

【超電導で拓くカーボンニュートラル社会】

2022年10月20日

産業競争力懇談会 **COCN**

【エクゼクティブサマリ（中間）】

1. 本プロジェクトの基本的な考え方

超電導は冷却さえ出来れば電気抵抗がゼロのため、エコな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、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。

一方で、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おり、中国でも中国製造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。

上記の状況のもと、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してプロジェクトを組成した。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した。

2. 検討の視点と範囲

超電導は、医療、半導体製造、交通、分析、通信、サイエンス等の分野で広く実用化が進んでいるが、最大市場であるMRI磁石では、海外企業がシェアの大半を占めている。その主な要因のひとつは、素材、機器、システムそれぞれの企業間のQCD要求の摺り合せ不足や、その結果として最終顧客への訴求力が弱化したためと推察する。また過去の超電導応用に関する国家プロジェクトでの取組が、必ずしも事業創出に至っていないこともふまえ、成長シナリオと、その経済合理性、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、以下の3つの産学連携タスクフォース（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1にまとめる。

表 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	・ 産業競争力強化 ・ カーボンニュートラルへの貢献	・ 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調査	・ 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	・ 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
＜TF-C＞ 共通技術調査	・ 各機器共通技術の横断的評価	・ 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

3. 産業競争力強化のための提言および施策

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、無駄なく有効に活用するため、社会全体で冷熱の利用方法を計画すべきと考える。超電導機器は、水素の沸点近傍の冷熱を利用するため、さらに高い温度域の冷熱は超電導以外のシステムで活用することも可能と考える。水素の冷熱を無駄なく最適に利用するため、関連する業界の垣根を超えて検討する場を構築したい。

国に対しては、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生し、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。

超電導を利用した社会インフラとしては、検討途上であるが、現時点では以下のようなものを考える。

- ・ 液体水素貯蔵設備＋液体水素冷却超電導発電機/水素発電ガスタービン
- ・ 超電導機器（発電機、電力貯蔵装置等）を活用した水素コンビナート

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・国研が連携しつつ、国の支援をいただきながら、カーボンニュートラル社会で必要となる様々な人材育成に取り組む必要がある。

国に対しては、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とモチベーションを創出することを提言する。

本プロジェクトは、提案する社会インフラの基本技術を 2030 年までに確立、2040 年までに社会実装するロードマップを念頭に、副次的な効果も含めたカーボンニュートラルへの貢献度を定量化したうえで、成長シナリオの青写真を 2 年間で描く。

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。

＜官民の分担＞

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/パッケージ輸出の主導

民：冷熱を利用する持続可能な産業を創出するためのエコシステムの構築

4. 最終報告書に向けた検討上の課題と展開

3 つのタスクフォース（TF-A: 成長シナリオ策定、TF-B: 超電導機器の経済合理性調査、TF-C: 共通技術調査）が最終報告に向けて進める課題と展開を以下に示す。

＜TF-A＞成長シナリオ策定の課題

- ・提案する社会インフラの具体化検討
- ・「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

＜TF-B＞超電導機器の経済合理性調査

- ・他タスクフォースと連携した目標設定の定量化
- ・効果的な開発注力ポイントの抽出、製造/運用コストの評価
- ・ベンチマーク深堀による経済合理性樹立の方策検討

＜TF-C＞共通技術調査

- ・現状技術水準と要求技術水準の比較・対照
- ・日本の強みと弱みの明確化
- ・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

上記課題について検討を進め、最終報告書にて、プロジェクトとして上記タスクフォースに対応した以下 3 つの観点で全体をまとめて、具体的な提案を行う。

①成長シナリオ

②成長シナリオを裏付ける超電導機器の経済合理性とカーボンニュートラルへの貢献度

③上記実現に必要な共通技術の整理と開発計画の提案

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	5
2. 本プロジェクトの進め方	6
3. 成長シナリオ策定の進捗状況	8
3. 1. 検討の進捗状況	8
3. 2. 最終報告書に向けた検討上の課題と展開	12
4. 超電導機器の経済合理性調査の進捗状況	13
4. 1. 検討の進捗状況	13
4. 2. 最終報告書に向けた課題と展開	16
5. 共通技術調査の進捗状況	17
5. 1. 検討の進捗状況	17
5. 2. 最終報告書に向けた課題と展開	19
6. 産業競争力強化のための提言および施策	20
7. 最終報告に向けた検討上の課題と展開	23
APPENDIX-1	1
APPENDIX-2	1

【プロジェクトメンバー】

#	区分	企業・大学・法人名	氏名
1	リーダー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	来栖 努
2	TF リーダー	三菱電機株式会社	野元 一宏
3	TF リーダー	株式会社日立製作所	和久田 毅
4	TF リーダー	国立大学法人 京都大学	雨宮 尚之
5	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	中村 英之
6	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	柳 寛
7	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	龍頭 啓充
8	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	小柳 圭
9	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	伊藤 智庸
10	メンバー	三菱電機株式会社	殿岡 俊
11	メンバー	三菱電機株式会社	荒金 淳
12	メンバー	三菱電機株式会社	三浦 英明
13	メンバー	三菱電機株式会社	長谷川 満
14	メンバー	株式会社日立製作所	安藤 竜弥
15	メンバー	株式会社日立製作所	青木 学
16	メンバー	株式会社日立製作所	田中 秀樹
17	メンバー	古河電気工業株式会社	坂本 久樹
18	メンバー	古河電気工業株式会社	中崎 竜介
19	メンバー	古河電気工業株式会社	山野 聡士
20	メンバー	株式会社フジクラ	大保 雅載
21	メンバー	岩谷産業株式会社	辻上 博司
22	メンバー	住友電気工業株式会社	小林 慎一
23	メンバー	住友電気工業株式会社	永石 竜起
24	メンバー	国立大学法人 九州大学	宮崎 寛史
25	メンバー	国立大学法人 新潟大学	福井 聡
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	アドバイザー	一般財団法人 電力中央研究所	秋田 調
31	アドバイザー	国立大学法人 東京大学	大崎 博之
32	アドバイザー	ASCOT	岡田 道哉
33	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

34	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
35	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
36	オブザーバー	三菱電機株式会社	畑 寛一
37	オブザーバー	キャノン株式会社	古川 靖之
38	オブザーバー	キャノンメディカルシステムズ株式会社	中井 宏章
39	オブザーバー	株式会社日立製作所	仙波 智行
40	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
41	COCN 担当実行委員	株式会社東芝	斉藤 史郎
42	COCN 担当企画小委員	三菱電機株式会社	金枝上 敦史
43	COCN 担当企画小委員	トヨタ自動車株式会社	佐藤 桂樹
44	COCN 企画小委員	富士通株式会社	大久保 進之介
45	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
46	COCN 企画小委員	株式会社日立製作所	菊地 達朗
47	COCN 企画小委員	ENEOS 株式会社	中山 慶祐
48	COCN 事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	山口 雅彦
49	COCN 副事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	土肥 秀幸
50	COCN 副事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	五日市 敦
51	COCN 副事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	武田 安司
52	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、エコな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。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。

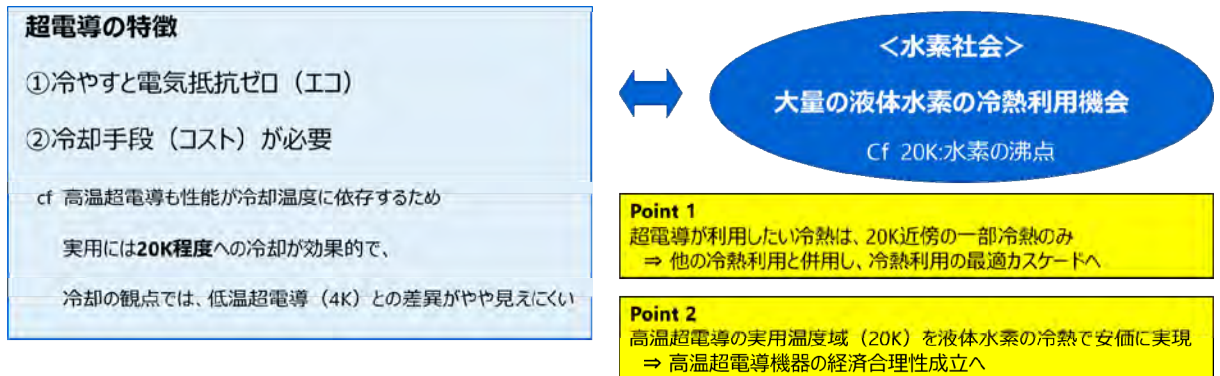


図 1-1 水素社会への超電導の貢献

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。また、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。特に米国の核融合ベンチャー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。さらに欧州では、加速器用高温超電導技術の未成熟の課題認識のもと 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り、中国でも中国製造 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。

現在の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。その要因としては、素材、機器、システムそれぞれの企業間の QCD 要求の摺り合せ不足や、その結果として最終顧客への訴求力が弱くなったこと等が推察される。また、これまでの超電導応用に関する国プロでの取組が、必ずしも事業創出に至っていないことから、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。

一方、2050 年のカーボンニュートラル実現に向けて水素社会への移行が想定されており、超電導がカーボンニュートラルに貢献する機会も想定されている。

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

超電導は、医療、半導体製造、交通、分析、通信、サイエンス等の分野で広く実用化が進んでいるが、最大市場である MRI 磁石では海外企業がシェアの大半を占めている。前章の背景でも言及したとおり、その主な要因のひとつは、素材、機器、システムそれぞれの企業間の QCD 要求の摺り合せ不足や、その結果として最終顧客への訴求力が弱化したためと推察する。また過去の超電導応用に関する国家プロジェクトでの取組が、必ずしも事業創出に至っていないこともふまえ、成長シナリオと、その経済合理性、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

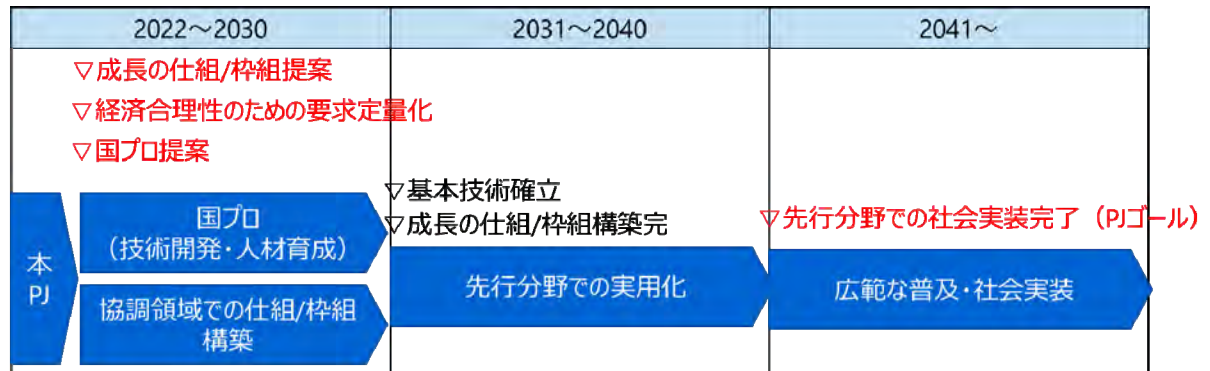
各タスクフォースの検討の視点と範囲を表 2-1 にまとめる。

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	・ 産業競争力強化 ・ カーボンニュートラルへの貢献	・ 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調査	・ カーボンニュートラルへの貢献 ・ 海外/国内案件の P E S T 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	・ 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
＜TF-C＞ 共通技術調査	・ 各機器共通技術の横断的評価	・ 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

また検討を進めるうえで、来年度の継続申請を念頭に 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する。

■ 想定するロードマップ



■ 想定する成長のステップ

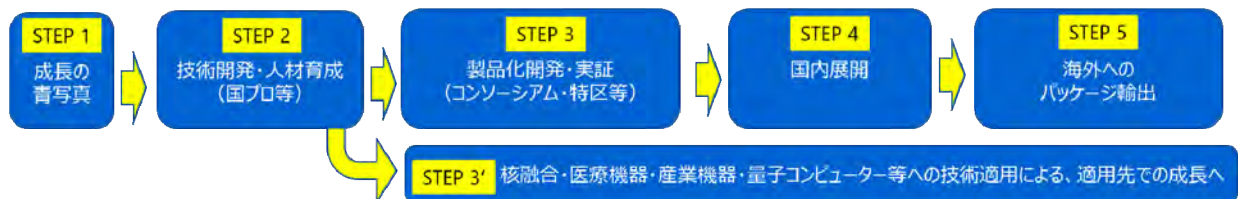


図 2-1 想定するロードマップと成長のステップ

3. 成長シナリオ策定の進捗状況

3. 1. 検討の進捗状況

タスクフォース A では、以下の検討範囲、および検討の視点にもとづく検討を進めており、検討状況について、下記（１）～（６）にまとめる。

<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>

- ・ 産業競争力強化
- ・ カーボンニュートラルへの貢献

（１）産業競争力強化の観点でのシナリオ検討

本プロジェクトでは、超電導をカーボンニュートラル社会実現に貢献する技術と位置付けることに加え、医療・一般産業・核融合・量子コンピュータ等の各分野での産業成長にも重要な役割を果たすべく、その強化のために、これら先行してきた開発プロジェクトについてについて整理、ベンチマークを行い、経済合理性と産業強化に対するインパクトを評価する。これにより、投資効果の高いターゲットに対し超電導技術が到達すべき経済的・技術的水準を明らかにするとともに、その技術および製品開発シナリオを策定する。

現在、タスクフォース B および C にて、これまでの超電導開発および共通技術に関する調査を進めている。調査結果も踏まえて産業力強化シナリオをまとめる。

（２）カーボンニュートラル社会実現に向けた超電導導入の観点でのシナリオ検討

カーボンニュートラルに貢献する超電導電力機器の導入シナリオを構築し、その経済合理性について検討・評価を行う。超電導機器は冷却が必須であり、超電導機器を広く社会実装するには冷却コストをどう負担するかがポイントとなる。そこでカーボンニュートラル実現のキーマンである水素に着目し、さらにこれを液体水素という形で利用する社会インフラを構築することにより、超電導機器を運転するための冷熱を得られることを前提としたシナリオを構築するとともに全体システムとしての成立性および経済合理性について検討・評価を進めている。

カーボンニュートラルに向け、再生可能エネルギーが大量に導入された場合、日単位だけでなく数か月にわたるような長期間の電力需給バランスを取ることが必要と言われており、エネルギーバッファとして水素利用が期待されている。

エネルギー貯蔵の形態としてエネルギー密度が大きな液体水素をベースとした社会インフラを構築し、ここに液体水素の冷熱を利用した超電導機器を実装することによりさらなる価値（例えば省エネや高品質電力）の提供を検討する。こう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によって輸出産業競争力を強化することを想定

(3) 液体水素貯蔵+水素発電(水素ガスタービン)+液体水素冷却超電導発電機による発電システム

液体水素

液体水素

液体水素

水素ステーション

FCV

液体水素

水素ガス

蒸発器

熱交換器

水素ガス

燃焼

空気

蒸気力タービン

水素ガスタービン

圧縮機

超電導回転機

コレクターリング

1: 水素給排装置 (HTC)

超電導界磁巻線

(出典：白井ほか，低温工学 Vol. 55 No. 1 2020 pp. 44-52)

(4) グリーン水素（液体）を用いた仮想揚水発電所

9

これは、余剰電力を液体水素の形として貯蔵し、需要に応じて速やかに水素タービンによって発電し電力供給を行うもので、液体水素をエネルギーバッファとして利用する。現行の揚水発電所に比較して、立地条件の制限を大幅に緩和できると考える。

（５）グリーン水素（液体）と液体空気をを用いた仮想揚水発電所

前記（４）をコンバインド発電（水素発電＋蒸気発電の組合せ）にしたうえで、液体空気エネルギー貯蔵（LAES）発電とも組合せる構成を考える（注１）。

冷熱をさらに活用し、空気分離により得られた酸素で、水素酸素燃焼させるグラーツサイクルとすることで、更なる高効率化も期待できる。（図 3-2）

（注1）LAESと冷熱をカスケード利用する考え方は、NEDO報告書「2021年度成果報告書 戦略策定調査事業／

水素社会の構築で必要になる革新的冷熱活用技術に関する調査」を参照

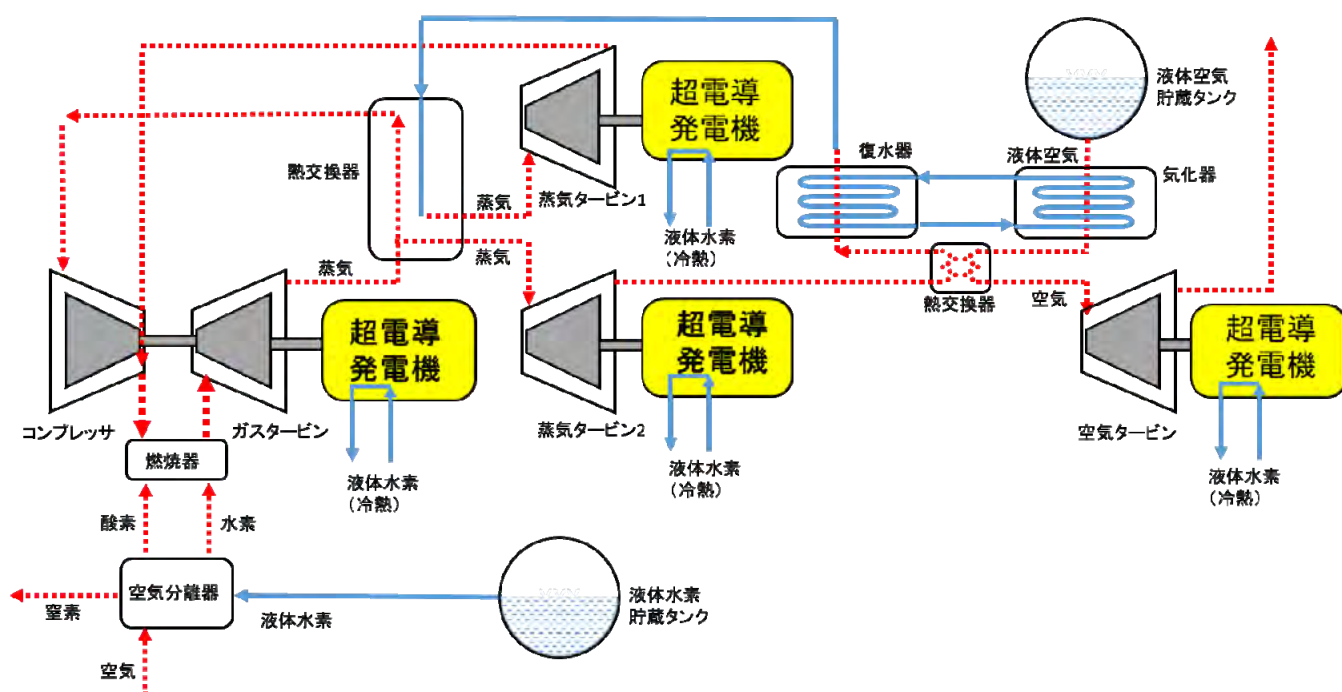


図 3-2 グリーン水素（液体）/液体空気をを用いた仮想揚水発電所

基本構成案を以下にまとめる。

＜基本構成案＞

①タービン３種類

- ・ 水素ガスタービン＋超電導発電機（液体水素冷却）
- ・ 蒸気タービン＋超電導発電機（液体水素冷却）
- ・ 空気タービン（液体空気を加熱）＋超電導発電機（液体水素冷却）

②エネルギー貯蔵

- ・ 液体水素タンク貯蔵（グリーン水素を液化）
- ・ 液体空気タンク貯蔵（一般の LAES では液化機で空気を液化貯蔵。

本コンセプトでは液化機利用とあわせ液体水素冷熱の一部も活用)

③液体水素の流れ

- ・液体水素タンク→各超電導発電機→空気分離装置→水素ガスタービンの燃料

④液体空気の気化手段（熱源）

- ・蒸気タービンの排熱を利用

本構成案では、液体水素を超電導発電機の冷却に使用した後、残りの冷熱を利用して空気から酸素を分離し、得られた水素ガスと酸素ガスを水素タービンの燃料として使用する。

液体空気でエネルギー貯蔵する LAES においては、液体水素の冷熱を活用することで、空気液化のための冷凍電力を省力化することができる。また液体空気の気化のための熱源として、これまで火力発電では海水に捨てられていた熱を回収して利用することから、発電所全体の効率改善を期待することができる。

本構成により、立地制限を大幅に緩和する高効率な仮想揚水発電所を実現できると考えており、成立性の検討を進めている。本構成案はもとより、再生可能エネルギーによる余剰電力でグリーン水素の製造・液化の経済合理性が見込みにくい場合でも、前記(3)と LAES との組合せにより、カーボンニュートラルに貢献するソリューションになると考える。

(6) 水素コンビナート

将来安価な液体水素が海外より輸入されることを想定し港湾地区に設置される液体水素備蓄基地に、発電所および水素を利用する産業およびカーボンリサイクルをはじめとする化学プラントを集約してコンビナートの形成を考える。原料としての水素から各プラントでの生成物に至るチェーンを構築することによって原材料輸送の合理化を行うとともに、液体水素の冷熱およびプラントから排出される排熱をカスケード利用することにより、コンビナート全体としてのエネルギー効率の改善が期待できる。

鉄鋼業は CO₂ の排出量が多いことから水素活用還元プロセス技術 (COURSE50) が 2008 年より行われており、水素の大口需要家となる製鉄所をコンビナートに含めるのは合理的であり自然な流れである。

コンビナートでは、水素ガスでは炭素化合物の代替をすることが合理的ではないプロセスに関しては従来通り炭素化合物を利用することとし、コンビナート域内で炭素の循環運用を行うためのメタネーション等のカーボンリサイクルプロセスをコンビナート内に設置する。発電所等の排熱利用を行うことによってカーボンリサイクルプロセスの高効率化が期待できる。化学・産業プロセスにおけるエネルギーおよび反応媒体としての水素ガス、メタンガス、一酸化炭素ガスを適切に使い分けることによって既存のプロセスの経済合理性については維持しつつ、コンビナート内で炭素を循環させることにより環境への排出をゼロとすることができる。

このコンビナートには液体水素の冷熱を利用した超電導機器、例えば超電導発電機、超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES) などを導入して電力源を構築し、電力品質に依存するプロセス、産業への供給を可能とするとともに、大電流を必要とするプロセスにおいては超電導ブスバーに

より低損失化を実現する。大型圧延機やアーク炉の使用による短周期電圧低下発生は、調相能力に優れる超電導や応答の速い SMES などを用い、コンビナート域内でのリアルタイム需給連携制御により補償され、超高品質電力依存の産業（プロセス）の誘致も可能となる。

3. 2. 最終報告書に向けた検討上の課題と展開

最終報告書に向けて検討を進める課題と展開について以下にまとめる。

（１）提案する社会インフラの具体化検討

- ・ 仮想揚水発電所に関しては、プラント全体としての青写真をより詳細に描き、全体としてのエネルギーの流れと効率を詳細に評価するとともに経済合理性（コスト）評価を行う。
- ・ 超電導発電機に関しては、NbTi 線材に変わる高温超電導線材として REBCO、BSCCO および MgB_2 の 3 つが想定されておりこれらを用いた場合の超電導発電機としての成立性と経済性について検討する。
- ・ 水素コンビナートについては、どのような産業、プロセス、機器を組み合わせるかでその形態およびそこから得られるメリットが大きく変わってくる。これらの点については先行検討事例の調査・理解等を進めるとともに、それを踏まえて、超電導応用の観点からみた水素コンビナートの構築例の考案とともにケーススタディによる妥当性（経済性）評価を行う。

（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調査の進捗状況

4. 1. 検討の進捗状況

タスクフォース B では、以下の対象とする超電導機器、および検討の視点にもとづいて、下記（１）～（３）の検討を進めている。進捗状況を以下にまとめる。

<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）
- ・ 粒子線治療装置
- ・ 核融合

<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、および海外の動向とのベンチマーク評価

超電導に関する国内プロジェクトを整理し（図 4-1）、海外プロジェクトとのベンチマークを実施すべく、海外プロジェクトの状況をまとめた。（表 4-1）

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た。（APPENDIX-1）

（２） カーボンニュートラルに対する効果、および経済合理性の評価

（１）の検討をふまえ、先行プロジェクト案件の経済合理性を評価し、経済合理性を達成するために必要な素材、機器、システム各技術への要求事項の定量化、最終顧客の運用を通じた QCD 要求の定量化を検討中である。

また、CO₂ 排出量削減効果について調査を進めている。検討にあたっては超電導機器投入の単体の効果に加え、システム全体における炭素低減効果も含めた貢献度の評価を進める。

（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

前記（１）、（２）の検討から、競争力強化のための注力ポイントを考察して、絞り込みを行うとともに改善策を今後検討することを計画している。

																						HTS			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 ボッド推進システム （NEDO） 3MW超電導モータ		大出力超伝導回転機器 キーハードの開発 （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 先端計測分析技術・機器開発（JST） Bi系脳用3TMRI		加速事業 医療機器 システム研究開発（AMED）			高温超電導実用化 促進技術開発（NEDO） 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）							高温超電導 回転ガンツリー開発 （AMED）		高機能・高効率・小型 加速器システム開発														
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																										

表 4-1 対象超電導機器に関する海外状況

発電機	(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 (航空機用) 【欧州】ASCEND プログラム (Airbus) 【米国】3MW 超電導発電機開発 (NASA)
モータ	(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 (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
電力ケーブル	【欧州】Essen AmpaCity プロジェクト (1km, 10kV)。Best Paths 洋上風力から陸上への送電システム開発 【米国】シカゴプロジェクト 【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)
粒子線治療装置	【欧州】HITRI+, SEEIIST, iFAST 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
磁気エネルギー 貯蔵システム	【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
核融合	【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 (Tokamaku Energy) 【米国】小型炉開発 (Commonwealth Fusion Systems)

4. 2. 最終報告書に向けた課題と展開

最終報告書に向けて検討を進める課題と展開について以下にまとめる。

(1) 他タスクフォースと連携した目標設定の定量化

- ・超電導線材等の適用機器や目標仕様を絞って開発した方が、投資対効果が高いものは、目標設定をタスクフォース A と連携して進める。
- ・より共通性が高いと判断される対象については、技術調査のタスクフォース C と連携して目標設定を進める。

(2) 効果的な開発注力ポイントの抽出、製造/運用コストの評価

- ・ひとつの超電導機器で社会実装ができると他の超電導機器にも波及効果が期待できるため、産業競争力向上の観点で、効果的な開発注力ポイントの検討を進める。
- ・競争優位性を確立するため、製造コスト低減検討に加えて、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。

(3) 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. 共通技術調査の進捗状況

5. 1. 検討の進捗状況

タスクフォース C では、以下の共通技術、検討の視点にもとづいて、下記（１）～（２）に記載のとおり検討を進めている。進捗状況を以下にまとめる。

<共通技術>

調査の便宜上、共通技術を超電導導体技術と超電導機器の冷却技術に大別し、以下のような範囲の共通技術について調査を実施する。

- ・ 超電導導体技術*：線材技術、集合導体技術、コイル技術
- ・ 超電導機器の冷却技術：冷却技術、液体水素寒冷利用環境

* ここでは、素材としての単線の超電導線を線材、コイルに巻く前段階の材料を導体と区別している。単線である線材がそのまま導体と位置付けられる場合もあれば、線材を素線として集合化した集合導体（ケーブル）が導体として位置づけられる場合もある。

<検討の視点>

- ・ タスクフォース B で調査する様々な応用製品（高温超電導応用機器）において共通して求められる技術、すなわち「共通技術」について、これらを横断的に眺めるような視点とする。

（１）調査の進捗状況

1) 超電導導体技術

1-1) 線材技術

現在、応用機器の開発に供することができるレベルまでの特性・長さが得られ、市販されている高温超電導線材は、Bi2223 多心テープ線材、Bi2212 多心線材、REBCO 薄膜テープ線材、MgB₂ 多心線材である。Bi2223 多心テープ線材の利点は多くの応用事例での長期信頼性、Bi2212 多心線材の利点は円断面による等方性、REBCO 薄膜テープ線材の利点は良好な磁界下臨界電流特性、MgB₂ 多心線材の利点は円断面による等方性・低製造コストである。

1-2) 集合導体技術

上記 1-1) の高温超電導線材は、いずれも単線では電流容量は数十から二、三百アンペア程度に限られる。そこで、大電流容量が要求される応用機器に向けては、線材を集合した集合導体が必要な場合がある。Bi2212 多心線材、MgB₂ 多心線材を用いたラザフォードケーブルの製作例はあるが、現時点で製品化されている集合導体は、REBCO 薄膜線材を用いた Roebel ケーブル（ニュージーランド製）、CORC 導体®（米国製）（スパイラル導体）に限られている。スパイラル導体は任意の方向に曲げられ立体形状のコイルを形成しやすいという利点を有している。

1-3) コイル技術

上記 1-1) の高温超電導線材を用いたパンケーキコイル、レーストラックコイル、ソレノイドコ

イルといった単純な形状のコイルの製作例は多く報告されている。しかし、単線を用いた、鞍型巻線のような立体形状コイルの製作例は極めて少ない。立体形状コイルについては、REBCO 薄膜テープ線材を用いた CORC 導体などの集合導体を用いた加速器用マグネットのモデルコイルについての製作例が複数報告されている。コイルの安定化・クエンチ保護技術として、無絶縁コイル技術が提案されているが、変動励磁や急速消磁が不可能であるなど、本質的な欠点があることも否めない。

超電導技術の現状について調査した詳細については APPENDIX-2 に示す。

2) 超電導機器の冷却技術

2-1) 冷却技術

HTS コイルの冷却に関する実験的な報告例としては、小型冷凍機による伝導冷却 (5-数十 K)、液体窒素循環冷却 (64-77 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、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) などの報告例があり、それぞれについての考察をまとめた。

また、LTS コイルで開発された冷却技術は液体ヘリウム、超臨界ヘリウム、気体ヘリウムを用いたものであるが、HTS コイルの冷却技術として参考になるものが多い。超電導発電関連機器・材料技術研究組合 (Super-GM) の 70 MW 発電機、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ける例などを調査してまとめた。

冷却の現状について調査した詳細については APPENDIX-2 に示す。

2-2) 液体水素寒冷利用環境

将来の水素社会において、液体水素の寒冷が HTS 応用機器の冷却にどの程度利用できるかは重要な検討課題であり、最終報告書に向けて調査検討を実施する。

以上をふまえ、現時点での中間まとめとして、少なくとも表 5-1 の技術項目の確立は必要と考える。

表 5-1 中間報告書段階での研究開発提言：確立が必要な超電導導体技術

		Bi2223 多心テープ線材	REBCO 薄膜テープ線材	MgB ₂ 多心線材
各線材の利点		・多くの応用事例での長期信頼性	・良好な磁界下臨界電流特性	・円断面による等方性 ・低製造コスト
確立が 必要な 超電導 導体 技術	線材技術	・長尺化 ・高臨界電流密度 ・交流：ツイスト・ブリッジング抑制・高抵抗母材	・長尺一様線材製造技術 ・多層薄膜間剥離耐性 ・交流：銅複合多心化・等価ツイスト	・歪み耐性 ・磁界下臨界電流特性 ・交流：ツイスト・非磁性母材
	集合導体技術	・集合導体構造検討 ・臨界電流低下抑制 ・交流：等価ツイスト ・機械特性	・臨界電流低下抑制 ・高電流密度化 ・機械特性 ・交流：等価ツイスト	・熱処理技術 ・集合導体構造検討
	コイル技術	・ソレノイドコイル化 ・絶縁コイル技術	・線材剥離抑制 ・絶縁コイル技術	・wind-and-リアクト技術、リアクト・アンド・wind技術
		立体形状コイル技術		
		・安定化・クエンチ検出・クエンチ保護（無絶縁に代わる技術）		

5. 2. 最終報告書に向けた課題と展開

中間報告書とりまとめの段階では、タスクフォース B が検討対象とする製品（応用機器）が定まっていなかったため、広く一般的に、共通技術について検討した。本来の共通技術という意味では、このような検討が重要であると考えるが、タスクフォース B が中間報告書段階で検討した製品（応用機器）を対照しながら、やや焦点を絞った共通技術の検討も有意義であるので、このような検討が最終報告書に向けた検討上の課題であると考ええる。

最終報告書に向けては、以下をまとめる。

- （１）現状技術水準と要求技術水準の比較・対照
- （２）日本の強みと弱みの明確化
- （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、それらについての研究開発の提案

6. 産業競争力強化のための提言および施策

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計画すべきと考える。超電導機器は、水素の沸点近傍の冷熱を利用するため、さらに高い温度域の冷熱は超電導以外のシステムで活用することも可能と考える。水素の冷熱を無駄なく最適に利用するため、関連する業界の垣根を超えて検討する場を構築したい。

国に対しては、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。

既に実用化されている超電導応用機器を参考に表 6-1 にまとめる。超電導を利用した社会インフラとしては、検討途上であるが、現時点では以下のようなものを考える。

- ・液体水素貯蔵設備＋液体水素冷却超電導発電機/水素発電ガスタービン
- ・超電導機器（発電機、電力貯蔵装置等）を活用した水素コンビナート

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・国研が連携しつつ、国の支援をいただきながら、カーボンニュートラル社会で必要となる様々な人材育成におり組む必要がある。

国に対しては、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とモチベーションを創出することを提言する。

本プロジェクトは、提案する社会インフラの基本技術を 2030 年までに確立、2040 年までに社会実装するロードマップを念頭に、副次的な効果も含めたカーボンニュートラルへの貢献度を定量化したうえで、成長シナリオの青写真を 2 年間で描く。

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。

＜官民の分担＞

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/パッケージ輸出の主導

民：冷熱を利用する持続可能な産業を創出するためのエコシステムの構築

これらにより、前記はもとより、超電導・極低温技術が更に洗練されることによるシナジーとして、医療分野、一般産業分野、小型核融合装置、量子コンピュータ等への技術適用が進み、技術転用先の分野でもそれぞれ成長が進むことも期待できる。

以上の提言を以下に改めてまとめる。

＜産業競争力強化のための提言のまとめ＞

- ①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生し、新たな輸出産業を育成・強化すること

＜施策としての提言のまとめ＞

- ①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、中長期視野に立った人材育成の機会とモチベーションを創出すること
- ②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しつつ、実用化と社会実装を進めること

＜官民の分担のまとめ＞

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/パッケージ輸出の主導

民：冷熱を利用する持続可能な産業を創出するためのエコシステムの構築

表 6-1 超電導を応用した実用化された製品

実用化された製品

医療用画像診断MRI

- ・ 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。

核磁気共鳴分光装置（NMR）

- ・ 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。

シリコン単結晶引き上げ装置

- ・ 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。

粒子線がん治療装置

- ・ 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ジ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。

※1. "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.47

※2. 欧州CONNECTUS <https://www.connectus.eu/track-us.html>

※3. 文部科学省、国立がん研究センター、がん治療用粒子線施設に関する調査報告書2019年度版 https://www.anten.or.jp/05_treatment/info/ryukansen-kensa_2019.pdf

実用化された製品

超電導リニア（磁気浮上鉄道）

- ・ 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。

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。

研究開発用機器における利用

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。

物理学

- ・ 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

天文学

- ・ 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

検出器（要素デバイス）

- ・ 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

※1 欧州CONNECTUSから発表の2011年の値

（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」）

7. 最終報告に向けた検討上の課題と展開

3つのタスクフォース（TF-A:成長シナリオ策定、TF-B:超電導機器の経済合理性調査、TF-C:共通技術調査）が最終報告に向けて進める課題と展開を以下に示す。

＜TF-A＞成長シナリオ策定の課題

- ・提案する社会インフラの具体化検討
- ・「産業力強化/経済合理性」の視点での成長シナリオの成立性検討
- ・「カーボンニュートラルへの貢献」の視点での成長シナリオの成立性検討

＜TF-B＞超電導機器の経済合理性調査

- ・他タスクフォースとのつなぎ役としての連携による全体整合化
- ・効果的な開発注力ポイントの抽出、製造/運用コストの評価
- ・ベンチマーク深堀による経済合理性樹立の方策検討

＜TF-C＞共通技術調査

- ・現状技術水準と要求技術水準の比較・対照
- ・日本の強みと弱みの明確化
- ・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

上記課題について検討を進め、最終報告書にて、プロジェクトとして上記タスクフォースに対応した以下3つの観点で全体をまとめて、具体的な提案を行う。

- ①成長シナリオ
- ②成長シナリオを裏付ける超電導機器の経済合理性とカーボンニュートラルへの貢献度
- ③上記実現に必要な共通技術の整理と開発計画の提案

以上

APPENDIX-1

(A) 海外とのマクロ分析比較 1（共通）

機器	日本	欧州	米国	中国, 他
政治	COP21 にて脱炭素化加速。ウクライナ危機でさらに再エネ加速。 脱炭素化社会（2050 年カーボンニュートラル）の推進 FIT、2022 年 4 月から FIP 導入予定	脱炭素社会を世界でいち早く実現する政策を進めている 脱炭素化社会の推進 加盟国の再エネ支援策に関するガイドライン（国家補助ガイドライン）の策定 各種基金を通じた再エネ含む低炭素技術の開発支援	バイデン米大統領により「パリ協定」に復帰する大統領令に署名し、2050 年までに二酸化炭素排出量実質ゼロと、2035 年までに電力部門の脱炭素をめざすことを表明 連邦政府：投資税額控除(ITC)、発電税額控除(PTC) 州政府：RPS、ネットメータリング RPS:Renewable Portfolio Standard(再生可能エネルギー利用割合基準)。一定以上の新エネルギーから発電する電気の利用を義務付けるもの。	脱炭素化社会の推進（2060 年までに二酸化炭素（CO₂）の排出を実質ゼロ）→3060 目標 中国金融学会グリーン金融専門委員会が「カーボンニュートラル目標とグリーン金融ロードマップに関する研究（概要版）」と題する報告書を発表 FIT(2022 年を目途に、大部分の電源に対する国家補助は廃止予定) RPS(2020 年から実施) グリーン電力証書
経済	水素インフラ導入 輸入エネルギーの依存度は大きい。原子力が減少、再エネの発電量が上昇するも、依然として輸入に頼っている。	各国によって状況は異なる。英国、スペインは輸入エネルギーへの依存度が増加傾向だが、その他は横ばい。イタリア・スペイン以外は再エネ発電量は上昇	輸入エネルギーの依存度は年々減少傾向である。再エネ関係の発電量の上昇が著しい	中国銀行も「21 年第 4 四半期以降、すでに契約済みの案件を除いて、海外の新規石炭採掘および新規石炭発電プロジェクトへの融資を行わない」と表明 輸入エネルギーへの依存度は低い、近年は依存度が若干増加傾向。再エネ関係発電量の上昇著しいが、発電量そのものの上昇度も高

				い
社会	2019 年時点における電源構成比率は再生エネルギー18%、原子力 6%、火力 76%である。 2021 年に策定された第 6 次エネルギー基本計画において、2030 年時点の野心的な見通しとして、再生エネルギー36-38%、原子力 20-22%、火力（水素、アンモニア） 1 %以上、火力（石炭、石油、天然ガス） 41%と掲げている。	脱炭素社会を目指すことを社会として容認・推進しており，それに沿った価値観の創出，社会行動を行っている 2030 年までにヨーロッパの 100 都市のカーボンニュートラル化を目標とし、脱炭素化へのアプローチを進めようとしている。	地球環境への意識は高く、必要と思えば大きな投資を惜しまない社会風土がある。	【中国】 【韓国】 電力需要増加 ・都市部での電力集中

(B) 海外とのマクロ分析比較 2 (発電機)

機器	日本	欧州	米国	中国, 他
発電機 (風力 向)	・ 10MW 機の調査研究完(2019)。 ・ 風況が比較的安定な大型洋上風力にシフト。	・ 風力発電が主力電源として位置づけられ、関連産業が確立、成長している。 ・ 1 風車当たりの出力を増やすことを求めている。(特に洋上風力) ・ ナセル重量に制限があり、1 風車当たりの出力を増強するには発電機を軽量化する必要がある。 ・ 発電機の軽量化技術として、超電導を励磁コイル(直流)に適用している。 ・ 大型機も常電導で可能になった現在の KPI は LCOE(Levelized Cost Of Electricity)。永久磁石と比較して HTS では LCOE で優位性が見られないというのが欧州 INNWIND プロジェクトの結論。	- 陸上風力が主体 - 米国 DoE にて(A)REBCO(AMSC), (B)NbTi(GE), (C)永久磁石の三つの予備検討が行われ、2021 年に NbTi の(B)の GE が勝者となり、20.2 million USD (20 億円) のプロジェクトが進行中。NbTi が勝った主な理由として、最も LCOE が安かった点が考えられる。	—
発電機 (航空機 向)	・ 第 1 回「航空機の脱炭素化に向けた新技術官民協議会」を開催 ・ 航空業界の有志による「ACT FOR SKY」という団体が設立	・ 液体水素社会への移行 ・ 電動航空機技術導入のためのスタンダード策定 ・ 2022 年 2 月 4 日、ヨーロッパの航空業界のリーダーたちは、航空の将来の持続可能性	・ バイデン米政権は、航空機燃料の脱炭素化について 2050 年を達成時期とすることを検討 ・ 電動航空機技術導入のためのスタンダード策定	—

		と脱炭素化に関するツールーズ宣言に署名 ・ Airbus 社は窒素酸化物（NOX）や CO ₂ 排出量の削減といった環境性能に優れた高燃費機体を設計するための研究開発に投資	・ 米ユナイテッド航空、脱炭素化へ 4000 万ドル投資	
発電機	SuperGM 70 MW 級超電導発電機	EcoSwing 3.6 MW 級超電導風力発電機	DOE 100 MVA 級超電導発電機 →コンポーネントの製作、検証で終了？	—

(C) 海外とのマクロ分析比較 3（同期調相機）

機器	日本	欧州	米国	中国, 他
同期調相機	同期調相機は自励式静止型調相機（STATCOM）の登場により駆逐されたが、再生可能エネルギー大量導入に伴い、高速動作の半導体+耐量が高く慣性力を有する回転機械を組み合わせたハイブリッド方式が提案されている。1) 日立 ABB パワーグリッド車が英国再エネ導入拡大に向け世界初のハイブリッド調相設備の実証を開始(2020.12.4)※1 STATCOM+同期調相機（常伝導）。2) 超電導発電機 SuperGM(70MW 級)は +47.2Mvar,-82.3Mvar※2	1) グリッドコード※2 2) 英国の系統安定性公募(Stability pathfinder phase 1(2019))、既存火力発電所の蒸気／ガスタービンをフライホイールに置き換え、同期調相機と接続して系統に慣性力を供給する。 デンマークに 250Mvar の同期調相機ある。 1) Entoso-E が superconducting synchronous condenser について言及、開発状況不明。※3 Best practice performance として 代表的には 20-200Mvar のレンジの同期調相機がグリッドにつながれている。350Mvar まではメーカーはできると言っている。 2)デンマーク：Bjaeverskov substation 250Mvar(2013), Fraugde and Herslev substations 900MVA of short-circuit power and +150/-75Mvar(2014) 3)ドイツ：Hesse, Germany (2013) -400～+900Mvar , 2.5GW Biblis 原発が同期調相	1) グリッドコード※2,3 超電導同期発電機の経済性評価不明（未調査） テキサス州(ERCOT)では発電機慣性の減少が過大となっており、系統の慣性力を管理 1) AMSC 超電導±8MVAR(2005)→12MVAR(2006)を実証、導入済み。 SuperVAR(TM) ※4 2) Granite Substation, Vermont, USA, Northwest Vermont Reliability Project, +25/-12.5Mvars ×4 同期調相機 + 25Mvar ×4 シャントバンク(MSC) 3) Blackwater startion, New Mexico UST (2019)	1)自然エネルギー財団;アジアスーパーグリッド構想(ASG),2011～ 2) スマートグリッドに関するモデルプロジェクトと政府技術開発支援 ※4 中国ではすでに 50Mvar, 300Mvar の常伝導（空冷、水冷）の同期調相機が開発されている。 Southern Power Grid(2018-2021), 2019: 300kvar, 2021: 10Mvar の計画。→ MT-27 にて active power test で 100kW

		機にコンバート 4) イタリア：Codrongianos, Italy 250Mvar ×2 (2014) ; Brindisi, Italy +250/-125Mvar (2020.5 announced)		
--	--	---	--	--

(D) 海外とのマクロ分析比較 4 (モータ、ケーブル)

機器	日本	欧州	米国	中国, 他
モータ	川崎重工業 3.0 MW 船舶モータ	Siemens 4.0 MW 級モータ	AMSC 36.5 MW 船舶モータ	中国 1 MW モータ
モータ (航空機向)	・第 1 回「航空機の脱炭素化に向けた新技術官民協議会」を開催 ・航空業界の有志による「ACT FOR SKY」という団体が設立	・液体水素社会への移行（エアバスへの資金注入への建前？） ・電動航空機技術導入のためのスタンダード策定 ・2022 年 2 月 4 日、ヨーロッパの航空業界のリーダーたちは、航空の将来の持続可能性と脱炭素化に関するトゥールーズ宣言に署名 ・Airbus 社は窒素酸化物（NOX）や CO ₂ 排出量の削減といった環境性能に優れた高燃費機体を設計するための研究開発に投資	・バイデン米政権は、航空機燃料の脱炭素化について 2050 年を達成時期とすることを検討 ・電動航空機技術導入のためのスタンダード策定 ・米ユナイテッド航空、脱炭素化へ 4000 万ドル投資	ー
ケーブル	電力用の国プロは終了。鉄道用は開発継続（JST、NEDO） 電力需要伸びず、分散型 NW 推進 ケーブル実証運転の実績（66kV, 横浜） 事故時の安全性対策に課題	Essen、BestPaths プロジェクト、他、EU プロ NEXANS 活動継続 洋上風力の増加 北部での発電を南部の消費地へ ケーブル実証運転実績 6 年（12kV, Essen）	DHS プロジェクト進行中（シカゴ） DOE はプロジェクトなし ケーブルメーカ不在 NW に脆弱部分があり、強化が必要 限流機能付き超電導ケーブルを開発	【中国】上海、深圳のプロジェクト進行中（電力会社と共同） 【韓国】国プロにて 23kV, 154kV ケーブル開発（～2017） 【中国】上海電纜、中天等が活動 【韓国】韓国電力、LS ケーブルで商業プロ

		限流器と併用		(Singal) 【中国】上海、深圳の実系統運転開始(2021 年秋) 【韓国】Shingal (2019 年 11 月) 運転開始 154kV 建設中 三相同軸(23kV)開発中
--	--	--------	--	---

(E) 海外とのマクロ分析比較5（粒子線治療装置）

機器	日本	欧州	米国	中国, 他
粒子線治療装置	2006 年にがん対策基本法制定、2007 年にがん対策推進基本計画が閣議決定	欧州諸国の研究所は、国・EU のサポートを受け HITRI+(※p2)、SEEHST(※p3)、iFAST(※p4)等のプロジェクトを立ち上げ、超伝導化を含めた粒子線治療装置の R&D を進めている。	対がん政策として、バイデンが副大統領時代の 2016 年に Cancer Moonshot を立ち上げるとともに、マルチイオン照射の開発に言及。また、Moonshot の再開も宣言されている(※p5)。今後、国内開発の可能性。	2014 年医療機器の国産化調達政策を打ち出した。
	重粒子線治療装置の小型化・高度化、並びに、その普及展開は、政策文章(※p1)において推進すると明記。	2021 に EU は Europe's Beating Cancer Plan を発表 (※p6)	バイデン大統領は 2022 年 2 月 2 日、「がん・ムーブメント」計画の再活性化を発表した。(※p7) これを受けて ASTRO が重点領域として Proton and Particle Therapy を提言。(※p8)	2018 年厚生労働省と中国国家衛生健康委員会の協力覚書 (MOC) 締結。(※p10) 2021 年第 14 次五カ年計画の項目として、放射線治療等の大型医療機器および重要部品の研究開発が挙げられた。(※p11)
	粒子線治療装置の日本企業の世界シェアは 2017 年で 25%程度(※e6)	医療機器の国別市場規模は、2016 年でドイツ 7%、フランス 4%、イギリス 3%、イタリア 3%(※e6)	医療機器の国別市場規模は世界最大であり、2016 年で 43%(※e6)	医療機器の国別市場規模は、2016 年で中国 5%、韓国 2%(※e6)
	現在、日本には粒子線がん治療施設が 25 ヲ所（重粒子線：6 ヲ所、陽子線：18 ヲ所、重粒子と陽子線の両方：1 ヲ所）あり、重粒子線治療装置に関しては世界一である。国民健康保険の適応範囲が広がりもあり、超伝導化により小型且つ、低コストな治療装置が開発されれば、大きな市場規模につながる可能性。	2020 年 Siemens が Varian Medical Systems を買収 2021 年に世界の粒子線治療市場規模は 2021 年に 7 億 9,710 万ドルで、2030 年までに 16 億 3,440 万ドルと予想され、2021 年から 2030 年の間の年平均成長率は 8.3%と予想(※e1)。欧州は最も大きなシェアを占め、年平均成長率も 9%と予想されている。重粒子線治療装置の超伝導化により陽子線治療装置同等のサイズ及びコストが実現できれ	粒子線治療装置の世界シェア（陽子に限る）は 2017 年で 25%程度(※e6) 北米は 2 番目に大きなシェアを占め、現在、北米には約 41 の陽子線治療センターがあり、地域市場の成長を加速させている。米国では現在、陽子線治療装置しかないが、重粒子線治療装置の超伝導化により陽子線治療装置同等のサイズ及びコストが実現できれば、同市場を席卷する可能性がある。	MarketsandMarkets のレポートによると、中国、インド、ブラジル、メキシコなどの多くの新興国における急速な経済発展と医療費の増加により、これらの国々の質の高い医療へのアクセスが改善されることが期待、粒子線治療の大きな市場となる(※e2)。GLOBOCAN 2021 によると、2021 年にアジア地域では 950 万人の新規がん症例があり、この数字は 2030 年までに 1280 万人に達すると予測され、これらの国々におけるがんの発生率の上

	ば、同市場を席巻する可能性がある。		昇は、粒子線治療装置に対する需要の増加をもたらすと予想されている。
2018 年の一人当たりの医療費支出は USD4,267、内公的医療費は 84.1% (※s5) 粒子線治療は、2022 年度においても新たな疾患が保険収載されるなど(※s1)、その治療効果や有効性が社会的に認知。診療報酬改定にて、QST における治療の約 7 割が保険適応となるなど、多くの疾患が保険適応となっている。	例えば 2018 年のドイツの一人当たりの医療費支出は USD5,472、内公的医療費は 77.7% (※s5) 欧州における粒子線施設は 2010 年当時、5 施設であったが、2020 年には陽子線治療施設を中心に、30 施設と 6 倍に増加(※s2)。公的保険・民間保険の適用範囲も拡大しており(※s3)、小型で安価な装置が上市されれば、普及が加速する可能性。	公的医療保険制度は、高齢者および障害者、低所得者を対象としたものに限られる (※s4) 2018 年の一人当たりの医療費支出は USD10,624、内公的医療費は 50.4% (※s5) 日本製重粒子線治療装置が拠点病院である Mayo Clinic に導入され、今後、米国内で同治療が FDA に承認され、保険が適用されるようになれば、重粒子線治療装置の普及が一気に加速する可能性が高い。	中国の 2018 年の一人当たりの医療費支出は USD501、内公的医療費は 56.4% (※s5)
重粒子線治療は放射線医学総合研究所が、世界に先駆けて実用化。世界初となる超伝導回転ガントリーを開発し、他国に対して技術的優位な立場にある。また、「量子メス」プロジェクトにおいて、シンクロトロン用超伝導電磁石の開発においても世界をリードしている。一方、陽子線治療においては住友重機械工業が超伝導サイクロトロンを開発し(※t1)、今後、普及が進むと思われる。	HITRI+、SEEIIST、iFAST プロジェクトにおいて、重粒子線治療用超伝導シンクロトロン超伝導電磁石は設計段階にある(※t2)。一方、陽子線に関してはベルギーの IBA による超伝導サイクロトロンが普及しており、この技術の炭素線治療装置への応用も開発(※t5)。先行プロジェクトの一つである HITRIplus には EU から 500 万ユーロの予算 (※t6)	重粒子線治療装置の超伝導化に関する研究開発は現在、行われていない。陽子線に関しては、VARIAN による超伝導サイクロトロン開発・普及が進んでいる。回転ガントリー用超伝導電磁石に関しては、LBL が陽子線用のプロトタイプ Canted-Cosine magnet を開発(※t3)。LBL が DOE より粒子線治療装置開発予算を獲得。LBL は Varian、PSI と共同で陽子線治療用超伝導電磁石の開発。(※t7)	山東省の万杰医院にて陽子線治療施設が 2004 年に稼動。蘭州の近代物理研究所が理化学研究所やドイツ GSI などと国際協力して進めている重イオン研究施設(HIRFL)にて治療用ビームラインが設置され 2006 年から治療を行うとともに、新たな重粒子線治療施設を省内 2 箇所に建設し、先行の武威は 2018 年 11 月に治療を開始。上海では炭素・陽子線治療施設が建設され、2014 年より治療を開始。(※t8) 陽子線治療装置に関しては、超伝導サイクロトロンプロトタイプ機を開発(※t4)。

(F) 海外とのマクロ分析比較 6 (SMES, 核融合)

機器	日本	欧州	米国	中国, 他
SMES	電力会社中心に瞬時電圧低下補償装置として SMES 開発 (10MVA - 1sec) 瞬時電圧低下補償のニーズがあり展開されてきたが、代替技術に置き換わった。	フランスで電磁推進用パルス電源として SMES (0.8MJ) 開発	瞬時電圧低下補償の μ SMES (1-3MW)、D-SMES の商品化	—
核融合	—	欧州連合関連機関 (EUROfusion) は 22 世紀に世界で 1 テラワット (100 万 kW 発電所 1,000 基分) の核融合発電所が必要であり、2050 年頃に発電を行う核融合原型炉 (DEMO) を建設すべきと提言。イギリス政府は、核融合エネルギーは低炭素で安全、かつ継続的で、事実上無制限のエネルギー源となる究極のクリーンな電力ソリューションになる可能性があるとして位置付け、2040 年までに核融合発電所を建設するとしている。	気候変動を緩和すると同時に社会に電力を供給するため、核融合エネルギーの開発に向けて積極的に取り組む。アメリカ独自の核融合発電所を 2040 年代までに建設。高温超伝導コイルといった技術を利用して、より低コストで小型のパイロットプラントの建設を目指す (DOE FES)。	—
	—	欧州グリーンディール政策。民間核融合エネルギーのスタートアップ企業へは、政府系からの投資も行われている。	民間核融合エネルギーのスタートアップ企業への投資が積極的に行われている。また、スタートアップ企業と大学、研究機関との共同活動が行われている。	—

	—	ITER から原型炉・商用炉へと順当な大型トカマクのロードマップに加え、小型炉として球状トカマクも商用炉の候補として開発されており、高温超伝導コイルが適用されている。	小型炉とするため、高温超伝導コイルを適用することを提案。	—
--	---	---	------------------------------	---

APPENDIX-2

1) 超電導導体技術

1-1) 線材技術

現在、応用機器の開発に供することができるレベルまでの特性・長さが得られ、市販されている高温超電導線材は、Bi2223 多心テープ線材、Bi2212 多心線材、REBCO 薄膜テープ線材、MgB₂ 多心線材である。

Bi2223 多心テープ線材は、高温超電導線材の中でも製造技術はもっとも成熟しており、長さ方向の特性が十分一様な、キロメートル級の長さの線材が工業的に製造されている。ただ、製造・市販している会社が世界的にみても限られており、世界全体の生産量という点では、REBCO 薄膜テープ線材に及ばないと想像される。また、多心化は、線材をテープ面方向に曲げやすく（曲げても劣化しにくく）するためには効果があるが、交流損失の低減には寄与していないことに注意を要する。多心化により交流損失を低減するためには、フィラメント間のブリッジングを抑制し、高抵抗母材を使用し、さらにツイストする必要がある。

Bi2212 多心線材は、円断面の線材が得られることから、あらゆる方向に曲げてコイルを巻くことができ、ラザフォードケーブルのような LTS 線材で成熟した集合導体技術も適用できる。しかし、コイルに巻いてそのまま使える Bi2223 多心テープ線材や REBCO 薄膜テープ線材と異なり、コイルに巻いたあと熱処理を行わないと超電導材料が化学的に生成されないが、長尺の熱処理技術が確立しているとは言えず、歪み耐性の向上も課題である。世界的にみても製造している企業が限られている点も、応用機器開発に使う上では欠点となる。

REBCO 薄膜テープ線材は、磁界下での臨界電流が高いことから、現在、応用機器開発にもっとも多用されている線材である。世界で、多数の企業が製造・販売しており、500 km/年/社、1000 km/年/社といった生産能力を公表している会社もある。数百メートル級の線材が製造できるようになっているものの、長さ方向の一様性に関しては、局所的に超電導特性が劣った区間ができることも多く、長尺線材を歩留まりよく製造する技術の開発が、応用機器に多用していく上ではぜひ必要である。また、コイル技術とも関係するが、交流機器や高い磁界精度が要求される機器に応用する場合には、幅広薄膜形状に起因する大きな磁化が、交流損失や遮蔽電流磁界を大きくしてしまう。磁化を小さくするために、超電導薄膜を細いフィラメントに分割する多心化も試みられているが、フィラメント間を絶縁するとフィラメント間の電流分流が阻害され、長尺臨界電流の劣化や超電導安定性の低下につながる。フィラメント間を銅等で接続する電流分流は可能となるが、銅等を介して流れる結合電流を速やかに減衰させる、LTS 線材のツイストと等価な、なんらかの仕組みの開発が必要となる。

MgB₂ 多心線材は、長尺の線材が製造し易く、製造コストの低減が期待できることから、近年、様々な応用機器への使用が考えられている線材である。円断面の線材が得られることから、あらゆる方向に曲げてコイルを巻くことができ、ラザフォードケーブルのような LTS 線材で成熟した導体技術が適用できる。しかし、コイルに巻いてそのまま使える Bi2223 多心テープ線材や REBCO 薄膜テープ線材と異なり、後述するように、ワインド・アンド・リアクト法やリアクト・アンド・ワインド法という方法をコイル化の際には適用しなければならない点が難点で、この難点を緩和

するために、歪みに対する耐性の向上が期待される。また、磁界下での臨界電流は十分大きいとは言えず、その向上に向けた研究開発が期待される。交流応用に向けては、短ピッチでのツイスト、非磁性母材の適用などの技術開発が必要である。

1-2) 集合導体技術

Bi2223 多心テープ線材、Bi2212 多心線材、REBCO 薄膜テープ線材、MgB₂ 多心線材のいずれについても、単線では電流容量は数十から二、三百アンペア程度に限られる。単線を使ってコイルを巻くとターン数が多くなりインダクタンスが大きくなりがちであるので、事故時等の電流遮断時を含む電流変化時や交流励磁時に端子電圧が過大になる大きなコイルにおいては、線材を束ねて電流容量を大きくした集合導体（ケーブル）を適用してコイルのインダクタンスを下げる必要がある。例えば、寸法が大きく単線で巻くとインダクタンスが大きくなるタービン発電機の巻線、エネルギーの取り出しをすばやく行いたい SMES、航空機用回転機などの交流励磁される電機子巻線などには、集合導体が必要となる。また、テープ線材は巻線工程で粗雑に扱うと曲がり、損傷してしまうので、コイルを巻くときの取り扱いに注意が必要であり、この点からも、超電導線材を構造部材と複合した集合導体は有利である。

現時点で製品化されている集合導体は、REBCO 薄膜線材を用いた Roebel ケーブル（ニュージーランド製）、CORC 導体（米国製）（スパイラル導体）に限られている。Roebel ケーブルは、コアがないため導体電流密度を高くし易く、素線が転位されており均流化が図れる点で優れているが、フラットワイズ曲げ以外の曲げは困難で、コイル化の際に制約となる。CORC 導体は、円断面の等方な機械・電磁特性をもった導体であり、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るが、コアがある分だけ導体電流密度が低下してしまう。研究開発段階のものまで含めると、欧米においては、核融合装置向けを中心に、REBCO 薄膜線材を用いた多様なケーブルが提案、試作されている。一方、日本においては、核融合科学研究所における核融合装置向けの開発例、京都大学における交流電気機器向けの開発例があるのみである。線材技術では、日本は世界をリードしてきており、現在も世界トップの性能を誇るが、集合導体技術については、欧米に比べて立ち遅れていると言わざるを得ず、今後の研究開発の加速が期待される。

Bi2212 多心線材、MgB₂ 多心線材は、円断面の線材であり、これらを用いたラザフォードケーブルの製作例はあるが、広く市販はされていない。これらの線材をケーブルに適用するためには、線材の歪みに対する耐性を向上し、後述するコイル化と組み合わせた、熱処理技術を含めた集合導体技術の開発が必要である。ただ、本質的には、円断面であることは集合化にとって有利であるので、これを生かした多様な集合導体構造の検討が期待される。

1-3) コイル技術

Bi2223 多心テープ線材と REBCO 薄膜テープ線材に関しては、フラットワイズには曲げやすく、エッジワイズには曲げにくいという、テープ形状に起因する機械的特性から、これまで製作されている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、フラットワイズ曲げ中心で形成できる形状に限定されている。しかし、従来

のかかなりの電気機器の巻線（コイル）の形状は鞍型であったり、分布巻きであったりしており、フラットワイズ曲げのみでは構成できない立体形状をしている。Bi2223 多心テープ線材と REBCO 薄膜テープ線材を用いた応用機器の概念設計例においても、フラットワイズ曲げによって実現できるレーストラックコイルなどを用いることを前提としているものが多く、応用機器として、必ずしも最適な設計とはなっていない可能性が高い。従って、応用機器に適した形状の巻線を可能とする立体形状コイル技術の開発が望まれるが、これは、集合導体技術の開発とも密接に関連する。

最近の HTS コイルの製作例の多くは REBCO 薄膜テープ線材を用いたものであるが、伝導冷却などのために、REBCO 薄膜テープ線材を用いて樹脂含浸したコイルを巻くと、線材を構成する多層薄膜の間で剥離が起こり、コイルが劣化してしまうことが問題となってきた。この問題は、線材間に意図的に密着性の悪い物質を挿入することにより剥離につながる応力を低減することで一応の解決は見ているが、特に大型のコイルになると完全に問題が解決できているとは言えず、さらなる剥離防止のための技術開発が望まれる。

HTS コイルは、常電導伝搬速度が遅く、常電導電圧が検出し易いレベルに到達する前にホットスポット温度が上昇し、コイルが劣化・焼損し易い。HTS コイルを熱暴走（クエンチ）から保護するための技術として、無絶縁コイルや金属絶縁コイルというコイル技術が開発されている。これらは、パンケーキコイルやレーストラックコイルのターン間を電氣的に絶縁せず、あるターンに熱暴走の芽となる常電導部が発生した場合に、電流を隣接ターンに迂回させ、熱暴走を防止する技術である。研究用途の高磁場マグネットのインサートコイルなどにおいて、これらの技術は有効に適用されている。しかし、これらの技術を適用したコイルでは、発生磁界を意図的に時間的に変動させたときにも電磁誘導によりターン間に電流が流れ、意図した変動磁界を発生できなかったり、ターン間に流れる電流により発熱が生じたりという問題がある。また、一定磁界を発生させる用途のコイルでも、励磁過程ではターン間に電流が漏れて流れるため、この電流が減衰するまでは所期の一定磁界を発生できない。さらに、なんらかの必要が生じて、急速消磁ができないという問題点も有している。従って、これらの技術が適用できない応用機器も多く、これに変わる熱暴走（クエンチ）保護技術を適用した絶縁コイル技術や、高感度なクエンチ検出技術の開発が期待される。常電導電圧検出に代わるクエンチ検出技術として光ファイバー等を用いた技術も研究されるが、広く実用されるには至っておらず、高感度なクエンチ検出技術の開発が期待される。

MgB₂ 多心線材の多くは円断面をしていることからコイル化の際の曲げ方向について異方性はなく、テープ形状をした線材に比べてコイル化には適している。その一方で、最終的な超電導材料である MgB₂ を化学的に生成するために熱処理を行った後は、曲げによる歪みでも超電導特性が劣化してしまう。そこで、熱処理前にコイルに巻いてから熱処理を施して MgB₂ を生成するワインド・アンド・リアクト法と呼ばれる方法か、コイルに巻く前に熱処理を施して MgB₂ を生成し、その後、大きな歪みをかけずに、言い換えるとあまり変形をさせないでコイルに巻くリアクト・アンド・ワインド法という方法のいずれかを適用する必要がある。いずれの方法も、超電導線材を単純にコイルに巻けばよい Bi2223 多心テープ線材と REBCO 薄膜テープ線材に比べるとコイル化が難しい

ことは否めなく、コイル化を容易にする技術開発が期待される。

2) 超電導機器の冷却技術

2-1) 冷却技術

HTS コイルの冷却に関する実験的な報告例としては、小型冷凍機による伝導冷却（5-数十 K）、液体窒素循環冷却（64-77 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。

液体窒素による冷却は、温度が高いために磁界下における臨界電流が十分大きいとはいえず、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た方法であるが、大型コイルや交流損失が発生する交流・変動励磁コイルへの適用は難しい冷却技術である。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冷却する上では、現状、実用できる唯一の技術であるが、気体ヘリウム自体の冷却を含めてシステムとしての研究開発の余地がある。

今後、到来すると予想される水素社会において、液体水素の寒冷を利用できる環境が広がれば、液体水素冷却技術は魅力的な冷却技術である。期待の一方で、液体水素を用いた実験ができる場所が限られているため、これまでの研究開発例は少ないが、少なくとも液体水素の伝熱特性については、ある程度まで実験データが蓄積されており、応用機器設計の基礎データとして用いることができる。試験環境の整備も含め、今後の研究開発の、より一層の促進が期待される。

LTS コイルで開発された冷却技術は液体ヘリウム、超臨界ヘリウム、ガスヘリウムを用いたものであるが、HTS コイルの冷却技術として参考になるものが多い。

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ても参考なる技術は多いと考えられ、このような視点からの研究開発が期待される。

LTS コイル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 LTS 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冷却技術である。この技術は、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、HTS コイルに適用できると考えられる。

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用いられた。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、HTS コイルに適用できると考えられる。

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