

【産業競争力懇談会 2023年度 推進テーマプロジェクト 最終報告】

## 【水素・超電導コンプレックス】

～Appendix～

2024年2月7日

産業競争力懇談会 **COCN**

## APPENDIX-1 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（下図）。

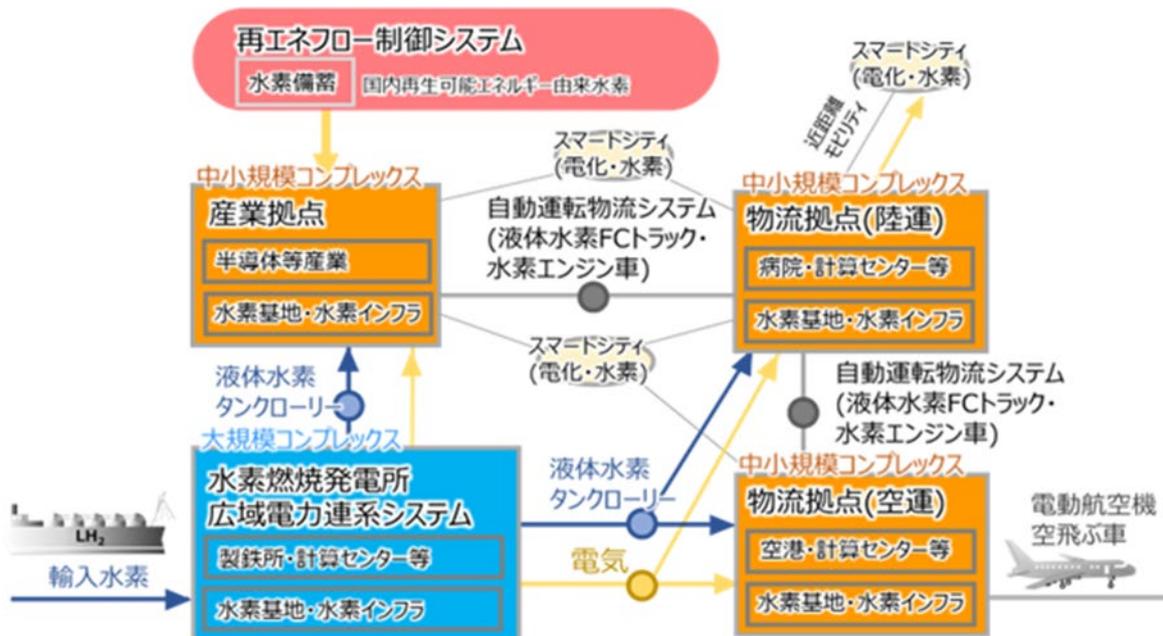


図 大規模コンプレックスと中小規模コンプレックスが核となる新しいネットワーク

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当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当たりの計算速度が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 $\alpha$ 線治療用の放射性核種(例えば $^{211}\text{At}$ 。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。

## APPENDIX-2 液体水素の冷熱利用

### 1) 冷熱利用の考え方

「水素・超電導コンプレックス」では水素を液化するのに使ったエネルギー、コストを回収し利用することで合理的なシステムを構築することを目指しているが、液体水素の冷熱からは液体水素を得るために投入したエネルギーのすべてを回収できるわけではないことに注意が必要である。

熱機関における熱効率は理論上カルノーサイクルを越えることができないことが良く知られている。冷凍機においては成績係数という定義があり、低熱源からの入熱量  $Q_L$  と、そのために必要な仕事  $W$  の比で定義され、理想的な冷凍機を用いても  $Q_L/W = Q_L/(Q_H - Q_L) = T_L/(T_H - T_L)$  を越えない。ここで  $T_L$  および  $T_H$  はそれぞれ低熱源および高熱源の温度である。仮に液体水素の温度を 20K、室温を 300K とするならば、室温から 20K の低温を得るためにはその冷熱が持つエネルギーの 14 倍もの仕事をする必要がある。したがって、冷熱量そのものを利用するのではなく、液化のために投入されたエネルギーによって得られた温度、すなわち極低温環境を利用することが重要である。

熱機関においてはエクセルギーという概念がある。これは系が外界と熱・仕事を交換しながら外界と平衡するまでに状態変化する時に系から理論上取り出せる最大の仕事量であり、高温側の入力熱量にカルノー効率を乗じて算出される。カルノー効率  $\eta_{\text{carnot}} = T_L/(T_H - T_L)$  であるから、高温であるほどエクセルギーが大きく、より仕事を取り出せることとなり価値がある。

低温においては温度の方が価値があるのでなるべく仕事をさせないように、温度差をなるべく小さくして冷熱を活用することがポイントとなる。直流電流に対して損失ゼロの超電導は冷熱エネルギーを消費しないという点で効率が良い。また、空気分離のように相転移を利用しその後冷熱を利用するなど、冷熱をエネルギーとして消費させず環境として利用するとともに多段階で冷が活用できるような仕組みを構築することが重要である。

### 2) 液体水素冷熱の利用の形態

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。

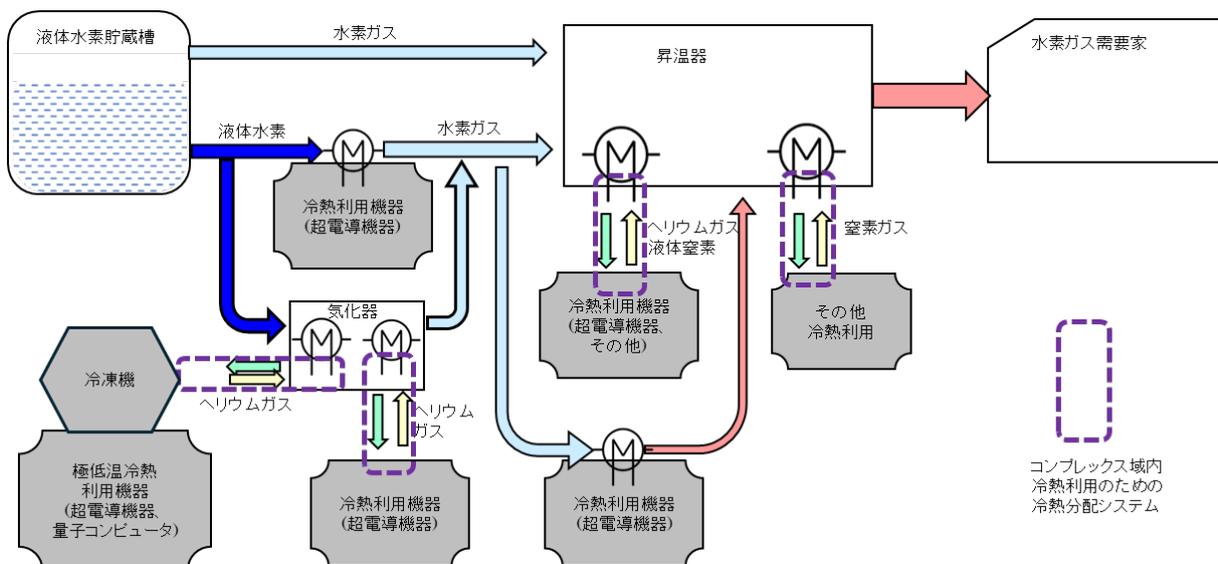


図 液体水素冷熱の間接利用方式の概念図

## APPENDIX-3 CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の評価

本プロジェクトの提案における CO<sub>2</sub> 排出量削減効果には、以下 A, B の 2 つの異なる種類の効果があり、各効果のポテンシャル（最大値）を評価した。

A. 電力系統への技術適用効果として、再エネ大量導入時の系統安定化手段として提案する、超電導発電機を活用した「超電導再エネフロー制御システム（仮称）」の導入等による以下の 2 効果进行评估

- ① 石炭火力電源の削減効果
- ② 調整用火力発電の削減効果

B. 超電導の普及により、電気機器の効率が向上することから、主な電気機器の効率向上による CO<sub>2</sub> 排出量削減効果进行评估

- ③ 発電機の超電導化・高効率化による削減効果
- ④ モータ超電導化・高効率化による削減効果

### (1) 検討 A 電力系統への技術適用による効果

#### ① 石炭火力電源の削減効果

経産省総合エネルギー調査解省エネルギー・エネルギー分科会／電力・ガス事業分科会再々可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会（第 48 回）「電力ネットワークの次世代化」（2022 年 12 月 27 日）資料によると、再エネポテンシャルの大きな北海道・東北地方から東京への系統増強（新設）が 600 万 kW～800 万 kW と示されている。これは確定された数値ではないものの、2050 年のカーボンニュートラルを見据えた場合に少なくともこれだけの再エネが導入され、既存の化石燃料発電が代替されるものと考えた。

“超電導再エネフロー制御システム（仮称）”はこの系統増強と同様の効果をもたらすと同時に季節間貯蔵をも狙ったものである。したがって、本システムによる CO<sub>2</sub> 削減効果は、この電力供給量相当の石炭火力発電所の削減によってもたらされると考えた。

このため国内の CO<sub>2</sub> 削減ポテンシャルは、送電容量 800 万 kW に対して稼働率 50%で電力が首都圏に送られるものと仮定すると、年間で

$$800 \text{ 万 kW} \times 365 \text{ 日} \times 24 \text{ h/日} \times 50\% = 350 \text{ 億 kWh}$$

の電力が既存の石炭火力発電所の代替として供給される。

石炭火力発電の CO<sub>2</sub> 発生量は 864g-CO<sub>2</sub>/kWh（ただし発電燃料燃焼分）なので、年間で

$$350 \text{ 億 kWh} \times 864 \text{ g/kWh} = 0.30 \text{ 億 ton/年（国内）}$$

の CO<sub>2</sub> 削減ポテンシャル量に相当する。

#### ②調整火力電源の削減効果

再エネを主力電源とする場合には、電力需給調整のための調整機能が必要となるが、調整火力発電所の機能を、本プロジェクトが提案する超電導再エネフロー制御システム（仮称）および

水素ガスタービン・超電導発電機が全て担った場合を想定して、電力調整用火力発電所の削減量でCO2削減量を評価した。

資源エネルギー庁の電力調査統計によると、2021年度の電気事業者の発電量は8,635億kWhであり、そのうち火力発電は6,814億kWh(78.9%)となる。火力の燃料種別内訳は、石炭2,826億kWh(32.7%)、LNG3,191億kWh(37.0%)、石油208億kWh(2.4%)である。

このうち、調整機能をもつ火力発電所としてLNGおよび石油火力発電所が本提案のシステム導入により50%削減できるものとする。LNG火力発電におけるCO2発生量は376g-CO2/kWh、石油火力発電におけるCO2発生量は695g-CO2/kWh(電力中央研究所「日本における発電技術のライフサイクルCO2排出量総合評価」より)なので、年間CO2削減ポテンシャルは最大で

$(3,191 \text{ 億 kWh} \times 376 \text{ g-CO}_2/\text{kWh} + 208 \text{ 億 kWh} \times 695 \text{ g-CO}_2/\text{kWh}) \times 50\% = 0.67 \text{ 億 ton/年 (国内)}$   
となる。上記①と②の検討をまとめた結果を以下に示す。

① 石炭火力の削減効果によるCO2削減ポテンシャル

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

0.67億ton/年 (国内、2050年)

## (2) 検討B 機器効率化によるCO2削減効果

本プロジェクトが提案する水素・超電導コンプレックスへの動きをきっかけに、高温超電導機器の実用化が進み、広く普及すると考えた。

各機器の超電導化によるCO2削減ポテンシャル(2050年)は、NEDO技術戦略研究センターレポート「持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針2020増補版」に整理されており、これを参照する。超電導化によるCO2削減効果が大きく見込まれるのは、発電機や産業用モータであり、それぞれを以下にまとめる。

③発電機の超電導化・高効率化によるCO2削減効果

0.22億ton/年 (世界、2050年)

④産業用モータの超電導化・高効率化によるCO2削減効果

0.21億ton/年 (世界、2050年)

なお、上記値は世界大での効果であり、国内の効果に推算した結果が以下となる。

③' 発電機の超電導化・高効率化によるCO2削減効果

0.0047億ton/年 (国内、2050年)

④' 産業用モータの超電導化・高効率化によるCO2削減効果

0.017億ton/年 (国内、2050年)

これらをまとめると次表となる。

表 CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の試算結果

種類	効果		実現時期			備考
				国内	世界	
電力系統への適用効果	以下内訳による全体効果（最大）		2050年	0.97	—	世界は未算出
	(内訳)	石炭火力電源削減効果		(0.30)	—	
		調整火力電源削減効果		(0.67)	—	
機器効率化による効果	発電機の超電導化			0.0047	0.22	NEDOレポートの算出 根拠から国内値も導出
	産業用モータの超電導化			0.017	0.21	
Cf 単純合算値				<b>0.99</b>	0.43 + $\alpha$ (未算出)	

## APPENDIX-4 製鉄プラントにおける超電導の導入効果の評価

### 1) 圧延ラインの電力損失削減効果

熱延工場ラインに含まれるモータおよび誘導加熱ヒータの総容量は 105MW、20.6MW である（JFE スチール株式会社西日本製鉄所カタログより第一熱延工場諸元表より）。超電導モータ適用により効率が従来モータの 90%から 99%に改善できるとすれば消費電力削減量は約 9.5MW となる。また、誘導加熱装置については従来の効率が 50%に対し 75%に改善できるとすれば約 5.2MW の削減となる。したがって、熱延ラインあたり約 12%の電力削減ポテンシャルがある。

2) NEDO の戦略的省エネルギー技術革新プログラムによると超電導ケーブル導入による発電所からプラント間の送電ロス低減量は、30MW で 1km あたり 95%以上低減でき、年間省エネルギー量は原油換算で 110kL、4.26TJ に相当する（CO<sub>2</sub> 排出削減量換算で 554t） [1]。たとえば 500MW の電力を 10km のケーブルを介して電力供給するプラントでは原油換算 18370kL、CO<sub>2</sub> 削減量は年間 92518ton に相当する。また国内製鉄業消費エネルギー（2020 年）1759PJ の内、電力消費量 139PJ（JFE ファクトブックより） [2] に対して 0.5%に相当する。

### 参考文献

[1]NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム “プラント内利用のための低コスト型三相同軸超電導ケーブルシステムの開発： ” <https://www.nedo.go.jp/content/100957617.pdf>

[2] 日本製鉄ファクトブック 2023: <https://www.nipponsteel.com/factbook/2023/>

## APPENDIX-5 経済効果の評価

本 PJ では、超電導単独による直接的なカーボンニュートラルへの貢献ではなく、超電導と液体水素とをベースとした社会システムを提案することにより 2050 年の社会のあるべき姿のなかでカーボンニュートラルにも貢献することを提案する。現在、実用化されている超電導機器は超電導の特徴である強磁場を利用したものであり、半導体単結晶引き上げ用磁石、医療用の MRI や加速器、分析用の高磁場 NMR 装置、高エネルギー物理用加速器などに限られている。電気抵抗ゼロの超電導は省エネを通じて低炭素化に寄与すると考えられるがこれを目指した超電導機器はまだ実用化にいたっておらず、また、液体水素インフラや冷熱利用に関わる超電導装置はまだ概念すら明確でない。したがって、個別超電導機器の定量的効果の評価、さらにそれらを積み上げて提案する社会像の経済的効果を見積もることは困難である。そこで期待される省エネ、CO<sub>2</sub> 削減量などから経済的な規模を見積もることにより効果、社会的インパクトを可視化する。

### (1) エネルギー分野（電力系統に関わる分野）の経済効果

広域再エネ連系構想における主な超電導装置は超電導発電機であり、その低インピーダンス特性により既存の送電インフラのまま系統安定性を維持しながら送電容量を増大させることができ、超長距離にわたっての系統連系が可能となることが期待される。再エネポテンシャルの大きな東北・北海道地方の再エネを、東北地方（秋田付近を想定）に電力⇄液体水素を変換する拠点を設置して集約し、超電導発電機を介して大電力需要地へむけて電力需給調整を行うものである。電力広域的運営推進機関(OCCTO)が策定している広域系統連系マスタープランに提示されている系統増強の一部に対応するものとなる。マスタープランによると東北・北海道からの東京への系統増強は数兆円規模[1]となり、これと超電導発電機の導入による経済性との競争になる。また、港湾地区に建設される輸入液体水素をベースとした水素・超電導コンプレックスには水素燃焼タービンおよび超電導発電機が配備されることになるが、これらと併せて再生可能エネルギーを系統に導入するために必須であった化石燃料による調整火力発電を全廃することができる。東北・北海道からの再生可能エネルギー供給による CO<sub>2</sub> 削減量を 0.3 億トン/年、また、調整火力の全廃により 0.7 億トン/年の CO<sub>2</sub> 排出量を削減でき、最大 1 億トン/年の CO<sub>2</sub> 削減ポテンシャルがあるものと試算した。

三菱総合研究所のレポート“カーボンプライシングの適切な炭素価格設定と制度設計”[2]によると、CO<sub>2</sub> 排出抑制の行動変容をおこさせるためには 10000 円/tCO<sub>2</sub>が必要とされるが業種によって許容できる炭素価格（上限炭素価格水準）が異なりエネルギー多消費・生産額あたりの排出量の大きな「鉄鋼・非鉄金属・金属」「電気・ガス」業界では 3000 円/tCO<sub>2</sub> 前後となる。仮に将来 10000 円/tCO<sub>2</sub> が設定されたとすると年間 1 兆円という金額となることから、設備投資の規模は投資回収期間を乗じて数兆—10 兆円規模となると推測される。

なお、NEDO が実施中の 2023 年度調査事業「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」では、東北北部に設置されている同期発電機の数台を超電導発電機に置き換えた場合の効果として、まだ評価途中のため確定値ではないが、約 10~100 万 kW の電力創出に相当する

可能性があるとし、その効果だけをみても、年間約 90～900 億円、10 年程度で、約 1 千億円から 1 兆円規模の経済効果を生み出す可能性があるとしており、モデル評価ケースだけでなく、さらに多くの箇所に分散配置されるケース等も想定すると、ここで概算する数兆—10 兆円規模という全体の規模感とも概ね合致する。

## (2) 産業向け省エネ超電導機器に関わる経済効果

これまで省エネ機器としての超電導装置は普及してこなかったが 2050 年のカーボンニュートラルに向けてのカーボンプライシングにより超電導機器の導入が期待される。鉄鋼プロセスを題材として省エネによる超電導導入による CO<sub>2</sub> 削減ポテンシャルおよび投資規模を、1) 圧延ラインに設置されているモータおよび誘導加熱装置を超電導機器に置き換えた場合の電力損失削減量、2) 発電所から製鉄プラントへの電力ケーブルを超電導ケーブルに置き換えた場合の電力損失低減量から概算する。

1) 熱延工場ラインに含まれるモータおよび誘導加熱ヒータの総容量は 105MW、20.6MW である

(JFE スチール株式会社西日本製鉄所カタログより第一熱延工場諸元表より)。超電導モータ適用により効率が従来モータの 90%から 99%に改善できるとすれば消費電力削減量は約 9.5MW となる。また、誘導加熱装置については従来の効率が 50%に対し 75%に改善できるとすれば約 5.2MW の削減となる。したがって、熱延ラインあたり約 12%の電力削減ポテンシャルがある。

2) NEDO の戦略的省エネルギー技術革新プログラムによると超電導ケーブル導入による発電所からプラント間の送電ロス低減量は、30MW で 1km あたり 95%以上低減でき、年間省エネルギー量は原油換算で 110kL、4.26TJ に相当する (CO<sub>2</sub> 排出削減量換算で 554ton) [3]。たとえば 500MW の電力を 10km のケーブルを介して電力供給するプラントでは原油換算 18370kL、CO<sub>2</sub> 削減量は年間 92518ton に相当する。また国内製鉄業消費エネルギー (2020 年) 1759pJ の内、電力消費量 139pJ (日本製鉄ファクトブック 2003 より [4]) に対して 0.5%に相当する。

製鉄業全体としての導入効果については電気使用量の内訳が不明、また超電導機器の導入量を見積もることができないため算出できない。液体水素冷熱については超電導装置の運転に活用する以外に単純に常温電流ケーブル (ブスバー) を蒸発ガスで冷却してもジュール損失低減が期待できるが、これの導入量も未定である。仮に製鉄プロセス全体の電力消費量のうち 10%の省エネに超電導および冷熱が寄与すると仮定するならば、電気代 23 円/kWh を仮定すると年間 1.1 兆円の削減効果がある。

## (3) 液体水素ボイルオフのための超電導補機に関わる経済効果

海外から水素を輸入し貯蔵する場合水素の形態としては、液体水素、MCH、アンモニアなどが候補である。水素ガスを需要家に分配する形態としては小口需要家向けやエネルギー密度が低くても許容できる用途、また、利用するエネルギー総量が小さい場合にはパイプラインや圧縮ガス (ポンペ) の形態が適切である。本 PJ で提案しているような液体水素貯蔵タンクを備える物流拠点、液体水素搭載の自動運転 FC トラックによる物流システムにおいては、エネルギー密度高く、付加的なプロセスなしにその場で蒸発させるだけで (純度の高い) 水素ガスが得られる液体

水素の形態が望ましい。水素エネルギーをベースとした社会システムを構築する上では液体水素の形で国内に広く液体水素拠点を全国各地に配置することが必須である。液体水素を貯蔵し、小分けにして分配するような利用方法では液体水素のボイルオフ低減・抑制が課題となる。

一般財団法人日本自動車研究所の“大型 FCV 燃料装置用液化水素技術に関するフィジビリティ調査” [5]によると従来方式の低圧充填・低圧貯蔵の液化水素貯蔵システムでは短時間(1日程度)でのボイルオフガス放出が必要となり、また差圧充填により 100kg の液体水素をタンクに注液する時にはフラッシュガス(排気による圧力低下に伴う蒸発ガス)は 30kg になると試算されている。そのためこれらの課題を解決するためには中圧充填・低～中圧貯蔵の subcooled liquid hydrogen (sLH<sub>2</sub>) を利用することが良いとしている。また、液化水素充填ステーションのインターフェイスとして気化量が少なく適切な流量の液体水素輸送ポンプの開発が必要と述べている。

超電導はその磁気的な特性によって非接触の磁気軸受けが実現できるとともに極めて損失の小さいモータを実現できるため、液体水素中に浸して動作させるサブマージドポンプがソリューションになりうる。また、JST の未来社会創造事業“磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発” [6]において開発されている高効率の磁気冷凍装置に超電導磁石を適用も想定される。このように超電導は液体水素をベースとした社会を構築する上で必須となるボイルオフガス低減に貢献すると考えられる。

2050 年の水素価格は 20 円/Nm<sup>3</sup> が目標とされており様々な技術が開発されている。ボイルオフ低減・抑制用超電導機器によって仮に 1 円/Nm<sup>3</sup> のコスト低減効果が実現されるとすると、2050 年の水素利用量は 2000 万トンとされていることから水素 1kg=11.14Nm<sup>3</sup> として換算すればその効果は年間あたり 2230 億円のコスト低減をしたことと等価となる。

#### (4) 水素・超電導コンプレックスのインフラ建設に関わる経済規模

水素・超電導コンプレックスの形成に対して超電導が直接的に貢献するわけではないが、超電導のもたらす液体水素のボイルオフ低減・抑制効果や水素冷熱活用の超電導装置の普及はコンプレックス形成の後押しをすることに違いない。その副次的な効果としての水素・超電導コンプレックスの経済規模を算出する。

2023 年に三菱地所は“基幹物流構想” [7]を提案しており、2026 年ごろの完成を目指し城陽市に新名神高速道路の宇治田原インターチェンジ(仮称)直結の物流施設が建設される計画である。この物流拠点は 5 棟総延べ 55 万 5000m<sup>2</sup> の物流施設であり、将来の完全自動運転トラックや隊列走行トラック、ダブル連結トラックなどの新しい物流拠点となることを目指している。

これにはまだ液体水素の拠点を備えた液体水素を搭載した FC トラックの自動運転物流システムという概念がないが、液体水素取り扱いに関わる課題解決および普及を進めることにより液体水素を搭載した FC モビリティが普及し自発的に液体水素を拠点配備した物流・交通のネットワークが構築されるものと考えられる。

一回の液体水素充填(100kg)で 1000km 走行できる FC トラックがダイムラートラックによって開発されている [8]が、国内の高規格幹線道路 14000km に対して 200km おきに拠点整備することとすれば 70 か所、その他産業集積地などにも拠点配備することとすれば 100 か所のオーダーで拠

点が整備されることとなる。(2021年現在大手EC事業者15社の物流拠点は84か所なのでオーダとしては外れているものではない)

11トン以上の大型トラックが液体水素タンクを搭載したFCトラックにリプレースされるとする。仮にFC大型トラック1台の価格を3000万円とし、2022年の大型自動車(営業用)の登録台数は476,396台[9]であるから14.3兆円の買い替え需要が発生する。また、物流拠点の投資規模については、日本GLP株式会社のマルチテナント型の物流施設「GLP ALFALINK 流山」の総投資額は1800億円以上となっており[10]、将来1000-2000億円のオーダで物流拠点が建設、リプレースされていくとすれば10-20兆規模となる。

CO<sub>2</sub>排出量の約6割を占める産業の多くは港湾・臨海部に立地していることから港湾地区の脱炭素化するカーボンニュートラルポート(CNP)形成の検討が行われている。大規模水素・超電導コンプレックスはCNPの形態の一つであるが、CNPの形成は必ずしも液体水素をベースとすることが本質ではないのでCNPへの投資規模から経済波及効果を算定することは適切ではない。水素基本戦略によると水素サプライチェーンへの官民による投資金額はすべてが液体水素関連ではないにせよ15年で15兆円を超える計画となっていること、また、川崎重工は2050年のグローバル水素関連市場約352兆円のうち、サプライチェーン関連機器(液化機、基地、運搬船など)、関連機器(タンク、FCV用バルブなど)および発電関連で約22兆円規模の市場を想定している[11]ことから数10兆円規模の市場が見込まれる。

#### 参考文献

[1] 電力広域的運営推進機関、広域系統長期方針(広域連系系統のマスタープラン)別冊(資料編) 2023年3月29日公表

[2] 三菱総合研究所, “カーボンプライシングの適切な炭素価格設定と制度設計企業の行動変容を後押しするために” : <https://www.mri.co.jp/knowledge/insight/20230905.html>

[3] NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム “プラント内利用のための低コスト型三相同軸超電導ケーブルシステムの開発” <https://www.nedo.go.jp/content/100957617.pdf>

[4] 日本製鉄ファクトブック 2023: <https://www.nipponsteel.com/factbook/2023/>

[5] 一般財団法人日本自動車研究所, “大型FCV燃料装置用液化水素技術に関するフィジビリティ調査” : NEDO 水素・燃料電池成果報告会 2022

[6] 沼澤健則, “JST 未来社会創造事業 磁気冷凍技術による革新的水素液化システム”, 低温工学 58巻2号(2023年)

[7] 三菱地所, “基幹物流構想、及び構想実現に向けた要望について” 国内投資拡大のための官民連携フォーラム資料(令和5年10月4日):

[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokunai\\_toushikakudai\\_forum/dai3/siryou7.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokunai_toushikakudai_forum/dai3/siryou7.pdf)

[8] <https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/mercedes-benz-trucks-provides-outlook-on-hydrogen-based-genh2-truck-at-iaa-transportation-2022-in-hanover-52032506>

[9]公益社団法人 全日本トラック協会, ”トラック輸送データ集 2022”

[10]”「ALFALINK」ブランド第 2 弾千葉県流山市「GLP ALFALINK 流山」全棟完成” :

<https://www.glp.com/jp/topics/press/694/>

[11]川崎重工、グループビジョン 2030 エネルギー・環境ソリューション:

[https://www.khi.co.jp/sustainability/library/report/2023/pdf/23\\_houkokusyo\\_13.pdf](https://www.khi.co.jp/sustainability/library/report/2023/pdf/23_houkokusyo_13.pdf)

## APPENDIX-6 環境効率（エコ・エフィシエンシー）の評価

環境効率の定義は各メーカー、製品毎で異なっているため、本プロジェクトでは以下で定義する。環境効率は、製品の性能向上の時系列を示す場合や、複数社の製品比較に用いられるが、今回は超電導機器に一部が置き換わったときの定量的な効果を示すのが目的であるため、環境効率の絶対値の評価でなく、相対的にどの程度変わるか（ファクターが何倍変わるか）という観点で評価を行った。

$$\text{環境効率（エコ・エフィシエンシー）} = \frac{\text{製品価値（売上高）}}{\text{環境負荷（CO}_2\text{排出量）}}$$

CO<sub>2</sub>削減量は APPENDIX-3 にて導出過程を記載しており、国内で超電導機器を導入した場合の環境効率のファクターの導出過程を以下(1)～(5)に示す。

引用の記載の無い電力予測値や超電導機器の普及による効率化（省エネ量）の数値は NEDO TSC Foresight「持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2020 増補版」のデータによる。

### (1) 石炭火力電源の削減効果

- ・ 資源エネルギー庁の電力調査統計によると、石炭火力による発電量は 2,826 億 kWh/年である。
- ・ 超電導再エネフロー制御システム（仮称）による石炭火力発電の省エネ量は送電容量 800 万 W、稼働率 50%から以下となる。

$$800 \text{ 万 kW} \times 365 \text{ 日} \times 24 \text{ h} \times 0.5 = 350 \text{ 億 kWh}$$

- ・ 石炭火力発電の CO<sub>2</sub>発生量は 864g-CO<sub>2</sub>/kWh（電力中央研究所「日本における発電技術のライフサイクル CO<sub>2</sub>排出量総合評価」）であるため、環境効率のファクターは以下となる。

$$1 / ((2826 - 350 \text{ 億 kWh}) \times 864 \text{ g-CO}_2/\text{kWh}) \div 1 / (2826 \text{ 億 kWh} \times 864 \text{ g-CO}_2/\text{kWh}) = \underline{1.14}$$

### (2) 調整火力電源の削減効果

- ・ LNG 火力発電における CO<sub>2</sub>発生量は 376g-CO<sub>2</sub>/kWh、石油火力発電における CO<sub>2</sub>発生量は 695g-CO<sub>2</sub>/kWh（電力中央研究所「日本における発電技術のライフサイクル CO<sub>2</sub>排出量総合評価」）から年間の CO<sub>2</sub>排出量は以下となる。

$$3,191 \text{ 億 kWh} \times 376 \text{ g-CO}_2/\text{kWh} + 208 \text{ 億 kWh} \times 695 \text{ g-CO}_2/\text{kWh} = 1.34 \text{ 億 ton/年}$$

- ・ 超電導再エネフロー制御システム（仮称）により電力量を 50%削減できると仮定すると、CO<sub>2</sub>削減量は以下となる。

$$1.34 \text{ 億 ton} \times 0.5 = 0.67 \text{ 億 ton/年}$$

- ・ 環境効率のファクターは以下となる。

$$1 / 0.67 \div 1 / 1.34 = \underline{2.00}$$

### (3) 超電導発電機の普及効率化

- ・ 2050年の日本国内発電量 1000TWhのうち、火力、水力、原子力等のタービン発電機によるものは75%と想定する。

タービン発電機による国内発電量  $1000 \times 0.75 = 750\text{TWh/年}$

- ・ CO<sub>2</sub>排出原単位 0.309kgCO<sub>2</sub>/kWh から CO<sub>2</sub>排出量は  $0.309 \times 750 \times 0.01 = 2.32$  億 tCO<sub>2</sub>
- ・ タービン発電機を超電導化した場合の効率向上（省エネ）は1%であり、超電導発電機を適用した際の CO<sub>2</sub>排出量は  $0.309 \times 750 \times (1-0.01) = 2.29$  億 tCO<sub>2</sub>
- ・ 環境効率に対するファクターは以下となる

$$1/2.29 \div 1/2.32 = \underline{1.01}$$

### (4) 超電導モータ（産業用）の普及効率化

- ・ 産業用モータの消費電力は、0.7MW 機が 25500 台、2.5MW 機が 10400 台として、年間稼働率 65% から CO<sub>2</sub>排出量は以下となる。

$$0.7 \times 0.65 \times 8760\text{h} \times 25500 + 2.5 \times 0.65 \times 8760\text{h} \times 10400 = 249.7\text{TWh/年}$$

$$0.309 \times 249.7 = 0.77 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$$

- ・ 超電導化による効率向上は 0.7MW 機 2.5%、2.5MW 機 3.5%とし、20K に保つ冷凍機負荷は 1 台あたり 0.00724MWh とすると、省エネ量は以下となる

$$0.7 \times 0.65 \times 8760\text{h} \times 25500 \times 0.025 + 2.5 \times 0.65 \times 8760\text{h} \times 10400 \times 0.035 - 0.00724 \times 8760 \times 35900 = 5.44\text{TWh/年}$$

超電導モータを適用した際の CO<sub>2</sub>排出量は CO<sub>2</sub>排出原単位 0.309kgCO<sub>2</sub>/kWh から以下となる。

$$0.309 \times (249.7 - 5.44) = 0.75 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$$

- ・ CO<sub>2</sub>削減量は以下となる。
- ・ 環境効率に対するファクターは以下となる

$$0.309 \times 5.44 = 0.017 \text{ 億 tCO}_2/\text{年}$$

$$1/0.75 \div 1/0.77 = \underline{1.02}$$

### (5) 超電導送電ケーブルの普及効率化

- ・ 275kV 級ケーブルを同じ送電容量の超電導ケーブルで更新した場合の 1km あたり省エネ量は 600MWh/年/km
- ・ 66kV 級ケーブルを同じ送電容量の超電導ケーブルで更新した場合の 1km あたり省エネ量は 21.5MWh/年/km
- ・ 地中ケーブル長は 275kV 級で 1800km、66kV 級 13200km あり、省エネ量は以下となる

$$600 \times 1800 + 21.5 \times 13200 = 1.36\text{TWh/年}$$

- ・ 超電導の普及率を 50%とすると  $1.36 \times 0.5 = 0.68\text{TWh/年}$ の省エネ量となる
- ・ CO<sub>2</sub>排出原単位 0.309kgCO<sub>2</sub>/kWh から CO<sub>2</sub>削減効果は以下となる。

$$0.68 \times 0.309 = 0.0021 \text{ 億 t/年}$$

- ・ 超電導機器適用による環境効率のファクターは以下となる。

$$1/(0.68 \times 0.309) \div 1/(1.36 \times 0.309) = \underline{2.00}$$

(6) 超電導磁気誘導加熱装置の普及効率化

- ・ 設備容量 5MW, 稼働率 20%, 台数 1000 台の消費電力は以下となる。

$$5 \times 8760h \times 0.2 \times 1000 = 8.76TWh/\text{年}$$

- ・ 超電導適用による効率化は 25%とし, 1 台あたりの冷凍機の損失は 7.24kWh とすると省エネ量は以下となる。

$$8.76 \times 0.25 - 0.00724 \times 8760h \times 1000 = 2.13TWh/\text{年}$$

- ・ CO<sub>2</sub> 排出原単位 0.309kgCO<sub>2</sub>/kWh から CO<sub>2</sub> 削減効果は以下となる。

$$2.13 \times 0.309 = 0.0066 \text{ 億 t/年}$$

- ・ 超電導機器適用による環境効率のファクターは以下となる。

$$1/((8.76 - 2.13) \times 0.309) \div 1/(8.76 \times 0.309) = \underline{1.32}$$

表. 環境効率に対する改善効果

項目	環境効率の改善効果 (ファクター) (2050 年, 国内規模)
石炭火力電源の削減効果	× 1.14
調整火力電源の削減効果	× 2.00
超電導発電機の普及効率化	× 1.01
超電導モーター (産業用) の普及効率化	× 1.02
超電導送電ケーブルの普及効率化	× 2.00
超電導磁気誘導加熱装置の普及効率化	× 1.32

## APPENDIX-7 超電導応用に関する主な国プロと、社会実装に至らなかったケースの要因推察

超電導応用製品は、医療用のMRIや分析用の高磁場NMR装置、半導体単結晶引き上げ装置用磁石等で広範な社会実装が進んでいる。一方、これまでの国プロに限ってみると、複数のチャレンジな取組が進められてきており、現時点で社会実装に至っていないものも多くみられる。これまでの主な国プロの社会実装の状況と未実装時の主な要因の推察を下表にまとめる。

表 主な超電導応用開発の社会実装状況と未実装時の主な要因の推察

国プロでの開発対象	ステータス	左記が3の場合の主な要因	補足
LTS:低温超電導 HTS:高温超電導	1: 社会実装完了 2: 研究開発中 3: 開発中断 or 中止	A: 市場環境起因 (需要変化) B: 技術・品質起因 C: コスト競争力起因 D: その他 (経営方針等)	
発電機	LTS	3 (Cf HTS:2)	A 開発期間中に国内電力需要が変化し、大型機の需要が消失、小型機では経済合理性の成立見通しがたらず製品化開発に進まなかったと考えられる。
超電導エネルギー貯蔵 (SMES)	LTS	1 & 3 (Cf HTS:2)	C 現在、高温超電導による発電機について、NEDO先導研究による研究開発が進行中。系統制御用途には更なる低コスト化が必要と評価。経済合理性の成立困難な見通しから製品化開発に進まなかったと考えられる。その後、瞬低補償用途で社会実装。
変圧器	LTS	3	C 現在、研究機関において高温超電導によるSMESの研究開発が進行中。
限流器	LTS	3	A 開発期間中に国内電力需要が変化し、系統連系用のニーズは遠いと判断。製品化開発には進まなかったと考えられる。
	HTS	3	C モチーフとした配電用途では経済合理性がないと判断して製品化開発には進まなかったと考えられる。
ケーブル (送電用)	HTS	3	A 開発期間中に国内電力需要が変化し、送電ケーブルの超電導化ニーズが低減し、製品化開発には進んでいないと考えられる。
ケーブル (鉄道き線用)	HTS	2	- - (国プロ継続中)
モータ (船舶用)	LTS	3 (Cf HTS:2)	C 技術実証したが、経済合理性の成立の見通しが立たず、製品化開発には進まなかったと考えられる。現在、研究機関で高温超電導による研究開発が進行中。
モータ (航空機用)	HTS	2	- - (国プロ継続中)
MRIマグネット	HTS	3 (Cf LTS:1)	B & C 技術開発を進めQCDの課題を確認し、LTS製品の代替には時期尚早との判断から製品化開発には進まなかったと考えられる。
NMRマグネット	HTS	1 & 2 (Cf LTS:1)	- - (国プロ継続中)
粒子線マグネット	HTS	2 (Cf LTS:1)	- - (国プロ成果をもとに開発進行中)
磁気浮上鉄道用マグネット	HTS	2	- - (国プロ成果をもとに開発進行中)

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