

【水素・超電導コンプレックス】

2023年10月5日

【エグゼクティブサマリ】

1. 本プロジェクトの基本的な考え方

カーボンニュートラルに向け、水素の多様な活用が検討されているが、液体水素の冷熱の有効活用についても検討を進めるべきと考える。

液体水素冷熱と相性のよい高温超電導を利用し、新しい超電導の利用（例：高温超電導発電機による再エネ広域連系、カーボンニュートラルのための産業応用等）をもとにした水素・超電導コンプレックスが核となり、エネルギー、物流・交通、情報、人流等を含めた将来のネットワークを構築する社会像を提案する。

このような液体水素を利用した大規模な超電導応用は、海外ではまだ本格検討されておらず、他国に先駆けて実用化することで、国際競争力強化に資すると考える。

温室効果ガス削減ポテンシャル（最大値）を約 1 億トン/年（2050 年）と試算し、経済効果についても最終報告に向け試算を進めており、カーボンニュートラルおよび産業競争力の強化に大きく貢献すると考える。

2. 検討の視点と範囲

昨年度の検討を踏まえ、水素・超電導コンプレックスによる成長シナリオと開発シナリオを検討した。各検討の視点と範囲を下表にまとめる。検討の範囲に核融合を含めてはいないが、本提案の共通技術は、核融合スタートアップの開発にも多くを適用可能である。

検討タスク	検討の視点	検討の範囲
成長シナリオ策定	・ 産業競争力強化 ・ 水素関連産業との連携 ・ 2050年のあるべき社会の姿	・ 液体水素冷熱を活用した超電導を利活用する社会インフラ
開発シナリオ策定	・ 社会実装を見通した全体整合 ・ 成長シナリオ実現の枠組案	・ 対象はタスクフォースAが検討する成長シナリオ ・ 協調領域の取組範囲内で検討

3. 検討結果

（1）成長シナリオ策定

水素と電力の相補的なエネルギーをベースとしたエネルギーシステムが構築されるとともに、液体水素集積地で超電導の新たな利用（※）が進み、集積地をノードとしたエネルギー・物流・交通・情報・人流の新しいネットワークを構築する 2050 年の社会像を描いた。（図 1）

（※）新たな利用例

＜エネルギー分野＞広域連系用発電機

＜物流・交通分野＞モータ、水素タンク用装置等、

＜産業分野＞誘導加熱、電磁攪拌、モータ等

＜情報分野＞超電導コンピュータ、量子コンピュータ等

cf 新たな応用に加え、従来の超電導応用（医療向け等）の高度化にも液体水素冷熱は貢献

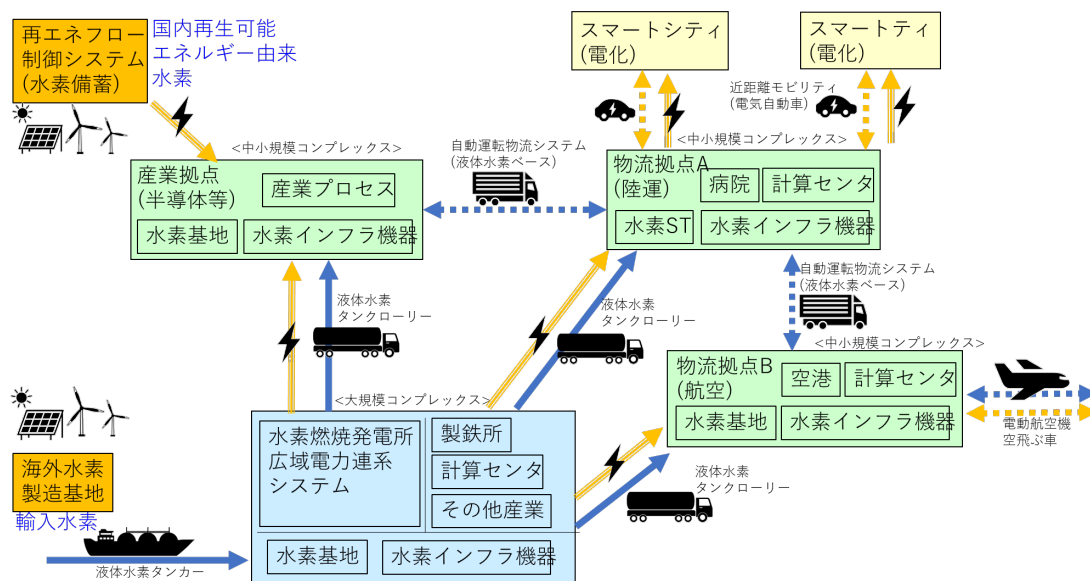


図1 液体水素と電力をベースとしたエネルギーと物流網の将来像

(2) 開発シナリオ策定

「液体水素取扱技術」および「水素冷却超電導技術」に重点注力して小規模実証し、プラント実証を経て社会実装につなげるロードマップを描いた。(図2) また開発加速のため国立研究機関に試験環境を整備して進めるシナリオを検討した。

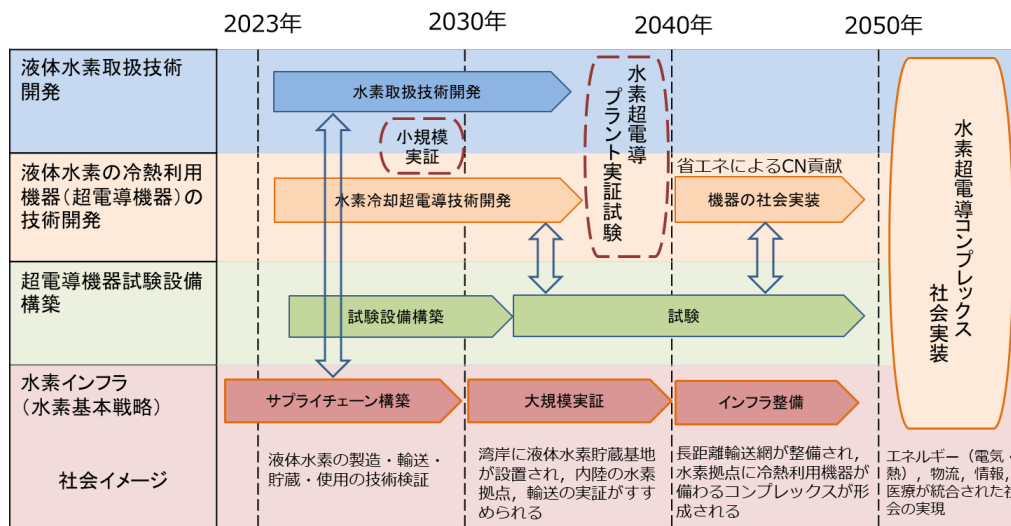


図2 開発ロードマップ

4. 産業競争力強化のための提言および施策(案)

最終報告に向けて以下を検討中であり、最終報告にてまとめる。

(1) 提言(案)

- ・カーボンニュートラルに向けて、国として積極的な液体水素の冷熱利用を検討すべきである。

- ・ 水素・超電導コンプレックスによる成長を目指し、液体水素冷熱の利活用の仕組みの検討、必要となる技術開発・開発環境整備、法規制対応等への対応において、国も積極的に支援して社会実装を進めることが望ましい。
- ・ 産官学が連携し、中長期視野に立った人材育成の機会を創出し、核融合を含む長期的な超電導のニーズを積極的に発信することが望ましい。

（２）施策（案）

- ・ 業界をまたいで液体水素の冷熱を利活用する仕組みを国や自治体とも連携して検討できる枠組を設置する。
- ・ 産学連携の国プロと、個別企業における技術開発を並行して基本技術の確立を加速し、国立研究機関を活用して実証を進め、実用化、社会実装を加速する。
- ・ 人材育成機会の創出のため、他分野での取組（例：原子力分野の人材ネットワークの取組等）を参照し、効果的な取組については取り込むとともに、業界の魅力を様々な機会を活用して積極的に情報発信する。

（３）官民の分担（案）

民は、水素・超電導コンプレックスが産業競争力強化とカーボンニュートラルに資するような冷熱の利用方法および魅力的なエコシステムを構築すること、および産官学連携による人材育成機会創出を進めることが望ましい。官は、液体水素冷熱の利活用の仕組み検討/技術開発・開発環境整備/法規制対応/人材育成機会創出における枠組づくりと経済面で協力することが望ましい。

５． 最終報告に向けた課題

最終報告に向けた主な課題を以下にまとめる。

- ・ 水素・超電導コンプレックスにおける液体水素冷熱を分配する仕組みの検討
- ・ 水素・超電導コンプレックスにおける超電導機器の経済合理性獲得のための要求定量化および経済効果の評価
- ・ 開発シナリオにおける協調領域と競争領域の各活動の整理
- ・ 開発シナリオにおける開発の枠組みの検討
- ・ プロジェクト終了後（今年度末予定）の推進の在り方の検討

以上

【目 次】

1. プロジェクトの背景と目的	5
1. 1. プロジェクトの背景.....	5
1. 2. プロジェクトの目的.....	7
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. 検討領域.....	9
3. 2. 基本コンセプト	9
3. 2. 1. 基本的な考え方	9
3. 2. 2. 水素・超電導コンプレックスの形態	11
3. 2. 3. 水素・超電導コンプレックスを核として形成される社会像.....	11
3. 2. 4. 産業分野のカーボンニュートラルへの超電導の貢献	13
3. 2. 5. 電力・エネルギー分野のカーボンニュートラルへの超電導の貢献.....	14
3. 2. 6. 液体水素冷熱の利用形態	14
4. 開発シナリオ策定	16
4. 1. 検討領域.....	16
4. 2. 開発シナリオ検討	16
4. 2. 1. 開発ロードマップ	16
4. 2. 2. 技術開発アイテム	17
4. 2. 3. 水素冷却超電導機器試験設備	19
4. 2. 4. 開発推進者（案）	19
5. 産業競争力強化のための提言および施策	20
6. 最終報告に向けた検討上の課題と展開	21

【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	TFB リーダー	三菱電機株式会社	野元 一宏
4	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	下之園 勉
5	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	稲富 誉也
6	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	高山 茂貴
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	東芝エネルギーシステムズ株式会社	高見 正平
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	三菱電機株式会社	高口 雄介
15	メンバー	三菱電機株式会社	殿岡 俊
16	メンバー	三菱電機株式会社	小笠原 敦
17	メンバー	株式会社日立製作所	安藤 竜弥
18	メンバー	株式会社日立製作所	田中 秀樹
19	メンバー	株式会社日立製作所	青木 学
20	メンバー	古河電気工業株式会社	中崎 竜介
21	メンバー	古河電気工業株式会社	手嶋 雄太
22	メンバー	古河電気工業株式会社	中尾 健吾
23	メンバー	株式会社フジクラ	大保 雅載
24	メンバー	岩谷産業株式会社	辻上 博司
25	メンバー	住友電気工業株式会社	小林 慎一
26	メンバー	住友電気工業株式会社	永石 竜起
27	メンバー	鹿島建設株式会社	鷲尾 卓
28	メンバー	鹿島建設株式会社	間宮 尚
29	メンバー	国立大学法人 京都大学	雨宮 尚之
30	メンバー	国立大学法人 新潟大学	福井 聡
31	メンバー	国立大学法人 九州大学	宮崎 寛史
32	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
33	メンバー	学校法人 関西学院大学	大屋 正義
34	メンバー	国立大学法人 東京大学	寺尾 悠

35	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
36	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
37	メンバー	国立研究開発法人 物質・材料研究機構	菊池 章弘
38	メンバー	鉄道総合技術研究所	富田 優
39	アドバイザー	一般財団法人 電力中央研究所	秋田 調
40	アドバイザー	国立大学法人 東京大学	大崎 博之
41	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
42	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
43	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
44	アドバイザー	国立大学法人 東京工業大学	岡村 哲至
45	アドバイザー	公益社団法人 低温工学・超電導学会	林 和彦
46	オブザーバー	三菱電機株式会社	畑 寛一
47	オブザーバー	キヤノン株式会社	古川 靖之
48	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
49	オブザーバー	株式会社日立製作所	仙波 智行
50	オブザーバー	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	古瀬 充穂
51	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
52	オブザーバー	国立研究開発法人 理化学研究所	小野 通隆
53	オブザーバー	富士通株式会社	田中 裕也
54	オブザーバー	富士通株式会社	吉川 博和
55	オブザーバー	富士電機株式会社	白川 正広
56	オブザーバー	富士電機株式会社	片桐 源一
57	オブザーバー	富士電機株式会社	平林 俊一
58	COCN 担当実行委員	株式会社東芝	斉藤 史郎
59	COCN 担当実行委員	鹿島建設株式会社	森山 善範
60	COCN 担当企画小委員	三菱電機株式会社	金枝上 敦史
61	COCN 担当企画小委員	トヨタ自動車株式会社	佐藤 桂樹
62	COCN 企画小委員	富士通株式会社	今泉 延弘
63	COCN 企画小委員	株式会社日立製作所	菊地 達朗
64	COCN 事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	山口 雅彦
65	COCN 副事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	土肥 秀幸
66	COCN 副事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	五日市 敦

67	COCN 副事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	武田 安司
68	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、液体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。

現在、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）等が検討されているが、アンモニアとMCHは水素化・脱水素化反応のためのエネルギーが必要である。液化水素は極低温であるために蒸発するといったデメリットがあるが、他のキャリアと違って冷熱のエネルギーも持っているため、この冷熱も活用することが出来る。この冷熱を超電導が活用することで、液化水素と高温超電導を組み合わせた新しい価値を提供することができる。

現在、実用化されている超電導応用製品例（一部計画含む）を表1-1に纏める。このうち最大市場であるMRI磁石の領域では、海外企業がシェアの大半を占める状況になっている。主な要因としては、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、その結果、最終顧客への訴求が不足したこと等が考えられる。

また我が国では、電力機器の超電導化を目指し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ず、経済合理性がないと判断されたためであろうと考えられる。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が進みにくい状況になっている。

一方で、米国、欧州、日本を含め世界的に核融合スタートアップへの資金提供があり、2021年単年で世界では5000億円超、今年9月にはUKでは新たな1000億円以上の政府予算が付くなど活発な動きがある。特に高温超電導コイルは核融合プラント実現に対する要となる技術である。また欧州では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も計画されつつあり、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。

今後、2050年のカーボンニュートラルに向けて色々な検討が進む中で、液体水素の冷熱利用が考えられるようになると、世界各国で液体水素の冷熱を利用した新しい超電導応用の検討が必ず加速されるものと考えられる。

これら状況をふまえ、国内の超電導に関する産業は、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状況にあると危惧されることから、2050年における水素社会で超電導が利用される将来像を他国に先駆けて描き、成長シナリオおよび開発シナリオを検討することとした。

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

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。

※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.4/27

※2: 欧州CONNECTUS <https://www.connectus.eu/market.html>

※3: 文部科学省、医用原子力技術研究開発財団、がん治療の最先端技術2019年度計画よりhttps://www.artsn.or.jp/05_treatment/info/ryuusisen-kanja_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」）

1. 2. プロジェクトの目的

昨年度に実施した「超電導が拓くカーボンニュートラル社会」プロジェクトでの検討結果をふまえ、カーボンニュートラルに貢献する水素冷熱を活用した新しい超電導応用を創出す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、超電導応用において、欧米・中国に対する国内産業の優位を構築することも目的とする。

2. 本プロジェクトの進め方

昨年度の検討では、2050年の将来の姿として、以下2つのコンセプトを柱とするビジョン（図2-1）を描き、想定される超電導応用機器や技術についての調査を実施した。

＜昨年度に検討した将来の姿における2つのコンセプト＞

- ① 広域再エネ連係構想（超電導再エネ制御フローシステム（仮称）による広域連系）
- ② 水素・超電導コンプレックス



図 2-1 昨年度に検討した広域再エネ連係構想と水素・超電導コンプレックス

前記①のコンセプト「広域再エネ連係構想」は、国内変動性再生エネルギーを最大源に活用し主力電源化した電力系統を構築することを目指し、インピーダンスの小さい超電導発電機の特性を利用した長距離・広域の電力連系によって電力需給のミスマッチを解消するとともに、余剰電力を水素に変換することによって短時間のみならず季節間エネルギー貯蔵をも可能とする構想である。

超電導発電機の導入により系統増強を最小限に抑えたまま、大量の変動性再生可能エネルギーの導入に対して系統の安定度を担保することがポイントであり、定量的効果の確認については専門的な検討が必要になることをふまえ、NEDO が今年度実施中の調査事業「水素冷熱を利用する超電導コンプレックスに関する調査」の中で検討されている結果を共有させていただき、定量的な効果を確認することを目指す。

前記②のコンセプト「水素・超電導コンプレックス」は、貯蔵液体水素を中心に水素活用産業やプラントを集約してコンプレックスを形成し、液体水素の冷熱とそれを利用した超電導の活用によってエネルギー利用効率の改善や付加価値を生み出すことを目指す構想である。

本プロジェクトでは、今年度の活動として、表 2-1 に示す 2 つの産学連携タスクフォースを新たに組成して検討を進める。なお、検討の範囲に核融合を含めてはいないが、本提案の共通技術は、核融合スタートアップの開発にも多くを適用可能である。

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 ・水素関連産業との連携（省エネ、低炭素化、カーボンニュートラル） ・2050 年のあるべき社会の姿	・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
＜TF-B＞ 開発シナリオ策定	・社会実装まで見通した全体整合 ・成長シナリオの実現に向けた枠組案（スコープ、体制、期間）	・対象は＜TF-A＞が検討する成長シナリオ ・協調領域の取組範囲内で検討

3. 成長シナリオ策定

3. 1. 検討領域

タスクフォース A では「水素・超電導コンプレックス」を重点的に検討する。検討の範囲、視点について以下に示すが、単なる産業プロセスの集合体としてのコンプレックスの在り方ばかりではなく、水素・超電導コンプレックスを核とした 2050 年の社会像についても検討する。

<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

<検討の視点>

- ・産業競争力強化
- ・水素関連産業との連携（省エネルギー、低炭素化、カーボンニュートラル）
- ・2050 年のあるべき社会の姿

3. 2. 基本コンセプト

産業競争力強化には、社会経済活動の基盤となるエネルギーシステムおよび革新的な物流システムの確立が欠かせないとする。各システムに関する基本コンセプトおよび水素と超電導のシナジーが創出する新たなシステムに関する基本コンセプトを以下にまとめる。

3. 2. 1. 基本的な考え方

（1）広域再エネ連系構想

2050 年のカーボンニュートラル社会では再生可能エネルギーの主力電源化が検討されており、発電量が大きく変動する再生可能エネルギーを受け入れるために電力需給平準化および系統安定化を行うための様々な施策が必要になる。これについては、昨年度に提案した広域再エネ連系構想が効果的なソリューションになると考えている。定量効果を NEDO 調査研究にて検討いただくことから、ここでは深掘しないが、この構想では、短期間の電力需給アンバランスのギャップを埋めることに加え、季節間エネルギー貯蔵や、エネルギー安全保障の観点からの有事向けのエネルギー貯蔵に水素を利用することをコンセプトにしている。今年度の検討では、液体水素による短期および季節間エネルギー貯蔵と、MCH による有事向けエネルギー貯蔵とを組み合わせることが合理的な構成になることを新たに確認した。

<cf 今年度検討概要>

- ・液体水素貯蔵で 100 日分相当の電力を賄うには、液体水素のエネルギー密度が LNG の 40% であり、現在の LNG 備蓄量は 2 週間分であることを踏まえると、LNG の現貯蔵スケールに対して 18 倍の容積が必要となる。
- ・2023 年 3 月の第 28 回水素・燃料電池戦略協議会の ENEOS 株式会社の資料によると MCH を既存石油タンク転用して貯蔵すれば水素 90 日分備蓄可能（2050 年時の年間水素使用量を 2000 万トンと仮定）とあり、有事向けの長期保管には MCH の採用が合理的である。

（２）新しいネットワークシステムの構築

カーボンニュートラルの観点、および物流の 2024 年問題の観点からも、物流システムは、大きな変革が必要になり、液体水素をベースとした長距離、大量輸送のための長距離輸送モビリティが活躍するようになると考えられる。この動きと連動し、自動運転システムおよび AI や IoT など組み合わせた最適化・効率化が進み、さらには交通や（１）で述べたエネルギーシステムの進化および人流もふくめた新しいネットワークシステム（エネルギー、物流、交通、情報、人流の新しいネットワーク）の構築が進むと考えられる。

モーダルシフトによって鉄道輸送や海運の比率は上がることになるが、長距離輸送の主力は長距離トラックであり、液体水素を積んだ燃料電池トラックによる高速道路を中心とした自動輸送ネットワークが構築される。ネットワークのノードとして液体水素貯蔵タンクを備えた物流拠点が全国に分布することになり、新しいネットワークシステムのひとつの拠点になっていくと考えられる。

（３）超電導と水素のシナジーが創出する新たな超電導の利用法

前述のようにエネルギーシステムおよび物流システムが確立されると国内全域に液体水素が分散して存在することになり、液体水素の冷熱利用により超電導がより使いやすいものになる。これまで、超電導の普及範囲は、冷却コストが負担となり、高磁場用途といった超電導が必須となる用途に限定されていたが、冷熱源と結合することで、新たな価値を貢献するようになると考えられる。

エネルギーシステムでは超電導発電機等の超電導電力機器、物流システム・モビリティ分野では、超電導モータ等を利用した新しいシステムが経済合理性をもってカーボンニュートラルに貢献するようになると期待できる。

超電導は磁場や電流で電磁気的な作用をもたらすことから、金属材料プロセスに対して親和性があり、製鉄や自動車向けアルミ部品製造などの産業プロセスにおいて省エネや素材の高性能化に寄与し、これら製造業における産業競争力強化への貢献も期待される。

さらに、液体水素利用拠点が遍在し、かつ、物流・交通等で拠点間連携がなされネットワークが構築されると、ネットワーク全体をリアルタイムで最適制御するような社会が生まれることが予想される。このネットワークには冷熱を活用した高速・低電力消費の超電導コンピュータや量子コンピュータが分散配置され、物流管理や自動運転などの物流システム全体がリアルタイム制御されるのに加え、リアルタイム交通制御や気象・災害予測、さらには事故や大規模災害発生時の復旧プロセスの最適な制御が行われることも期待される。

また、医療分野等の既存の超電導システムにおいても、水素冷熱を利用することで、より使い勝手のよいシステムとなり普及が後押しされると期待される。

超電導応用以外にも液体水素の冷熱を活用することにより CO₂ の分離回収や低温常電導ブスバー（ケーブル）による低損失化などでプロセスの高効率化や低炭素化につなげることもできる。

以上（１）（２）（３）で述べたように、液体水素の冷熱とそれを利用した超電導による水素・

超電導コンプレックスを、エネルギー、物流、交通、情報、人流等のネットワークを構成するように国内に配備することで、強靱で豊かな国の基礎を構築することができる。

3. 2. 2. 水素・超電導コンプレックスの形態

貯蔵液体水素を中心に水素活用産業やプラントが集約されることによって形成されるコンプレックスを規模で2つに大別し、それぞれ「大規模コンプレックス」と「中小規模コンプレックス」と呼ぶことにする。この2つのコンプレックスによって、水素と電力の2つのエネルギーを備え、物流・交通・情報が連携された社会が構築されと考えられる。2つの形態について説明する。

(1) 大規模コンプレックス

カーボンニュートラル社会では一次エネルギーとしての化石燃料は水素に転換されており、国内の再エネ電力価格が高いことから製造コストの安い海外から水素が輸入されることとなる。海外からの輸入水素は臨海地区に陸揚げされ、そのエリアには、川崎カーボンニュートラルコンビナートやカーボンニュートラルポートのように、水素利用量の多い産業が集積されと考えられる。さらに発電事業用の水素利用が増えると、発電所を中心としたコンプレックスの建設も進むと考えられる。これらの大規模コンプレックスは、2種類のエネルギー、すなわち電力と（液体）水素を国内に分配する供給源の位置づけとなる。輸入水素の形態としては液体水素を想定しているが、デメリットとされる水素液化コストは冷熱多段階活用および超電導の導入による付加価値によって回収される。

発電所が中心となる大規模コンプレックスは、現行の LNG 火力発電をリプレイスする形で形成が進むと想定され、現在の LNG 基地がその候補地となる。水素・超電導コンプレックスでは液体水素の冷熱を活用することによりコンプレックス全体としてのエネルギー効率を改善するが、その冷熱利用は LNG の冷熱利用をさらに発展させた形となる。

(2) 中小規模コンプレックス

中小規模コンプレックスは水素需要家（水素利用者）の液体水素貯蔵槽を中心として構成されるコンプレックスであって、水素モビリティのためのインフラ・拠点であり、グリーンな物流網を形成するために国土全体をカバーするように設置されるものである。水素ステーションのような小規模なものから物流拠点となる大型施設など様々な形態があり、そこでの水素使用量に応じて液体水素が集積・備蓄され、液体水素は主に臨海地区の大規模コンプレックスから液体水素ローリーで輸送される。発電所を中心として臨海地区に形成される大規模コンプレックスに対し、中小規模コンプレックスは後述するように物流・交通や情報（データ）のネットワークの結節点としての役割を持つこととなる。

3. 2. 3. 水素・超電導コンプレックスを核として形成される社会像

2050 年における社会の姿は、水素と電力の相補的なエネルギーをベースとしたエネルギーシステムが構築されるとともに、液体水素集積地をノードとした物流・交通ネットワークが構築され

るものになると考える（図 3-1）。

水素はエネルギー貯蔵できるが長距離・遠方に対してエネルギー供給が難しい形態のエネルギーであり、電力はその反対で貯蔵は難しいが長距離・遠方に対して瞬間的に供給が可能である。前者は時間的なエネルギー需給ギャップを埋めるものであり、後者は空間的なギャップを埋めることができる。電力から液体水素への変換は水電解そして液化によって行われ、液体水素から電力への変換は発電（燃料電池含む）によって行われる。

物流業界における低炭素化では鉄道や海運などへのモーダルシフトが進むものの主力は長距離トラック輸送であり、長距離貨物輸送のための自動走行物流システムが構築されることになると考えられる。長距離輸送のために 1 回の燃料充填で 1000km 以上の走行を可能とする液体水素搭載の FC トラックが物流の主役を担うこととなり、各地に液体水素ステーションを備える物流拠点が生まれることとなる。日本国内の高規格幹線道路は約 14000km であり、例えば航続距離 1000km に対して 200km おきに拠点を配置することにすれば 70 箇所、さらに産業集積地、水産業集積地にも拠点整備することにすれば 100~200 箇所のオーダーで日本国内に拠点が整備される。物流プロセスにおいては自動走行、交通制御といった輸送に直接関わる部分だけではなく荷下ろし、搬送、仕分けなどあらゆるプロセスが自動化された物流拠点（大型倉庫）がコンピュータによって運用・制御されるようになる。

高度な制御やリアルタイム制御を行うためにコンピュータが拠点到に配備されることになる。近年、計算処理量に増加に伴い電力消費量は増大の一途をたどり、コンピュータの世界においても省エネが必要であり消費電力あたりの処理能力が性能指標の一つとなっている。低損失で高速な超電導コンピューティングが検討されているが、SFQ（単一磁束量子回路）を利用した深層学習向けニューラルネットワーク処理エンジンである SFNuro（九州大学 井上弘士教授）では、従来半導体技術を用いたチップに対し消費電力あたりの計算速度が 2 桁増加することが期待されている。SFQ 回路を低損失で高速に動作させるためには 20K より低い領域、たとえば 4K で動作させることが必要であるが、水素・超電導コンプレックスでは液体水素の冷熱を利用して冷凍機によってさらに低温の環境を得ることができることから、単独で冷凍機を利用した超電導コンピュータを導入するのに比べ、冷熱利用の対価を冷熱供給者に支払う必要はあるものの、冷却コストを大幅に低減することができる可能性がある。また量子コンピュータの導入時においても同様に冷却コストを低減できると考える。

全国に配置された超電導コンピュータや量子コンピュータは拠点もしくは拠点周辺エリアの社会制御を行うばかりではなく、互いに連携することによって日本の国土全域にわたる大規模な気象や災害予測、自動運転や渋滞緩和を行う交通システムや大規模災害発生時の対応などの社会制御を担う。このように水素・超電導コンプレックスが有機的に結合された社会インフラにより、エネルギー、物流・交通、情報のネットワークが構築でき、単なる水素・電化社会よりさらに高度な社会を実現することが可能となる。

液体水素冷熱はエネルギー、物流、産業分野への超電導導入のみならず超電導医療装置の普及も後押しすることになる。これまでの医療装置（MRI や粒子線治療装置）の他、標的 α 線治療用の放射性核種（例えば ^{211}At 。半減期 7.2 時間）を生成するための超電導加速器などの導入が考えられ

る。水素・超電導コンプレックスは先端医療も提供することとなり、周辺には近距離モビリティ（EV 車等）で行き来する生活圏（スマートシティ）が形成されることとなる。

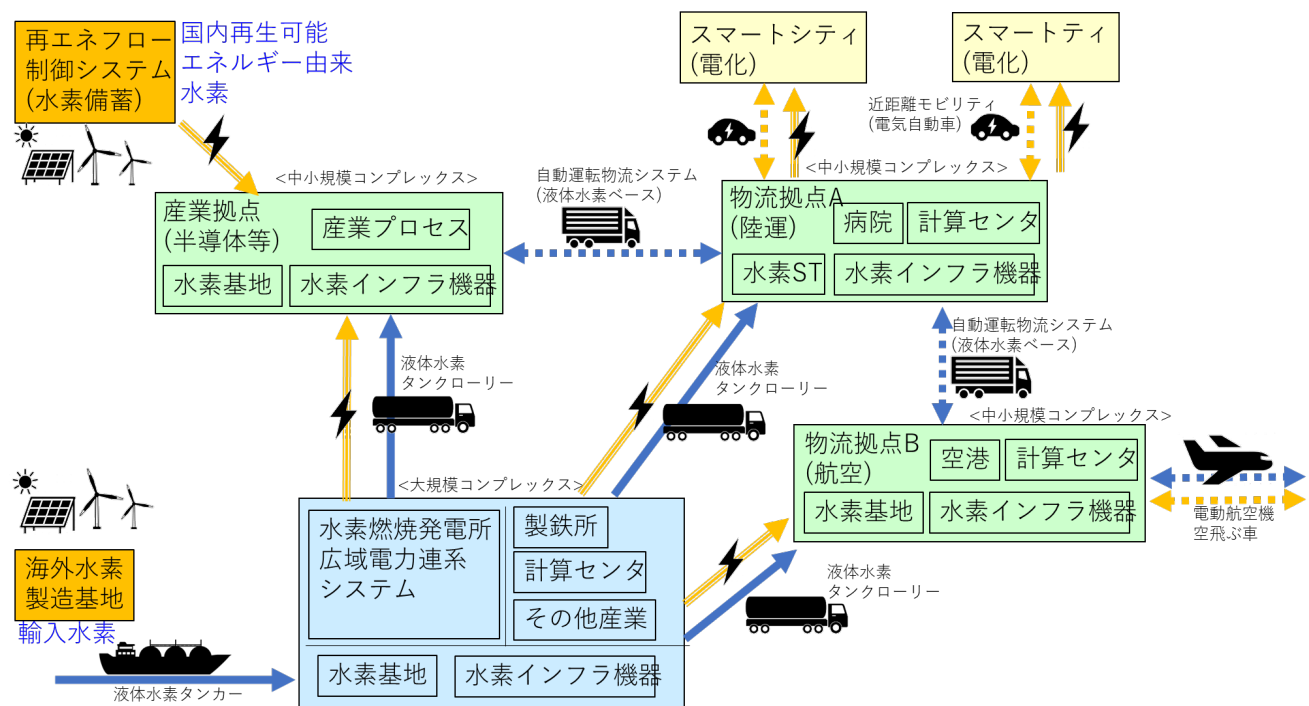


図 3-1 液体水素と電力をベースとしたエネルギーと物流網の概念

3. 2. 4. 産業分野のカーボンニュートラルへの超電導の貢献

水素社会では、適切な対価で液体水素の冷熱が利用できることを想定する。これまで超電導は冷却コストが負担になり、超電導でなければ実現・達成できない領域（たとえば高磁場発生用途、MRI、NMR、半導体引き上げ用磁石など）に普及範囲は限定されていた。冷却コストが下がり、さらに超電導機器の初期冷却や昇温後の再冷却のための冷熱をふんだんに利用できる環境になると、超電導機器導入の経済合理性が得られ、これまで実現・達成できていなかった領域においても超電導利用が促進されると期待される。

超電導が提供するものは磁場（大空間もしくは強磁場）と大電流であり、電磁氣的に作用をおよぼす金属材料に関わる産業プロセスにおいてその活用が期待できる。たとえば、製鉄産業は水素需要家であることから原料として購入した液体水素の冷熱を自家消費（活用）することが可能であり、製鉄産業向け超電導の活用としては以下のようなものが考えられる。

- ① 低損失・大電流ブスバー： 大電流用途、一般用途の電流ケーブルの省エネ
- ② 誘導加熱装置（熱源としての利用）： 高効率ヒータ、非加熱物の内部から加熱可能
- ③ 超電導モータ： 低損失、大トルクモータ
- ④ 電源安定化： 外部に対する電圧変動抑制（負荷変動補償 SMES）

⑤ 電磁力： 電磁誘導を利用した非接触物体制御（圧延プロセスでの蛇行制御）、電磁攪拌

また、超電導ケーブルを使わずとも 80K (−193℃) まで冷却すれば銅の抵抗率は常温の 1/4、90K (−183℃) まで冷却すれば 1/3 になるため、常電導ケーブルでも余剰冷熱を利用して温度を下げることで省エネに貢献する。

3. 2. 5. 電力・エネルギー分野のカーボンニュートラルへの超電導の貢献

昨年度の検討において、超電導発電機を利用した超電導再エネフロー制御システム（仮称）で構成する広域再エネ連系構想を実現できると、石炭火力電源や調整火力電源を削減することが可能となり、これによる CO2 削減ポテンシャル（最大値）として、それぞれ以下のように試算した。なお、超電導再エネフロー制御システム（仮称）の効果は、今年度の NEDO 調査研究のなかで定量的に評価される計画である。

＜広域再エネ連系構想にもとづく CO2 削減ポテンシャル（最大値）＞

①化石燃料の削減効果による CO2 削減ポテンシャル（最大値）

0.30 億 ton/年 （国内、2050 年）

②調整火力電源の削減効果による CO2 削減ポテンシャル（最大値）

0.67 億 ton/年 （国内、2050 年）

3. 2. 6. 液体水素冷熱の利用形態

液体水素冷熱の利用形態は、液体水素の浸漬冷却もしくは蒸発水素ガスを利用した直接利用方式と、液体水素もしくは蒸発水素ガスの冷熱を熱交換器で他の冷媒に移し替えて利用する間接利用方式の 2 通りが考えられる。

（1）直接利用方式

直接利用方式では水素は冷熱利用機器を流れることになるため、冷熱利用機器は液体水素貯蔵タンクや液体水素輸送パイプの一部として設計、インストールされることになり、コンプレックス建設の初期段階から液体水素設備と同時に建設されることになる。このような冷熱直接利用の形態の機器は、たとえば超電導発電機や超電導磁気エネルギー貯蔵装置（SMES）など大型の超電導装置であって水素・超電導コンプレックスの基幹装置になるものと考えられる。

（2）間接利用方式

間接利用方式では熱交換器を介して冷熱は取り出すものの水素自体は取り出さない。水素ガス需要家にとって必要なのは原料、燃料としての常温の水素ガスであって、貯蔵もしくは輸送の便宜上液体水素の形態となっているにすぎない。したがって、水素ガスは液体水素を気化して昇温して常温に戻してから利用される。図 3-2 に液体水素冷熱の間接利用方式の概念図を示す。図中の液体水素貯蔵槽に熱交換器を設置して冷熱を取り出す形態も考えられるが、液体水素貯蔵槽は長期間の液体水素貯蔵を可能とするように侵入熱量を抑えてボイルオフガスを発生させないよう

にするのが一般的であり、この形態を取ることは稀と考えられる。熱交換器は熱が侵入しても良い箇所もしくは積極的に熱を導入する気化器や昇温器のところに設置されることになる。

液体水素もしくは水素ガス配管に近接させて冷熱利用機器を利用する場合には、熱交換器から引き出された冷熱を固体伝導のかたちで利用することも考えられるが、コンプレックス域内で広く冷熱を利用するために冷熱をヘリウムガスなどの不活性ガス冷媒に移し替えた上で断熱輸送管を通じて域内に循環させることによって冷熱を配分し、冷熱利用ユーザは断熱輸送管に適切なアタッチメントをつけて冷熱を取り出して利用することになると考えられる。冷熱の温度に応じて冷媒は 1) ヘリウムガス (30K~60K)、2) 液体窒素 (64K~77K)、3) 窒素ガス (80K~) が利用される。直接利用方式とは異なり間接利用方式では、冷熱利用機器と液体水素のラインは別個であるため、同時にインストールされる必要はないが、熱交換器容量や冷熱分配用の冷熱配管についてはコンプレックス建設の計画段階から予め計画しておくことが必要である。

超電導機器は運転温度が低い方ほど性能が上がるため経済合理性で許される範囲で温度を下げて利用される。水素の沸点は約 20K であり間接方式で熱交換して冷熱を利用すると 20K より高い温度環境しか得られない。20K よりも低い温度環境をつくるためには液体水素の冷熱源を排熱先とする冷凍機の導入が効果的となる。現在、超電導装置用小型冷凍機としてGM冷凍機が広く使われているが、磁気冷凍の利用によりこれよりも高効率で冷熱を得ることも期待される。

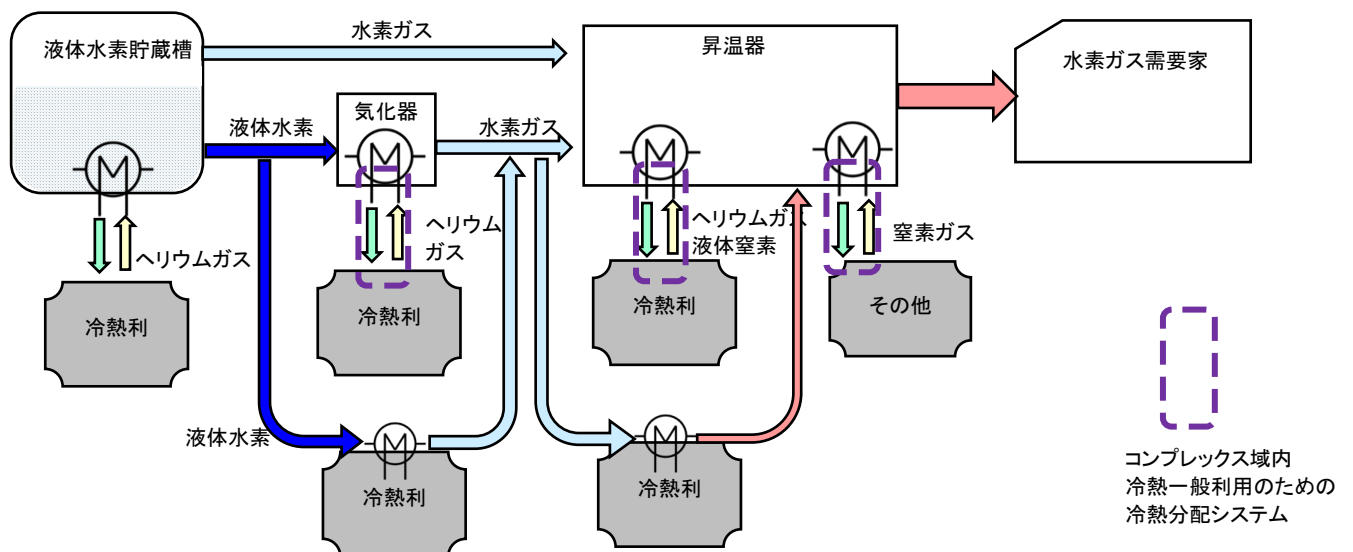


図 3-2 液体水素冷熱の間接利用方式の概念図

4. 開発シナリオ策定

4. 1. 検討領域

タスクフォース B では「水素・超電導コンプレックス」としてタスクフォース A が描く成長シナリオを実現するための開発シナリオを検討する。

<検討範囲>

- ・対象はタスクフォース A が検討する成長シナリオ
- ・協調領域の取組範囲内で検討

<検討の視点>

- ・社会実装まで見通した全体整合
- ・成長シナリオの実現に向けた枠組案（スコープ、体制、期間）

4. 2. 開発シナリオ検討

4. 2. 1. 開発ロードマップ

図 4-1 に開発ロードマップを示す。「液体水素取扱技術」および「水素冷却超電導技術」を小規模実証等により確立し、水素インフラが拡大整備される 2040 年代の前段階の 2035 年にプラントレベルでの液体水素を用いた冷熱利用機器（超電導機器）の「水素超電導プラント実証試験」（大規模実証）を行うことで、その後の社会実装につなげるロードマップを考えた。

超電導機器の試験には、冷却・冷凍設備の他、通電のための電源設備が必要であり、個別企業が技術開発に合わせて試験環境を用意することは、開発期間や費用面での課題が大きい。それ故、液体ヘリウムの冷却設備や試験用電源を保有する国立研究機関に、液体水素の冷却設備を追加配備し、液体水素の冷熱を利用する超電導機器のための共通試験設備を導入して進めることが合理的と考える。

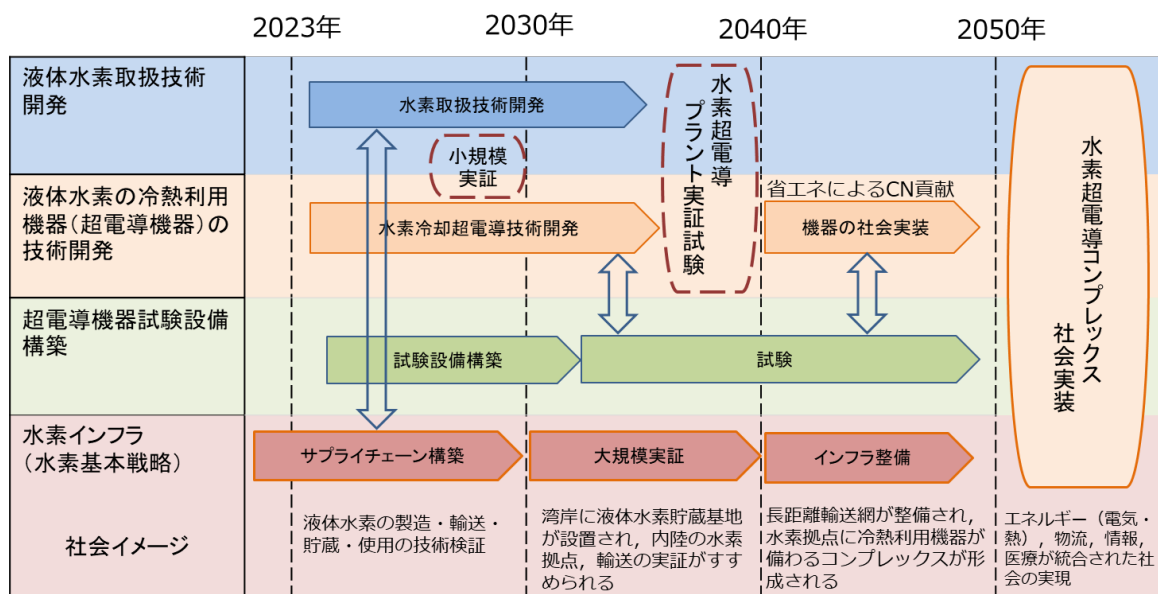


図 4-1. 開発ロードマップ

4. 2. 2. 技術開発アイテム

図 4-2 に 2035 年頃に計画する水素超電導プラント実証に向けた開発アイテムを示す。

技術開発は「液体水素取扱技術開発」と「水素冷却超電導技術開発」の 2 本柱で構成され、「水素超電導プラント実証試験」でプラント全体での冷熱活用を検証することを想定する。システム構成や必要となる水素量については試験計画の策定、要求仕様の定量化が必要である。

以下に「液体水素取扱技術開発」、「水素冷却超電導技術開発」、「共通技術」についてまとめる。

(1) 液体水素取扱技術開発

サブマージドモータとして LNG (−162 °C) や LN2 (−196 °C) 用のモータは既に製品化されているが、液体水素 (−253 °C) 向けのモータは製品化されておらず、今後の実用化が必要である。また、冷熱の取出しインターフェースも国際競争力を保持するため、積極的な規格化推進、国際アピールが必要である。液体水素は高圧ガス保安法の対象となっているため水素に関する国際規格の動向を踏まえた法規制への対応が必要である。

(2) 水素冷却超電導技術開発

コイルの大電流化のためには超電導線材を集合導体化する必要がある、交流損失による発熱を減らす、冷却能力を増やすといった開発が必要となる。冷却方式も浸漬方式/強制方式/間接方式と様々な構造が考えられ、集合導体やコイル形状、運転条件におけるコイル保護性等も考慮した機器毎にターゲットを定めた開発が必要となる。またそれら技術のベースとなる共通技術を以下に引用する。(詳細は昨年度の「超電導が拓くカーボンニュートラル社会」報告書を参照)

これらの共通技術の多くは、高温超電導を用いた小型核融合炉を開発する場合にも共通となる要素となる。

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。現在、特に研究開発が活発なのは、RE123 薄膜テープ線材と MgB2 多心線材であるが、前者については量産・低コスト化、後者については磁界中臨界電流向上の成果が得られている。

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である一方、多くの電気機器でより大きな電流が必要となるので、線材を集合した集合導体へのニーズは高い。断面が円形の Bi2212 多心線材、MgB2 多心線材は矩形導体やラザフォードケーブルのような集合導体を原理的に構成し易いが、いずれの線材も適切な熱処理に技術開発の余地がある。Bi2223 多心テープ線材と RE123

薄膜テープ線材はテープ形状が線材の集合化を難しくしているが、RE123 薄膜テープ線材については、スパイラル導体、Roebel（ロエベル）ケーブルなどが研究開発の途上にあり、日本発の技術の研究開発が求められる。

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は、テープ形状が原因で、多様な形状の巻線が難しい。Bi2212 多心線材、MgB2 多心線材は断面が円形なため多様な巻線形状に対応し易い一方、熱処理が必要な点が短所である。クエンチに対しての耐性を高めることも重要なコイル化技術であり、無絶縁・金属絶縁コイルなどが開発されているが、励磁速度が速いコイルや蓄積エネルギーが大きいコイルへの適用についてはまだ課題が多い。集合導体のコイル化技術は、集合導体の機械的特性も考慮する必要がある、今後の研究開発が必要な技術である。

④冷却技術

高温超伝導応用においては、液体ヘリウムや液体窒素による浸漬冷却のほか、液体温度が高いことから小型冷凍機による伝導冷却も積極的に適用されているが、大型コイルの冷却は難しい。液体・気体に関わらずなんらかの冷媒を用いた、液体ヘリウム温度 4.2 K から液体窒素温度 77 K の間の、高温超伝導のメリットが出しやすい領域における冷却技術の開発が求められる。

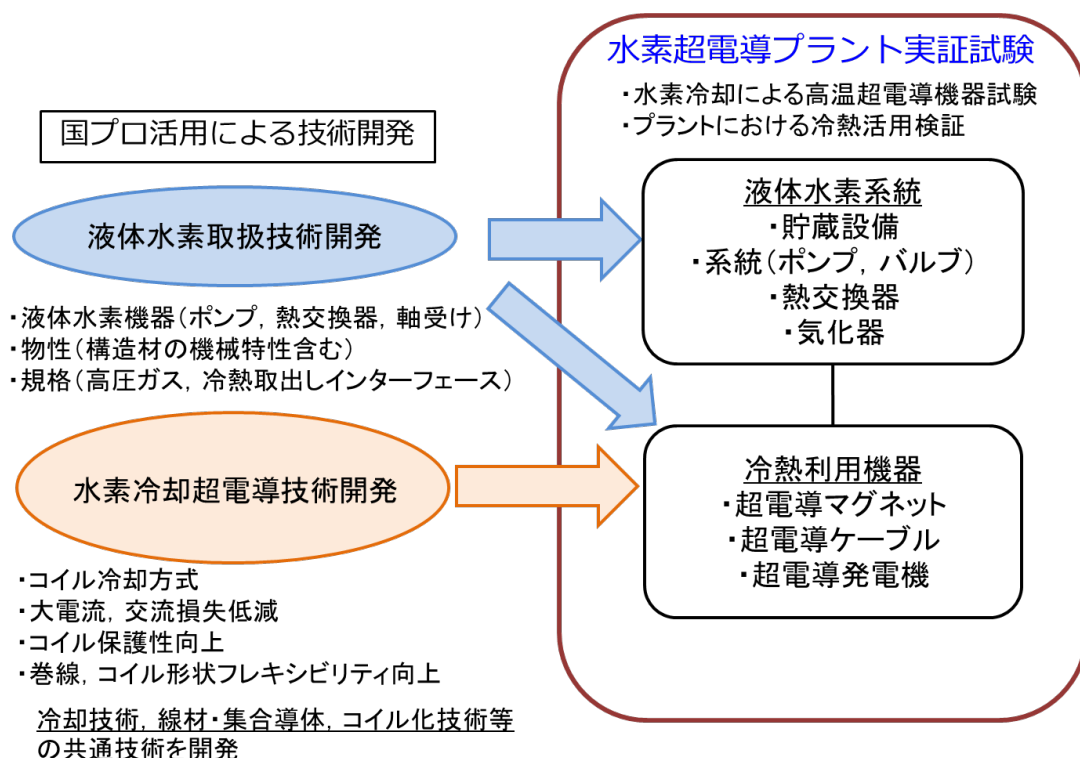


図 4-2. 開発アイテム

4. 2. 3. 水素冷却超電導機器試験設備

図 4-3 に超電導機器試験設備の構想を示す。冷却用のクライオスタットに加えて、液体水素の供給設備、通電のための電源設備から構成される。共通試験設備を国内に持つことで超電導技術の国際的優位性を保ち、開発スケジュールを短縮できる等のメリットが得られる。

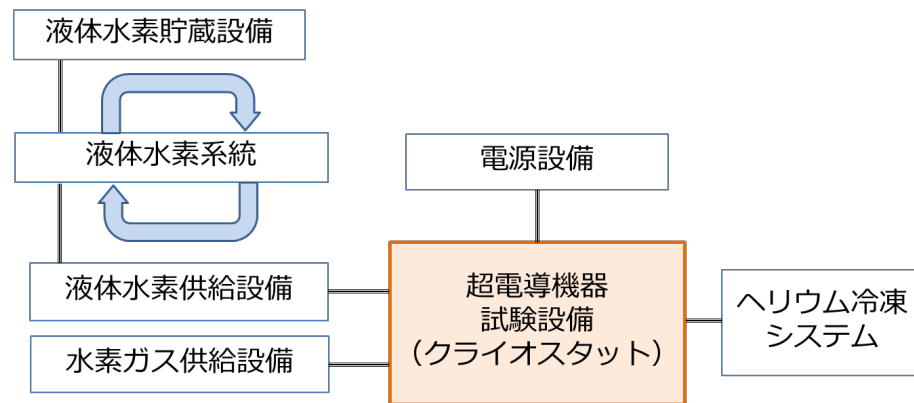


図 4-3. 水素冷却超電導機器試験設備

4. 2. 4. 開発推進者（案）

表 4-1 に開発項目ごとの開発推進者（案）を示す。

表 4-1. 開発の推進者（案）

開発項目	推進者
液体水素取扱技術開発	冷凍機器メーカー 重工業メーカー 大学, 研究所 水素団体
水素冷却超電導技術開発	冷凍機器メーカー 超電導線材メーカー 超電導マグネットメーカー 大学, 研究所
水素冷却超電導機器試験設備	大学, 研究所
水素超電導プラント実証試験	水素, 超電導（線材、マグネット）, 冷凍コンソーシアム 大学, 研究所 自治体

5. 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）においては、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%に留まっている。カーボンニュートラル社会では、水素の輸送/貯蔵において液化に要したエネルギーを最大限に回収できるように、液体水素冷熱の利用をあらかじめ計画してインフラ構築を進めるのが望ましい。カーボンニュートラルに向けて、国として積極的な液体水素の冷熱利用を検討すべきであると提言する。

本プロジェクトは、産業競争力強化のための施策として、液体水素の冷熱とそれを利用した超電導による水素・超電導コンプレックスを、エネルギー、物流・交通、情報等のネットワークを構成するように国内に広く配備することを提案する。

水素・超電導コンプレックスの実現には、水素冷熱の分配や活用の仕組みの確立、技術開発や開発環境の整備、水素に関する国際規格の動向を踏まえた法規制への対応、等が必要であり、それらは今後の議論となるが、個別企業のモチベーションだけでは推進が困難と想定され、国の後押しが必要と考える。これを踏まえて、

水素・超電導コンプレックスによる成長を目指し、液体水素冷熱の利活用の仕組みの検討、必要となる技術開発・開発環境整備、法規制対応等への対応において、国も積極的に支援して社会実装を進めることが望ましいと提言する。

そのための施策として、業界をまたいで液体水素の冷熱を利活用する仕組みを国や自治体とも連携して検討できる枠組を設置すること、また産学連携の国プロと、個別企業における技術開発を並行して基本技術の確立を加速し、国立研究機関を活用して実証を進め、実用化、社会実装を加速することを提案する。

上記を推進するためには人材育成も課題となる。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にある。多くの人材に魅力を感じてもらえる新しい事業を数多く創出し、様々な機会を活用して魅力を発信し、人材を集め、育成していく必要がある。これを踏まえ、

産官学が連携して中長期視野に立った人材育成の機会を創出し、核融合を含む長期的な超電導のニーズを積極的に発信することを提言する。

そのための施策として、原子力分野の人材ネットワークの取組等、他分野での取組を参照し、効果的な取組については取り込むとともに、業界の魅力を様々な機会を活用して、積極的に情報発信していくことを提案する。

これらの推進にあたっては、民は、水素・超電導コンプレックスが産業競争力強化とカーボンニュートラルに資するような冷熱の利用方法および魅力的なエコシステムを構築すること、および産官学連携による人材育成機会創出を進めることが望ましい。官は、液体水素冷熱の利活用の仕組み検討/技術開発・開発環境整備/法規制対応/人材育成機会創出における枠組づくりと経済面で協力することが望ましい。

6. 最終報告に向けた検討上の課題と展開

最終報告に向けた検討上の課題と展開を以下にまとめる。

（１）水素・超電導コンプレックスにおける液体水素冷熱を分配する仕組案の検討

水素・超電導コンプレックスでは、誰が域内全体の最適設計し、誰が冷熱を分配するのかが不透明である。液体水素を大量購入する需要家もしくは水素供給者が、コンプレックスの主体になる場合を除くと、自治体や国の介入が必要になるケースがあることも想定され、また冷熱の提供者は、自身が水素購入時に負担した液化コストを回収すると想定されるが、冷熱価格が適正に設定されるには、市場機能が働くことが不可欠になる可能性も想定される。このため水素・超電導コンプレックスにおける液体水素冷熱を分配する仕組案の検討が課題である。

定量的な議論を可能とするために、いくつかのユースケースを想定・設定し、それらの経済合理性の評価を予定する。

（２）水素・超電導コンプレックスの経済効果の試算

水素・超電導コンプレックスを目指す成長シナリオにおいて、コンプレックスの経済効果の試算を課題としている。コンプレックスでの採用が期待される複数の超電導応用について、液体水素冷熱を利用した場合の経済合理性評価を含む検討が必要であり、そのための要求事項を含めた整理を予定する。

（３）今後の開発における協調領域活動と競争領域活動の整理

水素・超電導コンプレックスを目指す開発シナリオにおいて、協調領域として進めた方が良い活動と、競争領域において進めた方が良い活動の整理が課題である。これらの整理を予定する。

（４）開発シナリオにおける開発の枠組の提案

水素・超電導コンプレックスを目指す開発シナリオにおいて、開発の枠組みの検討を課題としており、これらの検討と整理を予定する。

（５）プロジェクト終了後（今年度末予定）の推進の在り方の検討

今年度末でのプロジェクト終了予定を踏まえ、今後の推進の在り方の整理を予定する。

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