

# 世界経済における代替エネルギーの動向

## ―脱炭素経済におけるエネルギー利用側の動向に着目して―

神奈川大学 道満治彦

### はじめに

#### (1) 研究の背景

1973年の第一次石油危機から50年が経過した。半世紀の中で、エネルギー構造を取り巻く状況は大きく変化し、石油・石炭・天然ガスを中心とした化石燃料に代わる代替燃料として、原子力や新エネルギー開発の可能性が追及された。

そして、エネルギー政策やエネルギー市場を取り巻く国際政治経済学的な背景も変化している。オイルショック以降、エネルギー分野では化石燃料の需給や化石燃料の確保が最重要課題であり、代替エネルギー開発を除けば、政策論議の中心はエネルギー安全保障であった。しかしながら、1990年代以降に焦点化されてきた気候変動問題や、2015年に国連で策定された持続可能な開発目標（SDGs）、さらには企業経営や金融・投資の分野で重視されている環境・社会・統治（ESG）への対応も余儀なくされている。

代替エネルギー開発の動向に関しては、電力分野とそれ以外に分けることができる。電力分野は全般的に議論が先行しており、再生可能エネルギーが優位となりつつある。

原子力に関しては、1953年の国連総会におけるアイゼンハワー大統領の演説「平和のための原子力（Atoms for Peace）」以降、先進各国で原子力の平和利用が進められた<sup>1</sup>。日本においても、日本原電の東海原子力発電所における商用運転開始以降、原子力の発電利用が進められた。1979年のスリーマイル島原発事故、1986年のチェルノブイリ原発事故といった重大な原子炉過酷事故が発生するも、2000年代には原子力カルネサンスと呼ばれる先進国における原子力政策の見直しや原子炉の新設が検討された。しかしながら、①原子炉新設の工期延長に伴うコスト増や、②EUにおける安全規制の強化に伴う安全対策費用の増加、③2011年3月11日に発災した東京電力福島第一原発事故による世論の反発や事故処理等の要因により、新興国以外では代替エネルギーの中での最も選択肢ではなくなりつつある。確かに小型モジュール炉（SMR）の導入検討や研究開発が世界各国で検討されつつある<sup>2</sup>。し

---

<sup>1</sup> IAEA “Atoms for Peace Speech” <https://www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech>（アクセス日：2023年8月24日）

<sup>2</sup> 日本原子力研究開発機構（2022）「小型モジュール炉（SMR）開発の動向と原子力機構における新型炉開発の取組（2022.09.09掲載）」

<https://www.jaea.go.jp/04/sefard/ordinary/2022/2022090901.html>（アクセス日：2023年8月24日）

かしながら、研究開発段階もしくは実証炉導入の検討の域を出ておらず、商用化には至っていない。

他方で、新エネルギー開発に関しては、通商産業省によるサンシャイン計画（1974年）、ニューサンシャイン計画（1993年）などによって日本が世界でも主導的な立ち位置にはいたものの、当時は世界で見ても日本で見ても有力な代替エネルギーとなり得なかった。しかしながら、2050年までにカーボンニュートラルを目指すIEAのネットゼロシナリオにおいて、再生可能エネルギーが代替エネルギーの議論の中心となり、現実的な選択肢となっている。そうなり得たのは、①ドイツにおける2000年の再生可能エネルギー法成立による総合的な固定価格買取制度の導入とそれがもたらす再生可能エネルギーのコスト逡減、②電力自由化と発送電分離の電力システム改革による電力市場の透明化、③メリットオーダーに代表される経済的優先順位に基づく電力市場の形成に集約できる。

しかしながら、電力分野を除けば明確に代替エネルギー開発が進んでいるとは言い難い。そこで、電力分野を除く分野の中でも電気自動車（EV）および蓄電池、あるいは水素・アンモニア利用といったエネルギーの利用側の検討を行う必要がある。本稿（本報告）ではこれらの分野に焦点を当てていく。

## （2）先行研究

本稿（本報告）は、エネルギー利用側の技術選択を主題としつつも、国際政治経済学におけるエネルギー転換をどう位置付けるかという点から議論を進める。そこで、関連する先行研究について検討しておきたい。

まず国際政治経済学とエネルギーの関係性について論じた文献について言及しておきたい。Strange（1988）はエネルギー・スミスやリカードの時代以前から経済の生産の三要素以外に、技術とエネルギーを生産要素に加えるべきだったと主張し、その上で世界におけるエネルギー制度における変化は、4つの構造（安全保障構造、生産構造、金融構造、知識構造）の枠内もしくはその影響によって起こったと整理している。高橋（2022）は、これまでのエネルギー問題を扱う国際政治学・国際政治経済学の文献の多くが化石燃料を扱うリアリズムに基づく分析だったことに対して、再生可能エネルギーやエネルギー転換によるエネルギー安全保障の必要性、すなわち「リベラリズムに基づくエネルギー転換論」を説く。

次に、エネルギー利用側の状況について言及した文献を紹介しておきたい。Seba（2014）は、2014年時点で太陽光発電、電気自動車、自動運転車などの技術が既存のエネルギー産業や輸送産業を一掃する破壊的技術（テクノロジー・ディスラプション）が起こることは必然であると指摘し、エネルギーと輸送の工業化時代は情報技術と知識に基づくエネルギーと輸送の時代へと移行しつつあるとした。IEA（2021b）では、カーボンニュートラルへの対

応を迫られる中で、2050年ネットゼロエネルギーシナリオが提唱されており、この中では再生可能エネルギーを中心としたエネルギー構造を基礎としながらも、本稿で検討していく電化や水素利用の必要性にも言及している。飯田（2022）は、CASEやMaasといったモビリティの変革を整理した上で、環境コミュニティはEV化に期待し、テック業界は自動運転にわき、経済学者はライドシェアに新しい共有経済の可能性を見出し、投資家は企業テスラに注目していることを指摘し、それをテスラ化と捉えることができるとしている。高橋（2022）は、セクターカップリングの目的や背景を整理し、政策論上の意義を議論した上で、新たなエネルギーシステムとしての可能性について言及している。蓮見（2023）は、欧州新産業政策の中でのサーキュラーエコノミー、水素戦略、スマートモビリティ戦略についての動向を整理し、各産業部門のエネルギーの移行経路の方向性について議論した。

筆者は、道満（2021）で、コロナ禍において他国からの「外圧」が日本の気候変動エネルギー政策や企業経営を変化させてグリーン・リカバリーを推し進めたという仮説の下、①パリ協定の温室効果が削減目標の上積みへの圧力、②ダイベストメント運動による金融機関への圧力、③RE100とGAF A、④欧州グリーンディールによる影響、⑤米国大統領選挙と各国のグリーン・リカバリーによる影響、の5つの外部要因を検討した。道満（2023）ではEUにおける再生可能エネルギー政策の進展が欧州グリーンディールの前提条件であることを示し、日本の政策動向との比較を行った。EU再生可能エネルギー指令および電力指令により、再生可能エネルギーに対する優先給電と2つの優先接続の設定により、再生可能エネルギーが市場で競争可能な電源に成長したことを論じ、経済的優先順位（メリットオーダー）に基づく電力市場の形成に大きく寄与したことを分析した。その上で、2018年再生可能エネルギー指令における優先規定の縮小があったとしても、太陽光や風力等の変動型再生可能エネルギー（VRE）は限界費用が安く、メリットオーダーの中でも調達順位が高い電源となったことも示した。

拙稿で明らかにしてきたことは、発電側の代替エネルギーの転換がすでに再生可能エネルギーを中心として進んでおり、その理由となったのは①再生可能エネルギーの急速なコスト削減と、②再生可能エネルギーの導入拡大と市場の活用の相互作用、③カーボンニュートラルを目指す世界情勢の変化である。しかし、電力のみならずエネルギーシステム全体あるいはエネルギー利用側の状況については論じることができておらず、本稿（本報告）の問題意識は電力以外の状況についての価格・市場動向および制度・政策を中心に論点整理することにある。

### （3）本稿（本報告）の構成

利用側の動向を捉える前に、大前提として、一次エネルギーや電力分野の動向を踏まえる。

石油・石炭・天然ガスといったこれまでの化石燃料に代わるエネルギー源として、原子力や再生可能エネルギーの検討が行われてきた。こうした発電部門における代替エネルギーの市場や政策の動向を検討する。

代替エネルギーの供給側の状況を踏まえた上で、利用側の状況を考えていく必要がある。そもそも、2018年の最終エネルギー消費に占める電力消費量の割合（電力化率）は世界平均で19.3%であり、日本でも28.7%に過ぎない<sup>3</sup>。すなわち、残りの7割のエネルギー利用は、工業用や交通といった電力以外の形で利用されていることになる。そうした点で重要になるのが利用側のエネルギー技術の動向である。すなわち、蓄電池（バッテリー）と、水素利用の動向が重要である。

前者の蓄電池は、特に民生用の利用が考えられる。蓄電池は電気自動車（EV）との親和性が高く、太陽光発電と同様に、技術学習効果に沿って、価格の下落が見られ始めている。また、再生可能エネルギー大量導入の際の系統安定化対策としても期待されている。しかしながら、リチウムなどの重要な原材料（CRM）への依存や全固体電池の開発、バッテリーの再利用といった観点は今後の課題であり、かつ交通分野はともかく産業用利用は選択肢が限られる。

後者の水素利用は、特に産業用での利用が考えられている。交通分野ではトラックや航空輸送での燃料利用、産業部門では製鉄等での利用の可能性が検討されている。また水素は余剰電力を用いる方法以外でも生成が可能である。しかしながら、水素利用に当たってはパイプラインの敷設の問題や安全性への懸念が指摘されている。

もっとも、蓄電池も水素利用もともに再生可能エネルギーや原子力といった代替エネルギーの余剰電力を変換するという共通項はあるものの、整備するインフラの違いがあることに加え、目指すべきエネルギーシステムが集中型なのか分散型なのかが大きく異なってくる。そうした点を加味し、本稿（本報告）ではエネルギーシステムと技術選択の論点を整理していく。

## 1. 世界のエネルギー供給構造の現状

### (1) 世界のエネルギー供給の状況

まず、世界の一次エネルギー供給の構図を見ていきたい。オイルショックが発生した1973年時点での世界の一次エネルギー供給の総量は254EJである<sup>4</sup>。その内訳は、石炭24.7%、石油46.2%、天然ガス16.1%、原子力0.9%、水力1.8%、バイオマス10.2%、その他の再

---

<sup>3</sup> 経済産業省資源エネルギー庁（2021）「エネルギー白書2021」（HTML版）  
（<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/>）参照。

<sup>4</sup> IEA（2021）“Key World Energy Statistics 2021”，p.6

生可能エネルギー0.1%であった。2019年時点は世界の一次エネルギー供給の総量が606EJに達し、石炭26.8%、石油30.9%、天然ガス23.2%、原子力5.0%、水力2.5%、バイオマス9.4%、その他の再生可能エネルギー2.2%となった。一次エネルギー供給では、化石燃料から代替エネルギーへの転換が進んでいるとは言い難い。

他方で、電力分野では一次エネルギー供給とは違った傾向が見られる。1973年時点の世界の電力生産の総量は6131TWhである<sup>5</sup>。その内訳は、石炭38.3%、石油24.8%、天然ガス12.1%、原子力3.3%、水力20.9%、水力を除く再生可能エネルギー0.6%であった。これが、2019年時点の総量26936TWhとなり、内訳は石炭36.7%、石油2.8%、天然ガス23.6%、原子力10.4%、水力15.7%、水力を除く再生可能エネルギー10.8%である。特に、2010年以降は水力を除く再生可能エネルギーが増加傾向にある。

## (2) 再生可能エネルギーのコスト逡減と原子力のコスト増

世界各国での再生可能エネルギーの導入拡大の要因は、2015年のパリ協定に基づく温室効果ガス削減に向けた国際動向や、持続可能な開発目標（SDGs）も背景にあるが、もう一つの要因は太陽光・風力といった変動型再生可能エネルギー（VRE）のコスト低下である。IRENA（2022）によれば、特に太陽光の均等化発電コスト（LCOE）とともに2010年以降急激に下落しており、この背景には技術学習効果がある（図表1）<sup>6</sup>。

他方で、第一次石油危機以降、もう一つの代替エネルギーとなり得たはずの原子力はコストの増加が目立つ。そこには3つの要因があり、①新規原発の工期の延期に伴うコスト増加、②EU等における規制基準の強化による安全対策費用の増加、③福島第一原発に伴う事故対策費用・保険費用の増加が挙げられる<sup>7</sup>。そのため、代替エネルギーの発電分野の選択

<sup>5</sup> IEA（2021）“Key World Energy Statistics 2021”，p.30

<sup>6</sup> IEA・NEA（2020）によれば、LCOEを見れば、原子力が太陽光や風力といった他の代替エネルギーよりも安価であることが推計されている。しかしながら、地域別の見れば大きく傾向が異なり、米国、欧州、中国、インドは、太陽光および陸上風力が原子力よりも安価であるのに対して、日本は全体的にLCOEが高くなおかつ原子力の下限が太陽光や風力よりも安価である。

<sup>7</sup> ①新規原発の工期の延期に伴うコスト増加に関しては、英国のヒンクリー・ポイントC原発やフランスのフラマンビル原発が具体例として挙げられる。ヒンクリー・ポイントC原発では、英国会計院の試算では60～300億ポンドの追加費用が発生すると見られる。

<https://www.nao.org.uk/reports/hinkley-point-c/>

②EU等における規制基準の強化による安全対策費用の増加に関しては、2007年の欧州原子力安全規制機関グループ（ENSREG）が設立され（COMMISSION DECISION 2007/530/Euratom、DIRECTIVE 2009/71/EURATOM）、さらにストレステストの実施および安全規制の強化などにより、規制基準の強化の動きが見られる。

③福島第一原発に伴う事故対策費用・保険費用の増加に関しては、原子力の民間保険は以前から機能しておらず、公的保険制度が主であり、日本の原子力損害賠償保険は1200億円／基しか積み立てられていない（李他（2020））。さらに、福島第一原発事故の事故処

肢を考えた際、再生可能エネルギー優位の構図となりつつある。

## 2. エネルギーシナリオの検討とセクターカップリング・Power to X

### (1) 2050年・2030年のエネルギーシナリオ

本稿（本報告）を検討するにあたり、中長期のエネルギーシナリオの現況を確認しておく必要がある。ここでは、IEAの「2050年ネットゼロエネルギーシナリオ」、日本政府の「グリーン成長戦略」、未来のためのエネルギー転換研究グループによる「原発ゼロ・エネルギー転換戦略」および「レポート2030：グリーン・リカバリーと2050年カーボン・ニュートラルを実現する2030年までのロードマップ」を確認する。

#### ①IEAの2050年ネットゼロエネルギーシナリオ

2021年、IEAは“Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector”を公表した。報告書では、世界全体で2050年CO<sub>2</sub>ネットゼロ排出を目指すシナリオ、いわゆるネットゼロ（NZE）シナリオを示した。NZEシナリオでは、再生可能エネルギーの比率が一次エネルギー供給の3分の2、電力分野の約9割となると予想され、その中でも発電電力量のうち7割は変動型再生可能エネルギー（VRE）になると予想されている（図表2、図表3）。また需要側では、エネルギー効率性の向上や行動変容、電化（Electrification）、水素エネルギー、バイオエネルギー、CCUS、供給側では再生可能エネルギー、バイオエネルギー、原子力、CCUSが重要だと指摘されている。

また、NZEシナリオ、特に電化を進めるに当たって、重要な鉱物資源（Critical Minerals）の需要が高まることも指摘している（図表4）<sup>8</sup>。重要な鉱物資源の中には銅、リチウム、ニッケル、グラファイト、コバルト等が含まれている。IEAはエネルギー転換に伴う重要な鉱物資源に近年強い関心を寄せている<sup>9</sup>。すなわち、エネルギー技術の選択次第では重要な原材料（CRM）への依存度を高め、それがあつる種の障害となる得る可能性がある。

#### ②日本政府の「グリーン成長戦略」および「第6次エネルギー基本計画」

2020年10月、菅義偉首相（当時）は2050年カーボンニュートラルを宣言した。その2050年カーボンニュートラル宣言を体現していくものとして2020年12月に経済産業省

---

理費用は政府想定で21.5兆円としていたが、日本経済研究センターの試算では40年間で35～80兆円に達すると見られる。

<sup>8</sup> “Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector”の本文では Critical Minerals としているが、本稿での重要な原材料（Critical Raw Material: CRM）と同一のものである。

<sup>9</sup> IEA (2021) “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions”, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

が中心となり「クリーン成長戦略」が策定され、さらにその改訂版である「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が翌年6月に策定された。クリーン成長戦略の中では、2050年カーボンニュートラルを目標として、電力及び非電力分野のエネルギー供給構造を転換していくことが検討された（図表5）。それに加えて、今後成長が見込まれる14分野の産業に対して目標が設定され、政策支援を集中させていくとした<sup>10</sup>。

エネルギー分野の取り組みに着目すれば、再生可能エネルギーの主力電源化への取り組みや、福島第一原発事故以降の脱原発依存を見直して原子力政策の再構築を図るとともに、電化、水素・アンモニアやCCUS、カーボンリサイクル、合成燃料、メタネーションなど新たな選択肢の追求が明記された。特に、洋上風力発電の国内市場の創出や、水素・アンモニア利用への支援や国際的なイニシアティブの強化、原子力の次世代革新炉（高速炉、SMR、高温ガス炉、核融合）への研究開発支援が明記されたことが大きい。

また、クリーン成長戦略の後に策定された第6次エネルギー基本計画では、2030年の一次エネルギー供給（430百万kl程度）の内訳を、石油等31%、再生可能エネルギー22～23%、天然ガス18%、石炭19%、原子力9～10%、水素・アンモニア1%を見込む（図表6）。また2030年の電源ミックス（9340億kWh程度）は再生可能エネルギー36～38%、原子力20～22%、天然ガス（LNG）20%、石炭19%、石油2%、水素・アンモニア1%と見込んでいる。第6次エネルギー基本計画はクリーン成長戦略の方針が踏襲されており、これまでのエネルギー基本計画から洋上風力、水素・アンモニア利用、原子力の次世代革新炉への取り組みの記述が追加されている。

### ③未来のためのエネルギー転換研究グループによるグリーンリカバリーシナリオ

最後に、未来のためのエネルギー転換研究グループによるグリーンリカバリーシナリオを確認しておきたい。未来のためのエネルギー転換研究グループは日本の研究者グループによるシナリオ分析であり、2020年に「原発ゼロ・エネルギー転換戦略」、2021年に「レポート2030：グリーン・リカバリーと2050年カーボン・ニュートラルを実現する2030年までのロードマップ」を発表している。今回は後者を確認する。

「レポート2030」は、「原発ゼロ・エネルギー転換シナリオ」をベースに、政府のクリーン成長戦略の批判として、検討されたものである（図表7、図表8）。主要な論点としては次のとおりである。

①2030年時点で一次エネルギーに占める化石燃料の比率を2010年比60%削減および原

---

<sup>10</sup> 14分野は、①洋上風力・太陽光・地熱、②水素・燃料アンモニア、③次世代熱エネルギー、④原子力、⑤自動車・蓄電池、⑥半導体・情報通信、⑦船舶、⑧物流・人流・土木インフラ、⑨食料・農林水産業、⑩航空機、⑪カーボンリサイクル・マテリアル、⑫住宅・建築物・次世代電力マネジメント、⑬資源循環関連、⑭ライフスタイル関連である。

子力利用 0%とし、2050年までに化石燃料 100%削減を行う。②エネルギー消費全体を 2030年までに 2010年比で約 40%削減、2050年までに 62%削減を行う。③CO<sub>2</sub>排出量を 1990年比で 2030年までに 55%削減、2050年までに既存技術のみで 93%削減および新技術を含めて 100%削減を行うというものである<sup>11</sup>。

本シナリオでは、①2050年カーボンニュートラルを前提にした際にエネルギー効率性および省エネや、再生可能エネルギー、電気自動車等の既存技術を最大限活用する点、②原子力を利用しないという点、③エネルギー転換による雇用創出と旧来型産業からの雇用転換を促進させる点が重要である。他方で、本レポートでも課題として挙げられているのが、①産業部門（特に鉄鋼分野）のエネルギー転換、②自動車以外の交通部門のエネルギー転換である。

## (2) エネルギー利用とセクターカップリング・Power to X

IEA の NZE シナリオ、日本政府によるクリーン成長戦略、未来のためのエネルギー転換グループによるグリーンリカバリー戦略のすべてに共通する点は、2050年カーボンニュートラルを実現するために、再生可能エネルギーの主力電源化を行うことが必要であるという点である。その上で、何らかの形で電化の強化による蓄電池および電気自動車の利用や水素・アンモニア利用といったエネルギー利用側の取り組みを強化しなければならないという点にある。そこで検討しなければならないのが、セクターカップリングもしくは Power to X である。

IRENA 他（2018）の定義では、セクターカップリングのコンセプトは電力・熱・燃料といった異なるエネルギー需給体系の共同生産、複合利用、エネルギー変換、エネルギー代替であるとしている（図表 9）。高橋（2021）では IRENA 他（2018）等の先行研究の整理を経て、「再エネの導入が進む電力部門を、運輸や産業、熱といった他のエネルギー消費部門と連結・結合させること」と定義している。また、IRENA（2022）は、セクターカップリングとは再生可能エネルギー100%への転換を加速させることを目的に、最終利用セクターのアプリケーションを横断して電力を直接または間接的に利用することにより、エネルギーシステムの柔軟性と信頼性を向上させ、エネルギーシステムを最適化する重要な戦略であると指摘している。すなわち導入が加速化し主力電源化する再生可能エネルギー（特に VRE）をエネルギーシステムの中でどうマネジメントし、どう有効利用していくのかが肝だと言える。

また、ここで Siemens Energy（2021）も参照しておきたい。その中で指摘されていることは次のとおりである。脱炭素を実現するためには産業、電力、暖房、ガス、モビリティの

---

<sup>11</sup> 本レポートでは、水素利用や電化は新技術に含まれる。



各部門を統合・結合し、電力部門から再生可能エネルギーを供給し、脱炭素化を支援する必要がある。その際、セクターカップリングはエネルギー転換の基本要素であり、セクターカップリングを行うことで一次エネルギー供給における化石燃料消費量を 50%削減できる可能性がある。Simens Energy (2021) はその上で、Power to X がセクターカップリングへの技術解であるとしている。

Power to X とは、エネルギーや素材の供給において、中間製品の生産の基礎として電力を使用することである (IRENA (2022))。近年、水素利用に注目が集まっているが電力を水素等のガスに変換した場合は Power to Gas、電力から熱に変換した場合は Power to Heat となる。Simens Energy (2021) は、電気自動車 (EV) は現在多くの国で採用され破壊的トレンドとなっているが、長距離の大型輸送や海上輸送、航空予想の解決策にはならない可能性が高いという。

そこで、本稿 (報告) では第 3 節に蓄電池および電気自動車、第 4 節に水素・アンモニア利用の現況と課題について探っていく。

### 3. 蓄電池と電気自動車の導入の現状

#### (1) 蓄電池のコスト動向

蓄電池および電気自動車の状況を確認する上で、まず蓄電池の価格動向を確認しておきたい。

まず IEA による試算を確認しておきたい。図表 11 を見ると、2011 年時点でリチウムイオン蓄電池の平均価格は、正極材 32.6 ドル/kWh、その他のセルコスト 601.4 ドル/kWh、パックコスト 290 ドル/kWh の合計 924 ドル/kWh であった。しかしながら、2021 年推計では、正極材 28.7 ドル/kWh、その他のセルコスト 72.3 ドル/kWh、パックコスト 31 ドル/kWh の合計 132 ドル/kWh となっており、コストは約 14% となった。

次に、Bloomberg New Energy Finance (BNEF) の調査によれば、電気自動車や定置型蓄電池の価格の平均値が大きく下がったことが指摘されている<sup>12</sup>。図表 12 を見れば、2013 年時点でのリチウムイオン蓄電池の価格の平均値は、セル 502 ドル/kWh、パック 230 ドル/kWh の合計 732 ドル/kWh であった。しかしながら、2022 年時点でのリチウムイオン蓄電池の価格の平均値は、セル 120 ドル/kWh、パック 31 ドル/kWh の合計 151 ドル/kWh となっており、コストは約 2 割まで低下したことが分かる。

同様に、米エネルギー省の推計でも、2008 年と 2022 年を比較すればリチウムイオン蓄

---

<sup>12</sup> BNEF (2022) “Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh”, 6th December 2022, <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/> (アクセス日: 2023 年 8 月 30 日)

電池価格は 89%下落しており、2022 年の推計値は 153 ドル/kWh であるという<sup>13</sup>。

このように過去 10 年間のトレンドを見れば、リチウムイオン蓄電池の価格は少なくとも 10 年前の 2 割程度まで下落したことが分かる。図表 1 で確認した通り、リチウムイオン蓄電池の価格トレンドは太陽光発電の LCOE の遞減と同様の傾向が見られる。

## (2) 電気自動車の市場動向

リチウムイオン等を用いた蓄電池の価格低下の要因は、①電気自動車の導入拡大、②家庭用蓄電池の導入拡大、③系統蓄電池の導入拡大による採算拡大が背景にあると見られる。そこで、電気自動車 (EV) の市場動向とトレンドを確認しておきたい。

まず、電気自動車を議論する前に CASE 領域について言及したい。CASE とは、Connected (コネクテッド)、Autonomous (自動運転)、Shared (カーシェアリングとサービス)、Electric (電気自動車もしくは電動化) を指す。電気自動車はまさにこの Electric の部分に該当する。

IEA (2023) では、蓄電池駆動の電気自動車 (BEV) とプラグインハイブリッド車 (PHEV) の二種類を電動車と定義している。それによれば、2022 年の全世界の新車販売のうち、1000 万台 (14%) が電動車となっている。2010 年から 2022 年までの全世界の電動車の総数を見れば、2020 年には 2600 万台を超え、2021 年から 2022 年にかけて 60%増加した。さらに、電動車の総数のうち 7 割以上が BEV だとしている。また地域別にみれば、中国および欧州が主要な市場である。IEA (2023) によれば、中国の BEV 新車販売台数は 2021 年比で 6 割増の 440 万台に達した<sup>14</sup>。

また、電動車の主要メーカー 10 社のシェアも確認しておきたい (図表 14)。近年 BYD (中国) が大きく成長しており、2022 年の電動車のシェアのうち、トップの約 18% を獲得している。次にテスラ (米国) が約 13% のシェアを獲得している。IEA (2023) で指摘されているように、完成車市場において、フォルクスワーゲン、GM、トヨタ、ステランティス、ホンダ、ルノー・日産・三菱連合、フォード、現代自動車・起亜、Geely、メルセデスベンツ、BMW の販売シェアが 2015 年の 55% から 40% に減少している。その一方で、BYD と

---

<sup>13</sup> Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, U.S. Department of Energy (2023) “Electric Vehicle Battery Pack Costs in 2022 Are Nearly 90% Lower than in 2008, according to DOE Estimates”, 9th January 2023, <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fofw-1272-january-9-2023-electric-vehicle-battery-pack-costs-2022-are-nearly> (アクセス日: 2023 年 8 月 30 日)

<sup>14</sup> この中国における BEV の大量導入の背景には、充電インフラの急速な展開や、非電気自動車に対する厳格な登録政策、購入補助金の期間延長などが背景にあると、IEA (2023) は指摘している。なお、中国の新エネルギー車 (NEV) の導入目標は 2025 年までに販売シェアの 20% というものであり、2022 年の販売実績 (電動車割合 29%) はこの目標を前倒して達成したことになる。

テスラの合計は 20%から 30%に増加した。その大半が BEV もしくは PHEV であり、電動車、そしてその中核の部品であるリチウムイオン蓄電池の重要性が分かる。

### (3) 蓄電池・電気自動車を巡る課題

このように蓄電池および電気自動車は今や世界的には成長産業となっており、今後も市場が拡大することが期待されている。では、蓄電池・電気自動車を巡る課題はどこにあるのかを見ていきたい。課題を、①技術的側面、②CRM 等の資源制約と資源循環、③米中デカップリングの 3 点について整理しておきたい。

#### ①蓄電池・電気自動車の技術的課題

蓄電池および電気自動車の技術的課題として挙げられるのが、従来の液系リチウムイオン蓄電池の安全性の問題である。井上 (2022) によれば、電解質に可燃性の有機電解液を使用する従来のリチウムイオン電池の場合、通常の電圧域や外部回路の制御機能不全などで、過剰に負荷が生じることによって、熱暴走や電解液分解に繋がり発火や爆発の危険性があると指摘している。またエネルギー密度が増加する点も利点として挙げられている。

そこで、多くの自動車会社は全固体電池の研究開発に力を入れている。日系企業ではトヨタが 2027~28 年目途に、日産は 2028 年度を目標に実用化を図るとしている。他方で、全固体電池の実用化には技術的に解決しなければならない課題が残っているとされ、そのためのイノベーションに頼らざるを得ない。

また現状は研究開発段階であるため、実用化時のコストの問題という課題もある。電気自動車の普及の背景には、前述の既存の液系リチウムイオン蓄電池のコストの低下という側面があると考えられる。全固体電池の実用化が実現したとしても、既存の液系リチウムイオン蓄電池に取って代わるほどのコストとならない限りは普及には至らないもしくは多くの時間を要するという結果になると考えられる<sup>15</sup>。

#### ②蓄電池・電気自動車と重要な原材料 (CRM) の関連性と資源循環

二つ目の課題が蓄電池および電気自動車の特定の資源への依存である。すなわち、蓄電池や電気自動車の需要が高まるにつれて、重要な鉱物資源 (Critical Minerals) や重要な原材料 (CRM) への依存度が高まるといった問題である。

IEA (2023) によれば、2022 年にはリチウムの約 6 割、コバルトの約 3 割、ニッケルの約 1 割が電気自動車の蓄電池用途として利用されている (図表 15)。2017 年ではそれぞれ

---

<sup>15</sup> 加えて井上 (2022) でも言及されているが、安全性の対策は全固体電池の実用化だけではなく、電池の寿命予測技術といった劣化への対応などの手段も考えられる。

約 15%、約 10%、約 2%であり、この 5 年間でリチウム、コバルト、ニッケルの消費量が増加したと言える。また、価格に関しても電気自動車への需要が高まったことで、リチウムへの価格が上昇した<sup>16</sup>。

これらの問題を考える際に、CRM への依存度逡減やサプライチェーンの持続可能性、環境負荷、蓄電池のリサイクルが必要である<sup>17</sup>。そうした際に参考になる動きとして、2017 年に提唱された欧州バッテリー同盟 (EBA) が挙げられる<sup>18</sup>。EBA のコンセプトは、欧州における革新的で競争力のある持続可能なバッテリーのバリューチェーンを作ることにより、原材料の調達から、セルの材料の生成、セル製造、パックの製造、電気自動車の製造、そしてリサイクル・リユースまでの循環を意図している。EBA に関連して、COM(2018) 293 final でも、(一次および二次) 原材料の抽出・加工から始まり、セルやパックの設計・製造段階、そして、それらの使用、二次使用、リサイクル、廃棄に至るまで、バリューチェーン全体を通じて持続可能な電池製造に主眼を置いているとし、バリューチェーン全体で持続可能性のベンチマークを設定することを示唆している。また 2023 年 6 月、EU バッテリー規則 (Regulation (EU) 2023/1542) が制定され、第 8 条で電気自動車用等のバッテリーにおけるコバルト・鉛・リチウム・ニッケルのリサイクル割合の明記、第 61 条で電気自動車用等廃バッテリーの回収、第 71 条でリサイクル効率と素材回収の目標、第 73 条で電気自動車用等廃バッテリーの再利用準備の規定、第 76 条および付属書 XII ではバッテリーのリサイクルの義務的目標などが設けられている<sup>19</sup>。すなわち、EU としては蓄電池のリサイクル・リユースの促進、特に CRM への対応を一步進めたことになる<sup>20</sup>。

---

<sup>16</sup> IEA (2023) でも言及されているが、リチウム、ニッケル、コバルトの価格上昇の一因は需要に対する供給不足である。加えて、2022 年にはニッケル、コバルトは供給量が増加したことで価格は安定したが、リチウムは上昇を続けた。しかし、2023 年初旬に中国での電気自動車需要の鈍化からリチウム価格は下落した。

<sup>17</sup> IEA (2023) では、リチウムへの依存度逡減のためにナトリウムイオン電池についても言及されている。ナトリウムイオン電池は航続距離の短い都市型車両や定置型蓄電池以外には適さないものの、安価であり、さらに中国では実用化が進んでいるとの記述がある。しかしながら、あくまでも現在の主流は液系リチウムイオン電池である。

<sup>18</sup> European Commission “European Battery Alliance” [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-battery-alliance\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-battery-alliance_en) (アクセス日：2023 年 8 月 30 日)

<sup>19</sup> EU バッテリー規則の付属書 XII における目標は、2025 年までに鉛蓄電池 75%、リチウム由来の蓄電池 65%、ニッケルカドミウム電池 80%、その他廃バッテリー 50% をリサイクルし、2030 年までに鉛蓄電池 80%、リチウム由来の蓄電池 70% をリサイクルしなければならないというものである。加えて、物質回収にも目標があり、2027 年までにコバルト 90%、銅 90%、鉛 90%、リチウム 50%、ニッケル 90% をリサイクルし、2031 年までにコバルト 95%、銅 95%、鉛 95%、リチウム 80%、ニッケル 95% をリサイクルしなければならないとされている。

<sup>20</sup> EU の蓄電池のリサイクルに関しては、欧州グリーンディールや新サーキュラーエコノミー行動計画の観点がある。詳細は蓮見 (2023) を参照。また EBA や EU バッテ

### ③米中デカップリングと蓄電池・電気自動車のサプライチェーン

三点目に、米中デカップリングが与える影響、すなわち経済安全保障上の問題である。蓄電池、電気自動車ともに中国がサプライチェーンの中核を担っている。図表 16 は、世界における電動車販売台数と地域別のシェアの推移であり、この地域別のシェアは当該国・地域から輸出された電動車輸出台数を世界の総輸出台数で割ったものである。これによれば、中国から他国へ輸出される電動車の割合が 2022 年に 35%以上であったことが分かる。企業に着目すれば、BYD や Geely のような中国企業だけではなく、テスラやフォルクスワーゲンのように中国に拠点工場を置いている企業も多い。その上、中国は電動車の完成車だけではなく、リチウムイオン蓄電池の生産でも高いシェアを有している。

他方で、米中貿易戦争、そして米中デカップリングの影響が蓄電池・電気自動車を巡る動向にも関係している。米国は 2022 年、インフレ抑制法（Inflation Reduction Act）を制定した。インフレ抑制法の中で、電動車および燃料電池車の購入の際に 1 台当たり最大 7500 ドルの支援を受けられる点が盛り込まれた。その一方で、同法適応の際には、北米で最終組み立てる必要がある、なおかつ米国もしくは米国の信頼のおける貿易相手であること等の条件が盛り込まれている<sup>21</sup>。すなわち、対中を意識した戦略が垣間見える。他方で、中国も 2023 年 8 月 1 日から、半導体等でも使用され、次世代電気自動車でのゲームチェンジャーになり得るガリウムの輸出規制を迫っている<sup>22</sup>。このような事態を見れば、米中デカップリングによる蓄電池および電気自動車のグローバルサプライチェーンの分断が生じる可能性は否定できない。

これまでに見てきたように、蓄電池および電気自動車はすでにコスト下落のトレンドに入っており、加えて市場形成が形成している。そのため、すでにエネルギー利用側のゲームチェンジャーになっている。しかしながら、本項で見てきたように、蓄電池および電気自動車については、CRM 等の資源制約とリユース・リサイクル等の資源循環は待ったなしの状況となっていることに加え、米中デカップリングによるグローバルサプライチェーンの懸

---

リー規則については家本（2022）を参照。加えて、日本政府も 2022 年 8 月に「蓄電池産業戦略」を公表したが、バッテリーを巡るリサイクルシステムの確立は 2030 年を目途としている。

<sup>21</sup> The White House (2023) “Building A Clean Energy Economy: A Guidebook To The Inflation Reduction act’s Investments In Clean Energy And Climate Action”, Version2, January 2023, <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/12/Inflation-Reduction-Act-Guidebook.pdf>（アクセス日：2023 年 8 月 31 日）

<sup>22</sup> ロイター（2023）「中国のガリウム輸出規制、次世代 EV 設計に変更もたらず可能性」、2023 年 7 月 11 日、<https://jp.reuters.com/article/autos-gallium-china-evs-idJPKBN2YR0DZ>（アクセス日：2023 年 8 月 31 日）

念を払拭していく必要がある。

#### 4. 水素・アンモニア利用政策と現状

##### (1) 水素・アンモニアの生成方法と水素キャリア

##### ①水素・アンモニアの生成方法とグリーン水素・ブルー水素

水素は、カーボンニュートラルに向けた取り組みを進める際に、蓄電池および電気自動車と同様にエネルギー利用側（特に非電力分野）の中で重要な役割を担うと見られている。IEA の 2050 年ネットゼロエネルギーシナリオの中でも導入拡大が進むことが見込まれている。

そうした際に考えなければならないのは水素の生成方法である。水素は生成方法に応じてグレー水素、ブルー水素、グリーン水素と呼ばれる 3 種類がある。グレー水素およびブルー水素は、石油・天然ガス・石炭といった化石燃料由来であり、水素を取り出す際に CO<sub>2</sub> が発生する。その際に CO<sub>2</sub> の貯留・有効利用・回収（CCS/CCUS）を行わず大気中に CO<sub>2</sub> を排出するものがグレー水素、CCS/CCUS を行って地中に注入するものをブルー水素と定義している。他方で、グリーン水素は純粋な再生可能エネルギー由来の電気を用いて水電解を通じて生成される。一般的にグリーン水素およびブルー水素だけが温室効果ガス排出量削減に資するとされている。

##### ②水素の性質と水素キャリアとしてのアンモニア・メタン

水素は元来、着火しやすく爆発の恐れがある気体である。そのため、水素キャリアの活用の必要性が示唆されている。資源エネルギー庁の資料によれば、水素キャリアの有力な選択肢として、①液化水素、②メチルシクロヘキサン（MCH）、③アンモニア、④メタネーションが検討されている（図表 17）<sup>23</sup>。しかしながら、水素キャリアは現状ではそれぞれの課題を抱えており、どの手法が優位になるかは現状では見極めることはできない。

しかしながら、昨今、アンモニアとメタネーションに特に注目が集まっている。

前者のアンモニアについては、先述の通り生成方法が複数あり、さらに肥料用や化学製品の原料用として、すでにサプライチェーンが構築されている。他方で、アンモニアから水素を取り出すための技術の確立や、水素との比較でアンモニアのエネルギー利用の際の直接利用の用途が限られる点などが課題である。

後者のメタネーションは水素（H<sub>2</sub>）と二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を反応させてメタン（CH<sub>4</sub>）を

---

<sup>23</sup> 経済産業省資源エネルギー庁（2022）「水素・アンモニアを取り巻く現状と今後の検討の方向性」、  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene\\_shinene/suiso\\_seisaku/pdf/001\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/001_03_00.pdf)  
df（アクセス日：2023年8月31日）

生成させる技術であり、天然ガスの代替として利用できるとされる<sup>24</sup>。また、メタネーションの延長として、メタンから合成ガスを経由してフィッシャー・トロプシュ法（FT法）により精製される合成燃料（e-Fuel等）もある。しかしながらメタネーションは大規模設備が必要でかつ、原料となる再生可能エネルギー由来の水素や二酸化炭素の供給、あるいは精製コストなどが課題であり、ガス会社等が期待を寄せつつもまだ実証実験レベルにとどまる。

## （2）水素・アンモニアを巡る政策動向

水素・アンモニアをめぐる政策動向を確認する。

まずは日本の動向である。2017年、日本政府が世界ではじめとなる「水素基本戦略」を策定した。さらに、2020年10月の菅義偉首相（当時）によるカーボンニュートラル宣言を受けて水素・アンモニア利用を含む脱炭素技術への政策的支援が強化されており、カーボンニュートラルおよびグリーン・トランスフォーメーション（GX）の中核技術の一つとされている。2023年6月には水素基本戦略が策定され、水素、アンモニア、合成メタン、合成燃料等の支援を政府としても行っていくことが示されている。

EUの動向を確認しておく。官民パートナーシップのFCH JUは、2019年に「欧州水素ロードマップ」を策定した<sup>25</sup>。また、2020年には、欧州委員会は「欧州の脱炭素のための水素戦略」（COM(2020) 301 final）を策定した。同戦略は、欧州グリーンディールと連動しており、2024年までに少なくとも6GW、2030年までに40GWの再生可能エネルギー水電解装置を導入することを表明している。

また、米国・中国などに関しても水素戦略を策定しており近年、水素・アンモニア利用をめぐる戦略策定や政策的支援の動きが加速化している。

## （3）水素・アンモニアを巡る課題

### ①水素・アンモニア利用のコスト問題と技術開発

水素・アンモニア利用の課題の一つはコストである。

IEA（2022）は、現在の化石燃料価格であれば、再生可能エネルギーの由来のグリーン水素は多くの国で化石燃料からの水素と競合できるとし、次世代の電解槽プロジェクト次第ではコストが2030年までに現在の7割に低下し、1.3～4.5ドル/kgまで下がる可能性があるとしている。

Siemens Energy（2021）はさらに楽観的に、好条件の再生可能エネルギー（陸上風力）と

<sup>24</sup> メタネーションに関しては、秋元他（2022）を参照。

<sup>25</sup> Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking（2019）“HYDROGEN ROADMAP EUROPE”

電気分解によって生成されるグリーン水素は、グレー水素（1.5～2.5 ドル/kg）と同水準であると指摘している。他方で、再生可能エネルギーのコストが高い場合は2～6 ドル/kgとなると指摘している。IEA やシーメンスの予測は、あくまでも技術革新が起こることが前提となっている。

経済産業省資源エネルギー庁の予測も同様に、需要喚起や民間による投資拡大、技術革新を前提している。政府による「水素基本戦略」によれば、現在の水素供給コストは100 円/Nm<sup>3</sup>であり、これを2030年には30 円/Nm<sup>3</sup>、2050年には20 円/Nm<sup>3</sup>を目指すとしている<sup>26</sup>。

これらの状況を整理すれば、グリーン水素のコストと技術開発の現状として、一部ではコスト低下が見られ、グレー水素に匹敵するほどの価格競争力が出てきたものもあるが、今後の技術革新等に委ねなければならない部分があるということになる。さらに言えば、現在、水素・アンモニア利用の多くは、実証実験もしくは実証事業段階であり、商用化されているとは言い難い。そういった点では、一昔前の蓄電池・電気自動車もそうであったが、民間需要の喚起と量産化といった部分を実現できるかがカギになると考えられる。

## ②水素・アンモニア利用における供給網の構築

水素・アンモニア利用を考える上で、供給網の構築も大きな課題である。供給網と言えば、上流側のサプライチェーンの構築と、下流側の貯蔵・輸送問題の2つの観点がある。

上流側について言えば、一つは水素の輸入に関わる問題である。米国や欧州のようにブルー水素、グリーン水素を自国で生産・消費を行う場合は問題ない。しかし、日本のようにCCS/CCUSの国内コストの高くブルー水素のコストが高まる場合、かつ再生可能エネルギーの余剰電力の不足によりグリーン水素の生産の余地がない場合、原則は海外からの調達の主となる。その場合、蓄電池・電気自動車と同様に輸入元の国の地政学リスクの有無と、海上輸送の問題がある。特に、後者の海上輸送の際の課題に関しては水素キャリアの議論と絡む。すなわち、水素キャリアの技術革新とコスト低下が上流側の課題と直結している。

また、下流の問題は貯蔵タンクとパイプラインの敷設の問題である。まず、これらの問題も水素キャリアの議論と直結していることは言うまでもない。その上で、パイプラインや陸上・海上輸送を含め、需要地と供給地を結ぶ国内サプライチェーン網をどう構築していくかが課題と言える。

## 5. エネルギー技術とその選択

### (1) 魔の川・死の谷・ダーウィンの海

---

<sup>26</sup> 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議（2023）「水素基本戦略」、2023年6月6日



技術経営 (MOT) の議論の一つに、米国標準技術局 (NIST) が最初に概念化した魔の川・死の谷・ダーウィンの海と言われるものがある。出川 (2004) によれば、研究・開発成果を産業化に至らせ、完成させるまでに必要なステージを「研究」「開発」「事業化」「産業化」の4つに分けている。そうした際に、①「研究」と「開発」の間の障壁を魔の川、②「開発」と「事業化」の間の障壁を死の谷、③「事業化」と「産業化」の間の障壁をダーウィンの海と呼んでいる。

再生可能エネルギーの主力電源化の過程は、①1970年代以降の日本における新エネルギー開発、②日本における住宅用太陽光発電補助金事業の開始、③ドイツ等における固定価格買取制度導入および電力システム改革による技術学習効果とコスト逡減の大きく3つが大きな契機となっている。再生可能エネルギーに関して多くの勘違いがあるが、2000年代以降、中国企業による太陽光パネルの大量生産や、デンマークのヴェスタス、中国のゴールドウィンドといった風力発電メーカーの台頭もあり、再生可能エネルギーは「産業化」が進んだ。すなわち、「研究」もしくは「開発」のフェイズにはいない。また電力市場においても、フレキシビリティの考え方に基づいて、主流化している変動型再生可能エネルギーを電力需給の中心に考えた上で、市場全体で需給調整を行うかが政策論議の中心となっている<sup>27</sup>。

## (2) 発電技術の技術選択とエネルギー利用側の技術選択

代替エネルギーにおける発電技術の技術選択の議論では、変動型再生可能エネルギーのコスト逡減により、IEAのネットゼロシナリオでも主力電源となった。その一方で、原子力は、①原子炉新設の工期延長に伴うコスト増や、②EUにおける安全規制の強化に伴う安全対策費用の増加、③2011年3月11日に発災した東京電力福島第一原発事故による世論の反発や事故処理等の要因によるコスト増によって、代替エネルギーの発電分野における最重要電源ではなくなったと言える。さらに、発電分野における代替エネルギーの動向が再生可能エネルギー優位となった背景は、再生可能エネルギーの主流化と先進各国における電力システム改革等によって、①分散型エネルギーネットワークとなり、かつ②メリットオーダーをはじめとする電力市場の市場機能の強化が起こったのである<sup>28</sup>。

<sup>27</sup> 近年、欧州では柔軟性 (フレキシビリティ) を考慮した電力供給が行われている。安田 (2017) は、柔軟性を「電力システム全体がもつ調整能力のこと」と定義している。IEA (2014) では、最も広義には「費用効果の高い方法で供給と需要を一致させるために、電力システムが適応できる発電と需要のパターンの範囲」、狭義には「発電あるいは需要を、数分から数時間の時間スケールで、予期されるか予期されないに関わらず変動に対応して、増加または低減できる範囲」を意味するとしている。また、IEA (2011) の整理では、(1) ディスパッチ可能な電源、(2) エネルギーデマンドサイドマネージメントおよびデマンドレスポンス、(3) エネルギー貯蔵、(4) 隣接した電力市場との相互接続を柔軟性のリソースとしている。

<sup>28</sup> 高橋 (2021) は競争と独占の体制、基軸となる電源種別 (集中型電源および分散型電

では、エネルギー利用側、すなわち蓄電池および電気自動車と、水素・アンモニア利用の技術選択はどうなるのだろうか。まず、蓄電池および電気自動車から言及したい。蓄電池および電気自動車に関しては、全固体電池の研究開発および実装を待たずして加速度的に普及した。BYD、テスラ、フォルクスワーゲンといった企業が中心となり、すでに完成車市場を席捲している。その一方で、バッテリー等のリサイクルを含む静脈経済の形成も必要である。他方で、水素・アンモニアに関しては、各国で戦略策定や研究開発政策が進行している。しかしながら、一部で価格低下や実用化の一步を踏み出しつつもまだ産業化の段階に至っておらず、今後の研究開発・イノベーションが必要となる。

そうした中で、発電分野における代替エネルギーにおいて、変動型再生可能エネルギーが中心となったように、エネルギー利用側においてどちらかの技術を選択することになるかと言えばそうではない。むしろ、多くの場合で用途が異なるため、棲み分けが行われる可能性が高い。蓄電池は電気を動力とするものに限られ、用途としては送電系統における電力系統安定化対策としての系統蓄電池、家庭用・事業用蓄電池、および電気自動車などとなる。他方で、水素・アンモニア利用は輸送経路の制約があるため、産業用途、例えば水素還元製鉄、燃料電池車、船舶、航空機などとなることが想定される。しかしながら、自動車分野においては、今後本格的に蓄電池および電気自動車、水素・アンモニア利用の両者の間で市場競争が起こる可能性もあるだろう。

## 終わりに

本稿（本報告）では、エネルギー利用側、すなわち蓄電池・電気自動車と、水素・アンモニア利用に焦点を当てて、価格動向や世界市場の状況を踏まえた上で、どちらの技術選択を行うのかについて議論した。

蓄電池および電気自動車については、太陽光や風力が迎ったように急激な価格の下落が起こっている。その価格の下落がすでに電動車の市場形成に大きく関わっており、今後数年で自動車業界の主流となる可能性を秘めている。その一方で、リチウム・コバルト・ニッケルといった CRM への依存度の高さや、リユース・リサイクルといった静脈経済の構築、米中デカップリング下でのグローバルサプライチェーンの課題への対応が必要である。

他方で水素・アンモニア利用に関しては、水素還元製鉄、燃料電池車、船舶、航空機など産業分野での導入可能性がある。しかしながら、実際の利用にはサプライチェーンの構築や技術イノベーションが必要である。

そして、両者の間では自動車分野など一部の分野で競合の可能性のあるものの、用途が異

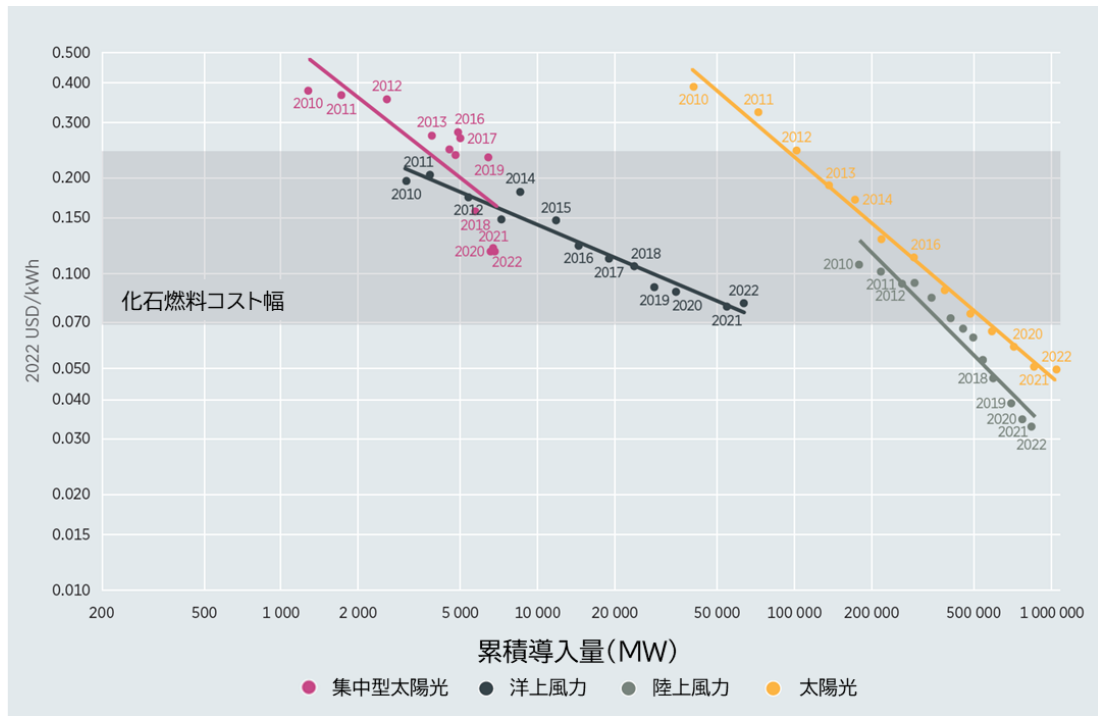
---

源) の二軸を取り、電力システムを集中型、競争型、分散型と区別した。なお、高橋 (2021) で指摘されているように、競争型と分散型は必ずしも相反するものではない。

なる部分が多く、すみ分けも可能である。

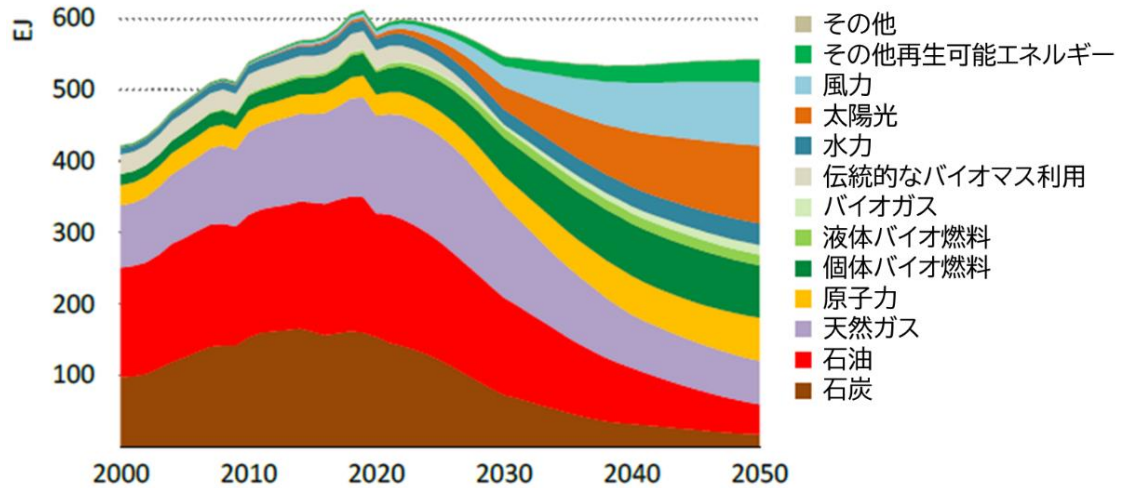
また、エネルギー利用側を議論する際に、再生可能エネルギー由来の電気・燃料を原則とすることが何より重要である。温室効果ガスの排出量を削減しカーボンニュートラルを目指す意味でも、化石燃料依存を低減し貿易赤字を防ぐ意味でも、エネルギー安全保障の構築およびエネルギー自給率向上を目指す意味でも必要な視点である。

図表一覧



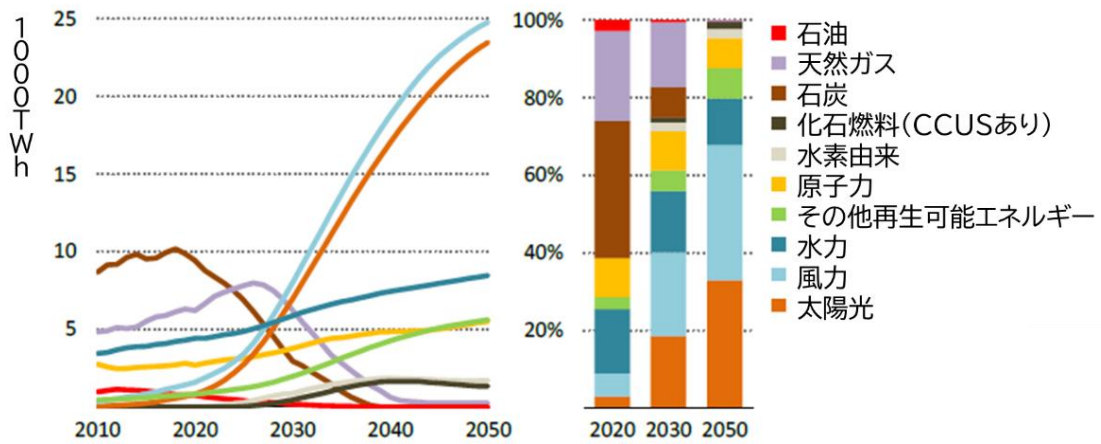
図表 1：世界における変動型再生可能エネルギーの LCOE の遞減

出典：IRENA (2023)



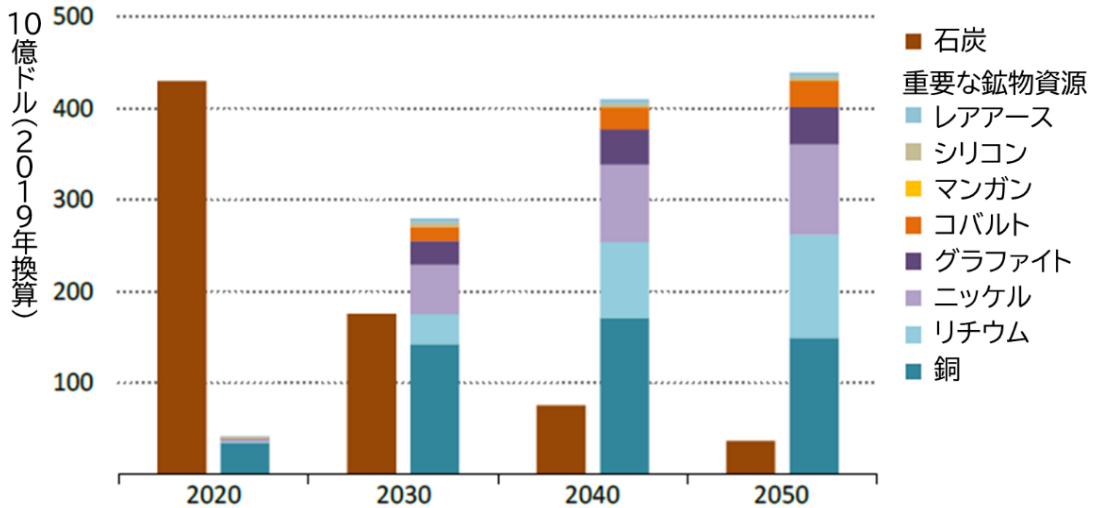
図表 2：IEA の NZE シナリオ下の一次エネルギー供給

出典：IEA (2021)



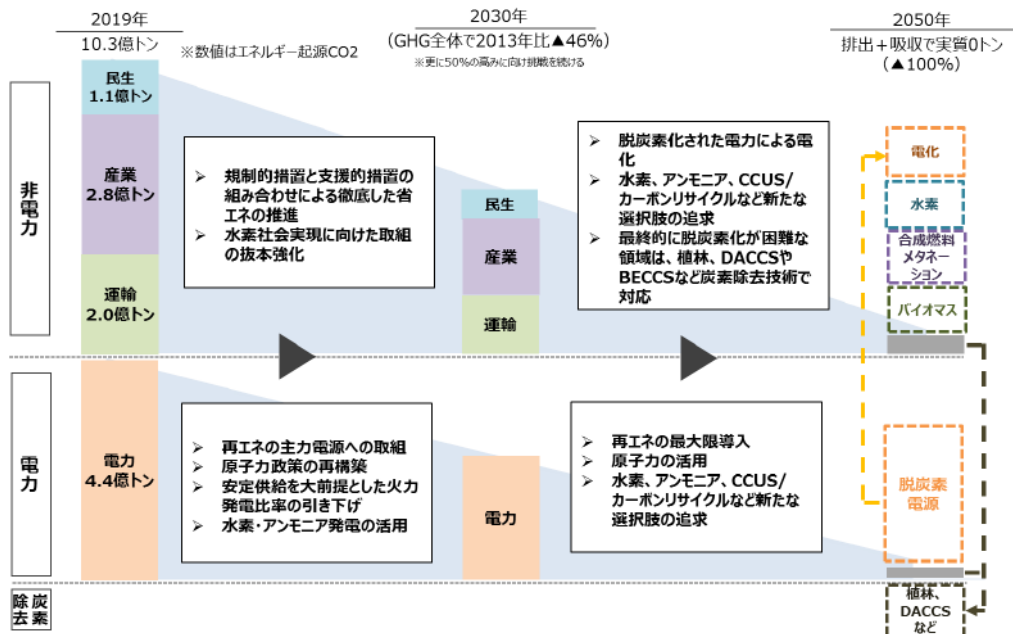
図表 3 : IEA の NZE シナリオ下の電力供給

出典 : IEA (2021)



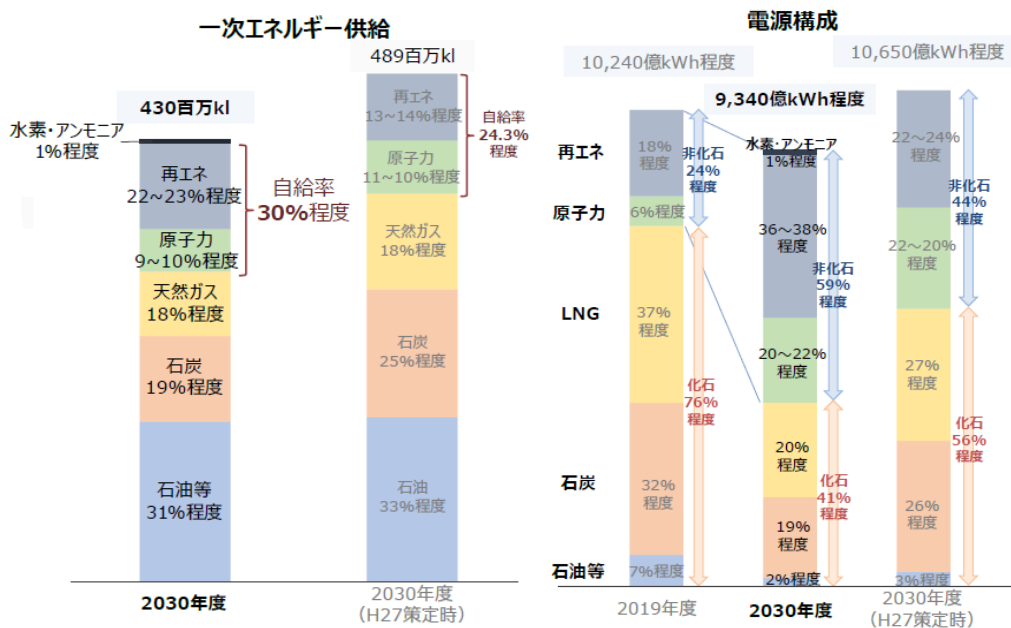
図表 4 : NZE シナリオにおける石炭と重要な鉱物資源の世界的価値

出典 : IEA (2021)



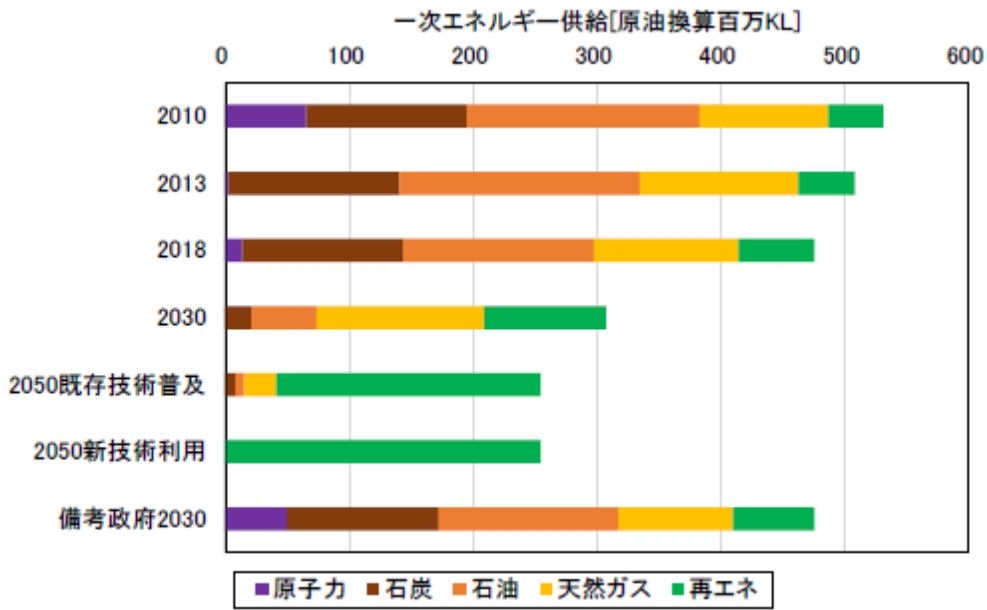
図表 5：クリーン成長戦略における 2050 年カーボンニュートラルの道筋

出典：2050 年カーボンニュートラルに伴うクリーン成長戦略

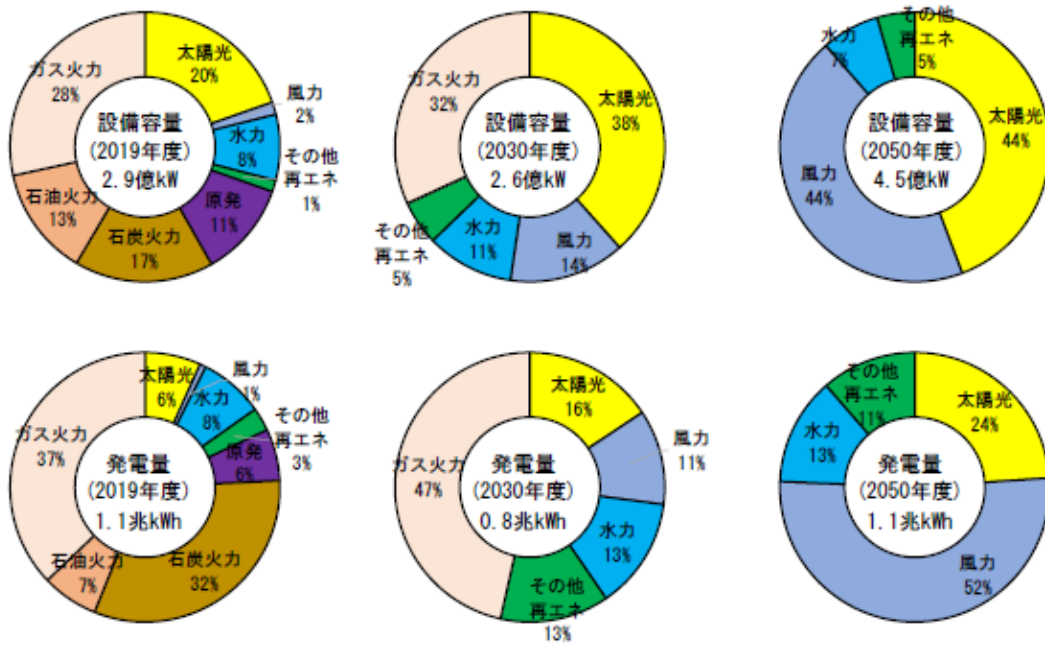


図表 6：政府想定 of 2030 年の一次エネルギー供給および電源構成

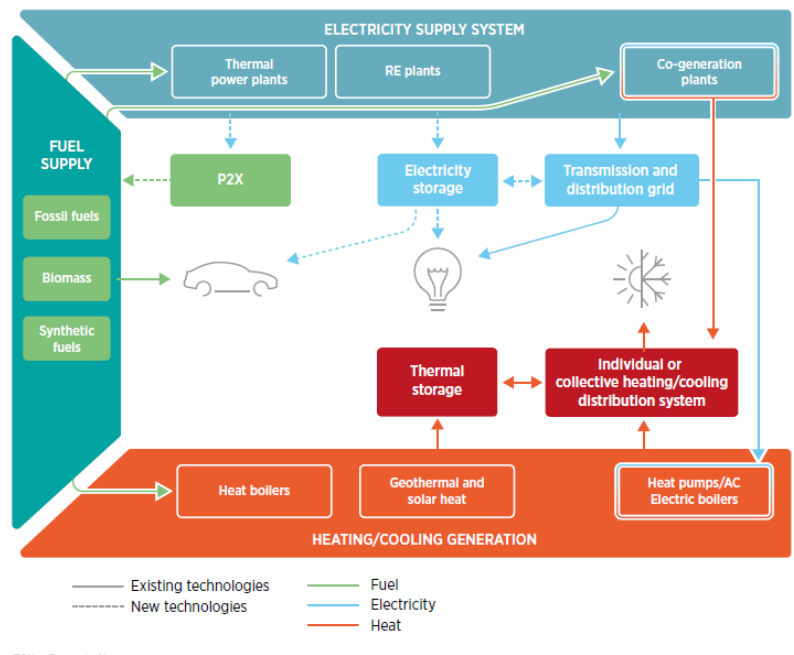
出典：資源エネルギー庁 (2021) 「2030 年度におけるエネルギー需給の見通し (関連資料)」



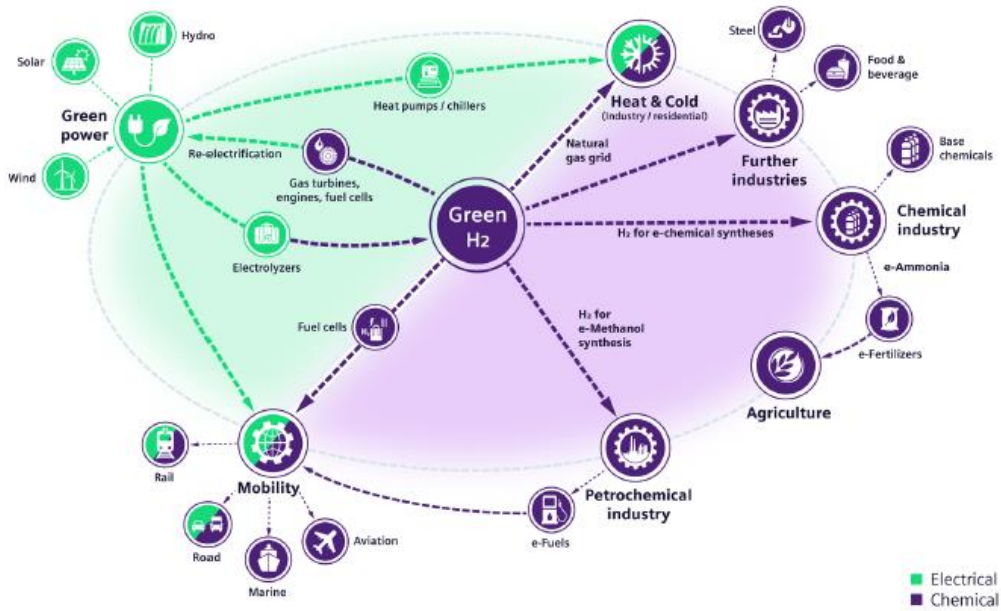
図表 7 : GR 戦略におけるエネルギー構成 (エネルギー全体)  
 出典 : 未来のためのエネルギー転換研究グループ (2021)



図表 8 : GR 戦略における再生可能エネルギー導入シナリオ  
 出典 : 未来のためのエネルギー転換研究グループ (2021)

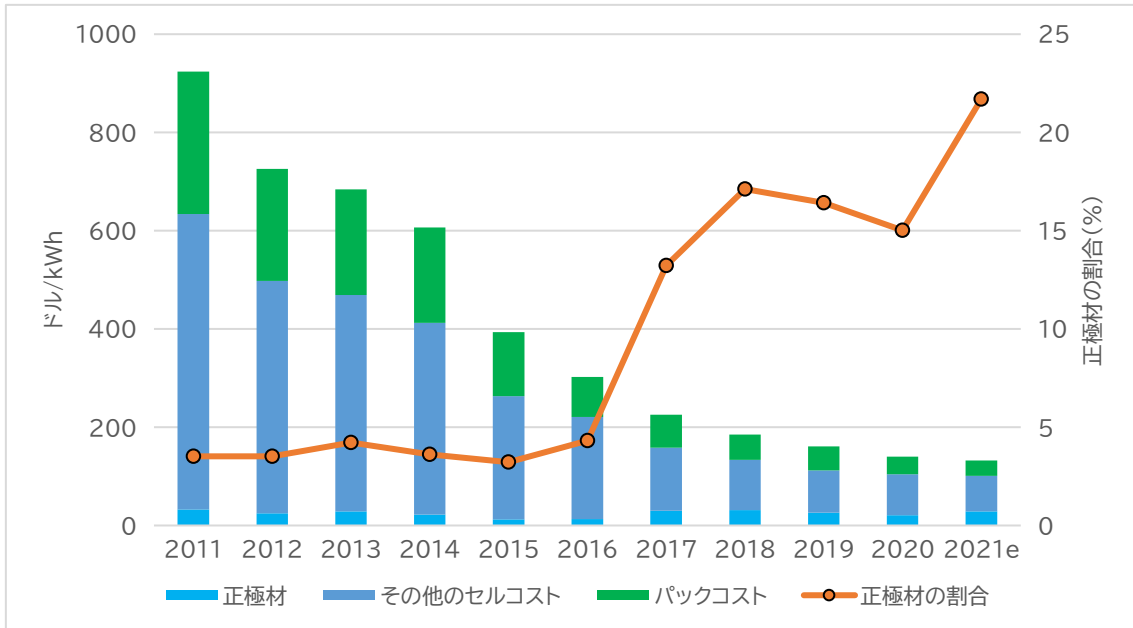


図表 9 : セクターカップリングの概念図  
 出典 : IRENA 他 (2018)



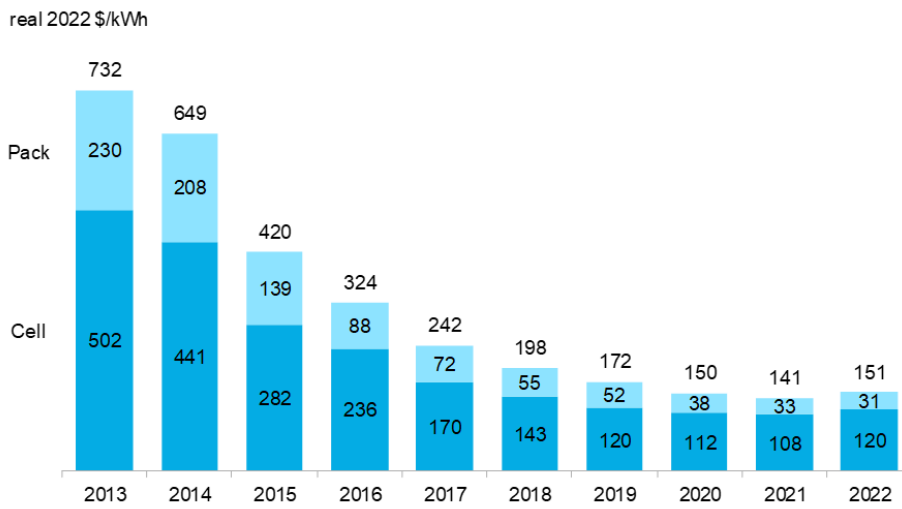
図表 10 : シーメンスが描く Power to X  
 出典 : Siemens Energy (2021)





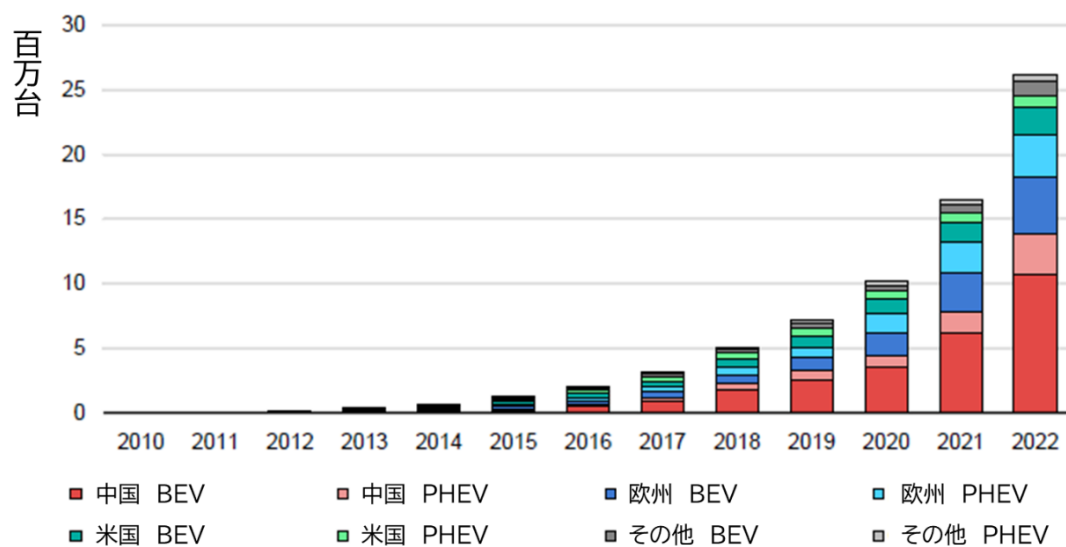
図表 11 : IEA によるリチウムイオン蓄電池単価試算の推移 (2011 年-2021 年)

出典 : IEA (2022)



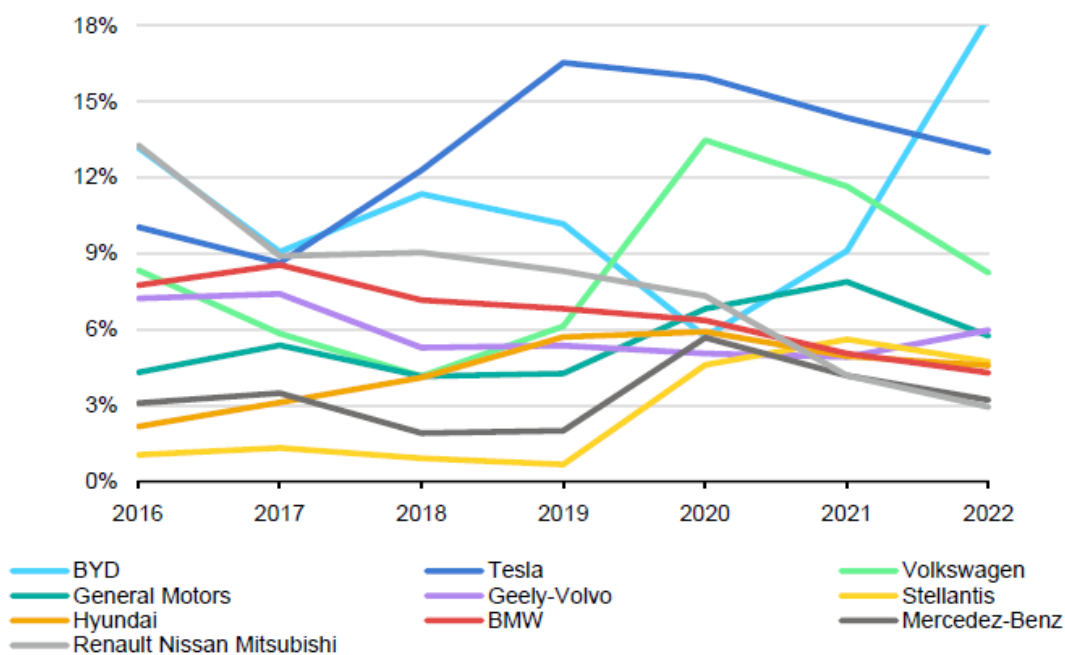
図表 12 : BNEF 調査によるリチウムイオン蓄電池単価の推移 (2013 年-2022 年)

出典 : BNEF (2022)



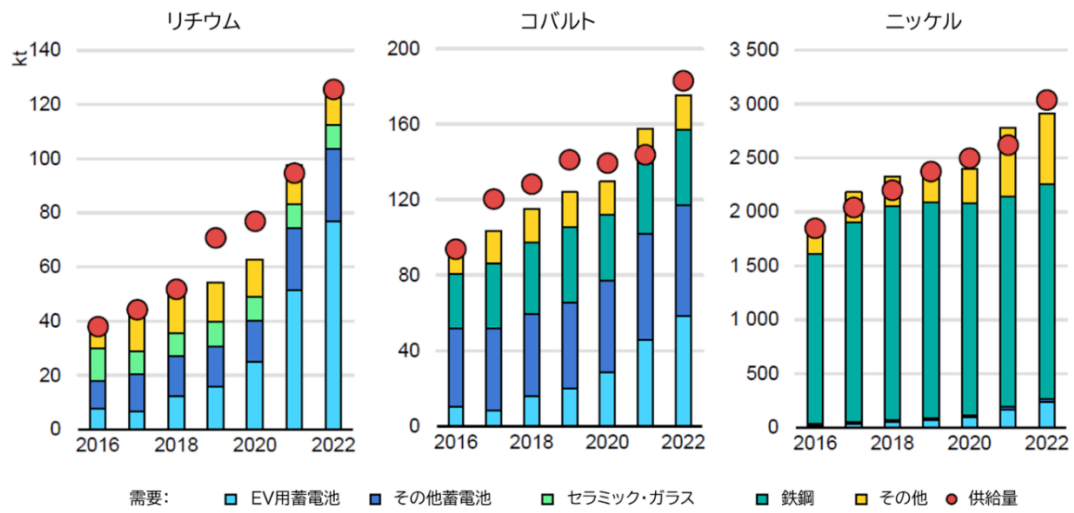
図表 13：電動車（BEV+PHEV）の総数の推移（2010年-2022年）

出典：IEA（2023）

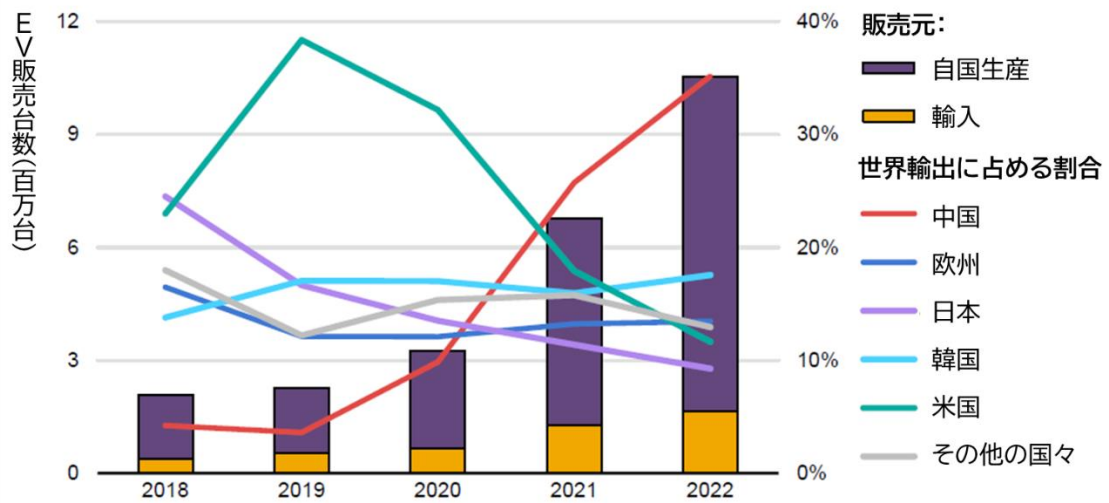


図表 14：主要 10 社の電動車（BEV+PHEV）のシェアの推移（2016年-2022年）

出典：IEA（2023）



図表 15：リチウム・コバルト・ニッケルの需給と用途の推移（2016年-2022年）  
出典：IEA（2023）

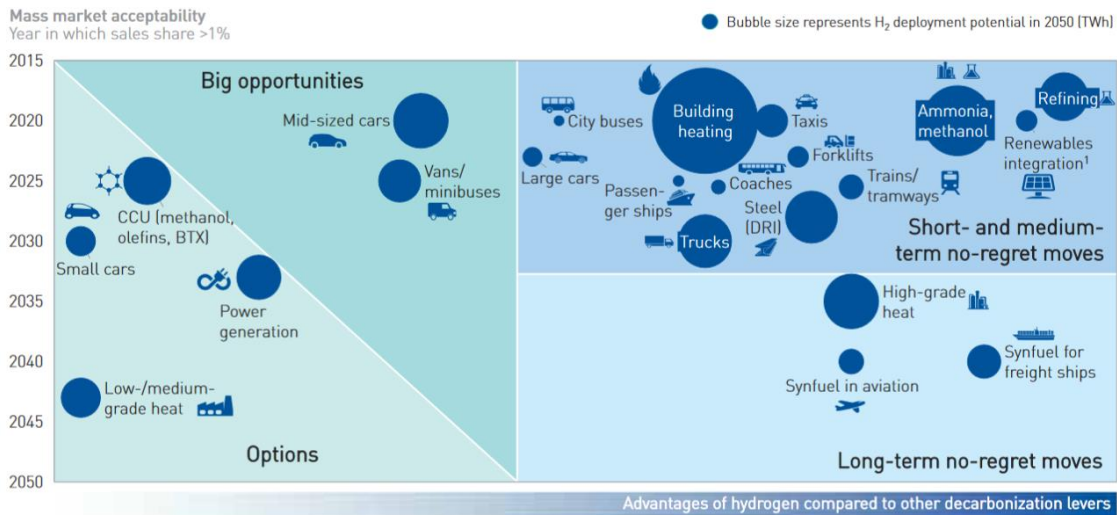


図表 16：世界における電動車販売台数と地域別のシェアの推移（2018年-2022年）  
出典：IEA（2023）

キャリア	液化水素	MCH	アンモニア	メタネーション
体積(対常圧水素)	約1/800	約1/500	約1/1300	約1/600
液体となる条件、毒性	-253℃、常圧 毒性無	常温常圧 トルエンは毒性有	-33℃、常圧等 毒性、腐食性有	-162℃、常圧 毒性無
直接利用の可否	N.A.(化学特性変化無)	現状不可	可(石炭火力混焼等)	可(都市ガス代替)
高純度化のための追加設備	不要	必要(脱水素時)		
特性変化等のエネルギーロス	現在:25-35% 将来:18%	現在:35-40% 将来:25%	水素化:7-18% 脱水素:20%以下	現在:-32%
既存インフラ活用、活用可否	国際輸送は不可(要新設)。国内配送は可	可(ケミカルタンカー等)	可(ケミカルタンカー等)	可(LNGタンカー、都市ガス管等)
技術的課題等	大型海上輸送技術(大型液化器、運搬船等)の開発が必要	エネルギーロスの更なる削減が必要	直接利用先拡大のための技術開発、脱水素設備の技術開発が必要	製造地における競争的な再エネ由来水素、CO2供給が不可欠

図表 17：水素キャリアの比較

出典：経済産業省資源エネルギー庁（2022）「水素・アンモニアを取り巻く現状と今後の検討の方向性」



図表 18：欧州の水素戦略

出典：Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (2019)

## 参考文献一覧

- 秋元圭吾・橘川武郎・エネルギー総合工学研究所・日本ガス協会編（2022）『メタネーションー都市ガスカーボンニュートラル化の切り札』エネルギーフォーラム
- アーサー・ディ・リトル・ジャパン（2023）『カーボンニュートラル燃料のすべてー電動化、水素に続く第3の選択肢』日経BP
- 飯田哲也（2022）「テスラ・ショッカーモビリティ大変革と持続可能性」『世界』2022年2月号、岩波書店
- 家本博一（2022）「車載電池大国としてのポーランドの新たな位置ー「欧州バッテリー同盟EBA」と「2020年電池規則案」の下での位置づけ」、池本修一・田中宏編著『脱炭素・脱ロシア時代のEV戦略ーEU・中欧・ロシアの現場から』文眞堂、pp.109-148
- 李秀澈・周瑋生・崔鐘敏・河津早央里・尹順眞（2020）「日本の原子力政策と原子力安全規制制度ー原子力リスクから安全な社会に向けて」『名城論叢』第20巻4号、pp.101-132
- 井上元（2022）「電気自動車用リチウムイオン電池の進化」『精密工学会誌』Vol.88、No.4
- 高橋洋（2021）「セクターカップリングのエネルギー政策論ー電力システム改革からエネルギーシステム改革へ」、大島堅一編著『炭素排出ゼロ時代の地域分散型エネルギー論』日本評論社、pp.257-284
- 高橋洋（2021）「日本の電力システム改革の形成と変容ー集中型・競争型・分散型」『環境と公害』第46巻1号、pp.14-21
- 高橋洋（2022）『エネルギー転換の国際政治経済学』日本評論社
- 出川通（2004）『技術経営の考え方ーMOTと開発ベンチャーの現場から』光文社新書
- 道満治彦（2021）「気候危機時代における環境政策と企業ー気候中立とコロナ後のグリーン・リカバリーに向けて」『比較経営研究』第45号、pp.24-54
- 道満治彦（2023）「グリーンディールの前提としての再エネ政策ー優先規定の変遷から見る日本への示唆」、蓮見雄・高屋定美編『欧州グリーンディールとEU経済の復興』文眞堂、pp.261-290
- 蓮見雄（2023）「産業戦略としての欧州グリーンディール」、蓮見雄・高屋定美編『欧州グリーンディールとEU経済の復興』文眞堂、pp.123-176
- 未来のためのエネルギー転換研究グループ（2020）「原発ゼロ・エネルギー転換戦略」  
<https://energytransition.jp/strategy>
- 未来のためのエネルギー転換研究グループ（2021）「レポート 2030ーグリーン・リカバリーと2050年カーボン・ニュートラルを実現する2030年までのロードマップ」  
[https://green-recovery-japan.org/pdf/japanese\\_gr.pdf](https://green-recovery-japan.org/pdf/japanese_gr.pdf)
- 安田陽（2017）「系統連系問題」、植田和弘・山家公雄編『再生可能エネルギー政策の国際比

- 較—日本の改革のために』京都大学学術出版会、pp.195-236
- European Commission (2018) EUROPE ON THE MOVE: Sustainable Mobility for Europe: safe, connected, and clean, COM(2018) 293 final
- European Commission (2020) A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, COM(2020) 301 final
- Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (2019) “HYDROGEN ROADMAP EUROPE”
- IEA (2011) “Harnessing Variable Renewables: A Guide to the Balancing Challenge”, International Energy Agency
- IEA (2014) “The Power of Transformation: Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems”, International Energy Agency  
(邦訳：新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）訳「電力の変革—風力、太陽光、そして柔軟性のある電力システムの経済的価値」、  
<https://www.nedo.go.jp/content/100643823.pdf>)
- IEA (2021a) “Key World Energy Statistics 2021”
- IEA (2021b) “Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector”
- IEA (2022) “Global Hydrogen Review 2022”
- IEA (2023) “Global EV Outlook 2023”
- IEA・NEA (2020) “Projected Costs of Generating Electricity 2020”
- IRENA・IEA・REN21 (2018) “Renewable Energy Policies in a Time of Transition”
- IRENA (2023) “Renewable Power Generation Costs in 2022”
- IRENA (2022) “Sector coupling: A key concept for accelerating the energy transformation”
- Lazard (2023) “2023 Levelized Cost Of Energy+”
- Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC
- Romain Zissler (2023) “Battery Storage to Efficiently Achieve Renewable Energy Integration”, Renewable Energy Institute
- Simens Energy (2021) “Power-to-X: The crucial business on the way to a carbon-free world”
- Susan Strange (1988) States and Markets, Bloomsbury Publishing (邦訳：スーザン・ストレンジ著、西川潤・佐藤元彦訳 (2020) 『国家と市場—国際政治経済学入門』ちくま学芸文庫)

Tony Seba (2014) Clean Disruption of Energy and Transportation: How Silicon Valley Will Make Oil, Nuclear, Natural Gas, Coal, Electric Utilities and Conventional Cars, Lightning Source Inc