

## 未来のストーリー

我が家の屋根に設置されたソーラーパネルは、今日も変わらずエネルギーを供給してくれている。朝の光を吸収し、昼間のエネルギーを蓄え、夜にはマイクログリッドによって余剰電力を近隣に供給する。我が家のエネルギーシステムはほぼ自給自足に近く、かつてのように大規模な電力会社に依存することはない。

今日は久々に家族で遠出をすることにした。今年70歳を迎える私の父のこだわりで、バーチャルではなくリアルな体験をしようという計画だ。私は7歳の息子を連れて、父が用意したカーシェアの燃料電池自動車に乗り込んだ。水素ステーションで燃料を補給してから地元の科学館へ向かった。科学館は、2050年の今もなお未来の技術とその可能性を示す場所であり、訪れる度に新たな発見がある。

科学館に到着すると、エネルギーの歴史や未来の技術に関する展示が目飛び込んできた。息子は目を輝かせながら、宇宙太陽電池や核融合発電に関する展示に見入っている。日本のエネルギーの在り方は大きく変わった。かつてはイデオロギーによって語られてきたエネルギー政策が、科学的根拠とその客観性によって支えられるようになった。環境、経済、社会といった多くの要素が絡み合う中で、再生可能エネルギーと原子力の二本柱がエネルギーの安定供給を実現している。特に、クリーンで持続可能なエネルギーの重要性が強調されるようになった。

展示を見ていると、クリーンな水素の輸入だけでなく、地域で作られたグリーン水素の利用が進んでいることがわかる。私達の生活の中でも水素の利用が当たり前となり、電気や熱はもちろんのこと、自動車だけでなく、バスやトラックも水素で街を走っている。水素と二酸化炭素を使ってプラスチック原料が作られるなど、新たな技術も次々と導入されている。もう何年も前から、カーボンニュートラルという言葉は時代遅れになっている。

息子は展示を一つひとつ丹念に見て回り、未来の技術について興味津々に私の父に質問を繰り返している。日本でもいよいよ核融合発電の原型炉が動き出し、宇宙開発競争にも本格参入している。この子が大きくなる頃には、月をもっと身近な存在になっているかもしれない。展示の一つには、未来の月面都市の模型があり、そこでは人々が普通に生活を営んでいる様子が描かれていた。

夕方になり、私たちは家路についた。自宅に戻り夕食を終えた後、リビングで親子三代で読書を楽しんだ。静かな夜、外の風景は月明かりと共に街の灯りが輝いている。ふと夜空を見上げ、この子が生きる未来では、人類がそこにいるのだろうかと考えた。科学館で見た未来技術の数々が現実のものとなり、息子が大人になる頃には、私たちの想像を超えた世界が広がっているのだろうか。私たちが築く未来は、この子供たちにどんな世界を見せてくれるのだろうか。

## 第4章 エネルギーとカーボンニュートラル

### 1. エネルギー消費の増大

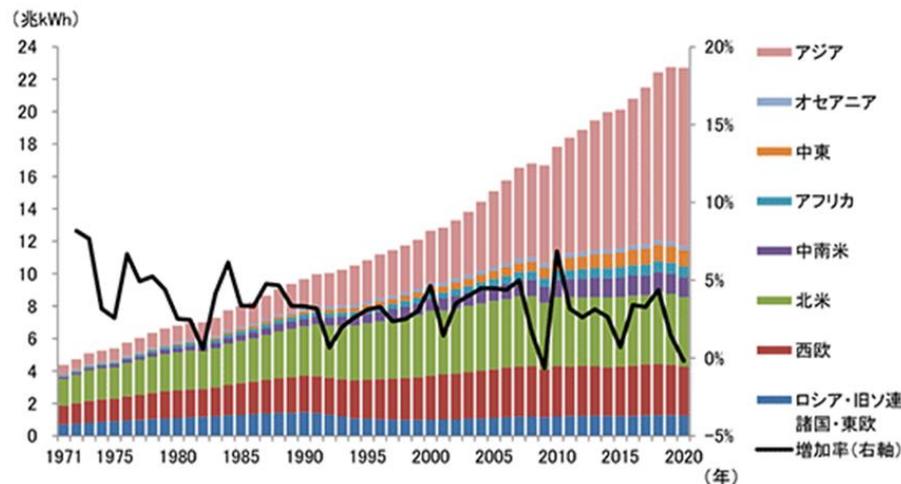
開発途上国の経済発展や自動車の電動化、AI 開発をはじめとしたデジタル用途の電力需要増加を背景に、世界のエネルギー消費量は増大が続く。太陽光や風力といった再生可能エネルギー（再エネ）の普及が進むものの、アジアなどでは火力発電の需要が根強く残る見通しだ。エネルギーの需給構造が変化中、従来の化石燃料に加え、再エネ設備などに使う鉱物資源についても獲得競争が激しくなっていくだろう。

#### (1) 増える消費電力と火力発電

##### ◆アジアを中心に電力需要の増加が続く

世界の電力消費量は、＜図表 4-1＞のとおり、特にアジアや中東、中南

図表 4-1 世界の電力消費量の推移

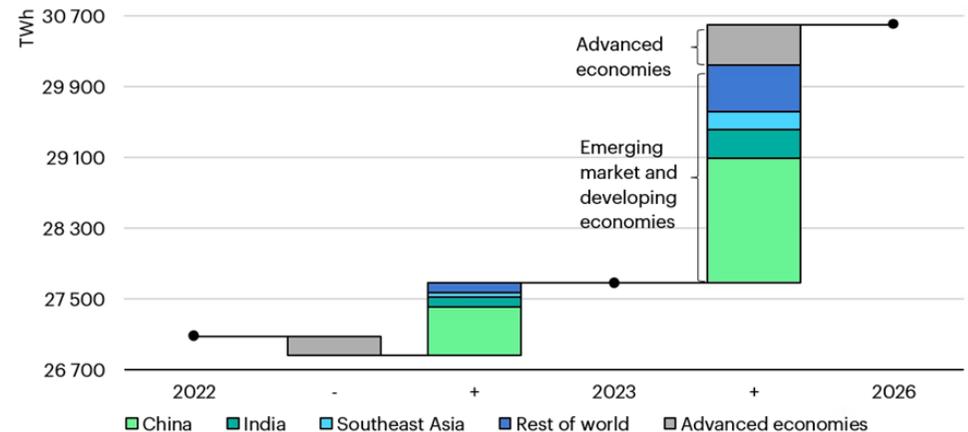


(出典) 資源エネルギー庁「令和 4 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2023)」(2023 年 6 月)

米などの開発途上国を中心に増え続けてきた。地域別に見ると、北米・西欧地域は他の先進国と比較して伸び率が低い一方、アジア、中東、中南米など開発途上国が多い地域では、電力消費量が急増している。特にアジアの電力消費量は 1994 年に西欧を、2004 年に北米を上回り、2020 年時点で世界全体の 5 割近くを占めるまでに拡大した。

足元もこの傾向に変化はなく、国際エネルギー機関 (IEA) によると 2026 年までの追加電力需要の約 85%は先進国以外の国々からもたらされる<sup>1</sup>。インドや東南アジアでは経済成長に伴って一人当たりの電力使用量が急速に増加している。中国は産業構造が変化の中で電力需要の伸びが鈍化しているものの、2026 年の需要は 2022 年から約 1,400 テラワットアワー (TWh) 増えると予測されており、これは EU の現在の年間電力消費量の半分以上に相当する＜図表 4-2＞。

図表 4-2 地域別の電力需要の前年比変化



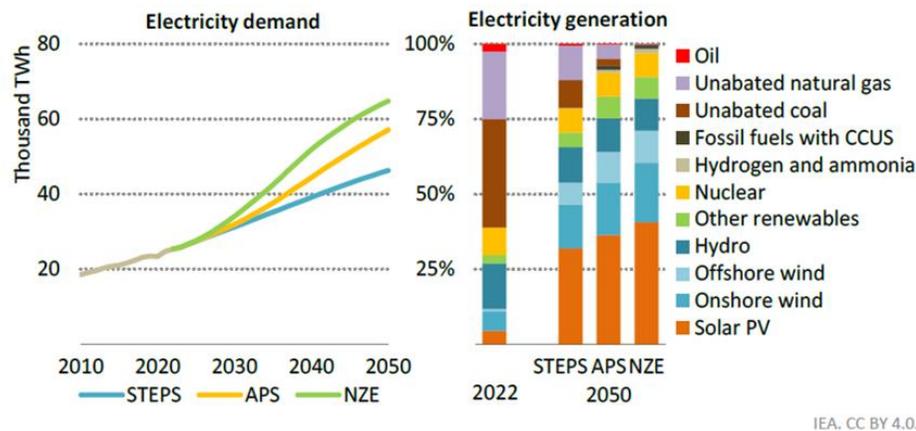
(出典) International Energy Agency (IEA), “Electricity 2024”, Jan.,2024.

<sup>1</sup> International Energy Agency (IEA), “Electricity 2024”, Jan.,2024

◆世界の電力需要は2010年の2倍超に

IEAが2023年に3つのシナリオで示したエネルギー需給予想によると、世界の電力需要は、<図表4-3>のとおり、2050年にかけていずれのシナリオでも増加が見込まれる<sup>2</sup>。このうち既に公表・実施済みの政策に限定して推計されたシナリオ「STEPS (Stated Policies Scenario)」によると、2050年の電力需要は44,167TWhと2010年の2倍以上に増える。需要増加の背景にあるのは人口増加や所得の増加、電化の進展だ。世界の人口は2050年までに約17億人増加すると予想されているが、そのほとんどがアジアとアフリカの都市部に集中する。地域別で電力需要が最も伸びるのはインドで、2050年には一国で東南アジアやアフリカを上回る規模になる見通しだ。

図表4-3 世界の電力需要と電源構成の見通し（シナリオ別）



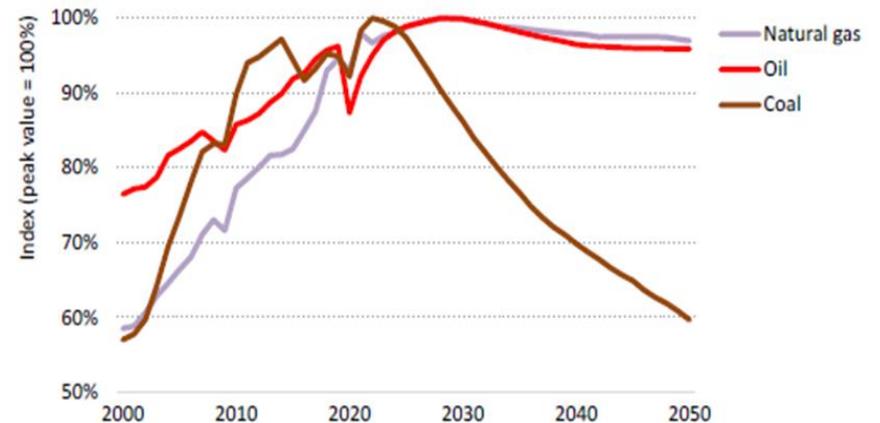
(出典) IEA, “World Energy Outlook 2023”, Nov.2023.

◆火力発電は3割以上削減

旺盛な電力需要をまかなうため、発電設備の容量もアジアを中心に拡大し

ていく。電源の種類としては、太陽光発電など再エネの活用が進むものの、安定電源として石炭や天然ガスを燃料とする火力発電の需要は根強く残るだろう。<図表4-4>のとおり、IEAの見通しでは、現在の政策を基にしたSTEPSシナリオであっても2030年までに化石燃料の需要がピークに達する。発電量から見ると、2022年時点の世界の発電量のうち火力発電は約61%を占めており、内訳は石炭が36% (10,427TWh)、天然ガスが22% (6,500TWh)、石油が2% (709TWh) となっている。STEPSシナリオでは、2030年の発電量の石炭火力は8,333TWhまで削減される見通しである。一方、ガス火力は6,611TWhとほぼ横ばいで、2030年までには先進国でのガス需要の減少が、開発途上国でのガス需要の伸びを相殺すると見込まれている。石炭火力の削減が続くことで、2050年時点の火力による発電量は計11,373TWhと、2022年時点から3割以上削減される見通しである。

図表4-4 STEPSシナリオにおける化石燃料消費量（燃料別）



(出典) IEA, “World Energy Outlook 2023”, Nov.2023.

<sup>2</sup> 「World Energy Outlook 2023」で現行政策に基づく「公表政策：STEPS」、政府の公約に基づく「発表誓約：APS」、温暖化ガス排出量ネットゼロ達成を目標とした「ネットゼロ：NZE」の3つのシナリオに基づいて予測している。

安定的に大量の電力を供給できる火力発電は、急増する電力需要に対応する手段として有用だが、カーボンニュートラルが世界的な命題となりつつある中、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の抑制にも取り組む必要がある。火力発電を持続的に活用していくには、CCS（炭素捕捉・貯蔵技術）などCO<sub>2</sub>を抑えるテクノロジーの発展がカギになる。

## （2）エネルギー獲得競争の激化

### ◆中東やアジアは化石燃料争奪も

脱炭素に向けた潮流が強まる中、化石燃料資源への依存度の低減は先進国を中心に進んでいる。IEAの見通しではSTEPSシナリオにおいて化石燃料の需要は2030年がピークとされているが、一部地域ではその後も化石燃料が主要なエネルギー源であり続けるだろう。特に中東やアジアではガス需要の増加が見込まれ、2050年の両地域のガス需要は世界全体の約47%にあたる1,968 km<sup>3</sup>を占める見通しだ。

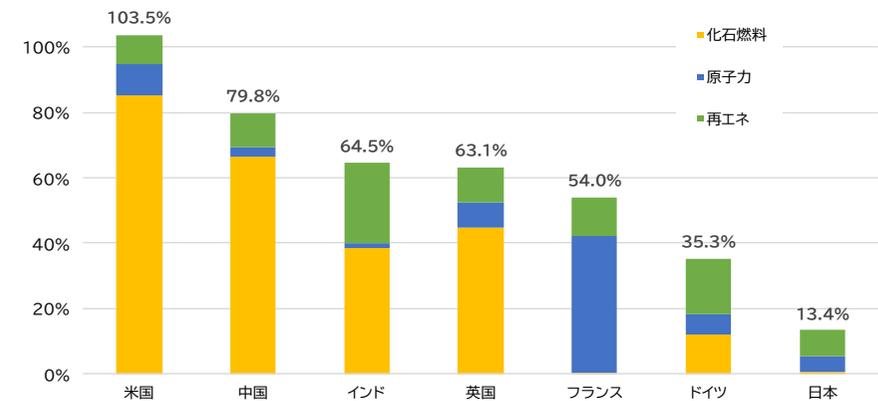
一方、2022年のロシアによるウクライナ侵攻後、欧州諸国がロシア産ガスからの脱却を図ったことで、短期的な需給バランスが崩れ、液化天然ガス（LNG）の価格が急騰した。これに加えて、中東の情勢不安もリスクを高めている。このように地政学的リスクが高まる中でガス需要が増えて行けば、中東やアジアなどではLNGの獲得競争が生じる可能性がある。

### ◆クリーンエネルギーが競争地図を塗り替える

日本は国土が狭く天然資源が少ないため、化石燃料を海外から大量に輸入している。2021年における日本のエネルギー自給率は13.4%と、これは他の経済協力開発機構（OECD）諸国等と比較しても低い水準である（図表4-5）。この高い海外依存度は、エネルギー安全保障上大きなリスクをもたらす

ており、エネルギー自給率の向上が大きな課題となっている。日本のようにエネルギーの自給率の低い国は、こうした資源獲得競争にさらされるリスクを負っている。

図表 4-5 主要国のエネルギー自給率（2021年）



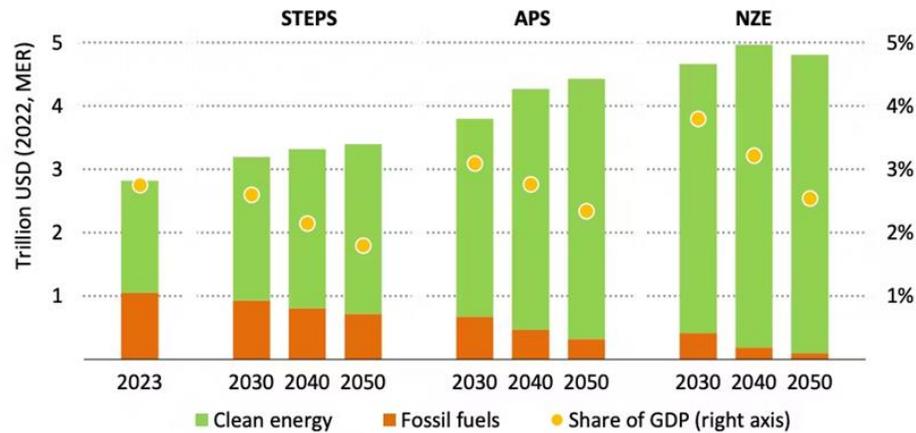
（出典）IEA, “World Energy Balances”より当社作成

エネルギー自給率を高めるには、燃料を資源に依存しない原子力や再エネといったクリーンエネルギーへの移行が重要である。加えて、化石燃料と再エネが共存する移行期は、国境を越えたリスクが高まる可能性があることから、化石燃料からの脱却は、各国の競争力を変える可能性が高い<sup>3</sup>。

IEAの報告では、現在、化石燃料への投資約1兆ドルであるのに対し、クリーンエネルギー向けの支出は1.8兆ドルである。2030年における世界のエネルギー投資総額は、STEPSでも3.2兆ドルとなり、うちクリーンエネルギーは2.5兆ドルを占めると予想している（図表4-6）。

<sup>3</sup> United Nations Development Programme, “2023-2024 human development report”, Mar., 2024.

図表 4-6 エネルギー別の投資の見通し



(出典) IEA, “World Energy Outlook 2023”, Nov.2023.

クリーンエネルギーへの移行が進むことによって、IEA は今後 3 年間で更に電力需要は増大すると見込んでおり、2024 年から 2026 年にかけては電力需要の伸びは平均 3.4% まで加速すると予測されている<sup>4</sup>。このうち、2026 年までの世界の電力需要の増加の約 85%は、中国、インド、東南アジア諸国からもたらされると予想している。

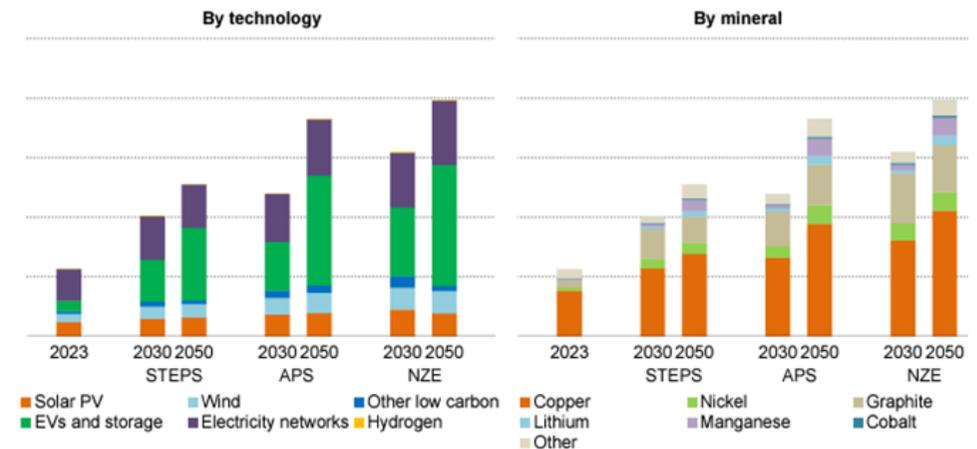
◆ 獲得競争の対象は化石燃料から鉱物へ

2050 年に向けては、クリーンエネルギーへの移行によって化石燃料への依存度が低減し、徐々に化石燃料資源の獲得競争は落ち着くと見ることができる。しかし一方で、クリーンエネルギーの需要増加に伴って、重要鉱物への依存度が高まるというリスクも生じる。銅、リチウム、ニッケル、コバルト、レアアースなどの重要鉱物は、電動車のバッテリーやモーター、風力発

電の永久磁石などに欠かせない。IEA によれば、重要鉱物の需要は STEPS シナリオにおいて、2030 年までに 2022 年から倍増し 20 メガトン (Mt) まで増加すると見込まれており、特に電気自動車 (EV) や蓄電池での伸びが顕著である<図表 4-7>。

日本は特に、レアアースやリチウムを中国などの特定の国に依存していることから、カーボンニュートラル実現に向けては、重要鉱物の獲得競争が激化していだろう。供給源を複数の資源国に分散することやリサイクル技術の確立、重要鉱物の使用量を減らす技術革新といった対策を進めることが重要になる。

図表 4-7 クリーンエネルギー技術ごとの鉱物の需要



(出典) IEA, “Global Critical Minerals Outlook 2024”, May.2024.

<sup>4</sup> IEA, “Electricity 2024”, Jan.,2024

## 2. クリーンエネルギーの拡大

脱炭素に向けた歩みを速めていくには、発電量の変動しやすい再生可能エネルギー（再エネ）を無駄なく使うことが重要になる。発電の適地と消費地を結ぶ送電網や蓄電池、自給自足型の小型送配電網「マイクログリッド」といった再エネを最大限活用するためのインフラ構築が進むだろう。原子力はエネルギー安全保障の観点からも注目が高まっており、安全性を高める取り組みを進めながら、世界的に活用の動きが広がっていくと考えられる。

### （1）太陽光と風力が世界の主力電源に

#### ◆再エネ導入量は2050年にかけて4倍超に

脱炭素の要請が強まる中、発電時に二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を出さない電源として太陽光や風力といった再エネの導入が急速に進んでいく。世界の再エネの発電容量は2023年時点で約4,141ギガワット（GW）導入されており、うち太陽光が1,552GW、風力が1,007GWだった。2023年単年の増加量は506GWと前年から約50%増え、うち4分の3を中国などにおける太陽光発電の増設分が占めた<sup>5</sup>。2050年には、世界の再エネはSTEPSでも19,120GW（うち太陽光12,639GW、風力3,874GW）にまで拡大する見通しだ。

国際エネルギー機関（IEA）によると世界の再エネ容量は2028年までに7,300GWに達すると予測される。米国・欧州連合（EU）・インド・ブラジルでは、2023～2028年における太陽光発電と陸上風力発電の導入量が約1,075GWと、それ以前の5年間と比べて2倍以上に増える見込みだ。

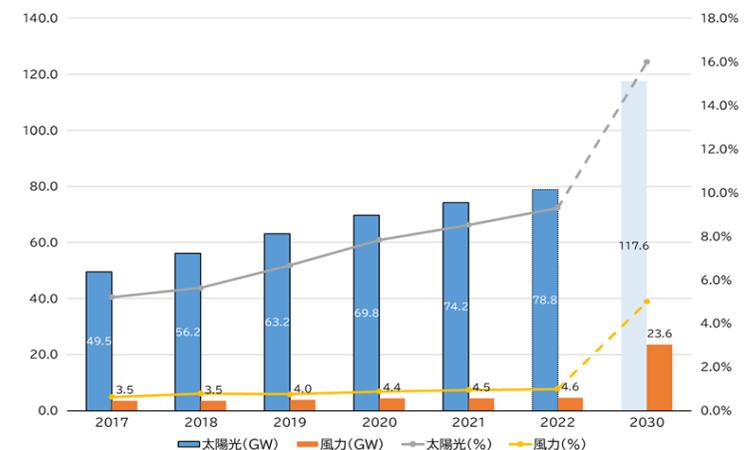
もっともこのペースでは2030年までに現在の2.5倍の増加にとどまり、国連気候変動枠組条約第28締約国会議（COP28）で採択された「2030年までに再エネの発電容量を世界全体で3倍にする」という目標には達しないとみられる。このため送電網インフラへの投資や新興国および開発途上国に対

する資金支援が必要になると考えられる。

#### ◆日本は送電網の整備が急務

日本は国民負担の抑制と地域との共生を図りながら、〈図表4-8〉のとおりに2030年度の電源構成に占める再エネ比率36～38%を達成するため、特に太陽光発電・風力発電へ注力している。2022年時点の太陽光の発電容量は78.8GWと5年間で59%伸び、風力は4.6GWと同31%伸びた。また、地域間での再エネの需要と供給の差を解消するため、全国規模で電力系統整備を進める方針である。具体的には、地域間を結ぶ送電線について今後10年間程度で、過去10年間とくらべて8倍以上の規模で整備を加速としている。

図表 4-8 日本の太陽光・風力発電の設備容量と2030年目標



（出典）Energy Institute, “Statistical Review of World Energy”, Jun,2023 .および IEA, “Monthly Electricity Statistics”, Mar,2023 .より当社作成

<sup>5</sup> IEA, “Renewables 2023”, Jan.,2024)

#### ◆再エネ設備の自給率も重要に

再エネ拡大によって電力自体の国内生産量は増えるが、現状では太陽電池や蓄電池、風力タービンといった関連機器を生産するための材料は一部の産出国に頼らざるを得ない。特に世界の太陽電池で用いられる結晶シリコンは中国が8割以上のシェアを占めている。この依存度を減らし、安定供給を確保することも重要な課題である。

この課題を技術革新によって解決する試みの1つが「ペロブスカイト太陽電池」だ。現在太陽光パネルのサプライチェーンは中国に大きく依存しているが、同電池の主要材料であるヨウ素は日本が世界シェアの30%を占めるため安定供給が見込める。従来の太陽電池に比べて薄く柔軟、軽量であるため多様な場所に設置できるのが特徴で、主にフィルム型とガラス型の2種類の開発が進んでいる。

フィルム型は建物の壁面や屋根、小型IoT（モノのインターネット）デバイスに使えるが、耐久性や大型化に課題がある。積水化学工業は東京都の港湾施設で国内最大規模のフィルム型電池検証プロジェクトを実施しており、電力は蓄電池に充電、港湾施設のデッキに掲げられているサインの点灯に活用する<sup>6</sup>。京都大学発スタートアップのエネコートテクノロジーズは三井不動産レジデンシャルと組み、住宅の照明や家具などにフィルム型電池を設置して夜間電力を確保する研究を進めている<sup>7</sup>。ガラス型は窓ガラスを代替でき、住宅やビルにおける発電拡大が期待される。パナソニックホールディングスはガラス型の実証を神奈川県藤沢市のスマートシティで実施しており<sup>8</sup>、住宅のバルコニーに設置して発電と景観の両立を目指す。

日本はペロブスカイト太陽光電池の研究開発で世界に先行してきたが、足元では陰りも見える。年間の特許出願件数は2019年まで5年連続世界一であったが、2020年以降は中国勢が日本を上回っている<sup>9</sup>。

#### ◆日本の風力は「浮体式」が切り札

風力発電のうち、海上で風車を回して発電する洋上風力発電は、陸上に比べて安定した風が得られ、景観・騒音面の影響が小さいといったメリットがあり、今後大量導入の可能性を秘めている。米国エネルギー省（DOE）によると、洋上風力発電の導入量は、2022年時点の59GWから2028年までに182GWを超える可能性がある<sup>10</sup>。

洋上風力発電には海底に固定した基礎に風力発電機を取り付けて発電する着床式と、洋上に風車を浮かべて発電する浮体式の2種類の設置方法がある。水深が50mを超える海域では、浮体式が着床式に比べて経済的に有利とされている。浮体式について、DOEの報告書では今後の浮体式風力発電の導入見通しについて複数機関の予測を比較して示しており、2030年までに約10GW、2050年までに300GWに達するなど様々に推定されている。

特に日本は近海で水深が急に深くなることから、深い海域にも設置可能な浮体式への期待が高まっている<sup>11</sup>。日本の洋上風力発電の導入見通しは、浮体式も含め2040年までに30~45GWの案件形成を目標に掲げており<sup>12</sup>、2050年に向けて浮体式洋上風力発電が普及すれば、日本の再エネ比率の大幅な拡大が見込まれる。

<sup>6</sup> 積水化学工業「東京都との港湾施設における国内最大規模のフィルム型ペロブスカイト太陽電池の検証について」（2024年5月24日）

<sup>7</sup> エネコートテクノロジーズ「住宅用ペロブスカイト太陽電池の共同研究を開始」（2023年10月17日）

<sup>8</sup> パナソニックホールディングス「世界初、ガラス建材一体型ペロブスカイト太陽電池 Fujisawa サステイナブル・スマートタウン内で長期実証実験を開始」（2023年8月31日）

<sup>9</sup> 日本経済新聞「曲がる太陽電池、中国猛追 特許出願はパナソニック首位」（2023年11月28日）

<sup>10</sup> U.S. Department Of Energy, “Offshore Wind Market Report: 2023 Edition”, Aug.,2023.

<sup>11</sup> NEDOによると、日本における浮体式を設置可能な海域は着床式の約5倍ある。

<sup>12</sup> 経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（2021年6月13日）

(2) 原子力発電の再拡大

原子力発電はエネルギー安全保障と脱炭素化という二重の目的から再び世界の関心を集めている。脱炭素に向けた国際的な取り組みが進む中でロシアによるウクライナ侵攻をきっかけにエネルギー危機が起こり、エネルギー自給率向上と脱炭素を両立する電源としての価値が再評価されている。

◆世界の設備容量は2050年に5割増

IEAのSTEPSシナリオによると原子力発電の設備容量は2050年に2022年の約1.5倍の620GWに達し<sup>13</sup>、増加分の大半は中国とその他開発途上国が占めている。原子力発電を容認している国では運転期間の延長や新規建設が増加し、世界全体の原子力発電の設備容量は拡大する見通しである。例えば中国では2023年12月に世界初の高温ガス炉(高い発電効率と炉心熔融を起こさない固有の安全性を持つ原子炉)原子力発電所が商業運転を開始したほか<sup>14</sup>、英国は2024年にウェールズ地方において大型の原子力発電所を新設する計画を発表した<sup>15</sup>。

IEAのAPSシナリオでは2050年の原子力発電の設備容量は770GW、NZEシナリオでは900GWを超えると予測されている。いずれのシナリオにおいても大型炉が主流になると見られているが、産業での熱供給や水素製造など多様な用途が見込めるSMR(小型モジュール炉)の開発が進展することによって、長期的には原子力発電利用の可能性を広げると指摘している。

国際原子力機関(IAEA)も2050年の原子力発電の見通しを発表している<sup>16</sup>。<図表4-9>のとおり、「現在の市場、技術、資源の動向が継続し、原子力発電に影響する明確な法律、政策、規制の追加的な変更がほとんどない」

場合を想定した低位予測による2050年時点の設備容量は458GW、「低位予測よりも野心的であるが妥当性があり、技術的に実現可能で、気候変動に関する各国の政策を考慮」した場合の高位予測では890GWに拡大すると予測している。

図表 4-9 世界における原子力発電の設備容量の見通し



(出典) International Atomic Energy Agency, “Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050”, Oct.2023.

◆日本もじわり見直しが進む

日本では2023年に成立した「GX脱炭素電源法」に基づいて原子力発電所の運転期間延長が認められるようになるなど、原子力政策が新たな段階に入っている。2021年に策定した「第6次エネルギー基本計画」では、可能な限

計画発表」(2024年6月3日)

<sup>16</sup> International Atomic Energy Agency, “Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050”, Oct.,2023

<sup>13</sup> IEA, “World Energy Outlook 2023”, Nov.,2023

<sup>14</sup> 日本貿易振興機構(JETRO)「世界初の第4世代原子力発電所、山東省で商業運転開始」(2023年12月27日)

<sup>15</sup> 日本貿易振興機構(JETRO)「英政府、ウェールズ北西部で大型原子力発電所の新設

り原子力発電への依存度を低減するとして、2030年の電源構成目標を20～22%としているが、足元ではエネルギー安全保障上の課題や、デジタル経済の拡大に伴う電力需要の増加といった新たな課題が顕在化している。2024年度中に行われるエネルギー基本計画の見直しにあたっては、既存施設の再稼働だけでなく、＜図表 4-10＞のとおり「GX 推進戦略」で示されている次世代革新炉開発の具体化に向けた議論も進められることが予想される。

図表 4-10 次世代革新炉の主な利点と運転開始時期

主な種類	主な利点	運転開始
小型軽水炉	・自然循環で確実な冷却 ・工期短縮・初期投資抑制	実証炉: 2040年前半
革新軽水炉	・安全性・信頼性向上、運転性・操作性の向上 ・規制プロセスを含め高い予見性	商用炉: 2030年半ば
高速炉	・高温/低温を活用した熱利用 ・優れた安全性、経済性向上かつ全性向上	実証炉: 2040年半ば
高温ガス炉	・高い固有の安全性 ・高温の熱を利用し多目的の利用が可能 (水素製造等)	実証炉: 2030年半ば
核融合炉	・核融合反応による固有安全性 ・高レベル放射性廃棄物がない	原型炉: 2050年以降

(出典) 資源エネルギー庁資料より当社作成

#### ◆安全性確保や廃棄物、課題も多く

原子力発電の技術開発においては、既設の軽水炉を基にした安全性の高い「革新軽水炉」の開発が進められている。例えば三菱重工業の「SRZ-1200」は、安全性を大幅に向上させた次世代の軽水炉として注目されている。また高レベル放射性廃棄物の容量を減らせる高速炉や、水素製造と発電の両立が期待される高温ガス炉の実証炉の開発も進んでいる。これらのプロジェクト

には、2023年度から3年間でそれぞれ460億円、431億円が投資される予定である。

ただ実際に国内で原子力発電を再び推進していくには、高い安全性の維持や廃棄物処理、建設コストの削減など多くの課題が存在する。廃棄物処理については原子力発電所で使用された燃料（使用済燃料）を再処理して再使用する「燃料サイクル」の実現がカギになる。使用済燃料の再処理施設は建設が進められているものの、原子力規制委員会による審査への対応などが進まず完成時期が見通せていない。使用済燃料はいったん各原子力発電所の燃料プールに保管するが、2023年時点で全国のプールの容量の8割が埋まっている。このため電力会社は発電所の敷地外に一時的に使用済み燃料を保管する「中間貯蔵施設」の建設を進めている。

一方、フランスでは北西部ラ・アーグにおける再処理施設について、政府が2040年以降も使用済燃料の処理と燃料サイクルに関する政策を推進する方針を示し、大規模投資を決定している<sup>17</sup>。これによって年間1,000tの使用済燃料の再処理・リサイクルが可能となる。同工場へは日本の発電所で発生した燃料の処理も依頼しているが、日本が本格的に燃料サイクルを回していくには国内で設備を確保することが重要になる。

日本が目指す「2050年カーボンニュートラル」達成に向けて原子力発電は一定の役割を担うことが必要と考えられる。特に資源に乏しい日本においては、次世代革新炉技術の開発と導入が、エネルギーミックスの多様化にも貢献できるだろう。2050年に向け、GX（グリーントランスフォーメーション）やDX（デジタルトランスフォーメーション）の潮流による電力需要の増加に対応するためには、安全性の向上を進めながら、同時に立地地域の住民や広く国民の理解を得ていく取り組みも重要になるだろう。

<sup>17</sup> Revue générale nucléaire, “Le Conseil de politique nucléaire annonce des investissements importants à Orano La Hague”, Feb.28, 2024

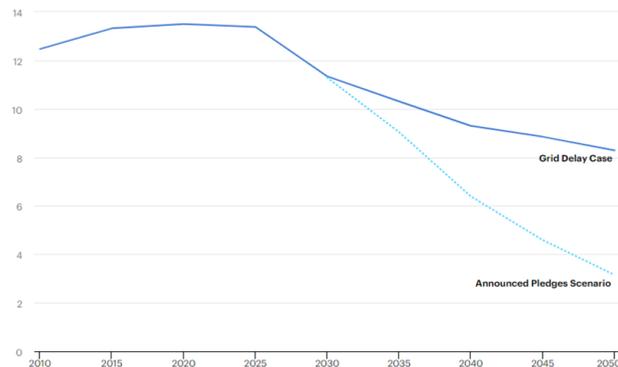
### (3) 再エネ利用の効率化・最大化

クリーンエネルギーへの移行、特に再エネの導入拡大においては、導入の適地とエネルギー消費地をつなぐ送電網の整備や蓄電池の導入が極めて重要である。情報通信技術（ICT）を活用して需要と供給のバランスを最適に調整するスマートグリッド技術は再エネの変動を吸収し、電力供給を安定させる役割を果たす。EU では再エネへの移行を加速させるために、スマートグリッドの導入を促進する行動計画が2023年11月に発表されている。

#### ◆再エネの拡大には送電網整備が欠かせず

IEA は2050年ネットゼロを達成するという世界の気候目標を達成するためには送配電網を2030年まで毎年約200万キロメートル拡張する必要があると指摘する<sup>18</sup>。2040年までには累計8,000万キロメートルの送電網を増設または改修する必要があるという<sup>19</sup>。再エネによる発電設備への投資は、過

図表 4-1 1 世界の電力部門のCO<sub>2</sub>排出量の見通し  
(送電網遅延ケースとAPSシナリオ)



(出典) IEA, “Electricity Grids and Secure Energy Transitions”, Oct., 2023.

去5年間で約2,000億ドル増加し2022年には7,500億ドルに達したが、世界の送電網への投資は年間約3,000億ドルで横ばいとなっている。

送電網への投資の遅れはクリーンエネルギーへの転換の遅れに繋がる可能性がある。送電網の整備が遅れると再エネの導入と化石燃料の使用抑制が進まないと考えられ、IEAによると、<図表4-1 1>のとおり、APSシナリオ（発表誓約）に比べてCO<sub>2</sub>排出量の削減が遅れると予想される。送電網の整備が遅れた場合、2050年までに電力部門から排出されるCO<sub>2</sub>の量（累計）はAPSシナリオに比べて58Gt多くなる計算だ。

#### ◆蓄電池が再エネの主力電源化に貢献する

蓄電池は電力の供給と需要のバランスを取るために活用でき、車の電動化や再エネの主力電源化に不可欠とされる。IEAが2024年4月に公表した報告書によると、電力分野における蓄電池（定置用）の新規導入数は2023年に41.5GWと前年の2倍以上になった<sup>20</sup>。バッテリー用途の大半を占める電気自動車（EV）向けの導入（車載用）は、2023年に前年比40%増加し、EVの台数ベースでは約1,400万台だった。

同報告書では太陽光発電と蓄電池は現在、インドにおける新規の石炭火力発電と同等のコスト競争力があり、今後数年で中国の新規石炭火力発電や米国の新規天然ガス火力発電と並ぶ競争力を持つと指摘している。STEPSシナリオでは、<図表4-1 2>のとおり、蓄電池と太陽光発電を組み合わせたプロジェクトの世界平均LCOEは2030年までに40%減少すると予測されている。これによって、太陽光発電と組み合わせた蓄電池は最も競争力のある新電力源のひとつとなるという。ただし、導入コストのさらなる低減や長寿命化、大規模な蓄電池の場合は広大な適地が必要となるなど、課題も多い。蓄電池市場は車載用・定置用ともに拡大する見通しで、2050年では車載

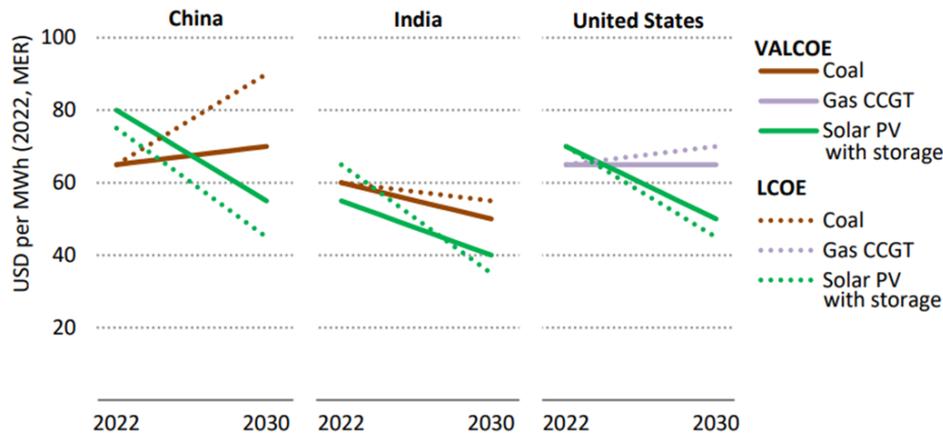
<sup>18</sup> IEA, “Net Zero Roadmap”, Sep., 2023.

<sup>19</sup> IEA, “Electricity Grids and Secure Energy Transitions”, Oct., 2023.

<sup>20</sup> IEA, “Batteries and Secure Energy Transitions”, Apr., 2024.

用が 53 兆円、定置用が 47 兆円規模の市場に成長する見込みである<sup>21</sup>。

図表 4-12 2022~2030 年 STEPS シナリオにおける中国、インド、米国における太陽光発電と蓄電池、石炭、天然ガスの LCOE と VALCOE)



(出典) IEA, “Batteries and Secure Energy Transitions”, Apr. 2024.

(注) LCOE (Levelised Cost of Electricity)：電源別発電単価のこと。建設費、資金調達、燃料費、炭素価格などすべてのコスト要素を1つの指標にまとめたもの。

VALCOE (Value-adjusted LCOE)：価値調整済み電源別発電単価のこと。電源のエネルギー価値、容量価値、柔軟性価値を LCOE に組み込んだもの。

#### ◆地域の電力供給をマイクログリッドで強靱化

マイクログリッドは地域単位で独立した電力供給システムを構築する技術である。このシステムは小規模ながらも発電、蓄電、そして消費を一元的に管理し、再エネを効率的に活用しつつ電力を安定して供給することを目指している。自然災害による大規模な停電時でも、地域内で電力を供給し続けることが可能である。太陽光発電や風力発電、蓄電池、水素など多様なエネル

ギー源によって、特に人口減少やインフラの保守人員が減少する地方においては、マイクログリッドが一つの解決策になり得るだろう。

茨城県つくば市はマイクログリッドを活用して 2030 年までに中心市街地エリアの脱炭素化を目指している<sup>22</sup>。既存の都市インフラである地域冷暖房共同溝を活用した自営線マイクログリッドを構築し、民間及び公共施設に太陽光発電や蓄電池を導入するとともに、市内の医薬品工場にて発生する魚油等を燃料とするバイオマス発電を導入する計画だ。このように再エネの利用拡大とともに、マイクログリッドはエネルギー供給の柔軟性を高め、地域社会の持続可能性を支える重要な役割を果たすことが期待される。

日本電機工業会がまとめた報告書<sup>23</sup>によれば、2050 年の「分散型グリッド」の絵姿として、カーボンニュートラルを目指す地域の中小都市(4~5 万世帯)の在り方が示されている。分散型グリッドは、域内で分散型エネルギー源(再エネ電源、蓄電池、次世代自動車、ヒートポンプなど)を統合管理することで、電力の混雑緩和・平準化を実現し、災害時には防災拠点や避難所向けの電力を確保することを可能とする。こうした分散型エネルギーによる地産地消によって、各家庭においては電力供給・電気料金の安定化や停電リスクの減少が実現することが期待される。

<sup>21</sup> 蓄電池産業戦略検討官民協議会「蓄電池産業戦略」(2022 年 8 月)

<sup>22</sup> 茨城県つくば市のホームページ「脱炭素先行地域づくり事業」

<sup>23</sup> 日本電機工業会「社会課題を解決する 2050 年分散型グリッドの絵姿」(2023 年 3 月)

### 3. グリーンテックの進化

二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）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CO<sub>2</sub>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。

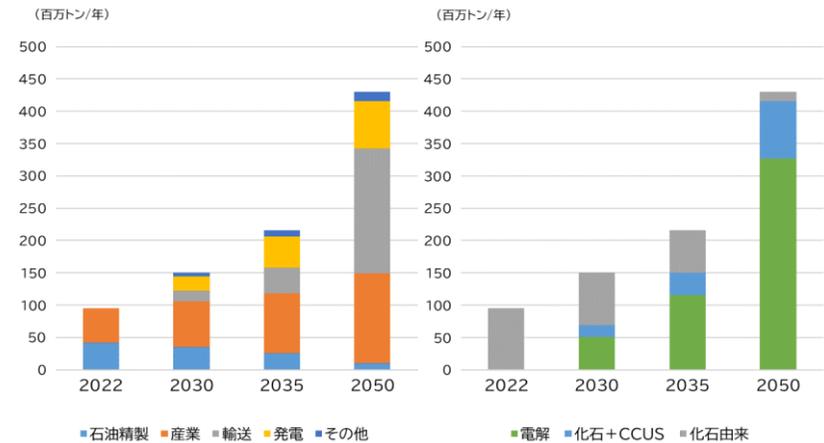
#### ◆水素の需要は2035年に2倍に

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）<sup>24</sup>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」<sup>25</sup>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CO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>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<sup>26</sup>。こうしたCO<sub>2</sub>の発生を抑

<sup>24</sup> 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CO<sub>2</sub>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。

<sup>25</sup> 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。

<sup>26</sup> 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。

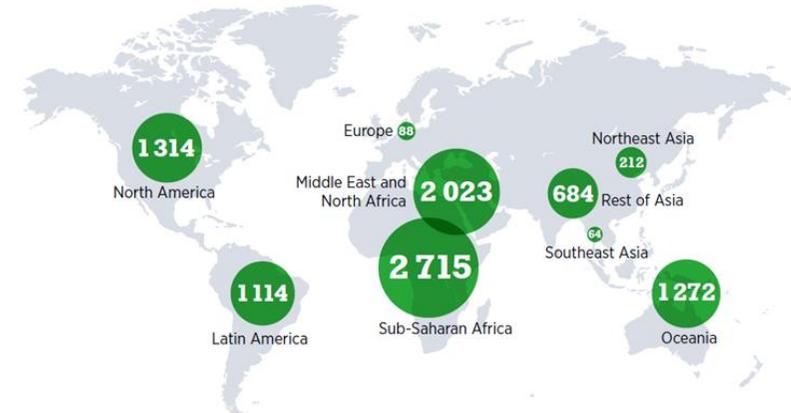
製造工場で排出するCO<sub>2</sub>の削減に水素を利用する取り組みもある。例えばIHIグループのIHI汎用ボイラは、工場内で使う蒸気を作るボイラーについて都市ガスに水素を混ぜて燃やせるタイプを開発した<sup>27</sup>。パナソニックは自社工場で燃料電池や太陽光発電、蓄電池を組み合わせた分散電源システムの実証実験を進めており、他社の工場や商業施設向けに事業化を目指している<sup>28</sup>。水素の地産地消を目指す試みは福島県浪江町で実証事業が進んでおり、太陽光で作ったグリーン水素を町内の輸送や家庭向けに供給している<sup>29</sup>。

#### ◆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<sup>30</sup>。

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)

<sup>27</sup> 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)

<sup>28</sup> 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)

<sup>29</sup> 福島県浪江町のホームページ「水素タウン構想について」

<sup>30</sup> 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 CO<sub>2</sub> 貯留、年数十億トンも

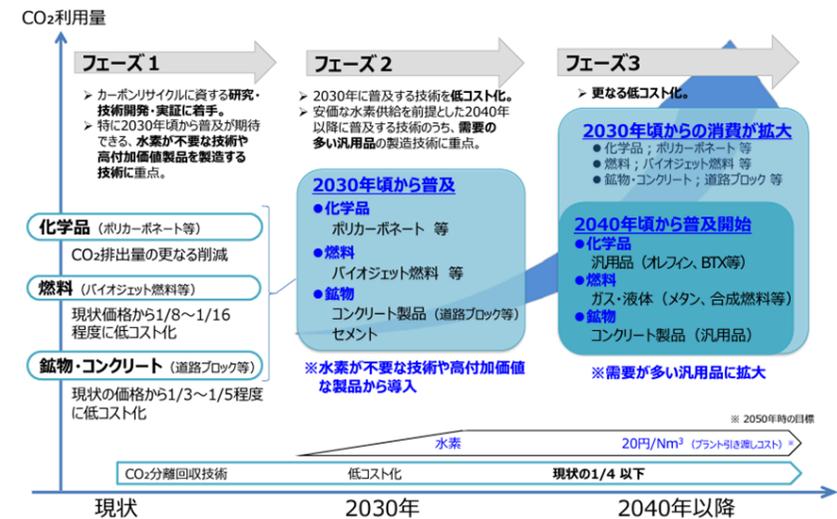
CCS の国際的シンクタンクである Global CCS Institute の調査によると、2023 年 7 月時点で世界に 392 の CCS 施設があり、前年から 102% 増えた<sup>31</sup>。そのうち稼働中の 41 施設は年間 4,900 万トンの CO<sub>2</sub> を回収・貯留する能力があり、これは世界全体の CO<sub>2</sub> 排出量の 0.1% に相当する。しかし世界的な気候目標を達成するためには不十分とされ、同報告書は 2030 年までに年間約 10 億トン、2050 年までに同数 10 億トンの CO<sub>2</sub> を CCS によって貯留・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<sup>32</sup>。

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、CO<sub>2</sub> 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<sup>33</sup>。このように、CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 回収にかかるコストの低減や、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> を回収

DAC は、大気中の CO<sub>2</sub> 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

<sup>31</sup> Global CCS Institute, “GLOBAL STATUS OF CCS 2023”, Nov.2023

<sup>32</sup> 経済産業省「CO<sub>2</sub> 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)

<sup>33</sup> 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 CO<sub>2</sub> を DAC によって回収する必要があるという<sup>34</sup>。

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 CO<sub>2</sub> 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<sup>35</sup>。

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)<sup>36</sup>」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<sup>37</sup>。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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 回収装置の普及が期待される。

#### ◆太陽光エネルギーで CO<sub>2</sub> 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<sup>38</sup>。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<sup>39</sup>。アンモニアは燃焼しても CO<sub>2</sub> 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<sup>40</sup>、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。

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

<sup>35</sup> 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)

<sup>36</sup> 空気を膜でろ過するだけで CO<sub>2</sub> を回収する方法で、従来の CO<sub>2</sub> 分離膜と比べ極めて高い CO<sub>2</sub> 透過性を有すナノ分離膜を使用することが特徴。

<sup>37</sup> 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)

<sup>38</sup> 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)

<sup>39</sup> 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)

<sup>40</sup> 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 100m<sup>2</sup> 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。

#### ◆CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub> 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<sup>41</sup>。

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<sup>42</sup>。

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

<sup>41</sup> 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)

<sup>42</sup> 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<sup>43</sup>。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<sup>44</sup>。

#### ◆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<sup>45</sup>。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<sup>46</sup>。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<sup>47</sup>。

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。

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

<sup>44</sup> 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）

<sup>45</sup> 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」

<sup>46</sup> 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）

<sup>47</sup> 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）