令和６年度

地球温暖化対策技術・エネルギー等分析・評価国際連携事業費

地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業

成 果 報 告 書

令和７年３月

公益財団法人 地球環境産業技術研究機構

委員会、ワーキンググループ名簿

（順不同）

＜地球温暖化対策国際戦略技術委員会＞

委員長	内山 洋司	筑波大学 名誉教授 （一社）日本エレクトロヒートセンター 代表理事 会長
委員	有馬 純	東京大学 公共政策大学院 特任教授
	岩船 由美子	東京大学生産技術研究所 教授
	上野 貴弘	（一財）電力中央研究所 社会経済研究所 研究推進マネージャー 上席研究員
	江守 正多	東京大学未来ビジョン研究センター 教授
	沖 大幹	東京大学大学院 工学系研究科 教授
	杉山 大志	キヤノングローバル戦略研究所 研究主幹
	高村 ゆかり	東京大学未来ビジョン研究センター 教授
	手塚 宏之	JFEスチール（株） 専門主監（フェロー）
	中上 英俊	（株）住環境計画研究所 代表取締役会長
	野村 浩二	慶應義塾大学産業研究所 所長 教授
	藤井 康正	東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授
	増井 利彦	国立研究開発法人 国立環境研究所 社会システム領域 領域長
	森 俊介	東京理科大学 名誉教授

委員会事務局　地球環境産業技術研究機構（RITE） システム研究グループ

＜モデル構築・分析WG＞

主査	森 俊介	東京理科大学 名誉教授
委員	紀伊 雅敦	大阪大学大学院 工学研究科 環境エネルギー工学専攻 教授
	黒沢 厚志	（一財)エネルギー総合工学研究所 カーボンニュートラル技術センター 地球環境グループ 部長 特任参事
	堂脇 清志	東京理科大学 創域理工学部 経営システム工学科 教授
	藤井 康正	東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授
	柳澤 明	（一財)日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット担任補佐 兼 エネルギー・経済分析グループマネージャー 研究主幹
	山形 与志樹	慶應義塾大学大学院 システムデザイン･マネジメント研究科 教授

	山　本　博　巳	東北大学大学院 工学研究科 電気エネルギーシステム専攻 先端電力工学共同研究講座 客員教授
	横　木　裕　宗	茨城大学 大学院理工学研究科（工学野） 都市システム工学領域 教授
	秋　元　圭　吾	RITE システム研究グループ グループリーダー
	和　田　謙　一	RITE システム研究グループ 主任研究員
	本　間　隆　嗣	RITE システム研究グループ 主任研究員
	佐　野　史　典	RITE システム研究グループ 主任研究員
	林　　礼　美	RITE システム研究グループ 主任研究員
	原　田　　洋	RITE システム研究グループ 主任研究員
	安　藤　輝　尚	RITE システム研究グループ 研究員
	ｻｲｰﾄﾞ ｼﾞｭﾊﾞｲｱｰ	RITE システム研究グループ 研究員

＜経済分析 WG＞

主　　査	野　村　浩　二	慶應義塾大学産業研究所 所長 教授
委　　員	杉　山　大　志	キヤノングローバル戦略研究所 研究主幹
	秋　元　圭　吾	RITE システム研究グループ グループリーダー
	長　島　美由紀	RITE システム研究グループ 主任研究員
	本　間　隆　嗣	RITE システム研究グループ 主任研究員
	望　月　則　孝	RITE システム研究グループ 主任研究員

＜セクター横断対策検討 WG＞

主　　査	下　田　吉　之	RITE 研究所長
委　　員	伊香賀　俊　治	（一財）住宅・建築 SDGs 推進センター 理事長 慶應義塾大学 名誉教授
	小　田　潤一郎	秋田大学 大学院国際資源学研究科 准教授
	金　成　修　一	（一財）日本自動車研究所 環境研究部 LCA グループ グループ長 主任研究員
	上　條　元　久	日産自動車（株） 総合研究所 EV システム研究所 エキスパートリーダー
	紀　伊　雅　敦	大阪大学大学院 工学研究科 環境エネルギー工学専攻 教授
	小宮山　涼　一	東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授
	齋　藤　　潔	（一社）日本電機工業会 環境ビジネス部 部長
	志　知　　明	（株）豊田中央研究所 エマージングエナジー研究企画・推進室 室長

	清　水　敦　志	パナソニックホールディングス（株）　課長
	堤　崎　高　司	（株）本田技術研究所 先進パワーユニット・エネルギー研究所 エキスパートエンジニア
	鶴　崎　敬　大	（株）住環境計画研究所 取締役研究所長
	西　尾　健一郎	（一財）電力中央研究所 社会経済研究所 上席研究員
	松　尾　雄　司	立命館アジア太平洋大学 教授
	松　橋　啓　介	国立研究開発法人 国立環境研究所 社会システム領域 地域計画研究室 室長
	村　上　正　吾	大成建設（株）営業推進・ソリューション本部 O&M ビジネス推進部 エネルギーマネジメント室 室長
	秋　元　圭　吾	RITE システム研究グループ グループリーダー
	佐　野　史　典	RITE システム研究グループ 主任研究員
	望　月　則　孝	RITE システム研究グループ 主任研究員
	中　野　優　子	RITE システム研究グループ 主任研究員
	安　藤　輝　尚	RITE システム研究グループ 研究員
	ｻｲｰﾄﾞ ｼﾞｭﾊﾞｲｱｰ	RITE システム研究グループ 研究員

＜イノベーション・投資促進検討 WG＞

主　　査	杉　山　大　志	キヤノングローバル戦略研究所 研究主幹
委　　員	木　村　　宰	（一財）電力中央研究所 社会経済研究所 上席研究員
	後　藤　大　亮	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙輸送技術部門 イプシロンロケットプロジェクトチーム 主任研究開発員
	清　水　　洋	早稲田大学商学学術院 教授
	中　山　寿美枝	電源開発（株）　執行役員
	野　村　浩　二	慶應義塾大学産業研究所 所長 教授
	秋　元　圭　吾	RITE システム研究グループ グループリーダー
	山　田　航　也	RITE システム研究グループ 副主席研究員
	長　島　美由紀	RITE システム研究グループ 主任研究員
	望　月　則　孝	RITE システム研究グループ 主任研究員
	中　野　優　子	RITE システム研究グループ 主任研究員

＜気候変動リスクマネージメント検討 WG＞

主　　査	山　地　憲　治	RITE 理事長
副 主 査	秋　元　圭　吾	RITE システム研究グループ グループリーダー
委　　員	江　守　正　多	東京大学未来ビジョン研究センター 教授

岸　本　充　生	大阪大学データビリティフロンティア機構 教授
杉　山　大　志	キヤノングローバル戦略研究所 研究主幹
杉　山　昌　広	東京大学未来ビジョン研究センター 教授
髙　橋　　潔	国立研究開発法人 国立環境研究所 社会システム領域 副領域長
平　林　由希子	芝浦工業大学大学院 理工学研究科 工学部 土木工学科 教授
松　尾　雄　司	立命館アジア太平洋大学 教授
松　田　裕　之	横浜国立大学 総合学術高等研究院 特任教員（教授）
森　　信　人	京都大学 防災研究所 教授
森　川　哲　男	（一財）日本エネルギー経済研究所 資源・燃料・エネルギー安全保障ユニット 石油グループ マネージャー 研究主幹

山　田　航　也	RITE システム研究グループ 副主席研究員
林　　礼　美	RITE システム研究グループ 主任研究員
大　西　尚　子	RITE システム研究グループ 主任研究員

目　　次

第 1 章　はじめに 19

1.1 背景 21

1.1.1 世界の温室効果ガス排出および気温の動向 21
1.1.2 気候変動枠組条約パリ協定 23
1.1.3 国連持続可能な発展目標 25
1.1.4 日本のエネルギーおよび地球温暖化政策の動向 26
1.1.5 欧州排出量取引制度の動向 41
1.1.6 IPCC 関連の動向 42

1.2 本研究の目的と実施内容 43

第 2 章 気候変動リスクマネジメント 49

2.1 気候変動リスクマネジメントの考え方 50

2.2 持続可能な発展とのシナジー・トレードオフ 62

2.2.1 気候変動緩和策と持続可能な発展との関係性 65
2.2.2 カーボンニュートラルに向けた重要鉱物の需要量と潜在的供給不足の分析 69

2.3 Non-CO_2 GHG 排出削減をめぐる動向と課題 82

2.3.1 Non-CO_2 GHG 緩和シナリオ研究の動向と課題 82
2.3.2 Non-CO_2 GHG 排出削減に関する文献調査 84

2.4 イノベーション戦略から見た気候変動リスクマネジメント 87

第 3 章 グリーン成長の限界と機会 90

3.1 グリーン成長の限界と機会 90

3.1.1 世界の経済成長と CO_2 排出の長期的な傾向 90
3.1.2 世界の CO_2 排出等についての近年の状況 93

3.2 価格高騰期のエネルギー価格差拡大 94

3.2.1 はじめに 94
3.2.2 測定フレームワーク 96
3.2.3 分類と PPP 感度 100

3.2.4 価格高騰期の内外価格差拡大 110
3.2.5 結び 119
3.2.6 補論：ECM 推計法の改訂 121
3.2.7 付録図表 125

3.3 戦後日本経済における鉄鋼の間接貿易 142

3.3.1 はじめに 142
3.3.2 近年の鉄鋼生産減退 145
3.3.3 鉄鋼の需給バランスの分析フレームワーク 150
3.3.4 拡張された需給バランスの測定 159
3.3.5 結び 167

3.4 国内外の排出削減の取り組み状況 169

3.4.1 日本の排出削減動向および政策動向 170
3.4.2 米国の動向 184
3.4.3 欧州の動向 192

3.5 国内外の再生可能エネルギーの動向 202

3.5.1 世界における再生可能エネルギーの導入状況 202
3.5.2 日本における再生可能エネルギーの導入状況 210

3.6 電力システム改革と温暖化対策 217

3.6.1 電力の競争環境 217
3.6.2 電力の価格動向 219
3.6.3 制度設計、市場設計 223
3.6.4 電力システム改革の検証 233

3.7 企業情報開示（TCFD など）、ESG 投資、グリーンボンド等の動向 237

3.7.1 気候変動情報開示 237
3.7.2 ESG 投資、グリーンボンド等の動向 245

3.8 気候変動政策に伴う費用負担の格差拡大の課題 255

3.8.1 はじめに 255
3.8.2 CO_2 排出における inequality の評価 256
3.8.3 気候政策と不衡平性の関係の評価 257
3.8.4 まとめ 261

第 4 章 中期緩和対策（パリ協定国別貢献 NDCs）分析 262

4.1 2030 年の排出削減目標（NDCs）に関する分析・評価 263

4.1.1 世界各国の NDCs の排出削減目標の状況 263
4.1.2 NDCs の排出削減努力の評価 265

4.2 拡張世界エネルギー・経済モデルによる NDCs の経済分析 267

4.2.1 背景と目的 267
4.2.2 分析の方法 270
4.2.3 分析結果 274
4.2.4 まとめと今後の課題 277

4.3 国際競争力への影響・国境調整税の評価 279

4.3.1 国境炭素調整に関する現況 279
4.3.2 国境炭素調整に関する分析の調査 281

4.4 排出削減努力等の研究事例の調査 291

4.4.1 UNFCCC 事務局による Synthesis レポート 291
4.4.2 UNEP による Emission Gap Report 2024 (EGR2024) 294
4.4.3 まとめ 306

第 5 章 長期緩和シナリオ分析 307

5.1 日本の 2050 年カーボンニュートラルに向けた分析 307

5.1.1 分析に用いた世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+の概要 307
5.1.2 2040 年排出削減目標に関する分析 310
5.1.3 エネルギーミックスの分析 317

5.2 CDR に関する経済ポテンシャル分析 346

5.2.1 はじめに 346
5.2.2 CDR 技術の排出削減コストと削減ポテンシャルについて 346
5.2.3 DNE21+モデルによる経済的排出削減ポテンシャルの評価 347
5.2.4 まとめ 355

5.3 DNE21+の拡張 356

5.3.1 年間時間ステップの拡張検討 356
5.3.2 時間分解能を向上させた DNE21+モデルでの蓄電及び蓄熱発電技術の定式化 391

5.4 需要側技術の動向と社会変化 395

5.4.1 デジタル化と循環経済による商業活動への影響 395

5.4.2 道路貨物輸送の緩和策による国内産業への影響評価 433
5.4.3 重要鉱物の再資源化ポテンシャル分析 440

5.5 気候変化を考慮した建物の冷暖房需要に関する分析 454

5.5.1 都市の気候変動適応策と建物の冷暖房用エネルギー需要量 455
5.5.2 統合評価モデルにおける気候変動による冷暖房需要への影響考慮の枠組み 463

5.6 需要サイドの定量的なモデル分析 479

5.6.1 シナリオ分析の背景と削減貢献量推計 479
5.6.2 需要側変化に関する定量的な分析のための各種想定シナリオ 483
5.6.3 需要側変化に関するシナリオ分析結果 487

5.7 エネルギー安全保障・安定供給に関する分析 495

5.7.1 気候変動緩和策とエネルギーセキュリティ 495
5.7.2 分析シナリオと分析手法 497
5.7.3 結果 500
5.7.4 今後の課題 505

第 6 章 国際枠組み、海外対策動向および国際モデル比較プロジェクト動向 507

6.1 IEA WEO の分析 507

6.1.1 WEO2024 の概要と課題 507
6.1.2 IEA WEO2023 と DNE21+シナリオとの比較 534

6.2 国際モデル比較プロジェクト EDITS の概要と貢献 536

6.2.1 国際モデル比較プロジェクト EDITS の概要 536
6.2.2 EDITS への運輸部門の分析シナリオの提供 537

第 7 章 まとめ 542

付録 ALPS 国際シンポジウム 549

要　　約

令和６年度地球温暖化対策技術・エネルギー等分析・評価国際連携事業費

「地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業」報告書

要　約

本報告書は、令和６年度地球温暖化対策技術・エネルギー等分析・評価国際連携事業費「地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業」の成果をとりまとめたものである。

地球温暖化は、地球全体の環境に深刻な影響を及ぼすものであり、その解決が強く求められる。しかし、地球温暖化は、世界のあらゆる国、様々な部門に影響を与え、一方でその影響は均一ではない。また、各国において取り得る緩和策、緩和費用にも差異が大きい。そのため、真に有効な対策を実現するためには、総合的なパッケージを作り上げることが重要と考えられる。

2015 年末の気候変動枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）で合意された「パリ協定」が 2016 年 11 月に発効した。その後、世界では 150 以上の国と地域が、21 世紀中ごろまでのカーボンニュートラルを表明し、温暖化への対応は、国際的にも成長の機会と捉える時代に突入している。日本政府は、2019 年 6 月に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を策定し、そこでは「21 世紀後半のできるだけ早い時期に実質ゼロ排出を目指す」とした。そして、2020 年 10 月には、菅首相が所信表明演説で「2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」と宣言した。そして、2020 年 12 月に経済産業省が中心になって、「グリーン成長戦略」を策定した。

他方、2022 年はエネルギー安全保障・安定供給の問題が顕在化した。ロシア・ウクライナ情勢からの化石燃料価格高騰や、2022 年 3 月の電力需給逼迫等により、改めてエネルギー安全保障・安定供給の課題を再認識し、2023 年 2 月には「GX（グリーントランスフォーメーション）実現に向けた基本方針」が閣議決定された。そして、2023 年 12 月には、政府 GX 実行会議において、分野別投資戦略もとりまとめられた。そして、2025 年 1 月には、米国でトランプ政権が誕生し、再び、パリ協定からの脱退が表明された。

また、再び世界に目を転じてみると、NDCs の深堀は進んでおらず、1.5℃のみならず、2℃目標の排出経路とも大きなギャップが残っている。しかも、足下での排出推移からは EU でも NDCs 達成が難しいと見られる状況になってきている他、多くの国で NDCs の達成は難しい可能性がある。そして、瞬間的かもしれないが、2024 年の世界平均気温は産業革命以前比で 1.5℃を超えた。国際社会は、気候変動対策の強化の必要性については概ね認識を一にしているものの、それでも具体的な対応については温度差がある。グローバルでカーボンニュートラルの達成を目指すうえでは、各国の掲げる野心や政策強度の違いによる、競争上の不公平性を是正し、カーボンリーケージを防止したうえで国際的なルール策定を実施していく必要がある。このような中、各

国・各地域・各産業の状況を総合的に考慮するとともに、気候変動政策の立案に貢献し得る様々な評価・分析を行う重要性は一層高まってきている。

2023 年には第 1 回グローバルストックテイク（GST）が実施され、パリ協定の目標達成に向けた世界全体での実施状況をレビューし、目標達成に向けた進捗評価がなされた。COP28 の GST の決定文書においては、「パリ協定の内容を踏まえ、各国それぞれ異なる国情、経路、アプローチを考慮し、各国ごとに自ら決定した方法で、以下の世界的努力への貢献を要請する。」とされたところである。そして、GST の内容を踏まえ、各国は国別削減目標（NDC）を更新することが求められており、パリ協定の目標に向けた各国の気候変動対策の実施の加速化や次期 NDC の策定などについて、世界各国で議論がなされてきている。日本政府も、2025 年 2 月に、地球温暖化対策計画の改定を行い、2035 年および 40 年の NDC としての温室効果ガス排出削減目標を、それぞれ、2013 年度比で 60%削減、73%削減とすることとした。また、第 7 次エネルギー基本計画、GX2040 ビジョンも策定し、地球温暖化対策計画とともに閣議決定がなされた。

一方、気候変動の科学的な知見の集積としては、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は 2021～23 年にかけて第 6 次評価報告書を公表している。これを基にしつつ、複雑な課題に対する科学的な分析等を更に進めていく必要がある。第 7 次評価報告書作成のプロセスも始まったところであり、2025 年 2 月には、IPCC 総会で第 7 次評価報告書の目次が承認された段階である。気候変動に関する最新の科学的知見の提供も引き続き求められている。

本事業では、最新の科学的知見や国際交渉の動向も踏まえながら、海外研究機関とも連携・協力しつつ、温暖化対策（緩和策及び適応策等）、ファイナンス、政策の総合的かつ整合的な分析・評価を行い、我が国の気候変動政策の立案や、IPCC、COP といった国際的な議論に貢献することを目的として実施した。そしてこれらによって、産業構造や経済社会の変革をもたらし、大きな成長につなげる、「経済と環境の好循環」を目指す将来枠組み・我が国の国際戦略立案に資する。

本報告書では、まず、第 1 章において背景と目的を記述した後、第 2 章で気候変動に関連した各種不確実性を指摘した上で、本事業で実施した定量的な分析も踏まえながら、気候変動リスクマネージメント戦略のあり方について議論を行い、とりまとめた。また、IPCC の最新の評価報告書で整理された内容を含め、気候変動対策と他の SDG 目標等とのシナジー・トレードオフについて記述した。更に、気候変動対策におけるイノベーションの可能性についてまとめ、気候変動リスクマネージメントにおけるイノベーションの役割について論じた。第 3 章ではグリーン成長の限界を正しく認識しつつ、その機会を見出すために、各種調査、分析した結果をとりまとめた。また、日本経済の長期エネルギー生産性変化における構造要因の分析、日本産業のエネルギー生産性変化の測定、電力自由化の下での温暖化対策の動向等についての調査、サステイナブルファイナンスの動向と既往のモデル分析の調査・検討等を行った。第 4 章では、中期的な緩和策の分析として、パリ協定 NDCs（Nationally Determined

Contributions）の排出削減目標に関する分析・評価を行った結果をまとめた。UNFCCC への提出や提出の検討が行われている、2030 年以降の NDCs についてもその分析内容等を整理した。また、国境調整税に関する国際的な議論の動向を整理するとともに、モデル分析による試算も行った。第 5 章は長期の緩和シナリオ分析についてまとめた。カーボンニュートラル実現のための各種技術の開発動向や国際的な最新の分析・評価について整理した。また、温暖化対策モデルにおいて、エネルギー供給側および需要側双方について、2050 年カーボンニュートラル実現の様々なシナリオを想定した分析を行った。第 7 次エネルギー基本計画のエネルギー需給見通し作成に対して、提供を行ったシナリオ分析についても、その内容を記載した。第 6 章においては、最新の海外の気候変動に関する政策動向の調査結果を記すとともに、国際エネルギー機関 IEA 等のシナリオ等についてもその概要等を記載した。第 7 章においてまとめを記載した。また、付録には本事業の一環として実施した国際シンポジウム等の内容について掲載した。以下に第 2～6 章のそれぞれのポイントを記載する。

第 2 章では気候変動リスクマネージメントのあり方について検討を行った。IPCC WG1 の第 6 次評価報告書では、地球温暖化が人間の影響で起きていることは「疑う余地がない」と評価した。気温安定化のためには、その時点において CO_2 排出をほぼゼロにする必要もある。しかし一方で、気候変動の程度および影響被害の程度には大きな不確実性が存在する。緩和費用面に関してもパリ協定 NDCs でも見られる限界削減費用の各国間での幅の大きさが指摘できる。また、一国内においても原子力等の社会的な利用制約や、エネルギー安全保障やその他政策との調和の必要性、また政治システム上の制約も考えられ、それらを踏まえると費用最小化時の緩和費用と比べかなり大きい費用が推計される。そのような中、様々なリスク要因を踏まえた上で、気候変動対策に関するより良い意思決定が求められる。また総合的に気候変動リスクを減じるためには、気候変動への適応も重要な対策と考えられる。本章では、気候変動対策とエネルギー安全保障や希少鉱物資源供給制約とのシナジー・トレードオフ等についても記述した。各種対策は、SDGs に対してシナジーも多く存在する一方、トレードオフも存在しており、トレードオフの影響を小さくしながら、対策を進める必要がある。また、気候変動影響・適応策の経済影響・経済効果やイノベーションとそれを誘発し得る政策についても言及しつつ、気候変動リスクマネージメントのあり方について整理を行った。

第 3 章では、グリーン成長の限界と可能性について、できる限り、データ、定量的な分析に基づきながら検討を行った。日本政府は、「経済と環境の好循環」を掲げている。しかしながら、その道筋は、現時点で明確にあるわけではなく、狭いパスとも考えられる。

経済と CO_2 排出のデカップリングの状況などについて、最新の定量的なデータ収集と分析を行い、その要因も含めて検討を行った。そして、更なる深堀として、世界主要国間での相対的なエネルギー価格と産業リーケージの動向についての分析について記載した。更に、日本の産業界が取り組んでいるカーボンニュートラル行動計画の実

績について、グリーン成長の視点を含め、排出削減努力についての一次的な試算も行った。

その他、日米欧における気候変動政策の動向やその国内外の評価について調査をし整理を行った。また、電力自由化の下で温暖化対策を進めるにあたっての課題、そしてそれへの対応として進められている電力政策の動向等についてまとめた。更には、グリーンボンド、サステイナブルリンクローン等、サステイナブルファイナンスの動向とこれまでのモデル分析例についてその内容と課題について整理を行った。気候変動政策に伴う費用負担の格差拡大の課題についても調査・検討を行った。

第 4 章では、パリ協定 NDCs の排出削減目標に関する分析・評価を行った。パリ協定では、プレッジ・アンド・レビューの仕組みとなっており、NDCs の国際的なレビューが重要となる。本研究では最新の NDCs に基づき、複数の指標で各国 NDCs の排出削減努力の国際比較を実施した。NDCs における 2035 年以降の排出削減目標についても、世界各国から提出された、もしくは、世界各国で検討が進められている目標について調査を行った。国際的な NDCs 評価の文献についても整理を行った。また、世界エネルギー経済モデル DEARS の地域分割の拡張を行い、排出削減とその国際的な協力において重要性が増すアジア諸国での経済影響について試算を行った。

更には、欧州では炭素国境調整税導入の具体的な検討が進められてきている。そこで、関連動向と既往モデル分析事例の調査を行うとともに、世界エネルギー経済評価モデルを拡張して、炭素国境調整税導入の影響に関する試算を行った。また、海外のモデルでも分析を行い、比較・評価を行った。炭素国境調整税は、炭素リーケージに一定の効果は有すると推計されるものの、効果は限定的とも見られ、原則的には CO_2 限界削減費用の差異が国間で大きくなりすぎないよう、排出削減目標の調整が重要と見られる。

第 5 章では、長期の温暖化対策・政策の総合的な分析を行った。日本政府は、第 7 次エネルギー基本計画、地球温暖化対策計画、GX2040 ビジョンを策定し、2025 年 2 月に閣議決定した、本事業では、これら計画に資する定量的な分析の提示を行った。世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+において、エネルギー供給側および需要側双方のエネルギーシステムの分析を行った。また、併せて、世界エネルギー経済モデル DEARS も活用して、CO_2 削減に伴う経済活動の低減効果等についても分析を行った。それらシナリオ分析について記載した。

また、大気中からの直接 CO_2 回収・貯留（DACCS）などの二酸化炭素除去技術（CDR）については、IPCC 第 6 次評価報告書でも、「CO_2 もしくは GHG の実質ゼロ実現のためには、CDR は不可欠」とされているが、本事業でも、CDR の技術調査、各種の経済性評価に関する調査を行うとともに、植林、バイオ炭、BECCS、DACCS といった相互依存関係もある CDR について、CCS とともに経済的ポテンシャルを DNE21+モデルを用いて分析・評価を行った。

国内外で変動性再生可能エネルギー（VRE）のコスト低減が進んでおり重要性が増している。他方、大量の VRE 導入は需要とのマッチングが難しくなるが、世界エネル

ギー・温暖化対策モデル DNE21+の年間の時間解像度では、評価が難しい。これまでは、系統統合費用を別途推定して、DNE21+モデルに統合して評価することで、簡略ながらも適切な評価となるようにしてきている。しかし、蓄電池や蓄熱、水素等、需要側対策等を含め、より精緻で整合的な評価を今後、実施する準備として、世界各国の電力負荷曲線の推計および太陽光、風力発電（陸上および洋上）の時間帯別の設備利用率やポテンシャルの推計を行った。

また、バッテリーなどのクリーンエネルギー技術導入に伴い鉱物資源需給ひっ迫の懸念があることから、重要鉱物の需要量について、再資源化の可能性も含めて、将来の見通しを推計した。

エネルギー需要サイドについては、デジタルトランスフォーメーション（DX）を中心に誘発され得るサーキュラーエコノミー、シェアリングエコノミー等、低エネルギー需要実現の可能性について、調査、分析を実施した。DX による貨物部門の技術・社会変化について調査した。また、デジタル化と循環経済の推進による商業活動への影響について調査した。そして、DX を中心とした技術変化や社会変化が、エネルギー需要にどのような変化をもたらし得るのかについて、定量的な推計を行い、DNE21+モデルを用いてエネルギー需給双方を整合的に分析した。これらによって、リバウンド効果を含む、行動変化を総合的に捉えて、将来のエネルギー需要の見通しを得る分析手法の今後の発展に資するものと考えられる。

第 6 章では、国際エネルギー機関（IEA）が 2024 年 10 月に発表した世界エネルギー展望 WEO2024 について解説を行った。本報告書では、これらシナリオについても概要をとりまとめるとともに、DNE21+によるシナリオとの比較評価についてもとりまとめた。

パリ協定は、世界すべての国が排出削減に取り組む仕組みとして出来上がったものの、現状では、世界各国がその目標を実現するための CO_2 限界削減費用には大きな差異が見られる。これは、CO_2 排出原単位の高い産業を中心に産業の国間の移転を誘発し、世界全体での排出削減効果を大きく減じるリスクがある。欧州は、このリスクを減じるため、炭素国境調整税の導入を目指しているが、本事業での分析からもその効果は一定程度あるものの、効果は限定的とも見られる。確かに、急速な気候変動対応強化への国際的な高まりは見られ、特にファイナンス部門を介した経済界への対応強化の要請も強まり、大きな進展が見られてきた。一方で、COVID-19、化石燃料価格の急騰、国際的な紛争のリスクなどが、気候変動対応にどのような影響を及ぼすかについても注視が必要である。化石燃料価格の高騰は、化石燃料生産企業の収益を大きくしてきている。これは、ここ数年の脱化石燃料のファイナンスの流れも変える可能性もある。また、気候変動対策に積極的だったドイツは、エネルギー価格の高騰や補助金頼みの電気自動車普及が壁にぶつかって、製造業の競争力低下につながって、厳しい経済状況となっている。いずれにしても、技術、社会のイノベーションがなければ、世界排出量の大幅な削減、そしてカーボンニュートラル化はあり得ない。広範なイノベーションを誘発する良い経済社会環境を整えることが重要と考えられる。意欲的な

目標だけでは長い気候変動との闘いを継続できず、真に実効ある気候変動対策のためには、地球温暖化対策と経済成長の両立は不可欠である。単なる希望を語るのではなく、着実かつ、「グリーン成長」もしくは「経済と環境の好循環」を具体的に実現し得る適切な対策・方策を明確にすることが求められている。また、多くの不確実性が存在する中で、リスクを総合的により良くマネージメントする戦略が求められる。広範で、深い分析、洞察が必要なため、今後、更なる調査、分析・評価を行っていく必要があるが、本年度の調査研究によって、真に「グリーン成長」を実現していく道筋のフレームワークとその具体的対策・方策の提示を行い、そしてその定量的な分析・評価も実施できたものと考えられる。

Fiscal Year 2024: Project for international cooperation on the analysis and assessment of climate change mitigation technologies and energies

"Project for international cooperation on the analysis and assessment of technologies for climate change mitigation"

Summary

This report summarizes the research achievements of our "Project for international cooperation on the analysis and assessment of technologies for climate change mitigation" for fiscal year 2024 as part of METI's project for international cooperation on the analysis and assessment of climate change mitigation technologies and energies.

As global warming is bound to have severe impacts on the whole planet, there are high expectations for solutions to this issue. However, while global warming affects various sectors in every country of the world, its impacts are not uniform. Mitigation measures and associated costs that countries can afford to take and pay may differ to very large extent. A comprehensive policy package is thus needed to allow truly effective climate mitigation implementation on a global scale.

The Paris Agreement that was adopted at the twenty-first session of the Conference of the Parties (COP21) in Paris at the end of 2015, came into force in November 2016. More than 150 countries and regions around the world have pledged to be carbon neutral by the middle of the 21st century. We are entering an era that sees addressing global warming as an opportunity for international growth. In June 2019, the Japanese government developed "Long-Term Strategy as a Growth Strategy Based on the Paris Agreement," which stated that Japan aims to achieve net zero emissions as early as possible in the second half of the 21st century. Then, in October 2020, Prime Minister Suga declared in his policy speech that "we aim to realize a carbon-neutral, decarbonized society by 2050". Then, in December 2020, the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) took the lead in formulating the "Green Growth Strategy."

On the other hand, challenges in energy security and stable supply have emerged in 2022. The soaring fossil fuel prices due to the Russia-Ukraine war, and the tight power supply-demand situation in March 2022 have reaffirmed the importance of energy security and stable supply. In February 2023, the Cabinet approved the "Basic Policy for the Realization of Green Transformation (GX)," and in December 2023, the government's GX Implementation Conference compiled sector-specific investment strategies. In January 2025, the second Trump administration came to power in the U.S., and he once again announced a withdrawal from the Paris Agreement.

Looking at the world again, the NDCs have not made significant progress in strengthening their targets, and there remains a large gap with the emission pathways for not only the 1.5°C target, but also the 2°C target. Moreover, the current emission trends indicate that many countries, including the EU, are finding it difficult to achieve their NDCs.

Although it may be temporary, the global average temperature in 2024 is 1.5°C above the pre-industrial level. While the international community is generally unanimous on the need to strengthen climate actions, they still differ on specific actions. In aiming to achieve carbon neutrality on a global scale, it is necessary to correct competitive unfairness caused by differences in the ambitions and policy intensity across countries and to prevent carbon leakage before implementing international rule-making. In this context, the importance of taking into account the overall situation of each country, region, and industry, as well as conducting various assessments and analyses that can contribute to the formulation of climate change policies, is becoming even more important.

The first Global Stocktake (GST) in 2023 has reviewed global collective actions toward the Paris Agreement goal and assessing progress toward meeting the goal. In the GST decision at COP28, it was decided “to contribute to the following global efforts, in a nationally determined manner, taking into account the Paris Agreement and their different national circumstances, pathways and approaches”. And based on the GST, each country is required to update its national reduction targets (NDC), and there have been discussions around the world on how to accelerate the implementation of climate change measures by each country toward the goals of the Paris Agreement and the formulation of the next NDC. In February 2025, the Japanese government revised its Plan for Global Warming Countermeasures, setting the greenhouse gas emission reduction targets as NDC for 2035 and 40 years at 60% and 73% reductions from the fiscal 2013 level, respectively. The 7th Strategic Energy Plan and the GX2040 Vision were also formulated and approved by the Cabinet together with the Plan for Global Warming Countermeasures.

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has released its Sixth Assessment Report for the period 2021-2023 as the latest scientific assessment of climate change. While building on this report, further scientific assessment of complex issues needs to be conducted. The process of preparing the Seventh Assessment Report has just started, and the IPCC General Assembly approved the table of contents of the Seventh Assessment Report in February 2025.There is a continuing need to provide the latest scientific knowledge on climate change.

This project assesses mitigation and adaptation measures, climate finance and climate policy in a consistent and comprehensive manner, taking into account the latest scientific knowledge on the subject, recent trends in international negotiations, and cooperating with international research organizations to support the formulation of Japan's climate change policy and international discussions such as IPCC and COP. This will contribute to the formulation of a future framework and Japan's international strategy aiming for a “virtuous circle between the economy and the environment” that will bring about changes in the industrial structure and society and lead to economic growth.

In this report, Chapter 1 describes the background and objective of the study. Chapter 2 discusses and compiles quantitative analysis on climate risk management carried out within this project, while pointing out various types of uncertainties related to climate

change. In particular, we conducted a study on the economic impact and effectiveness of climate change impact as well as adaptation measures. This chapter also describes synergies and trade-offs between climate change actions and other SDG targets, including those assessed in the IPCC's latest assessment report. Furthermore, we discuss the role of innovation for climate risk management by compiling the possibilities of innovation for climate change mitigation. Chapter 3 summarizes the results of various surveys and analyses in order to search for green growth opportunities while properly recognizing its limits. Furthermore, we assessed the structural factors in long-term energy productivity in the Japanese economy and measurement of energy productivity changes in Japanese industry, analyzed policy issues for electricity market liberalization and climate policy, and reviewed the trend and modelling-based analyses on sustainable finance. Chapter 4 summarizes the results of the analysis and assessment of emission reduction targets of the Nationally Determined Contributions (NDCs) of the Paris Agreement as an analysis of mid-term mitigation measures. The report also summarizes the analysis of the post-2030 NDCs that have been submitted or are under consideration for submission to the UNFCCC. In addition, we reviewed the climate policy on border tax adjustment and performed modeling analysis of the effects. Chapter 5 presents our analysis of long-term mitigation scenarios. Trends and the latest international analyses in the development of various technologies for carbon neutrality are summarized. We analyze various scenarios in the integrated assessment model for the carbon neutrality in 2050 for both the energy supply side and the demand side. The scenario analysis provided for the preparation of the Energy Demand-Supply Outlook for the Seventh Strategic Energy Plan is also included. Chapter 6 describes the results of a survey on the latest trends in overseas climate policies, as well as scenarios developed by the International Energy Agency (IEA) and other organizations. Chapter 7 summarizes insights gained from the studies above. The Appendix includes the summary of the International Symposium which was held as part of the Project. Key points of chapter 2 to 6 are described in the following paragraphs.

Chapter 2 addresses the issue of climate risk management. The Sixth Assessment Report of the IPCC WG1 assessed that there is “no doubt” that climate change is caused by human intervention. In order to ensure climate stabilization, it is necessary to reduce CO_2 emission to nearly zero. However, there is great uncertainty regarding climate sensitivity and climate-induced damage. There is also great uncertainty regarding the cost of climate change mitigation. We can also point out significant disparities across countries in terms of the marginal abatement costs to achieve the NDCs of the Paris Agreement. Moreover, if we take into account national constraints such as the nuclear stance, the necessity to conciliate mitigation goals with energy security and other national policies, and other constraints from each country’s political system, the total mitigation cost is probably much higher than the mitigation cost assessed with cost minimization methods. In such a context, and taking into account various risk factors, there is great need for good decision making in climate change

response. Adaptation is also regarded as an important option to reduce the risk of climate change comprehensively. This chapter describes the synergies and trade-offs between climate change measures, energy security and scarce mineral resource supply constraints. While there are many synergies between various measures and the SDGs, there are trade-offs as well, so measures need to be taken while reducing the impact of the trade-offs. It also summarized the ways of climate change risk management, referring to the economic impact and effects of climate change impacts and adaptation, as well as innovation and policies that could induce it.

Chapter 3 examines limits and potential of green growth using data and quantitative analysis as far as possible. The Japanese government is committed to a “virtuous cycle between the environment and the economy”. However, there is no clear path to this goal at present, and it can be considered a narrow path.

We have collected and analyzed the latest quantitative data on the decoupling between the economy and CO_2 emissions, and examined the factors behind this. And for a deeper analysis, we analyze relative energy prices and trends in industrial leakage among the world's major economies is presented. Furthermore, a primary estimate of emission reduction efforts, including a green growth perspective, was provided for the performance of the Carbon Neutral Action Plan undertaken by Japanese industry.

Besides, we studied and summarized climate change policy trends in Japan, the United States, and EU as well as domestic and international assessments of these policies. We discussed the issues involved in addressing global warming under the deregulation of power sector, and the trends in electric power policy that are being implemented to respond to these issues. Furthermore, we summarized the trend of sustainable finance, such as Green Bond and Sustainability Link Loan, and their challenges based on the modeling analysis. The challenges of increasing gap in cost burden associated with climate policies were also investigated and discussed.

In Chapter 4, we analyze and assess the post-2030 targets of the Nationally Determined Contributions (NDCs) contained in the Paris Agreement. The Paris Agreement is based on a pledge-and-review mechanism, and international review of NDCs will be important. In this study, based on the latest NDCs, we conducted an international comparison of the emission reduction efforts of NDCs in each country in several indicators. With regard to post-2035 emission reduction targets in NDCs, we conducted a survey of targets submitted by countries around the world or under consideration by countries around the world. This chapter also reviews several literatures on NDCs assessment. We have extended the regional breakdown of the DEARS global energy economic model to estimate the economic impact in Asian countries of increasing importance in mitigation efforts and their international cooperation.

In Europe, the introduction of a carbon border tax adjustment is now being considered, so we conducted broad research on border tax adjustment policy and upgraded our energy-economic model to analyze the impacts of the policy to estimate the impact of introducing a border tax adjustment. Analyses were also made with foreign models for comparison. Although the border tax adjustment is expected to have a certain effect on carbon leakage, the effect can be limited, and generally it is important to adjust emission reduction targets so that the difference in marginal CO_2 reduction costs does not become too large among countries.

Chapter 5 presents a comprehensive analysis of long-term global warming measures and policies. The Japanese government has formulated the 7th Strategic Energy Plan, the Plan for Global Warming Countermeasures, and the GX2040 Vision, which were approved by the Cabinet in February 2025, and this project presented quantitative analysis that contributes to these plans. We analyzed both energy supply and demand side energy systems in the DNE21+ model, a global energy and climate change assessment model. In addition, the Global Energy Economy Model, DEARS, was also used to analyze the effects of reductions in economic activity associated with CO_2 reductions. These scenario analyses are described in this report.

As for carbon dioxide removal technologies (CDR) such as direct air capture and storage (DACCS), the IPCC 6th Assessment Report states that “CDR is essential for achieving net zero CO_2 or GHG emissions”. This project also conducted a survey on CDR technologies and various economic evaluation studies, and analyzed and evaluated the economic potential of CDR, which involves interdependent relationships with afforestation, biochar, BECCS, and DACCS, using the DNE21+ model.

The importance of variable renewable energy (VRE) is increasing as its cost is being competitive both domestically and internationally. On the other hand, the introduction of large amounts of VRE makes it difficult to match demand, but it is difficult to make such assessment with the annual time resolution of the DNE21+ global energy and climate model. So far, grid integration costs have been estimated separately and integrated into the DNE21+ model to provide a simplified but appropriate evaluation. However, in preparation for more precise and consistent evaluations in the future, including demand-side measures such as storage batteries, thermal storage, and hydrogen, we have estimated the electricity load curves for countries around the world, as well as the hourly utilization rates and potentials of solar and wind power generation (onshore and offshore).

In addition, since there are concerns about a tightening of the supply-demand balance for mineral resources due to the introduction of clean energy technologies such as batteries, we have estimated the future demand for important minerals, including the possibility of their recycling.

As for the energy demand side, we investigated and summarized the possibility of realizing low energy demand through circular economy and sharing economy that can be

induced around digital transformation (DX). We examined, technological and social changes in the freight sector due to DX. We investigated the impact of digitalization and the circular economy on commercial activity. We examined quantitatively how technological and social changes, such as DX, might affect our daily life and bring about changes in energy demand, using the DNE21+ model to analyze both energy supply and demand in a consistent manner. These studies are expected to contribute to develop analytical tools and deep understanding of the change in behavior, including the rebound effect, and gaining insights into future energy demand.

Chapter 6 provides an overview of the World Energy Outlook (WEO2024) released by the International Energy Agency (IEA) in October 2024. This report outlines these scenarios and compares them with the DNE21+ scenario and mitigation costs.

Although the Paris Agreement was formulated as a mechanism for all countries around the world to work on emission reductions, there are currently large differences in the marginal CO_2 abatement costs for countries across the world to achieve their goals. This could induce transfers of industries, especially those with high CO_2 emission intensity, between countries and significantly reducing the effectiveness of global emission reductions. Europe is aiming to introduce a carbon border adjustment tax to reduce this risk, but the analysis in this project suggests that the effect of this tax will be limited, although it will have a certain effect. It is true that there has been a rapid increase in international efforts to strengthen climate actions, and there has been significant progress, especially in strengthening economic response through the financial sector. At the same time, we need to keep a close eye on how COVID-19 pandemic, the sharp rise in fossil fuel prices, and the risk of international conflicts will affect the climate actions. Soaring fossil fuel prices have been making fossil fuel producing companies more profitable. This could also change the trend of de-fossil fuel financing over the past few years. In addition, Germany, which has been active in climate change measures, is facing difficult economic conditions due to soaring energy prices and the stalled diffusion of electric vehicles that rely on subsidies, leading to a decline in the competitiveness of the manufacturing sector. In any case, without technological and social innovation, there will be no significant reduction in global emissions and no carbon neutralization. It is thus vital to create a socioeconomic environment ripe for extensive innovation.

As an ambitious target does not necessarily guarantee a continuous fight over climate change on the long-term, the compatibility of climate change mitigation and economic growth is indispensable for a truly effective climate change mitigation. Clear guidance and concrete measures, rather than wishful thinking, are needed to deliver steady progress toward “green growth” or a “virtuous cycle between the environment and the economy”. Moreover, while there are numerous uncertainties, there is a great need for a strategy that will handle risks in a comprehensive manner. Although we need further insights and deeper

analysis, we believe this study offers a relevant framework to pursue “true green growth” and concrete measures, also providing quantitative analysis and evaluation for that.

本　　編

第1章　はじめに

地球温暖化は、地球全体の環境に深刻な影響を及ぼすものであり、その解決が強く求められる。しかし、地球温暖化は、世界のあらゆる国、様々な部門に影響を与え、一方でその影響は均一ではない。また、各国において取り得る緩和策、緩和費用にも差異が大きい。そのため、真に有効な対策を実現するためには、総合的なパッケージを作り上げることが重要と考えられる。

2015 年末の気候変動枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）で合意された「パリ協定」が 2016 年 11 月に発効した。その後、世界では 150 以上の国と地域が、21 世紀中ごろまでのカーボンニュートラルを表明し、温暖化への対応は、国際的にも成長の機会と捉える時代に突入している。日本政府は、2019 年 6 月に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」[1)]を策定し、そこでは「21 世紀後半のできるだけ早い時期に実質ゼロ排出を目指す」とした。そして、2020 年 10 月には、菅首相が所信表明演説で「2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」と宣言した。そして、2020 年 12 月に経済産業省が中心になって、「グリーン成長戦略」[2)]を策定した。

他方、2022 年はエネルギー安全保障・安定供給の問題が顕在化した。ロシア・ウクライナ情勢からの化石燃料価格高騰や、2022 年 3 月の電力需給逼迫等により、改めてエネルギー安全保障・安定供給の課題を再認識し、2023 年 2 月には「GX（グリーントランスフォーメーション）実現に向けた基本方針」[3)]が閣議決定された。そして、2023 年 12 月には、政府 GX 実行会議において、分野別投資戦略もとりまとめられた[4)]。このような中、2025 年 1 月には、米国でトランプ政権が誕生し、再び、パリ協定からの脱退が表明された。気候変動への取り組みが国内外で強化される一方で、エネルギー安全保障・安定供給リスク、また、気候変動対応や貿易関係などの様々なリスクが顕在化してきていることへの対応の強化が必要になってきている。それらは、シナジーだけではなく、トレードオフ効果も大きいと考えられ、複合的な視点を有した対応が求められる。

また、再び世界に目を転じてみると、NDCs の深堀は進んでおらず、1.5℃のみならず、2℃目標の排出経路とも大きなギャップが残っている。しかも、足下での排出推移からは EU でも NDCs 達成が難しいと見られる状況になってきている他、多くの国で NDCs の達成は難しい可能性がある。そして、瞬間的かもしれないが、2024 年の世界平均気温は産業革命以前比で 1.5℃を超えた。国際社会は、気候変動対策の強化の必要性については概ね認識を一にしているものの、それでも具体的な対応については温度差がある。グローバルでカーボンニュートラルの達成を目指すうえでは、各国の掲げる野心や政策強度の違いによる、競争上の不公平性を是正し、カーボンリーケージを防止したうえで国際的なルール策定を実施していく必要がある。このような中、各国・各地域・各産業の状況を総合的に考慮するとともに、気候変動政策の立案に貢献し得る様々な評価・分析を行う重要性は一層高まってきている。

2023年には第1回グローバルストックテイク（GST）が実施され、パリ協定の目標達成に向けた世界全体での実施状況をレビューし、目標達成に向けた進捗評価がなされた。COP28のGSTの決定文書[5]においては、「パリ協定の内容を踏まえ、各国それぞれ異なる国情、経路、アプローチを考慮し、各国ごとに自ら決定した方法で、以下の世界的努力への貢献を要請する。」とされたところである。そして、GSTの内容を踏まえ、各国は国別削減目標（NDC）を更新することが求められており、パリ協定の目標に向けた各国の気候変動対策の実施の加速化や次期NDCの策定などについて、世界各国で議論がなされてきている。それに先立って、2023年5月に開催されたG7サミット（主要国首脳会議）や、2023年4月に札幌で開催された気候・エネルギー・環境大臣会合では、「経済成長とエネルギー安全保障を確保しながら、ネットゼロ、循環経済、ネイチャーポジティブ経済の統合的な実現に向けたグリーントランスフォーメーションの重要性を共有」した。そして、「各国の事情に応じた多様な道筋を認識しつつ、それらがネットゼロという共通目標に繋がることを強調」し、「安全性、エネルギー安全保障、経済効率性及び環境（S+3E）を同時に実現することの重要性を再確認」されている[6]。

このような状況にある中、日本政府も、2025年2月に、地球温暖化対策計画の改定を行い[7]、2035年および40年のNDCとしての温室効果ガス排出削減目標を、それぞれ、2013年度比で60%削減、73%削減とすることとし、日本のNDCとしてUNFCCC事務局に提出も行った[8]。これら目標は、既に提出済みの2030年46%削減から2050年実質ゼロ排出（100%削減）に至る直線的な削減にあたるものである。既往の削減目標は維持し、気候変動への対応を進めながら、他方で、複雑化してきている国際情勢にも対応するパスが選定されたものと考えられる。第7次エネルギー基本計画[9]、GX2040ビジョン[10]も策定し、地球温暖化対策計画とともに閣議決定がなされた。

グローバルでカーボンニュートラルの達成を目指すうえでは、各国の掲げる野心や政策強度の違いによる、競争上の不公平性を是正し、カーボンリーケージを防止したうえで国際的なルール策定を実施していく必要がある。このような中、各国・各地域・各産業の状況を総合的に考慮するとともに、気候変動政策の立案に貢献し得る様々な評価・分析を行う重要性は一層高まってきている。

世界における「グリーン成長の実現」が重要であり、これは言い換えれば、「経済と環境の両立」が重要ということであり、また、別の言い方をすれば、「持続可能な発展」が重要ということである。これを達成するためのあり得るシナリオはどういうものなのかを、できる限り定量的かつ総合的な分析をベースにして、その検討を行った。重要なことは、世界レベルで考えること、長期の視点で考えること、全体のシステムで考えること、そして、その中で、不確実性が大きい事象に対して、それに柔軟に対応しながら、大きな目的達成に向けてどうアプローチしていくべきか、といったことであり、これらの視点を重視して研究調査を行った。

本章では、本研究の背景として、気候変動問題や「グリーン成長」に関連する最近の国内外の主要な動向をまとめた上で、研究目的と研究内容について記述する。

1.1 背景

1.1.1 世界の温室効果ガス排出および気温の動向

世界の CO_2 排出量は上昇してきており、京都議定書採択後もむしろその上昇速度を高めてきた（図 1.1.1-1）[11]。これは、とりわけ中国を中心とした高中位所得国の排出の伸びが大きかったことによる（図 1.1.1-2）。一方、世界経済危機による CO_2 排出への影響は大きく、2009 年は、高所得国の CO_2 排出量の低下が著しく、世界全体の CO_2 排出量も前年比で低下した。そして、2020 年は COVID-19 のパンデミックに襲われた。2020 年の世界排出量は 2009 年を大きく上回る低減となった。しかし、これは経済のマイナス成長と引き換えに実現したのであり、これによって雇用も大きく失われた。グリーン成長が実現したわけではない。2009 年の排出低減後の 2010～2013 年にかけての排出量の増大は急速だった。COVID-19 によって特に運輸部門の排出量が一時的に大きく低下したが、その後の回復によって、2021～24 年において排出量は再び上昇してきており 2024 年は 2023 年排出量を更新し過去最高の排出量を記録したと見られる。各国のインフラ形成状況を踏まえると、長期的な基調は依然として排出増大要因が大きいと考えられる。先進国では排出の減少が起こってきているが、世界全体で見ると、CO_2 排出量は低下せず、上昇が続いている。CO_2 原単位の高い産業が先進国から途上国へ移転してきている。排出および排出削減の要因については慎重に分析することが、効果的な方策を見出すために重要と考えられる。深い分析については第 3 章で議論する。

また、これと連動する形で、世界平均気温は上昇を続けてきており、2024 年の気温は、瞬間的かもしれないが産業革命以前比で 1.5℃を超えた（図 1.1.1-3）。日本はじめ世界の多くの国が 1.5℃目標の実現を目指しているものの、現実的には、1.5℃目標の実現は極めて困難な状況となってきている。理想としての目標を有しつつも、現実を踏まえた実効ある排出削減、気候変動へのリスク対応が求められている。また、気候変動緩和と適応のバランスを戦略としてどう考えていくべきなのかも大きな課題と考えられる。

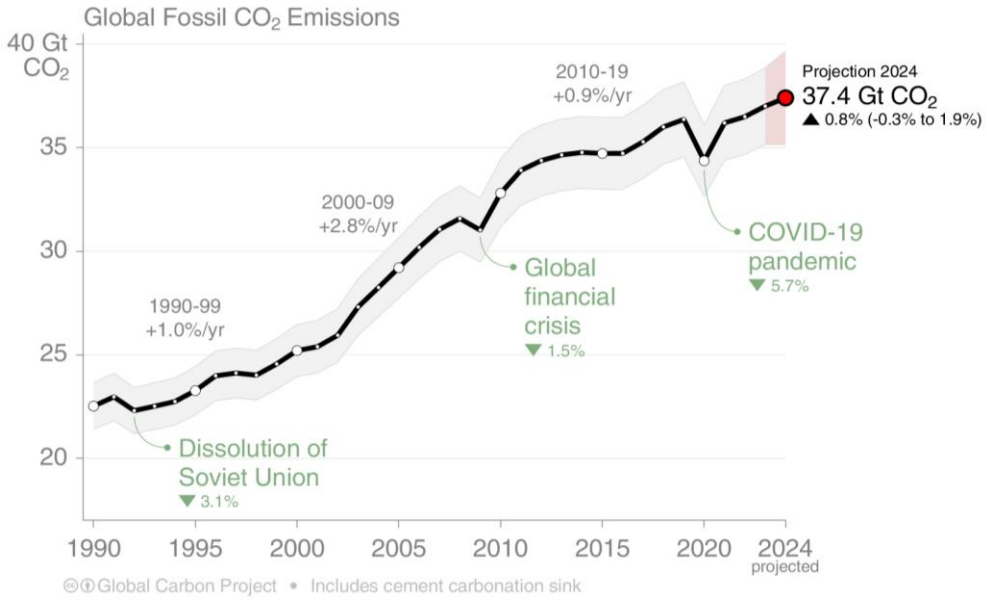


図 1.1.1-1 世界の CO_2 排出量推移（化石燃料燃焼および産業プロセス）
（出典：Global Carbon Project[11]）

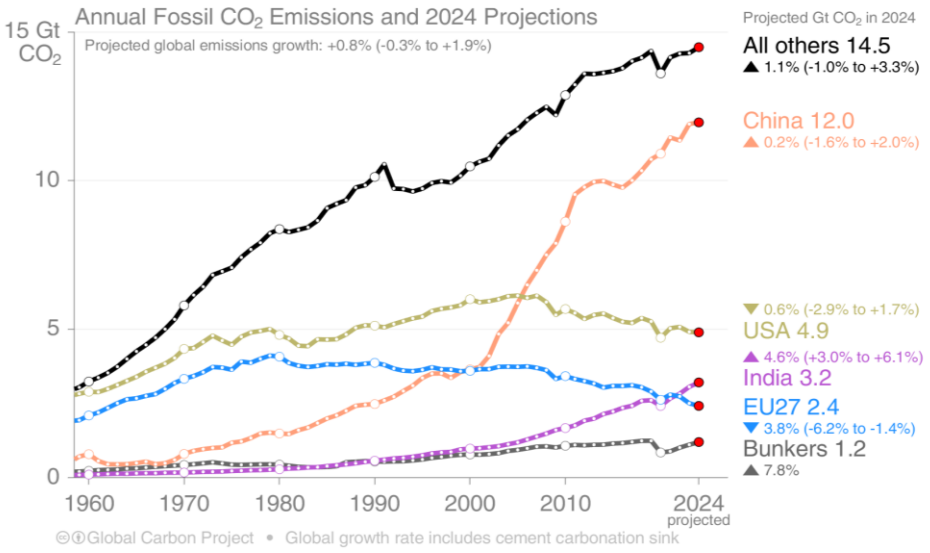


図 1.1.1-2 主要国別の CO_2 排出量推移（化石燃料燃焼および産業プロセス）
（出典：Global Carbon Project[11]）

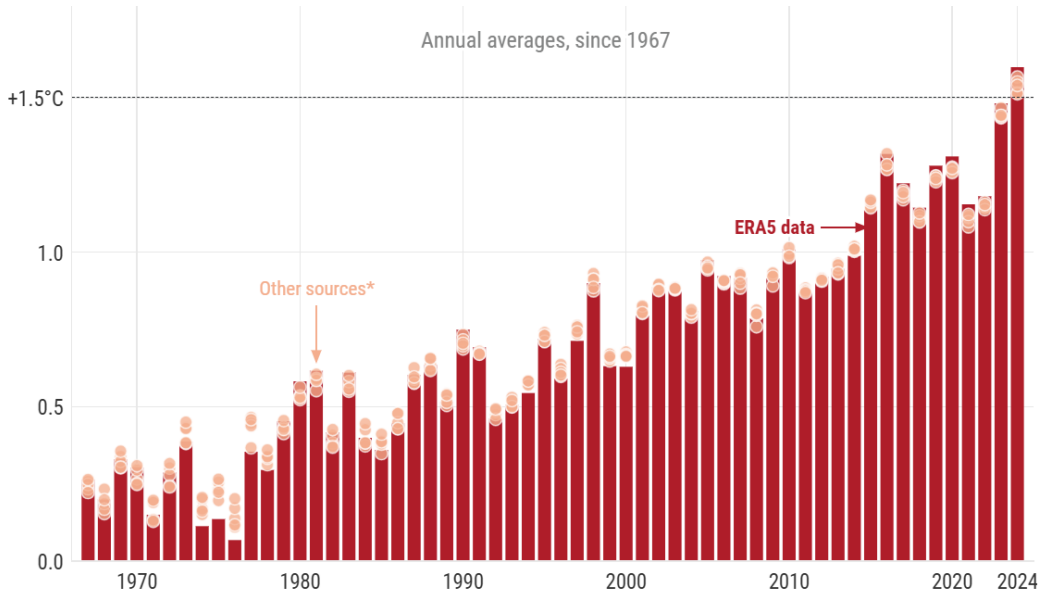


図 1.1.1-3 世界気温の変化

（出典：Copernicus Climate Change Service (C3S)[12)]）

1.1.2 気候変動枠組条約パリ協定

パリ協定は、先進国と途上国という隔てなく、ほぼすべての国が温室効果ガス排出削減に取り組む法的拘束力を有する国際枠組ができたという点で画期的なものと言える。しかし、そのプレッジ・アンド・レビューの枠組みであるがゆえに、プレッジされた目標がしっかりした排出削減努力を伴うような目標であるのかの検証や、実際に実効性をもって排出削減に取り組んでいるのかの検証が重要になってくる。2018 年 12 月に開催された COP24 で、パリ協定の詳細ルールについて大部分が合意された。そこでは NDCs のレビューの方法等が定められ、基本的には先進国と途上国とで差異を設けないこととなった。しかし、NDCs の排出削減努力を適切にレビューできる仕組みではなく、UNFCCC の外での NDCs の排出削減努力の評価も大変重要であると考えられ、本研究調査事業でも評価を行ってきている。なお、協定 6 条に関わる市場メカニズム関連のルールは、2021 年の COP26 で合意されたが、一部、残っていた 6 条 2 項に関する論点についても、2024 年の COP29 で決着を見た。

気候資金の問題も大きな問題となっている。COP21 では、①年間 1000 億米ドル規模の資金供与を 2025 年まで継続、②2025 年より前に新しい資金目標について合意、③新たな資金目標は最低年間 1,000 億米ドルとる、ことが合意されており、COP29 では、新たな資金目標の議論がなされた。結果、COP29 では、①先進国が主導して、2035 年までに少なくとも年間 3,000 億米ドル動員すること（多国間開発銀行による支援、途上国による支援を含む）、②すべての公的及び民間の資金源からの途上国に対する気候変動対策への資金を 2035 年までに年間 1.3 兆ドル以上に拡大するため、すべてのアクターに対して、共に行動することを求めることが合意された。しかし、そもそも先進国の多くは追加的に資金を提供できる余裕は小さく、また、米国がパリ協定から脱退する中、本合意の実行性には疑問も残る。

2021 年[13]、2022 年[14]、2023 年度[15]の本事業において、NDCs (Nationally Determined Contributions)の各国の排出削減努力について複数の指標を用いて評価を実施した。パリ協定の下で、2025 年 2 月までに、2035 年の NDCs 提出が招請されている状況にある。先述のように、日本も地球温暖化対策計画で次期 NDCs を規定し、決定したところである。また、他国においても次期 NDCs の検討や提出が進んでいるところである。本事業では、これら最新の NDCs の検討、提出状況も踏まえ、調査を実施しインプリケーションを含め、第 4 章において記載を行った。

パリ協定では第 2 条の目的において「全球平均気温上昇を産業革命前に比べ 2℃未満に十分に抑え、また 1.5℃に抑えるような努力を追求」し、第 4 条 1 項で「世界の温室効果ガス排出をできる限り早期にピークにする。その後、急速に削減し、今世紀後半には、温室効果ガスについて人為的起源排出とシンクによる吸収をバランスさせる」としている。そして、「適応能力を向上させ」、「資金の流れを低排出で強靭な発展に向けた道筋に適合させる」とした上で、「持続可能な発展と貧困撲滅の文脈において、気候変動の脅威への世界的な対応を強化する」としている。

日本政府は、2019 年 6 月に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を UNFCCC 事務局に提出[1]していたが、「2050 年カーボンニュートラル」宣言を受け、2021 年に地球温暖化対策計画を改定[16]するとともに、2021 年 10 月に改訂した「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を、UNFCCC 事務局に再提出[17]している。COP28 の GST 決定文書[5]では、「最新の NDCs が完全に実施された場合には 2.1～2.8℃の範囲の上昇」が予想されるとした上で、「パリ協定の長期の気温目標の排出経路とは大きなギャップがあることを認識する」とした。また、「IPCC 報告書は、様々なモデル分析の調査の結果、世界全体の GHG が、遅くとも 2025 年までのピークアウト、2030 年 43%減（19 年比）、2035 年 60%減（同）を達成する場合、オーバーシュート無しもしくは小さいオーバーシュートで 1.5℃目標が達成される見込みがある、としていることを認識する。」と記載された。また先述のように、「パリ協定の内容を踏まえ、各国それぞれ異なる国情、経路、アプローチを考慮し、各国ごとに自ら決定した方法で、以下の世界的努力への貢献を要請する。」とした上で、「2030 年までに再エネ容量を世界全体で 3 倍、エネルギー効率改善率を世界平均で年率 2 倍」、「科学に沿った形で 2050 年までにネットゼロを達成するため、2030 年に向け行動を加速させ、公正で、秩序ある、衡平な方法で、エネルギーシステムにおける化石燃料からの移行を図る」などの記述がなされた。

なお、UNEP による Emissions Gap Report[18]などでも、1.5℃はおろか 2℃目標とも大きな排出ギャップが存在しているとされている（図 1.1.2-1）。しかも、NDCs の 2030 年排出削減目標が未達となる国は多く出てくる可能性があり、NDCs の積み上げ評価の排出見通しから更に上振れの可能性は高い状況にある。

また、大きな動きとしては、2025 年 1 月に米国トランプ政権が発足し、パリ協定からの離脱の申請が行われたところであり、2026 年 1 月には、米国がパリ協定から再び脱退することとなる。

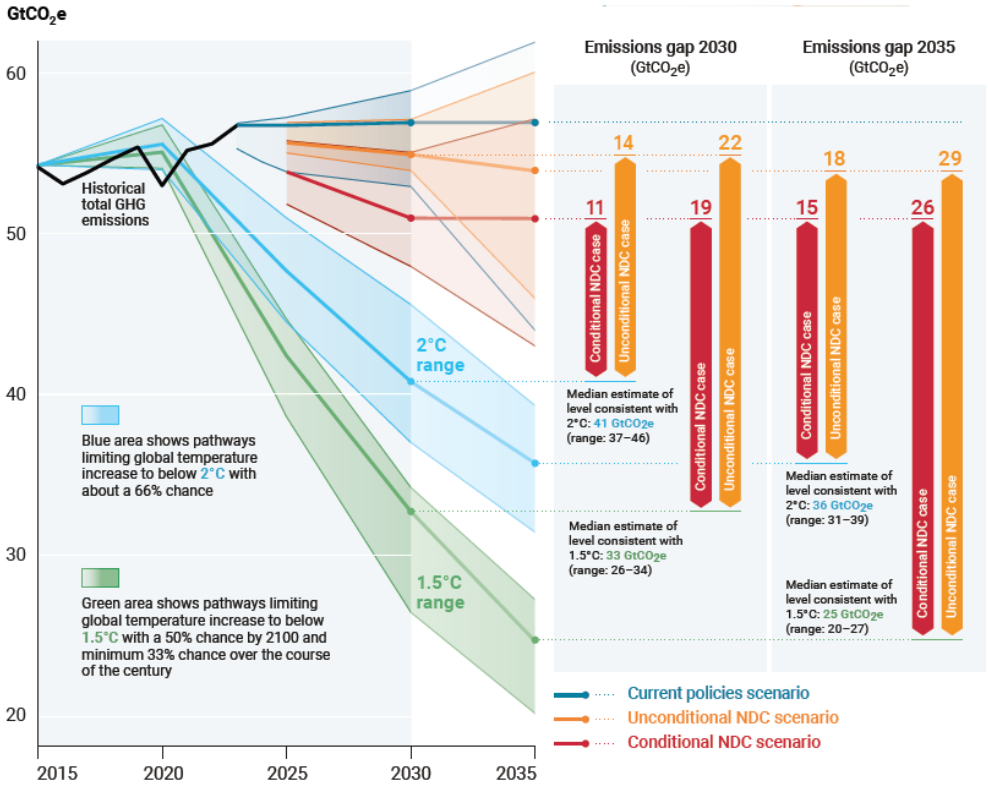


図 1.1.2-1　2030 年の NDCs の予想排出量と 2℃、1.5℃目標の排出量とのギャップ（出典：UNEP[18]）

1.1.3　国連持続可能な発展目標

国連は、2015 年 9 月の国連サミットで、国連加盟 193 か国が 2016 年～2030 年の 15 年間で達成するために掲げた目標として、持続可能な発展目標（SDGs）を採択した。SDGs は 17 の目標で成っており、13 番目に気候変動（Climate Action）も含まれている[19]。気候変動対応は極めて重要であるが、国際社会として取り組むべき課題はここで掲げられただけでも多く存在しており、気候変動対応との同時達成が望まれる。このような持続可能な発展目標間にはシナジー効果が存在する一方、トレードオフ効果も存在すると考えられる。持続可能な発展は、気候変動問題解決よりも高位の目標であり、持続可能な発展のための一つの要素として、気候変動問題の解決を考えていかなければ、より良い将来社会の実現とはならないと思われる。また、気候変動対応が、持続可能な発展目標全体との調和の中で実施しなければ、気候変動対応も持続できず、結果、気候変動問題の解決が遠のくことにもなりかねないと考えられる。そして、企業の中にも、SDGs を重視して企業理念や事業との整合性を判断する動きも広がりつつある。本研究においても、気候変動対応と持続可能な発展目標との関係については重要と位置づけており、これに関連した内容を 2.2 節等に記載した。また、デジタル化の進展やその新結合によるイノベーションによって低需要社会が実現すれば、SDGs の同時達成に大きな貢献を果たす可能性が高く、この視点での研究も進めた（2.4 節、5.4～5.6 節など）。



図 1.1.3-1 国連持続可能な発展目標（SDGs）

（出典：UN[19]）

1.1.4 日本のエネルギーおよび地球温暖化政策の動向

(1) 日本の排出量と対策の動向

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災によって引き起こされた福島第一原子力発電所の事故後、原発の再稼働もなかなか進まず、温室効果ガス排出量は大きく増大してきた。しかし、2021 年度は 2020 年度に COVID-19 パンデミックによる排出減の反動で前年度比若干の増加となったが、2022 年度は再び低下した（図 1.1.4-1）[20]。2013 年度以降、堅調に排出低減が進んでいるかのようにも見える。また、図 1.1.4-2 で示されるように、2050 年ネットゼロ排出（CN）や、2030 年▲46%目標に対しても順調な排出削減が続いていると評価もされている。

なお、振り返ると、2008 年頃に検討が行われた 2020 年排出削減目標は、当時の麻生政権の下で 2005 年比 15%減とされたが、実際の排出量はこれに近い数字となっている（因みに、鳩山政権では 1990 年比 25%減、2005 年比では 30%減程度であったが、これとは極めて大きなギャップがある。）。この間、大きな情勢変化があり、原子力発電の見込みは大きく低下する一方、FIT や FIP により、大きな費用負担と引き換えに再エネは大きく導入拡大した。GDP 成長率は当初の見込みは達成できず、低位で推移し、潜在的な排出量は低位となった。排出上昇要因、低下要因ともに存在しているが、結果として、麻生政権での目標に近い数字が実現している。

他方で、このような排出削減は、省エネや CO_2 原単位の改善で実現したよりも、生産活動量の低下が要因で実現している可能性も強くある。その分析、検討は、第 3 章に記載した。

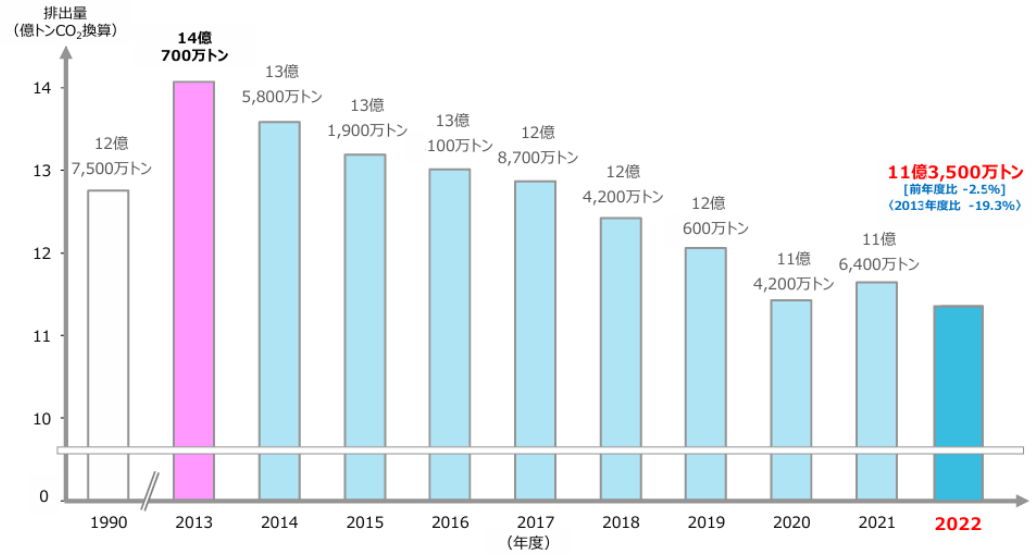


図 1.1.4-1 日本の GHG 排出量推移

(出典：環境省 [20])

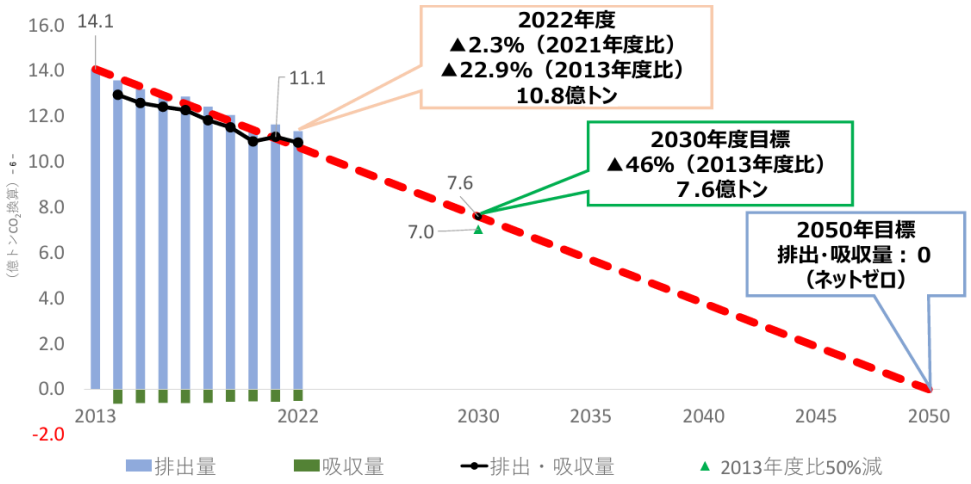


図 1.1.4-2 2030 年度目標及び 2050 年ネットゼロに対する進捗

(出典：中央環境審議会 [21])

エネルギー起源 CO_2 排出の展望に大きな影響を与え得るエネルギー政策としては、2021 年 10 月に第 6 次エネルギー基本計画 [22]が閣議決定された。またこのとき、地球温暖化対策計画も改定 [16]され、閣議決定された。2030 年の温室効果ガス排出削減目標は、26%減から 46%減（さらに 50%減の高みを目指す）へと公式に修正がなされた。そして、今年度、第 7 次エネルギー基本計画 [9]が策定され、また、地球温暖化対策計画も改定 [7]され、いずれも 2025 年 2 月に閣議決定された。前述のように、そこでは、2035 年および 40 年の NDC としての温室効果ガス排出削減目標を、それぞれ、2013 年度比で 60%削減、73%削減とされたところである。これに関連して、本事業では定量的な分析を実施した。その内容については、第 5 章において記載した。

(2) 日本の電力需要の傾向の変化の兆し

電力需要に対する変化の兆しが見られてきている。世界経済危機の 2008 年頃以降から、日本で電力需要は低下傾向となってきた。更に 2013 年以降は低下を加速してきた。省電力の効果もあるが、むしろ、電力多消費産業等の製造業の途上国への移転の効果が大きかったと見られる。この間、製品に体化された電力輸入（間接的電力輸入）は増大してきている。他方、直近になって、生成 AI 等に誘発された、データセンター等の IT 需要の増加が顕著になってきている。図 1.1.4-3 でも見られるように、2024 年は増加に転じ、今後の需要の見通しもかなり上昇が見通されており、更に 1 年前の推計よりも更に上昇が見込まれる状況となっている [23]。

更に CO_2 排出削減に伴って電化が求められる状況にもある。他方で、CO_2 排出削減で電力コストが上昇すると、とりわけ他国との相対価格が広がれば、電力多消費産業の海外移転が一層進むとともに、データセンターの国内立地も抑制的となり、国内では電力需要が上昇しない可能性もある。複雑な関係を、エネルギー需給全体で整合的に分析を行うことが重要と考えられる。エネルギー基本計画等の策定にあたっての議論でも、この点は重要な課題認識がなされたが、本事業で提供したシナリオ分析でもこれを踏まえた分析を実施した（第 5 章参照）。

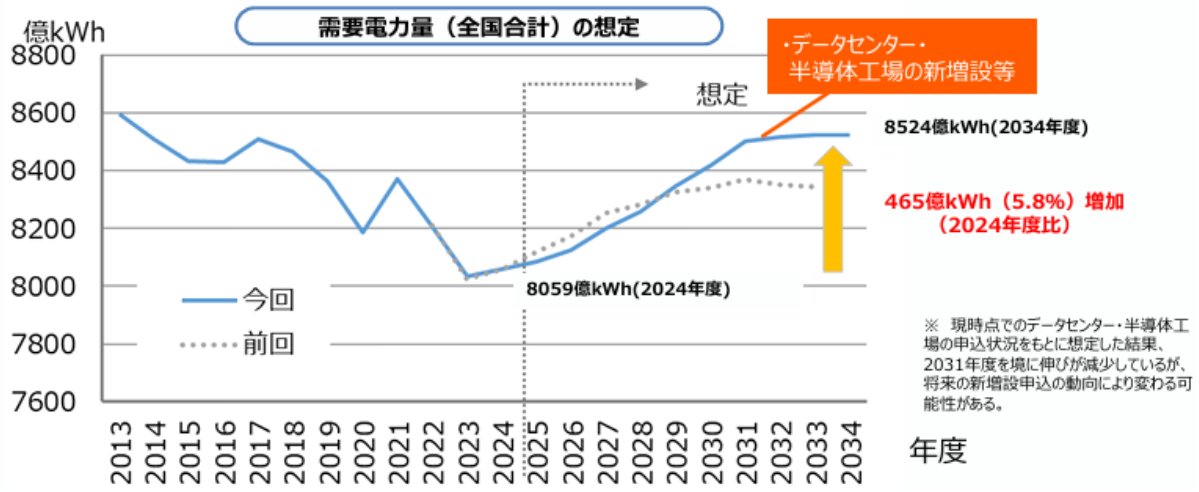


図 1.1.4-3 電力需要および将来見通し

（出典：経産省 [23]）

(3) 日本における自主行動計画と低炭素社会実行計画

日本国内の産業界の排出削減への取り組みは、「低炭素社会実行計画」[24]と、その後、「カーボンニュートラル行動計画」[25]として実施されており、いわゆるプレッジ・アンド・レビューの仕組みとなっている。これは、基本的な仕組みとしてはパリ協定と同じとなっている。そして、各種業界団体内のレビュー、経団連でのレビュー、政府審議会でのレビューにより、排出削減への取り組みのプレッシャーがかかる。排出削減への取り組み・目標は、①国内の企業活動における 2020 年・2030 年の排出削減目標（原単位目標等を含む）、②低炭素製品・サービス等による他部門での貢献、③海外

での削減貢献、④革新的技術の開発・導入の 4 本柱で成り立っており（図 1.1.4-4）、様々な形で排出削減を促す形となっている。

また、経団連は、②、④に関して、グローバル・バリューチェーン（GVC）を通した、様々な業種・企業による、多種多様な製品・サービス等の削減貢献の「見える化」事例をとりまとめている[26]。なお、GVC での削減貢献は、WBCSD が Avoided Emissions のガイドライン作成を行っており[27]、これに展開していると言える。



図 1.1.4-4　低炭素社会実行計画における 4 つの柱

（出典：経産省[24]）

日本の自主行動計画とその後の低炭素社会実行計画[24]、カーボンニュートラル行動計画[25]は、今後のパリ協定における自主的目標の提出とそのレビューという仕組みの具体化において、どのようにレビューを行うべきか、そして、いかに PDCA (Plan-Do-Check-Act)サイクルを回していくかなど、国際的なレビューの仕組み作りにも参考となると考えられる。

図 1.1.4-5 は、低炭素社会実行計画の 2022 年度実績のレビュー結果である[21]。また、業種毎の目標に対して、多くの業種で順調な排出削減となっている（表 1.1.4-1）。グリーン成長の視点から、低炭素社会実行計画の業種横断的な評価については、第 3.4 節において試評価を実施した。

○基本的な考え方

- 個々の対策・施策について、点検対象年度である**2022年度の対策評価指標の実績値に加え**、**2022年度以降の2030年度までの対策評価指標等の見通し等**も踏まえて進捗を確認し、**2030年度の見込みと目標水準（※）を比較して**評価を実施。
- **2030年度の見込みが目標水準以上になると考えられる対策・施策について**は、その程度に応じ、**数段階の評価分類を設けている**。

※地球温暖化対策計画に記載されている2030年度の対策評価指標、省エネ見込量、排出削減見込量

○評価方法

具体的には、2022年度に実施された対策・施策について、**以下の基準により、A～Eを評価**。

＜低炭素社会実行計画の着実な実施と評価・検証＞

A．**2022年度の実績値が既に2030年度の目標水準を上回るもの**…… **39業種**
B．**2022年度実績が基準年度比/BAU比で削減しているが、2030年度の目標水準は下回るもの**…… **70業種**
C．**2022年度実績が2030年度目標水準を下回り、かつ、基準年度比/BAU比で増加しているもの**…… **2業種**
D．データ未集計（新規策定・目標水準変更・集計方法の見直し等）…… **1業種**
E．目標未設定…… **2業種**

＜上記以外の対策・施策＞

A．このまま取組を続ければ対策評価指標等が2030年度にその目標水準を上回ると考えられる対策のうち、**2022年度の実績値が既に2030年度の目標水準を上回るもの**…… **8件**
B．このまま取組を続ければ対策評価指標等が**2030年度に目標水準を上回ると考えられる対策**（Aを除く）・**19件**
C．このまま取組を続ければ対策評価指標等が**2030年度に目標水準と同等程度になると考えられる対策**…. **62件**
D．取組がこのままの場合には対策評価指標等が**2030年度に目標水準を下回ると考えられる対策**…… **19件**
E．その他定量的なデータが得られないもの等…… **7件**

図 1.1.4-5　2022 年度の対策・施策の進捗評価

（出典：中央環境審議会・産業構造審議会 21)）

表 1.1.4-1　2030 年度に向けた進捗状況

温室効果ガス排出量・吸収量（単位：百万t-CO_2）		2013年度実績※1	2030年度目標※1	2022年度実績	2030年度削減率	2022年度削減率	2022年度※2 FU評価
		1,408	760	1,085	▲46%	▲23%	A,B,C：89件※3 D,E：26件※3
エネルギー起源CO_2		1,235	677	964	▲45%	▲22%	A,B,C：72件 D,E：19件
部門別	産業	463	289	352	▲38%	▲24%	A,B,C：25件 D,E： 4件
部門別	業務その他	238	116	179	▲51%	▲25%	A,B,C：14件 D,E： 4件
部門別	家庭	208	70	158	▲66%	▲24%	A,B,C： 8件 D,E： 4件
部門別	運輸	224	146	192	▲35%	▲14%	A,B,C：20件 D,E： 7件
部門別	エネルギー転換	106	56	82.4	▲47%	▲22%	A,B,C： 5件 D,E： 0件
非エネルギー起源CO_2、メタン、N_2O		134	115	119.8	▲14%	▲11%	A,B,C： 7件 D,E： 3件
HFC等４ガス（フロン類）		39.1	22	51.7	▲44%	+32%	A,B,C： 2件 D,E： 3件
吸収源		-	▲48	▲50.2	-	-	A,B,C： 3件 D,E： 0件
二国間クレジット制度（JCM）		官民連携で2030年度までの累積で１億t-CO_2程度の国際的な排出削減・吸収量を目指す。我が国として獲得したクレジットを我が国のNDC達成のために適切にカウントする。					A,B,C： 1件 D,E： 0件

※1 地球温暖化対策計画（令和３年10月22日閣議決定）における数値

※2「低炭素社会実行計画の着実な実施と評価・検証」以外の対策・施策の進捗評価。
※3以下の、部門横断的取組、2030年度排出削減目標の設定がない取組は、部門・ガス種別に割り当てておらず、部門別・ガス種別の合計値は一致しない。
○エネルギーの地産地消、面的利用の促進　○J-クレジット制度の活性化　○国立公園における脱炭素化の取組
○地方公共団体の率先的取組と国による促進　○地方公共団体実行計画（区域施策編）に基づく取組の推進

（出典：中央環境審議会・産業構造審議会 21)）

(4) 再生可能エネルギー導入拡大と費用負担の増大

CO_2 排出削減、カーボンニュートラルを目指す上で、再生可能エネルギーの果たすべき役割は大変大きく、拡大が必須である。再生可能エネルギーに対する固定価格買

取制度（FIT）の導入が進むなどし、世界的に再生可能エネルギー導入の拡大が続いている。日本も大幅な拡大が図られてきた。平地面積あたりの太陽光発電電力量では、世界最高水準となっている（図 1.1.4-6）。

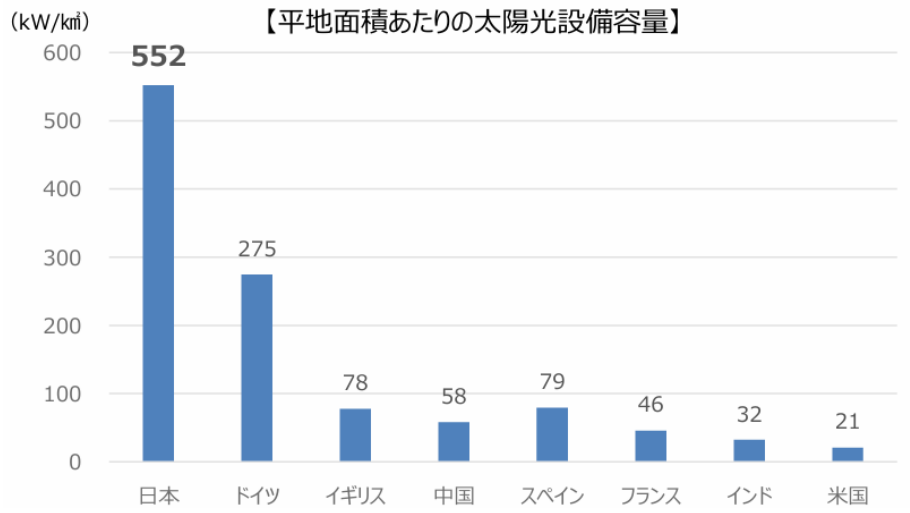


図 1.1.4-6 平地面積あたりの各国の太陽光発電の設備容量比較

（出典：調達価格委員会資料 [28]）

しかしながら、特に太陽光発電については FIT の買取価格が機動的に価格引き下げすることに失敗し、実際のコストとの間に大きな差が生じ、バブルが発生する状況が見られた。これによって、太陽光発電の導入量は増えるものの、そのコスト負担が大きくなり、電力料金が上昇し、負担感が大きくなっている（表 1.1.4-2）。2023 年度見込みの買取総額は年間 4.8 兆円､賦課金（負担額）は 2.7 兆円となっている（図 1.1.4-7）[28]。再生可能エネルギーの拡大は温暖化対策のために重要ではあるものの、経済効率性の悪い対策となり、経済的な負担が大きくなれば、我々の経済的なリソースは奪われてしまう。それによって、長期的には却って温暖化抑制に逆行しかねない。（再エネの動向については第 3.5 節に記載）

政府は、FIT の見直しを行い、事業用太陽光発電について、設備認定を行っているものの、未稼働が続いている案件について、設備認定の取り消しを行うなど対策を行った（2017 年 4 月改正 FIT 法施行）。また、2020 年 2 月には、更に FIT 法の改正が予定され、2022 年 4 月から大規模事業用太陽光発電を皮切りにして市場価格連動型の Feed-In Premium (FIP)への移行となった。これによって、FIT のような極めて投資予見性の高い制度から、ある程度の事業リスクを負いながらそれに見合った利潤を得るような制度へと移行することとなる。また、需給が逼迫し市場価格が高いときに、再エネ電気を例えば蓄電池を介して供給するなど、事業者の工夫を引き出す制度とされている。なお、2024 年度での検討において、2026 年度より、FIT 制度創設以来初となるが、大規模木材と液体燃料利用のバイオマス発電については、FIT、FIP の支援対象から除外することが決まり、自立的な運用へと移行されることなった。

表 1.1.4-2　日本の再生可能エネルギー導入容量と認定容量（2024 年 3 月末時点）

再エネ発電設備の種類	制度導入前	設備導入量(運転を開始したもの) 固定価格買取制度導入後											認定容量 固定価格買取制度導入後
	2012年6月までの累積	2012年度7月～・2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	制度開始後合計	2012年7月～2024年3月末
太陽光(住宅)	約４７０万kW	207.5万kW (476,461件)	103.6万kW (228,665件)	85.8万kW (179,384件)	79.2万kW (161,334件)	66.0万kW (133,271件)	73.3万kW (146,673件)	76.9万kW (152,223件)	75.9万kW (141,533件)	85.7万kW (153,169件)	105.9万kW (190,306件)	103.6万kW (197,523件)	**1,063.4万kW** (2,160,542件)	**1,082.4万kW** (2,201,424件)
太陽光(非住宅)	約９０万kW	676.8万kW (123,656件)	836.7万kW (152,756件)	814.8万kW (115,928件)	544.3万kW (72,560件)	474.5万kW (53,346件)	490.6万kW (54,817件)	487.8万kW (49,165件)	499.9万kW (33,305件)	373.1万kW (20,578件)	354.5万kW (13,679件)	206.3万kW (7,689件)	**5,759.3万kW** (697,479件)	**6,364.1万kW** (726,992件)
風力	約２６０万kW	18.4万kW (25件)	22.5万kW (24件)	14.8万kW (57件)	31.0万kW (150件)	16.9万kW (316件)	16.8万kW (454件)	44.9万kW (303件)	36.2万kW (272件)	29.8万kW (278件)	31.2万kW (340件)	108.1万kW (318件)	**370.6kW** (2,391件)	**1,639.8万kW** (6,258件)
地熱	約５０万kW	0.0万kW (1件)	0.4万kW (8件)	0.6万kW (10件)	0.5万kW (8件)	0.7万kW (23件)	0.9万kW (10件)	4.8万kW (6件)	1.4万kW (8件)	0.0万kW (4件)	0.2万kW (2件)	4.1万kW (10件)	**13.6万kW** (90件)	**21.2万/kW** (120件)
中小水力	約９６０万kW	0.6万kW (37件)	8.5万kW (56件)	9.3万kW (87件)	7.9万kW (101件)	7.5万kW (86件)	6.1万kW (86件)	13.3万kW (88件)	16.6万kW (79件)	12.8万kW (96件)	29.0万kW (71件)	25.0万kW (86件)	**136.5万kW** (873件)	**259.9万kW** (1,203件)
バイオマス	約２３０万kW	18.4万kW (59件)	18.2万kW (48件)	30.2万kW (57件)	35.3万kW (67件)	44.4万kW (73件)	31.2万kW (60件)	48.6万kW (62件)	37.0万kW (55件)	67.8万kW (69件)	131.5万kW (60件)	59.1万kW (57件)	**521.7万kW** (667件)	**842.0万kW** (1,084件)
合計	約2,060万kW	921.7万kW (600,239件)	989.9万kW (381,557件)	955.5万kW (295,523件)	698.2万kW (234,220件)	609.9万kW (187,115件)	618.8万kW (202,100件)	676.3万kW (201,847件)	667.0万kW (175,252件)	569.3万kW (174,194件)	652.3万kW (204,458件)	506.3万kW (205,683件)	**7,865.2万kW** (2,862,042件)	**9,889.0万kW** (2,937,081件)

※認定・導入の量及び件数については速報値　※ バイオマスは、認定時のバイオマス比率を乗じて得た推計値を集計。　※ 各内訳ごとに、四捨五入しているため、合計において一致しない場合がある。

80%

（出典：調達価格委員会資料 [28]）

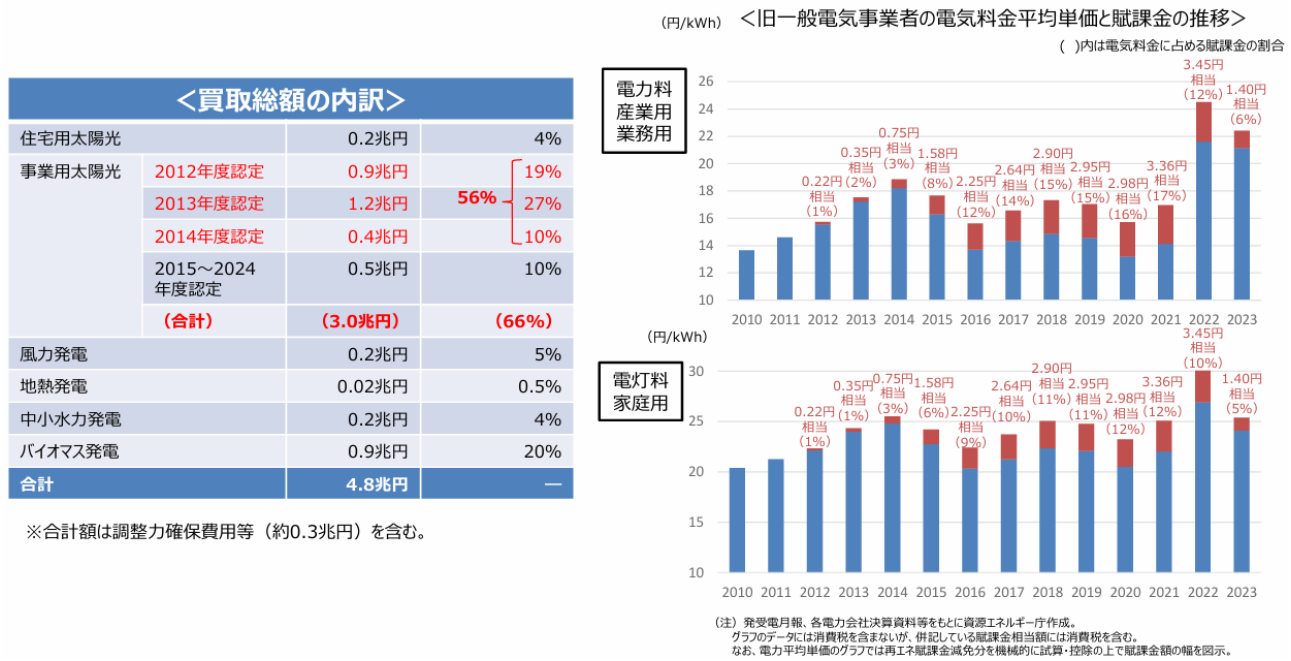


図 1.1.4-7　再生可能エネルギーの費用負担の推移

（出典：調達価格委員会資料 [28]）

(5) エネルギーシステム改革

日本政府は、東日本大震災以降、電力・ガスシステム改革として自由化の一層の促進を進めてきた。電力については、2020 年 4 月には送配電部門の法的分離がなされ、第 1 弾から 3 弾までの一連の改革が一通り終了した(ただし経過措置料金(規制料金)は解除がなされていない)。ガスについては 2017 年 4 月より都市ガスの小売料金の全面自由化となり、2022 年 4 月にガス導管部門の法的分離もなされた。

電力については、kWh、kW、ΔkW、非化石価値など、様々な特性の異なる電力が持っている価値を分離し、それぞれ市場取引することで、経済合理的に価値を評価していこうとしている。自由化によって、競争の下でのコスト低減が期待できるし、また、異業種の参入により、新たなサービスなどが生まれ、イノベーションの可能性が高まることは期待できる。一方で、エネルギー供給という公益性の高い部門での自由化によって、エネルギー供給において本来必要となる長期を考えた、より良い投資が行われにくくなってくる懸念もある。市場は短期的な経済合理性は追求できるが、長期への対応は容易ではなく（長期の電源設備維持を目的とした kW 価値の取引を想定する容量市場であっても）、慎重な制度設計が望まれる。地球温暖化対策についても、市場の下で良い投資が行われにくくなる懸念がある。電力やガスの自由化促進の下での地球温暖化対策のあり方も大きな課題となってきている。

そして、ロシア・ウクライナ情勢による化石燃料高騰と LNG 供給リスクの上昇、また、2022 年 3 月 22 日には東京、東北電力管内での電力需給逼迫が起こるなど、エネルギー安全保障、安定供給のリスクが顕在化してきている。まさに、電力自由化と温暖化対策との調和の難しさが顕在化してきた事象と考えられる。日本政府は、他の課題も踏まえ、「GX 実現に向けた基本方針」[3]で原子力の活用の方針や、電力供給安定化等、電力システムに関して改善方針を示したところである。また、2024 年度には脱炭素電源を長期に安定的に確保するため、容量市場の一部の機能として、長期脱炭素電源オークション市場が開設し、第 1 回目となるオークションも実施された。更に同じく 2024 年度には、需給逼迫に対するリスク対応のため、予備電源市場も創設され、こちらも第 1 回目となるオークションが実施された。ただし、予備電源市場については応札がなく、引き続き、他市場も含めて市場設計のあり方が議論される見通しである。また、短期断面では、2024 年度に需給調整市場が予定していたすべての商品の取引が開始された。しかし、一部の商品では需給が逼迫し、価格高騰となり、緊急的措置もとられるなど、市場設計の難しさも顕在化した。いずれにしても複雑化する市場が、安定供給、経済性、そして CO_2 排出削減の視点から適切に機能し得るのか、注視、検証していくことが、持続的な気候変動対策のためにも重要である。なお、2024 年度は、電力システム改革検証も実施された[29]。

電力自由化の下での地球温暖化対策の課題については第 3.6 節で議論する。

(6) エネルギー基本計画

エネルギー基本計画は原則として 3 年に一回見直しの検討が行われることとなっており、第 6 次エネルギー基本計画[22]が、2021 年 10 月に閣議決定された。今年度は、第 7 次エネルギー基本計画[9]の議論が行われ、2025 年 2 月に閣議決定された。そこでは、「S+3E の原則の下、安全性の確保を前提に、エネルギー安定供給を第一として、経済効率性と環境適合性の向上に向けて最大限取組を進めていくことが重要」とされた。これ自体は、第 6 次計画でもほぼ同じ記述がなされているが、第 7 次エネルギー基本計画では、2021 年以降の情勢を踏まえ、全体を通して、より、エネルギー安定供給と経済効率性に重きを置いた記述となったと考えられる。

図 1.1.4-8 は、2040 年のエネルギーミックスの姿におけるエネルギー全体および電源構成の見込みである[30]。これらは、本事業でのモデル分析、シナリオ分析の結果が参照されて策定された。詳細については、第 5.1 節に記載した。なお、従来のエネルギー基本計画で提示のエネルギーミックスと異なるのは、複数のシナリオの提示がなされたことである。様々な不確実性が存在し、高まっている国内外の情勢の中でも、経済と環境の好循環を実現することが必要であり、それに対応すべき、複数シナリオの提示となった。基本的には、2040 年の GHG 排出削減は 73%減（2013 年度比）とされたが、排出が上振れするリスクを想定したシナリオ（「技術進展」シナリオ）も提示されたことは、大きな変化と言える。

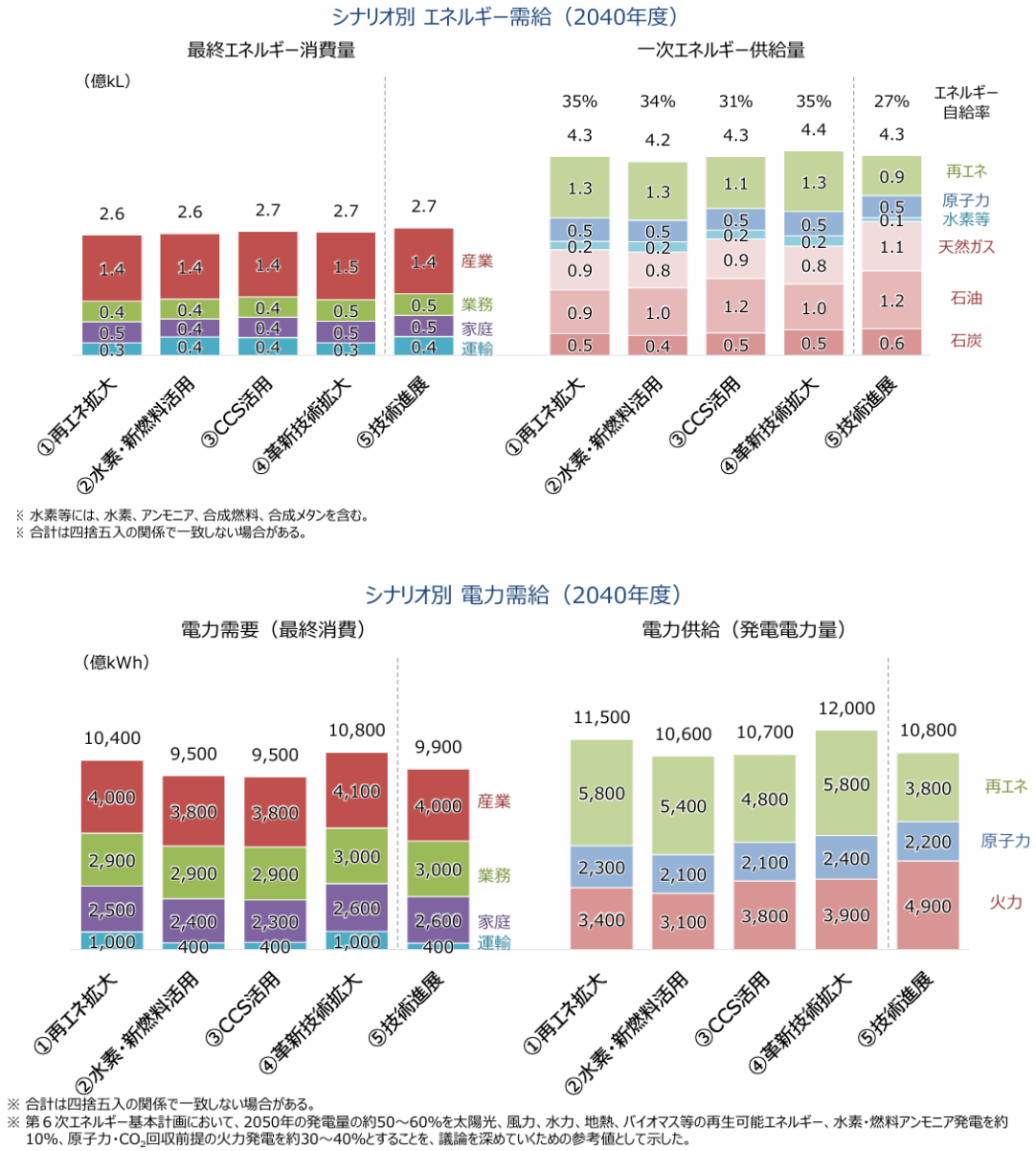


図 1.1.4-8　第 7 次エネルギー基本計画：2040 年エネミックス

（出典：経済産業省[30]）

(7) 地球温暖化対策計画

2021 年 10 月に地球温暖化対策計画が改正され、2030 年の 46%減目標を受ける形で大きく見直された [16]。COP での要請を受け、2024 年度には次期 NDC の議論が行われた。そして、2024 年 12 月に地球温暖化対策計画の改定案が提示され [7]、2025 年 2 月に閣議決定がなされた。そこでは、2035 年 60%減、2040 年 73%減（いずれも 2013 年度比）を目指すとされた。2040 年のガス種別、燃料種別排出削減の目安は、表 1.1.4-3 のように提示がなされた [31]。

表 1.1.4-3 地球温暖化対策計画における 2040 年の部門別排出削減見通し

（単位：百万 t-CO_2）

	2013 年度 実績[1]	2030 年度[2] (2013 年度比)	2040 年度[3] (2013 年度比)
温室効果ガス排出量・吸収量	1,407	760 (▲46%[4])	380 (▲73%)
エネルギー起源二酸化炭素	1,235	677 (▲45%)	約 360～370 (▲70～71%)
産業部門	463	289 (▲38%)	約 180～200 (▲57～61%)
業務その他部門	235	115 (▲51%)	約 40～60 (▲74～83%)
家庭部門	209	71 (▲66%)	約 40～60 (▲71～81%)
運輸部門	224	146 (▲35%)	約 40～80 (▲64～82%)
エネルギー転換部門	106	56 (▲47%)	約 10～20 (▲81～91%)
非エネルギー起源二酸化炭素	82.2	70.0 (▲15%)	約 59 (▲29%)
メタン（CH_4）	32.7	29.1 (▲11%)	約 25 (▲25%)
一酸化二窒素（N_2O）	19.9	16.5 (▲17%)	約 14 (▲31%)
代替フロン等 4 ガス[6]	37.2	20.9 (▲44%)	約 11 (▲72%)
ハイドロフルオロカーボン（HFCs）	30.3	13.7 (▲60%)	約 6.9 (▲77%)
パーフルオロカーボン（PFCs）	3.0	3.8 (+26%)	約 1.9 (▲37%)
六ふっ化硫黄（SF_6）	2.3	3.0 (+27%)	約 1.5 (▲35%)
三ふっ化窒素（NF_3）	1.5	0.4 (▲70%)	約 0.2 (▲85%)
温室効果ガス吸収源	－	▲47.7	▲約 84[7]
二国間クレジット制度（JCM）	－	官民連携で 2030 年度までの累積で、1 億 t-CO_2 程度の国際的な排出削減・吸収量を目指す。我が国として獲得したクレジットを我が国の NDC 達成のために適切にカウントする。	官民連携で 2040 年度までの累積で、2 億 t-CO_2 程度の国際的な排出削減・吸収量を目指す。我が国として獲得したクレジットを我が国の NDC 達成のために適切にカウントする。

2035年度の温室効果ガス排出量・吸収量の目標（2013年度比）については、約570百万t-CO_2（2013年度比60%減）とする。

国内の排出削減に加え、アジア地域を中心とした世界の排出削減について、アジア・ゼロエミッション共同体（AZEC）の枠組み等も活用しながら、着実に取組を進め、パリ協定第６条に基づき、我が国として獲得したクレジットを我が国のNDC達成のために適切にカウントできるよう検討を進める。

（出典：日本政府資料 [31]）

(8) 革新的技術開発－革新的環境イノベーション戦略・グリーン成長戦略

パリ協定長期成長戦略では、イノベーションの重要性が指摘された。そして、政府は、2020 年 1 月に「革新的環境イノベーション戦略」[32]を策定した。そこでは、イノベーション・アクションプランの重点領域として、①非化石エネルギー、②蓄電池を含むエネルギーネットワーク、③様々な分野で活用可能な水素、④カーボンリサイクル・CCUS、⑤農林水産分野での炭素固定等、として、アクションプランを策定した。また、2020 年 12 月に「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」[2]も策定され、また、2021 年 6 月に一部を改訂した最終的な「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定、公表された [33]（図 1.1.4-9）。取り上げられてい

る技術は、カーボンニュートラル達成のために重要と考えられる技術がほぼカバーされていると考えられるが、広範なるイノベーション政策として適切な政策となっているかの検証をし、必要に応じて是正していくことも重要である。

革新的な技術の開発普及の実現によって、炭素価格はあまり上昇しないながらも、大幅な排出削減が実現するようにしなければならない。さもなければ、グリーン成長にはつながらず、大幅な排出削減は現実社会では実現し得ない。

本研究でも、イノベーションの可能性について検討を行った（第 2.4 節）。



図 1.1.4-9 グリーン成長戦略

（出典：文献 2)）

(9) サステナブル・ファイナンス

長期的な投資を行う機関投資家を中心に、投資判断において、投資に ESG（Environment, Social, Governance）を組み入れる考えが進展してきた。また、「国連責任投資原則（PRI)」の署名機関数・規模も大きく増加してきている。そして、例えば英国ではスチュワードシップコードを改訂し、「スチュワードシップと投資を重要な環境、社会、ガバナンスの課題、そして気候変動も含めて、自身の責任を果たすために体系的に統合する」との文言が追加され、2020 年 1 月より改定されたスチュワードシップコードが施行された。また、日本においても、2019 年 12 月に日本版スチュワードシップコードの改訂案が公表された。このように ESG の重要性が増してきた。

また、サステナブル・ファイナンスの取組など、グリーンを定義して、民間資金を誘導する政策措置がとられてきた。EU は、環境上サステナブルな経済活動を分類・

定義したEUタクソノミーを策定した。EUタクソノミーは、良い技術と悪い技術を区別するような手法であり、この弊害についての議論も起こりつつある。例えば、マーク・カーニー イングランド銀行総裁は、2019年9月の国連気候変動サミットにおいて、「EUタクソノミーは二進法的になる傾向があり、むしろ『50段階の色合いのグリーン』を示すようなタクソノミーが必要との指摘」している。後述のようなトランジション・ファイナンスの動きもあり、最近の動きとしては、EUタクソノミーも、トランジション・ファイナンスに近づくような修正がなされてきているとも考えられる。サステナブル・ファイナンスは、図 1.1.4-10のように伸びてきた。

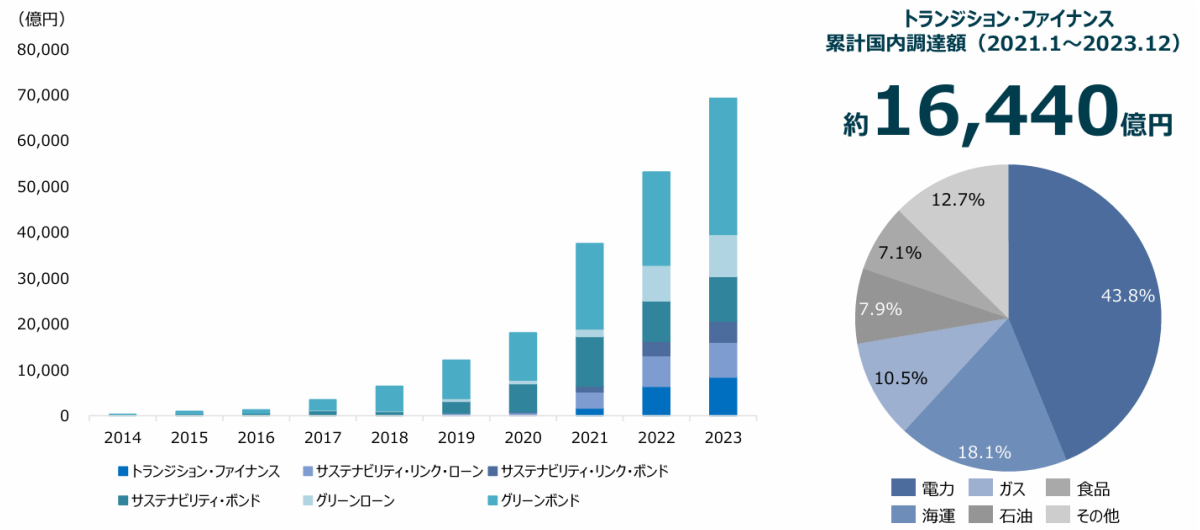


図 1.1.4-10 サステナブル・ファイナンスの動向

（出典：文献34)）

更には、気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）では、財務に影響のある気候関連情報の開示を推奨するとされ、それに賛同する企業も国内外で増加してきている。批判に一部対応するような形で、欧州委員会は2022年2月に、条件付きながら天然ガスと原子力も適格扱いとする最終方針を示した。なお、TCFDは2023年10月に解散し、その役割は、IFRS財団の下に設置された国際サステイナビリティ基準審議会（ISSB）に引き継がれている。

経済産業省は、2020年に環境イノベーション・ファイナンス研究会を立ち上げ、「クライメート・イノベーション・ファイナンス戦略2020」をとりまとめた[35]。そこでは、SDGsやパリ協定の実現のためには、グリーンか、それ以外の二項対立的な考え方ではなく、トランジション（T）、グリーン（G）、革新イノベーション（I）を同時に推進し、これらの事業に対してファイナンス（F）していくことが重要であり、このために、政府の気候変動対策へのコミットメント、企業の積極的な情報開示、資金の出し手によるエンゲージメントの3つの基盤を整備していく、とされた。

そして、クライメート・トランジション・ファイナンスの拡大を目指し、政府は「クライメート・トランジション・ファイナンスに関する基本指針」を策定した[36]。これは、グリーンボンド原則等を公表しているICMAが2020年12月に公表した「クライ

メート・トランジション・ファイナンス・ハンドブック」[37]に記載されている4要素（①トランジション戦略とガバナンス、②ビジネスにおける環境面のマテリアリティ（重要度）、③科学的根拠のある戦略、④実施の透明性）に基づき、開示に関する論点、開示事項・補足、独立したレビューに関する事項が記載された。

そして、さらに、トランジション・ファイナンスに資するよう、分野別ロードマップの策定が進められた。鉄鋼、化学、電力、ガス、石油、セメント、紙・パルプの策定がなされた[38]。また、2022年度には自動車のロードマップの策定もなされた。昨年度2023年度の本事業では、世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+を用いた、2℃、1.5℃目標と整合的な部門別ロードマップの策定も行った。

他方、2023年6月にはICMAハンドブックの改訂が行われ[39]、グリーンボンドやサステナビリティ・ボンドも含める形でより広くトランジション・ファイナンスを捉え直しが行われた。また、2021年に策定された基本指針以降の具体的なトランジション・ファイナンス事例も積みあがってきたこともあり、政府は、改訂版として、「クライメート・トランジション・ファイナンスに関する基本指針（2025年版）」を策定[40]されたところである。

他方、とりわけ米国において、ESG投資離れが進んできており、トランプ政権の誕生により一層進むと見られている。ESGファンドの資金額は、2023年から流出に転じ、2024年も前年以上の流出となったとされている。これは、テキサス州等での共和党主導の州当局が米金融機関を標的としてきた「反ESGキャンペーン」の圧力が影響したとされる。そして、2025年1月には、世界最大の資産運用会社である米ブラックロックが脱炭素をめざす国際的な枠組みである「ネットゼロ・アセットマネジャーズ・イニシアチブ（NZAM）」（資産規模は50兆ドル程度とされてきた）から離脱することとなった。その他の多くの資産運用会社等もNZAMから脱退もしくは脱退の意思を表明している。また、銀行の脱炭素をめざす国際枠組みである「ネットゼロ・バンキング・アライアンス（NZBA）」からも、同様に脱退が続いている。ここにきて、ESG投資の潮目が変わり、より現実的に、よりトランジションを重視しつつあるとも考えられる。

(10)温暖化適応計画

政府は、「気候変動による様々な影響に対し、政府全体として、全体で整合のとれた取組を計画的かつ総合的に推進するため、目指すべき社会の姿等の基本的な方針、基本的な進め方、分野別施策の基本的方向、基盤的・国際的施策を定めた、政府として初の気候変動の影響への適応計画」を2015年4月に策定し閣議決定を行った[41]。気候変動緩和を進めることは重要であるが、同時に、気候変動を完全には防止することは困難であり、過去の排出による効果を含め不可避的に進行する可能性のある地球温暖化影響に対する適切な対応を計画性をもって実施し、リスクに備えることは重要である。

適応計画では、基本戦略として、（1）政府施策への適応の組み込み、（2）科学的知見の充実、（3）気候リスク情報等の共有と提供を通じた理解と協力の促進、（4）地域での適応の推進、（5）国際協力・貢献の推進を挙げている。また、基本的な考え方として、観測・監視や予測を行い、気候変動影響評価を実施し、その結果を踏まえ適応

策の検討・実施を行い、進捗状況を把握し、必要に応じ見直す。このサイクルを繰り返し行い、おおむね 5 年程度を目途に気候変動影響評価を実施し、必要に応じて計画の見直しを行うとした。

また、気候変動への適応を推進することを目的として、2018 年 6 月には「気候変動適応法」が公布された。政府による気候変動適応計画の策定、環境大臣による気候変動影響評価の実施等が定められ、5 年程度を目途とした気候変動影響評価の実施も法律の中で位置づけられることとなった。これに基づき、2020 年 12 月に「気候変動影響評価報告書」[42)]がとりまとめられた。そして、2024 年度は気候変動影響評価報告書の改定に向けた議論がスタートし、2025 年度でのとりまとめを目指しているところである [43)]。

(11) GX 実現に向けた基本方針

政府は、岸田首相指示の下、2021 年 12 月に「クリーンエネルギー戦略」策定の議論を開始した。一方、その議論の中、2022 年 2 月にはロシアのウクライナ侵攻が起こり、上昇傾向にあった化石燃料価格は一層の上昇となり、特に天然ガスの供給途絶リスクも高まった。更には 2022 年 3 月には、東京電力管内と東北電力管内において、電力の需給逼迫が発生した。エネルギー安全保障、安定供給への懸念が高まる事態となった。また、電力を含め、エネルギーの価格上昇が顕著になり、経済への大きな影響が懸念されるようになった。CN に向けた排出削減への取り組みの方向性（環境への対応）は変わらないものの、エネルギー安全保障・安定供給、経済性とのバランス、いわゆる 3E を、これまで以上に認識し、対応しなければならない状況となった。このような中、2022 年 5 月にクリーンエネルギー戦略 中間整理 [44)]がとりまとめられた。そして、2022 年 7 月末に官邸において、GX 実行会議が設置され、2022 年 12 月末にとりまとめがなされた。そして、2023 年 2 月に「GX（グリーントランスフォーメーション）実現に向けた基本方針」[3)]が閣議決定された。



図 1.1.4-11　GX 実現に向けた政策のロードマップ

（出典：文献 3)）

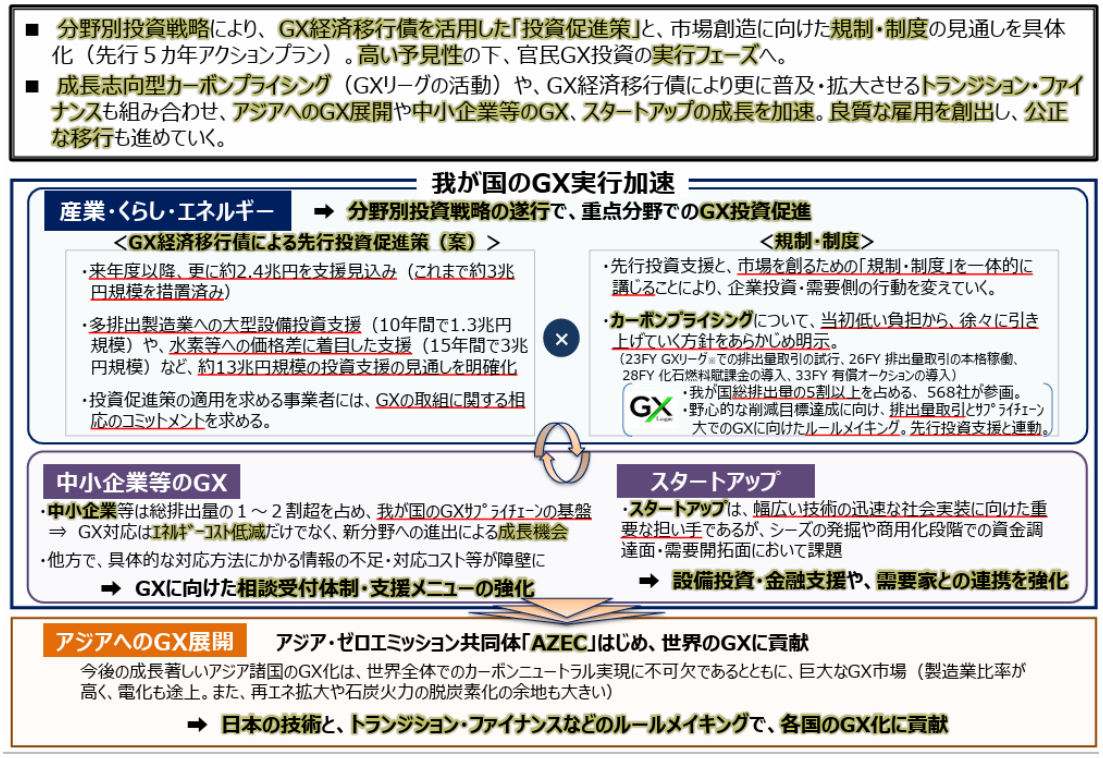


図 1.1.4-12　日本政府の GX 実現に向けた方針

（出典：文献 3)）

1.1.5　欧州排出量取引制度の動向

欧州排出量取引市場の炭素価格は、2021 年に入ってから急速に上昇し、100 ユーロ/tCO_2 に迫る価格となり、しばらくの間、高い水準で留まっていたが、2023 年に入り低下傾向となっている（図 1.1.5-1）[45]。炭素国境調整措置の必要性がより大きくなる一方、炭素国境調整措置で対応可能なのかという疑問も生じる。炭素国境調整措置でこの炭素価格に相当する輸入関税をかければ、鉄鋼等の素材価格が大きく上昇し得る。消費構造の変化を長期的には促すかもしれないが、代替製品が少ない製品の価格上昇は、物価の上昇のみをもたらし、排出削減には効果が乏しい可能性もある。日本政府も 2023 年 2 月に「GX 実現に向けた基本方針」[3]が閣議決定され、カーボンプライシングとして、炭素に関する賦課金と、排出量取引制度の導入の方針が決定された。第 4.1 節では 2030 年国別貢献（NDCs）の排出削減目標の CO_2 限界削減費用（炭素価格）推計を示したが、高い炭素価格が推計され、高い価格でなければ目標達成が難しいと見られる一方、国間で炭素価格に差異が大きければ、炭素のリーケージが起こって世界全体での排出削減効果は生じなくなってしまう可能性が高く、難しい戦略が求められる。第 4.3 節において、炭素国境調整措置に関する動向と分析・評価について記述した。



図 1.1.5-1　欧州排出量取引制度 EUA 炭素価格推移

（出典：Trading Economics[45]）

1.1.6　IPCC 関連の動向

IPCC は、第 6 次評価報告書（AR6）に向けたサイクルが終盤となり、第 3 作業部会（WG3）緩和に関する評価報告書が、2022 年 4 月に公表された[46]。また、統合報告書が 2023 年 3 月に公表された[47]。第 6 次評価プロセスは終了し、第 7 次評価報告書に向けたプロセスが開始したところである。IPCC は気候変動対策、政策に重要な影響を与えてきており、引き続き、IPCC 関連の動向を調査していくことは重要である。2023 年 4 月にはバンコクにおいて、第 6 次評価プロセスでのシナリオの活用に関する成果、課題のストックテイク、そして次期プロセスへの展望についてのシナリオ利用に関するワークショップが開催された[48]。また、2024 年 6 月にはウィーンにおいて、CDR・CCUS に関して IPCC インベントリ・ガイドライン改定に関しての専門家会合が開催された[49]。そして、2024 年 12 月にはクアラルンプールにて、IPCC 第 7 次評価報告書の章構成の案を議論するためのスコーピング会合も開催されたところである[50]。2025 年 2 月の IPCC 総会において、第 7 次評価報告書の章構成等が承認され[51]、執筆プロセスがスタートすることとなった。しかし、執筆スケジュールについては合意されず、第 1 回執筆者会合を 2025 年中に開催することのみ合意された。CDR・CCUS に関する方法論特別報告書についても、章構成等の議論がなされたが、こちらは合意できず、承認は次回の IPCC 総会に持ち越しとなった。

なお、IPCC は科学的な知見集約の場であるが、一方で政府間パネルであり、政府による様々な関与プロセスが存在している。緩和を扱う第 3 作業部会（WG3）は、共同議長およびテクニカルサポートユニットは米国となっているが、2025 年 2 月の IPCC 総会では、米国トランプ政権の指示で不参加となった。今後も、第 7 次プロセスにおいて、米国トランプ政権の影響も大きく受けながらの報告書作成作業となり、従来以上に困難が予想される。

1.2 本研究の目的と実施内容

以上のような背景の下、本事業では、最新の科学的な分析と議論の策定動向も踏まえながら、海外研究機関とも連携・協力しつつ、温暖化対策（緩和策および適応策）、ファイナンス、政策の総合的かつ整合的な分析・評価を行い、地球温暖化対策と経済成長の両立（グリーン成長）を目指す国際枠組み・わが国の国際戦略立案に資することを目的に以下のような項目等を実施した。

(1) コンピュータモデルを用いた総合的な分析・評価

世界エネルギー・温暖化対策技術評価モデル、経済モデル、及び、非 CO_2 温室効果ガス評価モデルによって、温暖化対策・政策の総合的な分析を行った。

(1－1) IPCC の要請を受けて、国際的に議論が行われている共有社会経済パス（Shared Socioeconomic Pathways: SSP）や今後の新シナリオの動向を踏まえた社会経済シナリオを想定し、2100 年までの期間について技術評価モデル DNE21+で温暖化対策の分析、評価を行った。なお、IPCC 1.5℃特別報告書で引用された低エネルギー需要（LED）シナリオに準ずるシナリオについても検討を行い、必要に応じてモデル拡張を行った上で、分析、評価を行った。また、SSP 等のシナリオに関する既往の分析、評価研究について調査、整理を行い、本分析、評価との比較を行った。

(1－2)

①2020 年以降（2030 年頃）の地球温暖化対策に関する将来枠組み・目標に関して、各国提出の排出削減目標、カーボンバジェットについて、複数の国際衡平性の指標（CO_2 排出原単位、限界削減費用均等化、GDP 比費用均等化、政策強度、製品炭素含有量等）における位置づけや気候変動によるマクロ経済への影響について、各種統計データおよびコンピュータモデルを用いて分析、評価を行った。その上で、パリ協定における進捗評価（レビュー）に資する評価方法の確立に向けた検討を行った。そして、パリ協定におけるグローバルストックテイクを踏まえ、進捗評価（レビュー）に資する評価方法の確立に向けた検討を行った。

②欧米等を中心に議論されている国境調整措置やカーボンクラブなどの貿易と気候変動対策を絡めた経済分析についても実施した。

③各国の長期目標との関係性についても分析、評価を行った。特に、パリ協定で位置づけられた２℃目標、1.5℃目標に関しては、同目標達成のための緩和策を評価するとともに、他の持続可能な発展目標とのシナジー効果、トレードオフ効果について分析、評価を行うほか、超長期のゼロエミッション達成に向けた対策の方向性の検討とその限界について分析、評価を行った。また、国際機関、研究機関、市民団体による排出削減目標の評価について、その方法論等を調査し、評価を行った。

(1－3) 下記の(2)項を踏まえつつ、上記(1-1)項の社会経済シナリオの下で、気候変動緩和と SDGs 等とのコベネフィットを考慮したシナジー効果、トレードオフ効果について、コンピュータモデルを用いた分析、評価を行った。

(1－4) 所得階層による温暖化対策の費用負担の衡平性と効率性とのトレードオフについて、コンピュータモデルを用いた分析、評価を行い、今後の大幅な排出削減にあたっての対策の在り方について検討を行った。

上記(1－1)～(1－3)、また下記の(8)項の国際モデル比較プロジェクト等に対応するために世界エネルギー・温暖化対策技術 DNE21+等のモデル拡張を行った。また、我が国のエネルギー及び温暖化対応の動向もモデル分析に反映させた。

(2) 気候変動対応のリスクマネージメントについての検討および温暖化緩和策と適応策の経済影響・経済効果、雇用への影響、気候変動対策におけるイノベーションの可能性に関する分析

気候変動対応の影響・適応の評価について、国際的な最新の学術的な評価に関するとりまとめを行い、その含意について検討を行った。更には、温暖化影響・適応の経済影響・経済効果評価モデルを開発し、緩和と影響・適応に関する総合的な分析・評価も行った。

加えて、気候変動対応に付随するリスクについて、気候変動対応に大きな影響を及ぼし得る要因を特定し、その影響について定量的な分析を行った。

その上で、それらの知見も踏まえつつ、気候変動対応のリスクマネージメントについて、考え方の整理を行うと共に、緩和策と適応策の経済影響・経済効果に関する分析を行った。

また、気候変動対策におけるイノベーションの可能性を調査・検討するとともに、イノベーションの気候変動リスクマネージメント戦略における位置づけについても検討を行った。

(3) 効果が期待できる温暖化対策の具体的なシステム提案とその分析

費用対効果の高い具体的な温暖化対策のシステム提案を行った。また、民生、運輸部門を中心とした積み上げ的なモデル分析、それらのシステム的な方策のモデル化とその分析により、その排出削減効果とシステムの費用およびその経済影響・効果について定量的な評価を行った。

(4) グリーン成長、温暖化対策技術の国際展開に関する分析

以下①～⑥の項目を含めて、「グリーン成長」の見通しについて考え方の整理およびデータに基づく分析を行った。

①エネルギー生産性の国際比較とその要因、それに伴う各国、世界のグリーン成長との関係についての分析

②消費ベース CO_2、製品に体化された電力（間接的電力輸入）に関する評価についても、最新動向の調査等

③国内外の再生可能エネルギー導入とその費用負担の状況などについて調査を行い、グリーン成長との関連についての整理

④米国、欧州等における CO_2 排出削減対策・政策を調査、整理

⑤日本の電力システム改革の下での CO_2 排出削減対策・政策の課題についての整理

⑥（ⅰ）グリーンファイナンスを含めた気候変動問題に対する金融部門の取り組みを調査（ⅱ）その際、石炭火力発電等のダイベストメントや、タクソノミーの議論や関連分析について調査（ⅲ）また、金融部門を明示的に考慮したモデル評価の課題を整理し、低炭素技術の国際展開に伴う、ファイナンシングを含めた金銭の流れを分析・評価

(5) 気候変動問題に関する主要論文の調査、整理

IPCC や UNFCCC 交渉などで注目されるような気候変動問題に関する主要な論文について調査を行った。

(6) 国内における学会等での気候変動問題の研究動向調査及び研究成果の発信

気候変動問題の研究動向を調査するため、主要な国内学会（エネルギー・資源学会等）・ワークショップ等に出席し、情報収集、整理を行った。また、(1)～(4)項に関する研究成果の発信も行った。

また、(1)の分析に資するため、セクター別主要企業・団体・学術専門家へのヒアリングやセミナー・講演会参加により情報収集及び研究成果の発信を行った。

(7) 気候変動に関する国際会議への参加等による各国動向調査

最新の気候変動に関する国際枠組み等に関する各国の動向を調査するため、米国、欧州の気候変動に関する主要な関係者（政府関係者、シンクタンク等）にヒアリングを行った。また、国際会議等の場で、研究成果の発信を行った。

(8) 国際モデル比較プロジェクトへの参画、海外研究機関等との研究協力

研究成果の国際展開をはかるため、以下のように、国際モデル比較プロジェクトへの参画や海外研究機関等との研究協力を行った。

(8－1) 国際応用システム分析研究所（IIASA）と技術進展の見通しとそのモデル分析に関する研究協力を行い、IIASA の気候変動に関連する研究の情報収集を行った。

(8－2) 米国未来資源研究所（RFF）と地球温暖化・エネルギー政策分析に関する研究協力、及び特に 2020 年以降の目標として米国が掲げうるものを評価するための関連政策動向分析を行った。

(8－3) 気候変動対策と持続可能な発展のコベネフィット、トレードオフ等のモデル分析を行う欧州の国際モデル分析比較プロジェクトへ参加した。

(8－4) エネルギー需要サイドの技術革新に関する国際モデル分析比較プロジェクト（EDITS）へのモデル分析結果の提供や、会合への参加、会議出席を行った。

(8－5) 気候変動緩和シナリオ分析の国際連携のためのコンソーシアム Integrated Assessment Modeling Consortium（IAMC）会合への参加、会議出席を行った。

(8－6) 国際エネルギー機関（IEA）と長期排出削減対策に関する研究協力を行った。

以上のような実施項目に関して、本報告書では、第 2 章で気候変動リスクマネージメントのあり方について検討した結果を記載し、第 3 章ではグリーン成長の限界を正

しく認識しつつ、その機会を見出すために、各種データの整理やそれを基にした分析・評価を行った。第 4 章では、中期的な緩和策の分析として、パリ協定 NDCs (Nationally Determined Contributions)の排出削減目標に関する分析・評価を行った結果をまとめた。第 5 章では長期の緩和シナリオ分析についてまとめた。第 6 章では最新の IEA シナリオの調査結果について記載すると共に、国際モデル比較プロジェクトの動向や各種分析について記載した。そして、第 7 章においてまとめを記載した。

参考文献（第 1 章に関するもの）

1) 日本政府「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」 (2019)、https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai40/pdf/senryaku.pdf
2) 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2020) https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/seichosenryakukaigi/dai6/siryou1.pdf
3) 日本政府、GX 実現に向けた基本方針、2023 年 2 月、https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html (2023 年 2 月 16 日アクセス)
4) 日本政府、分野別投資戦略、2023 年 12 月、https://www.meti.go.jp/press/2023/12/20231222005/20231222005.html (2024 年 2 月 26 日アクセス)
5) COP28, Decision -/CMA.5 Outcome of the first global stocktake (2023) https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_L17_adv.pdf
6) 日本政府、G7 札幌 気候・エネルギー・環境大臣会合 結果概要 (2023) https://www.env.go.jp/content/000129182.pdf
7) 日本政府、「地球温暖化対策計画」(2025) https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/250218.html（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）
8) 日本政府、「日本の NDC（国が決定する貢献）」(2025) https://www.env.go.jp/content/000291804.pdf（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）
9) 日本政府、「第 7 次エネルギー基本計画」 (2025) https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001.html（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）
10) 日本政府、「GX2040 ビジョン」(2025) https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218004/20250218004.html（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）
11) Global Carbon Project, Global Carbon Budget 2024, https://robbieandrew.github.io/GCB2024/
12) Copernicus Climate Change Service (C3S) (2025) https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024 (2025 年 2 月 10 日アクセス)
13) RITE/METI、令和 3 年度地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業報告書、2022 年 3 月
14) RITE/METI、令和 4 年度地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業報告書、2023 年 3 月
15) RITE/METI、令和 5 年度地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業報告書、2024 年 3 月

16) 日本政府「地球温暖化対策計画」https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html (2021)
17) 日本政府「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」(2021)
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/chokisenryaku.html
18) UNEP, Emissions Gap Report 2024 (2024). https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024
19) United Nations, Sustainable Development Goals,
http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/
20) 環境省、2022 年度（令和 4 年度）温室効果ガス排出量（確報値）、
https://www.env.go.jp/content/000215754.pdf
21) 中央環境審議会 地球環境部会・産業構造審議会産業技術環境分科会地球環境小委員会 合同会合 (2024)
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/ondanka_follow_up/pdf/002_03_00.pdf
22) 第 6 次エネルギー基本計画 (2021)
https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html
23) 経済産業省、電力・ガス基本政策小員会資料 (2025)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/085_06_00.pdf
24) 経団連 低炭素社会実行計画概要
https://www.meti.go.jp/committee/summary/0004647/2011_s01_00.pdf
25) 経団連 カーボンニュートラル行動計画
https://www.keidanren.or.jp/policy/vape/LowCarbonSociety2017.pdf
26) 経団連 グローバル・バリューチェーンを通じた削減貢献
http://www.keidanren.or.jp/policy/2018/102.html
27) WBCSD, Avioded Emissions (2022)
https://www.wbcsd.org/Overview/Policy-Advocacy-and-Member-Mobilization-PAMM/News/COP27-The-Business-of-Climate-Recovery-Accelerating-Accountability-Ambition-and-Action
28) 経済産業省 調達価格等算定委員会 資料 (2024)、
https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/095_01_00.pdf
29) 経済産業省、「電力システム改革の検証結果と 今後の方向性」電力・ガス基本政策小員会資料 (2025) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/085_03_02.pdf
30) 経済産業省 資源エネルギー庁、2040 年度におけるエネルギー需給の見通し（参考資料）(2025)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2024/068/068_005.pdf
31) 中央環境審議会 地球環境部会・産業構造審議会産業技術環境分科会地球環境小委員会 合同会合 資料 (2024)
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/ondanka_2050/pdf/009_03_02.pdf
32) 革新的環境イノベーション戦略 (2020) https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui048/siryo6-2.pdf
33) 日本政府、2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2021)
https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html
34) 経済産業省、トランジション・ファイナンス環境整備検討会資料（2024 年 3 月）
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/transition_finance/pdf/009_03_00.pdf

35) クライメート・イノベーション・ファイナンス戦略 2020
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/kankyo_innovation_finance/pdf/005_04_02.pdf
36) 日本政府、クライメート・トランジション・ファイナンスに関する基本指針 (2021)
https://www.meti.go.jp/press/2021/05/20210507001/20210507001.html
37) ICMA, Climate Transition Finance Handbook (2020)
https://www.icmagroup.org/assets/documents/Regulatory/Green-Bonds/Climate-Transition-Finance-Handbook-December-2020-091220.pdf
38) 経済産業省、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 https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/transition_finance_suishin/index.html
39) ICMA, Climate Transition Finance Handbook (2023)
https://www.icmagroup.org/assets/documents/Sustainable-finance/2023-updates/Climate-Transition-Finance-Handbook-CTFH-June-2023-220623v2.pdf
40) 経済産業省、トランジション・ファイナンス環境整備検討会 (2025)
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/transition_finance/pdf/011_04_00.pdf
41) 環境省 気候変動の影響への適応計画、2015 年 11 月 http://www.env.go.jp/press/files/jp/28593.pdf
42) 気候変動影響評価報告書 (2020) http://www.env.go.jp/press/files/jp/115261.pdf
43) 中央環境審議会　気候変動影響評価・適応小委員会 資料 (2024)
https://www.env.go.jp/council/06earth/tekiou4.html
44) 日本政府、クリーンエネルギー戦略 中間整理、2022 年 5 月、
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/008_01_00.pdf
45) Trading Economics, https://tradingeconomics.com/commodity/carbon (2024 年 2 月 6 日アクセス)
46) IPCC WG3 AR6: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (2022)
47) IPCC: AR6 Synthesis Reprot: Climate Change 2023 (2023)
48) IPCC Workshop on the Use of Scenarios in the Sixth Assessment Report and Subsequent Assessments (2023)
https://www.ipcc.ch/event/ipcc-workshop-on-the-use-of-scenarios-in-the-sixth-assessment-report-and-subsequent-assessments/
49) IPCC, IPCC Expert Meeting on Carbon Dioxide Removal Technologies and Carbon Capture Utilization and Storage (2024) https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/meeting/pdfiles/2407_Background_CDR_CCUS.pdf (2025 年 2 月 10 日アクセス)
50) IPCC, Chapter Outlines of the Working Group Contribution to the IPCC AR7-WGIII (2025)
https://apps.ipcc.ch/eventmanager/documents/88/270120250639-WGIII%20-%20Doc.%202%20-%20AR7%20Chapter%20Outline.pdf (2025 年 2 月 10 日アクセス)
51) IPCC, Decision IPCC-LXII-8. Scoping of the IPCC Seventh Assessment Report (AR7)
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2025/03/Decision-8-Working-Group-Outlines.pdf (2025 年 3 月 21 日アクセス)

第2章　気候変動リスクマネジメント

IPCC 第 1 作業部会（WG1）の第 6 次評価報告書（AR6）では、「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない。」とされた[1)]。また、第 5 次評価報告書（AR5）[2)]では、累積 CO_2 排出量と気温上昇にほぼ線形に近い関係が指摘された。このため、気温を安定化するためには、世界の CO_2 排出量を正味でほぼゼロにする必要があり、それは長期的に目指さなければならない目標と考えることができる。世界各国、企業、地方自治体などで、2050 年までにカーボンニュートラル（CN）実現を目指す動きが加速してきた。2023 年 5 月時点で期限付きでの CN を表明した国は、158 か国、世界 GDP の約 94%にも上ったとされる。

気候変動の不確実性を表す代表的な指標である、平衡気候感度については、第 4 次評価報告書（AR4）[3)]で likely range が 2～4.5℃、最良推定値 3℃、AR5 では AR4 以前と同じく再び 1.5～4.5℃に広がり、更には最良推定値は無しとされた。AR6 では、最良推定値 3℃、likely range 2.5～4℃と評価された。この likely range は AR5 の幅の半分程度であり大きく改善した。幅が狭められると、緩和策の意思決定が容易になってくるため、望ましいことである。一方で、引き続き、気候変動影響被害の程度とともに、大きな不確実性が残っていることに留意が必要である。

また気候変動緩和コストの不確実性も大きいと見られる。更には、気候変動対応の国際的な政治状況の不確実性が大きくなってきている。米国では、気候変動対策に後ろ向きなトランプ大統領が就任し、パリ協定からの離脱を宣言した。また、ドイツでは、製造業の苦境が際立つ中、政権交代が起こり、連立政権の枠組みの模索が続いている。2022 年に起こったロシアによるウクライナ侵略、さらには、2023 年にはパレスチナ・イスラエル紛争など、冷戦終結以降の国際的な協調ムードは一変してきている。また、それ以前からも、米中関係など、経済紛争等も増してきており、仮に米国が 4 年後に再び民主党政権になったとしても米中関係の経済的な緊張状態については継続する可能性も高い。他方、太陽光、風力、蓄電池など、世界の CN に資する技術の多くは、中国が供給先となっており、貿易的な障壁を生じる施策が講じられるならば、調達コストの増大となり、気候変動対策としては導入速度が抑制的にもなりかねない。第 1 章で見たように、世界の GHG 排出量は引き続き増大基調にあり、2024 年も 2023 年に引き続き過去最高の排出量を記録したとされる。協調下でも困難だった気候変動対策は、分断された世界で一層難しくなる可能性がある。また、世界的な物価上昇基調も伴って、洋上風力や水素などの事業の採算性が悪化してきているとされ、導入が停滞気味になってきている。

長期の意欲的なゴールを定めたとしても、様々なリスク要因を踏まえた上で、気候変動対策に関する良い意思決定が求められる。気候変動に対する対応策としては、緩和策の他、適応策、そして気候工学的な手法もあり得る。また、イノベーションの機会も多く存在しており、イノベーションをよく理解することで、気候変動マネジメント戦略の検討にも役立てることができる可能性がある。

第 2.1 節に気候変動リスクマネジメント戦略のあり方を記載した。第 2.2 節には、気候変動対策とその他 SDGs とのシナジー・トレードオフについて、とりわけ鉱物資源問題とエネルギー安全保障に焦点を当てた調査・分析について記載した。第 2.3 節では、Non-CO_2 GHG 排出削減の動向と課題を記載した。そして、第 2.4 節には気候変動リスクマネジメントから見たイノベーションの役割と期待について、核融合発電の事例も含めて記載した。

2.1 気候変動リスクマネジメントの考え方

本節では、気候変動リスクマネジメント戦略のあり方について、昨年度までの検討[4)]を踏まえ、各種論点の整理を行った。なお、気候変動リスクマネジメント戦略のあり方は、様々な視点が必要であるため、引き続き、検討を進めていくことが重要と考えられる。

- 緩和策の他、適応策、また、気候工学的な手法（DAC: CO_2 直接空気回収、SRM：太陽放射管理）など、様々なオプションがあり、時間軸、空間軸、様々な不確実性を踏まえながら、様々なオプションを適切に組み合わせ、トータルとしてのリスクの最小化を図ることが重要（図 2.1-1）。
- デジタルトランスフォーメーション（DX）によって、エネルギーや物質を情報という投入要素で代替できる可能性も出てきている。DX によって誘発され得る低需要社会の実現も含め、総合的な対応策を考えることも重要。幅広いイノベーションを誘発するような政策を採ることは重要

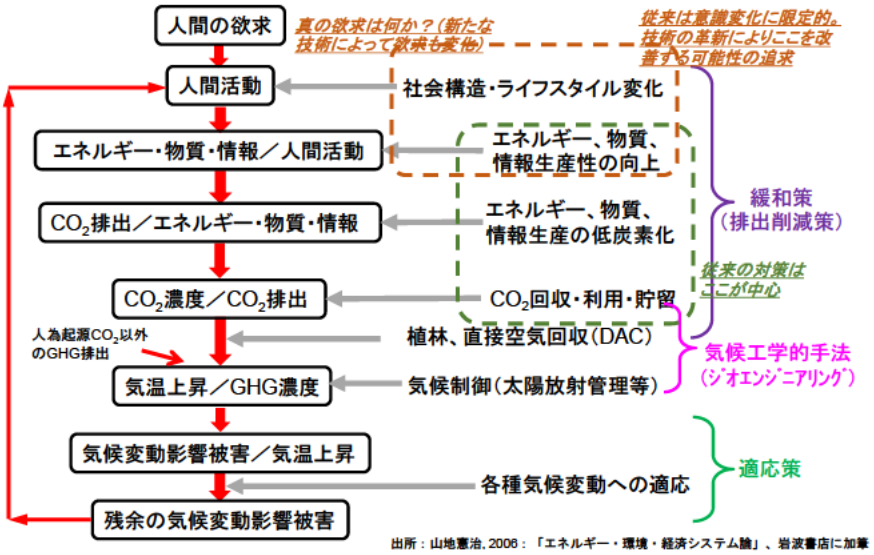
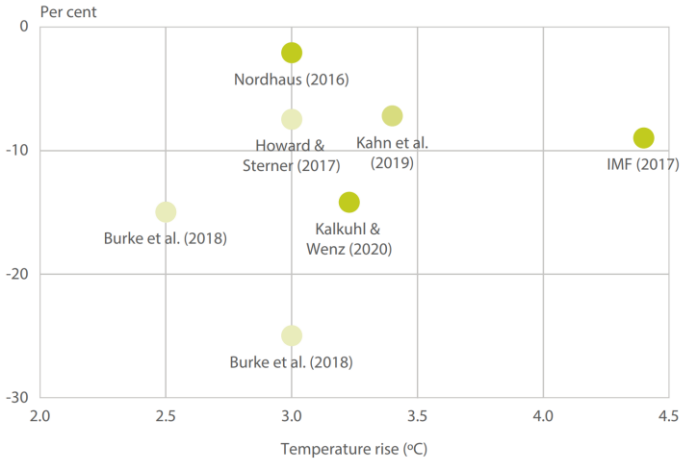


図 2.1-1 地球温暖化対策の基本構造

- 原則的には、緩和策、適応策、残余の影響被害の総和の最小化（費用便益分析）が望まれる。ただし、この手法は不確実性がないか、小さいときには採用できるが、気候変動を取り巻く状況には、様々な、かつ、大きな不確実性が存在す

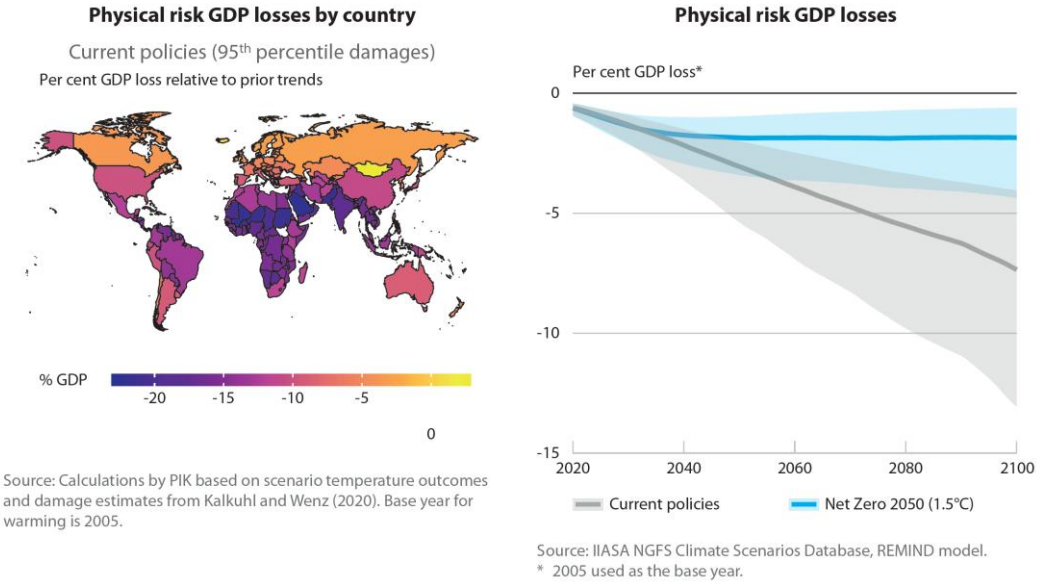
る（気候変動影響被害推計例は図 2.1-2）ため、データの見方、考え方によって大きな幅があり、費用と便益が一致する点にはあまりに大きな幅が生じてしまう。例えば、気候変動リスクに関わる金融当局ネットワーク（NGFS）の気候変動影響被害リスクの推計は、2021 年の ver.2[5]では、相対的に気候変動影響被害推計が大きい、Kalkuhl, Wenz (2020)の論文をベースに推計している(図 2.1-3)。更に 2022 年の ver.3[6]では、同じモデルを用いているものの、平均値ではなく、不確実性推計の上位 95%タイルの推計を採用している（図 2.1-4)。リスク回避志向は人によって様々であるが、どのような推計値を採用するかで、費用便益分析の結果は大きく異なってくる。ただし、もし気候変動影響被害について上位の 95%タイルの推計値を採用するのであれば、同様に気候変動緩和費用推計についても上位 95%タイルの推計値を採用するのが整合的と考えられるが、NGFS ではそのような扱いはされていないので、注意をもって報告を解釈すべきと考えられる。IPCC WG2 報告書では、エキスパートジャッジメントにより、最新報告書では図 2.1-5 のような影響被害リスクを提示している。しかし、報告書改定の度に、被害リスクの大きさは大きく表示される傾向がある。科学的な知見の集約によって真に影響被害リスクが大きいと推計されるようになっているならば、科学の進展として好ましいことであるが、国際政治が 2℃から 1.5℃目標へと厳しい排出削減目標を提示する中で、学術論文も政治目標を念頭に研究の焦点を当てるケースもあるかもしれない。複数の論文をベースにしたエキスパートジャッジメントであることを理解した上で、リスクを判断し、全体のリスクマネジメント戦略も考える必要性がある。

- いずれにしても、費用便益分析から、例えば、4℃のような世界を許容すれば影響被害が大きすぎる可能性があるとか、1.5℃では排出削減費用は大きくなりすぎる可能性があるといった程度の評価は一定程度意味をもって議論ができるものの、何℃に抑制するのが望ましいのかということを、科学的な費用便益分析を基にして、明確に言うことは困難な状況にある。このことは研究が相当進展しても、当面は変わることがないと考えられる。
- なお、米国インフレ抑制法案 IRA について、気候変動影響被害は Social Cost of Carbon (SCC)を採用して、費用便益分析を実施した研究例もある。ここでは、便益が IRA の費用を上回るとしているが、影響被害推計の不確実性が大きく、明確な結論が見いだせるかは疑問が残らないわけではない。



Source: As shown. Shade of marker reflects temperature baseline used in the underlying study. Burke, Howard & Sterner (lightest shade) measure temperature rise relative to pre-industrial levels. Kahn (medium shade) uses a baseline of 1960-2014. Nordhaus, IMF and Kalkuhl & Wenz (darkest shade) use a near-term baseline (ranging from 2005-present day).

図 2.1-2 気候変動影響による世界 GDP への影響推計（出典：NGFS[5)]）



Source: Calculations by PIK based on scenario temperature outcomes and damage estimates from Kalkuhl and Wenz (2020). Base year for warming is 2005.

Source: IIASA NGFS Climate Scenarios Database, REMIND model.
* 2005 used as the base year.

図 2.1-3 気候変動影響による世界 GDP への影響推計（出典：NGFS[5)]）

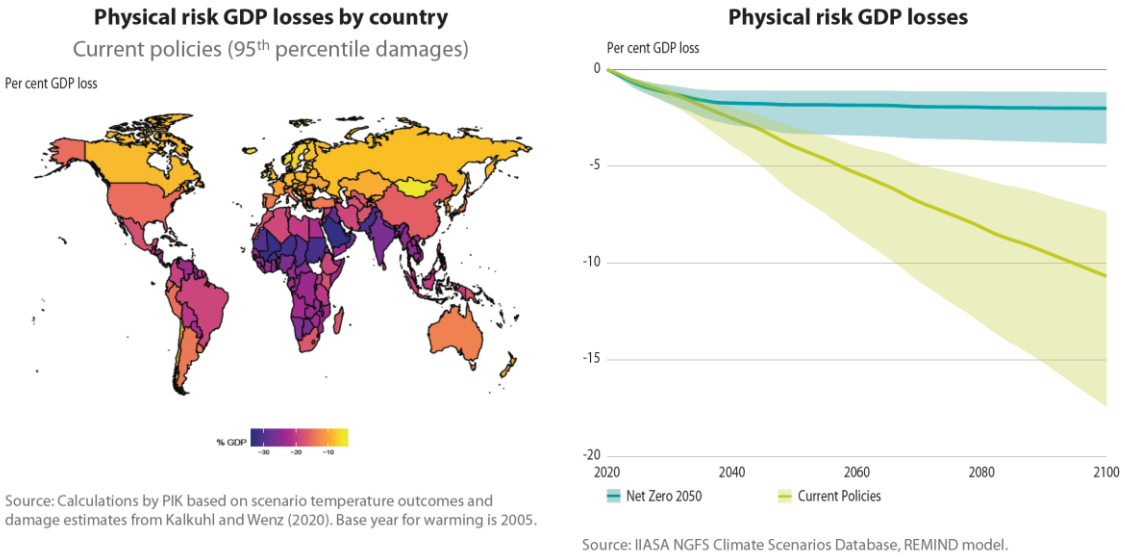
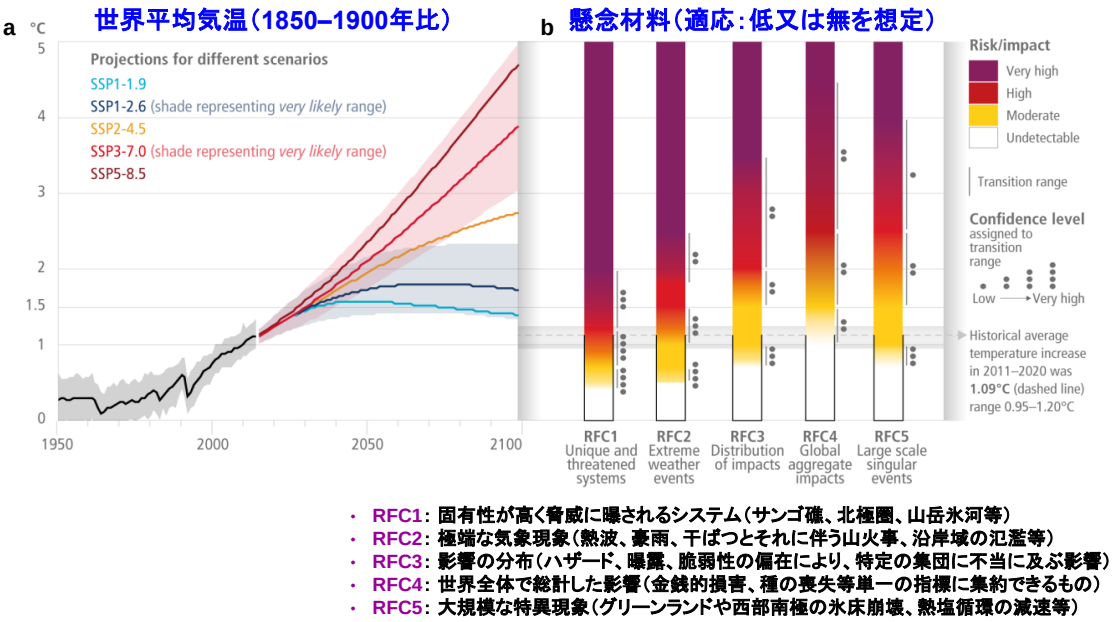


図 2.1-4 気候変動影響による世界 GDP への影響推計（出典：NGFS[6]）



- RFC1: 固有性が高く脅威に曝されるシステム（サンゴ礁、北極圏、山岳氷河等）
- RFC2: 極端な気象現象（熱波、豪雨、干ばつとそれに伴う山火事、沿岸域の氾濫等）
- RFC3: 影響の分布（ハザード、曝露、脆弱性の偏在により、特定の集団に不当に及ぶ影響）
- RFC4: 世界全体で総計した影響（金銭的損害、種の喪失等単一の指標に集約できるもの）
- RFC5: 大規模な特異現象（グリーンランドや西部南極の氷床崩壊、熱塩循環の減速等）

図 2.1-5 IPCC WG2 AR6 における気候変動影響被害評価（出典：IPCC[7]）

- また、同様に、仮に実質ゼロ排出を目指すとしたとしても、いつの時点までに正味ゼロ排出を目指すのが良いのかについては、費用便益分析からは算定することは事実上不可能である。すなわち、合理的な世界の排出削減経路を見出すことは不可能である。1.5℃目標や 2050 年カーボンニュートラル目標は、政治的に決定された、そうありたいという願望の目標であって、対策費用が極めて大きい状況でも実現が必須と考えるような目標ではないことは認識しておくべきである。
- 特に 2050 年やそれ以降においては、気候変動の科学、対応技術、社会情勢、政治情勢など、様々な不確実性が存在している。よって、長期の野心的なビジョ

ンを持ちながらも、不確実性をよく理解しながら、柔軟な対応をしていくことが重要と考えられる。経済産業省長期温暖化対策プラットフォーム報告書 [8]や第 5 次エネルギー基本計画 [9]でも、不確実性を認識した柔軟な対応（複線シナリオ的対応）の必要性が指摘されている。より高位の目的である「持続可能な発展」のためにも、野心的な目標・ビジョンを持ちながらも、柔軟な対応が必要である。

- 経済産業省長期温暖化対策プラットフォーム報告書 [8]では、最上位の目標（野心的なビジョン）として「持続可能な発展」を位置づけているが、これは妥当な目標と考えられる。一方、「持続可能な発展」は、貧困や飢餓撲滅などの目標との調和した対策が必要であり、高すぎる緩和費用（炭素価格）では、GHG の大幅排出削減につながったとしても、他目標の実現が困難になる可能性が高い。安価な対策技術を開発し、低い緩和費用であっても排出削減が進むような社会を実現することがリスク対応戦略上も必要。また現実にも高い炭素価格を世界全体で協調してつけることは不可能に近いとも考えられる。また、近年の国内での電力需給逼迫やロシア・ウクライナ情勢等による化石燃料価格の高騰は、改めて、エネルギー安全保障・安定供給、経済性の重要性を再認識させられる状況であり、S+3E のバランスの達成が重要であり、これは、SDGs の同時達成の必要性と同様の意味合いがあるものである。
- 累積 CO_2 排出量と全球平均気温上昇には線形の関係が見られる（図 2.1-6）。ゆえに、「持続可能な発展」を前提とした上で、気候変動対応の文脈においては、気温安定化のため、その時点で世界の CO_2 排出量のほぼゼロ排出が求められる。ただし、CO_2 排出量のほぼゼロ排出を実現する時点（気温安定化の時点）は、影響被害の大きさと対策の費用とを不断にチェックしながら見極めていくことが必要。

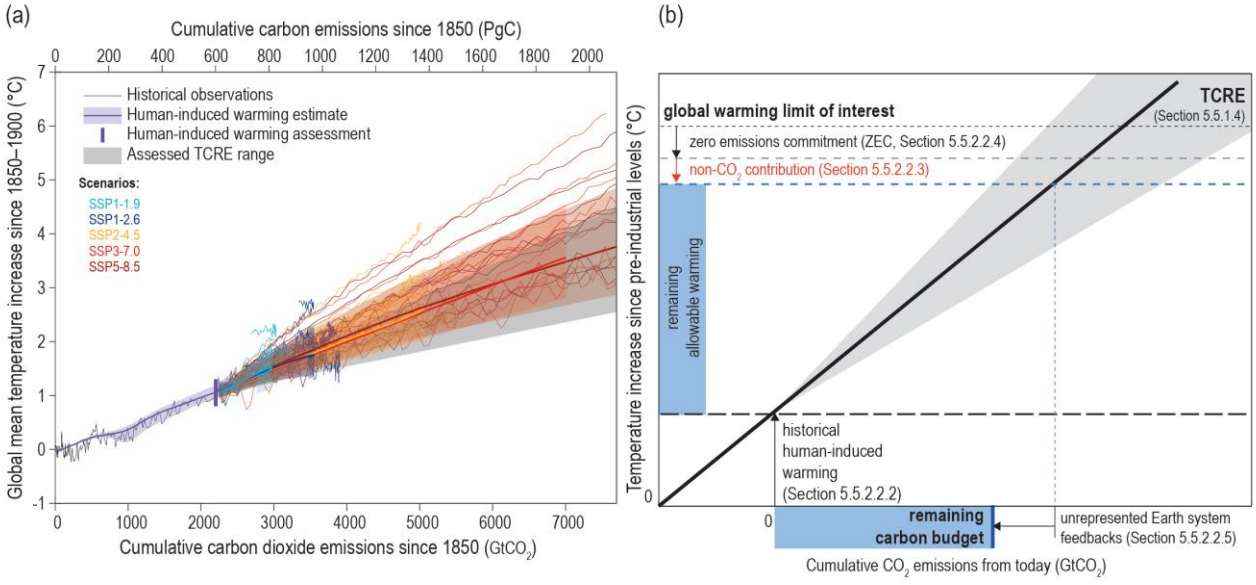


図 2.1-6 累積排出量と気温上昇の関係（出典：IPCC[7]）

- 不確実性が大きい中でのリスク対応が求められるため、様々な対策のオプションを有しておくことが重要と考えられる。IPCC 1.5℃特別報告書（SR15）[10]でも示されているように、1.5℃排出経路でも様々な経路、対策の可能性がある（P1～P4 で類型化された）。どれか一つの排出経路とそれに対応した技術ポートフォリオを前提とするのではなく、様々な不確実性に備え、複数のシナリオを念頭におきながら、リスク対応を行うことが必要と考えられる。第 6 次エネルギー基本計画[11]でも、2050 年カーボンニュートラルに向けて「あらゆる選択肢追求する」とされたが、第 7 次エネルギー基本計画[12]でも踏襲された。
- 気候変動影響が甚大なら、BECCS や DACCS、場合によって、SRM のような手段を使っても気温上昇抑制を図らなければならないかもしれず、オプションは有しておく必要がある。一方、気候変動影響に適応などで対応できるレベルであれば、BECCS や DACCS、場合によって、SRM などを大規模に使うことなく、適応で対応していくという複合的なリスク対応戦略が必要であろう。

【気候変動予測の不確実性】

- 気温上昇推計においてだけでも相当大きな不確実性あり。しかも、代表される平衡気候感度をとっても、不確実性は相当大きい。よって、仮に 2℃や 1.5℃目標など、気温目標を定めたとしても許容される世界排出量には大きな幅が生じる。更には、AR4[3]から AR5[2]に向けて、平衡気候感度は下限値が引き下げられたが、AR6[1]では気候感度の幅が縮まったが、それでも依然として不確実性が大きい状況は続いている。いずれにしても、不確実性の低減は簡単ではないと考えられ、不確実性を前提としたリスク対応戦略が求められる。
- また、過去数年間、気温上昇は急激であり、これまでの予測を超えるような変化も見られた。

【気候変動影響被害の相対化と適応の可能性】

- 気候変動影響被害は、社会経済的環境によって大きく異なることは多く、気候変動緩和のみならず、社会経済的環境の強化などが気候変動影響被害のリスク低減に重要なことも多い。
- 気候変動影響被害は、世界一様ではなく、地域的な偏在性が存在する。これは国際協調による緩和策を難しくする要因でもある。
- 過去、地球の気候は大きく変化してきた時期も多い。また、自然環境に対する脆弱性を、社会経済的環境を変化させ対応することで、小さくしてきた。一方で、逆に社会経済的環境の変化によって、自然環境を大きく改変してきた。気候変動影響被害を、過去の自然環境の改変と比較し、相対的にとらえることもリスク管理としては重要。
- 過去人類は、自然環境に適応してきたし、今後の気候変動に対しても適応できる余地は大きいとも考えられる。
- 厳しい緩和策をとったとしても、一定程度の気候変動は不可避であり、温暖化適応策は不可欠でまた効果的な場合もあると考えられる。現状では、「最新の

NDCs が完全に実施された場合には 2.1～2.8℃の範囲の上昇」（COP28 グローバル・ストックテイク決定文書）との見通しも示されている。適応策は、とりわけ途上国では経済開発と密接に関係しており、経済開発の文脈の中で実施することで小さな追加費用で適応策をとることができる場合や適応策によって気候変動がなくとも生じる被害を併せて低減でき、コベネフィットが生じる場合も多い。

【緩和費用の不確実性】

- 不確実性は、気候変動予測や影響被害だけに存在しているわけではなく、気候変動緩和費用にも付随している。
- CO_2 限界削減費用（炭素価格）は、IPCC AR5[13]では、430-530 ppm CO_2eq シナリオの場合（2℃目標相当）、2050 年では約 100～300 \$/tCO_2（25-75 パーセンタイル）、2100 年では約 1000～3000 \$/tCO_2、全シナリオでは 150～8000 \$/tCO_2 程度が推計。また、世界 GDP は 2050 年では 2～5%程度（25-75 パーセンタイル）、2100 年では 4～10%程度の損失と推計されている（図 2.1-7）。
- IPCC AR6[14]では、オーバーシュートがほぼ無い 1.5℃シナリオ（C1 カテゴリー）の場合には、2030 年では約 180～300 \$/tCO_2 程度（25-75%タイル）、2050 年では約 420～1000 \$/tCO_2 程度（25-75%タイル）と推計。世界 GDP は 2050 年では 2.7～4.1%程度（25-75 パーセンタイル）の損失と推計されている。なお、厳しい目標ほど、どういった技術までを想定しているか、社会経済の想定による差異などにより、推計される費用の幅は大きくなる傾向もある（図 2.1-8、図 2.1-9）。

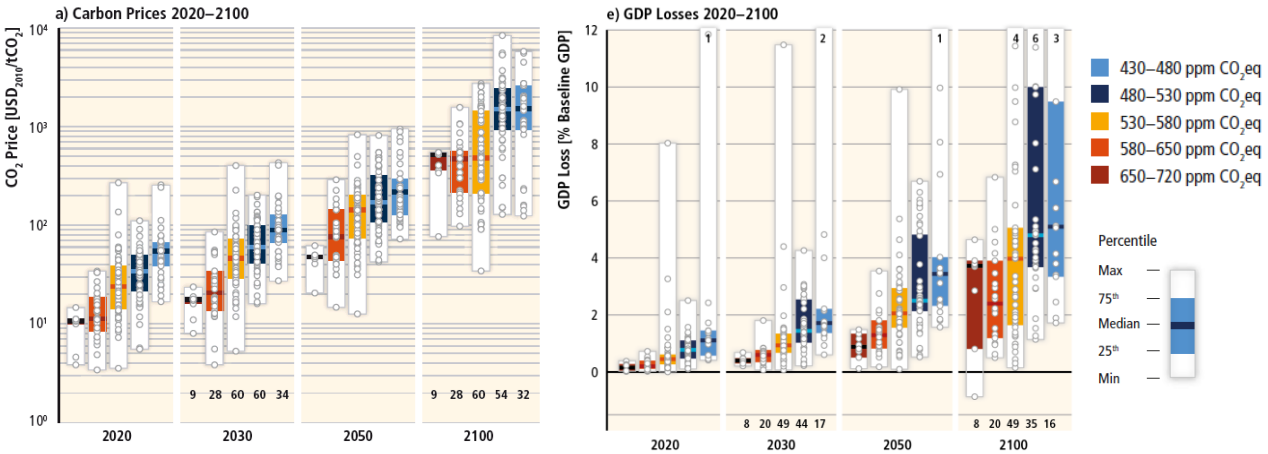


図 2.1-7 IPCC AR5 報告における濃度レベル別の世界の CO_2 限界削減費用と GDP ロス[13]

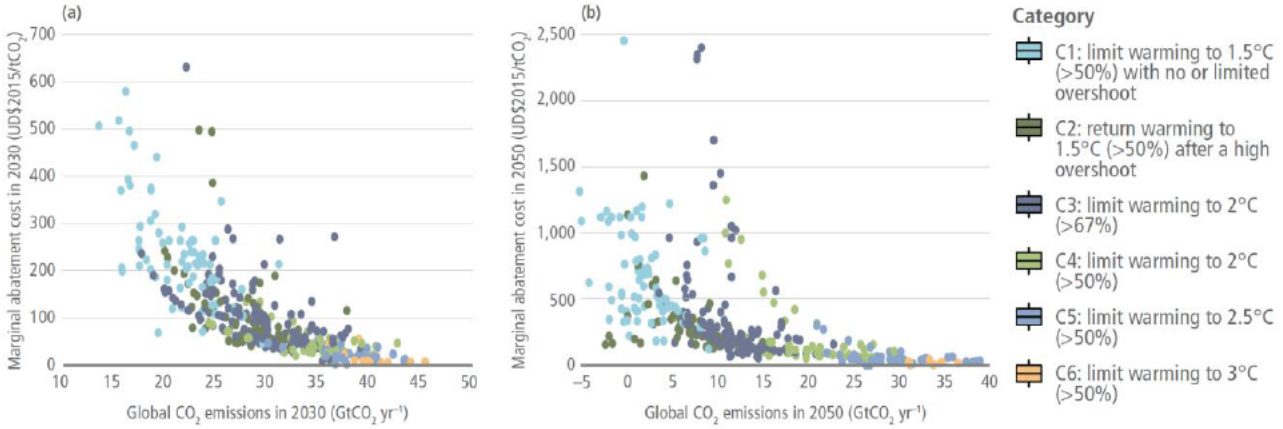


図 2.1-8 IPCC AR6 の報告における 2030 年と 2050 年の気温水準別の CO_2 限界削減費用 [14)]

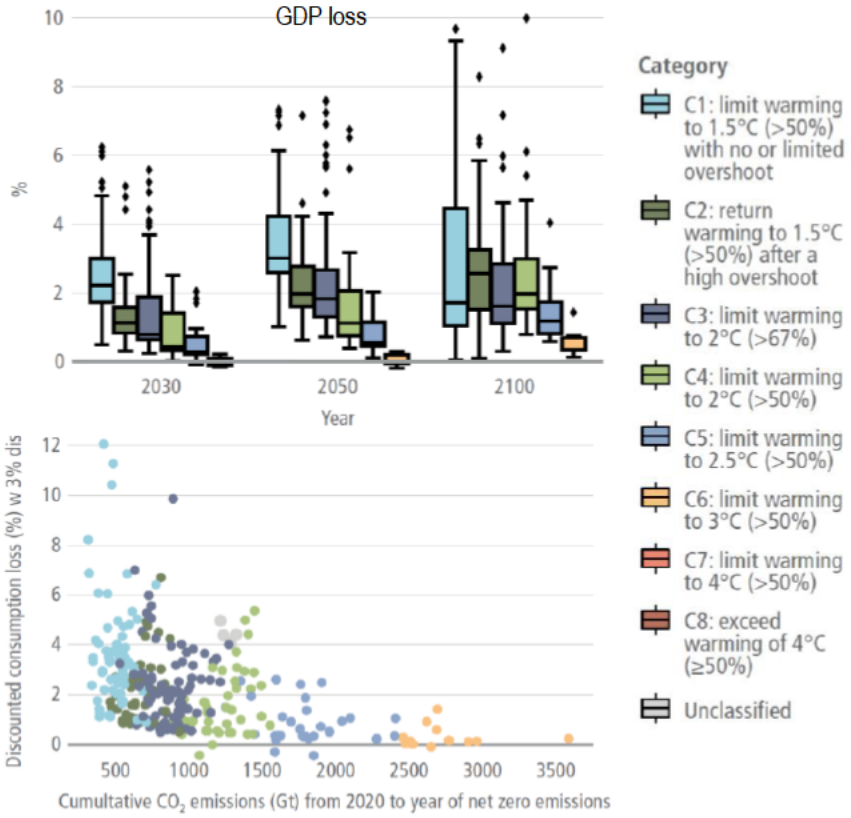


図 2.1-9 IPCC AR6 の報告における気温水準別の GDP ロス（上図）および消費ロス（下図、2020-2100 年の 3%/yr 割引率採用時の平均）[14)]

- 経済効率的な緩和費用の推計に大きな不確実性があるとともに、NDCs の排出削減目標でも見られるように各国間で限界削減費用に大きな差異があり、IPCC のシナリオ分析の多くで仮定されている、費用最小化の際の緩和費用よりも相当大きな費用となると推計される。
- 更に米国トランプ政権などに見られたように、政治的な不安定性もある。根本的に、気候変動問題は、排出削減費用はその実施主体の負担となるが、排出削

減に伴う気候変動影響低減の便益は広く世界全体で享受されるため、フリーライダーが生じやすい。また、排出削減意志のある政権であっても、NDCs の排出削減目標は意欲的であったとしても、三権分立の仕組み上、強力な気候変動政策をとれず、NDC を達成できず、事実上、フリーライダーになってしまう場合もあり得る。不安定な国際政治の中でも相応に機能する気候変動リスク対応戦略が望まれる。これらも考えると、世界で調和した高い炭素価格を形成することは現実には不可能に近いと考えられる。安価な炭素価格でも排出削減が進むような対応となることが重要である。

- 各国政府の対策は、費用効果的な対策ばかりがとられるわけではなく、非効率な政策・対策も多い。また、技術普及における社会的受容の制約、エネルギー安全保障など、気候変動対策以外の目的との調和などによっても、気候変動緩和費用は大きく上昇し得る。
- 結局、実際に費やされる費用は、推計費用の数倍もしくは数十倍になる可能性もあり、イノベーションの役割は大きい。
- 将来の社会経済の違いによって潜在的な排出量の見通しには大きな不確実性あり。また、それに伴って、2℃目標等の一定の排出量水準を実現しようとしても、それに必要な費用は将来の社会経済シナリオによって大きく異なる可能性あり。厳格な気温目標や排出削減の目標を掲げても、費用は大きく異なってくるため、実現の現実性は大きくことなる。よって、ある程度柔軟な気温目標や排出削減目標とせざるを得ないのではないか。

【気候工学的手法の位置づけ】

- 気候工学的手法による対策は、気候変動影響被害の fat tail に対する対応として、有効に働き得るとの見方あり。
- CCS 付きバイオエネルギー（BECCS）は、ネガティブ排出が可能となるという利点がある。現実的には、すべての部門で CO_2 排出ゼロを実現することは難しいと考えられるため、BECCS のようにネガティブ排出を実現できる技術は有効と考えられる。しかしながら、BECCS は、コストの問題に加えて、生態系への影響や規模の問題などがあり、現実的には大きな役割を担うことも困難と考えられる。正味ゼロ排出を実現するために、BECCS は一定の役割を担う可能性はあるものの、省エネルギー、脱炭素化技術の進展は重要と考えられる。
- CO_2 直接空気回収（DAC）も、ネガティブ排出が可能となるという利点がある。現時点では費用は相当高いと見られるし、CCS に比べ、大気中の CO_2 からの回収となるため、濃度が小さい CO_2 を回収することにもなり、CCS よりも不利になる。一方、CO_2 回収場所をあまり選ばないため、エネルギーが安価に供給可能で、CO_2 貯留をしやすい場所での設置が可能となるなどの利点がある。温暖化影響被害が仮に甚大であるとわかったとき、それを回避するためのバックストップ技術としての役割を果たすおともあり得る（温暖化影響被害の fat tail を強く意識した排出削減としなくてもいざというときに DAC というオプショ

ンで対応できる可能性があるなら、排出削減の柔軟性が増す)。なお、BECCS よりも生態系の影響などは小さいと考えられる。

- 太陽放射管理（SRM）は、気候変動影響被害の fat tail への対応オプションとして、DAC 以上に大きな可能性がある一方、副作用が存在する他、海洋酸性化には効かないなどの問題点もある。ただし、少なくとも甚大な温暖化影響被害に備えておく意味で、少なくも研究だけは行っておくことも気候変動リスク対応戦略として意義がある可能性もある。

【イノベーションの役割】

- 過去、技術は急速な進展を遂げてきており、今後も期待できる。
- 多くの研究では、大幅な排出削減には大きなコストを要するとされており、そのため、大幅な排出削減にはイノベーションによるコスト低減が不可欠と考えられる。一方、R&D の成否は不透明であり、それがすべて成功することを前提とした対応戦略も不適切と考えられる。
- 民間の R&D を活性化させるには、経済環境が良好なことが必要（より活発にイノベーションが誘発されるには様々な要素技術の進展が必要で、隣接可能性が高まることで「新結合」が起こる可能性も高まり、地球温暖化対策のイノベーションも起こりやすくなると考えられる。)。
- 特に近年、IT, AI、バイオ技術、材料技術など、デジタル技術の進展をはじめ、様々な技術イノベーションが見られる。これらは、直接的には CO_2 排出削減技術ではないものの、その波及から、経済自律的に、低エネルギー需要を誘発し、大幅な CO_2 排出削減につながる可能性あり。ただし、これら基礎的な技術（汎用目的技術）は、CO_2 排出削減制約を強化することにより誘発できるような技術イノベーションではないことに留意が必要。

【金融の役割】

- CN の実現に向けて、莫大な投資が必要となることから、金融セクターの役割も大きい。
- また、過去、数年、CN や大幅排出削減に向けたムーブメントは、情報開示要請やクライメイトファイナンスなど、金融セクターから誘導された面も大きい。
- 最近では、サステナビリティ基準委員会（SSBJ）は、International Sustainability Standards Board（International Sustainability Standards Board）基準ベースで、Scope 1～3 の排出量開示を 2027 年から義務付けるとした。
- しかしながら、ここ 1 年ほどで大きな変化も生じてきている。米国における反トラスト法違反での訴訟問題が主たるもので、米国金融機関のみならず、世界の金融機関の「ネットゼロ・バンキング・アライアンス（NZBA)」からの離脱が相次いでいる。トランプ大統領の誕生も伴って、従来のように金融セクターが強いドライバーになり得るのかについて不確実性が増している。

【気候変動緩和とコベネフィット、それを踏まえた戦略のあり方】

- 国連は 2015 年に 17 の目標を掲げた Sustainable Development Goals (SDGs) を策定。気候変動はその目標の一つだが、SDGs の他の目標を含めた全体として調和のとれた持続可能な発展を目指すことが必要。
- 気候変動緩和と、貧困・飢餓の撲滅、土地利用・食料アクセス、水資源アクセス、大気汚染物質（PM2.5 など）・健康影響、鉱物資源利用、エネルギー安全保障等とのトレードオフもしくはコベネフィットの関係性があり、そのバランスをとった気候変動対応戦略が必要。

【気候変動リスクへの認識】

- 気候変動影響のリスク認知は、国間で大きな差異があり（図 2.1-10）[15]、米国内に限っても、特に共和党支持者と民主党支持者では見方が大きく異なっている（図 2.1-11）[16]。その差は益々広がっている。2023 年 1 月実施の調査では、米国では 21 課題中 17 位であり、しかも民主党支持者と共和党支持しでは、最も見方の差異が大きい課題となっており、共和党支持者に限れば、最下位から 2 番目である。

Most common response　Least common response

	Global climate change	The spread of false information online	Cyberattacks from other countries	The condition of the global economy	The spread of infectious diseases
Canada	65%	68%	63%	58%	57%
U.S.	54	70	71	63	57
Belgium	75	68	68	60	61
France	81	74	75	63	68
Germany	73	75	69	50	49
Greece	86	79	67	93	82
Hungary	80	63	56	72	73
Italy	82	77	67	56	69
Netherlands	77	75	75	53	60
Poland	68	65	65	60	78
Spain	78	70	66	76	72
Sweden	70	64	68	37	44
UK	75	72	65	66	61
Israel	47	42	64	50	67
Australia	71	66	66	65	61
Japan	82	77	88	74	82
Malaysia	44	65	52	49	60
Singapore	57	57	61	61	61
South Korea	82	82	84	80	79
19-COUNTRY MEDIAN	**75**	**70**	**67**	**61**	**61**

Source: Spring 2022 Global Attitudes Survey. Q10a-e.
"Climate Change Remains Top Global Threat Across 19-Country Survey"

PEW RESEARCH CENTER

図 2.1-10 主要国別の気候変動問題に対する他問題との相対的な認識の違い [15]



図 2.1-11 米国の気候変動問題に対する認識（民主党と共和党支持層での差異を含む）16)

【科学的な評価を超えた安心感への対応】

- 科学だけでは決めきれない問題あり。リスクを総合的に判断しようとすれば、価値判断を避けることはできず、戦略立案においてこれをどう考えるべきか。気候変動への恐れ、安心できない、といった主観的な反応に配慮したリスク対応戦略を考えるべき。一方で、一般的な市民は、気候変動問題のような複雑なリスクの全体を総合的に認識することは困難であり、一般的な市民の部分的なリスク認知を重視し過ぎれば、適切な長期的リスク管理とはならない可能性もある。
- 過去排出してきた先進国の責任論や倫理的な側面からの主張である「気候正義（Climate Justice）」といった国際的な動向も存在している。ただし、「正義」は見方によって多様であり、何が「正義」かを判断するのは難しいとの意見がある。

気候変動対応においては、このような様々な要素を総合的に考えて、総合的なリスク管理を進めることが重要である。

参考文献（第 2.1 節に関するもの）

1) IPCC WG1, Sixth Assessment Rpoert, 2021

2) IPCC WG1, Fifth Assessment Report, 2013
3) IPCC WG1, Fourth Assessment Report, 2007
4) RITE、FY2022 ALPS 報告書 (2023)
5) NGFS, 2021. https://www.ngfs.net/en/publications-and-statistics/publications/ngfs-climate-scenarios-central-banks-and-supervisors-0
6) NGFS, 2022. https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/ngfs_climate_scenarios_for_central_banks_and_supervisors_.pdf.pdf
7) IPCC WG2, Sixth Assessment Rpoert, 2022
8) 経済産業省、長期地球温暖化対策プラットフォーム報告書、2017
9) 経済産業省、第 5 次エネルギー基本計画、2018
10) IPCC, Special Report on Global warming of 1.5 ℃ (SR15), 2018
11) 経済産業省、第 6 次エネルギー基本計画、2021
12) 経済産業省、第 7 次エネルギー基本計画、2025
13) IPCC WG3, Fifth Assessment Report, 2014
14) IPCC WG3, Sixth Assessment Report, 2022
15) Pew Research Center (2022) https://www.pewresearch.org/global/2022/08/31/climate-change-remains-top-global-threat-across-19-country-survey/
16) Pew Research Center (2023) https://www.pewresearch.org/politics/2023/02/06/economy-remains-the-publics-top-policy-priority-covid-19-concerns-decline-again/

2.2 持続可能な発展とのシナジー・トレードオフ

地球の平均気温が一時的ではあるが産業革命前比 1.5℃を上回り、気象関連災害が顕在化してきている。気候変動とその影響を軽減するため早急な対応が必要なことは言うまでもないが、同時に、人類は貧困、飢餓、健康、教育、経済成長、インフラ整備、陸域・海域保全等、人類の発展にかかる種々の課題に直面している。2015 年に採択された国連の持続可能な開発目標（SDGs）[1)]は、気候変動対応を含む 17 の課題を、2030 年までに達成すべき目標として掲げている。短中期、そして長期的な気候変動対応は、人類を取り巻く各種課題の解決に資するべく、持続可能な文脈で進めることが重要である。

気候変動対応策とその他持続可能な発展との関係は、IPCC でもしばしば議論され、例えば、IPCC WG3 第 6 次評価報告書（AR6）[2)]では、各部門で言及された緩和策について、SDGs との関係性を図 2.2-1 のように定性的にまとめている。これによると、複数の緩和策で、多数の SDGs とシナジー関係が期待される。但し、厳密にはシナジーやトレードオフの関係は、状況と規模によって異なる。また、文献が限られ評価できなかった項目も少なくなく、引き続きの調査・検討が必要といえる。

本節ではまず前半に、IPCC AR6 以降、状況や発展段階が異なる国々における緩和策について衡平性、実施、コストの観点から課題を調査し、特に SDGs とのトレードオフについてレビューした文献より主な指摘事項を記載する。SDGs とトレードオフとなりうる緩和策として、AR6までも指摘された植林やバイオエネルギー生産の他に、電気自動車（EVs）、都市計画、産業部門の再エネ電化、さらには部門横断的なデジタル化についても留意すべきトレードオフがあげられている。なお、EVs や再生可能エネルギーは、カーボンニュートラル（CN）に向けたエネルギーシステムの移行において重要な役割を担うと期待される一方、リチウム、ニッケル、コバルト等重要鉱物（critical minerals: CMs）の需要量を急拡大させ、持続的な資源利用や責任ある消費・生産とのトレードオフを危惧する文献も少なくない。そこで本節後半では、複数の CN シナリオに対し、重要鉱物の需要量と潜在的供給不足リスクについて分析した結果を基に、持続可能な発展の文脈でのエネルギー技術選択への示唆を記す。

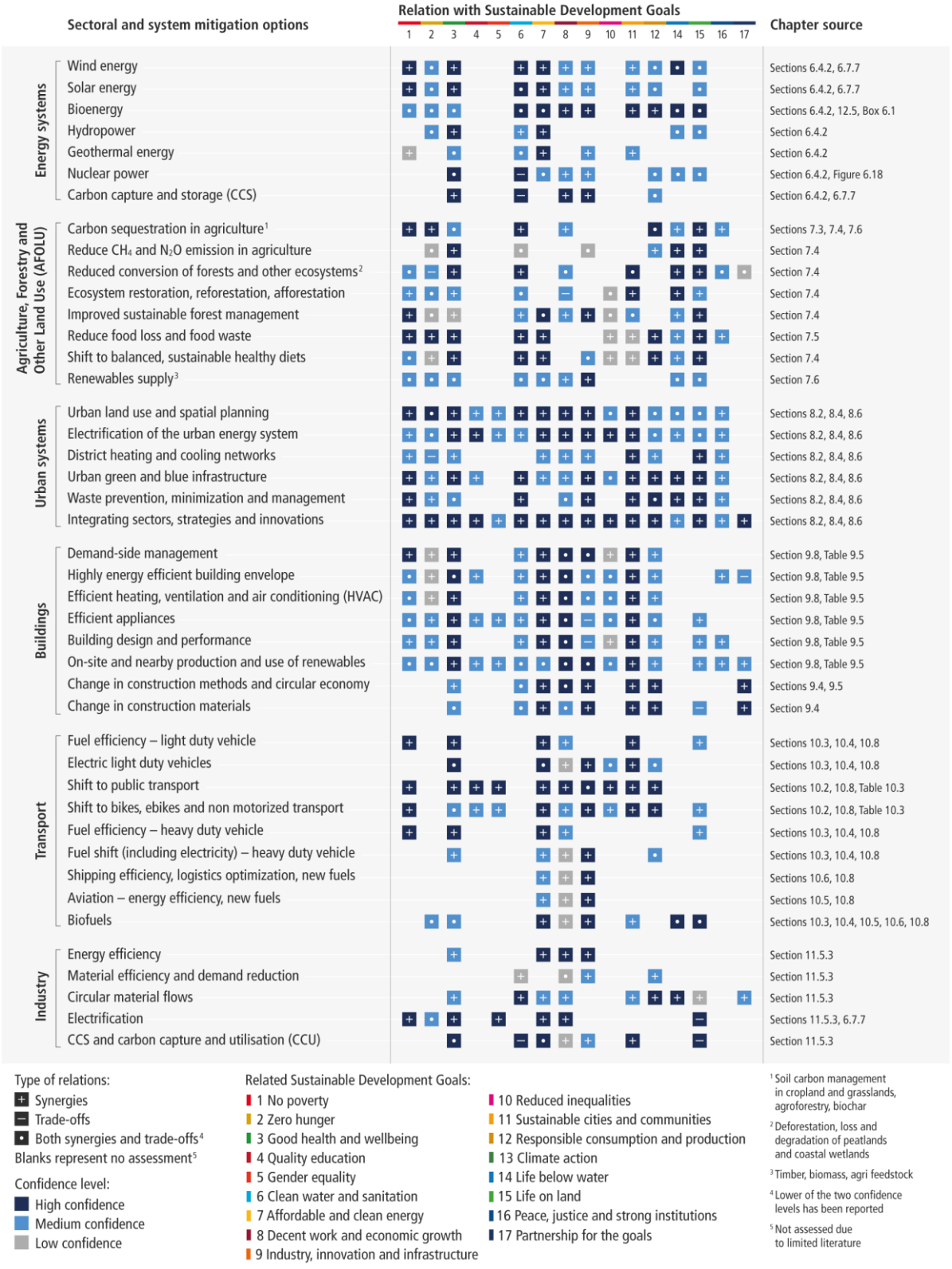


図 2.2-1 緩和策と SDGs とのシナジーとトレードオフの例（AR6 Figure 17.1、Figure SPM.8）

2.2.1 気候変動緩和策と持続可能な発展との関係性

Halsnæs ら [3]は、パリ協定の長期気温目標を達成するために必要な緩和行動は、持続可能な開発と調和したものでなければならないという観点から、IPCC WG3 AR6 で評価された部門別緩和策のうち、トレードオフの可能性が指摘されたものを対象に文献レビューを行った。そこでは、状況や発展段階が異なる国々における、潜在的な緩和策実施について、衡平性、コスト、資金面での課題例をあげ、トレードオフとなる SDGs を記している。レビューの結果、以下の部門の各種対策に、SDGs とトレードオフがあると述べている。

① 農業・林業・その他の土地利用部門

i) 植林

植林は、森林コミュニティや村民の収入（SDG1)、地域土壌質の改善（SDG2)、大気清浄化による健康便益（SDG3)、水の質と利用可能性の改善（SDG6)、周辺都市における潜在的な冷却効果（SDG11)、水中生物の避難場所や食料の供給源となる（SDG14)、生物多様性に寄与する（SDG15）等、多くの SDGs とのシナジーが見込まれる一方、農地との競合を増大させ、食料価格上昇を招き、食料安全保障（SDGs2）に影響を与えるといったトレードオフがある。このようなシナジーとトレードオフは、使用する樹種、実施規模・地域によって異なる（表 2.2.1-1)。

具体例として、韓国、中国、モンゴル、カザフスタンにおける植林プロジェクトロジェクトは、地域の低所得者や経済難民の受け入れ、教育センターの開設、林業関連の教育や研修等提供により、地域の社会経済的レジリエンスを向上に寄与したとの調査がある。一方、多くの地域で、植林が長期的で不確実性を伴う投資であることによる課題も見えてきている。ポーランドでは、10 ヘクタール未満の低収量農地での植林に財政的インセンティブを導入したが、必ずしも植林は進まない傾向がある。当然であるが、農民は不動産市場等他への投資と収益性を比べ、植林に有があると判断しない限り進まない。ガーナの植林プロジェクトは、クリーン開発メカニズム（CDM）の対象外であったため、ホスト・コミュニティの社会的・経済的利益がほとんどゼロであったとも指摘されている。植林の世界的展開には、プロジェクトにホスト・コミュニティが参加し知識を蓄積することが推奨されている。

ii) バイオエネルギー生産

アフリカとアジアの 15 カ国を対象とした調査・分析によると、バイオエネルギーへの投資は、経済成長と金融開発を促進する。そのような知見を基に、バイオエネルギー投資を支援する新たな政策を策定すべきという文献もある。但し、地域毎の課題と戦略が必要といえる。例えば、インドは国土の 60%が農業に利用されており、肥料や家畜飼料となる一次残渣の他に、発電用バイオマス原料となる二次残渣が大量に発生する。但し、バイオマスの輸送コストは貧しい農家には高すぎ、障壁となっている。政府によるバイオマスの輸送機器や市場、資金モデルを策定すべきとの指摘がある。なお、インド政府は地元のバイオマスを利用したバイオマス発電所を推進しており、

また、地方政府にはサトウキビ搾汁残渣であるバガスを用いたコージェネレーションプロジェクトを進めているところもある。

表 2.2.1-1 植林、バイオエネルギーと SDGs との関係

Aspects	Afforestation	Biomass production
Equity	Host communities may not get any social and economic benefits (Peprah 2017)	If local food prices increase, it can lead to food insecurity for the marginalised, esp. women (Beuchelt 2016) Commercial biomass activities are often male centric, so income increase may not benefit women (Beuchelt 2016)
Implementation	Farmers do not always prefer investing in afforestation (Źróbek-Różańska et al. 2014) Need involvement of forest communities (including fund transfer schemes), creating a knowledge pool from existing projects (Dasgupta and Srikanth 2021) Need international/national financing	Farmers perspectives: lack of profitability and lack of assurance of buyers, no organised biomass transport system to buyers (Roszkowska and Szubska-Włodarczyk 2022) Complementary measures—forest and water protection schemes, agricultural intensification and improved fertilisation efficiency helps in reducing trade-offs (Humpenöder et al. 2018) Creating new energy policies to support biomass investment (Kevser et al. 2022)
Costs	Depends on context, varies with scale, period and location	Increase in land prices leading to increased investment cost of crop establishment and biomass transportation cost (Choi et al. 2019) Cost of transportation is too high for poor farmers (Singh et al. 2020; Kumar et al. 2015)
SDGs (trade-offs are indicated)	SDG 2: large-scale/massive afforestation will increase competition with agricultural land, leading to increased food prices affecting food security (Kreidenweis et al. 2016)	SDGs 1, 2 and 15: massive scale implementation, and without considering local circumstances, can lead to competition with land resources and can have an adverse impact on food security (increasing food prices), biodiversity and livelihoods (Humpenöder et al. 2018; IPCC 2022a, b)

② 運輸部門

i) 電気自動車

EV は、陸上運輸部門排出削減の主要策であり、複数の研究が都市部の大気汚染低減（SDG3 健康と福祉）、EV のサプライチェーンやインフラ部門で雇用創出（SDG8 働きがいと経済成長）、石油の輸入依存度が高い地域のエネルギー安全保障（SDG7 手頃でクリーンなエネルギー）に寄与するとしている。

一方で、EV の普及が進んでいる米国の都市では、EV の初期費用の高さ、航続距離への不安、充電ステーション不足が主な課題となっている。また、農村部は都市部に比べ充電インフラが少ない、長距離移動を要することが多く航続不安が大きい等、都市と農村との格差を生んでいるとの指摘もある。EV 普及が序盤にあたるインドやネパールでは、EV 市場創出に向けた政府の取り組みがあるものの、潜在的 EV 購入者にとって、電池の性能・安全性、家庭内充電における電力利用の信頼性・品質等が、重大な懸念事項となっている。

トレードオフとしては表 2.2.1-2 に示すように、EV は初期費用が高いものの運用費用が低いことから、EV 使用者は従来車使用者に比べ移動の頻度が多く、距離が長くなる傾向があり、結果的にエネルギー消費低減や渋滞緩和に寄与せず、SDG11（産業と技術革新・インフラ）に反するとの指摘がある。また、EV 電池に必要な重要鉱物（リチウム、ニッケル、コバルト等）の利用増大や、電池の不適切な廃棄にかかる問題は、SDG12（責任ある消費と生産）とトレードオフ関係にある、としている。

ii) 公共交通

公共交通は気候変動緩和のための重要な戦略であり、公共交通サービスの衡平な配分は SDG11（産業と技術革新・インフラ）の一つでもある。

一方、トレードオフとして、韓国ソウルの地下鉄を例に、地下鉄沿線は交通の便が良く低コスト住宅があることから比較的低所得層が住む一方、高所得層は地下鉄から離れたより環境の良い地域を好んで住む。その結果、経済格差による空間的分断が強まった、と指摘している。

表 2.2.1-2 EV、公共交通と SDGs との関係

Aspects	Electric vehicles	Public transport
Equity	EVs upfront costs and charging infrastructure (not equitably dispersed) (Romero-Lankao et al. 2022; Sheldon 2022) Jobs, health and emission related issues in lithium- and cobalt-rich countries (Dall-Orsoletta et al. 2022) Export–import inequality (Dall-Orsoletta et al. 2022) Rural–urban divide (Dall-Orsoletta et al. 2022) Incentives for electric vehicles do not incorporate equity in their design (Hardman et al. 2021)	High fares or unequal access for some sections of society (Ghosh et al. 2022; Wang et al. 2022; Gössling 2016) Systems favouring private modes can result in excluding certain populations from equal access to mobility (Gössling 2016) Can lead to an increase in spatial division across economic lines (Seo and Nam 2019)
Implementation	Battery disposal–recycling is needed (Dall-Orsoletta et al. 2022) Equity issue can be solved by user-centric strategies (Romero-Lankao et al. 2022) Policymakers may provide purchase-based incentives (Singh-Patyal et al. 2021) Investment in infrastructure is needed (Jaramillo et al. 2022)	Need to incorporate equity dimension in the transport policy framework to account for differentiated transport needs (Ghosh et al. 2022; Roy et al. 2021) Public transportation policies should consider the residential location patterns of different socioeconomic classes (Gössling 2016)
Costs	High upfront cost for buyers New/repurposed infrastructure cost	Low to medium (depends on the system and the capacity)
SDGs (trade-offs are indicated)	SDG 11: EVs still consume a considerable amount of energy and contribute to other external effects such as congestion (Langbroek et al. 2017) SDG 12: material resources and disposal issues for EV batteries (Asokan et al. 2023)	SDG 11: trade-off between public transportation accessibility and housing size in Seoul, Korea (Seo and Nam 2019)

③ 都市活動

i) 都市計画、緑地

持続可能な都市と居住地は、気候の緩和及び適応において重要な役割を果たす必要がある。

公共交通と一体化したコンパクトな都市開発は、SDG3（健康と福祉）と SDG11（産業と技術革新・インフラ）とシナジーがある一方で、混雑、大気汚染、騒音等、地域の環境問題悪化といったトレードオフの可能性が考えられる（表 2.2.1-3）。

都市の緑地インフラは、健康や適応とのシナジーが報告される一方で、低所得層は近隣で住宅を購入できる可能性が低く、アクセスに不公平の課題がある。また、アフリカ、ジンバブエにおける都市農業は、低所得層の所得や食料アクセス向上に寄与する可能性があるものの、管理が不適切の場合、大気汚染や化学薬品による環境汚染をまねくとしている。

表 2.2.1-3 都市の緑地、計画と SDGs との関係

Table 3 Implications of urban actions (green spaces and urban planning) on SDGs, costs, equity and implementation

Aspect	Green spaces	Urban planning
Equity	Affordability of housing in cities can be influenced by green spaces (Sharifi 2020)	Equity can be a concern if not explicitly addressed. Weak groups can be displaced (Mohtat and Khirfan 2021)
Implementation	Barriers related to finance, accessibility and communication (Haase 2022) Implementation can be hindered due to constraints on inputs to urban farming (Chaminuka et al. 2021)	Land use strategies for mitigation and adaptation can be in conflict if they are not integrated (Xu et al. 2019) Governance aspects need to be integrated in studies in order to capture synergies and avoid trade-offs across several policy domains (Kilkis 2022)
Costs	Costs will depend on land availability (Chaminuka et al. 2021)	Low to medium costs (Xu et al. 2019)
SDGs (trade-offs are indicated)	SDG 3, 11: synergies with income generation and food access of urban farming, but trade-offs with local pollution and safety (Chaminuka et al. 2021)	SDG 3, 11: compact cities can imply increased air pollution, stress, noise and safety issues (Xu et al. 2019)

④ 産業部門

i) 再生可能エネルギーによる電化

産業は、世界的に非常に大きな GHG 排出源であり、大幅な排出削減には、電化、炭素貯蔵、材料リサイクル、エネルギー効率、CCS 等が必要である。このうち、再エネによる電化について、以下のようなトレードオフが指摘されている。

米国や欧州の研究によると、産業部門は、再生エネによる電化の余地が多い。近年の再エネルシステムは必ずしも高価ではなくなってきているものの、既存の化石燃料をベースとした生産システムと比較すると高価な点が、主たるトレードオフ要素といえる。インドの研究でも、再生可能エネをベースとしたシステムは投資コストが高く、特に小規模産業は資本へのアクセス不足が障壁となっている（表 2.2.1-4）。

表 2.2.1-4 再生可能エネルギーによる産業部門電化と SDGs との関係

Aspect	Electrification in industry with renewable energy
Equity	Access to finance can be limited in both high- and low-income countries, which can exclude some industries from electrification (Wei et al. 2019; Pal and Hall 2021)
Implementation	Significant barriers are faced for electrification of industry including costs and risk aversion of the industry towards new technologies. Other key barriers are heterogeneity of sectors and missing regulatory policies. The barriers exist in both high- and low-income countries (Wei et al. 2019; Pal and Hall 2021; Bataille 2020)
Costs	High costs associated with transformation from other energy systems to electrification based on study for EU and US (Wei et al. 2019) Electrification with renewable energy is costly compared with fossil fuel-based systems in some countries, e.g. India (Pal and Hall 2021) Electrification requires investments in several parts of the production system and can, therefore, be expensive (Wei et al. 2019; Pal and Hall 2021)
SDGs (trade-offs are indicated)	Many synergies are associated with renewable-based electricity, but costs are a major trade-off (Wei et al. 2019)

⑤ 部門横断

i) デジタル化

デジタル化、循環型経済、シェアリングエコノミーは、持続可能性に影響を与える重要なトレンドであり、中長期的にも注目される。デジタル化はサービス改善に寄与

し、様々な部門の SDGs 達成を支援すると期待される。例えば、オープンソースツールを介した情報提供は、地域の意思決定に役立つ。一方で、デジタル化による気候変動緩和への貢献は限られるとの見方がある。現在、世界の CO_2 排出量の 0.3%はデータセンターによるものであり、個人用デバイス、電話網、テレビを含む情報通信技術全体では、世界排出量の 2%以上を占めるとの推計がある。さらに、サービスへのアクセス向上に伴うエネルギー消費増加という間接的効果も考えられる。また、電子廃棄物、資源乱開発、生物多様性への悪影響により、SDG3、SDG13、SDG12 とトレードオフの関係が指摘されている（表 2.2.1-5）。

最近の世界的評価では、衡平性、特に後発開発途上国におけるデジタル技術へのアクセスの低さも課題としている。その上で、デジタルトランスフォーメーションを成功させるためには、繁栄、社会的包摂、環境の持続可能性、雇用の保護、優れたガバナンスが必要としている。

表 2.2.1-5 デジタル化と SDGs との関係

Aspect	Digitalisation
Equity	Unequal internet access for countries at different income levels and for different household income levels, can imply that digitalisation excludes some groups from services and markets (IIASA 2019)
Implementation	Structural obstacles need to be acknowledged and adequately managed (Pérez-Martínez et al. 2023) Ensuring responsible digitalisation through design, access and system complexity (Metta et al. 2022) International cooperation to avoid degradation of resources; appropriate choice of computing architecture and design and management of institutions (Creutzig et al. 2022)
Costs	High costs of implementing wide access to the internet (IIASA 2019)
SDGs (trade-offs are indicated)	SDG 3: trade-off between digitalisation and air quality emissions (Pérez-Martínez et al. 2023) SDG 13: energy-related CO_2 emissions (Jones 2018) SDG 12: waste generation (Pérez-Martínez et al. 2023) SDGs 7 and 8: increase in energy consumption as a result of direct impacts as well as through economic growth (Lange et al. 2020)

このように、気候変動対策と SDGs に関する調査・文献は増加している。但し、地域の特徴や課題は多様かつ複雑である様子が改めて認識される。気候変動対策を世界的実施につなげるためにも、各地域の文脈に沿って緩和策のコスト、資金、インフラ、技術アクセス、衡平性等を吟味し、戦略立案に資することが重要と考えられる。

2.2.2 カーボンニュートラルに向けた重要鉱物の需要量と潜在的供給不足の分析

(1) 背景と目的

カーボンニュートラル（CN）の達成に向け、世界 GHG 排出量の約 65%を占めるエネルギーの低炭素・脱炭素化は重要であり、再生可能エネルギー、水素・合成燃料、住宅・建築物のエネルギー消費性能、電動車等、各種クリーンエネルギー技術（clean energy technologies: CETs）の導入・促進が検討されている。一方、CETs の中には、シリコン、ニッケル、リチウム、コバルト等、重要鉱物（critical minerals: CMs）と呼ばれる素材が必要なものもあり、CETs の急速な導入拡大は、CMs の需要増大、ひいては調達困難をまねき CN 社会への移行のリスクとなる懸念も生じている。

そのような背景の下、昨年度はCETsに関する重要鉱物について動向と課題を調査、整理した[14]。すなわち、

- 重要鉱物の採掘や素材生産は世界の一部地域に依存している。
- 採掘や素材生産においては人権侵害や暴力、環境汚染等の指摘もあり、供給の維持・拡大には責任ある対応が求められている。
- 市場が未成熟で価格が変動しやすい側面がある。
- そのような状況下で、安定的な調達に資するべく、EU の重要原材料法案（Critical Raw Materials Act: CRMA）、米国バイデン政権下でのインフレ抑制法(Inflation Reduction Act: IRA)等、鉱物の域内・国内供給増大に言及する政策が複数策定されている。
- CN に向けた重要鉱物需要量シナリオとしては、G7「重要鉱物セキュリティのための 5 ポイントプラン」のポイント①長期的な需給予測、に携わる国際エネルギー機関（IEA）による Net Zero Emissions by 2050（NZE）シナリオがしばしば引用される。但し、CN シナリオは他にも多数考えられる。RITE の DNE21+モデルによる複数のトランジションロードマップについて、太陽光、風力、原子力発電、及び EV 用蓄電池のみであるが鉱物需要量を推計したところ、シナリオ間で大きな差が算定される。

今年度は、その他の低炭素発電、変動性再エネ（VRE: Variable Renewable Energy）のの導入に伴い増大すると見込まれる定置用蓄電池、水電解水素製造等についても鉱物需要量を推計した。さらに CETs 以外の用途用も合わせた総需要量を、専門機関による供給容量予測と比較し、各シナリオの潜在的供給不足リスクを検討した。以下ではその主要な結果と、重要鉱物の需要量と供給容量のバランスの観点からの、エネルギー技術選択に関する示唆について記す。

(2) 推計方法

① CN シナリオ

CN シナリオはパリ協定の 2°C、1.5°C 目標に相当し、EV と太陽光・風力発電技術のコストレベルが異なる 6 つである（表 2.2.2-1）。このうち 2°C_LcEV-LcRE、1.5°C_LcEV-LcRE シナリオは、それぞれ RITE トランジションロードマップ [5]の Orderly 2°C、Orderly 1.5°C に相当し、EV、太陽光・風力発電（以下文献 5)に準拠し「再エネ」と記す）技術のコストが順調に低減するシナリオである。これに加え、EV のコスト低減が比較的緩慢な 2°C/1.5°C_McEV-LcRE シナリオ、さらに再エネもコスト低減が緩慢な 2°C/1.5°C_McEV-McRE シナリオを設定した。これらは、例えば米国の新トランプ政権が IRA を見直したように、政策支援の変更、あるいは社会・地理的な事情により、コスト低減がそれほど進まない可能性も鑑みて設定した。なお、CO_2 除去（Carbon Dioxide Removal: CDR）の利用可能性、政策の地域差等は、解釈を容易にするため、2°C シナリオは Orderly 2°C と、1.5°C シナリオは Orderly 1.5°C と同じとした。

表 2.2.2-1 CN 及び Reference シナリオの想定

シナリオ	気候変動緩和レベル*1	技術のコストレベル	
		EV*2	再エネ*3
Reference	特段の排出削減無	Medium cost	Medium cost
2°C_McEV-McRE	2°C (>66%)	Medium cost	Medium cost
2°C_McEV-LcRE		Medium cost	Low cost
2°C_LcEV-LcRE【Orderly 2°C】		Low cost	Low cost
1.5°C_McEV-McRE	1.5°C (>50%) オーバーシュート無、または限定的	Medium cost	Medium cost
1.5°C_McEV-LcRE		Medium cost	Low cost
1.5°C_LcEV-LcRE【Orderly 1.5°C】		Low cost	Low cost

*1 Reference: 各国 NDCs を考慮せず。2°C、1.5°C シナリオの GHG 排出パスは文献 5)。
*2 EV：BEV、PHEV、HEV、FCEV
*3 再エネ：太陽光、風力発電

② 鉱物の需要量・供給容量推計における想定

a. 鉱物需要量

鉱物需要量推計対象の CETs として、重要鉱物を使用する代表的なもの（表 2.2.2-2）を取り上げる。各 CET の鉱物需要量は、DNE21+モデルにより排出制約下で費用効率的と分析された導入量に文献調査に基づく鉱物強度を乗じ、算定する。なお、定置用蓄電池は VRE の増大に伴って増えると考えられるが、DNE21+モデルでは明示的にモデル化していない。そこで、総発電電力量に対する VRE 発電電力量の比率を代理指標として算定する。

CETs 以外用途の鉱物需要量は、一人当たり GDP や人口を主要ドライバーとして算定されることが多い。ここでは、本シナリオと IEA シナリオとで GDP 成長率が近いこと踏まえ、IEA によるその他用途の鉱物需要量予測値 12)を適用する。

表 2.2.2-2 鉱物需要量推計対象の CETs と鉱物強度の想定

CETs	鉱物強度
太陽光	IEA (2023)[6]
風力	陸上、洋上別に、代表的タービンタイプの鉱物強度と市場シェア(IEA 2022)[7]に基づき設定。
原子力	IEA (2023)[6]
バイオマス火力	Ashby et al. (2012)[8]
太陽熱	Pihl et al. (2012)[9]
水素・アンモニア火力	IEA (2023)より天然ガス火力の鉱物強度を代用
水電気分解水素製造	アルカリ型(IEA 2023)[6]、固体高分子膜型(Marscheider-Weidemann et al. 2021)[11]が市場の各 55%、45%を占める[11]として設定。
定置用蓄電池	（総発電電力量に対する VRE 発電電力量の比率を代理指標とし、IEA の STEPS、APS、NZE シナリオにみられる線形関係に基づき算定（図 2.2.2-1 はリチウムの例））
EV 用蓄電池	各種電池タイプの鉱物強度(IEA 2022)[7]と市場シェア(IEA 2023)[6]より設定。
EV モーター	Wang et al. (2022)[10]

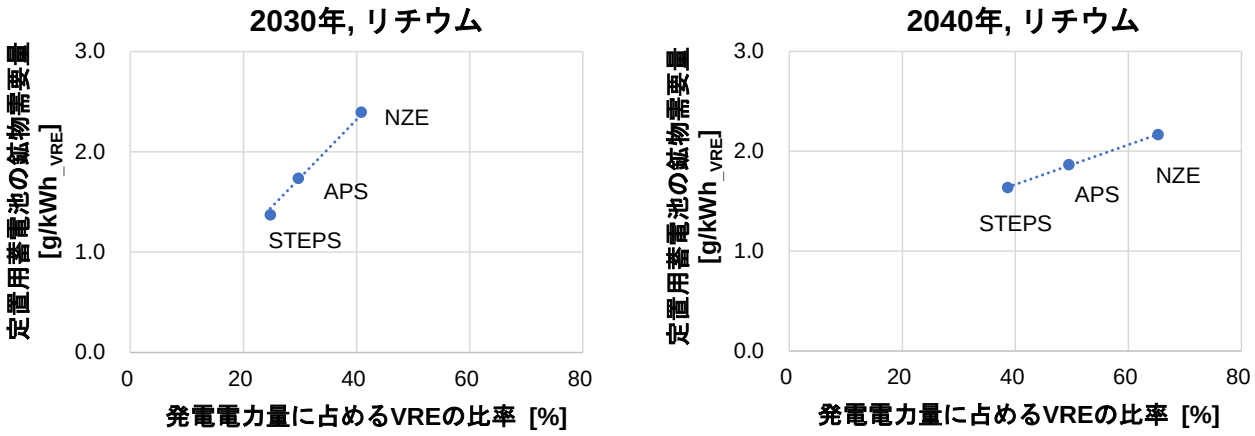


図 2.2.2-1 発電電力量に占める VRE 比率と定置用蓄電池のリチウム需要量 IEA の STEPS、APS、NZE シナリオにみられる関係

（データ出典）VRE の発電電力量、総発電電力量：World Energy Outlook 2022[13]
定置用蓄電池の鉱物需要量：Critical Minerals Market Review 2023[12]

b. 供給容量

供給容量は一次供給量とリサイクル量から成る。一次供給量は文献[14]の値に依拠し、リサイクル量は鉱物需要量及び製品寿命から推計する。

後述する通り、需要量と供給容量の比較はリチウム、ニッケル、コバルト、ネオジムを対象に行う。そこで、リサイクル量推計は、これら鉱物を多く含む EV 用・定置用蓄電池、及び、風力発電タービン・EV モーターを対象に行う。ここで、使用済製品の回収率は 2020 年の 45%から 2040 年には 80%まで増大[14]、回収製品からの鉱物の収率は 95%[15),16),17)]とした。

c. 鉱物種別の需要量と供給容量の比較

出来るだけ多くの鉱物種について実施するのが望ましいが、ここでは優先すべき鉱物種として IEA の NZE、APS 等シナリオで供給容量を上回る需要量増大が分析されている[6)]、リチウム、ニッケル、コバルト、ネオジムを取り上げる。

③ 留意事項

EV や発電プラント製造の時間は 0.5－4 年程度とされる[6)]。本推計では導入までのリードタイムは特に考慮せず、CET 導入年に鉱物需要が発生するとした。

DNE21+モデルはエネルギーシステムを詳細に表現するものの、重要鉱物のストック・フローを明示しておらず、コスト効率的 CETs の評価は、鉱物の需給バランスや価格の変化の影響を考慮したものではない。その点に留意した上で、本枠組みは、複数のシナリオに対し、CETs の鉱物需要量を比較的簡便に推計するためのものである。

④ 感度分析

CET の鉱物強度、低減率、蓄電池の種類、リサイクル等、各種想定には不確実性がある。そこで、表 2.2.2-3 の項目について感度分析を実施した。

表 2.2.2-3 感度分析の項目・ケース想定

項目・ケース		概要
鉱物強度の改善率		
	限定 ｹｰｽ	0.05% （但し PV 用ｼﾘｺﾝ、風力ﾀｰﾋﾞﾝ・EV ﾓｰﾀｰ用ﾈｵｼﾞﾑ：1.5%）
	標準 ｹｰｽ	0.5% （但し PV 用ｼﾘｺﾝ、風力ﾀｰﾋﾞﾝ・EV ﾓｰﾀｰ用ﾈｵｼﾞﾑ：2.4%）
	加速 ｹｰｽ	1.0% （但し PV 用ｼﾘｺﾝ、風力ﾀｰﾋﾞﾝ・EV ﾓｰﾀｰ用ﾈｵｼﾞﾑ：3.0%）
EV 用蓄電池の一台当たり容量		
	標準 ｹｰｽ	小型乗用車：BEV, PHEV, HEV 各 40, 8, 1 [kWh/台] 大型乗用車：BEV, PHEV, HEV 各 60, 12, 1.5 [kWh/台]
	大型 ｹｰｽ	小型・大型乗用車：BEV, PHEV, HEV 各 75, 15, 1.9 [kWh/台]
EV 用蓄電池の電池種市場シェア		
	NMC 主流 ｹｰｽ	2020 年頃に乗用車用蓄電池市場の約 70%を占めたﾆｯｹﾙ･ﾏﾝｶﾞﾝ･ｺﾊﾞﾙﾄ（NMC）系が、引き続き高いシェアを保つ。
	ASSB 加速 ｹｰｽ	全固体電池（ASSB）が出現後、加速的に市場シェアを拡大。
	標準 ｹｰｽ	ニッケルやコバルトを使用しないリン酸鉄リチウム（LFP）系がシェアを拡大し、2040 年に乗用車用蓄電池市場の 50%超。
	LFP 拡大 ｹｰｽ	ニッケル供給への懸念から LFP 系のシェアが一層拡大、2040 年に乗用車用蓄電池市場の約 80%を占める。
使用済製品の回収率		
	標準 ｹｰｽ	2020, 2030, 2040, 2050 年 各 45, 60, 80, 90%
	促進 ｹｰｽ	2020, 2030, 2040, 2050 年 各 45, 90, 95, 95%

(3) 分析結果

① DNE21+モデルで評価された CETs 選択シナリオ

DNE21+モデルで評価された CETs の全体像把握のため、各シナリオの部門別 GHG 排出量を図 2.2.2-2 に示す。これによると、発電部門の排出量は急速に削減し 2050 年まで 2°C シナリオでゼロに、1.5°C シナリオでは負にする。道路交通部門も特に 2°C/1.5°C_LcEV-LcRE シナリオで排出量を削減する。このシナリオは、EV、再エネ技術共にコスト低減が進むと想定したシナリオで、BEV と FCEV が車両の過半を占め（図 2.2.2-3）排出削減に寄与する。とはいえ、ICEV や HEV、PHEV もあり排出量はゼロにはならない。その他部門の残余排出量と共に、DACCS、BECCS、植林等の CDR で相殺する。各シナリオの CDR による CO_2 除去量を表 2.2.2-4 に示す。2050 年について、本分析 1.5°C シナリオの CDR は 10–12 Gt CO_2/yr である。これを IPCC 1.5°C シナリオの値と比べると、本分析シナリオは BECCS が少なく DACCS がやや多い、植林は IPCC シナリオ幅のほぼ中央で、オプション毎の違いはあるが、総量は概ね整合的といえる。一方、IEA NZE は BECCS と DACCS を合わせてもわずか 1.5Gt CO_2/yr と、CDR が極端に少ないシナリオである。

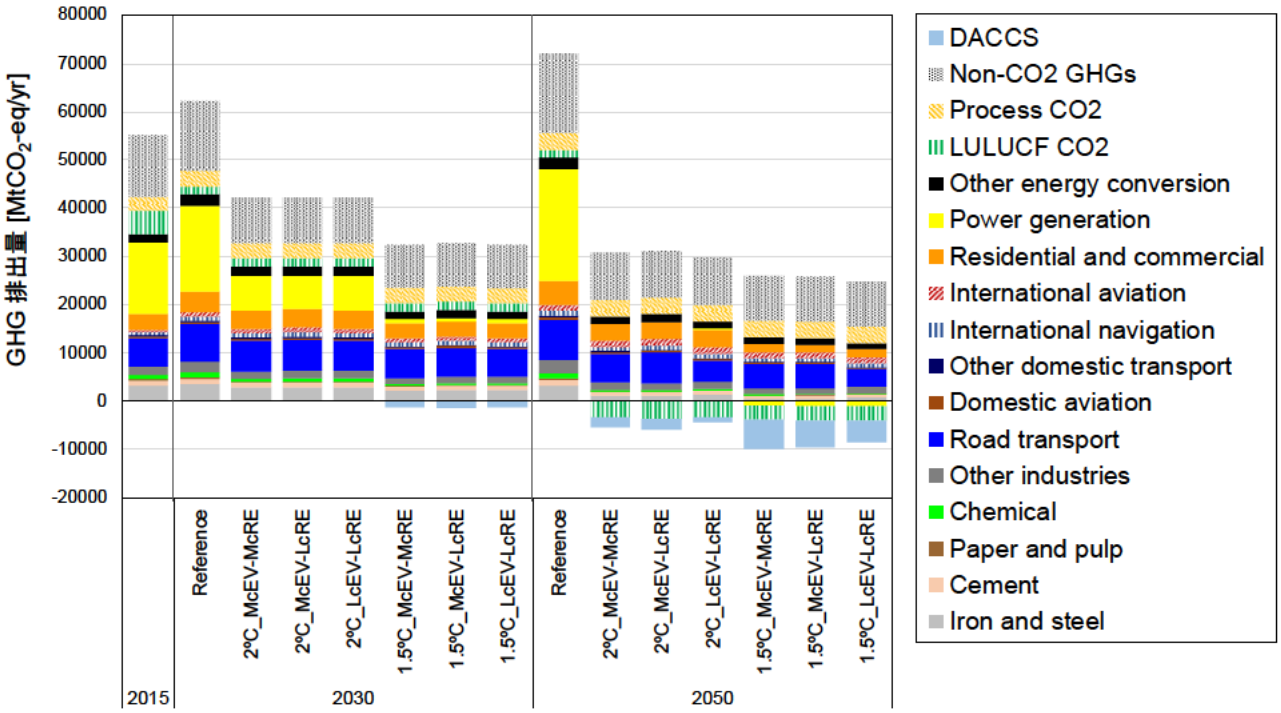


図 2.2.2-2 世界の GHG 排出量

表 2.2.2-4 CDR オプション別の CO_2 除去量 [unit: Gt CO_2/yr]

Year	Scenario	Land use	BECCS	DACCS	Total
2030	2°C_McEV-McRE	0	0.2	0.0	0.2
	2°C_McEV-LcRE	0	0.2	0.0	0.2
	2°C_LcEV-LcRE	0	0.1	0.0	0.1
	1.5°C_McEV-McRE	0	0.5	1.3	1.8
	1.5°C_McEV-LcRE	0	0.5	1.5	2.0
	1.5°C_LcEV-LcRE	0	0.5	1.2	1.8
2050	2°C_McEV-McRE	4.8	1.0	2.0	7.8
	2°C_McEV-LcRE	4.9	0.9	2.2	8.0
	2°C_LcEV-LcRE	4.9	1.0	0.9	6.8
	1.5°C_McEV-McRE	4.4	1.4	6.4	12.1
	1.5°C_McEV-LcRE	4.4	1.3	6.3	11.9
	1.5°C_LcEV-LcRE	4.3	1.5	4.7	10.5
	IPCC AR6 1.5°C（C1 and C2 シナリオ）	0.05–8	0.4–16	0–2.2	
	IEA NZE	No data	1.1	0.4	

（データ出典）IPCC AR6 1.5°C scenarios:Edward et al. (2023)[19)]

IEA NZE: IEA World Energy Outlook 2023[18)]

世界の保有台数(図 2.2.2-3)はEVのコスト低減が緩慢と想定したシナリオで、PHEVや HEV の数が増大する。この傾向は、再エネ技術のコスト低減想定に依らず、2°C/1.5°C_McEV-McRE、2°C/1.5°C_McEV-LcRE シナリオに共通してみられる。

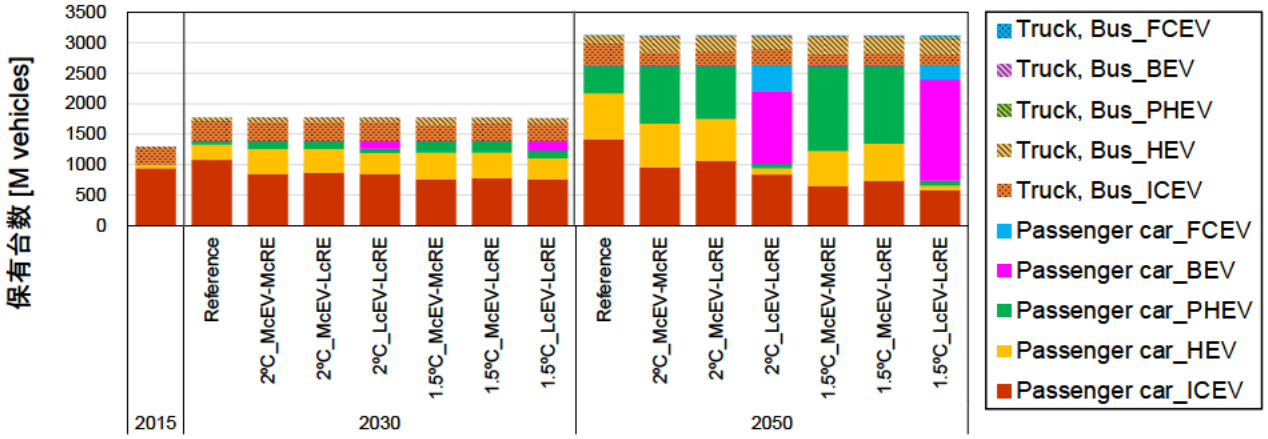


図 2.2.2-3 世界の保有台数

発電電力量（図 2.2.2-4）は、2°C シナリオより 1.5°C シナリオで大きくなる。1.5°C シナリオの中でも最大は 1.5°C_McEV-LcRE シナリオにみられる。このシナリオは、前述の通り、自動車に BEV はほとんど導入されない。このため、BEV が主流となる 1.5°C_LcEV-LcRE シナリオより道路交通部門の電力需要量は小さくなる。但し、それに伴って増える道路交通部門の排出量を、産業、民生部門で削減するためこれら部門の電化を一層進める。さらに、水電気分解水素製造、DACCS のための電力需要量も増える。結果として、発電電力量は 1.5°C_McEV-LcRE シナリオで最大となり、太陽光、風力発電も飛躍的に増大する。

なお、1.5°C_LcEV-McRE シナリオは、太陽光、風力発電のコスト低減が緩慢と想定したため、これらの発電電力量は 1.5°C シナリオの中でも最小となる。その分を、太陽熱発電、CCUS 付きガス火力で補う、と同時に、産業、民生部門における一層の省エネルギーにより電力需要を抑制する。このように、2°C、1.5°C の達成に向けては多様な技術選択シナリオのあることが、この結果からも読み取れる。以下では、このようなシナリオの違いが鉱物需要量に及ぼす影響を示す。

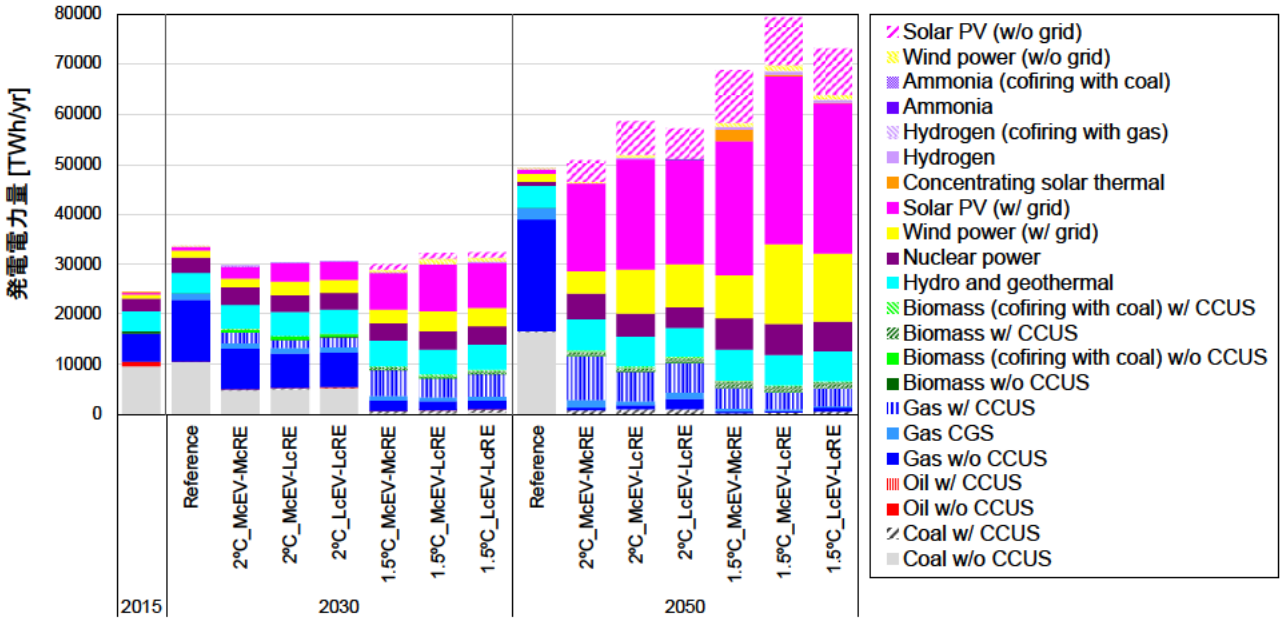


図 2.2.2-4 世界の発電電力量

② 主要鉱物の需要量・供給容量比較

各 CET の鉱物需要量推計結果は文献 20)に譲り、本節では、リチウム、ニッケル、コバルト、ネオジムについて、CETs とその他用途を合わせた総需要量を、供給容量と比較する。

図 2.2.2-5 に示すように、リチウムの需要量は EV 用・定置用蓄電池によるとことが多い。特に、1.5°C_LcEV-LcRE シナリオは、BEV が乗用車の過半を占め、太陽光・風力発電も比較的多く導入されるため、リチウム需要量は著しく増大し、2030 年には供給容量（一次供給（高位）＋リサイクル）と同程度、2040 年にはそれを大幅に上回ると推計された。1.5°C_McEV-LcRE シナリオは、(3)①項で述べた通り 1.5°C_LcEV-LcRE シナリオに比べ、太陽光・風力発電が増えるに伴い定置用蓄電池のリチウム需要量も大きくなるが、乗用車は PHEV や HEV が主流となり EV 用蓄電池用の需要量を大幅に押し下げる。その結果、総需要量は供給容量を大きく下回ると推計された。

同様の傾向が、コバルトにもみられる。リチウムとやや異なる点としては、総需要量に占める CETs 以外用途の割合が多いこと、2040 年には Reference シナリオであっても総需要量は供給容量に近づき、供給余力は小さいことがあげられる。

ニッケルは、低炭素発電、水電気分解水素製造等も需要量増大に寄与するが、EV 用蓄電池に比べるとこれらの寄与度は小さい。また、全てのシナリオで総需要量は供給容量を下回り、供給容量に比較的ゆとりがあると見込まれる。

ネオジムは、風力発電タービンや EV モーターが需要量増大に寄与する。供給容量は、一次供給（中位）＋リサイクル、のみで控えめな値かもしれないが、2030 年に 1.5°C_McEV/LcEV-LcRE、及び 2°C_LcEV-LcRE シナリオで需要量が供給容量を上回ると推計された。また、2040 年には Reference と 2°C_McEV-McRE シナリオ以外の全てのシナリオで需要量が供給容量を上回るとなった。

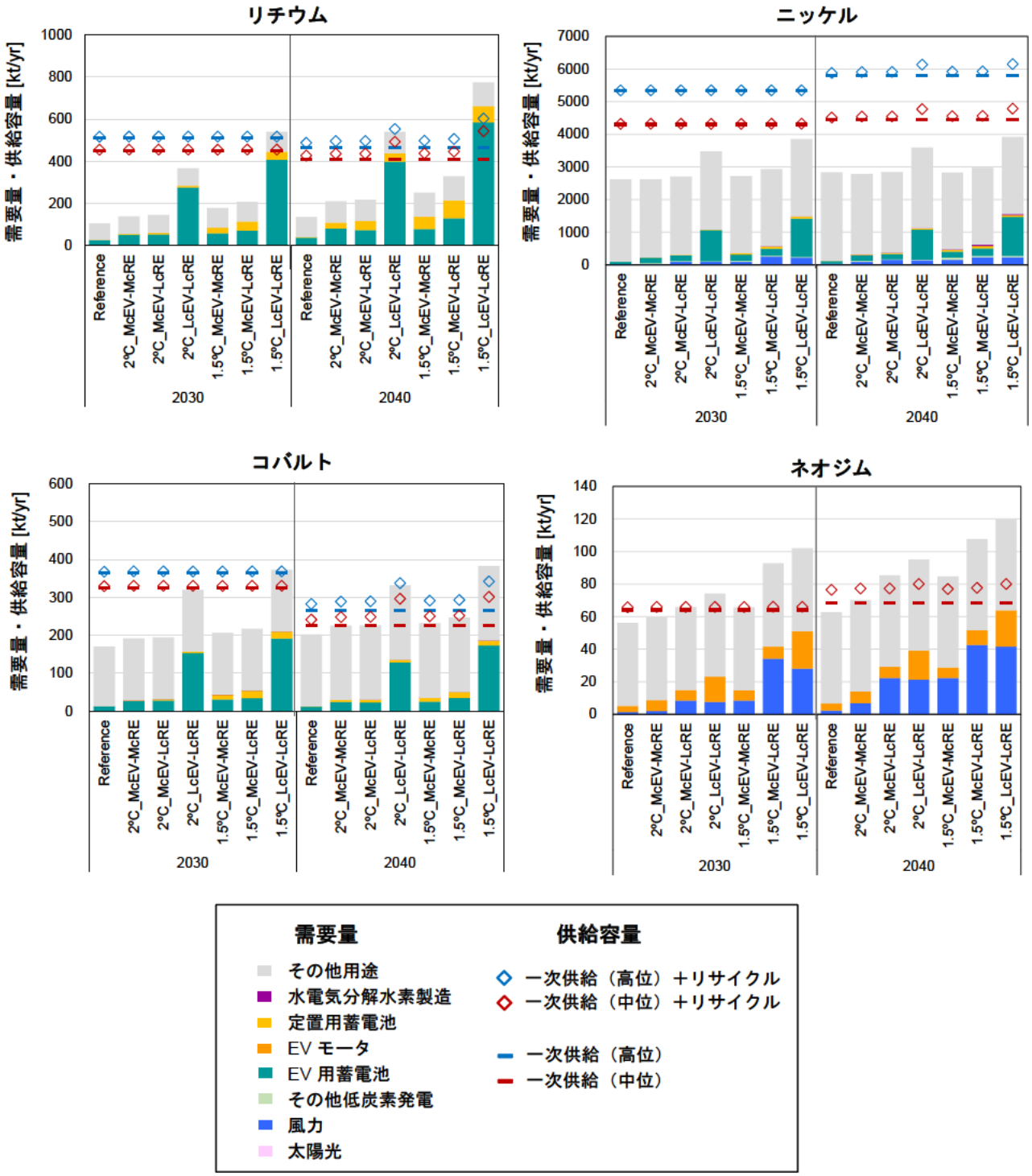


図 2.2.2-5 主要鉱物の需要量と供給容量

（データ出典）一次供給量：IEA(2024)[14]。一次供給（中位）は、既存及び建設中資産からの予想生産量に加え、今後進捗する可能性が高いプロジェクト分を含む。一次供給（高位）はその他に、ある程度開発が進んでおり、資金調達や許認可を検討中のプロジェクト分も含む。なお、ネオジウムの予測は、一次供給（中位）のみ。

（注）一次供給容量予測は 2040 年まで[14]であることより、本図でも 2030 年、2040 年の結果を示す。なお、需要量やリサイクル量は、表 2.2.2-3 の各項目「標準ケース」に基づいて推計したものである。

図 2.2.2-6 には、表 2.2.2-3 の各項目の不確実性を考慮した感度分析の結果を示す。

どのシナリオも、鉱物強度の改善率、EV 用蓄電池の一台当たり容量や市場シェアの想定によって需要量推計値に幅が生じる。また、使用済製品の回収率想定の違いは、リサイクル量に影響し供給容量に違いを生じさせる。但し、2030 年に、リサイクル対象となる製品の量は限られることより、回収率やシナリオによる供給容量の差異はほとんど見られない。

シナリオ毎に、リチウム、ニッケル、コバルト、ネオジウム各鉱物の需要量と供給容量を比較した結果は、次のように要約される。

- Reference シナリオ、2°C_McEV-McRE シナリオ：本分析で注目した鉱物種はいずれも、需要量が 2040 年に向けて増大するが、供給容量内に留まる。
- 2°C_McEV-LcRE シナリオ、1.5°C_McEV-McRE シナリオ：ネオジムは需要量が、2030 年に供給容量と同程度まで増大し、2040 年には上回る可能性が考えられる。
- 1.5°C_McEV-LcRE シナリオ：ネオジウムの需要量増大が顕在化し、2030 年、2040 年共に供給容量を大幅に上回る。
- 2°C_LcEV-LcRE シナリオ、1.5°C_LcEV-LcRE シナリオ：ネオジムの他、リチウム、コバルトでも 2030 年より需要量が供給容量を上回る可能性が考えられる。さらに 1.5°C_LcEV-LcRE シナリオではニッケルも 2030 年に需要量が供給容量を上回る可能性が考えられる。

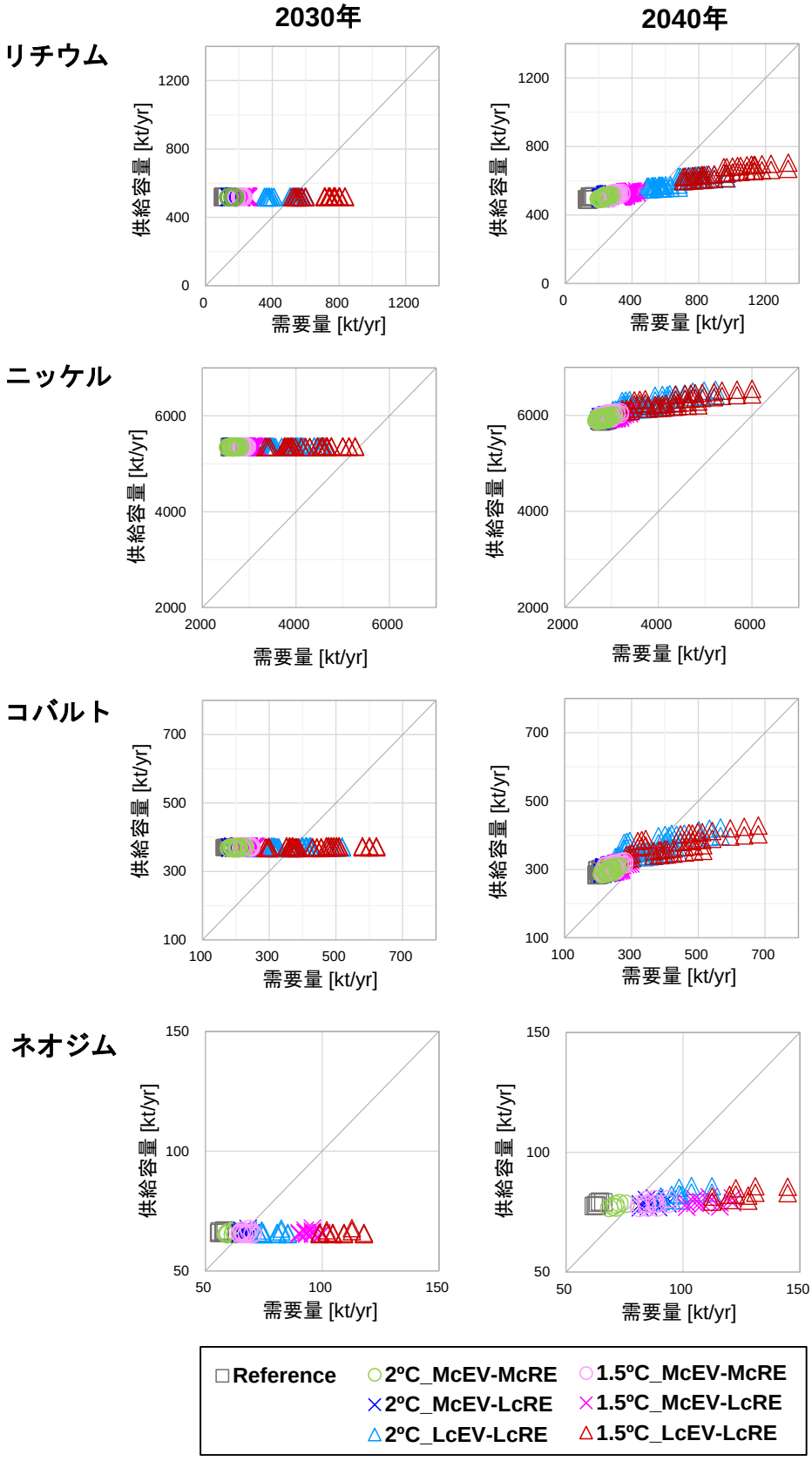


図 2.2.2-6 主要鉱物の需要量・供給容量比較

（注）供給容量：リチウム、ニッケル、コバルトは「一次供給（高位）＋リサイクル」、ネオジムは「一次供給（中位）＋リサイクル」。

(4) 本分析からの示唆と課題

① 分析結果のまとめと示唆

2°C、1.5°C 目標を満たす CETs 導入シナリオは複数考えられ、シナリオによって重要鉱物の需要量は異なる。本分析では、IEA の NZE シナリオ等で供給容量を上回る需要量増大が報告されている鉱物種について、総需要量を推計し、供給容量と比較した。

それによると、発電に太陽光や風力を大量に導入し、また乗用車の大半が BEV となる 2°C、1.5°C シナリオでは、風力発電タービン・EV モーター用にネオジウムの需要量が、EV 用・定置用蓄電池用にリチウムやコバルトの需要量が、急速に増大する。これら鉱物は需要量が供給容量を上回り、潜在的に供給不足となる可能性が考えられる。さらに、1.5°C ナリオでは、EV 用蓄電池をはじめ各種 CETs 用に、ニッケル需要も増大し、2030 年にその供給容量を上回る可能性が考えられる。

一方、発電に太陽光や風力以外（例えば CCUS 付きガス火力等）の技術利用も拡大し、また PHEV や HEV が乗用車の多くを占め、同時に植林や DACCS も相応に活用する場合、2°C シナリオでは、上記 4 種鉱物のいずれも 2040 年に向けて需要量が増えるが供給容量を下回り、潜在的供給不足の可能性は低いと考えられる。1.5°C シナリオでは、ネオジウムの需要量が供給容量を上回る可能性があるものの、両者の乖離は比較的小さいと、分析された。

以上の結果より、重要鉱物の潜在的供給不足の懸念を緩和しつつ、世界 CN に向けエネルギーシステムの移行を進めるという観点では、太陽光や風力発電、BEV といった、特定の技術に極端に依存することなく、その他の低炭素発電技術、PHEV や HEV、そして CDR も含め、多様な技術オプションを活用することが重要と示唆される。これは特に、2°C 目標より排出抑制が厳しい 1.5°C 目標を追求する際に必要といえる。

② 課題

本分析では供給容量の大半を占める一次供給の値を外部専門機関の予測に依拠しており、需要量が大幅に増大する時の供給拡大の余地を吟味していない。但し、(1)項で述べたように、重要鉱物の採掘や素材生産は社会的、環境的課題に直面していることを鑑みると、短期間で予想を大幅に上回る一次供給量増大は難しいと推測される。従って、これによる分析結果への影響は小さいと考えられる。

今後検討すべき課題として、今回得られた知見をより確かなものとするために、DNE21+以外のモデルによる CETs シナリオとの比較分析があげられる。また、より包括的な分析に向けては、考慮する CETs や鉱物種を増やすことがあげられる。例えば産業や民生部門の省エネルギーに寄与するヒートポンプ、各種 CETs や電力需要増大に伴って需要増大が見込まれる銅等が含まれる。さらに、より革新的なシナリオとして、例えば、デジタル化進展に伴い、カーシェア、ライドシェアが普及した場合の行動変容シナリオの分析は今後の課題である。

参考文献（第 2.2 節に関するもの）

1) UN: Sustainable Development Goals, https://www.un.org/sustainabledevelopment/ (accessed 2023-01-23)

2) IPCC WG3: Sixth Assessment Report: Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press (2022)
3) Halsnæs K, Some S, Pathak M (2024) Beyond synergies: understanding SDG trade-offs, equity and implementation challenges of sectoral climate change mitigation options. Sustainability Science, 19(1), 35-49.
4) RITE/METI、令和 5 年度地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業報告書、2024 年 3 月
5) RITE：カーボンニュートラルに向けたトランジションロードマップの策定（2023 年度版）(2024) https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/FY2023sectorroadmap_rev.pdf
6) IEA: Energy Technology Perspectives 2023 (2023)
7) IEA: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (2022)
8) Ashby MF: Materials for low-carbon power, 2nd edition (2012). https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2012/07/lowcarbon.pdf. Accessed 6 June 2024
9) Pihl E, Kushnir D, Sandén B, Johnsson F: Material constraints for concentrating solar thermal power. Energy 44, 944–954 (2012).
10) Wang M, Elgowainy A, Lee U, et al.: Summary of Expansions and Updates in GREET® 2022, Argonne National Laboratory (2022). https://greet.anl.gov/publication-greet-2022-summary. Accessed 25 Oct. 2023
11) Marscheider-Weidemann et al.: Raw materials for emerging technologies 2021 , – DERA Rohstoffinformationen (2021) 50: 366 p., Berlin.
12) IEA: Critical Minerals Market Review 2023 (2023)
13) IEA: World Energy Outlook 2022 (2022)
14) IEA: Global Critical Minerals Outlook 2024 (2024)
15) Dunn J, Slattery M, Kendall A, Ambrose H, Shen S; Circularity of lithium-ion battery materials in electric vehicles. Environmental Science & Technology, 55(8), 5189–5198 (2021).
16) Periyapperuma K, Sanchez-Cupido L, Pringle J M, Pozo-Gonzalo C: Analysis of sustainable methods to recover neodymium. Sustainable Chemistry, 2(3), 550–563 (2021).
17) Omodara L, Pitkäaho S, Turpeinen E M, Saavalainen P, Oravisjärvi K, Keiski R L: Recycling and substitution of light rare earth elements, cerium, lanthanum, neodymium, and praseodymium from end-of-life applications-A review. Journal of Cleaner Production, 236, 117573 (2019)). https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/33794/nbnfi-fe2022113068298.pdf?sequence=1
18) IEA: World Energy Outlook 2023 (2023)
19) Edward B et al. : AR6 Scenario Explorer and Database, https://iiasa.ac.at/models-tools-data/ar6-scenario-explorer-and-database. Accessed 26 Jan 2024
20) Hayashi A, Sano F, Akimoto K: How great will the demand for critical minerals be to meet the 2°C and 1.5°C goals? Insights from various technology deployment scenarios, Climatic Change, 投稿中

2.3 Non-CO_2 GHG 排出削減をめぐる動向と課題

2.3.1 Non-CO_2 GHG 緩和シナリオ研究の動向と課題

CO_2 起源による気候変動に加え、Non-CO_2 GHG 分野での緩和シナリオに関する最新動向とその課題について理解を深めることを目的として、同分野を研究している専門

家へのヒアリング、意見交換を行った。これらを通じて、Non-CO_2 GHG 排出の現状と、今後の緩和シナリオについて調査した。

(1) 背景情報としての国際的な動向

- Non-CO_2 GHG に特化した国際学会として、対策や観測、インベントリー、将来シナリオ等に関する専門家が集まる NCGG（International Symposium on Non-CO_2 GHG）が 2～3 年毎に開催されている [1)]。また関連して、USEPA が世界や部門を網羅した削減ポテンシャルと削減費用の情報を掲載した国際報告書「Non-CO_2 Greenhouse Gas Report」を出しており、Non-CO_2 GHG 対策に特化した内容となっている [2)]。
- また、関連して UNEP の気候と大気浄化の国際パートナーシップ（CCAC：Climate and Clean Air Coalition）による短寿命気候強制因子（SLCFs）と大気汚染物質に特化した、気候変動と大気汚染に関する国際活動があり、最近は注目を集めている。2021 年の報告書 [3)]は COP26 に合わせて報告され、グローバルメタンプレッジという流れを作った。短寿命気候汚染物質（SLCPs：Short-Lived Climate Pollutants）の中にはメタン、HFC に加えて、ブラックカーボンと対流圏オゾンがあり、これらをいかに削減し、それによる温暖化抑制や健康・環境への影響がどうなるかといった点が注目されている。
- 別の活動として、国際窒素イニシアティブ（INI）[4)]があり、2019 年の第 4 回国連環境総会（UNEA4）において、「廃棄窒素半減目標」の議論がなされている。INI がリードしている国際学会も定期的に開催され、削減のための推進活動を行っている。IPCC の Climate Change Assessment Report の窒素版を作成しようとしており、出版に向けた作業が進行中である。

(2) 農業部門におけるメタン、一酸化二窒素、アンモニア

- メタンに注目すると、グローバルメタンバジェット（Global Methane Budget）[5)]という報告書が毎年発行されており、それによるとメタンの発生源としては自然起源と人為期限は約半分ずつとなっている。自然起源のメタン抑制は難しいため、人為起源のメタン緩和策導入により、早期に大幅削減を行う必要がある。特にアジアにおいては、主要な排出源は農業部門である。また、一酸化二窒素も農業部門からの排出が圧倒的に多い。アンモニアは GHG では無いが PM2.5 の一部で、一酸化二窒素や窒素酸化物ともかかわりがあり、アンモニア排出のうち 9 割が農業部門となる。したがって、気候変動対策、大気汚染、オゾン層破壊、廃棄窒素対策の観点からも農業に注目する必要がある。

(3) ハイドロフルオロカーボン（HFCs）

- クロロフルオロカーボン（CFCs）の開発以降、冷媒や断熱材、発泡剤、洗浄剤、エアロゾルなどの用途に使われており、生産量の推移を見ると、CFCs からハイドロクロロフルオロカーボン（HCFCs）、HFCs へと変わってきた。CFCs と HCFCs はオゾン層破壊物質であるため、モントリオール議定書によって生産と

消費が減っており、これからはそれらの代替物質である HFCs が増えていくこととなる。日本でも HFCs への代替が進み、HFCs の排出量が増えているため、CO_2 を削減しても HFCs の排出増により相殺されてしまうということが指摘されている。HFC 排出量の中でも冷媒フロン類の増加傾向が大きいため、これへの対策が重要となる。

- 冷媒フロン類への対策としては、これまでは代替対策、漏洩対策、回収対策が主要なものとして言われてきた。時代の移り変わりにより、モントリオール議定書のキガリ改正が採択され、オゾン層を破壊する物質に対する生産と消費の規制から、オゾン層を破壊しないが CFCs や HCFCs の代替物質である HFCs についても規制対象に加えられ、生産・消費の段階的な削減スケジュールの改定がなされた。そのため、HFCs の代替対策をどう実施できるのかが重要な課題となっている。このキガリ改正は排出に対する規制ではなく、生産・消費への規制である。先進国はデータ入手先として UNFCCC の CRF に記載の消費量があるが、途上国はなかなかないことから推計が難しい状況にある。

(4) 課題

2040 年以降の HFC 削減については、代替冷媒がないといった問題もあり、キガリ改正の生産・消費の制約が厳しくなっていく中で代替化のスピードが追い付かなくなる。その課題を克服するためにも、代替技術の開発が必要である。

(5) まとめ

2050 年カーボンニュートラル目標の達成に向け、CO_2 排出削減や対策技術の進展は大きく注目されている。一方で、ネット GHG 排出ゼロといった観点を踏まえると、メタンやフロンといった Non-CO_2 GHG の分野での課題の洗い出しや対策技術の開発、導入・普及にも着目する必要がある。本節では、同分野での調査・研究を行ってきた専門家を招き、国内の研究家との間で幅広い観点からの意見交換を実施し、現状の認識共有ならびに今後の展望についての知見を得られたものである。

2.3.2 Non-CO_2 GHG 排出削減に関する文献調査

本節では、CH_4 削減に焦点を当てた UNEP/ Climate and Clean Air Coalition によるレポート[3)]を調査した。

CH_4 排出量の削減は、温暖化を 1.5℃に抑えるための費用対効果の高い戦略と評価された。対策により、2030 年までに排出量を 45%削減できる。この削減により、2040 年代までに 0.3℃近くの温暖化を防ぐことが可能となる。この分析では、先進的な 5 つの世界モデル（AIM/CGE, GCAM4, IMAGE, MESSAGE-GLOBIOM, REMIND-MAGPIE）を活用して、CH_4 削減による気候への影響を評価した。対策を講じることで、2030 年までに主に化石燃料からの CH_4 排出量を 30%削減できる。1.5℃の緩和目標を達成するためにはさらなる対策が必要であり、排出量をさらに 15%削減できる可能性があると評価されている。

CH_4削減ポテンシャルのほとんどは、CH_4-tあたり600ドル以下の費用で達成できると評価されている。2030年から2050年にかけて、特に化石燃料と廃棄物の削減ポテンシャルが高まると予想される。対象とする対策の約60%は緩和コストが低く、多くはネガティブコストである。ネガティブコストの削減率が最も高いのは、回収されたCH_4が収益を生み出す石油・ガス部門である。緩和策の可能性は地域によって異なる。地域別にみると、北米では、石油・ガス部門が低コストで緩和できる可能性が大きい。ヨーロッパとインドでは廃棄物部門が最大の可能性があり、中国では石炭生産に次いで家畜が重要となりうる。このような分析結果は、特定の地域や部門の状況に合わせてCH_4削減戦略を調整することの重要性を示唆している。

図 2.3.2-1は、農業、廃棄物、化石燃料などの部門における2020年と2030年のCH_4排出量を示している。また、CH_4削減による死亡回避、労働時間喪失、気温上昇回避率も示している。2030年までに、農業、廃棄物、化石燃料のCH_4排出量を大幅に削減できる可能性が示されている。緩和努力は、年間最大255,000人の死亡を回避するなど、実質的な健康上の利益につながる可能性がある。CH_4を効果的に削減できれば、年間約775,000時間の労働時間の損失を防ぐことも可能と推計されている。これらの行動は、2040年代までにその影響が顕著になる地球規模の気温上昇を抑制する上で極めて重要であるとされている。

図 2.3.2-2は、2030年におけるCH_4排出量削減のコストレベルを部門別に示している。CH_4削減対策の大部分は、低コストまたはネガティブコストで実施できる可能性が示されている。農業部門は、比較的低コストでCH_4排出を削減できる可能性が最も高い。また、石油・ガス部門では、低コストで回収されたCH_4を収益として増やすことが可能である。CH_4削減戦略の財政的影響は大きいが、気候変動によるより深刻な影響を避けるためには必要である。継続的なメリットが示すように、2030年以降も継続して取り組むことが極めて重要であるとされている。

より広範な脱炭素化戦略だけでは、必要なCH_4削減は達成が困難であり、焦点を絞った戦略が不可欠である。戦略には、排出量の価格設定と削減目標の設定が含まれる。障壁には、資金調達、生産方法、消費者行動の変化などがあり、効果的な対策のためには政府部門と民間部門の両者の関与が必要である。化石燃料部門で的を絞った対策を講じることで、低コストで排出量を大幅に削減できる可能性が大きい。また、低コストの対策は、2030年までに気候と大気の質に大きな利益をもたらす可能性も示唆されている。CH_4を対象とする戦略は、より広範な気候汚染物質緩和の取り組みと同時に行う必要性が示されている。

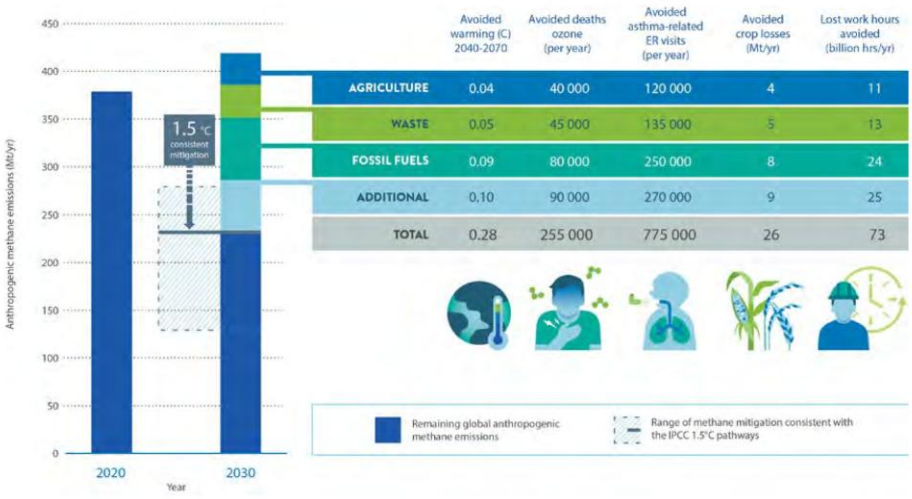


Figure ES1: Current and projected anthropogenic methane emissions and the identified sectoral mitigation potential in 2030 along with several benefits associated with sectoral-level methane emissions mitigation. Avoided warming occurs in the 2040s, other impacts are annual values beginning in 2030 that would continue thereafter.

図 2.3.2-1 2030 年における部門別 CH_4 削減ポテンシャル [3)]

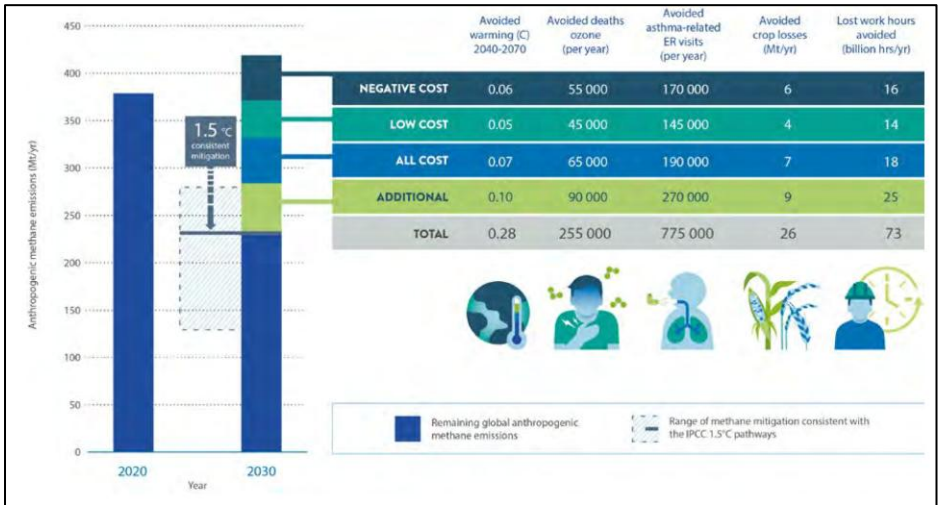


Figure ES2: Current and projected anthropogenic methane emissions and the identified mitigation potential in 2030 of targeted controls and their costs (low cost is greater than zero and less than 2018 US$ 600 per tonne of methane) as well as a set of additional measures, such as energy efficiency and fuel switching, plus behavioural changes, such as reduced food waste, dietary modification and energy demand management, that are consistent with the 1.5° C long-term maximum warming target. The cost of implementation of all-cost measures is more than 2018 US$ 600 per tonne of methane. Avoided warming is in 2040, other impacts are annual values beginning in 2030 that would continue thereafter.

図 2.3.2-2 2030 年における CH_4 対策コストと部門別改善効果 [3)]

参考文献（第 2.3 節に関するもの）

1) Global Methan Initiative: 9th International Symposium on Non-CO_2 Greenhouse Gases, https://globalmethane.org/events/details.aspx?eventid=656（アクセス日 2025.2.26）
2) USEPA: Global non-CO_2 greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation, 2015-2050 (2019)
3) Climate and Clean Air Coalition: Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions (2021)
4) International Nitrogen Initiative, https://www.initrogen.org/ （アクセス日 2025.2.26）
5) Global Methane Budget 2024, https://www.globalcarbonproject.org/methanebudget/index.htm （アクセス日 2025.2.26）

2.4 イノベーション戦略から見た気候変動リスクマネジメント

(1) はじめに

人為的な温室効果ガス排出により引き起こされる気候変動の程度及び影響被害の程度には大きな不確実性が伴うことは従前より指摘されている。これらの不確実性を考慮した上での総合的なリスクマネジメントが必要である。ロシアによるウクライナ侵攻といった地政学的リスクの顕在化によるエネルギー安全保障の重要性が改めて認識され、3E＋S のバランスの取れた取り組みが必要となる中、これらリスクを包括的にとらえ、エネルギー・気候変動に関連するイノベーションを広範に誘発する政策は重要となっている。

2020 年 10 月の菅総理による 2050 年までのカーボンニュートラル宣言を受け、企業による投資とイノベーション創出を支援し、経済と環境の好循環を作る産業政策として、「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が 2020 年 12 月に発表され、革新的な技術開発に対する支援を目的とした 2 兆円のグリーンイノベーション基金が創設された。2021 年 6 月には、企業の研究開発方針や経営方針の転換などの動きの促進を目的とし、グリーン成長戦略の更なる具体化が行われた。

2021 年 10 月にはエネルギー基本計画、地球温暖化対策計画、パリ協定長期戦略が改定された。他方で、これまでの計画だけでは、需要サイドのエネルギー転換の道筋や経済社会・産業構造全体をクリーンエネルギー中心としたものへと転換していくために必要となる具体的な政策対応が必ずしも明らかでなかったことを踏まえ、成長が期待される産業ごとの具体的な道筋や需要サイドのエネルギー転換、クリーンエネルギー中心の経済社会・産業構造の転換に向けた政策対応などについてクリーンエネルギー戦略において整理し、2022 年 6 月に中間整理として策定された。岸田総理は、水素・アンモニア等の普及促進を含め、今後 10 年間に 150 兆円の投資の呼び込みのため、20 兆円規模の GX（グリーントランスフォーメーション）経済移行債発行を示唆した。

2022 年 8 月には、GX 実行会議が発足し、新型原子炉の新設・リプレースを含む原子力の活用が表明され、その後の実行会議や審議会等での議論を踏まえ、年末には GX 基本方針が取りまとめられ、2023 年 2 月には「GX（グリーントランスフォーメーション）実現に向けた基本方針」が閣議決定された。2023 年 12 月には、今後 10 年を見

据えたロードマップの全体像が示され、水素・アンモニア、蓄電池産業、脱炭素目的のデジタル投資、次世代革新炉など 20 の分野・産業における目標・戦略、GX 移行債を活用した投資の内容などが、今後の道行きとして具体的に例示され、同 12 月には分野別投資戦略もとりまとめられた。さらに 2024 年 12 月には、24 年 7 月に閣議決定された GX 推進戦略を発展させる形で GX2040 ビジョンが策定され、2025 年 2 月に第 7 次エネルギー基本計画地球温暖化対策計画と共に閣議決定された。GX2040 ビジョン策定にあたっては、エネルギー、GX 産業立地、GX 産業構造、GX 市場創造の論点を土台に有識者との議論が行われ、DX による電力需要増への対応を目的とした再生可能エネルギー拡大、原子力の活用、脱炭素火力への投資拡大、石炭火力の扱い、効率的な産業集積と系統整備、技術・ビジネス・スケールの 3 要素を最大化する技術開発やスタートアップ・大企業の協働などの課題が GX 実行会議において指摘された。また、GX 実行会議においてドイツにおけるエネルギー価格高騰により競争力喪失が懸念されている状況が議論され、安定供給・環境適合・経済性のバランスがとれたエネルギー政策の重要性が認識されている。

気候変動に対応する長期イノベーションの誘発、投資促進政策が政府主導で進められる中、より実効性の高い政策の具体化に向け、これまでの政策による実績、成果をレビューするとともに、研究開発から事業化に至るプロセスにおけるイノベーション創出事例を調査し、政策との協調の枠組みを検討していくことも重要である。イノベーション創出の担い手である企業、スタートアップ、さらには大学や研究機関にとって望ましい政策枠組みはどのようなものなのか示唆を得るべく、関係者に対して事例調査を行った。

(2) これまでのイノベーション政策の動向と、そこから得られる今後の取り組み示唆

技術開発におけるイノベーションが国の経済成長にどのように貢献していくか、これまでの経済政策を振り返り、イノベーションを活用した GX による成長戦略の現状と課題について理解を深めることを目的として、同分野の専門家へのヒアリング、意見交換を通じ、今後の日本のイノベーションのあり方を考える上でのポイントを調査した。

- 研究開発は国の経済政策とは離れており、国立研究所のような国の機関と民間企業とが共同で研究開発をするようなことが望ましいが、昨今は基礎研究への投資を行い失敗した際に株主代表訴訟を起こされるリスクがあるため難しいこともある。
- 政府としても基礎研究分野に安定的な費用を拠出することに重点を置くのが良いのではないか。普及分野への税金投入がどこまで経済成長につながるのか慎重に考える必要がある。
- 民間企業のみならず大学なども含め、あらゆる面で競争が求められているのが現状である。そのために短期的な成果を求められるなど、どこも基礎研究を行う余裕がなくなっていることが課題の一つとして挙げられる。

- このような状況はEUでも同じようなものだが、米国は90年代にGAFAが出てきて違う道を歩んでいる。プラットフォームを作れるかどうかが重要なのだが、日本では90年代の民営化や自由化などによる混乱期にそのような対応が取れなかったことがある。
- 想定するマーケットの規模感においても、日本人の発想は国内限定的になってしまっていることが課題である。一方で米国は英語圏つまり世界全体のマーケットを念頭に置いている。
- サンシャイン計画を例にとると、米国の火力発電技術にキャッチアップする過程ではうまくいっており、技術的に遅れている分野でのキャッチアップを行っていくことも重要である。
- イノベーションの促進において、国ができるのは環境整備を行うことまでであり、そのような環境を用意すれば人材が集まり、創造性が伸長するはずだが、そのようになっていないことに着目する必要がある。
- 90年代や2000年代のように技術開発に力を注力するだけでなく、その技術を活用した市場作りも重要と思われるが、日本における課題の一つとして、新技術事業化等の場合に、金融セクターが実施する技術審査に時間とコストが相当かかるなど、手続きにおける問題も挙げられる。研究者が雇用環境や収入面でも安定的に研究に取り組めるようなシステムの構築も必要である。

(3) まとめ

2050年カーボンニュートラル目標の達成に向け、地政学リスクを考慮しつつ温暖化対策技術に関連する様々なイノベーションを早期実現する必要性が高まっている。本節では、イノベーション創出に向けた官民の役割や研究開発分野へのサポート体制や金融セクターとの連携の重要性などについて、専門家へのヒアリング調査に基づく検討を行った。特に短期での成果を求められる競争重視の流れが進む中、国の研究機関における安定的な基礎研究が大事であることや、民間部門との長期的な研究開発環境の充実の重要性が改めて認識された。

第3章　グリーン成長の限界と機会

3.1　グリーン成長の限界と機会

地球温暖化を防ぐためにはその主な原因とされている二酸化炭素（CO_2）の排出を削減することが不可欠であるが、その排出削減が経済活動に負の影響を及ぼす恐れがある。地球温暖化対策において、経済成長と CO_2 排出削減の両立、すなわち世界の GDP と CO_2 排出とのデカップリングが重要である。

第 1 章で触れたように、世界の CO_2 排出量は依然として上昇してきている。世界経済危機や COVID-19 パンデミック等の影響により、一時的に CO_2 排出量が前年比で低下した年もあったが、それは経済のマイナス成長を伴うものであり、その後、経済の回復と共に排出量は再び上昇した。また、これまで当事業で実施してきた、経済成長と CO_2 排出との関係性やデカップリングに関する分析・評価（文献 1)等）において、一部の国でデカップリングの傾向が見られるものの、それは主に先進国におけるエネルギー多消費的な製品生産の途上国への移転によるものであることを指摘してきた。世界全体での CO_2 削減はあまり進んでおらず、グローバルでは依然として経済と CO_2 排出がカップリングしている状況にあると言える。

本節では、世界全体における GDP と CO_2 排出量等との関係について、長期的な傾向を概観する。

3.1.1　世界の経済成長と CO_2 排出の長期的な傾向

(1) 世界 GDP と CO_2 排出量、電力消費量との関係

図 3.1.1-1 に、1971～2022 年における世界 GDP とエネルギー起源 CO_2 排出量との関係を示す。分析には、従来の報告と同様に、IEA による統計データ（文献 2),3)）を用いた。両者の間には強い正の相関関係が見られる。2013～2016 年にかけては、世界の CO_2 排出量は横ばい傾向にあったが、2017 年には再び上昇に転じた。長期の傾向で見ると、2009～2013 年の間の急上昇が 2013～2016 年の間で調整されたと見ることができ、その背景としては、中国を中心とする鉄鋼、セメントの生産調整等の影響が大きいが、これに、米国シェールガス生産の増大により、経済自立的に石炭からシェールガス（天然ガス）への燃料転換が 2005 年頃から進んできている影響が加わっての傾向と推計される（文献 4)）。2017 年、2018 年においては再び上昇し、2019 年は前年とほぼ同水準だったが、2020 年は COVID-19 のパンデミックにより、世界の CO_2 排出量は大幅に低減した。しかし、経済活動の停滞により GDP の落ち込みも大きかった。その後、世界経済は金融刺激策等で急速に回復し、世界 CO_2 排出量も再び増加に転じた。

図 3.1.1-2 には世界の GDP と一次エネルギー消費量（IEA 統計による一次エネルギー換算）の関係、また図 3.1.1-3 には世界 GDP と発電電力量の関係を示す。いずれも線形に近い関係が見られ、カップリングしている。世界 GDP と発電電力量については、一次エネルギー以上に強い線形の関係が見られる。

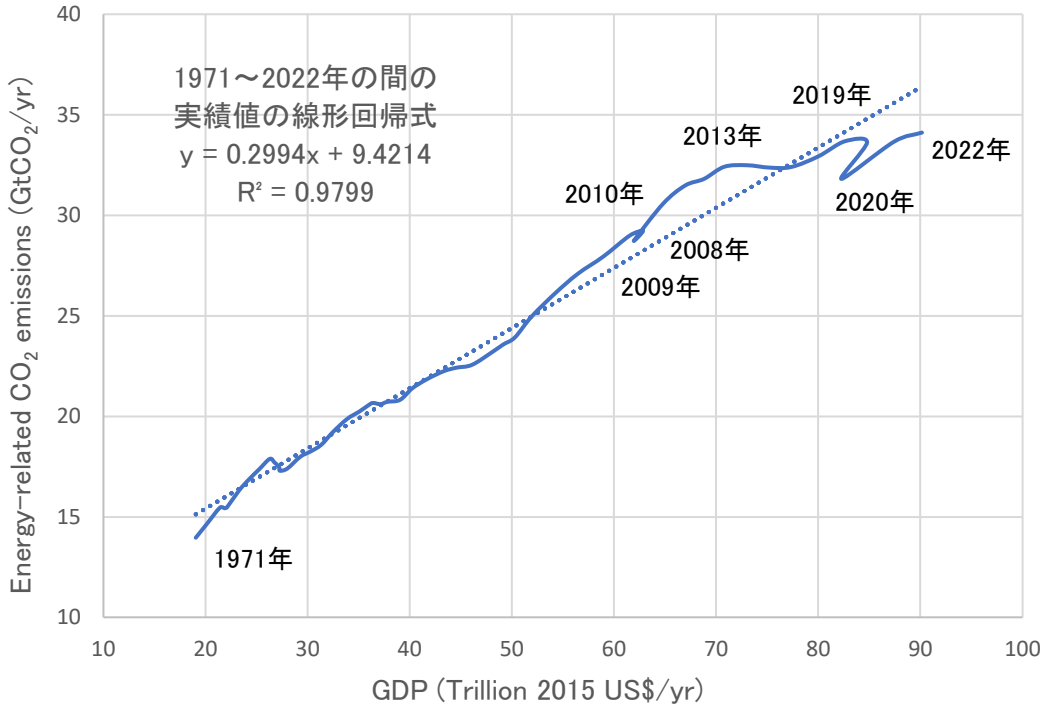


図 3.1.1-1 世界の GDP とエネルギー起源 CO_2 排出量の関係（1971～2022 年）

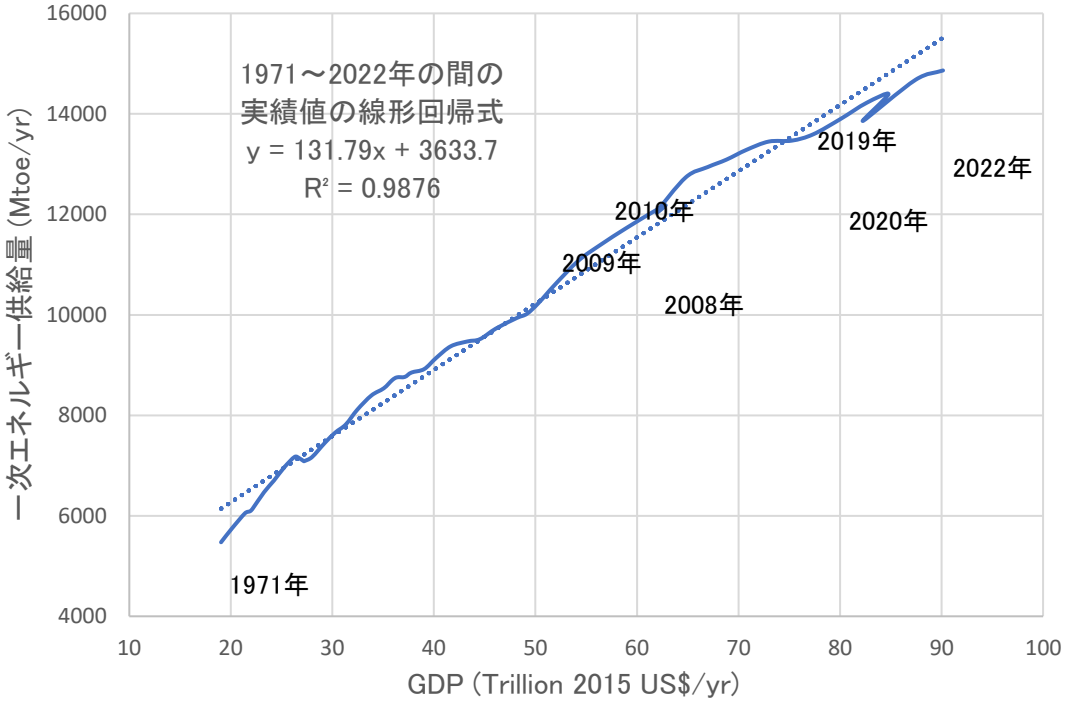


図 3.1.1-2 世界の GDP と一次エネルギー供給量の関係（1971～2022 年）

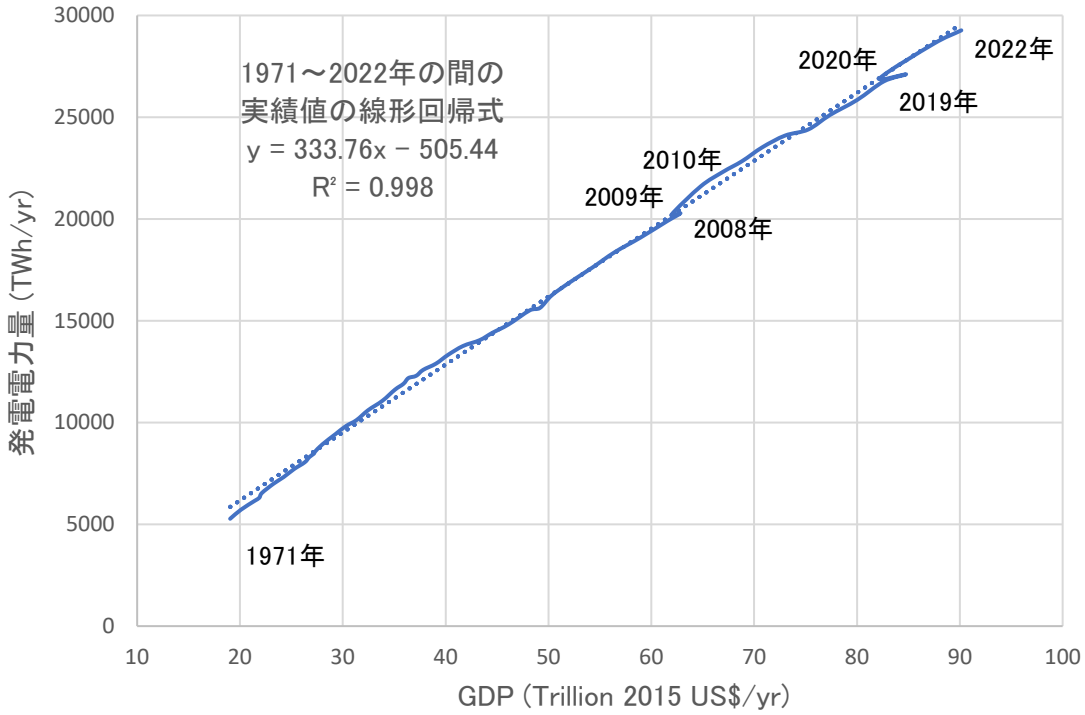


図 3.1.1-3 世界の GDP と発電電力量の関係（1971～2022 年）

(2) 世界 CO_2 排出量の要因分解

次に、世界 CO_2 排出量の増減について、茅恒等式の手法を用いた要因分解を示す。人口（POP と略す）、一人当たり GDP（GDP/POP）、GDP 当たり最終エネルギー消費量（TFC/GDP）、最終エネルギー当たり一次エネルギー供給量（PES/TFC）、一次エネルギー供給量当たり CO_2 排出量（CO_2/PES）に要因を分解し、世界における CO_2 排出量および各要因の 1971～2022 年における 10 年毎（最後は 12 年間）および 2010～2022 年の期間の 1 年毎の年平均変化率を求めた。図 3.1.1-4 にその結果を示す（分析に用いたデータは文献 2)）。

全体的な傾向として、世界 CO_2 排出量は増加している。2000～2010 年の期間は特に増大し、これは中国を中心としてインフラ整備が進み、エネルギー多消費産業の生産が激増したためと考えられるが、それを除けば大きなトレンドの変化は見られない。また、CO_2 排出量が上昇傾向である主な要因としては GDP の成長に因ることが大きいことが伺える。2010 年以降の 1 年毎のグラフではそれが顕著に現れており、特に COVID-19 に見舞われた時期とそれからの回復期において、CO_2 排出量変化が一人当たり GDP の変化と大きく連動している。

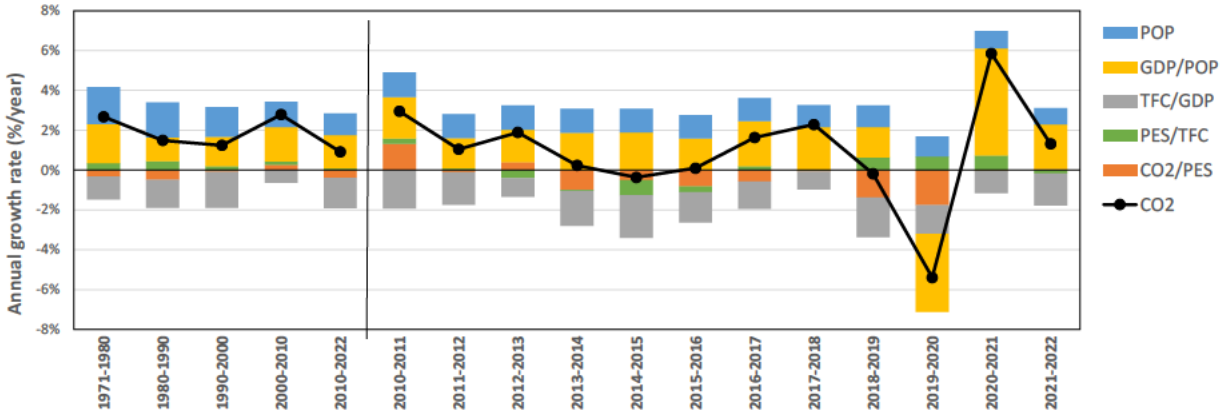


図 3.1.1-4　世界 CO_2 排出量の要因分解（茅恒等式）

3.1.2　世界の CO_2 排出等についての近年の状況

近年の世界 CO_2 排出の状況について、昨年度の報告書でも記したが、IEA の CO_2 排出に関するレポート [5]によると、世界エネルギー起源 CO_2 排出量は、2021 年に COVID-19 後のリバウンドにより対 2020 年比で大幅増加し、その後は緩やかな伸びになったものの、2023 年には前年比 1.1%増加の 37.4Gt に到達して、記録を更新した。2023 年の排出については、干ばつで水力発電量が減少したことによる押し上げを要因の一つとして挙げているが、一方、2019～2023 年でエネルギー起源 CO_2 排出が約 900Mt 上昇したことについて、2019 年以来の主要なクリーンエネルギー技術（PV、風力、原子力、ヒートポンプ、EV）の成長がなければ、排出の増加は 3 倍大きくなっていただろう、としている。これらのクリーンエネルギー技術の展開により、排出には構造的な減速傾向が見られることを指摘しており、2023 年までの 10 年間で世界の CO_2 排出は年間に 0.5%をやや上回るほどで増加しているものの、世界大恐慌以来では最も緩やかであると分析している。Global Carbon Project による Global Carbon Budget に関する最新のレポート [6]は、2014～2023 年における化石燃料由来と土地利用変化を合わせた CO_2 総排出量は、その前の 10 年間（2004～2013 年）における年間 2%という大幅な増加に比べ、ほぼ横ばい状態であったと報告している。地域的な傾向については、上述の 2023 年の排出に関するレポートによると、先進国では GDP が 1.7%成長したのに対し、排出は 4.5%減少したが、それは再エネ導入、米国における石炭からガスへのシフト等の構造的な要素と、幾つかの国における産業生産の停滞等の複数の理由による。また、中国やインドといった新興国では排出は増加しており、中国におけるポストパンデミックにおける多排出産業の継続的な成長や、インドでの堅調な GDP 成長等が排出増加の主な原因としている。近年における世界の GDP 成長と CO_2 排出の関係は、長期の線形トレンドの下方で推移している傾向も見られ、経済成長と CO_2 排出のデカップリング状況については、詳細な分析が求められる。

参考文献（第 3.1 節に関するもの）

1) RITE: 令和 3 年度地球温暖化対策における国際機関等連携事業 地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業 成果報告書 (2022)
2) IEA: Greenhouse gas emissions from energy 2024 (2024)
3) IEA: World Energy Balances 2024 (2024)
4) RITE: 平成 31 年度地球温暖化対策における国際機関等連携事業 地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業 成果報告書 (2020)
5) IEA: CO2 Emissions in 2023 (2024)
6) Global Carbon Project, Global Carbon Budget 2024, https://globalcarbonbudget.org/download/1253/?tmstv=1730990946

3.2 価格高騰期のエネルギー価格差拡大

3.2.1 はじめに

2025 年 1 月、米国第 2 次トランプ政権はパリ協定からの離脱を国連に通知し、バイデン政権のもとで実施されてきたグリーンニューディール政策の終了を宣言した（The White House 2025, Sec. 7）[1]。ドイツでは、2025 年 2 月 23 日の総選挙における野党であった中道右派のキリスト教民主同盟（CDU）の勝利を受け、これまで世界を牽引してきたカーボンニュートラル政策でも暖房や輸送における規制的手段や脱原発では軌道修正されるかもしれない（Goldmann 2025）。

脱炭素政策を取り巻く国際環境が激変する足音が聞こえていたなか、2024 年 12 月、日本では脱炭素政策を基盤とした第 7 次エネルギー基本計画の原案が示され、ほぼ修正されずに 2025 年 2 月 18 日に閣議決定されている。そこでは「脱炭素化に向けた取組に伴うコスト上昇を最大限抑制するべく、経済合理的な対策から優先して導入する」とされる（経済産業省 2025a, p.19）。だが日本のエネルギー政策にとって喫緊の課題は、脱炭素政策が不可避的に導くさらなるコスト上昇の抑制ではなく、近年に大きく拡大してきたエネルギー消費における内外価格差の縮小である。

政府もエネルギーの内外価格差の拡大に注視している。経済産業省（2025b, p.18）は「グローバル化が進み、生産拠点の海外移転が容易となった現代においては、諸外国との相対的なエネルギー価格差は自国産業の維持・発展にとって極めて重要な課題」と強調する。総合的なエネルギー価格差を適切に測定するためには、各国のエネルギー消費構造や産業構造の相違を考慮した体系的なデータベースの開発が必要である。産業用電力や個別化石燃料では、その単価（unit price）は既存統計や市場データから直接に観察できるが、異なる消費主体の直面する価格差としての代表性に問題があるかもしれない。熱量あたりの単価でみればエネルギー種別の単価差は数倍にも異なり、同じエネルギー種でもその消費主体によって単価は数倍にも異なる。またエネルギー統計と経済統計の概念と計数上の乖離は大きく、エネルギー統計からのエネルギー消

[1] 3.2 節は野村・稲場（2025）に基づき、2024 年度 ALPSⅣ経済分析 WG での議論によって加筆修正されたものである。

費量に平均的なエネルギー単価を乗じることでは経済統計におけるエネルギー消費額と大きな乖離が存在することも例外ではない。

エネルギー消費量と価格の構造的な把握では、経済統計とエネルギー統計を整合させた加工統計の開発が求められる。だが国民経済計算や産業連関表の公表を待つならば、そうした構築や分析には現象から 3–5 年ほどのタイムラグが生じざるをえなかった[2]。そうした課題に対して慶應義塾大学産業研究所では、脱炭素政策の加速を受けてその価格や生産に見いだされる動向を早期に把握するため、2022 年 1 月にエネルギーコスト・モニタリング（ECM）の開発を始めている。エネルギーコスト負担の動向を示す高頻度指標を現象から数か月ほどのタイムラグで推計する ECM の構造的な特徴は、エネルギー消費（インプット）のみではなく生産（アウトプット）との関係性において捉えることであり、価格面（p）とともに数量面（q）をエネルギー消費金額（v）との整合性を保持していることである。

これまでの ECM では、エネルギー種別・消費主体別に整合性を保持するために、（経済統計とエネルギー統計の概念差をできるだけ調整した上で）エネルギー統計の q と経済統計の v の測定量を優先し、価格 p（=v/q）を事後的に定義することを原則としてきた。しかし q と v に測定誤差や概念差が残るならば、事後的に定義される p に基づく内外価格差には大きな測定誤差を与えてしまう懸念があった。本節は、ECM の方法論に含まれていたこうした測定誤差の問題に対し、事後の p における測定誤差を再検討し、細分化されたレベルにおける q や v の ECM 測定法を改訂しながら、エネルギー消費の内外価格差としての精度改善を目的としている。

価格の時系列的な変化は価格指数（price index）と呼ばれるのに対し、2000 年代に入ってからは、横断面的な価格差・ギャップは価格水準指数（Price Level Index: PLI）と呼称されるものとなった。PLI は購買力平価（Purchasing Power Parity: PPP）を市場の為替レートで除して定義される。PPP や PLI に加え、内外価格差としてもっとも重視すべきは実質的なエネルギー価格差を示す Real PLI である。ここでの実質とは、エネルギーというインプット価格のみではなく、生産というアウトプット価格との関係によって価格差が定義されることを意味している。本節では、日本、中国、韓国、米国、英国、ドイツ、フランスの 7 か国を対象として、エネルギーの内外価格差指標（PPP、PLI、そして Real PLI）を測定する。測定期間は 2015 年 1 月から 2024 年 12 月までの速報値であり、加えて 2025 年の予測値を含んでいる。COVID-19 パンデミックからの世界経済の回復による、2021 年初めからのエネルギー価格高騰は世界的に類似したが、適切なエネルギー政策を策定していくためには、その背後で拡大する Real PLI に注視しなければならない。

[2] 野村（2021）は日本経済の長期産業別生産性勘定とエネルギー統計を接合した勘定体系を構築し、1955 年から 2016 年までの長期にわたるエネルギー消費およびエネルギー生産性の構造変化を分析している。しかしその最新データは 2016 年値であり、現象から 5 年のタイムラグが生じている。Nomura（2023）では 2015 年基準の国民経済計算体系（内閣府経済社会総合研究所）の公表に伴い、エネルギー分析用の生産性勘定においても基準改定を実施しているが、最新データは 2019 年に留まり分析のタイムラグは 1 年短縮されたにすぎない。急速に変化するエネルギーに関する状況を的確に捉え、エネルギー政策の不断の見直しを図るためには、扱う現象は限定的になるものの速報化が求められていた。

3.2.2 節ではエネルギー価格の多国間格差のフレームワークとして、とくに実質的な内外価格差を示す Real PLI とその含意について論じる。Real PLI の特性は為替レートの変化からは独立なことであり、過度の円安（ドル高）状態にある現在でも各国の国内経済が直面するエネルギーの内外価格差としての構造的なトレンドを把握できる。3.2.3 節では Real PLI の測定のための分類定義とそうした測定レベルの選択に伴う PPP 推計値に与える感度を分析する。本節の測定結果は 3.2.4 節において論じる。2021 年初めから（中国を除き）拡大した実質的な価格差は、そのピークにおいて米国比 2.3–2.7 倍に拡大し、2024 年第 4 四半期でも 2.2–2.5 倍の価格差が持続している。3.2.5 節を結びとする。本節での内外価格差の再検討によるこれまでの ECM 測定論の改訂については補論として 3.2.6 節において、また詳細な付録図表は 3.2.7 節において報告する。

3.2.2 測定フレームワーク

(1) 変数の定義

ECM の測定における基礎レベル（elementary level）は、エネルギー種（i）と経済主体（エネルギー消費主体）として産業（j）のクロス分類により定義される。基礎レベルにおける最終エネルギー消費（final energy consumption: FEC）と生産（gross domestic product: GDP）の諸変数を以下のように定義する。ECM では各国におけるエネルギー消費は月次ごとに、（日本以外の）生産は四半期ごとに定義されるが[3]、簡素化のためここでは時点（t）と国（c）を省略している。

E_{ij} 基礎レベルのエネルギー消費量（FEC）
P_{ij}^{E} 基礎レベルのエネルギー価格
V_{ij}^{E} 基礎レベルのエネルギー消費額（$=P_{ij}^{E}E_{ij}$）
V^{E} 集計レベルのエネルギー消費額（$=\sum_{ij}V_{ij}^{E}$）
E 集計レベルの（品質調整済み）エネルギー消費量
P^{E} 集計レベルの（品質調整済み）エネルギー消費価格（$=V^{E}/E$）
$\bar{E}$ 集計レベルの和集計エネルギー消費量（熱量換算）（$=\sum_{ij}E_{ij}$）
$\bar{P}^{E}$ 集計レベルの平均エネルギー消費単価（$=V^{E}/\bar{E}$）
X 集計レベルの生産量（実質 GDP）
V^{X} 集計レベルの生産額（名目 GDP）
P^{X} 集計レベルの生産価格（$=V^{X}/X$）

集計レベルにおけるエネルギー消費量（E）は、品質調整済みエネルギー消費量（quality-adjusted energy input）として、次のように定式化されている。

[3] 生産の速報値の把握ために、日本の ECM では月次 GDP 指標（JMGDP）の開発を合わせて実施しており（野村・稲場 2023）、日本以外では各国の公式 GDP 四半期推計値に依存している（Nomura and Inaba 2024）。そのため ECM 測定対象国におけるエネルギー関連指標は月次レベルでの推計としているが、Real PLI では四半期指標としている。

$$\Delta \ln E = \sum_{i,j} \bar{v}_{ij} \Delta \ln E_{ij}, \tag{3.2.2-1}$$

ここでΔは連続する二期間の差分として、$\Delta \ln E_{ij}$はそれぞれのエネルギー消費量の成長率を示している。その成長率を最終エネルギー消費総額に対するij別コストシェアの二期間平均値（$\bar{v}_{ij}$）をウェイトとして集計している（$\sum_{ij} \bar{v}_{ij}$=1）。熱量あたりの単価は、その品質の相違が反映され、エネルギー種（i）とエネルギー消費主体（j）ごとに異なる。エネルギー消費量（E）は、それを構成する異なるエネルギー種の間での品質の相違を、それぞれの相対的な価格差を考慮することで集計した指標である[4]。一国集計レベルでのエネルギー価格（P^E）は、V^Eと(3.2.2-1)式によるEにより、品質調整済みエネルギー価格（quality-adjusted energy input price）として、以下のようにインプリシットに定義される。

$$P^E = V^E / E. \tag{3.2.2-2}$$

エネルギー消費量（E）との比較のため、最終エネルギー消費（熱量換算）の和集計量として、

$$\bar{E} = \sum_{ij} E_{ij}, \tag{3.2.2-3}$$

を定義し、品質を考慮しないエネルギー消費量による平均単価を、

$$\bar{P}^E = V^E / \bar{E}, \tag{3.2.2-4}$$

として定義する。(3)項では、比較国間のエネルギー消費構造を反映した PPP とともに、$\bar{P}^E$に基づく内外価格差も定義される。

(2) 二国間格差

基礎レベルで定義されるP_{ij}^Eを各国通貨建て（local currency unit: LCU）で評価した熱量あたりの単価として測定し、c_1国を参照国としc_2国を比較国とした二国間のエネルギー消費の PPP を次のように定義する。

$$\mathrm{PPP}^{\mathrm{E}}_{ij,c_1c_2} = \frac{P^E_{ij,c_2}}{P^E_{ij,c_1}}. \tag{3.2.2-5}$$

基礎レベルでのエネルギーPPP に対し、一国集計レベルにおけるエネルギーPPP の測定では二国間のエネルギー消費構造の相違が考慮される。c_1国の消費量を基準として、ラスパイレス指数による PPP を以下のように定義する。

$$\mathrm{PPP}^{\mathrm{E(L)}}_{c_1c_2} = \sum_{ij} \frac{P^E_{ij,c_2} E_{ij,c_1}}{P^E_{ij,c_1} E_{ij,c_1}} = \sum_{ij} w^E_{ij,c_1} \mathrm{PPP}^{\mathrm{E}}_{ij,c_1c_2}. \tag{3.2.2-6}$$

[4] 経済測定としてのエネルギー品質の測定に関する詳細は野村（2021, 2.2.1 節）に詳しい。

w^E_{ij,c_1}はc_1国におけるエネルギー消費金額シェア（$V^E_{ij,c_1}/\sum_{ij} V^E_{ij,c_1}$）であり、それをウェイトとする加重算術平均によってラスパイレス指数によるエネルギーPPPが定義される。

同様に、c_2国の消費量を基準としたパーシェ指数によるエネルギー消費のPPPとして、

$$\mathrm{PPP}^{\mathrm{E(P)}}_{c_1c_2} = \sum_{ij} \frac{P^E_{ij,c_2} E_{ij,c_2}}{P^E_{ij,c_1} E_{ij,c_2}} = \frac{1}{\sum_{ij} w^E_{ij,c_2} \left(1/\mathrm{PPP}^{\mathrm{E}}_{ij,c_1c_2}\right)}, \tag{3.2.2-7}$$

を定義する。ここでw^E_{ij,c_2}はc_2国におけるエネルギー消費金額シェア（$V^E_{ij,c_2}/\sum_{ij} V^E_{ij,c_2}$）であり、それをウェイトとする加重調和平均によってパーシェ指数によるエネルギーPPPが定義される。

ラスパイレス指数とパーシェア指数により、フィッシャー指数によるエネルギーPPPは次のように定義される。

$$\mathrm{PPP}^{\mathrm{E(F)}}_{c_1c_2} = \sqrt{\mathrm{PPP}^{\mathrm{E(L)}}_{c_1c_2} \mathrm{PPP}^{\mathrm{E(P)}}_{c_1c_2}}. \tag{3.2.2-8}$$

フィッシャー指数によるPPP（(3.2.2-8)式）に対する基礎レベルのPPP（(3.2.2-5)式）の寄与度は次のように表される（Chevalier 2003, Eq. (11)）。

$$\mathrm{PPP}^{\mathrm{E(F)}}_{c_1c_2} = \sum_{ij} \frac{\left(E_{ij,c_1} + E_{ij,c_2}/\mathrm{QLI}^{\mathrm{E(F)}}_{c_1c_2}\right) P^E_{ij,c_1}}{\sum_{ij}\left(E_{ij,c_1} + E_{ij,c_2}/\mathrm{QLI}^{\mathrm{E(F)}}_{c_1c_2}\right) P^E_{ij,c_1}} \mathrm{PPP}^{\mathrm{E}}_{ij,c_1c_2}. \tag{3.2.2-9}$$

ここでの$\mathrm{QLI}^{\mathrm{E(F)}}_{c_1c_2}$はフィッシャー指数によって定義される二国間の数量水準指数（Quantity Level Index: QLI）であり、

$$\mathrm{QLI}^{\mathrm{E(F)}}_{c_1c_2} = \frac{V^{\mathrm{E}}_{c_2}/V^{\mathrm{E}}_{c_1}}{\mathrm{PPP}^{\mathrm{E(F)}}_{c_1c_2}}, \tag{3.2.2-10}$$

として定義される。(3.2.2-9)式において、$\mathrm{QLI}^{\mathrm{E(F)}}_{c_1c_2}$は二国間のエネルギー消費量のスケールを調整（$c_1$国のスケールに基準化）する役割を担っている。

(3) 多国間格差

フィッシャー指数によるbilateral PPP（(3.2.2-8)式）は、二国間の関係性としての転逆テスト（country reversal test）を満たすが、多国間の関係性としての推移性テスト（transitivity test）を満たさない[5]。本節ではEKS（Éltető-Köves-Szulc）法に基づき、エネルギー消費のEKS-PPPを次のように定義する。

[5] 転逆テストとは、c_1国とc_2国のPPPは、両国を入れ替えたc_2国とc_1国のPPPの逆数となることである。また推移性テストとは、c_1国とc_2国のPPPは、c_2国とc_3国のPPPをc_1国とc_3国のPPPで除したものと等しいことを示している。

$$\mathrm{PPP}^{\mathrm{E}}_{c_1c_2} = \prod_{c_3}\left(\mathrm{PPP}^{\mathrm{E(F)}}_{c_1c_3}\mathrm{PPP}^{\mathrm{E(F)}}_{c_3c_2}\right)^{1/\mathrm{N}}, \tag{3.2.2-11}$$

ここでNは本節の測定対象となる 7 カ国（日中韓米英独仏）である。以下では、(3.2.2-11)式によって測定される EKS-PPP を単に PPP と呼び、測定期間内における月次ごとに横断面的に推計する[6]。

比較国間のエネルギー消費構造の相違を反映した$\mathrm{PPP}^{\mathrm{E}}$に対し、エネルギー消費量（熱量換算）あたりの平均単価（(3.2.2-4)式）による PPP を、

$$\overline{\mathrm{PPP}}^{\mathrm{E}}_{c_1c_2} = \bar{P}^{\mathrm{E}}_{c_2}/\bar{P}^{\mathrm{E}}_{c_1}, \tag{3.2.2-12}$$

として定義する。$\mathrm{PPP}^{\mathrm{E}}$と$\overline{\mathrm{PPP}}^{\mathrm{E}}$の乖離は、3.2.3 節(1)項（表 3.2.3-2）に数値例を示しながら後述する。

エネルギーの価格水準指数（Price Level Index: PLI）は、エネルギーの PPP（$\mathrm{PPP}^{\mathrm{E}}_{c_1c_2}$）と市場における二国間の平均為替レート（$\mathrm{e}_{c_1c_2}$）に基づいて、以下のように定義される。

$$\mathrm{PLI}^{\mathrm{E}}_{c_1c_2} = \mathrm{PPP}^{\mathrm{E}}_{c_1c_2}/\mathrm{e}_{c_1c_2}. \tag{3.2.2-13}$$

たとえば、1kWh あたりの電力が日本で 30 円、米国で 0.1 ドル（10 セント）であるとき、電力の PPP は 300（=30/0.1）円／ドルである。このことは、もし日米間の為替レートが 300 円／ドルであれば、両国における電力サービスの購入において日本円と米ドルによる購買力がパリティー（平価）になることを意味している。いま市場における為替レートが 150 円／ドルであるとしたとき、電力の PLI は 2.0（=300/150）となる。この為替レートで示される購買力のもとでは、日本の電力価格は米国に比して 2 倍高いと評価される[7]。もし為替が円高となり 100 円／ドルとなれば、3 倍高いものと解される。時系列データにおいて価格指数（price index）は参照時から比較時までの価格変化を示すように、横断面データにおいて PLI は参照国から比較国の内外格差を示している。

エネルギーの実質的な内外価格差を評価するためには、エネルギーというインプットの PLI とともに、エネルギーを利用して生産されるアウトプットの PLI との関係を捉えることが望ましい。高いエネルギー価格差に直面しようとも、競争力のある経済が生産によって高いアウトプット価格（付加価値）を実現できるのであれば、実質的なエネルギー価格の負担は小さなものとなるからである。逆に、競争力を失いつつある経済がアウトプット価格の上昇を相対的に抑制せざるを得ない状況にあれば、エネ

[6] 本節による検討前の ECM（ECM_202501 まで）は、エネルギー消費の PPP を基準年とした 2015 年でのみ測定し、各国での一国集計レベルでの品質調整済みのエネルギー価格（P^E）の月次推計値を反映して延長推計していた。本節は(3.2.2-9)式のように PPP/PLI の基礎レベルにおける要因分解のため、各期における PPP を推計している。

[7] 1 米ドルと 150 日本円が等価であるとき、米国において 1 ドルで購入できる電力量は 10kWh だが、日本において 150 円で購入できる電力量は 5kWh と半分となる。

ルギー投入の内外価格差が不変であったとしても、実質的な負担は拡大していると言える。

エネルギー価格と生産価格の関係性を捉える指標として Real PLI を、

$$\text{Real PLI}^{\text{E}}_{c_1c_2} = \text{PLI}^{\text{E}}_{c_1c_2}/\text{PLI}^{\text{X}}_{c_1c_2} = \text{PPP}^{\text{E}}_{c_1c_2}/\text{PPP}^{\text{X}}_{c_1c_2}, \tag{3.2.2-14}$$

として定義する。ここで$\text{PPP}^{\text{X}}_{c_1c_2}$は（$c_1$国を参照国とする）二国間の集計アウトプット（実質 GDP）の PPP である。本節での生産 PPP は、最新となる 2021 年の国際比較プログラム（International Comparison Program: ICP）ラウンド（World Bank 2024）の推計値に基づいている[8]。その時系列的な四半期計数は、各国の四半期国民経済計算（Quarterly National Accounts: QNA）における GDP デフレーターを用いて延長推計しており、(3.2.2-13)式と同様にアウトプットの PLI が定義される。

Real PLI の大きな特性は、為替レートの変動による影響を受けないことである。(3.2.2-14)式の右辺第二項に示されるように、それはエネルギーとアウトプットの PPP の比であり、いずれも為替レートからは独立に測定される。円安が過度に進行した現状の日本では、(3.2.2-13)式におけるエネルギーPLI は実質的な負担を過小に評価するものとなろう。円安は、化石燃料の日本の輸入価格（円建て）を高めるが、国内における電力価格はそれほどには上昇せず、PLI という指標では（為替レートの円安により分母が大きくなるので）内外価格差はむしろ縮小する[9]。だが実質的な負担として評価すべきは生産価格差との相対的な関係である。円安の進行によっては、アウトプットの PLI も低下していることが一般的である。現在の日本におけるエネルギー内外価格差における実質的な負担は、両者の比である Real PLI によって評価することが望ましい。

3.2.3 分類と PPP 感度

(1) エネルギー種分類

前節の測定フレームワークに基づき、本節では具体的な測定法を論じる。表 3.2.3-1 は ECM におけるエネルギー種分類を示している。大分類として 1 桁分類の 6 財（1.石炭製品、2.ガス、3.石油製品、4.電力、5.熱供給、6.その他）、小分類として 3 桁分類の 29 財を定義している。本節での内外価格差（PPP, PLI, Real PLI）は ECM でのエネ

[8] 最新となる ICP2021 における GDP の PPP（World Bank 2024）では、ICP2017（World Bank 2020）からの改訂率（2021 年までの延長推計値から評価）によれば、日本では 2.0%（96.8 円／ドルから 98.7 円／ドルへ改訂）、中国では–4.6%、韓国 0.4%、英国では–5.0%、ドイツ–5.0%、フランス–8.0%である。ゆえに Real PLI では、ICP 改訂により日韓以外では上方（米国との実質的な格差が拡大する方向）へ改訂される。

[9] 戦後日本経済成長の経験に基づくと、日本の集計的なエネルギー価格は米国の 1.5 倍から 3.3 倍ほどの価格差というハンデに長期にわたり直面してきたが、日米格差がもっとも拡大したのは過度の円高を許容するに至った 1995 年である（野村 2021, 図 3.1）。円高は一次エネルギーの輸入価格（円建て）を低下させるが、電力や石油製品など二次エネルギーの国内価格は一次エネルギーほどには低下せず、エネルギーの日米価格差をむしろ拡大させる。現在の過度の円安下では逆の状況が生じている。

ルギー種小分類に基づき測定され、寄与度計算などでは必要に応じて大分類を利用している。

表 3.2.3-1 エネルギー種分類

2桁分類(6)	3桁分類(29)	2桁分類(6)	3桁分類(29)
1. 石炭製品	101. 石炭	4. 電力	401. 事業用電力
	102. 石炭コークス		402. 自家発電
	103. 石炭ガス	5. 熱供給	
	104. 泥炭・泥炭製品	6. その他	601. 廃棄物
	105. オイルサンド・オイルシェール		602. バイオ燃料
2. ガス			603. 原子力
3. 石油製品	301. 原油、NGL、石油精製原料		604. 水力
	302. 液化石油ガス		605. 地熱
	303. ガソリン		606. 太陽光
	304. ジェット燃料油		607. 太陽熱
	305. 灯油		608. 潮流・波浪・海洋
	306. 軽油		609. 風力
	307. 重油		610. その他エネルギー
	308. ナフサ		
	309. 潤滑油		
	310. その他石油製品		

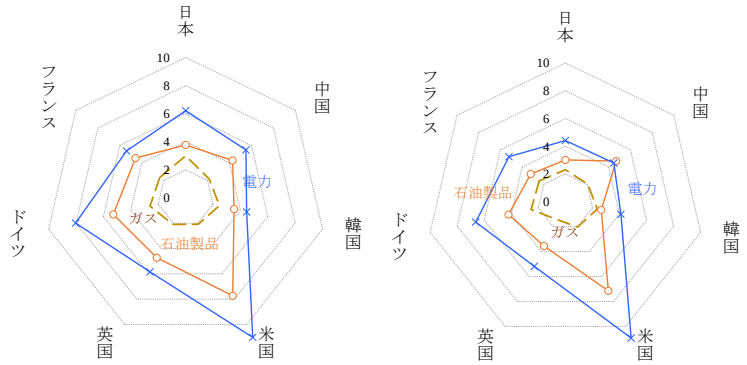
注：ECM の基礎レベルでは各エネルギー種は国産財と輸入財別に定義されているが、PPP では測定誤差を考慮して、両者を合わせた複合財として測定している。

なお 6.その他は、最終エネルギーとして直接に消費される廃棄物や再エネ（主に地熱と太陽熱であり、太陽光や風力による発電は 4.電力に含まれる）からなるが、統計資料からそうしたエネルギー価格に関するデータを入手することはかなり限定的である。部分的に利用可能な資料があろうとも、各国における複雑な補助金制度に支えられ、内外価格差としての意味のある国際比較は難しい。そのため 6.その他において ECM では簡易な仮定に基づいている[10]。その消費量シェアは限定的ではあるが、ドイツでは 2024 年第 4 四半期において FEC 総量に対して 8.3%、フランスでも 8.2%を占めている（後述の図 3.2.3-2）。本節のエネルギーPPP では、6.その他による寄与度は簡易な仮定に依存したものである。

各国における 1.石炭製品の熱量あたりの単価を 1.0 として基準化し、パンデミック前（2015–2019 年平均値）と 2024 年第 4 四半期において、エネルギー種ごと（大分類のうちの大きな 4 つ）の相対的な価格差（$\bar{P}_i^{\mathrm{E}}/\bar{P}_{i=1}^{\mathrm{E}}$）を示したものが図 3.2.3-1 である。エネルギー種間の相対的な価格差としては、石炭製品＜ガス＜石油製品＜電力とした安定した関係性があり、それはパンデミック後における価格差が拡大した後（図 3.2.3-1 右）でも概ね安定している。中国・韓国では石炭価格に比して相対的には電力価格は政策的に抑制されており、とくに現在では中国では石油の価格差が電力の価格差を上回るほどである。米国ではエネルギー価格全般が他国に比して安価だが、とくにガスと石炭価格において大きな優位性がある（図 3.2.4-4）。米国では、シェール革命によりガス価格は 2000 年代後半から大きく低下した。米国の石炭は露天掘りが主流であり、採掘コストが安い。その上に、シェールガスが安価に提供されるものとなったことで石炭の国内需要が低迷したが、内陸部から港までの国内輸送コストが大きい

[10] ECM では簡易的に、廃棄物では国ごとに最も単価が小さいエネルギー種（主に石炭）の単価を適用し、再エネでは（エネルギー転換部門では金額評価をせず）エネルギー最終消費では（熱供給の単価が利用できない国が多いため）ガスの単価を適用している。

ために輸出には適さず、国内価格が低下している。そうした安価な石炭とガスの国内価格により、エネルギー種間の相対関係として電力と石油価格は他国に比してより高価となっている（図 3.2.3-1）。

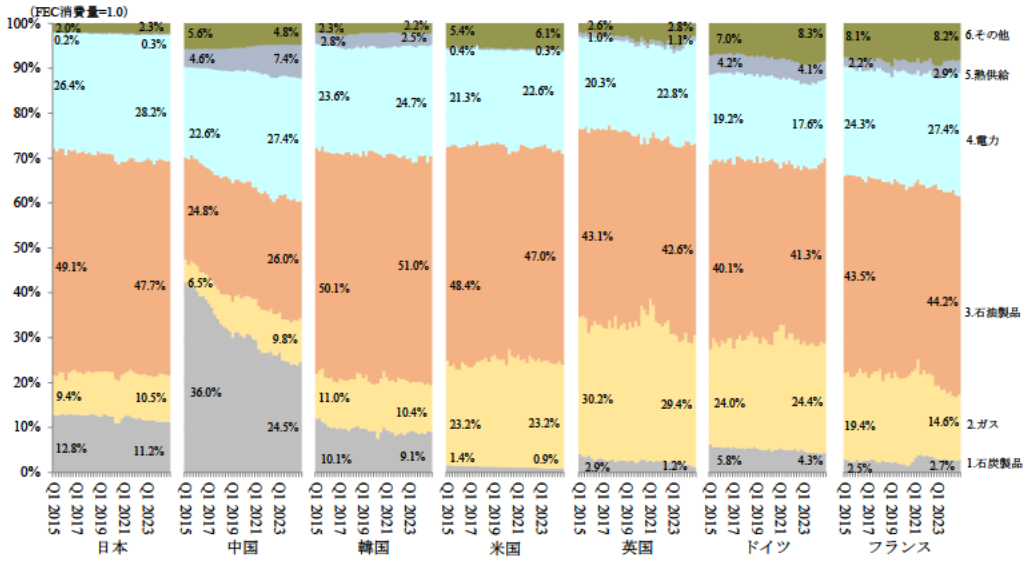


（2015–2019 年平均）　　（2024 年第 4 四半期）

単位：各国における石炭製品価格=1.0。注：エネルギー価格への税金および補助金を含む。

図 3.2.3-1 エネルギー種別の相対価格差

集計レベルでのエネルギーPPP は、エネルギー種ごとの価格差とともに、最終エネルギー消費の構成に依存する。各国における最終エネルギー消費の特性として、2015 年から 2024 年までの FEC 総量に占めるエネルギー種別（大分類）シェアを示したものが図 3.2.3-2 である。またとくに電力化率と化石燃料比率の国際比較は図 3.2.3-3 に示されている。電力化率は近年ではすべての対象国において 2–3 割ほどで類似するものの、そのうち日本が 2024 年第 4 四半期では 28.2%となりもっとも高い。対照的にもっとも電力化率の低いのはドイツであり 17.6%に留まる。ドイツでは電力化率は 2000 年代後半から穏やかな低下傾向にあったが 2015 年以降でも低迷し、近年は電力価格高騰（図 3.2.4-3）を受け減少している（図 3.2.3-3）。米国でも、とくに民主党バイデン政権下のもとでは、（米国内では相対的に）高い電力価格を反映して、電力化率の低下がみられる。中国は相対的には抑制された電力価格のもとに、産業サービス化の進行もあり、この間に電力化率は大きく上昇している。

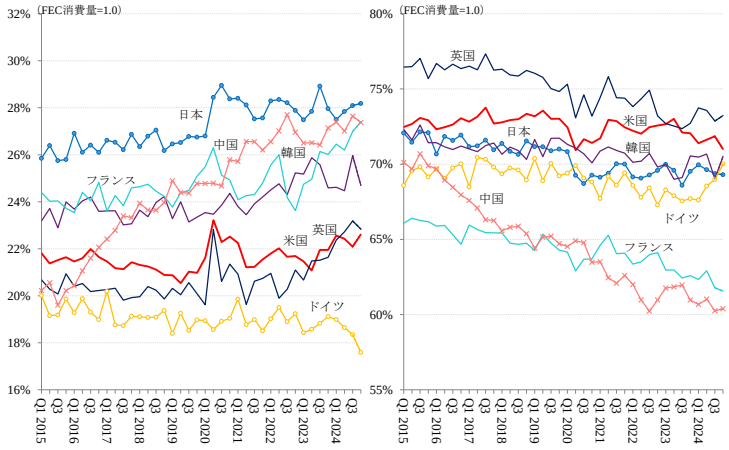


単位：FEC 消費量=1.0。出典：EIA Monthly Energy Review や UK Department of Energy Security and Net Zero Energy Trends など各国統計資料（Nomura and Inaba 2024, Tables 3–4）に基づく ECM 推計値。注：季節調整済み。観測期間は 2015 年第 1 四半期–2024 年第 4 四半期。図上の計数はパンデミック前（2015–2019 年平均値）と近年（2024 年第 4 四半期）のシェア。

図 3.2.3-2 最終エネルギー消費量シェア

FEC の化石燃料比率は、米国を除くすべての国で低下傾向にあるが、概ね 7 割ほどのシェアで安定している（図 3.2.3-3）。とくに中国では石炭製品の FEC に占めるシェアはパンデミック前の 36.0%から現在の 24.5%まで低下傾向にあるが（ここに石炭火力発電用の石炭消費量は大きく拡大[11]）、依然として依存度は高い。同国で最終消費される石炭製品の消費主体は、鉄鋼業（2024 年第 4 四半期において石炭製品の最終消費の 56.1%）と窯業土石製品製造業（同 16.1%）である。鉄鋼の内需低迷を受けて市場を海外に求めて同国によるダンピングの批判が高まったのは 2023 年第 2 四半期からであり、石炭シェアもほぼ横ばいとなっている（図 3.2.3-2）。

11 2024 年にも中国は 94.5 ギガワットの石炭火力発電所の建設見通しであり、これは 2015 年以来の最高記録となっている（Construction Briefing 2025）。

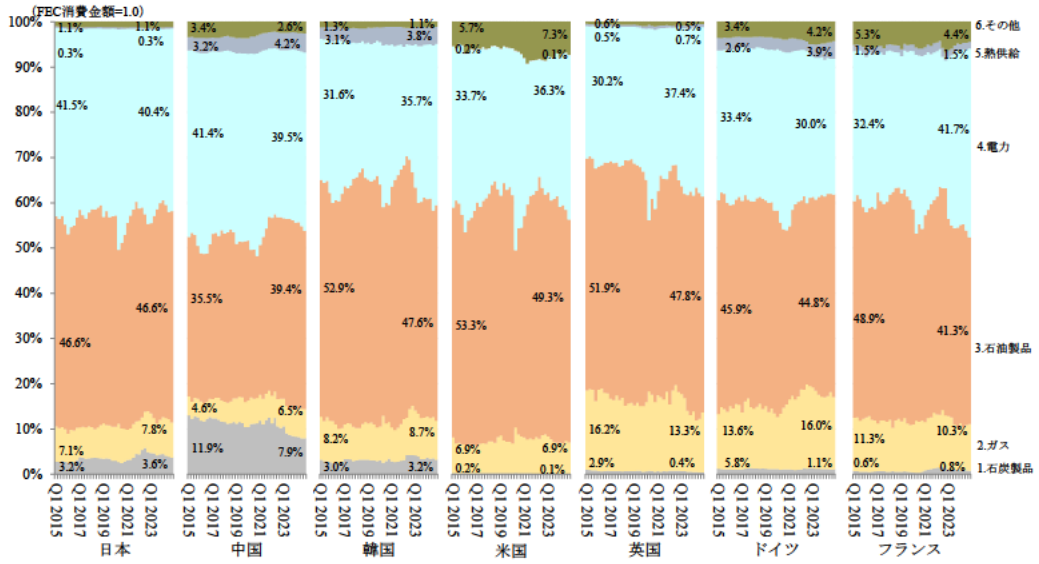


（電力化率）　　（化石燃料比率）

単位：FEC 消費量=1.0。出典・注:図 3.2.3-2 を参照。

図 3.2.3-3 電力化率と化石燃料比率

図 3.2.3-2 と同様に、エネルギー種別の FEC 消費金額シェアを示したものが図 3.2.3-4 である。消費量ベースに比して、消費金額ベースでは石炭のシェアはさらに縮小し、最大である中国でも近年（2024 年第 4 四半期）で 7.9%に減少する。その一方で相対的に高価な電力の重要性は金額シェアでは高まり、2024 年第 4 四半期では、最小となるドイツの 30.0%から最大となるフランスでは 41.7%を占めている。いずれの国でも最大の消費シェアは石油製品である（最小シェアは中国の 39.4%、最大シェアは米国の 49.3%）。集計レベルでのエネルギーPPP は EKS 法により測定されるが（(3.2.2-11)式）、その根源は、個別エネルギー種の PPP をその消費金額シェアをウェイトとした加重平均（(3.2.2-6)–(3.2.2-7)式）である。ゆえに集計レベルでのエネルギーPPP は、最大の消費金額シェアを持つ石油製品と、それに次ぐ金額シェアとなる電力の価格差を大きく反映する。



単位：FEC 消費金額=1.0。出典：各国統計資料（Nomura and Inaba 2024, Tables 3–4）に基づく ECM 推計値。注：季節調整済み。観測期間は 2015 年第 1 四半期–2024 年第 4 四半期。図上の計数はパンデミック前（2015–2019 年平均値）と 2024 年第 4 四半期のシェア。

図 3.2.3-4 最終エネルギー消費金額シェア

3.2.2 節(3)項に示される本節の PPP 測定フレームワークに対し、ひとつの比較対象は平均単価によって簡易に算定される $\overline{PPP}^{E}$（(3.2.2-12)式）である。いま数値例として、1.石炭製品と 4.電力の実測値（2024 年第 4 四半期）に基づいて、エネルギー種を統御することの意義を検討しよう。表 3.2.3-2 のように、日米両国の熱量あたりの平均単価と消費量（熱量）がデータとして観察されれば、両者の積による消費額の総計を消費量計で除することで、平均単価 PPP が算定される。ここで電力は石炭製品に対し、日本では 4.4 倍、米国では（安価な石炭価格に引きずられて）10.9 倍高価である（図 3.2.3-1 右）。2 つの財にこうした相対価格差が存在するが、消費量（ここでは FEC に限る）としては、米国では日本に比して相対的には石炭消費量ははるかに小さい（図 3.2.3-2）。そうした 2 財 2 国間のエネルギー消費下において算定される $\overline{PPP}^{E}$は 137.5 円／ドルである。2 財の集計レベルで定義される PPP は両者の PPP の間に入ることが望ましいが、こうした数値例（実測値）では電力の PPP（170.2 円／ドル）と石炭 PPP（421.6 円／ドル）の両者を下回り、平均単価 PPP はほとんど意味をなさない測定バイアスを与えている。表 3.2.3-2 の計数に基づくフィッシャー指数による PPP は 175.0 円／ドルであり、2 財の PPP の間に適切に位置する。

表 3.2.3-2 平均単価 PPP の誤謬

	平均単価 (MJあたり円 orドル)				消費量(熱量) (PJ)			消費額(10億円 or 10億ドル)		
	a.電力	b.石炭	(a/b)	平均単価	a.電力	b.石炭	計	a.電力	b.石炭	計
日本	6.639	1.505	4.41	5.182	783	310	1,093	5,196	467	5,663
米国	0.039	0.004	10.93	0.038	3,713	143	3,856	144.8	0.51	145.3
日米PPP	170.2	421.6		137.5						

注：計数は 2024 年第 4 四半期による ECM 実測値。平均単価 PPP は(3.2.2-12)式。なお本計数に基づくフィッシャー指数による PPP（(3.2.2-8)式）は 175.0 円／ドルである。

(2) 消費主体分類

ECM のエネルギー消費主体分類は、1.エネルギー転換部門と、2.非エネルギー転換部門に大別される。1.エネルギー転換部門は 5 つの 2 桁分類（11.電力業、12.熱供給業、13.石油製品、石炭製品製造業、14.鉱業、15.バイオ燃料製造業）からなり、2.非エネルギー転換部門は 5 つの産業（21.産業、22.運輸、23.家庭、24.業務、25.農林水産業）から構成される。

本節における FEC の内外価格差（PPP, PLI, Real PLI）の推計として、2.非エネルギー転換部門のみに限定した消費主体分類を表 3.2.3-3 に示している。2 桁分類（5 部門）に対し、21.産業部門のうちに 211.エネルギー多消費（Energy-intensive trade-exposed: EITE）産業と 212.Non–EITE 産業を分離し、また（経済統計との対応のため）22.運輸部門のうちに 221.運輸（家計）と 222.運輸（除家計）を分離した 3 桁分類（7 部門）、さらに 211.EITE 産業を 5 つに分離した 4 桁分類（11 部門）を定義している。また大きく家計と産業の 2 部門への集計部門を定義する。ここで家計部門は 221.運輸（家計）と 23.家庭の合計とし、産業部門はそれ以外である。

表 3.2.3-3 消費主体分類

2桁分類 (5)	3桁分類 (7)	4桁分類 (11)
21 産業	211 EITE産業	2111 鉄鋼業
		2112 化学業
		2113 非鉄金属業
		2114 窯業土石製品製造業
		2115 紙・パルプ製造業
	212 Non–EITE産業	
22 運輸	221 運輸（家計）	
	222 運輸（除家計）	
23 家庭		
24 業務		
25 農林水産業		

注：括弧内は部門数。家計と産業の 2 部門では、家計部門は 221 と 23 の合計として、産業部門はそれ以外として定義。転換部門を含めた詳細な消費主体分類は Nomura and Inaba（2024, Table 2）を参照。3 桁分類である 211.EITE 産業と 211.Non-EITE 産業は製造業であるが、後者には建設業と鉱業を含む。また 24.業務はサービス業と公務を含み、（IEA の統計では国際標準産業分類（ISIC）に準拠していることから）製造業企業の本社におけるエネルギー消費を含む。日本標準産業分類（JSIC）はそうした整合性が保たれておらず、本社のエネルギー消費も製造業に含まれていると考えられる。

消費主体分類の定義により、ECM では産業連関表（SUT/IOT）や SNA 統計（GDP 統計）などの経済統計に基づく名目消費金額としての年次ベンチマーキングがおこなわれる（Nomura and Inaba 2024, Section 3.3）。現象から 2–3 年ほどのタイムラグを持っておこなわれる金額の年次ベンチマーキングは、ECM におけるエネルギー消費額を経済統計などと整合させるために重要なプロセスだが、ときに大きな乖離を示すこともある[12]。乖離幅が軽微なときには、経済統計（における金額推計値）を優先して単価を事後的に定義している。しかし大きな乖離の生じるときには、内外価格差の推計値に大きく影響する。そうしたケースでは、エネルギー統計と経済統計のそれぞれを検討した上での計数補正や、ベンチマーキングにおける消費主体分類の粒度（3 桁分類から 2 桁分類への調整）などによって調整している。

ECM ではエネルギー消費が存在するすべての基礎レベルにおいて価格が付与されるように推計される。統計資料によって特定のエネルギー種の価格が観察できないケースでは、ECM では調和価格（harmonized price）により補完している。欠損国におけるエネルギーの調和価格は、統計資料から観察される国において当該エネルギーとそれと類似した（同じ 1 桁分類に属する 3 桁分類の）エネルギーとの相対価格指数を算定し、観察可能な国が複数存在するときにはその相対格差指数の幾何平均（ジェボンス指数）を用いることで補完推計したものである。

こうして測定されたP_{ij}^{E}の国別価格マトリックスに基づく PPP 測定における感度について、以下では 2 つの点を論じておきたい。

① 基礎レベルのゼロ消費量の扱い

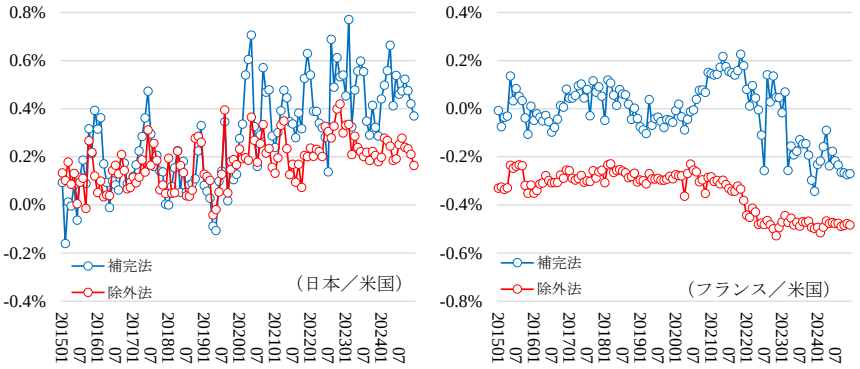
参照国あるいは比較国のいずれかの消費量が基礎レベルにおいてゼロであるケースでは、集計レベルの PPP 測定にバイアスをもたらす。ゼロ消費に対して以下のような対応法が想定される。

- 未調整
  調整をせず、ラスパイレスかパーシェの算定（(3.2.2-6)–(3.2.2-7)式の固定数量による算定）において、ゼロ消費となる分母か分子のどちらかで欠落したまま。
- 補完法
  ゼロ消費となる国において、単価は調和価格（上記）により推計し、合わせて（集計レベルには影響しないほどの）小さな消費量を想定して補完。

[12] ECM では二段階のベンチマーキングをおこなっている。第一段階は IEA の年次統計の公表に伴うエネルギー消費量のベンチマーキングであり、現象から 2 年近くのラグを持って実施される。たとえば 2022 年のエネルギー消費量の ECM 月次推計値は、2024 年 9 月の IEA World Energy Balances の公表によって 2022 暦年値としての整合性が主に比例デントン法により保持される。第二段階はエネルギー消費金額のベンチマーキングである。エネルギー消費主体間で大きな価格差や補助金などが存在すれば、（エネルギー統計が示す）エネルギー平均単価データはその代表性に問題があるかもしれない。経済統計との金額ベンチマーキングの意義は大きいが、エネルギー転換消費との識別、副産ガスの取り扱い、経済統計で産業内に含まれる自家発電用の消費金額の識別、本社部門の産業格付けの相違、あるいは経済統計における測定誤差など、課題は多い。そうした検討の上でベンチマーキングの粒度を定めて経済統計におけるエネルギー消費金額（暦年値）との整合性をとるように（主に比例デントン法により）単価の月次推計値を補正している。

- 除外法
  いずれかの国でゼロ消費となるエネルギー種を二国間 PPP の測定では両国ともに除く。

図 3.2.3-5 は、参照国を米国、比較国を日本とフランスとしたケースにおいて、未調整ケースの PPP 測定値（フィッシャー指数）に対する上記の補完法と除外法による測定値の乖離率を表している。未調整ケースに比して、日米 PPP では二つの補間法ともに概ね上方へと改訂させる傾向（改訂幅はプラス 0.8%以内）にあるのに対して、米仏 PPP では補完法によれば上方改訂から下方改訂となり除外法では下方への改訂（改訂幅はマイナス 0.6%以内）を示している。ともに調整法の選択による影響は PPP の測定精度に比して大きな影響を与えるものではないが、本節では時系列的には改訂幅が相対的に安定的となる除外法を採用している。



単位：未調整ケースからの乖離率。注：ここではエネルギー種 3 桁分類、消費主体 3 桁分類に基づき算定。観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月。

図 3.2.3-5 ゼロ消費量の調整法による感度

② 消費主体分類の相違による感度

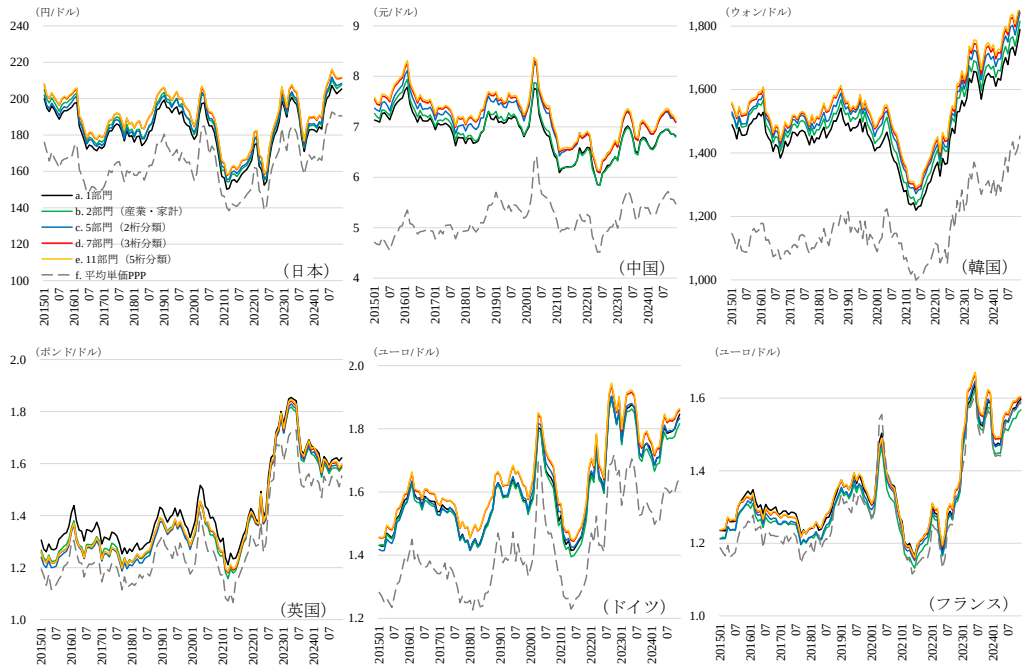
エネルギー消費では、同じエネルギー種でも消費価格は消費主体により大きく異なりうる。前節（表 3.2.3-2）で論じた平均単価 PPP の持つ集計バイアスは、消費主体間において大きな価格差が存在し、二国間においてエネルギー消費構造に相違のあるときにも現れる。その意味では集計レベルの PPP を細分化した主体レベルから測定することが望ましいが、とくに ECM のような速報値では、消費主体の細分化は必ずしもデータの測定精度が担保されたものではない（データが利用できない基礎レベルでは ECM での仮定による推計も含まる）ことに留意されたい。

集計レベルの PPP 測定におけるエネルギー消費主体の相違による感度として、エネルギー消費主体として一国全体（1 部門）、産業と家計（2 部門）、2 桁分類（5 部門）、3 桁分類（7 部門）、4 桁分類（11 部門）の 5 つのそれぞれの粒度で測定される PPP^{E}（(3.2.2-11)式）を比較したものが図 3.2.3-6 である（いずれもエネルギー種分類は基礎レベルで固定）。熱量あたりの平均単価（エネルギー種も集計したマクロ指標）により定義される $\overline{PPP}^{E}$（(3.2.2-12)式）を比較対象とすれば、エネルギー種を細分化して EKS

法によって測定されるPPP^Eはいずれも上回る。平均単価による PPP は、英仏ではその乖離幅は相対的に小さいが、格差を過小推計する傾向にあると言える。

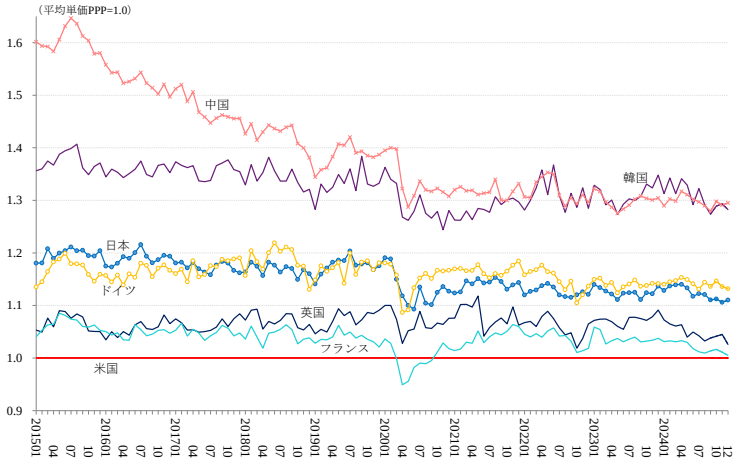
一方、消費主体の粒度に基づく乖離は相対的に小さい。本節の測定期間では、消費主体の細分化によって、英国を除くすべての国では上方（米国との価格差拡大）へと改訂される傾向が見いだされる。アジア諸国における消費主体の細分化による対米 PPP の上方改訂は、エネルギー多消費的である（石炭やガスなどへの依存度の高い）産業が相対的に大きな消費シェアを持ち、そしてそうした産業においてエネルギー価格差が大きいことに起因すると解される。消費主体別の測定精度は国ごとに異なり総じて評価することは難しいが、本節では消費主体として 3 桁分類（7 部門）に基づき PPP を測定する。

本節でのエネルギー種 3 桁分類・消費主体 3 桁分類を基礎レベルとしたPPP^Eを、熱量あたりの平均単価$\overline{PPP}^E$で除した比率の推移が図 3.2.3-7 である。基礎レベルまでの財と消費主体の細部化によれば、現在では中韓では 3 割弱、日独でも 1 割強、米国との内外価格差が適切に上方改訂される。



単位：米国=1.0。注：消費主体分類の差異に伴う EKS 法によるPPP^E（(3.2.2-11)式）の感度と熱量あたりの平均単価により推計される$\overline{PPP}^E$（(3.2.2-12)式）。季節調整済み。観測期間は 2015 年第 1 四半期–2024 年第 4 四半期。

図 3.2.3-6 エネルギーPPP の感度分析



単位：平均単価 PPP=1.0。注：エネルギー種 3 桁分類・消費主体 3 桁分類に基づく EKS 法による PPP^{E}（(3.2.2-11)式）と熱量あたりの平均単価により推計される $\overline{PPP}^{E}$（(3.2.2-12)式）の比。季節調整済み。観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月。

図 3.2.3-7 平均単価 PPP との乖離率

3.2.4 価格高騰期の内外価格差拡大

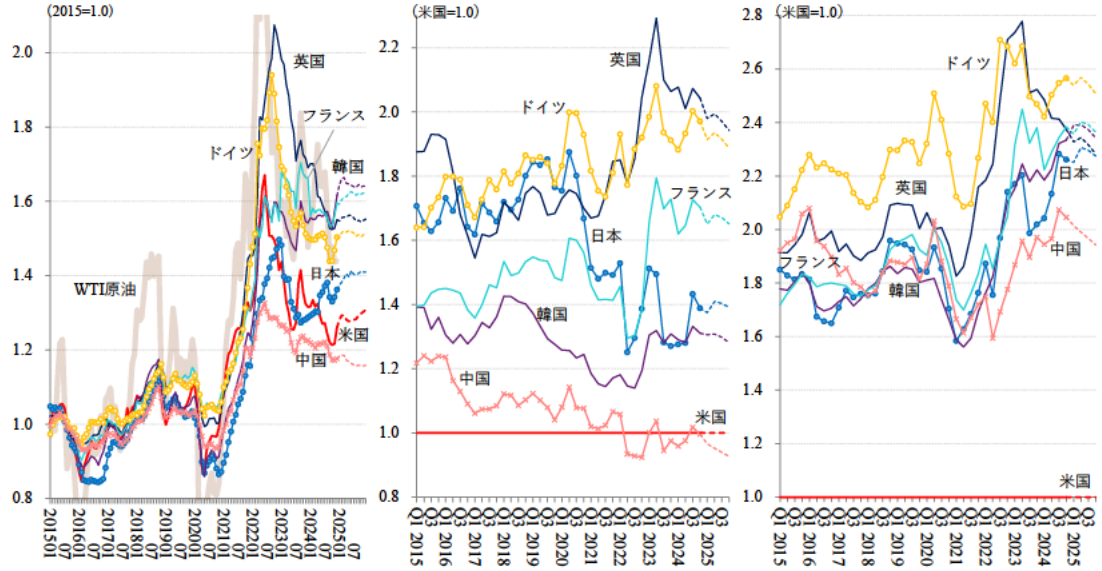
(1) 実質的な価格差

世界的な脱炭素政策（カーボンニュートラル政策や米国グリーンニューディール政策）は 2010 年代後半から加速し、日本でも 2020 年 10 月、菅義偉内閣のもとで 2050 年にカーボンニュートラルを目指すことが宣言された。当時の原油価格は、COVID-19 パンデミックによる急激な需要減退により大幅な下落（同年 4 月 20 日には WTI 原油先物価格がマイナスを記録）からの回復期にあった。パンデミックからの経済回復でも、ビルド・バック・ベター（Build Back Better）やグリーン・リカバリー（Green Recovery）を目指すべきと喧伝され、そうした情勢のなかでは化石燃料価格が長期的に下落するのではないかという楽観ムードすらも存在していた。

しかし当時も十分に予想されていたが、化石燃料価格の下落は一時的なものに留まり、2020 年 5 月から再び力強い上昇を始めている。そうした背景には、脱炭素政策におけるエネルギー転換のため化石燃料への投資抑制が指摘され、単なる需要回復を超えて持続的な価格上昇をもたらすことが懸念された。そうした基盤の上に、2022 年 2 月に勃発したロシア・ウクライナ戦争は価格上昇を加速させ、2022 年後半まで続く歴史的なエネルギー価格の高騰を導いている。

本節のフレームワークに基づき測定された、2015 年から 2024 年までの最終エネルギー消費の総合的な内外価格差と 2025 年前期の見通しを示したものが図 3.2.4-1 であ

る[13]。そこでは左に各国通貨建てによる品質調整済み価格（P^E）と、二つの内外価格差（中央に PLI、右に Real PLI）を示している。図 3.2.4-1 左における各国のエネルギー価格では、WTI（West Texas Intermediate）の原油価格（ドル建て）指数も比較されている。各国における総合的なエネルギー価格は、WTI 原油の価格上昇から数か月ほど遅行しながらも、2021 年初めから 2022 年後半まで高騰した。その後、価格高騰の半分ほどを戻したが、現在でも高値安定が持続されている。



（P^E）　　（PLI^E）　　（Real PLI^E）

単位：2015=1.0　（P^E）、米国=1.0（PLI^Eと Real PLI^E）。出典：エネルギー PPP は ECM の EKS 法による推計値、生産 PPP は 2021 ICP（World Bank 2024）における GDP の PPP を基準年として、各国における最新の四半期 GDP デフレーターより推計。WTI 原油価格は、EIA の日次原油スポット価格（Cushing, OK WTI Spot Price FOB）月平均値。注：観測期間は 2015 年 Q1–2024 年 Q4（季節調整済み）。2025 年値は予測値。エネルギー価格は税金および補助金を含む。

図 3.2.4-1 エネルギーの内外価格差

パンデミック後の価格高騰は主要国間で類似したものであり、シェール革命により 2000 年代後半から相対的に安価なエネルギー価格を享受していた米国もその例外ではない（図 3.2.4-1 左）。米国での価格高騰の特性は、その半分ほどの寄与（2024 年第 4 四半期における 2015 年 1 月比の上昇分の 47%が家計部門の負担増、そのうち家計の自家輸送によるガソリン消費負担増（47%のうちの 19 ポイント）によることである（図 3.2.7-5，図 3.2.7-6 右）。米国の家計部門（自家輸送を含む）による価格高騰への寄与

[13] 内外価格差の測定は、その実測期間では、ベンチマーク時点の単価、欠損データの補完法、エネルギー消費量や金額における年次ベンチマーキング（脚注 12）などの本節での仮定に依存し、また予測値は米国 EIA による化石燃料価格の予測や OECD による経済成長見通しなど大きく改訂されうる統計に依存している。3.2.6 節に論じるように、本節での再検討によっても内外価格差の水準が大きく改訂（その推移は比較的に安定）されたように、不断の見直しや市場環境の変化により内外価格の水準が改訂される可能性のあることに留保されたい。

度は、英仏とともに対象国間でもっとも高いグループに属している（図 3.2.7-1 右）。そうした米英仏の経験は、日中韓では家計部門の負担が（明示的あるいは陰伏的かに関わらず）同期間に大きく抑制されてきたことと対照的である[14]。2025 年 1 月に始まった第 2 次トランプ政権においてエネルギードミナンス（優勢）によるエネルギー価格の抑制が米国の主要な政策課題と位置づけられたことは、グリーンニューディール政策を推進したバイデン政権下で実現したエネルギー価格の負担拡大はアジア諸国の経験を上回るほどであり、またそのほとんどの負担を家計部門が負うものであったことを背景としている。

エネルギーの内外価格差である PLI によれば（図 3.2.4-1 中央）、2021 年初からのエネルギー価格高騰は日中韓では政策的に抑制されている。また 2022 年からは米国での金利上昇によって誘発された急速なドル高により、米国との内外価格差は大きく縮小している。米中関係では、近年ではエネルギーPLI がほぼ拮抗しているほどである。だが PLI による内外価格差は、中国で生産して海外市場で販売する輸出企業の評価としては相応しくとも、中国の国内経済におけるエネルギーの実質的な価格負担を捉えるためには適切ではない。通貨安（ドル高）によっては、生産活動におけるアウトプットの PLI も大きく低下しているからである（図 3.2.7-21 右）。

エネルギー消費における実質的な内外価格差としては、エネルギーのインプットと生産のアウトプットとの関係性を捉えなければならない（3.2.2 節(3)項）。図 3.2.4-1 右におけるエネルギーPLI を生産 PLI で除した Real PLI によれば、いくつかの特性が見いだされる。第一の特性は、実質的なエネルギー価格負担として、米国経済は他国を圧倒する優位性を保持していることである。表 3.2.4-1 は各国におけるパンデミック前（2015–2019 年）、ピーク時、2024 年第 4 四半期、そして 2025 年上半期の予測値を示している。Real PLI では、すべての対象国はパンデミック前でも実質的には米国に比して 1.8 倍から 2.2 倍の高いエネルギー価格に直面してきたと評価される。そのことは、こうした国では米国に比して高いエネルギー生産性（省エネ）が求められ、資本利用が相対的に抑制されるかエネルギー使用的ではない産業構造を強いられることで、米国に比して労働生産性が劣位となる傾向を促進していたことを示唆する。

とくに中国や韓国では、エネルギーPLI（図 3.2.4-1 中央）では米国との格差が小さいが、Real PLI（図 3.2.4-1 右）では大きく上方へとシフトしている。中国経済は低価格競争により世界市場でシェアを奪いながらも、依然として自らの生産価格（生産あたりの名目付加価値）を高めることができず、生産に利用されるエネルギー消費価格の実質的な負担として、パンデミック前ではむしろ日本を上回るものであったことを意味している（図 3.2.4-1 右）。言い換えれば、中国ではとくに電力価格では政策的に上昇幅を抑制せざるをえない状況にあり、また脱炭素に向けて水素やアンモニアなどコスト負担の大きいエネルギー転換を実現することの困難性は日本と変わらない（あるいはそれ以上である）ことを示している。

[14] 2024 年第 4 四半期において、日中韓における家計部門による負担の寄与度は（2015 年 1 月比の上昇分の）それぞれ 25%、9%、18%に限定されている（図 3.2.7-5, 図 3.2.7-6 右）。

表 3.2.4-1 価格高騰期のエネルギーReal PLIの拡大

	a.2015–19 年平均	b.パンデミック後 ピーク時		c.2024年 第4四半期	d.2025年 上半期
		(b/a)	時点	(c/a)	(d/a)
日本	1.80	2.31 (1.28)	2025Q2	2.26 (1.25)	2.28 (1.26)
中国	1.89	2.07 (1.10)	2024Q3	2.05 (1.08)	2.00 (1.06)
韓国	1.78	2.39 (1.34)	2025Q2	2.33 (1.31)	2.39 (1.34)
英国	1.98	2.78 (1.40)	2023Q2	2.37 (1.20)	2.34 (1.18)
ドイツ	2.20	2.71 (1.23)	2022Q3	2.57 (1.17)	2.55 (1.16)
フランス	1.83	2.45 (1.34)	2023Q2	2.38 (1.30)	2.38 (1.30)

単位：米国=1.0。出典：野村・稲場（2025）。

Real PLIにみる第二の特性は、近年の価格高騰は世界的に類似するが（図 3.2.4-1左）、米国との内外価格差はパンデミック前よりも大きく拡大したことである。パンデミック後のReal PLIのピーク期には、（中国を除く）すべての国で対米エネルギー価格差は2.3–2.8倍にまで拡大し、2024年第4四半期の速報値でも2.3–2.6倍の価格差が残されている。第二次トランプ政権によるエネルギードミナンスの追求によっては、エネルギー価格上昇がほぼ不可避となる脱炭素政策からの転換を各国が図らない限り、エネルギー価格差はさらに拡大せざるをえない。

第三の特徴は、主要国は米国との内外価格差が拡大するとともに、中国との格差も拡大していることである。表 3.2.4-2は、行に参照国、列には比較国となるReal PLI（参照国=1.0）として、パンデミック前（2015–2019平均値）を下段に、2024年第4四半期の速報値を上段におき、それぞれの二国間関係におけるReal PLIの変化率（対数成長率）を比較している。たとえば比較国を日本としたとき、米国を参照国とすれば両期間にReal PLIは23%増、中国を参照国とすれば14%増であり、日本の実質的な価格差が米中比で拡大したことを示している。参照国に比して比較国で相対的にエネルギー価格差が縮小したものは背景色を青とし、逆に拡大したものは赤としている。青の多い列に位置する比較国は、（参照国との二国間関係において）この間にエネルギー価格差が縮小したことを意味する。

表 3.2.4-2 Real PLI マトリックス

参照国		比較国 日本	中国	韓国	米国	英国	ドイツ	フランス
	日本	1.00	0.90	1.03	0.44	1.05	1.13	1.05
		1.00	1.05	0.99	0.56	1.10	1.22	1.01
		(0%)	(-15%)	(4%)	(-23%)	(-4%)	(-7%)	(4%)
	中国	1.11	1.00	1.14	0.49	1.16	1.25	1.17
		0.96	1.00	0.95	0.53	1.05	1.17	0.97
		(14%)	(0%)	(19%)	(-8%)	(10%)	(7%)	(18%)
	韓国	0.97	0.88	1.00	0.43	1.02	1.10	1.02
		1.01	1.06	1.00	0.56	1.11	1.24	1.03
		(-4%)	(-19%)	(0%)	(-27%)	(-9%)	(-12%)	(0%)
	米国	2.26	2.05	2.33	1.00	2.37	2.57	2.38
		1.80	1.89	1.78	1.00	1.98	2.20	1.83
		(23%)	(8%)	(27%)	(0%)	(18%)	(15%)	(27%)
	英国	0.95	0.86	0.98	0.42	1.00	1.08	1.00
		0.91	0.95	0.90	0.51	1.00	1.11	0.92
		(4%)	(-10%)	(9%)	(-18%)	(0%)	(-3%)	(8%)
	ドイツ	0.88	0.80	0.91	0.39	0.93	1.00	0.93
		0.82	0.86	0.81	0.45	0.90	1.00	0.83
		(7%)	(-7%)	(11%)	(-15%)	(3%)	(0%)	(11%)
	フランス	0.95	0.86	0.98	0.42	1.00	1.08	1.00
		0.99	1.03	0.98	0.55	1.08	1.20	1.00
		(-4%)	(-19%)	(0%)	(-27%)	(-8%)	(-11%)	(0%)

単位：参照国=1.0。出典：野村・稲場（2025）。注：各計数の上段は 2024 年第 4 四半期、下段はパンデミック前（2015–2019 年平均値）、括弧内はパンデミック前後の Real PLI の対数成長率。参照国に比して比較国で相対的にエネルギー内外価格差が縮小したものは背景色を青、拡大したものは赤としている。

中国はパンデミック前と 2024 年第 4 四半期との比較において米国比の Real PLI をほぼ同水準（8%の格差拡大）に維持しているが（表 3.2.4-1）、米中以外の対象国は中国との二国間関係としてエネルギー価格差が 7–19%拡大している（表 3.2.4-2）。エネルギー消費価格の抑制が（明示的あるいは陰伏的な）補助金や政府の介入によるものかは識別されないが、中国はマクロ的には米国とともに相対的には安価なエネルギーアクセスの提供に成功してきたと評価される[15]。

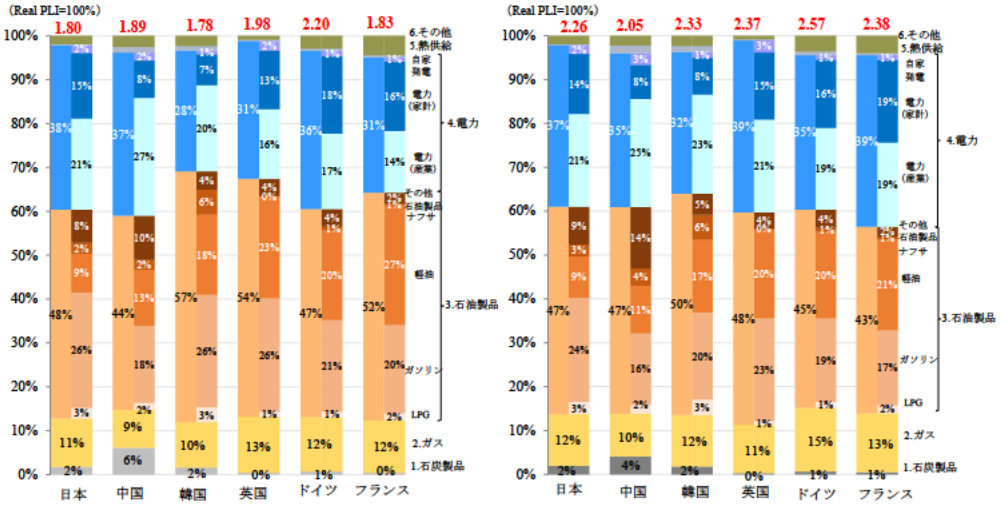
一方、米中とのエネルギー価格差がパンデミック後にもっとも拡大したのはフランスと韓国である。日本も、米中および独英に比してエネルギー価格差は拡大しており（対米国 23%、対中国 14%、対ドイツ 7%、対英国 4%）、この間のエネルギー消費における価格条件は悪化している。日本の ECM ではとくにエネルギー種別の補助金が明示的に分離推計されている。日本では 2024 年にも 3.5 兆円ほどの明示的な補助金によりエネルギー消費者価格が抑制された状態であり、今後の補助金制度の終了や脱炭素政策の継続によりさらなるエネルギー価格差の拡大が懸念される。

(2) エネルギー種別の価格差

Real PLI に測定される実質的なエネルギー価格差の拡大において、エネルギー種別の寄与率を分解したものが図 3.2.4-2 である。各図の上部に示すエネルギーReal PLI の水準を 100 として、パンデミック前（2015–2019 年平均）と 2024 年第 4 四半期を左右の図で比較している。実質的なエネルギー価格差を説明する要因はこの間に総じて

[15] ただし(3)項に論じるように、中国におけるエネルギー価格の抑制は家計部門に傾斜しており、産業部門での Real PLI の拡大は大きい。

安定しているが、日中両国を除き、内外価格差拡大における電力の寄与率は上昇している。とくに英国では 31%から 39%まで、韓国では 28%から 32%まで上昇が顕著となっている。

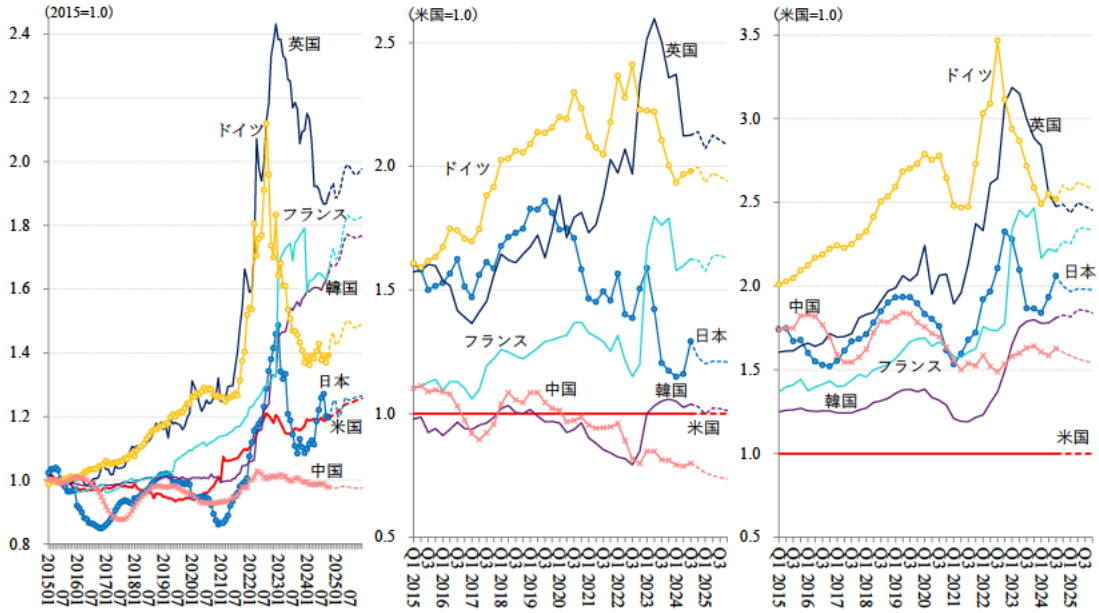


（2015–2019 年平均）　　（2024 年第 4 四半期）

単位：Real PLI=100%。注：エネルギー価格への税金および補助金を含む。Real PLI は EKS-PPP から定義されるが（各期における計数は棒グラフの上部に表示）、その寄与度は米国との二国間関係としての分解式（(3.2.2-9)式）に基づき算定されている。

図 3.2.4-2 Real PLI とエネルギー種別寄与率

電力のみに限った内外価格差を比較したものが図 3.2.4-3 である。脱炭素政策の加速により 2010 年代後半からはドイツと英国では電力価格上昇が始まり、2021 年からは一気に倍増している。この期間、ドイツでは国内電力価格の高騰に加え、再生可能エネルギーの発電量が低下する時間帯における輸入電力への依存度も増加し、大きな経済的負担となっている。エネルギー価格高騰がピークを迎える 2022 年第 3 四半期ではエネルギー価格高騰の 30%の寄与度を示している（図 3.2.7-5，図 3.2.7-6 左）。同国の輸入電力量の拡大は現在も継続しており（図 3.2.7-15，図 3.2.7-16 左）、2024 年第 4 四半期では電力の（直接的な）輸入依存度は kWh ベースでは 15%、金額ベースでは 21%に拡大した。



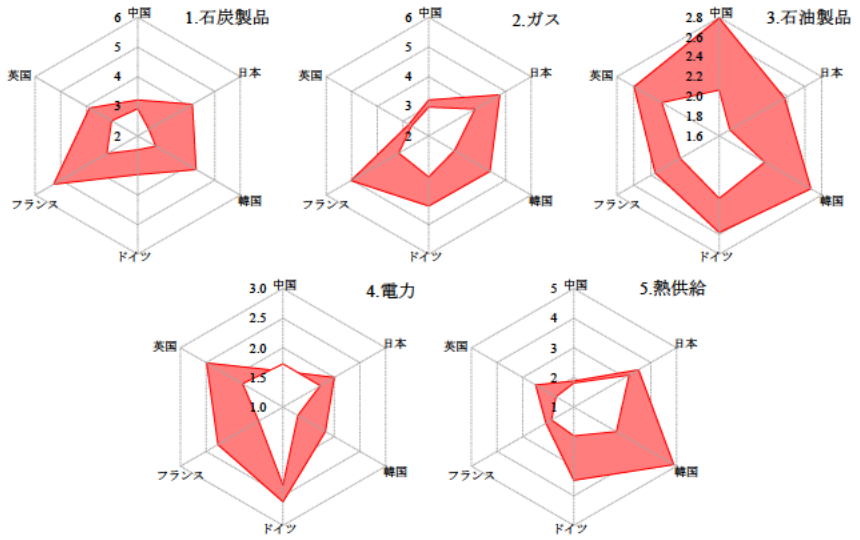
（P^E）　　（PLI^E）　　（Real PLI^E）

単位：2015=1.0　（P^E）、米国=1.0（PLI^Eと Real PLI^E）。出典：エネルギーPPP は ECM の EKS 法による推計値、生産 PPP は 2021 ICP（World Bank 2024）における GDP の PPP を基準年として、各国における最新の四半期 GDP デフレーターより推計（図 3.2.7-21 右）。注：観測期間は 2015 年 Q1–2024 年 Q4（季節調整済み）。2025 年は予測値。各国におけるエネルギー価格では税金および補助金を含む。

図 3.2.4-3 電力の内外価格差

電力 Real PLI では、ピークとなる 2022 年第 3 四半期において、ドイツの電力は米国の 3.5 倍に拡大している（図 3.2.4-3 右）。ドイツとのタイムラグはあるが英国、日本、フランスなどでも電力 Real PLI が拡大するなか、中国ではむしろパンデミック前の水準から抑制させている。そのことは、同国が総合的な内外価格差の拡大を対米比でほぼ抑制させてきた大きな要因となっている（表 3.2.4-1）。

エネルギー種別 PLI としてパンデミック前と現在までの変化を比較したものが図 3.2.4-5 である。内側がパンデミック前（2015–2019 年平均値）であり、外側（2024 年第 4 四半期）に行くほど現在ではエネルギー価格差が拡大したことを意味している。中国でみれば、石油製品の価格上昇は他国と等しい傾向であるが、石炭とガスでは価格上昇が抑制されており、そしてとくに二次エネルギーとして電力と熱供給は格差が抑制されている。

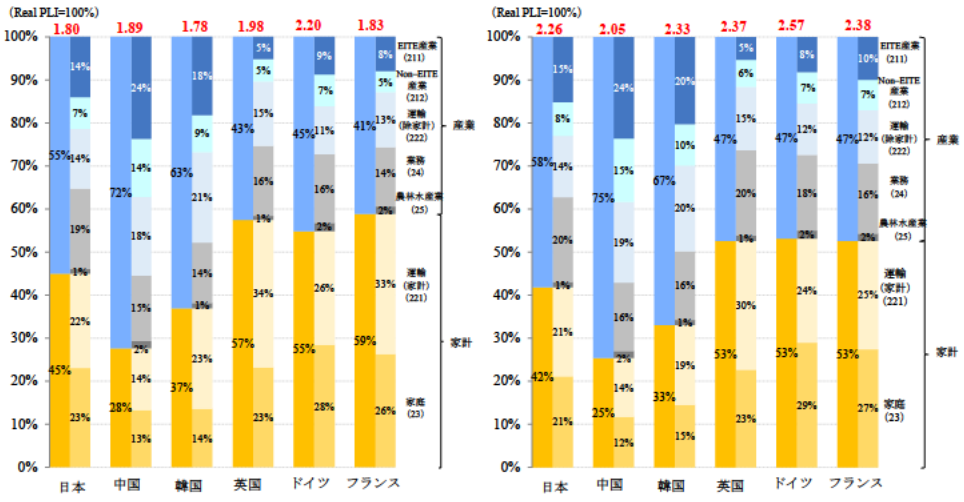


単位：米国=1.0。注：エネルギー価格への税金および補助金を含む。

図 3.2.4-4 エネルギー種別 Real PLI

(3) 消費主体別の価格差

前節の図 3.2.4-2 と同様に、エネルギーReal PLI に対する消費主体別の寄与率を示したものが図 3.2.4-5 である。すべての国で産業部門の寄与は上昇（家計部門は縮小）しているが、とくにフランスでは産業部門への傾斜が大きく寄与率では 6 ポイントも高まっている。中国はとくに家計部門における抑制が大きい。2024 年第 4 四半期における家計部門の寄与率は 25%まで低下した。

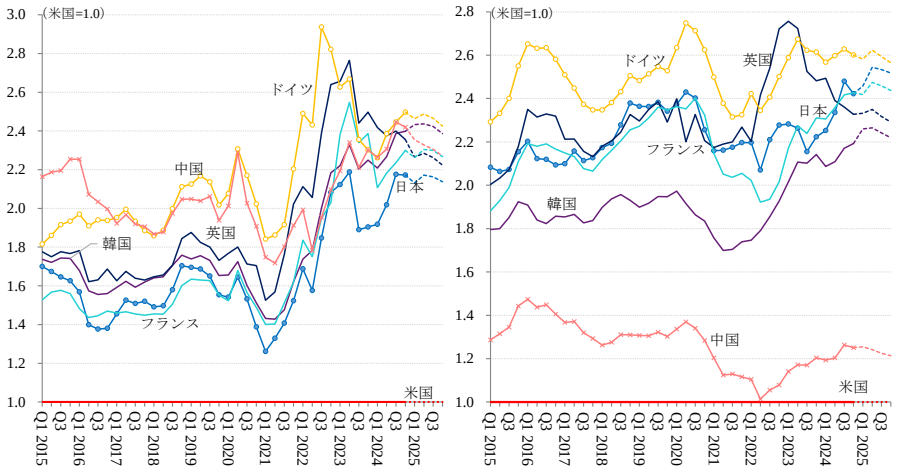


（2015–2019 年平均）　　（2024 年第 4 四半期）

単位：Real PLI=100%。注：エネルギー価格への税金および補助金を含む。Real PLI は EKS-PPP から定義されるが（各期における計数は棒グラフの上部に表示）、その寄与度は米国との二国間関係としての分解式（(3.2.2-9)式）に基づき算定されている。

図 3.2.4-5 Real PLI と消費主体別寄与度

産業部門と家計部門それぞれのエネルギーReal PLIは図 3.2.4-6に示されている。中国ではマクロのReal PLIは対米比で抑制されてきたが（図 3.2.4-1右）、家計部門は依然として負担力が小さいため価格抑制を強いられており（図 3.2.4-6右）、その負担は産業部門（図 3.2.4-6左）に現れている。産業部門における実質的なエネルギー価格差はむしろ欧州諸国と同様の水準に高まっている。それとは逆に日本は産業での価格差を抑制する傾向にある。日本の産業部門におけるReal PLIは（パンデミック前からの上昇幅は大きいが）他国に比してむしろ低い水準にあり、家計部門のReal PLIが相対的に高い。しかし産業部門（製造業とともに、サービス業、運輸業を含む）の内側には、エネルギー価格差として大きな乖離が存在している。



（産業部門）　　（家計部門）

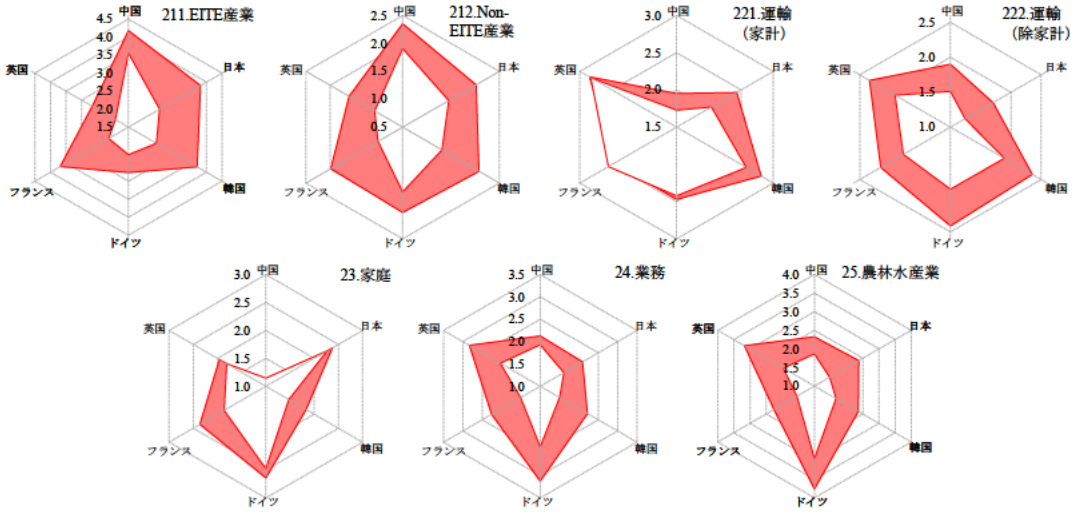
単位：米国=1.0。注：観測期間は2015年Q1–2024年Q4（季節調整済み）。2025年Q1–Q4は予測値。エネルギー価格への税金および補助金を含む。家計部門の実質化もGDPのPLIによる。

図 3.2.4-6 産業・家計部門エネルギー消費のReal PLI

消費主体別（3桁分類）のReal PLIとしてパンデミック前と現在までの変化を比較したものが図 3.2.4-7であり、内側がパンデミック前（2015–2019年平均値）、外側は2024年第4四半期の水準を示している。消費主体別のPPP測定値では経済統計としての精度が低下し[16]、また本来であればReal PLIの分母となる消費主体別生産のPLIがGDPのPLIとは大きく乖離しうるが、そうした主体間の生産PLIの差異が体系的に測定されているのは日米関係などに限られている（Jorgenson, Nomura and Samuels 2016）。図 3.2.4-7は簡易的にすべての消費主体別のReal PLIをGDPのPPPで評価した参考値だが、産業部門の内側において大きな乖離が存在することは確認できる。日本ではサービス業を含む産業部門の全体では価格差が抑制されているが（図 3.2.4-6左）、EITE

[16] 消費主体別のReal PLIの測定値は、消費主体間のエネルギー消費金額や消費量の配分（とくに消費主体の3桁分類）として、エネルギー統計と経済統計（産業連関表や国民経済計算）との間の概念調整が難しく、各国の産業連関表の測定精度や本節での測定法にも大きく依存しているため、今後も改訂の余地が残されていることには留意されたい。

産業ではパンデミック前も現在でもドイツを上回っており、Non-EITE 産業でもドイツと概ね同水準にある（図 3.2.4-7）[17]。他方、ドイツや英国ではサービス業（概ね 24. 業務）におけるエネルギーコスト負担が相対的に大きい。



単位：米国=1.0。注：すべての消費主体別 Real PLI を（各主体のアウトプットごとの PLI を考慮せずに）GDP の PPP で評価した参考値である。211.EITE 産業と 212.Non-EITE 産業がほぼ製造業に該当するが、分類の対応には課題もあり、表 3.2.3-3 脚注を参照。エネルギー価格への税金および補助金を含む。

図 3.2.4-7 エネルギー消費主体別 Real PLI

2021 年初からの米国でのエネルギー価格高騰における家計負担（とくに自家輸送）は大きく（3.2.4 節(1)項）、221.運輸（家計）と 23.家庭における対米国 Real PLI の拡大は抑制されているため、図 3.2.4-7 におおいて比較される両期間で乖離する面積は小さくなっている。それでも現在の家庭部門におけるエネルギーReal PLI はドイツ、日本、フランスにおいて米国の 2.5 倍ほどの水準にあり、日独ではパンデミック前からの高負担構造は継続し、フランスでは価格負担が高まっている。

3.2.5 結び

本節では、日本を含む主要 7 か国（日・中・韓・米・英・独・仏）を対象として、近年のエネルギー価格高騰に伴う総合的な最終エネルギー消費における内外価格差（PPP, PLI, Real PLI）の変化を測定してきた。2015 年 1 月から 2024 年 12 月までの速報推計値によれば、近年の価格高騰期に見出される本節の帰結は、2021 年初からのエネルギー価格高騰は主要国で類似するが、同時期に（中国を除く）5 カ国でエネルギ

[17] 図 3.2.4-7 の参考値では、中国の EITE 産業の Real PLI は、パンデミック前および現在も日独両国を上回るものと推計されている。そこでは中国の（サービス業における安価な生産価格を反映した）GDP の PLI（図 3.2.7-21 右）の反映（EITE 産業の Real PLI を過大評価）とともに、中国の産業連関表の測定精度に考慮して本節では EITE 産業としての年次ベンチマーキングを実施していないことから同産業のエネルギーPLI が過大評価されているかもしれない。

ーの実質的な内外価格差は大きく拡大し、そしてそれが現在まで持続していることである。米国でもエネルギー価格は高騰した(その多くは家計部門によって負担された)が、実質的な価格差はその拡大のピークにおいて米国比 2.3–2.8 倍にまで拡大し、現在も 2.3–2.6 倍の価格差が残されている。

日本政府も経済のグローバル化の深化に伴いエネルギー価格差の抑制を強く重視するが（経済産業省 2025b, p.18)、エネルギー環境政策と産業政策と一体化させた脱炭素政策を推進するならば今後の電力やエネルギー価格の上昇は不可避であろう。2 月 28 日、日本経済新聞（2025）は「電気代、もう下がらない」と題した記事を掲載し、「日本は 70 年代の石油危機後、エネルギー効率を向上させて産業競争力を高めた実績がある。エネルギー高騰を奇貨として、企業の技術や政府の脱炭素政策を総動員しながら成長力を高める必要がある」と指摘する。だが、省エネ・低炭素と脱炭素はまったく違う。低廉なコストによる技術的な解決策がなく、脱炭素政策としての国際的な方向性も大きく揺らいでいる。

第 2 次トランプ政権のエネルギードミナンス（優勢）の追求により米国が安価な化石燃料の利用を拡大させていくなか、日欧諸国が現行の脱炭素政策を継続させていくならば、エネルギー価格差のさらなる拡大とコスト上昇を通じた付加価値価格の抑制による Real PLI のさらなる拡大の懸念は大きい。すでにその弊害は顕在化している。英国とともにもっとも顕著な Real PL I 拡大を経験したドイツでは、エネルギー多消費製造業（EITE 製造業）の生産減退とともに、それ以外の製造業やサービス業にまでエネルギーコスト拡大による影響が及んでいる。同国経済が「欧州の病人」と称された 2002–2003 年を超えて、2025 年には 3 期連続のマイナス成長となることが懸念される。

ECM（2025 年 3 月 4 日公表）の EITE 生産指標によれば、日本は 2024 年 12 月において 2015 年比▲15%であり、同指標によるドイツの▲20%の後を追っている。米国では、バイデン政権のもとで緩やか減少してきた EITE 生産が昨年末からは急回復を始めている。日本国内における電力・エネルギー消費の米中比価格差を縮小させることは、原発の推進を除くほぼすべての脱炭素政策の継続とは相容れない。世界でも気候政策として現実的なアプローチを求める声は高まっており（Chancellor 2025)、日本は内外価格差の抑制に向けた政策への転換を検討すべきときにある。

参考文献（第 3.2 節に関するもの）

1) ADB (2017) Compendium of Supply and Use Tables for Selected Economies in Asia and the Pacific, Manila: Asian Development Bank, October.
2) Chancellor, Edward (2025) “Climate Policy Requires a More Realistic Approach,” Reuters, February 28.
3) Chevalier, Michel (2003) “Chain Fisher Volume Index Methodology,” Income and Expenditure Accounts Technical Series, 13-604-MIE no. 42, Statistics Canada.
4) Construction Briefing (2025) “Chinas Bau neuer Kohlekraftwerke erreicht 2024 10-Jahres-Hoch,” February 13.

5) Goldmann, Mattias (2025) “Germany’s Energy And Climate Policy Under CDU: What To Predict,” Forbes, March 2.
6) Jorgenson, Dale W., Koji Nomura, and Jon D. Samuels (2016) “A Half Century of Trans-Pacific Competition: Price Level Indices and Productivity Gaps for Japanese and U.S. Industries, 1955–2012,” in Jorgenson, D. W. et al. (Eds.) The World Economy – Growth or Stagnation?, Cambridge: Cambridge University Press.
7) Nomura, Koji (2023) Energy Productivity and Economic Growth—Experiences of the Japanese Industries, 1955–2019, Springer.
8) Nomura, Koji, and Sho Inaba (2024) “Post-Pandemic Surges of Real Unit Energy Costs in Eight Industrialized Countries,” RCGW Discussion Paper, 70, Research Center on Global Warming, Development Bank of Japan, March.
9) The White House (2025) “Unleashing American Energy,” January 20.
10) World Bank (2020) Purchasing Power Parities and Real Expenditures of World Economies: Summary of Results and Findings of the 2017 International Comparison Program, Washington, D.C.: World Bank.
11) World Bank (2024) ICP 2021 Global Report, Washington, D.C.: World Bank.
12) 経済産業省（2025a）「エネルギー基本計画」2 月.
13) 経済産業省（2025b）「GX2040ビジョン～脱炭素成長型経済構造移行推進戦略 改訂～」2 月.
14) 日本経済新聞（2025）「電気代、もう下がらない：脱炭素・AI 普及で構造一変」2 月 28 日.
15) 野村浩二（2021）『日本の経済成長とエネルギー：経済と環境の両立はいかに可能か』慶應義塾大学出版会.
16) 野村浩二・稲場翔（2023）「実質的なエネルギーコスト負担に関する高頻度指標の開発―月次 RUEC とその変化要因―」RCGW Discussion Paper, 68, 日本政策投資銀行 設備投資研究所地球温暖化研究センター, 3 月.
17) 野村浩二・稲場翔（2025）「ポストパンデミックのエネルギー価格高騰と実質格差拡大ー主要 7 か国の比較分析」KEO Discussion Paper, 185, 慶應義塾大学産業研究所, 3 月.

3.2.6 補論：ECM 推計法の改訂

2022 年 1 月に開始した ECM の測定フレームワークや利用データの詳細（野村・稲場 2023）は、その後の 3 年以上の月次更新と年次ベンチマーキングによる検証に伴い改訂をおこなってきている。ECM では、エネルギー種別・消費主体別の整合性が確保されるように、（両統計における概念差を可能な限り調整した後に）エネルギー統計におけるエネルギー消費量（q）と経済統計におけるエネルギー消費金額（v）を優先させ、エネルギー単価（p=v/q）を事後的に求めることを原則としている。しかし q と v の計数に測定誤差や概念差が残るままならば、事後に定義される p に基づく内外価格差の測定値に大きなバイアスを生じさせてしまう。ECM_202501（2025 年 2 月 1 日公表）までの内外価格差はそうした測定誤差を反映するものであった。

本節では Real PLI の再構築のため、エネルギー種別・消費主体別の単価の詳細を再検討し、従来までの測定法を大きく改訂している。そのプロセスにおける測定上の課

題や現在の諸仮定として、以下ではいくつかの検討例を論じ、Real PLI および RUEC における全般的な改訂状況について報告する。

(1) 中国の石炭消費

IEA の World Energy Balance（IEA-WEB）における石炭の国内消費量と、IEA Energy Prices の産業用石炭単価を乗じて推計される石炭消費額（IEA 消費額）は、中国国家統計局による産業連関表(NBS-IOT)の石炭消費額と比較して大幅な乖離がみられる。表 3.2.6-1 は NBS-IOT の公表年次における消費主体別石炭消費額を比較している。

表 3.2.6-1 中国の石炭消費額

	1) NBS-IOT				2) IEA消費額				3) 差分（=1-2）			
	消費額	自部門	他エネルギー転換部門	非エネルギー転換部門	消費額	自部門	他エネルギー転換部門	非エネルギー転換部門	消費額	自部門	他エネルギー転換部門	非エネルギー転換部門
2015	2,353	431	1,059	863	1,489	22	1,038	428	864	409	20	435
2017	2,476	365	1,081	1,030	2,127	30	1,592	505	349	335	-510	524
2018	2,698	391	1,219	1,088	2,159	26	1,684	449	539	366	-465	639
2020	2,686	385	1,258	1,042	2,130	19	1,716	396	555	367	-458	647

単位：10 億元。注：NBS-IOT の金額はすべて購入者価格評価として調整。

2017 年以降の（自部門を除いた）消費額では（両者の部門定義での相違はあるものの）概ね整合しているが、自部門の消費額では NBS-IOT が IEA 消費額の 10 倍ほどの規模となり、全年次で安定して乖離が確認される。経済統計における自部門投入額には、自家消費に加え自部門内での粗取引額が含まれるが、エネルギー統計では対象をより狭く定義されているためとみられる。そのことは石炭消費額に関する年次ベンチマーキングにおいて単価の測定誤差をもたらすため、自部門を除いた消費額の整合性を保持するように調整された単価によって自部門の消費額をもとめている[18]。

ただし 2015 年では、他の年次と比較して NBS-IOT と IEA 消費額の乖離が拡大し、自部門取引額による乖離では説明出来ない。第一の要因は IEA Energy Prices での単価である。IEA Energy Prices の産業用石炭価格は 2015 年から 2017 年に 36.8%上昇するが、同期間に中国の生産者価格指数（NBS-PPI）は 23.1%であり、13.7 ポイントもの乖離がある。2017 年以降では IO 消費額と整合していることからみれば、2015 年における IEA 石炭単価が過小であると評価される。第二の要因は、NBS-IOT における 2015 年エネルギー転換部門の消費額の過大推計である。既述のように NBS-PPI では石炭価格が 2 年間でおよそ 2 割上昇するが、NBS-IOT での（自部門を除く）エネルギー転換部門の消費額は 2%ほどの上昇に留まる。IEA-WEB や NBS のエネルギー統計（NBS Energy Output）では同期間に消費量の大きな下落は確認できない。2015 年における年次ベンチマーキングでは、2017 年のベンチマーキング済みの単価を NBS-PPI の Mining and Washing of Coal の価格指数を用いて遡及推計した 2015 年の単価を用いて、IEA-

[18] NBS-IOT におけるエネルギー消費額は生産者価格評価であり、輸送コストや卸・小売マージン額が含まれていない。ここでは ADB（2017）における 2012 年の石炭マージン率に基づき購入者価格評価へ調整している。

WEB の（自部門を除いた）消費量に乗じて推計した消費額を用いて年次ベンチマーキングするものへ改訂する。

(2) 中国のガス消費

中国のガス・原油では、表 3.2.6-2 に示されるように v、p、q それぞれの統計間での不整合が見出される。NBS-PPI ではガスの価格として「天然ガス・原油採掘」と「都市ガス製造」の 2 系列が公表され、2015–2017 年の成長率はそれぞれ 8%と–8%と正反対である。同期間の v にあたる、NBS-IOT の（天然ガス・原油から都市ガス製造業への投入額を除いた）ネットの消費額は 19%増、同じく q にあたる IEA-WEB のガス・原油の国内消費量は 11%増である。v と q に整合する原油・ガスの集計価格（p）は同期間に 8%上昇とみなされるが、金額シェアとして 20%を持つ都市ガスを考慮した集計価格ではそうした上昇は見いだされない。

表 3.2.6-2 中国の天然ガス・原油生産

	1) NBS-IOT 国内生産額（10億元）	2) IEA-WEB 生産量（PJ）	3) 生産価格 (=1/2)		4) NBS-PPI 天然ガス・原油採掘		5)貿易統計 輸入価格	
			指数	成長率	指数	成長率	指数	成長率
2015	844	13,708	0.062		1.00		1.00	
2017	1,163	13,214	0.088	35.7%	1.08	7.6%	1.04	4.1%
2018	1,294	13,548	0.096	8.2%	1.34	21.8%	1.34	25.1%
2020	1,077	14,911	0.072	-28.0%	0.94	-35.7%	0.91	-38.2%

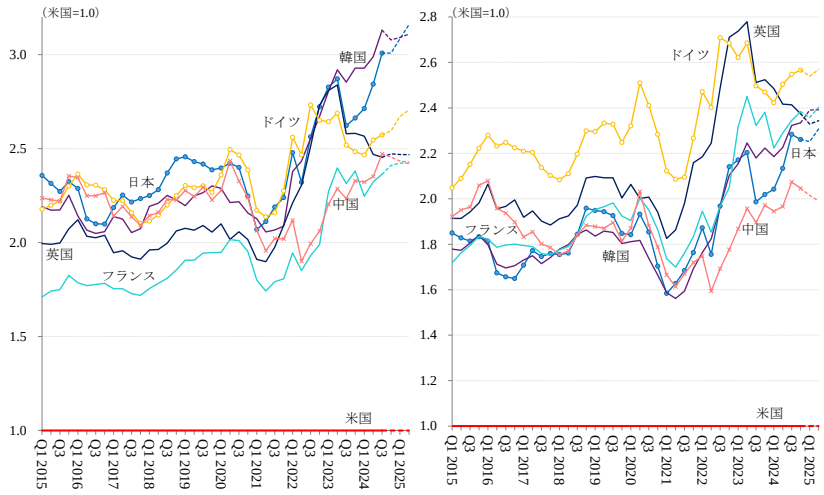
単位：10 億元。

不整合となる原因は、NBS-IOT における天然ガス・原油の生産額が過小推計されている可能性である。NBS-IOT の生産額と IEA-WEB の生産量から算出した生産価格は、2015 年から 2017 年に 35.7%上昇するが、既述のように NBS-PPI の成長率は同期間に 7.6%であり整合しない。生産量は NBS のエネルギー統計における生産量と IEA-WEB は整合的であり、(延長表である)NBS-IOT の 2015 年生産額が過小であると解される。ここでは NBS-IOT のベンチマーク年である 2017 年の生産価格に基づき、NBS-PPI の天然ガス・原油の価格指数により 2015 年生産価格を遡及推計し、IEA-WEB の生産量を乗じることで 2015 年生産額を算定する。その上で、天然ガスから都市ガスへの転換用投入額を除いて国内消費額とし、年次ベンチマーキングをおこなう。ただし、転換用投入額に関しては修正前の投入係数（投入額／生産額）により算定している。

(3) ECM_202501 からの改訂

本節での基礎レベルでの単価推計値を中心とした再検討により、改訂前後の Real PLI を比較したものが図 3.2.6-1 である。各国における時系列的な推移における改訂幅は小さいが（一部では新たな年次ベンチマーキングの影響もある）、Real PLI の水準としては大きな改訂となっている。とくに日韓の Real PLI は大きく下方改訂されている。価格水準としての測定が基礎レベルでの基準単価や測定法に依存するのに対して、名目 GDP 比での名目エネルギーコスト比である RUEC における改訂幅は限定的である（図 3.2.6-2）。エネルギーコストではエネルギー種別の総消費額の測定精度が保たれ

ていても、とくに消費主体間の配分やその価格と数量への分割において課題が多いからである。



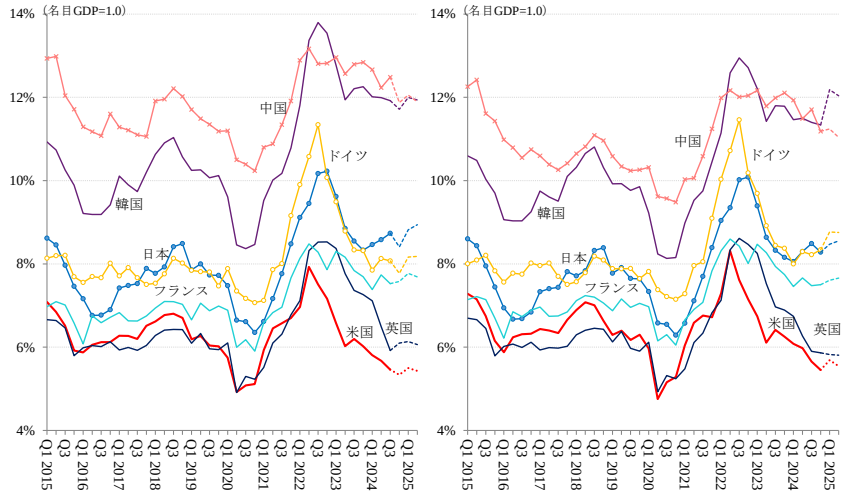
（改訂前）　　（改訂後）

単位：米国=1.0。注：改訂前は ECM_202501（2025 年 2 月 1 日公表）、改訂後は本節での検討後。

図 3.2.6-1 Real PLI の改訂

エネルギーの消費主体間では、エネルギー多消費産業と小規模な事業者や家計との間では需要規模に依存して、あるいは石炭など輸送コストが大きなものでは消費者の立地に依存して、数倍もの価格差を生じうる。たとえば米国の沿海部では、石炭の生産地である内陸部に比してだいぶ高価であり、市場で見る価格は貿易財としての高価な石炭をより強く反映しているかもしれない。

本節で統計資料における不整合や乖離を論じたように、実際の測定では本節での仮定に基づいて推計せざるを得ない面も残されている。消費主体間における価格差の認識や仮定は、その消費金額シェアを反映して、集計レベルでの内外価格差（PPP、PLI、Real PLI）に対して大きな影響を与える。経済統計ではエネルギーの転換消費と最終消費は識別して描写されず、エネルギー統計が重要な役割を持つ。両統計の概念差を埋め、内外価格差の実測を通じながら、基礎データの検討や消費金額の年次ベンチマーキングの粒度（脚注 12）を定めていく不断の検討が今後も求められる。



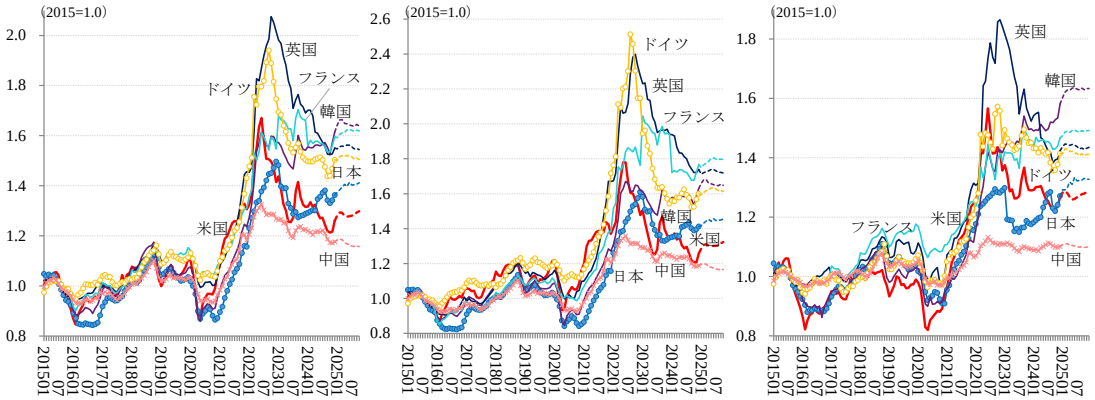
（改訂前）　　（改訂後）

単位：各国の名目 GDP=1.0。注：改訂前は ECM_202501（2025 年 2 月 1 日公表）、改訂後は本節での検討後。

図 3.2.6-2 RUEC の改訂

3.2.7 付録図表

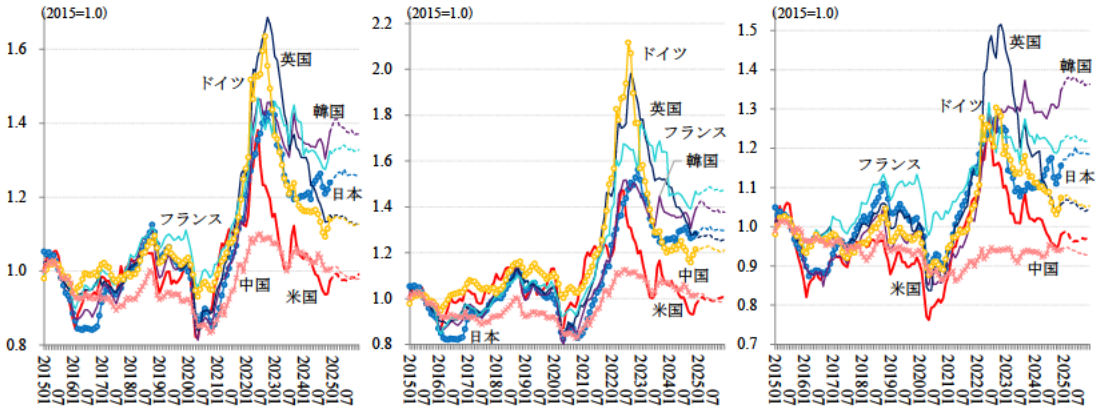
(1) 最終エネルギー消費



（一国集計）　　（産業部門）　　（家計部門）

単位：2015 暦年平均=1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。2025 年 1 月–12 月は予測値。最終エネルギー消費全体の価格であり、各国の消費ウェイトを反映したトランスログ指数により算定。税金や補助金の影響を含む消費者価格。

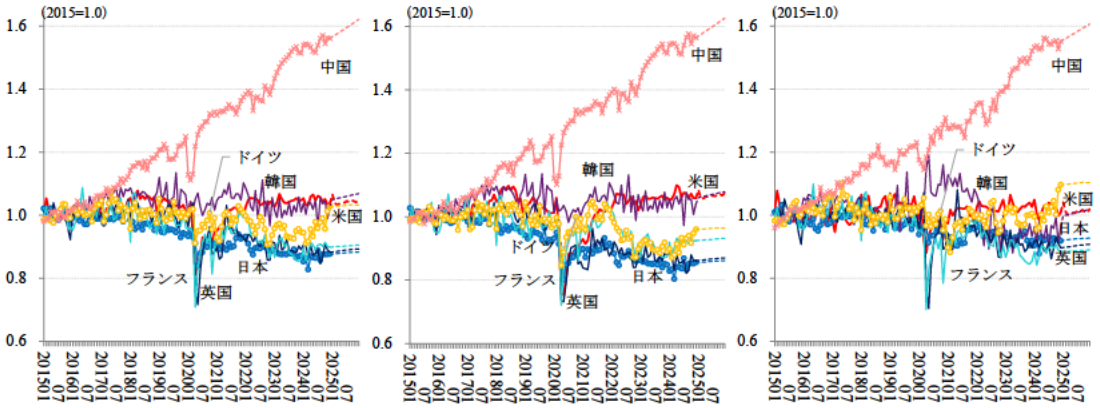
図 3.2.7-1 名目エネルギー価格



（一国集計）　　（産業部門）　　（家計部門）

単位：2015 暦年平均=1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。2025 年 1 月–12 月は予測値。最終エネルギー消費全体の価格であり、各国の消費ウェイトを反映したトランスログ指数により算定。税金や補助金の影響を含む消費者価格。実質化はいずれも GDP デフレーターによる。

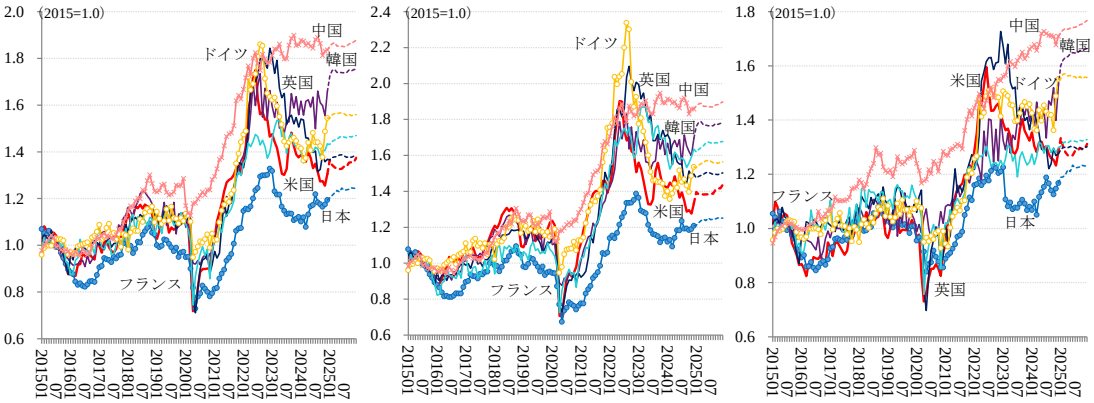
図 3.2.7-2 実質エネルギー価格



（一国集計）　　（産業部門）　　（家計部門）

単位：2015 暦年平均=1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。2025 年 1 月–12 月は予測値。最終エネルギー全体の消費量であり、各国の消費ウェイトを反映したトランスログ指数により算定。

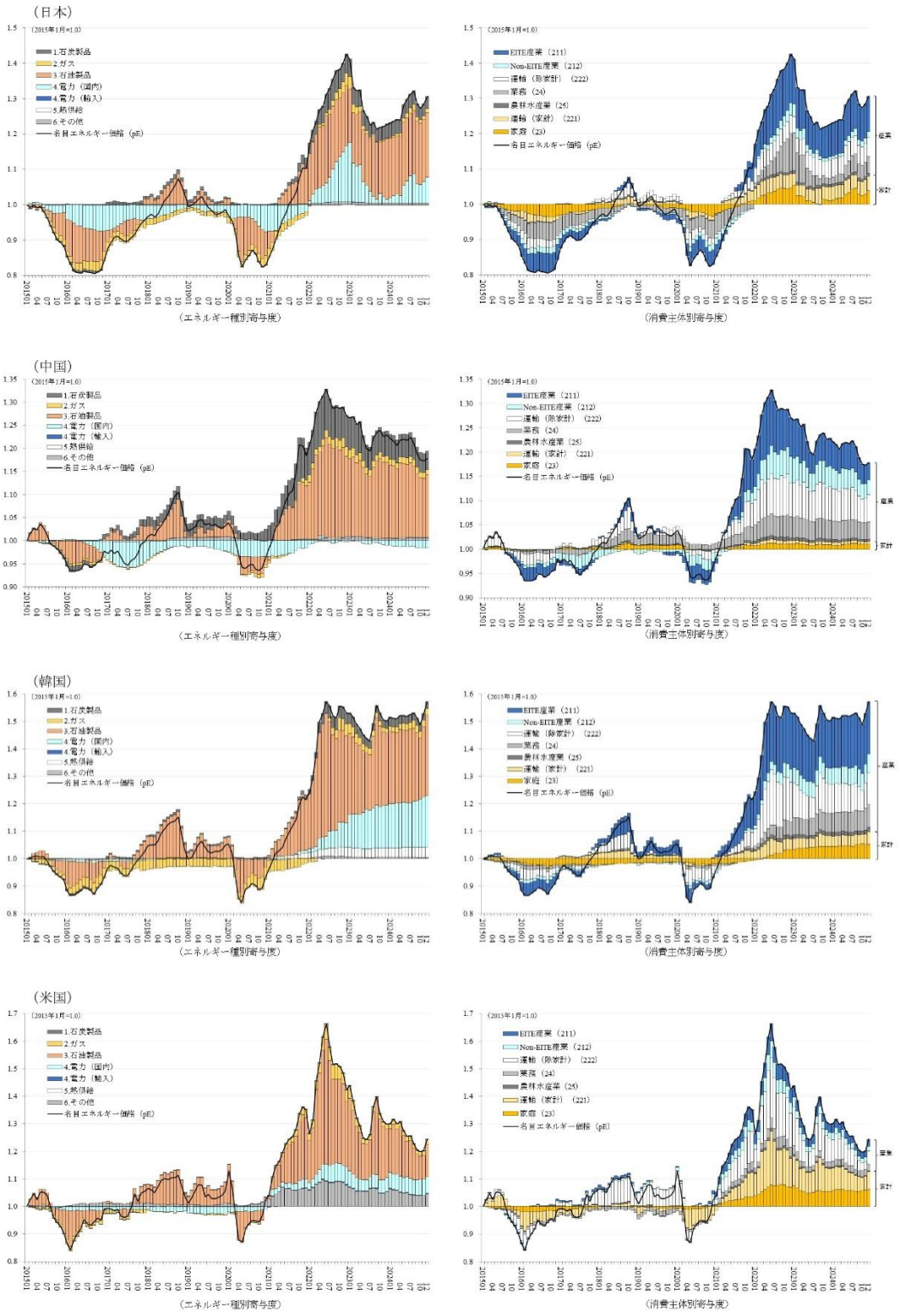
図 3.2.7-3 エネルギー消費量



（一国集計）　（産業部門）　（家計部門）

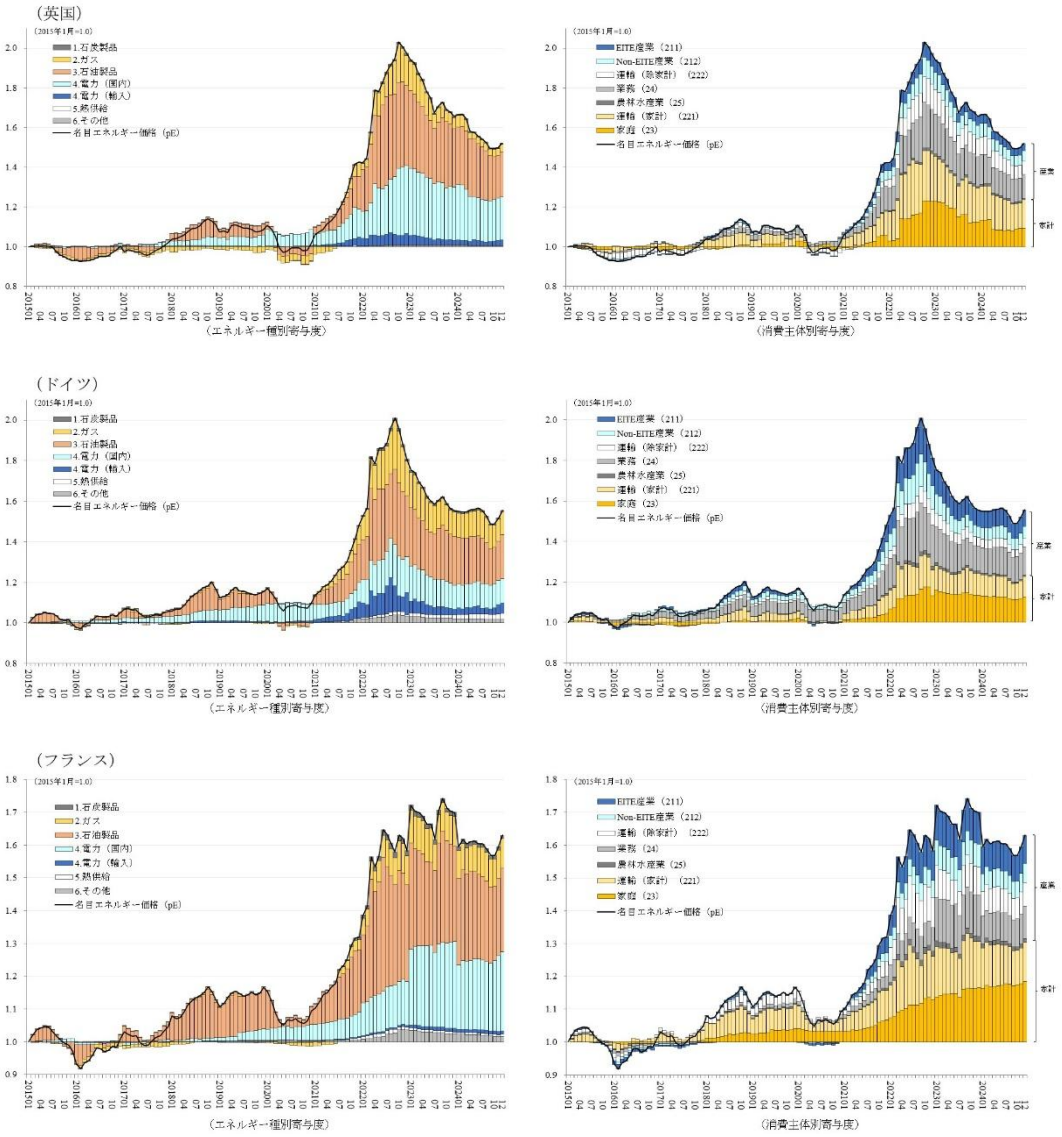
単位：2015 暦年平均=1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。2025 年 1 月–12 月は予測値。エネルギー価格への税金および補助金を含む。

図 3.2.7-4 エネルギー消費額



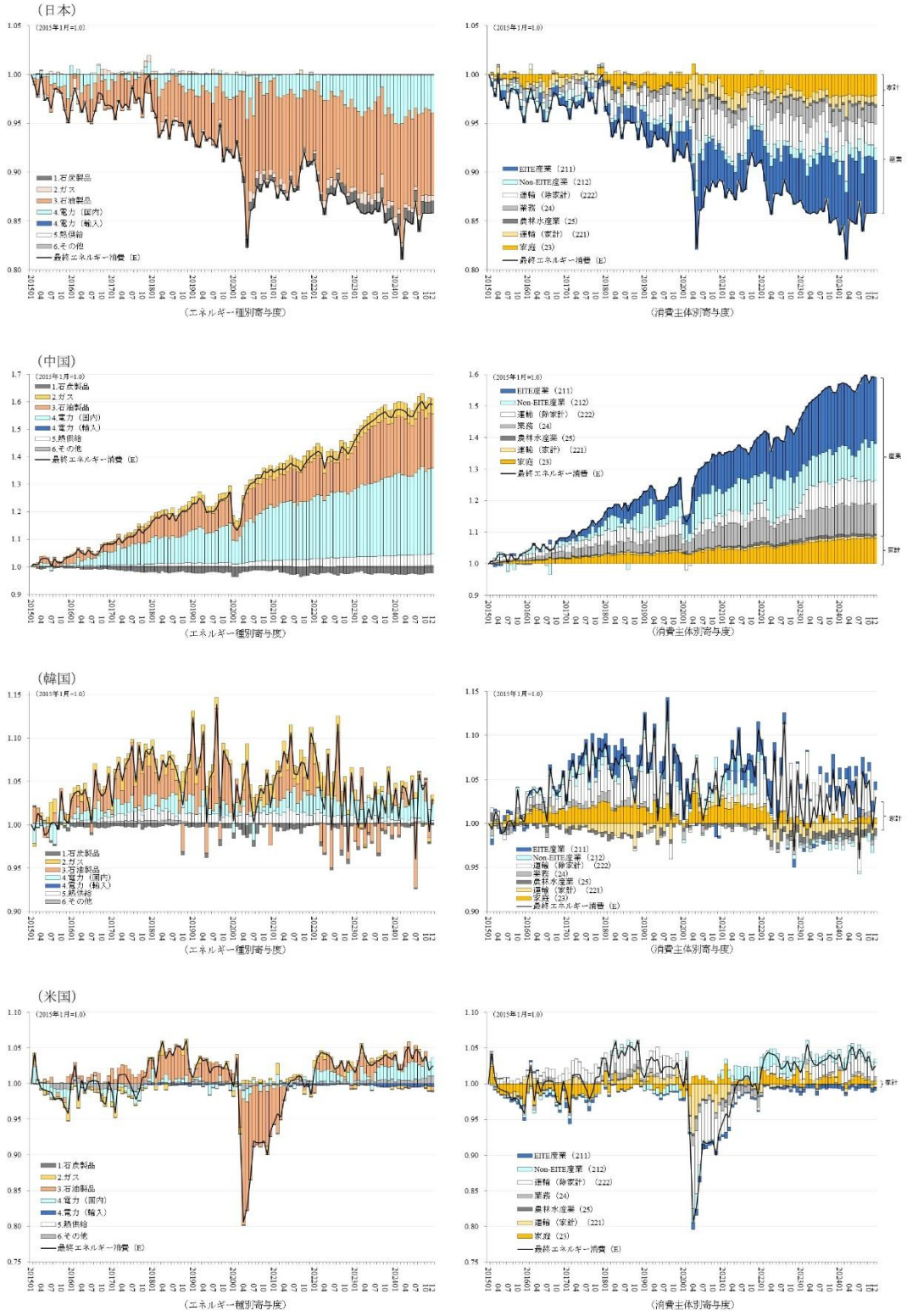
単位：2015 年 1 月＝1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。エネルギー価格への税金および補助金を含む。

図 3.2.7-5 エネルギー価格変化の寄与度



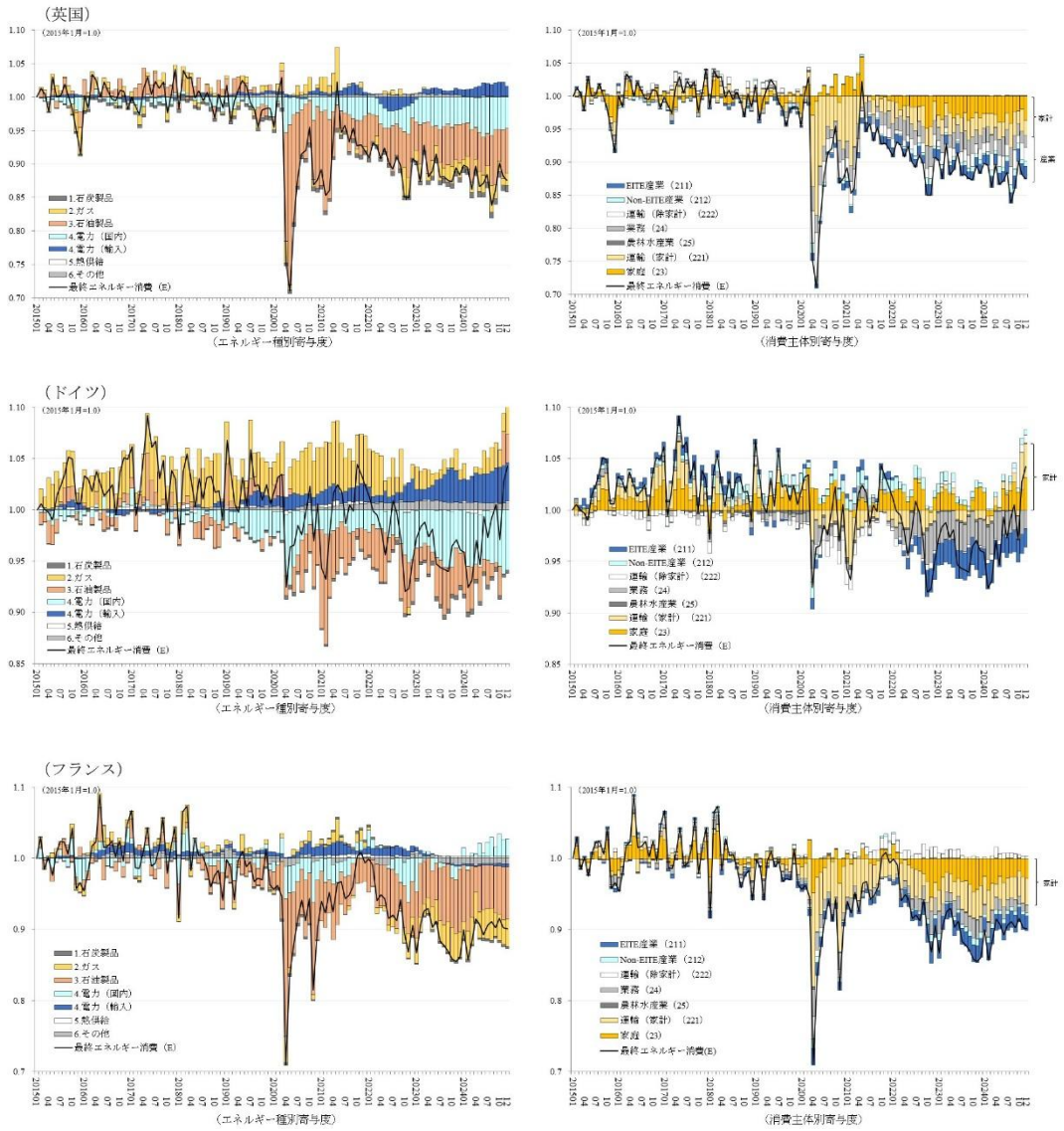
単位：2015 年 1 月＝1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。エネルギー価格への税金および補助金を含む。

図 3.2.7-6 エネルギー価格変化の寄与度（続）



単位：2015 年 1 月＝1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。

図 3.2.7-7 エネルギー消費量変化の寄与度



単位：2015 年 1 月＝1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。

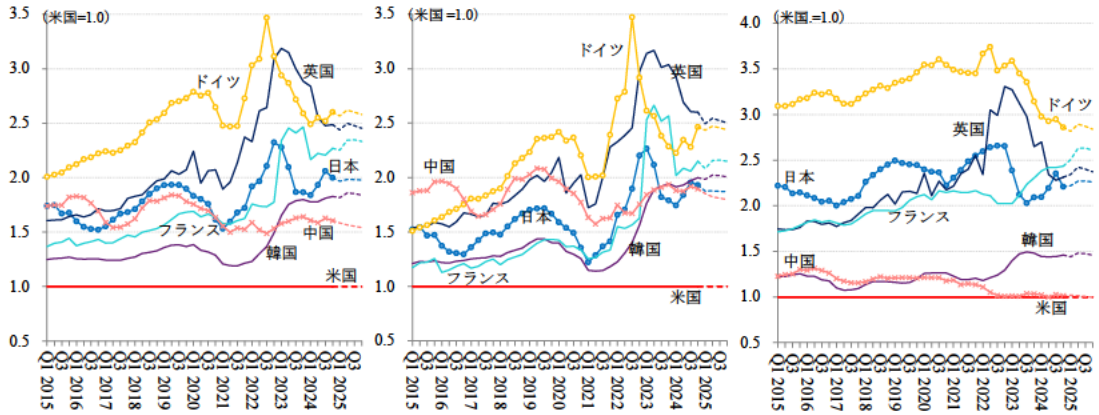
図 3.2.7-8 エネルギー消費量変化の寄与度（続）

表 3.2.7-1 エネルギー消費の内外価格差

	日本			中国			韓国			英国			ドイツ			フランス		
	PPP	PLI	Real PLI	PPP	PLI	Real PLI	PPP	PLI	Real PLI	PPP	PLI	Real PLI	PPP	PLI	Real PLI	PPP	PLI	Real PLI
2015	201.0	1.66	1.83	7.66	1.23	1.97	1,544	1.37	1.80	1.25	1.90	1.94	1.51	1.68	2.13	1.28	1.42	1.78
2016	185.5	1.71	1.70	7.67	1.15	1.97	1,500	1.29	1.73	1.30	1.76	2.00	1.60	1.77	2.25	1.29	1.43	1.80
2017	187.2	1.67	1.75	7.26	1.07	1.82	1,508	1.33	1.73	1.24	1.60	1.91	1.54	1.74	2.16	1.26	1.42	1.77
2018	191.7	1.74	1.83	7.32	1.11	1.81	1,557	1.42	1.82	1.28	1.71	1.98	1.54	1.82	2.17	1.28	1.51	1.83
2019	198.8	1.82	1.92	7.50	1.09	1.86	1,536	1.32	1.84	1.35	1.72	2.07	1.64	1.83	2.30	1.36	1.53	1.96
2020	189.5	1.77	1.83	7.56	1.09	1.89	1,473	1.25	1.76	1.35	1.73	2.00	1.70	1.94	2.38	1.37	1.56	1.93
2021	164.2	1.50	1.66	6.65	1.03	1.67	1,331	1.16	1.61	1.26	1.73	1.96	1.50	1.78	2.14	1.21	1.43	1.76
2022	178.7	1.37	1.93	6.46	0.96	1.70	1,504	1.17	1.91	1.53	1.88	2.41	1.78	1.88	2.57	1.29	1.36	1.95
2023	194.5	1.39	2.09	7.01	0.99	1.92	1,701	1.30	2.20	1.73	2.15	2.64	1.83	1.98	2.57	1.59	1.72	2.37
2024	203.3	1.34	2.18	7.10	0.99	2.01	1,777	1.30	2.27	1.60	2.05	2.42	1.80	1.95	2.51	1.55	1.67	2.31
2025	212.7	1.39	2.28	6.89	0.95	1.98	1,862	1.30	2.37	1.55	1.97	2.32	1.83	1.91	2.54	1.59	1.66	2.38
2015 Q1	203.2	1.71	1.85	7.47	1.22	1.92	1,532	1.39	1.78	1.23	1.88	1.91	1.46	1.64	2.05	1.24	1.39	1.72
Q2	200.7	1.65	1.83	7.59	1.24	1.95	1,525	1.39	1.77	1.23	1.88	1.91	1.49	1.64	2.09	1.27	1.40	1.76
Q3	199.0	1.63	1.81	7.66	1.22	1.96	1,546	1.32	1.81	1.24	1.93	1.94	1.53	1.70	2.15	1.29	1.44	1.80
Q4	201.2	1.66	1.83	7.92	1.24	2.06	1,574	1.36	1.84	1.28	1.93	1.98	1.58	1.73	2.22	1.32	1.45	1.83
2016 Q1	200.0	1.73	1.81	8.09	1.24	2.08	1,569	1.31	1.80	1.34	1.91	2.06	1.63	1.80	2.28	1.32	1.45	1.82
Q2	183.0	1.69	1.67	7.60	1.16	1.96	1,489	1.28	1.71	1.26	1.81	1.96	1.59	1.80	2.23	1.28	1.44	1.79
Q3	180.3	1.76	1.66	7.53	1.13	1.94	1,465	1.31	1.70	1.28	1.68	1.97	1.60	1.79	2.25	1.29	1.44	1.80
Q4	178.7	1.64	1.65	7.45	1.09	1.90	1,477	1.28	1.71	1.30	1.62	1.99	1.58	1.71	2.22	1.28	1.38	1.80
2017 Q1	183.8	1.62	1.71	7.31	1.06	1.83	1,504	1.30	1.73	1.25	1.55	1.92	1.57	1.67	2.21	1.28	1.36	1.79
Q2	190.4	1.71	1.77	7.37	1.07	1.86	1,518	1.34	1.75	1.27	1.62	1.95	1.57	1.73	2.20	1.27	1.40	1.79
Q3	187.3	1.69	1.75	7.17	1.07	1.80	1,504	1.33	1.71	1.23	1.61	1.90	1.52	1.79	2.14	1.24	1.46	1.76
Q4	187.4	1.66	1.76	7.17	1.08	1.79	1,507	1.36	1.74	1.22	1.62	1.88	1.49	1.76	2.10	1.23	1.45	1.75
2018 Q1	186.0	1.72	1.75	7.13	1.12	1.75	1,530	1.43	1.78	1.24	1.72	1.91	1.48	1.81	2.08	1.25	1.53	1.78
Q2	184.9	1.69	1.76	7.12	1.12	1.77	1,537	1.42	1.80	1.24	1.69	1.92	1.49	1.78	2.11	1.25	1.49	1.79
Q3	192.5	1.73	1.84	7.39	1.09	1.84	1,580	1.41	1.84	1.28	1.66	1.97	1.55	1.81	2.20	1.29	1.50	1.84
Q4	203.3	1.80	1.96	7.63	1.10	1.88	1,581	1.40	1.86	1.36	1.75	2.09	1.63	1.86	2.30	1.34	1.53	1.92
2019 Q1	203.2	1.84	1.95	7.58	1.12	1.88	1,544	1.37	1.84	1.36	1.77	2.10	1.63	1.85	2.30	1.36	1.55	1.95
Q2	201.5	1.83	1.94	7.53	1.10	1.87	1,555	1.33	1.86	1.36	1.75	2.09	1.65	1.86	2.33	1.37	1.54	1.97
Q3	198.8	1.85	1.93	7.57	1.08	1.90	1,545	1.29	1.85	1.36	1.68	2.09	1.66	1.84	2.33	1.38	1.53	1.98
Q4	191.9	1.77	1.85	7.33	1.04	1.81	1,500	1.28	1.80	1.31	1.68	2.00	1.60	1.78	2.25	1.34	1.48	1.92
2020 Q1	190.9	1.75	1.84	7.54	1.08	1.87	1,500	1.26	1.81	1.35	1.73	2.06	1.66	1.83	2.32	1.34	1.47	1.90
Q2	201.7	1.87	1.93	8.10	1.14	2.03	1,536	1.26	1.82	1.42	1.76	2.00	1.82	2.00	2.51	1.46	1.61	2.00
Q3	191.2	1.80	1.85	7.46	1.08	1.88	1,466	1.23	1.74	1.35	1.75	2.01	1.71	2.00	2.41	1.37	1.60	1.95
Q4	174.4	1.67	1.70	7.13	1.08	1.79	1,393	1.24	1.66	1.29	1.70	1.94	1.62	1.93	2.28	1.31	1.56	1.86
2021 Q1	160.2	1.51	1.58	6.61	1.02	1.67	1,320	1.19	1.59	1.21	1.67	1.83	1.51	1.82	2.12	1.21	1.46	1.74
Q2	162.0	1.48	1.63	6.54	1.01	1.61	1,293	1.15	1.56	1.20	1.68	1.86	1.46	1.75	2.09	1.17	1.41	1.70
Q3	165.0	1.50	1.68	6.62	1.02	1.67	1,325	1.14	1.59	1.26	1.74	1.98	1.47	1.74	2.10	1.20	1.42	1.76
Q4	169.5	1.49	1.76	6.81	1.07	1.72	1,386	1.17	1.69	1.37	1.85	2.16	1.58	1.81	2.27	1.24	1.41	1.83
2022 Q1	177.5	1.53	1.87	6.71	1.06	1.75	1,423	1.18	1.76	1.38	1.85	2.18	1.72	1.93	2.47	1.30	1.46	1.95
Q2	162.0	1.25	1.76	6.18	0.93	1.59	1,443	1.15	1.82	1.41	1.78	2.25	1.66	1.77	2.40	1.22	1.29	1.85
Q3	179.3	1.30	1.97	6.36	0.93	1.69	1,525	1.14	1.97	1.58	1.85	2.49	1.87	1.88	2.71	1.30	1.30	1.97
Q4	196.1	1.39	2.14	6.58	0.92	1.78	1,623	1.19	2.10	1.74	2.05	2.71	1.88	1.92	2.68	1.36	1.38	2.05
2023 Q1	200.0	1.51	2.17	6.85	1.00	1.87	1,663	1.30	2.15	1.78	2.16	2.74	1.85	1.98	2.62	1.55	1.66	2.32
Q2	204.9	1.49	2.20	7.27	1.04	1.96	1,734	1.32	2.25	1.83	2.29	2.78	1.91	2.08	2.69	1.65	1.79	2.45
Q3	185.0	1.28	1.99	6.85	0.95	1.90	1,679	1.28	2.18	1.66	2.10	2.51	1.78	1.94	2.50	1.56	1.70	2.32
Q4	188.0	1.27	2.02	7.05	0.97	1.97	1,729	1.31	2.22	1.66	2.06	2.52	1.78	1.91	2.47	1.61	1.73	2.38
2024 Q1	189.5	1.28	2.04	6.89	0.96	1.94	1,715	1.29	2.19	1.64	2.08	2.48	1.73	1.88	2.42	1.49	1.62	2.22
Q2	199.5	1.28	2.13	7.07	0.98	1.97	1,757	1.28	2.23	1.59	2.01	2.42	1.79	1.93	2.50	1.53	1.65	2.29
Q3	213.1	1.43	2.28	7.29	1.02	2.07	1,807	1.33	2.32	1.59	2.07	2.41	1.82	2.00	2.55	1.57	1.73	2.34
Q4	211.1	1.39	2.26	7.16	1.00	2.05	1,830	1.31	2.33	1.59	2.04	2.37	1.85	1.97	2.57	1.60	1.70	2.38
2025 Q1	209.7	1.37	2.25	7.03	0.97	2.01	1,874	1.31	2.39	1.56	1.98	2.33	1.83	1.91	2.54	1.58	1.65	2.36
Q2	215.0	1.41	2.31	6.93	0.95	1.99	1,876	1.31	2.39	1.57	1.99	2.34	1.85	1.94	2.57	1.60	1.68	2.40
Q3	214.1	1.40	2.30	6.84	0.94	1.97	1,862	1.30	2.37	1.55	1.97	2.32	1.83	1.92	2.54	1.60	1.67	2.39
Q4	212.1	1.39	2.28	6.74	0.93	1.94	1,838	1.28	2.34	1.53	1.94	2.28	1.80	1.89	2.51	1.58	1.65	2.36

単位：PPP は各国通貨／米国ドル、PRI は米国=1.0。出典：野村・稲場（2025）。

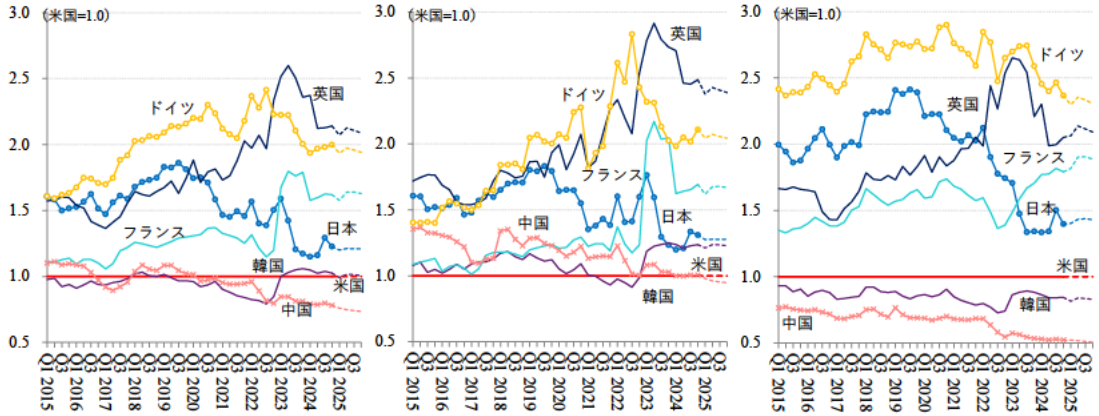
(2) 電力消費



（一国集計）　　（産業部門）　　（家計部門）

単位：米国=1.0。注：観測期間は 2015 年 Q1–2024 年 Q4（季節調整済み）。2025 年 Q1–Q4 は予測値。エネルギー価格への税金および補助金を含む。家計部門の実質化も GDP の PLI による。

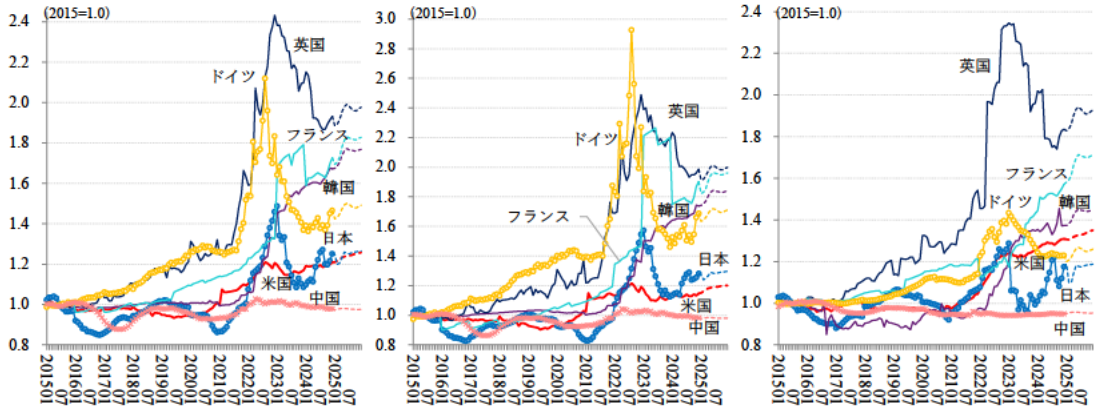
図 3.2.7-9 電力消費の Real PLI



（一国集計）　　（産業部門）　　（家計部門）

単位：米国=1.0。注：観測期間は 2015 年 Q1–2024 年 Q4（季節調整済み）。2025 年 Q1–Q4 は予測値。エネルギー価格への税金および補助金を含む。

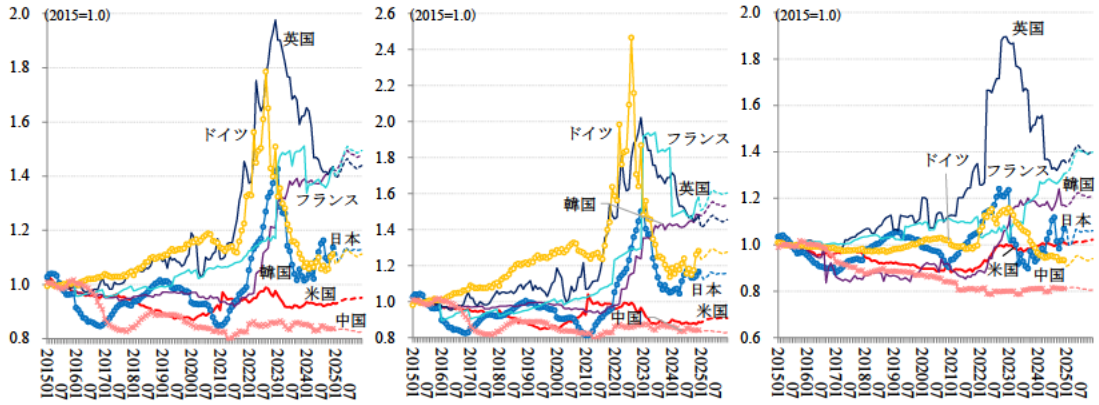
図 3.2.7-10 電力消費の PLI



（一国集計）　　（産業部門）　　（家計部門）

単位：2015 暦年平均=1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。2025 年 1 月–12 月は予測値。自家発電を含む電力消費全体の価格であり、各国の消費ウェイトを反映したトランスログ指数により算定。税金や補助金の影響を含む消費者価格。

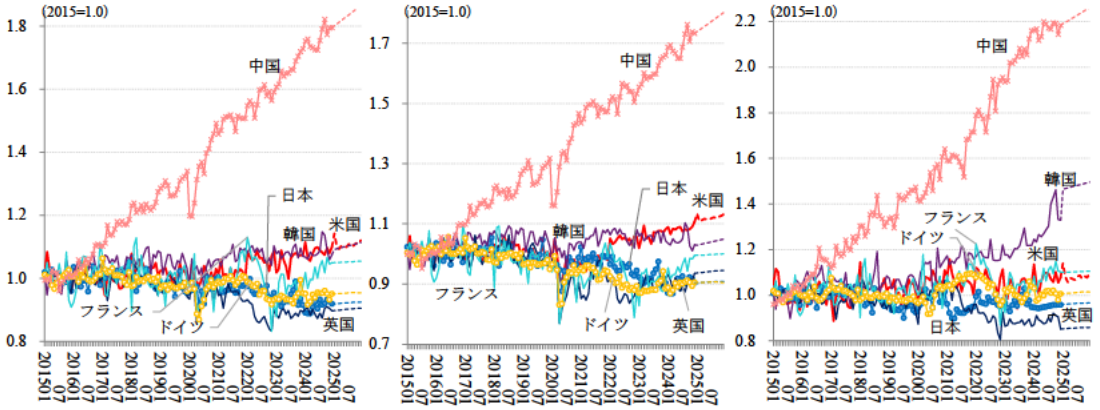
図 3.2.7-11 名目電力価格



（一国集計）　　（産業部門）　　（家計部門）

単位：2015 暦年平均=1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。2025 年 1 月–12 月は予測値。自家発電を含む電力消費全体の価格であり、各国の消費ウェイトを反映したトランスログ指数により算定。税金や補助金の影響を含む消費者価格。実質化はいずれも GDP デフレーターによる。

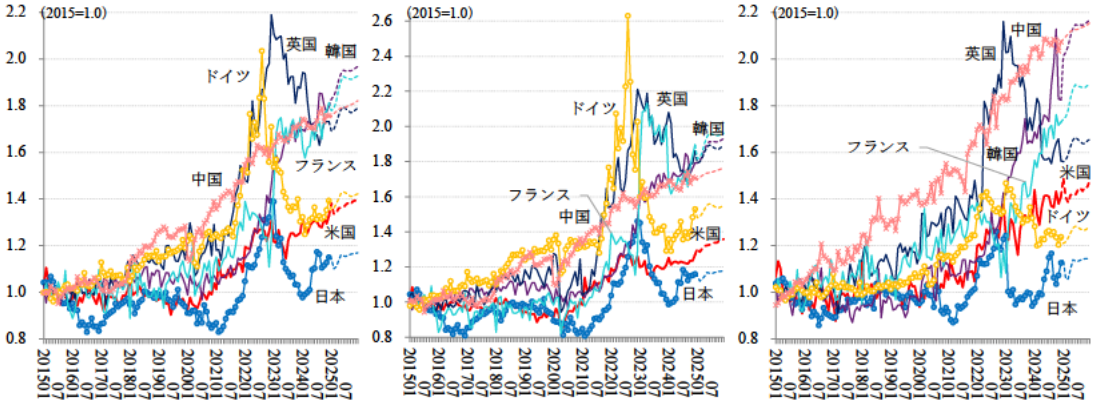
図 3.2.7-12 実質電力価格



（一国集計）　　（産業部門）　　（家計部門）

単位：2015 暦年平均=1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。2025 年 1 月–12 月は予測値。自家発電を含む電力全体の消費量であり、各国の消費ウェイトを反映したトランスログ指数により算定。

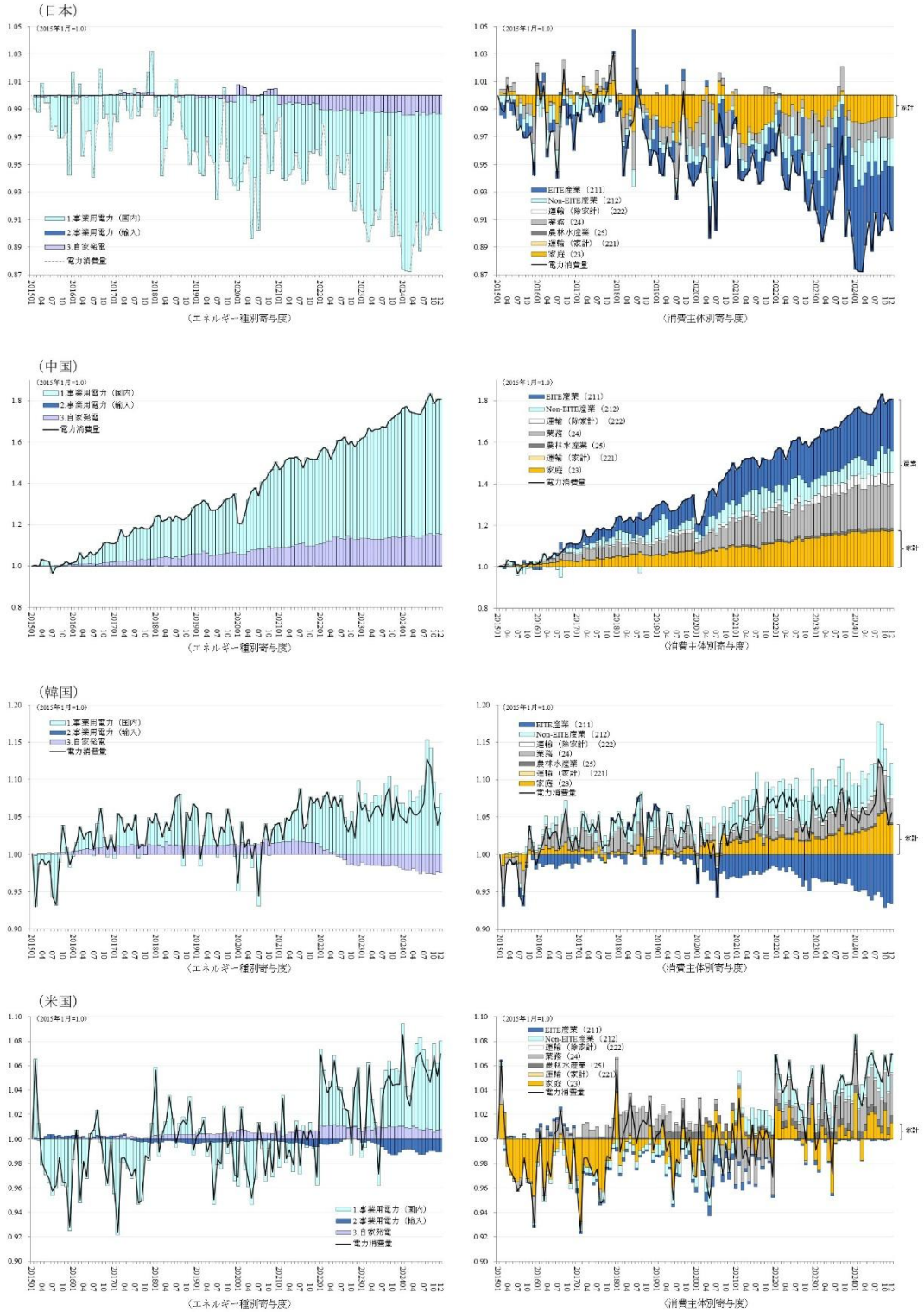
図 3.2.7-13 電力消費量



（一国集計）　　（産業部門）　　（家計部門）

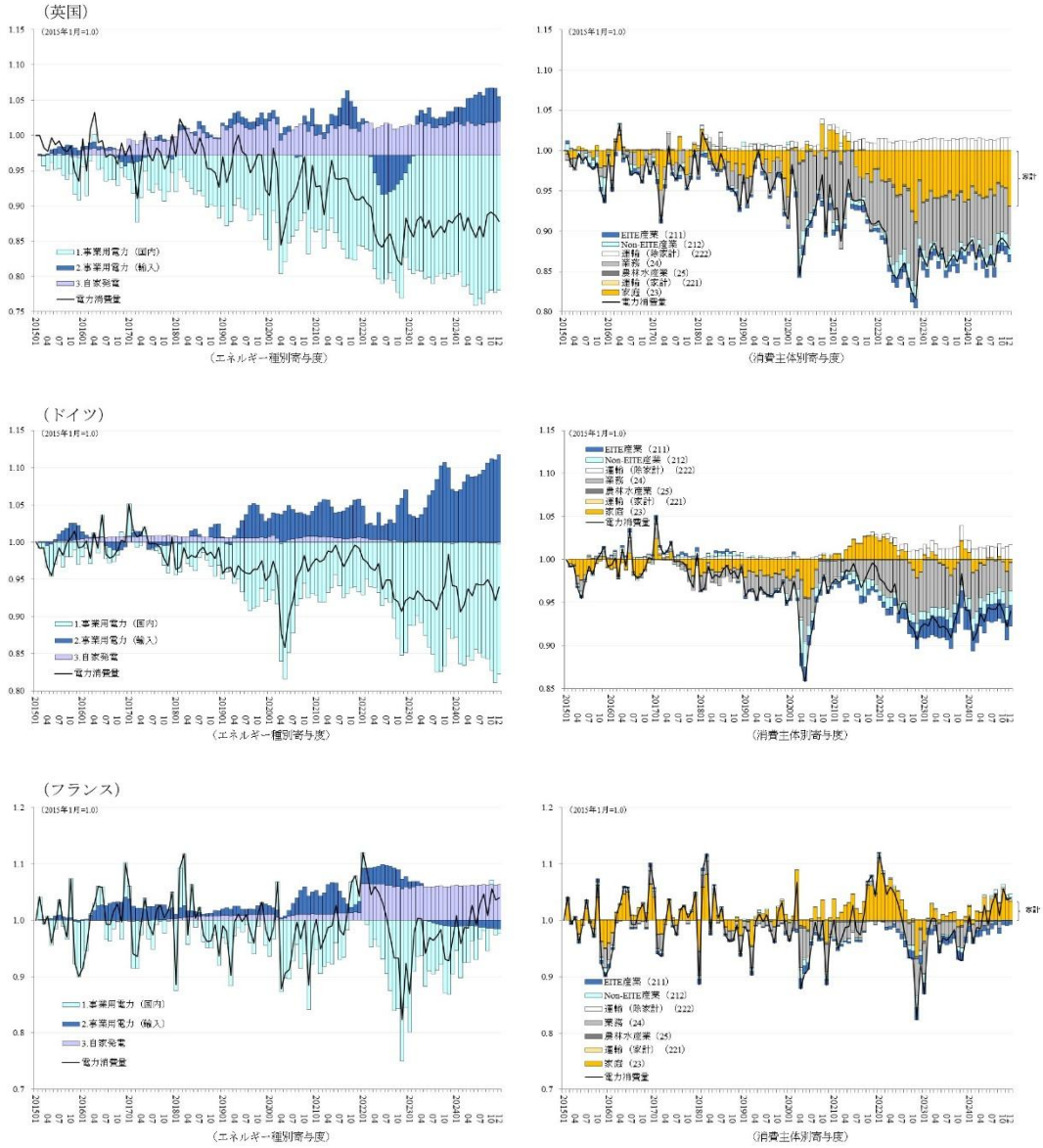
単位：2015 暦年平均=1.0。注：自家発電を含む電力全体の消費金額。観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。2025 年 1 月–12 月は予測値。エネルギー価格への税金および補助金を含む。

図 3.2.7-14 電力消費額



単位：2015 年 1 月＝1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。

図 3.2.7-15 電力消費量変化の寄与度



単位：2015 年 1 月＝1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。

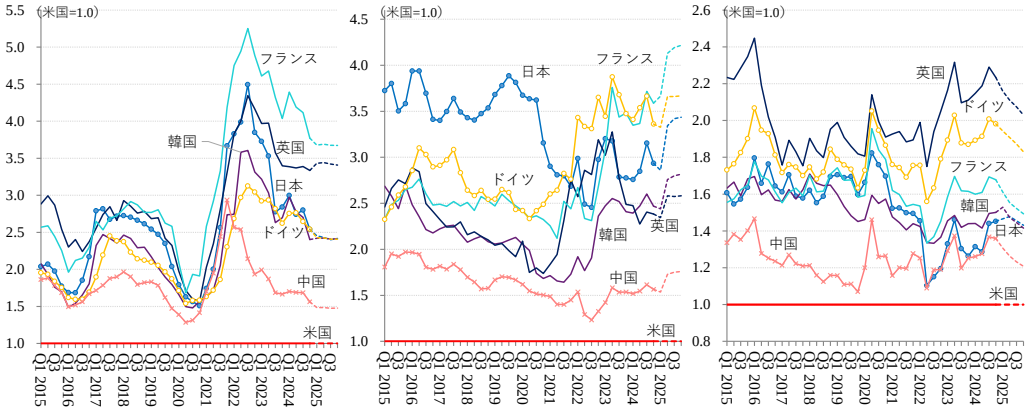
図 3.2.7-16 電力消費量変化の寄与度（続）

表 3.2.7-2 電力消費の内外価格差

	日本			中国			韓国			英国			ドイツ			フランス		
	PPP	PLI	Real PLI	PPP	PLI	Real PLI	PPP	PLI	Real PLI	PPP	PLI	Real PLI	PPP	PLI	Real PLI	PPP	PLI	Real PLI
2015	187.7	1.55	1.71	6.85	1.10	1.76	1,081	0.96	1.26	1.04	1.59	1.62	1.45	1.61	2.04	1.01	1.12	1.40
2016	169.2	1.56	1.55	6.92	1.04	1.78	1,088	0.94	1.25	1.08	1.47	1.67	1.55	1.72	2.18	1.01	1.11	1.40
2017	174.7	1.56	1.63	6.24	0.92	1.56	1,084	0.96	1.25	1.12	1.45	1.73	1.60	1.81	2.25	1.01	1.14	1.43
2018	189.8	1.72	1.81	6.98	1.06	1.73	1,116	1.01	1.30	1.22	1.63	1.89	1.73	2.04	2.45	1.05	1.24	1.50
2019	199.7	1.83	1.92	7.31	1.06	1.82	1,148	0.99	1.37	1.33	1.69	2.04	1.90	2.13	2.68	1.14	1.27	1.63
2020	181.3	1.70	1.75	6.79	0.98	1.70	1,116	0.95	1.33	1.40	1.80	2.08	1.96	2.23	2.74	1.18	1.34	1.66
2021	161.0	1.47	1.63	6.10	0.95	1.53	994	0.87	1.20	1.35	1.85	2.09	1.78	2.11	2.54	1.09	1.30	1.60
2022	192.1	1.46	2.08	5.82	0.87	1.53	1,059	0.82	1.35	1.69	2.09	2.67	2.21	2.32	3.18	1.16	1.22	1.75
2023	188.1	1.35	2.03	5.87	0.83	1.61	1,352	1.04	1.75	2.01	2.49	3.05	1.98	2.14	2.78	1.62	1.76	2.42
2024	182.6	1.21	1.96	5.68	0.79	1.61	1,410	1.03	1.80	1.71	2.19	2.59	1.82	1.97	2.54	1.48	1.61	2.22
2025	184.3	1.21	1.98	5.43	0.75	1.56	1,445	1.01	1.84	1.65	2.10	2.47	1.86	1.95	2.59	1.55	1.62	2.32
2015 Q1	191.4	1.61	1.74	6.76	1.10	1.74	1,076	0.98	1.25	1.04	1.57	1.61	1.43	1.61	2.01	0.99	1.11	1.37
Q2	191.9	1.58	1.75	6.81	1.11	1.75	1,082	0.99	1.26	1.03	1.58	1.61	1.44	1.59	2.03	1.00	1.11	1.40
Q3	183.4	1.50	1.67	6.82	1.09	1.75	1,080	0.92	1.26	1.03	1.60	1.61	1.46	1.62	2.05	1.01	1.13	1.41
Q4	184.2	1.52	1.68	7.00	1.10	1.82	1,087	0.94	1.27	1.06	1.60	1.64	1.49	1.63	2.09	1.04	1.14	1.44
2016 Q1	176.4	1.53	1.60	7.12	1.09	1.83	1,096	0.91	1.26	1.08	1.54	1.66	1.52	1.67	2.12	0.99	1.09	1.37
Q2	169.4	1.57	1.55	7.05	1.08	1.82	1,089	0.94	1.25	1.06	1.52	1.64	1.55	1.75	2.17	1.00	1.13	1.40
Q3	166.4	1.62	1.53	6.87	1.03	1.77	1,082	0.97	1.25	1.08	1.42	1.66	1.56	1.74	2.19	1.01	1.13	1.41
Q4	164.8	1.51	1.52	6.65	0.97	1.69	1,086	0.94	1.25	1.12	1.39	1.72	1.58	1.71	2.22	1.02	1.10	1.43
2017 Q1	167.2	1.47	1.55	6.33	0.92	1.59	1,080	0.94	1.24	1.10	1.37	1.69	1.59	1.70	2.24	0.99	1.06	1.40
Q2	173.5	1.56	1.61	6.14	0.89	1.54	1,077	0.95	1.24	1.10	1.41	1.70	1.59	1.75	2.23	1.00	1.10	1.40
Q3	179.0	1.61	1.67	6.15	0.92	1.55	1,089	0.96	1.24	1.11	1.45	1.72	1.60	1.88	2.25	1.02	1.19	1.44
Q4	179.3	1.59	1.68	6.32	0.96	1.57	1,090	0.98	1.26	1.17	1.56	1.81	1.63	1.92	2.29	1.04	1.22	1.47
2018 Q1	181.6	1.68	1.71	6.59	1.04	1.62	1,094	1.02	1.27	1.18	1.65	1.83	1.65	2.03	2.33	1.02	1.26	1.46
Q2	187.1	1.71	1.78	6.92	1.09	1.72	1,115	1.03	1.30	1.19	1.62	1.84	1.70	2.03	2.41	1.05	1.25	1.50
Q3	193.0	1.73	1.85	7.19	1.06	1.79	1,127	1.01	1.31	1.24	1.61	1.91	1.77	2.06	2.51	1.06	1.23	1.52
Q4	197.4	1.75	1.90	7.23	1.05	1.78	1,128	1.00	1.33	1.28	1.65	1.97	1.80	2.06	2.53	1.07	1.22	1.53
2019 Q1	201.5	1.83	1.93	7.32	1.09	1.81	1,143	1.02	1.36	1.29	1.67	1.99	1.84	2.09	2.59	1.09	1.24	1.57
Q2	200.6	1.83	1.93	7.41	1.08	1.84	1,155	0.99	1.38	1.34	1.72	2.06	1.90	2.14	2.68	1.13	1.27	1.62
Q3	199.7	1.86	1.93	7.33	1.04	1.83	1,154	0.97	1.38	1.32	1.63	2.03	1.92	2.14	2.70	1.16	1.29	1.67
Q4	197.0	1.81	1.90	7.19	1.02	1.78	1,138	0.97	1.37	1.35	1.74	2.07	1.95	2.16	2.73	1.17	1.30	1.68
2020 Q1	189.9	1.74	1.83	7.07	1.01	1.76	1,147	0.96	1.38	1.47	1.88	2.24	2.00	2.20	2.79	1.19	1.31	1.69
Q2	188.3	1.75	1.80	6.85	0.97	1.72	1,128	0.92	1.33	1.38	1.71	1.95	1.99	2.19	2.75	1.20	1.32	1.64
Q3	181.5	1.71	1.76	6.73	0.97	1.70	1,112	0.94	1.32	1.39	1.79	2.06	1.97	2.30	2.78	1.17	1.37	1.67
Q4	165.5	1.58	1.62	6.52	0.99	1.64	1,078	0.96	1.29	1.38	1.81	2.07	1.87	2.24	2.65	1.15	1.37	1.64
2021 Q1	155.1	1.47	1.53	6.18	0.95	1.56	1,005	0.90	1.21	1.26	1.73	1.89	1.76	2.12	2.48	1.10	1.33	1.58
Q2	158.9	1.45	1.60	6.08	0.94	1.50	987	0.88	1.19	1.26	1.76	1.96	1.72	2.08	2.47	1.09	1.31	1.58
Q3	164.5	1.49	1.68	6.10	0.94	1.54	989	0.85	1.19	1.36	1.88	2.14	1.74	2.05	2.47	1.10	1.29	1.61
Q4	165.5	1.46	1.72	6.04	0.95	1.53	995	0.84	1.22	1.50	2.03	2.37	1.91	2.18	2.73	1.09	1.25	1.63
2022 Q1	182.0	1.57	1.92	6.09	0.96	1.59	993	0.82	1.23	1.47	1.97	2.33	2.11	2.37	3.03	1.17	1.32	1.76
Q2	181.6	1.40	1.97	5.89	0.89	1.52	1,030	0.82	1.30	1.65	2.07	2.61	2.14	2.28	3.09	1.14	1.21	1.74
Q3	191.9	1.39	2.11	5.59	0.82	1.49	1,061	0.79	1.37	1.67	1.97	2.64	2.40	2.41	3.47	1.14	1.15	1.73
Q4	212.9	1.50	2.32	5.69	0.80	1.53	1,153	0.85	1.49	1.99	2.33	3.09	2.18	2.23	3.11	1.17	1.20	1.78
2023 Q1	210.1	1.59	2.28	5.80	0.85	1.58	1,276	1.00	1.65	2.07	2.52	3.19	2.07	2.22	2.94	1.56	1.67	2.34
Q2	195.0	1.42	2.10	5.94	0.85	1.60	1,355	1.03	1.75	2.08	2.60	3.15	2.04	2.22	2.87	1.65	1.80	2.45
Q3	173.9	1.20	1.87	5.89	0.81	1.63	1,378	1.05	1.79	1.98	2.51	3.00	1.93	2.11	2.72	1.62	1.76	2.41
Q4	173.7	1.17	1.87	5.87	0.81	1.64	1,399	1.06	1.80	1.90	2.36	2.88	1.86	2.00	2.59	1.66	1.79	2.47
2024 Q1	170.7	1.15	1.84	5.70	0.79	1.61	1,395	1.05	1.78	1.87	2.37	2.84	1.78	1.93	2.49	1.45	1.58	2.17
Q2	180.8	1.16	1.93	5.70	0.79	1.59	1,405	1.02	1.78	1.68	2.12	2.55	1.83	1.97	2.55	1.48	1.60	2.22
Q3	192.4	1.29	2.06	5.72	0.80	1.63	1,409	1.04	1.81	1.64	2.13	2.48	1.80	1.98	2.52	1.48	1.63	2.21
Q4	186.6	1.23	2.00	5.62	0.78	1.60	1,432	1.03	1.83	1.67	2.14	2.49	1.87	2.00	2.60	1.52	1.62	2.27
2025 Q1	183.2	1.20	1.97	5.53	0.76	1.58	1,424	0.99	1.82	1.63	2.07	2.44	1.85	1.93	2.57	1.50	1.58	2.25
Q2	184.8	1.21	1.98	5.45	0.75	1.57	1,458	1.02	1.86	1.68	2.13	2.50	1.88	1.97	2.62	1.56	1.64	2.34
Q3	184.7	1.21	1.98	5.40	0.74	1.55	1,454	1.01	1.85	1.66	2.11	2.48	1.87	1.96	2.60	1.57	1.64	2.35
Q4	184.4	1.21	1.98	5.35	0.74	1.54	1,443	1.01	1.84	1.65	2.09	2.45	1.85	1.94	2.58	1.55	1.63	2.33

単位：PPP は各国通貨／米国ドル、PRI は米国=1.0。出典：野村・稲場（2025）。

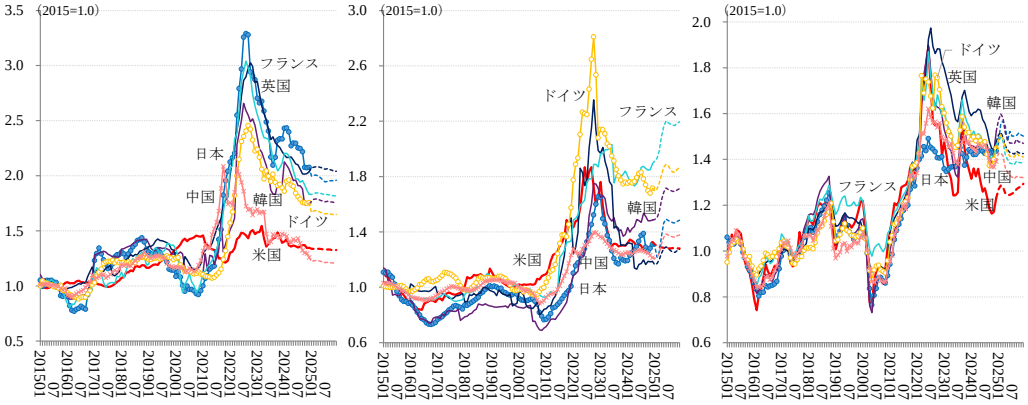
(3) 化石燃料



（石炭製品）　（ガス）　（石油製品）

単位：米国=1.0。出典：各国統計に基づく ECM 推計値。注：観測期間は 2015 年 Q1–2024 年 Q4（季節調整済み）。2025 年 Q1–Q4 は予測値。エネルギー価格への税金および補助金を含む。

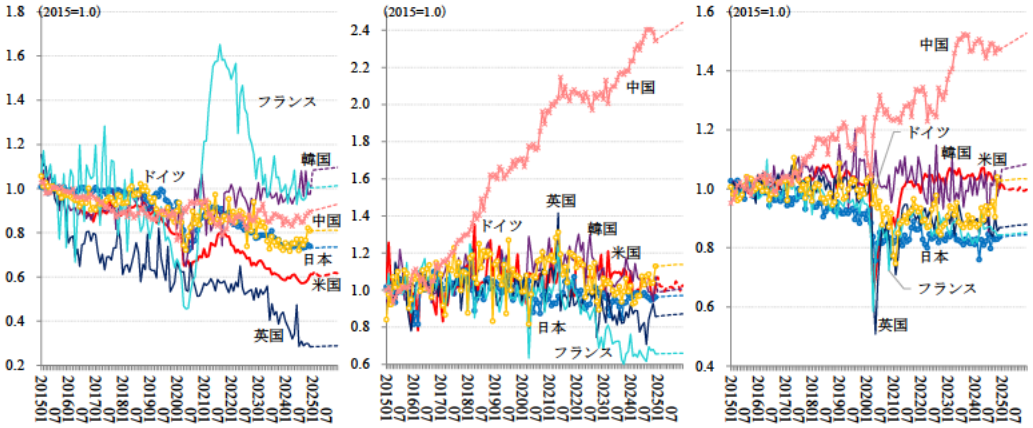
図 3.2.7-17 化石燃料 PLI



（石炭製品）　（ガス）　（石油製品）

単位：2015 暦年平均=1.0。注：観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。2025 年 1 月–12 月は予測値。各国の消費ウェイトを反映したトランスログ指数により算定。エネルギー価格への税金および補助金を含む。

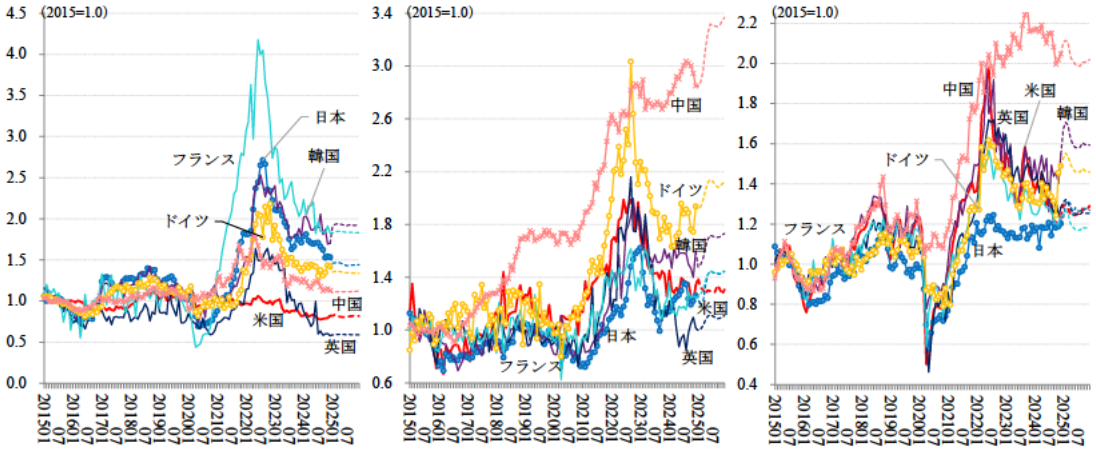
図 3.2.7-18 化石燃料価格



（石炭製品）　（ガス）　（石油製品）

単位：2015 暦年平均=1.0。注：化石燃料の最終エネルギー消費量であり、各国の消費ウェイトを反映したトランスログ指数により算定。観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。2025 年 1 月–12 月は予測値。

図 3.2.7-19 化石燃料消費量

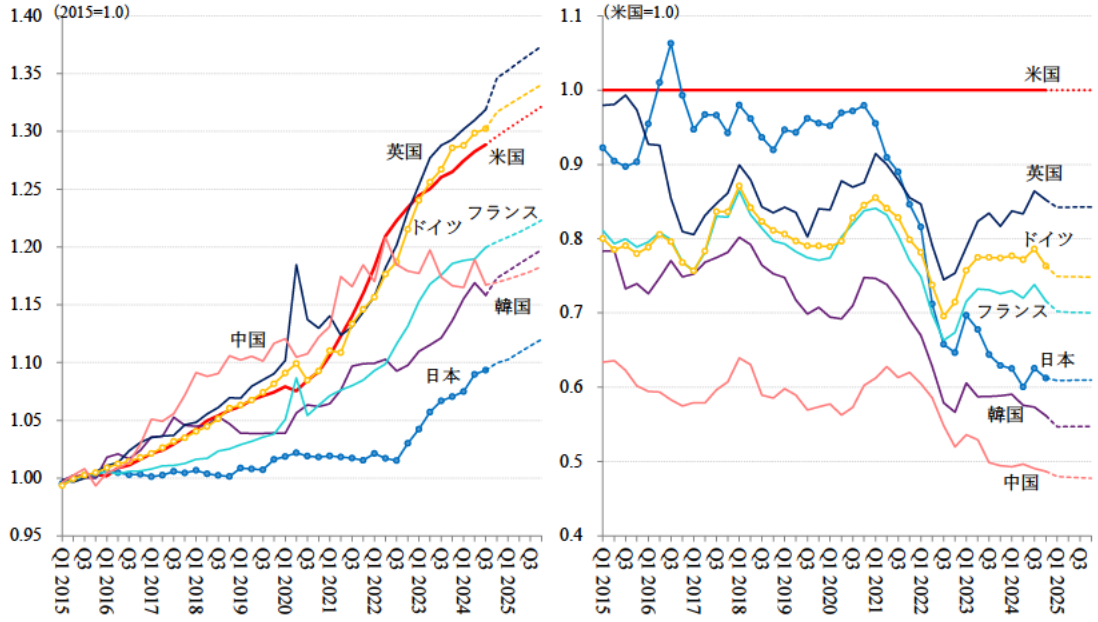


（石炭製品）　（ガス）　（石油製品）

単位：2015 暦年平均=1.0。注：化石燃料の最終エネルギー消費額。観測期間は 2015 年 1 月–2024 年 12 月（季節調整済み）。2025 年 1 月–12 月は予測値。エネルギー価格への税金および補助金を含む。

図 3.2.7-20 化石燃料消費額

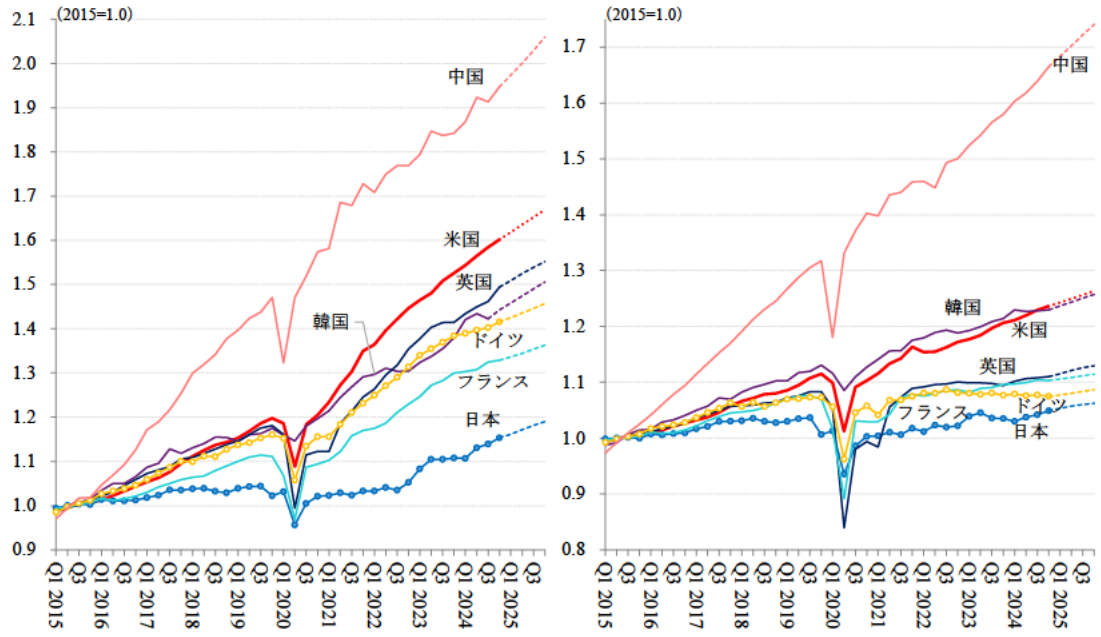
(4) 生産指標



（P^X）　　（PLI^X）

単位：GDP デフレーター（P^X）は 2015 暦年平均=1.0、生産 PLI は米国=1.0。注：2015 年 Q1–2024 年 Q4 は各国の四半期国民経済計算（QNA）および 2021 ICP（World Bank 2024）。2025 年 Q1–Q4 は OECD Economic Outlook（2024 年 12 月 4 日公表）の予測値による延長推計。

図 3.2.7-21 GDP デフレーターと生産 PLI



（実質 GDP：X）　　（名目 GDP：V^X）

単位：2015 暦年平均=1.0。注： 2015 年 Q1–2024 年 Q4 は各国の四半期国民経済計算（QNA）。2025 年 Q1–Q4 は OECD Economic Outlook（2024 年 12 月 4 日公表）の予測値。

図 3.2.7-22 名目・実質 GDP

3.3 戦後日本経済における鉄鋼の間接貿易

3.3.1 はじめに

1970 年代初めから 1 億トンから 1.3 億トンの水準でほぼ横ばいを維持していた日本の粗鋼生産は、2010 年代後半から急速な減退を始めた[19]。こうした生産減退の動向は、欧州や日本を中心に脱炭素政策（カーボンニュートラル政策）が強化され、鉄鋼業においても従来以上の取り組みが求められるようになった時期とおおむね一致している（Åhman et al. 2017, Bataille et al. 2018, Geels et al. 2017, Wesseling et al. 2017）。日本国内の粗鋼生産量（カーボンニュートラル行動計画非参加会社も含む）は、2023 年度には 8,234 万トン（2013 年度比▲24.1%）にまで減少した（日本鉄鋼連盟 2025, p. 8）。生産減退に伴い、鉄鋼業のエネルギー消費量は▲22.2%、二酸化炭素（CO_2）排出量は▲23.7%の減少となっている。こうした急速な変化の要因を解明することは、日本のエネルギー環境政策の再考に不可欠なものとなっている。

鉄鋼業は、既存技術によっては二酸化炭素（CO_2）の排出削減が困難な産業（hard-to-abate sector）である。安価に利用可能な排出削減技術が存在しないことはエネルギー多消費型（Energy-intensive trade-exposed: EITE）の製造業に共通する特性で

19 3.3 節は野村(2025)、最新の ECM（野村・稲場・吉田 2025）における EITE 指標、また 2024 年度 ALPS III 経済 WG での議論に基づき加筆修正されたものである。本稿の執筆においては泉山雅明氏、手塚宏之氏、小野透氏、田村潤一氏をはじめとする日本鉄鋼連盟の方々からたいへん貴重なご助言とコメントを頂いている。

あり、EITE 製造業における CO_2 排出削減は、少なくとも短期的には、ほとんど生産減退によって達成するしかない。生産の減少分は輸入によって代替されていく。しかし日本国内の鉄鋼生産活動は相対的に高いエネルギー効率を有していると考えられており[20]、カーボンリーケージ（炭素の漏れ）として知られる現象が示すように、日本企業による海外への生産移転や輸入代替は世界のエネルギー消費量や CO_2 排出量をむしろ増加させる可能性は大きい。

検討すべき課題は、EITE 製造業をも巻き込む脱炭素化（deep decarbonization）という目標設定が、不要な水準の産業空洞化を引き起こしていないかを検証することである。しかしそうした評価は容易ではない。鉄鋼生産の海外移転は、さまざまな不確実性を伴いつつも、グローバルなサプライチェーンを構築するための企業戦略としての合理性を有すると考えられる。企業の経営判断は尊重されるが、それは脱炭素政策の枠組みの中での（現行政策を所与とした）部分最適の合理性を示すにすぎない。問われるべき課題は、脱炭素政策が存在しない場合における全体最適の合理性であり、日本経済成長の戦略である。

日独両国の経済に共通する特性として、EITE 製造業（素材産業）は高い価格競争力を有するとともに、高い報酬と安定した雇用（decent jobs）を提供する基幹産業である（野村 2024）。適切に機能する政府であれば、鉄鋼生産の海外移転に伴い、国内経済が長年にわたり享受してきた良質な雇用機会、産業競争力、地域経済の基盤が喪失されるリスクについて、経済的あるいは安全保障上の観点から慎重に検討するだろう。日本製鉄による US スチール買収に対する米国政府の示す懸念は、この観点から見れば極めて合理的である。しかし日本では、脱炭素政策の名のもとに、こうした懸念がほとんど顧みられてこなかった。すでに進行している空洞化の現実を直視することなく、それを将来のリスクとして棚上げしている。このような政府の姿勢は、海外移転を進めたい企業にとっては有利に働き、同時に、EITE 製造業が政府の非現実的な脱炭素政策に消極的に同意するという相互作用を生じさせてきた可能性がある。

日本のメディアは、脱炭素政策に対して無批判に追随し、その推進を喧伝してきた。そして、鉄鋼の国内生産減退についても、その主要因を内需低迷に求め、経済のサービス化による不可避の流れであるかのように報じてきた。長期化する景気停滞やデフレの影響もあり、内需低迷という説明は広く受け入れられやすい。しかし、見かけ上の内需低迷が具体的にどのような需給構造の変化を示すかを明らかにすることは、素材産業である鉄鋼では特に困難な課題である。この検討には、観察される統計を見るのみでは不十分であり、理論と精緻な測定を通じて初めて可視化される需給構造の分析が不可欠である。

鉄鋼の需給構造を分析する上で最大の課題は、鉄鋼が主に中間財として機能し、投資財や消費財といった下流製品に埋め込まれて（embedded されて）取引される点にある。世界鉄鋼協会（World Steel Association: worldsteel）は、「真の」需要を把握するた

[20] 鉄鋼業のエネルギー効率を国際比較では、副生ガスや熱・圧力の回収・利用など、プラント全体の運用を考慮する必要があり、単純な比較は困難である。しかし地球環境産業技術研究機構（RITE）の評価によれば（日本鉄鋼連盟 2025, p. 18）、2019 年における日本の鉄鋼業は転炉鋼では 10–30%、電炉鋼では 3–10%ほど、他国よりも高いエネルギー効率を有すると評価されている。

め、鉄鋼における各国間の間接貿易（indirect trade）による取引量を試算している。2015 年に発表された worldsteel の報告書（worldsteel 2015）によれば、自動車や機械などの下流製品に埋め込まれ、日本から間接的に輸出される鉄鋼量は、2000 年および 2004–2013 年の取引量の平均値として、日本の直接的な鉄鋼輸出量の約 70%と推計される。一方、下流製品を通じて日本に間接的に輸入される鉄鋼量は、同期間における直接輸入量の約 120%に達すると試算されている。

本節における第 1 の目的は、worldsteel 推計値の検証である。worldsteel は金属製品や機械設備などの製品の 1 トンあたりに含まれる鋼材量（鋼材係数）を想定して、その貿易量から推計するボトムアップ型のアプローチによっている。しかし貿易統計から重量が把握されない貿易財も多く、その推計値はかなりの測定誤差を持つかもしれない。本節は、鉄鋼生産量と整合性を持ち完全分解するトップダウン型のアプローチにより、昭和 35 年（1960 年）からの各種の産業連関表に基づき網羅性を担保しながら測定していく。本節の帰結によれば、worldsteel 推計値は日本の間接輸出および間接輸入の両者を過小評価している。第 2 の目的は、本節での中間財の需要源泉と間接輸入の推計により拡張された需給バランスに基づき、戦後日本経済における需給構造の変化を捉えることである。

以下、3.3.2 節では近年における鉄鋼の生産減退について、粗鋼生産量および（品質調整済みの）集計生産量として、日本とドイツを中心として、直近となる 2024 年 11 月までの観察事実を整理する。日独両国では、とくに 2010 年代後半から生産減退が共通して観察される。日独の生産減退が始まる 2018 年末から現在までの 6 年間は、両国における脱炭素政策が加速した時期ともほぼ重なっている。3.3.3 節では、間接貿易を含む鉄鋼の需要構造を分析するための産業連関フレームワークを論じる。3.3.4 節では、本節の測定結果として、戦後日本経済における鉄鋼需給の構造変化を測定する。3.3.5 節を結びとする。

本節での測定からのひとつの帰結は、現在の日本経済では、鉄鋼の国内生産の変化は、総需要側からみれば間接輸出の減少に、総供給側からみれば間接輸入の拡大に大きく依存することである。こうした間接貿易の変化は、直接に観察される鉄鋼の需給バランスのもとでは単なる内需（中間需要）の低迷として捉えられてしまうが、本節で構築される拡張された需給バランスのもとでは適切に把握される。

本節の測定における課題のひとつは、産業連関表では 5 年ほどのタイムラグを受容せざるをえないことである。利用可能となる最新の産業連関表（基本表）は、2024 年 6 月に公表（9 月に改訂）された 2020 年産業連関表（総務省 2024a）であり、コロナ禍の特殊な状況を受けて構造変化の把握には適切ではないかもしれない。直近の間接輸出に関する動向は日本鉄鋼連盟による推計値のトレンドから補完していく[21]。こうした情報の制約はあるものの、近年に観察される生産減退は、海外への生産移転が消極的に同意する環境規制と環境規制の強化が促す生産移転という、意図せざる相互作用とその循環構造によるものと評価される。今後、脱炭素政策の加速により自動車や

[21] 日本鉄鋼連盟では間接輸出を 1995 年値から推計しており、2024 年 10 月出版の最新の推計値（日本鉄鋼連盟 2024b）では 2023 年までの計数が公表されている。ただし、(6)項に論じるようにその推計は普通鋼に限られており、推計値の水準は本推計とは乖離している。

機械などの下流製品の海外生産移転がさらに進むものとなれば、鉄鋼の間接輸出の縮小と間接輸入の拡大を通じ、さらなる鉄鋼生産減退をもたらす空洞化の連鎖が生じる可能性がある。

3.3.2 近年の鉄鋼生産減退

(1) 世界粗鋼生産の拡大

2010年代後半以降に観察される日本国内の鉄鋼生産には、国際比較から2つの特性が見出される。第1はドイツとの類似性であり、第2は日独経済に共通する鉄鋼生産減退は世界動向と大きく乖離することである。2015年から2023年における世界全体の粗鋼生産量の成長率と、その国別寄与度を示したものが表 3.3.2-1 である。国別寄与度の合計は世界成長率に一致しており、表では期間成長率に基づいて国・地域が右から左へと並んでいる。

2020年のCOVID-19パンデミックによりほとんどの国で短期的な生産減退を経験したが（主要国の推移は図 3.3.2-2 に後述）、2015–2023年の期間全体としてみれば世界生産は15.5%の順調な拡大となっている。この間、とくにインドと中国では国内生産をそれぞれ44.3%と23.7%の増産となった。現状の生産規模の相違を考慮すれば、中国はこの間における世界生産の拡大の80%近く（15.5%の拡大に対する12.3ポイントの寄与度）を説明しており、他国を圧倒している。インドも世界増産に対して18%の寄与率を示している。

表 3.3.2-1 世界の粗鋼生産量と経済成長（2015–2023年）

	日本	ドイツ	韓国	米国	ロシア	RoW	中国	インド	世界
a. 鉄鋼生産量	-18.9	-18.6	-4.7	3.2	7.0	7.5	23.7	44.3	15.5
	(-1.0)	(-0.4)	(-0.2)	(0.1)	(0.3)	(1.6)	(12.3)	(2.8)	
b. 実質GDP	4.0	7.5	18.0	17.4	11.1	16.3	44.0	42.1	20.8
	(0.2)	(0.3)	(0.3)	(4.2)	(0.2)	(7.0)	(7.3)	(1.3)	
c. 弾性値(a/b)	-4.8	-2.5	-0.3	0.2	0.6	0.5	0.5	1.1	0.7

単位：%（2015年から2023年までの8年間における対数成長率）、括弧内はパーセンテージポイント（寄与度）。出典：粗鋼生産量は日本鉄鋼連盟（2024a）、実質GDPはWorld Bank Open Data（2024）。注：国・地域は粗鋼生産成長率の低い順に左から並んでいる。RoWはその他世界（rest of the world）の略。

中印の鉄鋼増産は顕著だが、生産規模の変化との対応を検討する必要がある。表3.3.2-1の第2系列には、同期間の実質GDP成長率が示されている。8年間に40%を超える中国とインドの実質GDPの拡大は、世界の経済成長の20.8%のうちのそれぞれ7.3ポイントと1.3ポイントを牽引した。この間、粗鋼生産のGDP弾性値（鉄鋼生産の成長率／実質GDP成長率）として評価すれば、後発となるインドが1.1となり、経済の拡大を上回る鉄鋼需要を示している。中国、その他世界（rest of the world: RoW）、ロシアが0.5–0.6である。RoWには弾性値がいずれは1を上回るだろう中低位所得国が含まれており、中国の国内生産量は2020年代にはピークを打つと考えられが、インド

や ASEAN 諸国における需要拡大がそれを補い、世界の鉄鋼生産の拡大傾向は継続すると見られている。

粗鋼生産の GDP 弾性は、日独両国の特殊性を明確に示している。成熟した経済構造を持つ米国でも弾性値は 0.2 の正値となり、2018 年には一人あたりの生産量（購買力平価によって換算した実質 GDP）として日本を超過した韓国でも–0.3 とわずかな負値に留まる。それに対し、日本とドイツではそれぞれ–4.8 と–2.5 と突出して大きなマイナス値を記録した。

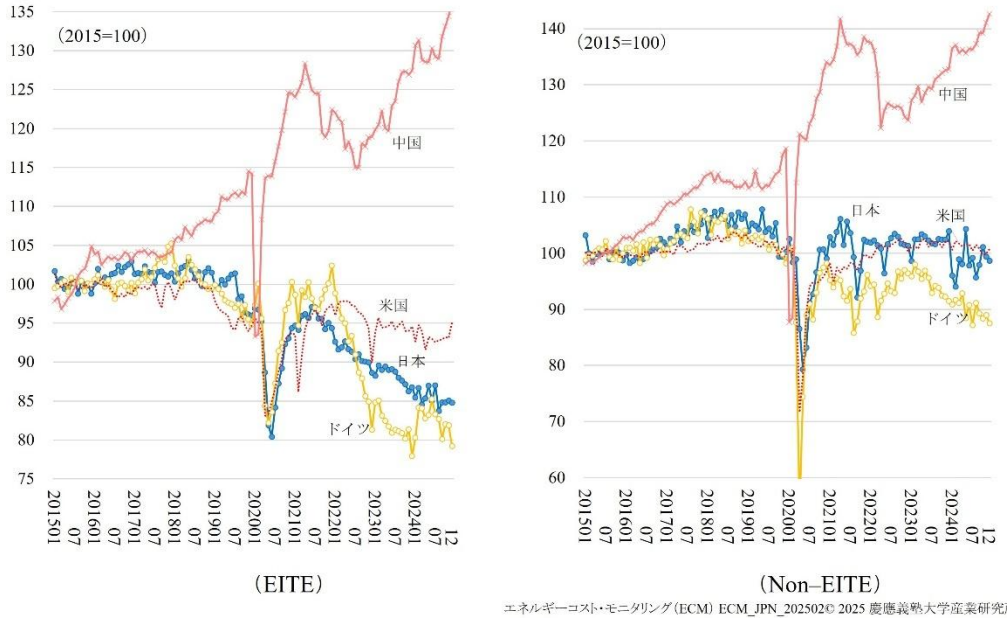
マクロ経済の観察によって確認されることは、世界の鉄鋼需要は拡大していること、先進国でも実質経済成長をプラスに維持しながらおおむね同水準の鉄鋼生産を継続している（GDP 弾性がゼロに近い）ことである。近年の日独の経験はそれを大きく逸脱する減退を示している。

(2) EITE 生産の動向

近年における日独の EITE 製造業および鉄鋼業における生産推移の詳細は、エネルギーコスト・モニタリング（ECM）の EITE 生産指標として毎月速報値が公開されている（Nomura and Inaba 2024）。その最新の速報値となる ECM（野村・稲場・吉田 2025）に基づき、図 3.3.2-1 左には、日本とドイツ、米国そして中国における、2015 年から 2024 年 11 月までの EITE 製造業における生産の推移を示している（EITE 製造業の対象は図 3.3.2-1 の脚注）。

2022 年第 3 四半期、実質的なエネルギーコスト負担がピークに達したドイツでは、EITE 製造業における国内生産が急減速した（図 3.3.2-1 左）。エネルギーコスト負担が急増した後のわずか 2 年余りで、EITE 製造業の生産は 20%もの減少を記録している。企業レベルではなく、一国の集計量としてこれほどの短期変動は極めて例外的である。図 3.3.2-1 右にみるように、エネルギーコスト上昇による直接的な影響が必ずしも大きくはない製造業（Non-EITE 製造業）でも、パンデミック後に回復してきた生産水準は 2022 年後半から減少をはじめ、現在ではパンデミック前（2018–2019 年）の生産水準からは 15%ほどの生産停滞を記録している。ドイツの経済成長率は、2023 年の 0.3%減に続き、2024 年における 2 年連続のマイナス成長（0.2%減ほど）はほぼ確実となっている。2 年連続となるマクロ生産の後退は「欧州の病人」と呼ばれた 2002–03 年以来である。2025 年も、過去 2 年間に経験してきたように、経済成長予測の下方修正が続く可能性は大きいとみられている。

日本では、歴史的な円安を受けて Non-EITE 生産は横ばいを継続しているが、EITE 生産の減退はドイツよりも早く、2021 年半ばから始まっている。タイミングの相違はあるが、2024 年後半までの EITE 生産減退水準は日独で類似的である。そして最新の月次 GDP 速報（慶應義塾大学産業研究所による JMGDP）によれば、日本の 2024 年の経済成長率は 0.2%減と評価される。歴史的な円安という好機にも関わらず、マクロ経済成長の低迷はドイツと同レベルにある。



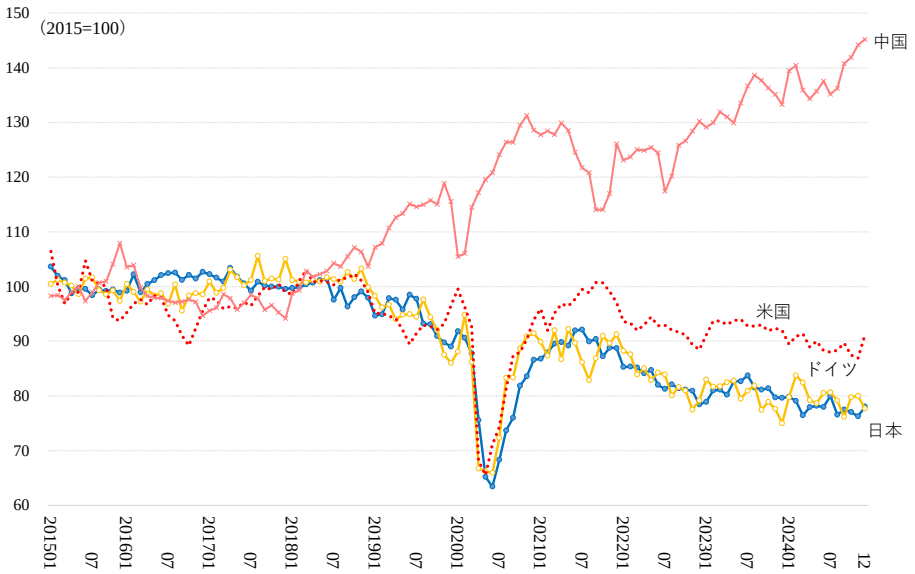
単位：各国の 2015 年生産水準=100。出典： エネルギーコスト・モニタリング（2025 年 3 月 4 日公表）。注:左図の EITE はエネルギー多消費製造業の集計生産指数であり、紙・パルプ製品、化学製品（医薬品を除く）、窯業土石製品、鉄鋼製品、非鉄金属製品製造業における詳細な生産物分類に基づく集計生産量（トランスログ指数）として定義。右図の Non-EITE は、EITE 以外の製造業における集計生産量として定義。

図 3.3.2-1 主要国の月次 EITE 生産（2015 年 1 月–2024 年 12 月）

(3) 日独の鉄鋼生産減退

EITE 製造業のうちとくに鉄鋼にフォーカスすれば、日独両国における生産減退のトレンドはかなり類似している。図 3.3.2-2 は ECM に基づいて、主要国における鉄鋼生産のみを取り出したものである。粗鋼生産量（物量）の変化である表 3.3.2-1 に対して、ECM における鉄鋼生産量は 10 種類の鋼材からトランスログ指数によって集計されており、相対的に高付加価値な鋼材の生産拡大は、品質調整済み（quality-adjusted）の鉄鋼生産の集計量の増加として評価されている。日独両国における鉄鋼生産の停滞は、おおむね 2018 年末から始まっている。表 3.3.2-1 における日独の粗鋼生産停滞（2015–2023 年）のほとんどはこの時期から生じたものである。

国内生産量の変化をもたらす要因は、国内外のエネルギー価格差の拡大、為替レートの変化、賃金上昇圧力などを受けた変化である「価格要因」と、脱炭素政策による規制や企業に求められる行動指針などの影響である「非価格要因」の 2 つに区分できよう。2018 年末から見いだされる日独両国における鉄鋼生産の減退では、むしろエネルギーにおける実質的な内外価格差が安定していた時期に生じており、非価格要因が大きいかもしれない。



単位：各国の 2015 年生産水準=100。出典：エネルギーコスト・モニタリング（2025 年 3 月 4 日公表）。

図 3.3.2-2 主要国の月次鉄鋼生産（2015 年 1 月–2024 年 12 月）

日独両国における生産減退の開始時は、鉄鋼業という hard-to-abate 産業においても脱炭素への転換が強く求められるようなった時期とおおむね一致し（Åhman et al. 2017, Bataille et al. 2018, Geels et al. 2017, Wesseling et al. 2017）、政策的な対応が加速される一歩前のタイミングである。2020 年 10 月、日本では 2050 年カーボンニュートラルを目指すことが宣言され、経済産業省が中心となって構築された「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（日本政府 2021）では、「世界に先駆けた」水素還元製鉄の技術確立を重要施策として位置付けている。それに呼応して、日本製鉄は 2021 年 3 月の中長期経営計画のなかで「日本製鉄カーボンニュートラルビジョン 2050」を公表するなど、企業レベルでの取り組みが加速した。ドイツでも、2019 年にはティッセンクルップが水素還元製鉄への転換プロジェクト「H2Steel」を開始している。それはドイツ連邦政府により 2020 年 6 月に策定された「国家水素戦略」、およびその具体策となる「工業の脱炭素化」（2021 年 1 月）と呼応している。

2018 年末からの現在までの 6 年間における生産減退トレンドは、日独両国でかなり類似している（図 3.3.2-2）。パンデミックによる一時的な落ち込みを除くと、ほぼ直線的な生産減退である。それは 2021 年からの（石炭を含む）エネルギーの価格の高騰期にも加速するものではなく、「非価格要因」による計画的な減産とも映る。日独による脱炭素政策の加速（deep decarbonization）は、環境規制やイノベーションを促すかというポーター仮説に関するこれまでの実証分析（Jaffe and Palmer 1997, Dechezleprêtre and Sato 2017 など）のショックをはるかに超過するインパクトを持っている。

2019–2020 年における脱炭素政策の加速の雰囲気を感じながら、2018 年末より国内生産量を減少させてきた日独産業に共通することは、そうした企業の国内での脱炭素化に向けた取り組みは各国政府（あるいは欧州連合）からの補助金に依存した経営戦

略であり、その勝算はほとんど見えていなかったことである。製鉄におけるグリーン水素（再エネ由来）の利用を前提とすれば、安価で安定した再エネ電力の供給が難しい日独両国が国内競争力を持ちえないことは、活動家による夢想を他所に、両国では長く指摘されてきたことである[22]。現在では、政策支援によっても安価なグリーン水素の供給が困難であることがより強く認識される中で、鉄鋼業は混乱の中にある。2024年8月、ドイツのティッセンクルップ・スチール・ヨーロッパ（TKSE）では、今後の経営方針を巡る親会社との根本的な意見の食い違いにより、経営首脳陣がそろって辞任ないし辞任表明する事態となった（ロイター 2024）[23]。

日独の生産減退に対し、米国の鉄鋼生産も低迷している（図 3.3.2-2）。米国は2021年末にはパンデミック前の生産水準を回復したが、その後に減速が始まった。コロナ禍からの回復で他国をリードした米国において、顕著となりつつあったインフレの持続可能性が経済学者の議論を集めたのは2021年初めであった[24]。結果としてインフレが力強く持続する中、2022年に入ってから米連邦準備制度理事会は大幅な利上げを実施し、それが強固なドル高（円安）を誘発している。2021年初に1ドル104円ほどであった為替レートは、2022年10月には一時的には150円にまで接近した。2021年末から2022年末にかけての米国での10%ほどの減産は、この間に進行した50%近いドル高の影響がもっとも大きいと考えられる。しかし2024年末の第2次トランプ政権の誕生が決まった後、12月には鉄鋼生産の急回復を見せている（図 3.3.2-2）。中長期的な変化を注視すべきであるが回復の始まりであるかもしれない。

日独の減退や米国バイデン政権下での低迷とは対照的に、中国の鉄鋼生産は独歩の躍進を遂げた（図 3.3.2-2）。日中の鉄鋼生産格差はもはや10倍にも拡大し、日独の生産減退は中国の拡大により完全に打ち消される。中国でも不動産市況の低迷などによる鉄鋼内需の低迷と過剰生産能力が大きな懸念とはなった。だが過剰生産能力の解消は中国にとっても難しい課題である。過剰能力が深刻化した2016–2020年（第13次五か年計画）には、陳腐化した生産能力のみを一部削減したが、生産量はほとんど減少せずにむしろ増加した。

なお中国企業は輸出価格を大きく低下させながら、市場を外需に求めたことでダンピングの批判が高まったのは2023年第2四半期からである（Reuters 2023）。中国のダンピング輸出は2018年末から見いだされる日独の生産減退の主要因ではない。

---

22 ドイツでもそうした挑戦の困難性が強く認識され始めた2022年中には、多くの懸念が示されている。たとえば「Stahlbranche im Krisenmodus（危機に瀕する鉄鋼業界）」（tagesschau 2022）「Die Stahlindustrie wird aus Deutschland abwandern（鉄鋼産業はドイツから移転するだろう）」（Blackout News 2022）。

23 ブームにあった水素関連企業の株価も急落している。現在までの需要が期待を下回っていることに加え、脱炭素政策や規制の不確実性も重しとなって投資家の懐疑的な見方が強まり、ナスダックなどに上場している関連株は2024年に30–50%の下落となっている。業界全体の株価指数は2020年半ばの水準まで後退しており、これにより2020–2021年のブーム期における上昇分をすべて失っている（Financial Times 2024）。

24 バイデン政権が提案した1.9兆ドルの米国救済計画（American Rescue Plan）による大規模な財政拡張に対し、ローレンス・サマーズ教授はインフレ圧力が持続的となるリスクを警告し、ポール・クルーグマン教授は足元のインフレは一時的な現象に過ぎないと主張した。その後に持続的に上昇が観察された消費者物価指数により、論争の軍配はサマーズ教授に上がった。

3.3.3 鉄鋼の需給バランスの分析フレームワーク

(1) 需給分析の課題

鉄鋼の需給分析における課題は大きく 2 つある。第 1 は、鉄鋼製品の主な用途は中間財（原材料・部材としての利用）であり、さまざまな投資財や消費財という最終財に埋め込まれて（embedded されて）いることである。ゆえにその需要構造としては、中間財としての需要（intermediate demands）の先にある下流製品の最終需要（耐久消費財、投資財、輸出財）などへと紐づけて理解することが求められる。それを描写する産業連関分析のフレームワークは(2)項と(3)項に論じる。

第 2 の課題は、鉄鋼製品間における埋め込み（embedment）である。鉄鋼業の内部でも中間需要としての相互依存関係（interdependency）があり、日本の産業連関表では中間生産物である粗鋼や銑鉄が分離して部門計上されながら鉄鋼製品の加工プロセスが描写されている。2020 年産業連関表（総務省 2024a）の統合小分類表に基づき、とくに鉄鋼部門の内部取引の詳細を抽出（他の部門を集約）したものが表 3.3.3-1 である。

表 3.3.3-1 産業連関表における鉄鋼部門の定義（2020 年）

		中間需要計								在庫純増・屑発生	輸出	輸入	国内生産額	鉄鋼業	
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	他					グロスGO	ネットGO
中間投入	S1 銑鉄・粗鋼	2,406	0	4,358	4	0	234	14	2	-81	52	-208	6,782	7,017	0
	S2 鉄屑	88	0	-37	-6	-33	2	-9	-56	-222	284	-11	0	5	0
	S3 熱間圧延鋼材	0	0	11	393	1,333	107	287	2,977	-113	1,322	-244	6,073	2,131	0
	S4 鋼管	0	0	0	63	0	1	5	655	-50	303	-38	940	70	0
	S5 冷延・めっき鋼材	0	0	0	24	514	7	637	2,214	-81	528	-195	3,646	1,181	0
	S6 鋳鍛造品（鉄）	0	0	0	0	0	9	0	1,592	-18	16	-24	1,576	9	0
	S7 他鉄鋼製品	1	0	0	0	0	1	0	2,188	-20	19	-163	2,027	2	0
	他	2,635	0	627	103	766	540	262						4,933	4,933
付加価値計		1,653	0	1,113	359	1,066	675	831						5,697	5,697
国内生産額		6,782	0	6,073	940	3,646	1,576	2,027			2,525	-883		21,044	10,630

資料：総務省（2024a）令和 2 年（2020 年）産業連関表 取引基本表（生産者価格評価表）（統合小分類表）より鉄鋼部門を抽出・集計。

鉄鉱石を原料として生産される粗鋼・銑鉄（表 3.3.3-1 における生産物コードでは S1）は、熱間圧延鋼材（S3）などを生産するための中間財・半製品（semi-finished products）である。また熱間圧延鋼材（S3）は、冷延・めっき鋼材（S5）の中間財となり、さらに冷延・めっき鋼材はその他の鉄鋼製品（S7）の中間財となる。もっとも大きな直接輸出財・輸入財は完成鋼材（finished steel products）としての熱間圧延鋼材（S3）だが、最上流にある粗鋼・銑鉄（S1）も輸出および輸入でも計上される（表 3.3.3-1）。このように鉄鋼製品は、中間財でありながらも輸出入に計上される最終財でもあり、それは完成鋼材に限定されない。本節では、貿易される粗鋼・銑鉄を含む最終財として計上される鉄鋼製品のグループを「鉄鋼最終需要品」（final demand steel products）と呼ぼう。

こうした鉄鋼製品間の埋め込みを前提とすれば、生産金額の時系列比較や国間の横断面比較においては注意が必要となる。一般に、産業連関表における国内生産額は粗生産（gross output: GO）と呼ばれ、粗生産額から中間投入額全体を除いた付加価値（value added）とは区分される。本節では、鉄鋼の粗生産（GO）として、鉄鋼最終需

要品によって捉える定義と（現行の産業連関表のように）中間財（半製品）を重複して捉える定義を識する。埋め込み分を除いた前者を「ネット GO」、後者を「グロス GO」と呼ぶ[25]。

鉄鋼の生産量や生産金額は、大きく 3 つの定義による測定がある。第 1 は、粗鋼換算（crude steel equivalent）などによって統一された評価であり、3.3.2 節(1)項のように日本鉄鋼連盟や worldsteel による評価はそうした重量ベースに基づく。そこでは高付加価値化などの品質の差異が考慮されない。第 2 は、グロス GO による把握である。国際比較では（部門分類や粒度の相違により）十分な留意が必要だが、日本の接続産業連関表のように共通した部門概念による測定であれば、グロス GO に基づいた構造変化を論じることができる。そして第 3 は、ネット GO による把握である。

表 3.3.3-1 の右ブロックには、鉄鋼業（S1 から S7 活動の集計部門）として、ネット GO とグロス GO の 2 つの定義による投入ベクトルを示している。グロス GO における鉄鋼製品の国内粗生産では 21.0 兆円とされるが、鉄鋼製品間の埋め込みを差し引き鉄鋼最終需要品によって粗生産が定義されるネット GO では 10.6 兆円と半減している（両者の付加価値は同一である）。ここでは鉄屑の発生と投入も除外している。産業連関分析における生産波及の計算では、グロス GO による投入ベクトルを用いると埋め込まれる粗生産額が重複して計算されるが、ネット GO ではそうした重複計算を回避できる。直接貿易と比較可能となる間接貿易の算定では、重複を排したネット GO による定義が望ましい。

また鉄鋼製品間における埋め込みという性格は、半製品や完成鋼材を含む鋼材間の重量あたりの単価の相違を生じさせている。日本鉄鋼連盟や worldsteel でおこなわれるような重量ベースによる測定は、統一的な基準を与え、時系列比較も可能となるが、鋼材間の単価の相違を捨象することは品質の差異を考慮しないことを意味している。間接輸出では、自動車や機械などの下流製品輸出財に埋め込まれる完成鋼材は、半製品を含む直接輸出よりも鋼材の単価は高い（数倍にもなる）。直接輸出に対する間接輸出比率を定義ですれば、金額ベースによる評価は重量ベースのそれを上回るものとなろう。言い換えれば、鋼材間の品質の相違を捨象した重量ベースの指標は、間接輸出への依存度を過小に評価している。ただし金額ベースでは、間接貿易額の時系列比較の意味は（価格変化の影響を含むため）限定的であり、同時点における相対的な比率（シェア）による評価のみが時系列比較が可能である。本節はネット GO および金額ベースに基づき、日本経済における鉄鋼需要の構造変化を描写する。

(2) 需給バランスの拡張

はじめに一国経済の産業連関表において、商品別最終需要ベクトル（f）を以下のように定義する。

$$f = c + i + e - m, \tag{3.3.3-1}$$

[25] 産業別の付加価値（GDP）は、生産性分析の文脈では純生産（net output）とも称されるが、ネット GO はそれとは異なる粗生産の概念である。

ここでfは商品別最終需要の列ベクトルであり、家計消費（対家計民間非営利消費・政府消費を含む）c、投資（総固定資本形成と在庫純増を含む）i、輸出e、輸入mの 4 つの列ベクトルから構成される。鉄鋼製品の最終需要では、消費ベクトル（c）は屑発生（マイナス計上）のみであり、投資は屑発生と在庫純増のみだが（表 3.3.3-1）、ここでは一国の生産体系全体を描いている。

日本経済における鉄鋼部門を分析する本節では、とくに細分類として投資ベクトル（i）は 1. 民間建設（家計住宅を含む）、2. 公的建設、3. 民間機械設備、4. 公的機械設備の 4 つ、輸出ベクトル（e）は 1. 鉄鋼（直接輸出）、2. 自動車、3. 機械（自動車を除く）、4. 金属製品他の 4 つに分割されている。なお日本の産業連関表では、最終需要および付加価値ともに「家計外消費支出」という項目が存在する特殊な形式をとっているが、本節ではそれは中間投入部門へと内生化（各年次の産業連関表において、内生部門のうちの「分類不明」と合算して部門を定義）している。

ここで投入係数行列（A）として、ネット GO（(1)項）に基づいて分母を国内粗生産額、分子を中間投入額（国産財と輸入財を含む複合財）とする投入係数（input coefficient）を定義すれば、一国経済の生産はレオンチェフ生産体系（Leontief production system）として次のように定式化される。

$$x = \mathrm{A}x + c + g + i + e - m. \tag{3.3.3-2}$$

輸入を移項して、総需要と総供給のバランスは以下のとおりである。

$$\mathrm{A}x + c + g + i + e = x + m. \tag{3.3.3-3}$$

表 3.3.3-2 は、(3.3.3-3)式において観察される鉄鋼需給バランスの数値例を示している。鉄鋼の内需の変化要因を理解するためには、大きく 2 つの課題があろう。第 1 の課題は、内需とされる中間需要（68）はすべて究極的には国内消費、国内投資、あるいは輸出などの最終需要へと帰属されるはずだが、それは直接観察されないことである。第 2 の課題は、海外で生産されて国内に供給される輸入（6）には、鋼材として通関するものだけが計上されるが、下流消費財や投資財の輸入を通じた間接的な鋼材輸入は把握されないことである。この両者を把握するためのフレームワークが求められる。

表 3.3.3-2 観察される需給バランス（数値例）

総需要 (88)					総供給 (88)	
内需			外需		国内生産	海外生産
A	C	I	E	=	X	M
68	0	0	20		82	6

出典：著者作成。注：3.3.4 節における近年の測定値に基づく概数。

ここでレオンチェフ逆行列（Leontief inverse）を

$$\mathrm{B} = (\mathrm{I} - \mathrm{A})^{-1} \ , \tag{3.3.3-4}$$

として定義すれば、(3.3.3-1)式におけるそれぞれの最終需要ベクトルから直接間接に誘発される生産量ベクトルは次式のように推計される。

$$x^{\mathrm{C}} = \mathrm{B}c, \quad x^{\mathrm{I}} = \mathrm{B}i, \quad x^{\mathrm{E}} = \mathrm{B}e, \quad x^{\mathrm{M}} = \mathrm{B}m. \tag{3.3.3-5}$$

それぞれの誘発される生産ベクトル（$x^z,\ z = C, I, E, and\ M$）を、観察される生産ベクトル（$x$）とは区分して波及生産量と呼ぼう。波及生産量は、最終需要ベクトルのそれぞれの需要を満たすように、直接的にあるいは間接的に誘発させるすべてを国内で生産すると想定した生産量である。(3.3.3-5)式に定義される波及生産ベクトルによって、(3.3.3-2)式の一国経済の生産ベクトル（x）は次のように分解される。

$$x = x^{\mathrm{C}} + x^{\mathrm{I}} + x^{\mathrm{E}} - x^{\mathrm{M}}. \tag{3.3.3-6}$$

(3.3.3-2)式のレオンチェフ生産体系に比して、(3.3.3-6)式では左辺の国内粗生産（x）がその生産を誘発する最終需要項目に紐づけて（中間需要のAxが消滅して）完全に分解されている。(3.3.3-2)式の右辺における各変数は統計（産業連関表）として観察される計数であるのに対して、(3.3.3-6)式の右辺はすべての中間需要がその源泉となる最終需要項目に紐付けられた波及生産という直接観察できない計数に分割されている。右辺の第 5 項（x^{M}）は、輸入財をすべて日本国内で生産すると想定したもとでの仮想的な波及生産である。x^{M}を控除することで、右辺の合計は観察される国内粗生産（x）と一致する。

ここでx^{M}を移項して、(3.3.3-3)式の観察される需給バランスに対して、波及生産ベースにより拡張された需給バランスとして次式をえる。

$$x^{\mathrm{C}} + x^{\mathrm{I}} + x^{\mathrm{E}} = x + x^{\mathrm{M}}, \tag{3.3.3-7}$$

その左辺は、国内最終需要（c、i）および輸出需要（e）を満たすために直接間接に必要とされる波及生産量であり、波及生産ベースの総需要を示している。右辺は、そうした総需要に対する供給であり、国内生産（x）と輸入の波及生産（x^{M}）により満たされる。

表 3.3.3-2 における観察される需給バランスの数値例に対して、拡張された需給バランスは表 3.3.3-3 に示されている。国内生産は不変だが、右辺では海外生産された鋼材は直接輸入分の 6 のみではなく、間接輸入として想定される 12 を含んで計上されており、拡張された需給バランスにおける総供給は 100 に拡大される。左辺である総需要では、中間需要はゼロとなり、すべてが究極的に帰属する消費、投資、輸出という最終需要に計上される。表 3.3.3-2 でゼロであった消費と投資が計上され、輸出は直接輸出の 20 に加えて、間接輸出の 25 が加算されている。

表 3.3.3-3 拡張された需給バランス（数値例）

総需要 (100)					総供給 (100)	
内需			外需			
A	C	I	E	=	X	M
0	15	40	45		82	18

出典：著者作成。注：3.3.4 節における近年の測定値に基づく概数。

拡張された需給バランス（表 3.3.3-3）の総需要（左辺）において、消費への依存度が安定的であり、投資への依存度がほぼボトムの水準にあるとすれば（日本経済の実測値は 3.3.4 節(1)項に報告）、国内生産の減退の多くは、（左辺の外需に占める）間接輸出の減少に依存すると解される。また総供給（右辺）でみれば、国内生産の減退は、（海外生産に占める）間接輸入の拡大に依存している（日本経済の実測値は 3.3.4 節(2)項に報告）。こうした間接輸出の減少や間接輸入の拡大は、観察される需給バランス（表 3.3.3-2）のもとでは、単なる内需低迷の結果として解釈されてしまうものである。表 3.3.3-3 の拡張された需給バランス式に基づき、需要の源泉（表 3.3.3-3 の左辺）に関する指標を(3)項に、供給の源泉（表 3.3.3-3 の右辺）に関する指標を(4)項で定式化する。

(3) 需要の源泉と間接輸出

波及生産ベースでの総需要を最終需要各項目へと紐づけた(3.3.3-7)式に基づき、商品（生産物）kごとに需要源泉依存度（Ultimate Demand Sources: UDS）を定義する（野村 2021, 第 5 章）。

$$\varphi_k^z = x_k^z / \left(x_k + x_k^{\mathrm{M}}\right), \qquad (3.3.3\text{-}8)$$

UDS によっては、中間財に埋め込まれるすべての鉄鋼需要は、その需要の源泉となる最終需要に紐づけられ、総需要（表 3.3.3-3 の左辺）に占める最終需要（C, I, E）ごとのシェアである（$z = \mathrm{C},\ \mathrm{I},\ \text{and}\ \mathrm{E}$）。

いまk=鉄鋼製品および$z = \mathrm{C}$とすれば、(3.3.3-1)式の家計消費のシェアは（屑発生を除き）ゼロだが、家計により消費されるすべての下流製品（自動車や金属製品などの耐久消費財）に埋め込まれる鋼材、またそれぞれの中間財（部品など）に埋め込まれる間接的な鋼材も、究極的には家計消費へと帰属されて UDS にカウントされる。最終需要項目別 UDS の合計（$\varphi_k^C + \varphi_k^I + \varphi_k^E$）は 1.0 であり、波及生産ベースでの総需要が完全分解されることを意味している。表 3.3.3-3 の数値例によれば、消費（UDS-C）、投資（UDS-I）、輸出（UDS-E）は、それぞれ 15%、40%、45%である。

日本の産業連関表では、すべての国内生産（グロス GO）をその源泉となる最終需要と紐づける測定量は「最終需要項目別生産誘発依存度」として公表されている。(3.3.3-8)式の UDS は、観察される国内生産ベースの需給バランス（表 3.3.3-2）ではなく、拡張された波及生産ベースの需給バランス（表 3.3.3-3）によって定義している。

たとえば、輸出される自動車の国内生産において、その部品（エンジンブロックやトランスミッション、バッテリーなど）を輸入へと切り替えたとすれば、鉄鋼の最終需要項目別生産誘発依存度では輸出への帰属は消失するが、UDS では輸出への帰属は変わらない。そのことは、鋼材という財の最終需要構造として、究極的な用途は不変であることを評価している[26]。

(3.3.3-7)式のx^{E}には鉄鋼の直接輸出とともに、自動車や機械などの下流製品輸出財に組み込まれる鉄鋼の間接輸出を含んでいる。とくに直接輸出に対する間接輸出の比として、商品kの間接輸出比率を以下のように定義する。表 3.3.3-3 の数値例によれば、間接輸出比率は 1.25 (=25/20)である。

$$\alpha_k^{\mathrm{z}} = \left(x_k^{\mathrm{E}} - e_k\right)/e_k, \tag{3.3.3-9}$$

(4) 総供給の輸入依存度

波及生産ベースでの需給バランスである(3.3.3-7)式に基づき、商品kごとの実効輸入依存度（Effective Import Dependency: EID）を次のように定義する（野村 2021, 第 5 章）。

$$\varepsilon_k = x_k^{\mathrm{M}}/\left(x_k + x_k^{\mathrm{M}}\right). \tag{3.3.3-10}$$

商品kを鉄鋼とすれば、一国経済のレオンチェフ生産体系に基づき定義される鉄鋼 EID は、日本経済において最終的に需要されるすべての財とサービスによって誘発される潜在的な総需要のうち、直接輸入とともに（最終財や中間財を通じて）間接的に輸入される波及生産（海外からの供給）によって満たされる構成比を与えている。表 3.3.3-3 の数値例によれば、鉄鋼 EID は 18% (=18/100)である。

ここでのx^{M}には鉄鋼の直接輸入とともに、下流製品輸入財に組み込まれている鉄鋼の間接輸入を含んでいる。とくに直接輸入に対する間接輸入の比として、商品kの間接

[26] worldsteel や日本鉄鋼連盟による鉄鋼の間接輸出は、国内生産ベースによる測定（観察される国内生産のうちの間接輸出分の推計）を意図しているものと考えられる。後述する 3.3.4 節(1)項と(2)項では worldsteel の間接貿易の推計値を評価するが、その推計アプローチは国内生産ベースではなく、むしろ波及生産ベースの評価に近いと考えられる（(6)項）。本稿では、国内生産ベースによる測定も補完的におこなっている。標準的な産業連関フレームワークのもとでは、国内生産ベースによる波及生産の需給バランスは、商品別の輸入係数（国内需要額に占める輸入額）を一定とした競争輸入モデルを想定し、(3.3.3-7)式の右辺における輸入による波及生産（x^{M}）を左辺の最終需要各項目から控除することから算定される。輸出財（たとえば乗用車）の生産における中間財（自動車部品）が輸入されるのであれば、輸入中間財に埋め込まれる鉄鋼は控除される。控除により(3.3.3-7)式の右辺は国内生産（x）のみとなり、国内生産ベースによる波及生産バランスが推計される。一国の産業連関表に基づくこうしたアプローチは、輸入中間財に埋め込まれる鉄鋼は日本の（同年あるいは過去の）直接輸出によるものであるかもしれないことは評価できない。グローバルなサプライチェーンの深化を反映するには多国間の国際産業連関表の利用が求められるが、現行で利用される国際表は OECD による Inter-Country Input-Output Tables (ICIO)でも 45 産業分類の中で一次金属（D24. Basic metals）と非鉄金属と分離されておらず、鉄鋼製品間における埋め込み（(1)項）などは評価できない。

輸入比率を以下のように定義する。表 3.3.3-3 の数値例によれば、間接輸入比率は 2.00 (=12/6)である。

$$\beta_k^z = \left(x_k^{\mathrm{M}} - i_k\right)/i_k, \tag{3.3.3-11}$$

本節で定義される UDS（(3.3.3-8)式）、EID（(3.3.3-9)式）、間接輸出比率（(3.3.3-10)式）、間接輸入比率（(3.3.3-11)式）は、いずれも各年の名目値で評価された生産バランスから導かれる名目ベースのシェアである。

(5) 時系列産業連関表

これまでの測定フレームワークに基づき、日本で利用可能な時系列的な産業連関表に基づき測定する。一般に、粗い統合分類に基づく産業連関分析によれば、レオンチェフ生産体系のもとでの生産波及を辿るための精度が損なわれ、その一方、細かい分類によればデータの測定精度や商品表としての行・列部門の対応における整合性の課題が生じるものとなろう。鉄鋼部門内における中間投入構造（3.3.3 節(1)項）を考慮すれば、分析される部門分類は時系列的に統一されていることが望ましく、そのためには、数時点の連続する産業連関表基本表を接合した接続産業連関表（接続表）の利用が有益である。

接続表の利用は時系列的な比較可能性を高めるが、戦後日本経済の全期間を統一した統計概念のもとに貫徹した接続表は現在も構築されていない。本節の測定では、接続表ごとに利用可能な統合分類の小分類や中分類、あるいは独自に定義された分類によって分析しながら、複数の接続表に基づく重複した年次における測定結果の比較から、鉄鋼製品の需給構造を描写する各種指標の測定精度を確認していくというアプローチをとっている[27]。

表 3.3.3-4 は本節の測定に利用した接続表（および基本表）のリストである。ここでの統合分類（かつての統一分類）とは、商品×商品表とする産業連関表において、行と列の商品分類数を同一とした正方行列となる分類である。1975–1980–1985–1990 年の 4 時点では、国民経済計算体系（System of National Accounts: SNA）における統計概念の改定（1953SNA から 1968SNA）に対応した概念調整をした長期接続表（Long Linked Input-Output Table: LLIO）を利用する（野村 1995）。なお最新となる産業連関表は、接続表では 2005–2011–2015 年表（総務省 2020）、基本表は 2024 年 6 月に公表

[27] 本稿の測定では､利用する産業連関表において鉄屑が部門として分離計上されている場合はその発生と投入をともに考慮しないが、分離できない場合は鉄鋼部門の波及計算に含まれてしまっている。また 1993SNA や 2008SNA への準拠やさまざまな経済統計的な定義変更など、同一接続表内のベンチマーク年次では概念的に整合していることが原則となるが、本稿で分析される異なる年次の接続表の間では乖離があることに留意されたい。たとえば研究開発の資本化は 2005–2011–2015 年接続表以降であり、それが中間消費される以前の産業連関表とは波及効果の基準が異なっている。

された 2020 年表（総務省 2024a）であり、本節での需要構造変化の測定は 2020 年までしかアップデートできない制約がある[28]。

表 3.3.3-4 測定に利用する産業連関表

産業連関表	統合分類数	出典
1 1960–1965–1970年接続表	233	行政管理庁（1975）
2 1970–1975–1980年接続表	233	行政管理庁（1985）
3 1975–1980–1985年接続表	233	総務庁（1990）
4 1975–1980–1985–1990年長期接続表	333	野村（1995）
5 1985–1990–1995年接続表	184	総務省（2000）
6 1990–1995–2000年接続表	99	総務省（2005）
7 1995–2000–2005年接続表	102	総務省（2010）
8 2000–2005–2011年接続表	105	総務省（2017）
9 2005–2011–2015年接続表	105	総務省（2020）
10 2020年基本表	188	総務省（2024）

注：ここでの「統合分類数」は EID/UDS の測定に利用した分類数であり、各接続表における統合（統一）中分類・小分類や著者による独自分類に基づく。野村（1995）は「長期接続産業連関表の推計と分析：1960-65-70-75-80-85-90 年」慶應義塾大学産業研究所。

構造分析に用いられる産業連関表の利用にタイムラグがあることは避けられないが、コロナ禍後における鉄鋼需要の構造変化は、(6)項に後述する日本鉄鋼連盟の時系列推計値（1995–2023 年）によって補完的に理解される。

(6) 世界鉄鋼協会と日本鉄鋼連盟の推計法

本節では worldsteel、日本鉄鋼連盟、そして本節での推計フレームワークの特性を論じ、その後それぞれの実測値を比較検討していく。worldsteel（当時、国際鉄鋼協会（International Iron and Steel Institute: IISI））は、鉄鋼の間接貿易に関する調査を 1974 年から 1996 年にかけて数回実施し、その間にも 3–4 年ごとに測定量を更新してきた。現在の最新の報告書は、2009 年から 2019 年を測定期間とする 2021 年報告書である。本節では、現在無償公開されている 2015 年報告書（worldsteel 2015）に基づき、その方法論とともに、日本に関する間接貿易量の推計値（公表期間は 2000 年および 2004–2013 年）を評価する。

worldsteel は鉄鋼需要（use）の構造を適切に評価するため、2 つの需要概念として、見かけ上の鉄鋼需要（apparent steel use: ASU）と真の鉄鋼需要（true steel use: TSU）を識別している。TSU の測定は、貿易統計の Harmonized Commodity Description and Coding System（HS コード）に基づき、金属製品、機械、電気機械、自動車、その他輸送機械などの重量ごとに鉄の含有量を示す鉄鋼係数（steel coefficient）を想定している（worldsteel 2015, Figure 3）。

[28] 2025 年 2 月時点では、経済産業省の延長産業連関表の最新表は 2020 年表（2015 年基準：2023 年 9 月公表）である。内閣府経済社会総合研究所による SNA 産業連関表では 2022 年表（2015 年基準：2024 年 3 月公表）まで利用可能だが内生 94 部門の中で鉄鋼品は「製鉄」と「その他の鉄鋼」の二部門のみであり、(1)項のような鉄鋼内部の中間投入構造が十分に描写できないため利用していない。

こうしたボトムアップ型の測定アプローチに限界があることも worldsteel は認識している。ひとつの大きな制約は各国の貿易統計では、そのすべての商品で重量（あるいはそれに近似的に接近できる台数などの物量情報）が計上されているわけではないことである。報告書（worldsteel 2015）では HS コードごとの推計の詳細は示されていないが、物量情報が欠落していたり、台数など重量をほとんど近似できないようなケースでは、間接貿易の測定対象から欠落させざるをえないだろう。その意味では、worldsteel 間接貿易量は、基本的には過小推計バイアスを持つと考えられる。

他方、HS コードでは中古品が分離・識別されていないものがほとんどであることから、間接貿易（とくに日本では間接輸出）が過大推計される可能性もある。ただし「解体用の船舶」（8908.00）などは HS コードでも分離定義されており、worldsteel 推計でも対象外であると考えられる（ただし「解体用の船舶」とされない中古船舶は、解体用かどうかに関わらず識別されていない)。日本の中古自動車で輸出では取引規模が大きいが、それは国別に 6 桁の HS コードの細分において（たとえば日本の中古乗用車は 8703.90.100 など 52 の HS コードによって）識別されている。worldsteel 推計値は 6 桁 HS コードでの United Nations Commodity Trade Statistics Database（UN Comtrade）に基づいて推計されており、中古車の補正（控除）がどこまでされているかは不明である[29]。

worldsteel のフレームワークの検討から指摘されることは、貿易統計における下流製品の輸出入データに基づいて鉄鋼の含有量を推計するアプローチとは、たとえば日本から輸出される自動車に含まれる鉄鋼はそのすべてが日本国内で生産され間接的に輸出されたものであることを暗に想定している。現実には、日本から輸出される完成車であっても、その自動車部品が輸入されていれば、部品に埋め込まれている鋼材は日本国産品ではないかもしれない（同年あるいは過去の日本の直接輸出と重複しているかもしれない)。グローバルなサプライチェーンが深化する中で、国内生産ベースで間接貿易を把握することの困難性は高まっている。worldsteel 推計値は（おそらく意図しないままに)国内生産ベースではなく、波及生産ベースに基づくものと解される。ゆえに worldsteel 推計値を評価する本節でも、より安定して把握される波及生産ベースによる把握を基準とし、国内生産ベースによる測定（(3)項の脚注 26）を補完的に実施している。

日本での鉄鋼の間接輸出は、日本鉄鋼連盟によっても推計されている。連盟の出版する『鉄鋼統計要覧』の 2000 年版以降では、1995 年からの間接輸出（「普通鋼鋼材最終需要別消費量推計」）に関する年度推計値が継続的に公表されている。推計法の詳細は明らかではないが、要覧には「普通鋼材の需要部門別消費量を各種統計に推計を加えて国民経済計算の最終需要別（国内生産の支出項目別）に組替えたもの」と説明されている。普通鋼材に限定されるという制約はあるが、後述する比較図（図 3.3.4-3）に示されるように、日本鉄鋼連盟の推計値における時系列トレンドはおおむね

[29] 2020 年産業連関表基本表では、原則として中古車や中古船舶は対象外であり（総務省 2024b)、鉄鋼の間接貿易を誘発しない。なお 1990 年基本表では中古船舶のカバレッジとして「解体用の船舶」を大きく超えて推計されているなど、その異なる基本表間でも取り扱いは統一されていない不整合を残している（野村 2004, 補章 A)。

worldsteel と類似している。また最新となる 2024 年版の要覧（2024 年 10 月公表）では、2023 年度までの推計値（2023 年度のみ暫定値）が示されており、コロナ禍後の需要構造の状況が把握される重要なデータとなっている。

産業連関表に基づく本節の測定の持つ最大の優位性は、すべての生産（波及生産）がその源泉となる最終需要へと（需給バランス式との整合性を保持しながら）完全に分解されることである（(2)項）。本節のトップダウン型のアプローチでは、商品の欠落による過小推計バイアスをもたない。worldsteel（2015）は 74 か国を対象とするため、世界全体の間接輸出量と間接輸入量ではその集計量として一定の精度検証が可能だが、それぞれの国内生産量および国内需要量と間接貿易量との整合性が保持されていないことは、過小推計バイアスを生じさせていると考えられる。本推計のもうひとつの特性は金額ベースに基づくことであり（(1)項）、各時点における直接輸出および間接輸出される鋼材における品質（単価）の相違が反映されている。

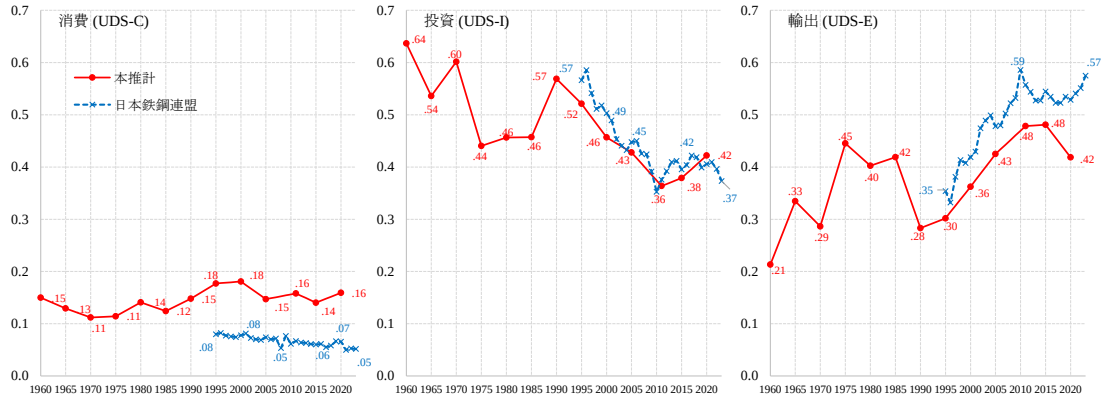
3.3.4 拡張された需給バランスの測定

(1) 総需要の構造変化－輸出依存の拡大

① 需要の源泉

本節では総需要の構造変化として、戦後日本経済における鉄鋼の需要源泉依存度（UDS）のトレンドを議論する。本節で推計される UDS は、日本鉄鋼連盟（2024b）の推計値（普通鋼鋼材最終需要別消費量推計）と比較される。それは普通鋼の国内需要を最終需要別に分離推計したものであるから、総需要ベースでの本節の推計値と比較可能となるように、普通鋼の直接輸出分を加算している。なお本推計値は、5 つの産業連関表（表 3.3.3-4 の 1,3,6,9,10）に基づいており、複数の産業連関表が重複する年次における精度の検討は後述する間接輸出比率（図 3.3.4-3）に示している。

波及生産ベースの鉄鋼 UDS（(3.3.3-8)式）として、消費（UDS-C）、投資（UDS-I）、そして輸出（UDS-E）への長期傾向を示したものが図 3.3.4-1 である。相互の計数の大きさが比較可能となるように 3 つの図の目盛りは統一されている（3 指標の合計値は 1.0）。またとくに UDS-I と UDS-E では、それを構成する細分類（それぞれを 4 分類に分解）による寄与度を図 3.3.4-2 に示している。



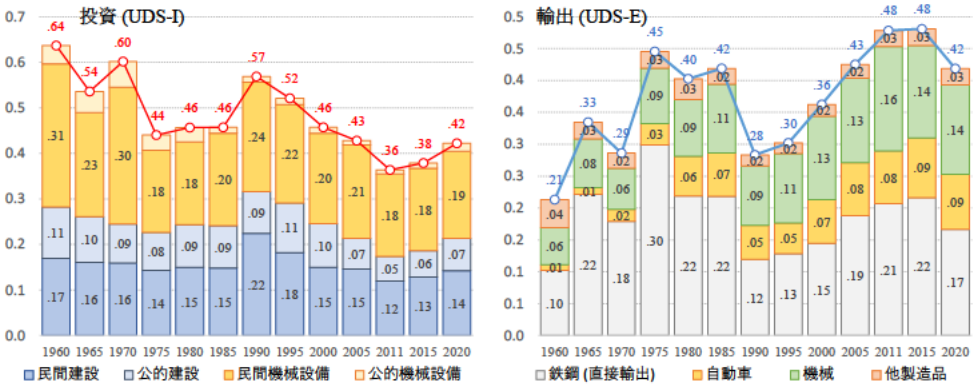
出典：表 3.3.3-4 の産業連関表（1,3,6,9,10）に基づく本推計値（1960–2020 年内の基準年のみ）、日本鉄鋼連盟（2024b）推計値（1995–2023 年）。注：UDS の定義は(3.3.3-8)式を参照。家計住宅建設は UDS-C ではなく UDS-I に含まれる。

図 3.3.4-1 最終需要項目別の鉄鋼 UDS

鉄鋼 UDS では、すべての波及生産はそれを誘発する究極的な最終需要の源泉に紐づけられる。戦後日本経済の長期傾向として見いだされることは、輸出依存度（UDS-E）の拡大であり、現在では輸出（直接と間接輸出の合計）は拡張された需給バランス（3.3.3 節(2)項）における総需要の半分近くを占める、最大の需要源泉である。究極的には総需要の半分を輸出に依存しているという鉄鋼の特殊性は際立つものである。輸出依存の高さを市場の脆弱さと捉えることは適切ではないだろう。直接輸出とともに、さまざまな下流製品に組み込まれて間接的な輸出先が分散されていれば、むしろ強みとなる。だが下流製品の海外生産移転の影響を強く受けざるをえない。

日本経済では投資と輸出の合計によってつねに 80%以上の需要源泉を支えてきたが、両者の役割は交代してきた。1960 年代初めは総需要の 6 割は投資によって説明されるが、1970 年代半ばからの下流製品輸出財生産の拡大期には、直接輸出とともに間接輸出の増加を反映して（図 3.3.4-2 右）、投資と輸出はシェアを分け合うものとなった。1970 年代半ばの直接輸出の拡大は、1960 年代における生産能力の拡張が、第 1 次オイルショック後の高度経済成長の終焉とともに過剰生産力となり、海外へ市場を求めるものとなったことが含まれる。それは現在の中国と同様である。1980 年代に輸出依存度の拡大を牽引した下流製品は、図 3.3.4-2 右に示されるように自動車や機械などである。

その後 1990 年代には、1985 年のプラザ合意とその後の日米構造協議を受け、鉄鋼の直接輸出を大幅に減少せざるをえなくなったことにより UDS-E は大きく低下した（図 3.3.4-2 右）。しかし 2000 年代半ばからは、再び UDS-I を超過するものとなっている。アジア諸国を中心としたサプライチェーンの深化により、日本からの直接輸出は間接輸出の拡大スピードを上回ったが（図 3.3.4-3）、投資需要ではとくに建設投資が低迷するなかで（図 3.3.4-2 左）、輸出への依存度（UDS-E）は相対的に高まっている。その後、コロナ禍の 2020 年には UDS-E は本推計値では低下したが（図 3.3.4-2 右）、それは一過的かもしれない。2023 年度までの推計値が得られる日本鉄鋼連盟（2024b）によれば、コロナ禍後も輸出依存度の上昇が見出される（図 3.3.4-1 右）。



出典：表 3.3.3-4 の産業連関表（1,3,6,9,10）に基づく本推計値（1960–2020 年内の基準年のみ）。注：UDS の定義は(3.3.3-8)式を参照。注：民間建設には家計住宅建設を含む。

図 3.3.4-2 鉄鋼 UDS における投資・輸出依存度の内訳

本推計によれば、鉄鋼需要の消費依存度（UDS-C）は相対的には小さいが、もっとも安定的である（図 3.3.4-1 左）。2000 年代半ば以降でも 14–16%ほどの安定した寄与がある。それは日本鉄鋼連盟による評価を大きく上回る[30]。もっとも大きく安定した最終需要である家計消費（耐久消費財など）を基盤とする鉄鋼需要の存在は、一般に考えられるよりもその内需の基盤が強固であることを示唆している。

UDS-I は日本経済では長期的な低下トレンドを持つが、すでに日本の総固定資本形成は固定資本減耗と同等な水準（純投資はほぼゼロ）に停滞して久しい。すでに現在ではほぼボトムの水準に近いと考えられる（図 3.3.4-1 中央）。むしろ今後には、高度成長期に建設された社会資本の更新投資期を迎え、UDS-I は上昇傾向へと転じる可能性は大きい。

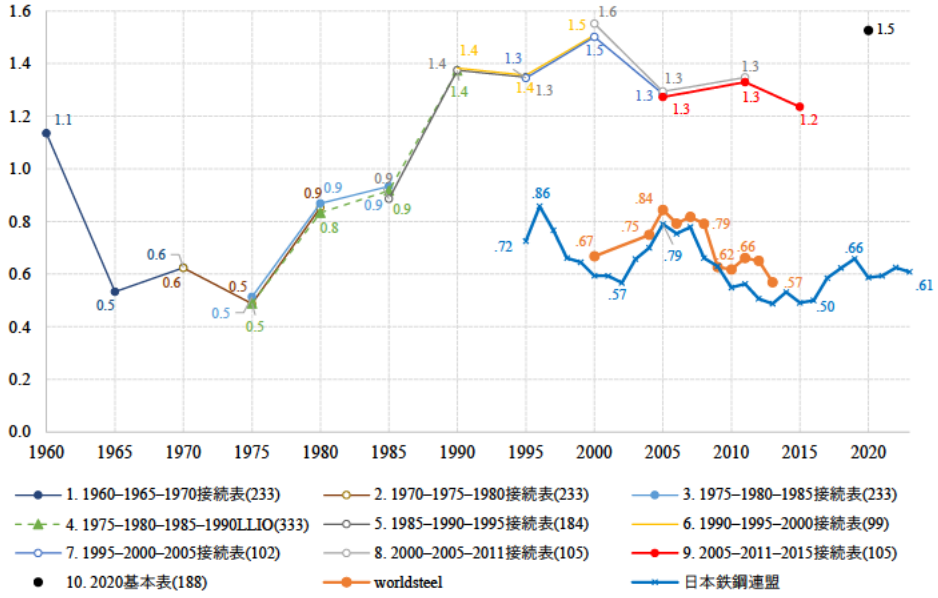
総需要側みる究極的な需要の源泉として、UDS-C と UDS-I における本推計値は、鉄鋼の内需が低迷し続けるというようなデフレ的悲観を支持するものではないことを示している。そして需要構造としての今後の変化は、UDS-E を構成する直接輸出と間接輸出の動向に大きく依存している。

② 間接輸出比率

戦後日本経済における鉄鋼の直接輸出と間接輸出の変化はいくつかの転換期を迎えている。間接輸出比率として、本測定値、worldsteel 推計値（worldsteel 2015）、そして日本鉄鋼連盟による推計値（日本鉄鋼連盟 2024b）を比較したものが図 3.3.4-3 である。間接輸出比率はそれぞれの統計で示される直接輸出に対する比として定義さ

30 本推計値と日本鉄鋼連盟の推計値（1995–2023 年）は、その水準やトレンドとしておおむね整合的だが、消費への依存度（家計消費・政府消費：UDS-C）は本推計値を大きく下回っている。このことは鉄鋼が組み込まれる金属製品や設備備品など、（産業の取得する）投資財とも（家計の取得する）耐久消費財ともなりうる財の帰属に関する日本鉄鋼連盟の推計フレームワークに依存するものかもしれない。『鉄鋼統計要覧』（日本鉄鋼連盟 2024b, p. 70）には「普通鋼鋼材用途部門別受注」という推計値があり、用途部門として「家庭用・業務機器用」があるが、産業連関表や国民経済計算における家計概念と乖離している可能性がある。

れている（(3.3.3-9)式）。なお日本鉄鋼連盟による間接輸出推計は普通鋼材に限られることから、普通鋼鋼材の直接輸出に対する比率として算定している。また本推計および worldsteel 推計は暦年値であるが、日本鉄鋼連盟のみは年度値である。本推計値による間接輸出比率は、利用する産業連関表（表 3.3.3-4）に依存して統計概念の差異が存在するが、重複する時点における推計値の乖離はわずかなことが確認され、その時系列トレンドはおおむね頑健である。



単位：各年の鉄鋼直接輸出＝1.0。出典：本推計値（1960–2020 年内の基準年のみ）、worldsteel（2015）推計値（2000 年と 2004–2013 年）、日本鉄鋼連盟（2024b）推計値（1995–2023 年）。注：本推計値は鋼材間の価格差を反映した名目ベースであり（3.3.3 節(1)項）、間接輸出比率は(3.3.3-9)式による定義。なお日本鉄鋼連盟の推計値は普通鋼材に限る。

図 3.3.4-3 鉄鋼の間接輸出比率

計数上の比較では、worldsteel 推計による間接輸出比率（この間の平均値として 0.7 ほど）に対し、本推計値では 1.3 ほどと大きく上回っている[31]。日本鉄鋼連盟の推計は普通鋼材に限られるが、worldsteel 推計値をわずかに下回る（時系列トレンドとしてはおおむね類似）。worldsteel および日本鉄鋼連盟と本推計値による乖離の源泉は、産業連関表による本節のアプローチでは鉄鋼需給バランスと完全な整合性を持って輸出を含む最終需要項目へと分解されることから過小推計バイアスを持たないこと、そして鉄鋼最終需要品の輸出金額の集計値による名目ベースの比率であることから構成する鋼材の価格差（品質の差異）を反映していることである。後者では、間接輸出さ

[31] 国内生産ベースによる間接輸出比率（脚注 26）の同期間の平均値では 1.1 ほどであり、ここでの波及生産ベースのそれを 17%下回る。worldsteel 推計値は国内生産ベースの間接輸出比率よりも 36%小さいものと推計されている。

れる鋼材は完成鋼材として相対的に単価が高いことを考慮すれば、名目ベースの間接輸出比率は粗鋼換算や重量によって評価されるそれを上回るものと考えられる。

乖離の源泉たる量的と質的補正の分解を試みことは、worldsteel/日本鉄鋼連盟による測定フレームワークをより詳細に描写する必要があるため本節のスコープから外れるが、本節の帰結は、worldsteel 推計値は真の間接輸出を過小評価しているというものである。

本節での間接輸出比率の推計値に基づけば、戦後日本経済の鉄鋼輸出において大きな転換期が見出される。鉄鋼の直接輸出と間接輸出の成長率を基準として示される 4 つの転換期は以下のとおりである。

- 1960 年代半ば: バランス成長期 （直接輸出≒間接輸出）
- 1970 年代後半: 下流製品輸出財の拡大期 （直接輸出＜間接輸出）
- 2000 年代前半: グローバル化の深化期 （直接輸出＞間接輸出）
- 2010 年代後半: 国内鉄鋼生産の減退期 （直接輸出＜間接輸出）

1960 年代前半では、鉄鋼の直接輸出は、自動車や機械などの下流製品輸出財の国内生産拡大によって誘発される鉄鋼の間接輸出よりも早いスピードで拡大し、間接輸出比率は大きく低下している。第 1 の転換期となる 1960 年代半ばからは、両者はほぼ均衡したスピードで拡大するものとなり、その後の 10 年間は間接輸出比率もおおむね横ばいとなっている（図 3.3.4-3）。

1970 年代後半には大きな転換期を迎えた。自動車や機械など下流製品輸出財の生産拡大によって誘発される鉄鋼の間接輸出は、鉄鋼の直接輸出の成長を上回り、力強く鉄鋼需要を牽引するものとなっている。その後の四半世紀の間、間接輸出比率は上昇を継続したが、日本経済の間接輸出が直接輸出を超過した（間接輸出比率が 1 を上回った）のは 1980 年代後半である。下流製品輸出財に組み込まれる鉄鋼の間接輸出が直接輸出を上回るという 1980 年代後半から続く傾向は、現在まで継続している。

第 3 の転換期となる 2000 年代前半からは、下流製品輸出財の国内生産は停滞し鉄鋼の間接輸出の成長スピードが減速し、アジア諸国などでの下流製品の生産拡大によって誘発される鉄鋼の直接輸出のスピードを再び下回り始めている。間接輸出比率の低下への転換におけるタイミングは幅を持って理解する必要があるかもしれない。下降トレンドへの転換は worldsteel 推計では本推計値よりも遅く、2008 年のリーマンショックから明確な低下傾向をみせている。日本鉄鋼連盟の推計値では、間接輸出比率は 1990 年代半ばから 2002 年まで低下するなど単調ではない推移であるが、2007 年からの低下傾向を示している。いずれにせよ同比率の低下への転換は、下流製品生産におけるグローバルなサプライチェーンの深化に適応した鉄鋼輸出として解される。

③ 近年の生産減退期における輸出構造変化

最後の上昇への転換期は、鉄鋼の生産減退（3.3.2 節(3)項）が始まった 2010 年代後半である。本節の 2020 年産業連関表基本表に基づく推計値では、明確な間接輸出比率の上昇を示している。ただしそれはコロナ禍において直接輸出と間接輸出ともに下落しているなかで生じており、一過的なものかもしれない。本節の目的のひとつは 2010

年代後半からの鉄鋼生産減退（3.3.2 節(3)項）であるが、産業連関分析として明確なトレンドを抽出するにはさらなる資料の蓄積を待たなければならない。

しかし、2023 年度まで推計されている日本鉄鋼連盟（2024b）による推計値からも、間接輸出比率における構造変化を伺い知ることができる（2023 年度値は暫定）。そこでは同比率は 2017 年から上昇し、コロナ禍後も 2010 年代に比して高位に安定している（図 3.3.4-3）。円安が継続する中で間接輸出は堅調であり、同比率の上昇はむしろ直接輸出の減少によって導かれている（図 3.3.4-2 右）。日本の鉄鋼直接輸出は、2013 年に 4346 万トンというピークに到達した後、2016 年には 4121 万トンに緩やかに減少し、その後 2019 年までの 3 年間で 3379 万トンへと 18%もの大幅な減少となった（日本鉄鋼連盟 2024b）。こうした急激な減少は、明らかな構造変化の存在を示唆している。

2010 年代、日本の鉄鋼各社はインドや ASEAN 諸国（タイやベトナムなど）において現地市場向けの生産体制の構築を進め、そこから周辺国への輸出も拡大させてきた。2018 年末からの現在まで続く鉄鋼生産減退（3.3.2 節(3)項）の要因として、その初期段階では、アジアでの生産体制の構築による日本からの直接輸出の減少がある。こうした国際展開は、日本の鉄鋼メーカーによるグローバル化への戦略的対応であり、また自動車メーカーの海外生産の展開に追随した動きとして、企業の経営判断としての合理性を持つものと解される。しかし、この間にも、既存技術では削減が困難な EITE 製造業を巻き込みながら、国内の脱炭素政策が加速しようとする確かな足音を日本の鉄鋼メーカーが感じとっていた。

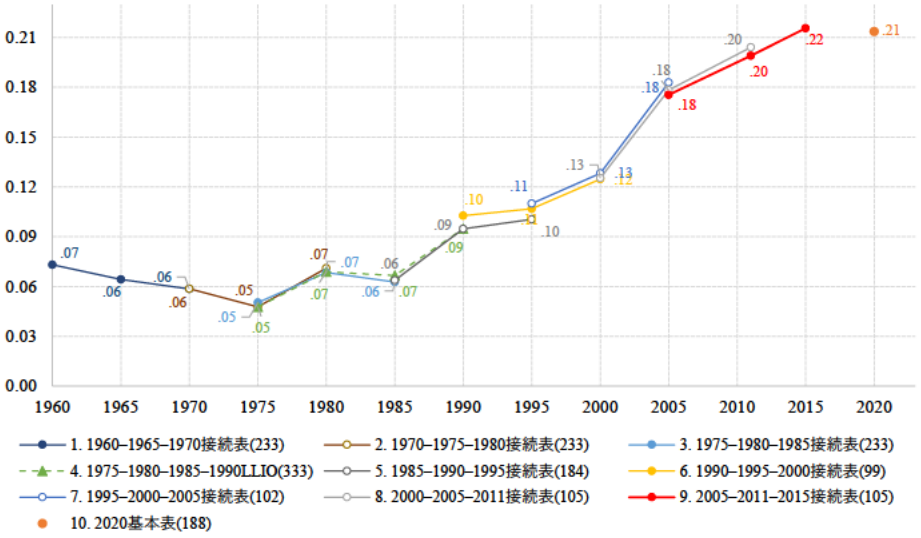
政府は産業の技術的制約への理解が不十分であるかあるいは目を閉じたままに、実現可能性は乏しく、また予見における合理性も欠く、2050 年カーボンニュートラルまでの直線的な削減目標設定に固執した。それは EITE 産業に対し、国内生産・投資における深刻な不確実性をもたらし、実質的に海外生産移転を促進してきた。技術的制約を熟知する鉄鋼会社は、海外での生産展開という現実的な適応を選択することで、国内生産の縮小を容認する（むしろ陰伏的に歓迎する）脱炭素政策への消極的な同意を示す結果となった。2010 年代後半からの海外生産移転と環境規制強化の間には、鉄鋼会社と政府の相互作用が存在している。

海外への生産移転と国内生産の減退は、2019–2020 年の脱炭素政策の加速に先行して始まり、その後の非現実的な政策強化を消極的ながらも許容する素地を与えてきた。そして、強化された政策はその後の 6 年余りにわたって、さらなる生産減退を促進している（3.3.2 節(3)項）。海外生産移転と環境規制強化の循環構造は、相互に強化し合いながら、日本国内におけるさらなる空洞化と経済基盤の弱体化をもたらし、グローバルな環境負荷も増加させるリスクを生じさせている。間接輸出への依存度が拡大したもとでは、今後、脱炭素政策の加速により自動車や機械などの下流製品の生産移転がさらに進めば、鉄鋼の間接輸出の縮小を通じ、さらなる鉄鋼生産の減退をもたらす空洞化の連鎖が生じる可能性が大きい。間接輸出を考慮しなければ、鉄鋼生産の減退は単なる内需低迷の結果として解釈されてしまう。

(2) 総供給の構造変化－輸入依存の深化

① 実効的な輸入依存

鉄鋼の総需要を満たすための総供給における構造変化として、直接・間接の輸入への実効輸入依存度（EID）の推移を示したものが図 3.3.4-4 である。日本経済の EID では転換期は 1970 年代後半である。1975 年には 5%ほどのボトムとなった EID は、その後には半世紀近い間、ほぼ単調な増加を続けており、2020 年では鉄鋼の総需要の 21%（国内需要をベースとすれば 27%）が直接・間接の輸入拡大に依存している。



出典：表 3.3.3-4 の接続表および基本表に基づく本推計値。注：各産業連関表の括弧内は分析における統合商品分類数を示している。一国経済における EID の定義は (3.3.3-10)式。

図 3.3.4-4 一国経済の鉄鋼 EID

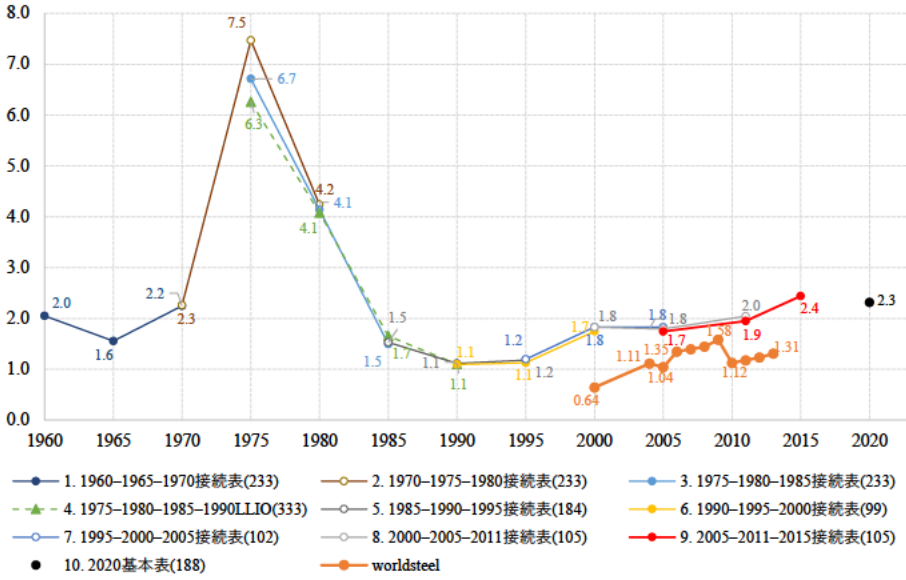
そのことは長期にわたり持続した実効輸入依存の拡大が、日本の鉄鋼国内生産を減じてきたことを示している。直接に観察されることは、1970 年代初めから近年の急激な生産減退期まで、1 億トンから 1.3 億トンの水準でほぼ横ばいとなる粗鋼生産の停滞であった。しかし、この間にも鉄鋼の総需要が停滞してきたのではなく、総需要の拡大はむしろ直接・観察の輸入拡大によって補われてきたのである。日本経済のみならず鉄鋼企業にとっても、鉄鋼 EID 上昇の合理性は問われなければならないし、それを低下させるような下流製品とのパッケージにおける産業政策が求められる[32]。

② 間接輸入比率

一貫した鉄鋼 EID の上昇が見いだされるが（図 3.3.4-4）、その間における直接輸入と間接輸入の関係性は大きく変化している。図 3.3.4-5 は直接輸入に対する間接輸入比率として、本推計値と worldsteel 推計値を比較している（日本鉄鋼連盟「鉄鋼統計要

[32] 日本では電力では輸入できないが、中間財の貿易を通じて間接的に輸入される。電力 EID では第 1 次オイルショック後に 22%ほどまで倍増したが、その後には 1990 年代半ばまでに半減させることに成功している（野村 2021, 第 5 章）。

覧」では、鉄鋼の間接輸入は推計されていない)。worldsteelによる間接輸出の推計が過小評価されているとすれば((1)項)、同様なアプローチによる間接輸入も過小推計バイアスを持つかもしれない。worldsteel(2015)によれば、間接輸入量は2000年代前半から直接輸入量を上回り、期間内の単純平均値では1.2ほどである。だがそれは本推計値(同期間の1.9)を5割ほど下回り、過小推計バイアスの存在が疑われる[33]。



単位:各年の鉄鋼直接輸入=1.0。出典:本推計値(1960–2020年内の基準年のみ)、worldsteel(2015)推計値(2000年と2004–2013年)。注:本推計値は鋼材間の価格差を反映した名目ベースであり(3.3.3節(1)項)、間接輸入比率は(3.3.3-11)式による定義。

図 3.3.4-5 鉄鋼の間接輸入比率

金額ベースによる本推計値に基づけば、戦後日本経済の全測定期間において、鉄鋼の間接輸入は直接輸入を上回っていたと評価される(図 3.3.4-5)。その間接輸入比率の推移は、1970年代半ばから後半にかけての(直接輸入の減少に起因する)間接輸入比率の急上昇期、そこから1990年代前半までの下降トレンド、そして1990年代後半からの上昇トレンドが特徴的である。1970年代初め、過剰生産能力を持つに至った日本鉄鋼は、直接輸出を拡大させるとともに(図 3.3.4-2右)、直接輸入を過度に減じさせるものとなり、それが同時期における間接輸出比率としての急上昇(図 3.3.4-5のスパイク)を作りだしている。現在の中国の状況と同様である。その後の1990年代前半までの間接輸出比率の下降トレンドは、過剰生産能力の解消に伴う直接輸入の拡大を主要因としており、選択と集中という経営判断の合理性を受けた正常化の過程と捉えられる。そして1990年代後半からは、下流製品のアジア諸国での生産拡大に伴い、そ

33 ただしworldsteel推計値として、間接輸入比率は、間接輸出比率よりも測定精度が劣るかもしれない。日本の直接輸入量はworldsteelでは2010年に527.5万tとされるが、それは同年における日本鉄鋼連盟『鉄鋼統計要覧』の720.8万tを大きく下回っている。だが直接輸出量では同年にそれぞれ4295.1万tと4339.5万tと乖離は大きくない。

うした下流製品をむしろ日本が輸入することにより、鉄鋼の間接輸入の拡大が顕著となっている。

2010 年代に入ると、間接輸入は直接輸入の 2 倍を上回るものとなった。拡大する日本の間接輸入には、アジアを中心としたグローバルなサプライチェーンの構築・発展に伴って、日本国内で生産された鉄鋼の直接輸出も含まれる（図 3.3.4-2 右）。日本経済における鉄鋼の直接輸入は、海外生産された価格競争力のある汎用品が主であると考えられるが、鉄鋼の間接輸入ではより質の高い鋼材が含まれ、金額ベースでの同比率を高めていると解される。

総供給側から 2018 年末からの生産減退との関係性を論じるには、さらなる資料の蓄積を待たなければならない。しかし今後、間接輸出の拡大における懸念（3.3.4 節(1)②項）と同様に、脱炭素政策の加速により自動車や機械などの下流製品の生産移転がさらに進行すれば、鉄鋼の間接輸入の拡大が促され、さらなる鉄鋼の国内生産減退をもたらす空洞化の連鎖が生じかねない。観察される需給バランスからみれば、そうした間接輸入の拡大は、鉄鋼の内需（中間需要）の低迷として解されてしまうのである。

3.3.5 結び

本節では、日独両国における近年の鉄鋼生産減退の動向を観察するとともに、戦後日本経済における鉄鋼の直接輸出入および（自動車や機械などの）下流製品を通じた間接輸出入の構造変化を測定し、内需の構造変化を分析してきた。産業連関分析によって拡張された鉄鋼の需給バランスからみれば、総需要と総供給のそれぞれにおいて大きな構造変化を見出すことができる。鉄鋼の総需要からみれば、消費への依存度が安定的であり、投資への依存度がほぼボトムの水準にあると評価され、国内生産の変化は間接輸出の動向に大きく依存するものとなっている。本節での測定によれば、1980 年代後半以降、日本の鉄鋼の間接輸出が直接輸出を上回ることが示される。鉄鋼の生産減退が顕著となった 2010 年代後半からは、間接輸出比率が再び上昇している。

総供給から見れば、国内生産の変化は間接輸入の動向に大きく依存するものとなっている。本節での測定によれば、鉄鋼の実効輸入依存度（直接輸入と間接輸入の合計）は 1970 年代後半以降一貫して上昇しており、1990 年頃までは直接輸入の拡大、1990 年代後半以降では間接輸入の拡大が牽引している。

現在、ドイツでは非現実的な脱炭素政策がもたらした弊害が顕在化し、行き過ぎた官僚主義への批判は高まっている。2024 年後半、ディ・ヴェルト紙はハベック“計画”経済大臣がドイツを産業博物館に変えると警鐘し（WELT 2024）、脱炭素の模範国たろうとしたドイツは“やってはいけない経済モデル”として批判されている（Zitelmann 2024）。Ifo 経済研究所は、官僚主義によって独 GDP は年間 1460 億ユーロが減じられていると試算した（Falck et al. 2024）。そして、米国では 2025 年 1 月 20 日の第 2 次トランプ政権発足後すぐに、パリ協定からの離脱を表明するなど、脱炭素政策（グリーン・ニューディール）の抜本見直しとエネルギードミナンス（優勢）の確立へと向けた取り組みが活性化している。ドイツの化学会社ランクセスの CEO は「ドイツが目を覚まさない限り、我々は米国に投資する」と痛烈に批判している（Handelsblatt 2025）。

しかし日本政府は、なお現実的な制約を十分に考慮しない政策強化を継続する。2024 年 12 月 19 日、政府は 2026 年度に本格導入する排出量取引制度の参加企業に、中長期的な CO_2 排出削減目標の策定と公開を義務づけ、目標を策定しない企業にはペナルティーを科す方針とされた（内閣官房 GX 実行推進室 2024）。現状では企業ごとに排出枠を無償で割り当てるとされているものの、有償化への転換が進められる可能性も否定できない。今後、脱炭素政策の加速により自動車や機械などの下流製品の生産移転がさらに進めば、鉄鋼の間接輸出の縮小と間接輸入の拡大を通じ、さらなる生産減退をもたらす空洞化の連鎖が生じる可能性がある。こうした間接貿易を考慮しなければ、鉄鋼生産の減退は単なる内需低迷の結果として解釈されかねない。海外生産移転と環境規制強化における意図せざる相互作用とその循環構造は、エネルギー多消費的な素材産業にこそ強みを持つ日本経済の産業基盤に対し深刻な影響を及ぼしている。

参考文献（第 3.3 節に関するもの）

1) Åhman, M., L. J. Nilsson, and B. Johansson (2017) “Global Climate Policy and Deep Decarbonization of Energy-intensive Industries,” *Climate Policy*, 17 (5), 634–649. DOI: 10.1080/14693062.2016.1167009.
2) Bataille, C., M. Åhman, K. Neuhoff, L. J. Nilsson, M. Fischedick, S. Lechtenböhmer, B. Solano-Rodriquez, A. Denis-Ryan, S. Stiebert, H. Waisman, O. Sartor, and S. Rahbar (2018). “A Review of Technology and Policy Deep Decarbonization Pathway Options for Making Energy-Intensive Industry Production Consistent with the Paris Agreement,” *Journal of Cleaner Production*, 187, 960–973. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.03.107.
3) Blackout News (2022) “Die Stahlindustrie Wird aus Deutschland Abwandern,” November 23.
4) Dechezleprêtre, A. and M. Sato (2017) “The Impacts of Environmental Regulations on Competitiveness,” *Review of Environmental Economics and Policy*, 11 (2), 183–206. DOI: 10.1093/reep/rex013.
5) Falck, O., Guo, Y. M., Pfaffl, C., Schmidt, K. M., Knill, C., Hinterleitner, M., Steinebach, Y., Kuhlmann, S., Gerls, F., Gönner, T., Licht, T., von Maltzan, A., Wohlrabe, K., Weinberger, D., Hahn, Y., Heimisch-Röcker, A., Englmaier, F., Mühlheußer, G., Wallmeier, N., Roider, A., Klug, G. C., Dittrich, F., Blesse, S., Hoegner, L., & Necker, S. (2024) “Kosten der Bürokratie–Reformen Dringend Geboten,” *Ifo Schnelldienst*, 77 (11), 3–46.
6) Financial Times (2024) “US and European Hydrogen Stock Prices Collapse as Prospects Deflate,” October 27.
7) Geels, F. W., B. K. Sovacool, T. Schwanen, and S. Sorrell (2017) “Sociotechnical Transitions for Deep Decarbonization,” *Science*, 357 (6357). 1242–1244. DOI:10.1126/science.aao3760.
8) Handelsblatt (2025) “Wir investieren in den USA – es sei denn, Deutschland wacht auf,” January 30.
9) Jaffe, A. B. and K. Palmer (1997) “Environmental Regulation and Innovation: A Panel Data Study,” *Review of Economics and Statistics*, 79 (4), 610–619. DOI: 10.1162/003465397557196.
10) Nomura, K. and S. Inaba (2024) “Post-Pandemic Surges of Real Unit Energy Costs in Eight Industrialized Countries,” RCGW Discussion Paper, 70, Research Center on Global Warming, Development Bank of Japan, March.

11) Reuters (2023) “China Steel Exports Seen Surging to Seven-Year High as Home Demand Wilts,” June 29.
12) tagesschau (2022) “Stahlbranche im Krisenmodus,” October 18.
13) WELT (2024) “Planwirtschaftsminister Habeck macht Deutschland zum Industriemuseum,” September 19.
14) Wesseling, J. H., S. Lechtenböhmer, M. Åhman, L. J. Nilsson, E. Worrell, and L. Coenen (2017) “The Transition of Energy Intensive Processing Industries towards Deep Decarbonization: Characteristics and Implications for Future Research,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79 (Supplement C), 1303–1313. DOI:10.1016/j.rser.2017.05.156.
15) worldsteel (2015) “Indirect Trade in Steel: March 2015 Report,” March.
16) worldsteel (2024) “World Steel in Figures 2024,” May.
17) Zitelmann, R. (2024) “Germany is an Economic Model for What Not to Do,” RealClearMarkets. December 9.
18) 総務省（2020）「平成 17–23–27 年接続産業連関表」8 月 31 日.
19) 総務省（2024a）「令和 2 年産業連関表」6 月 25 日（9 月 3 日訂正版）.
20) 総務省（2024b）「令和 2 年（2020 年）産業連関表－貿易統計コード対応表」.
21) 内閣官房 GX 実行推進室（2024）「GX 実現に資する排出量取引制度に係る論点の整理（案）」GX 実現に向けたカーボンプライシング専門ワーキンググループ（第 5 回）, 12 月 19 日.
22) 内閣府経済社会総合研究所（2024）「国民経済計算年次推計（2022 年度（令和 4 年度）年次推計）」.
23) 日本政府（2021）「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」6 月 18 日.
24) 日本鉄鋼連盟（2024a）「主要国鉄鋼生産」8 月.
25) 日本鉄鋼連盟（2024b）『鉄鋼統計要覧（2024 年版）』10 月.
26) 日本鉄鋼連盟（2025）「カーボンニュートラル行動計画報告」経団連 カーボンニュートラル行動計画 第三者評価委員会 報告資料, 2 月 13 日.
27) 野村浩二（2004）『資本の測定：日本経済の資本深化と生産性』慶應義塾大学出版会, 11 月.
28) 野村浩二（2021）『日本の経済成長とエネルギー：経済と環境の両立はいかに可能か』慶應義塾大学出版会, 6 月.
29) 野村浩二（2024）「エネルギー多消費産業を国内から追いやってはいけない」国際経済環境研究所, 3 月 18 日.
30) 野村浩二（2025）「戦後日本経済における鉄鋼の間接貿易」KEO Discussion Paper, 慶應義塾大学産業研究所, 2 月.
31) 野村浩二・稲場翔・吉田満咲（2025）「エネルギーコスト・モニタリング（ECM_JPN_202502）」慶應義塾大学産業研究所, 3 月 4 日.
32) ロイター（2024）「ティッセンクルップ鉄鋼子会社、経営首脳陣がそろって辞任　親会社と対立」8 月 30 日.

3.4　国内外の排出削減の取り組み状況

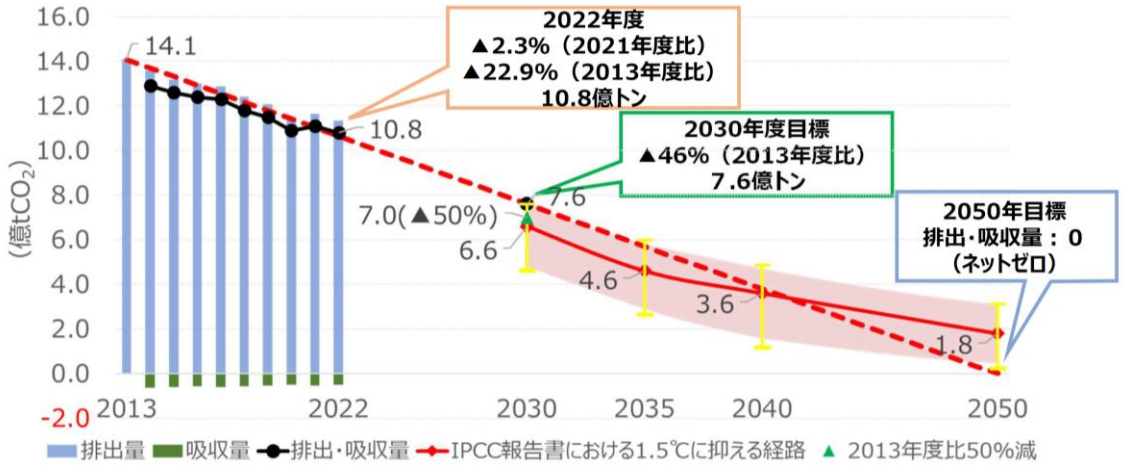
地球温暖化による気候変動問題への対策が求められる中、世界各国において、エネルギー、脱炭素技術、投資等、多岐の分野に関連する様々な政策が打ち出されている。本節では、日本および米国、欧州における気候変動政策の動向について報告する。

3.4.1　日本の排出削減動向および政策動向

(1) 日本全体の NDC と排出動向

2016 年に発効したパリ協定では、世界的な平均気温上昇を抑制するために 2℃、1.5℃目標が設定され、そのために、今世紀後半に世界の温室効果ガス (GHG) 排出のネットゼロを目指すとされた。これらの目標に対する取り組みとして、各国が GHG の排出削減目標を「国が決定する貢献 (NDCs: Nationally Determined Contributions)」として策定し（プレッジ)、定期的に評価を受けながら更新していく（レビュー)、いわゆるプレッジ&レビュー方式が採用されている。

日本は、2021 年 4 月に、菅首相（当時）が 2050 年カーボンニュートラル (CN) と整合的で野心的な目標として、2030 年度において GHG の 2013 年度比 46%削減を目指すことを表明し、同年 10 月に「地球温暖化対策計画」が改訂され（文献 1)), 日本の NDC として国連に提出された（文献 2))。これらの目標に対する進捗について、中長期の地球温暖化対策を検討する政府の合同専門家ワーキンググループの資料(文献 3)) によると、図 3.4.1-1 のように、2022 年度の日本の GHG 排出・吸収量は約 10 億 8,500 万トン（CO_2 換算）となり、過去最低値を記録し、オントラック（2050 年ネットゼロに向けた順調な減少傾向）を継続、とされている。



○ 温暖化を1.5℃又は2℃に抑える経路の世界全体の温室効果ガス（GHG）及びCO_2削減量

		2019年の排出水準からの削減量(%)			
		2030	2035	2040	2050
オーバーシュートしない又は限られたオーバーシュートを伴って温暖化を 1.5° C(>50%)に抑える	GHG	43 [34-60]	60 [48-77]	69 [58-90]	84 [73-98]
	CO_2	48 [36-69]	65 [50-96]	80 [61-109]	99 [79-119]
温暖化を 2° C(>67%)に抑える	GHG	21 [1-42]	35 [22-55]	46 [34-63]	64 [53-77]
	CO_2	22 [1-44]	37 [21-59]	51 [36-70]	73 [55-90]

※1：上の図の赤い帯の範囲は、2023年３月に公表されたIPCC第６次評価報告書統合報告書において示された1.5℃に抑える経路における世界全体の温室効果ガス排出削減量（%）を仮想的に我が国に割り当てたもの。
※2：当該報告書では、モデルの不確実性などを加味し、1.5℃に抑える経路は幅を持って示されているため、2030年、2035年、2040年、2050年時点における排出量は黄色線で幅を持って示している。また、その代表値をつないだものを赤色の実線で示している。

28

図 3.4.1-1　2030 年度目標および 2050 年ネットゼロに対する進捗

（出典）中央環境審議会 地球環境部会 [3)]

日本の CO_2 排出変化の特徴を把握するために、CO_2 排出量（化石燃料燃焼起因）の増減について茅恒等式の手法を用いた要因の分析を行った。人口(以下 POP と略す)、一人当たり GDP (GDP/POP)、GDP 当たり最終エネルギー消費量 (TFC/GDP)、最終エネルギー消費量当たり一次エネルギー供給量 (PES/TFC)、一次エネルギー供給量当た

り CO_2 排出量（CO_2/PES）に要因を分解し、1971～2022 年の間について、CO_2 排出量および各要因の 10 年毎および 2010 年以降の年毎の年平均変化率を求めた。図 3.4.1-2 にその結果を示す（分析に用いたデータは文献 4)）。

CO_2 排出量は、長期的には 2000 年代に入り減少傾向に転じた。2011 年の東日本大震災に伴う事故により原子力発電所が停止したため、CO_2 排出原単位（CO_2/PES）が大幅に悪化し、排出量が一時的に増大した。その後、排出原単位は改善しつつあるものの、2010～2022 年の期間で見ると原単位悪化を取り戻せていない。一方、GDP 当たり最終エネルギー消費量（TFC/GDP）は継続して改善しているように見られるが、産業構造の変化や、また近年においては、図 3.4.1-3 に示すように、エネルギー多消費産業の生産減少が影響しているとの指摘もある。

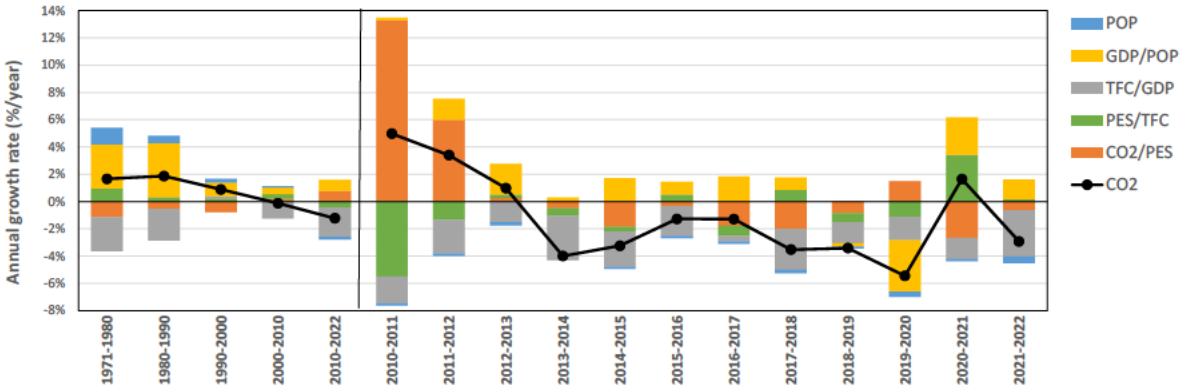


図 3.4.1-2　日本の CO_2 排出量の要因分解（茅恒等式）

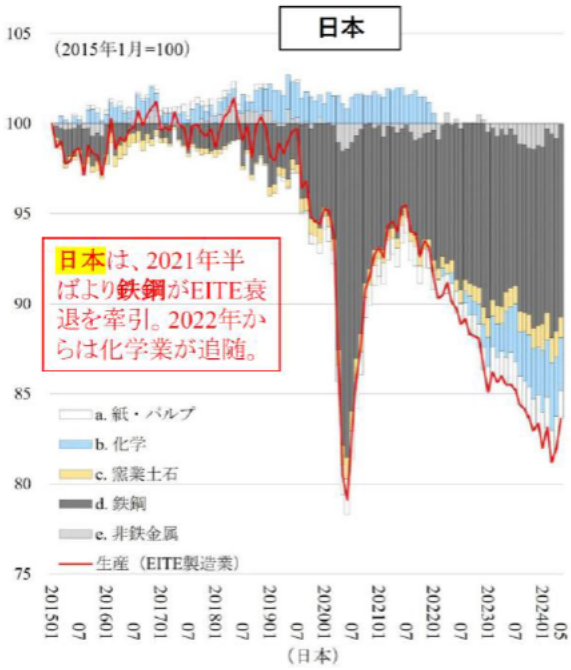


図 3.4.1-3　エネルギー多消費製造業の生産減退

（出典）GX に向けた専門家 WG 資料（文献 5)）

(2) 日本の産業界の自主的排出削減の取り組みに関する評価

日本国内においては、業界団体・企業等によって、地球温暖化に対する様々な取り組みがなされてきた。日本経済界を代表する日本経済団体連合会（経団連）は、1997年に「経団連環境自主行動計画（以下、「自主行動計画」）」（文献 6)）を策定、2013年にはこれを進化させた形で「経団連低炭素社会実行計画（以下、「低炭素社会実行計画」）」（文献 7)）を策定し、GHG 削減に向けて、各業種・企業における主体的かつ積極的な取り組みを推進してきた。これらの経団連を中心とした産業界の自主的取り組みに対しては、各種フォローアップや進捗レビュー等が実施されている。つまり、各業種が自主的に目標設定し（プレッジ）、その進捗状況が評価・検証される（レビュー）という仕組みになっている。

低炭素社会実行計画においては、国内事業活動における CO_2 削減、革新的技術開発等の四本柱のもと、2020 年目標（フェーズⅠ）、2030 年目標（フェーズⅡ）に向け、排出削減を目指した取り組みを着実に続けてきた。そして、2020 年 10 月の菅首相（当時）による 2050 年 CN 宣言を受け、その実現に向けた経済界の主体的取り組みの強力な推進のために、2021 年 11 月に「低炭素社会実行計画」が「経団連カーボンニュートラル行動計画（以下、「CN 行動計画」）」（文献 8)）と改められた。

CN 行動計画については着実に排出削減が進んでいることが報告されているが、経済成長と CO_2 排出量との間には強い正の相関関係があると言われていることから、CN 行動計画においてどのように排出削減が実現しているのか、背後の状況や要因を検証することは、目標値の達成だけでなく、経済成長と CO_2 排出削減の両立（グリーン成長）を目指す上で重要である。本項では、CN 行動計画のフェーズ II における自主的な排出削減の取り組みに関し、削減目標の設定および削減実績という 2 つの観点において検証、評価を行うと共に、目標設定と達成に向けた取り組みにおけるプレッジ&レビューの効果について触れる。

① CN 行動計画におけるフェーズ II（2030 年）目標設定に関する評価

a. 削減目標に関する評価

これらの取り組みにおいては、参加する業種が自ら行い得る最大限の目標を設定するとされ、その指標は統一されていない。また、これらの経団連を中心とした産業界の自主的な取り組みに対して、経団連による年度毎のフォローアップ、第三者評価委員会による進捗レビューや取り組み評価、さらに経済産業省ならびに環境省の関係審議会での業種別ワーキンググループや専門委員会で定期的に実施されている。つまり、各業種が自主的に目標設定し、その妥当性に関する説明責任を負い（プレッジ）、第三者評価委員会や政府審議会が進捗状況を評価・検証する（レビュー）、という仕組みになっている。そのような中で、政府審議会において 2030 年の政府目標との整合性が指摘され（文献 9)）、また 2021 年 10 月に改訂された地球温暖化対策計画（文献 1)）で策定された、2030 年度に日本で GHG を 2013 年度比 46%削減、産業部門でエネルギー起源 CO_2 を 38%削減という目標を踏まえ、CN 行動計画の各参加業種で、2030 年目標の見直しがなされてきている。

表 3.4.1-1 は、CN 行動計画に参加している産業部門の、目標指標および基準年を、2020 年 3 月、2022 年 3 月、2024 年 4 月のフォローアップから抜粋し、それらの推移を示している。目標指標を CO_2 排出量としている場合を緑色、また基準年を 2013 年としている場合を赤字で表しており、当初はエネルギー消費量、CO_2 原単位等、業種により様々な指標が用いられていたが、2024 年 4 月の時点で、参加 31 業種のうち 26 業種が 2030 年度目標として、基準年 2013 年度に対する CO_2 排出量目標を設定している。

表 3.4.1-1　産業部門の CN 行動計画参加業種の目標指標・基準年の推移

産業部門のCN行動計画参加業種	2020年3月		2022年3月		2024年4月	
	目標指標	基準年	目標指標	基準年	目標指標	基準年
日本鉄鋼連盟	CO2排出量	BAU	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013
日本化学工業協会	CO2排出量	BAU, 2013	CO2排出量	BAU, 2013	CO2排出量	2013
日本製紙連合会	CO2排出量	BAU	CO2排出量	BAU	CO2排出量	2013
電機・電子業界	ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位	2012	ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位、CO2排出量	2013	ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位、CO2排出量	2013
セメント協会	ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位	2010	ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位	2010	ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位、CO2排出量	2013
日本自動車工業会・日本自動車車体工業会	CO2排出量	1990	CO2排出量	1990, 2013	CO2排出量	2013
日本自動車部品工業会	CO2原単位	2007	CO2排出量	2007	CO2排出量	2013
日本鉱業協会	CO2原単位	1990	CO2原単位	1990	CO2排出量	2013
日本建設業連合会	CO2原単位	1990	CO2原単位	1990	CO2排出量	2013
住宅生産団体連合会	＜目標値なし＞					
石灰製造工業会	CO2排出量	BAU	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013
日本ゴム工業会	CO2原単位	2005	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013
日本製薬団体連合会	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013
日本アルミニウム協会	ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位	BAU	ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位	BAU	CO2排出量	2013
日本印刷産業連合会	CO2排出量	2010	CO2排出量	2010	CO2排出量	2010, 2013
板硝子協会	CO2排出量	2005	CO2排出量	2005	CO2排出量	2013
全国清涼飲料工業会	CO2原単位	2012	CO2原単位	2012	CO2原単位	2012
日本乳業協会	CO2排出量	2013	CO2原単位	2013	CO2原単位	2013
日本電線工業会	ｴﾈﾙｷﾞｰ消費量	2005, 2013	ｴﾈﾙｷﾞｰ消費量	2005, 2013	CO2排出量	2013
日本ベアリング工業会	CO2原単位	1997	CO2原単位	1997	CO2排出量	2013
日本産業機械工業会	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013
石油鉱業連盟	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013
日本伸銅協会	ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位	BAU	ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位	BAU	CO2排出量	2013
ビール酒造組合	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013
日本造船工業会・日本中小型造船工業会	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013	CO2排出量	2013
石灰石鉱業協会	CO2排出量	BAU	CO2排出量	BAU	CO2排出量	BAU, 2013
日本工作機械工業会	ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位	2008-2012	ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位	2008-2012	CO2排出量	2013
日本レストルーム工業会	CO2排出量	1990	CO2排出量	1990	CO2排出量	2013
製粉協会	CO2原単位	2013	CO2原単位	2013	CO2原単位	2013
日本産業車両協会	CO2排出量	2005	CO2排出量	2005	CO2排出量	2013
日本鉄道車輌工業会	CO2排出量	1990, 2005, 2010	CO2排出量	1990, 2005, 2010	CO2排出量	1990, 2005, 2010

（文献 8),10),11)から抜粋）

また、多くの業界団体がレビューを経て目標値を上げている。例えば、エネルギー多消費産業である日本化学工業協会、日本製紙連合会では、2024 年 4 月のフォローアップにおいて、目標に基づいた 2030 年 CO_2 排出量が、2 年前のフォローアップ時点に比べそれぞれ約 1,357 万 t-CO_2、約 327 万 t-CO_2 減少（=目標値を向上）している（表 3.4.1-2）。

表 3.4.1-2　削減目標引き上げの例

	2022年3月FU		2024年4月FU	
	2030年目標（ポイント）	計画に基づいた2030年排出量	2030年目標（ポイント）	計画に基づいた2030年排出量
日本化学工業協会	BAU比650万t-CO_2削減 絶対量2013年比679万t-CO_2削減 ・両目標を達成する。	5,685万t-CO_2	CO_2排出量（絶対量）を2013年度比で32%削減 ・BAU比指標を無くし、絶対量のみとすることで、化学産業のCO_2排出削減に対する姿勢や取り組みをわかりやすく示した。	4,328万t-CO_2
日本製紙連合会	2005年度実績を基準としてBAU比で化石エネルギー由来CO_2排出量を466万t-CO_2削減する。	1,494万t-CO_2	国内の生産設備から発生する2030年度のエネルギー起源CO_2排出量を2013年度比38%削減する。	1,167万t-CO_2

上述のように、日本の NDC として、産業部門の 2030 年度エネルギー起源 CO_2 排出量について、2013 年比▲38%となる 289Mt-CO_2 を目標値としている。CN 行動計画における排出削減目標が、どの程度、日本全体の 2030 年目標に整合しているかを評価するために、各業種が策定しているフェーズ II 目標に基づいて 2030 年度 CO_2 排出量を推計し、日本の NDC 下での 2030 年排出量との排出ギャップの試算を行った。CN 行動計画フォローアップ結果には個別業種編が含まれており、個々の業種の実績や考察等、取り組みの詳細が報告されているが、2023 年度のフォローアップ結果にあるこれらのデータ等（文献 10)）を参照し、各業種における削減目標から CN 参加企業全体の 2030 年排出量を算出した。さらに、参加企業のその業界におけるカバー率を考慮し、各業種全体の 2030 年排出量を推計した。その結果、CN 行動計画のフェーズ II 目標に基づく、参加業種の 2030 年 CO_2 排出量合計は約 280Mt-CO_2 となる（表 3.4.1-3)。また、上述の 2023 年度フォローアップ結果では、CN 行動計画参加業種の産業部門全体の CO_2 排出量（実排出）は、2021 年度は約 332Mt-CO_2、2022 年度が約 310Mt-CO_2 とされている。一方、温室効果ガスインベントリ（文献 12)）より、日本の産業部門全体の CO_2 排出量（Allocated）は、2021 年度が約 372Mt-CO_2、2022 年度が約 352Mt-CO_2 と報告されており、これらより産業部門における CN 行動計画参加業種の CO_2 排出量は、日本の産業部門全体の約 88%を占めるとする。以上より、日本の NDC に基づく産業部門全体の 2030 年エネルギー起源 CO_2 排出量の 88%である約 254Mt-CO_2 が、CN 行動計画参加業種の 2030 年排出量目標と考えられ、それに対し、現状では約 26Mt-CO_2 の排出ギャップがある。

表 3.4.1-3　産業部門の CN 行動計画参加業種の目標に基づいた 2030 年排出量の推計

産業部門のCN行動計画参加業種	CN行動計画の目標に基づいた2030年排出量（万t-CO_2）	業界全体2030年排出量（カバー率から推計）（万t-CO_2）
日本鉄鋼連盟	13610.0	14205.6
日本化学工業協会	4328.2	4988.6
日本製紙連合会	1167.5	1317.2
電機･電子業界	700.4	877.6
セメント協会	1535.1	1535.1
日本自動車工業会･ 日本自動車車体工業会	463.0	535.9
日本自動車部品工業会	416.2	1174.1
日本鉱業協会	278.3	278.3
日本建設業連合会	246.6	1387.7
住宅生産団体連合会	-	-
石灰製造工業会	175.0	190.9
日本ゴム工業会	115.4	129.5
日本製薬団体連合会	140.8	221.3
日本アルミニウム協会	100.7	123.6
日本印刷産業連合会	65.0	94.3
板硝子協会	86.9	86.9
全国清涼飲料工業会	123.8	178.6
日本乳業協会	114.0	168.2
日本電線工業会	60.2	77.7
日本ベアリング工業会	52.5	54.6
日本産業機械工業会	51.6	56.1
石油鉱業連盟	27.5	27.5
日本伸銅協会	44.7	141.1
ビール酒造組合	30.8	31.1
日本造船工業会･ 日本中小型造船工業会	46.8	52.0
石灰石鉱業協会	20.1	26.0
日本工作機械工業会	22.5	24.3
日本レストルーム工業会	15.4	15.4
製粉協会	20.8	22.0
日本産業車両協会	3.0	3.1
日本鉄道車輌工業会	2.9	8.1
合計		28032.6

（文献 10)を参考に集計）

プレッジ＆レビューにより、日本全体や産業部門での共通のターゲットを踏まえつつ、業種それぞれの状況を考慮し自主的に目標を設定し、評価・検証を行って徐々に個々の目標値を更新していく仕組みが上手く機能しているが、産業全体の目標値とのギャップをいかに狭めて行くかが、一つの課題である。

b.　CN 行動計画における排出削減の結果の検証、および自主的取り組みの評価

i)　削減目標に対する CO_2 排出量の実績

CN 行動計画 2024 年度フォローアップによると、2023 年度の CO_2 排出量の全部門（産業、エネルギー転換、業務、運輸）の合計値は 4 億 6,809 万 t-CO_2 となり、2013 年度比で減少（-21.0%）、前年度比でも減少（-2.3%）した。産業部門における 2023 年度の CO_2 排出量（電力配分後）は、図 3.4.1-4 に示すように、2013 年度比-23.3%、前年度比-3.6%となった。産業部門の CO_2 排出量の増減の要因分析より、前年度比においては、「経済活動量あたりのエネルギー使用量の変化」、「CO_2 排出係数の変化」、「経済活

動量の変化」のいずれも減少した（それぞれ-2.3%、-0.2%、-1.1%）。経済活動量減少の主因として、セメント業界の生産量減少や化学業界における外需縮小が挙げられる。2013 年度比においては、「経済活動量の変化」が大幅に減少（-17.1%）するとともに、「CO_2 排出係数の変化」と「経済活動量あたりエネルギー使用量の変化」も減少（それぞれ-4.2%、-2.1%）した（文献 13)）。



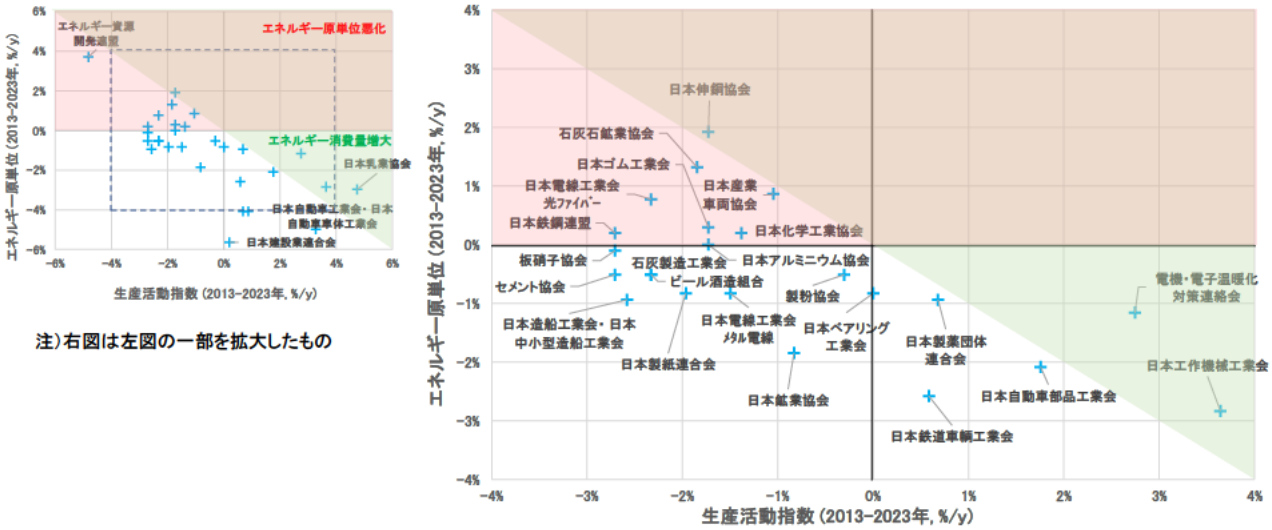
図 3.4.1-4 産業部門の CO_2 排出量（電力配分後）増減の要因分解

（出典）経団連 [13)]

ii) エネルギー原単位、CO_2 排出原単位等に関する業種横断的な分析

図 3.4.1-5 に、2013 年から 2023 年までの期間について、生産活動指数の変化と、生産活動あたりのエネルギー使用量と定義したエネルギー原単位変化を業種横断的にグラフ化した。薄い赤の部分はエネルギー原単位が悪化した業種を表す。なお、横軸の生産活動指数は各業種から提出されたデータであり、例えば日本鉄鋼連盟は粗鋼生産量、日本製薬団体連合会は医薬品製造業界の生産活動を示す上で最も一般的な指標である売上高を採用するなど、業界により異なる。

全体的な傾向としては、生産活動指数が低下した業種が多く見られ、それが CO_2 排出減少の大きな理由と考えられる。また、エネルギー原単位が悪化した業種が一定数あり、悪化の原因には生産活動の後退による影響があると考えられる。代表的なエネルギー多消費産業である日本鉄鋼連盟、日本化学工業会、日本製紙連合会、セメント協会はいずれも生産活動量が減少している。また、日本鉄鋼連盟、日本化学工業協会はエネルギー原単位が悪化し、上記の他の業種ではエネルギー原単位は改善している。



注）右図は左図の一部を拡大したもの

図 3.4.1-5　生産活動指数とエネルギー原単位の関係（2013～2023 年）

エネルギー原単位は生産活動の影響を受けることが多いため、各業種における年間のエネルギー原単位変化が生産活動指数の年変化によってどの程度説明されるかを分析した。図 3.4.1-6 では、横軸が 2013～2023 年の期間における各業種の生産活動指数変化とエネルギー原単位変化の相関の説明性（R^2 乗値）を示し、左に行くほど相関が高いことを意味する。縦軸は 2013 年比の 2023 年のエネルギー原単位指数を示し、1 以下であれば原単位が向上したことを表す。なお、回帰分析から得られた説明変数が有意でないもの（R^2 乗値が 0.3 より小さいものはほぼ全て）も参考として含めている。

領域 A は経済活動の変化に関わらずエネルギー原単位改善を達成していることを示しているが、一定程度の業種が経済活動の変動に因らず温暖化対策等を進めたことにより原単位改善を達成したと言える。日本鉄鋼連盟、日本化学工業協会は領域 C に位置しており、エネルギー原単位悪化は生産活動指数の低下が影響していることを示す。

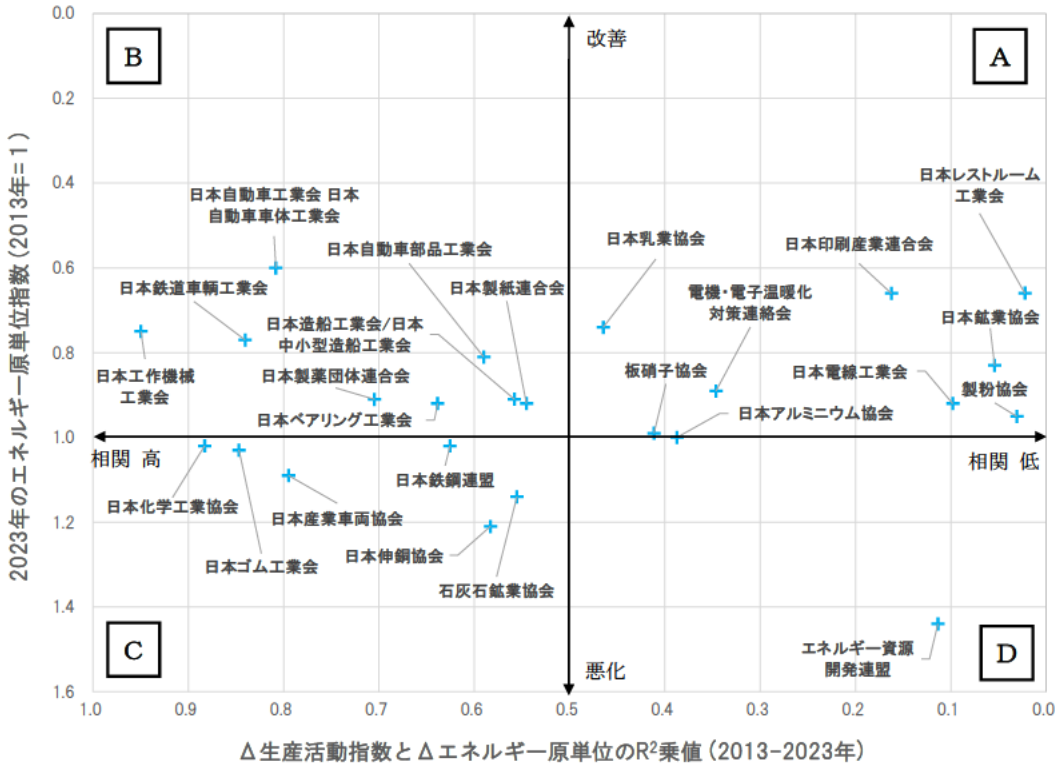


図 3.4.1-6 エネルギー原単位変化と原単位変化に対する生産活動変化の説明性（R^2）の関係（2013～2023 年）

2013～2023 年における、エネルギー原単位と CO_2 排出原単位（CO_2 排出量/エネルギー使用量）変化の関係を図 3.4.1-7 に示す。

CO_2 排出量/エネルギー使用量で見た CO_2 排出原単位は、2013～2023 年の期間でほぼ全業種において改善している。しかし、本節(1)項での CO_2 排出量の要因分解で見たように、日本では 2011 年の東日本大震災による原発停止で火力発電が増え、その影響で 2013 年には電力の CO_2 排出係数が大幅に悪化していたため、そこを起点とした CO_2 排出量/エネルギー使用量の向上にはそのような外的要因による影響も含まれていることを考慮すべきである。それらの影響を除いた評価のために、仮に購入電力の排出係数を固定した場合の試算を行った。例えば、電化率が比較的高い業種である日本造船工業会・日本中小型造船工業会および製粉協会について、図 3.4.1-7 の分析では CO_2 排出原単位が大きく改善という結果だが、固定した基礎排出係数（実排出係数）を用いて試算すると、2013～2023 年における CO_2 排出量/エネルギー使用量の変化率は、前者については殆ど変化なし、後者については若干の悪化となり、CO_2 排出原単位の向上には購入電力の排出係数の向上という外的要因が影響したと考えられる。一方、エネルギー多消費産業である化学工業協会や製紙連合について、同様に排出係数を固定した試算を行った場合、いずれも改善率は下がったものの、同期間において CO_2 排出量/エネルギー使用量の変化率は向上という結果であった。

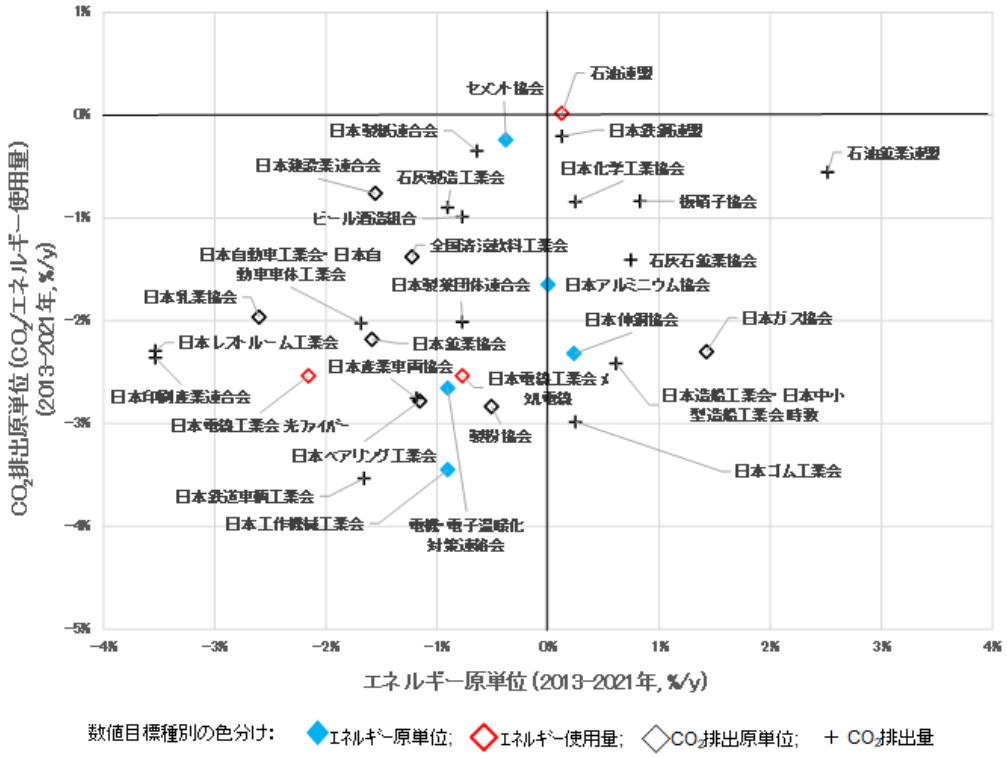


図 3.4.1-7　エネルギー原単位と CO_2 原単位の関係（2013～2023 年）

注）電力排出係数は、業種により固定値と可変値の採用が混在しているが、統一せず、各業種からの報告の数字をそのまま使用

以上の分析から、CN 行動計画フェーズ II において、2013～2023 年度の実績に基づく産業部門での CO_2 排出減少の主な要因として、CO_2 多排出な産業を含む多くの業種の生産活動量の低下の影響が考えられる。マクロでのエネルギー原単位向上には、個々の業種での省エネ努力もあるが、日本鉄鋼連盟と言ったエネルギー多消費業種における生産活動低下の影響も考えられる。また、CO_2 排出原単位の向上については、原発停止により電力の排出係数が悪化した時点を起点とする向上と言う外的要因が含まれることに留意すべきである。これらの点は、2023 年度 CN 行動計画フォローアップでも報告されている通りであるが、外部専門家による第三者評価委員会では、さらに委員からのコメントとして「業種の掲げる 2030 年度目標の多くが国内生産の減少と海外移転（及び輸入増）によって実現されている可能性」があり「それは産業の空洞化であり、本制度の意義とは反するものである」と指摘されている（文献 14)）。

② まとめ

世界においては、パリ協定の下で各国が GHG 排出削減のための NDCs を設定し、日本は 2030 年目標として、2013 年度比 46%削減の目標を掲げている。国内においては、日本の産業界を代表する経団連を中心とした、排出削減のための行動計画が策定されている。いずれにおいても、各主体者がそれぞれ目標を誓約し、その達成度や目標に向けた取り組み状況を評価する、プレッジ＆レビュー方式が採用されている。これらの取り組みの進捗としては、日本は 2030 年目標に対しオントラックと言われており、

経団連自主的取り組みではフェーズ II において順調に進んでいるとされている。しかし、日本で鉄鋼や化学等のエネルギー多消費製造業の生産が、近年、途上国へ移転していることが指摘されている。結果の背後の状況や削減の要因の検証等が重要である。

本項では、CN 行動計画のフェーズ II における自主的な排出削減の取り組みについて、プレッジ&レビューとの関連も踏まえ、削減目標に関する評価および排出削減の結果の検証を行った。まず目標指標については、従来、業種により異なる指標が採用されてきたが、政府審議会等における指摘を受け、2030 年の政府目標と整合するように、特に産業部門で、CO_2 排出量を指標とし、基準年を 2013 年度に変更する動きが見られる。また、多くの業界団体がレビュー等を経て目標値を上げている。さらに、各業種が策定しているフェーズ II 目標に基づいて 2030 年度 CO_2 排出量を推計したところ、現状では日本の NDC 下での 2030 年排出量と約 26Mt-CO_2 の排出ギャップがあるという試算結果であった。共通のターゲットを目指しつつ、各業界がそれぞれの状況を考慮し自主的に目標を設定し、レビューを経て徐々に目標値を更新していく仕組みが上手く機能していると言えるが、例えば産業部門全体の目標に対する妥当性と言った評価も必要ではないかと考える。次に、排出削減の要因の検証と自主的取り組みの評価として、2023 年までの実績値に基づき、生産活動指数とエネルギー原単位変化の関係、エネルギー原単位と CO_2 原単位変化の関係について、業種横断的に分析した。産業部門での CO_2 排出減少の背景には、CO_2 多排出な産業を中心とした多くの業種の生産活動量の低下の影響があることが示唆される。これは経団連によるフォローアップで報告されているが、第三者委員会でさらに踏み込んだ指摘がなされており、多方面の立場や視点からの検証が必要であることを示している。

世界においては、パリ協定の目標の進捗状況を評価するグローバル・ストックテイクのプロセスが始まっている。この仕組みを有効に機能させ、世界全体での、経済成長と排出削減との好循環を追求していくことが重要である。

(3) グリーントランスフォーメーション（GX）政策動向

産業革命以来の化石中心の経済・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「グリーントランスフォーメーション（以下 GX）」を実行するべく、必要な施策を検討するため、2022 年 7 月から GX 実行会議が開催され、2023 年 2 月 10 日に「GX 実現に向けた基本方針」が閣議決定された（文献 15)）。基本方針では、エネルギー政策の全体論として、(1) エネルギーの安定供給の確保を前提とした GX に向けた脱炭素の取り組みと、GX を進めるための方法論として、(2) 経済成長と脱炭素を同時に達成するための投資促進策である「成長志向型カーボンプライシング構想」の実現・実行の 2 つが示された。さらに、2023 年 5 月に「GX 推進法」と「GX 脱炭素電源法」が成立し、同年 7 月に「脱炭素成長型経済構造以降推進戦略（GX 推進戦略）」が閣議決定した。また、同年 12 月には、重点的に取り組む 16 分野における GX 実現に向けた投資促進策を具体化する「分野別投資戦略」がまとめられた（文献 16)）。図 3.4.1-8 に、GX 基本方針で示されたロードマップの全体像を示す。

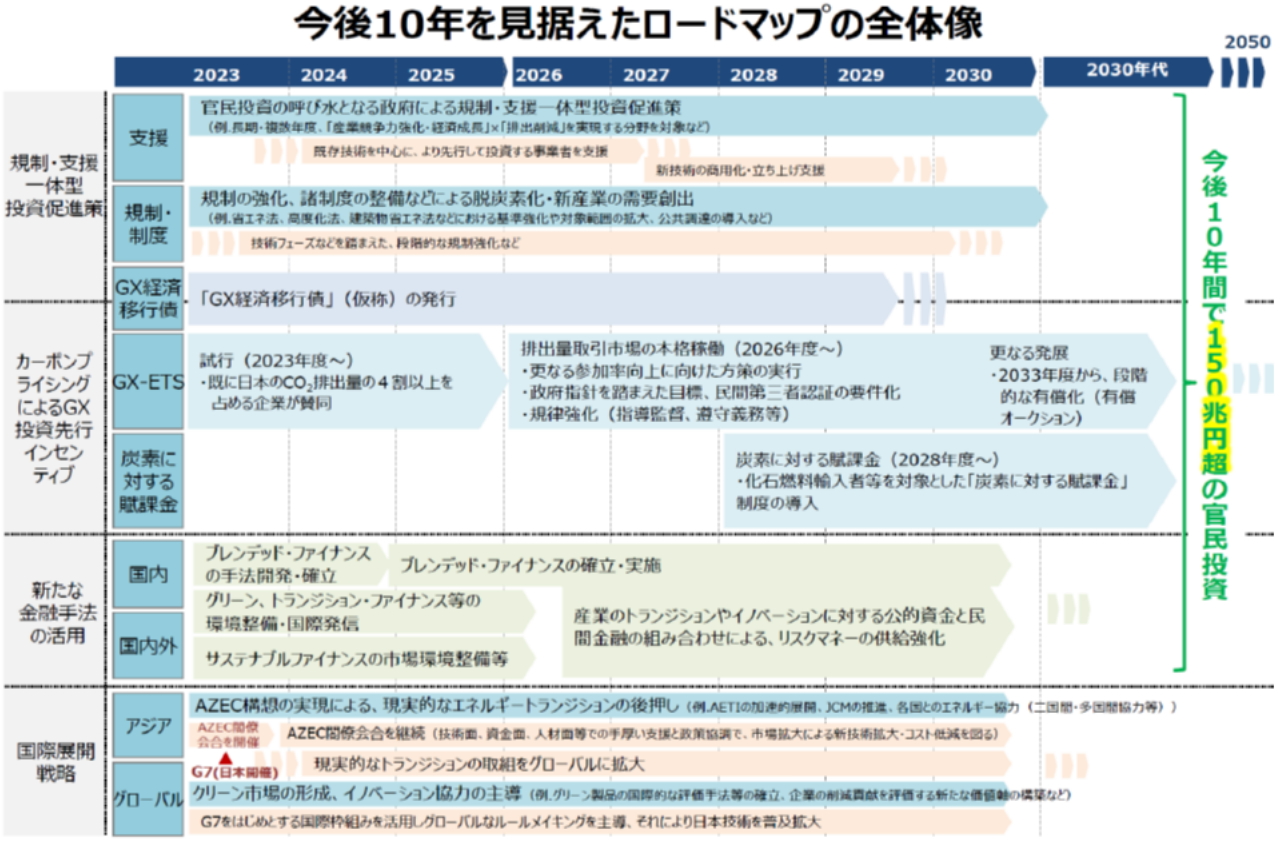


図 3.4.1-8　GX 実現のためのロードマップ

（出典）GX 実行会議 [15)]

今年度の GX 実行会議における議論では、まず、量・価格両面でのエネルギー安定供給確保、DX の進展や電化による電力需要の増加が見通される中でのその規模やタイミング、経済安全保障上の要請によるサプライチェーン再構築のあり方等について不確実性が高まっていること、また気候変動対策の野心を維持しつつ多様かつ現実的なアプローチを重視する動きや次世代技術への期待の高まりといった変化が生じていること等が指摘された。このような状況を受け、出来る限り事業環境の予見性を高め、日本の成長に不可欠な付加価値の高い産業プロセスの維持・強化につながる国内投資を後押しするため、産業構造、産業立地、エネルギーを総合的に検討し、より長期的視点に立った GX2040 のビジョンを示す、とされた（文献 17)）。そして、図 3.4.1-9 のようなスケジュールで GX2040 ビジョン策定に向けた検討が進められた。

2025 年 2 月 18 日に「GX2040 ビジョン」（脱炭素成長型経済構造移行推進戦略の改訂）が閣議決定された（文献 18)）。図 3.4.1-10 に、GX2040 ビジョンの概要を示す。

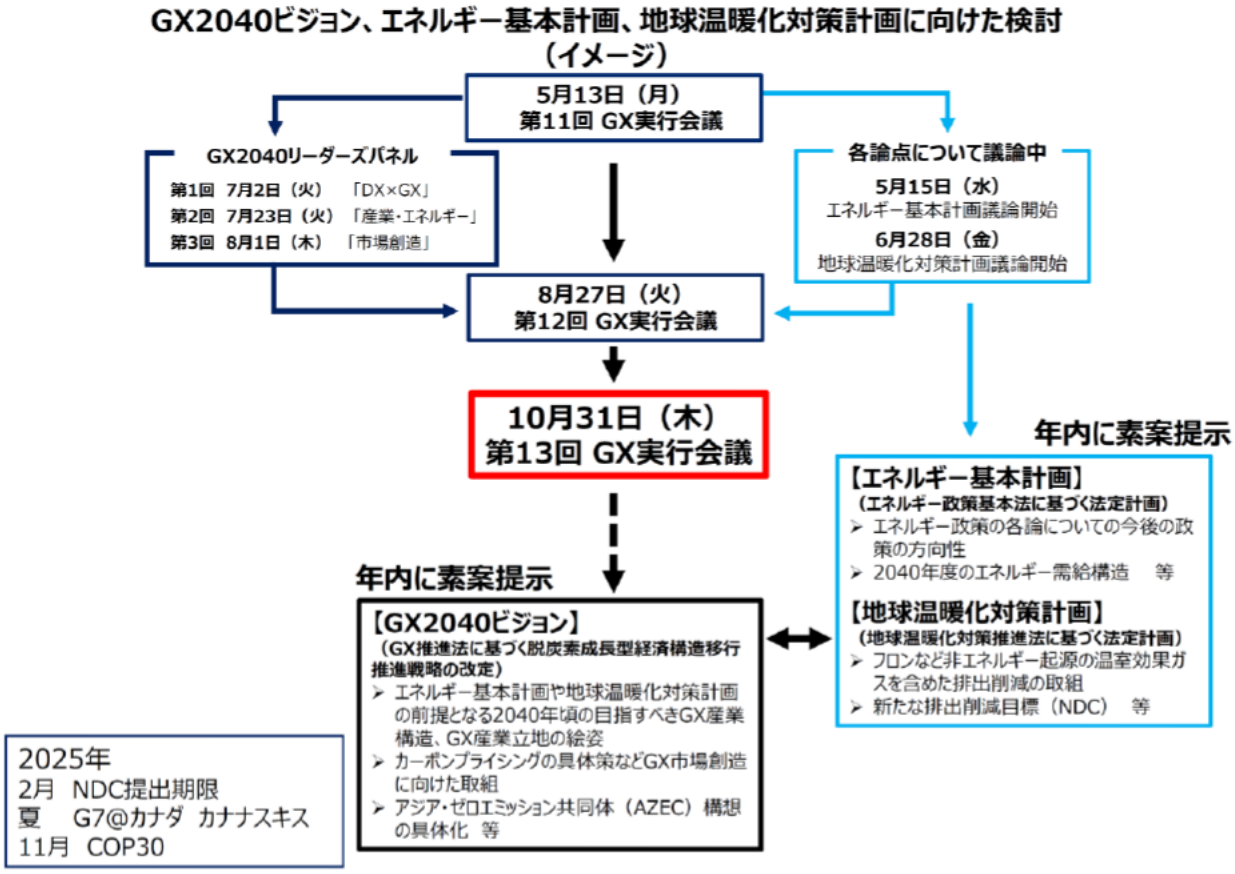


図 3.4.1-9 GX2040 ビジョン等に向けた検討（イメージ）

（出典）GX 実行会議 [17)]

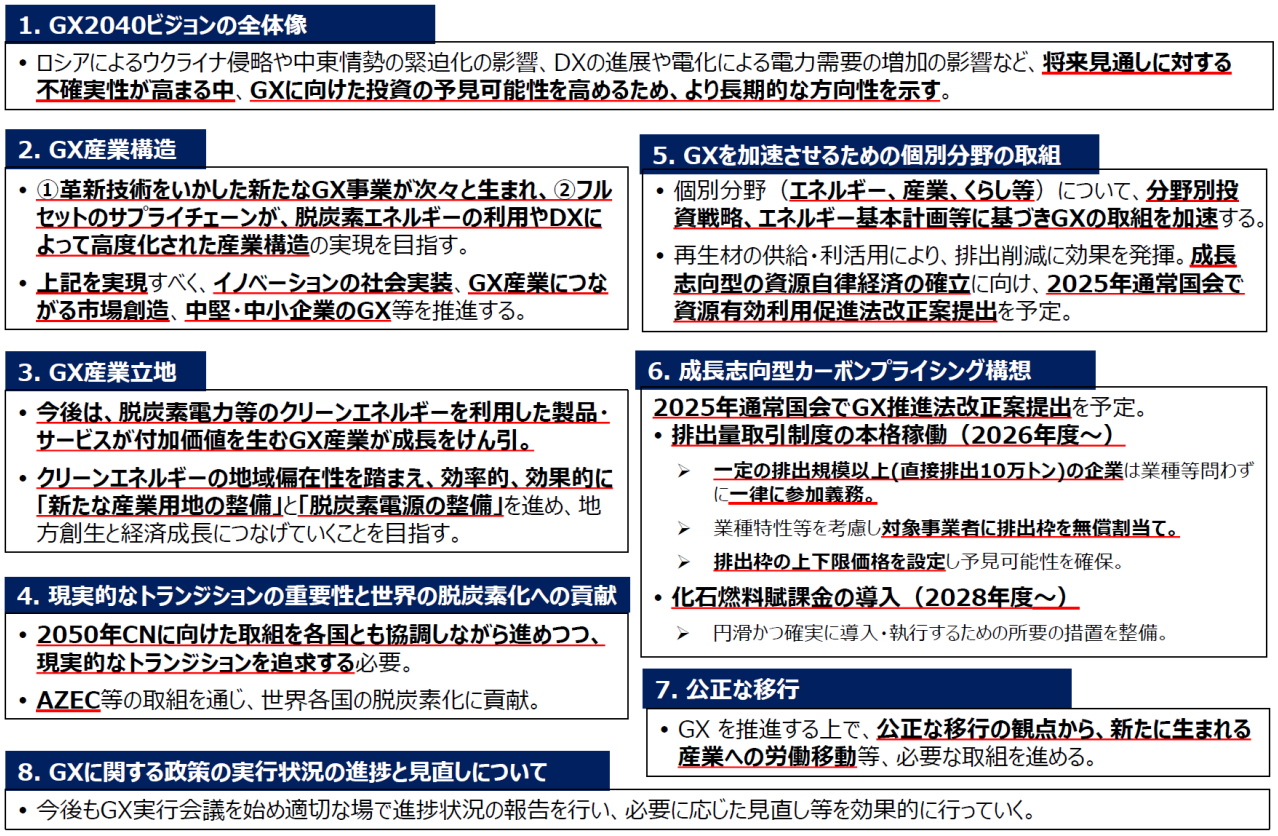


図 3.4.1-10 GX2040 ビジョンの概要

（出典） 日本政府 [18)]

参考文献（第 3.4.1 節に関するもの）

1) 日本政府: 地球温暖化対策計画 (2021)
2) Japan First NDC (Updated submission), submitted on 22/10/2021, UNFCCC NDC Registry
3) 中央環境審議会地球環境部会 2050 年ネットゼロ実現に向けた気候変動対策検討小委員会・産業構造審議会産業技術環境分科会地球環境小委員会中長期地球温暖化対策検討 WG 合同会合 第 1 回資料 (2024)
4) IEA: GHG Emissions from Energy 2024 (2024)
5) 野村浩二: 主要国のエネルギーコスト負担とエネルギー多消費産業の動向、GX 実現に向けた専門家ワーキンググループ 第 7 回資料 (2024)
6) 日本経済団体連合会: 環境自主行動計画 (1997)
7) 日本経済団体連合会: 経団連低炭素社会実行計画（2013, 2019 改訂）
8) 日本経済団体連合会: 経団連カーボンニュートラル行動計画 2050 年カーボンニュートラルに向けたビジョンと 2021 年度フォローアップ結果 総括編（2020 年度実績）(2022)
9) 産業構造審議会 産業技術環境分科会 地球環境小委員会・中央環境審議会 地球環境部会 低炭素社会実行計画フォローアップ専門委員会: 2019 年度低炭素社会実行計画 評価・検証結果及び今後の課題等（概要資料）(2020)
10) 日本経済団体連合会: 経団連カーボンニュートラル行動計画 2050 年カーボンニュートラルに向けたビジョンと 2023 年度フォローアップ結果 総括編（2022 年度実績）(2024)

11) 日本経済団体連合会: 経団連低炭素社会実行計画 2019 年度フォローアップ結果 総括編（2018 年度実績）(2020)
12) 国立環境研究所: 日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2022 年度）(2024)
13) 日本経済団体連合会: 経団連カーボンニュートラル行動計画 2050 年カーボンニュートラルに向けたビジョンと 2024 年度フォローアップ結果 総括編（2023 年度実績）[速報版] (2024)
14) カーボンニュートラル行動計画 第三者評価委員会: 2023 年度カーボンニュートラル行動計画 第三者評価委員会 評価報告書 (2024)
15) GX 実行会議: GX 実現に向けた基本方針、および概要・参考資料 (2023)
16) GX 実行会議: 分野別投資戦略 (2023)
17) GX 実行会議: 我が国のグリーントランスフォーメーション実現の加速に向けて、第 11 回、第 13 回会議資料 (2024)
18) 日本政府: GX2040 ビジョン ～脱炭素成長型経済構造移行推進戦略 改訂 (2025)

3.4.2 米国の動向

米国の政治においては、1850 年代以降、民主党と共和党という二大政党から大統領候補が選出されてきたという特徴がある。それぞれの理念や支持基盤等の特徴は異なり、エネルギー・環境政策も異なるため、特に近年においてはどちらの政党が政権に就くかが気候変動対策に大きな影響を与えると言える。

2015 年の COP21 で採択されたパリ協定は、当時の民主党オバマ大統領による強力な働きかけで、世界の温暖化ガスの二大排出国である米国と中国が批准し、2016 年 10 月に採択の条件を満たし、同年 11 月 4 日に発効された。しかし、2017 年 1 月に共和党トランプ大統領が就任し、同年 6 月にパリ協定からの離脱を表明、2020 年 11 月 4 日に米国はパリ協定から正式に脱退した。その後、2021 年 1 月に就任した民主党バイデン大統領はパリ協定への復帰を決定、30 日後の 2 月 19 日に復帰が認められた。そして、2024 年の大統領選挙で勝利したトランプ氏は、2025 年 1 月の就任と同時に、再びパリ協定からの脱退を表明した。トランプ大統領は、バイデン政権が設定したその他のエネルギー・環境政策についても見直す方針を示している。

本項では、前政権下での脱炭素化を中心とした政策に対する、第二次トランプ政権における方針の動向をまとめ、今後の米国の排出量推計に関する分析の例を紹介する。

(1) 第二次トランプ政権におけるエネルギー・環境政策の見直し

前政権である民主党バイデン政権において、2022 年 8 月に米国インフレ抑制法（Inflation Reduction Act、以下 IRA と表記）が成立した。これは、気候変動問題を重視する立場のバイデン大統領（当時）が、就任直後の 2021 年 4 月に一般教書演説で発表した米国雇用計画と社会保障計画を起点としており、ビルドバックベター法案として上下両院で審議され、2021 年 11 月に超党派により合意が得られた部分をインフラ投資・雇用法（Infrastructure Investment and Jobs Act、以下 IIJA と表記）として成立した等の経緯を経て、最終的に IRA として 2022 年 8 月 16 日に大統領が署名し成立した。インフレ抑制を主に狙うものだが中身はエネルギー安全保障と気候変動の分野での税

控除などを通じた投資が中心の政策となっている。同法は、10 年間で財政赤字を約 3,000 億ドル削減することでインフレの減速を狙ったものだったが、内訳を見ると、法人税の最低税率の設定と処方箋薬価の引き下げ等によって、財政赤字を約 7,000 億ドル減らした上で、それを原資として「エネルギー安全保障と気候変動」の分野で、税控除や補助金等を通じて、10 年間で 3,690 億ドルを投じるとされた。うち、4 割強がクリーン電力に対する税控除であった（文献 1),2)）。バイデン前政権は、IRA と IIJA による投資を通じて、クリーンエネルギー経済への移行を加速させてきた。2022 年第 3 四半期（7～9 月）以降のクリーンエネルギー関連の総投資額は 2,640 億ドルに達し、さらなる投資計画を進行させてきていた。また、対外的な気候政策としては、2024 年 12 月 19 日に、2035 年までに GHG 排出量を 2005 年比で 61～66%削減する新たな気候目標を公表し、国連気候変動枠組条約（UNFCCC）に 2035 年 NDC として提出した（文献 3)）。なお、提出された文書では、state, territorial, tribal, local 及び private sector など、連邦政府以外の取り組みを繰り返し強調し、連邦政府の役割については、“by increased federal engagement later in this decade”と言う記載が見られる（文献 4)）。

そして、2025 年 1 月 20 日、ドナルド・トランプ氏が第 47 代米大統領に就任、共和党のトランプ政権が発足した。民主党のバイデン政権が進めたエネルギー・環境政策を大幅に見直すことを公約としていたトランプ大統領は、就任時の声明で優先事項の一つとして“Make America Affordable and Energy Dominant Again”（エネルギードミナンス）を挙げ、“President Trump will declare an energy emergency and use all necessary resources to build critical infrastructure”（エネルギー緊急事態の宣言と重要インフラの構築）、“President Trump will withdraw from the Paris Climate Accord.”（パリ協定からの脱退）等を表明し、就任初日にこれらに関連した大統領令に署名した。前政権の有害で近視眼的な政策が原因で、我が国のエネルギー供給とインフラが不充分なためエネルギー価格高騰が引き起こされ、米国の経済、安全保障、米国民に異常な脅威となっていること、手頃な価格で信頼性の高い国内エネルギー供給とインフラが必要であること等が強調され、また、米国経済に損害を与える可能性のある国際協定において米国および米国民の利益を最優先することを政策に掲げ、UNFCCC 下のパリ協定からの脱退を即時に国連に通知すること、UNFCCC 下での財政拠出公約も撤回すること等を表明した（文献 5)）。

上野 [6]は、トランプ政権によるバイデン政権時の気候変動対策を始めとするエネルギー環境政策の見直しについて、具体的にどのような変化が起こり得るかを考察している。主に下記の項目が考えられる。

- 排出規制等の撤回
- IRA の見直し・撤回
- パリ協定からの脱退
- エネルギードミナンス政策

以下、各項目について概要を記す。

① 排出規制等の撤回

バイデン前政権では、大気浄化法等の既存法の下で、火力発電所、自動車、石油・ガス部門といった分野別の排出規制を導入した。トランプ政権は行政府の権限でこれらの規制を撤回、またより緩い代替規制の策定も進めると見られる。各種規制の見直し、緩和に向けて、就任初日に“Unleashing American Energy”と題した大統領令に署名し[7]、各省庁は国内のエネルギー資源開発に負担をかける措置を特定し、速やかにその撤回や改定等を進めること、炭素の社会的費用に関する算定基準や文書等を撤回し、米国環境保護庁（EPA）長官は従来の算定方法を連邦政府による認可や規制から排除することを検討すること、EPA長官はGHGの危険性を認定した最終規則[8]の合法性と継続的な適用可能性について提言を取りまとめること、等を指示した。GHGの危険認定は2009年にオバマ政権下で出されたもので、各種のGHG排出規制の法的根拠とされていることから、認定が取り消されれば既存法の下でGHG排出を規制できなくなるため[6]、政府の判断が注目される。

② IRAの見直し・撤回

上野[6]によると、法律の見直し・撤回にはそのための立法が必要なため、大統領権限では撤回できず、上下両院で法案を通す必要がある。2025年1月から始まった米国連邦議会において上下両院とも共和党が多数派となっているが、議席数は僅差である[9]。また、IRAにより多くの共和党州が投資と雇用の両面で恩恵を受けており[10]、地元経済の観点から撤回に躊躇する共和党議員も存在する。一方、トランプ大統領は“Unleashing American Energy”の大統領令で、全省庁にIRAおよびIIJAを通して充てられた予算の支払いを速やかに停止し、90日間以内にレビューを行って結果を提出するよう指示した。執行停止は政府予算が対象であり、IRAの大宗を占める減税措置は対象ではないが、各省庁における、国内エネルギー資源開発に負担をかける措置の特定、撤回・改定の一環として、減税措置に関する案件の見直しが行われる可能性もある。以上のことから、IRAの全面撤回は困難であると考えられるが、補助金や融資保証の未執行部分の見直し・撤回、また減税措置については要件を変更することで縮小や執行遅延を図る等の部分撤回が行われると見られる[6]。

③ パリ協定からの脱退

トランプ大統領は就任初日に“Putting America First In International Environmental Agreements”と題する大統領令に署名した。その中で、UNFCCCの下でのパリ協定からの脱退を速やかに国連に通告すること、UNFCCCの下でのあらゆる合意からの脱退を速やかに国連に通告すること、UNFCCCの下でのあらゆる資金提供公約を速やかに停止・撤回すること、国際環境合意における米国第一の目的のために必要な更なる取り組みを報告すること、等を指示した。そして、国連は米国トランプ政権からパリ協定を再び脱退するという通告を受けたことを明らかにし、正式な脱退は一年後の2026年1月27日になると発表した[11]。トランプ大統領は、2017年の第一次政権の際にもパリ協定からの脱退を表明し、2020年11月に米国は正式に脱退した。前回は協定の規定により協定発効時から実際の脱退完了まで4年かかったが、今回の脱退は1年で

発効することになること等から、米国脱退の影響は前回よりも甚大となるかもしれないと言う見方もある[12]。また、更にUNFCCC自体からの脱退のリスクも考えられる。2017年の脱退の際にもUNFCCCからの脱退が議論されたものの脱退には至らなかったが、今回の大統領令では“... the United States' withdrawal from any agreement, pact, accord, or similar commitment under the United Nations Framework Convention on Climate Change”とあり、これまでのUNFCCC下の取り組みを否定するような表現とも考えられ、UNFCCCからの脱退というリスクも否定できない[6]。最近の国際気候会議に米国の代表が欠席しているという報道もあり[13]、今後の気候変動交渉における米国不在の状況による影響が懸念される。

④　エネルギードミナンス政策

トランプ大統領は国際エネルギー戦略上の理念として、他国よりもエネルギー面で有利な立場にあることを指す「エネルギードミナンス」を掲げている。この「エネルギードミナンス」というコンセプトは、同氏の前回政権時にも提示されたもので、パリ協定脱退を表明した直後の2017年6月の演説では、“エネルギー独立に加え、エネルギードミナンスを目指す”と宣言した。当時の米国はエネルギーの純輸入国だったが、天然ガスや石油の輸出が拡大し、間もなく純輸出国になろうとしていた背景があり、エネルギー輸出により優位性・支配を確立することで、国内の雇用を生み出すと同時に、友好国・同盟国に真のエネルギー安全保障を与えると主張したものであった。2024年の大統領選で共和党の候補であったトランプ氏は、指名受諾演説の中で、“我々はエネルギードミナントとなり、自国だけでなく世界の他の国々にも供給することになる”と述べた。さらに、大統領選で勝利したトランプ氏は、当選後の声明で国家エネルギー会議（National Energy Council）の新設を表明し、“エネルギードミナンスにより、インフレを抑制し、中国とのAI競争に勝利し、世界中の戦争を終わらせるための米国の外交力を高めることができる”と、その位置付けについて述べた[6),14),15),16)]。そして、2025年2月14日、トランプ大統領は大統領令により、エネルギー政策の指令塔となる国家エネルギードミナンス評議会（National Energy Dominance Council）を設立した[5]。その中で、“我々はあらゆる形態の信頼性が高く手頃な価格のエネルギー生産を拡大することで、インフレを抑制し、経済を成長させ、高賃金の雇用を創出し、製造業における米国のリーダーシップを再確立し、AIにおいて世界を牽引し、世界中の戦争を終わらせるために商業および外交の手段を駆使して力により平和を取り戻さなくてはならない”、“原油、天然ガス等の豊かな国家資産を活用することにより、我々の最も美しい場所を保存・保護し、輸入への依存を減らし、経済を成長させ、それにより米国の赤字と債務を削減することができる”とし、これが米国をエネルギードミナントにするための政策であることが示された。今後、化石燃料を中心とする国産のエネルギー資源の開発、増産を加速して行くものと思われるが、一方で、各開発は民間ベースであるため、規制を取り除いたとしても、そもそも利益率の低い資源開発は進まないので、実際にどの程度の増産となるのかについては多様な見方がある。

(2) 米国の排出量推計の分析例

上野[6]では、米国務省の「第5回隔年報告書への補足文書[17]」で提示された分析に基づいて、IRAの見直し・撤回による米国のGHG排出量見通しの概算を示している。「第5回隔年報告書への補足文書」は、IRAおよび超党派インフラ法（BIL: Bipartisan Infrstructure Law、IIJAとして知られる）による排出への影響を評価したもので、マルチモデルの査読付き研究、政府文書での研究（文献18),19),20)）等のモデル分析結果を用いている。図 3.4.2-1は、米国の正味排出量の実績およびモデル分析による将来の推計を示す。青色の部分はIRAおよびIIJAが有りの場合の排出経路、赤色はIRAおよびIIJAが無しの場合の排出経路、緑色は2050年ネットゼロ排出と整合的な排出経路を示す。これに基づき、IRAを撤回できない場合、2030年に2005年比で33～41%減、2035年に42～50%減、またIRAのうち共和党支持者の間で特に不評なEV減税のみを撤回する場合（運輸部門はIRA無しの排出量、他部門はIRA有りの排出量と想定し）、2030年に2005年比で29～37%減、2035年に37～42%減と概算している。

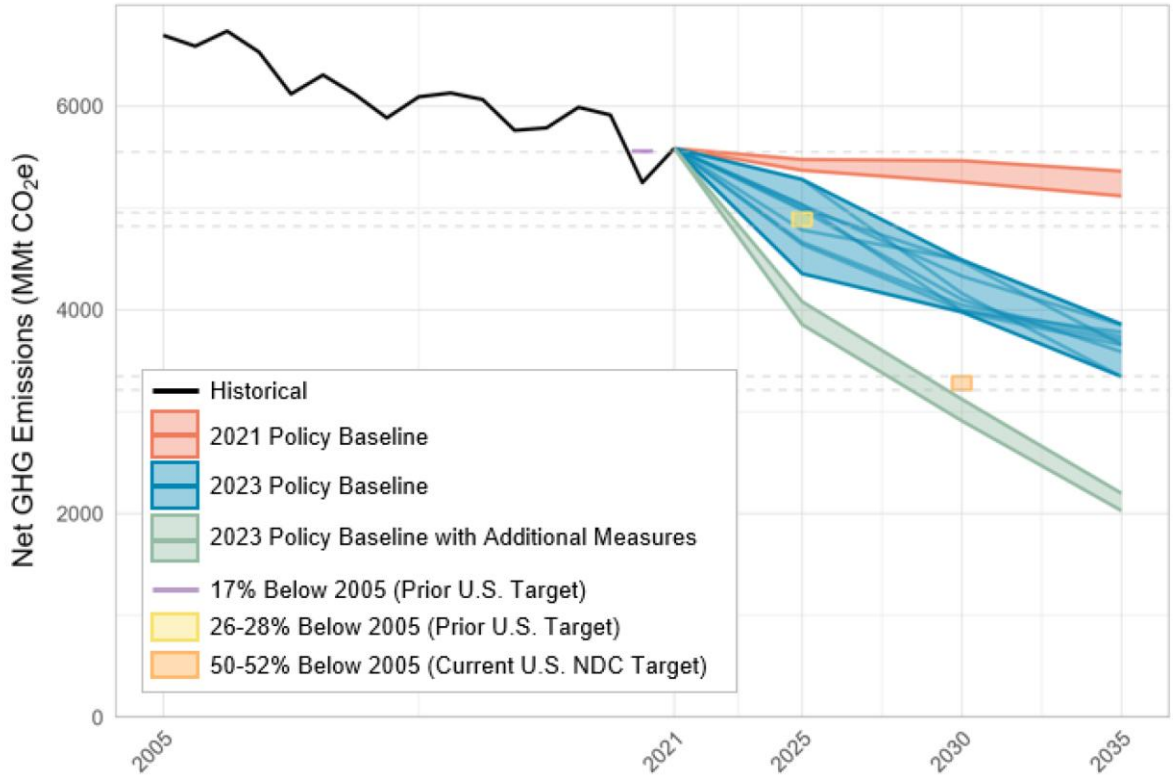


図 3.4.2-1 正味GHG排出経路（2005-2020年の実績値、2020-2035年の推計）
（出典）文献17)

2024年6月に発表された文献21)は、大統領選の結果が決まる前の分析だが、トランプ氏が選挙に勝利し大統領になった場合、バイデン氏の政策と比べて、2030年までに米国において40億トンが追加的に排出されることになる、としている。これは文献22)等の様々なモデリングの集約（文献18)）に基づく分析で、バイデン政権によるIRAを含む幾つかの気候政策による影響を含んでいる。40億トンとは、EUおよび日本を

合わせた年間排出量、あるいは 140 の低排出国の年間総排出量に匹敵する。図 3.4.2-2 は、バイデン政権下での気候公約の排出パス、および大統領選のそれぞれの候補者が勝利した場合の予測される排出パスを示す。バイデンシナリオ（青で示す部分）は、分析時点で実施中あるいは最終決定の段階にある全ての連邦政府による政策が継続すると仮定した場合の排出パスを示す。また、トランプシナリオ（赤で示す部分）は、バイデン政権下での IRA 等の主要な気候政策が撤廃された場合を想定している。化石燃料の推進やクリーンエネルギーの進展阻止のためにトランプ氏が採用すると考えられる方策等は考慮されていない。第二次トランプ政権が誕生すれば、米国は気候公約をはるかに達成できない可能性が高く、米国の排出量は 2030 年までに 2005 年比でほんの 28%減と予想され、一方、バイデン氏が再選されれば、2005 年比で約 43%となる、としている。そして、トランプシナリオでは、2030 年における米国の年間 GHG 排出量はバイデンシナリオより約 1GtCO$_2$eq、累積では約 4GtCO$_2$eq 高くなる。また、EPA が更新した炭素の社会的費用（Social Cost of Carbon）の推計（2030 年に$230/t-CO$_2$）[23]に基づくと、この追加的な 4GtCO$_2$eq により世界で 9,000 億ドル以上の気候被害がもたらされる、としている。

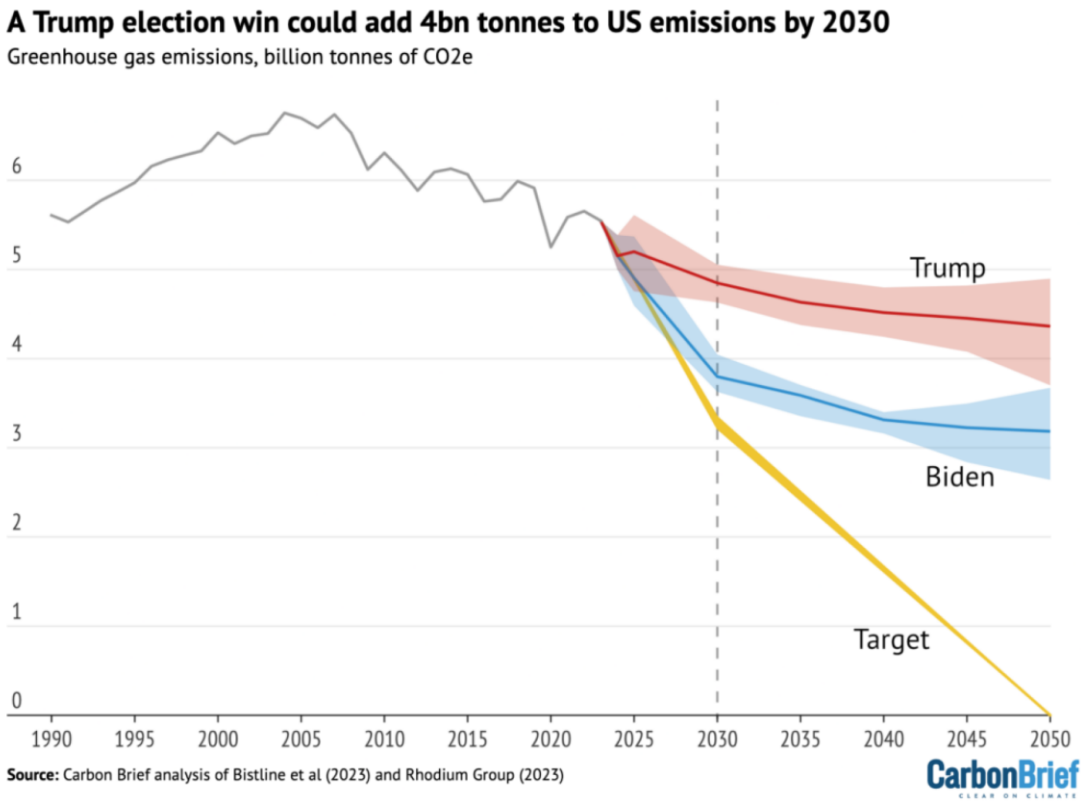


図 3.4.2-2　米国の気候公約および大統領選各候補が勝利した場合の排出パス
（出典）文献 21)

一方、連邦政府がパリ協定からの離脱を決定し後退的な気候政策を打っていることに反し、州、自治体、企業と言った非国家アクターが結集し、気候変動の解決に向け取り組んでいる動きもある。第一次トランプ政権がパリ協定から脱退した際に、気候

変動の解決を目指す州政府、企業、大学等が立ち上がり“We Are Still In”を立ち上げた。その後、2021 年の米国パリ協定復帰を機に“America Is All In”と名称を改め、活動を強化してきた。同ネットワークは、第二次トランプ政権がパリ協定からの再離脱を表明したことを受け、2025 年 2 月に、連邦政府の政策後退の状況下で気候アクションを進めるための提言を発表した[24]。その中では、Center for Global Sustainability (CGS)による分析に基づき、野心的な気候目標を達成するために非国家アクターの役割が重要であることを強調している。分析は、先導的な経済全体のモデルを用いて、連邦政府および非連邦組織による気候政策を表現し、可能性のある野心レベルのシナリオにおける米国の気候経路を描写している。図 3.4.2-3 は、各シナリオにおける正味 GHG 排出量の推計を示す。Non-Federal Leadership シナリオ（強化された非国家アクターによる政策と様々なレベルの連邦政府の気候政策後退を想定）の下で、米国は 2035 年までに 2005 年比 54～62%の排出削減を達成し、2035 年 NDC の達成が可能である、一方、Federal Rollbacks シナリオ（連邦政府が主要な気候規制や法令を撤廃し、非国家アクターが現行政策の実施を継続するが強化しないと想定）の場合、米国の 2035 年までの GHG 排出削減は 2005 年比 33～43%に留まる。

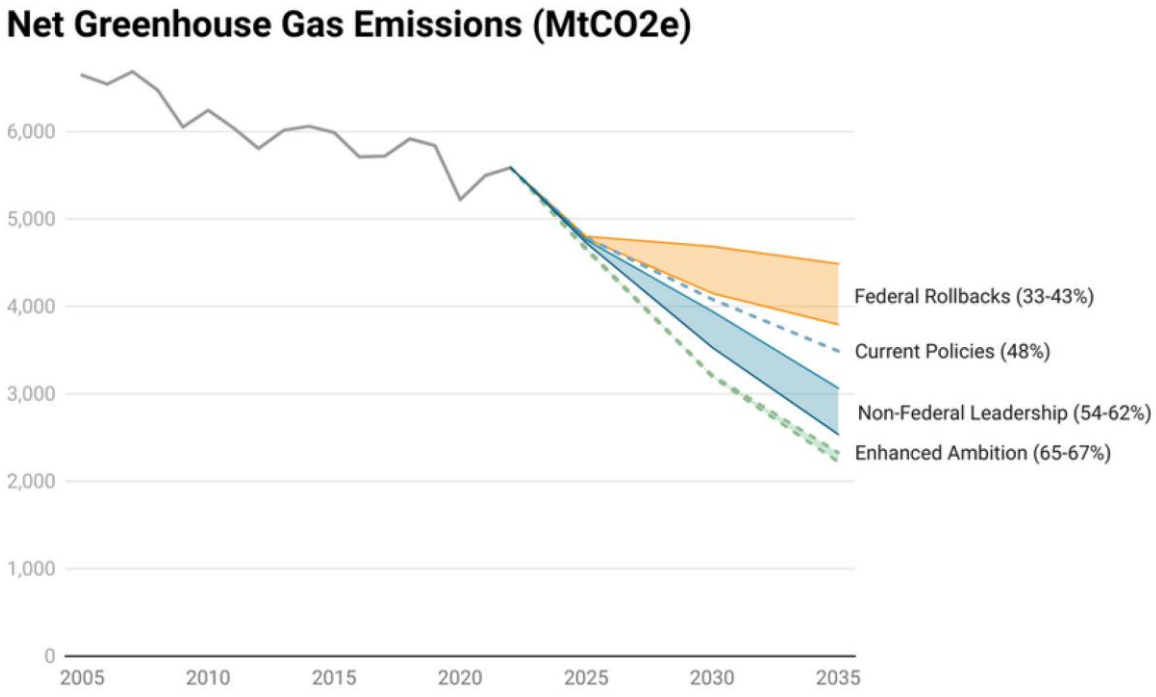


図 3.4.2-3 各シナリオにおける正味 GHG 排出量の推計（単位：$MtCO_2e$）
（注）排出実績データは EPA 2021 GHG inventory（GWP 100 を使用）に基づく
（出典）America Is All In[24]

(3) まとめ

2025 年 1 月 20 日に発足したトランプ政権は、大統領選挙中に掲げていた公約通り、民主党バイデン政権が進めた脱炭素に向けた取り組みを大幅に転換する方針や政策を

次々と打ち出している。具体的にどのような変化が起こり得るか、特に気候変動の分野で今後の GHG 排出への影響等について、引き続きその動向に注視が必要である。

参考文献（第 3.4.2 節に関するもの）

1) 古藤太平: 米国イン増え削減法成立と石油・天然ガス上流開発産業に対する影響、JOGMEC 記事 (2022)
2) 上野貴弘: 米国「インフレ抑制法案」における気候変動関連投資、電力中央研究所ディスカッションペーパー、SERC22009 (2022)
3) バイデン米政権、2035 年までに温室効果ガス 61～66%削減目標を発表、JETRO 記事、2024 年 12 月 23 日
4) United States of America 2035 NDC, submitted on 19/12/2024, UNFCCC NDC Resistry
5) The White House, https://www.whitehouse.gov/ （アクセス日: 2025 年 1 月 20 日、2 月 20 日）
6) 上野貴弘: 米国トランプ政権によるエネルギー・環境政策の見直しの行方（2025 年 1 月 30 日版）、電力中央研究所ディスカッションペーパー、SERC24005 (2025)
7) トランプ大統領、エネルギー関係で 5 本の大統領令に署名、規制の見直し・緩和を推進、JETRO 記事、2025 年 1 月 22 日
8) 74 FR 66496 - Endangerment and Cause or Contribute Findings for Greenhouse Gases Under Section 202(a) of the Clean Air Act, December 15. 2009, https://www.govinfo.gov/app/details/FR-2009-12-15/E9-29537
9) 米連邦議会第 119 会期始まる、ジョンソン下院議長が再選、トランプ氏勝利を認定、JETRO 記事、2025 年 1 月 7 日
10) IRA で拡大した米国気候変動対策市場、日本企業のビジネスは、JETRO 記事、2024 年 10 月 17 日
11) US to withdraw from climate deal on Jan. 27, 2026, says UN, Reuters, January 29, 2025
12) Trump's Paris climate exit will hit harder than in 2017, Reuters, January 22, 2025
13) US officials have been absent from global climate forums during Trump 2.0, The Guardians, February 25, 2025
14) 上野貴弘: トランプの「エネルギードミナンス」戦略 ―純輸出国の立場を活用 貿易交渉との一体化も―、電気新聞、2024 年 12 月 17 日
15) 上野貴弘; トランプ政権のエネ環境戦略 ―パリ協定は再加入交渉 輸出拡大は支配力促進―」、電気新聞、2017 年 7 月 5 日
16) Donald J. Trump, Remarks by President Trump at the Unleashing American Energy Event, June 29, 2017 https://trumpwhitehouse.archives.gov/briefings-statements/remarks-president-trump-unleashing-american-energy-event/
17) United States: 2023 Voluntary Supplement to the U.S. Fifth Biennial Report (2023)
18) John Bistline et al.: Emissions and Energy Impacts of the Inflation Reduction Act, Science Vol. 380 (2023)
19) U.S. Department of Energy: Technical Appendix: Investing in American Energy (2023)
20) Steinberg, Daniel C., et al.: Evaluating Impacts of the Inflation Reduction Act and Bipartisan Infrastructure Law on the U.S. Power System, National Renewable Energy Laboatory Techinical Report (NREL/TP-6A20-85242) (2023)

21) CarbonBrief: Anayisys – Trump election win could add 4bn tonnes to US emissions by 2030, 6/3/2024 (2024)
https://www.carbonbrief.org/analysis-trump-election-win-could-add-4bn-tonnes-to-us-emissions-by-2030/
22) Rhodium Group: Taking Stock 2023: US emissions projections after the Inflation Reduction Act (2023)
23) US Environmental Protection Agency (EPA): Report on the Social Cost of Greenhouse Gases – Estimates Incorporating Recent Scientific Advances (2023)
24) America Is All In: Advancing U.S. climate action under federal policy rollbacks (2025)
https://www.americaisallin.com/advancing-us-climate-action-under-federal-policy-rollbacks

3.4.3 欧州の動向

(1) 欧州の目標と現状

2021 年 7 月に公布された欧州気候法では「EU 全体の温室効果ガス排出量と除去量は、遅くとも 2050 年までに EU 内で均衡させ、その日までに排出量を正味ゼロにするものとし、それ以降は排出量マイナスを目指す（第 2 条 1 項）」ことが盛り込まれている。この 2050 年の目標は国際クレジットを使用することなく EU 域内で達成することが想定されている。欧州はその中間目標として 2030 年までに GHG を 1990 年比で少なくとも 55%削減を掲げており、欧州委員会はこの GHG 削減目標を達成するための政策を整備するため、2021 年 7 月に「Fit for 55（COM(2021) 550）」と呼ばれる政策パッケージを発表した。

また、欧州気候法ではパリ協定のもとで行われる第 1 回グローバルストックテイクから 6 か月以内に 2040 年までの中間目標を欧州気候法に追加する立法提案を作成しなければならないことを定めている。これに基づき 2024 年 2 月、欧州委員会は 2040 年までの EU の気候目標に関するコミュニケーション [1)]を発表し、2040 年までに GHG 排出量を 1990 年比で 90%削減するよう勧告した。

このような目標に対し、足元の GHG 排出はゆるやかな減少傾向にある。「気候行動 2024 進捗レポート [2)]」によると 2023 年の GHG 排出は 2022 年に比べて 8.3%減少（実質 GDP は＋0.5%）し、1990 年比で GHG 排出量を少なくとも 55%削減するという EU の 2030 年目標に向けた仮想的な直線的排出経路に概ね沿っているとしている（図 3.4.3-1）。

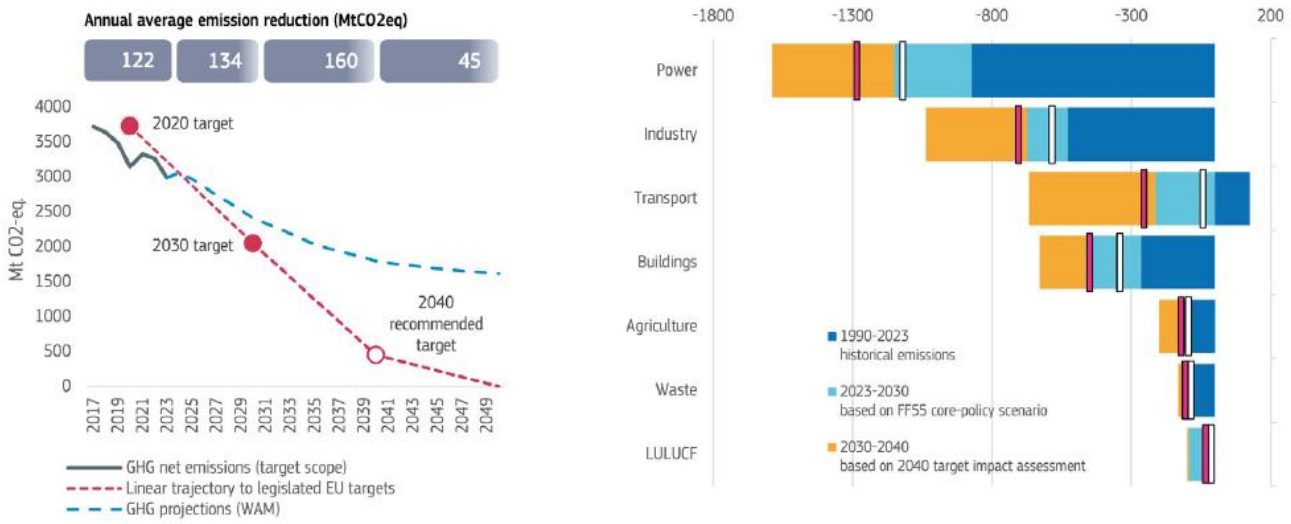


図 3.4.3-1 EU における GHG 排出経路とセクター別の排出

（出典）European Commission[2)]

今後、2030 年目標に向けて 134MtCO2-eq/年のペースで排出削減が必要となるが、2017～2023 年の年平均削減量は約 120MtCO2-eq であり、さらに大きな削減努力が必要である。

セクター別にみると運輸、建物、産業部門における排出削減が最大の課題となっている。欧州委員会が実施したインパクト評価ではこれらの部門で大幅な排出削減を見込んでいるが、これまでのところほとんど削減が進んでいない、もしくは想定している削減量を大幅に下回っている。また、農業部門は 2030 年までに期待される排出削減を達成できそうな傾向にあったが、近年は排出削減のペースが落ちており、今後、さらなる取り組みが必要と考えられている。

ネットゼロ目標実現に向けては CCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）と言われる炭素の回収、活用、貯留が重要になる。2024 年 3 月、欧州委員会は産業炭素管理に関するコミュニケーション [3)]（Communication on Industrial Carbon Management）を発表し、CO_2 回収、大気中から直接除去する技術、CO_2 を貯蔵したり利用したりする技術が 2040 年目標や 2050 年のネットゼロ排出目標にどのように貢献しうるのかの詳細を明らかにした。これによると EU の 2040 年目標達成には 2040 年までに約 2 億 8000 万トン、ネットゼロ目標を達成するには 2050 年までに約 4 億 5000 万トンの CO_2 を回収する必要があるとしている（図 3.4.3-2）。

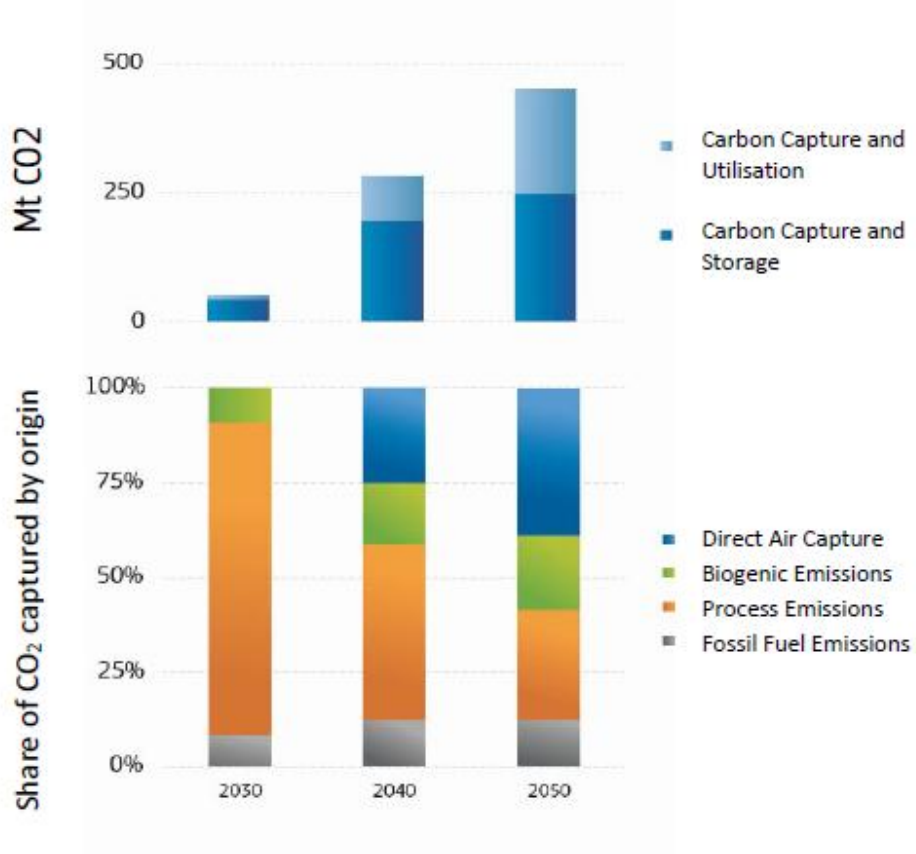


図 3.4.3-2 EU における CO2 回収・貯留の規模（上）と回収される CO2 発生源の割合（下）

（出典）European Commission[3)]

(2) 欧州の問題意識と政策動向

欧州は野心的な気候目標達成に向けて取り組んでいるが、近年はその弊害が顕在化するようになり、経済成長とのバランス、競争力の確保に腐心している様子がうかがえる。

a. 2024-2029 年戦略アジェンダ

2024 年 6 月 6 日から 9 日にかけて、欧州議会選挙（定員 720、任期 5 年）の投票が EU 各国で実施され、極右・ポピュリズム政党（アイデンティティー・民主党）が票を伸ばし、中道右派（欧州人民党）と中道左派（社会民主進歩同盟）は安定的に票を獲得したものの緑の党が失速した（図 3.4.3-3）。

その後、6 月 27 日には欧州理事会が戦略アジェンダ（Strategic agenda 2024-2029）を採択し、「自由で民主的な欧州（A free and democratic Europe）」、「強く安全な欧州（A strong and secure Europe）」、「繁栄し競争力のある欧州（A prosperous and competitive Europe）」という 3 つの柱からなる今後 5 年間の方針を示した。気候政策については、3 つ目の柱の中で「2050 年までの気候変動中立化への道筋において、私たちは現実的であり、未来の市場、産業、質の高い雇用を創出するために、グリーンとデジタルの移行の可能性を活用する」、「エネルギー転換を加速させ・・・豊富で安価なクリーン

エネルギーの供給を確保する。そのためには、あらゆるネットゼロ・低炭素ソリューションによる野心的な電化と、送電網、蓄電、相互接続への投資が必要となる」ことが盛り込まれている。これまで欧州では再生可能エネルギーが偏重されていたが、より現実的、技術中立的な形で目標を達成しようとする方向にシフトしつつあり、欧州の政治的バランスの変化がその一因になっていると考えられる。

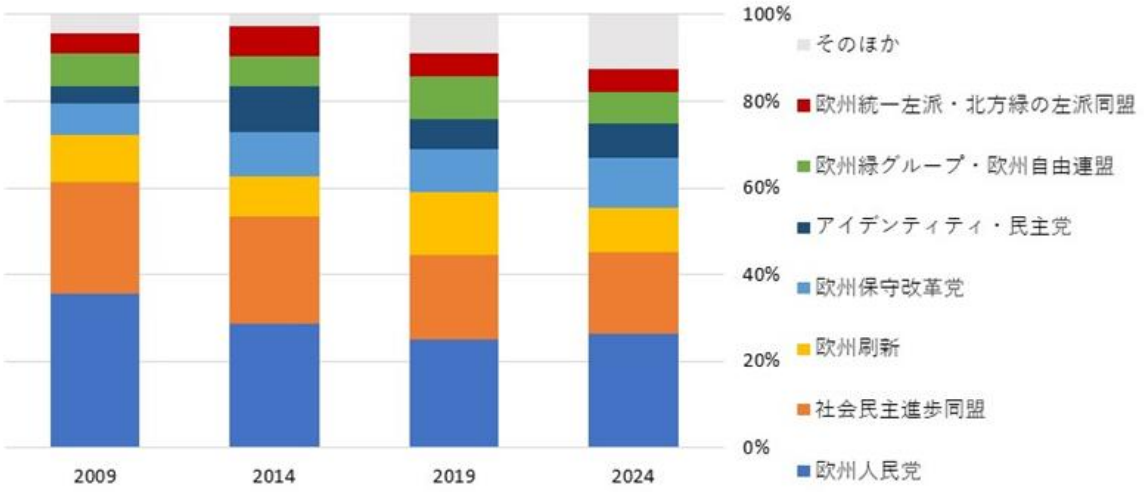


図 3.4.3-3 欧州議会の党派別議席シェア推移

b. EUROPE'S CHOICE: 2024-2029 年政治指針

7 月 18 日にはフォンデアライエン欧州委員会委員長の続投（2024-2029 年）が決まり、今後 5 年間の政治指針"EUROPE'S CHOICE"[4]が示された。この指針は概ね欧州理事会の戦略アジェンダに沿ったものであるが、企業の競争力向上、ビジネス環境整備に向けたより具体的な対策が盛り込まれている。欧州グリーンディールが企業に負担感をもたらしているという問題意識から、新たに「クリーン産業ディール」を打ち出し、規制の簡略化や許認可の迅速化、脱炭素化技術の域内生産や導入支援策などによる競争力強化を図る方向性が示された。

c. ドラギレポート

2024 年 9 月には欧州中央銀行総裁などを務めたマリオ・ドラギ氏が「欧州競争力の未来 [5]」と題したレポート、通称「ドラギレポート」を公表した。これは欧州委員会の依頼を受けて作成されたもので、EU の競争力強化に向けた政策提言がまとめられている。「欧州は経済成長の鈍化が顕著であり、これまで成長率を高めるためのさまざまな戦略が生まれては消えていったが、その傾向は変わっていない」という問題意識のもと、米国や中国と比較しながら現状を分析し、課題を特定し、解決策を提示している。

EU は高水準の社会的包摂、カーボンニュートラル、地政学的プレゼンスの向上など、さまざまな野望を掲げているが、経済成長なくしてこれらを実現することは難しい。しかし、EU の経済成長は過去 20 年間一貫して米国を下回っており、中国も急速

に追い上げている。米欧の GDP 格差は 2002 年時点で 17%であったが、2023 年には 30%に拡大し、中国の GDP は 2020 年頃に欧州を追い越している（図 3.4.3-4）。この主な要因は生産性の違いに起因し、米国との一人当たり GDP（購買力平価（PPP）ベース）格差の約 70%は EU の生産性の低さによって説明できるとしている。

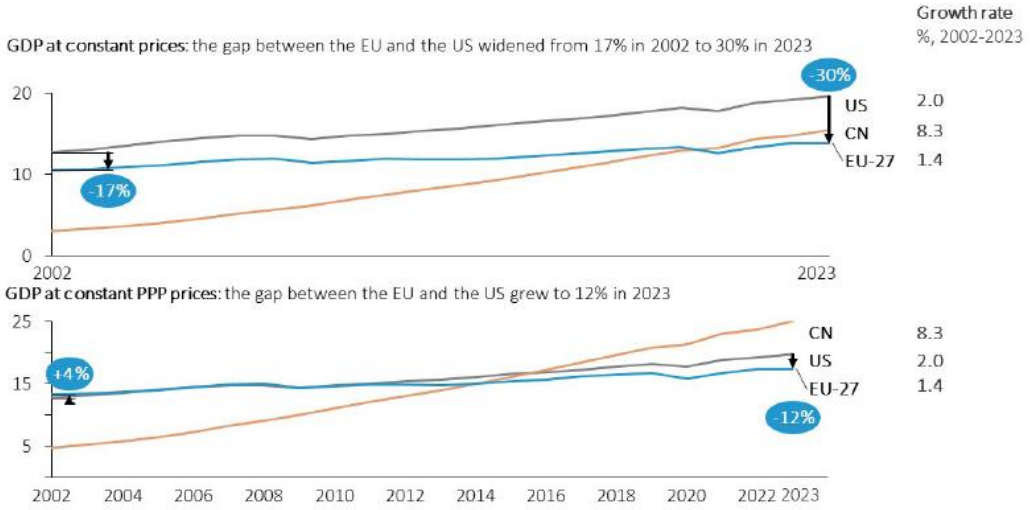


図 3.4.3-4 GDP の推移比較

（出典）The future of European competitiveness[5)]

持続可能な成長のため、欧州には 3 つの変革が必要としている。1 つはイノベーションを加速させ、新たな成長エンジンを見出すこと。EU の競争力は現在、外需（特に中国）の低迷と中国企業による競争圧力の高まりという 2 つの側面から圧迫されており、世界貿易における EU のシェアは特にパンデミックの発生以降、顕著に低下している（図 3.4.3-5）。イノベーションの加速は、EU の生産性上昇を促し、家計所得の伸びと内需の拡大につながる。

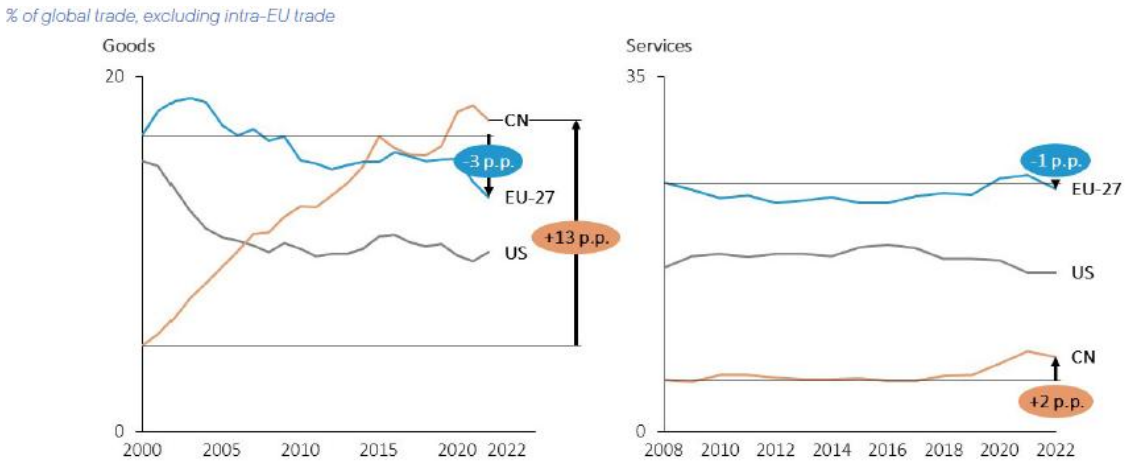


図 3.4.3-5 世界貿易に占め財とサービスのシェア

（出典）The future of European competitiveness[5)]

2 つ目は脱炭素化と循環型経済への移行を継続しながら、高いエネルギー価格を引き下げること。ロシアのウクライナ侵攻により EU 企業は米国の 2～3 倍の電力価格と 4～5 倍の天然ガス価格に直面しており（図 3.4.3-6）、クリーン技術や電気自動車などは中国との競争が激しくなっている（図 3.4.3-7）。エネルギーから産業まで、脱炭素化のあらゆる側面について首尾一貫した戦略を策定する必要がある。3 つ目は他国への依存度を低下させ、自国の安全保障を高めること。EU は重要な鉱産物の多くを中国に依存しており、米国との安全保障環境も変わりつつある。欧州のエネルギーシステムの脱炭素化は、自然エネルギーや原子力など発電コストの低いクリーンなエネルギー源の大量導入につながり、脱炭素化は、欧州がエネルギー価格を引き下げ、クリーン技術で主導権を握ると同時に、エネルギー安全保障を強化する機会を提供するとしている。

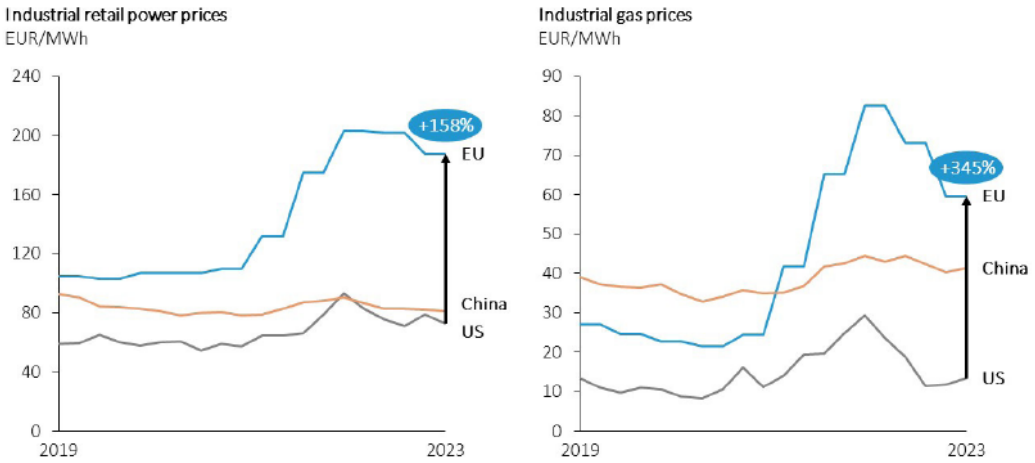


図 3.4.3-6 産業用電力価格（左）とガス価格（右）

（出典）The future of European competitiveness[5)]

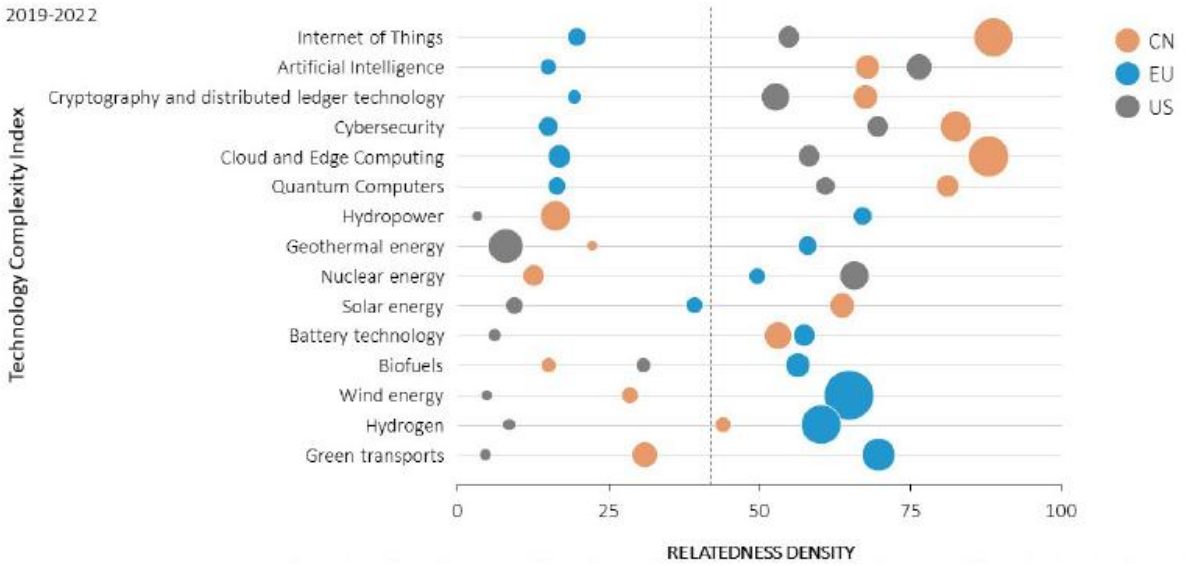


図 3.4.3-7 デジタルおよびグリーン技術における EU のポジション

（出典）The future of European competitiveness[5)]

EU のイノベーションを阻んでいる要因として多様な規制による企業負担の増大が指摘されており、この解決策として規制の簡素化による企業負担の軽減が提言されている。規制簡素化を担当する欧州委員会副委員長を任命し、増え続ける規制の合理化や重複の解消を進めつつ、各種の報告義務を 25%削減し、中小企業を対象とするものは 50%削減を目指すべきとしている。

d. ブダペスト宣言

11 月 8 日、欧州理事会はハンガリーのブダペストで非公式会合を開催し、欧州の産業競争力強化に関するブダペスト宣言を採択した。この宣言はドラギレポートの提言を欧州首脳があらためて確認した形になっており、研究開発強化、防衛力の強化、デジタルトランスフォーメーション、エネルギー戦略、気候政策など内容は多岐にわたる。その中の 1 つに規制の簡素化が盛り込まれており、企業にとって明確でシンプルかつスマートな規制の枠組みを確保し、特に中小企業にとっての行政、規制、報告の負担を大幅に軽減することが必要であり、報告義務を 25%削減するための具体的な提案を 2025 年前半に行うことを欧州委員会に求めている。

e. 競争力コンパス

2024 年 12 月に欧州委員会の第 2 次フォンデアライエン体制が発足し、2025 年 1 月に在任期間中の政策ロードマップとなる「競争力コンパス [6)]」が発表された。ドラギレポートの提言を踏まえ、①イノベーションギャップの是正、②脱炭素化と競争力、③対外依存の軽減と安全保障の強化の 3 分野、及び分野横断事項に該当する具体的な政策・法案とその発表時期を示している（表 3.4.3-1、表 3.4.3-2）。

表 3.4.3-1 競争力コンパスに含まれる政策、法案（Part 1）

分野	政策・法案	発表時期
イノベーションギャップの是正	Start-up and Scale-up Strategy	2025 Q2
	28th regime	2025 Q4-2026 Q1
	European Innovation Act	2025 Q4-2026 Q1
	European Research Area Act	2026
	AI Factories Initiative/ Apply AI, AI in Science, and Data Union Strategies	2025 Q1/2025 Q3
	EU Cloud and AI Development Act	2025 Q4-2026 Q1
	EU Quantum Strategy/ a Quantum Act	2025 Q2/2025 Q4
	European Biotech Act and Bioeconomy Strategy	2025-2026
	Life Sciences Strategy	2025 Q2
	Advanced Materials Act	2026
	Space Act	2025 Q2
	Review of the Horizontal Merger Control Guidelines	-
	Digital Networks Act	2025 Q4
脱炭素化と競争力	Clean Industrial Deal and an Action Plan on Affordable Energy	2025 Q1
	Industrial Decarbonisation Accelerator Act	2025 Q4
	Electrification Action Plan and European Grids Package	2026 Q1
	New State Aid Framework	2025 Q2
	Steel and metals action plan	2025
	Chemicals industry package	2025 Q4
	Strategic dialogue on the future of the European automotive industry and Industrial Action Plan	2025 Q1
	Sustainable Transport Investment Plan	2025 Q3
	European Port Strategy and Industrial Maritime Strategy	2025
	High Speed Rail Plan	2025
	Carbon Border Adjustment Mechanism Review	2025
	Circular Economy Act	2026 Q4
	Vision for Agriculture and Food	2025 Q1
	Oceans Pact	2025 Q2
	Amendment of the Climate Law	2025

（出典）European Commission[6)]

表 3.4.3-2 競争力コンパスに含まれる政策、法案（Part 2）

分野	政策・法案	発表時期
対外依存の軽減と安全保障の強化	Conclude and implement ambitious trade agreements, Clean Trade and Investment Partnerships	-
	Trans-Mediterranean Energy and Clean Tech Cooperation initiative	2025 Q4
	Joint purchasing platform for Critical Raw Minerals	2025 Q2-3
	Revision of directives on Public Procurement	2026
	White Paper on the Future of European Defence	2025 Q1
	Preparedness Union Strategy	2025 Q1
	Internal Security Strategy	2025 Q1
	Critical Medicines Act	2025 Q1
	European Climate Adaptation Plan	2026
	Water Resilience Strategy	2025 Q2
分野横断	Omnibus simplification and definition of small mid-caps	26/2/2025
	European Business Wallet	2025
	Single Market Strategy	2025 Q2
	Revision of the Standardisation Regulation	2026
	Savings and Investments Union	2025 Q1
	Next MFF, including Competitiveness Fund and a Competitiveness Coordination Tool	2025
	Union of Skills	2025 Q1
	Quality jobs roadmap	2025 Q4
	Skills Portability Initiative	2026

（出典）European Commission[6)]

EU は加盟国 27 か国により構成され、企業は EU 域内で事業をしようとすると加盟国ごとに異なる税制、労働法、会社法、倒産法などへの対応が必要となり、事業拡大の足かせとなっている。そのため、EU の 27 加盟国とそれぞれの国内法体系と並存する全域共通の選択可能な法的枠組みとして第 28 番目の法制度（28th regime）が提案されている。

気候変動関連のものとしては、国境炭素調整（Carbon Border Adjustment Mechanism）の見直しのほか、規制の簡素化に向けて 2025 年 2 月にサステナブルファイナンス開示規則（Sustainable Finance Disclosure Regulation）やデューデリジェンス（Corporate Sustainability Due Diligence Directive）、タクソノミーをカバーするオムニバスパッケージの第 1 弾を発表することが記載されている。

f. オムニバスパッケージ、クリーン産業ディール

2025 年 2 月、欧州委員会は EU の規則を簡素化し、競争力を高め、さらなる投資を促すための政策パッケージ、いわゆる「オムニバスパッケージ [7),8)]」、及び競争力強化と脱炭素を両立し、経済成長を目指す政策文書「クリーン産業ディール [9)]」を発表した。

オムニバスは「包括的な」という意味で、サステナブルファイナンス報告、サステナブルデューデリジェンス、EU タクソノミー、炭素国境調整メカニズム、欧州投資プログラムなど関連する広範囲な法律をカバーしている。なお、タイトルにある Directives (EU) 2022/2464 は企業サステナビリティ報告指令（Corporate Sustainability Reporting Directive: CSRD）、Directives (EU) 2024/1760 は EU コーポレート・サステナビリティ・デューディリジェンス指令（Corporate Sustainability Due Diligence Directive: CSDDD）に該当する。CSRD については比較的規模の小さい企業を義務報告対象から除外し、それによりサプライチェーンの中小企業の報告負担を軽減すること、EU タクソノミーについても報告義務の負担を軽減すること、CSDDD についてもデューデリジェンスの要求事項を簡素化することが提案されている。CBAM についても報告対象事業者を約 90%削減し、多くの小規模事業者の報告負担を軽減するとしている。これらの施策により約 63 億ユーロ/年の行政コストが削減されると見積もられ、この法案は今後、EU 理事会と欧州議会で審議されることになる。

クリーン産業ディールは脱炭素化を加速し、循環型経済を推進するために主に 2 つのセクターに焦点を当てている。1 つは、高いエネルギーコスト、不公平な国際競争、複雑な規制に直面しているエネルギー集約産業、もう 1 つは産業変革、競争力強化、脱炭素化を推進するドライバーとなるクリーン技術であり、それぞれに対する支援策に重点が置かれている。

参考文献（第 3.4.3 節に関するもの）

1) European Commission, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Securing our future Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society (2024) COM(2024) 63 final
2) European Commission. “Progress Report 2024 Climate Action” (2024)
3) European Commission, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, Towards an ambitious Industrial Carbon Management for the EU (2024) COM(2024) 62 final
4) Ursula von der Leyen. EUROPE’S CHOICE- POLITICAL GUIDELINES FOR THE NEXT EUROPEAN COMMISSION 2024−2029 (2024)
5) Mario Draghi. The future of European competitiveness – A competitiveness strategy for Europe (2024)

6) European Commission, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THECOUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, A Competitiveness Compass for the EU (2025) COM(2025) 30 final
7) European Commission, Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directives (EU) 2022/2464 and (EU) 2024/1760 as regards the dates from which Member States are to apply certain corporate sustainability reporting and due diligence requirements. (2025) COM(2025) 80 final
8) European Commission, Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directives 2006/43/EC, 2013/34/EU, (EU) 2022/2464 and (EU) 2024/1760 as regards certain corporate sustainability reporting and due diligence requirements. (2025) COM(2025) 81 final
9) European Commission, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS - The Clean Industrial Deal: A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation (2025) COM(2025) 85 final

3.5 国内外の再生可能エネルギーの動向

3.5.1 世界における再生可能エネルギーの導入状況

パリ協定において、産業革命前からの世界全体の気温上昇を 2℃さらには 1.5℃に抑えるという長期目標が掲げられたのを受け、多数の国・地域が 2050 年や今世紀後半に温室効果ガス排出量のネットゼロを目指すことを表明している。また、2023 年に開催された COP28 の合意文書では、2030 年までに世界全体の再エネ容量を現状の 3 倍にする目標が明記された（文献 1)）。これらの目標実現に向けた有効な手段としての再生可能エネルギーへの期待が高まっている。本報告では、主に 2023 年までの実績データを基に、国内外における長期的な再エネ導入の状況を報告する。

(1) 世界全体の再生可能エネルギー導入の概観

図 3.5.1-1 に、2015～2023 年における世界全体の発電設備容量（ストック）の推移を示す。世界の再生可能エネルギー発電容量は、2015 年に約 2,000GW 程度まで増加し、石炭火力の発電容量を超えて以来、順調に増加し、2021 年には 3,000GW を越えるまでに成長した。2022 年までは前年比 10%前後の増加だったが、2023 年には前年比 17%増となり 4,000GW を超えた。図 3.5.1-2 は、2010 年および 2023 年における世界の発電電力量に占める主な燃料源の割合を示す。再エネの世界全体の発電電力量に占める割合は、2010 年には 20%だったが、2023 年には 30%となった。

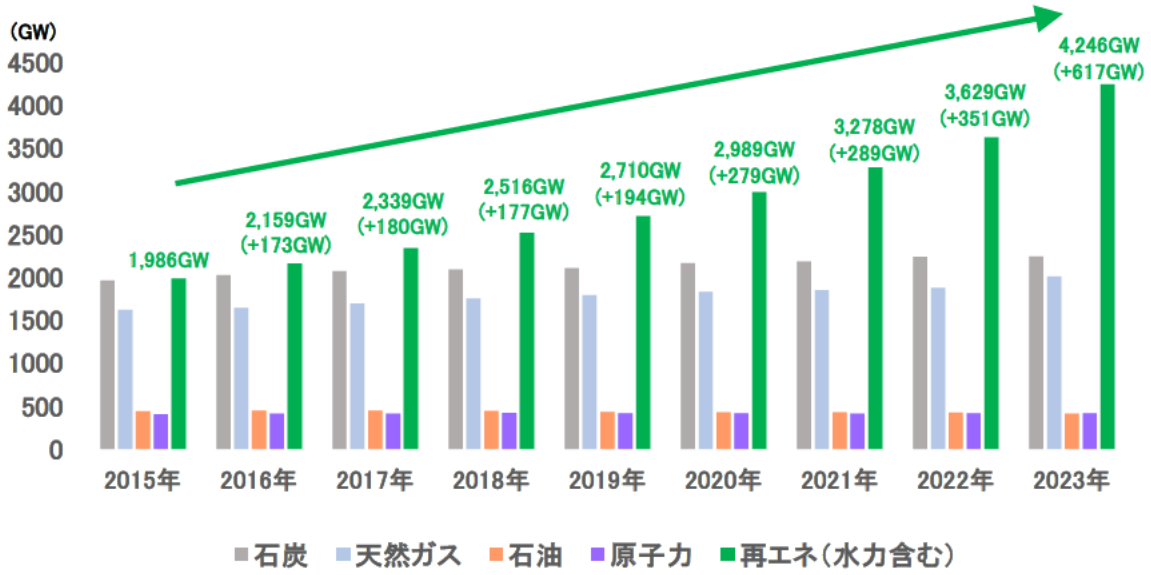


図 3.5.1-1 2015～2022 年における世界全体の発電設備容量（ストック）
（IEA, World Energy Outlook 2017～2024[2)-9)]より作成）

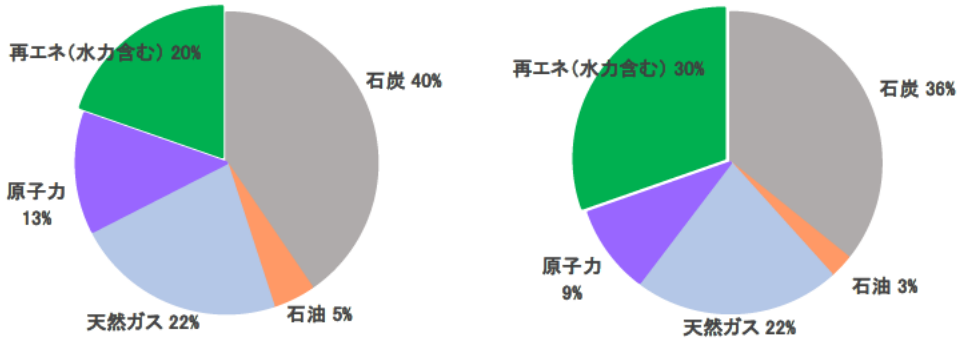


図 3.5.1-2 世界の発電電力量に占める燃料源の割合（左: 2010 年、右: 2023 年）
（IEA, World Energy Outlook 2024[9)]より作成）

図 3.5.1-3 と図 3.5.1-4 はそれぞれ、IRENA による 2023 年の世界の再生可能エネルギー発電容量における燃料源の割合と、2018-2023 年の世界の再生可能エネルギー発電容量の推移および 2023 年導入容量を示す。この統計によると、2023 年の世界の再生可能エネルギー容量は、3,870GW に達し、太陽光が水力を抜いて最大のシェアを占めた。2023 年に追加された再生可能エネルギー全体の設備容量は、473GW（前年比+13.9%）で、このうち太陽光は前年比+32.2%となる 346GW が導入された。また、図 3.5.1-5 にも示すように、太陽光が容量拡大をリードし続けている。

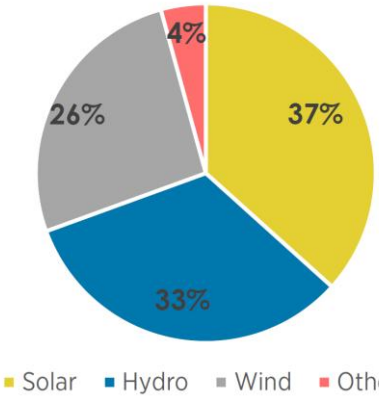


図 3.5.1-3　2023 年の世界の再生可能エネルギー発電容量における燃料源の割合

（出典）IRENA[10)]

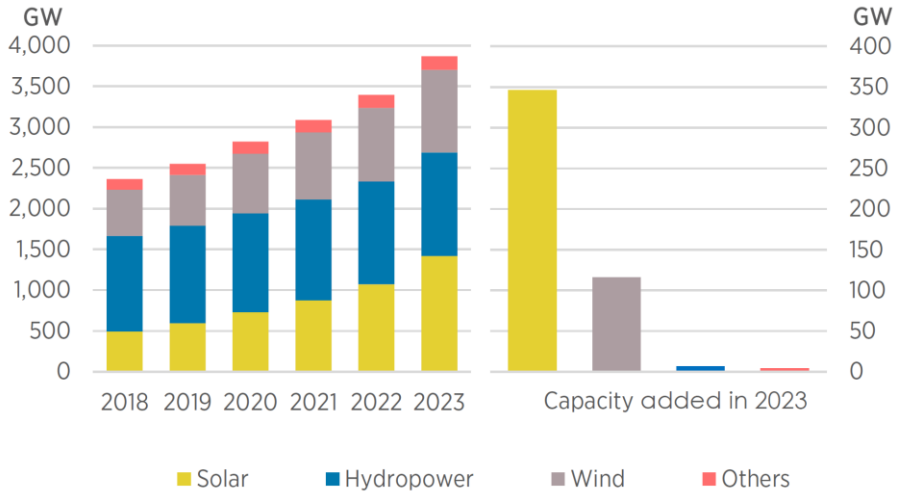


図 3.5.1-4　2018～2023 年の世界の再生可能エネルギー容量の推移および 2023 年導入容量

（出典）IRENA[10)]

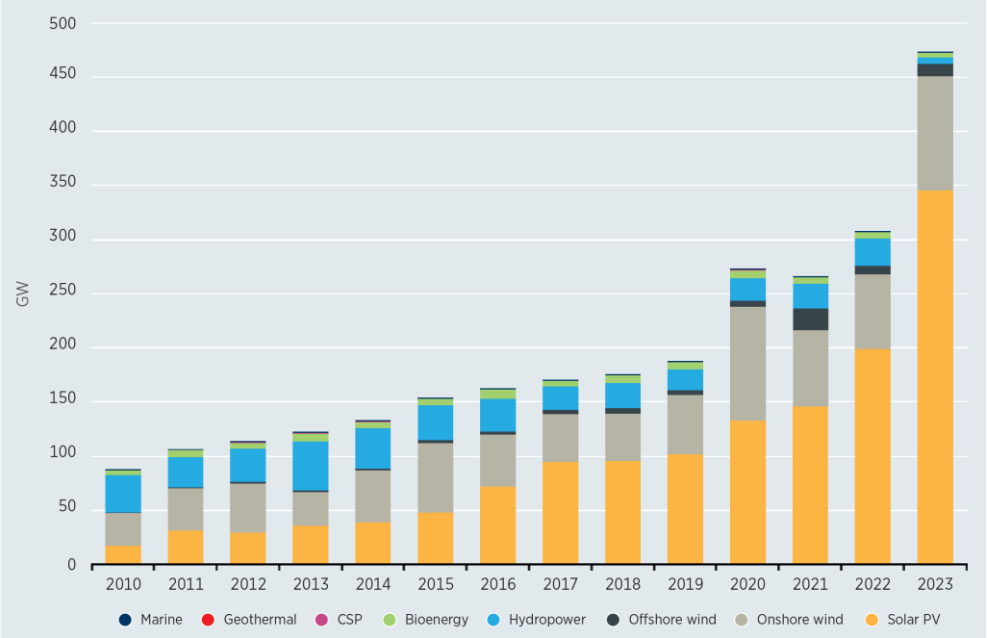


図 3.5.1-5　2010～2023 年における世界の再生可能エネルギー導入容量の推移

（出典）IRENA[11)]

(2) 世界の国別導入量

特に成長の著しい太陽光発電（PV）と風力発電について、世界の動向を整理する。

① 太陽光発電（PV）

図 3.5.1-6、図 3.5.1-7 はそれぞれ、IEA の統計による、2013～2023 年における世界の太陽光発電（PV）の年間導入容量の推移と、2023 年の世界の PV 年間導入容量について導入量の多い国別の割合を示している。また、図 3.5.1-8 は、世界の太陽光発電（PV）の 2023 年までの累積導入容量の国別割合を示す。2023 年の太陽光発電（PV）の年間導入容量は少なくとも 456.0GW と推計され、2022 年の 2 倍近くの容量が新たに導入された。成長の大部分は中国によるもので、中国国家エネルギー（NEA）によると 235.0～277.2GW が導入された。これは世界全体の 60%以上を占め、同国の累積 PV 導入容量は 691.2GW ほど（少なくとも 649.0GW）となった。国としては米国が 2 位で、成長が緩やかであった 2021 年と 2022 年の後に 50%近い増加となる 33.9GW が導入され、累積導入容量は 177.3GW となった。次にドイツ、インドと続き、それぞれ 15.0GW、13.0GW を導入し、累積導入容量はそれぞれ 82.3GW、92.6GW となった。またブラジルは昨年までの数年に見られたような高成長ではなかったものの、2023 年に 12.4GW を導入し、累積では 37.8GW となった。2023 年までの世界の累積 PV 導入量は 1,642.0GW に到達した。また、同統計では 2023 年の世界 PV 導入容量における上位 10 か国が全体の 84%を占めており、世界 PV 市場が限られた国により牽引されていることが示唆される。

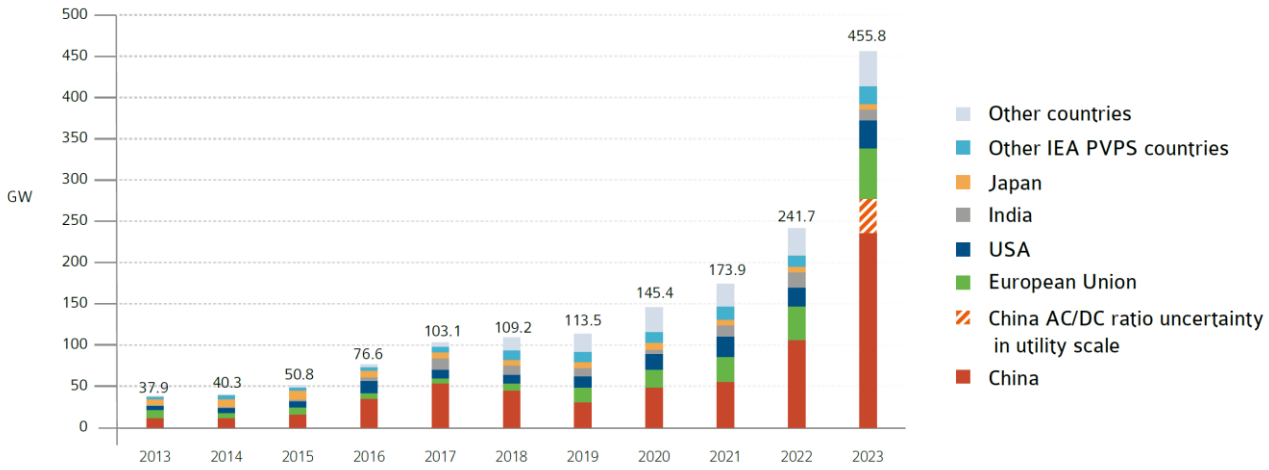


図 3.5.1-6　2013～2023 年の世界の太陽光発電（PV）の年間導入容量の推移

（出典）IEA[12)]

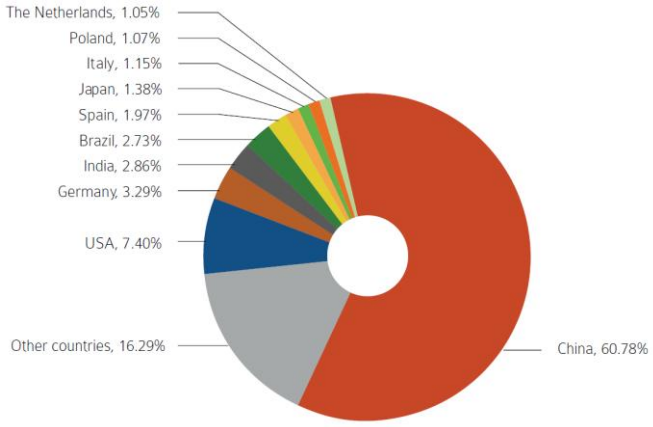


図 3.5.1-7　世界の太陽光発電（PV）の 2023 年における年間導入容量の国別割合

（出典）IEA[12)]

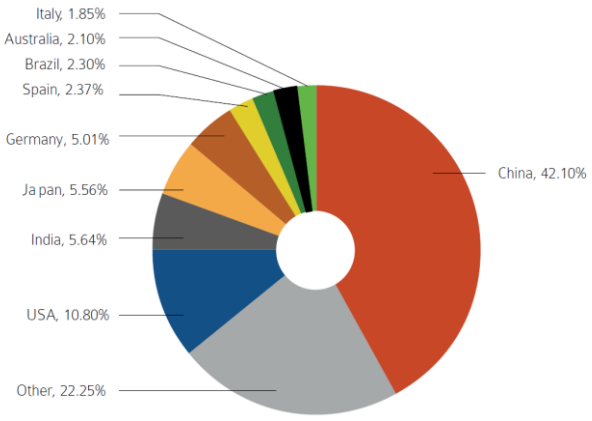


図 3.5.1-8　世界の太陽光発電（PV）の 2023 年までの累積導入容量の国別割合

（出典）IEA[12)]

② 風力発電

Global Wind Energy Council のレポート[13]によると、2023 年、世界では 116.6GW の風力発電容量が追加された。これは、2022 年比 50%以上の増加であった。図 3.5.1-9 に、世界の風力発電（陸上、洋上）の 2019～2023 年における年間導入容量を示す。陸上風力発電の導入容量は 100GW を越え、洋上風力発電は 11GW 近くが導入され、それぞれ史上最高と 2 番目の導入容量となった。図 3.5.1-10 には世界の風力発電の 2023 年の年間導入容量の地域別および上位 10 か国の割合を示す。中国とインドでの力強い回復により、アジア太平洋地域の世界市場に占める割合は、2022 年比 15%増となる 71%まで成長した。2 番目の市場である欧州では、導入容量 18.3GW のうち 16.2GW が EU-27 域内におけるもので史上最高となったが、欧州全体が世界に占める割合は 2022 年より 9%減少し 16%であった。北米が 3 番目を維持したが、米国での陸上風力導入が 2014 年以来の最低レベルまで落ち込んだ影響で世界でのシェアは 5%減少した。国別では、2023 年の風力発電導入容量の上位 5 か国は中国、米国、ブラジル、ドイツ、インドで、これらの 5 か国で全体の 80%を占めた。上位 5 か国が占める割合は、前年よりも 9%上がったが、それは中国での世界市場におけるシェアが急増したことに因る。

図 3.5.1-11 は、世界の風力発電（陸上、洋上）の 2023 年までの累積導入容量の推移を示す。2023 年に風力発電の累積導入容量は世界全体で 1,021GW となった（前年比+13%）。上位 5 か国は、変わらず中国、米国、ドイツ、インド、スペインで、これら 5 か国で 2023 年時点の世界の風力発電累積導入容量の 72%を占めた。

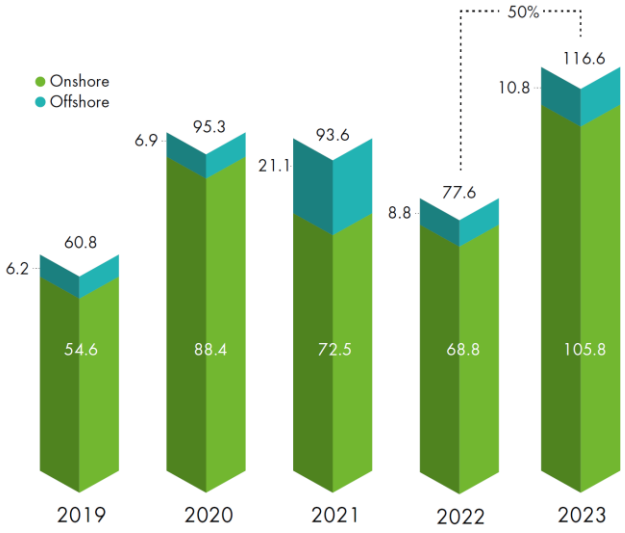


図 3.5.1-9 世界の風力発電（陸上・洋上）の 2019～2023 年の年間導入容量（GW）
（出典）GWEC[13]

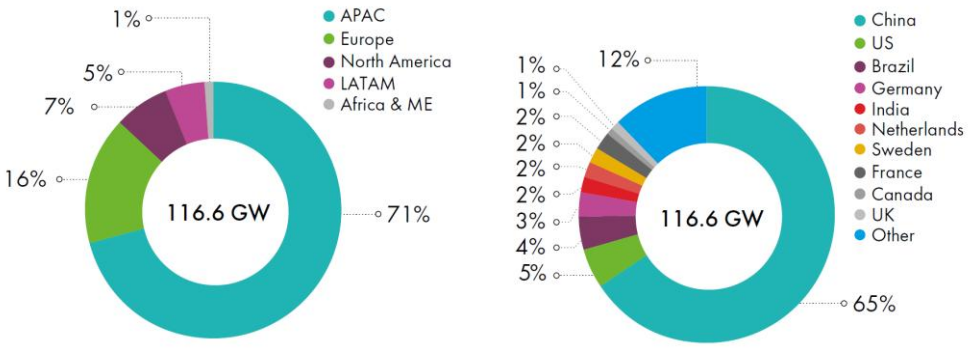


図 3.5.1-10　世界風力発電の 2022 年の導入容量の地域別（左）および上位 10 か国（右）の割合

（出典）GWEC[13)]

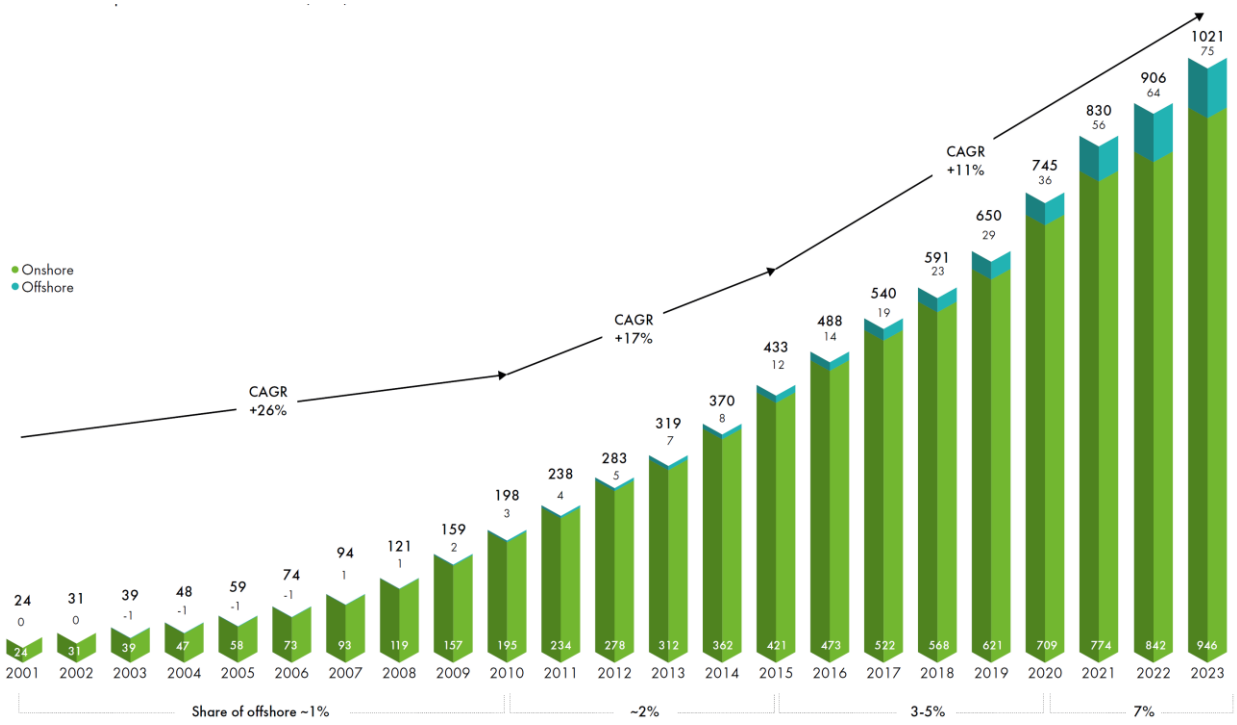


図 3.5.1-11　世界の風力発電の 2023 年までの累積導入容量の推移（GW）

（出典）GWEC[13)]

(3) 再生可能エネルギーのコスト動向

IRENA[11)]は約 23,372 件のプロジェクトから収集した Renewable Cost Database に基づき、再エネ発電技術のコストやパフォーマンスに関する分析を行っている。図 3.5.1-12 は、世界の各種再生可能エネルギーの 2010 年と 2023 年における LCOE（Levelized Cost of Electricity）を示す。太陽光は 2010 年以来、最も急速な価格低下をしている。事業用 PV の LCOE は 2010 年の 0.460 USD(2023USD)/kWh から 2023 年の 0.044 USD(2023USD)/kWh と 90%低下した。このコスト低下が起こった期間に、世界の PV 累積容量（事業用および住宅用）は、2010 年に 40GW から 2023 年末には 1,412GW へと飛躍的に増加した。LCOE の低下は主にモジュール価格の低下に因るところが大き

く、2009 年 12 月から 2023 年 12 月までで約 93%下がった。また、陸上風力発電の LCOE は 2010 年の 0.111 USD(2023USD)/kWh から 2023 年には 0.033 USD(2023USD)/kWh と 70%低下したが、その理由として、風力タービンコストの低下とタービン技術向上による設備利用率の上昇が挙げられる。洋上風力発電の LCOE については、2010～2023 年に 63%低下（2010 年に 0.203 USD(2023USD)/kWh から 2023 年に 0.075 USD(2023USD)/kWh）した。

このように、均等化発電原価を表す LCOE は低減して来たが、一方、太陽光や風力といった変動性再生可能エネルギー（VRE）の比率が増えていくと、電力システム全体を安定させるためのコストも追加的に生じる。こうした電力システム全体のコストや、外部費用などを考慮した発電コストに関する議論も行われている（文献 14)）。

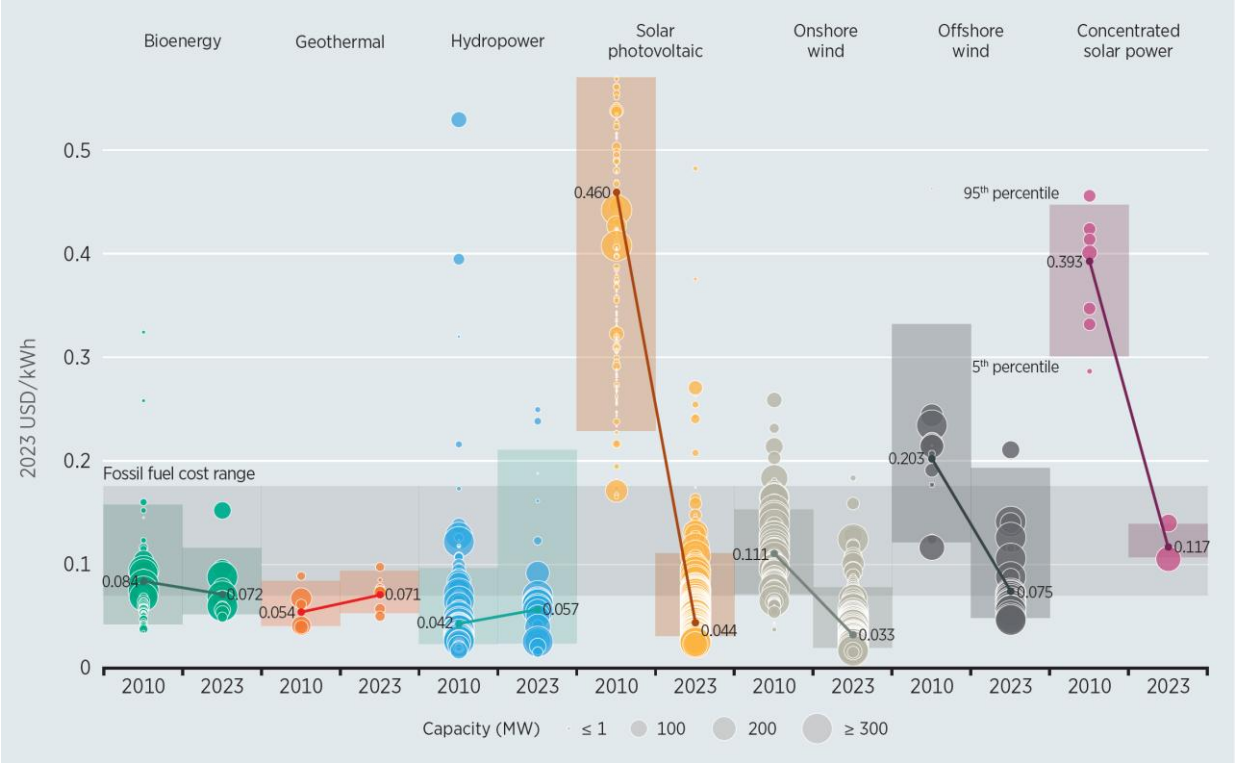


図 3.5.1-12 世界の各種再生可能エネルギーの LCOE コスト

（出典）IRENA[11)]

(4) 再生可能エネルギーの課題

太陽光、風力発電のコスト低減が進展しているものの、世界的にも課題が見え始めている。近い時点では、材料費の上昇に伴って、コスト低減が鈍化もしくは緩やかな上昇を見せ始めている点が挙げられる。また、太陽光パネル製造は中国への依存度が極めて高くなってきており、風力発電タービンメーカーシェアにおいても中国は高い割合を占めている。更に、ロシアによるウクライナ侵略を受けたエネルギー不足、エネルギー価格の高騰により、欧州等で太陽光発電導入が一層進んだことで、中国の太陽光パネル輸出の一層の増加も見られる。一方、米国は、2022 年にウイグル強制労働防止法を制定し、これに基づいて、米国国内への中国製太陽光パネルの輸入が制限さ

れ、国内での太陽光パネル製造の増強がなされてきていたが、政権の交代による再エネ政策の転換が、今後の再エネの進展に大きく影響する可能性がある。

例えば、英国では洋上風力発電の導入量が大きくなっているが、2021 年は風があまり吹かず、風力発電の発電電力量が落ち、天然ガス需要が増大して、これにロシア・ウクライナ情勢が加わって、2021 年秋からの世界的な天然ガス高騰につながった。導入量が増えてくると、自然変動に伴って様々なリスクを誘発する可能性もある。

3.5.2 日本における再生可能エネルギーの導入状況

(1) 再生可能エネルギーに関する政策

2012 年 7 月の FIT 制度（固定価格買取制度）開始により、日本における再エネの導入は大幅に増加し、発電電力量に占める再エネ発電の割合は、2011 年度 10.4%から 2023 年度 22.9%に拡大した。2020 年 6 月に、FIT 制度の抜本見直し等を内容とした再エネ特措法の改正を含む「エネルギー供給強靭化法」が成立し、以降、再生可能エネルギーの大量導入や主力電源化を検討する資源エネルギー庁小委員会等において、再エネ型経済社会の創造や、再エネ大量導入に向けた諸制度の検討、エネルギー供給強靭化法の詳細設計についての検討が重ねられた。2021 年 10 月に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画（文献 15)）では、2030 年度の温室効果ガス 46%削減に向けて、施策強化等の効果が実現した場合の野心的目標として、電源構成 36～38%（合計 3,360～3,530 億 kWh 程度）の導入を目指すことが掲げられ（表 3.5.2-1)、この実現に向けて、取り組みの加速を図っていくことが重要であり、S+3E を大前提に、再エネの主力電源化を徹底し、再エネに最優先の原則で取り組み、国民負担の抑制と地域との共生を図りながら最大限の導入を促す、とされた。

2023 年に 2 月に閣議決定された「GX 実現に向けた基本方針」（文献 17)）では、再生可能エネルギーについて、国民負担の抑制と地域との共生を図りながら S+3E を大前提に、主力電源として最優先の原則で最大限に取り組み、再エネ比率 36～38%の確実な達成を目指すことが掲げられた。さらに、同年 4 月に開催された「再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議」では、再生可能エネルギーの導入促進に向けた取り組みを具体化して強力に進めるため、「再生可能エネルギーの導入拡大に向けた関係府省庁連携アクションプラン」（文献 18)）がとりまとめられた。

今年度には、第 7 次エネルギー基本計画の策定に向け、政府の審議会等で再生可能エネルギーの主力電源化に向けた議論が重ねられてきた（文献 16)）。そして、2025 年 2 月に第 7 次エネルギー基本計画が閣議決定された（文献 19)）。その中では、脱炭素電源の供給力を抜本的に強化していく必要があるとされ、そのうちの一つである再生可能エネルギーの主力電源化を徹底し、地域との共生と国民負担の抑制を図りながら最大限の導入を促す、とされている（図 3.5.2-1)。2040 年度におけるエネルギー需給の見通しにおける新たな電源構成として、再エネは 4～5 割程度、内訳では太陽光が 23～29%程度、風力が 4～8%、水力が 8～10%程度、地熱が 1～2%程度、バイオマスが 5～6%程度とすることが示された。

表 3.5.2-1 再エネの導入推移と 2030 年の導入目標

	2011年度	2023年度	2030年ミックス
再エネの電源構成比 発電電力量:億kWh	**10.4%** （1,131億kWh）	**22.9%** （2,253億kWh）	**36-38%** （3,360-3,530億kWh）
太陽光	0.4%	9.8%	14-16%程度
	48億kWh	965億kWh	1,290~1,460億kWh
風力	0.4%	1.1%	5%程度
	47億kWh	105億kWh	510億kWh
水力	7.8%	7.6%	11%程度
	849億kWh	748億kWh	980億kWh
地熱	0.2%	0.3%	1%程度
	27億kWh	34億kWh	110億kWh
バイオマス	1.5%	4.1%	5%程度
	159億kWh	401億kWh	470億kWh

（出典）2023年度数値は令和5年度（2023年度）エネルギー需給実績（速報）より引用

（出典）再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 [16)]

6．脱炭素電源の拡大と系統整備

＜総論＞

- DXやGXの進展に伴い、**電力需要の増加が見込まれる**中、それに見合った**脱炭素電源の確保ができなかったために**、国内産業立地の投資が行われず、**日本経済が成長機会を失うことは、決してあってはならない**。
- **再生可能エネルギーか原子力かといった二項対立的な議論ではなく**、**脱炭素電源を最大限活用**すべき。
- こうした中で、**脱炭素電源への投資回収の予見性を高め、事業者の積極的な新規投資を促進**する**事業環境整備**及び、電源や系統整備といった大規模かつ長期の投資に必要な資金を安定的に確保していくための**ファイナンス環境の整備**に取り組むことで、**脱炭素電源の供給力を抜本的に強化**していく必要がある。

＜再生可能エネルギー＞

- S+3Eを大前提に、電力部門の脱炭素化に向けて、**再生可能エネルギーの主力電源化を徹底**し、関係省庁が連携して施策を強化することで、**地域との共生**と**国民負担の抑制**を図りながら**最大限の導入**を促す。
- **国産再生可能エネルギーの普及拡大**を図り、**技術自給率の向上**を図ることは、脱炭素化に加え、我が国の**産業競争力の強化**に資するものであり、こうした観点からも**次世代再生可能エネルギー技術の開発・社会実装を進めていく必要**がある。
- 再生可能エネルギー導入にあたっては、①**地域との共生**、②**国民負担の抑制**、③**出力変動への対応**、④**イノベーションの加速とサプライチェーン構築**、⑤**使用済太陽光パネルへの対応**といった課題がある。
- これらの課題に対して、①**事業規律の強化**、②**FIP制度や入札制度の活用**、③**地域間連系線の整備・蓄電池の導入等**、④**ペロブスカイト太陽電池**（2040年までに20GWの導入目標）や、EEZ等での**浮体式洋上風力**、国の掘削調査や**ワンストップでの許認可フォローアップ**による**地熱発電**の導入拡大、**次世代型地熱**の**社会実装加速化**、**自治体が主導する中小水力の促進**、⑤**適切な廃棄・リサイクルが実施される制度整備等**の対応。
- 再生可能エネルギーの主力電源化に当たっては、電力市場への統合に取り組み、**系統整備**や**調整力**の確保に伴う社会全体での統合コストの最小化を図るとともに、次世代にわたり事業継続されるよう、**再生可能エネルギーの長期安定電源化**に取り組む。

図 3.5.2-1 第 7 次エネルギー基本計画での再エネに関する政策の方向性

（出典）日本政府資料 [19)]

(2) 日本における再生可能エネルギー導入量

① 太陽光発電

図 3.5.2-2、図 3.5.2-3 にそれぞれ、太陽光発電の FIT・FIP 認定量・導入量および太陽光発電（2,000kW）の各国の買取価格を示す。第 6 次エネルギー基本計画で策定されたエネルギーミックス（10,350～11,760 万 kW）の水準に対して、2024 年 3 月における FIT 制度開始前導入量+FIT・FIP 認定量は 8,010 万 kW、導入量は 7,380 万 kW となり、2030 年のミックスに対する導入進捗率は約 67%である。2024 年度の買取価格は、住宅用（10kW 未満）が 16 円/kWh、事業用（50kW 以上 250kW 未満）が 9.2 円/kWh 等だが、海外の買取価格と比べて高い。事業用（250kW 以上）は屋根設置を除き入札対象になっており、2023 年度における計 4 回入札での加重平均落札価格は 7.76 円/kWh である。

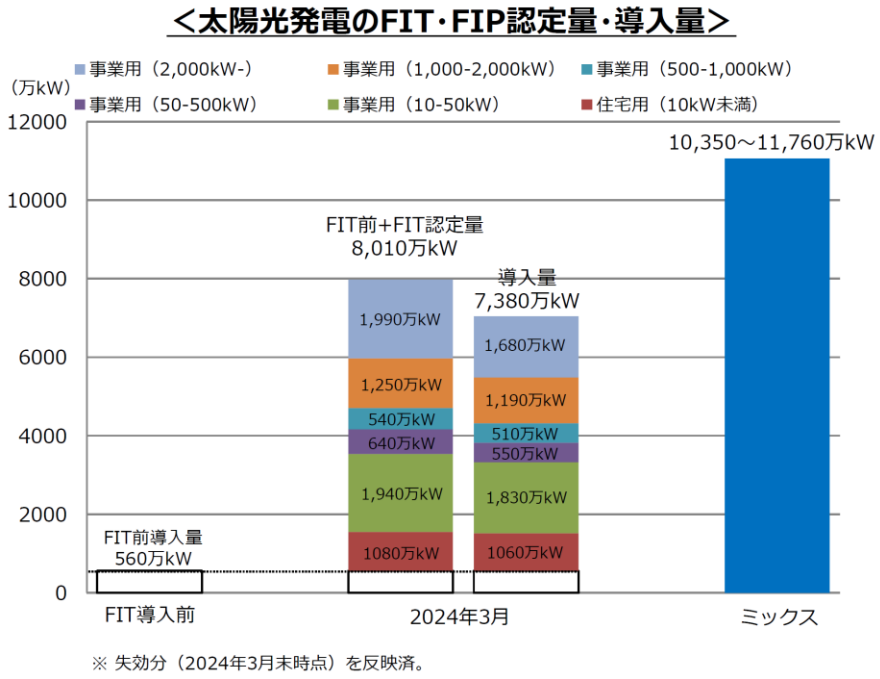


図 3.5.2-2 太陽光発電の FIT・FIP 認定量と導入量

（出典）調達価格等算定委員会 [20]

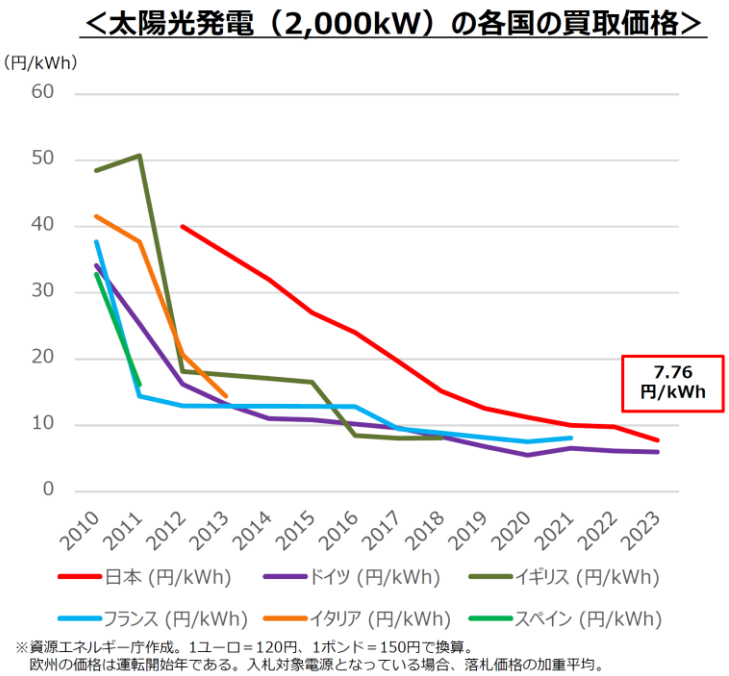


図 3.5.2-3 太陽光発電（2,000kW）の各国の買取価格

（出典）調達価格等算定委員会 [20]

② 風力発電

図 3.5.2-4、図 3.5.2-5 にそれぞれ、風力発電の FIT・FIP 認定量・導入量および風力発電（20,000kW）の各国の買取価格を示す。エネルギーミックス（2,360 万 kW）の水準に対して、2024 年 3 月における FIT 制度開始前導入量+FIT・FIP 認定量は 1,830 万 kW、導入量は 610 万 kW となり、2030 年のミックスに対する導入進捗率は約 26%である。洋上風力（着床式・浮体式）発電については、現時点では導入案件は少ないものの、今後の導入拡大が見込まれる。買取価格については、陸上風力発電が 14 円/kWh（2024 年度入札における上限価格）等であるが、海外の買取価格と比べて高い。

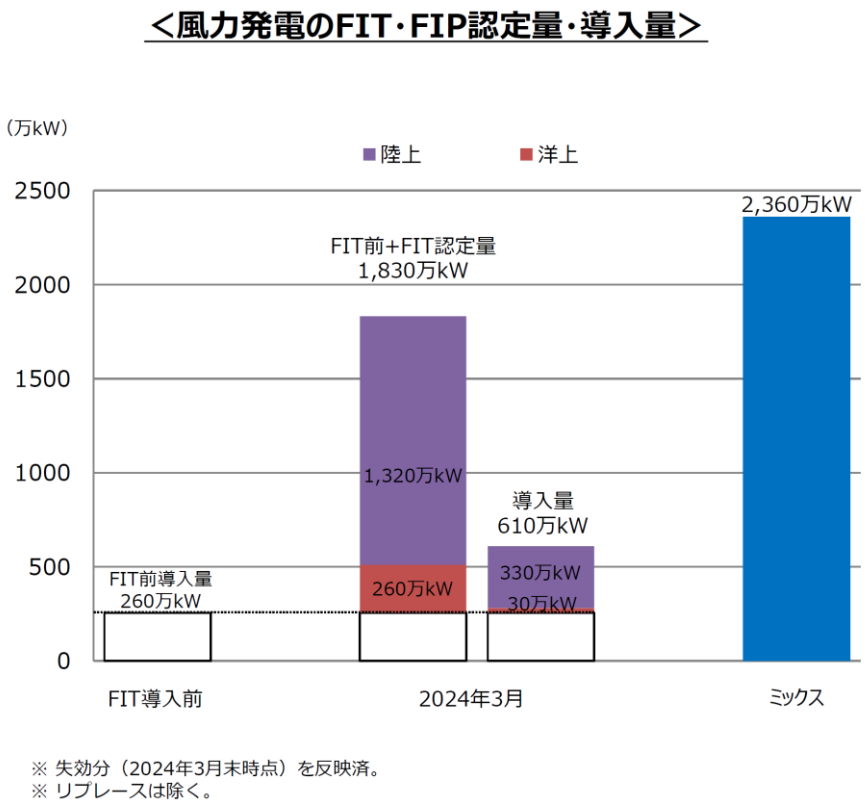


図 3.5.2-4 風力発電の FIT・FIP 認定量と導入量

（出典）調達価格等算定委員会 [20]

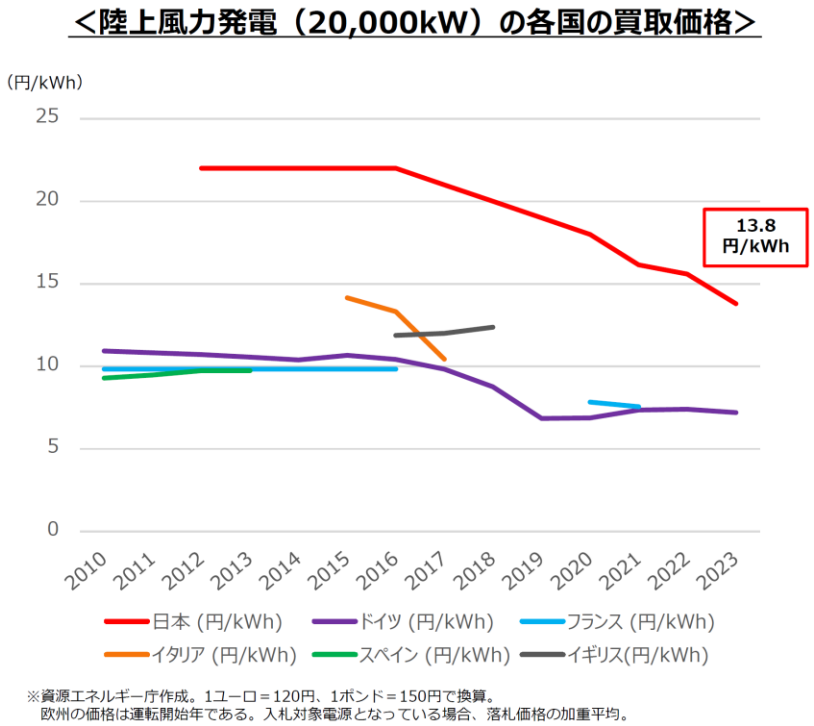


図 3.5.2-5 陸上風力発電（20,000kW）の各国の買取価格

（出典）調達価格等算定委員会 [20]

(3) 再生可能エネルギー導入における課題

FIT 制度により再エネ導入量は大きく拡大したが、第 1 章の 1.1.4 節でも記載したように、高い再生可能エネルギーの賦課金による国民負担の増大が問題である。調達価格等算定委員会[20]によると、2024 年度（予測）の買取総額は 4.8 兆円、賦課金（国民負担）総額は 2.7 兆円（賦課金炭化は 3.49 円/kWh）になっており、買取総額の内訳によると事業用太陽光発電に係る買取費用が大半を占めている。また電気料金に占める賦課金割合は、2023 年度実績では、産業用・業務用が 6%、家庭用が 5%となっている（図 3.5.2-6）。

<買取総額の内訳>

住宅用太陽光		0.2兆円	4%
事業用太陽光	2012年度認定	0.9兆円	19%
	2013年度認定	1.2兆円	56% → 27%
	2014年度認定	0.4兆円	10%
	2015～2024年度認定	0.5兆円	10%
	（合計）	（3.0兆円）	（66%）
風力発電		0.2兆円	5%
地熱発電		0.02兆円	0.5%
中小水力発電		0.2兆円	4%
バイオマス発電		0.9兆円	20%
合計		4.8兆円	—

※合計額は調整力確保費用等（約0.3兆円）を含む。



図 3.5.2-6 FIT・FIP 制度に伴う国民負担の状況

（出典）調達価格等算定委員会[20]

また、再生可能エネルギーの導入拡大に向けた論点として、図 3.5.2-7 に示すように、国民負担の抑制の他、地域との共生、出力変動への対応、イノベーションの加速とサプライチェーン構築、使用済太陽光パネルへの対応等に関する課題が挙げられている。

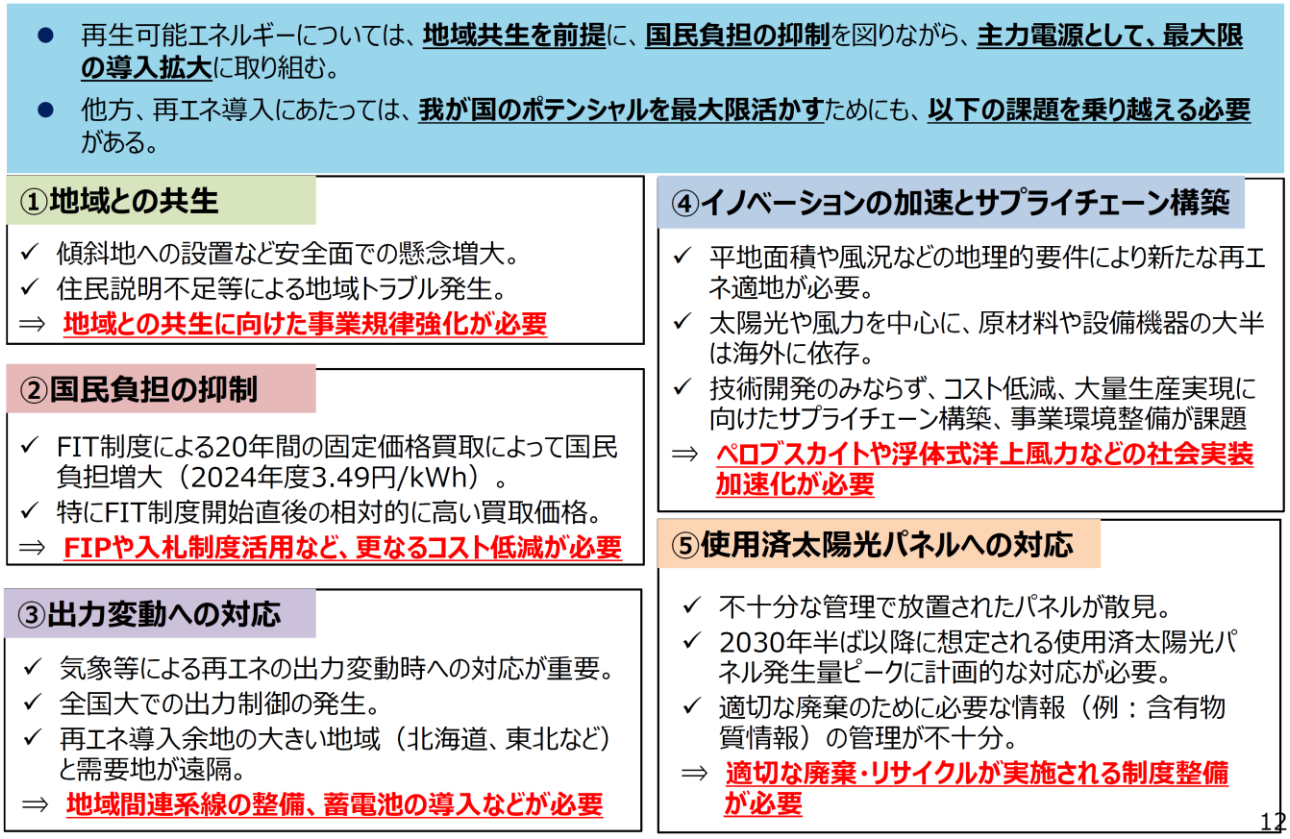


図 3.5.2-7 再生可能エネルギーの導入拡大に向けた課題

（出典）再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 16)

参考文献（第 3.5 節に関するもの）

1) UNFCCC: Outcome of the first global stocktake (2023)
2) IEA: World Energy Outlook 2017 (2017)
3) IEA: World Energy Outlook 2018 (2018)
4) IEA: World Energy Outlook 2019 (2019)
5) IEA: World Energy Outlook 2020 (2020)
6) IEA: World Energy Outlook 2021 (2021)
7) IEA: World Energy Outlook 2022 (2022)
8) IEA: World Energy Outlook 202 (2023)
9) IEA: World Energy Outlook 2024 (2024)
10) IRENA: Renewable Energy Capacity Highlights (2024)
11) IRENA: Renewable Power eneratin Cots in 2023 (2024)
12) IEA: Trends in Photovoltaic Applications 2024 (2024)
13) GWEC: Global Wind Report 2024 (2024)
14) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 発電コスト検証ワーキンググループ、発電コスト検証に関するとりまとめ (2025)
15) 日本政府: 第 6 次エネルギー基本計画 (2021)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf

16) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会／電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会、次期エネルギー基本計画の策定に向けたこれまでの議論の整理（再生可能エネルギー関係） (2024)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/071_01_00.pdf
17) GX 実行会議: GX 実現に向けた基本方針および参考資料 (2023)
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/pdf/kihon.pdf
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/pdf/kihon_sankou.pdf
18) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議 (2023)
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/action_plan.pdf
19) 日本政府: 第 7 次エネルギー基本計画 および概要 (2025)
https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001-1.pdf
https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001-2.pdf
20) 経済産業省 調達価格等算定委員会、国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案 (2024)

3.6 電力システム改革と温暖化対策

日本では、コスト効率化や電力以外の事業との融合による新たなサービスの創出等を狙って、電力システム改革が行われてきた。また、ガス事業についても同様にガスシステム改革が行われてきた。全面自由化後は、発電事業、送配電事業、小売電気事業の 3 事業に分割され、送配電事業については、中立性を担保するために 2020 年 4 月に法的分離が行われた。送配電部門は、引き続き、総括原価方式による地域独占・料金規制が維持されるが、発電事業、小売事業は全面自由化され、一部、小売りの規制料金（経過措置料金）は継続されているものの、一連の電力システム改革は一旦終了した。電気事業法において、法的分離後、5 年以内に検証を行うことが規定されており、2024 年度は電力システム改革の検証が行われた。

主要な課題意識としては、とりわけ低炭素化、脱炭素化への対応が必要となる中、一般にこれら電源は設備単価が増大する。他方、自由化は、短期的な効率向上には資すると考えられるが、長期的な投資の予見性を低下させ、とりわけ、設備単価の高い電源への投資が、長期的には経済合理的な水準から過少な投資となり得る。このトレードオフを有する課題にどう対処していくのかが重要な論点である。

3.6.1 電力の競争環境

小売における新電力の比率は大きく上昇した（図 3.6.1-1）。ただし、2022 年度は、化石燃料高騰の中、特別高圧、高圧では、新電力の比率の低減が見られた。2023～24 年度にかけては 22 年度と比べ化石燃料価格が低位に推移したこともあり、新電力シェアの低下に歯止めがかかり、増加傾向に戻っている。

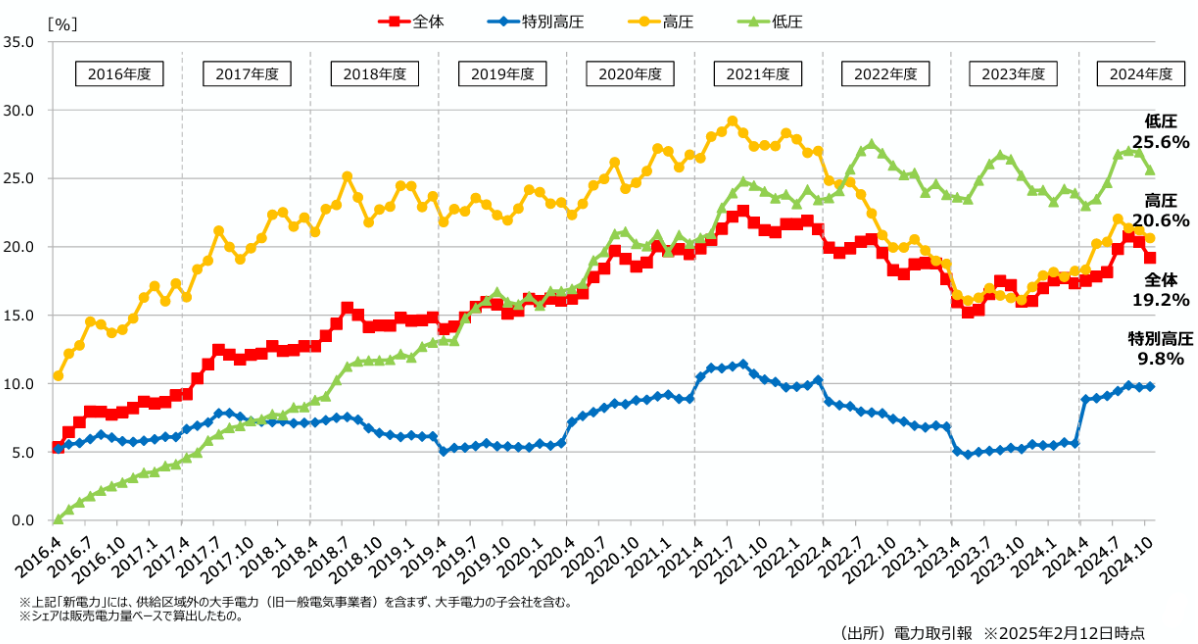


図 3.6.1-1 新電力のシェアの推移

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 [1]）

電力卸取引市場（スポット市場）の取引量は、グロスビディングと呼ばれる、旧一般電気事業者に半強制的に一定の発電電力量を市場に拠出するよう求める制度もあり、取引量は 2018 年頃から劇的に増大し、全電力需要の 40%程度となった（図 3.6.1-2）。他方、旧一般電気事業者で内外無差別の卸電力取引が進展してきたこともあり、その分、グロスビディングが緩和されてきたこともあって、直近では、若干低下し、2024 年は 30～35%程度で推移してきている。ただしいずれにしても、卸取引市場の活用へと移行しており、卸取引市場の価格が電力需給価格全体により大きな影響を及ぼすようになってきている。これは競争的な点では望ましいが、他方、とりわけ気候変動対策や電力の安定供給の視点からは課題も多い。小売事業としては、電力需要の奪い合いになるため、需要が読みにくい。発電事業者も、市場取引が中心となると、価格ボラティリティが高いこともあって投資予見性が立ちにくく、投資がしにくい状況でもある。とりわけ、脱炭素電源は、一般的に資本費が大きくなるため、一層投資しにくい状況となる。

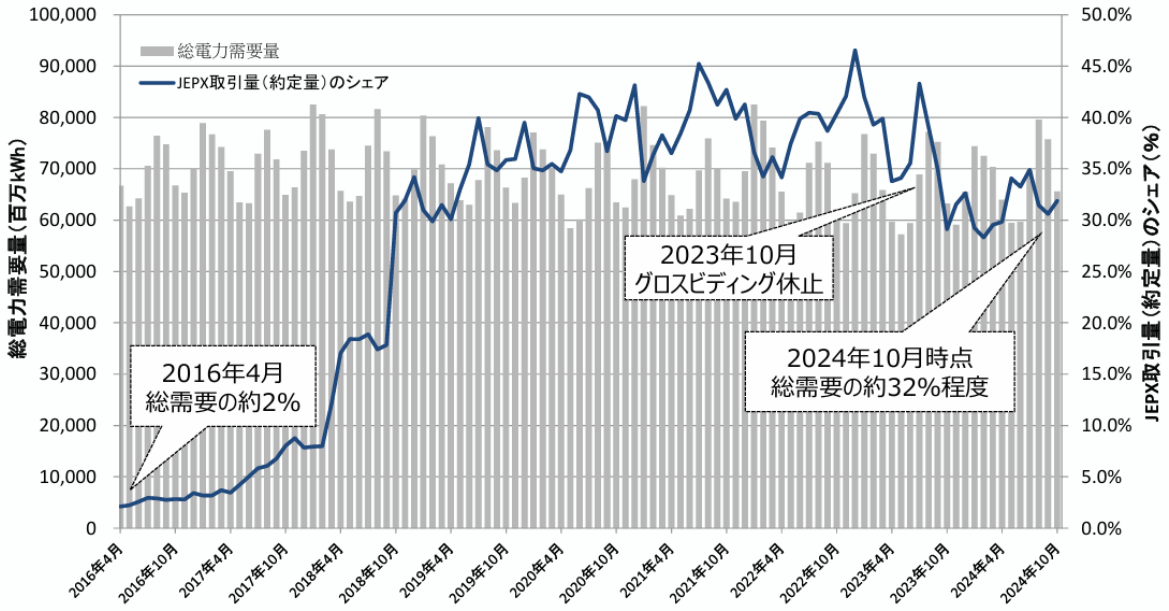


図 3.6.1-2 JEPX のスポット市場取引量（約定量）の推移

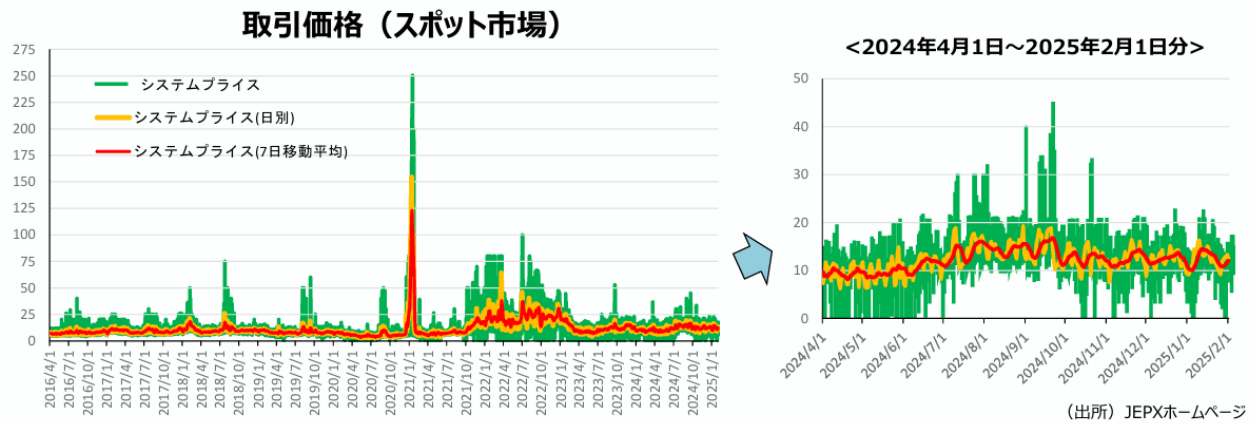
（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 [1]）

3.6.2 電力の価格動向

図 3.6.2-1 は、取引価格の推移である。需給がひっ迫すれば、市場により価格調整が働き、価格が上昇している。その面では短期的な需給調整という点で、価格がシグナルになって、調整が機能していると見ることができる。しかしながら、2021 年 1 月には kWh あたり 250 円といった極めて高い価格となった。2021 年 1 月には比較的長期間にわたって kWh の不足に陥ったため、電力市場は大きく混乱した。また、2021～2022 年の冬季においても高い価格推移となり、2022 年 3 月 22 日は東京、東北電力管内での季節外れの寒さの影響もあり、電力需要は増大し、一方、変動性再エネ（VRE）の供給力は低位となって需給逼迫となった。また、ロシア・ウクライナ情勢による化石燃料価格の高騰の影響が重なり、2022 年は年間通じて高い価格となった。需給がひっ迫すれば、ディマンドレスポンス（DR）のような対応を促すために、ある程度高い価格付けは必要である。一方、VRE の供給が順調な時間帯で下限値である 0.01 円/kWh の価格となるコマも増えてきている。2024 年は、化石燃料価格が 2023 年から継続して比較的落ち着いていたことから、9 月頃に残暑が厳しく若干の状況局面もあったものの、電力の卸取引価格も抑制傾向となった。

しかし、安定的な電力需給と電力事業運営という点から、このようにボラティリティの極めて高い市場は必ずしも望ましくない。そして、規制料金においては、事前に認められている燃料費調整額の上限幅を超え、小売電力事業者の経営を圧迫した。規制料金（経過措置料金）は、みなし小売事業者（旧一般電気事業者）に適用されるが、規制料金が適正にコスト転嫁できなければ、新電力も、顧客が流出する恐れがあるため、料金転嫁が事実上難しく、新電力の経営を大きく圧迫する事態ともなった。2023 年には多くの事業者で経過措置料金の改定審査がなされ、料金が上昇したが、それで

も適正にコストが料金に転嫁できる状況に至っていないと見られる。高度化法の下で、電力小売事業者に現在、2030 年の非化石電源比率 44%の達成が求められており、高度化法義務達成市場や FIT 証書を取引する再エネ価値取引市場での負担が生じている事業者も多い。最低価格（高度化法義務達成市場：0.6 円／kWh、再エネ価値取引市場：0.4 円／kWh）にほぼ貼りついているものの、それでもこれらの費用負担は大きい。そして、これら費用をはじめ、温暖化対策で上昇してきている費用の多く、もしくは、一部は、現状では経過措置料金に反映できていないと見られる。そして、経過措置料金だけではなく、競争条件の確保から、自由料金にも、そのコストの多くは反映できていないと考えられる。コストが料金に適正に転嫁されなければ、省エネやディマンドレスポンスなど、適正な電力需要の抑制・制御ができず、社会厚生を歪めてしまう。なお、再エネ調達比率が高い小売事業者でも、需給不一致時の調整コストとなっているインバランス料金が高騰する。また、一般的に脱炭素に資するような電源は、資本費が高いため、価格ボラティリティの高さは、投資リスクの高さをもたらす可能性がある。



	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度※
平均価格（円/kWh）	16.5	14.7	9.8	8.5	9.7	9.8	7.9	11.2	13.5	20.41	10.74	12.24
最高価格（円/kWh）	55	44.6	44.9	40.0	50.0	75.0	60.0	251.0	80.0	100.0	52.94	45.01
200円/kWh超えの時間帯	0	0	0	0	0	0	0	0.3%	0	0	0	0
100～200円/kWhの時間帯	0	0	0	0	0	0	0	1.6%	0	0.04%	0	0
(参考)0.01円/kWhの時間帯※	0	0	0	0	0	0	0.1%	1.5%	1.6%	3.3%	4.7%	2.3%

※2024年度の平均価格は2025年2月1日時点までの価格

図 3.6.2-1 日本における電力卸取引市場（スポット市場）の取引価格の推移
（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 [1]）

小売価格の変化として、図 3.6.2-2 に日本における電気料金平均単価（大手電力）の推移を、図 3.6.2-3 に国際的な電力価格の推移の比較を示す。燃料以外の要素については低減傾向があるものの、FIT 賦課金が上昇しており、また燃料費が急上昇し、結果として電気料金は上昇してきている。他方、燃料以外の要素が低減している点も、実質価格との関係も踏まえて評価が必要であるし、全体の価格についても、他国との相対価格との関係性についても詳細に見ていく必要はある。政府もその認識を共有して、新たに、調整された電力価格推計も提示した（図 3.6.2-4、図 3.6.2-5）。本事業でもこれまで、他国との相対的なエネルギー価格の推計の重要性を指摘し、慶応大野村

教授の協力の下、その推計を実施してきたところであり、電力システム改革の評価においても参考とされたものである。そして政府は、電力自由化によって、電力価格が低下しているとまでは言えないとした。

なお、先述のように、現状では、温暖化対策に要している費用の多く、もしくは一部については、料金転嫁できておらず、事業者の負担となっていると見られることにも留意して、日本の小売電力価格を見る必要がある。それは、他の業種と比較して、電気事業が、低い自己資本利益率となって表れていることからも確認できる。

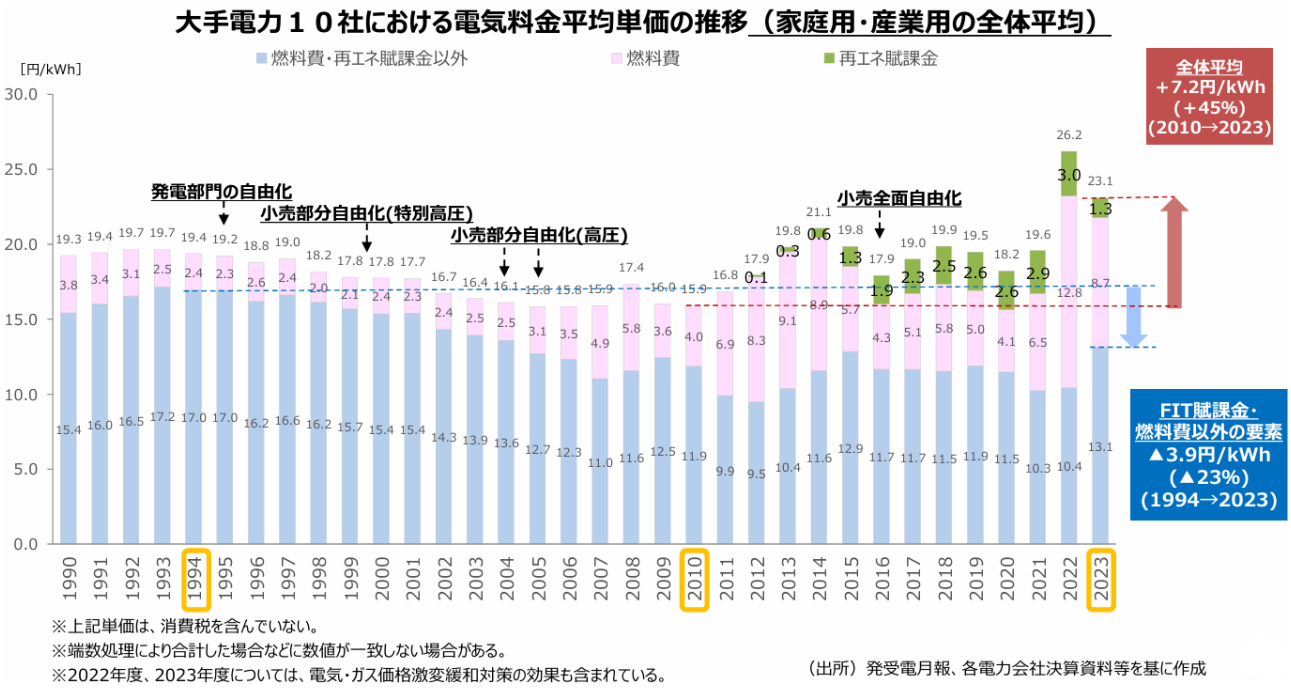


図 3.6.2-2 日本における電気料金平均単価（大手電力）の推移

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 [2]）

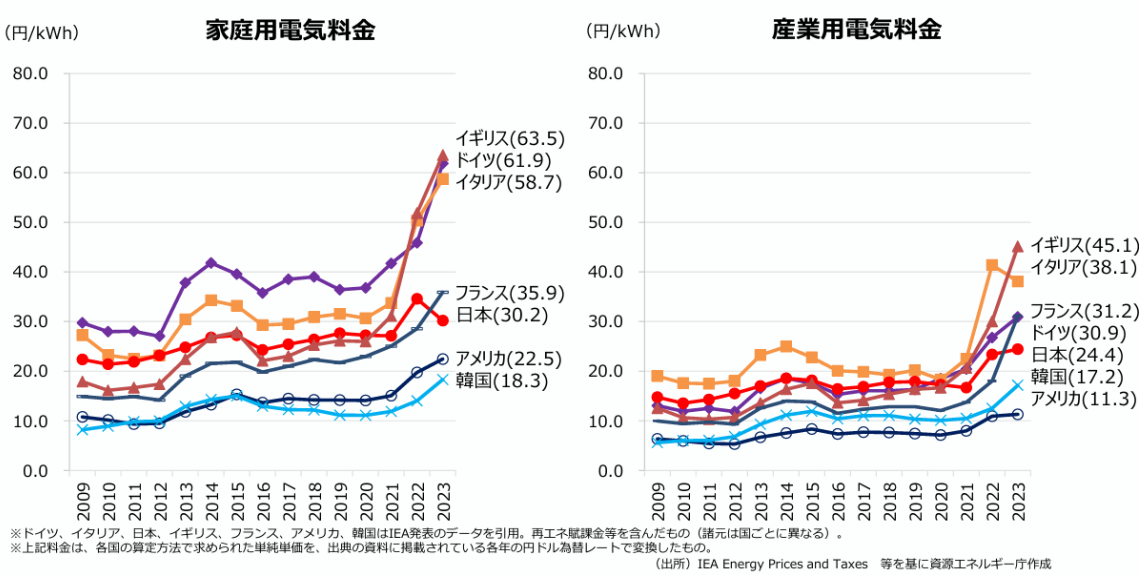
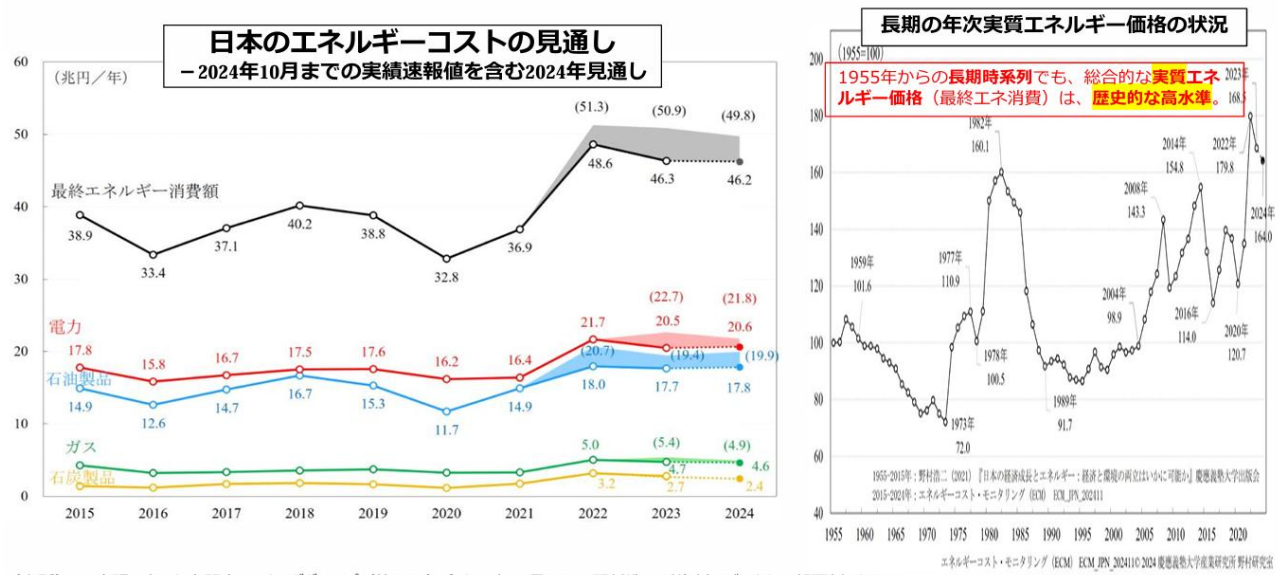


図 3.6.2-3 電気料金の国際比較

注）毎年の為替レートで円換算されたもの

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 [1]）



（出所）GX実現に向けた専門家ワーキンググループ（第７回）令和６年８月９日　野村浩二氏資料のデータを一部更新したもの

図 3.6.2-4 実質的なエネルギー価格推移

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 [3]）

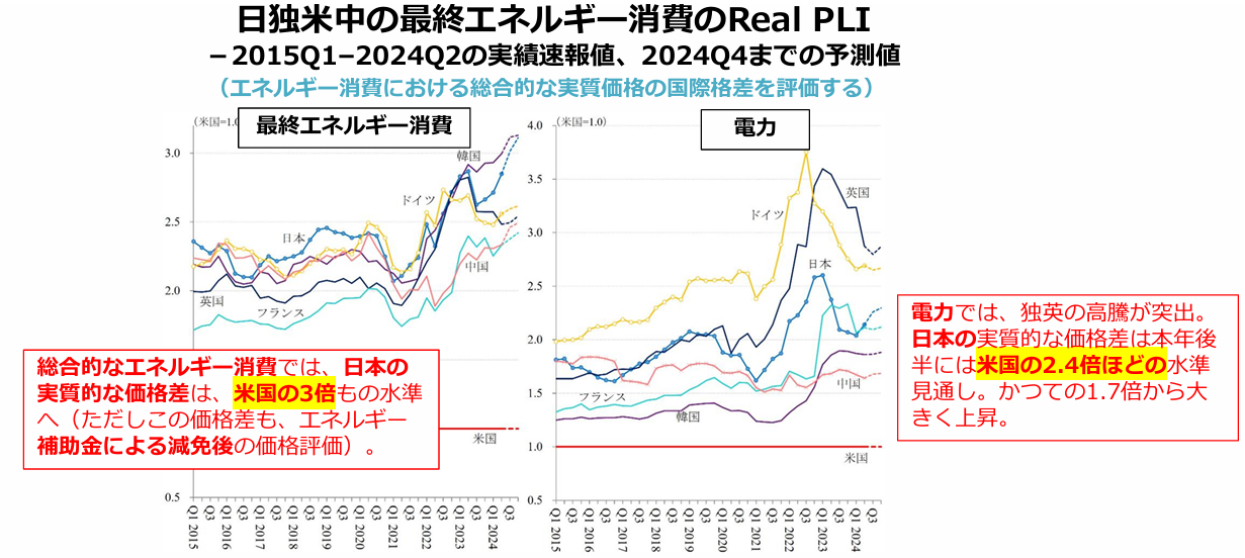


図 3.6.2-5 実質的なエネルギー価格の国際比較

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 3)）

3.6.3 制度設計、市場設計

政府は、卸取引市場（kWh 価値の取引）だけでなく、容量市場（kW の取引）、需給調整市場（Δ kW の取引）、非化石価値取引市場（非化石電源比率実現のための価値や、ゼロエミッション価値などの環境価値の取引）の制度設計を行い、容量市場と非化石価値取引市場は 2020 年度に開始された。また、需給調整市場は 2021 年 4 月に開設され、調整力についても、これまでのエリア毎の公募から広域調達となった。そして、2024 年 4 月からは、需給調整市場は、予定されていた全商品の取引が開始された。

これらの市場は、温暖化対策の視点からも極めて重要であり、引き続き、制度の詳細を詰め、また、必要に応じて見直しながら、導入を進めていくことが求められる。

(1) 非化石価値取引市場・高度化法義務達成市場

非化石価値取引市場は、2021 年度からは、再エネの非化石証書の取引を目的とした再エネ価値取引市場と、2030 年に向けた非化石電源比率（現状では前エネルギーミックスの 44%が目標値）達成に向けた高度化法義務達成市場の 2 つに分離された。現在、再エネ価値取引市場における FIT 非化石証書の最低価格が 0.4 円/kWh で、高度化法義務達成市場の非 FIT 非化石の最低価格は 0.6 円/kWh となっている。先述のように、本来であれば、高度化法義務達成市場は正に非化石電源の拡大のために需要家の負担を求めなければならないコストであるものの、需要家に十分に価値を理解してもらえるような状況になっておらず、料金転嫁が難しい状況が続いている。このような中、再エネ価値取引市場における FIT 非化石証書の最低価格を引き上げ、高度化法義務達成市場との価格差を縮め、需要家への料金転嫁を少しでもしやすいような制度変更の方向性が示されているところである。

ただ、いずれにしても、引き続き多くの課題が残っている。「2050 年カーボンニュートラル」や「2030 年 46%排出削減」といった厳しい排出削減は、初期投資額の大き

な設備導入が求められる場面が多い一方で、エネルギーシステム改革は市場の活用に主眼があるが、どうしても市場は短期の価格を主たるターゲットとしてしまう傾向があり、その市場価格は変動性が大きい傾向がある。これが、長期の大規模投資が必要となりがちな CO_2 排出削減対策と矛盾する部分がある。政府は、2023 年 2 月に「GX 実現に向けた基本方針」[4]を閣議決定したが、改めて、エネルギー安定供給・安全保障、経済効率性、環境をどう両立するか、どうバランスさせるか、エネルギーシステム改革の下でより高度な制度設計が求められる状況となっている。

「GX 実現に向けた基本方針」においては、排出量取引制度の GX-ETS の導入方針も決めたが、排出量取引制度も同様に、短期的な市場価格で排出量の調整を図るため、長期の大規模投資を促しにくい傾向があるとされてきた。なお、GX-ETS や炭素に対する賦課金は、高度化法義務達成市場との重複性が相当に強い。特に、高度化法義務達成市場は、電力に対する初期割り当てグランドファザリング式の排出量取引制度の亜種とも言える（排出量取引制度とは異なり、化石燃料の燃料種間の差異はない）。GX-ETS 等への統合、そして高度化法義務達成市場の廃止の道筋をつけていくことが、効率的な排出削減のためには必要である。

(2) 容量市場・予備電源市場

① 容量市場

卸取引市場は、理論的に限界費用で価格が決まる。限界電源はピーク時間帯では LNG になりやすく、原子力や石炭火力は、可変費が安価で固定費が高価なため、固定費分を LNG 可変費と原子力や石炭の可変費との差額分で補って、収支をバランスさせ、その中で利潤も得ていくこととなる（図 3.6.3-1）。固定費は回収しにくいが、図 3.6.2-1 で見られるように、価格がスパイクする時間帯もあるため、そのスパイクした際に得られる収入で固定費分と利潤を確保してくこととなる。しかし、先にも記載したように、安定的な電力需給と事業環境の整備という点からは、あまりに価格スパイクすることも問題である。また、再生可能エネルギーが固定価格買取制度（FIT）のような政策措置で、優先給電ルールで市場に出てくると、卸取引市場価格が下がってしまう（図 3.6.3-2）。そうすると、例えばガス複合発電のような限界電源となりやすい電源も、設備利用率が低下して、投資回収が難しくなってしまう。また、限界電源になりにくい電源（石炭火力など）でも、市場価格が低下して、売電収入が低下し、利益を得にくい構造になってしまう。結果として、火力発電を中心とした、電力の安定供給のために必要な電源が過小となってしまう。これは「ミッシングマネー」問題と言われる。

そこで、政府は、容量市場を創設し、稼働していない電源でも、kW 価値に応じて収入が得られる仕組みを創設し、2020 年に開始した。これにより、固定費の一部は、容量市場で実際の運用の 4 年前というタイミングで、予見性を高めることで、電源の維持をして、持続的な電力システムを構築しようとしてきている。

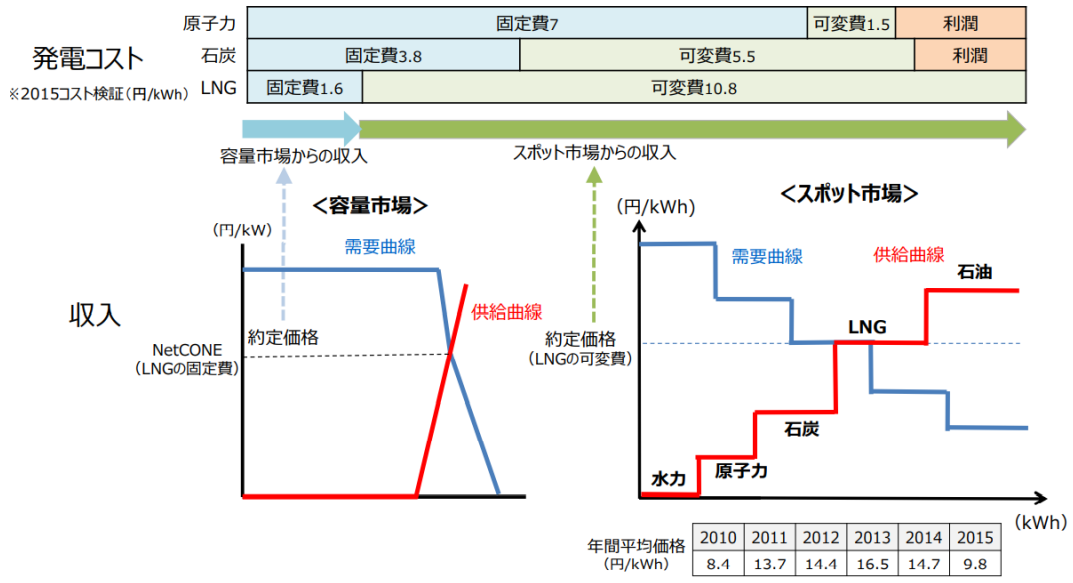


図 3.6.3-1 発電投資回収のイメージ

（出典：電力広域的運営推進機関 [5]）

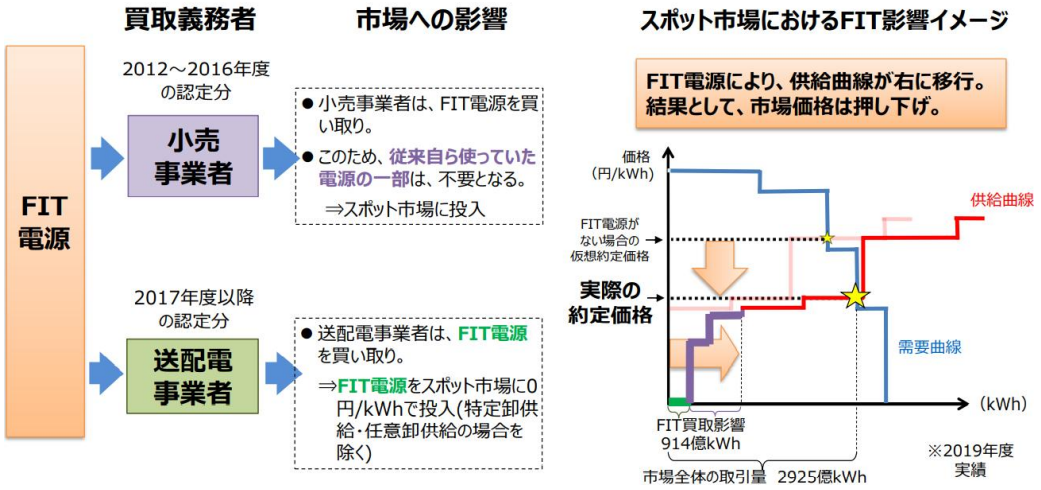


図 3.6.3-2 スポット市場における FIT の影響

（出典：電力広域的運営推進機関 [5]）

2024 年度（実需給年度 2028 年度）のオークションでは、昨今の需給逼迫状態にも照らして、従来の調達容量では稀頻度リスクを十分に織り込んだ電源容量の募集になっていないのではないか、との見方もある中、調達量の再検討が行われた（図 3.6.3-3、図 3.6.3-4）。検討の結果、2024 年度オークションでは表 3.6.3-1 のような調達量とされた。

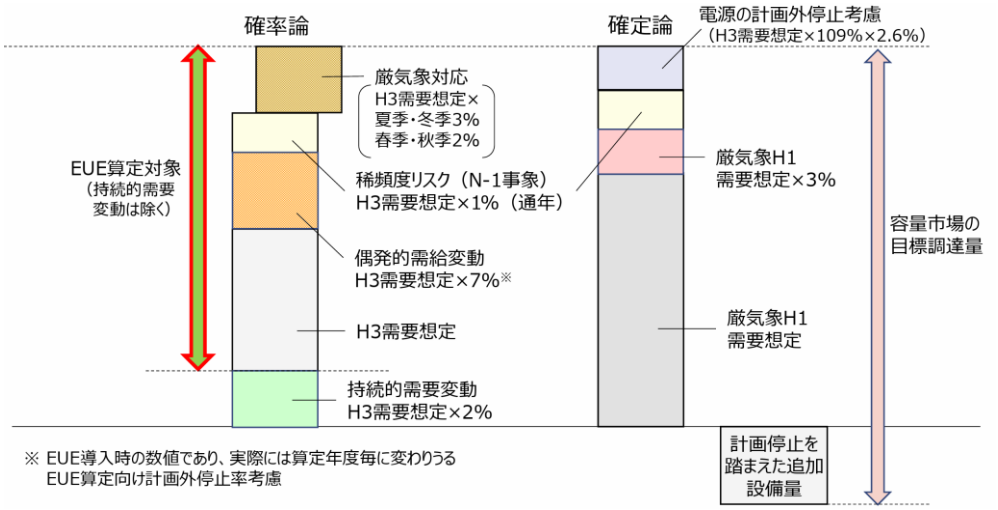
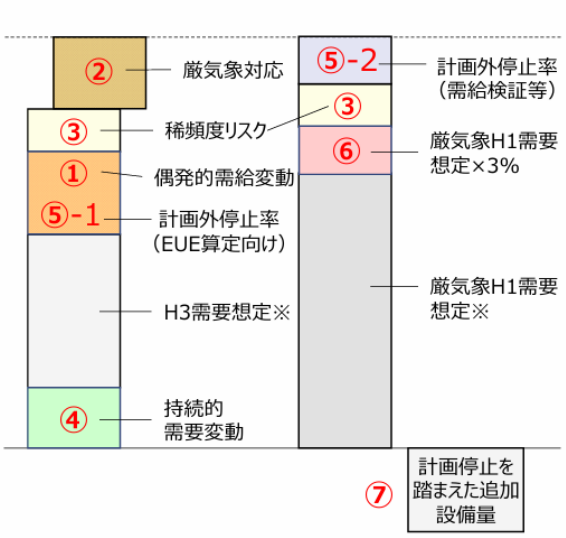


図 3.6.3-3 容量市場の目的調達量における設備容量の予備率の想定

（出典：電力広域的運営推進機関 [6]）



	現在の設定	見直しの方向性
① 偶発的需給変動	LOLP：0.3日/月に相当する予備力	**毎年・算定年度ごとに見直し**
② 厳気象対応	夏季・冬季：3% 春季・秋季：2%	**毎年・算定年度ごとに見直し**
③ 稀頻度リスク	年間通して1%	必要に応じて適宜見直し
④ 持続的需要変動	年間通して2%	必要に応じて適宜見直し
⑤ 計画外停止率	EUE算定向け:4.3% 需給検証等:2.6% ※代表で火力数値を記載	必要に応じて適宜見直し
⑥ 厳気象H1需要想定の3%	H1需要想定の3%	必要に応じて適宜見直し
⑦ 追加設備量	1.9か月	必要に応じて適宜見直し

※ 需要想定については算定時点における最新のデータを都度使用する

図 3.6.3-4 容量市場の目的調達量における設備容量の予備率の見直し方針

（出典：電力広域的運営推進機関 [7]）

表 3.6.3-1　2024 年度容量市場メインオークションの目標調達量

<2024年度メインオークションの目標調達量>

単位：万kW

設定項目	2024年度 メインAX	2023年度 メインAX	（差）	備考	
目標調達量	**18,615.9**	18,447.4	**(+168.5)**	①+②+③+④	寄与度*+0.9%
①全国H3需要	16,057.7	16,059.8	（▲2.1）	－	寄与度*±0.0%
②偶発的需給変動分	1,780.4	1,684.3	（+96.1）	EUE基準0.016 (2024年度) EUE基準0.044 (2023年度)	（*：2023年度メインAXの目標調達量比） 寄与度*+0.5%
a.必要予備率	945.4	1,041.9	（▲96.5）	LOLP:0.3日/月に相当する予備力 EUE :0.407より算出した供給力	
b.厳気象対応	674.4	481.8	（+192.6）	夏冬：H3需要×4.2%(2024) 夏冬：H3需要×3.0%(2023)	
c.稀頻度リスク	160.6	160.6	（±0.0）	通年：H3需要×1.0%(2024) 夏冬：H3需要×1.0%(2023)	
③追加設備量	456.6※1	382.1※1	（+74.5）	年間停止可能量1.9ヵ月 H3需要の2.8%(2024)	寄与度*＋0.4%
④持続的需要変動分	321.2	321.2	（±0.0）	H3需要の2.0%(2024) H3需要の2.0%(2023)	寄与度*±0.0%

※1 厳気象対応･稀頻度リスク(春秋)の供給力は、安定電源の補修調整で対応

四捨五入の関係で合計が合わないことがある

（出典：電力広域的運営推進機関 [7]）

2024 年度（実需給年度 2028 年度）の容量市場オークション結果は、表 3.6.3-2 のとおりである。なお、表 3.6.3-2 は過去 5 年の結果も併せて示されている。初年度の 2020 年度は設定した上限価格にほぼ張り付くという結果であった。しかしながら、2020 年度オークションの上限価格に張り付く結果を受けて、容量市場の制度について各種変更を施した。これも反映され、2021 年度オークション価格は 2020 年度よりも大きく低下し、また、NetCONE と呼ばれる参照価格よりも大幅に低い価格での約定となった。そして、2022、2023 年度とオークション価格および約定総額は 2021 年度よりは上昇傾向となってきていたが、2024 年度のオークション結果は、オークション価格および約定総額ともに初年度の 2020 年度を上回り、過去最高額となった。別途、データセンター等による IT 需要増の見通しの下、今後の電力需要の増大、需給逼迫の懸念がある状況も反映された価格形成だったとも考えられる。

なお、過去 5 年間のオークションを通して、一定の価格指標性は生まれてきたとも考えられるものの、それでも価格ボラティリティが高いので、長期におよぶ投資回収の予見性が立ちにくく、投資がしづらい状態は残っている。

表 3.6.3-2　2020～24 年度（対象年：2024～28 年度）容量市場オークション約定総額の結果

		第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
実施年度		2020	2021	2022	2023	2024
実需給年度		2024	2025	2026	2027	2028
約定総容量（万kW）		16,769	16,534	16,271	16,745	16,621
指標価格（円/kW）		9,425	9,372	9,557	9,769	9,875
エリアプライス（円/kW）	北海道	14,137	5,242	8,749	13,287	14,812
	東北		3,495	5,833	9,044	
	東京			5,834	9,555	
	中部			5,832	7,823	10,280
	北陸				7,638	8,785
	関西					
	中国					
	四国					
	九州		5,242	8,748	11,457	13,177
約定総額（経過措置控除後）（億円）		15,987	5,140	8,504	13,140	18,506
総平均単価（経過措置控除後）（円/kW）		9,534	3,109	5,226	7,847	11,134

（出典）約定総容量、エリアプライス、約定総額（経過措置控除後）については、電力広域的運営推進機関が公表している各オークションの約定結果
総平均単価（経過措置控除後）については「約定総額（経過措置控除後）÷約定総容量」にて算出

（出典：制度検討作業部会資料 [8]）

② 長期脱炭素電源オークション

このように、容量市場開設から 5 年となり、価格の目線が需給で比較的そろってきたようにも見られる。しかしそれでも毎年のオークションであり、4 年後の 1 年間の供給力の提供に対して対価が支払われる仕組みである。そして、価格の変動性がどうしても大きくなる可能性があることは、長期的な電源投資を難しくする可能性がある。特に、脱炭素化に向けた、新設電源の投資のインセンティブとしては小さいと考えられる。

一般的には既存電源の方が、新設電源よりも安価であり、既存電源ベースの価格で、容量市場の価格形成が行われると考えられる。そうすると、新設電源にとっては、投資リスクをとって建設するだけの十分な対価を得られない可能性があり、新設電源への投資を安定的に促すことができるのか、慎重に検討する必要がある。また、4 年後の 1 年間であるが、通常の電源は、建設計画から運開まで 3～10 年程度要するため、4 年前にならないと対価がわからないと投資とその回収の計画を立てにくく、金融機関からの融資も受けにくい可能性がある。先行して容量市場を導入した欧州では、容量市場の価格が上昇すると、ディーゼル発電のように短期で導入可能な規模が小さく、発電効率が悪い電源の導入が促進されたという報告もなされている。更に火力の場合、通常、30～40 年運転されるが、1 年毎に対価が変わるため、投資回収の予見性が低く、それも投資を躊躇させる方向に働く。

特にカーボンニュートラルということになると、CCS 付き火力発電なども重要になると考えられるが、設備単価は上昇し、また CCS 無しよりも投資リスクは高いと考えられる。先に指摘したように、市場は価格スパイクが起こることもあるが、いつか起

こると考えられる価格スパイクを期待して金融機関が融資する可能性は必ずしも高くない。図 3.6.3-5 で指摘があるように、通常、リスク回避的に投資が行われてきており、ダウンサイドリスクをより大きく評価される傾向が見られる。そうすると、卸取引市場での価格スパイクに期待したり、容量市場で一定の投資回収はできるとしても、新設電源の建設は過小となる可能性も高い。

そこで、容量市場の中に、長期脱炭素電源オークションという別市場が設置されることとなった。容量市場は 4 年後の 1 年間の容量のみの募集を毎年繰り返すが、この長期脱炭素電源オークションは、容量募集期間は原則 20 年とすることとされた。また、供給力提供開始期限は電源によって長期間の開発による投資リスクの高さとそれに応じたリターンの違いがあるという特徴の違いに応じて、表 3.6.3-3 のように、差異を設けることとなった。これによって、脱炭素電源の新設を促すインセンティブとして一定の役割が果たされると考えられる。ただし、長期脱炭素電源オークションを活用した場合、原則、市場収益の 9 割は還付しなければならない。長期での費用回収の予見性を高めて投資リスクは小さい形にはなっているものの、投資リスクとリターンのバランスがとれていて、民間投資が進むのか等、引き続き、注視していく必要がある。

- 民間事業者の投資意思決定においては、「標準ケース」、「アップサイドケース」、「ダウンサイドケース」といった各ケースの発生確率を分析した上で、リスクに見合うだけの収入見通しがあれば、投資が行われるのが一般的。
- 発電事業は初期に多額の投資を伴うことや、前頁の発電事業者の収入構造を踏まえれば、**スポット市場**からの将来収入の**ダウンサイドリスクが大きい場合には、投資が十分に進まない可能性**がある。
- 電源投資を安定的に確保する観点からは、**将来収入のダウンサイドリスクへの対応が課題**として挙げられるのではないか。

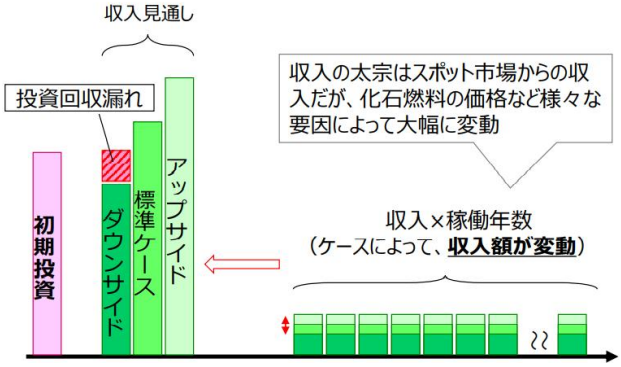


図 3.6.3-5 投資リスクの課題

（出典：制度検討作業部会資料 [9]）

表 3.6.3-3 脱炭素長期電源容量市場の設計：供給力提供開始期限

電源種	供給力提供開始期限（案）
太陽光	5年（法・条例アセス済の場合：3年）
風力、地熱	8年（法・条例アセス済の場合：4年）
水力	12年（法・条例アセス済の場合：8年） （多目的ダム併設型についてはダム建設の遅れを考慮）
水素・アンモニア（専焼）、バイオマス 水素・アンモニア混焼のLNG、CCS火力 既設火力の改修（水素・アンモニア混焼、バイオマス専焼）	11年（法・条例アセス済・不要の場合：7年）
原子力	17年（法・条例アセス済の場合：12年）
蓄電池	4年
LNG（時限的に対象）	6年 ※21頁のとおり、早期に供給力を提供開始できる新設・リプレース案件のみを対象とするため、供給力提供開始期限を短く設定

（出典：制度検討作業部会資料 [10]）

具体的な制度設計が進められ、容量市場の付帯的な市場として、2024 年には長期脱炭素電源の初回のオークションが行われた。応札および落札容量を図 3.6.3-6 に示す。応札、また落札も蓄電池が多い結果であった。現状では、容量市場に対しては、極めて規模が小さい市場でスモールスタートが切られたところであるが、脱炭素電源への移行が必要になる中、費用を抑制しつつ、かつ安定供給に資するようにするため、どのように拡大していくかは今後の課題である。

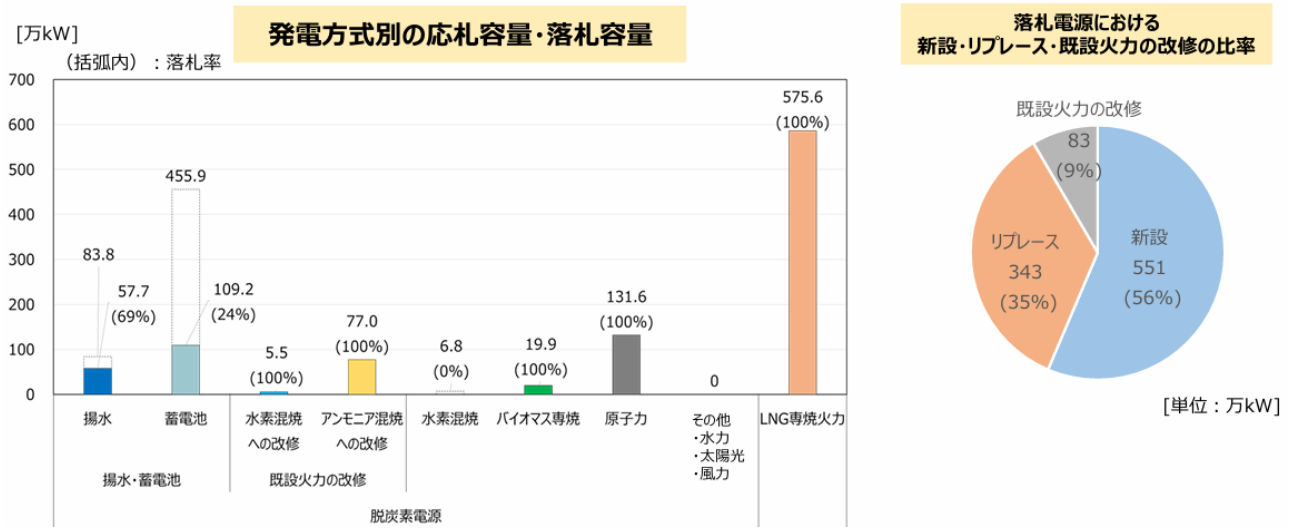


図 3.6.3-6 長期脱炭素電源オークション（応札年度：2023 年度）の約定結果

（出典：電力広域的運営推進機関 [11]）

なお、2025 年のオークションでは、揚水、蓄電池に加え、化学的手法、熱を用いた蓄電など、より幅広い蓄電技術が入札対象として認められる方針が示されたところである。また、2025 年オークションから、CCS についても、水素やアンモニア発電と競合的に入札可能とする方針が示されたところである。脱炭素に資する電源のコスト低下を促すためにも、競争的な制度は重要と考えられる。

③　予備電源市場

容量市場では、厳気象対応分などの予備力を見込んではいるが、大規模災害等により大きな電源脱落が起こった場合に対する予備電源は確保されていない。容量市場でその予備電源まで確保しようとすれば、現状の容量市場の仕組みでは原則シングルプライスオークションで価格決定がされるため、大きな容量募集となれば、約定価格が引きあがり、小売全体での費用負担が大きくなる恐れもある。そこで、大規模災害等により大きな電源脱落が起こった場合に対応するため、電源へのリクワイアメント等を容量市場電源と変える形で、2024 年に予備電源市場が創設された。

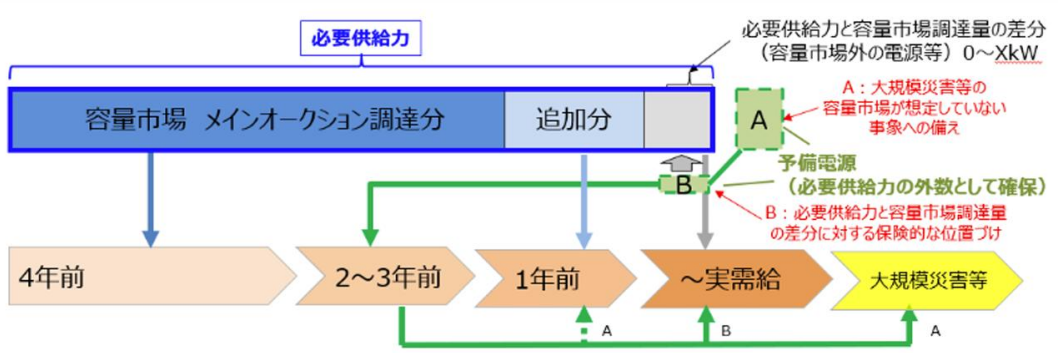


図　3.6.3-7 必要供給力と容量市場における調達量、予備電源の関係

（出典：電力広域的運営推進機関 [12]）

しかし、電源の維持コスト等に対して、得られる支払い額が小さい理由や、その他、様々な理由があったと見られるが、2024 年の募集に対しては応札ゼロとなった [13]。引き続き、要件を緩和するなど、制度修正を行って、次年度の募集を行っていく方針が示されている。

(3) 需給調整市場

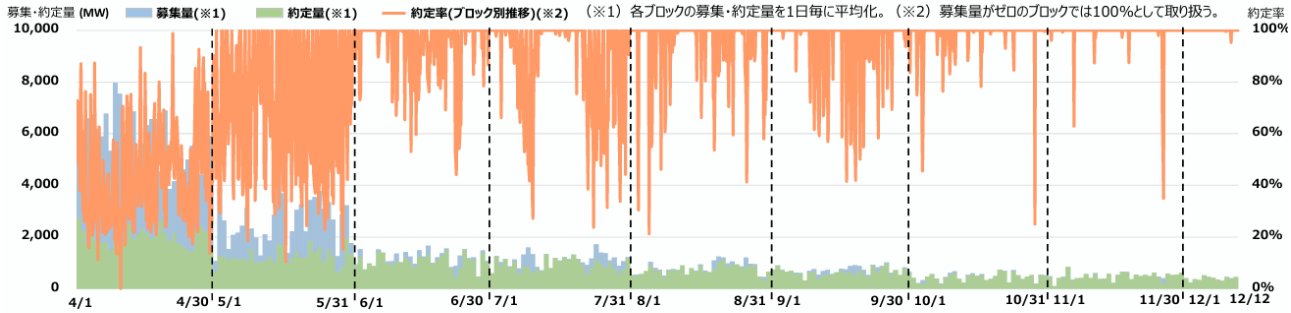
変動性再エネが増大してくる中で、ΔkW の取引となる需給調整市場の重要性が増している。

政府は、2021 年 4 月より、エリアを越えた広域的な調整力の調達・運用と、市場原理による競争活性化・透明化による調整力コスト低減を図るため、需給調整市場を開設し、三次調整力②（三次②）の取引を開始、2022 年 4 月には三次調整力 ①（三次①）の取引を開始した。2024 年 4 月に残りの二次調整力①②（二次①、二次②）、一次調整力（一次）の取引を開始した。

しかし、2024 年 4 月以降、募集量に対する応札量・約定量の未達が発生した。前日商品については調達費用の高騰も大きな課題となった（図 3.6.3-8）。政府は、緊急的な措置をして募集量の削減を行い、調達費用の抑制を図った。対策後、落ち着きはしているものの、4～6 月の間の調達費用総額は、前年度に比べ相当大きな額となった（図 3.6.3-9）。

今回の問題は、制度的な問題でもあるものの、大きくは、変動性再エネが増大している中で需給調整が難しくなってきており、それに要する費用が大きくなっていくことの警鐘が市場を通じて現れたとも考えられる。

このような事態もあり、政府は、kWh とΔkW の同時約定を行って、両者合わせたコストの最小化を図るべく、同時市場の導入を検討している。しかし、仮に最適化可能なシステム構築ができたとしても、短期断面であり、kW 市場や燃料の長期調達を含めた、長期断面まで含めた最適化ではないので、3E に資する全体最適に資する制度設計をどのようにしていくべきかは大きな課題が残っている。



	4/1~4/30	5/1~5/31	6/1~6/30	7/1~7/31	8/1~8/31	9/1~9/30	10/1~10/31	11/1~11/30	12/1~12/12
1日あたり前日商品募集量(MW/日)	46,710	20,746	9,429	8,965	6,379	5,718	3,686	3,853	3,081
約定率平均	34.3%	48.2%	90.3%	83.2%	91.9%	89.7%	96.8%	98.4%	99.9%

（出典）電力需給調整力取引所からの提供資料より事務局作成（速報値）

図 3.6.3-8 需給調整市場約定率の推移（2024 年 4～12 月）

（出典：制度検討作業部会資料 [14]）

【2024/4/1~6/30 調達費用総額】

(百万円)	週間商品			前日商品(うち蓄電池・DR)			総額		
	4月	5月	6月	4月	5月	6月	4月	5月	6月
北海道	1,213	1,607	2,189	1,397 (231)	337 (23)	82 (19)	2,611	1,944	2,271
東北	923	782	1,799	359 (55)	1,243 (33)	223 (6)	1,281	2,024	2,023
東京	486	839	984	7,002 (8)	4,783 (1)	1,228 (0)	7,488	5,622	2,212
中部	981	711	595	1,515 (83)	2,575 (100)	651 (42)	2,496	3,286	1,246
北陸	155	97	136	41 (0)	107 (13)	27 (7)	196	204	163
関西	2,173	2,170	2,572	1,596 (417)	718 (177)	234 (31)	3,768	2,888	2,806
中国	605	839	763	967 (87)	719 (78)	298 (30)	1,572	1,558	1,061
四国	548	413	375	65 (10)	82 (25)	47 (0)	613	495	422
九州	2,938	2,931	2,835	683 (146)	694 (178)	638 (34)	3,621	3,625	3,474
合計	10,022	10,389	12,249	13,626 (1,036)	11,257 (628)	3,428 (170)	23,647	21,646	15,677

【参考：2023年度調達費用総額】

三次①	三次②	総額
3,421	2,078	5,499
739	6,414	7,153
628	7,708	8,336
2,430	6,777	9,207
39	237	276
26,268	6,131	32,399
860	5,112	5,972
5,167	5,120	10,286
10,067	6,325	16,391
49,619	45,902	95,519

（出典）電力需給調整力取引所からの提供資料より事務局作成（速報値）

図 3.6.3-9 需給調整市場の調達費用（2024 年 4～6 月）

（出典：制度検討作業部会資料 [14]）

3.6.4　電力システム改革の検証

以上記載してきたような電力システムを取り巻く課題がある中、2024 年度は電力システム改革の検証が行われた。電力システム改革検証では、現状の評価として図 3.6.4-1 のように整理がなされ、電力システムに影響を及ぼし得る経済社会環境変化として図 3.6.4-2 のような整理がなされた。広域融通などで良い結果も出ているものの、火力発電の収益性低下に伴って供給力が低下し、安定供給への懸念が出てきていること、電気料金を低く抑制できているとまでは言えないこと、多数の小売事業者の参入はあったものの、需要家保護の観点からの懸念も生じていることなど、むしろ課題意識も大きくなっていると整理がなされたところである。昨今の経済社会情勢変化としては、DX による電力需要量の増大や CN への対応、安全保障リスクの高まりから LNG の長期調達の重要性の増大なども指摘されている。

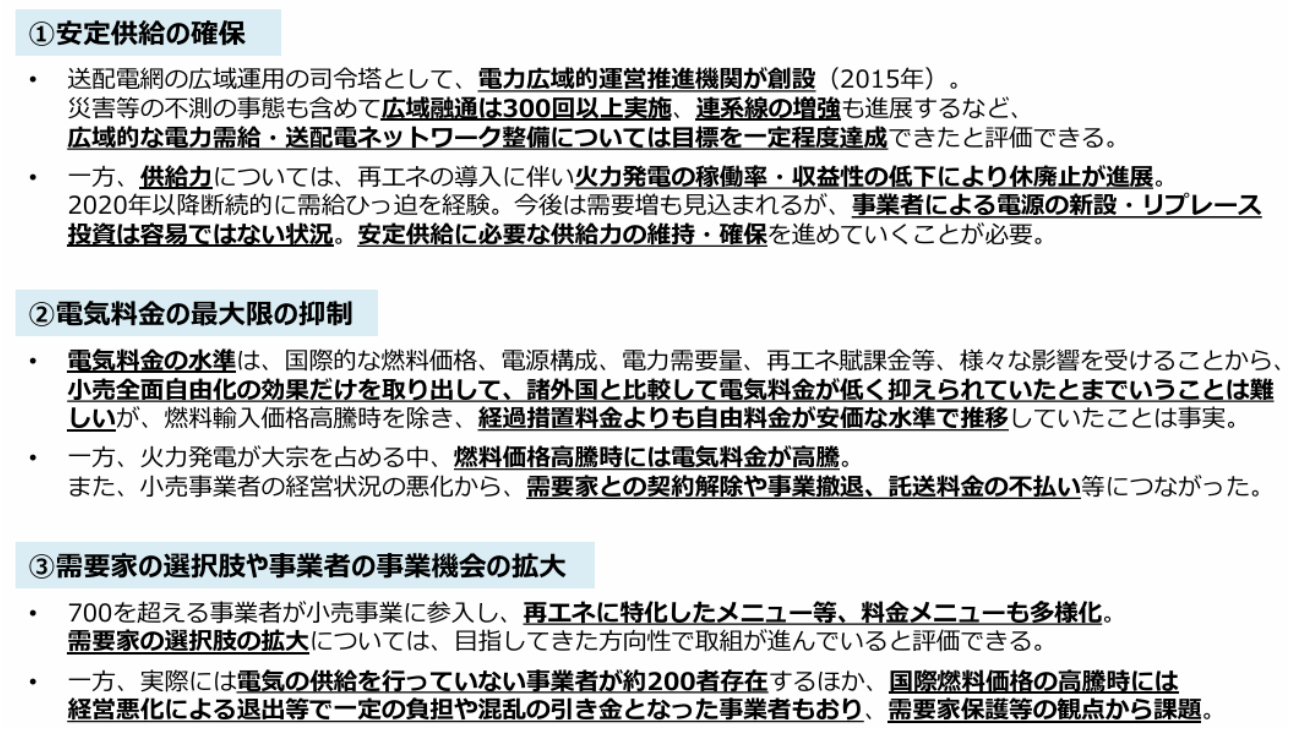


図 3.6.4-1 電力システム改革検証で示された現状の評価

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 [15]）

①世界的なDXや脱炭素化の流れの加速

- **国際的なDXやカーボンニュートラルへの対応が加速化**し、排出削減と経済成長を共に実現するGXに向けた**大規模な投資競争が激化**。
- また、AIの進展による計算量の増大に伴い、**将来的な電力需要は増加する見込み**。

②地政学的リスクを含む経済安全保障リスクの高まり

- **地政学的な環境の変化に伴う国際燃料価格の高騰等へのリスク**が高まりつつあり、海外調達先の多角化、徹底した省エネの展開、エネルギー自給率の向上等の対応が求められる。
- 一方、**LNGは長期契約による調達が多い**ため、2022年の国際燃料価格高騰のピーク時にも欧州の天然ガスやアジアのLNGほどの急騰は避けられたが、LNGスポット価格の影響等で発電用の一般炭が未曾有の高水準に高騰。

③世界全体でのインフレの進行

- 世界全体でエネルギー・食糧価格や賃金の上昇を背景としたインフレが進行しており、**物価高騰等の電気料金の上昇要因への対応といった課題**にも直面。

図 3.6.4-2 電力システム改革検証で示された電力システムに影響を及ぼし得る経済社会環境変化

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 15)）

その上で、今後目指すべき方向性や対応方針として、それぞれ、図 3.6.4-3、図 3.6.4-4のような整理がなされた。電力自由化は、短期的なコスト抑制には資する面が大きいが、より気候変動対応やエネルギー安全保障のような長期的かつグローバルな視点での課題への対応手段としては、調和性が良いものとは考えられず、市場の失敗を是正する、規制的な手法との調和をどのように図っていくかは、大きな課題として残っており、引き続き、制度の改良を行っていく必要がある。

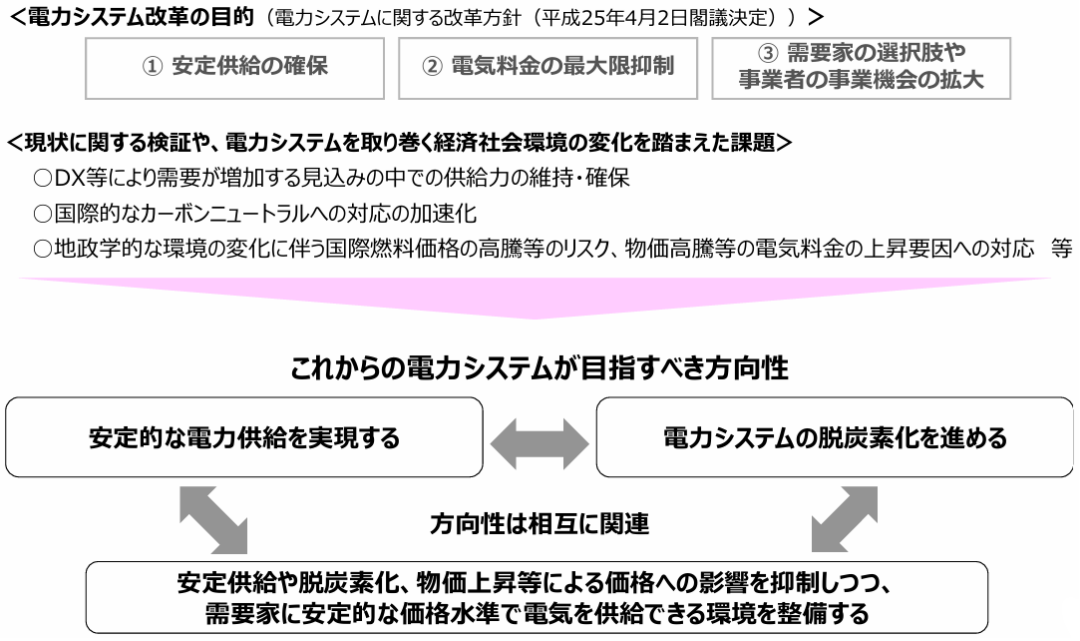


図 3.6.4-3 電力システム改革検証で示された電力システムが目指すべき方向性

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 15)）

1．安定供給確保を大前提とした、電源の脱炭素化の推進

○**世界的な脱炭素化の流れ**や、**20年ぶりの電力需要増**が見込まれる中で、**安定供給と脱炭素化の両立に向けて、長期的かつ継続的に必要な電源投資が行われ、安定的に電源の運用ができるような仕組みを構築**することが必要。

＜対応方針＞

- **事業期間中の市場環境の変化等に伴う収入・費用の変動に対応できるような制度措置や市場環境を整備**。
- **水素・アンモニア、CCUS 等を活用した火力の脱炭素化**について、技術開発やコストなどを踏まえた時間軸や排出量にも留意しつつ、**長期脱炭素電源オークション等を通じ、事業者の予見可能性を確保しながら進めていく**。
- 燃料の安定的確保の見通しや供給力を提供する事業者の実態確認等、**発電事業者に求められる機能や役割を整理**。

2．電源の効率的な活用に向けた系統整備･立地誘導と柔軟な需給運用の仕組構築

○**再生可能エネルギー**の更なる**導入拡大**と電力の**安定供給を実現**するためには、**電源と需要の状況を踏まえた形での系統の効率的整備、供給力や調整力の確保、短期の需給運用の効率的実施**等が必要。

＜対応方針＞

- **地域間連系線の整備**について、マスタープランの見直し等の検討を進めるとともに、**大規模系統整備に係る託送料金制度における費用回収の在り方**等、制度的な対応を含めた**資金調達環境の整備**について検討。
- **地内基幹系統等**について、**一般送配電事業者等が効率的・計画的に整備を進めるための仕組み**を検討。
- データセンター等の**系統接続申込みの規律の確保**及び**大規模需要の効率的な系統整備の観点での適地への誘導**。適地における**先行的・計画的な系統整備を進めるための枠組み**を検討。
- **系統制約を考慮しつつ、供給力と調整力を同時に約定させる同時市場の導入に向けた検討**を本格的に進める。

3．市場を通じた、安定的な価格での需要家への供給に向けた小売事業の環境整備

○スポット市場には一定の厚みが確保されたが、**燃料価格の高騰**など**市場環境が厳しい局面**においては、**小売電気事業者の退出、電気料金の急激な変動**など、**需要家に一定の負担や混乱**を生じさせ、**国民経済に大きな影響**を与えた。

○需要家に対する**安定的な水準の価格による電力供給を実現**するためには、**小売事業の環境整備**が必要。

＜対応方針＞

- **電源調達手段をより多様化**するため、長期取引を含めた相対取引やブローカー経由の取引等の活用、先物市場・先渡市場・ベースロード市場などの市場を含む**取引制度の拡充・再整備**等を検討。
- 需要家の脱炭素ニーズや発電・小売電気事業者の創意工夫が活かされるよう**内外無差別な卸売の考え方を整理**。
- 現行制度も踏まえつつ、**量的な供給能力（kWh）の確保**に関し、**小売電気事業者に求める責任・役割**やその**遵守を促す規律**、それを前提とした**市場や卸取引を含む制度措置の必要性**等について検討を深め、必要な措置を実施。
- **経過措置料金**は、**解除が妥当な状況と評価された地域はなく、引き続き競争状況の確認を継続**。その上で、経過措置料金の**実体的な役割の是非や今後の制度的な対応の必要性、低圧需要家に対するセーフティネットの在り方・必要性**等について改めて検討。

4．共通する課題

○電源・系統への投資に対するファイナンス

・市場環境の大きな変化に伴う**事業の不確実性の高まり**等を受けて、**事業者の資金調達が難しく**なり、また、金融機関・機関投資家等にとっても、**融資・投資のハードルが高まってきている中**、民間金融機関等が取り切れないリスクについて、**公的な信用補完の活用とともに、政府の信用力を活用した融資等、脱炭素投資に向けたファイナンス円滑化の方策**等を検討。

○電力システムにおける公的役割を担う機関の体制強化

・系統整備、需給運用、電源投資などに関して公的役割を担う、日本電力卸取引所、電力需給調整力取引所、電力広域機的運営推進機関の体制の強化に向けて、制度や予算措置等の必要な対応を行っていく。

図 3.6.4-4 電力システム改革検証で示された電力システムが直面する課題と対応方針

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 [15]）

参考文献（第 3.6 節に関するもの）

1) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 「電力小売全面自由化の進捗状況について」 (2025)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/086_03_00.pdf
2) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 資料 (2024)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/079_03_00.pdf
3) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 資料 (2024)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/084_03_00.pdf
4) 日本政府、GX 実現に向けた基本方針、2023 年 2 月、
https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html
5) 電力広域的運営推進機関 容量市場の在り方等に関する検討会 (2023)
https://www.occto.or.jp/iinkai/youryou/kentoukai/2022/files/youryou_kentoukai_43_03.pdf
6) 電力広域的運営推進機関 調整力及び需給バランス評価等に関する委員会 (2024)
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2023/files/chousei_94_01.pdf
7) 電力広域的運営推進機関 容量市場の在り方等に関する検討会 (2024)
https://www.occto.or.jp/iinkai/youryou/kentoukai/2024/files/youryou_kentoukai_56_06.pdf
8) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会 「容量市場について」(2025)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/099_03_03.pdf
9) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会 「電源確保について」(2021)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/060_05_00.pdf
10) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会 「長期脱炭素電源オークションについて」(2022)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/070_05_00.pdf
11) 電力広域的運営推進機関 容量市場の在り方等に関する検討会 (2024)
https://www.occto.or.jp/iinkai/youryou/kentoukai/2024/files/youryou_kentoukai_55_03.pdf
12) 電力広域的運営推進機関 「予備電源募集要綱等に関する説明会資料」 (2024)
https://www.occto.or.jp/yobidengen/files/yobidengen_setsumeikai_2024_r1.pdf
13) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会 「予備電源について」(2024)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/097_04_00.pdf
14) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会 「需給調整市場について」(2024)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/098_03_00.pdf
15) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 「電力システム改革の検証結果と今後の方向性（案）の概要」(2025)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/085_03_01.pdf

3.7 企業情報開示（TCFD など）、ESG 投資、グリーンボンド等の動向

3.7.1 気候変動情報開示

パリ協定の実施フェーズに入り、企業による気候関連の情報開示に対する要請が高まっている。国や地域によっては有価証券報告書等の財務情報に加え、気候変動に関する情報の開示義務化・法制化も検討されている。企業は一貫した手法で排出量を算定し、排出削減目標に向けた進展を対外的に示していくことが求められるようになってきている。小節ではサステナビリティ情報開示基準、及び GHG 排出算定のガイドラインとなっている GHG プロトコルについて課題や最新の動向をまとめた上で、今後の見通しについて整理する。

(1) サステナビリティ情報開示

パリ協定が成立した 2015 年、G20 の要請を受けた金融安定理事会（Financial Stability Board: FSB）は、気候関連の情報開示及び金融機関の対応をどのように行うかを検討するため「気候関連財務情報開示タスクフォース（Task force on Climate-related Financial Disclosures: TCFD）」を設置した。2017 年に TCFD が公表した報告書[1)]では、企業等に対し財務に影響しうる気候変動関連リスク、及び機会に関する情報を開示することが推奨されていた。TCFD ガイドラインによって世界的に気候情報開示を標準化していく狙いがあったが、企業の自発的な開示に委ねられていたため実際にはあまり浸透しなかった。

その後、国際会計基準（International Financial Reporting Standards: IFRS）を策定する IFRS 財団が、2021 年に企業の非財務情報開示の国際基準を策定する機関として「国際サステナビリティ基準審議会（International Sustainability Standards Board: ISSB）」を設立した。ISSB は 2023 年 6 月に各国の法定開示基準の土台となる IFRS S1 号「サステナビリティ関連財務情報の開示に関する全般的要求事項」と IFRS S2 号「気候関連開示」を公表した。翌月、世界の証券市場や先物市場を規制する組織の連合体である証券監督者国際機構（International Organization of Securities Commissions: IOSCO）がこれを承認するとともに、世界各国の規制当局に対し ISSB 基準をそれぞれの規制枠組みにどのように組み込むことができるかを検討することを呼びかけた。これに応じサステナビリティ関連情報開示を検討中、もしくは検討が完了した国や地域（2024 年 9 月時点）は以下のとおり；ボリビア、ブラジル、カナダ、チリ、コスタリカ、エルサルバドル、オーストラリア、バングラデシュ、中国、香港、日本、マレーシア、パキスタン、フィリピン、シンガポール、韓国、スリランカ、台湾、EU、ガーナ、ケニア、ナイジェリア、スイス、タンザニア、トルコ、ウガンダ、英国。

なお、TCFD は企業開示のモニタリング機能は ISSB に移管し、2023 年 10 月のステータスレポート発表をもって解散している。

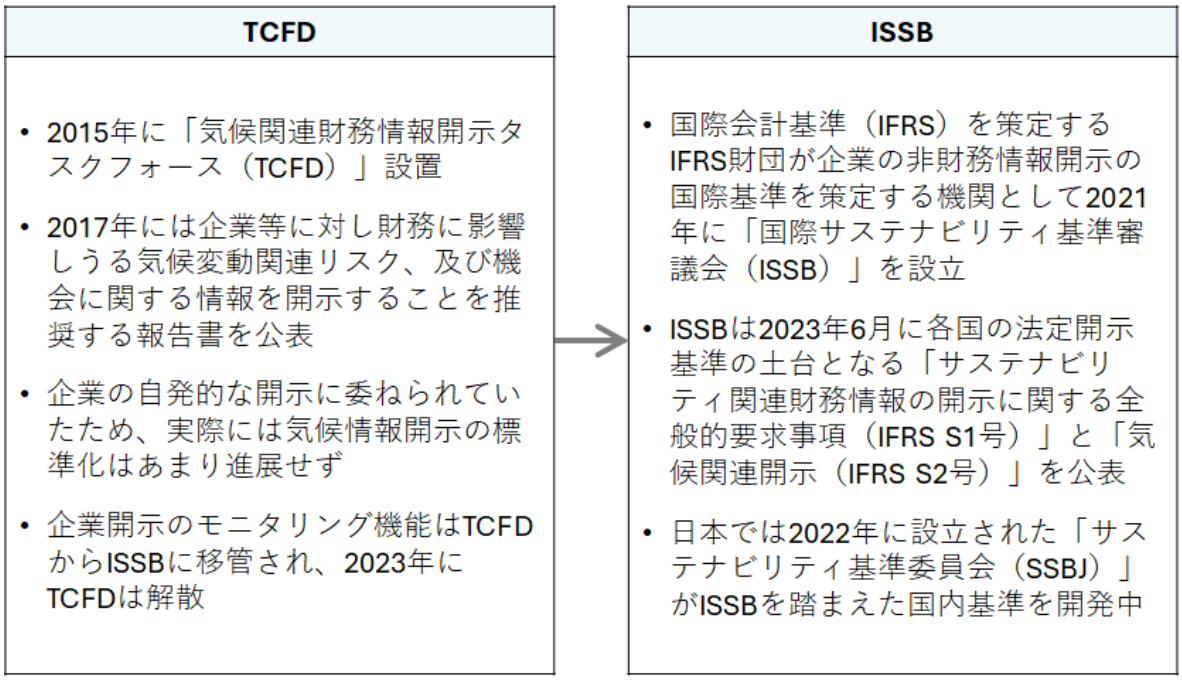


図 3.7.1-1 TCFD から ISSB へ

（出典）和田 [2)]

日本ではサステナビリティ基準委員会（Sustainability Standards Board of Japan: SSBJ）が IFRS S1 号及び IFRS S2 号をどのような形で国内開示基準に取り入れるか検討している。2024 年 3 月に草案が公開され、25 年 3 月までに最終化する予定になっている。この SSBJ 基準は金融商品取引法に基づく法的枠組みに組み込むことが想定されており、法的強制力をもつことになる。SSBJ 基準は概ね ISSB 基準に沿ったものだが、IFRS S1 号の基本的な事項を定めた部分をユニバーサル基準（「適用基準」）とした上で、テーマ別基準として「一般開示基準」と「気候関連開示基準」に分けた構成としている（図 3.7.1-2）。

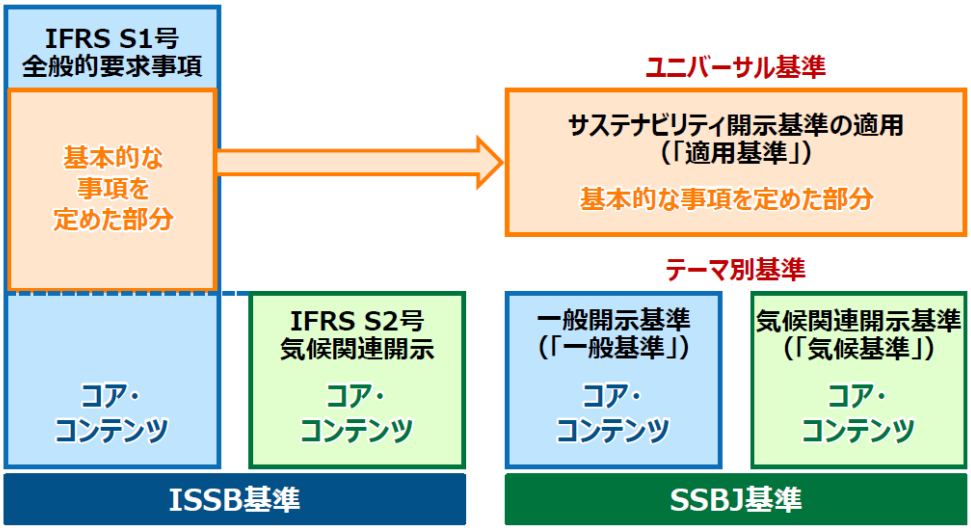


図　3.7.1-2 ISSB 基準と SSBJ 基準

（出典）SSBJ ホームページ

気候関連の産業横断的指標としては IFRS 基準同様、「（GHG プロトコルにもとづいた算定による）スコープ 1、スコープ 2、スコープ 3 の温室効果ガス排出」、「移行リスク」、「物理的リスク」、「機会」、「資本投下」、「内部炭素価格」、「報酬」の開示が求められている。

表 3.7.1-1 SSBJ 気候基準案の概要

項目	主な内容
目的	一般目的財務報告書の主要な利用者が企業に資源を提供するかどうかに関する意思決定を行うにあたり有用な、気候関連のリスク及び機会に関する情報の開示（IFRSS2 号に相当する定め）について定めること
コア・コンテンツ	• TCFD 提言を踏まえ、気候関連のリスク及び機会に関して、ガバナンス、戦略（シナリオ分析に基づく気候レジリエンスの評価を含む）、リスク管理、並びに指標及び目標に関する開示を提供 • ガバナンス、戦略の一部、リスク管理の定めについては、一般基準案とほぼ同じ（「サステナビリティ関連」を「気候関連」に置き換え）
産業横断的指標等	以下の産業横断的指標等に関連する情報の開示 （1）スコープ 1、スコープ 2、スコープ 3 の温室効果ガス排出、（2）移行リスク、（3）物理的リスク、（4）機会、（5）資本投下、（6）内部炭素価格、（7）報酬
GHG 排出	原則として GHG プロトコルを用いることが要求されるが、法域の法令等（例えば温対法）で GHG プロトコルと異なる測定方法が要求される場合は、当該方法の利用が認められる
スコープ 2	ロケーション基準に加え、少なくとも次のいずれかを開示 （1）契約証書を有している場合は、利用者の理解に必要な当該契約証書に関する情報 （2）マーケット基準によるスコープ 2 温室効果ガス排出量の開示
スコープ 3	カテゴリー別にスコープ 3 温室効果ガス排出量を開示 資産運用、商業銀行、保険に関する活動の 1 つ以上を行っている場合、又は、それらを業として営むことについて企業が活動する法域の法律等により規制を受けている場合、投融資先の排出量（ファイナンスド・エミッション）について開示
産業別の指標	産業別の指標のうち、主なものを開示 開示する産業別の指標を決定するにあたり、ISSB の「産業別ガイダンス」については、（適用は要求されないが）参照し、その適用可能性を考慮
気候関連の目標	気候関連の目標がある場合、当該目標に関する情報を開示（温室効果ガス排出目標を含む）

企業のバリューチェーンで発生する間接的な温室効果ガス排出量、いわゆるスコープ 3 排出も開示が義務化されている。開示にあたっては、GHG プロトコルのスコープ 3 基準（2011 年）のカテゴリー（上流は購入した財及びサービス、資本財、スコープ

1 温室効果ガス排出又はスコープ 2 温室効果ガス排出に含まれない燃料及びエネルギー関連の活動、上流の輸送及び流通、事業において発生した廃棄物、出張、従業員の通勤、上流のリース資産/下流は下流の輸送及び流通、販売した製品の加工、販売した製品の使用、販売した製品の廃棄処理、下流のリース資産、フランチャイズ、投資）に沿ってカテゴリー別に開示することが求められている。ただし、スコープ 3 排出を正確に把握することは難しく、当該企業が直接関与できるスコープ 1 やスコープ 2 排出に算定精度、信頼度の面で劣っている。そのため、スコープ 3 排出量の算定で取引先提供のデータに誤りが事後的に発覚しても虚偽記載等の責任を負わせない（セーフハーバー）方針が示されている。

SSBJ 基準の有価証券報告書における開示義務化については、金融庁の審議会「サステナビリティ情報の開示と保証のあり方に関するワーキング・グループ」において、金融商品取引法に基づく法定開示における位置付けを議論しており、時価総額 1 兆円以上の企業については、2027 年 3 月期、遅くとも 2028 年 3 月期から開始する案が検討されている（図 3.7.1-3）。

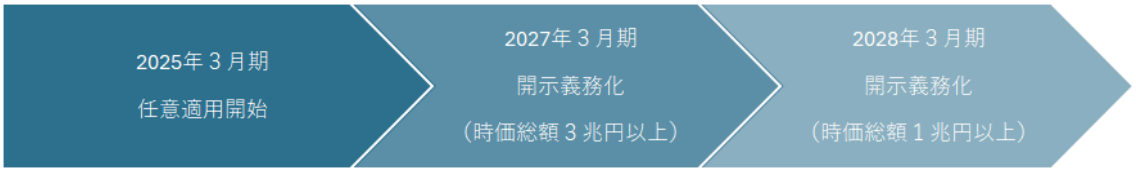


図 3.7.1-3 SSBJ 基準の適用スケジュール案

（出典）和田 [2)]

米国では 2022 年 3 月に米国証券取引委員会（Securities and Exchange Commission: SEC）が気候関連の開示規則案（Rules to Enhance and Standardize Climate-Related Disclosures for Investors）[3)]を公表した。パブリックコンサルテーションでは 2 万 4,000 件を超える意見が提出され、それらのコメントを踏まえた修正を経て、2024 年 3 月に最終規則が採択された。規則案の段階では、スコープ 1、スコープ 2、スコープ 3 の排出が対象となっていたが、採択された最終規則ではスコープ 3 の開示要件が削除されるなど開示要件が緩和されている。ただし、企業や業界団体は過剰規制であることを主張し、他方、環境保護団体などは規制が不十分であることを訴え、SEC に対する提訴が多発した。米国連邦控訴裁判所は訴訟の審理の間 SEC に対して規則の一時停止を命じ、同年 4 月、SEC は規則を一時停止した。さらに、政権交代によりトランプ政権が発足したことで GHG 開示のような問題についての規則制定権限が SEC にあるのかということが争点となった。現在の SEC は規則制定権限を有しないというスタンスをとっており、2025 年 2 月には SEC のマーク・ウエダ委員長代行が GHG 開示規則の効力を争う訴訟の停止を裁判所に申し立てた。これにより気候情報開示規則の廃止に向けた動きが加速するとみられている。

EU では 2023 年 1 月に企業サステナビリティ報告指令（Corporate Sustainability Reporting Directive: CSRD）が発効した。CSRD は、サステナビリティ事項の報告に関する制度的な枠組みを定めるものであり、その具体的な報告項目や内容については、

欧州サステナビリティ報告基準（European Sustainability Reporting Standards: ESRS）において定められるものとされ、2024 年 1 月から順次適用されている。気候変動は ESRS の中の一つの開示項目（ESRS E1）となっている。ただし、EU では詳細な報告義務が企業活動の足かせとなり EU の競争力を損なっているという反省から、2025 年 2 月にオムニバスパッケージ（規制改革パッケージ）が発表され、規制の簡素化に向けて動き出している。

(2) GHG プロトコル

1992 年に採択された気候変動枠組条約において、締約国は国別報告書を通じて温室効果ガスインベントリを提出することが義務付けられた。これを受け IPCC は 1996 年に温室効果ガスインベントリ作成方法のガイドラインをまとめ（その後、2006 年と 2019 年に改訂）、各国はこれに沿って温室効果ガスを算定・報告している。しかし、企業活動に関する排出については国際機関などが策定した基準はなく、GHG プロトコルがデファクトスタンダードとして用いられている。

GHG プロトコルは企業やプロジェクトなどの GHG 排出量を算定・報告するためのガイドラインで、世界資源研究所（WRI）と持続可能な開発に関する世界経済人会議（WBCSD）の 2 つの非政府組織が中心となり企業、NGO、政府機関など広範なステークホルダーと協議を重ねながら開発された。2001 年に「GHG プロトコル：事業者排出量算定報告基準」の第一版が発行され、その後、プロジェクトの排出に関する算定基準（2006 年）や製品ライフサイクルに伴う排出の算定報告基準（2011 年）、地域のインベントリのための基準（2014 年）など様々な基準が開発されている。

GHG プロトコルでは、企業が所有または管理する排出源から直接排出されるものをスコープ 1、購入電力に由来する間接排出をスコープ 2、上流の事業活動から顧客や最終消費者による下流までを含めた企業のバリューチェーン全体の GHG 排出をスコープ 3 として評価対象を 3 つのカテゴリーに分類している。

ただし、サプライチェーンからのスコープ 3 排出は企業が直接管理できるスコープ 1 や 2 とは異なり、データの入手が難しく排出削減の目標設定や戦略の実行が難しいといった課題がある。企業が上流と下流の主体（例えば、サプライヤーや顧客）からデータを取得することは困難であり、バリューチェーンも世界中のさまざまなサプライヤーが複雑に絡み合ったネットワークになっているため排出量の把握に不確実性が残る。Stenzel & Waichman[4)]も現在のスコープ 3 排出量の推定は業界平均やその他の概算に基づいており、精度が低いことを指摘している。また、既存の基準（ISO 基準、GHG プロトコル基準など）やセクターガイドライン（製品分類規則や製品環境フットプリント法など）には曖昧さがあり、排出量推定方法も複数あるため、推計に不確実性がともなっている。さらにスコープ 3 の排出量算定では同一の排出が複数の事業者のインベントリに重複して計上されるダブルカウントが生じやすく、Gopalakrishnan[5)]は適切な責任分担ルールを設定することの必要性を訴えている。

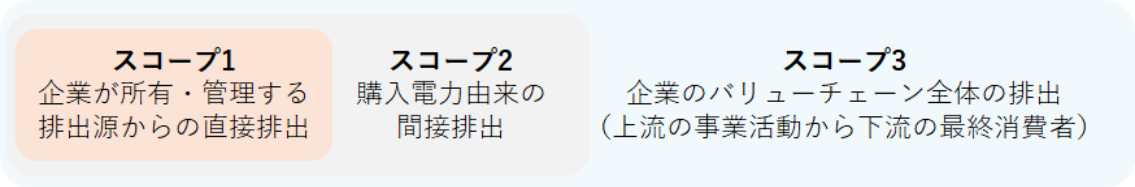


図 3.7.1-4 事業者の排出評価対象

GHG プロトコルは企業レベルの GHG 算定のガイドラインとして広く活用され、サステナビリティ情報開示基準においても GHG プロトコルに準拠した形で排出量算定が行われることになっている。しかし、近年ではネットゼロ目標を掲げる企業が増え、この目標に向けた進捗の測定など多様な形で活用されるようになっている。ネットゼロに向けたプロセスを評価する場合、排出量を正確に把握するだけでなく、対象範囲や方法論、ベースライン設定など様々な論点がある。排出量算定（inventory accounting）に加え排出削減量算定（intervention accounting）も重要となり、従来の方法論では実情にそぐわなかったり、指標に十分に反映しきれなかったりするケースが出てきている。そのためネットゼロ目標に向けた進捗をより適正に測定、計画、追跡できるよう 2026 年後半の完成を目指し GHG プロトコルの改訂が進められている（図 3.7.1-5）。

Workstream	2025	2026	2027	2028
Corporate Standard	• Summary of decisions taken on key issues as of Q4 2025 agreed by the TWG and ISB	• Draft revised Corporate Standard for public consultation	• Revised Corporate Standard	
Scope 2	• Draft revised text on key requirements for public consultation	• Revised text on key requirements • Draft revised Scope 2 Standard and Guidance for public consultation on topics not included in the 2025 public consultation	• Revised Scope 2 Standard and Guidance	
Scope 3	• Summary of decisions taken on key issues as of Q4 2025 agreed by the TWG and ISB	• Draft revised Scope 3 Standard and Guidance for public consultation	• Revised Scope 3 Standard and Guidance	
Actions and Market Instruments	• Summary of decisions taken on key issues as of Q4 2025 agreed by the TWG and ISB • Targeted public consultation on select key issues related to actions and market instruments at the end of 2025 to inform subsequent standard development		• Draft standard and guidance on impacts of actions and market instruments for public consultation	• Standard and guidance on impacts of actions and market instruments
Land Sector and Removals	• Land Sector and Removals Standard and Guidance			

図 3.7.1-5 GHG プロトコル改訂スケジュール

（出典）GHG プロトコル ホームページ

改訂にあたっては多様なステークホルダーと意見交換を積み重ね、論点を整理し、透明性を確保しながら規格開発が進められている。

ネットゼロの評価という点では排出量を算定するだけでなく、排出削減や炭素除去を捕捉することが必要になる。GHG プロトコルの改訂作業の中で、フランスの環境エネルギー管理庁(ADEME)の支援を受けたプロジェクトである Net Zero Initiative[6]は、企業の取り組みとしては排出の測定、削減、オフセットが必要であるとしおり、そのパフォーマンスを測定するための指標として図 3.7.1-6 のような分類を提案している。排出対象については自社内（GHG プロトコルのスコープ 1 と 2 に相当)、上・下流（スコープ 3 に相当)、バリューチェーン外に 3 分類し、取り組みの柱としては排出削減（Pillar A)、削減貢献量（Pillar B)、炭素除去（Pillar C）という 3 つの異なるタイプの行動を区別し、それぞれについて独立した形で報告することによって企業の取り組みの全体像を把握するとともに、排出量を正確に算定するためのフレームワークを提示している。

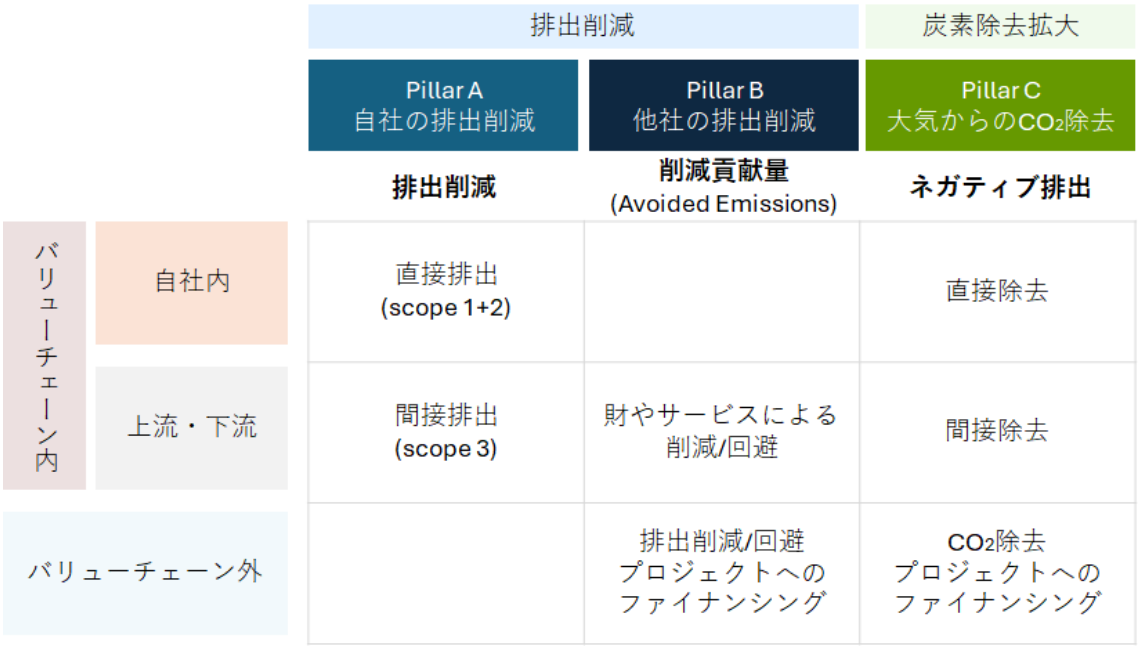


図 3.7.1-6 評価指標のフレームワーク

（出典）和田 [7]

他方、カーボンクレジットや削減貢献量をネットゼロ目標達成の手段、あるいは排出量の算定にあたってカウントすることについては否定的な見解もある。カーボンクレジットを活用した排出量のオフセットを許容すると自社の削減活動が後回しになる、炭素除去クレジットのほとんどが途上国における植林によるものであり、これが土地収奪やグリーンウォッシュにつながるといった批判があり、SBTi（Science Based Targets initiative）ではネットゼロ目標を評価するにあたりカーボンクレジットを活用することについては保守的な傾向がみられる。

GHG プロトコルでは、このような論点について「企業基準（Corporate Standard)」、「スコープ 2」、「スコープ 3」、「行動と市場手段（Actions and Market Instruments)」、

「森林の算定（Forest Carbon Accounting)」に関する作業グループ（Technical Working Groups）を設置し、現在、テクニカルな検討を進めている。

参考文献（第 3.7.1 節に関するもの）

1) Task Force on Climate-related Financial Disclosures. “Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures” (2017)
2) 和田謙一; グローバルな気候変動目標と整合した企業行動, (2025), 第 41 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
3) https://www.sec.gov/rules/proposed/2022/33-11042.pdf
4) Stenzel, Aurel, and Israel Waichman. "Supply-chain data sharing for scope 3 emissions." npj Climate Action (2023)
5) Gopalakrishnan, Sanjith. "The why and how of assigning responsibility for supply chain emissions." Nature Climate Change 12 (2022)
6) César Dugast; Net Zero Initiative – A Framework for collective carbon neutrality. Carbone 4 (2020)
7) 和田謙一; カーボンアカウンティング規格開発の動向と課題, (2024), 第 40 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス

3.7.2 ESG 投資、グリーンボンド等の動向

(1) 背景

2006 年に国連は機関投資家による投資判断プロセスに ESG 基準:環境（Environment)、社会（Social)、企業統治（Governance）を組み込む「責任投資原則 （Principles of Responsible Investment : PRI)」を提唱した。PRI[1)]によると、2025 年 3 月 17 日時点で、PRI への署名機関は、5,294 機関（内、投資マネージャー4,044、アセットオーナー749、サービスプロバイダー501）である。地域別にみると、最も多いのが米国であり（990 機関)、次いで英国・アイルランド（823 機関)、フランス（424 機関）であり、日本は 145 機関が署名している。2023 年末時点（5,372 機関が署名）と比較して若干減少傾向にある。

脱炭素化社会に向けて金融部門の役割が高まる中で、ESG 投資（サステナブル投資あるいは社会的責任投資とも呼ばれる）は増加傾向にあった。しかし、一方で、米国において ESG 投資に関する反発が高まっている。ESG を巡る議論は、COVID-19 のパンデミック以降、さらに悪化し、株主総会での ESG の見解に関する提案は今後さらに増加すると考えられる。

本節は、近年の反 ESG を巡る動向及び金融に関する民間イニシアティブの方向転換、そして ESG に関するデータを概観し、今後の課題についてまとめることを目的とする。

(2) 反 ESG の広がり

2021 年に民主党のバイデン政権が発足した同年 6 月に、テキサス州では化石燃料関連企業への投資を抑制する金融機関に対し、州の年金基金等が投資をすることを禁じる州法が成立した[2)]。そして、翌年、同法に対応するため ESG に積極的な金融機関の

ブラックリストが公表された[3]。このブラックリストには、ブラックロック、UBS及びBNPパリバなどが含まれている。また、2023年5月に、米国フロリダ州において、ESGの要素を公的資産の投資に組み込まないことを義務付ける「反ESG法」が成立した[4]。このことから、共和党に対する支持基盤がある州を中心に、2025年の米国トランプ大統領の再選前から反ESGの動きは表面化していた。2024年11月には、米テキサス州を含む複数の州が、ブラックロック、バンガード・グループ、ステート・ストリートを提訴し、ESG投資により電気料金を上昇させたことから、これらの企業が反トラスト法に違反していると主張した[5]。

米調査会社Equila (Ho 2025)[6]は、2020年から2024年上半期を対象に、Equilar 500（売上高上位の米国上場企業500社）に含まれる企業の株主総会で提出された全反ESG株主提案を分析した。この場合、反ESGに分類される提案とは、ESGトピックスに関する企業責任の主張を減少させるように求める言及がある提案や、社会及び環境問題に対して企業の責任を求める投資家による介入に批判的な提案を指す。Equilar500の反ESG提案件数は9であったが、2024年上半期は92件に及ぶ。反ESG提案は今後も年次総会で増加していく可能性が高いことを示している。また、ESGの内訳をみると、2024年上半期において、ガバナンス問題が45件と一番多く、次いで社会問題が27件、そして環境問題が20件となっている。一方で、同調査においては、ESG提案は常に過半数の支持を集めることに失敗しており、件数が増加しているにも関わらず、低い支持率で推移している点が言及されている。

(3) 金融に関する民間イニシアティブの動き

本節は、金融に関する民間イニシアティブに焦点をあて、現在の動向を調査する。2021年4月に、前イングランド銀行総裁であったMark Carney国連気候変動・金融特使と、国連気候変動枠組み条約（UNFCCC）におけるCOP26議事国によって、ネット・ゼロを実現する世界経済への移行を加速するため、Glasgow Finance Alliance for Net Zero (GFANZ)[7]が発足した。GFANZは独立した民間団体であり、パリ協定の目標達成に向け、金融部門の取組みを支援することを目的としている。

図 3.7.2-1は2024年11月に公表されたGFANZの進捗報告書[8]におけるGFANZを構成するアライアンスの会員数を表している。2021年発足以来、同会員数は、年々増加し、COP29の時点では700社を超え、金融安定理事会が規定する「グローバルなシステム上重要な銀行（G-SIB)」の80%が参加している。

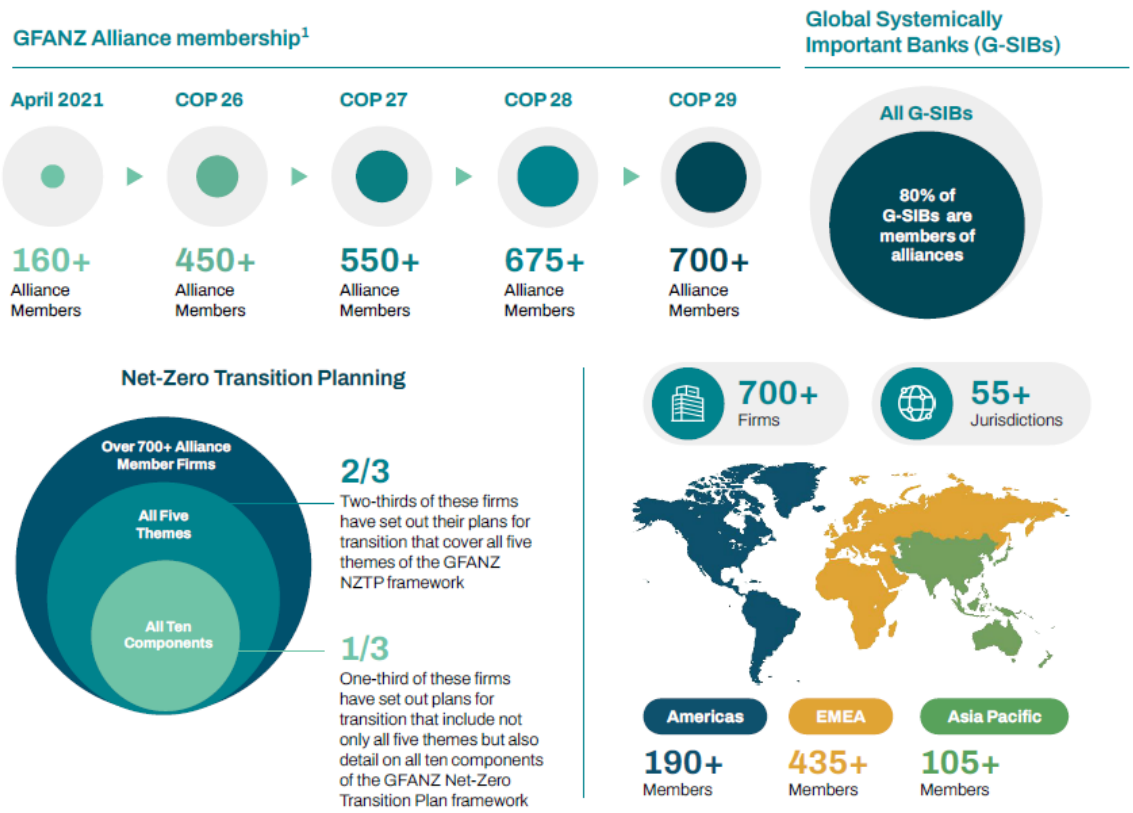


図 3.7.2-1 GFANZ の参加団体

（出典）GFANZ[8)]

設立当初は、同アライアンスへの加盟条件の一つは、UNFCCC 事務局が実施する「Race to Zero」の最低基準を遵守することが定められていた[9)]。同基準は以下の通りである。

- 2050 年までに全排出量スコープのネット・ゼロを達成するため、科学的根拠に基づいたガイドラインを使用
- 今後 10 年間で脱炭素化 50%に相当する 2030 年の暫定目標を設定
- ネット・ゼロへの移行戦略を設定し、公表
- 目標達成に向けた進捗状況について、透明性のある報告と会計処理を実施
- オフセットの使用に関する厳格な制限を遵守

しかし、その後、ロシアのウクライナ侵略によるエネルギー情勢の変化、また、米国の大手銀行が訴訟や取り締まりの懸念から GFANZ からの脱退を検討するようになるなど、COP27（2022 年開催）を前に加盟金融機関の反発が生じ、2022 年 11 月 1 日以降、「Race to Zero」のガイドラインの遵守については触れておらず、条件が緩和された。

現在、GFANZ を構成する金融イニシアティブは以下の 7 つである[9)]。

- Net-Zero Banking Alliance (NZBA)：銀行を対象とした連盟

- Net-Zero Insurance Alliance (NZIA)：保険会社を対象とした連盟
- Net-Zero Asset Mangers Initiative (NZAM)：運用会社を対象としたイニシアティブ
- Net-Zero Asset Owner Alliance (AoA)：アセットオーナーを対象とした連盟
- Net-Zero Financial Service Providers Alliance (NZFSPA)：金融サービスプロバイダーを対象とした連盟
- Net Zero Investment Consultants Initiative (NZICI)：投資コンサルティング会社を対象としたイニシアティブ

2024 年 12 月以降、政治的圧力の高まりを受けて、ゴールドマン・サックス・グループ、ウェルズ・ファーゴ、シティグループ、バンク・オブ・アメリカ、モルガン・スタンレー、JP モルガン・チェースが NZBA から脱退した [10]。また、カナダの大手銀行 5 行（TD 銀行、モントリオール銀行、カナダ・ナショナル銀行、カナダ帝国商業銀行、スコシア銀行）も NZBA から脱退を表明した [11]。脱退の動きは日本の銀行にも波及し、2025 年 3 月 4 日に、三井住友フィナンシャルグループも NZBA から脱退を発表し [12]、同年 3 月 12 日に、野村ホールディングスも脱退すると NZBA に届け出た [13]。

2025 年 3 月 17 日現在、44 ヶ国の 132 の銀行が NZBA に参加しており、米国は 3 行（Amalgamated Bank、Areti Bank、Climate First Bank）、日本は、三菱 UFJ フィナンシャルグループ、みずほフィナンシャルグループ、三井住友信託グループ、農林中金銀行の 4 行が継続して参加している [14]。

一方、NZAM については、米資産運用会社のブラックロックが、NZAM 加盟に関し共和党議員からの批判（や、テキサス州を含む複数の州が反トラスト法違反したとの主張）を受け、NZAM から脱退した [15]。2022 年に運用会社のバンガードも NZAM を脱退している [15]。2025 年 1 月、このような米国における最近の動向と、投資家のそれぞれの管轄区域における規制と顧客の期待の違いを考慮し、NZAM は取り組みの見直しを開始し、その間は主な活動が一旦停止されると公表があった [16]。現在、NZAM の公式 website において、加盟運用会社リストも見ることができない状態になっている。

(4) グリーンファイナンスに関するデータ

① ESG 投資の現況

本節では現在のサステナブル・ファイナンスの投資動向を概観する。国際団体である Global Sustainable Investment Alliance(GSIA)は、世界のサステナブル投資額を集計した報告書を隔年で発行している。最新版は、2023 年 11 月に公表された第 6 版（2022 年版）である。以下に同報告書 [17]の内容をまとめる。

2021 年以降、GSIA と責任投資原則（PRI）による定義の調和により、サステナブル投資のアプローチとスクリーニングアプローチの定義は表 3.7.2-1 及び表 3.7.2-2 のように定められた。

表 3.7.2-1　投資アプローチの定義

アプローチ	定義
適正審査	投資が許容されるかどうかを判断する、定義された基準に基づく規則を適用
ESG 統合	リスク調整後リターンの向上を目指し、投資分析と意思決定プロセスにおいて ESG 要素を考慮
テーマ投資	特定のトレンドにアクセスするための資産の選択
スチュワードシップ（受託責任）	投資家の権利と影響力を活用し、顧客と受益者のための長期的価値全体の保護及び向上
インパクト投資	財務的リターンとともに、測定可能な社会的・環境的インパクトを生み出すことを意図した投資

（出典）GSIA[17]より著者翻訳

表 3.7.2-2 スクリーニングアプローチの定義

アプローチ名	内容
スクリーニングアプローチ	投資が許容されるかどうかを判断する、定義された基準に基づく規則を適用
規範に基づくスクリーニング	国連等の国際機関が発行する国際的規範に基づく事業または発行体の実践に関する最低基準に照らした投資の審査
ネガティブ／除外スクリーニング	投資対象外とみなされる活動、特定のセクター、企業、国あるいはその他の発行体をファンドやポートフォリオから除外すること（例：武器及びタバコ製品、動物実験及び人権侵害活動等）。
ポジティブ／ベストインクラス・スクリーニング	同業他社と比して良い ESG パフォーマンスを示し、ある定義された閾値以上の評価を得た部門、企業及びプロジェクトに投資をすること

（出典）GSIA[17]より著者翻訳

データ対象国は欧州、米国、カナダ、日本、オーストラリア、ニュージーランド、そしてサステナブル・ファイナンス動向調査に関しては同報告書では英国、中国及びその他アジア諸国が加えられた。

表 3.7.2-3 は、世界のサステナブル投資資産の国別内訳を表している。

表 3.7.2-3 国別のサステナブル投資資産
（2016 年から 2022 年、USD billions）

Snapshot of global sustainable investing assets, 2016– 2022 (USD billions)

REGION	2016	2018	2020	2022
Europe	12,040	14,075	12,017	14,054
Canada	1,086	1,699	2,423	2,358
Australia & New Zealand	516	734	906	1,220
Japan	474	2,180	2,874	4,289
Sub-total (USD Billions)	14,115	18,688	18,220	21,921
% change		*32%*	*-3%*	*20%*
United States	8,723	11,995	17,081	8,400
Total (USD Billions)	22,838	30,683	35,301	30,321
% change		*34%*	*15%*	n/a

Note: 2022 not applicable due to a change in methodology

（出典）GSIA[17)]

世界のサステナブル投資資産は 2022 年時点で 30.3 兆米ドルに達したが、前年の 35.3 兆米ドルと比べて減少した。同報告書では、その理由の一つとして、米国の手法変更によるところが大きいと記されている。具体的には、改訂された米国の方法論の下では、投資において使用した ESG 基準に関する情報を提供していない投資家の運用資産は含まれていないためである。しかし、近年の ESG 投資に対して反発する動きが表面化してきた可能性も考えられる。

② 債券市場

非営利団体である気候債券イニシアチブ（CBI）は世界のグリーンボンドの概況を公表している[18)]。図 3.7.2-2 は発行体別の世界のグリーンボンド発行実績を表している。

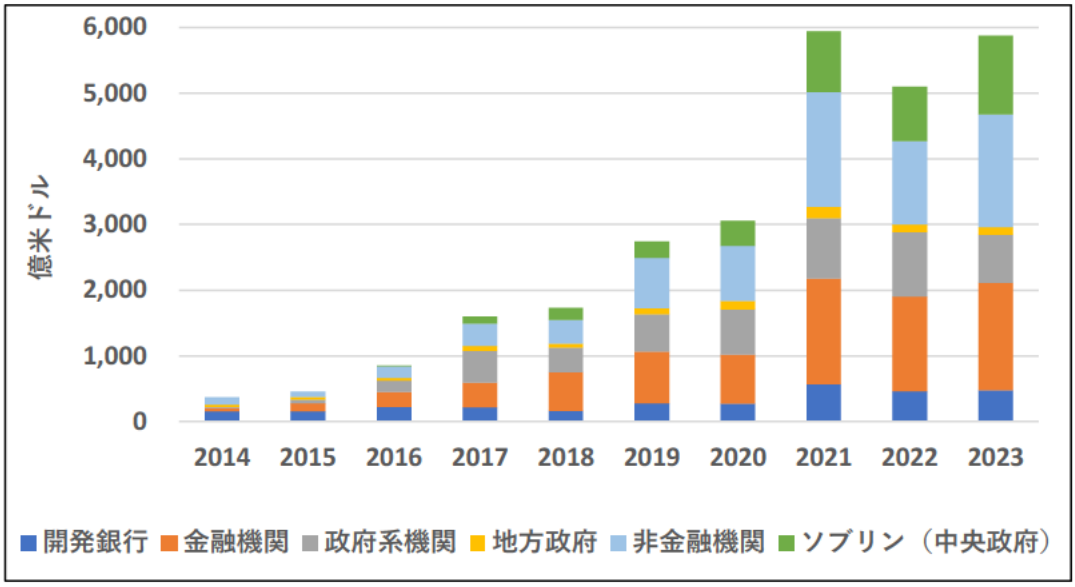


図 3.7.2-2 世界のグリーンボンド発行実績：発行体別

（出典）CBI[18]より著者作成

発行体別でみると、世界のグリーンボンド発行額は、2022 年に一旦落ち込むが、2023 年は 2021 年と同程度まで回復している。民間部門（金融機関 と非金融機関の合計）が大半を占め、グリーンボンド市場を牽引している。

図 3.7.2-3 は、世界のグリーンボンドの使途別の発行額である。エネルギー、建物、運輸が大きな割合を占め、全体の 75%に及ぶ。

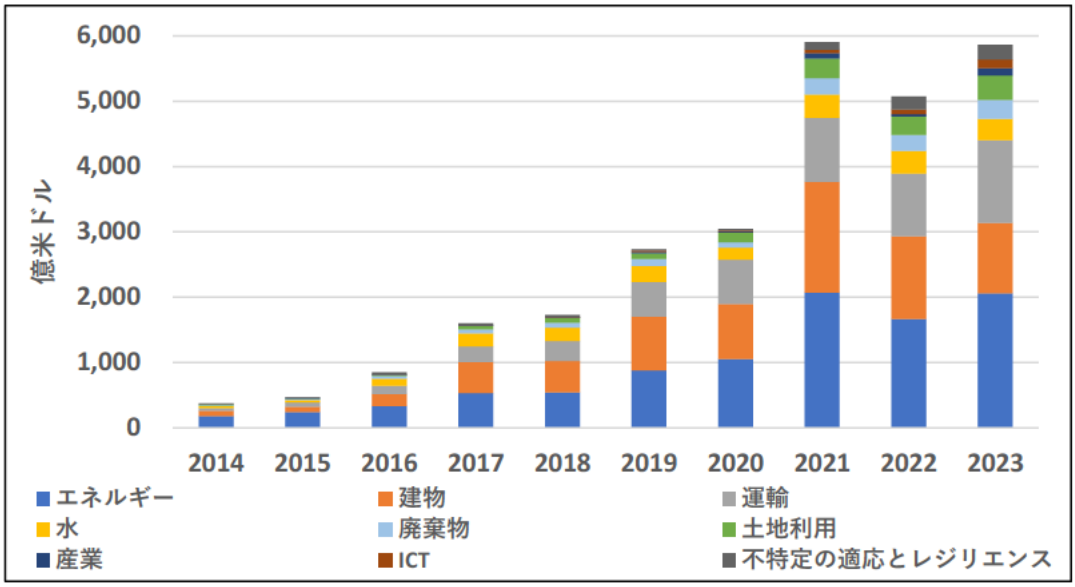


図 3.7.2-3 世界のグリーンボンド発行実績：使途別

（出典）CBI[18]より著者作成

図 3.7.2-4 は、世界のグリーンボンドの地域別の発行額である。2021 年と比較すると、米国の発行額が減少する一方で、アジア・太平洋及びヨーロッパの発行額が増加していることがわかる。

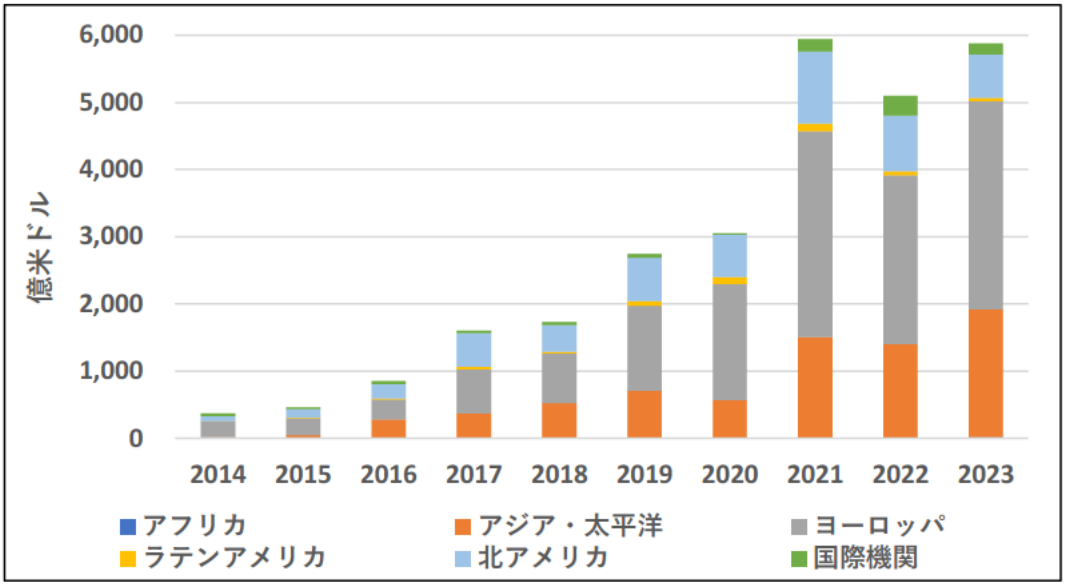


図 3.7.2-4 世界のグリーンボンド発行実績：地域別

（出典）CBI[18]より著者作成

最後に、各国中央銀行の取組みに関する分析を紹介する。この 10 年間、中央銀行は、移行リスクと物理的気候リスクを考慮し、管理する役割を担ってきた。Shears et al. (2025)[19]は、OECD 加盟国及び G20 加盟国 47 ヶ国における中央銀行の気候リスク管理行動に関するオリジナルのデータを構築した。単純な線形回帰モデルを使用し、リリスク（re-risking）と脱リスク（de-risking）のスコアが経済的リスク要因（石油・ガスセクターと金融セクターの規模、気候災害へのエクスポージャー）や政治的要因（気候政策の厳しさ及び気候変動に対する国民の関心）と相関しているかどうかを検証している。

その結果、中央銀行の気候変動リスク管理は、座礁資産やクリーンエネルギー投資リスクに対する経済的エクスポージャーを主因とするのではなく、国内の気候政治及び国民の関心と相関していることを主張している。つまり、中央銀行は金融政策の独立性を有するものの、むしろ化石燃料からクリーンエネルギーへの移行に向けた政治的な要請に沿った行動をしていることを示唆している。

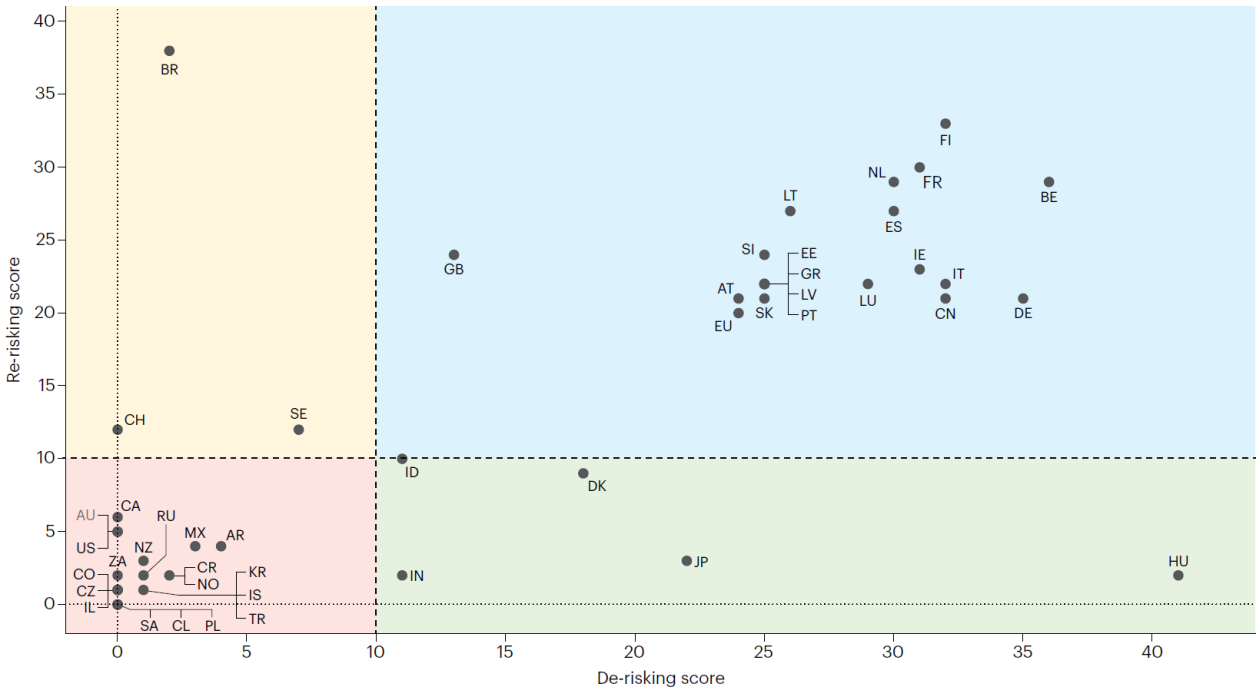


図 3.7.2-5 国別スコア（縦軸：Re-risking、横軸：De-risking）

（出典）Shears et al.[19)]

図 3.7.2-5 の縦軸は re-risking（リリスク）を、横軸は de-risking（脱リスク）スコアを表し、国によってこれらのリスクが大幅に異なることが示唆される。リリスクとは金融の安定性を保つために、移行リスク及び物理的気候リスクを金融リスク管理に組み込む中央銀行の行動を指し、脱リスクはクリーンエネルギー投資リスク（技術リスク、市場リスク、政策リスク）の低減を図り、脱炭素化を促進する活動を指す。10 より高い得点は、実質的な活動をしていることを示し、10 以下の場合は限定的な活動を表すと想定している。

図 3.7.2-5 の青い象限は、re-risking と de-risking のスコアが高い国であり、主に欧州中央銀行の加盟国、英国、中国が該当する。一方、同図の赤い象限は re-risking と de-risking 両方のスコアが低いことから、これらの活動が両方とも比較的少ないことを表しており、米国、韓国、ロシア等が含まれる。黄色の象限に位置する国々は、de-risking よりも re-risking を重視している（ブラジル、スイス、スウェーデン）。また、緑の象限に位置する国々は、主に de-risking に取り組んでいる（ハンガリー、デンマーク、日本、インド、インドネシア）。このことから、中央銀行の気候リスクに対する行動は、その国の気候変動の厳しさ及び気候変動に対する国民の関心と正の相関がある一方で、経済リスクとの相関が低いことがわかる。

(5) まとめ

本節は、近年の反 ESG を巡る動向及び金融に関する民間イニシアティブの方向転換、そして ESG に関するデータ・分析を概観した。トランプ政権以降、ESG 投資及びグリーン債市場における反 ESG の動きが加速すると考えられ、米国の反 ESG が他国へ波

及するかどうか、あるいは、ESG を巡る諸問題を明らかにし、改善された ESG 活動が普及するのか、今後の動きを注視していきたい。

参考文献（第 3.7.2 節に関するもの）

1) PRI: Signatory directory (accessed on March 17, 2025)
2) Legiscan: Texas Senate Bill 13, https://legiscan.com/TX/text/SB13/2021 (accessed on March 17, 2025)
3) Comptroller.Texas.Gov.: Divestment status lists, https://comptroller.texas.gov/purchasing/publications/divestment.php (accessed on March 17, 2025)
4) The Florida Senate: CS/CS/HB3- Government and corporate activism, https://www.flsenate.gov/Committees/BillSummaries/2023/html/3195 (accessed on March 17, 2025)
5) Bloomberg: ブラックロックとバンガード、テキサス州が提訴－ESG 投資を問題視、https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2024-11-27/SNM9IYDWRGG000 (2025 年 3 月 17 日アクセス)
6) Jeremy Ho: Anti-ESG proposals have increased in volume, but fare poorly, Harvard Law School Forum on Corporate Governance, February 6, 2025, https://corpgov.law.harvard.edu/2025/02/06/anti-esg-proposals-have-increased-in-volume-but-fare-poorly/ (accessed on March 14, 2025).
7) GFANZ: https://www.gfanzero.com/ (2025 年 3 月 12 日アクセス)
8) GFANZ: Progress Report 2024, November 2024
9) GFANZ: Progress Report 2021, November 2021
10) Bloomberg: 政治的圧力に身構える米大手行、気候変動対策グループから相次ぎ脱退、https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2025-01-06/SPM9FGDWLU6800 (2025年3月17日アクセス)
11) Global Trade Review: Top Canadian banks latest to pull out of Net Zero Banking, January 28, 2025. https://www.gtreview.com/news/sustainability/top-canadian-banks-latest-to-pull-out-of-net-zero-banking-alliance/ (accessed on March 17, 2025)
12) 日本経済新聞：「脱・脱炭素」米国市場の圧力　三井住友 FG が国際枠組み脱退、2025 年 3 月 6 日
13) 日本経済新聞：野村 HD、脱炭素の国際枠組みから脱退　投資目標は継続、2025 年 3 月 12 日
14) NZBA: https://www.unepfi.org/net-zero-banking/members/
15) Bloomberg: ブラックロック、気候変動対策グループ脱退－米大手行に続く動き、2025 年 1 月 10 日、https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2025-01-10/SPUB4ZDWX2PS00、 (2025 年 3 月 17 日アクセス)
16) NZAM: Update from the Net Zero Asset Managers initiative, January 13, 2025, https://www.netzeroassetmanagers.org/update-from-the-net-zero-asset-managers-initiative/ (accessed on March 17, 2025)
17) GSIA: Global Sustainable Investment Review 2022 (2023)
18) CBI: Market data, https://www.climatebonds.net/market/data/ (2025 年 2 月 24 日アクセス)
19) Welsh, H. Assessing Anti-ESG Efforts in the 2023 Proxy Season, Sustainable Investments Institute (Si2), 2023

3.8　気候変動政策に伴う費用負担の格差拡大の課題

3.8.1　はじめに

国連が 2015 年に採択した「持続可能な発展目標(SDGs)」の一つに気候変動問題が含まれており、気候変動問題は国際社会で取り組むべき重要課題と認識されている。一方で、SDGs の他の 16 目標との同時達成は必須であり、持続可能な発展目標間のシナジーとトレードオフを考慮した気候変動問題対応が望まれている。このことはパリ協定における、持続可能な発展と貧困撲滅の文脈において、気候変動の脅威への世界的な対応を強化するとの記述にも反映されている。

気候変動と持続可能な発展目標との関係性の一つとして、気候変動によって引き起こされる問題や気候変動対策による費用負担に不均一性があることは以前から指摘されており、COP28 における GST 決定文書にも、科学に沿った形で 2050 年までにネットゼロを達成するため、2030 年に向け行動を加速させ、公正で、秩序ある、衡平な方法で、エネルギーシステムにおける化石燃料からの移行を図ると記載された。IEA の分析 [1]によると、家庭エネルギー及び輸送燃料の世帯支出を収入十分位別で見ると、先進国、新興国・途上国とも高所得層ほどエネルギー支出が多い傾向については共通であるが、世帯所得に対するシェアの傾向は異なっており、先進国では低所得層ほど負担が重く、新興国・途上国では低所得層ほど負担は軽く 7%程度である（図 3.8.1-1）。新興国・途上国においては、低所得層のエネルギー負担が軽いともいえるが、低所得層は高所得層の 4 分の 1 のエネルギーしか消費することができず、またこの図に含まれない伝統的バイオマスに大きく依存していることが要因でもある。

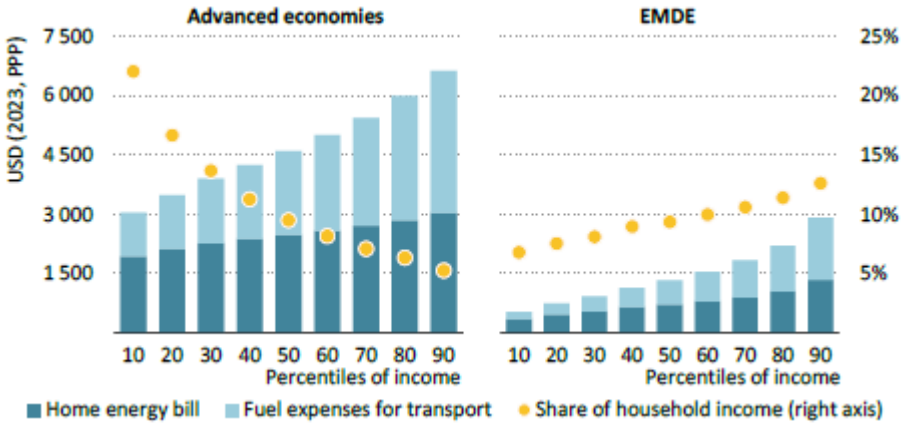


図 3.8.1-1　所得十分位別の世帯エネルギー・輸送燃料年間支出（2019～2023 年平均）

このような状況を踏まえた各国の排出削減目標、あるいは温暖化対策を検討するとともに、持続可能な発展目標における貧困や不平等の撲滅との関係について継続的に評価を行いフィードバックしていくことは重要である。IEA[3]は、化石燃料補助金のうち対象を限定しているのは 14%のみであり、結果として高所得層に対する補助金は低所得層の 6 倍程度に達するとしている（図 3.8.1-2）。

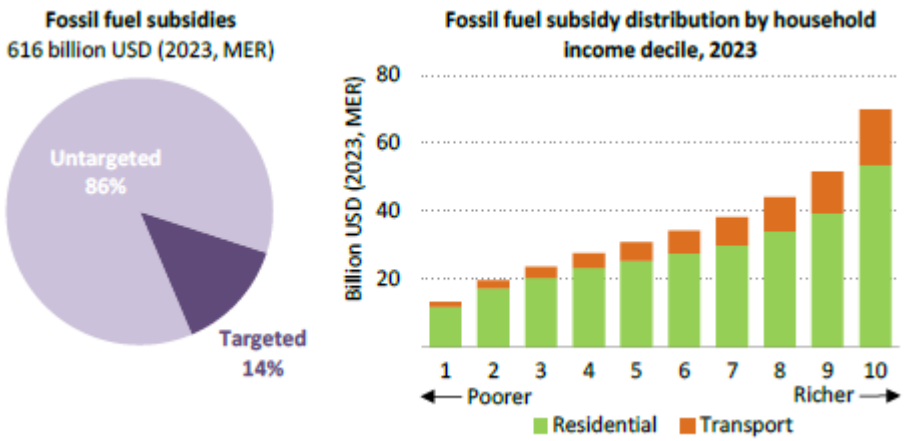


図 3.8.1-2　世界の化石燃料補助金と所得十分位別の分配状況

本節では、気候変動や対策に伴う費用負担の衡平性に関する分析について、近年の文献に基づき考察する。

3.8.2　CO_2 排出における inequality の評価

CO_2 排出について、所得階層間での不均一性、いわゆる carbon inequality が観測されている。Zheng[2)]によると、近年の傾向として、先進国ではカーボンフットプリントの減少と carbon inequality の拡大がみられ、途上国ではカーボンフットプリントは増大する一方 carbon inequality は多様な傾向が見られている（図 3.8.2-1）。Carbon inequality の拡大は高所得層の所得増大に伴う GHG 増大率が低所得層よりも大きいことにある。GHG 集約度の低減率は低所得層のほうが大きい場合も多くみられ（図 3.8.2-2）、このために carbon inequality が拡大するとの見方もあるが、低所得層はもともと GHG 集約度の高い安価な製品を購入、消費する傾向にあり GHG 集約度の低減効果が出やすいため、不衡平性の評価においては GHG 集約度の変化率のみでなく多様な指標で行うことが望ましい。

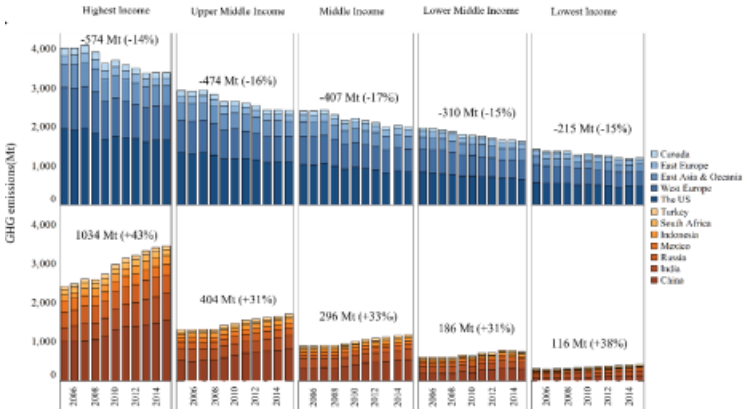


図 3.8.2-1　世界各国の所得 5 分位別 GHG フットプリント（2005～2015 年）

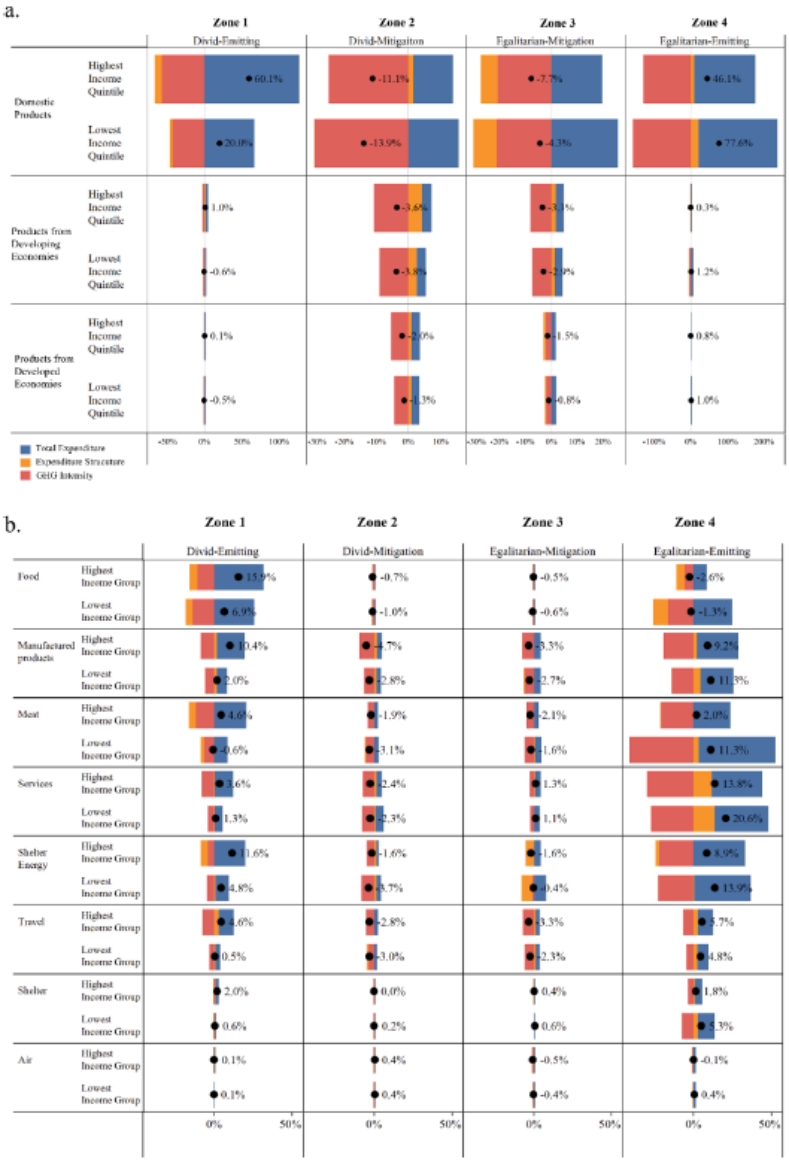


図 3.8.2-2　所得グループ別のカーボンフットプリント変化の要因

3.8.3　気候政策と不衡平性の関係の評価

気候変動は脆弱な人々に対しより大きな影響をもたらし、炭素価格などの気候政策もまた貧困層に対してより大きな負の影響をもたらす、いわゆる逆進性を帯びているとされ、不衡平性を助長するとされる。Emmerling[4]は、Well-below 2℃(WB2C)における、炭素収入の再分配と気候被害低減の双方を考慮した分析を行った。気候変動影響はCMIP6による国別の気温とKalkuhl and Wenzに基づく被害関数を用いて評価している。緩和策及び炭素収入の再配分による不衡平性はRICE50+モデルを用いて評価している。シナリオは炭素収入の再分配スキームに基づきNEUTRAL、EPC、PRO-POORの3シナリオを想定している。NEUTRALでは不衡平性を考慮しない均一な再分配を行うケースを、EPCでは税収を成人一人当たりの年間気候配当として再分配するケースを、PRO-POORでは低所得世帯を中心に再分配するケースを想定している。2050年の発生関数をみると、再分配スキームにより低所得層がより多くの便益を受けるのは

PRO-POOR シナリオであるが、気候影響を回避する効果を低所得層がより多く得るのは EPC シナリオであり、ネットの効果では EPC は幅広い所得層に正の効果があるのに対し PRO-POOR では下位 2 つの所得層に便益が集中する（図 3.8.3-1）。WB2C 目標と炭素税再分配政策の総合的な効果を、リファレンスよりも状況が改善する人口シェアで見た場合、EPC シナリオで最も高く、また効果は低所得層のほうでより大きい（図 3.8.3-2）。均一再分配ケース（NEUTRAL）でも気候被害の低減効果により 51%の人口がリファレンスシナリオより状況が改善するが、PRO-POOR ケースでは全体の便益を受ける人口は最も少ない。長期的には WB2C が達成されることによりいずれのケースにおいてもほぼすべての人口の状況が改善するが、トランジション期において EPC ケースはより不衡平性を緩和する効果を持つ。所得間の不衡平性は緩和策と気候変動影響の両方により影響を受けることから、両方を考慮した包括的な分析に基づく政策の重要性が示唆される。

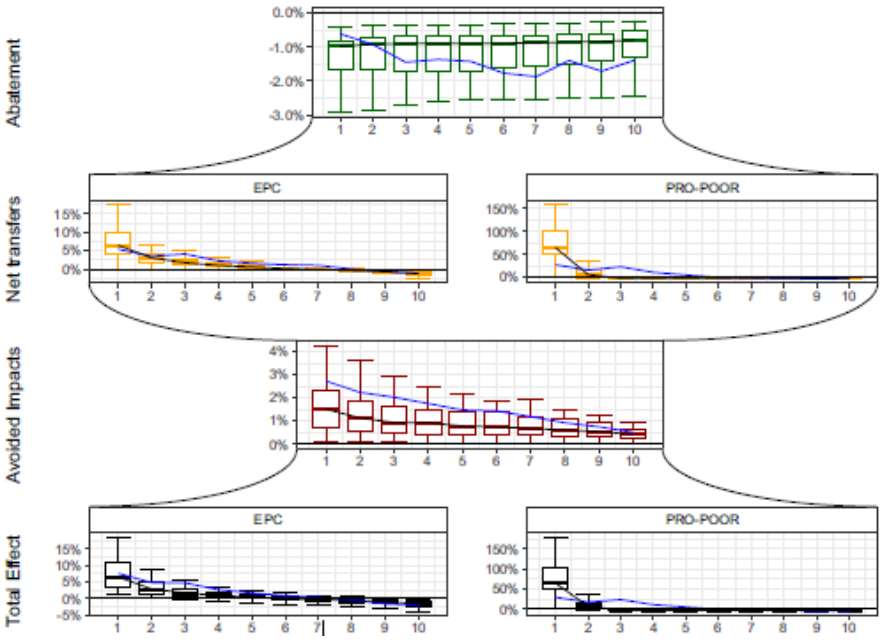


図 3.8.3-1　WB2C におけるリファレンス（気候影響あり）からの削減費用、回避された影響、再分配、総効果発生曲線（2050 年）

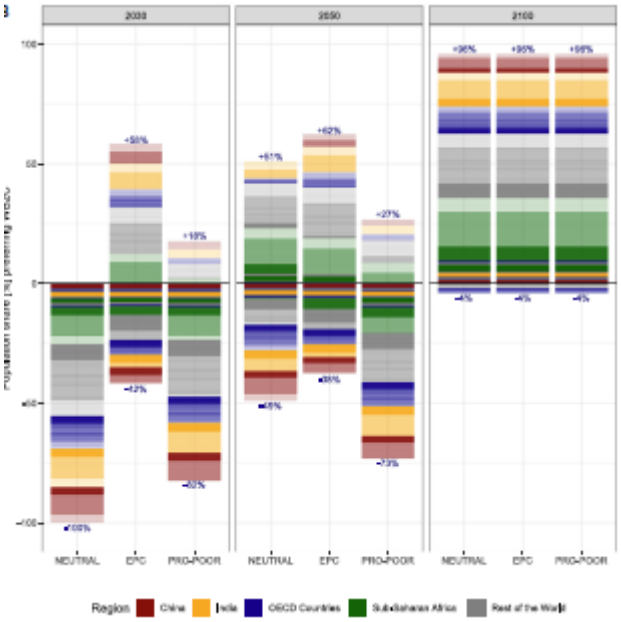


図 3.8.3-2　WB2C 下でリファレンス（気候影響あり）から状況が改善する人口のシェア

前述の分析で用いられた RICE50+モデルは費用便益最適化モデルであるが、CGE モデルやマクロ経済モデル、詳細プロセスモデルなど複数の種類のモデルで行った分析例でも同様の結果が得られている。文献 5)では、RICE50+、NICE、AIM、GEM-E3、Imaclim、ReMIND、WITCH、E3ME が参画し、気候影響を考慮しないリファレンスシナリオに対し、気候影響を考慮した気候政策無しシナリオ、パリ目標シナリオ、及び炭素税再分配（EPC）シナリオの下での衡平性、政策コスト、福祉への影響を評価した。衡平性の指標であるジニ係数の変化の評価では、気候政策無しシナリオとパリ目標シナリオではいずれのモデルも 2100 年に向けジニ係数の上昇を示した（図 3.8.3-3）。気候政策無しシナリオでは、地域によってはジニ係数は 2 以上上昇し、不衡平性は大きく増大する。一方、EPC シナリオでは多くのシナリオが 2050 年までのジニ係数は低下し不衡平性は改善されるとの結果を示している。

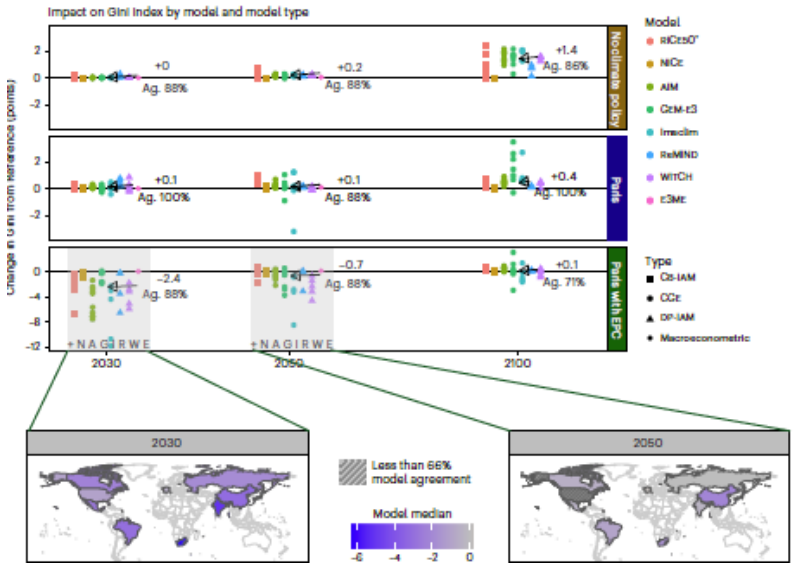


図 3.8.3-3　ジニ係数のリファレンスからの変化

政策コストについては、多くのモデルが、パリ目標シナリオと EPC シナリオでは期間を通してリファレンスよりも低下するとの結果を示している（図 3.8.3-4）。

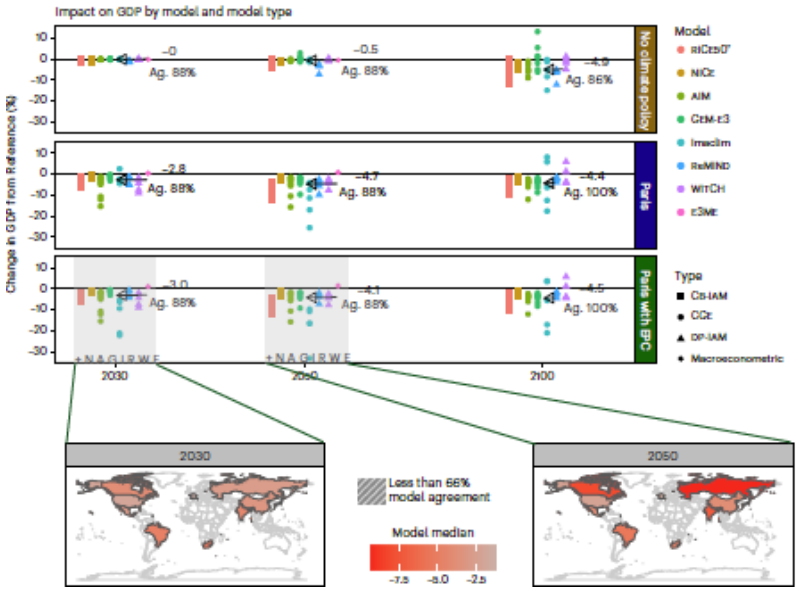


図 3.8.3-4　政策コスト（GDP 損失）のリファレンスからの変化

福祉への影響は、GDP影響と不衡平性を総合した結果として示される（図 3.8.3-5）。気候政策がない場合は 2100 年に向け大きく低減し、パリ目標シナリオでは政策コスト増大により早い時期から低減する。EPC シナリオでは短期（2030 年）では平均でやや増大し、2050 年にはネットゼロに達しているため炭素税再分配の原資が枯渇し福祉は低減するものの 2100 年の低減幅は他のシナリオよりは小規模である。

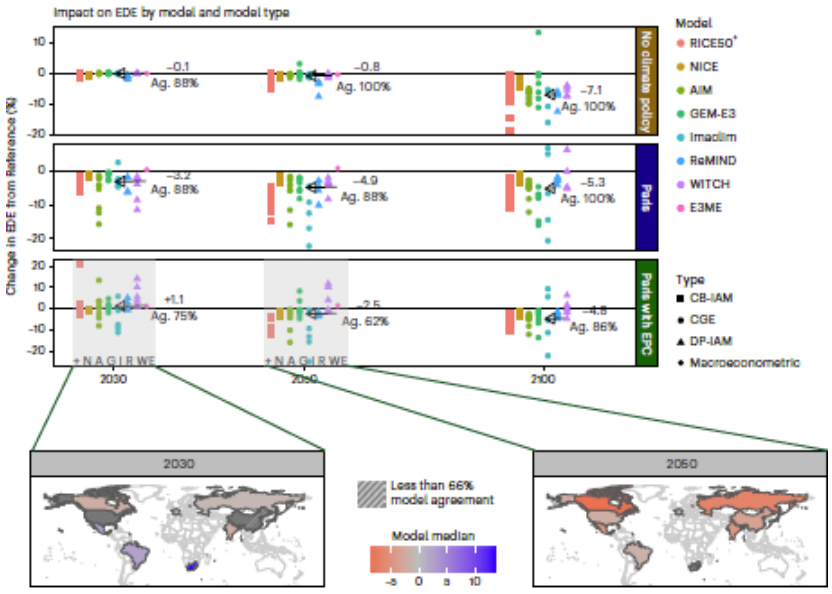


図 3.8.3-5　EDE（均等配分に基づく消費）指標による福祉への影響

3.8.4　まとめ

本節では、気候変動と衡平性に関する最新の研究を通して、気候変動対策による費用負担の衡平性の分析結果について考察した。途上国の経済発展に伴う経済格差の拡大がみられる中、CO_2 排出についても不均一性の拡大が懸念される。この状況を踏まえた気候政策の検討において、気候影響、政策コスト（補助金）、所得階層間の費用負担の不衡平性といった単一の指標による評価に依拠するのではなく、様々な指標により包括的な評価を行い、よりよい政策を選択することは持続可能な発展の観点からも望ましい。統合評価モデルを用いた衡平性の既往分析例は増えてきており、その中でも、低所得層を焦点とした補助政策が必ずしも全体の効用の最大化には結びつかないとの結果は示唆に富む。これらを参考にした分析を進め、衡平性とのバランスを考慮した温暖化政策を検討することは重要である。

参考文献（第 3.8 節に関するもの）

1) IEA, World Energy Outlook (2024)
2) Zheng et al., Rising carbon inequality and its driving factors from 2005 to 2015 (2023)
3) IEA, From Taking Stock to Taking Action (2024)
4) Emmerling et al., Global inequality consequences of climate policies when accounting for avoided climate impacts, Sustainability 1, 100008 (2024)
5) Emmerling et al., A multi-model assessment of inequality and climate change, Nature Climate Change, Vol. 14, 2024

第4章　中期緩和対策（パリ協定国別貢献 NDCs）分析

パリ協定は、多くの国の参加を促すため、いわゆるプレッジ・アンド・レビューの仕組みを採用した。実際にそれは有効に働くと期待でき、ほぼすべての国が排出削減に取り組む枠組みができた。パリ協定では、すべての国が自主的に目標と達成方法を決め、それを国別貢献（NDCs: Nationally Determined Contributions）として 5 年ごとに提出する（第 4 条 2 項、第 4 条 9 項）。目標見直しにあたっては、従前の目標に比べて前進させるよう求めている（第 4 条 3 項）。また、効果的な実施を促すために、透明性を高めた形で、すべての国が共通かつ柔軟な方法でその実施状況を報告しレビューを受けるものとされた（第 13 条）。パリ協定が実効ある形で排出削減を行っていくためには、レビューをいかに適切に実施できるかが重要になると考えられる。ただし、COP24 で決定されたレビューの実施方法においては、各国 NDCs の適切さ、不適切さについてはレビュー対象とはならないため、UNFCCC の外での評価が重要と考えられる。

2021 年 4 月の気候変動サミットに前後して、先進国を中心に、NDCs の排出削減目標を引き上げがなされた。一方で、2021 年 COP26 では、グラスゴー気候合意において、「気温の上昇を摂氏 1.5 度に制限するための努力を継続することを決意する」とされ、そして「異なる国情を考慮しつつ、2022 年末までに、パリ協定の温度目標に整合するよう、必要に応じて各国の国が決定する貢献における 2030 年目標を再検討し、強化することを締約国に要請する」とされた。しかしながら、2022 年末までに NDCs の 2030 年排出削減目標を引き上げた国はわずかに留まった。2023 年には 5 年毎に実施することとされている、グローバル・ストックテイク（GST）が初めて実施された。GST では、「最新の NDCs が完全に実施された場合には 2.1～2.8℃の範囲の上昇」の見通しとされた。パリ協定長期目標の 2℃を十分に下回る、もしくは 1.5℃目標とは大きなギャップが残っている。

昨年度の本事業[1)]での NDCs の評価から、NDCs の大きな深堀はなされていないため、本章では、NDCs の排出削減目標（2030 年頃）に関する分析・評価を行った結果をまとめた。まず、第 4.1 節で 2035 年以降の削減目標も含めた NDCs の排出削減目標の概要と一昨年度の CO_2 限界削減費用の推計を再整理した。第 4.2 節では、世界エネルギー経済モデル DEARS の地域解像度を向上させ、排出削減とその国際的な協力において重要性が増すアジア諸国での経済影響について試算を行った。第 4.3 節においては、主要国の国境調整措置の現況について述べ、昨年度までの NDCs のもとでの炭素国境調整措置の影響分析などについて整理した。第 4.4 節では、関連する国際的な NDCs 評価の文献について整理を行った。

4.1　2030 年の排出削減目標（NDCs）に関する分析・評価

4.1.1　世界各国の NDCs の排出削減目標の状況

2015 年の第 21 回国連気候変動枠組み条約締約国会議（COP21）で合意されたパリ協定で、2020 年以降の排出削減目標について、すべての国が国別貢献（NDCs）を策定し国連に提出して、それをレビューする、プレッジ・アンド・レビュー形式をとることとなった。2021 年 4 月の気候変動サミットに前後して、先進国を中心に、NDCs の排出削減目標を引き上げた。日本については 2030 年に 2013 年比▲26%としていた排出削減目標を 2013 年比▲46%に引き上げ、更に 50%減の高みを目指して挑戦するとした。この目標に対応した日本のエネルギーミックスを含む、「第 6 次エネルギー基本計画」が策定され、地球温暖化対策計画も改定された（2021 年 10 月に閣議決定）。さらに、2021 年 10 月末より英国グラスゴーで開催された COP26 に合わせ、多数の国が従来の目標を更新した NDCs を提出、あるいは目標の更新を表明した。一方、中国、インド、ロシアなどは原則従来通りの排出削減目標である。

表 4.1.1-1 に、今回の分析・評価の対象とした国・地域について、2025 年 3 月 15 日までに国連に提出された NDCs[2)]の 2030 年目標、2035 年以降の目標（公表されているものを含む）、およびカーボンニュートラル（CN）宣言の状況を示す。

表 4.1.1-1　主要国の NDCs の排出削減目標

国・地域名	2030 年目標	2035 年以降目標	CN 宣言
日本	2013 年比▲46%	2013 年比▲60% （2035 年）； ▲73%（2040 年）	2050 年 CN
米国	2005 年比▲50%～▲52%	2005 年比▲61%～▲66%（2035 年）	2050 年 CN
EU *	1990 年比▲55%	1990 年比▲90%（2040 年） **	2050 年 CN
英国	1990 年比▲68%	1990 年比▲81%（2035 年）	2050 年 CN
スイス	1990 年比▲50%	1990 年比▲65%（2035 年）； ▲75%（2040 年）	2050 年 CN
豪州	2005 年比▲43%		2050 年 CN
カナダ	2005 年比▲40%～▲45%	2005 年比▲45%～▲50%（2035 年）	2050 年 CN
韓国	2018 年比▲40%		2050 年 CN
メキシコ	BAU 比▲35% (BAU2030: 991MtCO_2eq/yr)		2050 年 CN
トルコ	BAU 比▲41% (BAU2030: 1175MtCO_2eq/yr)		2053 年 CN
南アフリカ	2026～2030 年に 350～420MtCO_2eq/yr		2050 年 CN
ロシア	1990 年比▲30%		2060 年 CN
ウクライナ	1990 年比▲65%		2060 年 CN
カザフスタン	1990 年比▲15%		2060 年 CN
中国	2030 年に GDP あたり CO_2 排出量を 2005 年比▲65% 以上、2030 年より前に CO_2 排出量のピークを達成		2060 年 CN
インド	GDP あたり GHG 排出量を 2005 年比▲45%		2070 年 CN
サウジアラビア	2019 年比▲278MtCO_2eq/yr		2060 年 CN
パキスタン	BAU 比▲15% (BAU2030: 1603MtCO_2eq/yr)		
タイ	BAU 比▲30% (BAU2030:約 555MtCO_2eq/yr)		2050 年 CN
マレーシア	GDP あたり GHG 排出量を 2005 年比▲45%		2050 年 CN
シンガポール	GHG 排出量ピーク達成後、2030 年に 60Mt CO_2eq/yr	45～50MtCO_2eq/yr（2035 年）	2050 年 CN
ブラジル	2005 年比▲53.1% (1.20GtCO_2eq/yr)	2005 年比▲59%～▲67% (1.05～0.85GtCO_2eq/yr)（2035 年）	2050 年 CN
インドネシア	BAU 比▲31.89% (BAU2030：2.869GtCO_2eq/yr)		2060 年 CN

注）* 2020 年 12 月 31 日以降は英国に適用されない

** 欧州委員会が 2040 年目標として公式に表明、国連には未だ提出されていない

4.1.2 NDCsの排出削減努力の評価

本研究調査は、世界全体に占めるエネルギー起源 CO_2 排出量および GDP（MER）の比率の高い国、23 カ国・地域について評価した。表 4.1.2-1 に、2030 年目標における 1990 年比、2005 年比、2013 年比、2015 年比、2019 年比の排出量について示す。表 4.1.2-2 には、2035 年 NDCs を提出した国について、同様に 2035 年の排出量について示す。

表 4.1.2-1 各国の 2030 年の GHG 排出量（各基準年比）

	基準年比排出削減率				
	1990年比	2005年比	2013年比	2015年比	2019年比
日本：2013年比▲46%	▲39.8%	▲43.8%	▲46.0%	▲42.5%	▲37.5%
米国：2005年比▲50%～▲52%	▲40～▲43%	▲50～▲52%	▲45～▲47%	▲44～▲46%	▲43～▲45%
EU：1990年比▲55%	▲55%	▲51%	▲42%	▲41%	▲38%
英国：1990年比▲68%	▲68%	▲63%	▲55%	▲50%	▲43%
スイス：1990年比▲50%	▲50%	▲51%	▲49%	▲44%	▲42%
豪州：2005年比▲43%	▲43%	▲43%	▲36%	▲35%	▲33%
カナダ：2005年比▲40%～▲45%	▲18～▲25%	▲40～▲45%	▲38～▲43%	▲38～▲44%	▲39～▲45%
韓国：2018年比▲40%	+29%	▲28%	▲39%	▲40%	—
メキシコ：BAU比▲35% (BAU2030: 991$MtCO_2eq/yr$)	+39%	▲6%	▲17%	▲14%	—
トルコ：BAU比▲41% (BAU2030: 1175$MtCO_2eq/yr$)	+323%	+164%	+91%	+84%	+64%
南アフリカ：2026～2030年に350～420$MtCO_2eq/yr$	▲2.4～+17%	▲33～▲19%	▲39～▲27%	▲38～▲26%	—
ロシア：1990年比▲30%	▲30%	+51%	+52%	+49%	+36%
ウクライナ：1990年比▲65%	▲65%	▲24%	▲23%	▲1%	▲7%
カザフスタン：1990年比▲15%	▲15%	+12%	+9%	▲6%	▲13%
中国： CO_2排出原単位2005年比▲65%	+274%	+76%	+14%	+12%	—
インド：GHG排出原単位2005年比▲45%	+272%	+139%	+66%	+57%	—
サウジアラビア：2019年比▲278$MtCO_2eq/yr$	+56%	▲9%	▲43%	▲45%	▲42%
パキスタン：BAU比▲15% (BAU2030: 1603$MtCO_2eq/yr$)	+631%	+329%	+235%	+230%	—
タイ：BAU比▲30% (BAU2030：約555$MtCO_2eq/yr$)	+85%	+11%	▲6%	▲4%	—
マレーシア：GHG排出原単位2005年比▲45%	+287%	+55%	+23%	+18%	—
シンガポール：排出ピーク後、2030年に60$MtCO_2eq/yr$	+75%	+23%	▲4.5%	+0.3%	—
ブラジル：2005年比▲53.1%	▲34%	▲53%	▲58%	▲57%	—
インドネシア：BAU比▲31.89% (BAU2030：2.869$GtCO_2eq/yr$)	+320%	+188%	+122%	+104%	—

注）

・2013 年比は、IEA データにない一部の国については EDGAR データを使用（中国、南ア等）

・韓国の公表値の 2030 年排出量は 2015 年に基づく（2018 年実績値が得られないため）

表 4.1.2-2　各国の 2035 年の GHG 排出量（各基準年比）

	基準年比排出削減率				
	1990年比	2005年比	2013年比	2015年比	2019年比
日本：2013年比▲60%	▲55.4%	▲58.3%	▲60.0%	▲57.4%	▲53.7%
米国：2005年比▲61%～▲66%	▲53～▲59%	▲61～▲66%	▲57～▲62%	▲56～▲62%	▲55～▲61%
英国：1990年比▲81%	▲81%	▲78%	▲73%	▲70%	▲66%
スイス：1990年比▲65%	▲65%	▲66%	▲65%	▲61%	▲59%
カナダ：2005年比▲45%～▲50%	▲25～▲31%	▲45～▲50%	▲43～▲48%	▲44～▲49%	▲45～▲50%
シンガポール：ﾋﾟｰｸ後、2030年に45～50MtCO$_2$eq/yr	+31～+46%	▲8～+3%	▲28～▲20%	▲25～▲16%	－
ブラジル：2005年比▲59%～▲67%	▲42～▲53%	▲59～▲67%	▲63～▲70%	▲62～▲70%	－

図 4.1.2-1 には、DNE21+モデルで評価した、各国の限界削減費用を示す。なお、この分析は 2021 年 12 月 31 日までに国連に提出された NDCs について評価したものである。日本、英国、EU27 では 400 \$/tCO$_2$ を超える限界削減費用が推計される一方、発展途上国の限界削減費用は安く、インド等は限界削減費用が 0 \$/tCO$_2$ でも達成可能（ベースラインで排出削減目標が達成可能）と推計された。なお、各国の NDCs の積み上げで期待される排出量を世界全体で最も費用効率的に達成する（限界削減費用均等化）とすれば、47 \$/tCO$_2$ の限界削減費用になると推計されている。また、世界の主要国の排出削減状況は順調にはいっておらず、多くの国で目標未達成となる可能性もないわけではない（例えば文献 3)）。

各国の CO$_2$ 限界削減費用の評価は、国によって排出削減目標達成のための限界削減費用に大きな差異があるという結果であり、炭素リーケージも懸念される。排出削減努力が小さいと見られる国への目標引き上げの要請を強めていくことは重要であると言える。一方で、先進国と発展途上国のギャップが埋まる可能性は低いとの認識も必要である。

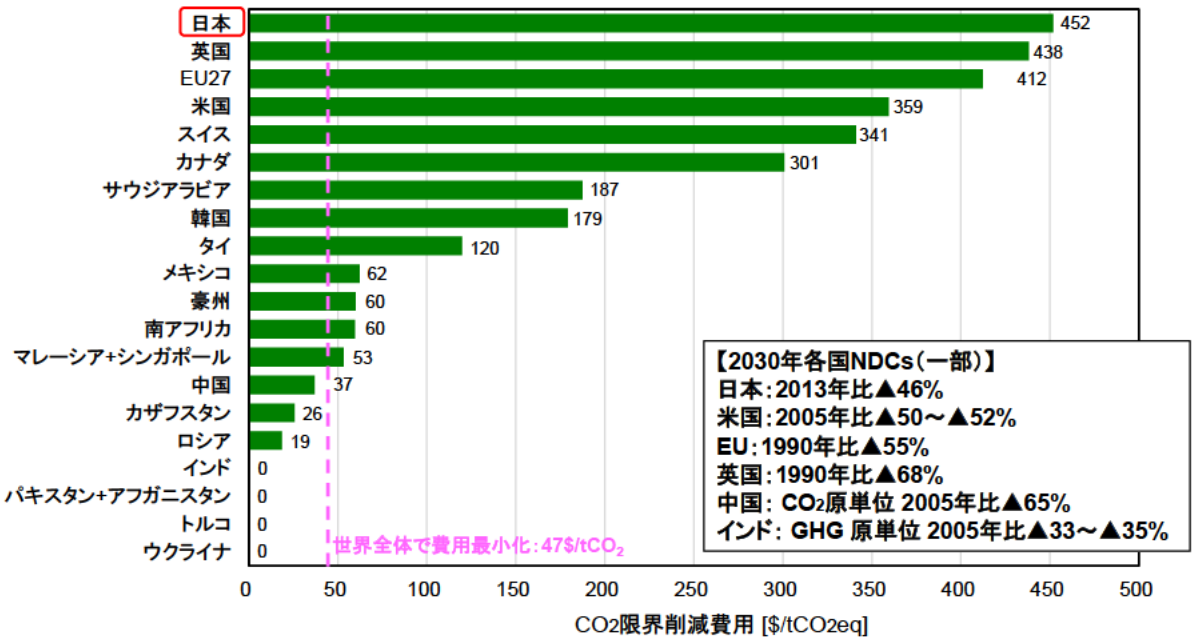


図 4.1.2-1 各国の CO_2 限界削減費用（2030 年）

注）ブラジル、インドネシアについては、土地利用変化による排出削減の寄与度が大きいと見られる一方、その不確実性が極めて大きいため、限界削減費用の推計をしていない。イランは、BAU の定義の不明確性が大きいため、費用推計していない。

参考文献（第 4.1 節に関するもの）

1) RITE/METI、令和 5 年度地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業報告書、2024 年 3 月
2) UNFCCC; NDC Registry, https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/All.aspx (最終アクセス日：2025 年 3 月 15 日)
3) 中央環境審議会 地球環境部会 (2023) https://www.env.go.jp/content/000142594.pdf

4.2 拡張世界エネルギー・経済モデルによる NDCs の経済分析

これまで開発してきた世界エネルギー経済モデル DEARS について、アジア地域の分析を詳細に行えるように、地域区分やデータベースを更新した。本節では、この拡張世界エネルギー・経済モデルによる 2030 年アジア地域の分析について記す。

4.2.1 背景と目的

気候変動対策は、グローバルな課題であると同時に、地域性を考慮した取り組みが不可欠である。特にアジア地域は、世界の CO_2 排出量の約半分を占め（図 4.2.1-1）、急速な経済成長と人口増加に伴いエネルギー需要が増加している。しかし、多くの国々が石炭火力発電に依存しており、再生可能エネルギーへの移行には技術的・経済的課題が存在する。このような状況下で、地域全体でゼロエミッションを目指す協力体制の構築が急務となっている。この文脈において、アジア・ゼロエミッション共同体

（AZEC: Asia Zero Emission Community）が注目を集めている。AZEC は、2022 年 5 月に日本政府によって提唱され、同年 12 月に正式に発足した地域協力イニシアティブである。この枠組みは、アジア太平洋地域におけるカーボンニュートラルの実現を目指し、エネルギートランジションの加速と脱炭素技術の開発・普及の促進を主な目的としている。AZEC の基本原則は、各国の産業構造やエネルギー構成などの国情を考慮した多様な道筋の下で、CN を達成することである。現在、11 カ国（日本、豪州、ブルネイ、カンボジア、インドネシア、ラオス、マレーシア、フィリピン、シンガポール、タイ、ベトナム）の AZEC パートナー国が参加している（図 4.2.1-2、図 4.2.1-3）。AZEC の主要な項目には、再生可能エネルギー、水素・アンモニア、原子力、CCUS（二酸化炭素回収・利用・貯留）などの技術分野での協力推進、グリーンファイナンスの拡大、人材育成などが含まれる。具体的な定量的な目標などは設定されていない。また、参加国間での政策対話や情報交換、官民連携によるプロジェクトの推進、国際金融機関との協力によるグリーンプロジェクトへの投資促進なども重要な活動内容となっている。第 2 回 AZEC 首脳会合（2024 年 10 月）では「今後 10 年のためのアクションプラン」に関する AZEC 首脳共同声明が採択された。このアクションプランでは、AZEC ソリューションの推進（GHG 算定・報告に関する共通ルール導入、GHG 排出の可視化など）、セクター別イニシアティブの始動（再エネ・ゼロエミッション火力の促進、低炭素交通手段の促進、工業プロセスの脱炭素化）、具体的なプロジェクトの推進（AZEC パートナー国で進行中の 350 件以上のエネルギー分野を中心とした協力プロジェクトのさらなる推進）が記載されている。

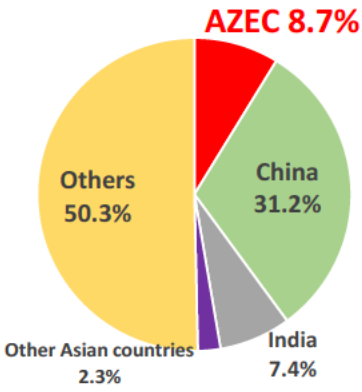


図 4.2.1-1 世界エネルギー起源 CO_2 排出量の地域別シェア（2022 年）[14)]



図 4.2.1-2 AZEC パートナー国（11 か国）[15)]

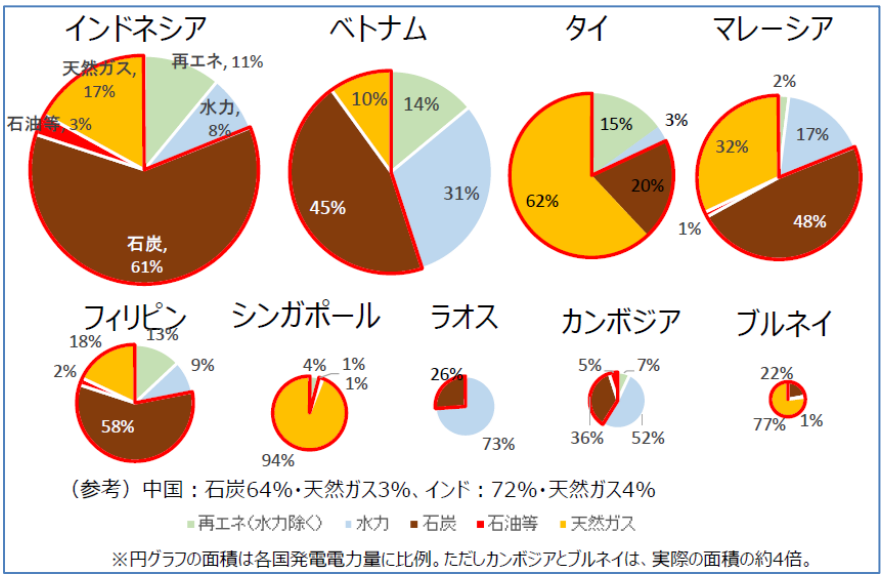


図 4.2.1-3 AZEC 主要国のエネルギー供給構成 [15)]

しかし、アジア地域における気候変動対策の重要性が高まっているが、この地域に焦点を当てた学術的な経済分析は依然として限られている。特に、東南アジア地域を含めた緩和策対策の限界削減費用やエネルギーシステム分析などに関する既往研究はあるものの [1),13)]、それらの地域の経済影響分析の研究事例は限定的である [2),3)]。文献 2),3)で東南アジア諸国の気候政策とマクロ経済の多様性を考慮することの重要性が示唆されている。また AZEC のような地域協力イニシアティブの経済的影響や有効性に関する実証研究は、ほとんど行われていない状況である。また、短期的な文脈では、東南アジアにおけるインドネシアやタイなどのエネルギー多消費産業では EU の CBAM（国境炭素調整メカニズム）の影響の懸念が指摘されている [4)]。本分析は、このような背景を踏まえ、アジア地域の気候変動対策に関する経済影響分析を行うことを目的とする。特に、AZEC パートナー国の経済成長、エネルギー構造の転換、温室効果ガス排出量にどのような影響を与えるかを、世界エネルギー経済モデルを用いて

分析する。これにより、アジア地域特有の課題に対する AZEC のアプローチの有効性を評価し、今後の政策立案に向けた示唆を得ることを目指す。

4.2.2 分析の方法

本分析では、世界エネルギー経済モデル DEARS[5),6),7)]の中でアジア主要地域を分析できるように拡張し、世界を 26 地域（表 4.2.2-1）に分割した[8)]、トップダウン型経済モジュールとボトムアップ型エネルギーシステムモジュールの統合モデルを利用する。経済モジュール（一般均衡モデル構造をベース）では、非エネルギー18 産業を想定し、国際産業連関表 GTAP (Global Trade Analysis Project) Ver.11（基準年 2017 年）データベース[9)]に基づく産業連関構造を明示し、各地域の産業構造や地域間の貿易（輸出入）構造を明示的に扱っている。割引後の全期間・全地域の消費効用の総和が最大となるように、各地域における産業別生産額の配分と、それら産業生産活動および家計消費活動に必要なエネルギーの供給構造を整合的に計算する構造になっている。モデルは、動学的非線形型の最適化モデルとして定式化される。

表 4.2.2-1 拡張 DEARS モデル（世界 26 地域版）の地域分類

1	米国	14	インドネシア
2	カナダ	15	タイ
3	英国	16	台湾
4	EU （West）	17	ベトナム
5	EU （East）	18	その他東・東南アジア
6	その他西欧	19	インド
7	日本	20	その他南アジア
8	豪州・NZ	21	中東・北アフリカ
9	ロシア	22	南アフリカ
10	その他旧ソ連・東欧	23	その他アフリカ
11	中国	24	ブラジル
12	韓国	25	メキシコ
13	マレーシア・シンガポール	26	その他中南米

エネルギーモジュールでは、一次エネルギー8 種類を想定し、CCS 技術を含むボトムアップによる簡略化したエネルギーシステムを明示化し、エネルギーバランスや発電構成などを扱うことが可能である。IEA[9),10)]のエネルギーバランス表を 2017 年基準年値として利用し、それに合致するように国際産業連関表を調整した。各化石燃料の供給曲線は RITE[11)]や Krey 他 [12)]をベースに想定した。特定の地域において厳しい CO_2 削減目標を達成する場合には、相対価格が低い地域への産業リーケージ、産業移転などを整合的に評価可能である。

図 4.2.2-2 と図 4.2.2-3 には主要 AZEC パートナー国の一次エネルギー供給と産業別付加価値の内訳を示す。オーストラリアと日本などの先進国では、サービス業の割合

が大きい。一方、発展途上国では、製造業（エネルギー多消費産業 EITE やその他製造業 Other manufacturing）やその他の産業（農業、鉱業、建設業、エネルギー産業など）の割合が大きい。しかし、日本では、米国や英国などの他の先進国よりも製造業の割合が高い。

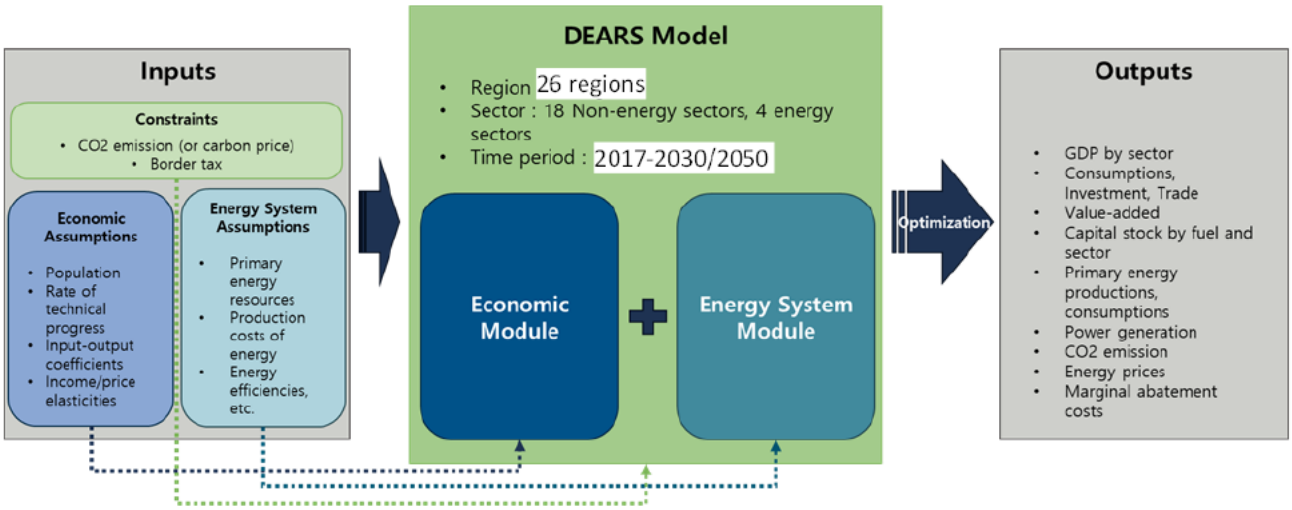


図 4.2.2-1 DEARS モデルの構造

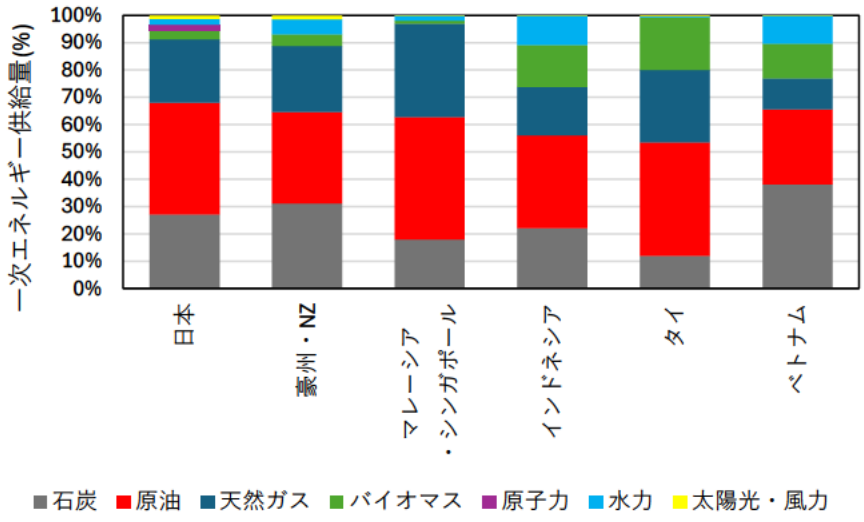


図 4.2.2-2 主要 AZEC 国の一次エネルギー供給（2017 年）[10)]

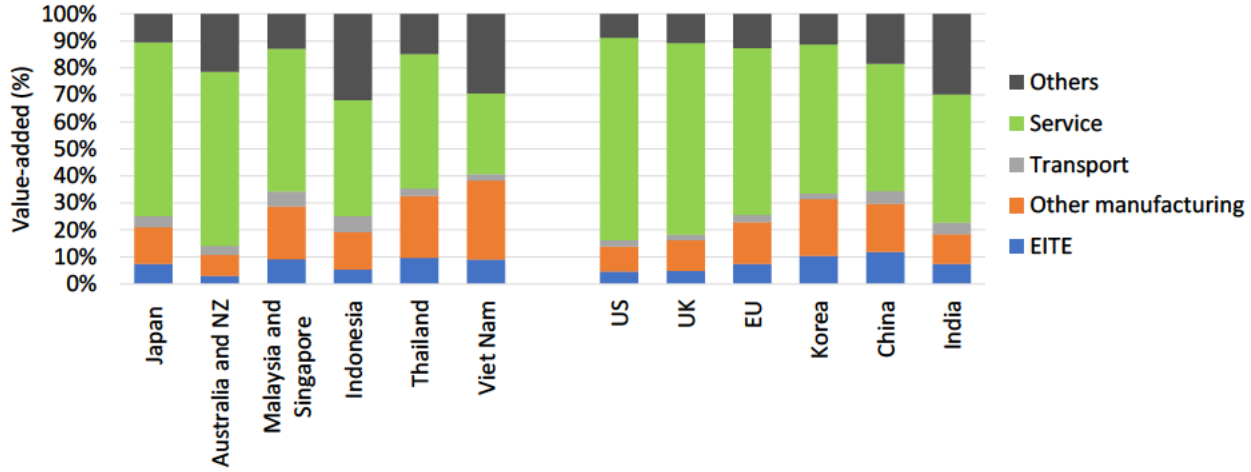


図 4.2.2-3 主要 AZEC 国の産業別付加価値額（2017 年）[9)]

表 4.2.2-2 は、本分析におけるシナリオを示した。基準となるベースシナリオは中位社会経済シナリオ SSP2 を想定した。表 4.2.2-3 には、AZEC 国の 2030 年 NDC 排出削減目標を示した。前述のように、世界エネルギー経済モデル DEARS はエネルギー起源 CO_2 排出のみを対象としているために、エネルギー起源 CO_2 削減目標としてシナリオに反映した。S1 は、各国が 2030 年 NDC 排出削減目標を単独で達成した場合である。S2 は、AZEC パートナー国が協調して、AZEC 排出削減目標合計値を協調して達成した場合である。このとき炭素価格（限界削減費用）は AZEC 内で共通となる。このとき、S1 の AZEC 各国の排出削減量をベースに、AZEC 内の各国 ETS が仮想的に完全に接続された場合（ETS 価格=共通炭素価格）を想定し、CO_2 排出量の取引額を反映した。日本では GX-ETS が 2026 年より本格稼働する予定である。インドネシアでは 2023 年から石炭火力を対象に取引が開始され、ベトナムでは 2028 年から正式に ETS を運用する計画である [17)]。その他の ASEAN 国でも検討中の国が多い（図 4.2.2-4）。S3 は、S1 に加え、EU-CBAM を考慮した場合を想定した。各国のパラメータのチューニングなどの精査などが今後の課題の一つである。

表 4.2.2-2 分析シナリオ

シナリオ	概要
S1	各国が単独で、2030 年の NDC 排出削減目標を達成する。
S2	AZEC 諸国は協調して NDC の全体的な排出削減目標を達成する（AZEC 域内では同じ炭素価格（AZEC 内の ETS 価格））
S3	S1 に加えて、EU からの輸入には、CBAM（炭素国境調整メカニズム）が適用される。ここでの CBAM は、エネルギー多消費産業 EITE の EU への輸入品を対象とし、EU との炭素価格差（EU 価格未満）が炭素関税として課される。EU の炭素価格は約 200$/tCO₂（2030 年）[モデル内で内生的に決定される]。

注：S2 は、AZEC 内の各国 ETS が接続された場合（ETS 価格=共通炭素価格）を想定し、CO_2 排出量の取引額を反映。

表 4.2.2-3 想定した各国の 2030 年目標

AZEC パートナー国	2030 年の GHG 排出削減目標（各国の NDC 削減目標）	2030 年エネルギー起源 CO_2 排出削減目標（本分析で用いた目標）
日本	-46%（2013 年比）	-45%（2013 年比）
豪州	-26%～-28%（2005 年比）	-26%（2005 年比）
タイ	-20%（BAU 比）	-20%（BAU 比）
マレーシア	-45%（GHG/GDP、2005 年比）	-45%（CO_2/GDP、2005 年比）
シンガポール	-36%（GHG/GDP、2005 年比）	-36%（CO_2/GDP、2005 年比）
インドネシア	-29%（BAU 比）	-13%（BAU 比）
ベトナム	-9%（BAU 比）	-9%（BAU 比）

注：2022 年末までに提出された NDC 削減目標に基づく。日本とインドネシアについて NDC に記載されているエネルギー起源 CO_2 排出削減目標を採用した。

ASEANにおけるカーボンプライシングの概要

	ボランタリー市場 炭素クレジット制度／民間炭素取引所		コンプライアンス市場 排出権取引（ETS）／炭素税		二国間合意（炭素クレジット分野）			
					日本（JCM）	スイス（Kilk）	シンガポール	韓国
シンガポール	○	・クライメート・インパクトX（CIX）（2022年稼働） ・エアカーボン・エクスチェンジ（ACX）やMVGX等の取引所が開設（国際クレジット取引が主目的）	○	・2019年に炭素税導入（大規模排出施設が対象） ・国際カーボンクレジットにより最大5%控除可能	-	-	-	-
インドネシア	○	・2023年にインドネシア証券取引所（IDX）傘下の炭素取引所（IDX Carbon）稼働 ・エネルギー部門（再エネ、バイオマス発電など）、森林部門（森林破壊の削減など）、農業部門、工業部門、廃棄物部門が対象	○	・2023年にキャップ＆トレード方式に基づくETS（石炭火力発電所が対象）に導入 ・炭素税は2022年から2025年へ延期	○ （クレジット発行あり）	-	○ （全般的な協力合意）	-
タイ	○	・2013年に国内クレジット制度T-VER、2023年にPremium T-VER（高品質クレジット）が稼働 ・グリーン電力証書（Renewable Energy Certigficates: REC）取引	△	・炭素税／ETSの導入を検討中	○ （クレジット発行あり）	○ （パリ協定6条の案件合意）	○ （案件特定の協力合意）	
マレーシア	○	・炭素取引所（BCX）が2022年稼働 ・国際クレジットを取引可	△	・炭素税／ETSの導入を検討中	-	-	-	-
フィリピン	△	・国内クレジット制度を検討中	△	・炭素税／ETSの導入を検討中	○ （クレジット発行なし）	-	-	-
ベトナム	○	・地場複合企業CTグループによる同国初のカーボンクレジット取引所「ASEAN炭素クレジット取引所株式会社（CCTPA）」（2023年開設）	△	・ETSを2025年から試験運用、2028年から正式運用を計画 ・ETSの排出枠や炭素クレジットの取引所開設を政府主導で検討中	○ （クレジット発行あり）		○ （パリ協定6条の協力合意）	○ （パリ協定6条の協力合意）

（注）○は導入済み、△は検討中。
（資料）野本哲也(2023)等より国際通貨研究所作成

図 4.2.2-4 ASEAN 諸国の炭素市場の概要 [18)]

4.2.3 分析結果

図 4.2.3-1～図 4.2.3-6 には、日本、豪州・NZ、タイ、インドネシア、マレーシア・シンガポール、ベトナムの産業影響を示した。対応する炭素価格は図 4.2.3-7 に示した。S1 において、AZEC の中では、日本や豪州・NZ の炭素価格（限界削減費用）が高く、産業影響も大きい傾向にある。日本は、先進国の中でもエネルギー多消費産業の生産が相対的に大きい傾向が推計された。推計された各国の炭素価格の傾向は既往研究 16)と概ね類似傾向にある。パラメータの精査などを進め、より詳細に分析することが課題としてあげられる。

S1（NDC の単独達成）で限界費用が高かった日本は、S2 では、ETS による排出権を購入することになるものの、限界費用を抑えながら達成できる。一方、S1 での限界費用が低いインドネシアやベトナムは、S2 でより多くの削減することなり全体に費用効率的となる。

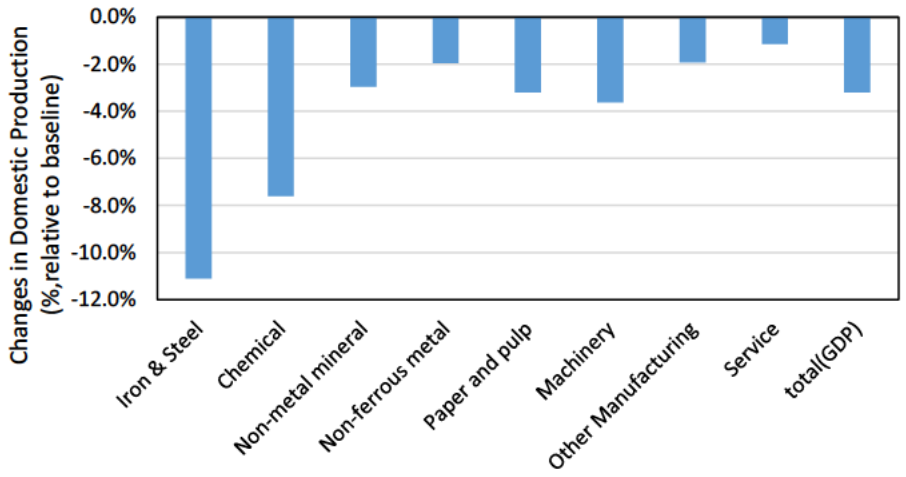


図 4.2.3-1 S1-2030 年の日本の GDP・産業生産への影響（ベースライン比）

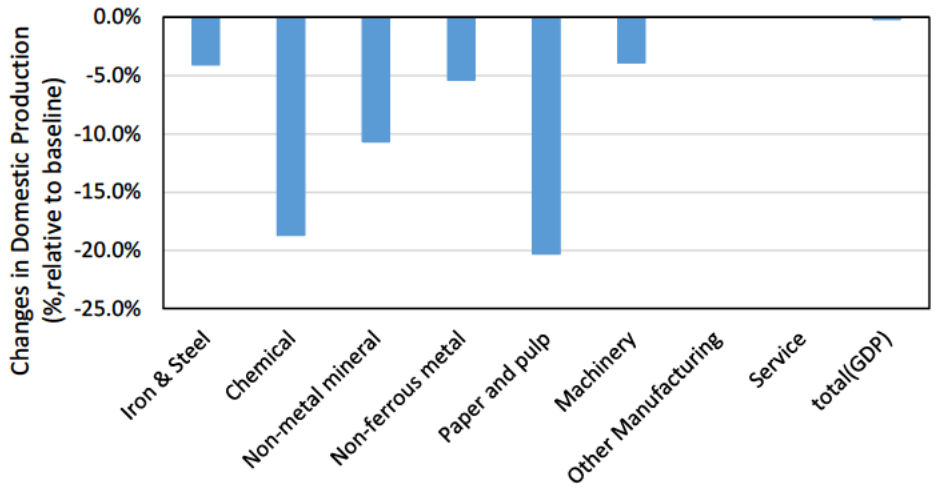


図 4.2.3-2 S1-2030 年の豪州・NZ の GDP・産業生産への影響（ベースライン比）

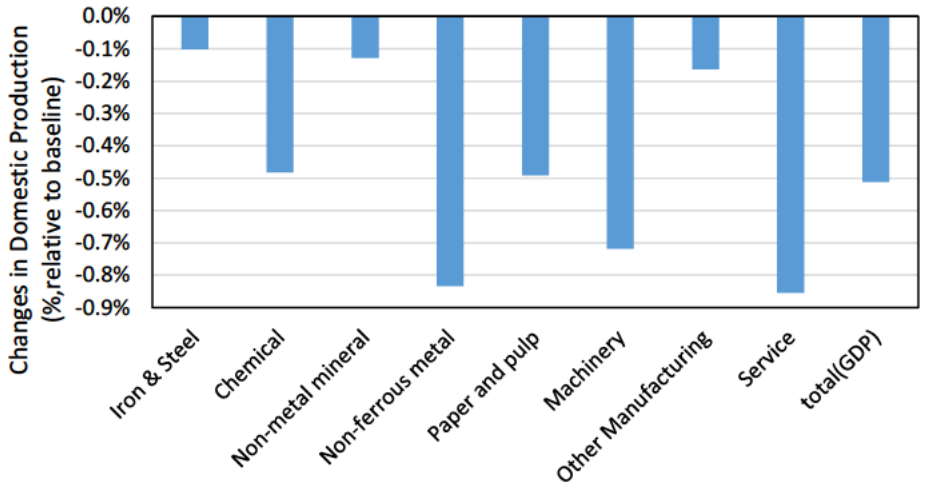


図 4.2.3-3 S1-2030 年のタイの GDP・産業生産への影響（ベースライン比）

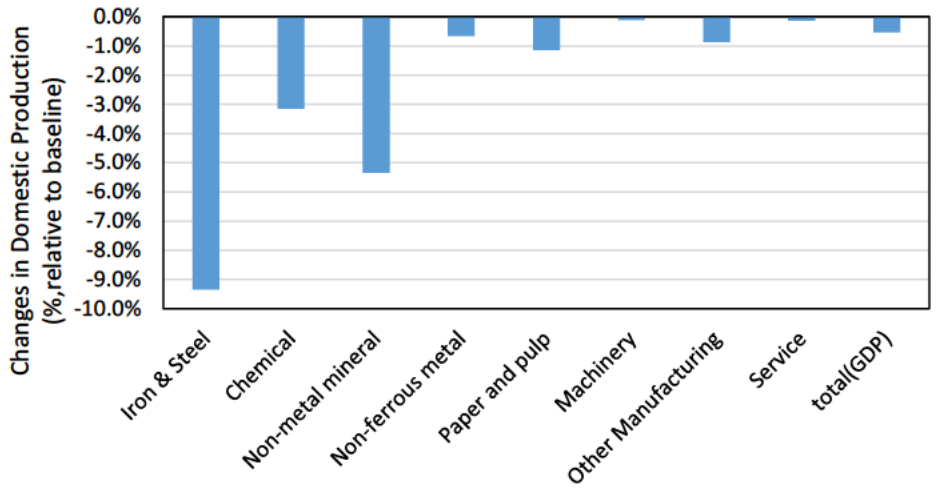


図 4.2.3-4 S1-2030 年のインドネシアの GDP・産業生産への影響（ベースライン比）

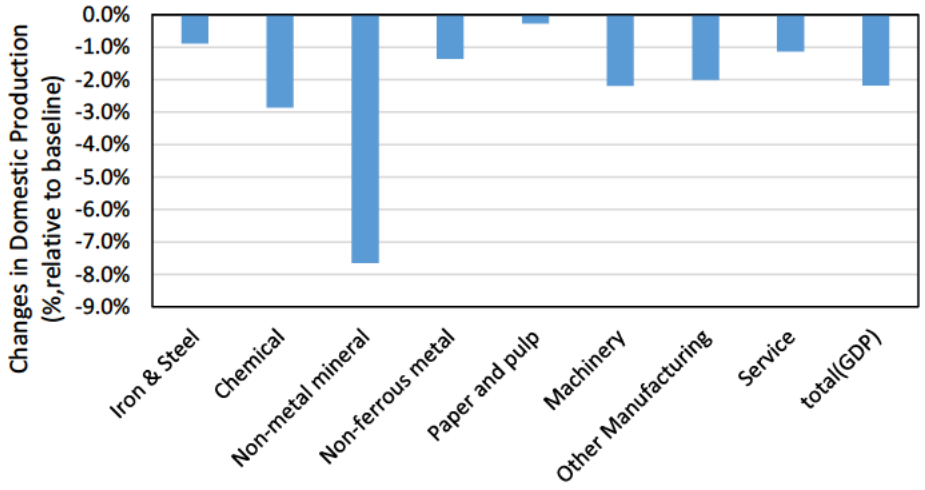


図 4.2.3-5 S1-2030 年のマレーシア・シンガポールの GDP・産業生産への影響（ベースライン比）

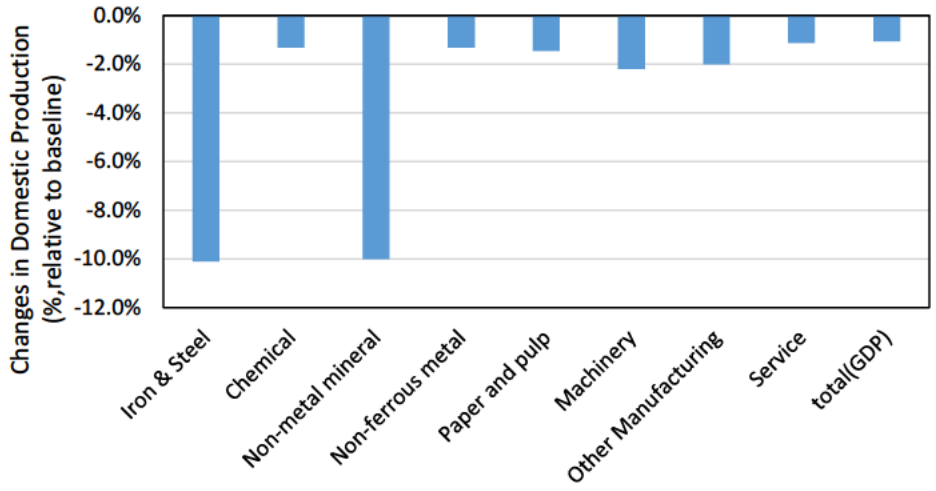


図 4.2.3-6 S1-2030 年のベトナムの GDP・産業生産への影響（ベースライン比）

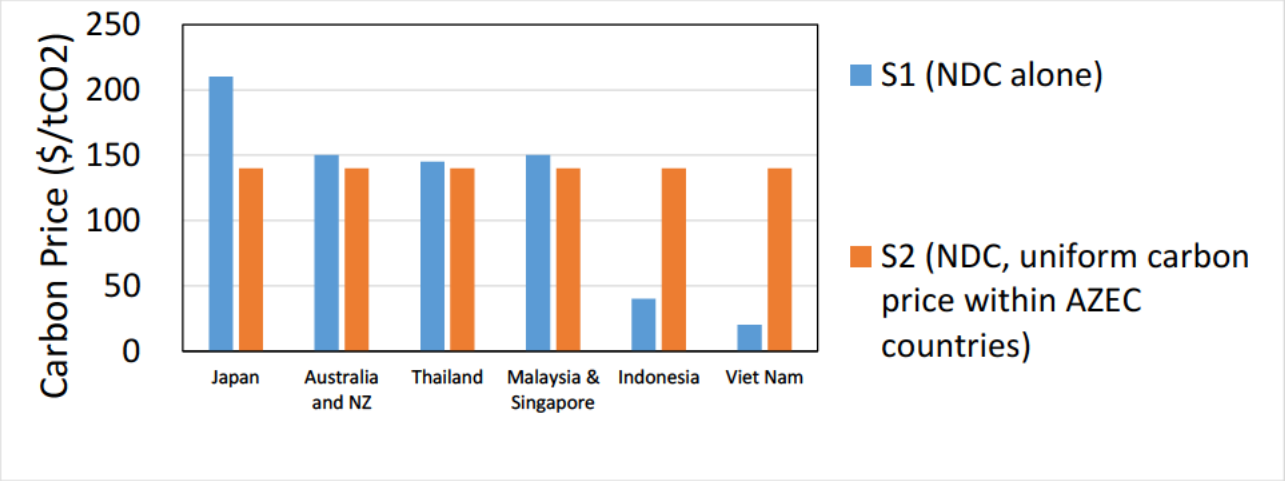


図 4.2.3-7 S1 と S2-2030 年の炭素価格（ベースライン比）

図 4.2.3-8 は、エネルギー集約型産業の生産への影響が AZEC 諸国の中で比較的大きいインドネシアにおける、産業別影響のシナリオ比較を示した。S3（EU 炭素価格との差は約 170$/tCO$_2$）における EU-CBAM の実施により、エネルギー集約型産業の生産が悪化する（エネルギー集約型産業では、ベースライン比で 1%から 4%ポイント）。エネルギー集約型産業のインドネシア輸出（EU 輸入）に追加課税が限定される S3 と比較すると、S2 では炭素価格が S1 よりも約 100$/tCO$_2$ 高く設定されており、すべての経済活動に課税されるため、S2 よりも生産への悪影響が大きいと推定された。

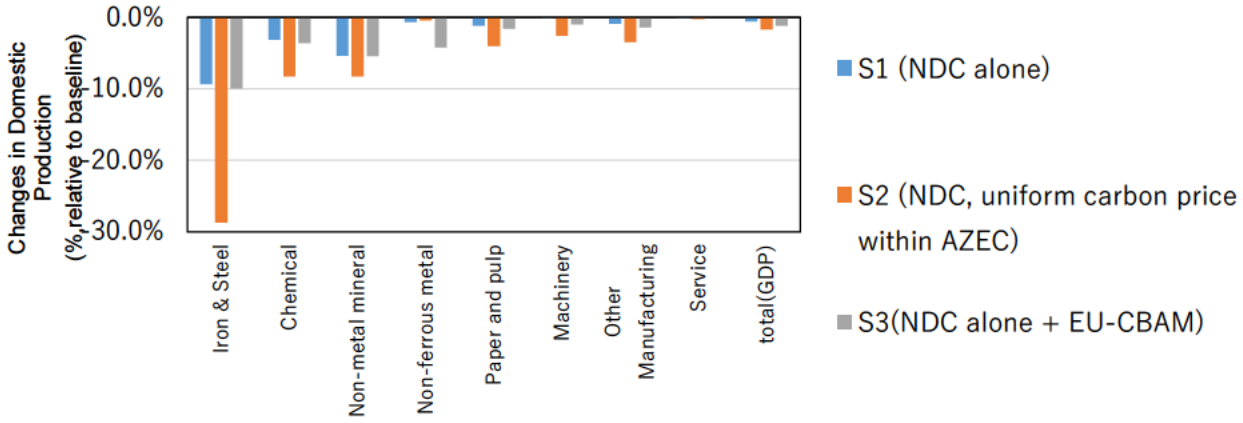


図 4.2.3-8 2030 年のインドネシアの産業別影響（ベースライン比）

注：S2 では共通炭素価格（ETS 価格）による CO_2 取引額を反映している。

4.2.4 まとめと今後の課題

世界エネルギー経済モデル DEARS を用いて、アジア主要地域の産業別の経済影響分析を行い、炭素価格によって誘発される各産業の生産量低減の影響を試算した。今後パラメータの想定やチューニングなどの精査を進める必要がある。アジア地域における効果的な気候変動対策の設計に貢献するとともに、エネルギー構造や産業構造の

地域特性を考慮しつつ地域協力を通じた脱炭素化の可能性と課題をより詳細に明らかにすることが期待される。また、この分析を通じて、アジア地域の気候変動対策に関する学術的知見の蓄積に寄与し、今後の研究の基礎となる実証的証拠を提供し、AZECの今後の発展にも重要な示唆を与えると考えられる。

今後、中長期的なCN目標を分析する必要がある。そのためには、脱炭素技術オプションの追加の検討が重要と考えられる。現在のDEARSモデルの温暖化技術オプションは、技術を詳細に描けるエネルギーシステムモデルと比較すると、CN目標などの厳しい目標で必要とされる脱炭素技術オプションは、特に非電力部門では十分に想定されていない点があげられる。また、BECCSやDACなどのネガティブ排出技術も想定されていない。そのため、技術オプションが不十分であるために、悪影響がより大きく推計される可能性がある。一方、多くの一般均衡モデルと同様に、DEARSモデルでは生産構造や輸出構造は弾性値を用いて定式化されているため、非常に厳しい目標において、過去に観測されなかったような財価格上昇が生じた際に、それらの影響が十分に考慮されていない可能性がある点に留意が必要である。そのため、急激な価格上昇時には、モデル解よりもさらに非連続的な大きな悪影響が考慮されていない可能性がある。これらの留意点に対するモデル改良や分析方法改善は今後の課題である。

参考文献（第4.2節に関するもの）

1) K. Akimoto, F. Sano, T. Homma, M. Nagashima, N. Onishi, Analysis of the 2030 emissions reduction targets of the previous and current nationally determined contributions of Japan, and a comparison between countries using energy-technology and energy-economic models, Asia-Pacific Sustainable Development Journal, 30-1, (2023)
2) W. Dant et al., Heterogeneity Analysis of Regional Greenhouse Gas Driving Effects: An Empirical Study from Southeast Asian Countries, Energies , 17-23, (2024)
3) A. Suwandaru et el. Understanding the Economic Drivers of Climate Change in Southeast Asia: An Econometric Analysis, Economies 12-8, (2024)
4) JETRO, 徐々に進展するカーボンプライシング（インドネシア）, https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2024/0502/f71405a8c66f75e9.html（アクセス日 2024.11.29）
5) 秋元圭吾,本間隆嗣; 2030年排出削減目標の経済影響と炭素国境調整措置の経済緩和効果に関するモデル分析, 経済分析, 第206号, pp.54-73(2023).
6) 本間隆嗣,魏啓為,小田潤一郎,秋元圭吾; 現状の気候・エネルギー政策を考慮した, パリ協定国別貢献における国際競争力に関する分析,エネルギー・資源、Vol.41, No.5, (2020)
7) T. Homma and K. Akimoto; Analysis of Japan's energy and environment strategy after the Fukushima nuclear plant accident, Energy Policy, 62 (2013), pp.1216–1225.
8) KANG Dahyun,本間隆嗣,長島美由紀,秋元圭吾,The Assessment of 2030 Nationally Determined Contribution （NDC） Targets of Japan, South Korea and China Focusing on Industrial Impacts、第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2024)
9) Global Trade Analysis Project (GTAP), https://www.gtap.agecon.purdue.edu/（アクセス日 2024.11.22）

10) IEA; World Energy Statistics, (2023)
11) RITE: 地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業 成果報告書, (2020)
12) V. Krey et al.; MESSAGEix-GLOBIOM Documentation. Technical Report, (2020), International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg.
13) 日本エネルギー経済研究所、IEEJ World Outlook 2025, (2024) https://eneken.ieej.or.jp/data/12087.pdf（アクセス日 2025.1.31）
14) IEA; World Energy Statistics, (2024)
15) METI, 東南アジアのエネルギー事情(2024), https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/asia_decarbonization.html （アクセス日 2025.1.31）
16) RITE: 地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業 成果報告書, (2022)
17) 三菱総合研究所、進展する ASEAN の炭素市場(2023)、https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20231127.html（アクセス日 2025.1.31）
18) MUFG、経済情報：ASEAN 主要国における GX 戦略の概要と進捗（2024）https://www.bk.mufg.jp/report/ecoinf2024/report_asean_20241001.pdf（アクセス日 2025.1.31）

4.3 国際競争力への影響・国境調整税の評価

本節では、主要国の国境調整措置（CBAM）の制度設計について整理し、CBAM 実施による定量的な影響分析や、政策影響や課題について述べる。

4.3.1 国境炭素調整に関する現況

国境調整措置は、気候変動対策の一環として進められており、各国が独自の制度を整備している。主要な制度設計の要素（図 4.3.1-1）に関して、ここでは、EU、UK、豪州、米国の状況について内容をまとめる[1),2),7)]。

制度設計要素	設計の選択肢
1．貿易措置	輸入財の調整のみか、**輸出財へのリベートを含む**のか
2．調整対象とする国内制度	**炭素税、排出量取引制度か、規制的な措置か**、両者か
3．課税対象国	気候リーダー国の免除、後発開発途上国（LDCs）への配慮
4．対象セクター	素材産業や電力だけか、**複雑な製品**に拡大するのか
5．排出のバウンダリー	工場内の直接排出のみ（Scope1）か、購入電力や蒸気等を含むのか（Scope2）、採掘時や最終消費の排出等を含むライフサイクルで考えるのか（Scope3）
6. 製品に体化された炭素排出量の計算 embodied emission	工場や企業単位別の実排出量の適用か、ベンチマーク（ベストプラクティス、平均値）かベンチマークの場合、**既存の国際基準等を**用いた自己申告を併用するか
7.調整額の計算のための炭素価格	原則として、国内炭素価格（炭素税、排出量取引制度、諸規制など）と同等か、それ以下の範囲。ー輸入品への課金と併せ、**輸出国の炭素価格分**の考慮
8.収入使途	国内の環境使途に利用するか、途上国支援に活用するか

図 4.3.1-1 国境炭素調整に関する制度設計要素 [1)]

EUは、世界初の国境調整措置（CBAM）を2026年に導入する計画である。2023年10月から移行期間が始まり、鉄鋼、セメント、肥料、アルミ、水素などが対象製品として指定されている。CBAMは、輸入製品の体化排出量に基づいて課金を行うもので、EUの排出量取引制度（EU ETS）と連動している。CBAMの対象となる商品の輸入者は、これらの商品に含まれる炭素に関するデータを提出し、EU ETS許容額と同等のCBAM証明書を購入する必要がある。これらの証明書は、直近のEU ETS価格に合わせて継続的に販売される。CBAMに基づく課金は、無償割当の段階的廃止と原産国で支払われる炭素価格に基づいて調整される。対象製品は、セメント、電力、肥料、鉄鋼（下流製品を含む）、アルミ、水素などである。課税方法は、EU ETS価格を基にした四半期課金が行われる。免除規定として、EU加盟国、スイス、アイスランド、ノルウェー、リヒテンシュタインは対象外とされている。対象は、輸入製品のみである。EUのCBAMでは、直接排出（Scope 1）と間接排出（Scope 2）を含む体化排出量を考慮する。具体的には、セメントや肥料、電力では直接・間接排出を含むが、鉄鋼やアルミ、水素では直接排出のみが対象である。データが得られない場合、EU ETSのベンチマーク値を使用することもあるとしている。収入使途に関して、EUのCBAMでは、加盟国は収益の25%を保持し、残りの75%はEU全体で用いられる予定である。

英国は、2027年にCBAMを導入する計画を立てている。対象製品は、セメント、肥料、セラミック、鉄鋼、アルミ、水素などである（UK-ETSの対象製品と一致させるように範囲が設定される予定）。課税方法は、排出量取引制度の炭素価格をもとにしたセクター別実効炭素価格が使用される。免除規定に関して、輸入金額が10,000ポンド未満の事業者は免除される予定である。英国は、国内で提供される無償割当を考慮して、英国のETS価格よりも低い料金を設定することで、差別のないアプローチを維持することを目指している。対象は、EU-CBAMと同様に、輸入製品のみである。UK-CBAMでは、製品の製造プロセスにおける直接排出と間接排出を含む体化排出量を考慮する。実際の排出量データが得られない場合、企業別・工場別の製品のデフォルト値を使用し、必要に応じて上乗せが行われる。また、国際認定フォーラム（IAF）やUKASによる認証が検討されている。収入の使途について具体的な明記はない。

豪州は、排出量取引制度を基に国境調整措置を実施する計画である。セメント製品が初期の対象とされる。課税基準は、輸入製品の排出強度が豪州の基準を超える場合に課税される。対象製品としては、セメント、クリンカ、石灰などが検討されている。対象は、輸入製品のみである。製品のライフサイクル全体を考慮することは明示されていない。輸入製品の排出強度を評価し、豪州の基準と比較することで課税が行われる予定である。収入の使途について具体的な明記はない。

2025年1月以降のトランプ政権では、アメリカのエネルギーおよび環境政策が大きく変更される一連の大統領令が発令されている（例えば、大統領令第14162号のパリ協定からの正式な離脱など）。従来のバイデン政権の気候変動対策重視の方針から、規制緩和、国内エネルギーの拡大、経済安全保障に重点を置いた戦略へと大きく転換している。2025年1月以前の米国では、国境調整措置の方法論を開発するためのタスクフォースが設置され、党派を超えた法案が提出されており、特にBill Cassidy上院議員による提案が注目されていた。この提案の対象製品は、鉄、アルミ、石油製品など

である。輸入製品に焦点を当てた制度設計が検討されていた。製品の排出原単位の差に基づく階層的な課税制度を導入することが検討されており、間接排出やプレカーサー（前駆体）も含まれる可能性があった。

4.3.2 国境炭素調整に関する分析の調査

(1) CBAMの経済影響分析

昨年度までに実施した、DEARSモデルによるCBAM影響分析の要約について記載した[12),13)]。次に、EU-CBAMによる中国とインドの影響分析を実施したRocchiら[4)]による分析結果を記す。

これらの分析では、CBAM（輸入品への課税）の対象となるエネルギー多消費産業（EITE: energy-intensive and trade-exposed）の生産と貿易に影響を与える可能性を示している。しかし、EUや英国で計画されているCBAMは輸入品に限定され、その影響は国内で実施される削減対策に比べると効果はかなり限定的であると推計された。また、CBAMがマクロ経済やCO_2排出量に与える全体的な影響は小さい。CO_2排出量に制約がある場合（例えば、NDC排出削減目標など）には、CBAMの直接の対象ではない非EITE産業への悪影響が考えられ、マクロ経済全体がわずかに悪化する可能性を示唆している。

① DEARSモデルによるCBAMの影響分析[12),13)]

昨年度までに実施した、DEARSモデルによるCBAM影響分析の要約を述べる[12),13)]。本分析で用いた世界エネルギー経済モデルDEARSは、世界を18地域に分割した、トップダウン型経済モジュールとボトムアップ型エネルギーシステムモジュールの統合モデルである。世界全体の消費効用最大化を目的関数とした、動的非線形最適化モデルである。経済モジュール（一般均衡モデル構造型）では、非エネルギー18産業を想定し、国際産業連関表GTAP (Global Trade Analysis Project) Ver.9データベースに基づく産業連関構造を明示し、産業構造や貿易構造を明示化したモデル化をしている。

表 4.3.2-1には、シナリオ分析のシミュレーションケースの想定を示した。ここでは、2030年の各国のNDC排出削減目標をもとに、国境調整措置による影響を評価した。国境調整措置としての炭素関税は、クラブと非クラブの炭素価格差に基づいて決定されると想定した。炭素価格・炭素関税による税収は、その他の税と同様に、政府収入として政府消費に用いられると想定した。ベースラインのGDPとCO_2排出は、IEAのcurrent policy scenario（COVID-19影響は含まれていない）に合うように各種パラメータを調整した。EITEは、鉄鋼、化学、非鉄金属、窯業土石、紙パルプ産業を対象とした。輸出リベートは、EITEの輸出品に対する100%減免を想定した。本分析のCBAMに関するCO_2排出量の対象範囲は、スコープ1（直接排出）とスコープ2（電力に関する間接排出）である。炭素関税を避けるために生じうる、非クラブにおける削減対策強化などは想定していない

表 4.3.2-1　シミュレーションケースの想定

ケース名	クラブ				非クラブ	
	メンバー	削減目標	CBAM（輸入限定）	輸出リベート	メンバー	削減目標
NDC	欧州、米国、日本	NDC削減目標を共同で達成。（クラブ内は同一炭素価格）	無	無	中国、その他	各地域NDC削減目標を達成
Club+CTAX0			有（非クラブからのEITE輸入品に対して）			無（炭素価格ゼロ）
Club+CTAX0 +BCA						
Club+CTAX0 +BCA +ExRebate				有		

図 4.3.2-1 には、代表的な EITE 産業である鉄鋼産業の生産と純輸入へのケース別影響を示した。このとき、NDC 達成するための推計炭素価格は、国によって大きく異なり、30 年のクラブ内の限界削減費用（炭素価格）は 161[$/tCO$_2$]と推計され、一方、中国とインドでは、それぞれ 49、3[$/tCO$_2$]と相対的に低い炭素価格が推計された。

炭素価格が高いクラブの鉄鋼産業などの EITE 産業では大きな悪影響を受け、生産減少や純輸入増加が推計された（NDC ケース）。さらに、クラブが単独で野心的な NDC 削減目標を掲げた場合（NDC、Club-CTAX0 ケース）、クラブ全体で鉄鋼産業の生産量減少と純輸入増加が顕著となり、競争力の悪化が一層深刻化する可能性が大きい。このような状況下で CBAM を導入した場合（Club-CTAX0+CBAM ケース）、一部のリーケージを軽減できるものの、その効果は NDC 達成に伴う悪影響を完全に補うほどではないと推計された。

一方で、輸出リベートを併用することで（Club-CTAX0+CBAM+ExRebate ケース）、鉄鋼産業の生産や輸出の損失を大幅に軽減できる可能性がある。輸出リベートは輸入限定の CBAM よりも効果が高いと推計された。しかし、この制度は WTO ルールに抵触する可能性がある点には注意が必要である。

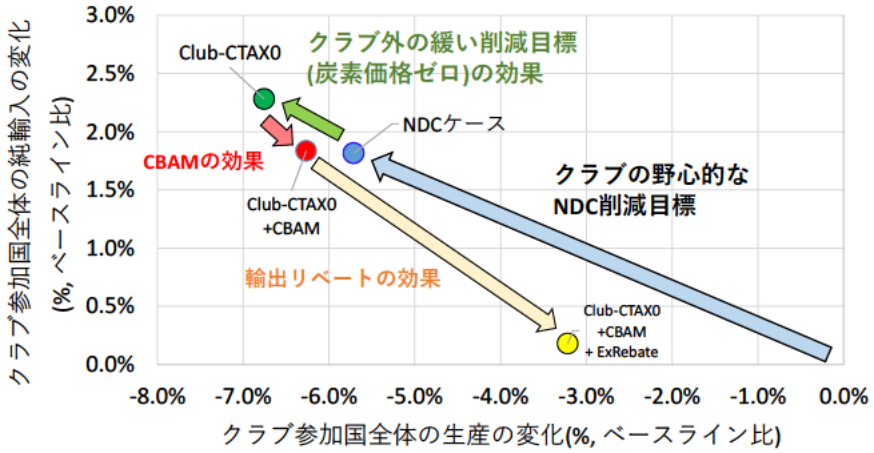


図 4.3.2-1　欧州・米国・日本の鉄鋼産業の生産・純輸入への影響（2030 年）
注記：両軸の変化%は、ベースライン生産量を用いて規格化

図 4.3.2-2 と図 4.3.2-3 には、EITE 産業の CBAM（輸入限定）をクラブ参加国が実施した場合、クラブ参加国全体（欧州、米国、日本）と非参加国全体の産業への影響をそれぞれ示した。CBAM を実施すると、参加国の EITE 産業では、輸入価格の上昇により国際競争力が向上し、輸入が減少する一方で国内生産と輸出が増加すると推計される。しかし、EITE の生産量増加に伴う CO_2 排出量の増加を相殺するため、CBAM 対象外の非 EITE の生産量を減少させ、マクロ経済全体では悪影響が及ぶ可能性がある。

一方、非参加国では、EITE 産業の生産は大幅に減少するものの、機械産業などの生産が増加する可能性がある。したがって、CBAM 制度の設計には、直接対象となる産業だけでなく、対象外の産業やマクロ経済全体への波及効果も考慮する必要がある。より望ましい制度設計を構築するためには、包括的な産業政策を踏まえた検討が求められる。

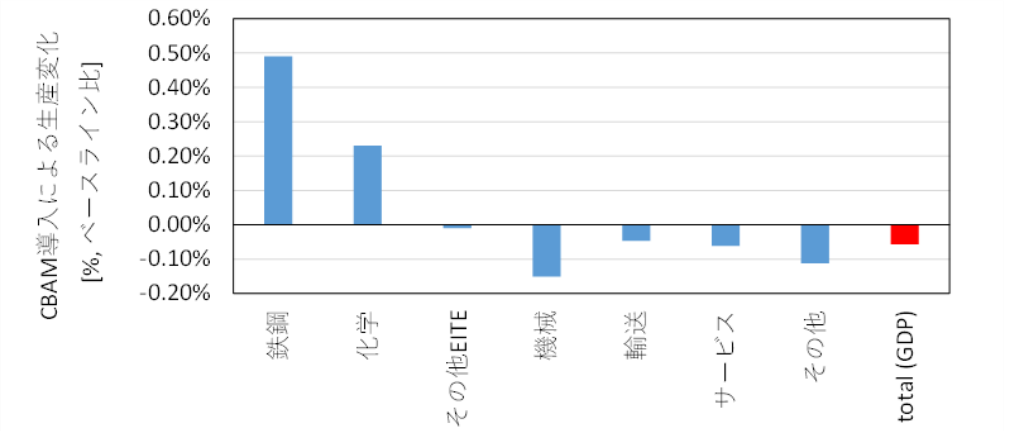


図 4.3.2-2　エネルギー多消費産業 EITE への CBAM をクラブ参加国が導入した際の、各産業への影響（クラブ参加国全体（欧州・米国・日本の合計）、2030 年）

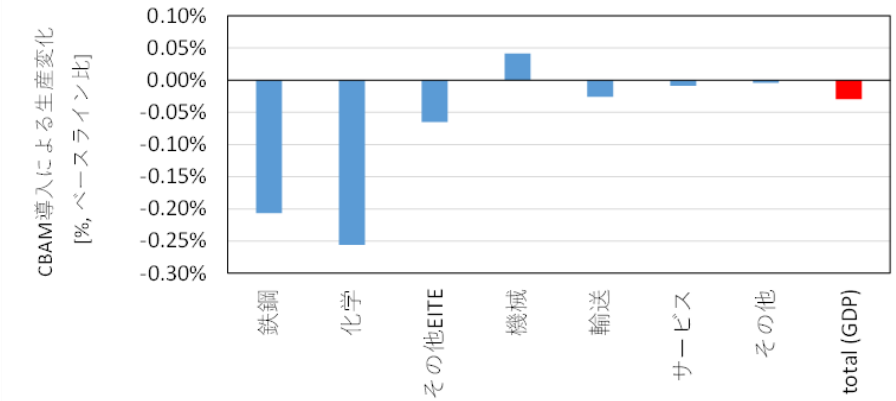


図 4.3.2-3　エネルギー多消費産業 EITE への CBAM をクラブ参加国が導入した際の、各産業への影響（クラブ非参加国全体、2030 年）

国境炭素調整に関する調査・分析によって得られた知見や懸念は以下の通りである。

- 各地域が NDC を達成する場合（本分析では、日米 EU は共同達成を想定）では、EITE 産業を中心に、リーケージが見込まれる。
- EITE 産業に CBAM の導入は、国際競争力の低下をやや軽減しうる。しかし、その効果は、野心的な NDC 目標達成のために生じる生産ロスに比べると小さい。
- 輸出リベートも追加可能ならば、大きくリーケージは削減され、国際競争力の低下も軽減されうる（WTO ルールを満たさない可能性高）。
- CBAM の効果は国によって異なり、EITE 製品を大規模に輸入する国は、CBAM の効果が大きくなる。
- CBAM の導入によって、CBAM 課税対象の産業の競争力は改善するものの、直接的には CBAM 対象ではない産業やマクロ経済全体に悪影響を及ぼす可能性がある。
- クラブ参加国の CBAM 導入によって、非参加国による報復や貿易戦争などのリスクがあり、かえって効果的な地球規模の気候変動の緩和を弱める可能性がある。
- CBAM は一定の効果はあるものの、リーケージを防ぐのに万能ではない。特定地域の炭素価格を高く設定し過ぎないことも含め、NDCs の排出削減努力の国際協調化を図っていくことは重要である。

② FIDELIO モデルによる EU-CBAM の中国・インドへの影響分析 [4)]

FIDELIO モデルは、グローバルなマクロ経済・多部門・多地域モデルである。国やセクター間の相互作用を分析するように設計されているため、EU CBAM や中国やインドにおける炭素規制措置などの政策を評価するのに適している。このモデルは、輸出入関係に基づいて二国間貿易フローを導き出し、輸入・国産との配分はアーミントンの弾力性によって決定される。これらの弾力性は、国内品と輸入品の間の代替可能性を捉えている。モデルに含まれる企業は、国内外の需要を満たすために、エネルギーサービス、資本、労働力の最適な組み合わせを選択する。これは、入れ子構造の一定代替弾力性 CES 型生産関数で表現されている。家計消費は、所得の分配と貯蓄率を反映して、所得の五分位数で消費シェアを内生的に決定される。標準的な CGE モデルとは異なり、FIDELIO には資本コストや人件費の決定などについてネオケインズ的要素が組み込まれている。資本コストはセクター間で均一であり、資本ストックの平均価格や金利などの要因に左右されまる。金利は、多くの CGE モデルのように貯蓄と投資を同一視するのではなく、インフレと経済活動のトレードオフを反映したテイラー・ルールによって設定される。賃金は、フィリップス曲線または賃金設定曲線に沿って、期待消費価格、労働生産性、失業率の影響を受ける構造となっている。

FIDELIO モデルのデータベースは、主に、Eurostat の国際供給および使用表である FIGARO（Full international and global accounts for research in input-output Analysis）データベース [5)]を使用している。モデルのキャリブレーションに使用されたデータは 2015 年値である。モデルの地域分類は、FIGARO データベースで確認できる 46 地域を対象としている。EU 加盟国はそれぞれ単一国として分類され、EU 以外については、

米国や日本などの先進国や中国、インド、ブラジルなどの途上国は単一国として分類され、その他は ROW として分類され、世界全体をカバーしている。FIGARO-E3 データベースは、エネルギーと排出量に関するデータであり、これらを用いている。温室効果ガス排出量データには燃焼および非燃焼プロセスからの CO_2、CH_4、N_2O、F ガスが含まれている。この詳細なデータベースは、輸入商品の排出原単位やエネルギー投入量を推定し、CBAM 関税や国内炭素価格を計算する際に使用される。

表 4.3.2-2 分析シナリオ想定 [4)]

Scenario	Policy implemented
Baseline	Full EU ETS (it includes EU ETS allowances phasing out for EITE sectors).
CBAM	Full EU ETS and EU CBAM (the sectors covered in the CBAM scenario are iron and steel, aluminium, fertilisers, and cement).
Chinese ETS	Full EU ETS and Chinese ETS on CBAM industries (the Chinese ETS on the power sector becomes more stringent, with a higher carbon price up to 40 EUR per tonne of CO_2).
Chinese ETS + CBAM	Full EU ETS, Chinese ETS and CBAM.
Indian ETS	Full EU ETS and Indian ETS on CBAM and power sectors (with a carbon price up to 40 EUR per tonne of CO_2).
Indian ETS + CBAM	Full EU ETS, Indian ETS and EU CBAM.
Chinese and Indian ETS	Full EU ETS, Chinese and Indian ETS.
Chinese and Indian ETS + CBAM	Full EU ETS, Chinese and Indian ETS and EU CBAM.

EU-CBAM のマクロ経済への影響に関して、EU 諸国と非 EU 諸国の両方にとって無視できる程度である。地域ごとの GDP のばらつきは 0.5%未満で、米国はわずかにプラスの傾向を示しているのに対し、他の地域ではマイナスの変動はごくわずかである（図 4.3.2-4）。しかし、セクター別の傾向には偏りがあり、EU の EITE 生産は増加し、プラスの影響は 2030 年には約 1.5%、2040 年には 2%に達すると推計された。また、EU-CBAM の世界 CO_2 排出量に与える影響もわずかであるという結果となった。CBAM 政策全体的な影響（マクロ GDP や世界 CO_2 排出量）はさほど大きくないものの、特定の地域や部門ごとのばらつきがある結果が示された。これらの結果は、DEARS モデル [12)]と整合的である。このことから、有意義な環境政策とするためには、CBAM をより広範な国際的な炭素規制政策と統合することの重要性を示唆している。

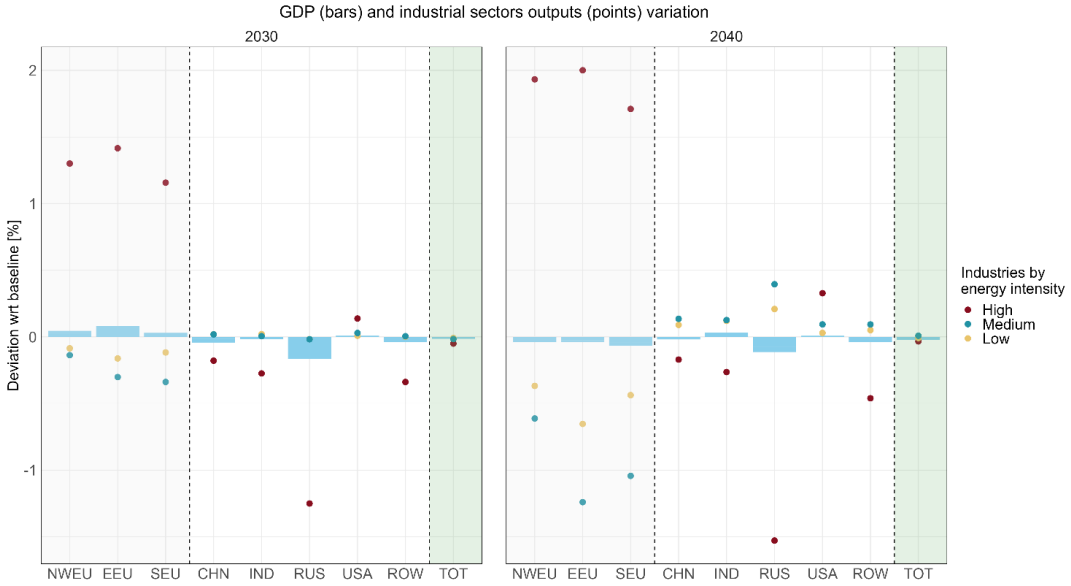


図 4.3.2-4 CBAM シナリオによる各地域の GDP・産業生産への影響（ベースライン比）[4)]

シナリオ比較により、EU-CBAM が EU の輸入に与える影響は、中国、インド、またはその両方が追加の炭素政策を実施するかどうかによって異なることが明らかになった。中国またはインドからの EU 輸入が大幅に減少するシナリオは、CBAM シナリオよりも、相手国が気候緩和対策を実施する場合に限定される（図 4.3.2-5、図 4.3.2-6）。すなわち、CBAM による影響は、中国やインドが国内で気候緩和対策を実施する影響に比べ小さいことが推計された。これらの結果は、DEARS モデル [12)] と概ね整合的である。

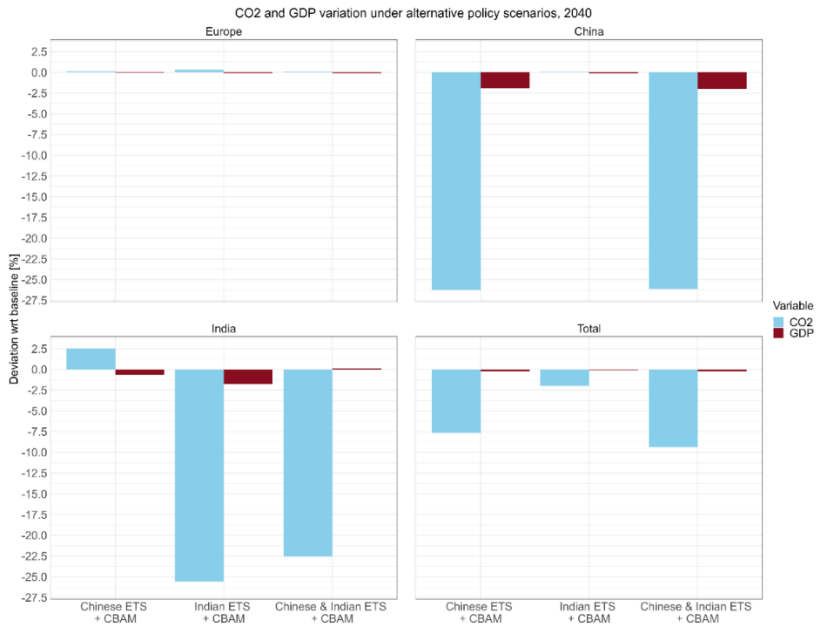


図 4.3.2-5 各シナリオの CO2・GDP への影響（ベースライン比）[4)]

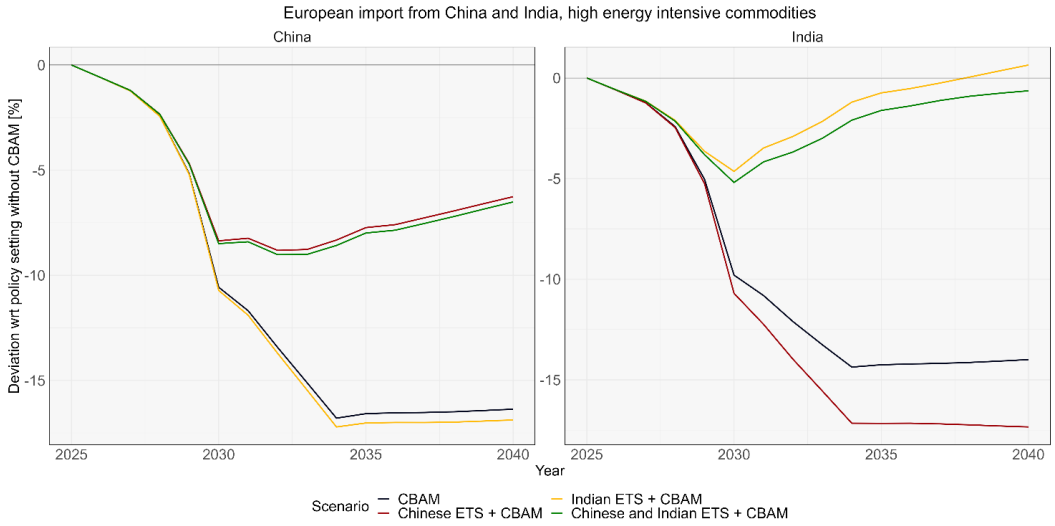


図 4.3.2-6 各シナリオの EU 輸入への影響（ベースライン比）[4)]

FIDELIO の一般均衡モデルを用いた、CBAM による中国とインドの国際貿易、生産、環境成果に及ぼす影響を評価した。この調査結果は、CBAM がマクロ経済と環境に与える全体的な影響は、現在考えられている EU-CBAM の枠組みでは無視できる程度である可能性を示唆している。しかし、この政策は EITE の生産と貿易に大きな影響を与える可能性を示唆している。厳格な国際炭素規制政策の枠組みに組み込むと、CBAM が国際貿易フローに与える影響はそれほど顕著ではなく、地域格差もあると推計された。

(2) 気候政策と貿易の相互運用性 [6)]

Elkerbout and Nehrkorn[6)]による気候政策と貿易の相互運用性（Interoperability）に関する議論を整理した。炭素強度の定量化に関連する、気候政策と貿易政策の相互に作用する複数の課題について検証した。

気候変動対策によって、貿易の管理コストを増大させる可能性がある。そこで、貿易障壁を増やすことなく、各国が気候政策を実施する概念である気候政策と貿易の相互運用性について議論されている。相互運用性は、各国が独自の気候政策を実施する中で、それらの政策が管理コストの増加や国際貿易の障壁となることとは望ましくないという概念である。相互運用性の目的は、国際貿易に関連する取引コストを減少させることである。取引コストをできる限り最小限に抑えることによって、各国は生産性を高めつつ、野心的な気候変動対策を実施することが可能となる。また、相互運用性は、すべての政策の調和を目指すというよりも、各国の政治的・経済的な状況を考慮しつつ、各国の多様な政策が、障壁とならないように連携をとるに重点が置かれている。

Elkerbout and Nehrkorn[6)]によると、Brexit に見られるように、行政上の負担は貿易に悪影響を及ぼす可能性がある。また、炭素強度の定量化には、生産プロセスと連動した測定が必要である。工場・施設ベースから製品レベルの炭素会計への移行は実質的には困難である。政策立案者は、目的を損なうことなく、技術的指標について合意す

べきである。既存の基準は、特に製品レベルの会計において、相互運用性を複雑にしている。相互運用性を構築するうえでの問題には、技術的目標と政治的目標を区別することが含まれる。貿易関連の気候政策における相互運用性は、各国が追加の貿易障壁を小さくし、気候目標を達成できる枠組みを構築し、それによってグローバルな協力と経済効率を高めることを目的とするのが望ましいことを示唆している。

(3) CBAM の潜在的な政策の影響・波及効果と課題

Clausing ら[7]による CBAM の潜在的な政策の影響・波及効果と課題について記す。

政策的波及効果について、CBAM は、国内外の気候政策に影響を与え、政策の重大な波及効果をもたらす可能性がある。海外の炭素価格制度の価格が EU よりも低い場合、CBAM 課税は炭素価格の分だけ減額される仕組みである。CBAM の普及が進めば、各国にカーボンプライシングを採用するよう促すこともできる可能性が指摘されている。例えば、エネルギー多消費産業（EITE）を大量に EU に輸出しているトルコやウクライナのような国では、カーボンプライシングを採用するインセンティブが強いと予想される。すでにカーボンプライシング政策を実施している国でも、CBAM に対応してプログラムを調整する可能性がある。例えば、中国では、2026 年に始まる CBAM 課税に先立ち、鉄鋼、セメント、アルミニウムなどのセクターを排出量取引システムに追加することを検討している。

さらに、CBAM は、エネルギー集約産業の生産に関して再生可能エネルギーの利用やクリーンな生産方法を革新したりするなどの対応を促す可能性がある。また、各国は CBAM 対象のセクターからの輸出に焦点を当てる可能性がある。

Clausing ら[7]によると、EU-CBAM の実施は、世界中で炭素価格に関する取り組みを増加させ、世界的な波及効果をもたらしている可能性があると指摘している。2019 年 7 月に EU CBAM が初めて議論されたとき、全世界で 57 件の炭素価格設定イニシアティブが実施あるいは実施予定であった。2024 年 5 月までに、75 件に増加し、対象地域は世界の排出量の約 24%を占めた。この増加は、EU の政策イニシアティブに対する世界的な反応が増加している可能性を示している。また、2019 年 7 月の時点で炭素価格が設定されていない地域において、炭素価格や CBAM に関するメディアのヒット数は約 4 倍に増加したことが観測されている。これらの増加は、炭素価格設定や CBAM への関心の高まりによる可能性がある。ただし、このような因果関係が必ずしも明確に証明されているわけではない点に留意が必要である。

CBAM に関する政策提言として、世界的な排出削減を促進する政策波及効果を生み出す可能性を Clausing ら[7]は強調している。これらのメカニズムは、効果的な気候変動緩和の取り組みを妨げてきた長年のフリーライダー問題に対処する方法と見なされている。CBAM を実施することで、各国は他の国がカーボンプライシングを採用するインセンティブを創出し、それにより排出量削減に向けたより世界協調的なアプローチを促す可能性を示唆している。しかし、CBAM が成功するかどうかは、慎重な政策設計と運用に依存している。CBAM が既存の炭素価格制度とどのように相互作用するかを検討することや、意図しない貿易障壁やその他の経済的歪みが生じないようにすることがあげられる。政策の抵抗感への対策として、グローバルな協調の重要性も強

調されている。2021 年の国際税務協定の成功は、グローバルな調整が集団行動の問題にどのように対処できるかを示す先例となった。国際租税協定の背後にあるインセンティブと同様に、CBAM は各国が協定に加盟するインセンティブを設け、財政収入が他国に流出することを避けるためのインセンティブを設けるなど、グローバルな調整が、CBAM の普及と有効性にとって極めて重要と指摘している。

CBAM の課題について述べる。課題の 1 つは、測定とクレジットの問題に関連する課題である輸入品の炭素排出量を管轄区域ごとにどのように評価するかということである。企業が管轄区域の平均排出量よりもクリーンであることを証明する仕組みがない限り、企業レベルの脱炭素化への取り組みが十分に奨励されないリスクがある。そのためには、平均排出量をそれに応じて調整する必要がある。また、CBAM が課す可能性のある管理上の負担にも留意しなければならない。特に、CBAM を遵守する見込みがある開発途上国にとっては、調整のための時間を確保し、技術支援を提供することが重要である。CBAM には独自の温室効果ガス強度の定量化規則がある場合があり、相互運用性の欠如はこれらの国にとって実施困難になる可能性がある。

もう 1 つの課題は、CBAM を課す場合の対象の特定、免除の範囲である。実施国は、海外のどの炭素価格措置を自国の制度と同等のものとして認めるかを決定する必要がある。免除の範囲はまだ完全には確立されていない。EU や英国が輸出にのみ炭素税を課す国にクレジットを与えるのか、それともヨーロッパへの輸出にのみ手数料を課す国にクレジットを与えるのかという疑問が生じうる。これらの課題は、CBAM がグローバルな脱炭素化への取り組みを促進する上で公正かつ効果的であることを保証するために極めて重要と考えられる。

(4) マテリアルフローを考慮した経済モデル開発

CBAM シミュレーションとモデル強化に関して、Parrado ら [8]による、マテリアルフローを考慮した CMCC-ICES モデル（一般均衡型経済モデル）開発について記す。ここでは、CGE モデルへの物理的流れと貨幣的流れの統合、量的保全の課題への取り組み、気候変動の文脈におけるより正確な経済モデリングのための解決策をまとめた。

Parrado ら [8]は、炭素の国境税調整の研究に用いられる CGE モデルのほとんどが、貨幣フローから関税を計算しているため、商品の炭素集約度の評価に偏りが生じる可能性があることを指摘している。これに対処するためには、CGE モデルを修正するためプロセスを整理した物質の物理的な流れに関する情報を収集しその流れを貨幣の流れに結び付け、最終的に、セクター間の経済的相互作用と物理的相互作用の両方の一貫性を確保するためのモデル修正である。

まず、ICES モデルはマテリアルフローを反映できるように拡張する計画である。鉱物関連のデータベースに関して、GTAP consortium が、鉱石およびプラスチックのバリューチェーンに関連する追加の経済部門を提供する GTAP-CE という新しいデータベースを提供している。CMCC-ICES モデルは、経済及びエネルギー以外にも、GTAP-CE から鉄鋼、アルミニウムに関連するセクターのマテリアルフロー情報を追加し開発を進めている。マテリアルフローを、新しい鉱物セクターに対応する数量とリンクさせる必要がある。

次に、マテリアルフローを表現するためのモデル定式化の改良を検討した。従来のCGEモデルでは、輸入財と国産財の代替性を表現するためにCES（Constant elasticity of substitution、固定の代替弾力性）関数が広く用いられているが、ここではACES（Additive constant elasticity of substitusion、加法性をもつ代替弾力性）関数[10),11)]における定式化を検討している。主な違いは、ウェイトにバリューシェア（金額）を使用するCESアプローチとは対照的に、ボリューム（量）の加法性を保証するACESの特性を利用する。CES関数では、加法性が満たされないために、マテリアルバランスを表現することが難しい（入力と出力のバランス）。これらの違いは、相対価格を平均化して複合財の価格を決定する方法を理解する上で非常に重要であると考えられている。物理量が単にCES生産関数を用いて貨幣価値とリンクされている場合には、物理量の不均衡を生み出す可能性が指摘されている[9)]。そのために、加法性が保証されたACES関数がマテリアルフローを考慮する上で有効と考えられる。ACES関数の加重は、CESで使用される金額シェアではなく、数量シェアを使用する点に特徴がある。

参考文献（第4.3節に関するもの）

1) 柳、乱立するCBAM（炭素国境調整措置）、日中省エネ環境総合フォーラム長期貿易分科会(2024) https://jcpage.jp/jcevent/file/event/upload/file/383/04_longterm_09_ieej%20_yanagi_jp.pdf （アクセス日2025.2.25）
2) EU、Carbon Border Adjustment Mechanism、https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en （アクセス日 2025.2.25）
3) CSIS、Crafting a Robust U.S. Carbon Border Adjustment Mechanism、https://www.csis.org/analysis/crafting-robust-us-carbon-border-adjustment-mechanism（アクセス日2025.2.26）
4) Rocchi et al., Expanding carbon pricing boundaries and the EU CBAM: insights into China and India, CMCC-RFF, Technical report (2024)
5) Eurostat, FIGARO tables: EU inter-country supply, use, and input-output tables, https://ec.europa.eu/eurostat/web/esa-supply-use-input-tables/information-data#figaro （アクセス日2025.2.26）
6) M. Elkerbout and K. Nehrkorn, Trade-Friendly Climate Policies: The Promise of “Interoperability”, RFF Working Paper 24-11, https://www.rff.org/publications/working-papers/trade-friendly-climate-policies-the-promise-of-interoperability/ (2024) （アクセス日 2025.2.25）
7) K. Clausing et al., How Carbon Border Adjustments Might Drive Global Climate Policy Momentum, RFF Working Paper 24-20, https://www.rff.org/publications/reports/how-carbon-border-adjustments-might-drive-global-climate-policy-momentum/ (2024) （アクセス日 2025.2.26）
8) R. Parrado et al., Methods and data sources to develop a coupled physical-monetary flows CGE approach, CMCC-RFF, Technical report (2024)

9) Taheripoor et al. Land use in computable general equilibrium models. Journal of Global Economic Analysis. 5. 63-109. 10.21642/JGEA.050202AF. (2020)
10) P. B. Dixon and M. T. Rimmer, “A New Specification of Labour Supply in the MONASH Model with an Illustrative Applications.” Australian Economic Review 36(1):22–40. doi: 10.1111/1467-8462.00265 (2003)
11) J.A.Giesecke, N.H. Tran, E. L. Corong, and S. Jaffee. “Rice Land Designation Policy in Vietnam and the Implications of Policy Reform for Food Security and Economic Welfare.” Journal of Development Studies 49(9):1202–18. doi: 10.1080/00220388.2013.777705. (2013)
12) RITE : 脱地球温暖化と持続的発展可能な経済社会実現のための対応戦略の研究、（公財）地球環境産業技術研究機構 令和 5 年度報告書 (2023)
13) RITE : 脱地球温暖化と持続的発展可能な経済社会実現のための対応戦略の研究、（公財）地球環境産業技術研究機構 令和 4 年度報告書 (2022)

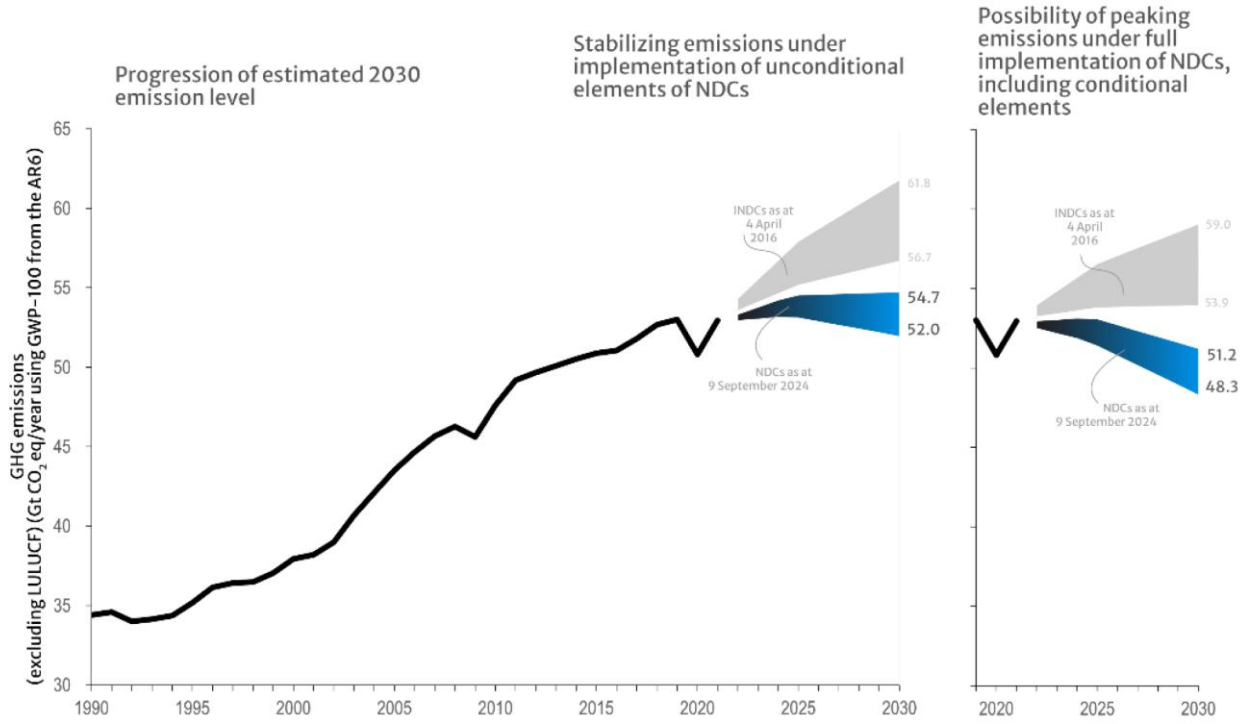
4.4 排出削減努力等の研究事例の調査

本節では、他機関による NDCs の下での排出削減努力の研究事例として、UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)および UNEP (United Nations Environment Programme)の分析を紹介する。

4.4.1 UNFCCC 事務局による Synthesis レポート

UNFCCC 事務局は、2024 年 10 月 28 日に、パリ協定の 195 の締約国を代表する、168 件の最新の NDCs に関する情報（2024 年 9 月 9 日時点）をまとめた年次報告書を公表した [1)]。対象となるこれらの国の GHG 排出量は、2019 年における世界 GHG 排出量の 95%を占め、排出量絶対量は 52.9$GtCO_2eq$（LULUCF を除く）となる。

図 4.4.1-1 は、GHG 排出量実績値および NDCs 下の GHG 排出量パスを表している。中心部分にあるグラフは条件が無い場合、右側部分が条件付きの場合を示している。また、国際航空からの排出量は 2030 年まで 2019 年レベルで一定とする(～619$MtCO_2$)。国際海運からの排出量は 2018 年時点で 755$MtCO_2eq$ であり、2030 年までに 2008 年比で 20～30%減少すると仮定し、2050 年頃までにネット・ゼロを達成する。これは、国際海事機関（IMO）の 2023 年度版 GHG 削減戦略に沿って、2050 年までに 2008 年比で 90～100%削減を実施するものと整合的である。現在の条件無し NDCs が達成された場合は、2030 年の世界 GHG 排出量は 53.3 (52.0-54.7) $GtCO_2eq$、条件付き NDCs を含めた場合（条件無しと条件付きの両方を含む）、2030 年の世界 GHG 排出量は 49.8 (48.3-51.2) $GtCO_2eq$ と推計される。また、現在の条件無しの NDCs が達成された場合（条件付きの目標は除く）、2030 年の世界 GHG 排出量は 2019 年比で約 2.6%減少する。これは、前年の報告書（2019 年比で約 2.0%の減少）より若干低い排出レベルである。



Note: For comparison, global emissions with LULUCF in 2030, when taking into account implementation of the new or updated NDCs (blue areas), are estimated to 55.2 (53.9–56.6) Gt CO_2 eq considering unconditional elements and 51.7 (50.2–53.1) Gt CO_2 eq assuming full implementation.

図 4.4.1-1 NDCs 下の GHG 排出量パス（LULUCF を除く）

（出典）UNFCCC[1)]

図 4.4.1-2 は IPCC 第 6 次評価報告書(AR6)で評価された 3 つのシナリオ(1.5℃ with no overshoot、1.5℃ with limited overshoot、likely below 2℃）における世界 GHG 排出量と NDCs 達成時における世界排出量を比較したものである。1.5℃（50%以上の可能性）with no or limited overshoot シナリオでは、2030 年までに 2019 年比で GHG 排出量が 43(34-60)%減少する。一方、2℃シナリオ（67%以上の可能性）では、GHG 排出量が 2019 年レベル比で 2030 年までに 27(13-45)%減少する。以上のことから、今回の報告書では、前回報告書と同様に、費用対効果の高い排出量レベルを達成するためには、現在から 2030 年までに NDCs の野心レベルを大幅に引き上げるか、最新の NDCs を大幅に超過達成するか、あるいは、両方を達成することが早急に必要であることが指摘されている。

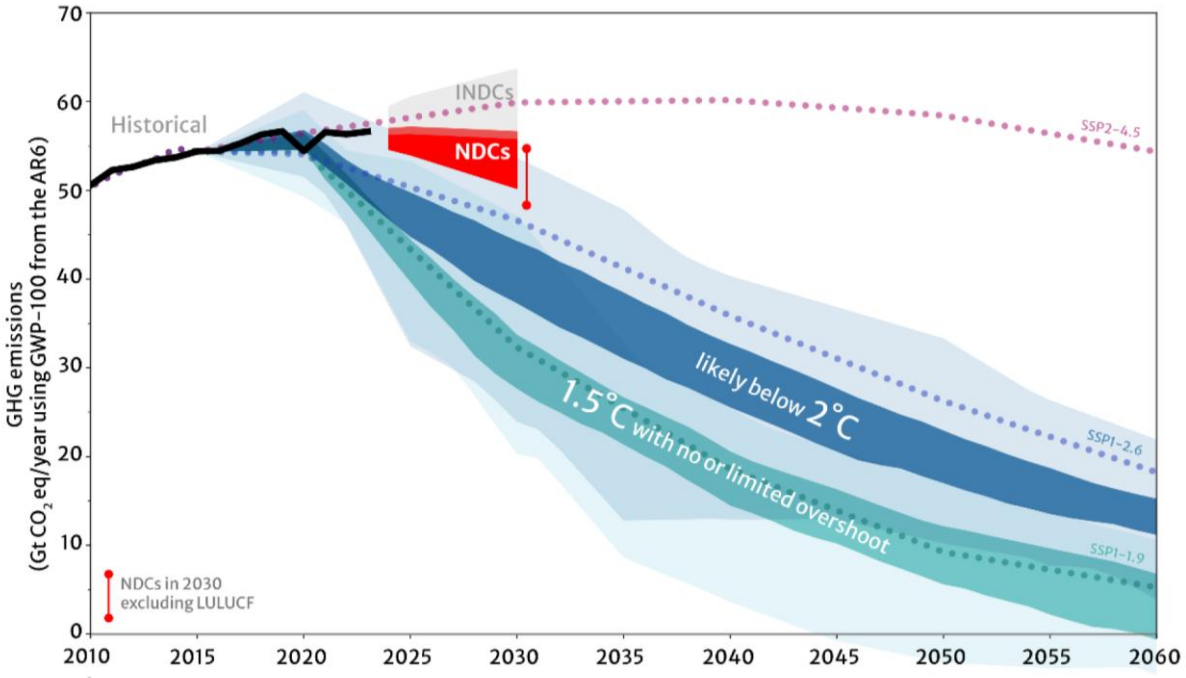


図 4.4.1-2　IPCC AR6 で評価されたシナリオにおける世界 GHG 排出量と NDCs 下における世界排出量との比較

（出典）UNFCCC[1)]

図 4.4.1-3 は、NDCs において 2030 年コストが 20US$/tCO₂eq および 100US$/tCO₂eq を下回る緩和ポテンシャルの高い優先分野に言及している締約国の割合を示す。効果的な緩和オプションとして多く言及されているのは、再生可能エネルギー発電、森林等の転換の減少、産業でのエネルギー効率の向上等である。

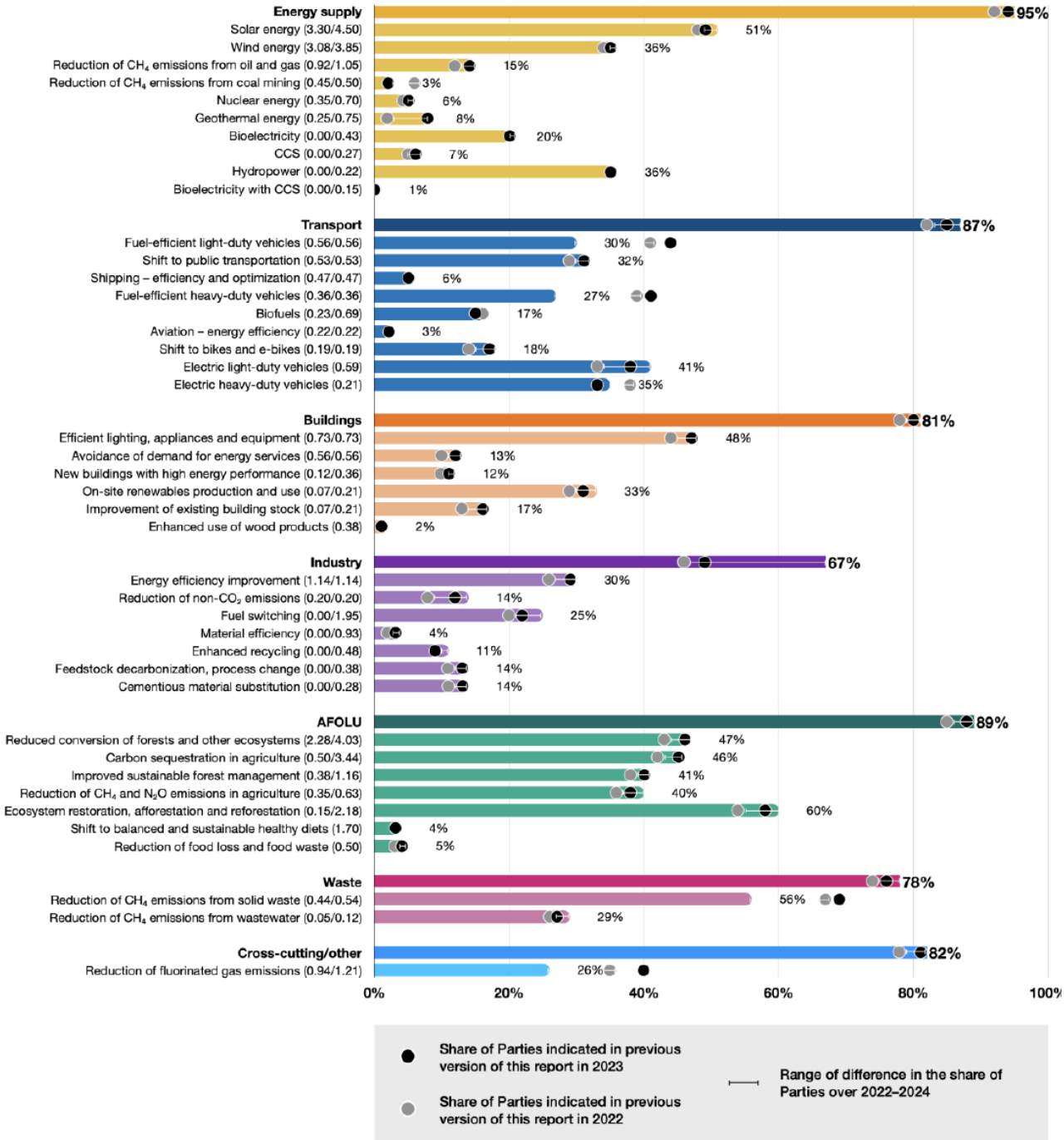


図 4.4.1-3　NDCs において緩和ポテンシャルの高い優先分野に言及する締約国の割合

（注）括弧内の数値は順に、2030 年の緩和コストが 20US$/tCO₂eq、100US$/tCO₂eq を下回る緩和ポテンシャル（GtCO₂eq/yr）を示す。

（出典）UNFCCC[1)]

4.4.2　UNEP による Emission Gap Report 2024 (EGR2024)

2024 年 10 月 24 日に、UNEP は Emission Gap Report (EGR) 2024 を公表した[2)]。EGR は UNEP が毎年公表しているものであり、各国の NDCs（2024 年度版は 2024 年 9 月 1

日までに提出されたものを対象）やその進捗状況についてまとめ、パリ協定の目標との排出量のギャップを評価することが目的である。本報告書は第 15 版となる。なお、COP28 以来、新しい NDCs を提出した NDCs を提出したのは 3 か国（マダガスカル、ナミビア、パナマ）だけで、そのうち 2030 年目標を強化したのはマダガスカルのみである。次期 NDCs（2035 年目標）提出の締切まで数ヶ月となった中、今回の報告書は、パリ協定の長期的気温目標の達成の可能性を維持するために、次期 NDCs に要求されることに特別なフォーカスを当てている。また、G20 加盟国は世界の平均よりも迅速に費用効果的かつ公正に排出ギャップを埋める上で中心的な責任があることや、セクター毎の排出削減ポテンシャル評価についても言及している。

排出ギャップの評価では、表 4.4.2-1 にあるように、4 カテゴリー（現行政策シナリオ、NDC シナリオ、最も強い誓約のシナリオ、特定の気温制約に沿った費用最小化シナリオ）のシナリオが想定されている。現行政策シナリオは、IPCC WGIII　第 6 次評価報告書（AR6）、および Climate Action Tracker、PBL、JRC、ENGAGE 等による研究、IEA World Energy Outlook 2023 の STEPS シナリオ等を参照、NDC シナリオは Climate Action Tracker や JRC 等 4 つのモデリングに基づいた最新の更新を反映、最も強い誓約のシナリオは条件付き NDCs とネットゼロ目標が全て達成された場合を想定、費用最小化シナリオは特定の気温レベル（パリ協定と整合する 2℃、1.5℃目標等）に制約した場合の排出経路を IPCC WGIII AR6 での研究から導き、対応する気温上昇は IPCC WGI AR6 の評価や更新された残余カーボンバジェットに基づく、としている。

表 4.4.2-1 排出量推計と排出ギャップ評価のためのシナリオの概要

Category	Scenario cases	Cut-off year	Scenario description
Reference scenario	Current policies	2023	This scenario projects global GHG emissions assuming all currently adopted and implemented policies as at November 2023 are realized and that no additional measures are undertaken. When extended beyond 2030, it assumes a continuation of efforts at a similar level of ambition.
NDC scenarios	Unconditional NDCs	2024	This scenario projects the GHG emissions assuming full implementation of the most recent NDCs that do not depend on explicit external support (cut-off date: September 2024). When extended beyond 2030, it assumes a continuation of efforts at a similar level of ambition.
	Conditional NDCs	2024	In addition to the unconditional NDCs, this scenario encompasses the most recent NDC targets for which implementation is contingent on receiving international support, such as finance, technology transfer and/or capacity-building (cut-off date: September 2024). When extended beyond 2030, it assumes a continuation of efforts at a similar level of ambition.
Strongest pledge scenario	Conditional NDCs + all net-zero pledges	2023	This is the most optimistic scenario included. It assumes the achievement of the conditional NDC scenario until 2030 and all net-zero or other long-term low emissions development strategy (LT-LEDS) pledges (cut-off date: July 2024) thereafter.
Mitigation scenarios consistent with limiting global warming to specific levels	Below 2°C	N/A	A least-cost pathway starting from 2020 and consistent with keeping global warming below 2°C throughout the twenty-first century with at least a 66 per cent chance.
	Below 1.8°C	N/A	Least-cost pathway starting from 2020 and consistent with holding global warming below 1.8°C throughout the twenty-first century with at least a 66 per cent chance.
	Around 1.5°C (with no or limited overshoot)	N/A	Least-cost pathway starting from 2020 and ensuring that global warming is kept below 1.5°C with at least a 33 per cent chance throughout the entire century and is brought back below 1.5°C with at least a 50 per cent chance by 2100. This pathway reaches net-zero GHG emissions in the second half of the century.

（出典）UNEP[2)]

図 4.4.2-1 は、異なるシナリオ下の世界の GHG 排出量と 2030 年時点の排出量ギャップを表している。2030 年の排出量のギャップの定義は、「現行政策および NDCs 等を完全に実施した場合の世界 GHG 排出量」と「各気温上昇シナリオを費用最小化の下で達成する場合に得られる世界の GHG 排出量」との差である。また、表 4.4.2-2 の数値は、図 4.4.2-1 の数値を詳細にしたものである。

現行政策の下では、2030 年の世界の GHG 排出量は 57(53-59)$GtCO_2eq$ と推計される。その推計値より、条件無し NDCs では約 2(0-3)$GtCO_2eq$、条件付き NDCs では約 5(2-9)$GtCO_2eq$ 下回る。条件無しの NDCs に関し、2030 年の排出ギャップ（中央値）は、2℃目標の経路で 14$GtCO_2eq$、1.5℃目標の経路で 22$GtCO_2eq$ である。一方、条件付きの場合、それぞれの気温目標で条件無しよりギャップが約 3$GtCO_2eq$ 縮まり、排出ギャップは、2℃目標の経路で 11$GtCO_2eq$、1.5℃目標の経路で 19$GtCO_2eq$ である。これらは昨年の評価から変わっておらず、それは昨年から NDCs や費用最小化パスに

有意な更新がないことが理由である。また、条件無しおよび条件付き NDCs の実施により、2030 年の世界 GHG 排出量は 2019 年比でそれぞれ 4%、10%削減される。一方、2℃目標を達成するためには、2030 年までに 28%の削減が必要であり、1.5℃に抑制するためには、42%の削減が必要であると指摘している。これらの推計は昨年の報告書と同様であり、依然として早急で加速した緩和対策が必要であることが強調されている。

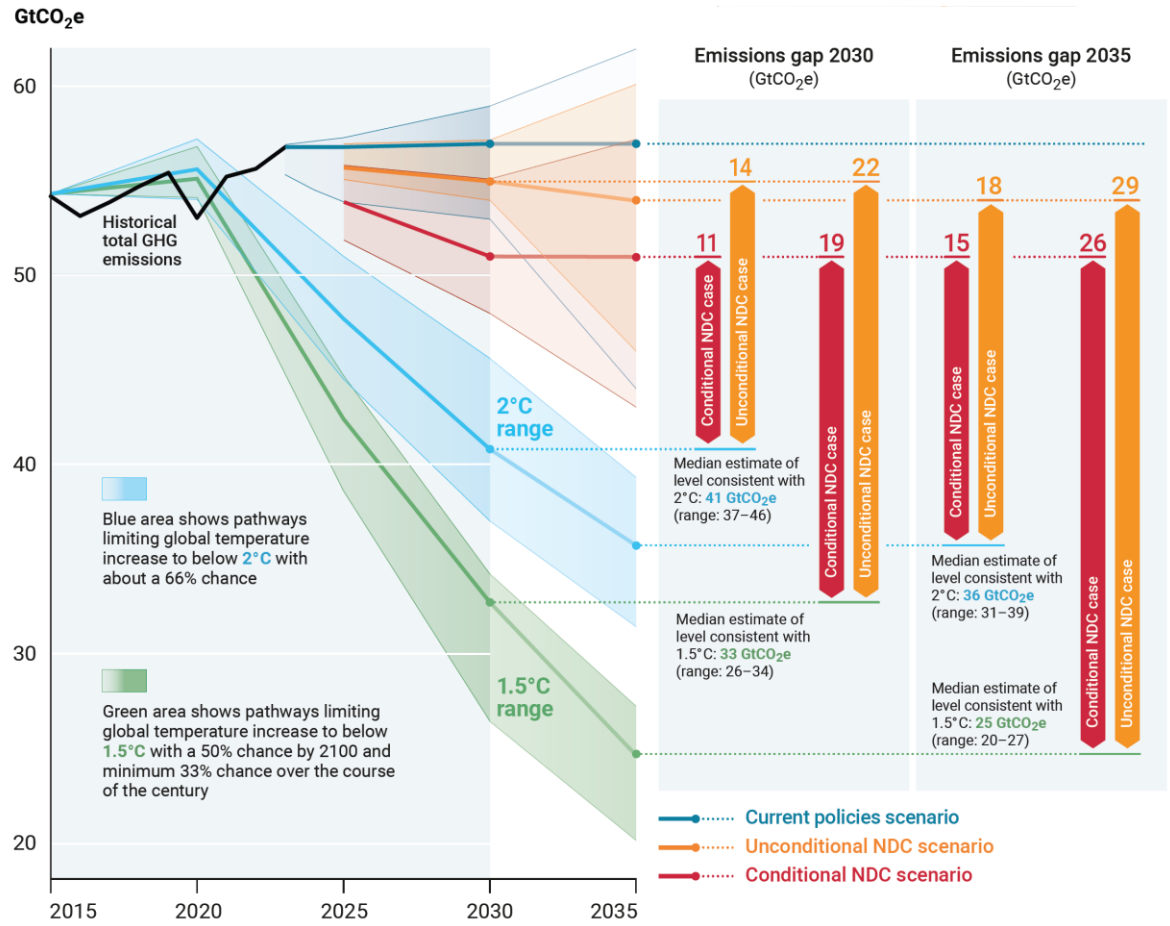


図 4.4.2-1 異なるシナリオ下の世界の GHG 排出量と 2030 年および 2035 年時点の排出量ギャップ

（出典）UNEP[2)]

表 4.4.2-2　各シナリオにおける各年の世界の GHG 排出量と推計排出量のギャップ

Scenario	Projected GHG emissions ($GtCO_2e$)	Estimated emissions gaps ($GtCO_2e$)		
	Median and range	Below 2°C	Below 1.8°C	Around 1.5°C
2030				
Current policies	57 (53–59)	16 (12–18)	22 (18–24)	24 (20–26)
Unconditional NDCs	55 (54–57)	14 (13–16)	20 (19–22)	22 (21–24)
Conditional NDCs	51 (48–55)	11 (7–14)	17 (13–20)	19 (15–22)
2035				
Current policies continued	57 (44–62)	21 (9–26)	30 (18–35)	32 (20–37)
Unconditional NDCs continued	54 (46–60)	18 (10–24)	27 (19–33)	29 (21–35)
Conditional NDCs continued	51 (43–57)	15 (8–22)	24 (17–30)	26 (19–33)
Conditional NDC + all net-zero pledges	43 (38–49)	8 (2–13)	16 (11–22)	19 (13–24)
2050				
Current policies continued	56 [25–68]	36 (4–48)	44 (12–56)	48 (16–60)
Conditional NDC + all net-zero pledges	19 [6–30]	-1 (-14–10)	7 (-6–18)	11 (-2–22)

Note: Scenarios are defined in table 4.1. The 2030 median current policies estimate is about 0.5 $GtCO_2e$ higher (rounding results in 1 $GtCO_2e$ higher in the table) than the median estimate of last year's assessment, mainly due to the impact of updated recent emissions trends and methodological updates.

The GHG emissions ranges for 2035 and 2050 show the minimum–maximum range across different projection-model assumptions and include 2030 current policy/NDC assessment uncertainty (UNEP 2023, chapter 4, appendix C). That means that the uncertainty over which emissions current policies or NDCs will result in for 2030 and the ambiguity in how this can be extended into the future are captured by this range. The gap numbers and ranges are calculated based on the original numbers (without rounding), and these may differ from the rounded numbers in the table. Numbers are rounded to full $GtCO_2e$. The gap numbers and ranges are calculated as the difference between the median and minimum and maximum estimates for GHG emissions of the current polies and NDC scenarios and the median estimate for GHG emissions of the least-costs scenarios in line with specific temperature limits. GHG emissions have been aggregated with the 100-year global warming potential values from AR6.

（出典）UNEP[2)]

EGR は気温上昇の見通しについても言及している。図 4.4.2-2 は各シナリオにおける今世紀での気温上昇の推計を示す。現行政策の継続で、今世紀にかけて気温上昇は最大 3.1℃（66%の可能性）と推計される。条件無しおよび条件付き NDCs の実行による気温上昇推計は、それぞれ 2.8 (1.9-3.7)℃、2.6 (1.9-3.6)℃（いずれも 66%の可能性）である。これらの 3 つのシナリオでは、気温上昇が 1.5℃以内（中央値）になる確率はほぼゼロである、としている。パリ協定の気温目標達成に一番近い唯一のシナリオは、条件付き NDCs+ネットゼロ公約が実施される場合で、推計気温上昇は 1.9 (1.8-2.3)℃（66%の可能性）である。

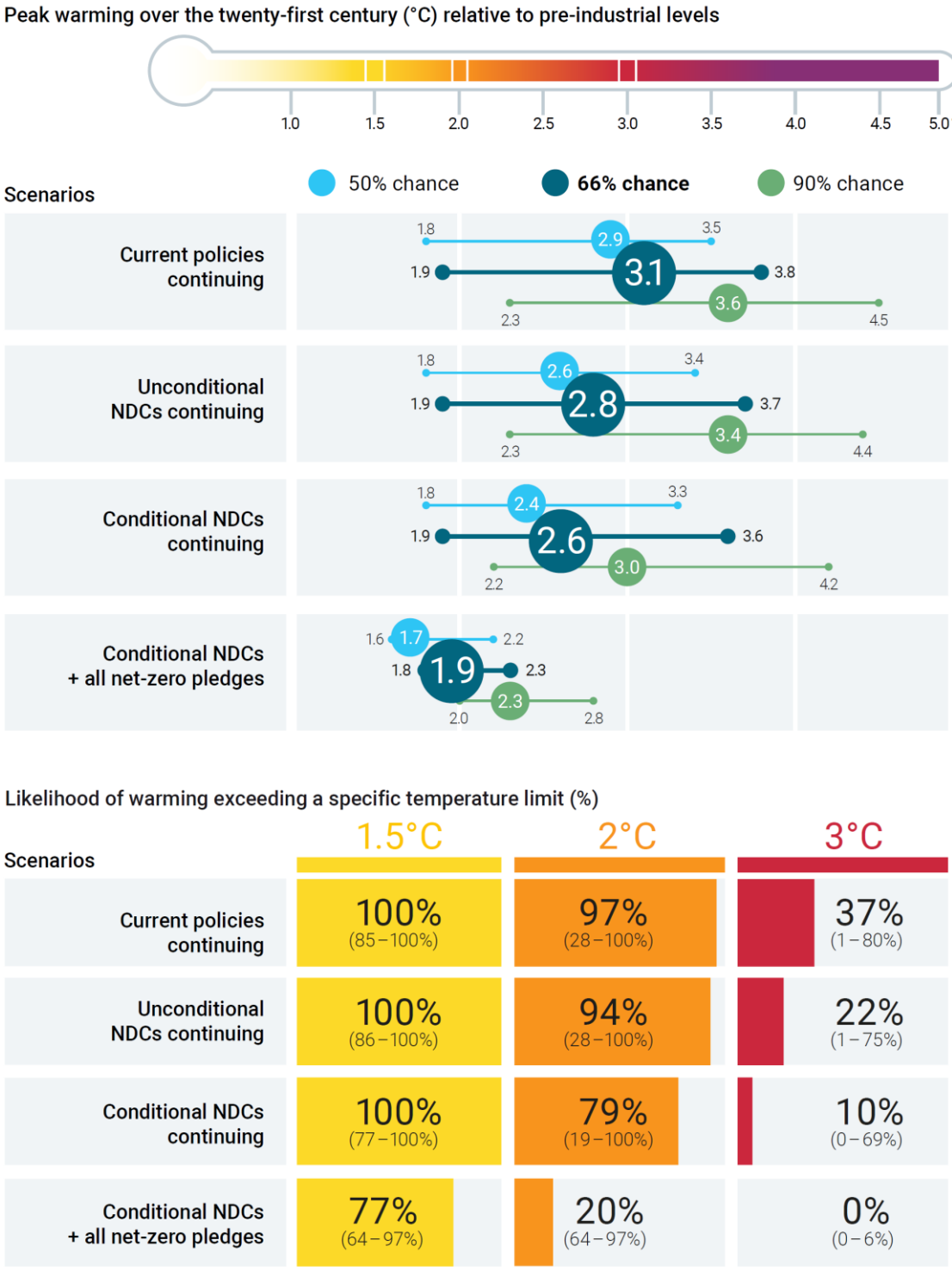


図 4.4.2-2 各シナリオにおける気温上昇の推計（上：今世紀でのピークにおける産業革命以降の気温上昇、下：特定の気温上昇を超える可能性

（出典）UNEP[2)]

また、各国の NDCs 達成可能性についての言及がある。各国の NDCs 達成可能性評価は、独立した研究機関が行った先行研究に基づく（表 4.4.2-3）。基本的には、世界モデルおよび国内モデルの分析結果の両方を参照し評価をしている。

表 4.4.2-3 G20 加盟国の評価に用いた NDCs および現行政策の下で得られた 2030 年時点の排出量データの参考文献リスト

Country	Updated or new NDC and other announced 2030 target: official data sources (cut-off date: 1 July 2024)[1]	Current policies scenario: Official data sources [2]	Current policies scenario and NDC scenario: Independent sources (1. global models and 2. national models)
Argentina	UNFCCC (2023)	N/A	1. Climate Action Tracker (2024) (as reported in Nascimento *et al.* (2023)), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only)
Australia	Australia, Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water (2023)	Australia, Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water (2023)	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023), Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only)
Brazil	UNFCCC	N/A	1. Climate Action Tracker (2024) (as reported in Nascimento *et al.* (2023)), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023), Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only) 2. Baptista *et al.* (2022) [3]
Canada	Environment and Climate Change Canada (2023)	Environment and Climate Change Canada (2023)	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023), Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only) 2. Canadian Climate Institute (Sawyer *et al.* 2022) (legislated / developing policies scenario)
China	N/A	N/A	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023), three ENGAGE scenarios ((Schmidt Tagomori, Dafnomilis, *et al.* 2023; Schmidt Tagomori, den Elzen *et al.* 2023) ; excl. LULUCF)[5], Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only) 2. National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation (NCSC; excl. LULUCF), Energy Research Institute (ERI) – Integrated Policy Assessment Model for China (IPAC; excl. LULUCF). NCSC and ERI scenarios are published in the COMMIT scenario database (IIASA 2021; van Soest *et al.* 2021)
European Union	European Environment Agency (EEA) (2023) [4]	EEA (2023) [4]	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023)(CP only), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023), Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only)

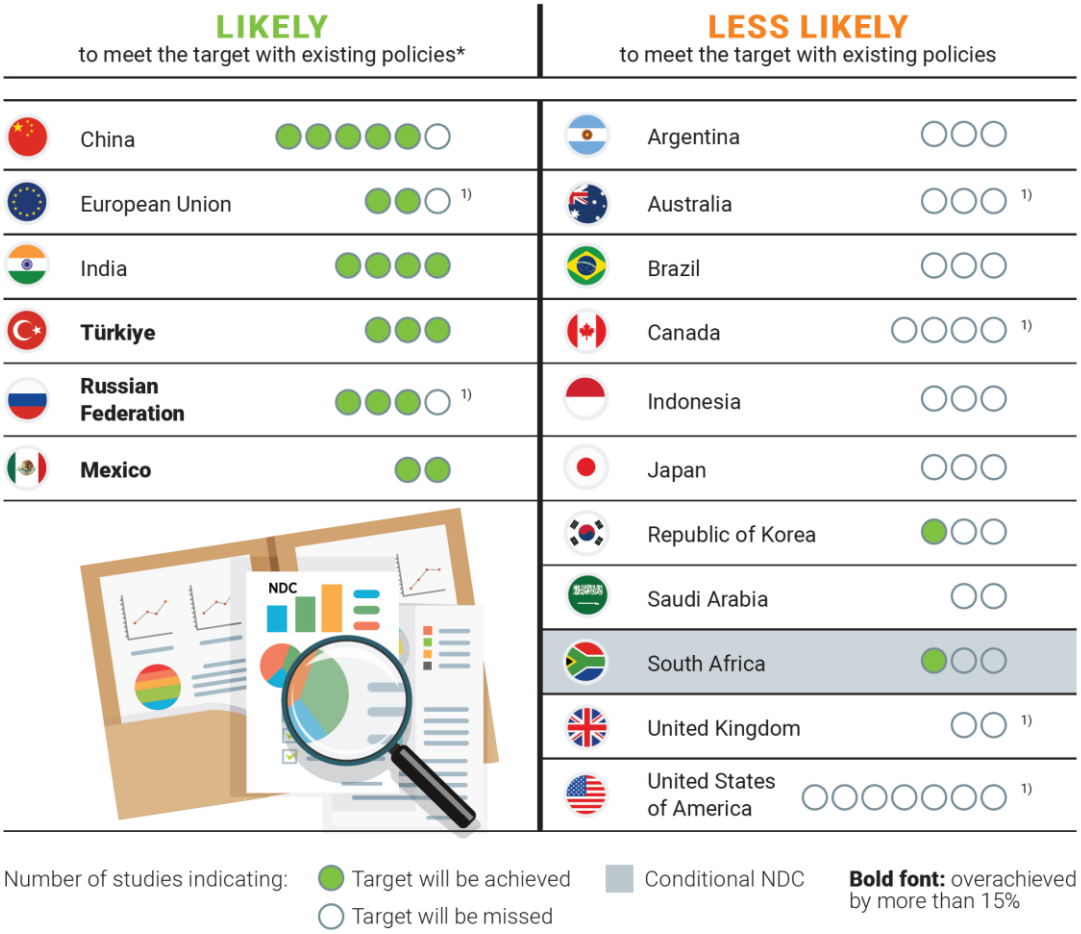
India	N/A	N/A	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023), four ENGAGE scenarios ((Schmidt Tagomori, Dafnomilis, *et al.* 2023; Schmidt Tagomori, den Elzen *et al.* 2023), four CP scenarios and two NDC scenarios, both excl. LULUCF))[5], Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only)
Indonesia	UNFCCC	N/A	1. Climate Action Tracker (2024) as reported in Nascimento *et al.* (2023)), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023), Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only)
Japan	UNFCCC	N/A [2]	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023), Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only)
Mexico	UNFCCC	N/A	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023) Meinshausen *et al.* (2023)(NDC only)
Republic of Korea	UNFCCC	N/A	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023), Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only) [6]
Russian Federation	UNFCCC	NC8/BR4	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023), one ENGAGE scenario (GCAM, (Schmidt Tagomori, Dafnomilis, *et al.* 2023; Schmidt Tagomori, den Elzen *et al.* 2023), excl. LULUCF)[5], Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only)
Saudi Arabia	N/A	N/A	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023)(NDC only), Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only) 2. KAPSARC
South Africa	UNFCCC	N/A	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023), Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only)
Türkiye	UNFCCC	N/A [2]	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023)
United Kingdom	UNFCCC	Department for Energy Security and Net Zero (2023)	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), Meinshausen *et al.* (2023) (NDC only)
United States of America	UNFCCC	N/A [2]	1. Climate Action Tracker (2024), Joint Research Centre (Keramidas *et al.* 2023), PBL (den Elzen *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023) 2. Four scenarios from Bistline *et al.* (2023)[6]

（出典） UNEP[3)]

表 4.4.2-4 は、主要国の NDCs（南アフリカ以外は、条件無しの NDCs）の進展状況について先行研究を参照し、評価したものである。表中の丸の数は、先行研究の数を示す。先行研究は、2022 年から 2024 年 6 月 1 日までに発行された研究を対象としている。評価のカテゴリーは、「現行政策で達成する可能性がある（Likely）」あるいは「現行政策で達成する可能性は低い（Less Likely）」に分けられる。G20 加盟国全体での 2030 年排出量は、条件無し NDCs 下で 34GtCO$_2$eq（中央値）、現行政策シナリオ下で 35GtCO$_2$eq（中央値）となり、どちらの推計も昨年の報告書より若干減少したため、条件無し NDCs の実施ギャップは昨年と変わらない。評価全体としては、11 の G20 加盟国が現行政策で NDCs 目標を達成するには不十分であることが指摘されており、昨年の評価と比べて、サウジアラビアや EU 等については若干異なるものの、大きくは変わらない。

また、図 4.4.2-3 は、G20 加盟国の 2030 年までの現行政策と NDCs 目標との実施ギャップ（座標はそれぞれ対 2019 年比の排出増減）を示す。斜めの線より下に位置する国は現行の政策で NDCs を達成する可能性が高いことを表す。ただし、現行政策で NDCs が達成可能と評価された国々の中には、新たな NDCs で目標の強化が行われず、NDCs 提出以降、現行政策ベースの排出が NDCs を下回っている国もあることも、言及されている。

表 4.4.2-4　主要国の NDCs の達成可能性評価



Note: All NDCs considered in this assessment are unconditional NDCs, unless otherwise mentioned. The African Union does not have its organization-wide NDC as at 1 June 2024. The assessment is based on independent studies mainly published in 2022 or later (see appendix B2 for the list of studies reviewed). The number of independent studies that project a country to meet its current NDC target are compared with the total number of studies and indicated in brackets.

1)Current policies scenario projections from official publications are also examined. The official publications for five G20 members (Australia, Canada, European Union, United Kingdom and United States of America) show that they do not project yet to meet their 'point in time' NDC target under their current policies scenarios (Australia, Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water 2024; European Environment Agency 2023; Environment and Climate Change Canada 2023; Capros *et al.* 2021; United Nations Framework Convention on Climate Change 2024); for the Russian Federation, official projections of the Fifth Biennial Report indicate that the country would achieve its NDC with existing policies (Russian Federation 2023). For the European Union, the official projections by the European Environment Agency do not fully account for the impact of some recently adopted policies, most notably the REPowerEU plan.

（注）公式文書による現行政策シナリオ予測も検討されている。G20 加盟国 5 カ国（オーストラリア、カナダ、EU、英国、米国）の公式発表によると、現行政策シナリオでは「時点」の NDC 目標を達成する見込みはない。ロシアは、隔年の第 5 回報告書の公式予測では、現行政策で NDC を達成できるとされている。EU については、欧州の環境機関による公式の予測は、最近採択された幾つかの政策、特に REPowerEU plan の影響を完全には考慮していない。

（出典）UNEP[2)]

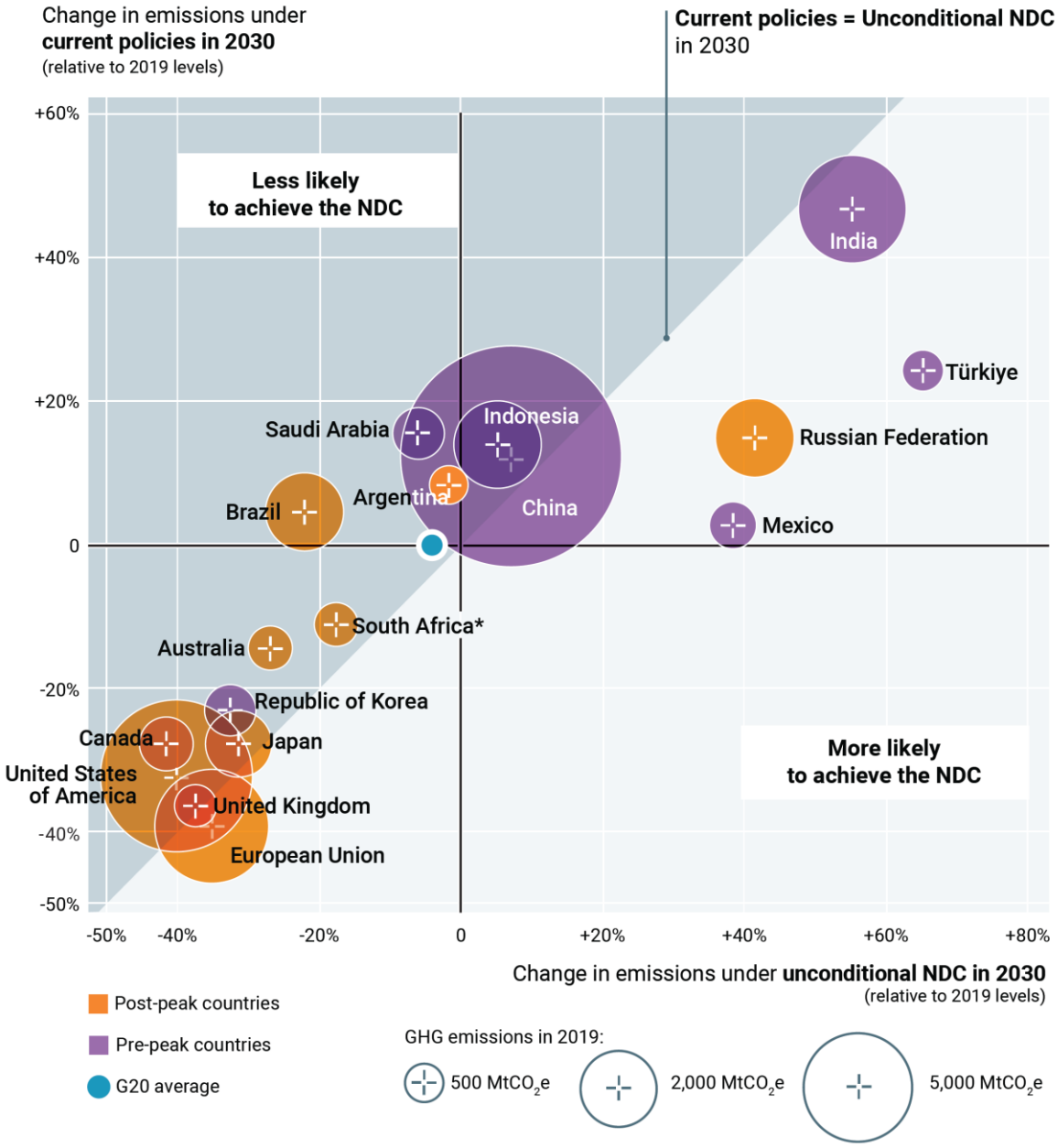


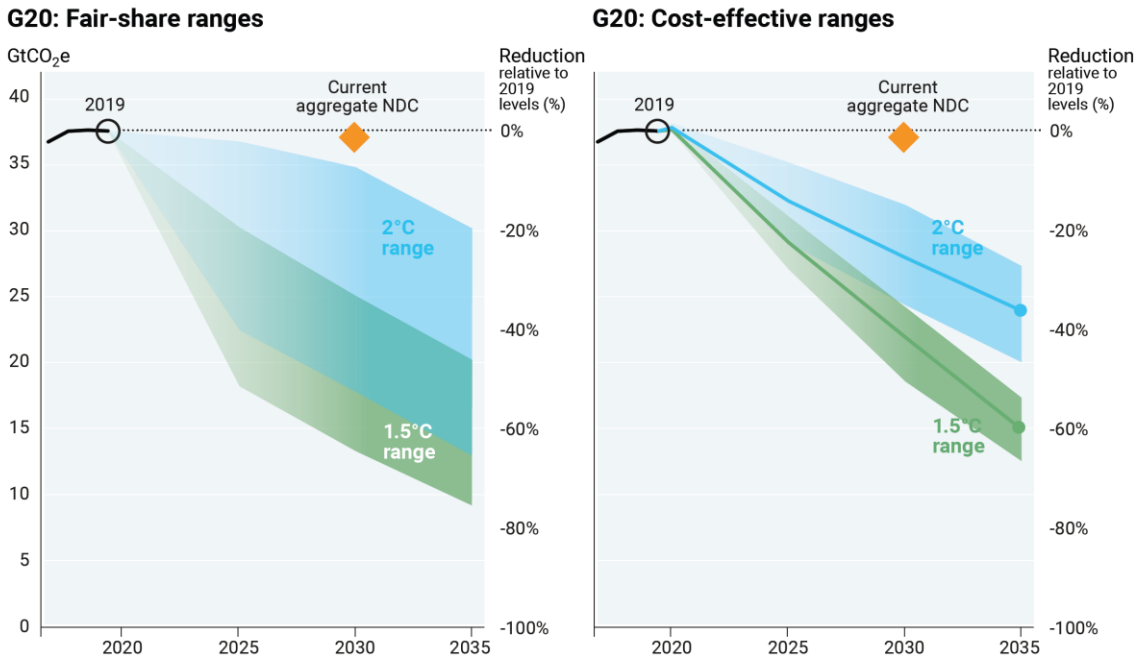
図 4.4.2-3 G20 加盟国の 2030 年時点での現行政策と NDCs 目標とのギャップ

（注）南アフリカ以外は条件付き NDCs の場合。G20 加盟国の平均の円の大きさは、2019 年の GHG 排出量を表すものではない。

（出典）UNEP[2)]

さらに、G20 加盟国を対象として、NDCs 下の排出量とパリ協定目標における排出量との比較評価を行っている。世界の排出削減を国レベルに分配する方法には、主に費用効果的原則（cost-effective）、公平なシェアの原則（fair-share）がある。図 4.4.2-4 は、それぞれの原則に基づき、G20 加盟国を考慮した 2℃および 1.5℃目標と整合する排出レンジ（対 2019 年の削減率）を示している。橙色のマークは、G20 国の NDCs を集約した 2030 年排出レベル（対 2019 年の削減率）を示す。G20 加盟国全体（アフリカ連合を除く）の現在の NDCs は、パリ協定の気温目標と一致する費用効果的なパ

スにも公平な負担のパスにも合致していない。また、いずれのアプローチにおいても、G20 加盟国全体で世界平均よりも早いペースでの削減が必要であることを示唆している。



Reduction ranges by country groups and approaches relative to 2019 levels

Country group	Approach	2°C range 2030	2°C range 2035	1.5°C range 2030	1.5°C range 2035
World average		-20% (-13 to -28%)	-30% (-22 to -37%)	-37% (-31 to -46%)	-50% (-45 to -58%)
G20	Fair-share	-8 to -56%	-21 to -70%	-35 to -69%	-49 to -81%
	Cost-effective	-23% (-14 to -32%)	-34% (-25 to -43%)	-38% (-32 to -46%)	-55% (-49 to -61%)

Note: All reductions are given relative to 2019 emissions, excluding LULUCF. Fair-share ranges shown give the minimum and maximum of the fair-share range, which therefore includes all the equity approaches assessed here. Cost-effective and global ranges show the median, and the twentieth to eightieth percentiles (in line with chapter 4).

図 4.4.2-4　パリ協定の気温目標に整合する G20 加盟国全体（アフリカ連合以外）の排出レンジ（対 2019 年削減率）（上：公平なシェアおよび費用効果的原則に基づく排出レンジ、下：世界平均との対 2019 年削減率の比較）

（出典）UNEP[2)]

図 4.4.2-5 は、2030 年における各セクターの GHG 排出削減ポテンシャル推計を示す。USD200/tCO$_2$eq 以下の緩和策により、2030 年には 31(25-35)GtCO$_2$eq の削減ポテンシャルがある。PV と風力で 2030 年の総排出削減ポテンシャルの 27%を占める。森林伐採

の削減、森林再生や管理等で 2030 年に総排出削減ポテンシャルの 19%を占める。他の緩和策としては、需要サイドにおける効率化の向上、電化、燃料転換等がある、としている。

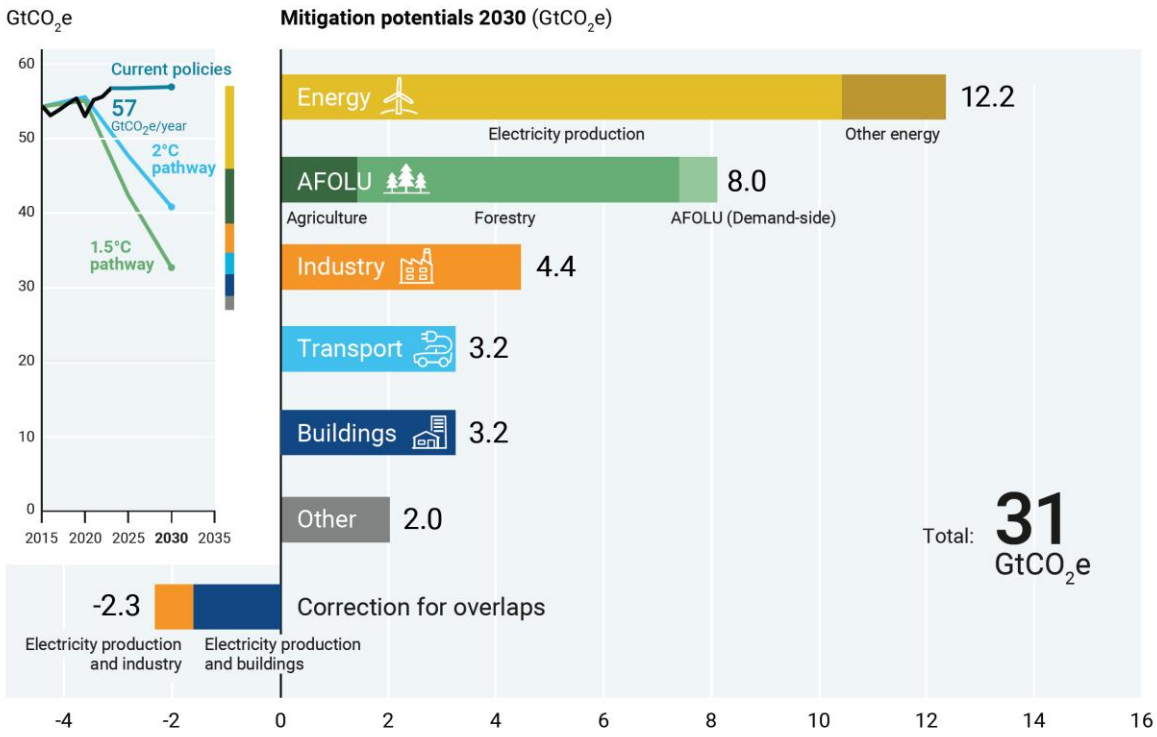


図 4.4.2-5　2030 年における各セクターの USD200/tCO$_2$eq 以下の緩和ポテンシャル
（出典）UNEP[2)]

4.4.3　まとめ

先行研究の結果より、条件付きの NDCs を完全達成した場合においても、IPCC が提示する 1.5℃シナリオからは依然として大きな乖離があり、さらに、NDCs 自体も現行政策では達成が難しい国も数多く存在することが指摘されている。今後、各国の対策の強化や削減に向けた国際協調の高まりが期待される中で、それらの排出削減努力の評価方法についてもさらに検討が必要であると思われる。

参考文献（第 4.4 節に関するもの）

1)　UNFCCC: Nationally determind contributions under the Paris Agreement – Synthesis report by the secretariat, 28 October 2024 (2024)

2)　UNEP: Emissions Gap Report 2024 (2024)

3)　UNEP: Emissions Gap Report 2024, Appendices (2024)

第5章　長期緩和シナリオ分析

5.1　日本の 2050 年カーボンニュートラルに向けた分析

次期 NDCs としての 2035 年の排出削減目標の提出を 2025 年 2 月までに行うことを、各国に対し招請されている。また、今年度は、3 年に一度改定されることとなっているエネルギー基本計画の見直しの年でもあった。そのため、日本政府は、エネルギー基本計画 [1]、地球温暖化対策計画の改定 [2]を行うとともに、グリーントランスフォーメーション（GX）産業競争力強化策に焦点を当てた GX2040 ビジョンの策定 [3]を行った。これらの議論にあたって、政府からの要請を受け、本事業の一環として、モデル分析、シナリオ分析を行い、分析結果の提示を行った。本節では、それらの分析結果等について記載する。

5.1.1　分析に用いた世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+の概要

他の章・節においても、分析に活用しているが、本節では、シナリオ分析で用いた、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+[4)~8)]の簡単な概要を記載しておく。DNE21+は以下のような特徴を有している。図 5.1.1-1 にエネルギーフロー、CO_2 フローの概要を示す。

- 評価対象期間における世界全体のエネルギーシステム総コストを最小化する（最適化型モデル（線形計画モデル）。エネルギー供給部門からエネルギー消費部門まで、エネルギー輸出入、時点間の設備推移までも含めてハードリンクしており、完全に整合的なシステムを算定する。）。
- 最適化代表時点は 2005, 2010, 2015, 2020, 2025, 2030, 2040, 2050, 2070, 2100 年の 10 時点
  （2005 年は 2003～2007 年、2010 年は 2008～2012 年、2015 年は 2013～2017 年、・・・をそれぞれ代表している。2005～15 年は実績値でキャリブレーションを行っている。）
- 世界全体を 54 地域に地域分割（米国、中国等は 1 国内を更に分割。計 77 地域分割）
- エネルギー供給技術（各種発電技術、石油精製、石炭ガス化技術など）、二酸化炭素分離・回収、貯留・隔離については、各技術のコストやエネルギー効率などを明示的にモデル化（ボトムアップ的）。
- エネルギー需要技術については、
  - エネルギー多消費産業のうち、鉄鋼、セメント、紙パ、アルミ、化学の一部（エチレン・プロピレン製造、BTX 製造、アンモニア製造）、運輸（自動車）、民生の一部については、各技術のコストやエネルギー効率などを明示的にモデル化（ボトムアップ的）。これらの部門の活動量（産業部門は生産量、自動車は輸送需要、民生の一部は機器の利用時間）は外生的に想定し、

モデル計算においては固定とする。一方、技術選択は、モデルで内生的に決定され、エネルギー消費量などが導出される。

- それ以外の部門については、地域によって技術特性が様々であったり、将来の技術が多様であると予想されるなど、個別技術の積み上げを行うことが必ずしも的確な評価につながらないと考えて、個別技術としては想定せず、最終エネルギー需要を産業、運輸、民生部門別にマクロ的に 4 種に区分（固体燃料需要、液体燃料需要（ガソリン需要、軽質油需要、重質油需要)、気体燃料需要、電力需要）してモデル化（トップダウン的）し、全部門にわたる評価を実施。
- 省エネルギー効果は、長期価格弾性値を用いて評価。

- 各設備については、設備のヴィンテージ（過去の何年にいくらの容量の設備が導入されたか）を考慮しているため、時点によって代替のための費用効率性が異なることが明示的に考慮され、それが費用効率的な技術選択に反映される。設備寿命を残して新たな設備の建設も、当然、高い費用と算出されるが、モデル上、考慮できる。
- 分割地域間のエネルギー：石炭、石油・各種石油製品（合成液体燃料含む)、天然ガス、合成メタン、エタノール、電力、水素、アンモニアおよび CO_2 の輸送をモデル化
- 各種一次エネルギーを考慮（石炭、石油（在来型、非在来型)、天然ガス（在来型、非在来型)、水力・地熱、原子力、風力、太陽光、太陽熱、バイオマス)。
- 電力需要については、電力負荷変動に合わせた供給となるように、年負荷持続曲線を基に、電力負荷の大きさによって 4 時間帯に区分し、それぞれ需給バランスがとれるようにモデル化。これによって、ベース電源、ピーク対応電源など、それぞれの発電技術の特性にあった評価を可能としている。
- 各種エネルギー変換過程（各種発電、石炭ガス化・液化、天然ガス改質、バイオマス液化など)、二酸化炭素分離・回収、利用、貯留・隔離（CCUS）などをモデル化
- 運輸部門については、道路交通、航空（国際・国内)、国際海運については、技術積み上げのモデル化を行っており、それ以外については燃料種別にマクロで(トップダウン的に）モデル化している。なお、モビリティ間の代替については、需要想定時に外生的には想定されるものの、モデルでの内生的な選択としては考慮していない。
- 道路交通部門については、乗用車（小型、大型、都市コミュータ用)、バス、トラック（小型、大型）に区分し、モデル化している。
- 道路交通需要は、旅客（乗用車、バス）は輸送サービス需要として p-km、貨物(トラック）は t-km を想定している。

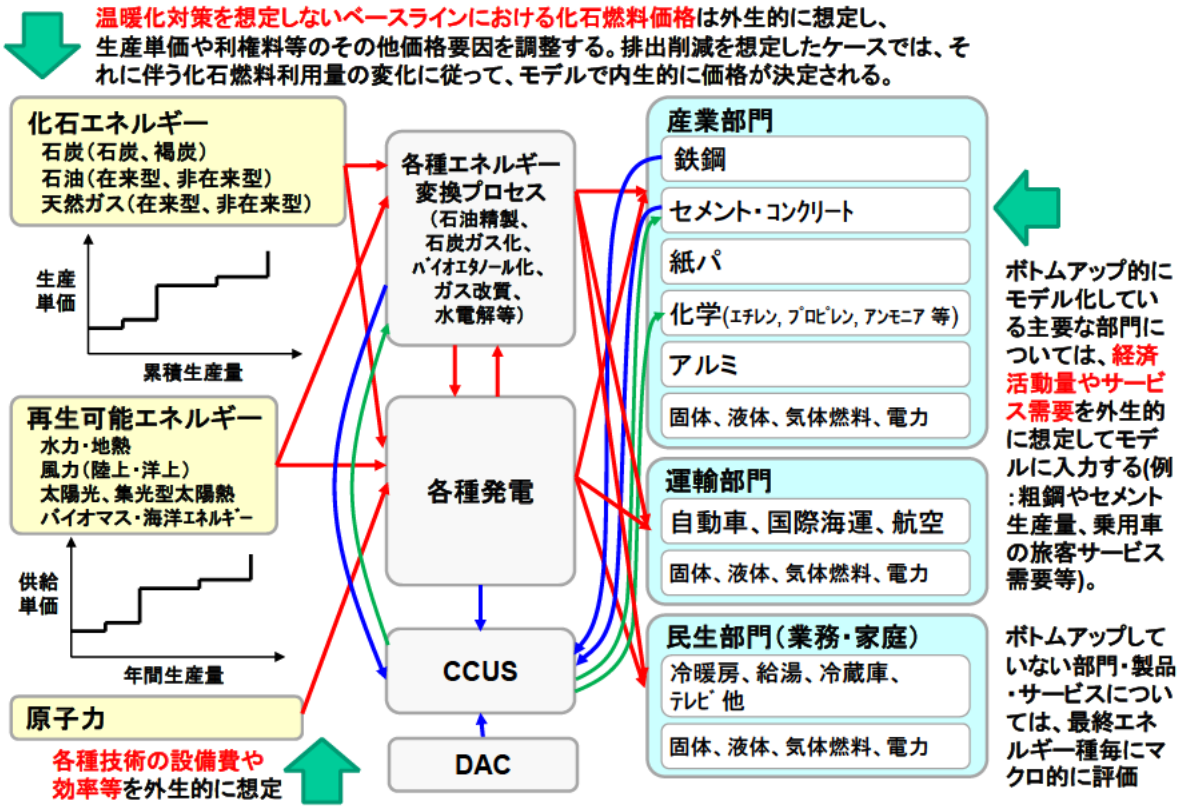


図 5.1.1-1 DNE21+におけるエネルギーフローの全体概要

- エネルギーシステム総コストは以下の費用の総和となる。
  - ➢ 各種積み上げ技術の費用
    ［設備費］／［投資回収年数］＋［運転・メインテナンス費］＋［年間燃料費］
    注)［運転・メインテナンス費］は設備費に対するある係数として、
    ［年経費率］≡ 1／［投資回収年数］＋［対設備費の運転・メインテナンス費の比率］
    とし［年経費率］を各技術において想定している。
  - ➢ トップダウン部分の費用（消費効用の損失）
    技術積み上げの対象外となっているその他諸々のエネルギー消費については、最終エネルギー価格と省エネルギー量の関係を長期価格弾性値で表現。積分値が消費効用の損失と定義でき、それをトップダウン部分の削減費用としている。
- 設備費が高くても、省エネ効果が高く、年間燃料費が、([設備費］／［投資回収年数］＋［運転・メインテナンス費]) の増分を上回って節約可能であれば、限界削減費用 0$/tCO$_2$ のケースでモデル上、技術選択がなされることになる。すなわち、純費用とならない対策は、排出削減を想定したケース以前にモデルの最適化計算によって選択される。

DNE21+モデルは世界モデルであるため、国内の電力系統や再エネの国内での地域偏在性を考慮した分析は難しい。そこで、基本政策分科会に提示したシナリオ分析においては、系統対策費用について、別途、東京大学藤井・小宮山研究室および日本エネルギー経済研究所による最適電源構成モデルによる、変動性再生可能エネルギーが大量に導入された場合の電力システム費用の上昇分（統合費用）の推計結果を活用した[9]。日本エネルギー経済研究所による最適電源構成モデルの概要は以下のとおりである。

- 全国のAMeDASデータ等をもとに変動性再生可能エネルギーの出力の時間変動をモデル化し、線形計画法によって電力部門の最適な設備構成（発電設備及び蓄電システム）及び年間の運用を推計
- 今回は日本全体を 5 地域（北海道、東北、東京、九州、その他）に区分し、1時間刻みのモデル化により計算を実施。発電コストや資源制約などの前提条件はDNE21+の想定に合せて設定

【モデル計算で考慮されているもの】
出力抑制、電力貯蔵システム（揚水発電、リチウムイオン電池、水素貯蔵）、発電設備の利用率低下、地域間連系線、貯蔵や送電に伴う電力ロス
【モデル計算で考慮されていないもの】
地内送電線、配電網、回転慣性の低下の影響、EV による系統電力貯蔵、再生可能エネルギー出力の予測誤差、曇天・無風の稀頻度リスクなど

モデルの主要な前提条件については､エネルギーミックス分析の 5.1.3 節において、シナリオ想定とあわせて記載する。

5.1.2 2040 年排出削減目標に関する分析

(1) 分析の背景
2035 年もしくは 40 年の温室効果ガス排出削減目標については、中央環境審議会と産業構造審議会の合同会合(中央環境審議会地球環境部会 2050 年ネットゼロ実現に向けた気候変動対策検討小委員会・産業構造審議会イノベーション・環境分科会地球環境小委員会中長期地球温暖化対策検討 WG 合同会合）で議論が行われた。議論に資する定量的な分析を提示するため､2040 年の排出削減水準について 3 種類のシナリオを設定し、DNE21+モデルを用いて分析を行い、審議会に提供した[10]。

(2) シナリオ分析
世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+（モデル概要は前節記載）を用いて分析を行った。なお、本分析では、経済影響までは評価せず、エネルギー関係のコストの評価に留め、よって、次節のエネルギー基本計画のエネルギーミックス分析と

は異なり、経済モデル等を用いた生産活動量推計へのフィードバック計算は行っていない。

① シナリオ分析の想定

技術の展望の違いによって、推計される排出削減費用は異なってくるため、排出削減水準の違いの他に、将来の技術進展を楽観的に、かつ、技術普及障壁を小さく想定した「成長実現シナリオ」と、技術進展を保守的に、かつ、技術普及障壁を大きく想定した「低成長シナリオ」想定の 2 シナリオについて分析を行った。2 シナリオの想定は表 5.1.2-1 に示すとおりである（具体的な想定値については、次節のエネルギー基本計画のエネルギーミックスの分析を参照されたい）。

分析にあたっての GHG 排出削減経路については、図 5.1.2-1 のような 3 種類の経路を想定した。なお、世界全体については、2030 年は各国提出済みの NDCs における排出削減目標の達成を前提として、その上で、2100 年 1.5℃シナリオに準拠する世界の GHG 排出経路を想定した。

3 種類の経路は、2040 年の排出削減量は、2050 年 CN に向けて、上に凸の経路となる▲60%、直線削減となる▲73%、下に凸の経路となる▲80%の 3 経路である。2030 年の NDC である▲46%減に向けて、日本の排出量はオントラックと見える。しかし、原子力発電の再稼働や、エネルギー多消費産業の生産量の低下で実現してきているところが大きく、2030 年▲46%減達成の見通しが高い訳ではないことに留意が必要である。つまり、現状削減ペースである、直線削減であっても、決して現状レベルの取り組みを行っていれば良いというものではない。また、一般的には、仮に技術進展が順調に起こってもそれが相当早いものでない限り、設備ストックがあるため、また割引率があるため、一般的には期間における経済合理的な排出削減は、上に凸の経路が導き出されやすい。

表 5.1.2-1 シナリオ想定：各種技術展望等

シナリオ	潜在的経済成長	原子力	再エネ		CCS／CDR	水素・ｱﾝﾓﾆｱ	合成燃料	ﾃﾞｰﾀｾﾝﾀｰ等 IT 需要	自動車	鉄鋼
	所得効果、人口・なりゆき産業構造変化等	【上限】低位/高位	【ﾎﾟﾃﾝｼｬﾙ】太陽光、陸上風力の社会共生制約 低位：強/高位：弱	【ｺｽﾄ】中位/ｺｽﾄ低減加速	【ﾎﾟﾃﾝｼｬﾙ上限】低位/高位	【ｺｽﾄ】中位/ｺｽﾄ低減加速	【ｺｽﾄ】中位/ｺｽﾄ低減加速	将来シナリオ（外生。ただし価格弾性効果考慮）	【EV】中位 ｺｽﾄ低減加速	水素 DRI 普及速度
成長実現シナリオ	GDP高位（内閣府「成長実現ケース」）	高位	高位	ｺｽﾄ低減加速・洋上収斂	高位	ｺｽﾄ低減加速	ｺｽﾄ低減加速	高位	ｺｽﾄ低減加速	高位
低成長シナリオ		低位	低位	中位	低位	中位	中位	中位	中位	中位

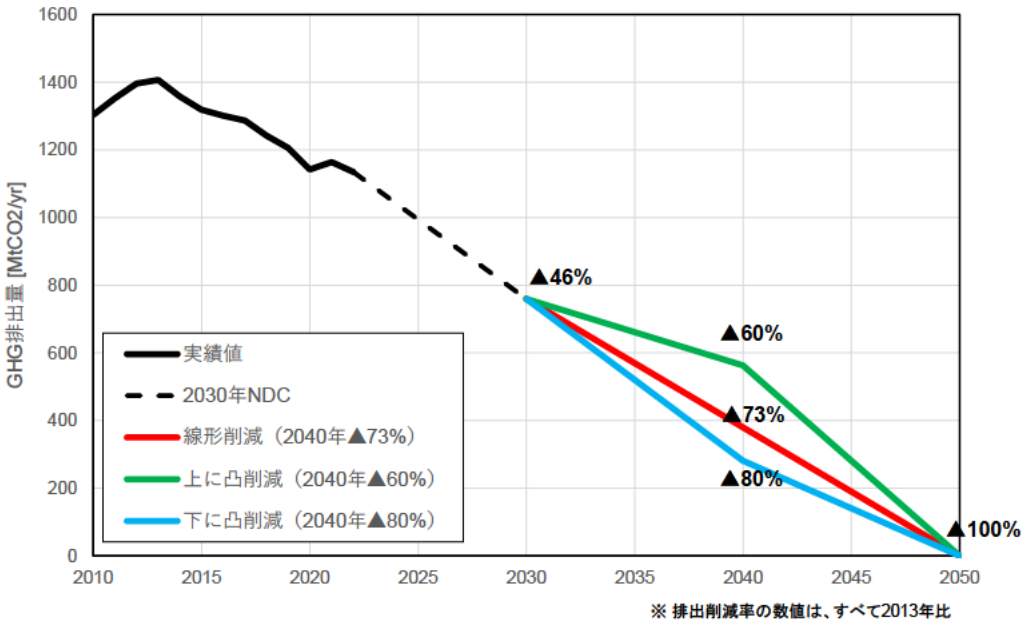


図 5.1.2-1 GHG 排出量削減経路の想定

表 5.1.2-2 に本想定シナリオの気温上昇の見通しについて整理した。表では、IPCC 第 6 次評価報告書[11]で整理されたシナリオの内、1.5℃対応のシナリオ（C1：オーバーシュート無もしくは小、C2：オーバーシュート有の 2 種類）との比較もしている。1.5℃排出経路を外生的に想定した上でのシナリオ分析のため、当然ながら、3 つの排出経路いずれであっても、1.5℃目標と整合的なものとなっている。その上で、2040 年における世界全体の GHG 排出量の 2019 年比削減率をみると、GHG 排出量では、C1 と C2 の間程度、エネルギー起源 CO_2 に限れば、C1 シナリオ相当である。また、CO_2 排出量の正味ゼロ排出実現時期も 2050～55 年であり、C1 シナリオ相当である。他方、正味 CO_2 ゼロ排出までの累積 CO_2 排出量は C2 相当、また、ピーク時の気温上昇は 1.7℃で、こちらも C2 相当と言える。これらの指標は、2030 年は既にプレッジされている各国の NDCs を前提としたことに強く影響されている。UNEP Emissions Gap Report[12]でも、現在提出されている 2030 年の NDCs を積み上げても、1.5℃はおろか、2℃目標とも大きな排出ギャップがあるとされており、それとも整合的である。もし、累積排出量を更に抑制し、ピーク気温上昇を C1 相当の 1.6℃未満を実現しようとするなら、2040 年の排出削減水準の議論に留まらず、2030 年の NDCs の深堀の可能性の議論が必須である。とりわけ、大排出国である、中国、米国、インドの 2030 年 NDCs の深堀論が不可避である。しかし、現状を鑑みると、その深堀は現実的ではない。よって、1.5℃目標を前提として、日本の 2040 年の排出削減目標の議論をするとした場合、ここで想定のシナリオは、合理性の有するシナリオ設定であると考えられる。

表 5.1.2-2 1.5℃シナリオとの整合性（世界全体）

	2040年GHG排出削減率（2019年比）	CO2排出量の正味ゼロ排出実現時期	正味CO2ゼロ排出までの累積CO2排出量(2020年以降)	気温上昇	
				ピーク	2100年
IPCC C1：1.5℃オーバーシュート無もしくは小	69 [58–90] %	2050–55年	510 [330-710] GtCO2	1.6℃	1.3℃
IPCC C2：1.5℃オーバーシュート有	55 [40–71] %	2055–60年	720 [530-930] GtCO2	1.7℃	1.4℃
本分析シナリオ	62 %（エネ起CO2：71–72%）	2050–55年	767 GtCO2	1.7℃	1.4℃

（出典）IPCC の数字は、IPCC WG3 第 6 次評価報告書 [11] Table SPM2 より

② シナリオ分析結果

表 5.1.2-3 には、2040 年時点における世界各国間での CO_2 限界削減費用の比較を示す。また、図 5.1.2-2 には、2040 年の排出削減水準別の日本の CO_2 限界削減費用を示すとともに、他モデル推計の 2050 年実質ゼロ排出（1.5℃シナリオ）時の世界の CO_2 限界削減費用（費用最小化、限界削減費用世界均等化時）推計との比較を示した。図 5.1.2-3 は、同じく CO_2 限界削減費用であるが、時系列で表示したものである。

まず、表 5.1.2-3 を見ると、▲60%のケースでは、世界の CO_2 限界削減費用が日本を含め、各国間でほぼ均等化している。この削減水準であっても、1.5℃目標を前提としていることから相当高い限界削減費用が推計される。すなわち、世界全体で 1.5℃の排出経路を実現しようとした場合、最も経済効率的な削減水準と言える。他方、▲73%、▲80%では、成長実現シナリオ、低成長シナリオともに、日本の限界削減費用は他国を上回る。つまり、他国よりも大きな削減努力が必要になると考えられる。▲73%、▲80%は、経済合理的ではないが、先進国としての役割の視点、衡平性の視点で評価されるべき目標と考えられる。他方で、日本の CO_2 限界削減費用が他国に比べ相対的に大きくなれば、エネルギー多消費産業の海外移転を誘発してしまい、世界全体での排出削減効果が損なわれてしまう。▲80%では限界削減費用の海外との格差が大きくなることが理解できる。とりわけ、低成長シナリオの場合、その傾向が強く見られる。

なお、繰り返すが、今回の分析では、世界全体で 1.5℃未満への取り組みがなされることを前提とした分析である。表 5.1.2-3 で見られるように、たとえ技術進展を楽観的に想定した、成長実現シナリオであっても、世界の CO_2 限界削減費用はかなり高い水準と推計される。これは、1.5℃目標実現の困難さを示唆するものでもある。また、足下では、1.5℃ばかりでなく、2℃目標とも大きな排出ギャップがあるとされている。1.5℃目標が実現しない可能性も高く、他国がこの表で示唆される費用まで対策を実施しない可能性は十分にあり得る。そうした場合、たとえ、▲60%であったとしても、他国と日本との限界削減費用の差異は大きく開くリスクも存在していることを認識する必要がある。

表 5.1.2-3 世界各国間での CO_2 限界削減費用（2040 年）の比較

	成長実現シナリオ			低成長シナリオ		
日本の2040年削減率	▲60%	▲73%	▲80%	▲60%	▲73%	▲80%
日本	294	364	504	410	602	850
米国	294	293	292	410	410	409
英国	294	293	292	428	428	428
EU	298	298	296	410	410	409
その他	294	293	292	410	410	409

単位：USD/tCO_2（2000年価格）

図 5.1.2-2 は、日本における 2040 年の排出削減水準別の CO_2 限界削減費用の傾向を示すとともに、それについて、国際的な CO_2 限界削減費用推計との関係性も確認したものである。削減水準が深堀されるにしたがって、下に凸で限界削減費用の上昇が見られる。そして、低成長シナリオの方がその傾向が強い。金融関係の投資判断等に用いられることが多い、NGFS のシナリオ[13]とも比較を行った。NGFS シナリオでは、3 モデルが用いられているが、その中で、1.5℃シナリオと整合的とされる Net Zero2050 シナリオの CO_2 限界削減費用の範囲を示す。Net-Zero 2050 シナリオは、基本的に各国間での限界削減費用均等化が前提となっているので、▲60%の分析との比較がしやすい。本分析では、まず、▲60%では NGFS の 3 モデル推計の中に入っている。よって、DNE21+による今回の技術想定の下での CO_2 限界削減費用推計は、ロバストな数値と考えられる。その上で、▲73%では低成長シナリオ時には、NGFS の 1.5℃シナリオの CO_2 限界削減費用（＝炭素価格）水準を上回る。▲80%になれば、高成長シナリオ時であっても、NGFS の推計水準を上回る。

図 5.1.2-3 は、時系列での確認である。2030 年▲46%は、政治的にトップダウンで決定された感が強くその是非はあると考えられるが、既に政治的に決定され、UNFCCC にも日本の NDC として提出がなされている。先述のように、▲46%に向かってオントラックとは言うものの、その内容は、原子力発電の再稼働とエネルギー多消費産業の生産活動量の低下による部分がかなり大きい。この後の 5 年間を展望すると、▲46%の実現は決して容易ではないと考えられ、極めて意欲的と言える目標である。そうは言うものの、提出済みの 2030 年の NDC と、それ以降の NDC と比較して、限界削減費用が低下するような目標の場合、排出削減への意欲が低下したのではないかとの批判もあり得る。そこで、図 5.1.2-3 は、時系列で日本の CO_2 限界削減費用を表示したものである。唯一、成長実現シナリオ下で 2040 年▲60%の場合には、2040 年の限界削減費用が 2030 年よりも若干低下する可能性が示唆された。ただし、わずかであり、モデル推計の誤差範囲内とも言える程度である。▲73%以上であれば、成長実現シナリオ下であっても、2030 年費用よりも上昇が推計された。

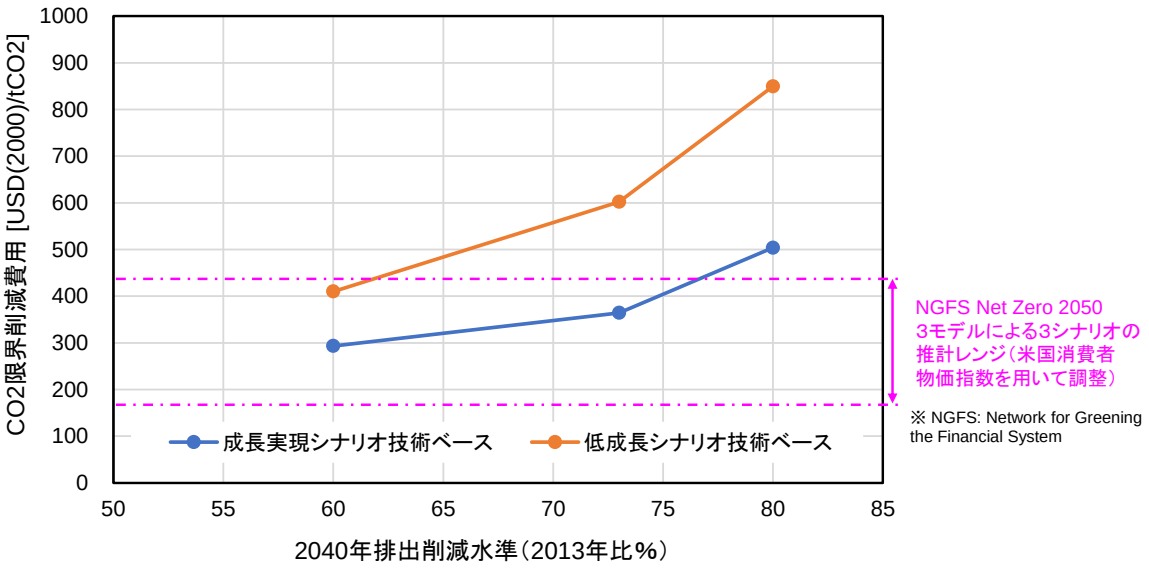


図 5.1.2-2 削減水準別 CO_2 限界削減費用（2040 年）の傾向と他モデル推計の限界削減費用との比較

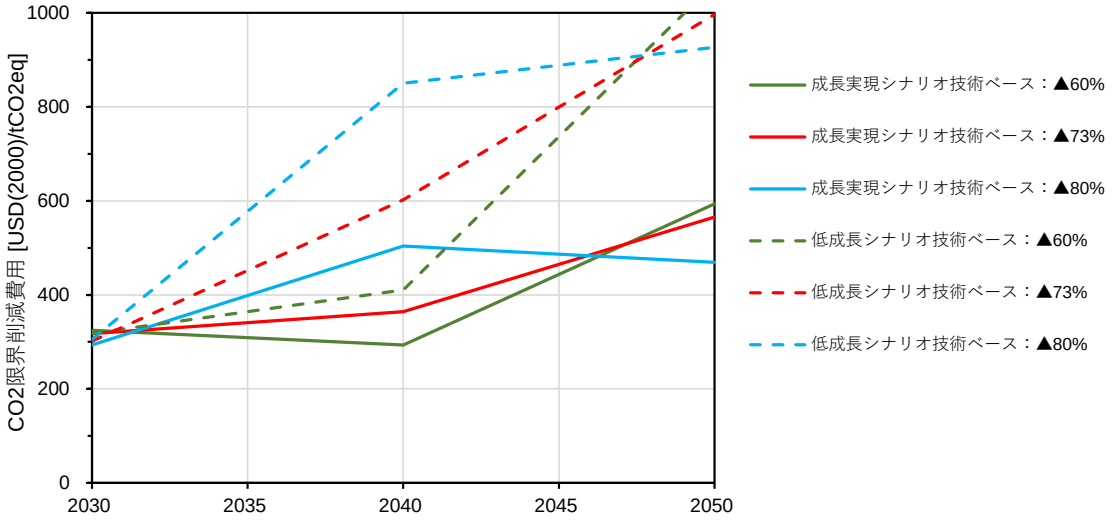
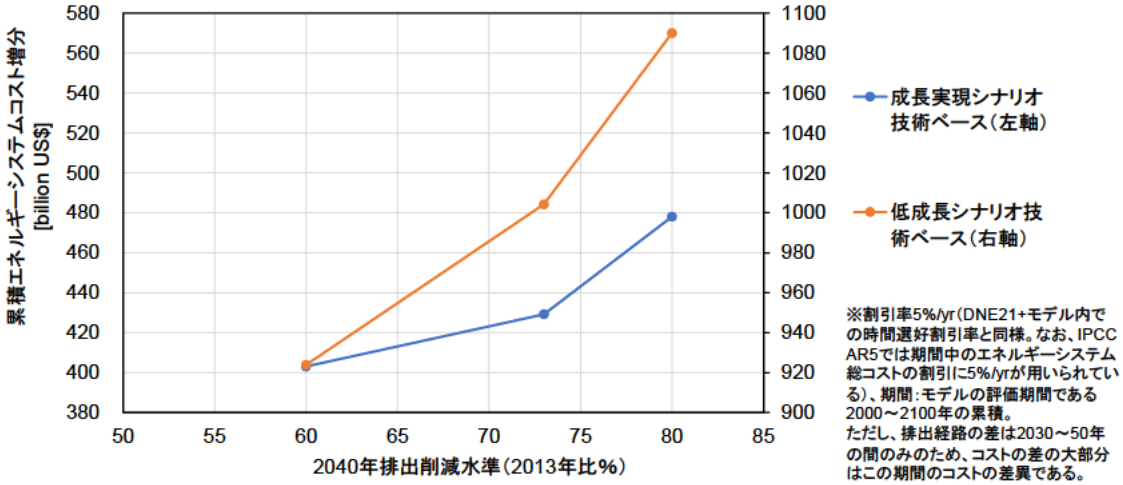


図 5.1.2-3 CO_2 限界削減費用：時系列

2050 年はいずれも CN（実質ゼロ排出）を想定しているが、図 5.1.2-3 で見られたように、DNE21+は動的に解法していることから、2040 年の排出削減目標が厳しい場合、2040 年の限界削減費用が上昇するかわりに、2050 年の限界削減費用は若干低下する場合もある。ただし、当然ながらトータルの費用は、排出削減水準が厳しくなるにしたがって（累積排出量が小さくなるにしたがって）上昇する。特段の温暖化対策をとらないとしたベースライン時のエネルギーシステム総コストからのコスト増分（排出削減費用）の推計結果を、図 5.1.2-4 に示す。グラフは時点累積の排出削減費用を、表には時点毎の排出削減費用を記載した。累積費用で見ても、下に凸の傾向、すなわち排出削減水準が深堀されるにしたがって逓増的な傾向が見られた。なお、成長実現シナリオと低成長シナリオとでは、費用が 2 倍程度異なっている。例えば、▲60%か

▲80%かによる費用の違いよりも、技術進展の想定の違いの方が大きく費用に影響する。技術進展の不確実性が大きく残っている中での排出削減目標のあり方を考えることも重要である。



	2040年▲60%		2040年▲73%		2040年▲80%	
	2040	2050	2040	2050	2040	2050
成長実現シナリオ	+49	+163	+70	+162	+115	+150
低成長シナリオ	+82	+382	+149	+370	+204	+369

単位:billion US$/yr
※ 特段の排出削減を考慮しない経済合理的なベースラインにおけるエネルギーシステム総コストからのコスト増分

図 5.1.2-4 日本のエネルギーシステムコスト増分（排出削減費用）

(3) 政府の意思決定

政府は、本分析結果を提示した中央環境審議会と産業構造審議会の合同会合での議論も踏まえながら、直線的な排出削減目標とする方針とし、2035 年▲60%、2040 年▲70%の目標を決定した。2024 年 12 月末に方針が決定され、パブリックコメント後、2025 年 2 月 18 日に、この目標を含んだ地球温暖化対策計画を閣議決定した [2)]。また、同日、UNFCCC 事務局に、日本の NDC の排出削減目標として同目標を提出した [14)]。

なお、合同会合での議論においては、上に凸、直線、下に凸、それぞれの排出経路を支持する意見が出され意見が割れた。上記の経済的な分析と、その分析の前提もしくは結果としての排出量に関する視点からのみ、これまでの記載と若干重複するが付記しておく。特に下に凸の主張では、IPCC 1.5℃オーバーシュート無もしくは小の経路（C1）の平均値としての 2035 年の排出削減率は、2019 年比 60%であり、これを 2013 年比に換算すると 66%となり、政府の方針提示の 2035 年▲60%はこれに届かないという主張があった。しかし、そもそも C1 シナリオには幅があり、2035 年の削減率に幅があること、また、C1 シナリオが提示しているのは世界全体の削減率であり、各国はそれぞれの事情があり、世界各国一律の削減率は非合理的な対策となることなどに留意が必要である（先述のように経済合理性からは、日本は 2040 年▲60%程度が合理的で、この点からは上に凸の方が合理的）。また、本分析では、ピーク気温が 1.7℃とな

っており、ここだけを見れば C2 シナリオ相当であることも議論となった。しかし、先述のように、これは 2040 年の排出量ではなく、2030 年の大排出国の NDCs によって必然的に算定されるものであり、今回の 2040 年近辺の日本の NDCs の議論とは無関係である。このような点について、分析結果を正しく理解することが重要と考えられる。

5.1.3 エネルギーミックスの分析

(1) 分析の背景

2024 年度は、3 年に一回の見直しが求められているエネルギー基本計画改定にあたった。今回の第 7 次エネルギー基本計画では、以下の情勢変化を踏まえた中での計画策定がなされた [1)]。

- ロシアによるウクライナ侵略や中東情勢の緊迫化などの経済安全保障上の要請が高まる
- DX や GX の進展に伴う電力需要増加が見込まれる
- 各国がカーボンニュートラルに向けた野心的な目標を維持しつつも、多様かつ現実的なアプローチを拡大
- エネルギー安定供給や脱炭素化に向けたエネルギー構造転換を、経済成長につなげるための産業政策が強化されている

エネルギー基本計画の議論に資するため、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会から、複数の研究機関に対して、以下のような定量的なシナリオ分析の要請が行われた [15)]。

① 想定する温室効果ガス削減水準については、中環審・産構審合同会合での議論を踏まえ、各専門機関の分析結果を比較可能なものとするため、2030 年度 46%削減から 2050 年ネットゼロへと現在の削減トレンドを直線的に削減が進んだケースを分析に含めること

② できる限り S＋3E が確保された水準とすること

③ 安定供給、経済成長、脱炭素を同時に実現するという我が国の GX の基本的理念に基づき、経済活動量を過度に損なわないこと

④ シナリオ分析の前提となる諸元の設定については、これまでの資源エネルギー庁を中心とする政府の審議会における議論と整合的な水準とすること

⑤ 各シナリオの分岐点については、脱炭素化に伴う社会全体のコストを最小化する観点から、再生可能エネルギー、水素等、CCS の技術・コストなどに着目したものとすること。その上で、複数機関のシナリオ分析結果を比較・検証可能なものとすること。なお、各分野の技術開発が期待されたほど進まず、コスト低減等が十分に進まない場合も想定されるため、既存技術を中心にその導入拡大が進んだ場合についても、可能であれば分析を依頼

⑥ その上で、シナリオ分析の対象や結果については、以下の内容についても満たされていることが望ましい

- 分析対象は温室効果ガス排出全体であること（エネルギー起源 CO_2 に対象を限定したシナリオ分析を排除するものではない）
- 国際的なエネルギー価格差を踏まえた分析を実施すること

弊機構においても分析の要請を受け、本事業において分析等を実施した[16),17)]。最終提示版は、文献 17)であり、以降は、文献 17)における分析を記載する。文献 16)では、森林吸収源については、RITE の土地利用評価モデル GLaW と DNE21+モデルを用いて内生的に解法したが、林野庁から日本の森林吸収源について測定方法の変更で従来よりも大きな森林吸収見通しが示されたため、これを外生的に反映させる形で、文献 17)へと更新を行った。なお、前節の排出削減水準の分析では、この森林吸収源の推計の修正は反映しておらず、文献 16)と整合的となっている。

(2) シナリオの想定と分析手法

① 想定シナリオ

エネルギー基本計画のエネルギー需給見通し（エネルギーミックス）向けの分析として表 5.1.3-2 の 5 シナリオの分析を行った。それとは別に、基本政策分科会には、参考として表 5.1.3-3 に示すような極端リスクシナリオも提示した。エネルギー基本計画は、その名のとおり、政府の計画であり、単なる将来展望ではなく、そうあって欲しい世界観が描かれるもとと考えられる。しかし、実際には、そうあって欲しい世界観が実現しない場合もある。表 5.1.3-3 はそのようなリスクが発動した場合、どのようなコスト等が発現し得るかを定量的に分析したものである。

先述のとおり、5.1.2 節で記載した、NDCs に関する議論も踏まえ、政府は、2030 年▲46%から 2050 年 CN に至る排出経路として、線形での削減、すなわち、2035 年▲60%、2040 年▲73%の排出削減目標とすると提示された。したがって、エネルギーミックスの分析としては、この排出削減水準を中心に分析を行った。その上で、「成長実現シナリオ」は、広範かつ大きく技術進展が実現するシナリオである。他方、一部のみ技術進展がうまくいくシナリオが、「再エネ」、「水素系燃料」、「CCS」の各シナリオである（表 5.1.3-2）。

表 5.1.3-2 記載の残る「排出上振れリスクシナリオ」の説明を行う前に、表 5.1.3-3 の極端リスクシナリオを説明する。

表 5.1.3-3 の極端リスクシナリオも、2040 年▲73%を前提に分析を行った。「低成長シナリオ」は、すべての技術が現状の延長線上のような進展に留まるシナリオである。後述の分析結果で理解できるように、この「低成長シナリオ」時の日本の経済影響は甚大であり、海外との相対的なエネルギー価格の上昇によって、エネルギー多消費産業が国際競争上、劣後し、生産量の大きな低下が見込まれ得る。政府の GX 政策は、環境と経済の好循環を目指すものであり、GHG 排出量が大幅に低減できても、経済が大きく棄損する世界は避けなければならない。しかも、このとき、国内の排出量は低減しても、エネルギー多消費産業は海外でその分、活動量が増加し、世界全体の排出量は低減しない可能性が高い。また、「原子力ゼロシナリオ」は、2040 年までに原子力をゼロにするシナリオで、現状では原子力推進へと政策の舵が切り始められている

が、大きな政策変更があった場合についての評価となる。後述のように、この場合でも、2040 年の経済影響は大きくなる。

しかし、極端リスクシナリオとは記載したが、「低成長シナリオ」でも、現状の延長線のような技術進展は見込んでおり、ドイツの足下での経済悪化状況からしても、十分に発現するリスクが高いシナリオでもある。そのため、革新的に技術進展がしなかった場合に、国内の GHG 排出量目標を厳格に実現せず、相対的なエネルギー価格差を広げ過ぎないように対応する、リスク対応戦略として「排出上振れリスクシナリオ」も提示した。このシナリオでは、1.5℃シナリオ相当の炭素価格水準を想定し、日本の排出量についてはモデルの経済計算に基づいて算定される。結果としては、「排出上振れリスクシナリオ」では、2040 年 73%減、2050 年 CN は実現せず、2040 年 61%減、2050 年 79%減となっている。

なお、文献 17)では IT 需要に関する感度解析も実施しているが、本報告では割愛する。

表 5.1.3-1 シナリオ想定：定性的記述

a) エネルギーミックスシナリオ

排出削減シナリオ	シナリオ名	シナリオ概要
2040年▲73%＋2050年CN（世界1.5℃未満）	成長実現シナリオ	排出削減対策が広範に順調に技術進展する。国際的な排出削減協調も順調で、日本の国際的な相対的エネルギー価格差が適度に収まる。日本の温暖化対策技術が海外にも広く普及。経済と環境の好循環を実現し得る。
	再エネシナリオ	再エネの社会共生制約小・コスト低減加速
	水素系燃料シナリオ	合成メタン（e-methane）・合成燃料（e-fuels）・アンモニアを含め、水素系エネルギーのコスト低減加速
	CCSシナリオ	CO2貯留の社会障壁小。経済合理的な範囲で広範に普及
炭素価格シナリオ：技術進展等の不確実性下でのリスク対応の経済と環境の好循環シナリオ（政策目標としては、2040年▲73%＋2050年CNだが、政策変数としては排出削減費用をターゲットとし、技術・社会情勢の不確実性により、結果としての排出量は変化）	排出上振れリスクシナリオ	技術進展は「成長実現シナリオ」相当が実現できず、再エネ、CCS・CDR、水素系ｴﾈﾙｷﾞｰ、原子力等の技術進展・普及が抑制的。そのため、海外との相対的なｴﾈﾙｷﾞｰ価格差が広がることから、経済と環境の好循環維持のため、炭素価格政策水準も抑制的となる社会像

b) 参考シナリオ

排出削減シナリオ	シナリオ名	シナリオ概要
2040年▲73%＋2050年CN（世界1.5℃未満）	原子力ゼロシナリオ	2040年までに原子力ゼロ
	低成長シナリオ	技術進展が漸進的。CN対策のため、他国との日本の国際的な相対的エネルギー価格差が拡大。産業の海外移転進展し、経済の大幅な停滞リスク発現

以上のシナリオについて、図 5.1.3-1 では分析した各シナリオをマッピングして表示した。当然ながら、将来のシナリオは無数に存在している。本分析では、政府の審議会の議論に資するようなシナリオを少数に絞って選択している。また、繰り返しではあるが、本分析は、政府のエネルギー基本計画の議論に資する分析を行ったのであ

って、それは将来の最もあり得そうなエネルギーの姿を示すというものではないことにも留意が必要である。政治的な意思としての排出削減水準（例えば 1.5℃未満）をベースとした分析であり、そういった制約条件の下でのコスト最小のエネルギーの姿を提示している。「低成長シナリオ」や「排出上振れリスクシナリオ」なども分析したが、ロシア・ウクライナ戦争や気候変動対応に消極的な米国トランプ政権の動向、また、これまで気候変動対策に極めて積極的だったドイツの経済不況・政治の不安定化をはじめ、国際的な情勢は混とんとしてきている。図 5.1.3-1 で示すように、ここで提示したシナリオ以外が発現する可能性は十分高く存在している。他方、シナリオは代表するシナリオを理解しながら、シナリオ間の比較を行い、その差を理解しつつ、分析シナリオの周辺まで含めて、理解を広げられるものでもあるので、そういった活用が求められる。

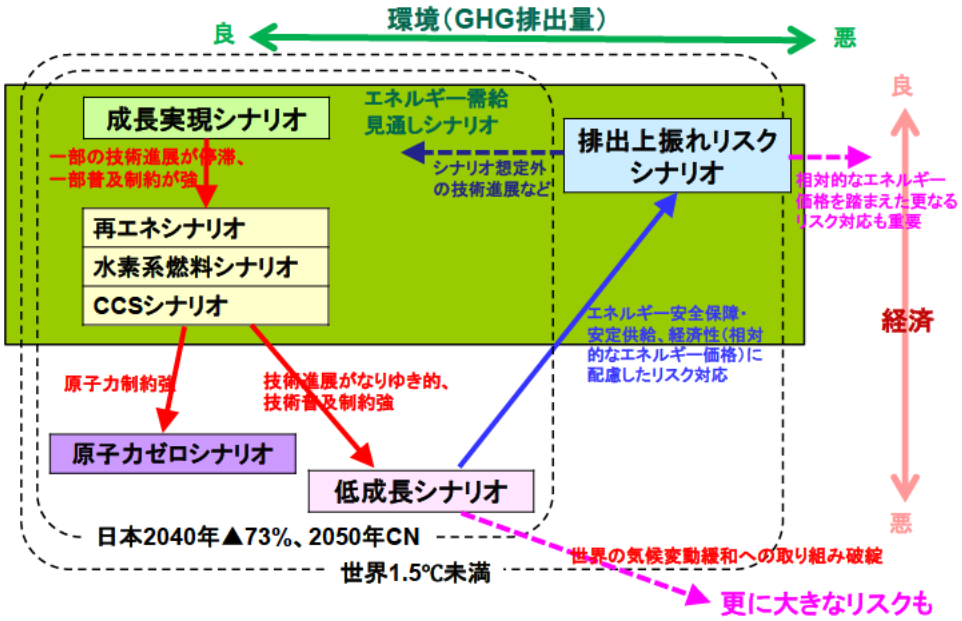


図 5.1.3-1 各シナリオの位置づけ

② 主要なシナリオ想定・モデル前提条件

各シナリオにおける個別の技術想定等については、表 5.1.3-2、表 5.1.3-3 のとおりとした。モデルの前提条件やシナリオ想定の詳細については、文献 17),21)を参照されたい。ここでは、再エネのコスト・ポテンシャル想定（図 5.1.3-2）、IT 需要想定（図 5.1.3-3）、乗用車（小型）の車両コスト想定（表 5.1.3-4）のみ掲載する。

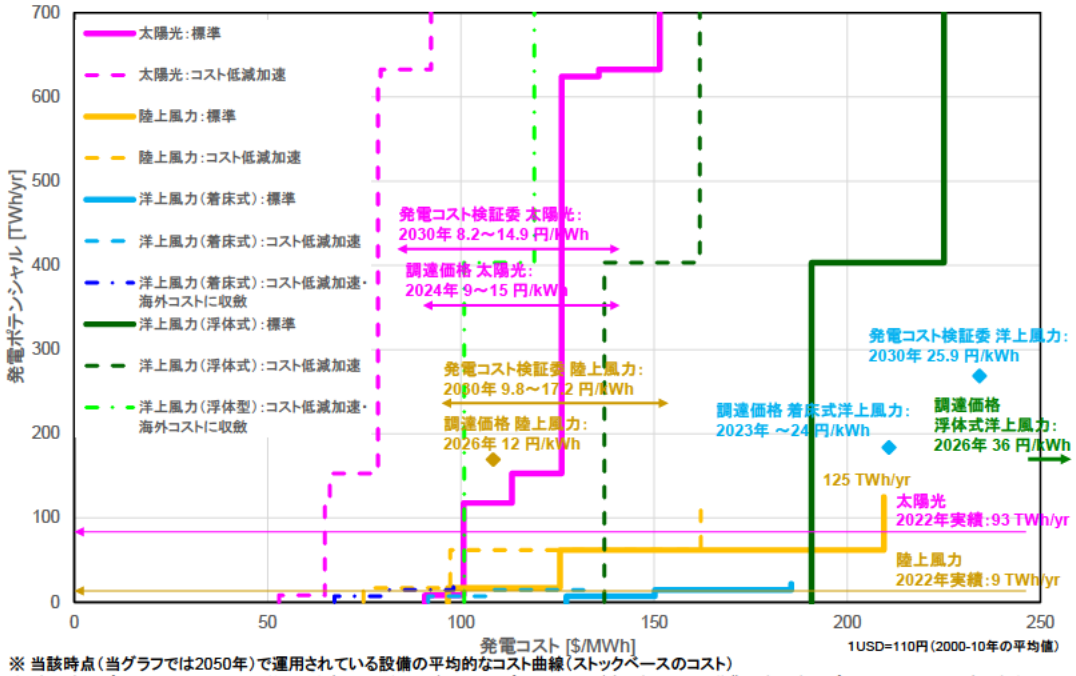
なお、「低成長シナリオ」以外では、エネルギー多消費産業の生産量の低減については、原則、世界エネルギー経済モデル DEARS[18),19)]を使って推計し、DNE21+モデルにフィードバックを行って計算した。他方、「低成長シナリオ」では、長期価格弾性値を▲1.0 と高い弾性値を想定して分析した。これらの点については、次項の分析手法の部分で解説する。

表 5.1.3-2 シナリオ想定：各種技術展望等（エネルギーミックスシナリオ）

シナリオ	潜在的経済成長	GHG排出削減制約	原子力	再エネ		CCS／CDR	水素・アンモニア	合成燃料	データセンター等 IT需要	自動車	鉄鋼	鉄鋼・化学・自動車等の生産量の展望：炭素価格による生産量低下
	所得効果、人口・なりゆき産業構造変化等	GHG排出削減によって誘発される炭素価格	【上限(2050年)】 低位：現状60年運転延長炉 中位：10%（2040年20%程度） 高位：20%	【ポテンシャル】 低位：太陽光(上限：現状比2倍)、陸上風力制約強(上限：3倍) 高位；太陽光、陸上風力制約弱(上限：現状比4倍)	【コスト】 中位/コスト低減加速	【年間貯留ポテンシャル(2050年)上限】 低位：1.2億トン 高位：2.4億トン	【コスト】 中位/コスト低減加速	【コスト】 中位/コスト低減加速	将来シナリオ（外生）	【EV】 中位/コスト低減加速	水素DRI普及速度	
成長実現シナリオ	GDP高位（内閣府「成長実現ケース」）	世界全体で1.5℃目標、日本2030年▲46%+2040年▲73%+2050年CN	高位	高位 (最適化計算結果として中位)	コスト低減加速・洋上収斂	高位	コスト低減加速	コスト低減加速	高位	コスト低減加速	高位	小 (中弾性(DEARS))： 成長実現シナリオの結果をすべてに適用
再エネシナリオ			中位	高位 (最適化計算結果として高位)	コスト低減加速・洋上収斂	低位	中位	中位	高位	コスト低減加速	高位	
水素系燃料シナリオ			中位	高位	中位	低位	コスト低減加速	コスト低減加速	高位	中位	高位	
CCSシナリオ			中位	高位	中位	高位	中位	中位	高位	中位	高位	
排出上振れリスクシナリオ		炭素価格：NGFS NZ2050相当	中位	高位	中位	低位	中位	中位	高位	中位	中位	

表 5.1.3-3 シナリオ想定：各種技術展望等（参考シナリオ）

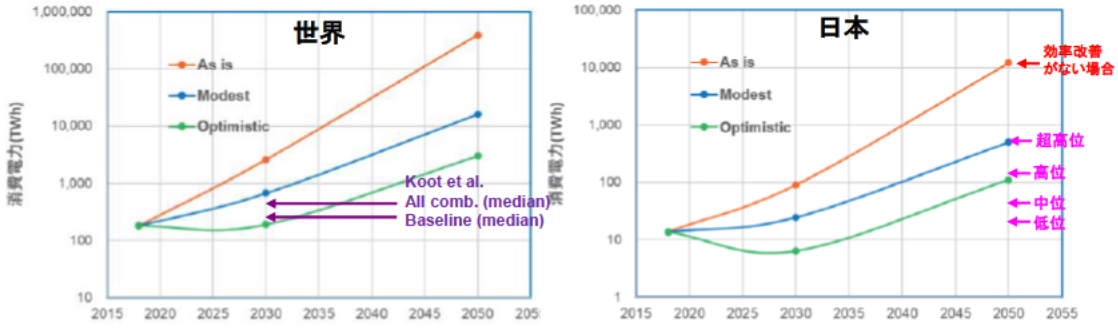
シナリオ	潜在的経済成長	GHG排出削減制約	原子力	再エネ		CCS／CDR	水素・アンモニア	合成燃料	データセンター等 IT需要	自動車	鉄鋼	鉄鋼・化学・自動車等の生産量の展望：炭素価格による生産量低下
	所得効果、人口・なりゆき産業構造変化等	GHG排出削減によって誘発される炭素価格	【上限(2050年)】 低位：現状60年運転延長炉 中位：10%（2040年20%程度） 高位：20%	【ポテンシャル】 低位：太陽光(上限：現状比2倍)、陸上風力制約強(上限：3倍) 高位；太陽光、陸上風力制約弱(上限：現状比4倍)	【コスト】 中位/コスト低減加速	【年間貯留ポテンシャル(2050年)上限】 低位：1.2億トン 高位：2.4億トン	【コスト】 中位/コスト低減加速	【コスト】 中位/コスト低減加速	将来シナリオ（外生）	【EV】 中位 コスト低減加速	水素DRI普及速度	
成長実現シナリオ（再掲）	GDP高位（内閣府「成長実現ケース」）	世界全体で1.5℃目標、日本2030年▲46%+2040年▲73%+2050年CN	高位	高位 (最適化計算結果として中位)	コスト低減加速・洋上収斂	高位	コスト低減加速	コスト低減加速	高位	コスト低減加速	高位	小 (中弾性(DEARS))： 成長実現シナリオの結果をすべてに適用
原子力ゼロシナリオ			2040年ゼロ	低位	中位	低位	中位	中位	高位	中位	高位	
低成長シナリオ			低位	低位	中位	低位	中位	中位	中位	中位	中位	大 (高弾性＋RAS法)



※ 当該時点（当グラフでは2050年）で運用されている設備の平均的なコスト曲線（ストックベースのコスト）
注）太陽光のポテンシャルには、原則的に、強度の足りない屋根設置のポテンシャルが含まれている。営農型太陽光のポテンシャルは原則含まれない。ただし、GISの土地利用評価の精度によるため厳格な区分ではない。

図 5.1.3-2 日本の変動性再エネコスト・ポテンシャルの想定（2050 年）

データセンター電力需要



情報通信ネットワーク（ルーター・無線基地局）電力需要

JSTではネットワークについてもデータセンターとほぼ同程度の需要を推計

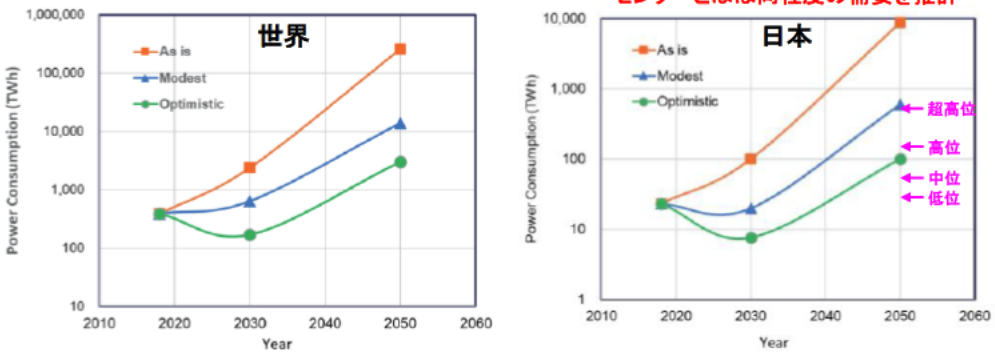


図 5.1.3-3 データセンター・ネットワークの電力消費想定

表 5.1.3-4 自動車車両コストの想定：小型乗用車

【標準の技術想定シナリオ】
（EVﾊﾞｯﾃﾘｰｺｽﾄ：2050年：1万円/kWh相当）

	2015	2020	2030	2050
在来型内燃自動車	170	170	180	185
ハイブリッド車（ガソリン）	210	209	202	201
プラグインハイブリッド車（ガソリン）	270	248	219	210
純電気自動車（BEV）	311	305	265	225
燃料電池自動車（FCEV）	598	514	388	244

単位）万円/台

【EVコスト低減加速シナリオ】
（EVﾊﾞｯﾃﾘｰｺｽﾄ：2030年：6千円/kWh、2050年：5千円/kWh相当）

	2015	2020	2030	2050
在来型内燃自動車	170	170	180	185
ハイブリッド車（ガソリン）	210	208	201	201
プラグインハイブリッド車（ガソリン）	270	244	210	205
純電気自動車（BEV）	311	285	210	205
燃料電池自動車（FCEV）	598	412	244	205

単位）万円/台

③ 分析の手法・手順

a. 推計方法・手順の概要

本稿では、シナリオの分析手法、手順について説明する。シナリオ分析においては、図 5.1.3-4 のような分析手順を採用した。「成長実現シナリオ」ほか、エネルギーミックスシナリオ 5 シナリオ等では図中左側の推計手順を、「低成長シナリオ」では図中右側の推計手順を採用した。いずれも、まず、潜在的な実質 GDP 成長率は 1.7%/年相当とした上で、各種生産量等を想定し、DNE21+モデルで計算した。

エネルギーミックスシナリオ 5 シナリオでは、DNE21+モデルから得られた CO_2 限界削減費用（＝炭素価格）を DEARS モデルの入力として計算し、エネルギー多消費産業の各種生産量と自動車の低減影響を推計した。それを用いて DNE21+の前提条件を修正し、再度、DNE21+モデルで計算を行った。また、日本の脱炭素・低炭素に資する技術、製品による海外市場の獲得効果も推計した。

他方、「低成長シナリオ」は、最近の欧州等で見られる高い価格弾性値を採用し、DNE21+モデルから得られたエネルギー価格から経済影響を推計した。産業別の影響については KEO-RAS 法で推計を行った。

それぞれの計算については、以下に解説する。

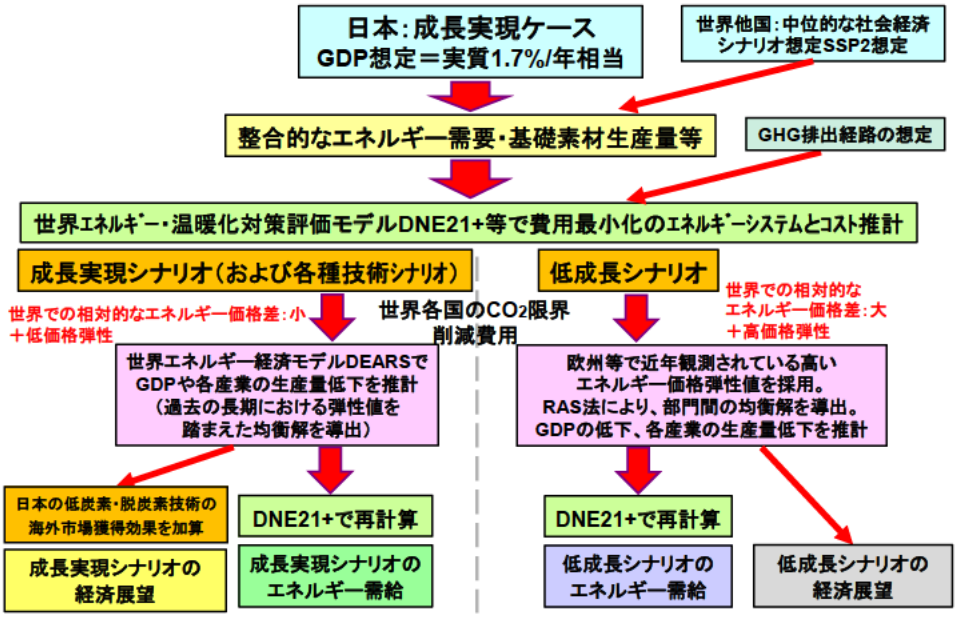


図 5.1.3-4 エネルギー需給・経済影響分析の手法

b. 需要低減量の推計（価格弾性）

DNE21+では、原則的には、エネルギー価格上昇による需要低減効果は内生的に計算される。しかしながら、エネルギー多消費産業の生産量（粗鋼生産量、エチレン生産量等）については、国別に外生的に想定を行っており、相対的なエネルギー価格変化に伴う、国際的な産業の移転については考慮できない。相対的な価格差が小さい場合は、この扱いで大きな問題はないが、国間で相対的なエネルギー価格差が大きく生じる場合では、別途考慮が必要になる。エネルギー基本計画の議論では、国間で相対的なエネルギー価格差が議論の焦点となり、そのため、今回、このような手法を採用した。

- 「成長実現シナリオ」等では国際産業連関表 GTAP9（基準年 2011 年）をベースとした一般均衡モデル DEARS モデルを利用して、生産量の低下を推計。なお、DEARS のエネルギーの長期価格弾性値は▲0.4～▲0.6 程度となっている。
- 「低成長シナリオ」では、最近の先進国でエネルギー多消費産業で見られる産業の海外移転を踏まえた、価格弾性値（文献 [20]など）を反映した分析を実施。所得弾性値 1.0、価格弾性▲1.0 と想定した上で、産業部門間の均衡は KEO-RAS 法を用いて推計

とした。

c. 「成長実現シナリオ」における海外市場獲得効果の推計

なお、「成長実現シナリオ」は、世界に先行して低炭素・脱炭素技術の開発、実証、商用化が進展し、各種技術のコスト低減等が加速する世界観である。他方、DEARS モデルは国際産業連関表をベースにモデルが構成されているが、分割された部門内において、日本の環境に優れた技術の比率が高いことが考慮できず、世界への低炭素・

脱炭素技術の展開に伴う経済効果は含まれない。そこで、この効果を考慮するため「海外での排出削減対策の設備投資額増に伴う日本製品の輸出増分」を別途推計した。

【推計手順】

（1） DNE21+モデルから「成長実現シナリオ」で推計された、世界における低炭素・脱炭素技術の設備費を整理

（2） 日本の各種機器の輸出シェアを実績値を基に想定し、（1）を用いて、日本の設備・機器の海外での投資増を推計（なお、海外での工事費相当額として 26%を想定し、日本の投資増分から除外）

（3） （2）を、輸送機械産業[運輸関連技術の寄与]、電気機械産業[家電機器技術の寄与]、汎用機械産業[発電他、その他の技術の寄与]の 3 分類に整理

（4） （3）を基に、産業連関表の波及効果分析（当該設備投資増加による 2 次効果まで考慮、2015 年表[大分類]を利用）を用いて、GDP への波及効果（誘発 GDP）を推計

d. 「排出上振れリスクシナリオ」における炭素価格想定

「排出上振れシナリオ」では、排出量ではなく、炭素価格を固定した上で、各種技術進展が「成長実現シナリオ」ほど進まない場合について、リスクシナリオの分析を行った。このシナリオでは、主要先進国の（明示的もしくは暗示的）炭素価格が高まらず、また「成長実現シナリオ」の想定ほど技術が進展しないことによって、産業リーケージの懸念が大きくなり、「成長実現シナリオ」相当の炭素価格相当までは高めることが困難になるリスクを想定した。具体的には、1.5℃未満シナリオで世界限界削減費用均等化時の炭素価格の国際的な幅広いモデル分析の平均的な炭素価格を採用した。

図 5.1.3-5 で示すように、NGFS[13]の Net Zero 2050 シナリオの CO_2 限界削減費用（炭素価）格推計の平均値を採用した。これは、IPCC における CO_2 限界削減費用推計 [11]と比較しても整合的なものである。

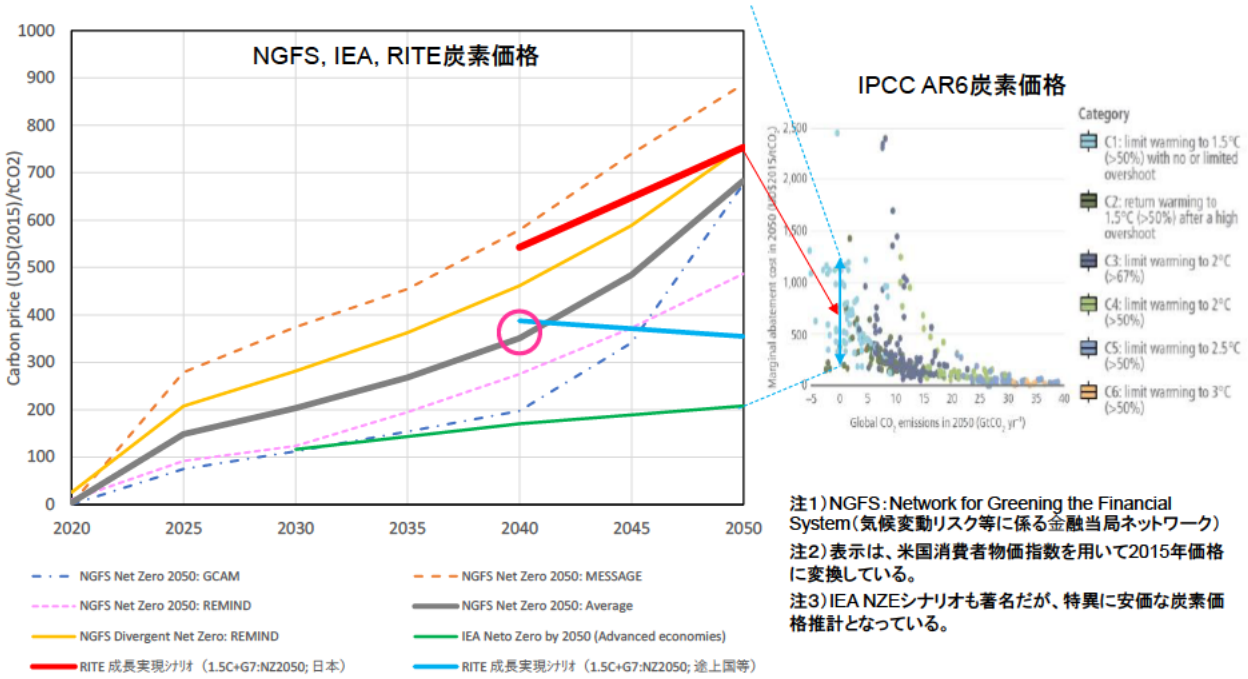


図 5.1.3-5 排出上振れシナリオで想定した炭素価格（1.5℃／2050 年 CN）

(3) エネルギーミックスシナリオ

本項では、エネルギーミックスシナリオ 5 シナリオの分析結果を掲載する。

CO_2 限界削減費用を表 5.1.3-5 に、エネルギーシステムコスト増分、電力限界費用、電力平均費用を表 5.1.3-6 に示す。また、電力限界費用について、他国との比較を行ったものを表 5.1.3-7 に示す。

CO_2 限界削減費用を見ると、「成長実現シナリオ」であっても、2040 年▲73%、2050 年 CN を実現するにはかなり高い費用が必要になると分析される。実現のためには、本分析で想定できなかったような更なるイノベーションも必要とも考えられる。「排出上振れリスクシナリオ」では、先に記載のように、1.5℃シナリオ相当の炭素価格推計を世界全体に想定したため、CO_2 限界削減費用（炭素価格）は世界一律となっており、「成長実現シナリオ」よりも若干低めの価格となっている。「排出上振れシナリオ」では、技術進展が現状のペースに留まると想定したが、排出制約ではなく、一定の炭素価格での想定をしたため、エネルギーコスト、電力コストは、「成長実現シナリオ」レベルに留まる結果となっている。電力価格の他国との比較でみると、いずれのシナリオでも排出削減への対応のため、現状よりは価格上昇は避けられないが、海外との相対的な価格差はあまり広がらない結果となっている。

表 5.1.3-5 CO_2限界削減費用（経済フィードバック計算前）

	成長実現シナリオ		再エネシナリオ		水素系燃料シナリオ		CCSシナリオ		排出上振れシナリオ	
	2040	2050	2040	2050	2040	2050	2040	2050	2040	2050
日本	301	578	369	716	467	742	396	892	257	500
米国	294	262	350	348	409	454	362	350	257	500
英国	294	317	350	387	419	558	369	452	257	500
EU	298	413	350	516	409	648	362	541	257	500
その他	294	262	350	348	409	454	362	350	257	500

単位：USD/tCO_2（2000年価格）
注）一部の国抜粋表示

表 5.1.3-6 日本のエネルギーシステムコスト増分、電力費用（経済フィードバック計算前）

	成長実現シナリオ		再エネシナリオ		水素系燃料シナリオ		CCSシナリオ		排出上振れシナリオ	
	2040	2050	2040	2050	2040	2050	2040	2050	2040	2050
エネルギーシステムコスト増分 [billion US$/yr][*1]	**[+48]**	**[+129]**	**[+61]**	**[+193]**	**[+105]**	**[+256]**	**[+85]**	**[+226]**	**[+97]**	**[+166]**
電力限界費用 [US$/MWh][*2]	212	197	224	258	251	287	242	279	213	244
電力平均費用 [US$/MWh] [*3]	139	134	141	168	155	186	146	147	130	147

*1 [](青字)はベースラインからのコスト増分。
*2 発電端での限界費用。ただし、系統統合費用は含む。2020年のモデル推計の電力限界費用は166 US$/MWh
*3 発電端での平均費用。ただし、系統統合費用は含む。2020年のモデル推計の電力平均費用は95 US$/MWh

表 5.1.3-7 電力限界費用：各国間比較（経済フィードバック計算前）

	2020	ベースライン		成長実現シナリオ		再エネシナリオ		水素系燃料シナリオ		CCSシナリオ		排出上振れシナリオ	
		2040	2050	2040	2050	2040	2050	2040	2050	2040	2050	2040	2050
日本	166	127	105	212	197	224	258	251	287	242	279	213	244
米国	40	38	53	98	102	118	103	125	136	116	113	127	127
英国	114	135	119	180	160	195	165	223	217	203	210	201	218
ドイツ	114	119	108	175	155	191	162	202	216	198	202	194	207
フランス	114	133	116	171	144	165	147	172	185	173	171	174	159
韓国	103	103	99	174	142	173	151	194	167	195	168	184	177
中国	61	66	81	143	110	152	121	213	171	192	172	173	171
インド	105	121	134	187	167	190	183	236	223	239	207	223	207

単位：USD/MWh（2000年価格）
注）一部の国抜粋表示。発電端での限界費用。ただし、系統統合費用は含む。2020年値はすべてモデルでの推計値
※ 本分析では、世界各国の原子力を含め個別電源の政策は考慮していないことに留意されたい。

「成長実現シナリオ」、「排出上振れリスクシナリオ」について、世界エネルギー経済モデル DEARS で推計した生産量、GDP の低下の推計を表 5.1.3-8 に示す。また、海外市場獲得効果も含めた場合の経済成長率見通しも記載している。「成長実現シナリオ」では、急速な技術進展を見込んでいるが、それでも、2040 年▲73%、2050 年 CN という厳しい排出削減目標の想定のため、GDP では 2040 年▲4.1%、2050 年▲5.6%が見込まれた。鉄鋼では 2040 年▲3.9%、2050 年▲11%である（たとえば、2050 年では潜在的な粗鋼生産量は 9000 万トン／年と見込んだが、▲11%によって 8000 万トン／年に）。ただし、世界が 1.5℃目標に向けて取り組む場合には、海外市場の獲得効果も期待され、推計には大きな不確実性が存在するものの、5%/yr ポイント程度の上昇が見込まれた。そのため、潜在的な経済成長の見通し程度（2040 年では若干の増）を実現し得るシナリオとなっている（2023～40 年の経済成長率は人口低減効果を織り込んで 1.5%/年の推計）。

「排出上振れリスクシナリオ」では、技術進展が「成長実現シナリオ」のように急速に進まない想定であり、排出量が上振れするものの、経済影響としては、「成長実現シナリオ」と大差のないものと推計された。経済活動の大きな落ち込み、また、炭素制約による産業の海外移転を避けるべきであり、そのようなリスクに対応し得るシナリオとなっている。

表 5.1.3-8 生産量・GDP の低下：成長実現・排出上振れシナリオ

ベースラインからの低減率	成長実現シナリオ		排出上振れシナリオ	
	2040	2050	2040	2050
鉄鋼	−3.9%	−11.0%	−3.6%	−11.0%
（生産量 [億トン/年]）	(0.86)	(0.80)	—	—
化学	−3.7%	−11.2%	−3.3%	−10.7%
窯業土石(セメント含)	−2.1%	−2.7%	−1.7%	−3.8%
非鉄金属	−1.4%	−2.7%	−1.2%	−5.0%
紙パ	−3.5%	−6.3%	−3.1%	−7.2%
輸送機械	−4.1%	−6.9%	−4.7%	−8.2%
GDP（CO_2削減技術の海外市場獲得効果含まず）	−4.1%	−5.6%	−3.6%	−5.9%
GDP, GNI（海外市場獲得効果含む）	内閣府「成長実現ケース」の一人当たりGDP成長率を若干上回る水準（海外市場獲得効果：+4%～5%程度）		内閣府「成長実現ケース」の一人当たりGDP成長率とほぼ同等の水準（海外市場獲得効果：+3～4%程度）	
経済成長率：2023年からの年成長率 ※ 人口低減見通しが含まれる	+1.5%/年	+1.2%/年	+1.4%/年	+1.2%/年

注）気候変動による負の影響の緩和による便益は含んでいない。成長実現シナリオでは上記に追加的にGX⇒DXの正の経済効果もあり得る。

図 5.1.3-6 に日本の部門別 GHG 排出量を示す。先に記載済みであるが、「排出上振れリスクシナリオ」では、2040 年▲61%、2050 年▲79%と推計された。「排出上振れリスクシナリオ」を除いて、2040 年以降、DACCS の利用も見られる。なお、林野庁による森林吸収源が大きくカウントできるとの想定に伴い、負排出が大きくなったことにより、水素系燃料や DACCS は少し抑制的な結果となっている。

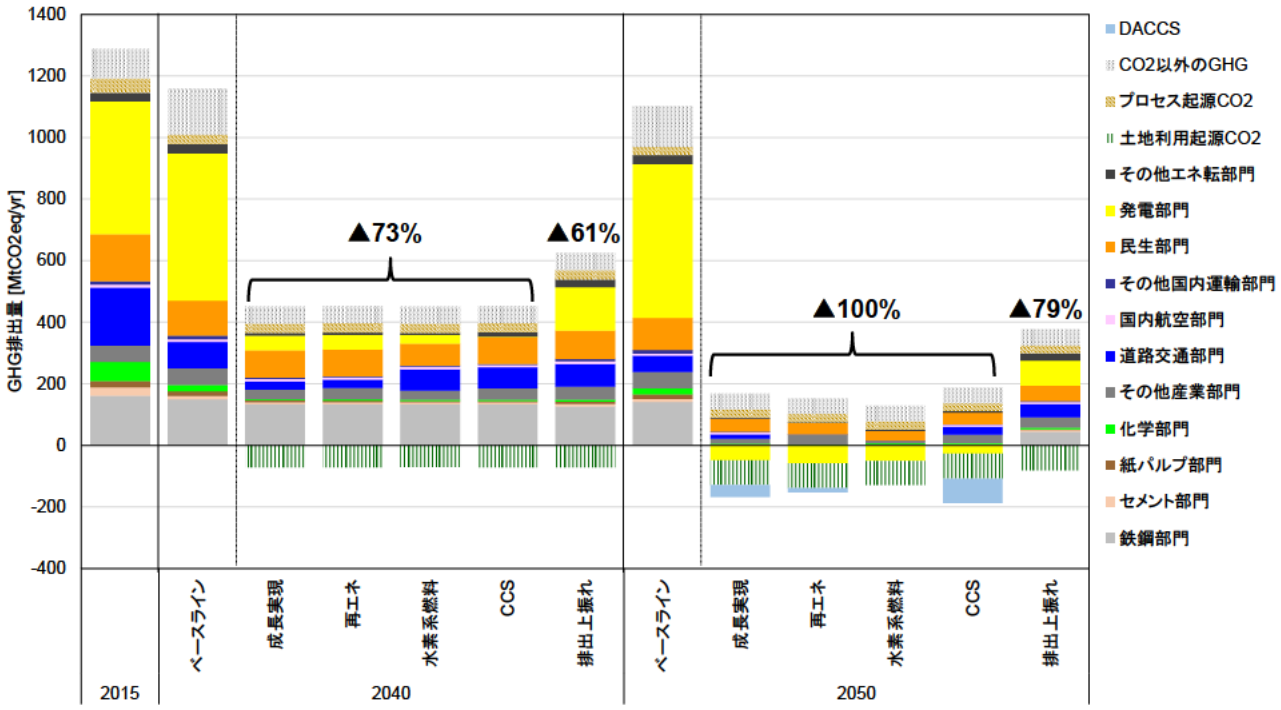


図 5.1.3-6 部門別 GHG 排出量

図 5.1.3-7、図 5.1.3-8 にそれぞれ、日本の一次エネルギー供給量、発電電力量を示す。

一次エネルギー供給量は、2040、2050 年にかけて、いずれのシナリオでも大きな低減が見られる。再エネの拡大、CCS の利用が経済合理的であり、また、アンモニア、e-methane、e-fuels の輸入も経済的な対策と評価される。他方、「排出上振れシナリオ」では、水素系エネルギーの輸入は小さくなり、LNG はほぼ現状水準が経済合理的となっている。

他方、発電電力量はいずれのシナリオでも増大が見られる。2040 年▲73%では、非 CO_2 GHG やその他 hard-to-abate の産業部門などが存在するため、発電部門ではほぼゼロ排出が経済的となっている。また、再エネ、原子力、CCS の組み合わせが経済合理的である。「排出上振れシナリオ」では、2050 年までは、LNG 発電（コジェネ、CCS 付き含む）の比率は現状レベル程度が経済合理的な結果となっている。2040 年の再エネ比率は 40～50%程度となっている。「排出上振れリスクシナリオ」では、それよりも少し比率が小さく、35%程度となっている。CO_2 限界削減費用の上昇、また、電力需要の一層の増大が見られる、2050 年では浮体式洋上風力の増大が顕著に見られる。

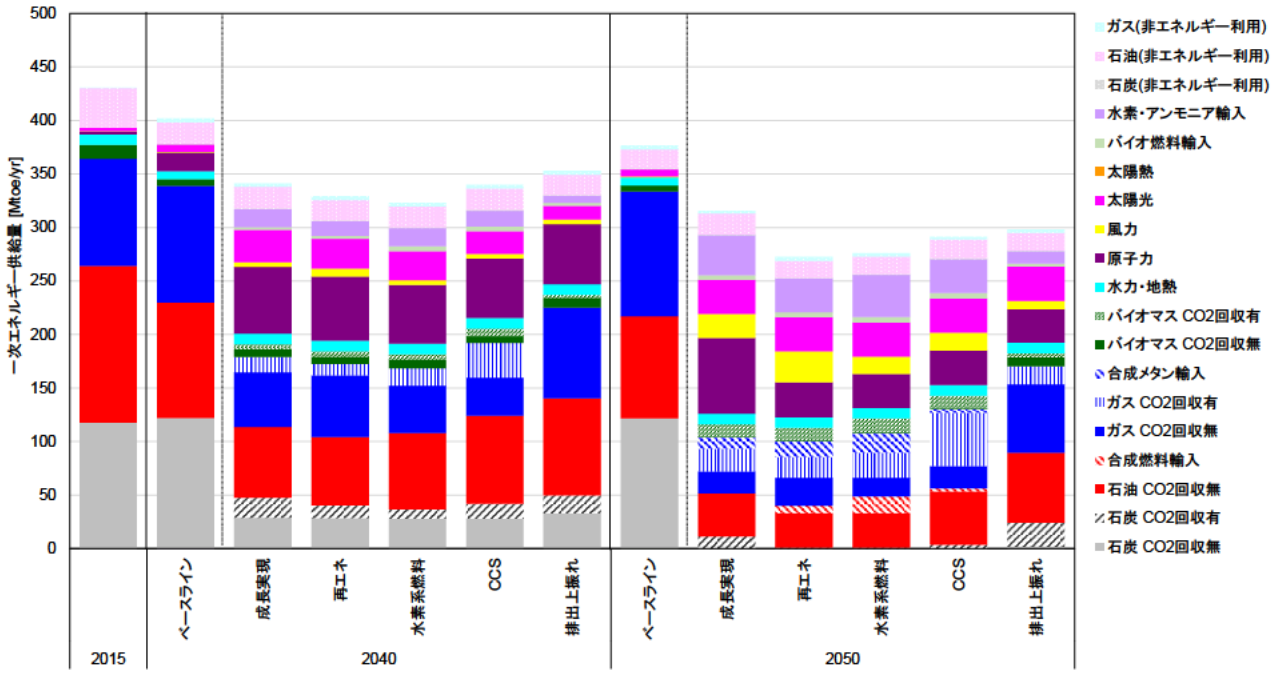


図 5.1.3-7 一次エネルギー供給量

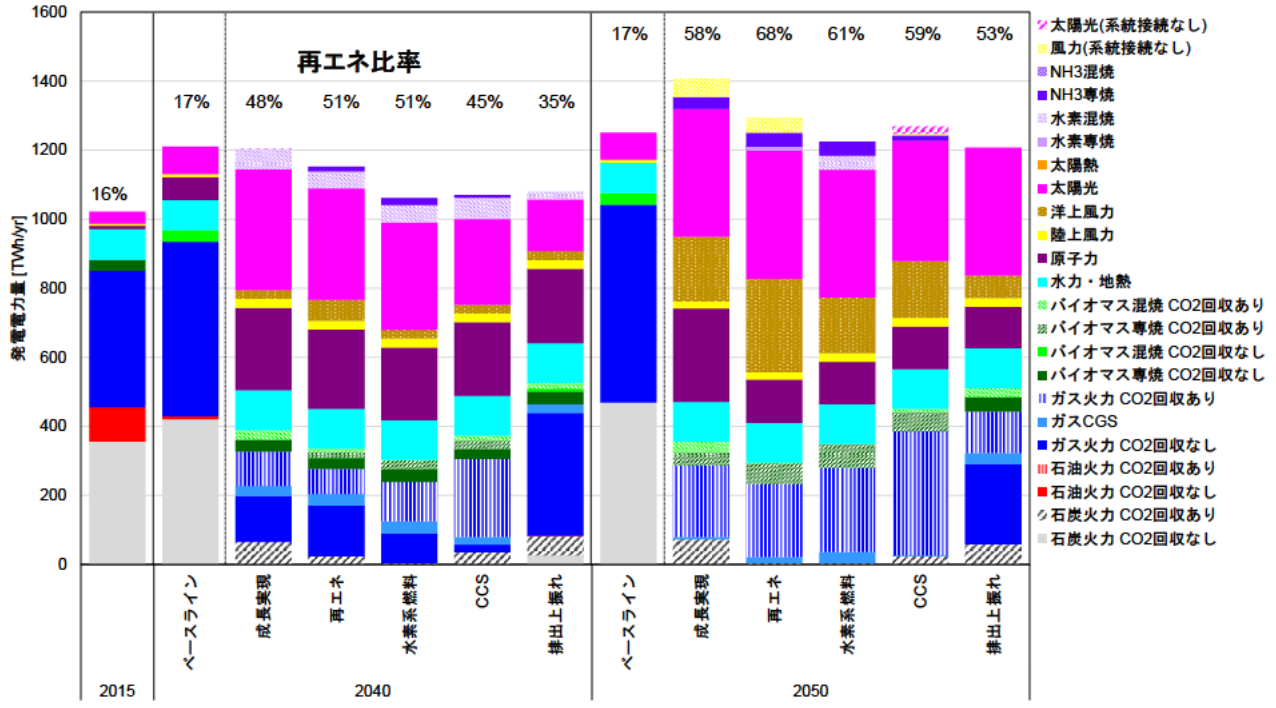
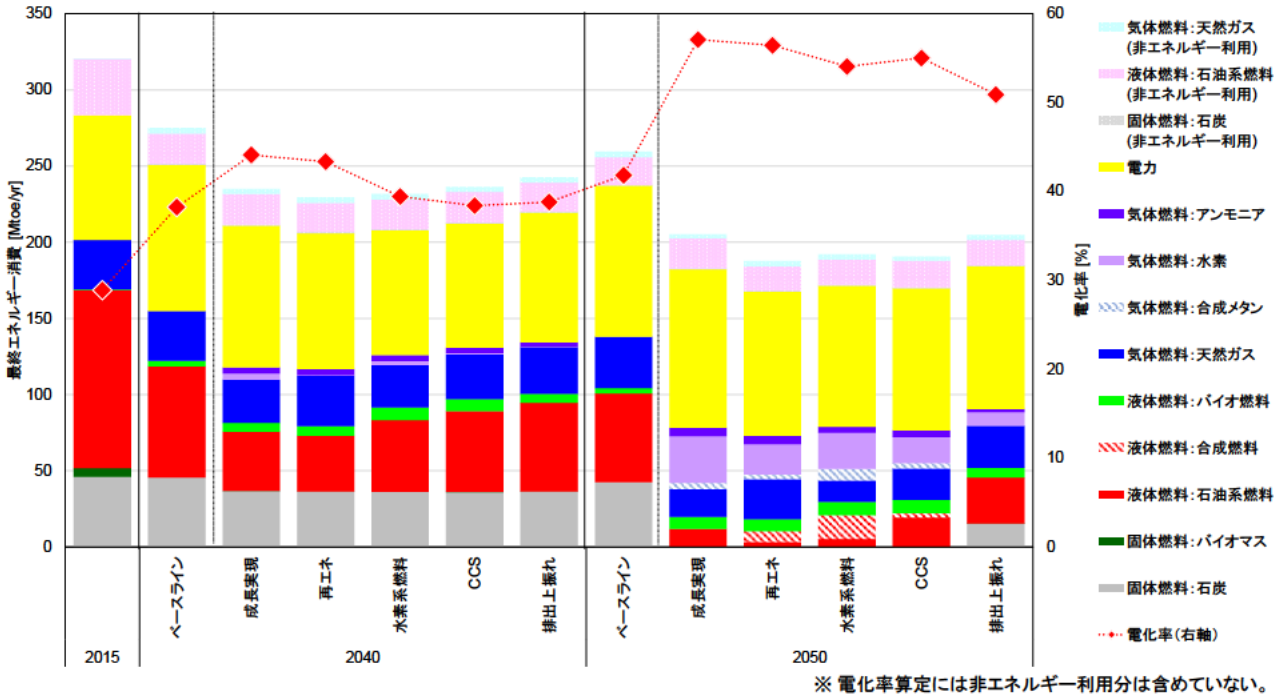


図 5.1.3-8 発電電力量

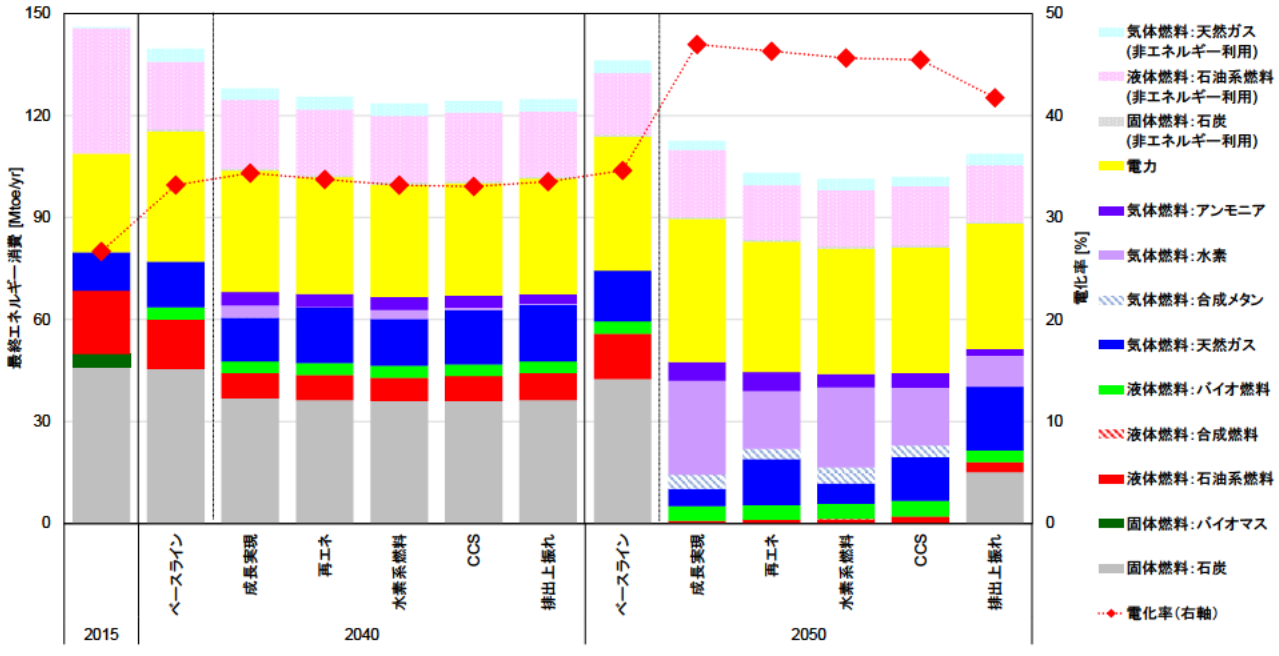
図 5.1.3-9、図 5.1.3-10、図 5.1.3-11、図 5.1.3-12 に、それぞれ最終エネルギー消費量計、産業部門、民生部門、運輸部門別の最終エネルギー消費量を示す。電化率を高めることが経済合理的な対策である。他方、いずれの部門においても、完全な電化は経済合理的ではなく、水素、アンモニア、合成メタン（e-methane）、合成燃料（e-fuels）、バイオ燃料も組み合わせることが経済合理的な対策となっている。

最終エネルギー計では、2040 年の電化率は、▲73%シナリオでは 38～44%。2050 年 CN 時では 54～57%となっている。2040 年の最終エネルギー消費量合計は、▲73%シナリオでは 2015 年比▲26～▲28%、2050 年 CN 時では▲36～▲41%と推計された。



※電化率算定には非エネルギー利用分は含めていない。

図 5.1.3-9 燃料種別の最終エネルギー消費量計



※電化率算定には非エネルギー利用分は含めていない。

図 5.1.3-10 燃料種別の最終エネルギー消費量：産業部門

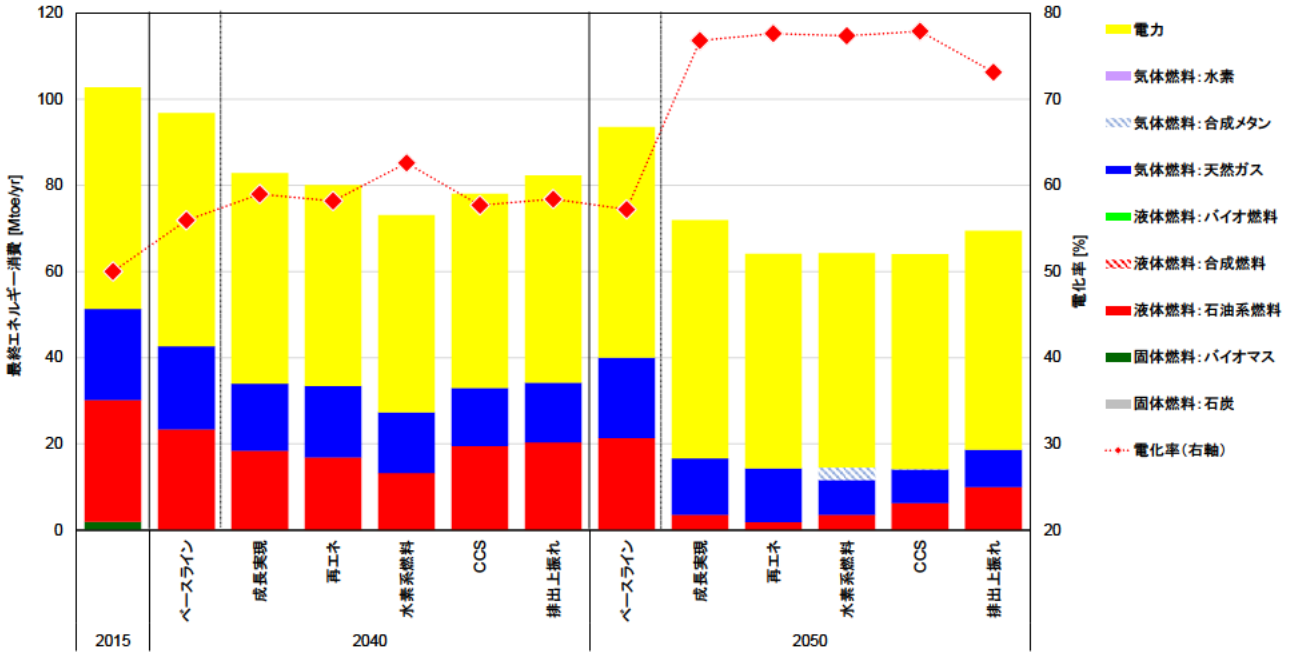


図 5.1.3-11 燃料種別の最終エネルギー消費量：民生部門

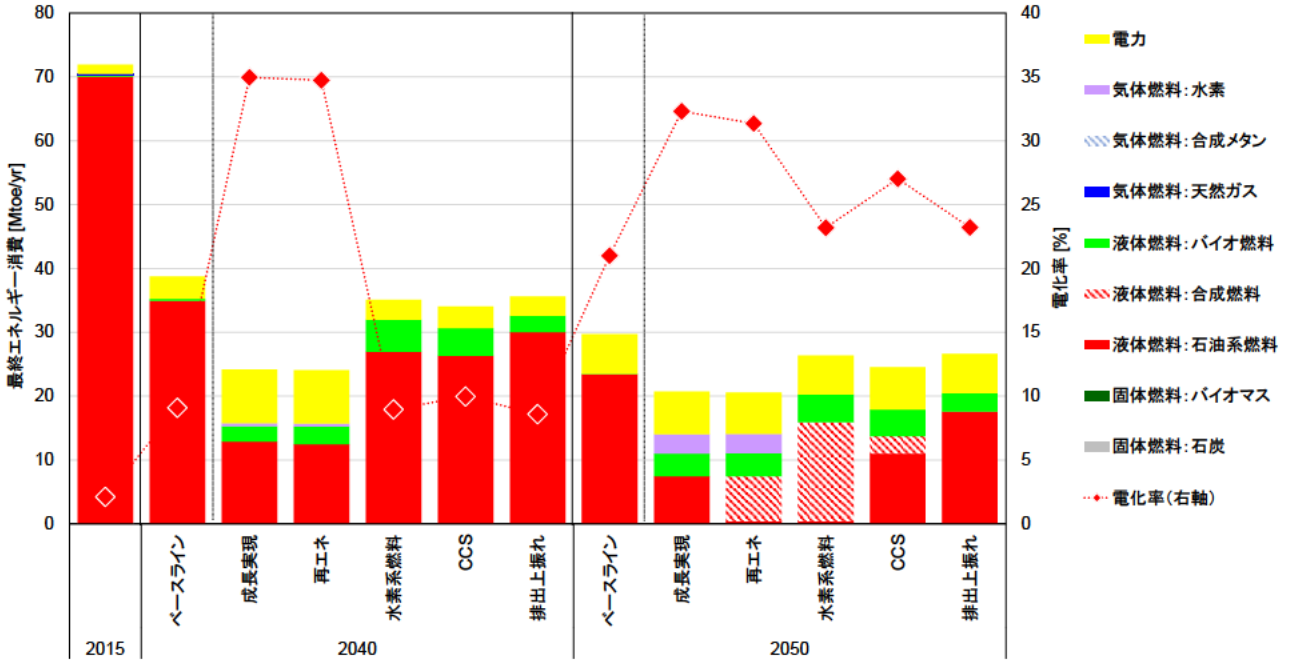


図 5.1.3-12 燃料種別の最終エネルギー消費量：運輸部門

図 5.1.3-13 に部門別の最終電力消費量を示す。いずれのシナリオも 2040 年に向けて電力需要は増大が見られる。また、2050 年に向けては、IT 需要、電化需要の一層の高まりにより、さらに増大が推計される。「成長実現シナリオ」では、2040 年 1081、2050 年 1210TWh/年である。2040 年については、「水素系燃料シナリオ」、「CCS シナリオ」は、CO_2 限界削減費用が他シナリオよりも相対的に高いことから、電力需要も相対的には抑制的になっている。

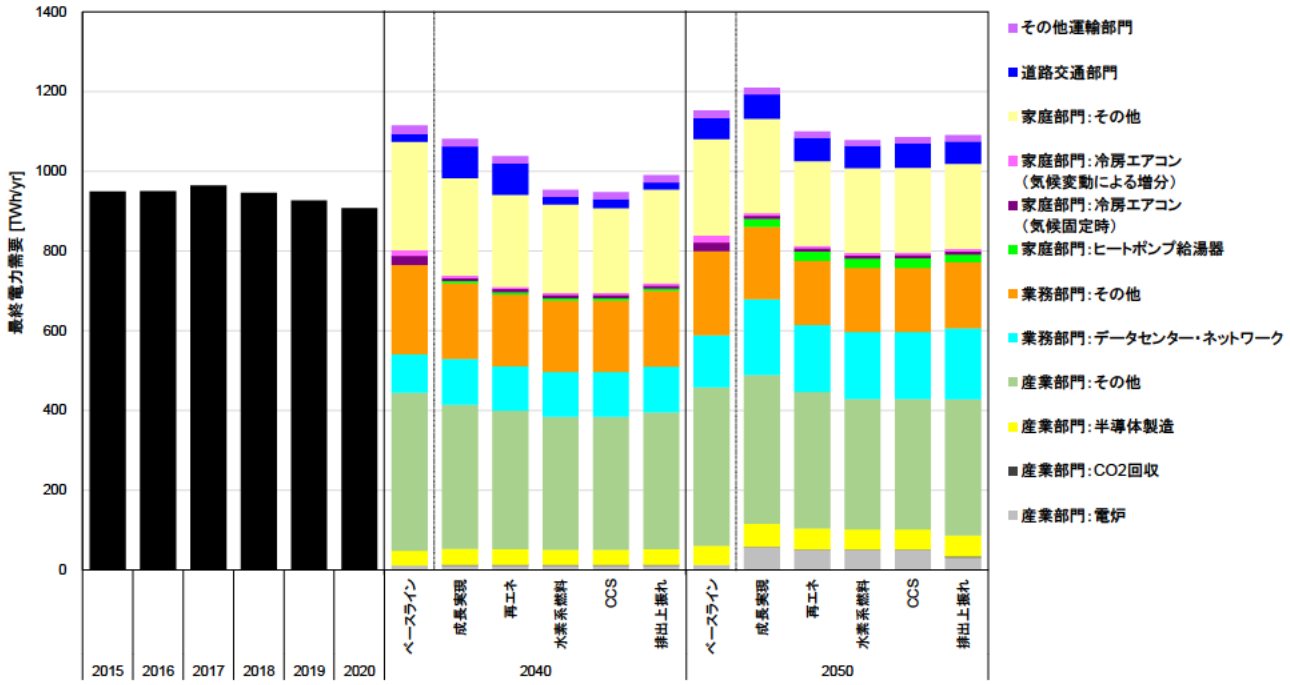


図 5.1.3-13 部門別の最終電力消費量

(4) 極端リスクシナリオ

本項では、極端リスクシナリオ2シナリオの分析結果を掲載する。表 5.1.3-9 に CO_2 限界削減費用、排出削減費用、電力費用の推計を示す。また、表 5.1.3-10 に電力限界費用の国際比較を示す。

「原子力ゼロシナリオ」、「低成長シナリオ」では、CO_2 限界削減費用や電力費用のより一層の増大が推計される。また、日本と他国との比較では、相対価格としても電力価格差が広がることが確認できる。なお、ここでは、世界全体で 1.5℃未満を実現することを前提とした分析を行ったが、実際には、世界は斑模様であり、国によってはベースラインに近い対策しかしない可能性もある。この場合、「低成長シナリオ」の電力価格と他国の電力価格は、より一層広がる可能性もあるので、ある程度、柔軟な排出削減対応も見据えることは重要である。

表 5.1.3-9 日本の CO_2 限界削減費用、エネルギーシステムコスト増分（排出削減費用）、電力費用（経済フィードバック計算前）

	成長実現シナリオ		原子力ゼロシナリオ		低成長シナリオ	
	2040	2050	2040	2050	2040	2050
CO2限界削減費用 [USD/tCO2eq]	301	578	618	867	538	951
エネルギーシステムコスト増分 [billion US$/yr]*1	[+48]	[+129]	[+148]	[+322]	[+152]	[+337]
電力限界費用 [US$/MWh]*2	212	197	337	314	311	318
電力平均費用 [US$/MWh] *3	139	134	177	212	154	213

*1 []（青字）はベースラインからのコスト増分。
*2 発電端での限界費用。ただし、系統統合費用は含む。2020年のモデル推計の電力限界費用は166 US$/MWh
*3 発電端での平均費用。ただし、系統統合費用は含む。2020年のモデル推計の電力平均費用は95 US$/MWh
※ いずれも2000年価格で表示

表 5.1.3-10 電力限界費用：各国間比較（経済フィードバック計算前）

	2020	ベースライン（再掲）		成長実現シナリオ（再掲）		原子力ゼロシナリオ		低成長シナリオ	
		2040	2050	2040	2050	2040	2050	2040	2050
日本	166	127	105	212	197	337	314	311	318
米国	40	38	53	98	102	126	141	126	139
英国	114	135	119	180	160	224	217	222	217
ドイツ	114	119	108	175	155	205	216	204	216
フランス	114	133	116	171	144	173	184	173	184
韓国	103	103	99	174	142	194	174	194	173
中国	61	66	81	143	110	213	171	213	171
インド	105	121	134	187	167	238	223	237	224

単位：USD/MWh（2000年価格）
注）一部の国抜粋表示。発電端での限界費用。ただし、系統統合費用は含む。2020年値はすべてモデルでの推計値
※ 本分析では、世界各国の原子力を含め個別電源の政策は考慮していないことに留意されたい。原子力ゼロシナリオは、日本のみ2040年以降原子力ゼロの制約を追加で課している。

また、表 5.1.3-11 には「低成長シナリオ」における GDP の低下等の推計を、「成長実現シナリオ」との比較で示す。なお、「成長実現シナリオ」と「低成長シナリオ」の経済影響等の分析は、エネルギー基本計画のエネルギー需給見通しに関する分析提供に先立って、GX2040 ビジョン策定の参考とするため、2024 年 8 月開催の GX 実行会議専門家 WG 会合 [22]でも分析結果を提供した。表 5.1.3-11 で見られるように、「低成

長シナリオ」では、技術進展が漸進的であることから、日本は相対的に安価な脱炭素エネルギーへのアクセスが海外に比べて一層乏しい状況となり、結果、海外との相対的なエネルギー価格差が広がり、海外への産業移転が大きくなる可能性が示されている。鉄鋼、化学産業では、ベースラインに比べ 40%程度の生産量の低下が推計される。また、自動車産業（輸送機械）でも、同様の水準の生産量低下が推計される。

GDP 全体でも、13～14%程度とかなり大きな低下となる。極端リスクシナリオとして位置付けはしたものの、決してレアなシナリオではなく、技術進展がそれほど進まない中で、2050 年 CN に向けて直線的に排出削減を進めれば、「低成長シナリオ」の分析結果が示すような世界は十分起き得ると考えられる。これを避けるためのシナリオが先に説明した「排出上振れリスクシナリオ」である。

表 5.1.3-11 生産量・GDP の低下：低成長シナリオシナリオ

ベースラインからの低減率	成長実現シナリオ（DEARS）［再掲］		低成長シナリオ（価格弾性：▲1.0、所得弾性：1.0 ＋ RAS法）	
	2040	2050	2040	2050
鉄鋼	−3.9%	−11.0%	−41%	−46%
（生産量［億トン/年］）	（0.86）	（0.80）	（0.53）	（0.49）
化学	−3.7%	−11.2%	−35%	−40%
窯業土石(セメント含)	−2.1%	−2.7%	−30%	−34%
非鉄金属	−1.4%	−2.7%	−35%	−39%
紙パ	−3.5%	−6.3%	−33%	−37%
輸送機械	−4.1%	−6.9%	−42%	−47%
GDP（CO_2削減技術の海外市場獲得効果含まず）	−4.1%	−5.6%	−13%	−14%
GDP, GNI（海外市場獲得効果含む）	内閣府「成長実現ケース」の一人当たりGDP成長率を若干上回る水準（海外市場獲得効果：+4%～+5%程度）		上記とほぼ同様（海外市場獲得効果は期待できず）	
経済成長率：2023年からの年成長率 ※ 人口低減見通しが含まれる	+1.5%/年	+1.2%/年	+0.6%/年	+0.7%/年

注）気候変動による負の影響の緩和による便益は含んでいない。成長実現シナリオでは上記に追加的にGX⇒DXの正の経済効果もあり得る。

図 5.1.3-14、図 5.1.3-15 に、それぞれ、日本の一次エネルギー供給量、発電電力量を示す。「低成長シナリオ」では、一次エネルギー供給量、発電電力量ともに相当抑制的となる。発電電力量は、本来、IT 需要等で潜在的には増大が見込まれるが、相対的に高いエネルギー価格となれば、産業の海外移転を含め、生産量が低下しながら、エネルギー消費量を抑制することが必要になる。経済性の高い電源投資には長いリードタイムも必要なことが多く、電力需給逼迫をしないためにも、「低成長シナリオ」を実現しない予見性の高いエネルギー・気候変動政策が重要と言える。この意味でも、「排出上振れシナリオ」が第 7 次エネルギー基本計画のエネルギー需給見通しに加えられたものと考えられる。

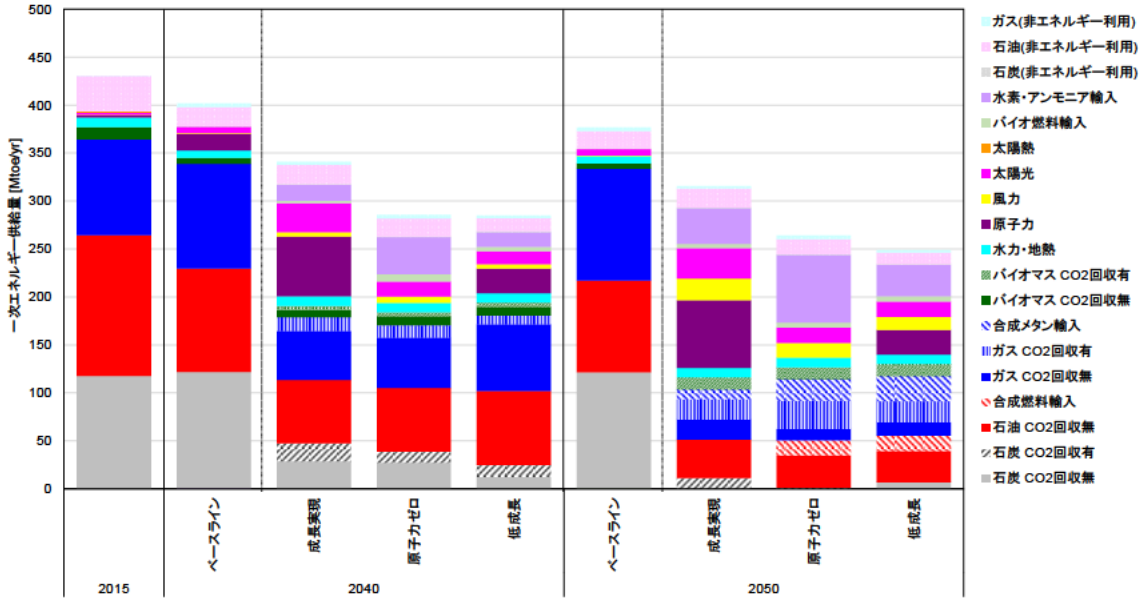


図 5.1.3-14 一次エネルギー供給量

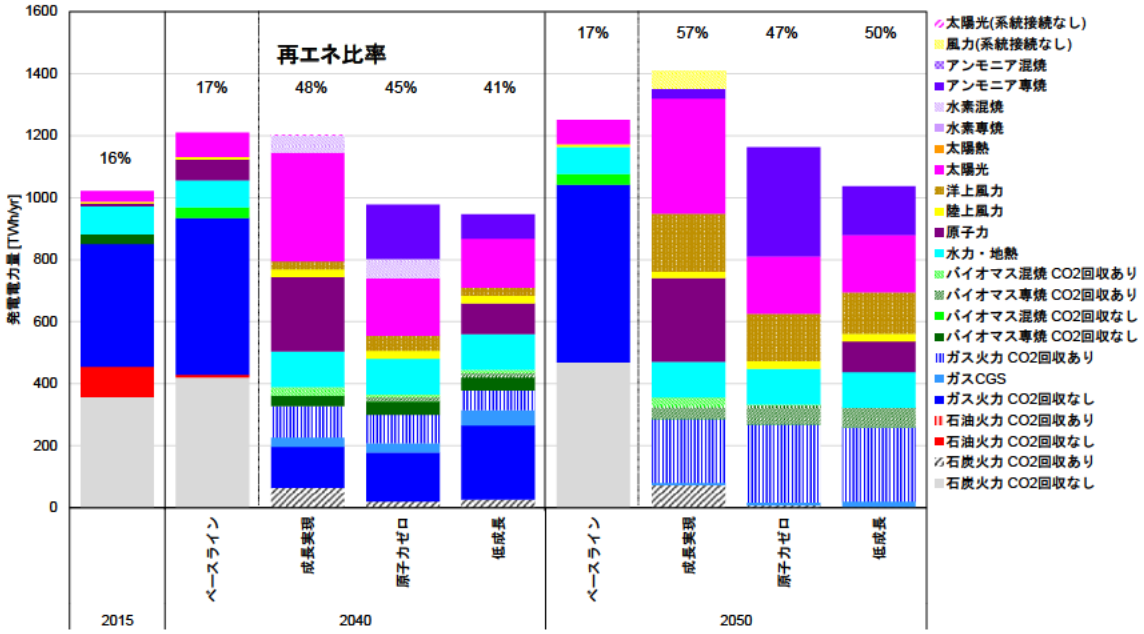


図 5.1.3-15 発電電力量

図 5.1.3-16、図 5.1.3-17 に、それぞれ最終エネルギー消費量計、部門別の最終電力消費量を示す。需要側で見ても、「原子力ゼロシナリオ」、「低成長シナリオ」では、高いエネルギー価格によって、需要が相当抑制的になっていることが確認できる。

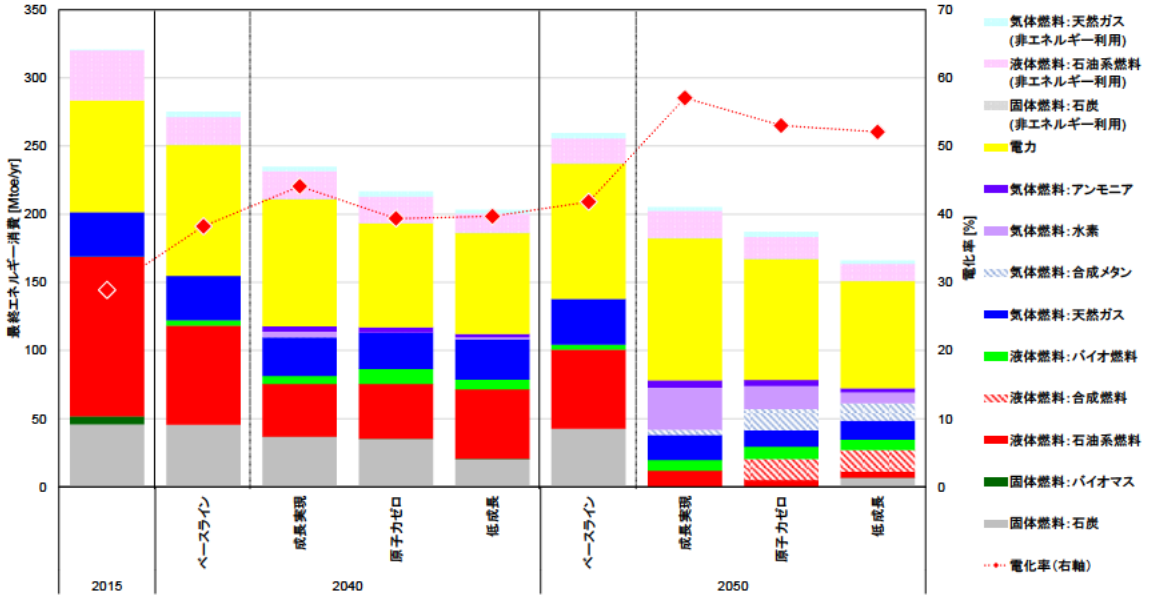


図 5.1.3-16 燃料種別の最終エネルギー消費量計

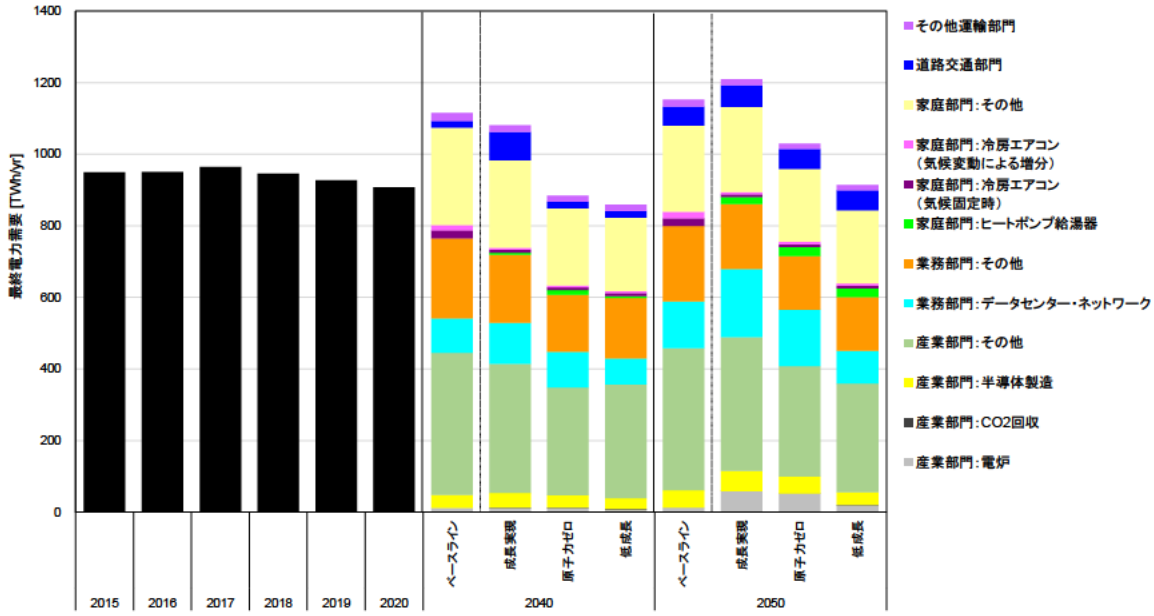


図 5.1.3-17 部門別の最終電力消費量

(5) エネルギー基本計画・需給見通しでの反映

第 7 次エネルギー基本計画に付属の 2040 年のエネルギー需給見通しは、RITE による分析を主軸としつつ、策定が行われた。ただ、RITE 提供のシナリオ名と、エネルギー需給見通しのシナリオ名は異なっているので、対応表を表 5.1.3-12 に示す。RITE 分析の「成長実現シナリオ」は「革新技術拡大」、「排出上振れリスクシナリオ」は「技術進展シナリオ」となっている。

図 5.1.3-18、図 5.1.3-19 にそれぞれ、2040 年のエネルギー需給見通し、電力需給見通しを示す。なお、RITE の分析グラフでは、石油換算トン（toe）表記だが、エネル

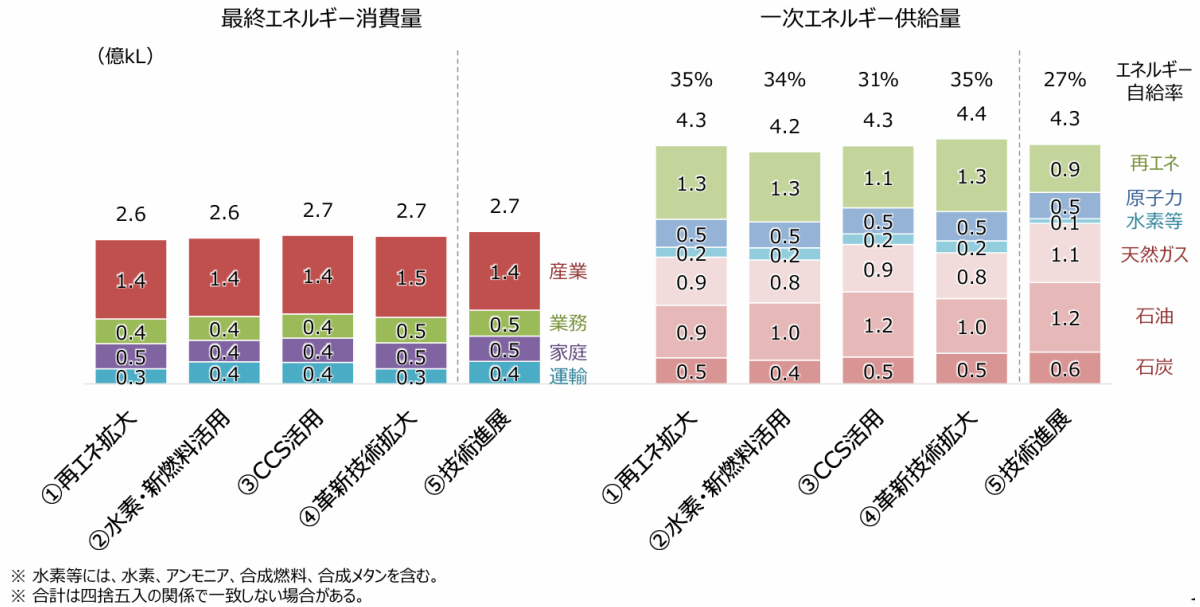
ギー需給見通しは石油 kL 表示なので、注意されたい（1 toe=1.09 kL=41.9 GJ）。また、図 5.1.3-20 には、2040 年のエネルギー起源 CO_2 排出量を示す。

第 7 次エネルギー基本計画を議論した基本政策分科会では、RITE を含む複数の研究機関に対して分析の要請が行われた。複数の研究機関から提示された分析の幅も図 5.1.3-21 のように示された。RITE をはじめ、それぞれの研究機関の分析は、モデル構造が異なる（例えば、最適化型モデルか否か、日本モデルか世界モデルかなど）だけではなく、前提条件も異なっているので、分析の幅は当然ながら出てくる。分析にあたっての考え方も理解する必要があり、単純な比較が適切なわけではないが、RITE の分析は比較的中庸な結果を示している。

第 7 次エネルギー基本計画では、「再生可能エネルギー、原子力などエネルギー安全保障に寄与し、脱炭素効果の高い電源を最大限活用することが必要不可欠」と記載がなされた。

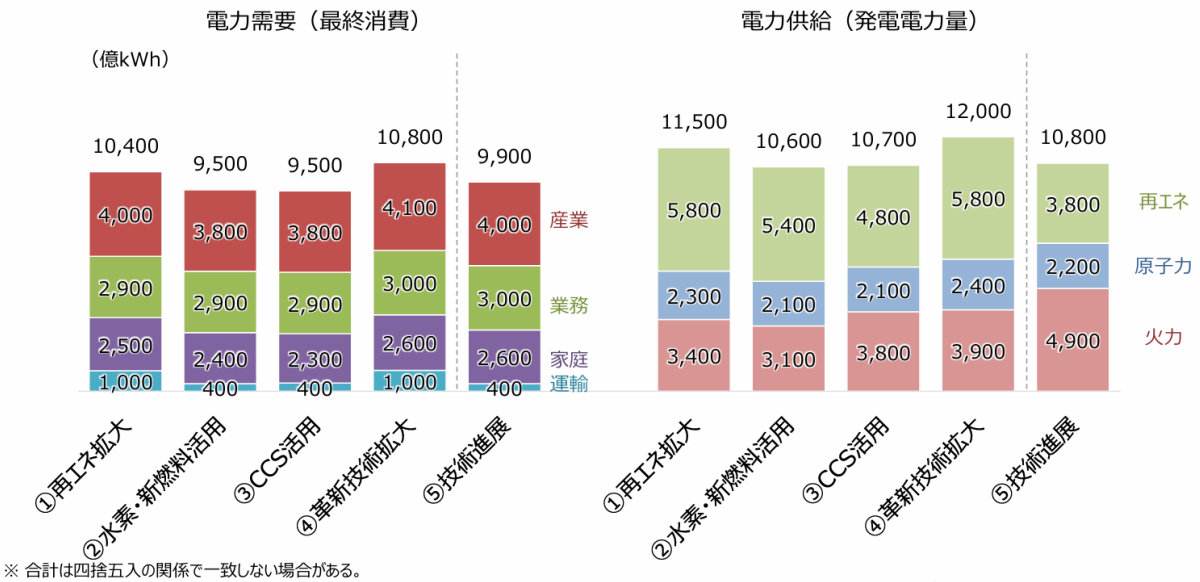
表 5.1.3-12 第 7 次エネルギー基本計画エネルギー需給見通しシナリオと RITE シナリオの関係性

エネルギー需給見通し		RITE 分析 シナリオ名
①再エネ拡大	既存の再エネ技術に加え、ペロブスカイト太陽電池・浮体式洋上風力等の大幅なコスト低減が実現し、国内の再エネ導入量が拡大	再エネシナリオ
②水素・新燃料活用	水素等の製造コストの大幅な低減により、水素・アンモニア火力の活用とともに、非電力部門における水素・アンモニアや合成燃料・合成メタン等の活用が拡大	水素系燃料シナリオ
③CCS 活用	CO_2 貯留可能量の拡大、CO_2 回収・輸送・貯留技術の大幅なコスト低減により、一定の化石燃料の利用が残存しつつ、発電や産業での CCS の活用が拡大	CCS シナリオ
④革新技術拡大	幅広い革新技術で導入制約の克服、大幅なコスト低減等が進展。エネルギー需給の両面で様々な革新技術をバランスよく活用することにより、脱炭素化が進展	成長実現シナリオ
⑤技術進展	2040 年度までに革新技術の大幅なコスト低減等が十分に進まず、既存技術を中心にその導入拡大が進展	排出上振れリスクシナリオ



※ 水素等には、水素、アンモニア、合成燃料、合成メタンを含む。
※ 合計は四捨五入の関係で一致しない場合がある。

図 5.1.3-18 2040 年のエネルギー需給見通し



※ 合計は四捨五入の関係で一致しない場合がある。
※ 第６次エネルギー基本計画において、2050年の発電量の約50～60%を太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス等の再生可能エネルギー、水素・燃料アンモニア発電を約10%、原子力・CO_2回収前提の火力発電を約30～40%とすることを、議論を深めていくための参考値として示した。

図 5.1.3-19 2040 年の電力需給見通し

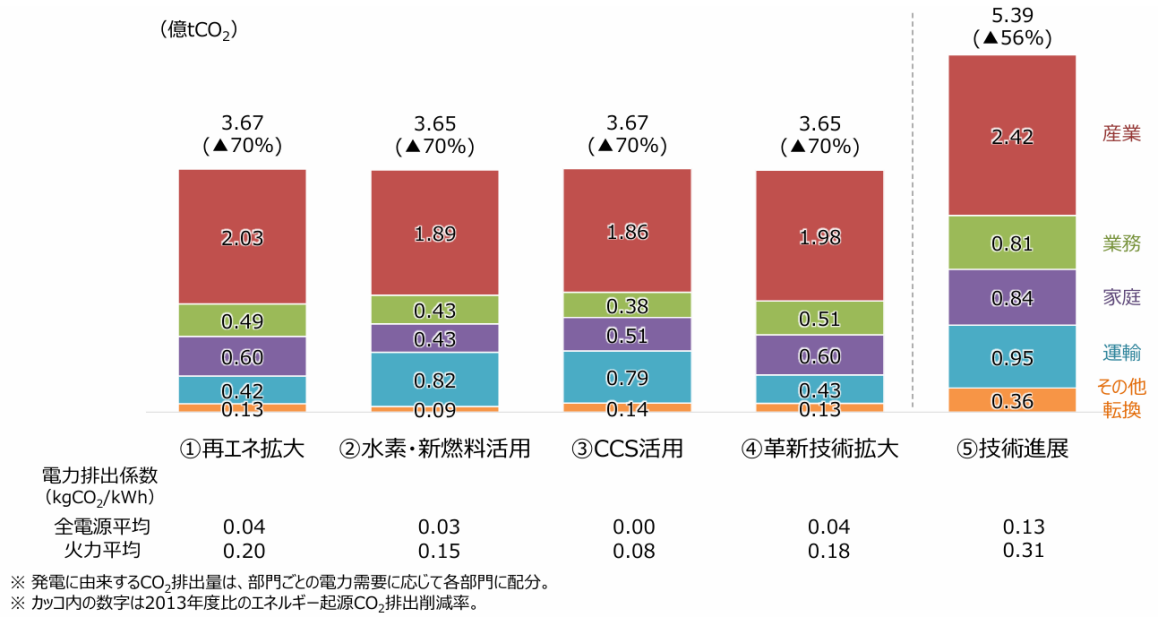
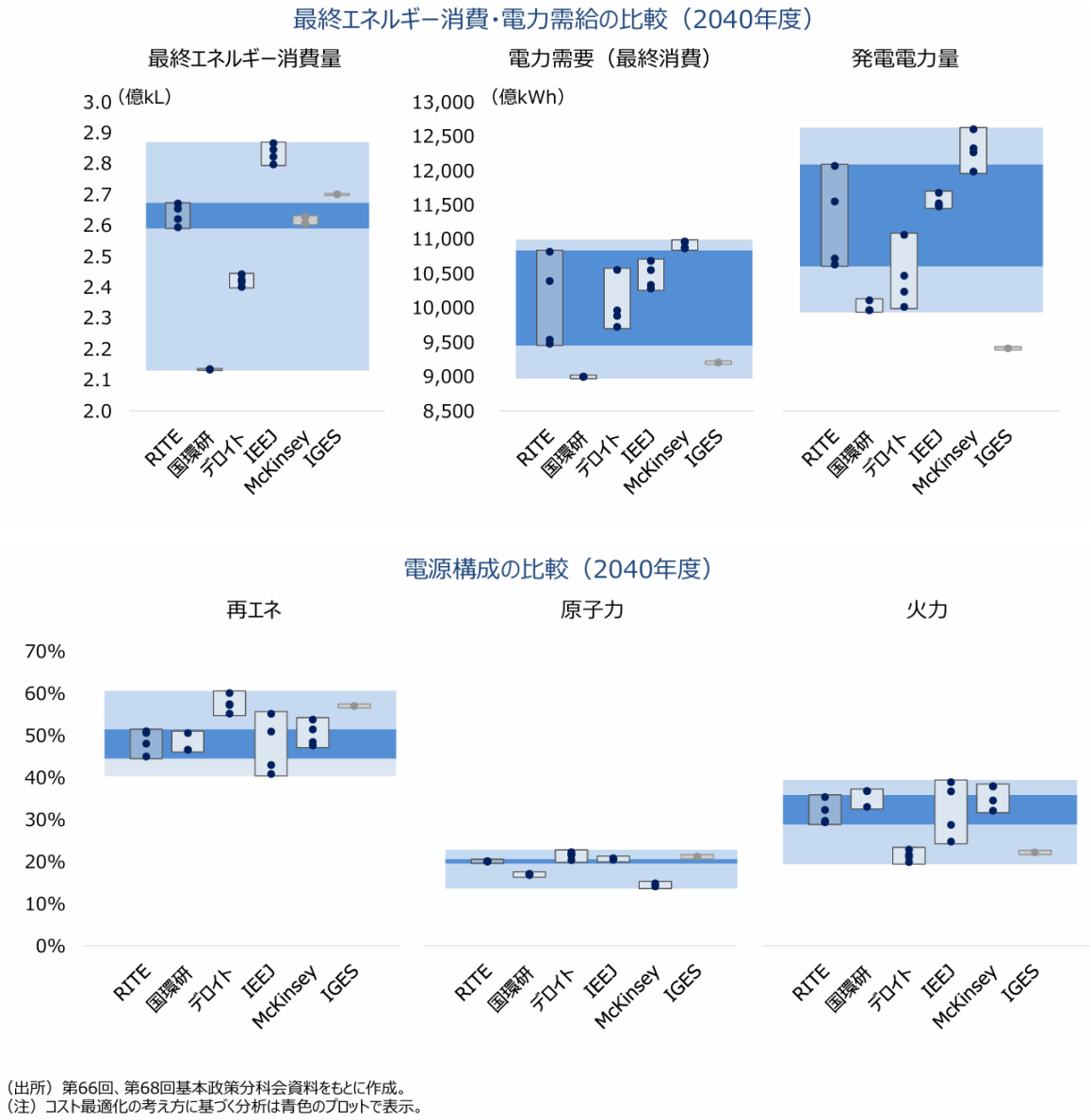


図 5.1.3-20 2040 年のエネルギー起源 CO_2 排出量見通し



（出所）第66回、第68回基本政策分科会資料をもとに作成。
（注）コスト最適化の考え方に基づく分析は青色のプロットで表示。

図 5.1.3-21 RITE と他研究機関の 2040 年のシナリオ分析の比較

最後に、①再エネ拡大、②水素・新燃料活用、③CCS 活用、④革新技術拡大の 4 シナリオにおける、最終エネルギー消費・一次エネルギー供給、電力需要・電源構成、部門別エネルギー起源 CO_2 排出量を、表 5.1.3-13、表 5.1.3-14、表 5.1.3-15 にそれぞれ示す。また、表 5.1.3-16 には、⑤技術進展シナリオのエネルギー需給・部門別エネルギー起源 CO_2 排出量等を示す。⑤技術進展シナリオでは、天然ガスの一次エネルギー供給量は 7,400 万トン（石油換算 1.1 億 kL）程度とされた。その上で、エネルギー基本計画では、エネルギー安全保障・安定供給、経済性、環境の 3E のバランスが強調されるとともに、LNG の長期契約検討の重要性も強調された。

表 5.1.3-13 エネルギー需給見通しの最終エネルギー消費・一次エネルギー供給

	2013年度（実績）	2022年度（実績）	2040年度（見通し）
最終エネルギー消費量	**3.6億kL**	**3.1億kL**	**2.6～2.7億kL程度**
産業	1.7億kL	1.4億kL	1.4～1.5億kL程度
業務	0.6億kL	0.5億kL	0.4～0.5億kL程度
家庭	0.5億kL	0.5億kL	0.4～0.5億kL程度
運輸	0.8億kL	0.7億kL	0.3～0.4億kL程度
一次エネルギー供給量	**5.4億kL**	**4.7億kL**	**4.2～4.4億kL程度**
再エネ	0.5億kL	0.7億kL	1.1～1.3億kL程度
原子力	0.0億kL	0.1億kL	0.5億kL程度
水素等	－	－	0.2億kL程度
天然ガス	1.3億kL	1.0億kL	0.8～0.9億kL程度
石油	2.3億kL	1.7億kL	0.9～1.2億kL程度
石炭	1.4億kL	1.2億kL	0.4～0.5億kL程度
エネルギー自給率	6.5%	12.6%	3～4割程度

※ 水素等には、水素、アンモニア、合成燃料、合成メタンを含む。

表 5.1.3-14 エネルギー需給見通しの電力需要・電源構成

	2013年度（実績）	2022年度（実績）	2040年度（見通し）
電力需要	**0.99兆kWh**	**0.90兆kWh**	**0.9～1.1兆kWh程度**
産業	0.36兆kWh	0.32兆kWh	0.38～0.41兆kWh程度
業務	0.32兆kWh	0.31兆kWh	0.29～0.30兆kWh程度
家庭	0.29兆kWh	0.26兆kWh	0.23～0.26兆kWh程度
運輸	0.02兆kWh	0.02兆kWh	0.04～0.10兆kWh程度
発電電力量	**1.08兆kWh**	**1.00兆kWh**	**1.1～1.2兆kWh程度**
再エネ	10.9%	21.8%	4～5割程度
太陽光	1.2%	9.2%	23～29%程度
風力	0.5%	0.9%	4～8%程度
水力	7.3%	7.7%	8～10%程度
地熱	0.2%	0.3%	1～2%程度
バイオマス	1.6%	3.7%	5～6%程度
原子力	0.9%	5.6%	2割程度
火力	88.3%	72.6%	3～4割程度

表 5.1.3-15 エネルギー需給見通しの部門別エネルギー起源 CO_2 排出量

	2013年度（実績）	2022年度（実績）	2040年度（見通し）
エネルギー起源CO_2排出量	**12.4億tCO_2**	**9.6億tCO_2** （2013年度比▲22%）	**3.6～3.7億tCO_2程度** （2013年度比▲70%程度）
産業	4.6億tCO_2	3.5億tCO_2	1.8～2.0億tCO_2程度
業務	2.3億tCO_2	1.8億tCO_2	0.4～0.5億tCO_2程度
家庭	2.0億tCO_2	1.6億tCO_2	0.4～0.6億tCO_2程度
運輸	2.2億tCO_2	1.9億tCO_2	0.4～0.8億tCO_2程度
その他転換	1.0億tCO_2	1.0億tCO_2	0.1～0.2億tCO_2程度
CO_2回収量	－	－	0.6～1.2億tCO_2程度

表 5.1.3-16 エネルギー需給見通し「技術進展シナリオ」のエネルギー需給等

	2040年度（技術進展シナリオ）
最終エネルギー消費量	**2.7億kL程度**
一次エネルギー供給量	**4.3億kL程度**
再エネ	0.9億kL程度
原子力	0.5億kL程度
水素等	0.1億kL程度
天然ガス	1.1億kL程度
石油	1.2億kL程度
石炭	0.6億kL程度
電力需要	**1.0兆kWh程度**
発電電力量	**1.1兆kWh程度**
エネルギー起源CO_2排出量	**5.4億tCO_2程度**（2013年度比▲56%程度）
CO_2回収量	0.5億tCO_2程度

※ 水素等には、水素、アンモニア、合成燃料、合成メタンを含む。

参考文献（第 5.1 節に関するもの）

1) 日本政府、「第 7 次エネルギー基本計画」 (2025) https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001.html（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）

2) 日本政府、「地球温暖化対策計画」(2025) https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/250218.html（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）

3) 日本政府、「GX2040 ビジョン」(2025) https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218004/20250218004.html（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）

4) K. Akimoto, M. Nagashima, F. Sano, T. Ando, Gaps between costs and potentials estimated by bottom-up assessments versus integrated assessment models, Energy Strategy Reviews, 55, 101521, 2024.

5) K. Akimoto, Assessment of road transportation measures for global net-zero emissions considering comprehensive energy systems, IATSS Research, 47(2), 196-203, 2023.
6) K. Akimoto, F. Sano, J. Oda, H. Kanaboshi, Y. Nakano, Climate change mitigation measures for global net-zero emissions and the roles of CO_2 capture and utilization and direct air capture, Energy and Climate Change, 2, 100057, .2021.
7) K. Akimoto, F. Sano, T. Homma, J. Oda, M. Nagashima, M. Kii, Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost, Energy Policy, Vol. 38,(7), 3384-3393, 2010.
8) K. Akimoto, F. Sano, J. Oda, T. Homma, U.K. Rout, T. Tomoda, Global Emission Reductions through a Sectoral Intensity Target Scheme, Climate Policy, 8, S46-S59, 2008.
9) 秋元、佐野、2050 年カーボンニュートラルのシナリオ分析（中間報告）、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会 https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/043/043_005.pdf（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）
10) 秋元、佐野、本間、RITE DNE21+モデルを用いた日本の 2040 年排出削減目標の感度解析 https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/ondanka_2050/pdf/006_07_00.pdf（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）
11) IPCC, 2022: Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, IPCC
12) UNEP, Emissions Gap Report 2024 (2024). https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024
13) NGFS: NGFS Scenarios for central banks and supervisors (2022) https://www.ngfs.net/system/files/import/ngfs/medias/documents/ngfs_climate_scenarios_for_central_banks_and_supervisors_.pdf.pdf
14) 日本政府、「日本の NDC（国が決定する貢献）」(2025) https://www.env.go.jp/content/000291804.pdf（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）
15) 資源エネルギー庁、「シナリオ分析について」 (2024) https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2024/066/066_005.pdf（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）
16) 秋元、佐野、本間、「2050 年カーボンニュートラルに向けた我が国のエネルギー需給分析」（2024） https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2024/066/066_008.pdf（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）
17) 秋元、佐野、本間、「2050 年カーボンニュートラルに向けた我が国のエネルギー需給分析（2024 年 12 月 3 日提示の分析の更新版）」（2024） https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2024/068/068_008.pdf（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）
18) T. Homma, K. Akimoto, Analysis of Japan's energy and environment strategy after the Fukushima nuclear plant accident, Energy Policy 62, 1216–1225 (2013)
19) 本間 他、現状の気候・エネルギー政策を考慮した，パリ協定国別貢献における国際競争力に関する分析、エネルギー・資源、41-5 (2020)
20) Zsuzsanna Csereklyei, Price and income elasticities of residential and industrial electricity demand in the European Union, Energy Policy, Vol. 137, (2020)

21) RITE システム研究グループ、「DNE21+モデルを含む RITE のシナリオ分析モデルの概要」(2024) https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/DNE21plusmodeloverview.pdf（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）
22) 秋元、佐野、本間、「2050 年カーボンニュートラルに向けた我が国のエネルギー需要展望」（2024） https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/senmonka_wg/dai7/siryou2.pdf

5.2 CDR に関する経済ポテンシャル分析

5.2.1 はじめに

パリ協定で「世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べて 2℃より十分低く保ち、1.5℃以内に抑える努力をする」という世界共通の長期目標が掲げられ、各国が温室効果ガス（GHG）の削減に取り組んでいる。我が国では、2050 年にカーボンニュートラル（CN）を実現することを目標として、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」が 2021 年 10 月に閣議決定された [1)]。その長期戦略の中で、CO_2 の排出が避けられない分野からの排出に対しては、CDR（Carbon Dioxide Removal）技術を活用して CO_2 の除去を目指す等、CDR 技術の必要性が示された。また、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第 3 作業部会（WG3）は、2022 年 4 月に公表された第 6 次評価報告書（AR6）の中で、CDR は CO_2 および GHG の排出を正味ゼロとするためには必要不可欠であり、排出削減が困難な部門からの残余排出を相殺する役割を果たすと明記した [2)]。このように CDR は CN 実現に向けて必要な技術となっている。この CDR 技術には、CO_2 を大気から直接回収して貯留する DACCS（Direct Air Carbon Capture and Storage）や CO_2 の回収・貯留とバイオマス発電を組み合わせた BECCS（Bio-Energy with Carbon Capture and Storage）などがあるが、その中で技術成熟度レベル（TRL：Technology Readiness Level）が 6 以上と実運用環境下で効果が確認されている DACCS、BECCS、植林およびバイオ炭について、CO_2 排出削減コストと削減ポテンシャルを調査するとともに、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いて、2050 年までの世界と日本における経済的排出削減ポテンシャルを評価した。

5.2.2 CDR 技術の排出削減コストと削減ポテンシャルについて

ネガティブエミッション市場創出に向けた検討会が整理した CDR 技術の排出削減コストと削減ポテンシャルについて、DACCS、BECCS、植林およびバイオ炭に関しては、表 5.2.2-1 のとおりである。

表 5.2.2-1 CDR 技術の排出削減コストと削減ポテンシャル

分類	TRL[1)]	除去コスト[1)] $/tCO2[4)]		除去ポテンシャル[1)] GtCO2/年[5)]	
	共通	世界		世界	
DACCS	6	200	100~300	22.5	5~40
BECCS	5-6	208	15~400	5.8	0.5~11
植林・再生林	8-9	120	0~240	5.3	0.5~10
バイオ炭	6-7	178	10~345	3.5	0.3~6.6

1) IPCC Sixth Assessment Report "Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change" Table 12.6 and p1271
4) 2050年想定のCO2除去コストの中央値　5) 2050年の除去ポテンシャルの中央値、陸上バイオ系は重複あり

（出典）経済産業省 [3)]

中央値で見ると、CO_2 排出削減コストは、植林が最も低く 120$/t$CO_2$、次いでバイオ炭が 178$/tCO_2、BECCS および DACCS が約 200$/t$CO_2$ となっている。一方、CO_2 排出削減ポテンシャルにおいては、バイオ炭、植林、BECCS が約 4～6GtCO_2/yr であるのに対し、DACCS は約 23GtCO_2/yr と、他の CDR 技術に比べて約 4～6 倍大きい削減ポテンシャルを有すると評価されている。

5.2.3 DNE21+モデルによる経済的排出削減ポテンシャルの評価

DACCS、BECCS、植林およびバイオ炭において、BECCS とバイオ炭はバイオマスを資源として利用し、BECCS と DACCS は回収した CO_2 を地下に貯留するように、同じ資源、同じ貯留方法を用いる技術が存在する。そのため、これらの技術が導入されると、各技術間で同じ資源、同じ貯留層を巡る競合が生じることになる。このような背景から、CDR 技術の CO_2 排出削減ポテンシャルを的確に評価するためには、各技術が互いに与える影響を考慮する必要がある。世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+は、CO_2 の回収・貯留技術を具体的にモデル化する等、各技術による相互影響を考慮した上で、コスト効率的な CO_2 排出削減ポテンシャルを評価することが可能なモデルとなっている。そこで、DNE21+モデルで評価するための前提条件を設定し、その条件に基づいて、DACCS、BECCS、植林およびバイオ炭の経済的排出削減ポテンシャルを評価した。

(1) DNE21+モデル分析での前提条件

① バイオ炭の製造

バイオマスを熱分解することによって、バイオ炭とバイオ燃料を製造するタイプを想定し、バイオマスに含まれる炭素の 45.7%、42.6%[4)]が夫々バイオ炭、バイオ燃料に含まれるものとした。但し、IPCC のバイオ炭の算定法に則り、100 年後の炭素残存率を 0.8[5)]と想定し、炭素残存率を乗じた分が固定されることとした。また、熱分解に必要となる電力は、バイオ炭 1ton 当たり 0.28kWh[4)]、バイオ炭の有機炭素含有率は、バイオ炭の製造にセルロース系物質のみが利用可能として、同物質に属する木材と草本

系の有機炭素含有率 0.77tC/(t-dry matter)と 0.65tC/(t-dry matter)[5]の平均値である 0.71tC/(t-dry matter)、熱分解の設備費は 200$/(ton/day)[6),7)]と想定した。バイオ炭の製造フローを図 5.2.3-1 に示す。

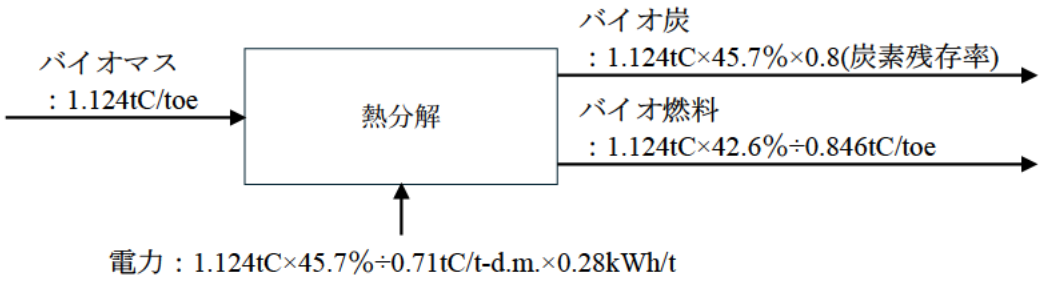


図 5.2.3-1 バイオ炭の製造フロー

② DAC の設備費

図 5.2.3-2 に示す DAC の設備費想定のうち、HT DAC、LT DAC ともにコスト低減が保守的な conservative scenario を採用した。conservative scenario は、パリ協定の実行遅延により、DAC の累積導入必要量の 50%のみが実現されるという前提で、技術習熟率（累積導入量が 2 倍になる際のコスト低減率）を 10%と想定している。また、HT DAC は高温の水溶液を利用して CO_2 を脱離するシステム、LT DAC は固体吸着材で吸着した CO_2 を低温で脱離するシステムである。

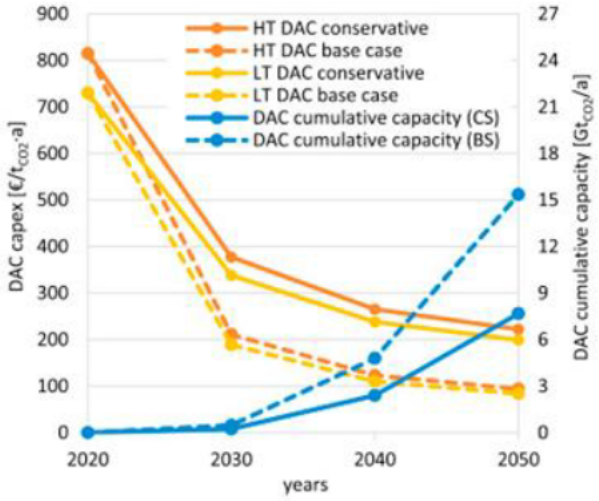


図 5.2.3-2 DAC の設備費と累積設備容量の想定

（出典）Mahdi Fasihi, et al.[8)]

③ DAC のエネルギー消費量

図 5.2.3-2 の HT DAC と LT DAC におけるエネルギー消費量の想定を表 5.2.3-1 に示す。HT DAC は電力のみ利用し、LT DAC は電力と熱を利用するシステムである。HT DAC の電力量は 10 年間で 5%ずつ、LT DAC の電力量および熱量は夫々10 年間で 10%、14.3%ずつ低減していくものと想定している。なお、LT DAC は熱供給源として廃熱を

利用することを想定していると考えられるが、DNE21+では温度帯別の熱フローをモデル化していない。また、廃熱利用の場合、廃熱が利用可能な地点と CO_2 貯留ポテンシャルのある地点とのマッチングが必要となることがあるため、熱は別途、水素やガスで供給するものと想定した。

表 5.2.3-1 DAC のエネルギー消費量の想定

システムの種類	エネルギー消費量[/tCO_2]		
		2020 年	2050 年
HT DAC	電力量[kWh]	1,535	1,316
LT DAC	熱　量[GJ]	6.3	4.0
	電力量[kWh]	250	182

（出典）Mahdi Fasihi, et al.[8)]

④　CO_2 の貯留ポテンシャルと貯留費用

CO_2 の貯留ポテンシャルおよび貯留費用の想定を表 5.2.3-2 に示す。深部帯水層への CO_2 貯留については、掘削リグの台数に制約がある等、その急速な拡大には困難が伴うことを鑑み、貯留の拡大率に制約を設けた。具体的には、国内/地域の総貯留ポテンシャルに対して、2030 年までは年間 0.02%、それ以降は年間 0.04%ずつの貯留量の拡大を想定した。この制約に沿って貯留量を拡大した場合の 2030 年および 2050 年における最大貯留量を表 5.2.3-3 に示す。

表 5.2.3-2 CO_2 の貯留ポテンシャルと貯留費用の想定

	貯留ポテンシャル[$GtCO_2$]			貯留費用[1]
	日本	世界	IPCC_SRCCS(2005)	[\$/tCO_2]
廃油田（石油増進回収）	0.0	112.4	675-900	92-227
廃ガス田	0.0	147.3-241.5		10-132
深部帯水層	11.3	3,140.1	103-104	5-85
炭　層（メタン増進回収）	0.0	148.2	3-200	47-274

（出典）総合資源エネルギー調査会　基本政策分科会 [9)]

表 5.2.3-3 深部帯水層への最大貯留量[$MtCO_2$/yr]

	2030 年	2050 年
世界全体	6,258	31,378
日　本	0	91

（出典）総合資源エネルギー調査会　基本政策分科会 [9)]

[1] 本数値には CO_2 回収費用は含まれていない

⑤　その他の条件

BECCS に関するバイオマス発電の効率、設備費、バイオマス発電からの CO_2 回収技術等、その他の条件については、総合資源エネルギー調査会　基本政策分科会 [9]に記載の前提条件を採用した。

(2) DNE21+モデルによる分析結果

①　世界全体での経済的排出削減ポテンシャル

a.　2030 年における世界全体での CDR 技術の経済的排出削減ポテンシャル

2030 年における世界全体での CDR 技術の経済的排出削減ポテンシャルを図 5.2.3-3 に示す。

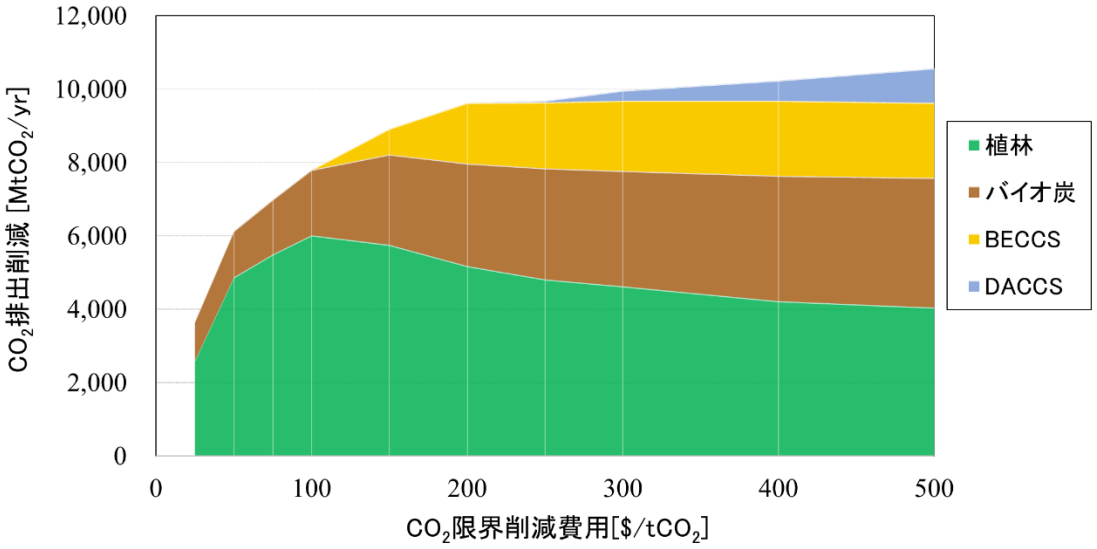


図 5.2.3-3　2030 年における CDR 技術の経済的排出削減ポテンシャル（世界）

100$/$tCO_2$ 以下の領域では、植林、バイオ炭のみが導入されるが、150$/$tCO_2$ から BECCS が導入され、BECCS の経済的排出削減ポテンシャルが増加するにつれて、植林のポテンシャルは減少し、バイオ炭のポテンシャルの成長は鈍化した。また、250$/$tCO_2$ から DACCS が導入され、DACCS の経済的排出削減ポテンシャルの増加に伴い、BECCS のポテンシャルの成長は鈍化し、500$/$tCO_2$ での経済的排出削減ポテンシャルの合計は 10.6$GtCO_2$/yr となった。

b.　2050 年における世界全体での CDR 技術の経済的排出削減ポテンシャル

2050 年における世界全体での CDR 技術の経済的排出削減ポテンシャルを図 5.2.3-4 に示す。

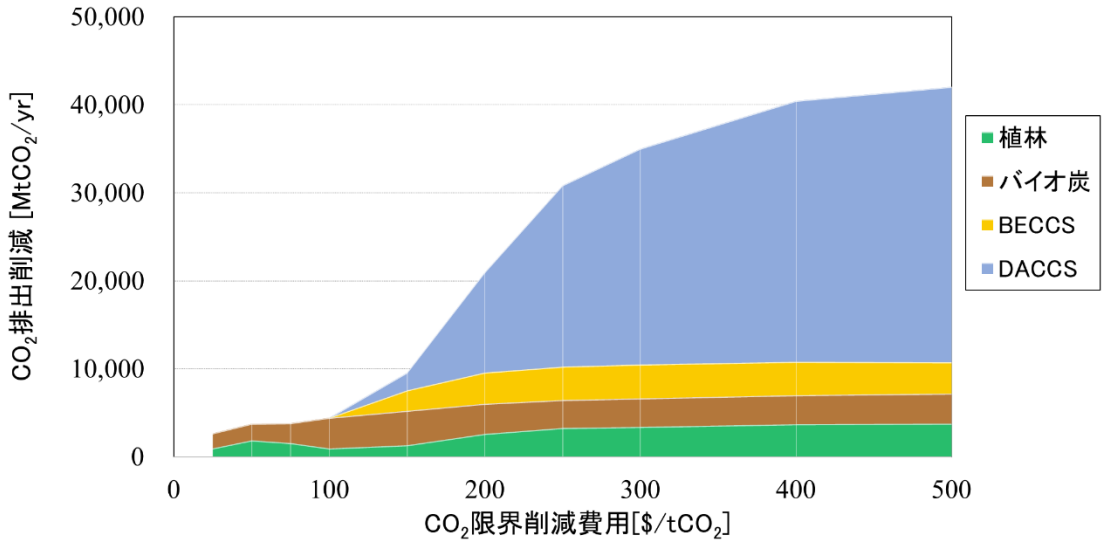


図 5.2.3-4　2050 年における CDR 技術の経済的排出削減ポテンシャル（世界）

成長した森林を伐採してエネルギー利用する国・地域があり、植林による経済的排出削減ポテンシャルは 2030 年に比べて小さく、100$/tCO$_2$ での経済的排出削減ポテンシャルの合計は 4.5GtCO$_2$/yr となった。150$/tCO$_2$ から BECCS および DACCS が導入され、導入時のこれらの経済的排出削減ポテンシャルは同等のレベルであったが、200$/tCO$_2$ 以上の領域では、DACCS の経済的排出削減ポテンシャルが大幅に増加する一方で、BECCS のポテンシャルの成長は鈍化し、500$/tCO$_2$ での経済的排出削減ポテンシャルの合計は 42GtCO$_2$/yr となった。なお、その内訳は、植林が 3.8GtCO$_2$/yr、バイオ炭が 3.4GtCO$_2$/yr、BECCS が 3.5GtCO$_2$/yr、DACCS が 31.3GtCO$_2$/yr であり、いずれも表 5.2.2-1 に示す排出削減ポテンシャル内であった。

c.　2050 年における世界全体での CCS 技術の経済的排出削減ポテンシャル

b 項で示したとおり、2050 年では、CO$_2$ 限界削減費用が 200$/tCO$_2$ 以上の領域で、DACCS の経済的排出削減ポテンシャルが増大する結果となった。これに伴い、回収した CO$_2$ を地下に貯留する量が増加するため、従来 CCS 技術と貯留層を巡って競合が生じることになる。そこで、回収した CO$_2$ を地下に貯留する BECCS、DACCS と従来 CCS 技術の経済的排出削減ポテンシャルを評価した。その結果を図 5.2.3-5 に示す。

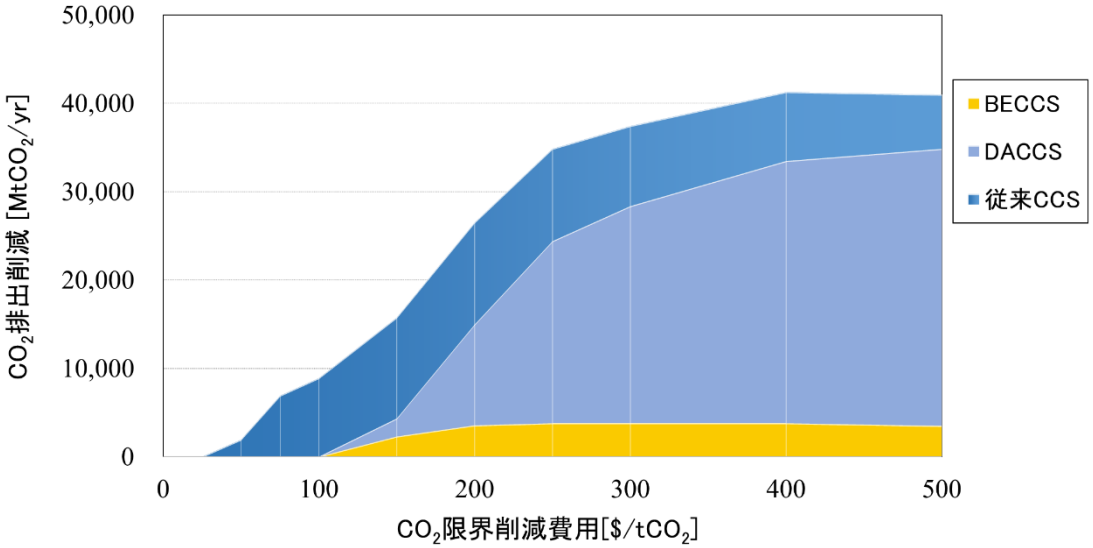


図 5.2.3-5 2050 年における CCS 技術の経済的排出削減ポテンシャル（世界）

200$/tCO$_2$までは、従来の CCS 技術による経済的排出削減ポテンシャルは増加するが、200$/tCO$_2$を超えると、DACCS の経済的排出削減ポテンシャルの増加に伴い、従来の CCS 技術のポテンシャルは減少する結果となった。

② 日本での経済的排出削減ポテンシャル

a. 日本での CDR 技術の経済的排出削減ポテンシャル

2030 年と 2050 年における日本での CDR 技術の経済的排出削減ポテンシャルを夫々図 5.2.3-6、図 5.2.3-7 に示す。

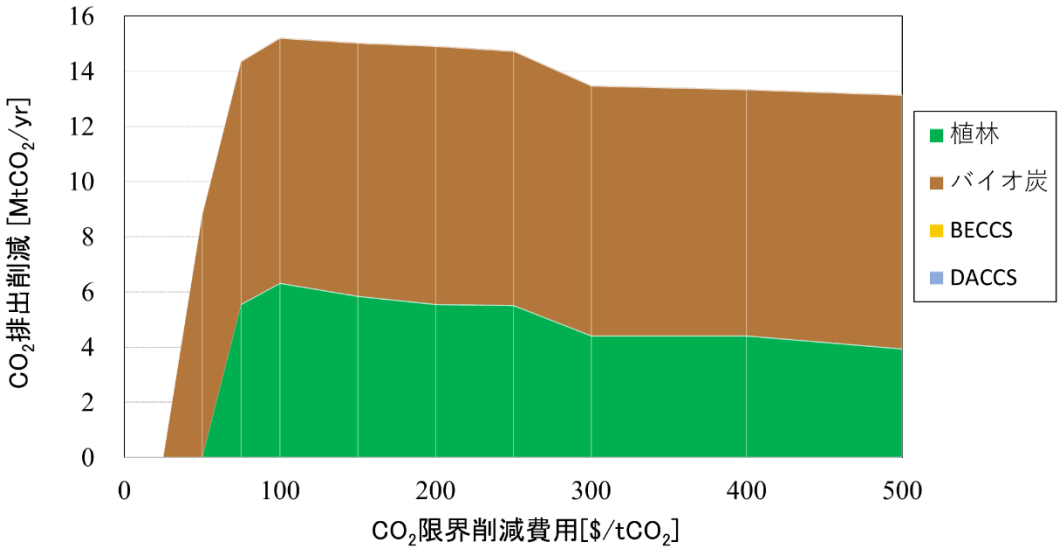


図 5.2.3-6 2030 年における CDR 技術の経済的排出削減ポテンシャル（日本）

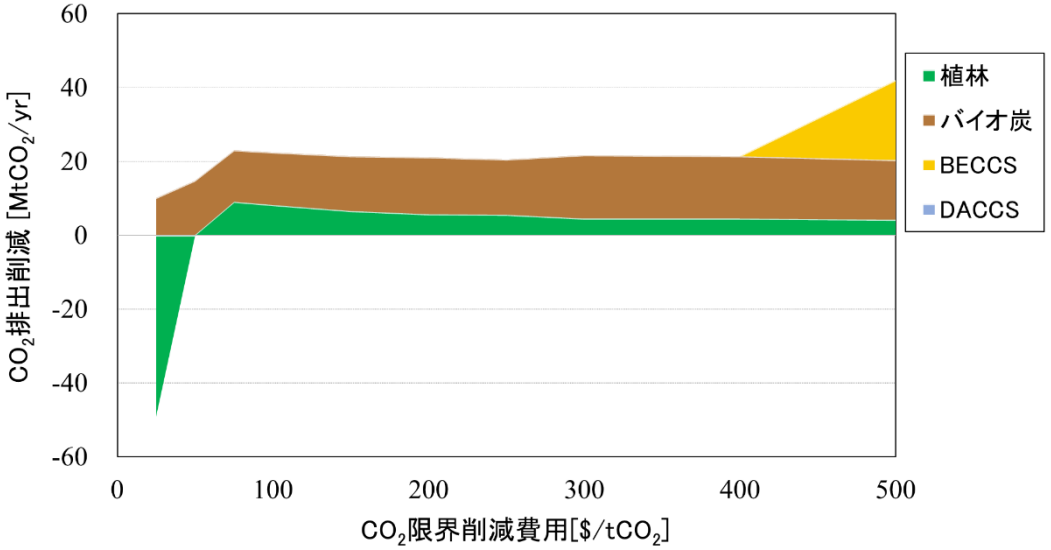


図 5.2.3-7　2050 年における CCS 技術の経済的排出削減ポテンシャル（日本）

2030 年では植林とバイオ炭のみが導入され、BECCS と DACCS は導入されなかった。2050 年においては、25$/tCO$_2$ で森林を伐採してエネルギーに利用する結果となった。また、400$/tCO$_2$ 以下の領域では、2030 年と同様に植林とバイオ炭のみが導入され、500$/tCO$_2$ で BECCS は導入されるものの、DACCS は導入されなかった。500$/tCO$_2$ での経済的排出削減ポテンシャルの合計は 42MtCO$_2$/yr で、世界全体の 0.1%であった。

b.　2050 年における日本での CCS 技術の経済的排出削減ポテンシャル

日本においても、世界と同様、2050 年における BECCS と従来 CCS 技術の経済的排出削減ポテンシャルを評価した。その結果を図 5.2.3-8 に示す。

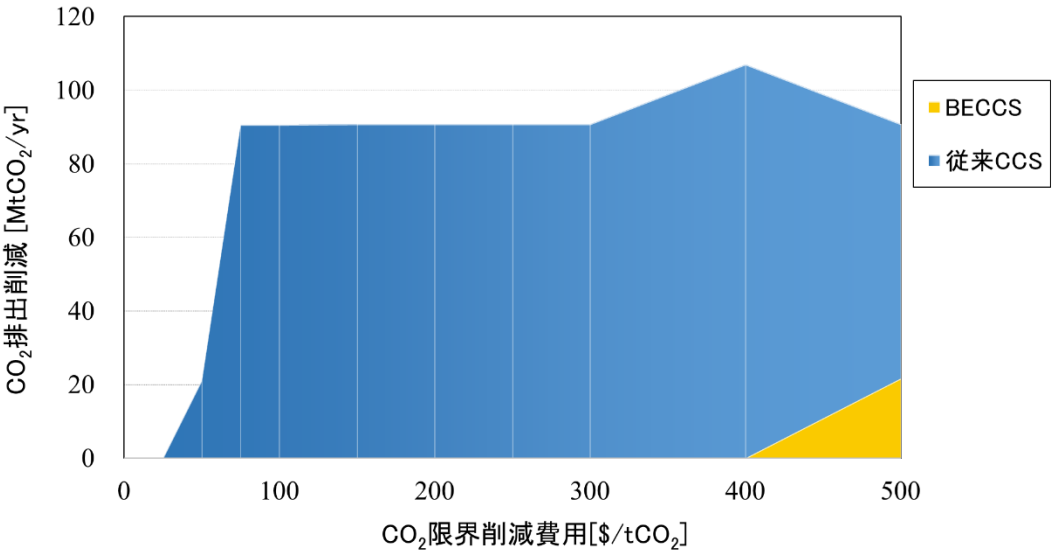


図 5.2.3-8　2050 年における CCS 技術の経済的排出削減ポテンシャル（日本）

BECCS の経済的排出削減ポテンシャルは小さく、従来の CCS 技術のポテンシャルが大部分を占める結果となった。また、経済的排出削減ポテンシャルの合計は 120Mt 未満であり、これは CCS 長期ロードマップに記されている 2050 年時点の CO_2 貯留量の目安である年間約 120～240Mt（約 1.2～2.4 億 t）に達しなかった。この理由として、表 5.2.3-2 および表 5.2.3-3 に示すとおり、日本は CO_2 貯留ポテンシャルが小さいこと、また本分析では、全世界に同じ CO_2 限界削減費用を用いて経済的排出ポテンシャルを評価したため、コストの高い CO_2 の海外輸送が行われなかったことが挙げられる。

③ 2050 年 CN 達成に必要な CO_2 貯留量と CO_2 限界削減費用

b 項で示したとおり、CO_2 の海外輸送が行われなかった場合、日本での CCS 技術の経済的排出削減ポテンシャルの合計は、CCS 長期ロードマップに記されている 2050 年時点の CO_2 貯留量の目安に達しなかった。そこで、2050 年に CN を達成するとしたシナリオに、CO_2 の海外輸送・貯留を可能とし、かつ海外クレジットを活用しないケースと、海外クレジットを活用したケースを織り込んで、2050 年における日本の CO_2 回収・貯留量および CO_2 限界削減費用を評価した。

- ケース 1：海外への CO_2 の輸送・貯留が可能（海外への CO_2 輸送可能量は、2013 年 GHG 排出量の 6 分の 1 に相当する 235MtCO_2/yr）、かつ海外クレジット活用せず
- ケース 2：海外クレジット活用

その結果を図 5.2.3-9 と表 5.2.3-4 に示す。

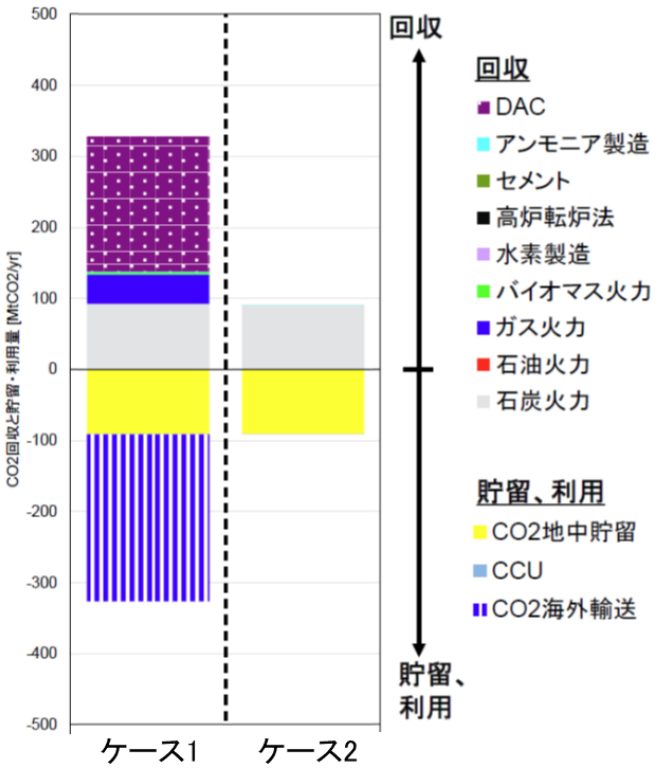


図 5.2.3-9 2050 年 CN 達成時の日本の CO_2 回収・貯留量

表 5.2.3-4 2050 年 CN 達成時の CO_2 限界削減費用

ケース		CO_2 限界削減費用
No.	内　　容	[$/tCO_2$]
1	海外への輸送・貯留の活用	525
2	海外クレジットの活用	168

日本で回収した CO_2 を海外へ輸送し貯留できるケース 1 では、CO_2 限界削減費用は 525$/tCO$_2$ と 500$/tCO$_2$ は超えるものの、DAC が導入されることによって、海外輸送を含めた貯留量は 300MtCO_2/yr を超え、2050 年時点の CO_2 貯留量の目安を満足した。また、海外クレジットを活用したケース 2 では、ケース 1 に比べて、CO_2 限界削減費用は約 3 分の 1 に抑えられた。

5.2.4 まとめ

CO_2 の排出削減が困難な分野からの排出を削減するために必要とされる CDR 技術のうち、技術成熟度が 6 以上の DACCS、BECCS、植林およびバイオ炭において、CO_2 排出削減コストは植林が最も低く、次いでバイオ炭となっている。一方、CO_2 排出削減ポテンシャルについては、DACCS が他の技術に比べて約 4～6 倍大きい削減ポテンシャルを有している。これら 4 つの技術において、BECCS とバイオ炭はバイオマスを資源とし、BECCS と DACCS は回収した CO_2 を地下に貯留する技術であるため、これらの技術が導入されると、各技術間で同じ資源、同じ貯留層を巡る競合が生じることになる。そこで、各技術による相互影響を考慮した上で、CO_2 排出削減ポテンシャルの評価が可能な DNE21+モデルを用いて、世界全体および日本における DACCS、BECCS、植林およびバイオ炭の経済的排出削減ポテンシャルを評価した。その結果、各技術のポテンシャルにおいて、以下の関係性が認められた。

- CO_2 限界削減費用が低い領域では、植林、バイオ炭、高い領域では BECCS、DACCS の経済的排出削減ポテンシャルが大きい
- BECCS の経済的排出削減ポテンシャルの増加に伴って、植林のポテンシャルは減少、バイオ炭のポテンシャルの成長は鈍化
- DACCS の経済的排出削減ポテンシャルの増加に伴って、BECCS のポテンシャルの成長は鈍化

また、2050 年における日本での経済的排出削減ポテンシャルの合計は、世界全体の 0.1%で、CCS 長期ロードマップに記されている 2050 年時点の CO_2 貯留量の目安（年間約 120～240Mt）に達しない結果となった。そこで、2050 年に CN を達成するとしたシナリオに、CO_2 の海外輸送・貯留を可能とするケースと海外クレジットを活用したケースを織り込み、日本の CO_2 回収・貯留量と CO_2 限界削減費用を評価した。CO_2 の海外輸送・貯留を可能とするケースでは、CO_2 限界削減費用は 500$/tCO$_2$ は超えるものの、DAC が導入されることによって、海外輸送を含めた貯留量は 300MtCO_2/yr を超え、2050 年時点の CO_2 貯留量の目安を満足した。一方、海外クレジットを活用したケースでは、CO_2 の海外輸送・貯留を可能とするケースに比べて、CO_2 限界削減費用は

約 3 分の 1 に抑えられた。この結果から、DAC で回収した CO_2 を海外に輸送して貯留する、あるいは海外クレジットを活用することによって CO_2 排出を相殺できるようになれば、2050 年の CN 実現の蓋然性が高まるものと推察できる。したがって、CO_2 貯留ポテンシャルが小さい我が国では、貯留ポテンシャルの高い地域への CO_2 輸送・貯留ができる仕組みづくりや、CCS による CO_2 削減をクレジットとして取引できる制度の整備を促進する必要があると考える。

参考文献（第 5.2 節に関するもの）

1) 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）、https://www.env.go.jp/content/900440767.pdf、(アクセス日 2025.02.17)
2) IPCC WG3 AR6: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (2022)
3) 経済産業省：ネガティブエミッション市場創出に向けた検討会とりまとめ（2023 年 6 月）、https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/negative_emission/pdf/20230628_1.pdf、(アクセス日 2025.02.17)
4) Alexandre Tisserant, et al.: Life-cycle assessment to unravel co-benefits and trade-offs of large-scale biochar deployment in Norwegian agriculture, Resources, Conservation & Recycling, 179 (2022), 106030
5) IPCC: Appendix4 Method for Estimating the Change in Mineral Soil Organic Carbon Stocks from Biochar Amendments: Basis for Future Methodological Development, (2019)
6) Maryam Nematian, et al.: A techno-economic analysis of biochar production and the bioeconomy for orchard biomass, Waste Management, 135 (2021), pp. 467-477
7) Ongama Soka, et al.: A feasibility assessment of the production of char using the slow pyrolysis process, Heliyon, 6 (2020), e04346
8) Mahdi Fasihi, et al.: Techno-economic assessment of CO_2 direct air capture plants, Journal of Cleaner Production, 224 (2019), pp. 957-980
9) 秋元圭吾、佐野史典：2050 年カーボンニュートラルのシナリオ分析（中間報告）、総合資源エネルギー調査会　基本政策分科会、https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/043/043_005.pdf、(アクセス日 2025.02.17)

5.3　DNE21+の拡張

5.3.1　年間時間ステップの拡張検討

(1) 時間解像度向上モデルの概要

これまで、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+(Dynamic New Earth 21+)[1),2)]では、電力需要について年負荷持続曲線を基に、電力負荷の大きさによって、図 5.3.1-1（左）に示すように 1）瞬時ピーク、2）ピーク、3）中間、4）オフピークの 4 時間帯に区分し、それぞれ需給バランスがとれるようにモデル化してきた [3)]。しかし、4 つという時間分解能では、再エネによる日内発電量の変動や季節による需要の変化などを十分に両立させて、需給バランスを評価出来ず、本来必要な蓄電コスト

等を過小評価する懸念がある。そこで別途、系統統合費用関数を想定し、モデル内で評価している。また、日本については、日本エネルギー経済研究所・東大の電源モデルで、VRE 比率に応じた系統統合費用を算定することで精緻化している[4]。なお、R. Komiyama[5]らのように、日本を対象に、10 分間隔（1 年 52,560 分割）や 1 時間間隔（1 年 8,760 分割）など、細かい時間分解能で評価している事例もある。IEA TIMES モデル[6),7)]では、分析対象を特定の国・地域に限定したり、世界をいくつかのブロックに分けた上で、季節レベル、昼夜レベルなどの時間階層を設定することで、計算コストを抑制しつつ、ある程度適切な評価が可能な工夫がなされている事例もある。モデルはすべての事象を表現できるわけではないので、分析の目的、計算コスト、データ入手等の観点を踏まえて適切な水準のモデル化を行うことが望ましい。また、必要に応じて、複数のモデルを組み合わせて分析するなどの対応をとることも重要である。

他方、近年計算機、また最適化ソルバーの性能も向上し、また各種データ入手もしやすくなってきていることから、複数のシナリオ分析が現実的な計算時間で実現できる範囲で、時間分解能を細かくする改良を行った。

電力需給バランスについて、図 5.3.1-1（右）に示すように 1 年を 3 か月単位での 4 区分（春夏秋冬相当）に分けた上で、それぞれについて 1 日を 4 時間帯に分け 16 時間帯とし、これに瞬時ピーク時間帯を合わせた、17 時間帯としてモデル化した。春（3～5 月）、夏（6～8 月）、秋（9～11 月）、冬（12～2 月）に対し、24 時間を Ⅰ［7～10 時）、Ⅱ［10～17 時）、Ⅲ［17～20 時）、Ⅳ［20～7 時）の 4 つに分割した。更に、1 年を 8,760 時間とした際に最も電力需要の多い 3 時間を瞬時ピーク時間帯とした。瞬時ピーク時間帯区分は事実上 kW 制約に相当する。

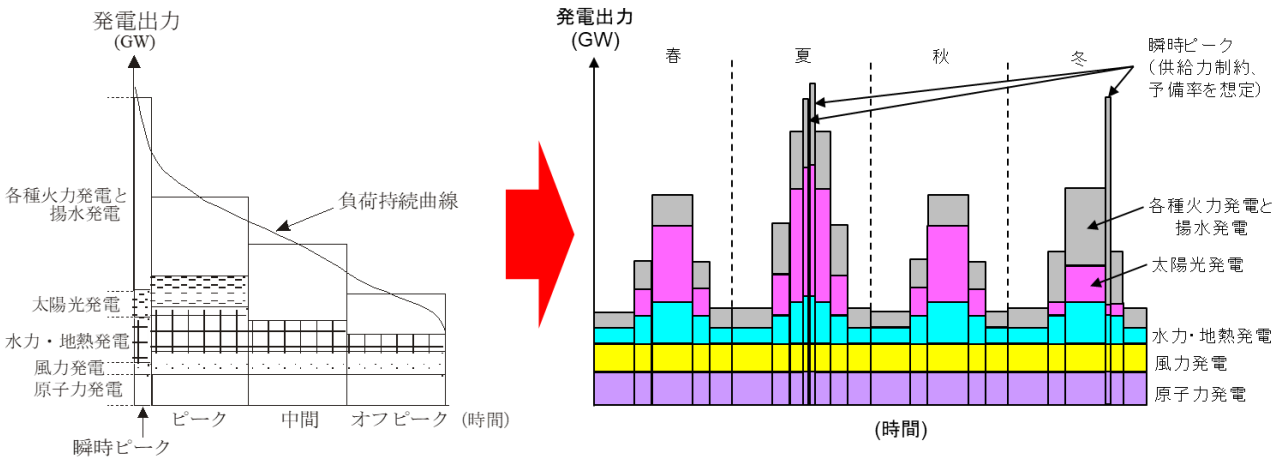


図 5.3.1-1　改良前（左）と改良後（右）の DNE21＋の電力需要曲線

電力需給バランスを 17 時間帯で扱うに当たり、各時間帯における電力需要量と電力供給可能量を設定する必要がある。

(2)項では電力需要量推計の改良について記載する。電力需要量の推計手順としては図 5.3.1-2 に示すように、将来の GDP 予測や現在の気温データなどの電力需要の説明変数を想定し、各要素による電力需要を推計する。それらを足し合わせ、1 年 8,760

時間の時間分解能で、全世界 54 地域について推定し、17 時間帯に割り当てる[8)]。日本における電力需要の推定例として、図 5.3.1-3 のように 1 年 8,760 時間の電力需要が 17 時間帯に整理される。

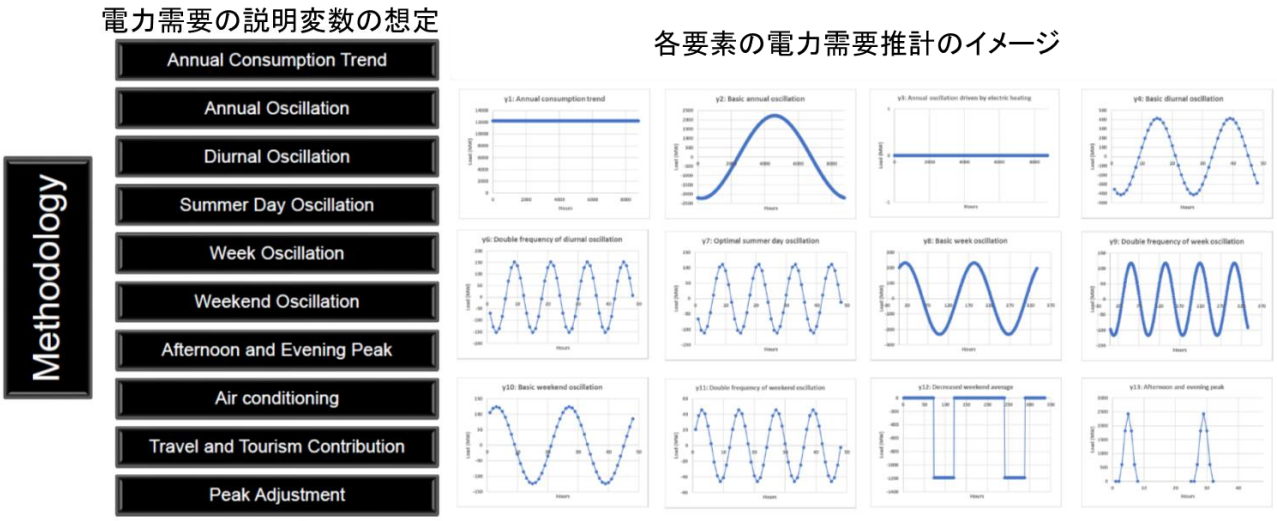


図 5.3.1-2 電力需要の説明変数の想定（左）と各要素の電力需要推計のイメージ（右）

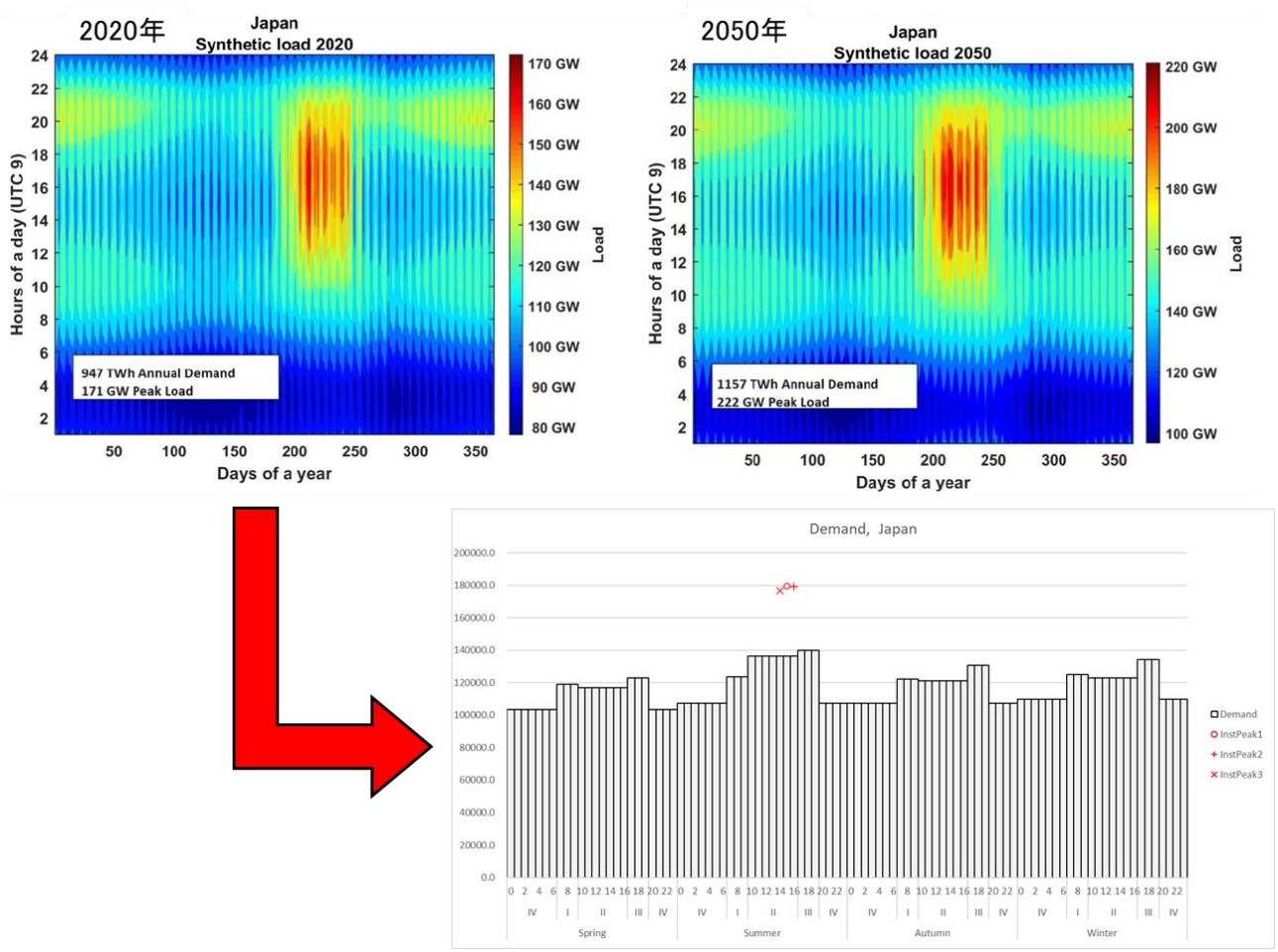


図 5.3.1-3 電力需要推計例：日本

(3)項では電力供給量（＝発電量）推計の改良について記載する。電力供給量は発電設備出力に設備利用率と該当時間帯の時間数を掛け合わせたものとして推計する。設備利用率について、火力発電所のような出力調整可能な電源については、最大設備利用率を与えた上で、モデル最適化結果として時間帯毎に発電量が決定される。一方、太陽光発電と風力発電については、出力が時間帯に応じて変動し、自由に調整できない発電技術として考え、Renewables.ninja[9]から得られる地域毎、1 年 8,760 時間の設備利用率を 17 時間帯に整理したものを与える。具体的にはまず、Renewables.ninja から現地時間で指定年の太陽光発電、風力発電の 8,760 時間の設備利用率データを取得する。推定した電力需要データにおいて、ピーク 3 時間帯を特定し、そのピーク時間帯の各設備利用率に期待できる出力割合を係数として掛けたものを瞬時ピークの設備利用率とする。その他の時間帯については、該当する 16 時間帯のそれぞれに割り振り、その平均値を設備利用率とする。日本における太陽光と風力の電力供給の推定例を図 5.3.1-4、図 5.3.1-5 に示す。

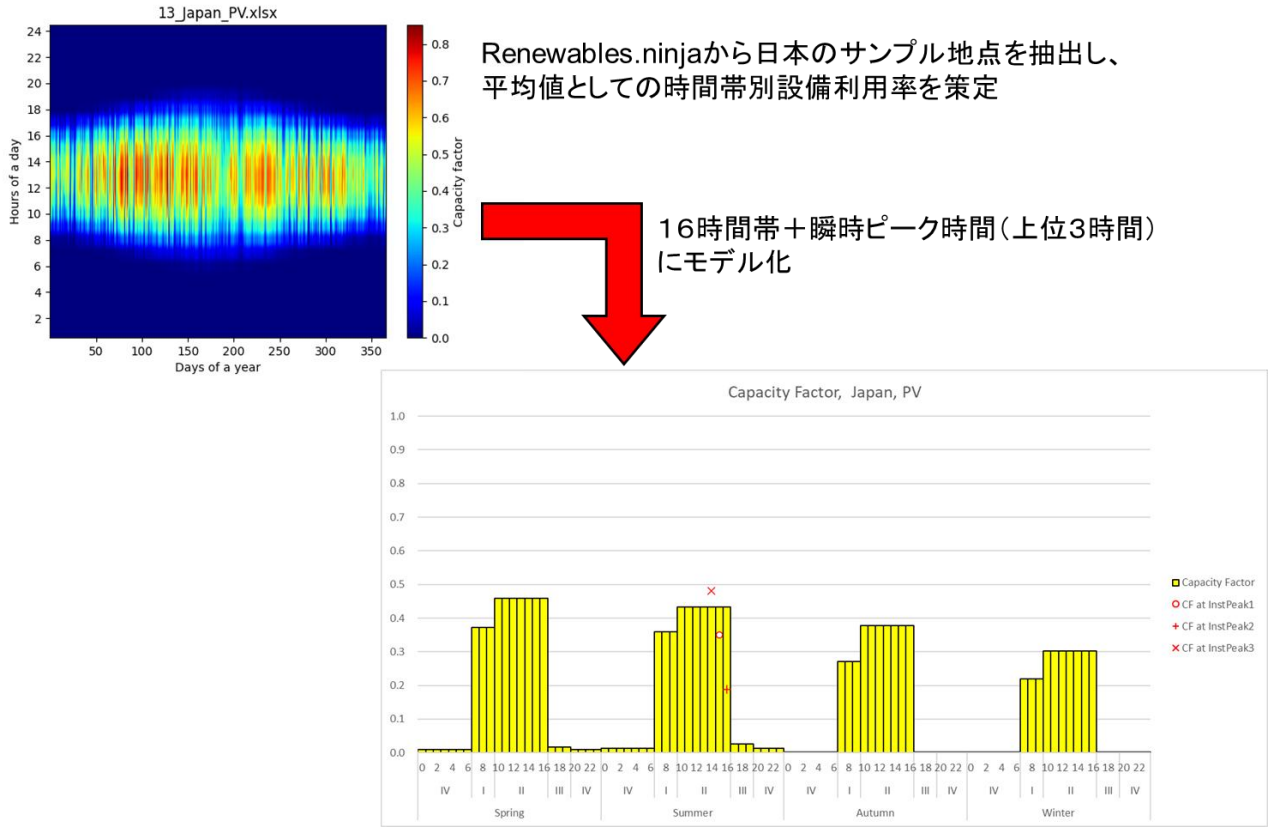


図　5.3.1-4　電力供給推計例：日本の太陽光

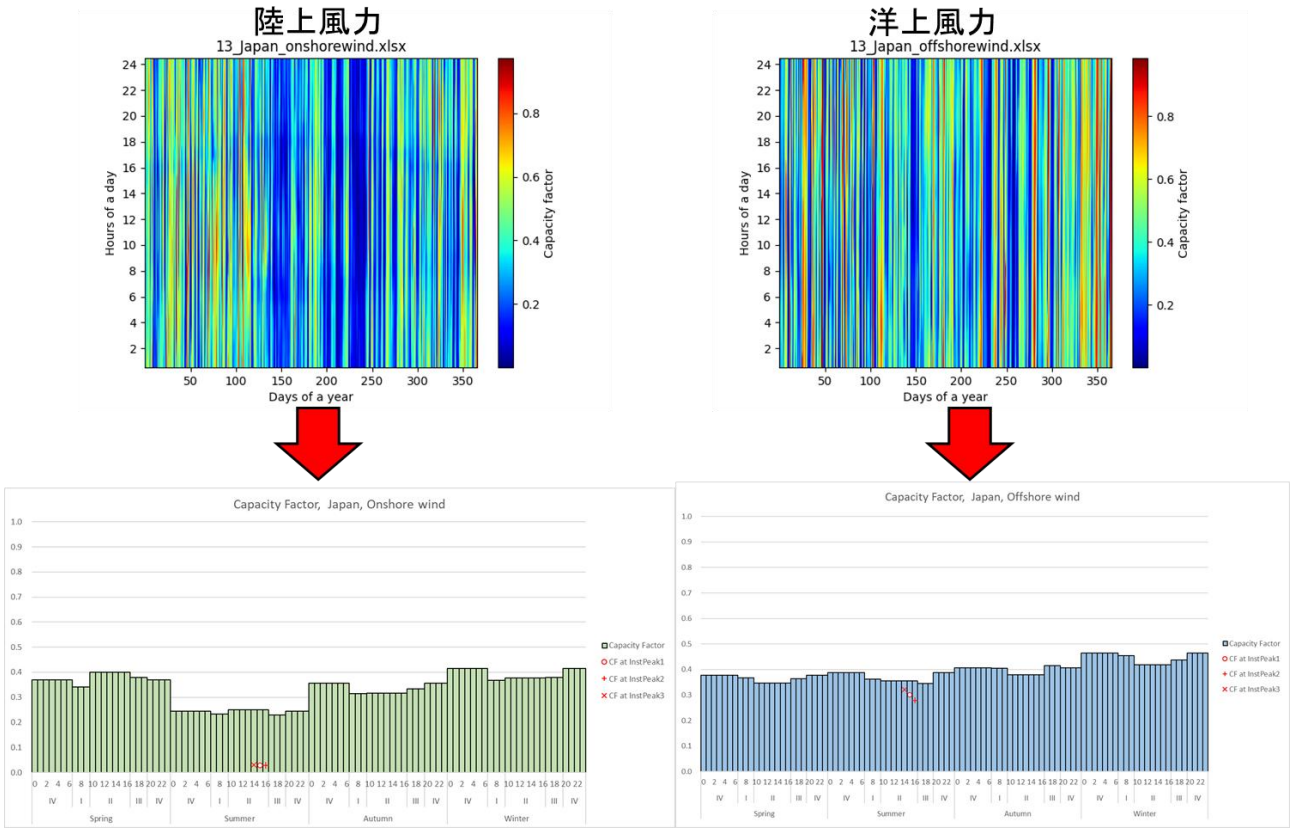


図　5.3.1-5　電力供給推計例：日本の風力

(2) Assessment of Japan's Electricity Demand with High Temporal and Spatial Resolution

概要

ネットゼロ排出政策への移行に伴い、大規模な変動性再生可能エネルギーの導入が進むことで、部門別の需要および供給パターンに大きな変化が生じると予測される。本研究では、電力部門に焦点を当て、最初にさまざまな社会経済シナリオに基づくGDPおよび人口の予測データを用い、スペクトル解析を組み込んだ重回帰分析により、2050年までの国別・地域別の年間電力需要を5年ごとに推計した。次に、過去の消費動向、気象条件、地理的要因、および予測される経済活動の変化を踏まえ、年間電力需要を一連の正弦関数に分解することで、1時間ごとの需要パターンを導出した。さらに、基準年の実際の負荷プロファイルを活用し、基準年である2020年および将来の目標年の時間別電力需要を調整・推計した。本分析の結果は、国および地域の電力部門の脱炭素化研究に貢献するとともに、DNE21+モデルを用いた統合評価において、グローバルエネルギーシステムのネットゼロ移行を支える参考データとして活用される。

後半では、高時間・高空間分解能での評価に着目し、日本の電力需要について分析した。現在の気象条件および地球温暖化の影響による将来の変化を考慮し、都道府県別・時間別の電力需要のパターンと傾向を特定した。特に、近年観測されている異常気象の影響を最も受けやすいとされる家庭部門の冷暖房需要に焦点を当てた。その結果、人口密度、経済活動、気候条件などの要因によって電力需要に大きな変動が生じることが明らかになった。これらの変動を理解することは、エネルギー供給の最適化、電力系統の安定確保、および持続可能な政策決定において重要である。本研究の成果は、日本のエネルギー計画および管理に貢献し、変化する課題への対応を支援する貴重な知見を提供することが期待される。

Abstract

As we transition toward a net-zero emissions policy for climate change mitigation, substantial shifts in sectoral demand and supply patterns are anticipated due to the large-scale integration of variable renewable energy sources. This study focuses on the electricity sector. Using projected GDP and population data for various socio-economic scenarios, we first estimate annual electricity demand at both national and regional levels through multiple linear regression incorporating spectral analysis, covering the period up to 2050 in five-year intervals. The annual electricity demand is then decomposed into a series of sine functions to derive hourly demand patterns, considering historical consumption trends, weather conditions, geographical factors, and anticipated economic activity shifts. Real load profiles from the base year are utilized to calibrate and project hourly electricity demand for the reference year 2020 and future target years. The results of this analysis will contribute to national and regional power sector decarbonization studies and serve as input for integrated assessments of the global energy system's transition to net zero, using the DNE21+ model.

The second part of the study delves into the assessment of Japan’s electricity demand, emphasizing high temporal and spatial resolution analysis. By utilizing current weather conditions and future projections due to global warming effects, the research aims to identify patterns and trends in electricity demand across prefecture level at hourly resolution. We particularly focus on residential heating and cooling demands as those are mostly affected due to extreme weather conditions as recently observed. The findings reveal significant variations in demand influenced by factors such as population density, economic activity, and climate conditions. Understanding these dynamics is crucial for optimizing energy supply, enhancing grid reliability, and informing policy decisions aimed at sustainability. Ultimately, this work contributes valuable insights to Japan's energy planning and management in the face of evolving challenges.

① Introduction

Japan has relatively steady electricity demand and supply over the last two decades as shown in Figure 5.3.1-1 mostly due to stable economy and stagnant population. As the country is aiming at net-zero emission by 2050, large scale contribution is expected from the electricity sector with massive integration of solar PV and wind turbines in the generation mix. Potential deployment of more electric vehicles and data centers would also increase the demand. However, improvement of energy efficiency and depopulation might keep the demand almost steady in coming years as found in previous studies[10]. In order to obtain optimal dispatch policy of the emission free electricity system, we need to identify the future electricity demand precisely. Considering historical pattern, population dynamics, geographical variation and transmission limitations, we aim to identify future hourly electricity demand at prefecture level so that further analysis could be performed with high temporal and spatial resolution.

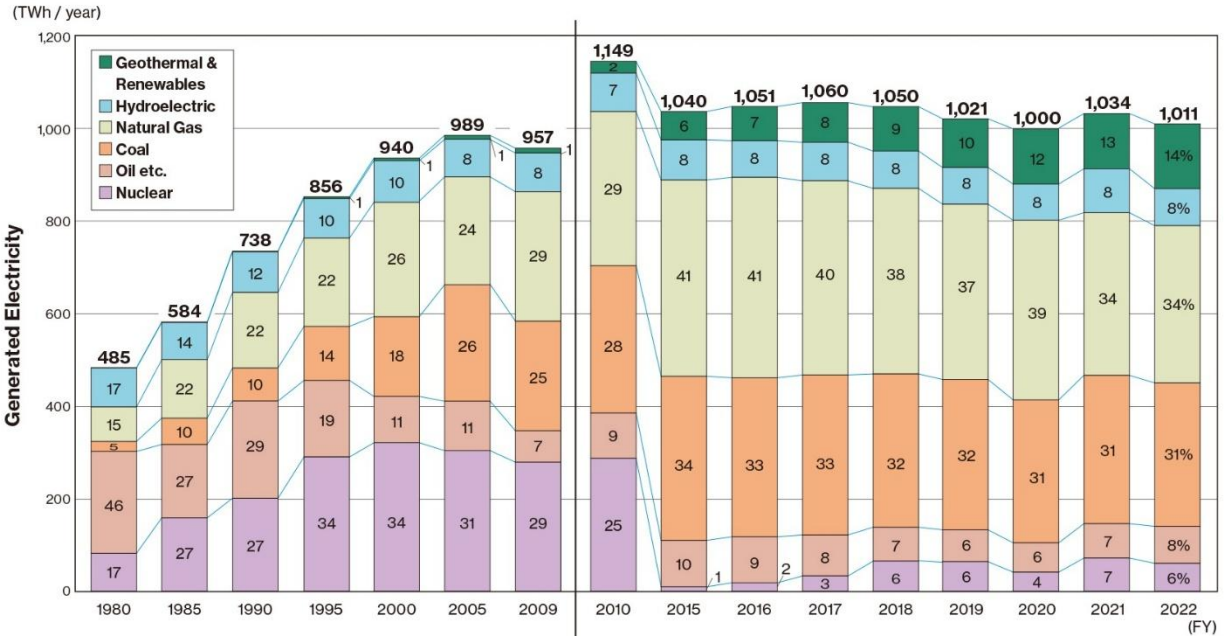


Figure 5.3.1-1 Japan's Historical Electricity Generation[11)]

② Methodology

There have been several studies on short-term and long-term electrical load forecasting, a review of which reveals that regression models are widely used for long term prediction. These methods try to relate consumption of electricity directly with GDP and economic growth. Some methods widely used in IAMs also focus on typical demand patterns per end-use function which require large amount of end-use historical data that is not available for most of the developing regions of the world. In this analysis, we mostly adopt the methodology proposed by Toktarova et al.[12)] for long term hourly load forecasting for countries of the world. However, we are extending the analysis by considering electricity trade, diffusion of new electricity driven technologies through introduction of additional sine functions.

Our methodology for modelling electricity demand is based on historical demand profiles and the relationship of the demand with a few easily accessible parameters. Although this methodology could be applied to any country or region of the world, we initially modelled 54 countries and regions as per DNE21+ model defination.

Economic growth and electricity consumption are closely related. The world global electricity demand trend was found as a function of GDP per capita by a two-term exponential function[12)]. In this paper, we consider GDP per-capita in purchasing power parity (PPP) as the economic indicator. There has been several discussions and debate on the choice of GDP by ppp and MER (market-exchange rate) for long-term scenario analysis[13)]. However, we adopted GDP-ppp as it reflected better statistical coherence for the historically available data. Long term GDP and population projections were adopted from the existing DNE21+ model for the Shared Socio-economic Pathway 2 (SSP2)[14)] in which the world follows a path in which social, economic, and technological trends do not shift markedly

from historical patterns. Development and income growth proceed unevenly, with some countries making relatively good progress while others fall short of expectations.

Correlation between electricity demand per capita (E_cap^tj) and GDP per capita (E_{cap}^{tj}) for the year 2012 was analyzed to represents the dependence between those for a certain country *j* and year *t* as given in Eq. (5.3.1-1).

$$E_{cap}^{tj} = a.(e^{\left(b.GDP_{cap}^{tj}\right)} - e^{\left(c.GDP_{cap}^{tj}\right)}) \quad (5.3.1\text{-}1)$$

Coefficients are: a=7.721×10^4 kWh, b=-1.95×10^{-6} 1/(€/capita), c=-5.655×10^{-6} 1/(€/capita).

Future projection of peak demand per capita is calculated based on Eq. (5.3.1-2).

$$Peak^{tj} = a.GDP_{cap}^{tj} + b \quad (5.3.1\text{-}2)$$

Coefficients are: a = 0.0456 W/ €, b = 14.48 W/capita.

Annual electricity demand and peak projection for the reference year (2020) and other analysis years were calculated using the above equations. It is to be noted that actual values for the year 2020 was excluded due to Covid effect.

③ Key Factors for Load Forecasting

The sum of 18 sine functions describes various relationships between demand and underlying influencing parameters as shown in Eq. (5.3.1-3).

$$load(x) = \sum_i y_i(x) = \sum_i a_i sin^{n_i}(b_i x + c_i) + d_i \quad (5.3.1\text{-}3)$$

Where, x is the time in hours since the beginning of the year, running from 1 to 8760. Additional parameters are ai the amplitude, b_i the frequency, c_i the phase shift, d_i the additional ordinate offset, ni the power of sine (only values 1 and 2 are used), and *i* denotes the number of sine functions used to describe the full load curve. The 18 sine functions present trends and seasons at different levels as listed below, as per A. Toktarova et al.'s paper[12].

- Annual consumption trend (y_1): Average demand in MW
- Annual oscillation:
  - Basic annual oscillation (y_2)
  - Annual oscillation driven by electric heating (y_3)
- Diurnal oscillation
  - Basic diurnal oscillation (y_4)
  - Diurnal oscillation driven by low electricity prices (y_5)
  - Double frequency of diurnal oscillation (y_6)
- Optimal summer day oscillation (y_7)

- Week oscillation
  - Basic week oscillation (y_8)
  - Double frequency of week oscillation (y_9)
- Weekend oscillation
  - Basic weekend oscillation (y_{10})
  - Double frequency of weekend oscillation (y_{11})
  - Decreased weekend (y_{12})
- Afternoon and evening peak (y_{13})
- Air conditioning
  - Day peak (y_{14})
  - Summer night peak (y_{15})
  - Winter Peak (y_{16})
- Travel and tourism contribution (y_{17})
- Maximum Demand Consumption (y_{18})

A sample calculation for different sine functions and corresponding graphs are shown in Figure 5.3.1-2. It is to be noted that not all sine functions may not be required or significant for a country.

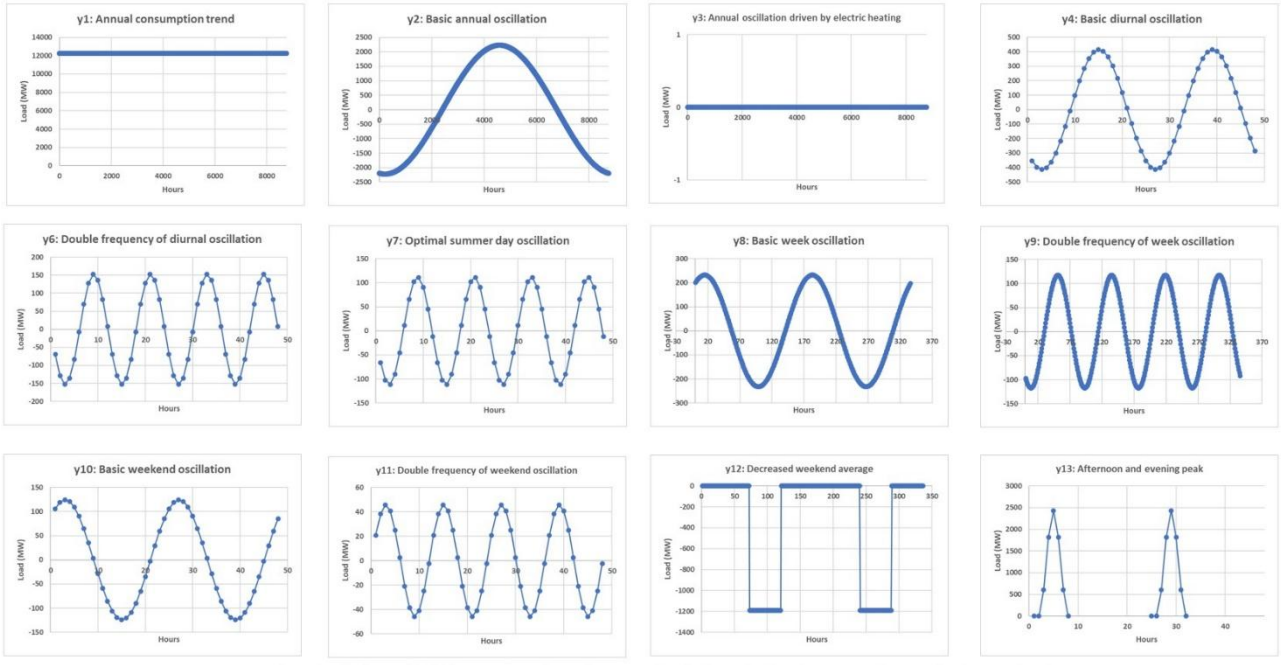


Figure 5.3.1-2 Sample Calculation of Different Sine Functions to Obtain Load-Curve

④ Results Analysis

The analysis was performed for the whole world in addition to the most representative countries. Global population and per-capita GDP assumptions along with annual electricity demand are presented in Figure 5.3.1-3 and Figure 5.3.1-4 respectively. We also compared

global electricity demand projections with International Energy Agency (IEA) Stated Policy Scenario (STEPS), Announced Pledges Scenario (APS) and Net Zero Emission by 2050 Scenario as published in World Energy Outlook 2023[15]. Country-wise electricity demand along with comparison with IEA scenarios are presented in Figure 5.3.1-5.

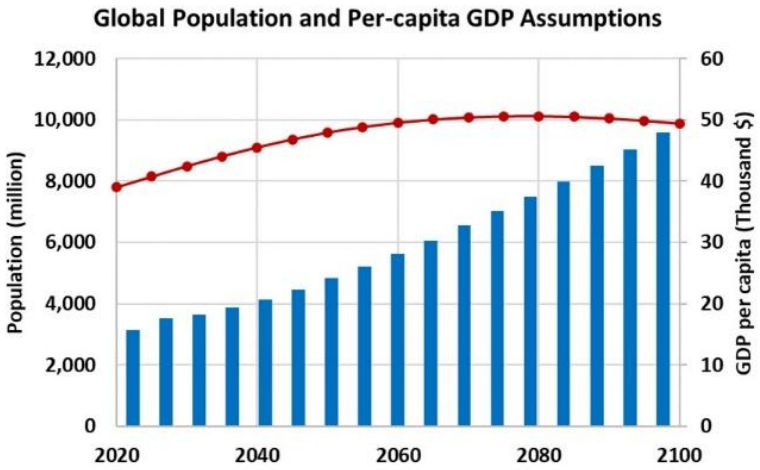


Figure 5.3.1-3 Global population and per-capita GDP projection

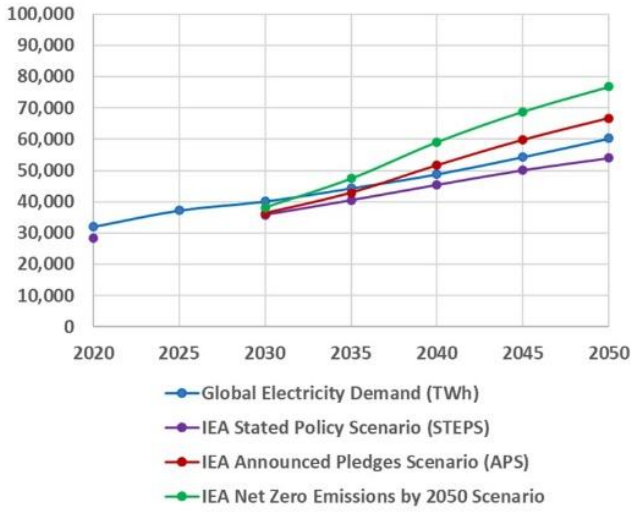


Figure 5.3.1-4 Global electricity demand projection and comparison

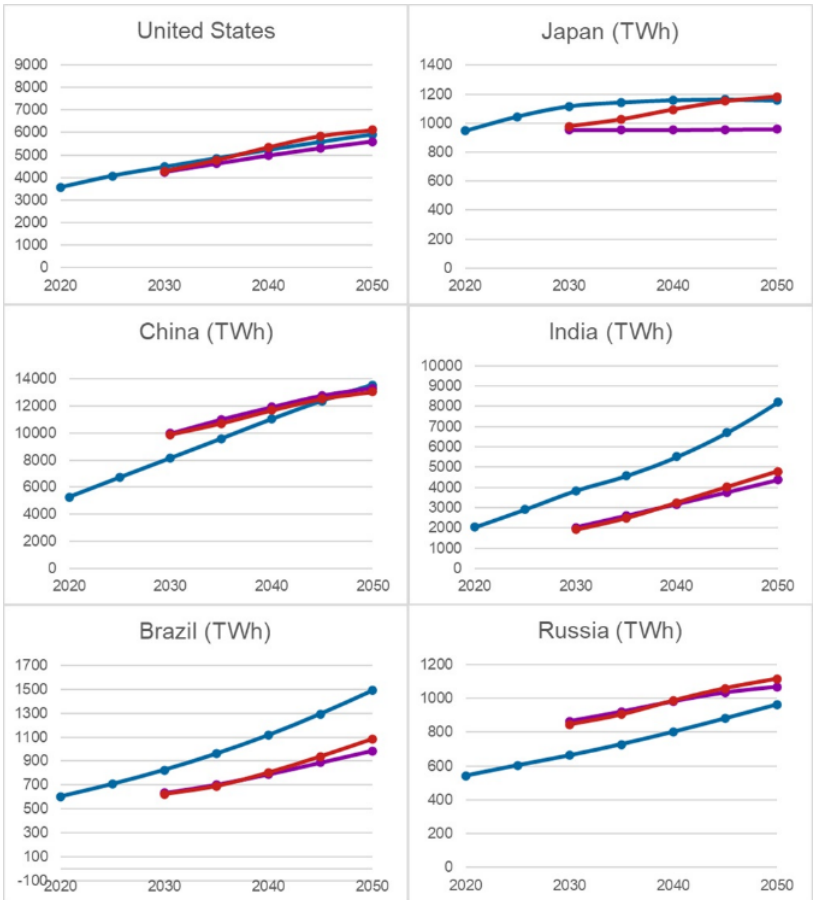


Figure 5.3.1-5 Electricity demands projection (TWh) for some countries

It is observed that for large economies like USA and China, the projected electricity demand matches closely with different IEA scenarios. However, countries with significant electricity trading opportunities like Brazil and Russia there is a difference; the reason of which might be not considering electricity import and export options in this analysis. For developed regions like UK, Germany, France, Australia etc. the growth in electricity sector is almost stable whereas it is much steeper in developing regions like India, Indonesia, South Africa etc. Countries with steady growth but decreasing population have almost stable need for electricity over the years due to large scale electrification as a measure for reducing CO_2 emissions and energy sector decarbonization.

We also analyzed future hourly load patterns for representative years for the countries and observed different dimensions as shown in Figure 5.3.1-6 (a, b, c, d). Countries with large geographical coverage like the USA shows wide seasonal variation and consistent peak-load all through the year. Whereas a country with unevenly distributed population like China shows larger peak demand during Summer. In case of Japan, the peak load remains consistent during the summer. Whereas, developing regions like India shows dual peaks initially which diminishes over time as normally observable for such countries.

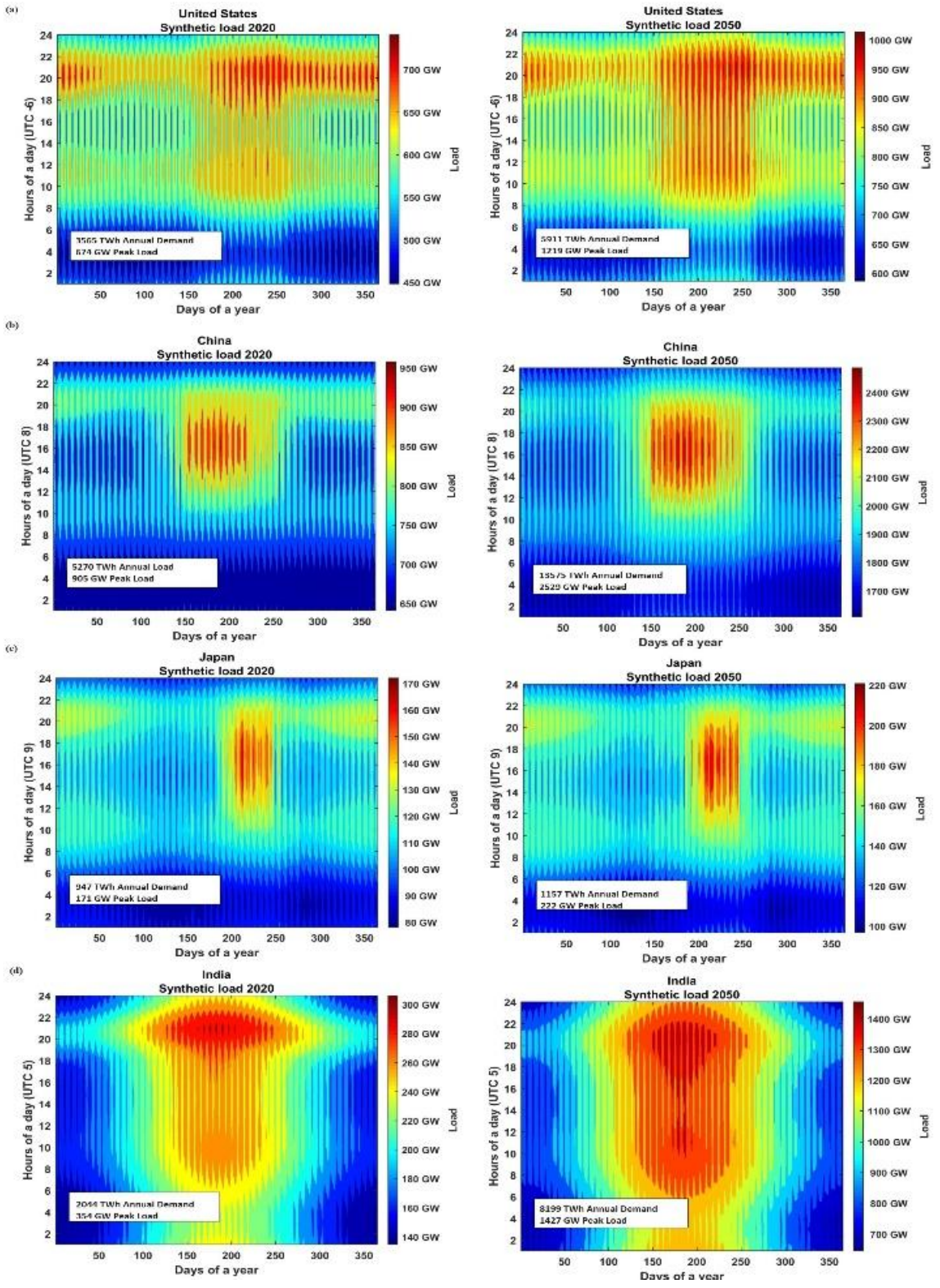
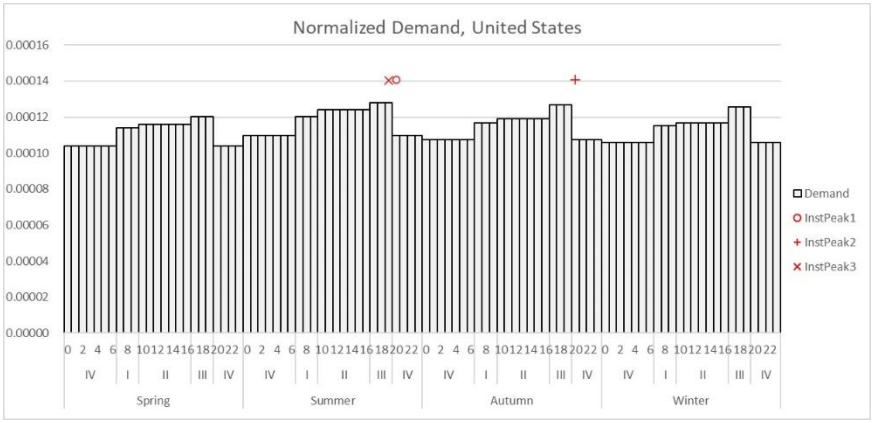
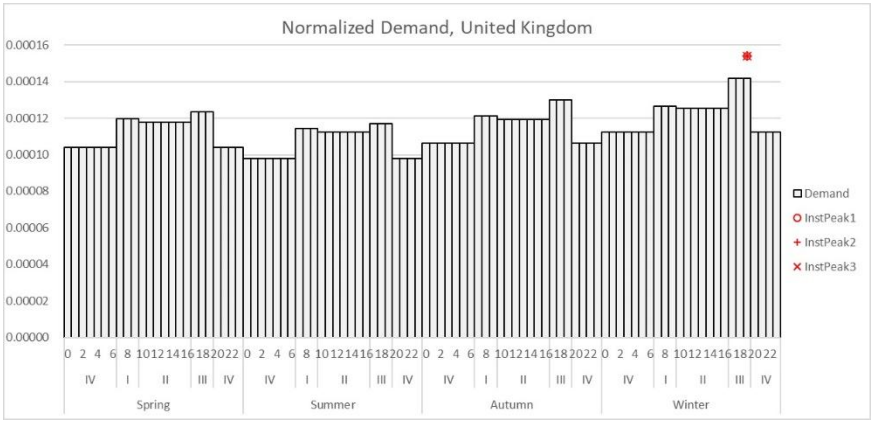
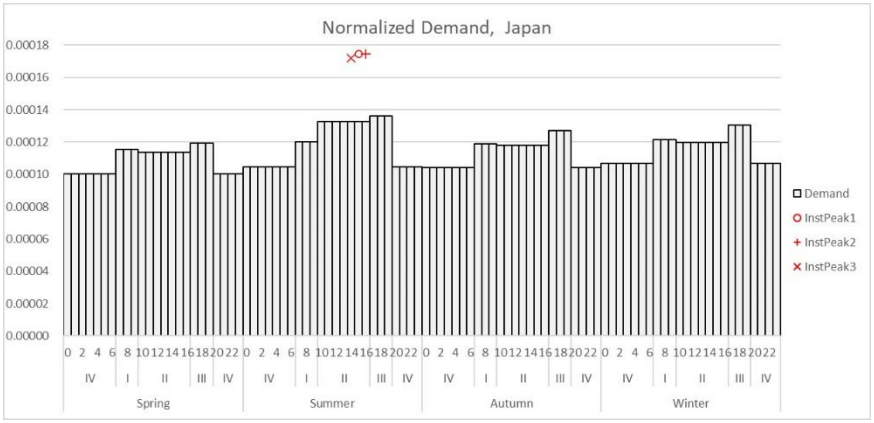


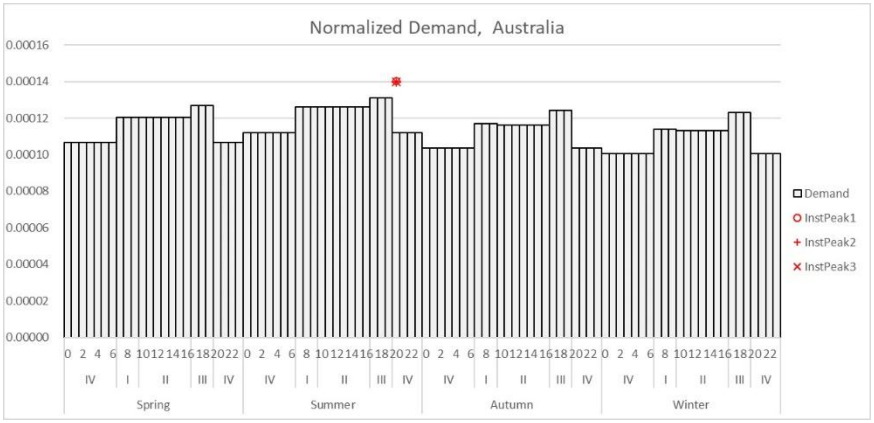
Figure 5.3.1-6 Hourly Electricity load patterns of (a) USA, (b) China, (c) Japan and (d) India for representative years.

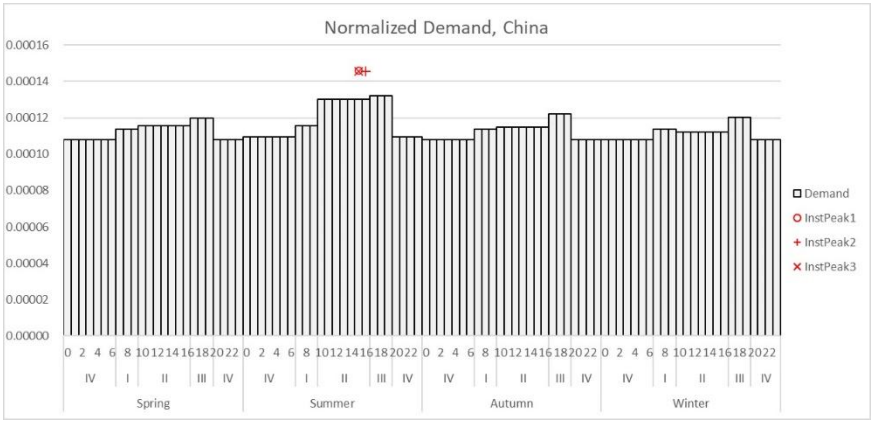
Next, we present samples of the newly adopted normalized load curves of 54 country / regional groups in Figure 5.3.1-7 which would be used in the updated DNE21+ model with newly adopted VRE potential and capacity factors.

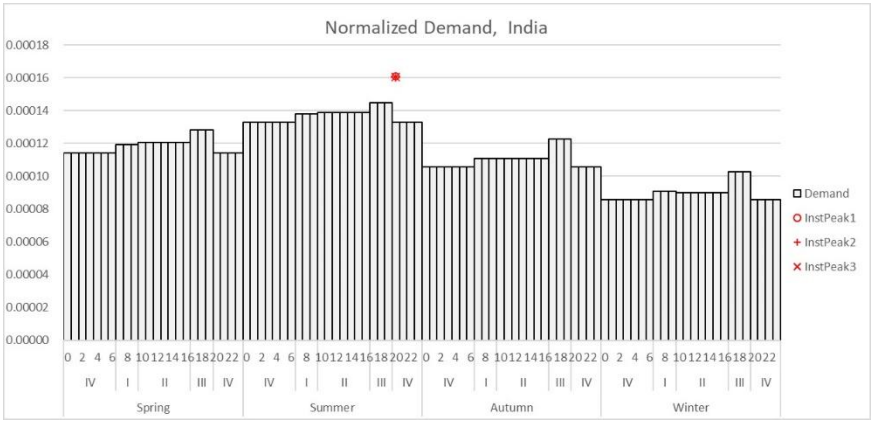

Normalized Demand, United States
0.00016
0.00014
0.00012
0.00010
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0.00000
Demand
InstPeak1
InstPeak2
InstPeak3
Spring
Summer
Autumn
Winter

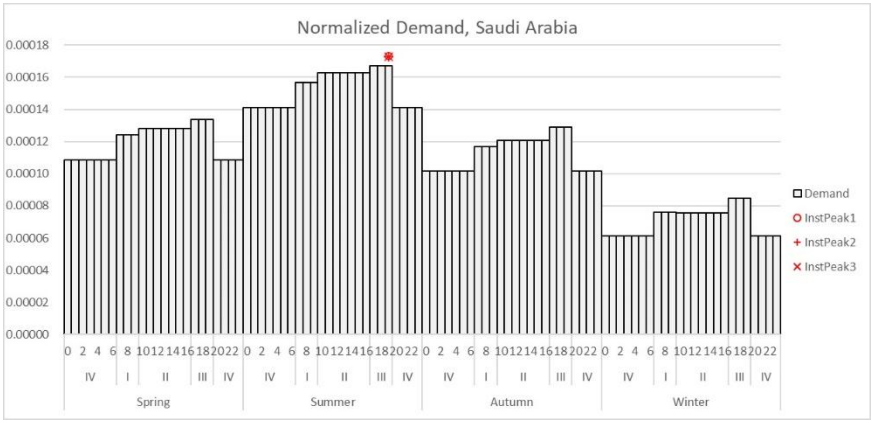

Normalized Demand, United Kingdom
0.00016
0.00014
0.00012
0.00010
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0.00000
Demand
InstPeak1
InstPeak2
InstPeak3
Spring
Summer
Autumn
Winter

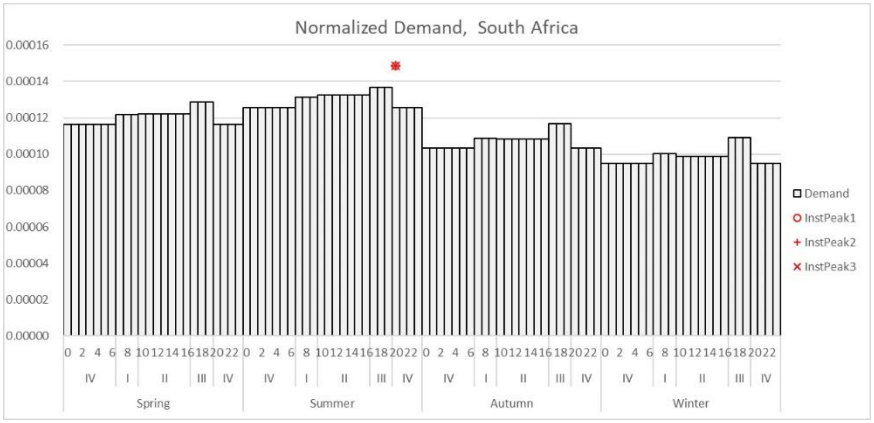

Normalized Demand, Japan
0.00018
0.00016
0.00014
0.00012
0.00010
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0.00000
Demand
InstPeak1
InstPeak2
InstPeak3
Spring
Summer
Autumn
Winter


Normalized Demand, Australia
0.00016
0.00014
0.00012
0.00010
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0.00000
Demand
InstPeak1
InstPeak2
InstPeak3
Spring
Summer
Autumn
Winter


Normalized Demand, China
0.00016
0.00014
0.00012
0.00010
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0.00000
Demand
InstPeak1
InstPeak2
InstPeak3
Spring
Summer
Autumn
Winter


Normalized Demand, India
0.00018
0.00016
0.00014
0.00012
0.00010
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0.00000
Demand
InstPeak1
InstPeak2
InstPeak3
Spring
Summer
Autumn
Winter


Normalized Demand, Saudi Arabia
0.00018
0.00016
0.00014
0.00012
0.00010
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0.00000
Demand
InstPeak1
InstPeak2
InstPeak3
Spring
Summer
Autumn
Winter


Normalized Demand, South Africa
0.00016
0.00014
0.00012
0.00010
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0.00000
Demand
InstPeak1
InstPeak2
InstPeak3
Spring
Summer
Autumn
Winter

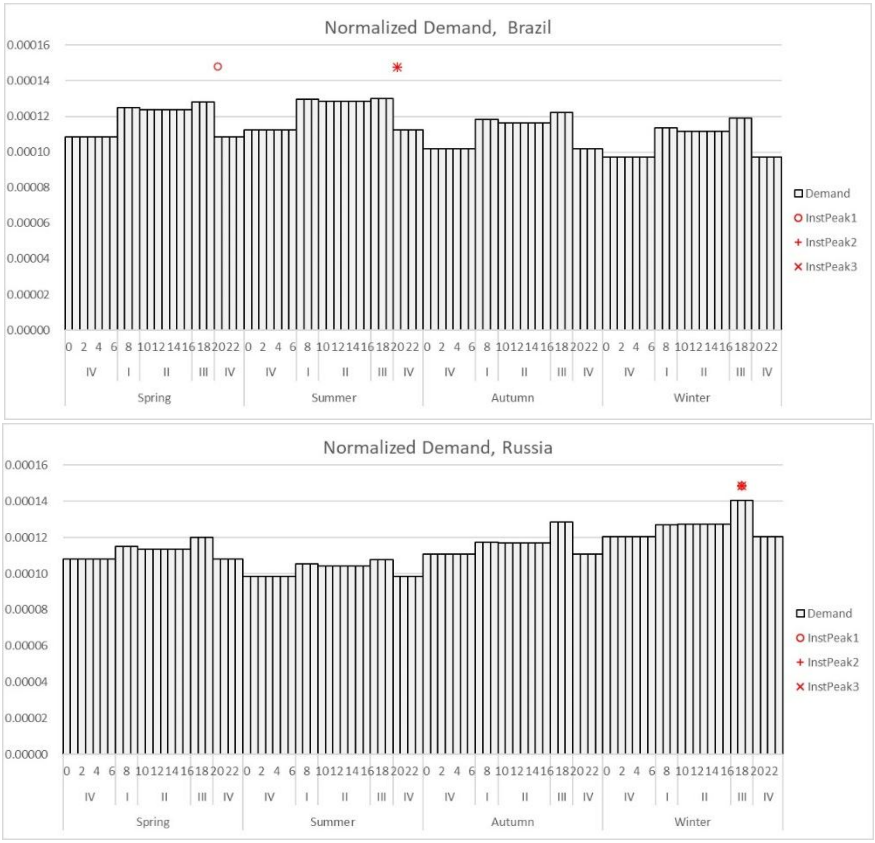


Figure 5.3.1-7 Normalized Demand Load Curves for some DNE21+ country / regions.

⑤ Japan Case Study with High-Spatial Resolution

In case of Japan, the electricity demand sees a slow but steady growth from around 1000 TWh in 2020 to stabilizing around 1200 TWh in between 2030 to 2050 as shown in Figure 5.3.1-5. International Energy Agency (IEA) Stated Policy Scenario (STEPS) and Announced Pledges Scenario (APS) also show similar results as published in World Energy Outlook 2023. The total electricity demand is then distributed among 47 prefectures of Japan based on historical trend and average ratio. Prefecture-wise demand pattern of electricity for the analysis years 1990-2021[16] reveal that even though there are vast differences in terms of demand share among prefectures, those do not vary much over the years. The average demand share of the 47 prefectures is shown in Figure 5.3.1-8.

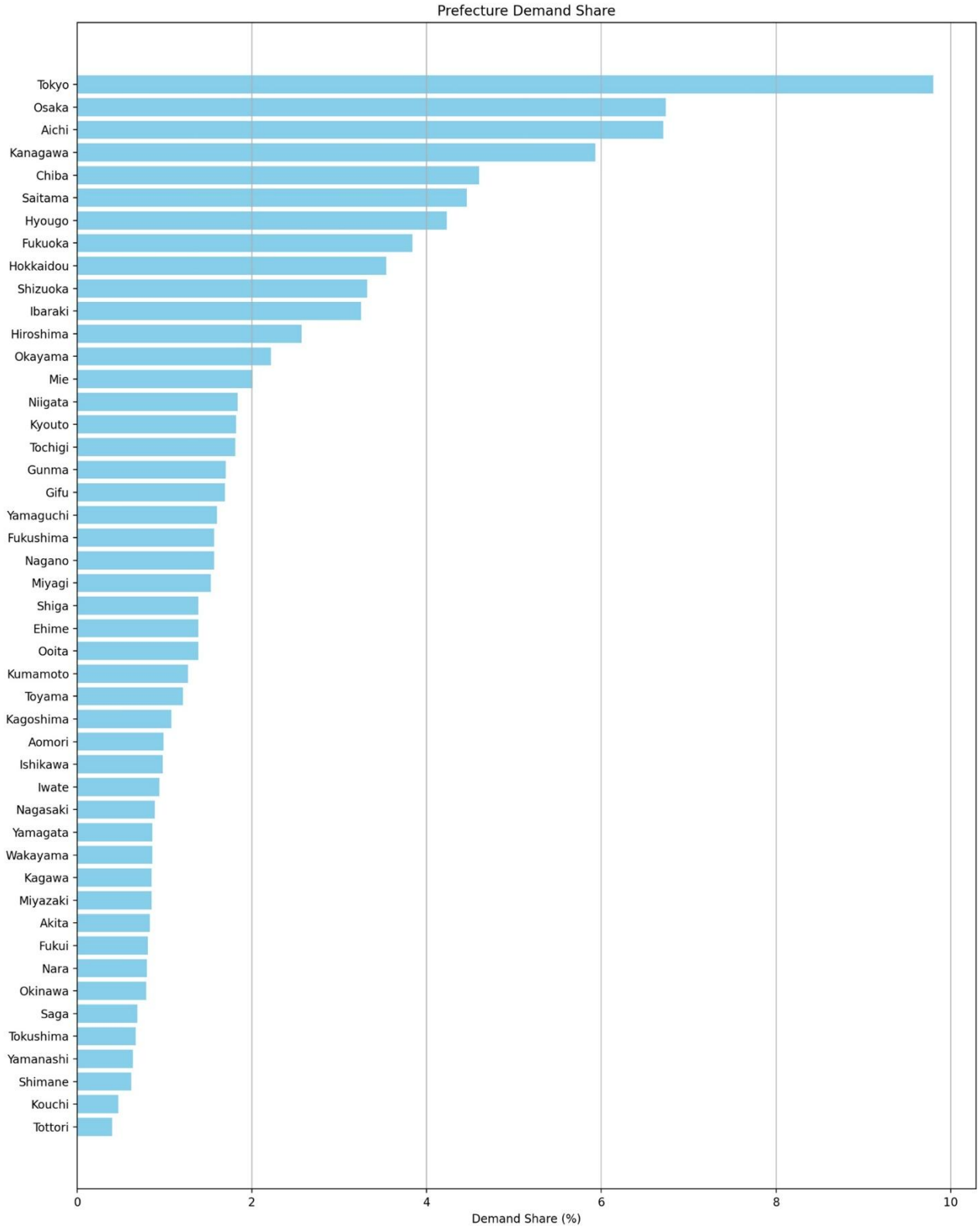


Figure 5.3.1-8 Prefecture-wise Electricity Demand share in Japan.

As Japan is an industrialized country, the daily load pattern has not changed much other than the peak values over the last fifty years. The peak load normally occurs during the summer at around 3 pm in the afternoon when most of the industrial load is in action and

cooling requirements are high. However, over the last few years there has been a change in the peak load occurrence which has shifted to winter mornings at around 9 am, mostly driven by heating requirement when offices and industries start operation as shown in Figure 5.3.1-9.

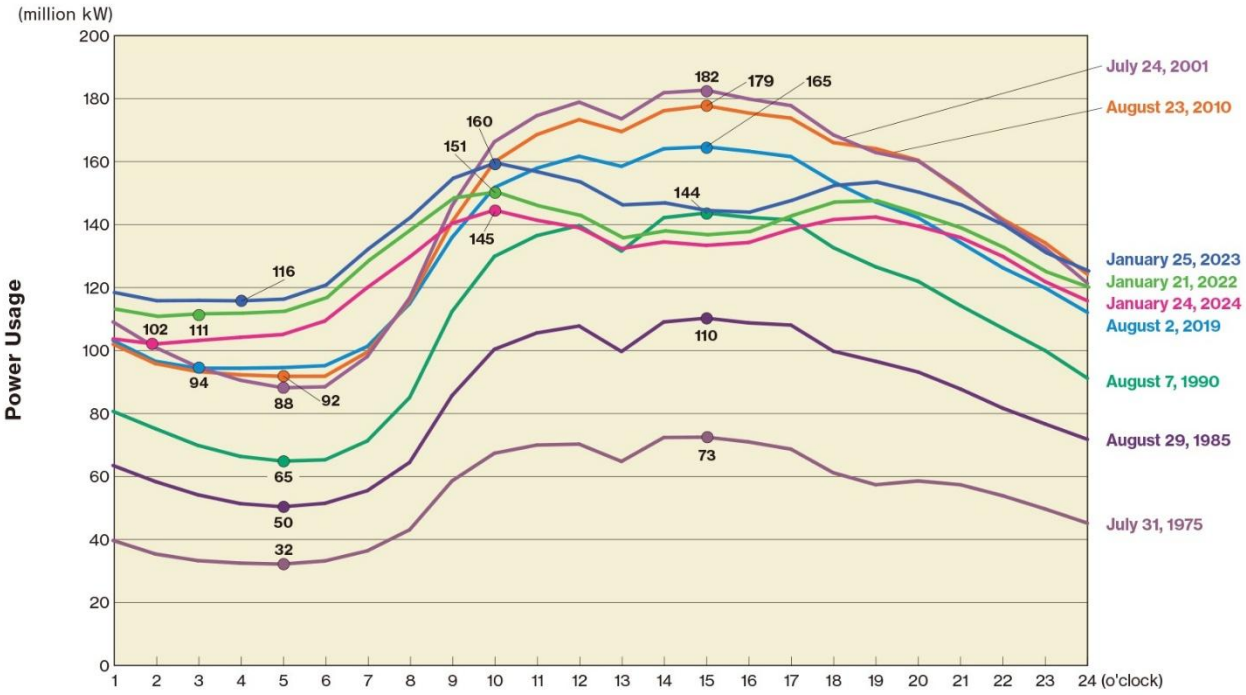


Figure 5.3.1-9 Load Curves on peak Power Days[17].

It is obvious that recently heating demand is playing a significant role in the peak power timing which might have its origin in the abnormal climatic behavior. If we consider the historical residential consumption sources, it is obvious that heating load takes almost half of the total residential load whereas cooling demand is generally less than 5% of the total as shown in Figure 5.3.1-10.

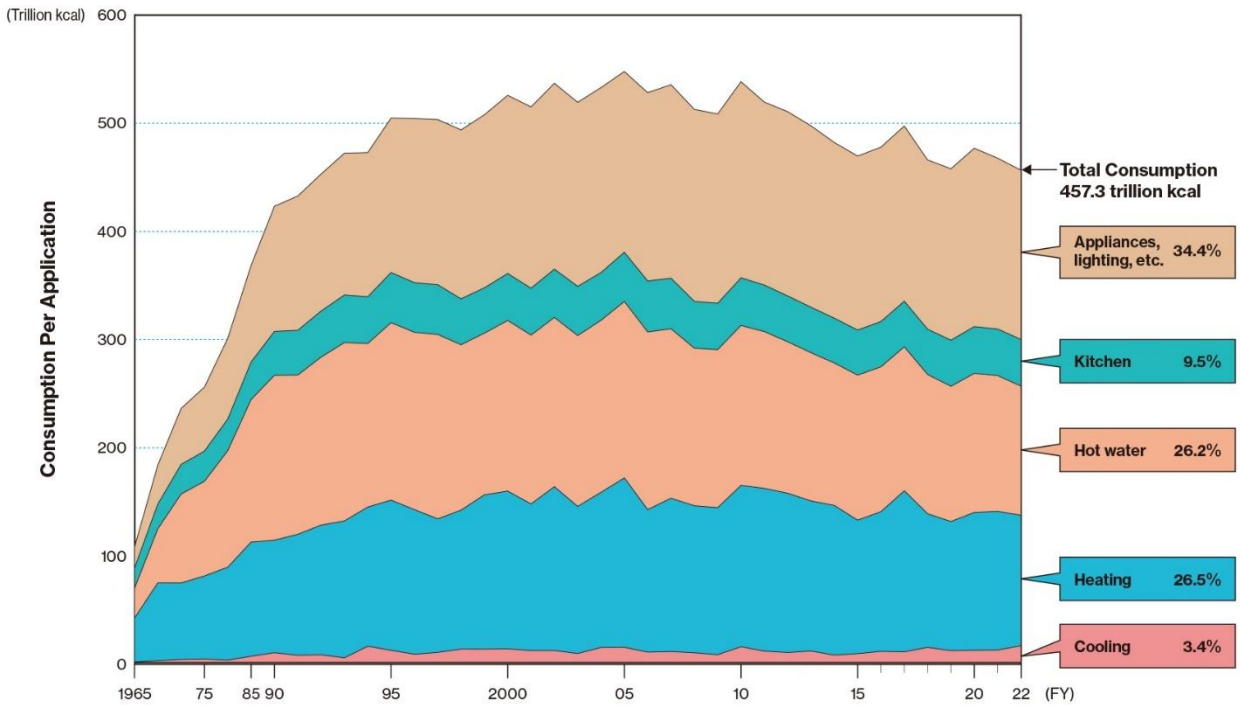


Figure 5.3.1-10 Household Energy Consumption Per Application[18].

⑥ Conclusion

Despite the widespread availability of real load profiles for European countries and the comparatively limited data for emerging and developing nations, the model produces reliable results across diverse global regions. Key factors such as the high share of conventional marginal-cost generation (e.g., hydro and nuclear power), air conditioning usage, tourism impact, industrial consumption, local temperature variations, and seasonal effects significantly influence the model's accuracy and have been integrated into its framework. This proposed electricity demand model, which relies on only a few easily accessible parameters, is applicable worldwide. Its ability to provide electricity demand forecasts at an hourly resolution for entire years makes it particularly valuable for energy scenario research related to climate change mitigation. Future developments will focus on incorporating electricity trade among countries via interconnected grids and exploring different emission reduction scenarios. Additionally, emerging technologies—such as the large-scale adoption of electricity-driven vehicles for passenger and freight transport, the continued expansion of data centers with high electricity consumption, and similar trends—can be integrated into the analysis through the appropriate selection of sine functions. This approach ensures the model remains adaptable to ongoing global transformations. As climate change increasingly influences daily energy consumption patterns, these factors must be considered in future scenario analyses. This study also identifies future electricity demand at prefecture level for Japan with hourly temporal resolution addressing the climate change effects so that future optimal dispatch policy could be formulated with net zero emission.

(3) 供給側の改良の検討

① 太陽光発電における過積載に関する調査

(1)項に記載の通り Renewables Ninja のデータを基に太陽光発電の 17 時間帯別設備利用率を想定しているが、Renewables Ninja の設備利用率は、日照データと太陽光パネル出力特性を基に計算された理論値であり、太陽光パネル容量とパワコン容量は同一であることが暗黙の前提となっている。しかし、パワコン容量より設備容量の大きな太陽光パネルを設置(＝過積載)する場合が増えており、RN 設備利用率(Renewables Ninja から求めた設備利用率)よりも設備利用率(AC)(パワコン視点≒FIT 等認定容量視点、つまり、系統から見た設備利用率)が高い場合も増えていると思われるため、調査を行った。

IEA データ[19]から過積載率と設備利用率(AC)について OECD 合計の推移を整理したものを表 5.3.1-1 に示す。経年により、過積載率、設備利用率(AC)共に上昇傾向となっている。設備利用率(AC)を過積載率で割ると、ピークカット影響を無視すれば設備利用率(DC)(パネル視点での設備利用率)に相当すると考えられるが、これは図 5.3.1-6 のようにほぼ一定となる。よって、設備利用率(DC)は経年で変わらず、設備利用率(AC)が上昇しているのは過積載によるものと考えられる。

表 5.3.1-1 過積載率と設備利用率(AC)の推移（OECD 合計）

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
設備容量(DC,MW)	168,784	201,214	233,194	271,801	324,372	386,898	463,001	557,101
設備容量(AC,MW)	160,933	189,272	217,113	250,220	295,201	346,963	411,800	491,383
過積載率	104.4%	105.7%	106.9%	108.1%	109.3%	110.8%	112.0%	112.9%
発電量(GWh)	181,858	216,150	261,941	301,788	349,511	421,207	503,073	622,732
設備利用率(AC)	14.1%	14.1%	14.7%	14.7%	14.6%	15.0%	15.1%	15.7%

※設備容量(DC)はパネル容量、設備容量(AC)はパワコン容量に相当。

※各年の設備容量は該当年末と前年末の平均値。本項内では以後も同様の扱い。

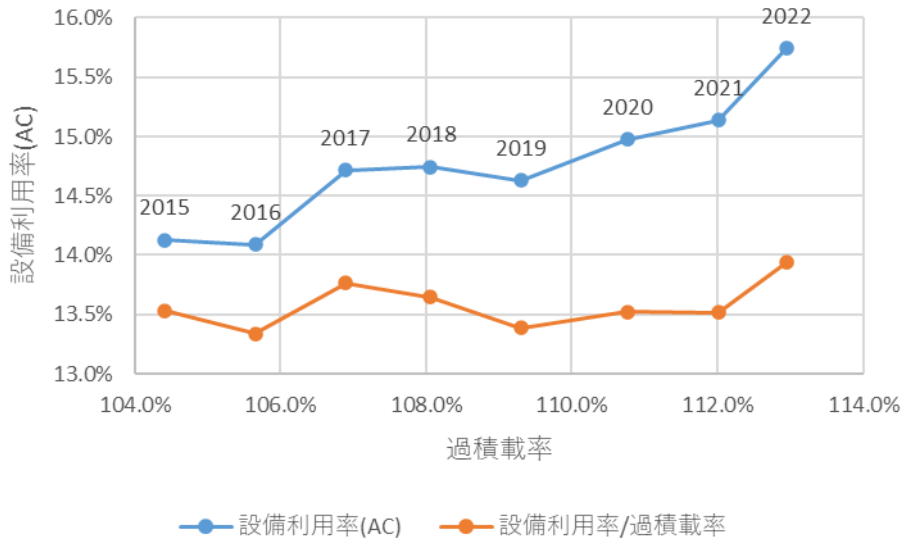


図 5.3.1-6 設備利用率(AC)/過積載率の推移（OECD 合計）

ここで、ピークカット影響について考察する。過積載率の実績については文献 20)より、2017 年度の日本の都道府県毎、容量区分毎でおおむね 110～130%程度となっており、最大でも 151%である。過積載率 150%程度までなら、ピークカット影響は大きくない[21]との報告があり、現状、過積載によるピークカット影響は無視できるものと考えられる。

以上から、今後 RN 設備利用率を利用する際には、過積載を考慮し、過積載率分だけ設備利用率を上昇させることを検討する。

② 太陽光発電における RN 設備利用率の妥当性確認

RN 設備利用率は気候条件等から推定されるものであり、太陽光発電における出力抑制や自家消費によって、実際の設備利用率(AC)とは乖離する可能性があるため調査を行った。

IEA の実績データ[19]から過積載率と設備利用率(AC)を計算した後、RN 設備利用率に過積載率を掛けて、設備利用率(AC)と比較を行った。日本とドイツについての結果を表 5.3.1-2、表 5.3.1-3 に示す。どちらも過積載率を考慮した RN 設備利用率は設備利用率(AC)よりも相当に高く、乖離要因として出力抑制・自家消費・その他（Renewables Ninja データが持つバイアス、悪条件箇所への設置増加、など）の影響が考えられる。

表 5.3.1-2 過積載率を考慮した RN 設備利用率と設備利用率(AC)の比較（日本）

Japan	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
過積載率	105.3%	106.2%	106.9%	108.3%	110.2%	112.4%	114.4%	115.9%
RN設備利用率	15.9%	15.7%	15.8%	15.7%	15.9%	15.7%	15.9%	15.9%
RN設備利用率×過積載率	16.8%	16.6%	16.9%	17.0%	17.6%	17.7%	18.2%	18.4%
設備利用率(AC)	13.8%	13.7%	13.7%	13.5%	13.3%	13.4%	13.1%	12.9%

表 5.3.1-3　過積載率を考慮したRN設備利用率と設備利用率(AC)の比較（ドイツ）

Germany	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
過積載率	101.5%	101.8%	102.0%	102.4%	102.8%	103.3%	104.1%	104.8%
RN設備利用率	14.7%	14.3%	13.9%	14.8%	14.3%	14.4%	13.8%	14.9%
RN設備利用率×過積載率	14.9%	14.5%	14.2%	15.2%	14.7%	14.9%	14.4%	15.6%
設備利用率(AC)	11.6%	11.1%	11.1%	11.6%	11.1%	11.4%	10.5%	11.3%

まず、乖離要因として出力抑制が支配的かを確認するため、各電力会社の公開データ[22)-31)]より発電量・出力抑制量を整理した。結果を表 5.3.1-4 に示す。2017 年度から 2022 年度までのデータであるが、出力抑制は 1%未満と極僅かであり、設備利用率(AC)にはほぼ影響しないと考えられ、乖離要因として出力抑制は支配的ではない。

表 5.3.1-4　日本の太陽光発電量と出力抑制量の実績

供給実績(MWh)	2017年度		2018年度		2019年度		2020年度		2021年度		2022年度	
	太陽光	出力制御	太陽光	出力制御	太陽光	出力制御	太陽光	出力制御	太陽光	出力制御	太陽光	出力制御
北海道	1,312,636	0	1,569,964	0	1,978,626	0	2,489,448	0	2,642,557	0	2,703,754	1,737
東北	4,162,711	0	5,998,412	0	6,838,839	0	7,387,881	0	8,620,027	0	9,932,399	59,351
東京	14,106,540	0	15,350,620	0	16,787,570	0	18,685,210	0	21,322,470	0	22,622,570	0
中部	8,904,167	0	9,990,434	0	11,177,796	0	12,485,897	0	13,270,199	0	14,278,091	0
北陸	803,407	0	941,706	0	1,157,654	0	1,258,185	0	1,377,091	0	1,593,897	0
関西	5,092,853	0	6,522,740	0	7,192,390	0	7,744,235	0	7,970,823	0	8,808,060	748
中国	4,522,454	0	5,253,236	0	6,047,231	0	6,709,590	0	7,582,501	0	8,360,237	39,268
四国	2,564,250	0	2,685,110	0	3,146,560	0	3,691,880	0	3,868,690	0	4,226,200	17,310
九州	9,156,332	0	9,896,937	94,764	10,437,948	443,223	12,477,736	385,533	12,455,921	512,485	13,737,386	438,890
沖縄	396,496	0	413,652	0	406,262	0	413,155	0	428,609	0	427,796	312
全国	51,021,846	0	58,622,811	94,764	65,170,876	443,223	73,343,217	385,533	79,538,888	512,485	86,690,390	557,616
出力抑制率(全国)		0.0%		0.2%		0.7%		0.5%		0.6%		0.6%

次に、乖離要因として自家消費が支配的かを確認する。文献 32),33)によると、2019 年においては住宅用太陽光発電(=10kW 未満)の自家消費率は概ね 3 割であり、2023 年 1~8 月でも 3 割である。資源エネルギー庁のデータ[34)]より、住宅用太陽光発電について設備利用率(AC)を計算し、RN 設備利用率×過積載率の値と比較したところ、半分程度あるいは半分以下の設備利用率となった。住宅用太陽光発電の自家消費率が 3 割であったとすると、残り 2 割以上は別の乖離要因によって設備利用率が低下していることになる。

表 5.3.1-5　過積載率を考慮したRN設備利用率と設備利用率(AC)の比較（日本、住宅用太陽光発電）

	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
過積載率	106.9%	108.3%	110.2%	112.4%	114.4%	115.9%
RN設備利用率	15.9%	15.7%	15.9%	15.9%	15.8%	15.9%
RN設備利用率 ×過積載率	17.0%	17.0%	17.5%	17.8%	18.1%	18.5%
設備利用率(AC)	9.1%	9.1%	8.8%	7.6%	7.2%	6.6%

※過積載率は表 5.3.1-2 の年データ、RN 設備利用率と設備利用率(AC)は年度データとなっており、集計対象期間に差異がある。

以上より、住宅用太陽光発電については自家消費に加え、その他（Renewables Ninja データが持つバイアス、悪条件箇所への設置増加、など）の要因が影響し、RN 設備利用率と過積載率から算出した設備利用率と実績である設備利用率(AC)は乖離していると考えられる。また、事業用太陽光発電については自家消費に関するデータの入手が難しく、いずれにせよ、特定しきれない要因によって、乖離が起きている。今後 RN 設備利用率から推計した太陽光設備利用率の精度向上のために、過積載率の考慮のみならず、未確定の乖離要因による効率低下の影響を実績値等から補正する方法を検討する必要がある。

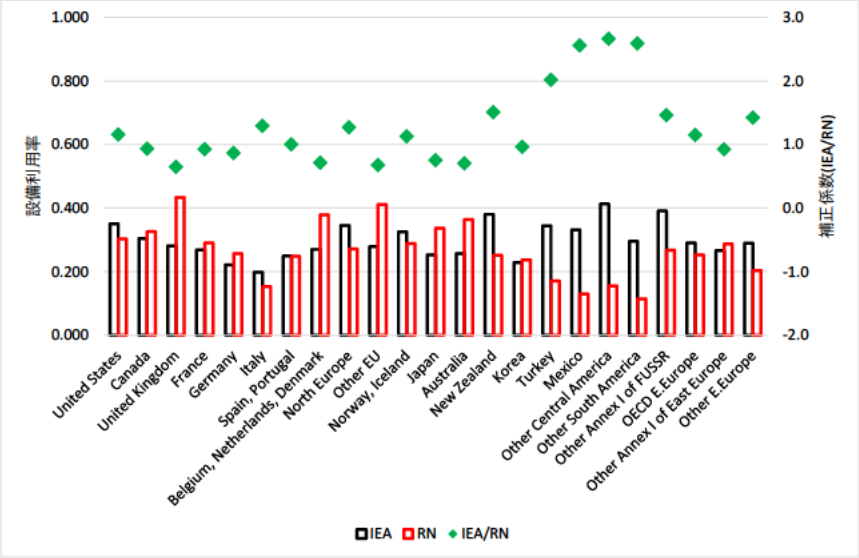
③　Renewables Ninja データベースに基づく風力発電設備利用率想定値の検証

これまでの項で述べたとおり、DNE21+の時間解像度向上に関連して、昨年度、風力発電の地域別の毎時設備利用率を Renewables Ninja（以降 RN）から取得し、17 時間帯に整理した。手順は、プラント仕様（ハブ高、風力タービンのモデル）を統一したうえで、陸上風力は各地域 3 点、洋上風力は各地域 5 点のデータを RN より取得し、各地域の平均値を算定し、さらに 16 時間帯別に平均化して出力パターンを整理しモデル入力値としている。この手法の課題として、RN が提供する設備利用率は、過去の天候データに基づき計算された理論値であり、様々な要因により実績値と差異がある可能性があることが挙げられる。DNE21+における VRE 出力の時間解像度向上は、最適化計算で得られる年間発電量に対し 16 時間帯の出力パターンを適用しており、RN による設備利用率の絶対値をそのまま利用しているわけではない。一方、今後、VRE の瞬時ピーク期待出力（H3）の想定を検討するにあたり、RN による設備利用率をそのまま利用することが妥当かどうかは確認しておくことが望ましい。本項では、風力発電の設備利用率について、実績値と RN データを比較し補正の必要性を検討した。

実績値は、IEA 統計 [19]の 2020 年年間発電実績値と年設備容量から算定した年間実績値を用いた。毎時実績値については各国 TSO 等の機関が公表しているケースもあるが限られた国のみであることから、前述の通り IEA 統計値に基づく年間平均値で比較することとした。実績値と RN 値の比較を図 5.3.1-7 に示す。IEA 統計にデータがあり、また 2020 年の設備容量が 100MW 以上の国・地域で比較を行った。陸上風力は 23 地

域、洋上風力はデータ数が少なく 4 地域で比較を行った。ほとんどすべての地域で実績値と RN 値に差異がみられ、RN 値を補正することが望ましいことがわかる。図中のドットは実績値を RN 値で除した値であり、1 を超えるものは実績値が理論値を超えていることを意味する。陸上風力では 1 を超えるケースが多くみられ、特に中南米地域では 2 を超えるケースもみられる。

a.陸上風力



b.洋上風力

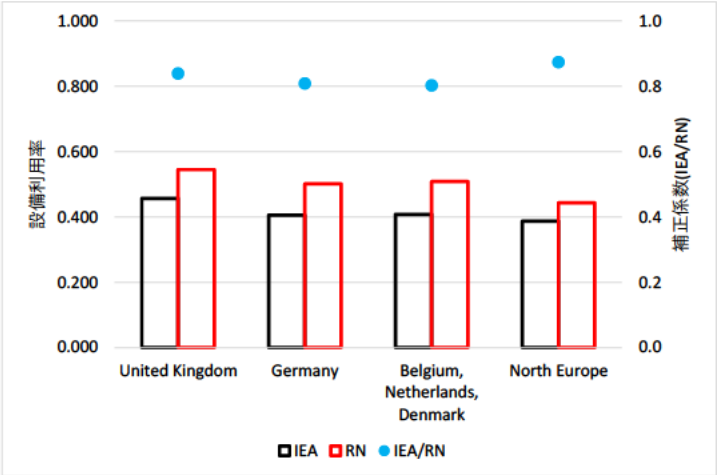


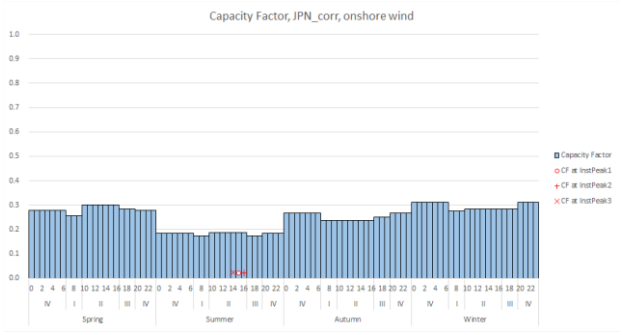
図 5.3.1-7 IEA に基づく実績値と RN データの年間設備利用率の比較

図で示される実績値と RN 値のギャップの要因に関して、RN のモデル開発者の論文[35]によると、天候データに基づく風力発電推計にはモデル起因バイアス、地点の風況表現の限界などのバイアスが存在し、RN ではこれらのバイアスは欧州データについては補正済とされている。しかし、上記比較では欧州でもギャップがみられており、これは RN データ取得時の座標及び技術パラメータ（タービンモデル、ハブ高）と実際の発電所のものが異なるためと思われる。また、欧州以外の国のデータは RN でも未補正であるため、Renewables Ninja 出力データと実績値の差異は、欧州と同様の要

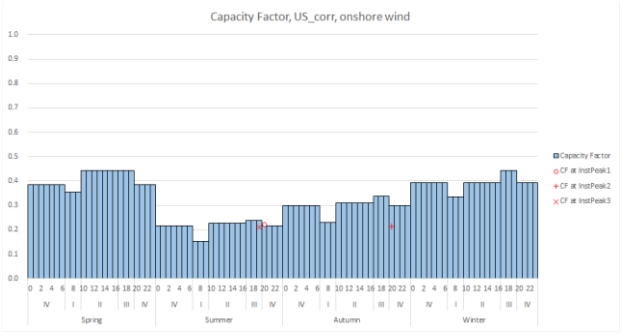
因に加え、前述のバイアスの影響も内包していると考えられる。ギャップの要因に基づく補正係数の設定は難しいため、実績値と RN 値の比較が可能な国・地域のみに対し実績値／RN 値で算定される補正係数を用いて、RN 値を実績値に整合させることとした。

主な国の補正後の 17 時間帯別設備利用率を図 5.3.1-8 に示す。メキシコなど補正係数が大きな値をとる地域であっても、17 時間帯設備利用率が 1 を超えるケースは見られないことから、今回算定した値を補正係数とすることは問題ないものと思われるが、各地域の結果に留意しつつ、今後モデル入力値の再算定を進めていく。

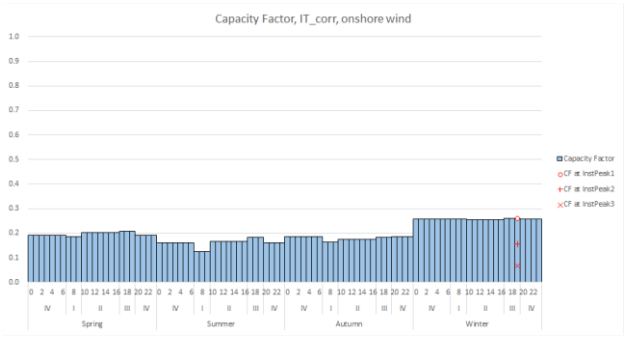
a. 日本、陸上風力（補正係数 0.75）



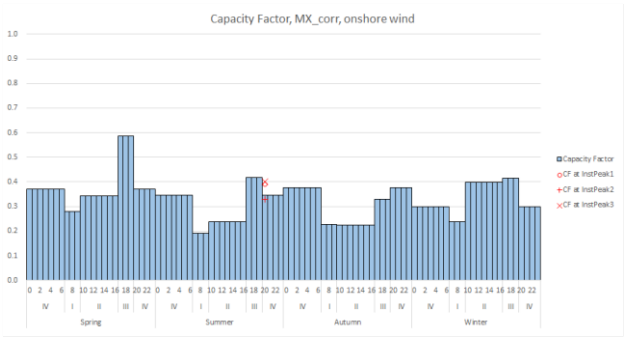
b. 米国、陸上風力（補正係数 1.16）



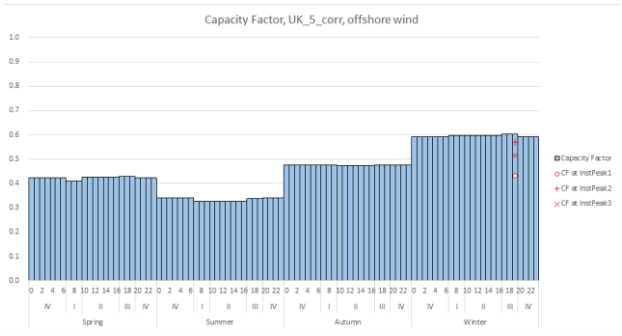
c. イタリア、陸上風力（補正係数 1.29）



d. メキシコ、陸上風力（補正係数 2.56）



e. 英国、洋上風力（補正係数 0.84）



f. ドイツ、洋上風力（補正係数 0.81）

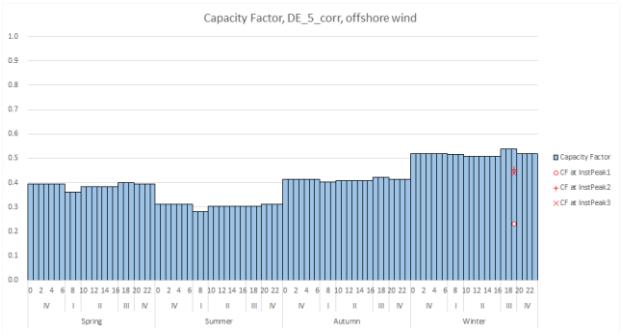


図 5.3.1-8 補正後の RN 設備利用率

④ H3 期待出力の検討

これまで DNE21+では、太陽光、風力の瞬時ピークの期待出力は、日本の L5 評価の数値を参考に、設備容量に対して、原則、太陽光 25%、風力 3%としていた。これに

対し、現在 OCCTO では夏季需要に対する L5 評価は用いず、全月を対象として確率的な EUE 算定の結果として、安定電源代替価値となる調整係数を採用している。

昨年度の年間時間ステップ拡張検討において、VRE の瞬時ピーク期待出力に関しては、RN の毎時設備利用率から、別途推計した毎時電力需要の瞬時ピーク（H3）時点における設備利用率を選択して用いた（別途、11%の予備率を考慮）。今年度、より確度の高い H3 期待出力値を RN データに基づき想定することを目的として、日本とドイツの過去 10 年間の毎時需要実績値と毎時 RN 設備利用率データを用いて、H3 需要時における RN 毎時設備利用率の分析を行った。具体的には、H3 における RN 設備利用率の、過去 10 年間平均値と下位 3 年間分の比率を算定し、算定された比率を昨年度推計の各国 H3 設備利用率に適用することで妥当な H3 期待出力が算定可能かを検討した。過去 10 年間の需要実績値は、日本は OCCTO によるデータ [38]を、ドイツは ENTSO-E によるデータ [39]を利用した。

日本における 2014～2023 年の年ピーク需要実績と VRE 設備利用率を図 5.3.1-9 に示す。各年におけるピーク需要上位 3 点における VRE の設備利用率を、太陽光（黄）、陸上風力（緑）、洋上風力（青）のドットで示している。日本ではピーク需要時間帯は全て夏季の日中（11～16 時）である。太陽光と風力は比較的高い設備利用率が見込める傾向にあるが、低い場合もみられる。陸上風力はそれ程高い設備利用率は期待できない。

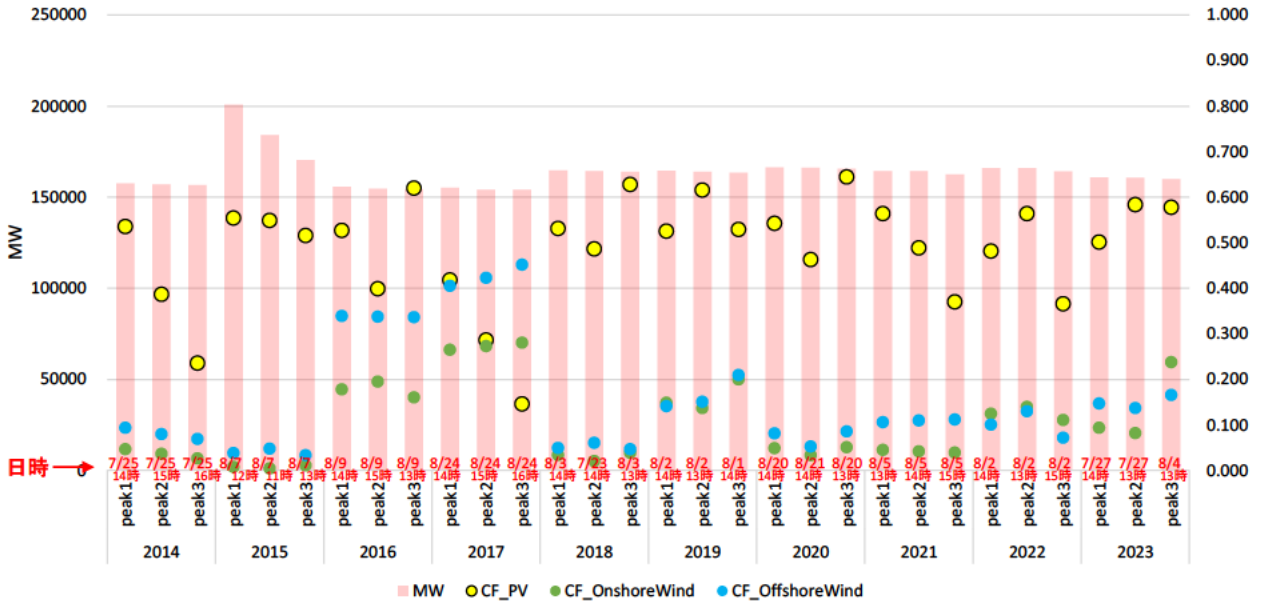


図 5.3.1-9　日本における年ピーク需要実績と VRE 設備利用率

各年 H3 時の平均設備利用率（図 5.3.1-10）を用いて、H3 時設備利用率の（a）10 年平均と（b）下位 3 年平均を算定した結果を表 5.3.1-6 に示す。下位 3 年平均値は、太陽光と陸上風力についてはこれまでの期待出力想定値（太陽光 25%、風力 3%）と近い結果である。10 年平均に対する下位 3 年平均の比（b/a 値）は、太陽光 0.779、陸上風力 0.247、洋上風力 0.360 と算定された。

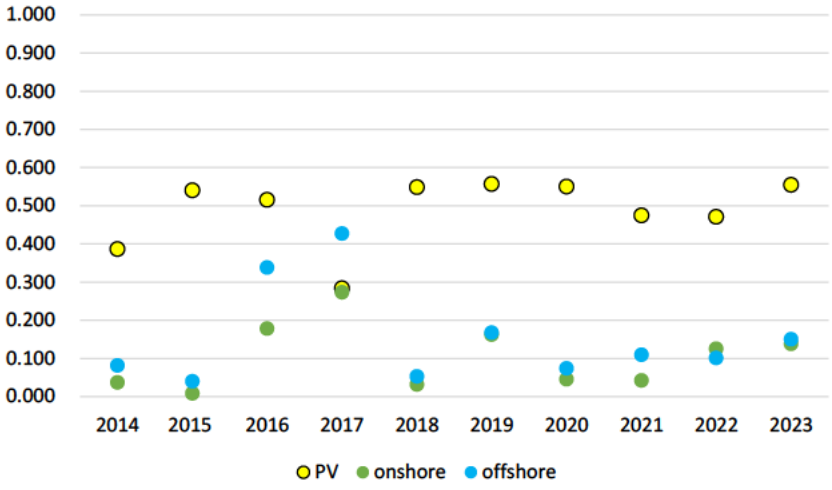


図 5.3.1-10 日本における H3 時の平均設備利用率

表 5.3.1-6 日本における H3 の平均設備利用率

	(a)10年平均	(b)下位3年平均	b/a
PV	0.488	0.381	**0.779**
陸上風力	0.104	0.026	**0.247**
洋上風力	0.154	0.056	**0.360**

欧州は日本と異なりピーク需要が冬季に集中する地域であり、日本と異なる傾向を示すと考えられることから、ドイツを対象に同様のデータ整理を行った。結果を図 5.3.1-11 に示す。なお、ENTSO-E のデータは 2015 年以降のみ入手可能であったため、9 年間のデータを利用した。需要ピーク時間帯は冬季夕方が多いが、近年は冬季日中（12 時前後）となるケースが増大していることがわかる。ピーク時間の違いにより太陽光の設備利用率の傾向は異なる。洋上風力は比較的高い設備利用率が見込める傾向にあるがややばらつく。陸上風力はばらつきが大きい。

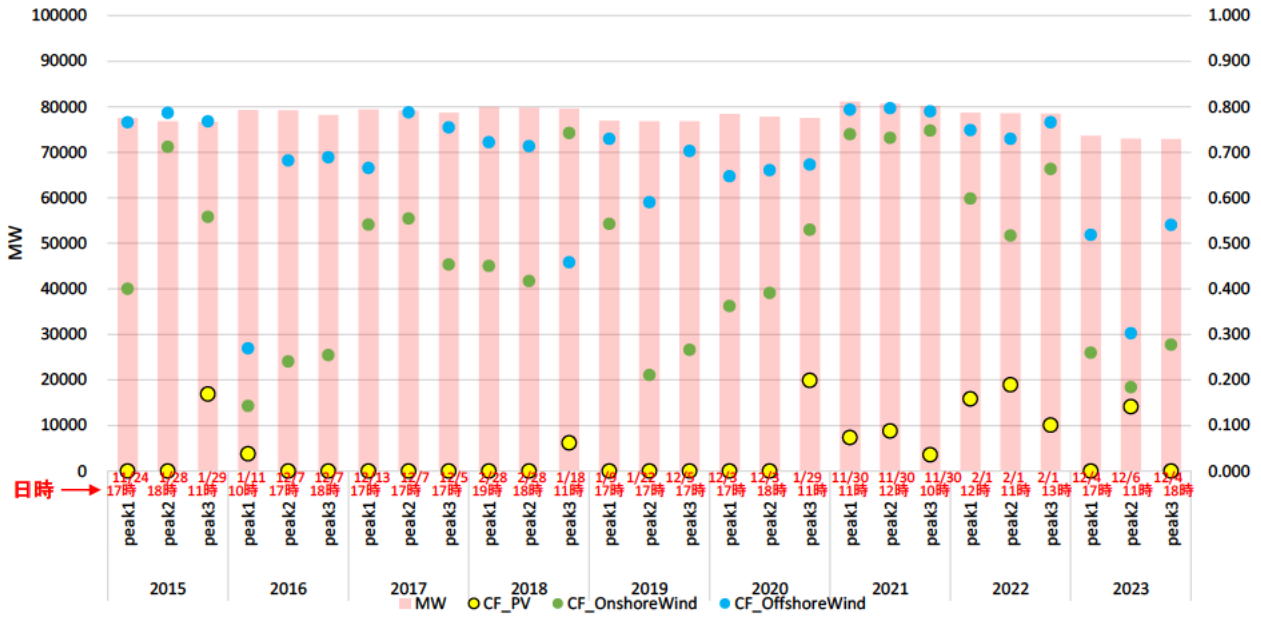


図 5.3.1-11　ドイツの年ピーク需要実績と VRE 設備利用率

各年 H3 時の平均設備利用率を用いて、(a) 9 年平均値と (b) 下位 3 年平均値を算定した。結果を表 5.3.1-7 に示す。b/a 値は、太陽光 0.091、陸上風力 0.572、洋上風力 0.841 と算定され、日本の結果とは異なる。特に太陽光の場合、ドイツの需要ピークは多くが夕方であり設備利用率が 0 に近いため、大きな値を取らない結果となる。

表 5.3.1-7　ドイツにおける H3 の平均設備利用率

	(a)9年平均	(b)下位3年平均	b/a
PV	0.047	0.004	**0.091**
陸上風力	0.463	0.264	**0.572**
洋上風力	0.669	0.544	**0.841**

VRE の設備利用率の水準は季節や時間帯で差異があり、H3 需要の時間帯によって b/a 値は大きく異なることが示されたことから、日本もしくはドイツの値を H3 時間帯が異なる地域の値として適用することは適切ではないと考えられる。このため、日本とドイツのデータを用いて 16 時間帯別の b/a 値を算定し、各地域の H3 時間帯に応じて選択し、設備利用率に対する係数として適用する方法を検討した。太陽光、陸上風力、洋上風力の 16 時間帯別の b/a 比の比較（表 5.3.1-8）から、2 国の時間帯別 b/a 比の傾向は類似していることがわかる。

表 5.3.1-8　16 時間帯別の b/a 比

左：太陽光、中：陸上風力、右：洋上風力

		日本	ドイツ	平均
Spring	I	0.639	0.635	0.637
Spring	II	0.656	0.677	0.667
Spring	III	0.234	0.470	0.352
Spring	IV	0.088	0.090	0.089
Summer	I	0.745	0.776	0.760
Summer	II	0.755	0.763	0.759
Summer	III	0.410	0.731	0.571
Summer	IV	0.144	0.184	0.164
Autumn	I	0.605	0.466	0.536
Autumn	II	0.619	0.567	0.593
Autumn	III	0.079	0.142	0.110
Autumn	IV	0.042	0.018	0.030
Winter	I	0.581	0.204	0.393
Winter	II	0.616	0.384	0.500
Winter	III	0.010	0.008	0.009
Winter	IV	0.010	0.000	0.005

		日本	ドイツ	平均
Spring	I	0.330	0.409	0.369
Spring	II	0.366	0.403	0.385
Spring	III	0.432	0.471	0.451
Spring	IV	0.446	0.544	0.495
Summer	I	0.245	0.398	0.321
Summer	II	0.250	0.389	0.320
Summer	III	0.306	0.444	0.375
Summer	IV	0.335	0.549	0.442
Autumn	I	0.345	0.437	0.391
Autumn	II	0.329	0.397	0.363
Autumn	III	0.399	0.474	0.437
Autumn	IV	0.413	0.515	0.464
Winter	I	0.402	0.450	0.426
Winter	II	0.389	0.416	0.403
Winter	III	0.437	0.501	0.469
Winter	IV	0.485	0.485	0.485

		日本	ドイツ	平均
Spring	I	0.447	0.409	0.428
Spring	II	0.455	0.402	0.429
Spring	III	0.470	0.447	0.459
Spring	IV	0.481	0.473	0.477
Summer	I	0.323	0.367	0.345
Summer	II	0.320	0.378	0.349
Summer	III	0.373	0.388	0.381
Summer	IV	0.378	0.437	0.408
Autumn	I	0.416	0.464	0.440
Autumn	II	0.401	0.423	0.412
Autumn	III	0.439	0.465	0.452
Autumn	IV	0.442	0.480	0.461
Winter	I	0.472	0.501	0.486
Winter	II	0.468	0.486	0.477
Winter	III	0.489	0.532	0.510
Winter	IV	0.518	0.518	0.518

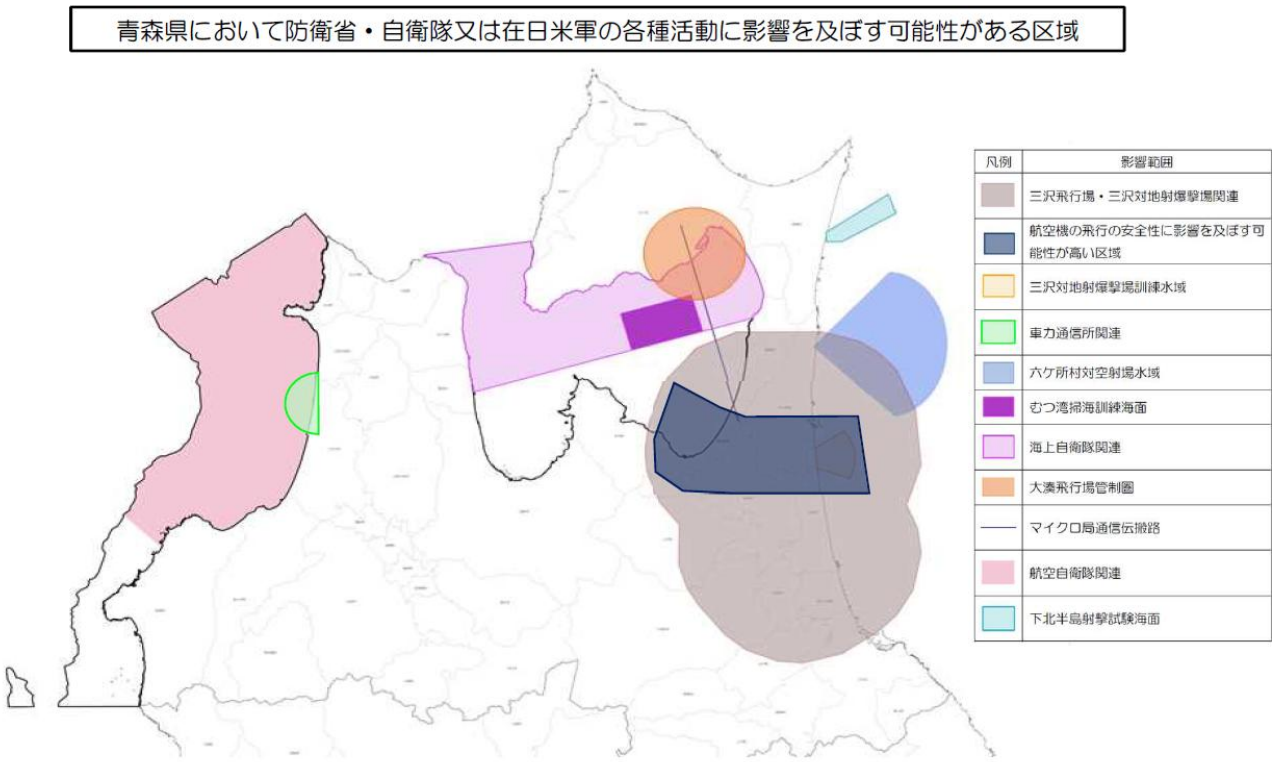
以上のように、2 国の平均値（表 5.3.1-8 最右列）を 16 時間帯別の b/a 比として設定し、54 地域ごとの H3 時間帯に応じた設備利用率に対する係数として選択する手法を考案した。この手法であれば、各地域の需要と VRE 出力に応じた、妥当性の高い H3 期待出力が想定可能で、また将来の需要パターン変化により H3 時間帯が変化した場合でも対応可能である。一方、想定値の数が増大しモデルでの取り扱いが煩雑になる可能性があり単純化を検討する余地はある。また太陽光は夜間でもわずかではあるが期待出力が想定されるなど妥当性の再検証は必要である。これらを考慮したうえで、より妥当な H3 値の検討を進めていく。

⑤　洋上風力設置不可海域の検討

洋上風力ポテンシャルに関して、昨年度の検討においては、IEA[36]の Technical potential のうち、離岸距離 60km 未満(near shore)を対象とした。このポテンシャル評価において対象から除外されている海域は、低風速（5m/s 以下）の海域、海洋保護区域（IUCN Ia, Ib, II, III）、緩衝地帯（海底ケーブル：1km、主要航路：20km、地震断層線：20km）、既存の海洋石油・ガス設備や漁場との競合海域とされ、防衛上の観点から風力発電が設置できない海域は除外されていない。

一方、日本では、風力発電設置申請時に、防衛レーダーとの干渉の関係から認可が得られないケースがある。例として、防衛省は、風力発電設備による警戒管制レーダー、航空管制レーダー、気象レーダーへの影響回避の観点から、事前の影響評価の結果によっては風車の配置や高さの変更を要請するとしている（図 5.3.1-12）。欧州でもレーダーと風力発電との干渉の可能性が調査されてきている。Van der Wal は EU のプロジェクト“WindSpeed”の work package3 のレポートにおいて、北海海域における風力以外の海洋利用（船舶航行、石油ガス採掘、漁業、ケーブル・パイプライン敷設、軍事利用、砂採掘、自然保護区域、海洋生物、レーダー干渉）、及びそれらと洋上風力との相互作用を調査し、英国レーダーとの干渉範囲を示している（図 5.3.1-13）。なお、

レーダーは民間機、軍用機用のほか、陸上及び船舶のナビゲーションレーダーが対象であり防衛レーダーは記載がなく調査に含まれていない。



出典：「地理院地図」（国土地理院）（https://maps.gsi.go.jp）を基に防衛省が作成したもの

図 5.3.1-12　日本における防衛面を考慮した風力発電設置時の対応例

出典：防衛省 [39)]

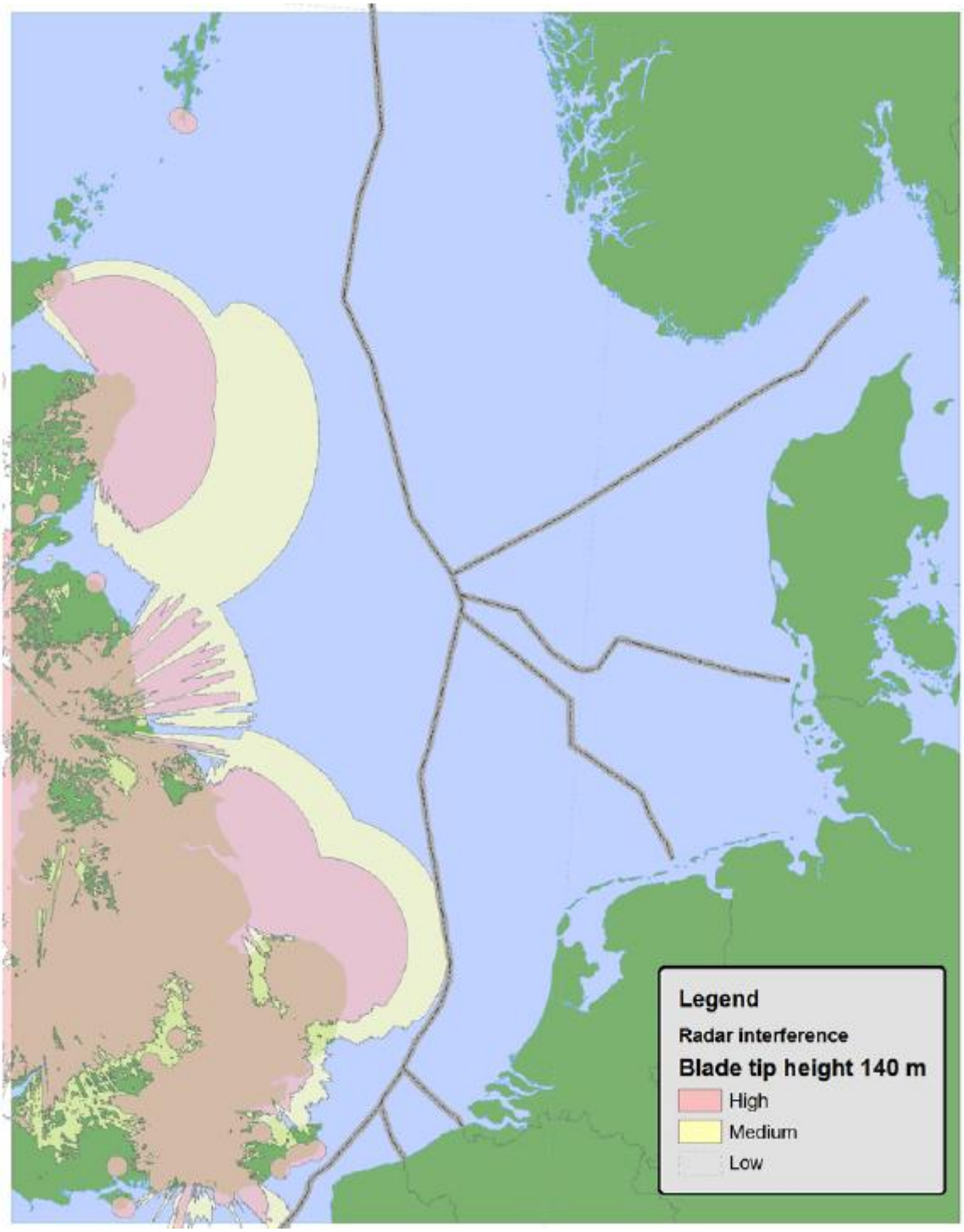
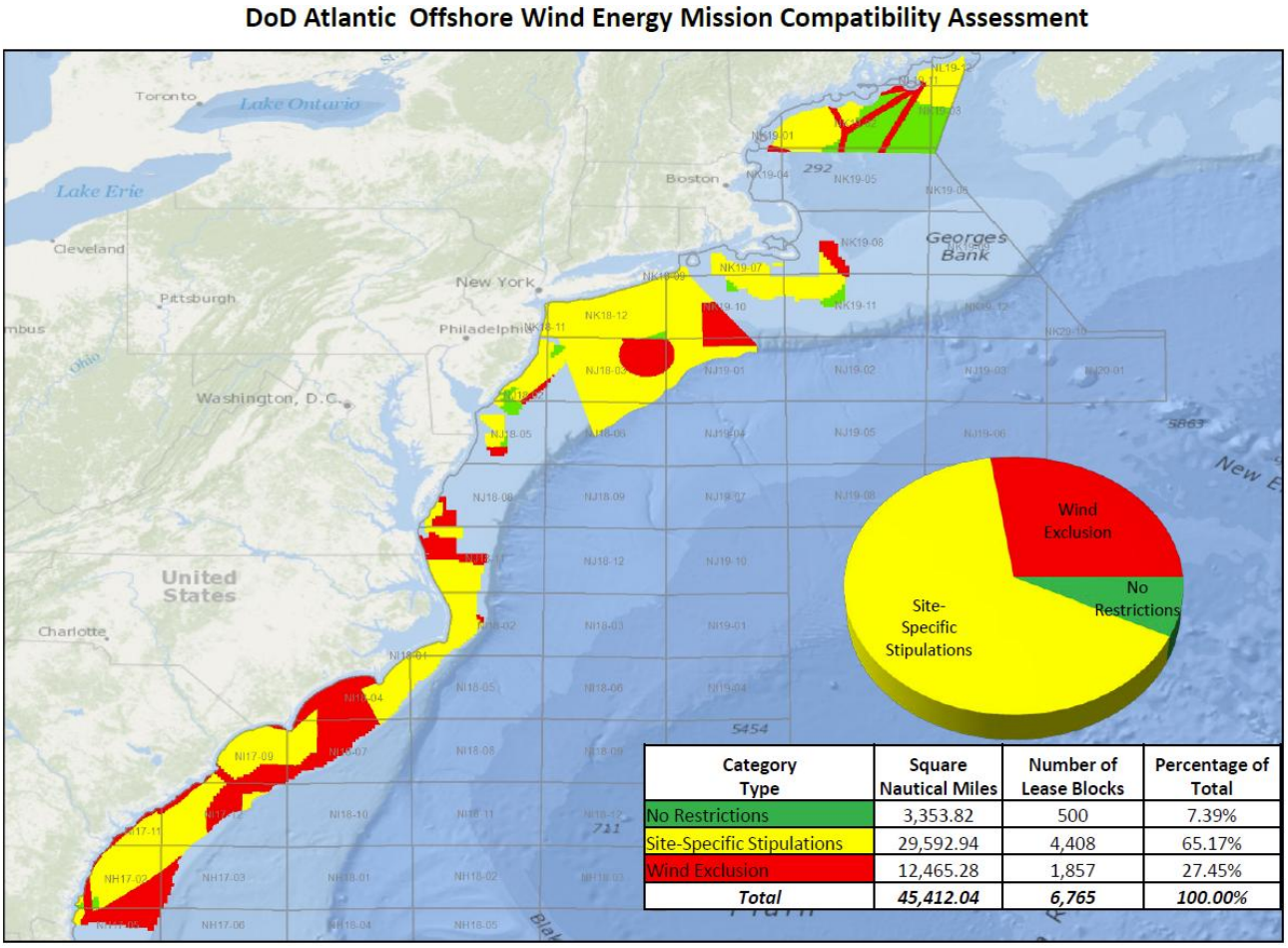


図 5.3.1-13 北海における風力タービンによる英国レーダーへの干渉範囲

出典：文献 40)

これらを踏まえ、洋上風力ポテンシャル推計において考慮すべき要素の一つとして、防衛上の観点（軍事利用海域、防衛レーダーとの干渉など）から洋上風力が設置できない海域について、論文や各種レポートを基に調査し、防衛上の理由による洋上風力設置不可エリアの面積比率を検討した。

米国では、大西洋での洋上風力設置に関して、軍事上の観点から設置可否を検討し、海岸線から概ね 60km 以内の対象区域のうち 27.5%が設置不可としている（図 5.3.1-14）。ここにはレーダー設置起因も含まれている。



Category Type	Square Nautical Miles	Number of Lease Blocks	Percentage of Total
No Restrictions	3,353.82	500	7.39%
Site-Specific Stipulations	29,592.94	4,408	65.17%
Wind Exclusion	12,465.28	1,857	27.45%
Total	*45,412.04*	*6,765*	*100.00%*

図 5.3.1-14　大西洋における洋上風力設置と軍事活動の両立性評価

出典：文献 41)

Jongbloed[42]は、北海の 75%を対象に、洋上風力の設置に関して、風力以外の海洋利用（船舶航行、石油ガス採掘、漁業、ケーブル・パイプライン敷設、軍事利用、砂採掘、自然保護区域、海洋生物）への影響を最小化し、経済的に導入可能な面積を算定している。Military Area が対象海域に占める面積は 14%であり、場合によっては風力の設置は可能と想定していることから、軍事上の理由による洋上風力設置不可エリアは 14%よりも小さいと考えられる。

日本の推計例では、環境省による洋上風力ポテンシャルの推計[43]において、自衛隊訓練海域対象地域における洋上風力導入ポテンシャルを 3608kW、海域全体の 2.3%と推計している。この海域の洋上風力設置可否については明記されていない。別の文献[44]では、在日米軍の海上訓練地域であるため設置対象外とされている面積は全体の 0.57%と推計している。いずれも防衛レーダーについては検討の対象外である。

機密性の点から得られる公開情報は限定的であるが、防衛レーダーを評価対象に含み、かつ現状に基づき評価されている文献 41)を参考に、防衛上の理由により洋上風力が設置不可である海域の比率を 27.5%と想定する。

参考文献（第 5.3.1 節に関するもの）

1) K. Akimoto, et al.: Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost, Energy Policy, 38(7), 3384-3393 (2010)
2) K. Akimoto, et al.: Assessment of the emission reduction target of halving CO_2 emissions by 2050: macro-factors analysis and model analysis under newly developed socio-economic scenarios, Energy Strategy Reviews, 2, 3-4, (2014), 246-256.
3) RITE：DNE21+モデルの概要―発電部門―；https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/DNE21plus_Electricity.pdf（アクセス日 2025.2.17）
4) 経済産業省 資源エネルギー庁：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会（第 43 回会合）資料 2, https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/043/043_005.pdf（アクセス日 2024.12.2）
5) R. Komiyama, Y. Fujii: Assessment of massive integration of photovoltaic system considering rechargeable battery in Japan with high time-resolution optimal power generation mix model, Energy Policy, 66, (2014),73-89
6) IEA: IEA-ETSAP, https://iea-etsap.org/index.php（アクセス日 2024.12.12）
7) R. Loulou, et al.: Documentation for the TIMES Model PART II, https://iea-etsap.org/index.php/documentation（アクセス日 2024.11.11）
8) J. Sieed, et al.: Long Term Electricity Demand and Hourly Load Forecasting for Countries of the World, 第 40 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2024)
9) Stefan Pfenninger, et al.: Renewables.ninja, https://www.renewables.ninja/（アクセス日 2024.11.15）
10) J. Sieed, T. Ando, Y. Nakano, N. Mochizuki, F. Sano and K. Akimoto; Long Term Electricity Demand and Hourly Load Forecasting for Countries of the World, Proceedings of the 40th Energy System, Economy and Environment Conference, (2024), pp.450-453.
11) JAERO Graphical Flipchart (2024), data sourced from Energy White Paper 2024, Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry (METI).
12) A. Toktarova, L. Gruber, M. Hlusiak, D. Bogdanov, C. Breyer; Long term load projection in high resolution for all countries globally, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 111(2019), pp.160–181.
13) D. P. V. Vuuren, K. H. Alfsen; PPP Versus Mer: Searching for Answers in a Multi-Dimensional Debate, Climatic Change 75(2006), pp.47–57.
14) K. Riahi et al.; The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, Global Environmental Change, 42(2017), pp.153-168.
15) International Energy Agency; World Energy Outlook 2023 Extended Dataset (2023).

16) Energy Balance Table by Prefecture (2022), Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry (METI).
17) JAERO Graphical Flipchart (2024), data sourced from the Federation of Electric Power Companies (FEPC).
18) JAERO Graphical Flipchart (2024), data sourced from the EMDC Handbook of Energy and Economic Statistics in Japan, The Institute of Energy Economics, Japan (IEEJ).
19) IEA: Renewables Information April 2024 (2024)
20) 山田洋行、原卓也、志知明：日本全国における配電エリア毎の過積載を考慮した太陽光発電の導入状況分析、エネルギー・資源学会論文誌、41 巻 2 号(2020)
21) 資源エネルギー庁：第 44 回 再エネ大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 資料１、https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/044_01_00.pdf（アクセス日 2025.3.6）
22) 北海道電力ネットワーク株式会社：北海道エリアの需給実績、https://www.hepco.co.jp/network/con_service/public_document/supply_demand_results/index.html（アクセス日 2025.3.6）
23) 東北電力ネットワーク株式会社：過去実績データのダウンロード、https://setsuden.nw.tohoku-epco.co.jp/download.html（アクセス日 2025.3.6）
24) 東京電力パワーグリッド株式会社：エリア需給実績データ、https://www.tepco.co.jp/forecast/html/area_jukyu_p-j.html（アクセス日 2025.3.6）
25) 北陸電力送配電株式会社：エリア需給実績について、https://www.rikuden.co.jp/nw_jyukyudata/area_jisseki.html（アクセス日 2025.3.6）
26) 中部電力パワーグリッド株式会社：でんき予報、https://powergrid.chuden.co.jp/denkiyoho/（アクセス日 2025.3.6）
27) 関西電力送配電株式会社：過去の関西エリアの需給実績の公表データのダウンロード、https://www.kansai-td.co.jp/denkiyoho/area-performance/past.html（アクセス日 2025.3.6）
28) 中国電力ネットワーク株式会社：供給区域の需給実績（過去分）、https://www.energia.co.jp/nw/service/retailer/data/area/（アクセス日 2025.3.6）
29) 四国電力送配電株式会社：過去の需給実績データのダウンロード、https://www.yonden.co.jp/nw/supply_demand/data_download.html（アクセス日 2025.3.6）
30) 九州電力送配電株式会社:エリア需給実績データ、https://www.kyuden.co.jp/td_area_jukyu/jukyu.html（アクセス日 2025.3.6）
31) 沖縄電力株式会社：需給関連情報(需給実績)の公表、https://www.okiden.co.jp/business-support/service/supply-and-demand/（アクセス日 2025.3.6）
32) 資源エネルギー庁：第 50 回調達価格等算定委員会、https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/050_01_00.pdf（アクセス日 2025.3.6）
33) 資源エネルギー庁：第 91 回調達価格等算定委員会資料、https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/091_01_00.pdf（アクセス日 2025.3.6）
34) 資源エネルギー庁：再生可能エネルギー電気の利用の促進に関する特別措置法　情報公表用ウェブサイト、 https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary（アクセス日 2025.3.6）

35) Staffel and Pfenninger, Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output, Energy 114 (2016)
36) IEA, Offshore Wind Outlook (2019)
37) OCCTO, 系統情報サービス、https://www.occto.or.jp/keitoujouhou/index.html
38) ENTSO-E, Total Load - Day Ahead / Actual, https://transparency.entsoe.eu/
39) 防衛省、青森県において防衛省・自衛隊又は在日米軍の各種活動に影響を及ぼす可能性がある区域、https://www.mod.go.jp/j/approach/chouwa/windpower/pdf/affect_aomori.pdf
40) Van der Wal, Inventory of current and future presence of non-wind sea use functions (2009)
41) Office of the Secretary of Defense, Update: DoD assessment of offshore military activities and wind energy development on the Outer Continental Shelf off South Carolina
42) Jongbloed, Identifying space for offshore wind energy in the North Sea. Consequences of scenario calculations for interactions with other marine uses (2014)
43) 環境省、平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書(2011)
44) 尾羽、再エネ海域利用法を考慮した洋上風力発電の利用海域に関する考察 (2019)

5.3.2 時間分解能を向上させた DNE21+モデルでの蓄電及び蓄熱発電技術の定式化

(1) はじめに

地球温暖化への懸念が高まり、世界各国がカーボンニュートラル（以下、CN と記載）に向けて動いている。CN 達成のために、今後様々な地球温暖化対策技術が社会に導入され、CO_2 排出量が削減される必要がある。CN 実現のためには、再生可能エネルギー（以下、再エネと記載）などのゼロエミッション発電技術を大幅に拡大させる必要がある。しかし、再エネの主力となる太陽光発電や風力発電はいわゆる変動性再エネ（以下、VRE と記載）であり、発電量が自然環境に強く影響され不安定である。また、同じくゼロエミッション発電技術である原子力発電も技術的には出力調整は可能であるものの、日本では一定出力で発電することを原則として運用されており、合理性の面からも設備利用率を高く維持することが望まれる。一方で、電力需給においては供給量と需要量が時間的に一致する同時同量が必要であるため、発電技術は自由に出力を調整できることが望ましく、経済的価値も高い。比較的自由に出力調整できるゼロエミッション発電技術としては、CCS(Carbon dioxide Capture and Storage)機能を備えた、化石燃料を用いての火力発電や水素やアンモニアなどのゼロエミッション燃料を用いた火力発電が挙げられる。これら出力調整が可能な火力を組み合わせていくことは重要だが、FIT/FIP 制度によって太陽光、風力の導入、また認定量は大きくなっており、そして既に VRE の出力抑制は増大してきている。また今後、更に原子力発電の再稼働が進むと見られることから、余剰電力を蓄電し、必要な時に改めて電力として供給することが重要になると考えられる。一般的に蓄電技術といえば、鉛蓄電池やリチウムイオン電池に代表される蓄電池や以前から利用されている揚水発電などが実用化されている。また、蓄熱発電についても、安価であることを強みと捉え、高価な蓄電池などの代替手段として評価される [1)]こともある。

5.3.2 節では、DNE21+の電力需給において、これまでの年間 4 時間帯から 17 時間帯分割に拡張したモデルを用いて各蓄電・蓄熱発電技術の経済性を評価する方法について検討する。

(2) 分析条件

① 蓄電技術のモデル化

本項では、17 時間帯分割したモデルにおける蓄電・蓄熱発電技術のモデル化について記載する。対象技術としては、今回、リチウムイオン電池（以下、LIB と記載）・揚水発電・蓄熱発電に注目する。各技術に対し、対応可能な充放電パターンを表 5.3.2-1 に示すように差別化し、モデル化を行う。

表 5.3.2-1 各技術毎の充放電可能パターン

	LIB	揚水発電・蓄熱発電
日内蓄電	Ⅱ→Ⅲ Ⅱ→Ⅳ	○
季節間蓄電	×	○
瞬時ピーク蓄電	○	○

LIB は他２つの技術に比べ、自己放電が大きいため、日内蓄電（例：夏の昼から夕方への充放電）と瞬時ピーク蓄電（16 時間帯いずれかから瞬時ピークへの充放電）を可能とし、季節を越えた充放電はできないものとする。また、計算コスト抑制のため、太陽光発電による発電量増加により夏の昼から夕方など使用頻度が高くなりやすい充放電パターンのみをモデル化し、冬の夜から昼など使用頻度が低くなりやすい充放電パターンはモデル化しないとする。蓄電設備は設備出力[W]と設備容量[Wh]のパラメータを持つが、今回 LIB は充放電パターンを特定してモデル化し、モデルの説明変数としては出力[W]のみとする。例えば、時間帯Ⅲに放電するパターンの場合、典型的な放電時間が 3 時間であれば、1W 分の出力設備と 3Wh 分の容量設備に掛かるコストを 1W 当たりの設備コストとして集約して扱うものとする。

次に、揚水発電・蓄熱発電は日内蓄電と瞬時ピーク蓄電に加え、季節間蓄電（例：春から夏への充放電）もできるものとする。また、これらの蓄電設備は設備出力[W]と設備容量[Wh]のパラメータを持つとする。これは季節間蓄電、日内蓄電、瞬時ピーク蓄電の各蓄電ケースにおいて、設備出力は共有、設備容量は独立して扱うためである。例えば、春から秋への季節間蓄電と夏の日内蓄電を考えた場合、季節間蓄電と日内蓄電で放電時間帯が異なるため、同じ出力設備を使用することができる。一方、容量設備は春に充電した後、秋に放電するまでの夏の間も、その分の容量は埋まっているため、夏の日内蓄電には別の容量設備が必要となることを表す。注意として、瞬時ピークについてはモデル内では特定の季節に属さないとするが、当然、実データとして考えるとどこかの季節には属することとなる。厳密に言えば、各地域毎に、瞬時ピークの 3 時間について、属する時間帯がそれぞれ 16 時間帯のどの時間帯かを特定し、

その分を差し引いて、地域毎に異なる年割合とするべきである。しかし、処理が非常に煩雑となるため、1 年 8,760 時間から 3 時間を引いた 8,757 時間を 16 時間帯に比例配分することとする。それに伴い、放電電力量についても、本来、瞬時ピークが実データで属する時間帯を特定し、その時間帯での季節間蓄電・日内蓄電による放電電力量を瞬時ピークの放電電力量としても考慮すべきであるが、そのような処理も行わないとする。

② 蓄電・蓄熱発電技術のパラメータ設定

蓄電・蓄熱発電技術のモデルパラメータを表 5.3.2-2 のように設定する。出力設備コスト・容量設備コスト・充放電効率については、代表として 2030 年と 2050 年の値を、出力設備及び容量設備の運転維持費・最大設備利用率・寿命については時点によって変わらないとして、時点不変の値を示す。ここで、5.3.2 節内での$は 2000 年$換算の表記としている。また、LIB に関しては、前述の通り容量設備コストを出力設備コストに集約しており、その想定放電時間に応じてコストが異なる。ここでは、2030 年・2050 年値共に放電時間を 1～11 時間とした想定した場合のコストを記載する。()では参考として集約前の各コストを示した。それぞれの技術について、メリット・デメリットがはっきりしており、分かり易くデメリットで整理すると、容量設備コストの高い LIB、出力設備コストの高い揚水発電、充放電効率の低い蓄熱発電となっている。充放電効率については、例えば LIB の場合、貯蔵期間に応じた自己放電により変化するものであるが、充放電時のエネルギー転換ロスの方が支配的であると考え、今回は未考慮とする。

表 5.3.2-2 各蓄電・蓄熱技術のコスト及び効率設定

		LIB	揚水発電	蓄熱発電
出力設備コスト(集約)[$/kW]	2030	254~1,633	-	-
	2050	155~994	-	-
出力設備コスト[$/kW]	2030	(117)	844	790
	2050	(71)	860	587
容量設備コスト[$/kWh]	2030	(138)	60	20
	2050	(84)	61	10
充放電効率[%]	2030	86	78	44
	2050	86	78	70
出力設備運転維持費[%/年]	-	0.3	1.1	2
容量設備運転維持費[%/年]	-	-	0.001	2
最大出力設備利用率[%]	-	80	85	85
最大容量設備利用率[%]	-	-	80	80
寿命[年]	-	13	55	25

パラメータの設定方法として、LIB・揚水発電についてはいずれも O. Schmidt ら [2] の値を参考にした。次に、蓄熱発電の充放電効率・各運転維持費・寿命については安藤ら [3]の標準ケースの値を用いた。設備コストについては、LIB 同様に容量設備コストも出力設備コストに集約する形で算出していたため、別々に再算出した。その過程において、線形補間では 2050 年以降に一部のコストが負になったため、指数補間に処理を変更している。

出力設備の設備利用率について、揚水発電・蓄熱発電については最大 85%と設定する。また、LIB は運用に伴い蓄電可能容量が減少していくが、一般に初期容量の 80%以上に蓄電出来なくなったタイミングを寿命 [2]と判断する考え方がある。そこで、寿命期間内は 80%の設備容量は使用可能と考え、容量設備の最大設備利用率を 80%としたい。ただし、LIB については、容量設備コストを出力設備コストに集約しているため、実際には出力設備の設備利用率を最大 80%と設定する。さらに、揚水発電・蓄熱発電の容量設備の設備利用率についても同様の考え方から最大 80%と設定する。年経費率は運転維持費の各設備費割合と主観的割引率の合計とし、主観的割引率は一人当たり GDP に応じ、地域別・時点別に 8～20%[4]で設定する。

(3) おわりに

5.3.2 節では、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いて、1 年間を 17 時間帯に分割した形で電力需給バランスをモデル化し、そのモデルにおいて各蓄電・蓄熱発電技術について、経済性を評価する方法について検討した。

17 時間帯のモデル化については、計算コストを抑制しつつモデルの電力需給バランスの表現力を向上させるため、電力需給の季節変化・日内変化・瞬時ピークという特徴に応じて時間帯を分割し、更に使用可能な技術を差別化した。LIB については、モデル化する充放電パターンを絞り、容量設備コストを出力設備コストに集約することで、パラメータ数の削減を図った。揚水発電・蓄熱発電については、出力当たりの設備コストの違い･容量当たりの設備コストの違い･充放電効率の違いを表現するため、出力設備コストと容量設備コストを別々に与えた｡電力需給量のモデル化については、特に太陽光発電・風力発電が季節や時刻によって大きく発電量が変動することを表現するため、17 時間帯それぞれに割り振る形で設備利用率を設定した。

今後、5.3.2 節で示した 17 時間帯モデルと各技術パラメータを用いて、蓄電・蓄熱発電技術について、経済性評価を行う。

参考文献（第 5.3.2 節に関するもの）

1) 岡崎徹：蓄熱発電所とその日本での適用検討、日本エネルギー学会機関誌　えねるみくす、98 (2019)、pp.131-138.
2) O. Schmidt et al.: Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies, Joule, 3, (2019), 81-100
3) 安藤輝尚、佐野史典、秋元圭吾：世界エネルギーモデルを用いた蓄熱発電技術の評価、第 40 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、(2024)

4) RITE：温暖化対策コスト評価およびその推計の前提となる投資の主観的割引率（投資回収判断年数）について、
https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/mitigationcost-discountrate.pdf（アクセス日 2023.12.8）

5.4 需要側技術の動向と社会変化

5.4.1 デジタル化と循環経済による商業活動への影響

デジタル化の進展、シェアリングエコノミーの普及、環境意識の高まり等により、消費行動を含む生活行動が変化し、需要構造が大きく変化する可能性が高まっている。気候変動対策の評価に当たっては、リバウンド効果を含めて包括的に変化をとらえる必要があり、エネルギー需要を規定する生活行動に遡って、需要の発生メカニズムを検討する必要がある。その一環として、住環境計画研究所の協力により調査・検討を実施している。

表 5.4.1-1 に示すように、昨年度まではコロナ禍により日本でも急速に広まった在宅勤務に注目した。在宅勤務は生活行動、家庭やオフィスビルのエネルギー需要を変えつつあるものの、その影響が明確に現れるまでにはまだ一定の時間を要すると考えられる。他方、オンラインショッピング等の E コマース（EC）は普及が始まって既に四半世紀が経過しており、店舗・倉庫等の商業用建築物の需要に影響が現れてきていると考えられる。このような背景から、今年度は、デジタル化の進展や循環型経済（Circular Economy: CE）の普及等が商業用建築物の需要に及ぼす影響について調査を行い、関連情報を整理した。

表 5.4.1-1 生活行動に基づく需要発生メカニズムの調査・検討事項
（2020 年度～2024 年度）

年度	2020	2021	2022	2023	2024
既往研究等の文献調査	• 生活行動とエネルギー（テレワーク、COVID-19影響等） • 「隠れた費用」	• 在宅勤務等	• 在宅勤務等（特に移動需要に着目）	• 在宅勤務等の電力ロードカーブへの影響、オフィス需要の変化	• Eコマースが商業用建築物需要に及ぼす影響
公的統計等の活用	• 生活行動とエネルギーに関する統計の情報収集	–	• 既往研究におけるデータソース等の情報収集	• 在宅勤務実施世帯のエネルギー需要分析（家庭CO_2統計データ分析、米国RECSデータ分析）	• 小売業床面積、Eコマースの普及率及びEコマースの促進要因の情報収集 • 時系列、国・地域間比較、相関関係
オリジナル調査	–	• 生活行動・消費行動のアンケート調査（在宅勤務、ネットショッピング実施状況で層化）	–	–	–
定量的検討（モデル化）	• 分析フレームワークの改造 • パス図の構築（在宅勤務、ネットショッピング）	• 重回帰分析、因子分析 • SEMによるモデル化（在宅勤務、ネットショッピング）	• COVID-19後の生活行動に関する国交省調査データの分析	–	–

(1) 関連情報の収集と相関分析

消費者向けの E コマース（EC）市場は、国や地域ごとのデジタル化の進展度合い、経済環境、消費者行動、サービスモデルや販路の多様化など、さまざまな要因から影響を受ける。また、EC の発展に伴い、商業施設の面積や小売業態に変化が生じ、従来の実店舗の役割が変化する可能性も指摘されている。さらに、消費者のサステナビリティに対する関心が高まる中、CE へのシフトが EC 市場に与える影響が顕著になりつつある。例えば、アパレル業界ではリユースの普及により衣服の使用寿命が延び、その結果として生産や販売のための新たな工場や店舗建設の需要が減少するなど、商業活動に変化をもたらす可能性がある。（図 5.4.1-1 は、要因や影響のイメージ図）

本項では、デジタル化進展、CE 普及、商業活動に関連する情報を収集する。調査対象国は、日本、米国、中国、欧州といった EC（BtoC および CtoC）市場規模の大きい主要国 [1]である。さらに、各国の統計や国際機関の公表情報など、信頼性と正確性の高いデータに基づき、デジタル化進展、CE 普及、商業活動の相関関係を定量的に分析する。統計データの整理対象は、各国の EC 市場規模に関する情報が利用可能な 1998 年から 2022 年までとする。

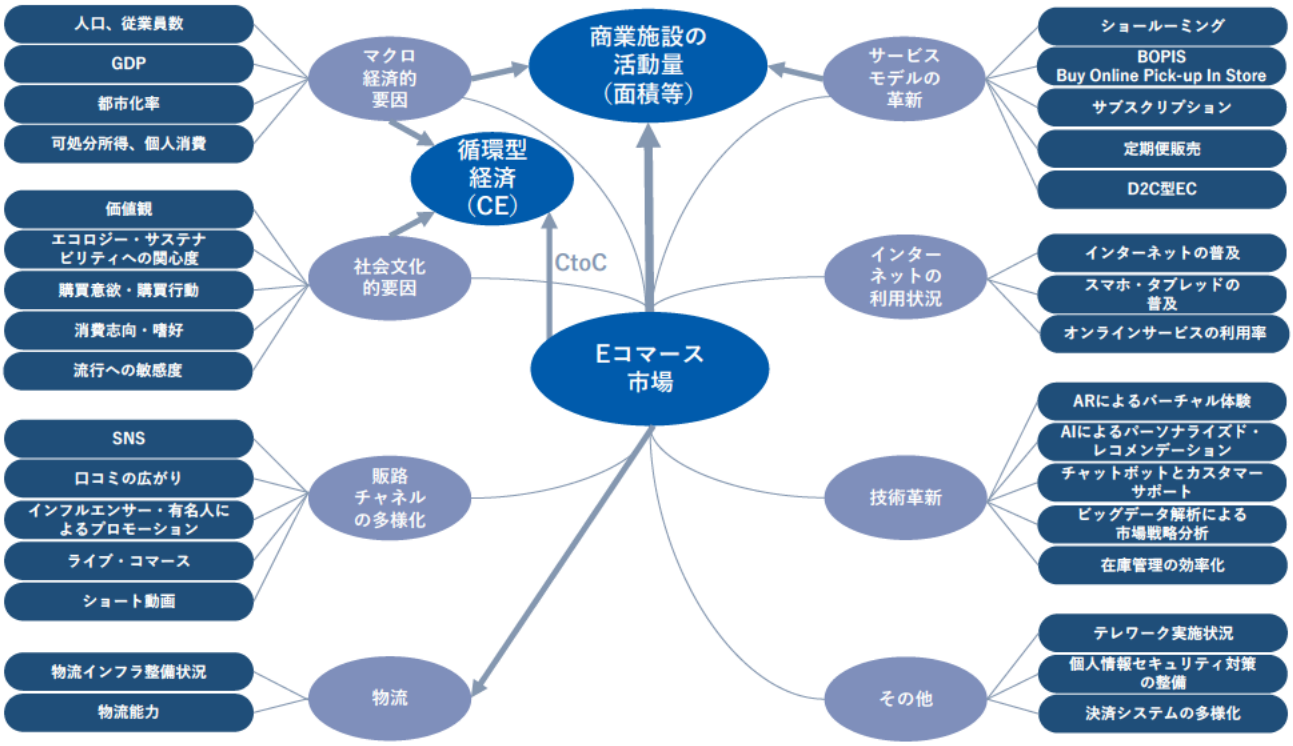


図 5.4.1-1 EC の成長に寄与する要因と商業活動への影響要因（イメージ図）

① 関連情報の収集

a. 商業活動に関する情報

i) 小売業（床面積データ）

日本、米国、中国、欧州の小売業床面積データを基に、図 5.4.1-2 のような経年変化が見られる。これらから、国ごとの傾向の違いを以下の通り整理する。

- 日本においては、2000 年初頭にやや増加したものの、その後減少傾向に転じ、2020 年時点では 1999 年を下回る水準となっている。これは、人口減少や消費行動の変化、EC 市場の拡大などが影響している可能性がある。特に、国内市場の成熟化や都市部における小売施設の集約が、小売業床面積の微減に寄与したと考えられる。
- 米国の動向をみると、1999 年を 1 とした場合、2000 年初頭は 1.09 と大きく増加し、また 2010 年初頭にかけて増加し続けたが、その後縮小する傾向が見られる。2018 年時点でも 1999 年を上回る水準を維持しているが、近年の減少は、大型ショッピングモールの衰退や EC 市場の拡大が要因となっている可能性がある。
- 一方、中国の小売業床面積は、日米とは対照的に急速な成長を遂げている。2012 年を基準とすると、一貫した増加傾向が見られ、2020 年には 2.6 に達している。この著しい成長は、中国における経済成長や都市化の進展に加え、新たな商業施設の開発が活発に行われ、小売業床面積が拡大していることを示唆している。特に、2000 年代以降、ショッピングセンターの建設が加速し、小売業の物理的な拡大が継続している。ただし、EC 市場の発展が進む中で、今後は売場面積の拡大が鈍化する可能性があるとの指摘もある [2)-3)]。また、一部の都市ではショッピングセンターの売場面積が過剰であるとの指摘 [4)]もなされており、地域（上海等）によっては供給過多が課題となる可能性がある。
- 欧州においては、2011 年に比べ 2020 年は 11%の増加が見られるが、これは卸売業と小売業を含めたデータである点に留意が必要であり、小売業単体の動向を正確に反映しているとは限らない。そのため、本データはあくまで参考程度にとどめるべきであり、欧州各国の小売業床面積の変化をより正確に把握するには、追加の統計情報の検討が求められる。

総じて、日本や米国では小売業床面積が減少または停滞傾向にある一方で、中国では急激な増加を示している。この違いには、表 5.4.1-2 に示すように、マクロ・経済的要因（経済成長、人口動態、可住地面積、投資回収など）、立地的要因、都市計画や契約形態の違い、建物の寿命や修繕管理状況、および EC の普及状況などが、小売業の建築面積の変化に影響を与えていると考えられる。

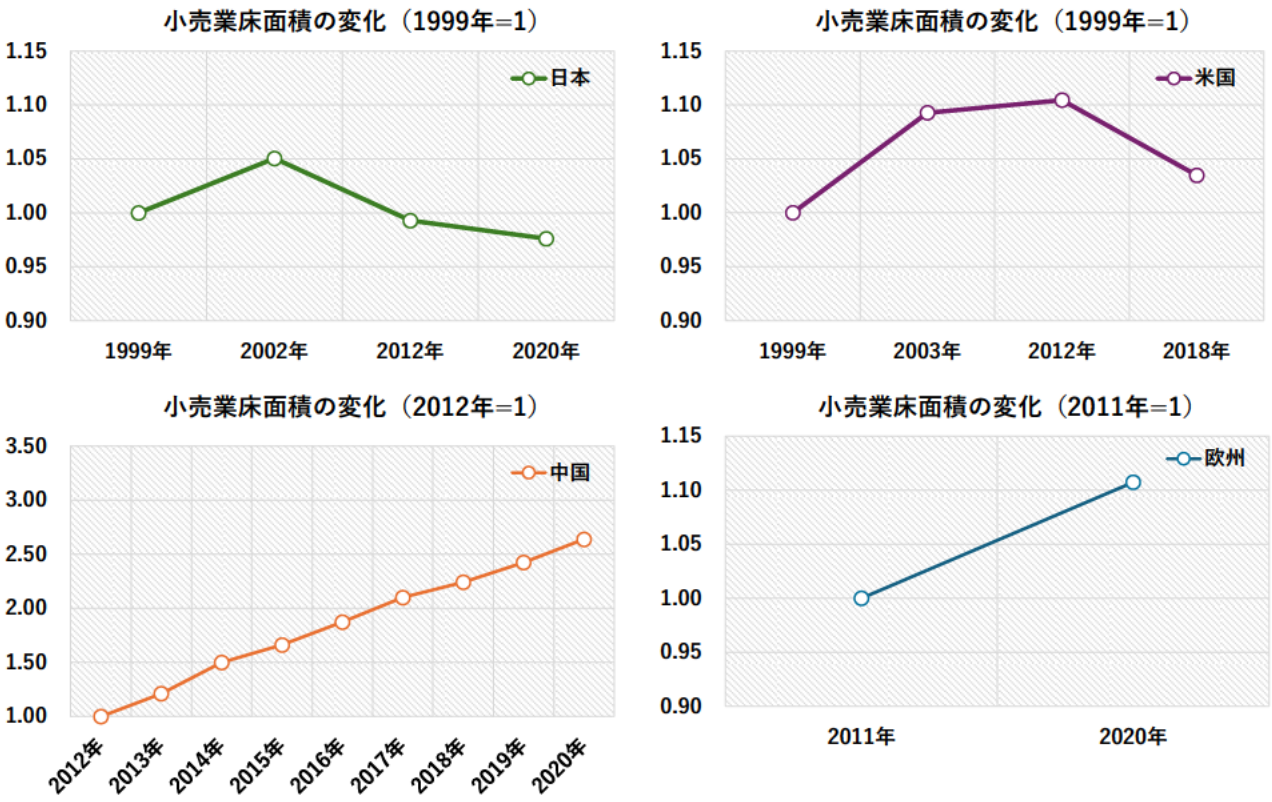


図 5.4.1-2 各国小売業床面積（ストック）の経年変化

（出典）各種統計情報[5)-15)]に基づき作成

（注）欧州のデータは、卸売業と小売業を含む点に留意が必要

表 5.4.1-2 建物の建設面積に影響を与える要因

No.	大分類	細分類
1	マクロ・経済的要因	・ 市場・需要・地理的要因（国レベル）：景気動向、人口・都心部集中型、可住地面積 ・ 商圏（地域レベル）：人口密度、年齢層（客層・高齢化）、集客力、購買力、空室率 ・ 運営コスト・投資回収：賃料、土地価格、光熱費、人件費、投資規模、売上高、採算性 ・ その他：ライフスタイル、消費意識、消費行動の変化（週末のまとめ買い習慣、車離れなど）
2	立地的要因	・ 交通アクセス ・ 周辺環境（競合店舗や同業他社店舗の集積状況）による集客相乗・購買意欲への影響
3	法・規制的要因、体制づくり	・ 都市計画法・建築基準法（容積率、建ぺい率の制限） ・ 大規模小売店舗法・立地法、土地利用の規制など ・ 契約形態・契約期間 ・ 空き店舗の利活用への体制整備
4	設計・建築的要因	・ 売場の配置・ゾーニング ・ 建物の寿命、修繕管理状況
5	ECの影響	・ EC化の拡大に伴う実店舗の役割の変化 ・ 小売業態の再編（店舗形態の変化） ・ サプライチェーンの変化

表 5.4.1-3　各国における小売業床面積の比較

調査項目	国別	統計/調査名	現状実績	課題
小売業ストック面積	日本	経済産業省「商業統計」	• 1999年：1.34億㎡（1.06㎡/人） • 2020年：1.31億㎡（1.03㎡/人）	• 2020年以降のデータは利用不可 • 一部調査年間で数値が接続しない場合がある
	米国	米国エネルギー省のエネルギー情報局「Commercial Building Energy Consumption Survey（CBECS）」	• 1999年：10.6億㎡（3.7㎡/人） • 2018年：11.0億㎡（3.4㎡/人）	• 小売業カテゴリーにスタジオなど、ECとは関係のない施設のデータも含まれている • サンプル調査に基づく推計であり、実態と差異が生じる可能性有 • 利用可能なデータの時点が限定的
	中国	中国商務省「China Trade and External Economic Statistical Yearbook」、中国連鎖経営協会「中国ショッピングセンターの年次レポート」	• 2011年：3.3億㎡（0.25㎡/人） • 2020年：8.2億㎡（0.58㎡/人）	• 年間売上高500万人民元以上の小売事業者に限定されており、データの網羅性が不十分
	欧州	参考文献（GfK社のデータ）に基づく推計	• 2020年：5.8億㎡（1.13㎡/人） ※推計値	• 包括的なデータベースは存在するが、特定の年の情報に限定され、経年変化の把握ができない • 卸売業と小売業が分離されておらず、小売業の面積を単独で把握できない

（出典）各種統計情報[2),6)-9),10),11),14),15)]に基づき作成
（注）欧州の数値は、欧州連合（EU）加盟国のものである

なお、各国のデータには下記のような課題がある。

【日本】

- 日本の小売業床面積に関する最も有用な公的統計は、経済産業省が実施する「商業統計」である。本統計は、日本標準産業分類に基づき全国の小売業事業所の売場面積を調査しているが、2020 年以降のデータが存在しないほか、2007 年と 2012 年の調査設計変更により数値の接続に課題がある。
- このほか、国土交通省の「建築物ストック統計」や「建築着工統計調査」なども公的統計として存在するが、小売業単独の面積を把握することはできない。公的統計以外では、民間研究機関が集めたデータベースや業界団体の調査データも存在するが、同様の課題がある。
- 加えて、業界団体の調査データも存在するが、商業統計との整合性が取れていない場合があり、また業界団体の加盟企業に限定されていることが多く、全国規模での把握が困難である。さらに、売場面積の推計方法にも課題が残る。具体的には、一店舗あたりの面積を想定して全体の面積を推計する必要があり、この方法には精緻性に限界がある。

【米国】

- 米国は、米国エネルギー省のエネルギー情報局が実施する「Commercial Building Energy Consumption Survey（CBECS）」において、業務用建物の属性やエネルギー消費量が調査されている。直近年の調査（CBECS 2018）では、約 1.6 万棟[16)]の非住宅建築物が調査対象となっており、屋内型・ストリップモール、ショッピングモール以外の小売店舗、食品販売店舗が小売業として分類されている。ただし、ディーラー、スタジオ、ギャラリーなどの EC と関係の

乏しい施設も含まれている点に留意する必要がある[17]。また、CBECS は全米の非住宅建築物の中からサンプル調査を行い、その結果を拡大推計しているため、精度に留意する必要がある。

- 他には、「City and County Commercial Building Inventories[18]」という米国の都市と郡における商業建物に関するモデリングデータが提供されているが、経年データではないため、変化のトレンドを追うことができない。

【中国】

- 中国の小売業床面積に関する公的統計情報には、いくつかのデータが存在するが、それぞれに特徴と課題がある。これらの中でも「中国建築業統計年鑑」は、中国で最も代表的な公的データの一つであり、同年鑑に収録されているデータは、中国国家統計局が策定した「建設業統計報告制度（中国語：建筑业统计报表制度)」に基づいて収集・集計されたもので、住宅および非住宅全般に関する情報を含んでいる。非住宅の分類には「商業・サービス業」や「倉庫」の新築竣工面積の経年データがあるものの、「商業・サービス業」には飲食店や宿泊施設も含まれており、小売業に特化したデータが得られないという課題がある。
- 小売業のストック面積に関連する統計としては、「中国貿易外経済統計年鑑（中国語：中国贸易外经济统计年鉴)」や「小売業の業界団体の調査データ」を参考にすることができる。しかし、業界団体の調査は、チェーン店を対象とした結果であるため、利用する際にはその範囲や対象の限定性に留意する必要がある。
- また、中国のショッピングセンターの面積については、中国連鎖経営協会などの公開資料より参考できる。
- さらに、日本と同様に小売業の業界団体による調査データも存在するが、これらはチェーン店を対象とした結果であるため、調査範囲や対象に限定性があり、全国規模でのデータ網羅性に欠けるという課題がある。
- これらの統計における主な課題は、データの網羅性が不十分であり、特定の業態や施設に偏っていること、また業種や調査対象が限定されている点である。

【欧州】

- 欧州においては、欧州全体を対象とした統計調査は行われておらず、欧州委員会の資金提供の研究プロジェクトの一環で、BuiltHub や EU Building Stock Observatory といった特定時点における商業施設を含む非住宅建築のストックデータの収集と分析が行われている。また、一部の国の統計機関や民間企業が部門別のエネルギー消費調査を実施しており、その中に小売業に関する情報も含まれているが、いずれも小売業単体で分離されることはなく、卸売業と小売業が合わせて報告される場合が多い。
- これらの研究プロジェクトでは、アドホックで収集されたデータを基に商業施設やエネルギー消費に関する包括的なデータが提供されているが、いくつかの課題が存在する。例えば、データは特定の年の情報に限られており、経年変化を把握することができない。また、商業施設のカテゴリーには卸売業が含まれ

ており、小売業のストック面積を単独で把握することが難しい。さらに、一部の国のデータが欠けており、全体の網羅性が不十分であるという点も問題である。

ii) 物流・倉庫（宅配便取扱個数）

各国における物流・倉庫の面積動向は、各種公的統計データおよび調査結果に基づいて把握されているが、これらの統計は主として農業、製造業、鉱業等の製品や原料を保管する普通倉庫の面積を対象としているため、EC 専用倉庫の面積に関する直接的な情報は提供されていない。そこで、代替指標として「宅配便等取扱個数」の調査結果を整理した。

日本においては、国土交通省が公表する統計によれば、2022 年に約 50 億個（一人当たり約 40 個）の宅配便が取り扱われたことが確認されている。これは、EC 市場の拡大と連動して宅配需要が増加していることを示唆している。

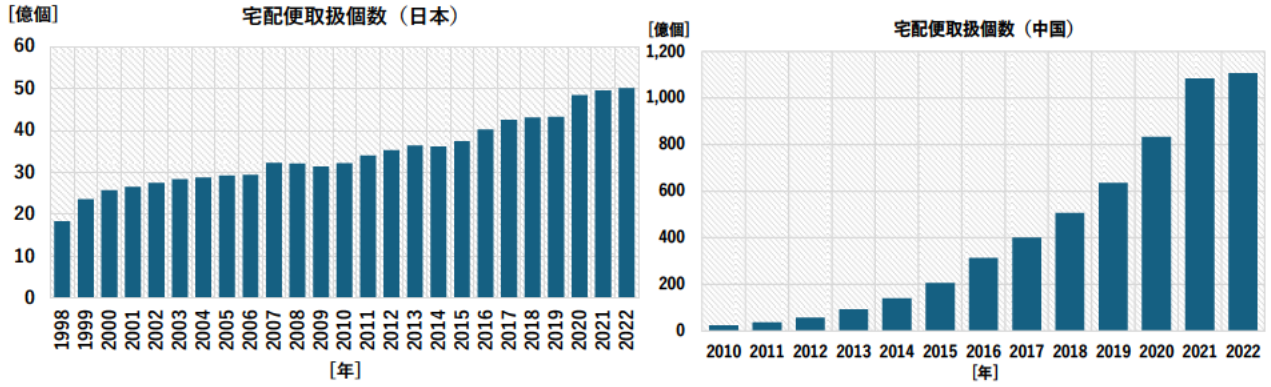


図 5.4.1-3　宅配便取扱個数の推移（左図：日本、右図：中国）

（出典 1）左図：国土交通省「宅配便等取扱実績調査 [19]」に基づき作成

（出典 2）右図：中国国家郵政局発展研究センター「中国宅配物流調査 [20]」に基づき作成

（注）日本の「宅配便」とは、一般貨物自動車運送事業の特別積合せ貨物運送又はこれに準ずる貨物の運送及び利用運送事業の鉄道貨物運送、内航海運、貨物自動車運送、航空貨物運送のいずれか又はこれらを組み合わせて利用する運送であって、重量 30kg 以下の一口一個の貨物を特別な名称を付して運送するものをいう [19]。

米国においては、米国政府が運営する郵便サービス USPS（United States Postal Service）や民間配送会社の統計データが参考となる。Pitney Bowes 社の調査結果 [21] によれば、2023 年の小包配送件数は 217 億件（一人当たり約 66 個）に達しており、そのうち、Amazon が全体の約 27%を占め、USPS に次ぐ第 2 位となっている。

また、Jean-Paul Rodrigue のレポート [22]によると、Amazon の物流施設は年々増加傾向にあり、その大部分が EC における中核的物流拠点である E-フルフィルメントセンターである。これらの施設は、迅速な配達を実現するために戦略的に配置され、ラストマイル施設としても重要な役割を果たしている。

中国においては、国家郵政局発展研究センターが実施する調査結果に基づくと、宅配業務は安定的に成長しており、2022 年の宅配取扱量は約 1,100 億個（一人当たり約 80 個）に達し、過去最高を記録している。業界内では大手企業の優位性が顕著であり、全国に数十万の営業拠点が整備され、都市部のみならず農村地域においてもサービス網が拡大している。一人当たりの宅配便取扱個数で見ると、中国は日本の約 2 倍、米国の約 1.2 倍となっており、EC 市場の急速な拡大が物流需要の増大に強く寄与していることが窺われる。

以上のように、各国の物流動向は、EC 市場の拡大が大きく寄与していると推察される一方で、直接的な EC 専用倉庫の面積の詳細な動向に関する情報は十分に整備されていないという共通の課題が存在する。各国ともに、EC 市場の成長に伴う物流需要の具体的な影響度や施設の内訳について、今後さらなる詳細な調査が求められる。

b. デジタル化と循環型経済に関する情報

日本では、経済産業省が 1998 年から毎年実施している「電子商取引実態調査」において、BtoC-EC および CtoC-EC 市場の動向が把握されている。調査結果によれば、1998 年の BtoC-EC 市場規模は約 650 億円であったが、2022 年には約 23 兆円に達し、小売業全体の市場規模に占める割合は約 14.5%となっている。また、品目別の構成比を見ると、コロナ禍に伴う外出制約などの影響により、2020 年以降は物販系のシェアが増加し、EC 化率が高い品目（書籍・音楽・映像ソフト、生活家電・PC 周辺機器、生活雑貨等）の需要拡大が顕著となっている。

一方、CtoC-EC 市場に関しては、フリマアプリやネットオークションの取引規模が同調査によって把握されており、2022 年の市場規模は約 2.4 兆円に達している。ただし、これらのデータは 2018 年以降に限定され、また、純粋な消費者間取引以外の BtoB や BtoC の取引も含まれている点には留意が必要である。

米国では、米国国勢調査局が発表する「Annual Retail Trade Report」の公的統計データを参考に BtoC-EC 市場規模を把握することができる。米国の BtoC-EC 市場は、特にコロナ禍において前年比約 43%の大幅な成長を遂げ、2022 年には約 1 兆ドルに達し、小売業全体に占める割合は約 14.4%となっている。品目別の動向においては、食品・飲料、家具・家庭用品、玩具・趣味・ゲーム、家電製品、スポーツ用品など、在宅時間の増加に連動して各カテゴリーで需要が急増している。

一方、中古品市場に関しては、米国国勢調査局の「Monthly Retail Trade Survey」により中古品取扱店舗の売上高が把握されているものの、CtoC-EC に関する公的データは存在しない。ただし、アパレル分野に限定すると、ThredUP 社のレポートによれば、アパレルのリセール（再販）市場は年々拡大しており、2023 年には 230 億ドルに達し、従来型のリサイクルショップや寄付市場を上回る傾向にある。また、同レポートでは、2023 年から 2028 年の間に年平均成長率（CAGR）11%で市場が拡大し続けると予測されている。

中国では、中国商務部が発行する「E-COMMERCE IN CHINA」より、BtoC-EC 市場および CtoC-EC 市場に関する情報を把握することができる。現在、中国は世界最大の BtoC-EC 市場となっており、2022 年には小売業全体に占める割合が約 39%（サービス

分野を除く割合は約 3 割）に達している。巨大な消費市場と高密度の都市群、急速なインターネット普及、スマートフォンの浸透、充実した物流インフラ、便利なショッピングアプリ、デジタル決済システムの多様化などが、EC 市場拡大の主要要因として働いている。また、コロナ禍による実店舗の売上減少がオンライン購買の急増を招き、BtoC-EC 市場の成長をさらに後押しした。

中国の EC 市場は、2000 年代初頭にアリババグループが運営する淘宝網（Taobao）を中心とする CtoC-EC 市場が先行して発展したが、2011 年以降は BtoC 市場が優勢となり、2022 年には BtoC-EC のシェアが全体の約 8 割を占めるまでに成長した。中国における CtoC-EC 市場は発展当初、日本のフリマアプリ市場とは異なり、個人事業主（小規模事業者）による新品商品の販売が主流であり、中古品取引は限定的であった。しかし近年では、日本と同様にフリマアプリを通じた中古品取引が増えている。

欧州では、Ecommerce Europe が公表する「EUROPEAN E-COMMERCE REPORT」を通じて BtoC-EC 市場の動向を把握でき、2022 年の売上高は約 8640 億ユーロに達している。

一方、CtoC-EC 市場や中古品取引の定量的データは限られているため、文化的背景や政策を中心に整理した。欧州では古くからリユースや修理の文化が根付き、「蚤の市」が盛況であり、ブランド品もメンテナンスを施して受け継ぐことが一般的である。こうした文化は資源の無駄遣いを削減し、循環型経済の促進につながっている。

欧州委員会は 2020 年に新たな循環型経済行動計画 [33]を採択し、循環型材料使用率を 2030 年までに倍増させることを目標としている。本計画では、電子機器、バッテリー・車両、包装、プラスチック、繊維、建設・建物、食品などが重点分野とされ、特に環境負荷の大きい繊維分野が注目されている。2020 年時点で EU の繊維廃棄物の平均回収率は 12%であるが、国によっては 50%を超えるなどばらつきが大きい [34]。

このように、各国の EC 市場規模と EC 化率は伸び続けており、特にコロナを契機に市場規模の拡大が顕著である。先進国では従来から実店舗が充実しており、小売業がある程度発展していたため、EC 化の進展は比較的緩やかであったが、コロナ禍によりオンライン購買の需要が急増し、市場拡大が加速している。一方、中国のような後発国では、デジタル化の進展と実店舗小売の発展がタイミングよく重なり、EC が急速に普及したことが一因であると考えられる。特に、スマートフォンの普及、決済手段の多様化、物流インフラの発展が EC の成長を後押ししており、これらの要因が相まって市場が拡大している。

こうした成長の中で、EC 市場の成長は循環型経済を加速させる要因となり、オンラインプラットフォームを活用したリユースが持続可能な消費行動を支えることから、両者は相互に強化し合う関係にある。

表 5.4.1-4　各国における EC 市場規模の比較

調査項目	国別	統計/調査名	現状実績	特徴
EC市場規模	日本	経済産業省 「電子商取引実態調査」	【BtoC-EC市場規模】 • 1998年：0.65兆円、EC化率：0.04% • 2022年：23兆円、　EC化率：14.5% 【CtoC-EC市場規模】 • 2022年：2.4兆円（BtoC-ECの約10%）	• コロナ禍を契機に日本のEC市場は拡大し、特に物販系の成長が顕著 • EC化率はデジタルコンテンツや家電・雑貨分野が高く、食品・医薬品分野では低い
	米国	米国商務省国勢調査局 「Annual Retail Trade Report（ARTS）」	【BtoC-EC市場規模】 • 1998年：143億ドル、　EC化率：0.5% • 2022年：9975億ドル、EC化率：14.4%	• 在宅時間の増加が消費行動を変え、EC市場全体の拡大を後押し • コロナ禍で生活必需品やエンタメ・健康関連商品のEC化が進展
	中国	中国商務部 「E-Commerce in China」	【BtoC-EC市場規模】 • 2008年：0.01兆人民元、EC化率：0.08% • 2022年：17兆人民元、　EC化率：39% 【CtoC-EC市場規模】 • 2022年：4.4兆人民元（BtoC-ECの約26%）	• 物流インフラの発展、スマートフォン普及、ライブコマース等の販路の多様化、決済の多様化が市場拡大を後押し • コロナ禍による外出制限がEC利用を定着 • 品目別では通信機器、家具・家庭用品、食品・飲料の伸びが顕著
	欧州	Ecommerce Europe 「European E-Commerce Report」	【BtoC-EC市場規模】 • 2012年：2765億ユーロ、EC化率：－ • 2022年：8640億ユーロ、EC化率：15.2%※ ※参考文献より（ECDBのデータ）	• イギリス、ドイツ、フランスが主要市場 • ファッション、電子機器、趣味の分野でEC化が進展 • 日用品等は依然として実店舗での購買が主流

（出典）各種統計情報 [23)-32)]に基づき作成

（注）欧州の数値は、2012 年は欧州連合（EU）加盟国、2022 年は欧州 37 ヵ国のデータである。

② 相関分析

a. 国別にみるデジタル化や循環型経済と商業活動の関連性

i) 各種要因と EC 売上高との相関関係

ここでは、日米中の三か国における EC 市場データが入手可能な 2008 年から 2022 年までのデータ、欧州については 2012 年から 2020 年までのデータを用いて、一人当たり GDP と EC 売上高の関係を検討する。なお、本節に示す調査対象国の一人当たりの GDP および EC 売上高を比較するにあたり、為替レートを用いてドル換算している。ただし、為替レートは時期によって大きく変動するため、以下に示す過去年の対ドル平均為替レート [35)-37)]を使用している点に留意されたい。

- 日本：日本銀行の 1998 年～2022 年の為替レートの平均値 109 円/ドル
- 中国：中国外貨取引センターの 2006 年～2022 年の為替レートの平均値 6.7319 人民元/ドル
- 欧州：欧州中央銀行の 2000 年～2022 年の為替レートの平均値 1.218 ドル/ユーロ

各国・地域の一人当たり GDP と一人当たりの EC 売上高の関係をみると、米国と中国においては両者の間に強い相関が見られるが、日本と欧州においては弱い相関が確認される。日本や欧州のような先進国では既にデジタル化を進展する経済基盤が整っていることから、経済成長率に関わらず一人当たり EC 売上高が増加していると考えられる。中国も既にその段階に入っているとみられる一方、本調査で対象としていない、より経済規模の小さい国・地域において同様の傾向が見られるかどうかは今後の検討課題である。また、米国では一人当たり EC 売上高が成熟しつつあるように見えるが、一時的な傾向である可能性もあり、他の国・地域を含め今後の動向をふまえて評価する必要がある。

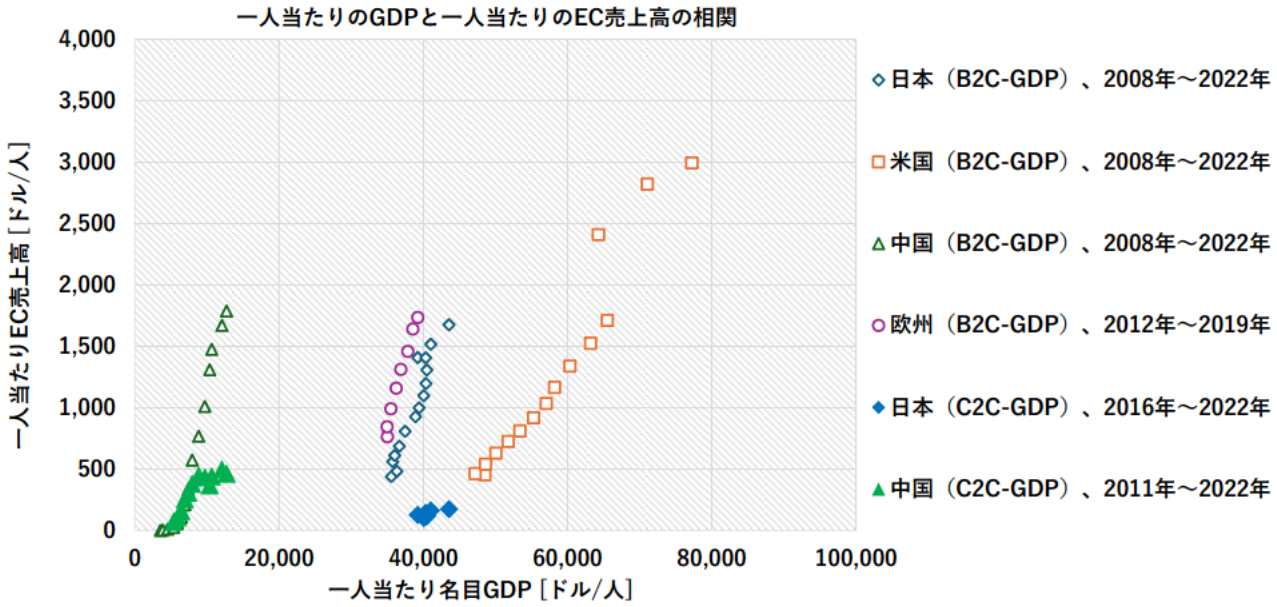


図 5.4.1-4 一人当たりの GDP と EC 売上高の相関

（出典）各種公表値[23)-31),38)-41)]に基づき作成

（注）上図に示す欧州は、イギリスの EU 離脱前の EU 加盟国のデータである

ii) 各種要因と小売業床面積との相関関係

図 5.4.1-5～図 5.4.1-6 は、横軸にそれぞれ一人当たりの GDP と EC 市場規模、縦軸に一人当たりの小売業床面積を取った相関図である。なお、中国のデータは 2009 年～2022 年の充実した時系列データであるのに対し、日本は 2012 年～2020 年のうちの数時点、米国は 1999 年～2018 年のうち 4 時点のデータに限られるため、国別の傾向を比較する際には、データの欠落の影響を十分に考慮する必要がある。なお、欧州については店舗面積に関しては利用可能なデータが 2 時点のみであるため、これを基にした相関性の検討は適切ではない。そのため、ここでは検討対象外とする。

日本においては、一人当たりの小売業床面積は 1999 年以降、ほぼ横ばいの傾向を示している。これは、人口減少や高齢化が進展する中で、オンラインショッピングの利用増加や、すでに整備された大規模な商業施設の存在が、物理的な小売業床面積の拡大を抑制する要因となっているためと考えられる。加えて、EC 売上高の増加が確認されるにもかかわらず、一人当たりの小売業床面積に大きな変化が見られないことは、国内市場における物理的店舗の利用パターンが既に成熟していること、あるいは EC の普及が既存の小売業床面積に直接影響を与えていない可能性を示唆するものである。

米国における一人当たり小売業床面積は、1999 年から 2003 年にかけて上昇傾向を示し、3.8～4.0 ㎡/人の範囲で推移していたが、2012 年および 2018 年には、それぞれ 3.7 ㎡/人、3.4 ㎡/人と減少している。米国の一人当たり小売業床面積は日本や欧州の約 3 倍の水準であり、その理由は明らかではないが、供給過剰により EC の進展による負の影響を比較的受けやすい可能性がある。

大前研一著「デジタル小売り革命[42)]」によれば、米国において多くの消費者がアマゾンを利用するようになった結果、2006 年には大手 CD 販売チェーンのタワーレコー

ドが倒産し、その後も 2011 年の大手書店ボーダース、2015 年の家電量販店ラジオジャック、2017 年の玩具販売トイザらス、2018 年の百貨店シアーズ・ホールディングスの経営破綻が相次いでいる（図 5.4.1-7）。

また、米国のウォルマートは、2010 年代の業績が振るわない時期に、売上高が低迷する要因の一つは、消費者の購買行動が店舗からオンラインにシフトしていることにあると見て、オンライン販売の強化を打ち出し、その一歩として、EC 小売業の買収に着手した。具体的には、2016 年に jet.com を買収、2017 年に入り 4 社を買収した [43]。

Credit Suisse 社は 2017 年に、米国におけるショッピングモールの廃墟化が急激に進行し、2022 年までに全体の 20～25%が消滅すると予測していて、当時、この予測は Los Angeles Times をはじめとする複数のメディアで引用されていた [44]。

米国のビジネス雑誌「Forbes（2025 年 1 月 30 日の記事）[45]」によると、2025 年には米国で最大 15,000 店舗が閉鎖される見込みであり、これは 2024 年の閉鎖数の 2 倍にあたる。これに対して約 5,800 店舗の新規開店が予想されているが、閉鎖数が依然として開店数を大きく上回る傾向にあり、これは伝統的な小売業の環境変化を如実に示している。

これらの事例を踏まえると、米国では、EC 市場の拡大とともに、一人当たりの小売業床面積が縮小している可能性がある。ただし、この現象には、オンライン取引の普及により実店舗の需要が低下したことが影響している可能性に加え、米国の人口増加による要因も絡んでいると考えられる。人口増加が一部の市場で新たな需要を生む一方で、EC の拡大が従来型の店舗に対する需要を圧迫し、もし実店舗の数が現状維持される場合、人口増加に伴い、一人当たりの小売業床面積が減少する傾向が見られることも考えられる。

中国では、2011 年における一人当たり小売業面積が約 0.25 ㎡/人であったのに対し、2020 年時点では約 0.57 ㎡/人にまで倍増している。この増加は、急速な経済発展に伴い消費活動が活発化した結果である。しかしながら、一人当たり GDP や BtoC-EC 売上高の伸びと比較すると、その増加幅は相対的に小さい。これは、オンラインショッピングの急速な普及により、従来の物理的店舗に対する需要が相対的に低下していることを反映している。

業界団体なども実店舗の面積について過剰であると指摘している。中国百貨店協会の公表資料 [4),48)]においては、中国の商業施設の面積について以下の見解が示されている。

- 商業施設の面積は、地域の経済発展水準、および消費者の可処分所得や購買力に大きく依存する。
- 一部の都市では、一人当たりのショッピングセンターの売場面積が過剰である。例えば、上海市における一人当たりのショッピングセンター面積は、2006 年の 0.17 ㎡から 2017 年には 0.72 ㎡へ大幅に増加し、2017 年時点で上海の一人当たり全小売床面積の 22%を占めている。一方で、上海のショッピングセンターの売上高は近年、社会消費財小売総額の 14～15%の範囲で推移し、成長が停滞している。これらのデータは、過去十数年間の一人当たり所得や小売総額の増加に加え、インフレーションや物価指数の変動を考慮すると、市場の健全な成長

傾向とは乖離している可能性があり、面積と売上高のバランスを考慮する必要性を示唆している。

- 国内の主要都市（1級都市：上海、北京、広州、深セン）においては、一人当たりショッピングセンター面積の上限値を0.3㎡に設定すべきである。
- 国内のショッピングセンターにおける一人当たり商業面積の過剰問題は、政府や業界全体が十分に注目し、対応を検討すべき重要な課題である。

日本や米国においては、経済発展が先行し、物理的店舗が市場の中心的役割を担った後にオンラインショッピングが普及していった。しかし、中国では、経済成長とEC市場の拡大が同時並行的に進行しているため、物理的店舗が市場全体の主流とはならず、ECがその役割を補完する形で発展している。また、都市化の進展、新たな商業施設の整備、そしてオンラインとオフラインの融合が同時並行的に進んでいる中国特有の経済・社会的背景が、一人当たりの小売業床面積の増加傾向に影響を与えていると考えられる。さらに、後発国では、経済発展初期からデジタル技術が普及しているため、従来の物理的店舗の発展を経ることなく、効率的なオンライン流通モデルが迅速に導入され、結果として直接的にEC市場が主流となる状況が生まれている。

中国では急速な経済成長とEC市場の拡大が進む中で、一人当たりの小売業床面積は増加しているが、その増加幅はGDPやEC売上高の伸びに比べて控えめである。また、過剰な店舗面積についての指摘[4)]があり、市場のバランス再考の必要性が浮き彫りとなっている。日米との対照から、中国の市場構造の特異性が明らかになり、今後はこれらの動向を注視する必要がある。

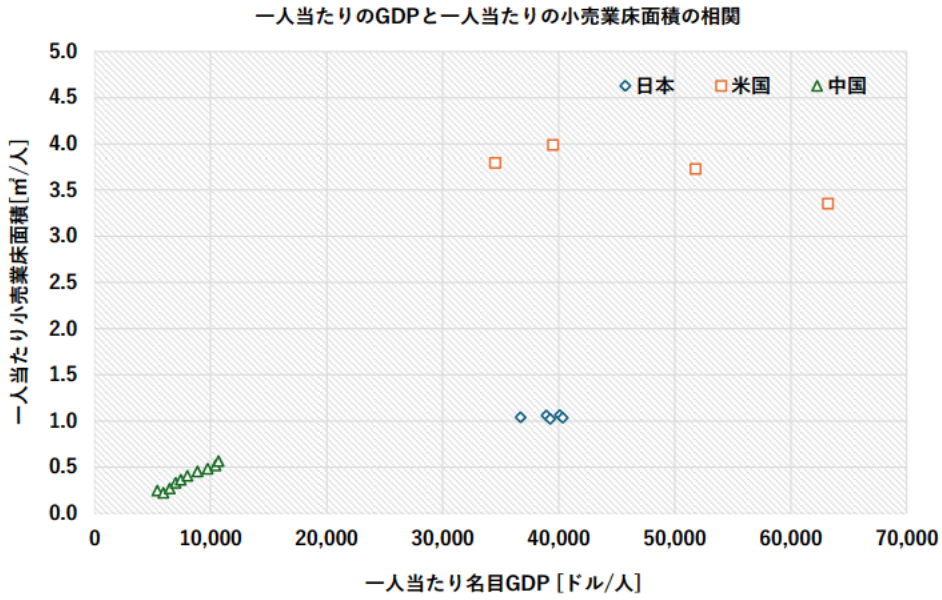


図 5.4.1-5 一人当たりの GDP と小売業床面積の相関

（出典）各種公表値[5)-13),35),38)-39)]に基づき作成

（注 1）日本のデータ：2012 年、2014 年、2016 年、2019 年、2020 年を含む 5 時点のデータを基に集計した結果

（注 2）米国のデータ： 1999 年、2003 年、2012 年、2018 年を含む 4 時点のデータを基に集計した結果

（注 3）中国のデータ：2011 年～2020 年のデータを基に集計した結果

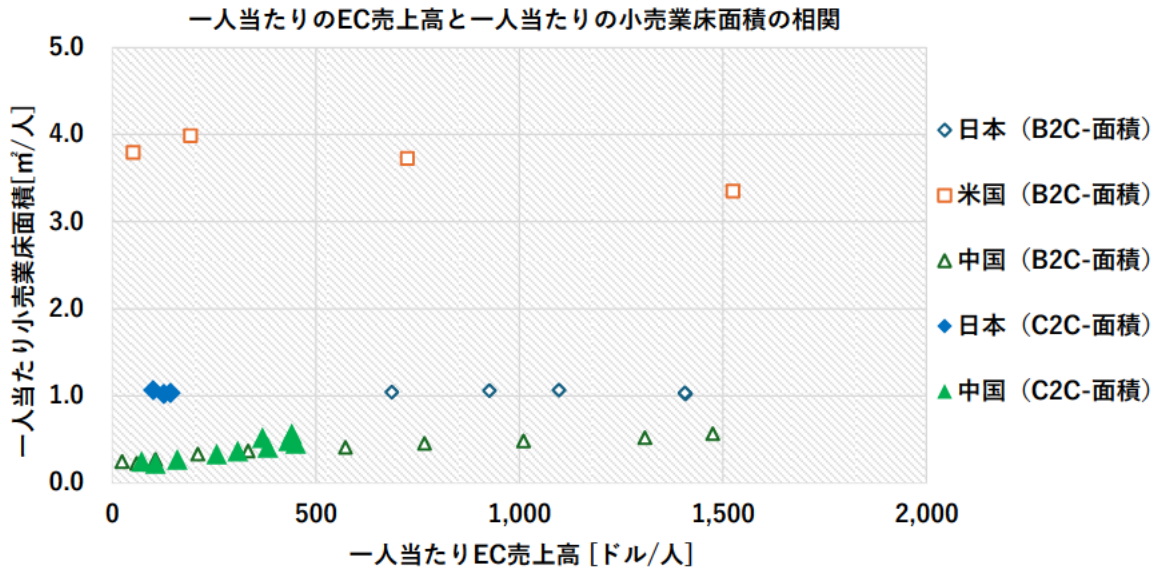


図 5.4.1-6 一人当たりの EC 売上高と小売業床面積の相関

（出典）各種公表値[5)-13),23)-25),35),38),39)]に基づき作成

（注 1）日本のデータ（B2C-面積）：2012 年、2014 年、2016 年、2019 年、2020 年を含む 5 時点のデータを基に集計した結果

（注 2）日本のデータ（C2C-面積）：2016 年、2019 年、2020 年を含む 3 時点のデータを基に集計した結果

（注 3）米国のデータ（B2C-面積）： 1999 年、2003 年、2012 年、2018 年を含む 4 時点のデータを基に集計した結果

（注 4）中国のデータ（B2C-面積、C2C-面積）：2011 年～2020 年のデータを基に集計した結果



図 5.4.1-7 アマゾンの売上高の推移

（出典）ナスダックの公開資料[42),46)]に基づき作成

b.　消費財別にみる EC 売上高と商業活動の関連性

i)　EC 化率が高い品目

消費財市場において、EC の普及と商業活動の関連性は品目ごとに大きな違いが見られる。その中でも、EC 市場の拡大による影響が最も顕著に現れている業種の一つが書店である。本や雑誌、CD などは、購入前に物理的なサイズや内容が容易に把握できるため、オンライン販売との相性が良い。これらの商品は、オンラインで豊富な品揃えから商品を迅速に選び購入できる利便性が大きく向上したことで、従来の書店が果たしてきた役割は急速に変化している。

書店業界（書籍市場）の EC 化率が高まるにつれ、店舗数や店舗面積への影響が一層顕著になっている。書店マスタ管理センターのデータによると、国内の書店の店舗数および総店舗面積は長期的に減少傾向を示しており、この経年変化が EC 化率の上昇と密接に関連していることが窺える。特に、50 坪未満の小規模書店の減少が顕著である一方で、300 坪以上の大型店舗は一定数を維持している（図 5.4.1-8 の棒グラフ）。

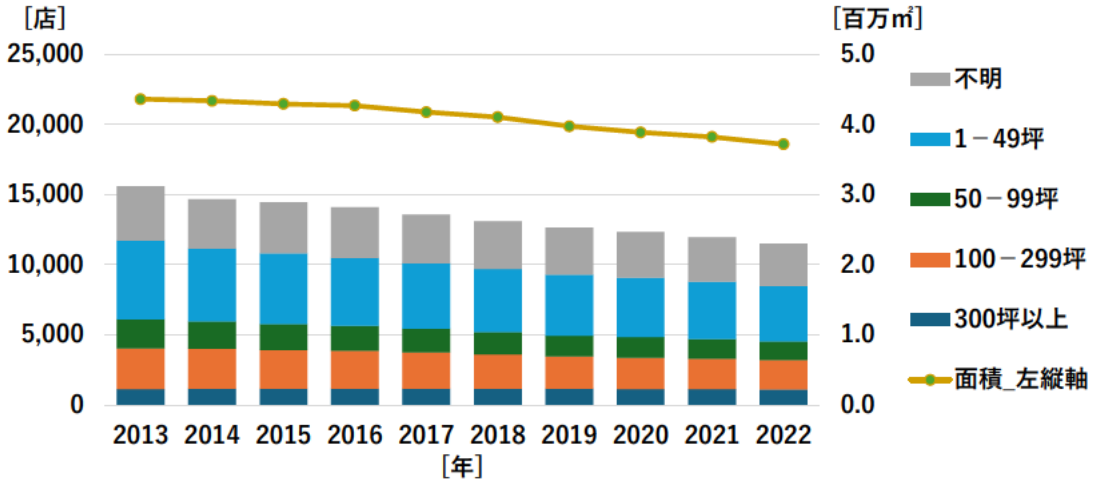


図 5.4.1-8　書店の坪数別店舗数と面積の推移（日本）

（出典）書店マスタ管理センター「店舗数・店舗坪数」の公表値[47]に基づき作成

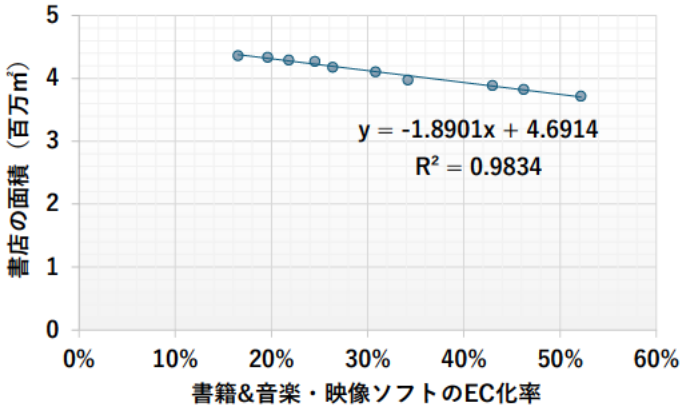


図 5.4.1-9　品目別 EC 化率と店舗面積の相関（日本、書籍・音楽・映像ソフト）

（出典）経済産業省「電子商取引実態調査 [23]」および書店マスタ管理センター「店舗数・店舗坪数」の公表値 [47]に基づき作成

（注）上図は、日本の 2013 年～2023 年のデータを基に集計した結果である。

これは、大型店舗が書籍や音楽・映像ソフト以外にも文房具、雑貨などの商品ラインナップを拡充することで、多様な消費者ニーズに応えているためと考えられる。さらに、一部の大型店舗では、カフェとの連携によって、顧客が長時間滞在しながら本を楽しんだり作業を行ったりできるような快適な空間を提供している。このように、大型店舗は従来の書店の枠を超えた新たな店舗経営の形を模索しており、その結果、一定の競争力を維持しているといえる。

一方で、デジタル技術の革新に伴い、オンラインプラットフォームが利便性を高め、消費者の主要な購買チャネルとして定着したことが、小規模書店に深刻な影響を与えている。特に、小規模店舗は商品の取り扱い範囲やサービスの面でオンラインプラットフォームとの競争が厳しく、経営の維持が難しくなった結果、閉店を余儀なくされるケースが増加していると考えられる。

また、電子書籍や有料動画配信、有料音楽配信などデジタルコンテンツ市場の成長も、物理的なメディアを購入していた消費者をオンラインへと移行させる重要な要因となっている。

このように、デジタル化による新たな購買行動の定着は、特に書店をはじめとする物理的な店舗の経営環境に大きな変化をもたらしている。

ii)　EC 化率が低い品目

書籍とは対照的に、生鮮食品のように即時性や品質確認が重視される品目に関しては、従来型の店舗が依然として重要な役割を果たしている。食料品の購入においては、消費者が実際に目で見て確認したり、直接手に取って選んだりすることが志向されるため、オンラインショッピングにおける利便性向上の影響を受けにくい。これにより、生鮮食品市場では物理的店舗が依然として主流を占める状況が続いている。

図 5.4.1-10 に示す食料品の EC 化率と一人当たりの食料品の店舗面積の相関をみると、EC 化率が 1%未満と低い時期と比較して、EC 化率が高くなるにつれて一人当たりの食料品の店舗面積が減少傾向にあることが分かる。これは、消費者のオンラインシ

ョッピングへの依存度が高まるにつれて、従来型の店舗が果たす役割が一部縮小していることを示唆している。一方で、即時性や品質確認が特に求められる生鮮食品では、消費者が店舗で実物を確認したいというニーズが依然として強く、オンラインとオフラインの購買チャネルが共存している。このため、食料品の店舗面積の減少幅は他の品目と比較して緩やかであると考えられる。なお、利用可能なデータの制限により、図 5.4.1-10 には 1999 年以降の数時点分のデータしか示されていない点には留意が必要である。

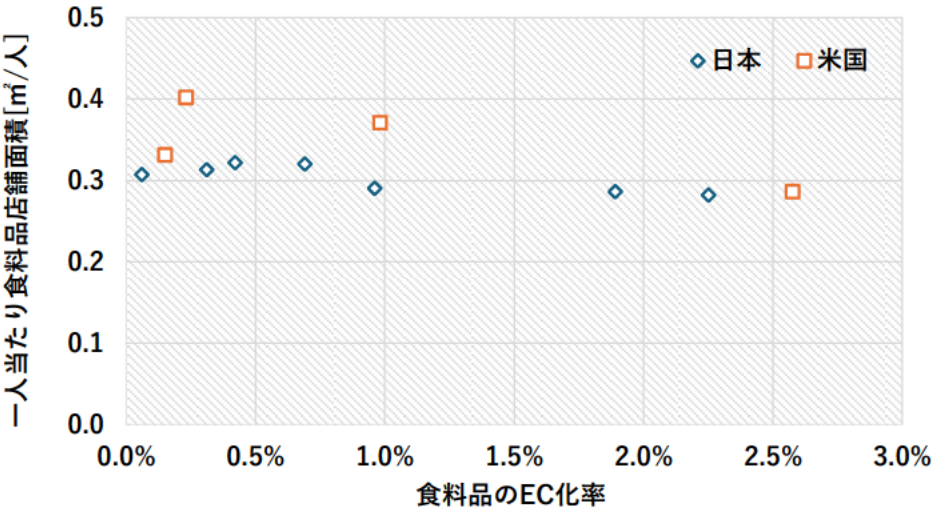


図 5.4.1-10 品目別 EC 化率と食料品店舗面積の相関（日本・米国）

（出典）各種公表値 [5)-9),23)-24)]に基づき作成

（注 1）日本のデータは 7 時点（1999 年、2002 年、2004 年、2007 年、2012 年、2014 年、2016 年）

（注 2）米国のデータは 4 時点（1999 年、2003 年、2012 年、2018 年）

生鮮食品の EC は多くの課題を抱えており、そのためこの分野では実店舗が依然として多く残っている。例えば、最初期の生鮮食品ネット販売業者の 1 つであるオカド（Ocado）は、2000 年にイギリスで設立されたが、黒字化するまでに 14 年を要した。また、アマゾンも 2007 年に「アマゾンフレッシュ」を試みたが、同様に成功には時間がかかっている。生鮮食品のネット販売に伴う主な課題について、文献 2)では以下の点が指摘されている。

- 高頻度の取引：配送コストがかかる
- コールドチェーンの物流：配送時に重さや大きさ、量が変化するため、配送がより複雑になる
- 目視での確認が必要：鮮度にばらつきがある
- 生産者の数が多い：高度に細分化されている
- 明確な標準品がない：生鮮食品のほとんどがノーブランド
- 配達時間に対する要件：2 日も（2 時間でも）待ってもらえない

これらの課題が実店舗での販売を支える要因となっており、現在も生鮮食品市場においては実店舗が主要な販売チャネルとなっている。

c. 相関分析のまとめ

各国の具体的な状況や、品目別 EC 化率の高低と実店舗面積との関係は以下のように整理される。

- 日本では、一人当たり GDP の増加は緩やかであるが、EC 市場は着実に拡大している。しかし、EC 市場の拡大が進んでも、既存の充実した実店舗網、緩やかな経済成長、人口減少・高齢化などの影響により、一人当たりの実店舗面積はほぼ横ばいに留まっている。なお、EC 化率が高い品目の実店舗面積は明らかに減少傾向になっているが、全体としてはデジタル化が実店舗面積の縮小に直結していないという状況が見られる。
- 米国では、経済成長に伴い、一人当たり GDP の上昇と共に EC 市場が急速に拡大している。特にコロナ禍におけるオンライン購買の急増が、市場拡大の主要要因となっている。その結果、EC 市場の成長とともに、実店舗面積は縮小傾向にあり、消費者のオンラインシフトが従来型店舗の需要低下を引き起こしている可能性が窺える。
- 中国では、急速な経済成長とデジタルインフラの整備により、一人当たり GDP が大幅に上昇し、BtoC-EC 市場は世界最大級に拡大している。一方、実店舗の面積も増加しているが、その増加率は GDP や EC 売上高の伸びに比べ相対的に控えめである。これは、EC 普及が急速に進む中で従来型店舗の需要が低下していることを反映するとともに、オンラインとオフラインが融合する中国特有の経済環境が、実店舗面積と EC 市場との関係に独特な影響を及ぼしていることを示唆している。また、都市部では過剰な店舗面積が問題視され、市場バランスの再検討が求められているという指摘もある。
- 欧州では、先進国として緩やかな GDP 成長の下、EC 市場は増加傾向にある。しかしながら、実店舗面積に関しては、利用可能なデータが 2 時点のみであるため、これを基にした相関性の検討は適切ではない。

以上のように、デジタル化と循環型経済の推進が商業活動に与える影響は国ごとに異なり、米国では EC 市場の成長に伴う実店舗面積の縮小が示唆される一方、中国ではオンラインとオフラインの融合が新たな経済環境を生み出している。しかし、調査対象国においても分析期間が数年に限られており、今回の分析結果の正確性、またこれらの傾向が長期的に続くかどうかについては不確実性が残る。これらの結果は仮説に過ぎない可能性があり、今後のデータ収集とさらなる分析が求められ、これらの趨勢がどのように進化するかを引き続き注視することが重要である。

(2) 将来予測に関する文献調査

① 小売業の将来展望

a. 市場予測レポートにおける小売業の評価

定期的に市場動向を評価している調査機関は今後 5～10 年程度の商業用不動産市場（小売業以外にオフィス、レジャー、物流等を含む）の安定的な成長を予測しており、小売セクターには大幅な成長の可能性があると指摘する調査機関もある（表 5.4.1-5）。顧客体験型スペースの充実や、オンライン注文した商品の店舗・駐車場での受け取り・返品への対応などを進めるため、新規開発や既存施設のリニューアルが進むと見込まれる。また、EC の拡大は物流・倉庫の需要を刺激し、特に都市部近郊での開発が拡大すると考えられている。TechNavio のレポートでは環境に配慮した商業スペースの建設がこの市場の促進要因として言及されており、商業用不動産市場の成長が加速すると、建築物の環境性能向上も加速すると考えられる。

表 5.4.1-5 商業用不動産市場予測レポートにおける小売業の評価

調査主体	予測期間	年平均成長率 (CAGR)	評価（小売業関連）
Mordor Intelligence[49)]	2025～2030 年	4.0%	• 小売セクターは大幅な成長を目撃する可能性 • デベロッパーは消費者の需要に適合し、変化する小売環境に適応するための様々な戦略に焦点 ➢ ショッピングセンターの多目的化リフォーム ➢ テナントミックスのカスタマイズ ➢ 新しいリースモデルの開発 ➢ オンライン注文の店舗・駐車場での受け取りへの対応
IMARC[50)]	2025～2033 年	3.08%	• 力強い経済成長、都市化の傾向、複合施設の人気、AI や VR 技術の融合など技術革新が全体の市場を押し上げ • EC 市場の急速な拡大（2025～2033 年に CAGR25.83%）による倉庫・配送施設需要拡大に伴い、特に都市部近郊での物流施設の開発が拡大
TechNavio[51)]	2025～2029 年	4.6%	• 世界的な商業部門の成長、民間投資の拡大、EC 支出の増加が牽引 • 促進要因は、マーケティングイニシアチブの拡大、不動産業界における技術導入、環境に配慮した商業スペースの建設

（出典）各種資料 [49)-51)]に基づき作成

（注 1）年平均成長率（CAGR）はオフィス、物流倉庫、レジャー施設などを含む商業用不動産市場全体の数値である。

（注 2）対象地域は調査によって異なるが、いずれも主要国・地域はカバーされている。

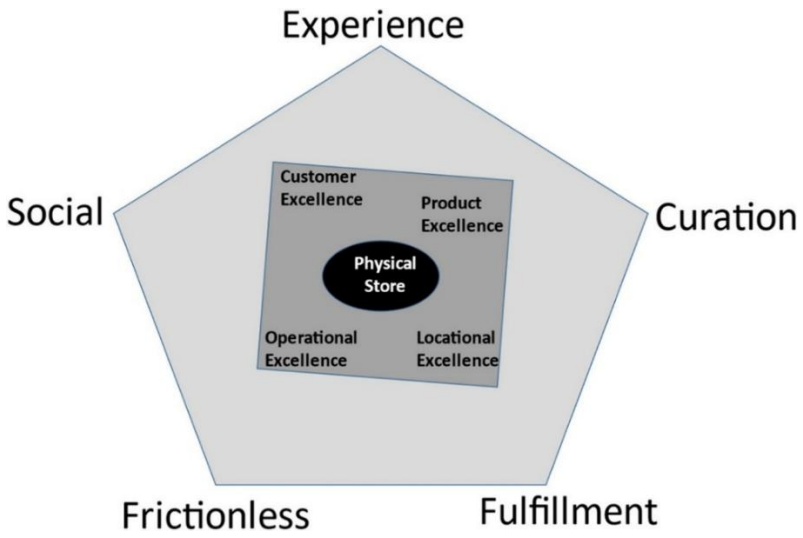
b. 小売業における店舗の再構築

小売業における店舗の役割を再評価する流れを受けて、Journal of Retailing 誌の特集号（2023 年 12 月）では「店舗の活性化」をテーマに 11 本の研究論文が掲載されている。ここではエディターによる総説である Grewal et al.(2023)[52]から概要を紹介し、デジタル時代の店舗の在り方を展望する。

Grewal et al.(2023)は冒頭で「店舗の終焉の予測が根強く残っているにも関わらず、店舗の小売スペースは小売業者の戦略の要素として復活している」と解説し、ウォルマートによる店舗近代化の投資（2023 年発表、総額 90 億ドル）を例に挙げている。ウォルマートの取り組み内容は、レイアウトの強化や販売品目の拡大、革新的な技術の統合であり、革新的な技術にはインタラクティブディスプレイの導入、QR コードによるシームレスな顧客体験が含まれる。また、店舗がミニ配送センターの役割を担うことで、EC の顧客体験の改善（迅速な配送、商品の受け取り・返品など）や配送コストの低減が可能になる。デジタル時代に小売チェーンが成功するには物理店舗が不可欠と見なされるようになっている。

さらに EC の影響で危機に陥っていた米国の大手書店チェーンのバーンズ＆ノーブルは､アマゾンが実験的な実店舗を設立しようとして失敗した場所を含む 30 の新店舗をオープンする計画がある（2023 年 3 月時点）ことを紹介している。背景には店舗は単に本を売る場所以上のもので、オンラインでは再現が難しい方法で書籍を発見し、探究し、つながることができる物理的な空間を提供する必要がある、という認識がある。

このような事例から著者らは、物理店舗の再構築には、テクノロジー、パーソナライズされたエンゲージメント、コミュニティ主導のイニシアチブ、利便性への取り組みの融合が必要と述べ、5 つの主要な推進力（戦略的レバー）を特定している。つまり、再構築された店舗におけるショッピング環境は、(1) 優れた体験を提供し、(2) フリクション（摩擦）がなく、(3) キュレーションを提供し、(4) ソーシャル要素を取り入れ、(5) シームレスなフルフィルメントを提供する必要があり、小売業者はこれらを活用して、4 つの領域（商品、顧客、オペレーション、場所）で卓越性を生み出すことができると指摘している（図 5.4.1-11）。



戦略的なレバー

キュレーション	お客様に合わせた商品やショッピング環境のセレクト
体験	興奮、トラフィック、商品の発見、教育を促進し、顧客が小売業者やブランドと対話できるようにする店内体験要素
フリクション（摩擦）レス	時間、労力、エネルギーの需要を減らす（つまり、摩擦を取り除く）店内要素により、カスタマージャーニーを改善
ソーシャル	消費者が互いに、そして店員とつながることを可能にする店内のソーシャル要素
フルフィルメント	小売業者から顧客に商品を届け、店舗内の効率を高め、コストを削減するためのバックエンド プロセスの改善

卓越する分野

商品	高い認知価値、効果的なブランディング、ポジショニング
顧客	顧客維持と顧客サービスを確保するためのアピール
オペレーション	効率的な運用とビジネス慣行
場所	便利な店舗の場所と強力なオンラインプレゼンス

図 5.4.1-11 店舗の再構築を組織化するフレームワーク

（出典）Grewal et al.(2023)[52)]の図 1 及び表 1

特集号に掲載された各研究論文のトピックと特徴は表 5.4.1-6 の通りであり、論文の性質（概念的か実証的か）、5 つのレバーと 4 つの卓越領域との関係性が整理されている。実証的な論文が 5 本（うち 1 本は括弧書き）あり、既にこれら 5 つのレバーが実際の店舗運営に反映されつつあることが窺える。

著者らが研究論文から抽出した、小売業者が店舗の再構築を進めるに当たっての助けとなる示唆を表 5.4.1-7 に示す。これらの内容から、デジタル化の進展などのテクノロジーの革新が EC だけでなく店舗も含めて小売業を大きく変化させようとしていることが読み取れる。また、キュレーションに関して店舗の場所的背景（「地元で手作りされた商品」など）を活用すること、体験に関して最新の拡張テクノロジーを導入することや五感に訴える工夫をすること、ソーシャルに関して販売員が買い物客と社会的関係を築くこと、など店舗のオンラインに対する優位性が強調されている。

表 5.4.1-6　Journal of Retailing 誌特集号掲載論文のトピックと特徴

著者（論文）	フォーカストピック	概念的/実証的?	レバー					卓越する領域			
			キュレーション	体験	フリクションレス	ソーシャル	フルフィルメント	商品	顧客	オペレーション	場所
Bruckberger et al. (2023)	小売業の地に足の着いた理解：場所、人、過去	概念的	①	③		②		X	x		x
Schau et al. (2023)	グローカルな小売風景	実証的	①			②		X	x		X
Scholdra et al. (2023)	パーソナライゼーションは店舗で効果的	概念的	○					X	X		
Hagtvedt and Chandukala (2023)	店舗での体験	概念的		②	①				X		
Szocs et al. (2023)	感覚要素の役割を理解する	概念的	②	①		③			X		
Breugelmans et al. (2023)	顧客が店舗を訪れる理由	両方	②	③	④	①	⑤	X			
Grewal et al. (2023)	ロボットとAIを使用して効率と体験を強化できる	概念的(及び実証的)			①	②		X		X	
Kopalle et al. (2023)	ダイナミックプライシングの利点を理解することの重要性	概念的			○			X		X	
Dekimpe et al. (2023)	小型(近接)店舗導入の役割	実証的			①		②			X	X
Ratchford et al. (2023)	小売デリバリーのイノベーション	両方					○			X	X
Pappas et al. (2023)	販売員の重要性と関連性	概念的		③	②	①		X		X	

（出典）Grewal et al.(2023)[52]の表 2

（注 1）丸数字は出典の表中の記載順を示す（単一の場合は○）。

（注 2）大文字の"X"は主に影響を与える領域、小文字の"x"は二次的に影響を与える領域を示す。

表 5.4.1-7　店舗の再構築を進める小売業者への主な示唆

レバー	小売業者への示唆	出典
キュレーション	• 伝統や遺産を強調した商品を提供し、地元で手作りされた商品をストックすることで、店舗に「地に足の着いた」感覚を作り出す	Bruckberger et al. (2023)
	• 選択と背景を融合させたキュレーション戦略により、顧客がグローバルブランドと信頼感のある形でローカルにつながることができる「グローカルな小売風景」を作り出す	Schau et al.(2023)
体験	• 拡張テクノロジーは、興味と利便性に基づく魅力を組み合わせた没入型体験を店舗で提供するのに役立つ • 拡張テクノロジーにより、顧客はほとんど、あるいは全く手間をかけずに商品を試すことができ、同時にエンゲージメントが向上する	Hagtvedt and Chandukala (2023)
	• 店舗では、顧客が商品（香水、食料品店の新鮮な果物など）に触れたり、匂いを嗅いだり、見たり、場合によっては味わったりすることができる • 未来の店舗はさらに「感覚を刺激し、（中略）多感覚体験を戦略的にキュレーションすることにますます注力する」	Szocs et al. (2023)
フリクション（摩擦）レス	• 小売業者はテクノロジー（ロボット、AIなど）を活用して、顧客向けアプリケーション（レコメンデーション、パーソナライゼーション、店舗内顧客体験管理など）や、供給側の業務（在庫最適化、物流、店舗内効率など）に集中する	Grewal et al. (2023) ※出典の総説記事とは別の研究論文
	• 大型店舗ネットワークを超えて、小型近接店舗の導入が時間とアクセシビリティの利便性を生み出す新たな可能性を検討する	Dekimpe et al. (2023)
ソーシャル	• テクノロジーをネガティブな出来事を減らすことに役立て、販売員は買い物客と社会的関係を築き、知識を蓄積し、公平性と持続可能性を促進する役割を果たす	Pappas et al. (2023)
フルフィルメント	• デリバリーを小売業者、消費者自身あるいは第三者が担うことを想定し、好みのモードと受け取り場所を選択できるようにする	Ratchford et al. (2023)

（出典）Grewal et al.(2023)[52]に基づき作成

② EC が小売業の店舗需要に及ぼす影響に関する学術研究

本節では 2 本の査読付き論文（Zhang et al.(2016)[53]及び Daniel and Hernandez(2024)[54]を紹介する。

Zhang et al.(2016)は、中国における EC の進展が小売業の不動産（店舗）需要に及ぼす影響についてデータや事例に基づき検討した研究であり、中国で EC が爆発的に進展した 2010 年代前半までの動向を詳しく扱っている。将来展望についてはトレンドからの示唆に留まるが、本調査の対象国・地域のなかで独特な発展を遂げている中国を対象とする研究であることから取り上げることとする。

Daniel and Hernandez(2024)は、メディアにおいて EC の進展が店舗型の小売業に破壊的影響を与えると予想する見方（「小売の黙示録（retail apocalypse）」と呼ばれる）が拡がっていることについて検討するため、カナダ・トロント地域の小売業や不動産業の動向に詳しい専門家を対象に、デルファイ法で実施した将来の小売業の店舗需要予測を行っている。

両研究で先行研究のレビューが行われているため、その内容を整理したうえで、オリジナルの研究成果を紹介する。

a. 先行研究

Zhang et al.(2016)によれば、EC が小売業の店舗需要に及ぼす影響に関する研究は 1990 年代の EC の台頭を契機に開始され、2000 年代前半から成果が発表されるようになった。英国と米国のケーススタディーを行った Worzala et al.(2002)[55]が、それ以降の研究のベンチマークとなったと指摘している。この研究では、米国・英国の小売業者に共通する EC の影響の見方として、①EC の脅威や影響はほとんど感じられないこと、②EC の障壁としてフルフィルメントとセキュリティの問題があること、③小売スペースの需要は短期的には変わらないか増加すること、が示されている。

Zhang et al.(2016)は EC が小売業の店舗需要に及ぼす影響に関する先行研究について、①原因とメカニズム、②特性、③具体的な影響の 3 パートに分けて整理しており、論文の記載をもとに、主な知見を表 5.4.1-8～表 5.4.1-10 に整理する。

影響の原因（EC の強み）については費用対効果やアクセス性、マーケティングの優位性が挙げられており、現在では一般常識的な内容と言える。影響のメカニズムについては、2000 年頃の研究では EC の強みが店舗の苦境をもたらし不動産市場にも悪影響を及ぼすとする概念的な議論にすぎなかったが、2010 年代にはより実証的な研究が進み既にこうした影響が顕在化し始めていることが窺える。

表 5.4.1-8　EC が小売業の不動産需要に及ぼす影響に関する先行研究（1）
原因とメカニズム

項目	主な知見
影響の原因（EC の強み）	• 費用対効果：　流通や在庫管理が時間節約的かつコスト効率的であるため、店舗に対して競争力のある価格設定をしやすい • アクセス性：　時間的・地理的障壁を超えてショッピングへのアクセスを提供できる • マーケティング：　購買データの収集・分析による精緻な市場セグメンテーションとターゲティングが可能 • 参照文献：　Burt & Sparks(2003), Baen(2000), Dixon & Marston(2002), Hendershott et al.(2000), Steel et al.(2013)
影響のメカニズム①2000 年頃の研究	• 消費者にとって距離や立地に係る利点が重要ではなくなるため、店舗の売上が減少し業績が低迷する可能性がある • その結果、賃料や不動産価値が影響を受け、さらに貸し手や投資家の見通しにも影響を与える • 参照文献：　Borsuk(1998), Dixon & Marston(2002)
影響のメカニズム②2010 年代の研究	• 店舗経営の資本収益率の低迷により、大手小売ブランドが店舗から EC に転換するようになった • EC がほぼ全ての事業領域をカバーするに至り、小売業の不動産の位置づけの見直し（リポジショニング）に影響を与えている • 参照文献：　Guo et al.(2013)

（出典）Zhang et al.(2016)[53]の 2 章 2.1 節に基づき作成

EC が物理店舗に与える影響の特性（表 5.4.1-9）については、2000 年代前半から多様な研究成果があり、物理店舗の需要に負の影響があるという見方、あるいは軽微な影響に留まるという見方があるだけでなく、EC を展開する実力のある小売業者がバーチャル空間と物理店舗の相乗効果で発展することで、正の影響を及ぼすという見方もあった。EC が物理店舗に代替的である（減少要因である）か、それとも補完的である（維持・拡大要因である）かについては、この研究がレビューした 2010 年代前半までの段階では、どちらが優勢とは言い難い。

EC の具体的な影響（表 5.4.1-10）については、小売業の業態（店舗の種類）や販売品目によって異なるという見方で一致している。特に販売品目については、標準化されている、安価である、安定した市場があるという性質を持つ商品を主に扱っている小売業が苦境に陥ると見られている。具体的には音楽メディア、ビデオ、ソフトウェア、書籍である。

以上の先行研究に関する考察をふまえ、Zhang et al.(2016)は、このテーマが従来先進国に焦点を当てたものが多かったが、EC が中国を含め発展途上国で急速に発展する中で、発展途上国における EC の進展が小売業の店舗需要に与える影響を理解することの重要性を強調している。

表 5.4.1-9　EC が小売業の不動産需要に及ぼす影響に関する先行研究（2）特性

項目	主な知見
負の影響の指摘	• 潜在的影響は甚大。商業地域の人通りの減少、衝動買いの減少、EC との競争による利益率低下により、最終的には空室率が上昇（Baen(2000)） • EC が消費者の消費パターンを変え、金融サービスや観光産業とともに小売業の店舗需要に負の影響を及ぼす（Winograd et al.(2000)）
軽微な影響の指摘	• EC の脅威に小売業不動産は脆弱だが、最初の脅威にさらされたのはカタログ通販であり、店舗需要に実質的な悪影響を及ぼしていない（Bardhan et al.(2000)） • 英国・米国の小売業者は短期的需要について依然として楽観的である（Worzala et al.(2002), Muhanna & Wolf(2002)） • EC は商業を再構築しつつある社会的、人口統計的、経済的諸要因の複合における一つの要素に過ぎない（Dixon et al.(2001), Technology Foresight (Program), & Retail Logistics Task Force (2000), Weltevreden & Rietbergen(2007)） • 南アフリカのショッピングセンターの利用者数（2001 年と 2003 年）に EC が悪影響を及ぼした証拠が得られなかった（McClatchey et al.(2007)） • 不動産事業者を調査し、EC がマレーシアの小売業不動産に及ぼす影響はわずかであると結論づけた（Najib Razali et al.(2014)） • 影響が軽微となる理由：①EC の悪影響を回避するため小売業者は物理店舗とバーチャル空間のハイブリッドモデルを採用し、店舗は商品の受け取り、交換、メンテナンス等のサービスに移行する可能性、②店舗では価格に敏感な消費者が減り、比較的収益性の高いニーズが対象となり、より広いスペースへの需要が増加する可能性（Hendershott et al.(2000)）
正の影響の指摘	• 米国では EC を導入する能力や見込みのある小売業者は物理店舗の需要を拡大している一方、そうではない小売業者は店舗を閉鎖する傾向があることから、バーチャル空間の拡大は物理店舗の拡大を促進する（小売業の成長を補完する）（Andersen & Rosen (2000)） • 実店舗は既存のブランド力を生かし、EC を補完的なチャネルとして活用することで Win-Win の形で売上を拡大できる（Winograd et al.(2000)）
代替か補完か（まとめ）	• EC と物理店舗の関係は、代替と補完のいずれか一方ではなく、両方の影響の組み合わせである • 消費者と小売業者の双方が、EC を補完チャネルと見なすか、代替チャネルと見なすか、によって決まる • 以上の参照文献：　Salomon(1986)、Sparks & Findlay(2000), Weltevreden & Rietbergen(2007), Dixon et al.(2001) • 短期的には補完的効果の方が大きい可能性がある（Weltevreden & Rietbergen(2007)）

（出典）Zhang et al.(2016)[53]の 2 章 2.2 節に基づき作成

表 5.4.1-10　EC が小売業の不動産需要に及ぼす影響に関する先行研究（3）
具体的な影響

項目	主な知見
業態によって異なる影響	• 百貨店のように品揃えの豊富な小売業が EC に対して脆弱である一方、強力なブランド力を持つ小売業は脆弱ではない（Dixon & Marston(2002)） • 大規模な中心市街地の魅力が高まり、小規模な中心市街地が苦境に陥るという二極化が進む（De Kare-Silver(2000)） • 中国では伝統的な低価格店やショッピングセンター、ブランド力のない路面店が悪影響を受ける（Liu(2013),Meng & Ding(2013)）
販売品目によって異なる影響	• 電子機器、衣料品、家庭用品ように高度に標準化され、安価で、安定した需要がある品目を扱う小売業が最も苦境に立たされるという点で、ほとんどの学者の意見が一致 • 音楽メディア、ビデオ、ソフトウェア、書籍を販売する店舗は、相対的に大きな影響を受ける • 参照文献：　Worzala et al.(2002), Dixon & Marston (2002)

（出典）Zhang et al.(2016)[53]の 2 章 2.3 節に基づき作成

Daniel and Hernandez(2024)は、Zhang et al.(2016)より約 8 年が経過した段階で先行研究のレビューを行っている（表 5.4.1-11）。2000 年代前半の先行研究については、メディアや投資市場が懸念していたような深刻な影響は無いとする研究が主流であると指摘している。この捉え方は、Zhang et al.(2016)がベンチマーク研究として紹介した Worzala et al.(2002)と整合的である。他方、オンラインとオフラインのシームレスな連携が小売業の生産性向上において重要視されており、オフライン（店舗）をどのように位置づけるかについて小売業者の模索が続いていると指摘されており、このようなトレンドに関するオムニ（全方位）チャネルコマースの概念を明示している。

オムニチャネルの意義が強調されることで EC の補完的効果が強調されるようになったが、2010 年代半ばには従来型の大手小売業の苦境（倒産・閉店・株価低迷など）が相次ぎ報じられ、メディアは「小売の黙示録」と名付けて EC の深刻な影響を示唆するようになった。しかし、学術研究ではこのような苦境を EC の影響のみに紐づける議論は退けられており、貧弱な管理や会計慣行の影響や、変化する商業環境への適応の失敗と評価されている。

2020 年初頭からの COVID-19 パンデミックは小売業の店舗需要に打撃を与えると予測され、実際、EC への移行が加速したが、その持続性については十分な証拠は得られておらず、著者らは Verhoef et al.(2023)に基づき、将来の EC のトレンドを考察するにはデルファイ法などの構造化された手法の適用が必要と指摘している。

表 5.4.1-11　EC が小売業の店舗需要に及ぼす影響に関する先行研究（4）近年の動向

項目	主な知見
オムニチャネルコマースの普及	• EC は「オムニチャネルコマース」（オンラインとオフラインのシームレスな組み合わせ）と呼ばれるものの一部として、物理店舗を補完するものとして見なされ始めた（Anderson et al.(2003), Coughlan et al.(2006), Verhoef et al.(2007)） • オンラインとオフラインが「オムニチャネル」の各種タッチポンとを通じて統合させると生産性が向上する（Avery et al.(2012), Bell et al.(2014), Bendoly et al.(2005)ほか） • 他方で、オフラインを顧客の購買体験のどこに位置付けるべきかを理解するのは難しく、多くの小売業者はオムニチャネル実装の困難さに直面している（Cook(2014)）
「小売の黙示録」に関する報道と評価	• 2015 年のメディア報道で EC が小売スペースの需要に及ぼす影響に関する議論が最高潮に達し、小売業の倒産、店舗の閉鎖、株価の低迷などの報道では、商業スペースの終焉を告げる見出しと紐づけられた（Helm et al.(2020), Wyld et al.(2020)） • 「小売の黙示録」（物理店舗の深刻な不振）が EC の成長に起因する世界的な現象であったというコンセンサスを学術研究で見つけるのは困難である（Helm et al.(2020)） • 貧弱な管理や会計慣行が「小売の黙示録」に大きく関連している（Kaufinger & Nuenschwander(2020), Kline(2018), Mathews(2018)） • 「小売の黙示録」の見出しを飾った小売業者のほとんどは、変化する環境への適応に失敗した（Mende(2019)）
COVID-19 の影響	• 2020 年初頭の COVID-19 パンデミックにより、小売スペース需要の崩壊予測がさらに強化された • 消費者の買い物行動の習慣が変化し、新たな環境が生み出された（Eger et al.(2021), Truong & Truong(2022)） • 消費者にとってショッピングにおける快楽的、経験的、社会的相互作用価値より、実利的で機能的な価値の重要性が向上した（Mortimer et al.(2024)） • パンデミックの影響の持続性や EC の進展トレンドとの乖離について広く議論された（Nanda et al. (2021)他多数） • パンデミック時の消費者の経験は、EC の有用性に関する認識と継続意向の高まりにつながった（Shaw et al.(2022)） • 他方で、パンデミック下で認識された孤独感がオンラインへの移行を緩和する可能性がある（Wang(2023)） • 消費者セグメント、店舗の種類、配送オプションに対する消費者感度など、複雑な要因が購買チャネル選択（EC か店舗か）の持続性に影響している（Dey et al.(2023)ほか） • パンデミックに起因する変化が持続する証拠は不十分であり、将来のトレンドを導出するにはデルファイ法などの構造化された方法が求められる（Verhoef et al.(2023)）

（出典）Daniel and Hernandez(2024)[54]の 2 章に基づき作成

b. 中国における EC の影響に関する考察

Zhang et al.(2016)[53)]は、中国を事例として EC の進展が小売業の店舗需要にどのような影響を及ぼしているかについて統計データをもとにマクロスケール（全体）及びミクロスケール（小売業の業態別）で検討している。この論文で示された内容は第 3 章で示した内容と概ね整合的であるため詳細は割愛するが、ここでは EC が物理店舗の需要に及ぼす影響が補完的か代替的か、さらに中国における将来の展望について、著者らがどのような見方をしているかに注目する。

著者らはマクロスケールでは 2009 年以降の EC の急成長と小売業の不動産開発の減速の間には、負の相関関係がある可能性が高いと指摘している。特に、アパレル、靴、食料品、3C 商品（コンピューター・通信・家電）、書籍などの商品を扱う店舗は EC の悪影響を受けた可能性が高いと指摘している。

業態別の考察（表 5.4.1-12）では、まずスーパーマーケットの苦境が 2012 年以降に明瞭になったとしているが、完全に競争力が失われたわけではなく、例えばウォルマートが中国でも「オンラインで注文し、オフライン（店舗）で受け取る」ビジネスモデルを確立するなど、オンラインと店舗の補完的関係を強化するなどの動きが出ていたことを紹介している。また、コールドチェーン物流の普及で生鮮食品まで EC の領域に入りつつあったが、店頭で手に取って選べる店舗の利点があり、店舗型スーパーマーケットが代替されるとは考えにくいと考察されている。

百貨店は物販が主体のため EC に脆弱であり、2012 年には営業床面積が減少に転じるなど、大きな影響が出ており、背景には大手 EC サイトの隆盛がある。特に「独身の日」（11 月 11 日）のセールでは顕著な存在感を示すようになり、百貨店が取り扱う商品の購入チャネルがオンラインに移行した。しかし、百貨店もオンライン販売を強化し対抗している。また、飲食（フードコート）やレジャー活動を取り入れ、滞在時間を延ばす取り組みにより、ショッピングセンターに近い業態への転換を進めている。こうした取り組みから、著者らは百貨店の復活と存続を予想している。

中国ではショッピングセンターが急速に普及したものの、2010 年代前半には供給過剰に陥り、EC の影響も重なって苦境を迎えたが、他の業態と同様にオンラインとの融合を進めるとともにソーシャルメディアの活用や、飲食・娯楽・体験スペースの拡充に取り組んでいる。著者らはショッピングセンターの将来についても前向きに展望している。

表 5.4.1-12　EC が小売業の店舗需要に及ぼす影響（中国）

業態	影響	理由・原因
スーパーマーケット	• 2012 年以降、各種指標が低迷 • 小規模チェーンほど深刻	• 主力商品のうち生鮮食品以外は EC に適するようになった • EC の低価格と豊富な品揃え • コールドチェーン物流の普及で生鮮食品にも EC 化の機運
百貨店	• 2012 年に営業床面積が減少した • 売上高伸び率は 2010 年以降、劇的に低下	• 小売（物販）中心のため EC との競争に弱い • 2013 年の独身の日（11 月 11 日）の EC サイトのセールが大成功
ショッピングセンター	• 2013 年、北京と広州の空室率は 10%超、瀋陽は 20%超（賃料は下落）	• 地域の消費者の購買力に照らして過剰な供給（新設） • EC の影響

（出典）Zhang et al.(2016)[53]の 5 章に基づき作成

c.　カナダ・トロント地域における小売業の店舗需要の将来予測

Daniel and Hernandez(2024)[54]はトロント州立大学の Christopher Daniel と Tony Hernandez による研究である。Christopher Daniel は、Daniel(2021)[56]において、2018 年にミニデルファイ法を用いて、カナダ・トロント地域における 9 つの小売セクターにおける EC 普及率（売上ベースの EC シェア）、一人当たりの小売業床面積、一人当たりの店舗数が 2021 年、2031 年、2041 年の 3 時点でどのように変化するかを予測した。本研究は、同じ方法で COVID-19 パンデミック発生後の 2022 年に実施された（直近の予測時点は 2025 年に更新）。研究方法の概要を表 5.4.1-13 に示す。

デルファイ法は個々の専門家が予測を行い、全員の予測結果がフィードバックされ、予測を見直してもらうプロセスを繰り返し､徐々に予測を収束させていく方法である。負担の大きい方法であるため、本研究のミニデルファイ法では予測回数を 2 回に限定して実施された。本研究では小売業、不動産業の分野で最低 7 年の経験を有する専門家が予測を行っており、2018 年予測の参加者 19 名のうち 18 名が参加した。

表 5.4.1-13　将来予測に関する研究方法の概要

項目	内容
対象地域	カナダ・オンタリオ州トロント市を中核とする地域 人口 980 万人（2022 年）、将来予測 1,330 万人（2041 年）の同地域は北米市場展開を目指す小売業者のテスト市場に選定されることが多い
方法	ミニデルファイ法： 1) 各専門家が第 1 ラウンドの予測を実施（数値とコメント） 2) トリミングされた平均値と匿名化コメントを共有 3) 第 2 ラウンドの予測を実施（数値とコメント）
実施時期	第 1 ラウンド：2022 年 5 月 12 日～5 月 24 日 第 2 ラウンド：2022 年 6 月 29 日～7 月 22 日
質問（予測）内容	9 つのセクター別の 1) EC 普及率（売上ベースの EC シェア） 2) 一人当たり小売業床面積 3) 一人当たり店舗数 時点：　2025 年、2031 年、2041 年
参加専門家人数	18 名
専門家の要件	• 小売、商業用不動産、ショッピングセンター管理、都市計画の専門家、またはこれらの複合分野のコンサルタント • 最低 7 年以上の業界経験
備考	• 2018 年に、同じ地域、同じ方法、ほぼ同じ専門家集団による予測を実施している（Daniel(2021)[56]）

（出典）Daniel and Hernandez(2024)[54]に基づき作成

Daniel and Hernandez(2024)におけるセクター別の EC 普及率の予測結果を表 5.4.1-14 に示す。予測結果によると、各セクターの絶対値には差があるが、いずれのセクターも大きく伸びることが予想されている。なお、COVID-19 パンデミックを経て、2018 年の予測結果と比べ、すべてのセクターで 2041 年の予測値が上昇している（＋2.2～＋6.1%ポイント）。参加した専門家のコメント（予測値に付随して提出されたもの）によると、パンデミックはオンラインの消費者行動の採用を加速させたものの、その持続性の判断は難しく、また、EC の収益性の低さのため小売業者はオンラインとオフラインの最適なバランスを模索し続けている。

表 5.4.1-14　専門家による EC 普及率の将来予測結果（トリミングされた平均値）

NAICS（北米産業分類）カテゴリー	2025	2031	2041	2025–2041	
				Ch.Δ	Ch. %
442家具・家庭用品	12.2	18.4	24.8	12.6	103.3
443電気・電子機器	30.6	37.9	49.2	18.6	60.8
444建材・園芸用品	6.8	10.2	14.3	7.5	110.3
445食品・飲料	14.0	19.2	28.2	14.2	101.4
446ヘルスケア・パーソナルケア	11.4	17.1	25.1	13.7	120.2
448衣料品・アクセサリー	17.5	25.7	33.3	15.8	90.3
451スポーツ・趣味・楽器・書籍	15.0	22.5	31.0	16.0	106.7
452百貨店・総合小売(General Merchandise)	13.5	19.0	26.2	12.7	94.1
722飲食サービス	11.0	15.3	20.5	9.5	86.4

（出典）Daniel and Hernandez(2024)[54]の表 1 に基づき作成
（注 1）単位：%
（注 2）カテゴリー名称は表中の 3 桁コードと 2017 NAICS に基づき作成

一人当たりの小売業床面積の予測結果を表 5.4.1-15 に示す。飲食サービス、ヘルスケア・パーソナルケアを除く 7 つのセクターで将来、面積が減少すると予測されている。比較的減少率が高いセクターは電気・電子機器と家具・家庭用品である。論文では合計値は示されておらず、合計値で論ずるのは適切ではない可能性もあるが、9 つのカテゴリーの単純合計値は 2025 年～2041 年に 4%減少する。なお、床面積を平方メートル換算すると合計で 2025 年の予測値は 1.74 ㎡/人、飲食サービスを除く合計で 1.48 ㎡/人となる。これは第 3 章で示した米国の水準の半分以下であり、日本や欧州の水準に近い。

ここで示された床面積の減少傾向は、2018 年予測に比べ、控えめである。例えば、電子・電気機器の 2025 年～2041 年の変化率は−34%とされていたところ、2022 年予測では−15%に留まっている。著者らは、ハイエンド商品のショールーミング化が EC の影響をわずかに緩和すると考察している。EC 普及初期のショールーミング化は、店頭で商品を確認し、オンラインで EC 業者から安価に購入するなど、店舗経営の小売業に不利益な購買行動を表す概念であったが、現在ではオムニチャネル戦略による相乗効果や、「ハイエンド商品は実際に触れて購入したい」という消費者ニーズへの対応など、総合的に収益化する観点で評価されている。

表 5.4.1-15　専門家による一人当たり小売業床面積の将来予測結果
（トリミングされた平均値）

NAICS（北米産業分類）カテゴリー	2025	2031	2041	2025–2041	
				Ch. Δ	Ch. %
442家具・家庭用品	1.49	1.41	1.28	−0.21	−14
443電気・電子機器	0.34	0.32	0.29	−0.05	−15
444建材・園芸用品	1.74	1.68	1.65	−0.09	−5
445食品・飲料	4.07	3.89	3.90	−0.17	−4
446ヘルスケア・パーソナルケア	1.33	1.34	1.35	0.02	2
448衣料品・アクセサリー	2.29	2.17	2.08	−0.21	−9
451スポーツ・趣味・楽器・書籍	0.88	0.85	0.82	−0.06	−7
452百貨店・総合小売(General Merchandise)	3.75	3.59	3.40	−0.35	−9
722飲食サービス	2.81	2.95	3.17	0.36	13

（出典）Daniel and Hernandez(2024)[54]の表 4 に基づき作成
（注 1）単位：平方フィート[ft²]/人
（注 2）カテゴリー名称は表中の 3 桁コードと 2017 NAICS に基づき作成

専門家は EC 普及率の予測を 2018 年より上方修正したにもかかわらず、床面積についても予測を引き上げている。この点について著者らの明確な理由付けは確認できないが、結論では「小売の黙示録」と呼ばれる EC 普及による小売業の店舗需要の破壊的影響というストーリーについて、本研究では裏付けが得られないとして、退けている。また、都市計画分野への提言として、「この研究は小売スペースが何十年にもわたって私たちの都市構造の重要な部分であり続けることを示唆している。今後の開発では、小売業と消費者サービスの面積を現在の一人当たりの数字と同程度に維持する必要がある」と考察している。当然ながらセクターによって状況は異なるとも指摘されているが、2010 年代からオンラインと店舗を組み合わせた小売業の最適解の模索から、新しい店舗の活用方法（体験型、オンライン注文品の受け取りなど）が発見されるようになるにつれて、店舗の需要は今後も粘り強く続くと考える専門家（業界関係者）が増えていることを示唆している。

③　将来予測に関する文献調査のまとめ

①項では小売業を含む商業用不動産の市場予測レポート(今後 5〜10 年程度)から、小売セクターの不動産市場について大幅な成長の可能性を指摘する調査機関もあり、EC と店舗のオムニチャネル戦略の拡大が小売業の店舗や物流･倉庫の需要を刺激していることが示唆された。また、店舗を活性化し、再構築する方法に関する一連の研究から、デジタル化の進展などのテクノロジーの革新が EC だけでなく店舗も含めて小売業を大きく変化させつつあること、また、オンラインに対して店舗に優位性がある販売手法(場所的背景を伝える、五感に訴える、販売員が買い物客と関係を築くなど)が推奨されていることを確認した。

②項では EC が小売業の店舗需要に及ぼす影響に関する 2 本の学術論文から、この研究テーマに関する先行研究の成果を整理したうえで、両論文の成果を整理した。総合すると、EC の台頭の脅威にさらされた物理店舗の小売業が、オンライン（EC）とオフライン（店舗）を融合するオムニチャネル戦略によって、双方の強みを生かす形で変化を遂げつつあることから、今後も店舗は小売業において重要な役割を果たすという見方で概ね一致していると考えられる。従って、一人当たりの小売業の店舗床面積が大きく減少するとは考えにくく、EC と店舗の相互補完的な関係が当面の間は続くと考えられる。

なお、CtoC-EC 市場の観点での検討はできなかった。この点について、CtoC-EC 市場の成長の制約として出品や集荷の手間、配送コストの負担などが想定されるところ、オムニチャネル戦略に基づく小売業が発展し、店舗の再構築の過程でフルフィルメントの最適化やソーシャル（消費者同士のつながりなど）の強化が進むことで、CtoC-EC 市場の成長も進むと考えられる。

また、一人当たり小売業床面積や物流・倉庫面積について、定量的な見通しを示すことがほとんどできなかった。唯一、カナダ・トロント地域を対象としたデルファイ法による小売業床面積予測を紹介したが、世界全体の動向としてとらえることはできない。

さらに AI による自動運転車が既に米国や中国で普及しつつあるものの、この技術革新が小売業に与える大きな影響については本調査の視野に入っていない。これは物流、配送や消費者の買い物行動（移動を含む）に大きな影響を及ぼす可能性があり、普及が進むにつれて小売業の店舗需要に関する将来展望は大きく変わる可能性がある。

参考文献（第 5.4.1 節に関するもの）

1) 経済産業省「令和 5 年度電子商取引実態調査」
https://www.meti.go.jp/press/2024/09/20240925001/20240925001-1.pdf (accessed 2025-01-10)
2) ウィンター・ニー、他「ニューリテール進化論、中国デジタル小売革命の軌跡に学ぶ新たな価値のつくり方」、2024 年
3) Tsinghua University Building Energy Research Center レポート「2023 Annual Report on China Building Energy Efficiency」
4) 中国百貨店協会「0.3 ㎡の一人当たりショッピングセンター面積 : 現在の中国国内都市の警戒線!」
http://www.ccagm.org.cn/bg-yj/5371.html (accessed 2025-02-07)
5) 経済産業省「商業統計」
https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/syougyo/index.html (accessed 2025-01-10)
6) 米国エネルギー省「業務用建物エネルギー消費調査（CBECS）」データベース（CBECS 2018）
https://www.eia.gov/consumption/commercial/data/2018/ (accessed 2025-01-10)
7) 米国エネルギー省「業務用建物エネルギー消費調査（CBECS）」データベース（CBECS 2012）
https://www.eia.gov/consumption/commercial/data/2012/ (accessed 2025-01-10)
8) 米国エネルギー省「業務用建物エネルギー消費調査（CBECS）」データベース（CBECS 2003）
https://www.eia.gov/consumption/commercial/data/2003/ (accessed 2025-01-10)

9) 米国エネルギー省「業務用建物エネルギー消費調査（CBECS）」データベース（CBECS 1999）
https://www.eia.gov/consumption/commercial/data/1999/ (accessed 2025-01-10)
10) 中国貿易外経済統計年鑑「2009 年版～2022 版」
11) 「贏商 tech」と「中国百貨店協会（CCAGM）」の共著レポート「中国ショッピングセンター業界の年次レポート（2021 年）」
http://www.ccagm.org.cn/storage/uploads/file/2021/06/24/%E8%B5%A2%E5%95%86-%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E8%B4%AD%E7%89%A9%E4%B8%AD%E5%BF%83%E8%A1%8C%E4%B8%9A%E5%B9%B4%E5%BA%A6%E5%8F%91%E5%B1%95%E6%8A%A5%E5%91%8A.pdf (accessed 2025-01-17)
12) 中国連鎖経営協会 China Chain store & Franchise Association（CCFA）のレポート
「中国ショッピングセンターの年次レポート（2023 年）」
http://www.ccfa.org.cn/portal/cn/xiangxi.jsp?id=445119&type=33 (accessed 2025-02-13)
13) 中国連鎖経営協会 China Chain store & Franchise Association（CCFA）のレポート
「中国のショッピングセンターが社会経済発展に与える貢献に関するレポート（2021 年）」
https://www.zhiyanbao.cn/index/partFile/1/ccfa/2022-11/1_48876.pdf (accessed 2025-02-13)
14) EU Building Stock Observatory (BSO)
https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/eu-building-stock-observatory_en (accessed 2025-02-04)
15) GfK 社「2018 年小売業調査」
https://nielseniq.com/global/en/insights/report/2019/map-of-the-month-sales-area-provision-europe-2018/ (accessed 2025-02-05)
16) 米国エネルギー省「業務用建物エネルギー消費調査（CBECS）」における調査手法
https://www.eia.gov/consumption/commercial/reports/2018/methodology/sampling.php (accessed 2025-01-10)
17) 米国エネルギー省「業務用建物エネルギー消費調査（CBECS）」における調査対象建物の定義
https://www.eia.gov/consumption/commercial/building-type-definitions.php (accessed 2025-01-10)
18) 米国「City and County Commercial Building Inventories」
https://catalog.data.gov/dataset/city-and-county-commercial-building-inventories-010d2 (accessed 2025-01-10)
19) 国土交通省「令和 5 年度宅配便等取扱実績」
https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001759881.pdf (accessed 2025-01-15)
20) 中国国家郵政局発展研究センター「中国宅配物流調査」における宅配便取扱個数
https://www.spb.gov.cn/gjyzj/c100278/common_list.shtml (accessed 2025-01-17)
21) Pitney Bowes 社レポート「Index Reveals Significant Shifts in Carrier Dynamics and Consumer Behaviors in 2023」
https://www.pitneybowes.com/us/shipping-index.html
22) Jean-Paul Rodrigue, The distribution network of Amazon and the footprint of freight digitalization, Journal of Transport Geography, Volume 88, October 2020
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692320306074 (accessed 2025-02-05)

23) 経済産業省「電子商取引実態調査」
https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/statistics/outlook/ie_outlook.html (accessed 2025-01-10)
24) 米国国内の小売業の年次調査「Annual Retail Trade Report（ARTS）」
https://www.census.gov/programs-surveys/arts/about.html (accessed 2025-01-20)
25) 中国商務部「E-COMMERCE IN CHINA」
https://search.mofcom.gov.cn/allSearch/?siteId=0&keyWordType=title&acSuggest=%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E7%94%B5%E5%AD%90%E5%95%86%E5%8A%A1%E6%8A%A5%E5%91%8A (accessed 2025-01-20)
26) ECOMMERCE EUROPE「EUROPEAN E-COMMERCE REPORT 2024」
https://ecommerce-europe.eu/wp-content/uploads/2024/10/CMI2024_Complete_light_v1.pdf (accessed 2025-01-31)
27) ECOMMERCE EUROPE「EUROPEAN E-COMMERCE REPORT 2023」
https://www.upu.int/UPU/media/wwwUpuIntUniversalPostalUnionAboutUpuBodiesConsultativeCommittee/2023EuropeanEcommerceReportEn.pdf (accessed 2025-01-31)
28) ECOMMERCE EUROPE「EUROPEAN E-COMMERCE REPORT 2022」
https://www.eurocommerce.eu/app/uploads/2022/08/European-E-Commerce-Report-2022-LIGHT-VERSION.pdf (accessed 2025-01-31)
29) ECOMMERCE EUROPE「EUROPEAN E-COMMERCE REPORT 2019」
https://www.ecommerce-europe.eu/wp-content/uploads/2019/07/European_Ecommerce_report_2019_freeFinal-version.pdf (accessed 2025-01-31)
30) ECOMMERCE EUROPE「EUROPEAN E-COMMERCE REPORT 2018」
https://www.ecommerce-europe.eu/wp-content/uploads/2018/07/Press-Kit-European-B2C-Ecommerce-Report-2018.pdf (accessed 2025-01-31)
31) ECOMMERCE EUROPE「EUROPEAN E-COMMERCE REPORT 2014」
https://ecommerce-europe.eu/wp-content/uploads/2016/08/B2C-b2c-ecommerce-report-europe-2014-light.pdf.pdf (accessed 2025-01-31)
32) E-Commerce Database（ECDB）の Cihan Uzunoglu 氏による記事（2024 年 8 月 30 日）「Online vs. Offline Shopping in Europe: Is the Post-Pandemic Slump Over?」
https://ecommercedb.com/insights/online-vs-offline-retail-in-europe-looking-at-the-negative-space-of-ecommerce/4612 (accessed 2025-02-03)
33) European Commission「Circular Economy Action Plan」
https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en (accessed 2025-02-07)
34) 欧州環境機関「Management of used and waste textiles in Europe’s circular economy」
https://www.eea.europa.eu/publications/management-of-used-and-waste-textiles#:~:text=The%20EU%20generated%20an%20estimated,%25%20was%20post-consumer%20waste. (accessed 2025-02-07)
35) 日本銀行「為替レートの時系列統計データ」
https://www.stat-search.boj.or.jp/ssi/cgi-bin/famecgi2?cgi=$graphwnd (accessed 2025-02-07)
36) 中国外貨取引センター China Foreign Exchange Trade System「為替レートの時系列データ」
https://iftp.chinamoney.com.cn/chinese/bkccpr/index.html?tab=2 (accessed 2025-02-07)

37) 欧州中央銀行 European Central Bank「為替レートの時系列データ」
https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-usd.en.html (accessed 2025-02-12)
38) 世界銀行「World Development Indicators」
https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators (accessed 2025-01-10)
39) Eurostat「Real GDP per capita」
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_08_10/default/table?utm_source=chatgpt.com
(accessed 2025-02-17)
40) 中国商務部「中国の EC 市場規模に関するレポート」
https://dzswgf.mofcom.gov.cn/yjbg/page1.html (accessed 2025-01-21)
41) 世界銀行と中国アリババグループによる共著レポート「E-Commerce Development: Experience from China」
https://documents1.worldbank.org/curated/en/344961574449770307/pdf/E-commerce-Development-Experience-from-China.pdf (accessed 2025-01-21)
42) 大前研一「デジタル小売り革命」、BBT×プレジデント エグゼクティブセミナー選書、Vol. 15、2021 年 第 1 刷発行
43) 公益財団法人流通経済研究所「米国流通概要資料集（新版_2018 年版）」
44) Los Angeles Times の記事「Up to 25% of U.S. shopping malls may close in the next five years, report says, June 2017」
https://www.latimes.com/business/la-fi-malls-closing-20170531-story.html (accessed 2025-02-10)
45) 米国のビジネス雑誌 Forbes「Twice As Many Stores In The U.S. Are Expected To Close In 2025
https://www.forbes.com/sites/pamdanziger/2025/01/30/retail-apocalypse-well-over-twice-as-many-stores-will-close--as-open-in-2025/#:~:text=Key%20Facts,in%202020%20during%20the%20pandemic. (accessed 2025-02-10)
46) ナスダックの公開資料「Do You Know How Much Amazon's Revenue Has Grown Over the Last 20 Years? The Answer Will Blow Your Mind」
https://www.nasdaq.com/articles/do-you-know-how-much-amazons-revenue-has-grown-over-the-last-20-years-the-answer-will-blow (accessed 2025-02-07)
47) 一般社団法人日本出版インフラセンター 書店マスタ管理センター
https://www.jpoksmaster.jp/ (accessed 2025-01-10)
48) 中国赢商网「中国における 2021 年のショッピングセンター業およびブランド発展に関する研究」
http://down.winshang.com/bgshow20220307.html (accessed 2025-01-16)
49) Mordor Intelligence, Commercial Real Estate Market Size - Industry Report on Share, Growth Trends & Forecasts Analysis (2025-2030) ,
https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/commercial-real-estate-market
(accessed 2025-02-18)
50) IMARC, Commercial Real Estate Market Size, Share, Trends and Forecast by Type, End Use, and Region, 2025-2033,
https://www.imarcgroup.com/report/en/commercial-real-estate-market
(accessed 2025-02-18)

51) TechNavio, Global Commercial Real Estate Market 2025-2029, https://www.gii.co.jp/report/infi1626793-global-commercial-real-estate-market.html (accessed 2025-02-18)
52) Grewal, D., Breugelmans, E., Gauri, D., Gielens, K. (2023). Re-imagining the physical store, Journal of Retailing, 99(4), 481-486, https://doi.org/10.1016/j.jretai.2023.11.008.
53) Zhang, D., Zhu, P., Ye, Y. (2016). The effects of E-commerce on the demand for commercial real estate, Cities, 51, 106-120, https://doi.org/10.1016/j.cities.2015.11.012.
54) Daniel, C., Hernandez, T. (2024). What retail apocalypse? A Delphi forecast of commercial space demand in the Toronto region, Journal of Retailing and Consumer Services, 77, https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2023.103670.
55) Worzala, E.M., McCarthy, A.M., Dixon, T., Marston, A. (2002). E-commerce and retail property in the UK and USA. Journal of Property Investment & Finance, 20(2),142–158, https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/14635780210420034/full/html
56) Daniel, C. (2021). Smart Growth and the Future of Commercial Space in the Greater Golden Horseshoe Area, https://rshare.library.torontomu.ca/articles/thesis/Smart_Growth_and_the_Future_of_Commercial_Space_in_the_Greater_Golden_Horseshoe_Area/24076518/1?file=42240744 (accessed 2025-02-14)

5.4.2 道路貨物輸送の緩和策による国内産業への影響評価

パリ協定目標達成に向けた取り組みの文脈において、需要側部門の取り組みの重要性は IPCC AR6[1)]においても指摘されている。IEA は、代替技術が存在しない、あるいは高価である部門において、消費者の行動変容はエネルギー消費の増大を抑制しつつ排出削減の一助となることを指摘している[2)]。

本事業ではこれまで、CN 目標達成におけるエネルギー需要部門の排出削減対策の評価を目的に、hard-to-abate な部門の一つとされる貨物運輸部門について、貨物運輸需要を維持しつつエネルギー需要及び排出を削減する対策による排出削減貢献の分析を、世界エネルギーシステムモデルを用いて行ってきた。具体的には、貨物運輸の需要側対策として、消費者の行動変容、あるいは物流 ICT 技術導入促進を含む運輸側技術進展の中から、貨物輸送サービス需要を維持しつつ輸送効率を高めるような技術を取り上げ、これらの対策による車両走行距離やエネルギー消費などへの影響を既往文献などに基づき定量化した上で、世界エネルギーシステムモデル DNE21+を用いて評価した。しかし、運輸技術の進展は輸送サービス需要を満たしつつ排出削減に大きな役割を果たしうるものの、行動変容についてはそれ程大きな影響になりうるとは評価されず、需要側対策の包括的な検討としては課題が残った。

一方で、経済を構成する各産業は、相互に密接な取引関係を持ちながら生産活動を行っている。需要側対策の導入は、この産業の連関を通して他のエネルギー多消費産業を含め様々な産業部門の経済活動にも影響すると考えられる。将来の日本経済や貨

物輸送需要の増加を踏まえつつ、産業全体への経済波及効果を含めて評価することは、排出削減目標達成における需要側対策の役割を理解するうえで重要と考えられる。

そこで本節では、道路貨物輸送の需要側対策による日本国内産業への経済波及効果を、道路貨物輸送対策及び 2030 年の日本の産業規模を考慮した産業連関表に基づいて分析した結果について述べる。

(1) 貨物運輸対策の需要側対策の影響

本分析では、貨物運輸需要を維持しつつ排出削減を実現しうる対策として、宅配輸送やオンライン購買時における消費者の行動変容、及び、物流側の効率向上を目的とした ICT 技術導入促進を対象とした。具体的な対策と影響を表 5.4.2-1 に示す。

表 5.4.2-1 考慮する対策

シナリオ	対策	影響
行動変容	宅配輸送における消費者側の再配達抑制対策	宅配ロッカー、在宅時指定配達アプリ導入等により再配達率が低減し、宅配輸送の車両走行距離[v-km]が低減する 機器及びソフトウェアのコストが発生する
		宅配ロッカーの利用が物流の効率化にも貢献し、宅配輸送の車両走行距離[v-km]が低減する 機器のコストが発生する
	オンラインショッピングにおける返品回避対策	顧客の行動変容により回避可能な返品に関して、アプリの導入、行動変容を促進する nudge の導入により返品率が低減し、宅配輸送の車両走行距離[v-km]が低減する ソフトウェアのコストが発生する
	オンラインショッピングにおける即時配達回避対策	即時配達を選択している消費者が通常配送の選択に切り替えることにより、効率的な配送が促進され、宅配輸送の車両走行距離[v-km]が低減する
物流への ICT 導入促進	物流側の再配達抑制対策	最適配送ルートの自動生成（スマートメーターデータ＋AI）などにより再配達率が低減し宅配輸送の車両走行距離[v-km]が低減する
	ICT 技術の更なる導入による物流効率化	ICT 技術導入促進や Physical internet 普及による物流資産の共有により物流の効率化が実現し、道路貨物輸送の車両走行距離[v-km]が低減する

これらの対策による道路貨物輸送、及びコストへの影響（2030 年）について、昨年までの調査と今年度調査した内容を基に表 5.4.2-2 の通り想定した。

表 5.4.2-2 貨物運輸関連対策による影響の想定（2030 年）

	行動変容	物流 ICT 技術
道路貨物車両走行距離[v-km]減少率(%)	-7.0	-16.5
ソフトウェアコスト（億円／年）	0.678	0.339
機器コスト（億円／年）	284	-

ソフトウェアは、宅配輸送における再配達抑制対策や、オンラインショッピングにおける返品回避対策において導入、利用されるものを想定している。ソフトウェアのコストについては、昨年度は、開発費について、1 本当たり$100,000 と想定し、国ごとに 2 本/年導入されると仮定して国ごとのコストを推計していたが、今年度は運用費についても追加考慮を行った。ソフトウェアの運用費は、その規模や種類にもよるが、開発費の 5～15%のコストが毎月発生するとされている [3]。総務省の試算に基づくと、月単位の運用費は開発費の約 10%と算定できる [4]。これらに基づき、ソフトウェア開発費の 10%を月運用費と想定し、年換算してコスト計上した。なお、Physical internet システムなどの物流効率化技術の開発・運用コストについては、情報が得られないため本分析では考慮していない。

機器コストは宅配ロッカーの導入や利用に係るコストとして算定した。昨年度の検討で、利用者一人当たりのコストを$200/yr とし、1.0%/yr のコスト低減、普及率を考慮して国全体のコストを推計した。IT 機能等を搭載したロッカーは本分析では考慮していない。

(2) 対策による影響と産業連関表の部門

貨物運輸関連の需要側対策により影響を受ける産業が、産業連関表上のどの部門に相当するかを、R2 年産業連関表 [5]の統合小分類（188 部門）を用いて検討し、表 5.4.2-3 の通りとした。

表 5.4.2-3　対策により影響を受ける産業連関表上の部門

対策シナリオ	対策	影響	産業連関表の小分類
①行動変容	再配達抑制対策（消費者側）	[-]貨物自動車の走行距離 [+]機器（宅配ロッカー） [+]ソフトウェア開発費、運用費	道路貨物輸送(5722) その他金属製品(2899) 情報サービス(5931)
	返品回避対策	[-]貨物自動車の走行距離 [+]ソフトウェア開発費、運用費	道路貨物輸送(5722) 情報サービス(5931)
	即時配達回避対策	[-]貨物自動車の走行距離	道路貨物輸送(5722)
②物流 ICT 技術	再配達抑制対策（物流側）	[-]貨物自動車の走行距離 [+]ソフトウェア開発費、運用費	道路貨物輸送(5722) 情報サービス(5931)
	物流効率化技術	[-]貨物自動車の走行距離	道路貨物輸送(5722) 自家輸送（貨物自動車）(5732)

(3) 貨物運輸対策による経済波及効果の評価

本項では、貨物運輸対策による経済波及効果の評価手順と結果について述べる。経済波及効果については、各種対策導入による直接効果、一次波及効果と、一次波及効果で推計された GDP 増加による二次波及効果を推計した。なお、本分析では、貨物輸送需要は維持しつつ貨物自動車の走行距離は減少する対策を対象としている。これに基づき、産業連関表において、道路貨物輸送部門の国内生産額は変化せず投入額（費用構成）の低減が起こると想定している。

分析手順を以下に示す。まず、道路貨物輸送の対策の影響を考慮した 2020 年産業連関表を構築した。道路貨物輸送、自家輸送（貨物自動車）の 2 部門について、国内生産額は不変とし、対策により特定の部門（石油製品（うちガソリンと軽油分)、タイヤ・チューブ、自動車部品・同附属品、その他の運輸附帯サービス、貸自動車業、自動車整備、その他の対事業所サービス、その他の金属製品、情報サービス）の中間投入に表 5.4.2-2 の影響があるものとし、中間投入額合計を見直した。中間投入額合計の低減分は全て粗付加価値(GDP)に配分した。配分総額はシナリオにより 1800～9700 億円である。ただし、輸送機械は道路貨物輸送の費用構成に含まれていないため、輸送機械の低減分だけ総固定資本を減じ、国内生産額も減少するものとした。この生産額変化が対策の直接効果に相当する。最後に、産業全体の投入額を、KEO-RAS 法により調整し、対策を考慮した産業連関表とした。

次に、2030 年の産業連関表の構築と、対策の影響を考慮した見直しを行った。2030 年の産業連関表は、DNE21+で想定する日本の 2030 年 GDP、及び産業別の需要増加率を考慮して構築した。具体的には、各産業部門のうち、道路貨物輸送とエネルギー多

消費産業（鉄鋼、セメント、紙パルプ、化学）は、モデルで想定する需要から 2020-2030 年の増加率を算定し R2 年産業連関表の国内生産額に適用して 2030 年国内生産額を推計した。その他の部門は、RITE で想定する GDP の 2020-2030 年成長率にもとづき変化するとして推計した。そして、産業全体の投入額を KEO-RAS 法により調整し、2020 年産業連関表と同じ手順で、道路貨物輸送の対策を考慮した産業連関表を構築した。分析における日本の 2020-2030 年 GDP 増加率想定、及び DNE21+モデルにおける日本の貨物輸送需要及びエネルギー多消費産業の需要見通しに基づく、2020 年～2030 年増加率を表 5.4.2-4 に示す。

表 5.4.2-4　日本の貨物輸送需要、エネルギー多消費産業の増加率の標準想定

	2020～2030 年増加率
GDP	+25.4%
道路貨物輸送需要	+13.6%
粗鋼	+11.5%
セメント	-3.8%
紙パルプ	+1.3%
化学（エチレン・プロピレン）	-4.2%

続いて、対策による経済波及効果の推計（2020 年、2030 年）を行った。経済波及効果として、前述の通り対策による直接効果、直接効果による波及効果（一次波及効果）、一次波及効果の下での GDP 変化による新たな国内消費に誘発される効果（二次波及効果）を評価した。

直接効果は輸送機械の国内生産額変化として推計される。

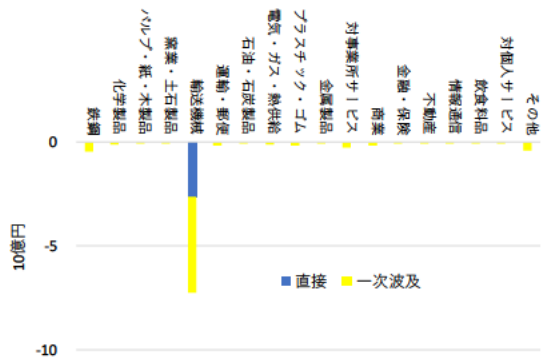
一次波及効果として、輸送機械の国内生産額の低減に誘発される、産業部門別の国内生産誘発額を、レオンチェフ逆行列（$[I-(I-M)A]^{-1}$ 型）を用いて推計した。また、産業部門別の付加価値率（付加価値額／国内生産額）を用いて、一次波及効果による付加価値額（GDP）変化を推計した。

二次波及効果として、対策による中間投入額低減分の粗付加価値への配分と、前述の一次波及効果による付加価値額変化に対して、限界消費性向 0.3 を想定して民間消費支出増加額を推計し、この増加額を民間消費支出構造に基づき各産業に比例配分し自給率を乗じて産業別の需要増加額を算定した上で、この増加に誘発される国内生産誘発額と付加価値額変化を、一次波及効果と同様の手順で推計した。

以上の直接効果、一次波及効果、二次波及効果を合計して、貨物運輸対策による経済波及効果を推計した。なお、産業構造や価格、自給率は 2020 年以降一定であるとの前提に基づき推計を行っている。

図 5.4.2-1 に、貨物運輸対策による国内生産額への直接・一次波及効果（2020 年）を示す。①行動変容、②物流 ICT 技術とも、輸送機械で 7～10 億円程度の生産減少がみられるほか、道路貨物輸送、金属製品、石油製品、鉄鋼や紙パルプといったエネルギー多消費産業でわずかな生産減少がみられる。

a.



b.

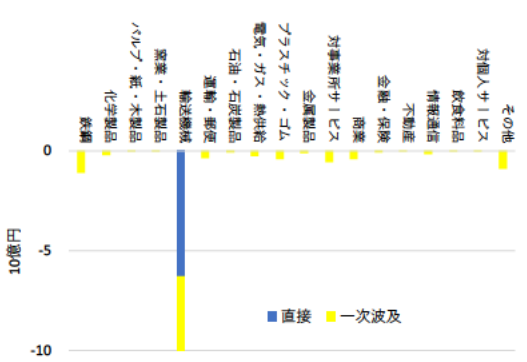
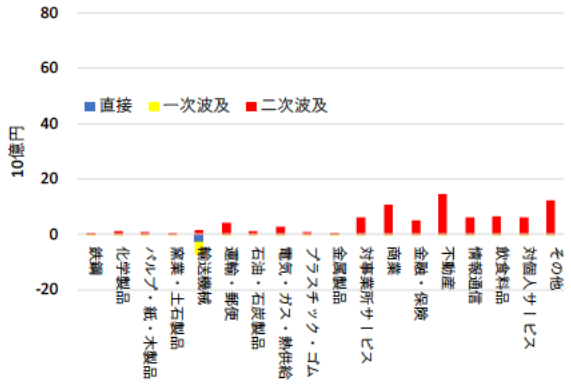


図 5.4.2-1 貨物運輸対策による国内生産額への直接・一次波及効果（2020 年）
a. 行動変容、b. 物流 ICT 技術

直接・一次波及効果に、二次波及効果を含めた経済波及効果を図 5.4.2-2 に示す。GDP 増大の波及効果を考慮した二次波及評価では、運輸やエネルギー、サービス系など広範な産業の生産の誘発がみられる。なお、本分析では導入される対策が貨物輸送需要を維持しつつエネルギー消費を低減するとの前提の下、対策導入により輸送機械以外の産業の国内生産額は不変で投入額低減分が全て付加価値（GDP）に回ると仮定している。この想定のため、大規模な二次波及効果を誘発する結果となっている。

a.



b.

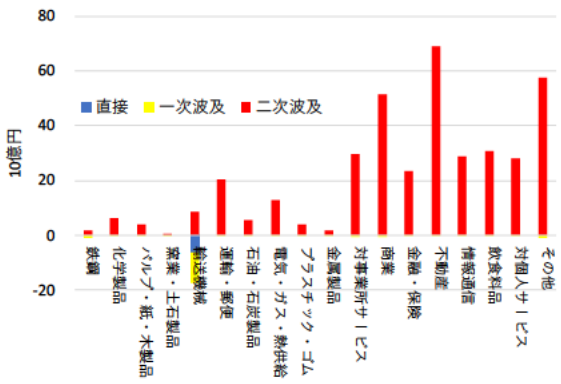


図 5.4.2-2 貨物運輸対策による国内産業への経済波及効果（2020 年）
a. 行動変容、b. 物流 ICT 技術

2030 年の産業規模と貨物運輸対策を考慮した 2030 年産連表を用いて推計した経済波及効果を図 5.4.2-3 に示す。2020 年と同様、両シナリオにおいて、一次波及では輸送機械、道路貨物輸送、鉄鋼や紙パルプ、エネルギー（石油・電気）の生産額が減少し、②物流 ICT ではより減少幅が大きい。二次波及ではサービス業を中心に国内生産額が増大し、2020 年と比較すると増加額は+10%程度である。

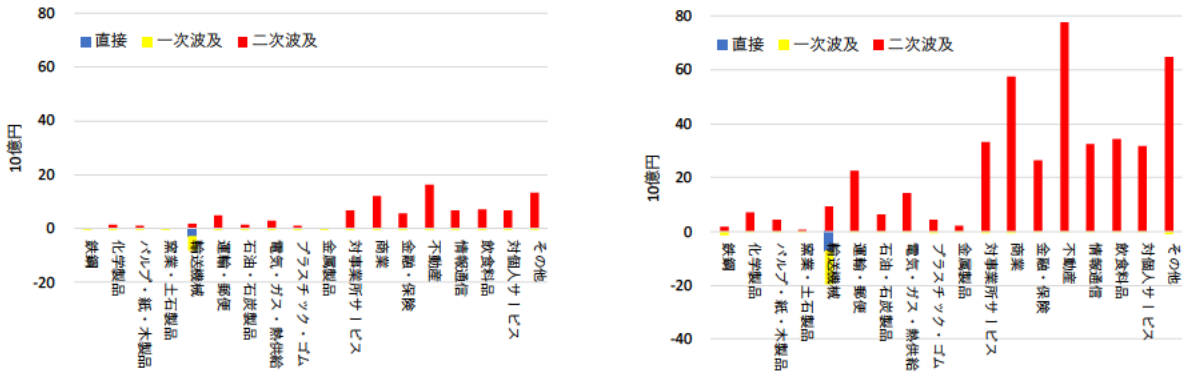


図 5.4.2-3 貨物運輸対策による国内産業への経済波及効果（2030 年）

貨物輸送対策によるエネルギー多消費産業、道路貨物輸送、エネルギーへの経済波及効果（二次波及まで含めた国内生産額の変化）を表 5.4.2-5 に示す。鉄鋼は標準想定では 2030 年に向け増大する（表 5.4.2-4）が、対策導入によりシナリオによっては減少する。一方、セメント、化学（エチレン・プロピレン）は標準では 2030 年に向け微減すると想定しているが、対策導入による波及効果で増大する。また、エネルギー（石油製品、電気）の国内生産額は増大する。

表 5.4.2-5 貨物輸送対策によるエネルギー多消費産業、道路貨物輸送、エネルギーの国内生産額の変化（単位：10 億円）

	2020 年		2030 年	
	①行動変容	②物流 ICT 技術	①行動変容	②物流 ICT 技術
道路貨物輸送	+1.36	+6.75	+1.40	+6.99
鉄鋼	-0.18	+0.49	-0.21	+0.53
セメント	+0.02	+0.11	+0.02	+0.09
紙・パルプ	+0.06	+0.31	+0.07	+0.34
化学	+0.04	+0.22	+0.04	+0.22
石油製品	+1.11	+5.29	+1.24	+5.96
電気	+2.18	+10.62	+2.41	+11.91

(4) まとめ

本項では、道路貨物輸送の需要側対策による日本国内産業への経済波及効果について、対策を考慮した 2020 年産業連関表、及び 2030 年の産業規模と対策を考慮した産業連関表を用いて、GDP 生産波及の所得効果を含む二次波及まで含めた分析を行った。直接効果＋一次波及の評価では、対策導入により輸送機械、エネルギー、一部のエネルギー多消費産業の国内生産額の減少が見られ、各種対策による他産業への波及効果が確認された。対策導入の影響が他部門に波及し様々な部門での排出削減に貢献しうることが示唆される。二次波及効果の評価では、対策導入時の GDP 増大による民間消費の創出により、サービス産業を中心に幅広い産業にわたって大規模な国内生産誘発

が推計された。本分析では、貨物輸送需要を減ずることなく車両走行距離を減少させる対策を対象としており、これら対策により経済全体に対する正の影響がみられるとの結果であるが、他方でこの経済波及効果を考慮した排出削減への影響は検討できておらず、今後の課題である。また、対策導入により貨物輸送需要を維持しつつエネルギー消費を低減するとの前提を反映するため、国内生産額は不変で投入額は低減し、低減分が全て付加価値（GDP）に回ると想定したことから、相当な額の国内生産と付加価値の誘発が推計される結果となった。この想定に関しては今後検討が必要であるが、本研究により排出削減目標達成に向けた需要側対策の役割の包括的な評価手法が構築されたものと考える。今後、この手法に基づき、サービスのデジタル化などその他の対策による国内産業への経済波及効果を評価し、排出削減目標における貨物運輸対策の役割のモデル評価を進める。

参考文献（第 5.4.2 節に関するもの）

1) IPCC、IPCC WGIII AR6 (2022)
2) IEA、World Energy Outlook 2024 (2024)
3) システム運用コストの相場は？ https://system-kanji.com/posts/system-operation-cost （アクセス日：2024 年 11 月 1 日）
4) 総務省、光ブロードバンドの活用方針検討チーム第 5 回 (2010) https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/broadband/27088_1.html（アクセス日:2024 年 11 月 1 日）
5) 総務省、令和 2 年(2020 年)産業連関表 (2020)

5.4.3 重要鉱物の再資源化ポテンシャル分析

(1) 背景と目的

カーボンニュートラル（CN）社会の実現に向け、エネルギーシステムの変換は必須であり、再生可能エネルギー、水素・合成燃料、住宅等の省エネルギー、電動車（EVs）等、各種クリーンエネルギー技術（CETs）の導入が検討されている [1)]。一方、CETs の中にはリチウム、ニッケル、コバルト、ネオジム等、重要鉱物（Critical minerals: CMs）と呼ばれる素材が必要なものもあり、急速な導入拡大に伴う CMs の需要増大に懸念も生じている [2)]。CMs は、鉄等（Bulk minerals と呼ばれる）に比べ、市場が未成熟で価格が変動しやすい、鉱石や素材の生産を一部地域に依存している、採掘に関する人権侵害、環境汚染も指摘され [3)]、供給の迅速な拡大は容易でない（CMs をめぐる動向と課題は、本報告書 2.2.2 節(1)項にも記載）。そこで近年注目が高まっているのが、代替物質の開発、製品の長寿命化、リサイクル等、需要側の対策である [4)]。このうち、リサイクルは、新たな調達ルートとしても期待され、促進政策が検討されている。

例えば、EU は 2023 年に電池規則 [5)]を発効し、域内で使用される全種の電池を対象に、使用済み電池（廃電池）の回収率、再資源化の収率について目標値を設定した（例：電動自転車・スクーター用電池は 2031 年末までに 61%回収を義務付けた。EV 用電池は無料引き取りを義務づけるべきとされた。再資源化の収率については、2031 年末までにリチウム 80%、コバルト・ニッケル・銅・鉛は 95%を達成する等）。さらに、リ

サイクル材の最低使用割合目標値（例：EV 用電池の極材活物質について、2031 年以降、コバルトは 16%、リチウム、ニッケルは 6%以上の割合で、リサイクル材を含むこと等。）が設定された。日本はリサイクルに関する数値目標はないが、リサイクル材の確保に向け、海外の e-スクラップ回収網設立を見据えた現地進出等が、資源外交指針として言及されている[6]。

このような背景のもと、リサイクルシステムの検討に向けては、将来の CMs 需要量・廃棄量の見通しが重要となる。しかしながら、将来の CMs 需要量・廃棄量には多様な不確実性がある。例えば、国連の気候変動枠組み条約で、世界の平均気温上昇を産業革命前比 1.5℃に抑える努力の追求を決意したものの、世界の平均気温は一時的とはいえ 1.5℃を上回り、現実的な観点からはもう少し高い気温に相当するシナリオも視野に入れる必要が考えられる。また、仮に同じ目標気温でも CN への移行シナリオは複数考えられる。RITE のシナリオ分析によると、再エネや EV のコスト低減、CO_2 除去（CDR）オプションの利用可能性により費用効率的と評価される排出削減策は異なり、CMs の需要量推定値に数倍の違いが生じる（文献 7)及び本報告書 2.2.2 節を参照)。さらに、代替物質の台頭があげられる。例えばリチウムイオン電池（LIB）は、極材素材が異なる複数タイプが開発されており、どのタイプの電池が市場を席巻するかによって、将来、廃電池から回収できる鉱物の種類や量は異なる。さらに、CMs のリサイクル費用や価格の不透明さがある。経済的に合理性が見込まれなければ、普及・継続に課題が生じる。

本研究では、上述のような不確実性を考慮しつつ、世界 CN と整合的な CET 導入シナリオ下での重要鉱物の再資源化ポテンシャルの分析を試みた。本節では、試算の第一歩として、リサイクルに向けた機運が高まる一方で、多様な不確実性が存在する、車載用 LIB を対象とした分析について記す。

(2) 車載用 LIB の構成と重要鉱物のリサイクル手法

① 車載用 LIB の構成

LIB の基本構造は正極材、負極材、セパレータ、電解液（全固体電池（ASSB）の場合は、電解質）からなる。負極材は銅の集電体に負極活物質（グラファイト、シリコン等）を、正極材はアルミニウムの集電体に正極活物質を塗布したものが多い[8]。正極活物質は多種開発され、ニッケル・コバルト・アルミニウム（NCA）系、ニッケル・マンガン・コバルト（NMC）系、リン酸鉄リチウム（LFP）系、マンガン酸リチウム（LMO）系等がある。電解液は塩化リチウムを有機溶媒で溶かしたもので可燃性がある（電解質は固体で不燃性。硫化物系、酸化物系、ポリマー系等がある。)。

車載用 LIB はセルを基本単位とし、複数セルからモジュールが、さらに複数モジュールを集約しパックが構成され、車に搭載される。近年は、セルを直接積層したパック等も開発されている。CMs は、セルやモジュールの端子、熱伝導体、筐体に銅やアルミニウムが、極活物質等にリチウム、ニッケル等が含まれる（表 5.4.3-1)。リサイクルは、サプライチェーンがある程度確立されている銅等を軸に、経済的価値が比較的高いコバルトやニッケル、リチウム等の回収プロセスが検討されている[8]。

表 5.4.3-1 各種 LIB のパックに含まれる代表的な CMs

CMs		LIB の種類				
		NCA	NMC	LFP	LMO	ASSB
銅	Cu	○	○	○	○	○
アルミニウム	Al	○	○	○	○	○
リチウム	Li	○	○	○	○	○
ニッケル	Ni	○	○			○
マンガン	Mn		○		○	○
コバルト	Co	○	○			○
グラファイト	C	○	○	○	○	
シリコン	Si	○	○	○	○	

② 重要鉱物のリサイクル手法

車載用 LIB リサイクルの概念図を図 5.4.3-1 に示す。EV の廃電池から CMs を回収し再び車載用 LIB に利用する形式は、クローズドループ・リサイクルと呼ばれる。これに対し、EV 廃電池の定置用電池への適用はカスケード・リサイクル又は二次利用と呼ばれる。クローズドループ・リサイクルは特定用途の CMs を無限に循環利用する、持続可能な形式とされる。

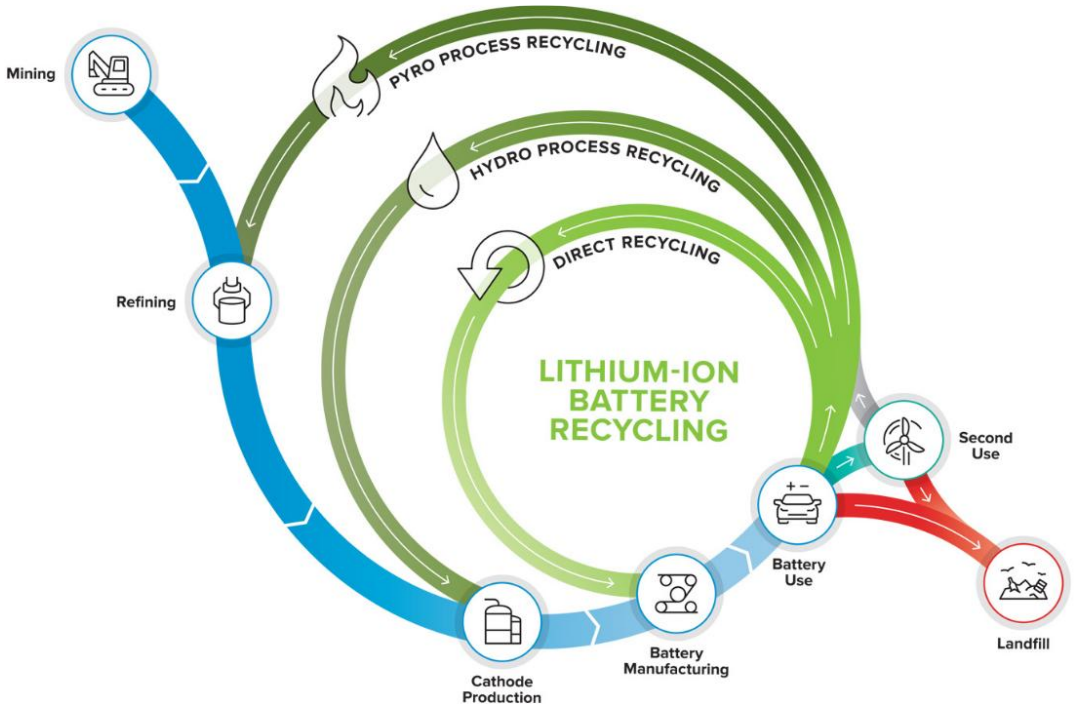


図 5.4.3-1 車載用 LIB のリサイクル概念図 [9)]

クローズドループ・リサイクルの手法は、乾式法、湿式法、ダイレクト法に大別される。どれも、まず廃電池のパックをモジュールに解体、放電・失活処理をする。その後、以下のいずれかの処理を行う。

a. 湿式法

- 【機械的前処理】加熱・焙焼、破砕・粉砕
- 【物理的選別】ふるいかけにより Co、Ni、Li 等を含む極材粉（ブラックマス）と Cu や Al 等のミックスメタルに分別
- 【精錬】極材粉は化学液（例：硫酸）に溶かし、前処理で未除去の物質を除去後、溶媒抽出法により Co、Ni、Li 等の順に各化合物として回収する。Cu や Al 等のミックスメタルは製錬原料とする。

b. 乾式法

- 機械的前処理や物理的選別を経てもよいが、廃電池を直接炉に投入することもできる。溶融処理後 Cu、Ni、Co 等の合金を回収。この他の成分はスラグとなる。
- 合金から正極活物質（Ni、Co 等）を分離・回収するには、さらに湿式法の【精錬】を行う。

c. ダイレクト法

- 熱処理や精錬を経ず、極活物質を集電体から剥離（高圧放電の衝撃波等により）させ、回収する。

上記のうち乾式法は廃電池の直接投入も可能であるが、Co や Ni の融点（1500～1600℃）付近での高温処理のためエネルギー消費量が大きい、また Li や Mn 等はスラグに移行するため回収が難しい。湿式法はプロセスが複雑であるが、比較的高い収率を期待できる。ダイレクト法は、焙焼や溶融、精錬が無く、必要なエネルギーや薬品も少ない点で有望視されるが、研究途上であり大規模化等の課題がある。現在は、湿式法、乾式法、その組み合わせが、目的に応じて利用されている [10]。

(3) CMs の再資源化ポテンシャル分析に関する主な想定

① CN に整合的な CETs 導入シナリオ

世界 CN と整合的な CETs 導入量は、RITE が開発したトランジションロードマップ [11]より 2℃目標に相当する DO2、O2 シナリオと 1.5℃目標に相当する DO1.5、O1.5 シナリオから引用する。ここで、O シナリオは、DO シナリオに比べ、政策の地域差が小さく、再エネや EV のコスト低減がより進む、また CDR の利用可能性は小さいと想定している（表 5.4.3-2）。CETs は、DNE21+モデル [12)-14)]により、エネルギーシステムコストを最小にすると評価されたもので、車は小型・大型乗用車、バス、小型・大型トラック（各 BEV、PHEV、HEV、ICEV、FCEV）に区分されている。

なお、CN シナリオの他、特段の排出制約が無い Reference シナリオも CMs 再資源化ポテンシャル分析の対象とした。

表 5.4.3-2 CN シナリオ

CN シナリオ	気温上昇	再エネ・EV のコスト低減	CDR の利用可能性	政策の地域差
DO2	ﾋﾟｰｸ 1.8◦c; 2100 年 1.7◦c	中位	中	大*1
O2	ﾋﾟｰｸ 1.7◦c; 2100 年 1.7◦c	高位	小	小*2
DO1.5	ﾋﾟｰｸ 1.7◦c; 2100 年 1.4◦c	中位	中	大*1
O1.5	ﾋﾟｰｸ 1.6◦c; 2100 年 1.4◦c	高位	小	中*3

（注）トランジションロードマップ[11]の Disorderly2.0℃/1.5℃、Orderly2.0℃/1.5℃シナリオを、本節では簡略的にそれぞれ DO 2/1.5、O2/1.5 シナリオと記す。

*1 主要先進国は 2050 年 CN、その他地域は CO_2 限界削減費用（MAC）均等化で削減。

*2 世界 MAC 均等化。

*3 世界 MAC 均等化をベースに、但し主要先進国は 2050 年 CN。

② 車載 LIB の CMs 再資源化ポテンシャル分析の枠組み

各 CN シナリオの車種別の新車販売台数に、一台当たり電池容量、鉱物強度を乗じ、鉱物需要量を推計する。廃電池は、全てクローズドループ・リサイクルされるとし、廃電池中の鉱物量×回収率×収率より鉱物の再資源化ポテンシャルを推計する。電池製造時に発生する不良品ロスは、将来は少なくなるとして、本推計の対象外とした。

廃電池の回収率は IEA の NZE シナリオ[4]に依拠し、2020 年代初期の 45%から 2030 年 60%、2040 年 80%、2050 年 90%まで向上するとした。収率は EU のバッテリー規則[5]に基づき設定した。再資源化ポテンシャルを推計する鉱物種は、前述のリサイクル技術や資源価値を考慮し Li、Ni、Co、Mn 及び Cu、Al とした。

その他、大まかではあるが、LIB の種類（表 5.4.3-1）別に、単位廃電池当たりのリサイクル費用と便益を算定し、再資源化が費用上合理的と考えられる電池種、及び当該電池種からの回収量も試算する。

なお、本分析では、再資源化による CETs 選択への影響は特に考慮していない。

③ LIB に関する想定

a. 車種別の電池容量と寿命

車種別の電池容量、車寿命は DNE21＋モデルの想定に依拠する。乗用車は車寿命中に電池交換無、バス・トラックは車寿命が長く年間走行距離も長いことより車寿命中に 1 回電池を交換するとした。廃電池は車の寿命が尽きた時、又は電池交換時に発生する。

b. LIB のパックに含まれる鉱物量

Cu や Al は、GREET データ[15]に基づき、車種別の LIB パック重量×LIB パック内の各素材重量割合から算出する。将来の LIB パック重量は、重量エネルギー密度の向上に伴い低減する、向上率は過去 30 年（2.2%/yr[16]）に比べやや鈍化する（1.9%/yr）とした。

Li、Ni、Co、Mn の量は、LIB の種類によって異なる。そこで表 5.4.3-1 の種類別（NMC 系はさらに 4 種類に区別）に、現在の単位電池容量当たり量[kg/kWh][17]を設定、将来は技術進展に伴い低減する（低減率：0.5%/yr[17]）とした。

c. 各種 LIB の市場シェア

EV に搭載される LIB の種類は LIB や EV メーカーの開発・販売戦略に依り不確実性が大きい。そこで IEA の見通し[2),17)]を参考に表 5.4.3-3 の 3 つのケースを想定した。図 5.4.3-2 に各種 LIB の市場シェアを図示する。

表 5.4.3-3 各種 LIB の市場シェアに関する想定

ケース	概要
NMC 主流	2020 年頃に乗用車用 LIB 市場の約 70%を占めた NMC 系が、引き続き高いシェアを保つ。
標準	ニッケルやコバルトを使用しない LFP 系がシェアを拡大し、2040 年に乗用車用 LIB 市場の 50%超。
LFP 拡大	ニッケル供給への懸念から LFP 系シェアが一層拡大、2040 年に乗用車用 LIB 市場の約 80%を占める。

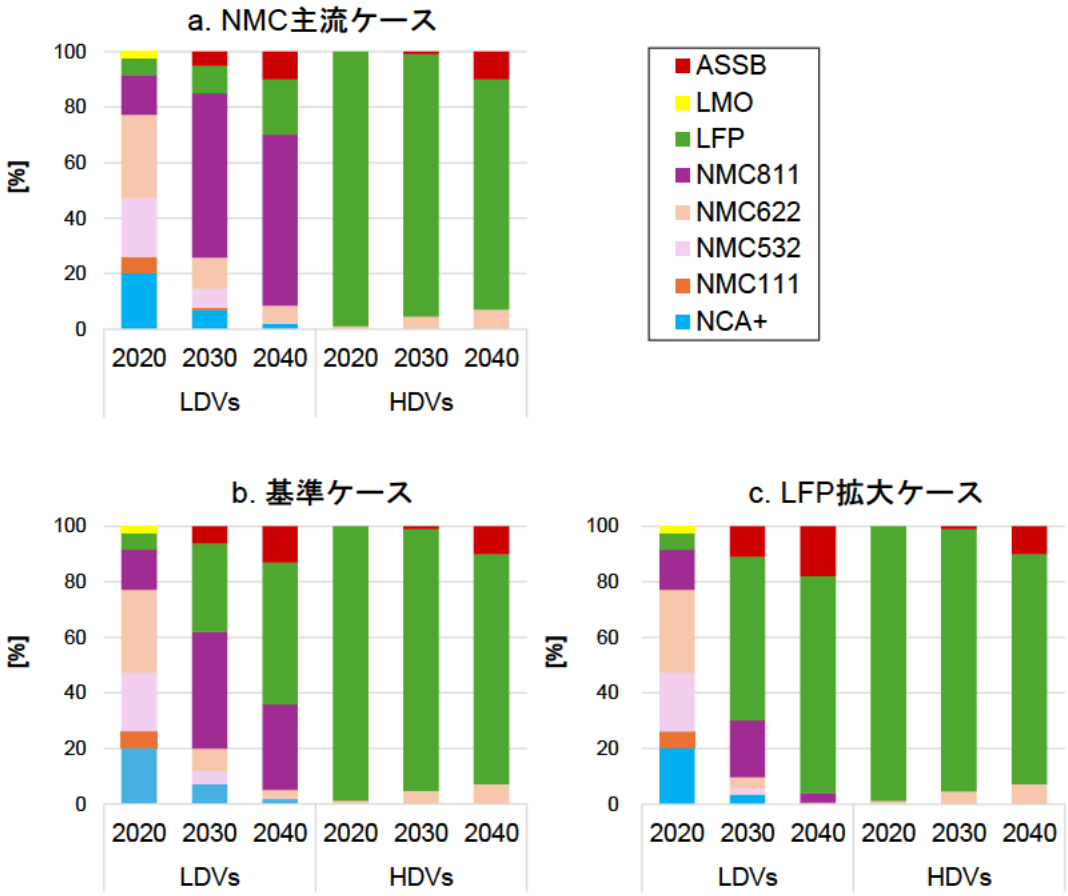


図 5.4.3-2 各種 LIB の市場シェア

④ 経済的合理性に関する想定

リサイクルによる便益からリサイクルにかかる費用を差し引くことにより、経済的合理性を概算する。ここで、便益として i) 人権・環境問題の低減、ii) 廃電池の埋め立て等処理費用の低減、iii) 原料調達費用の低減等が考えられる。但し i) や ii) は地域やバウンダリー想定による不確実性が大きいこと、また情報も限られることより、ここでは iii) 原料調達費用の低減に注目した。

a. リサイクル費用

データの入手可能性を考慮し、リサイクル費用は概括的に i) 廃電池の回収・運搬・解体と ii) 機械的前処理・精錬からなるとし、現在の処理費用を、i) は 1100 USD/t-電池パック、ii) は 3500 USD/t-電池セルとした [18),19)]（パックに対するセルの比率は 0.8 と想定）。なお、ii) は、NMC 系の電池から湿式法により主要鉱物を回収する費用である [19)]。NCA、LFP、LMO 系の電池は表 5.4.3-1 の通り、回収鉱物種が少ないことより溶媒抽出の回数も減るとして、ii) の費用を各 5、15、10 ポイントだけ NMC 系より低く設定した。また、i) と ii) の費用に占めるエネルギー費用は、文献 21)を参考に各 5%とした。

将来について、新技術は特に考慮していないが、技術習熟により処理費用は低減する（累積処理量 2 倍で 10%低減、文献 20)に基づき想定）とした。なお、エネルギー

費用の算定では、DNE21＋のエネルギー価格上昇率を参照し、CN シナリオ下での費用上昇を考慮した。

b. 原料調達費用の低減

回収鉱物で原料を代替できるとし、「回収鉱物量×鉱物価格＝回収資源価値」だけ、原料調達費用が低減するとした。鉱物価格は、2020 年頃の価格が将来も続く「低価格ケース」と上昇する「高価格ケース」の 2 つを想定した。2020 年頃の価格は文献 22)より引用、高価格ケースは文献 23)の価格上昇率に基づき外挿推計した（表 5.4.3-4）。

表 5.4.3-4 鉱物価格想定 [thousand USD/t]

素材	純分率	2020	高価格ケース		
			2030	2040	2050
電気銅	1	6.1	10.0	8.6	8.6
アルミ地金	1	1.8	2.9	2.5	2.5
炭酸リチウム	0.188	10.8	30.8	24.8	24.8
硫酸ニッケル	0.22	3.5	9.1	11.0	11.0
四三酸化マンガン	0.72	2.2	2.9	3.6	4.5
コバルト酸化物	0.64	30.0	180.0	41.2	41.2

(4) 分析結果

① 電池需要量、廃電池量

図 5.4.3-3a に世界の新車販売台数をシナリオ別に示す。2℃シナリオに比べ、1.5℃シナリオでは EV が増え、ICEV が減る傾向がみられる。さらに注目すべき点は、技術のコスト想定による EV 車種の違いである。再エネ・EV のコスト低減がより進むと想定した O2、O1.5 シナリオでは乗用車新車販売の大半が BEV となるのに対し、DO2、DO1.5 シナリオでは PHEV や HEV が主流となる。DO シナリオは運輸部門の最終エネルギーに石油が相当量残り、その分を植林や DACCS 等の CDR で相殺するシナリオである [11)]。電池の需要量は、このような車種の違いを反映し、O2、O1.5 シナリオは 2050 年にそれぞれ 4TWh/yr、6.5TWh/yr まで増大するが、DO2、DO1.5 シナリオでは O シナリオの数分の一に留まる（図 5.4.3-3b）。電池の廃棄はこれより 10～20 年後に生じる（図 5.4.3-3c）。2030 年の廃電池は現在 EV に搭載されているものであり、シナリオに依らず 90 GWh 程度である。それ以降はシナリオに依り、例えば O1.5 シナリオでは 2040 年、2050 年に 2030 年比、各 18 倍、43 倍まで増大する、一方 DO1.5 シナリオでは 2040 年に 4 倍、2050 年に 7 倍に留まる。廃電池に含まれる主要鉱物（図 5.4.3-3d）は、重量では銅やアルミニウムが多いが、ニッケルも特に NMC 系電池が LIB 市場シェアを維持するケースで多いと算定された。

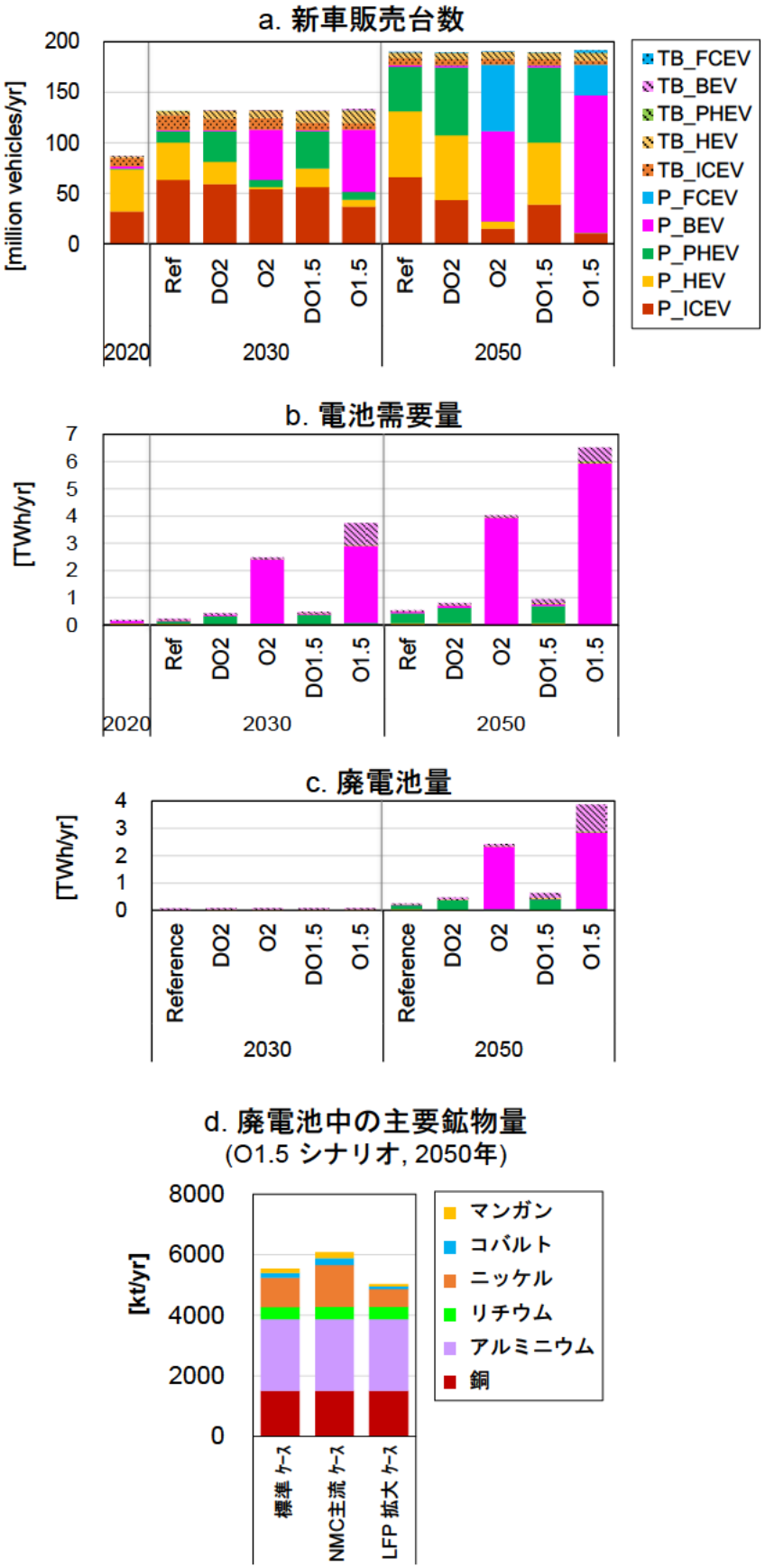


図 5.4.3-3 新車販売台数と電池の需要量・廃棄量、廃電池中の鉱物量

② 重要鉱物の再資源化ポテンシャル

廃電池量×廃電池回収率×鉱物収率から算定した再資源ポテンシャルを図 5.4.3-4 に示す。電池の需要量・廃棄量を反映し、2℃シナリオより 1.5℃シナリオで多い。また、目標気温が同じでも O シナリオと DO シナリオでは顕著な差が生じる。例えば 2050 年にリチウム、ニッケル、コバルトの再資源化ポテンシャルは、廃電池が多く発生する O1.5 シナリオで各 370～380、550～1310、80～190 kt/yr、廃電池量が少ない DO1.5 シナリオで各 60、80～210、10～30 kt/yr と算定された。なお、ニッケルとコバルトは、LIB 各種の市場シェアに依っても大差が生じる。NMC 系電池が LIB 市場の主流を維持するケースに比べ、ニッケル・コバルトフリーの LFP 系が市場の大半を占めるケースでは、2050 年のニッケル、コバルトの再資源化ポテンシャルは 40%程度に留まる。

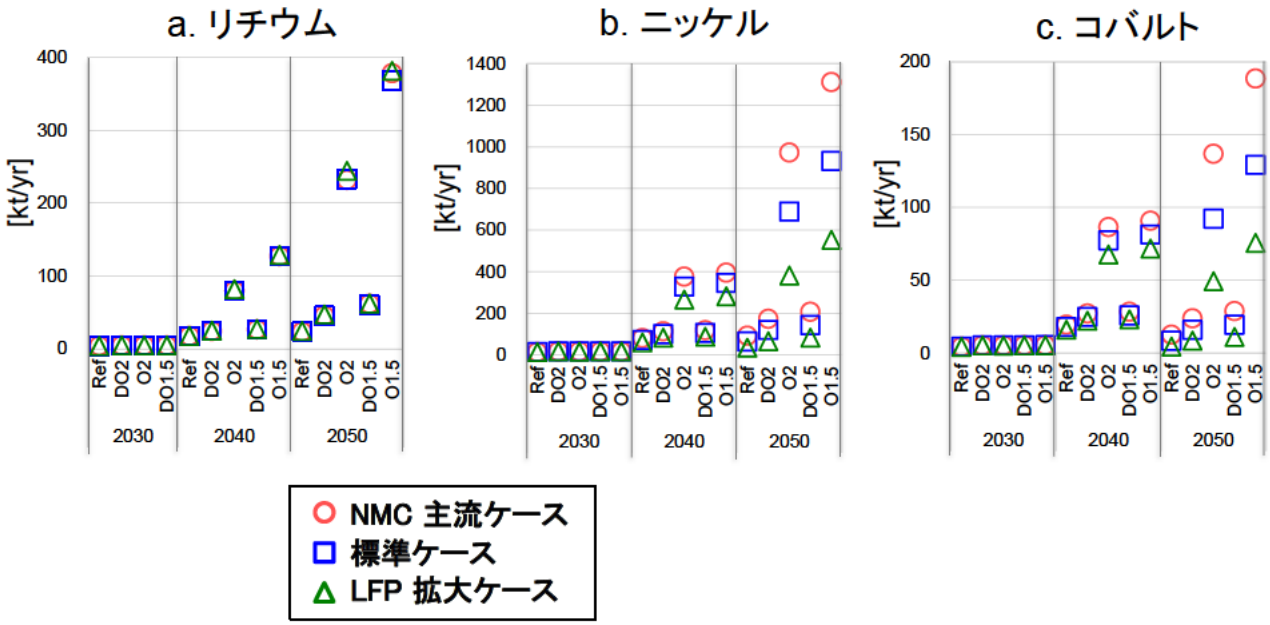


図 5.4.3-4 主要鉱物の再資源化ポテンシャル

図 5.4.3-5 に、需要量に対する再資源化ポテンシャルの割合を示す。参考まで EU 電池規則における極材活物質に対する 2031 年以降の、リサイクル材最低使用割合目標値も示す。図より、本分析で想定した廃電池回収率、鉱物の収率が世界全体で実施された場合、ほぼ全てのシナリオで EU のリサイクル材最低使用割合目標を満たすだけのリサイクル材を確保できると考えられる。

但し、廃電池が未だ限定的のところ需要量が急速に増大する O2、O1.5 シナリオの 2030 年は、世界全体で見る限り、EU の目標値を下回ると算定された。仮に電池製造時不良品の回収、再資源化も考慮すると、需要量に対する再資源化ポテンシャルの比率は若干向上するが、不良品の発生率や回収率、さらに市場シェアを占める LIB 種に依存し、目標達成は極めて不確実と考えられる。

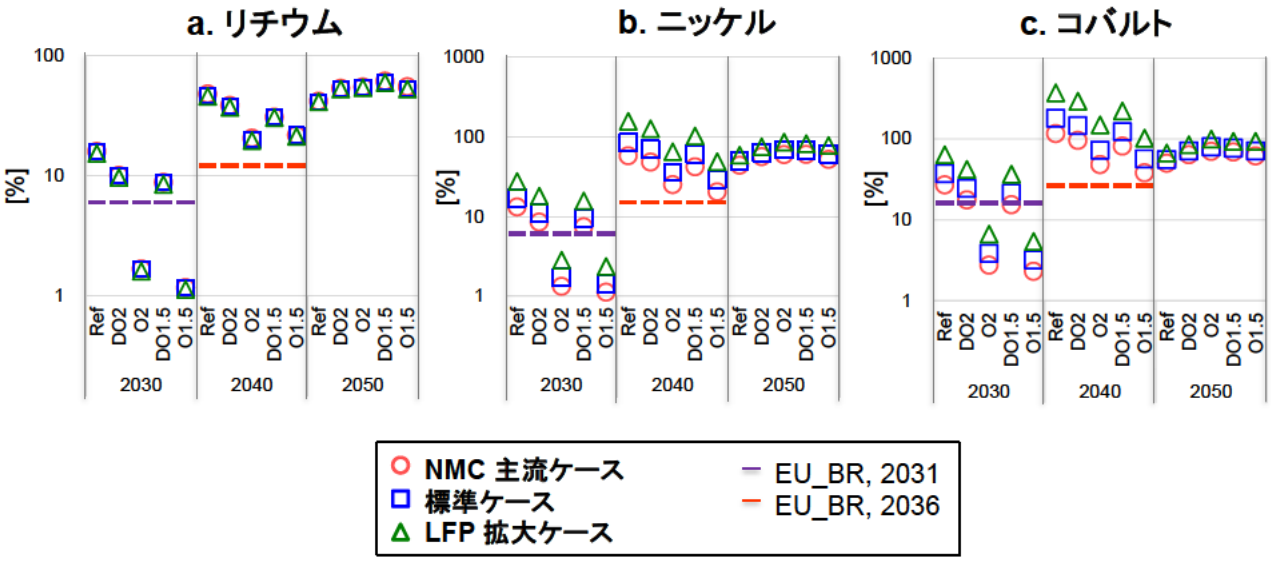


図 5.4.3-5 主要鉱物の需要量に対する再資源化ポテンシャルの割合

③ リサイクルの経済的合理性

DO2、O2 シナリオを例に、各電池種の回収資源価値とリサイクル費用を図 5.4.3-6 に示す。ここで、回収資源価値は「鉱物低価格」、リサイクルのエネルギー費用は「エネルギー高価格（日本程度）」に基づき算定している。図より、2030 年には DO2、O2 シナリオ共ほぼ全ての種類の電池で、回収資源価値はリサイクル費用より小さく、収支は負（損失）となる。但し、CO_2 限界削減費用が世界共通とした O2 シナリオでは DO2 シナリオに比べエネルギー価格が低いため、リサイクル費用が抑制され、回収鉱物種が多い NMC 系電池で収支はわずかながら正（利益）と算定された。

2050 年には、DO2、O2 シナリオ共、累積処理量の増大に伴いリサイクル費用が低減する。特に廃電池が多い O2 シナリオでその傾向が強く、利益が生じやすい。なお、LFP 系電池はコバルトやニッケルを含まないため、回収資源の価値は小さく、利益も小さく算定される傾向がある。

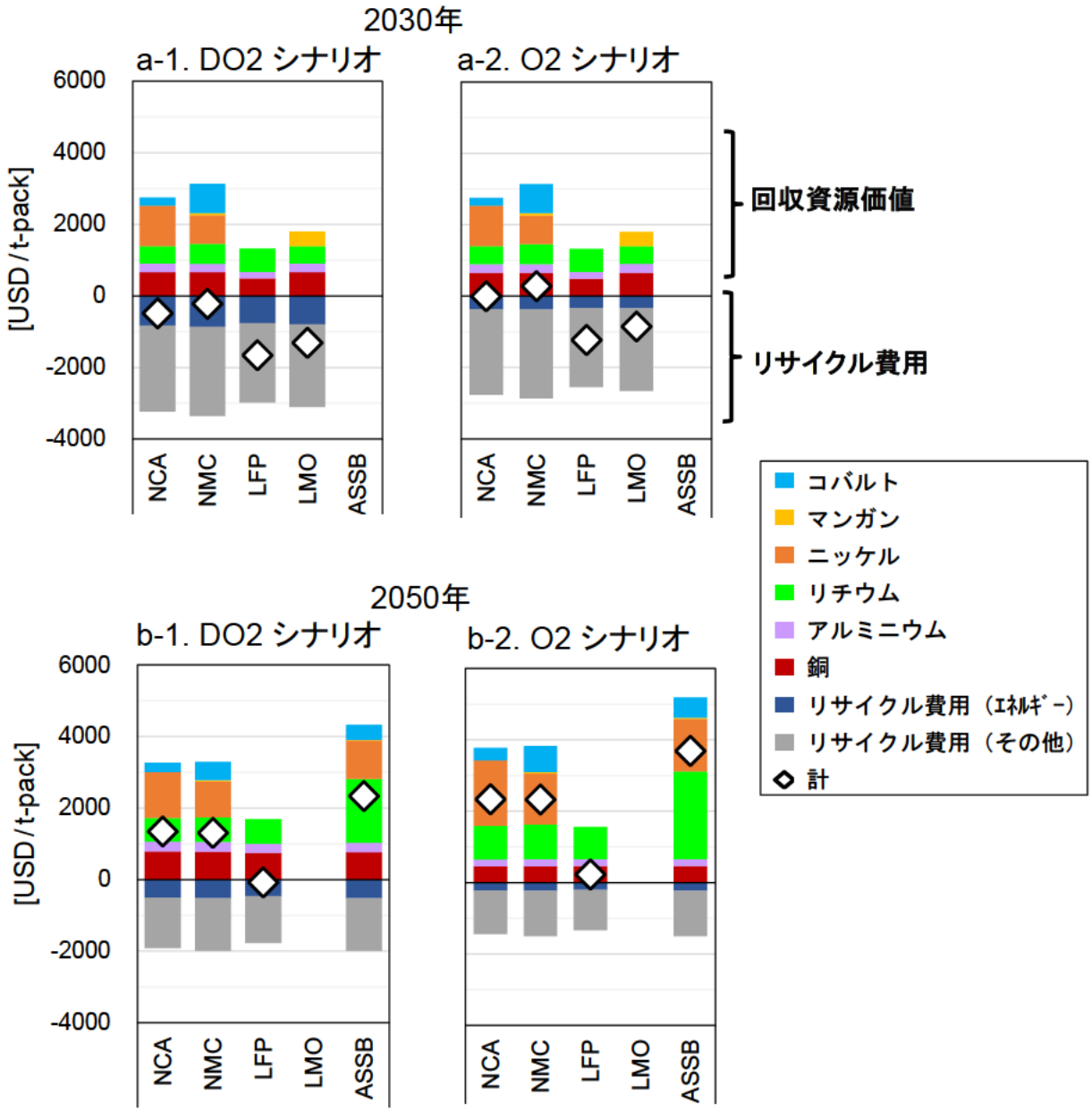


図 5.4.3-6 各種電池の回収資源価値とリサイクル費用

（注）a、b 共、回収資源価値は「鉱物低価格」、リサイクルのエネルギー費用は「エネルギー高価格（日本程度）」に基づき算定。

このような費用上合理的と考えられる電池種からの回収鉱物量の、再資源化ポテンシャルに対する割合を示したのが図 5.4.3-7a である。当然ながら、鉱物価格が高い場合、回収資源価値は高くなり、リサイクルが費用上合理的な電池種と、そこからの回収量が増える。仮にネルギー価格が中国程度に安価と想定すると、図 5.4.3-7b に示す通り、鉱物価格が低くい場合も利益を生じる回収量が増える。エネルギー費用の抑制も重要といえる。

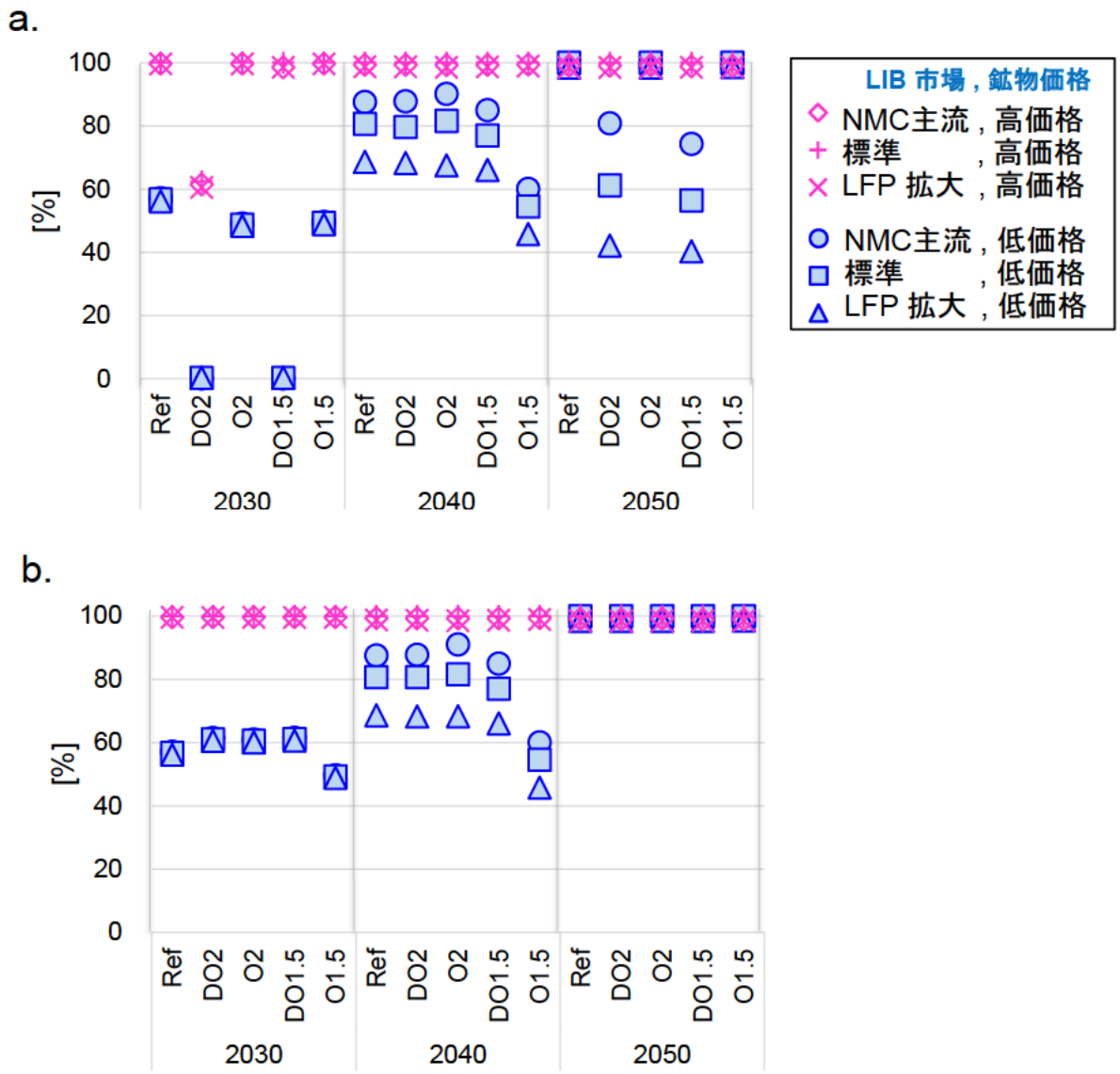


図 5.4.3-7 再資源化ポテンシャルのうち、経済的合理性が見込まれる電池からの回収割合（リチウムの例）

（注）リサイクルのエネルギー費用算定において、a は「エネルギー高価格（日本程度）」、b は「エネルギー低価格（中国程度）」を適用。

(5) まとめと課題

世界 CN と整合的な複数の CETs 導入シナリオを対象に、CMs の再資源化ポテンシャルを分析した。ここでは試行の第一歩として、リサイクルに向けた機運が高まる一方で、多様な不確実性が存在する、車載用リチウムイオン電池（LIB）を対象とした。分析により以下のことが示された。

再資源化ポテンシャルは、電池の需要量・廃棄量を反映し 2℃シナリオより 1.5℃シナリオで大きくなる傾向がある。さらに注目すべき点として、目標気温が同じでも、各種クリーンエネルギー技術のコスト想定や CDR の利用可能性に依って、電池の需要量・廃棄量は異なる。例えば、1.5℃目標に向け、再エネ・EV のコスト低減が進みか

つ CDR の利用可能性が小さいと想定した O1.5 シナリオでは、BEV が乗用車新車販売の大半を占め電池需要量が急増大する、それに伴い廃電池量も 2030 年の 90 GWh 程度から 2040 年、2050 年には 2030 年比 18 倍、43 倍まで増大する。一方、再エネ・EV のコスト低減が鈍く、CDR の利用可能性が大きいと想定した DO1.5 シナリオでは、乗用車新車販売は PHEV や HEV が主流となり、2040 年、2050 年の廃電池量も 2030 年比 4 倍、7 倍に留まる。このため、廃電池からのリチウム、ニッケル、コバルトの再資源化ポテンシャルは、2050 年に O1.5 シナリオでは各 370～380、550～1310、80～190 kt/yr、一方 DO1.5 シナリオでは各 60、80～210、10～30 kt/yr と分析された。なお、ニッケルとコバルトは、普及する電池種に依っても大差が生じる。上記算定幅の上限値は NMC 系電池が今後も電池市場の大半を占めるケースの値であり、下限値はニッケル・コバルトフリーの LFP 系電池が市場を席巻するケースの値である。

このような違いはあるものの、再資源化ポテンシャルの需要量に対する割合は、ほぼ全てのシナリオ・ケースで EU の 2031 年以降リサイクル材最低使用割合目標を上回る。但し、一部、廃電池量が未だ限定的のところ需要量が急速に増大する O1.5 や O2 シナリオの 2030 年は、世界計で見る限り、EU のリサイクル材最低使用割合目標を下回り、世界全体での目標達成は難しい可能性が考えられる。

参考までに、リサイクル技術として湿式法を用いた場合のリサイクル費用と、回収資源価値との収支から、リサイクルの経済合理性を試算した。それによると、シナリオや各種想定、時点に依るが、鉱物価格が低く、かつ処理量が少なく技術習熟・コスト低減があまり見込めない、そしてエネルギー価格が高い場合に、再資源化は損失となる可能性が示唆された。多様な不確実性が存在する中、利益を確保しつつリサイクルを普及、継続するには、各種電池の特徴により適したリサイクル技術・システムと、そして安価なエネルギーが必要と考えられる。

本分析は、試行の第一歩として実施したもので、各種想定値の精査、改良の余地がある。また、より具体的な検討に向けては、地域別の廃電池や再資源化ポテンシャルの分析が必要である。さらに、リサイクルが採鉱や素材生産における社会的・環境的課題の緩和に寄与する効果のとらえ方等についても情報収集し、総合的に望ましい資源の利用・供給のあり方の検討に資することが求められる。

参考文献（第 5.4.3 に関するもの）

1) IPCC WG3: Sixth Assessment Report: Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press (2022)
2) IEA: Energy Technology Perspectives 2023 (2023)
3) BK Sovacool et al.: Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. Science, 367(6473), 30–33 (2020)
4) IEA: Global Critical Minerals Outlook 2024 (2024)
5) EU: Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council (2023)
6) 経済産業省：GX を見据えた資源外交指針(2023)
7) RITE/METI：令和 5 年度地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業報告書、2024 年 3 月

8) 所千晴： 使用済みリチウムイオン電池からの資源分離回収技術, 廃棄物資源循環環境学会誌, 33(3), 181–187 (2022)
9) ReCell: Lithium-ion Recycling Practices, https://recellcenter.org/research/ （アクセス日 2024.10.20）
10) IEA: Critical Minerals Market Review 2023 (2023)
11) RITE： カーボンニュートラルに向けたトランジションロードマップの策定（2023 年度版）(2024)
12) K Akimoto et al.: Impacts of ride and car-sharing associated with fully autonomous cars on global energy consumptions and carbon dioxide emissions, Technological Forecasting and Social Change, 174, 121311 (2022)
13) K Akimoto, et al.: Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost, Energy Policy, 38(7), 3384–3393 (2010)
14) K Akimoto, et al.: Climate change mitigation measures for global net-zero emissions and the roles of CO_2 capture and utilization and direct air capture, Energy and Climate Change, 2, 100057 (2021)
15) M Wang et al.: Summary of expansions and updates in GREET® 2022, Argonne National Laboratory (2022)
16) 野澤 哲：次世代電池業界地図、30 年超ぶりの革新技術実用化ラッシュ (2023) https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/08070/ （アクセス日 2024.11.1）
17) IEA: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (2022)
18) 太平洋セメント：車載用等の使用済リチウムイオン電池の低炭素型リサイクルシステム実証事業報告書 (2019) （アクセス日 2024.11.9）
19) McKinsey & Company: Battery recycling takes the driver’s seat (2023) https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-recycling-takes-the-drivers-seat （アクセス日 2024.10.28）
20) C Wilson et al.: Marginalization of end-use technologies in energy innovation for climate protection, Nature Climate Change, 2, 780–788 (2012)
21) GTAP: GTAP10 Data Base (2019)
22) JOGMEC： 資源マテリアルフロー2020, 2021
23) IMF: Soaring metal prices may delay energy transition (2021) https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2021/11/10/soaring-metal-prices-may-delay-energy-transition（アクセス日 2024.10.15）

5.5 気候変化を考慮した建物の冷暖房需要に関する分析

建物部門からの GHG 排出は、世界総排出量の約 1/5 を占める。今後、気候変動による気温上昇は建物部門の冷暖房エネルギー需要とそれにかかる GHG 排出に影響を及ぼす、特に熱帯の発展途上地域で冷房用エネルギー需要量を増大させると考えられる。長期緩和策を検討する上で、そのような影響を、将来の温暖化レベル、技術進展、社会・経済変化と整合的な態様で理解する必要がある。このような認識のもと、本 PJ では、国際応用システム研究所（IIASA）の協力により、温暖化影響を考慮した建物部門のエネルギー需要量、及び長期緩和策に関するモデルの開発と分析を行ってきた[1),2)]。

本年度は(1)都市の暑熱適応策、特に、緑地密度増大による周辺温度の低下が建物内の冷房用エネルギー需要量に及ぼす影響を分析した。さらに、(2)統合評価モデリングにおいて、昨年度までは温暖化による冷房用エネルギー需要量増大のみを考慮したが、本年度は暖房用エネルギー需要量の減少も考慮するフレームワークを検討した。

5.5.1 都市の気候変動適応策と建物の冷暖房用エネルギー需要量

(1) 背景・目的

都市は人口密度が高いため気候災害への曝露も高く、気候変動影響のホットスポットである。一般的に、農村部に比べ都市部に多い、石、コンクリート、アスファルト等は不浸透性、低アルベドのため蒸発冷却を抑制し、ヒートアイランド現象の要因の一つとなっている（Oke, 1982）[23]。建物の空間的配置（高さ、方向、大きさ、距離）、風の通り道、地形との相互作用も 都市の気候を左右する。そして、植生や緑地も、日陰や、蒸発散による潜熱冷却をもたらし、都市気候に影響を及ぼす。このため、都市の変革は気候変動への適応に重要であり、緑地は都市の熱負荷増大を軽減するための重要な戦略となっている。なお、緑地には、外気温を下げ屋内の冷房需要を低減するだけでなく、都市生態系サービスを提供し人間の wellbeing 高める可能性も期待されている。

都市緑地の冷却効果については、これまで、統計的手法を用いた多くの研究がなされている（Aram et al, 2019 等）[3]。緑地の冷却効果が気候帯や都市形態に強く依存することを考慮したものもある（Kirschner et al., 2023）[16]。樹木の空間構成と冷却効率については、米国のボルチモアとサクラメントを対象とした詳細な研究がある（Zhou et al., 2017）[31]。 彼らは、樹木による冷却効果は、サクラメントよりもボルチモアで高く、都市によって大きな違いがあることを発見した。但し、使用した統計手法にも強く依存しており、決定的な結論には至らなかった。Wang et al.（2020）[28]は、米国の 10 のバイオームにまたがる 118 都市を対象に、都市緑地の割合が 1 パーセント増えるごとに約 0.168℃の冷却効果があることを明らかにした。 同時に、樹木被覆率は気温変化の 40%を説明できる、冷却効率は暑く乾燥している南西部の都市で高い、湿度の高い都市では気温変化が、乾燥した都市では湿度の変化がより重要である、等を示した。Zhan et al.（2024）[30]は MODIS 衛星で観測した地表面温度と緑地データを用い、世界 440 都市（各都市の樹木被覆率は 0～60%）における冷房効率を調査した。そして、樹木追加による冷却効果は “飽和曲線” を示す、また気候レジームによって冷却効果も異なる、とした。Li et al.,(2024)[19]は、Landsat 8 衛星のレベル 2 の地表面温度データと、都市緑化の代理指標として正規化植生指数（NDVI）データを用い、都市緑化の効果を世界的不平等の観点から調査した。それによると都市緑化は、平均的な都市では「暖かい季節」に－3℃の気温低下に寄与する。しかし、グローバル・サウスの都市では、グローバル・ノースの都市に比べて、その冷却能力の 3 分の 2 しかなく、世界的な不平等があるとしている。

このように、これまで研究は、地表面温度と観測された緑化度に基づくものが大半である。本研究では、都市気候モデルによる気候データ、及び樹冠密度から算定され

た街路緑地データ、という詳細な情報に基づき、街路緑地の温度低減ポテンシャルを推計する。さらに、将来の街路緑地として楽観的なシナリオと悲観的なシナリオを検討する。続いて、推定した温度冷却ポテンシャル係数と、各都市の街路緑地シナリオを MESSAGEix-Buildings の CHILLED モデルに組み込み、都市の街路緑地による住宅や商業建物の冷房用エネルギー需要量の削減ポテンシャルを評価する。

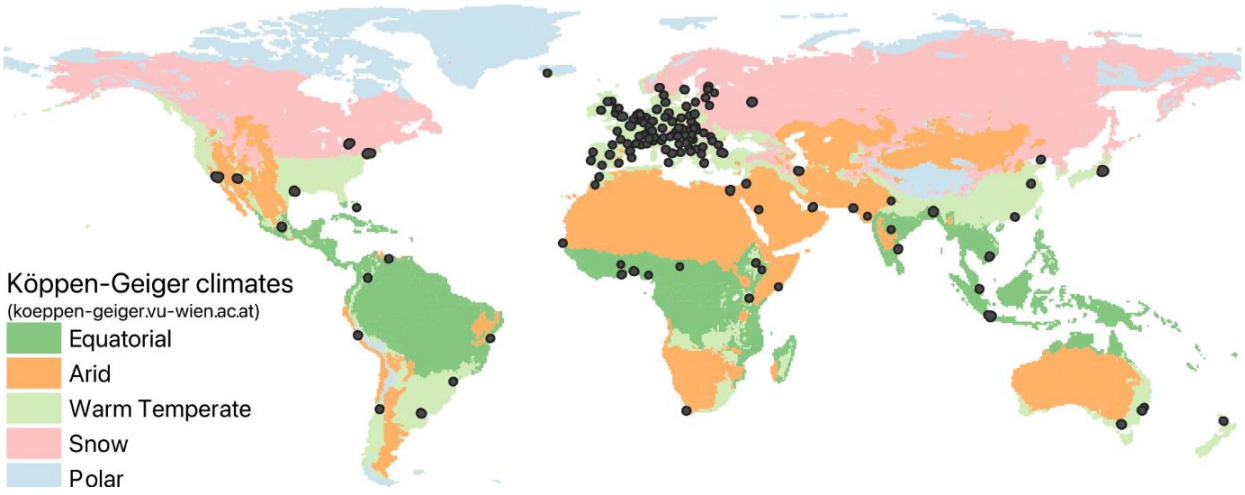


図 5.5.1-1 本調査で対象とした 142 都市とそのケッペン・ガイガー気候区分

(2) モデル化と分析の方法

① 街路緑地による都市気温低減効率推計

世界 142 都市の現在の気候データ（空間分解能 100m、時間分解能 1 時間）は、PROVIDE プロジェクト（Climate Risk Dashboard - PROVIDE[6]; De Ridder et al., 2015[7]）の UrbClim モデルを活用して入手する。分析で考慮する変数は、暑さ指数 WBGT（地上 2m 高の気温、相対湿度、風速、日射角、日射量を組み合わせた指数）、及び地上 2m 高の平均気温、最高気温、最低気温で、それぞれ月平均値を使用する。

さらに、Falchetta and Hammad (2024)[10]の手法（都市の道路に沿った任意の XY 座標について、樹冠被覆密度を予測する機械学習モデル）により、142 都市の各サンプリング点における街路緑地密度を分析し、街路樹の平均樹冠密度を示す指標、GVI（Green View Index, 詳細は Seiferling et al., 2017[26]参照）を算出する。GVI は 0～100 の値で、植生に覆われた可視パノラマの割合を表す。

各サンプリング地点と都市に、ケッペン・ガイガー分類と LCZ（local climate zone）の両方を割り当てた。ケッペン・ガイガー分類は一般的な気候帯（図 5.5.1-1）を、LCZ は建物の高さと疎密に基づき都市建築環境を特徴付けるものである（Demuzere et al., 2022[8]; Stewart & Oke, 2012[27]）。

以上のデータを基に回帰分析を行い、各都市の LCZ 毎に一定面積の街路緑地による冷却効率を図 5.5.1-2 のように推計した。

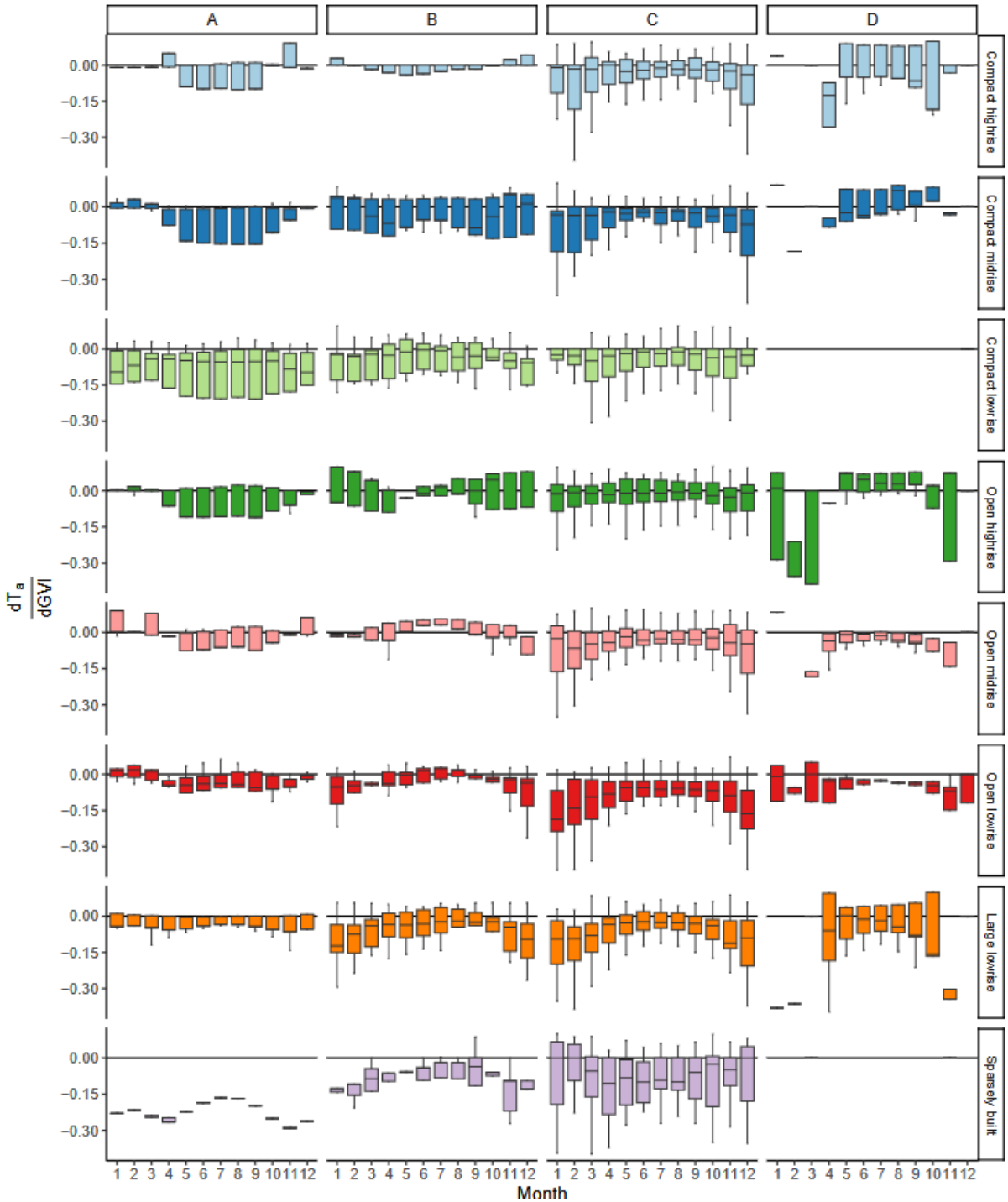


図 5.5.1-2 街路緑地による冷却効率の推定値

（注）世界 142 都市の各サンプリング地点に対する推計値。ケッペン・ガイガー気候帯（A～D 列：順に熱帯、乾燥帯、温帯、亜寒帯）と、建築環境 LCZ（行：Compact highrise、Compact midrise 等）に分類して表示。

② 都市の街路緑地シナリオの設定

各都市の建築環境 LCZ 毎に、2016～2023 年の街路緑地密度に基づき、将来の街路緑地シナリオを設定した。具体的には、街路樹平均樹冠密度指標、GVI を i)これまでに観測された高めの値（LCZ、気候帯が同じ地域の 75 パーセンタイル値）から 2050

年までに 25%増大するシナリオと、ii)これまでに観測された低めの値（同 25 パーセンタイル値）から 2050 年までに 50%減少するシナリオである。なお、LCZ、気候帯が同じ地域の 10、90 パーセンタイル値をそれぞれ下限値、上限値とした。作成した GVI シナリオの例を図 5.5.1-3 に示す。

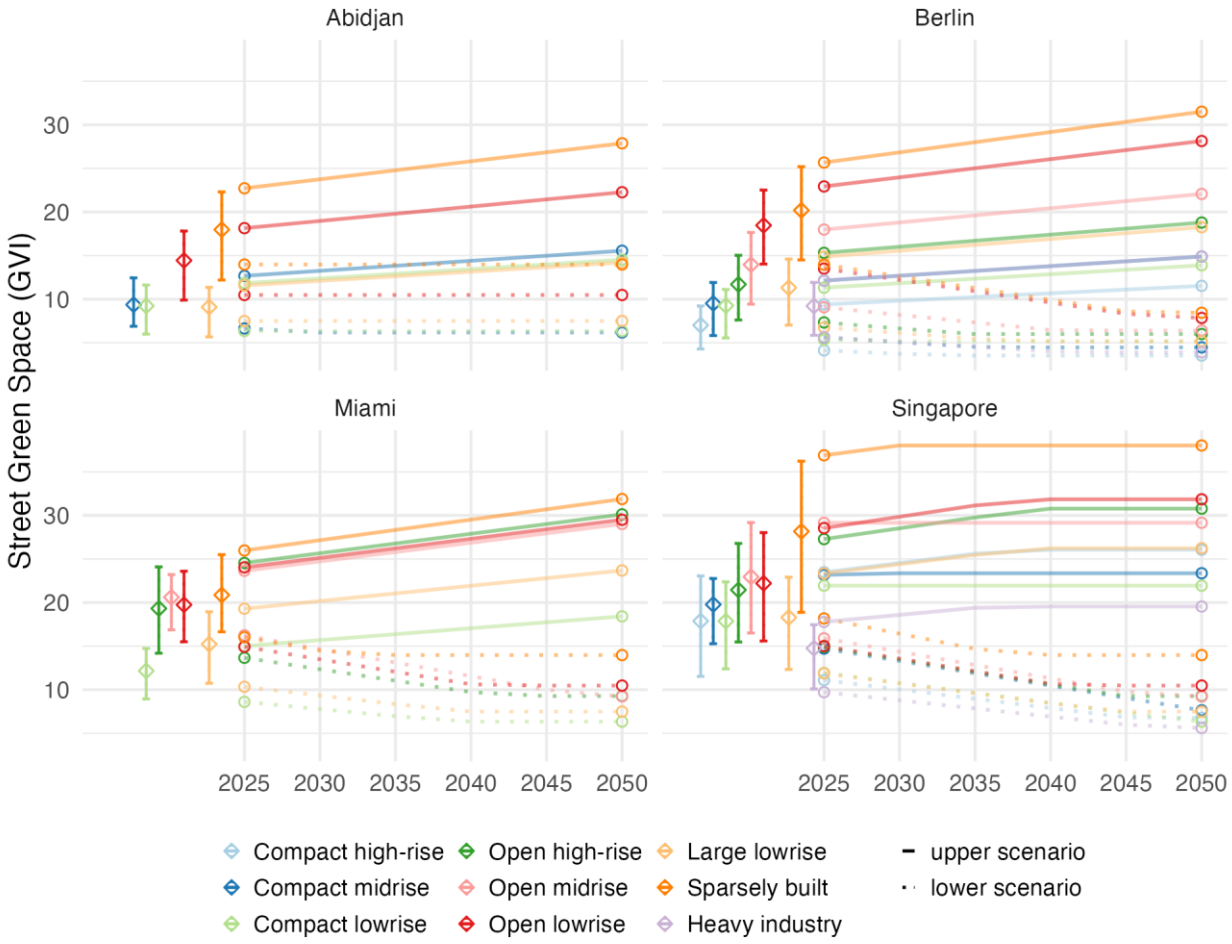


図 5.5.1-3 4 街路樹平均樹冠密度指標、GVI のシナリオ（4 都市の例）

（注）図中、実線は増大シナリオ、点線は減少シナリオ（本文参照）

③ 街路緑地による冷却効果の冷房需要モデルへの統合

街路緑地の冷却効果による冷房需要への影響の分析に、気候影響モデル CHILLED（Mastrucci et al., 2019, 2021）[21),22)]を使用する。CHILLED は、住宅及び商業用建物のエネルギーバランスを表現したモデルで、設定温度に対し空間の冷暖房に必要な単位面積当たりエネルギーを分析する。入力する気候データは、最新の全球地球システムモデルで予測されたアンサンブルデータ（空間解像度 0.5° のグリッドデータ）より主に地表気温、相対湿度である。本分析では、各グリッドの地表気温を、街路緑地シナリオと都市・建築環境別の冷却効率に基づき更新の後、使用する。

ここで、街路緑地シナリオとして、次の 3 つを設定した。

- **No green space**: 街路緑地を 0 とし、地表気温の調整を行わない。CHILLED の基本設定。
- **Current green space**: 現在の街路緑地レベルを考慮して地表気温を調整。
- **Green space expansion**: 街路緑地拡大シナリオに対し、地表気温を調整。適応シナリオ。

温暖化シナリオは、次の Baseline と SSPx を想定した。

- **Baseline**: 現在気候（SSP126 シナリオの 2015～2020 年までの気候）を継続。
- **SSPx**: CMIP6 の SSP126、SSP370、SSP585 シナリオ。2050 年気温上昇予測値の中央値はそれぞれ 1.7、2.1、2.4 °C。

(3) 分析結果

緑地効果を考慮しない No green space シナリオにおけるヨルダン、アンマンの住宅・商業用建物の月別冷房用エネルギー需要量を図 5.5.1-4 に示す。夏季の冷房用エネルギー需要量が、温暖化レベルが高いシナリオ程、大きく算定される。

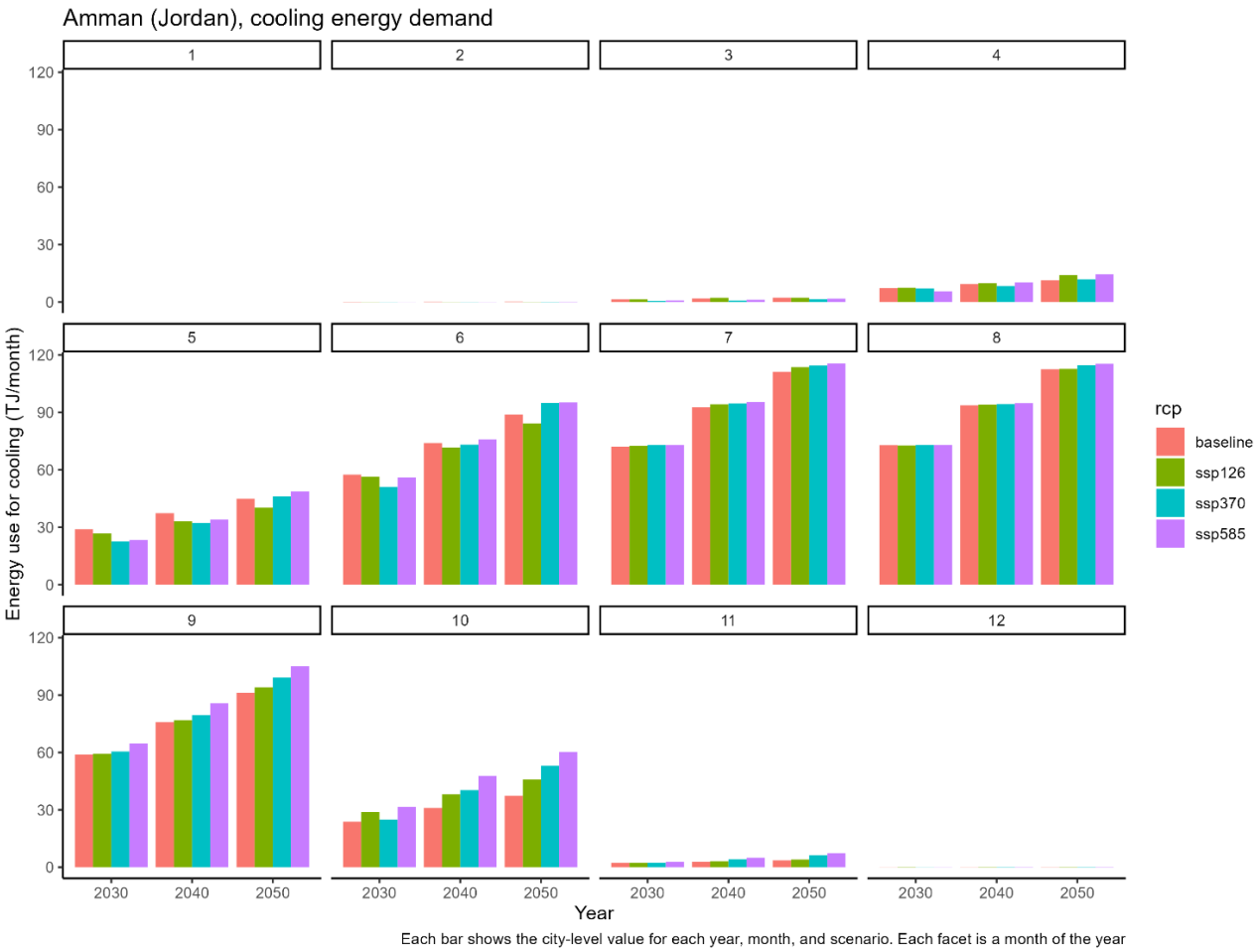


図 5.5.1-4 ヨルダン、アンマンの月別冷房用エネルギー需要量
（No green space シナリオ）

図 5.5.1-5 には、Current green space シナリオの年間の冷房用エネルギー需要量を示す。街路緑地の冷却効果の考慮により、No green space シナリオに比べ年間冷房需要量は 0.4～0.6%、小さく算定される。時点が進むにつれ、また、温暖化レベルが高いシナリオ程、この比率が小さくなるのは、街路緑地の冷却効果が一定であるのに対し、分母となる冷房需要量が大きくなるためである。

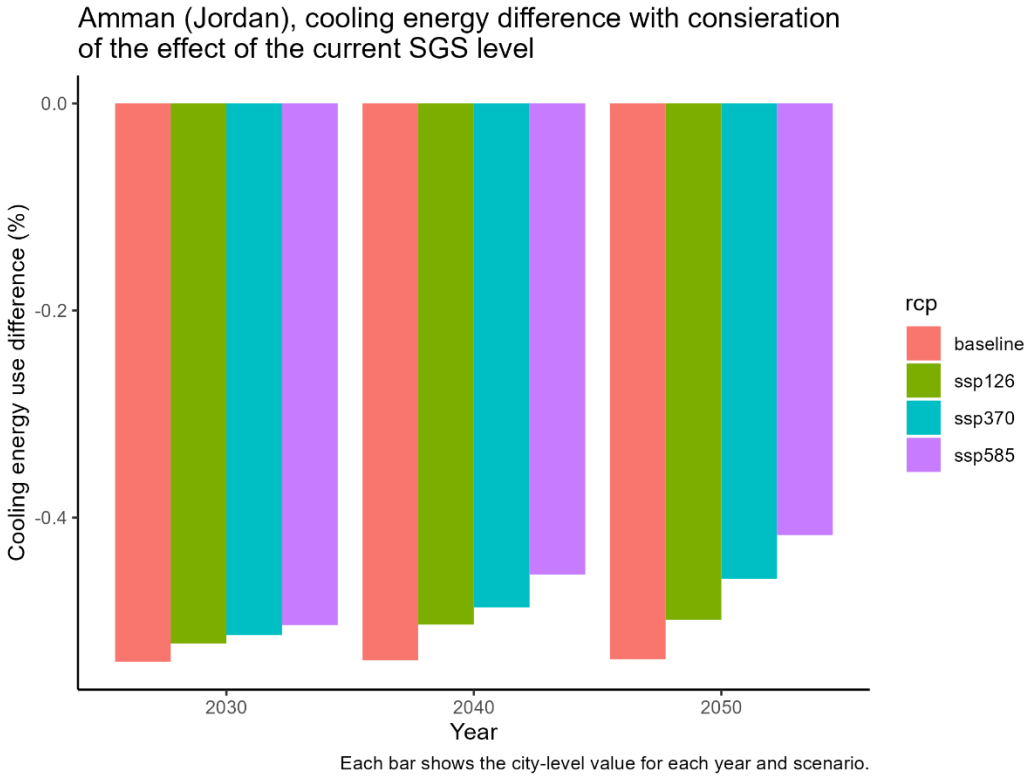


図 5.5.1-5 ヨルダン、アンマンの年間冷房用エネルギー需要量の差異
（Current green space シナリオ、対 No green space シナリオ）

図 5.5.1-6 には、Green space expansion シナリオにおける年間冷房需要量の差（対 Current green space シナリオ）を、世界主要都市について示す。これより、街路緑地拡大により、世界主要都市の年間冷房用エネルギー需要量は 0.5～3%、小さくなる。

なお、エネルギー需要量減少の絶対量は、温暖化シナリオが高い程大きく、最も暑い都市で最高、となる。一方、図 5.5.1-6 のように減少率で示すと、温暖化レベルが高いシナリオ程、また、暖かい都市程（図の上側の都市程）、値は小さくなる傾向が見られる。分母となる冷房用エネルギー需要量が大きいことによる。

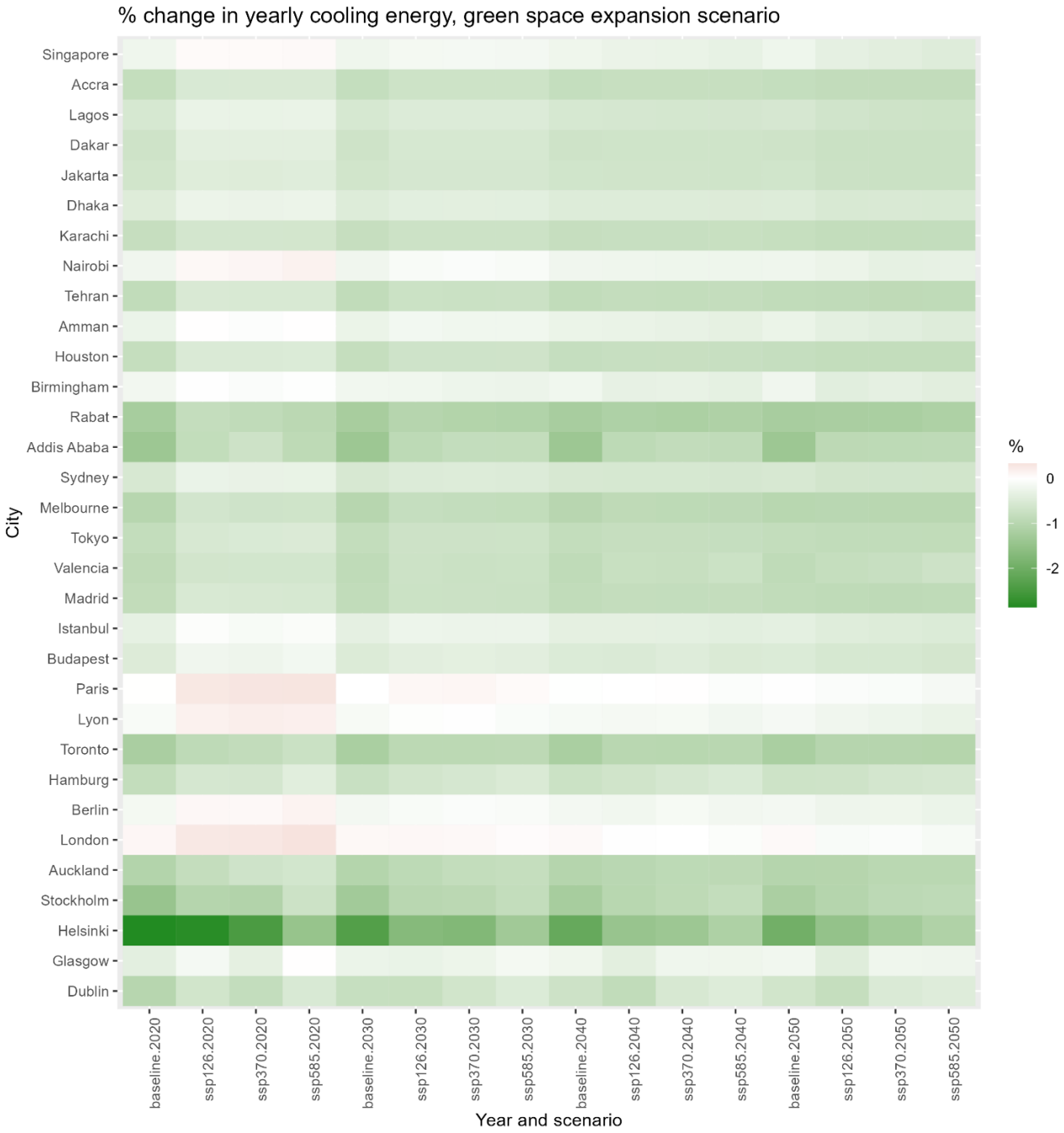


図 5.5.1-6 世界主要都市の年間冷房需要量の差異

（Green space expansion シナリオ、対 Current green space シナリオ）

人口比重冷房度日（historical）の大きい都市の順に表示。

ヨルダン、アンマンについて、街路緑地拡大による月別冷房用エネルギー需要量の低減量は、図 5.5.1-7 の通りである。

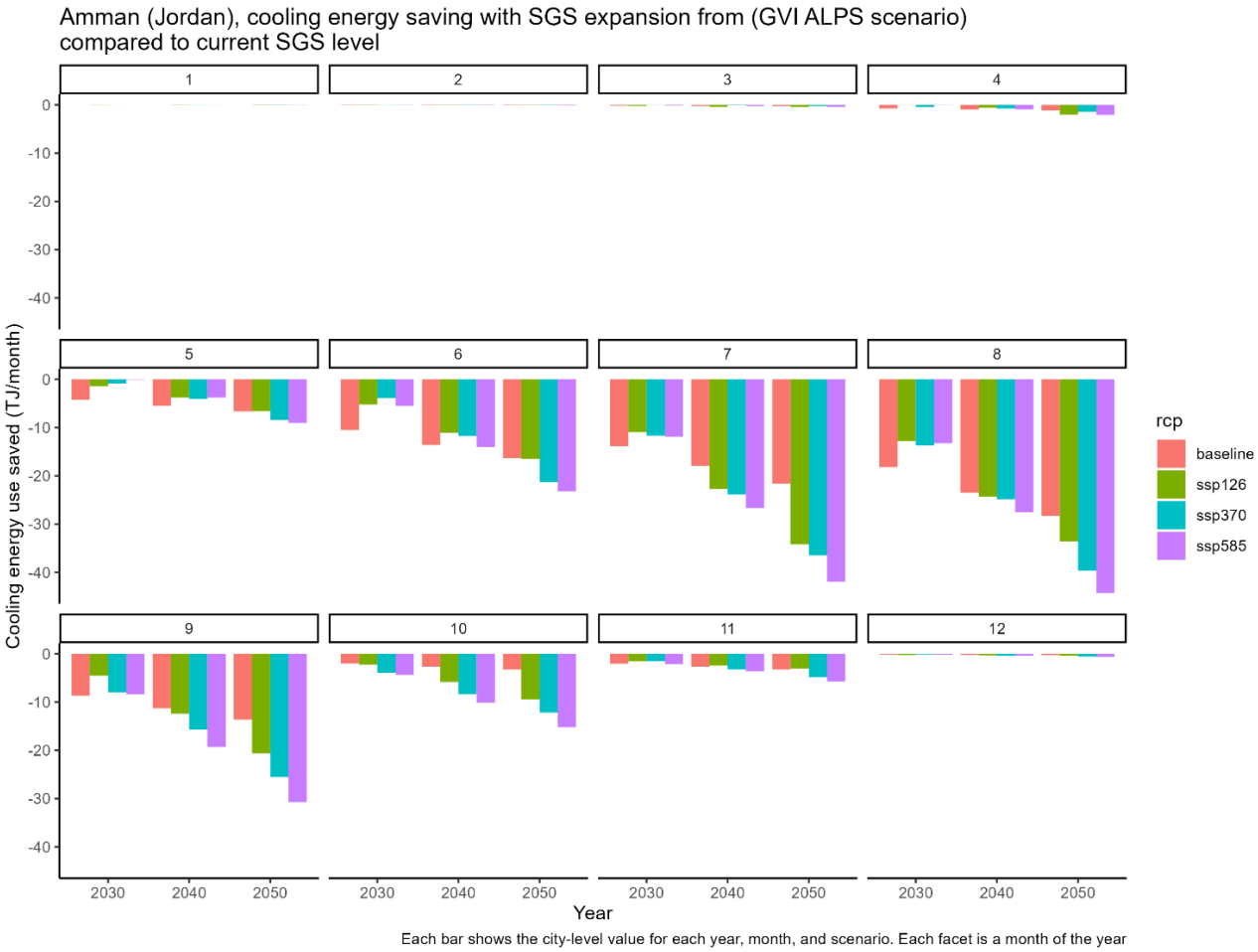


図 5.5.1-7 ヨルダン、アンマンの月別冷房需要量
（Green space expansion シナリオ、対 Current green space シナリオ）

(4) まとめ

本研究では、まず世界各都市の詳細な気候データと緑地密度データに基づき回帰モデルを作成、都市内の建物の密度や種類等、形態特性を考慮しながら、街路緑地が都市の月別平均気温に及ぼす影響を分析した。次に、都市の緑地密度について、これまでに観測された水準や傾向、気候学的・形態学的な拡大可能性を考慮し、将来の緑地密度シナリオを作成した。そして、各都市の街路緑地拡大シナリオと、街路緑地の冷却効果を CHILLED モデルに組み込み、2050 年までの複数の気候シナリオ下での、世界主要都市の住宅・商業用建物の月別冷房用エネルギー需要量を分析した。

分析の結果、街路緑地は、都市の冷房用エネルギー需要量の削減に貢献することが示された。各都市の街路緑地が拡大するシナリオでの年間冷房用エネルギー需要量は、街路緑地が現状のままとしたシナリオに比べ、0.5～3%低減すると推定された。エネルギー需要量低減の絶対量は、温暖化シナリオが高い程大きく、最も暑い都市で最高、となる。

今後の課題として、都市内の形態と影響をより詳細に考慮すること、また、一日のうち、あるいは月々の中でも気温が高い時間帯における冷却能力をより良く表現するため、緑地と冷却能の関係性、及び CHILLED モデルにおいて、時間分解能向上の検

討があげられる。適応策としての都市緑地の可能性と限界をより良く理解するために、この分野でのさらなる研究が必要である。

5.5.2 統合評価モデルにおける気候変動による冷暖房需要への影響考慮の枠組み

(1) 背景・目的

統合評価モデル（IAM）は、エネルギー、社会経済、環境といった異なるセクター間の複雑な相互作用を分析・評価するために設計された計算フレームワークであり、地球温暖化を緩和するための潜在的な排出経路を探索するための重要なツールである。しかし、地球規模の地球システム・気候モデル（GCM）でシミュレートされた気候データを、排出量や気温上昇と整合性を保ちながらIAMに組み込むことは、容易でなく、研究課題となっている。

そこで、本研究では、これまで、MESSAGEix-Buildingsのフレームワークを活用し、地球温暖化による冷房需要への影響をパターンスケーリング手法により、あらゆる地球温暖化シナリオに対し柔軟にエミュレートしIAMに組み込む方法を検討した（Byers, Meng, et al., 2024[5]; Mastrucci et al., 2023[20]）。

今年度は、このエミュレーションの枠組みと方法を、地球温暖化による暖房需要への影響も考慮できるように拡張した。以下の節に、改良したモデリングの枠組みとシナリオの設定、分析結果、及び結論を記す。

(2) モデル化と分析の方法

① モデルの枠組み

図 5.5.2-1 に示すように、統合評価モデル MESSAGEix-GLOBIOM (Fricko et al., 2017[12]; Krey et al., 2020[17])、冷暖房需要モデル CHILLED、建物ストック回転率 STURM モデル (Mastrucci et al., 2021)[22]の、3つのモデルを用いる。

まず、MESSAGEix-GLOBIOMモデルのCO_2排出パスに対応する温暖化シナリオについて、CHILLEDエミュレーターを用い、住宅・商業用建物の設定温度に応じた床面積当たり冷房用・暖房用エネルギー需要強度を推計する。エミュレーターの開発には、温暖化影響、そして不均質な世帯や住宅特性を考慮しながら、既存（2020年以前に建築）と新規（2020年以降に建築）別にエネルギー需要強度を分析するCHILLEDモデルを用いる。次に、STURM モデルを用いて建物の更新、エネルギー効率改善策の選択等も加味する。そして、温暖化による冷暖房用最終エネルギー需要量の変化分をエネルギーキャリア別にESSAGEix-GLOBIOMモデルに引き渡す。

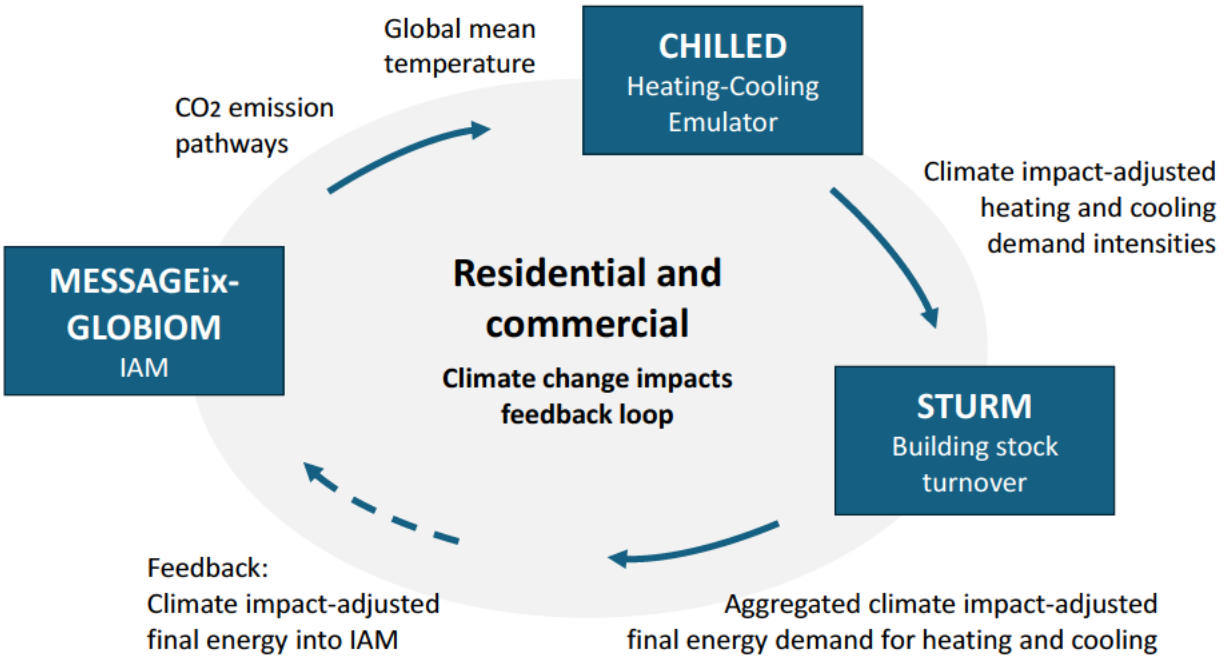


図 5.5.2-1 モデルの枠組み

② 冷房用・暖房用エネルギー需要強度エミュレーター

図 5.5.2-2 に暖房の設定温度を 21℃とした場合の、各地域の既存建物、新規建物別の単位床面積当たりエネルギー需要量と CO_2 の累積排出量（2015 年以降）との関係を示す。ここで CO_2 の累積排出量は、世界平均気温と強い線形関係があることから温暖化レベルの代理指標として使用している。以下、この関係を暖房用エネルギー需要強度エミュレーターと呼ぶ。冷房用エネルギー需要強度のエミュレーター開発と同様に[4)]、GCMs による気候予測の不確実性を考慮するため、5 つの GCMs（GFDL-ESM4、IPSL-CM6ALR、MPI-ESM1-2-HR、MRI-ESM2-0、UKESM1-0-LL）のデータを用いた。図中、赤色の実線は各 GCM データに基づく推計値の単純平均値を、破線は線形分位点回帰により算出した 5、25、50、75、95 パーセンタイル値を示す。

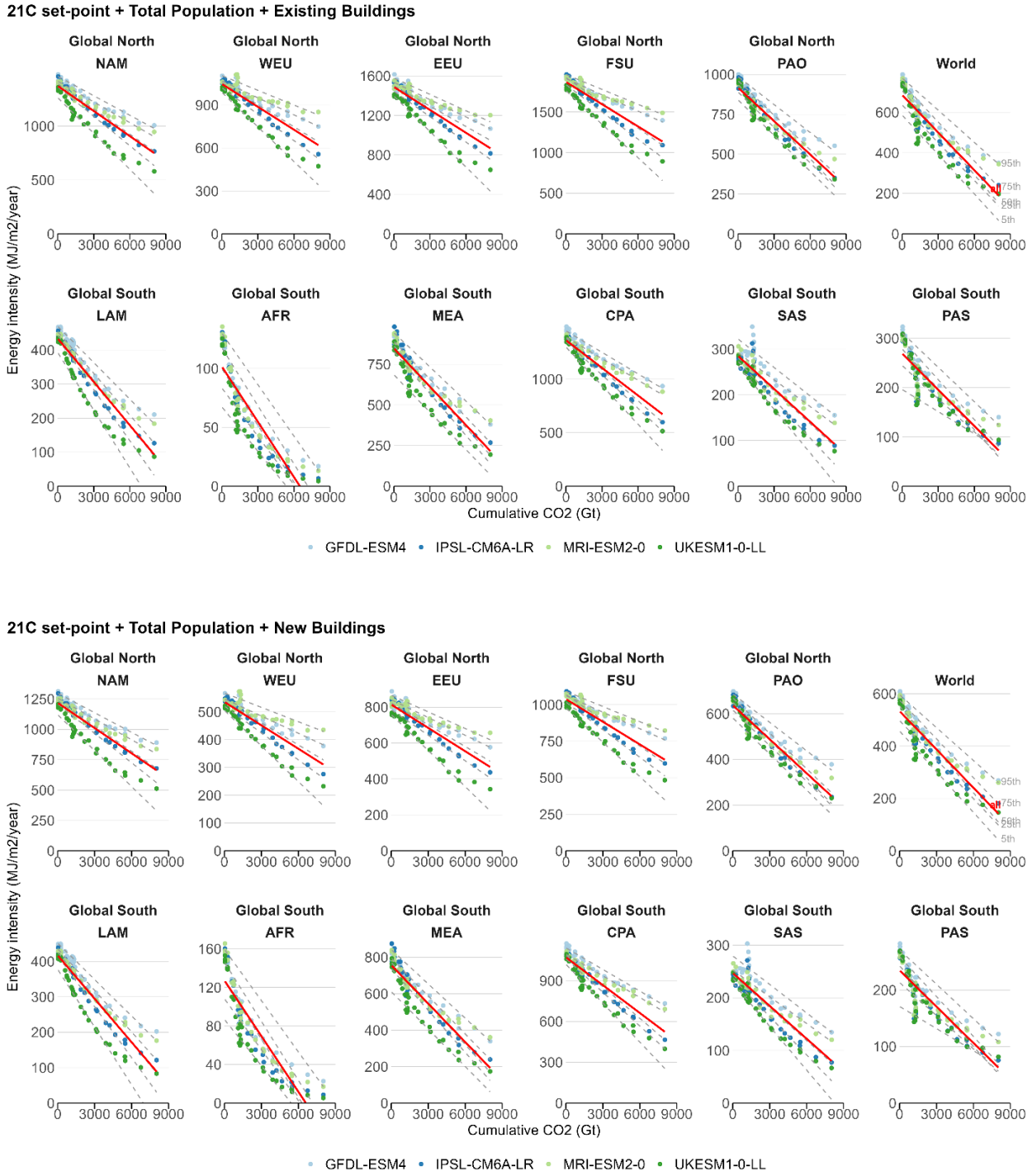


図 5.5.2-2 CO_2 累積排出量に対する地域別の単位床面積当たり暖房用エネルギー需要量

（上段：既存建物、下段：新規建物。設定温度は上下段とも 21℃）

（注）図中の CPA には、世界 12 地域区分（表 5.5.2-2）の CHN:China と RCPA:Rest of Centrally Planned Asia が含まれる。

図 5.5.2-3 には、冷房の設定温度を 23℃とした場合の、各地域の既存建物、新規建物別の単位床面積当たりエネルギー需要量と CO_2 の累積排出量との関係を示す。

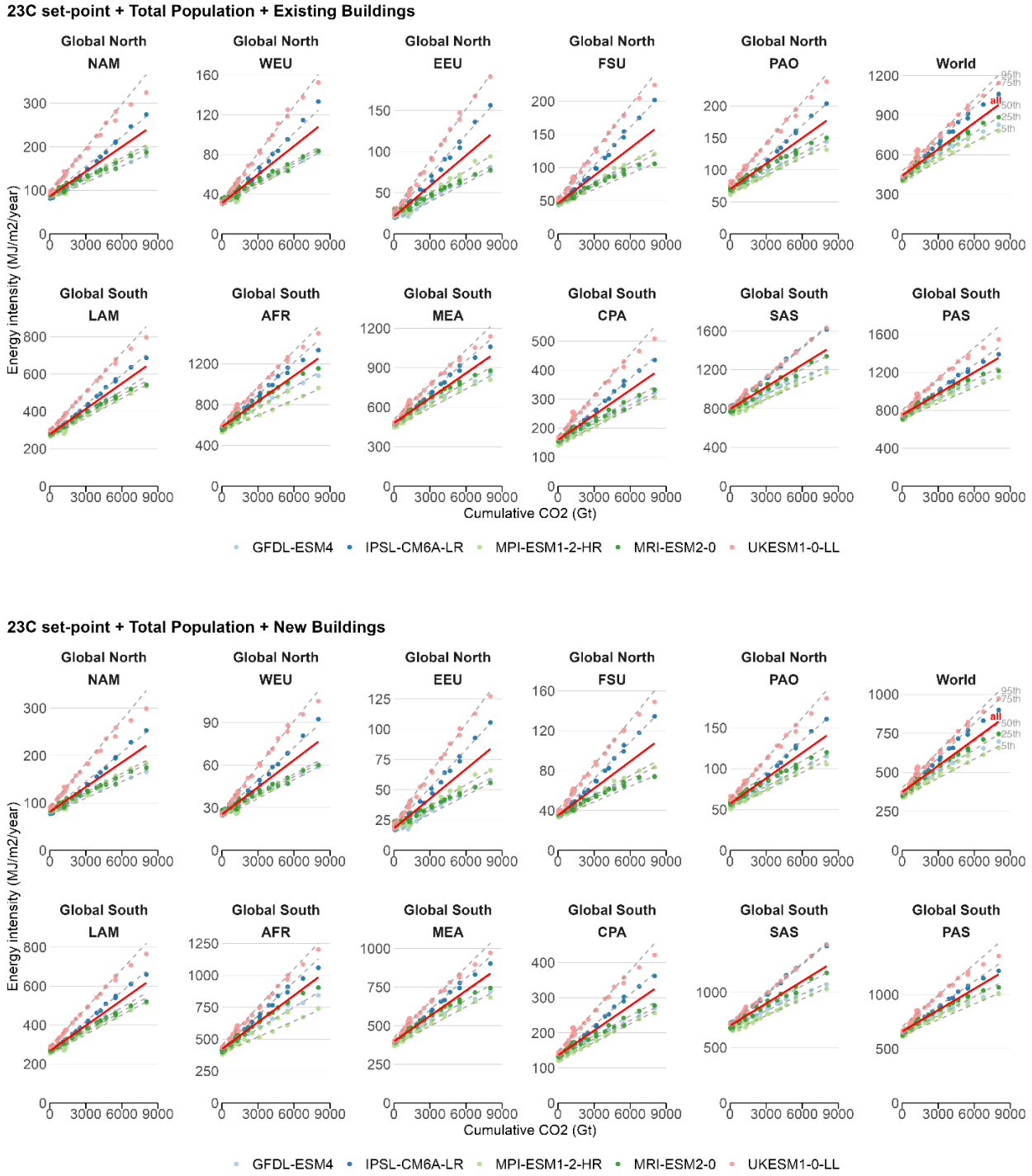


図 5.5.2-3 CO_2 累積排出量に対する地域別の単位床面積当たり冷房用エネルギー需要量

（上段：既存建物、下段：新規建物。設定温度は上下段とも 23℃）

（注）図中の CPA には、世界 12 地域区分（表 5.5.2-2）の CHN:China と RCPA:Rest of Centrally Planned Asia が含まれる。

③ 建物のストック回転率と最終エネルギーのモデル化

a. 建物のストック回転率

将来のシナリオにおける建物のストック回転率と、冷暖房の最終エネルギー需要はSTURMの動的マテリアルフロー分析モデル（Sandberg et al.,2016）[25]を用いて推計する。住宅及び商業用の建築年別ストックは、地域、気候帯、都市農村部、建物タイプ、エネルギー効率レベル、暖房用エネルギーキャリアによって、複数の建物コホートに区分される。建物ストックを表現する基本単位は、住宅部門は住宅戸数、商業部門は床面積である。住宅用建物については、住宅戸数、世帯規模、一人当たり床面積に基づいて床面積を計算する。建物の取り壊しは、建物コホート別の耐用年数確率を表すワイブル分布曲線を用いて計算する。新規建設は、建物コホート別の床面積需要を満たすために必要な量と取り壊されたストック量を考慮して算定する。

b. 最終エネルギー需要

気候シナリオ(s)に対し、地域(r)、建物のコホート(j)、時点(t)の暖房用(h)最終エネルギー需要($e_{final,h,s,r,j,t}$)は、式(5.5.2-1)より計算される。

$$e_{final,h,s,r,j,t} = \frac{e_{h,s,r,j,t} \cdot f_{op,h,s,,r,j,t}}{\eta_{h,s,r,j,t}} \quad (5.5.2\text{-}1)$$

$e_{h,s,r,j,t}$:the useful heating energy demand intensity per unit of floorspace

$f_{op,h,s,r,j,t}$:the dimensionless share of daily hours of heating operation

$\eta_{h,s,r,j,t}$: the efficiency conversion coefficient of the heating system

暖房用エネルギーキャリアの違いは、効率変換係数ηで考慮する。

同様に冷房用(c)の最終エネルギー需要($e_{final,c,s,r,j,t}$)は、式(5.5.2-2)より計算される。

$$e_{final,c,s,r,j,t} = \frac{A_{s,r,j,t} \cdot e_{c,s,r,j,t} \cdot f_{op,c,s,r,j,t}}{\eta_{c,s,r,j,t}} \quad (5.5.2\text{-}2)$$

$A_{s,r,j,t}$: the access to air-conditioning (share on total stock)

$e_{c,s,r,j,t}$: the useful energy demand intensity per unit of floorspace

$f_{op,c,s,r,j,t}$: the share of daily hours of air-conditioning operation

$\eta_{c,s,r,j,t}$: the efficiency conversion coefficient of the cooling system

c. エネルギー効率の設定

住宅については、一連の離散選択モデル（Giraudet et al., 2012[13]; Mastrucci et al., 2021[22]）を用いて、建物の外壁や暖房システムのエネルギー効率や、暖房用エネルギーキャリア（石炭、電気、ガス、石油、固形バイオマス）の切り替え等、新築や改築におけるエネルギー効率に関する決定を行う。意思決定モデルは、エネルギー効率改

善に関する様々な投資オプション(i)のライフサイクルコスト(LCCi)の計算に基づく（式(5.5.2-3)）。

$$LCC_i = C_{inv,i} + C_{op,i} + C_{int,i} \quad (5.5.2\text{-}3)$$

$C_{inv,i}$: investment costs
$C_{op,i}$: operational costs
$C_{int,i}$: intangible costs

新築、改築、燃料転換オプションの投資コストに関するデータは、文献（Esser et al. 2019[9]；Fleiter et al.,2016[11]；Mastrucci et al.,2021[22]）に基づく。運転コストは、エネルギーキャリア別及び建物コホート別の暖房用最終エネルギー需要量と、IAM MESSAGEix-GLOBIOM のエネルギー価格予測に基づく。気候変動影響とエネルギー供給システム進展を考慮している。 intangible costs は、投資に対する技術特有の障壁を表す。家庭のタイプによって、投資に対する素因が異なるという特徴があり、運転コストの計算に適用する一連の割引率によって表わす。

エネルギー効率改善のための各投資オプション(i)の市場シェア(MS)は、そのライフサイクルコスト（LCC）を全オプション(k)の LCC と比較し、異質性パラメータ ν（外生）を用い、式(5.5.2-4)より推定される。

$$MS_i = \frac{LCC_i^{-\nu}}{\sum_k LCC_k^{-\nu}} \quad (5.5.2\text{-}4)$$

改築率は、意思決定モデルの結果に基づいて内生的に計算される（但し、地域固有制約有）。新築、改築、燃料転換の各オプションの市場シェアは、最終的にストックに反映され、以降の各タイムステップのストック構成が更新される。

このような枠組みにより、例えば、温暖化により暖房需要が減少し、暖房用エネルギー費用が減少した場合、全体的なライフサイクルコストが変化し、投資コストの低いオプションが有利になるため、エネルギー効率改善への投資水準が低下する可能性も考慮できる仕組みになっている。

なお、商業部門のエネルギー効率改善と改築率は、一連のシナリオ想定に基づき外生的に設定する。

d. 地域集約と IAM への引き渡し

このように設定した、冷暖房用のエネルギーキャリア別、最終エネルギー需要量シナリオを世界 12 地域に集約し、MESSAGEix-GLOBIOM に引き渡す。

④ 分析用のシナリオ設定

人口、GDP、一人当たり床面積、建築ストックの更新、エネルギー効率改善等は、標準的な SSP2 に基づく社会経済を想定した（表 5.5.2-1）。

また、気候変動レベルは次の 3 つを想定した。

- Baseline： SSP2 の社会経済を想定するが、気候変動の影響は無い。
- SS126、SSP370：SSP2 の社会経済は同じ、SSP126、SSP370 の排出シナリオによる気温の変化がある。2100 年までの世界平均気温は各 1.6℃、4.0℃。

表 5.5.2-1 主要なモデルパラメータの想定

Model parameter	**Settings**	**Source**
Climate	The 50th percentile of the CHILLED results based on the ISIMIP3b GCM ensemble that covers the range of climate model uncertainty	(Lange & Büchner, 2021)[18]
Population	SSP2 v3	(IIASA, 2024[14]; Werning, 2024[29])
GDP	SSP2 v3	(IIASA, 2024)[14]
AC access	Calculated based on methods in literature using SSP2 data	(Isaac & van Vuuren, 2009)[15]
Set points	Cooling: 23°C; Heating: 21°C	(Mastrucci et al., 2021)[22]
Floorspace	Continuation of current trends based on SSP2	(Mastrucci et al., 2021)[22]
Building characteristics	Continuation of current trends based on SSP2	(Mastrucci et al., 2021)[22]
Heating/cooling systems efficiency	Continuation of current trends based on SSP2	(Mastrucci et al., 2021)[22]
Energy price	Output from MESSAGEix-GLOBIOM SSP2 scenario runs	(Riahi et al., 2021)[24]

なお、各地域の既存建物、新規建物別の単位床面積当たり暖房用エネルギー需要強度については、昨年度の冷房用エネルギー需要強度と比較可能なように、次の 3 つのシナリオも分析した。

- **Current policies**（EN_NPi2100）：2020 年までの気候政策とエネルギー政策が盛り込まれ、2030 年以降の GHG 排出価格が控えめに推移し、今世紀末には約 110USD2010/tCO2eq になる。2100 年の世界のピーク気温の中央値は 3.31°C。
- **2°C**（EN_NPi2020_1400f）、**1.5°C**（EN_NPi2020_300f）：2020 年まで現行政策シナリオを踏襲し、その後、パリ協定の 2℃と 1.5℃目標を遵守する。2℃シナリオで世界のピーク気温の中央値は 1.95°C に達し、2100 年には 1.83°C に戻る。1.5℃シナリオでは、世界のピーク気温の中央値は 1.64°C に達し、2100 年には 1.25°C に戻る。

(3) 分析結果

図 5.5.2-4 に、 CHILLED エミュレーターで分析した、地域別の単位面積当たり暖房用エネルギー需要強度を示す。どの地域も既存建物、新築建物とも、温暖化レベルが大きいシナリオ程、暖房用エネルギー需要強度は小さくなる。既存建物と新築建物でのエネルギー需要強度の差が、旧ソ連（FSU)、東欧（EEU)、西欧（WEU)、太平洋 OECD（PAO）で大きく算定されたのは、これらの地域の既存建物（2020 年以前に建築）に古いものが多いことによる。その他の地域は、既存建物でも比較的新しいため、新築建物との差が小さい。

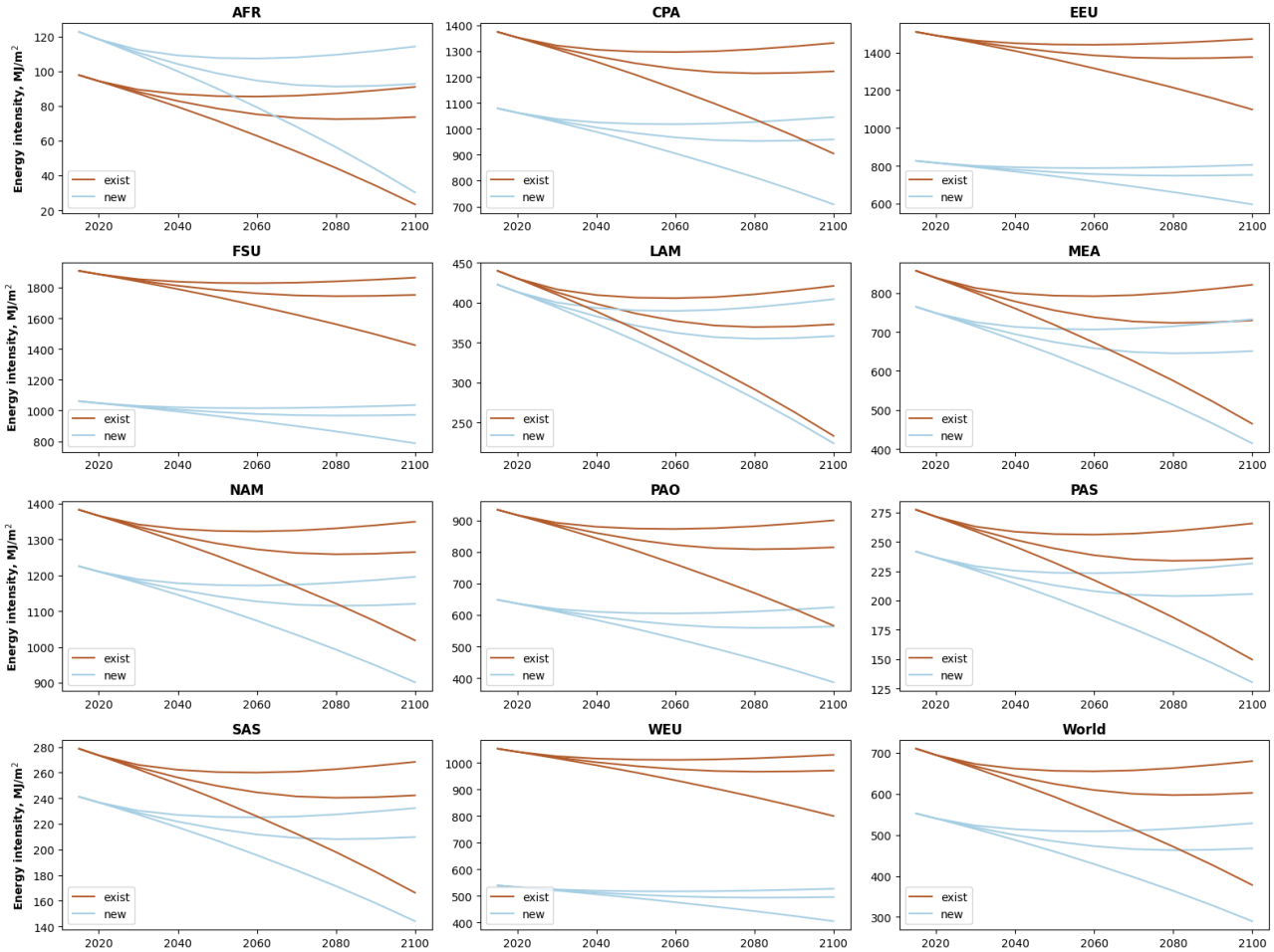


図 5.5.2-4 地域別の暖房用エネルギー需要強度

（注）既存建物、新築建物の各 3 つの曲線は上から順に 1.5℃、2℃、Current policies シナリオをさす。

図 5.5.2-5 に住宅、商業用建物の床面積を示す。グローバル・サウスで、人口増加と住宅、建物サイズの増大により、床面積が顕著に増大する。サブサハラアフリカ（AFR)、南アジア（SAS）では、2100 年にはそれぞれ約 150、100 billion m^2 まで増える。中国は 2040 年まで増大するが、その後減少に転じる。グローバル・ノースの増大率は小さい。どの地域も、床面積に占める住宅の割合が多い。但し、サブサハラアフ

リカ（AFR）等途上地域では、人口と GDP 増大により、商業用建物の床面積割合も大きく伸びる。

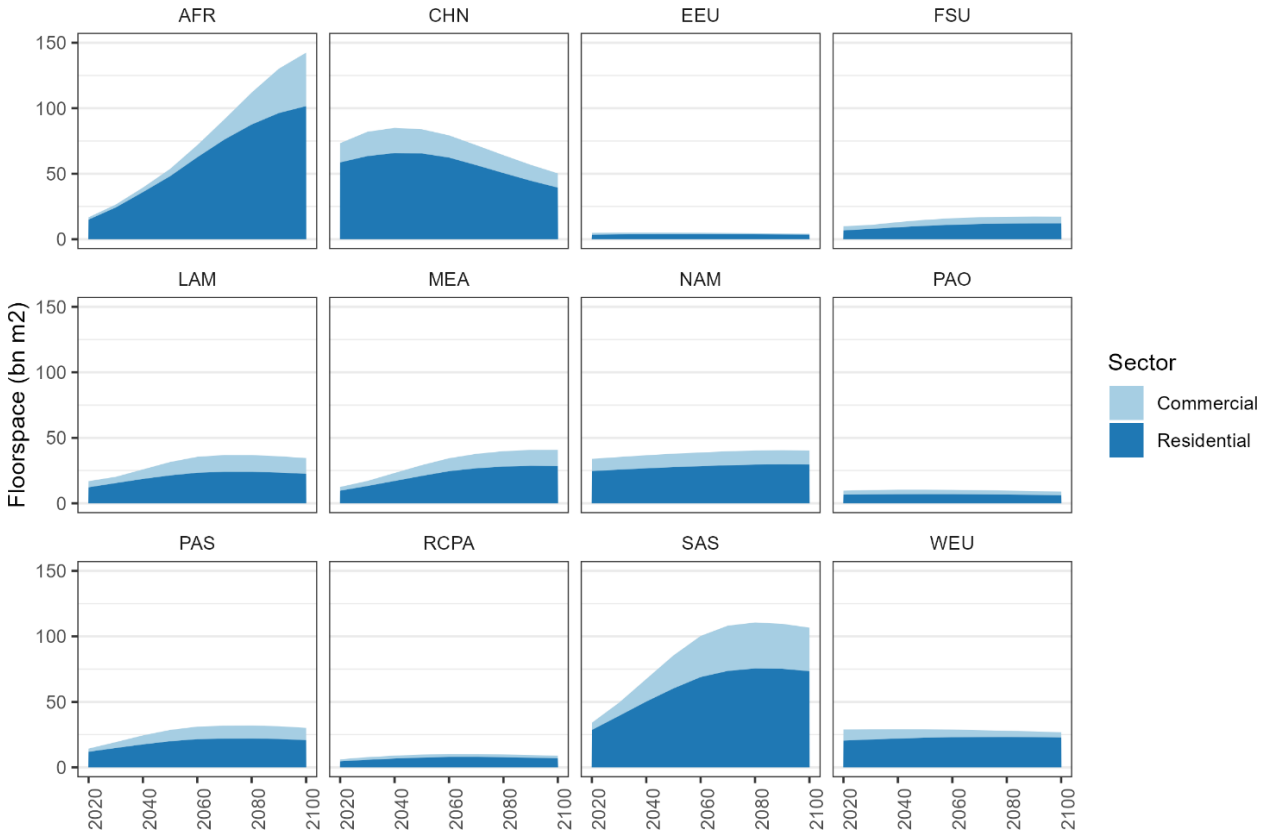


図 5.5.2-5 地域別の住宅、商業用建物の床面積

図 5.5.2-6 に地域別の暖房用エネルギー需要量を示す。ここでは、気候データに、5 種類の GCM データの中でも中庸な値を示した MRI-ESM2-0 モデルの予測値を用いている。気候変動無の Baseline シナリオ下で、欧州（EEU、WEU）、北米（NAM）では、現行のエネルギー効率改善目標に従い、暖房用エネルギー需要量は次第に低減する。旧ソ連（FSU）は増大傾向を維持、中国（CHA）は 2040 年以降、人口減少に伴い暖房用エネルギー需要も減少する。中東・北アフリカ（MEA）は人口増加に伴い、暖房用エネルギー需要は増大する。

気候変動を考慮したシナリオ、特に SSP370 シナリオでは、暖房用エネルギー需要量が多い CHA、FSU、NAM、WEU で、Baseline シナリオから大きく減少する。その他の地域、特にグローバル・サウスでは、暖房用エネルギー需要量の低減量は少ない。この傾向は住宅、商業用建物に共通してみられる（商業用建物に比べ、暖房用エネルギー需要量がより高い住宅で顕著である）。

図 5.5.2-7 には、冷房用エネルギー需要量を示す。冷房用エネルギー需要量は、人口増加、豊かさレベルと冷房システムへのアクセス向上により、幾つかの発展途上地域で顕著な増大が見込まれる。気候変動無の Baseline シナリオ下で、住宅の冷房用エネルギー需要量はサブサハラアフリカ（AFR）、中東・北アフリカ（MEA）、南アジア

（SAS）での増大が、商用建物冷房エネルギー需要量はサブサハラアフリカ（AFR）、南アジア（SAS）での増大が目立つ。気候変動は多くの地域で将来の冷房エネルギー需要を増大させる。SSP370 シナリオでは、特にグローバル・サウスの AFR、MEA、SAS とグローバル・ノースの NAM 地域で影響が大きい。温暖化レベルが小さい SSP126 シナリオではその影響はかなり緩やかで、エネルギー需要レベルはベースラインに近くなる。

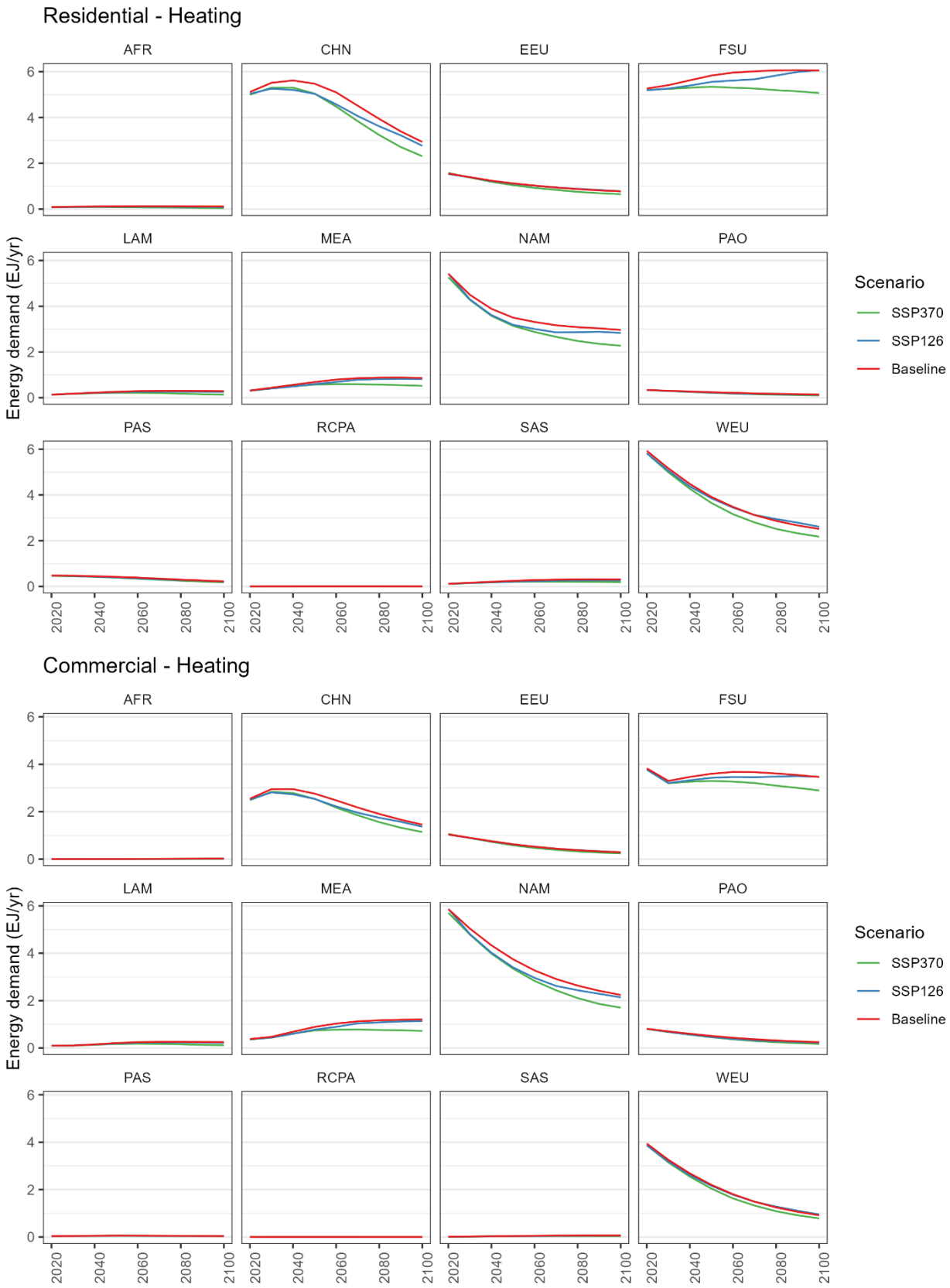


図 5.5.2-6 地域別の暖房用エネルギー需要量（上段：住宅、下段：商業用建物）

（注）気候データ： 本分析で使用した GCM データのうち中庸な値を示した MRI-ESM2-0 モデルの予測値

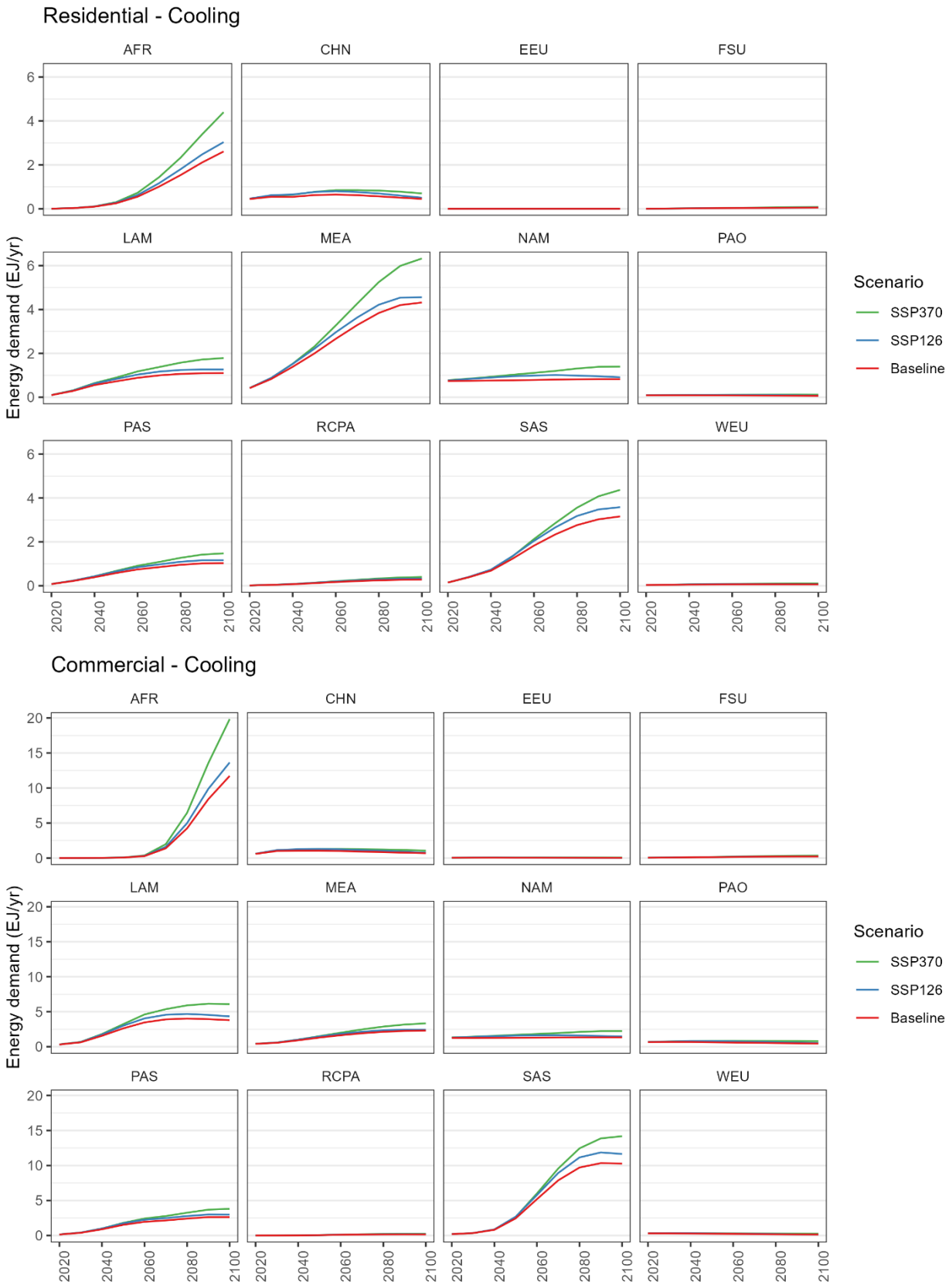


図 5.5.2-7 地域別の冷房用エネルギー需要量（上段：住宅、下段：商業用建物）

（注）気候データ： 本分析で使用した GCM データのうち中庸な値を示した MRI-ESM2-0 モデルの予測値

図 5.5.2-8 に、2050 年と 2100 年の気候変動による冷房用・暖房用エネルギー需要量の変化（気候変動無の Baseline シナリオに対する変化）を示す。異なる GCM の予測データに基づく分析結果を示している。これより、特に温暖化レベルが高い SSP370 シナリオにおいて、GCM 気候予測による不確実性範囲が大きい。

2050 年までの短期的には、冷房用・暖房用エネルギー需要量は、0.5～1.5EJ/年のオーダーで増減する。増減の傾向から、地域を以下のように分類できる

- 主に冷房エネルギー需要が増加する：AFR、LAM、MEA、PAO、PAS、SAS（温暖な低緯度にあり、ほとんどが発展途上国）
- 主に暖房エネルギー需要が減少する：FSU、WEU、EEU（概ね中緯度の温帯にあり、先進的な経済圏）
- 暖房需要の減少と冷房需要の増加がほぼ均衡する：CHN、NAM、RCPA

2100 年までには、世界全体がより豊かになりエアコンへのアクセスレベルが高くなる、さらに、温暖化が進み冷房エネルギー需要がさらに増加する、このためほとんどの地域で冷房用エネルギー需要量が温暖化影響により大幅に増大する。特に AFR（+10～15 EJ/年; SSP370 シナリオの値, 対 Baseline シナリオ）と SAS（+5～9 EJ/年）において顕著であり、暖房用需要の減少が冷房用需要の増加を上回ると地域は WEU と FSU のみと分析された。

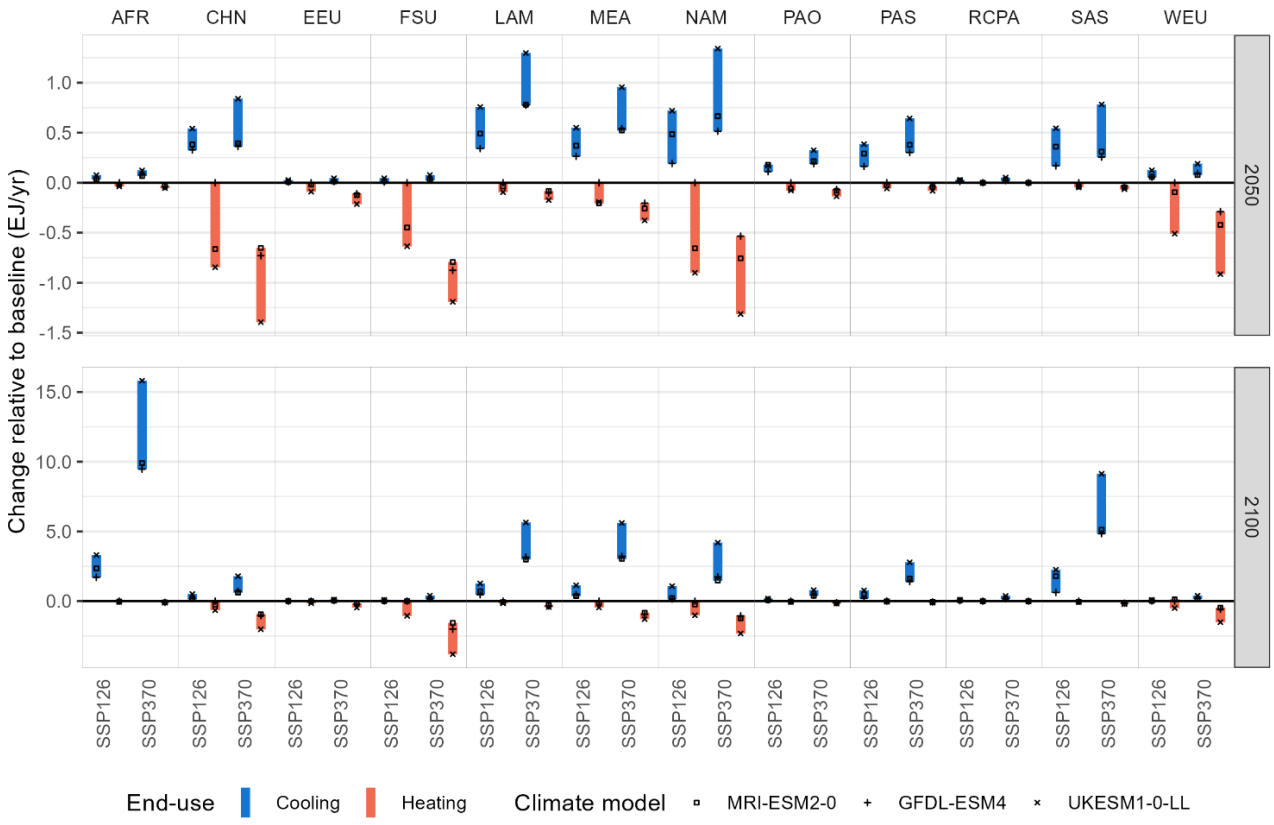


図 5.5.2-8 地域別、気候シナリオ別の冷房・暖房用エネルギー需要量（気候変動無シナリオ比）

（注）図中、需要量の幅は、気候モデルによる予測の不確実性を示す。

(4) 本分析の留意点

本分析で想定した温暖化シナリオ SSP370 は、今世紀末までに 4.0℃に達する。一方、現在の気候緩和政策で 2100 年の世界平均気は+2.7℃とすると、SSP370 は高すぎるシナリオと考えられる。

冷房、暖房の運転時間や設定温度はエネルギー需要量に重要な要素であるが、本分析では、これらを一定としている。また、本分析では、気温の上昇に対する消費者需要のリバウンドを想定していない。これらの点に注意が必要である。

(5) まとめ

本研究では、地球温暖化が暖房エネルギー需要にどのような影響を与えるか、また冷房エネルギー需要の増加とのバランスをどのようにとるかをよりよく理解するために、CHILLED モデルの方法論を発展させ、線形回帰に基づく地域別エネルギー原単位エミュレーターを開発した。また、建物ストック回転率モデルの改良も行った。さらに、温暖化による冷房用・暖房用エネルギー需要量への影響を地域毎に分析した。温暖化の冷房用・暖房用エネルギー需要量への影響の傾向として、温暖で典型的な発展途上地域（AFR、LAM、MEA、PAO、PAS、SAS）では冷房用エネルギー需要量が主に増加する、冷涼で典型的な先進地域（WEU、EEU、FSU）では暖房用エネルギー需要量が主に減少する、CHN、NAM、RCPA 等地域では両方の変化がほぼ均衡することを明らかにした。

これらの知見は、地球温暖化の不平等性を浮き彫りにしている。つまり、典型的な低開発地域が、温暖化影響やより適応によって負担を強いられるだけでなく、過去の排出量が多い高開発地域が、温暖化の恩恵を受けるということを示すものである。

表 5.5.2-2 MESSAGEix-GLOBIOM の世界 12 地域区分とグローバル・ノース/サウスの関係

Region	Abbreviation	Category
Sub-Saharan Africa	AFR	Global South
China	CHN	Global South
Central and Eastern Europe	EEU	Global North
Former Soviet Union	FSU	Global South
Latin America and the Caribbean	LAM	Global South
Middle East and North Africa	MEA	Global South
North America	NAM	Global North
Pacific OECD	PAO	Global North
Other Pacific Asia	PAS	Global South
Rest of Centrally Planned Asia	RCPA	Global South
South Asia	SAS	Global South

参考文献（第 5.5 節に関するもの）

1) RITE/METI、令和 4 年度地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業報告書、2023 年 3 月
2) RITE/METI、令和 5 年度地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業報告書、2024 年 3 月
3) Aram, F., Higueras García, E., Solgi, E., & Mansournia, S. (2019). Urban green space cooling effect in cities. Heliyon, 5(4), e01339. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339
4) Byers, E., Krey, V., Mastrucci, A., Meng, M., van Ruijven, B., & Zhong, X. (2024). Better understanding the challenges and opportunities for reducing energy demand in the buildings sector. IIASA.
5) Byers, E., Meng, M., Mastrucci, A., van Ruijven, B., & Krey, V. (2024). Flexible emulation of the climate warming cooling feedback to globally assess the maladaptation implications of future air conditioning use. Environmental Research: Energy, 1(3), 035011. https://doi.org/10.1088/2753-3751/ad6f11
6) Climate Risk Dashboard – PROVIDE. (n.d.). Retrieved July 1, 2024, from https://climate-risk-dashboard.climateanalytics.org/
7) De Ridder, K., Lauwaet, D., & Maiheu, B. (2015). UrbClim – A fast urban boundary layer climate model. Urban Climate, 12, 21–48. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.01.001
8) Demuzere, M., Kittner, J., Martilli, A., Mills, G., Moede, C., Stewart, I. D., Van Vliet, J., & Bechtel, B. (2022). A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. Earth System Science Data, 14(8), 3835–3873. https://doi.org/10.5194/essd-14-3835-2022
9) Esser, A., Dunne, A., Meeusen, T., Quaschning, S., & Denis, Wegge. (2019). Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU Final report. 87.
10) Falchetta, G., & Hammad, A. (2024). Tracking green space along streets of world cities. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3916891/v1
11) Fleiter, T., Steinbach, J., & Ragwitz, M. (2016). Mapping and analyses of the current and future (2020—2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables)—Work package 2: Assessment of the technologies for the year 2012 (Issue March).
12) Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D. L., Obersteiner, M., Pachauri, S., … Riahi, K. (2017). The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. Global Environmental Change, 42, 251–267. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004
13) Giraudet, L. G., Guivarch, C., & Quirion, P. (2012). Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling. Energy Economics, 34(2), 426–445. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.07.010
14) IIASA. (2024). SSP 3.1 (Release July 2024). IIASA and contributing modeling teams. [Dataset]. https://data.ece.iiasa.ac.at/ssp/.

15) Isaac, M., & van Vuuren, D. P. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. Energy Policy, 37(2), 507–521. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.051
16) Kirschner, V., Macků, K., Moravec, D., & Maňas, J. (2023). Measuring the relationships between various urban green spaces and local climate zones. Scientific Reports, 13(1), 9799. https://doi.org/10.1038/s41598-023-36850-6
17) Krey, V., Havlik, P., Kishimoto, P., Fricko, O., Zilliacus, J., Gidden, M., Strubegger, M., Kartasasmita, G., Ermolieva, T., Forsell, N., Guo, F., Gusti, M., Huppmann, D., Johnson, N., Kikstra, J., Kindermann, G., Kolp, P., Lovat, F., McCollum, D., … Riahi, K. (2020). MESSAGEix-GLOBIOM Documentation—2020 release. https://doi.org/10.22022/IACC/03-2021.17115
18) Lange, S., & Büchner, M. (2021). ISIMIP3b bias-adjusted atmospheric climate input data (Version 1.1) [Dataset]. ISIMIP Repository. https://doi.org/10.48364/ISIMIP.842396.1
19) Li, Y., Svenning, J.-C., Zhou, W., Zhu, K., Abrams, J. F., Lenton, T. M., Ripple, W. J., Yu, Z., Teng, S. N., Dunn, R. R., & Xu, C. (2024). Green spaces provide substantial but unequal urban cooling globally. Nature Communications, 15(1), 7108. https://doi.org/10.1038/s41467-024-51355-0
20) Mastrucci, A., Byers, E. A., Niamir, L., van Ruijven, B., & Krey, V. (2023). ALPS report 2022-23: Challenges for energy demand reductions in the buildings sector. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).
21) Mastrucci, A., Byers, E., Pachauri, S., & Rao, N. D. (2019). Improving the SDG energy poverty targets: Residential cooling needs in the Global South. Energy and Buildings, 186, 405–415. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.015
22) Mastrucci, A., van Ruijven, B., Byers, E., Poblete-Cazenave, M., & Pachauri, S. (2021). Global scenarios of residential heating and cooling energy demand and CO2 emissions. Climatic Change, 168(3–4), 14. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03229-3
23) Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), 1–24. https://doi.org/10.1002/qj.49710845502
24) Riahi, K., Bertram, C., Huppmann, D., Rogelj, J., Bosetti, V., Cabardos, A.-M., Deppermann, A., Drouet, L., Frank, S., Fricko, O., Fujimori, S., Harmsen, M., Hasegawa, T., Krey, V., Luderer, G., Paroussos, L., Schaeffer, R., Weitzel, M., Van Der Zwaan, B., … Zakeri, B. (2021). Cost and attainability of meeting stringent climate targets without overshoot. Nature Climate Change, 11(12), 1063–1069. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01215-2
25) Sandberg, N. H., Sartori, I., Heidrich, O., Dawson, R., Dascalaki, E., Dimitriou, S., Vimm-r, T., Filippidou, F., Stegnar, G., Šijanec Zavrl, M., & Brattebø, H. (2016). Dynamic building stock modelling: Application to 11 European countries to support the energy efficiency and retrofit ambitions of the EU. Energy and Buildings, 132, 26–38. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.100
26) Seiferling, I., Naik, N., Ratti, C., & Proulx, R. (2017). Green streets − Quantifying and mapping urban trees with street-level imagery and computer vision. Landscape and Urban Planning, 165, 93–101. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.05.010
27) Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879–1900. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1

28) Wang, J., Zhou, W., Jiao, M., Zheng, Z., Ren, T., & Zhang, Q. (2020). Significant effects of ecological context on urban trees' cooling efficiency. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 159, 78–89. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.001
29) Werning, M. (2024). Gridded maps of global population scaled to match the 2023 Wittgenstein Center (WIC) Population projections (Version 1.0) [Dataset]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.13745063
30) Zhan, W., Wang, C., Wang, S., Li, L., Ji, Y., Du, H., Huang, F., Jiang, S., Liu, Z., & Fu, H. (2024). Fraction-dependent variations in cooling efficiency of urban trees across global cities. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 216, 229–239. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.07.026
31) Zhou, W., Wang, J., & Cadenasso, M. L. (2017). Effects of the spatial configuration of trees on urban heat mitigation: A comparative study. Remote Sensing of Environment, 195, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.043

5.6 需要サイドの定量的なモデル分析

5.6.1 シナリオ分析の背景と削減貢献量推計

デジタルトランスフォーメーション（DX）およびその他、技術・社会のイノベーションによって、暗黙的なコストも低減しつつ、比較的安価なコストによって、低エネルギー需要社会を誘発できる余地が生まれてきている。IPCC 第 6 次評価報告書（AR6）[1)]でも、各種文献からの各対策におけるエネルギー需要や CO_2 排出量の低減効果に関する報告結果として、図 5.6.1-1、図 5.6.1-2 のような整理もなされた。推計の幅が大きいものの、エネルギー需要や CO_2 排出量のかなり大きな低減も期待されることが示されている。一方、これらの分析は、各対策の低減率に関する評価であり、部門横断的に整合的かつ定量的なエネルギー低減量や、CO_2 排出低減量が示されているわけではない。同じく、IPCC AR6 は、需要部門の対策によって世界全体の GHG 排出量の低減効果も提示し、「需要側の対策とエンドユースサービスの新しい提供方法によって、エンドユース部門における世界全体の GHG 排出量をベースラインシナリオに比べて 2050 年までに 40～70%削減しうる。」とした。ただし、各対策をそれぞれ積み上げて評価したものであり、対策コストを含めて、必ずしも整合的かつ定量的なモデルを使って部門横断的に推計したものではない。

全体整合的なシナリオとしては、IPCC 1.5℃特別報告書（SR15）[2)]で引用され、注目を集めた、IIASA の MESSAGE モデルを用いた Low Energy Demand（LED）シナリオ [3)]が著名であり、これを期に、世界でも定量的なシナリオ作成が進行中である。ただし、需要部門の全体整合的なモデル推計は容易ではなく、分析は緒に就いたばかりと言える。

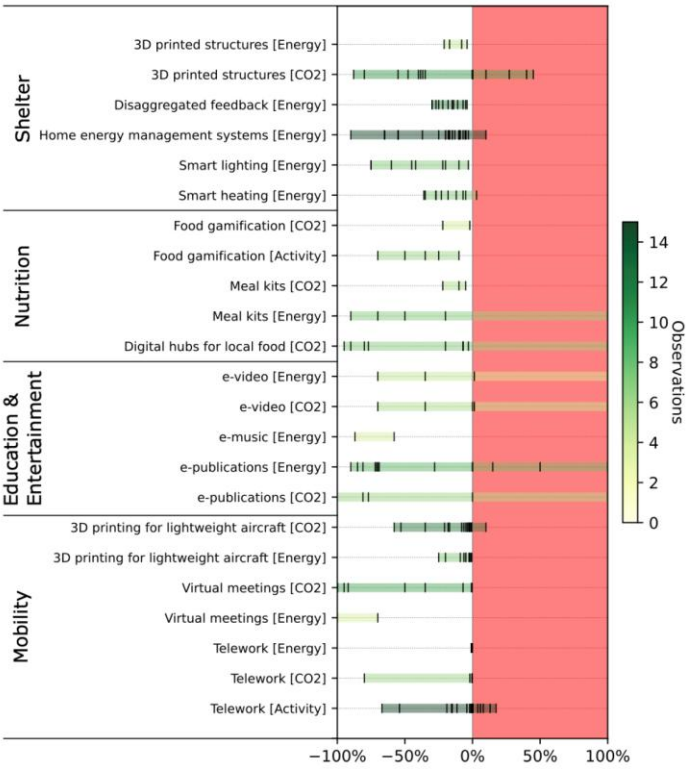


図 5.6.1-1　デジタル化によるエネルギー消費・CO_2 排出への影響

（出典：IPCC WG3 AR6[1)]）

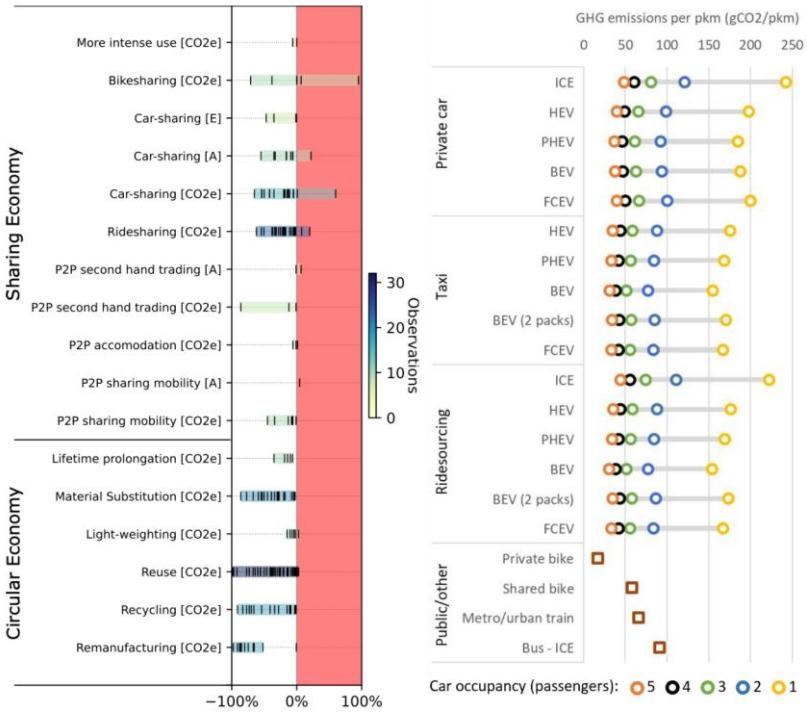


図 5.6.1-2　シェアリング・サーキュラーエコノミーによるエネルギー消費・CO_2 排出への影響

（出典：IPCC WG3 AR6[1)]）

他方、企業の排出量のカウントとして、WRI と WBCSD による GHG プロトコルが広く利用されてきている。Scope 1, 2, 3 が規定されているが、とりわけ Scope 3 は重要であるが、厄介でもある。排出削減に貢献する製品・サービスを提供しても、それが世界で大きく受け入れられれば、自社の Scope 3 排出量は増大してしまう。このような課題意識の下、WBCSD を中心に、“avoided emissions（削減貢献量）”を定義、検討する動きも広がってきている[4)]。図 5.6.1-3 に簡略な“Avoided emissions”の定義のイメージを示す。“Avoided emissions”をより良く定義できれば、グローバルで大きな排出削減を実現する製品・サービスの提供を、より強く企業等の活動にインセンティブとして与えることができる（図 5.6.1-4 を参照）。しかし、多くの課題もある。そもそも、Scope 3 排出量をカウントするのも、バウンダリーの定義の難しさが存在しているが、“avoided emissions”は排出量の差分に注目するため、Scope 3 排出量のカウントよりも、バウンダリーの課題は幾分か容易であるとも言える。他方、最大の課題は、ベースライン排出量の定義である。ベースライン排出量を過大に想定すると、“avoided emissions”量も過大となり、グリーンウォッシュの懸念が生じてしまう。

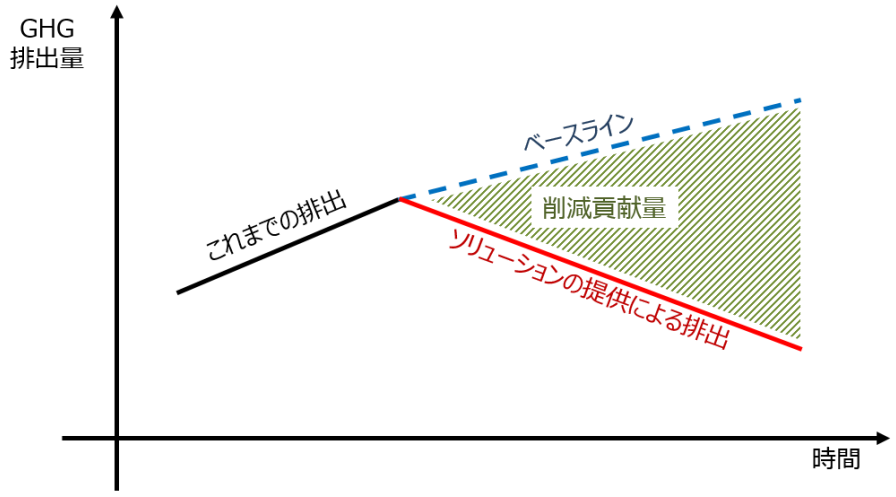


図 5.6.1-3 削減貢献量（Avoided emissions）とは（定義のイメージ）
（出典：経済産業省[5),7)]）

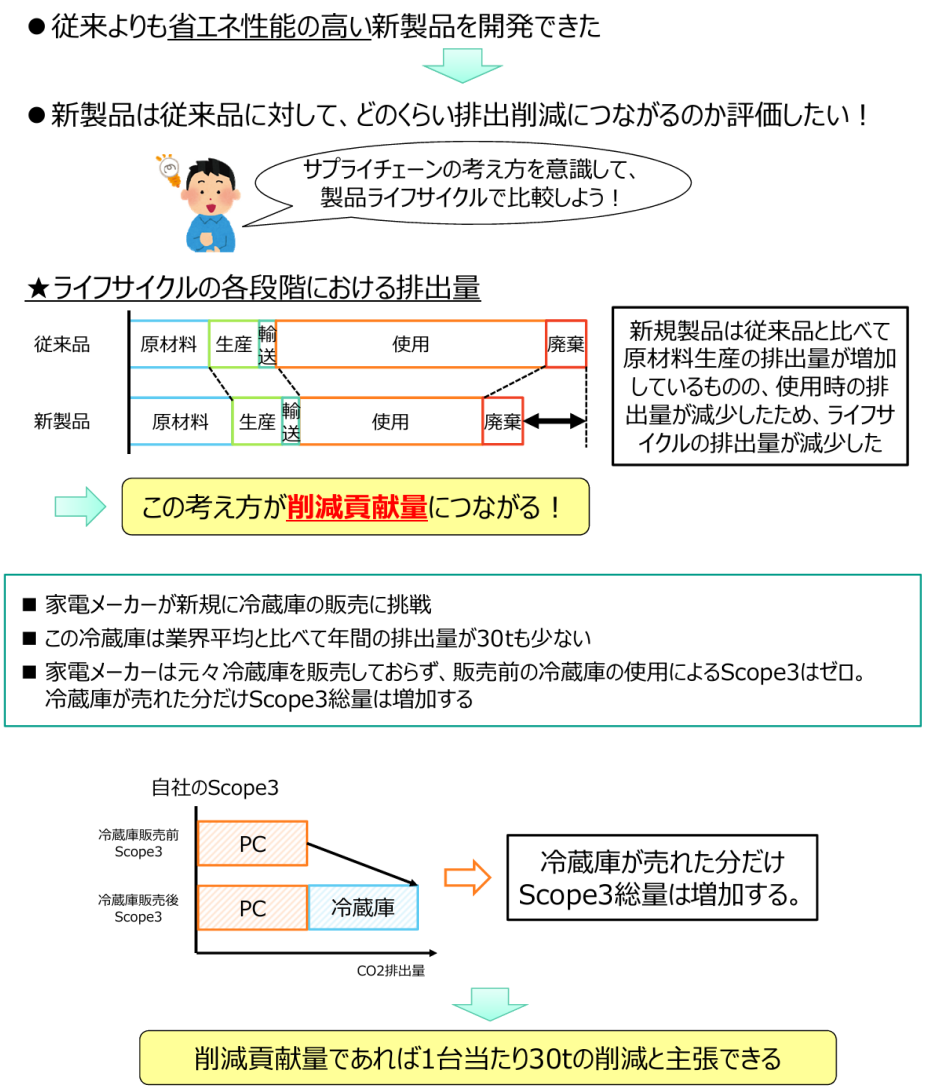


図 5.6.1-4 削減貢献量（Avoided emissions）の意義

（出典：環境省 [6]）

需要側対策は、製品・サービスを通じて、大きな“avoided emissions”を生み出す可能性がある。本節では、DNE21+モデルを用いた需要部門の対策に関するシナリオ分析を介して、パリ協定長期目標と整合的な“avoided emissions”の将来展望を示す。企業の実績値としてのベースライン排出量の定義には難しさが伴うものであるが、エネルギーシステムモデルを用いた分析では、CO_2 排出削減努力なかりせば、のケースとして、ベースライン排出量は明確に定義できるので、ベースライン排出量の定義の課題は生じない。需要側対策の将来貢献を定量的に示すことによって、需要側対策の“avoided emissions”としての排出削減貢献を見える化し、企業、社会の対応へのインセンティブを働かせることにつながると考えられる。

なお、“avoided emissions”も事前評価（ex-ante evaluation）と事後評価（ex-post evaluation）がある。表 5.6.1-1 に、“avoided emissions”の事前、事後評価について整理を行った。企業活動の結果として事後評価に焦点があたることが多いし、事後評価は

当然重要である。他方、ベースラインの定義が難しいこともあり、グローバルで見て、二重計上がないよう、モデルを用いた事前評価の重要性も高いと考えられる。

表 5.6.1-1 “Avoided Emissions”の事前、事後評価

	事前評価 （ex-ante evaluations）	事後評価 （ex-post evaluations）
評価方法	モデルを用いた推計	各対策について、普及量等から積み上げて推計
特徴	ベースラインは明確で、追加努力としての削減量を推計可能	グローバルで排出削減に寄与し得る製品・サービスの普及に対して削減貢献量の実績を主張できる
課題	技術毎の詳細な評価は難しい	「対策なかりせば」のベースラインの定義に曖昧さが残りやすく、過大な推計になるのではとの懸念が存在
想定される利用場面	企業等が取り組むべき製品・サービスの削減効果を定量的かつ包括的に示すことができ、企業等の適切な活動の誘発につながり得る。ベースラインの定義に曖昧さが残り、過大な削減貢献量推計への懸念となる事後評価の補間としても利用可能	企業等の製品・サービスを通した取り組みについて、Scope3 では排出増と評価される場合でも、グローバルな排出削減への貢献として、その取り組みの努力等が評価され、アピール材料として活用し得る。

5.6.2 需要側変化に関する定量的な分析のための各種想定シナリオ

(1) 定性的なシナリオ

図 5.6.2-1 のようなドライバーを考慮した定性的なシナリオ [4)]を基に、定量的なシナリオ策定を行った。本シナリオは、EDITS（Energy Demand changes Induced by Technological and Social innovations）事業における WG で検討されているものであり、本 ALPS 事業のモデル分析作業において参考にした。デジタル化の進展と新結合によるイノベーション、そして適切な生活水準（DLS）が融合した世界観であり、well-being を高めながら、低需要（エネルギーおよび各種物質や製品等）を実現し得るとするシナリオである。要素間の関係性については、図 5.6.2-2 に示す。

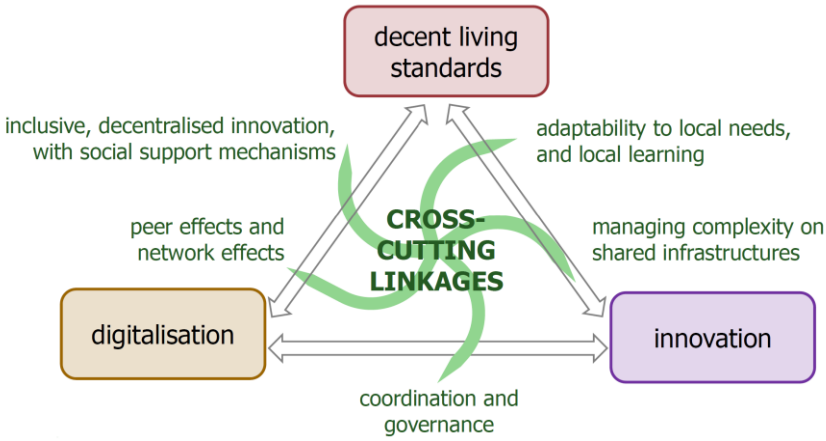


図 5.6.2-1 定性的シナリオ‘High-with-Low’の想定ドライバー

（出典：EDITS WG3 Narratives group シナリオ [7]）

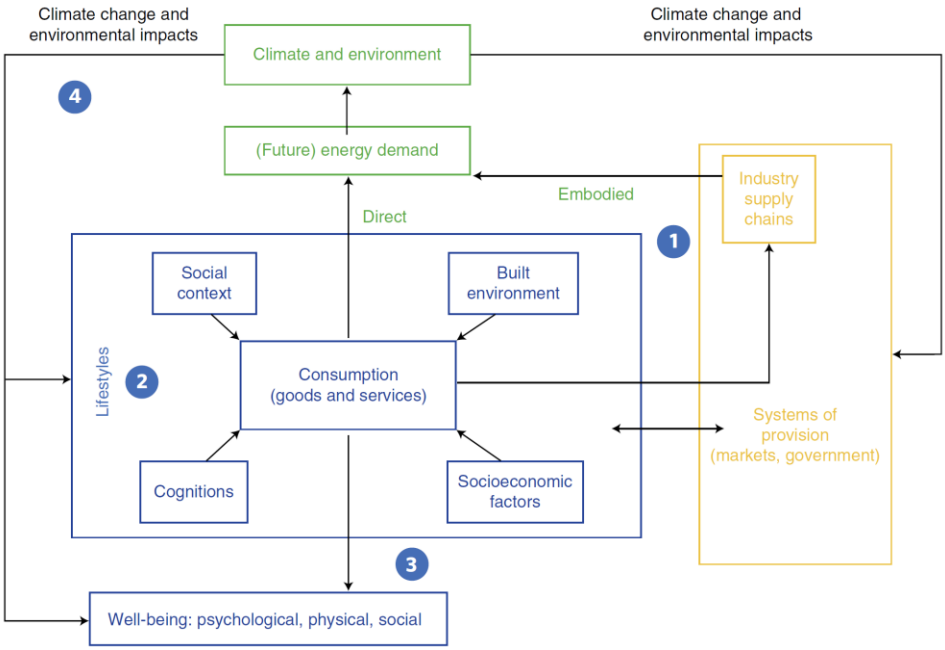


図 5.6.2-2 定性的シナリオ‘High-with-Low’の要素間の関係

（出典：EDITS WG3 Narratives group シナリオ [7]）

(2) 定量的な分析のためのシナリオ想定

世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いて、DX を中心にして誘発されるサーキュラーエコノミー、シェアリングエコノミーによる、低エネルギー需要社会の実現、そして、GHG 排出量の低減効果を定量的に推計した。推計には現時点では定量的なデータ入手の困難性もあり、波及効果について一部しか考慮できていないことに注意が必要である。また、モデル前提条件の想定についても、不確実性が大きく、より良いデータの入手、反映の課題が残っている。DNE21+モデルは、鉄鋼、セメント、化学製品など、CO_2 排出原単位の高い製品を積み上げ評価しているため、サーキ

ュラーエコノミー、シェアリングエコノミー等による基礎素材製品の低下、それに伴うエネルギー消費の低下等を整合的に分析可能である。

前節の図 5.6.2-1 のような定性的なシナリオドライバーを基に、定量的なシナリオ想定を行った。表 5.6.2-1 に昨年度想定した、DX によるサーキュラーエコノミー(CE)誘発のシナリオ想定を示す（以降、本報告書では、シェアリングエコノミーもサーキュラーエコノミーに内包されるものとして、CE と記載する)。また、表 5.6.2-2 には、分析を行ったシナリオ名と、各シナリオの想定内容を示す。需要側のデジタル化の進展、イノベーションとして、CE 関連だけではなく、変動性再生可能エネルギーの利用増大に資する、電力需要側の柔軟性の提供の可能性についても考慮した。具体的には、DN21+の電力需要曲線において、BEV や PHEV、ヒートポンプ給湯器、コジェネレーションシステムが、特に太陽光の日中の供給力の需要調整を、標準のシナリオよりも、柔軟に提供できると想定した（“FL”シナリオ)。また、需要側技術は、granular technologies と呼ばれるような規模の小さい技術が多い。これら技術は、サイクルが早いことがあって、一般に技術習熟率が高い傾向が観測される。DNE21+では、太陽光発電や風力発電、EV 用バッテリーなど、標準シナリオでも大きなコスト低減を見込んでいる。しかし、これら比較的規模の小さい技術の技術習熟率が一層高くなるシナリオ（“GR”シナリオ）も想定した。ただし、このシナリオはあくまで外生的な想定であり、参考として他シナリオの結果と比較するべきものという位置づけであることに注意されたい。

表 5.6.2-2 には、分析を行ったシナリオ名と、各シナリオの想定内容を示す。排出シナリオとしては、特段の排出シナリオを想定しないベースライン、2℃（>66%確率）の B2DS シナリオ、および 1.5℃の 15DS シナリオを想定した。B2DS では、別途、日本を含む主要先進国それぞれについては 2050 年 GHG のカーボンニュートラルを想定した。他方、15DS シナリオでは、世界全体で CO_2 限界削減費用の均等化を想定した。

表 5.6.2-1 DX によるサーキュラーエコノミー（CE）誘発のシナリオ想定

DXによるCE誘発等	エネルギー消費への直接的な影響	エネルギー消費への間接的な影響	DNE21+モデル分析における想定（暫定試算）
1) 完全自動運転車実現により誘発されるライドシェア、カーシェアリング（2030年時点までは想定せず）	- ライドシェアによる乗用車用エネルギー消費量の低減	- カーシェアリングに伴う乗用車台数の低下に伴う、鉄鋼、プラスティック、ゴム、ガラス、コンクリート等の低減 - 製品、素材の国際貨物輸送の低減⇒項目 8)	- 鉄鋼製品生産量：▲4%（車両＋立体駐車場。道路建設含まず） - プラスティック製品： ▲1% - タイヤ製品：▲28%（乗用車向け比）（エネルギー消費量低減換算値をモデルで想定） - ガラス製品：▲28%（乗用車向け比）（エネルギー消費量低減換算値をモデルで想定） - セメント製品：▲1%（立体駐車場のみ。道路建設含まず）
2) バーチャルミーティング、テレワーク	- 移動の低減に伴う運輸部門のエネルギー消費量の低減	- *長期的に建築物の稼働率上昇、必要な空間面積の低減により、鉄鋼、コンクリート等の低減の可能性有* 【今回のモデル分析では未考慮】	- 旅客需要：▲10%
3) E-publication等による紙の代替	- 紙の生産のためのエネルギー消費量の低減	- *紙媒体の配送等の貨物需要低減の可能性有* 【今回のモデル分析では未考慮】	- 紙パ生産量：▲20%
4) E-コマースや他のDXによるアパレルのリサイクル・シェア化の促進	- アパレル製造のエネルギー消費の低減	- *ショッピングセンター等、小売店舗の低減と、それに伴うエネルギー消費、また建築物建設の低減により、鉄鋼、コンクリート等の低減の可能性有* 【今回のモデル分析では未考慮】	- アパレル生産量：▲20%（エネルギー消費量低減換算値をモデルで想定）
5) 都市開発、設計等の進展による建築物の高寿命化	- 建築物の高寿命化による、セメント、鉄鋼製品の低減に伴うエネルギー消費量の低減		- 建築物の高寿命化：+40%、それに伴うセメント：▲3%、鉄鋼製品需要の低減：▲3%
6) 需要予測の向上等による食品廃棄の低減	- 必要食品生産量の低減等に伴う、窒素肥料、プラスティック製品等の生産に伴うエネルギー消費量の低減 - 小売店舗等のエネルギー消費量の低減 - 必要食品生産量の低減等に伴う、メタン、一酸化窒素排出量の低減	- 農畜産物、食品等の低減に伴う国際貨物輸送の低減 ⇒ 項目 8) - *食品販売量の低減に伴う、小売店舗の低減に伴う鉄鋼、コンクリート製品等の低減の可能性* 【今回のモデル分析では未考慮】 - *他用途への利用可能な土地面積の増大に伴う植林等による CO_2 固定可能性* 【今回のモデル分析では未考慮】	- 石油化学製品（窒素肥料含む）の低減：▲1% - プラスティック製品：▲1% - 紙パ製品：▲0.5% - 輸送サービス需要：▲1% 他 （以上、産業連関表より算定） - メタン、一酸化窒素排出低減：▲493 $MtCO_2eq/yr$ in 2050
7) 3D プリンティングの適用による素材の低減	- アルミニウム、鉄鋼製品等の低減 - 製造段階による電力消費量の低減	- 航空機の軽量化に伴う運航時のエネルギー消費量の低減 - *自動車等の軽量化に伴うエネルギー消費量の低減* 【今回のモデル分析では未考慮】	- アルミニウム製品：▲1% - 鉄鋼製品：▲0.02% - 直接的電力消費量：▲1% - 航空機の運航時のエネルギー消費量：▲10%
8) 基礎素材やその他製品需要の低減に伴う国際海運需要の低減	- 国際海運需要の低減によるエネルギー消費量の低減		- 国際海運需要：▲1%

赤字： 家庭部門関連、 緑字： 業務部門関連、 青字: 輸送部門関連、 紫字： 産業部門関連、茶字：非 CO_2 GHG 等

表 5.6.2-2　モデル分析のためのシナリオ想定

	排出削減経路	主にデジタル化によるエネルギー需要低減						電力需要のフレキシビリティ(EV, HP, CGS)	小規模技術(PV、風力、EV等)のより急速なコスト低減
		運輸 1)	家庭 2, 3, 4)	建築物 5)	農業・食品 6)	産業 7)	派生効果 8)		
BL-Std	Baseline（特段の気候変動緩和政策を想定せず。炭素価格0）	—	—	—	—	—	—	—	—
BL-Mobil		○							
BL-Resid			○						
BL-Build				○					
BL-Food					○				
BL-Ind						○			
BL-All_CE		○	○	○	○	○	○		
BL-All_CE+FL		○	○	○	○	○	○	○	
BL-All_CE+FL+GR		○	○	○	○	○	○	○	○
B2DS-Std	B2DS 2 °Cを十分に下回る排出に抑制（かつ2030年の各国NDCsを想定、主要先進国：2050年GHGでのCN）	—	—	—	—	—	—	—	—
B2DS-Mobil		○							
B2DS-Resid			○						
B2DS-Build				○					
B2DS-Food					○				
B2DS-Ind						○			
B2DS-All_CE		○	○	○	○	○	○		
B2DS-All_CE+FL		○	○	○	○	○	○	○	
B2DS-All_CE+FL+GR		○	○	○	○	○	○	○	○
15DS-Std	15DS 1.5℃未満（MAC均等）	—	—	—	—	—	—	—	—
15DS-All_CE+FL+GR		○	○	○	○	○	○	○	○

注1）IPCC等で用いられている共有社会経済パス（SSP）は、中位的なSSP2ベースで分析
注2）本来、DXによる電力消費量の増大等のリバウンド効果も考えられるが、CO2限界削減費用低下に伴うリバウンド効果以外のリバウンド効果は今回考慮していない

5.6.3　需要側変化に関するシナリオ分析結果

(1) DX 等の需要対策に関するシナリオ分析結果

まず、CO_2 排出削減を考慮しない、Baseline シナリオの結果を示す。図 5.6.3-1 に CE 進展を想定しない標準シナリオ（Std）からの世界の最終エネルギー消費量の低減を示す。かなり限定された波及効果のみを考慮した分析段階ではあるものの、想定したサーキュラーエコノミー・シェアリングエコノミー実現によって部門横断的に大きな省エネ効果が期待できることが示されている。また、GHG の排出低減効果も大きいことが推計される。

同じく、B2DS シナリオについて、図 5.6.3-2 に CE 進展を想定しない標準シナリオ（Std）からの世界の最終エネルギー消費量の低減を示す。また、B2DS シナリオ、15DS シナリオについて、標準シナリオ（Std）からの世界の GHG 排出量の低減を図 5.6.3-3 に示す。かなり限定された CE の事例および波及効果のみを考慮しただけでも、2050 年では、現在の世界の最終エネルギー消費量全体の 6%程度、また、2℃目標下で経済合理的と推計される省エネ量の半分程度もの省エネが、サーキュラーエコノミー・シェアリングエコノミーによって更に追加できる可能性が示唆される。排出削減目標が決まっている条件では、想定したサーキュラーエコノミー・シェアリングエコノミー

対策は相対的に費用が安価なため、限界的な費用の対策と評価される、CCS 付きバイオエネルギー（BECCS）や大気中 CO_2 直接回収貯留（DACCS）といった二酸化炭素除去（CDR）技術への寄与を低減し得る。なお、最終エネルギー消費量の低減効果は大きいが、CO_2 削減効果は、エネルギー供給側の CO_2 原単位低減も伴っているため、エネルギー消費量ほど、大きくは算定されない。ただし、後述のように、費用低減効果は大きい。

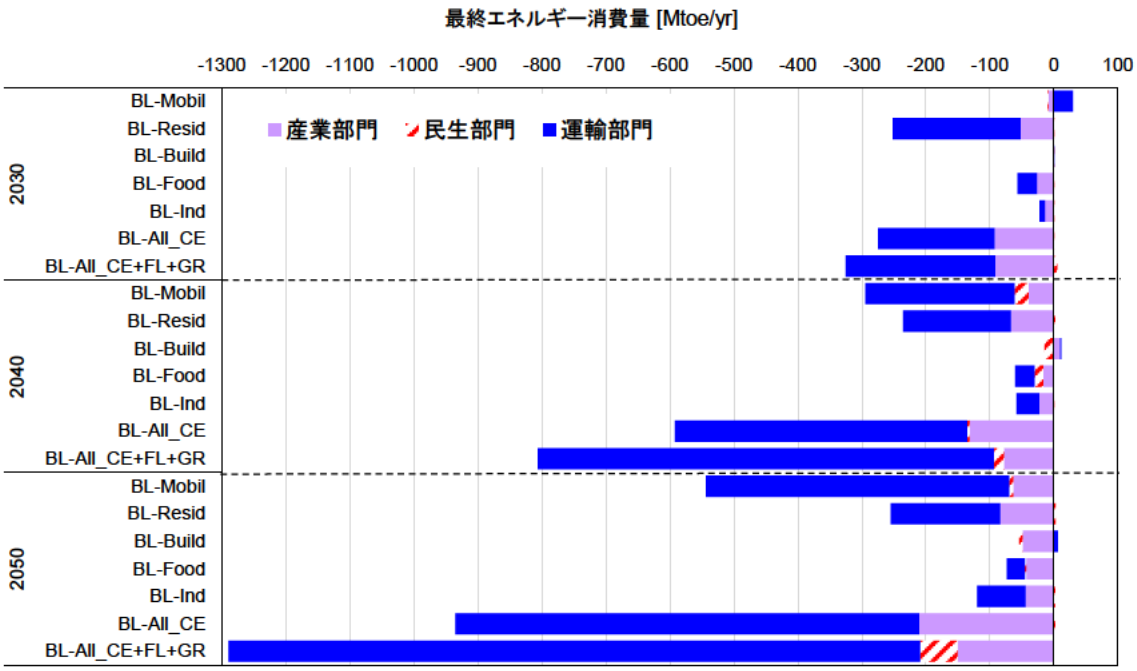
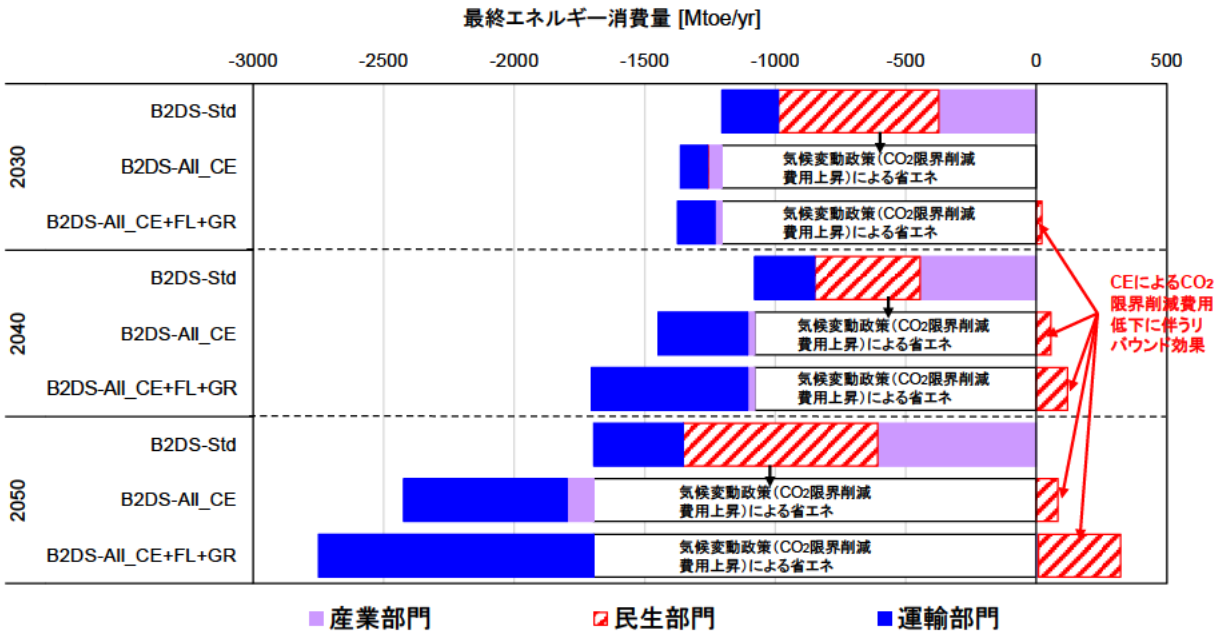
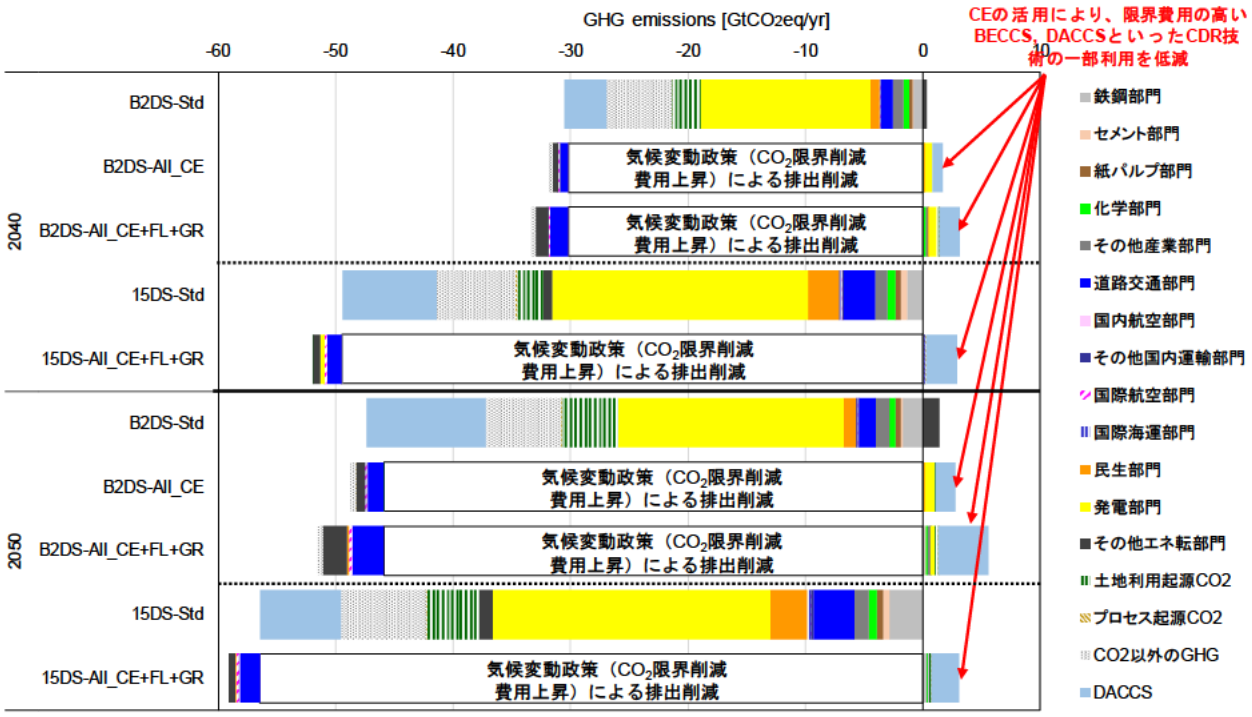


図 5.6.3-1　世界エネルギー消費量（ベースラインシナリオ、CE 想定時の変化）



参考）2019年の世界の最終エネルギー消費量実績値：10 Gtoe/yr、2050年のベースラインの最終エネルギー消費量推計値：14 Gtoe/yr

図 5.6.3-2 世界エネルギー消費量（B2DS（2℃制約シナリオ）下、CE 想定時の変化）



参考）2019年の世界のGHG排出量実績値：59 GtCO2eq./yr、2050年のベースラインの排出量推計値：73 GtCO2eq/yr

図 5.6.3-3 世界の GHG 削減効果（B2DS（2℃制約シナリオ）および 15DS（1.5℃制約シナリオ）下、CE 想定時の変化）

表 5.6.3-1 には、CE シナリオ下におけるエネルギーシステム総コストの Std シナリオ比での低減を、また、表 5.6.3-2 には、B2DS および 15DS 時の CO_2 限界削減費用を示す。DX によって誘因され得る CE の推進により、エネルギーシステムコストの大き

な低下が推計される。特に完全自動運転車等によるライドシェア、カーシェアによって社会全体としての大きなコスト低減効果が期待できるが、テレワークなどの家庭部門の変化、食品ロス低減なども、エネルギーシステムコストの低減に比較的大きな効果が期待できる。

また、表 5.6.3-2 で確認できるように、2℃目標、1.5℃目標といった長期目標の実現においては、CO_2限界削減費用の低下が期待できる。

表 5.6.3-1 ベースラインおよび B2DS 時のエネルギーシステム総コストの低減：CE 想定時（単位：Billion USD/yr）

	Scenarios	Mobil	Resid	Build	Food	Ind	All_CE	All_CE +FL	All_CE +FL+GR
2030-2040 年の間の年平均値	Baseline	▲547	▲339	▲1	▲57	▲4	▲894	▲894	▲963
	B2DS	▲556	▲352	▲0	▲64	▲5	▲926	▲928	▲1038
2040-2050 年の間の年平均値	Baseline	▲1601	▲459	▲1	▲74	▲7	▲1971	▲1971	▲2085
	B2DS	▲1635	▲477	▲6	▲90	▲14	▲2037	▲2038	▲2266

※ Baseline、B2DS のそれぞれの排出シナリオの標準ケースからの CE ケースによるコスト低減分

表 5.6.3-2 B2DS および 15DS 時の CO_2 限界削減費用（単位：USD/tCO_2eq）

	2℃（>66%）：B2DS				1.5℃：15DS	
	B2DS-Std	B2DS_All-CE	B2DS_All-CE+FL	B2DS_All-CE+FL+GR	15DS-Std	15DS_All-CE+FL+GR
2040 年	68–310	57–238	57–240	50–195	550	344
2050 年	146–739	123–524	122–522	60–364	513	225

※ 限界削減費用の幅は国による差異

(2) 需要側対策を中心とした削減貢献量の試算

本項では、“avoided emissions”として、とりわけ、需要側対策として重要との認識が大きい電化技術の中で、EV（EV バッテリー）、ヒートポンプ冷暖房・給湯機器を取り上げ、DNE21+モデルを用いて世界全体での“avoided emissions”の事前評価を実施した。

① 分析シナリオの想定

想定した排出削減シナリオは、1.5℃シナリオ（>50%確率）をメインとして、2℃シナリオ（>66%確率）についても評価を行った（以下、それぞれ、B15 シナリオ、WB2 シナリオと表記）。なお、1.5℃シナリオについては、表 5.6.3-3 で示すように、EV バ

ッテリーのコストに加えて、再エネのコストについての感度解析も実施した。具体的な VRE、自動車コスト（EV バッテリー）の想定は、第 5.1 節の想定に準じた。

表 5.6.3-3　1.5℃シナリオ（B1.5 シナリオ）の感度解析シナリオ

		VREs	
		コスト低減加速	保守的コスト低減
EVs	コスト低減加速	B15	B15_VRE(L)
	保守的コスト低減	B15_EV(L)	B15_(L)

② 分析結果

まず、図 5.6.3-4、図 5.6.3-5 にそれぞれ、1.5℃シナリオ（B15）、2℃シナリオ（WB2）における世界の部門別・技術別の排出削減効果を示す。モデル分析であるため、ベースライン排出量（炭素価格ゼロ）は、モデル上は、明確に定義ができ、経済自律的な排出削減と、追加的な排出削減は分離されている。発電部門での削減効果は大きいものの、エネルギー需要部門の対策効果も大きく、その対策の強化は重要である。

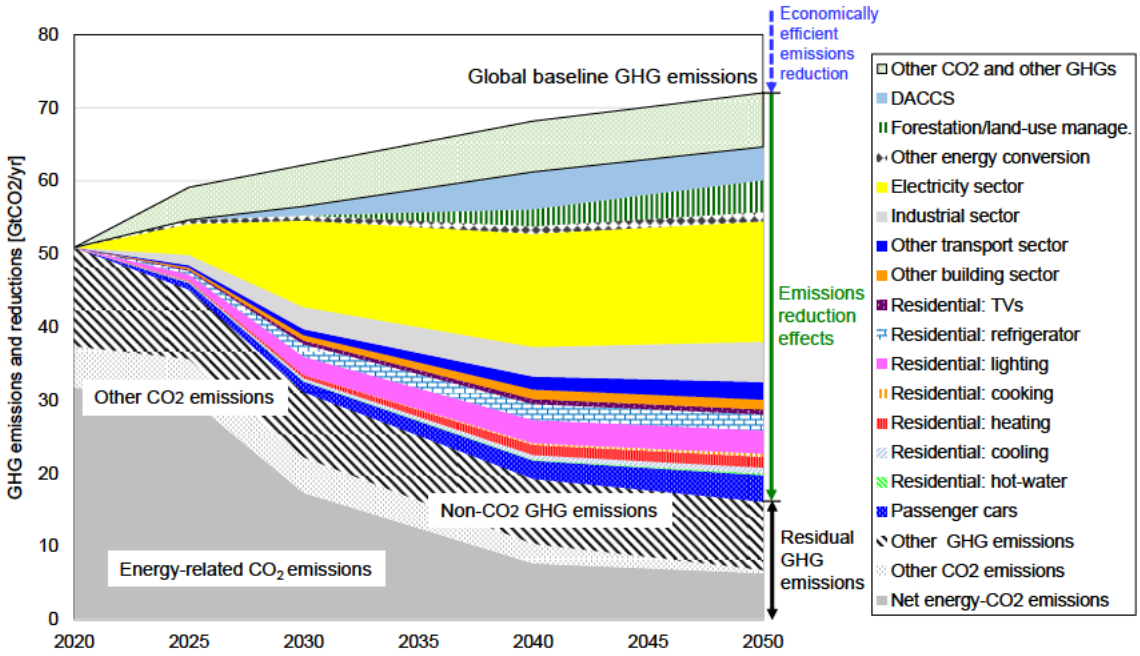


図 5.6.3-4　1.5℃シナリオ（B15 シナリオ）下の世界における部門別排出削減効果

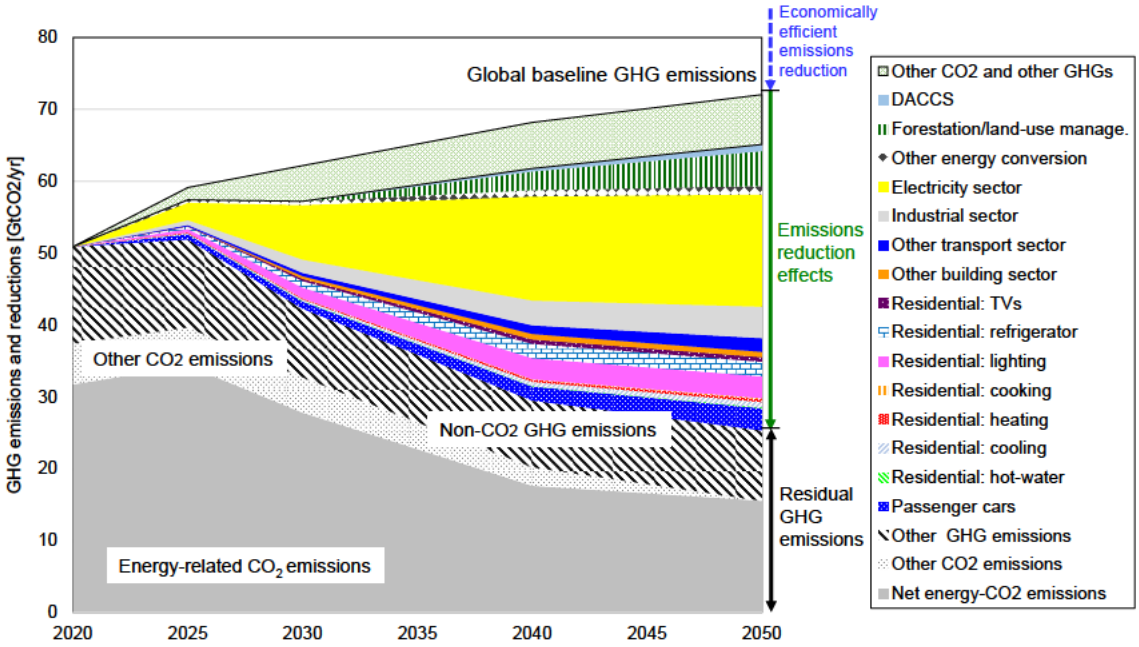


図 5.6.3-5　2℃シナリオ（WB2 シナリオ）下の世界における部門別排出削減効果

図 5.6.3-6、図 5.6.3-7 に、2℃および 1.5℃シナリオ下の世界の乗用車ストック、乗用車の最終エネルギー消費量を示す。また、Scope 2 排出量計算に必要となる、図 5.6.3-8 に世界の発電電力構成を示す。

図 5.6.3-6 では、標準シナリオは、EV（EV バッテリー）のコスト低減は楽観的に見込んだシナリオとしたこともあり、比較的大きな導入が見られる。他方、保守的なコスト低減の想定下においては、PHEV、HEV の比率が大きい。

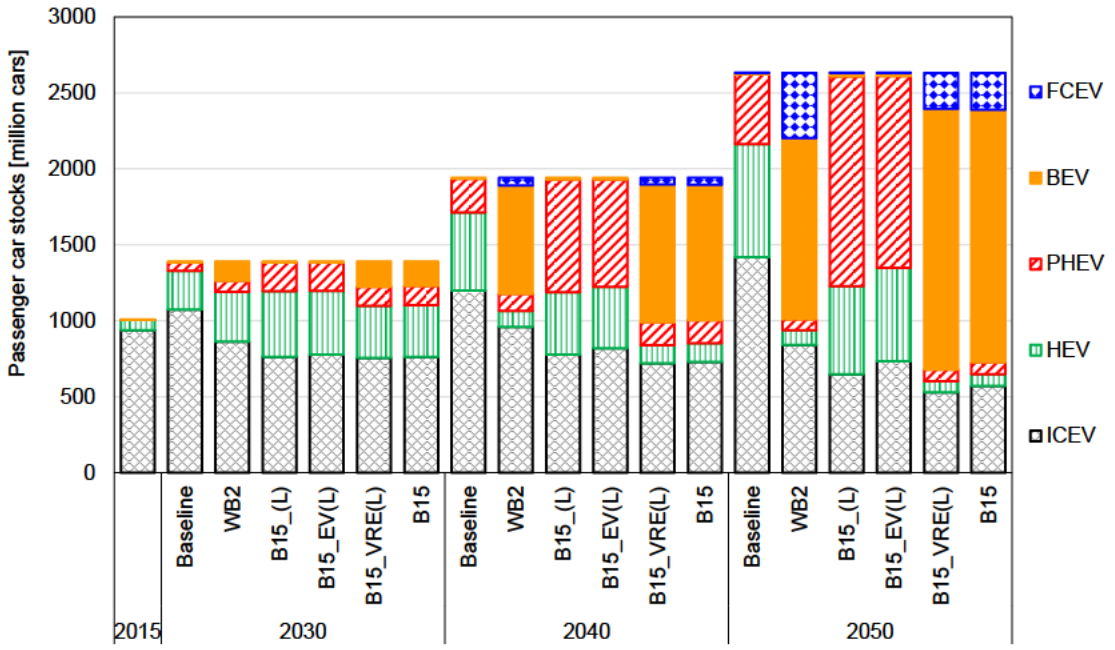


図 5.6.3-6　2℃／1.5℃シナリオ下の世界における乗用車のストック

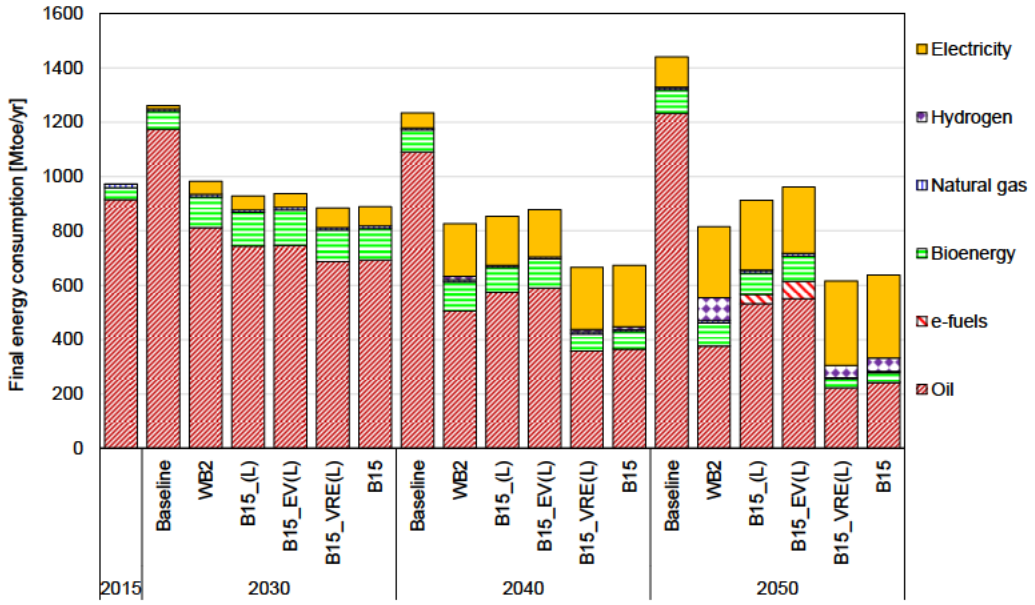


図 5.6.3-7　2℃／1.5℃シナリオ下の世界における乗用車の最終エネルギー消費量

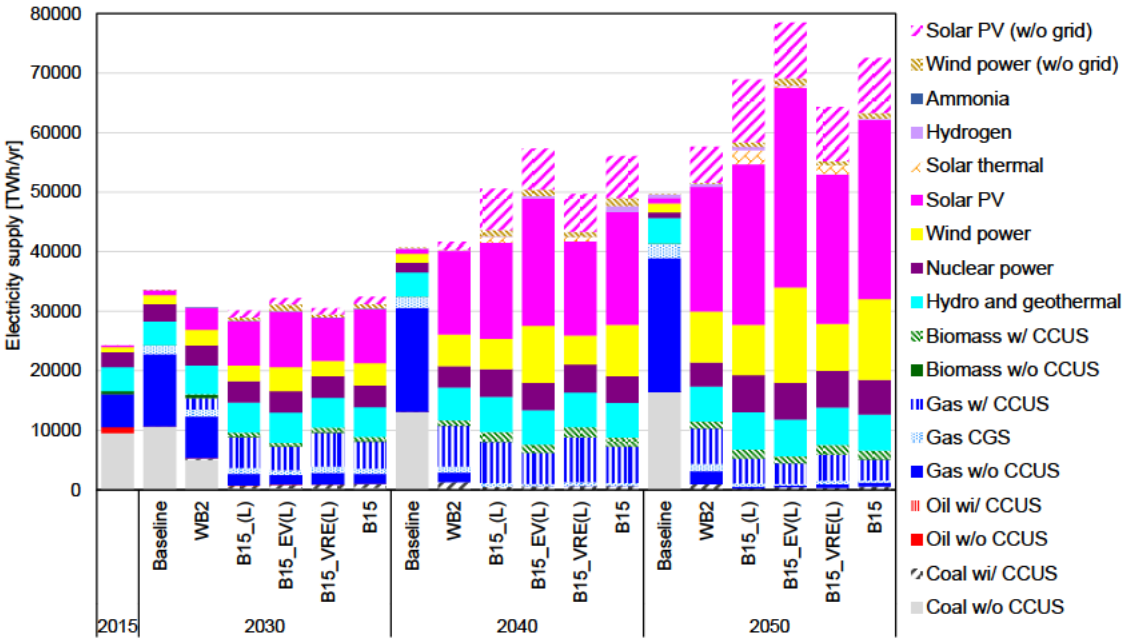


図 5.6.3-8　2℃／1.5℃シナリオ下の世界の発電電力量

図 5.6.3-9 に 2℃および 1.5℃シナリオ下の世界排出削減効果を示す。本評価は、各部門での排出削減効果であり、通常の省エネ効果なども含まれている。乗用車の EV 化による排出削減効果は比較的大きい。また、2℃か、1.5℃目標かの違いよりも、EV バッテリーのコスト見通しの違いによる影響が大きい。ヒートポンプ（HP）暖房は、2℃目標下での導入量は小さい一方、1.5℃目標下では導入量が大きくなり、排出削減効果も大きくなっている。HP 給湯については、今回の分析の想定下では、1.5℃目標下でも世界的にはあまり大きな拡大が推計されず、削減効果も比較的小さめと推計された。

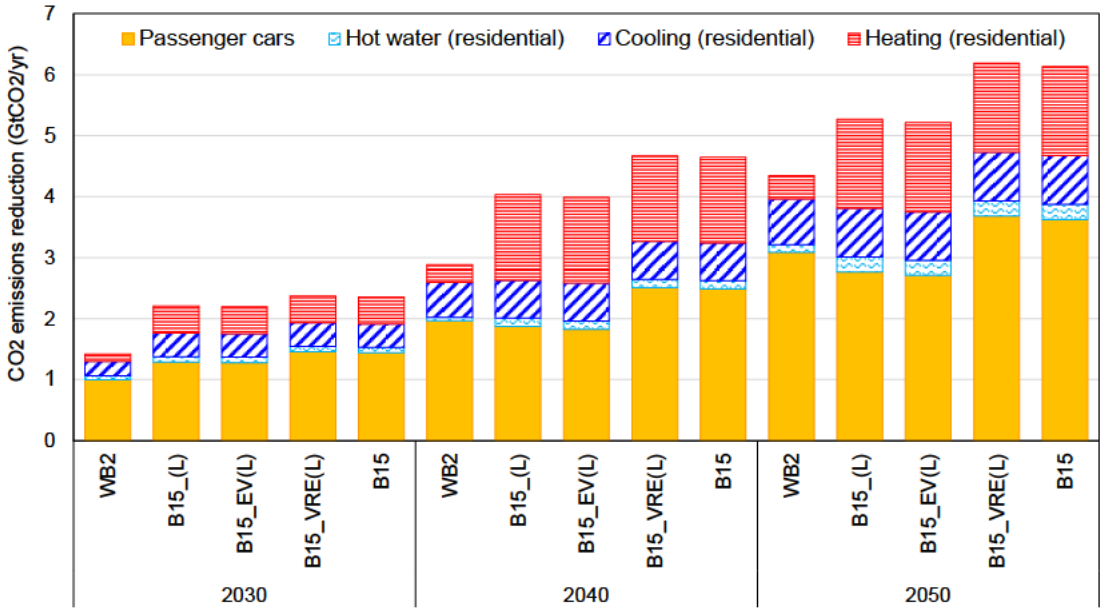


図 5.6.3-9 2℃／1.5℃シナリオ下の世界排出削減効果：EV（EV バッテリー）・ヒートポンプ機器等

図 5.6.3-10、図 5.6.3-11 にそれぞれ、EV バッテリーと HP 暖房・給湯機器の 1.5℃シナリオ下の累積の世界排出削減効果（排出削減貢献量）を示す。累積削減効果として示しており、“avoided emissions”の定義に合致する推計とした。EV 関係（EV バッテリー）の累積排出削減効果は、2050 年には 12 $GtCO_2$ 程度、HP 暖房・給湯機器関係の累積削減効果は、2050 年には 4 $GtCO_2$ 程度と推計された。大きな削減効果が推計される。

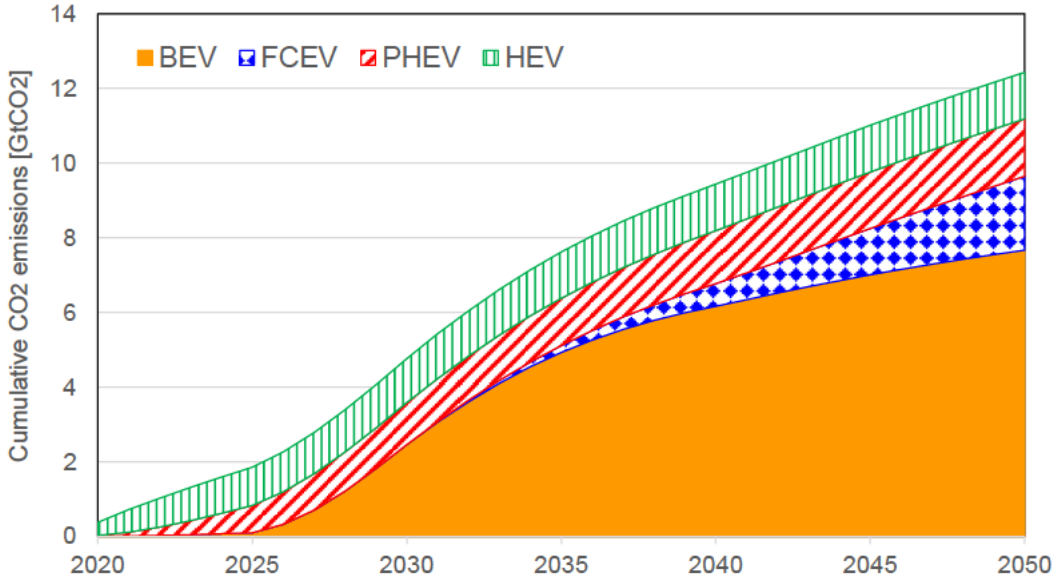


図 5.6.3-10 1.5℃シナリオ下の累積の世界排出削減効果（排出削減貢献量）：EV（EV バッテリー）関連

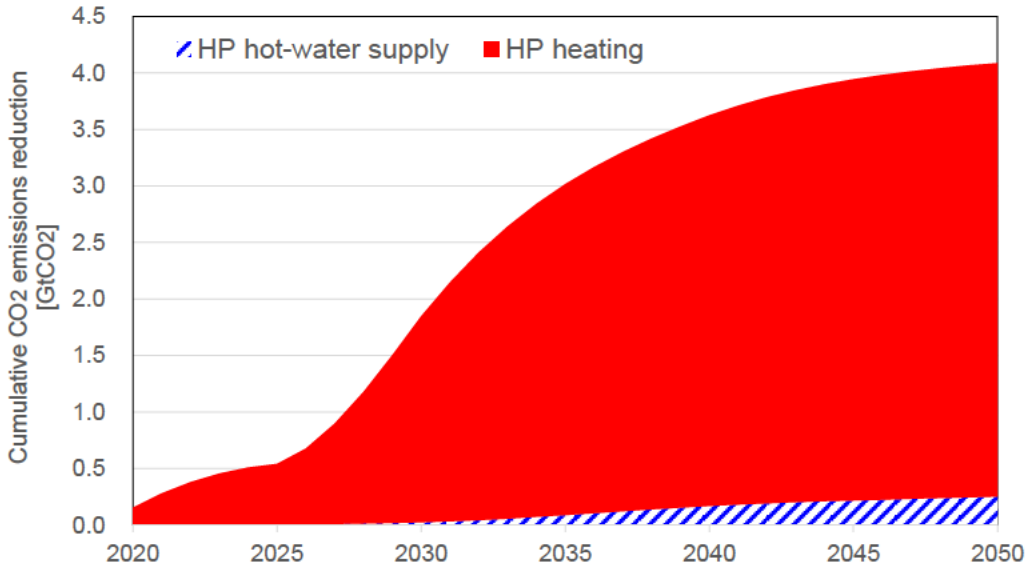


図 5.6.3-11 1.5℃シナリオ下の世界排出削減効果（排出削減貢献量）：ヒートポンプ関連（HP 暖房、HP 給湯）

このように事前評価として、二重計上なく整合的かつ定量的に、“avoided emissions”を算定し、提示することで、需要側対策の削減行動を促すことに資するものと考えられる。引き続き、分析・評価を実施していく予定である。

参考文献（第 5.6 節に関するもの）

1) IPCC WG3、第 6 次評価報告書 (2022) https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/
2) IPCC, Special Report on Global Warming on 1.5 °C (2018). https://www.ipcc.ch/sr15/
3) A. Grubler et al., A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies, Nature Energy, 3 (2018)
4) WBCSD (2023). https://www.wbcsd.org/Imperatives/Climate-Action/Resources/Guidance-on-Avoided-Emissions
5) 資源エネルギー庁 (2023) https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/sakugenkokenryo.html
6) 環境省「削減貢献量について」 https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/files/SC_syousai_Option1_20230301.pdf
7) EDITS WG3 Narratives group (Arnulf Grubler, Greg Nemet, Shonali Pachauri, Charlie Wilson), The 'High-with-Low' Scenario Narrative (2022)

5.7 エネルギー安全保障・安定供給に関する分析

5.7.1 気候変動緩和策とエネルギーセキュリティ

2022 年 2 月から始まったロシアによるウクライナ侵略以降、世界でエネルギーセキュリティの重要性に対する認識が高まっている。2022 年度の日本のエネルギー自給率は 12.6%[1)]と低く、化石燃料への依存並びに特定地域からの輸入が多いことが依然とし

て課題である。また、通商白書[2]によると、2022年において日本は過去最大の貿易赤字を経験し、その大半は資源価格の高騰並びに円安を起因とする鉱物性燃料の輸入価格が上昇したためである。貿易収支変化（2000年代前半から2010年代後半を対象）をみると、その他地域と中東の鉱物燃料が大きく貿易赤字に寄与していることが示されている。日本経済及び貿易構造の強靭化という観点からも鉱物性燃料の依存を減少させていくことが重要である。日本は、2050年のカーボンニュートラル実現に向け、化石燃料の脱炭素化、再生可能エネルギーシェアの拡大、原子力発電の活用並びに水素及びアンモニアの導入促進が強調されている。

エネルギーセキュリティの定量分析は数多くあり、エネルギーセキュリティの定義及び分析手法も目的によって様々であるが、大まかに分けると以下の3つの方法がある。

① 様々なエネルギーセキュリティ指標及びレーダーチャート等で指標毎に評価あるいは総合的に評価（例えば、山田[3]、OECD/NEA[4]、清水・中野[5]、Gasser[6]、エネルギー白書2021[7]、Bento et al.[8]）.
② 先行研究及びエクスパートジャッジメント等を考慮し、特に、定量化が困難な項目を取り扱えることが可能な階層分析法（AHP法）で推計したもの（内山他[9]、Ren et al.[10]）
③ エネルギーセキュリティの費用化（例えば、RITE[11]、土肥・杉村[12]）

手法1に関し、Gasser[6]は63のエネルギーセキュリティ指標について包括的に考察しており、エネルギーセキュリティの定量評価における異なる想定（対象燃料、評価変数、地理的範囲、時間軸、重みづけ方法）による同指標への影響を示している。尚、Gasser[6]が対象とした先行研究の大半は過去のデータを用いて推計しており、将来のエネルギーセキュリティ指標を算出している文献は約1割弱と数少ないことがわかる。清水・中野[5]は「化石資源集中リスク」、「カントリーリスク」及び「チョークポイントリスク」を考慮したエネルギーセキュリティ指標を推計しており、原油（1975年～2014年）及び天然ガス（1993年～2014年）の輸入データを用いてエネルギーセキュリティ指標を算出している。Bento et al.[8]は、需給両サイドの観点から、エネルギーセキュリティの12の指標に基づき、需要に関する政策介入による効果を分析している点が特徴的である。

エネルギー政策の優先分野は、国や地域によって異なることから、評価指標の重要度に応じて評点を重みづけ加算したものが手法2である。各評価指標に対するウェイト付けは階層分析法（AHP）が使用され、専門家へのアンケート調査を基に実施している。Ren et al.[10]は、異なる水素製造方法（化石燃料ベース、再生可能エネルギーベース、原子力発電ベース）に関し、AHP法を用いて各エネルギーセキュリティ指標の観点(Availability, Accessibility, Affordability, Acceptability, Applicability, Adaptability)から各水素製造方法の優劣を明らかにしている。

最後に、手法3に関し、RITE[11]は、エネルギーセキュリティ対策として石油備蓄に焦点を当て、ハーフィンダール・ハーシュマン指数（HHI）と石油備蓄基地の建設費

用を考慮して、エネルギーセキュリティ対策費用を推計し、発電コストに含めている。同様に、土肥・杉村[12]は、備蓄日数をセキュリティ指標（HHI）の関数として定義し、得られた備蓄日数に対応する設備費、維持費、運搬費、陳腐化費用（蒸発等の損失及び資源価格の変動リスク)の合計をエネルギーセキュリティ費用として算出している。

本分析は、長島他[13]で実施した水素及び水素系エネルギーを含む包括的なエネルギーセキュリティ指標に基づき、手法1における清水・中野[5]に従って、各種トランジションシナリオの下で燃料集中度、カントリーリスク及びチョークポイントリスクについて段階的に分析する。

5.7.2 分析シナリオと分析手法

本節では、RITE のエネルギーシステムモデル（DNE21+）を用いて、気候変動緩和策とエネルギーセキュリティとの関係を考察する。シナリオは、特段の気候変動緩和策が無いベースライン及び 3 つのシナリオ（Orderly Below 2ºC、Orderly 1.5ºC、1.5ºC-CO_2_CN）を想定する[14][15]（表 5.7.2-1）。1.5ºC-CO_2_CN シナリオは GHG ではなく CO_2 のみを対象にモデル最適化計算を行い、各部門で CO_2 が実質ゼロに近くなるシナリオであり、IEA の Net Zero シナリオ(NZE)[16]に相当するものである。

表 5.7.2-1 気候変動緩和策シナリオ想定

シナリオ	気温上昇	政策のスピード	CDR	再エネEV	政策の地域差	他シナリオとの類似性		
						IPCC AR6	NGFS	IEA
Baseline	特段の温暖化対策が無い場合							
Orderly Below 2℃	1.7℃程度	早（2030 年 NDC: 全世界 MAC 均等化）	小	高位進展	小（MAC 均等化）	Likely below 2℃ with immediate action [C3a]	Orderly: Below 2℃	SDS
Orderly 1.5℃	1.4℃（2100 年）	早（2030 年 NDC: 全世界 MAC 均等化）	中	高位進展	中（主要先進国 2050 年 CN）	1.5℃ with no or limited overshoot [C1]	Orderly: Net Zero 2050	
1.5℃-CO_2_CN	1.5℃程度	早（2030 年 NDC: 全世界 MAC 均等化）	小*	高位進展	中（主要先進国 2050 年 CN）	1.5℃ with no or limited overshoot [C1]		NZE

（出典）佐野他[14]、RITE/METI[15]

*発電部門での BECCS や e-メタン+CCS の利用を限定的にしている。

本稿ではエネルギーセキュリティ分析で使用される代表的な多様性指標である HHI を使用した Oda et al.(2013)[17]の指標に石炭、水素、アンモニア、合成メタン、合成石油、石油製品（LPG、ナフサ、ガソリン、灯油、軽油、低硫黄・高硫黄重油、石油コークス、BTX（ベンゼン、トルエン、キシレン））の脆弱性を追加した指標を用いる（長島他 [13]）。DNE21+モデルでは、水素やアンモニアの国内製造方法として、水の電気分解（電力系統、風力発電、太陽光発電）や化石燃料（ガス）の改質、ガス化（バイオマス、石炭）、石油化学、石油精製からの副産物として得られるものを想定している。

清水・中野 [5]の分析方法にしたがい、輸入資源の集中、カントリーリスク及びチョークポイントリスクを段階的に考慮したエネルギーセキュリティ指標を算出する。

(5.7.2-1)式は、輸入資源の集中のみを考慮した場合を、(5.7.2-2)式はカントリーリスクを加えた場合、そして、(5.7.2-3)式は、さらにチョークポイントを加えた場合のエネルギーセキュリティ指標をそれぞれ表している。

$$ESI_1 = \sum_f \frac{C_f}{\mathrm{TPES}} \sum_i \left(S_{i,f}^2\right) \tag{5.7.2-1}$$

$$ESI_2 = \sum_f \frac{C_f}{\mathrm{TPES}} \sum_i \left(r_i \cdot S_{i,f}^2\right) \tag{5.7.2-2}$$

$$ESI_3 = \sum_f \frac{C_f}{\mathrm{TPES}} \sum_i \left(r_i \cdot CP_i \cdot S_{i,f}^2\right) \tag{5.7.2-3}$$

C: 各燃料 *f*（石炭、石油、天然ガス、水素、アンモニア、合成メタン、合成石油、石油製品）の輸入量、TPES: 一次エネルギー供給量、*r*: 輸入先 *i* 国のカントリーリスク（$1 \leq r \leq 3$）、*CP*: チョークポイントリスク（$1 \leq CP \leq 3$）、*S*: 輸入先 i 国からの輸入シェア

本分析ではカントリーリスクに関して、日本貿易保険（NEXI）の 2024 年 10 月 22 日現在の国・地域のリスク・カテゴリーを使用した [18]。同リスク・カテゴリーはリスクが低い順に A から H の 8 段階に格付けされている。NEXI の格付けは基本的には OECD の評価 [19]（0 から 8 段階）を基に国・地域のリスク・カテゴリーを決定している。OECD のデータは 0 から 8 の範囲で示されているが、本分析ではこのカテゴリーをカントリーリスク数値とし、IEA[20]と同様に 1～3 の範囲に変換した（表 5.7.2-2）。数値が大きいほどカントリーリスクが高いことを示す。尚、OECD カテゴリーでは、高所得 OECD 国はカテゴリー化されていないが、NEXI のカテゴリーにしたがい、これらの国・地域を数値評価する。また、将来時点においてもカントリーリスク値は変化しないと想定した。

表 5.7.2-2 輸入元のカントリーリスク値

国・地域	数値	国・地域	数値	国・地域	数値
U.S.	1.00	China	1.57	South Africa	2.14
Canada	1.00	North Korea, Mongolia	3.00	Mexico	1.86
U.K.	1.00	Viet Nam, Cambodia, Laos	2.62	Brazil	2.14
France	1.00	South Korea	1.29	Venezuela, Guyana, Suriname	2.81
Germany	1.00	Malaysia, Singapore	1.29	Paraguay, Uruguay, Argentina	2.33
Italy	1.00	Indonesia	1.86	Other South America	2.26
Spain, Portugal	1.43	Philippines	1.86	Russia	3.00
Belgium, Netherlands, Denmark	1.00	Brunei	1.57	Other Annex I of FUSSR (Ukraine)	3.00
North Europe (Sweden and Finland)	1.00	India	1.86	Belarus	3.00
Other EU	1.50	Iran	3.00	Kazakhstan	2.43
Australia	1.00	Saudi Arabia	1.57	Other FUSSR	2.67
N.Z.	1.00	Bahrain, Oman, Qatar, UAE, Yemen	2.20		

チョークポイントの設定及びチョークポイントリスクの推計は、清水・中野[5)]の設定に基づいた（表 5.7.2-3)。チョークポイントリスクは、チョークポイントを通らない場合は 1 とし、チョークポイントを 3 ヶ所通過する場合を最大値の 3 とする。そのため､チョークポイントを 1 カ所及び 2 ヶ所通過の際は､中間の値をとると仮定する。

表 5.7.2-3　日本が輸入する際のチョークポイント

輸入元	チョークポイント
イラン、イラク、クウェート、カタール、サウジアラビア、UAE	ホルムズ海峡、マラッカ海峡
オマーン、イエメン、インドネシア（50%)、米国（50%)、マレーシア（50%）	マラッカ海峡
トリニダード・トバゴ、ノルウェー、ブラジル、ベネズエラ、英国	パナマ運河
アルジェリア、カザフスタン、シリア、アゼルバイジャン、リビア、チュニジア	マンダブ海峡、スエズ運河、マラッカ海峡
エジプト	マンダブ海峡、マラッカ海峡

（出典）清水・中野 [5)]

*インドネシア､米国及びマレーシアについては半量が 1 ヶ所のチョークポイントを通過すると仮定。

本分析で用いる DNE21+モデルは線形モデルであり、エネルギー需給コストを最小化する最適モデルである。本シナリオ分析では、エネルギー安全保障上の考慮は行っておらず、得られた結果を基に事後的にエネルギーセキュリティ指標を分析する。

DNE21+は各国・地域間の燃料貿易構造を考慮している点が特徴的である。そのため、燃料輸入先の国・地域やカントリーリスク及びチョークポイントリスクを考慮した分析が可能となる。また、地域間輸送の対象は、石炭、原油・各種石油製品（e-fuels を含む)、天然ガス、合成メタン、電力、エタノール、水素、アンモニア、CO_2 を想定する。

54 地域を対象に、技術毎に輸送網を設定し、輸送地点の組み合わせに応じて、距離・コスト・輸送ロス等を設定し、また、技術毎に輸送施設を設定し、設備寿命・コスト等を設定する。

具体的にはモデルでは、二国・地域間の輸出入量を直接算出することはできないが、各国・地域間の輸出入の輸送設備容量を設定している。これは最大設備容量を示しているため、設備は存在するものの、ある期間は設備を使用していない可能性もあることに留意が必要である。そのため、本分析ではモデルで得られた各年の各国・地域の輸出入データを参照することにより、日本の各燃料に関する輸入先を特定する。そして、輸入先の設備容量のシェアをもとめ、各燃料の日本の総輸入量にそのシェアを掛けることによって、二国・地域間における各燃料の輸入量と想定する。

5.7.3　結果

図 5.7.3-1 は、日本の一次エネルギー供給量を示している。ベースラインシナリオにおいて、日本の一次エネルギー供給は輸入化石燃料に大きく依存していることがわかる。カーボンニュートラルに向けて、各化石燃料への依存が減少し、風力及び太陽光によるエネルギー供給のシェアは 2050 年に上昇する。また、水素・アンモニア、合

成メタンといったカーボンニュートラル燃料を輸入して利用することが費用効率的であると評価されている。

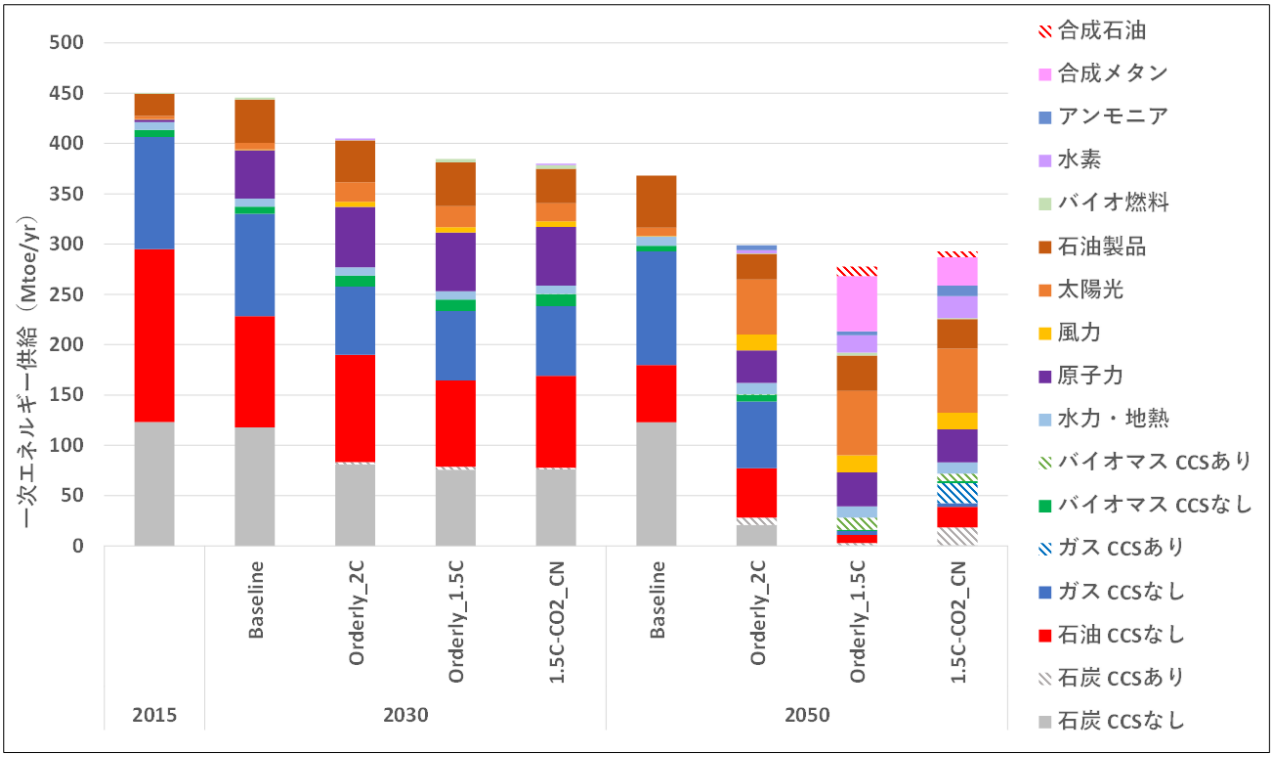


図 5.7.3-1　一次エネルギー供給量（日本）

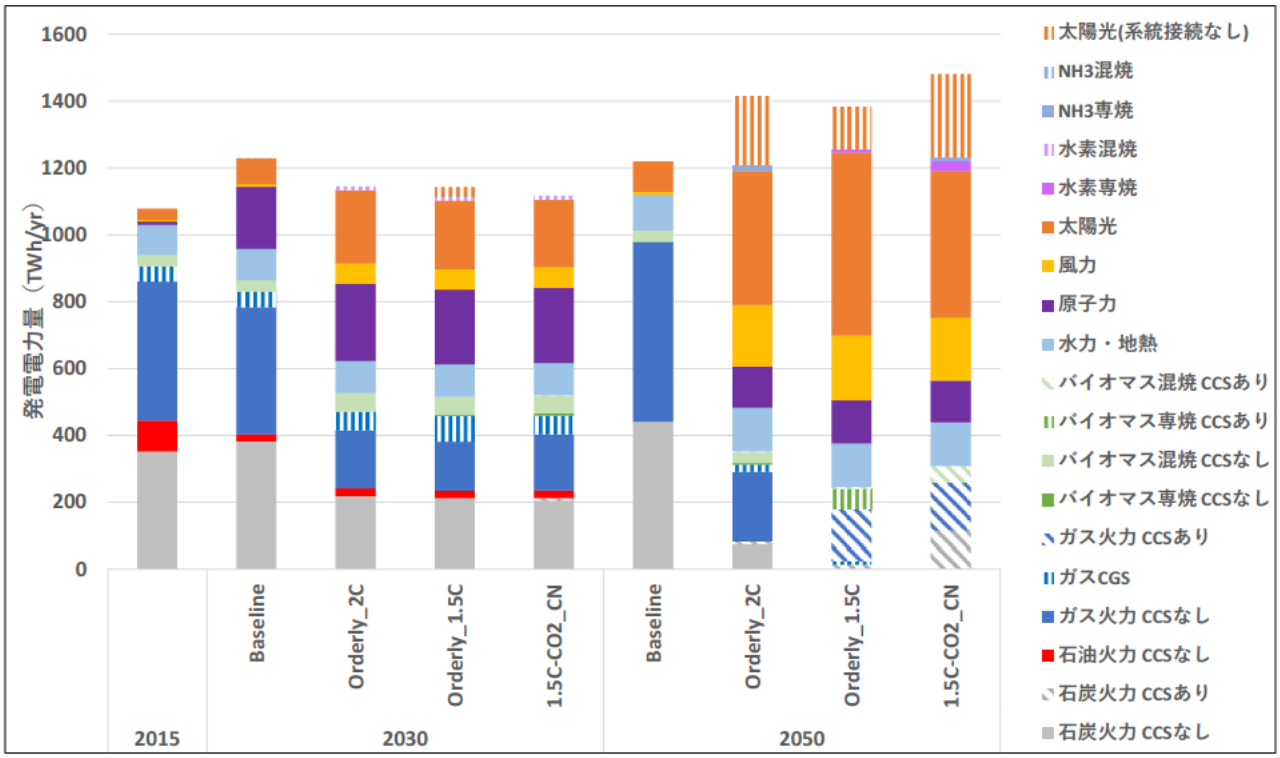


図 5.7.3-2 発電電力量（日本）

図 5.7.3-2 は日本の発電電力量を表している。2030 年については、第 6 次エネルギー基本計画における電源構成の比率を制約として想定する。気候変動対策シナリオにおいては、太陽光等の再エネ普及拡大や CCS 利用に加えて、輸入水素及びアンモニアによる発電がおこなわれる。また、Orderly_1.5°C シナリオでは、2050 年におけるガス火力発電+CCS は、合成メタンが利用されている。1.5°C-CO_2_CN では、発電部門での BECCS や合成メタン+CCS は利用できないと制約しているため、CCS 付き石炭火力の比率が上昇する。

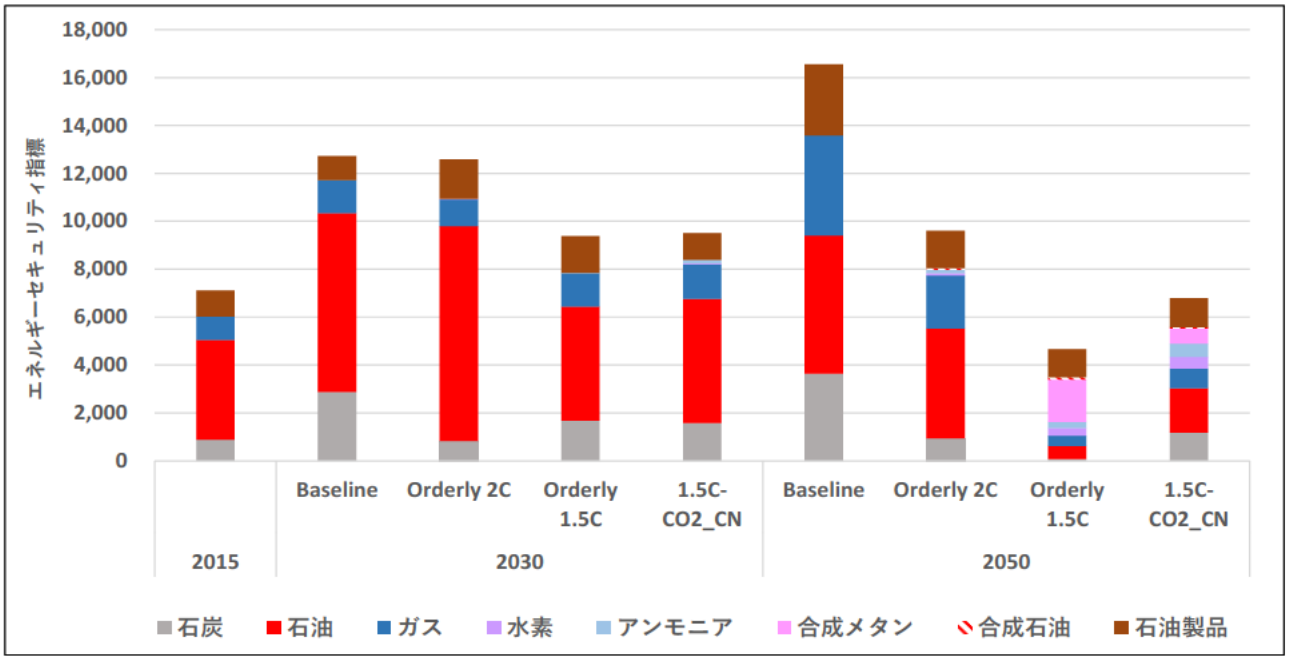


図 5.7.3-3 エネルギーセキュリティ指標（ESI_3）：燃料毎の構成

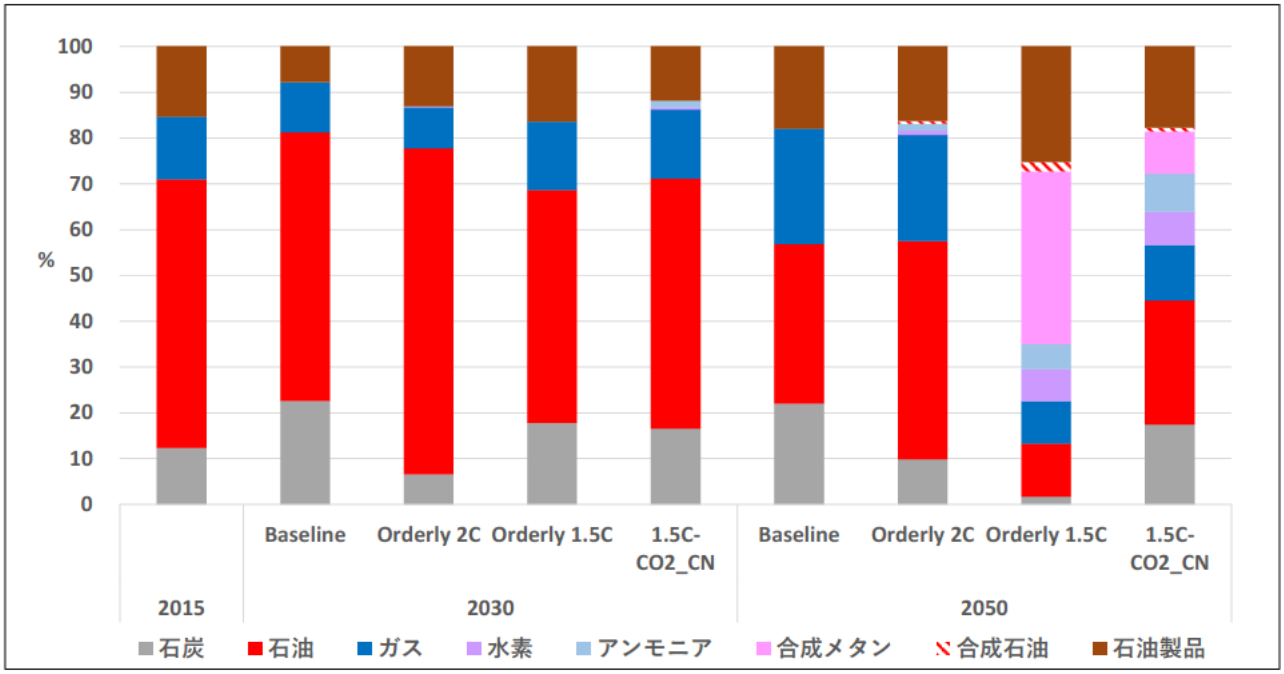


図 5.7.3-4 エネルギーセキュリティ指標に対する各燃料の寄与度

図 5.7.3-3 は輸入燃料集中、カントリーリスクとチョークポイントを考慮したエネルギーセキュリティ指標であり、数値が大きいほどエネルギー脆弱度が高いことを表す。図 5.7.3-4 は、同指標に対する各燃料の寄与度を表している。2015 年の値は、現状のエネルギーセキュリティ指標値を表し、エネルギー地政学を考慮した輸入先の多様化により、エネルギーコスト最小化のシナリオと比べてエネルギー脆弱度が低い（特に、石炭及びガス）。

ベースラインに関して、化石燃料、特に石油による脆弱度への寄与度が高くなることにより、脆弱度が上昇する（中東からの輸入依存が高いため）。

1.5°C-CO_2_CN シナリオでは、2050 年においてベースライン比で、エネルギーセキュリティの脆弱性が半分以上改善する（輸入総量減少、再エネ増加、水素・アンモニア等を含む多様化）。2050 年時点で Orderly 1.5°C シナリオの脆弱性が最も低い（理由：輸入量が最も低いため等）。

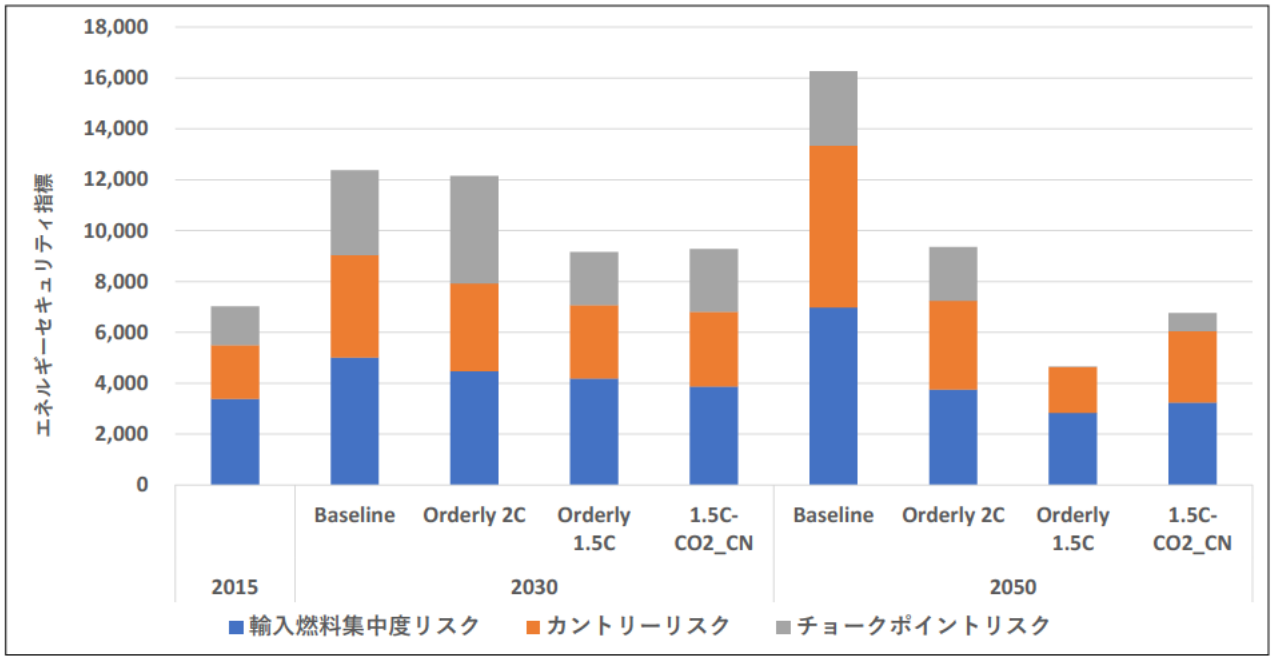


図 5.7.3-5 エネルギーセキュリティ指標（ESI_3）：リスク毎の構成

図 5.7.3-5 は、エネルギーセキュリティ指標のリスク毎の構成を示している。輸入燃料集中リスクのみを対象とした指標（青部分）は、シナリオ間の差異が比較的小さい。2050 年時点では、Orderly1.5°C シナリオにおけるチョークポイントリスクは非常に小さい。これは、化石燃料の依存度が低下し、さらにカーボンニュートラル燃料である水素、アンモニア等の輸入元のカントリーリスク及びチョークポイントリスクが低いため、最もエネルギーセキュリティ上、望ましい結果となる。

最後に、コストの観点からみると、Orderly 1.5°C 及び 1.5°C-CO_2_CN シナリオは非常に高くなることから、エネルギー供給を安価に確保することが今後の課題である（表 5.7.3-1、表 5.7.3-2）。

なお、今回得られたエネルギーセキュリティ指標は、費用最小化の下で得られた結果であり、DNE21+モデルは線形モデルのため、最適化結果は費用効率的な一か所に集まりやすい特徴がある。しかし、現実の世界では、地政学リスクを踏まえた貿易構造となっていることに留意が必要である。

表 5.7.3-1　CO_2限界削減費用[$/t$CO_2$]

シナリオ	2030 年	2050 年
Orderly 2C	81	158
Orderly 1.5C	234	465
1.5C-CO_2_CN	282	341

（出典）佐野ら[14]、RITE/METI[15]

表 5.7.3-2　CO_2削減費用[billion US$/yr]

シナリオ	2030 年	2050 年
Orderly 2C	0	20
Orderly 1.5C	9	145
1.5C-CO_2_CN	20	95

（出典）佐野ら[14]、RITE/METI[15]
（注）ベースラインシナリオからの年間のエネルギーシステムコストの増分

5.7.4　今後の課題

本章では、カーボンニュートラルに向けた日本の気候変動緩和策の移行期に関する異なるシナリオについて、燃料集中度、カントリーリスク及びチョークポイントリスクを考慮し、エネルギーセキュリティ指標を推計した。現状のモデル計算では費用として反映されていないカントリーリスク並びにチョークポイントリスクがエネルギーセキュリティに与える影響は大きく、実際の政策においては輸入先の多様化並びに、国産エネルギーのシェアを高めることが必要であるが、その際の費用も同様に考慮することがもとめられる。

今後の課題としては、今回得られたエネルギーセキュリティ指標の内生化である。今回使用したHHIにおいて、輸入燃料集中度は非線形のため内生化が容易ではない(別途、収束計算が必要となる)。一方、カントリーリスク及びチョークポイントリスクはHHIにおいて線形関数のため、これらを内生化して分析することは可能である。

参考文献（第 5.7 節に関するもの）

1) 資源エネルギー庁：エネルギー白書 2024
2) 経済産業省：通商白書 2023
3) 山田英司：先進諸国との比較におけるわが国のエネルギーセキュリティレベルの評価研究、日本原子力学会和文論文誌、6、4(2007)、pp.383-392.
4) OECD/NEA: The full costs of electricity provision, OECD, 2018.
5) 清水裕，中野冠：チョークポイントリスクを考慮したエネルギーセキュリティ指標、安全工学、57、3(2018)、pp. 237-245.
6) Patrick Gasser: A review on energy security indices to compare country performances, Energy Policy, 139(2020), 111339.

7) 資源エネルギー庁：エネルギー白書 2021
8) Nuno Bento, Arnulf Grubler, Benigna Boza-Kiss, Simon De Stercke, Volker Krey, David L. McCollum, Caroline Zimm, and Tiago Alves: Leverage demand-side policies for energy security, Science, 383, 6686(2024), pp.946-949.
9) 内山洋司、髙橋圭子、斎藤雄志：経済性、セキュリティ、リスクからみた我が国の最適電源構成の検討、電力経済研究、20(1986)、pp.27-57.
10) Jingzheng Ren, Kristian Peter Andreasen and Benjamin K. Sovacool: Viability of hydrogen pathways that enhance energy security: A comparison of China and Denmark, International Journal of Hydrogen Energy, 39(2014), pp.15320-15329.
11) RITE：電源別発電コストの最新推計と電源代替の費用便益分析 (2014)
12) 土肥英幸、杉村丈一：エネルギーセキュリティの費用化手法の検討、日本エネルギー学会誌、97(2018)、pp.23-30.
13) 長島美由紀、佐野史典、小田潤一郎、秋元圭吾、安藤輝尚：カーボンニュートラルに向けた日本のエネルギーセキュリティ指標の考察と評価、第 40 回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 (2024)、pp.350-354.
14) 佐野史典、秋元圭吾、長島美由紀：世界温暖化対策評価モデルによるカーボンニュートラルに向けたトランジションの分析、第 39 回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集、(2023)、pp.445-446.
15) RITE/METI : 令和 4 年度地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業成果報告書、2023 年 3 月
16) IEA: Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector, (2021).
17) Junichiro Oda, Keigo Akimoto, Fuminori Sano, Miyuki Nagashima, Kenichi Wada, Toshimasa Tomoda: Analysis of CCS impact on Asian energy security, Energy Procedia, 37 (2013), pp.7565-7572.
18) 日本貿易保険：国カテゴリー表、https://www.nexi.go.jp/cover/categorytable (アクセス日 2025.1.20)
19) OECD: Country risk classifications of the Participants to the Arrangement on officially supported export credits, https://www.oecd.org/trade/topics/export-credits/documents/cre-crc-current-english.pdf (アクセス日 2023.11.30)
20) IEA: Energy security and climate policy: Assessing interactions, (2007).

第6章　国際枠組み、海外対策動向および国際モデル比較プロジェクト動向

6.1　IEA WEO の分析

6.1.1　WEO2024 の概要と課題

国際エネルギー機関（IEA）が毎年発刊している World Energy Outlook（WEO）は、エネルギー需給の最新動向と将来展望を示したもので、長らく世界のエネルギー関係者にとってバイブル的な存在であった。この WEO の将来展望は複数のシナリオによって示されており、これまでも何度かシナリオの名称や位置づけが変わったこともあったが、近年特に大きく変化してきている。この章では、昨年 10 月に発刊された最新の WEO2024 について、有料のデータ（Extended data の AnnexA）をベースとして主要なエネルギー指標を示し、WEO2024 の描くシナリオを理解する。また、日本の第 7 次エネルギー基本計画原案と Announced Pledges Scenario（APS、日本が 2050 年にカーボンニュートラルを達成すると想定している）の比較、更に Net Zero Emission by 2050 シナリオ（NZE）が登場した WEO2021 以降のシナリオの比較分析を示し、シナリオの変化から得られるインプリケーションを考察する。

(1) WEO2024 のシナリオ

WEO2006 から WEO2024 までのシナリオを図 6.1.1-1 に示す。WEO2010 から中心シナリオ、BAU シナリオ、2℃シナリオという 3 つのシナリオの組み合わせが 10 年間続いたが、WEO2020 で 1.5℃シナリオが BAU シナリオに取って代わり、WEO2021 で APS（カーボンニュートラル宣言している国は全て達成すると想定したシナリオ）が加わり、WEO2022 で 2℃シナリオが消え、シナリオは STEPS、APS、NZE の 3 つになり、それ以降はこの 3 シナリオがメインシナリオとして位置づけられている。

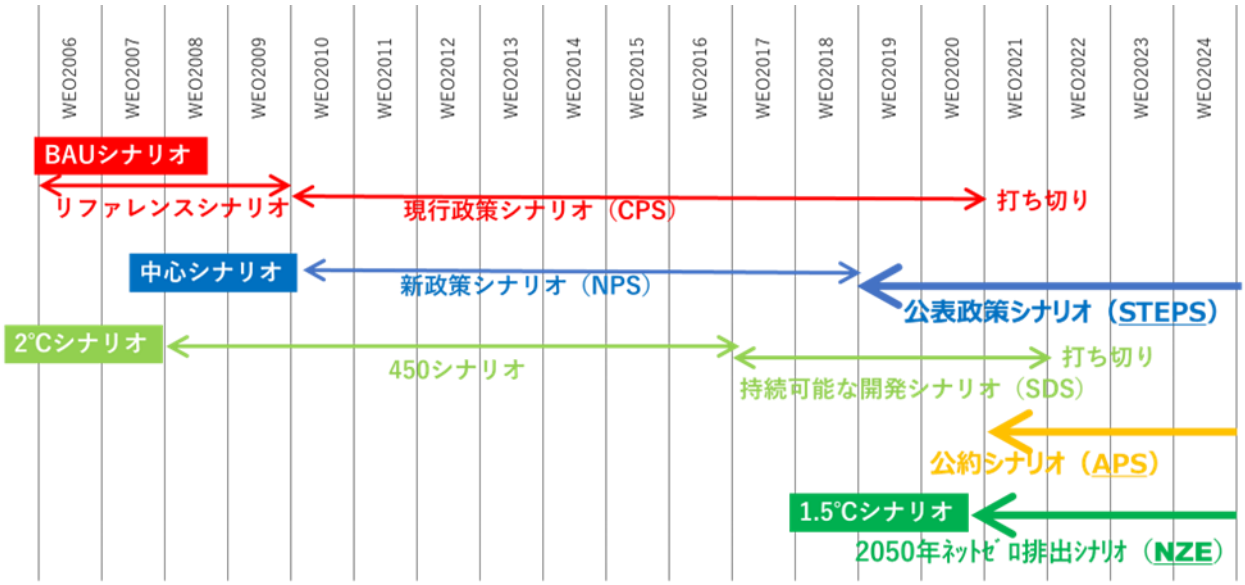


図 6.1.1-1 WEO のシナリオの変遷

シナリオのアプローチとして中心シナリオは将来予測シミュレーションによる forecast 型である一方で、1.5℃シナリオ（2℃シナリオ）はエネルギー起源 CO_2 と産業プロセス CO_2 の合計排出量を 2050 年にゼロ（2040 年に 15～19 億トン）と固定して目標達成の手段を見出す backcast 型である。

WEO2021 以降レギュラー化した 3 つのメインシナリオのうち、STEPS は forecast 型、NZE は backcast 型であり、APS はカーボンニュートラル宣言している国は backcast 型、その他の国は forecast 型のいわばハイブリッド型のシナリオである。上図に示す通り、WEO2019 までは forecast 型シナリオが 2 つ、backcast 型シナリオが 1 つという構成で、予測重視であったと言える。しかし、WEO2022 以降は forecast 型シナリオ 1 つ、backcas 型シナリオ 1 つ、ハイブリッド 1 つという構成に変わり、目標重視にシフトしていると言える。

例年 WEO ではシナリオ別の CO_2 排出量のグラフを掲載していたが、本年は図 6.1.1-2 のイメージ図のみであった。

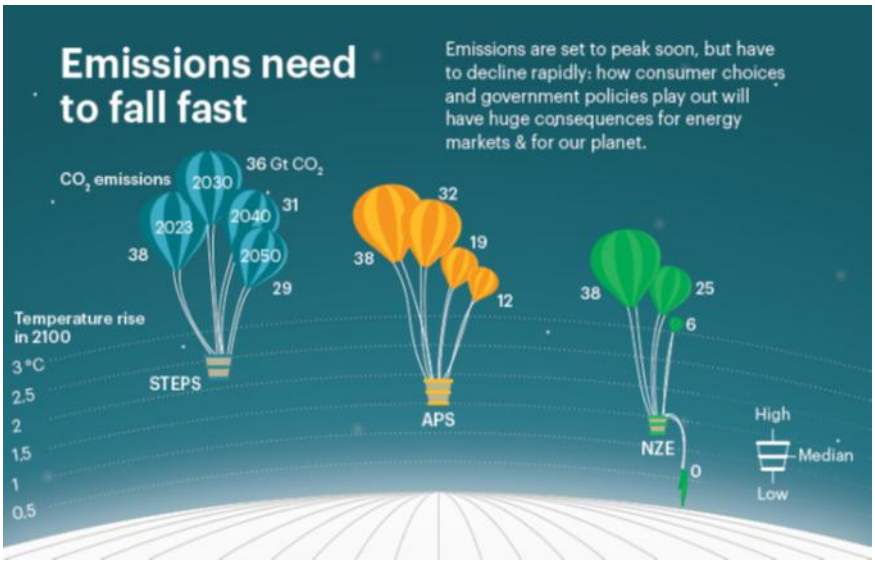


図 6.1.1-2　WEO2024 の 3 つのシナリオの CO_2 排出

3 つのシナリオは以下のように定義されている。

“Stated Policies Scenario (STEPS)”:世界各国の最新の政策設定を詳細に読み解くことで、エネルギー部門の今後の方向性を示す。このシナリオは、現在実施されている、あるいは発表されているエネルギー、気候、および関連産業政策を考慮に入れている。これらの政策の目的は、無条件で達成されると想定されているわけではない。それらの政策が実施のための適切な準備によって裏付けられている場合に限定している。STEPS は、2100 年に 2.4℃の気温上昇を伴う（50%の確率）。

“Announced Pledges Scenario (APS)”:長期的なネットゼロ目標や NDC での誓約を含め、すべての国のエネルギー・気候目標が完全かつ予定通りに達成されると仮定している。これは、ほとんどの政府が長期的な公約を達成するための政策を実施するにはまだほど遠いことを考えると、強引な仮定である。APS は、2100 年に 1.7℃の気温上昇を伴う（50%の確率）。

“Net Zero Emissions by 2050 (NZE) Scenario”:2050 年までに世界のエネルギー部門が CO_2 排出量正味ゼロを達成する道筋を描いており、限定的なオーバーシュートで長期的な地球温暖化を 1.5℃に抑えるケース（50%の確率）と整合する。NZE シナリオはまた、2030 年までに近代的エネルギー・サービスへの普遍的アクセスの達成と大気質の大幅な改善の実現によって、エネルギー関連の主要な国連持続可能な開発目標を達成する。

無料でダウンロード可能な WEO2024 と有料データベースのシナリオ別のデータ availability を以下に示す。NZE に関しては世界合計値のみで、地域／主要国別の数値は示されていないという状況は WEO2021 以来変わっていない。

表 6.1.1-1　WEO2024 のシナリオ別データ availability

シナリオ	WEO2024（無料 PDF） AnnexA 記載データ 地域区分×対象年	有料 AnnexA 記載データ 地域区分×対象年
STEPS	世界 × **2030/2035/2040/2050 年**	世界、主要地域／国（北米、中南米、欧州、EU、アフリカ、中東、ユーラシア、アジア太平洋、ASEAN、OECD、非 OECD、新興国および途上国、先進国／米国、ブラジル、ロシア、中国、インド、日本） × 2030/2035/2040/2045/2050 年
APS		
NZE		世界 × 2030/2035/2040/2045/2050 年

人口と GDP 成長率の想定は、3 シナリオ共通で、人口は従来と同様に国連人口予測を参照して 2050 年に 97 億人に増加すると想定している。GDP 成長率は WEO2024 では 2023～2050 年の年平均成長率を 2.7%としている。これは、WEO2023 では 2022～2050 年の年平均成長率を 2.6%としていたのと比較して、0.1%高い想定であり、コロナ禍以降 3 年ぶりの上方修正である。

WEO2024 の燃料価格については表 6.1.1-2 の通りである。全体的に WEO2023 に比べて下方修正されている。NZE の下方修正は現行の価格低下を反映し、（後述の通り）更なる化石燃料需要低下を想定していることを反映している、と考えられる。燃料価格の想定は、いずれも NZE＜APS＜STEPS であり、需要が大きいほど高くなっている。

表 6.1.1-2 燃料価格の想定

Table 2.3 ▷ Wholesale fossil fuel prices by scenario

		STEPS			APS			NZE Scenario		
USD (MER, 2023)	2023	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
IEA crude oil (USD/barrel)	82	79	77	75	72	63	58	42	30	25
Natural gas (USD/MBtu)										
United States	2.7	3.9	4.1	4.2	3.2	3.0	2.9	2.1	2.0	2.0
European Union	12.1	6.5	7.6	7.7	6.0	5.2	5.2	4.4	4.1	4.0
China	11.5	7.2	8.2	8.3	6.9	6.2	6.2	5.0	4.8	4.8
Japan	13.0	8.3	8.8	8.7	6.8	6.1	6.2	5.0	4.8	4.8
Steam coal (USD/tonne)										
United States	57	51	42	40	42	31	27	28	23	23
European Union	129	68	69	64	64	51	48	57	43	39
Japan	174	105	86	82	81	66	61	66	53	49
Coastal China	150	101	88	82	78	67	61	64	54	49

WEO2024 の炭素価格の想定は表 6.1.1-3 の通りとなっている。

表 6.1.1-3 炭素価格の想定

Table B.2 ▷ CO_2 prices for electricity, industry and energy production in selected regions by scenario

USD (2023, MER) per tonne of CO_2	2030	2035	2040	2050
Stated Policies Scenario				
Canada	126	126	126	126
Chile and Colombia	21	24	28	28
China	39	43	46	52
European Union	140	145	149	158
Korea	56	65	73	89
Announced Pledges Scenario				
Advanced economies with net zero emissions pledges*	135	160	175	200
Selected emerging market and developing economies with net zero emissions pledges**	40	65	110	160
Other emerging market and developing economies	-	6	17	47
Net Zero Emissions by 2050 Scenario				
Advanced economies with net zero emissions pledges*	140	180	205	250
Selected emerging market and developing economies with net zero emissions pledges**	90	125	160	200
Selected emerging market and developing economies without net zero emissions pledges	25	50	85	180
Other emerging market and developing economies	15	25	35	55

*メキシコを除くすべての OECD 諸国を含む。
**中国、インド、インドネシア、ブラジル、南アフリカを含む。

(2) WEO2024 の一次エネルギー供給

WEO2024 の有料データベースに記載された各種エネルギー関連指標の世界合計値について、3 つのシナリオを比較分析した結果を示す。

一次エネルギー供給の比較を図 6.1.1-3 に示す。STEPS では再エネの増加が顕著ながら、化石燃料（石炭、石油、ガス）の合計は 2050 年までほぼ維持される。NZE では再エネが激増する一方で、化石燃料が激減する。

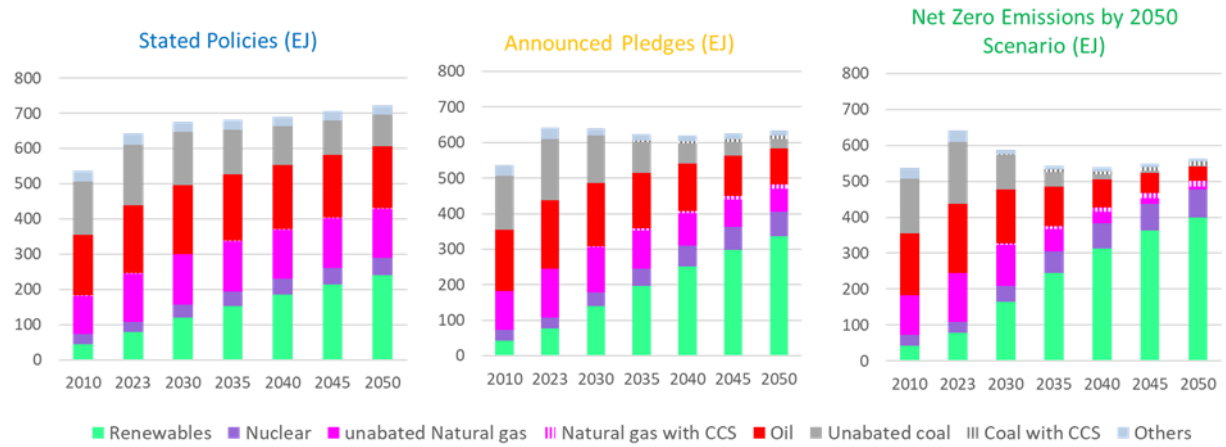


図 6.1.1-3 シナリオ別一次エネルギー供給

2050 年断面の燃料別一次エネルギー供給とその燃料構成をシナリオ間で比較すると図 6.1.1-4 の通りである。2050 年の NZE の一次エネルギー供給は STEPS の 78%（左図）であり、大きな差がある。2050 年の再エネの比率は STEPS では 33%、NZE では 71%と STEPS の倍以上である。化石燃料の比率は STEPS では 56%（うち CCUS 付き 0.4%）、NZE では 14%（うち CCUS 付き 5%）となっている。（右図）

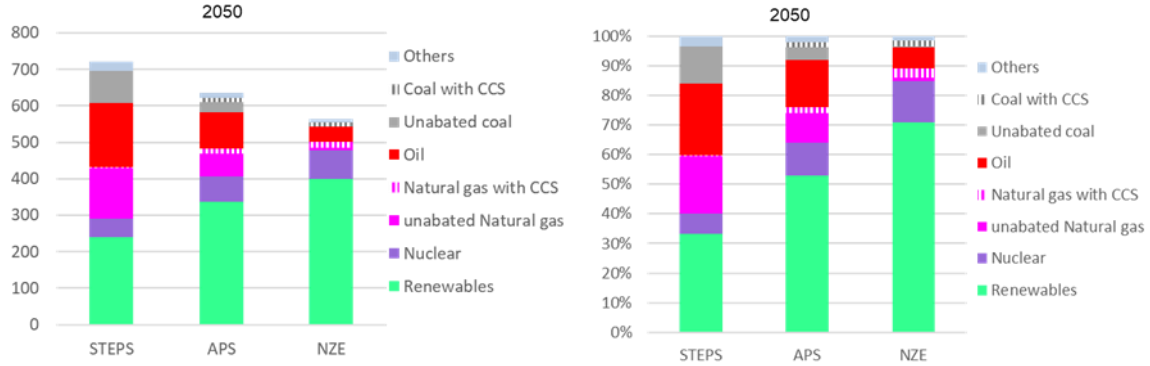


図 6.1.1-4 2050 年におけるシナリオ別一次エネルギー供給（左）と燃料構成（右）

主な非化石燃料と削減対策なし化石燃料についてのシナリオ別の供給量を図 6.1.1-5 に示す。

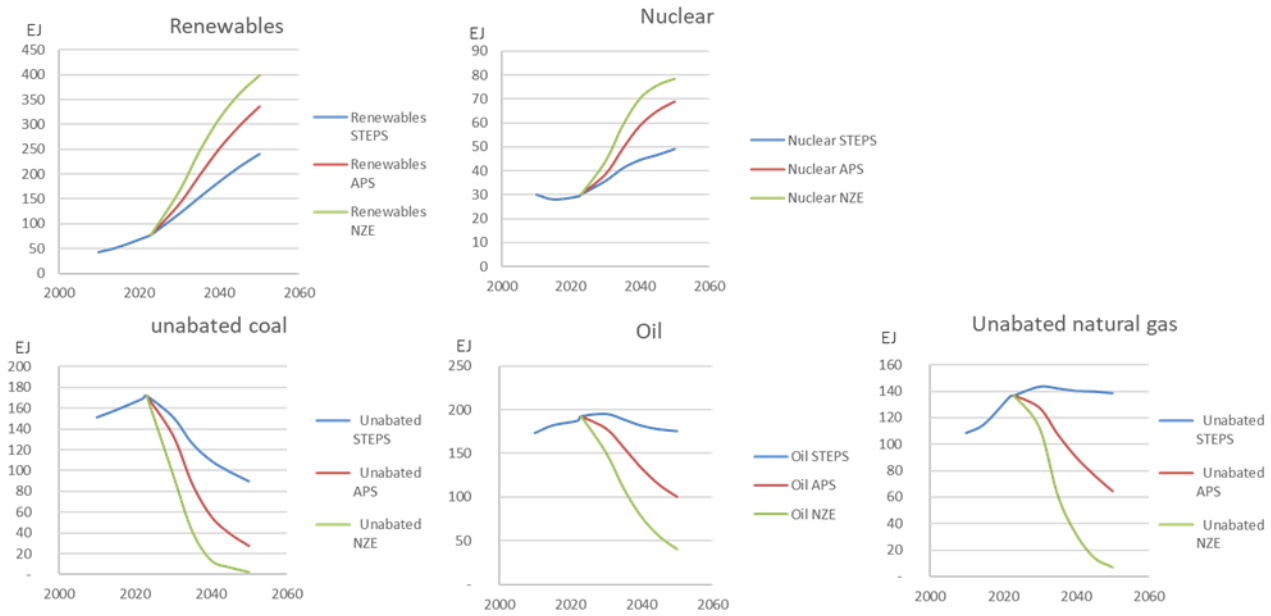


図 6.1.1-5　燃料別のシナリオ別供給量変化（上段：非化石、下段：化石燃料）

上段の再生可能エネルギー、原子力については、全てのシナリオで増加しているが、その増加率は原子力＜再生可能エネルギーである。下段の削減対策なしの石炭、石油、ガスの比較では、石炭はいずれのシナリオでも減少していく一方で、STEPS で石油と天然ガスは 2030 年には現状より増加、それ以降は減少に転じる。石油、天然ガス共に APS と NZE では今後減少していく。また、NZE では削減対策なし石炭は 2040 年代にゼロになる一方で、削減対策なし石油と天然ガスは 2050 年にも残ることが示されている。

CCUS 付きの石炭および天然ガスについて見ると、図 6.1.1-6 の通りである。CCUS 付き石炭は NZE では早期に導入が始まり、2035 年までは増加ペースが大きいが、2035 年以降はそのペースが鈍化し、2050 年には NZE より遅く導入されるが増加ペースが速い APS とほぼ等量となる。一方 CCUS 付きガスは増加ペースは STEPS<<APS<NZE と異なるが、一定のペースで増加し続ける。

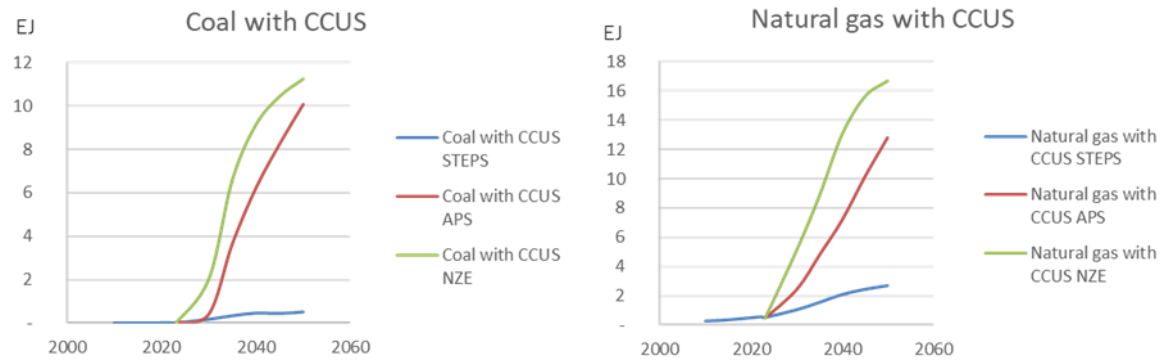


図 6.1.1-6　CCUS 付き石炭（左）とガス（右）のシナリオ別供給量変化

(3) WEO2024 の最終エネルギー消費と発電電力量

次に、WEO2024 の最終エネルギー消費を利用エネルギー別、部門別の順に、最後に主要な利用エネルギーである電気の発電電力量について見ていく。

① 利用エネルギー別最終エネルギー消費

2010 年から 2050 年までのシナリオ別の利用エネルギー別 TFC を図 6.1.1-7 に示す。STEPS では需要が増加して行くのと同じペースで電気が増加し、それ以外の燃料構成はほぼ変わらないように見えるのと比較して、NZE では今後エネルギー消費は低下し、化石燃料が大幅に減少していく一方で電気が大きく増加する。また、NZE では水素が目に見えるレベルで増加している。

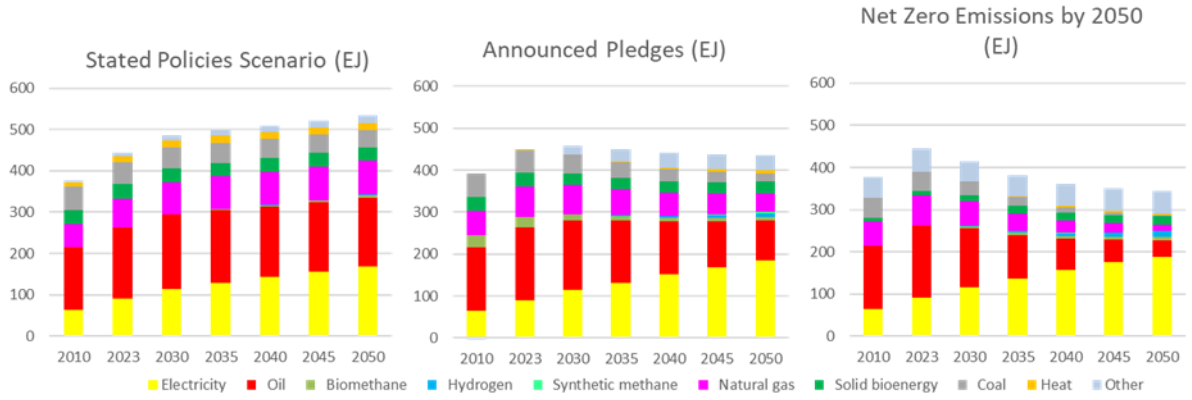


図 6.1.1-7 シナリオ別の利用エネルギー別 TFC

2050 年断面のシナリオ別 TFC の比較（左）と TFC 構成比較（右）を図 6.1.1-8 に示す。2050 年において、NZE の最終エネルギー消費量は STEPS の 65%であり、一次エネルギー供給における NZE の割合が 78%であったのに比べて更に小さい。これは、二次エネルギー、三次エネルギーの利用量と共にエネルギー損失が増加していることに起因すると考えられる。右図の構成割合から、電気の比率は STEPS では 32%、NZE では 55%であり、NZE では電化が進んでいる。一方で、化石燃料の比率は STEPS では 58%、NZE では 18%と大きな差がある。

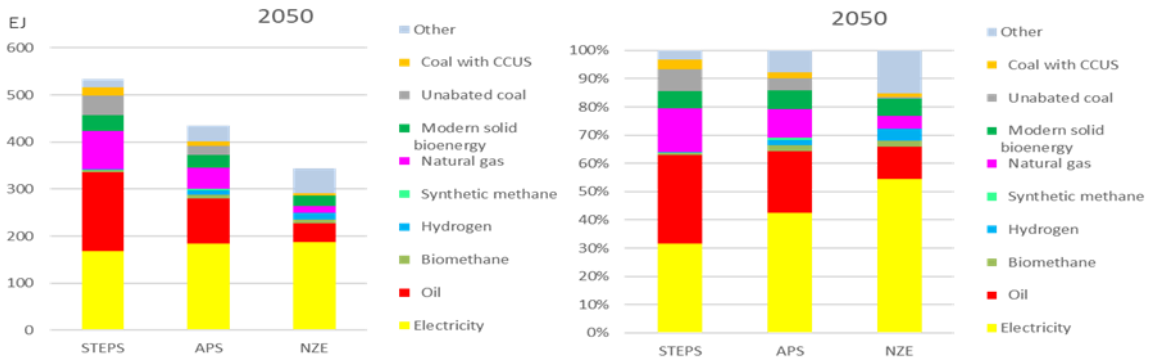


図 6.1.1-8 2050 年のシナリオ別 TFC（利用エネルギー別）とその構成

② 部門別最終エネルギー消費

2010 年から 2050 年までのシナリオ別の部門別 TFC を図 6.1.1-9 に示す。STEPS では全ての部門でエネルギー消費が増加するが、NZE では産業は漸減、運輸と民生は大きく減少している。

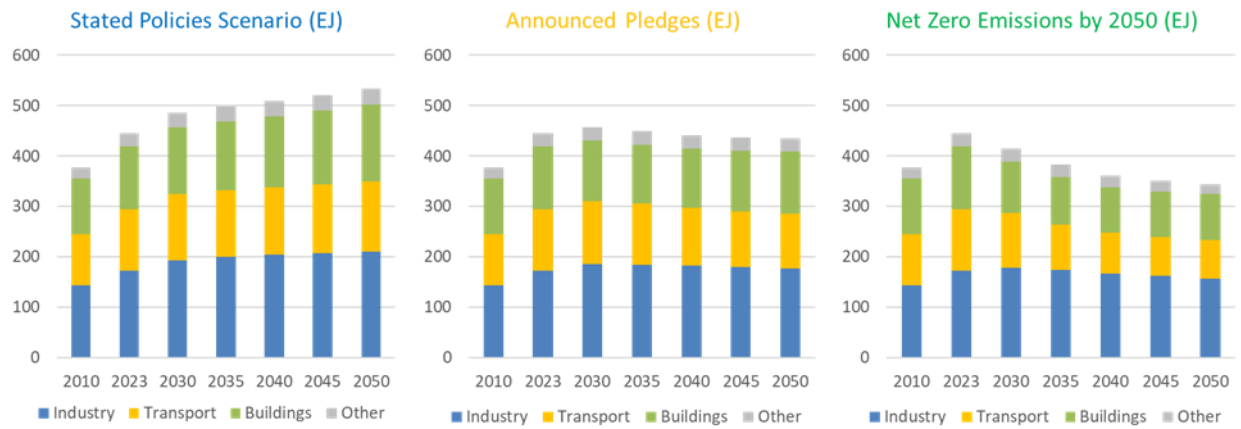


図 6.1.1-9 シナリオ別の部門別最終エネルギー消費

部門別のシナリオ別 TFC の変化を図 6.1.1-10 に示す。産業のシナリオ間ギャップが最も狭く、NZE においても連続的な変化をしている。運輸はシナリオ間ギャップが最も大きい。NZE は、2010～2020 年の間の増加分（コロナ禍の影響を含む）を 2022～2030 年の間に打ち消すペースで低下している。民生もシナリオ間ギャップは大きく、NZE ではコロナ禍でも減少しなかったエネルギー消費が 2022～2030 年で大きく低下しており、部門間で見ても、最も急激な低減ペースが想定されている。

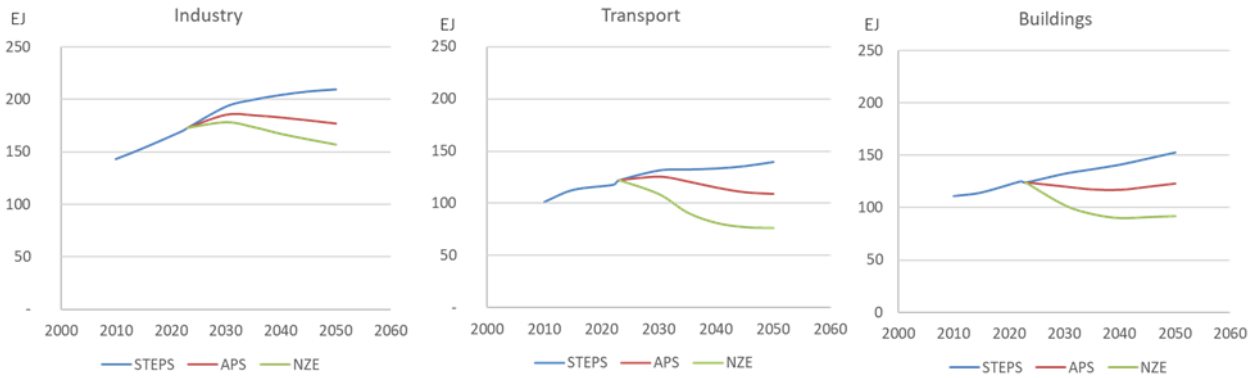


図 6.1.1-10 部門別のシナリオ別 TFC の変化

民生の NZE における TFC は 2023 年の合計 124EJ から 2030 年には合計 103EJ に大きく低下している。その要因を探るために、利用エネルギー別の 2023 年から 2030 年の変化を見ると、traditional biomass が 19EJ からゼロに、化石燃料が合計で 14EJ 低下している一方で、電気、バイオメタン、モダンバイオマスの利用が合計で 10EJ 増加していることが確認された。即ち、NZE の民生部門の想定は、traditional biomass を利用

している貧困層が電気、バイオメタン、モダンバイオマスなど高価なエネルギーを利用できるようになることを前提としており、更に、非常に急激な省エネ技術の進化、行動変容によるエネルギー節減を前提としていることを意味する。いずれも 2030 年までの 6 年間での実現は困難である。

③　発電電力量

2010～2050 年のシナリオ別の電源別発電電力量を図 6.1.1-11 に示す。WEO2024 の電源区分は凡例の通りで、火力発電については燃料別ではなく「削減対策なしの化石燃料」、「CCUS 付きの化石燃料」の 2 つに区分されている。発電電力量は全てのシナリオで増加するが、その増加ペースは STEPS＜APS＜NZE である。STEPS では太陽光、風力が増加し、削減対策なしの化石燃料は漸減する。NZE では太陽光と風力は激増する一方で、削減対策なしの化石燃料は 2040 年にはかなり抑制され、2050 年にはほぼゼロになっている。

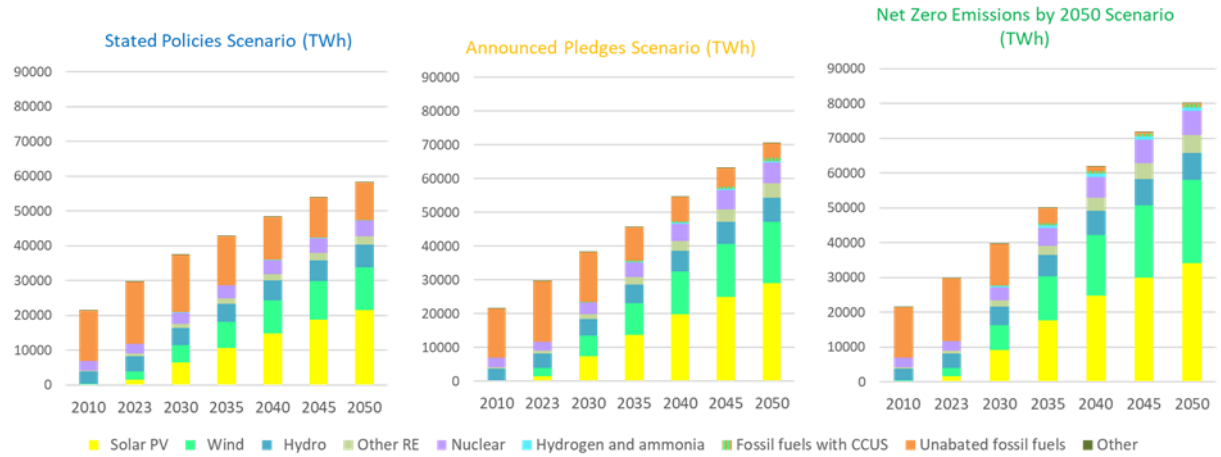


図　6.1.1-11　シナリオ別の電源別発電電力量

図 6.1.1-12 に 2050 年のシナリオ別電源別発電電力量（左）とその構成（右）を示す。発電電力量は STEPS で 2050 年に 58,000TWh、NZE では 80,000TWh と STEPS より 40%大きい。2050 年の太陽光＋風力比率は STEPS で 58%、NZE では 72%、再エネ比率は STEPS で 73%、NZE で 88%である。一方で、2050 年の削減対策なし化石燃料（火力発電）の比率は STEPS で 19%、NZE で 0.3%となっている。

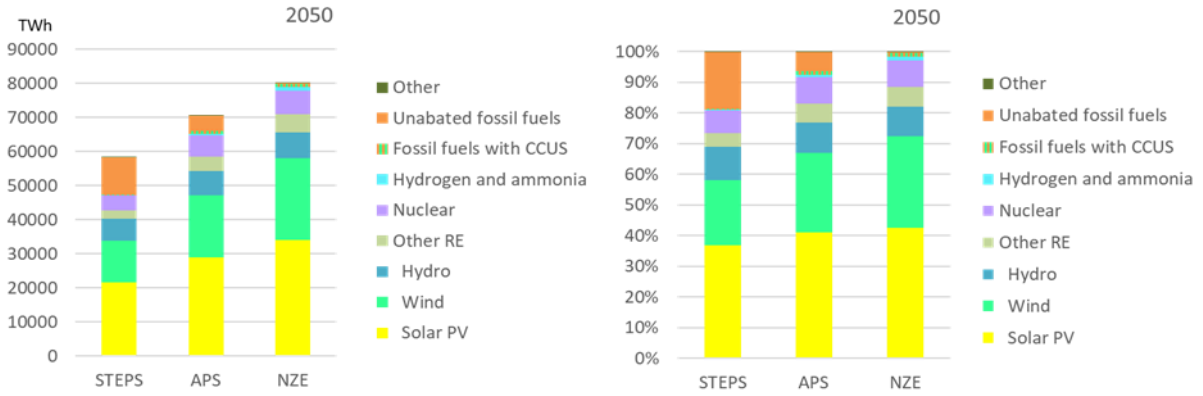


図 6.1.1-12　2050 年のシナリオ別の電源別発電電力量とその構成

太陽光と風力という変動性再生可能エネルギー電源の割合が高まると、当然ながら調整力ニーズも増加する。WEO2024 では、STEPS と APS の調整力ニーズを評価して、供給ソースが図 6.1.1-13 のように示されている（NZE については記載がない）。

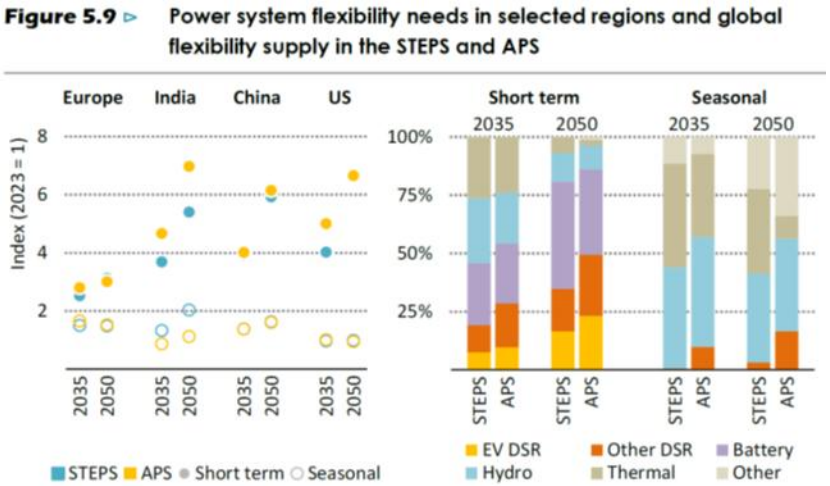


図 6.1.1-13　STEPS と APS における電力システムの調整力ニーズと調整力供給

変動性再エネ増加に伴って短期的な調整力ニーズが 2～7 倍に増加し、調整力供給の大半はバッテリーと DSR が担い、APS では、DSR のうち EV による DSR が 2035 年には 3 割、2050 年には半分を占める、としている。これは、EV の大量導入という展望とは整合が取れているように見えるが、「EV の導入」と「EV の電力系統連系」ではコスト、技術、制度（法整備が必要）の全ての面で全く異なることから、実現性には大きな不確実性がある。

(4) WEO2024 の CO_2 排出量と CO_2 回収・除去

2010～2050 年のシナリオ別の部門別 CO_2 排出量、回収量、除去量を図 6.1.1-14 に示す。STEPS ではエネルギー供給部門からの排出量は低下するが、最終消費部門からの排出量は変わらない。NZE ではエネルギー供給部門からの排出量が急減して 2040

年にはゼロになるが、産業、運輸部門からの排出量の低下は遅く、2040 年以降に大きく低下する。

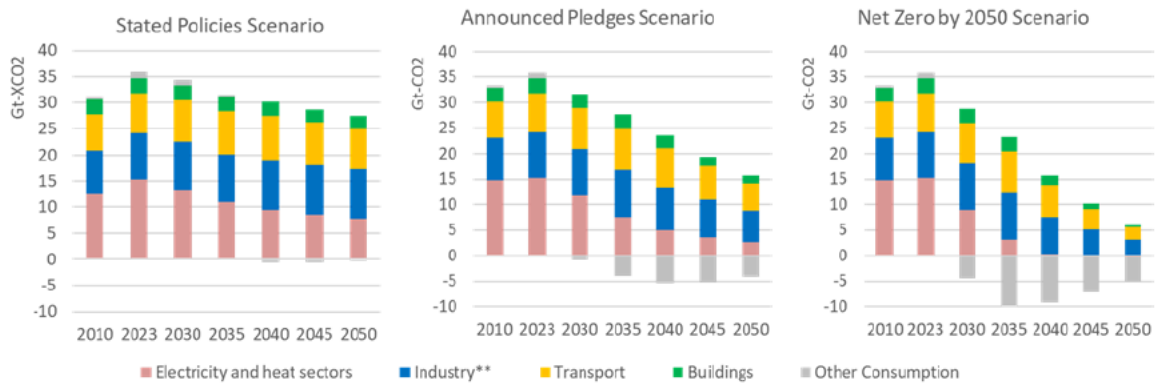


図 6.1.1-14　シナリオ別部門別 CO_2 排出量

2050 年のシナリオ別燃料別 CO_2 排出量を**図 6.1.1-15** に示す。2050 年のネット CO_2 排出量は STEPS で 27Gt、APS で 12Gt、NZE でゼロである。STEPS、APS とも石油からの排出が最大である。2050 年の除去量は STEPS で 0.05Gt、APS で 0.8Gt、NZE で 1.8Gt となっている。2050 年の回収量は STEPS で 0.4Gt、APS で 3.7Gt、NZE で 5.9Gt である。

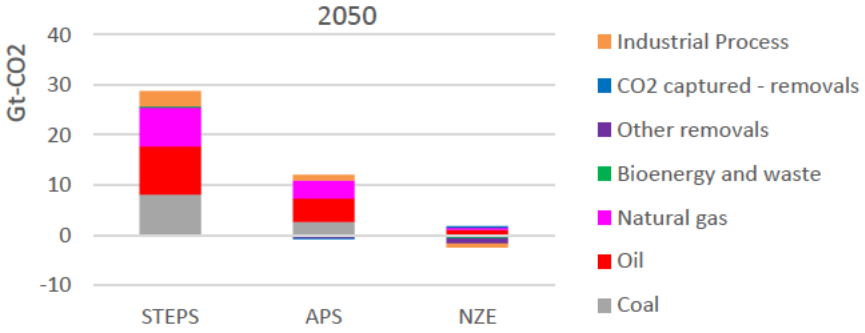


図 6.1.1-15　2050 年のシナリオ別燃料別 CO_2 排出量

表 6.1.1-4 に AnnexA に示されている CO_2 排出量、回収量、吸収・除去量を示す。表にはオリジナルの表を簡略化し、①Total CO_2、②Combustion activities、③Other removals、④Total CO_2 removals、⑤Total CO_2 captured のみを示す。①はネットの CO_2 排出量であり、産業プロセス、フレア排出が含まれる。①－（②－③）=産業プロセス、フレア排出量、③は④の内数、④は⑤（CO_2 除去以外の通常の CCS を含む CO_2 回収量）の内数である。図 6.1.1-15 は、これに基づいてグラフ化したものである。

表 6.1.1-4　AnnexA の NZE の CO_2 emissions（Table A.4c より抜粋）

					Net Zero Emissions by 2050 (Mt CO_2)			
		2010	2022	2023	2030	2035	2040	2050
①	Total CO_2*	32 805	37 230	37 723	25 112	13 485	6 221	-
②	Combustion activities (+)	30 566	34 290	34 789	23 082	12 143	5 678	777
	Coal	13 840	15 285	15 667	8 590	3 587	1 086	158
	Oil	10 479	11 219	11 334	8 149	5 334	3 208	878
	Natural gas	6 062	7 516	7 520	6 232	3 417	1 811	391
	Bioenergy and waste	186	270	267	111	- 195	- 428	- 650
③	Other removals** (-)	-	1	1	182	361	586	1 069
	Biofuels production	-	1	1	114	191	264	289
	Direct air capture	-	-	0	68	170	322	780
④	Total CO_2 removals**	-	1	1	243	671	1 110	1 797
⑤	Total CO_2 captured**	16	43	40	1 023	2 540	4 001	5 924

*Includes industrial process and flaring emissions.

**Includes industrial process emissions.

(5) WEO2024 の描く日本

有料データベースに掲載されている日本の STEPS と APS のデータから、WEO2024 が描く日本の 2050 年までのエネルギー需給の姿と、2050 年カーボンニュートラル達成と整合するように 2040 年の目標を定めた第 7 次エネルギー基本計画と APS の比較を行った結果を示す。

① WEO2024 の日本の STEPS と APS の姿

WEO2024 有料データに基づいて描いた STEPS と APS の日本の燃料別一次エネルギー供給を図 6.1.1-16 に示す。いずれのシナリオでも日本の一次エネルギー供給は 2050 年に向けて低下していくが、APS の方が低下幅が大きい。いずれのシナリオでも化石燃料が減少していき、再エネが増加していくという傾向は共通であるが、APS の方が化石燃料の減少ペースも再エネの増加ペースも早い。

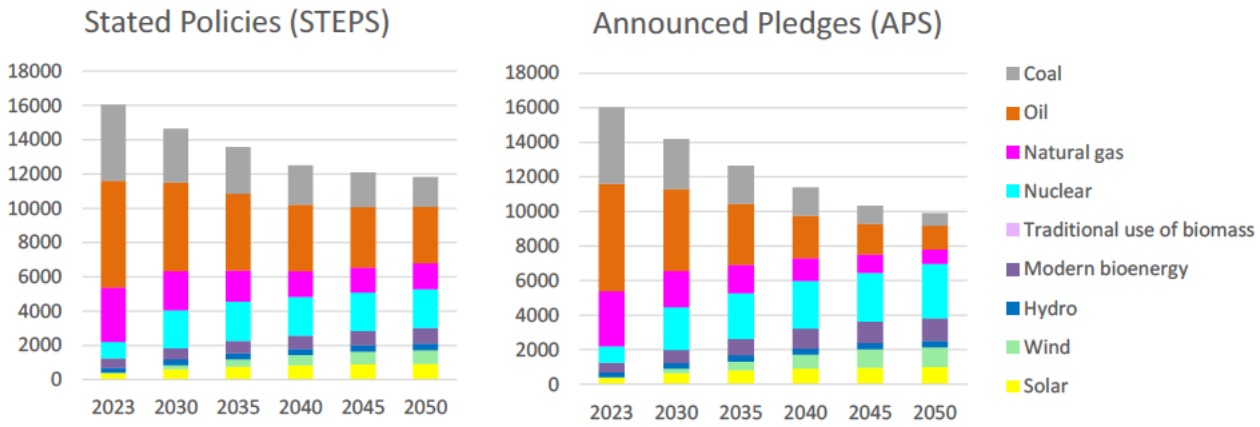


図 6.1.1-16 日本の燃料別 TPES（左：STEPS、右：APS）

次に、日本の STEPS および APS の部門別の最終エネルギー消費を図 6.1.1-17 に示す。双方のシナリオでエネルギー消費量は低下しているが、APS ではより低下量が大きい。全ての部門で STEPS より APS のエネルギー消費量がより大きく低下しているが、産業部門では 2050 年の APS／STEPS は 84%、運輸では同 67%。民生では同 81%と、運輸部門の APS のエネルギー消費が最も強く圧縮されている。

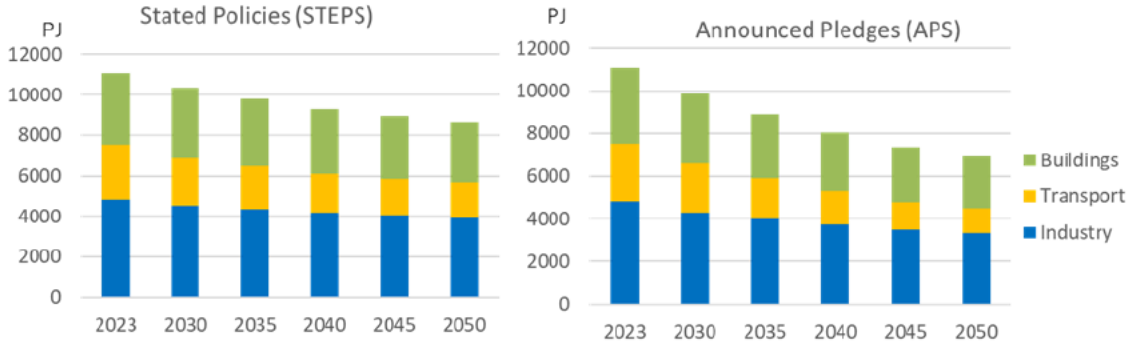


図 6.1.1-17 日本の部門別 TFC（左：STEPS、右：APS）

日本の STEPS と APS における電源構成の変化を図 6.1.1-18 に示す。対策なし化石燃料（Oil+Unabated natural gas+Unabated coal）に着目すると、STEPS では減少しつつも 2050 年に 17%残るのに対して、APS では 2050 年には 0.3%になっている。APS では火力発電を置き換える形で Fossil fuel with CCUS と水素・アンモニアが増加している。2050 年における太陽光＋風力は STEPS で 42%、APS で 43%であるが、STEPS では太陽光>風力なのに対して、APS では風力＞太陽光と逆転している。

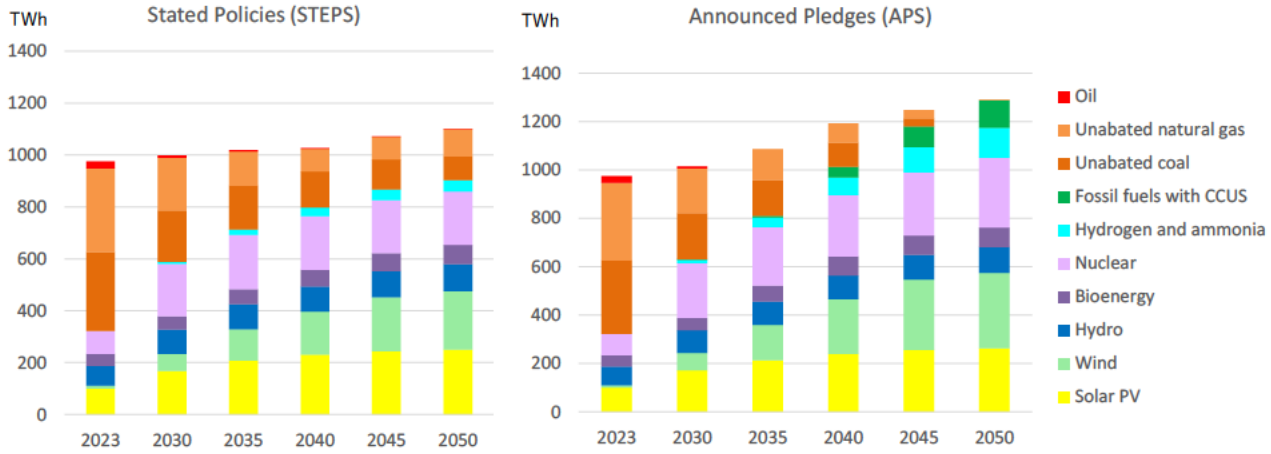


図 6.1.1-18　日本の STEPS と APS の電源構成

図 6.1.1-19 に APS の 2050 年における日本、EU、米国の電源構成を示す。APS では、日本、EU、米国は 2050 年のカーボンニュートラルを想定しており、日本と米国の 2050 年の電力 CO_2 排出係数（右軸）はマイナス、EU はほぼゼロになっている。電力部門がカーボンマイナス／ゼロを達成している 3 つの国・地域の発電電力量の電源構成比較からは、日本には以下のような特徴があることが読み取れる。

太陽光＋風力の割合が 43%で、EU70%、米国 77%と比べて少ない

原子力の割合が 21%で、EU15%、米国 12%に比べて大きい

水素・アンモニアの割合が 9.1%、CCUS 付き火力が 8.4%と合計で 18%、EU（合計で 0.1%）、米国（合計で 2.5%）と比べて大きい

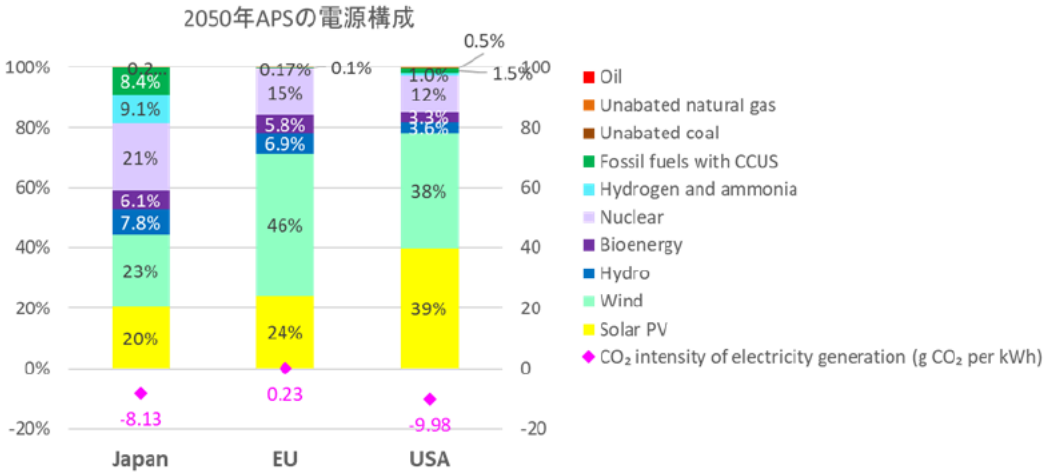


図 6.1.1-19　2050 年 APS の日本、EU、米国の電源構成

② 第 7 次エネルギー基本計画原案と WEO2024 APS の比較

2025 年 2 月に閣議決定された第 7 次エネルギー基本計画（第 7 次エネ基）は、2050 年カーボンニュートラルと整合するように 2040 年の目標を定めたものである。この

2040 年目標と、APS の 2040 年断面を比較することにより、IEA と日本の 2050 年カーボンニュートラルへのアプローチを分析することを試みた。

図 6.1.1-20 に一次エネルギー供給の比較を示す。ここで、日本のエネルギー統計において、化石燃料は高位発熱量を石油キロリットルで表記している一方で、IEA 始め多くの国際統計では、低位発熱量をジュールで表記しているので、WEO2024 の値は高位発熱量の石油キロリットルに換算して比較している。

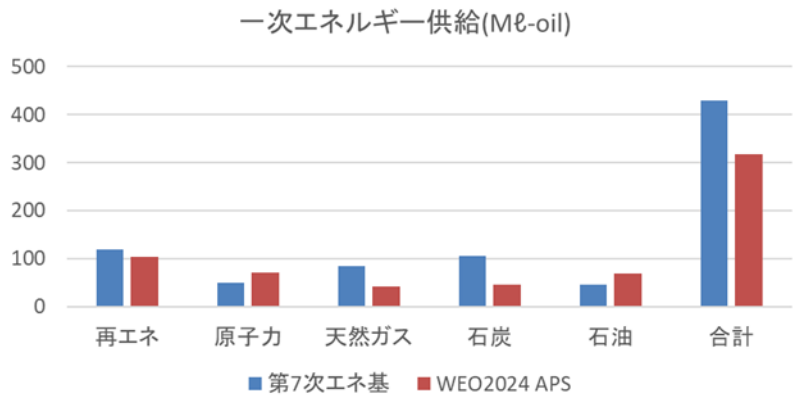


図 6.1.1-20 第 7 次エネ基と WEO2024 APS の一次エネルギー供給（2040 年）

再エネはエネ基＞APS、原子力はエネ基＜APS、天然ガスと石炭は共にエネ基>>APS、石油はエネ基＜APS であり、合計値は天然ガスと石炭の差が効いて、エネ基＞APS となっている。

次に、部門別の最終エネルギー消費について、電力／非電力に分けて比較したものを図 6.1.1-21 に示す。

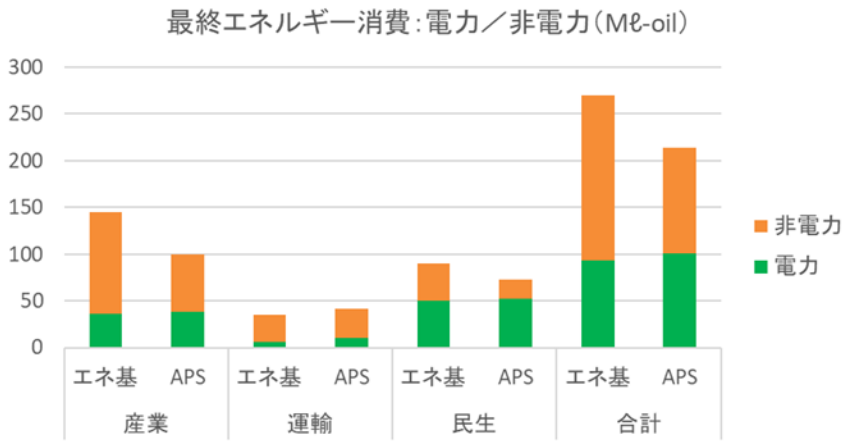


図 6.1.1-21 第 7 次エネ基と WEO2024 APS の最終エネルギー消費（2040 年）

産業、運輸、民生のいずれにおいても、電力の消費量はエネ基と WEO2024APS でほぼ等しく、これは双方とも最大限の電化を想定していることを示唆する。一方で、非電力は産業と民生でエネ基＞WEO となっており、最終エネルギー消費の合計の差、ひいては一次エネルギー供給の差もここに起因すると考えられる。この差については、

WEO2024 では日本の経済成長率を 2023～2050 年で 0.7%と想定しているのに対して、エネ基では 2023～2040 年の経済成長率を 1.5%と倍以上の想定であり、経済成長に伴ってより多くのエネルギー消費を見込んでいるのではないかと考えられる。

次に、発電電力量とその電源構成の比較を表 6.1.1-5 に示す。

表 6.1.1-5　第 7 次エネ基と WEO2024 APS の発電電力量と電源構成（2040 年）

			第7次エネ基 原案		WEO2024 APS	
発電電力量			1,150TWh		1,244TWh	
電源構成	再エネ	太陽光	4-5割	23~29%	54%	19%
		風力		4-8%		18%
		地熱		1-2%		2%
		水力		8-10%		8%
		ﾊﾞｲｵﾏｽ		5-6%		6%
	原子力		2割程度		20%	
	火力	石油	3-4割		24%	0%
		石炭				8%
		LNG				6%
		水素・ｱﾝﾓﾆｱ				6%
		火力＋CCUS				4%

発電電力量は APS とエネ基でほぼ等しい。電源構成については、再エネはエネ基＜APS、（太陽光はエネ基＞APS、風力はエネ基＜＜APS、地熱と水力はエネ基≒APS）、原子力はエネ基＝APS、火力はエネ基＞APS となっている。つまり、APS ではエネ基に比べて、日本の電源の低炭素化がより速いペースで進展すると想定していることがわかる。なお、火力に関しては、エネ基は燃料別の内訳がないため個々の比較はできない。

(6) WEO2021～WEO2024 の比較分析

WEO2021 は、一次エネルギー供給および最終エネルギー消費の内訳の項目を従来の WEO から大幅に変更しているため、それ以前との比較ができない。WEO2021～WEO2024 の 4 つの比較を行った結果を示す。

WEO2021～WEO2024 の STEPS の一次エネルギー供給、最終エネルギー消費、発電電力量、CO_2 排出量の比較を図 6.1.1-22 に示す。一次エネルギー供給、最終エネルギー消費、CO_2 排出量は WEO2021 から毎年低下しており、2050 年値は WEO2021 から WEO2024 にかけて一次エネルギー供給は 3%、最終エネルギー消費は 4%、CO_2 排出量は 16%低下している。その一方で発電電力量は、WEO2021 から毎年増加しており、2050 年値は WEO2021 から WEO2024 にかけて 25%増加している。

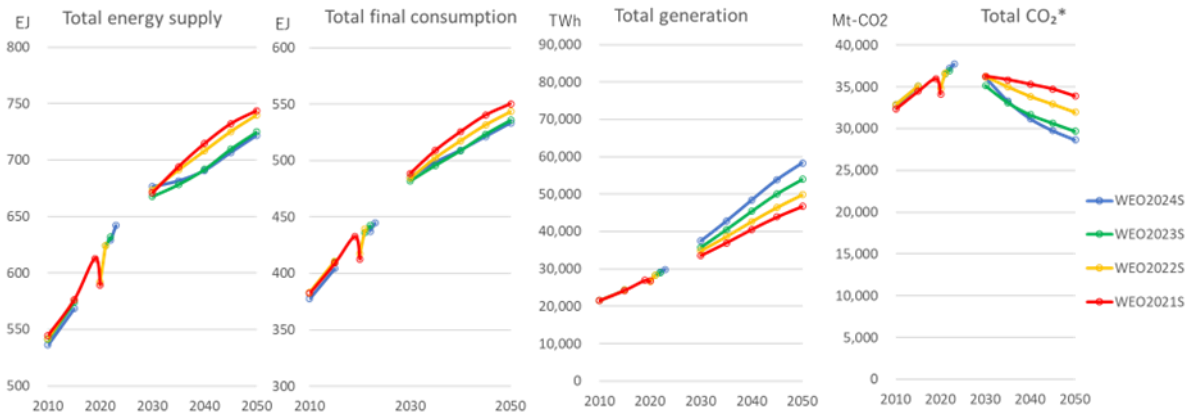


図 6.1.1-22　WEO2021～WEO2024 STEPS の比較
（左から一次エネルギー供給、最終エネルギー消費、発電電力量、CO_2 排出量）

2030 年の CO_2 排出量に着目すると、WEO2021 では最新実績値（2020 年）からの 10 年間で 2.1Gt 増加であったのに対して、WEO2022 では 9 年間で 0.4Gt 減少、WEO2023 では 8 年間で 1.8Gt 減少、WEO2024 では 7 年間で 1.6Gt 減少することになっている。CO_2 排出量はコロナ禍の影響で 2020 には一度低下したが、翌年から再び増加に転じているという実態を鑑みても、2030 年までにより短い期間でより大きく削減するという STEPS は、本当に forecast 型シナリオなのか疑問が生じる。

① STEPS 世界合計値の比較分析：一次エネルギー供給

WEO2021～WEO2024 の STEPS の化石燃料別の比較を図 6.1.1-23 に示す。

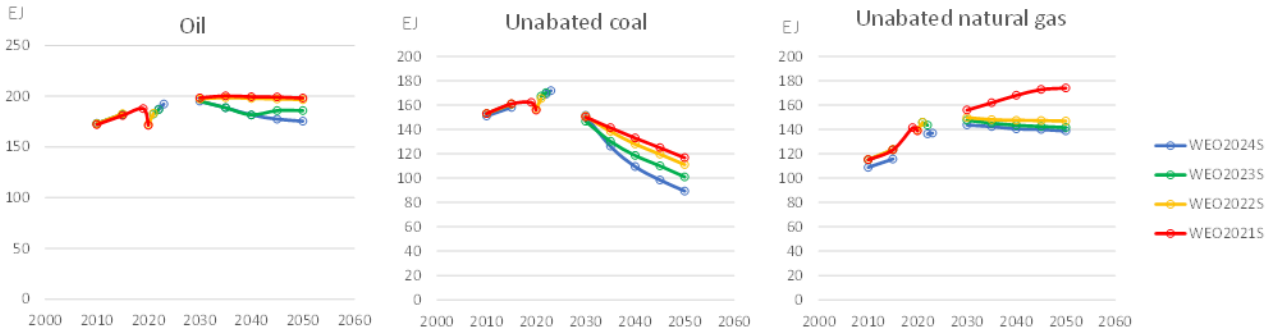


図 6.1.1-23　WEO2021～WEO2024 STEPS 一次エネルギー供給量の比較
（左：石油、中：石炭、右：天然ガス）

WEO2021 から毎年低下している傾向は石油、天然ガス、石炭で共通している。石油は、WEO2023 で「2030 年より前にピークを迎える」とされて話題を呼んだが、WEO2024 でも IEA はその主張を維持している。ただし、有料データでは 2023 年と 2030 年の間の数値がないため、ピークが何年にどれだけなのかは確認できない。石炭は、単調減少という傾向を保ったまま年々その減少ペースが大きくなっている。天然ガスは、

WEO2021 では 2050 年まで需要増加であったのが、WEO2022 で 2030 年以降漸減に変化して、それ以降年々僅かに低下している。

② STEPS 世界合計値の比較分析：最終エネルギー消費と CO_2 排出量

部門別の最終エネルギー消費と CO_2 排出量の WEO の発行年における変化に注目した比較を図 6.1.1-24、図 6.1.1-25 にそれぞれ示す。



図 6.1.1-24 WEO2021～WEO2024 STEPS 部門別の最終エネルギー消費
（左：産業、中：運輸、右：民生）

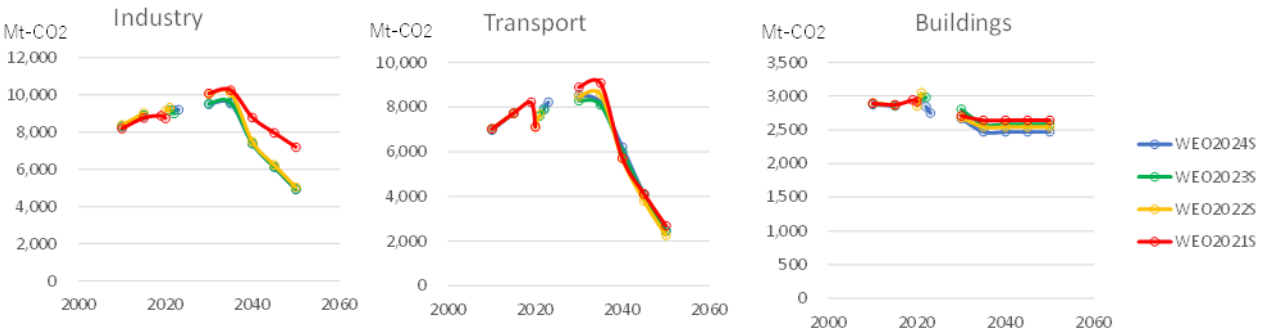


図 6.1.1-25 WEO2021～WEO2024 STEPS 部門別の CO_2 排出量
（左：産業、中：運輸、右：民生）

WEO2021 から WEO2024 にかけて、産業と民生ではエネルギー消費量が変化していないのに、CO_2 排出量が大きく低下しており、一方で、運輸では目に見えてエネルギー消費量が低下しているのに CO_2 排出量は変化していない。その原因を探るべく、部門別の電化率（最終エネルギー消費に占める電気の割合）を計算した結果が図 6.1.1-26 である。また、AnnexA に示されている STEPS の部門別の主な指標の成長率を表 6.1.1-6 に示す。

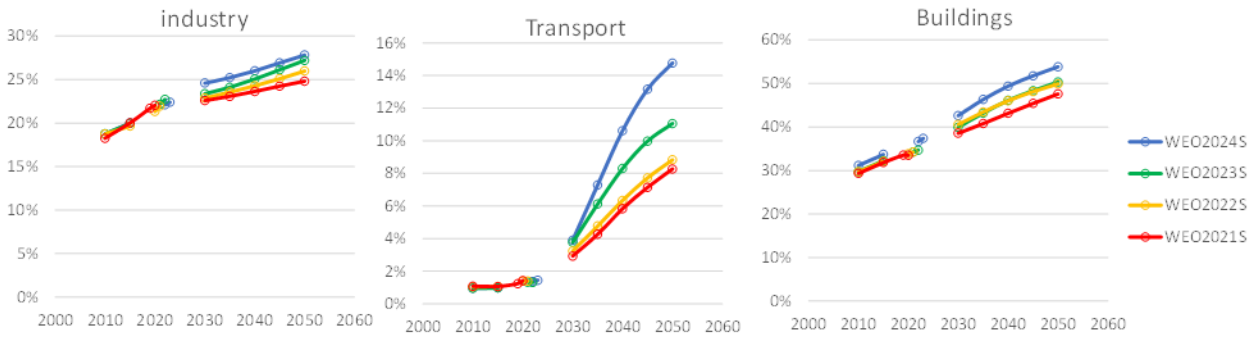


図 6.1.1-26　WEO2021～WEO2024 STEP 部門別の電化率
（左：産業、中：運輸、右：民生）

表 6.1.1-6　STEPS の部門別の主な指標の 2050 年までの想定成長率

	年平均成長率 (%) 2023-2025
Industrial production (Mt)	
Primary chemicals	1.1
Steel	0.9
Cement	0.6
Aluminium	1.6
Transport	
Passenger cars (billion pkm)	2.5
Heavy-duty trucks (billion tkm)	2.7
Aviation (billion pkm)	3.7
Shipping (billion tkm)	1.2
Buildings	
Households (million)	1.1
Residential floor area (million m^2)	1.6
Services floor area (million m^2)	1.5

電化率からは、全ての部門で毎年増加していること、特に運輸部門ではその増加割合が大きいことが確認された。

産業部門における指標では、鉄、セメント、化学の生産量の成長率はいずれも低い。この化石燃料依存度の高い 3 業種の生産量増加の停滞と、アルミニウムの生産量増加に伴う電力消費量増加（および、記載はないが軽産業の電化促進）により、電化率が上昇し、産業全体のエネルギー消費量を維持しつつ CO_2 排出量を低下させている、という因果関係が確認された。

運輸部門では道路、航空で輸送量が大きく成長すると想定されているが、電化率を大きく増加させることで（内燃機関→電動モーターによる大幅な効率向上が）エネルギー消費量を低下させ、CO_2 排出量を維持している、という因果関係が確認された。

民生では、電化率を毎年増加させることで建物を増加させながらもエネルギー消費を維持しつつ、CO_2 排出量を毎年低下させている、ということが確認できた。

③　STEPS 世界合計値の比較分析：発電電力量と電力 CO_2 排出係数、電化率

太陽光、風力、削減対策なし化石燃料（火力発電）の発電電力量の比較を図 6.1.1-27 に示す。

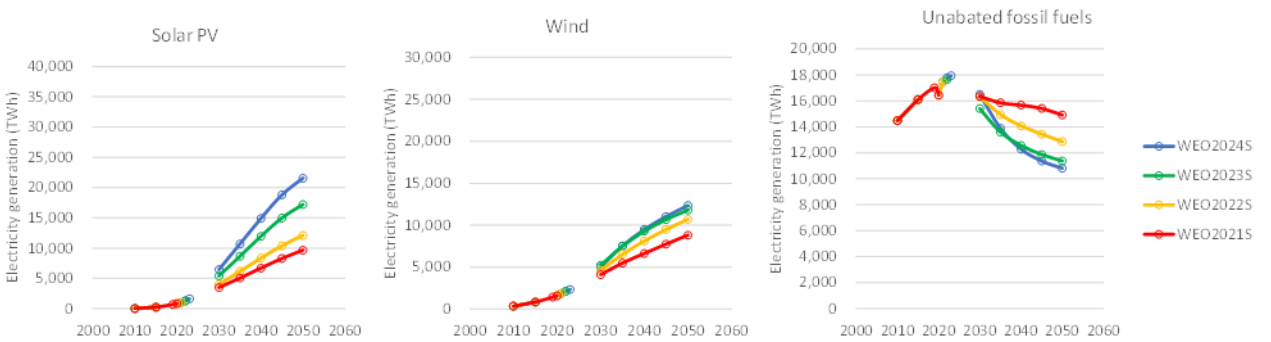


図 6.1.1-27　WEO2021～WEO2024 STEPS の比較
（左：太陽光、中：風力、右：対策なし火力発電）

太陽光発電と風力発電は WEO2021 から WEO2024 にかけて毎年増加している一方で、対策なし火力発電は毎年減少している。発電電力量と CO_2 排出量から算定した WEO2021～WEO2024 STEPS の電力 CO_2 排出係数の比較を図 6.1.1-28 に示す。

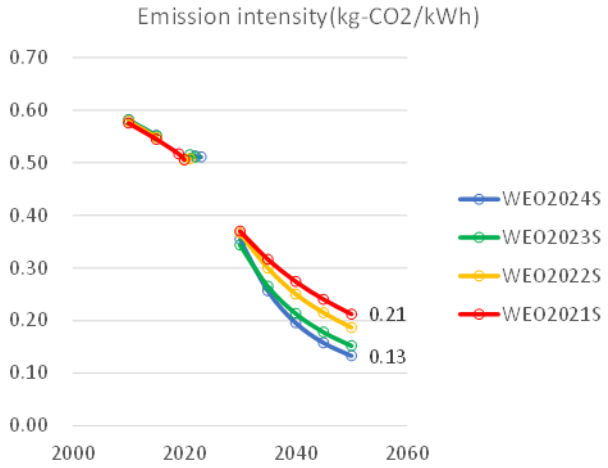


図 6.1.1-28　WEO2021～WEO2024 STEPS の電力 CO_2 排出係数の比較

排出係数は WEO2021 から WEO2024 にかけて年々低下しており、2050 年断面では WEO2021 から WEO2024 にかけて 37%の大幅な低下となっている。これは、図 6.1.1-27 で示したように太陽光および風力の増加と対策なし火力発電の減少の結果である。

次に最終エネルギー消費における電力の割合（電化率）の変化を示す。

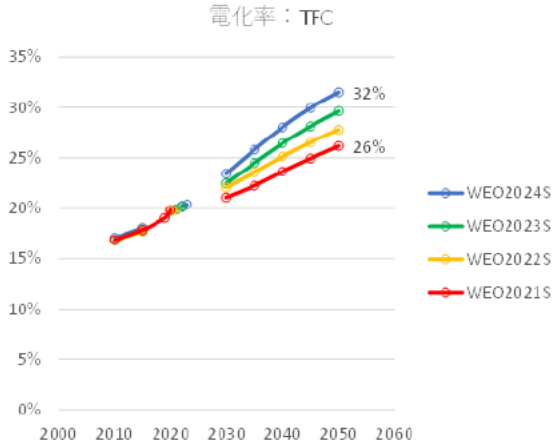


図 6.1.1-29　WEO2021～WEO2024 STEPS の最終エネルギー消費電化率の比較

最終エネルギー消費の電化率は毎年引き上げられており、2050 年断面では WEO2024 には 32%、WEO2021 から 6 ポイント、相対的に 23%の大幅な増加となっている。このような電力の CO_2 排出係数の大幅な低下と、電化率の大幅な上昇が、図 6.1.1-22 に示した CO_2 排出低下をもたらす要因となっていることが確認された。

④　中国に注目した分析

図 6.1.1-22 では、STEPS において、発電電力量が増加している中で、一次エネルギー供給、最終エネルギー消費および CO_2 排出量が低下していることが示されている。そこで、STEPS の CO_2 排出量を地域別に確認する。WEO では、表 6.1.1-1 に示した通り 7 つの地域（北米、中南米、欧州、アフリカ、中東、ユーラシア、アジア太平洋）に区分しているが、アジア太平洋は多くの指標で世界の約半分を占めるため、ここから中国とインドを抜き出して、9 つの国・地域に区分したものが図 6.1.1-30 である。

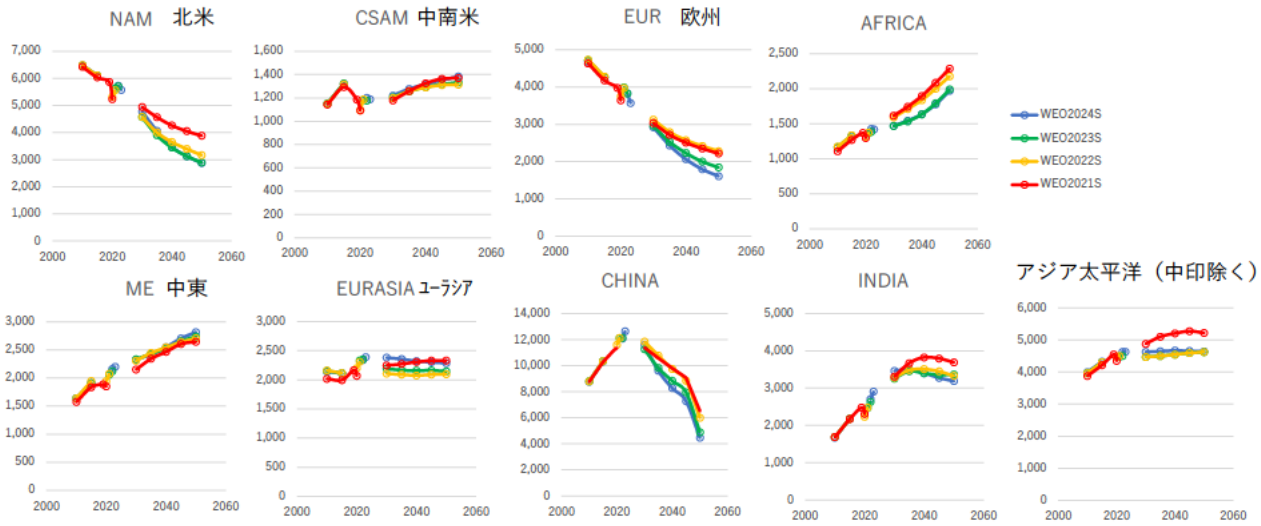


図 6.1.1-30　国・地域別の STEPS の CO_2 排出量（WEO2021～WEO2024）

9 つの国・地域における CO_2 排出量の変化を見ると、世界最大の排出国である中国だけが過去の実績が増加しているのに対して、シナリオでは 2030 年以降低下していて、「折れ曲がって」見えるほどであり、他の地域と比べても特異である。そこで、中国の一次エネルギー供給とそのうちの再エネ、石油、石炭、天然ガスについて確認した結果を図 6.1.1-31 に示す。

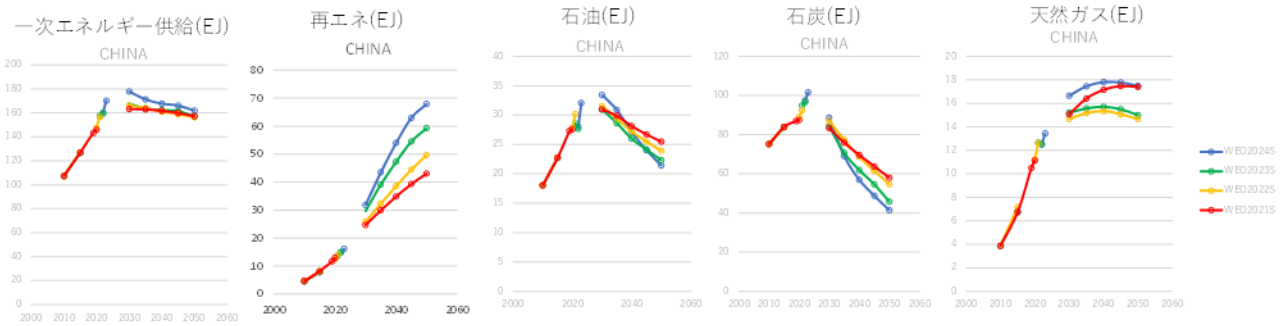


図 6.1.1-31　中国の STEPS の一次エネルギー供給
（左から合計、再エネ、石油、石炭、天然ガス）

一次エネルギー供給はこれまで増加の一途であったのが、STEPS では 2030 年以降緩やかに低下している。その内訳を見ると、再エネは大きく増加して毎年上方に引き上げられているのに対して、石油と石炭はこれまで増加してきた実績から 2030 年以降急減となっていることが確認できた。このような STEPS における中国の石油、石炭供給の激減が中国の CO_2 排出量激減の要因であり、ひいては世界の CO_2 排出量の低下に寄与していると考えられる。

⑤　NZE の比較分析

WEO2021～WEO2024 の NZE の一次エネルギー供給、最終エネルギー消費、発電電力量、CO_2 排出量の比較を図 6.1.1-32 に示す。

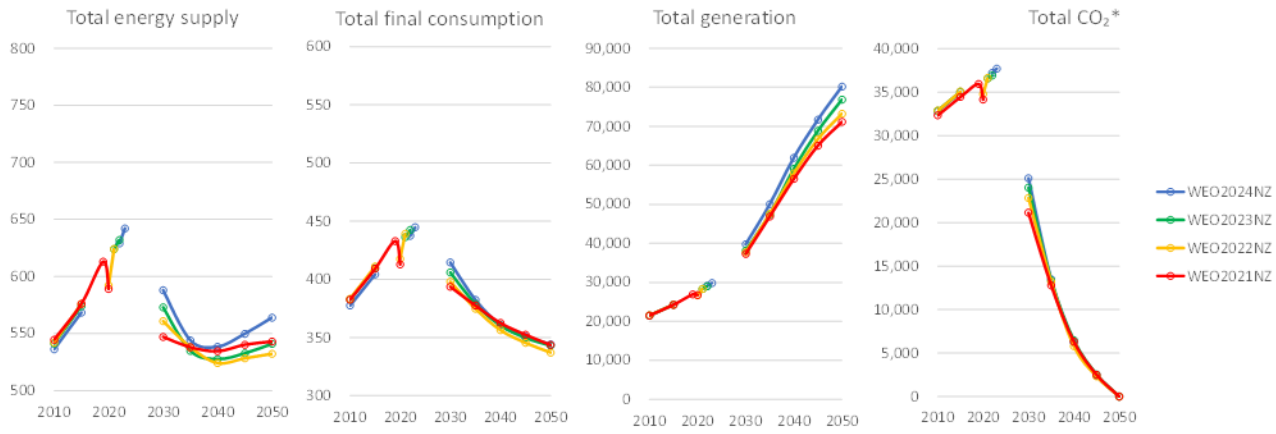


図 6.1.1-32 WEO2021～WEO2024 NZE の比較
（左から一次エネルギー供給、最終エネルギー消費、発電電力量、CO_2 排出量）

全体的な変化に着目すると、WEO2021～WEO2024 にかけて、最終エネルギー消費、CO_2 排出は大きく変化してない。一方で、一次エネルギー供給は不規則な変化をしている。発電電力量は WEO2021＜WEO2022＜WEO2023＜WEO2024 という傾向で、STEPS と同様である。しかし、2030 年値に着目すると、全てにおいて毎年上方に引き上げられており、これは足元の値が毎年増加していることを反映して着地点を引き上げていると考えられる。しかし、2030 年値が引き上げられることで、その後の最終エネルギー消費、CO_2 排出量の低下の斜度はより大きくなり、実現性がより厳しくなっていることを示している。

(7) WEO2024 に対する課題意識

STEPS において、発電電力量が増加している中で、一次エネルギー供給、最終エネルギー消費および CO_2 排出量が低下している要因については、(6)④項で中国の CO_2 排出量の激減が寄与していることを示した。ここに 2 つの疑問が生じる。一つは、STEPS の定義（(1)項に記載）では、現行の政策のうち裏付けがある場合に限って STEPS に反映させているとあることと整合しているのか、という点である。確かに中国は NDC で 2030 年に CO_2 排出量をピークアウトするとしているが、石油、石炭の激減を裏付ける現行政策が着実に実行されているのか、というと甚だ疑問である。もう一つは、forecast 型だと説明されている STEPS において、このような激変が最適化計算により導かれるのか、という点である。石油と石炭を急激なペースで再エネに置き換えていくには、コストの激変が必要であるが、STEPS における中国の炭素価格は表 6.1.1-3 に示した通り低いレベルで変化すると想定されており、化石燃料調達費用に大きな変化はないと考えられる。一方で、再エネのコストについては、発電部門のコストを LCOE で確認することができる。

表 6.1.1-7　STEPS の中国の LCOE

	Capital costs (USD/kW)			Capacity factor (%)			Fuel, CO_2, O&M (USD/MWh)			LCOE (USD/MWh)			VALCOE (USD/MWh)		
	2023	2030	2050	2023	2030	2050	2023	2030	2050	2023	2030	2050	2023	2030	2050
China															
Nuclear	2 800	2 800	2 500	80	70	70	30	30	30	75	80	75	75	80	75
Coal	800	800	800	55	35	15	55	50	50	70	80	120	70	70	90
Gas CCGT	560	560	560	30	20	15	80	70	75	100	105	115	85	70	60
Solar PV	670	410	280	13	13	13	10	10	10	50	30	25	70	70	70
Wind onshore	990	940	900	24	25	26	10	10	10	45	40	40	55	50	55
Wind offshore	2 380	1 720	1 260	32	37	40	20	15	10	90	60	40	95	60	40
Electricity generation costs										80	80	65			

STEPS では VALCOE を用いて最適化計算をしていると考えられるが、石炭と太陽光の VALCOE は 2030 年で同額に、2050 年では太陽光が石炭より安価になっている。

WEO2024 の STEPS における主要な国・地域の再エネ電力比率と、中国の発電電力量の電源構成を図 6.1.1-33 に示す。

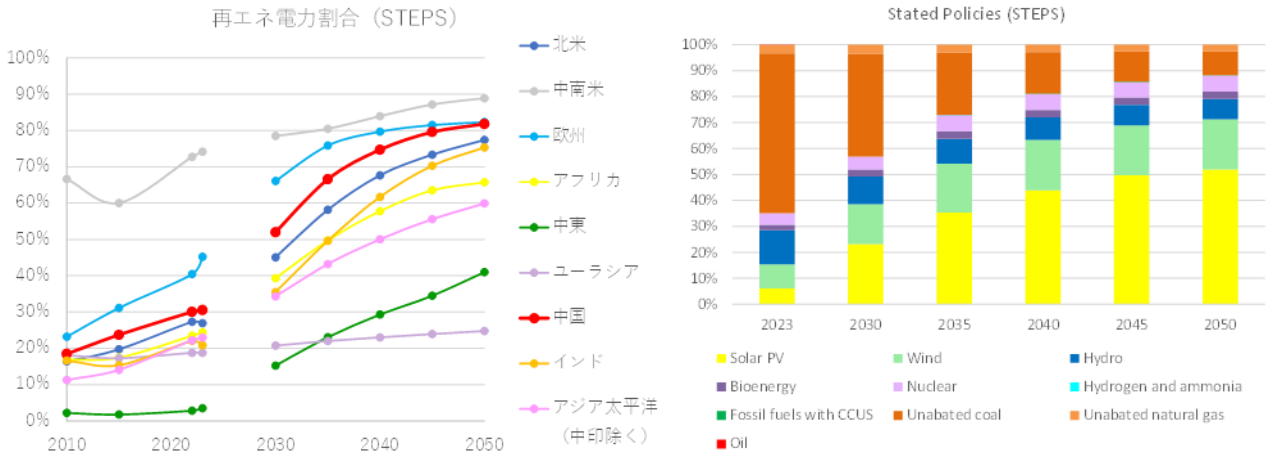


図 6.1.1-33　WEO2024 STEPS の主要な国・地域の再エネ電力割合（左）と中国の電源構成（右）

再エネ電力割合の変化において、過去のトレンドと STEPS の想定が他の国・地域が連続しているのに対して、中国だけが不連続であること、中国の太陽光発電の割合が 2023 年実績の 6%から 2030 年には 23%へと激増している。中国は 2030 年の太陽光と風力の発電設備容量の目標（12GW）を 2024 年に達成したと発表しているが、WEO2024 の STEPS では 2030 年までにこの目標量の約 4 倍の設備容量（42GW）になると想定されている。WEO2024 の STEPS における中国の政策は表 6.1.1-8 の通りであり、2023 年から 2030 年までに太陽光の 4 倍増という激変は不整合と言わざるを得ない。

表 6.1.1-8　WEO2024 で想定されている中国の STEPS の政策

Region/ country	Scenario	Policies and targets
China	STEPS	• 2024 National Economic and Social Development Plan, with energy consumption per unit of GDP to decline by around 2.5% within the year. • Made in China 2025 target to transition from heavy industry to higher value-added manufacturing, with the goal of raising domestic content of core components and materials to 70% by 2025. • Targets for 20% non-fossil share of the energy mix by 2025 contained in the 14th Five-Year Plan. • Targets to peak CO_2 emissions before 2030 and raise the share of non-fossil energy to 25% in the energy mix by 2030, contained in the updated NDC. • Emissions standard of coal mine methane.

また、部門別の CO_2 排出量に関しても、国・地域別に見ると疑問に思える点がいくつかある。その一つが、民生部門の CO_2 排出量である。STEPS におけるアフリカ、中東、中国、インドの民生部門の CO_2 排出量の変化を図 6.1.1-34 に示す。

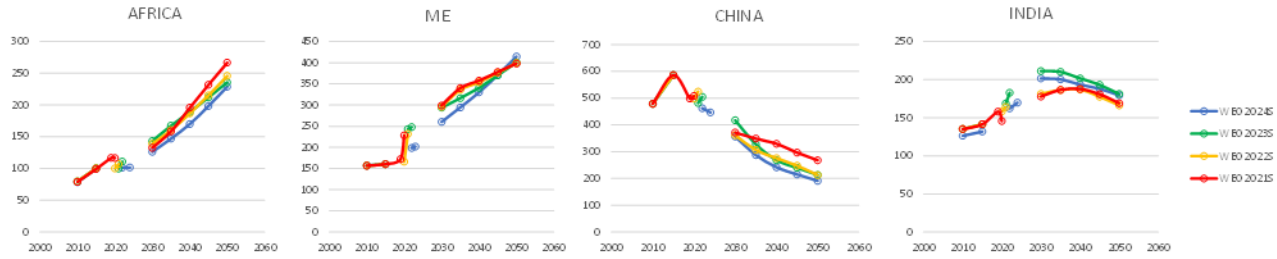


図 6.1.1-34　Buildings からの国・地域別 CO_2 排出量（WEO2021～WEO2024）

アフリカ、中東では民生部門の最終エネルギー消費は増加するが中国、インドで低下する。GDP 成長を続けて豊かになっていく中国で民生部門の CO_2 排出量が減少する点に関しては、人口減少に伴うものだと強弁はできても、人口が増加して、かつ GDP 成長に伴ってより多くの家庭やビルで冷房を使うインドで、STEPS の民生部門の CO_2 排出量が低下しているのは違和感もある。インドの民生部門の最終エネルギー消費は増加するが、電化率の 24%（2023 年）から 65%（2050 年）という大幅な上昇と、電源構成における再エネ＋原子力割合の 25%（2023 年）から 81%（2050 年）という大幅な増加が CO_2 排出量低下をもたらしているという因果関係は把握できたが、この極端に見える電化率と電源構成の変化が STEPS として妥当な展望なのかについては、引き続き、検証が必要と思われる。

WEO2021 の NZE 登場以来、NZE は目指すべき姿のように扱われながら、STEPS と APS と同じ解像度では描かれていない。本文中にも AnnexA にも、有料データベースにも NZE のデータは世界合計値のみで国・地域別のデータが掲載されていない。また、NZE は変動性再エネ導入量が最も大きく、電力の調整力のニーズも最大のはずであるが、(3)③項で記載した通り、調整力に関する分析は STEPS と APS のみを対象として

おり、NZE に関する記載はない。NZE に対する、検証、議論を促すために、NZE についても国・地域別データの提供がなされることを期待したい。

6.1.2 IEA WEO2023 と DNE21+シナリオとの比較

本節では、第 5.1 節で記載したエネルギー基本計画向けの RITE DNE21+によるシナリオと IEA WEO シナリオの比較を行った。

図 6.1.2-1 は、IEA WEO2023 の日本の APS、STEPS シナリオと、DNE21+による「成長実現シナリオ」、「低成長シナリオ」、「排出上振れリスクシナリオ」の発電電力量を示している。APS は CO_2 排出量が 2050 年に▲97%を想定しており、DNE21+による「成長実現シナリオ」、「低成長シナリオ」と似通った排出削減水準である。他方、STEPS は 2050 年▲64%であり、DNE21+による「排出上振れリスクシナリオ」は▲79%であり、若干の開きはあるが、これらシナリオを比較した。

2040 年で、WEO APS と DNE21+「成長実現シナリオ」を比較すると、発電電力総量は同程度、電源構成の比率としては、再エネは WEO が若干大きめ（風力が大、太陽光は小）、CCS が小さめの結果となっている。2050 年では再エネ量は同程度、WEO の方が、CCS が小さめで水素系燃料が若干大きめとなっている。

WEO STEPS と DNE21+「排出上振れリスクシナリオ」とで比較すると、「排出上振れリスクシナリオ」の方が、排出削減レベルが厳しいこともあるが、とりわけ 2050 年では総発電電力量が大きめとなっている。2040 年では、「排出上振れリスクシナリオ」の方が STEPS よりも、再エネが小さめで、LNG が大きくなっている。2050 年では再エネ量は同程度だが、「排出上振れリスクシナリオ」の方が STEPS よりも、LNG が大きめで、CCS についても大きくなっている。

図 6.1.2-2 は、IEA WEO2023 の日本の APS、STEPS シナリオと、DNE21+による「成長実現シナリオ」、「低成長シナリオ」、「排出上振れリスクシナリオ」における最終エネルギー消費量を示している。

WEO APS と DNE21+「成長実現シナリオ」を比較すると、2040 年、2050 年ともに、APS は「成長実現シナリオ」よりも、かなり最終エネルギー消費量を小さく推計している。APS の水準は、産業の海外移転が進むと推計された「低成長シナリオ」程度となっている。無論、IEA も日本の製造業の大きな縮退を想定した結果としての最終エネルギー消費量ではないと考えられるが、結果としては、産業の大きな縮退を想定したシナリオ程度の推計となっている。

WEO STEPS と DNE21+「排出上振れリスクシナリオ」とで比較では、2050 年では排出削減水準の違いが表れていることも考慮すると、両者で大きな差異は認められなかった。

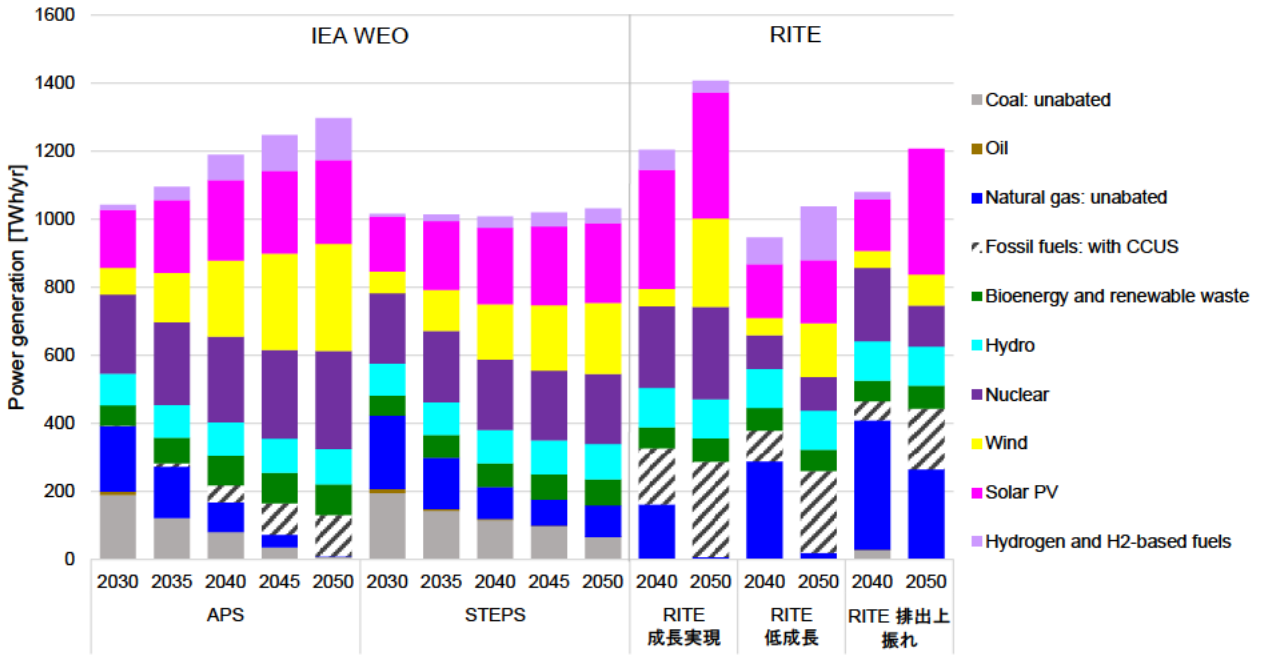


図 6.1.2-1 IEA WEO2023 と DNE21+シナリオにおける日本の電力消費量の見通し

（出典：文献 1)Extended data を基に加工）

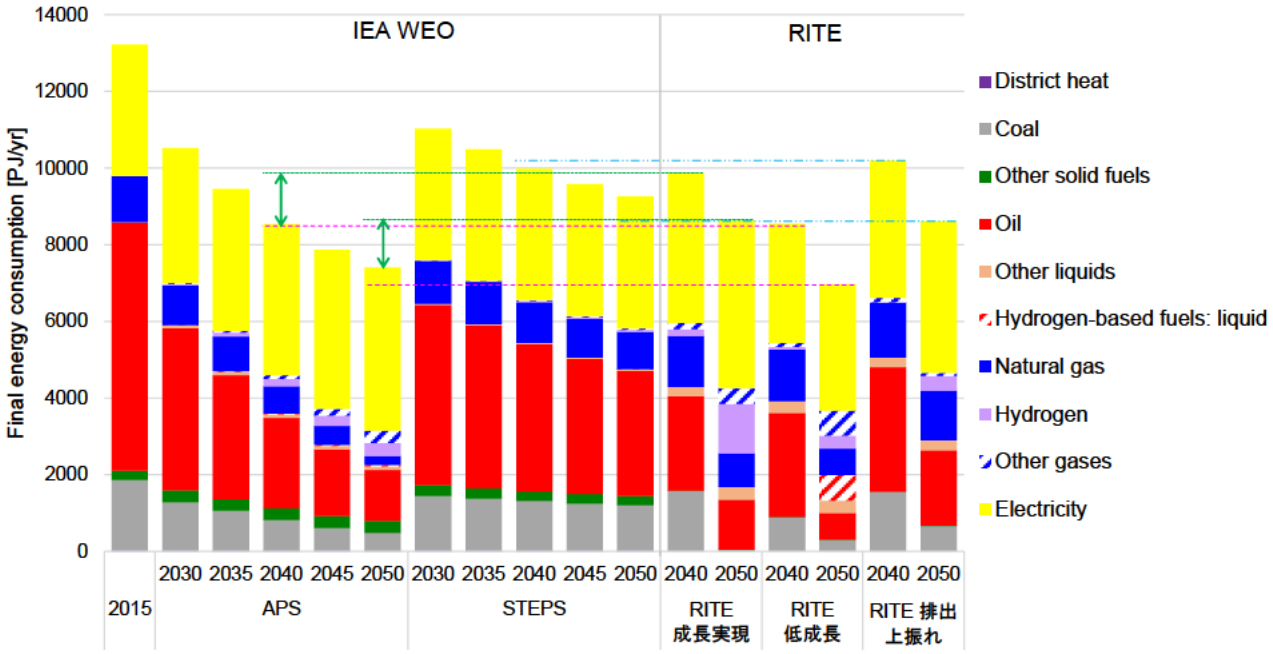


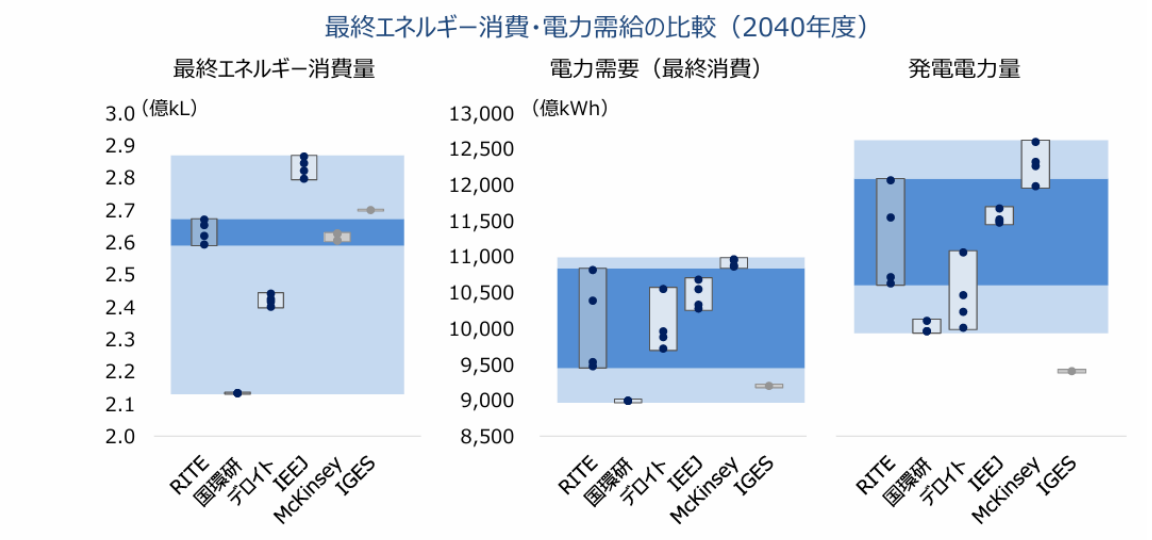
図 6.1.2-2 IEA WEO2023 と DNE21+シナリオにおける日本の最終エネルギー消費量の見通し

（出典：文献 1)Extended data を基に加工）

もちろん、IEW WEO と DNE21+の間では、GDP 想定は異なっており、DNE21+では WEO よりも高い GDP 想定となっている。しかし、STEPS と「排出上振れリスクシナリオ」では比較的近い需要推計となっているものの、APS は大きく需要が下がってい

る点は、価格の弾性値が高い想定ということである。これが、省エネルギーによるものなのか、生産量の低下によるところが大きい結果なのかは、よく峻別して、引き続き、検討していくことが重要と考えられる。

最後に参考として、最終エネルギー消費量、発電電力量について、第 7 次エネルギー基本計画の議論のために、シナリオ提供を行った研究機関間の推計の比較を図 6.1.2-3 に示す。政府の整理でも、RITE の推計は、提供した 6 研究機関の中で中位的なものであるとされている。



（出所）第66回、第68回基本政策分科会資料をもとに作成。
（注）コスト最適化の考え方に基づく分析は青色のプロットで表示。

図 6.1.2-3　DNE21+シナリオにおける日本の最終エネルギー消費量の見通し：第 7 次エネルギー基本計画エネルギーミックス分析に提示の他研究機関との比較
（出典：文献 2)）

参考文献（第 6.1.2 節に関するもの）

1) IEA, World Energy Outlook 2023

2) 日本政府、「第 7 次エネルギー基本計画－2040 年度におけるエネルギー需給の見通し（関連資料）」(2025) https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001-3.pdf（最終アクセス日 2025 年 2 月 20 日）

6.2　国際モデル比較プロジェクト EDITS の概要と貢献

6.2.1　国際モデル比較プロジェクト EDITS の概要

本事業では、国際モデル比較プロジェクトに対し、モデルを用いたシナリオ分析を提供するなど、貢献を行ってきている。過去に、米国の Energy Modeling Form (EMF)[1)] や欧州の ENGAGE[2)]など、多くのプロジェクトに参画してきた。2020 年から経済産業省の委託事業として、本 ALPS 事業と同じく RITE が受託し、IIASA はじめ多くの国際的な研究機関、大学（LBNL、OECD/ITF、AIT、CMCC、清華大、東大、阪大など）と

共同で、EDITS (Energy Demand changes Induced by Technological and Social innovations)[3]を実施してきている。本 ALPS 事業では、RITE としての需要サイドに焦点を当てた分析を実施し、EDITS 事業に提供を行った EDITS 事業においては、他の研究機関の分析と併せ、国際モデル比較として研究を行っている。これによって、ALPS 事業の成果をより大きな形で、IPCC 報告書等に反映されることを目指している。

EDITS では、IPCC 1.5℃特別報告書（SR15）[4]で焦点が当たり、その後の IPCC 第 6 次評価報告書でも、需要サイドの章として焦点が当てられた、Low Energy Demand (LED)シナリオ[5]の精緻化、より広範な分析を目指している。具体的には、①エネルギー需要サイドの技術革新と、②それに基づき生じる社会変化、③さらにその CO_2 排出削減への影響等について調査、分析、評価を行うとともに、④国際研究コミュニティの構築を通して、各国の主要研究機関と共にシナリオ比較研究が実施されている。

6.2.2 EDITS への運輸部門の分析シナリオの提供

第 5.6 節で記載したような需要サイドのモデル分析を本 ALPS 事業で実施し、EDITS 事業に展開した。また、運輸部門の LED シナリオ策定のため、OECD/ITF、IIASA 等と連携し、運輸部門のモデル比較・シナリオ比較を実施した。ここでは、デジタル化の進展に伴い全世界な導入・拡大が見込まれるシェアモビリティに着目した。シェアモビリティは、エネルギーや物質の需要低減、さらに wellbeing の向上に寄与すると期待される。例えば RITE の DNE21+モデルを用いた分析によると、自動運転ライドシェア、カーシェアを考慮したシナリオでは、カーボンニュートラル（CN）達成のための CO_2 限界削減コストや、鉄鋼、プラスチック、セメント等物質需要が低減する[6]。

OECD/ITF の PASTA モデルは、運輸部門の政策目標と持続可能性評価を目的に開発されたもので、旅客と貨物をそれぞれ都市と非都市のサブモデルで表現する。このうち都市旅客モデルは世界 9200 以上の都市内の移動に関し 18 のモードを考慮し、カーシェア、ライドシェア、速度制限、公共交通サービスの向上等の交通政策シナリオに対し、CO_2 や大気汚染物質の排出量の低減、混雑度、アクセス度の改善等が算定されている[7]。IIASA の MESSAGEix-Transport は、統合評価モデル MESSAGEix-GLOBIOM のサブモデルの一つで、旅客、貨物の需要、サービス・技術の詳細化が図られている[8]。これらモデルには、得意とする要素の違いがある。そこで、モデル比較・シナリオ比較と同時に、モデル分析を互いに補完し合うことにより、シェアモビリティによる気候変動緩和への効果をより良く理解し、政策立案のためのより優れた情報提供を目的としている。

需要サイドの分析では、とりわけ国・地域別のシナリオとなると、そもそも各モデルが前提としている実績値のデータにも大きな差異が見られる。そこで今年度は、その差異の理解の促進、調整作業を実施した。図 6.2.2-1 は DNE21+モデルと PASTA モデルで人口シナリオを比較している。3 か国を見る限り将来の人口シナリオに大きな差は見られない。なお、GDP は、人口よりも差異は見られるものの、後述のサービス需要のような大きな差異はない（図 6.2.2-2）。

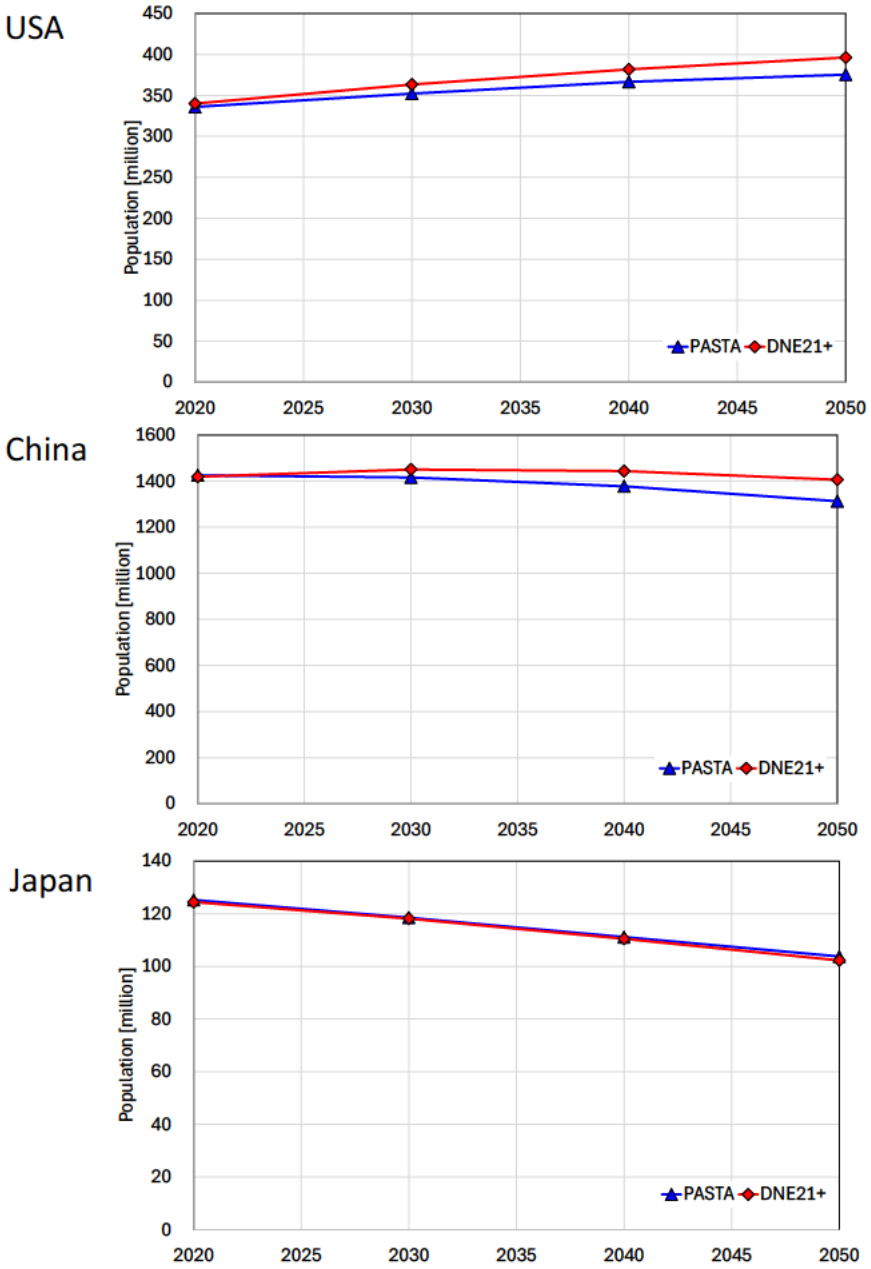


図 6.2.2-1 DNE21+と PASTA モデルでの人口シナリオ比較（米国、中国、日本）

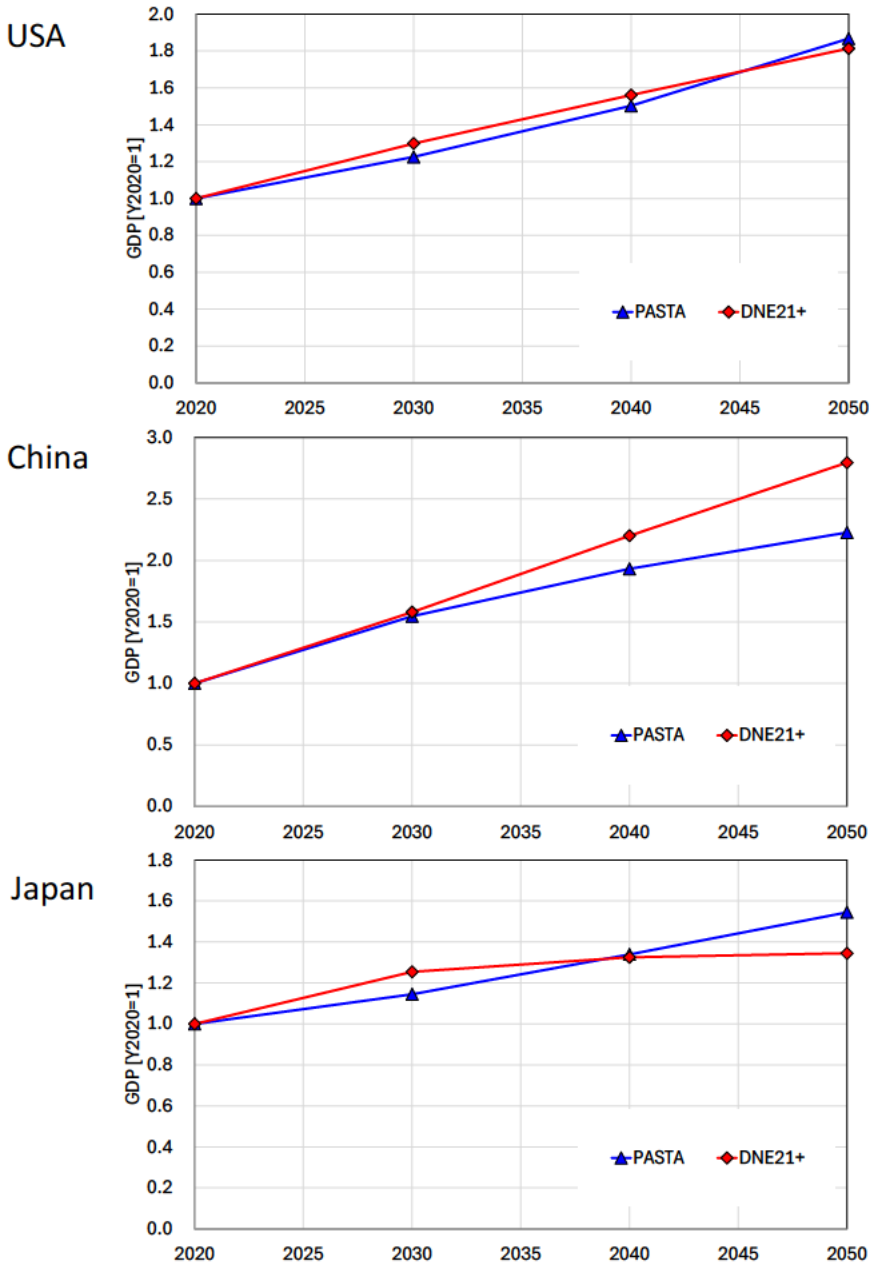


図 6.2.2-2 DNE21+と PASTA モデルでの GDP シナリオ比較（米国、中国、日本）

図 6.2.2-3～図 6.2.2-5 は、道路旅客輸送サービス需要について、人口と同様に、米国、中国、日本の比較を示している。米国については、実績値である 2020 年における需要は、2 つのモデルで概ね一致している。将来の見通しに大きな差異があり、PASTA モデルは、将来の需要が大きく増加すると見込んでいる。中国については、実績値である 2020 年における需要は 2 つのモデルで概ね一致していると共に、将来の見通しにおいても、米国ほどの大きな差異は無い。一方、日本については、実績値である 2020 年における需要から大きな差異があり、今後、モデル間での調整が特に必要と言える（なお、PASTA の日本の道路旅客需要量は、その後、国土交通省の自動車輸送統計データに基づき調整が行われた）。

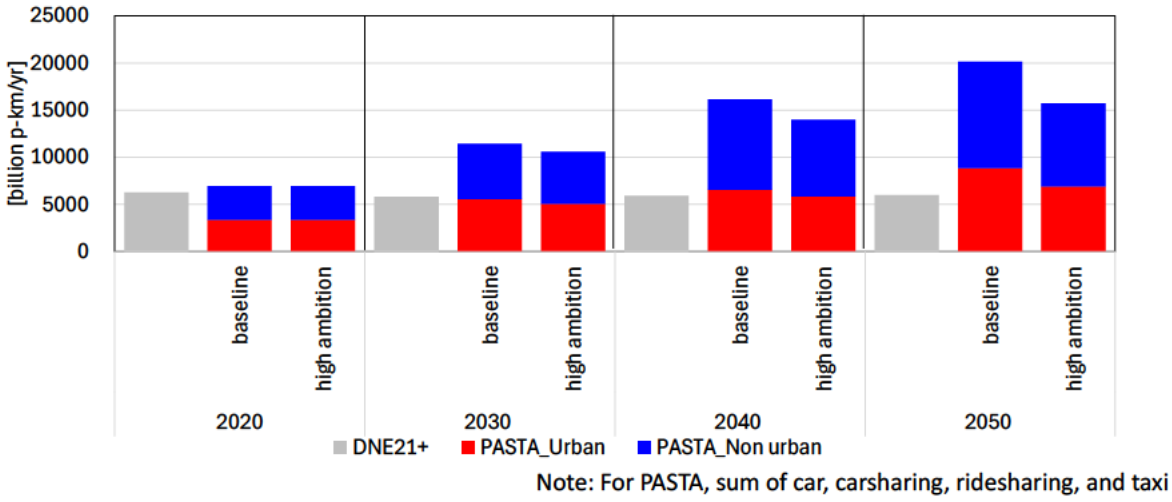


図 6.2.2-3 DNE21+モデルと PASTA モデルでの道路旅客需要シナリオ比較（米国）

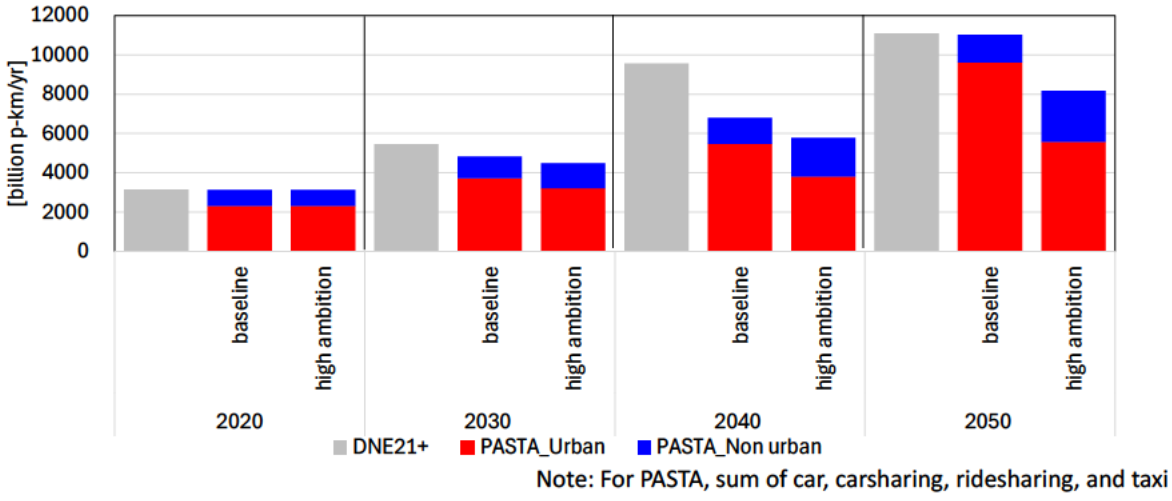


図 6.2.2-4 DNE21+モデルと PASTA モデルでの道路旅客需要シナリオ比較（中国）

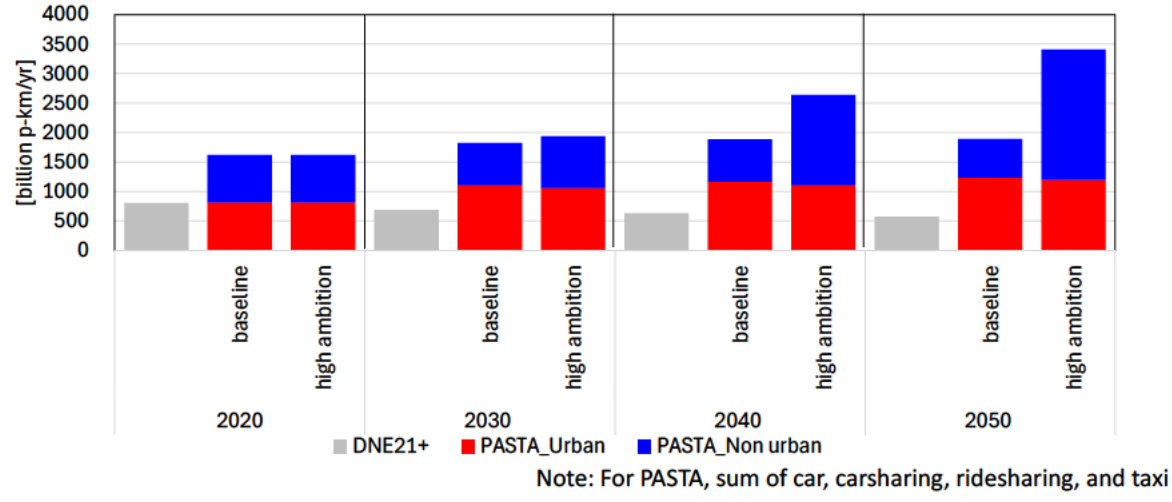


図 6.2.2-5 DNE21+モデルと PASTA モデルでの道路旅客需要シナリオ比較（日本）

実績値の差異は、将来の対策の見通しにも影響し、モデル間で異なるインプリケーションを導く恐れもあるため、このような調整作業は時間を要するものではあるが、IPCC 第 7 次評価報告書に向けて重要な取り組みとなると考えられる。

参考文献（第 6.2 節に関するもの）

1) Energy Modeling Forum. https://emf.stanford.edu/ （最終アクセス日 2025 年 3 月 21 日）
2) ENGAGE. https://engage-climate.org/project/（最終アクセス日 2025 年 3 月 21 日）
3) EDITS, https://iiasa.ac.at/projects/edits（最終アクセス日 2025 年 3 月 21 日）
4) IPCC, Special Report on Global Warming on 1.5 °C. https://www.ipcc.ch/sr15/
5) A. Grubler et al., A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies, Nature Energy, 3 (2018)
6) Akimoto, K., Sano, F., Oda, J., Impacts of ride and car-sharing associated with fully autonomous cars on global energy consumptions and carbon dioxide emissions. Technological Forecasting and Social Change 174, 121311 (2022). https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121311
7) ITF, Transport Outlook 2023
8) IIASA, Tools for MESSAGEix-GLOBIOM models （最終アクセス日 2025 年 3 月 22 日）

第7章　まとめ

地球温暖化は、地球全体の環境に深刻な影響を及ぼすものであり、その解決が強く求められる。しかし、地球温暖化は、世界のあらゆる国、様々な部門に影響を与え、一方でその影響は均一ではない。また、各国において取り得る緩和策、緩和費用にも差異が大きい。そのため、真に有効な対策を実現するためには、総合的なパッケージを作り上げることが重要と考えられる。

本事業では、最新の科学的知見や国際交渉の動向も踏まえながら、海外研究機関とも連携・協力しつつ、温暖化対策（緩和策及び適応策等）、ファイナンス、政策の総合的かつ整合的な分析・評価を行い、我が国の気候変動政策の立案や、IPCC、COP といった国際的な議論に貢献することを目的とした。これらにより、積極的に温暖化対策を行うことが、産業構造や経済社会の変革をもたらし、大きな成長につなげる、「経済と環境の好循環」を目指す将来枠組み・我が国の国際戦略立案を進めていくべく、事業を実施した。

本報告書では、まず、第 1 章において背景と目的を記述した。

第 2 章では、気候変動に関連した各種不確実性を指摘した上で、本事業で実施した定量的な分析も踏まえながら、気候変動リスクマネージメント戦略のあり方について議論を行い、とりまとめた。また、気候変動対策とエネルギー安全保障や希少鉱物資源供給制約とのシナジー・トレードオフ等についても記述した。各種対策は、SDGs に対してシナジーも多く存在する一方、トレードオフも存在しており、トレードオフの影響を小さくしながら、対策を進める必要がある。そして、気候変動対策におけるイノベーションの可能性についてまとめ、気候変動リスクマネージメントにおけるイノベーションの役割について論じた。

第 3 章ではグリーン成長の限界を正しく認識しつつ、その機会を見出すために、CO_2 排出量変化の要因分析を行った。そして、更なる深堀として、世界主要国間での相対的なエネルギー価格と産業リーケージの動向についての分析について記載した。更に、日本の産業界が取り組んでいるカーボンニュートラル行動計画の実績について、グリーン成長の視点を含め、排出削減努力についての一次的な試算も行った。また、日米欧における気候変動政策の動向やその国内外の評価について調査をし、整理を行った。更には、クライメイトファイナンスの動向とこれまでのモデル分析例についてその内容と課題について整理を行った。

第 4 章では、中期的な緩和策の分析として、パリ協定 NDCs（Nationally Determined Contributions）の排出削減目標（2030 年頃）に関する分析・評価を行った結果をまとめた。本研究では最新の NDCs に基づき、複数の指標で各国 NDCs の排出削減努力の国際比較を実施した。国際的な NDCs 評価の文献についても整理を行った。また、世界エネルギー経済モデル DEARS の地域分割の拡張を行い、排出削減とその国際的な協力において重要性が増すアジア諸国での経済影響について試算を行った。

第 5 章では、長期の温暖化対策・政策の総合的な分析を行った。日本政府は、第 7 次エネルギー基本計画、地球温暖化対策計画、GX2040 ビジョンを策定し、2025 年 2 月に閣議決定した、本事業では、これら計画に資する定量的な分析の提示を行った。世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+において、エネルギー供給側および需要側双方のエネルギーシステムの分析を行った。また、併せて、世界エネルギー経済モデル DEARS も活用して、CO_2 削減に伴う経済活動の低減効果等についても分析を行った。それらシナリオ分析について記載した。

また、大気中からの直接 CO_2 回収・貯留（DACCS）などの二酸化炭素除去技術（CDR）については、IPCC 第 6 次評価報告書でも、「CO_2 もしくは GHG の実質ゼロ実現のためには、CDR は不可欠」とされているが、本事業でも、CDR の技術調査、各種の経済性評価に関する調査を行うとともに、植林、バイオ炭、BECCS、DACCS といった相互依存関係もある CDR について、CCS とともに経済的ポテンシャルを DNE21+モデルを用いて分析・評価を行った。

国内外で変動性再生可能エネルギー（VRE）のコスト低減が進んでおり重要性が増している。他方、大量の VRE 導入は需要とのマッチングが難しくなるが、世界エネルギー・温暖化対策モデル DNE21+の年間の時間解像度では、評価が難しい。これまでは、系統統合費用を別途推定して、DNE21+モデルに統合して評価することで、簡略ながらも適切な評価となるようにしてきている。しかし、より良い評価に資するように、時間解像度を高めたモデル拡張を行った。

また、バッテリーなどのクリーンエネルギー技術導入に伴い鉱物資源需給ひっ迫の懸念があることから、重要鉱物の需要量について、再資源化の可能性も含めて、将来の見通しを推計した。

エネルギー需要サイドについては、デジタルトランスフォーメーション（DX）を中心に誘発され得るサーキュラーエコノミー、シェアリングエコノミー等、低エネルギー需要実現の可能性について、調査、分析を実施した。DX による貨物部門の技術・社会変化、食料廃棄低減に伴う土地利用変化とそれによる非 CO_2 温室効果ガス排出量低減等について調査した。また、デジタル化と循環経済の推進による商業活動への影響について調査した。そして、DX を中心とした技術変化や社会変化が、エネルギー需要にどのような変化をもたらし得るのかについて、定量的な推計を行い、DNE21+モデルを用いてエネルギー需給双方を整合的に分析した。これらによって、リバウンド効果を含む、行動変化を総合的に捉えて、将来のエネルギー需要の見通しを得る分析手法の今後の発展に資するものと考えられる。

第 6 章では、カーボンニュートラルに関する国際的なシナリオ分析の動向を記述するとともに、国際モデル比較プロジェクトの動向を整理した。国際エネルギー機関（IEA）が 2024 年 10 月に発表した世界エネルギー展望 WEO2024 について解説を行った。本報告書では、これらシナリオについても概要をとりまとめるとともに、DNE21+によるシナリオ、排出削減費用とポテンシャル推計（第 4 章、5 章に記載）との比較評価についてもとりまとめた。

本第 7 章においてまとめを記載した。また、付録には本事業の一環として実施した国際シンポジウムの内容について掲載した。

以下に本報告書の内容の全体像についての簡単なまとめを記載する。

2015 年にパリ協定が合意され、すべての国が排出削減に取り組む枠組みが合意され、各国が自主的に排出削減目標を掲げ、レビューする仕組みとなった。また、長期目標が定められ、2℃目標や 1.5℃目標が掲げられた。2021 年に開催された COP26 では世界の平均気温の上昇を 1.5℃に抑える努力を追求することを決意すると合意され、COP26 までに、多くの国が 2050 年頃までのカーボンニュートラルを目指すと宣言した他、先進国を中心に世界の多くの国が自国の 2030 年の排出削減目標を引き上げた。世界は、気候変動対策の強化を進めている。その後も 2030 年目標の野心度の更なる引き上げが目指されたものの、大きな変化はなく 1.5℃目標だけでなく、2℃目標とも引き続き大きな排出ギャップが存在していると考えられる。また、世界は多様であり、見かけ上、言葉上の強化と、真の排出削減努力とは一定のギャップが存在する可能性がある。足下の世界排出量も過去最高を記録しており、排出削減が成功しているような状況にはない。そして、2024 年は瞬間的かもしれないが、1.6℃上昇程度に到達したとされている。更には、2025 年 1 月には、米国において、気候変動対策に積極的ではないトランプ大統領が再就任し、パリ協定からの離脱を表明した。また、気候変動対策をある意味主導してきたドイツは、エネルギー価格高騰とそれに伴う製造業の生産量低下で経済的な苦境に陥っており、政治も不安定な状況に陥っている。主要先進国で排出は低減しても、途上国に CO_2 原単位の高い産業、製造工程が移転しているに過ぎない状況と言える。

グローバルに排出削減努力の協調が必要である。しかしながら、最新の NDCs や社会経済状況を反映した、2030 年 NDC の排出削減努力の分析からは、国間の排出削減目標を実現するために必要な努力、実現の難易度が一層開いていると推計された。根本的には、国間で限界削減費用の均等化が望まれる。一方、この実現は極めて難しいという点にも多くの理解がある。そのため、欧州は、国境炭素調整措置の導入が始まっている。冷戦終結以降の国際的協調の時代から、米中の対立、世界とロシアの対立など、世界は分断の方向にも進みつつある。協調の時代でさえ難しかった気候変動対策の協調が、より一層難しくなってきている。このように、国際的な気候変動対策は一層複雑化してきている。気候変動対策を着実に進めながら、一方で、これらを踏まえた柔軟でしたたかな対応戦略が必要と考えられる。

近年、再生可能エネルギーのコスト低減が著しく、再エネによるグリーン成長の可能性の光明も見え始めている。しかし、世界を見渡しても、完全にグリッドパリティを達成しているものはわずかと見られる。また、導入規模を拡大すれば、条件の悪い再エネを活用することとなり、再エネ単価は上昇するし、系統対策費用が増大していくと考えられる。全体システムの中で、再エネも正しく評価していくことが重要である。つまり適正な水準の再エネ導入は、グリーン成長に資すると考えられるが、それを超える導入はグリーンには資するが、成長には逆行する。第 7 次エネルギー基本計画策定にあわせて実施された発電コスト検証においても、再エネの系統統合費用の重要性が確認された。今後より一層、変動性再生可能エネルギーが拡大する中で、他方、変動性再生可能エネルギーは、世界地域・国による時間帯別の供給ポテンシャルに差

異が大きく、電力需要のパターンとの関係にも、より一層詳細な分析を実施していくことが重要である。そして、系統対策の課題と機会を、より明確化していくことが求められる。そこで、本年度は、DNE21+モデルにおいて、時間帯の需給パターンをより詳細にモデル化する改良も実施したところである。

広範で非連続なイノベーションが不可欠である。本研究におけるモデルを用いたシステム的な分析では､カーボンニュートラルのような厳しい排出削減のためには､様々な対策の組み合わせが重要であることを示した。そして、それぞれの技術についてもコスト低減の見通しは確実なわけではない。直接的な気候変動対策だけではなく、それを構成する要素技術、基礎技術、そして、それらを誘発する組織、制度のイノベーションなど併せて求められる。

一方、日本国内では、エネルギーシステム改革が進められる中で、電力需給のひっ迫の課題が顕在化してきている。脱炭素電源は、長期の視点で大きな投資リスクを負って投資しなければならない場合も多く、それと短期の効率性を追求する市場とがミスマッチする部分もある。市場の失敗を是正する、政策が必要である。更に、ロシアによるウクライナ侵略によって、天然ガスをはじめとした化石燃料価格の急騰も加わってきている。「2050 年カーボンニュートラル」の環境面が強くなっていたところで、改めて、3E（エネルギー安全保障・安定供給、経済性、環境性）のバランスの重要性を社会は再認識した状況である。全体のシステムとして理解をし、分析を深めておくことの重要性も再認識されたところである。第 7 次エネルギー基本計画のエネルギー需給見通しは、本事業でのシナリオ分析を活用してまとめられたが、提供したシナリオ分析は、これらの視点も踏まえながら、策定したものである。また、第 7 次エネルギー基本計画自体も、これら視点を認識した上でとりまとめられたと考えられる。

今後の課題としては、特にエネルギー需要サイドの技術イノベーションの波及的な可能性の定量的かつ整合的な分析は、広範なる省エネの可能性とともに、リバウンド効果の推計など、まだまだ取り組むべき課題は多く、今後、国際的な研究コミュニティーを幅広く巻き込みながら進展させていく必要がある。また、広範なイノベーションを誘発させ、気候変動緩和に結び付けていくことが期待できる政策パッケージのあり方を更に詰める必要がある。

以上述べた他にも多くの課題が存在しており、今年度の研究成果をベースに一層の研究展開を進め、国際的な研究コミュニティーへの貢献と、気候変動政策の立案における情報提供の強化を図っていくことが求められる。

持続的かつ効果的な温暖化対策のためには、これまで言われてきた以上に、地球温暖化対策と経済成長の両立が重要となってきている。さもなければ、言葉だけは踊っても、実際の国際社会、及びグローバルサプライチェーンの下では CO_2 排出削減に寄与しておらず有効な温暖化の抑制につながらない。規範的な単なる希望を語るのではなく､「経済と環境の好循環」を着実に実現し得る適切な対策・方策を明確にすることが求められている。

本調査研究では、このような真の「経済と環境の好循環」を実現していく道筋のフレームワークとその具体的対策・方策の検討を包括的に行った。この問題は、広範で、深い分析と洞察が必要なため、今後、更なる調査・分析・評価を行っていく必要があるが、本研究調査でまとめた知見は、今後の気候変動対策・政策において重要な情報・示唆となると考えられる。

付　　録

付録　ALPS 国際シンポジウム

(1) はじめに

本研究事業では、地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業を進めるにあたり、地球温暖化問題研究で世界的に著名なオーストリアの国際応用システム分析研究所（IIASA: International Institute for Applied Systems Analysis）、米国の未来資源研究所（RFF: Resources for the Future）、国際エネルギー機関（IEA）をはじめ、世界の研究機関とも協力しながら研究を進めている。

2025 年 2 月、本共同研究の成果報告会として、また、本研究について幅広い関係者の理解を得るとともに今後に向けての指導・助言も得るため、「ALPS 国際シンポジウム ―多様化する国際情勢下の地球温暖化対策と主要先進国の政策の取り組みについて―」を開催した。当日は、先進的に温暖化対策に取り組んでいる国際応用システム分析研究所、アジア工科大学、延世大学、Resources for the Future (RFF)、一般財団法人電力中央研究所といった大学や研究機関の方から、カーボンニュートラルへの取り組みや経済成長との両立に向けた米国、欧州、アジア、日本における政策の状況や産業界における課題などをご紹介いただいた。企業、官公庁、大学、研究機関、その他団体等から約 100 名超が参加した。

現在、世界では 2050 年カーボンニュートラル（CN）に向けた取り組みを強化しているが、排出量は引き続き増大基調にある。さらに終結の見通しが立たないロシアとウクライナの戦争や中東の軍事紛争の深刻化、さらには米国大統領選挙でのトランプ前大統領勝利による政権交代を始め、世界の政治情勢も不安定化するなど、国際情勢は不確実性が高まっている。本シンポジウムでは、各国の政策動向や 2050 年の CN 実現に対する課題について、幅広い方々にとって最新の研究成果をもとに深く考える有意義な機会となった。

以下に、本シンポジウムの概要を掲載する。当日の講演者の詳細な略歴や講演スライドは RITE ホームページのシンポジウム紹介欄に掲載されているので参照されたい。(https://www.rite.or.jp/system/events/2025/02/fy2024alpsresult.html)

開催年月日　2025 年 2 月 4 日（火）10:00-17:00
開催場所　虎ノ門ヒルズフォーラム
（東京都港区虎ノ門 1-23-3）
主催　公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）
共催　経済産業省

講演	**Global transformations and policies toward carbon-neutral world** Dr. Nebojsa Nakicenovic Distinguished Emeritus Scholar and Former Deputy Director General, IIASA
	Carbon Neutrality in South-East Asia: A policy perspective Dr. Shobhakar Dhakal Professor, Asian Institute of Technology (AIT)
	Carbon Neutrality in Korea Dr. Tae Yong Jung Professor, Yonsei University（延世大学）
	Climate-and-trade policy under geopolitical competition Dr. Milan Elkerbout Fellow, Resources for the Future (RFF)
	米国トランプ政権によるエネルギー・環境政策の見直しの行方 上野 貴弘 一般財団法人電力中央研究所　社会経済研究所 上席研究員・研究推進マネージャー
	日本の排出削減シナリオ分析と政策動向 秋元 圭吾 RITE システム研究グループ グループリーダー

“Global transformations and policies toward carbon-neutral world”

Dr. Dr. Nebojsa Nakicenovic

Distinguished Emeritus Scholar and Former Deputy Director General (IIASA)

Humanity is facing formidable challenges from wars and hunger to pandemic and ever-increasing pressure on the Earth systems including climate change. Earth is the only planet we know that can sustain life we know; it “is a fine place and worth fighting for” as Ernest Hemingway once said.

The United Nations 2030 Agenda with its 17 Sustainable Development Goals (SDGs) and the Paris Climate Agreement back in 2015 there appeared resolve to achieve aspirational and ambitious vision of a safe and just future for all within planetary boundaries – a world free from hunger, injustice, and poverty, leading to universal education, health, and employment with inclusive economic development, based on transparency, dignity and equity. Many ambitious national and international policies were introduced to nudge the world toward a safe and just future for all. An example is the European Green Deal.

However, a decade has passed since the adoption of the SDGs and the Paris Climate Agreement. A lot has been achieved but not nearly enough given the Herculean task ahead and formidable immediate challenges and crises. An important example is climate change. To achieve the Paris Agreement, greenhouse gas emissions need to be halved every decade and approach net zero by the middle of the century, in less than three decades, while the global emissions are still increasing at an unprecedented rate. In fact, 2024 has been the hottest year with global meant temperature exceeding 1.5oC, the lower stabilization level of the Paris Agreement and with high certainty also the higher stabilization level of 2oC will be exceeded.

We argue that a safe and just future for all can be achieved through disruptive and inclusive change about people, societies and about values and behaviors. This will require “doing more with less” – efficiency and sufficiency of providing more services with less resources and impacts on the Earth system - a new integrated, systemic, and holistic pathway to achieve the grand transformation.

Digital Revolution along with the other disruptive transformations, despite many inherent dangers, hold the promise of helping achieve safe and just future. The potential is here for the integration of digital and other innovations into new systems and human activities. The ongoing advances encompass artificial intelligence (AI), connectivity, digitization of information, additive manufacturing (3D printing), virtual reality, Internet of things (IoT), machine learning, block chain, robotics, quantum computing and synthetic biology. A good example of the power of digitalization is the disruptive nature of information and communication technologies (ICT)such as mobile phones and their gigantic potential effect in enabling fundamentally new human activities while reducing specific energy and materials requirements as well as greenhouse-gas emissions compared with the analogue devices they replace.

Humanity may be moving toward new civilizational thresholds. Super-intelligent machines like the convergence of quantum computing and AI might even develop a “life” of their own, with the capacity both to harm and benefit human agents. The digital transformation calls for a comprehensive “social steering”, a set of regulatory standards and normative frameworks, physical infrastructure, and digital systems, to capture the benefits of the digital revolution while avoiding the many potential downsides. An essential priority should be to develop science, technology, and innovation roadmaps to better understand the potential benefits and dangers of digitalization and how to leverage the digital revolution toward sustainable development for all. The principles of digital transformation for sustainable development have yet to be written as humanity embarks on the fundamental transformation. If the potential opportunities are seized, the transformational change would benefit people and the planet.

人類は、戦争や飢餓からパンデミックや気候変動を含む地球システムへの増大を続ける圧力に至るまで、大変な課題に直面している。地球は、生命を維持できる唯一の惑星である。かつてアーネスト・ヘミングウェイが言ったように「素晴らしい場所であり、戦う価値がある」。

17 の持続可能な開発目標（SDGs）を掲げた国連 2030 アジェンダと、2015 年のパリ気候協定では、プラネタリーバウンダリー内で、全ての人にとって安全で公正な未来、すなわち飢餓、不正義、貧困のない世界、透明性、尊厳、公平性に基づく包括的な経済発展を伴う普遍的な教育、健康、雇用につながる、意欲的で野心的なビジョンを達成する決意が示された。そして、全ての人にとって安全で公正な未来に向けて世界を後押しするため、多くの野心的な国内外の政策が導入された。その一例が、欧州グリーン・ディールである。

しかし、SDGs とパリ協定が採択されてから 10 年が経過した。多くのことが達成されたが、前途多難な課題、当面の困難や危機を考えると、まだ十分とは言えない。その重要な例が気候変動だ。パリ協定を達成するためには、温室効果ガスの排出量を 10 年ごとに半減させ、今世紀半ばまでに正味ゼロに近づける必要があるが、世界の排出量はかつてないペースで未だに増加を継続している。実際、2024 年は最も暑い年であり、世界の平均気温はパリ協定の下限安定化レベルである 1.5℃を超えた。高い方の安定化レベルである 2℃も確実に超えるであろう。

全ての人にとって安全で公正な未来は、人間や社会、価値観、行動様式に関する破壊的かつ包括的な変革によって達成されると私たちは主張する。そのためには、「より少ない資源で、より多くのサービスを提供する」という効率性と充足性、そして地球システムへの影響を軽減し、大転換を達成するための統合的、体系的、全体論的な新たな道筋が必要となる。

デジタル革命は、他の破壊的な変革とともに、多くの危険を内在する一方、安全で公正な未来の実現に貢献すると期待できる。そこには、デジタルやその他のイノベーションを新しいシステムや人間の活動に統合する可能性がある。現在進行中の進歩には、人工知能（AI）、コネクティビティ、情報のデジタル化、積層造形（3D プリンテ

ィング)、バーチャルリアリティ、モノのインターネット（IoT)、機械学習、ブロックチェーン、ロボット工学、量子コンピューティング、合成生物学などが含まれる。デジタル化の能力を示す好例として、携帯電話などの情報通信技術（ICT）の破壊的な性質や、アナログ機器に比べエネルギーや材料の必要量や温室効果ガスの排出量を削減しながら根本的に新しい人間活動を可能にする巨大な潜在的効果、が挙げられる。

人類は新たな文明の閾値に向かっているのかもしれない。量子コンピューターとAIが融合したような超知能マシンは、人間のエージェントに危害を加えたり利益をもたらしたりする能力を持ち、それ自体が「生命」を開発するかもしれない。デジタルトランスフォーメーションは、多くの潜在的なマイナス面を回避しながらデジタル革命の恩恵を享受するために、一連の規制基準や規範的枠組み、物理的インフラ、デジタルシステムといった包括的な「社会的舵取り」を必要としている。デジタル化の潜在的な利益と危険性をより良く理解し、全ての人のための持続可能な開発に向けてデジタル革命を活用する方法を理解するために、科学、技術、イノベーションのロードマップ開発が重要な優先事項であるべきだ。持続可能な開発のためのデジタルトランスフォーメーションの原則は、人類が根本的な変革に乗り出す中で、まだ書かれていない。潜在的な機会を捉えれば、変革は人々と地球に恩恵をもたらすだろう。

（RITE　抄訳）

“Carbon Neutrality in South-East Asia: A policy perspective”

Dr. Shobhakar Dhakal
Professor, Asian Institute of Technology (AIT)

The world is not on track to limit warming to 1.5C and this target is increasingly becoming challenging with slow climate actions leading to continuous rise in GHG emissions. South-East Asian countries have made NDCs, carbon neutrality and net-zero pledges at various levels and timeframes followed by varying strategies. This talk presents a holistic insight on the state of emissions in South-East Asian countries, their key imperatives, emission-economic interlinkages, and key policy challenges towards achieving long-term carbon neutrality and net-zero targets.

世界は 1.5°C の温暖化制限目標に向けて進んでおらず、気候変動対策の遅れにより温室効果ガス（GHG）排出量が増加し続けている。東南アジア諸国は、さまざまなレベルと時間枠で NDC（国別削減目標）、カーボンニュートラル、およびネットゼロのプレッジを行い、それに続くさまざまな戦略を採用している。この講演では、東南アジア諸国の排出状況、主要な課題、排出と経済の相互関係、および長期的なカーボンニュートラルとネットゼロ目標の達成に向けた主要な政策課題について包括的な洞察を行う。

（RITE　抄訳）

“Carbon Neutrality in Korea”

Dr. Tae Yong Jung
Vice Chair, Group of Chief Scientific Advisors, European Commission
Professor, Yonsei University（延世大学）

Climate change is a typical example of global public good and cannot be solved by a single country, nor can it be solved independently of the fundamental change in the 21st century. Therefore, on this occasion, I will make a short presentation on the mega trends of the 21st century and briefly introduce Korea's carbon neutrality policy.

Finally, I will make some specific suggestions from the point of view of Korea, as a donor country, who could contribute to tackling climate change issues in cooperation with the international community.

気候変動は、グローバルな公共財の典型的な例であり、単一の国では解決できず、21 世紀における根本的な変化と無関係に解決することもできない。したがって、この機会において、21 世紀のメガトレンドについて簡単にプレゼンテーションを行い、韓国のカーボンニュートラル政策を簡潔に紹介する。

最後に、ドナー国としての韓国の視点から、国際社会と協力して気候変動問題に取り組むための具体的な提案をいくつか行う。

（RITE　抄訳）

“Climate-and-trade policy under geopolitical competition”

Dr. Milan Elkerbout
Fellow, Resources for the Future (RFF)

Climate and trade policy are increasingly intertwined. Against a background of intensified geopolitical competition and fragmentation, trade policy has returned to the top of the political agenda, while the decarbonization of industries and related value chains continues at different speeds in different regions. As countries pursue the decarbonization of their industrial sectors, concerns about the competitiveness of domestic producers manufacturing heavily traded commodities increase. The risk of carbon leakage is particularly influential in shaping climate policies targeting energy-intensive industry. Carbon border adjustments are recent examples of such policies that can impact other countries through international trade. At the same time, trade can be critical to the dissemination of low-carbon technologies, while newly popular green industrial policies can also have economic spillovers in other countries. And policies in one country may beget policy responses elsewhere; another spillover effect.

気候変動政策と貿易政策はますます複雑になっている。地政学的な競争と分断が激化する中、貿易政策が政治的課題の最優先事項として再び戻ってきた一方、産業および関連するバリューチェーンの国の脱炭素化は地域によって異なる速度で進んでいる。各国が産業部門の脱炭素化を進めるにつれて、貿易で大量に取引される商品を製造する国内生産者の競争力に対する懸念が高まっている。エネルギー集約型産業を対象とする気候変動政策の策定においては、炭素リーケージのリスクが大きな影響力を持つ。

このような政策の最近の事例の１つとして、国際貿易を通じて他国に影響を与える可能性がある炭素国境調整があげられる。また、もう１つの波及効果として、貿易は低炭素技術の普及に重要であり、新たに普及しつつあるグリーン産業政策は他国にも経済波及効果をもたらす可能性がある。また、ある国の政策が他国の政策対応を生み出す可能性もある。

（RITE　抄訳）

“米国トランプ政権によるエネルギー・環境政策の見直しの行方”

上野 貴弘
一般財団法人電力中央研究所
社会経済研究所 上席研究員・研究推進マネージャー

2025 年 1 月 20 日に発足した共和党のトランプ政権は、民主党のバイデン政権が進めたエネルギー・環境政策、特に気候変動対策を大幅に見直す。総じて、トランプ政権はバイデン政権の脱炭素化を中心とする政策を改め、国産化石燃料の増産を重視し、さらにはその輸出拡大によって外交的影響力の強化を図る方針である。

IRA のうち見直し・撤回の対象とならない部分や、一部の州政府・ビッグテック企業の取り組みによる温室効果ガスの排出削減は続くものの、バイデン政権が掲げた削減目標には到達せず、2050 年ネットゼロ排出と現実の乖離が広がると予想される。

“日本の排出削減シナリオ分析と政策動向”

秋元 圭吾
公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)
システム研究グループ　グループリーダー

主要先進国の温室効果ガス排出量は低減傾向にあるが、これはエネルギー多消費産業の海外移転が起因している。また、世界排出量は引き続き上昇傾向が見られており、早期のカーボンニュートラル実現への要請が強まっている。CO_2 排出削減に向けた電化促進やデータセンター等での電力需要増大に対し、安定的で低廉なコストでの電力供給は重要である。再生可能エネルギーの一層の拡大や原子力の有効活用、さらには国際的なエネルギー安定供給・安全保障上の課題を踏まえ、我が国における排出削減シナリオ分析を元にして、先般まとめられた第 7 次エネルギー基本計画の概要や柔軟で実効性のある気候変動対策を展望する。



本報告書の内容を利用する際は、
公益財団法人 地球環境産業技術研究機構（RITE）
システム研究グループにご一報願います。

電　話　０７７４（７５）２３０４
ＦＡＸ　０７７４（７５）２３１７