

3. グリーンテックの進化

二酸化炭素（CO₂）の排出量低減に寄与しながら、太陽光などの再生可能エネルギー（再エネ）に比べ安定した供給が見込めるエネルギーとして、水素の活用が進んでいく。水素を本格的に利用する水素社会が到来すれば、従来の石油を軸としたエネルギー地政学は大きく変容する可能性がある。核融合発電をはじめとした革新的なエネルギー技術の研究開発も加速していくだろう。

（1）水素社会の実現

水素はカーボンニュートラルの実現に重要な役割を果たすとの期待が大きいエネルギーの1つだ。使用時にCO₂を排出しないだけでなく、地球上に大量に存在するため安定供給が見込めるほか、エネルギー密度が大きい、長期貯蔵が可能といったメリットがある。再エネを含む多様な資源から製造できるため、日本のような小資源国にとっては自国内生産や調達先の多様化を通じてエネルギー安全保障の強化にも資する。

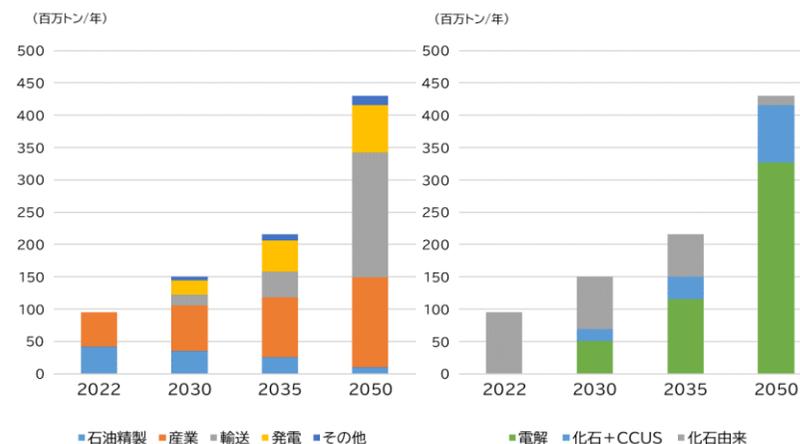
◆水素の需要は2035年に2倍に

IEAによると、＜図表 4-1 3＞のとおり、2050年までに水素の需要は2022年時点の4倍以上の約0.4Gtまで増加する見込みだ。発電部門のほか、輸送部門では燃料電池（FC）²⁴によって駆動する乗用車や商用車（FCバス・FCトラック）も増えていく。産業部門では水素を使って鉄鉱石から鉄を取り出す「水素還元製鉄」²⁵や化学品原料での利用が見込まれている。このように電化による脱炭素化が困難とされる分野での利用が期待される。

水素は製造方法によってはその過程でCO₂を排出する。2022年時点で製造されている水素の大部分は天然ガスや石炭といった化石燃料由来の「グレ

ー水素」が占めているが、CO₂を回収・貯留・利用するCCUSと組み合わせる「ブルー水素」や、再エネによる水の電気分解で製造する「グリーン水素」の供給が徐々に増えていく。2050年時点では水素供給量に占めるグリーン水素の割合は約76%にのぼる見通しだ。

図表 4-1 3 水素の需要（左）と供給（NZE シナリオ）



(注) 水素は水素化合物を含む

(出典) IEA, “Net Zero Roadmap”, Sep. 2023.より当社作成

◆「ブルー」「グリーン」が脱炭素に貢献

脱炭素への貢献という意味ではブルー水素やグリーン水素への期待が高い。水素として直接利用するだけでなく、水素からアンモニアや合成燃料等を製造することで様々な燃料や原料として使うこともできる。発電部門では水素やアンモニアを燃料とする火力発電の技術開発が進んでおり、例えば三菱重工業は2024年5月に水素だけを燃やす「水素専焼」として国内最高水準の出力となるエンジン発電設備の実証を開始した²⁶。こうしたCO₂の発生を抑

²⁴ 水素と酸素を化学反応させて発電する装置で、ブルー・グリーン水素を用いる場合はCO₂などを排出しないクリーンなエネルギーとして利用できる。

²⁵ 鉄鉱石を還元するにあたってコークス（石炭）の代わりに水素を用いる技術。

²⁶ 日本経済新聞「三菱重工、国内最高水準の水素専焼エンジン実証運転へ」（2024年5月）

える発電技術を確立できれば、引き続き火力発電の需要が旺盛なアジア諸国への輸出などを通じて世界的な脱炭素化にも貢献することが可能になる。

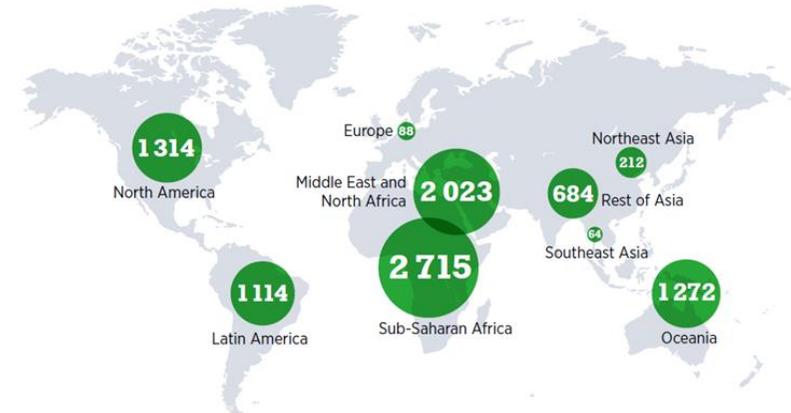
製造工場で排出するCO₂の削減に水素を利用する取り組みもある。例えばIHIグループのIHI汎用ボイラは、工場内で使う蒸気を作るボイラーについて都市ガスに水素を混ぜて燃やせるタイプを開発した²⁷。パナソニックは自社工場で燃料電池や太陽光発電、蓄電池を組み合わせた分散電源システムの実証実験を進めており、他社の工場や商業施設向けに事業化を目指している²⁸。水素の地産地消を目指す試みは福島県浪江町で実証事業が進んでおり、太陽光で作ったグリーン水素を町内の輸送や家庭向けに供給している²⁹。

◆エネルギーの地政学が根本から変わる

水素はエネルギー安全保障の文脈でも重要な役割を担うだろう。実際、ロシアによるウクライナ侵攻でエネルギー危機に瀕したEUは2022年、水素の活用によって域内のエネルギー自給強化を目指す「リパワーEU」計画を発表した。EU諸国のガス輸送インフラ事業者によって域内に水素パイプラインを整備する「欧州水素バックボーン（EHB）」構想も進行している³⁰。

国際再生可能エネルギー機関（IRENA）の報告書によれば、＜図表4-14＞のとおり、地理的条件に恵まれた中東・北アフリカ及びサブサハラ・アフリカが、将来の水素生産および輸出の主要地域になり得るとされている。これらの地域が豊富な太陽光や風力を活用して、グリーン水素を効率的に生産できる潜在能力を持つためである。実際、中東産油国は低炭素水素製造に向けた動きを見せており、エネルギー資源の輸出国としての役割を再定義しようとしている。

図表 4-14 2050年までに1.5ドル/kg以下でグリーン水素を製造できる技術ポテンシャル



(注) 単位＝エクサジュール

(出典) International Renewable Energy Agency, “Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor”, Jan.2022.

水素社会を実現するには課題も多く、再エネ発電容量を大幅に拡大したり、国際的なサプライチェーンを構築したりといった取り組みを進める必要がある。発電部門や産業部門など需要側についても効率やコストの面で技術革新が求められる。

その反面、こうした点で先行できた国はエネルギー安全保障上も優位に立っている可能性が大きい。特に日本のような小資源国にとっては、国産グリーン水素の生産と、グリーン・ブルー水素の調達先多様化を進めることにより、中東依存度を低下させる戦略を取り得る。水素社会の実現は従来の石油中心のエネルギー地政学を根本から変える可能性がある。

月29日)

²⁷ IHI「都市ガス専焼と水素混焼に切替運転が可能なハイブリッド型ボイラを開発」

(2023年12月19日)

²⁸ 日本経済新聞「パナソニック、100%再エネ工場を実験 英国で水素活用」(2023年

11月14日)

²⁹ 福島県浪江町のホームページ「水素タウン構想について」

³⁰ 日本貿易振興機構（JETRO）「フランス・オーストリア企業、チュニジアでグリーン水素開発へ覚書締結」(2024年5月31日)

(2) ネガティブエミッション技術の導入

カーボンニュートラルの達成に向けては、排出を避けられない温室効果ガスを除去するためのネガティブエミッション技術 (NETs) が不可欠である。炭素回収・貯留技術 (CCS) や CCS に利用を組み合わせた CCUS、直接空気回収技術 (DAC)、人工光合成技術などの主要な NETs の開発が各国で進められている。これらが実用化されれば、低炭素で安定した水素エネルギーの供給や、燃料・化学品原料の製造が可能になるだろう。

◆地中に CO₂ 貯留、年数十億トンも

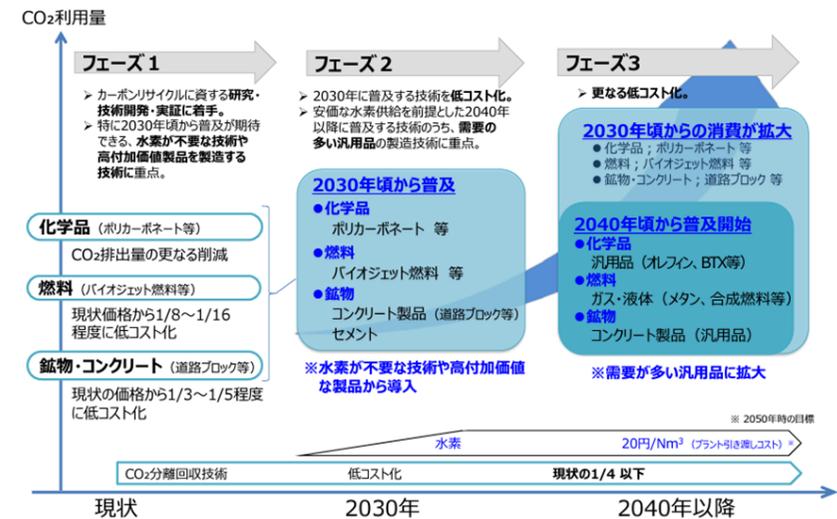
CCS の国際的シンクタンクである Global CCS Institute の調査によると、2023 年 7 月時点で世界に 392 の CCS 施設があり、前年から 102% 増えた³¹。そのうち稼働中の 41 施設は年間 4,900 万トンの CO₂ を回収・貯留する能力があり、これは世界全体の CO₂ 排出量の 0.1% に相当する。しかし世界的な気候目標を達成するためには不十分とされ、同報告書は 2030 年までに年間約 10 億トン、2050 年までに同数 10 億トンの CO₂ を CCS によって貯留・削減する必要があると指摘している。

北米や欧州ではすでに CCS 事業の法律が整備され、商用化に向けて、税控除・直接補助金等の取組を強化している。また、アジア太平洋地域では 2023 年に 34 の新規プロジェクトが発表され、一部地域では CCS 実施に向けた法律の整備も始まっている³²。

日本国内では、〈図表 4-1 5〉のとおりカーボンリサイクル技術ロードマップが策定されており、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のグリーンイノベーション基金事業において、CO₂ を用いたプラスチック原料、燃料、コンクリートの製造技術が開発されている。さらに、広島県大崎

上島では、カーボンリサイクルの実証研究拠点が設立され、最先端技術の開発や実証試験が集中的に行われている³³。このように、CO₂ を原料とした技術開発が行われている一方、CCS そのものの課題として、CO₂ 回収にかかるコストの低減や、CO₂ が貯留される場所の地域理解の増進などがあり、政府による事業環境の整備への支援が必要とされている。

図表 4-1 5 日本におけるカーボンリサイクルの普及計画



(出典) 経済産業省「カーボンリサイクル技術ロードマップ」(2021年7月改訂)

◆大気中から直接 CO₂ を回収

DAC は、大気中の CO₂ を化学的に吸収し、固定化または有用な製品への変換を可能にする技術である。メリットとして、大気中から直接回収することから、設置場所を選ばないという点が挙げられる。IEA の予測では、2050 年ネットゼロ達成に向け、2030 年には年間 8,500 万トン、2050 年には同 9

³¹ Global CCS Institute, "GLOBAL STATUS OF CCS 2023", Nov.2023

³² 経済産業省「CO₂ 分離回収技術開発に関連した国内外の情勢について」(2024年5月10日)

³³ 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「カーボンリサイクル技術の確立に向けた実証研究拠点が完成」(2022年9月14日)

億 8,000 万トンの CO₂ を DAC によって回収する必要があるという³⁴。

現在、DAC 技術は開発の初期段階にあり、いくつかの企業や研究機関が商業化に向けて取り組んでいる。たとえば、米国の石油ガス会社 Occidental は、年間 50 万トンの CO₂ を回収できる世界最大規模の DAC プラントを開発している³⁵。

日本国内では、九州大学が研究開発を進める DAC 技術「m-DAC(R)³⁶」を活用し、九州大学と双日が共同出資するスタートアップの Carbon Xtract 社が、施設園芸における環境負荷低減のソリューションを提供するなど、小型・分散型 DAC 市場の創出を目指している³⁷。このように、欧米では大型の DAC プラントの建設が進む一方で、日本では、小型・分散型 DAC 技術の開発も進められている。

ただし、DAC は CO₂ 回収のプロセスにおいて多量のエネルギーを要する点が課題である。工場等から発生する排ガスと異なり、大気中の CO₂ 濃度は 0.04% と低いため、より省エネルギーかつ低コストで CO₂ を回収する研究開発が求められる。現在、経済産業省では DAC ロードマップの策定に向けた議論が進められており、まず 2030 年に向けては、今後の DAC 導入目標の明確化など、需要拡大を促す事業環境整備の検討が進むとみられる。

DAC によって回収した CO₂ をメタンなどの有価物に転換する技術が確立されれば、炭素循環社会が実現できる。特に日本では、立地制約等から、大型ではなく小型分散型の CO₂ 回収装置の普及が期待される。

◆太陽光エネルギーで CO₂ を資源に

人工光合成技術は、植物の光合成プロセスを模倣したもので、主に光触媒を用いる方式と光電極を用いる方式に大別され、太陽光のエネルギーを利用して水を電気分解して水素を生成する、あるいは水と二酸化炭素から有機化合物を生成する技術である³⁸。この技術により、大気中の二酸化炭素を減らしつつ、エネルギー資源や化学原料を作り出すことができる。

光触媒を用いる手法では大阪大学が環境汚染物質の硝酸を太陽光のエネルギーでアンモニアに変えることに成功し、2040 年以降の実用化を目指している³⁹。アンモニアは燃焼しても CO₂ を排出しない燃料として注目されているため、次世代燃料の製造につながることを期待される。

人工光合成は水素の供給手段としても利用できる可能性がある。グリーン水素は再エネ由来の電力で水を電気分解して作るが、人工光合成は太陽光エネルギーを直接利用するため、エネルギー変換の過程での損失が少ないと考えられている。国内では光触媒パネルを用いた水素製造の実証に成功しており⁴⁰、より高いエネルギー変換効率を持つ光触媒の開発が期待される。将来は、住宅の屋根に設置された光触媒パネルから水素を製造し、家庭用燃料電池や燃料電池自動車で活用するといった使い方も考えられる。

一方で、実用化にはまだ多くの課題がある。特に、高い変換効率の達成、長期間の安定稼働、コストの低減が主要な課題として挙げられる。現状では、人工光合成の研究は主に基礎研究の段階にあるが、技術的な課題が克服されれば、エネルギーとしての水素生産や、化学原料の持続可能な供給など、カーボンニュートラル達成に向けた重要な役割を果たすことが期待される。

³⁴ IEA, “Direct Air Capture: A key technology for net zero”, Apr.2022.

³⁵ エネルギー・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) 「米国 Occidental の Direct Air Capture (DAC) 開発が商業化に向け進捗中」(2024 年 1 月 30 日)

³⁶ 空気を膜でろ過するだけで CO₂ を回収する方法で、従来の CO₂ 分離膜と比べ極めて高い CO₂ 透過性を有すナノ分離膜を使用することが特徴。

³⁷ Carbon Xtract 「大気からの二酸化炭素の直接回収を可能とする分離膜型 DAC 装置の施設園芸用途における早期社会実装に向けた連携協定締結」(2024 年 3 月 13 日)

³⁸ 応用物理学会 「人工光合成 水と二酸化炭素を活用する太陽光エネルギーの貯蔵技術」(2021 年 12 月 7 日更新)

³⁹ 日本経済新聞 「汚染物質からアンモニア、人工光合成を利用 大阪大学」(2024 年 4 月 30 日)

⁴⁰ 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「世界初、人工光合成により 100m² 規模でソーラー水素を製造する実証試験に成功」(2021 年 8 月 26 日)

（3）次世代エネルギー技術

次に 2050 年にかけて実用化の可能性のある革新的エネルギー技術の研究開発動向を見ていく。世界が目指す「エネルギーの安定供給」「カーボンニュートラルの実現」というゴールから考えると、核融合発電、超電導技術、宇宙太陽光発電の3つの技術が極めて重要と言えるだろう。

◆CO₂を出さず燃料の心配も少ない核融合発電

核融合発電とは、軽い原子核同士（重水素、トリチウム）が融合して別の原子核（ヘリウム）に変わる際に放出されるエネルギーを使って発電する技術である。発電時に CO₂ を排出せず、燃料となる重水素やトリチウムは海中に豊富に存在している。核分裂反応と異なり安全性が高く、発生する放射性廃棄物は低レベルのみであるという特長がある。

現在、日本や米国などが参加する国際熱核融合実験炉（ITER）計画が進行中で、フランス国内で実験炉の建設を進めている。米国は民間での開発を推進するためスタートアップ企業を支援する方針である。中国では ITER と同規模の核融合工学試験炉（データ取得を目的とされる実験炉と、発電能力を実証する原型炉の間に位置付けられる）を建設し、2030 年代に原型炉に改造する計画を進めている⁴¹。

日本は 2023 年 4 月に「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」を策定し、フュージョンエネルギー（核融合エネルギー）の技術開発と産業育成を進めている。この戦略では、原子力発電の推進による人材育成が、将来的に核融合エネルギーの開発にも役立つとされている。〈図表 4-16〉のとおり、原型炉の開発を核融合エネルギーシステムのコア領域と位置づけ、リチウム回収技術や金属精製技術といった資源・エネルギー分野や、電磁気による影響解析技術といった医療分野への応用も視野に入れつつ、AI 解析や

量子コンピュータ等の他分野の技術との統合も考慮して、研究開発や産業育成に取り組んでいくこととされている。具体的な事例としては京都大学発スタートアップの京都フュージョニアリングが 2022 年に世界初となる核融合発電の試験プラントを建設に着手し、2024 年末に発電実証試験の開始を予定している⁴²。

図表 4-16 核融合技術の社会実装に向けた考え方



（出典）内閣府「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」（2023年4月）

内閣府が定めるムーンショット目標の中でも「2050年までにフュージョンエネルギーを多面的に活用する」と謳われ、資源制約の克服やエネルギー問題の解決だけでなく、宇宙探査・海洋探査などの未知の領域に挑戦するための小型動力源として活用することも目指している。

実際に核融合技術は宇宙産業でも革新的なエネルギー源として期待されている。例えば米 Helicity Space は宇宙船向けの核融合エンジン開発を進めており、2023年にはシードラウンドで500万ドルを調達して「太陽系探査に

⁴¹ 文部科学省「文部科学省における核融合の挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討状況について」（2023年8月3日）

⁴² 京都フュージョニアリング「京都フュージョニアリング、世界初の核融合発電試験プラント建設」（2022年7月6日）

必要な技術」として核融合技術の開発を進めている⁴³。核融合エンジンは従来のロケットエンジンに比べて燃料が少量で済むため、これまでより速く遠くまで行けるようになる可能性がある。

実用化に向けた課題としては、核融合反応を起こすために重水素やトリチウムを1億度以上のプラズマになるまで加熱、維持する技術や、核融合反応によって生じるエネルギーを効率的に回収するシステムの開発などといったものがある。

◆超電導技術でエネルギー損失を減らす

超電導技術は特定の金属などを極めて低い温度にすると電気抵抗がゼロになる現象を利用した技術で、医療分野（MRI、NMR など）で実用化されているほか、産業・輸送分野（産業用超電導モーター、船用モーターなど）での活用も期待されている。エネルギー・電力分野では送電線を冷却して超電導状態にすることで送電にかかるエネルギー損失を大幅に減少させると期待される。

超電導技術は核融合炉の小型化にも重要である。元々核融合を起こす際には超電導コイルで作る磁場を利用するが、従来の超低温コイルに比べ高温の超電導コイルを用いると必要なスペースを小さくできる。国内の例では、核融合スタートアップのヘリカルフュージョンが高温超電導コイルを用いた小型の核融合炉を開発しており、2026年までの実証を目指している⁴⁴。

◆宇宙空間で高効率の太陽光発電

宇宙空間に設置した太陽電池で作った電力を地球に送って利用する宇宙太

陽光発電も実用化の期待が高い。宇宙空間に設置した太陽光パネルで発電した電力をマイクロ波やレーザー光に変換し、地球に伝送した後に再び電力に変えて利用するシステムだ。地上での太陽光発電と比較して、昼夜や天候、自然災害の影響を受けにくいというえ、太陽光が大気で減衰しないため地上の1.4倍の強度の太陽光を利用できる利点がある⁴⁵。欧州では2050年カーボンニュートラル達成に向け、宇宙太陽光発電システムの実現可能性を調査するSOLARISプロジェクトを2022年に開始した⁴⁶。日本でも研究開発が進んでおり、例えばNTTはマイクロ波と比べてシステムを小型化しやすいレーザー光を用いる技術の研究を進めている⁴⁷。

宇宙太陽光発電が実現すれば安定電源としてカーボンニュートラルに貢献するだけでなく、離島や災害時の非常用電源としても活用できる。技術的な課題やコストの問題があるものの、宇宙太陽光発電の実現は未来におけるエネルギー供給のあり方に変革をもたらす可能性がある。

これらの技術は、エネルギーの安定供給やカーボンニュートラルの実現という目先のエネルギー問題を超えて、人類の未来を劇的に変える可能性を秘めている。離島や遠隔地での自立したエネルギーシステムや、宇宙進出につながる小型動力源として活用されれば、人類の活動領域は大きく広がるだろう。中でも核融合技術は人類の宇宙への挑戦を後押しする技術としても期待が高まっている。

⁴³ Helicity Space, “Helicity Space Raises \$5M Seed Round”, Dec.11,2023.

⁴⁴ 日経クロステック「ヘリカルフュージョンが高温超電導体の実証に成功、核融合炉の小型化に弾み」（2024年3月7日）

⁴⁵ 宇宙航空研究開発機構（JAXA）のホームページ「宇宙太陽光発電システム（SSPS）について」

⁴⁶ 経済産業省「令和4年度重要技術管理体制強化事業（宇宙分野における重要技術の実態調査及び情報収集）調査報告書」（2023年3月）

⁴⁷ NTT宇宙環境エネルギー研究所「宇宙太陽光発電実現に向けた長距離レーザーエネルギー伝送技術と地上での利用」（2024年1月12日）