関しては、現状技術水準と要求技術水準が比較・対照した (表 5-2)。その要点と表に示した以外の技術の要素について以下に述べる。

a) RE123 薄膜テープ線材の線材技術・集合導体技術：臨界電流・臨界電流密度の点では、現状技術水準は要求技術水準に達している。機械特性については、集合導体にした場合に電磁力・遠心力に耐え得るかという点で、現状技術水準が要求技術水準に達しているか不明である。CORC®

型ケーブル製造技術は、CORC®ケーブル・ワイヤの製作例から現状技術水準は要求技術水準に達していると考えられる。SCSC ケーブル製造技術は、4 層ケーブルまでしか製作例がなく、現状技術水準が要求技術水準に達しているか判断できない。Roebel ケーブル製造技術は、素線数の点で、現状技術水準が要求技術水準に達しているか不明である。

- b) MgB₂ 多心線材の線材技術・集合導体技術：臨界電流・臨界電流密度の点では、巻線全体を構成するための要求技術水準に現状技術水準は達していない。機械特性については、集合導体にした場合に電磁力・遠心力に耐え得るかという点で、現状技術水準が要求技術水準に達しているか不明である。集合導体製造技術は、概ね現状技術水準は要求技術水準に達している。
- c) コイル技術：RE123 薄膜テープ線材を用いた集合導体、MgB₂ 多心線材を用いた集合導体ともに、Super-GM の同期発電機（70 MW 級モデル機）の界磁巻線のような大型の鞍型コイルを製作した実績はなく、要求技術水準は現状技術水準に達していない。

（２）日本の強みと弱みの明確化

応用超電導技術を、上流側から、素材としての線材技術、線材を使った集合導体技術、線材・集合導体を使ったコイル技術、コイルを使った機器・システム技術、という形に分けて検討する。RE123 薄膜テープ線材の配向中間層を形成するために、日本発の技術である IBAD 法が世界で広く使われていることに例示されるように、高温超電導線材技術は日本の強みであると考えられる。また、Super-GM において、その後も例がない大型の超電導発電機を作り上げ、設計通りの性能を発揮させ得たことから見ても、機器・システム化技術も日本の強みであると考えられる。

一方、高温超電導の集合導体コンセプトのほとんどが海外発のものであったり、RE123 薄膜テープ線材の応用を開く端緒となった無絶縁・不完全絶縁コイルが海外発のものであったりすることに例示されるように、高温超電導の集合導体技術や高温超電導のコイル技術は日本の弱みであると考えられる。

（３）産業競争力強化のために国として研究開発に注力すべき共通技術の抽出

（３－１）超電導導体技術

産業競争力強化のために、日本の強みである、上流側の「素材としての線材技術」と下流側の「機器・システム技術」の間を繋ぐものでありながら日本の弱みでもある、集合導体技術とコイル技術の研究開発には、国として、ぜひ注力すべきである。また、下流に位置する集合導体技術・コイル技術のニーズをしっかりと意識した線材技術の研究開発にも国として注力すべきである。国として研究開発に注力すべき線材技術・集合導体技術・コイル技術の要素を表 5-4 に示す。

表 5-4 国として研究開発に注力すべき線材技術・集合導体技術・コイル技術の要素

線材の種類	Bi2223 多心テープ線材	RE123 薄膜テープ線材	MgB ₂ 多心線材
線材技術	<ul style="list-style-type: none"> ●高臨界電流密度化 ●低交流損失化 	<ul style="list-style-type: none"> ●臨界電流一様化 ●剥離耐性向上 ●小曲げ半径化 ●多心化 ●永久電流スイッチ用（常温時高抵抗化） 	<ul style="list-style-type: none"> ●磁界下高臨界電流密度化 ●歪み耐性向上 ●低交流損失化 ●永久電流スイッチ用（常温時高抵抗化）
集合導体技術	<ul style="list-style-type: none"> ●集合導体概念 	<ul style="list-style-type: none"> ●集合導体構成 ●高強度化 ●低交流損失化 ●集合導体端子・接続 ●ケーブル・イン・コンジット導体 	<ul style="list-style-type: none"> ●集合導体構成 ●高強度化・歪み耐性向上 ●低交流損失化 ●集合導体端子・接続 ●ケーブル・イン・コンジット導体
コイル技術		<ul style="list-style-type: none"> ●集合導体コイル化 ●立体巻線 ●コイル間接続（常電導、超電導） 	<ul style="list-style-type: none"> ●集合導体コイル化 ●コイル間接続（常電導、超電導）
	<ul style="list-style-type: none"> ●安定化・クエンチ検出・クエンチ保護（無絶縁に代わる技術） 		

（3-2）冷却技術

液体ヘリウム温度と液体窒素温度の間の温度領域において適用可能な冷却技術について、冷媒の選択を含め、研究開発が必要であると考えられる。表 5-3 の中で水素を用いた各種冷却技術と、液体水素との熱交換で冷却した気体ヘリウムによる冷却技術は、特に注目する価値があると考えられる。

Super-GM の発電機開発において、冷媒の吸排装置および循環機構、シールや軸受けといった冷却に関係する要素技術が開発されており、高温超電導機器の設計製造でも参考になる。しかし液体ヘリウム以外の冷媒を採用する場合、その物性の相違から、それら要素技術がそのまま適用できるかについては慎重な検討を要する。特に超電導回転機の冷却技術は、個別の機器に対するテーラーメイドで開発される傾向が強く、体系化されていない。技術確立に向けて国として研究開発に注力すべきテーマである。

また、冷凍機に関して、表 5-3 に示したような各種の冷媒に適合した 2 段式冷凍機の開発、小型化、省電力化、蓄冷材の開発なども国として研究開発に注力すべきテーマである。

6. 産業競争力強化のための提言および施策

国内の液化天然ガス（LNG）については、冷熱は必ずしも十分な活用がされないまま社会インフラの整備が進み、国内の LNG 冷熱の利用率（冷熱利用した LNG 量/全 LNG 使用量）は約 20～30%に留まり、「冷熱発電」、「深冷空気分離装置」での利用が主となっている。

これからインフラ構築する液体水素においては、輸送/貯蔵のために液化に要したエネルギーを最大限に回収し、無駄なく有効に利活用するため、社会全体で冷熱の利用方法をあらかじめ計画すべきと考える。

超電導によるカーボンニュートラルへの貢献、および欧米・中国に対する産業競争力強化のための施策として、本プロジェクトでは、社会の将来像として、液体水素の集約貯蔵拠点を中心に、広く水素を利活用する水素・超電導コンプレックスが形成されることを想定する。

そのなかで、液体水素の冷熱で冷却した超電導装置が提供するベネフィット（磁場、大電流、放射光、ビーム、中性子など）により、新たな価値やプロダクトを創生する産業体の構築を提案するとともに、超電導発電機を採用した超電導再エネフロー制御システム（仮称）による広域再エネ連系を提案する。個々の構成要素については、検討を要するが、水素社会における冷熱と超電導の利活用は、いずれ今後世界中で検討が始まるものと考えられ、他国に先駆けた検討と社会実装を進めることが産業競争力の観点から重要と考える。

上記をふまえ、本プロジェクトからの提言として、水素社会における冷熱の利活用の仕組み、および超電導を利活用した社会インフラを日本が先導して構築するとともに、これらのインフラパッケージを海外輸出することで国内の雇用を創出し、同時に、新たな輸出産業力強化を押し進めることを提言する。

また、上記を推進するための枠組みの構築と、技術開発および実用化の推進、それらに必要な人材の育成が課題となる。1990年代をピークに、超電導・極低温分野では、技術者の人数減少と高齢化が進んでいる。超電導技術者が急激に減少する時期に差し掛かっており、次の世代への技術の伝承には、一刻も猶予がない状況であり、産業界と大学・国研が連携して国の支援をいただきながら、多くの人材に魅力を感じてもらえる新しい事業を創出し、様々な機会を通して魅力を発信し、人材を集め、育成していく必要がある。

これを踏まえ、本プロジェクトからの2つめの提言として、将来の社会インフラ構築には、新たな人材の育成が急務な状況にあり、個別企業のモチベーションだけでは難しいため、産業界と大学・国研が連携して中長期視野に立った人材育成の機会の創出およびモチベーションの向上を押し進めることを提言する。

本プロジェクトは、提案する基本技術を2030年までに確立し、2040年に先行分野において液体水素冷熱を利用した超電導応用機器を社会実装することを念頭し、カーボンニュートラルへの貢献策と産業競争力強化策とを含む成長シナリオの青写真を2年間で描く。

これを踏まえ、本プロジェクトからの3つめの提言として、青写真を描いた後、産官学連携による国家プロジェクトで運用まで見据えた技術開発を行い、特区等での実規模実証を進めることで必要な技術と人材を育成、実用化と社会実装を進めることを施策として提言する。

また、これらを確実に推進するため、官民が以下の役割で連携して進めることが望ましいと考える。

官：国家プロジェクトによる開発枠組の構築と推進、特区等における実規模実証および国内インフラ整備/パッケージ輸出の推進

民：冷熱を利用した持続可能な産業を創出するための魅力的なエコシステムの構築

7. まとめ

今年度の主な活動成果を以下にまとめる。

(1) 成長シナリオ策定の活動成果

超電導によるカーボンニュートラルへの貢献、および欧米・中国に対する産業競争力強化のための提案として、将来の水素社会において液体水素の集約貯蔵拠点が形成されることを想定し、冷熱の有効活用を前提に以下の2つのコンセプトを策定した。

(1-1) 超電導再エネフロー制御システム（仮称）を用いた広域再エネ連系構想

液体水素の冷熱を活用した水素ガスタービン・高温超電導発電機の採用により、国内の変動性再生エネルギーを広域連系し、超電導発電機による電力システムの安定化（低インピーダンス化）をはかることで、再生エネルギーの大量導入時に必要とされている送電インフラの増強を軽減する可能性シナリオを提案した。

(1-2) 水素・超電導コンプレックス構想

液体水素の集約貯蔵拠点を中心に広く水素を利活用する水素・超電導コンプレックスが将来形成されることを想定し、域内で、液体水素の冷熱で冷却した超電導装置が提供するベネフィット（磁場、大電流、放射光、ビーム、中性子など）により新たな価値やプロダクトが創生される成長シナリオを提案した。

(2) 超電導機器の経済合理性・CO₂削減効果

成長シナリオ策定、共通技術調査と連携して、超電導機器の経済合理性・CO₂削減効果に関する以下の調査を進め、また共通技術調査の検討における要求水準レベルを設定した。

(2-1) 国内プロジェクトの整理、および海外プロジェクト動向調査

超電導に関する国内プロジェクトと海外プロジェクト動向を整理し、政治・社会・経済・技術を含めたマクロ分析を実施し、俯瞰的に状況をまとめ、各種検討で参照するためのデータベースを整備した。

(2-2) CO₂排出量の削減効果、超電導機器導入メリット

超電導発電機や水素コンプレックス構想で採用が見込まれる各種超電導応用機器のCO₂排出量の削減ポテンシャルの調査例を調べ、超電導を適用するメリットと併せて整理した。CO₂削減ポテンシャルは、発電機や産業用モータが主となり、世界規模で、それぞれ年間2000万t以上（国内はこのうちの約8%（産業用モータ）、約2%（発電機））と評価されている。

(3) 共通技術調査

液体水素の冷熱を利用した高温超電導機器を構成する鍵となる「線材」「集合導体」「コイル」「冷却」の観点で、共通技術の現状、要求レベルとの比較・対照、産業競争力強化の観点で注力すべき技術について検討した。

(3-1) 高温超電導の線材技術・集合導体技術・コイル技術・冷却技術の現状調査

高温超電導の線材技術、集合導体技術について現状を調査し、複数の線材、集合導体について、それぞれの特徴を比較、整理した。コイル技術については、これまでの開発における巻線方式を調べ、それぞれの特徴をまとめた。また冷却技術については、各種冷媒と冷却方式の組み合わせケースごとの、それぞれの現状について整理した。

(3-2) 現状技術水準と要求技術水準の比較・対照、日本の強みと弱み、注力すべき共通技術
想定される要求技術水準として、Super-GMの同期発電機(70 MW級モデル機)を参照し、現状技術水準との比較・対照を行い、線材技術、集合導体技術、コイル技術について、それぞれの評価結果をまとめた。また集合導体技術、コイル技術については海外が先行し、日本の弱みになっていることを整理した。さらに、本提案を実現するために、研究開発として注力すべき共通技術として、集合導体技術、コイル技術、冷却技術を抽出した。

(4) 次年度に向けた課題

本プロジェクトは2年間の取組を計画しており、次年度に向けた課題を以下にまとめる。

- ・提案する再エネ広域連系構想の具体化検討(新規課題レベルの研究が必要。進め方含めて課題)
- ・「産業競争力強化」「カーボンニュートラルへの貢献」視点での成長シナリオの成立性検討
- ・効果的な注力ポイントの抽出、製造/運用コストの評価(検討継続)
- ・ベンチマーク深堀による経済合理性樹立の方策検討
- ・産業競争力強化のために国として研究開発に注力すべき共通技術の抽出、開発計画の提案

以上

一般社団法人 産業競争力懇談会（COCN）

〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-1

日本プレスセンタービル 6階

Tel : 03-5510-6931 Fax : 03-5510-6932

E-mail : jimukyoku@cocn.jp

URL : <http://www.cocn.jp/>

事務局長 山口雅彦