



令和4年度
カーボンニュートラルの実現に向けたエネルギー
貿易・投資市場への影響

2023年2月

一般財団法人 国際貿易投資研究所(ITI)

INSTITUTE FOR INTERNATIONAL TRADE AND INVESTMENT

令和4年度（一財）貿易・産業協力振興財団 助成事業

はじめに

化石燃料を中心とするエネルギー資源は、世界貿易全体の 10%程度を占め極めて大きく、また、エネルギー価格も需給、経済・金融状況、政治動向、戦争や紛争の発生、気候等の様々な要因で大きく変動している。こうした化石燃料関連の設備投資は巨額を要し、我が国はもとより世界全体の経済に及ぼす影響は大きい。こうした中、2021 年 10 月末に開催された COP26（国連気候変動枠組条約第 26 回締約国会合）では、2030 年に温室効果ガス（以下、GHG）の排出量を 2010 年比で 45%削減し、2050 年には GHG 排出量をネット・ゼロ（以下、カーボンニュートラル）とする目標が再確認されている。さらに 2022 年の COP27 では世界全体のカーボンニュートラルの達成のため、特に発展途上国のロス&ダメージ（気候変動の悪影響に伴う損失と損害）支援のための基金を設立することが合意されている。

ただし、2015 年のパリ開催の COP21 で、年間 1,000 億ドルの支援目標が先進国に課されているが、達成できていない状況がある。さらに、2025 年までに大幅に増額する先進国の新資金目標を設定することは極めて厳しい。今回の COP27 は発展途上国側に成果が多い会合であったと評価されている。

しかも、カーボンニュートラルを達成するためには、既存のエネルギー供給構造に大幅な変更が必要となる。エネルギー産業はその規模の大きさから、変更と代替を円滑に進めることは容易ではなく、各国が政策としていかに取り組むかを詳細に検討する必要がある。

化石燃料の代替となる再生可能エネルギーの大量導入もインフラ整備やコスト面から見ても課題が多い。水素利用等のカーボンニュートラル達成のためのイノベーション推進と、その大規模導入にも相応の時間が必要である。

一方、ロシアによるウクライナ侵攻に端を発した世界的なエネルギー情勢の変化、欧米諸国による対ロ経済制裁が、石油、ガスも含めた化石燃料資源の開発（投資計画を含む）・生産、輸出入にいかに関与するか、他の大輸出国である中東諸国、米国等の政策動向への波及を注視する必要がある。

世界的に石炭への投資急減が既に生じている環境下、カーボンニュートラルを実現する上でエネルギー資源の開発の他、エネルギー関連設備・機器や研究開発などへの投資およびエネルギー関連貿易に生じる未曾有の変化を予測し、備えを行っていく必要がある。とりわけ、今般のロシアへの経済制裁のインパクトの検証は急務となっている。

エネルギー産業は、規模が大きく、食料と並んで各国における市民の生存を担う必需品で

あり、急激な転換は容易ではない。このためカーボンニュートラルを目指すためには、化石燃料の供給を一定程度維持しながら、低炭素燃料や再生可能エネルギーの導入を着実に進めていく必要がある。自国ばかりでなく、世界全体の経済・社会の安定と成長の持続を維持しつつ、カーボンニュートラルに向けたエネルギーシフトを進めるための知見の整理に本研究会での議論が有益な示唆を与えることを願っている。

本研究会は、一般財団法人 国際貿易投資研究所 (ITI) のもつ貿易と投資に関する膨大な研究集積を活用するとともに、エネルギー分野の有識者の知見を得て各国のカーボンニュートラルに向けた動きがエネルギー関連の投資および貿易に与える影響を分析し、情報需要者への普及啓発に取り組むものである。

本報告書は、2022 年度の「カーボンニュートラルの実現に向けたエネルギー貿易・投資市場への影響」をテーマとしたエネルギー経済分野に関する研究会事業の報告書として作成したものであり、本研究会の委員がそれぞれの専門分野につき分担執筆した各章の個別テーマは、いずれも我が国の企業、政策担当者などに対して提言することを念頭におきつつ研究を行った上の記載となっている。

本研究会の構成メンバーは、以下のとおりである。

主 査	武 石 礼司	東京国際大学 特命教授
委 員	大先 一正	東京ガス株式会社元経営調査室長、日本エネルギー経済研究所 桜会会長
委 員	亀井 淳史	技術経営コンサルタント
委 員	紀ノ岡幸次	関西電力株式会社 エネルギー・環境企画室 企画担当部長、 電気事業低炭素社会協議会 代表理事
委 員	中山寿美枝	電源開発株式会社執行役員、京都大学経営管理大学院特命教授
委 員	星野 優子	ENEOS 中央技術研究所 技術戦略室 上席研究員

令和 5 年 2 月 一般財団法人 国際貿易投資研究所

要 約

第 1 章 カーボンニュートラルの実現に向けたエネルギー貿易・投資市場への影響調査 研究会における検討内容と成果の概要とその論点

東京国際大学

特命教授 武石 礼司

第 1 章では、4 回にわたり開催された研究会での審議内容につき第 1 節から第 4 節で紹介するとともに、第 5 節で IEA（世界エネルギー機関）の世界エネルギー見通し 2022 年版を用いた昨今の議論の内容を見つつ、将来に向けた課題を指摘した。

第 1 節では、エネルギー関連の投資・需給、さらにレアメタルに関する日本の政策動向を分析した。第 2 節では、地球環境問題に対する考え方を考察した。第 3 節では、ガス産業が 2050 年においてもガス導管を使用したエネルギー供給を担う将来像を見た。第 4 節では、石油化学産業という化学産業への素材提供を行う業種の将来計画を検討した。第 5 節では、IEA 等の 2050 年に向けたエネルギーシナリオを比較検討した。第 6 節では、今後のカーボンニュートラルへの取り組みにおける課題につき検討し、2030 年に 2013 年比 46%の温室効果ガス削減を早急な施策で満たすことは、日本経済と社会に大きなマイナスの効果として、雇用喪失、リスク資産あるいは座礁資産を生み出して社会が不安定化する可能性があることを指摘した。

第 2 章 2050 年カーボンニュートラルのシナリオ

電源開発株式会社 執行役員

京都大学経営管理大学院 特命教授

中山 寿美枝

国際エネルギー機関（IEA）が 2021 年に“Net Zero by 2050”というレポートを発刊し、同年の国連気候変動枠組条約第 26 回締約国会合（以下、COP26）に向けて 2050 年に世界がカーボンニュートラルを達成するための NZE（ネット・ゼロ・エミッション）シナリオ（正確にはエネルギー起源 CO₂ と産業プロセスの CO₂ を 2050 年にゼロにするシナリオ）（以下、NZE）を技術別、分野別ロードマップと共に示した。世界で最も有名な 2050 年カ

ーボンニュートラルのシナリオと言える **NZE** について、ロードマップと共にその概要を示し、同レポートと共に公表されたエクセルデータの分析結果と、そこから見えてくる **NZE** の課題の抽出を行った。その結果、**NZE** は、非常に不連続なエネルギー需要の低下、化石燃料の需要の激減、水素燃料および再生可能エネルギーの激増とコスト激減、莫大な電力インフラへの投資、多くの革新的技術の商用化、そして全人類の行動変容、これら全てが実現することを前提条件としているものであり、多くの課題があることが示唆される。

第3章 モビリティのカーボンニュートラルから考える日本の産業戦略

技術経営コンサルタント

亀井 淳史

欧米を中心にガソリン乗用車を 2035 年までに販売禁止するとの動きがあり、一気に EV 化が進むと目されている。一方、日本の自動車業界は脱炭素に向けハイブリッド車を含めて複数の選択肢を提示している。この問題は自動車がどうなるかというだけでなく将来のエネルギー選択の問題であり、各国の産業戦略にもつながる議論でもある。

そこで本稿では、モビリティ（移動手段）のカーボンニュートラルの動きを、日本が先行して環境対策車の開発を進めた経緯とともに再考し、モビリティから考えられるエネルギー選択について検討を行った。

また、自動車産業とエネルギーが直面する課題について分析し、人口減少と人口移動、第 4 次産業革命の進展による業態と産業構造の転換を指摘し、2050 年の日本のあり方を念頭に日本の産業戦略として、スマートシティ（デジタル技術を活用してより住民や企業の利便性を向上させた都市）のデータプラットフォームや水素製造・供給・利用技術などブレークスルーとなるキー技術を核にグローバルな社会システムを構築する「社会システムの産業化」を指針として提唱した。

第4章 電力産業のカーボンニュートラル化の取り組み

関西電力株式会社 エネルギー・環境企画室 企画担当部長

電気事業低炭素社会協議会 代表理事

紀ノ岡 幸次

エネルギーインフラ事業である電気事業の根幹は、「S+3E」の達成を果たす最適なエネルギーミックスの追求にあるが、カーボンニュートラル実現に向けた電気事業のアプローチの両輪である「電気の低・脱炭素化」と「電化の促進」について国内外の取り組みを紹介する。「電気の低・脱炭素化」については、原子力の自主的・継続的な安全性向上、再生可能エネルギーの最大限の導入・活用とそのための系統対策、および火力発電の効率性向上等の従来の取り組みに加えて、SMR や高温ガス炉等の次世代革新炉の開発、CCS/CCU さらには水素/アンモニア等に関する革新的技術を活用した火力発電の低・脱炭素化等に取り組む。「電化の促進」については、蓄熱式ヒートポンプや IH 等の普及促進に加えて、ICT の高度化によるエネルギーマネジメント等を通じて、デマンドサイドにおける省エネと CO₂ 削減の同時達成を目指す。あわせて、低炭素型インフラ技術を通じて新興国・発展途上国の CO₂ 削減にも貢献していく。政府には、これらに対する政策的・財政的措置、イノベーション技術と経済合理性を両立させる政策パッケージ、コスト負担への国民理解の醸成を求めたい。

第5章 ガス産業のカーボンニュートラル化の取り組み

東京ガス株式会社 元経営調査室長

日本エネルギー経済研究所 桜会会長

大先 一正

ガス産業のカーボンニュートラル化の具体的な方法には、①バイオガスを精製して天然ガス並みに改質されたバイオメタンの利用、②脱炭素化された水素 (H₂) と回収済み二酸化炭素 (CO₂) から製造された合成メタン (以下、e-メタン) の利用、③脱炭素化水素の直接利用がある。世界の各国は、エネルギーに関する自国の様々な条件を踏まえた選択を行っており、わが国では、e-メタンの利用がガス産業のカーボンニュートラル化の柱とされ、各方面での取り組みが開始されている。

このため、第 5 章第 1 節では、経済産業省資源エネルギー庁に設置されたメタネーション推進官民協議会での検討状況と 2022 年 11 月にまとめられた中間報告の要旨を報告し、次いで 2022 年 11 月開催の政府の GX（グリーン・トランスフォーメーション）実行会議でまとめられた基本方針に盛り込まれたメタネーション支援策等を紹介する。第 2 節では、日本ガス協会が発表したカーボンニュートラル化の取り組みと大手都市ガス会社による e-メタン由来の米国産 LNG の輸入計画及び革新的メタネーション技術の研究開発と社会実装化（実用化）への取り組み状況を報告する。また、第 3 節では、欧州連合（EU）と米国の取り組み方向を概観し、わが国にとって参考となる点を考察する。

第 6 章 カーボンニュートラルとエネルギーレジリエンスー多様性の確保と石油産業の役割ー

ENEOS 株式会社 中央技術研究所技術戦略室

上席研究員 星野 優子

はじめに 2050 年までのカーボンニュートラル実現にむけて注目される、再生可能エネルギーの導入拡大とエネルギーの電力シフトについて、課題や備えるべきポイントについて整理する。再生可能エネルギーの特徴の一つにエネルギー密度の低さがある。同じエネルギーを取り出すのに、より大掛かりな設備が必要になるため、再生可能エネルギー導入の拡大は、重要鉱物をはじめとした資源貿易の拡大や多様な稀少金属鉱物（レアメタル）のサプライチェーンリスクの増大など貿易面でも新たな課題も生んでいる。化石資源に恵まれない日本にとって、世界的なカーボンニュートラルへの移行をチャンスととらえ、関連技術・製品の輸出競争力を獲得していくためには、国内のエネルギー供給と価格の安定が不可欠となる。この実現においては、特定のエネルギー源のみに偏らないバランスの取れたエネルギー需給構造（エネルギー源や利用形態の多様性を確保すること）がカギとなる。太陽光や風力などの変動型再生可能エネルギーだけに頼らない電源構成の多様性に加え、災害時・非常時のエネルギー供給のレジリエンスの観点からは、電力だけに頼らないエネルギー源（エネルギー供給インフラ）の多様性を失わない努力も忘れてはならない。人口高齢化と低成長が予想される日本において、カーボンニュートラルの実現と並行してエネルギー供給インフラの多様性を確保していくには、既存のインフラを最大限活用しながら新しいものに置き換えていく丁寧な移行が重要になる。最後に、そこにおいて石油産業が果たせる役割にもふれる。

目 次

はじめに

要約

第1章 カーボンニュートラルの実現に向けたエネルギー貿易・投資市場への影響

調査研究会における検討内容と成果の概要とその論点	1
第1節 世界のエネルギー需給の状況と近年の変化.....	1
1. エネルギー需給、CO ₂ 排出量、投資および鉱物資源の動向	2
2. 日本政府の方針と課題	7
第2節 地球環境問題に関する考え方 —「地球温暖化と脱炭素のファクトフルネス」 (第2回研究会) から得られた示唆—.....	11
第3節 ガス産業の将来的な方向性 —「2050 年カーボンニュートラルに向けた都市ガス 業界の取り組み」(第3回研究会) から得られた示唆—.....	12
第4節 石油化学産業の将来的な方向性 —「石油化学産業とカーボンニュートラル」 (第4回研究会) から得られた示唆—.....	15
第5節 OECD IEA が掲げる 2050 年の世界のエネルギー需給の姿.....	19
第6節 まとめ 直近の情勢分析と今後のカーボンニュートラルへの取り組み	32
1. 本稿での分析から得られた内容	32
2. 今後のカーボンニュートラルへの取り組み	32
参考文献.....	35
注	35

第2章 2050 年カーボンニュートラルのシナリオ

第1節 ネットゼロ報告書の構成.....	36
第2節 NZE シナリオの前提	36
第3節 NZE シナリオの概観	39
第4節 技術別ロードマップ	41
第5節 部門部ロードマップ	46
第6節 NZE のインプリケーション	53
1. 経済へのインプリケーション	53
2. 雇用	54
3. 電力コスト.....	54
4. エネルギー・セキュリティ	55
第7節 データによる NZE の分析	56
1. NZE の CO ₂ 排出と前提条件.....	56
2. NZE の電力	58
3. 一次エネルギーと最終エネルギー消費のシナリオ間比較	61
4. ネットゼロ報告書の課題.....	65

第3章 モビリティのカーボンニュートラルから考える 日本の産業戦略.....	67
はじめに.....	67
第1節 輸送部門の脱炭素の状況.....	68
第2節 EV化、FCV化の経緯.....	71
第3節 「ガソリンエンジン車販売禁止」への自工会の対応.....	73
第4節 エネルギー選択枝の意味.....	76
1. 生産側から見た車のエネルギー選択.....	76
2. 利用サイドから考えるユースケース.....	78
3. これからの発展可能性.....	80
4. 自動車産業が直面する本質的な課題.....	81
第5節 脱炭素実現への障壁.....	83
第6節 2050年のグランドデザイン.....	85
第7節 日本の産業戦略.....	87
まとめ.....	89
参考文献.....	90
注.....	91
第4章 電力産業のカーボンニュートラル化の取り組み.....	96
はじめに.....	96
第1節 電力業界の取り組み.....	97
1. 「S+3E」の達成.....	97
2. 電気事業におけるCO ₂ 排出削減.....	97
3. 具体的施策.....	98
第2節 関西電力の取り組み.....	105
1. 『ゼロカーボンビジョン 2050』.....	105
2. 『ゼロカーボンロードマップ』.....	106
第3節 国への期待.....	108
1. 「電気の低・脱炭素化」と「電化の促進」に資する政策的・財政的措置.....	108
2. イノベーション技術と経済合理性を両立させる政策パッケージ.....	109
3. コスト負担への国民理解の醸成.....	109
注.....	109
第5章 ガス産業のカーボンニュートラル化の取り組み.....	110
はじめに.....	110
第1節 わが国全体としてのメタネーションに向けての取り組み.....	113
1. メタネーション推進官民協議会の検討経緯と中間報告.....	113
2. GX実行会議での基本方針の取りまとめ.....	122
第2節 都市ガス業界の取り組み.....	124
1. 日本ガス協会のカーボンニュートラル化の取り組み.....	124

2. 都市ガス事業者による具体的な取り組み	126
第3節 世界各国のメタネーションを巡る動向	133
1. IEA による e-メタンの将来予測	133
2. 日本・欧州・米国での e-メタンの位置付け	134
むすびに	137
 第6章 カーボンニュートラルとエネルギーレジリエンスー多様性の確保と石油産業の役割ー	138
はじめに	138
第1節 再生可能エネルギー拡大の影響	138
1. エネルギー密度と資源への依存度	139
2. カーボンニュートラル関連品と輸出競争力	142
第2節 エネルギーの電力シフト	145
1. 貿易統計からみる石油需要の減少	145
2. エネルギーの電力シフトと残された課題	146
第3節 エネルギーのレジリエンス	149
1. 多様性の確保	149
2. エネルギー企業の役割	150
参考文献	151

第1章 カーボンニュートラルの実現に向けたエネルギー貿易・投資市場への影響 調査研究会における検討内容と成果の概要とその論点

東京国際大学

特命教授 武石 礼司

はじめに

本研究会は、カーボンニュートラル（実質排出ゼロ）の実現に向けたエネルギー貿易・投資市場への影響を検討することを目的として設立され、2022年に4回の会合を持った。この4回の研究会の各会で話題提供を担当した者とその内容は以下の通りである。

- ・ 第1回 2022年7月1日 東京国際大学 武石礼司特命教授 「エネルギーコスト比較について」
- ・ 第2回 2022年8月18日 キャノングローバル戦略研究所 杉山大志研究主幹 「地球温暖化と脱炭素のファクトフルネス」
- ・ 第3回 2022年10月3日 日本ガス協会 早川光毅専務理事 「2050年カーボンニュートラルに向けた都市ガス業界の取り組み」
- ・ 第4回 2022年11月7日 石油化学工業協会 志村勝也専務理事 「石油化学産業とカーボンニュートラル」

以下では、第1章の執筆筆の武石が行った第1回目研究会の発表の一部を説明するとともに、第2回の杉山氏、第3回の早川氏、第4回の志村氏の各氏から頂いたご講演の内容につき、武石が注目した部分につき記載する。

さらに本章の最後に、2022年11月に公表されたIEA（世界エネルギー機関）の世界エネルギー見通し（World Energy Outlook）2022年版から注目される部分を抜き出しながら、2030年、2050年に向けたカーボンニュートラルへ向けた方向性とその実施可能性を議論し、最後にまとめを行っている。

第1節 世界のエネルギー需給の状況と近年の変化

本節は、第1回研究会の武石発表による「エネルギーコスト比較」の概要を含めた検討を行う。

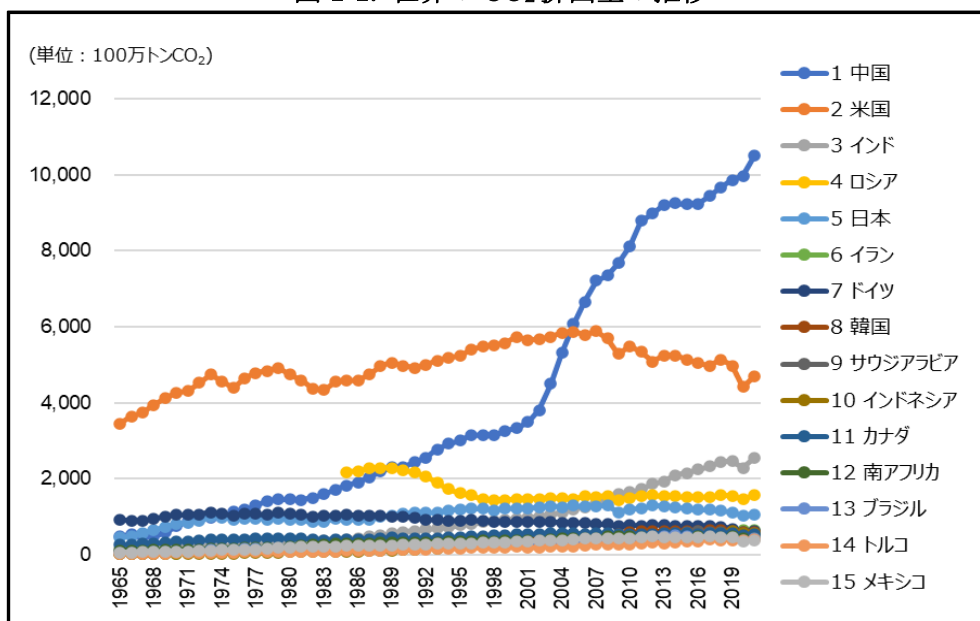
1. エネルギー需給、CO₂ 排出量、投資および鉱物資源の動向

パリ協定が2016年に発効し、カーボンニュートラルおよび1.5℃目標を目指す動きがEUを中心として始まっている。世界の主要国が将来的なCO₂削減目標を表明する中、世界の先進企業は、CO₂排出量を削減したビジネスモデルを提示できるかが、勝ち組を意味する場合も次第に見られるようになってきている。化石燃料の利用を低減し、再生可能エネルギーの太陽光、風力などの利用を拡大し、また水素利用を目指すなどの動きが高まっており、多くの国において、次第に、再生可能エネルギーの利用増大による電力化率の向上が図られるようになってきている。

こうして、従来、石油やガスに頼った部分を電力でカバーする場合も次第に増えてきており、そのためのシステム転換として、エネルギー源を変えていくエネルギー・トランジション（移行）、エネルギー・トランスフォーメーション（変革）という動きが生じている。

ただし、世界のCO₂排出量（2021年）を見ると図1-1で示すように国別第1位の中国、3位のインドというように、発展途上国において増大傾向が続いている。世界に占める比率では、中国が31%、第2位の米国が14%、第3位がインドで8%となっている。第4位はロシアで、第5位が日本である。米国および日本は減少傾向となっており、中国とインドという発展途上国におけるCO₂排出量の増大が顕著であり、CO₂排出量の増大は、先進国の問題から、発展途上国における問題という面が強くなってきていると言える。

図 1-1. 世界の CO₂ 排出量の推移



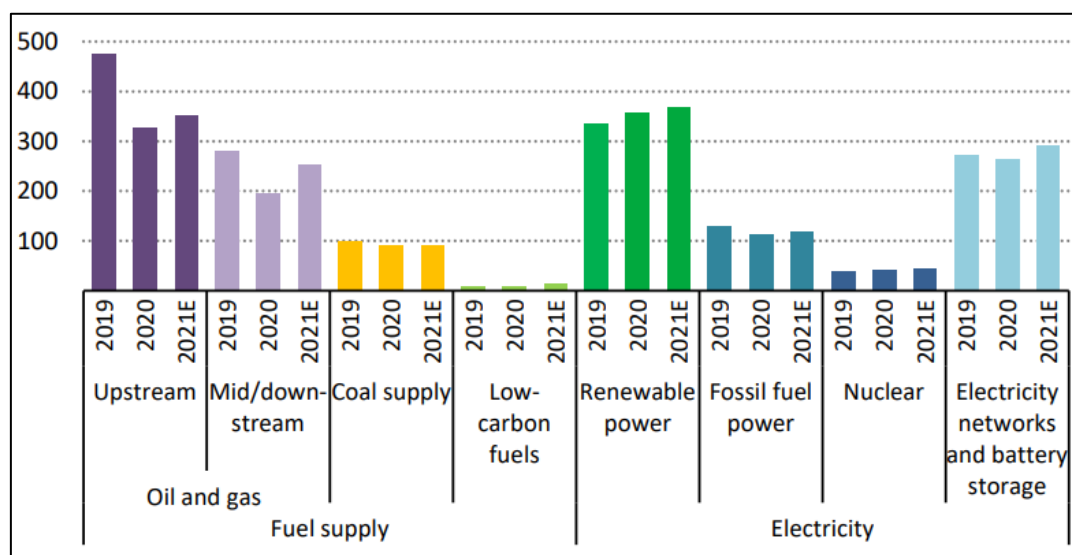
出所：BP ; Statistical Review of World Energy June 2022 より筆者作成

エネルギーの高効率な利用を図り、かつ、ESG（環境、社会、統治）に配慮し、SDGs（持続可能な開発目標）や省エネを図る動きが生じているのは、先進国が中心となっている。

世界のエネルギー部門への投資額を見ると、図 1-2 で 3 年分の数値で示すように石油とガスの上流（開発・生産）部門への投資額が減少傾向にある中、再生可能エネルギーへの投資額が近い将来上回ると予想される状況となっている。また電力の送配電と蓄電部門への投資額も増大している。

図 1-2. 世界のエネルギー投資額（2019 年および 2020 年の実績と 2021 年の推計）

（単位：10 億ドル）



資料：IEA；[World Energy Investment 2021](#) (p.17 より転載)

(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/5e6b3821-bb8f-4df4-a88b-e891cd8251e3/WorldEnergyInvestment2021.pdf>)

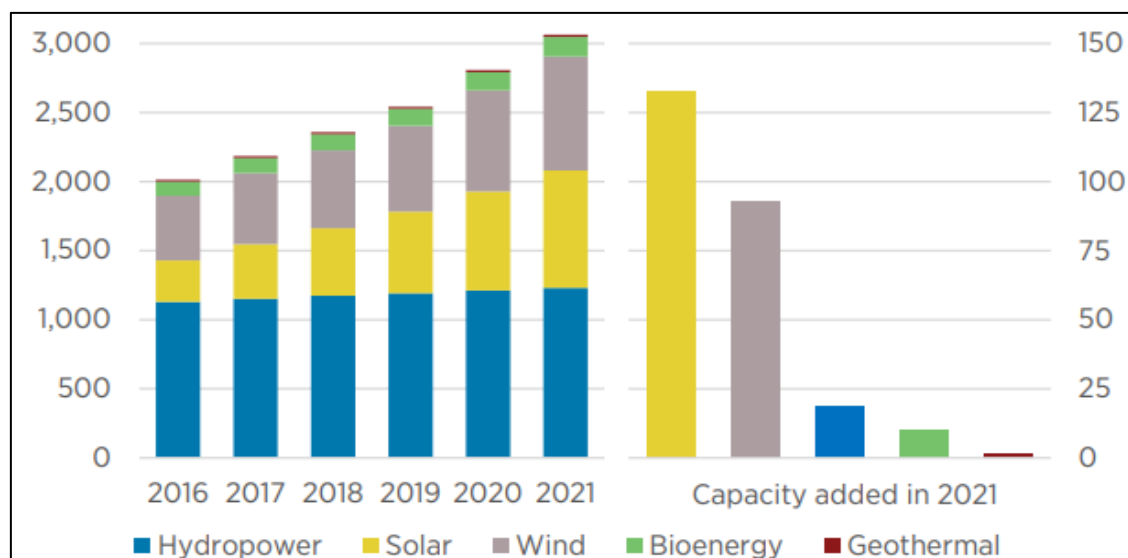
多額の資金が再生可能エネルギーに振り向けられることで、図 1-3 で示すように、水力に加えて、太陽光と風力の発電容量（GW）が近年大きな伸びを示している。

ただし、水力が発電容量においても最も大きいのは水力で、太陽光と風力が次に多くなっている。2021 年の単年度の世界の再生可能エネルギーの発電能力の伸びを見ると 9.1%であり、総発電能力の伸びの 81%を再生可能エネルギーが占めている。内訳は、太陽光が圧倒的に多く、次いで風力、水力の順となっている。太陽光と風力の発電電力量は、設備稼働率を割り引いてみる必要があり、太陽光で 14%から 17%程度、風力では 27%程度の稼働率（価格等算定委員会、2022 年）であるために、依然として再生可能エネルギーによる電力供給は水力に多く依存している。また、太陽光と風力の発電量（kWh）は大幅に少なくな

る状況は変わっていない。総発電量に占める比率は、再生可能エネルギーのうちでは中型以上の水力と地熱で大きくなっている。

図 1-3. 再生可能エネルギーによる世界の発電能力の推移（2016 年から 2021 年）

（単位：GW）



出所：IRENA; “[Renewable capacity highlights](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2022.pdf?la=en&hash=6122BF5666A36BECD5AAA2050B011ECE255B3BC7)” 11 April 2022（p.1 より転載）

([https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA-](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2022.pdf?la=en&hash=6122BF5666A36BECD5AAA2050B011ECE255B3BC7)

[RE_Capacity_Highlights_2022.pdf?la=en&hash=6122BF5666A36BECD5AAA2050B011ECE255B3BC7](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2022.pdf?la=en&hash=6122BF5666A36BECD5AAA2050B011ECE255B3BC7))

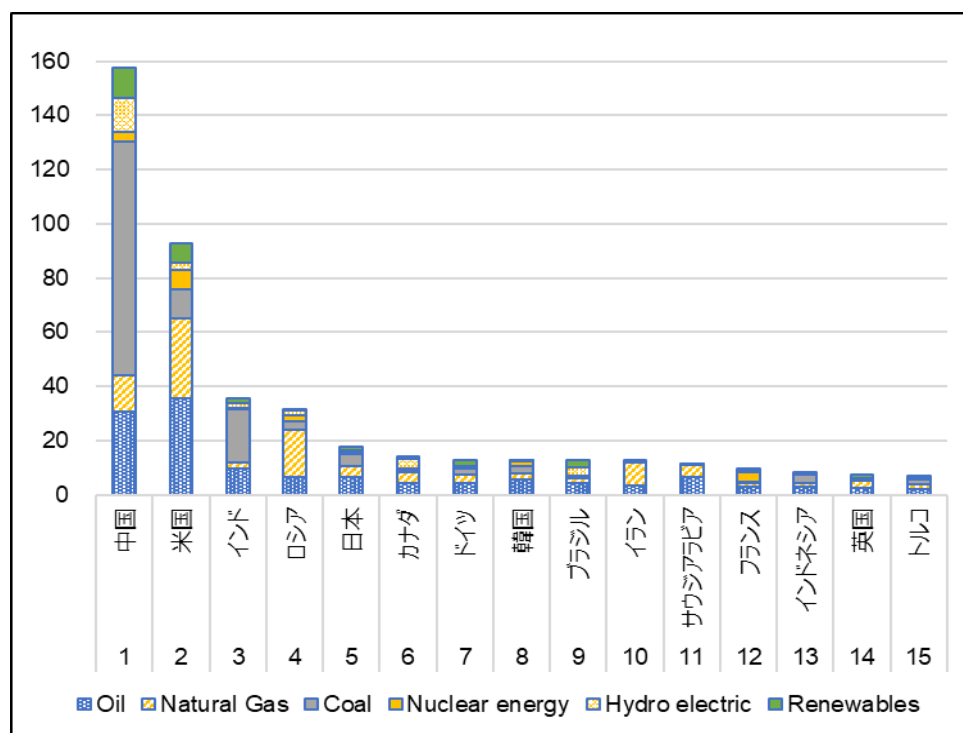
世界の国別にエネルギー消費量の多い順に、その内訳を比べると、図 1-4 および図 1-5 で示すように、依然として化石燃料である石油・ガス・石炭の消費量が、世界の主要国で過半から 8～9 割を占めている状況があることがわかる。

国別では、中国のエネルギー消費量が世界の中で突出して多く、しかも中国の石炭依存が 55%と極めて高い。同じくインドも 57%となっている。脱石炭は簡単には進まない高い比率となっている。

一方、再生可能エネルギー（水力を除く）は、現在漸く本格普及が始まったところと言える。ドイツで 2 割、水力が豊富なブラジルで 2 割に留まる。

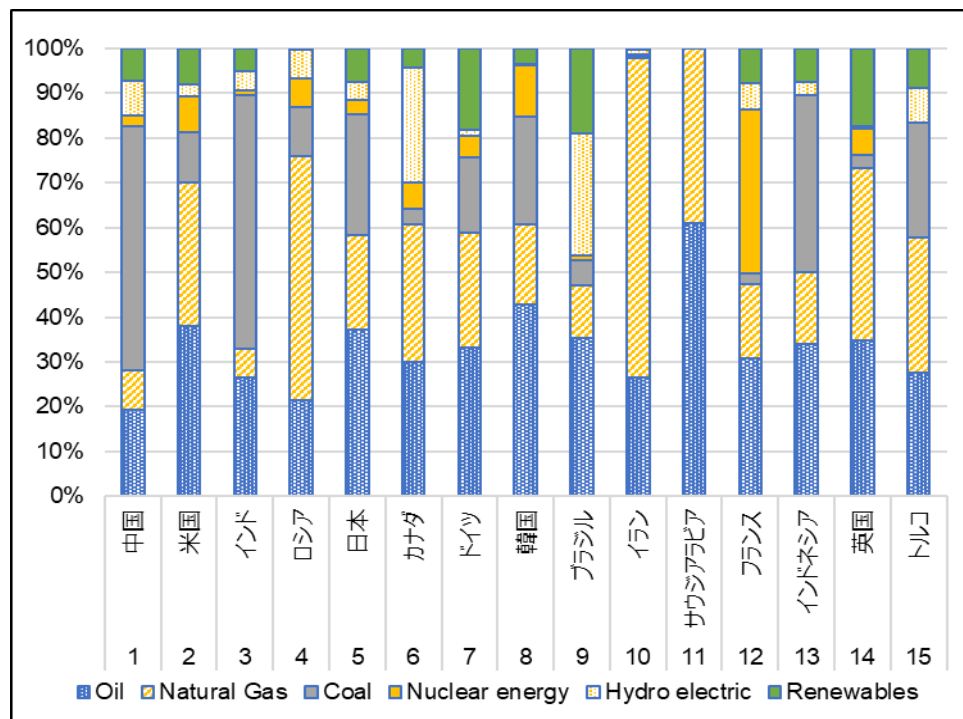
図 1-4. 世界主要国の一次エネルギー消費量（2021 年）

（単位：Exajoules）



出所：BP；Statistical Review of World Energy June 2022 より筆者作成

図 1-5. 世界主要国の一次エネルギー消費量（構成比表示）（2021 年）



出所：BP；Statistical Review of World Energy June 2022 より筆者作成

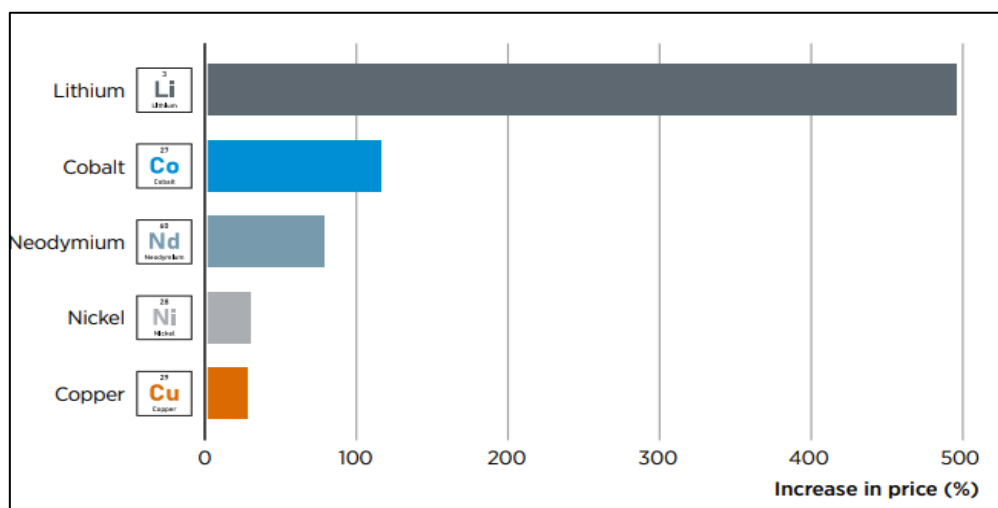
日本の洋上風力発電の初めてとなる 2021 年の入札において、三菱商事等のグループが 3 か所とも最安値で、それぞれ 11.99 円/kWh、13.26 円/kWh、および 16.49 円/kWh で落札し、他の応札企業グループからは、圧倒的な低価格での落札で採算が合うのか疑問だとの声があがった。日本でも従来と比べると、太陽光、風力などの設置コストが低下傾向にあると言える。

ただし、太陽光パネルの供給国は 8 割以上を中国が独占しており、これは中国内の電力価格が新疆ウイグル自治区のように 1kWh 当たり日本円にして 5 円台と言われる安価な電力を利用し、また労賃も安い中で製造されたパネルが世界的な競争力を持つためと言われている（遠藤、2022）。

再生可能エネルギーの導入促進は、希少金属の消費量の増大を招いており、太陽光パネルにおいては中国における鉱物資源の独占傾向が生じており、世界での中国の一人勝ちを招く可能性が生まれている。

図 1-6 で示すように、2021 年のみの数値で見ても希少金属であるリチウムの価格の急上昇が生じており、将来的にも需要増によりさらに上昇すると予測される状況がある。

図 1-6. 鉱物価格の上昇率（2021 年）



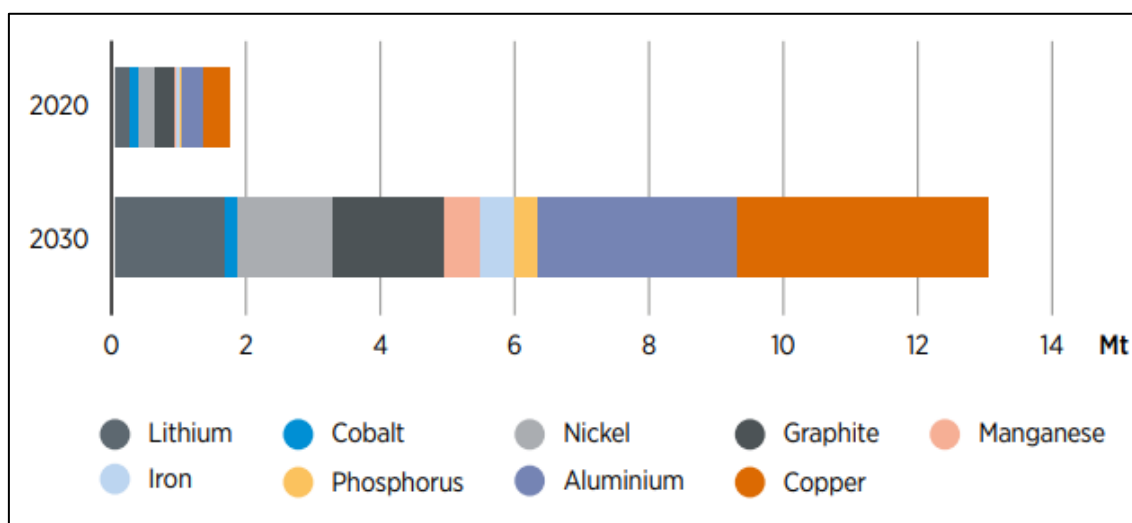
出所：IRENA；“[WORLD ENERGY TRANSITIONS OUTLOOK 2022](#)”（p.297 より転載）

(<https://www.irena.org/>-

/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf?rev=353818def8b34effa24658f475799464)

図 1-7 は、蓄電池用の鉱物資源の消費量が急増する状況を示している。レアメタルなどの鉱物資源は、今後も多量に必要となると予測され、太陽光パネル、EV 制御用の半導体など、銅、ニッケル、アルミニウム、グラファイト、リチウム、マンガン、コバルト等、多種の希少金属が求められる。しかも、多量の希少鉱物資源を世界の様々な地域で開発・生産すると環境破壊の問題も種々生じることが危惧される。

図 1-7. 蓄電池用の鉱物消費量の上昇



出所：IRENA；“[WORLD ENERGY TRANSITIONS OUTLOOK 2022](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf?rev=353818def8b34effa24658f475799464)”（p.308、図 7.8 を転載）

(<https://www.irena.org/>-

/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf?rev=353818def8b34effa24658f475799464)

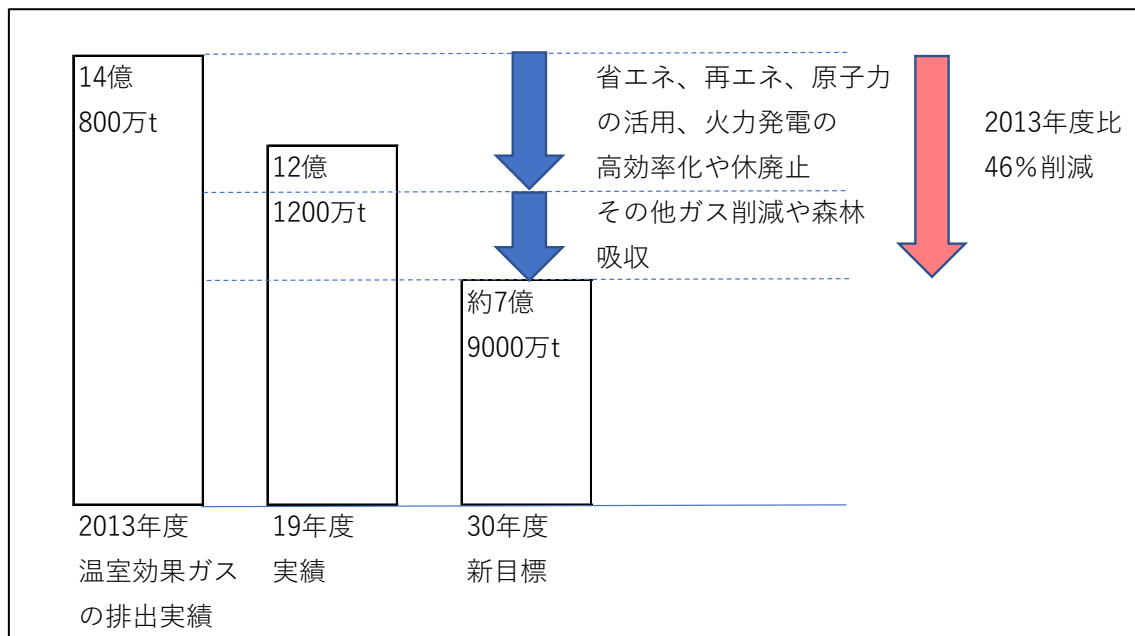
2. 日本政府の方針と課題

2050 年にカーボンニュートラルを実現するために、今から毎年、同じ削減量で温室効果ガスを減らしていくと計算すると、2030 年時点では 45.9%の削減が必要になる。数値で見ても図 1-8 で示すように、2019 年度に比べて、2030 年までに 4 億 2,200 万トン、35%の削減が必要とされている。毎年に直すと CO₂ 換算で 4,500 万～5,500 万トンものすさまじい規模での削減を行っていくことを意味する。本当に達成されるのか、非常に厳しい目標が提示されていることを意味している。

エネルギー供給は、様々な設備を整備しながら配送されるシステム産業であり、CO₂ 排出量の大幅削減を促すとシステムの変換が間に合わず、エネルギー供給のボトルネックが生じて、停電、価格の高騰と急落も生じ、投資も進まないなど、様々な影響が生じることが危

惧される状況がある。

図 1-8. 2030 年に向けた日本政府の温室効果ガス削減計画



出所：日経 BP ; 「[どう挑む温室効果ガス 46%削減](https://project.nikkeibp.co.jp/ESG/atcl/column/00005/042600071/)」

(<https://project.nikkeibp.co.jp/ESG/atcl/column/00005/042600071/>) より筆者作成、一部改変

日本政府が掲げるグリーン成長戦略による 46%の温室効果ガスの排出量の削減目標においては、以下の 5 つの重点施策が並ぶ。

- (1) 再生可能エネルギーなど脱炭素電源の最大限の活用
- (2) 投資を促す刺激策
- (3) 地域の脱炭素化への支援
- (4) グリーン国際金融センターの創設
- (5) アジアなど世界の脱炭素への移行の支援

バイデン政権の要請に応じた菅首相の判断で 2021 年 4 月 22 日に 46%削減を目指すこととされたが、これは政治で目標が決まったという状況があることを意味しており、実際に、達成可能かは、詳しく検討しておく必要がある。取り得る政策を積み上げても 30%台後半の削減が限界ではないかとの意見も聞かれる状況にあり、「目標の実現可能性は非常に低い。電力業界による再エネ拡大や原発再稼働といった努力だけでは達成できない。製造業によ

る電力需要の大幅削減、高い電力料金を受け入れることが前提となろう」との発言も聞かれる（東京大学の本部和彦客員教授）。

なお、地球環境問題に積極的なバイデン政権下の米国の 2030 年目標は、2005 年比で 50～52%の削減を目指すとしている。

2022 年の段階では、エネルギー価格と食料品価格が上昇した上に円安が加わって物価上昇が生じた。輸入品の価格上昇による国内物価の上昇が生じて消費が弱まる影響が生じており、日本が着実な経済成長を達成することは、世界的なウクライナ戦争が続いていることもあり、世界的な経済停滞もあって容易ではない。

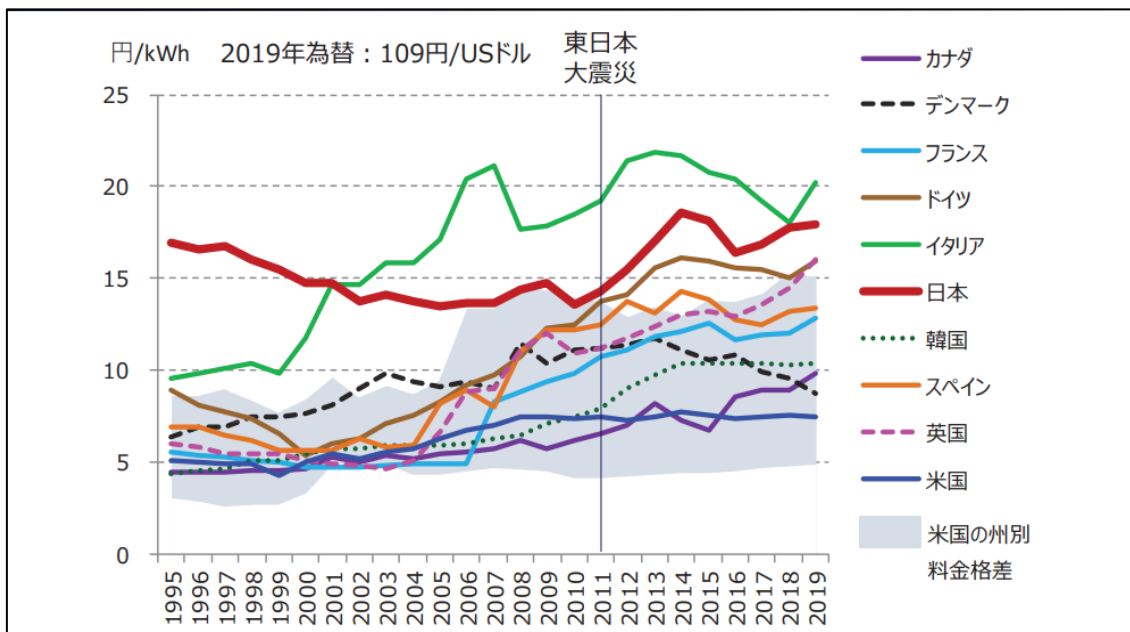
日本においては、再生可能エネルギーの導入拡大が進められており、また、原発の導入拡大も目指されている。日本の CO₂ 排出量の 4 割は発電からもたらされており、石炭火力は今後、耐用年数が切れるところまで運用し、その後引退させていく政策が採用されると予想される。ガス火力も設備の老朽化が進んできているが、中長期の利用方針が明確化されていく必要がある。省エネがどこまで可能か、技術進歩をいかに盛り込むかも重要な論点である。建物の効率化と電化促進、自動車の排ガス削減と効率化、航空用次世代燃料の研究開発、森林・農業の排出削減と吸収拡大、産業プロセスへの CO₂回収・貯留（CCS）と水素の導入、CO₂以外の温室効果ガスの削減も必要となる。

エネルギー転換が進んでいる中、エネルギーミックスが次第に変わっていく状況の下、エネルギー供給不足が生じないように、事前の準備と対応が必要となっている。

図 1-9 と図 1-10 は、世界の主要国の産業用と家庭用の電気料金の比較である。日本の産業用料金は 2019 年にイタリアに次いで 2 位と高くなっている。一方、安いのは、米国、デンマーク、カナダ、韓国である。韓国の産業競争力の源泉は、この安価に設定された産業用の電力価格にあると言える。

家庭用料金では、日本は、2019 年において、ドイツ、イタリア、デンマークに次いで高くなっている。安い順番では、韓国、カナダ、米国となっている。

図 1-9. 世界の産業用の電気料金比較（1995 年～2019 年）

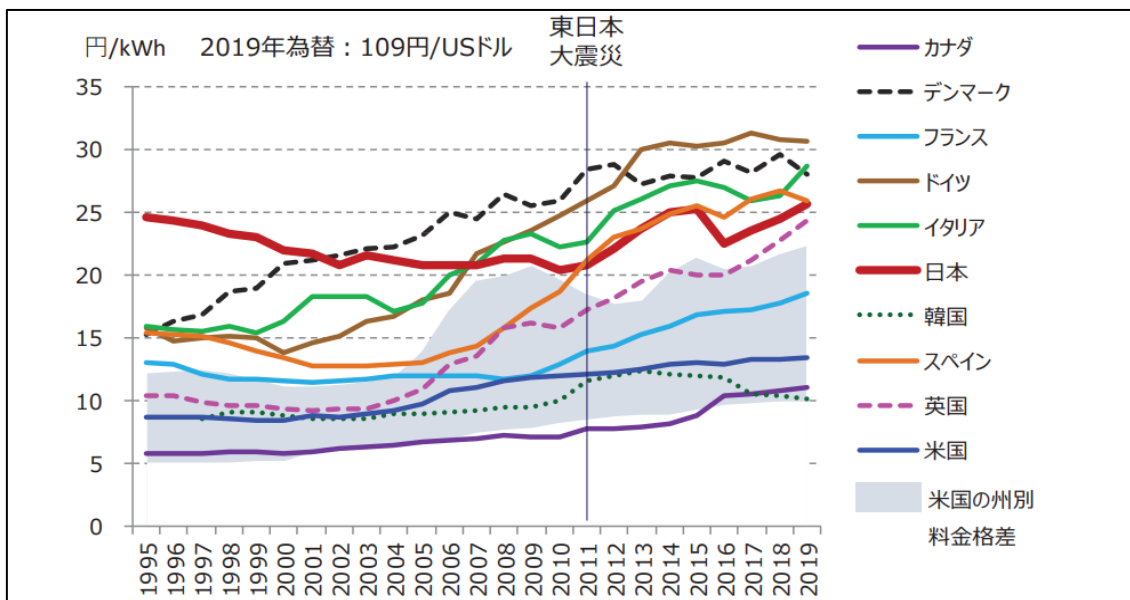


注. 消費税等（付加価値税・売上税等）は含まない

出所：電力中央研究所；筒井美紀（2021）「[電気料金の国際比較](#)」（図 2 を転載）

(<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/discussion/download/20010dp.pdf>)

図 1-10. 世界の家庭用の電気料金比較（1995 年～2019 年）



注. 消費税等（付加価値税・売上税等）は含まない

出所：電力中央研究所；筒井美紀（2021）「[電気料金の国際比較](#)」（図 1 を転載）

(<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/discussion/download/20010dp.pdf>)

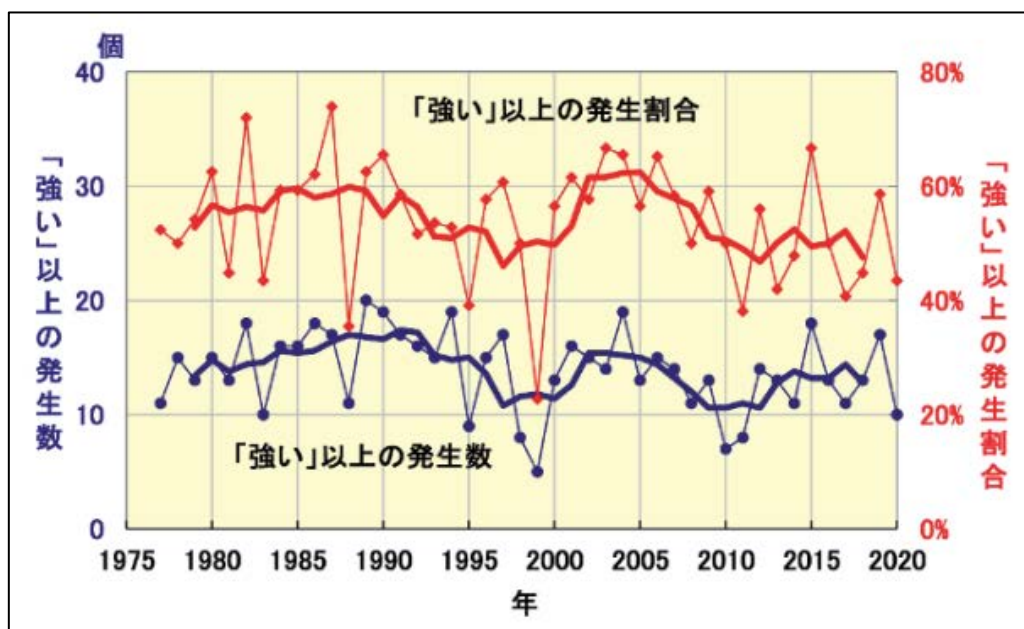
第2節 地球環境問題に関する考え方

—「地球温暖化と脱炭素のファクトフルネス」（第2回研究会）から得られた示唆—

気象データから分析していくと、図1-11で示す災害の激甚化は生じていないとの結果が得られる。例えば、気象庁のデータをもとに、「強い」以上の勢力となった台風の発生数と、全台風数に対する割合を5年間の移動平均で見ると、両方の指標ともに横ばいであり、台風の激甚化は生じていない（杉山 2018、2021）。

確かに、大気中のCO₂濃度は増えているが、気温上昇は100年間で0.7℃に止まっており、人が感じることは無い。一方、東京は1930年以降、都市化で2℃も暑くなっている。

図1-11. 「強い」以上の勢力となった台風の発生数と全発生数に対する割合の経年変化



注1. 実線は、「強い」以上の勢力となった台風の発生数（青）と全台風に対する割合（赤）の経年変化。

注2. 太い実線は、それぞれの5年移動平均。

出所：気象庁；気候変動監視レポート2020（p.40、図2.4-3 転載）

(https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2020/pdf/ccmr2020_all.pdf)

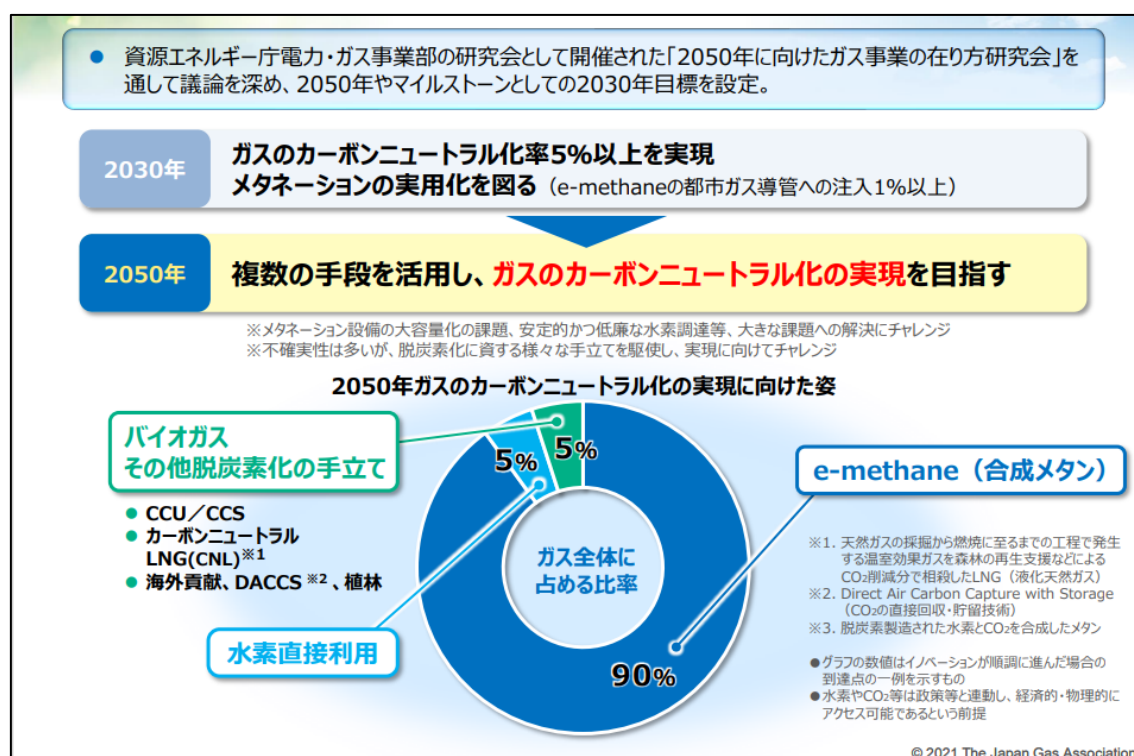
一日の雨量の年間の最大値を期間1951～2010年で、全国92観測所の平均で見ても、増加傾向は見られない（Fujibe, 2013）とされる。また、世界の社会統計を比べると、世界は住みよくなっており、温暖化による破局の兆しは無い。しかも、主要な作物の収穫量は増えており、台風など極端な気象による死亡数は1920年代から現在に向かい減少している。

その他、地球気候モデルではCO₂の予測が高過ぎっており、被害を過大評価している。そのためモデル計算では温暖化し過ぎる結果となっている（クーニン、2022）との評価が存

図 1-13 で示すように、ガス産業では 2030 年でガスのカーボンニュートラル化率 5%以上を実現する計画である。水素と CO₂ を合成して製造した合成メタン（E-メタン）を都市ガス導管に 1%以上注入し、メタネーションを図る。

2050 年にはさらにメタネーション設備の大容量化を図り、水素の供給も行う計画である。

図 1-13. ガス産業が目指す 2030 年 2050 年の姿



出所：日本ガス協会；「[カーボンニュートラルチャレン 2050 アクションプラン](https://www.gas.or.jp/gastainable/CNAP/CNAP.pdf)」（p.2、1-2 を転載）
 (https://www.gas.or.jp/gastainable/CNAP/CNAP.pdf)

図 1-14 で示すように、ガス産業は、アクション 1 で、2030 年の温室効果ガス削減目標（NDC）の達成に貢献する。次いで、アクション 2 では、メタネーションの実現（実装）に挑戦する。さらに、アクション 3 では、水素直接供給に取り組む計画である。

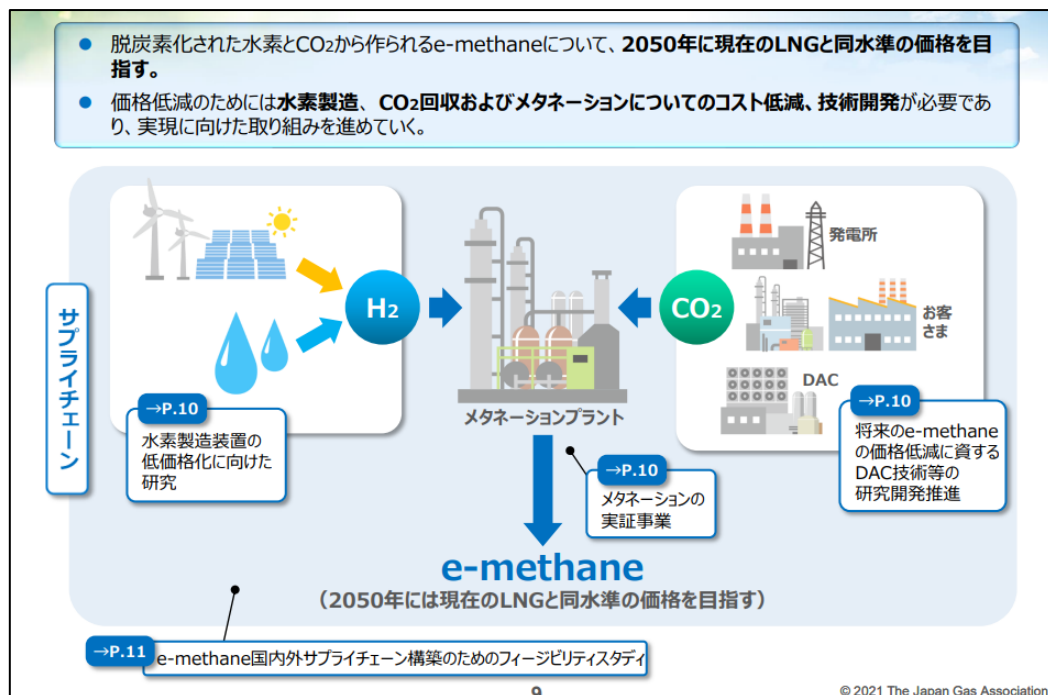
図 1-14. ガス業界が採用する 3 つのアクション



出所：日本ガス協会；「カーボンニュートラルチャレン 2050 アクションプラン」(p.3、2 を転載)
(<https://www.gas.or.jp/gastainable/CNAP/CNAP.pdf>)

図 1-15 で示すように、2050 年に向けての目標は、合成メタン（E-メタン）を 2050 年で現在の LNG と同水準の値段とすることで、そのために技術開発を進めるとしている。

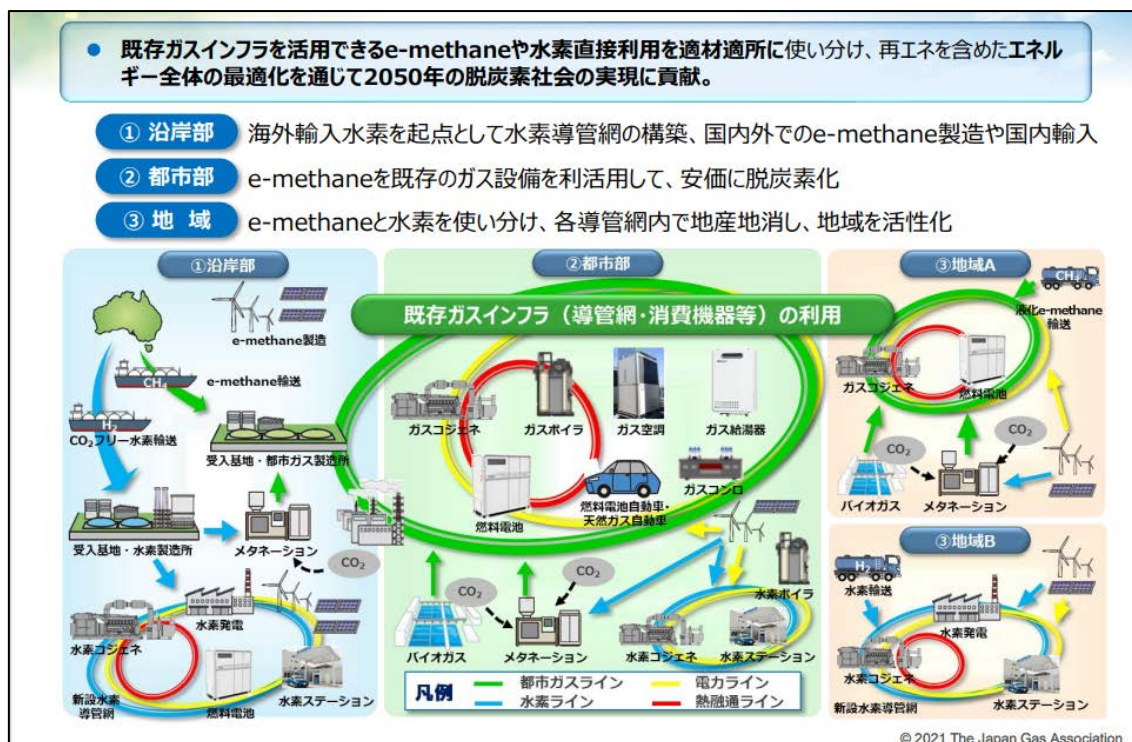
図 1-15. メタネーションのコストの低減



出所：日本ガス協会；「カーボンニュートラルチャレン 2050 アクションプラン」(p.9 を転載)
(<https://www.gas.or.jp/gastainable/CNAP/CNAP.pdf>)

図 1-16 は、2050 年にガス産業が果たす役割を示している。ガス供給配管という設備を有効活用しながら、エネルギー供給を行っていく将来像となっている。

図 1-16. 2050 年のガス供給の目標（2020 年 11 月公表）



出所：日本ガス協会；「カーボンニュートラルチャレンジ 2050 アクションプラン」（p.18、参考を転載）
<https://www.gas.or.jp/gastainable/CNAP/CNAP.pdf>

第 4 節 石油化学産業の将来的な方向性

—「石油化学産業とカーボンニュートラル」（第 4 回研究会）から得られた示唆—

石油化学産業は、技術革新を通じて、炭素循環の輪を確立・維持しつつ、高度な機能を持った新しい基礎素材を供給するとしている。その標語として、図 1-17 で示すように「循環炭素化学」を設定している。

図 1-17. 循環炭素化学の考え方

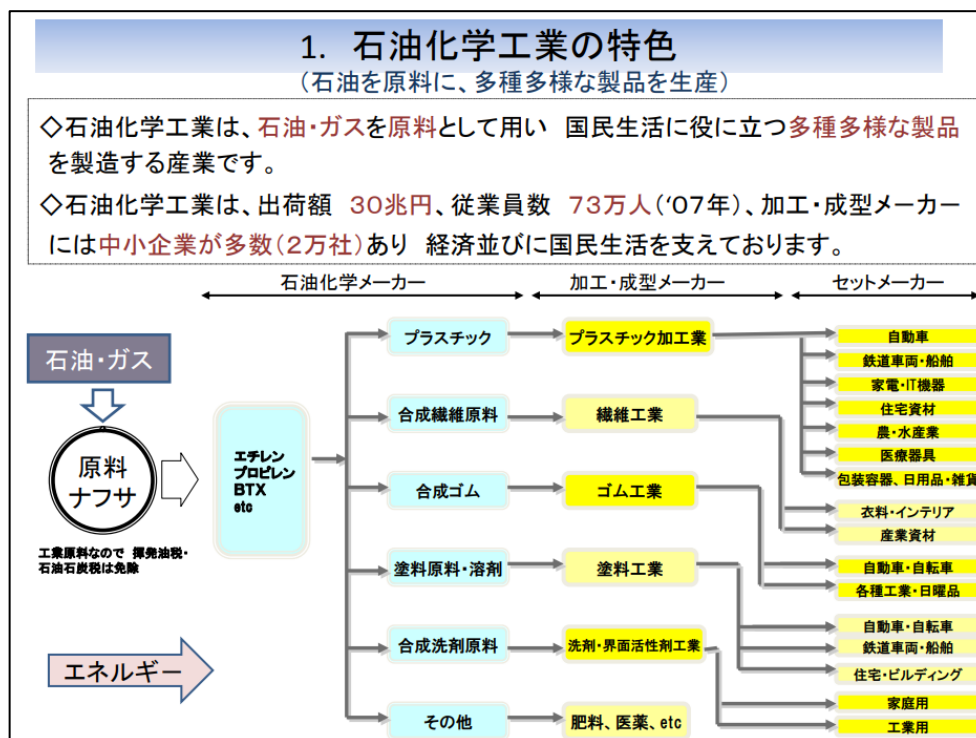


出所：石油化学工業協会；「循環炭素化学」って、ななに？（p.2 を転載）

(https://www.jpca.or.jp/files/activities/leaflet_carbonchemistry.pdf)

図 1-18 で示すように、石油化学工業は石油およびガスから得られる原料ナフサ、エタン、プラスチック、合成ゴムなどの基礎化学製品を製造し、さらに加工・成型メーカー、セトメーカーなどを通じて多種多様な製品を供給している。

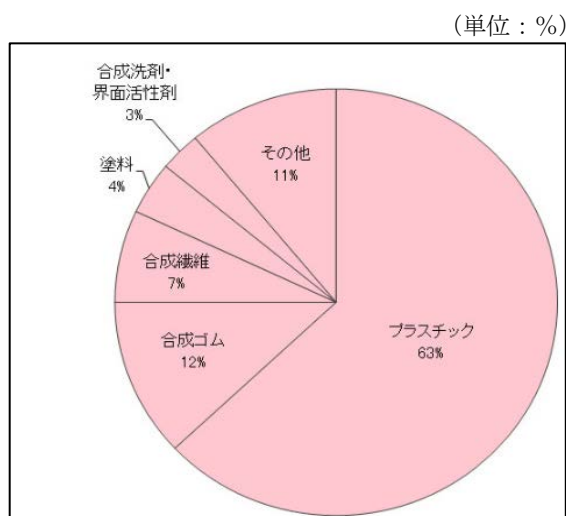
図 1-18. 石油化学工業の現状



出所：石油化学工業協会；「[温室効果ガス削減に貢献する 石油化学工業の役割](#)」(p.2 を転載)
(<https://www.jpca.or.jp/files/sustainability/gasreduction.pdf>)

図 1-19 で示すように、石油化学製品の消費量の内訳は、プラスチックが 6 割、合成ゴムが 1 割超、その他、合成繊維、塗料、合成洗剤・界面活性剤等となっている。

図 1-19. 日本の石油化学製品の消費量比率

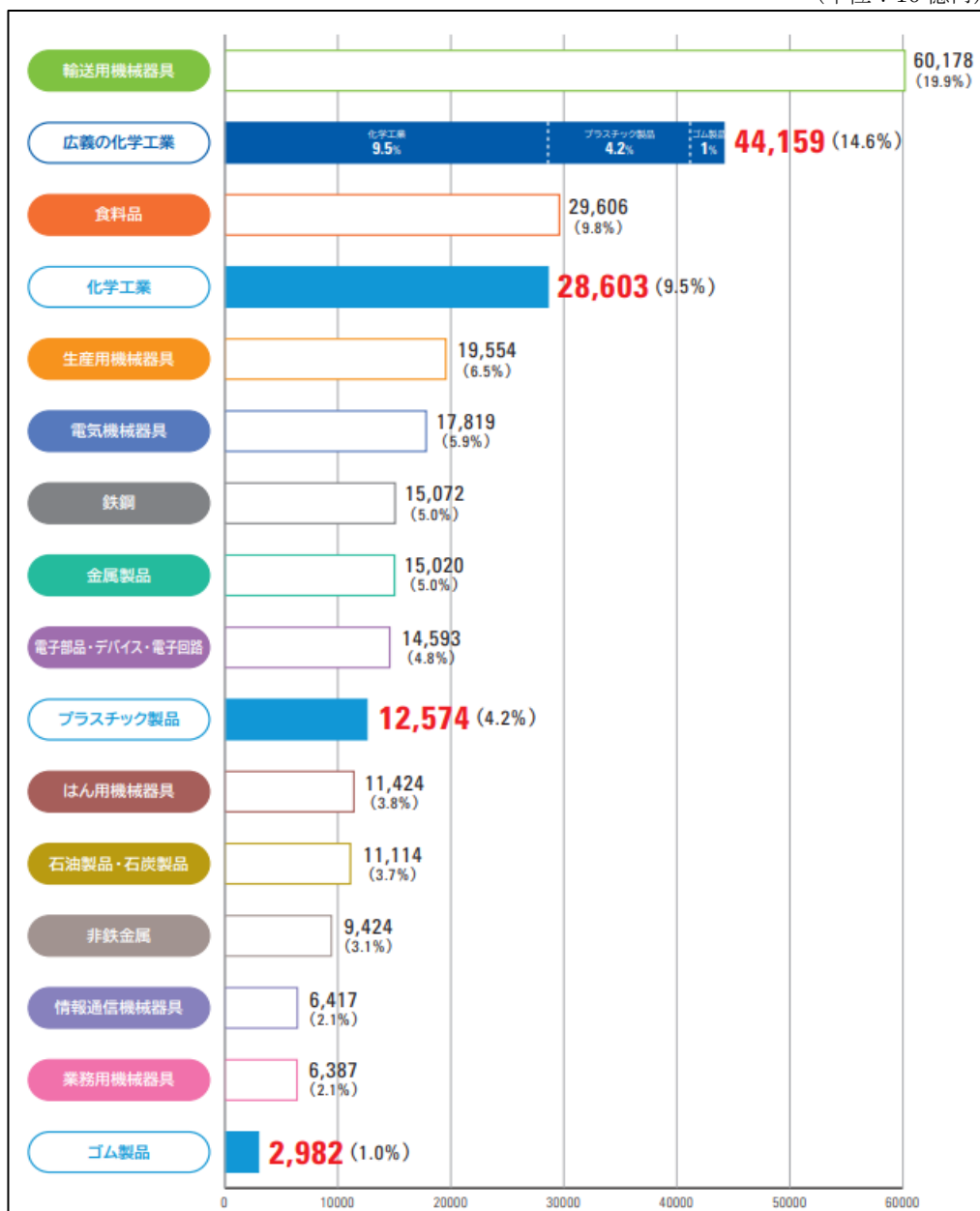


出所：石油化学工業協会；[Let's Study 石油化学](#)
(<https://www.jpca.or.jp/studies/junior/enyinfo03.html>)

図 1-20 で示すように、日本の業種別の工業出荷額を見ると、化学工業は、輸送用機械器具に次いで大きな規模を持ち、広義の化学産業（プラスチック製品、ゴム製品を含む）で出荷額 44 兆円、狭義の化学産業では 29 兆円、プラスチック製品で 13 兆円、ゴム製品で 3 兆円であり、規模は大きい。これだけの規模の産業を支えているナフサ、エタン等をカーボンフリー素材で置き換えることは簡単には進まない。

図 1-20. 日本の製造業の業種別出荷額（2020 年）

（単位：10 億円）



出所：（一財）日本化学工業協会ホームページより

(https://www.nikkakyo.org/upload_files/chemical_industry/01_shipments.pdf)

第 5 節 OECD IEA が掲げる 2050 年の世界のエネルギー需給の姿

OECD の国際エネルギー機関 (IEA) が毎年発表する世界エネルギー展望 (World Energy Outlook 2022 年版) の予測数値を見て、将来シナリオ 3 通りにおいて、いかなる差異が生じると予測されているかを比較検討する。

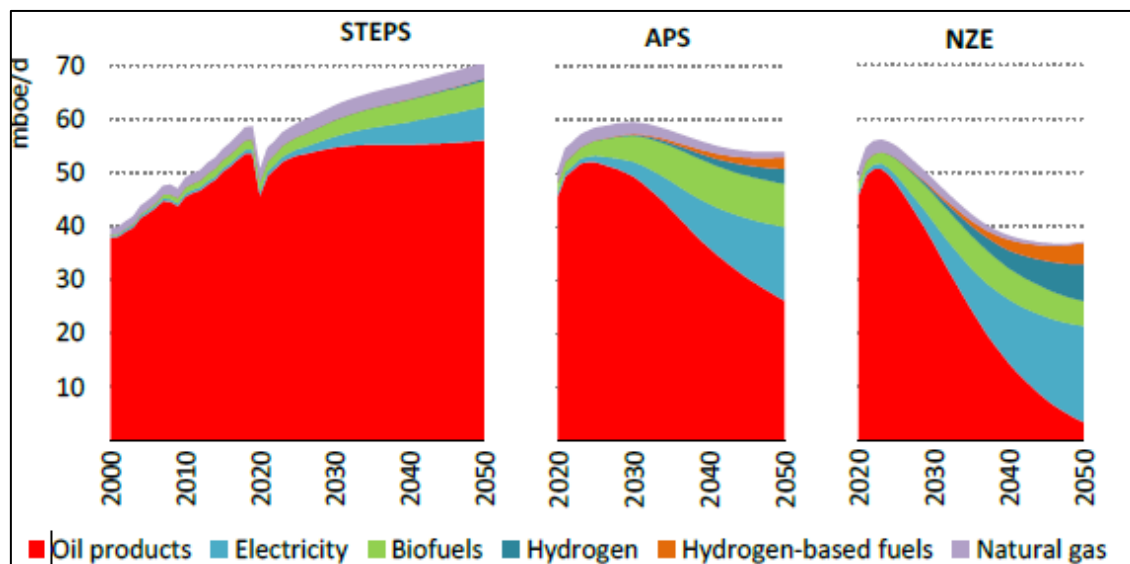
図 1-21 では、輸送用のエネルギーの消費量に関して、3 種のシナリオにおける将来予測が全く異なることを示している。STEPS は Stated Policies Scenario で公表政策シナリオであり各国の表明済みの政策を反映し、APS は、Announced Pledges Scenario で有志国の宣言を反映し、NZE は Zero Emissions by 2050 Scenario でネットゼロ達成を実現するシナリオである。

輸送用エネルギーに関しては、各国が一致して石油消費量を減らす動きに出るかどうか、取り組みが実効性を持つか次第で全く異なった姿となる。

輸送部門は長期間に亘り石油需要を支えてきたが、APS および NZE においては電力が石油を代替するため、その役割は弱くなっている。

図 1-21. 輸送用エネルギー消費予測

(単位：mboe/d=100 万石油換算バレル／日)



注. STEPS : Stated Policies Scenario (公表政策シナリオ)、APS : Announced Pledges Scenario (有志国の宣言を反映したシナリオ)、NZE : Zero Emissions by 2050 Scenario (2050 年にネットゼロ達成を実現するシナリオ)

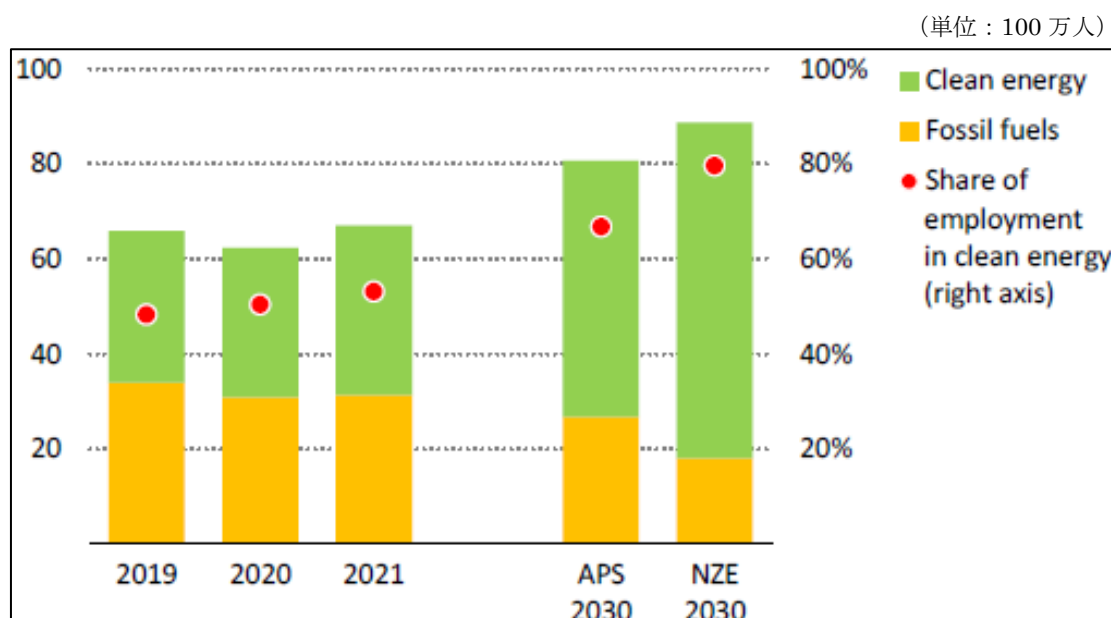
資料 : IEA, [World Energy Outlook 2022](#) (p.52、図 1.13 を転載)

(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

図 1-22 では、エネルギー関連の雇用者数は、クリーンエネルギー従事者の増大により増えると予測している。一方、化石燃料の雇用者は減少へ向かう。太陽光発電において必要な雇用者数はパネルの設置が済めば、その後は少ない。浮体式の大型洋上風力においては、自動化を推し進めないと、陸上のような人間によるメンテナンスが困難である。本当に図 1-22 のように雇用増大がもたらされるかについては、議論を深めていく必要がある。

クリーンエネルギー従事者数は全エネルギー従事者の過半を占める。そして、この割合は APS および NZE で顕著に増加する。

図 1-22. クリーンエネルギーと化石燃料の雇用者数の予測



注. APS : Announced Pledges Scenario (有志国の宣言を反映したシナリオ)、NZE : Zero Emissions by 2050 Scenario (2050 年にネットゼロ達成を実現するシナリオ)

資料 : IEA, [World Energy Outlook 2022](#) (p.78、図 1.26 を転載)

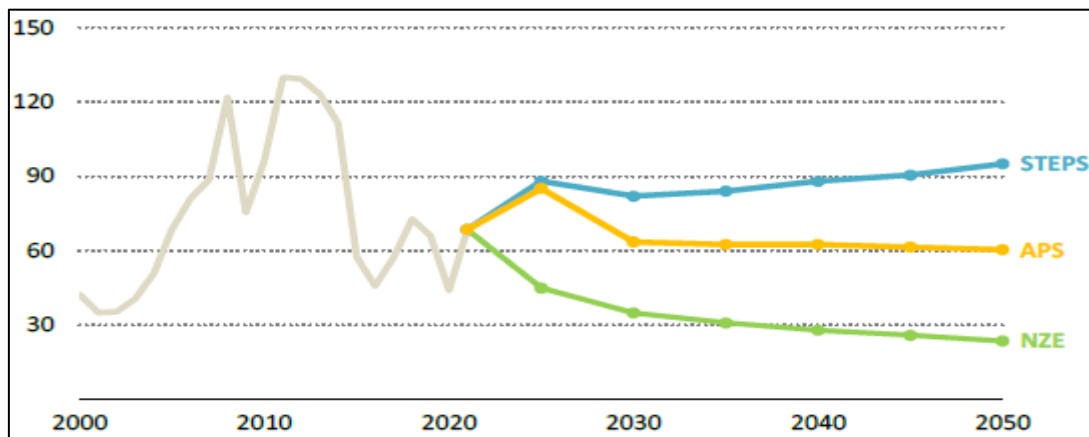
(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

図 1-23 で示すように、石油価格は需要が減れば価格が下がる関係があり、NZE では 30 ドル／バレルを下回る状況が続くことが予測されている。投資資金が入るかどうかは石油需要の予測に依存することが示されている。

石油の均衡価格は、需給関係を反映して、シナリオにより大きく異なることが示されている。

図 1-23. 石油価格の 2050 年に向けた予測：3 種類のシナリオ別

(単位：ドル／バレル、2021 年)



注. STEPS : Stated Policies Scenario (公表政策シナリオ)、APS : Announced Pledges Scenario (有志国の宣言を反映したシナリオ)、NZE : Zero Emissions by 2050 Scenario (2050 年にネットゼロ達成を実現するシナリオ)

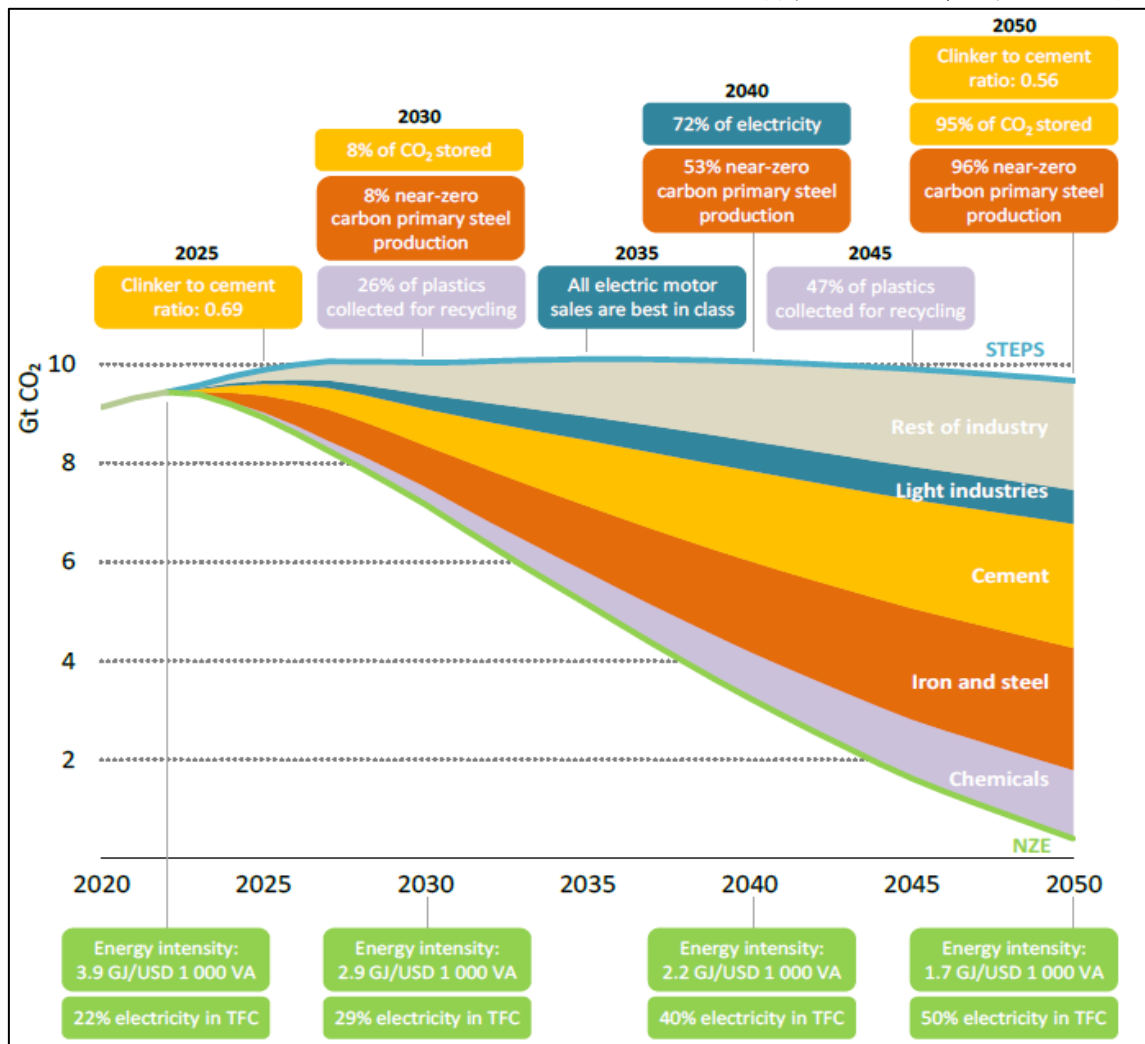
資料 : IEA, [World Energy Outlook 2022](#) (p.111、図 2.11 を転載)

(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

図 1-24 では、世界の工業部門において STEPS (公表政策) と NZE の間には大きな差異があり、その差異を埋めるためには、セメント生産からの脱 CO₂ 排出、鉄鋼からの脱 CO₂ 排出、化学産業におけるプラスチック・リサイクルの徹底、電動モーターの効率向上などが挙げられている。

図 1-24. 工業部門における CO₂ 削減計画

(単位：ギガトン；10 億トン CO₂)



注. STEPS : Stated Policies Scenario (公表政策シナリオ)、NZE : Zero Emissions by 2050 Scenario (2050 年にネットゼロ達成を実現するシナリオ)

資料 : IEA, [World Energy Outlook 2022](#) (p.141、図 3.11 を転載)

(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

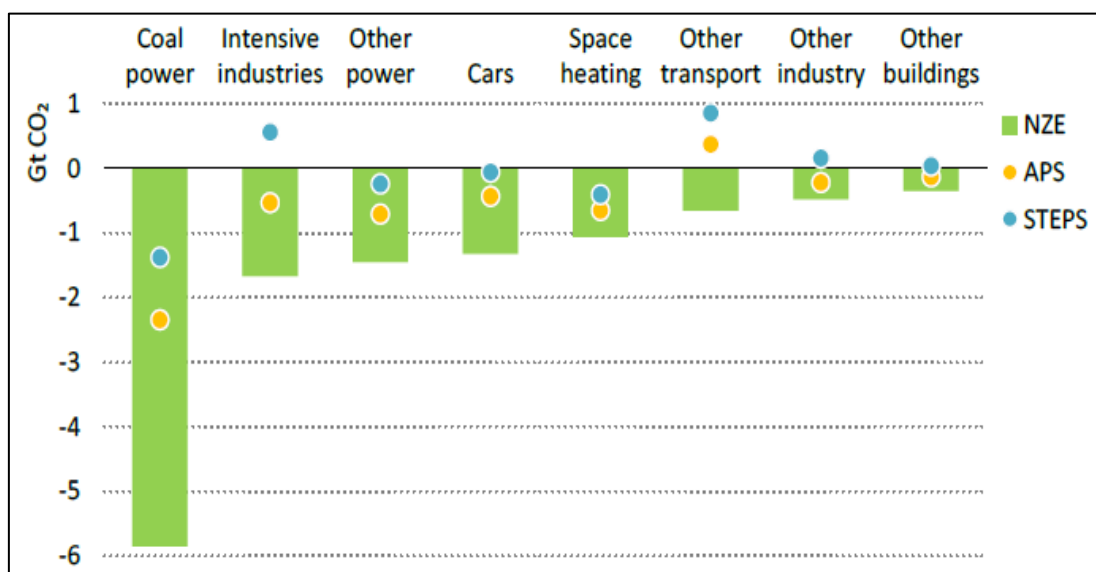
図 1-25 は、2021 年から 2030 年の間で、世界の CO₂ 排出量削減がセクター別、シナリオ別でどのように進められるべきかを予測して示している。

削減幅が最も大きいのは ①石炭火力の削減である。NZE では、2030 年までに徹底的に石炭火力を廃止する必要があることが示されている。

その他項目としては、②工業用の効率向上、③その他発電、④自動車、⑤地域暖房、⑥その他輸送、⑦その他工業、⑧その他建物となっている。

図 1-25. CO₂排出量削減のセクターとシナリオ別予測

(単位：ギガトン；10 億トン CO₂)



注. STEPS : Stated Policies Scenario (公表政策シナリオ)、APS : Announced Pledges Scenario (有志国の宣言を反映したシナリオ)、NZE : Zero Emissions by 2050 Scenario (2050 年にネットゼロ達成を実現するシナリオ)

資料 : IEA, [World Energy Outlook 2022](https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf) (p.254、図 5.10 を転載)

(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

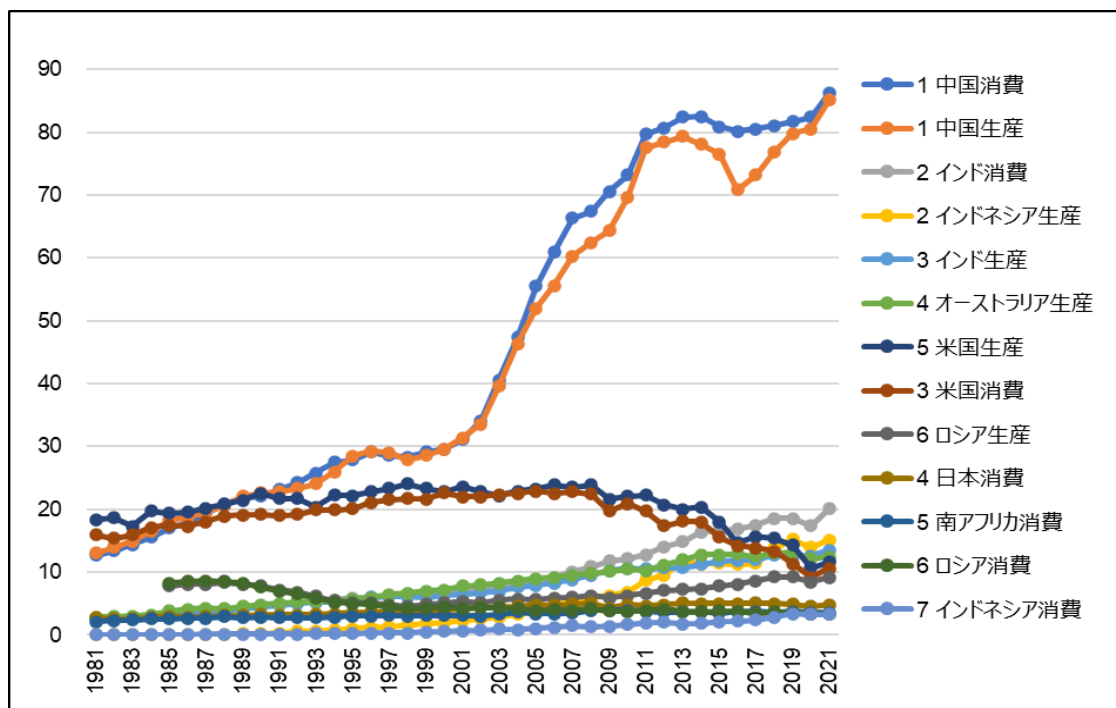
石炭火力の廃止が徹底的に行われることが NZE においては求められている。しかし、図 1-26 で示すように、石炭火力の増強を急速に進め続けてきたのが中国であり、2021 年においても大幅な石炭生産の増大、石炭消費量の増大を生じさせている。中国は、生産・消費とも圧倒的 1 位となっている。第 2 位は、米国で石炭消費量は 2000 年代に入ってから減少を続けており、2021 年の石炭消費量は 3 位、生産量は 5 位となっている。

2021 年において、インドは、石炭消費量が 2 位、生産量が 3 位である。インドネシアは石炭生産量が 2 位、消費量が 7 位である。オーストラリアは石炭生産量が 4 位である。日本は石炭消費量が 4 位である。ロシアは、石炭生産量および消費量ともに 6 位となっている。

欧米諸国が「脱炭素」に取り組み「基礎的な電力供給を減らす」(トムソン、2022) 一方で、中国の石炭火力の増強は産業競争力の強化・強靱化をもたらす。

図 1-26. 世界の国別の石炭生産量と消費量の推移（1981 年から 2021 年）

（単位：エクサジュール）



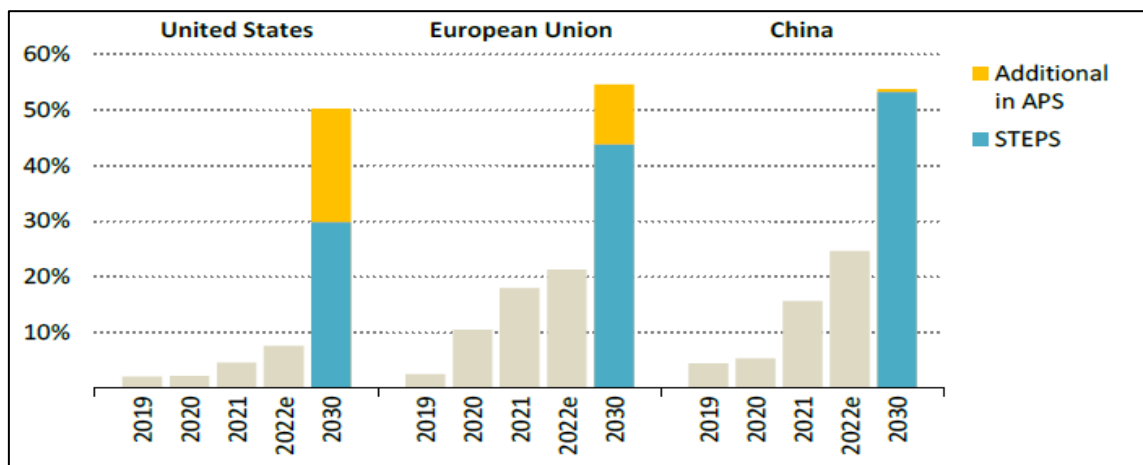
出所：BP ; Statistical Review of World Energy June 2022 より筆者作成

図 1-27 は、2030 年に向けた米国、EU、中国の電気自動車（以下、EV）の導入比率の予測である。いずれの国・地域においても、2030 年に向けて EV が急増する予測となっている。

2030 年において、EV の導入比率は、米国で 30%から 50%、EU で 40%から 50%超、中国で現在の導入計画（STEPS：公表政策シナリオ）で 50%超と見込まれている。

近年の傾向に基づくと、APS では 2030 年までに世界の主要市場で販売される全自動車の半分は、電気自動車である。

図 1-27. 電気自動車の導入予測



注 1. 2022e : 2022 年推計値

注 2. STEPS : Stated Policies Scenario (公表政策シナリオ)、APS : Announced Pledges Scenario (有志国の宣言を反映したシナリオ)

資料 : IEA, [World Energy Outlook 2022](#) (p.274、図 5.22 を転載)

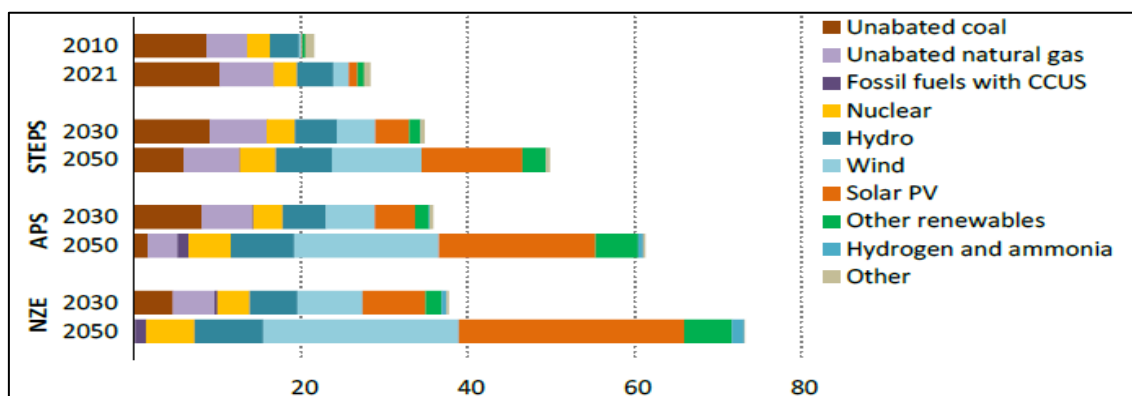
(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

図 1-28 は、世界の発電電源の将来予測で、3 種類のシナリオ別に電力化がいかに進むかを予測している。3 シナリオともに電力消費量が 2050 年に向けて増大するが、NZE>APS>STEPS の順で 2050 年に向けて発電量が伸びるとしている。

大幅に発電量を伸ばすためには、太陽光と風力の導入に依存するとしている。

図 1-28. 世界の発電電源の将来予測

(単位 : 1,000 TWh)



注 1. その他の再生可能エネルギーには、バイオエネルギー発電、廃棄物発電、地熱発電、集光型太陽熱発電、海洋発電がある。

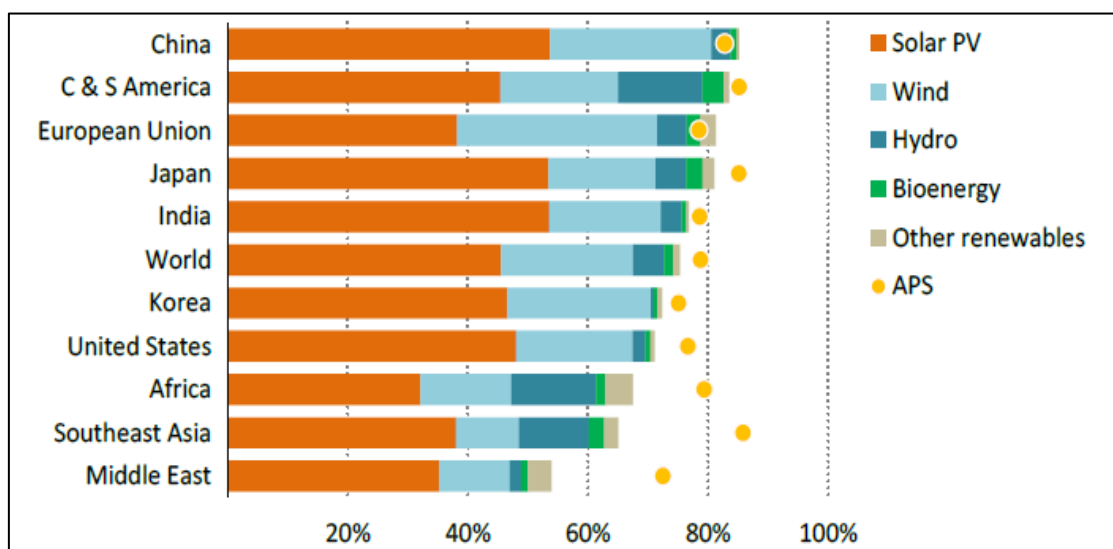
注 2. STEPS : Stated Policies Scenario (公表政策シナリオ)、APS : Announced Pledges Scenario (有志国の宣言を反映したシナリオ)、NZE : Zero Emissions by 2050 Scenario (2050 年にネットゼロ達成を実現するシナリオ)

資料 : IEA, [World Energy Outlook 2022](#) (p.293、図 6.7 を転載)

(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

図 1-29 は、再生可能エネルギーの 2022 年から 2050 年までの増分（%）の内訳予測である。太陽光がいずれの国・地域においても過半を占めており、風力が次いでいる。EU では風力の比率が大きくなっている。中南米、アフリカと東南アジアにおいては、未だ水力の増加が生じると予測されている。

図 1-29. 再生可能エネルギーの 2022 年から 2050 年までの増分の内訳予測
(STEPS シナリオ)



注 1. C&S America : 中南米

注 2. STEPS : Stated Policies Scenario (公表政策シナリオ)、APS : Announced Pledges Scenario (有志国の宣言を反映したシナリオ)

資料 : IEA, [World Energy Outlook 2022](#) (p.294、図 6.8 を転載)

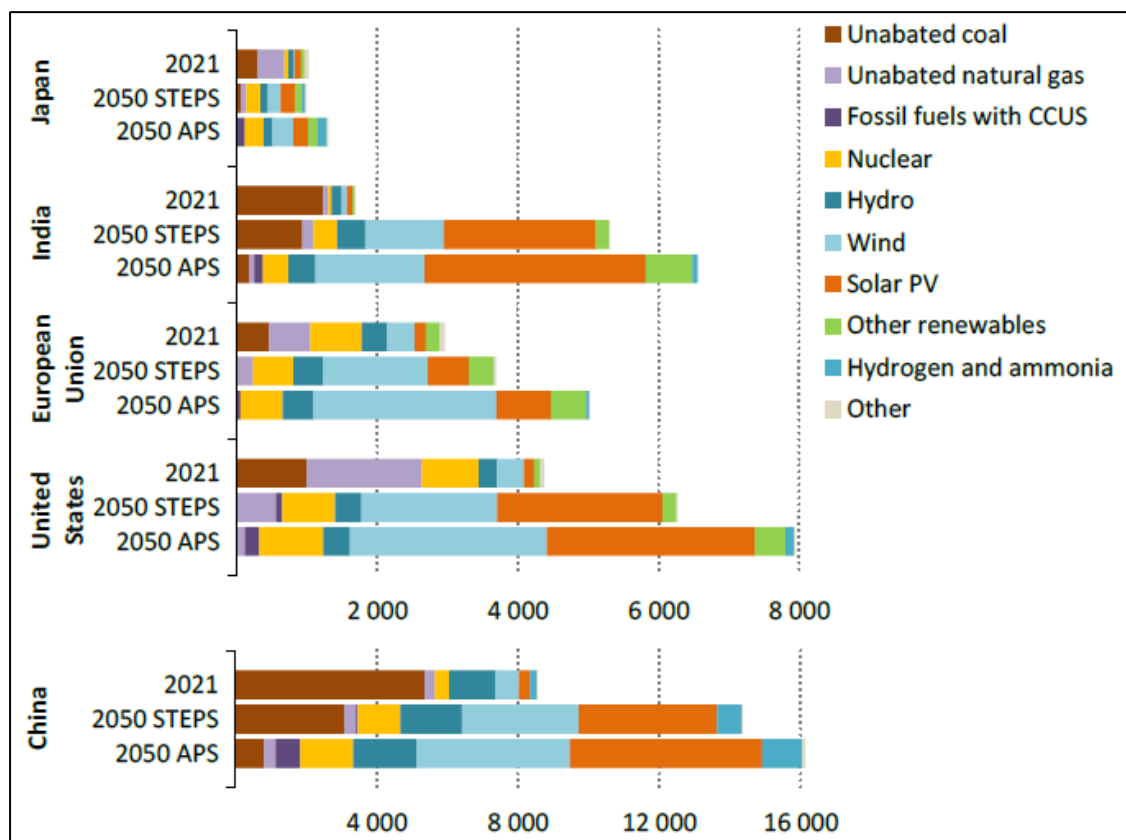
(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

図 1-30 は、世界各国・地域の発電量の 2050 年の予測で、STEPS と APS のシナリオ別に示されている。2021 年の実績値と比べると、日本の伸びが少ない一方、インド、EU、米国、中国がともに大きく伸びる予測となっている。インドは 3 倍となる勢いであり、中国も 2 倍の可能性があり、米国は 5 割増または 2 倍となる予測となっている。

発電量の内訳としては、欧州が風力に大幅依存しており、米国は、風力と太陽光に依存している。インドは太陽光に依存すると予測され、中国は、風力と太陽光に依存すると予測されている。

図 1-30. 世界各国・地域の発電量：2050 年予測

(単位：TWh)



注 1. その他の再生可能エネルギーには、バイオエネルギー発電、廃棄物発電、集光型太陽熱発電、海洋発電がある。その他には非再生廃棄物発電およびその他を含む。

注 2. STEPS : Stated Policies Scenario (公表政策シナリオ)、APS : Announced Pledges Scenario (有志国の宣言を反映したシナリオ)

資料：IEA, [World Energy Outlook 2022](https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf) (p.298、図 6.10 を転載)

(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

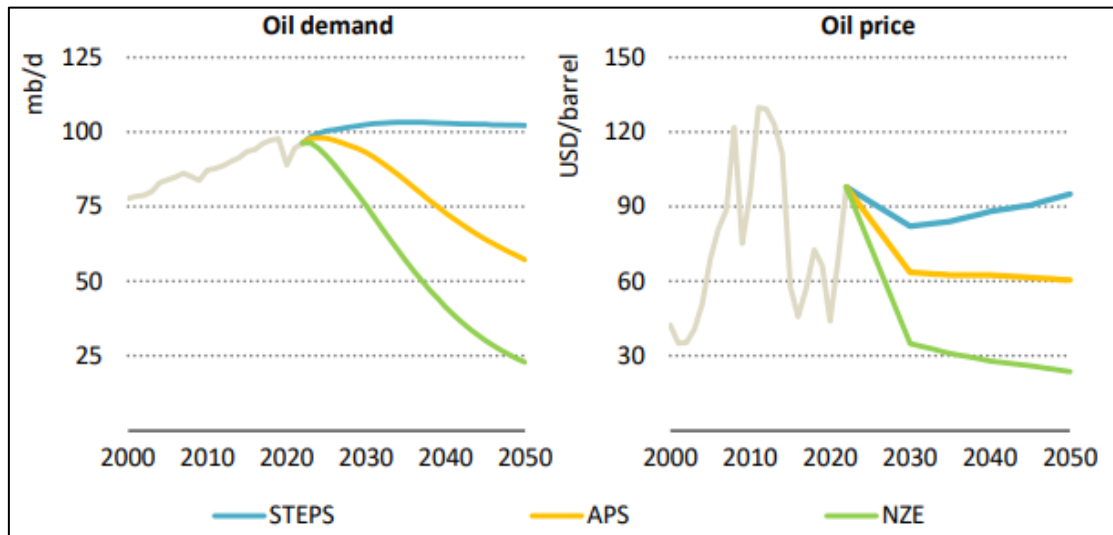
図 1-31 は、石油消費量と価格の推移予測である。消費量が横ばいなら価格は高めの 90 ドル／バレル程度、消費量減少では、価格は 60 ドル／バレル程度、消費量が急減すると価格は 30 ドル／バレル以下まで低下すると予測されている。

石油需要のピークは、STEPS の場合 2030 年代中央、APS の場合 2020 年代中央、NZE の場合は政策により大きく異なる。

図 1-31. 石油消費量と価格の推移予測

(単位： 100 万バレル／日)

(単位： ドル／バレル)



注. STEPS : Stated Policies Scenario (公表政策シナリオ)、APS : Announced Pledges Scenario (有志国の宣言を反映したシナリオ)、NZE : Zero Emissions by 2050 Scenario (2050年にネットゼロ達成を実現するシナリオ)

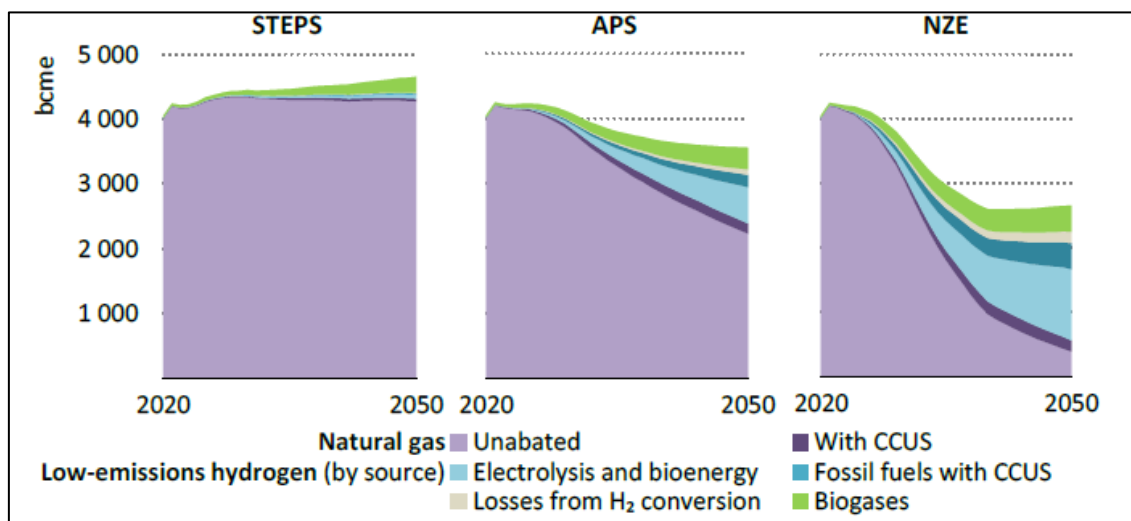
資料 : IEA, [World Energy Outlook 2022](#) (p.330、図 7.1 を転載)

(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

図 1-32 は、ガス体燃料の供給のシナリオ別の 2050 年に向けた予測である。APS では、電気分解 (Electrolysis) 等を利用し、多量のガス体燃料を製造すると予測されている。NZE ではより多くのバイオ燃料を導入している。しかも、NZE では 2040 年頃以降、CO₂ 削減措置のない在来型ガスの供給は大幅減となっている。

図 1-32. ガス体燃料の供給のシナリオ別の予測

(単位：天然ガス換算 10 億m³)



注. STEPS : Stated Policies Scenario (公表政策シナリオ)、APS : Announced Pledges Scenario (有志国の宣言を反映したシナリオ)、NZE : Zero Emissions by 2050 Scenario (2050年にネットゼロ達成を実現するシナリオ)

資料 : IEA, [World Energy Outlook 2022](https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf) (p.380、図 8.6 を転載)

(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

図 1-33 は、天然ガスの地域別貿易量の 2050 年に向けた予測である。

EU のロシアからのガス輸入が大幅に削減される予想となっている。世界的なリバランスが EU 発で生じると予測されている。

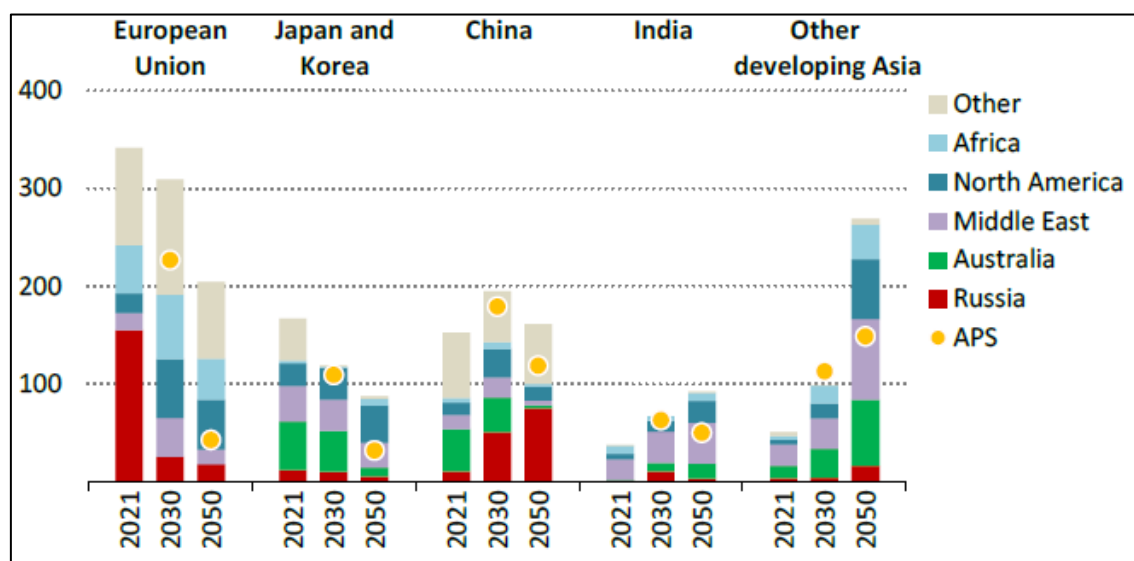
ガスの輸入量は、EU、日本・韓国では共に減少する予測となっている。

中国は、2030 年に向けて一旦上昇したあと、その後 2050 年に向けては減少へ向かうと予測されている。インドは、微増が継続する予測となっている。

その他の発展途上国は、天然ガス消費量が 2050 年に向けて、オーストラリア、中東、北米、アフリカからの輸入を増大させていくと予測されている。

図 1-33. 天然ガスの地域別貿易量の予測 (STEPS シナリオ)

(単位:10 億m³)



注：APS：Announced Pledges Scenario（有志国の宣言を反映したシナリオ）

資料：IEA, [World Energy Outlook 2022](https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf) (p.381、図 8.7 を転載)

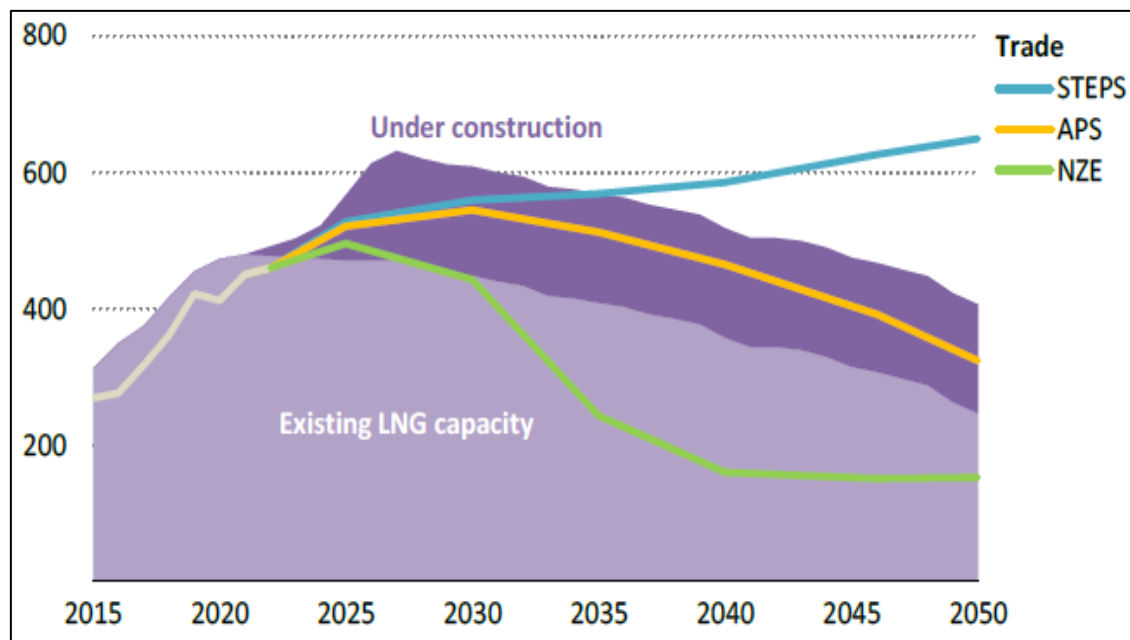
(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

図 1-34 は、LNG 施設建設と LNG 貿易量の予測であるが、既存および建設中の LNG 設備容量は 2020 年代後半にピークとなる予測となっている。STEPS ではさらに建設増強が続く、一方、APS では、建設中の設備までは使用されるが、LNG 生産量は自然減に向かうと予測される。NZE では、既存 LNG 設備も運転抑制へ向かう予測である。

LNG 貿易は近時点では全シナリオで増加するが、それ以降は急速に異なった動きを示す。

図 1-34. LNG 施設建設と LNG 貿易量の予測

(単位:10 億m³)



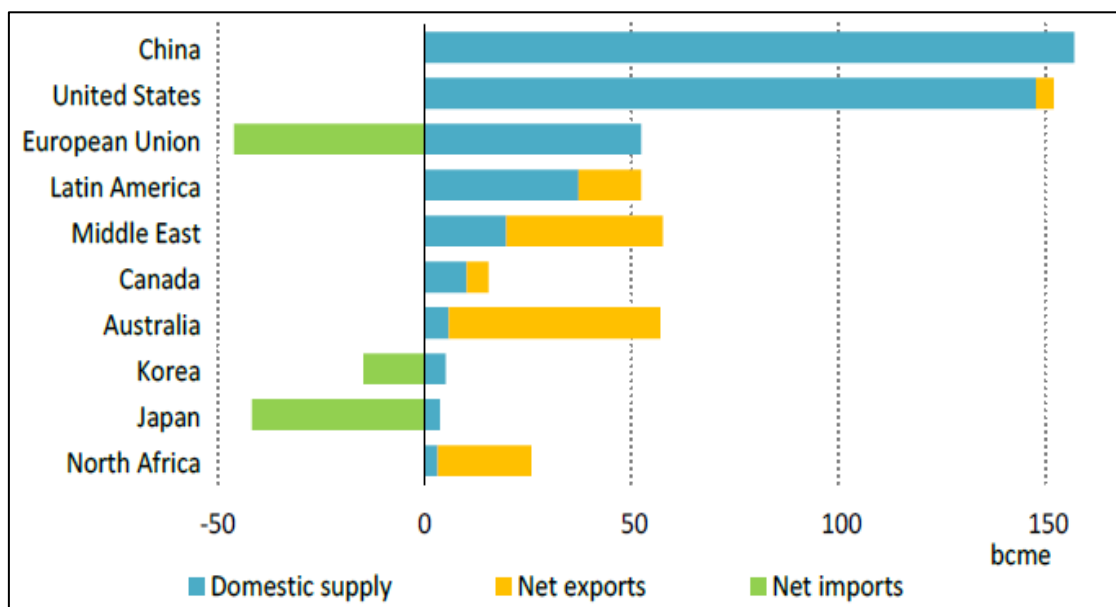
注. STEPS : Stated Policies Scenario (公表政策シナリオ)、APS : Announced Pledges Scenario (有志国の宣言を反映したシナリオ)、NZE : Zero Emissions by 2050 Scenario (2050年にネットゼロ達成を実現するシナリオ)

資料 : IEA, [World Energy Outlook 2022](https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf) (p.383、図 8.8 を転載)

(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

図 1-35 は、世界の水素供給とその貿易量 (APS) の予測を示している。世界のうちで、日本と韓国は輸入に大きく依存する。EU は半量近くを輸入する。多量の輸出を行うのは、オーストラリア、中東、北アフリカ、中南米である。

図 1-35. 水素供給とその貿易量（APS シナリオ）



注：APS：Announced Pledges Scenario（有志国の宣言を反映したシナリオ）

資料：IEA, [World Energy Outlook 2022](#)（p.396、図 8.18 を転載）

(<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)

第 6 節 まとめ 直近の情勢分析と今後のカーボンニュートラルへの取り組み

1. 本稿での分析から得られた内容

第 1 節では、エネルギー関連の投資・需給、さらにレアメタルに関する日本の政策動向を分析した。

第 2 節では、地球環境問題に対する考え方を考察した。

第 3 節では、ガス産業が 2050 年においてもガス導管を使用したエネルギー供給を担う将来像を見た。

第 4 節では、石油化学産業という、化学産業への素材提供を行う業種の将来計画を検討した。

第 5 節では、IEA 等のシナリオを分析した。

2. 今後のカーボンニュートラルへの取り組み

以上の本稿における検討から、日本政府の 2030 年に 2013 年比で温室効果ガスを 46%減という目標は、必ず達成されなければならない目標と言うよりは、「努力目標」として技術

進歩を促すために政府から為されたエールと位置付けることが望ましいと考察される。

日本政府はバングラデシュとインドネシア等で、相次いで海外における日本の石炭火力技術の導入支援を取り止めているが^(注1)、発展途上国において求められているのは、まずは経済発展であり、国民が皆、絶対的貧困といった状態から脱することであり、CO₂排出量の大幅削減を達成できる日本の高高度な石炭火力発電技術には、依然として海外で活用できる面があると考えられる。

特に「COP27で潮目が変わった」(藤枝一也、2023)との指摘は注目される。自社の排出量の2030年46%の削減達成を目指すに際して、外部よりの「購入電力のCO₂排出係数(電力1kWh当たりのCO₂排出量)が46%程度改善」(同)するとの日本政府の計画任せの数値で計算するべきでないとの指摘がなされている。また、森林クレジットも過大に評価・発行する可能性が指摘されている(同)。2030年の達成は目標ありきではなく、実現できる範囲での取り組みとすべきとの意見が産業界からは出されるようになってきている。

30年先、あるいはさらに先の時代における国のあり方、最適なエネルギー構成を考える難しさについても指摘しておきたい。2050年のカーボンニュートラルの実現を目標として国が宣言を行ったことから、バックキャスティングで2030年にはある水準になければならないとして、現在の投資方針を出そうとすると、あまりにも加重な変化を産業界や国民に負わせることになる。雇用喪失、リスク資産あるいは座礁資産(市場環境や社会環境の変化により、価値が大きく毀損する資産)を生み出して社会が不安定化する可能性も高まる。

こうした危機を避けるためには、一定程度の予測の下、先行投資を行ない、エネルギー供給システムの改変を行い、かつ、常に見直しをしながら改革を進めていくことが望ましい。

昨今では、グローバリズムの見直し、自国の産業競争力強化の視点がより強く意識されて各国の政策が打たれており、産業政策、補助政策も公然と実施される状況にある。しかも、例えば貿易の促進を自由貿易により促す機関であるWTO(世界貿易機関)で紛争処理機関のパネルが機能不全を起こしている状況があるように(福永ほか、2022)、国連安全保障理事会は言うまでもなく、国際機関の機能不全は修復不可能な段階にまで至っている。

ただし、現在が歴史的な転換点に至っていることは間違いなく、エネルギーシステム全体としての転換(トランスフォーメーション)が、IT技術の目覚ましい進歩とともに生じている。それと同時に、人々の意識改革を促す制度の設定が求められ、政策の打ち出し方の新たな試み、例えば、行動経済学上の言葉であるNudgeを意識した強制せずとも良い選択へ導く方策を導入することが検討されるべきである。また、課税・財政制度のあり方もより消

費者を意識し、エネルギー分野では需要サイドの重要性がより高まることは間違いない。

国際的に見ても、ウクライナ戦争の発生を見ても明らかなように、政策合意が難しい時代に入ってきており、求められていることが合意できない可能性がある。それでも、欧州の企業・機関は CO₂ 削減で先駆的立場を採ろうと温室効果ガス削減要求をより強く求めていくことが予想される。

米国エネルギー省のエネルギー情報局（EIA）のエネルギー需給予測では、6 通り、7 通りもの将来予測の異なった線が引かれている。これは、エネルギー需給の将来は、経済成長率の高低、石油価格の高低、再生可能エネルギーコスト動向、石油とガスの価格動向等、様々な要素から成り立つために、こうした将来条件を設定して、あとは各民間事業者が自分のリスクで考えて事業を行って下さいと示しているのである。

日本のように、何が何でも 2030 年で 46%の削減を達成しようとする場合、足りない部分は排出量取引により海外から買う決断を促されると予想され、国富の流出を招くこととなる。

中国が 2022 年においても石炭の増産を続け、石炭火力の発電量を 2025 年までは増やすと宣言しているのは、後ほど石炭火力をガス火力に転換すれば、排出量取引で日本に排出枠を高値で売ることができることを見越した動きとも推察できる。京都議定書に基づく CDM（クリーン開発メカニズム）により日本のみが世界で唯一排出削減の義務を負い、CDM による中国向けだけでも 1 兆円とも言われる排出権分の金額を支払った過去をもう一度思い起こす必要がある。

一途にグローバリズムが進むと考え、WTO、TPP（環太平洋パートナーシップ）、RCEP（地域的な包括的経済連携）等に多大の期待をかけて日本の経済の維持・発展を期待できる時代は過ぎ去ってしまっている。RCEP では、中国からの日本向け自動車およびその部品の輸出は無税であり、日本からの中国向け自動車と同部品の輸出は関税がかかっており、中国政府の多大の補助を受けた中国製の電気自動車が日本へ続々と輸出され始めている。

今後、エネルギー需給を左右する大きな技術進歩が次々と生じるに違いないことから、柔軟に変化の時代へ対応できるような、頭の切り替えと、相互主義・相互利益の原則を重視し、国内企業を守り育てる日本政府の施策の徹底が期待される。

参考文献

- ・ 遠藤誉 (2022). 『ウクライナ戦争における中国の対ロシア戦略 世界はどう変わるのか』 PHP 新書
- ・ クーニン、スティーブン E. (2022). 『気候変動の真実』 日経 BP
- ・ 杉山大志 (2021). 『地球温暖化のファクトフルネス』 電子書籍出版代行サービス
- ・ 杉山大志 (2018). 『地球温暖化問題の探求』 デジタルパブリッシングサービス
- ・ トムソン、アンドリュー (2022). 『中国、ロシアとの戦い方』 ワニブックス
- ・ 福永有夏 (2022). 「第 5 章 WTO 紛争処理の現状と見通し」『WTO 改革の原点と焦点』 所収一般財団法人国際貿易投資研究所、pp.54-63
- ・ 藤枝一也 (2023). 「「気合い」の脱炭素宣言は終焉を迎える－企業は COP27 で潮目が変わったことを認識すべき－」 国際環境経済研究所
<https://ieei.or.jp/2023/01/opinion230113/>
- ・ IEA, World Energy Outlook 2022
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>

注

¹ 2 件の石炭火力支援中止：バングラデシュとインドネシア

日本経済新聞 2022 年 6 月 22 日 18:28 (2022 年 6 月 22 日 22:23 更新)

政府は 22 日、バングラデシュとインドネシアで手続きを進めていた石炭火力発電所建設への円借款供与を中止すると発表した。

主要 7 か国 (G7) は 2021 年、温暖化ガスの排出削減対策が講じられていない石炭火力発電への新規支援を同年末までに終了することで合意した。政府はいずれも「継続案件」で対象外としていたが、石炭火力への批判的な国際世論を踏まえ転換した。

環境保護団体は「G7 の約束に違反している」と指摘していた。

対象はバングラデシュのマタバリ 2 石炭火力発電所とインドネシアのインドラマユ石炭火力発電所の 2 案件。両案件とも日本の支援で建設に向けた調査をしていた。工事は着手していなかった。

外務省の小野日子外務報道官は記者会見で「円借款案件として、これ以上進めないことにした」と説明した。脱炭素社会の移行へ発展途上国を支援する考えも示した。〔共同〕

第2章 2050年カーボンニュートラルのシナリオ

電源開発株式会社 執行役員

京都大学経営管理大学院 特命教授

中山 寿美枝

国際エネルギー機関（以下、IEA）は2021年5月に、“Net Zero by 2050 Roadmap for the Global Energy Sector”（以下、「ネットゼロ報告書」）という報告書を公表した。COP26議長（英国外務大臣）からの要請に基づいて作成したという同報告書についてIEAは、「2050年に世界全体でエネルギー利用及び産業プロセスからのCO₂排出量をネットゼロにする」ための道筋を、技術別、分野別に短期の具体的目標（マイルストーン）を置いて示した、としている。

この世界一有名なカーボンニュートラルシナリオ（以下、NZE）を、ネットゼロ報告書に基づいて概要とマイルストーンを示し、報告書別表の数値分析等から見えてくるNZEの課題について述べる。

第1節 ネットゼロ報告書の構成

ネットゼロ報告書は序章に「政策決定者向け要約」を置き、1章から5章までで構成されている。第1章ではNDC（国が決定する貢献）と整合を取ったSTEPSシナリオ（以下、STEPS）と、ゼロエミッション宣言している国が目標達成したと想定するAPCシナリオ（以下、APC）について記載しており、APCにおける2050年のエネルギー起源のCO₂排出量は21Gtであり、ネットゼロには程遠いことを示している。その上で、第2章から第5章までは2050年ネットゼロを達成するNZEについて記載している。第2章ではNZEの前提条件、概観、技術別のロードマップを示し、第3章ではNZEの部門別ロードマップを、そして第4章ではNZEのインプリケーションを示している。

第2節 NZEシナリオの前提

NZEでは、世界の人口は2050年には97億人を超え、世界のGDPは2020年比で2030年には約1.5倍、2050年には2倍以上になると想定している。（2019年価格表示ドル）

燃料価格については、2050年に2020年比で石油は35%低下、石炭は23～51%低下、ガ

スは米国ではほぼ変化なく、欧州では約 75%上昇、アジアでは約 20%から 30%低下すると想定している。

NZE では燃料価格について表 2-1 の通り想定している。石油と石炭の価格は 2050 年には 2020 年比で半減すると想定されているが、これは 2050 年に向かって大きく石油と石炭の需要が下がることから需給が緩み、市場原理で価格が下がるというロジックによると考えられる。

表 2-1. NZE シナリオの燃料価格

(単位：2019 年価格表示ドル)

Real terms (USD 2019)	2010	2020	2030	2040	2050
IEA crude oil (USD/barrel)	91	37	35	28	24
Natural gas (USD/MBtu)	0	0	0	0	0
United States	5.1	2.1	1.9	2.0	2.0
European Union	8.7	2.0	3.8	3.8	3.5
China	7.8	5.7	5.2	4.8	4.6
Japan	12.9	5.7	4.4	4.2	4.1
Steam coal (USD/tonne)					
United States	60	45	24	24	22
European Union	108	56	51	48	43
Japan	125	75	57	53	49
Coastal China	135	81	60	54	50

出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](#) (p.51, 表 2.1 を転載)

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

NZE のカーボン価格は、下表の通りであり、2050 年には先進国で 250 ドル、主要な新興国・発展途上国でも 200 ドルというレベルに達する。

表 2-2. NZE シナリオのカーボン価格

(単位：2019 年価格表示ドル/t・CO₂)

	2025	2030	2040	2050
先進国	75	130	205	250
主要な新興国と発展途上国*	45	90	160	200
その他新興国と発展途上国	3	15	35	55

注*．中国、ロシア、ブラジル、南アを含む

出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](#) (p.53, 表 2.2 より筆者作成)

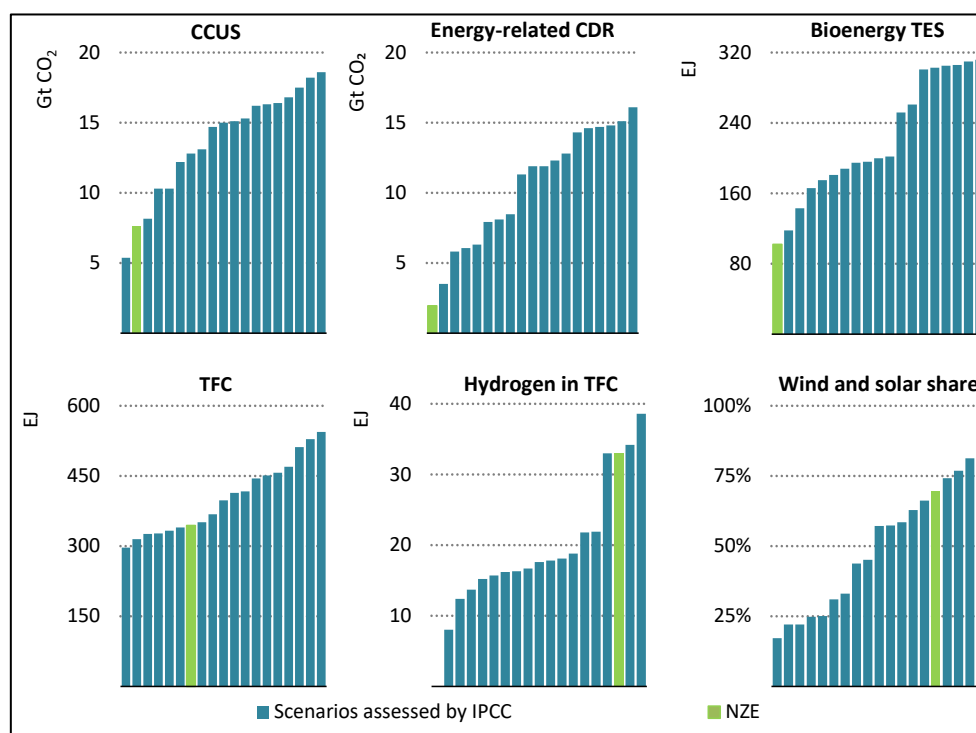
ネットゼロ報告書は、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）1.5℃特別レポートの 90 本の 1.5℃シナリオ（世界の平均気温の上昇を産業革命以前の水準から 1.5 度に抑えるシナリオ）のうち 18 本のシナリオが 2050 年時点でネットゼロ排出を達成しているとして、この 18 本のシナリオと比較した NZE の特徴（いずれも 2050 年値）を図 2-1 で示している。

以下のような特徴がある。

- ・ CCUS（炭素回収・利用・貯留）：IPCC のシナリオ（以下、IPCC）の中間値は 2050 年 150 億トンであり、NZE はその半分以下と少ない
- ・ CDR（二酸化炭素除去）：IPCC では 35 億トンから 160 億トンであり、NZE の 19 億トンはそれらと比べて大幅に少ない
- ・ バイオエネルギー供給量：IPCC の 2050 年中間値は 200 エクサジュール（ 10^{18} ジュール=100 京ジュール、以下、EJ）であるが、NZE ではその最小値を下回る 100EJ
- ・ 最終エネルギー消費：IPCC の 2050 年最終エネルギー消費は 300EJ から 550EJ（2020 年 410EJ）。NZE では 2050 年 340EJ と低い範囲にあたる
- ・ 水素：IPCC の中間値は 2050 年の水素エネルギーは 18EJ。NZE では 33EJ と高い範囲にあたる
- ・ 風力と太陽：IPCC では 2050 年の電力供給における風力と太陽光の比率は 15%から 80%。中間値 50%。NZE では 70%と高い範囲にあたる

図 2-1. 2050 年における主要な指標に関する NZE と IPCC シナリオとの比較

（単位：Gt CO₂：10 億トン）



出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050)（p.63, 図 2.11 を転載）

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

なお、NZE を試算したモデルは、IEA の WEO モデル（地域別・部門別シミュレーション型）と ETP モデル（地域別・技術別バックキャスティング型）をハイブリッドさせたも

ので、大気汚染に関しては IIASA（国際応用システム分析研究所）のモデルで試算していると記載されている。

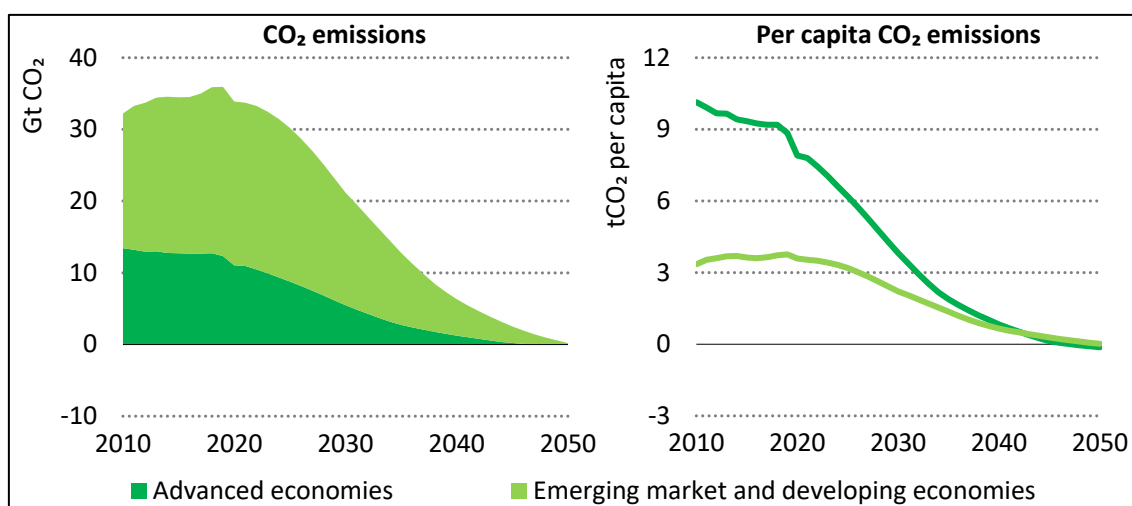
第3節 NZE シナリオの概観

NZE の CO₂ 排出は、文字通り「2050 年に世界全体でネットゼロ」であるが、先進国／発展途上国別で見ると、先進国合計では 2045 年にネットゼロを達成、2050 年には 2 億トン除去（図 2-2（右）、マイナス部分）している一方、発展途上国合計では 2050 年に 2 億トンの排出を先進国のマイナスでオフセットしている、という差異がある。（図 2-2）

図 2-2. NZE シナリオにおける世界の CO₂ 排出量

（単位：Gt CO₂：10 億トン）

（単位：1,000 トン／人）



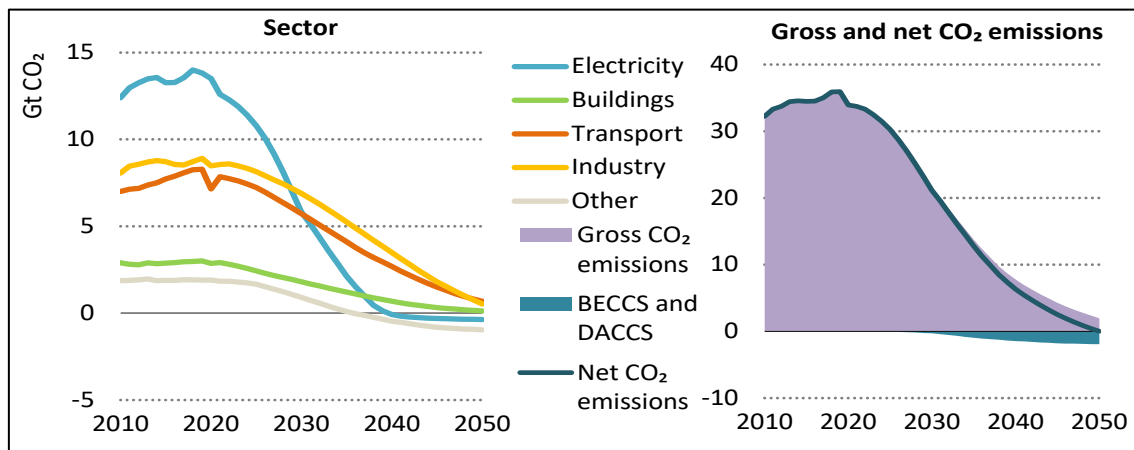
出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050)（p.53，図 2.2 を転載）

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

部門別排出では、電力部門からの排出が最も早く、かつ大きく低下し、2040 年頃にはネットマイナスとなる（図 2-3（左）。電力部門のこのような排出低下の主な要因は石炭火力の減少によるものである。2050 年には BECCS（バイオマスエネルギー利用時の燃焼により発生した CO₂ を回収・貯留する技術。）と DACS（大気中の CO₂ を直接回収し貯留する技術）で 19 億トンの除去が行われる（図 2-3（右））。

図 2-3. NZE シナリオにおける部門別世界の CO₂ 排出量、グロスとネットの排出量

(単位 : Gt CO₂ : 10 億トン)



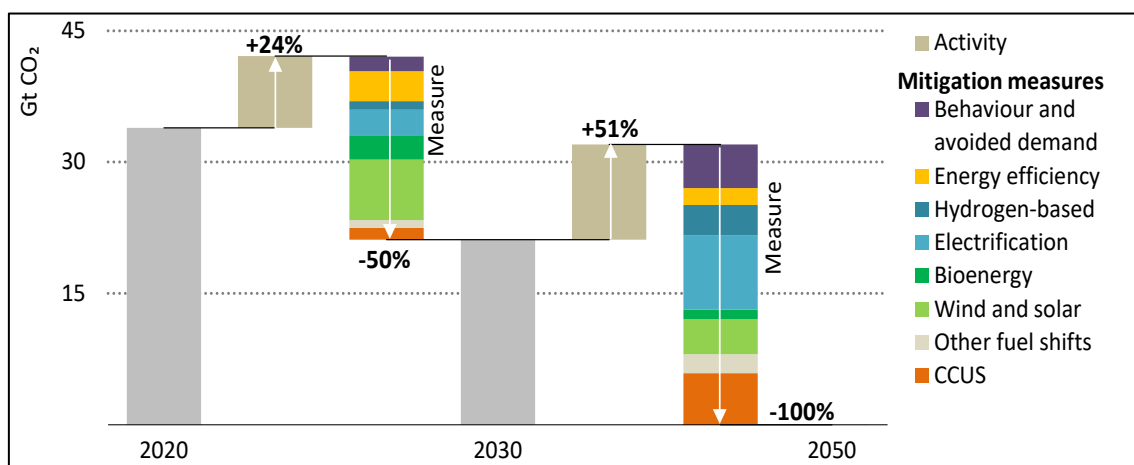
出所 : IEA ; [NET ZERO by 2050 Scenario](https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050) (p.55, 図 2.3 を転載)

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

図 2-4 は、行動変容、省エネルギー、水素ベース燃料、電化、バイオエネルギー、風力と太陽光、CCUS という重要な削減手段別に NZE の削減を 2020 年比で示している。NEZ での 2030 年までの削減には、風力と太陽光が最大の貢献をし、次いで電化と省エネが貢献する。一方、2030 年から 2050 年にかけての削減には、電化が最大の貢献をし、次いで CCUS、水素、行動変容が貢献する。

図 2-4. 2020 年から 2050 年における NZE シナリオの緩和手段別の排出削減

(単位 : Gt CO₂ : 10 億トン)



出所 : IEA ; [NET ZERO by 2050 Scenario](https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050) (p.64, 図 2.12 を転載)

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

第4節 技術別ロードマップ

重要な削減技術 7 分類（省エネ、行動変容、電化、再エネ、水素、バイオエネルギー、CCUS）それぞれについて、達成期限とマイルストーンを示したロードマップが表形式で掲載されている。その中で、NZE を象徴する 2050 年のマイルストーンは以下の通りである（報告書の掲載順）。

- ・ 省エネ：世界の全ての建物ストックの 85%以上はゼロ排出可能
- ・ 行動変容：過剰なエネルギー消費を抑制。例えば車の最高速度を時速 100 キロに制限。都市部における ICE（ガソリンエンジンなど内燃機関）車の使用禁止（自転車、バスを利用）。航空機に代え、可能であれば高速鉄道の利用。資源消費抑制。例えばリサイクル
- ・ 電化：エネルギー最終消費に占める電気の割合は 49%、乗用車ストックに占める EV（電動車）の割合 86%
- ・ 再エネ：全電力に占める再エネ割合は 88%、PV（太陽光発電）の年間新設量は今後 2050 年まで 630GW/年（現状の 4.7 倍）
- ・ 水素：水素ベース燃料の生産量は 530Mt/年（現状の 6 倍）、うち 62%は水電解（現状 5%）で残りは化石燃料由来（CCUS 付き）
- ・ バイオ：バイオエネルギーに占める新型バイオ燃料の割合は 97%（現状 27%）
- ・ CCUS（CO₂回収・利用・貯留）：CO₂回収量 7,600Mt-CO₂（現状 40 Mt-CO₂）うち BECCS（バイオエネルギーCCS）約 1,400 Mt-CO₂、DACS（直接空気回収・貯留）約 600 Mt-CO₂

以下に、7 つの技術別ロードマップを示す。表 2-3 は NZE 達成のための省エネルギーのロードマップである。年間のエネルギー改善率を過去 10 年間の実績と比べて 2030 年までは 3 倍弱に引き上げる必要がある。また、2050 年時点で世界の全ての建物ストックの 85%以上をゼロ排出可能に改築する必要がある。

表 2-3. NZE シナリオ達成のための省エネルギーのロードマップ

部門	2020	2030	2050
総合エネルギー供給	2010-20	2020-30	2030-50
年間エネルギー原単位 (MJ/GDP (USD)) 改善率	-1.6%	-4.2%	-2.7%
産業			
鉄のガス直接還元エネルギー原単位(GJ/t)	12	11	10
一次化学物質のエネルギー原単位 (GJ/t)	17	16	15
輸送			
ICE大型トラックのストックの燃費(2020年を100として)	100	81	63
民生・業務			
ストック全体におけるゼロ排出レディービルの割合	<1%	25%	>85%
電化製品のエネルギー消費量 (2020年を100として)	100	75	60

出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（p.66，表 2.3 より筆者作成）

以下に NZE 達成のための行動変容のロードマップを示す。プラスチックの回収率を 2050 年には 54%と現状の 3 倍以上にする必要があり、車の最高速度を時速 100 キロ/に制限。都市部における ICE 車の使用禁止（自転車、バスを利用）、高速鉄道の利用が可能な場合は航空機を利用しないこと、冷暖房温度の制約、などが挙げられている。

表 2-4. NZE シナリオ達成のための行動変容のロードマップ

部門	時期	マイルストーン
産業	2020	プラスチックの回収率=17%
	2030	プラスチックの回収率=27% 乗用車の軽量化による重量減少率=10%
	2050	プラスチックの回収率=54% 肥料の利用効率10%向上
輸送	2030	車道における100km/時の速度制限とエコドライビングの導入 都市部でのICE車の利用禁止
	2050	国内便は可能な場合は高速鉄道にシフト ビジネスおよび長距離レジャー航空便は2019年レベル以下に
民生業務	2030	暖房温度を平均19-20℃に設定 冷房温度は平均24-25℃に設定 過剰に高温な温水温度を下げる
	2050	床面積当たりのエネルギー集約度の高い材料の利用30%低減 建築物の寿命20%延長

出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（p.70，表 2.4 より筆者作成）

表 2-5 に NZE 達成のための電化のロードマップを示す。2050 年には世界の最終エネルギー

ギー消費に占める電気の割合は約 5 割、運輸部門では乗用車は約 9 割、2 輪車・3 輪車は全てを電動化する必要がある。EV 用のバッテリー需要は現状の約 100 倍。

表 2-5. NZE シナリオ達成のための電化のロードマップ

部門	2020	2030	2050
エネルギー消費に占める電気の割合	20%	26%	49%
産業			
製鉄における電炉の割合	24%	37%	53%
軽工業における電化率	43%	53%	76%
輸送			
ストックにおけるEVの割合：			
乗用車	1%	20%	86%
二輪車／三輪車	26%	54%	100%
バス	2%	23%	79%
バン／小型トラック	0%	22%	84%
大型トラック	0%	8%	59%
EV用のバッテリー需要 (TWh)	0.16	6.6	14
民生・業務			
ヒートポンプ導入台数（百万台）	180	600	1,800
熱需要におけるヒートポンプの割合	7%	20%	55%
電気にアクセスのない人口（百万人）	786	0	0

出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（p.72, 表 2.5 より筆者作成）

表 2-6 に NZE 達成のための再生可能エネルギーのロードマップを示す。世界の合計発電電力量に占める再エネ割合を 88%とし、PV の年間新設量を今後 2050 年まで 630GW（現状の 4.7 倍）、風力は 350GW 以上（現状の 3 倍強）とする必要がある。

表 2-6. NZE シナリオ達成のための再生可能エネルギーのロードマップ

部門	2020	2030	2050
電力部門			
発電電力量に占める再エネの割合	29%	61%	88%
年間に新設される発電設備出力：			
太陽光	134	630	630
風力	114	390	350
うち洋上風力	5	80	70
給電指令可能な再エネ	31	120	90
エンドユース部門			
最終エネルギー消費に占める再エネの割合	5%	12%	19%
PVを屋根に設置している家の割合（百万軒）	25	100	240
太陽熱と地熱利用のビルの割合	2%	5%	12%
産業での最終消費における太陽熱と地熱の割合	0	1%	2%

出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（p.74, 表 2.6 より筆者作成）

表 2-7 に NZE 達成のための水素・水素ベース燃料のロードマップを示す。2050 年には水素ベース燃料の生産量を年間 530Mt（現状の 6 倍）にする必要があるが、現状 1 割に留まる低炭素水素の割合を 100%に、量としては現状の 50 倍以上にする必要がある。低炭素水素の内訳は、62%は水電解（現状 5%）で残りは化石燃料由来（CCUS 付き）となっている。2050 年の部門別の水素・水素ベース燃料の消費は、電力が 2 割、運輸が 4 割強、産業が 4 割弱となっている。

表 2-7. NZE シナリオ達成のための水素・水素ベース燃料のロードマップ

部門	2020	2030	2050
水素ベース燃料の生産量(Mt)	87	212	528
低炭素水素の生産量	9	150	520
化石燃料由来の水素（CCUS付き）の割合	95%	46%	38%
水電解による水素の割合	5%	54%	62%
商用生産	15	127	414
オンサイト生産	73	85	114
水素ベース燃料の消費量(Mt)	87	212	528
電力	0	52	102
水素による発電量	0	43	88
アンモニアによる発電量	0	8	13
製油所	36	25	8
民生・業務・農業	0	17	23
輸送	0	25	207
水素燃料	0	11	106
アンモニア燃料	0	5	56
合成燃料	0	8	44
産業	51	93	187

出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（p.76, 表 2.7 より筆者作成）

表 2-8 に NZE 達成のためのバイオエネルギーのロードマップを示す。2050 年にはバイオエネルギーに占める新型バイオ燃料の割合は 97%（現状 27%）とする必要がある。

表 2-8. NZE シナリオ達成のためのバイオエネルギーのロードマップ

	2020	2030	2050
エネルギー供給合計 (EJ)	63	72	102
新型バイオマス原料由来の割合	27%	85%	97%
近代型バイオガス燃料 (EJ)	2.1	5.4	13.7
バイオメタン	0.3	2.3	8.3
近代型液体バイオ燃料 (EJ)	1.6	6	7
新型バイオ燃料 (EJ)	0.1	2.7	6.2
近代型固体バイオ燃料 (EJ)	32	54	74
従来型固体バイオマスの利用 (EJ)	25	0	0
調理に従来型固体バイオマスを利用する人口 (百万人)	2340	0	0

出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario (p.79, 表 2.8 より筆者作成)

表 2-9 に NZE 達成のための CCUS (CO₂ 回収・利用・貯留) のロードマップを示す。2050 年の CO₂ 回収量を 7,600Mt・CO₂ (現状 40 Mt・CO₂)、うち BECCS (バイオエネルギー-CCS) 約 1,400 Mt・CO₂、DACS (直接空気回収・貯留) 約 600 Mt・CO₂ とする必要がある。

表 2-9. NZE シナリオ達成のための CCUS のロードマップ

	2020	2030	2050
回収量 (Mt CO ₂)	40	1,670	7,600
化石燃料プロセスからのCO2回収	39	1,325	5,245
電力	3	340	860
産業	3	360	2,620
商用水素製造	3	455	1,355
非バイオ燃料製造	30	170	410
バイオエネルギーからのCO2回収	1	255	1,380
電力	0	90	570
産業	0	15	180
バイオ燃料製造	1	150	625
直接空気回収	0	90	985
うち除去	0	70	630

出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario (p.80, 表 2.9 より筆者作成)

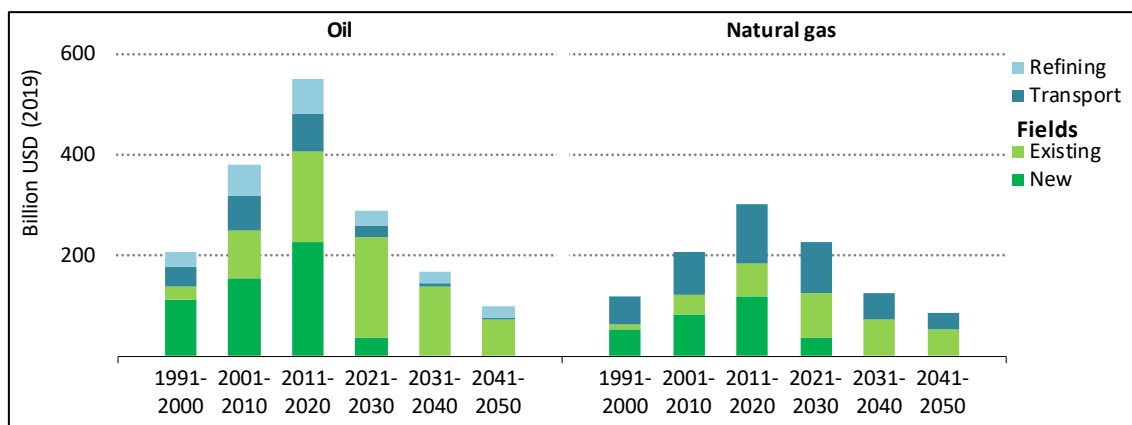
第5節 部門部ロードマップ

第3章では、化石燃料、低排出燃料、電力、産業、輸送、民生・業務の6つ部門別の章からなっているが、化石燃料を除く5つの部門についてはNZE達成のための達成期限とマイルストーンを表形式にしたロードマップを示している。

なお、化石燃料の章には、ロードマップは示されていないが、ネットゼロ報告書の中で一番有名になった図が示されている。IEAは図2-5を示して「NZEでは今後、石油・ガスの上流部門への新規の投資は不要」と記載したことで、各国のメディアから「供給部門への投資を萎縮させるものだ」と多くの批判を浴びたのである。

図2-5. NZE シナリオの石油・ガス供給への投資

(単位：2019年価格表示10億ドル)



出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050) (p.103, 図3.4を転載)

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

化石燃料を除く5つの部門のNZEの2050年のマイルストーンの主なものは、以下の通りである。

低排出燃料・電力部門

- ・ 世界の全発電量は71,200TWh（現状の約3倍）
- ・ 水素生産のための電力需要は14,500TWh（＝全発電電力量の20%、現状1TWh）
- ・ PVと風力の占める割合は68%（現状9%）
- ・ CCUS付きの火力発電の発電量は1,330TWh（現状4TWh）

産業部門

- ・ 産業部門の電化率は46%（現状21%）CO₂回収量は2,800Mt（現状3Mt）

- ・ 化学製品における回収プラスチック再利用率 54%（現状 17%）
- ・ 鉄鋼生産の直接水素還元の割合 29%（現状ゼロ）

運輸部門

- ・ 石油製品（燃料）におけるバイオ燃料ブレンド割合は 41%（現状 5%）
- ・ 航空燃料に占める水素ベース合成燃料の割合は 33%（現状ゼロ） バイオ燃料は 45%（現状ゼロ）
- ・ 船舶燃料のアンモニア割合は 46%（現状ゼロ） 水素ベース燃料は 17%（現状ゼロ）

業務・家庭部門

- ・ 既存の建物の 85%以上はゼロ排出対応にリフォーム（現状 1%未満）
- ・ ヒートポンプ導入台数 18 億台（現状の 10 倍）
- ・ 業務・家庭部門における分散型 PV による発電量 7,500TWh（現状の約 20 倍）

以下に、5 つの部門別ロードマップを示す。表 2-10 は NZE 達成のための低排出燃料のロードマップである。低排出燃料はバイオエネルギーと水素に分類され、2050 年には、新型液体バイオ燃料の生産量を現状の 60 倍以上とし、水素生産のための電力需要は 14,500TWh（＝全発電電力量の 20%、現状 1TWh）が必要、そのための電解装置の容量は約 3,600GW（現状は 1GW 未満）とする必要がある。

表 2-10. NZE シナリオ達成のための低排出燃料のロードマップ

部門	2020	2030	2050
バイオエネルギー			
近代バイオエネルギーに占める近代バイオ燃料の割合（変換損失除く）	20%	45%	48%
新型液体バイオ燃料（mboe/d）	0.1	2.7	6.2
ガス系統におけるバイオメタンの割合	<1%	2%	20%
バイオ燃料生産からのCO2回収量（Mt CO2）	1	150	625
水素			
生産量（Mt H2）	87	212	528
うち低排水素（Mt H2）	9	150	520
電解装置の容量（GW）	<1	850	3,585
水素生産に関わる電力需要（TWh）	1	3,850	14,500
水素生産からのCO2回収量（Mt CO2）	135	680	1,800
水素・アンモニア貿易港の輸出ターミナルの数	0	60	150

注. バイオ燃料：バイオエネルギーから作られた液体または気体

mboe/d=1 日あたり 100 万バレル石油等価

出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（p.111, 表 3.1 より筆者作成）

表 2-11 に NZE 達成のための電力部門のロードマップを示す。2050 年には世界の全発電量は 71,200TWh（現状の約 3 倍）、PV と風力の占める割合は 68%（現状 9%）、CCUS 付きの火力発電の発電量は 1,330TWh（現状 4TWh）とする必要がある。

表 2-11. NZE シナリオ達成のための電力部門のロードマップ

カテゴリー			
電力部門の脱炭素化	2035年までに先進国合計でゼロエミッション 2040年までに新興国および途上国でゼロエミッション		
水素ベース燃料	2025年までに石炭火力をアンモニア混焼に、ガス火力を水素混焼に改造を開始		
排出を伴う火力発電	全ての亜臨界圧石炭火力（既設の870GWおよび建設中の17GW）を2030年までに段階的廃止 全てのCCUSなしの石炭火力を2040年までに段階的に廃止 全てのCCUSなしの大型石油火力を2030年代に段階的に廃止 CCUSなしのガス火力は2030年までに減少に転じ、2040年には90%削減		
カテゴリー	2020	2030	2050
世界合計発電電力量 (TWh)	26800	37300	71200
再生可能エネルギー			
発電設備容量 (GW)	2,990	10,300	26,600
発電電力量に占める割合	29%	61%	88%
発電電力量に占めるPVと風力の割合	9%	40%	68%
CO2回収・利用・貯留 (CCUS) 付きの発電電力量 (TWh)			
CCUS付きの石炭・ガス火力発電	4	460	1,330
CCUS付きのバイオエネルギー発電	0	130	840
水素およびアンモニア			
石炭火力(CCUSなし)での水素・アンモニア混焼割合	0%	3%	100%
ガス火力(CCUSなし)での水素・アンモニア混焼割合	0%	9%	85%
CCUSでオフセットしていない化石燃料			
発電電力量に占めるCCUSなし石炭の割合	35%	8%	0.0%
発電電力量に占めるCCUSなしガスの割合	23%	17%	0.4%
原子力	2016-2020	2021-2030	2031-2050
年間平均新設容量 (GW)	7	17	24
インフラ			
電力ネットワーク投資 (2019 10億USD)	260	820	800
変電所容量 (GVA)	55,900	113,000	290,400
バッテリー貯蔵容量 (GW)	18	590	31,00
公共EV充電設備 (GW)	46	1,780	12,400

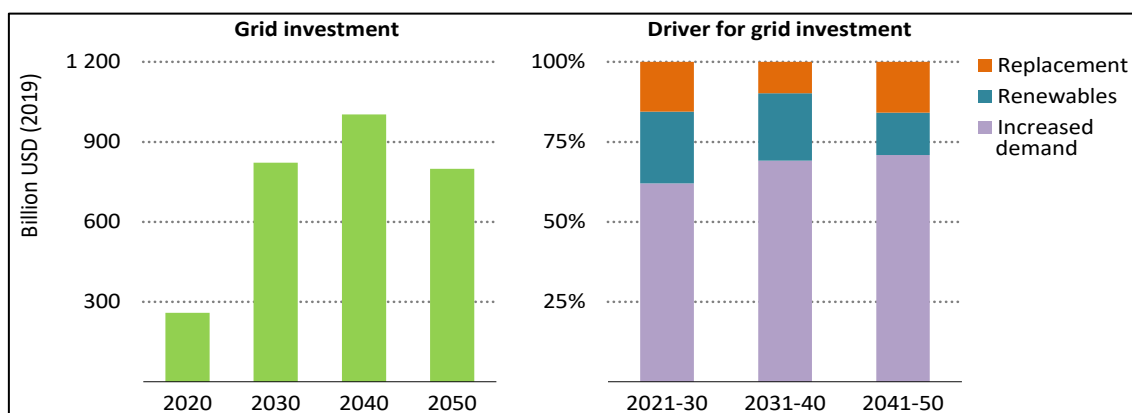
出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（p.117, 表 3.2 より筆者作成）

この電力部門の変革には電力ネットワークへの投資が不可欠である。電力需要の増加と老朽設備の更新と再エネ電源の系統連系のため、2040 年までに世界の送電線の総延長は現状の 2 倍に、投資は 2030 年までに現状の 3 倍に増加する（図 2-6）。

図 2-6. NZE シナリオにおける世界の電力ネットワークへの投資

(単位：2019 年価格表示 10 億ドル)

(単位：%)



出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](#) (p.118, 図 3.12 を転載)

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

表 2-12 に NZE 達成のための産業部門のロードマップを示す。2050 年には産業部門の電化率は 46%（現状 21%）CO₂回収量は 2,800Mt（現状 3Mt）とする必要があり、化学製品における回収プラスチック再利用率 54%（現状 17%）、鉄鋼生産の直接水素還元の割合 29%（現状ゼロ）とする必要がある。

表 2-12. NZE シナリオ達成のための産業部門のロードマップ

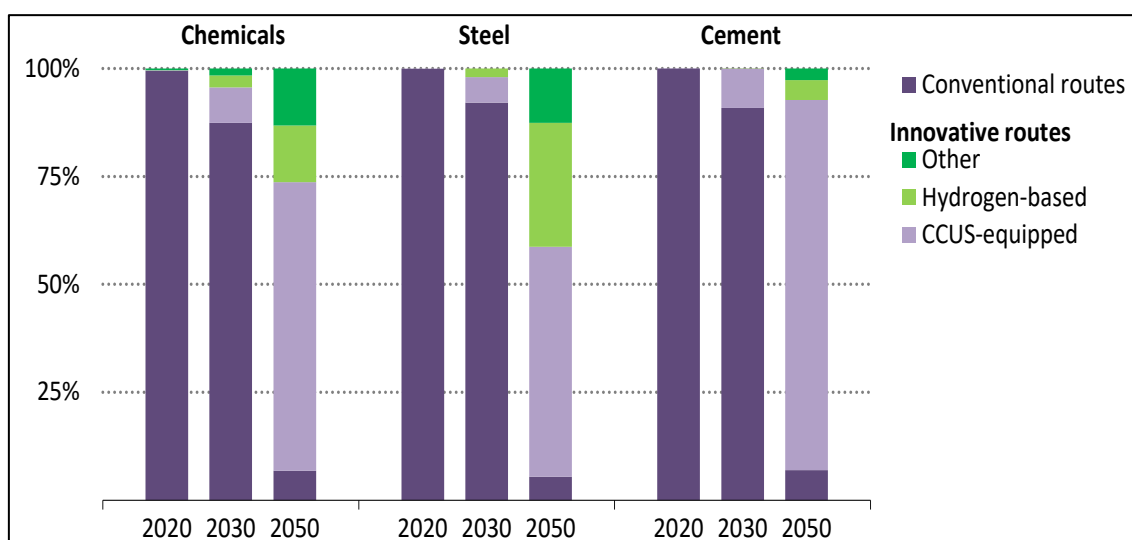
カテゴリー			
重工業	2035年には、全ての新設設備は革新的な低排出ルートとなる		
産業用モーター	2035年には、販売される全ての電気モーターはクラス最高のものになる		
カテゴリー	2020	2030	2050
産業合計			
最終消費における電気の割合	21%	28%	46%
水素の需要 (Mt H ₂)	51	93	187
CO ₂ 回収量 (Mt CO ₂)	3	375	2800
化学			
リサイクル率: 回収プラスチックの再利用	17%	27%	54%
二次製品の再利用	8%	14%	35%
水素の需要 (Mt H ₂)	46	63	83
オンサイト水素製造用電解装置の容量 (GW)	0	38	210
革新的製造ルート経由の割合	1%	13%	93%
CO ₂ 回収量 (Mt CO ₂)	2	70	540
鉄			
リサイクル・再利用:インプットに占めるスクラップの割合	32%	38%	46%
水素の需要 (Mt H ₂)	5	19	54
オンサイト水素製造用電解装置の容量 (GW)	0	36	295
鉄鉱石からの鉄鋼生産に占める 水素還元製鉄 + 電炉法の割合	0%	2%	29%
鉄鉱石電解製鉄 + 電炉法の割合	0%	0%	13%
CCUS付帯設備の割合	0%	6%	53%
CO ₂ 回収量	1	70	670
セメント			
クリンカ割合	0.71	0.65	0.57
水素の需要 (Mt H ₂)	0	2	12
革新的製造ルート経由の割合	0%	9%	93%
CO ₂ 回収量 (Mt CO ₂)	0	215	1,355

出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](#) (p.129, 表 3.3 より筆者作成)

産業部門においては、化石燃料を原料とする素材産業（化学、鉄、セメント）が **hard to abate sector**（CO₂ 排出削減困難）であることが知られているが、NZE ではこの 3 つの産業について以下のような図を示している。即ち、2050 年にはこの 3 つの産業では従来の製造手法はほとんど別の手法（CCUS 付設、水素利用、他の技術）と置き換えられており、既存の設備の総入れ替えが必要なが示唆されている。

図 2-7. NZE シナリオにおける世界の素材産業の製造手法（構成比）

（単位：％）



出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050)（p.126, 図 3.19 を転載）

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

表 2-13 は NZE 達成のための輸送部門のロードマップを示す。2050 年には燃料におけるバイオ燃料ブレンド割合は 41%（現状 5%）、航空燃料に占める水素ベース合成燃料の割合は 33%（現状ゼロ）バイオ燃料は 45%（現状ゼロ）、船舶燃料のアンモニア割合は 46%（現状ゼロ）水素ベース燃料は 17%（現状ゼロ）とする必要がある。

表 2-13. NZE シナリオ達成のための輸送部門のロードマップ

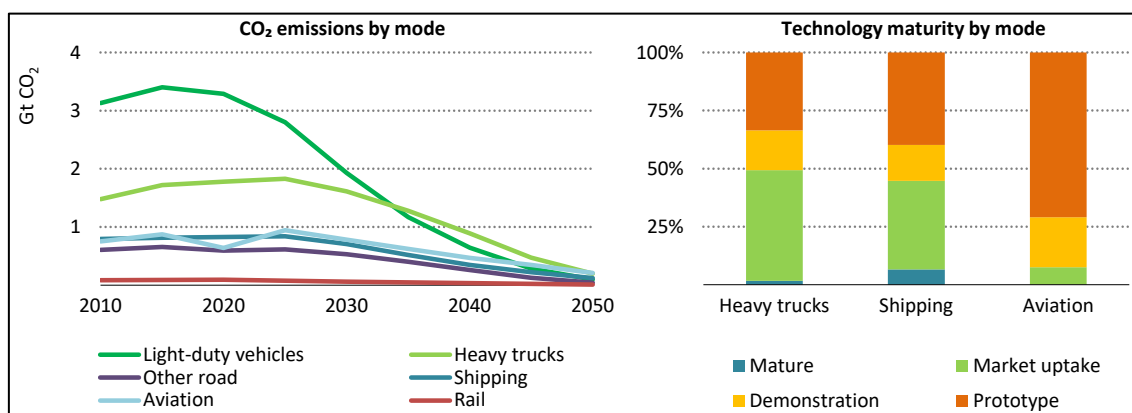
カテゴリー				
道路輸送	2035年には、世界中でICEの新車販売は終了			
航空・船舶	可能な限り早期に排出原単位の厳格な削減目標を実施			
カテゴリー		2020	2030	2050
道路輸送				
新車販売に占めるプラグインHV、EV FC車の割合				
	乗用車	5%	64%	100%
	二輪車・三輪車	40%	85%	100%
	バス	3%	60%	100%
	バン・軽トラック	0%	72%	100%
	大型トラック	0%	30%	99%
石油製品に占めるバイオ燃料ブレンド割合		5%	13%	41%
鉄道				
鉄道エネルギー消費に占める電気と水素の割合		43%	65%	96%
モーダルシフトによる活動の増加（2020年＝100）		100	100	130
航空				
航空エネルギー消費に占める水素ベース合成燃料の割合		0%	2%	33%
航空エネルギー消費に占めるバイオ燃料の割合		0%	16%	45%
行動変容により回避された需要（2020年＝100）		0	20	38
船舶				
船舶エネルギー消費に占める割合：				
	アンモニア	0%	8%	46%
	水素	0%	2%	17%
	バイオエネルギー	0%	7%	21%
インフラ				
公共EV充電設備（100万基）		1.3	40	200
水素充填設備（基）		540	18,000	90,000
完全電化の鉄道の割合		34%	47%	65%

出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（p.138, 表 3.4 より筆者作成）

輸送部門では、現状ほぼ 100%石油系燃料を利用している重量車両、船舶、航空部門の排出削減が課題であるが、ネットゼロ報告書では以下のような図を示している。図 2-8（右）のオレンジ色は削減技術が現状は実験室レベルであることを表しており、航空では削減の 7 割を、船舶では削減の 4 割をこのレベルの技術に頼っていることが示されている。

図 2-8. 世界の輸送手段別 CO₂ 排出量と 2050 年までの排出削減の技術成熟度別シェア

(単位: Gt CO₂ : 10 億トン、%)



出所: IEA; [NET ZERO by 2050 Scenario](#) (p.132, 図 3.21 を転載)

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

表 2-14 に NZE 達成のための業務・家庭部門のロードマップを示す。2050 年には既存の建物の 85%以上はゼロ排出対応にリフォーム(現状 1%未満)、ヒートポンプ導入台数 18 億台(現状の 10 倍)、業務・家庭部門における分散型 PV による発電量 7,500TWh(現状の約 20 倍)とする必要がある。

表 2-14. NZE シナリオ達成のための業務・家庭部門のロードマップ

カテゴリー			
新築の建築物	2030年以降、全てゼロカーボン対応		
既存の建築物	2030年以降、毎年2.5%がゼロカーボン対応にリフォーム		
カテゴリー	2020	2030	2050
民生・業務			
既設ビルに占めるゼロ・カーボン・レディ改築の割合	<1%	20%	>85%
新設ビルに占めるゼロ・カーボン・レディ建築の割合	5%	100%	100%
冷暖房			
ヒートポンプ台数(百万基)	180	600	1800
太陽熱利用者（百万人）	250	400	1200
行動変容により回避された住宅用エネルギー	n.a.	12%	14%
家電製品と照明			
家電のエネルギー消費単位（2020年=100）	100	75	60
照明の販売に占めるLEDの割合	50%	100%	100%
エネルギーアクセス			
電気を利用する人口（10億人）	7	8.5	9.7
クリーン調理器具を利用する人口（10億人）	5.1	8.5	9.7
民生・業務におけるエネルギーインフラ			
分散型PV発電(TWh)	320	2,200	7,500
EV 個人充電器（百万基）	270	1,400	3,500

出所: IEA; [NET ZERO by 2050 Scenario](#) (p.147, 表 3.5 より筆者作成)

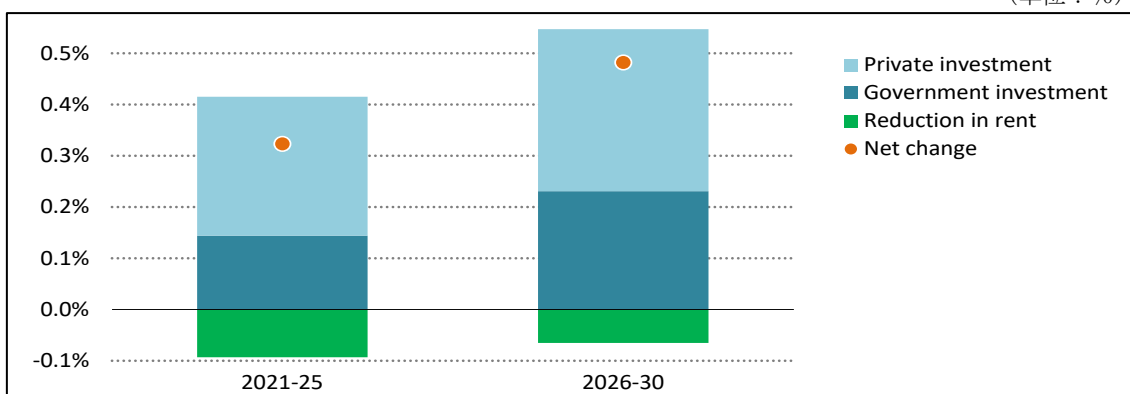
第 6 節 NZE シナリオのインプリケーション

1. 経済へのインプリケーション

NZE では、政府と民間のクリーンエネルギーへの投資急増がエンジニアリング業、製造業、建設業の出荷額を刺激し、2020 年代後半には世界の GDP 成長率を STEPS と比較して年率 0.5%押し上げる（図 2-9）としている。

図 2-9. STEPS シナリオに対する NZE シナリオの世界 GDP 年平均成長率の変化

(単位：%)



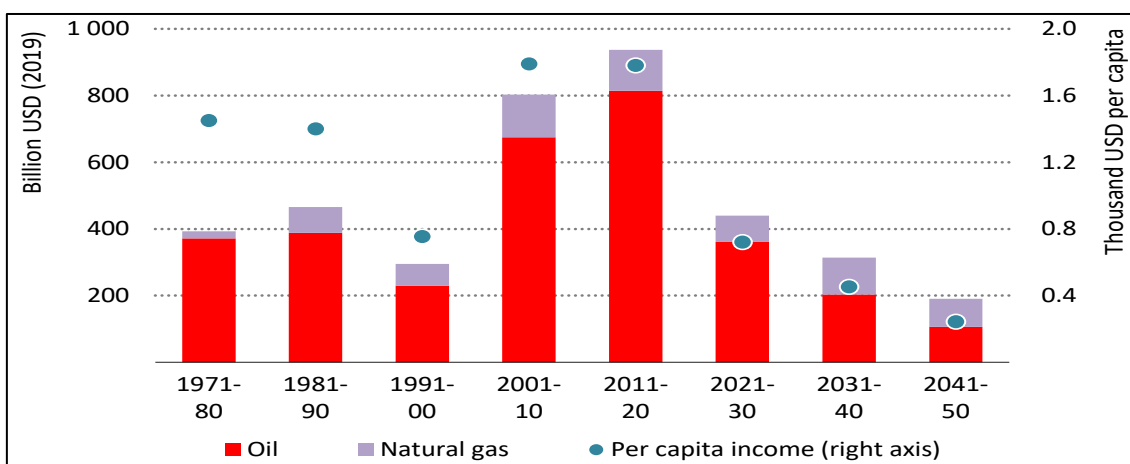
出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](#) (p.156, 図 4.3 を転載)

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

世界全体では上図のようであるが、マクロ経済に与える影響は地域間で大きな差異があり、産油・産ガス国では化石燃料の需要と価格の低下により、収入が激減する（図 2-10）。

図 2-10. NZE シナリオにおける産油・産ガス国における石油・ガス販売収入

(単位：2019 年価格表示 10 億ドル、1,000 ドル/人)



出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](#) (p.157, 図 4.4 を転載)

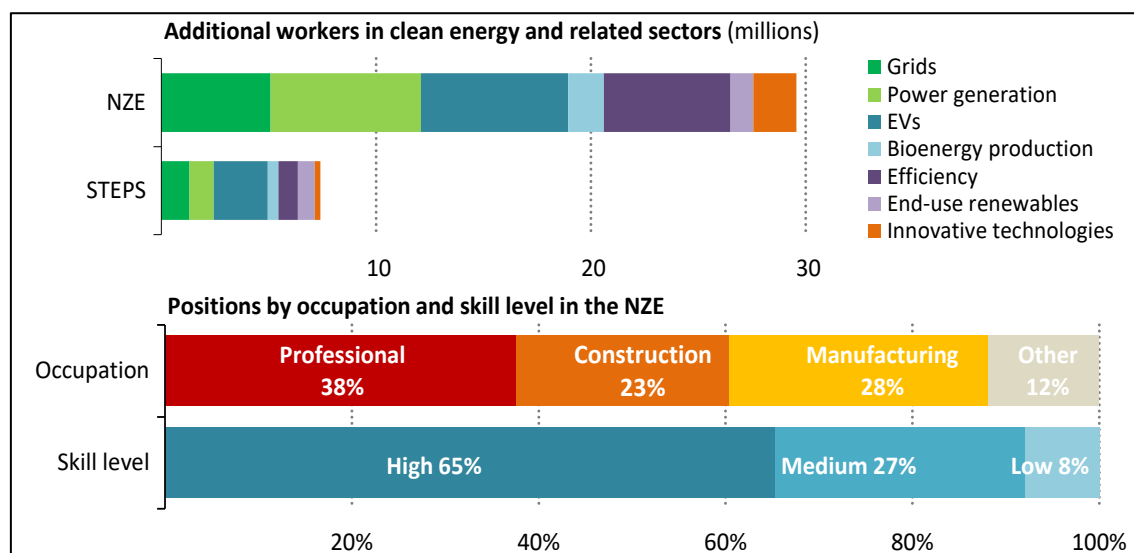
(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

2. 雇用

NZE では 2030 年までに、クリーンエネルギー部門に新たな雇用が 1,400 万人生まれ、化石燃料・発電部門の 500 万人の雇用減少を上回り、エネルギー部門での雇用は 900 万人増加する。また、クリーンエネルギーによる雇用増加に加えて、住宅改修、省エネ家電、EV 製造などによる 1,600 万人の雇用増もあり、2030 年までにクリーンエネルギー部門では約 3,000 万人の新規労働者が必要で、その 3 分の 2 は高度な熟練を要し、大多数は職業訓練を必要とする職である（図 2-11（右））。

図 2-11. NZE と STEPS シナリオにおけるクリーンエネルギーと関連部門における新たな労働者と NZE シナリオにおける 2030 年の能力レベルと職業の構成

（単位：100 万人、％）



出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050)（p.159, 図 4.6 を転載）

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

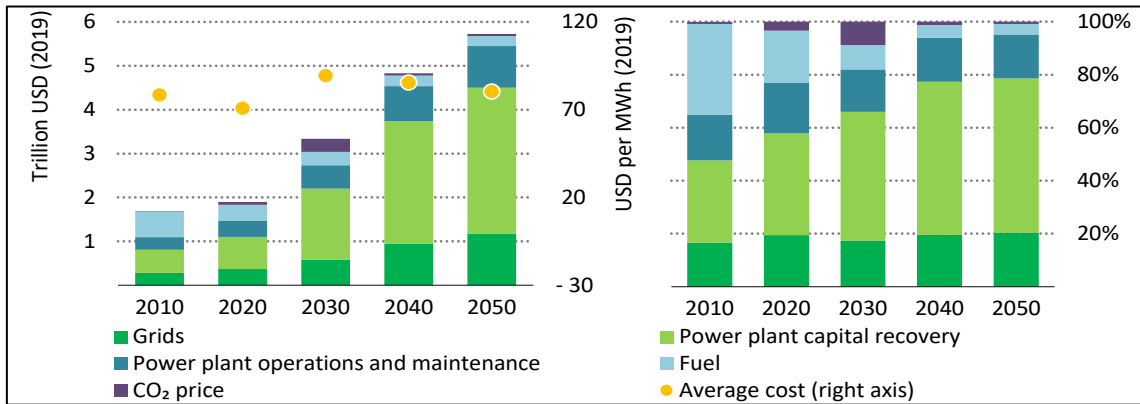
3. 電力コスト

NZE の電力システムコスト（図 2-12（左）、棒グラフ）は 2050 年には現状比で 3 倍となるが、発電電力量も約 3 倍に増加するため、電力量当たりの供給コスト（同、黄色いマーク）の上昇は緩やかである。再エネの大量増加、それに伴う燃料費（同、水色）の減少により、電力産業はより資本（同、黄緑色）集約的になる。

図 2-12. NZE シナリオにおける構成要素別の世界の電力供給コスト

(単位：2019 年価格表示：1 兆ドル)

(単位：2019 年価格表示：ドル/MWh)



出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](#)（図 4.9 を転載）

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

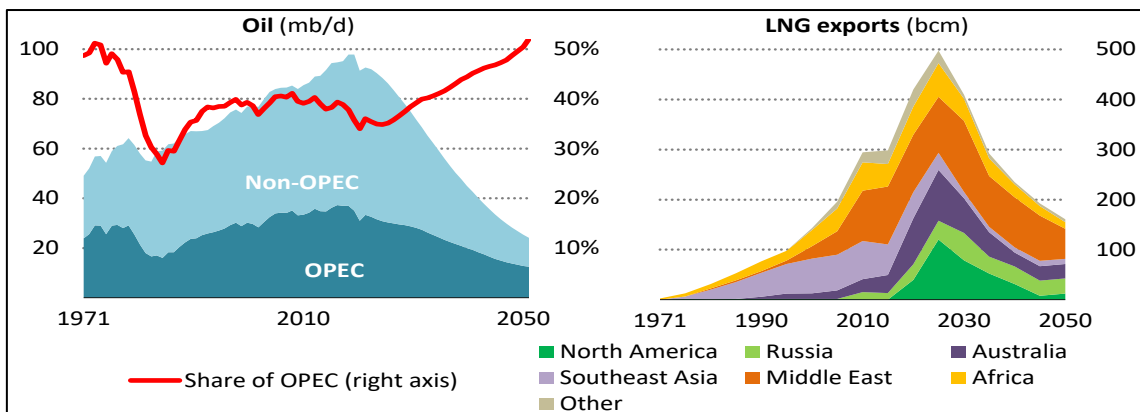
4. エネルギー・セキュリティ

NZE では、石油・ガスの需要が低下していく中で、石油と天然ガスの供給確保の重要性は現在よりも定量的に低下するが、安定的、信頼できる電力システムを維持する点において、さらにクリーン技術への原料供給増に伴うリスクは残る。一方で、石油、天然ガスの供給量は減少するものの、石油においては OPEC と国営石油会社への依存度が増加し、天然ガスにおいても競争力のある供給者に集中する（図 2-13）。石油・ガスによる収入低下に苦しむ国への依存度が高まることから、突然の価格上昇、供給減が、消費国への安定供給にリスクをもたらす可能性が依然としてある。

図 2-13. NZE シナリオにおける地域別の世界の石油輸出と LNG 輸出

(単位：100 万バレル/日)

(単位：100 億 m³)



出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](#)（p.175, 図 4.17 を転載）

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)

第7節 データによる NZE シナリオの分析

同報告書の巻末の Annex には、前提となる人口や GDP などの経済指標、そして NZE (2050 年に世界でネットゼロを達成するシナリオ) の各種エネルギー指標の 2030 年、2040 年、2050 年の展望、電力関係のコスト想定が表形式で示されている。また、報告書の全ての図のデータがエクセルでダウンロード可能であり、1 章の図のデータから (Annex に詳細が示されていない) STEPS と APC の数値も入手できる。これらの数字を分析することで、IEA が強調していない NZE の別の側面を読み取ろうと試みた。

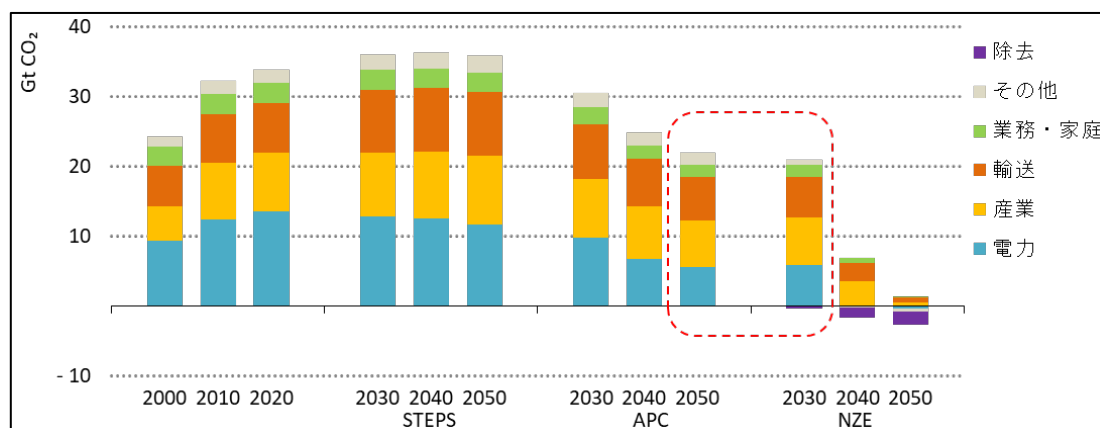
1. NZE の CO₂ 排出と前提条件

ネットゼロ報告書においては、NZE の姿がワンショットで示されることが多く、他のシナリオとの比較は経済効果、雇用などに限られている。そこで、基本的なエネルギー指標について比較を行った (STEPS と APC の数値は 1 章の図のデータを元になっているため、その範囲で可能な比較を行っている)。

STEPS、APC、そして NZE の CO₂ 排出量と部門別内訳を図 2-14 に示す。

図 2-14. シナリオ別 CO₂ 排出量とその部門構成

(単位: Gt CO₂: 10 億トン)



出所: IEA ; NET ZERO by 2050 Scenario (データより筆者作成)

この図から、NZE の 2030 年の排出量とその構成は APC の 2050 年のそれ (図中の点線で囲った 2 つ) はほぼ同じであることがわかる。つまり、NZE では、あと 9 年足らずで APC の 29 年分の変化を遂げなければいけない、ということを意味する。そして、NZE では 2040 年には電力部門 (現状は全体の 4 割を占める) からの排出をゼロにし、他のシナリオでは減

らせない産業、輸送からの排出についても半減させ、2050年にはわずかに残る産業、輸送からの排出を「除去」でオフセットしなければならない。

NZE が前提としている人口、GDP などの経済指標と主な活動については表 2-15 の通りである。

表 2-15. 主な経済指標、産業活動等の前提条件

	指標					平均成長率 (%)	
	2019	2020	2030	2040	2050	2020-2030	2020-2050
人口 (億人)	77	78	85	92	97	0.9	0.7
GDP (2019US兆ドル, 購買力平価)	135	128	184	247	316	3.7	3.1
一人あたりGDP (2019USD, 購買力平価)	17 558	16 545	21 638	26 975	32 648	2.7	2.3
	活動					平均成長率 (%)	
	2019	2020	2030	2040	2050	2020-2030	2020-2050
工業生産							
主要化学品 (Mt)	538	529	641	686	688	1.9	0.9
鉄 (Mt)	1 869	1 781	1 937	1 958	1 987	0.8	0.4
セメント (Mt)	4 215	4 054	4 258	4 129	4 032	0.5	0.0
輸送							
乗用車 (10億人km)	15 300	14 261	15 775	19 159	24 517	1.0	1.8
トラック(10億トンkm)	26 646	25 761	38 072	49 756	59 990	4.0	2.9
航空 (10億人km)	8 160	2 780	10 250	12 060	15 650	14	5.9
船舶 (10億トンkm)	107 225	109 153	155 621	209 905	291 032	3.6	3.3
業務・家庭							
営業床面積 (百万 m ²)	49 670	49 825	58 867	68 576	78 157	1.7	1.5
住宅床面積 (百万 m ²)	190 062	192 558	235 745	290 696	345 183	2.0	2.0
世帯数 (億)	2 095	2 116	2 435	2 765	3 051	1.4	1.2

*航空旅客キロは民間旅客航空を指し、専用貨物および軍事航空の活動を含まない

出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（p.200, 表 A.5 より筆者作成）

一人当たり GDP の数値は 2050 年に現状の約 2 倍に増加し、世界全体が豊かに成長していく姿を前提としている。産業部門では、今後も鉄、化学品の生産量はペースを落としながらも増加していく。輸送部門では、乗用車、トラック、航空、船舶の利用は 2050 年には現状の 2～3 倍に増加し、業務・家庭部門では業務施設も住宅も 2050 年には現状の 1.6～1.8 倍に増加する。

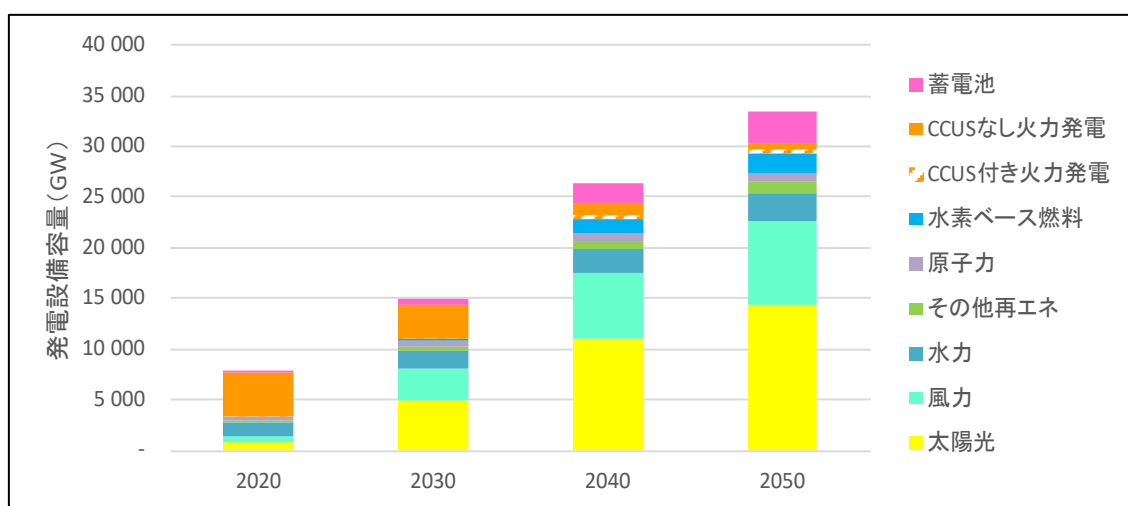
このような豊かに成長を遂げながらネットゼロ排出を実現している NZE とは、どのような世界なのだろうか？

2. NZE シナリオの電力

2050 年 NZE 報告書と言えば「NZE では 2050 年には再生可能エネルギーが電力の 88%」というのが既に 1 つのシンボルになっているので、まずは電力から見ていくことにする。2050 年ネットゼロ報告書の中で電力に関しては、発電電力量についての記載がほとんどで、発電設備容量については NZE の太陽光と風力の記載のみで、その全容は示されていない。そこで、Annex A に基づき、NZE の電源別の発電設備容量を図示すると図 2-15 のようになる。

図 2-15. NZE シナリオの電源別の発電設備容量

(単位 : GW : 10 億ワット)



出所 : IEA ; NET ZERO by 2050 Scenario (データより筆者作成)

NZE では、世界の発電設備容量は現状と比べて、2030 年には 2 倍弱に、2050 年には 4 倍以上になる。現在の世界の発電設備容量合計 (約 7,800GW) と比べて、2050 年における風力はそれを約 10%上回り、太陽光は約 2 倍になる。想像し難い規模感である。蓄電池も同比較で 4 割と、物凄いことになっている。なお、この蓄電池は電力用であり、EV 用には別に膨大なバッテリーが必要である。

NZE を試算したモデルについては、世界エネルギー見通し (WEO) の世界エネルギーモデル (WEM) とエネルギー技術予測モデル (ETP) のハイブリッドということで詳細は不明であるが、電力に関しては WEM で計算していると思われる。通常、長期の電力需給解析を行う場合は、負荷帯ごとの需要と LCOE (規格化発電コスト) を用いて新たに導入される電源を最適化 (コスト最小化で決定) し、その電源構成と需要を所与として変動費を最適

化して電源ごとの発電電力量を決定する。Annex B では、米国、欧州、中国、インドの LCOE が示されているが、以下に米国とインドを抜粋して示す。

表 2-16. NZE シナリオの電源別 規格化発電コスト (LCOE)

	Financing rate (%)	Capital costs (\$/kW)			Capacity factor (%)			Fuel, CO ₂ and O&M (\$/MWh)			LCOE (\$/MWh)		
	All	2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050
United States													
Nuclear	8.0	5 000	4 800	4 500	90	80	75	30	30	30	105	110	110
Coal	8.0	2 100	2 100	2 100	20	n.a.	n.a.	90	170	235	220	n.a.	n.a.
Gas CCGT	8.0	1 000	1 000	1 000	55	25	n.a.	50	80	105	70	125	n.a.
Solar PV	3.7	1 140	620	420	21	22	23	10	10	10	50	30	20
Wind onshore	3.7	1 540	1 420	1 320	42	43	44	10	10	10	35	35	30
Wind offshore	4.5	4 040	2 080	1 480	42	46	48	35	20	15	115	60	40
India													
Nuclear	7.0	2 800	2 800	2 800	70	70	70	30	30	30	75	75	75
Coal	7.0	1 200	1 200	1 200	50	n.a.	n.a.	35	50	75	65	n.a.	n.a.
Gas CCGT	7.0	700	700	700	55	50	n.a.	45	45	50	55	60	n.a.
Solar PV	5.8	580	310	220	20	21	21	5	5	5	35	20	15
Wind onshore	5.8	1 040	980	940	26	28	29	10	10	10	50	45	40
Wind offshore	6.6	2 980	1 680	1 180	32	37	38	25	15	10	130	70	45

出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（p.201, 表 B.1 より筆者作成）

米国、インド共に 2050 年の太陽光は現状の半分以上にコスト低下すると想定されていることを示している。洋上風力については、1/3 に低下すると想定されている。これだけコスト低下すれば、最適化計算で大量に導入されるのは無理もない。ただし、膨大な太陽光、風力の導入に伴う適地の減少、原材料（特に報告書でも触れている「重要な鉱物」）の需要急増などはコストを上昇させる影響があり、それらを考慮した上で、このような大幅なコスト低下が起こると想定しているのかどうかは不明であることから、その点は疑問が残る。

また、図 2-16 からは、米国でもインドでも石炭火力の LCOE が 2030 年以降 n.a.（該当なし）となっている点にも注意を要する。LCOE の数字がなければ、新規の電源は計算不能であり、つまり経済性とは関係なく強制的にゼロとしている、ということを意味する。そもそも、これら LCOE が該当なしとなっているのは、利用率（capacity factor）が n.a.であることに起因すると考えられる。2035 年には電力をネットゼロにすると宣言している米国は

ともかく、現状の電力に占める石炭依存度 70%のインドにおいて 2030 年の利用率を「該当なし」とすることはどういうことなのか、理由は不明である。

また、Annex B には、EV 用の蓄電池と水素製造の電解装置のコスト想定も示されており、表 2-17 に示す通りである。これによれば、2050 年の蓄電池のコストは現状の約 1/2 から約 1/3 に、同年の電解装置のコストは現状の約 1/2 から 1/6 であり、極めて大きなコスト低下が想定されている。需要の急増に伴う原材料価格の高騰などの可能性を考慮した上で、このような大幅なコスト低下が想定されているかどうかは不明である。一方で、最下段の CCUS 付きのガス火力の資本コストは、2050 年に現状比で 20%程度の低下であり、蓄電池や電解装置のような大幅なコスト低下は見込まれていない。

表 2-17. NZE シナリオにおける蓄電池、水素製造技術の資本コスト

	2020	2030	2050
Battery packs for transport applications (USD/kWh)	130 - 155	75 - 90	55 - 80
Low-temperature electrolyzers (USD/kW _e)	835 - 1 300	255 - 515	200 - 390
Natural gas with CCUS (USD/kW H ₂)	1 155 - 2 010	990 - 1 725	935 - 1 625

出所：IEA；[NET ZERO by 2050 Scenario](https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050)（p.202, 表 B.2 を転載）
<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

Annex A に記載された発電設備容量と発電電力量から電源毎の利用率を計算してみると表 2-18 のようになる。NZE では、太陽光、風力の利用率が共に 2020 年から 2050 年にかけて約 5 割と大きく増加しており、これは、変動性再エネである太陽光・風力は導入量の増加に従って（需要を供給が上回ることが増えて）出力抑制が増加して利用率が減少する、という実態とは逆である。

表 2-18. NZE シナリオの電源別設備利用率

	2020	2030	2040	2050
太陽光	13%	16%	18%	19%
風力	25%	29%	33%	34%
CCUS 付き火力発電	46%	65%	61%	39%
CCUS なし火力発電	43%	32%	6%	4%

出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（p.198, 表 A.3 より筆者作成）

その理由を考えると、需要を上回ったときは、変動性再エネの発電電力を①貯蔵、②利用していると推測される。蓄電池の 2050 年の導入量は約 3,100GW（現状の 170 倍）であ

り巨大な貯蔵容量があり、水素製造用の水電解装置の 2050 年導入量は約 3,600GW となっていて、利用可能な電力量も膨大である。電解装置のコストは表 2-17 において、2050 年には現状の 1/2～1/6 にコスト低下すると想定されている。電力用蓄電池のコスト想定は記載されていないが、表 2-17 に EV 用バッテリーは 2050 年に現状の 3/5～1/3 にコスト低下すると想定されており、同等のコスト低下を想定している可能性がある

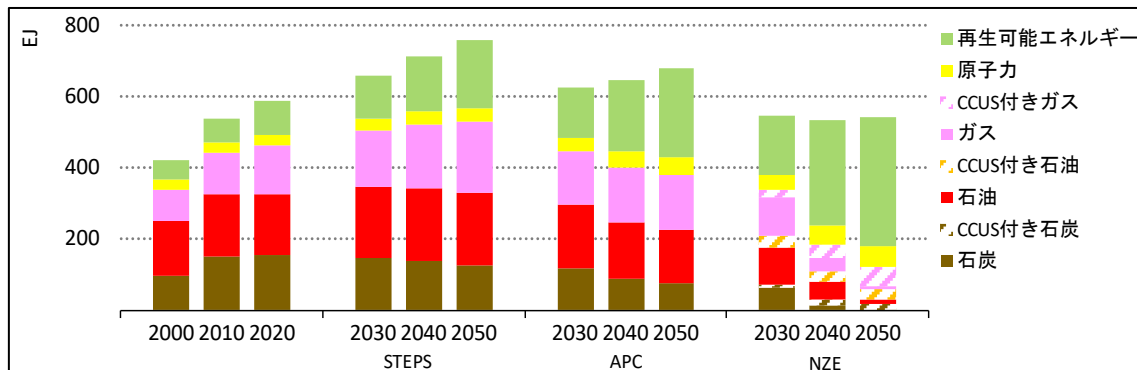
水素を水電解で作る電気は、大幅コスト低下した太陽光、風力および、「余った」太陽光や風力の電気（＝無料）を利用するので非常に安価であり、また初期コストである電解装置もコスト低下するという想定であり、即ち、全ての想定が揃わない限り実現しないということの意味する。

3. 一次エネルギーと最終エネルギー消費のシナリオ間比較

次に、一次エネルギー需要と最終エネルギー消費についてシナリオ間で比較して見ていく。

図 2-16. シナリオ別一次エネルギー需要とそのエネルギー種別構成

(単位：EJ：エクサジュール)



出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（データより筆者作成）

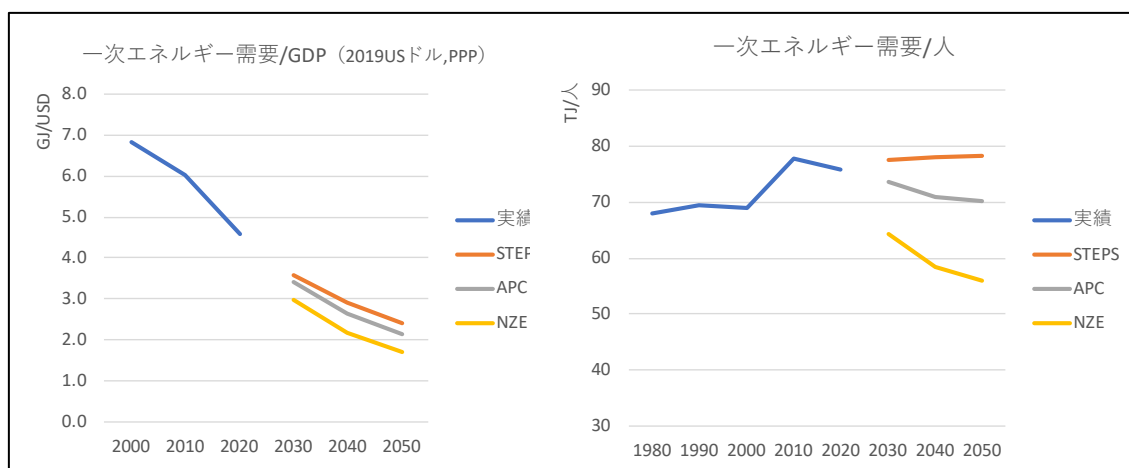
STEPS と比較して NZE では、2030 年のエネルギー需要は約 8 割に、2050 年には約 7 割に減少していることがわかる。その構成も、STEPS では減らない化石燃料が NZE では急激に減少すること、STEPS では一定割合で増加する再生可能エネルギーが NZE では急激に増加すること、などが対照的に示されている。しかし、前述の通り人口も経済も成長していく前提でありながら、これほどエネルギー需要が減るのは何故だろう、という疑問が生じる。

このような人口と GDP の前提における、一次エネルギー需要との関係をシナリオ別に示

すと図 2-17 のようになる（IEA データベースの人口データを用いて、右表は 1980 年から表示している）。

図 2-17. シナリオ別 世界の GDP あたり一次エネルギーと一人あたりの一次エネルギー需要

（単位：GJ: ギガジュール／2019 年価格表示ドル） （単位：1,000 ジュール／人）



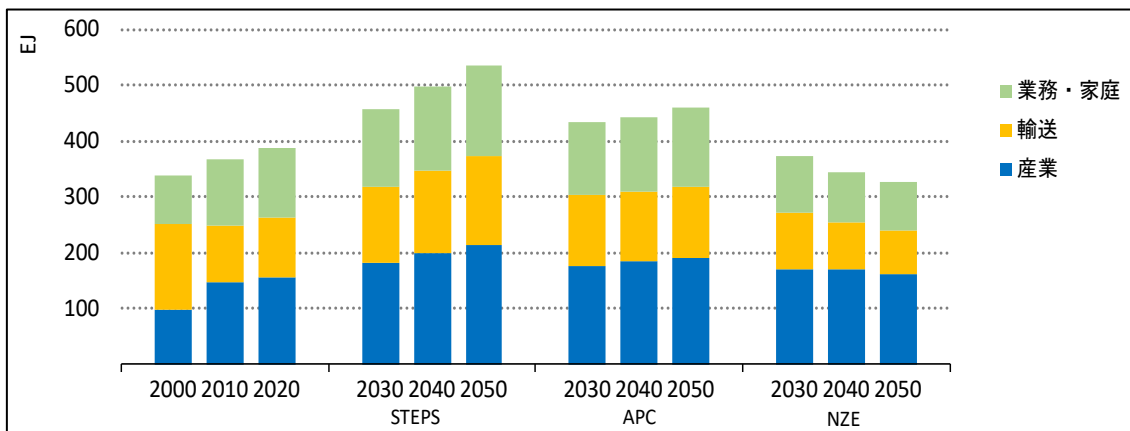
出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario （データより筆者作成）

GDP 当たりのエネルギー需要も、一人当たりのエネルギー需要も、STEPS と APC ではこれまでの実績から連続的に変化しているのに対して、NZE では 2030 年にかけての変化量が大きく不連続である。NZE では、GDP あたりのエネルギー需要は 2030 年までに 35%、一人当たりのエネルギー需要は 15%低下させなければならない。あと 9 年間でこれだけ大幅なエネルギー需要の減少を、どのような手段で実現するのだろうか。

エネルギー需要を減少させるのは、省エネ効果による最終エネルギー消費の減少、エネルギー転換損失の低下、の 2 つである。そこで次に、シナリオ間の最終エネルギー消費を比較してみる。図 2-18 に、STEPS、APC、NZE の部門別の最終エネルギー消費の展望を示す。

図 2-18. シナリオ別の最終エネルギー消費とその分野別内訳

(単位：EJ:エクサジュール)



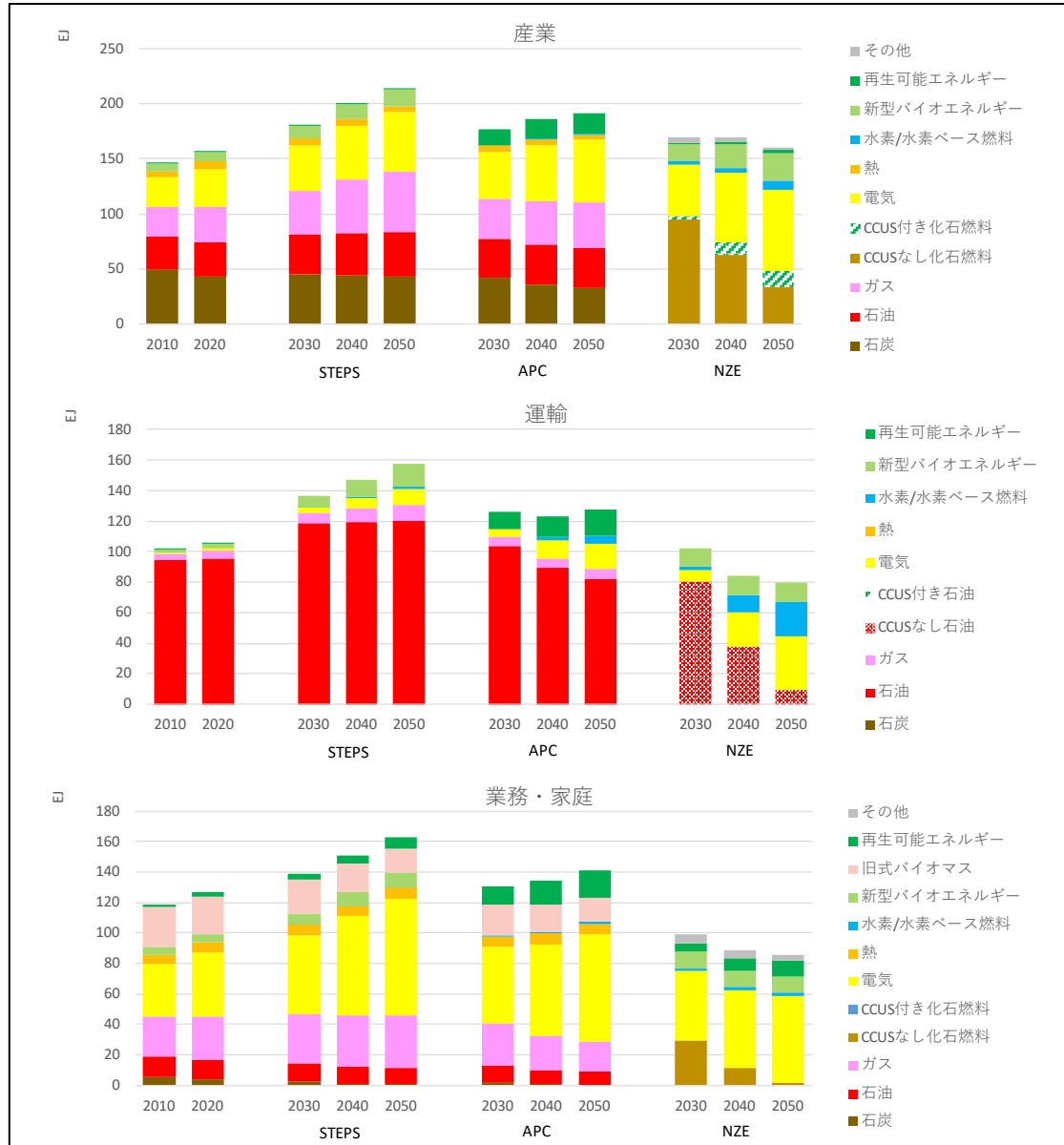
出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（データより筆者作成）

この図からは、STEPS と APC では最終エネルギー消費が将来に向かって増加していくのに対して、NZE では将来に向かって減少していくこと、特に 2020 年から 2030 年までの減少量が他のシナリオとの比較では非常に大きい、ということが見て取れる。STEPS と比較して NZE の最終エネルギー消費は 2030 年には 20%低く、これは一次エネルギー需要と同様であり、消費が減ったことが需要を減らしていることがわかる。一方で、STEPS と比較して NZE の最終エネルギー消費は 2050 年には 40%低く、これは一次エネルギー需要が同比較で 30%低いのに比べて更に 10%低い。即ち、エネルギー転換損失が大きくなっていると考えられ、これは大量に利用されると想定されている二次エネルギー水素の製造に伴うものだと想定される。

図 2-18 から、NZE では産業、運輸、業務・家庭の全ての部門でエネルギー消費が減っていることがわかるが、そのエネルギー源の構成がわかるようにして示したのが図 2-19 である。

図 2-19. 部門別のエネルギー源別 最終エネルギー消費
(上：産業、中：運輸、下：業務・家庭)

(単位：EJ：エクサジュール)



出所：IEA；NET ZERO by 2050 Scenario（データより筆者作成）

産業部門では、電気とバイオエネルギーが増加して化石燃料の一部を置き換えるが、それでも化石燃料の消費が残る。他のシナリオに比較して NZE ではエネルギー消費は低下しているが、運輸、業務・家庭ほど大きくは低下しない。

運輸部門では、NZE では全体の消費量が大きく低下し、中でもこれまでほぼ全量を占めていた石油の割合が大きく低下する。ネットゼロ報告書の附表 A.5「経済及び活動の指標」

では、運輸部門の道路、航空、船舶全ての活動量が大きく増加していく想定にも関わらず、これだけのエネルギー消費量低下を実現できるのは、大きな燃費向上が想定されているからではないかと考えられる。

業務・家庭部門では、2020 年実績から NZE2030 年のエネルギー消費の低下量が大きいのが際立っている。NZE では、SDGs の目標 4 の達成、即ち、2030 年までに世界中の全ての人々が電力とクリーン調理器具にアクセスできると想定しているにもかかわらず、同時期にこの部門のエネルギー消費量が大幅に低下するのは、省エネルギーを大きく見込んでいたためだと考えられる。

4. ネットゼロ報告書の課題

ネットゼロ報告書には、本文中にはないのに、表や図のインプリケーションに記載されている文言が見受けられる。象徴的なのは、政策決定者向け要約において NZE 全体のロードマップを示している” Key milestones in the pathway to net zero” という図である。ここに 2021 年目標として「削減対策なしの新規の石炭火力の開発中止」と書かれているが、本文中にはそのような記述はない。そして、その後の G7 サミット共同声明にこの目標が反映された。最初から G7 共同声明に記載する根拠とするために、この本文にはないマイルストーンをロードマップに書き込んでいたのではないかと疑念も生じる。

分析途中での前提条件の変更や、レビューによる修正が反映されていない、ということかもしれない。それらの矛盾点を論うことに意味はないが、この報告書によって NZE が「世界で唯一達成されなければならない道」のように金科玉条的に扱われるのであれば、話は別である。

そもそも、2050 年ネットゼロ報告書のローンチイベントで、IEA 事務局長は「これは 2050 年ネットゼロに向かう a pathway（一つの道筋）であり、the pathway（唯一の道筋）ではない」と言った。もしそうであるならば、NZE というシナリオを一つだけ示したことは、誤解を招くのではないか。既に多くの NGO（非政府組織）が NZE を根拠として「新規の石油・ガス開発は不要だと IEA が示した」、「2050 年の電力は再エネ 90%と IEA が示している」などと主張している。IEA は同報告書で NZE という 1 つのシナリオだけでなく、複数の道筋を pathways to Net Zero by 2050 として示すべきではなかったのか。

この 2050 年ネットゼロ報告書は、COP26 議長（英国）の要請を受けて作成されたものであり、その目的は COP26 で NZE を目指すべき道として示すことだと考えるのが自然で

ある。しかし、今回示された **a pathway**、即ち **NZE** は世界全体の合計値であり、経済にも雇用にもプラスだと言っているが、当然地域によって影響は異なる。勝ち組もあれば、負け組もあるはずであるが、それらが示されないまま「世界全体でこの道を目指そう」と言ったところで、痛みを伴う可能性が高い国や地域、特にコロナで経済が痛んでいる発展途上国や産油国の支持が得られるのだろうか？

NZE については、その後発刊された **WEO2021**、**WEO2022** でもメインシナリオとして取り上げられている。しかし、**STEPS**、**APS** といった他のシナリオは世界合計値に加えて、主要な地域・国別のエネルギー指標を示しているのに対して、**NZE** では依然として世界合計値しか示していない。これでは、各国にネットゼロを目指せと言いながら、**NZE** は世界合計値しかないということでは全く参考にならない。**NZE** を真に **2050** 年カーボンニュートラル実現に役立つシナリオとするためには、他のシナリオと同様に主要な国別・地域別のエネルギー指標を示すべきである。

今後は、世界各地の研究所がそれぞれの国、地域の特性を考慮したネットゼロシナリオを各種示すことにより、それら「様々な道筋」について、経済性や安全保障面からのサステナビリティ、その他の課題について幅広く議論できるようになれば、ネットゼロシナリオの実現性も高まるのではないか。

第3章 モビリティのカーボンニュートラルから考える 日本の産業戦略

技術経営コンサルタント

亀井 淳史

はじめに

2022年10月27日 EU 閣僚理事会と欧州議会は、乗用車・小型商用車の2035年全新車のゼロエミッション化を決定した^(注1)。既にそれ以前の2020年には英国や米カリフォルニア州がICE（ガソリンエンジンなど内燃機関）による乗用車を2035年までに販売禁止するとの動きがあり、2021年の国連気候変動枠組条約第26回締約国会合（COP26）では「世界のすべての新車販売について、主要市場で2035年までに、世界全体では2040年までに、EV（電気自動車）等、二酸化炭素を排出しないゼロエミッション車とすることを目指す」との共同声明がなされ^(注2)、「世界はEV化へ大きく舵を切った」との受け止めが広がった。

一方、日本の自動車業界は「敵は炭素。内燃機関ではない」、「カーボンニュートラルという山の登り方は一つではない」、「技術力を活かすには、規制で選択肢をせばめるべきではない」（日本自動車工業会^(注3)）とし、政府も「多様な選択肢を追求し^(注4)」、「乗用車については、2035年までに、新車販売で電動車^(注5)100%を実現するとしている。以下、参考までに、「電動車」、「EV」等の分類を示す（表3-1）。

表3-1. “電動車”、“EV”等の分類

自動車	電動車	EV（電気自動車）	ZEV	EV cars
		FCV（燃料電池自動車）		
		PHV（プラグインハイブリッド自動車）		
		HV（ハイブリッド自動車）		
	ICE（内燃機自動車）			

注1. 経済産業省は、“電動車”（黄色部分）をEV+FCV+PHV+HVと定義している^(注6)

注2. 欧州委員会は、ZEV（ゼロエミッション車）をEV+FCV（橙色部分）と定義し、2035年目標として“ZEV”100%を掲げている^(注7)

注3. IEAは、“EV cars”をEV+FCV+PHVと定義している。（緑色部分）^(注8)

注4. 厳密に電池のみで走行する車を“BEV（バッテリーEV）”と表記する場合がある

出所：各種資料から筆者作成

しかし、欧米を中心に海外メーカーによる EV 販売台数が急増していることから、「日系メーカーは EV 市場に出遅れているのでは」との報道^(注 9)や、一部には「日本のカーメーカーは HV にしがみついている」との厳しい指摘まで出ている。これらは日本の基幹産業である自動車在今后成長機会を逸するのではとの危惧がその背景にあるものと思われる。

そこで本稿では、このモビリティ（移動手段）のカーボンニュートラル（実質排出ゼロ）の動きから今後のエネルギー選択や更に日本の産業戦略を俯瞰的に考えてみたい。

第 1 節 輸送部門の脱炭素の状況

2022 年国内の新車販売は世界的な半導体不足による生産停止等で 6%の減少となる中、電動車は 5%を超える拡大をし、乗用車新車販売の 45%と半数に迫る状況である。

中でも EV は前年比 2.7 倍の 5 万 8,813 台に拡大しているが、これは軽自動車の EV が発売され大きく販売を増やしたことによる。これまで EV は高級車が多かったが軽自動車という手ごろな EV の出現で購入層が一気に広がった。軽自動車は近年その販売シェアを拡大しており、今後軽 EV の車種拡大により EV の販売台数は伸びていくものと考えられ、日本の電動車、EV 市場も変わり始めている（表 3-2）。

表 3-2. 国内の EV 新車販売実績

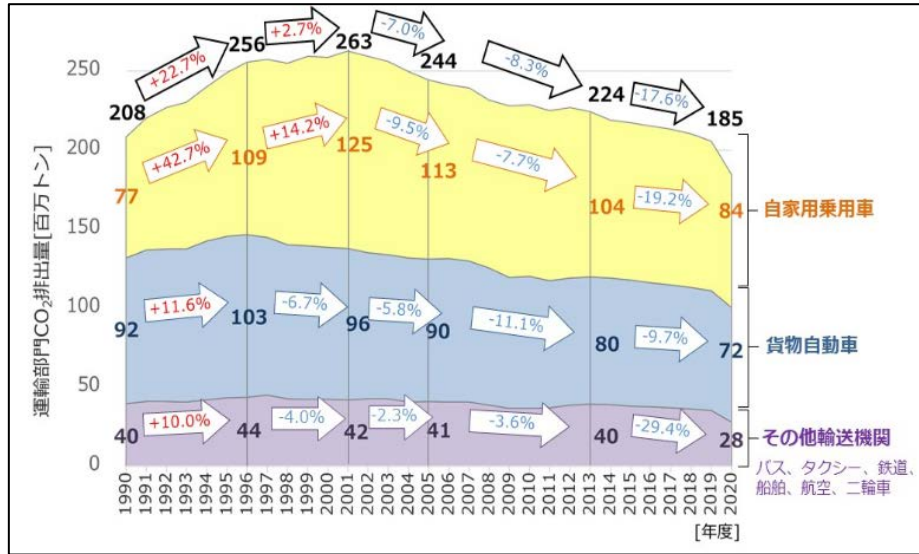
	2021 年(1～12 月)					2022 年(1～12 月)				
	全販売台数 (台)	EV		電動車合計*		全販売台数 (台)	EV		電動車合計	
		(台)	比率(%)	(台)	比率(%)		(台)	比率(%)	(台)	比率(%)
小型・普通車	2,399,862	21,139	0.88	1,488,421	40.49	2,223,303	31,592	1.42	1,565,116	45.39
軽自動車	1,275,836	554	0.04			1,224,995	27,221	2.22		
乗用車全体	3,675,698	21,693	0.59			3,448,298	58,813	1.71		

注. 電動車はEV、HV、PHV、FCVの合計

出所：（一社）日本自動車会議所、（一社）全国軽自動車協会連合会より著者作成）

現時点での EV 販売を見ると EU の 9.1%^(注 10)、全米 2.9%^(注 11)（いずれも 2021 年実績）からは確かに見劣りするが、輸送部門の CO₂ 排出量は着実に減少している（図 3-1）。

図 3-1. 運輸部門における二酸化炭素排出量



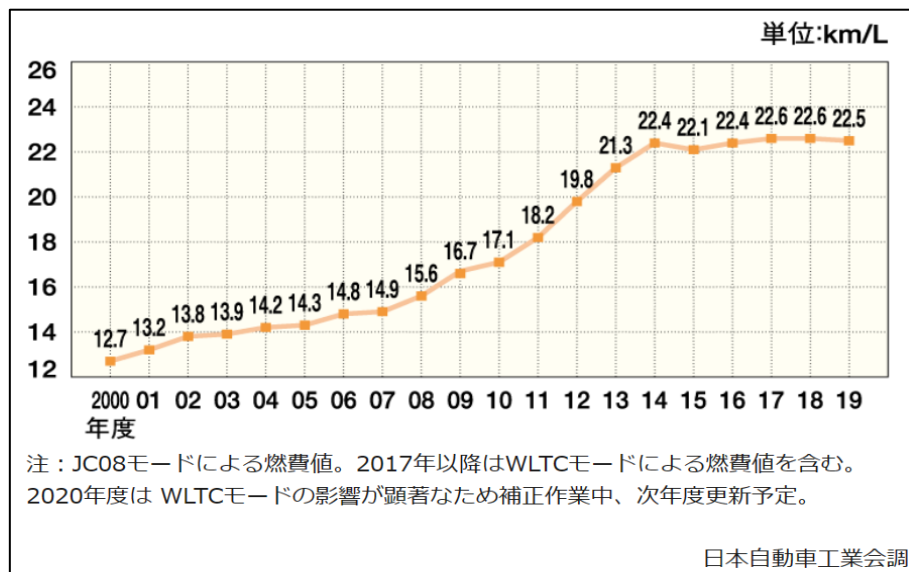
出所：国土交通省；[運輸部門における二酸化炭素排出量](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html)

(https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html)

これは主に

- ① 自動車走行燃費の向上（HV 等電動車の増加、軽自動車の比率増加他による）（図 3-2、図 3-3）
- ② 平均走行距離の減少（主に高齢化、若年層の減少と車離れ、ライフスタイルの変化による）（図 3-4）

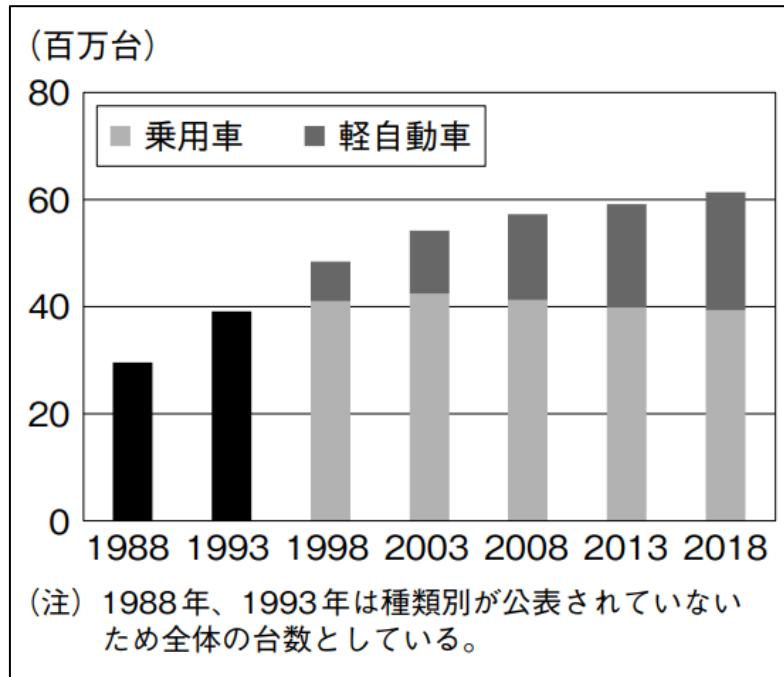
図 3-2. ガソリン自動車の平均燃費



出所：日本自動車工業会；[CO₂ 排出量削減に向けた自動車の燃費向上への取り組み](https://www.jama.or.jp/operation/ecology/fuel_efficiency/index.html)
[自動車燃費 | JAMA - 一般社団法人日本自動車工業会](https://www.jama.or.jp/operation/ecology/fuel_efficiency/index.html)

(https://www.jama.or.jp/operation/ecology/fuel_efficiency/index.html)

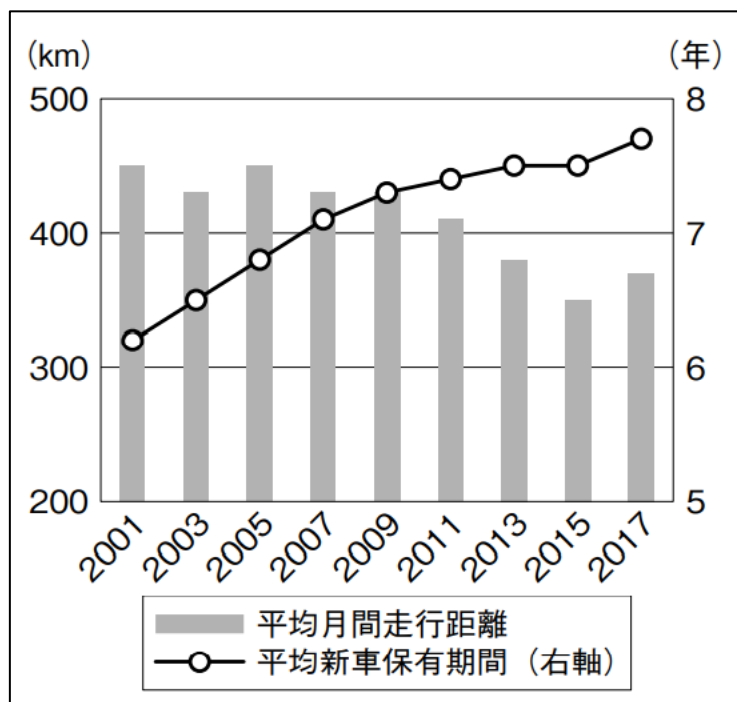
図 3-3. 乗用車の保有台数の推移



出所：財務省；[広報誌「ファイナンス」\(p.48、図表 3 を転載\)](#)

(https://www.mof.go.jp/public_relations/finance/201908/201908k.pdf)

図 3-4. 月間走行距離と保有期間



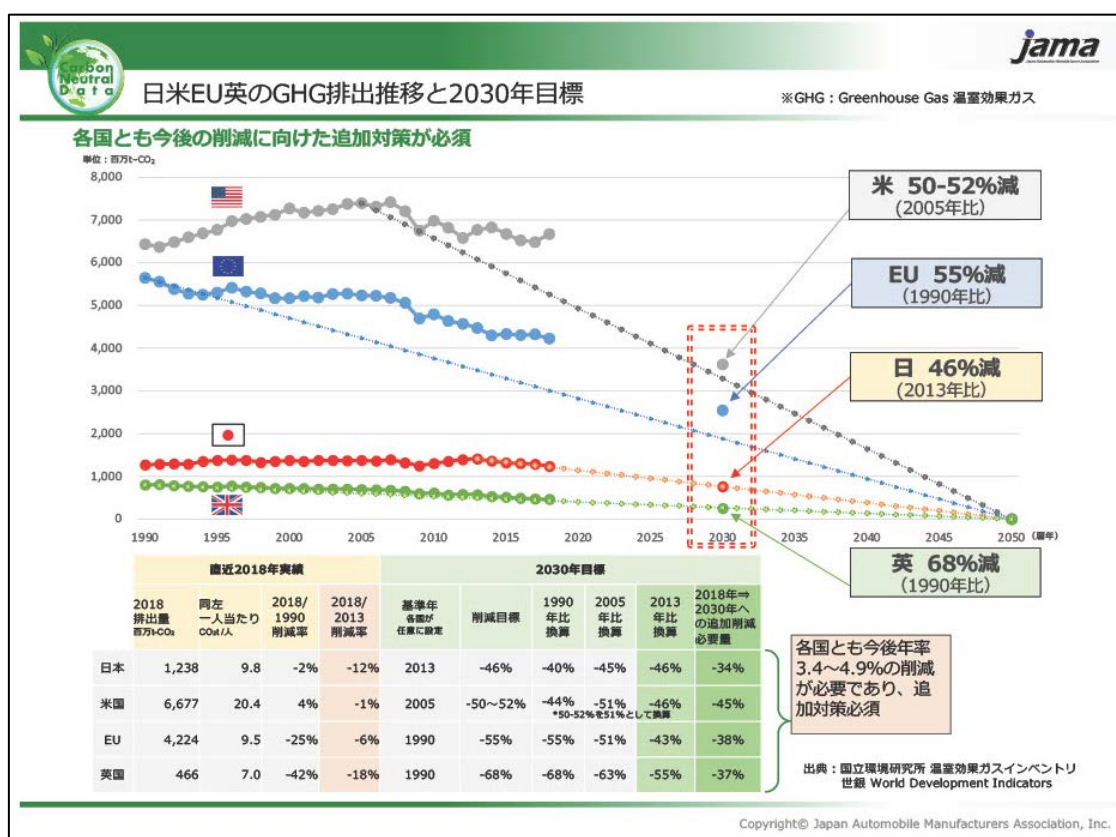
出所：財務省；[広報誌「ファイナンス」\(p.48、図表 6 を転載\)](#)

(https://www.mof.go.jp/public_relations/finance/201908/201908k.pdf)

に起因すると考えられ、このような傾向は当面続くことが見込まれるため運輸部門の CO₂ 排出量の減少傾向は続くと考えられる。

全部門の CO₂ 排出量も減少傾向にあり（図 3-5）結果として計画線上の削減を実現しており、国全体としても「脱炭素に後ろ向き」との指摘はあたらない。

図 3-5. 日米EU 英の GHG 排出推移と 2030 年目標



出所：日本自動車工業会；[カーボンニュートラルデータ集 \(jama.or.jp\)](https://www.jama.or.jp/operation/ecology/carbon_neutral_data/pdf/CNData_11.pdf#page=1)

(https://www.jama.or.jp/operation/ecology/carbon_neutral_data/pdf/CNData_11.pdf#page=1)

第2節 EV化、FCV化の経緯

ここで改めて EV と FCV への変遷を振り返ってみたい。

まず、世界に先駆け自動車の電動化開発を進め、いち早く量産化を実現したのは日本である。

1997 年に発売されたトヨタ初代プリウス^(注 12) はハイブリッド車であるが、ハイブリッド化のためにブレーキやステアリングなど旧来油圧や負圧で機械的に制御されていた機能

部品を全て電動化している。これはドライブバイワイヤーと言われ、電動化を実現させるための必須の基盤技術だ。このプリウスでハイブリッド車の量産が実現されたことにより、将来電池がリーズナブルなコストで実現できさえすればいつでもエンジンを電池に載せ替えEVにすることができる自動車技術上画期的なマイルストーンとなった。

このように日本のカーメーカーが電動化開発に注力した背景は、究極的にクリーンな車はEVになるとの思いからだ。80年代～90年代にかけて米マスキー法に始まる環境規制（排ガス規制）は年を追う毎に厳しくなっていたが、これは自動車の急激な台数増加とそれに伴う環境問題が世界各国で深刻になってきたためである。

エンジン開発者たちはどんどん厳しくなる排ガス規制に対応しつつ、究極的に全く排気ガスを出さない車の開発を目指していた。その最終的な解決手段はEVであるが当時はまだ鉛バッテリーしかなく、重く走らないだけでなく充電時間も長いというおよそ自動車として使える代物ではなかったため、商品化するにはまずエンジンの動力を使いながら電池とモーターでエンジンの苦手な発進、低速域を補うハイブリッド車が現実的と考えられた。このハイブリッド化の効果は大きく、スムーズな加速と減速時のブレーキからのエネルギー回収で大きく走行燃費を伸ばしそれだけ排ガスも少なくなり、運動性能の優れた環境適応車として高い車両価格にもかかわらず米国カリフォルニアを中心にリベラルな若者たちに人気となった。これはメーカーにとっても将来EV化しても受け入れてもらえるという手応えにもなった^(注13)。

しかし、まだもう一つの課題が残っている。脱石油だ。日本は2度のオイルショックを経験し、いつか訪れる次のオイルショックにどう備えるかはカーメーカーの存続に係わる経営課題でもあった。天然ガス、アルコール、GTL、ガソリンの次の燃料は何か模索が続いた。そこで絞られてきた答えが水素だ。日本では90年代国家プロジェクトとして脱石油を目指したサンシャイン計画がニューサンシャイン計画に移行しWE-NETプロジェクト^(注14)につながった。国際的水素利用のネットワークが広がる期待も大きかった。

水素は国内でもある程度の調達が可能で、政治的にも比較的安定な地域間でやり取りができ、長期に安定したエネルギーになる可能性は大きい。何より燃料電池を使えば利用時の環境負荷はほぼないと言える。燃料充填型の車ならFCVは究極の車になるはずだ。そのための長寿命で信頼性のある燃料電池とぶつかっても安心な水素貯蔵タンクの開発が進められ、2014年になって量産型のFCVであるトヨタMIRAI^(注15)がリリースされるに至った。

この時点で、ポスト石油時代のモビリティとして3つの選択肢が揃ったことになる。

- ✓ 1 つはオール電動化社会の EV
- ✓ 2 つは水素エネルギー社会の FCV
- ✓ 3 つは合成燃料、バイオ燃料など第 3 の燃料による ICE 車（含む HV、PHV）である。

FCV の発売は水素時代の到来を感じさせ雑誌等でも「EV か FCV か」など話題となったが、政策としては何を指すのか確たる方向付けには至らなかった。

第 3 節 「ガソリンエンジン車販売禁止」への自工会の対応

日本のカーメーカーは脱石油、脱炭素に向け 3 つの選択肢を示すことができるようになった。これは「もっとクリーンな車を」、「もっと省エネな車を」、「もっと安全な車を」、という多様な社会的ニーズに応えてきた結果であり、また「その時々的情勢や様々な地域でも使うことができる車を提供する」というメーカーの責任からでもある。

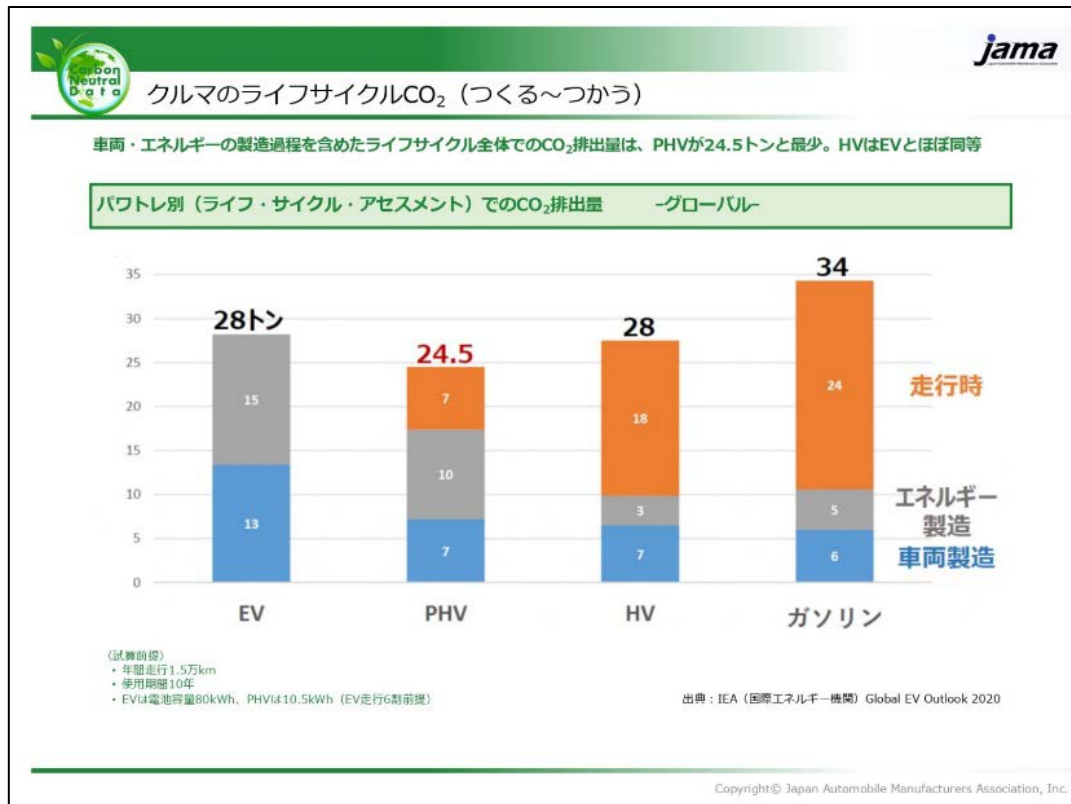
ところが、2017 年ぐらいから一部の国や地域で EV 化のため ICE 車の販売を規制する議論が出始め、「COP26 で新車販売のゼロエミッション化に関する共同声明を発表」（JETRO ビジネス短信 2021 年 11 月 12 日^{（注 16）}）や「EU、ガソリン車の新車販売禁止 35 年までに」（日本経済新聞 2022 年 10 月 28 日^{（注 17）}）との決定が相次ぐようになった。

このような特定車種の販売禁止策はそもそも選択の余地を無くすもので、日本のカーメーカーの戦略的な見直しが迫られるのみならず脱炭素を進める上でも大きな混乱が懸念される事態となっている。

更にこの時期、コロナ景気対策による購入支援策もあり世界各国で EV の販売台数が急増し、EU では 22 年 1 月～9 月期には新車販売の内 EV が 10.6%、PHV は 8.6%を占めるまでになった^{（注 17）}。このため一部のマスコミ報道でも「世の中は EV に方向転換しているのに日本（のカーメーカー）はハイブリッドにしがみついている」というコメントまで出るようになった。

日本自動車工業会はこういった動きに対し以前よりライフサイクル全体での CO₂ 排出量を議論すべきで、「車両・エネルギーの製造過程を含めたライフサイクル全体での CO₂ 排出量は、PHV が 24.5 トンと最少。HV は EV とほぼ同等」と主張していた（図 3-6）^{（注 18）}。

図 3-6. クルマのライフサイクル CO₂



出所：日本自動車工業会；[カーボンニュートラル データ集 \(jama.or.jp\)](https://www.jama.or.jp/operation/ecology/carbon_neutral_data/pdf/CNData_10.pdf)
 (https://www.jama.or.jp/operation/ecology/carbon_neutral_data/pdf/CNData_10.pdf)

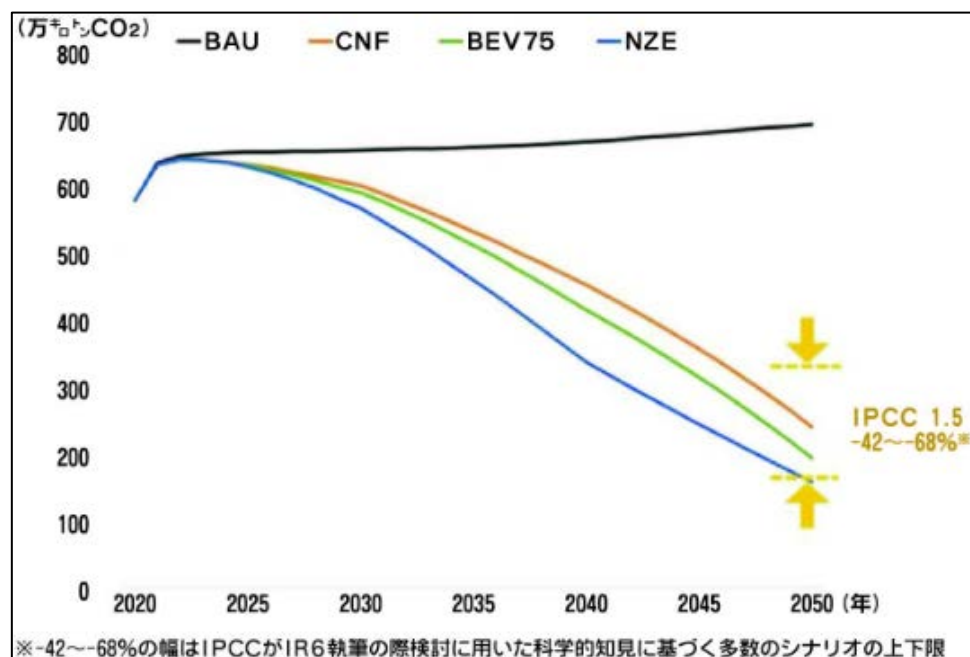
また 2022 年 11 月には「2050 年のカーボンニュートラルに向けたシナリオの分析結果」を発表している。

この分析では、

- ✓ シナリオ 1 「CNF：カーボンニュートラル燃料を積極活用する」
- ✓ シナリオ 2 「BEV75：電動化を積極推進する」
- ✓ シナリオ 3 「IEA-NZE：国際エネルギー機関 (IEA) のシナリオをベースとした世界全体の新车販売が完全に EV・FCV 化する」

の 3 つのシナリオを世界 9 つの地域毎にその CO₂ 削減目標達成の可能性を分析し、いずれのシナリオも気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 「第 6 次評価報告書」による「CO₂ 排出量を 20 年比で 42～68%削減する」という目標を達成する可能性があることを示した (図 3-7) (注 19)。

図 3-7. 世界のシナリオ別 CO₂ 排出削減推計



出所：日本自動車工業会；[2050 年カーボンニュートラルのシナリオを分析。脱炭素の手段が一つではないことを裏付ける結果に - JAMA BLOG 一般社団法人日本自動車工業会](https://blog.jama.or.jp/?p=2987)
(<https://blog.jama.or.jp/?p=2987>)

この結果を受け国際自動車工業連合会（OICA）は「EV だけではなく HV やカーボンニュートラル燃料を含めた「多様な選択肢」でも二酸化炭素（CO₂）排出量の削減目標を達成し得ることが確認できた」とし、COP27 にてグローバル脱炭素フレームワーク「Carbon Neutrality by 2050」としてリリースした^{（注 20）}。

これは自動車に限れば極めて的を射た分析であり、正確な理解と判断を促す冷静な対応である。確かに BEV、HV、PHV、FCV はその構造も定義も複雑でその違いが万人に理解されているとは考えられず、「エンジンを積んでガソリンを入れて走っていて何が電動車だ。HV は欺瞞だ。」と単純化された誤認識のまま議論が進められている恐れも十分考えられる。

ただし、一部の反 ICE 車、HV 論の人たちが「脱炭素の目標はモビリティだけでなくエネルギー全てを再生可能にすることで、車をいち早く EV にすることが電力の完全再生可能エネルギー化につながる」と考えているとすれば、モビリティのカーボンニュートラルへの選択肢は議論に値しないことになる。

ここに来てこういった極端な動きや意見に対しカーボンニュートラル燃料など ICE の残余地を残すような議論も出始めており、早晚規制の見直しやガイドラインの修正につな

がることを期待したいが、すべて EV 化することでカーボンニュートラルを実現していくというのも選択肢の一つであり、それ自体否定されるべきものではない。むしろ日本側がその対案となるようなサステナブルな社会の姿とその達成方法を示せないことの方が重大であろう。

第4節 エネルギー選択肢の意味

そこでモビリティ側からのエネルギーの選択肢について考えてみたい。

1. 生産側から見た車のエネルギー選択

まず EU が進めるような完全 EV 化を目指すなら原発も含めて全電源カーボンニュートラルの見通しが必須だ。その上、長距離大型トラックなど EV 化しにくい車両の対応も考えなければならない。

FCV も同様に水素を燃料としていつでも安定的に供給し続けられる見通しが必要だ。仮に EV を主体にして、EV 化できないところを FCV がカバーするというのは FCV からすると大きな量産効果が期待できないニッチ商品となる可能性もある。

それに対して合成燃料の検討が進んでいる^(注 21) 合成燃料は製造効率やコスト的な面から EV や FCV へ完全移行するまでのつなぎ的用途のように論じられるが、一旦使われ始めるとそれなりのシェアを占めて残っていく可能性が大きいと考えている。合成燃料用のエンジン開発が進み超高効率燃焼の省燃費 HV であれば消費燃料が少なく実質的な燃料コスト負担を下げることにもつながる。唯一問題になる可能性は走行中の窒素酸化物規制だろうがこれも更に改良が進む可能性もある^(注 22)。

バイオアルコールも車側から見れば課題は少ない。E10 ガソリンなど既に使われており、合成燃料に混ぜることも可能だ。ただ、バイオアルコールは農産物として作られるので生産地の農業問題がそのまま転写され^(注 23)、海外から大量調達するようなことは安定供給のリスクもあり難易度は高いだろう^(注 24)。むしろ地域の耕作放棄地の利用促進など地域エネルギーとしての期待とポテンシャルが大きい。

ローカルエネルギーでは木質系メタンガスや活性汚泥、家畜糞尿他からのバイオメタン等があり、ドイツでは CNG（圧縮天然ガス）車も普通に乘られている^(注 25)。サービスステーション（SS）で売られているガスの多くは天然ガスだが、スウェーデンではバイオガス

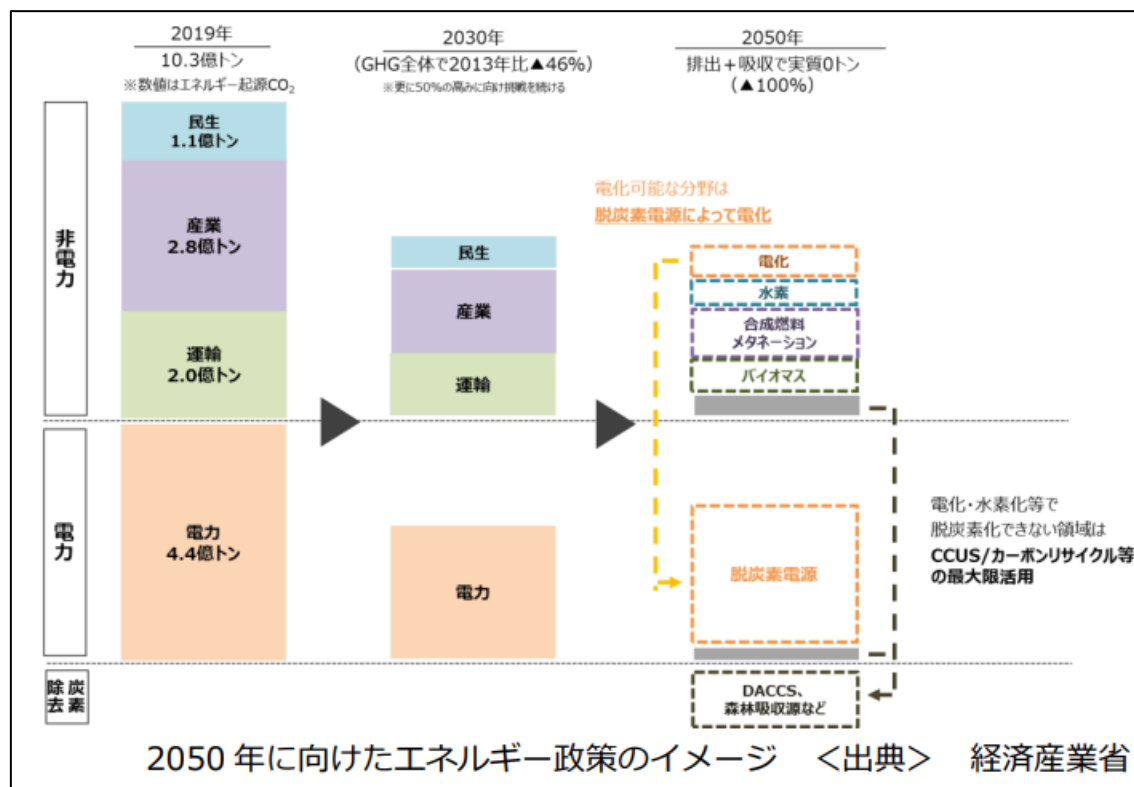
や木質系メタンガスを自動車燃料に使う事業化も行われている^(注26)。カーボンニュートラルへの取り組みとしては重要だが、ドイツで実際 CNG 車に乗っている知人は「普通に乘れるけど、走らない、」と素直な感想を聞かせてくれた。日本では大きく市場拡大する可能性は高くはないと思われる。

モビリティのエネルギーとしては EV（電気）と FCV（水素）、それにカーボンニュートラル燃料（合成燃料、バイオアルコール他）の3つの流れになり、その地域や社会情勢によりその組み合わせの比率をコントロールしていくことになるだろう。むしろモビリティ側は最適な組み合わせを可能にしていると言える。

この点から政府の「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略^(注27)」に示されている「2050 年に向けたエネルギー政策のイメージ」（図 3-8）を見るといささか総花的とも見えるが、結局運輸部門のエネルギーもこのような組み合わせ選択にならざるを得ない。

ただし、政策としてどう実現するのかの道筋は明らかでなく、結果的なイメージの域を脱していない。

図 3-8. 2050 年に向けたエネルギー政策のイメージ



出所：政府；「[パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略](#)」（p.17、図4を転載）

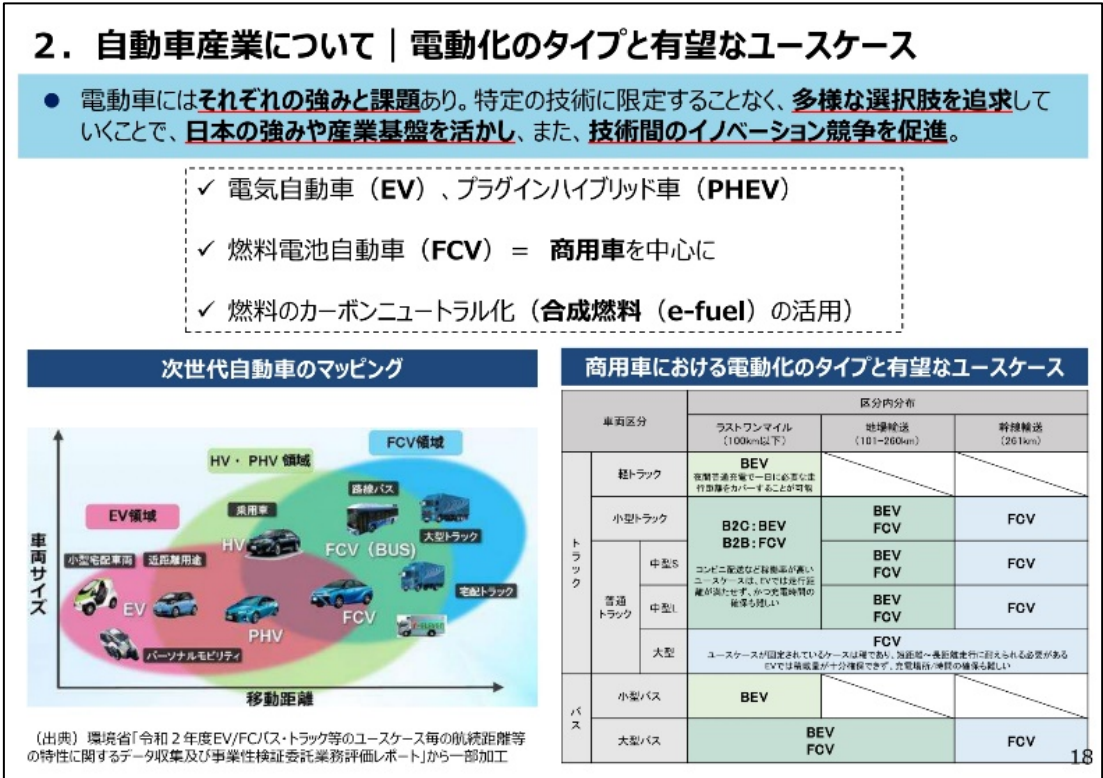
(<https://www.env.go.jp/content/900440767.pdf>)

2. 利用サイドから考えるユースケース

次に脱炭素車の商品性、即ちユーザー側は何を選択するだろうかという点についても触れておきたい。

経済産業省では EV、FCV、カーボンニュートラル燃料車について大まかなすみ分けと、商用車については利用分類によるユースケースを示している（注 28）（図 3-9）

図 3-9. 電動化のタイプと有望なユースケース



出所：経済産業省；「[トランジション・ファイナンス](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/transition_finance_suishin/pdf/009_04_00.pdf)」に関する自動車分野における技術ロードマップ（案）（p.18 を転載）
（https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/transition_finance_suishin/pdf/009_04_00.pdf）

EV の普及の議論ではノルウェーが取り上げられることが多い（注 29）。ノルウェーでは 2021 年乗用車の新車販売では EV、PHEV で 86.2%にもなっている。2025 年までに全新車をゼロ排出車とする目標達成も近いかもしれない。勿論、主電力が安価な水力発電である一方、ガソリン価格や ICE 車の課税負担を上乗せするなど徹底した EV 優遇策を講じている。確かに EV 普及に好条件が揃っていることはまちがいないが、同時に「全て EV が走る国を目指す」という思いとその社会的合意形成のメカニズムの存在を忘れてはならない。

次に、2021 年一番売れた EV が特斯拉だったことも興味深い（表 3-3）。主力モデルのモデル 3 と Y だけで 90 万台以上販売し、EV の世界シェアでは 20%を超える（2021 年）。

表 3-3. 2021 年 世界の EV 販売ランキング

（単位：台）

順位	車種名	年間販売台数	国
1	Tesla Model 3	500,713	米国
2	Wuling HongGuang Mini EV	424,138	中国
3	Tesla Model Y	410,517	米国
4	Volkswagen ID.4	121,631	ドイツ
5	BYD Qin Plus PHEV	111,553	中国
6	Li Xiang One EREV	90,491	中国
7	BYD Han EV	86,901	中国
8	BYD Song Pro/Plus PHEV	78,973	中国
9	Changan Benni EV	76,454	中国
10	Volkswagen ID.3	76,278	ドイツ
11	Renault Zoe	73,867	フランス
12	GAC Aion S	71,192	中国
13	Chery eQ	68,821	中国
14	Kia Niro EV	64,594	韓国
15	Nissan Leaf	64,201	日本
16	Great Wall ORA Black Cat	63,538	中国
17	Toyota RAV4 PHEV	61,544	日本
18	Hyundai Kona EV	60,700	韓国
19	XPeng P7	60,607	中国
20	SAIC Roewe Clever EV	56,116	中国

出所：兵庫三菱自動車販売グループ HP より著者作成（注 30）

特斯拉は EV であると同時に、注目されている自動運転機能（かなりの制限はあるが）やコネクティビティと言われる音楽やメディアのストリーミングサービス等常時特斯拉のネットワークと接続される高度な情報端末でもある。ユーザーは購入時から個人のアカウントとして管理され、故障時など特斯拉による遠隔診断、修理も可能である。また車を制御するソフトウェアやユーザーインターフェースも頻繁にしかも自動でアップデートされ、その度にリニューアルされる（注 31）。特斯拉人気はこういった従来の車とは違う革新性による部分が少なくない。このことは今後 EV の普及拡大には補助金などの優遇制度だけでは物

足りず、市場は何か次の新しい付加価値を求めていることが伺える。

例えば充電の自動化^(注 32)ができればユーザーは自分で燃料や電気を入れることから解放され利便性は格段に良くなる。その上 V2H (Vehicle to Home: EV に充電された電力を家庭等に供給することが可能な充放電技術)、V2G (Vehicle to Grid: EV を系統接続し、EV に充電された電力を系統に供給することが可能な充放電技術) によるエネルギーマネジメントが付加されれば EV や PHV の利用価値は大きく変わるだろう。

2 番に売れた中国の Wuling Hong Guang Mini EV (宏光 MINI EV) も象徴的だ。コンパクトで機能を最小限に絞り 2 万 8,800 元 (約 52 万円、2022 年 3 月 4 日時点) の低価格を実現〜は世界からも注目されたが、軽量コンパクトな乗り物は EV が席卷できる可能性を示した。

EV は電池が高額で安くならないと言われ続けているが、近距離移動に絞ることでバッテリー容量を抑え、コストと重量を同時に下げられる。重量軽減は走行距離の伸長に直結するのでバッテリー容量を抑えてどこまで実用性があるのか議論があったが、2021 年 40 万台以上販売されたことは、近距離に絞った EV の実用性が証明されたと言って良いだろう。その上軽量 EV なら構造が単純で修理やメンテナンス費用が安くなることも見込まれる。

1 日の走行距離が 10km 程度のニーズは多い。メンテナンス費用や税金が安くて給油に行かなくてもいいとなればその使いやすさから EV が選択されていくものと考えられる。

乗用車から商用車へ目を転じると状況は様変わりする。長時間、長距離走行をするトラックには EV は不利だ。給油、給水素型が圧倒的に使いやすいだろう。また働く車の代表である救急車や冷蔵車、キッチンカーなど走行以外のエネルギーが必要な車には FCV が有利で商品価値は高い。EV は大型化すればそれだけ電池容量が増え、走行距離が長い業務用のトラックなどではバッテリーも含めメンテナンス費用も高額にならざるを得ない。大容量の充電が可能な施設も限られてくるだろう。

逆に FCV と合成燃料車は同じような用途で共存すると考えられる。使い方にも大きな差はなくその時々エネルギー事情で選択され、現在のガソリン車とディーゼル車がそれぞれの用途で併存していると同じだろう。

3. これからの発展可能性

長期的なモビリティを考える上ではいくつかの技術革新の可能性も頭に入れておきたい。まず EV で期待される全固体電池がある。安全性が高く急速充電にも耐えられ EV 性能を

大きく向上させることになる。だが、現時点でその商品化が定まっておらず実用化時期には既に現行のリチウムイオン電池で市場が形成され、コスト、性能、信頼性の改良も一層進むことになる。そうなるとリチウムイオン電池と全固体電池との差が縮まり、全固体電池の市場インパクトは現在の期待値より小さくなる可能性もある。革新的なイノベーションにはタイミングも重要だ。

ユーザーからすると自動給電で充電ケーブルの取り回しから解放されるようになる方がEVの商品魅力度は大きい。非接触給電の国際規格や標準化^(注 33)も進んでいるので技術的ハードルはさほど高くない。商品化のタイミングは自動走行の一つとして期待されている自動バレーパーキング^(注 34)とシンクロするのではないかと考えられる。自動バレーパーキングは運転者が車から降りた後、指定された駐車スペースに車が無人で車庫入れするもので、実用化されれば車の使い方や駐車場の設置方法まで変わる可能性があり多くの企業で開発が進められている。自動駐車できてそのまま充電されることになれば都心部などEVへの流れは決定的なものとなるだろう。

HVやICE車でもイノベーションは続く。戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の「革新的燃焼技術」ではエンジン熱効率50%超を達成したとの成果報告もあり^(注 35)、エンジンの効率向上はまだ続く。超リーンバーンや低摩擦損失などの技術を積み重ねて実現しているが、量産車への波及効果は大きい。将来はエンジン自体コンパクトになりオイルポンプ等の補機や動弁系と言われる吸排気バルブまで電動化されて精緻に燃焼制御されるようになるだろう。EVで技術が進歩したヒートマネジメントもICEに逆流し、ICE車の効率向上に寄与する。

エンジンが高出力でコンパクト化し可動部分を減らしていくとエンジンシステムがメンテナンスフリーのパッケージ化されるだろう。精緻に燃焼制御することで多種類の燃料に対応できEVに搭載してレンジエクステンダー(EVの航続距離を伸ばすために利用される補助的なエンジン発電装置)とする使い方もある。

EVとエンジンは技術的には一層融合しより高度なシステムに発展する可能性は極めて高い。技術の価値と意義を見据え、着実な技術開発を進めることは日本の取るべき基本戦略である。

4. 自動車産業が直面する本質的な課題

自動車産業が直面する本質的な課題は実は電気か水素かという Prime mover (原動力)

の問題ではない。

先述のテスラの躍進は EV であること以上に従来型カーメーカーにとっては衝撃的である。テスラが様々な先進性を持つだけでなく、多くのクレームも含め世界で受け入れられ始めたことで自動車産業は転換期を迎えたという強い危機感を募らせている。

まずテスラのユーザーはネットワークを介し直接メーカーとつながる。テスラはユーザーに新しいデータとソリューションを提供し続け、顧客につながりと安心感を提供すると同時に膨大な走行データを蓄積し、それが新たなアプリケーションやサービスを創出させ、付加価値に変えていくエコシステムを作り上げることに成功した。

その基盤となっているのが OTA^(注 36)と言われるネットワークを介して車のソフトウェアやデータの更新をする技術だ。ユーザーにとってみると常に最新状態に update され、ユーザーインターフェースも頻繁に刷新されるので年式が経る毎の型落ち感がない。ユーザーに常に新しくなっている感覚を与え続ける商品価値は大きい。これはユーザーのつなぎ止めや中古車価格の維持にも効果的だ。

高度なセキュリティと安全性に係わるデータをネットワーク経由で書き換えることは多くのカーメーカーではできなかった。誤動作のリスクがあるからだ。しかし、テスラはコロンプスの卵のように実現した。その意味ではディスラプティブなイノベーション（技術革新やアイデアによって、従来の状況を打破し、その事業の業界構造を大きく変化させること）である。

大きな転換点と言えるのは、ハードウェアからソフト、サービス、データへ利益の源泉がシフトし、それを世界の少なくない規模のユーザーが受け入れたという事実である^(注 37)。テスラは新たなマネタイズ（収益化）の仕組みをプラットフォーム化した。それは、今後ハードウェアはコモディティ化し儲け代が減少していくことを示している。

更に次の未来への変化も垣間見える。

車の部品構成が PC のようにユニット化し、コモディティ化をさらに加速していく。従来型の車づくりでも既に四半世紀前からモジュール化など生産の効率化や車種展開を容易にする動きはあった。しかし、中国で爆発する車需要に対し数多くの新興カーメーカーが台頭し、開発リードタイムを短縮するためユニット提供可能なパーツを使い始めた。それに伴いユニット提供するサプライヤーも増え、EV 生産ではさらに顕著となっているが、そこには日本メーカーが築いていった生産ピラミッドはない。コアとなるユニットをグローバルに供給していくサプライヤーが台頭し自動車産業の構造転換も始まっている^(注 38)。

EV 用の電池は新たに発生する市場だが既に半導体のように規模の競争になっている。テスラはメガファクトリー^(注 39)として莫大な投資で一度に巨大な生産力を持ち、導入設備の価格交渉力、ひいては電池そのものの供給と価格決定権を握る戦略で、トップダウン的意思決定が苦手な日本企業の動きは及び腰に見える。

こういった変化はコンピューターやスマホとの類似性が指摘されるが、確かに重なるころは多いと思われる。だとすれば 90 年代に IBM が遭遇した技術、社会、ビジネスの変化とその後のソリューションビジネスへの大転換から学ぶべきことがあるかもしれない。

第 5 節 脱炭素実現への障壁

エネルギーが直面する危機もカーボンニュートラルだけではない。

急激な人口減少とエネルギー利用の効率化でエネルギー需要は減少している。更に過疎地域が増え、商店、病院、学校、行政サービス、公共交通といった居住機能の消失とともに無住居地区や廃村化が広がっている。こういった地域へのエネルギー供給は経営効率を悪化させ、需要者へのサービス低下も始まっている。電力等のユニバーサルサービスのあり方についても議論されるようになるだろう

また地域のガスエネルギーは地域の LP ガス販売事業者が担っており、経営の行き詰まりは即ち地域のガソリンスタンドの営業中止にもつながっている。しかし、こういった地域エネルギー事業の未来についてはその事業主体の殆どが零細企業のためなかなか議論が進まず、災害時のバックアップ機能とともにシリンダー供給型のエネルギーはどうなるのか、その方向性が問われている。LP ガスのグリーン LP への転換だけで片付く問題ではない。

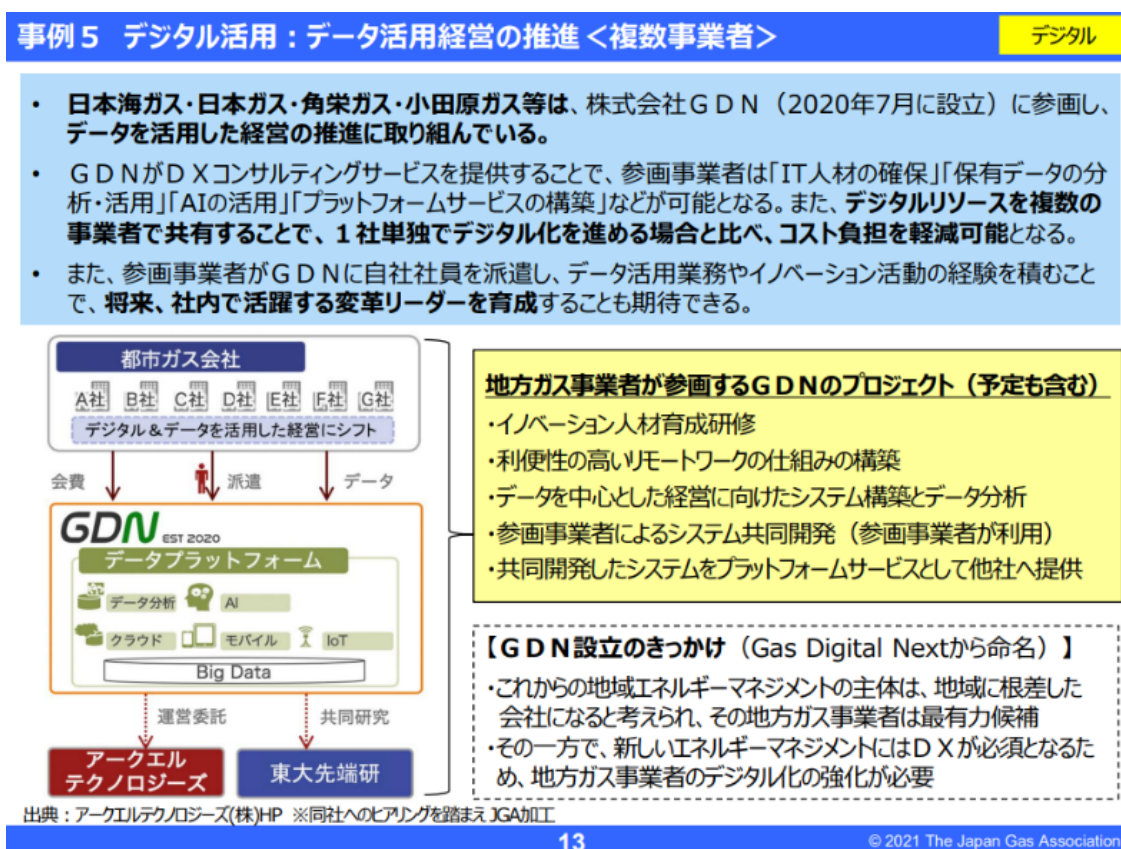
勿論オール電化と EV に移行すればエネルギーとしては成り立つことになるが、オール電化の普及率は 2021 年時点で 20%弱程度と言われ、2030 年時点でも 1,000 万世帯程度と予測されており^(注 40)、全て電気に依存することにまだ抵抗感のある世帯が多く、全世帯をオール電化に切り替えていくのは容易ではない。

地方都市ガス事業者も状況は同じだ。しかし、中には住宅事業や地域開発などを手掛け地域のインフラサービス企業として事業拡大しているところもあり、今後地域エネルギーサービスを担うキープレーヤーとして成長できる可能性は大きい。経済産業省の 2050 年に向けたガス事業の在り方研究会資料（図 3-10）^(注 41)では日本海ガス・日本ガス・角栄ガス・小田原ガス他によるデータプラットフォームの共同開発と、そのシステムを他社へも販売し

ていく取り組みが紹介されている。

中堅の地域ガス会社らが営業地域を超えてデータ上でネットワーク化され、更に将来経営統合するようになれば、全国ネットの巨大なエネルギーサービス企業として生まれ変わる可能性も期待される。

図 3-10. 地方都市ガスのデータプラットフォーム



出所：経済産業省；[2050年に向けたガス事業の在り方研究会](#)（p.13、事例5を転載）

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/2050_gas_jigyo/pdf/005_03_00.pdf)

ゼロカーボンシティの実現も避けては通れないテーマだ。しかもそこは同時にスマートシティでもあるはずだ。しかし、2050年にどのような地域、都市を作るのか、その構想もまた見えていない。

現在地方中核都市とその周囲に人口の集中が進んでいる。これは主にその周辺の地域からの転入によるもので、鉄道駅周辺の他、企業進出による事業所や高速道路IC近くの大型ショッピングセンターの周辺に新興住宅地が形成される場合が多い。特に駅前再開発によ

の高層マンションはその利便性、快適性から急速に広がっており^(注 42)、地方の活力低下が取り沙汰されている中では朗報ではある。

しかし、現在作られている住宅や高層マンションは間違いなく 2050 年にはそのまま残っている。そこをゼロカーボン化しスマート化しなければならないが、具体的なゼロカーボン化、スマート化の構想がないまま開発が進められているのではないかと危惧せざるを得ない。スマートシティで代表的な柏の葉では綿密な開発構想と住民や開発事業者、進出企業などとの合意形成に努力を重ねている^(注 43)。既存ビルの脱炭素や現在計画されているビルに対する脱炭素化のロードマップや基準化は喫緊の課題であるが、一朝一夕に進むとはおよそ考えられない。

エネルギーは差し迫るこのような課題を克服し、同時にモビリティが期待するようなカーボンニュートラル電源、水素、カーボンニュートラル燃料の提供が実現できるか道のりは厳しい。

第 6 節 2050 年のグランドデザイン

ではカーボンニュートラルが達成される 2050 年の日本のグランドデザインはどうなっているのだろう。

2014 年国土交通省は「国土のグランドデザイン 2050」を公表しているが^(注 44)、これは国土行政の方向性を整理しており、2050 年に日本はどのようなになっているかの予測や計画目標ではない。また、2020 年 12 月に経済産業省が公表した「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」^(注 45)では 2050 年時点での新たな産業が示されているが、現在の産業も含め将来の産業構造がどうなっているかは明らかではない。

グリーン成長戦略とほぼ同時期の 2021 年 6 月に国土交通省が公表した「国土の長期展望」があり^(注 46)、産業基盤の構造転換や大都市のリノベーション、3 大都市圏を結ぶスーパー・メガリージョンなどが謳われているが、グリーン成長戦略で示された「カーボンニュートラルの産業イメージ」にあるような水素受入基地や水素関連産業をどのように構築していくのか具体的な構想はなく、グリーン成長戦略による新たな基幹産業のための幹線道路網や都市形成にも言及はない。

2050 年カーボンニュートラルを目指し、社会を変革していくには、2050 年にどうゼロカーボンを達成するかというつじつま合わせの発想ではなく、今世紀後半の日本と世界をど

う作り上げるかという視点でエネルギー、国土・地域開発、モビリティ、産業創出他を同時に議論し、2050年またそれ以降のあるべき姿（グランドデザイン）を明らかにしなければならない。

グランドデザインのためには、現在の延長線ではないブレークスルー的発想も必要だろう。例えば増加するカーボンニュートラル電力のため幹線系統の増強策として長距離海底直流送電他も検討されている^(注 47)が、超電導送電も実用化の射程距離にある^(注 48)。慶応大学名誉教授の島田晴男氏、くにうみアセットマネジメント株式会社代表の山崎養世氏らは既存の高速道路沿いに超電導送電線を敷設し、高速道路沿線に新たな産業集積と都市づくりをするよう提唱している^(注 49)。

高速道路用地を活用できれば送電線敷設のための新たな用地買収を行う必要がなく早期に実現できる可能性は高い。超電導は日本が先行開発した技術で、中央リニア新幹線の運用も間近だ。

日本政府も世界的圧力に押されるように2035年までに乗用車の新車販売をすべて「電動車」とすると表明するぐらいなら、「2035年までに超電導送電でカーボンニュートラル電力を送る」と宣言しても良かったのではないかな。何よりこれは日本にしかできないイノベーションで、世界に先駆け実用化すればカーボンニュートラルに向かう世界に対しインパクトは計り知れない。世界中の高速道路がエネルギー幹線になり、超電導送電は日本発の新産業を創出するになるだろう。

高速道路の高度利用としては高速道路の一部を自動走行専用レーンにしようというアイデアもあり、そのレーンを走行中非接触給電にすればEVやFCVなら高速道路上をほぼ無制限に走り続けられる。1980年代に遡るが第2東名の計画構想時に、既に中央分離帯を上下トラック専用レーン化して将来の無人運転につなげるという議論もあったと聞く（石井威望 東京大学名誉教授）。高速道路の一部レーンを貨物専用にして電動化、無人運航化すれば物流は大きく効率化、低コスト化し、産業界への恩恵は計り知れない^(注 50)。

長距離の無人輸送は世界でまだ実現できていない巨大なニーズである。自動走行するトラックだけでなく運行管理システムや給電システム、高機能高速道路の設計ノウハウまですべてが世界戦略商品となる。メガリージョン構想には不可欠である。

核融合発電も数10年単位ではあるがイノベーションの有力候補になるだろう。地熱開発も進まない日本で高レベル核廃棄物の地層処分がうまく進められるとは考えにくく、このまま原発が続けられない事態も織り込んでおかなければならない。核融合実現時の社会は

どうなるか、どう日本の基幹産業化するのか戦略が必要だ。中国はエネルギー覇権を狙い莫大な開発投資をしているとも言われている。日本も文部科学省の重点政策にあげられているが、どのレベルになったらエネルギー計画に盛り込み、どうキャッチアップするか基本的な方針は描き、世界市場への戦略商品としたい。

南米パタゴニアでの水素生産構想も日本が手掛けるべき重要なプロジェクトになるはずだ。この計画は NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）が 93 年から 2002 年まで進めた WE-NET（水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術）計画の一環で数年間に渡り現地の風況調査、実機確認などを行い、当時日本の総発電量の 10 倍の水素生産が可能と見込まれたが^(注 51)、直近の水素需要が見込まれず、日本までの水素運搬船などの技実開発を待たねばならず 2002 年に終了した。

しかし、2020 年 12 月ドイツシーメンスエナジーとポルシェが同じく南米チリで風力から e-fuel（CO₂ と水素を合成して製造する人工的な燃料、合成燃料）を製造し、ドイツへ送る計画を発表し^(注 52)、22 年 12 月には生産を開始したとも報じられた。これに対しドイツのペーターアルトマイヤー連邦経済相は「・・・シーメンスエナジーとポルシェがグリーン水素や e-fuel を、他国で生産・開発することを非常に嬉しく思う」とコメントしているが^(注 53)、これこそ日本政府がいうべき発言だったのではないかと残念で悔しい思いをしている当時の関係諸先輩方は多いはずだ。

確かにパタゴニアは日本から見れば地球の反対側でざっと水素運搬船は 2 万 km の航海となる。しかし、数年の後には遠洋航路は無人の遠隔操縦^(注 54)が可能となるだろう。しかも送り先は日本だけではない。グリーン水素を求める国は確実に増えていくはずで、アルゼンチンは産水素国となり日本は環太平洋の水素メジャーになれる可能性も大きい。是非日本のグランドデザインに盛り込みたい。

グランドデザインを構想し日本の国土やインフラを刷新して新たな社会システムを構築すると同時に、それを世界に向けた新産業創出につなげなければならない。

第 7 節 日本の産業戦略

では 2050 年の日本を支える産業戦略はどうか。ポイントはシステム化とグローバル指向だ。

新たな産業創出というと自動車に次ぐ次の産業は何かと言われるが、確かに有人ドロー

ンや人工知能による新しいサービス、ロボットなど出現しビジネスも一変する可能性は大きい。今後 10 年は様々な技術が実用化され市場に出てくる「テクノロジーボーナス」の時代だろう。しかし、その背後には物の作り方やサービス、ビジネスの仕組みそのものが大きく変わる第 4 次産業革命が加速し、産業構造の枠組みや社会の仕組みまでが大きく様変わりする^(注 55) ことを大前提にして議論しなければならない。

その観点では 2017 年経済産業省による「新産業構造ビジョン^(注 56)」には、第 4 次産業革命を踏まえ、社会システムのイノベーションを進め産業構造を変革していくと同時に、世界の課題解決という新たな産業創出の視点も伺える。しかし、戦略 4 分野にエネルギーによる産業転換の切り口がなく、結局エネルギーは「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略^(注 57)」の 14 の重点分野に取り込まれた形になり、総合的な産業構造に転換していく意図は希薄になった。

ここで改めてシステムの産業化、殊に社会システムの産業化について着目したい。

先にも述べたが、今後地方の中核都市に人口が集まりスマートシティが形成され、都市 OS やデータプラットフォーム、そこで動く様々な API (ソフトウェアやプログラム、Web サービスの間をつなぐインターフェース) など既にビジネスの広がりが見込まれている。またエネルギーサービスや住宅の保守メンテナンスサービスの多様化、商品の無人配送など先進的で、経済力のある地域から実現されるだろうが、同時に都市間でプラットフォームやデータの共通化、API の相互乗り入れなどが進むはずだ。一都市単独での開発はリスクが大きく時間と費用が掛かり過ぎる。都市間競争から都市間協創の時代である。しかもグローバルで。

スマートシティはほぼ世界同時に進展する。ニーズや優先課題は異なるものの先進国、発展途上国を問わず中核となる地域はスマートシティとして発展する。むしろ都市化が急速に進む新興国の方が、より近未来的なスマートシティが出現する可能性は大きい。世界には 100 万人都市は数 100 を超え、10 万人都市はその 10 倍^(注 58) になるだろう。データプラットフォームの提供先は無数に近い。

日本の(優れた)システムを発展途上国に展開するという驕った発想を止め、世界の新興都市づくりに深く係わり、同時に国内都市のスマート化を進める必要がある。そうでないと次世代の交通システムやインフラサービスなど後からでは持ち込めないだろう。

他にも新産業構造ビジョンでも取り上げられているが、PHR^(注 59)と言われる個人の健康データプラットフォームは世界でもニーズは大きい。母子健康管理システムも同じブラッ

トフォームに乗り、自治体の住民サービスにも不可欠となる。日本はこういったネットワーク上のプラットフォームだけでなく母子手帳に象徴されるような優れた母子健康管理の仕組みも提供でき、対応する産科、小児病院や医療システムの展開へも繋がる^(注 60)。プラットフォームが共通であれば、日本が先行する健康保険や介護システムも商品となり得るだろう。

ビジネスの収益源がハードウェアからシステムソリューションに移り、そのデータと新たなサービスがより大きな付加価値を生み出していくのがシステム化社会であり、日本はシステム化することは苦手との指摘もあるが、視野を広げ発想を変えて新しいマーケットを創出しなければならない。

水素についても同じようなことが考えられる。将来の水素産業は水素自動車や水素発電など 2030 年国内市場規模で 1 兆円を超え 2050 年には 8 兆円とも目されていて^(注 61) 大いに期待される市場だ。ただグローバルな視点からは水素列車にはもっと重要な可能性があるのではないかと思う。日本では既にかなり電化が進んでいるため列車水素化の注目度は高くないが^(注 62)、これから鉄道網を拡張して行くインドやアセアン諸国にとって水素列車は魅力的なはずだ。

まず水素列車なら新線建設に架線設備が要らない。電力調達用の発電所や変電設備の新規投資も不要だ。架線の保全コストや台風などの架線トラブルも無くなる。彼らにとって水素列車を導入するメリットは大きい。またこれからの鉄道運営は切符販売や改札も不要になり、駅の設備投資や課金システムも低コストで実現できる。日本が水素列車のメリットをアピールし、発展途上国での新たな鉄道事業に参入できれば、水素列車の保守管理、運行管理システムに加え、水素供給ビジネスへも広がるだろう。

また新駅を核にした地域開発も進む。新興スマートシティの開発チャンスであり、先のスマートシティでのビジネスにも直結する。水素ステーションの拡充や地域エネルギー供給サービスへも広げられるだろう^{(注 63)、(注 64)、(注 65)}。

一つのキーとなる技術的ブレークスルーを核に大きな社会システム化していくことが 21 世紀のイノベーションであり、日本が進めるべき新産業化の核心である。

まとめ

昨今新聞、ニュース等で報じられる「EV か HV か」という議論に留まらず、世界中の自動車産業は今まさに大きな産業転換に迫られている。それはビッグデータが経済を押し進

め、人工知能が機能する第 4 次産業革命の序章に過ぎず、もっと大きな変化がすべての産業に対しこれから始まるだろう。

エネルギーも同じ渦中にある。カーボンニュートラルや人口減少など顕著な変化がトリガーになっているが長い視点に立てば 21 世紀型のサステナブルで高度にデータ化された社会への転換に他ならない。日本がどのようなエネルギーシステムを目指すのか世界も注目している。

いつの時代も先を見通すことはたやすくはないが、予見する努力を重ね、この時代変化の先にどのような社会を作るのか、新たな産業創出にはそのイメージと発想が不可欠である。

今世紀後半に向かって日本をどう作り変えていくのか真剣な議論を重ねなければならない。

参考文献

- ・ G.A.オラー、A.ゲッペールト、G.K.S.プラカーシュ（訳）小林四郎、齋藤彰久、西村晃尚『メタノールエコノミー CO₂をエネルギーに変える逆転の発想』（2010）．化学同人
- ・ 中道昭『2022 年雄次世代自動車産業』（2018）．PHP ビジネス新書
- ・ 三菱総合研究所編『移動革命 MaaS、CASE はいかに巨大市場を生み出すか』（2020）．NHK 出版
- ・ 中西孝樹『CASE 革命 MaaS 時代に生き残るクルマ』（2020）．日経ビジネス文庫
- ・ 山本康正『2030 年に勝ち残る日本企業』（2021）．PHP ビジネス新書
- ・ 鈴木貴博『日本経済予言の書 2020 年代、不安な未来の読み解き方』PHP ビジネス新書
- ・ 英『エコノミスト』編集部（訳）東江一紀、峰村利哉『2050 年の世界 英『エコノミスト』誌は予測する』（2015）．文春文庫
- ・ ダリル・ブリッカー、ジョン・イビットソン（訳）倉田幸信文『2050 年 世界人口大減少』（2020）．文藝春秋
- ・ 夫馬賢治『データでわかる 2030 年地球の姿』（2020）．日経プレミアシリーズ
- ・ 河合雅司『未来の年表 人口減少日本でこれから起きること』（2017）．講談社現代新書
- ・ 河合雅司『未来の年表 2 人口減少日本でこれから起きること』（2018）．講談社現代新書

書

- ・ 榊淳司『ようこそ、2050 年の東京へ 生き残る不動産 廃墟になる不動産』（2020）. イースト新書
- ・ ビクター・マイヤー＝ショーンベルガー、トーマス・ランジ、（訳）斎藤栄一郎『データ資本主義（ビッグデータがもたらす新しい経済）』（2019）. NTT 出版
- ・ 日本経済新聞データエコノミー取材班『データの世紀』（2019）. 日本経済新聞出版
- ・ 日本経済新聞社（編）『NEO ECONOMY: 世界の知性が挑む経済の謎』（2022）. 日経 BP 日本経済新聞出版本部
- ・ 小宮昌人、楊皓、小池純司『日本型プラットフォームビジネス』（2020）. 日本経済新聞出版
- ・ 此本臣吾（監修）、森健、NRI デジタルエコノミーチーム『デジタル国富論』（2020）. 東洋経済新報社
- ・ クライド・プレストウィッツ、（訳）村上博美、小野智子『2050 近未来シミュレーション日本復活』（2016）. 東洋経済新報社
- ・ 川口伸明『2060 未来創造の白地図 ～人類史上最高にエキサイティングな冒険が始まる』（2020）技術評論社
- ・ 杉山大志『「脱炭素」は嘘だらけ』（2021）. 産経新聞出版
- ・ 野口悠紀雄『リープフロッグ 逆転勝ちの経済学』（2020）. 文春新書

注

- 1 日本経済新聞「[EU、ガソリン車の新車販売禁止 35 年までに](#)」2022 年 10 月 28 日他
- 2 日本自動車会議所 自動車産業インフォメーション「[COP26 宣言 HV 含むガソリン車販売 40 年までに停止、23 か国合意](#)」2021 年 11 月 15 日他
- 3 日本自動車工業会「[自工会記者会見](#)」2022 年 5 月 19 日
同「[カーボンニュートラル、2023 年活動方針、モーターショーは「ジャパンモビリティショー」へ。](#)」2022 年 11 月 17 日
- 4 首相官邸ホームページ「[COP26 世界リーダーズ・サミット 岸田総理スピーチ](#)」2021 年 11 月 2 日
ロイター「[自動車の脱炭素は多様な選択肢を追求、市場獲得に貢献＝岸田首相](#)」（衆院代表質問）2023 年 1 月 25 日
- 5 首相官邸ホームページ「[第二百四回国会における菅内閣総理大臣施政方針演説](#)」2021 年 1 月 18 日
- 6 内閣官房ホームページ「[2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 \(P28\)](#)」2020 年 12 月 25 日
- 7 JETRO ビジネス短信「[欧州委、温室効果ガス 55%削減目標達成のための政策パッケージを発表](#)」2021 年 7 月 15 日

-
- 欧州委員会 Press release「[European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions](#)」14 July 2021
- 8 IEA [Global EV Outlook 2022](#)
- 9 読売新聞オンライン「[EV 競争激化 日本の出遅れどう挽回するか](#)」2022年5月11日他
- 10 欧州自動車工業会 (ACEA) Press releases「[Fuel types of new cars: battery electric 9.1%, hybrid 19.6% and petrol 40.0% market share full-year 2021](#)」
(参考) JETRO 地域・分析レポート「[EU の 2021 年新車登録台数、HEV がディーゼル車を超える、EV も躍進](#)」2022年2月04日
同添付資料
JETRO 地域・分析レポート「[EU の 2021 年の乗用車販売・生産台数、新型コロナ直撃の 2020 年も下回る](#)」2022年8月5日
- 11 全米自動車ディーラー協会 (NADA)「[NADA DATA 2021](#)」(Overview より)
- 12 トヨタ博物館車両データベース「[トヨタ プリウス NHW10 型](#)」
トヨタ自動車株式会社 公式企業サイト (global.toyota)「[初代プリウス 1997-2003](#)」
- 13 GAZOO「[＜プリウス誕生秘話＞第 1 回 21 世紀のクルマを提案せよ \(1993 年 9 月～1994 年 11 月\)](#)」
他
- 14 日本エネルギー学会 第 4 回日本エネルギー学会大会 (1995/07/25-1995/07/26) 基調講演
千葉貢「2-1.ニューサンシャイン計画と WE-NET プロジェクト」
水素エネルギーシステム Vol.19, No.2, 1994 福田健三「WE-NET プロジェクトの現況」
計測と制御 第 39 巻 第 1 号 2000 年 1 月号 大野哲雄「水素利用国際クリーンエネルギー システム
技術 (WE-NET)」他
- 15 トヨタ博物館車両データベース「[トヨタ MIRAI](#)」
- 16 JETRO ビジネス短信「[COP26 で新車販売のゼロエミッション化に関する共同声明を発表](#)」2021年11月12日
JETRO ビジネス短信「[気候変動対策を促進、COP26 の 2040 年までに新車販売ゼロエミッション化に賛同](#)」2021年11月16日
- 17 ACEA Press releases「[Fuel types of new cars: battery electric 11.9%, hybrid 22.6% and petrol 37.8% market share in Q3 2022](#)」より Q1-Q3 2022
概要的な解説として くらし TEPCO「[【最新版】電気自動車 \(EV\) の普及率はどのくらい? 「日本で普及しない」は本当?」](#) EV DAYS 2022 年 11 月 25 日
- 18 日本自動車工業会「[カーボンニュートラルを目指す自工会](#)」JAMA blog 2021 年 10 月 29 日
- 19 日本自動車工業会「[2050 年カーボンニュートラルに向けたシナリオ分析](#)」2022 年 9 月
- 20 OICA「[OICA Releases Global Decarbonization Framework](#)」
「[Carbon Neutrality by 2050](#)」November 2022
- 21 経済産業省合成燃料研究会
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 18 日
経済産業省 第 9 回 経済産業分野におけるトランジション・ファイナンス推進のためのロードマップ
策定検討会「[「トランジション・ファイナンス」に関する自動車分野における技術ロードマップ \(案\)](#)」
2022 年 12 月 15 日他
- 22 日本経済新聞「[日本ガイシ社長「PHV の排ガスゼロに」浄化装置を開発](#)」2023 年 1 月 16 日等
- 23 山家公雄著「日本型バイオエタノール革命」2008 日本経済新聞出版
- 24 他にも政治的な影響も受けやすい
燃料油脂新聞「[供給網構築へ国際連携強化 経済性、GHG 削減効果議論 日米エタノールワークショップ](#)」2022 年 10 月 7 日等
[燃料油脂新聞社 石油業界でエリートをめざすあなたへ](#)

- 25 前出 10. JETRO 地域・分析レポート「EU の 2021 年の乗用車販売・生産台数、新型コロナ直撃の 2020 年も下回る」添付資料表 1「天然ガス自動車（NGV）販売台数 43,235 台」2022 年 8 月 5 日
- 26 日経 BP「[日立造船、スウェーデンでバイオガス事業、自動車燃料に供給](#)」メガソーラービジネスニュース 2021 年 11 月 11 日
中原准一 科研費報告書（課題番号 16380148）「[農業農村の持続的発展を目指すコミュニティ型投資・雇用戦略の日欧比較研究 - プロシューマー（生産＝消費者）間連携における経済的価値の創出をめぐって - 第 4 章スウェーデン・ヨーテボリにおける BRG の役割](#)」平成 19 年 4 月
[三重大学学術機関リポジトリ研究教育成果コレクション \(nii.ac.jp\)](#)
バイオガス生産を行う Gasum 社（フィンランドの国営エネルギー会社 天然ガスの輸入販売とフィンランドとスウェーデンに 17 のバイオガス精製所を運営）の HP
[Lidköping biogas plant | Gasum](#)
また生産されたバイオメタンを LNG 化するエアリキッド社の HP
[Liquefaction plant | Air Liquide Energies](#)
- 27 環境省「[パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略（令和 3 年 10 月 22 日閣議決定）](#)」
- 28 経済産業省 第 9 回 経済産業分野におけるトランジション・ファイナンス推進のためのロードマップ策定検討会 資料 4「トランジション・ファイナンス」に関する自動車分野における技術ロードマップ（案）
[第 9 回 経済産業分野におけるトランジション・ファイナンス推進のためのロードマップ策定検討会（METI/経済産業省）](#)
- 29 JETRO ビジネス短信「[2021 年の新車登録台数、ノルウェーで過去最高、スウェーデン・フィンランドは BEV 倍増](#)」2022 年 1 月 14 日
同 表 1「[ノルウェーの燃料種別新車登録台数](#)」（2020 年、2021 年）
（参考）PRESIDENT Online「[「環境意識の高さでは説明できない」ノルウェーで電気自動車が急速に普及した本当の理由](#)」2022 年 1 月 12 日他
- 30 姫路三菱ウェブ編集局 編集局ニュース 2022 年 3 月 1 日「[【世界全体編】EV/PHV/PHEV 年間 販売台数ランキング TOP20【2021 年 最新】](#)」より
- 31 テスラ HP より
[オートパイロット | テスラジャパン \(tesla.com\)](#)
[コネクティビティ | テスラ サポート ジャパン \(tesla.com\)](#)
[ソフトウェア アップデート | テスラ サポート ジャパン \(tesla.com\)](#)
[プライバシーについて | テスラ ジャパン \(tesla.com\)](#)
これらのネットワーク機能を可能とするためテスラ車には数多くのセンサーが装備されている。テスラはこれらの車両データを収集・解析して開発に使っているという指摘もある。
GIGAZINE 2022 年 08 月 09 日「[テスラは「オートパイロット」や「完全自動運転」を実現するために膨大なデータを収集している](#)」
- 32 日本経済新聞「[VW はロボット方式 EV 充電自動化ビジネスが熱い](#)」2021 年 1 月 18 日
- 33 篠原真毅 庄木裕樹「[ワイヤレス電力伝送の技術、制度化、標準化最新動向](#)」電子情報通信学会誌 Vol.101 No.1pp.79-84 発行日:2018 年 1 月
- 34 グーネットマガジン 車の最新技術「[自動運転で駐車を行う「自動バレーパーキング」とは？仕組みと課題を解説！](#)」更新 2019 年 3 月 18 日他
- 35 科学技術振興機構「[自動車エンジンの熱効率、悲願の 50%を達成 SIP 成果の実用化で CO₂ 排出量削減期待](#)」サイエンスポータル ニュース 2019 年 1 月 30 日
- 36 サイバーセキュリティ.com コラム「[OTA \(Over The Air\) 技術とは？仕組みやメリットデメリット、活用事例を徹底解説](#)」他
- 37 野口悠紀雄「[テスラを侮る人に知ってほしい「評価される訳」利益の源泉をハードからソフトへ移しつつある](#)」東洋経済 ONLINE 2021 年 4 月 18 日
- 38 新たな EV プラットフォームを狙う台湾 FOXCONN、日本電産など
[Foxconn Transforms Automobile Industry with Launch of Open Platform for Electric Vehicles and](#)

-
- [Announces Pioneering R&D Programs In Taiwan | Foxconn Technology Group \(honhai.com\)](#)
[EV プラットフォーム | 日本電産株式会社 \(nidec.com\)](#)
[Foxconn to use Nidec drives for MIH platform - electrive.com](#)
- 39 テスラ ギガファクトリー
[テスラ ギガファクトリー | テスラジャパン \(tesla.com\)](#) リンク切れ (404 エラー)
- 40 日本経済新聞「[富士経済、オール電化・ZEH・コネクテッド住宅市場の結果を発表](#)」2020年11月4日
[0542751_02.pdf \(nikkei.co.jp\)](#)
- 41 第5回 2050年に向けたガス事業の在り方研究会 資料3「[地方ガス事業者の現状と今後の課題](#)」日本ガス協会説明資料 2021年1月28日
- 42 NHK NEWS WEB「[ビジネス特集 地方でタワマン建設ラッシュ! その理由は?](#)」2021年6月22日
東洋経済 ONLINE「[人口減の地方でも「マンション好調」のカラクリ 戸建て文化に変化、竣工前に完売の物件も](#)」2019年12月16日
- 43 柏の葉アーバンデザインセンター (UDCK)「[柏の葉国際キャンパスタウン構想: 公・民・学の連携](#)」
- 44 国土交通省「[国土のグランドデザイン 2050 ～対流促進型国土の形成～](#)」平成26年
同「[第二次国土形成計画 \(全国計画\) \(平成27年8月14日閣議決定\)](#)」
- 45 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を策定しました](#)」2020年12月25日
成長戦略閣議決定 (令和3年6月18日)・成長戦略実行計画、成長戦略フォローアップ他
[成長戦略会議 | 内閣官房ホームページ](#)
- 46 国土交通省「[デジタルを前提とした国土の再構築～「国土の長期展望」最終とりまとめを公表します～](#)」
令和3年6月15日
- 47 経済産業省「[長距離海底直流送電の整備に向けた検討会](#)」等
日経ビジネス「[遠い需要地、脆弱な送電網 整備に5兆円必要 “直流革命”に期待](#)」2021年9月17日
週刊エコノミスト Online「[再エネ普及の救世主? 「海底直流送電」に集まる期待](#)」2021年4月25日
- 48 NEDO ニュースリリース「[国内初「高温超電導ケーブル」の電力系統への連系運転開始—超電導送電実用化へ—](#)」2012年10月29日他
- 49 高速道路の高度利用は一般財団法人国土技術研究センター「[エネルギーインフラネットワークと高速道路の高度化に関する研究会](#)」の報告も興味深い
山口 作太郎「[超電導直流送電 \(SCDC\) の技術開発の現状と動向](#)」中部大学・超伝導センター2019年10月04日
同様の議論は鉄道でも議論されている 国土交通省「[エコレールラインプロジェクト推進検討会議](#)」より鉄道技術総合研究所「[鉄道用超電導ケーブルの開発](#)」2012年7月30日
[国土交通省報道発表資料「鉄道分野における低炭素化及び省エネルギー対策に関する連絡会議\(第2回\)及びエコレールラインプロジェクト推進検討会議の結果について」](#)
[国土交通省打ち合わせ資料](#)
J-STAGE「[次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション](#)」
鉄道技術総合研究所「[21. 営業線における超電導き電システムの機能の実証](#)」主要な研究開発成果
2019年度
- 50 現在隊列走行による後続車無人化が進められているが ([報道発表資料: 高速道路におけるトラックの後続車無人隊列走行技術を実現しました - 国土交通省](#))、物資だけの専用レーンであれば、高速かつ高密度で運航できる。
90年代~2000年代に先端物流システムとして提案されていた
(一社)運輸総合研究所より
西田雅、北村公大、中村英夫「[高速幹線物流システムの提案](#)」
石坂久志「[先端貨物輸送システムの導入提案～第二東名・名神自動車道の先進的な活用を目指して～](#)」
石坂久志「[第二東名・名神自動車道への先端貨物輸送システムの導入提案](#)」
- 51 大野哲雄「[水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 \(WE-NET\)](#)」計測と制御 第39巻 第1号
2000年1月号
NEDO 報告「

-
- NEDO 報告「[風力発電の現状と水素製造の可能性](#)」
- 52 Siemens Energy Press「[Siemens Energy and Porsche, with partners, advance climate-neutral e-fuel development](#)」02 December 2020
JETRO ビジネス短信「[チリで合成燃料の製造工場が稼働開始、ドイツのボルシェやシーメンスが参画](#)」
2022 年 12 月 28 日
- 53 German Business Consulting 戦略ニュース「[e-fuel で連携、ボルシェとシーメンスエナジー。](#)」2020
年 12 月 03 日
- 54 国土交通省「[自動運航船の実用化へ向けた取組](#)」
日本財団 無人運航船プロジェクト「[MEGURI2040](#)」
一般財団法人日本船舶技術研究協会【[船舶技術の戦略的研究開発](#)】
- 55 鈴木将之「2060 年の日本産業論」 2016 年 東洋経済新報社 他
- 56 経済産業省 [第 17 回 産業構造審議会 新産業構造部会](#) 2017 年 5 月 29 日
同「[「新産業構造ビジョン」一人ひとりの、世界の課題を解決する日本の未来](#)」
- 57 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を策定しました-「経済と環境の好循環」につなげるための産業政策-](#)」2020 年 12 月 25 日
同 [資料 2](#)
同「[2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略を策定しました](#)」2021 年 6 月 18 日
[20210618005-3.pdf \(meti.go.jp\)](#)
- 58 mongabay.com「[Cities in the world with more than 1 million inhabitants in 2005](#)」
The Globalist Global Governance「Just the Facts: World's Million-People Cities There are about
500 Million-People cities worldwide.」
[Just the Facts: World's Million-People Cities - The Globalist](#)
Brilliant Maps「[The 4037 Cities In The World With Over 100,000 People](#)」February 23, 2015
- 59 内閣府 経済・財政一体改革推進委員会 第 31 回国と地方のシステムワーキング・グループ「厚生労働省における取組（PHR・遠隔医療）について」2022 年 4 月 19 日
[経済・財政一体改革推進委員会 国と地方のシステムワーキング・グループ](#)
[<資料 3-3 厚生労働省資料（厚生労働省における取組（PHR・遠隔医療）について>](#)
- 60 デロイト トーマツ ナレッジ「[ヘルスケア業界における新たなエコシステム構築について ～『未来投資戦略 2017』、『新産業構造ビジョン』を読み解く～ライフサイエンス・ヘルスケア 第 9 回](#)」では
「グローバル市場におけるヘルスケア市場の更なる獲得」の重要性を指摘している
- 61 NEDO [水素エネルギー白書](#) 2014 年 7 月 30 日 1-2-3 産業振興（P8～P9）
- 62 経済産業省第 1 回 モビリティ水素官民協議会 事務局資料「[モビリティのカーボンニュートラル実現に向けた水素燃料電池車の普及について](#)」における「輸送部門における水素利用」でも自動車の他船舶や飛行機などへの水素利用の記載はあるが、鉄道はない
- 63 インフラ・鉄道輸出の動き
「インフラシステム輸出戦略（平成 29 年度改訂版）」（平成 29 年 5 月 29 日 経協インフラ戦略会議決定）
首相官邸ホームページ [経協インフラ戦略会議](#)
同「[インフラシステム海外展開戦略 2025（令和 4 年 6 月追補版）](#)」
同 [siryou1.pdf](#)
国土交通省「[海外展開戦略（鉄道）](#)」平成 29 年 10 月
前出（56.）p.163 にも鉄道の輸出が取りあげられているが、水素は議論されていない
- 64 株式会社三菱総合研究所 コラム「技術で拓く[超電導技術の将来展望](#)」超電導送電においてもリープフロッグを指摘している
- 65 竹内純子「[わが国のインフラ海外展開を考える](#)」国際環境経済研究所 2020 年 6 月 23 日

第4章 電力産業のカーボンニュートラル化の取り組み

関西電力株式会社 エネルギー・環境企画室 企画担当部長

電気事業低炭素社会協議会 代表理事

紀ノ岡 幸次

はじめに

地球温暖化対策は、2015 年 12 月に採択された「パリ協定」のもとで、日本も国際社会の一員として積極的な役割が期待されている。電力業界全体において実効性ある地球温暖化対策を推進することを目的として、国内の電気事業者の有志により 2016 年 2 月に「電気事業低炭素社会協議会」（以下、「協議会」）が設立され、「低炭素社会実行計画」を掲げ、その目標達成に向けた取り組みを推進してきた。各事業者がそれぞれの事業形態に応じた地球温暖化対策の取組みを着実に実行するとともに、協議会がその取り組み状況の促進・支援および適切な確認・評価を行い、PDCA（Plan（計画）、Do（実行）、Check（確認）、Act（改善））サイクルを推進することで、一丸となって低炭素社会の実現を目指している。

国内では 2018 年 7 月に「第 5 次エネルギー基本計画」が閣議決定されるとともに、2019 年 6 月にパリ協定に基づき、脱炭素社会を目指すとする「長期低排出発展戦略」が UNFCCC（国連気候変動枠組条約）事務局へ提出され、それぞれ、2030 年以降を見据えたエネルギー政策の方向性と将来の日本のビジョンが示された。その後、2020 年 10 月に政府による「2050 年カーボンニュートラル宣言」が表明され、2021 年 10 月には「第 6 次エネルギー基本計画」および「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」が閣議決定された。これを受けて、協議会では上記「低炭素社会実行計画」を「カーボンニュートラル行動計画」^(注 1)と改称し、革新的技術の追加等、低炭素化のみならず脱炭素化への取り組みを追記するとともに目標値の見直しを行った。本稿では、地球規模での CO₂ 排出削減による 2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、電気事業のあり方と具体的施策について述べた後、個別事業者の取り組みとして、関西電力の事例を紹介する。

第1節 電力業界の取り組み

1. 「S+3E」の達成

エネルギーインフラ事業である電気事業の根幹は、安全（Safety）の確保を大前提とした上で、エネルギー安定供給（Energy security）を第一に、経済性（Economic efficiency）、環境保全（Environment）、すなわち「S+3E」の達成を果たす最適なエネルギーミックス（電源構成）の追求にある。

エネルギー安定供給に関しては、2018年に発生した北海道胆振東部地震や、2019年に発生した台風第15号等の自然災害を受けた発電設備の停止や送配電設備の被害によって電力供給が遮断され、国民の生活に大きな支障を招いたことで、電力インフラのレジリエンス（災害等時の停電回避・速やかな復旧）向上の必要性が認識された。また、2016年の電力の小売全面自由化を契機に新規参入が進展し、需要家の選択肢の拡大が図られる一方で、そのことが電源の投資回収の予見性を低下させ、新規開発が停滞する中で老朽火力発電所の休廃止が進み、需給ひっ迫リスクが高まった。さらに至近ではロシアのウクライナ侵攻によるグローバルな資源価格の高騰がこれに拍車をかけ、エネルギー安全保障の観点からも、安定供給の確保が急務となっている。

こうした中で、CO₂排出削減の切り札として再生可能エネルギーの主力電源化を進めていかなければならないが、それには系統制約の克服とともに再生可能エネルギー電源の出力変動に応じた調整力を確保していく必要がある。そのうえで、経済性と環境性を両立させ、将来にわたって我が国の産業部門の国際競争力と国民の豊かな生活を維持していくための安定的な電力供給を果たすことが電気事業者の責務である。

2. 電気事業におけるCO₂排出削減

電気事業におけるCO₂排出削減のアプローチは、徹底した省エネルギーと最適なエネルギー構成を前提として、「電気の低・脱炭素化」と、「電化の促進」を両輪とした電力供給サイドと需要サイドの双方における総合的な電力供給サービスを向上させることにある。我が国のCO₂排出に占める発電等のエネルギー転換部門の割合が約4割であることを鑑みても、電力供給サイドのCO₂排出原単位（発電量当たりの排出量）の低減だけではカーボンニュートラルは実現できず、これと並行して産業・運輸および民生（業務・家庭など）部門における電化を進めることが不可欠である。

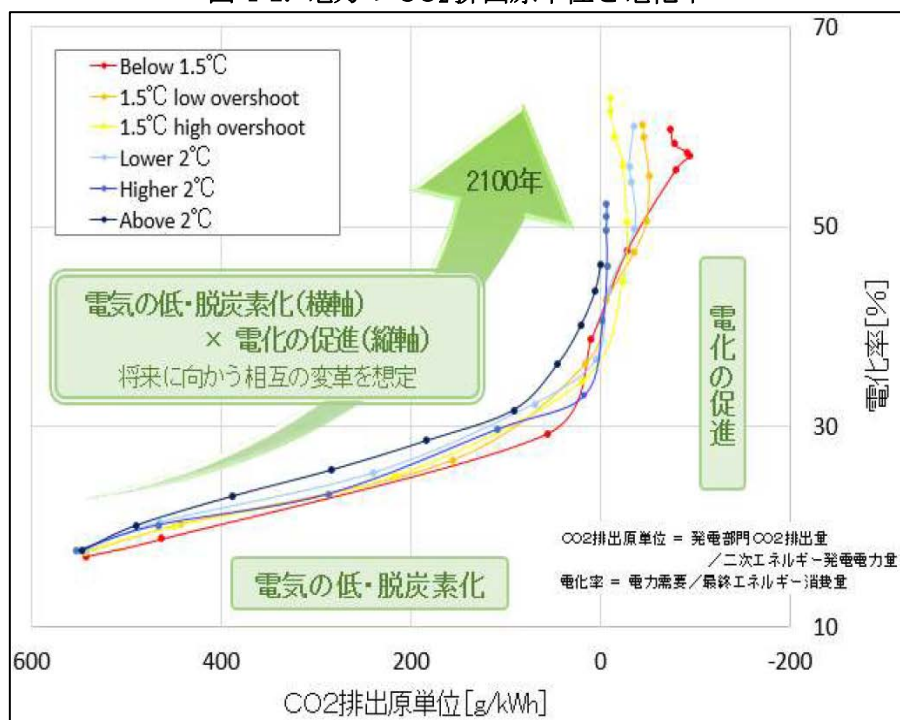
したがって、確立した脱炭素電源（原子力や再生可能エネルギー）の最大限活用やヒートポンプ活用等の普遍的な取組みを継続しつつ、電力供給サービスのさらなる高度化を果たすための「イノベーション」を通じた革新的技術の実用化に向けて、官民一体となって努力していく必要がある。加えて、国内に捉われない地球規模での CO₂ 排出削減に向けて、我が国の最先端技術による低炭素型インフラ技術の輸出ならびに自らの海外事業の展開による「海外貢献」に積極的に取組んでいく必要がある。

3. 具体的施策

(1) 将来に向けた「電気の低・脱炭素化」と「電化の促進」

以下のグラフは「IPCC（気候変動に関する政府間パネル）1.5℃特別報告書^(注2)」のデータベースをもとに、同報告書で区分された「Above2℃」～「Below1.5℃」の6つのカテゴリーに含まれる計 300 程度のシナリオを対象として、それぞれ想定されている現在から2100年までの10年ごとの世界全体における「電力の CO₂ 排出原単位」と「電化率」の数値について、カテゴリー別に中央値をプロットしたものであり、いわば、各カテゴリーの目標達成のために、両項目がそれぞれ到達しているものとする参考的なレベルを示す分布図である。

図 4-1. 電力の CO₂ 排出原単位と電化率



カテゴリー名称	内 容
Below 1.5°C	21世紀中のピーク昇温が確率50～66%で1.5°C未満。オーバーシュートなし
1.5°C low overshoot	2100年の昇温中央値が1.5°C未満。確率50～66%で一時的に1.5°Cを超過
1.5°C high overshoot	2100年の昇温中央値が1.5°C未満。確率67%以上で一時的に1.5°Cを超過
Lower 2°C	21世紀中のピーク昇温が確率67%以上で2°C未満
Higher 2°C	21世紀中のピーク昇温が確率50～66%で2°C未満
Above 2°C	2°C超過

出所：電気事業低炭素社会協議会；「[2050年カーボンニュートラルの実現に向けた我が国電気事業者の貢献について](#)」（p.3）

(<https://e-lcs.jp/news/32b9ad4be3fe035115f823f1fcba827baf20398e.pdf>)

いずれのカテゴリーにおいても、プロット分布は 2100 年に向けて右上がりとなっており、それぞれの気温上昇の抑制目標を達成するための手段として、将来にわたる、省エネルギーおよび効率改善を考慮し、「電力の CO₂ 排出原単位」の低減と「電化率」の向上の双方が想定されたものであることを表している。各シナリオにおいて電力供給サイドおよび需要サイドのそれぞれに織り込まれた技術の実現可能性および経済合理性に係る不確実要素はあるものの、徹底した省エネルギーと最適なエネルギー構成を前提として、「電気の低・脱炭素化」と「電化の促進」の双方による総合的な電力供給サービスの向上・変革が重要であることが示唆されたものと言える。

(2) 従来からの普遍的な取組み

電気事業を通じた CO₂ 排出削減のアプローチとなる「電気の低・脱炭素化」と「電化の促進」については、これまでも各事業者がその事業形態に応じて様々な施策を検討・展開してきており、これに関しては、今後の中長期にわたって継続的に果たすべき普遍的な取組みと言える。

1) 安全確保を大前提とした原子力発電の活用

「電気の低・脱炭素化」のうち、原子力については、福島第一原子力発電所事故から得られた教訓と知見を踏まえた徹底的な安全対策を実施し、規制基準に留まることなく、自主的・継続的に安全性向上に取り組むとともに、核燃料サイクルを着実に推進していく。また、立地地域をはじめ広く社会の理解が得られるよう丁寧な説明を尽くした上で、安全が確認され稼働したプラントについて、安全・安定運転に努めていく。

2) 再生可能エネルギーの活用

主力電源化が期待される再生可能エネルギーについては、水力、地熱、太陽光、風力、バイオマスの最大限の導入・活用とともに、太陽光発電の出力変動対策についての技術開発や地域間連系線を活用した風力発電の導入拡大に取り組む。

3) 火力発電の高効率化

火力発電の開発等にあたっては、プラント規模に応じて、経済的に利用可能な最良の技術（BAT）を用いるとともに、既設プラントの熱効率の適切な維持管理に努める。

4) 電化の促進

「電化の促進」については、蓄熱式ヒートポンプやIH等の電化機器の普及拡大とともに、EV（電気自動車）、PHV（プラグインハイブリッド自動車）の充電インフラの開発・普及に貢献する。また、電気使用の効率化を実現するための環境整備として、スマートメーター（自動検針機能付き電力メーター）の導入を完了する。

(3) 革新的技術／イノベーション

上述の「IPCC1.5℃特別報告書」に示されるような、将来における大幅なCO₂排出削減を達成するためには、以上のような従来の取組みの延長だけではない、抜本的な革新的技術を生み出す「イノベーション」が不可欠であり、これらの技術の実用化に向けて、官民一体となって努力していく必要がある。ここで求められる「イノベーション」とは、単なる最先端技術の確立のみでなく、環境性能に見合ったコストによって経済合理的な実用化・普及が果たされる社会実装レベルの技術を創出するものである。「電気の低・脱炭素化」と「電化の促進」のそれぞれの観点から期待される革新的技術として、以下のようなものが挙げられる。

1) 原子力

◇小型モジュール炉

SMR（Small Modular Reactor）と呼ばれる出力 30 万 kW 以下の小型原子炉。軽水炉（PWR、BWR）やガス炉など様々な炉型がある。小型軽水炉では、原子炉出力が小さいことから、冷却機能の喪失時において、従来の大型軽水炉と同様に、ポンプでの注水により炉

心を冷却する機能だけでなく、大気との熱交換や炉心上部に設置されたタンクやプールの保有水の重力のみによる注水により、炉心を冷却できるシステムも設計されている。また、需要規模の小さい地域や未開発地などでの利用に適しており、エネルギー需要の増加に併せてモジュールを追加することも可能であり、燃料の交換を行うことなく長期間運転を可能とする設計もある。

◇熔融塩炉

熔融塩（主に、フッ化物熔融塩（ LiF-BeF_2 ））に核燃料物質（ウランやトリウム）を溶解させて液体燃料とし、ポンプにより液体燃料そのものを原子炉と 1 次系熱交換器の間で循環させる液体燃料炉。核燃料物質が冷却材としての熔融塩と一体となって循環するため、運転しながら新燃料の補給が可能となるとともに、燃料処理系を設けることによって核分裂生成物の除去や核燃料物質の連続抽出が可能となる。この燃料の融点・沸点が高く、蒸気圧も低いことから 1 次系の構造材を薄くでき、効率の高い熱利用システムとすることができる。また、プルトニウムなどの超ウラン元素を実質的に生成せず、またウランに比べ資源量が豊富と言われるトリウムを燃料として利用可能なことから資源の有効利用を図ることができる。

◇高温ガス炉

炉心の主な構成材に黒鉛を中心としたセラミック材料を用い、核分裂で生じた熱を外に取り出すための冷却材にヘリウムガスを用いた原子炉。1,000℃程度の高温ガスを用いたガスタービン発電によって高い発電効率を実現することが可能なおうえ、熱供給と組み合わせた熱電併給システムの構築も可能であり、水を熱分解する化学反応（IS プロセス）を利用した水素製造装置との組み合わせも検討されている。

◇核融合炉

重水素や三重水素のような軽い原子核同士が反応して、より重い原子核になる時に発生する核融合エネルギーと呼ばれる巨大なエネルギーを取り出すシステム。この実現に向け、国際協力で進められているトカマク方式の ITER（イーター）計画などの活動が進展している。高レベル放射性廃棄物が発生しないことから、エネルギーの長期的な安定供給と環境問題の克服を両立させる将来のエネルギー源として期待されている。

2) 再生可能エネルギー

◇次世代太陽光発電

次世代太陽光電池として注目されるのはペロブスカイトと呼ばれる結晶構造を有する材料を発電層として用いた太陽電池。ペロブスカイト原料を含む溶液を塗布・印刷するという製造プロセスから、他の太陽電池に比べて単純化が可能であり、大幅な低コスト化が見込まれる。また、フィルム材料への形成が可能であり、これまで重量物を載せられなかった設備への敷設など、用途拡大の可能性を備える。この他、導体をナノレベルに極小化し、高い変換効率を得られる量子ドット太陽光や、電力をマイクロ波に変換することで、自然条件に左右されない宇宙空間での太陽光エネルギーの利用といった未来技術にも期待がかかる。

◇蓄電池

難燃性で熱的・化学的安定性に優れた固体電解質を使用する全固体リチウムイオン電池は、電解液を使用する蓄電池ではトレードオフの関係にあったエネルギー密度と安全性の両立が可能である。また、「リチウム－硫黄電池」、「亜鉛－空気電池」、「新型金属 (Li,Mg,Al)－空気電池」等の革新型蓄電池では、エネルギー密度を 500Wh/kg まで向上させることが目指されている。

3) 火 力

◇CCS (Carbon dioxide Capture and Storage)

火力発電所等から排出された CO₂ を他の気体から分離・回収のうえ、地中深くに圧入・貯留する技術。効率的な分離回収技術として、化学吸収法・固体吸収法・膜分離法等の開発が進められている。カーボンニュートラルなバイオマス発電で発生した CO₂ を回収・貯留する BECCS (Bioenergy with CCS) は実質的なネガティブエミッション技術 (大気中の CO₂ を除去する技術) と言える。

◇CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) ／カーボンリサイクル

CCS と同様に回収した CO₂ を利用する技術。CCU の一例として、圧入した CO₂ によって石油等の生産量を増加させる石油増進回収 (EOR : Enhanced Oil Recovery) が海外において実施されてきたが、我が国においては昨今から、CO₂ を炭素資源 (カーボン) と捉え、多様な炭素化合物として、触媒開発・人工光合成・藻類利用・メタネーション (水素と二酸

化炭素から「メタン」を合成する技術）・コンクリート化等に再利用する「カーボンリサイクル」の考えに基づく検討が始まっている。

4) 水素・アンモニア

◇水素サプライチェーン

- ・ 再生可能エネルギーの活用 (Power to Gas)

水の電気分解によって水素が発生する原理を利用して再生可能エネルギー由来の電力からCO₂フリーの水素を製造する技術。特に、出力変動型電源からの余剰電力を水素の形状で貯蔵することによって、エネルギーを有効に活用できるほか、この水素を触媒によってCO₂と化学反応させることでメタンを生成することも可能となる。

- ・ 海外の安価な未利用エネルギーの活用

海外に豊富に存在するものの、低品位ゆえに利用先が限定される褐炭のガス化処理によって水素を製造する技術。この際に発生するCO₂をCCS (CO₂回収・貯留技術)・CCU (CO₂回収・利用) で分離・回収することにより、CO₂フリーの水素を得ることが可能となる。

- ・ 水素発電

燃焼速度の大きさや火炎温度の高さから天然ガスなどの他の燃料と比べて燃焼時のNO_x (窒素酸化物) が発生しやすい水素の特性に対して、これに適応する燃焼器の開発等により火力発電設備での使用が可能となれば、これまでに技術が確立している燃料電池に加えて、大規模なCO₂フリー電力の確保が可能となる。

◇アンモニアサプライチェーン

- ・ アンモニア製造新触媒の活用

従来のアンモニア製造方法である鉄系触媒を用いたハーバーボッシュ法は、高温高压下での合成が前提となることに加え、機構も複数存在することから小型化が難しく、また、多量のエネルギーを必要とすることでCO₂排出量が多い特徴があるが、低温・低圧で合成可能な新触媒の開発により、海外特許保有者 (ライセンサー) に依存しない生

産体制が構築できるとともに、製造コストの低減、製造時の CO₂ 排出量の低減が可能となる。

- ・ グリーンアンモニア電解合成技術の開発

従来のグリーンアンモニア（CO₂ を排出しない方法で生成された原材料を用いて製造するアンモニア）製造方法では、水の電気分解、水素貯蔵、水素と窒素の反応という 3 プロセスの装置が必要であるが、水と窒素から 1 ステップで低コスト・低 CO₂ 排出でアンモニアを製造できるグリーンアンモニア電解合成技術の開発によりグリーンアンモニア合成量増加につながり、製造効率向上が可能となる。

- ・ アンモニア発電

燃焼安定性や NO_x 発生抑制等の課題に対し、収熱技術や燃焼方法、さらにはバーナー技術の開発が必要。また、石炭火力ボイラとガスタービンでは、課題克服に異なる技術が求められるが、それぞれに対応した混焼・専焼技術の開発により、燃焼しても CO₂ を排出せず、ライフサイクル全体として水素より安価な燃料アンモニアの発電利用が可能となる。

5) 運輸部門の電化促進

トラックおよび航空機の電動化に向けては、大量・長距離輸送を果たす蓄電池の高出力化および小型化・軽量化のための技術開発が求められる。また、船舶においては、回生電力の発生機会が無いことから、蓄電池の大容量化が求められる。いずれも蓄電池の低コスト化は共通の課題であり、電力供給サイド・需要サイドともに、これらの解決に向けた技術開発が期待される。

6) 産業部門・民生部門の電化促進

産業部門においては、金属・化学・セメント産業等における一部の直接加熱工程を除けば、電化によるエネルギー消費量の削減がもたらす CO₂ 排出削減ポテンシャルは大きく、製鉄プロセスであれば、前述の電力由来の水素（Power to Gas）を利用した水素還元製鉄の実用化によって、これがさらに拡大する可能性がある。加えて、産業部門における電化の促進による効果として、生産工程における電力使用量の機動的な運用による需要サイドでの調整力、すなわち分散型エネルギーシステムにおける VPP（仮想発電所：バーチャルパワープラント）・DR（デマンドレスポンス）の役割を果たすことによって、再生可能エネルギーの導

入拡大に対する系統安定化への貢献にも期待される。また、産業部門・民生部門のいずれにおいても、ICT（情報通信技術）の高度化による電化メリットの可視化をはじめとした情報の充実によって、ヒートポンプや IH 等の高効率機器の有効性が認識され、導入後には AI（人工知能）・IoT（モノをインターネットでつなぐ技術）による効率的な制御が行われることによる省エネ・CO₂ 排出削減の同時達成が期待される。

(4) 海外貢献

地球温暖化問題の解決を果たすためには、グローバルバリューチェーンを通じた地球規模での CO₂ 排出削減に取り組むことが必要となる。今後も引き続き、我が国が世界に誇る高効率火力発電技術^(注 3) や系統安定化問題を抱える他国やエネルギー需給体制の未成熟な新興国・発展途上国を対象とするエネルギーマネジメントといった低炭素型インフラ技術の輸出や自らの海外事業の展開による国際的な貢献を進めていく。例えば、エネルギー効率に関する国際パートナーシップ（GSEP）活動を通じた石炭火力設備診断や、二国間クレジット制度（JCM）を含む国際的な制度の動向を踏まえた、先進的かつ実現可能な電力技術の開発・導入等により地球規模での低炭素化を目指す。

これについては、CO₂ 排出削減の観点のみならず、2015 年 9 月の国連サミットで採択された 2030 年度に向けての「持続可能な開発目標（SDGs）」が目指す、豊かで活力のある社会の実現とも整合的であり、さらなる将来の世界の創造にも繋がるものである。

第 2 節 関西電力の取り組み

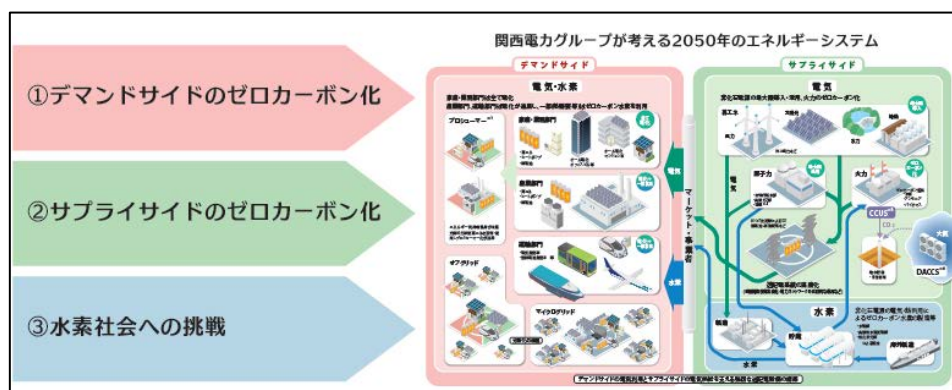
2020 年 10 月に政府において 2050 年カーボンニュートラル宣言がなされるなど、地球温暖化への社会的な要請が一層高まる中、関西電力ではさらなる地球温暖化問題への対応を推進していくため、2021 年 2 月に『ゼロカーボンビジョン 2050』を策定し、2022 年 3 月にはそれを実現するための道筋を定めた、『ゼロカーボンロードマップ』を策定した。以下その概要を紹介する。

1. 『ゼロカーボンビジョン 2050』

『ゼロカーボンビジョン 2050』では、2050 年のエネルギーシステムについて、3D（脱炭素化・分散化・デジタル化）+D（電化）が劇的に進展し、サプライサイド（供給側）で

はエネルギー供給がゼロカーボン化される一方で、デマンドサイド（需要側）ではエネルギー利用が「電気」と「水素」に集約されるとともに、エネルギー利用者自身がプロシューマー^{（注4）}化してエネルギーの供給も行うなど、デマンドサイドの役割が拡大すると想定している。このような世界観を踏まえ、取組みの大きな方向性として「デマンドサイドのゼロカーボン化」、「サプライサイドのゼロカーボン化」、「水素社会への挑戦」という3つの柱を掲げ、発電事業をはじめとする事業活動に伴うCO₂排出を2050年までに全体としてゼロとすることを目指している。

図 4-2. 関西電力グループが考える 2050 年のエネルギーシステム



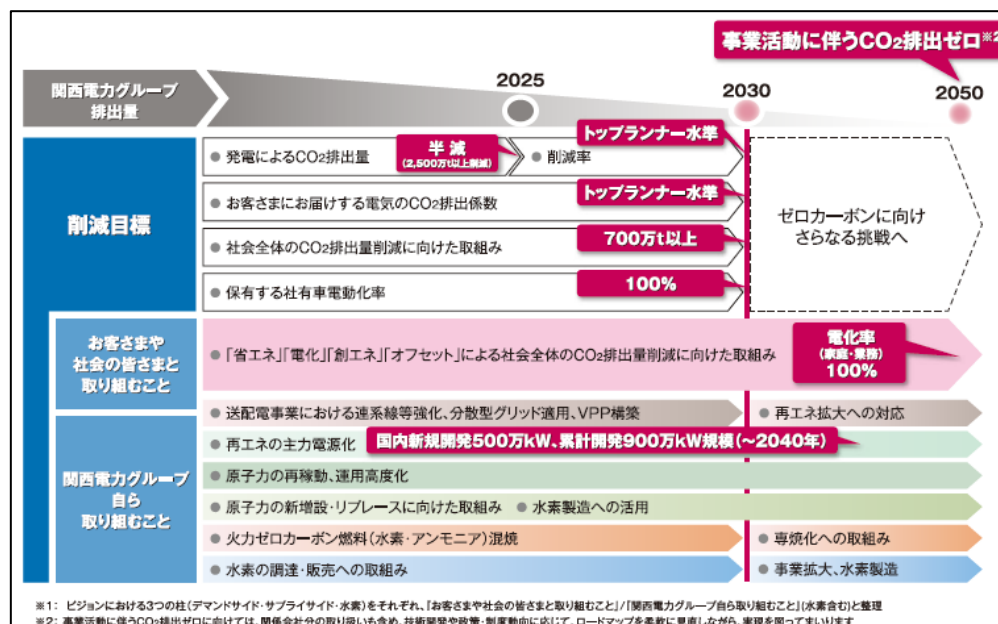
出所：関西電力グループ「ゼロカーボンビジョン 2050」

(<https://www.kepcoco.jp/sustainability/environment/zerocarbon/index.html>)

2. 『ゼロカーボンロードマップ』

2050年に事業活動に伴うCO₂排出量ゼロを実現する具体的な道筋を示す『ゼロカーボンロードマップ』では、2030年度を中間地点と位置づけ、『ゼロカーボンビジョン 2050』における取組みの3つの柱を「関西電力グループ自ら取り組むこと」と「お客さまや社会の皆さまと取り組むこと」の2つの観点で再整理し、2030年度時点の目標と合わせて、各分野における具体的な取り組み内容を示している。

図 4-3. 関西電力グループ「ゼロカーボンロードマップ」



出所：関西電力グループ「ゼロカーボンロードマップ」

(<https://www.kepco.co.jp/sustainability/environment/zerocarbon/roadmap.html>)

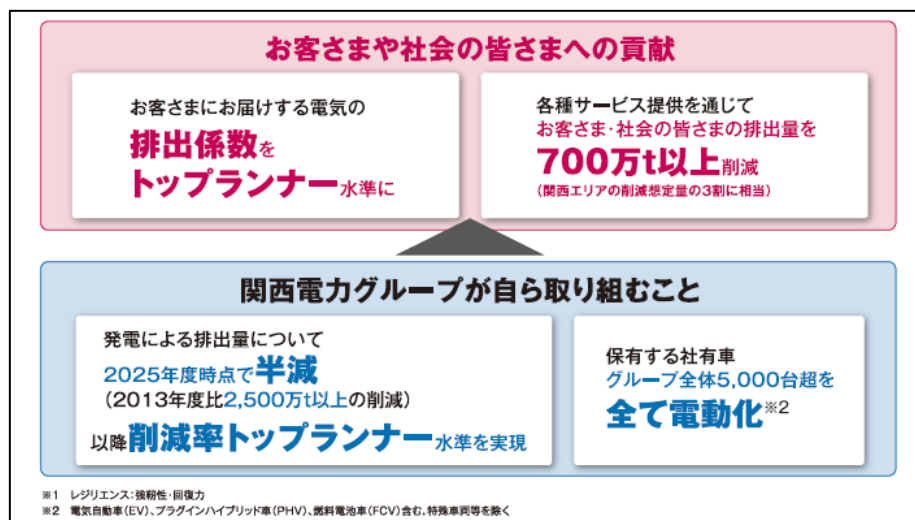
「関西電力グループ自ら取り組むこと」として、「発電による排出量について 2025 年度時点で半減、以降削減率でトップランナー水準を実現」、「保有する社有車（グループ全体 5,000 台超）を全て電動化」の 2 つの目標を掲げ、再生可能エネルギーの主力電源化や、原子力の最大限活用、火力のゼロカーボン化、ゼロカーボン水素の活用およびこれらの取組みを支えるための最適な電力系統の実現により CO₂ 排出量削減を着実に進めていくこととしている。特に、再生可能エネルギーについては、開発目標として 2040 年までに国内で 1 兆円規模の投資を行い、新規開発 500 万 kW、累計開発 900 万 kW 規模の開発を目指す。

「お客さまや社会の皆さまと取り組むこと」としては、「お客さまにお届けする電気の排出係数をトップランナー水準にする」、「各種サービスを通じてお客さま・社会の皆さまの排出量を 700 万トン削減する」ことを目標として掲げ、デマンドサイドの CO₂ 排出量削減に資する様々なサービスを提供していくこととしている。

電力分野以外にも運輸分野で車両導入と併せた充電やエネルギーマネジメントサービス等をワンパッケージで提供することによる CO₂ 排出量削減や、EV 船や空飛ぶ車等の導入のサポートによる、陸・海・空におけるモビリティ（移動手段）の電化推進や、コミュニティ分野で、地域課題を踏まえ、自治体やディベロッパーと連携し、関西電力グループの様々なソリューションや新技術を組み合わせた幅広いサービスを提供するなど、様々な分野で

ゼロカーボン社会の実現に貢献することとしている。

図 4-4. 関西電力グループの CO₂ 削減目標



出所：関西電力グループ「ゼロカーボンロードマップ」

(<https://www.kepco.co.jp/sustainability/environment/zerocarbon/roadmap.html>)

第3節 国への期待

1. 「電気の低・脱炭素化」と「電化の促進」に資する政策的・財政的措置

我が国全体での 2050 年カーボンニュートラルの実現という非常にチャレンジングな目標に対し、電気事業者として需給両面から貢献していく上で政府に期待したいのは、まず、「電気の低・脱炭素化」と「電化の促進」に資する政策的・財政的措置である。2023 年 3 月に閣議決定された「GX 実現に向けた基本方針」^(注 5) において、脱炭素電源を最大限活用すべく、再生可能エネルギーの主力電源化とともに、原子力については、必要な規模を持続的に活用するため、次世代革新炉の開発・建設に取り組んでいくことなどの具体的な方針が示された。今後は、次世代革新炉の開発・建設に取り組むに際しての課題である、初期投資の大きさを踏まえた資金調達支援や、原子力の特性を踏まえた費用回収に資する制度措置等の具体化が重要である。また電化の促進に向けては、ヒートポンプや IH 等高効率機器普及・技術開発等への補助拡充などである。これに関連し、FIT（再生可能エネルギー固定価格買取）制度は再エネ導入拡大による電気の低・脱炭素化に資するものの、既に FIT 賦課金による相当の負担があり、将来のカーボンニュートラルに不可欠な電化の促進を阻害しないようにすることが必要である。

2. イノベーション技術と経済合理性を両立させる政策パッケージ

次に、社会実装可能なイノベーション技術と経済合理性を両立させる政策パッケージである。例えば水素・アンモニア発電を社会実装するためには、大量かつ安価で安定供給可能な燃料サプライチェーンの確立が必要であり、また、CCUS（CO₂回収・貯留・利用）/カーボンリサイクルを社会実装するためには、CO₂の輸送・貯留インフラ等の環境が整備されることを前提としながら、技術開発を推進していくことが必要である。カーボンニュートラルを実現するための設備投資や研究開発等については、GX（グリーン・トランスフォーメーション）移行債による20兆円規模の国の支援が打ち出されているが、こうした観点をふまえて、適切に活用されることが望まれる。

3. コスト負担への国民理解の醸成

最後に、カーボンニュートラル実現に必要なコストを社会全体で負担することへの国民理解の醸成である。カーボンプライシングによるコスト上昇が見える化することは、需要家の行動変容に繋がるとともにGX関連製品・事業の付加価値の向上を通じて、民間のGX投資先行インセンティブになる。したがって、国が率先して国民理解を得る努力を行い、行動変容促進につなげるとともに、小売事業者が適時に価格に反映できる仕組みを整備するための検討が望まれる。

注

¹ <https://e-lcs.jp/news/detail/000275.html>

² IPCC（気候変動に関する政府間パネル）がUNFCCC（国連気候変動枠組条約）からの要請を受けて、1.5℃の地球温暖化による影響とそこに至る温室効果ガスの排出経路について、2018年10月に取りまとめた特別報告書。正式タイトルは「気候変動の脅威への世界的な対応の強化、持続可能な発展及び貧困撲滅の文脈において工業化以前の水準から1.5℃の気温上昇にかかる影響や関連する地球全体での温室効果ガス（GHG）排出経路に関する特別報告書」。

³ 高効率のプラント導入、運用、設備改修により、2030年度におけるOECD諸国及びアジアの発展途上国での石炭火力CO₂削減ポテンシャルは最大9億t-CO₂/年

⁴ 自身で発電した電気を消費し、余剰分は売電する生産消費者

⁵ https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002_1.pdf

第5章 ガス産業のカーボンニュートラル化の取り組み

東京ガス株式会社 元経営調査室長

日本エネルギー経済研究所協会会長

大先 一正

はじめに

わが国が国際社会に公約した 2050 年のカーボンニュートラル（実質排出ゼロ）や 2030 年度の温室効果ガスの 2013 年比 46%削減の実現のためには、①エネルギー需要の電力化を輸送部門も含めて可能な限り推進し、併せて電源の脱炭素化を図るとともに、②電力化が困難な産業・民生部門の熱需要や輸送部門の液体燃料需要等の脱炭素化を図り、かつ③脱炭素化が難しく、排出が避けられないエネルギー由来の二酸化炭素（CO₂）については、大気から回収し、地下に貯留する必要がある。

このうち、電力化が困難な熱需要や液体燃料需要の脱炭素化については、合成メタン、合成液体燃料、バイオマス（動植物から生まれた、再利用可能な有機性資源で化石資源を除いたもの）の導入が有効と考えられ、特に脱炭素化された水素（H₂）と CO₂からメタネーションにより製造される合成メタンは、既存の天然ガス及び LNG の生産・輸送インフラや都市ガス導管網、需要家のガス消費機器がそのまま利用できるため、非電力分野でのスムーズな脱炭素化の担い手として注目を集めている。

このため、わが国では、表 5-1「メタネーション取り組みマップ 2023」に示されるように多くの天然ガス生産者、都市ガス事業者、エンジニアリング会社、船会社、大口産業用需要家等が、技術開発やサプライチェーン構築の検討、実証、事業化等に着手している。しかし、メタネーションによる合成メタンの社会実装化（実用化）に向けては、技術的な効率性の向上や設備大型化等の課題に加え、海外サプライチェーンの構築等による安価な水素や CO₂の調達、CO₂カウント等の多くの課題の克服が必要となっている。

このような状況を踏まえ、経済産業省資源エネルギー庁は、官民の関係者が一堂に会して情報を共有し、メタネーションにより生産される合成メタンの活用拡大に向けた諸課題を検討し、実用化に向けた計画を策定するため、2021 年 6 月に「メタネーション推進官民協議会」を設立した。その後、メタネーション推進官民協議会では、専門的な課題をより深堀

りするタスクフォースを 3 つ設立して検討を進め、2022 年 11 月開催の第 9 回官民協議会では、「今後のメタネーションの推進について」と題する中間報告を取りまとめた。

この中間報告に盛り込まれた検討成果は、12 月 22 日に開催された政府の第 5 回 GX（グリーン・トランスフォーメーション）実行会議で決定された基本方針に盛り込まれ、政府として GI（グリーン・イノベーション）基金を活用した研究開発の支援等を推進し、合成メタンの実用化・低コスト化に向けた支援の在り方を検討することになった。

一方、都市ガス業界では、21 世紀後半の脱炭素社会では、低炭素燃料ではあるが、燃焼時の CO₂ 排出が避けられない天然ガスの需要家向け導管供給が困難になることを踏まえ、メタネーションにより製造される合成メタンの導入事業を、1872 年の横浜でのガス灯向け石炭ガス供給の開始及び 1960 年代末から 2010 年代初めにかけて実施された LNG 導入及び供給ガスの天然ガス化に続く「第 3 の創業」と位置付け、業界の生き残りをかけた課題として取り組むことを決めた。

このため、日本ガス協会では、2020 年 11 月に「2050 年のカーボンニュートラル化」と題する宣言により脱炭素化への決意を表明するとともに、2021 年 6 月には業界としての 2030 年及び 2050 年の具体的な目標を定めたアクションプランを発表し、業界全体としての取り組み姿勢を明らかにした。

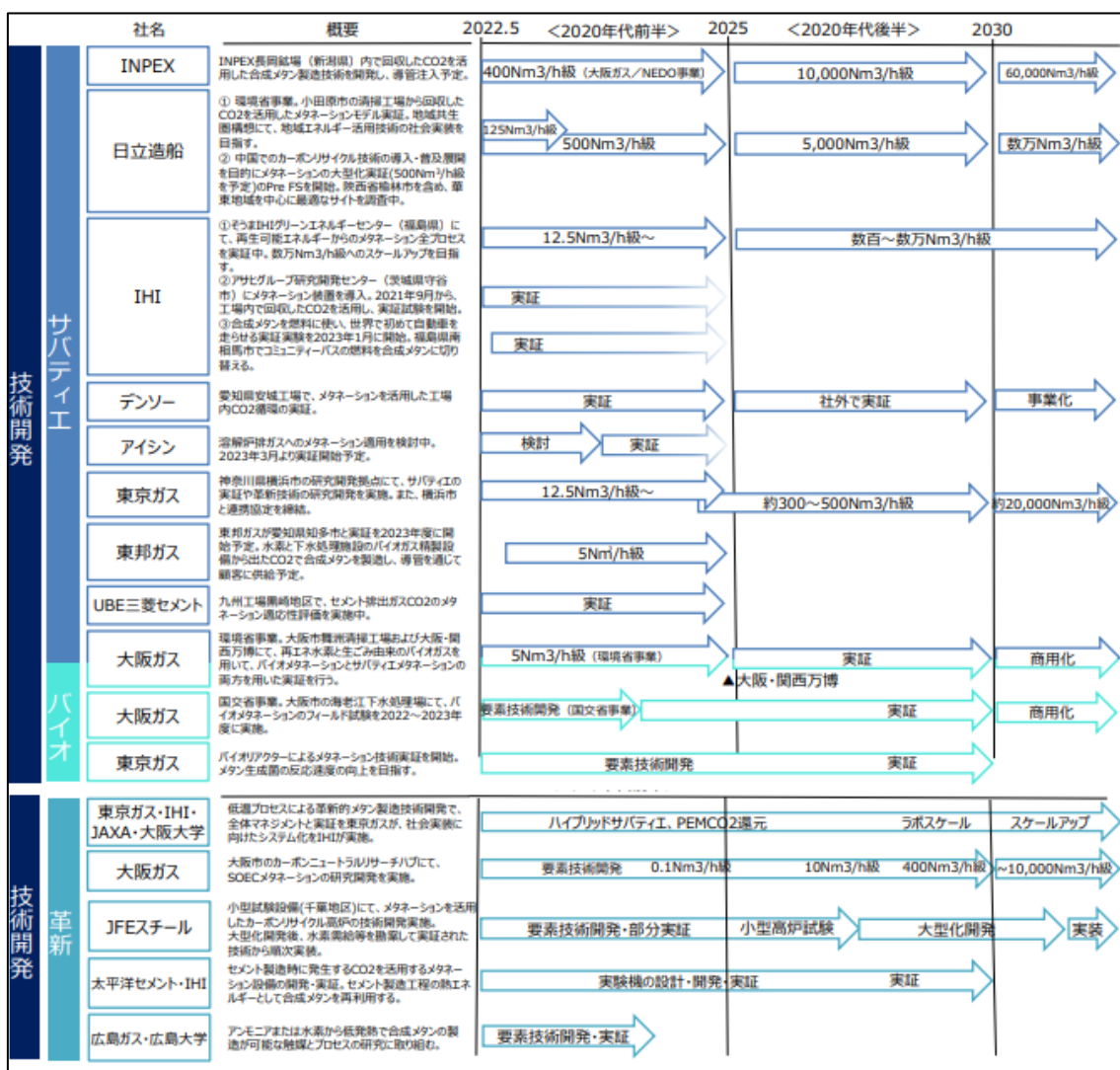
この日本ガス協会を軸とした都市ガス業界全体としての取り組みに加え、各社は単独あるいは連携してカーボンニュートラル化の取り組みを推進しており、特に東京ガス・大阪ガス・東邦ガスの大手都市ガス 3 社は三菱商事と 2022 年 9 月に覚書を締結し、米国における合成メタンの事業可能性調査の本格化を決め、2030 年に想定されている都市ガス需要の約 1%に相当する 13 万トンのカーボンニュートラル LNG の確保の目途を立てつつある。また、東京ガスと大阪ガスの大手 2 社は、共同委員会「革新的メタネーション技術社会実装検討委員会（委員長：橘川武郎国際大学副学長）」を設立し、2022 年 12 月 22 日に初会合を開催し、両社がそれぞれ開発に取り組んでいる革新的メタネーション技術の 2030 年以降の社会実装化に向けて共通する課題への助言を受けることとしている。

メタネーションにより製造された合成メタンには、技術的な困難性もあり、現時点では水素やアンモニアに比べると社会実装化に向けての競争にやや遅れを取っていると考えられる。しかし、第 9 回メタネーション推進官民協議会で発表された横浜国立大学と日本エネルギー経済研究所の共同研究によれば、海外から輸入された合成メタンは、輸入水素に比べてコスト面で優位であり、輸入アンモニアに対してもそれ程遜色がないことが明らかに

された。また、合成メタンには、既存の天然ガスや LNG インフラがそのまま利用できる長所もあり、海外においても気候変動対策に熱心な企業や政策担当者の関心が高まっている。

以上のようなメタネーションを巡る最近の動向を踏まえ、本稿ではメタネーション導入に向けての官民による全国的な取り組み方向及び政府の方針に加え、わが国の都市ガス業界及び欧米諸国での取り組み状況を報告する。なお、メタネーションによる合成メタンの呼称については、日本ガス協会が第9回メタネーション推進官民協議会で提案して承認され、広く用いられるようになっている「e-メタン (e-methane)」を用いる。

図 5-1. メタネーション取り組みマップ 2023



サプライチェーン	国内	太平洋セメント・東京ガス	太平洋セメント／東京ガスが、セメント製造工程から回収されるCO2を活用した合成メタンを都市ガス導管で供給するメタネーション事業のFS調査を実施中。
		富士フイルム・東京ガス・南足柄市	富士フイルム／東京ガス／南足柄市が包括連携協定を締結し、富士フイルム足柄サイトへのメタネーション導入FSの開始を合意。
		関西電力	堺エリアで関西電力グループの設備を活用したメタネーション実証に向けたFS調査を実施（2021年度にNEDO事業で実施）。
		東邦ガス・デンソー・アイシン	アイシン／デンソー／東邦ガスが、内陸部の工場群(都市ガス需要)から回収したCO2を、湾岸部のLNG基地へ運搬して合成メタンを製造し、都市ガス導管を用いて当該需要に供給するCO2循環モデルのFS調査を実施中。
		西部ガス	北九州市とカーボンニュートラル実現に向けた連携協定を締結し、ひびきLNG基地でのメタネーション実証を検討。
	海外	東京ガス・住友商事	ペトロナス／東京ガス／住友商事がマレーシアで製造した合成メタンを日本に導入するFS調査を実施中。
		東京ガス・大阪ガス・東邦ガス・三菱商事	東京ガス／大阪ガス／東邦ガス／三菱商事が北米で製造した合成メタンを日本に導入するFS調査を実施中。 ※東京ガス／三菱商事は豪州等においても、同様のFS調査を実施中。
		東京ガス・大阪ガス・三菱商事	東京ガス／大阪ガス／三菱商事が、中東エリアでのFS調査を実施中。
		INPEX・大阪ガス	INPEX／大阪ガスが豪州等から国内への合成メタンの大規模供給に向けたFS調査/LCA調査及び10,000・60,000Nm3/hの基本設計を実施中（2021年度からNEDO事業で実施）。
		大阪ガス	①大阪ガス／ATCOオーストラリアが豪州で製造した合成メタンを豪州域内で供給・日本等への輸出することに関するFS調査を実施中（2022年中に完了）。 ②大阪ガス／City Energy等がシンガポールで合成メタンを生成し、現地のガス需要に供給するためのビジネスモデル等の検討を実施中（2022年中に完了）。
サプライチェーン	海外	JERA	米国で再エネ由来水素と火力発電所等から回収したCO2より合成メタンを製造し供給を行うFS調査を実施（2021年度にNEDO事業で実施）。
		東邦ガス・豊田通商・トタルエナジーズ	東邦ガス／豊田通商／トタルエナジーズは水素・合成メタンなどを日本に導入するための、FS調査開始に合意。トタルエナジーズが製造する水素・合成メタンなどの海上輸送、国内受入・配送・利用までのバリューチェーン全体の課題を洗い出し、実証実験を視野に入れた適地の選定と、導入に向けた実現性の調査を行う。
		東京ガス・大阪ガス・シェル	東京ガス／大阪ガス／シェルは、海外メタネーションの日本導入事業の商用化を目指し、エンジニアリング・経済性を議論中。
		大阪ガス・丸紅	大阪ガス／丸紅／PERU LNGはペルーでの合成メタン製造について事業化調査を開始。ペルー国内や日本での販売に向けた検討を実施中。
	プラットフォーム	大阪ガス・三菱重工・日本IBM	大阪ガス／三菱重工／日本IBMは合成メタンの環境価値の可視化・最適化に向け、三菱重工と日本IBMが構築を進めるCO2流通を可視化するデジタルプラットフォーム「CO2NEX（コネックス）」を活用し、サプライチェーン全体における合成メタンのCO2排出量を可視化し環境価値の流通・移転を可能にするシステムの概念実証（PoC：Proof of Concept）を共同で実施することに合意。
参考	船舶	商船三井	「CCR研究会 船舶カーボンリサイクルWG」の幹事会社として、カーボンニュートラルな合成メタンを船舶の代替燃料として活用することにより、CO2排出抑制を目指す。
		国際海事機関	メタネーションの原料として分離、回収したCO2が各国のGHG inventory に排出計上されている場合、そのCO2から合成したメタンの船上燃焼時のCO2排出をゼロと見做す案を日本等が提案

出所：資源エネルギー庁；「[今後のメタネーションの推進について](#)」

（第9回 メタネーション推進官民協議会資料）

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_04_02.pdf)

第1節 わが国全体としてのメタネーションに向けての取り組み

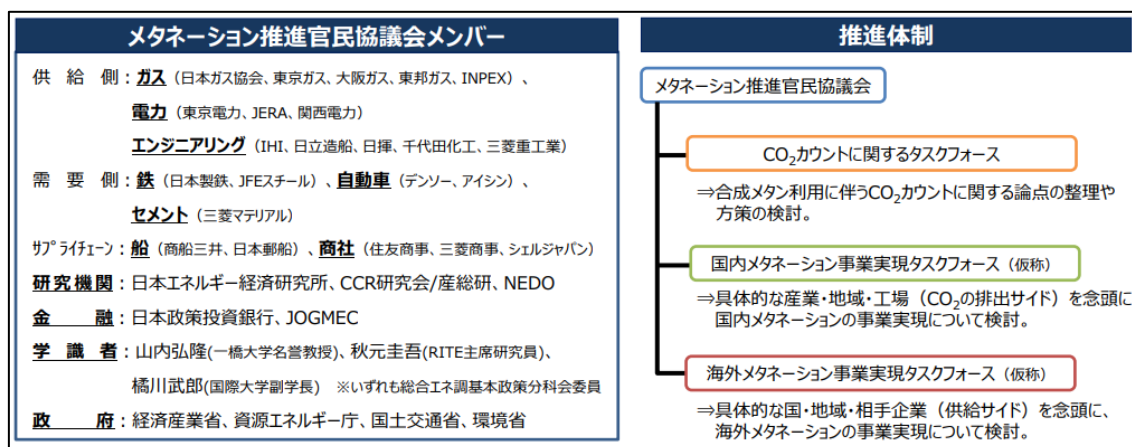
1. メタネーション推進官民協議会の検討経緯と中間報告

(1) 検討経緯

2021年6月28日に山内弘隆一橋大学名誉教授を座長に官民29名の委員で構成される「メタネーション推進官民協議会」が設置され、より専門的な立場からの課題検討のため、①CO₂カウントに関するタスクフォース、②国内メタネーション事業実現タスクフォース、③海外メタネーション事業実現タスクフォースが設けられた。その後、約1年半の検討成果を踏まえ、2022年11月22日開催の第9回官民協議会において「今後のメタネーションの推進について」と題する中間報告がまとめられ、その内容は、12月22日開催の政府の第5

回 GX 実行会議（議長：岸田文雄首相）で決定された「GX 実現に向けた基本方針」に盛り込まれ、添付された参考資料の「今後の道行き」において e-メタンの目標・戦略や支援方針等が明らかにされた。

図 5-2. メタネーション推進官民協議会のメンバーと推進体制



出所：経済産業省産業技術環境局；「エネルギーを起点とした GX について」（第 3 回 産業構造審議会 産業技術環境分科会 グリーントランスフォーメーション推進小委員会／総合資源エネルギー調査会基本政策分科会 2050 年カーボンニュートラルを見据えた次世代エネルギー需給構造検討小委員会 合同会合資料,p.64）

(https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/003_02_00.pdf)

(2) 中間報告「今後のメタネーションの推進について」の要旨

第 9 回メタネーション推進官民協議会でまとめられた中間報告は、1) 日本企業によるメタネーションの取り組みの広がり、2) 合成メタンの導入に向けた制度・仕組み、3) 合成メタン燃焼時の CO₂ カウント、4) 合成メタンの導入促進の検討の方向性の 4 項目で構成されており、各項目の要旨は下記の通りである。

1) 日本企業によるメタネーションの取り組みの広がり

① 国内メタネーションに係わる動向

国内では、鉄鋼・石油化学等により CO₂ が大量に排出されるコンビナート等でのメタネーション導入が効果的と考えられ、製造業によるオンサイトの e-メタンの生産・利用の実証の取り組みが始められており、今後の国内の水素供給の充実を踏まえた拡大が期待されている。このため、必要となる水素供給量を把握するとともに、供給のあり方も検討し、水素拠点形成やカーボンニュートラル・コンビナート、カーボンニュートラル・ポートの検討

との連携を図る必要がある。特に、臨海部の国内メタネーションについては、鉄鋼・化学・セメント・ガス火力発電との連携が想定され、今後、水素の供給・利用やインフラ整備が国・都道府県・複数の事業者の連携の下で推進されることが見込まれる。一方、内陸部の工業団地や工場で行われる国内メタネーションについては、水素、または再生可能エネルギー電力の供給確保が課題となる。

表 5-1. 国内メタネーションの類型

	臨海型国内メタネーション	内陸型国内メタネーション
イメージ	多産業集積型	地域再エネ生産型
関連する取組	水素拠点形成 CNコンビナート、CNポート	
想定される 合成メタン利用者	鉄鋼、セメント、ガス火力発電所 導管注入による拠点外の複数需 要家への供給	内陸の工業団地、工場
水素供給	副生水素や輸入水素を水素専用 の導管で供給等	地域再エネの利用等

出所：資源エネルギー庁；「[今後のメタネーションの推進について](#)」

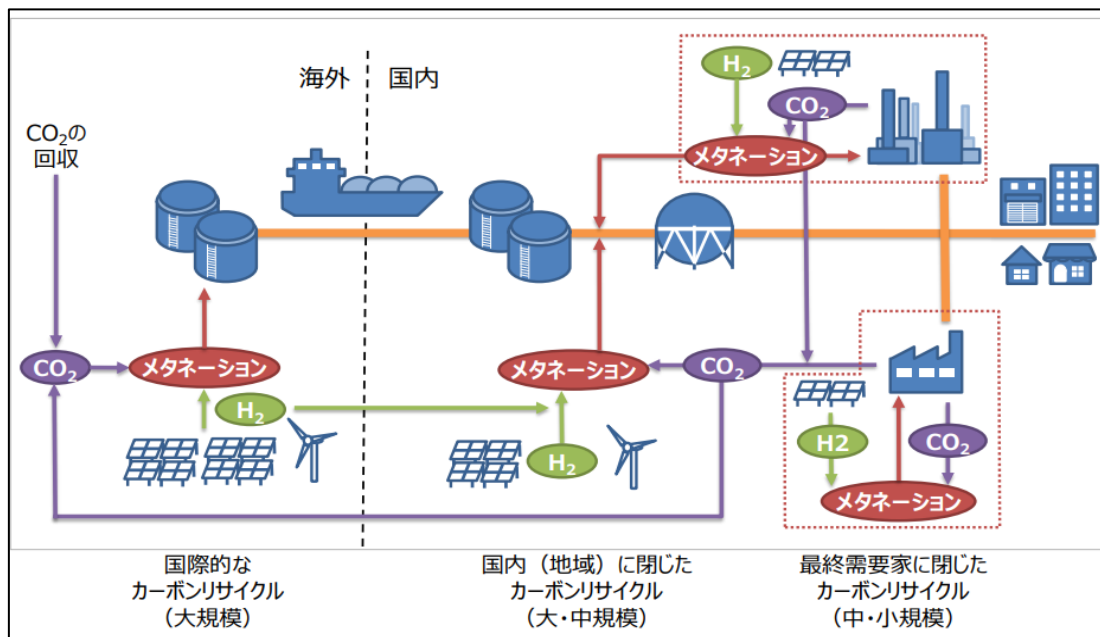
(第 9 回 メタネーション推進官民協議会資料,p.5)

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_04_01.pdf)

② 海外メタネーションに係わる動向

海外メタネーションは、場所によっては相対的に安価な水素を活用できるため、大規模、かつ安価な合成メタンの輸入が期待できることから、特に都市ガス会社が注目しており、東京ガス・大阪ガス・東邦ガスの 3 社は三菱商事と共同で米国テキサス州及びルイジアナ州で製造した e-メタンを日本に輸入するプロジェクトの実現可能性調査を行っている。また、東京ガス・大阪ガスの 2 社はシェルと e-メタンの輸入事業の実現を目指して技術的課題や経済性を議論中であり、東邦ガスは豊田通商・トタルエナジーズとトタルエナジーズが製造する e-メタン等の海上輸送及び国内受入・配送・利用までのバリューチェーン全体の課題を洗い出し、導入に向けた実現可能性調査を実施している。

図 5-3. メタネーションの社会実装のイメージ



出所：経済産業省；「エネルギーを起点とした産業のGXについて」（第3回 産業構造審議会 産業技術環境分科会 グリーントランスフォーメーション推進小委員会／総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 2050年カーボンニュートラルを見据えた次世代エネルギー需給構造検討小委員会 合同会合資料,p.60）
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/003_02_00.pdf

2) 合成メタンの導入に向けた制度・仕組み

① 環境価値の移転等

海外でe-メタンと天然ガスが混合され、液化されたLNGが輸入・供給された場合や国内で生産されたe-メタンが天然ガスと混合されて供給された場合には、物理的にe-メタンのみを需要家に供給することはできない。従って、それぞれを区別するための認証制度やe-メタンの環境価値だけを切り出し、移転・取引する仕組みの整備が必要となる。このため、官民協議会及びタスクフォースにおいて基本的な検討を継続するとともに、2023年度には類似の国内制度・海外事例等の整理や具体的なプロジェクトに基づく課題の洗い出しや解決策等について検討する。

② エネルギー供給構造高度化法の目標

第6次エネルギー基本計画では、2030年に都市ガスインフラへe-メタンを1%注入し、水素直接利用・バイオガス・クレジットでオフセットされたLNG等のその他の手段と合わせて5%のカーボンニュートラル化を図ること目標としており、バイオガス（バイオメタン）

の導入やその他の手段の活用拡大も重要となっている。一方、バイオガス（生ごみや紙ごみ、家畜のふん尿や草木類などのバイオマスを原材料とし、それらをメタン発酵させたもの）については、エネルギー供給構造高度化法に基づき、一定規模以上のガス小売事業者については、バイオガス導入によるガス供給の拡大に取り組む責務があるが、e-メタンも対象とした新たなエネルギー供給構造高度化法の目標を定める必要がある。

エネルギー供給構造高度化法の目標の検討に当たっては、導入支援策及び認証制度や環境価値を移転・取引する仕組み等の e-メタンの社会実装を促進するための制度措置と合わせて検討することが重要であり、同法の新たな目標設定については、関係審議会における「カーボンニュートラルに向けたガス制度整備」の議論の中で検討する。

3) e-メタン燃焼時の CO₂ カウント

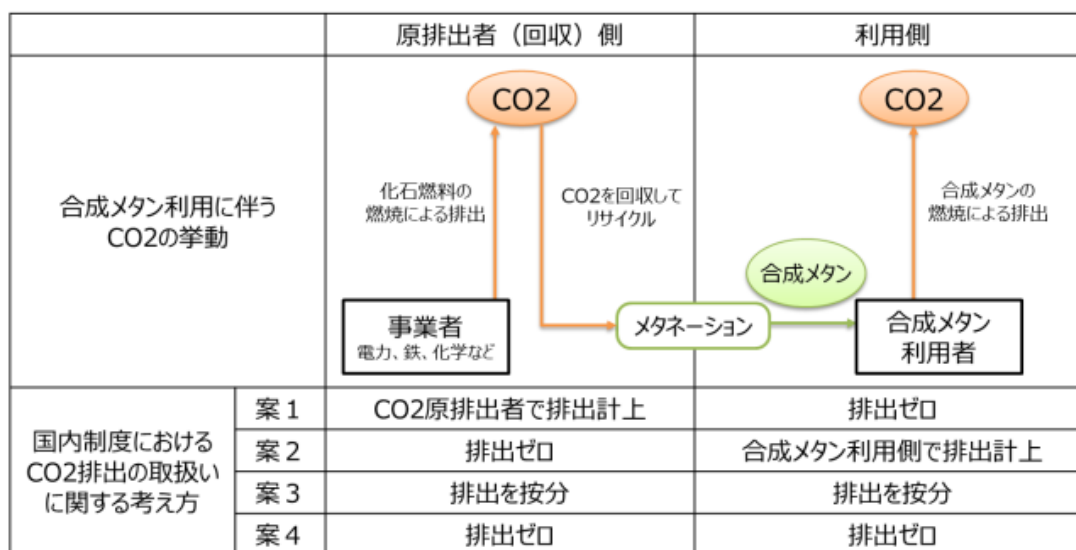
e-メタンは燃焼時に CO₂ を排出するため、CO₂ 排出の取り扱いについて e-メタンの利用促進に繋がる国際・国内ルールの整備が必要であり、CO₂ 排出を実質的にゼロと見なす環境価値を明確にし、その帰属先を決めることにより、e-メタンの需要家の予見可能性が高まり、利用促進に繋がることが期待される。

国内で回収した CO₂ を用いて国内で製造・利用される国内メタネーションによる e-メタンについては、国レベルの CO₂ 排出の取扱いが問題となる訳ではなく、国内の各種制度において、各制度の趣旨に則り、適切な制度設計をおこなうことが期待される。

海外で回収した CO₂ を用いて海外で製造した e-メタンを日本国内で利用する海外メタネーションのビジネスモデルについては、国レベルの CO₂ 排出の取扱いが重要である。マルチの国際ルール作りは、交渉等に相当程度の時間を要すると見込まれるため、まずは日本企業が計画している具体的な e-メタン製造プロジェクトを前提にして、その投資先国との 2 国間のルール作りに官民連携で取り組むことを優先する。

カーボンリサイクル燃料の燃焼時の CO₂ 排出の取扱いは、e-メタンに固有の課題ではなく、カーボンリサイクル燃料一般に共通することから、今後、合成燃料やグリーン LPG の官民協議会とも連携して、内外のルール作りの促進を図ることが重要である。

図 5-4. e-メタン利用に伴う CO₂ の挙動と CO₂ カウンترلール案（イメージ図）



出所：CO₂ カウントに関するタスクフォース；「[合成メタン利用の燃焼時の CO₂ カウントに関する中間整理](#)」（第 6 回 メタネーション推進官民協議会資料, p.17）

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/co2_tf/pdf/20220322_1.pdf)

4) e-メタンの導入促進の検討の方向性

e-メタン利用の黎明期における導入拡大に向けた支援措置については、2022 年 5 月にまとめられたクリーンエネルギー戦略中間整理を踏まえ、需給両面で LNG 及び都市ガスと e-メタンのコスト差・値差などに注目して検討中である。検討に際しては、水素やアンモニアと異なり、需要家側の抜本的な燃料転換が不要であり、かつ供給側の新たなサプライチェーンインフラの整備が不要な e-メタンは、先行的な事業者による大規模な生産設備への投資を実現するため、一定の投資リスクを軽減する支援が有効である。このため、エネルギーの安定供給という大前提の下、支援すべき対象を明確にしつつ、何と何の差額に着目してどのような支援のあり方が適切か、規制・制度の観点も含めて引き続き検討する。

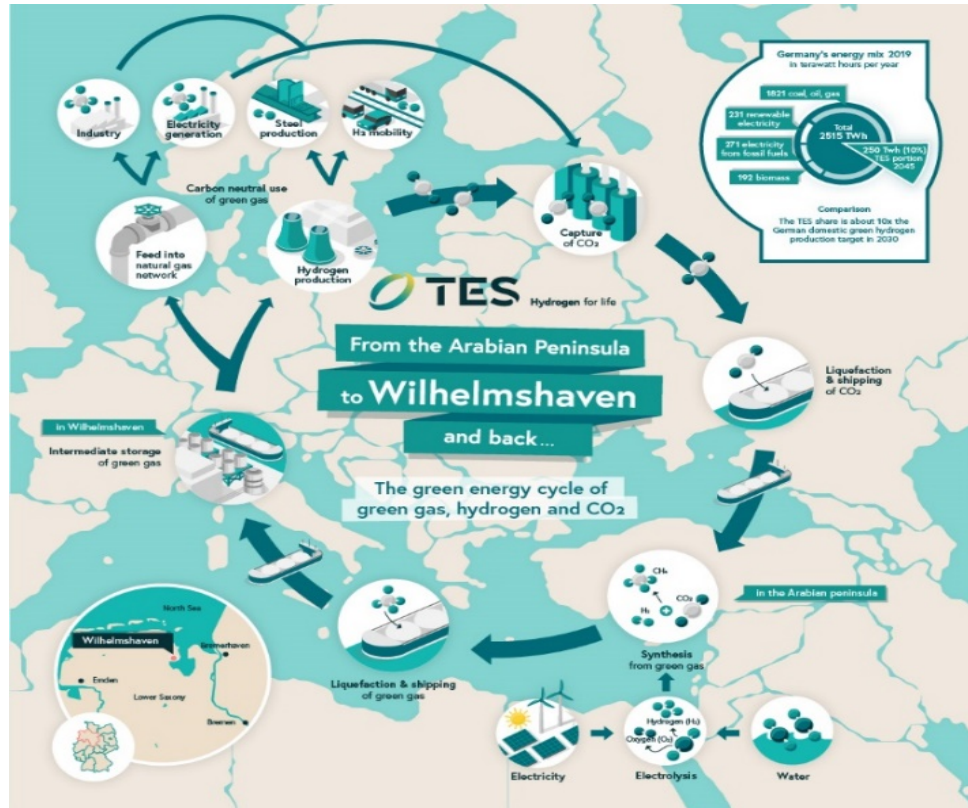
5) 再生可能エネルギー水素の輸送手段としての e-メタン活用

海外では合成メタンを燃焼利用するのではなく、純粋な水素キャリア（輸送手段）として利用する計画があり、ドイツ北海沿岸のヴィルヘルムスハーフェン港では、Tree Energy Solutions (TES) 社が、LNG 貯蔵再ガス化船 (FSRU) を利用して海外において e-メタンを液化して生産された LNG を輸入し、水素と CO₂ に分離後、水素は国内向けに供給し、CO₂ は回収して再び LNG 生産国に再輸出し、e-メタン製造に利用するプロジェクトを推進

している。

これまでの所、日本ではこのような形での e-メタン利用の事業計画はないが、既存の LNG サプライチェーンの活用が可能という e-メタンのメリットを活かすことが可能な事業モデルの 1 つと考えられる。

図 5-5. 独ヴィルヘルムスハーフェン港における e-メタンによる水素輸入構想



資料：資源エネルギー庁；「[今後のメタネーションの推進について](#)」（第 9 回 メタネーション推進官民協議会資料,p.19）

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_04_01.pdf)

(3) e-メタン供給の経済性調査

第 9 回メタネーション推進官民協議会では、横浜国立大学と日本エネルギー経済研究所による共同研究報告「合成メタン等の製造・供給費用試算」が報告されており、海外から輸入される e-メタンの供給費用は 107~126 円/Nm³-CH₄ と推計され、水素キャリアの中では、海外輸入アンモニア（直接利用）の 101 円に次いで低コストであり、海外液化水素の 177 円を下回ることが示された。e-メタンには、既存の天然ガスや LNG 等に係るインフラがそのまま利用でき、ガス消費機器の熱量変更作業や取替えを必要としない長所があるため、特に都市ガス配給網への導入に向けての期待が高まっており、このため、共同研究報告示され

た報告内容の要旨を下記に紹介する。

1) 分析手法等

① 分析手法

- 変動性再生可能エネルギー電力由来の水素キャリアについて、製造地から国内送配手前までの供給費用を積上げ式的に試算する。このため、以下の式の通り、サプライチェーンの総費用（分子）を供給量（分母）で割ることにより $1\text{Nm}^3\text{-CH}_4$ あたり（熱量等価）の費用を算出する。

$$\text{JPY/Nm}^3\text{-CH}_4 = \frac{\text{総費用(JPY/y)}}{\text{総供給量(Nm}^3\text{-CH}_4\text{/y)}} = \frac{\text{キャリア製造費(水素製造含む)} + \text{港湾貯蔵費} + \text{輸送費} + \text{再転換費}}{\text{総供給量}}$$

② 想定されたサプライチェーン（9 ケース）

「e-メタン」については、海外合成と国内合成について、それぞれ革新技術利用と既存技術利用の 2 ケースを想定して 4 ケース、「水素」は海外液化 1 ケース、「アンモニア」は海外で製造し、国内では水素分離と直接利用の 2 ケース、「メチルシクロヘキサン（MCH）」は海外で製造し、国内では水素分離と国内メタン合成の 2 ケースを想定する。

表 5-2. 想定されたサプライチェーンの概要（9 ケース）

ケース	製造国	国際輸送キャリア	国内送配キャリア
① 海外合成メタン（革新技術）	国外 (再エネ電力由来)	液化合成メタン	合成メタン
② 海外合成メタン（既往技術）			
③ 海外液化水素		液化水素	水素
④ 海外メチルシクロヘキサン（MCH）		メチルシクロヘキサン	
⑤ 海外アンモニア（水素分離）		液化アンモニア	液化アンモニア
⑥ 海外アンモニア（直接利用）			
⑦ 海外MCH+国内メタン合成		メチルシクロヘキサン	合成メタン
⑧ 国内合成メタン（革新技術）	国内 (再エネ電力由来)	なし	
⑨ 国内合成メタン（既往技術）			

出所：横浜国立大学・日本エネルギー経済研究所；「[合成メタン等の製造・供給費用試算](#)」

（第 9 回 メタネーション推進官民協議会資料,p.3）

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_03_04.pdf)

③ 前提条件

(ア) 分析の考え方

- 海外から国内での水素キャリア製造～国内送配前までの費用を考慮する。
- サプライチェーンの規模は、メタン換算（熱量等価）で 10 万 $\text{Nm}^3\text{-CH}_4/\text{h}$ とする。
- 対象年は 2030 年より後の長期的な時間軸を想定してパラメータを設定する。

(イ) 主な諸元

- メタン合成に関連する諸元は、主に事業者ヒアリングから設定する一方、水電解や液化水素・MCH・アンモニアは国際エネルギー機関 (International Energy Agency、以下、IEA) 「The Future of Hydrogen」(2019)の想定に依拠する。
- 割引率は同 IEA 文献 (2019) にならない 8%とし、為替レートは 113 円/ドルとする。
- 海外生産国は同文献を基に、太陽光・風力ハイブリッド型の再エネ条件が比較的優れている中東を想定する。

表 5-3. 海外生産国の想定

項目	本分析	豪州	チリ	米国	中東	出典・考え方
海外再エネ単価・設備利用率 ^{※2}	2.5cent/kWh, 29%	3.1cent, 26%	2.3cent, 23%	3.1cent, 28%	2.5cent, 29%	IEA「Future of Hydrogen」(2019)
輸送距離	12 000km	7 000km (豪州西部)	17 000km	17 000km (メキシコ湾)	12 000km (ペルシャ湾)	YNU推計

出所：横浜国立大学・日本エネルギー経済研究所；「[合成メタン等の製造・供給費用試算](#)」

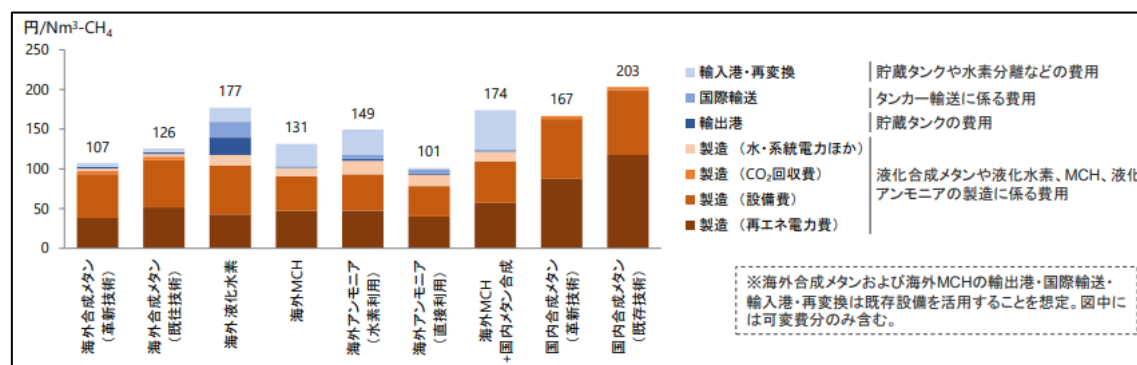
(第 9 回 メタネーション推進官民協議会資料,p.6)

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_03_04.pdf)

- 国内再エネの想定も同 IEA 文献に依拠し、再エネ発電単価は 6.3 セント/kWh、設備利用率は 19%と想定する。

④試算結果

図 5-6. 供給費用の試算結果（2030 年より長期を想定した推計値）



出所：横浜国立大学・日本エネルギー経済研究所；「[合成メタン等の製造・供給費用試算](#)」

(第 9 回 メタネーション推進官民協議会資料,p.7)

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_03_04.pdf)

(4) まとめ

- ① 海外 e-メタンは、水素キャリアの一つとして重要な選択肢であることが示唆された。海外 e-メタンの供給費用は 107~126 円/Nm³-CH₄ と推計され、アンモニア(直接利用)と共にコスト優位なキャリアと考えられる。
- ② 本分析では、新設輸送インフラを用いた場合においても、海外 e-メタンが優位性を維持し得ることも確認した。海外生産国に既存インフラが存在しない、もしくは経年劣化等で新たな設備入替の投資が必要な場合にも、e-メタンは重要な選択肢の一つとなり得る。
- ③ 本分析の基準想定では e-メタンの価格目標(40~50 円/Nm³-CH₄)には達しなかった。経済性の改善に向けては、安価、かつ設備利用率が高い再エネ電力の調達や技術開発による設備費の低減が必要となる。例えば、安価な再エネ電力(0.4 セント/kWh を想定)を確保し、設備費を基準想定から半分程度に低減できれば、海外合成メタンの供給費用は目標水準に達する可能性がある。
- ④ 本試算では、再エネ電源・水素製造設備・CO₂供給源の地理的配置及び地域偏在対応の費用と再生可能エネルギーの時間変動性をならすための設備費用の2点を捨象した。
- ⑤ 本試算は一定の想定に基づくものであり、今後の技術進展状況に応じて変化する可能性がある点に留意が必要である。

2. GX 実行会議での基本方針の取りまとめ

(1) 第 5 回 GX 実行会議の開催

日本政府の GX 実行会議は、産業革命以来の化石燃料中心の経済・社会・産業構造をクリーンエネルギー中心に移行させ、経済社会システム全体の変革、すなわち、GX を実行するのに必要な施策検討のために設立され、2022 年 7 月 22 日に第 1 回会議が開催されており、12 月 22 日の第 5 回会議では、「GX 実現に向けた基本方針」が取りまとめられた。

(2) 基本方針に示された e-メタンの位置付け等

基本方針では、e-メタンはカーボンリサイクル燃料として位置付けられており、既存のインフラや設備が利用可能であるため、脱炭素化に向けた投資コストを抑制できる点や、電力以外のエネルギー供給源の多様性の確保に貢献し、かつエネルギーの安定供給に資する点を踏まえ、燃焼時の CO₂ 排出の取扱いに関する国際・国内ルール整備に向けて調整を行い、

GI 基金を活用した研究開発支援等を推進するとともに、実用化・低コスト化に向けた様々な支援のあり方を検討することが定められた。

(3) 参考資料に示された具体的な内容

基本方針に添付された参考資料では、「今後の道行き」の「事例 19：カーボンリサイクル燃料；SAF（持続可能な航空燃料）、合成燃料、合成メタン」において、e-メタンは、新たな供給側のインフラ整備や需要側の対応が不要であるという利点を活かし、目標・戦略としては、①大規模生産技術の確立と ②CO₂ 排出に係るルールの整備を早期に行うとともに、③大規模投資により大量生産・大量供給を実現する方針を示し、国内導入比率を 2030 年に 1%、2050 年には価格を LNG と同水準として 90%に高めることが示された。

GX 投資については、官民による製造技術開発及び製造設備等への投資を約 2 兆円と見込み、①大規模生産・コスト低減の技術開発・実用化等、②バイオメタンの導入、③水素・再エネを活用した臨海部や工場等における国内メタネーションの生産・利用の実証・導入を行うこととされた。また、タイムテーブルとしては、2024 年までに第 1 期海外生産プロジェクトの実現可能性調査（FS）及び詳細設計等を完了させ、2029 年までに第 1 期海外生産プロジェクトへの投資を行い、2030 年以降、国内への供給開始及び第 2 期以降の海外生産プロジェクトへの投資拡大を行い、2040 年代には革新技术による合成メタンの国内供給を行うことが目指された。

規制・制度については、2024 年までに認証や環境価値の移転等の仕組みの検討・整備及び様々な支援のあり方を検討し、2025 年以降は民間企業による自立的なサプライチェーンの構築を促す一方、2030 年まではエネルギー供給構造高度化法の目標による供給側の利用促進を図り、それ以降は新目標による供給側の利用促進等に取り組むこととされた。

国際戦略については、2024 年まで第 1 期プロジェクト候補国との CO₂ 排出の取扱いルールの整備に向けた調整を行い、2025 年以降は第 2 期プロジェクト候補国との CO₂ 排出の取扱いルールの整備に向けた調整を行い、2030 年以降は調整状況を踏まえた多国間の CO₂ 排出の取扱いルールの検討を行う。また、アジア等における天然ガスへの燃料転換や天然ガス高度利用の需要獲得を図り、2030 年代後半には天然ガスから e-メタンの移行需要の獲得に努めることとされた。

第2節 都市ガス業界の取り組み

1. 日本ガス協会のカーボンニュートラル化の取り組み

(1) 「カーボンニュートラルチャレンジ 2050」宣言（2020 年 11 月）

都市ガス業界では、2020 年 10 月 26 日に菅義偉首相（当時）が臨時国会の所信表明演説において 2050 年までに国内の温室効果ガス排出を「実質ゼロ」とする方針を表明したことを踏まえ、11 月 24 日の記者会見において、広瀬会長（当時）より 2050 年カーボンニュートラルの実現に積極的に対応していくことを発表しており、業界として、目標はチャレンジングでアンビシャスであり、大きな社会変容、革新的なイノベーション等のこれまでの温暖化対策の延長線上ではない非連続な取り組みが不可欠であるが、エネルギー供給の一翼を担う業界として積極的に対応する方針を表明した。

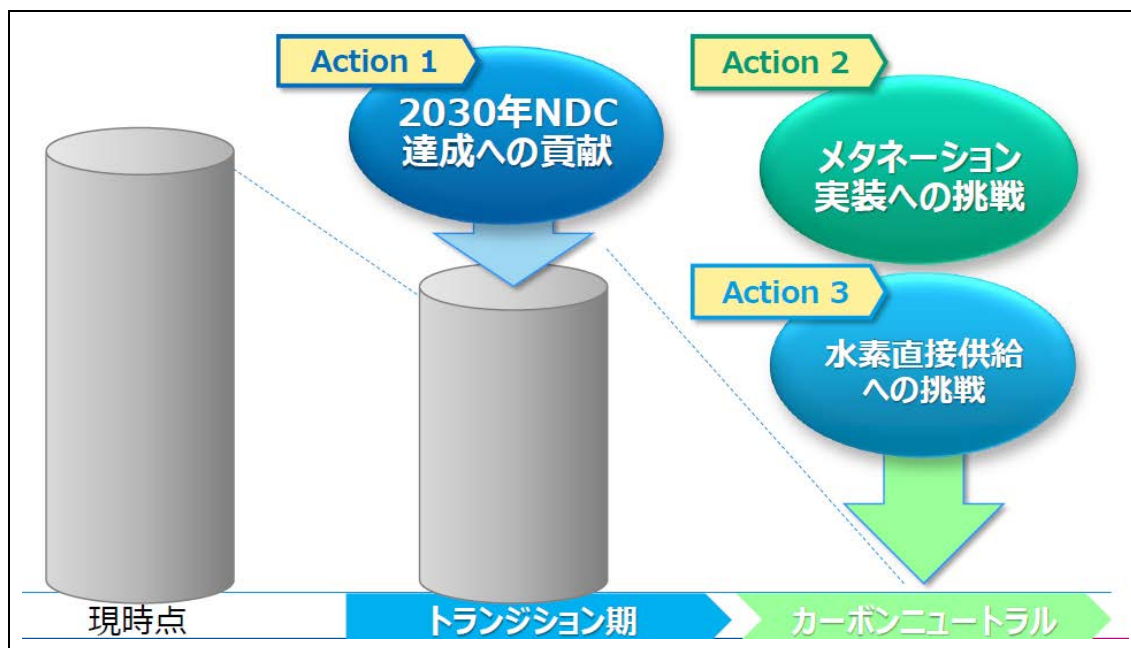
また、エネルギー供給については、「S（安全）+3E（安定性、経済性、環境性）が基本であり、その実現のためには、エネルギー利用の多様化とエネルギーネットワークの多重化が重要であることに加え、資源の乏しい日本においては、したたかさ（戦略性）としなやかさ（柔軟性）が重要とのスタンスを示し、2050 年までの 30 年間を移行期間と位置付け、カーボンニュートラル化に取り組むことを明らかにした。

(2) 「アクションプラン」発表（2021 年 6 月）

日本ガス協会は、2020 年 11 月発表の「カーボンニュートラルチャレンジ 2050」の宣言を踏まえ、2021 年 6 月 10 日にカーボンニュートラル化の取り組みを具体化するため、「アクションプラン」を発表した。

このアクションプランは、わが国が 2050 年のカーボンニュートラル及び 2030 年度の温室効果ガス排出量を 2013 年度比 46%削減することを「国が決定する貢献(NDC:Nationally Determined Contribution)」として表明していることを踏まえ、①産業・海上輸送分野での天然ガスの普及拡大やカーボンニュートラル LNG の導入拡大等による 2030 年 NDC 達成への貢献、②メタネーション実装に向けての技術開発・コスト低減・サプライチェーン構築等の分野での挑戦、③沿岸部を中心とした適地において新たに敷設する導管経由の水素直接供給への挑戦の 3 つのアクションを設定し、アクション毎に具体的な取り組みやロードマップを策定した。

図 5-7. アクションプラン～3 つの Action～



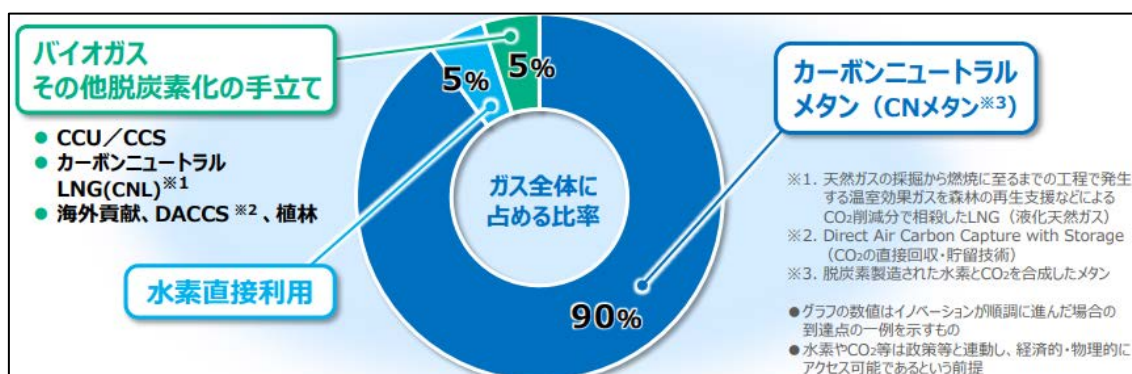
出所：日本ガス協会；「[2050 年カーボンニュートラルに向けた都市ガス業界の取り組み](https://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/gas_jigyo/data/20220926_cn_seminar_b.pdf)」
 (関東経済産業局 主催 広域関東圏ガス事業高度化セミナー資料,p6)
 (https://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/gas_jigyo/data/20220926_cn_seminar_b.pdf)

このアクションプランにより、2030 年に向けては、メタネーションの実用化を図り、e-メタンの都市ガス導管への注入量を 1%以上とするとともに、CO₂ クレジットを利用したカーボンニュートラル LNG 等の脱炭素化の手立てにより、都市ガスのカーボンニュートラル化を 5%以上とすることが目標として示された。

また、2050 年に向けては、メタネーション設備の大容量化の課題や安定的、かつ低廉な水素調達等の大きな課題への解決にチャレンジし、脱炭素化に資する様々な手立てや手段を活用し、ガスのカーボンニュートラル化の実現を目指すこととされ、2050 年のカーボンニュートラル化の実現に向けた姿としては、e-メタン 90%、水素直接利用 5%、バイオガスおよびその他脱炭素化の手立て 5%が目標とされた。

なお、2022 年 5 月にまとめられた資源エネルギー庁の「グリーンエネルギー戦略・中間整理」においても、e-メタンを既存インフラに 2030 年 1%、2050 年 90%導入する同じ目標が織り込まれており、官民一体となってカーボンニュートラル化の実現に取り組むことが再確認されている。

図 5-8. 2050 年ガスのカーボンニュートラル化の実現に向けた姿



出所：日本ガス協会；「[カーボンニュートラルチャレン 2050 アクションプラン](#)」

（第1回 メタネーション推進官民協議会資料,p.2）

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/001_06_00.pdf)

2. 都市ガス事業者による具体的な取り組み

(1) 米国キャメロン LNG 基地を活用した e-メタン導入

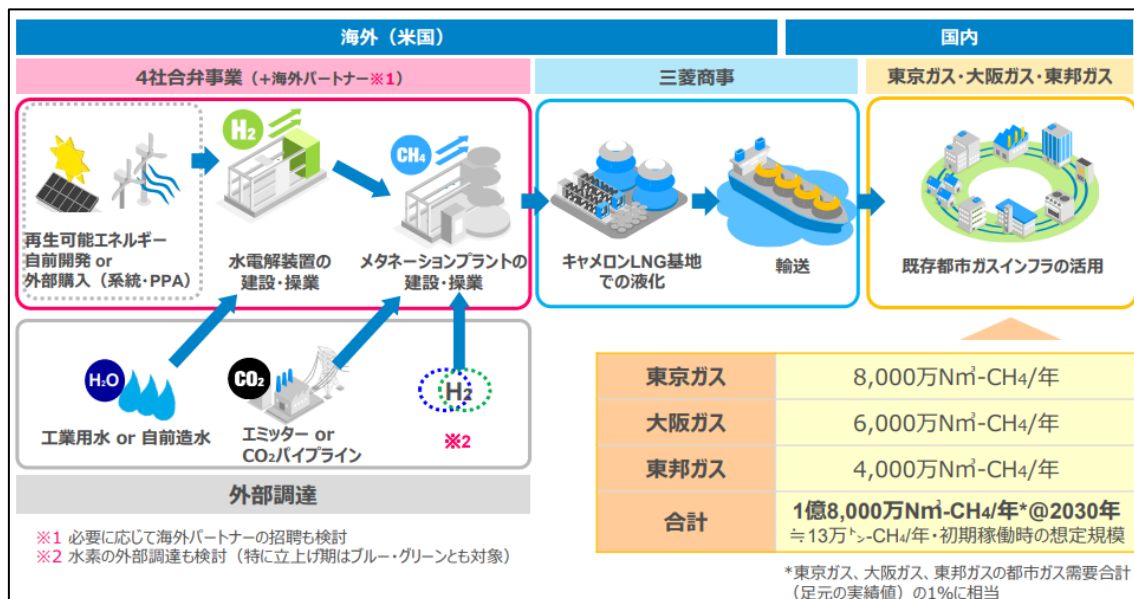
東京ガス・大阪ガス・東邦ガス・三菱商事の4社は、2022年9月に覚書を締結し、制度・商務・原材料・技術の4つのワーキンググループを設立して、米国におけるe-メタンの事業可能性調査を本格化させており、11月22日開催の第9回メタネーション推進官民協議会では、覚書に基づく検討内容や今後のスケジュール等が報告された。

4社は、e-メタンを原料とするカーボンニュートラル LNG を2030年より米国で年間13万トンを製造し、わが国に輸入することにより、東京ガス・大阪ガス・東邦ガス3社の都市ガス販売量の約1%を賄うことを目指している。この目標が実現されれば、日本ガス協会が2021年6月に発表したアクションプランの「Action1：2030年NDC達成への貢献」の実現が可能となり、期待を集めている。

1) 全体のサプライチェーンのイメージ

計画では、4社の合併事業体が米国内の候補地に水電解装置とメタネーションプラントを建設し、水素製造に必要な再生可能エネルギー電力と用水に加え、メタネーション用のCO₂とケースによっては水素も調達してe-メタンを製造し、三菱商事が事業参加しているキャメロン LNG 基地で液化し、都市ガス3社のLNG受入基地に輸送することが想定されている。

図 5-9. サプライチェーンイメージ



出所：三菱商事；「[米国キャメロン LNG 基地を活用した日本への合成メタン導入に関する詳細検討](#)」

(第 9 回 メタネーション推進官民協議会資料,p.7)

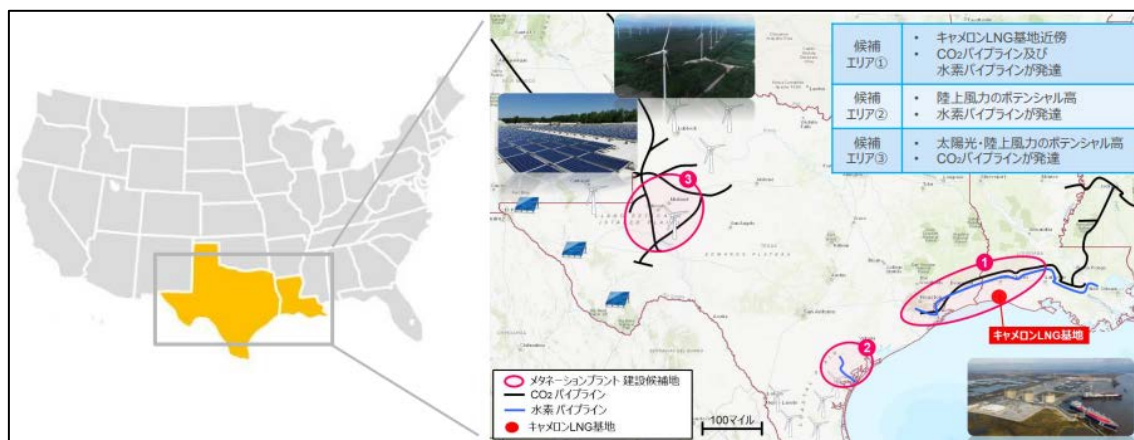
(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_03_02.pdf)

2) テキサス州及びルイジアナ州の候補地

e-メタンの LNG への液化と LNG 輸送船への積込みは、三菱商事が事業参加しているルイジアナ州のキャメロン LNG 基地の活用が想定されているが、e-メタンの製造に必要な水電解装置とメタネーションプラントの設置場所については、米国メキシコ湾岸では、再生可能エネルギー電力、用水、CO₂、さらには水素の供給インフラが整備されているため、原料調達に関して様々な方式が選択可能なため、今後の検討作業を通じて最適な場所を選択することになっている。

なお、現時点での候補地としては、既存インフラの活用可能性の観点から、①CO₂パイプライン及び水素パイプラインが発達しているルイジアナ州のキャメロン基地周辺、②陸上風力のポテンシャル高く、水素パイプラインが発達しているテキサス州南西部のメキシコ湾岸地帯、③太陽光・陸上風力発電のポテンシャル高く、CO₂パイプラインが発達しているテキサス州北西内陸部の 3 地点が想定されている。

図 5-10. 米国（ルイジアナ州・テキサス州）の 3 候補地



出所：三菱商事；「[米国キャメロン LNG 基地を活用した日本への合成メタン導入に関する詳細検討](#)」

（第 9 回 メタネーション推進官民協議会資料,p.6）

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_03_02.pdf)

3) 今後のスケジュール

4 社は今後、検討対象の候補地について、再生可能エネルギー電力・用水・水素・CO₂といった原材料の調達や水電解装置及びメタンネーションプラント（生産装置）の用地確保等に関する現地調査や現地の関係機関・事業者と協議を進めることとしている。また、現地調査や制度面の協議結果を踏まえ、2023 年度末に事業コンセプトを決定する予定であり、その後、2024 年度の基本設計（以下、FEED）、2025 年度の最終投資決定（以下、FID）、2029 年度の合成メタンの生産開始、2030 年度の日本への輸出開始を目指している。

図 5-11. 今後のスケジュール

(事業年度)								
2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
4社体制組成 現地調査開始	事業コンセプト 詳細検討	基本設計 (FEED)			設計・調達・建設 (EPC)		合成メタン 生産開始	合成メタン 輸出開始

出所：東京ガス・大阪ガス・東邦ガス・三菱商事 プレスリリース（2022 年 11 月 29 日）；

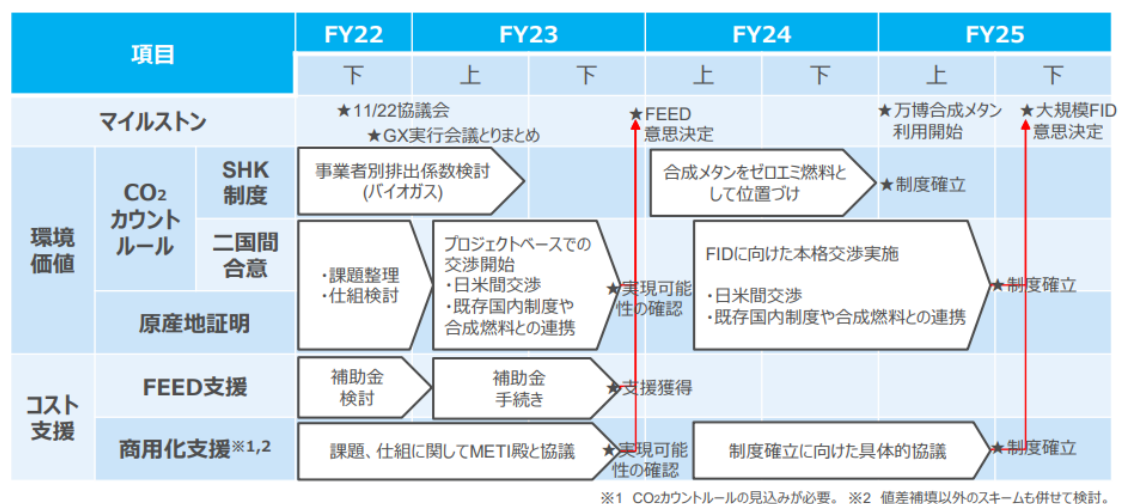
「[米国キャメロン LNG 基地を活用した日本への合成メタン（e-methane）導入に関する詳細検討の実施について](#)」(<https://www.tokyo-gas.co.jp/news/press/20221129-01.html>)

また、海外で製造した e-メタンの導入は初めての試みであるため、制度（環境価値・コスト支援）に関する様々な検討が欠かせず、環境価値については、①日本と生産国の間で一般

の天然ガスと区別するための原産地証明や、②e-メタン利用時の CO₂ 排出カウントの整理に関し、FEED 開始前の 2023 年度中に実現可能性を確認することが必要であり、2025 年度の FID 前には制度を確立させる必要がある。

一方、コスト支援については 2023 年度中に次年度の FEED 開始前に FEED 支援を獲得することが必要であり、加えて 2025 年度上期までに水素及びアンモニアへの支援と並ぶ内容の商用化支援を獲得することも必要となっている。

図 5-12. 制度上の課題（環境価値、コスト支援）に関する検討スケジュール



出所：三菱商事；「[米国キャメロン LNG 基地を活用した日本への合成メタン導入に関する詳細検討](#)」

(第 9 回 メタネーション推進官民協議会資料,p.9)

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_03_02.pdf)

(2) 東京ガスと大阪ガスの革新的メタネーション技術開発の取り組み

1) 革新的メタネーション技術社会実装検討委員会の設置

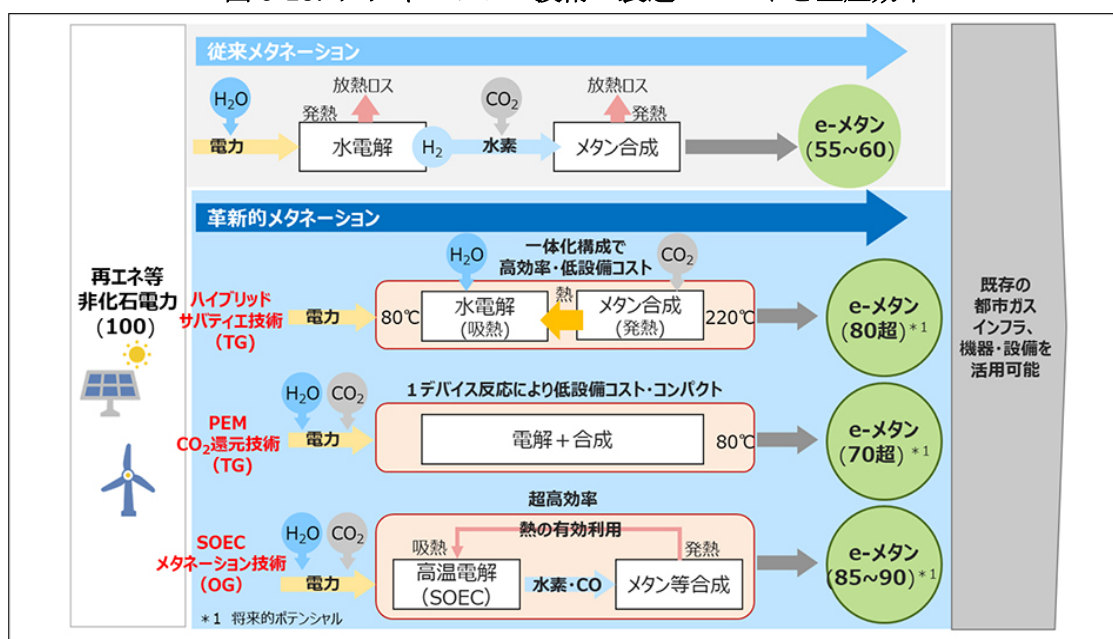
東京ガスと大阪ガスは、橘川武郎教授（国際大学副学長）を委員長とする共同委員会「革新的メタネーション技術社会実装検討委員会」を設置し、2022 年 12 月 20 日に初会合を開催した。両社は、それぞれ新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の GI 基金事業として「革新的メタネーション技術」の開発に取り組んでおり、共同委員会は 2030 年度以降の社会実装に向けて共通する課題への助言を行うことになっている。

2) 革新的メタネーション技術開発の方向

e-メタンは、天然ガスの輸送・配給インフラや需要家の消費機器がそのまま活用できる長

所を有する半面、製造コストが嵩むため、低減が課題となっており、日本ガス協会では、現在は1立方メートル当たり250円の製造コストを2030年に120円、2050年には50円とすることを目指している。そのカギを握るのが、「革新的メタネーション技術」であり、既存のサバティエ技術によるe-メタンの製造効率は55~60%（補器損失込みでは50%程度）であるが、東京ガスの「ハイブリッド・サバティエ技術」と「PEM（固体分子膜）CO₂還元技術」では、将来的なポテンシャルとしてそれぞれ80%超、70%超が見込まれており、大阪ガスのSOEC（固体酸化物形電解セル）メタネーション技術では85~90%が見込まれている。

図 5-13. メタネーション技術の製造フロートと生産効率

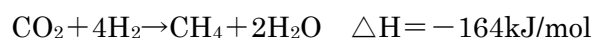


出所：東京ガス・大阪ガス プレスリリース（2022年12月20日）；「[革新的メタネーション技術社会実装検討委員会の設置](#)」

(<https://www.tokyo-gas.co.jp/news/press/20221220-02.html>)

3) 革新的メタネーション技術の概要

メタン製造技術の一つにサバティエ反応（Sabatier reaction）を利用する方式があり、水素（H₂）と二酸化炭素（CO₂）を高温・高圧状態に置き、ニッケル等を触媒としてメタンと水を生成することができ、化学反応は次の式で表される。



サバティエ反応は、1902年にフランスの科学者ポール・サバティエによって提案されて

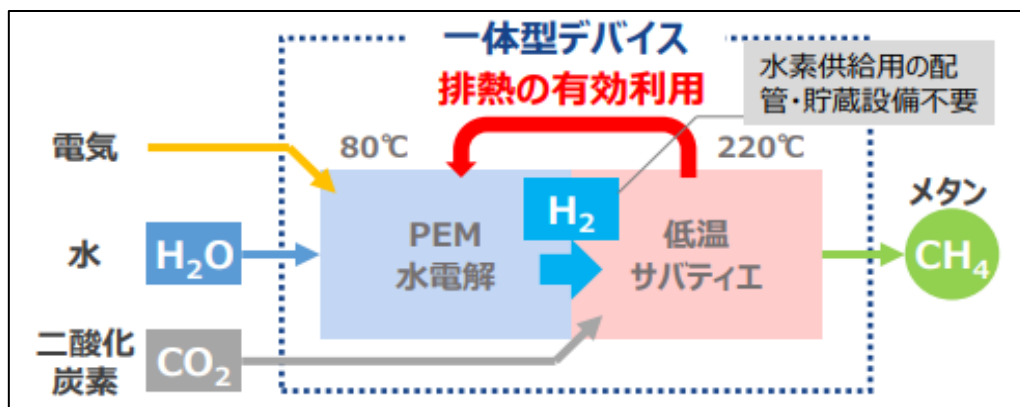
おり、基本的な技術は確立されているが、設備の大容量の商用化に向けては、反応時に発生する排熱の利用、化学反応の制御、耐久性の高い触媒の開発、装置のコンパクト化等の技術的課題の克服が必要とされている。

これに対し、東京ガスと大阪ガスがそれぞれ取り組んでいる革新的メタネーション技術は、従来のメタネーション技術（サバティエ反応）とは異なり、水と CO_2 から直接 e-メタンを製造するため、水素が不要であり、製造プロセスの一体化や排熱利用による高いエネルギー変換効率の達成が可能という特徴があり、低コスト化が見込まれている。

① ハイブリッド・サバティエ技術（東京ガス）

東京ガスは、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と連携して、同機構が宇宙用試作デバイスにおいて原理実証済みの「固体分子膜型（PEM：Polymer Electrolyte Membrane）水電解」と「低温（約 220°C ）サバティエ反応」を組み合わせ、熱融通を可能とする一体型デバイス構造を開発しており、高効率化に加え、稼動停止や再生可能エネルギー電源の出力変動への対応等、熱管理の容易化を目指している。基本的に既存技術の組み合わせであり、早期の社会実装化が期待されている。

図 5-14. ハイブリッド・サバティエ技術による e-メタン製造のイメージ



出所：東京ガス；「[合成メタンの社会実装に向けた当社取り組み](#)」

（第 8 回 メタネーション推進官民協議会資料,p.7）

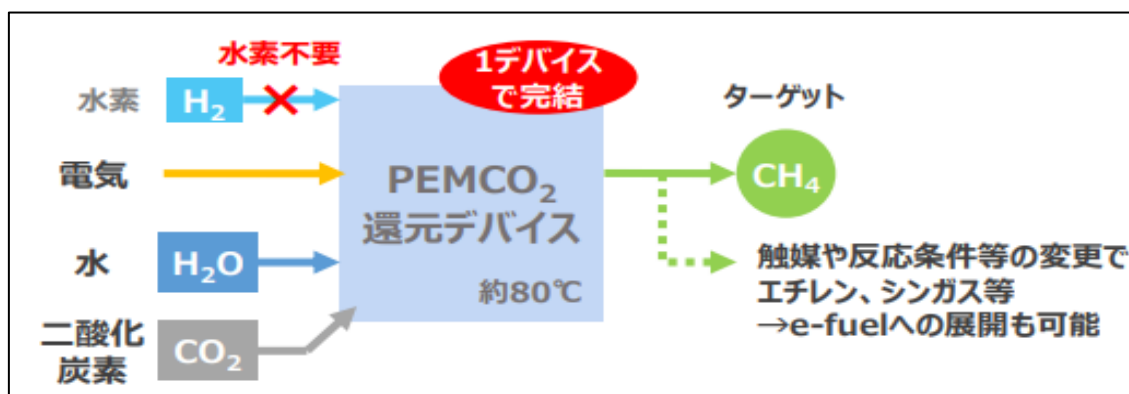
(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/008_03_00.pdf)

② PEM CO_2 還元技術（東京ガス）

東京ガスは、水の電気電解にも用いられている固体分子膜（PEM）を利用した電気化学的還元である「PEM CO_2 還元」により、水と CO_2 から直接、メタンを製造する技術開発に取り組んでいる。この技術は、約 80°C の低温での反応を利用するため、高温が必要なサバ

ティエ反応では課題となる熱管理が不要となる。また、シンプルな設備構造から大幅な設備コスト低減が可能となり、電極の工夫により様々な e-fuel（合成燃料）の合成にも適用できる可能性もあるため、幅広い用途への展開が期待されている。

図 5-15. PEM CO₂還元技術（東京ガス）



出所：東京ガス；「[合成メタンの社会実装に向けた当社取り組み](#)」（第8回 メタネーション推進官民協議会資料,p.9

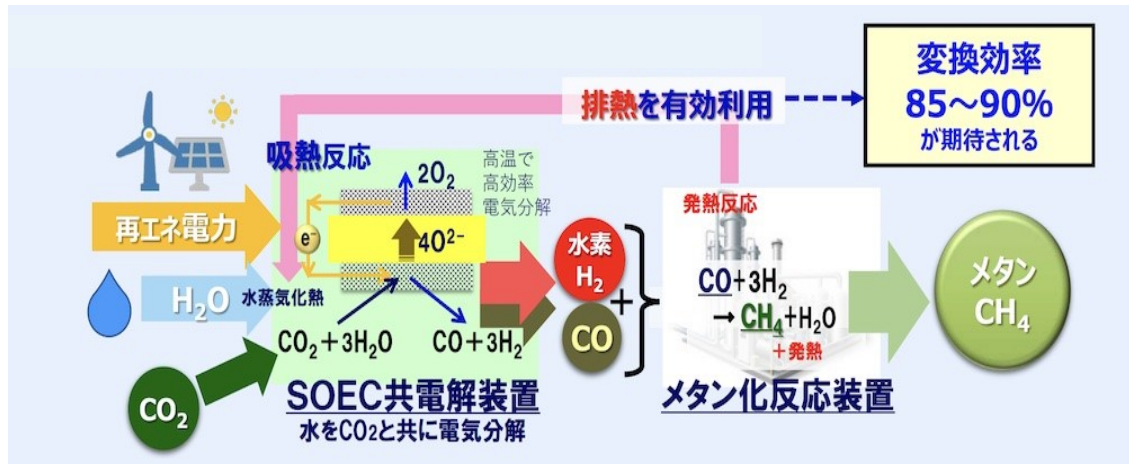
(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/008_03_00.pdf)

③ SOEC メタネーション技術

大阪ガスが開発している SOEC メタネーション技術は、固体酸化物形電解セル（SOEC：Solid Oxide Electrolysis Cell）を用いて、水蒸気と CO₂を再生可能エネルギー電力等により 700～800℃の高温での共電解により水素（H₂）と一酸化炭素（CO）を生成し、次いでメタン化反応によりメタン（CH₄）を合成するものである。この技術では、メタン化反応（発熱反応）で発生する熱を、SOEC 共電解反応（吸熱反応）に有効利用することが可能であり、共電解に必要な電力が削減できるため、既存技術に比べエネルギー変換効率が高い。

一方、基礎研究段階であり、解決すべき課題が多いとの指摘もなされているが、大阪ガスでは、SOEC の逆反応である水素から電力を得るための固体酸化物型（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）家庭用燃料電池「エネファーム」の技術開発で培ってきた蓄積を活用し、2021年1月に技術開発のカギを握る金属型 SOEC の実用化に成功しており、2022～2024 年度にラボスケール（一般家庭2戸相当）、2025～2027 年度にベンチスケール（一般家庭約200戸相当）、2028～2030 年度にはパイロットスケール（一般家庭約1万戸相当）の試験を行うことを予定している。

図 5-16. SOEC メタネーション技術



出所：大阪ガスプレスリリース（2021年1月25日）：都市ガスの脱炭素化に貢献「革新的メタネーション」実現のキーとなる新型 SOEC の試作に成功～水素・液体燃料などの高効率製造にも活用可能な技術の開発～（[新型 SOEC について](#)、p.4）

(https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2021/_icsFiles/afieldfile/2021/01/25/210125_2_1.pdf)

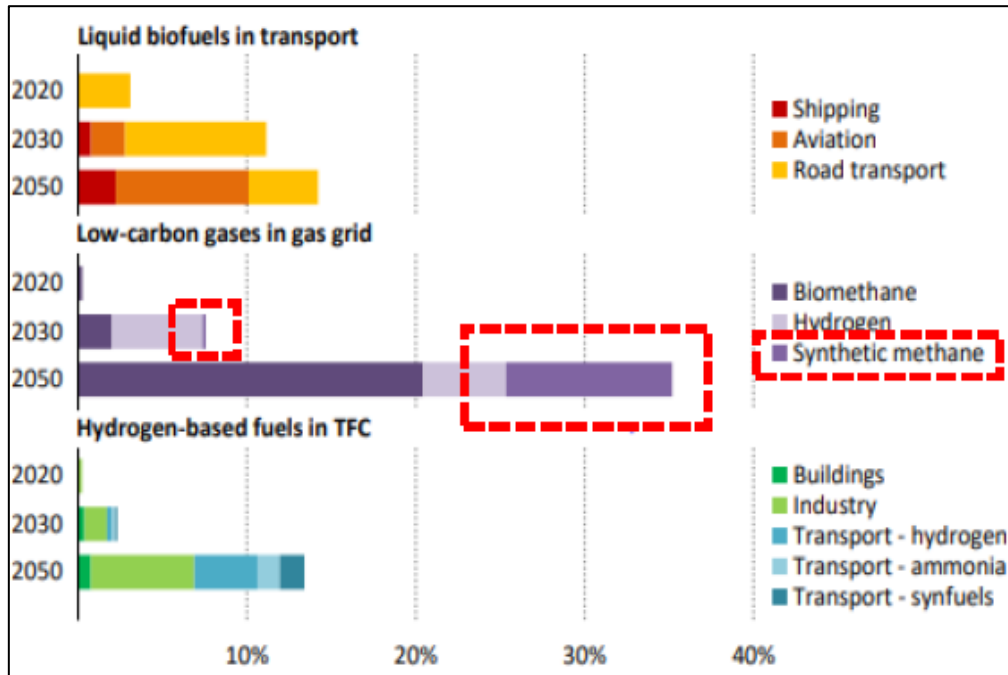
第3節 世界各国のメタネーションを巡る動向

1. IEA による e-メタンの将来予測

IEA は 2021 年 5 月、「2050 年までの実質ゼロ」（Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector）を発表し、世界のエネルギー部門の 2050 年までの脱炭素化、もしくは CO₂ 排出ネットゼロ目標の達成のために必要なアクションを明らかにした。

この報告は IEA の歴史上、最も重要かつ挑戦的な発表の 1 つと評価されており、その中でも注目された指摘の一つに電力化が困難な分野での低炭素燃料の在り方があり、2050 年には世界全体でガス導管網により供給されるガス体エネルギーの内、35%は低炭素ガス（Low-carbon gas）である①バイオメタン、②水素、③合成メタン（e-メタン）となり、このうち、e-メタンは約 3 割を占めると予測し、特に 2030 年以降に導入速度が高まることを見込んでいる。

図 5-17. 世界の低炭素燃料の分野別供給量予測



出所：IEA；「[Net Zero by 2050](#)」（図 3.6）に筆者加筆

(https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf)

2. 日本・欧州・米国での e-メタンの位置付け

わが国と同様に欧米諸国も、天然ガスパイプライン網等の既存のガスインフラの活用を指向しており、水素、バイオメタン、e-メタンを活用する将来像が公表されている。

一方、ガス体エネルギーの種別構成はそれぞれに特色があり、わが国の政府の「グリーンエネルギー戦略」や日本ガス協会の「カーボンニュートラルチャレンジ 2050・アクションプラン」では、2050 年の e-メタンのシェアは 90%、水素直接利用とその他バイオガス等のシェアはそれぞれ 5%と想定している。これに対し、欧州委員会が 2021 年 12 月に発表した「欧州連合（EU）域内のガス市場に関する法案の改正案」によれば、欧州では 2050 年には、ガス需要の約 1/3 を CO₂回収・利用・貯留（CCUS）付き天然ガス利用で賄い、残り約 2/3 を再生可能・低炭素ガスで賄うことが想定されているが、水素及びバイオガス・バイオメタンが中心のため、e-メタンのシェアは相対的に小さくなっている。ただし、e-メタンは水素利用の一形態であることを踏まえると、2050 年カーボンニュートラルに向けてガス体エネルギーとして水素利用を重視する点では、わが国と欧州の方向性は一致していると考えられる。

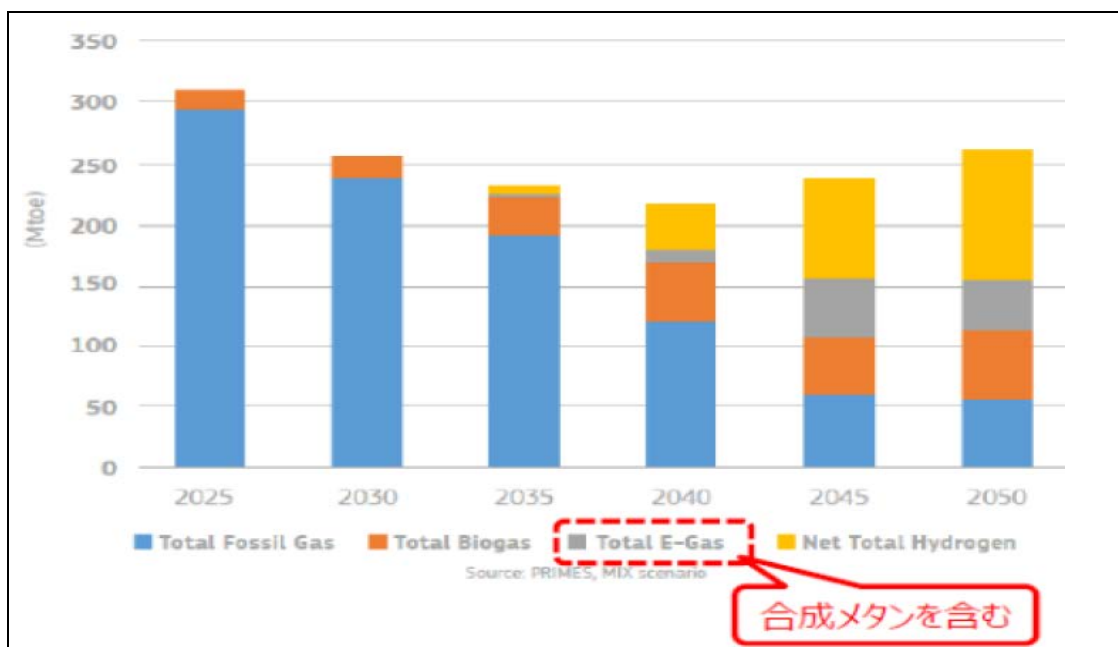
図 5-18. 日欧のガス体エネルギー利用の取り組み方向

	日本	欧州
水素利用の形態	・合成メタン ・水素直接利用 ※個別地域における混合利用は排除していない。	・水素混合 ・水素の直接利用 ・合成メタン
その他のガス	・バイオガスの利用 ・オフセットした天然ガスの利用	・バイオガス、バイオメタンの利用 ・CCUSと天然ガスの利用
内訳	2050年 ●合成メタン：90% ●水素直接利用：5% ●バイオガス： ●オフセットした天然ガス： ●CCUSと天然ガス ●その他： } 5%	2050年のエネルギーミックスにおけるガス体エネルギーの割合20%。 ●再生可能・低炭素ガス：2/3 ・水素 ・バイオガス、バイオメタン ・合成メタン ●CCUSと天然ガス：1/3

出所：経済産業省産業技術環境局；「[エネルギーを起点としたGXについて](#)」（第3回 産業構造審議会 産業技術環境分科会 グリーントランスフォーメーション推進小委員会／総合資源エネルギー調査会基本政策分科会 2050年カーボンニュートラルを見据えた次世代エネルギー需給構造検討小委員会 合同会合資料,p.62）
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/003_02_00.pdf

図 5-19. 欧州のガス体燃料消費量（2050年）

（単位：Mtoe：石油換算メガトン）



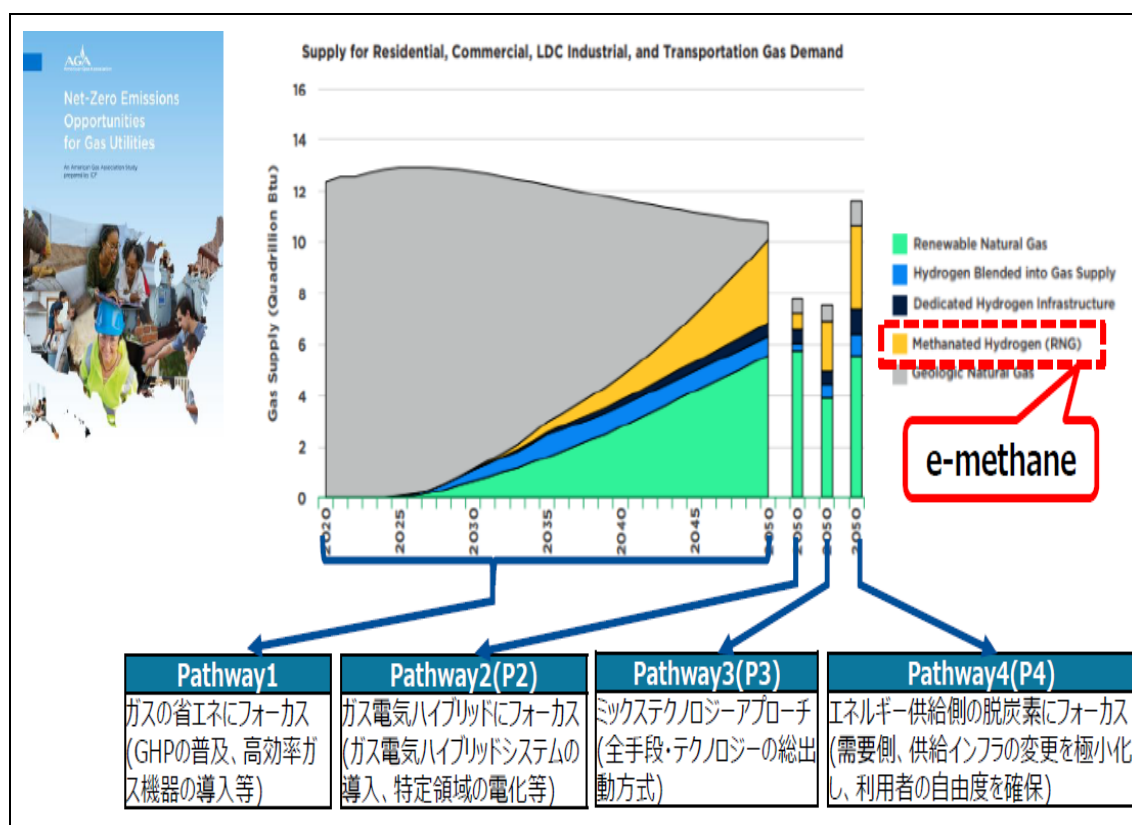
出所：European Commission; [Delivering the Green Deal: The Role of Clean Gase including Hydrogen](#)
 に日本ガス協会にて加筆
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_21_6690

米国では、米国ガス協会（AGA：American Gas Association）が、2022年2月にカーボンニュートラル実現を達成するための道筋を探った研究成果を報告書「Net Zero Emissions Opportunities for Gas Utilities」として発表した。

同報告書では、エネルギー利用のあり方に幅を持たせた4つのシナリオが示されており、いずれのシナリオにおいても、バイオガスから天然ガスと同様の品質にアップグレードされ、メタン濃度が90%以上のバイオメタンを意味する「再生可能天然ガス（Renewable Natural Gas）」のシェアが最も大きくなることを見込まれているが、e-メタンも「メタン化水素（Methanated Hydrogen）」として活用が想定されている。ただし、電気とガスの2つのエネルギーを組み合わせる暖房や給湯需要を賄う機器・システム等を集中的に導入するPathway2（P2）ケースでは、相対的にe-メタンの導入量は小さくなっている。

図 5-20. 米国の住宅・商業・産業・輸送用需要向けガス種別供給量

（単位：1 兆 BTU（英熱量））



出所：America Gas Association; [Net-Zero Emissions Opportunities for Gas Utilities\(p.106\)](#) に日本ガス協会にて加筆

(<https://www.aga.org/wp-content/uploads/2022/02/aga-net-zero-emissions-opportunities-for-gas-utilities.pdf>)

むすびに

現在、各国は脱炭素社会の構築に向け、エネルギー供給面では CO₂ を排出しない風力発電・太陽光発電や原子力発電等の活用を推進し、エネルギー利用面では電気自動車やヒートポンプの普及促進等に努めているが、エネルギー需要の過半を占める熱需要を満たしていくためには、脱炭素化された燃料の導入が不可欠となっている。このため、整備された天然ガス輸送・配給網や LNG バリューチェーンを有する国や地域では、既存インフラを活用して経済的、かつスムーズな脱炭素社会への移行を可能とする燃焼時にも CO₂ を排出しないガス体エネルギーの技術開発、導入を重要な選択肢としている。

その際、選択の対象となる主なガス体エネルギーは、IEA「Net Zero by 2050」報告でも明らかとなっており、①バイオメタン、②脱炭素化水素、③e-メタンであり、米国ではバイオメタンが中心となり、次いで e-メタンと水素の利用が想定され、欧州連合では水素の利用を中心にバイオメタンが続き、e-メタンの果たすべき役割は小さくなっている。これに対し、わが国の場合は、国土が狭い地理的条件や再生可能エネルギー発電に適した気象条件の地域が限られているため、バイオメタンや再エネ電源由来の水素の国内供給に多くを期待することは難しく、e-メタン由来のカーボンニュートラル LNG の輸入に活路を見出すことが欠かせなくなっている。

一方、e-メタンは技術的な困難性もあって、現時点では、アンモニアや水素の技術開発や実用化、事業化においてやや遅れ気味であるが、第 9 回メタネーション推進官民協議会において発表された報告では、コスト面でそん色がないことが明らかにされた。加えて、昨年末には、GX 実行会議において e-メタンの導入支援の取り組みが示され、大手都市ガス 3 社と三菱商事による e-メタン由来の米国産 LNG の輸入事業計画の検討着手や大手都市ガス 2 社による革新的メタネーション技術の社会実装化に向けた共同委員会での検討開始が発表されるなど、これまでの取り組みの遅れを取り戻す動きが明らかとなっている。このため、今後とも e-メタンの導入促進に向け、メタネーション推進官民協議会等の場を通じて官民の連携を深め、技術開発及び社会実装化に向けた技術的、制度的、経済的な課題の克服に取り組むことが重要となっている。

第6章 カーボンニュートラルとエネルギーレジリエンス ー多様性の確保と石油産業の役割ー

ENEOS 株式会社 中央技術研究所技術戦略室

上席研究員 星野 優子

はじめに

2050 年までのカーボンニュートラルの達成は、現在の知恵と技術の延長線上では非常に野心的な目標であり、革新的なブレイクスルーが不可欠である。それでも太陽光、風力の発電コストが大きく低下したことで、これらを中心とした再生可能エネルギー発電量は急拡大している。2022 年公表の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第三作業部会の報告書では、千本を超える世界の温室効果ガス（以下、GHG）排出量のシナリオがレビューされており、2050 年までのカーボンニュートラルを実現するには、様々な対策技術が総動員される必要が示されている。そのなかでも、再生可能エネルギーを中心とした電源の低炭素化とエネルギーの電力シフトは多くのシナリオで対策の柱として位置づけられている。日本においても、再生可能エネルギーの導入拡大とエネルギーの電力シフトに大きく振り切ったシナリオへの期待が高まっているが、そこに死角や課題はないのか、考えてみたい。

2022 年以来のウクライナ危機で明らかになったのは、様々な資源のサプライチェーンの脆弱性である。再生可能エネルギーの導入拡大とエネルギーの電力シフトを追求していく場合には、化石燃料の貿易量が減少する一方で、金属鉱物などの資源の貿易量が拡大する。また、多様な稀少金属鉱物（レアメタル）のサプライチェーンの管理が必要になるために、カーボンニュートラル関連技術のサプライチェーンにおいてボトルネックが生じやすくなり、これは最終的にカーボンニュートラルの実現コストを上昇させることにもつながる。以下では、これらを順にみていったあとで、課題解決のポイントとして「多様性の確保」を取り上げ、最後に石油産業の役割について考えてみたい。

第1節 再生可能エネルギー拡大の影響

カーボンニュートラルの達成手段として、電源の低炭素化と電化促進の重要性が指摘されている。電源の低炭素化を図るうえで期待が高まっているのが太陽光発電などの再生可

能エネルギーの利用拡大である。

1. エネルギー密度と資源への依存度

表 6-1. ライフサイクルでみた発電設備建設に必要な資源投入量の比較

	LNG火力(1500℃複合) 100万kW		事業用太陽光発電1万kW	
前提条件	年間発電量(MWh)	6,132,000	年間発電量(MWh)	12,110
	耐用年数(年)	40	耐用年数(年)	30
ライフサイクル での発電量当 たり重量 g/kWh	ボイラー	0.03	PVモジュール	2.31
	タービン	0.02	(PVモジュール副資材)	12.91
	その他設備・基礎	0.51	架台・基礎他	26.18
	合計	0.56	合計(除くモジュール副資材)	28.50

出所：電力中央研究所報告（2016）より筆者作成

再生可能エネルギーは、石炭、石油や天然ガスなどの化石燃料に比べて資源枯渇の心配がなく発電時に CO₂ も排出しない。また火力発電に比べて燃料コストの負担がなく、いったん稼働を開始すれば、燃料需給ひっ迫時にも燃料調達や価格高騰を心配する必要がない。化石燃料のほとんどを輸入に依存する日本にとっては、この再生可能エネルギーを安価に安定的に活用することが重要なことは改めて言うまでもない。他方で課題はある。再生可能エネルギーの特徴の一つであるエネルギー密度の低さは、設備コストを押し上げる要因になる。また、再生可能エネルギーの中でも導入の拡大が進む太陽光や風力エネルギーは、出力が変動するためその変動への対応は不可欠となる。これら課題のうち、ここではエネルギー密度についてとりあげたい。

一般に再生可能エネルギーは、化石燃料に比べてエネルギー密度が低いことが特徴としてあげられる。その結果、同じ量のエネルギーを取り出すためには、より広い面積、より大掛かりな設備が必要になる。それは同時に、資源への依存度を高めることにつながる。

まず、太陽光発電を例に発電のために必要な面積を比較してみたい。関西電力の資料によれば、例えば、40 万 kW の LNG 火力 5 基からなる堺港発電所の面積は 10 万 m² で、隣接する堺太陽光発電所は設備容量 1 万 kW で 21 万 m² を占めている。同資料では、仮に LNG 火力の稼働率を 80%、太陽光発電の稼働率を 12% とすると、同じ発電量を得るためには太陽光発電では LNG 火力の 2,600 倍の面積が必要な計算になると指摘している。

次に設備規模についてみてみたい。電力中央研究所（2016）の発電技術ごとの LCA（Life

Cycle Assessment:ライフサイクルアセスメントとは製品の原料採取から製造・廃棄に至るライフサイクル全体での CO₂ 排出量などの環境負荷を評価する手法) データをもとに発電のために必要な設備規模を、設備建設に必要な資源投入量の重量で比較したのが表 6-1 である。100 万 kW 級の LNG 火力発電所では、ボイラー、タービン、その他の機械設備や基礎工事には、鉄鋼、セメント合計で約 14 万トンの資源投入が必要になる。耐用年数を 40 年としてライフサイクルでの発電量で除した、ライフサイクルでの発電量あたりの資源投入量は 0.56g/kWh となる。

これに対して、1 万 kW 級の事業用太陽光発電所では、PV モジュール架台・基礎工事には、約 1 万トンの資源投入が必要になる。PV モジュール副資材は、重量ベースで 9 割以上が純水であることから、表 6-1 の合計からは除いている。それでも耐用年数を 30 年としてライフサイクルでの発電量で除した、ライフサイクルでの発電量あたりの資源投入量は 28.50g/kWh となり、LNG 火力発電所の約 50 倍になる。

表 6-2. 2030 年までの長期エネルギー需給見通しの太陽光発電導入目標達成に必要な資源量

2030年までに必要な資源量(t)		※比較のための数字：直近年の生産・貿易量(t)		※生産(輸入実績) 出典
セメント	32,468,501	55,741,000	2021年度国内生産量	セメント協会
鉄	9,012,344	95,636,800	2021年度国内粗鋼生産量	日本鉄鋼連盟
ガラス	2,190,165			
アルミ	610,196	1,484,000	2020年度日本のアルミ新地金輸入量	日本アルミニウム協会
その他	1,477,625			
うち銅	338,313	1,507,000	2019年度国内粗銅生産量	JOGMEC
うちシリコン	280,051	11,369	2021年中国の対世界シリコン輸出量(純度99.99%以上)	国連貿易統計
		776,156	2021年中国の対世界シリコン輸出量(純度99.99%未満)	国連貿易統計

注. 長期エネルギー需給見通しにおける 2030 年度の太陽光発電導入量の目標達成との差分 44.2GW 増設を想定

出所：電力中央研究所報告(2016)他資料より筆者作成

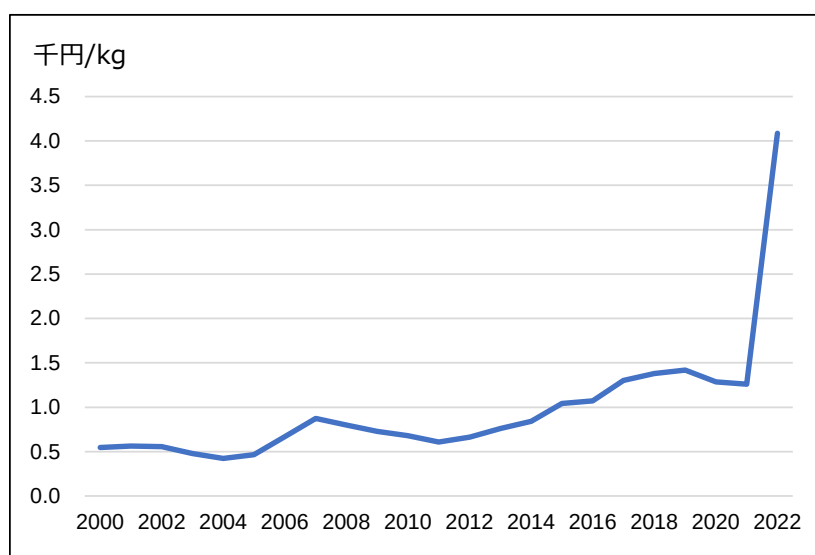
2050 年のカーボンニュートラルの実現に向けて 2021 年度に策定された 2030 年までの長期エネルギー需給見通しでは、現状の太陽光発電導入量 55.8GW に対して、2030 年までに必要な導入量は最大で 44.2GW になる。仮にすべて表 6-1 でみた 10MW の事業用太陽光発電所の増設で対応すると想定したときに、2030 年までに必要になる太陽光発電の設置面積は、928 ㎥となり、これは香川県の面積の約半分に相当する。また、同じく 2030 年までの長期エネルギー需給見通しの目標達成に相当する太陽光発電建設に伴って必要になる資

源量を試算したのが表 6-2 である。これら必要な資源量には例えば太陽光パネルとして製品輸入したものに体化したものも含まれることに注意は必要であるが、直近の単年での生産あるいは輸入規模と比較すると、いずれも無視できない量になることが確認できる。2030 年までに必要になる資源量は、セメントでは 2021 年度の国内生産量の 57%、鉄鋼では 2021 年度の国内粗鋼生産量の 9%、銅では 2019 年度の国内粗銅生産量の 22%に相当する。また、シリコンでは、世界最大の輸出国である中国の純度 99.99%未満のシリコンの 2021 年の対世界輸出量の 36%に相当する量が必要になる。

太陽光パネルをはじめ再生可能エネルギーの導入は、途上国も含めた世界規模で拡大することが予想されており、それに伴う資源需要は世界規模で急増することが予想される。それは、ここで取り上げた鉄、銅やシリコンといった素材資源だけでなく、コバルトやリチウムといった希少金属資源についても同様である。これら金属資源では、サプライチェーンの脆弱性、つまり供給国の偏在性による価格高騰、不安定化が既に顕在化している。

図 6-1 は、リチウムイオンバッテリーの原料となるリチウムについて日本の貿易統計から 2000 年以降の輸入単価の推移をみたものである。輸入単価は、2010 年以降徐々に上昇基調にあったが、2022 年には前年比で 3 倍強に高騰している。こうした金属資源は、再生可能エネルギー発電設備だけでなく、蓄電池、電気自動車などにおいても重要な部品を構成

図 6-1. 酸化リチウム&水酸化リチウムの輸入単価（暦年）



注 1. HS コード (2825.20) 酸化リチウム及び水酸化リチウム

注 2. 2022 年は 11 月までの累計から算出

出所：財務省；貿易統計より筆者作成

しており、その価格高騰は、カーボンニュートラルの目標達成のカギとなると期待されている電化のコスト全体を上昇させる可能性があることに注意を払う必要がある。

2. カーボンニュートラル関連品と輸出競争力

世界的なカーボンニュートラルへの挑戦は、化石燃料資源に恵まれない日本にとっては、製品や技術力の優位性を発揮できるチャンスとして捉えることもできる。ひとくちにカーボンニュートラル達成に必要となる製品（ここではカーボンニュートラル関連品と呼ぶ）といっても多様なものがあげられるが、以下では再生可能エネルギーや電化を進めるうえで欠かせない製品である、太陽光パネルに用いられる光電性半導体デバイスとリチウムイオン電池の2つを例として取り上げて、日本の輸出競争力の変化を見てみたい。

輸出競争力の指標の一つである貿易特化係数は、輸出入金額の合計（輸出金額＋輸入金額）に占める純輸出金額（輸出金額－輸入金額）のシェアで計算される。貿易特化係数が1に近い場合は、輸出特化型すなわち輸出競争力が高い製品であることを示す。逆にマイナス1に近い場合には、輸入特化型すなわち輸出競争力が低い製品であることを示す。しかし実際にはこれらの中間に位置する製品も多く、特にゼロに近い場合には、同種の製品間の水平分業が行われていることを示している。

図6-2は、2012年1月以降の光電性半導体デバイスとリチウムイオン電池の貿易特化係数の推移を月次でみたものである。光電性半導体デバイスの貿易特化係数は、2012年の0.8から2021年には0.6とわずかに低下している。またリチウムイオン電池の貿易特化係数は直近の2022年夏以降にはゼロに近づいている。

このように貿易特化係数からみると、程度の差はあるものの光電性半導体デバイス、リチウムイオン電池ともに輸出競争力の低下が懸念される。そこで、国産財と輸入財の差別化の度合いをみるために、輸入品と国産品の代替の起こりやすさの指標としてArmington(1989)による弾力性（Armington弾力性）を推定する。通常、代替弾力性は正の値をとることが期待され、仮に弾力性が小さい場合には、製品差別化が進み価格競争の影響を受けにくい財であることを意味する。逆に弾力性が大きい場合には、価格競争にさらされやすく、国内生産コストが上昇する場合には、より輸出競争力の低下を招きやすい財であることを意味する。

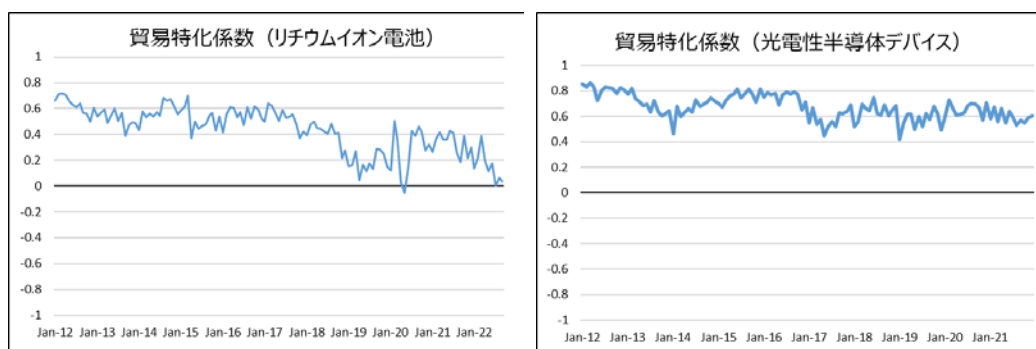
弾力性の推定にあたっては、星野（2001）を参考に、以下の輸出入価格を用いた簡易的な推定方法を用いる。輸出数量を E 、輸入数量を M 、輸出価格を PE 、輸入価格を PM 、誤差項

を ε_t とすると、Armington 弾力性は以下の(1)式で示すモデルにおける係数パラメータ σ として推定できるものとする。

$$\ln(E_t/M_t) = \alpha_t + \sigma \ln(PM_t/PE_t) + \gamma_i \sum_i \text{月次ダミー} + \varepsilon_t \quad (1)$$

図 6-2. カーボンニュートラル関連品の貿易特化係数の例

貿易特化係数 = (輸出金額 - 輸入金額) / (輸出金額 + 輸入金額)



注. 光電性半導体デバイスの輸出 (HS コード: 854140990)、輸入 (HS コード: 854140090)、リチウムイオン電池の輸出 (HS コード: 850760000)、輸入 (HS コード: 850760000)
出所: 財務省; 貿易統計を基に筆者が計算

上記モデルで推定した光電性デバイス半導体とリチウムイオン電池についての Armington 弾力性 σ の推定結果を表 6-3 に示す。

光電性半導体デバイスの Armington 弾力性は 0.702 であり 1 よりも小さい。これは国産財価格と輸入財の価格比が 1%変化したときに、国産財と輸入財の比率の変化は 1%よりも小さいことを意味する。光電性半導体デバイスでは、図 6-2 でみた貿易特化係数からも相対的に製品差別化が進んでいると考えられるが、それでも代替弾力性のパラメータはプラスで有意に推定されていることから、輸入財との価格競争の影響は免れないことが確認できる。

リチウムイオン電池の Armington 弾力性は 1.663 と 1 よりも大きく、価格比が 1%変化

表 6-3. Armington 弾力性の推定結果 (国内財と輸入財の代替の起こりやすさ)

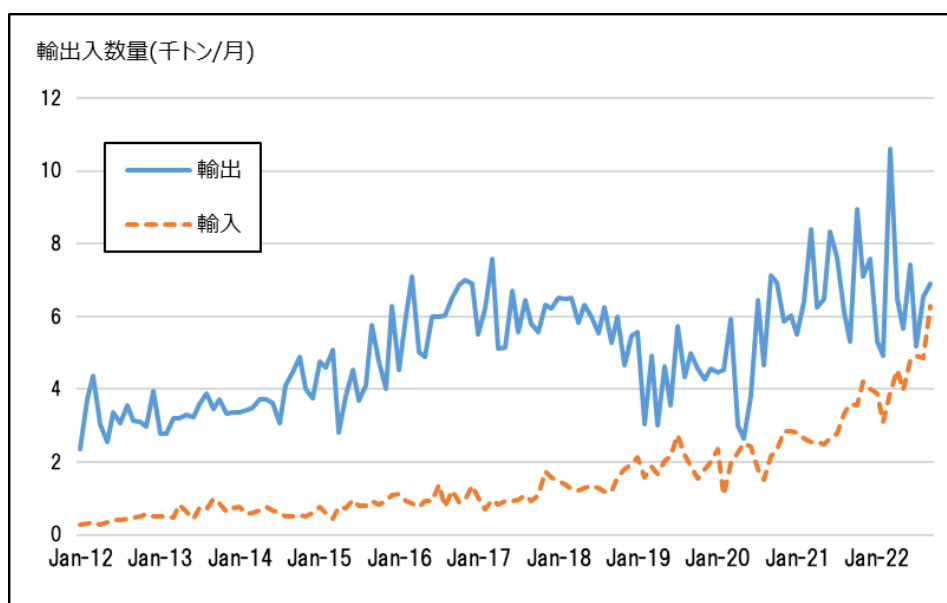
	Armington弾力性 σ	t 値	推定期間
光電性半導体デバイス	0.702	10.11	2012.1-2021.12
リチウムイオン電池	1.663	8.04	2012.1-2022.9

注. モデル式(1)は状態空間モデルとして定式化

したときに、国産財と輸入財の比率は1%以上変化することを意味している。図 6-2 でみたように近年のリチウムイオン電池の貿易特化係数はゼロに近づいており水平分業が進む一方で、Armington 弾力性の推定結果からは、より輸入財との価格競争にも晒されやすいことがうかがえる。

図 6-3 は、日本のリチウムイオン電池の貿易数量の推移を月次の重量ベースでみたものである。これによると、2020 年以降、急激に輸入数量が増加していることがわかる。リチウムイオン電池は、家電製品だけでなく、変動型再生可能エネルギー発電の調整力として定置用蓄電池での需要増が見込まれるほか、電気自動車（以下、EV）のバッテリーでも使われることから、再生可能エネルギー利用拡大と電化によるカーボンニュートラルの実現を目指すシナリオにおいて非常に重要な製品である。それと同時に、分析の結果からは、輸入品との価格競争にさらされやすい製品でもあることが確認された。

図 6-3. 日本のリチウムイオン電池の貿易数量の推移



出所：財務省；貿易統計より筆者作成

ここでは、光電性半導体デバイスとリチウムイオン電池の 2 つのみを取り上げるにとどまったが、そこから示唆されるのは、日本の製造業がカーボンニュートラルへの挑戦を支える製品群においても強みを発揮するためには、希少金属資源を含めた原材料の安定的調達やエネルギー価格をはじめとする国内生産コストが安定することの重要性である。

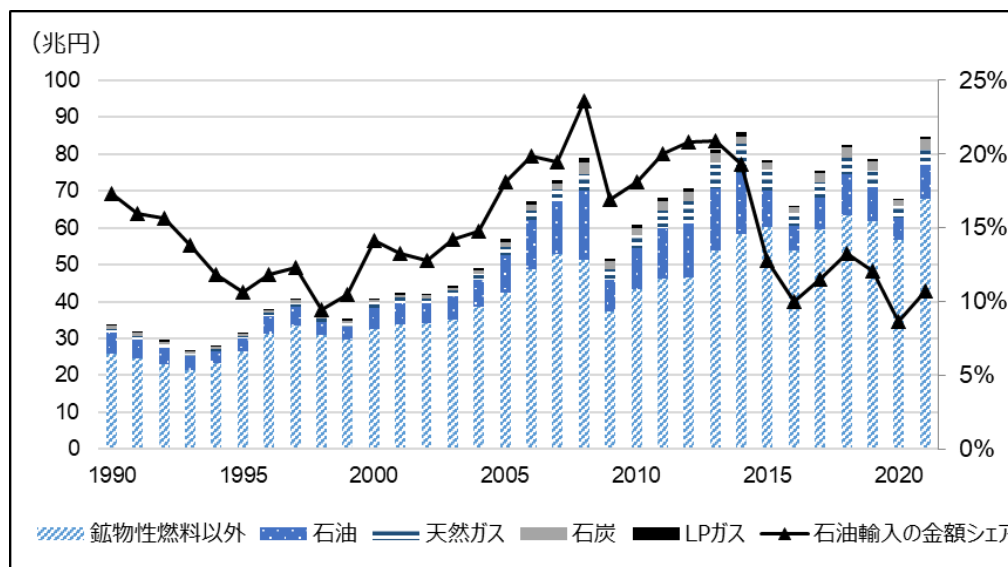
第2節 エネルギーの電力シフト

ここまでみてきた再生可能エネルギーを中心とした電源の低炭素化と並んでカーボンニュートラルの実現においてカギになるものとして期待されているのがエネルギーの電力シフトである。以下では、まず電力シフトの裏側で起きている石油需要減少の貿易への影響からみていきたい。

1. 貿易統計からみる石油需要の減少

図 6-4 は、日本の輸入総額の財別内訳と石油輸入金額のシェアの推移を示したものである。2021 年の日本の原油・粗油、石油製品輸入金額の合計は 9 兆 69 億円、輸入全体に占める石油の金額シェアは 2021 年で 10%であった。同シェアは 1990 年代では 10%台で推移したが、2000 年以降に 20%台まで上昇し、その後ふたたび低下傾向にある。

図 6-4. 日本の輸入金額の内訳と石油輸入金額シェア



注. 石油輸入は、原油・粗油及び石油製品の輸入合計

出所：財務省；貿易統計より筆者作成

図 6-5 は、1990 年代以降の石油輸入金額の変化を輸入数量と輸入価格の要因に分解したものである。原油価格の低迷が続いた 1990 年代は輸入価格要因がマイナスに寄与しているのに対し、2000 年代には価格要因が石油輸入金額を大きく増加させた。同時にこの時期から輸入数量が減少要因になっていることが確認できる。

そこで図 6-6 は、2000 年以降の石油輸入数量の変化を、期間別にトレンド要因、所得要因、価格要因に分解したものである。その結果、トレンド要因は一貫してマイナスに寄与しており、エネルギーの転換や燃費の改善による石油需要の減少傾向が続いていることがわかる。また、要因分解のために推定した石油輸入関数において、価格下降時の価格変数については、マイナスで有意な説明力を持たなかった。価格要因(実質価格ベース)は、価格上昇時のみ石油輸入量に影響を与えており、価格上昇時の価格弾力性はマイナス 0.084 と推定された。このため価格要因は一貫して輸入量の減少に寄与している。このことは、仮に将来的に原油価格が低下傾向に転じても、それが石油需要の増加にはつながりにくく、経済の低成長が続く中においては、エネルギー転換や燃費改善などのトレンド要因が継続する限り石油輸入量（すなわち石油需要量）の減少が継続する可能性を示唆している。

図 6-5. 日本の石油輸入金額の要因分解

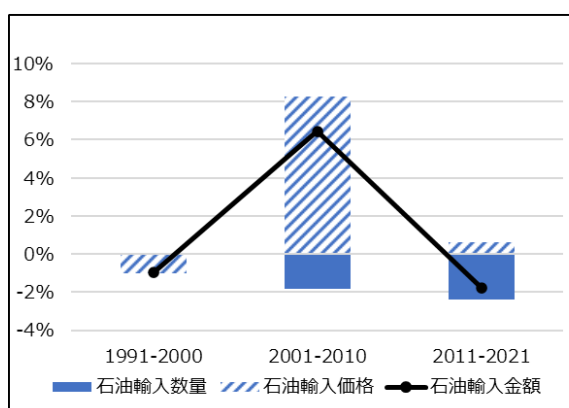
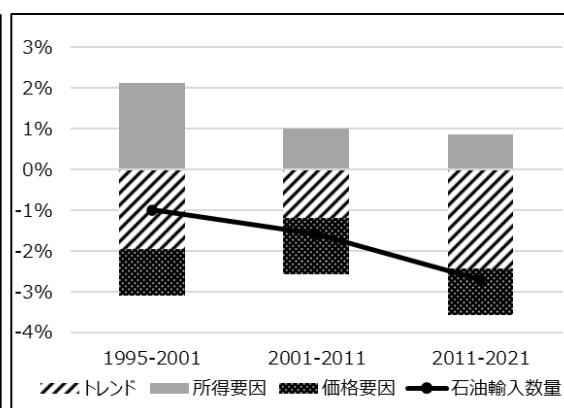


図 6-6. 日本の石油輸入数量の要因分解



注. 図 6-6 の要因分解には、実質 GDP と原油価格を説明変数とする石油輸入数量の状態空間モデルを用いた。推定期間は 1995-2021 年。価格変数については、星野（2013）を参考に、価格上昇／下降時の価格弾力性の非対称性を考慮した。価格下降時の価格弾力性は符号条件を満たさないため、価格上昇時のみのモデルを用いた。価格上昇時の価格弾力性は、マイナス 0.084

出所：財務省；貿易統計より筆者が計算

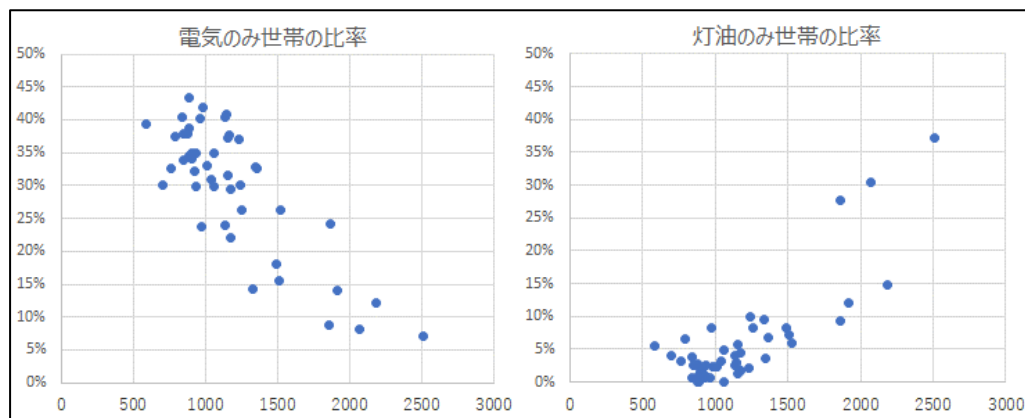
2. エネルギーの電力シフトと残された課題

石油需要が減少する一方でエネルギーの電力シフトが進んでいる。電化による省エネや CO2 削減への貢献は、再生可能エネルギーを中心とした電源の低炭素化と並んでカーボンニュートラルの実現においても重要な役割を果たすものとして期待されている。2022 年版の国際エネルギー機関（IEA）の世界エネルギーアウトルックによれば、カーボンニュートラルと整合的な日本のシナリオにおける最終エネルギー消費に占める電力のシェアは、

2020 年の 28%から 2050 年には標準ケースに相当する STEPS (Stated Policies Scenario) で 35%、カーボンニュートラルシナリオに相当する APS (Announced Pledges Scenario) では 55%まで上昇する。部門別に 2050 年の電化率の想定をみると、電化困難な需要が多い産業部門、運輸部門では、STEPS でそれぞれ 25%、16%、APS でも 45%、43%にとどまるのに対し、家庭部門と業務部門を合わせた民生部門全体での 2050 年の電化率は STEPS で 61%、APS では 81%まで上昇すると見込まれている。西尾他 (2010) では、G7 各国の家庭部門、自動車輸送について電化による CO₂ 削減効果を推定している。このうち家庭の暖房・給湯分野でのエネルギーをすべて電力に転換し、電気利用技術への転換を通じた高効率化を図るケースでは、日本について電力の CO₂ 原単位を一定と想定した場合でも、ベースラインに比べて 64%の削減につながるという結果を得ている。このように民生部門における電化は CO₂ 排出量の削減に大きく貢献することがわかる。他方で、エネルギーの電力シフトにも残された課題がある。その中でも重要なエネルギーレジリエンスの確保について、以下では家庭部門の電化を例に考えてみたい。星野・小川 (2023) では、家庭の暖房用途のエネルギーに焦点をあて、世帯属性別のエネルギー利用実態と電化シフトの課題を分析している。

図 6-7 は環境省の家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査の個票データをもとに、横軸に暖房度日 (暖房用のエネルギー需要の必要度合いを示す指標であり、ここでは都道府県別の日平均気温と 14℃との差を一年分累積して求めた)、縦軸に電気のみ世帯比率、灯油のみ世帯比率をとって、47 都道府県別平均値をプロットしたものである。各エネルギー源の特徴を見るために、暖房用に使用するエネルギー源が 1 種類のみの世帯を対象としている。なお、ガスのみの世帯は十分なサンプルが得られない都道府県もあったため、ここでは電気のみ、灯油のみの世帯を取り上げて分析している。暖房度日が大きくなるほど、すなわち寒冷地であるほど暖房用のエネルギー源として電気のみを使用する世帯の比率は小さくなり、灯油のみを使用する世帯の比率は大きくなる。近年、性能向上に伴って寒冷地用のヒートポンプ・エアコンは徐々に普及しているものの、非寒冷地に比べてエネルギー効率は不利なため、特に厳寒地では電気のみで暖房する世帯は少なくなると考えられる。

図 6-7. 47 都道府県の暖房度日(横軸)と電気/灯油のみ世帯の比率



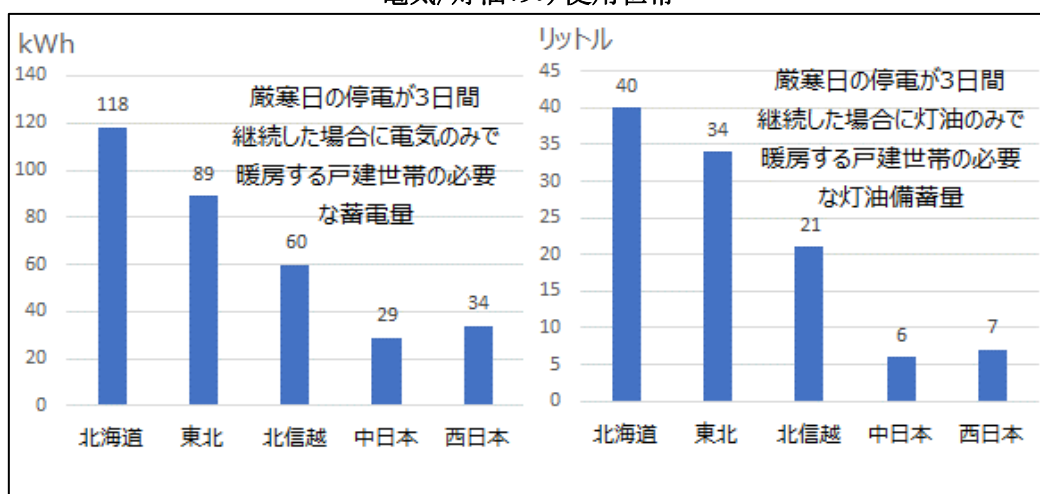
注 1. 暖房度日は、日平均気温が 14℃を下回る日の日平均気温と 14℃の差を一年間合計した値とし、県庁所在地データから都道府県別に推計している。

注 2. ガスのみの世帯は十分なサンプルが得られない都道府県もあったため、ここでは電気のみ、灯油のみの世帯を取り上げて分析している

出所：星野・小川（2023）の図 4 より筆者作成。データ出所：環境省「家庭の CO₂ 排出実態調査」

また、停電など暖房用のエネルギー供給の途絶に対する備えの面からも、寒冷地においては、電気のみではなく、灯油やガスのみ、あるいは複数のエネルギー源を用いた暖房を行う世帯が増えると考えられる。星野・小川(2023)では、暖房度日と暖房用エネルギー消費量の関係を用いて、厳寒日の停電が 3 日間継続した場合に戸建世帯の暖房に必要なエネルギー量を、地域別に推計している（図 6-8）。ここで暖房度日は、日平均気温が 14℃を下回る日

図 6-8. 厳寒日の停電が 3 日間継続した場合に戸建世帯の暖房に必要なエネルギー備蓄量
電気/灯油のみ使用世帯



出所：星野・小川（2023）の表 4 より筆者作成。データ出所：環境省「家庭の CO₂ 排出実態調査」

の日平均気温と 14℃の差を一年間合計した値とし、県庁所在地の気象データから都道府県別に推計している。定義から、寒冷地ほど暖房度日は大きくなる。図 6-8 に示す通り、最も暖房度日が多い北海道においては、電気暖房のみの戸建て世帯では、厳寒日 3 日間の停電に備えるためには、118kWh の蓄電が必要になる。非常時の蓄電池としての活用が期待されるバッテリーEV の蓄電池容量は、日産リーフで 40~60kWh、軽自動車 EV の日産サクラで 20kWh、テスラのロングレンジの EV で 100kWh である。北海道で電気暖房のみの戸建て世帯では、厳寒期の 3 日間の停電時の暖房途絶に備えるためには、テスラのロングレンジ EV 並みを超える蓄電量が必要になることがわかる。他方で灯油暖房のみの戸建て世帯では、18ℓのポリタンク 2 個分強で済むことがわかる。

第 3 節 エネルギーのレジリエンス

1. 多様性の確保

カーボンニュートラルの目標達成に向けては、太陽光や風力などの再生可能エネルギー拡大とエネルギーの電力シフトがコンセンサス・ビューとして語られることが多い。しかし、ここまでみてきたように、単一のエネルギー源や単一のエネルギーシステムに依存することは、特定の資源、技術や製品に依存することであり、これは同時に特定の国や地域に依存することを意味する。このため、資源需給のひっ迫、地政学リスク、サプライチェーンリスクや気象・災害リスクに対する脆弱性を高めてしまうことにつながる。2020 年に行われた経産省の「エネルギーレジリエンスの定量評価に向けた検討会」の議論においても「多様性の確保」は重要なキーワードとして挙げられている。

カーボンニュートラルの目標達成に向けては、電源の低炭素化、エネルギーの電力シフトを進めるなかでも、エネルギーシステムの多様性を失わない努力を続けることが重要である。ひとくちに多様性といっても、エネルギーの種別、輸入先、供給インフラ、利用形態など様々な切り口がある。仮にエネルギー種別を例にとっても多様なエネルギー源がある。太陽光や風力だけでなくバイオマスや地熱など多様な再生可能エネルギー源がある。再生可能エネルギーだけでなく原子力、低炭素燃料や二酸化炭素回収・貯留技術（以下、CCS）と組み合わせた火力発電など多様な低炭素電源がある。また電力だけでなくバイオマス燃料、水素や合成燃料など多様な低炭素燃料がある。さらに省エネや CCS、ネガティブエミッションと組み合わせた石炭、石油、天然ガスなど多様な化石燃料の利用方法がある。これら多様

なエネルギーが、それぞれの課題を補完しあうことで、より柔軟で強靱なエネルギーシステムの実現が可能になる。

石油を例に考えてみたい。石油を中心にしたエネルギーの中東依存度の低減と地政学リスクの管理は、日本のエネルギー安全保障の大きな課題の一つである。しかし裏返すと、その備えとして、他のエネルギーにはない長期間の備蓄を持つことが、逆に石油の最大の強みにもなっている。2022年4月現在、88日分の民間備蓄（うち原油が50%、製品が50%）、145日分の国家備蓄（うち原油が97%、製品が3%）と4日分の産油国共同備蓄がある〔石油連盟（2022）〕。地政学リスクへの対応に加えて、カーボンニュートラルを目指して自然変動型の再生可能エネルギー導入を拡大していく中では、図6-8でみた灯油の例のように、小規模分散型の需要家備蓄との組み合わせることで、エネルギーのレジリエンス確保に貢献することを可能にしている。

2. エネルギー企業の役割

エネルギーシステムの多様化は冗長化でもあるが、冗長化にはコスト負担を伴う。これからの日本は人口高齢化・人口減少による低成長が見込まれており、再生可能エネルギーを含めた国内のエネルギー資源は限られている。こうした状況の下でカーボンニュートラル目標実現のための投資と並行してエネルギーシステムの多様性を確保していかななくてはならない。このため、今後も高い経済成長や需要増加が見込まれる国や再生可能エネルギー資源に恵まれた国々とは、とるべき選択肢は異なってくると考えられる。既存のエネルギーインフラを活用して追加的なコストを抑え、必要な冗長性を残しつつ、エネルギーシステムの更新を行っていく、丁寧なエネルギートランジション（移行）が重要になる。

国際石油産業環境保全連盟（IPIECA: International Petroleum Industry Environmental Conservation Association）は、「エネルギー移行における石油・ガス産業の役割」として、以下を挙げている。①「自らの GHG 削減」として、エネルギー効率改善、フレアー削減、メタンガスの管理、低炭素エネルギーや再生可能エネルギーの電力利用、②「消費者の排出量削減の支援」として、天然ガスの利用拡大、内燃機関システムの効率化、電気自動車、バイオ燃料、液化天然ガス、アンモニア、水素燃料電池などの低炭素モビリティの技術開発、③「石油・ガス産業が有する経験やノウハウの活用」として、水素製造やサプライチェーン、二酸化炭素回収・貯留・利用（CCUS）、④「低炭素分野での事業開発」として、風力、太陽光発電、バイオ燃料などの再生可能エネルギーの利用、投資、生産である。足元での消費

者ニーズにこたえながらカーボンニュートラルへの移行を進める①、②の取り組みと、石油・ガス業界の蓄えた知見を活かした革新的な技術や事業を開発する③、④の取り組みを並行させている。表 6-4 は石油連盟が昨年末にまとめた石油業界のカーボンニュートラルに向けたビジョンであるが、国際石油産業環境保全協会（IPIECA）の考え方と基本的に同じである。エネルギー供給の S+3E（安全性、安定供給、経済性、環境への適合）を担うための既存対策の強化・技術開発に加えて、2050 年のカーボンニュートラル達成に向けては革新的技術開発の目標が掲げられている。

2050 年のカーボンニュートラルの実現という野心的な目標を掲げつつ、同時に足元では、暮らしや経済を支えるエネルギーを途絶させることなく、安全・安価に消費者に届ける責務を負うのが、電力、ガス、石油などのエネルギー事業者である。見栄えがいい方策だけでは、責務を果たすことはできないことを、誰よりもよく知るのもエネルギー事業者である。どうすれば社会の負託にこたえることができるのか悩みながら、技術開発を含めた新しい挑戦を続けていくことが求められている。

表 6-4. 石油業界のカーボンニュートラルに向けたビジョン（石油連盟）

	既存対策の強化・技術開発	革新的技術の実用化に向けたチャレンジ（～2050年）
1. 自社の事業活動に伴うCO ₂ 排出削減	・省エネ対策の強化・燃料転換の推進 ・再エネ・ゼロエミ電源の活用・開発促進	・精製プロセスの変革(CO ₂ フリー水素の活用等の技術開発) ・CCS・CCU(カーボンサイクル)の技術開発
2. 供給する製品に伴うCO ₂ 排出削減	・第1世代バイオ燃料の活用 ・内燃機関の燃費向上に資する燃料開発 ・持続可能な航空燃料（SAF）など次世代バイオ燃料の供給	・CO ₂ フリー水素の技術開発 ・合成燃料e-fuel(カーボンサイクル)の技術開発 ・持続可能な航空燃料（SAF）など次世代バイオ燃料の技術開発
3. CO ₂ 排出削減・吸収源対策	・バリューチェーンの低炭素化(環境配慮型製品・潤滑油等) ・水素ステーション、EV充電のインフラ整備 ・再エネ事業の拡大・開発促進 ・廃プラリサイクル等の推進	・水素（アンモニア含む）供給事業の技術開発 ・石化製品の原料転換(バイオマス・カーボンサイクル) ・CCS・CCU(カーボンサイクル)の技術開発 ・廃プラリサイクル等の技術開発

出所：石油連盟(2022)「石油業界のカーボンニュートラルに向けたビジョン（目指す姿）」より筆者作成

参考文献

- ・ IEA(2022). World Energy Outlook 2022
- ・ IPCC WGIII(2022). IPCC Sixth Assessment Report, Mitigation of Climate Change
- ・ 西尾健一郎・星野優子（2010）. 主要 7 か国の電気利用技術による CO₂ 削減ポテンシャルー家庭用ヒートポンプと電気自動車のケース分析ー，電力中央研究所研究報告 Y09019
- ・ Armington,P.S.(1969). A Theory of Demand for Products Distinguished by Place

of Production, IMF Staff Papers Vol. 16, No. 1

- ・ [関西電力のホームページ](#) ; (最終アクセス日 : 2023 年 1 月)
- ・ 今村栄一・井内正直・坂東茂 (2016). 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, 電力中央研究所研究報告 Y06
- ・ 財務省 ; 貿易統計各年版
- ・ 国連 ; 貿易統計 COMTRADE
- ・ 星野優子 (2011). 日本のエネルギー需要の価格弾力性の推計—非対称性と需要トレンドを考慮して—, 電力中央研究所研究報告 Y10016
- ・ 星野優子 (2001). 日本の半導体貿易の構造変化と輸出競争力、電力経済研究 No.46
- ・ 環境省 ; 家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査 (家庭 CO₂ 統計) 各年版
- ・ 星野優子・小川順子 (2023). 家庭 CO₂ 統計からみた家庭の暖房におけるエネルギーレジリエンス、エネルギー・資源学会第 39 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集
- ・ [エネルギーレジリエンスの定量評価に向けた検討会 \(2020\). 中間論点整理](#)
(最終アクセス日 : 2023 年 1 月)
- ・ [石油連盟 \(2022\). 今日の石油産業 2022.](#) (最終アクセス日 : 2023 年 1 月)
- ・ [IPIECA\(2022\). The role of the oil and gas industry in the energy transition.](#) (最終アクセス日 : 2023 年 1 月)
- ・ [石油連盟 \(2022\). 石油業界のカーボンニュートラルに向けたビジョン \(目指す姿\) 【2022 年 12 月版】](#) (最終アクセス日 : 2023 年 1 月)

〔禁無断転載〕

カーボンニュートラルの実現に向けたエネルギー貿易・投資市場への影響

令和4年度（一財）貿易・産業協力振興財団 助成事業

発行日 2023年2月

編集発行 一般財団法人国際貿易投資研究所（ITI）

〒104-0045 東京都中央区築地1丁目4番5号 第37興和ビル3階

TEL : (03) 5148-2601 FAX : (03) 5148-2677

Home Page : <http://www.iti.or.jp>

