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

令和４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	上野 貴弘	（一財）電力中央研究所 社会経済研究所 上席研究員
	江守 正多	国立研究開発法人 国立環境研究所 地球システム領域 副領域長
	沖 大幹	東京大学大学院 工学系研究科 教授 国際連合大学 上級副学長
	下田 吉之	大阪大学大学院 工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 都市エネルギーシステム領域 教授
	杉山 大志	キヤノングローバル戦略研究所 研究主幹
	髙村 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（地球環境）
	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 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
	本部 和彦	東京大学 公共政策大学院 客員教授 大成建設（株） 常務執行役員
	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 室長
	森 俊介	国立研究開発法人 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター 研究統括／上席研究員

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	国立研究開発法人 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター 研究統括／上席研究員
委員	紀伊 雅敦	香川大学 創造工学部 建築・都市環境コース 教授
	黒沢 厚志	（一財）エネルギー総合工学研究所 研究理事 主席研究員
	末広 茂	（一財）日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット グループマネージャー 研究主幹
	堂脇 清志	東京理科大学 理工学部 経営工学科 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

	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	（一財）電力中央研究所 グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 上席研究員
	横　木　裕　宗	茨城大学大学院 理工学研究科 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
	副　島　　勉	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

＜経済分析 WG＞

主　　査	野　村　浩　二	慶應義塾大学産業研究所 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	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	伊香賀　俊　治	慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科 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
	梶　野　　勉	（株）豊田中央研究所 第一要素研究企画・推進室 主席研究員
	金　成　修　一	（一財）日本自動車研究所 エネルギー・環境研究部 環境評価グループ
	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	香川大学 創造工学部 建築・都市環境コース 教授
	小宮山　涼　一	東京大学大学院 工学系研究科 レジリエンス工学研究センター 准教授

	齋　藤　　潔	（一社）日本電機工業会 環境ビジネス部 次長
	清　水　敦　志	パナソニック（株） イノベーション推進部門 エネルギー事業開発室 エネルギーPF プロジェクト プロジェクトマネージャ
	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 戦略企画管理室第 1 ブロック チーフエンジニア エキスパートエンジニア（EE）
	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 アジア太平洋学部 准教授
	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）エネルギー本部 ZEB・スマートコミュニティ部 部長（担当）
	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
	ジョニ･ジュペスタ	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 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　通　秀　樹	（株）日本総合研究所 創発戦略センター 部長（IoT システム推進担当）
	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 研究開発部門 第四研究ユニット H3 ロケットプロジェクトチーム（併任） 主任研究開発員
	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 教授
	古　橋　　真	ソニーグループ（株） サステナビリティ推進部 環境グループ
	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 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 研究所長
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	国立研究開発法人 国立環境研究所 地球システム領域 副領域長
	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 准教授
	高　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 アジア太平洋学部 准教授
	松　田　裕　之	横浜国立大学大学院 環境情報研究院 教授
	森　　信　人	京都大学 防災研究所 沿岸災害研究分野 教授
	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
	ジョニ･ジュペスタ	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 研究員

目　　次

要　約 3

第 1 章 はじめに 17

1.1 背景 18

1.1.1 世界の温室効果ガス排出の動向 18
1.1.2 気候変動枠組条約パリ協定 20
1.1.3 国連持続可能な発展目標 21
1.1.4 日本のエネルギーおよび地球温暖化政策の動向 22
1.1.5 欧州排出量取引制度の動向 35
1.1.6 IPCC 関連の動向 36

1.2 本研究の目的と実施内容 36

第 2 章 気候変動リスクマネージメント 42

2.1 気候変動リスクマネージメントの考え方 42

2.2 IPCC 第 6 次評価報告書 WG1 の概要 51

2.2.1 気候の現状 51
2.2.2 将来予測 54
2.2.3 気候感度 59
2.2.4 残余カーボンバジェット 61
2.2.5 地球温暖化係数 63
2.2.6 まとめ 63

2.3 IPCC 第 6 次評価報告書 WG2 の概要 64

2.3.1 気候変動のリスクとそれを取り囲むシステムの相互作用 64
2.3.2 観測された影響 66
2.3.3 将来の影響 67
2.3.4 適応策と課題 70
2.3.5 まとめ 73

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 74

2.4.1 民間企業におけるイノベーションを生む改善の連鎖の有効性 75

2.4.2 スタートアップ投資に関する事例検討 76
2.4.3 まとめ 78

第 3 章 グリーン成長の限界と機会 79

3.1 グリーン成長の限界と機会：世界の経済成長と CO_2 排出の関係 79

3.1.1 デカップリングに関する議論 80
3.1.2 世界の経済成長と CO_2 排出量の関係についてのこれまでの RITE での分析 81
3.1.3 世界の CO_2 排出量等についての近年（～2019 年）の状況 84
3.1.4 世界の CO_2 排出量に影響する要因についての分析 87
3.1.5 まとめ 92

3.2 エネルギー価格高騰に対する耐性評価 94

3.2.1 エネルギー安全保障の課題 94
3.2.2 フレームワーク 96
3.2.3 日米比較 99
3.2.4 日本経済の RUEC 108
3.2.5 産業レベルの脆弱性評価 120
3.2.6 結び 124
3.2.7 補論 A：生産性統計におけるエネルギー勘定 126
3.2.8 補論 B：FIT は太陽電池の価格低下を加速させたか 129
3.2.9 付図表 133

3.3 間接的な電力輸入 145

3.3.1 政策評価と現実の乖離 145
3.3.2 フレームワーク 146
3.3.3 電力の実効輸入依存 149
3.3.4 結び 167
3.3.5 補論 A：ベンチマーク産業連関表 169
3.3.6 補論 B：電力需要見通しと実績 170

3.4 日本の産業界の温室効果ガス排出削減の取り組み状況の分析 172

3.4.1 経団連における地球温暖化対策の取り組みの概要 173
3.4.2 低炭素社会実行計画（カーボンニュートラル行動計画）の参加業種における排出削減努力の分析 175
3.4.3 まとめ 183

3.5 再生可能エネルギー導入の国内外の動向 184

3.5.1 世界における再生可能エネルギーの導入状況 184
3.5.2 日本における再生可能エネルギーの導入状況 191

3.6 エネルギーシステム改革と温暖化対策 197

3.6.1 電力自由化の市場と温暖化対策 197
3.6.2 エネルギーインフラにおける気候変動への適応 205

3.7 グリーンファイナンスの動向とモデル分析例の整理 207

3.7.1 金融部門における気候関連リスク分析の取り組みと背景 207
3.7.2 NGFS による気候シナリオの概要 207
3.7.3 NGFS シナリオに基づいた使用例 216
3.7.4 考察 216

3.8 気候変動政策に伴う費用負担の格差拡大の課題 218

3.8.1 はじめに 218
3.8.2 分析における想定 219
3.8.3 分析結果 222
3.8.4 感度分析：費用効率的な電力料金の進展による影響の感度分析 225
3.8.5 2030 年新 NDC に基づく分析 226
3.8.6 まとめ 228

第 4 章 中期緩和対策（パリ協定国別貢献 NDCs）分析 231

4.1 2030 年の排出削減目標（NDCs）に関する分析・評価 231

4.1.1 世界各国の NDCs の排出削減目標の状況 231
4.1.2 直近の社会経済情勢のモデル分析への反映 233
4.1.3 NDCs の排出削減努力の評価 249
4.1.4 過去の NDCs の排出削減費用推計との差異の検討 264

4.2 国際競争力への影響・国境炭素調整の評価 267

4.2.1 はじめに 267
4.2.2 2030 年の日本の NDC 排出削減目標に関する経済影響分析 268
4.2.3 2030 年 NDC 排出削減目標下における国境調整措置に関する分析 282

4.3 排出削減努力等の研究事例の調査 293

4.3.1 現状および NDCs の排出削減努力の評価 293
4.3.2 国境調整税に関する動向調査とモデル試算例 298

第 5 章 長期緩和シナリオ分析 305

5.1 長期温暖化対策技術（ゼロエミッションに向けた技術等）の調査 ..306
5.1.1 需要サイドの対策の動向、調査等 306
5.1.2 再エネの技術動向とグリーンイノベーション基金等の政策動向 317
5.1.3 二酸化炭素除去（CDR）の技術動向 335
5.1.4 水素、アンモニア、合成燃料の技術動向 347
5.2 長期緩和策分析とそのインプリケーション 371
5.2.1 長期緩和策分析のモデル概要 371
5.2.2 日本の CN シナリオ分析 388
5.2.3 世界の CN シナリオ分析 396
5.2.4 水素関連の分析 410
5.2.5 航空部門関連の分析 422
5.3 日本における家庭の財、サービス需要：生活行動の長期的な変化の検討 434
5.3.1 はじめに 434
5.3.2 調査概要 434
5.3.3 生活行動とエネルギー消費量に関する既往研究や既往統計の情報収集 435
5.3.4 生活行動・消費行動に関するアンケート調査 445
5.3.5 生活行動モデルの定量化 489
5.3.6 まとめ 505
5.4 最終需要サイドの分析の開発 507
5.4.1 最終需要部門の変化に伴う統合的な分析 507
5.4.2 サービス需要のトランスフォーメーションの素材需要・供給分析のモデル開発 536
5.4.3 消費者の多用性を考慮した需要サイドのモデル分析の検討 549
5.5 IT 等の進展による食料システムにおける排出削減の分析 573
5.5.1 背景と目的 573
5.5.2 分析方法 574
5.5.3 分析結果 581
5.5.4 まとめと課題 585
5.6 地球温暖化対策と土地利用・食料アクセスに関する分析 587
5.6.1 背景と目的 587
5.6.2 FAI 分析の枠組み 588
5.6.3 大気中 CO_2 直接回収(DAC)の影響：食料価格推計に対する感度分析 ... 594

5.6.4 その他技術の利用拡大による影響 603
5.6.5 まとめと課題 607

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 611

6.1 主要国の長期正味ゼロ排出等に関するモデル分析の動向 611

6.1.1 長期低排出戦略 611
6.1.2 正味ゼロ排出目標の状況 612
6.1.3 正味ゼロ排出目標の気温上昇への影響 613
6.1.4 国やセクターによる正味ゼロ排出目標の違い 614
6.1.5 実現可能性の評価 618
6.1.6 米国の事例 619
6.1.7 EU の事例 622
6.1.8 中国の事例 625

6.2 国際モデル比較プロジェクト分析等の動向（ENGAGE） 629

6.2.1 実現可能なパス（WP2 Task 2.4） 632
6.2.2 オーバーシュートの回避 635
6.2.3 今後の予定 635

6.3 国際エネルギー機関 IEA のシナリオに関する調査 637

6.3.1 WEO2021 の概要と課題 637
6.3.2 IEA NZE と DNE21+の CN シナリオとの比較 663

6.4 エネルギーイノベーションのビジネスモデルの調査 672

6.5 長期正味ゼロ排出目標に関する海外分析事例の調査 675

6.5.1 はじめに 675
6.5.2 ソーラージオエンジニアリングに関する社会科学研究 675
6.5.3 パリ協定に基づく長期シナリオ下で、DAC が経済効率と不平等に与える影響 680
6.5.4 WITCH モデルによる、再生可能エネルギー由来の炭化水素に関する分析 688

第 7 章 まとめ 694

付録 1 ALPS 国際シンポジウム 701

付録２　国際競争力・国境炭素調整措置に関する WS 概要 711

要　　約

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」報告書

要　約

本報告書は、令和３年度における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」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。COVID-19 の影響により 1 年遅れで英国グラスゴーにて第 26 回締約国会議（COP26）が開催された。パリ協定の詳細ルールの策定の内、先送りされていた協定 6 条に関する市場メカニズムに関連したルールの策定が議論され、ようやく合意を得た。

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。世界の多くの国と地域が、2050 年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。また、中国も 2060 年までに、インドは 2070 年までに実質ゼロ排出を目指すとした。米国は、2021 年 1 月にトランプ政権からバイデン政権へと移行し、パリ協定に復帰、また 2021 年 4 月には気候サミットを主宰し、各国に 2030 年排出削減目標の深堀を要請した。これに対応し、日本政府は、2021 年 4 月に、2030 年の温室効果ガス排出削減目標を 2013 年度比 26%減から 46%減、更に 50%減の高みを目指すと深堀を行った。その他、先進国を中心に 2030 年目標の深堀が行われた。このように、意欲的な排出削減を目指す動きが国内外で加速してきている。そして、2021 年 10 月には、第 6 次エネルギー基本計画が閣議決定され、また、地球温暖化対策計画、および、パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略についても改定し閣議決定された。

一方で、2021 年 11 月に英国グラスゴーで開催された COP26 では、国連や英国政府等が意図した合意が得られたわけではなかった。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。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）においては、第 6 次評価報告書等の作成に向けて、気候変動に関する最新の科学的知見の提供が求められている。

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。

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、それをもって、地球温暖化対策と経済成長の両立（グリーン成長)、長期戦略における「環境と成長の好循環」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 WG1 および WG2 の最新の評価報告書の知見の概要についても整理した。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、世界主要国の消費ベース CO_2 排出量の推計を行った。また、エネルギー価格変動に対する日本経済の耐性の評価、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、グリーン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（2030 年頃）に関する分析・評価を行った結果をまとめた。各種制約に伴う NDCs 達成の排出削減費用の上昇等について分析するとともに、国際競争力への影響についても評価を行った。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 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、国際モデル比較プロジェクトの各種動向、国際エネルギー機関 IEA 等のシナリオ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。IPCC による気候変動の科学（WG1）と気候変動の影響・適応（WG2）に関する最新の評価について知見の整理を行った。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ことを指摘した。また長期でも気温推計の不確実性や社会経済の不確実性等から、仮に 2℃や 1.5℃目標などを定めたとしても、気候変動緩和コストの不確実性もかなり大きいと見られる（これらの具体的な評価は第 5 章に記載)。更に気候変動枠組みの政治的な安定性という課題も存在している。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。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、「環境と経済の好循環」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、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。最新データに基づき、日本における製品等に体化された間接的な電力輸入の推計も実施した。また、エネルギー価格変動に対する日本経済の耐性についての評価も実施した。更に、日本の産業界が取り組んでいる低炭素社会実行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、欧州や日本などにおける再生可能エネルギー導入状況とその課題について調査を行った。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等についてまとめた。更には、グリーン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（2030 年頃）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。パリ協定採択の 2015 年以降、COVID-19 の影響を含め国際的な経済の見通しも変化してきている。また、先述のように、先進国を中心に多くの国が NDC の 2030 年の排出削減目標の深堀を行った。そこで、本研究では最新の動向をふまえ、排出削減費用を含む、複数の指標を採用し、各国 NDCs の排出削減努力の国際比較を実施した。また、日本の新たな 2030 年の排出削減目標-46%について、その経済影響についても分析・評価を行った。日本の排出削減目標実現には、大きな排出削減費用と経済影響が推計された。なお、国際的な NDCs 評価の文献についても整理を行った。

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、2030 年の NDCs の下での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。先述のように、日本政府を含む、世界の多くの国が、2050 年にカーボンニュートラルを目標に掲げた。このような状況を踏まえ、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。特に、日本の 2050 年カーボンニュートラル目標については、本事業で実施したシナリオ分析を、第 6 次エネルギー基本計画の議論を行った、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会に提供し、カーボンニュートラル実現のための方向性の議論に貢献した。

具体的には、エネルギー供給サイドについては、カーボンニュートラル実現において、より一層重要性が増すと考えられる、水素や水素系燃料である、アンモニア、合成燃料（合成メタン、合成液体燃料）の技術調査、各種の経済性評価に関する調査を行った。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）についても技術調査、各種の経済性評価に関する調査を行った。これらの調査は、DNE21+モデルによる 2050 年カーボンニュートラル分析においても反映した他、その可能性についての感度解析も実施した。

エネルギー需要サイドについては、IoT、AI 技術等による低エネルギー需要実現の可能性について、完全自動運転車実現によるカーシェアリング・ライドシェアリング誘発の影響の評価や食料システムにおける食料廃棄の低減の可能性とその影響評価、アパレルの動向とアパレル分野における製品に体化されたエネルギーを含む、エネルギー低減、CO_2 排出量低減の可能性と課題などについて調査し、整理を行った。さらには、消費行動を包括的に評価するため、COVID-19 による生活行動の変化について調査した。そして、デジタル化等の技術変化や社会変化が、生活行動にどのような影響を与え、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検討や、技術普及における「隠れた費用」の推計についての調査等を行った。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。

また、持続可能な発展と気候変動対策との調和という視点から、土地利用、食料需給との関係性についても分析を行った。

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）は、2021 年 5 月に、Net Zero by 2050 において世界の 2050 年カーボンニュートラル（NZE）シナリオを発表し、また 2021 年 10 月に発表した世界エネルギー展望 WEO2021 でも、他のシナリオとともに NZE シナリオのより詳細な解説を行った。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。国際モデルプロジェクトとしては、欧州委員会が研究

資金を提供し IIASA が主宰するパリ協定目標を技術的、社会的、政治的に達成可能な排出削減経路を分析・評価する ENGAGE (Exploring National and Global Actions to reduce Greenhouse gas Emissions) プロジェクトの動向について概要をまとめた。

パリ協定は、市場メカニズム関連のルールについても合意がなされ、実施の形態は固まった。一方、COP26 での議論は、パリ協定そのものから、1.5℃目標の合意や、2030 年の排出削減目標の深堀、もしくは個別の対策についての合意など、首脳間などでの合意に焦点が移ったと言える。しかし、COP26 終了時に、英国政府が不満を見せたように、実効性を伴って、世界が 1.5℃未満の目標を達成できるのか、もしくは、2050 年のカーボンニュートラルといった目標が達成できるのか、については大きな不透明性が残ったままと言える。確かに、ここ 1 年あまりの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る。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。国際的な公式の場での意欲的な目標に、実行が伴うものかは、見極めが必要である。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「環境と経済の好循環」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 2021: Project for cooperation of international organizations on climate change mitigation

“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 2020 as part of METI’s promotion program for cooperation of international organizations on climate change mitigation.

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. COP26 was held in Glasgow, UK, one year later than originally scheduled due to COVID-19 pandemic. The rules related to the market mechanism regarding Article 6 of the Agreement, which had not been resolved, was agreed upon and the Paris rulebook was finally completed. In June 2019, the Japanese government developed a "long-term strategy as a growth strategy based on the Paris Agreement," in which it "aims to achieve net zero emissions as early as possible in the second half of the 21st century. In October 2020, Prime Minister Suga declared in his policy speech that he would "aim to achieve a carbon-neutral, decarbonized society by 2050. In December 2020, the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) took initiative in formulating the “Green Growth Strategy”. Many countries and regions around the world have pledged to be carbon neutral by 2050, and the world is entering an era in which addressing global warming is seen as an opportunity for economic growth. China and India have also announced that they aim to achieve net zero emissions by 2060 and 2070, respectively. With the transition from the Trump administration to the Biden administration in January 2021, the United States returned to the Paris Agreement and hosted a climate summit in April 2021, urging countries to dig deeper into their 2030 emission reduction targets. Responding to this, the Japanese government strengthened its greenhouse gas emission reduction target for 2030 from a 26% reduction compared to the FY2013 level to a 46% reduction, and then possibly to a 50% reduction in April 2021. The 2030 target has been strengthened, especially in

developed countries. In this way, the movement toward ambitious emission reductions is accelerated in Japan and abroad. In October 2021, the Cabinet approved the Sixth Basic Energy Plan, as well as the Global Warming Prevention Plan and the Long-Term Strategy as a growth strategy based on the Paris Agreement.

On the other hand, COP26, held in Glasgow, UK in November 2021, did not result in the agreement that the UN and the UK government had expected. Although the international community is generally aware of the need to strengthen climate actions, there is still a large gap in terms of specific measures among countries. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is to provide the latest scientific knowledge on climate change in the Sixth Assessment Report and other documents. In this context, it is becoming even more important to comprehensively consider the situation of each country, region, and industry, as well as to conduct various assessments and analyses that can contribute to the formulation of climate policies.

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. Our goal is to contribute to the development of an international framework and of a national strategy under which economic growth and climate measures would be compatible (green growth), creating “a virtuous cycle between environment and growth" in the long-term strategy.

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. Overall findings of the latest assessment reports of IPCC WG1 and WG2 was also summarized. Besides, we discuss the role of innovation for climate risk management by compiling the possibilities of innovation for climate change mitigation. Chapter 3 estimates consumption-based CO_2 emissions on the global level and for major countries in order to search for green growth opportunities while properly recognizing its limits. Furthermore, we assessed the resilience of the Japanese economy to energy price fluctuations, analyzed policy issues for electricity market liberalization and climate policy, and reviewed the trend and modelling-based analyses on green finance. In Chapter 4, we analyze and assess mid-term climate change mitigation through a compilation of the post-2030 targets of the Nationally Determined Contributions (NDCs) contained in the Paris Agreement. In particular we assessed the effect on global competition by analyzing how various constraints increase the cost of achieving the NDCs. 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.

Chapter 6 describes the results of a survey on the latest trends in overseas climate policies, as well as an overview of international model comparison projects and 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. The findings of the IPCC's most recent assessments of the science of climate change (WG1) and climate change impacts and adaptation (WG2) are pulled together. 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. Besides, although the long-term target has been set at 2ºC or 1.5 ºC, given the uncertainty around future average temperature as well as future socioeconomic pathways, the uncertainty in mitigation costs is very important as well (which will be evaluated in detail in Chapter 5). In addition, the political stability of the climate change framework is also an important issue. 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 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 quantitative data on the decoupling between the economy and CO_2 emissions, and examined the factors behind this. Based on the latest

data, we estimated the indirect electricity imports embeded in products made in Japan and assessed the resilience of the Japanese economy to energy price fluctuation. The performance of the Low Carbon Society Action Plan, which is being implemented by Japanese industry, including the perspective of green growth, was preliminary evaluated in terms of emission reduction efforts.

Besides, we conducted literature review on the current situation of renewable integration in Europe and Japan and related issues. Since the Chinese government has implemented renewable energy deployment for poverty alleviation, we assessed their impacts and challenges. We discussed issues to be addressed in promoting global warming mitigation under deregulation of electric power. Furthermore, we summarized the trend in Green Finance and its 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. Since 2015, when the Paris Agreement was adopted, the international economic outlook has been changing, including the impact of COVID-19. In addition, as mentioned earlier, many countries, especially developed countries, have strengthened their emission reduction targets for 2030 in their NDCs. Therefore, in this study, based on the latest trends, we conducted an international comparison of the emission reduction efforts of NDCs in each country by adopting several indicators, including emission reduction costs. We also analyzed and evaluated the economic impact of Japan's new 2030 emission reduction target of 46%. The cost and economic impact of Japan's new emission reduction target of 46% in 2030 are estimated to be significant. In addition, literature on international NDCs assessment was also reviewed. We conducted a literature review and sorted peer-reviewed publications regarding NDCs assessment.

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 under the NDCs in 2030. 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. As mentioned above, many countries, including the Japanese government, have set a goal of carbon neutrality by 2050. In light of this situation, we analyzed both

energy supply and demand side energy systems in the DNE21+ model, a global energy and climate change assessment model. In particular, for Japan's 2050 carbon neutrality target, the scenario analysis conducted in this project was provided to the Strategic Policy Committee of the Advisory Committee for Natural Resources and Energy, which discussed the Sixth Basic Energy Plan, and contributed to the discussion for carbon neutrality.

Specifically, on the energy supply side, we conducted a technical survey on hydrogen and hydrogen-based fuels, such as ammonia and synthetic fuels (synthetic methane and synthetic liquid fuels), which are expected to become more and more important in achieving carbon neutrality, as well as a survey on various economic evaluations. We also conducted a technical survey on carbon dioxide removal (CDR) technologies, such as direct atmospheric capture and storage (DACCS), and various economic evaluations. These studies were also reflected in the 2050 carbon neutrality analysis using the DNE21+ model, and sensitivity analyses of the feasibility are also made.

As for the energy demand side, we investigated and summarized the possibility of realizing low energy demand through IoT and AI technology, etc. We also evaluated the impact of the realization of fully automated vehicles on inducing car sharing and ride sharing, the possibility of reducing food waste in the food system and its impact, the trend of apparel, and the possibility and issues of reducing energy and CO_2 emissions, including energy embodied in products in the apparel sector. For a comprehensive analysis of consumer behavior, we investigated the changes in lifestyle or behavior caused by COVID-19 pandemic. We examined how technological and social changes, such as digitization, might affect our daily life and bring about changes in energy demand, and studied the estimation of "hidden costs" in technology diffusion. 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.

For the harmonization of sustainable development and climate change, we analyzed the relationship among land use change, food supply and demand

Chapter 6 describes the trends in international scenario analysis on carbon neutrality and summarizes the initiative of the international model comparison projects. In May 2021, the International Energy Agency (IEA) published the global 2050 carbon neutral (NZE) scenario in Net Zero by 2050, and in October 2021, the World Energy Outlook (WEO2021) presented a more detailed description of the NZE scenario along with other scenarios. This report outlines these scenarios and compares them with the DNE21+ scenario. As for international model projects, we summarized the ENGAGE (Exploring National and Global Actions to reduce Greenhouse gas Emissions) project, funded by the European Commission and led by IIASA, which analyzes and evaluates technically, socially, and politically achievable emission reduction pathways for the Paris Agreement targets.

As for the Paris Agreement, the rules related to the market mechanism have been agreed upon, and the form of implementation has been solidified. On the other hand, it can be said that the focus of the discussions at COP26 shifted from the Paris Agreement itself to the high-level agreement among the heads of state, such as the agreement on the 1.5°C target, the strengthening the 2030 reduction target, or the agreement on individual measures. However, as the British government complained at the end of COP26, there is still a great deal of uncertainty as to whether the world will be able to effectively achieve the goal of 1.5°C, or the goal of carbon neutrality in 2050. It is true that there has been a rapid increase in international efforts to strengthen climate actions over the past year, 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. It is necessary to keep a close eye on whether the ambitious goals expressed in official international forums are feasible. 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、現実社会における国内外の様々な制約を良く理解した上で、持続できる総合的な対策パッケージを作り上げることが重要と考えられる。

2015 年 12 月にパリで開催された国連気候変動枠組条約（UNFCCC）第 21 回締約国会議（COP21）において、2020 年以降の温室効果ガス排出削減枠組み・目標となるパリ協定が合意された。そして、2016 年 11 月 4 日に発効した。我が国も 2016 年 11 月 8 日に署名し、12 月 8 日に締約国に加わった。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。2021 年 11 月には、COVID-19 の影響により 1 年遅れとなった第 26 回締約国会議（COP26）が英国グラスゴーで開催された。パリ協定の詳細ルールの策定の内、先送りされていた協定 6 条に関する市場メカニズムに関連したルールの策定もようやく合意を得た。また、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し、排出削減対策が取られていない石炭火力発電の段階的な削減の努力を加速する、ともした。

EU は、2019 年 12 月に発足したフォン・デア・ライエン体制において、気候変動対策への意欲を示し、炭素国境調整措置の導入検討を行うとし、2021 年 7 月に具体的な炭素国境調整措置の制度案の提示がなされた。炭素国境調整措置の検討は、まさに世界の足並みが揃っていないことへの EU の懸念に他ならない。また、気候変動を含む持続可能な発展投資の適正性のガイドラインの位置づけの EU タクソノミーは、天然ガスや原子力発電の扱いについてペンディングとなっていたが、条件付きながら、天然ガス、原子力ともに適正とする最終的な案が提示された。現実を見据えた実効性を考慮した方針決定と考えられる。

一方、米国では、トランプ政権が、2019 年 11 月に正式にパリ協定離脱の申請を行い、一年後の 2020 年 11 月にパリ協定から一旦離脱した。しかし、2021 年 1 月に発足したバイデン政権は、政権発足と同時にパリ協定への再加入を表明し、再加入を果たした。バイデン政権も、気候変動対策への意欲を示すとともに、炭素国境調整措置の導入についても検討するとしている。2021 年 4 月には気候サミットを主宰し、2030 年排出削減目標の深堀を働きかけ、日本を含む、複数の国はそれに応じる形で、排出削減目標の深堀を宣言した。

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 [1)]。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[2]。そして、2021年4月には、2030年の温室効果ガス排出削減目標を2013年度比26%減から46%減、更に50%減の高みを目指すと深堀を行った。2021年10月には、第6次エネルギー基本計画[3]が閣議決定され、また、地球温暖化対策計画[4]、および、パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略[5]についても改定し閣議決定された。

世界の多くの国と地域が、2050年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。また、中国も2060年までに、インドは2070年までに実質ゼロ排出を目指すとした。COP26における有志連合による声明では、自動車に関しては、20を超える国や企業が、世界の全ての新車販売について、主要市場では2035年、世界全体では2040年までに電気自動車など二酸化炭素を排出しないゼロエミッション車とすることを目指すとし、メタン排出については、メタン排出を2030年までに2020年比で30%削減する「グローバル・メタン・プレッジ」に世界100か国以上が加わるなどの動きも見られた。

このように、意欲的な排出削減を目指す動きが国内外で加速してきている。一方で、COP26でも引き続き、各国間の対立は顕著だった。また、COVID-19パンデミックによって、一時的に落ち込んだ石油需要は回復を見せ、石油、ガス価格等が急上昇してきている。また、欧州等では、電力価格も急上昇している。COVID-19からの回復による需要増、気候変動対策の下、石油、ガス等の上流投資が滞っていること、ウクライナ情勢が緊迫してきていること、気候条件がよくなく風力発電の出力が低位となったことなどの複合的な要因と見られる。更に直近では、ウクライナ情勢は悪化の一途をたどり、全世界的にエネルギー価格やその他資源価格はじめ、物価の上昇が起こっている。エネルギー安全保障、安定供給が最優先という状況が顕著になる可能性も高い。気候変動対策の難しさや、全体システムとしての対策の重要性、移行過程の重要性などを示唆しているとも考えられる。

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、「環境と経済の両立」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）[6]。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 年の排出量は再び上昇したと見られている。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。また、EU は、通常の排出量カウント方法である生産ベース CO_2 排出量では減少傾向にあるが、それは製造業を中心としたエネルギー多消費産業が途上国に移転したことによる影響が大きく、消費ベース CO_2 排出量（もしくは需要ベース CO_2 排出量と呼ばれる）でカウントすると、生産ベース CO_2 排出量ほど減少していない（図 1.1.1-3）。グローバル経済の中での産業の移転が起こっていることが大きい。ゆえに、世界全体で見ると、CO_2 排出量は低下せず、上昇が続いている結果にもなっている。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。

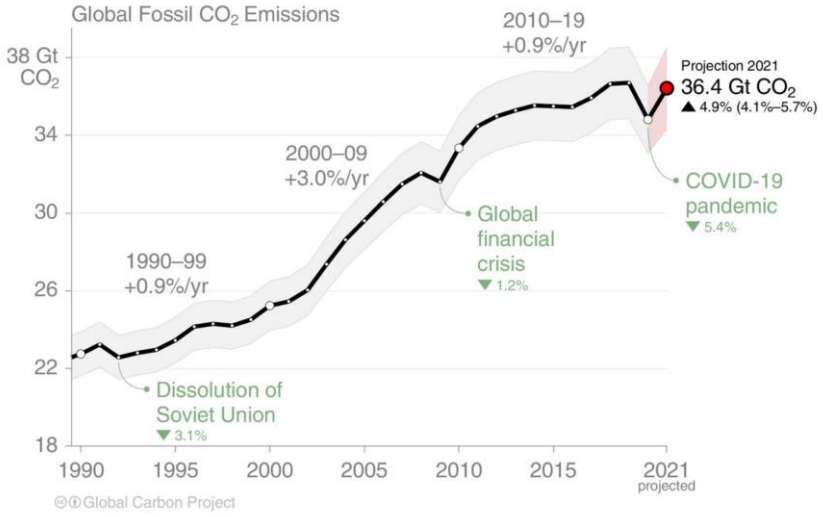


図 1.1.1-1 世界の CO_2 排出量推移（化石燃料燃焼および産業プロセス）
（出典：Global Carbon Project[6)]）

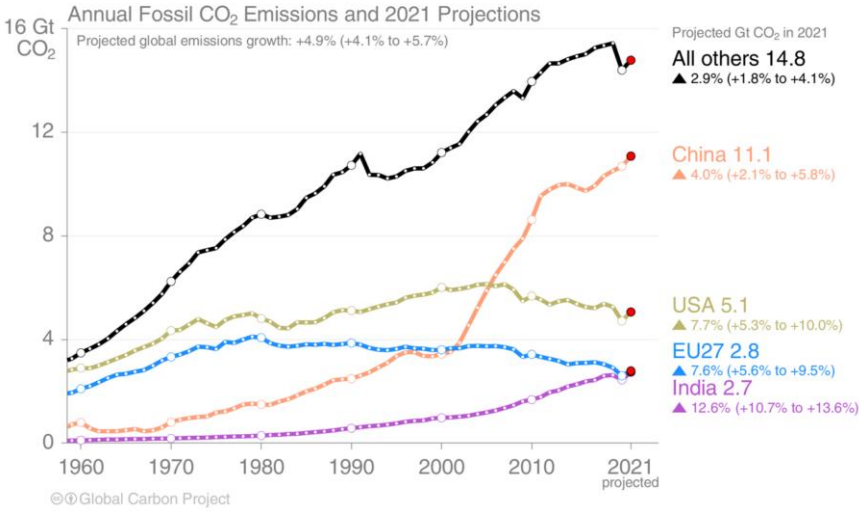


図 1.1.1-2 主要国別の CO_2 排出量推移（化石燃料燃焼および産業プロセス）
（出典：Global Carbon Project[6)]）

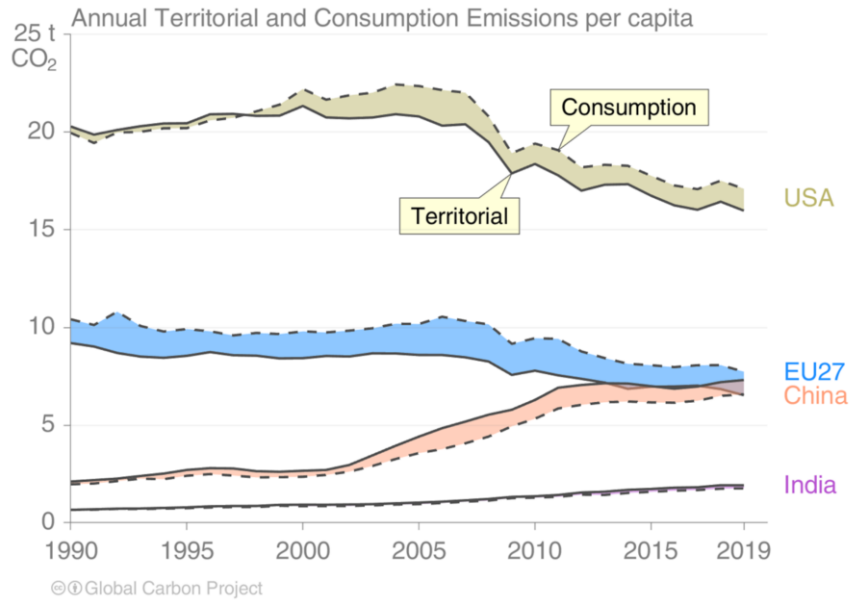


図 1.1.1-3 世界主要排出国の生産ベース CO_2 と消費ベース CO_2 排出量の推移
（出典：Global Carbon Project[6)]）

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る。協定 6 条に関わる市場メカニズム関連のルールは、COP24、COP25 と合意できなかったが、2021 年 11 月の COP26 でようやく合意された。これにより、パリ協定実施の枠組みが一応の完成をみることとなった。

本研究では、NDCs (Nationally Determined Contributions)の評価手法の提案とその評価についても実施した（第 4.1 節）。本年度は、排出削減目標の引き上げが相次いだため、それらを反映するとともに、最新の経済状況を踏まえた分析を実施した。また、国内政策によって、NDCs の削減費用がどの程度上昇するか等について分析を行った。

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 事務局に提出していたが、「2050 年カーボンニュートラル」宣言を受け、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 事務局に再提出した。

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。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の分析は重要な位置づけを占める（5.3～5.4 節）。特にイノベーションによって、経済自律的に低エネルギー需要が実現すれば、SDGs の同時達成に大きな貢献を果たす可能性が高い。



図 1.1.3-1 国連持続可能な発展目標（SDGs）（出典：UN[7)]）

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、2013 年度をピークに電力消費量の低下や電源の排出原単位の改善等によって前年度比で排出減の傾向が続いている（図 1.1.4-1）[8)]。2020 年排出量（速報値）も前年比で減少し、2005 年度比では 16.8%の減少となった。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%減であったため、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 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。

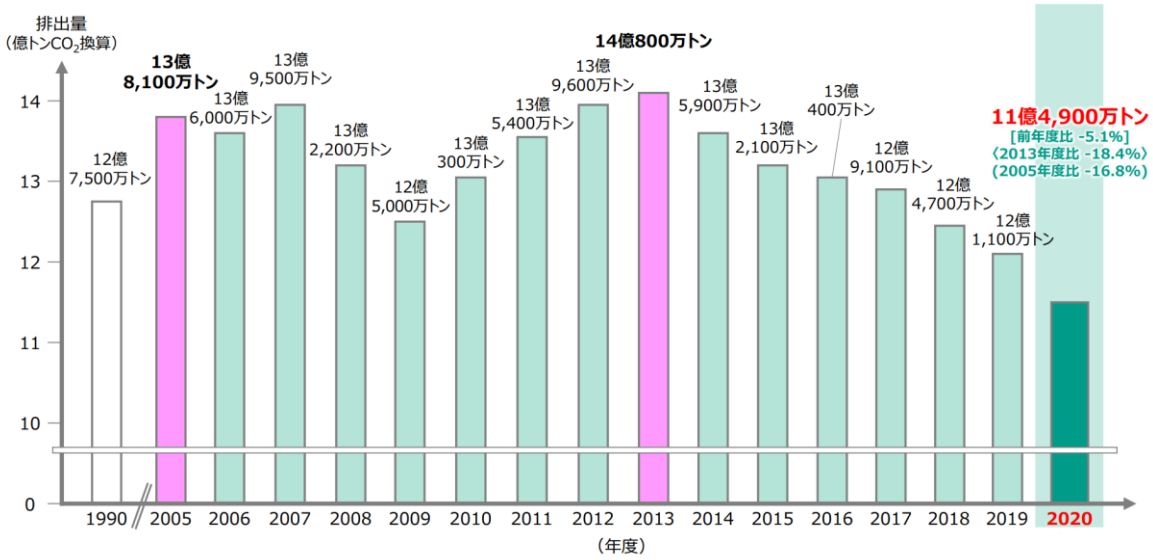


図 1.1.4-1 日本の GHG 排出量推移（出典：環境省 [8]）

日本政府は、2014 年 4 月に閣議決定された第 4 次エネルギー基本計画で強調されたとおり、安全性を大前提としつつ、3E+S（経済効率性、エネルギー安定供給・安全性、環境保全性、安全性）の政策目標を達成するという方針に基づいて、2015 年にエネルギーミックス（長期エネルギー需給見通し）策定を行った [9]。

長期エネルギー需給見通しでは、2030 年の電源構成について、石炭 26%、LNG 27%、原子力 22～20%、再エネ 22～24%程度等とされた。省エネルギーについては、省エネ・温暖化対策前の基準ケースと比較して、最終エネルギー全体では 13%の低減、電力では 17%の低減を見込んだ。（2018 年に第 5 次エネルギー基本計画では、エネルギーミックス（長期エネルギー需給見通し）は改定されなかった。）これをベースに、2030 年の温室効果ガス排出削減目標を 2013 年度比 26%減とし、日本の NDC として提出された。

2021 年には、エネルギー基本計画の議論が本格的になされ、2021 年 10 月に第 6 次エネルギー基本計画 [3]が閣議決定された。また地球温暖化対策計画も改定 [4]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。第 6 次エネルギー基本計画、地球温暖化対策計画については後述する。

(2) 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」[10]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 1.1.4-2）、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[11]。

そして、経団連は、2021 年 11 月に低炭素社会実行計画を、2050 年カーボンニュートラルに向けたゴールを明確化する形にして、カーボンニュートラル行動計画（CN 行動計画）を策定し公表した[12]。

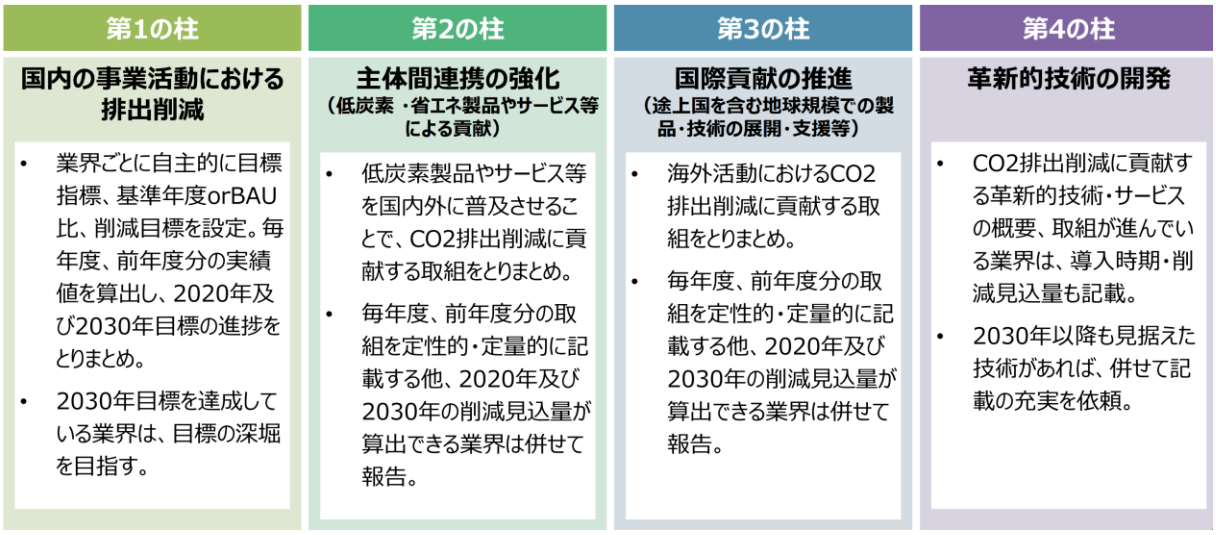


図 1.1.4-2 低炭素社会実行計画における 4 つの柱（出典：経産省[13]）

日本の自主行動計画とその後の低炭素社会実行計画は、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。

表 1.1.4-1 は、低炭素社会実行計画の 2019 年度実績のレビュー結果である[14]。多くの業種において、2020 年度目標を達成済みであるが、わずかではあるが目標を下回っている業種も残っている。また、2020 年度実績はとりまとめ中であるが、COVID-19 の影響により生産活動量が大きく落ち込んだ業種もあり、原単位目標を掲げている業種においては、指標が急激に悪化した業種も見られる。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。

表 1.1.4-1 低炭素社会実行計画レビュー（出典：産業構造審議会 [14]）

経済産業省41業種+環境省3業種	2020年目標	2030年目標
2019年度実績が目標水準を上回る	35業種	17業種
基準年度比/BAU比で削減しているが、2019年度実績において目標水準には至っていない	5業種	23業種
2019年度実績が基準年度比/BAU比で増加しており、目標水準には至っていない	2業種	2業種
データ未集計等	2業種	2業種

(3) 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（表 1.1.4-2）。また、平地面積あたりの各国再エネおよび太陽光・陸上風力の発電電力量では、世界最高水準となっている（図 1.1.4-3）。

表 1.1.4-2 再生可能エネルギーの発電電力量の変化（出典：調達価格委員会 [15]資料）

発電電力量の国際比較（水力発電除く）

単位：億kWh

	2012年	2019年
日本	309	→ 1,056 3.4倍
EU	3,967	→ 6,600 1.7倍
ドイツ	1,213	→ 2,227 1.8倍
イギリス	359	→ 1,146 3.2倍
世界	10,586	→ 27,938 2.8倍

出典：IEA データベースより資源エネルギー庁作成

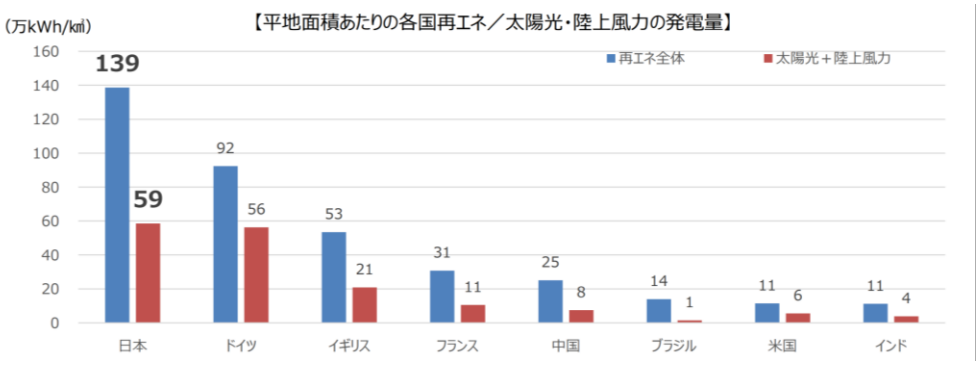


図 1.1.4-3 平地面積あたりの各国再エネおよび太陽光・陸上風力の発電電力量（2018年時点）比較（出典：総合資源エネルギー調査会資料 [16]）

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（表 1.1.4-3）、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。2021 年度見込みの買取総額は年間 3.8 兆円、賦課金（負担額）は 2.7 兆円となっている（図 1.1.4-4）。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)へ移行が行われる。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。

表 1.1.4-3 日本の再生可能エネルギー導入容量と認定容量（2021 年 3 月末時点）
（出典：調達価格委員会 [15]資料）

<2021年3月末時点のFIT認定量・導入量>

再生可能エネルギー発電設備の種類	設備導入量（運転を開始したもの） 固定価格買取制度導入前 2012年6月末までの累積導入量	固定価格買取制度導入後 2012年度（7月～3月末）・2013年度の導入量	2014年度の導入量	2015年度の導入量	2016年度の導入量	2017年度の導入量	2018年度の導入量	2019年度の導入量	2020年度の導入量	制度開始後合計	認定容量 固定価格買取制度導入後 2012年7月～2020年3月末
太陽光（住宅）	約４７０万kW	207.4万kW（476,577件）	103.5万kW（228,697件）	85.7万kW（179,408件）	79.1万kW（161,356件）	65.9万kW（133,279件）	73.2万kW（146,685件）	76.8万kW（152,239件）	75.8万kW（141,551件）	**767.5万kW**（1,619,792件）	**791.8万kW**（1,659,416件）
太陽光（非住宅）	約９０万kW	677.2万kW（123,730件）	837.2万kW（152,807件）	815.2万kW（115,962件）	544.5万kW（72,578件）	474.8万kW（53,363件）	490.7万kW（54,828件）	488万kW（49,174件）	500万kW（33,322件）	**4,827.7万kW**（655,764件）	**6,757.9万kW**（781,979件）
風力	約２６０万kW	11万kW（21件）	22.5万kW（24件）	14.8万kW（58件）	31万kW（152件）	17.8万kW（322件）	17万kW（517件）	46.8万kW（340件）	36.2万kW（268件）	**197万kW**（1,702件）	**1,306.3万kW**（8,006件）
地熱	約５０万kW	0万kW（2件）	0.4万kW（9件）	0.5万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）	1.3万kW（8件）	**9.1万kW**（76件）	**15.9万kW**（103件）
中小水力	約９６０万kW	0.6万kW（39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（89件）	16.6万kW（79件）	**69.7万kW**（623件）	**156万kW**（820件）
バイオマス	約２３０万kW	8.7万kW（46件）	18万kW（48件）	31.4万kW（57件）	35.1万kW（67件）	49.1万kW（75件）	30.7万kW（61件）	48.0万kW（62件）	44.2万kW（56件）	**265.1万kW**（472件）	**796.2万kW**（734件）
合計	約2,０６０万kW	904.8万kW（600,415件）	990.2万kW（381,641件）	957万kW（295,582件）	698.1万kW（234,262件）	615.8万kW（187,148件）	618.5万kW（202,187件）	677.6万kW（201,910件）	674.2万kW（175,284件）	**6,136.1万kW**（2,278,429件）	**9,824.2万kW**（2,451,058件）

62.4%

※ 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。
※ 改正FIT法による失効分（2021年3月時点で確認できているもの）を反映済。

＜買取総額の内訳＞			
住宅用太陽光		0.3兆円	7%
事業用太陽光	2012年度認定	0.8兆円	22%
	2013年度認定	1.1兆円	60% 28%
	2014年度認定	0.4兆円	10%
	2015年度認定	0.1兆円	3%
	2016年度認定	0.1兆円	3%
	2017年度認定	0.04兆円	1%
	2018年度認定	0.1兆円	3%
	2019年度認定	0.02兆円	0%
	2020年度認定	0.001兆円	0%
	2021年度認定	0.0001兆円	0％
	（合計）	（2.7兆円）	（70%）
風力発電		0.2兆円	5%
地熱発電		0.02兆円	0.4%
中小水力発電		0.1兆円	3%
バイオマス発電		0.5兆円	14%
合計		3.8兆円	—

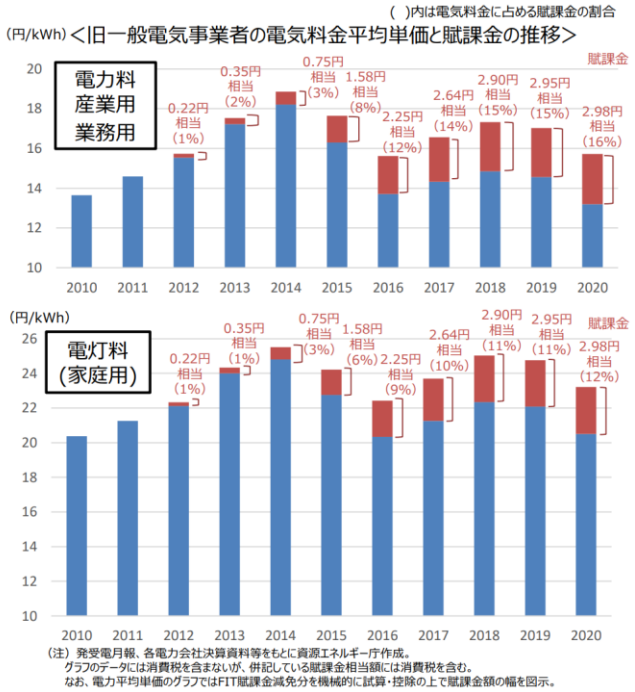


図 1.1.4-4 再生可能エネルギーの費用負担の推移（出典：経済産業省 [15]）

(4) 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 月からガス導管部門の法的分離が予定されている。

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（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）。

(5) エネルギー基本計画

エネルギー基本計画は 3 年に 1 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 [3]が、2021 年 10 月に閣議決定された。

2020 年 10 月の総合資源エネルギー調査会基本政策分科会資料[17]では、第 5 次エネルギー基本計画[18]以降のエネルギーをめぐる状況変化を踏まえた、今後の検討の主な視座として、以下の点が提示されていた。これらの視座や、「2050 年カーボンニュートラル」宣言、そして 2030 年目標としての 2013 年度比 46%削減（さらに 50%減の高みを目指す）の宣言を踏まえながら、新たなエネルギー基本計画が策定された。

① 国際情勢の変化
1) 自国第一主義の台頭
2) 新型コロナウィルス感染症拡大の教訓
3) 中東を巡るパワーバランスの変化
4) 気候変動問題への危機感の高まり
5) 新たなテクノロジーの台頭

② 国内情勢の変化
1) エネルギー供給基盤の揺らぎ
2) 電力自由化と再エネ拡大による投資環境の変化
3) 新たな技術の可能性拡大が道半ば

図 1.1.4-5 は、2030 年のエネルギーミックスの姿における電源構成の見込みである[19]。第 6 次エネルギー基本計画では、46%減の目標がとても厳しい目標であるため、エネルギーミックスの数値も「野心的な見通し」とした。一方で、エネルギー政策の要諦は、安全性を前提とした上で、エネルギーの安定供給を第一とし、経済効率性の向上による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に、環境への適合を図る S+3E の実現のため、最大限の取組を行うこととしている。環境対応は重要であるが、S+3E の実現が重要で、とりわけエネルギーの安定供給の重要性、優先度の高さを指摘したものとなっている。

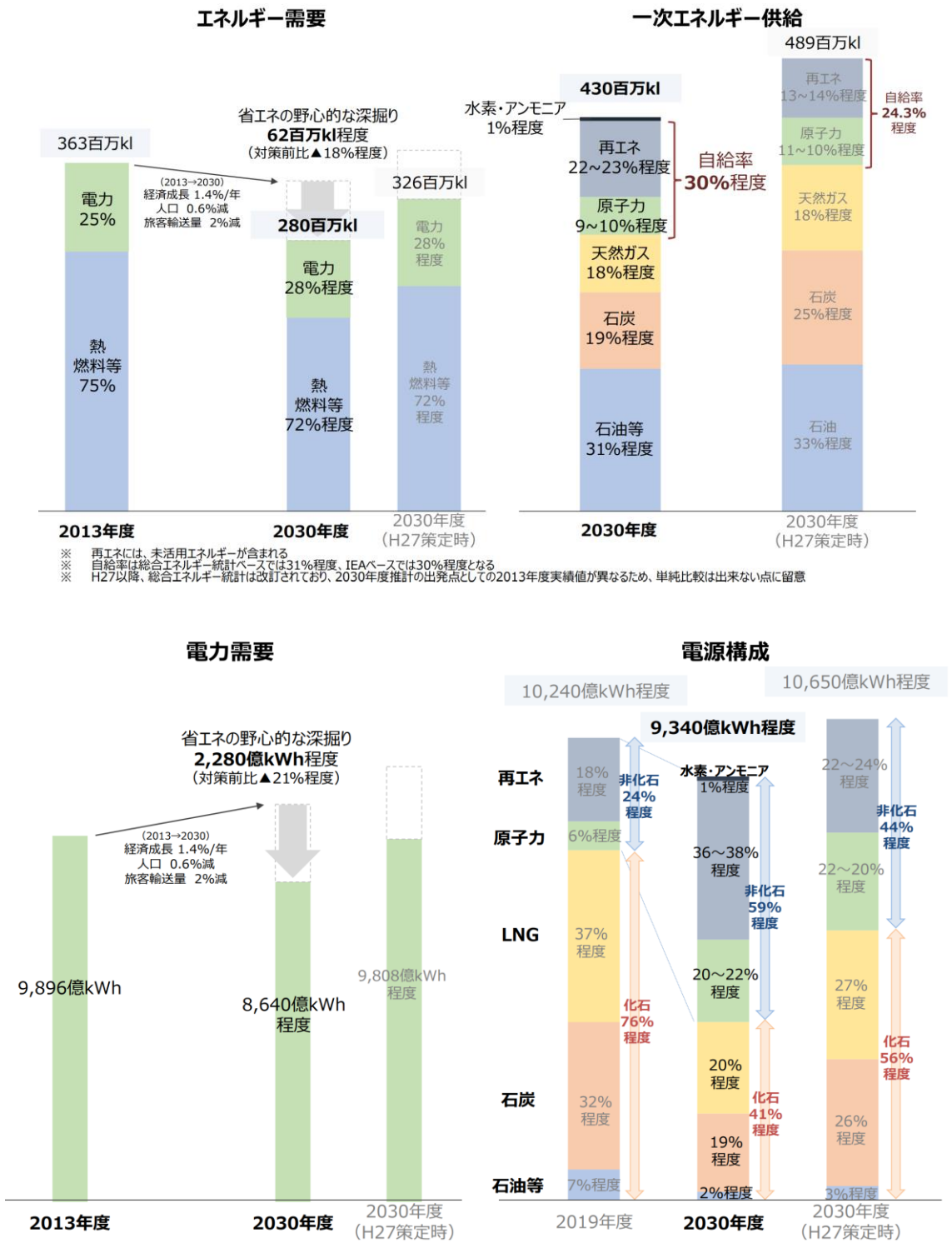


図 1.1.4-5 第 6 次エネルギー基本計画：2030 年エネミックス（出典：経済産業省 [19]）

(6) 地球温暖化対策計画

46%減の目標を受ける形で、地球温暖化対策計画も大きく見直された。2030 年の部門別排出削減見通しは、表 1.1.4-4 のような形とされた [4]。

引き続き、産業界の排出削減への取り組みとして、低炭素社会実行計画を主に自主的な取り組みを実施、強化していく方針となっている。また、2030 年までに 100 以上の「脱炭素先行地域」を創出するとした。

表 1.1.4-4 地球温暖化対策計画における 2030 年の部門別排出削減見通し
（出典：日本政府資料 [4]）

温室効果ガス排出量・吸収量（単位：億t-CO2）			2013排出実績	2030排出量	削減率	従来目標
			14.08	7.60	▲46%	▲26%
エネルギー起源CO_2			12.35	6.77	▲45%	▲25%
	部門別	産業	4.63	2.89	▲38%	▲7%
		業務その他	2.38	1.16	▲51%	▲40%
		家庭	2.08	0.70	▲66%	▲39%
		運輸	2.24	1.46	▲35%	▲27%
		エネルギー転換	1.06	0.56	▲47%	▲27%
非エネルギー起源CO_2、メタン、N_2O			1.34	1.15	▲14%	▲8%
HFC等４ガス（フロン類）			0.39	0.22	▲44%	▲25%
吸収源			-	▲0.48	-	（▲0.37億t-CO_2）
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。			-

(7) パリ協定長期成長戦略

2018 年 8 月に内閣総理大臣の下に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略策定に向けた懇談会」が立ち上げられ、議論が行われた。そして、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」を閣議決定し、UNFCCC 事務局に日本の長期戦略として提出を行った。そこでは、「最終到達点としての「脱炭素社会」を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現することを目指す」とされた。

しかし、2020 年 10 月の菅首相（当時）の 2050 年カーボンニュートラル宣言を受け、先述のように、エネルギー基本計画、地球温暖化対策計画の改定がなされ、これら改定と同じく 2021 年 10 月に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」も改定された。図 1.1.4-6 は改定された長期戦略の概要である。

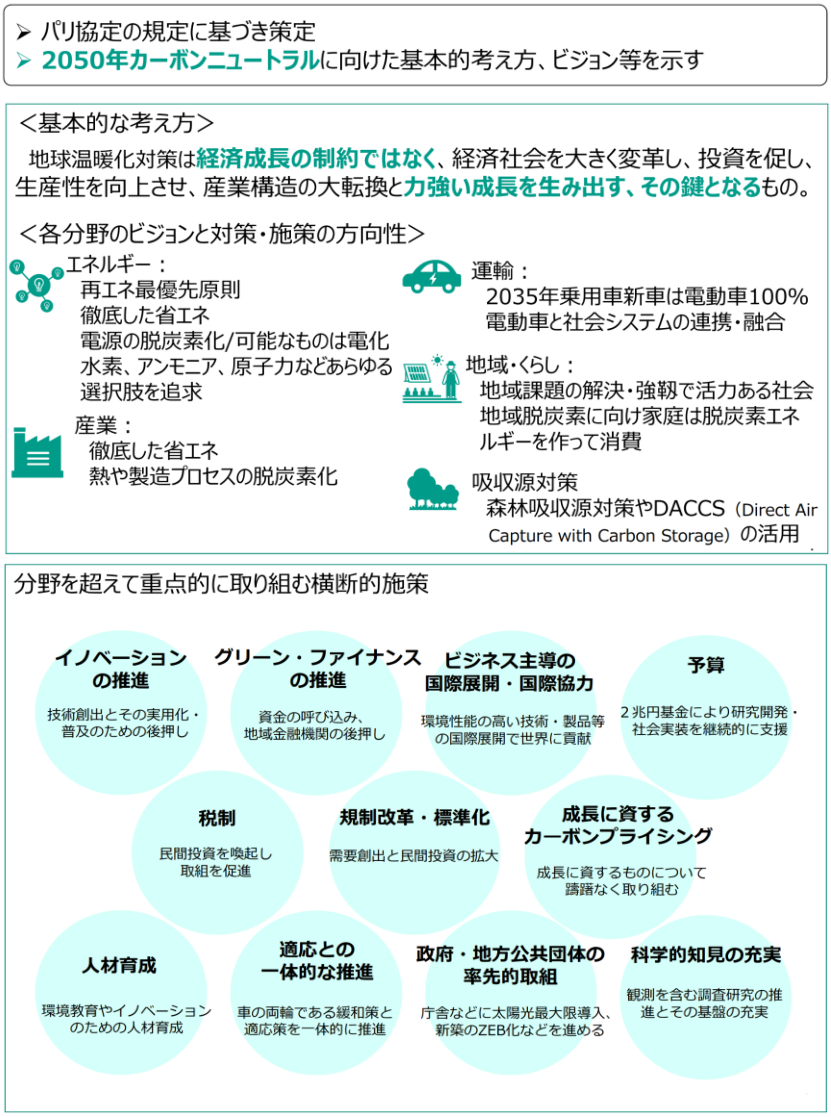


図 1.1.4-6 パリ協定長期成長戦略（概要）（出典：文献 5)）

(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」[20]を策定した（図 1.1.4-7）。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」[21]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[22]（図 1.1.4-8）。

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）。

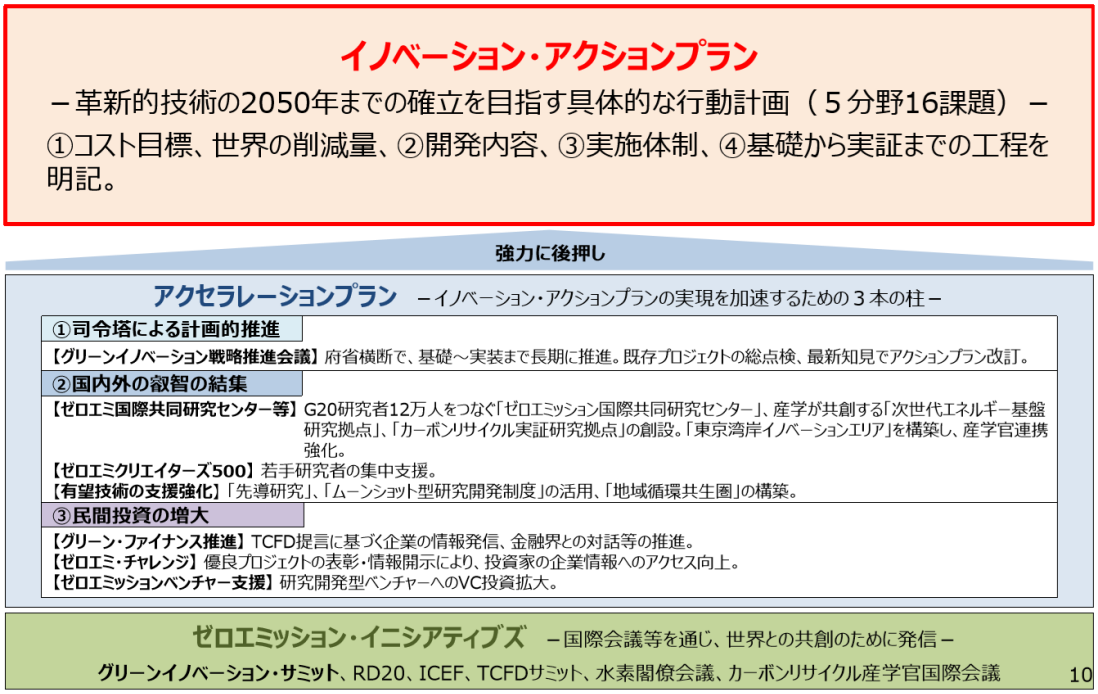


図 1.1.4-7 革新的環境イノベーション戦略（全体像）（出典：文献 20)）

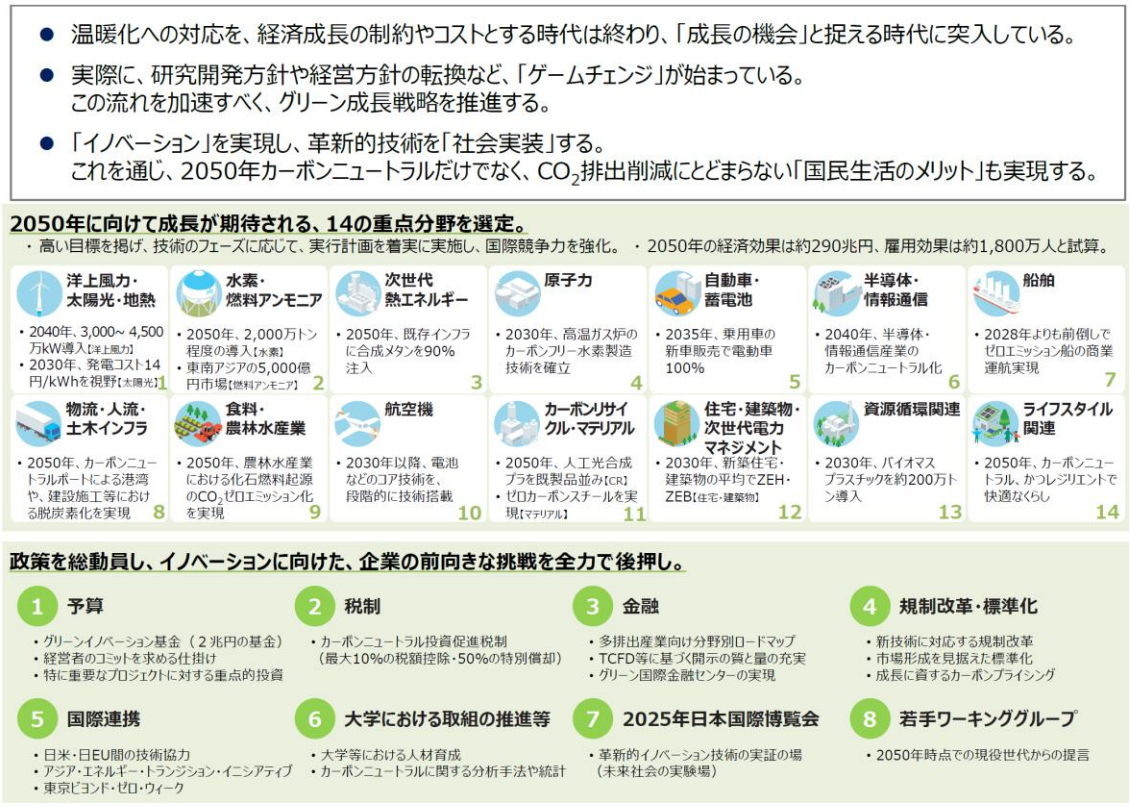


図 1.1.4-8 グリーン成長戦略（出典：文献 22)）

(9) サステイ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ている。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 の重要性が増している。

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始めている。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てきている。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。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。

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 [23]。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 [24]。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」[25]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。

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 [26]。

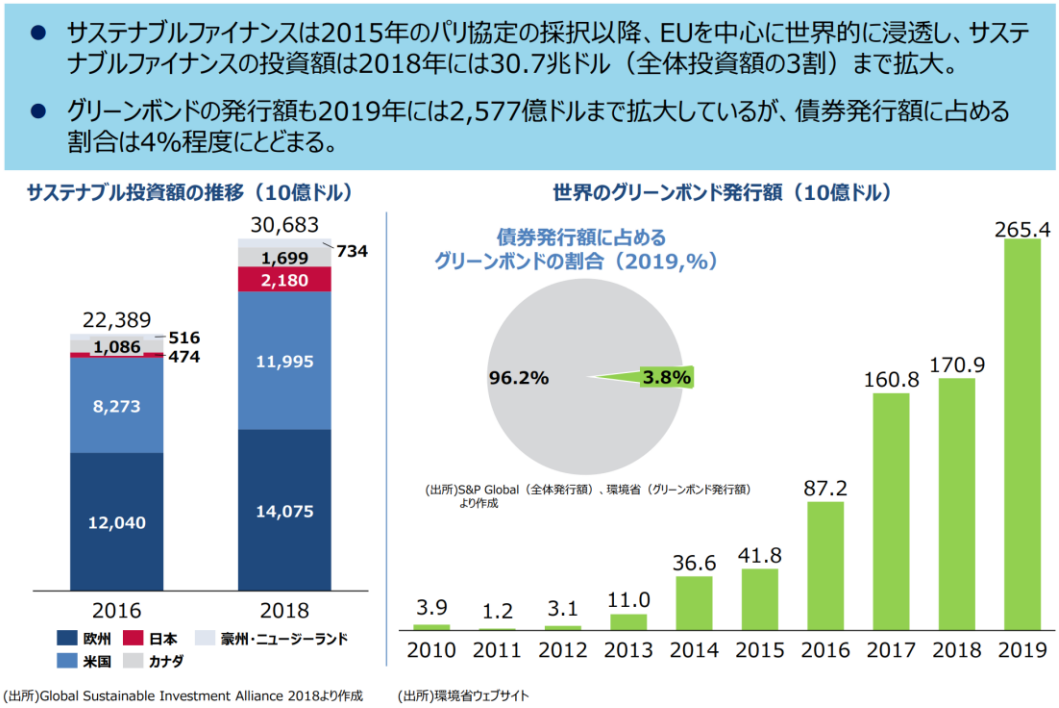


図 1.1.4-9 サステイナブルファイナンスの動向（出典：文献 27)）

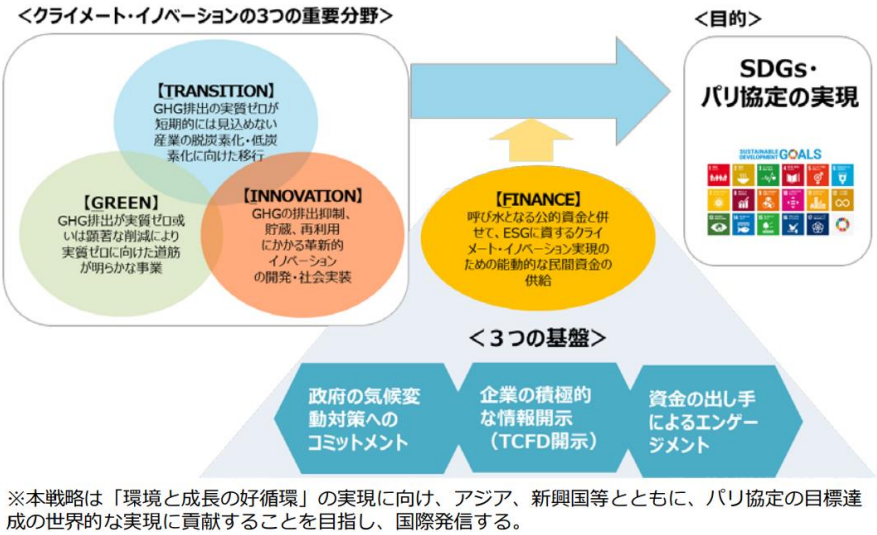


図 1.1.4-10 クライメート・イノベーション・ファイナンス戦略 2020 の概要（出典：文献 20)）

(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[28]。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」[29]がとりまとめられた。

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、1 年間で急速に上昇した（図 1.1.5-1）。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。第 4.2 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。

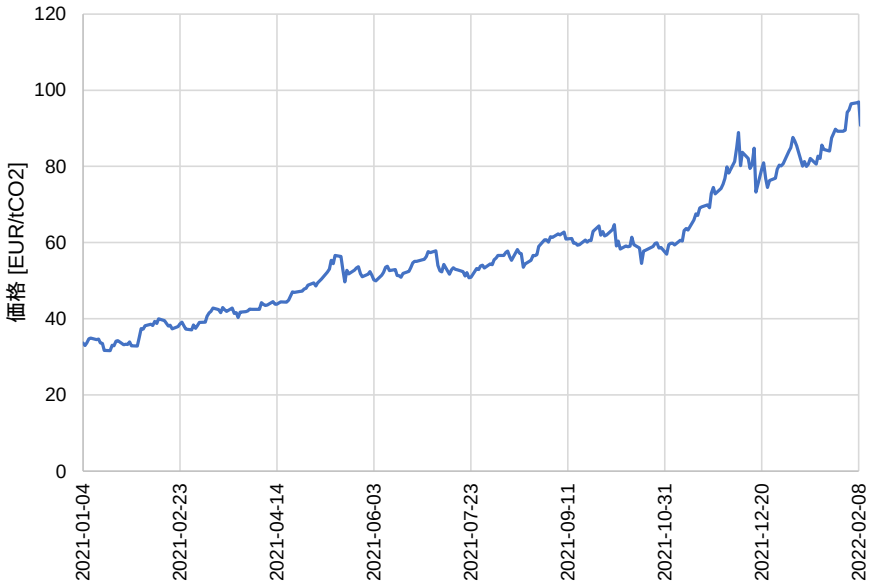


図 1.1.5-1 欧州排出量取引制度 EUA 炭素価格推移（出典：EMBER[30]）

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大詰めを迎えている。

IPCC では、新しい統合シナリオとして SSPs (Shared Socioeconomic Pathways、共有社会経済パス)と呼ばれる、WG 横断的な分析の共通基盤とするシナリオの検討、策定も進められてきた。これは当初、AR5 の分析に間に合わせようとしてきたが、ほとんど間に合わず、AR6 に向けて、ベースとなる社会経済シナリオになると考えられるため、本事業でもこの検討を行った。2017 年 9 月の IPCC 総会において章構成が承認された後、気候変動緩和を扱う第 3 作業部会（WG3）については、報告書執筆者会合は 2018 年 4 月に第 1 回が、2019 年 9 月に第 2 回会合、2020 年 4 月に第 3 回会合、2021 年 4 月に第 4 回会合（第 3 回、第 4 回会合は COVID-19 の影響によりオンライン）が開催され、最終政府レビュードラフトが 2021 年 11 月に政府レビューにかけられた状況である。2022 年 3 月末から開催される IPCC 総会での承認が予定されている。

一方、気候変動の自然科学的側面を扱う第 1 作業部会（WG1）の報告書は、2021 年 8 月の IPCC 総会で承認され公表された。また、気候変動影響・適応策を扱う第 2 作業部会（WG2）の報告書は、2022 年 2 月の IPCC 総会で承認され、公表されたところである。IPCC WG1 と WG2 の報告書の概要については、第 2.2 節および第 2.3 節に記載した。

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、国際的に議論が始まっている共有社会経済パス（Shared Socioeconomic Pathways: SSP）に沿っ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 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。

②欧州を中心に議論されている国境調整措置に関する経済分析についても実施することとした。

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、評価を行ったほか、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、気候変動緩和と PM2.5 など大気汚染物質削減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、世界全体の 2050 年頃までの期間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①～⑤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 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欧州等における電力自由化の下での CO_2 排出削減対策・政策を調査、整理し、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

⑤（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、環境経済・政策学会等）・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) スタンフォード大・Energy Modeling Forum (EMF)と研究協力を行い、EMF の研究成果の情報収集を行った。

(8－3) 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。

(8－4) 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国際モデル分析比較プロジェクト Exploring National and Global Actions to reduce Greenhouse gas Emissions (ENGAGE) 会合への参加、会議出席を行った。

(8－5) 英国の研究機関から、地球温暖化・エネルギー政策分析に関する情報収集を行うとともに、本研究の分析の提供を行い、意見交換を行った。

(8－6) 中国の研究機関から、地球温暖化・エネルギー政策分析に関する情報収集を行うとともに、本研究の分析の提供を行い、意見交換を行った。

(8－7) 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）会合への参加、会議出席を行った。

(8－8) 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。

(8－9) 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（2030 年頃）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 章では最新の海外の気候変動に関する政策動向や IPCC シナリオ動向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) 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) 第 6 次エネルギー基本計画 (2021)
https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html
4) 日本政府「地球温暖化対策計画」https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html (2021)
5) 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
6) Global Carbon Project, Global Carbon Budget 2021
https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/21/files/GCP_CarbonBudget_2021.pdf
7) United Nations, Sustainable Development Goals
http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/
8) 環境省、2020 年度（令和 2 年度）温室効果ガス排出量（速報値）
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/ondanka/ghg-mrv/emissions/material/honbun_sokuhou_2020.pdf
9) 経済産業省、長期エネルギー需給見通し (2015)
http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf
10) 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
11) 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
12) 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
13) 経済産業省 世界全体でのカーボンニュートラル実現のための経済的手法等のあり方に関する研究会 資料 (2021)
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_neutral_jitsugen/pdf/002_03_00.pdf
14) 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 低炭素社会実行フォローアップ専門委員会 合同会議 (2021)
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/follow_up/pdf/007_03_00.pdf
15) 経済産業省 調達価格等算定委員会 資料 (2021)
https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/070_01_00.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資料 (2021)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/025_01_00.pdf
17) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会資料 (2020)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/032/pdf/032_004.pdf
18) 第 5 次エネルギー基本計画 (2018)
https://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001-1.pdf
19) 2030 年度におけるエネルギー需給の見通し（参考資料）(2021)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/opinion/data/03.pdf
20) 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
21) 経済産業省、2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2020)
https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html

22) 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
23) 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
24) 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
25) ICMA, Climate Transition Finance Handbook (2020)
https://www.icmagroup.org/assets/documents/Regulatory/Green-Bonds/Climate-Transition-Finance-Handbook-December-2020-091220.pdf
26) 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
27) 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
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/transition_finance/pdf/001_04_00.pdf
28) 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
29) 気候変動影響評価報告書 (2020) http://www.env.go.jp/press/files/jp/115261.pdf
30) EMBER, EUA prices. https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/ (2022 年 2 月 16 日アクセス)
31) IPCC WG1, AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis (2021)
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

第2章　気候変動リスクマネージメント

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。第 1 章で記載したように、政治的には 2050 年までにカーボンニュートラル実現を目指す動きが加速した。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についての政権の交代も含めて不確実性が大きい。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、気候変動マネー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ージメント戦略のあり方を記載した。第 2.2、2.3 節には、IPCC AR6 について、第 1 作業部会（自然物理）と第 2 作業部会（気候変動影響・緩和）の概要について整理した。そして、第 2.4 節には気候変動リスクマネージメントから見たイノベーションの役割とその誘発に関する方向性の議論を記載した。

2.1　気候変動リスクマネージメントの考え方

本節では、気候変動リスクマネー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ー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）。

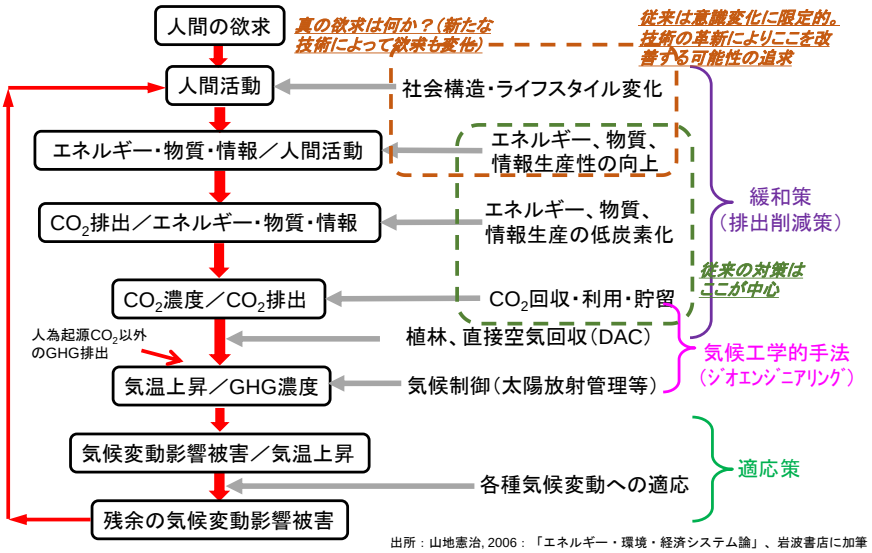


図 2.1-1 地球温暖化対策の基本構造

- 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。よって、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。

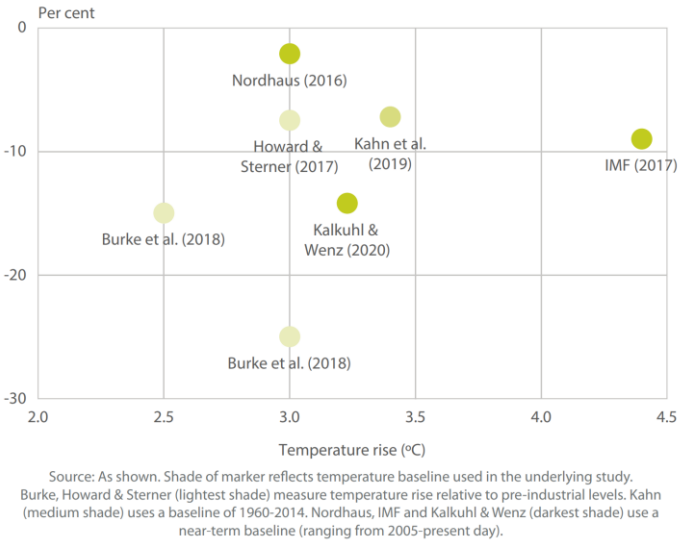


図 2.1-2 気候変動影響による世界 GDP への影響推計（出典：NGFS[5)]）

- 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 [6]や第 5 次エネルギー基本計画 [7]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 [6]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。
- 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。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。
- 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。図 2.1-3 でイメージを整理したが、IPCC 1.5℃特別報告書（SR15）[8]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 [9]でも、2050 年カーボンニュートラルに向けて「あらゆる選択肢を追求する」とされた。

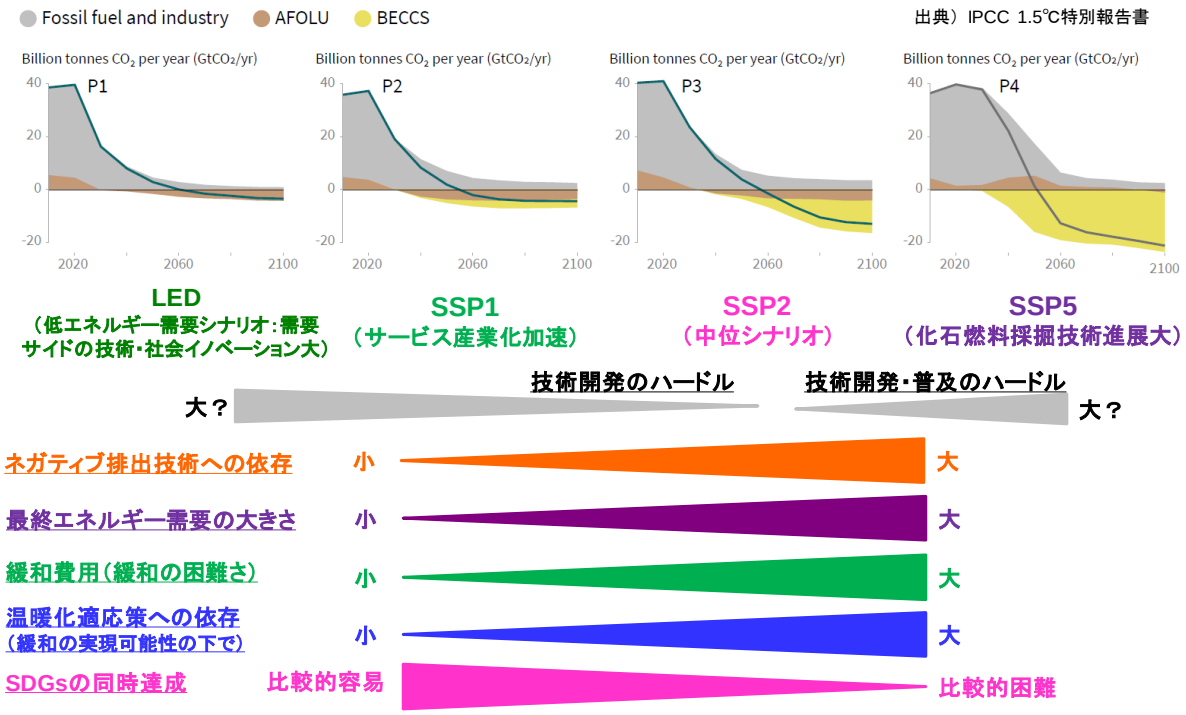


図 2.1-3 大幅排出削減シナリオの類型化と特徴

- 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。

【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。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、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 2.1-4）[10)]。
- 1.5℃シナリオの場合には、2100 年では約 245～13000 \$/tCO_2 程度（全シナリオ報告）と推計 [8)]。1.5℃の場合、2℃の場合と比較して、約 3～4 倍と推計されている [8)]。また、一部の社会経済シナリオの下では、実行可能解が得られなかったモデル分析も多い [8)]。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。当然ではあるが、厳しい排出削減目標ほど、多くのオプションの可能性を追求する必要性が増す（図 2.1-5）[11)]。

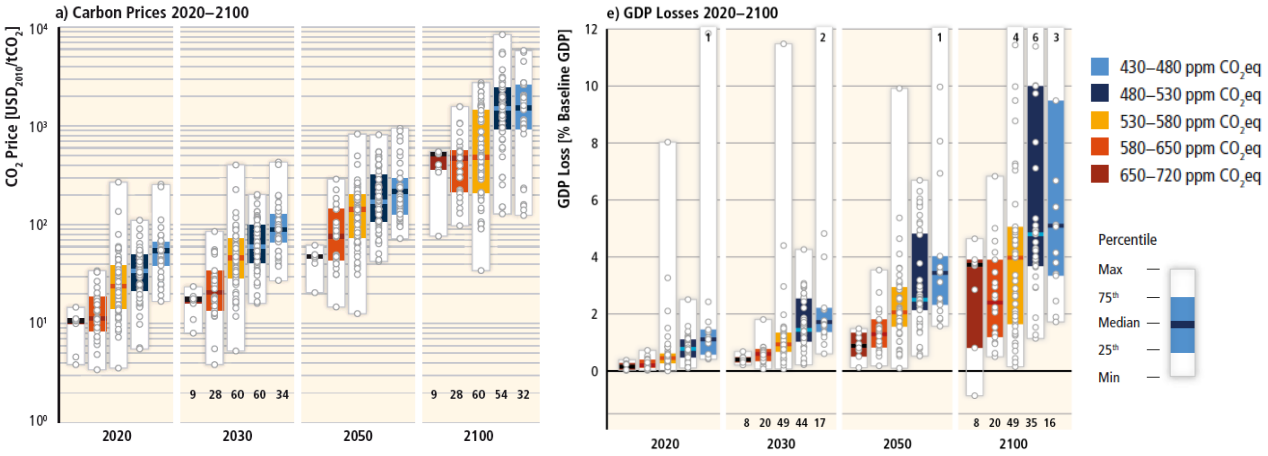


図 2.1-4 濃度レベル別の世界の CO_2 限界削減費用と GDP ロス [10)]

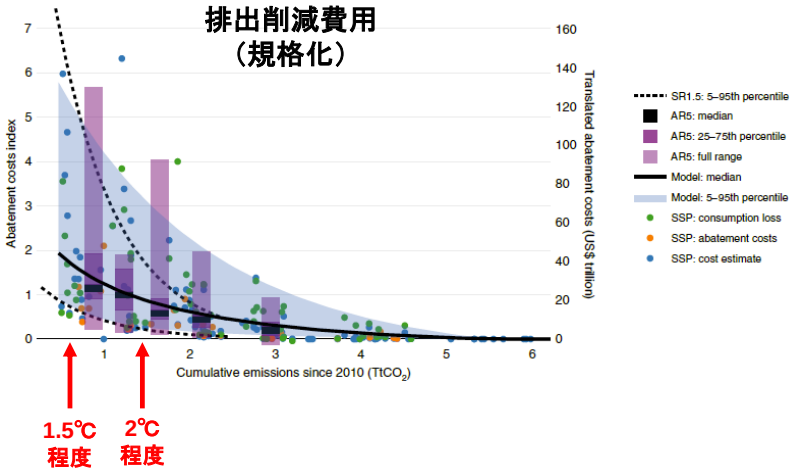


図 2.1-5 世界の各種モデルによる排出削減費用推計 [11)]

- 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、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バイデン政権であっても、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（図 2.1-6）。

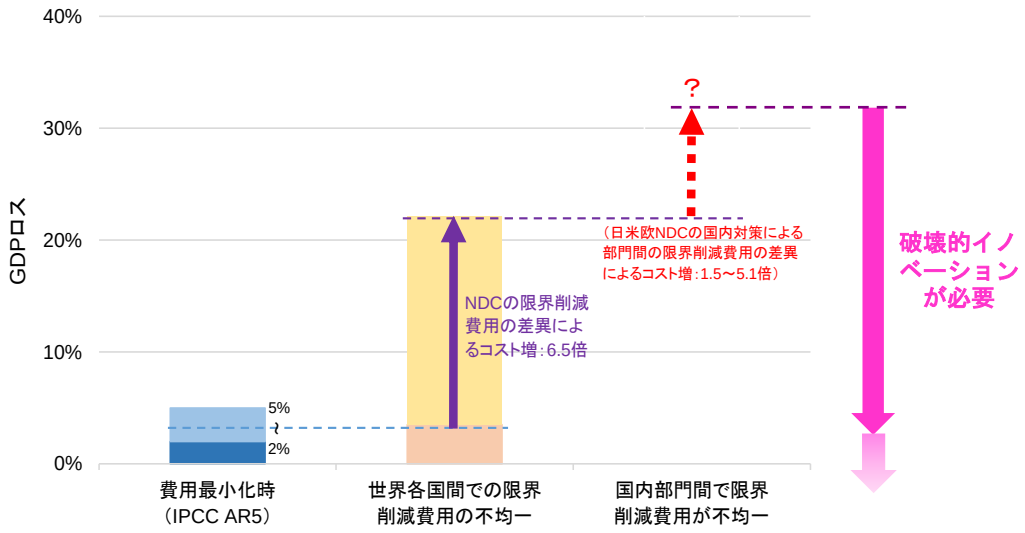


図 2.1-6 2℃目標時の世界 GDP 損失のイメージ（費用最小化と現実社会で予想される費用とイノベーションの役割）[4)]

- 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。

【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）・健康影響等とのトレードオフ、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高まってきてはいるものの、国間で大きな差異があり、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。その差は益々広がっている。2022 年 1 月の調査では、米国では気候変動問題は 18 課題中 14 位であり、しかも民主党支持者と共和党支持者では、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、18 課題中最下位である（図 2.1-7）[12)]。

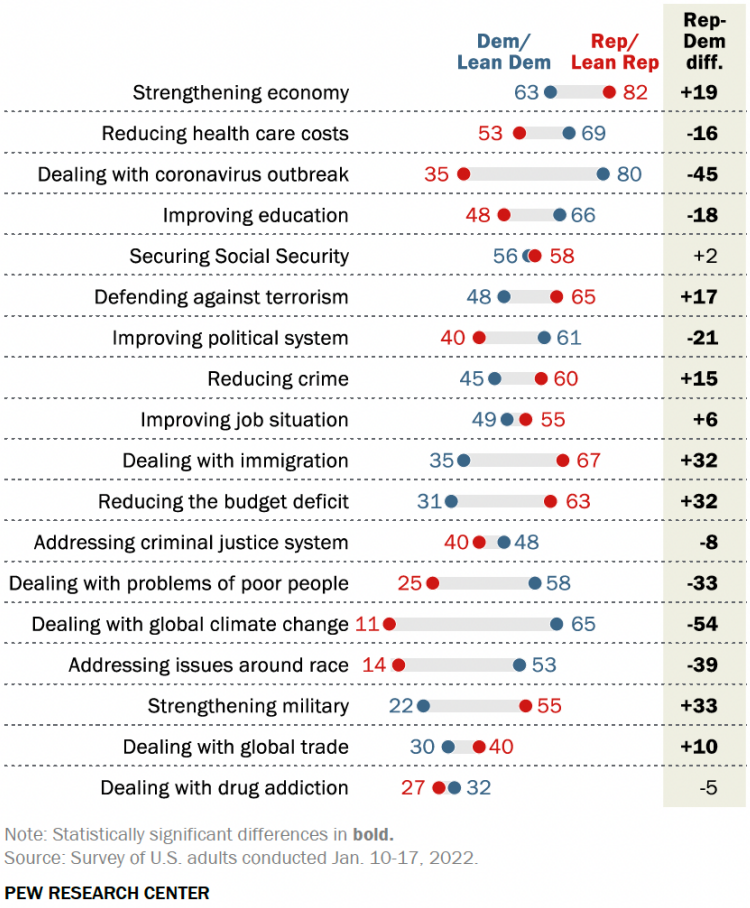


図 2.1-7 米国の気候変動問題に対する認識（民主党と共和党支持層での差異を含む）

12)

【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 Report, 2021
2) IPCC WG1, Fifth Assessment Report, 2013
3) IPCC WG1, Fourth Assessment Report, 2007
4) RITE、FY2020 ALPS 報告書 (2021)
5) NGFS, 2021. https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/820184_ngfs_scenarios_final_version_v6.pdf
6) 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
7) 経済産業省、第 5 次エネルギー基本計画、2018
8) IPCC, Special Report on Global warming of 1.5 ℃ (SR15), 2018
9) 経済産業省、第 6 次エネルギー基本計画、2021
10) IPCC WG3, Fifth Assessment Report, 2014
11) D. van Vuuren et al., Nature Climate Change (2020)
12) Pew Research Center (2022) https://www.pewresearch.org/politics/2022/02/16/publics-top-priority-for-2022-strengthening-the-nations-economy/

2.2 IPCC 第 6 次評価報告書 WG1 の概要

気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）は、国連環境計画（UNEP: United Nations Environment Programme）と世界気象機関（WMO: World Meteorological Organization）により 1988 年に設立された組織で、気候変動に関する最新の科学的知見を評価して取りまとめた「評価報告書」を 1990 年以降 5～8 年毎に公表している。第 6 次評価報告書（AR6: six assessment report）のうち、第一作業部会（WG1）報告書「自然科学的根拠」が、IPCC 第 54 回総会にて承認・受諾され、2021 年 8 月 9 日に公表された。本節ではその概要を記す。

2.2.1 気候の現状

(1) 世界平均気温

2011～2020 年の世界平均気温は 1850～1900 年比 1.09 [0.95～1.20] ºC で[1]、過去 2000 年間で最も高かった（図 2.2.1-1a）。また、海上（0.88 [0.68～1.01]℃）よりも陸域（1.59 [1.34～1.83]℃）の昇温の方が大きかった。この要因について気候モデルシミュレーションによると、図 2.2.1-1 b のように、自然起源要因と人為起源要因の両方を考慮しなければ、観測されたような気温上昇を再現することは出来ない。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。

[1] [ ] : very likely range (90–100%)

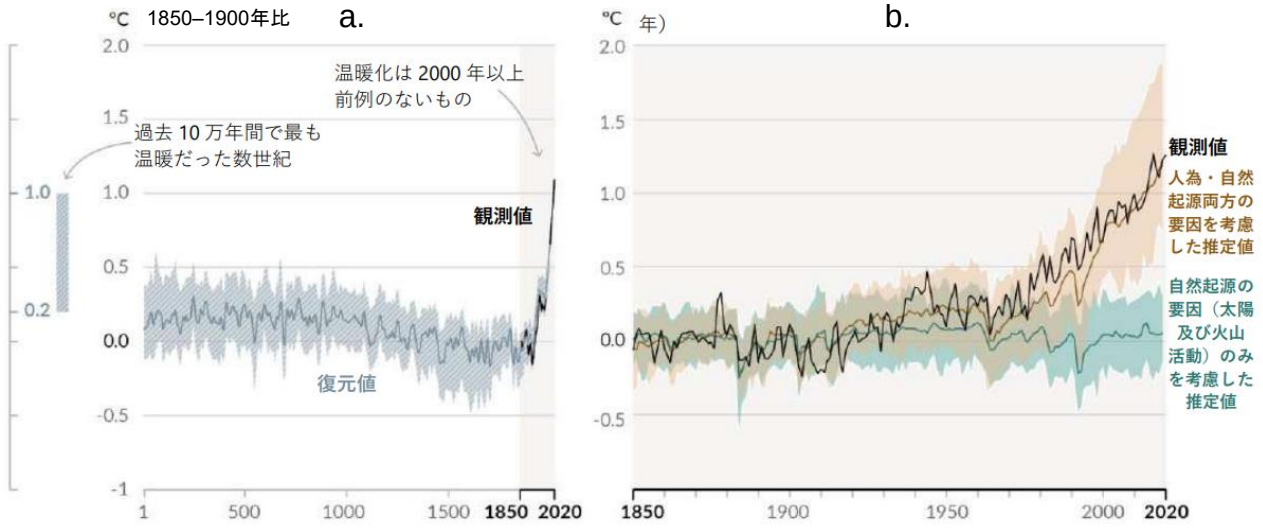


図 2.2.1-1　a 古気候記録から復元した世界平均気温の変化、b 最近の観測による世界平均気温の変化（図 SPM.1）[2)]

なお、人間活動による温室効果ガスの排出は昇温に寄与するが、同じく人間活動に伴って排出される二酸化硫黄や有機炭素等由来のエーロゾルは冷却効果があり、上述した昇温を部分的に抑制している（図 2.2.1-2）。

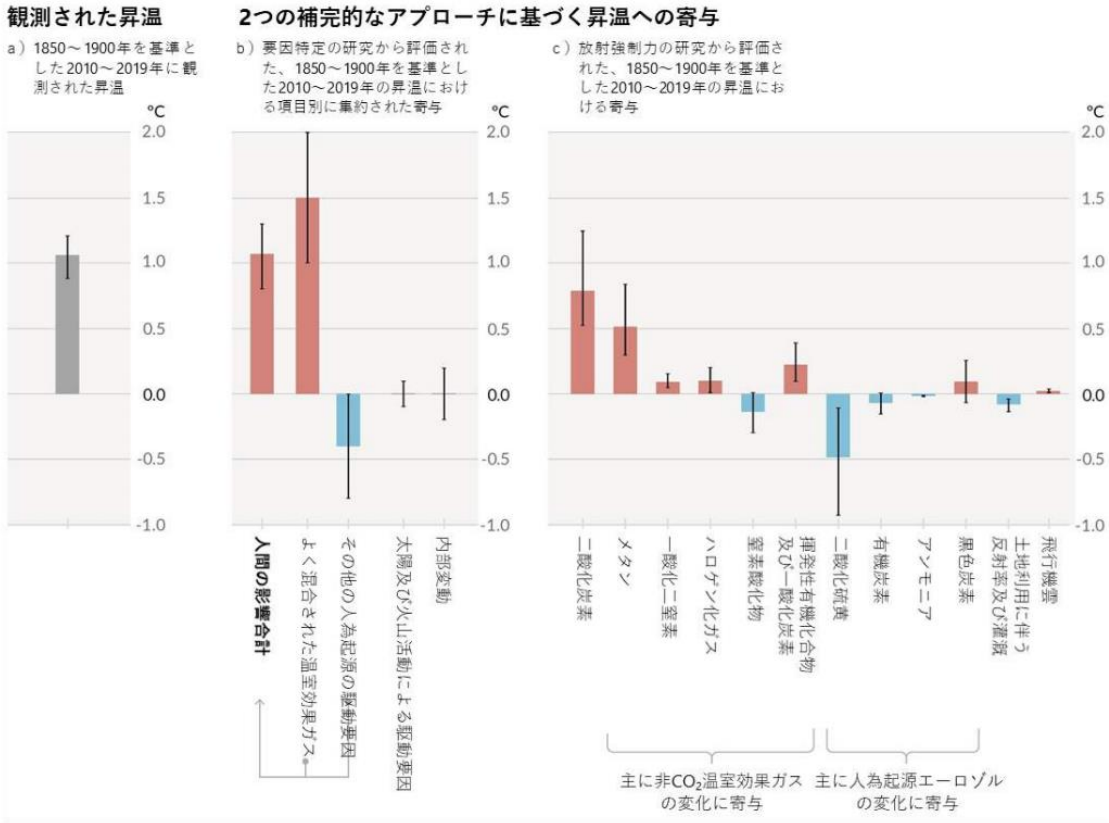


図 2.2.1-2　2010～2019 年の昇温への寄与（図 SPM.2）[2)]

(2) 降水量・海面水位等

① 陸域降水量

世界の陸域の平均降水量は 1950 年以降増加している可能性が高く、1980 年代以降はその増加率が加速している（確信度が中程度）。

② 氷河・海氷

人間の影響は、1990 年代以降の世界的な氷河の後退と 1979～1988 年と 2010～2019 年との間の北極域の海氷面積の減少（9 月は約 40%、3 月は約 10%の減少）の主要な駆動要因である可能性が非常に高い。

③ 海洋

世界の海洋表層（水深 0～700 m）が 1970 年代以降昇温していることはほぼ確実であり、人間の影響が主要な駆動要因である可能性が極めて高い。人為的な CO_2 の排出が、現在進行している外洋域表層海水の世界的な酸性化の主要な駆動要因であることは、ほぼ確実である。

④ 世界平均海面水位

世界平均海面水位は、1901～2018 年の間に 0.20［0.15～0.25］m 上昇した。その平均上昇率は、1901～1971 年の間は 1.3［0.6～2.1］mm/年だったが、1971～2006 年の間は 1.9［0.8～2.9］mm/年に増大し、2006～2018 年の間には 3.7［3.2～4.2］mm/年に更に増大した（確信度が高い）。

⑤ 陸域生物圏

1970 年以降、陸域の生物圏の変化は地球温暖化に連動している。つまり、両半球では気候帯が極方向に移動し、北半球の中高緯度帯では、1950 年代以降、生長期が平均して 10 年あたり最大で 2 日長くなった（確信度が高い）。

(3) 極端な気象現象

図 2.2.1-3 は、1950 年代以降に観測された変化を、世界 45 地域毎に表示したもの。これによると、極端な高温は、世界のほぼ全ての 41 地域で頻度・強度が増大しており、これに人間が寄与したという確信度は高い。大雨は 19 地域で増大したが人間寄与に関する確信度は低い。また、データや文献が限定的な地域も少なくない。農業及び生態学的干ばつは、アフリカやアジア、ヨーロッパの一部地域で増大しているが、人間が寄与した確信度は低い。

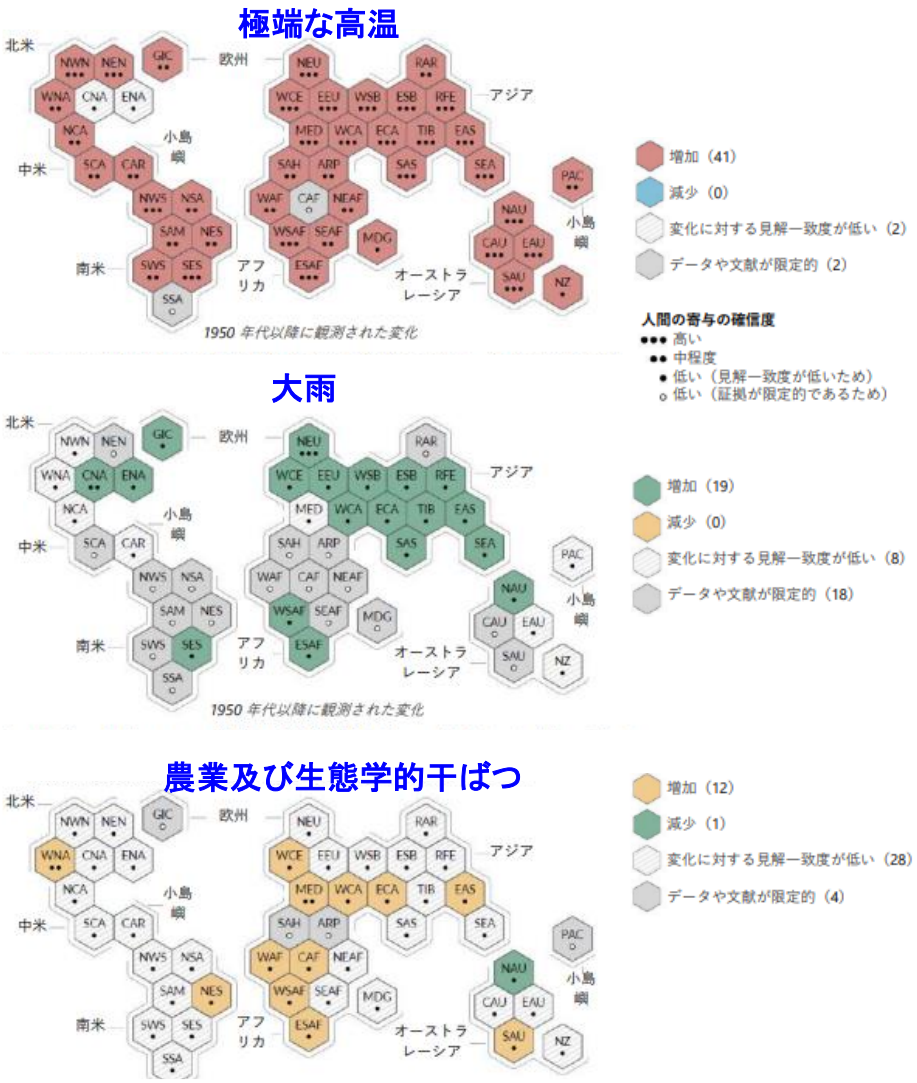


図 2.2.1-3 1950 年代以降に観測された変化（図 SPM.3）[2)]

2.2.2 将来予測

(1) 将来気候の分析シナリオ

IPCC で取り上げられる将来気候予測は、主に CMIP（Coupled Model Intercomparison Project）という気候モデル比較プロジェクトで分析されたものである。AR5 に向けて実施された CMIP5 では図 2.2.2-1 の右端のように温暖化レベルが異なる 4 つのシナリオ（2.6、4.5、6.0、8.5 w/m^2）について分析された。CMIP6 では温暖化レベルとして 1.9、3.4 と 7.0 w/m^2 が追加され、さらに、社会経済シナリオ（SSP）[3)]との対応付けがなされ、SSP1-1.9 のようなシナリオ名になっている。

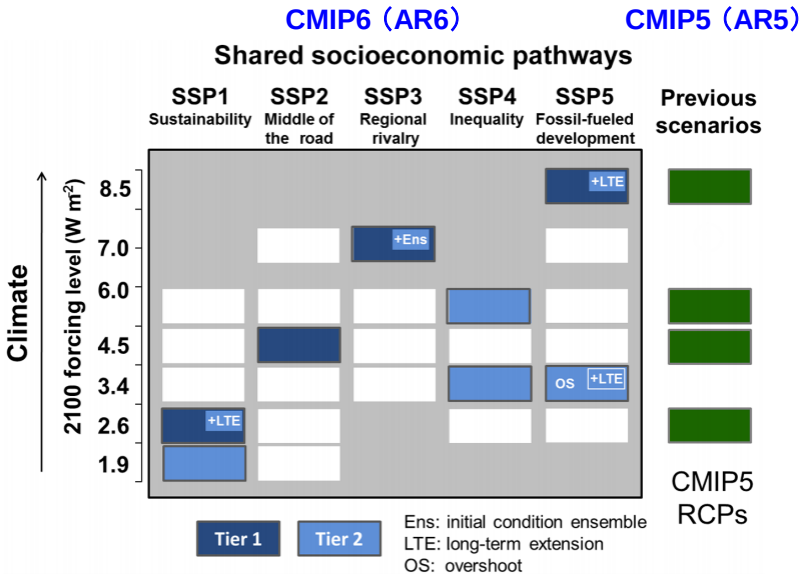


図 2.2.2-1 将来気候の分析シナリオ [4)]

図 2.2.2-2 に、排出量が非常に低い(SSP1-1.9)、低い(SSP1-2.6)、中間(SSP2-4.5)、高い(SSP3-7.0)、非常に高い(SSP5-8.5)、各シナリオの人為起源排出量を示す。SSP1-1.9、SSP1-2.6 シナリオでは、それぞれ 2050 年代、2070 年代に人為起源 CO_2 排出がゼロ、それ以降は負になる。一方、SSP5-8.5 では、21 世紀後半には CO_2 排出量が現在の倍以上まで増大する。

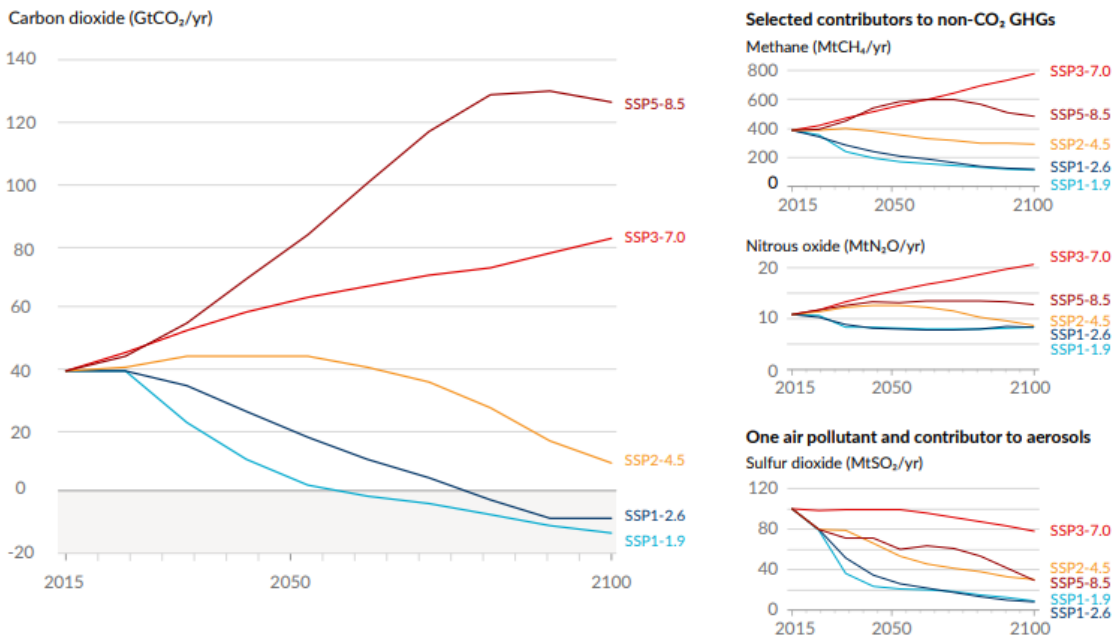


図 2.2.2-2 人為起源排出量 [1)]

(2) 世界平均気温、海面水位等の変化

図 2.2.2-3、図 2.2.2-4 は、各シナリオに対する、気候モデル予測の結果を示している。これらによると SSP5-8.5、SSP3-7.0、SSP2-4.5 シナリオでは、2100 年まで世界平均気温の上昇、世界陸域平均降水量の増大、北極海の海氷面積の減少、海水面の酸性化が続く。なお、排出量が低い SSP1-2.6 シナリオでは次第に安定、また、非常に低い SSP1-1.9 シナリオでは 21 世紀後半にこれらの変化はピークアウトすると予測されている。これらと少し傾向の異なるのが海面水位の変化である（図 2.2.2-3d)。世界平均海面水位は SSP1-1.9 シナリオであっても、2100 まで上昇を続けると予測されている。海洋の熱的慣性が非常に大きいことによる。

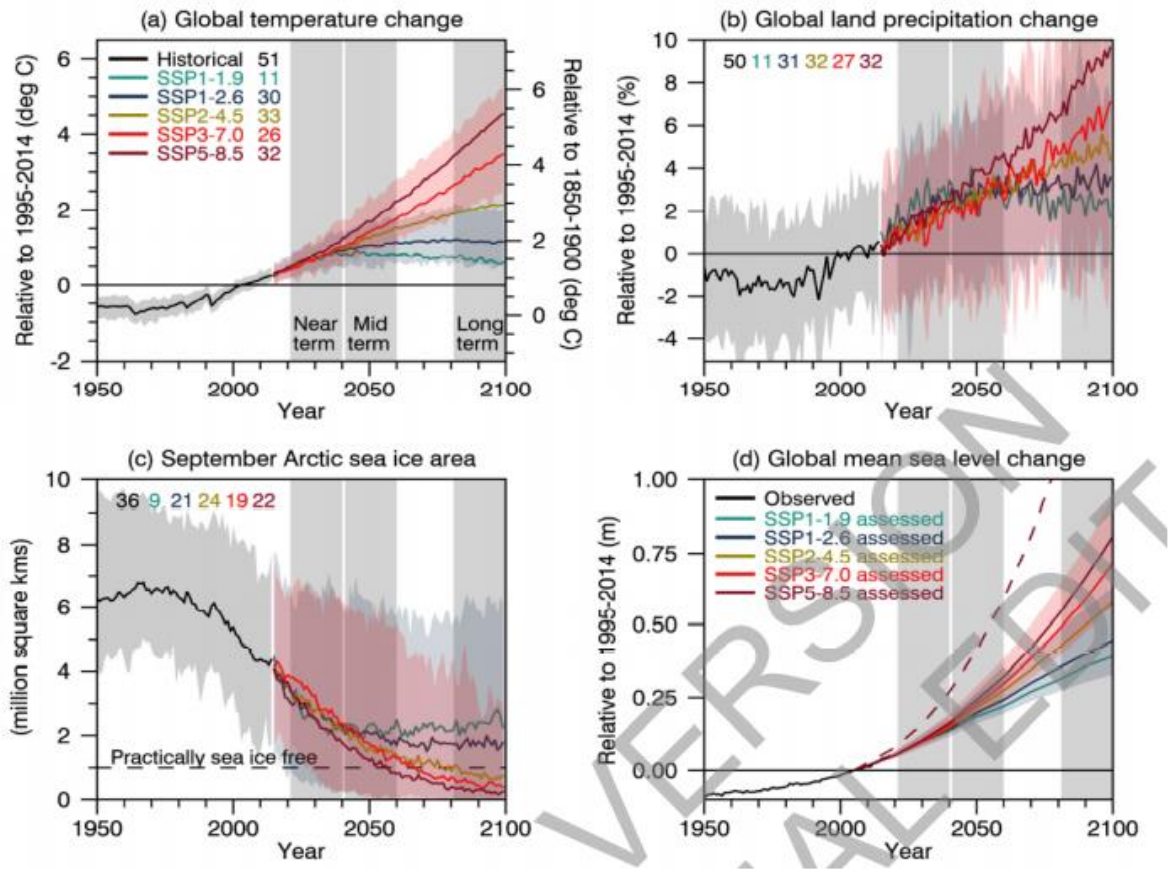


図 2.2.2-3 世界平均気温変化、陸域平均降水量変化、北極海の海氷面積、世界平均海面水位 1)

注）凡例の数字は気候モデルの数。図中の実線はモデルの平均値、陰は SSP1-2.6 シナリオと SSP3-7.0 シナリオの 5～95%レンジ。(d) の破線は、確信度・可能性は低いが、SSP5-8.5 シナリオで氷床の不安定プロセスを考慮した場合の 83 パーセンタイル値で、2100 年には 1.7m に達する。

VERSION ALERT

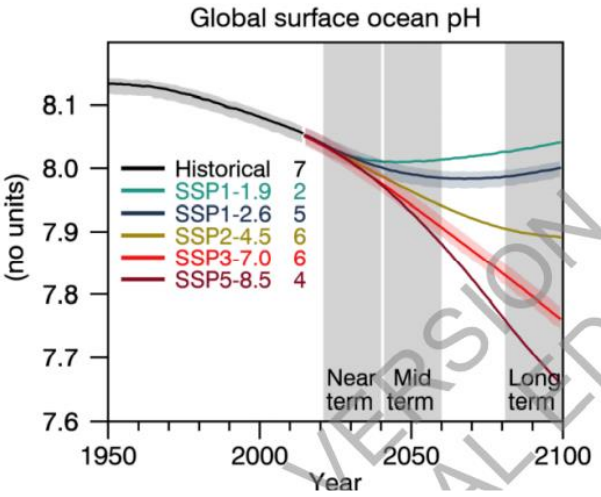


図 2.2.2-4 世界平均海水面の pH[1)]

表 2.2.2-1 は、各シナリオ下で所定の気温を超える時期をまとめたものである。これより、SSP1-2.6、SSP1-1.9 シナリオのように GHG 排出が大幅に減少しない限り、世界平均気温は 1.5℃及び 2℃を超えると分析されている。なお、1.5℃を超える時期が、SSP5-8.5 以外のシナリオ下で 2020 年代前半～2040 年代前半という評価は 1.5℃特別報告書（SR15）[5)]の Figure SPM.1 に記された 2030～2052 年より 10 年程早まったという見方も公開当初散見されたが、SR15 の Figure SPM.1 は、近年の上昇率を単純に線形外挿したものであり、表 2.2.2-1 のモデル分析値との比較は出来ない。参考までに、SR15 の Table 2.SM.12 に、AR6 の SSP1-1.9 シナリオに似た 1.5℃-low-OS シナリオのモデル分析結果が示されており、それによると 1.5℃を超える時期は 2033～2036 年（中央値は 2035 年）と、今回の評価と同様の値になっている。

表 2.2.2-1 所定の温度を超える時期

	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
1.5°C	2025–2044 (2013–2032, n.c.)	2023–2042 (2012–2031, n.c.)	2021–2040 (2012–2031, 2037–2056)	2021–2040 (2013–2032, 2033–2052)	2018–2037 (2011–2030, 2029–2048)
2°C	n.c. (n.c., n.c.)	n.c. (2031–2050, n.c.)	2043–2062 (2028–2047, 2075–2094)	2037–2056 (2026–2045, 2053–2072)	2032–2051 (2023–2042, 2044–2063)
3°C	n.c. (n.c., n.c.)	n.c. (n.c., n.c.)	n.c. (2061–2080, n.c.)	2066–2085 (2050–2069, n.c.)	2055–2074 (2042–2061, 2074–2093)
4°C	n.c. (n.c., n.c.)	n.c. (n.c., n.c.)	n.c. (n.c., n.c.)	n.c. (2070–2089, n.c.)	2075–2094 (2058–2077, n.c.)

注）20 年の移動平均値が所定の気温（1850～1900 年比 ℃）を超える場合、平均期間の中間年。

(3) 極端な気象事象

AR5 以降、極端な気象の分析も進展し、図 2.2.2-5 のように、高温や大雨は、頻度、強度共に増大すると評価された。

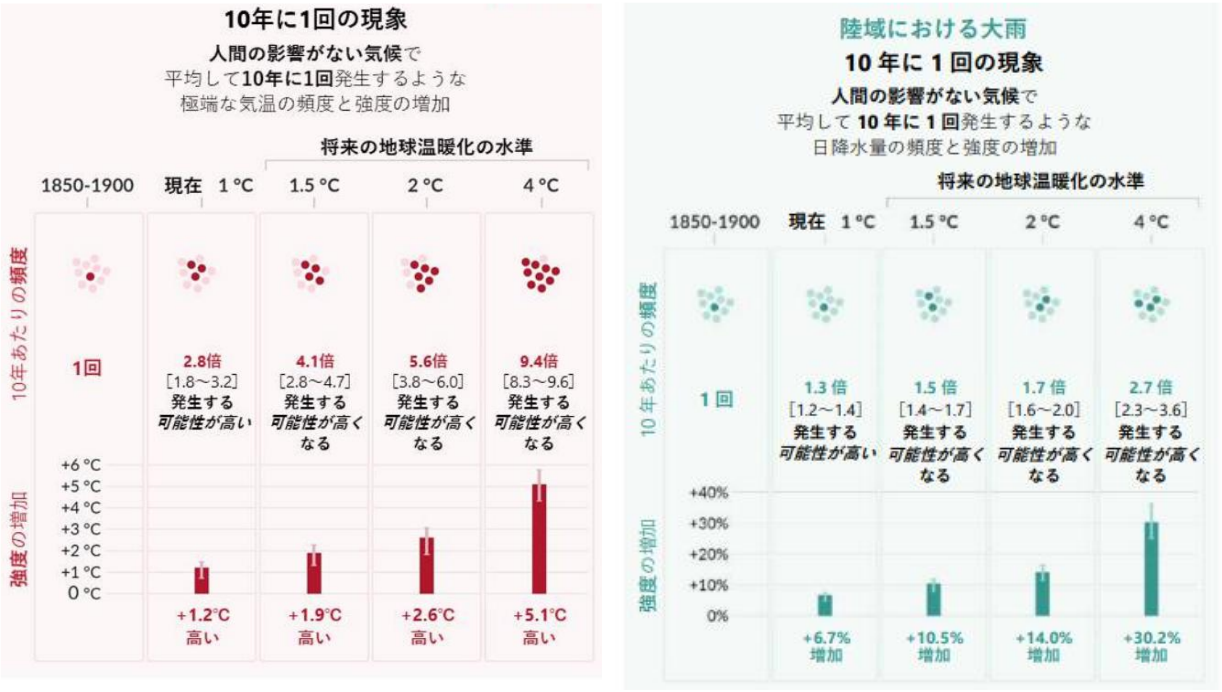


図 2.2.2-5 極端な高温と大雨の頻度と強度（図 SPM.6）[2)]

(4) 山岳・極域氷河、永久凍土の融解

山岳や極域の氷河は、過去 10 年間に、観測が開始された 20 世紀初頭以降のどの 10 年間より大きく減少した。将来も、全ての SSP シナリオ下で減少が続くと予測されている。反応の遅れのため、仮に世界の気温が安定しても、数十年間は減少を続けると見込まれている。

永久凍土は、年間を通じて温度が 0℃を越えない土壌で、厚さは数 m～数百 m、北半球の陸域面積の約 15%（約 2 千 2 百万 km^2）と見積もられている。気候モデルにおける永久凍土の物理的表現は未だ十分でないものの、温暖化に伴って体積が減少し、図 2.2.2-6 のように排出量が非常に高いシナリオの気温では永久凍土上層 3m 部分について、そのほぼ 100%が融解すると予測されている。このような融解は、永久凍土に含まれる炭素の放出につながると見込まれている。

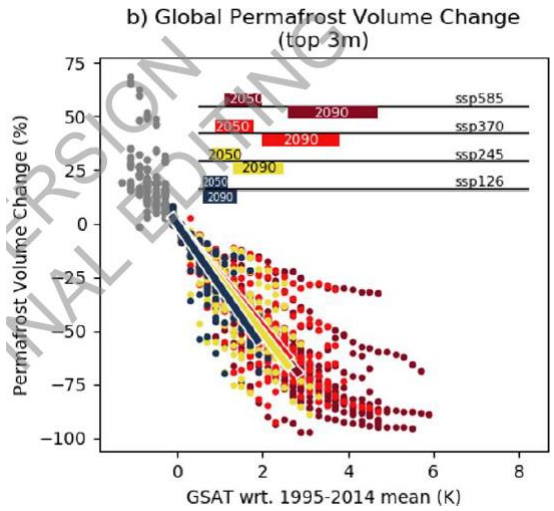


図 2.2.2-6 世界の永久凍土（上層 3m 部分）の体積変化(Figure 9.22b[1)])

(5) 可能性が低いものの影響が大きい事象

可能性が低いものの影響が大きい事象の記述もなされている。例えば、GHG 排出量が非常に高い SSP5-85 シナリオ下で、可能性も確信度も低いが氷床が不安定になり海面上昇が加速的に進む場合の予測値も、図 2.2.2-3d の破線のように表記されている。

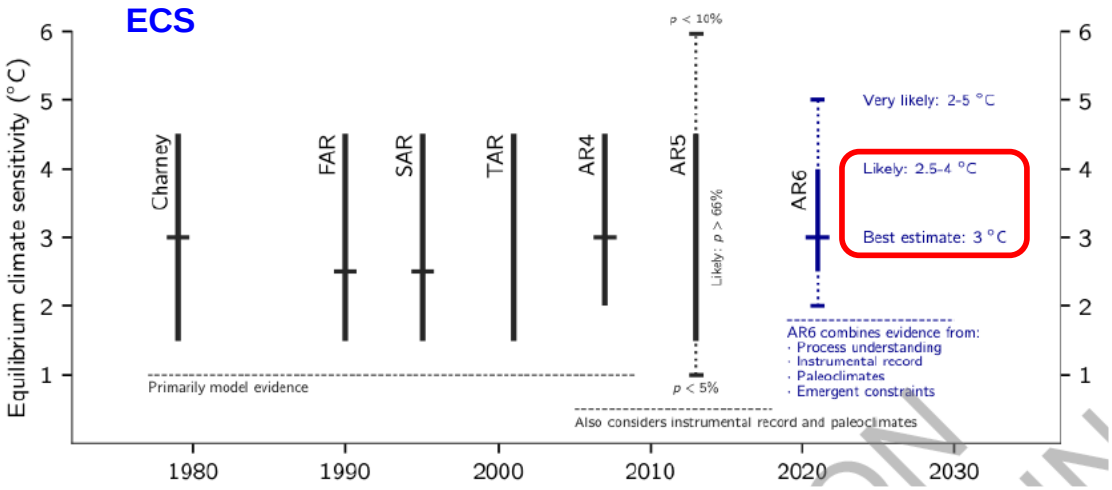
海洋大循環は地球が太陽から受け取った熱を循環させる重要な役割を果たす。その海洋大循環のうち、大西洋から北極海にわたる流れは大西洋子午面循環（Atlantic Meridional Overturning Circulation: AMOC）と呼ばれ、特に、北大西洋の寒い海で冷やされ高密度になった水塊の深層への沈み込みは、海洋大循環の駆動力ともいえる。温暖化に伴い、この AMOC は弱化するとみられている。もし AMOC が突然停止すると、熱帯雨林帯の南方シフト、アフリカやアジアのモンスーンの弱化、南半球のモンスーンの強化、欧州における乾燥など、地域的な気象パターンや水循環を変える可能性が非常に高いとされる。AR6 では、全ての排出シナリオ下で、AMOC は 21 世紀中に弱化する。但し、弱化の程度はモデルによって異なり、確信度は低い、また、2100 年までには停止しない（中程度の確信度）と評価された。なお、AR6 の公開後に、海水表面温度や塩分濃度の観測値に基づくと AMOC はこれまでの比較的安定な状態から臨界点に近い状態に近づいたとし、停止の可能性を示唆する論文 6)も公開され、研究・議論は続いている。

2.2.3 気候感度

気候感度は、CO_2 濃度上昇に対する地球システムの応答感度を示す指標である。「大気中 CO_2 濃度が 2 倍に増大し、地球システムが安定的な状態になった時の全球平均気温上昇」で定義される平衡気候感度 (ECS: equilibrium climate sensitivity) は、温暖化対策評価で、排出量から全球平均気温上昇を簡易的に推計するモデルの重要パラメータの一つでもある。この他、「大気中 CO_2 濃度が 1%/yr で増加し、2 倍になった時（濃度

増加を始めて 70 年後）の全球平均気温上昇」で定義される過渡的気候応答 (TCR: transient climate response) も有名である。

図 2.2.3-1 に示すように、ECS は FAR 以降、likely range1.5～4.5℃、最良推定値 2.5℃とされていた。AR4 で、likely range2～4.5℃、最良推定値 3℃と不確実性の幅はやや狭まったものの、AR5 では再び 1.5～4.5℃に広がり、最良推定値は無とされた。AR6 では、最良推定値 3℃、likely range 2.5～4℃と評価された。この likely range は従来の幅の半分であり、AR6 で目覚ましく狭められた。TCR についても、最良推定値 1.8℃、likely range1.4～2.2℃で AR5 に比べ不確実性の幅が狭められた。



TCR

℃	Best estimate	Likely range
AR4	–	(very likely larger than 1℃ and very unlikely greater than 3℃)
AR5	–	1.0–2.5
AR6	1.8	1.4–2.2

図 2.2.3-1 気候感度評価の変遷

出典）ECS: AR6 Figure TS.16。TCR: AR4・AR5・AR6 より抜粋。

気候感度は、図 2.2.3-2 のように、エネルギー収支式に基づく気候プロセス（Process understanding）、測器観測データとの整合性（Instrumental record）、古気候データとの整合性（Paleoclimate）、気候感度と相関があると考えられるもので観測可能な値との関係（Emergent constraint）を考慮の上、評価される。

なお、AR5 までは気候モデル比較プロジェクト CMIP に参加した各モデルの気候感度の値も考慮していたが、AR6 の評価では CMIP6 モデルの値は考慮していない。参考までに、CMIP6 の参加モデルは CMIP5 より増え、各モデルの気候感度のバラつきが広がると共に、気候感度のモデル平均値は 0.5℃程増大した（AR6　FAQ7.3, Figure 1 参照）。つまり、CMIP の気候モデル結果だけを見ると、AR5 に比べ、モデルの気候感度はバラつきが拡大し平均値は若干高まったが、AR6 の気候感度評価は、CMIP 気候モデル結果は考慮せず、上述したようにその他の情報に基づいている。AR7 でも、CMIP 気候モデルの値は気候感度の評価に用いられないのか、気候感度の不確実性幅と合わせ、引き続き注目される。

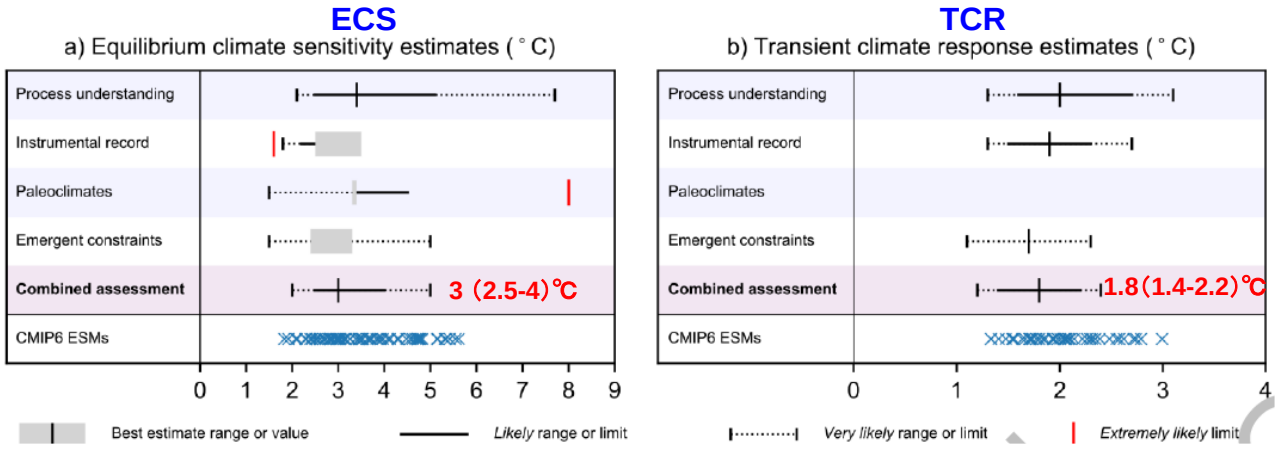


図 2.2.3-2　　ECS、TCR 評価のための情報 [1)]

2.2.4　残余カーボンバジェット

図 2.2.4-1 のように、人為的な CO_2 排出量の累積値と世界平均気温上昇の間には、ほぼ線形の関係が見られる。これより、気温上昇を所定水準以下に抑制しつつ、今後排出しうる CO_2 量（残余カーボンバジェット）が概算される。表 2.2.4-1 に示すように、例えば 1850～1900 年の世界平均気温上昇を 50%以上の確率で 1.5℃までに抑える場合の、2020 年以降残余カーボンバジェットは 500 Gt CO_2、67%以上の確率では 400 Gt CO_2 と評価されている。これらの値を SR15 の値と比較すると、50%以上の値は SR15 と変わらないものの、67%以上の値は SR15 に比べ約 60 Gt CO_2 増大している。逆に、33%以上の確率で抑制する場合の値は SR15 に比べ約 100 Gt CO_2 減少している。このように、50%以上に対する残余カーボンバジェットは SR15 と同様でありながら、67%以上、33%以上に対する値が SR15 に比べそれぞれ増大、減少した理由として、累積 CO_2 排出量に対する過渡的気候応答（TCRE：transient climate response to cumulative CO_2 emissions）

の likely range が狭まった事があげられており（AR6 Box 5.2 参照）、また 2.2.3 節で述べた気候感度の不確実性幅の縮小とも関連していると考えられる。

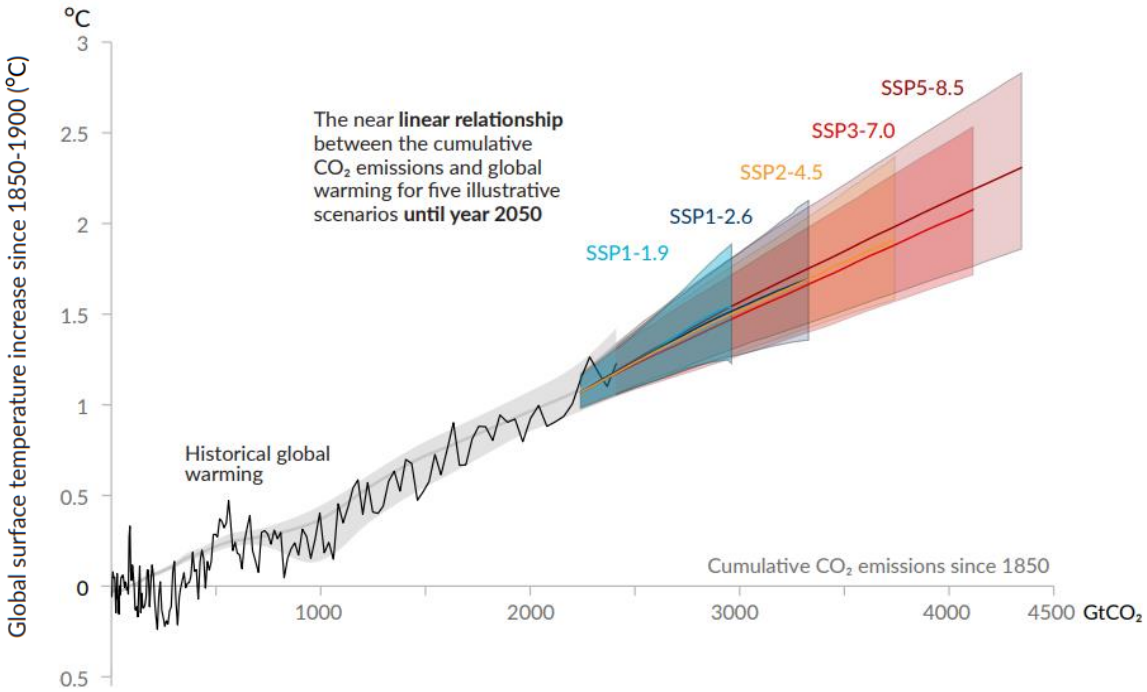


図 2.2.4-1　累積 CO_2 排出量と気温上昇

表 2.2.4-1　2020 年以降の残余カーボンバジェット（表 SPM.2）[2)]

1850～1900 年から 2010～2019 年にかけての地球温暖化（°C）	1850～2019 年にかけての過去の累積 CO_2 排出量（$GtCO_2$）
1.07（*可能性が高い範囲：0.8～1.3*）	2390（*可能性が高い範囲：± 240*）

1850～1900 年を基準とする気温上限までのおおよその地球温暖化（°C）*(1)	2010～2019 年を基準とする気温上限までの追加的な地球温暖化（°C）	2020 年初頭からの残余カーボンバジェット推定値（$GtCO_2$）*気温上限までで地球温暖化を抑制できる可能性*(2)*					非 CO_2［温室効果ガス］排出削減量のばらつき*(3)
		17%	33%	50%	67%	83%	
1.5	0.43	900	650	500	400	300	非 CO2［温室効果ガス］排出削減量の増減により、左記の値は 220 $GtCO_2$ 以上増減しうる
1.7	0.63	1450	1050	850	700	550	
2.0	0.93	2300	1700	1350	1150	900	
参考 SR15と比較 †1			33%	50%	67%		
1.5 ℃			760	500	340		
2.0 ℃			1950	1420	1090		

†1: 2018-2019 年の CO_2 排出量約 80Gt CO_2 を差し引き、2020 年以降値として表示。

2.2.5 地球温暖化係数

地球温暖化係数（GWP: Global Warming Potential）は、CO_2を基準に、他の温室効果ガスの温暖化能力を表したもの。単位質量排出後の放射強制力を、大気中滞留時間（寿命）を考慮し、特定の期間（例：100 年）にわたって積算した値を、基準ガスであるCO_2に対する相対値で表す。統一的な計算方法はなく、WG1 報告書で毎回更新されている。non-CO_2として代表的なCH_4について AR6 のGWP_{100}は、fossil =29.8、non-fossil=27.2 と、記載が見当たる第２次評価報告書（SAR）以降では最も大きい値が報告されている。

参考まで UNFCCC の 2021 年温室効果ガスインベントリ報告では AR4 のGWP_{100}が、IPCC WG3 AR5 では、SAR のGWP_{100}が使用されている。第何次 IPCC の GWP が使用されているか留意する必要がある。

2.2.6 まとめ

AR6 では、AR5 以降の観測や各種情報の充実、新しい気候モデルによる分析、複数の証拠に基づく解析により、気候変動及び人間の影響について理解が深まった。

その結果、以下の事が明記された。

- 地球が人間の影響で温暖化していることに「疑う余地がない」。（AR5 までの「可能性が極めて高い」と比べ、強い表現）
- 人間活動の影響で極端な気象事象が顕在化している。
- 向こう数十年の間に GHG 排出が大幅に減少しない限り、21 世紀中に地球温暖化は 1.5℃及び 2℃を超える。
    - ✧ これらは、早急な GHG 排出削減が必要である科学的根拠として COP26 等で引用された。

なお、気候変動リスク管理の観点では、以下も重要な知見といえる。

- 平衡気候感度（ECS）、過渡的気候応答（TCR）、累積CO_2排出量に対する過渡的気候応答（TCRE）等、地球システムの応答性に関する重要なパラメータの不確実性幅が狭められた。
    - ✧ これら不確実性幅の縮小は、CO_2排出に対する地球システムの感度は小さいかもしれず対策は無駄かもしれない、という理由での対策先送りを抑制する、と同時に、安全サイドの観点で対策を行う場合、例えば必要以上の排出削減を行わなくても気温上昇のリスクを回避できる。すなわち、気候変動リスクの管理においてカバーすべき範囲の縮小につながる。
- 海面上昇、暑熱等は、将来、世界のカーボンニュートラルが実現したとしても、一定程度避けられない。
    - ✧ GHG 排出の削減と同時に、影響に備えることも重要である。
- 氷床の大規模崩壊や大西洋子午面循環（AMOC）の突然停止が今世紀中に発生する可能性や確信度は高くないものの、可能性を排除することは出来ない。

✧ 発生の可能性は低いが、生じた場合の影響が非常に大きい事象にも、引き続き留意していく必要がある。

参考文献（第 2.2 節に関するもの）

1) IPCC: AR6 Climate Change 2021:The Physical Science Basis (2021)
2) 気象庁: AR6/WG1 報告書 政策決定者向け要約（SPM）暫定訳
3) O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S.,et al.: The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Global environmental change, 42, 169-180 (2017)
4) O'Neill et al.: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, Geosci. Model Dev., 9, 3461–3482 (2016)
5) IPCC: Special report on Global Warming of 1.5 ºC (2018)
6) N. Boers: Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation, Nature Climate Change volume 11, 680–688 (2021)

2.3 IPCC 第 6 次評価報告書 WG2 の概要

本節では、IPCC 第 55 回総会にて承認・受諾され、2022 年 2 月 28 日に公表された、第二作業部会（WG2）報告書「影響・適応・脆弱性」の概要を記す。

2.3.1 気候変動のリスクとそれを取り囲むシステムの相互作用

IPCCWG2 によると気候変動リスクは、気候関連ハザード、曝露、脆弱性から生じうる[1)]。AR6 では、図 2.3.1-1 のように、それを取り囲むシステムとして、気候、生態系（生物多様性を含む）を取り上げ、システム間の相互作用に注目している。これらシステム間の相互作用は、気候変動、生態系劣化と生物多様性の損失から生じる新たなリスクの基礎となると同時に、将来への機会を提供する、という考え方による。

AR5 に比べると、生態系との関連性、又、レジリエントで持続可能な開発との関連性に、より重きが置かれているといえる。

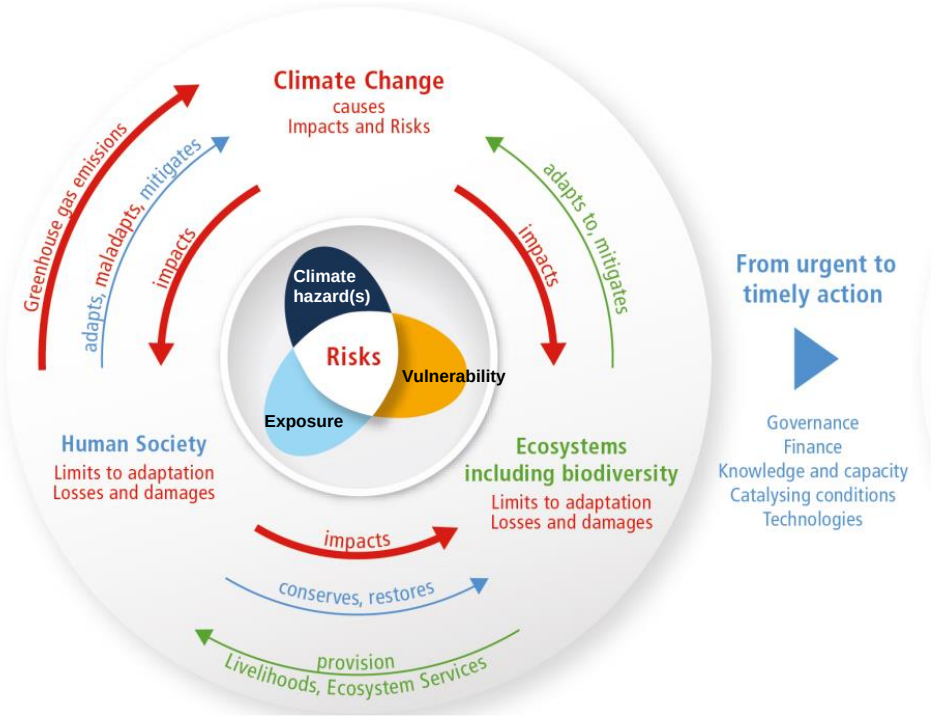


図 2.3.1-1　システムの相互作用とトレンド（Figure SPM.1）[2)]

用語

- リスク：価値観や生態系の多様性を認識した上で、人間または生態系に有害な結果をもたらす可能性のこと。気候変動との関連では、リスクは以下のものから生じうる。
    - ✧ 気候関連ハザード：人命の損失、負傷、その他の健康への被害、及び財産、インフラ、生活、サービス提供、生態系、環境資源に対する損害、損失を引き起こす可能性のある自然/人為的な物理的事象/傾向の潜在的な発生
    - ✧ 曝露：人、生活、種または生態系、環境機能、サービス、資源の存在と定義される。インフラ、経済的・社会的・文化的資産の存在
    - ✧ 脆弱性： 悪影響を受ける傾向や素因。害に対する敏感さや感受性、対処・適応能力の欠如等、様々な概念や要素を含む
- 適応：気候変動への曝露や脆弱性を軽減する上で重要な役割を担っている。
    - ✧ 生態系における自律的な適応
    - ✧ 人間システムにおける予測的/反応的、漸進的/変革的適応。
- レジリエンス：社会、経済、生態系が危険な事象や傾向等に対処する能力。攪乱の後、以前の状態に戻す。本質的な機能、アイデンティティ、構造を維持する。より広義には、能力だけでなく、変容する能力も含まれる。

2.3.2 観測された影響

Summary for Policymakers (SPM) B.1 によると、「人為起源の気候変動は、極端現象の頻度と強度の増加を伴い、自然と人間に対して、広範囲にわたる悪影響と、それに関連した損失と損害を、自然の気候変動の範囲を超えて引き起こしている」。AR6 WG1 の「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。」を踏襲し、人為起源気候変動の影響と明記している。

図 2.3.2-1 は、観測された影響を示したものである。図 a 生態系のうち、特に陸域生態系については、論文数の増加を反映し、気候変動影響の観測を、高い確信度で評価している。図 b 人間システムについては、さらに影響の質を±で示している。世界全地域に共通する影響として、暑熱等があげられる。これは、熱波等極端な気象事象の影響研究が充実した事と関連する。一般に影響は地域によって異なり、水不足、農業/作物の生産はアフリカ、小島嶼、地中海沿岸地域で悪影響があった一方で、アジア、ヨーロッパ、北米、北極域、山岳域では、良い影響もあったと評価されている。経済的影響は、多くの地域で、農林水産業、エネルギー、観光業、屋外労働生産性等悪化による損害があった一方、北極域では、エネルギー需要の減少や、農業市場や観光における比較優位の恩恵もあったと評価されている。全体的に、アフリカ、小島嶼に、悪影響評価が多い。

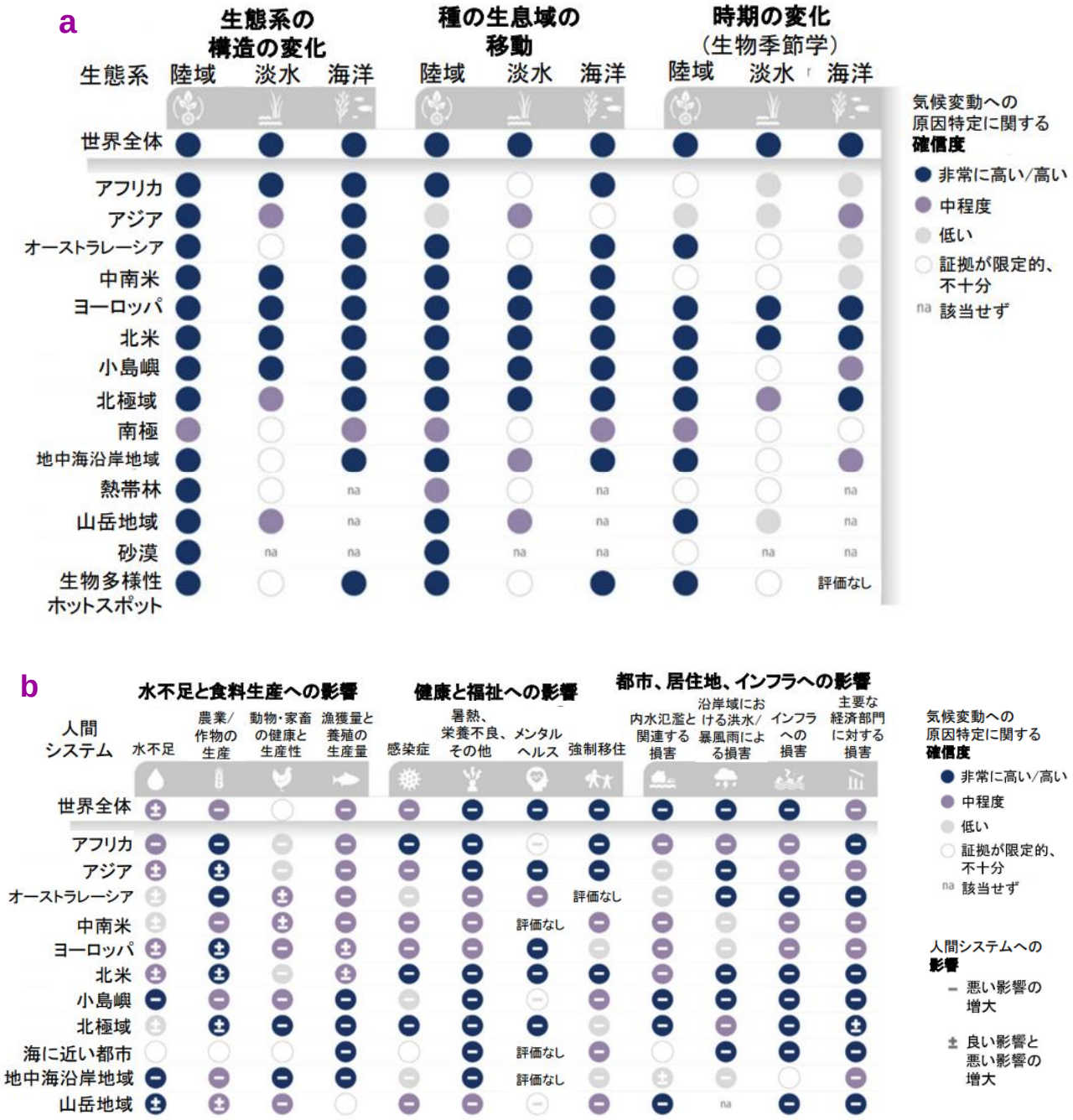


図 2.3.2-1　観測された気候変動影響 a.生態系、b.人間システム（Figure SPM.2）[3)]

注）メンタルヘルス：異常気象、度重なる事象、予期される事象等の影響。
強制移住：異常気象や気候現象による非自発的移住。脆弱性をもたらし永続化。

2.3.3　将来の影響

(1) 温暖化レベルとリスク

図 2.3.3-1 は世界の平均気温上昇における、5 つの懸念材料（Reasons for Concern: RFC）のリスク/影響の程度を示したもの。AR6WG1 の極端気象現象の頻度、強度の予測も反映され、全体的に AR5 までより厳しい評価になっている。例えば、5 つの RFC の中で

は、低い気温上昇でも最も脆弱とされる 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）について、+1℃に対する評価は、1.5℃特別報告書では「中程度」であったところ[4]、AR6 では「中程度～高い」となっている。

また、気候の影響を受けやすい人間の健康影響については、図 2.3.3-2 のように、適応シナリオ毎の評価もなされている。

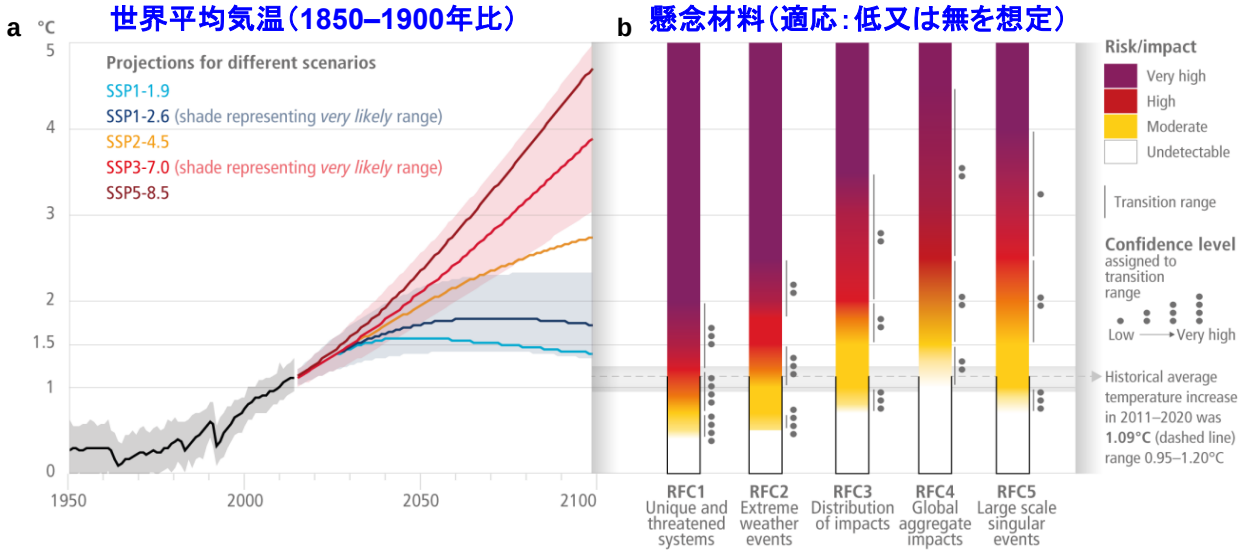


図 2.3.3-1　温暖化レベルとリスク（Figure SPM.3 a,b）[2]

注）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、種喪失等単一指標に集約可のもの）
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）

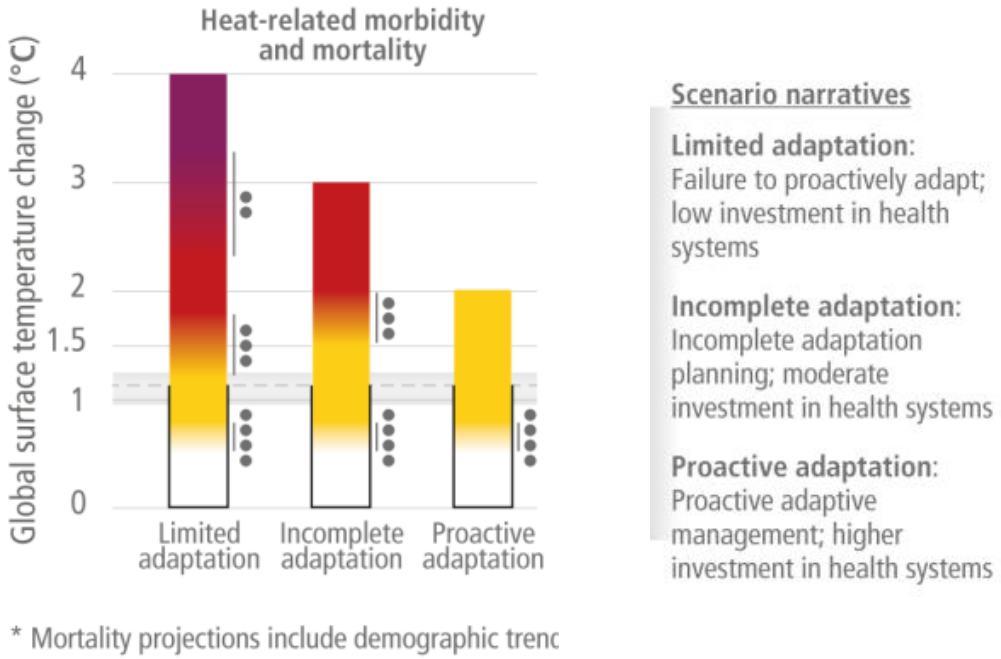


図 2.3.3-2 適応シナリオ別のリスク（Figure SPM.3 e）[2)]

(2) 一時的オーバーシュートの影響

SMP B.6 によると、「地球温暖化が、次の数十年間又はそれ以降に、一時的に 1.5℃を超える場合（オーバーシュート）、1.5℃以下 に留まる場合と比べて、多くの人間と自然のシステムが深刻なリスクに追加的に直面する（確信度が高い）。オーバーシュートの規模及び期間に応じて、一部の影響は更なる温室効果ガスの排出を引き起こし（確信度が中程度）、一部の影響は地球温暖化が低減されたとしても不可逆的となる（確信度が高い）」とある。これらは、気候変動対し早急の対応を促すためのものと考えられるが、下記のように、比較的規模の大きいオーバーシュートを想定しての評価と考えられる点に留意が必要である。

- SPM B.6 の脚注 37 “In this report, overshoot pathways exceed 1.5°C global warming and then return to that level, or below, after several decades.” によると、オーバーシュートの期間は数十年とあるが、何℃の上昇かは明確でない。
- 参考までに、脚注 27 “Overshoot: In this report, pathways that first exceed a specified global warming level (usually 1.5°C, by more than 0.1°C), and then return to or below that level again before the end of a specified period of time (e.g., before 2100). Sometimes the magnitude and likelihood of the overshoot is also characterized. The overshoot duration can vary from at least one decade up to several decades.” によると、「0.1℃以上の差」とあるが、上限は特に記されていない。
- 脚注 38 によると“Despite limited evidence specifically on the impacts of a temporary overshoot of 1.5°C, a much broader evidence base from process understanding and the impacts of higher global warming levels allows a high confidence statement on the irreversibility of some impacts that would be incurred following such an overshoot.”のように、「1.5℃の一時的なオーバーシュートの影

響に特化した証拠は限られている」、「プロセスの理解とより高い地球温暖化レベルの影響から得られたより広範な証拠により、このようなオーバーシュートの後に生じるいくつかの影響の不可逆性について、高い信頼性をもって声明することができる。」

✧ すなわち、SSP1-1.9 シナリオ等で想定されている「0.1℃以下」とは異なり、より大規模なオーバーシュートを想定しての評価と考えられる。

2.3.4 適応策と課題

(1) 適応策

AR5 以降、適応策に関する研究事例が増加した。その多くは水関連の事例であり、中でも、農業等気候変動に左右される生活への依存度が高いアフリカやアジアに多い。また、南半球は農業、北半球は都市に関する研究事例が多い（図 2.3.4-1）。

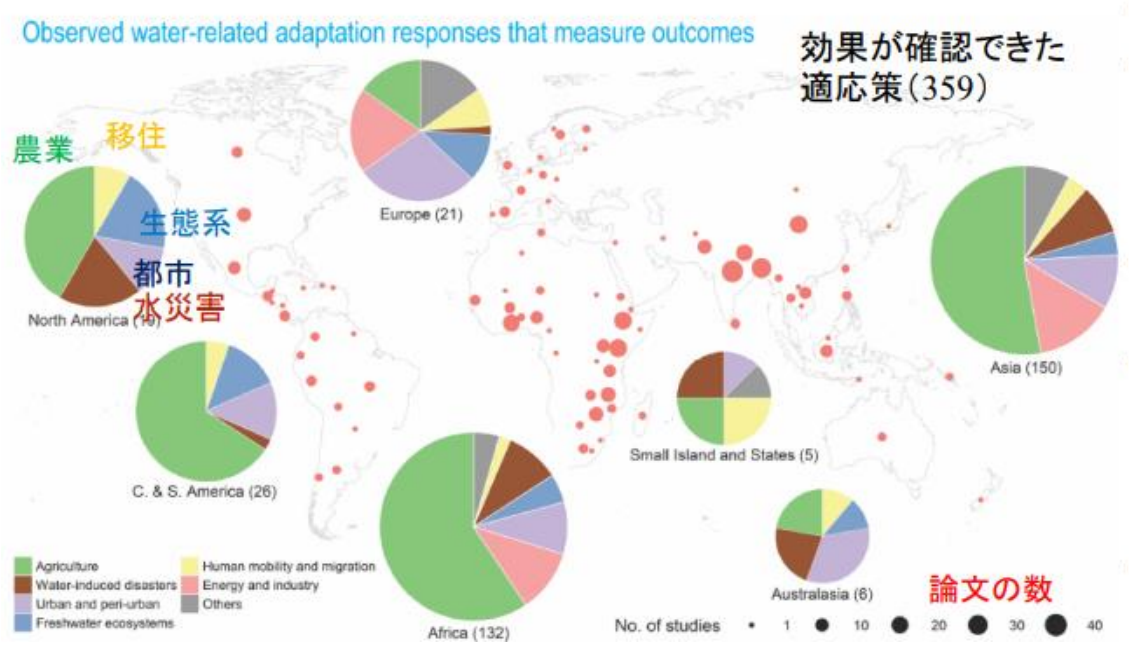


図 2.3.4-1 水関連適応策（効果が確認できた 359 論文の地域・項目内訳）[4)]

以下に、各部門の適応策と課題について、SMP C2.1～C2.10 より抜粋する。

① 水

- 内陸部の洪水に対し、非構造的対策（早期警報システム等）と構造的対策（堤防等）の組み合わせ。土地利用計画（湿地や河川の復元による自然の保水力強化、建築禁止区域や上流の森林管理）
- 農場での水管理、貯水、土壌水分保持、灌漑 。（灌漑は干ばつリスクと気候変動影響の軽減に有効だが、地下水やその他の水源の枯渇促進や土壌塩類化を避けるため適切な管理が必要。大規模灌漑は、地方から地域の気温と降水量のパターンを変える可能性もある。）
- 水関連適応策の有効性は、温暖化が進むにつれて低下する。

② 食料

- 品種改良、アグロフォレストリー、コミュニティベースの適応、農場と景観の多様化、都市農業。(制度的な実現可能性、作物の適応限界、費用対効果は適応策の有効性に影響を及ぼす。)
- 害虫駆除、受粉、炭素隔離・貯留等、生態系に基づく管理・自然プロセスに則ったアプローチ。(課題は、コスト、市場へのアクセス、新しい知識と管理。潜在的有効性は社会経済的状況、生態系ゾーン、種の組み合わせ、制度的支援に依る)。
- 食品損失・廃棄の低減、バランスの取れた食事は、栄養、健康、生物多様性およびその他の環境的利益に貢献する。

③ 森林

- 自然林：保全、保護、回復のための対策。管理林:持続続可能な森林管理、弾力性を高めるための樹種構成の多様化と調整、病害虫や山火事 によるリスク増大への対処。これらは、一般に炭素蓄積量と吸収量の回復力を高める。
- 地域社会や先住民族との協力や包括的な意思決定、先住民族 の固有の権利の承認は、多くの地域で森林適応を成功させるために不可欠。

④ 生物多様性

- 陸上、淡水、沿岸、海洋の生態系の保全、保護、回復。
- 状況が許す限り、特に保全地域や保護地域間の連結性を高め、生態学的に適切な新しい場所への種の移動を促進。脆弱な種に的を絞った集中管理、種が局所的に生き残ることができる避難場所の保護等。

⑤ 生態系に基づく適応

- 人間、生物多様性、生態系サービスに対する様々な気候変動リスクを低減し、複数のコベネフィットをもたらす。
    - ✧ 樹木やその他の植生を利用した都市緑化は、局所的な冷却効果をもたらす。
    - ✧ 自然の河川システム、湿地、上流の森林生態系は、水を貯留し、水の流れを緩やかにし洪水リスクを軽減する。
    - ✧ 沿岸湿地は、海面上昇の速度が自然の適応能力を超えて土砂を堆積させるまで、十分な空間と適切な生息地が利用可能であれば、暴風雨や海面上昇に伴う沿岸侵食や洪水から保護する。

⑥ 都市・農村、インフラ

- 都市や農村の居住地やインフラの設計・計画において、気候変動の影響やリスクを考慮することは、レジリエンスを高め、人間の福利を向上させるために重要である。
- 基本的なサービス、インフラ、生計の多様化と雇用の提供、地域や地方の食料システムの強化、コミュニティベースの適応は、特に低所得者や周縁化された人々の生活と生計を向上させる。

- 地方、市町村、国レベルの包括的、統合的、長期的な計画と、効果的な規制・監視システム、財政的・技術的資源・能力により、都市・農村システムの移行が促進される。
- 農村部に住む人々の多くが気候変動に対して高い脆弱性を持っている。現金給付や公共事業等の社会的保護プログラムに気候変動への適応を組み込むことは、実現性が高い。特に基本的なサービスやインフラに支えられた場合、気候変動に対するレジリエンスを高められる。

⑦ 情報通信技術（ICT）

- ICT は、都市・インフラシステムの機能と深く関わっており、「スマートシティ」構想の中核をなす。一方、ICT への電力供給は、電力ネットワークに依存している。これらの相互依存関係や気候変動下での関連リスクについて、未だ情報が限られている。（6.3.5.3 節）

⑧ 海面上昇

- ゆっくり進行する平均海面水位上昇と、極端海面水位の頻度・高さ増大への対応が必要。海面上昇率が高い場合、特に、可能性は低いが氷床の崩壊が発生した場合は、影響が早期化する。
- 低平な沿岸の都市や集落、小さな島々で進行する海面上昇と地盤沈下への対応には、防護、順応、事前計画移転等がある。
- これらは、十分に前もって計画され、社会文化的価値観や開発の優先順位と整合し、包括的なコミュニティ参加プロセスに裏打ちされた、組み合わせや順序だった場合、より効果的である。

⑨ エネルギーシステム

- 最も実現可能性が高いオプションは、レジリエンスのあるインフラ、信頼性が高い発電システム、既設・新設発電所の効率的な水の利用。
  発電の多様化は、特に農村部の人々の気候変動への脆弱性を軽減する。状況に応じて分散化できる発電（例：風力、太陽光、小規模水力発電）、需要サイドの管理（例：蓄電、エネルギー効率の改善）等。
- 気候変動に対応したエネルギー市場、現在及び予測される気候変動に応じたエネルギー資産の設計基準の更新、スマートグリッド技術、堅牢な送電システム、供給不足に対応する能力の向上は、中長期的に高い実現可能性を持ち、緩和とのコベネフィットがある。

⑩ 燃料輸送

- 石油、天然ガス、水素、バイオマス、隔離前の CO_2 等の、パイプラインや道路、鉄道、船舶による輸送に関する適応策（6.3.5.4 節）
  - ✧ 工学的な改善
  - ✧ 輸送パターンの変更によるサービスの中断に対する計画と準備
  - ✧ 現地での貯蔵容量の増加
  - ✧ 重要な輸送ノードの特定と優先的な保護

⑪ 部門横断

- 特に最もリスクの高い人々に対して、気候災害への曝露から身を守るための的を絞った投資や資金調達の機会が複数存在する。
- 早期警報と対応システムを含む暑熱健康アクションプランは、猛暑に対する効果的な適応策。
- 水と食物を媒介とする疾病に対する効果的な適応策には、飲料水へのアクセス改善、水と衛生設備が洪水や異常気象に曝されることの低減、早期警報システムの改善。
- 媒介性疾患に対する効果的な適応策としては、早期警戒システム、ワクチン開発などが挙げられる。
- メンタルヘルスリスクを軽減するための効果的な適応オプションには、メンタルヘルスケアへのアクセス、異常気象による心理社会的影響のモニタリング等が含まれる。

(2) 適応の限界

SMP C.3 によると、一部の生態系は適応の限界に達している（確信度が高い）。地球温暖化の進行に伴い、損失と損害が増加し、更に多くの人間と自然のシステムが適応の限界に達するだろう（確信度が高い）。人間の適応は限界に達しているものもあるが、様々な制約、主として財政面、ガバナンス、制度面及び政策面の制約に対処することによって克服しうる（確信度が高い）。

(3) 気候にレジリエントな開発

包括的、効果的、革新的な対応により、適応と緩和の間の相乗効果を利用し、トレードオフを減らすことができ、持続可能な開発を促進することができる（SMP D.1）。

次の 10 年間における社会の選択及び実施される行動によって、中期的及び長期的な経路によって実現される気候にレジリエントな開発が、どの程度強まるかあるいは弱まるかが決まる（確信度が高い）（SMP D.5）。

2.3.5 まとめ

AR6WG2 によると「人為起源の気候変動は、極端現象の頻度と強度の増加を伴い、自然と人間に対して、広範囲にわたる悪影響を引き起こしている」。AR6 WG1 と同様、人為起源と明記し、AR5 までと比べると強い表現を用い、早期対策を促す内容となっている。人間社会と生態系システムを対象の評価として以下のような事が記された。

- 温暖化影響と適応
  - ✧ これまで観測された影響：全地域で観察された悪影響は暑熱。一般に影響は地域によって異なる。例えば、水不足、農業/作物の生産は、アフリカ、小島嶼、地中海沿岸地域で悪影響があった一方、アジア、ヨーロッパ、北米、北極域、山岳域では良い影響もあった。
  - ✧ 将来の温暖化に対する影響：例えば、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）は、+1.5℃でもリスク・影響

は高い～非常に高い。（極端気象現象の頻度、強度の予測も踏まえ、従来の報告書より厳しい評価となっている。）

- ✧ 人間社会については、水、食料、都市・農村、エネルギーシステム等、適応の評価も増加。課題は、財政面、ガバナンス、制度面及び政策面の制約。

- 気候にレジリエントな開発
  - ✧ 「包括的、効果的、革新的な対応により、適応と緩和の間の相乗効果を利用し、トレードオフを減らすことができ、持続可能な開発を促進することができる」と、気候にレジリエントな開発の必要性を強調。

なお、1.5℃を一時的に超えた場合（オーバーシュート）の影響について、1.5℃以下に留まる場合と比べ深刻なリスクに追加的に直面するとの記載があるが、WG3 等で評価している 0.1℃程度のオーバーシュートとは異なり、より大規模なオーバーシュートを想定しての評価の可能性が考えられる。

参考文献（第 2.3 節に関するもの）

1) IPCC: AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability
2) IPCC: AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability
3) AR6 WG2 SPM の概要（暫定訳）https://www.jma.go.jp/jma/press/2202/28c/ipcc_ar6_wg2_a.pdf (accessed 2022-03-13)
4) IPCC: Special report on Global Warming of 1.5 ºC (2018)
5) 平林由希子：ALPSIII 気候変動リスクマネジメント検討 WG 講演資料. 2022.03.14

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

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。IPCC 1.5℃特別報告書[1)]では、1.5℃を実現しうる 2050 年カーボンニュートラルにおいても様々な排出経路や対策があり得ることが示されており、LED シナリオを除く全てのシナリオで負排出技術の必要性が示唆されている。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重要である。また直近においては地政学的リスクの顕在化によるエネルギー安全保障の確保も改めて指摘されてきているところである。3E+S の観点から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していく政策は重要である。

世界でカーボンニュートラル実現を目指す動きが加速する中、2020 年 10 月に菅総理より 2050 年までのカーボンニュートラルの実現を目指すとの宣言がなされた。この目標の下、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っていく産業政策として「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[2)]、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[3)]。

また 2021 年 6 月には統合イノベーション戦略 2021[4)]が閣議決定された。ここでは、気候変動問題を取り巻く国内外の情勢変化を踏まえ、革新的環境技術の研究開発と非連続的イノベーション創出の推進が重点施策の一つとして掲げられている。また、気候変動問題への対策の具体的な取り組みとして、カーボンニュートラルの実現に向けた省エネルギー及び電化の促進と電力の脱炭素化の推進、また次世代型太陽電池、CCUS/カーボンリサイクル、水素等の革新的イノベーションの強力な推進が言及されている。このほか、昨年来提示されてきたエネルギー基本計画、地球温暖化対策計画の重要戦略なども踏まえて、経済・社会全体での取り組みを加速するコンセプトでクリーンエネルギー戦略の策定に向けた検討が始まっている。クリーンエネルギー戦略は岸田総理の「新しい資本主義」の中心戦略に位置付けられており、グリーントランスフォーメーション（GX）を起点とした新たな産業について、具体的なビジネス・産業の創出につながる道筋を示し、エネルギー・産業の各分野の投資を促進していくことが求められている。

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、よりよい政策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、大学、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か、イノベーション創出を誘発しうる環境や基盤はどのようなものなのか示唆を得るべく、事業化サイドの視点に基づく事例検討を行った。

2.4.1 民間企業におけるイノベーションを生む改善の連鎖の有効性

従来の官主導による産業政策だけでなく、民間企業の視点からイノベーションの方向性や戦略性について理解を深めるため、経営学の気鋭の研究者との意見交換を通じ、今後の日本のイノベーションを考える上でのポイントを調査した。

- 日本は生産工程すなわち生産手法のイノベーションは得意とされてきた一方、製品のイノベーションは苦手とされてきた。では、どのように生産手法を革新させてきたかというと、カイゼンとその連鎖によることがわかる。一見すると地道な改良が連鎖することによって大規模なイノベーションに化けるのであり、「この連鎖をいかに起こすか、どうマネジメントするか」が経営のカギとなる。
- ここでいうカイゼンとは、品質・コスト・納期等の経営指標向上を目的とする全員参加型の組織変化をいい、日本企業の強みとしてとらえることができる。カイゼン（Kaizen）は 1980 年代に注目を集め、Oxford 英英辞典にも収録されるなど、国際ビジネスの場でも一般化している。そこで、研究者自身による日本の自動車産業関連企業における実態調査を基に、イノベーションを生み出す組織構造と改善活動成果の関係の一般化を試みた。

- 幾つかの企業における観察を踏まえ、すべてのイノベーションが「小さな革新の連鎖」から生まれている可能性さえあるのだが、この連鎖をさせやすくするためには組織横断型でランダムに情報や知見を伝達・共有できるようなネットワークの存在が有効である。
- 個としての天才の登場を待ちわびたり、天才を育成したりするのではなく、ありきたりな個人によるネットワーク化で構成する組織形成を目指す方が有効である。
- 個々のカイゼンに取り組むだけでは連鎖は起きず、そこに組織としてのビジョンや戦略性などがあり、目的を持ってカイゼンをつなぐ人材が必要である。これらがつながった結果として、社会を一新する仕組みが出てくる。
- 環境関連イノベーションへの応用例として、環境専門家・空調メーカー技術者・生産管理系経営学者が出会う場の創出が重要で、これらの交流を通じ、それぞれが日々改良を積み重ねていくことでイノベーティブなシステムや利用法が発見されるのではないだろうか。
- イノベーション政策への示唆として、イノベーション創出のためのネットワーキング機会の創出といった簡単ではあるが効果検証の微妙な政策、研究費申請書簡略化や報告義務簡素化といったイノベーションの阻害要因をつぶすといった実現へは中難易度であるものの有効な政策、さらには特許クラブ制度や特許トレーサビリティ制度といった高難度だがいつか必要になる（既に必要である）政策のパターンに類型化できるのではないか。

2.4.2 スタートアップ投資に関する事例検討

イノベーション投資促進政策に関する問題意識として、近年の大型研究開発プログラムへの投資拡大がある。2014 年に導入された SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）は年間 200～300 億円程度、2020 年度から始まったムーンショット型研究開発制度は 10 年間で 1150 億円、グリーンイノベーション基金事業は 10 年間で 2 兆円の政府投資であり、投資額は増大しつつあるが、これまでと同様の手法で投資を増やしても投資先が限定される可能性があること、また市場化・事業化の可能性や成長性を適切に評価できるのかといった懸念があり、必要なイノベーションは生まれにくいのではとの指摘がなされている。一方で、スタートアップへの投資が拡大し、全体として大きなリターンを生み出している状況が近年見られている。そこで本節では、スタートアップ投資の方法論について調査しまとめたレポート[5)]を基に、そのインプリケーションについて整理した。

- 世界的にスタートアップ投資の位置づけが増大している。米国、EU27 においては研究開発費年総額に対するスタートアップ投資額は近年 10～18%程度で推移している。日本においては 3%弱であるものの増加傾向にあり、2020 年度における科研費や NEDO 予算総額と比較するとおよそ 2～3 倍程度の規模に成長している。また、企業の中には自社の研究開発費以上の CVC（コーポレート・ベンチャー・キャピタル）年間投資を事業会社経由で行っている例も見られる。

- スタートアップへの投資が増え続けている理由としては、適切に行えばペイするということがある。VC の平均的な利益率は 15～30%程度との調査結果があり、成功確率は低くリスクは高いが大きな価値創出に成功するスタートアップが一部ではあるが生まれており損失をカバーしているためである。
- スタートアップを効率的に誕生・成功・淘汰させる方法論が近年確立されてきており、このことがスタートアップの成功事例増加に寄与している。従来、基礎研究もしくは事業成長の段階においての方法論は議論されてきたものの実証・事業化段階におけるいわゆる「死の谷」の部分については、産学連携や技術移転などに代表される従来型の方法論はうまく機能しなかった。これが、過去 20 年ほどの間にリーンスタートアップやアクセラレーションなどスタートアップの方法論が確立されてきた。リーンスタートアップを例にとると、従来のような綿密な分析や計画に基づく製品開発は不確実性が高い環境においては非効率であったのに対し、リーンスタートアップは実用最小限の製品作成と必要最小限のユーザテストに基づき仮説検証サイクルを高速に回すことで製品・サービス開発を効率的に進めることが可能である。
- 従来の公的 R&D プログラム・実証事業における審査実績の評価を適切に行うことが重要であるとともに、不確実性が高く変化も早い市場ニーズに対応するためには数年を要するような従来方法論のみではなくスタートアップ投資における方法論を取り入れたプログラムを検討していくことも有用と考えられる。また、資金配分メカニズムの改善策の例として、卓越したプログラム・ディレクターへの更なる権限付与によるハイリスク・ハイリターン研究への投資、また長期的で失敗に寛容な投資方式などの検討も必要と考えられる。
- これらのスタートアップ方法論は主としてコンシューマ分野対象であり、エネルギーのようなインフラ事業、コモディティ分野にも適用可能なのか、また営利目的の投資と政府 R&D を同様に議論することができるのかといった指摘はある。しかし、基盤研究などにおいてもリーンスタートアップのような高速で検証する枠組みを取り入れるなど参考にできる部分はあると考えられ、これらを支援するような投資プログラムの検討は有用である。また日本においてはベンチャーに対する出資側にも課題があり、目利きを米国などに委ねるなどリソースが不足しているのが現状である。スタートアップの事業化の可能性を見極める能力の養成も重要である。さらに、投資を受ける側の市場の整備が現状では十分であるとは言えず、ここを整えていく必要がある。
- グリーンイノベーション基金はスタートアップ投資につながっているとは言いにくい。WG で検討する際にはテーマとコンソーシアムが形成されており、ベンチャーが入りにくい状況である。ベンチャーが参入しやすい公的 R&D プログラムの整備についても検討の余地がある。

2.4.3 まとめ

2050 年カーボンニュートラル目標達成に向け、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を促進しうる環境について、実例調査に基づく検討を行った。イノベーション創出のための連鎖を起こす組織形成、また組織を超えたネットワーク形成の機会を幅広く提供していくことは有用であることが示唆される。また、このネットワークの活用も念頭に置きつつ、革新的技術の早期実用化に資する投資プログラムの構築は、現在の公的大型 R&D プログラムによる長期技術開発への支援を補完する位置づけとなりうる。基盤技術から実用化までを考慮した包括的な支援制度の構築は、経済と環境の好循環に資するものであり、具体的な制度検討に有用となる分析、提言を行っていくことは引き続き重要である。

参考文献（第 2.4 節に関するもの）

1) IPCC; 1.5℃特別報告書（2018）
2) 経済産業省；2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（2020）
https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html
3) 経済産業省；2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（2021）
https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html
4) 内閣府；統合イノベーション戦略 2021（2021）https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/2021.html
5) 木村宰；スタートアップ投資に関する情報提供、令和 3 年度　第 3 回 ALPSIII イノベーション・投資促進検討 WG 講演資料 (2022)

第3章　　グリーン成長の限界と機会

CO_2排出削減は重要であるが、その排出削減は経済成長に負の影響を及ぼす恐れがあり、それによって世界の CO_2 排出削減への取り組みは大きく進んでこなかったと言える。経済成長と CO_2 排出削減が両立（グリーン成長）することが重要である。

近年、先進国の一部では、GDP は上昇しているものの、CO_2 排出量は減少しており、世界全体でも GDP は成長しているものの、CO_2 排出量は 2013～16 年にかけてほぼ横ばいではあった。しかし、2016 年以降の世界排出量は再び増加に転じた（図 1.1.1-1 を参照）。また、2020 年は COVID-19 の影響によって、世界排出量は大幅に低下したと見られている。しかし、これも大幅な GDP の低下と合わさって排出量が低下したものであり、経済成長と CO_2 排出削減が両立しているわけではない。2021 年は再び増大したと推計されている。

政府は「2050 年カーボンニュートラル」を目指すと宣言し、2020 年 12 月には、「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定した。そこでは、産業構造や社会経済の変革をもたらし、次なる大きな成長に繋げて、「経済と環境の好循環」を作っていく産業政策 ＝ グリーン成長戦略　を実現していくとした。また、新しい時代をリードしていくチャンスの中、大胆な投資をし、イノベーションを起こすといった民間企業の前向きな挑戦を、全力で応援していくことが政府の役割としている。しかし当然ではあるが、政府の支援も排出削減コストの負担ということであり、大きな費用負担は、成長の阻害要因となり、そのグリーン成長実現の道筋が明確となっているわけではない。

本章では、これらの状況について最新のデータも踏まえながら分析、評価を行った。3.1 節でグリーン成長の概括を行った後に、3.2 節において、エネルギー価格高騰に対する耐性評価を行った。3.3 節では、日本における間接的な電力輸入の測定を行った。昨年度本事業の報告でも実施したが、2019 年までなど最新のデータを加えるとともに更に分析を深化させた。3.2、3.3 節については、慶応大野村浩二教授に執筆頂いた。3.4 節では、足元の日本の産業界の排出削減の取り組み状況を分析した。3.5 節では世界および日本における再生可能エネルギー導入状況、系統対策を中心とした対策の取り組みの動向、そして課題について調査、整理を行った。3.6 節では電力自由化を中心としたエネルギーシステム改革の政策動向を記載しつつ、温暖化対策を進めるにあたっての課題についてまとめた。さらに 3.7 節では、グリーンファイナンスの動向と定量分析例の整理を行った。また、気候変動対策においても効率性の追求は重要であるが、一方、衡平性についても留意が必要である。3.8 節では、FIT 等の政策によって費用負担も増大してきているが、それに伴う負担の偏りの状況について調査を行った。

3.1　グリーン成長の限界と機会：世界の経済成長と CO_2 排出の関係

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。

これまで、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や評価を実施し、報告を行ってきた。本節では、まず、それらの当機構における分析・評価の主要点をまとめる。そして、近年における世界の CO_2 排出量の増減に寄与すると考えられる要因は何か、また各要因がどの程度 CO_2 排出に寄与しているかを分析し、GDP と CO_2 排出の関係の状況について考察する。なお、本研究では CO_2 はエネルギー起源の CO_2 を意味する。また、長期的な傾向を見ることを主な目的とするため、2019 年までを対象の期間（COVID-19 による影響は考慮しない）とする。

3.1.1 デカップリングに関する議論

デカップリングの定義については、GDP は上昇するがエネルギー消費量もしくは GHG 排出量の原単位が低下する weak decoupling と、GDP は上昇するがエネルギー消費量もしくは GHG 排出量自体が低下する strong decoupling が考えられる（文献 1)）が、世界の GDP と CO_2 排出量との間には、過去において強い正の相関関係、つまり両者はカップリングしている状況が見られてきた。しかし近年、世界全体において GDP は成長しているものの、CO_2 排出が停滞あるいは減少している、いわゆる経済と CO_2 排出のデカップリングが起こっているという指摘が見受けられる。

デカップリングの指摘例としては、平成 28 年度の報告（文献 2)）で紹介したように、Jackson et al.[3] は、2014～2015 年にかけて経済が順調に拡大する中で CO_2 排出の伸びが減速し、CO_2 排出と経済成長がデカップリングする傾向があるとした。また米国のオバマ前大統領が Science 誌に寄稿した論文（文献 4)）では、2008～2015 年の米国において、経済は 10%成長したがエネルギー起源 CO_2 は 9.5%減少したとし、さらに 2015 年の世界全体においても、経済が成長したのに対しエネルギー起源 CO_2 排出量は前年と同レベルの見込みという IEA の所見を引用し、気候変動に立ち向かうためには低成長・生活水準の低下を余儀なくされるという論争に終止符を打つものであるという見解が述べられた。

一方、Wiedenhofer et al.[5]および Haberl et al.[6]によると、多くの文献レビューが経済成長と資源使用および GHG 排出とのデカップリングを扱っているが、absolute（もしくは strong）デカップリングの経験的証拠は殆ど見当たらないか、あるいは決定的でない。Wiedenhofer et al.および Haberl et al.は、さらに、経済成長（GDP）、資源使用（素材とエネルギー）、GHG 排出の関係に関する 835 の文献について体系的レビューを行い、2 つのパートにまとめている。パート 1 ではデカップリングがこれらの 3 つの要素の関連においてどのように研究されているかについて、そのコンセプトや分析手法といった観点から検証し、パート 2 ではこの体系的レビューに基づいた政策へのインプリケーションについて示しているが、GDP と CO_2 排出との間に relative（もしくは weak）decoupling の状況は見られるものの、長期的な absolute（もしくは strong）decoupling の例は稀であるとしている。

3.1.2 世界の経済成長と CO_2 排出量の関係についてのこれまでの RITE での分析

(1) 世界での GDP と CO_2 排出の関係性の分析・評価

平成 28 年度の報告における「世界での GDP と CO_2 排出の関係性の分析・評価」（文献 2)）では、図 3.1.2-1 に示すように、2000～2015 年の間の GDP と CO_2 排出量の関係を示したうえで、2013～2015 年にかけて CO_2 排出量がほぼ横ばいになっていることについて、長期の傾向で見ると 2009～2013 年における排出の大きな伸びが調整されてきたと考えることが妥当としている。さらに、2000～2015 年における CO_2 排出実績について線形回帰を行った結果の 2015 年値を基準排出量とし、2015 年の実績排出量との差である 10.9 億トンの削減の原因について考察を行った。表 3.1.2-1 に示すように、主な要因として、世界の銑鉄生産量の減少（約 2.5 億トン）、米国のシェールガス利用拡大による減少（約 2.2 億トン）等が考えられ、要因を積み上げた削減効果の合計は約 7.2 億トンである。このうち銑鉄やセメント生産量の減少は中国の需給調整の影響が強く、またこれらの要因のうち比較的明確にデカップリングの要因と考えられるのはシェールガス拡大のみであり、strong decoupling を継続できる状況にあるとは言いがたいとしている。

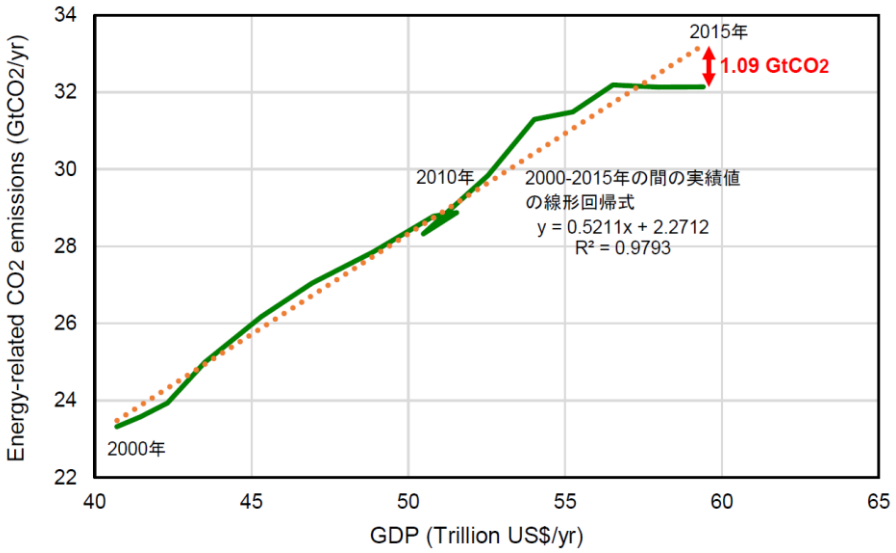


図 3.1.2-1 世界の GDP 成長と CO_2 排出量の関係（2000～2015 年）

表 3.1.2-1　世界の 2015 年時点の CO_2 排出削減効果

要因	2015 年排出削減効果	内容
世界の銑鉄生産量の減少	約 2.5 億トン	銑鉄約 1.0 億トン減少
世界のセメント生産量の減少	約 0.5 億トン	セメント約 1.7 億トン減少
米国のシェールガス利用拡大による減少	約 2.2 億トン	米国における石炭火力からガス発電への転換の促進による
再エネ発電（太陽光・風力・地熱など）拡大による減少	約 1.6 億トン	再エネ発電比率の 2000-15 年の平均的な拡大に対し、2015 年は 1.2%ポイント分大きい
日本の CO_2 排出量低下	約 0.4 億トン	原子力稼働率の低下などで 2013 年にかけて約 1.1 億トン引き上げていたが、低効率の石油火力等の停止等により、2015 年には+約 0.7 億トンに
要因積み上げ削減効果計	**約 7.2 億トン**	
マクロ推計からの排出削減効果	**約 10.9 億トン**	

(2) 消費ベース CO_2 排出の分析

平成 30 年度における「消費ベース CO_2 排出の分析」（文献 7)）では、2000～2014 年での主要国について、貿易に体化した CO_2 を推計し、消費ベース CO_2 の評価（生産ベース CO_2 との比較）をしている。図 3.1.2-2 は「（消費ベース CO_2）-（生産ベース CO_2）」の排出量差を地域別に示している。2000 年以降、中国、インド、ロシアは、継続的に CO_2 輸出国であり、その輸入先は主に先進国である。サービス産業化の進展したそれらの先進国・地域では、見かけ上の CO_2 排出量（生産ベース）が小さくなる可能性があるが、貿易に体化された CO_2（消費ベース）は大きい。近年、消費ベース CO_2 の低下傾向が見られるが、体化された CO_2 の輸入元である主に中国での原単位の改善によるところが大きい。

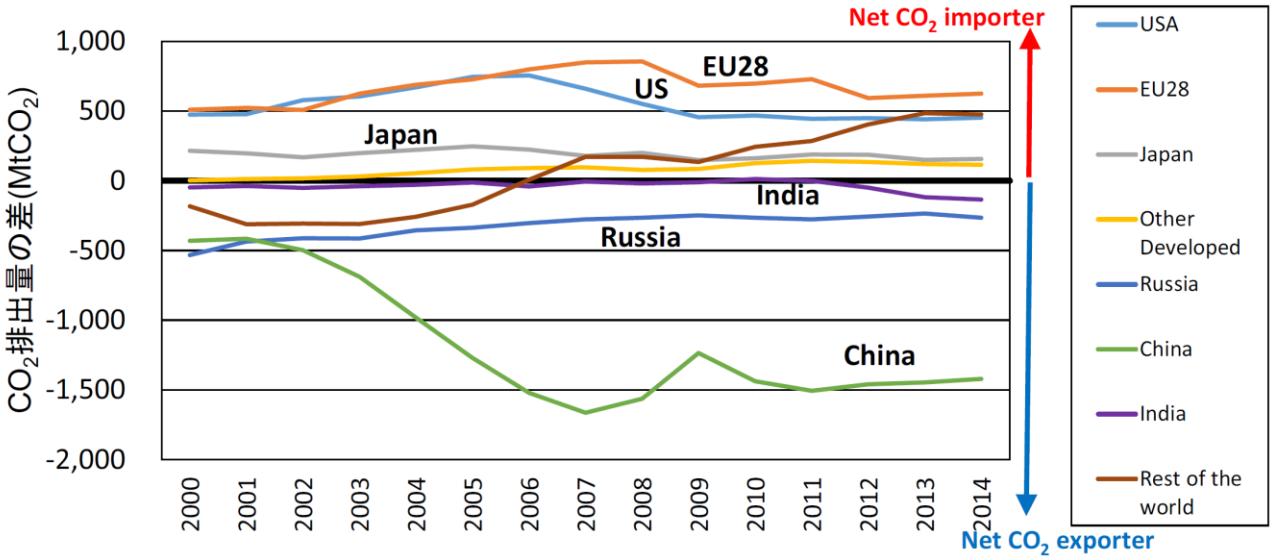


図 3.1.2-2　2000～2014 年における生産・消費ベース CO_2 排出量の差の地域比較

(3) 間接的な電力輸入

令和 2 年度には、電力多消費的な最終財や中間財の国内生産を縮小し、輸入へと切り替えることによる間接的な電力輸入に着目し、1960～2015 年における日本の経済成長に伴う電力消費の構造変化を評価した（文献 8)）。図 3.1.2-3 は日本経済における電力の実効輸入依存度(EID)の変化を示すが、大きく 3 つの変動期があり、1995 年以降に電力 EID が上昇している。1990 年代からの国際的なサプライチェーンの見直しは日本経済におけるエネルギー消費構造にも大きな影響を与え、エネルギー多消費的な部品生産の輸入への切り替えやエネルギー消費的な加工の最終段階を（消費地に近い）海外生産へと移管することによって、日本国内のエネルギー生産性指標は”見かけ上”は改善したように見えると指摘している（最新の推計は、本報告書の第 3.3 節参照)。

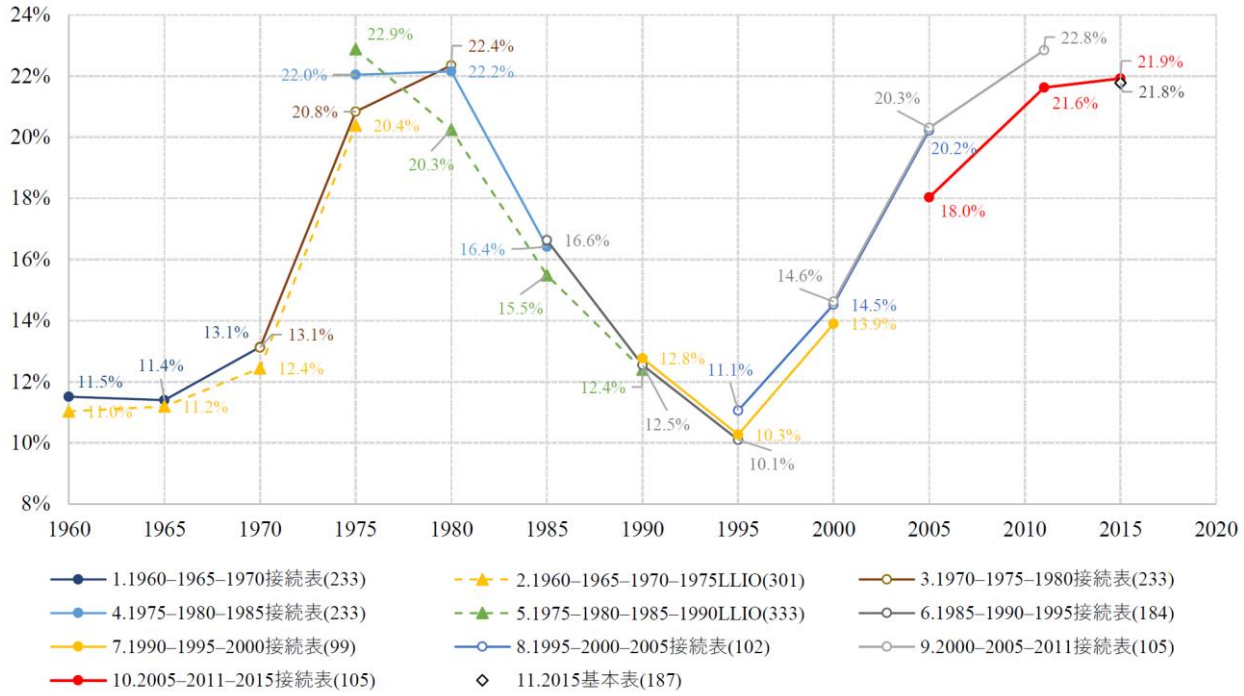


図 3.1.2-3 日本経済の電力 EID

以上の RITE における分析より、一部の国ではデカップリング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海外への移管等を通して、それらの国外での排出としてカウントされているためで、世界全体での CO_2 はあまり削減されず、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。

3.1.3 世界の CO_2 排出量等についての近年（～2019 年）の状況

(1) 世界 GDP と CO_2 排出量、電力消費量との関係

図 3.1.3-1 に、1971～2019 年における世界 GDP と CO_2 排出量との関係を示す（分析に用いたデータは文献 9)）。両者の間には強い正の相関が見られる。2013～2016 年の排出量はほぼ横ばいだったものが、2017 年、2018 年においては再び上昇したが、2019 年は前年とほぼ同水準だった。表 3.1.3-1 に、1971 年、2000 年、2009 年からの CO_2 排出量の GDP 弾性値を示す。過去 20 年間と比べ最近の 10 年において GDP 弾性値が下がっており、GDP の上昇ほどには CO_2 排出量が増加しない傾向が強まっていると言える。ただし、2000～2013 年頃の排出急増とその後の排出増の抑制は、中国における生産活動量の変化によるところが大きいことや、インド等の人口が大きい国が後を追うと考えると、長期にわたる将来的な傾向については評価が難しいところである。

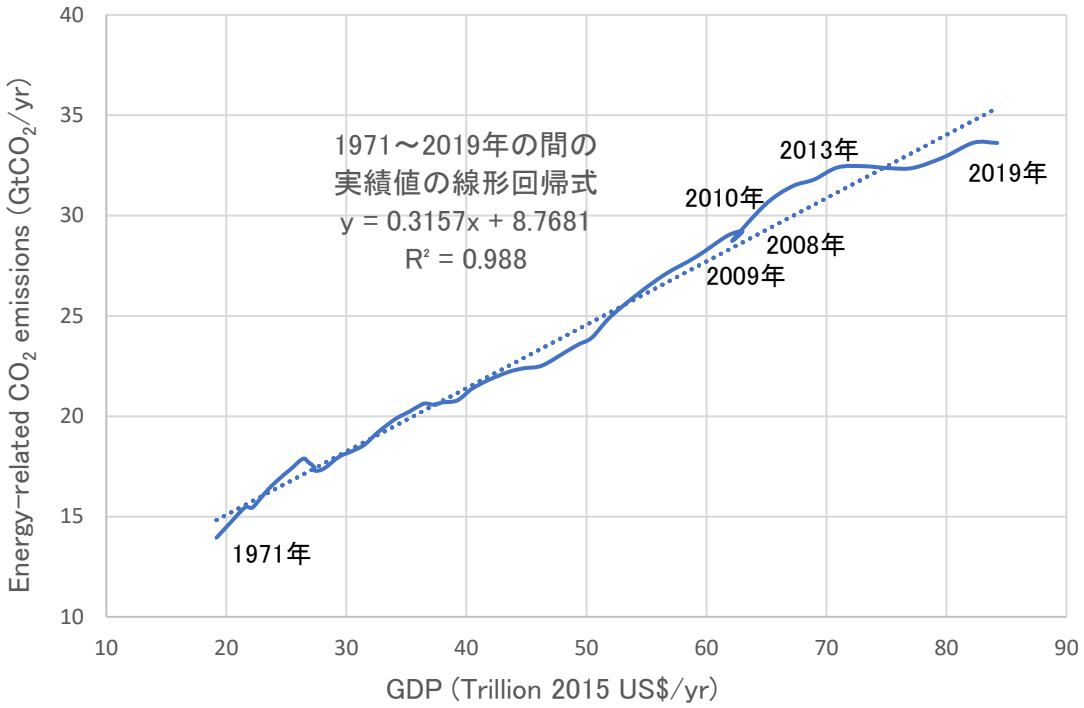
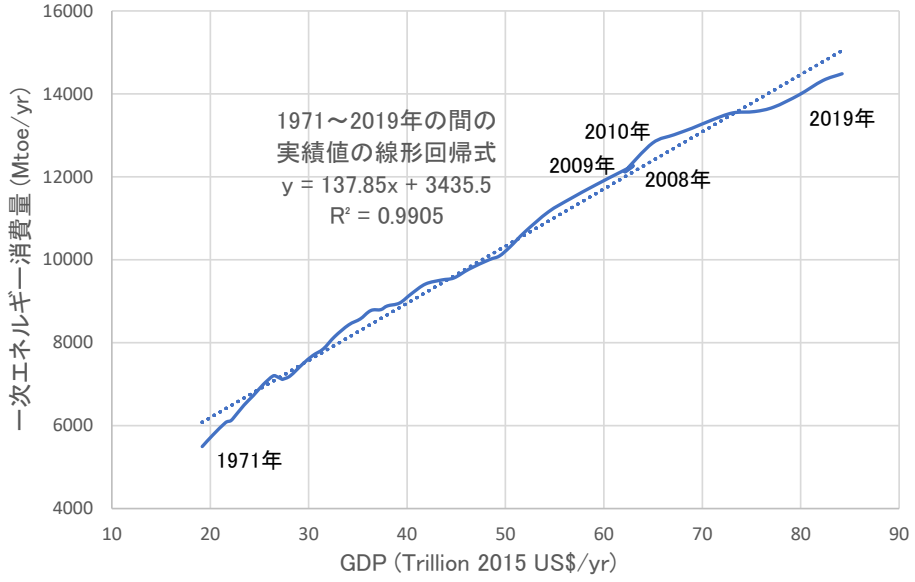


図 3.1.3-1　世界の経済成長と CO_2 排出量の関係（1971～2019 年）

表 3.1.3-1　CO_2 排出量の GDP 弾性値

	GDP 弾性値
1970～2019 年	0.59
2000～2019 年	0.66
2009～2019 年	0.51

図 3.1.3-2 には、世界 GDP と世界の一次エネルギー供給量および世界の発電電力量との関係を示す（分析に用いたデータは文献 9)および文献 10)）。いずれも、CO_2 排出量との関係以上に、強い正の相関が見られる。なお、2019 年について見ると、一次エネルギー供給量は回帰線とほぼ平行して上昇しているのに対し、CO_2 排出量の方は若干だが横ばいになっているのは、エネルギー低炭素化の影響の可能性がある。



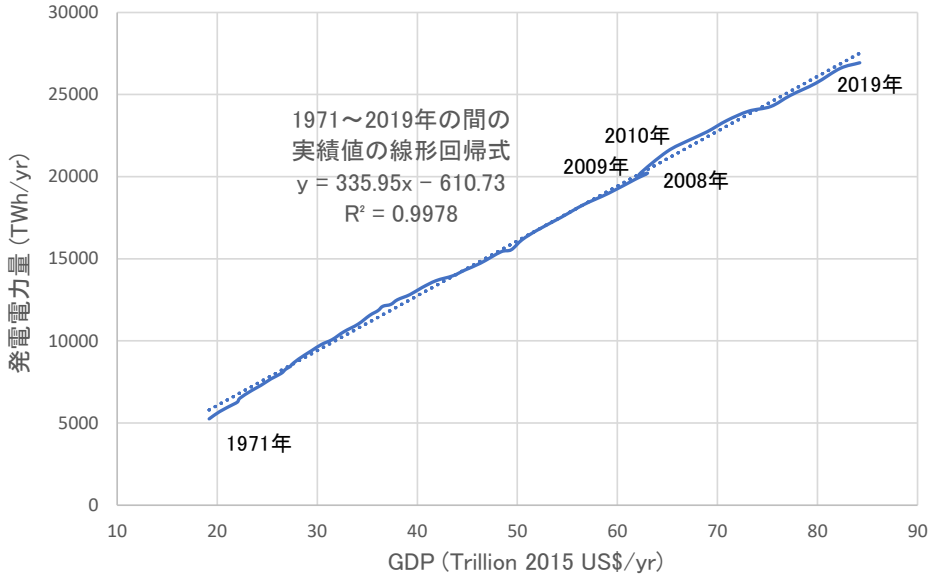


図 3.1.3-2 世界の経済成長と一次エネルギー供給量（上）および発電電力量（下）との関係

(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。GDP、GDP 当たり最終エネルギー消費量（FEC/GDP）、最終エネルギー消費量当たり一次エネルギー消費量（PES/FEC）、一次エネルギー当たり 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 10 年毎および 2010～2019 年の期間の 1 年毎の年平均変化率を求めた。図 3.1.3-3 にその結果を示す（分析に用いたデータは文献 9)および文献 10)）。

10 年毎の長期の傾向という点では、2010 年代においても、省エネや CO_2 排出原単位向上の傾向に大きな変化は見られないが、1 年毎に見ると一次エネルギー当たりの CO_2

排出量変化が CO_2 排出量の増減とほぼ連動しており、世界 GDP と CO_2 排出量および一次エネルギー供給量との関係で触れたように、2019 年にはそれまでの数年と比べて低炭素化がより進んだことにより CO_2 増加が抑えられたのではないかと考えられる。

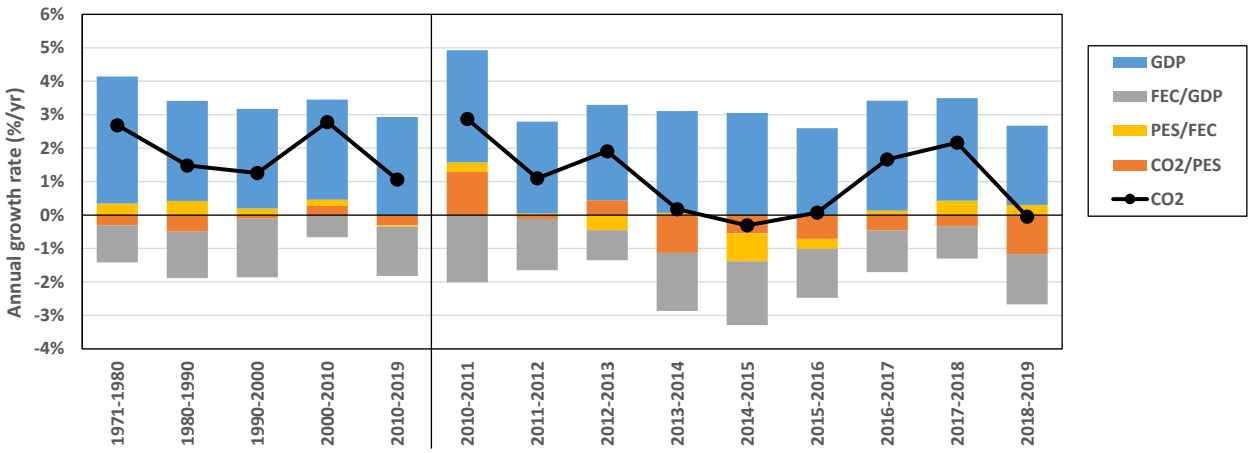


図 3.1.3-3 世界 CO_2 排出量の要因分解（茅恒等式）

(3) 2019 年の世界 CO_2 排出量の傾向

2019 年の世界 CO_2 排出量の状況について、IEA と BP による報告では次のように指摘している。IEA Global Energy Review 2019（文献 11)）によると、2019 年の先進国における特に発電部門からの CO_2 排出量が減少し、他地域からの排出量増加が相殺され、世界全体では前年とほぼ同様の排出量となった。先進国での発電部門からの CO_2 排出量が減少した理由としては、石炭火力発電の減少、主に風力や PV といった再生可能エネルギーの成長、石炭からガスへの転換、原子力発電の増加等を挙げている。また、BP Statistical Review of World Energy 2020（文献 12)）は、2019 年の CO_2 排出はエネルギー消費の減速、石炭から再エネや天然ガスへの転換により、前年の急激な増加から減速したとしている。エネルギー需要の伸びの鈍化とエネルギーミックスにおける石炭から天然ガスや再エネへのシフトにより、炭素排出の増加が大幅に減速したとしている。

このような状況の背景には、世界的な脱炭素化の流れに伴った石炭火力発電の削減、また主に米国において天然ガス価格の低下によるガス火力発電の増加や、日本での原子力発電の再稼働に伴い化石燃料からの発電が減少した事情等が考えられる。

3.1.4 世界の CO_2 排出量に影響する要因についての分析

(1) 世界の CO_2 排出量に関する回帰分析

前項での分析から、近年の世界 GDP と CO_2 排出とは依然として強い相関関係があり、世界全体では経済成長と CO_2 排出との明確なデカップリングは見られない。一方、GDP 弾性値は低下しており、2019 年には GDP は順調に成長しながらも、CO_2 排出原単位の低下により CO_2 排出量は増加しないという傾向も見られる。そこで、今後のデカップ

リングの状況を探るために、世界の CO_2 排出に寄与すると思われる要因がどの程度 CO_2 排出に影響しているかを分析した。

① 分析の概要

1990～2019 年において、世界の CO_2 排出量を目的変数として、これまでの RITE でのデカップリング分析を参考に、CO_2 排出量と強い関係を持つと考えられる、表 3.1.4-1 に示す要因を採り上げ、それらを説明変数として回帰分析を行った。世界の GDP は必須の変数とし、それ以外の説明変数を順に式に入れていき、回帰式の精度や統計的な有意性を評価した。データは、粗鋼生産量は worldstee1（文献 13)）、セメント生産量は USGS（文献 14)）、それ以外については IEA（文献 9),10)）を参照した。

表 3.1.4-1 世界の CO_2 排出量に関する回帰分析の説明変数

説明変数	単位	データ出所
世界の GDP	Trillion US$/y, 2015MER	IEA
世界の粗鋼生産量	Mt 粗鋼/y	Worldsteel
世界のセメント生産量	Mt セメント/y	USGS
世界の発電電力量に占める再生可能エネルギー発電の割合（世界再エネ発電比率）		IEA
中国の石炭火力向け燃料消費量	Mtoe/y	IEA
米国の石炭・ガス発電の合計に占める石炭火力発電の割合		IEA

② 分析の結果

最も回帰式の精度が高く、統計的に有意となったのは、世界 GDP、世界粗鋼生産量、世界セメント生産量、および世界再エネ発電比率を説明変数とする式であった。説明変数の影響度については、世界再エネ発電比率、世界粗鋼生産量、世界セメント生産量、世界 GDP の順で寄与度が高い。結果の概要を表 3.1.4-2 に示す。

表 3.1.4-2　回帰分析の結果概要

回帰統計	
重相関 R	0.999328
重決定 R2	0.998657
補正 R2	0.998442
標準誤差	189.8317
観測数	30

分散分析表

	自由度	変動	分散	観測された分散比	有意 F
回帰	4	6.7E+08	1.68E+08	4648.339	1.7E-35
残差	25	900901.7	36036.07		
合計	29	6.71E+08			

説明変数	係数	t 値	P-値
世界 GDP（MER、2015）	90.1	6.6	6.62E-07
世界のセメント生産量	1.6	7.2	1.59E-07
世界の再エネ発電比率	-28014	-12.3	4.43E-12
世界の粗鋼生産量	5.5	8.2	1.52E-08

③　CO_2 排出量の実績値と回帰式による推定値の比較

図 3.1.4-1 に、1990～2019 年における CO_2 排出の実績値と回帰式に基づく推定値をグラフ化したものを示す。回帰式の補正 R^2 乗値は非常に高く、排出実績と回帰式による推定値の線は殆ど重なり、統計的には当てはまりの良いモデルと言える。

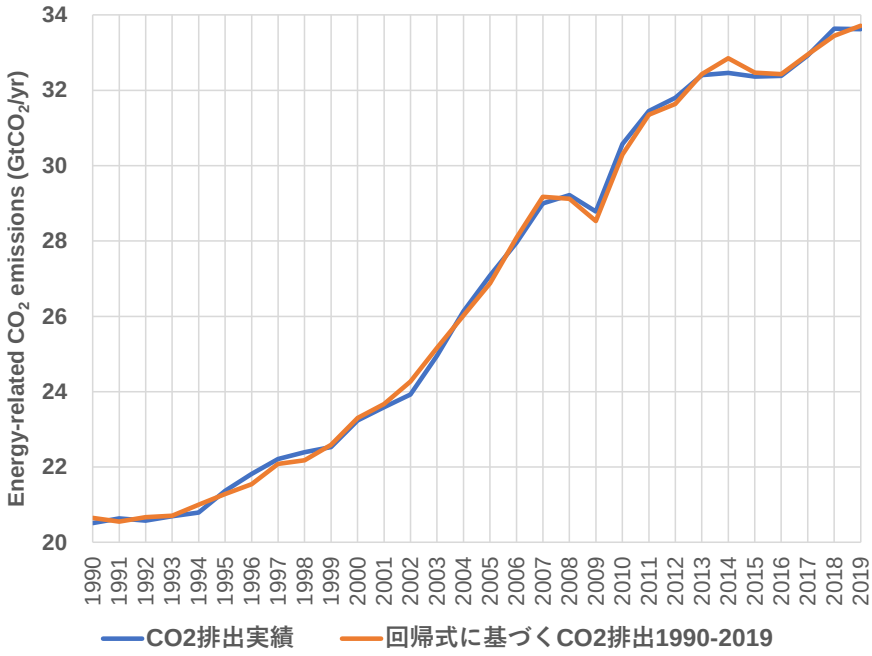


図 3.1.4-1　1990～2019 年における CO_2 排出実績と回帰式に基づく CO_2 排出推定値

(2) 2030 年の CO_2 排出と再エネ比率の推計

パリ協定は、「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする」としている。IPCC は、2℃未満にするためには 2030 年時点の温室効果ガス排出量を 2010 年比 25%減、1.5℃以内に抑えるには同年比 45%減にする必要があるとしている。今回の分析の結果から、1990～2019 年において再エネの世界発電電力量に占める比率が世界 CO_2 排出量に大きく寄与していると考えられるが、今後の CO_2 排出量との関連を見るために、導かれた回帰式に基づき、RITE の世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+における想定値（世界の GDP、世界セメント生産量、世界粗鋼生産量について）を用いて、2030 年の排出削減目標における再エネ比率の推計を行った。

その結果を表 3.1.4-3 および図 3.1.4-2 に示す。主要な温室効果ガスである CO_2 を 2030 年に 2010 年比 25%削減しようとすると、(DNE21+における世界 GDP、セメント生産量、粗鋼生産量の想定の下では、)世界の発電電力量に占める再エネの割合を約 75%にする必要がある。同様に 45%削減を目指すならば、約 97%の電力源を再エネにする必要がある。また、同様の想定の下で 2030 年に CO_2 が 2010 年比で半減するためには再エネ 100%が求められる（この時、1990-2030 年の GDP 弾性推計値は-0.26）。一方、仮に再エネが 2010～2019 年のほぼ線形に沿って拡大し、2030 年に再エネ比率が約 35%に達するとした場合、CO_2 排出量を 2010 年比 45%削減するための GDP、セメント生産量、粗鋼生産量の削減量を推計したところ、各々2030 年における推計値より約 64%削減（一律での削減を想定）する必要があるという結果になった。

表 3.1.4-3 2030 年 CO_2 排出削減目標における再エネ発電比率および各要因の推計

	CO_2排出	CO_2排出量（$GtCO_2$）	世界GDP (兆米ﾄﾞﾙ)	世界ｾﾒﾝﾄ生産量 (Mtｾﾒﾝﾄ)	世界粗鋼生産量 (Mt粗鋼)	世界再エネ比率
2010	2030年目標基準年	30.6	64.95	3313.41	1435.25	18.5%
2019	現状	33.6	84.22	4004.00	1875.16	26.4%
2030〔推計1〕	2010年比▲25%	22.9	109.74 *1	4161.66 *2	1930.57 *3	74.7%
	2010年比▲45%	16.8				96.6%
	2010年比▲50%	15.3				100%
2030〔推計2〕	2010年比▲45%	16.8	39.51 (*1の▲64%)	1498.20 (*2の▲64%)	695.01 (*3の▲64%)	35%

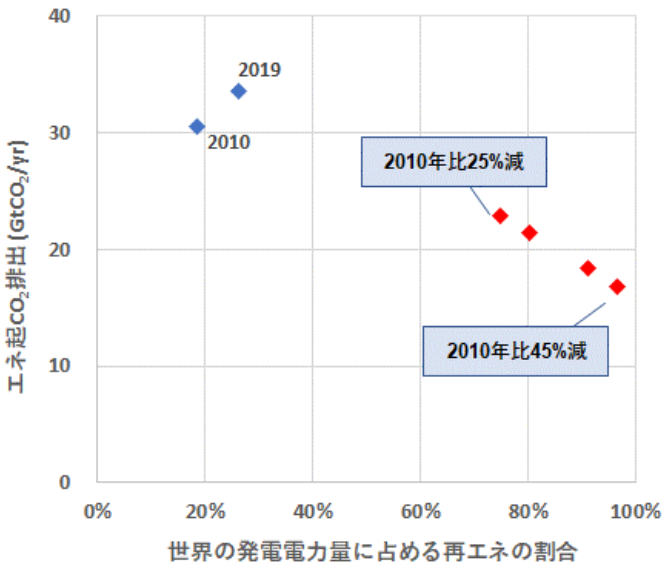


図 3.1.4-2　2030 年 CO_2 排出削減目標における再エネ発電比率の推計

更に、再エネの導入に影響を与える主な要因としては、再エネの価格が考えられる。そこで、IRENA の PV および陸上風力発電の世界加重平均 LCOE（文献 15)）を用い、2010～2019 年についてそれぞれの相対価格（対 2010 年）と世界の発電電力量に占める再エネ比率との間に線形の関係があると想定し、相関分析を行った。表 3.1.4-4 に結果の相関係数を示す。PV の平均 LCOE および陸上風力の平均 LCOE のいずれも再エネ発電比率と高い相関が見られ、再エネ拡大に影響していると言える。

表 3.1.4-4　2010～2019 年における世界再エネ発電比率と PV および陸上風力発電の加重平均 LCOE（対 2010 年価格）の相関係数

	PV 平均 LCOE	陸上風力平均 LCOE
世界再エネ発電比率	-0.93	-0.98

以上の分析から、現在のセメントや鉄鋼生産量、再エネ比率の変動や傾向において導き出されたこの回帰式に基づけば、2030 年にセメント、鉄鋼の生産を継続しつつ、GDP が成長しながら、再エネ発電コストの削減により再エネを拡大していくことで CO_2 排出を抑えられる可能性がある。一方で、表 3.1.4-3 で示されたように、GDP が成長しながら（推計 1)、例えば 2030 年に CO_2 を 45%削減するには、再エネ比率を 97%に高めなければならないが、しかし、例えば変動性再生可能エネルギー（VRE）の比率が高まると立地条件等の理由でコストが上昇することも考えられ、更に系統安定化のための追加費用が必要となること等から、今後も継続的に、再エネ価格が低下し続け、再エネ導入が更に進んで行くかどうかについては疑問の余地がある。よって、従来の産業構造を前提として、2030 年に▲25%や▲45%といった厳しい排出削減を、経済成長を伴って実現することは大変難しく、大きなトランスフォーメーションが不可欠とも考えられる。

3.1.5 まとめ

本研究では、世界の経済成長と CO_2 排出との関係の状況を考察することを目的に、まず RITE でなされた、経済と CO_2 排出のデカップリングに関する分析を提示した。そして、近年における世界の CO_2 排出量の傾向を概観し、その増減に寄与すると考えられる要因とその影響度を探るために、世界 CO_2 排出量を目的変数とする回帰分析を行った。

1990～2019 年における世界のエネルギー起源 CO_2 排出量に関する回帰分析では、GDP と CO_2 排出との強い関係が示されデカップリングは見られなかった。また、最も当てはまりの良い結果を示したモデルの説明変数のうち、世界セメント生産量と粗鋼生産量は GDP に影響していることから、デカップリングの要因になるとは考えにくい。世界再エネ発電比率がこれらの変数のうち最も CO_2 排出に対する影響度が高かったが、化石燃料よりも安価で経済合理性を有するものか、政策措置によるものかによってデカップリングの見方は異なる（文献 2)）ため、どのような再エネの導入が大きかったのか精査が必要である。

さらに、導かれた回帰式に基づき、DNE21+における GDP、世界セメント生産量および世界粗鋼生産量の推計値を用いて、2030 年の排出削減目標における再エネ比率の推計を行った。2030 年に CO_2 を 2010 年比 25%削減しようとすると、DNE21+の想定の下では、世界の発電電力量に占める再エネの割合を約 75%にする必要があり、世界の平均気温上昇を 1.5℃に抑えるための 45%削減を目指すならば、殆どの電力を再エネにする必要がある。再エネ導入に影響を与える要因と考えられる再エネの価格について、再エネ発電比率との相関を見たところ、PV の LCOE および陸上風力発電の LCOE のいずれとも高い相関が見られた。主に再エネ（PV、陸上風力）の発電コスト低下による再生可能エネルギーの導入が CO_2 排出（削減）に寄与するという結果を示したが、再エネのコストが急上昇することもあり得る点には注意が必要である。また、再エネが現状ペースで拡大した場合において、2030 年に CO_2 排出量を 2010 年比 45%削減するためには、GDP、セメント生産量、粗鋼生産量を大幅に低減する必要があるという結果となったが、そのような状況が現実になるとは考えにくく、更には経済成長を追求しつつ CO_2 排出とのデカップリングを実現しようとするならば、エネルギー集約的な産業における革新的かつ大規模な排出削減技術の進展等が不可欠である。

本研究における世界 CO_2 排出量に関する回帰分析では、CO_2 排出に大きな影響を持つと思われる要因を説明変数とし分析を行った。今後の再生可能エネルギー導入の拡大が、経済成長と CO_2 排出とのデカップリングを目指す上で重要な要素の一つとなり得るが、この結果のみで、世界の気温上昇目標に見合うほどの CO_2 削減を再生可能エネルギーだけで実現させることができると結論づけることはできない。世界の経済成長と CO_2 排出との関係をより詳細に見るためには、エネルギー需要と言った様々な要素を考慮する必要がある。世界 CO_2 排出量の動きに注視すると共に、それをより良く表現できる要因は何か、とりわけ今後のデカップリングの動向に関連する要因やその分析方法について、検討を続けていきたい。

参考文献（第 3.1 節に関するもの）

1) Lars Handrich, Claudia Kemfert, Anselm Mattes, Ferdinand Pavel and Thure Traber; Turning point: Decoupling greenhouse gas emissions from economic growth, Heinrich Böll Stiftung (2015)
2) RITE; 平成 28 年度地球環境国際連携事業 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 (2017)
3) Robert B. Jackson, Josep G. Canadell, Corinne Le Quéré, Robbie M. Andrew, Jan Ivar Korsbakken, Glen P. Peters and Nebojsa Nakicenovic; Reaching peak emissions, Nature Climate Change, 6, pp.7-10 (2016)
4) Barack Obama; The irreversible momentum of clean energy, Science, 355-6321, pp.126-129 (2017)
5) Dominik Wiedenhofer, Doris Virág, Gerald Kalt, Barbara Plank, Jan Streeck, Melanie Pichler, Andreas Mayer, Fridolin Krausmann, Paul Brockway, Anke Schaffartzik, Tomer Fishman, Daniel Hausknost, Bartholomäus Leon-Gruchalski, Tânia Sousa, Felix Creutzig and Helmut Haberl; A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part I: bibliometric and conceptual mapping, Environmental Research Letters, 15-6 (2020)
6) Helmut Haberl, Dominik Wiedenhofer, Doris Virág, Gerald Kalt, Barbara Plank, Paul Brockway, Tomer Fishman, Daniel Hausknost, Fridolin Krausmann, Bartholomäus Leon-Gruchalski, Andreas Mayer, Melanie Pichler, Anke Schaffartzik, Tânia Sousa, Jan Streeck and Felix Creutzig; A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II: synthesizing the insights, Environmental Research Letters, 15-6 (2020)
7) RITE; 平成 30 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 (2019)
8) RITE: 令和 2 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 (2021)
9) IEA; Greenhouse gas emissions from energy (2021)
10) IEA; World energy balances (2021)
11) IEA; Global Energy Review (2019)
12) BP; Statistical Review of World Energy (2020)
13) world steel; Steel Statistical Yearbook （各年）
https://www.usgs.gov/centers/nmic/cement-statistics-and-information （アクセス日 2021.9.21）
14) USGS; Cement Statistics and Information （各年）
https://www.usgs.gov/centers/nmic/cement-statistics-and-information （アクセス日 2021.9.21）
15) IRENA; Renewable Power Generation Costs in 2019 (2020)

3.2 エネルギー価格高騰に対する耐性評価

3.2.1 エネルギー安全保障の課題

エネルギー安全保障の分析課題は、化石燃料の供給障害などによる価格高騰リスクの評価と、それによる経済的な影響評価の 2 つの側面へと分離される[1]。第一の課題においては、中東情勢の緊迫化によるリスク増大を指摘する声が近年高まっている[2]。その背景には、米国でのシェール革命（shale revolution）がある。OPEC やロシアは、米国シェール企業を撤退へと追い込むため、原油価格を非常に安価な水準へと誘導するよう協調的な増産をおこなってきた。しかし、肉を切らせて骨を断つ戦略は、米国の石油生産をわずかに縮小させるだけに終わった[3]。もはや米国は天然ガスの輸出国となり、米国エネルギー情報局（EIA 2018）によれば 2029 年には石油でも純輸出国へと転換しうるという。Royal（2018）は、米国でのシェール革命による経済的自由の獲得を歓迎しながらも、同時に中東地域の秩序維持への関心が低下することにより生じる地政学的な反作用に注視すべきとしている。2020 年の COVID-19 によるパンデミックは需要激減と原油価格の暴落を導いたが、中東地域における構造的な問題はくすぶっている。2021 年からはパンデミックからの世界経済の回復に伴うエネルギー需要増とともに、2022 年 2 月にはロシアによるウクライナ侵攻により、原油価格は再びバーレルあたり 100 ドルを上回る水準にまで高騰した。すでに顕在化したエネルギー価格高騰により、第二の課題に向けた分析の要請も高まっている。

エネルギー安全保障における第二の課題は、経済体系のエネルギー価格高騰に対する耐性の評価である。歴史を振り返るならば、第一次オイルショック後、日本経済は原油価格高騰に対する耐性を大きく改善してきた。それは 2000 年代半ばに直面した原油高という自然の手による実験によっても、オイルショック時に比して日本経済への影響は相対的に軽微となることが確認されている。当時の『エネルギー白書 2007』（資源エネルギー庁 2008）は、長期時系列産業連関表による価格波及分析に基づき、石油代替エネルギーへの転換や省エネの進行によって、日本経済では原油高に対する耐性が強化されたと評価する[4]。しかし近年、こうした耐性への懸念は、国際的にも高まってきている。

欧州委員会の報告書（European Commission 2014）では、1995 年から 2009 年の 15 年間を測定期間として、その期間には実質単位エネルギーコスト（real unit energy cost:

---

[1] 3.2 節は野村（2021）第 3 章における 2016 年（日米比較では 2015 年）までの測定値から、2015 年基準 JSNA（日本の国民経済計算体系）に基づく基準改定および 2019 年までの更新値に基づき、加筆修正されている。

[2] 豊田正和「危機に備え自給率を高める必要がある」SankeiBiz（2019 年 7 月 25 日）は、日量 1000 万バーレル（世界の石油需要の 1 割ほど）もの原油供給が途絶する事象も生じうるとし、危機感を持つべきだと警鐘を鳴らしている。

[3] Lack（2018）はこうした試みはむしろ米国シェール企業におけるさまざまなイノベーションを誘発し、価格競争力の改善をもたらしてきたと指摘する。OPEC は 2016 年 9 月には当初の狙いを断念し、原油価格は再び上昇へと向かった。

[4] 『エネルギー白書 2007』での当該分析は慶應義塾大学産業研究所における試算であるが、そこでは原油価格の影響のみを評価している。最終エネルギー全体を含んで捉えれば、産業連関モデルによる直接・間接の波及効果を考慮したうえでマクロ的に集計された影響評価は、後述（3.2.4(1)節）する RUEC の時系列比較（図 3.2.4-1）とおおむね整合する。

RUEC）としての緩やかな上昇傾向が世界的に見いだされることを指摘している。その定義の詳細は後述（3.2.2 節）されるが、RUEC は生産する付加価値額に占める名目エネルギーコストのシェアであり、エネルギー価格高騰による経済体系への影響の度合いを総合的に評価する指標となる。世界的に見いだされる RUEC の上昇は、実質エネルギー価格の上昇がエネルギー生産性の改善（EPI）を上回り、価格高騰に対する経済としての耐性が脆弱化したことを意味する。同報告書によれば、欧州（EU27）の製造業では、この期間に年率 4.5%ものスピードで RUEC が上昇した。欧州製造業における EPI は同期間に年率 1.5%の改善を示すが、それは実質エネルギー価格の上昇率（年率 6.1%）を相殺するにはまったく不十分であった。欧州委員会は、エネルギー価格の変動に対する脆弱性の増大に対して警笛を鳴らしている。

同様な傾向は日米両国にもみられる。同報告書（European Commission 2014）によれば、米国製造業では 2009 年ほどからシェール革命による価格低下の恩恵が出始めるものの、観察期間（1995–2009 年）の実質エネルギー価格の上昇率では年率 7.4%となるなど、むしろ欧州をも上回っている。しかしながら米国では相対的に高い EPI（年率 2.5%）により、RUEC の上昇率は 4.7%と、欧州と同レベルまで抑制されている。また日本の製造業は、同期間に年率 7.9%というより高い実質エネルギー価格の上昇に直面する一方、EPI は欧米を下回る低水準（年率 1.1%）に留まり、高い RUEC の上昇（年率 6.8%）を余儀なくされている。それは欧米に比して年率 2 ポイントほども上回り、日本のエネルギー価格高騰に対する耐性の脆弱化はより顕著である。

エネルギー安全保障上の二つの課題に対し、日本経済の抱えるリスクはその双方で増大してきた。そして現在では、近年における産業構造の変化や再エネの拡大など、耐性評価をよりリアルタイムに把握していく価値は高まっている。国内における再エネの拡大は第一のエネルギー安全保障上の課題に対しておリスク軽減に寄与すると期待されるが[5]、第二の課題においては RUEC を上昇させる危惧が大きい。3.2 節は、エネルギー価格変動に対する経済の耐性について分析をおこなう。脆弱性の評価指標としての RUEC は、その指標の水準自体よりも、国際比較としての格差率や時系列比較による変化率など、相対的な評価が重要である。はじめに 3.2.2 節では、RUEC や実質エネルギー価格に関する測定フレームワークを整理する。3.2.3 節では、日米比較の視点から 1955 年から 2019 年までの長期にわたる生産要素の投入価格差と RUEC 格差を分析し、エネルギー投入を軸とした日本経済の構造的な課題を考察していく。2010 年代の測定値を含むことで、米国でのシェール革命による RUEC 低下の進行がより明確に観察され、近年の日米 RUEC 格差は戦後 60 年間のピークに達するほど拡大したことが示される。

3.2.4 節では日本経済における RUEC 上昇要因の分解をおこなう。3.2.2 節に示されるように、RUEC の変化はエネルギー生産性の変化と実質エネルギー価格の変化という、大きく 2 つの要因へと分解される。エネルギー生産性がおもに数量側の分析であるのに対し、3.2 節のフォーカスは価格側の分析にある。エネルギー価格変化による影響評価は、その名目価格によるよりも、実質価格による評価が望ましい。3.2.4(2)節では実

[5] ただし間欠性のある自然変動再エネの導入拡大に伴い、第一の課題において期待されるリスク軽減効果は急速に逓減すると考えられる。

質エネルギー価格として、集計産出価格に対する相対価格とともに、とくに資本や労働といった他の生産要素との代替関係を想定して、エネルギーと資本・労働との相対価格としての変化へと分解する。1990 年代半ば以降では、二度のオイルショックを含む期間（1973–95 年）に比して名目エネルギー価格の上昇率は 3 分の 1 ほどに縮小されたが、実質エネルギー価格の上昇率はむしろ高まったことが見いだされる。3.2.5 節では、一国経済における RUEC の変化における産業起因について分析する[6]。3.2.6 節は 3.2 節の結びとする。

3.2.2 フレームワーク

エネルギーコスト分析のため、一国経済における価格関数を以下のように想定する。

$$P^X = f(P^K, P^L, P^E, T). \tag{3.2.2-1}$$

ここでP^Xは、産業別産出量のトランスログ指数によって定義される集計産出量（X）から、インプリシットに定義される集計産出価格である[7]。右辺のP^K、P^L、P^Eはそれぞれ資本（K）、労働（L）、エネルギー（E）の品質調整済み集計投入価格であり[8]、Tは技術状態を表す指標である。一国経済では次の名目バランスが成立している。

$$V^X(= P^X X) = \sum_\theta V^\theta \left(= P^\theta \theta\right), \ (\theta = KLE) \tag{3.2.2-2}$$

V^θはθを資本、労働、エネルギーとしたとき（ここでは「KLE 投入要素」と呼ぶ）、それぞれの名目コストをまとめた表記である（たとえばエネルギー投入（$\theta = E$）では、名目コストV^Eがその価格P^Eと数量Eの積であることを(3.2.2-2)式右辺で表している）。KLE 名目コストのうち、ここではエネルギーコスト（V^E）におけるエネルギー投入の価格（P^E）と消費量（E）への分解について定式化しよう。エネルギー投入量の測定量として、エネルギー種間の相対価格により品質の相違を考慮した集計量を次のように定式化する。

$$\Delta \ln E = \sum_{i,j} \bar{v}_{ij} \Delta \ln E_{f,ij}, \tag{3.2.2-3}$$

ここで$E_{f,ij}$はエネルギー種（i）ごとの産業部門（j）別の最終エネルギー消費量であり、Δは連続する二期間の差分として、$\Delta \ln E_{f,ij}$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おけるエネルギー種別部門別

---

[6] 3.2.3 節および 3.2.5 節の測定は、エネルギー投入構造の分析のために拡張された生産性勘定に基づいている。生産性勘定におけるエネルギー消費表の概要は 3.2.7 節補論 A を参照。また一国経済と産業部門との完全な分解のため、家計もひとつの産業部門として内生的に扱われている。産出およびエネルギー消費における家計部門の内生化については野村（2021）第 2 章 2.2.2 節に詳しい。

[7] エネルギーコスト分析のため、ここでの産業別産出量は、付加価値量とエネルギー投入量から定義されている。

[8] 長期時系列の分析における投入要素の品質統御のため、ここでの測定における資本投入は、産業別に 142 の生産資産（ソフトウェア、R&D などを含む）、4 つの在庫資産、5 つの土地資産、18 の耐久消費財サービス（家計部門用）として、全体で 169 の資産に基づく資本サービスからの集計値によっている。また労働投入については、産業別に性、4 つの学歴分類、11 の年齢階層、5 つの就業上の地位のクロス分類として、440 の労働属性分類に基づく労働サービスからの集計値として測定される。

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（$\sum_{i,j}\bar{v}_{ij}$=1）。熱量あたりの単価はエネルギー種ごとに異なる。P^Eは、V^Eと(3.2.2-3)式によって測定される「品質調整済みエネルギー投入量（quality-adjusted energy input）」であるEにより、インプリシットに定義される。

こうした変数定義のもと、「名目単位エネルギーコスト（nominal unit energy cost: NUEC）」は、一単位の生産量あたりの最終エネルギー消費コストとして次のように定義される。

$$NUEC = V^E/X \tag{3.2.2-4}$$

(3.2.2-4)式での名目単位エネルギーコスト（NUEC）を、集計産出価格（P^X）によってデフレートした指標は「実質単位エネルギーコスト（real unit energy cost: RUEC）」と呼ばれている。RUEC は、経済システム全体としてのエネルギー価格高騰への脆弱性を評価するために有効な指標である。

$$RUEC = NUEC/P^X = V^E/V^X \tag{3.2.2-5}$$

(3.2.2-5)式のように、RUEC は名目産出額に占めるエネルギーコストの名目シェアとしても解される。ここで一国経済におけるグロスのエネルギー生産性を最終エネルギー消費量（一次エネルギー換算値: E_p）あたりの産出量によって定義し、その成長率（τ）を、

$$\tau = \Delta\ln X - \Delta\ln E_p, \tag{3.2.2-6}$$

とする。また実質エネルギー価格（real energy price）の成長率（π）を

$$\pi = \Delta\ln P^E - \Delta\ln P^X, \tag{3.2.2-7}$$

として定義しよう。このもとで(3.2.2-5)式の RUEC 成長率を次のように表記する。

$$\Delta\ln RUEC = \pi - \tau + \Delta\ln q. \tag{3.2.2-8}$$

RUEC の変化率は、実質エネルギー価格変化（π）、グロス EPI（τ）、そしてエネルギー品質変化（$\Delta\ln q$）に分離される。ここでqは

$$q = E/E_p, \tag{3.2.2-9}$$

として定義されており、最終エネルギー消費量（一次エネルギー換算値）あたりの品質調整済みエネルギー投入量としての指数であり、エネルギーの品質変化を評価する指標である[9]。

いまπがゼロであれば、EPI（τの改善）は RUEC を低下させ、エネルギー価格高騰に対する耐性は強化される。またπが正のもとでは RUEC は上昇し、耐性は脆弱化に向かう。その一方では、πの上昇によっても EPI が誘発される。その比率τ/πはエネルギー生

9 エネルギー品質に関する測定のフレームワークは野村（2021）第 2 章 2.2.1 節を参照。そこではエネルギー品質指数（energy quality index）は、エネルギー転換指数（energy conversion index）とエネルギー高度化指数（energy sophistication index）へと分解される。

産性の価格弾性である。π上昇が RUEC を高める直接的な効果は、誘発されたτの改善分だけ緩和される。しかし、技術水準が一定のもとではその弾性値は逓減し、こうした緩和効果は縮小していく。

一国経済で定義されるグロス EPI である(3.2.2-6)式のτは、産業での省エネ投資などによって実現した狭義の EPI に加えて、エネルギー多消費型産業における生産の相対的な拡大や縮小など、産業構造変化の影響も含まれている。野村（2021）では、その成長率（τ）を、産業構造要因（structural change effect: σ）、エネルギー品質要因（energy quality effect: q_*）、そして調整済みエネルギー生産性（adjusted energy productivity）の変化率（τ_*）へと次のように分解している。

$$\tau = \Delta\ln\sigma + \Delta\ln q_* + \tau_*. \tag{3.2.2-10}$$

ここでτ_*は、エネルギー品質変化による要因（q_*）や産業構造変化による要因（σ）を考慮したうえで測定される、調整済みのエネルギー生産性指標である。なお、ここでのq_*と(3.2.2-9)式での品質指標qとは、集計ウェイトの相違によりわずかに乖離している。(3.2.2-8)式に(3.2.2-10)式を代入して、

$$\Delta\ln RUEC = \pi - \Delta\ln\sigma - \tau_* + \mu, \tag{3.2.2-11}$$

のように、RUEC の変化は実質エネルギー価格変化（右辺第一項）、産業構造変化（第二項）、それを調整したうえでのエネルギー生産性改善（第三項）へと分解される。エネルギー多消費的な産業が拡大するような産業構造変化によっては、$\Delta\ln\sigma$はマイナス値となり、一国経済の RUEC を上昇させる。逆に経済におけるサービス化の進行など、エネルギー多消費型産業の相対的な縮小は RUEC を低下させる。なお右辺第四項は、上記のウェイトの相違を反映したエネルギー品質の集計バイアス（μ）であり、

$$\mu = \Delta\ln q - \Delta\ln q_*, \tag{3.2.2-12}$$

として定義されている。後述する 3.2.4(1)節では、(3.2.2-11)式に基づき日本経済における RUEC の変化要因を分析していく。

また(3.2.2-11)式の実質エネルギー価格（π）における集計産出価格（P^X）は、KLE 投入要素の価格と技術水準に依存している。(3.2.2-1)式の集計価格関数において、規模に関する収穫一定と完全競争を仮定して、一国経済における全要素生産性（TFP）の成長率をトランスログ指数によって定義する。

$$\tau^T = \sum_\theta \bar{v}_\theta \Delta\ln P^\theta - \Delta\ln P^X \quad (\theta = KLE). \tag{3.2.2-13}$$

ここで$\bar{v}_\theta$は KLE 投入要素それぞれの名目コストシェア（V^θ/V^X）の二期間平均値である（$\bar{v}_K + \bar{v}_L + \bar{v}_E = 1.0$）。(3.2.2-13)式を(3.2.2-7)式へと代入して、(3.2.2-11)式における実質エネルギー価格の成長率（π）は次のように分解される。

$$\pi = \bar{v}_K\pi^K + \bar{v}_L\pi^L + \tau^T. \tag{3.2.2-14}$$

ここでπ^Kおよびπ^Lは、それぞれ資本と労働サービスの投入価格を基準として実質化されたエネルギー価格の変化率であり、

$$\pi^K = \Delta \ln P^E - \Delta \ln P^K \quad (3.2.2\text{-}15)$$

および

$$\pi^L = \Delta \ln P^E - \Delta \ln P^L \quad (3.2.2\text{-}16)$$

として定義される。(3.2.2-14)式は実質エネルギー価格の変化率を、資本投入価格（資本サービス価格）変化による寄与（右辺第一項)、労働投入価格（労働サービス価格）変化による寄与（第二項)、そして TFP による寄与（第三項）の 3 つの要因へと分解している。後述する 3.2.4(2)節では、(3.2.2-14)式に基づいて日本経済における実質エネルギー価格変化の構造について考察する。

3.2.3 日米比較

(1) 日米エネルギー価格差

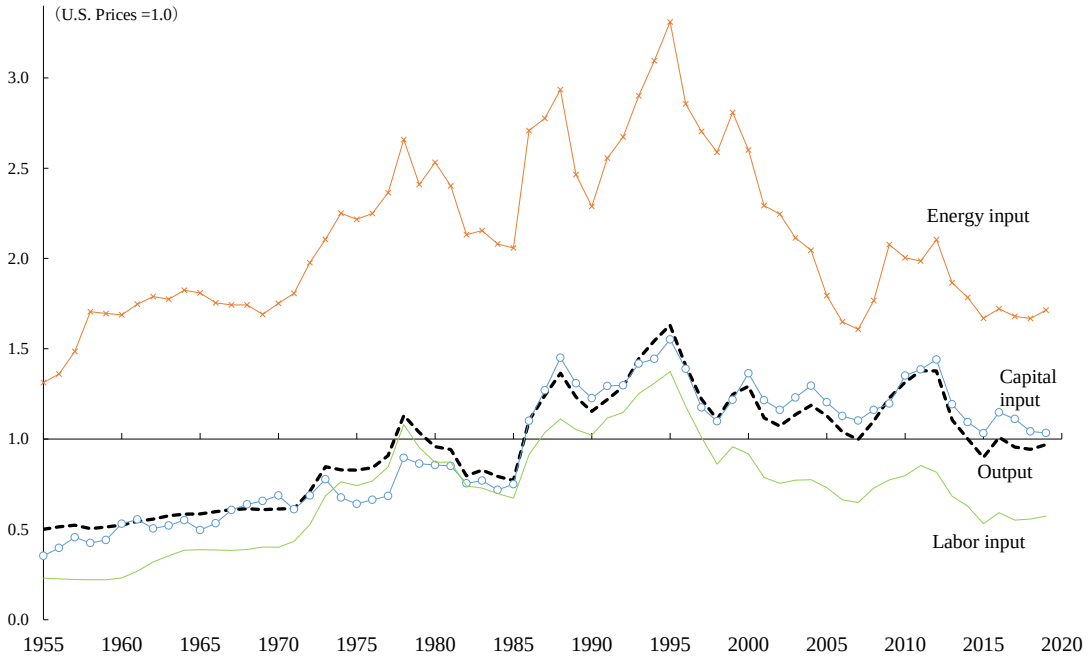
日米格差の視点から、エネルギー消費の価格差における長期傾向を観察しよう[10]。もしエネルギー消費における内外価格差が存在せず、国際市況におけるエネルギー価格変動を両国が等しく受けるのであれば、エネルギー価格高騰による国際競争力への影響は基本的には中立である。しかし現実には、日米間のエネルギー消費には内外価格差が存在しており、それは本節での観察のように長期的に安定している。またエネルギー消費における内外価格差が資本や労働といった他の生産要素における価格差と等しいならば、両国は KLE 投入要素に対して同じ相対価格体系に直面していることになる。もしエネルギー消費における内外価格差が大きく、その価格差は資本サービス投入の価格差を上回れば、その経済は省エネ投資を増加させ、よりエネルギー節約的な技術を採用するものとなろう。それはエネルギー消費の価格差のすべてを相殺せずとも、部分的に RUEC 格差を緩和させる効果を持つ。しかし技術水準が一定で限界費用が逓増するもとでは、こうした緩和効果も徐々に限定的なものとなろう。

国際価格差の測定は、世界銀行など国際機関や各国統計局の参加のもと国際比較研究プロジェクト（international comparison program: ICP）における購買力平価（purchasing power parity: PPP）として構築されてきた（Eurostat-OECD 2012; World Bank 2014, 2020）。ICP では最終需要項目の商品別購入者価格差のデータを収集し、それに基づき一国集計レベルでの GDP の PPP が構築されている。しかしそれは最終需要に限られていることから、中間財はその対象ではなく、また付加価値項目における資本投入や労働投入における価格差も推計されない。こうした問題を補うため、日米国際産業連関表のフレームワークに基づき、産業の中間消費における詳細な商品レベルでの日米価格差体系が構築されてきた（Nomura, Miyagawa and Samuels 2019）。また資本サービスと労働サービスの日米共通分類を構築したうえで、資本・労働投入における産業別日米価格差

10 3.2.3 節の日米比較は両国の産業別生産性勘定（Jorgenson, Nomura and Samuels 2016）に基づくが、エネルギー種別としての細分化の程度や、エネルギー転換や最終消費に関する定義などが日米間では統一されておらず、ここでは（家計部門を除く）産業集計レベルによる測定となっている。また本節でのアウトプットは実質付加価値によって定義されており、そこにエネルギーコストを加える 3.2.4 節での日本経済の分析ともカバレッジが異なることに留意されたい。

も測定される（Jorgenson, Nomura and Samuels 2016）。本節ではこうした推計の 2019 年までの更新推計値に基づき、日米両国におけるエネルギー実質価格差と RUEC 格差を考察する。

一国集計指標としての KLE 投入要素の価格水準指数（price level index: PLI）として、1955–2019 年における長期推移を示したものが図 3.2.3-1 である。PLI は PPP を各年の年平均為替レートで除した指数であり、各年次において米国の価格を基準とした内外価格差を意味する。図 3.2.3-1 において PLI が 1.0 を下回るのであれば、米国に比して日本の価格が安価であることを示している。なお、両国における名目的なエネルギー価格の集計指数（2015 年における米国エネルギー価格を 1.0 と基準化）は図 3.2.3-2 に比較されている。



単位：各年におけるそれぞれの米国価格を 1.0 と基準化（1955–2019 年）。注：日米格差となる PLI（価格水準指数）は、Jorgenson, Nomura and Samuels（2016）の産出、エネルギー・資本・労働投入の購買力平価を各年の年平均為替レートで除した指数（更新推計値）。

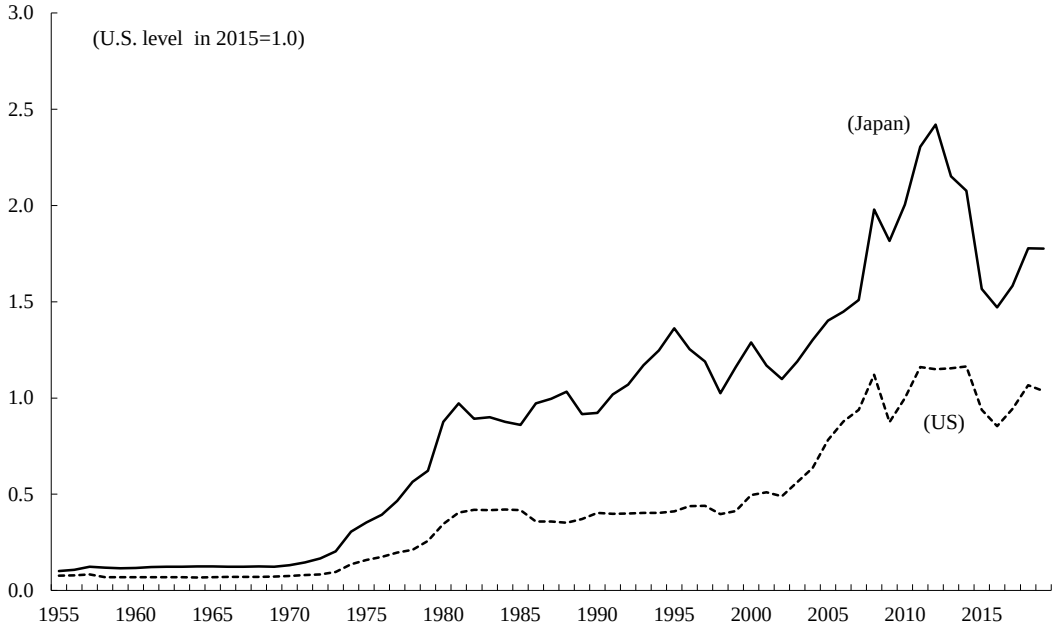
図 3.2.3-1：エネルギー、資本・労働投入価格の日米格差

相対的に安価な日本の労働は、とくに高度経済成長期には日本の価格競争力の主要な源泉であった。過度の円高が進行した 1990 年代半ばを除き、ここでのすべての観察期間において日本の労働サービス価格は米国の水準を下回っている。日本の資本サービス価格は高度経済成長期には相対的に安価であったものの、1985 年のプラザ合意を転機として米国よりも 10–50%ほど高い水準へ変化している[11]。それに対してエネルギ

11 1980 年代前半は産出価格の PLI が 1 を下回っており、その為替水準のもとでは日本経済の価格競争力が高く評価されているが、プラザ合意後にはそうした円安修正を大きく超えた円高の進行により、日本経済の停滞をもたらす要因となっている。

一価格では、観察期間のすべてにおいて日本経済は米国に比して 1.5–3.0 倍ほど高い価格に直面している。

名目的なエネルギー消費価格における日米格差がもっとも拡大したピークは 1995 年である。集計産出価格（GDP の PLI）を基準とすれば、1995 年の年平均為替レートは 63%も過大であると評価されるほどの円高となった（図 3.2.3-1）。それは円建てによる一次エネルギーの輸入価格を低下させるものの、電力や石油製品など二次エネルギーの国内生産価格は一次エネルギー価格ほどには低下せず、エネルギー消費における日米価格差をむしろ拡大させた。ピークとなる 1995 年には、日本経済は米国に比して 3.3 倍もの高い国内エネルギー価格での競争を余儀なくされている。その後、エネルギーの PLI は緩やかに低下するものの、民主党政権の末期となる 2011–12 年には為替レートは 37%ほど過大に評価されている。その為替水準では、日本の労働サービス投入における価格競争力上の優位性すらも喪失する方向へ進んでいる（図 3.2.3-1）。この時期、エネルギー消費における日米価格差も再び 2.0 倍の水準へと拡大している。



単位：米国価格の 2015 年値を 1.0 と基準化（1955–2019 年）。注：データは Jorgenson, Nomura and Samuels（2016）の更新推計値による。

図 3.2.3-2：日米両国における名目エネルギー価格

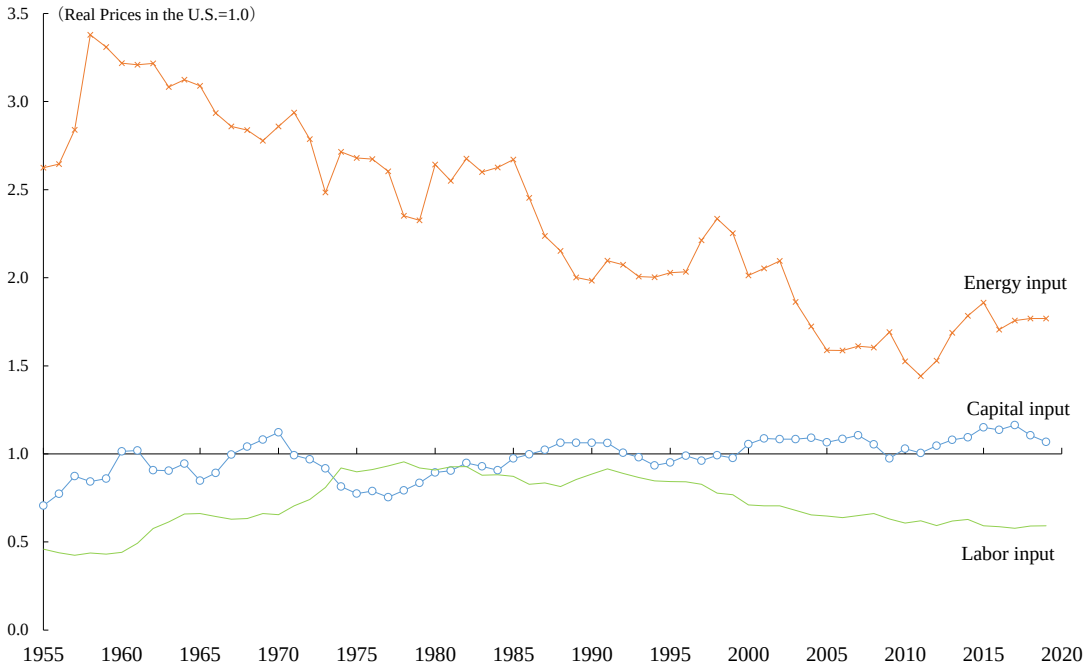
KLE 投入要素の PLI をアウトプットの PLI によって除した指標は、それぞれの実質価格としての日米格差となる（図 3.2.3-3）。図 3.2.3-1 での PLI による内外価格差は為替レートの変動による影響を含むが、図 3.2.3-3 ではそれを含まず、より安定的な傾向

を持つ[12]。また両国における実質エネルギー価格（2015 年の米国における実質エネルギー価格を 1.0 と基準化）の推移は図 3.2.3-4 に比較されている。

日米の実質エネルギー価格（π_J/π_U）によって評価すれば、名目エネルギー価格差（図 3.2.3-1）とは大きく推移が異なり、内外価格差のピークはここでの観測期間の始まりとなる 1950 年代後半期である。Jorgenson, Nomura and Samuels（2016）による日米産業生産性研究では、1950 年代半ば、日本の全要素生産性（TFP）の水準は米国の半分ほどに過ぎなかったと測定されている。そのことは、両国で同じ生産物を生産するならば、その生産価格は（TFP が劣位にある）日本では 2 倍高いものとならざるをえなかったことを意味している。高いエネルギー価格と TFP としての圧倒的な劣位に直面しながらも、メイドインジャパンにマイナスのブランド価値しかなかった当時の日本では、米国に比して半分ほどの生産価格を実現しなければ、自国生産品の需要を獲得することできなかった。この制約を埋めたものが安価な賃金である。当時の日本における時間あたり賃金水準（類似した品質の労働サービス）は米国の 20%以下に過ぎず（図 3.2.3-1）、360 円／ドルという円安に設定された固定為替相場のもとで、それは日本の価格競争力の源泉となった。言い換えれば、この経済環境下では低賃金に甘んじるしかなかったと言える。

日本の高度経済成長の前夜にピークを迎える、米国水準の 3.5 倍という実質エネルギー価格としての日米格差は、日本経済におけるエネルギーの重要性は当時はるかに高かったことを意味している。その後の高度成長に伴い、生産価格としての日米の平準化、そしてエネルギー安定供給と低廉な価格実現への企業努力により、2010 年ほどまでの半世紀もの間、実質エネルギー価格の格差は縮小してきた（図 3.2.3-3）。二度のオイルショックを挟み、名目エネルギー価格での価格差の上昇期もあるものの、長期的には集計産出価格の上昇トレンドによって、実質エネルギー価格の格差は縮小する方向へ推移している。官民の継続的な取り組みは「石油の一滴は血の一滴」と称されたエネルギーの重要性を和らげることに成功してきたが、しかしそれは油断も生じさせた。

12 ここでの両国の資本サービスには土地（農業用地、工業用地、商業用地、住宅用地）を含んでいる。資本ストックに占める土地のシェアは日本では米国より大きいが、図 3.2.3-3 にみるようにその資本サービス価格（使用者コスト）の実質価格としての日米格差はこの長期の観察期間においてわずかな乖離幅に収まっている。

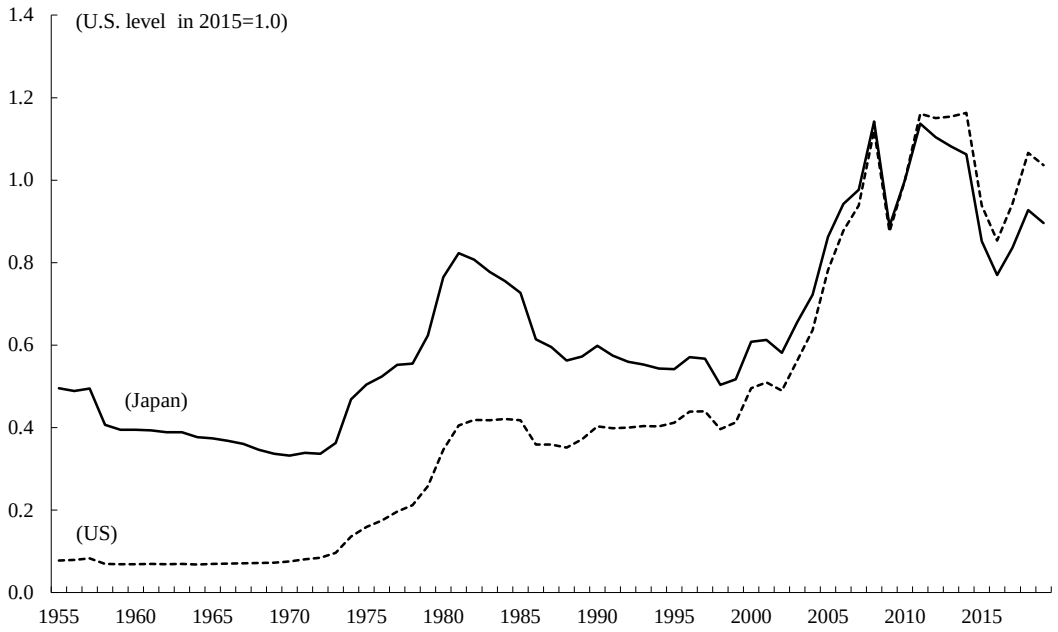


単位：各年におけるそれぞれの米国実質価格を 1.0 と基準化（1955–2019 年）。注：図 3.2.3-1 より算定。

図 3.2.3-3：エネルギー、資本・労働投入実質価格の日米格差

近年においてその転換点となるのは 2011 年であり、その後には実質エネルギー価格における日米格差は再び拡大へと転じている。米国は 2009 年ほどよりシェール革命による恩恵があるが、日本では東日本大震災後の原発稼働の停止や、再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT）による太陽光発電の推進などにより電力価格が上昇した[13]。こうした実質エネルギー価における日米格差の拡大は、日本がより不利な競争環境を余儀なくされるものとなったことを示している。しかし、これはエネルギー価格上昇に対する日米経済の脆弱性の違いを十分に反映したものではない。適切な評価のためには、RUEC 格差の分析が必要である。

[13] FIT 制度導入による太陽電池モジュールの価格に対する影響は 3.2.8 節補論 B を参照。



単位：米国価格の 2015 年値を 1.0 と基準化（1955–2019 年）。注：データは Jorgenson, Nomura and Samuels（2016）の更新推計値による。

図 3.2.3-4：日米両国における実質エネルギー価格

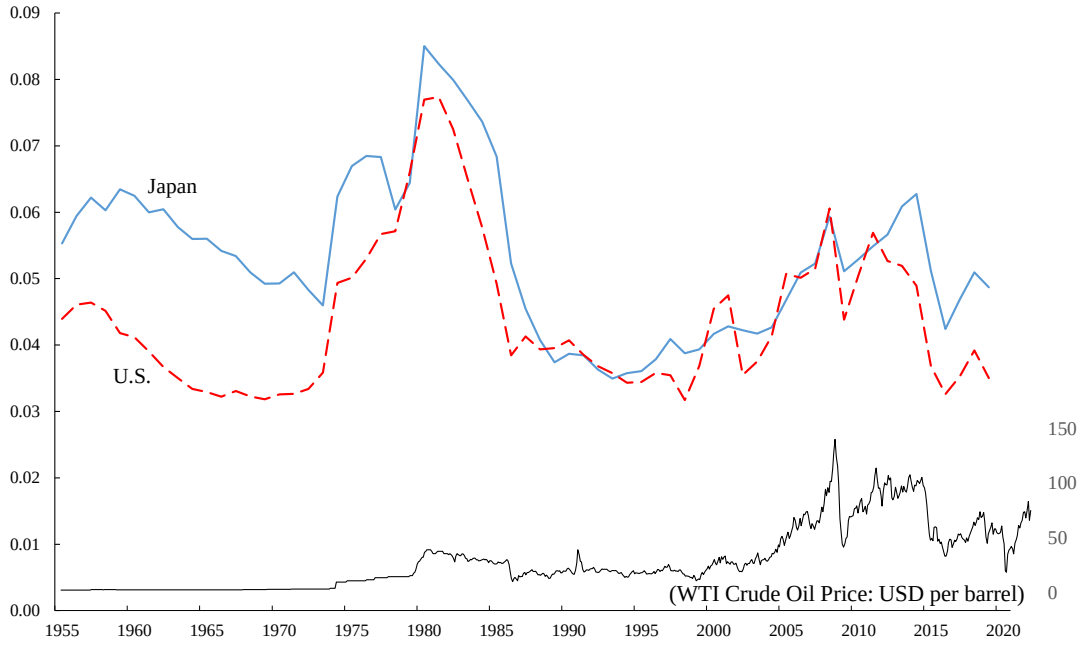
(2) 日米 RUEC 格差

エネルギー価格高騰に対する経済としての耐性を総合的に評価するためには、RUEC という指標が有効である。エネルギー価格が高騰しようとも、もしそれを国内産出価格へと完全に転嫁できるような状況にあれば、経済への影響は相殺される。またエネルギー価格とは独立に、競争力のある日本の生産物への海外需要の高まりなどにより国内産出価格が上昇するのであれば、エネルギー価格高騰に対する耐性もまた強化される。逆に日本経済の競争力喪失から生産物が陳腐化し、その産出価格が低下を余儀なくされるような状況では、名目エネルギー価格が一定であろうとも、実質エネルギー価格は高まる。技術力の喪失は RUEC を高め、エネルギー安全保障としてのリスクを増大させる。

図 3.2.3-5 は日米両国における RUEC の推移を比較している。その下部には、参考として国際的な月平均原油価格の変動を示している。日米両国ともに、二度のオイルショックは RUEC をおおむね倍増させる影響を持つが、それにより露呈した脆弱性は、1980 年代から 1990 年代初めまでの 10 年間で、両国ともに大幅に緩和させることに成功している。1970 年代初めから 1990 年代初めまでの 20 年間、RUEC の水準においても日米両国間の乖離はわずかである。図 3.2.3-6 では両国の RUEC の格差指数とともに、その格差の要因分解を示している[14]。この 20 年間に日米 RUEC 格差がわずかなものであることは、日本が米国の 2 倍を超える実質エネルギー価格（図 3.2.3-3）の影響を、

[14] ここでのエネルギー生産性は、エネルギー品質の変化による影響を含んだグロス指標である。

米国に比して 2 倍以上に高いエネルギー生産性水準が十分に緩和してきたことを示している[15]。



単位：日米両国における各年名目付加価値額=1.0（1955–2019 年）。注：Jorgenson, Nomura and Samuels（2016）の更新推計値より算定。本節の日米比較では家計部門の産出を含んでいない。下部には価格的な変動による影響のため、対応する期間における West Texas Intermediate (WTI or NYMEX)の月平均原油価格を示している（1955 年 1 月から 2021 年 12 月まで)。

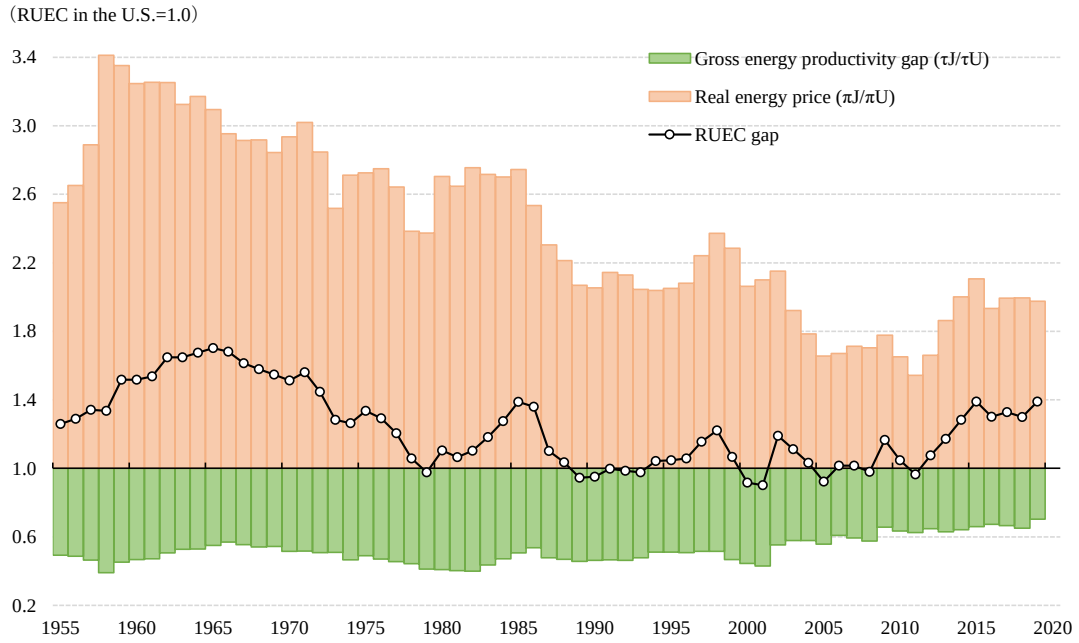
図 3.2.3-5：日米両国の RUEC

欧州委員会（European Commission 2014）による製造業での測定値と同様に、1995 年から 2000 年代後半までの RUEC は、日米両国ともに上昇傾向にある（図 3.2.3-5）。2000 年代に入ってからの上昇は原油高の影響が大きいが、RUEC 水準は二度のオイルショック期のピークに比して、およそその半分ほどの水準に過ぎない。『エネルギー白書 2007』での分析によれば、原油高による国内物価への影響度は 1970 年代初めに比して、おおむね半分程度にまで縮小したことが指摘される（資源エネルギー庁 2008）。3.2 節での RUEC はエネルギー消費全体の価格を包括するため、その対象は原油に限らないが、おおむねその耐性における強化の傾向は整合している。しかし電力、天然ガス・石炭を

15 エネルギー消費に関する日米両国の生産性統計における概念差もあり、ここでのエネルギー生産性指標は両国での産業構造の相違を考慮していない。後述する 3.2.4 節では日本の産業構造要因を統御するが、もし日米両国の構造要因による格差を推計できれば、両国のエネルギー生産性格差は大きく縮小すると考えられる。日本がより高い実質エネルギー価格に直面することにより断念せざるをえなかったエネルギー多消費的な生産の存在は、グロスのエネルギー生産性格差として、日本の優位性を大きくみせるような影響を持っている。また時系列的な変化においても、産業構造変化による寄与度のタイミングは日米それぞれに異なると考えられ、米国でも Murtishaw and Schipper（2001a, 2001b）は 1994–98 年に観察されるグロス EPI の多くは構造変化によると分析している。

含めたエネルギーコスト全体では、RUEC における上昇傾向が 1990 年代半ばより始まっている。

2009–10 年および 2014–15 年における二度の原油価格低下による変動はあるが、2009 年ほどから米国ではシェール革命の恩恵が表れており、また日本の RUEC の低下スピードを上回っている。日米両国の RUEC 格差は図 3.2.3-6 に示されている。そこでの日米格差は 2019 年には 40%ほどまで拡大している。日本の RUEC 水準はオイルショック時のピークほどには高まっていないが（図 3.2.3-5）、国際競争力の観点から日米格差として評価すれば、拡大した近年の RUEC 格差水準は高度経済成長期のピークへと接近していく水準である。

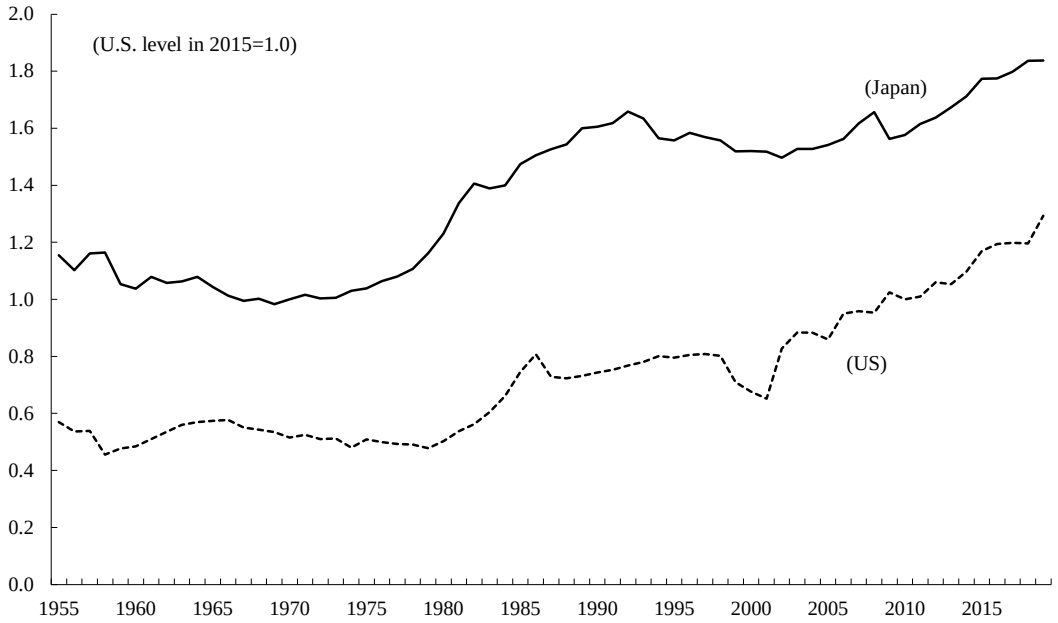


単位：各年の米国水準=1.0（1955–2019 年）。注：Jorgenson, Nomura and Samuels（2016）の更新測定値より算定。本節の日米比較では家計部門の産出を含んでいない。実質エネルギー価格の日米格差（π_J/π_U）は、(1)節の図 3.2.3-3 と整合している。

図 3.2.3-6：日米 RUEC 格差の要因

2010 年代における格差拡大の要因は、実質エネルギー価格における価格差の拡大とともに、日本が優位性を有し続けている日米エネルギー生産性格差の縮小にある（図 3.2.3-6）。両国におけるエネルギー生産性水準（米国の 2015 年におけるエネルギー生産性水準を 1.0 と基準化）の推移は図 3.2.3-7 に比較される。日本経済におけるエネルギー生産性改善への努力は継続している（省エネ政策としては強化されてきた）ものの、EPI のスピードは米国経済の半分以下である。安価となっていく省エネ技術は資本財へと自ずと体化されるものとなり、必ずしも省エネ投資を目的とせずとも、更新投資のタイミングなどにより経済体系へ組み込まれていく性格がある。また米国でも、実質エネルギー価格の上昇を受け、経済合理性を持つこととなった省エネ技術の導入・普及も存在したものと考えられる。そうした要因の細部へと踏み込むことは本節

のスコープを超えるが、1995 年には 60%ほどあった日本のエネルギー生産性水準における優位性は、2019 年にはその半分ほどにまで縮小している（表 3.2.3-1）[16]。



単位：米国価格の 2015 年値を 1.0 と基準化（1955–2019 年）。注：データは Jorgenson, Nomura and Samuels（2016）の更新推計値による。本節の日米比較では、その産出指標は家計部門のアウトプットを含まない産業集計値であり、3.2.4 節の定義とは異なることに留意されたい。

図 3.2.3-7：日米両国におけるエネルギー生産性

16 米国エネルギー効率経済協議会（American Council for an Energy-Efficient Economy）はエネルギー効率に関する国別ランキングを発表しており、2015 年の総合評価（国家努力、建築物、産業、輸送の 4 分野）として独国を 1 位に、日本を 2 位、英国を 5 位、そして米国を 8 位と位置付けている（Kallakuri et al. 2016）。2018 年では、総合評価（国の取り組み、建物、産業、交通の 4 分野で構成）として、日本を 5 位、米国を 11 位とそれぞれランクダウンされている（Castro-Alvarez et al. 2018）。日本の順位が相対的に低いのは、本評価では日本が北海道を除いて温暖であるなどの気候条件を考慮しておらず、建築物の分野で 15 位（米国は 12 位）と大きく評価を落としている要因が大きいと考えられる。

表 3.2.3-1：一国経済の中長期 EPI の変化要因

	RUEC			Real Energy Price			Gross Energy Productivity		
	JP	US	JP/US	JP	US	JP/US	JP	US	JP/US
1955	1.26	1.00	1.26	2.55	1.00	2.55	2.03	1.00	2.03
1960	1.42	0.94	1.52	2.59	0.80	3.25	1.82	0.85	2.14
1970	1.12	0.74	1.51	1.97	0.67	2.94	1.76	0.90	1.94
1973	1.05	0.82	1.28	1.85	0.73	2.52	1.76	0.90	1.96
1980	1.94	1.75	1.10	4.18	1.54	2.70	2.16	0.88	2.45
1990	0.88	0.93	0.95	2.48	1.21	2.05	2.82	1.30	2.16
1995	0.82	0.78	1.05	2.24	1.09	2.05	2.73	1.39	1.96
2000	0.95	1.03	0.92	2.53	1.23	2.06	2.67	1.19	2.25
2008	1.35	1.38	0.98	3.93	2.31	1.70	2.91	1.67	1.74
2010	1.21	1.15	1.05	3.33	2.02	1.65	2.77	1.75	1.58
2015	1.16	0.84	1.39	3.62	1.72	2.11	3.11	2.05	1.52
2019	1.11	0.80	1.39	3.57	1.81	1.98	3.22	2.27	1.42

単位：各年の米国水準=1.0（1955–2019 年）。注：Jorgenson, Nomura and Samuels（2016）の更新測定値より算定。本節の日米比較では家計部門の産出を含んでいない。

3.2.4 日本経済の RUEC

(1) エネルギーコスト上昇の要因

日本経済における RUEC 変化要因として、図 3.2.4-1 は実質エネルギー価格とエネルギー生産性の推移を示している（その計数は 3.2.9 節付表の表 3.2.9-1 を参照）。高度経済成長期には、実質エネルギー価格（π）はむしろ低下しており省エネ投資を促すものではないにもかかわらず、生産拡張投資に伴い、意図せずとも「借りた技術（borrowed technology）」としての省エネ効果が織り込まれてきた[17]。そのことは産業構造変化を調整した真の EPI 指標において見いだされる[18]。

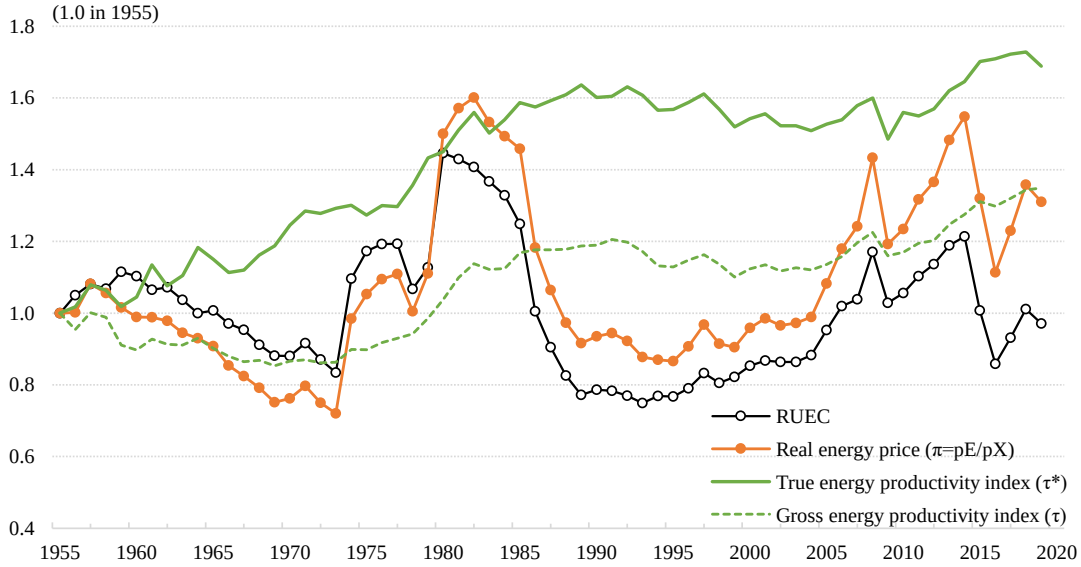
第一次オイルショック後には、急速な実質エネルギー価格の上昇に誘発されて高い EPI が実現している。しかし、1980 年代半ば以降に実質エネルギー価格が大きく下落したフェーズにおいては、とくにエネルギー生産性が低下する傾向は見いだされず、エネルギー生産性は（τ_*およびτの両指標ともに）ほぼ横ばいである。こうした非対称性はエネルギー生産性変化におけるひとつの特性である。

一般に、エネルギー生産性の変化は、省エネ投資などを含む資本財や耐久消費財における効率性（ストック効果）によるものと、その稼働状況によるもの（フロー効果）の大きく 2 つに分けられる。実質エネルギー価格の低下時においては、たとえばエアコンの利用頻度や空調レベルを高めるなどにより多くのエネルギー・サービスが消費

[17] 産業別にみても、Konishi and Nomura（2015）では資本や労働など他の生産要素を明示的に取り扱いながら、フレキシブルな価格関数の推計により、高度経済成長期では生産拡張投資などに伴って多くの産業でエネルギー節約的（energy-saving）な技術が自律的に組み込まれていたことが見いだされている。

[18] 第 I 期（1955–73 年）における EPI では、エネルギー品質変化の考慮によっては大きく低下（エネルギー生産性はむしろ悪化）するが、高度成長期における産業構造変化を適切に評価した測定値によれば、高い EPI 実現が見いだされている（野村（2021）第 2 章 2.4.1 節）。

され、そのフロー効果によってエネルギー生産性は悪化していく[19]。その一方、かつての実質エネルギー価格の高騰期にトップランナー企業や環境意識の高い家計に普及した資本財や耐久消費財は、その価格低下を通じて、未導入であるフォロワー型の企業の更新投資や家計の買い替え需要に伴い経済体系へと組み込まれる。こうした普及プロセスによって経済全体としてのエネルギー生産性は改善していく。1980 年代の横ばいは、その両者が相殺された姿として捉えられる[20]。後の(3)節では資本とエネルギーの関係を特掲して考察する。



単位：1955 年値=1.0（1955–2019 年）。注： RUEC は 3.2.2 節の(3.2.2-5)式による。

図 3.2.4-1：日本経済の RUEC、実質エネルギー価格と EPI

また 1990 年代半ばから 2000 年代後半までのエネルギー価格上昇によってもエネルギー生産性としての改善は見いだされないが、東日本大震災後になって再び上昇がみられる（図 3.2.4-1）。それは 2015 年以降における実質エネルギー価格の低下期にも継続する。その改善は震災後に求められた家計などにおける一過的な省エネ・節電によ

---

[19] エネルギー・サービス量は経済測定では一般的ではないが、自動車の利用や住宅・オフィスにおける冷暖房などのエネルギー・サービス量E_Sを定義すれば、$E_p = (E/E_p)^{-1}(E_S/E)^{-1}(E_S/X)X$とも理解される（ここで$E$は質的調整済みのエネルギー投入量、$E_p$は一次エネルギー消費量、$X$は産出量）。Herring（2006）は省エネとは「より低品質のエネルギー・サービス化によるエネルギー消費の削減」（“reduced energy consumption through lower quality of energy services”）であるとした。それは右辺第三項であるE_S/X（生産量一単位あたりのエネルギー・サービス需要量）の縮小を通じた犠牲的なE_pの減少として理解される。またこうしたエネルギー・サービス量の識別によれば、右辺第二項のE_S/Eのみを狭義に捉えた真のエネルギー生産性として理解することもできる。Murtishaw and Schipper（2001a, 2001b）はグロス EPI から構造変化要因の分解において、真の EPI を狭義のE_S/E（あるいは本章のエネルギー品質の変化を考慮せずにE_S/E_p）として捉えている。それに対してここでの真のエネルギー生産性であるX/Eは$(E_S/E)(E_S/X)^{-1}$として、E_S/Xのようなエネルギー・サービスの縮小や低品質化を含むものである。

[20] 星野（2012）は、エネルギー多消費型産業において、価格上昇期には下降期よりも大きな価格弾力性となるような非対称性を測定している。それは資本など他の生産要素の価格変動を考慮したエネルギー価格効果の測定ではないが、エネルギーのみでみればその価格上昇期と下降期の価格弾力性は長期的に安定しており、価格弾性の時系列変化はこうした非対称的な価格変動の混在した影響によるものである可能性を指摘している。

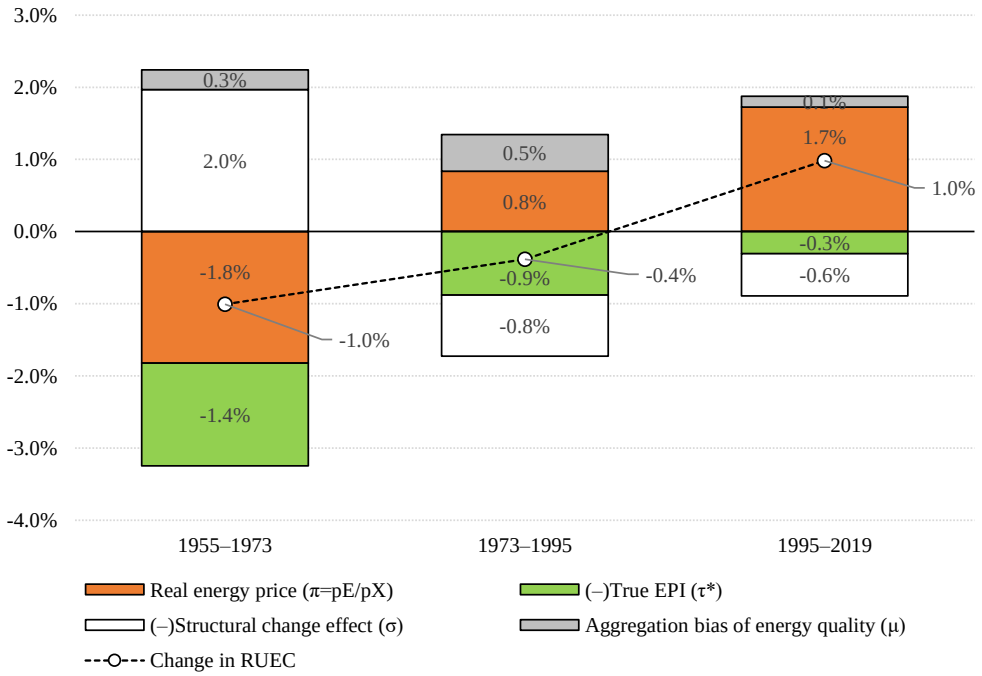
る効果を含むが、野村（2021）ではその主要な改善要因となる化学製品製造業では産業内における製品構成変化の影響が大きいことが指摘されている。こうした産業内における影響は産業レベルでの測定値に含まれており、図 3.2.4-1 における真の EPI（τ_*）にもグロス的な性格が残っている。

資本の硬直性、産業内における普及プロセス、エネルギー価格変動による影響の非対称性を考慮し、その観察期間内において実質エネルギー価格の上昇期と下降期の両者を含むように 20 年ほどの期間として、3.2 節での分析期間として、

第 I 期　　高度経済成長期　　（1955–73 年）
第 II 期　　オイルショック後　　（1973–95 年）
第 III 期　　RUEC 上昇期　　（1995–2019 年）

の 3 つの期間へと分離しよう。

図 3.2.4-2 はこの期間平均値として RUEC の変化要因を分解している。RUEC の年平均成長率では、第 I 期の▲1.0%と第 II 期の▲0.4%から、第 III 期には 1.0%の上昇へと転じている。欧州委員会による報告書（European Commission 2014）は製造業に限った分析であるが、世界的に RUEC の上昇傾向がみられる 1990 年代半ばは、戦後日本経済の長期トレンドからみても RUEC が上昇へと転じた転換期として評価される。



単位：%（年平均成長率）。注：RUEC の要因分解は 3.2.2 節の(3.2.2-11)式による。

図 3.2.4-2：日本経済の RUEC 変化要因

RUEC 変化における 1990 年代半ばの転換期は、大きく 3 つのトレンド変化を反映している。第一に実質エネルギー価格（π）の上昇である。それは第 I 期の▲1.8%（アウトプット価格の上昇によってエネルギー価格は相対的には低下）から、第 II 期にはプラス 0.8%へと転じ、そして第 III 期にはさらに 1.7%へと上昇幅を拡大させている。こうした変化要因の詳細は(2)節において後述しよう。二度のオイルショックを含む第 II

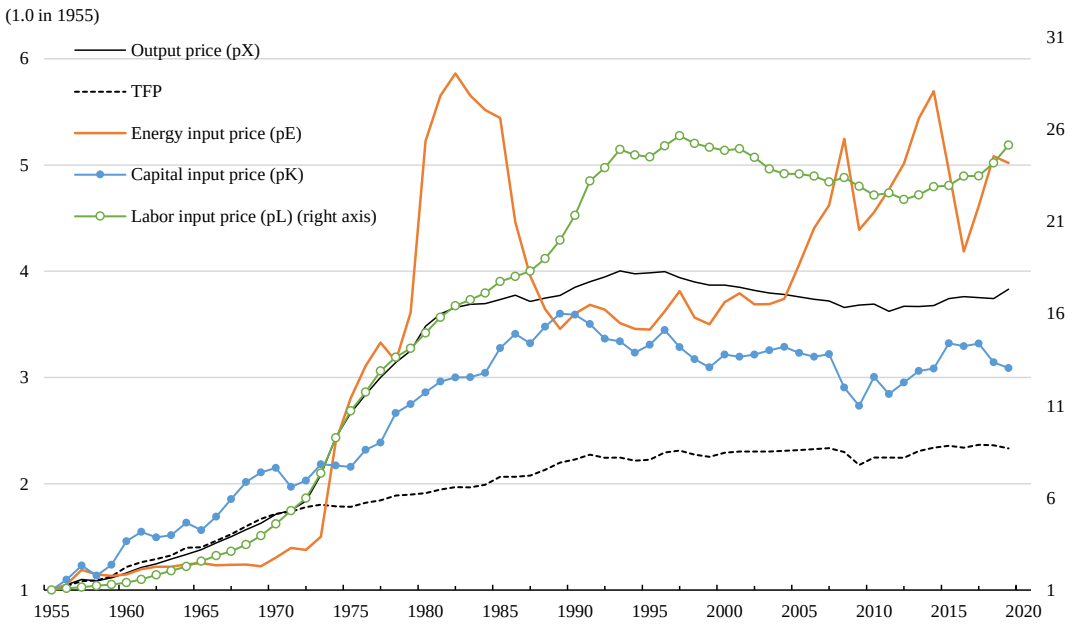
期に比して、第 III 期では名目エネルギー価格の上昇は大きく抑制されるが、実質エネルギー価格の上昇率はむしろ高まったことが見いだされる。

第二に、実質エネルギー価格の上昇率が逓増しているにもかかわらず、産業構造変化要因を統御した EPI（τ_*）によれば、第 I 期の 1.4%改善から第 II 期 0.9%へ、そして第 III 期には 0.3%へとその改善率は逓減している。実質エネルギー価格によるエネルギー生産性の弾性値として評価すれば、第 II 期の▲1.05 から第 III 期には▲0.18 へと大きく低下している。安価に利用できる省エネ技術が枯渇していくなかで、実質エネルギー価格の上昇を、エネルギー生産性の改善によって相殺する効果は、この期間の日本経済において急速に減衰したと解される。

第三に、第 II 期には一国経済におけるエネルギー多消費型産業の相対的な縮小により、産業構造変化要因（σ）は一国経済の RUEC を年率 0.8%低下させているが、第 III 期には 0.6%へと低下している。サービス化の進行などの産業構造における変化は、RUEC 上昇を緩和させる効果を持つが、そうした構造変化要因も 1990 年代半ば以降は縮小している。

(2) 実質エネルギー価格

日本経済において推計された集計産出価格、KLE 投入要素価格指数、そして TFP 指数は図 3.2.4-3 のとおりである（その計数は 3.2.9 節付表の表 3.2.9-1）。3.2.2 節で論じたように、名目価格指数はそれぞれの内部構成や品質の相違を統御したもとでの集計価格として定義され、品質調整済みの価格指数として測定されている。なお労働投入価格のみ、観察期間における上昇幅が大きく異なるため、その単位は図 3.2.4-3 の右軸による。KLE 投入要素価格のうち、エネルギー価格はもっとも変動が大きいことから、その傾向の把握は分析期間の設定に大きく依存するが、長期のトレンドとしてそれは上昇傾向にある。日本経済では、資本投入価格では 1990 年代初めより、労働投入価格では 1990 年代後半より安定から低下傾向を示すことと対照的である。



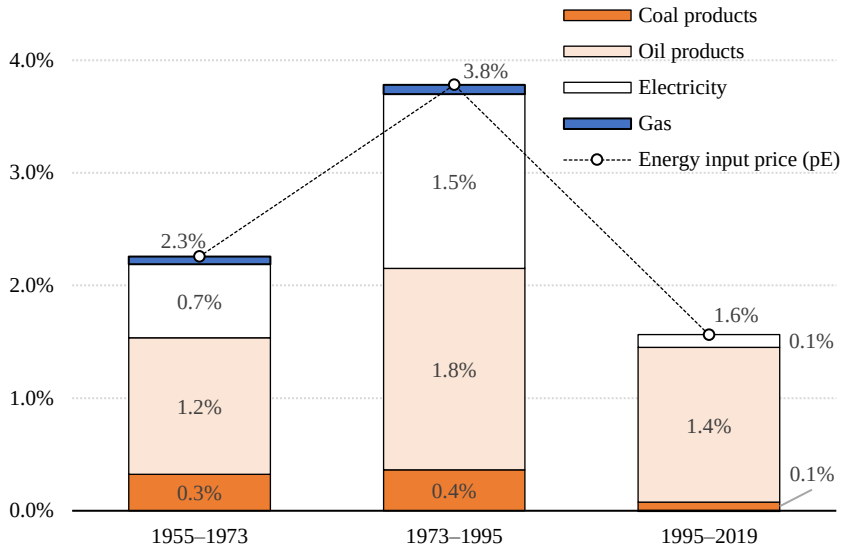
単位：1955 年値=1.0（1955–2019 年）。注：各価格指数および TFP 指数は 3.2.2 節の(3.2.2-14)式などによる。

図 3.2.4-3：産出価格および KLE 投入価格と TFP

名目エネルギー価格変化率に対するエネルギー種別寄与度は図 3.2.4-4 に与えられている。ここでは最終エネルギー消費ベースで捉えているため、発電に用いた化石燃料は二次エネルギーとしての電力による寄与度として含まれている[21]。おおむね 20 年ほどの期間ごとにみれば、エネルギーの価格変動をもたらす大きな要因は依然として石油であり、第 I 期と第 II 期ではその半分ほどの寄与度となり、第 III 期ではほとんどすべての価格上昇要因となっている。その寄与度では 1.2–1.8 ポイントと長期トレンドとして安定的である。

石炭やガスによる集計エネルギー価格の上昇に対する寄与は、いずれの期間でも限定的である。電力による名目エネルギー価格上昇率への寄与度は、第 I 期の 0.6%から第 II 期の 1.5%（その寄与率は 40%ほど）へと拡大するが、第 III 期には 2011 年の震災後の価格上昇はあるものの、1990 年代半ばからの 2000 年代前半までの電力価格低下と相殺して、期間平均値としての影響は軽微である。そうした推移を反映して、第 III 期の名目エネルギー価格の上昇率は、第 II 期の半分以下にまで低下している。

21 エネルギー消費データ（KDB-E）の概要は 3.2.7 節補論 A を参照。図 3.2.4-4 はエネルギー種別最終エネルギー消費価格をトランスログ指数によって 4 つのグループへと集計している。



単位：%（年平均成長率）。注：資料は KDB-E（3.2.7 節補論 A）による。

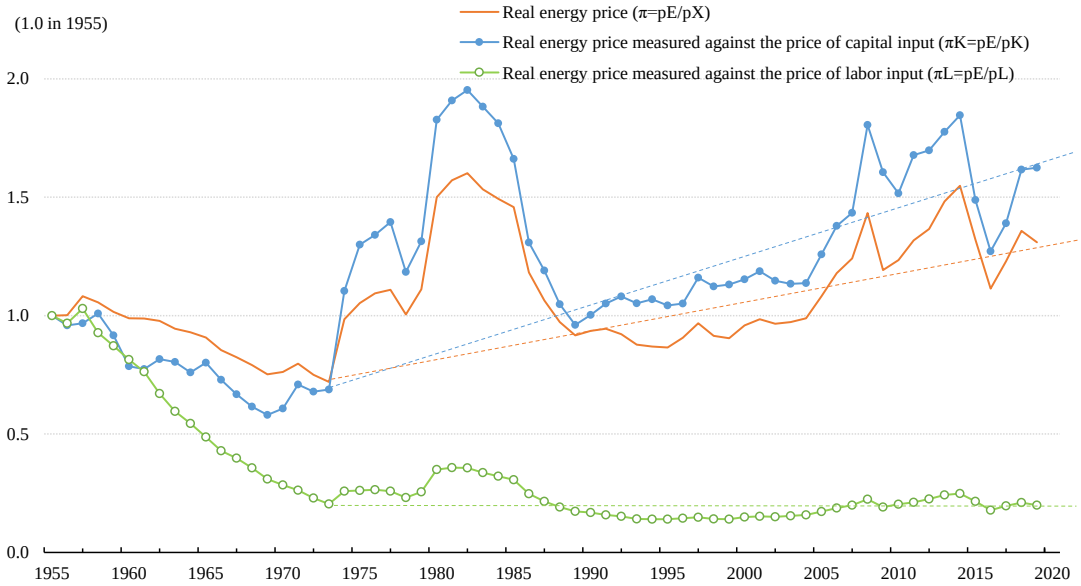
図 3.2.4-4：エネルギー価格変化率に対するエネルギー種別寄与

図 3.2.4-3 での価格指数より、(3.2.2-14)式および(3.2.2-15)式で定義した資本と労働投入価格を基準とした実質エネルギー価格（π^Kとπ^Lの両指数）の推移を描いたものが図 3.2.4-5 である（その計数は表 3.2.9-1 を参照）。戦後日本経済におけるエネルギー価格としてのピークは 1982 年と 2014 年である。2 つのピーク時では、その名目価格は 1955 年比で最大 6 倍ほどに（図 3.2.4-3）、実質価格（π）では 1.6 倍ほどに上昇している。

労働投入価格や TFP による影響を取り除き、資本投入価格を基準とした実質エネルギー価格（π^K）として評価すれば、そのピークは 1955 年比の 2 倍ほどの水準である。このようなエネルギー価格高騰期におけるπ^Kの上昇は、省エネ投資のためのインセンティブを十分に高めるだろう。しかし図 3.2.4-5 にみるように、エネルギー価格高騰が持続する期間は 2 つのピーク時ともにおおむね 10 年間ほどであり、それは主要な資本財の実効耐用年数よりもだいぶ短い。エネルギー生産性を高める投資の判断は、現在におけるより高い資本コストと、将来において不確実でありながらも抑制されうるエネルギーコストの現在価値とに依存する（Gillingham, Newell and Palmer 2009）。短期的なエネルギー価格高騰を受けても、それが長期化しないという期待は、拙速な省エネ投資の実施を民間企業に躊躇させよう。拙速な導入は、長期的には資本コストの負担のみとなり、競争力を毀損しかねない。

価格高騰期を含む実質エネルギー価格の長期トレンドをみよう。図 3.2.4-5 では 1973 年を開始点とする長期トレンドを点線によって評価している。資本投入価格を基準とした実質エネルギー価格（π^K）による評価では、1973–2019 年に 2.4 倍ほどの上昇であり、年平均 1.9%の上昇である。産出価格を基準とした実質エネルギー価格（π）による評価では年率 1.3%の上昇であり、労働投入価格を基準としたエネルギー実質価格（π^L）ではほぼ横ばいである。人類史におけるエネルギーの役割を論じたバーツラフ・シュミル教授は、そのひとつの特徴としてエネルギー価格の長期的な低下傾向を掲げ

ている（Smil 2017）。しかし第一次オイルショック後は、過去数百年のトレンドとは異なる例外的な期間とも言えるかもしれない。そして低炭素／脱炭素への世界的な意識の高まりは、将来においてもこうした傾向を少なくとも数十年は持続させる可能性が大きい。

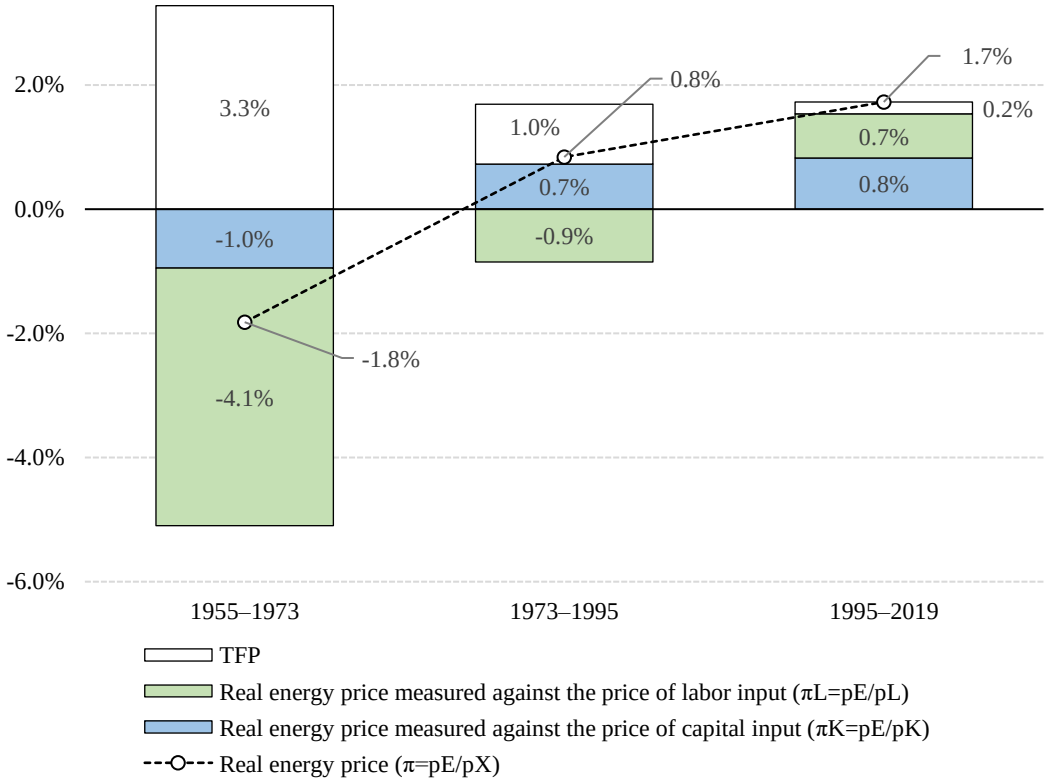


単位：1955 年値=1.0（1955–2019 年）。注：実質エネルギー価格（π）は、資本投入価格を基準とした価格（π^K）と労働投入価格を基準とした価格（π^L）および TFP からなる（3.2.2 節の(3.2.2-14)式から(3.2.2-16)式）。

図 3.2.4-5：実質エネルギー価格

エネルギーの名目価格（P^E）は、第 I 期の年率 2.3%の上昇から、二度のオイルショックを含む第 II 期には年率 3.8%にまで拡大し、そして第 III 期には 1.6%まで大きく低下している（図 3.2.4-4）。しかし実質エネルギー価格（π）でみれば、第 I 期における▲1.8%から、第 II 期には 0.8%上昇、そして第 III 期には 1.7%上昇へと逓増している。図 3.2.4-6 は(3.2.2-14)式に基づくπの要因分解を示している。第 I 期に実質エネルギー価格がむしろ年率 1.8%の低下となった最大の要因は、エネルギー価格上昇を上回る労働投入価格（P^L）の上昇である。それは 4.1 ポイントほど実質エネルギー価格を低下させる寄与となり、この期間の TFP 改善によるプラスの寄与度（3.3%）を相殺するに十分なものとなっている[22]。

22 完全競争市場のもとでは、(3.2.2-14)式にみるように TFP の改善はアウトプット価格（P^Y）を低下させ、実質エネルギー価格（π）を上昇させる。

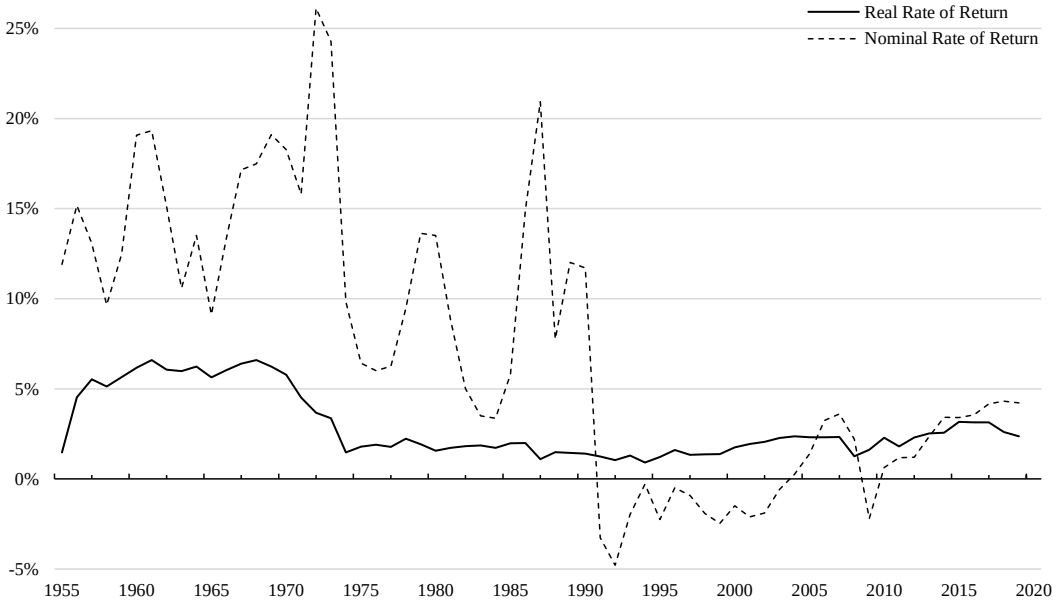


単位：%（年平均成長率）。注：実質エネルギー価格（π）の分解は 3.2.2 節の(3.2.2-14)式による。

図 3.2.4-6：実質エネルギー価格の変化要因

第 II 期では、π^Lの負の寄与が▲0.9%と大きく減少し、π^Kの（第 I 期の）負の寄与が 0.7%と正の寄与に転じた。π^Kがプラスへと転じた理由は、名目エネルギー価格の上昇に加え、日本経済の実質資本収益率が低下したためである。図 3.2.4-7 は日本経済の名目と実質の事後的な資本収益率の推計結果である。実質収益率は 1960–64 年の平均 6.2%（名目 15.2%）から 1970–74 年には 3.8%（18.9%）、1975–79 年には 1.9%（8.4%）へと急速に低下している。実質収益率の大幅な低下により、この時期の資本サービス価格としての上昇は、資本財取得価格（投資財の価格）における上昇を大きく下回るものとなった。このため第 II 期にはπ^Kが上昇に転じている。そのことは、省エネルギー投資を促進されるものとなった。

第 III 期には、40 年間続いたπ^Lのマイナス寄与もプラス 0.7%へと転じ、第 II 期から第 III 期への実質エネルギー価格上昇を加速する最大の要因になった。日本経済の停滞による名目賃金率の低下が、エネルギー価格の実質負担を増大させたのである。このことは(4)節で考察するように、日本経済に奇妙な構造変化をもたらしている。



単位：1955 年値=1.0（1955–2019 年）。出典：KDB2021 での事後的な資本収益率の推計値に基づく。

図 3.2.4-7：実質資本収益率

(3) 資本エネルギー比率の上昇

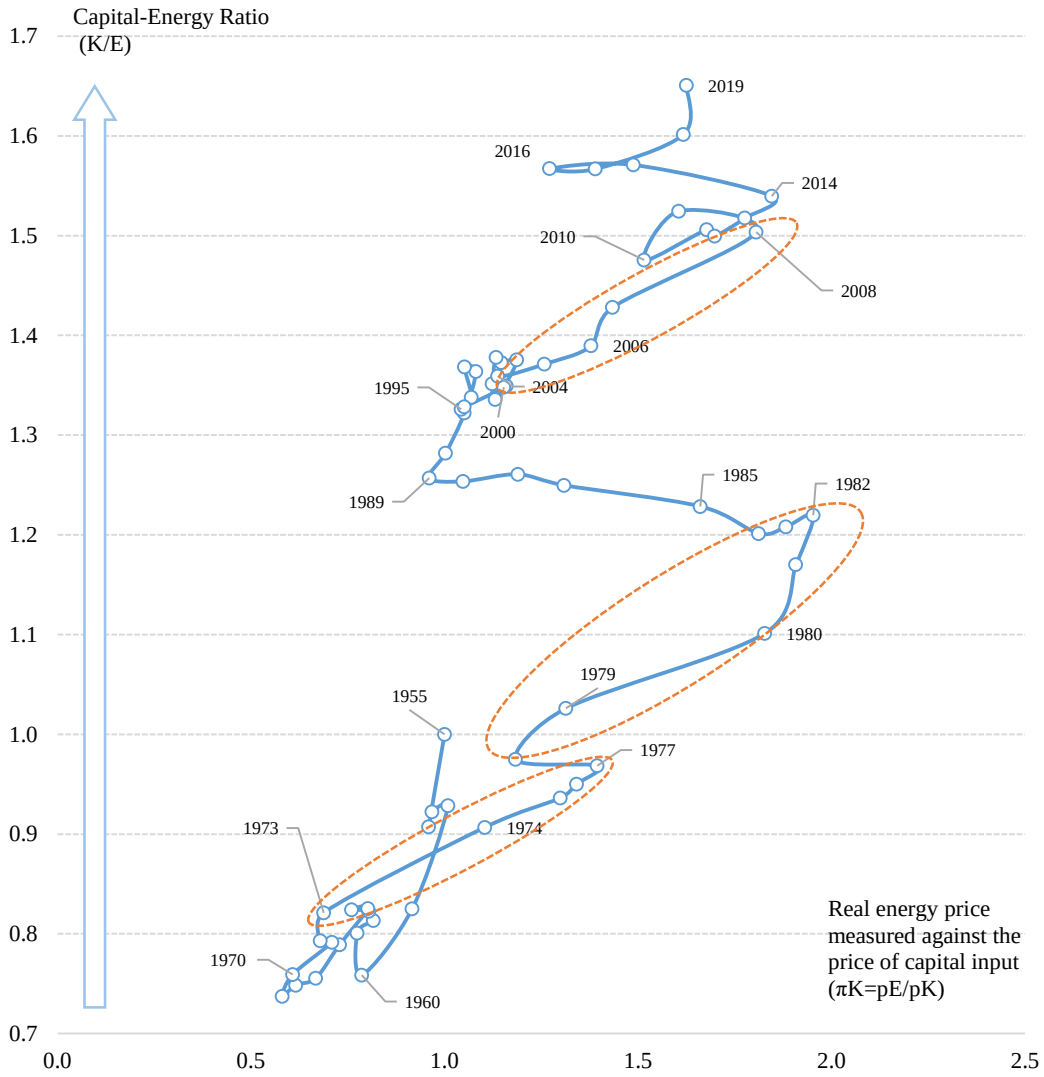
実質エネルギー価格がプラスへと転じた第 II 期（1973–95 年）には、エネルギー価格の上昇が資本投入価格の上昇を上回るように$\pi^K (= P^E/P^K)$がプラスへ転じている（図 3.2.4-6）。第 II 期以降のπ^K上昇は、エネルギー消費を節約するような資本投入の拡大（省エネ投資）を促すだろう。エネルギーと資本の代替関係としての視点から、日本経済の経験を描いたものが図 3.2.4-8 である。ここでは横軸に資本投入価格を基準とした実質エネルギー価格（π^K）、縦軸にエネルギーに対する資本投入量の比率（K/E）の推移を描いている。ともに 1955 年値を 1.0 と基準化している。

エネルギー投入を軸として、本節では資本エネルギー比率（K/E）の上昇（一単位の資本サービス投入量に必要なエネルギー投入量が少なくなるような技術変化）を「エネルギーに対する資本深化」（capital deepening to energy）と呼ぼう[23]。資本財の稼働（アウトプット）のためにエネルギーが使用（インプット）されるという意味において、K/Eは資本サービスを提供するためのエネルギー生産性とも理解される。

1990 年代後半からの情報通信技術の導入期など、より多くの電力使用に依存したコンピュータ制御された機械設備やデータセンターなどの資本蓄積の拡大によって、短期的には資本深化の逆行（K/Eの低下）をもたらすかもしれない。図 3.2.4-8 でも 1995–2005 年などではわずかながらもその逆行や、総じて資本深化の停滞が見いだされる。しかし情報通信機器における省エネ性能の改善などにより、その停滞後には再び資本深化が進行している。ここでの全観察期間におけるより長期的な視点でみれば、第一次オイルショック以降のわずかな例外期を除き、図 3.2.4-8 において左下から右上

[23] 資本深化や労働浅化（3.2.4(4)節）について、その産業レベルでの定式化と分析は野村（201）第 4 章でおこなわれている。

へと階段状に各ステージを昇っていくように、日本経済ではエネルギーに対する資本深化が進行している。1990 年代半ば以降には情報通信投資の拡大期を含めても[24]、一単位のエネルギー投入によってより多くの資本を稼働させるような技術変化がみられる[25]。



単位：1955 年値=1.0（1955–2019 年）。注：横軸の資本投入価格を基準とした実質エネルギー価格（π^K）は 3.2.2 節の(3.2.2-15)式による。

図 3.2.4-8：エネルギーに対する資本深化

日本経済のエネルギーに対する資本深化の長期傾向は、生産拡張や更新投資に伴って安価な省エネ技術が体化された資本財が導入されていく「意図せざる EPI」と、資本

[24] 日本の設備投資（総固定資本形成）に占める情報通信資本のシェアの推移は 3.3.3(3)節の図 3.3.3-6 を参照。

[25] ここでの資本サービス投入量は土地による資本サービスが含まれる。日本経済における 1960–2000 年では土地を含んだ資本サービスの年平均成長率は 5.9%であり、土地を除く固定資産へと限定した測定値（年率 7.6%）よりも 1.7 ポイント小さい（野村 2004）。図 3.2.4-8 のエネルギーに対する資本深化の長期傾向としては、エネルギー投入の視点から土地を除いた資本サービスとすれば、さらに顕著なものとなる。

投入価格に対するエネルギー価格の上昇を反映した省エネ投資の拡大による「意図したEPI」の両者による。両者は明確に分離されるものではないが、とくに資本投入価格に対してエネルギー価格が上昇しながら資本深化が進行した典型的な「意図したEPI」の時期として、図 3.2.4-8で右上がりとなる楕円で囲んだ3つの期間が見いだされる。

それぞれの期間における事後的な資本・エネルギー間の代替の弾力性は、1973–77年には0.233、1978–82年には0.448、2004–08年には0.219と評価される。興味深いことは、こうした相対価格変化によって代替（「意図したEPI」）が進行した後のエネルギー価格の低下（π^Kの低下）期には、対称的に資本深化が逆行（K/Eが低下）するものではなく、トップランナーをフォローする他の経済主体における省エネ技術の普及プロセス（「意図せざるEPI」）を経て、むしろわずかながらも資本深化が進行していることである。エネルギーと資本の代替においては、資本深化の逆行の歯止めと見えるこうした「ラチェット効果」が見いだされる。

(4) 労働エネルギー比率の低下

RUECが上昇を始める第III期（1995–2019年）は、名目エネルギー価格（P^E）の上昇率は第II期（1973–95年）の半分以下にまで抑制されたが（図 3.2.4-4）、日本経済における1990年代後半からの労働投入価格（P^L）の低下により（図 3.2.4-3）、労働投入価格を基準とした実質エネルギー価格（π^L）もまた上昇へと転じている[26]。第III期以降のπ^L上昇は、第I期および第II期にみられる一単位の労働投入量あたりのエネルギー消費量が拡大していく長期的な傾向から転じ、むしろ逆にそれが低下する、奇妙ともとれる技術代替を促している。

エネルギーと労働投入の価格代替を描いた図 3.2.4-9では、戦後日本経済成長における基調として、労働投入価格を基準とした実質エネルギー価格（π^L）の低下とともに、一単位の労働がより多くのエネルギー投入を必要とするような技術変化（労働エネルギー比率（L/E）の低下）として定義される「エネルギーに対する労働浅化」（labor shallowing to energy）が見いだされる。図 3.2.4-8における資本深化とは対照的に、図3.2.4-9において右上から左下へと変化する労働浅化は、1950年代後半からの高度経済成長期においてとくに顕著となっている。

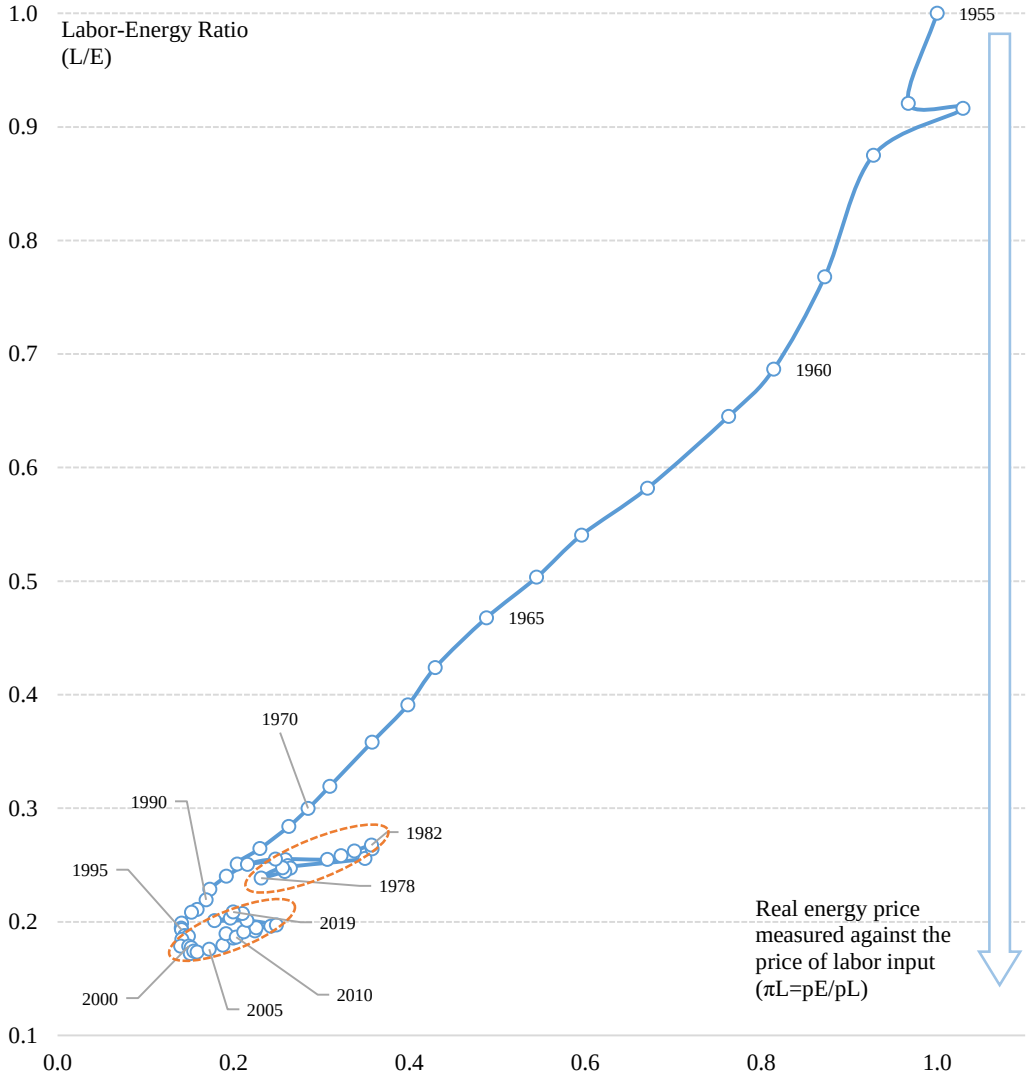
それは高い労働生産性の改善を実現する原動力であった。すでに1952年には、英国電気技術者協会（Institute of Electrical Engineers）のコーネル・リーソン会長は比喩的な表現ながらも、「労働者の手にある1kWhの増加はその能力を10倍にする」と表現した[27]。労働浅化は、外部からのエネルギー利用（インプット）を拡大することによって、労働サービスの提供（アウトプット）の品質を高めるような技術変化である[28]。経済成

[26] この期間には女性就業者や短時間労働者の拡大があり、一人あたり賃金率ではさまざまな影響を含むが、学歴や年齢、就業形態など労働者の質的な相違を統御した品質調整済み労働投入価格指数の測定値によれば、日本経済における労働投入価格の低下が1997年から2012年までの15年間継続している。それは先進国における経済成長の経験からも極めて特殊な事例である。

[27] “Electricity’s Role in Industry–Contribution to Raising Productivity,” Financial Times, October 30 1952.における Colonel B. H. Leeson 氏のコメント。

[28] 労働サービス量（アウトプット）の測定量には、エネルギー利用（インプット）拡大による質的変化は反映されず、L/Eという意味でのエネルギー生産性は低下していく。しかし、それはX/Lという労働生産性を大きく高めることに寄与するのである。

長のプロセスにおいて進行するこうした労働浅化は、労働投入から資本投入への代替、そして資本を稼働させるためのエネルギー投入の拡大という、資本を仲介とした 2 つの技術変化の結果としても捉えられる[29]。



単位：1955 年値=1.0（1955–2019 年）。注：横軸の労働投入価格を基準とした実質エネルギー価格（π^L）は 3.2.2 節の(3.2.2-16)式による。

図 3.2.4-9：エネルギーに対する労働浅化

日本経済における労働浅化の例外となる期間は 1973–87 年であり、実質エネルギー価格（π^L）が上昇することで労働浅化は停滞している。その後わずかなπ^Lの低下傾向でも労働浅化が再び進行するが、もうひとつの転換点は 2002/03 年にある。そこでは日本経済のデフレ傾向をもたらした賃金率低下を反映して、π^Lがむしろ相対的に上昇し、それを受けて「労働浅化の逆行」（L/Eの上昇）が見いだされる。π^Lが上昇してもL/Eが上昇しないような、（図 3.2.4-8 の資本深化にみられた）ラチェット効果は見いだされ

[29] こうした 2 つの技術変化による生産性指標に対する影響は、野村（2021）第 4 章 4.2.2 節における Case-3 として、数値例によってエネルギー生産性に与える影響が考察されている。

ない。労働者は相対的に高価となる国内におけるエネルギー価格を反映して、その利用するエネルギー投入量を減じているのである。

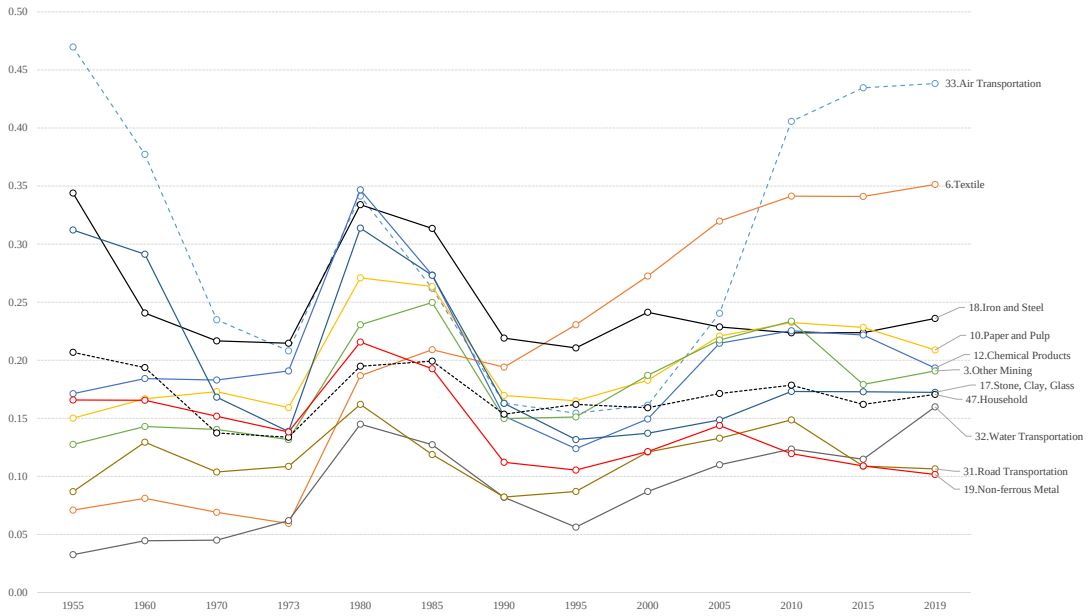
エネルギー消費を節約しても労働投入を拡大するような現象は、直接的には企業における省エネ担当者の設置・増員や省エネ診断士の増加、顧客の光熱水費などの経費削減実績から対価を得るような ESCO 事業などの拡大に相応すると捉えられる。しかし労働浅化という現象の多くは、長期化するデフレ経済のもとで労働投入から資本投入へと代替する技術変化の停滞を反映するものと考えられる。労働サービスの提供において利用するエネルギーを減少せざるをえなければ、リーソン氏による 60 年前の観察と対応して、労働生産性の改善は停滞ないし退行するだろう。2000 年代後半以降に加速する日本経済の EPI には、もっとも重要な労働生産性の改善を犠牲としたエネルギー生産性改善の効果が含まれている[30]。

3.2.5 産業レベルの脆弱性評価

3.2 節の最後に、一国経済における RUEC 変化の産業起因を分析しよう[31]。3.2 節での測定において一国経済を形成する 47 産業部門のうち、ここではエネルギー転換部門（13.石油製品製造業、14.石炭製品製造業、36.電力業、37.ガス業）を除く 43 部門において、第 III 期（1995–2019 年）における RUEC 平均値を基準として、43 産業を 4 つのパネルへと分割する。表 3.2.9-2 は 4 つのパネルごとの産業を示している。なお各パネル内における産業分類は、RUEC の 2019 年値（3.2.9 節付図表の図 3.2.9-1）を基準としてソートされている。その時系列推移はパネルごとに図 3.2.5-1 から図 3.2.5-4 に描かれている。

[30] 労働浅化による EPI への影響の定式化は、野村（2021）第 4 章 4.2.1 節を参照されたい。

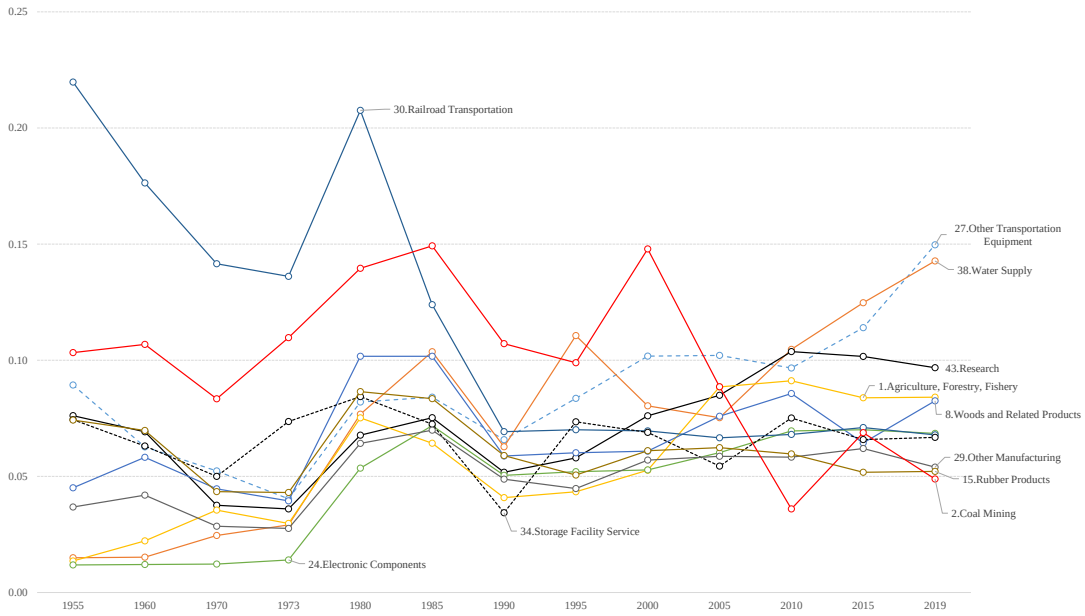
[31] 一国全体における RUEC 変化率の産業要因への分解は$\Delta \ln RUEC = \sum_j \left(\bar{w}_j^E \Delta \ln V_j^E - \bar{w}_j^X \Delta \ln V_j^X \right)$に基づく。ここで$\bar{w}_j^E$および$\bar{w}_j^X$は、それぞれエネルギー消費コストおよび産出額における産業別シェアの二期間平均値である（$\sum_j \bar{w}_j^E = \sum_j \bar{w}_j^X = 1.0$）。右辺の括弧内は、産業部門（$j$）別の一国集計レベルでの RUEC 変化率への寄与度を示している。



単位：産業別名目産出額V_j^X（名目付加価値＋エネルギーコスト）=1.0（1955–2019 年）。

図 3.2.5-1：産業別 RUEC（Panel-A）

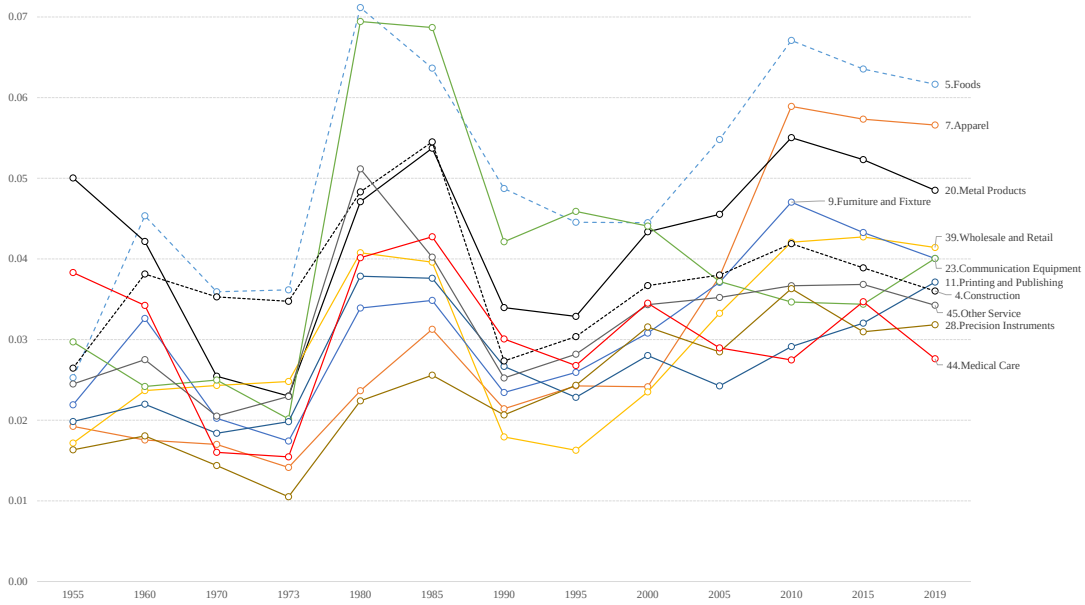
高い RUEC を持つ Panel-A は、エネルギー価格変動に対してもっとも影響を受けやすい投入構造を持つ産業群である。エネルギー多消費型産業である 10.紙パルプ製品製造業、18.鉄鋼業、12.化学製品製造業、17.窯業製品製造業、19.非鉄金属製品製造業に加え、33.航空輸送業と 31.道路輸送業がここに含まれている。その最上位に位置する産業は 33.航空輸送業であり、現在では航空燃料を中心にそのエネルギー消費額は産出額の 3 分の 1 以上（付加価値の半分以上）を占めている。こうした産業では、燃料の価格変動に対して極めて大きな影響を受けるため、2000 年代には運賃とは別建てとして燃料価格の変動を反映する燃油サーチャージが導入されている。



単位：産業別名目産出額V_j^X（名目付加価値＋エネルギーコスト）=1.0（1955–2019 年）。

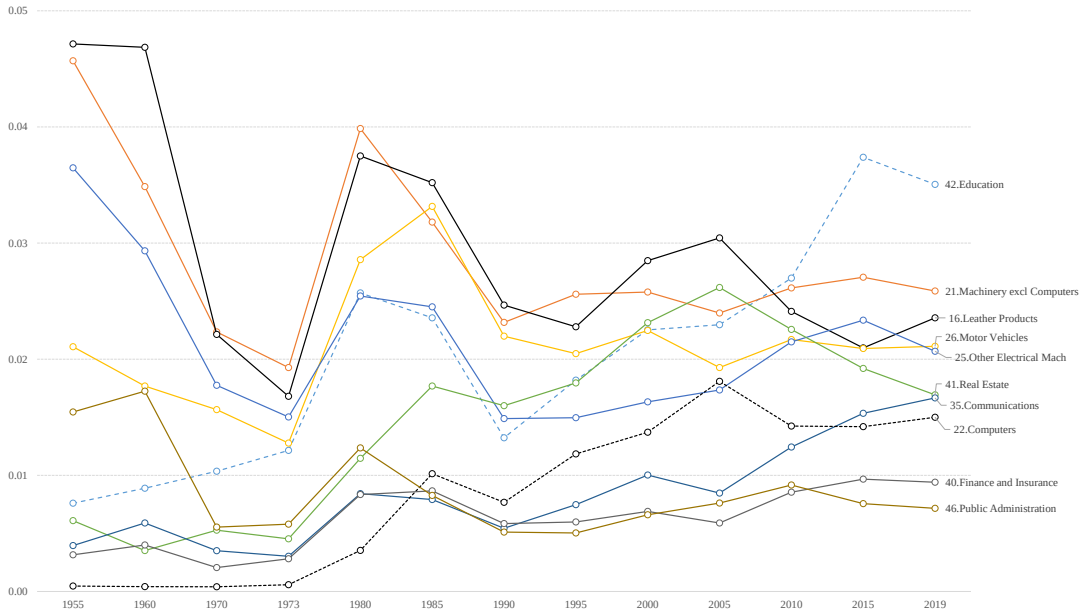
図 3.2.5-2：産業別 RUEC（Panel-B）

エネルギー多消費型産業に加えて、3.その他鉱業、2.石炭鉱業（すでにそれを専業とする事業者は日本国内に存在しない）、6.繊維製品製造業など、産業内で生産される付加価値が長期にわたり停滞する産業群もこの Panel-A に含まれている。とくに 6.繊維製品製造業は上位から 2 番目に位置し、1955 年の RUEC ではわずかに 7%であったものが、この 60 年間に逓増し 2000 年代半ばからは 30%ほどに到達する。高い RUEC は当該産業における低付加価値を主要因としている。その RUEC 水準は 33.航空輸送業と同水準にあるが、エネルギー価格変動に対する脆弱性の評価は大きく異なる。33.航空輸送業では燃油サーチャージによって経営への影響が一定程度切り離され、燃料価格高騰によっては海外の競合企業も同様な影響を受ける。他方、6.繊維製品製造業では電力消費への依存度がより高く、日本国内における電力価格の高騰によって、国際市場で非対称的な競争力の毀損を余儀なくされる。



単位：産業別名目産出額V_j^X（名目付加価値＋エネルギーコスト）=1.0（1955–2019 年）。

図 3.2.5-3：産業別 RUEC（Panel-C）



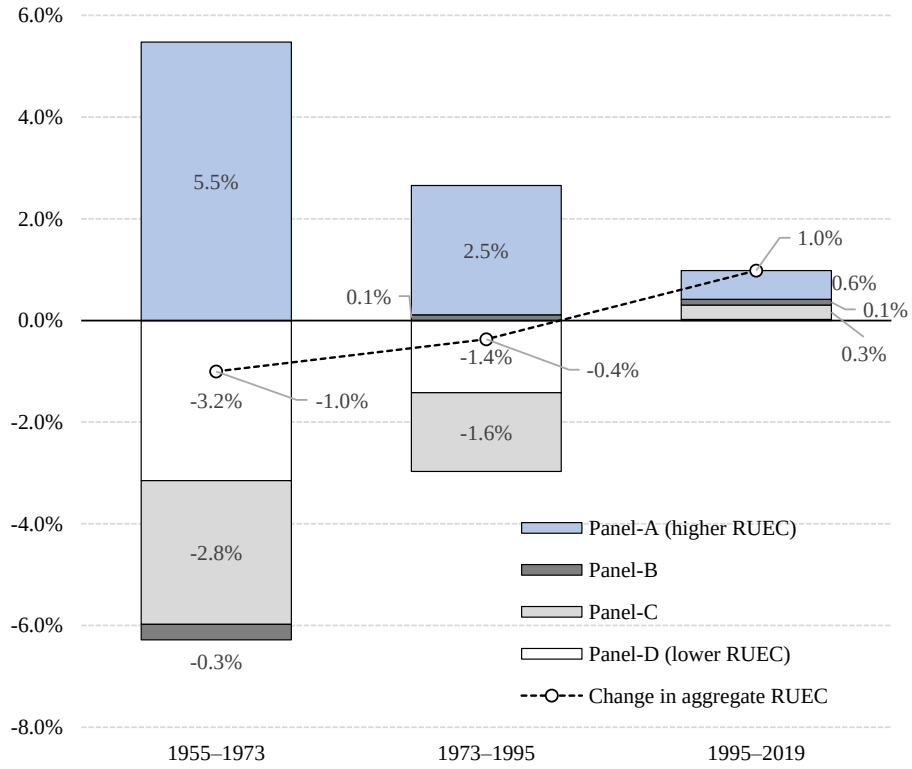
単位：産業別名目産出額V_j^X（名目付加価値＋エネルギーコスト）=1.0（1955–2019 年）。

図 3.2.5-4：産業別 RUEC（Panel-D）

エネルギー多消費型の産業においても、高付加価値を実現できる産業とそうでない産業での乖離がみられる。10.紙パルプ製品製造業と 19.非鉄金属製品製造業の推移は対照的である（図 3.2.5-1）。ここでの観測期間の初期では、後者の RUEC は前者を上回るが、すぐにそれは逆転しオイルショック後からは大きく差が開いている。2019 年ではその乖離は 3 倍ほどに拡大している。10.紙パルプ製品製造業が低付加価値から抜け出せなかったなか、非鉄金属ではコスト競争力を失った製品の国内生産からの撤退、

中間財となるエネルギー多消費的な精錬プロセスの海外移転、また高付加価値型にシフトすることでRUECが低下している[32]。

一国全体のRUECの変化率（図 3.2.4-2）に対して、4つのパネルごとの産業要因について分解したものが図 3.2.5-5である。第I期と第II期をみれば、エネルギー多消費型産業（Panel-A）におけるRUECの拡大が一国経済のRUECを高め、エネルギー寡消費型産業（Panel-CとPanel-D）におけるRUECの低下がそれを押し下げている。しかし、両者の乖離は縮小する傾向にある。第III期には、もはやPanel-C群も一国経済のRUECを押し上げる要因へと転じている。近年におけるRUECの拡大は（3.2.4(2)節の図 3.2.4-6のように）賃金率の低下などを反映したデフレ型であり、その影響を産業別にみれば、エネルギー多消費型産業におけるコスト増加であるよりも、より裾野の広い産業に影響が及んでいる。日本経済におけるエネルギー価格高騰に対する脆弱性の増大は、緩やかながらも広範な産業に見いだされるものとなっている。



単位：%（年平均成長率）。注：その定式化は脚注31による。

図 3.2.5-5：日本経済のRUEC変化における産業起因

3.2.6 結び

3.2節では日本経済における長期の実質単位エネルギーコスト（RUEC）とその日米格差の測定により、エネルギー価格高騰に対する日本経済の耐性評価をおこなってき

[32] Kaltenegger et al.（2017）は中間財生産における間接的なエネルギーコストの重要性を指摘するが、ここでのRUECの低下には中間財の輸入代替によるエネルギーコスト削減による影響が含まれている。3.3節では中間財輸入を通じた間接的な電力消費の拡大傾向について考察する。3.2節で観察されるRUECの上昇期となる1990年代半ばは、日本経済において間接的な電力輸入への依存度が高まる時期と重なっている。

た。測定結果によれば、米国でのシェール革命の恩恵が観察される 2009 年以降より日米の RUEC 格差は急速に拡大しており、近年では日本は米国に比して 40%ほど高い RUEC に直面する。日米格差が拡大した要因は、両国におけるエネルギー生産性格差の縮小と実質エネルギー価格差の拡大との両面による。近年、米国の EPI は高く、エネルギー生産性水準における日本の優位性はこの 20 年で半減した。拡大した日米 RUEC 格差は、かつての高度経済成長期におけるピークの水準に接近するものである。

日本経済のエネルギー価格高騰に対する耐性はオイルショック後に改善してきたが、この 20 年間に再び脆弱化している。日本の RUEC が上昇へと転じた転換点は 1990 年代半ばである。それは大きく 2 つの変化を反映している。第一の変化は、第一次オイルショック後から上昇へと転じた実質エネルギー価格の上昇率が、第 II 期（1973–95 年）から第 III 期（1995–2019 年）にかけてさらに高まったことである。これは同期間に名目エネルギー価格の上昇率が半分以下にまで低下したものの、第 III 期に賃金率の下落によってアウトプット価格（付加価値価格）が低下し、デフレ型の実質エネルギー価格の上昇をもたらしたことによる。デフレ型の RUEC 上昇は、エネルギー多消費型産業への直接的な影響よりも、広範な産業においてエネルギー価格高騰への耐性を脆弱化させる影響を持っている。

第二の要因は、EPI の低迷である。第 II 期から第 III 期にかけて実質エネルギー価格の上昇が逓増したにもかかわらず、EPI は逓減している。その詳細は野村（2021）で指摘されるように、安価に利用できる未導入の省エネ技術が限定されるなかで、エネルギー生産性の改善により RUEC 上昇を抑制するような効果は、実質エネルギー価格が上昇しようとも限定的なものとなっていることである。

また 2000 年後半からの日本経済に観察される EPI の回復は、あらためてその質が問われなければならないだろう。3.2 節の分析によれば、エネルギー投入を軸とした日本経済の構造変化の基調として、一単位のエネルギーの投入によってより多くの資本サービスの提供を可能とするような技術変化（資本エネルギー比率（K/E）の上昇）である「エネルギーに対する資本深化」と、一単位の労働がより多くのエネルギー投入を利用するような技術変化（労働エネルギー比率（L/E）の低下）としての「エネルギーに対する労働浅化」が進行している。労働浅化は、外部からのエネルギー利用を拡大することによって、労働サービスによる生産力を高めていく技術変化であり、それは（多くの場合は資本蓄積を仲介者として）労働生産性の改善を実現する大きな原動力であった。しかし 2000 年代前半からの日本経済では、むしろ「労働浅化の逆行」（L/E の上昇）が見いだされる。それは賃金率が低下するデフレ経済のもとで、労働から資本への代替が抑制され、労働生産性の改善が停滞したことを示唆している。言い換えれば、近年の EPI の回復には、労働生産性の改善を犠牲とした効果が含まれている。

日本経済が長期的にゼロエミッション電源へのエネルギー転換の実現を目指すとしても、実現には数十年を要する。その移行期間は必ずしも現在地と目的地との直線上に位置づけない、過渡的な戦略が必要であろう。2017 年 1 月からは、日本でも米国からのシェールガス由来の LNG の輸入が始まった。輸入調達先の多様化としての効果や

日米貿易不均衡を緩和させる効果が期待されていたものの、その輸入価格は同月に到着した東南アジアや豪州産の LNG の平均値よりも 6–7 割高であったという[33]。

短期・スポット市場の整備や LNG 備蓄の拡大などにより、輸入価格の低下に向けた今後の努力も期待されるが、RUEC の抑制に向けて重要なことは、原子力や石炭利用を含めた適切なエネルギーミックスの構築を継続していくことである。再エネ拡大は化石燃料への依存度を低下させるが、国内では依然として高い発電コストに加え、その蓄積に伴い需給調整や系統増強のためのコスト負担を増大させる。それは日本経済の直面する実質エネルギー価格を世界レベルからさらに大きく乖離させ、産業競争力を削いでいく。拙速なエネルギー転換によって RUEC を高めれば、海外での供給障害や急な需要拡大によって導かれる原油・LNG の価格高騰時におけるダメージは大きなものとなり、日本経済の抱えるリスクとなる。

また近年の RUEC 上昇は、名目エネルギー価格の上昇よりも、むしろ産出価格の低下という日本経済の国内要因を源泉とする。長期化するデフレ経済は、エネルギー価格高騰に対する脆弱性も増大させてきた。労働生産性の改善を通じて賃金率を高め、2000 年代初めから進行する「労働浅化の逆行」を修正しなければならない。そのためには収益性の高い国内投資の拡大が求められる。規制的な省エネ政策や環境自主行動計画（2013 年度からは低炭素社会実行計画、2021 度よりカーボンニュートラル行動計画）などによるエネルギー消費抑制的な行動制約は、国内生産拡張への投資を躊躇させ、海外へと向かわせる懸念は大きい。時間をかけてより安価になっていく省エネ技術は、政策支援（補助金）により（省エネの）前倒しなどせずとも将来的には資本へと体化され、省エネ効果は自ずと経済体系に組み込まれていく性格がある。日本経済が労働浅化を逆行させるような技術変化の継続を強いるならば、労働生産性と経済成長とを犠牲とするものとなろう。

3.2.7 補論 A：生産性統計におけるエネルギー勘定

本節の産業別エネルギー消費量は、1955 年を開始年次とする長期産業別生産性統計（KEO Database: KDB）における長期時系列産業連関表（供給使用表: KDB-SUT）と整合して構築された、エネルギー消費表（KDB-E）に基づいている。KDB は内閣府経済社会総合研究所（2021）によって構築される日本の国民経済計算体系（Japanese System of National Accounts: JSNA）との整合性を保持しながら拡張・構築されており、JSNA（2015 年基準）に基づいて 1955 年までの長期遡及がおこなわれている。そのフレームワークと測定に関する詳細は黒田・新保・野村・小林（1997）、野村（2004）、Jorgenson and Nomura（2005）を参照されたい。

一般に、経済統計では電力など二次エネルギーへの転換のためのエネルギー消費と最終消費されるそれが識別されておらず、エネルギー消費構造の分析における障害となっている。また数%のコストシェアしか持たないエネルギーでは、名目値を制約として変動の大きな価格指数から実質値を評価するようなアプローチでは、エネルギー生産性の測定指標が大きく荒れてしまう。改善のためには、エネルギーの分類を細分化

[33]「米シェール輸入開始－LNG 価格抑える取引力急務」『日経産業新聞』 2017 年 3 月 9 日。

したうえで、物量と価格指数から名目金額を先決するような生産性勘定の構築が求められる。

エネルギー統計ではエネルギー消費構造が詳細に描写されるが、そのアウトプットである産出量との関係性、また同時に利用される別のインプットである資本や労働との関係性など、生産過程の全体としての把握はできない。またエネルギー統計はもっぱら物量であり、その背景にある価格やコストとしての理解へと接近することもできない。経済統計の中に織り込むことにより、エネルギー消費を経済成長の文脈のもとで理解することが可能となる。

しかし、両統計における産業分類概念の相違も大きい。KDB-E では、産業分類を経済統計における活動分類に基づきながら、同時にエネルギー統計における物量・熱量としての詳細な消費構造との整合性を可能なかぎり維持しつつ、名目値としての KDB-SUT とのバランスを保持している。利用するエネルギー統計は、「総合エネルギー統計」（経済産業省）および『EDMC エネルギー・経済統計要覧』（日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット 2021)、また「産業連関表」（総務省）付帯表の「物量表」である。

KDB-E は、高炉ガスや転炉ガス、自家蒸気など副産物の発生と投入を含む、エネルギー転換部門における中間消費（37 のエネルギー種別）とすべての部門における最終消費（27 のエネルギー種別）の名目金額表（以下の A 表)、物量表（B 表）および熱量表（C 表および D 表）から構成されている。エネルギー統計と経済統計の接合のため、いくつかの調和がおこなわれている。たとえば、経済統計では日本の経済主体が消費した国際航空輸送や外洋輸送なども国内生産として含まれ、そのために海外で消費（特殊貿易（輸入））したエネルギー消費も計上されている。「総合エネルギー統計」ではそれを含まないため、KDB-E の最終エネルギー消費量のほうが大きな値となる。

また自家蒸気の投入に関しては、日本のベンチマーク産業連関表においては明示的な金額評価がされていない。しかし KDB-E では、「総合エネルギー統計」に計上される産出と投入における主体の差異を考慮し、最終エネルギー消費としての自家蒸気の投入についても金額評価をおこなっている。そうした概念変更によって、現行の産業連関表に対して、自家蒸気の産出主体における粗生産額が増加し自家消費（中間投入）されることによって付加価値率は低下する傾向となる。長期時系列 KDB-SUT ではそうした調整をおこなうことで、エネルギー統計との整合性が保持されている。

表 3.2.7-1 エネルギー・生産体系分析用データ（KDB-E）

A. 金額表
（単位：100万円）

			産業(j)の中間需要 1.農業 ・・・ 36.電力 ・・ 46.公務	最終需要(f) 47.家計消費(H)	48.在庫純増(Z)	49.輸出(E)	50.(控除)輸入(M)	51.輸入品商品税(TM)	52.国内生産
エネルギー種(i)	[転換部門]中間消費(T)	1.原油 ・ ・ ・ 34.自家蒸気(発生)	$P_{ij}E^{T}_{ij}$	0			$P_{if}E^{T}_{if}$		$P_iE^{T}_{i}$
		35.水力 36.原子力 37.その他再エネ	0				0		
	最終消費(C)	1.原油 ・ ・ ・ 27.自家蒸気(投入)	$P_{ij}E^{C}_{ij}$	$P_{if}E^{C}_{if}$					$P_iE^{C}_{i}$

B. 物量表
（単位：エネルギー種別固有単位）

			産業(j)の中間需要 1.農業 ・・・ 36.電力 ・・ 46.公務	最終需要(f) 47.家計消費(H)	48.在庫純増(Z)	49.輸出(E)	50.(控除)輸入(M)	51.輸入品商品税(TM)	52.国内生産
エネルギー種(i)	（転換部門）中間消費(T)	1.原油 ・ ・ ・ 34.自家蒸気(発生)	E^{T}_{ij}	0			E^{T}_{if}	0	E^{T}_{i}
		35.水力 36.原子力 37.その他再エネ							
	最終消費(C)	1.原油 ・ ・ ・ 27.自家蒸気(投入)	E^{C}_{ij}	E^{C}_{if}					E^{C}_{i}

C. 熱量表
（単位：10^{10}kcal）

			産業(j)の中間需要 1.農業 ・・・ 36.電力 ・・ 46.公務	最終需要(f) 47.家計消費(H)	48.在庫純増(Z)	49.輸出(E)	50.(控除)輸入(M)	51.輸入品商品税(TM)	52.国内生産
エネルギー種(i)	（転換部門）中間消費(T)	1.原油 ・ ・ ・ 34.自家蒸気(発生)	$c_iE^{T}_{ij}$	0			$c_iE^{T}_{iM}$	0	$c_iE^{T}_{i}$
		35.水力 36.原子力 37.その他再エネ							
	最終消費(C)	1.原油 ・ ・ ・ 27.自家蒸気(投入)	$c_iE^{C}_{ij}$	$c_iE^{C}_{iH}$	$c_iE^{C}_{if}$				$c_iE^{C}_{i}$

D. 熱量表（一次エネルギー換算）
（単位：10^{10}kcal）

			産業(j)の中間需要 1.農業 ・・・ 36.電力 ・・ 46.公務	最終需要(f) 47.家計消費(H)	48.在庫純増(Z)	49.輸出(E)	50.(控除)輸入(M)	51.輸入品商品税(TM)	52.国内生産
エネルギー種(i)	（転換部門）中間消費(T)	1.原油 ・ ・ ・ 34.自家蒸気(発生)	$\varepsilon_ic_iE^{T}_{ij}$	0			$\varepsilon_ic_iE^{T}_{iM}$	0	$\varepsilon_ic_iE^{T}_{i}$
		35.水力 36.原子力 37.その他再エネ							
	最終消費(C)	1.原油 ・ ・ ・ 27.自家蒸気(投入)	$\varepsilon_ic_iE^{C}_{ij}$	$\varepsilon_ic_iE^{C}_{if}$	$\varepsilon_ic_iE^{C}_{if}$				$\varepsilon_ic_iE^{C}_{i}$

3.2.8 補論 B：FIT は太陽電池の価格低下を加速させたか

2012 年 7 月、再生可能エネルギーの推進のため、余剰電力買取制から全量買取制へと拡張させた FIT 制度が導入された。政府が高い買取価格でも推進しなければならないとする根拠のひとつは、太陽電池メーカーなど国内産業の育成であった。しかし太陽電池（PV）モジュールでは国産品は安価な輸入品に代替されやすく、FIT 制度導入前に 20–30%ほどであった日本の輸入シェアは、その導入から半年後の 2013 年第 1 四半期には一気に 70%近くへと拡大した[34]。

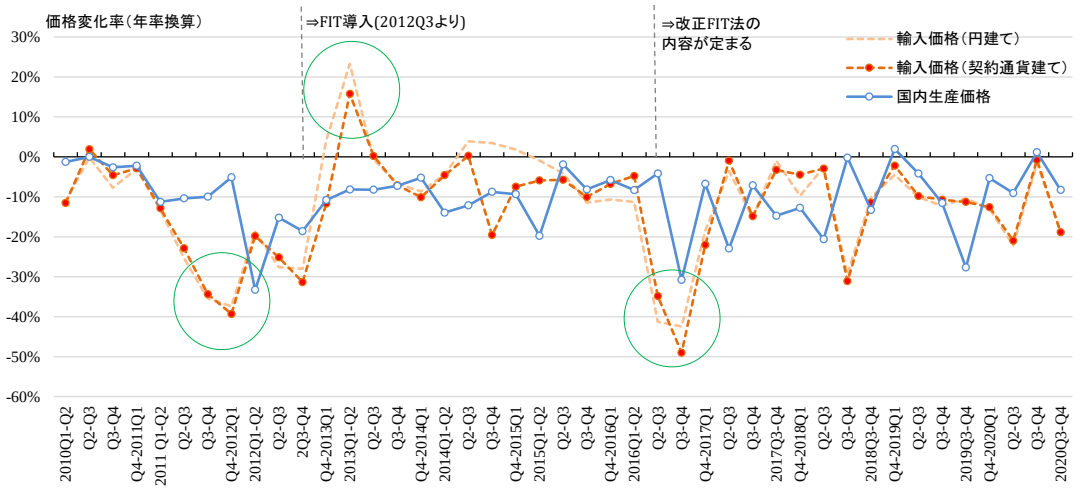
もうひとつの根拠は、政策的な推進による生産量の拡大が将来の価格低下をもたらすという習熟効果（learning by doing）への期待である。再エネの発電コストが高くとも、政策的な推進によって将来の価格を低下させることができるならば、現在の支援政策の実施を正当化できよう。その代表的な例は、政策的な推進がなければ市場も形成されないような初期の段階にあり、現在では電動車（FCV や EV）の普及に不可欠である水素ステーションや急速充電スタンドの設置などが相応する。しかし PV モジュールは、FIT 導入前から長期にわたり価格が低下しており、すでにコモディティ化していた[35]。FIT 制度による急速な需要拡大は、その基調としての価格低下を「加速」させただろうか。

日本の FIT 導入前後の PV 価格の実績をみよう。PV では日本銀行「企業物価指数」により、良質な価格統計を利用できる。2010 年第 1 四半期から 2020 年第 4 四半期まで、太陽電池モジュールの輸入価格および国内生産価格の変化を示したものが図 3.2.8-1 である。はじめに FIT 導入前夜となる 2011 年には、中国メーカーよる激しい低価格競争により、年率 20–40%もの価格低下が実現している。それは大規模生産の追求による過当な消耗戦であり、各メーカーは大きな余剰生産力を持っていた。

---

[34] CES 関数の推計による PV の国産品と輸入品の代替の弾力性は 5.66 と 1 を大きく上回り、太陽電池モジュールがすでにコモディティ化している商品であることを裏付けている。詳細は野村浩二・吉岡完治・大澤史織「太陽電池の輸入シェア弾性の測定と電力価格上昇によるシミュレーション－」KEO Discussion Paper, No.131, 慶應義塾大学産業研究所（2013 年 1 月）を参照されたい。

[35] Nemet（2006）は PV の生産価格の低下として、大きく 4 つの段階に分離している。第 1 段階は 1980 年代までの米国を中心とした研究開発による技術プッシュ期、第 2 段階は 1980 年代から 1990 年代までの日本を中心とした政策主導によるニッチ市場の形成期、第 3 段階は 2000 年代のドイツによる再エネ推進による需要拡大期、そして第 4 段階が 2010 年代以降の世界市場規模の拡大と中国企業などを中心とした低価格競争期である。日本が FIT 制度を導入した 2012 年は市場が成熟した第 4 段階にあった。



単位：%（各四半期の年率換算成長率：（2010 年第 1 四半期から 2020 年第 4 四半期）。
出典：日本銀行「国内企業物価指数」「輸入物価指数」に基づき作成。

図 3.2.8-1：太陽電池の輸入価格と国内生産価格の変化

皮肉にも、その苦境を救ったのは日本の FIT 制度である。制度導入時の 2012 年第 3 四半期が大きな転換点となり、日本の輸入価格はむしろ「上昇」へと転じた。2013 年の第 1 四半期から第 2 四半期には、円建ての輸入価格は 23.3%（年率換算）もの上昇である。それは円安を主要因とするものではない。同期間では、契約通貨建てでも年率 15.8%の上昇となっている[36]。

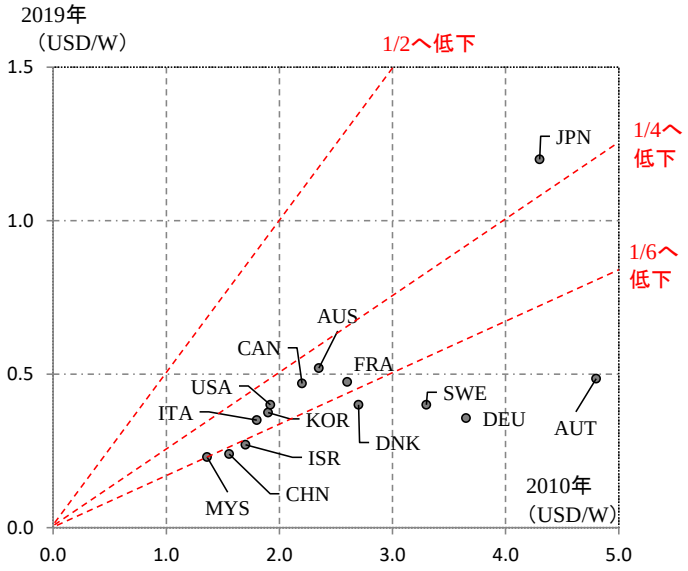
FIT 制度による国民負担の拡大、そして固定価格で買い取ってもらう権利を持ちながらも未稼働なままにされた案件など、2012 年に拙速に導入された制度の問題が明確になり、2016 年に経済産業省は制度改革に向けた議論を開始している。興味深いことに、改正 FIT 法の行方が定まる 2016 年第 3 四半期には、日本の輸入価格は逆に年率 50%もの急速な価格下落を記録している。それは FIT 推進期間内に上乗せされてきた価格プレミアムを削ぎ落とし、国際市況の基調として価格低下スケジュールへと戻るような動きである[37]。FIT 制度の導入は、PV による日本の高い発電コストを低下させることには逆効果であった。

高い買取期間によるノイズがあったとしても、中長期的には PV モジュールの日本の輸入価格も生産価格も低下してきた（図 3.2.8-1）。その内外価格差は解消へと向かったのだろうか。図 3.2.8-2 では、IEA-PVPS（2020）に基づき 2010 年（横軸）から 2019 年（縦軸）にかけての 1W あたりのモジュール単価（米ドル評価）の各国平均値をプロットしている（原点からの放射線状の右下に行くほど、この期間内における価格下落率が大きい）。各国の国内におけるバラツキも大きく、大まかな平均値の比較に留まる

[36] 青島矢一・朝野賢司（2015）「固定価格買取制度がもたらす非効率性：日本の住宅用太陽光発電システム普及の分析」, IIR ワーキングペーパー, WP#15-10（一橋大学イノベーション研究センター）では、約 120 万件の家庭用太陽光発電システムのデータに基づいた分析により、FIT 導入がコストダウンに貢献したとは言い難く、むしろ非効率性を助長する危険性を指摘している。

[37] 野村浩二・天野智道（2014）「太陽光発電の高い買取価格は競争を阻害するか」RCGW Discussion Paper No.49（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）では、サーチモデルによるシミュレーションにより、FIT 制度による高い買取価格の設定は「価格を上方へと引きつける張力」を持ち、むしろ「競争を阻害する」と分析されている。

が、ここで測定されるほぼすべての国において、2019 年における PV モジュール価格は 2010 年値の 4 分の 1 から 6 分の 1 以下にまで低下している。2010 年時において高価であったオーストリアやドイツでは、2019 年には世界水準にまで低下している。唯一の例外は日本である。（この期間には 2 割以上円安となっているにもかかわらず）内外価格差は縮小する方向に向かっていない。



単位：ドル/W。出典：IEA-PVPS（2020）の太陽電池モジュール価格の国際比較に基づき作成。注：各国の計数として幅のあるものはその中央値によって評価している。2019 年値が計上されていないドイツは 2017 年値から、オランダは 2018 年値から、各国変化率の幾何平均値により算定している。また日本の 2019 年値は$1.57/W と、その 2018 年値（$1.2）および 2017 年値（$1.12）よりさらに大きく上昇しており、この図では 2018 年値のままで固定している。

図 3.2.8-2：世界の太陽電池モジュールの価格変化

日本での土地利用や建設におけるコストは相対的に高いとしても、貿易財である機械設備における内外価格差は解消されるという見通しも一般には多くあった[38]。しかし図 3.2.8-2 は、コモディティ化した PV モジュールですら、内外価格差の解消はそれほど簡単ではないことを物語っている。1989 年の日米構造協議では、日本の流通（卸小売業）における高コスト構造が指摘され、その解消が求められた。その後、小売サービスの価格では価格差が縮小してきたものの、卸売サービスでは近年でも依然として

[38] たとえば杉山昌広・朝野賢司（2013）「固定価格買い取り制度（FIT）における太陽光発電の機動的な買い取り価格設定の必要性」（『エネルギー・資源学会論文誌』Vol.34, No.2）では、日本の FIT 導入後の PV モジュールにおいて「今後輸入が増え競争が進むと、大きな内外価格差が長期にわたって継続するとは考えにくい」とし、日本では「価格低下の余地は大きい」と予想している。

大きな内外価格差が存在すると測定される[39]。それは必ずしも日本の卸売業者の非効率性を示すものではなく、取引コスト低減という卸売業による狭義の機能に加え、情報提供、物流、金融機能などにおけるより高いサービス品質を示唆するかもしれない。要因の特定にはさらなる調査研究を要するが、卸売サービスの価格差は簡単には解消されず、それは日本経済の生産性水準が劣位する源泉のひとつである。太陽電池モジュールでは、太陽光発電による電力を高く買い取ってくれる日本の政策の存在自体が、皮肉にもPVモジュールの卸売サービスにおける価格を高め、硬直化させる要因となっている。

日本の相対的に高い建設コストは、建設時の地域住民への配慮や労働者の安全確保を含めたより高いサービス品質の反映であるとも捉えられる。内外価格差が日本の消費者が求める高いサービス品質への要請に起因するものであれば、その解消は必ずしも将来に約束されたものではない。

39 財の卸売・小売価格の比較は容易だが、(財の価格とは切り離した)そのサービス自体の内外価格差の測定は難しい。野村浩二・宮川幸三(2017)「日本の卸売・小売サービスは高いのかーマイクロデータに基づくマージン率推計と日米価格差」RIETI Discussion Paper, 17-J-026(経済産業研究所)による(一定の仮定に基づく)測定によれば、卸売サービスでは日米の内外価格差は近年でも依然として縮小されておらず、日米両国の一国経済における内外価格差を説明する大きな要因であると指摘される。

3.2.9 付図表

表 3.2.9-1：日本経済の RUEC とその変化要因

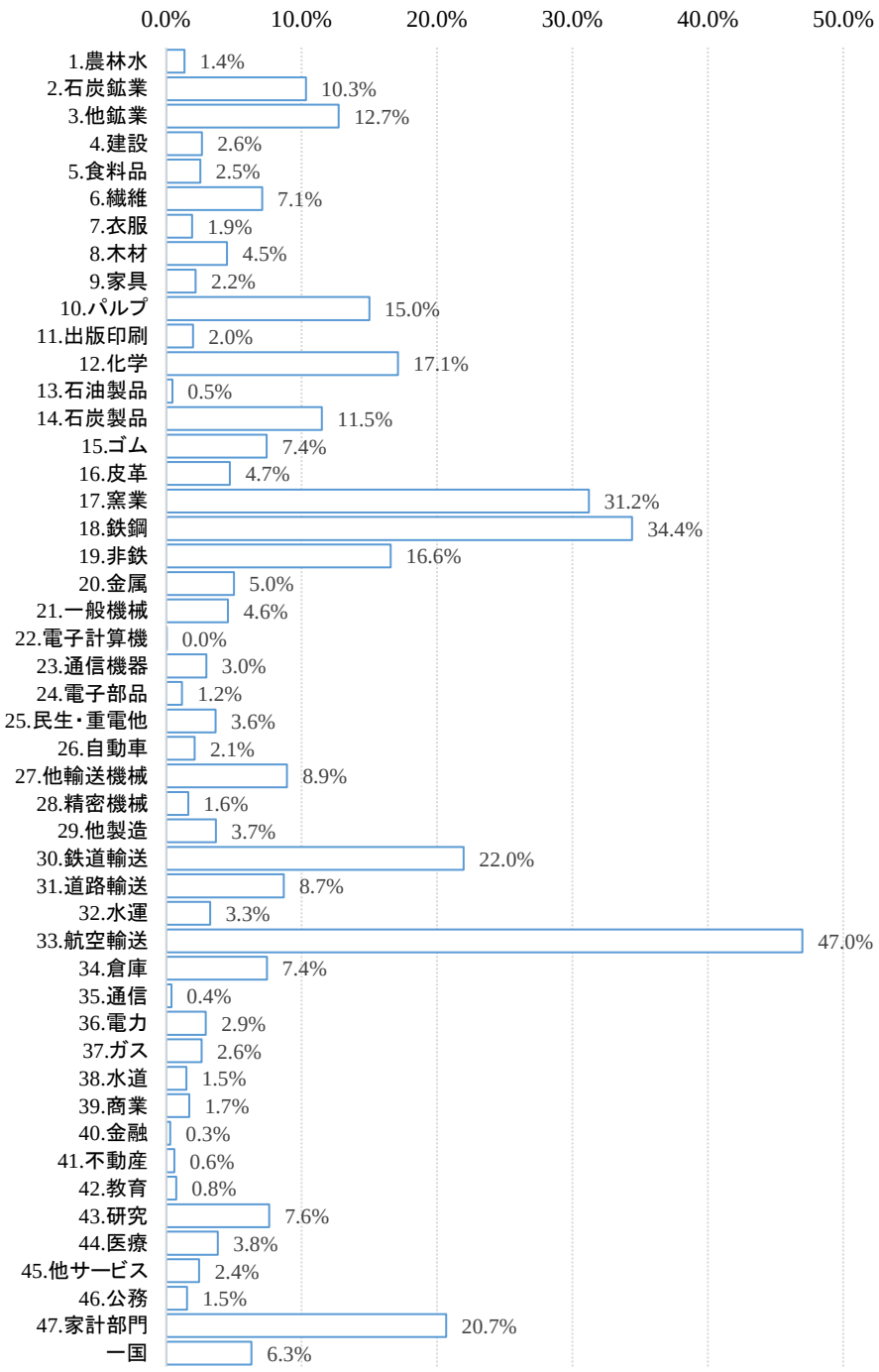
	RUEC		Prices and TFP					Real energy prices			Energy productivity		
			pE	pX	pK	pL	TFP	π	π^K	π^L	τ	σ	τ_*
1955	0.063	(1.00)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1956	0.066	(1.05)	1.052	1.050	1.098	1.088	1.038	1.002	0.959	0.967	0.990	0.938	1.018
1957	0.068	(1.08)	1.190	1.100	1.230	1.156	1.083	1.082	0.968	1.029	1.038	0.931	1.079
1958	0.067	(1.07)	1.147	1.087	1.136	1.237	1.091	1.056	1.009	0.927	1.025	0.945	1.064
1959	0.070	(1.12)	1.134	1.117	1.238	1.300	1.129	1.016	0.916	0.872	0.945	0.904	1.018
1960	0.070	(1.10)	1.148	1.161	1.460	1.410	1.218	0.989	0.786	0.814	0.930	0.868	1.045
1961	0.067	(1.07)	1.198	1.212	1.547	1.570	1.262	0.988	0.774	0.763	0.962	0.831	1.135
1962	0.068	(1.07)	1.220	1.247	1.495	1.819	1.292	0.978	0.816	0.670	0.947	0.864	1.076
1963	0.065	(1.04)	1.220	1.291	1.517	2.048	1.327	0.945	0.805	0.596	0.945	0.845	1.105
1964	0.063	(1.00)	1.242	1.336	1.635	2.281	1.398	0.930	0.760	0.545	0.965	0.803	1.183
1965	0.064	(1.01)	1.253	1.380	1.563	2.570	1.402	0.908	0.802	0.487	0.935	0.806	1.151
1966	0.061	(0.97)	1.232	1.443	1.691	2.870	1.464	0.854	0.729	0.429	0.913	0.811	1.113
1967	0.060	(0.95)	1.238	1.503	1.855	3.108	1.525	0.824	0.667	0.398	0.897	0.792	1.120
1968	0.058	(0.91)	1.241	1.567	2.016	3.471	1.601	0.792	0.615	0.357	0.900	0.765	1.161
1969	0.056	(0.88)	1.224	1.629	2.108	3.956	1.669	0.752	0.581	0.309	0.885	0.734	1.187
1970	0.056	(0.88)	1.306	1.714	2.149	4.585	1.718	0.762	0.608	0.285	0.898	0.714	1.245
1971	0.058	(0.92)	1.397	1.752	1.971	5.314	1.737	0.797	0.709	0.263	0.902	0.705	1.285
1972	0.055	(0.87)	1.378	1.837	2.029	5.993	1.780	0.750	0.679	0.230	0.893	0.705	1.278
1973	0.053	(0.83)	1.501	2.084	2.183	7.351	1.804	0.720	0.688	0.204	0.895	0.702	1.292
1974	0.069	(1.10)	2.400	2.437	2.173	9.263	1.787	0.985	1.104	0.259	0.932	0.724	1.300
1975	0.074	(1.17)	2.807	2.666	2.159	10.72	1.784	1.053	1.300	0.262	0.932	0.744	1.273
1976	0.075	(1.19)	3.109	2.841	2.318	11.75	1.822	1.094	1.341	0.265	0.952	0.747	1.300
1977	0.075	(1.19)	3.329	3.002	2.387	12.89	1.844	1.109	1.395	0.258	0.964	0.764	1.297
1978	0.067	(1.07)	3.156	3.140	2.665	13.64	1.889	1.005	1.184	0.231	0.977	0.746	1.356
1979	0.071	(1.13)	3.612	3.252	2.749	14.12	1.898	1.111	1.314	0.256	1.022	0.738	1.433
1980	0.091	(1.45)	5.225	3.484	2.859	14.95	1.911	1.500	1.827	0.349	1.076	0.771	1.450
1981	0.090	(1.43)	5.653	3.598	2.962	15.81	1.945	1.571	1.908	0.358	1.140	0.795	1.510
1982	0.089	(1.41)	5.861	3.660	3.001	16.43	1.968	1.601	1.953	0.357	1.180	0.804	1.559
1983	0.086	(1.37)	5.653	3.688	3.003	16.76	1.967	1.533	1.882	0.337	1.163	0.829	1.502
1984	0.084	(1.33)	5.517	3.695	3.045	17.13	1.992	1.493	1.812	0.322	1.166	0.808	1.539
1985	0.079	(1.25)	5.444	3.733	3.277	17.75	2.067	1.458	1.661	0.307	1.212	0.821	1.587
1986	0.063	(1.00)	4.463	3.775	3.409	18.03	2.066	1.182	1.309	0.248	1.220	0.840	1.575
1987	0.057	(0.90)	3.955	3.716	3.323	18.32	2.077	1.064	1.190	0.216	1.220	0.833	1.592
1988	0.052	(0.83)	3.645	3.747	3.479	18.99	2.131	0.973	1.048	0.192	1.222	0.830	1.609
1989	0.049	(0.77)	3.458	3.773	3.600	19.99	2.199	0.917	0.961	0.173	1.231	0.826	1.637
1990	0.050	(0.79)	3.601	3.849	3.591	21.34	2.230	0.935	1.003	0.169	1.234	0.845	1.602
1991	0.049	(0.78)	3.684	3.902	3.504	23.22	2.275	0.944	1.051	0.159	1.250	0.859	1.605
1992	0.049	(0.77)	3.638	3.946	3.366	23.93	2.244	0.922	1.081	0.152	1.242	0.852	1.631
1993	0.047	(0.75)	3.513	4.004	3.340	24.92	2.247	0.877	1.052	0.141	1.215	0.854	1.608
1994	0.049	(0.77)	3.458	3.975	3.233	24.62	2.217	0.870	1.069	0.140	1.174	0.852	1.565
1995	0.048	(0.77)	3.450	3.985	3.308	24.52	2.228	0.866	1.043	0.141	1.171	0.846	1.568
1996	0.050	(0.79)	3.624	3.997	3.447	25.11	2.295	0.907	1.051	0.144	1.190	0.850	1.587
1997	0.053	(0.83)	3.813	3.940	3.286	25.67	2.312	0.968	1.160	0.149	1.206	0.852	1.611
1998	0.051	(0.81)	3.565	3.898	3.173	25.25	2.275	0.915	1.123	0.141	1.178	0.870	1.568
1999	0.052	(0.82)	3.502	3.870	3.095	25.04	2.255	0.905	1.131	0.140	1.141	0.868	1.519
2000	0.054	(0.85)	3.709	3.869	3.215	24.87	2.292	0.958	1.154	0.149	1.165	0.876	1.542
2001	0.055	(0.87)	3.793	3.850	3.195	24.96	2.304	0.985	1.187	0.152	1.177	0.882	1.556
2002	0.055	(0.86)	3.689	3.821	3.216	24.49	2.303	0.966	1.147	0.151	1.159	0.886	1.523
2003	0.055	(0.86)	3.692	3.796	3.256	23.87	2.303	0.973	1.134	0.155	1.168	0.889	1.522
2004	0.056	(0.88)	3.742	3.782	3.289	23.60	2.311	0.989	1.138	0.159	1.162	0.898	1.508
2005	0.060	(0.95)	4.068	3.759	3.232	23.59	2.317	1.082	1.259	0.172	1.178	0.902	1.527
2006	0.064	(1.02)	4.407	3.736	3.196	23.47	2.326	1.180	1.379	0.188	1.200	0.908	1.539
2007	0.066	(1.04)	4.621	3.721	3.221	23.16	2.336	1.242	1.435	0.200	1.241	0.915	1.578
2008	0.074	(1.17)	5.246	3.660	2.906	23.39	2.300	1.433	1.805	0.224	1.271	0.927	1.600
2009	0.065	(1.03)	4.390	3.681	2.734	22.92	2.178	1.193	1.606	0.192	1.203	0.949	1.485
2010	0.067	(1.06)	4.556	3.691	3.005	22.44	2.246	1.234	1.516	0.203	1.213	0.911	1.560
2011	0.070	(1.10)	4.772	3.622	2.844	22.55	2.246	1.317	1.678	0.212	1.239	0.942	1.549
2012	0.072	(1.14)	5.014	3.671	2.952	22.21	2.244	1.366	1.698	0.226	1.247	0.932	1.570
2013	0.075	(1.19)	5.437	3.667	3.061	22.45	2.309	1.483	1.776	0.242	1.294	0.933	1.620
2014	0.077	(1.21)	5.694	3.678	3.084	22.89	2.340	1.548	1.846	0.249	1.323	0.942	1.645
2015	0.064	(1.01)	4.942	3.743	3.321	22.97	2.359	1.320	1.488	0.215	1.359	0.937	1.701
2016	0.054	(0.86)	4.188	3.760	3.294	23.47	2.340	1.114	1.271	0.178	1.346	0.927	1.709
2017	0.059	(0.93)	4.615	3.752	3.320	23.49	2.367	1.230	1.390	0.196	1.369	0.936	1.722
2018	0.064	(1.01)	5.083	3.742	3.143	24.18	2.362	1.358	1.617	0.210	1.393	0.948	1.728
2019	0.061	(0.97)	5.020	3.832	3.089	25.16	2.333	1.310	1.625	0.200	1.399	0.973	1.689

単位：RUEC は名目産出額（V^X）=1.0。それ以外および括弧内は 1955 年値=1.0。注：σは産業構造要因、τ_*は産業構造要因を統御したもとでの調整済みの真の EPI、τはグロスの EPI。

表 3.2.9-2：産業別 RUEC

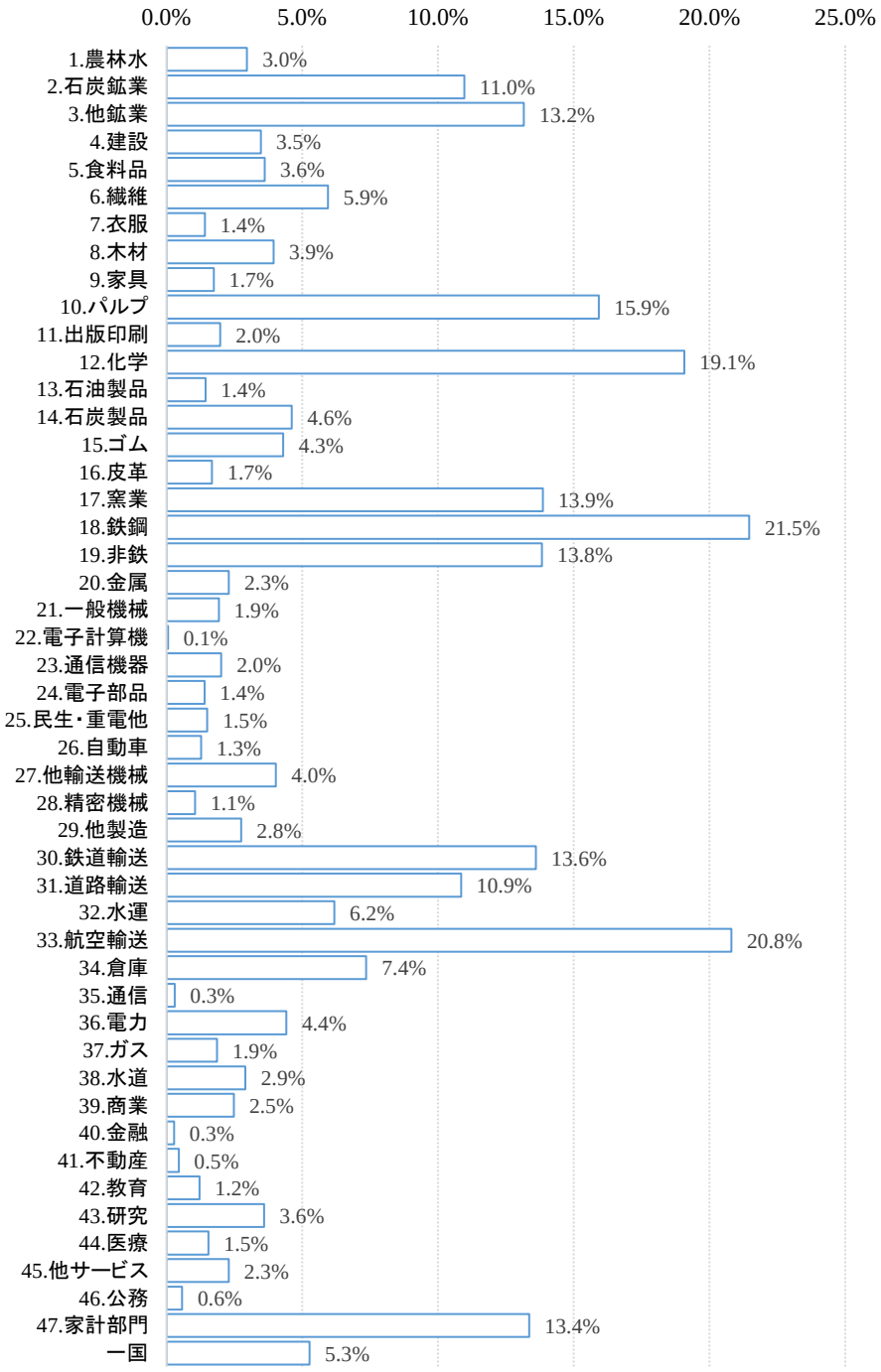
	1955	1960	1970	1973	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019
Panel-A													
33.Air Transportation	0.47	0.38	0.23	0.21	0.34	0.26	0.16	0.15	0.16	0.24	0.41	0.43	0.44
6.Textile	0.07	0.08	0.07	0.06	0.19	0.21	0.19	0.23	0.27	0.32	0.34	0.34	0.35
18.Iron and Steel	0.34	0.24	0.22	0.21	0.33	0.31	0.22	0.21	0.24	0.23	0.22	0.22	0.24
10.Paper and Pulp	0.15	0.17	0.17	0.16	0.27	0.26	0.17	0.17	0.18	0.22	0.23	0.23	0.21
12.Chemical Products	0.17	0.18	0.18	0.19	0.35	0.27	0.15	0.12	0.15	0.21	0.23	0.22	0.19
3.Other Mining	0.13	0.14	0.14	0.13	0.23	0.25	0.15	0.15	0.19	0.22	0.23	0.18	0.19
17.Stone, Clay, Glass	0.31	0.29	0.17	0.14	0.31	0.27	0.16	0.13	0.14	0.15	0.17	0.17	0.17
47.Household	0.21	0.19	0.14	0.13	0.19	0.20	0.15	0.16	0.16	0.17	0.18	0.16	0.17
32.Water Transportation	0.03	0.04	0.04	0.06	0.14	0.13	0.08	0.06	0.09	0.11	0.12	0.11	0.16
31.Road Transportation	0.09	0.13	0.10	0.11	0.16	0.12	0.08	0.09	0.12	0.13	0.15	0.11	0.11
19.Non-ferrous Metal	0.17	0.17	0.15	0.14	0.22	0.19	0.11	0.11	0.12	0.14	0.12	0.11	0.10
Panel-B													
27.Other Transportation Equipmen	0.09	0.06	0.05	0.04	0.08	0.08	0.07	0.08	0.10	0.10	0.10	0.11	0.15
38.Water Supply	0.01	0.02	0.02	0.03	0.08	0.10	0.06	0.11	0.08	0.08	0.10	0.12	0.14
43.Research	0.08	0.07	0.04	0.04	0.07	0.08	0.05	0.06	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10
1.Agriculture, Forestry, Fishery	0.01	0.02	0.04	0.03	0.08	0.06	0.04	0.04	0.05	0.09	0.09	0.08	0.08
8.Woods and Related Products	0.05	0.06	0.04	0.04	0.10	0.10	0.06	0.06	0.06	0.08	0.09	0.06	0.08
24.Electronic Components	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07
30.Railroad Transportation	0.22	0.18	0.14	0.14	0.21	0.12	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
34.Storage Facility Service	0.07	0.06	0.05	0.07	0.08	0.07	0.03	0.07	0.07	0.05	0.08	0.07	0.07
29.Other Manufacturing	0.04	0.04	0.03	0.03	0.06	0.07	0.05	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05
15.Rubber Products	0.07	0.07	0.04	0.04	0.09	0.08	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
2.Coal Mining	0.10	0.11	0.08	0.11	0.14	0.15	0.11	0.10	0.15	0.09	0.04	0.07	0.05
Panel-C													
5.Foods	0.03	0.05	0.04	0.04	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.07	0.06	0.06
7.Apparel	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.06	0.06	0.06
20.Metal Products	0.05	0.04	0.03	0.02	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.05	0.05
39.Wholesale and Retail	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04
9.Furniture and Fixture	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04
23.Communication Equipment	0.03	0.02	0.02	0.02	0.07	0.07	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04
11.Printing and Publishing	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04
4.Construction	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
45.Other Service	0.02	0.03	0.02	0.02	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03
28.Precision Instruments	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03
44.Medical Care	0.04	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Panel-D													
42.Education	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
21.Machinery excl Computers	0.05	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03
16.Leather Products	0.05	0.05	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
26.Motor Vehicles	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
25.Other Electrical Mach	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
41.Real Estate	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
35.Communications	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
22.Computers	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
40.Finance and Insurance	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
46.Public Administration	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

単位：産業別名目産出額（名目付加価値+エネルギーコスト）を 1.0 とした指数。



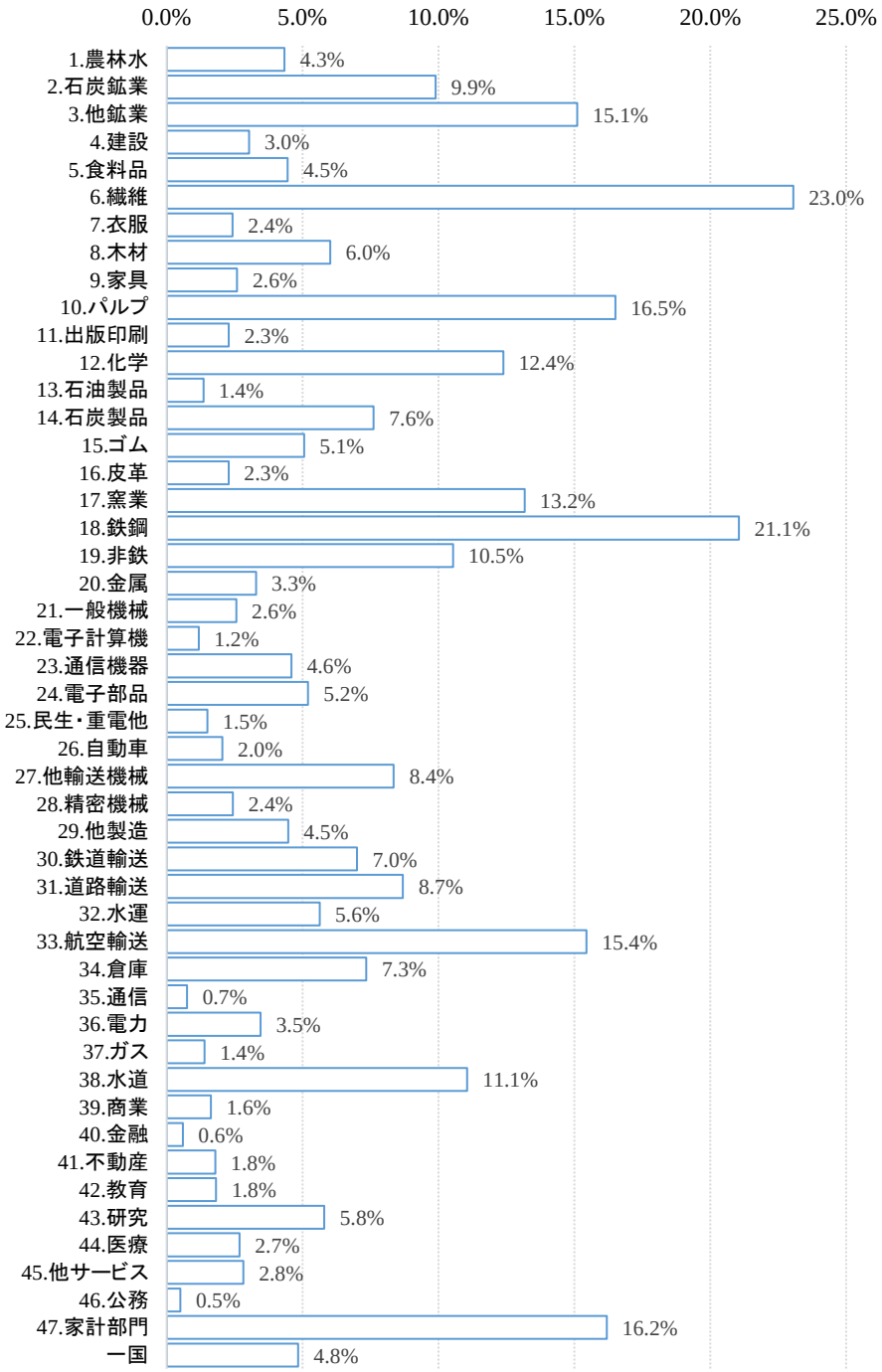
単位：産業別名目産出額V_j^X（名目付加価値＋エネルギーコスト）=1.0（1955 年）。

図 3.2.9-1：産業別 RUEC（1955 年）



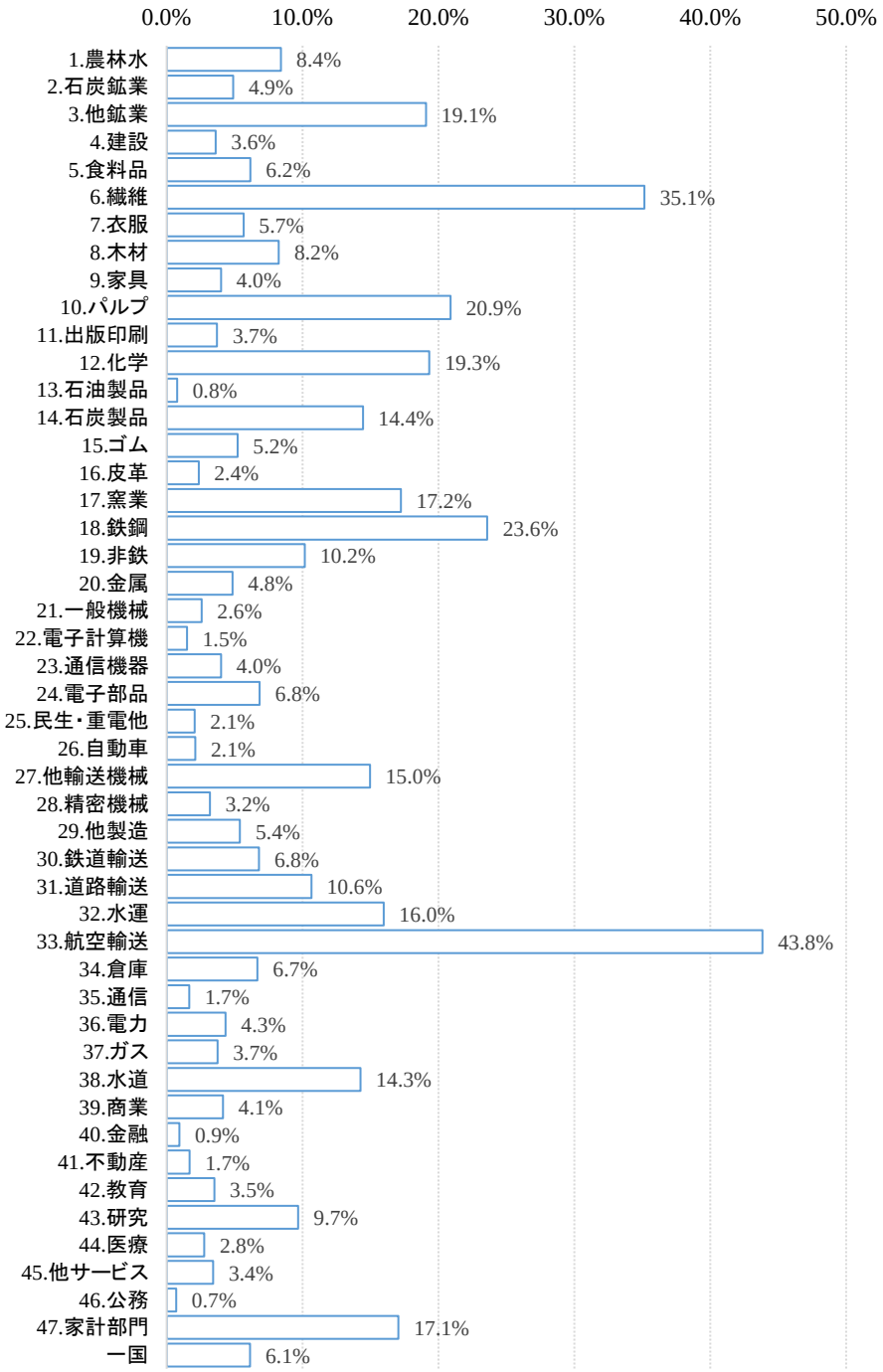
単位：産業別名目産出額V_j^X（名目付加価値＋エネルギーコスト）=1.0（1973 年）。

図 3.2.9-2：産業別 RUEC（1973 年）



単位：産業別名目産出額V_j^X（名目付加価値＋エネルギーコスト）=1.0（1995 年）。

図 3.2.9-3：産業別 RUEC（1995 年）



単位：産業別名目産出額V_j^X（名目付加価値＋エネルギーコスト）=1.0（2019 年）。

図 3.2.9-4：産業別 RUEC（2019 年）

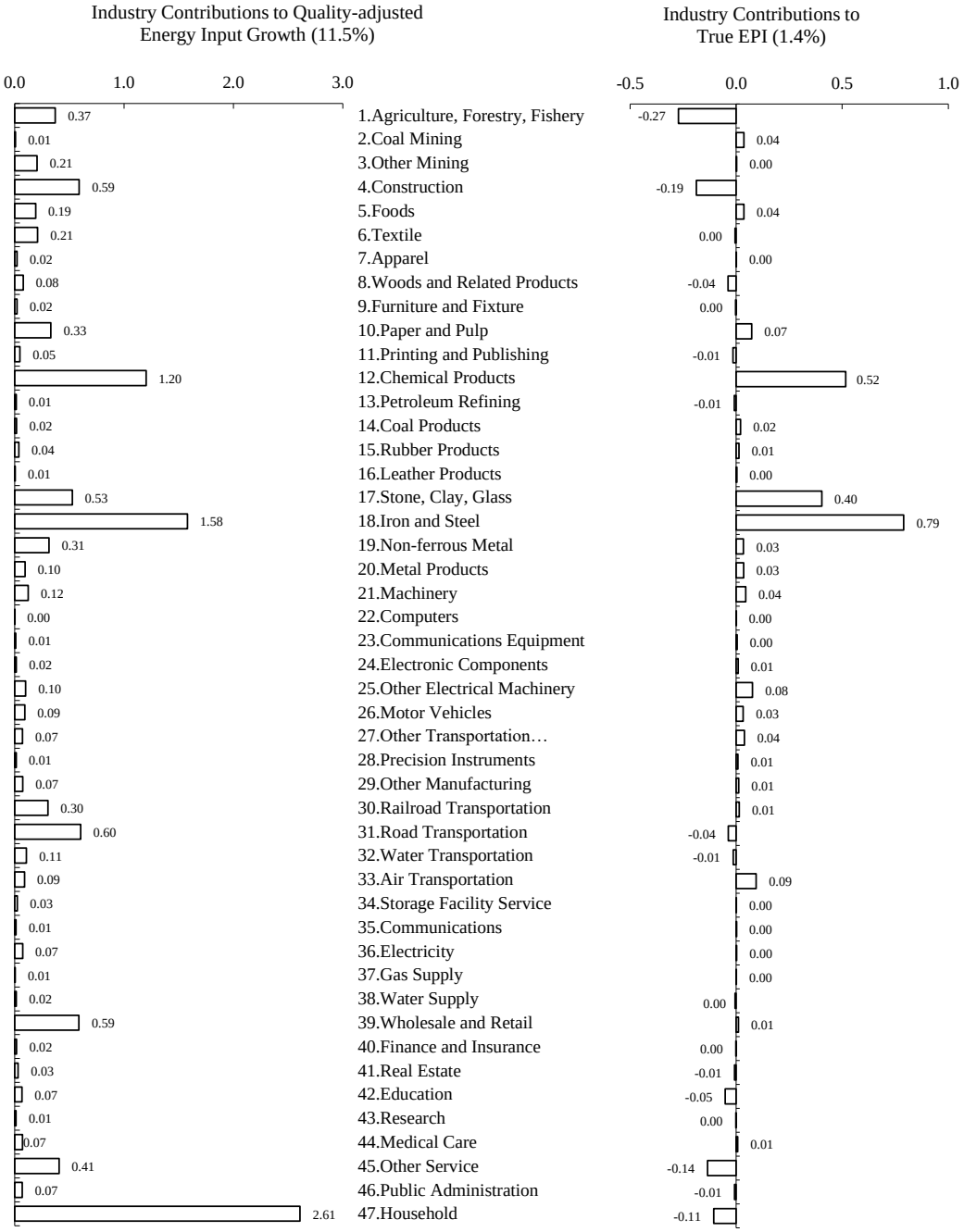


図 3.2.9-5：エネルギー消費とエネルギー生産性の産業別寄与度（1955–73 年）

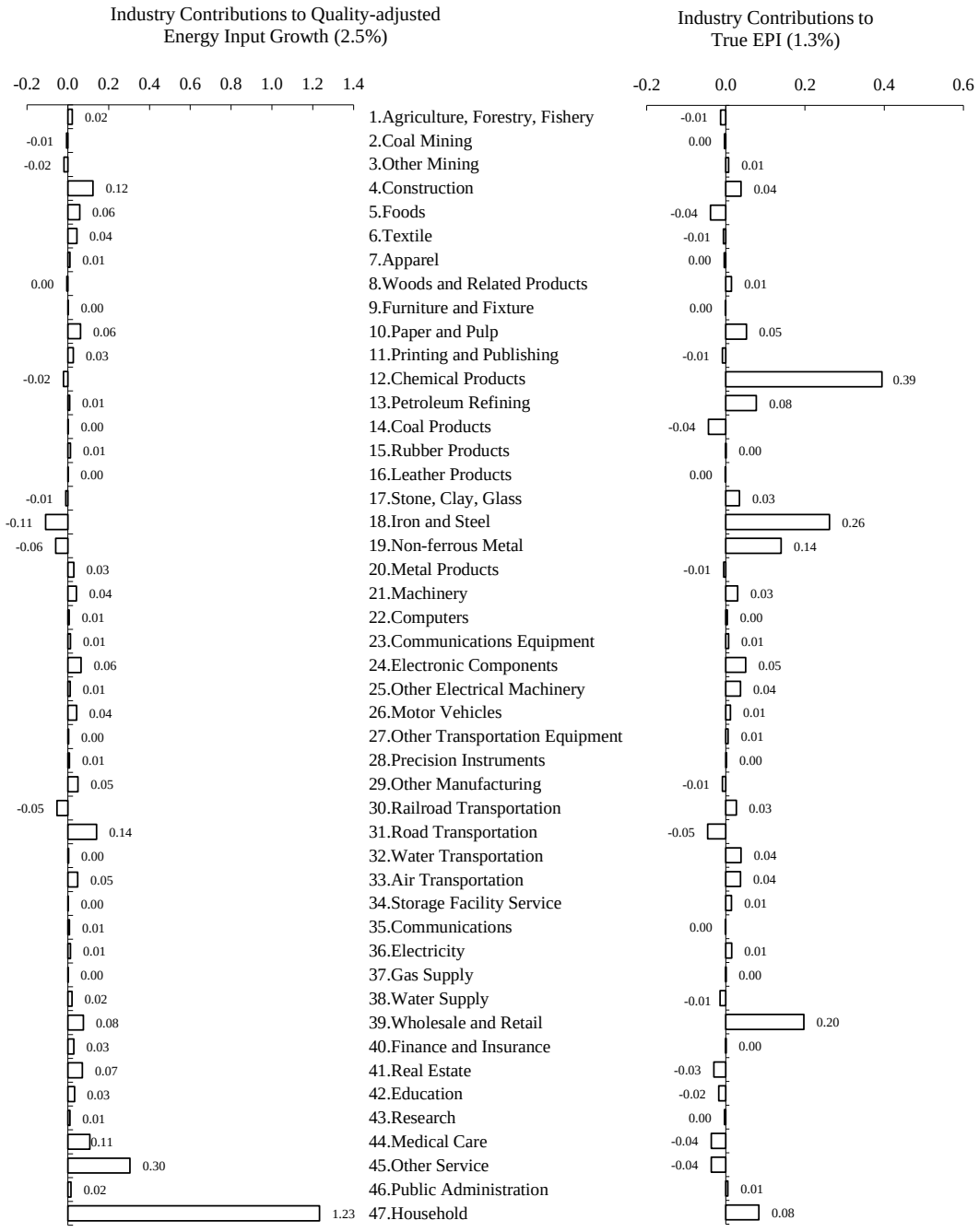


図 3.2.9-6：エネルギー消費とエネルギー生産性の産業別寄与度（1973–90 年）

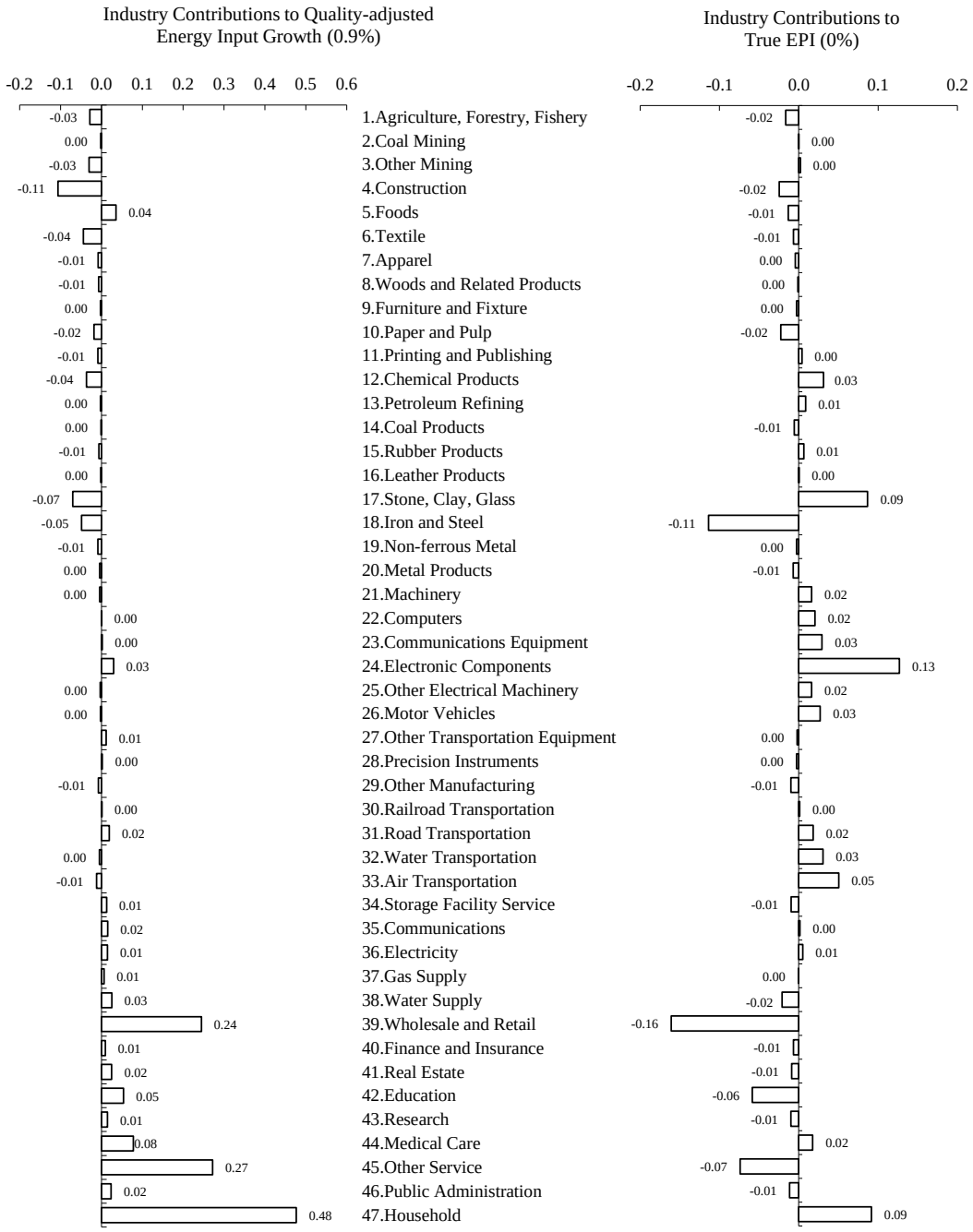


図 3.2.9-7：エネルギー消費とエネルギー生産性の産業別寄与度（1990–2008 年）

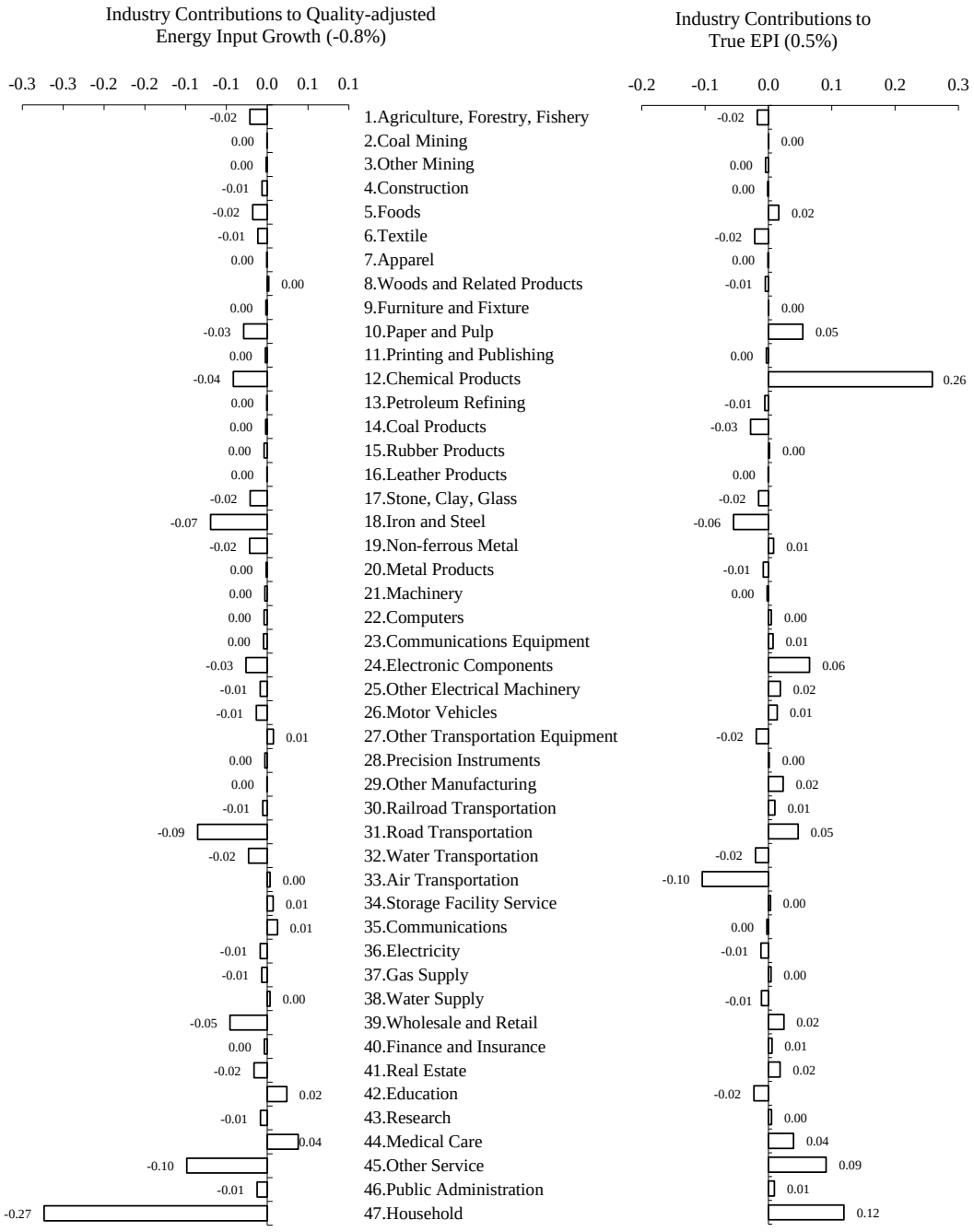


図 3.2.9-8：エネルギー消費とエネルギー生産性の産業別寄与度（2008–19 年）

参考文献（第 3.2 節に関するもの）

1) Castro-Alvarez, F., Vaidyanathan, S., Bastian, F., & King, J. (2018). The 2018 International Energy Efficiency Scorecard. American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE). Report I1801.
2) Energy Information Administration (2018) Annual Energy Outlook 2018, the U.S. Energy Information Administration.
3) European Commission (2014) Energy Economic Developments in Europe, European Economy 1, Brussels: European Commission.
4) Eurostat-OECD (2012) Eurostat-OECD Methodological Manual on Purchasing Power Parities, 2012 edition, Eurostat Methodologies and Working Papers, European Union/OECD.
5) Gillingham, Kenneth, Richard G. Newell and Karen Palmer (2009) "Energy Efficiency Economics and Policy", Annual Review of Resource Economics, Vol.1, No.1.
6) IEA-PVPS (2020) "Trends in Photovoltaic Applications 2020," Report IEA-PVPS T1-38: 2020.
7) Jorgenson, Dale W. and Koji Nomura (2005) "The Industry Origins of Japanese Economic Growth," Journal of the Japanese and International Economies, Vol.19, No.4.
8) 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 D. W. Jorgenson, et al. (eds.) The World Economy – Growth or Stagnation?, Cambridge: Cambridge University Press, Chap.13.
9) Kallakuri, Chetana, Shruti Vaidyanathan, Meegan Kelly and Rachel Cluett (2016) "The 2016 International Energy Efficiency Scorecard," American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), Report E1602.
10) Kaltenegger, Oliver, Andreas Löschel, Martin Bikowski and Jörg Lingens (2017) "Energy Costs in Germany and Europe: An Assessment Based on a (Total Real Unit) Energy Cost Accounting Framework," Energy Policy, Volume 104.
11) Konishi, Yoko and Koji Nomura (2015) "Energy Efficiency Improvement and Technical Changes in Japanese Industries, 1955-2012," RIETI Discussion Paper Series 15-E-058.
12) Lack, Simon (2018) "America's Path to Energy Independence: The Shale Revolution," Forbes, June 4.
13) Murtishaw, Scott and Lee Schipper (2001a) "Energy Saving and Structural Changes in the US Economy: Evidence from Disaggregated data Using Decomposition Techniques," Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, LBNL-48786, September.
14) Murtishaw, Scott and Lee Schipper (2001b) "Disaggregated Analysis of US Energy Consumption in the 1990s: Evidence of the Effects of the Internet and Rapid Economic Growth," Energy Policy, Vol.29, Issue 15.
15) Nemet, Gregory (2006) "Beyond the Learning Curve: Factors Influencing Cost Reductions in Photovoltaics," Energy Policy, Vol. 34, No. 17.
16) Nomura, Koji, Kozo Miyagawa and Jon D. Samuels (2019) "Benchmark 2011 Integrated Estimates of the Japan-U.S. Price Level Index for Industry Outputs," in B. M. Fraumeni (eds.) Measuring Economic Growth and Productivity–Foundations, KLEMS Production Models, and Extensions, London: Academic Press, Chap.12.

17) Royal, Todd (2018) “Shale 2.0 – Is There a Geopolitical Dark Side?,” The National Interest, February 8.
18) Smil, Vaclav (2017) Energy and Civilization: A History, Cambridge: The MIT Press. （塩原通緒訳『エネルギーの人類史』青土社、2019 年）.
19) World Bank (2014) Purchasing Power Parities and Real Expenditures of World Economies: Summary of Results and Findings of the 2011 International Comparison Program, Washington, D.C.: World Bank.
20) World Bank (2020). Purchasing Power Parities and the Size of World Economies: Results from the 2017 International Comparison Program. Washington, D.C.: World Bank.
21) 経済産業省（2015）「長期エネルギー需給見通し」7 月.
22) 黒田昌裕・新保一成・野村浩二・小林信行（1997）『KEO データベースー産出および資本・労働投入の測定ー』慶應義塾大学産業研究所.
23) 資源エネルギー庁（2008）『平成 18 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2007）』経済産業省 資源エネルギー庁.
24) 内閣府経済社会総合研究所（2021）『2020 年度（令和 2 年度）国民経済計算年報』内閣府.
25) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット (2021) 『EDMC エネルギー・経済統計要覧』省エネルギーセンター.
26) 野村浩二（2004）『資本の測定ー日本経済の資本深化と生産性』慶應義塾大学出版会.
27) 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.
28) 星野優子（2012）「日本の製造業業種別エネルギー需要の価格弾力性の推計ー国際比較のための分析枠組みの検討ー」『エネルギー・資源』Vol.34, No.1.

3.3 間接的な電力輸入

3.3.1 政策評価と現実の乖離

2000 年代後半からの日本経済における電力需要は、その策定時には野心的と考えられていた政府による節電･省エネ目標を上回るスピードで減少した（3.3.6 節補論 B）[40]。エネルギー多消費的な中間財部品などの国内生産品を輸入品へ切り替えることや、輸出向けの財の加工における最終工程を（消費地に近い）海外生産へと移管することで、マクロや産業レベルでのエネルギー生産性指標は、見かけ上は改善したように見える。政府は省エネ法における規制措置の進捗評価として、化学業やセメント業では 2008 年以降にエネルギー消費原単位が減少傾向にあると評価する（資源エネルギー庁 2020b）。しかし、そうした減少のすべてをエネルギー生産性改善（energy productivity improvement: EPI）とみなせば、省エネ政策の効果を過大評価するものとなろう。

1990 年代からのグローバル化の進展、世界金融危機や東日本大震災を契機としたグローバルなサプライチェーンの見直しは、日本経済におけるエネルギー消費構造にも大きな影響を与えてきたと考えられる。それはマクロや産業レベルの EPI の測定では見いだすことのできない、生産物レベルでの変化である。3.3 節では電力を対象とし、日本経済における電力消費の輸入依存度の測定を通じて、電力消費的な財の国内生産から海外生産へのシフトを評価する。国際的な送電網に接続しない日本では、電力消費における直接的な輸入依存はゼロである[41]。しかし、電力多消費的な中間財や最終財の国内生産を縮小し、それを輸入財へと切り替えることは、間接的に電力を輸入しているものと解される。それは統計では直接に観察されない変化である。3.3 節では財と財との間の相互依存関係を描写する産業連関におけるレオンチェフ生産体系に基づき、経済体系におけるすべての間接的な電力輸入量を評価するための指標として「実効輸入依存度（effective import dependency: EID）」を構築する。

一国経済における間接的な電力輸入依存を示す EID の変化は、中間財や最終財の輸入係数とともに、最終需要構造（家計消費や設備投資などのシェアやその財・サービスの構成）の変化にも依存している。そうした影響の抽出のため、3.3 節では EID 指標に加えて、すべての電力投入についてそれを誘発する源泉となる最終需要へと紐づけた指標として、「需要源泉依存度（ultimate demand sources: UDS）」が構築される。電力はほぼすべての生産プロセスに投入されるが、そうした電力の中間消費は究極的にはなんらかの最終需要（家計消費や設備投資、あるいは輸出など）によって誘発されたものと考えられる。小売電気事業者は直接の需要者を知るものの、その電力需要が何に紐づいて誘発されたものかは知らない。たとえばホテルを直接的な電力消費者とすれば、その宿泊客が観光客なら、ホテルでの電力需要の源泉は家計消費であると理解される。もしその宿泊がビジネス利用の建設業者であるとすればその電力需要は国内の資本蓄積のためであると、また輸出する自動車メーカーの社員であれば電力消費も

[40] 3.3 節は野村（2021）第 5 章における 2015 年までの測定値から、2018 年延長産業連関表（経済産業省 2021）に基づく推計値を加え、そのインプリケーションに関する加筆および改訂をおこなっている。

[41] わずかに統計上、日本の居住者による海外での電力消費が輸入（直接購入）として計上されるに過ぎない。

輸出によって誘発されたものと解されよう。あるいは鉄鋼メーカーや対企業サービス業におけるビジネス客であれば、それぞれの財・サービスの顧客へとさらに遡り、ホテルでの電力需要の帰属も先送りされる。電力 UDS は、こうして繋がる糸を手繰り寄せていき、すべての電力需要の究極的な源泉となる最終需要への依存を集約した指標である。需要の究極的な源泉を探ることは、将来需要の見通しの策定や電力価格上昇による影響評価のためにも重要な情報となる。

3.3.2 節では、産業連関分析に基づく測定のフレームワークとして、一定の仮定のもと、一国経済における電力 EID/UDS、最終需要項目別および商品別の電力 EID/UDS を定式化する[42]。3.3.3 節では、1960 年から 2015 年までのベンチマークにおける複数の接続産業連関表（接続表）および 2018 年の延長産業連関表（延長表）に基づき、電力 EID/UDS の両指標を測定していく。3.3 節の測定によれば、長期の日本経済において大きく 3 つの変動期が見いだされ、とくに 1995 年からの 20 年以上にわたり一国経済の電力 EID が倍増したことが指摘される。財レベルの測定によっても見いだされる間接的な電力輸入の拡大は、近年の日本経済において電力消費的な財が海外生産へとシフトしていることを意味している。野心的とも思われた節電・省エネ目標を上回る、現実経済における電力需要の低迷は、直接観察によっては見えない電力多消費的な製品の海外生産への移転というような構造変化を反映したものである。一国経済の電力 EID の変化要因に対しては、3.3.3(2)節および 3.3.3(3)節における最終需要別測定、また 3.3.3(4)節における商品別測定を通じて接近していく。3.3.4 節は結びとする。

3.3.2 フレームワーク

(1) 一国経済の EID/UDS

一国経済の産業連関表における商品別最終需要ベクトル（f）を以下のように定義する。

$$f = c + g + i + e - m, \tag{3.3.2-1}$$

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を含む）c、政府消費g、総固定資本形成（在庫純増を含む）i、輸出e、輸入mの 5 つの列ベクトルから構成される[43]。

投入係数行列A（国産財と輸入財を含む）を定義したもとで、レオンチェフ生産体系（Leontief production system）は次式のように定式化される。

$$x = \mathrm{A}x + c + g + i + e - m. \tag{3.3.2-2}$$

レオンチェフ逆行列を

[42] 財貨・サービスは SNA においては生産物（product）と称されるが、3.3 節では産業連関分析における用語として商品（commodity）とも呼んでいる。それは財とともにサービスを含んでいる。

[43] 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るが、3.3 節ではそれは中間投入へと内生化（各年次における産業連関表において分類不明と合算して部門を定義）している。

$$\mathrm{B} = (\mathrm{I} - \mathrm{A})^{-1} \ , \qquad (3.3.2\text{-}3)$$

とすれば、各最終需要ベクトルに対応して直接・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。

$$x^{\mathrm{C}} = \mathrm{B}c, \quad x^{\mathrm{G}} = \mathrm{B}g, \quad x^{\mathrm{I}} = \mathrm{B}i, \quad x^{\mathrm{E}} = \mathrm{B}e, \quad x^{\mathrm{M}} = \mathrm{B}m. \qquad (3.3.2\text{-}4)$$

ここではそれを「波及生産量」と呼ぼう。波及生産量はそれぞれの最終需要を満たすように、すべてを国内生産したときの仮想的な粗生産量である。(3.3.2-4)式に定義される波及生産ベクトルによれば、(3.3.2-2)式における一国経済の生産量は次のように分解される。

$$x = x^{\mathrm{C}} + x^{\mathrm{G}} + x^{\mathrm{I}} + x^{\mathrm{E}} - x^{\mathrm{M}}. \qquad (3.3.2\text{-}5)$$

(3.3.2-5)式は、国内粗生産量（x）がその生産を誘発する最終需要項目へと紐づけて分解されることを意味している。その右辺の第 5 項では、輸入財をすべて国内生産するとした想定のもとでの波及生産量（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。

(3.3.2-5)式においてx^{M}を移項して、需給バランス式として次式をえる。

$$x^{\mathrm{C}} + x^{\mathrm{G}} + x^{\mathrm{I}} + x^{\mathrm{E}} = x + x^{\mathrm{M}}, \qquad (3.3.2\text{-}6)$$

(3.3.2-6)式の左辺は国内最終需要（c、g、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、その右辺はそうした需要を満たすための国内生産と輸入による供給量として捉えられる。

導かれた(3.3.2-6)式のバランス式に基づいて、商品kの波及生産量に対する最終需要（C, G, I, E）ごとのシェアを

$$\varphi_k^z = x_k^z / \left(x_k + x_k^{\mathrm{M}}\right), \qquad z = \mathrm{C}, \quad \mathrm{G}, \quad \mathrm{I}, \quad \text{and E} \qquad (3.3.2\text{-}7)$$

としよう。(3.3.2-7)式は波及生産量の一国集計値における最終需要項目別生産誘発依存度であり、各シェアの合計（$\varphi_k^{\mathrm{C}} + \varphi_k^{\mathrm{G}} + \varphi_k^{\mathrm{I}} + \varphi_k^{\mathrm{E}}$）は 1.0 である[44]。商品$k$を電力サービスとすれば、家計によって消費されるすべての財とサービス（食料品や衣服などの消費財、自動車や民生用電機機器などの耐久消費財、飲食店や不動産サービスなど）の生産段階において利用される電力消費、またそれぞれの中間財・サービスの波及生産段階において利用される間接的な電力消費も、究極的には家計消費による電力生産の誘発（φ_k^{C}）としてカウントされる。本節ではそれを「需要源泉依存度」として UDS（ultimate demand sources）と呼ぶ。UDS では中間財・サービス生産におけるすべての電力消費は、その需要の源泉となる最終需要に紐づけられている。

また最終需要各項目へと紐づけた波及生産量である(3.3.2-6)式の分解により、商品kの「実効輸入依存度（effective import dependency: EID）」を以下のように定義する。

44 需要源泉依存度（UDS）は産業連関表に付随する最終需要項目別生産誘発依存度と類似するが、後者は国内粗生産量を分母とするのに対して、UDS では間接輸入による影響を描写するため波及生産量を分母として評価している。

$$\varepsilon_k = x_k^{\mathrm{M}} / \left(x_k + x_k^{\mathrm{M}}\right). \tag{3.3.2-8}$$

商品kを電力サービスとすれば、一国経済のレオンチェフ生産体系に基づき定義される電力 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波及生産としての仮想的な電力量のうち、最終財や中間財の輸入を通じて間接的に輸入されると推計される電力量の占めるシェアである。間接的に輸入される電力消費量（x_k^{M}）は、すべての輸入財を日本国内において生産したときに直接・間接に必要とされる電力の波及生産量として評価されている[45]。

(2) 特定商品の EID/UDS

(3.3.2-8)式に定義される一国経済の EID に対して、仮想的な最終需要ベクトルを所与としたもとでの EID/UDS 指標を算定しよう。いま任意の最終需要ベクトルをzとし、その需要を満たすために誘発される国内生産量ベクトル（$x_{(z)}$）と輸入量ベクトル（$m_{(z)}$）を競争輸入モデルにより算定すれば[46]、最終需要ベクトルzに対応した仮想的な産業連関表は次式によって導かれる。

$$x_{(z)} = \mathrm{A}x_{(z)} + z - m_{(z)}. \tag{3.3.2-9}$$

(3.3.2-9)式は一国経済におけるレオンチェフ生産体系を示す(3.3.2-2)式から、仮想的な最終需要zのもとで切り出される部分的な生産体系を示しており、そこでの$m_{(z)}$は最終需要自体（z）と誘発される中間需要（$\mathrm{A}x_{(z)}$）の両者に含まれる輸入量を評価している。

(3.3.2-3)式のレオンチェフ逆行列（輸入財を含む）を用いて、(3.3.2-4)式と同様に最終需要（z）と輸入（$m_{(z)}$）おける生産波及量をそれぞれ以下のように定義する。

$$x^{\mathrm{z}} = \mathrm{B}z, \quad x_{(z)}^{M} = \mathrm{B}m_{(z)}. \tag{3.3.2-10}$$

このもとで(3.3.2-6)式と同様な商品ごとの波及生産の需給バランス式として、

$$x^{\mathrm{z}} = x_{(z)} + x_{(z)}^{M}, \tag{3.3.2-11}$$

が導かれる。任意の最終需要zに対応した商品kの EID は、(3.3.2-8)式と同様に、

$$\varepsilon_k^{\mathrm{z}} = x_{(z)k}^{M} / \left(x_{(z)k} + x_{(z)k}^{M}\right), \tag{3.3.2-12}$$

として定義される。

---

[45] 海外生産における電力消費の効率性が日本よりも劣る（一単位の生産により多くの電力を使用する）とすれば、輸入相手国における実際の生産における電力消費量はここでの算定値（x_k^{M}）を上回る。多国間の国際産業連関表によれば、そうした接近も可能であるが、商品部門定義の粗さや価格差、そして測定精度の課題は大きい。よって本節の EID は国内効率基準のもとで評価する。

[46] 標準的な競争輸入モデルとして、商品別に輸入係数を定義し、それを対角要素とする輸入係数行列（$\widehat{\mathrm{M}}$）によって、国内波及を描くレオンチェフ逆行列$\left(\mathrm{I} - \left(\mathrm{I} - \widehat{\mathrm{M}}\right)\mathrm{A}\right)^{-1}$によって国内生産量$x_{(z)}$を算定し、そのうえで必要となる中間財（および最終財）に対応した輸入ベクトル$m_{(z)}$を推計している。

商品kを電力サービスとし、最終需要ベクトルzとして、たとえば自動車のみの観察値（(3.3.2-1)式に観察されるc、g、i、eの 4 つの最終需要ベクトルの合計）を抽出すれば（他の商品の最終需要をゼロとする）、(3.3.2-12)式は自動車という特定商品の直接・間接の生産段階を総合的に評価した電力の実効輸入依存度（EID）を示している。また同じ最終需要ベクトルzの想定のもとでは、(3.3.2-7)式によって電力生産における自動車による需要源泉依存度（UDS）が算定される。それは一国経済の電力消費量のうち、最終財としての自動車による直接・間接の生産段階に投入される電力消費量の占めるシェアを示している。言い換えれば、電力総需要のどれほどが、究極的に自動車の生産によって誘発されたものであるかを評価する指標となる。このように、最終需要ベクトルzとして特定商品を切り出したもとでの指標を「商品別 EID/UDS」と呼ぶ。

いま最終需要ベクトルzを、(3.3.2-1)式に観察されるc、g、i、eの 4 つの最終需要ベクトルとすれば、(3.3.2-8)式に定義される一国経済の EID（ε_k）は、最終需要項目別 EID（ε_k^z）の加重平均値として次のように分解される。

$$\varepsilon_k = \sum_z \varphi_k^z \varepsilon_k^z, \quad z = \mathrm{C}, \quad \mathrm{G}, \quad \mathrm{I}, \quad \text{and E} \tag{3.3.2-13}$$

ここでウェイトとなるφ_k^zは、(3.3.2-7)式に定義される最終需要項目別 UDS である。一国経済の EID において、任意の二期間における差分を$\Delta\varepsilon_k$とすれば、その変化要因は以下のように分解される。

$$\Delta\varepsilon_k = \sum_z (\bar{\varphi}_k^z \Delta\varepsilon_k^z + \bar{\varepsilon}_k^z \Delta\varphi_k^z), \quad z = \mathrm{C}, \quad \mathrm{G}, \quad \mathrm{I}, \quad \text{and E} \tag{3.3.2-14}$$

ここで$\bar{\varphi}_k^z$および$\bar{\varepsilon}_k^z$は、それぞれφ_k^zおよびε_k^zの比較する二期間平均値によって定義されている。(3.3.2-14)式右辺の括弧内において、第一項は最終需要項目別 EID 変化による寄与度、第二項は最終需要項目別 UDS 変化による寄与度である。一国経済の EID 変化は、最終需要項目別の実効輸入依存度の変化と、電力需要の源泉となる最終需要構造の変化という 2 つの要因に分解される。

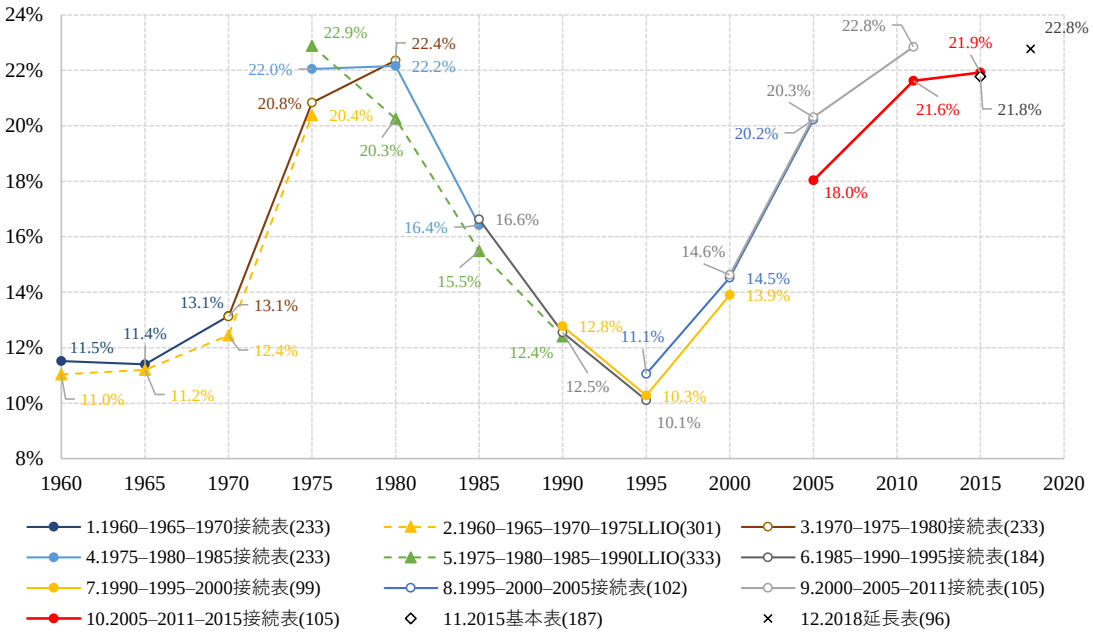
3.3.3 電力の実効輸入依存

(1) マクロの電力 EID

3.3.5 節補論 A での産業連関表（表 3.3.5-1）に基づき、(3.3.2-8)式に定義される一国経済の電力の EID 指標としての時系列的な推計値を比較したものが図 3.3.3-1 である。最新のベンチマーク年産業連関表となる 2015 年基本表（総務省 2019）の統合小分類（187 分類）に基づく測定では、一国経済の電力 EID は 21.8%と推計される。同基本表における統合中分類（107 分類）に基づく測定でもその推計値は 21.9%とほぼ類似して

おり[47]、電力サービスが商品として分離定義された 100 分類ほどの測定でも十分な測定精度を持っていると評価される。

EID（ε_k）は総供給量（国内生産量と輸入量の合計）に対する輸入量のシェアとして定義されており、国内生産量に対して占める実効輸入比率は$\varepsilon_k/(1-\varepsilon_k)$によって算定される。2015 年における一国経済の電力 EID 推計値（21.8%）は、間接的な電力輸入量が国内生産量の 28.1%に相応することを意味する。日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット（2021）による当該年における電力需要量 1.02 兆 kWh（発電端）によって換算すれば、電力の間接輸入量は 2,900 億 kWh ほどに相応する。言い換えれば、マクロの電力 EID としての 1 ポイントの間接輸入量の拡大は、国内電力需要を 100 億 kWh ほど減少させる効果を持っている。



単位：%。出典：表 3.3.5-1 の接続表および基本表に基づく推計値（ただし 2018 年表のみ経済産業省（2021）による 2015 年基準の延長表に基づく）。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(3.3.2-8)式による。

図 3.3.3-1：一国経済の電力 EID

利用する接続表や統合商品分類に依存して推計値に差異はあるものの、図 3.3.3-1 によればその乖離幅は 1–2 ポイントほどに留まっている。とくに乖離の大きい期間は 2005 年であり、2005–2011–2015 年接続表および 2000–2005–2011 年接続表に基づく当該年次の推計値はそれぞれ 18.0%と 20.3%である。前者の接続表では研究開発が資本化されるなど SNA 基準による概念差もあるが（脚注 61）、産業連関表としての統計概念の変更は最終需要項目における「調整項」の相違にある。輸出品に対して消費税は免税となるが、2011 年表までは輸出品の国内流通に課されている（還付される）消費税分は調

47 2020 年 8 月末に公表された総務省（2020）の 2005–2011–2015 年接続表（105 統合中分類）によっても、電力 EID の 2015 年推計値は 21.9%であり、2015 年基本表（総務省, 2019）による推計値とほぼ等しいことが確認される（図 3.3.3-1）。

整項ベクトルとして輸出ベクトルより別掲されている。しかし 2005–2011–2015 年接続表では、商品別に調整項相当額は輸出に加算され、還付される調整項相当額合計は卸売との交点でマイナス計上するものとなっている。図 3.3.3-1 における 2000–2005–2011 年接続表に基づく推計値では、調整項は輸出ベクトルへと加算されており、(後述する(3)節に測定されるように) 輸出財の電力 EID は相対的に大きいことから、こうした輸出の過大評価は一国経済の電力 EID を過大に評価していると解される[48]。

こうした概念差に基づく断層の存在による 1–2 ポイントほどの測定精度の幅を認識しながらも、統計概念が原則として統一された同一の接続表内において、測定される 3 年あるいは 4 年のベンチマーク年における変動の傾向は、異なる接続表間においても類似することが確認される（図 3.3.3-1）[49]。3.3 節の以下では、接続表 1、4、7、10 および延長表 12（3.3.5 節補論 A の表 3.3.5-1）に基づいた推計値により分析していく。ここでの観察期間となる 1960–2018 年において、大きく 3 つの変動期として、

第 I 期　　：1970 年から 1980 年までの電力 EID 上昇期
第 II 期　　：1980 年から 1995 年までの電力 EID 低下期
第 III 期　　：1995 年から 2018 年までの電力 EID 上昇期

を見いだすことができる。経済統計におけるベンチマーク年として 5 年おきとなる制約はあるものの、日本経済における電力 EID の転換年は 1970 年、1980 年、そして 1995 年である。

第 I 期では、電力 EID は 1960 年代における 10%前半の水準から、高度経済成長の終焉から第一次オイルショックの影響により、1970 年からわずかに 5 年ほどの期間において一気に 20%を超えるまで上昇している。第 II 期は 1980 年からの電力 EID の下降期であり、1995 年には 1960 年代の水準をわずかに下回る 10.3%へと大きく低下した。そして第 III 期では、電力 EID は 1995 年から再び上昇し、2015 年には 21.9%、2018 年には 22.8%へと 1970 年代後半の水準と類似している。

ベンチマーク年および 2018 年の延長年において測定された電力 EID に基づき、それぞれの中間年次は直線補間し、2018 年度以降は固定したものを時系列的な電力 EID の推計値としよう。図 3.3.3-2 では、観察される日本の電力需要実績（a 系列）と、(時系列 EID 推計値に基づく）観察されない間接的な電力輸入量を含む推計値（b 系列）を比較している。日本経済が中間財・最終財の貿易を通じて輸入されたと解される電力量は大きく、電力 EID が上昇へと転じる転換期となる 1995 年度には 1,130 億 kWh、電力需要がピークとなる 2007 年度には 2,850 億 kWh へと拡大し、2020 年度にも 2,950 億 kWh の規模があると解される。

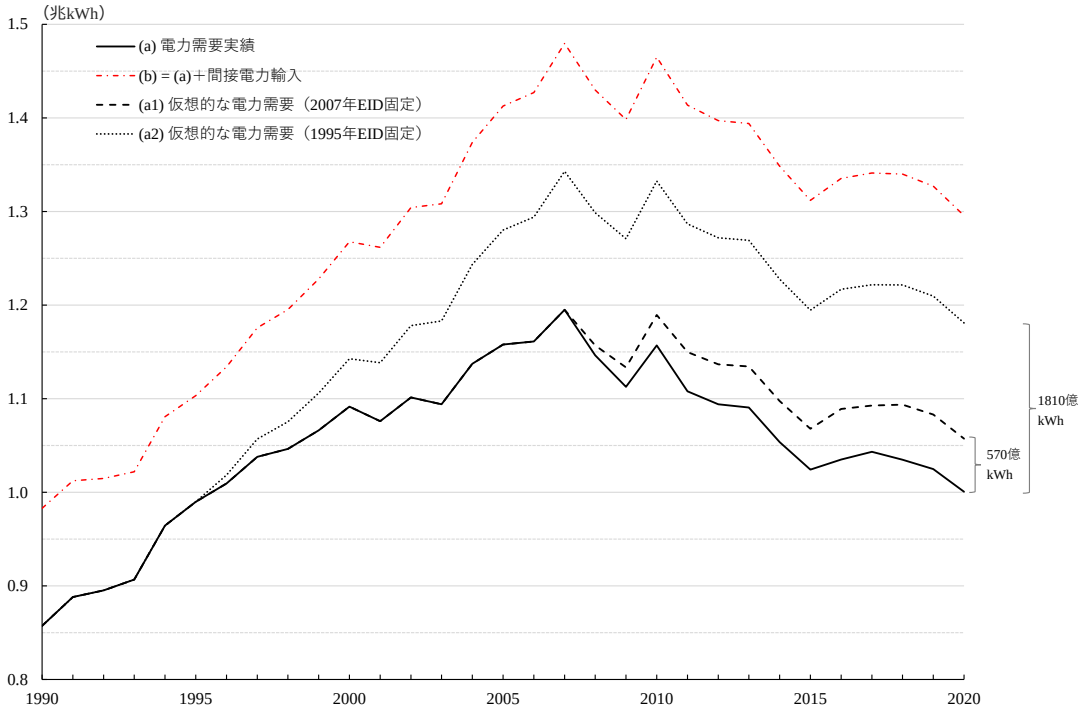
いま仮想的に、2007 年度の電力 EID（19.2%：国内需要量に対して 23.8%）を固定したケースにおける 2020 年度までの電力需要量の推計値を示したものが図 3.3.3-2 の a1

[48] 1989 年に導入された消費税の税率は、ベンチマーク年ごとに 1990 年 3%、1995 年 3%、2000 年 5%、2005 年 5%、2011 年 5%、2015 年 8%である。次節以降、表 3.3.5-1（3.3.5 節補論 A）における接続表 7（1990–1995–2000 年表）が利用される年次では調整項の影響により電力 EID はわずかながら過大に評価されている。しかしトレンドを変えるほどの影響を持たない。

[49] 2 つのベンチマーク年の間における変化としては、1970–75 年における変動がもっとも大きい。同期間における分析として、次節以降では表 3.3.5-1（3.3.5 節補論 A）における接続表 1 と 4 が利用されるが、その接続年となる第一次オイルショックを挟む期間における大きな変動は、表 3.3.5-1 における接続表 3 や長期接続表 2 においても同様であることが確認される(図 3.3.3-1)。

系列である。需要のピークとなる 2007 年度から 2020 年度にかけての電力需要実績の減少幅は 1,950 億 kWh であるが、その 29.2%にあたる 570 億 kWh は間接的な電力輸入量の拡大による影響であると評価される。野心的と思われていた政府見通しを大きく下回って低下した、近年の国内電力需要の低迷（3.3.6 節補論 B）では、間接的な電力輸入拡大の効果によってその 3 割ほどが説明される。

より長期の評価として、間接的な電力輸入率の拡大への転換点となる 1995 年度の電力 EID（10.3%：国内需要実績に対して 11.5%）を固定したもとで、2020 年度までの電力需要量の推計値を評価したものが図 3.3.3-2 の a2 系列である。そうした仮想的な推計値では、2020 年度において実績値を 1,810 億 kWh 上回るものとなり、もし電力 EID の上昇がなければ（2007 年の実績値でのピークと類似する）1.2 兆 kWh の国内需要が存在していたものと解される。第 III 期における電力 EID の拡大は、日本国内の電力需要の減少に対して大きな影響を持っていたことが示唆される。



単位：1 兆 kWh（発電端、自家発電を含む）。注：(a)系列は日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット（2021）による実績値（1990–2019 年度）と資源エネルギー庁による 2020 年度予測値による。(b)および(a1)と(a2)系列の試算は、接続表 1、4、7、10 および延長表 12（3.3.5 節補論 A の表 3.3.5-1）に基づいた電力 EID 推計値からの簡易的な時系列推計値に基づく（なお電力需要量では年度値であるが、ここでは暦年値の電力 EID 推計値を近似として対応づけている）。

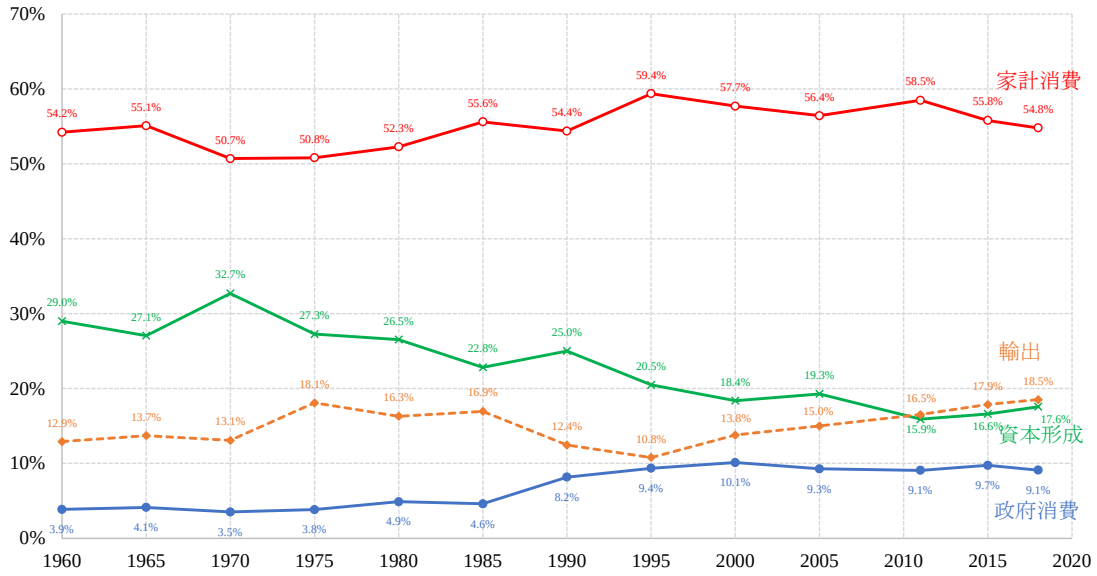
図 3.3.3-2：電力需要の実績と間接的な電力輸入

(2) 最終需要項目別 UDS

図 3.3.3-3 は(3.3.2-7)式に基づく、電力の波及生産量における最終需要項目別 UDS としての長期的な推移を示している。測定に利用される産業連関表は、接続表 1、4、7、10 および延長表 12（3.3.5 節補論 A の表 3.3.5-1）である。電力 UDS 指標では、電力の

すべての波及生産はそれを誘発する究極的な最終需要としての源泉に紐づけられるが、日本経済では長期的に安定して家計消費が最大の誘発要因となっている。

直接的に観察される電力消費としては、2015 年基本表ではその 26.3%が家計によって消費され、残りの 73.4%は産業における中間消費、0.3%は輸出（直接購入）である。電力がいかに家計消費を支えているものか、直接観察されるそれは過少評価を導くだろう。電力 UDS では、産業における電力の中間消費量（全体の 73.4%）はさらにそれを誘発する最終需要へと遡って紐づけられ、究極的な生産誘発先としての家計消費への依存度は直接消費シェア（26.3%）の 2 倍を超える 55.8%に上る。高度経済成長期を含む長期にわたる観察期間において、サービス化の進行など需要構造の変化も大きいが[50]、図 3.3.3-3 にみるように家計消費によって誘発される電力生産のシェアは、高度経済成長期を含めて 50–60%と安定している。



単位：%。出典：表 3.3.5-1 の接続表（1,4,7,10）および延長表（12）に基づく推計値。
注：最終需要項目別電力 UDS の定義は(3.3.2-7)式による。

図 3.3.3-3：最終需要項目別の電力 UDS

教育や医療サービスなど、地方政府や中央政府によって提供されるサービス生産およびその波及生産における電力消費は、ここでの最終需要項目別 UDS においては政府消費に計上されており、公務サービスによる直接・間接の電力消費とともに、近年ではそれは一国全体の電力需要の 10%ほどを誘発する要因となっている。家計消費と政府消費の合計によっては、一国経済における電力生産はその 3 分の 2 ほどが消費による誘発である。言い換えれば、電力コストが増大するならば、（価格上昇が完全に転嫁されるもとでは）究極的にはその 3 分の 2 が家計による財・サービスや公共サービスの消費を通じて負担されることを意味している。再エネ拡大による家計の負担は、こうした財・サービスへの価格転嫁を通じ、さらには産業競争力の喪失と所得低下を通じて、直接的な FIT 賦課金の負担をはるかに上回るものとなる。

50 消費構成としてのサービス化の影響は大きい。家計消費総額に占めるサービス消費のシェアは 1960 年の 48.4%から 2015 年には 80.0%へと拡大している。

日本経済における資本形成は、金額では近年でも輸出を 60%ほど上回るものの、電力 UDS では輸出によるそれを下回る。そのことは平均的な輸出財の生産が、(平均的な資本財に比して) 直接・間接的により電力多消費的であることを意味している。そのことは、規制的な性格を強める省エネ政策や電力の価格高騰や安定供給への懸念は、国際競争力の毀損へと直接的に結びつきやすいことを示唆している。2015 年では、日本における電力の波及生産量の 17.9% (国内電力消費量の 15.2%) は輸出需要によって誘発されたものと評価される[51]。

長期傾向として、資本形成による電力 UDS は第 II 期および第 III 期においてほぼ一貫して低下し、その反面、第 II 期において家計消費や政府消費による電力 UDS は拡大している (図 3.3.3-3)。とくに家計消費では 1975 年から 1995 年にかけて誘発依存度は 50.8%から 59.4%まで上昇し、政府消費では 1985 年から 1995 年まで 4.6%から 9.4%へ倍増している[52]。最終需要項目別 UDS の長期的な変動は、第 II 期におけるこうした投資から消費への 14 ポイントほどのシフトによって特徴づけられる。また第 III 期では輸出の電力 UDS の拡大も大きい。輸出による電力 UDS は (1985 年の 16.9%から) 1995 年の 10.8%まで低下するが、その後に上昇へと転じ、2011 年には資本形成の電力 UDS を超えるものとなった。

(3) 最終需要項目別 EID

最終需要項目別の電力 EID の推計値は図 3.3.3-4 に示されている。それは最終需要ごとの複合財 (商品群) としての実効輸入依存度を評価している。最終需要項目別にみれば、資本形成と輸出という複合財の電力 EID は消費 (家計消費および政府消費) による同指標を安定的に上回っている。その順位には変動もあるが、1990 年以降では資本形成における電力 EID がもっとも高く、輸出、家計消費、政府消費の順となる。

2015 年には資本形成の電力 EID は 35.6%であり、同年における家計消費の電力 EID (16.9%) に比して、間接的な電力輸入に対する依存度として 2 倍以上の差異がある。こうした差異は国内生産されるサービスの占めるシェアなど、それぞれの需要における商品構成の相違を反映したものと考えられる[53]。また最終需要項目別の電力 EID としての差異 (図 3.3.3-4) を前提とすれば、第 II 期において観察される投資から消費への電力 UDS シフト (図 3.3.3-3) も、一国経済の電力 EID の低下を促進させる効果を持っていたことを意味している。

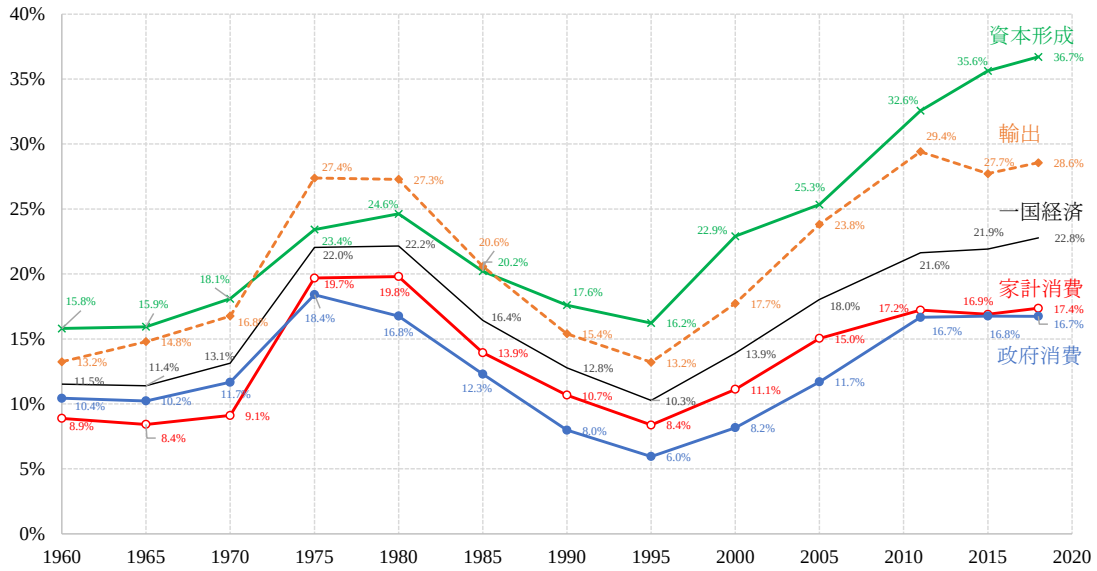
(1)節で定めた一国経済の電力 EID における 3 つの大きな変動期は最終需要項目別にも同様に見いだされる (図 3.3.3-4)。後述する(4)節での測定によれば、同様な変動は商品レベルでも見いだされるが、電力 EID におけるこうした変動は、大きくは日本経済におけるマクロ的な輸入比率の推移に依存している。図 3.3.3-5 では一国経済の電力

[51] 産業連関表付表における最終需要項目別生産誘発依存度 (電力の国内生産量を分母とする) によれば、2015 年基本表付表 (統合小分類) では家計外消費支出 (本節の測定では内生化されている) により 2.5%、家計消費 60.1%、政府消費 9.8%、資本形成 12.4%、輸出 15.2%である。後述のように資本形成では相対的に電力の間接輸入量が大きく、電力の波及生産量による本節での定義 ((3.3.2-7)式) では、資本形成による電力 UDS がより大きく評価される。

[52] 1993SNA への準拠により、政府消費の拡大には社会資本の固定資本減耗の計上による影響も含まれている。

[53] 商品別の電力 EID の傾向は 3.3.3(4)節で測定される。

EID の推移とともに、マクロ的に定義した輸入比率を比較している。電力 EID における 3 つの転換年（1970 年、1980 年、1995 年）は輸入比率におけるそれと一致する。電力 EID が急上昇した第 I 期（1970–80 年）、発電の 7 割以上を石油火力に依存していた日本経済は、第一次オイルショックの影響により電力価格が 3 倍以上へ急騰することを余儀なくされ、電力 EID は輸入比率に比してより大きく上昇している。オイルショックの影響は世界的に大きいものの、1960 年代における原油価格安定を背景として石油依存度を大きく高めていた日本経済では、この期間に電力多消費的な中間財において国内生産から輸入への切り替えが急速に進行したことを示している。



単位：%。出典：表 3.3.5-1 の接続表（1,4,7,10）および延長表（12）に基づく推計値。
注：最終需要項目別電力 EID の定義は(3.3.2-12)式による。

図 3.3.3-4：最終需要項目別の電力 EID

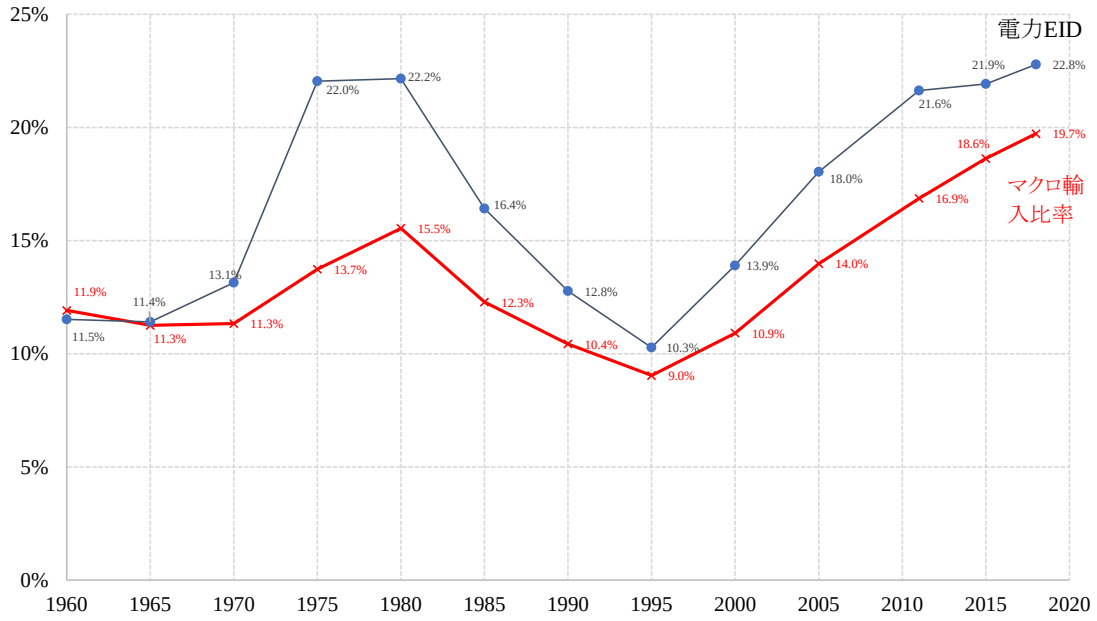
その後の電力 EID が低下する第 II 期（1980–95 年）でも、電力 EID の低下は輸入比率のそれを上回るスピードで進行した。1970 年代に上昇を続けた電力価格は、1980 年を境にしてほぼ横ばいになり、1985 年度から 2007 年度までの間に電灯・電力平均で約 3 割低下している（資源エネルギー庁 2020a）。企業努力による電力価格の低廉化の実現は、この期間の日本経済の電力 EID を低下させた大きな要因であったと考えられる。

また第 II 期は、電力供給の安定性が大きく改善した時期としても高く評価される。石油からの代替が求められる日本経済は、1970 年にはわずかに 1.5%の発電シェアであった LNG 火力は、1980 年には 15.4%、1995 年には 22.4%へ拡大している[54]。また原子力発電は、同期間に 1.6%から 16.9%、そして 34.0%にまでの拡大に成功している。

低圧電灯需要家一軒あたりの年間停電時間によっても、1980 年度の 237 時間（年間停電回数では 1.38 回）から 1995 年度には 10 時間（年間停電回数では 0.20 回）へと劇

[54] 1959 年に「メタン・パイオニア号」が米英間の LNG 海上輸送に成功し、天然ガスの液化技術および LNG の液化輸送技術が実用段階に至った。東京ガスと東京電力によれば、両社が 1967 年 3 月にアラスカ LNG プロジェクトからの導入を契約し、東京ガス根岸工場と東京電力南横浜火力発電所からなる両社の共同基地である根岸基地（横浜市磯子区）にアラスカから LNG 船「ポーラアラスカ号」が入船し、日本で初めて LNG が導入されたのは 1969 年 11 月 4 日である。

的な改善を実現している[55]。安定供給の実現による電力 EID への影響を数量的に評価することは困難であるが、長期にわたる安定供給への取り組みによる電力サービスとしての質的改善に向けた電気事業者の企業努力が、国内電力消費における価格上昇や安定供給への懸念を後退させ、第 II 期にはマクロ的な輸入比率低下の影響を上回る電力 EID 低下の実現に寄与したと考えられる[56]。



単位：%。出典：表 3.3.5-1 の接続表（1,4,7,10）および延長表（12）に基づく推計値。
注：ここでのマクロの輸入比率は、輸入／（家計消費＋政府消費＋資本形成）によって定義している。

図 3.3.3-5：マクロ輸入比率と電力 EID

電力 EID が再上昇する第 III 期（1995–2018 年）では、基調としてのマクロの輸入比率は 9.0%から 19.7%にまで増加している。一国経済の電力 EID は、その前半期（1995–2005 年）には輸入比率の上昇を超えるようなスピードで上昇し、その後半期（2005–18 年）ではむしろその逆の推移となる（図 3.3.3-5）。図 3.3.3-4 に示される最終需要項目別の電力 EID によれば、第 III 期では資本形成における上昇がもっとも顕著

[55] 資源エネルギー庁（2020a）による 10 電力会社合計値（元データは電気事業連合会「電気事業のデータベース」）による（1988 年までは沖縄電力を除く）。そのデータの開始年次となる 1966 年度では年間停電時間 701 分（年間停電回数では 4.85）であり、1990 年代半ばまで大きく改善した後は、台風や東日本大震災などの一次的な悪化を除くと、年間停電時間としてはほぼ横ばいとなり安定的な電力供給が継続している。

[56] 第 II 期には国内電力価格の低下が実現するものの、その一方では円高傾向も続いており、ドル建てによる評価によれば、むしろ日本の電力価格は上昇したと評価される。Jorgenson, Nomura and Samuels（2016）によれば、電力・ガスの投入価格における日米格差は 1955 年から長期にわたり一貫して 2 倍以上である（米国内における生産地での電力価格が安価であることを考慮すれば、生産活動における電力投入価格差はさらにその倍以上とみなされる）。1970 年には 2.1 倍の価格差であるが、第 II 期の転換年となる 1980 年には 3.5 倍にも日米価格差が拡大し、そして 1995 年にはさらに 3. 9 倍へと拡大している。国際競争の観点によれば、第 II 期における電力 EID 低下の加速は、質の高い電力の安定供給の実現がより大きな要因であったと考えられる。

である。資本形成による電力 EID は 1970 年代半ばの水準（25%ほど）から 2015 年には 35.6%（2018 年では 36.7%）へと大きく上昇しており、家計消費による電力 EID は再上昇後の 2015 年の 16.9%（2018 年の 17.4%）においても 1970 年代半ばの 20%弱を下回っていることと対照的である。

こうした資本形成における電力 UDS と EID の変化は、一国経済の電力 EID の変動に顕著な影響を与えている。表 3.3.3-1 では(3.3.2-14)式に基づき、一国経済の電力 EID の変化に対する最終需要項目別の EID と UDS における変化要因への分解を示している。表 3.3.3-1 の右ブロックに示された最終需要別 UDS 変化による寄与度は総計として小さいが、資本形成の電力 UDS の低下はいずれの期間においても一国経済の電力 EID を 1 ポイントほど低下させる影響を持っている。第 III 期では、とくにその後半期（2005–18 年）におけるマイナスの寄与度が▲0.5 ポイントと大きい。この期間、最終需要としての資本形成自体の金額シェアはほぼ横ばいであるから、資本形成の電力 UDS の減少は資本財構成として相対的にエネルギー多消費的な商品の縮小を示唆している。

また EID の変化による最終需要項目別寄与率（表 3.3.3-1 の中央のブロックの括弧内）によれば、第 I 期と第 II 期では、EID 変化率は逆方向（一国経済の電力 EID として第 I 期では 9.0 ポイントの上昇、第 II 期では 11.9 ポイントの低下）であるが、その最終需要項目別の寄与率は、家計消費では 60%ほど、資本形成では 20%ほど、輸出では 17%と類似している。しかし第 III 期では家計消費の EID による寄与率は 42%へと低下し、それに替わって資本形成における EID の寄与率が 32%へと拡大した。このことは資本財構成として、電力の実効輸入依存度の高い資本財へとシフトしたことを反映している。

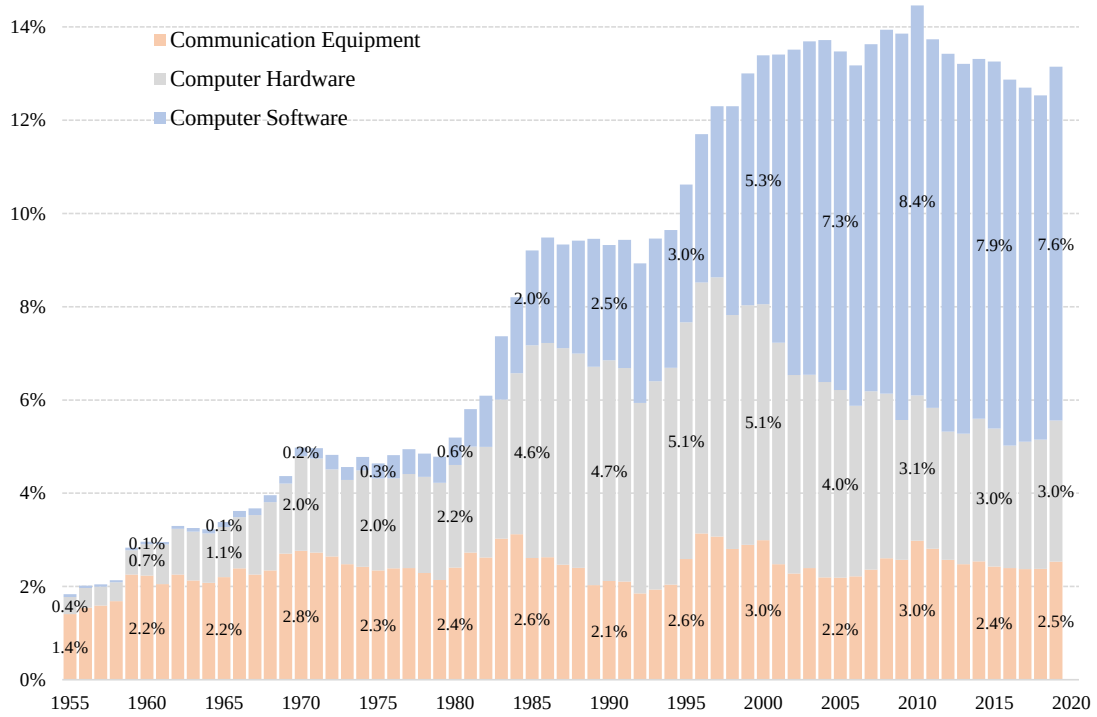
表 3.3.3-1：一国経済の電力 EID の変化要因

		一国経済 EID変化	最終需要別EID変化の寄与度					最終需要別UDS変化の寄与度				
			家計消費	政府消費	資本形成	輸出	計	家計消費	政府消費	資本形成	輸出	計
第I期	1970–1980	9.0	5.5	0.2	1.9	1.5	9.2	0.2	0.2	-1.3	0.7	-0.2
			(0.60)	(0.02)	(0.21)	(0.17)	(1.00)					
第II期	1980–1995	-11.9	-6.4	-0.8	-2.0	-1.9	-11.0	1.0	0.5	-1.2	-1.1	-0.8
			(0.58)	(0.07)	(0.18)	(0.17)	(1.00)					
第III期	1995–2018	12.5	5.1	1.0	3.9	2.2	12.3	-0.6	0.0	-0.8	1.6	0.2
			(0.42)	(0.08)	(0.32)	(0.18)	(1.00)					
前期	1995–2005	7.8	3.9	0.5	1.8	1.4	7.6	-0.3	0.0	-0.2	0.8	0.2
			(0.51)	(0.07)	(0.24)	(0.18)	(1.00)					
後期	2005–2018	4.7	1.3	0.5	2.1	0.8	4.6	-0.3	0.0	-0.5	0.9	0.1
			(0.28)	(0.10)	(0.45)	(0.17)	(1.00)					

単位：パーセンテージ・ポイント（年平均成長率）。注：表 3.3.5-1 における 1、4、7、10 の接続表および 12 の延長表に基づく推計値。分解は(3.3.2-14)式に基づく。括弧内は電力 EID の変化による寄与度に対する最終需要項目別寄与率。

資本形成の電力 UDS や EID にみられるこうした特性は、1990 年代後半より顕著となった情報通信投資（IT 投資）のシェア拡大に起因している。図 3.3.3-6 は日本経済の総固定資本形成全体に占める IT 投資の名目シェアの長期変遷を示している。1980 年代半ばからの 10 年間では同シェアは 10%ほどと安定的であるものの、第 III 期の転換年である 1995 年から 2010 年にかけて IT 投資シェアは 15%ほどまで大きく拡大した。その

構成をみれば、コンピュータや情報通信機器における価格低下の加速を受けてハードウェアの名目シェアが低下するなかで、コンピュータソフトウェアの占めるシェアが拡大している。2000 年代半ば以降では、ソフトウェアへの投資はハードウェアへの投資シェアを逆転する。こうした資本財構成としての変化は、資本形成の電力 UDS を低下させ（図 3.3.3-3）、その電力 EID を上昇させる効果を持っている（図 3.3.3-4）。



単位：%（一国経済の総固定資本形成全体に占める名目シェア）。出典：内閣府経済社会総合研究所（2020）、KEO Database 2021, Asian Productivity Organization （2021）による長期遡及推計値に基づき作成。

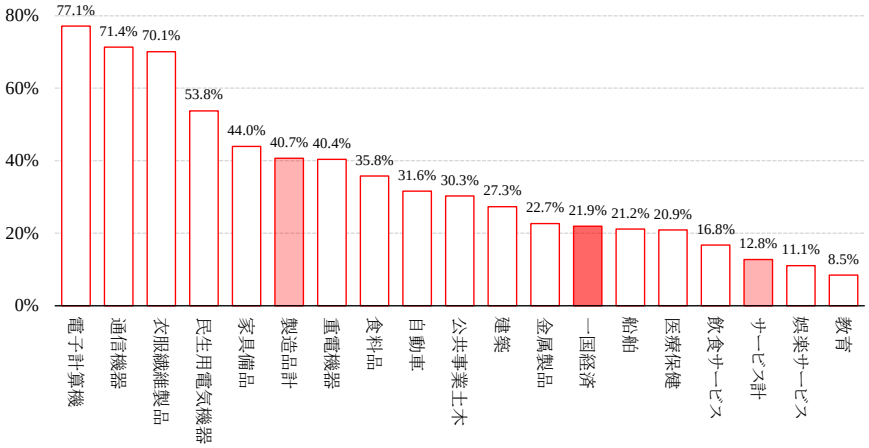
図 3.3.3-6：資本形成における情報通信投資シェア

(4) 商品別 EID

前節における最終需要別電力 EID は、個別財や個別サービスにおける電力の実効輸入依存度の変化のみではなく、財・サービスの需要構成としての変化を反映したものであった。表 3.3.3-1 では一国経済の電力 EID 変化における最終需要項目別の要因分解をおこなったが、さらにそれを商品別におこなうことは接続表の商品分類が時系列的には異なることから困難である。ここでは近似的に時系列的な比較が可能となる商品（最終財）を抽出し、その商品ごとの電力 EID/UDS の測定を通じてマクロ的な電力 EID

の変化要因へと接近していく[57]。比較される代表的な消費財と資本財のそれぞれについて、商品別電力 EID の推計値は図 3.3.3-9 および図 3.3.3-10 に、商品別電力 UDS は図 3.3.3-11 および図 3.3.3-12 においてその推移を示している。また図 3.3.3-13 および図 3.3.3-14 では、製造品全体（すべての財の複合財）とサービス全体（すべてのサービスの複合財）という商品群としての評価をおこなっている。それぞれの計数は表 3.3.3-2 を参照されたい[58]。

商品レベルの測定によっていくつかの特性が見いだされる。第一に、商品別の電力 EID の跛行性は大きい。ベンチマーク表による 2015 年の推計値によれば、図 3.3.3-7 に示されるように、ここで特掲する商品では最大となる 77.1%（電子計算機）から 8.5%（教育）まで実効電力輸入依存度には大きな乖離がある。その序列は、おおまかには貿易財となる財からサービスへと並ぶが、製造品全体としての電力 EID は 40.7%と、一国経済の水準（21.9%）を大きく上回る。サービスでは最終需要における直接的な輸入は（直接購入を除き）ゼロであるが、その生産波及により輸入される財生産における電力消費量を反映してサービス全体の電力 EID は 12.8%となり、製造品全体の 3 分の 1 ほどの水準にある。ここで比較されるサービス内では、医療保健サービスの電力 EID が 20.9%ともっとも高く、最低となる教育サービスの 8.5%との乖離も大きい。



単位：%。出典：表 3.3.5-1 の接続表 10 に基づく推計値。注：商品別 EID の定義は(3.3.2-12)式による。

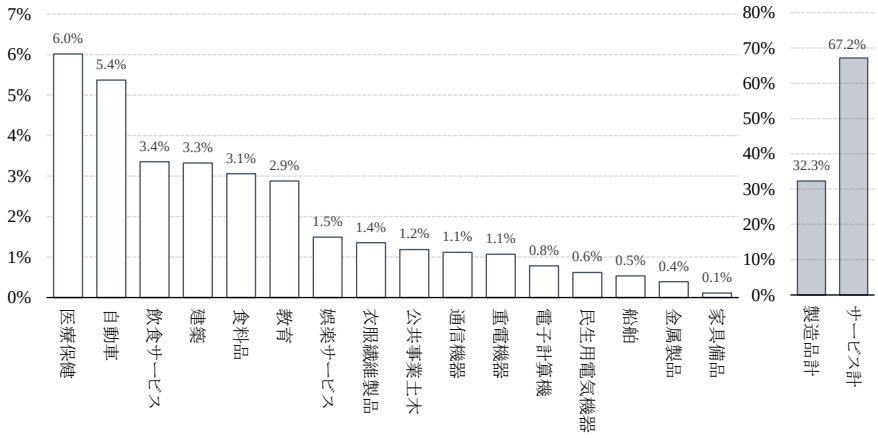
図 3.3.3-7：電力 EID の商品別比較（2015 年）

[57] 本節における商品レベルでの測定も接続表 1、4、7、10 および延長表 12（3.3.5 節補論 A の表 3.3.5-1）に基づくが、接続表間における商品分類の対応関係には不整合が残されている。接続表 7 と接続表 10 では同じ分類数（105 統合中分類）でもその定義には相違があり、たとえば前者の通信機器は後者では通信・映像・音響機器となるなどカバレッジが異なっている。こうした時系列比較の困難性による測定誤差は、電力 EID（図 3.3.3-9 および図 3.3.3-10）ではあまり大きなものではないと考えられるが、そのボリュームを反映する電力 UDS（図 3.3.3-11 および図 3.3.3-12）では影響はより大きい。

[58] 消費財と資本財の区分は商品固有の特性ではなく、ここでのグループ定義は便宜上のものである。たとえば、消費財（図 3.3.3-9 および図 3.3.3-11）に属する家具備品には民間企業や政府による総固定資本形成や輸出向けを含むものであり、資本財（図 3.3.3-10 および図 3.3.3-12）に属する自動車には家計消費や輸出向けを含んでおり、商品別電力 UDS の測定値では商品ごとにすべての最終需要（家計消費、政府消費、資本形成および輸出）を対象としている。

第二に、電力生産を誘発する究極的な最終需要としての源泉はサービスが主である。貿易されないサービスでは電力 EID 指標は製造品に比して低いものの（図 3.3.3-7)、電力 UDS 指標によってその需要構成をみれば、2015 年では一国全体の電力生産（波及生産量)のうち 67.2%がサービス需要に紐づけられると評価される。図 3.3.3-8 では 2015 年における電力 UDS を商品別に比較している。とくに現在では電力需要の源泉としてそのトップに位置づけられる商品は医療保健サービス（介護を含む）であり、その電力 UDS は 2015 年では 6.0%と自動車の 5.4%を超えている。医療保健サービスは、電力需要に対する影響力も大きく、またサービスの中では実効輸入依存度が高いことが特徴である。

日本経済におけるサービス化の進行は、電力 UDS の変化にも見いだされる。製造品とサービスの全体的傾向を示した図 3.3.3-14 によれば、電力 UDS としてのサービスへの依存はとくに第 II 期に拡大しており、第 III 期となる 1995 年以降では微減している。商品別にみても、自動車の電力 UDS が 1970 年代から 5%ほどでほぼ横這いであるのに対して（図 3.3.3-12)、医療保健サービスでは 1970 年代半ばから大きく上昇し（図 3.3.3-11)、1995 年には自動車を逆転している。電力の究極的な需要先としてのサービス化の進行は、第 II 期における一国経済の電力 EID の低下を加速させる要因となっている。



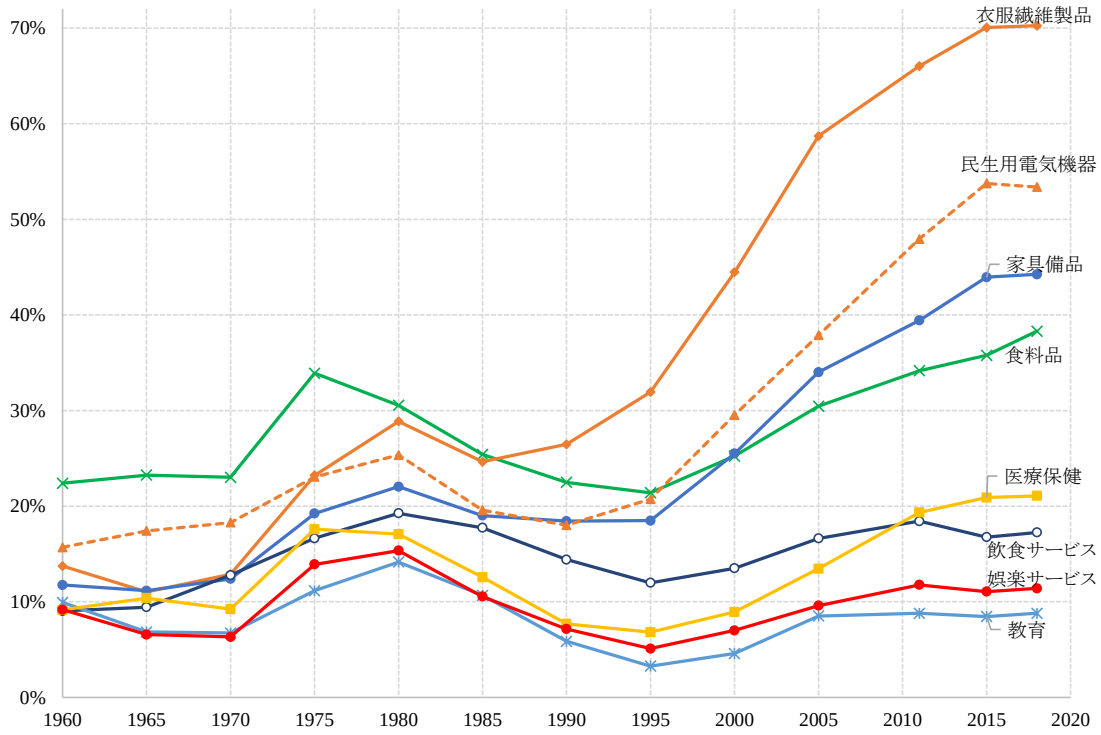
単位：%。出典：表 3.3.5-1 の接続表 10 に基づく推計値。注：商品別電力 UDS の定義は(3.3.2-7)式。

図 3.3.3-8：電力 UDS の商品別比較（2015 年）

第三に、一国集計レベル（(1)節の図 3.3.3-1）および最終需要項目レベル（(3)節の図 3.3.3-4）で観察される電力 EID における三期間ごとの変動は、図 3.3.3-9 および図 3.3.3-10 における商品レベルの測定においてもおおむね同様に観察される。それは日本経済の電力 EID の変化としてのマクロ的な傾向は、需要構造の変化よりも、主として商品レベルでの実効輸入依存度の変化に起因することを意味する。3 つの変動期ごとの、商品別の電力 EID（横軸）と UDS（縦軸）の推移は、それぞれ図 3.3.3-15、図 3.3.3-16 そして図 3.3.3-17 にプロットされている。三期間のいずれも、電力 EID の変化方向は商品別にほぼ同一である。第 I 期における例外的な商品は電子計算機であり、そこでは

大型コンピュータなどにおける国産率の上昇を反映するが（図 3.3.3-15）、第 III 期の再上昇期では本節で抽出したすべての商品に共通して電力 EID の上昇が見いだされている（図 3.3.3-17）。第 III 期後半には、マクロ的な電力 EID 上昇は減速するが（図 3.3.3-5）、通信機器や電子計算機、家具備品など電力 EID の上昇を継続している商品も多い。

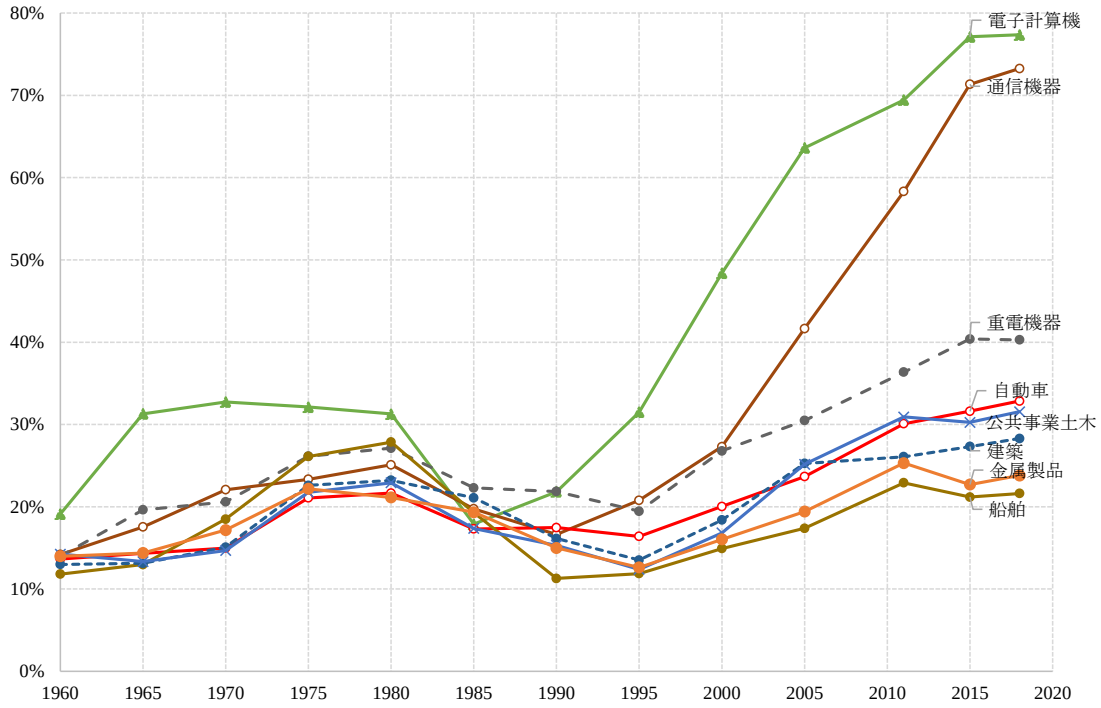
第四に、3 つの変動期において商品レベルでも類似した傾向を示すものの、電力 EID 変化の転換年には商品ごとの相違がある。電力 EID が低下する第 II 期から、再上昇へと転じた第 III 期に入る転換年はマクロ的には 1995 年となるが、衣服・繊維工業製品（図 3.3.3-9）や電子計算機・同付属装置（図 3.3.3-10）では、第 II 期でも電力 EID が低下するのは 1980–85 年のみであり、1985 年以降では 40 年間にわたり継続して上昇している。こうした商品では財の輸入比率が大きく上昇しており[59]、2015 年では両商品ともにその最終需要によって誘発される電力需要の 7 割以上が間接輸入に依存する。民生用電気機器（図 3.3.3-9）や通信機器（図 3.3.3-10）では上昇へと転じる時期はそれにわずかに遅れるが、1990 年には上昇へと転じており、電力 EID は 1980 年代の 20%ほどの水準から 2015 年にはそれぞれ 50%と 70%を超える水準にまで上昇している。



単位：%。出典：表 3.3.5-1 の接続表（1、4、7、10）および延長表（12）に基づく推計値。注：商品別電力 EID の定義は(3.3.2-12)式。

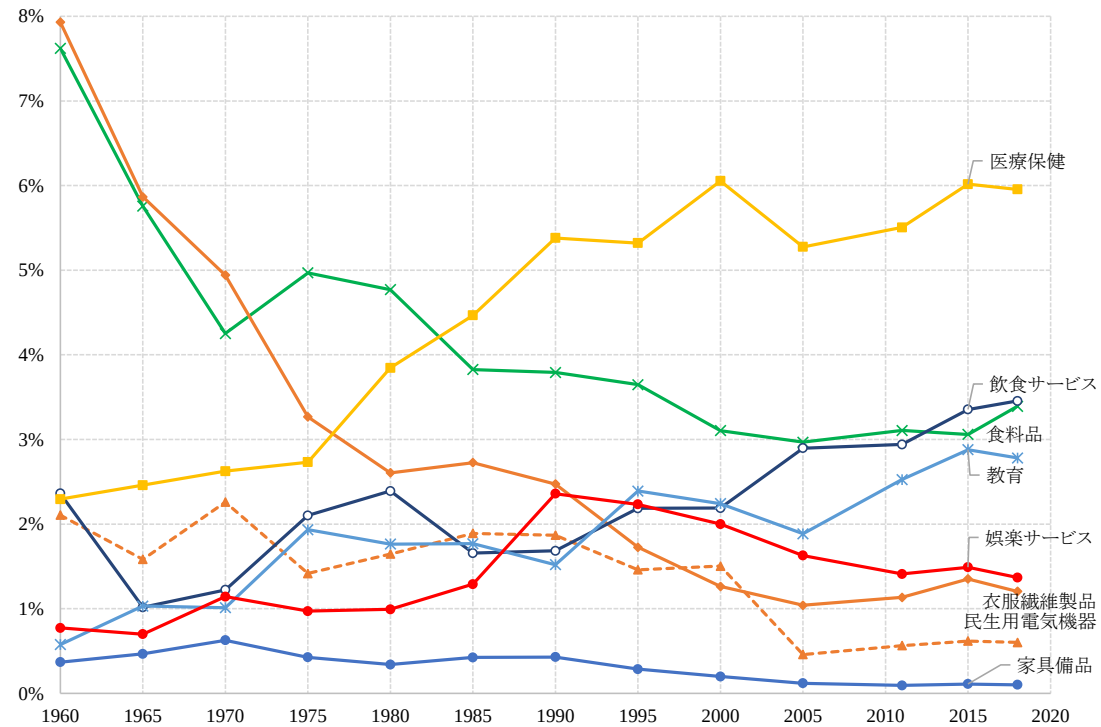
図 3.3.3-9：消費財の商品別電力 EID

59 衣服・繊維工業製品と電子計算機・同付属装置の輸入係数は、2015 年ではそれぞれ 63.7%と 69.0%（接続表 10）であり、1985 年でのそれぞれ 8.5%および 6.9%（接続表 4）から大きく上昇している。両商品ともに、電力 EID としての評価では 1985 年時点の 20%ほどの電力の間接輸入の存在により、輸入係数自体の変化よりも穏やかになっている。



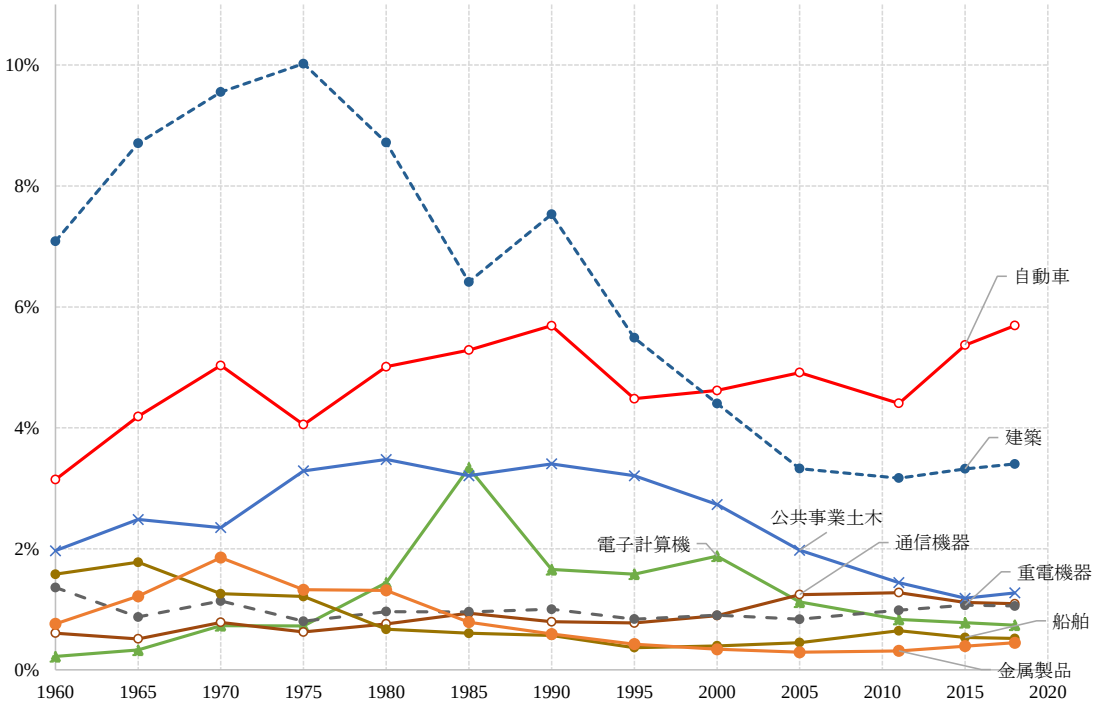
単位：%。出典：表 3.3.5-1 の接続表（1、4、7、10）および延長表（12）に基づく推計値。注：商品別電力 EID の定義は(3.3.2-12)式。

図 3.3.3-10：資本財の商品別電力 EID



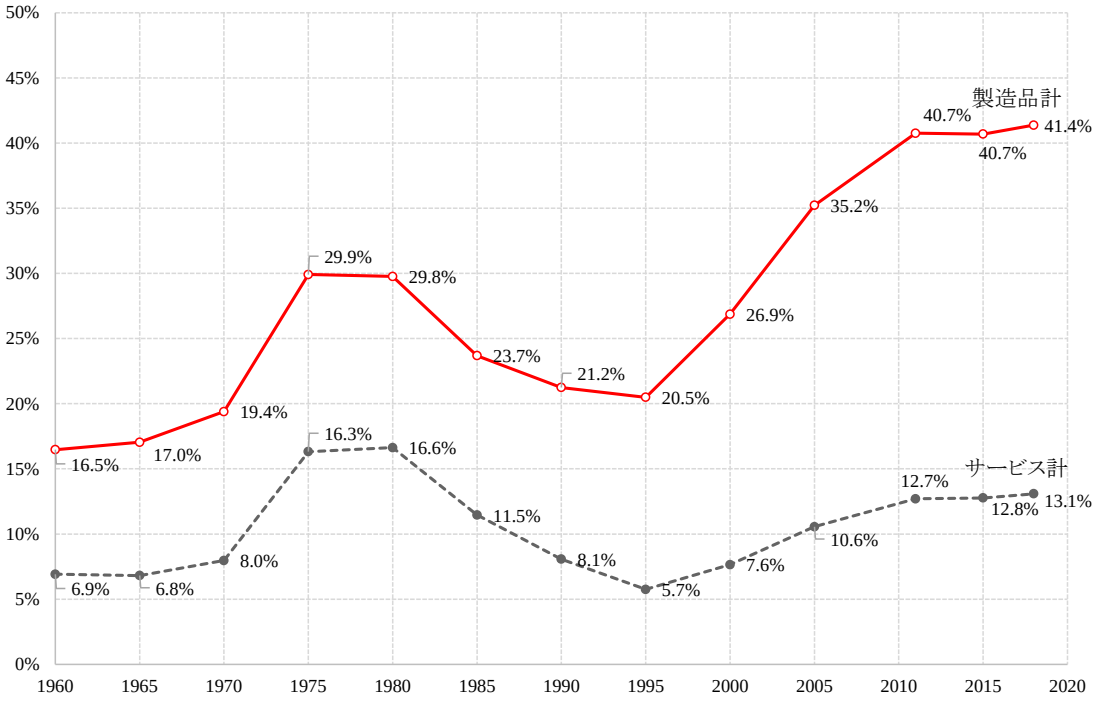
単位：%。出典：表 3.3.5-1 の接続表（1、4、7、10）および延長表（12）に基づく推計値。注：商品別電力 UDS の定義は(3.3.2-7)式。

図 3.3.3-11：消費財の商品別電力 UDS



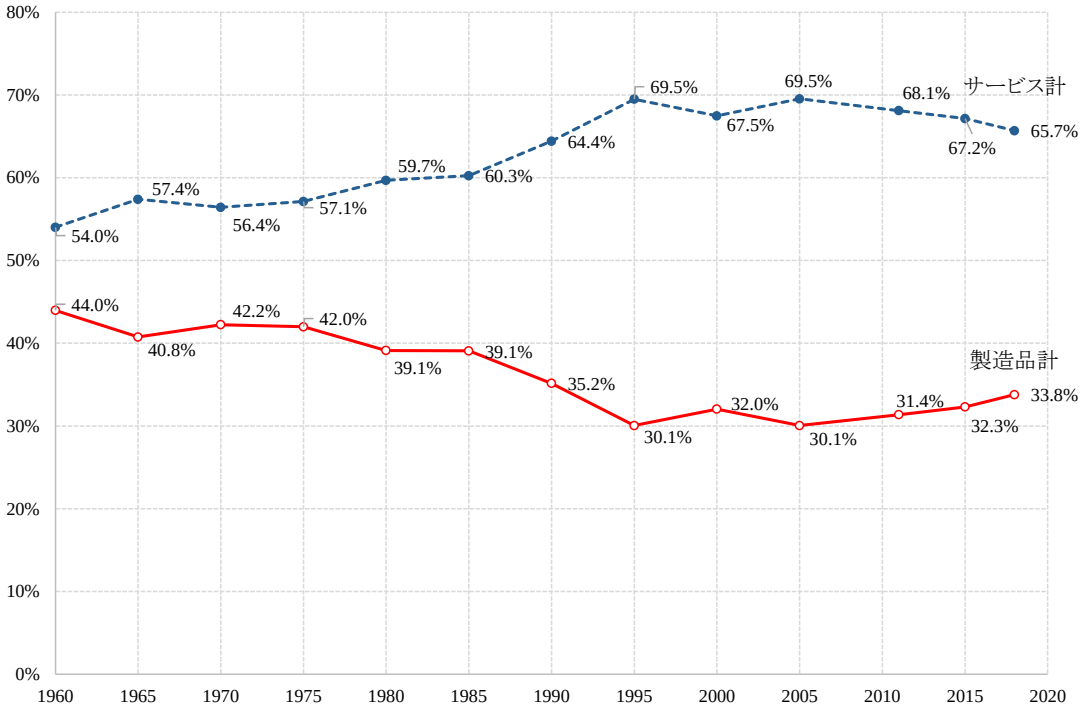
単位：%。出典：表 3.3.5-1 の接続表（1、4、7、10）および延長表（12）に基づく推計値。注：商品別電力 UDS の定義は(3.3.2-7)式。

図 3.3.3-12：資本財の商品別電力 UDS



単位：%。出典：表 3.3.5-1 の接続表（1、4、7、10）および延長表（12）に基づく推計値。注：商品別電力 EID の定義は(3.3.2-12)式。

図 3.3.3-13：集計財と集計サービスの電力 EID



単位：%。出典：表 3.3.5-1 の接続表（1、4、7、10）および延長表（12）に基づく推計値。注：商品別電力 UDS の定義は(3.3.2-7)式。

図 3.3.3-14：集計財と集計サービスの電力 UDS

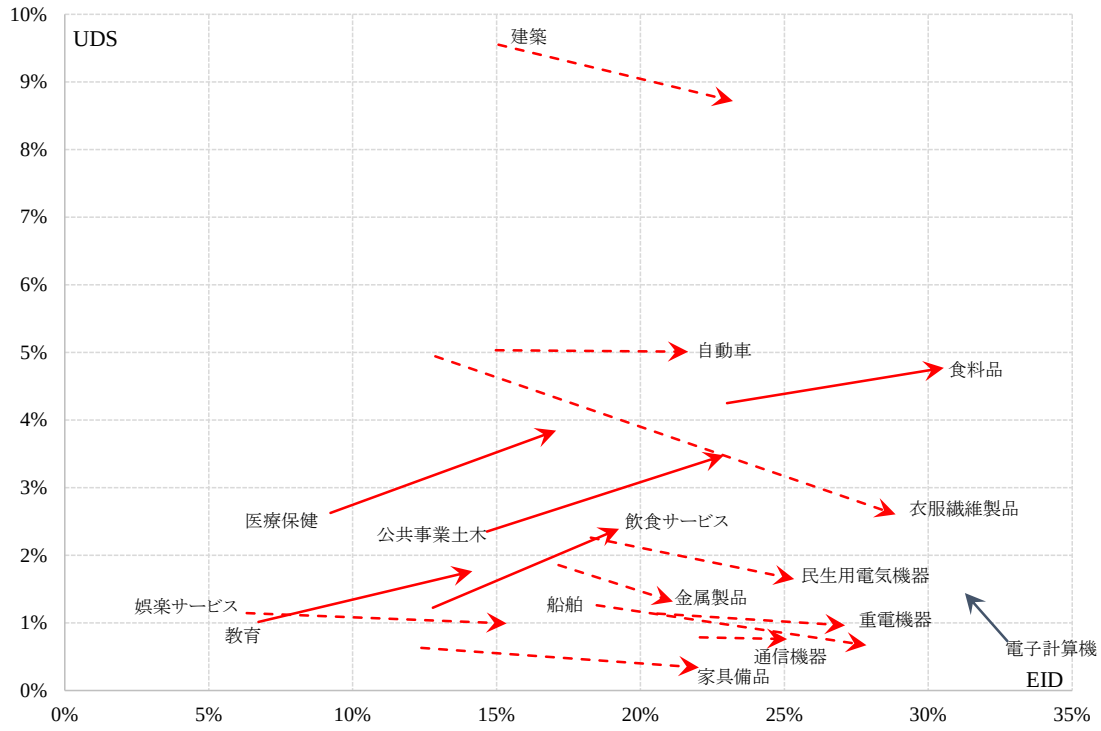
表 3.3.3-2：商品別電力 EID/UDS

	食料品		衣服繊維製品		家具備品		民生用電気機器		医療保健		教育	
	EID	UDS	EID	UDS	EID	UDS	EID	UDS	EID	UDS	EID	UDS
1960	22.4	7.6	13.7	7.9	11.8	0.4	15.7	2.1	9.1	2.3	9.9	0.6
1965	23.2	5.8	11.0	5.9	11.2	0.5	17.4	1.6	10.4	2.5	6.8	1.0
1970	23.0	4.3	12.9	4.9	12.4	0.6	18.3	2.3	9.2	2.6	6.7	1.0
1975	33.9	5.0	23.2	3.3	19.2	0.4	23.1	1.4	17.6	2.7	11.2	1.9
1980	30.5	4.8	28.9	2.6	22.0	0.3	25.3	1.6	17.1	3.8	14.2	1.8
1985	25.4	3.8	24.6	2.7	19.0	0.4	19.6	1.9	12.6	4.5	10.7	1.8
1990	22.5	3.8	26.5	2.5	18.4	0.4	18.0	1.9	7.7	5.4	5.9	1.5
1995	21.4	3.6	31.9	1.7	18.5	0.3	20.7	1.5	6.8	5.3	3.3	2.4
2000	25.2	3.1	44.5	1.3	25.5	0.2	29.5	1.5	8.9	6.1	4.6	2.2
2005	30.5	3.0	58.7	1.0	34.0	0.1	37.9	0.5	13.5	5.3	8.5	1.9
2011	34.2	3.1	66.0	1.1	39.4	0.1	47.9	0.6	19.3	5.5	8.8	2.5
2015	35.8	3.1	70.1	1.4	44.0	0.1	53.8	0.6	20.9	6.0	8.5	2.9
2018	38.3	3.4	70.3	1.2	44.2	0.1	53.4	0.6	21.1	6.0	8.8	2.8

	娯楽サービス		飲食サービス		金属製品		電子計算機		通信機器		重電機器	
	EID	UDS	EID	UDS	EID	UDS	EID	UDS	EID	UDS	EID	UDS
1960	9.2	0.8	9.0	2.4	14.0	0.8	19.1	0.2	14.2	0.6	14.0	1.4
1965	6.6	0.7	9.4	1.0	14.4	1.2	31.3	0.3	17.5	0.5	19.6	0.9
1970	6.3	1.1	12.8	1.2	17.2	1.9	32.7	0.7	22.1	0.8	20.6	1.1
1975	13.9	1.0	16.6	2.1	22.2	1.3	32.1	0.7	23.3	0.6	26.1	0.8
1980	15.4	1.0	19.3	2.4	21.1	1.3	31.3	1.4	25.1	0.8	27.1	1.0
1985	10.5	1.3	17.7	1.7	19.3	0.8	17.9	3.3	19.7	0.9	22.3	1.0
1990	7.2	2.4	14.4	1.7	15.0	0.6	21.8	1.7	16.6	0.8	21.9	1.0
1995	5.1	2.2	12.0	2.2	12.6	0.4	31.5	1.6	20.8	0.8	19.4	0.8
2000	7.0	2.0	13.5	2.2	16.0	0.3	48.4	1.9	27.3	0.9	26.8	0.9
2005	9.6	1.6	16.6	2.9	19.4	0.3	63.6	1.1	41.6	1.2	30.5	0.8
2011	11.8	1.4	18.4	2.9	25.3	0.3	69.5	0.8	58.3	1.3	36.4	1.0
2015	11.1	1.5	16.8	3.4	22.7	0.4	77.1	0.8	71.4	1.1	40.4	1.1
2018	11.4	1.4	17.2	3.5	23.8	0.4	77.4	0.7	73.3	1.1	40.3	1.1

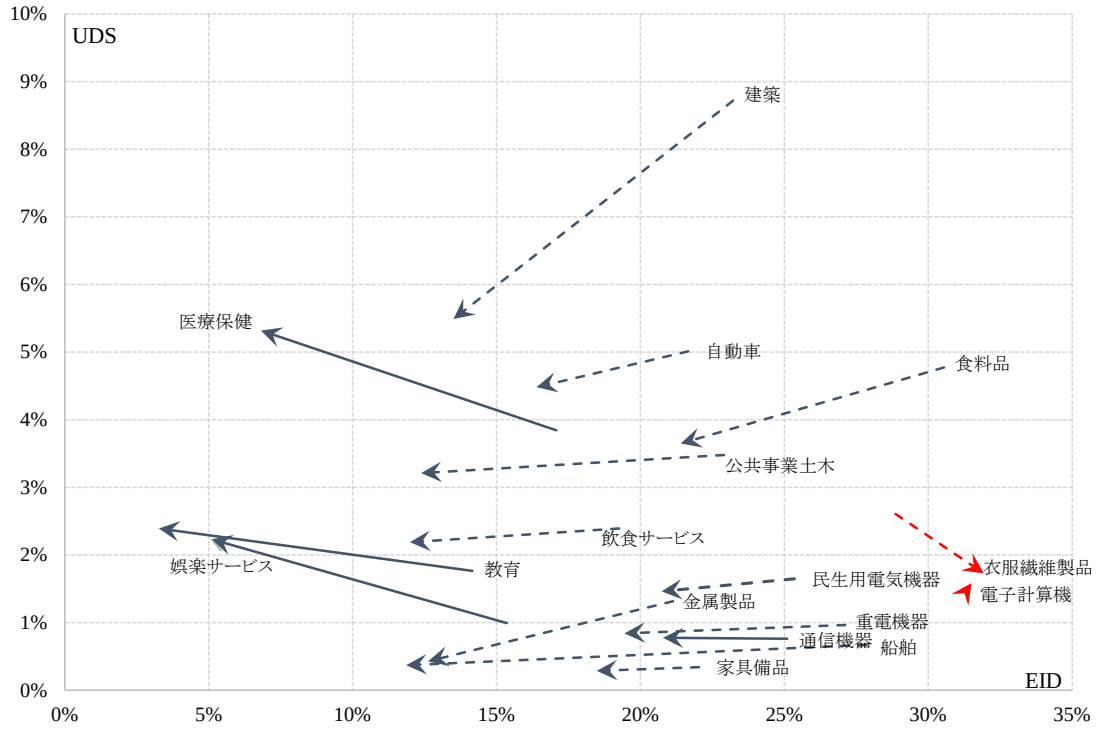
	自動車		船舶		建築		公共事業土木		製造品計		サービス計	
	EID	UDS	EID	UDS	EID	UDS	EID	UDS	EID	UDS	EID	UDS
1960	13.6	3.1	11.8	1.6	13.0	7.1	14.2	2.0	16.5	44.0	6.9	54.0
1965	14.3	4.2	13.0	1.8	13.1	8.7	13.3	2.5	17.0	40.8	6.8	57.4
1970	15.0	5.0	18.5	1.3	15.1	9.6	14.7	2.4	19.4	42.2	8.0	56.4
1975	21.1	4.1	26.1	1.2	22.6	10.0	21.8	3.3	29.9	42.0	16.3	57.1
1980	21.7	5.0	27.9	0.7	23.2	8.7	22.9	3.5	29.8	39.1	16.6	59.7
1985	17.3	5.3	19.3	0.6	21.1	6.4	17.3	3.2	23.7	39.1	11.5	60.3
1990	17.5	5.7	11.3	0.6	16.1	7.5	15.3	3.4	21.2	35.2	8.1	64.4
1995	16.4	4.5	11.9	0.4	13.5	5.5	12.4	3.2	20.5	30.1	5.7	69.5
2000	20.0	4.6	14.9	0.4	18.4	4.4	16.8	2.7	26.9	32.0	7.6	67.5
2005	23.7	4.9	17.4	0.5	25.3	3.3	25.2	2.0	35.2	30.1	10.6	69.5
2011	30.1	4.4	22.9	0.6	26.1	3.2	30.9	1.4	40.7	31.4	12.7	68.1
2015	31.6	5.4	21.2	0.5	27.3	3.3	30.3	1.2	40.7	32.3	12.8	67.2
2018	32.8	5.7	21.6	0.5	28.3	3.4	31.5	1.3	41.4	33.8	13.1	65.7

単位：%。注：商品別電力 EID および電力 UDS の定義はそれぞれ(3.3.2-12)式と(3.3.2-7)式を参照。



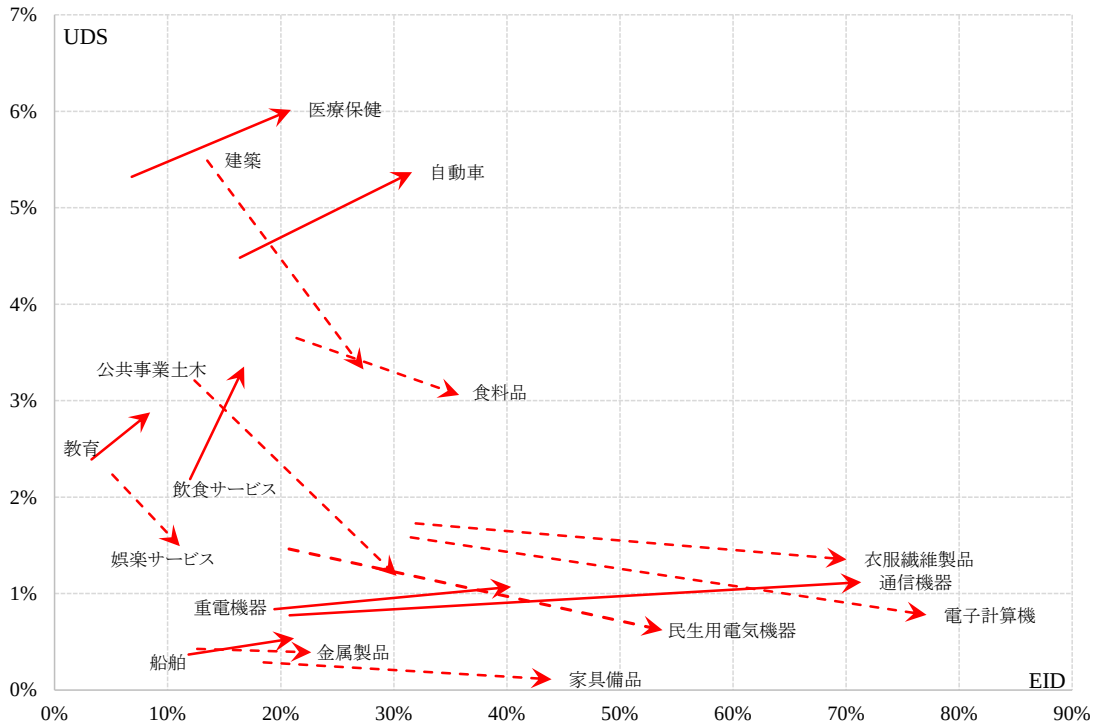
出典：表 3.3.5-1 の接続表（1、4）に基づく推計値。注：矢印の始点は 1970 年値、終点は 1980 年値。電力 EID の上昇は赤色、その低下は青色（ここでは電子計算機のみ）、UDS の上昇は実線、その低下は破線。

図 3.3.3-15：商品別電力 EID/UDS 変化（1970–80 年）



出典：表 3.3.5-1 の接続表（4、7）に基づく推計値。注：矢印の始点は 1980 年値、終点は 1995 年値。電力 EID の上昇は赤色（ここでは衣服繊維製品・電子計算機のみ）、その低下は青色、UDS の上昇は実線、その低下は破線。

図 3.3.3-16：商品別電力 EID/UDS 変化（1980–95 年）



出典：表 3.3.5-1 の接続表（7、10）に基づく推計値。注：矢印の始点は 1995 年値、終点は 2018 年値。電力 EID の上昇は赤色、その低下は青色（ここでは対象商品なし）、UDS の上昇は実線、その低下は破線。

図 3.3.3-17：商品別電力 EID/UDS 変化（1995–2018 年）

3.3.4 結び

直接には観察されない間接的な電力輸入量を把握する指標として、3.3 節では電力の実効輸入依存度（EID）を定義し、複数の接続産業連関表および直近の延長産業連関表を用いながら長期の日本の経済成長プロセスに伴う電力 EID の変遷を数量的に評価してきた。3.3 節での測定結果は以下のように要約される。

第一に、電力の安定供給や価格上昇における期待にも依存して、日本経済の電力 EID は大きく変遷している。一国経済におけるマクロの輸入比率の変化を基調とした大きく 3 つの変動期として、第 I 期（1970 年から 1980 年までの上昇期）、第 II 期（1980 年から 1995 年までの低下期）、第 III 期（1995 年から 2018 年までの再上昇期）が見いだされる。第 III 期に再上昇した一国経済の電力 EID は、2015 年には 21.9%、2018 年には 22.8%に高まっている。それは二度のオイルショックの影響により大きく上昇した、観察期間内におけるピークである 1980 年の 22.2%に類似した水準である。

第二に、オイルショック後に高まった電力 EID に対して、1980 年代には日本経済はそれを大きく低下させることに成功した。高度経済成長期に石油への依存度を高めていた日本経済は、第一次オイルショック後には電力 EID の急上昇を余儀なくされたが、ピークとなる 1980 年の 22.2%から 1995 年には 10.3%への大幅な低下を実現している。その要因としては、投資から消費へとシフトしてきた最終需要や、医療保健や娯楽サービスの拡大によるサービス化の進行など、需要面の構造変化による影響もある。し

かし、原子力発電や LNG 火力発電による石油代替の実現、停電時間の劇的な減少など、電力事業者による安定供給としての改善効果も大きいと考えられる。そうした影響を数量的に識別することは困難だが、安定供給への信頼なしには電力 EID の持続的な低下を推進することは難しいだろう。

第三に、近年では間接的な電力輸入が再び大きく拡大している。1995 年からの電力 EID の再上昇期では、商品レベルにおいても例外なく電力 EID が上昇している[60]。この期間における需要構造変化による影響としては、経済のサービス化による影響が横這いとなるが、コンピュータソフトウェアへの投資シェア拡大など、需要構造の変化としては引き続きマクロの電力 EID を低下させる方向にある。しかし一国経済の電力 EID は、1995 年の 10.3%から 2018 年の 22.8%へと大きく拡大した。電力 EID における 12.5 ポイントの上昇は、それぞれの年次における電力需要量として換算すれば、間接的な電力輸入量が 1130 億 kWh から 2950 億 kWh へ拡大したものと評価される。そのことは、もしこの間における電力 EID の上昇がなければ、(2007 年の実績値でのピークと類似する) 1.2 兆 kWh の国内需要が存在していたことを意味している。

政府による野心的な需要見通しを下回るものとなった近年の日本における国内電力需要の低迷（3.3.6 節補論 B）は、その 3 割ほどが間接的な電力輸入量の拡大によって説明される。日本経済において電力多消費的な財の生産が海外へとシフトしてきたことによる国内電力需要の低下は、あたかも省エネの達成であるかのように解されてきた。省エネや CO_2 排出削減を求め強化されてきた国内政策や、電力価格高騰や安定供給の毀損への懸念を拡大させてきた再エネ推進や電力自由化は、むしろ電力 EID を拡大させるような変化を促してきた懸念は大きい。安価に利用可能な省エネや低炭素技術が制約され、さらなる追加的な国内対策は全要素生産性を低下させ産業競争力を毀損させる懸念が拡大するなかで（野村 2021)、それが可能である企業は海外への生産シフトによって適応しようとしている。海外への有効需要の漏れは、1990 年代からの日本経済の長期にわたる停滞要因のひとつである可能性は大きい。

将来に向けて電力需要はどう変化するだろうか。AI や IoT など新しい技術革新を社会実装させるため、さらなるデジタル関連投資の拡大が期待される。他方では 1960/70 年代に形成された社会資本の更新投資の時期も迫っており、資本形成による需要変化がマクロの電力 EID をさらに低下させることは見込みづらい。また日本社会におけるさらなる高齢化の進行は、家計消費における医療保健サービスの需要シェアをより大きく拡大させるだろう。3.3 節での商品レベルでの測定によれば、現在では医療保健サービスは電力需要を誘発する最大の商品であり、すでに自動車生産（およびその間接波及生産）のための電力需要誘発を超過している。日本社会におけるさらなる高齢化の進行は、電力需要を牽引するものとなろう。

最終需要構造の変化が電力 EID を低下させる効果は減衰すると考えられるなかで、将来における商品別電力 EID は近年の上昇を継続するのか、それとも 1980 年代のよう

60 近年の電力 EID 上昇の転換期は、日本経済の実質単位エネルギーコスト（RUEC）が上昇へと転じた期間とも重なる（3.2.4(1)節の図 3.2.4-2)。RUEC の上昇は電力 EID を高める効果を持つと考えられるが、観察される RUEC は中間財などの輸入代替による緩和効果を織り込んだ後での脆弱化を示すものである。

に低下へと転じさせることができるか、それは今後のエネルギー環境政策に依存するだろう。拙速な石炭火力からのフェードアウト、電力価格の上昇を余儀なくさせる再エネの大量導入の推進、また国際的に協調ある水準を超えた省エネ法などによる規制手段の強化によれば、日本国内の温室効果ガス排出抑制へと「成功」するとみえるかもしれない。しかし、それは日本経済における電力やエネルギーの実効的な輸入依存度をさらに高めることにより実現される虚構に過ぎない。国内における有効需要の喪失は日本のさらなる経済低迷をもたらすであろう。

3.3.5 補論 A：ベンチマーク産業連関表

電力消費構造における時系列的な比較可能性を高めるため、3.3 節での電力の EID/UDS 指標の測定では連続する数時点の産業連関表基本表（ベンチマーク表）を接合した接続産業連関表（接続表）を利用する。

表 3.3.5-1 は 3.3 節での測定に利用した接続表（および基本表）のリストを与えている。その統合分類（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ための分類である。ここでは 10 府省庁によって構築される総務省「接続産業連関表」を基準としながら、国民経済計算体系（System of National Accounts: SNA）における基準変更（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)。LLIO は 1960–65–60–75 年の 4 時点における 333 部門統合分類表と、1975–80–85–90 年の 4 時点における 301 統合分類表からなる。2015 年基本表は現在に利用可能な最新のベンチマーク表であるが、近年における傾向を把握するため、経済産業省（2021）による 2018 年延長表も利用している。

表 3.3.5-1：EID/UDS 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	1960–1965–1970–1975年長期接続表	301	野村(1995)
3	1970–1975–1980年接続表	233	行政管理庁(1985)
4	1975–1980–1985年接続表	233	総務庁(1990)
5	1975–1980–1985–1990年長期接続表	333	野村(1995)
6	1985–1990–1995年接続表	184	総務省(2000)
7	1990–1995–2000年接続表	99	総務省(2005)
8	1995–2000–2005年接続表	102	総務省(2010)
9	2000–2005–2011年接続表	105	総務省(2017)
10	2005–2011–2015年接続表	105	総務省(2020)
11	2015年基本表	187	総務省(2019)
12	2018年延長表	96	経済産業省(2021)

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・小分類やここでの独自分類に基づく。

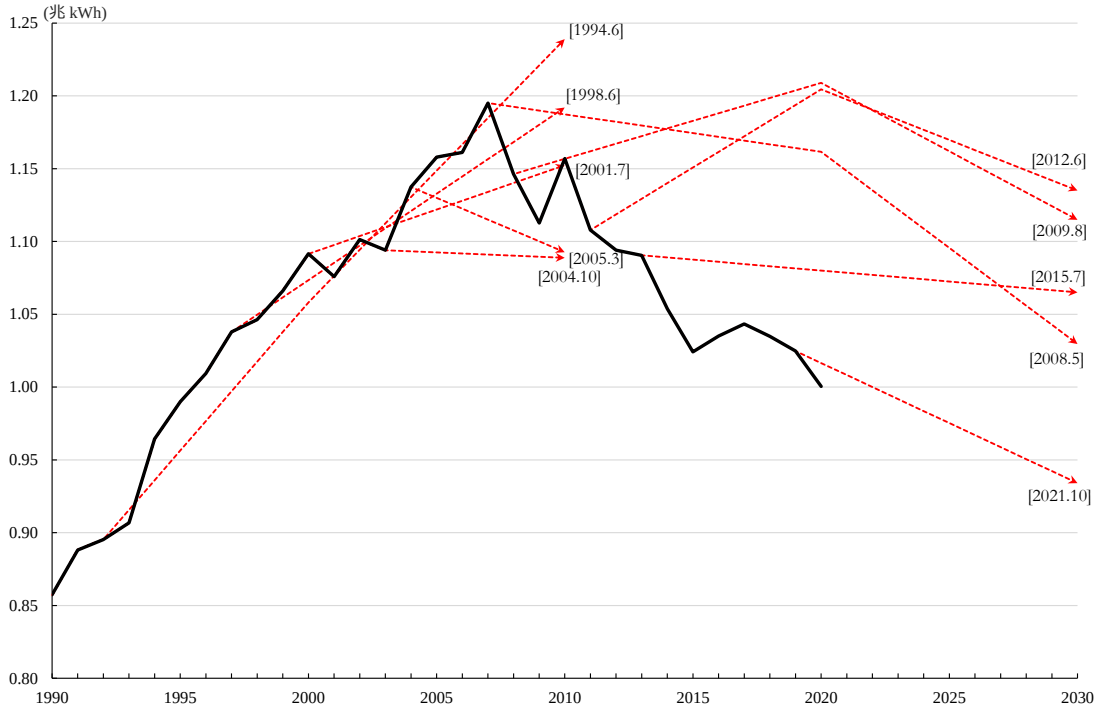
一般に、粗い（集計度の高い）統合分類に基づく分析によればレオンチェフ生産体系における生産波及としての測定精度が損なわれ、その一方、細かい分類によれば行・列部門の対応における商品表としての整合性としての課題が生じてしまう。また分析される統合部門分類は時系列的に統一されていることが望ましいが、同一部門内における生産物の質的変化や産業構造の変化のもとでは、分析する統合分類を時系列的に統一させることによる弊害も大きいと考えられる。3.3 節では分析される接続表ごとに、利用可能な統合分類の小分類や中分類、あるいは独自に定義された分類などよって分析し、各ベンチマーク年次における複数の接続表に基づく重複した測定結果の比較から、電力 EID/UDS 指標としての精度を確認する（3.3.3(1)節の図 3.3.3-1）というアプローチをとっている[61]。

3.3.6 補論 B：電力需要見通しと実績

20 世紀を通じ、日本は欧米諸国に比して常に高いエネルギー価格に直面してきた。第一次オイルショックによる原油価格の高騰、気候変動問題への対応のため、さまざまな省エネ政策を先進諸国にならい、またときに先んじて取り組んできている。経済産業省では、数年に一度「長期エネルギー需給見通し」（以下、需給見通し）として 10 年から 20 年ほど先のエネルギーと電力の需給予測をおこなっている。それは合理的な予測であることを超え、政策ターゲットとしての性格を帯びるものへ変化してきた。1970 年代や 1980 年代、日本経済において事後的に実現されるエネルギー・電力需要は、需給見通しによる予測値を下回る傾向にあった。言い換えれば、十分な供給力の確保を目的とするように、需給見通しは将来需要を過大に推計する傾向にあった。

1990 年代後半は大きな転機となる。1997 年 12 月には京都で気候変動枠組条約第 3 回締約国会議（COP3）が開催され、気候変動への対応が政府によって重要な政策課題となり、将来の電力供給は温室効果ガス排出抑制という政策ターゲットと不可分な性格を有するものとなった。そのことは野心的な省エネ目標を織り込んで、電力需要量のターゲットを過小に設定する誘因を与えている。図 3.3.6-1 は、1990 年代後半以降からの経産省や日本政府による電力需要の見通しについて、それぞれの策定年次からの見通し（点線）と、その後の実績値（実線）を比較している。

61 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することが原則となるが、本節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（企業内で実施される活動を含めて研究開発費が資本形成され、そのストックの固定資本減耗が付加価値項目に加算される）は 2005–2011–2015 年接続表のみであり、研究開発費用がすべて中間消費されるそれ以前の表とは波及効果の基準が異なっている。



単位：1 兆 kWh（発電端、自家発電を含む）。注：点線は日本政府による電力需要見通しの予測値（括弧内は公表時点）、実線は日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット（2021）による実績値（1990–2019 年度）と資源エネルギー庁による 2020 年度予測値による。需給見通しにおいて複数シナリオが設定されている場合は、そのもっとも野心的なシナリオによる評価を示している（自家発電の包含など公開資料から不明な部分に関しては一部推計値を含む）。なお需給見通し策定時に利用可能なデータは前年値までなどといった制約があるため、公表時点の 1–2 年前から現実値とは乖離がある。

図 3.3.6-1：電力需要の実績と政府による需要見通し

図 3.3.6-1 にみるように、予測値と実績値との関係は 2000 年代半ばから後半を境にして大きく傾向が異なっている。その前半期では、1998 年から 2005 年までの需給見通しが目指すようには、現実の電力需要は減少しなかった。当時においても政府は省エネ・節電の進展を必ずしも楽観していたわけではないが、京都議定書の求める温室効果ガス排出抑制ターゲットのもと、原子力や再エネなど低炭素電源の拡大によって補うことのできない排出分は、最終的に電力需要の縮小という目標へと押し付けられてきた性格がある。

比喩的に言えば、釣り竿の先端の位置を（効率改善なきままのベースラインとしての）将来におけるエネルギー需要量とし、先端から針までの釣り糸の長さをエネルギー生産性改善（EPI）による削減量とすれば、その両者が科学的に推計されるならば、針に装着された餌の位置（効率改善後のエネルギー消費量）は自ずと定まる。しかしこのとき、餌は水面より上に位置するかもしれない。数量的なターゲットを持つエネルギー環境政策では、水面を下回る餌の位置は野心的な政策ターゲットとして先決さ

れ、釣り竿の先端からの距離を調整するために、その科学的な予測値を超えて不釣り合いに長い釣り糸が設定されてきたのである[62]。

転機は世界金融危機である。戦後最大のマイナス成長を記録した日本経済の電力需要は急激に縮小した。2008 年および 2009 年の需給見通し自体は野心的な政策ターゲットとみなされていたものの、図 3.3.6-1 にみるように実際の電力需要はさらに減少した。2011 年の福島第一原子力発電所事故後には、原発への依存度の縮小という新たな制約が加わり、大幅な再エネの推進とともに、電力需要の縮小に向けてより強い圧力が加えられるものとなった。そうした野心的な節電・省エネ目標は、世界金融危機からの回復と震災後の復興需要の拡大により実現困難なものとして捉えられることも多かったが、そうした悲観論をよそに、現実の電力需要は政策目標を上回るスピードで減少している（図 3.3.6-1）。

参考文献（第 3.3 節に関するもの）

1) 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 D. W. Jorgenson, et al. (eds.) The World Economy – Growth or Stagnation?, Cambridge: Cambridge University Press, Chap.13.
2) 資源エネルギー庁（2020a）「令和元年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2020）」6 月.
3) 資源エネルギー庁（2020b）「エネルギー政策の現状について」第 1 回 中央環境審議会地球環境部会 中長期の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 地球環境小委員会地球温暖化対策検討ワーキンググループ 合同会合、資料 5、9 月.
4) 総務省（2019）「平成 27 年産業連関表」6 月.
5) 総務省（2020）「平成 17–23–27 年接続産業連関表」8 月.
6) 内閣府経済社会総合研究所（2021）『2020 年度（令和 2 年度）国民経済計算年報』内閣府.
7) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット (2021) 『EDMC エネルギー・経済統計要覧』省エネルギーセンター.
8) 野村浩二（1995）「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、 mimeo。
9) 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.

3.4 日本の産業界の温室効果ガス排出削減の取り組み状況の分析

地球温暖化対策の推進には産業界の協力が不可欠であり、日本においては業界団体・企業等によって、温暖化の主な原因とされている二酸化炭素（CO_2）を始めとする温室効果ガス排出削減のための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、1991 年に「経団連地球環境憲章」において環境

62 そして奇妙な長い釣り糸（野心的な EPI の要請）は、政府が省エネ対策を強化するための根拠を与えるものとして利用されてきた。

保全にむけて自主的かつ積極的な取り組みを進めていくことを宣言し、1997 年に「自主行動計画」を発表した。自主行動計画は、京都議定書の第 I 約束期間と時期を同じくする 2010 年前後の CO_2 排出削減目標を設定し、その後 16 年間にわたって対策が行われ終了した。2009 年には、自主行動計画を引き継ぐ形で「低炭素社会実行計画」の基本方針が発表され、取り組みが開始された。低炭素社会実行計画においては、国内の事業活動における CO_2 削減、革新的技術開発等の 4 本柱のもと、2020 年目標（フェーズ I)、2030 年目標（フェーズ II）が策定され、取り組みが続けられている。

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の分析および評価については、自主行動計画に関する総括的な評価等 [1),2)]で公表されており、さらに昨年度には、低炭素社会実行計画における取り組みの分析・評価を行った [3)]。本節では、昨年度の報告以降に公表された 2019 年度および 2020 年度実績に基づき、上述のこれまでの分析（2014 年および 2020 年に実施）との比較も踏まえ評価を行った内容を報告する。

3.4.1 経団連における地球温暖化対策の取り組みの概要

(1)「経団連低炭素社会実行計画」の概要

① 経団連低炭素社会実行計画策定の経緯

経団連は、自主行動計画をさらに進化させた形で、低炭素社会実行計画を策定した。同計画において、1)国内の事業活動から排出される CO_2 の削減、2)消費者・顧客を含めた主体間の連携の強化、3)途上国への技術移転など国際貢献の推進、4)革新的技術の開発の 4 本柱のもと、2020 年に向けたフェーズⅠ、2030 年に向けたフェーズⅡの目標が策定され、PDCA サイクルに沿って取り組みが続けられている [4)]。

低炭素社会実行計画については、2014 年度以降、各年度のフォローアップにおいて取り組みや目標に対する進捗のレビューが行われており、2019 年度フォローアップ結果 [5)]では、2018 年度の CO_2 排出量は全部門（産業、エネルギー転換、業務、運輸）において、2013 年度比（わが国の 2030 年中期温暖化対策目標の基準年度比）および前年度（2017 年度） 比ともに減少したこと、また CO_2 排出増減の要因分解から、エネルギー転換部門における電力排出係数の低下（エネルギーの低炭素化）が電力を使用する全部門において排出量削減に繋がったこと等が報告されている [5)]。

② 経団連低炭素社会実行計画における目標設定と進捗状況

目標指標については、エネルギー原単位、CO_2 排出量等の様々な指標が採用されている。表 3.4.1-1 に、低炭素社会実行計画に参加している経団連傘下の業種について、文献 4)に基づいて集計した目標指数の種類と部門別件数を示す。なお、参考として自主行動計画時の件数についても併せて記す（集計には文献 6)の個別業種版を参照)。

表 3.4.1-1　目標指数の種類と部門別件数（経団連傘下の業種）

	エネルギー原単位	エネルギー消費量	CO_2原単位	CO_2排出量
低炭素社会実行計画				
エネルギー転換部門（3業種）	1	1	1	1
産業部門（31業種）	7	2	8	14
業務部門（16業種）	15	0	2	0
運輸部門（12業種）	5	3	3	2
自主行動計画〔参考〕				
エネルギー転換部門（3業種）	1	0	2	1
産業部門（31業種）	11	4	8	13
業務部門（13業種）	6	4	1	3
運輸部門（6業種）	0	0	4	2

注）複数の指標を採用している業種については複数回カウント

2018 年度までの実績での目標達成の進捗状況については、フェーズⅠ（2020 年度）目標に対し、経団連傘下の 62 業種中 41 業種が既に目標に到達し、15 業種がより高い目標への見直しを実施している。また、別途、経済産業省と環境省においてもそれぞれ業種別ワーキンググループや専門委員会を設置し、産業界の低炭素実行計画の取り組みについてフォローアップを行っている。2018 年度実績においては、経済産業省および環境省所管 44 業種のうち、2020 年目標は 31 業種、2030 年目標は 18 業種が達成しており、前倒しで着実に取組が進められている [5]。

(2) 経団連を中心とする自主的取り組みを巡る 2020 年度以降の動向

経団連は、2020 年 10 月の菅首相（当時）による 2050 年までにカーボンニュートラルを目指すとの宣言を受けて、2020 年 12 月に「2050 年カーボンニュートラル（Society 5.0 with Carbon Neutral）実現に向けて -経済界の決意とアクション-」を発表した。さらに、2021 年 6 月、「グリーン成長の実現に向けた緊急提言」を発表し、2050 年カーボンニュートラルの実現に向けた経済界の主体的取組みの強力な推進のために、「経団連 低炭素社会実行計画」を「経団連 カーボンニュートラル行動計画」と改めることを表明した [7]。

一方、低炭素社会実行計画の評価・検証は、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が、2021 年 3 月に行われた経産省・環境省の合同フォローアップ会議 [8]において、2019 年度実績について、両省所管 44 業種のうち、2020 年度目標は 35 業種、2030 年目標は 17 業種が達成しており、前倒しで着実な取り組みが進められていることが報告された。さらに、2019 年度の CO_2 排出実績に基づき、2013～2019 年度にかけて産業・エネルギー転換・業務・運輸の全部門合計の CO_2 排出量は毎年着実に削減し、2019 年度には約 10.7%削減（産業部門では約 10.9%削減）を達成したことが報告された。また、今後の課題として、2020 年度目標達成については新型コロナウイルスの影響を考慮した評価の検討、2030 年目標については日本の 2030 年目標との整合性等が挙げられた。

2021 年 11 月には、低炭素社会実行計画で定めた 2030 年度目標の不断の見直しを行い、我が国の 2030 年度目標の実現に寄与すべく取り組みを行っていくとして「経団連

カーボンニュートラル行動計画」が策定され、併せて 2021 年度フォローアップ結果（2020 年度実績速報版）が公表された[9]。2020 年度実績については、全部門（産業、エネルギー転換、業務、運輸）の CO_2 排出量が 2013 年比で約 22.3%削減した（ただし、2020 年度は新型コロナウイルスの影響により経済活動量が大幅に減少）。産業部門における CO_2 排出増減の要因として、経済活動量の変化による CO_2 排出の減少幅が大きかったこと、また経済活動量あたりのエネルギー使用量の変化による CO_2 排出量は前年比で増加したこと等が指摘されている。

3.4.2 低炭素社会実行計画（カーボンニュートラル行動計画）の参加業種における排出削減努力の分析

これまで、総体的には全ての部門において CO_2 排出量が 2013 年度比および前年度比ともに減少し、産業界が努力を続けていると評価されている。一方、表 3.4.1-1 に示すように、目標設定にはエネルギー原単位やエネルギー消費量、CO_2 排出量といった様々な指標が採用されており、業種により異なる。排出削減努力のより良い評価のためには、目標に対する進捗や達成度だけでなく、複数の視点からの分析・考察が必要である。そこで、生産活動、エネルギー原単位（生産活動あたりのエネルギー使用量）、CO_2 排出原単位の関係性に着目し、それらの全体的な傾向や業種間の比較等の分析・考察を、定量的な評価に適していると考えられる経団連傘下の製造業を中心とした産業部門およびエネルギー転換部門を対象として行ってきた。今回は、2019 年度および 2020 年度の実績データに基づき、同様の分析・評価を行った。分析には、「経団連低炭素社会実行計画 2020 年度フォローアップ結果<2019 年度実績> 」および「経団連低炭素社会実行計画 2021 年度フォローアップ結果<2020 年度実績>[速報版]」の公表データを用いた。

(1) 業種毎の生産活動指数とエネルギー原単位変化の関係

まず、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。図 3.4.2-1 に 2012～2018 年の期間の実績について（昨年度実施の分析）、図 3.4.2-2 に 2012～2019 年の実績について、図 3.4.2-3 に 2012～2020 年の実績についての結果を示す。また、2014 年に行われた 1997～2010 年の期間についての同様の分析の結果を図 3.4.2-4 に示す。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、住宅生産団体連合会は建築着工統計調査に基づく床面積、また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。

2012～2019 年を示した図 3.4.2-2 では、前回の分析（2012～2018 年度）よりも生産活動指数が悪化した業種が増加した。一方、全体的にはエネルギー原単位の変化がマイナスになっている業種が殆どで、前回同様エネルギー原単位は概ね改善している。エネルギー原単位が悪化した業種の多くは生産活動が後退している。また、前回の分析（2012～2018 年）に比べ、エネルギー消費量が減少した業種が増加した。2020 年ま

での実績値を含む図 3.4.2-3 においては、数えるほどの業種を除き、COVID-19 の影響により生産活動が悪化し、またエネルギー消費量も減少している。エネルギー原単位が悪化した業種も前回より増えたが、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。

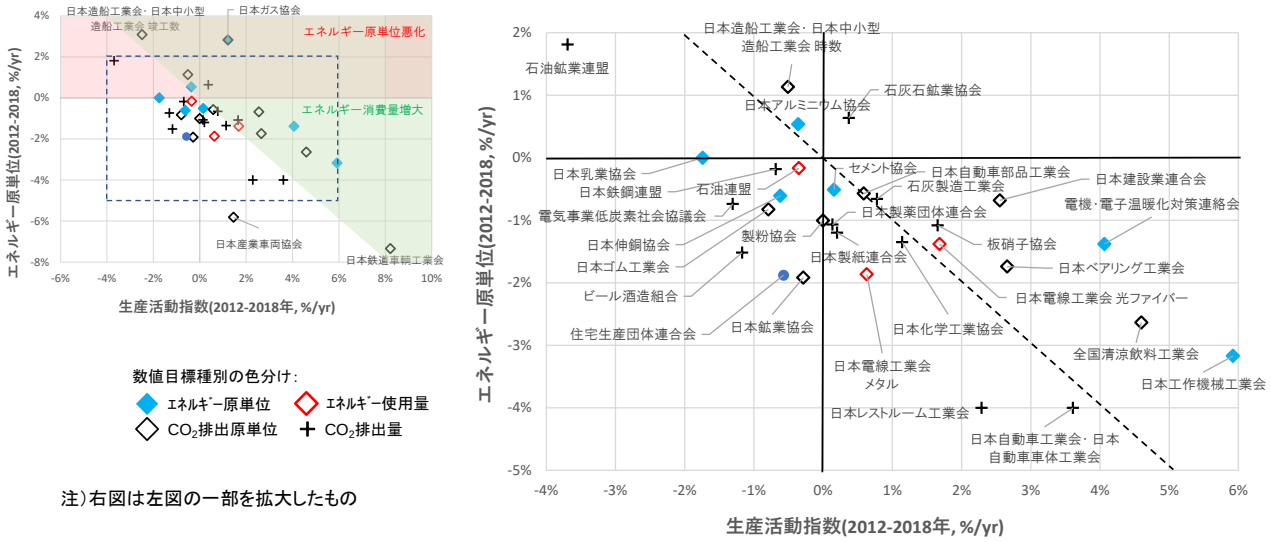


図 3.4.2-1 生産活動指数とエネルギー原単位の関係(2012～2018 年)(出典:RITE[3])

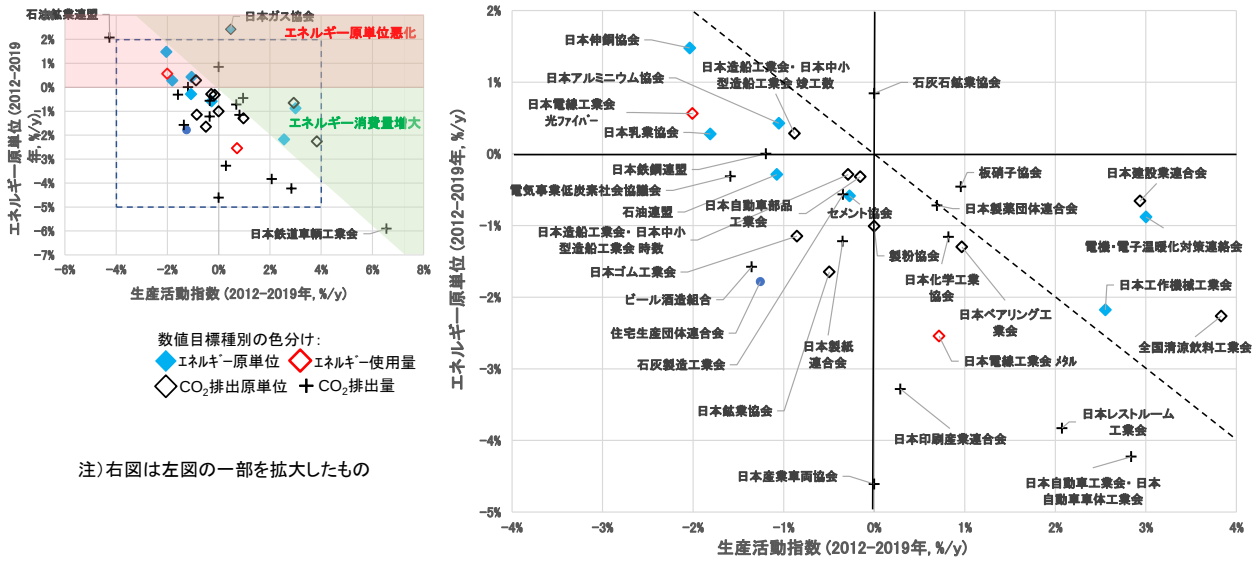
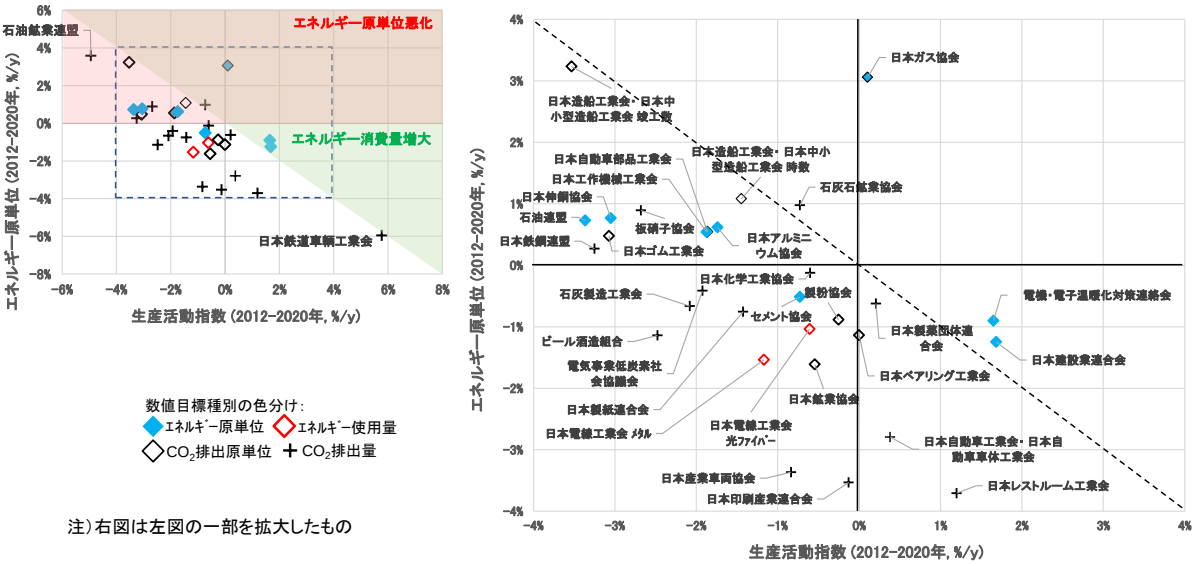
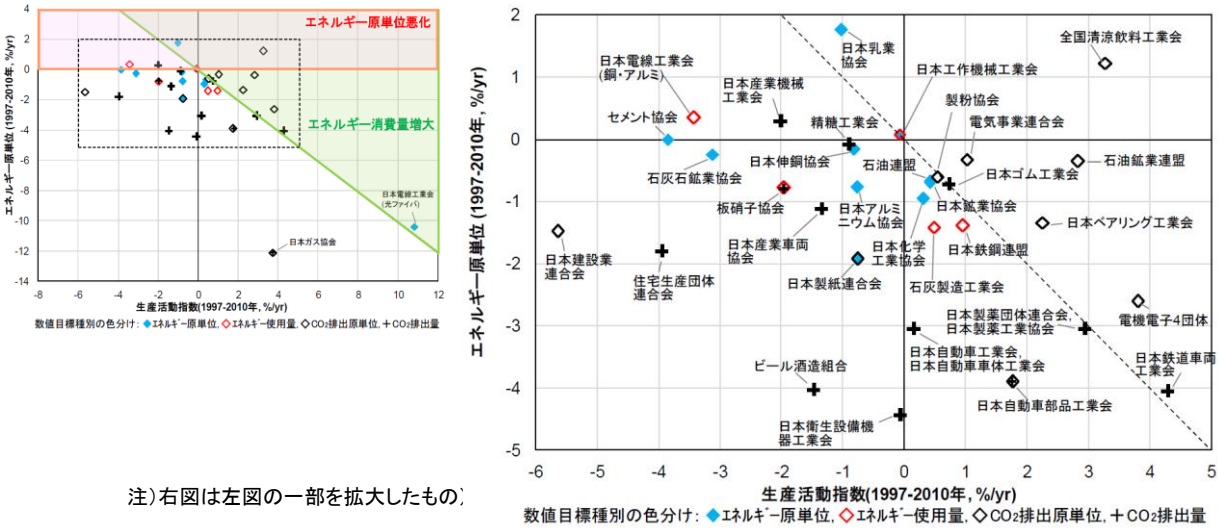


図 3.4.2-2 生産活動指数とエネルギー原単位の関係 (2012～2019 年)



注）右図は左図の一部を拡大したもの

図 3.4.2-3 生産活動指数とエネルギー原単位の関係（2012～2020 年）



注）右図は左図の一部を拡大したもの）

図 3.4.2-4 生産活動指数とエネルギー原単位の関係（1997～2010 年）（出典：徳重ら[2)]）

(2) 業種毎のエネルギーと CO_2 排出原単位変化の関係

次に、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 3.4.2-5、図 3.4.2-6、図 3.4.2-7 にそれぞれ、2012～2018 年、2012～2019 年、2012～2020 年について示す。図 3.4.2-8 には、1997～2010 年における同様の分析の結果を示す。なお、電力排出係数は、業種により固定値の採用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している。

CO_2 排出量/エネルギー使用量で見た CO_2 排出原単位は、2012-2018 年において、1997～2010 年におけるよりも全体的に大きく改善していたが、図 3.4.2-6 で見られるように、概ねその傾向が続いている。CO_2 排出原単位は、2012～2020 年においてもほぼ全ての業種で改善した。COVID-19 の影響により殆どの業種でエネルギー使用量が減少し

たが、CO_2排出原単位は継続して改善された。ただし、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2012年にはCO_2排出原単位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。

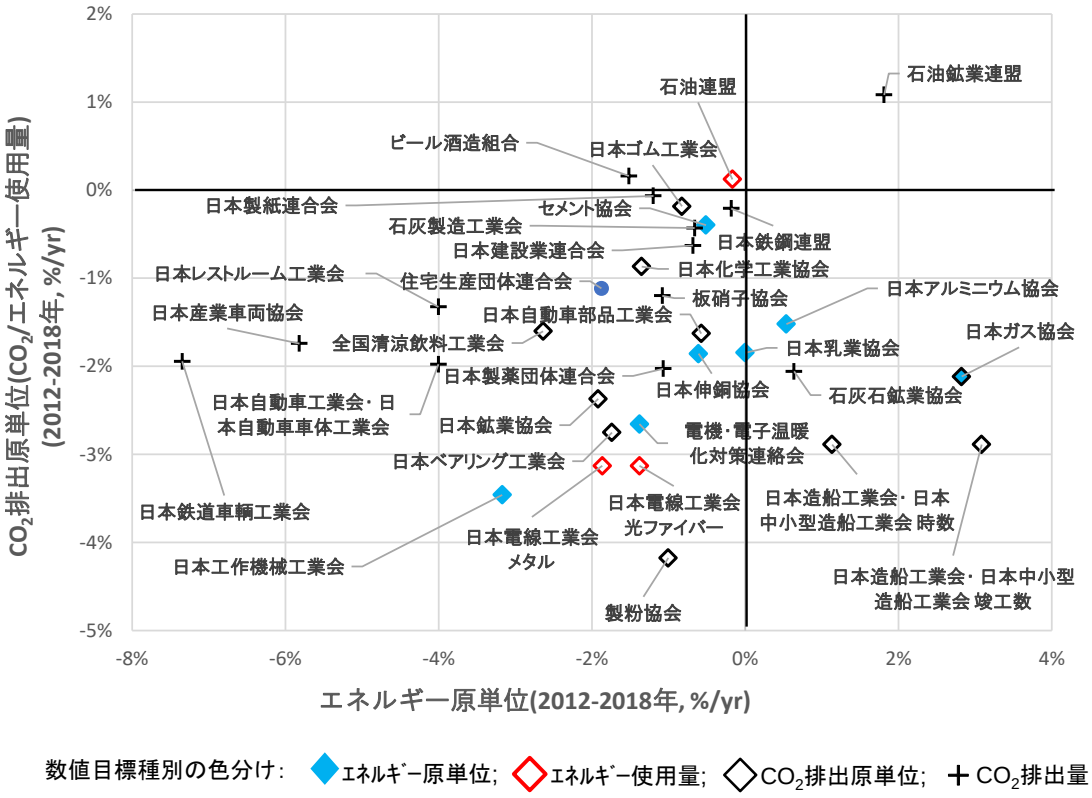
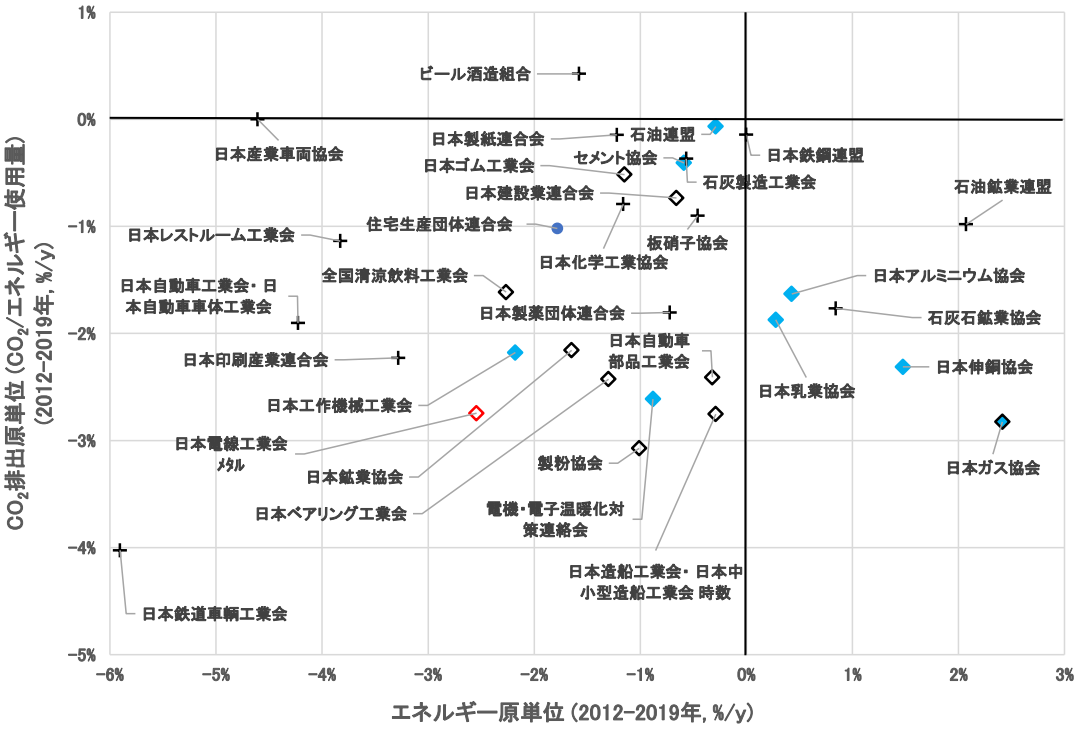
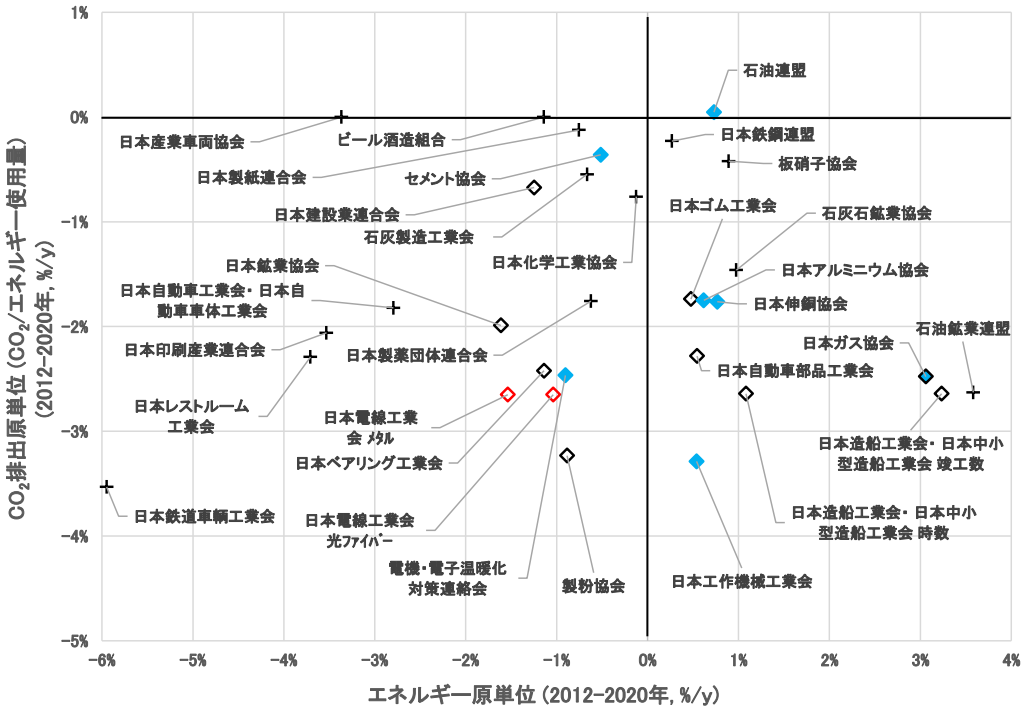


図 3.4.2-5 エネルギー原単位とCO_2排出原単位の関係（2012～2018年）（出典：RITE[3)]）



数値目標種別の色分け: エネルギー原単位; エネルギー使用量; CO_2排出原単位; CO_2排出量

図 3.4.2-6 エネルギー原単位と CO_2 排出原単位の関係（2012～2019 年）



数値目標種別の色分け: エネルギー原単位; エネルギー使用量; CO_2排出原単位; CO_2排出量

図 3.4.2-7 エネルギー原単位と CO_2 排出原単位の関係（2012～2020 年）

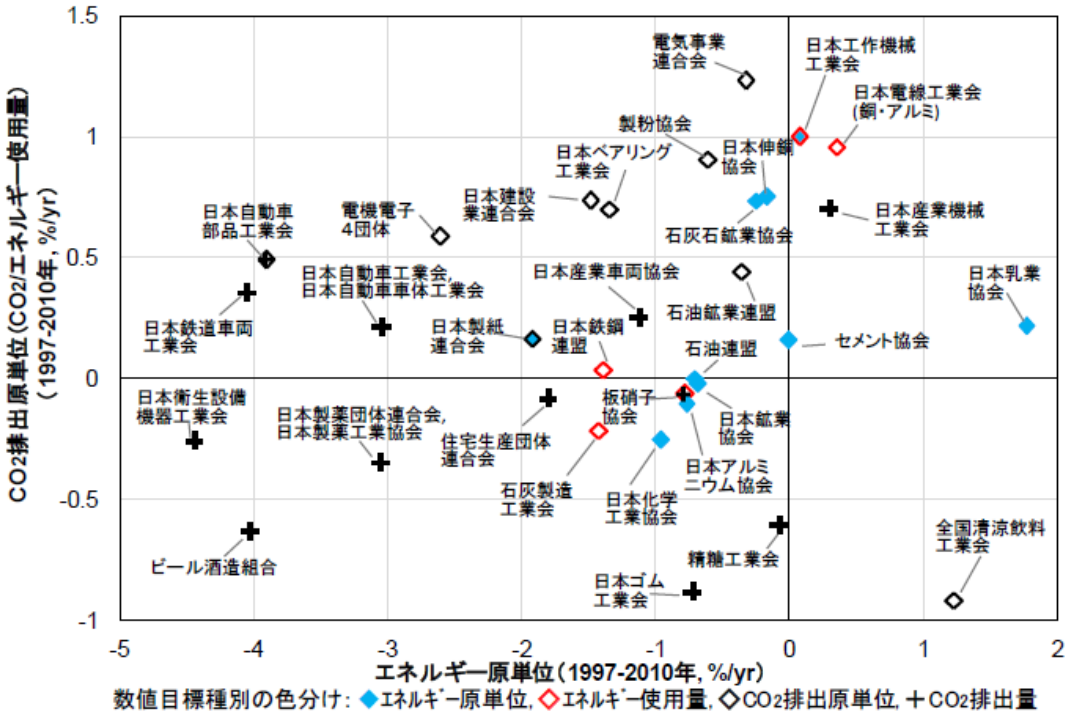


図 3.4.2-8 エネルギー原単位と CO_2 排出原単位の関係（1997～2010 年）（出典：徳重ら [2)]）

(3) エネルギー原単位変化の生産活動指数変化による説明性

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。そこで、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 3.4.2-9 では、横軸が 2010～2018 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 2010 年比の 2018 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。図 3.4.2-10 および図 3.4.2-11 には、それぞれ 2012～2019 年、2012～2020 年における同様の分析の結果を示す。

図 3.4.2-10 では、多くの業種でエネルギー原単位の改善が見られたが、領域 B にある業種については、それは経済活動の伸びによるところが大きいと考えられる。領域 C にある業種については、エネルギー原単位の悪化は経済活動の悪化による可能性が高い。経済活動の変化にかかわらずエネルギー原単位の改善を達成している領域 A にある業種は、2018 年までの分析に比べ減少した。図 3.4.2-11 においては、多くの業種において、生産活動の変化（改善あるいは悪化）とエネルギー原単位の変化（改善あるいは悪化）の連動性が高かった。経済活動の変化にかかわらずエネルギー原単位の改善を達成している領域 A にある業種は少数だった。

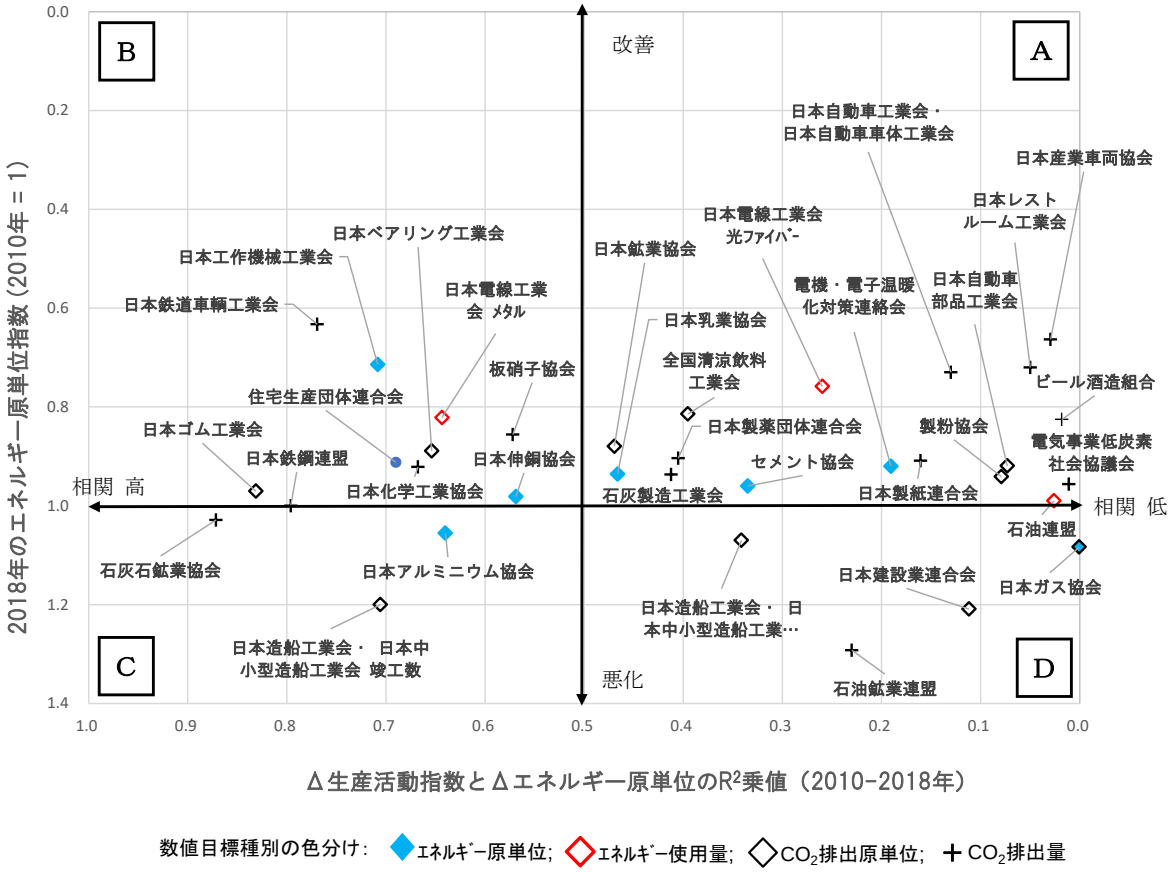
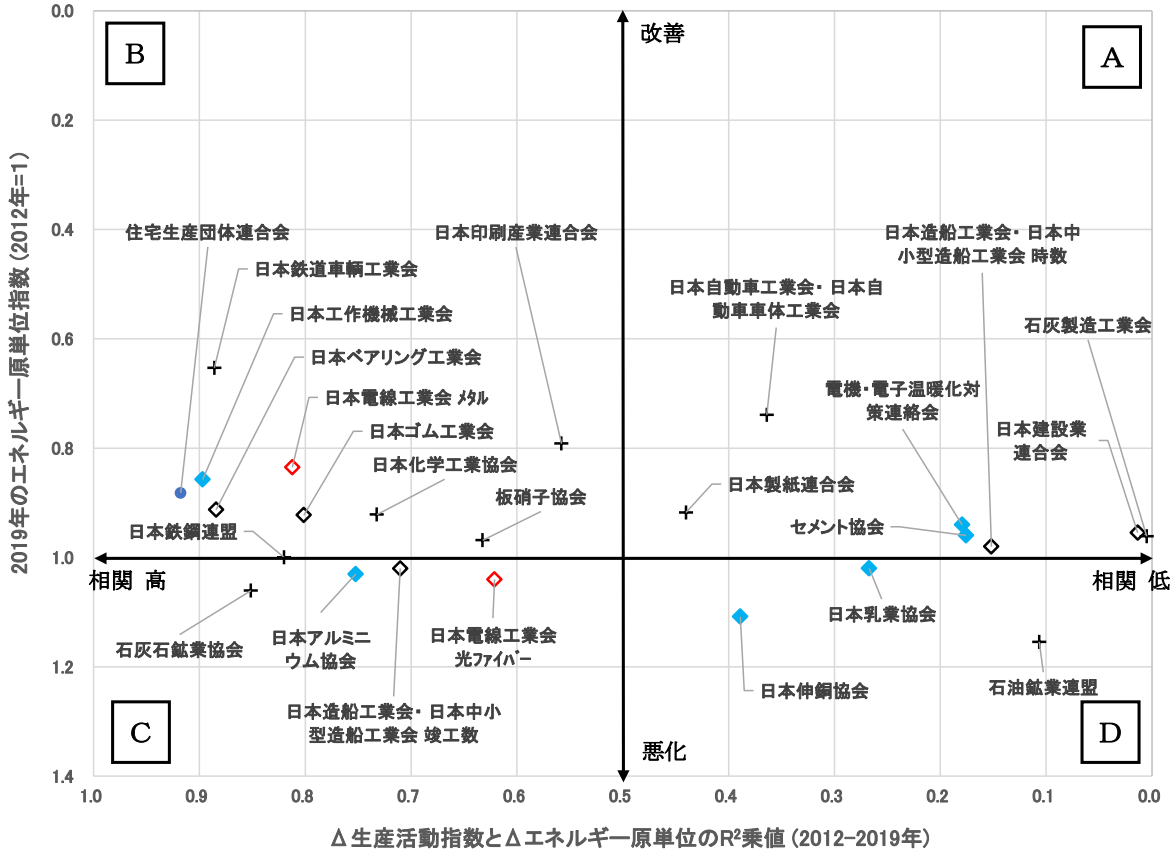


図 3.4.2-9 産業部門参加業種におけるエネルギー原単位変化と原単位変化に対する生産活動変化の説明性（R^2）の関係（2010-2018 年）（出典：RITE[3)]）



数値目標種別の色分け：◆ｴﾈﾙｷﾞｰ原単位；◇ｴﾈﾙｷﾞｰ使用量；◇CO_2排出原単位；＋CO_2排出量

図 3.4.2-10 産業部門参加業種における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（2012-2019 年）

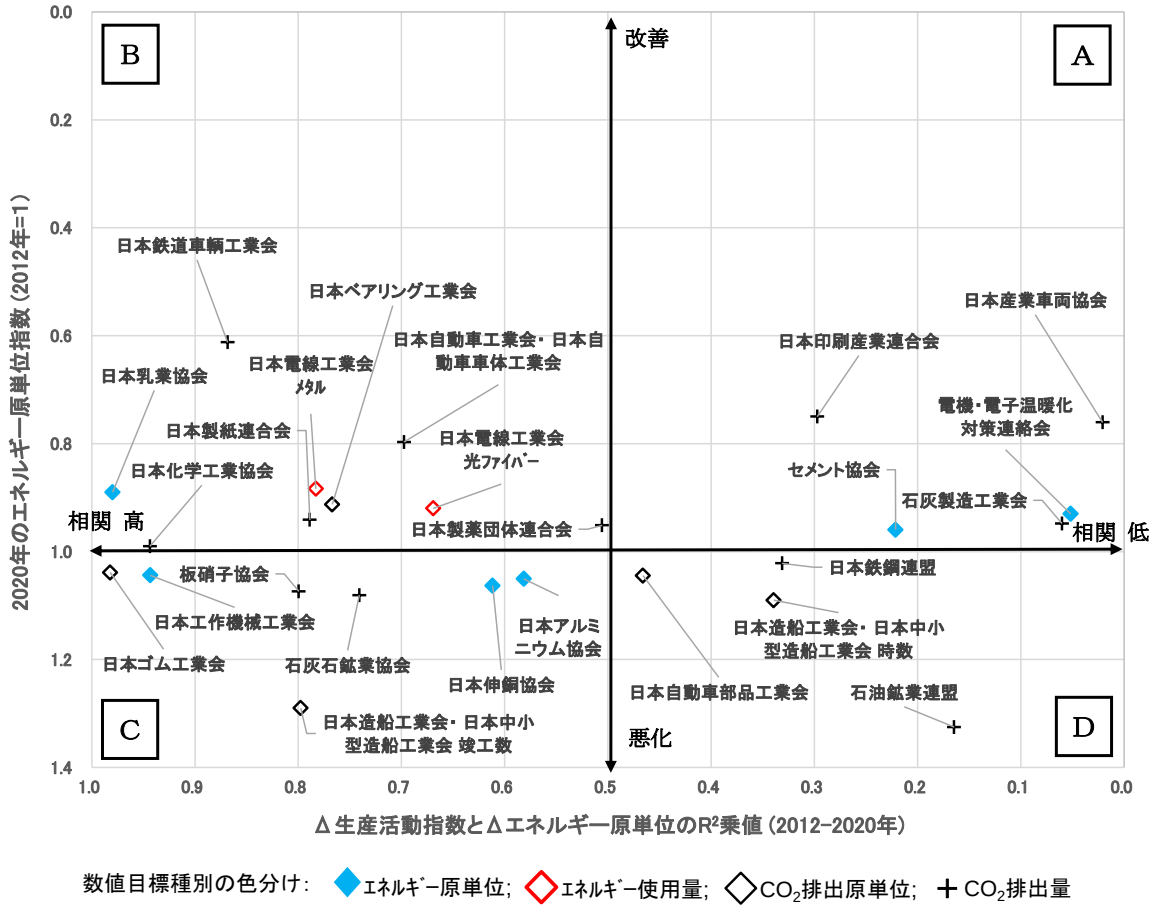


図 3.4.2-11 産業部門参加業種におけるエネルギー原単位変化と原単位変化に対する生産活動変化の説明性（R^2）の関係（2012-2020 年）

3.4.3 まとめ

本分析においては、低炭素社会実行計画・カーボンニュートラル実行計画の産業・エネルギー転換部門参加業種における排出削減努力の評価のために、業種毎の生産活動指数とエネルギー原単位変化の関係、業種毎のエネルギーと CO_2 排出原単位変化の関係、またエネルギー原単位変化の生産活動指数変化による説明性に関する分析を、2019 年および 2020 年実績に基づき行った。2019 年は全体的にはエネルギー原単位が改善し、CO_2 排出原単位もほぼ全ての業種で改善した。2020 年においては、殆どの業種で COVID-19 の影響により生産活動が悪化し、エネルギー原単位が悪化した業種も増加した。一方、殆どの業種でエネルギー使用量が減少したにもかかわらず CO_2 排出原単位は継続して改善された。さらに、エネルギー原単位変化の生産活動指数変化による説明性の分析から、エネルギー原単位の悪化の原因には生産活動の後退による影響があったと考えらえる。

今後、日本の産業界での自主的な取り組みを推進していく上で、重要な検討事項の一つは、カーボンニュートラル行動計画における 2030 年度目標を、政府の掲げる 2050 年カーボンニュートラルに向けた 2030 年排出削減目標との整合性の中でどのように設

定するか、ということである。今後のフォローアップに向けた検討会[10]では、30年目標における原単位と総量の考え方、共通指標としてのCO_2排出削減率の統一化等が意見として挙げられた。産業界の自主的取り組みのより良い評価のために、これらの議論を踏まえた、さらに異なる視点からの分析手法の検討が必要である。

参考文献（第3.4節に関するもの）

1) 経済産業省自主行動計画の総括評価に係る検討会　自主行動計画の総括的な評価に係る検討会とりまとめ（2014）
2) 徳重功子、秋元圭吾、小田潤一郎、本間隆嗣; 京都議定書第1約束期間における日本の温室効果ガス排出削減の取り組みに関する分析・評価、エネルギー・資源、36-2 (2015)
3) RITE; 令和2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（2021）
4) 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）
5) 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）
6) 日本経済団体連合会; 環境自主行動計画（温暖化対策編）2013年度フォローアップ結果（2012年度実績）概要版および個別業種版（2013）
7) 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; 2020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）
8) 日本経済団体連合会; 経団連低炭素社会実行計画 2020年度フォローアップ結果 総括編（2019年度実績）（2021）
9) 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）[速報版]（2021）
10) 産業技術環境局 低炭素社会実行計画のフォローアップ及び新計画策定に向けた検討会; 低炭素社会実行計画の振り返りと今後のフォローアップについて（2021）

3.5　再生可能エネルギー導入の国内外の動向

3.5.1　世界における再生可能エネルギーの導入状況

地球温暖化対策としての再生可能エネルギーへの期待は大きい。パリ協定では世界の温室効果ガスの排出量を今世紀後半に実質ゼロを目指すとされ、世界各国・地域において、その目標実現に向けた有効な手段として再生可能エネルギーの導入が進んでいる。本報告では主に、2020年までの国内外における長期的な再エネ導入状況を記す。

(1) 再生可能エネルギー導入の概観

図 3.5.1-1 に、2014～2020 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、順調に増加している。2020年には3,000GWに迫る

ほどにまで成長した。図 3.5.1-2 は、2010 年および 2020 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している。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、2020 年には 28%まで伸びている。

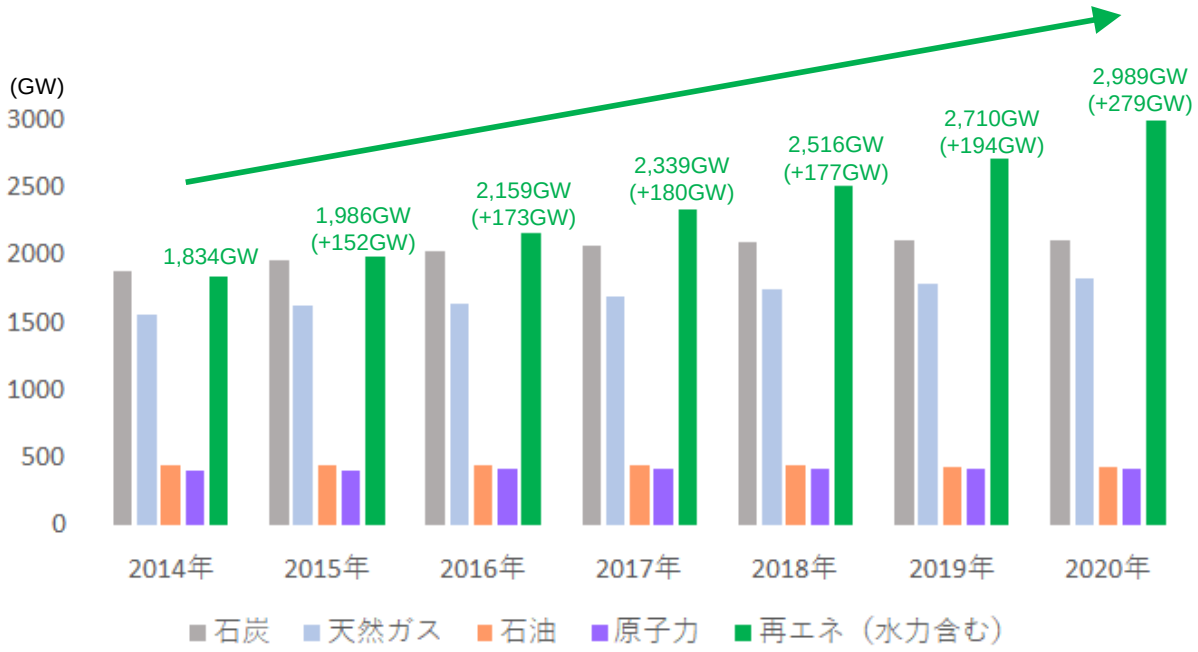


図 3.5.1-1　2014～2020 年における世界全体の発電設備容量（ストック）（IEA, World Energy Outlook 2016～2021 より作成）

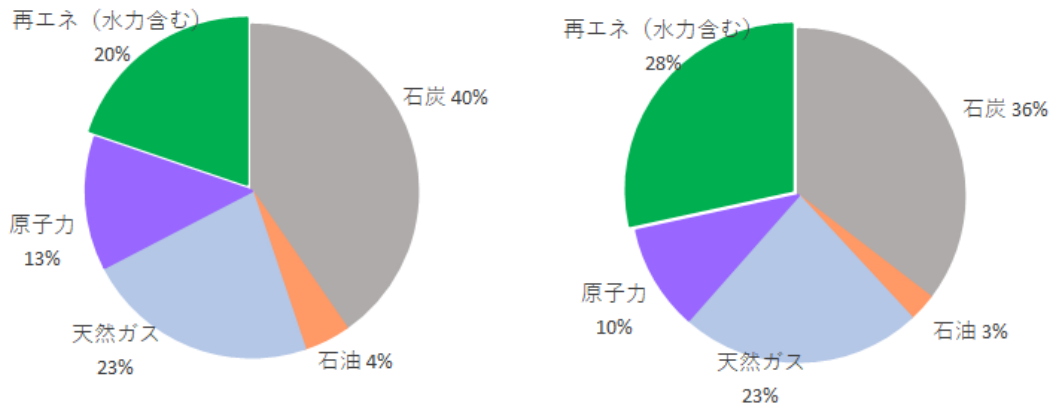


図 3.5.1-2　2010 年と 2020 年における世界の発電電力量に占める燃料源の割合（IEA, World Energy Outlook 2021 より作成）

また、図 3.5.1-3 と図 3.5.1-4 はそれぞれ、IRENA[7]による 2020 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 2016-2020 年の世界の再生可能エネルギー導入容量の推移および 2020 年導入容量を示す。この統計によると、2020 年の世界の再生可能エネルギー発電容量は 2,799GW に達した。水力が依然として最大のシェアを占めるが、残りの部分を風力と太陽光とで同等の割合を占めた。再生可能エネルギー

の導入容量は順調に増加しており、2020 年には 261GW（前年比+10.3%）が追加された。太陽光が 127GW（+22%）で最も増加が大きく、続いて風力 111GW（+18%）と、太陽光と風力が 2020 年のその増加の 91%を占めた。これは年間の増加としてはこれまでで最大である。

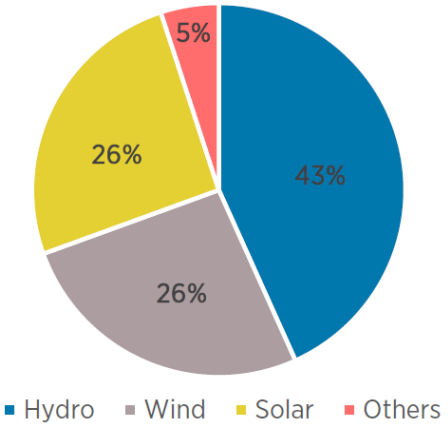


図 3.5.1-3 2020 年の世界の再生可能エネルギー発電容量における燃料源の割合（出典：IRENA[7]）

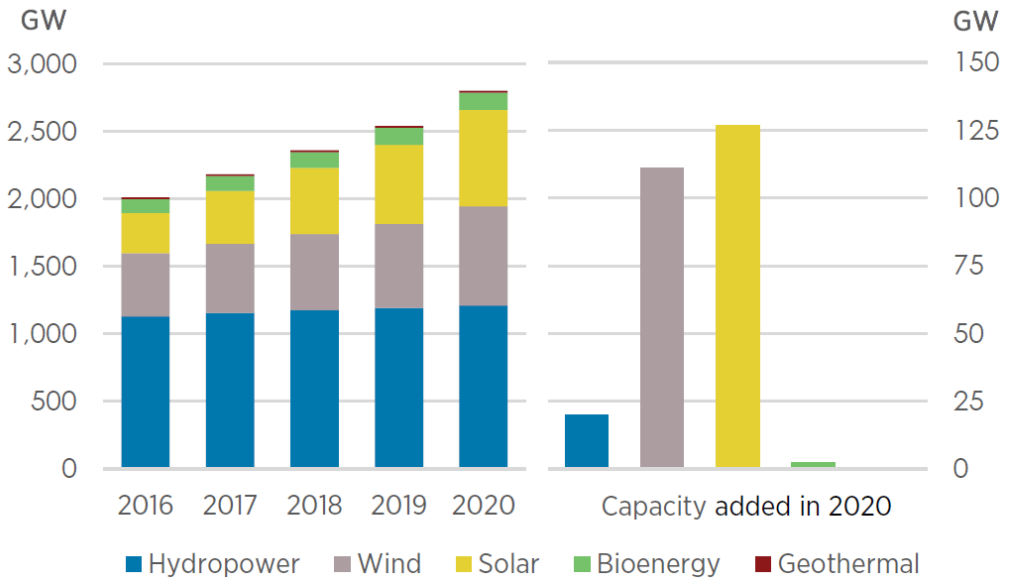


図 3.5.1-4 2016～2020 年の世界の再生可能エネルギー導入容量の推移および 2020 年導入容量（出典：IRENA[7]）

(2) 世界の国別導入量

次に、特に成長の著しい太陽光発電（PV）と風力発電について、世界における国別の導入量を整理する。

① 太陽光発電

図 3.5.1-5、図 3.5.1-6 はそれぞれ、世界の太陽光発電（PV）の 2020 年の年間導入量と 2010～2020 年の世界の PV 年間導入容量の推移を、国別の割合と共に示している。

2020年に世界全体での太陽光発電(PV)の年間導入容量は145.2GWに達した。COVID-19パンデミックによる混乱にかかわらずこれまでで最高の年間導入容量を記録した。中国が2020年まで8年連続で年間導入容量の首位で、2020年には48GW以上を導入した。2017年には世界導入容量の半分以上を占めたものの、以降、太陽光発電に関する支援策の見直しにより成長が減速の傾向にあったが、中国国家エネルギー局によると2020年は2017、2018年に匹敵あるいは超過するほどのレベルであった。地域として見た場合、2番目に年間導入容量が大きかったのはEUで、2011年の記録的な23.2GWに迫る19.8GWが導入された。ドイツ（4.9GW)、オランダ（3GW)、スペイン（3.5GW）等が主要なマーケットである。続いて米国は19.7GWを導入し、過去2年と比べると大きく成長した。その次はベトナムで、その導入量11.1GWの殆どが分散型PVであった。その次の位置にある日本は安定した成長で、2020年に8.7GWを導入したが、記録となった2015年（10.8GW）には届かなかった。

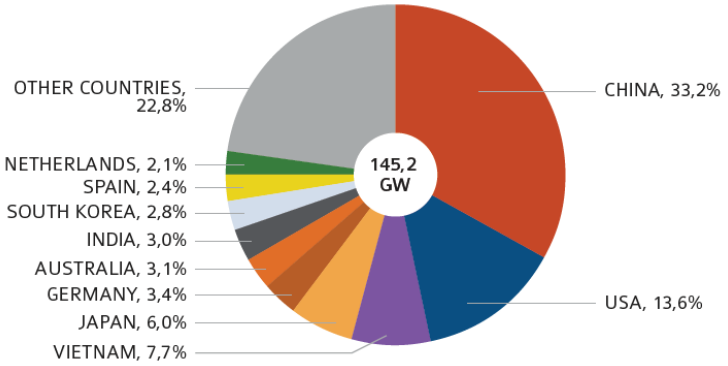


図 3.5.1-5 世界の太陽光発電（PV）の2020年の年間導入容量（出典：IEA[8])

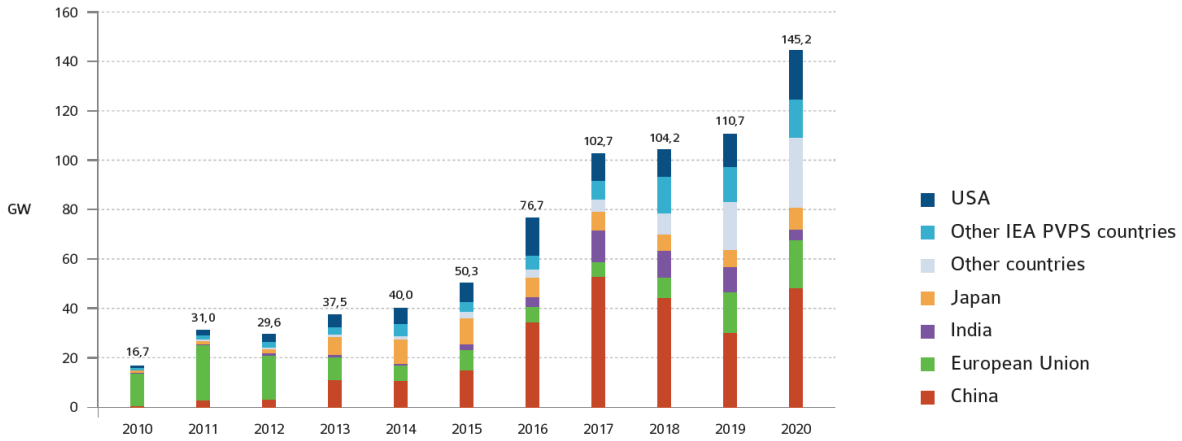


図 3.5.1-6 2010～2020年の世界の太陽光発電（PV）の年間導入容量の推移（出典：IEA[8])

2020年までの世界の累積PV導入量は、図 3.5.1-7にあるように、767GWとなった。その70%は過去5年間に導入されたものである。累積PV導入量の1位は中国で、世界

全体の約 3 分の 1 を占める 253.6GW に達した。2 位は米国、3 位は日本となった。また、図 3.5.1-8 には、世界の PV 導入容量における上位国が占める割合の推移を示す。世界の PV 導入容量における上位国が占める割合を見ると、上位 10 か国が全体の 77%を占めており、依然として世界 PV 市場が限られた国により牽引されていることを示す。しかし、数年前に比べるとその割合は低く、上位以外の国々が市場全体の成長により貢献し始めていると言える。2019 年以前の数年において上位国が占める割合が減少傾向にあったが、2020 年に再び上昇した。これは主に、中国の PV 市場の成長が鈍化し 2020 年に再び伸びたことを反映しており、中国の PV 市場が市場全体の展開を方向づけていることがうかがえる

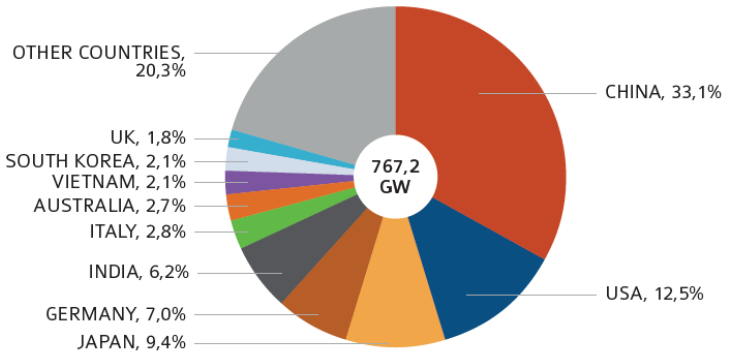


図 3.5.1-7 世界の太陽光発電（PV）の 2020 年までの累積導入容量（出典：IEA[8)]）

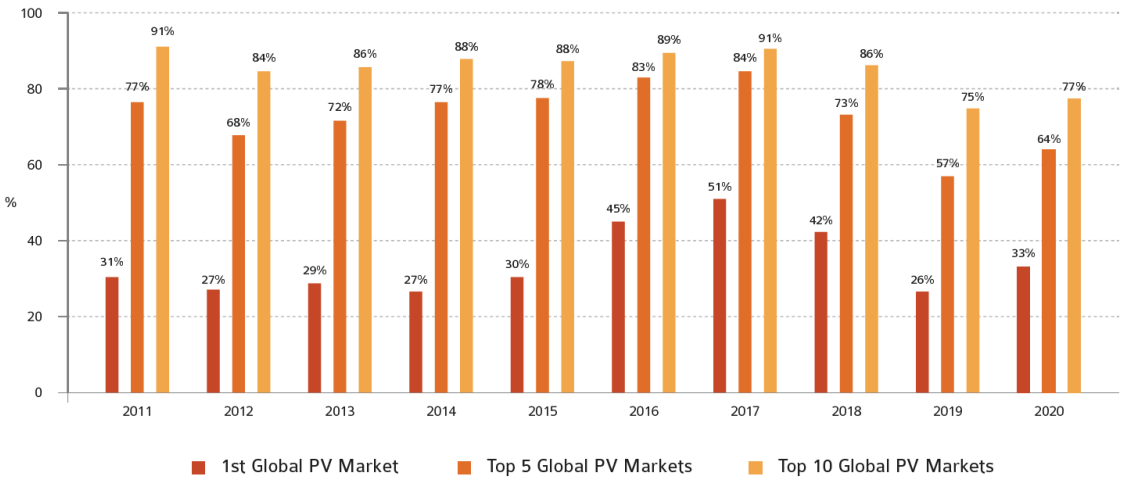


図 3.5.1-8 世界の太陽光発電（PV）導入容量における上位国が占める割合の推移（出典：IEA[8)]）

② 風力発電

図 3.5.1-9 に、世界の風力発電（陸上、洋上）の 2016～2020 年における年間導入容量を示す。2020 年に、世界で風力発電（陸上、洋上）の年間導入容量の史上最高となる 93GW 以上が導入された。これは対前年比+53%という飛躍的な伸びであった。陸上風力発電の 2020 年の導入容量は史上最高となる 86.9GW、洋上風力発電は二番目の記録となる 6.1GW であった。図 3.5.1-10 には、世界の陸上風力発電の 2020 年の年間導

入容量および上位 5 か国の割合を示す。2020 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、オランダ、ドイツで、これらの 5 か国で全体の 80.6%を占めた。2019 年の上位 5 か国（中国、米国、英国、インド、スペイン）が占める割合は 70%で、この割合は昨年より 10%以上増加した。

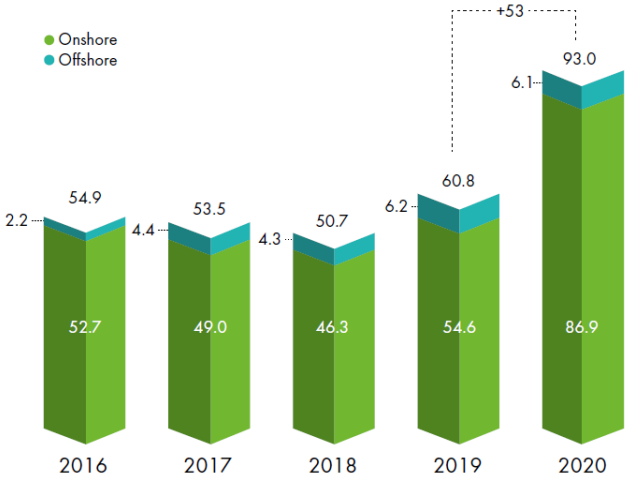


図 3.5.1-9 世界の風力発電（陸上、洋上）の 2016～2020 年の年間導入容量（GW）（出典：GWEC[9]）

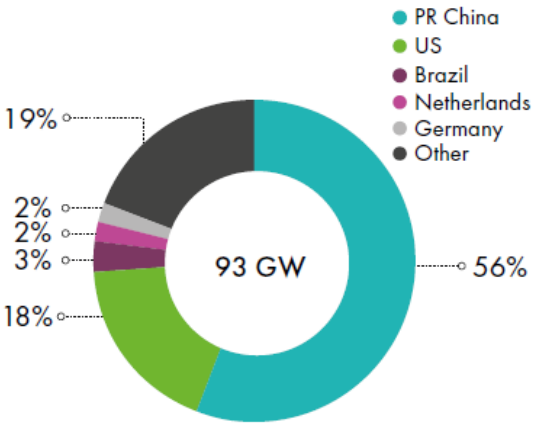


図 3.5.1-10 世界の陸上風力発電の 2020 年の年間導入容量と上位 5 か国の割合（出典：GWEC[9]）

図 3.5.1-11 に、世界の風力発電（陸上、洋上）の 2020 年までの累積導入容量の推移を示す。2020 年までの風力発電（陸上、洋上）の累積導入容量は世界全体で 743GW だった（前年比+14%）。また、図 3.5.1-12 は、世界の陸上および洋上風力発電の 2020 年までの累積導入容量と国別の割合を示す。世界陸上風力発電の 2020 年までの累積導入容量は 700GW 以上に達したが、この飛躍的な増加は主に 2 大市場である中国と米国における成長によるものである。中国国家エネルギー局によると 2020 までの同国の陸上風力発電累積導入容量は 272GW だった。米国においては、2020 年に記録となる 17GW

が導入され、累積導入容量は 120GW を越えた。これらは主に中国における FiT や米国での Productin Tax Credit (PTC)と言った政策が関係しているが、この 2 大市場を除くと、陸上風力発電の成長を牽引したのはオークション、入札、グリーン証書と言ったメカニズムであった。

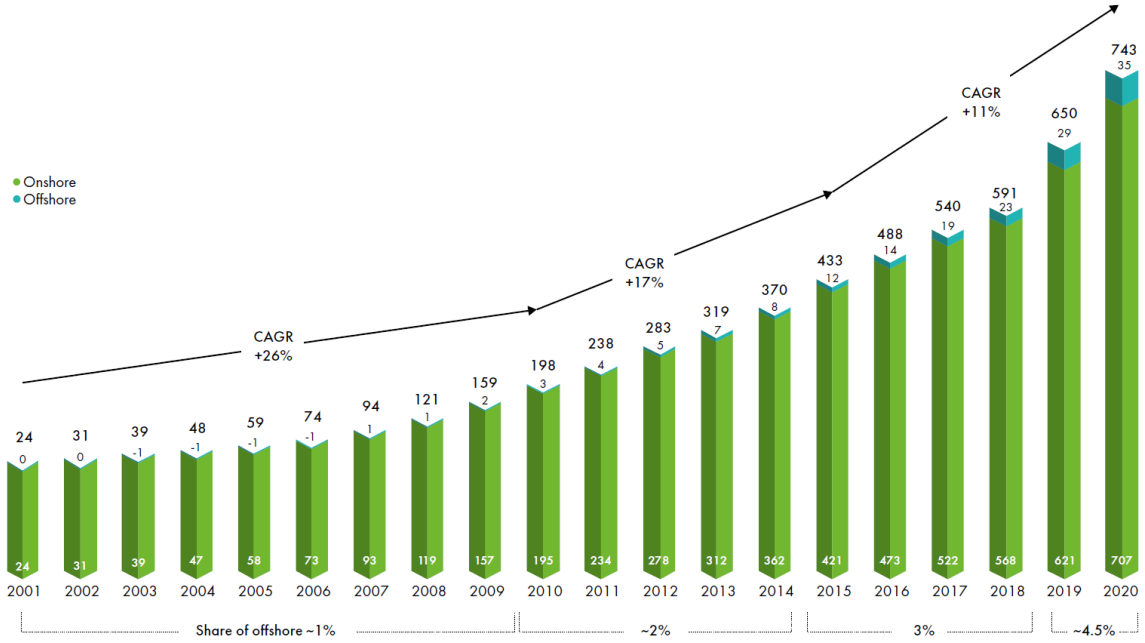


図 3.5.1-11 世界の風力発電（陸上、洋上）の 2020 年までの累積導入容量の推移（GW）（出典：GWEC[9)]）

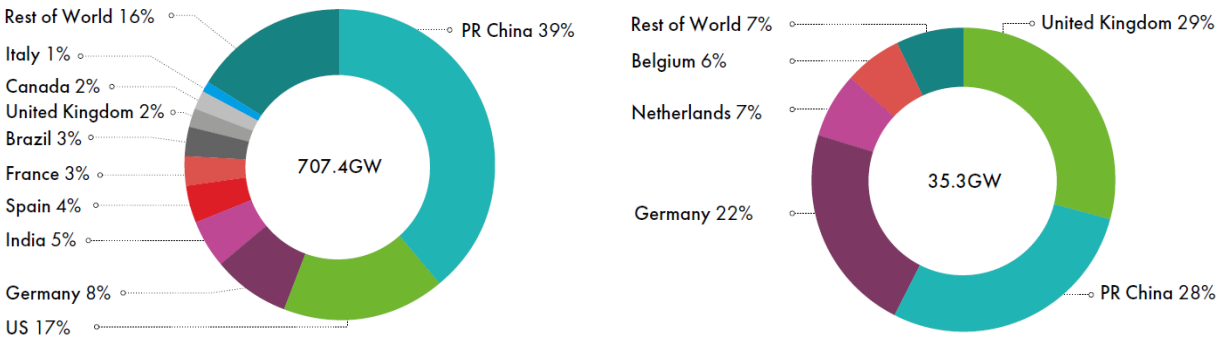


図 3.5.1-12 世界の風力発電の 2020 年までの累積導入容量および国別の割合（左：陸上風力、右：洋上風力）（出典：GWEC[9)]）

(3) 再生可能エネルギーのコスト動向

IRENA[10)]は約 20,000 件のプロジェクトから収集した Renewable Cost Database と Auctions and Power Purchase Agreement (PPA) 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 3.5.1-13 は、世界の各種再生可能エネルギーの 2010 年と 2020 年における LCOE（Levelized Cost of Electricity）を示す。

再エネの LCOE は過去 10 年間に急速に低下しており、事業用 PV の LCOE は 2010 年から 2020 年で 85%低下、陸上風力発電は 56%低下、洋上風力発電は 48%の低下であった。集中型太陽熱発電（CSP）の LCOE は 68%低下したが、2020 年には 2 件（いずれも中国）のみだったため、同国の事情が反映された結果である。2019 年の報告（RITE[11]）と 2020 年とでコストを比較すると、太陽光発電（PV）は 2019 年には 0.068 USD(2019USD)/kWh だったが 2020 年は 0.057 USD(2020USD)/kWh、集中型太陽熱発電（CSP）は 2019 年には 0.182 USD(2019USD)/kWh だったが 2020 年は 0.108 USD(2020USD)/kWh、洋上風力発電は 2019 年には 0.115 USD(2019USD)/kWh だったが 2020 年は 0.084 USD(2020USD)/kWh、陸上風力発電は 2019 年には 0.053 USD(2019USD)/kWh だったが 2020 年は 0.039 USD(2020USD)/kWh であった。

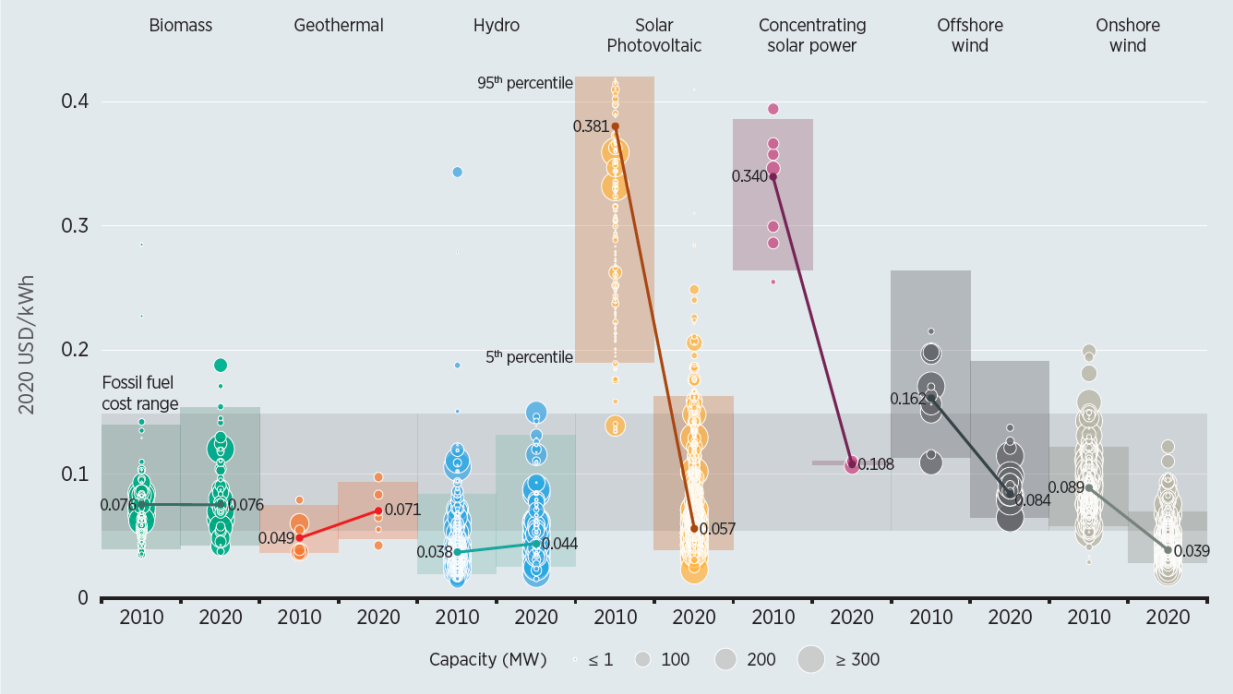


図 3.5.1-13 世界の各種再生可能エネルギーの LCOE（出典：IRENA[10]）

3.5.2 日本における再生可能エネルギーの導入状況

日本では、2012 年の再生可能エネルギー特別措置法の施行以降、固定価格買取制度（「FIT 制度」）による再エネの導入拡大を図るとともに、その過程で生じる国民負担や系統制約等の導入障壁の克服に取り組んできた。その後、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ける議論を踏まえ、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」が成立した。2020 年 7 月 22 日以降、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と再生可能エネルギー主力電源化制度改革小委員会の合同会合において、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議論が行われ、大量小委に

おいては第 6 次エネルギー基本計画の改定やエネルギーミックスの見直しに向けた再エネに係る議論が行われてきた（文献 12)）。

2021 年 10 月 22 日に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画では、「再生可能エネルギーに関しては、S+3E を大前提に、2050 年における主力電源として最優先の原則の下で」「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」とされている。2030 年度の電力需要は 8,640 億 kWh 程度、総発電電力量は 9,340 億 kWh 程度を見込んでおり、再生可能エネルギーについては、足元の導入状況や認定状況を踏まえつつ、施策強化により 3,130 億 kWh 程度の実現を目指すとしている。その上で、2030 年度の温室効果ガス 46%削減に向けては、もう一段の施策強化等に取り組み、その効果が実現した場合の野心的なものとして、合計 3,360～3,530 億 kWh 程度の導入、電源構成では 36～38%程度を見込む（図 3.5.2-1、文献 13)）。図 3.5.2-2 は第 6 次エネルギー基本計画で策定された新たなエネルギーミックスとミックスに対する導入状況を示す。

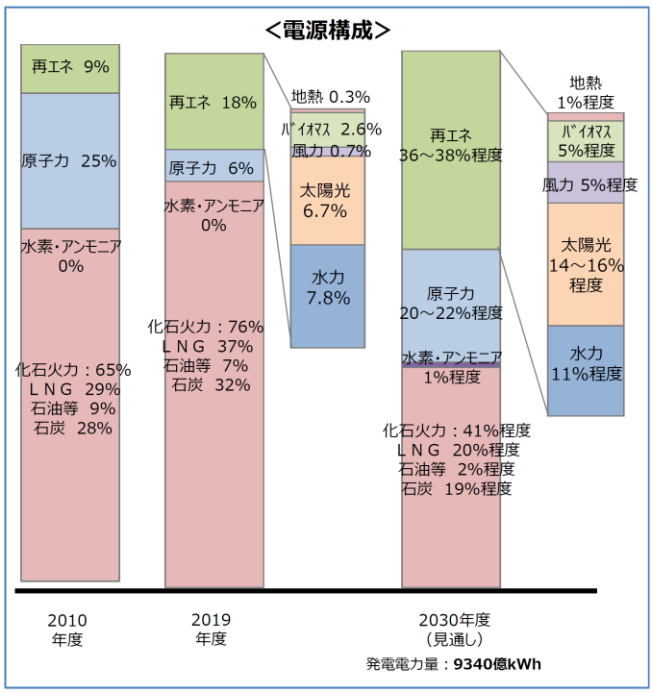
GW(億kWh)	2030年度の野心的水準	H27策定時
太陽光	103.5~117.6GW (1,290~1,460)	64GW (749)
陸上風力	17.9GW (340)	9.2GW (161)
洋上風力	5.7GW (170)	0.8GW (22)
地熱	1.5GW (110)	1.4~1.6GW (102~113)
水力	50.7GW (980)	48.5~49.3GW (939~981)
バイオマス	8.0GW (470)	6~7GW (394~490)
発電電力量	**3,360~3,530億kWh**	**2,366~2,515億kWh**

※2030年度の野心的水準は概数であり、合計は四捨五入の関係で一致しない場合がある

具体施策		導入見込容量（発電電力量）
＜政府として目標設定しているものや具体施策により、具体的な導入量が見込まれるもの（240億kWh程度）＞		
①	系統増強等を通じた風力の導入拡大【経済産業省】	陸上風力：2.0GW（40億kWh程度） 洋上風力：2.0GW（60億kWh程度）
②	新築住宅への施策強化【経済産業省、国土交通省、環境省】	太陽光：3.5GW（40億kWh程度）
③	地熱・水力における現行ミックスの達成に向けた施策強化	地熱（50億kWh程度） 水力（50億kWh程度）
＜今後、官民が一体となって達成を目指していくもの（～170億kWh程度）＞		
④	地域共生型再エネ導入の推進【環境省・農林水産省】	太陽光：4.1GW（50億kWh程度） ※風力、地熱、水力、バイオマスも含まれうる
⑤	民間企業による自家消費促進【環境省】	太陽光：10.0GW（120億kWh程度）

図 3.5.2-1　新たなエネルギーミックスにおける再生可能エネルギーの発電電力量の見込み（出典：総合資源エネルギー調査会 13)）

注）後段は、3,130 億 kWh から 3,360～3,530 億 kWh への引き上げへの施策強化の内訳



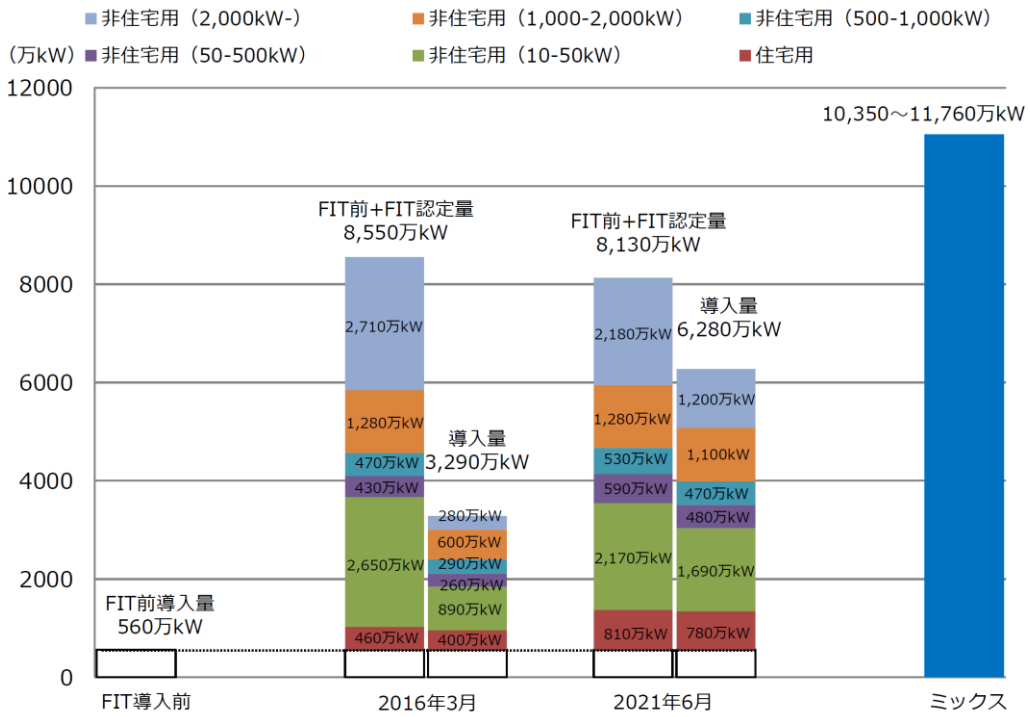
(kW)	導入水準 (21年3月)	FIT前導入量 ＋FIT認定量 (21年3月)	ミックス (2030年度)	ミックスに対する導入進捗率
太陽光	6,200万	8,100万	10,350～11,760万	約56%
風力	450万	1,190万	2,360万	約19%
地熱	61万	67万	148万	約41%
中小水力	980万	1,000万	1,040万	約94%
バイオマス	500万	1,030万	800万	約63%

※バイオマスはバイオマス比率考慮後出力。
※改正FIT法による失効分（2021年３月時点で確認できているもの）を反映済。
※太陽光の「ミックスに対する進捗率」はミックスで示された値の中間値に対する導入量の進捗。

図 3.5.2-2 新たなエネルギーミックスに対する再生可能エネルギーの導入状況（出典：調達価格等算定委員会 [14]）

(1) 太陽光発電

図 3.5.2-3、図 3.5.2-4 にそれぞれ、太陽光発電の FIT 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。新しいエネルギーミックス（10,350～11,760 万 kW）の水準に対して、2021 年 6 月における FIT 制度開始前導入量+FIT 認定量は 8,130 万 kW、導入量は 6,280 万 kW となった。2021 年度の買取価格は、事業用（50kW 以上 250kW 未満）が 11 円/kWh 等だが、海外の買取価格と比べて高い。事業用（250kW 以上）は入札対象になっており、2021 年度第 1 四半期・第 2 四半期・第 3 四半期における入札の加重平均落札価格はそれぞれ 10.82 円/kWh、10.60 円/kWh、10.31 円/kWh である。



※ 改正FIT法による失効分（2021年6月時点で確認できているもの）を反映済。

図 3.5.2-3 太陽光発電の FIT 認定量と導入量（出典：調達価格等算定委員会 [15]）

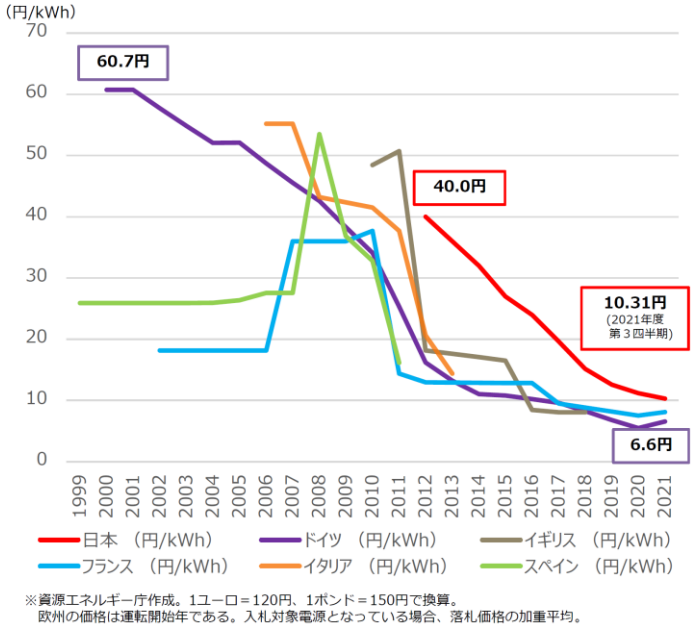
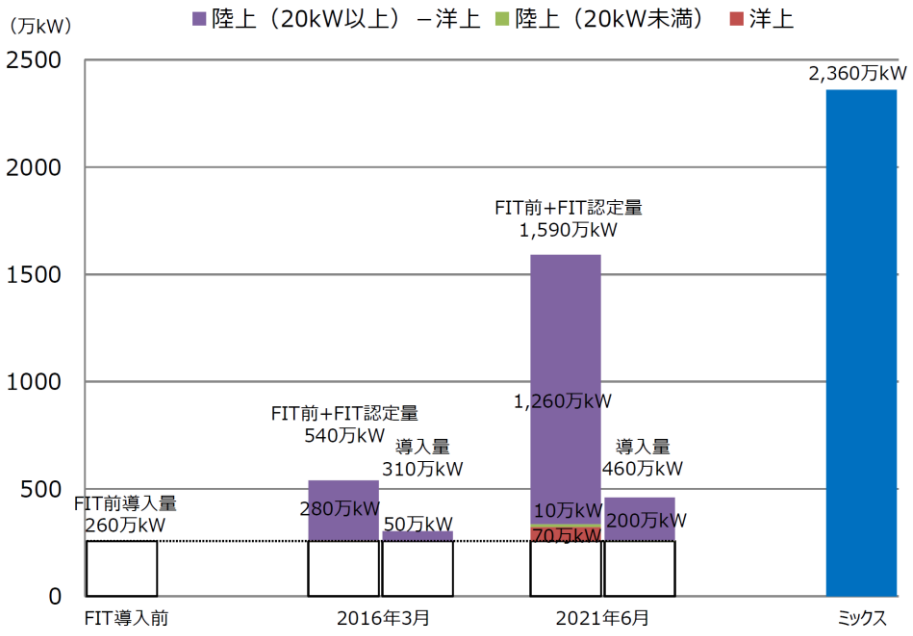


図 3.5.2-4 太陽光発電（2,000kW）の各国の買取価格（出典：調達価格等算定委員会 [15]）

(2) 風力発電

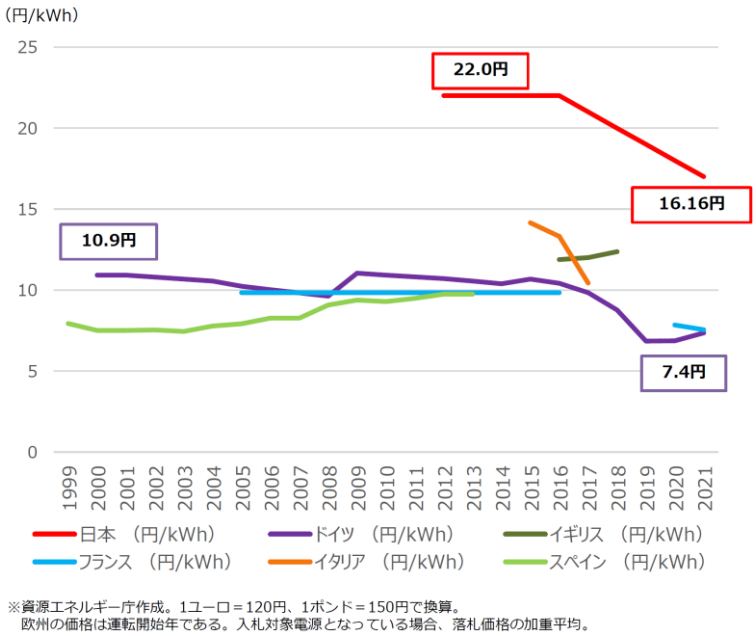
図 3.5.2-5、図 3.5.2-6 にそれぞれ、風力発電の FIT 認定量・導入量および風力発電（20,000kW）の各国の買取価格を示す。新しいエネルギーミックス（2,360 万 kW）の水準に対して、2021 年 6 月における FIT 制度開始前導入量+FIT 認定量は 1,590 万 kW、

導入量は 460 万 kW となった。洋上風力発電（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。2021 年度の買取価格は、陸上風力発電の 2021 年度入札における平均落札価格が 16.16 円/kWh 等だが、海外の買取価格と比べて高い。



※ 改正FIT法による失効分（2021年6月時点で確認できているもの）を反映済。

図 3.5.2-5 風力発電の FIT 認定量と導入量（出典：調達価格等算定委員会 16)）



※資源エネルギー庁作成。1ユーロ＝120円、1ポンド＝150円で換算。
欧州の価格は運転開始年である。入札対象電源となっている場合、落札価格の加重平均。

図 3.5.2-6 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 16)）

(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、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。図 3.5.2-7 に示すように、2021 年度（予測）の買取費用総額は 3.8 兆円、賦課金（国民負担）総額は 2.7 兆円になっており、買取総額の内訳によると 2012 年度～2014 年度に認定された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、2020 年度実績では、産業用・業務用が 16%、家庭用が 12%となっている。

<買取総額の内訳>

住宅用太陽光		0.3兆円	7%
事業用太陽光	2012年度認定	0.8兆円	22%
	2013年度認定	1.1兆円	60% 28%
	2014年度認定	0.4兆円	10%
	2015年度認定	0.1兆円	3%
	2016年度認定	0.1兆円	3%
	2017年度認定	0.04兆円	1%
	2018年度認定	0.1兆円	3%
	2019年度認定	0.02兆円	0%
	2020年度認定	0.001兆円	0%
	2021年度認定	0.0001兆円	0%
	（合計）	（2.7兆円）	（70%）
風力発電		0.2兆円	5%
地熱発電		0.02兆円	0.4%
中小水力発電		0.1兆円	3%
バイオマス発電		0.5兆円	14%
合計		3.8兆円	—

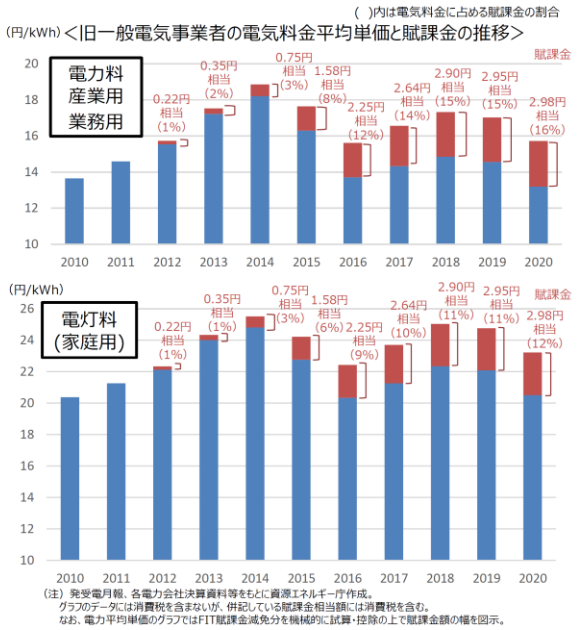


図 3.5.2-7 FIT 制度に伴う国民負担の状況（出典：調達価格等算定委員会 [14]）

また、第 1 章の 1.1.4 節でも記載したように、日本では、平地面積あたりの太陽光・陸上風力の発電電力量などで見ると、既に世界最高水準となっており、エネルギー密度の小さい再エネの利用に伴う土地制約が、とりわけ国土が狭く、平地が少ない日本では顕在化してきている。不適切と考えられる設置も見られ、住民とのトラブルも増大してきており、条例で規制を行う地方自治体が増加してきている。更なる再エネの持続的な拡大のためには、他の土地利用目的との競合の少ない適地の確保を進めることが重要である。一方、いずれにしても、再エネの設備費自体は今後もまだ低下の余地が残っていると考えられるが、土地の競合回避などの対応に伴う、周辺費用は増大する可能性も高く、これまでのように継続的に価格低下が進むとは言い切れない。

参考文献（第 3.5 節に関するもの）

1) IEA, World Energy Outlook 2016
2) IEA, World Energy Outlook 2017
3) IEA, World Energy Outlook 2018
4) IEA, World Energy Outlook 2019

5) IEA, World Energy Outlook 2020
6) IEA, World Energy Outlook 2021
7) IRENA, Renewable Capacity Highlights (2021)
8) IEA, PVPS Trends in Photovoltaic Applications 2021
9) GWEC, Global Wind Reort 2020 (2021)
10) IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2020 (2021)
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（ALPS） 令和 2 年度報告書（2021）
12) 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　中間整理（第 4 次）（2021）
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/20211022001_01.pdf
13) 第 6 次エネルギー基本計画
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf
14) 調達価格等算定委員会（2021） https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/070_01_00.pdf
15) 調達価格等算定委員会（2021） https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/073_01_00.pdf
16) 調達価格等算定委員会（2021） https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/073_02_00.pdf

3.6 エネルギーシステム改革と温暖化対策

3.6.1 電力自由化の市場と温暖化対策

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ている。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ている。図 3.6.1-1 は、電力システム改革後の事業形態を示している。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ところである。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。小売における新電力の比率は大きく上昇した（図 3.6.1-2）。電力は経過措置料金の解除が見送られている状況であるが、都市ガスについては、2021 年 10 月に規制料金（経過措置料金）の規制解除がなされた。また、2022 年 4 月にガス導管の法的分離がされる予定で、一連のガスシステム改革は一旦終了の形となる。

ただ、多くの課題が残っており、また、「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、更には、国際的な化石燃料価格高騰も起こっており、直近ではウクライナ情勢も加わり、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は、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。

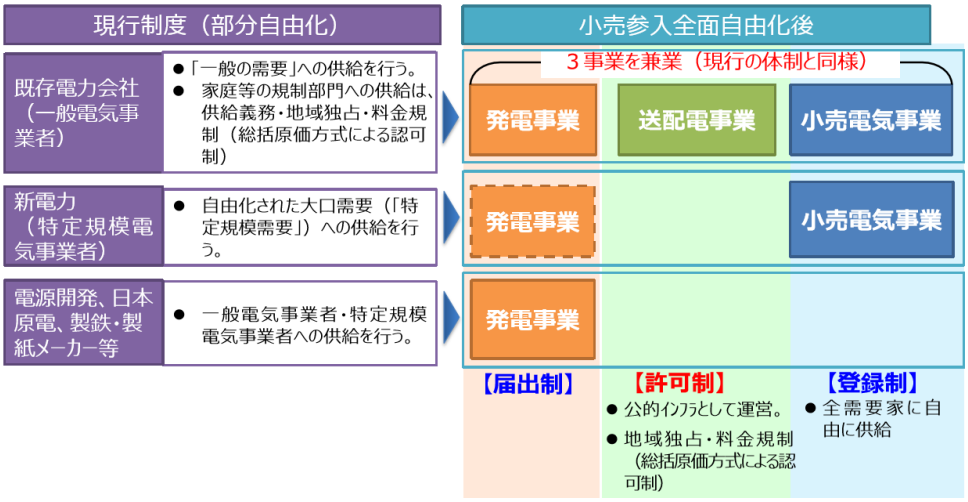


図 3.6.1-1 日本における電力システム改革後の事業形態 [1)]

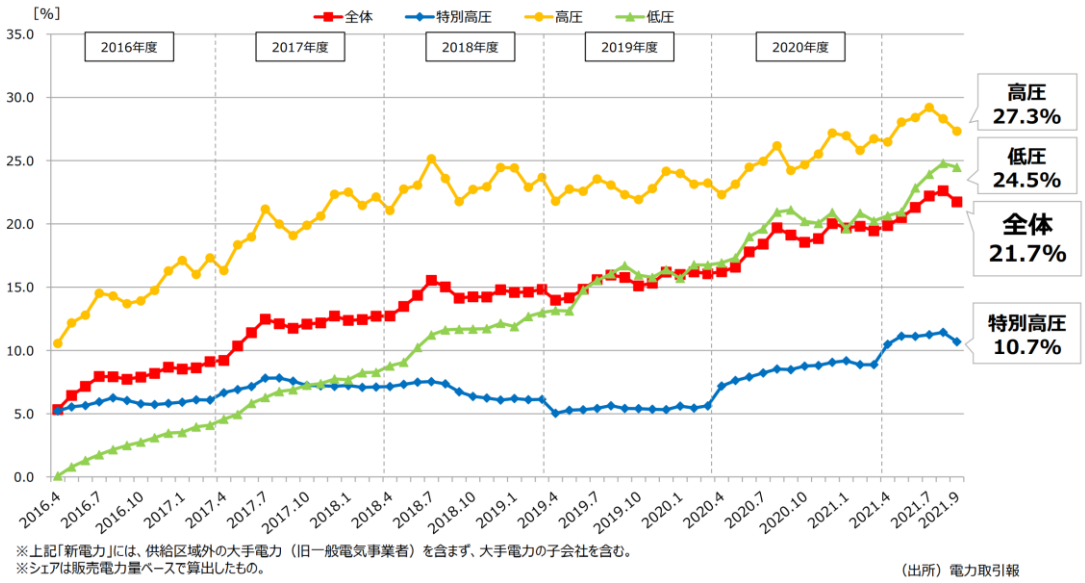


図 3.6.1-2 新電力のシェアの推移 [2)]

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って、取引量は過去数年間で劇的に増大し、全電力需要の 40%程度となっている（図 3.6.1-3）。このように、これまでの相対契約中心から、卸取引市場の活用へと移行している。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。図 3.6.1-4 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。また、2021～2022 年の冬季においても高い価格推移となっている。一方、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。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。しかし、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。安定的な電力需給と電力事業運営という点からは必ずしも望ましくない。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。

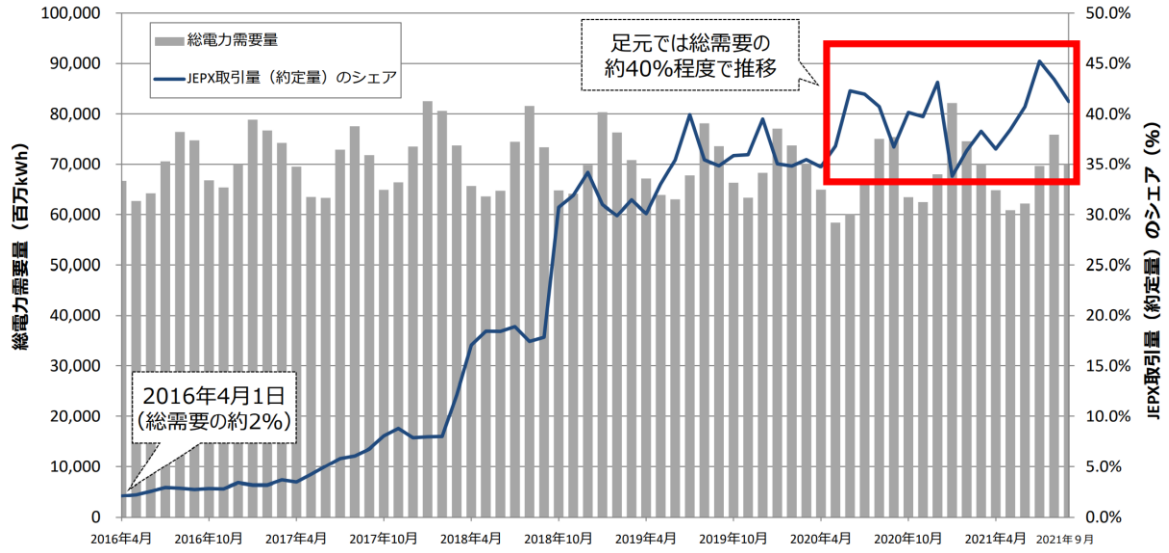
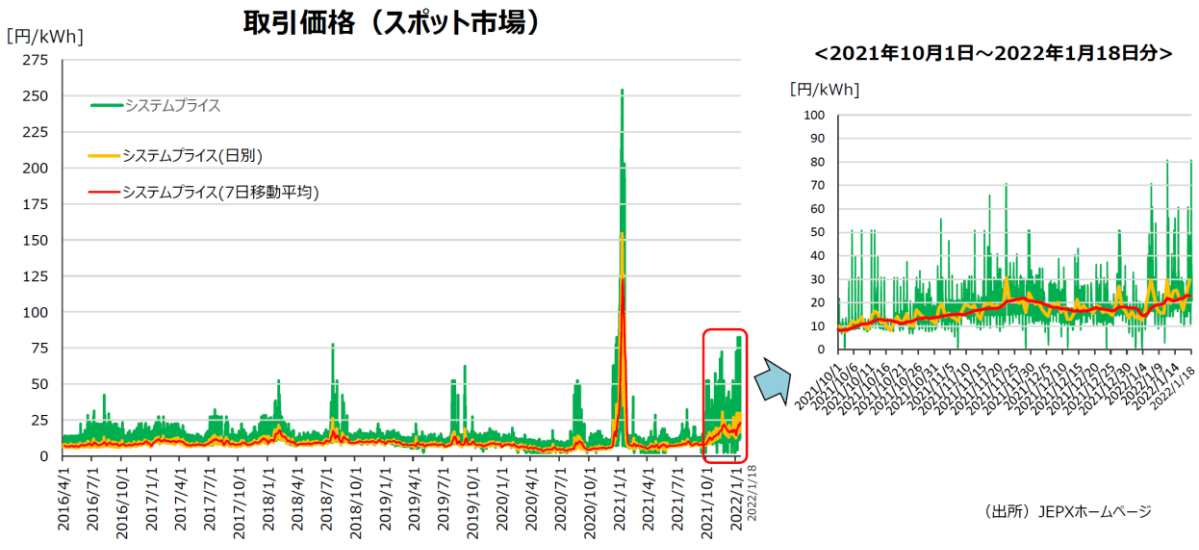


図 3.6.1-3 JEPX の取引量（約定量）の推移 [2)]



	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
平均価格（円/kWh）	16.5	14.7	9.8	8.5	9.7	9.8	7.9	11.2	11.0
最高価格（円/kWh）	55	44.6	44.9	40.0	50.0	75.0	60.0	251.0	80.0
200円/kWh超えの時間帯	0	0	0	0	0	0	0	56	0
100～200円/kWhの時間帯	0	0	0	0	0	0	0	287	0
(参考)0.01円/kWhの時間帯※	0	0	0	0	0	0	22	266	233

図 3.6.1-4 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 [2)]

政府は、図 3.6.1-5 で示されているように、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（ΔkW 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。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。

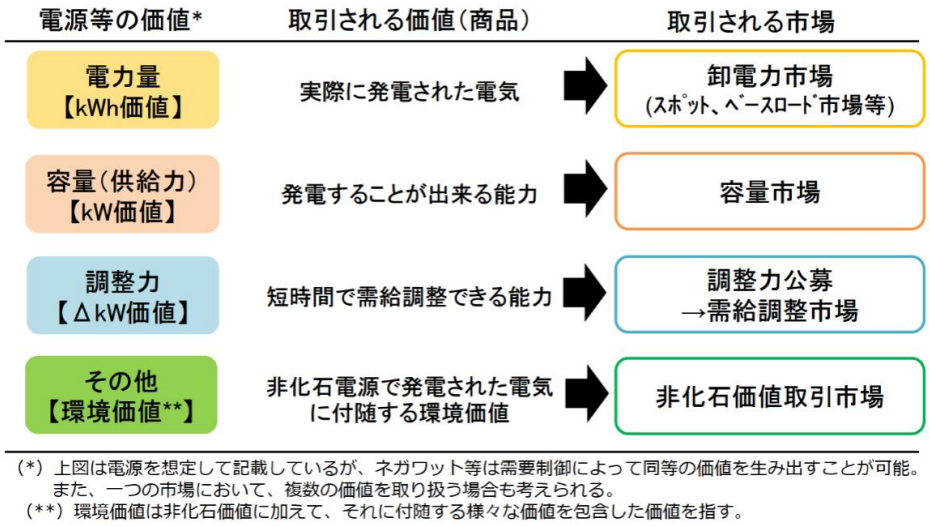


図 3.6.1-5 日本における導入済みもしくは導入予定の電力関連の取引市場 [1)]

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 3.6.1-6）。固定費は回収しにくいが、図 3.6.1-4 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 3.6.1-7）。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。

図 3.6.1-4 で見られたように、長期的には、この影響により、平均価格は低下傾向にあった。一方、ここ 1、2 年は、この影響が続いているものと見られるが、その一方で、少し長期的には気候変動対策の流れからの化石燃料への上流投資の停滞、中期的には COVID-19 後の需要増大、短期的な影響としては積雪の影響による変動性再エネの出力

低下等が加わり、供給と需要の差が小さい状況となりやすく、価格が上昇していると見られる。

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。そして、開始した、2020 年度容量市場オークション結果は図 3.6.1-8 のようになった。設定した上限価格にほぼ張り付くという結果であった。これは、現在の発電設備の置かれた状況を反映したものとも考えられる。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（図 3.6.1-9）。

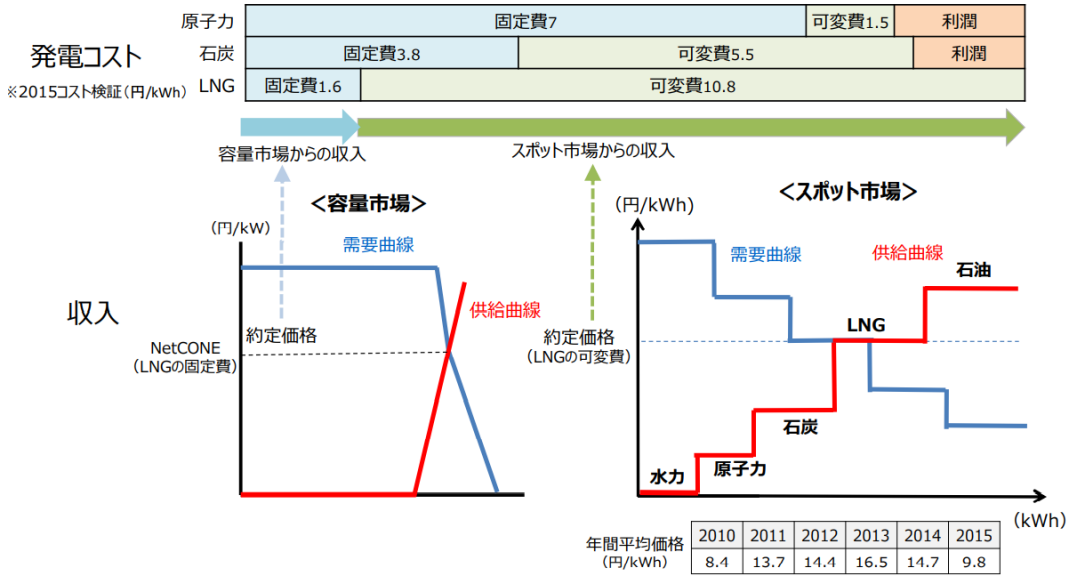


図 3.6.1-6 発電投資回収のイメージ [1)]

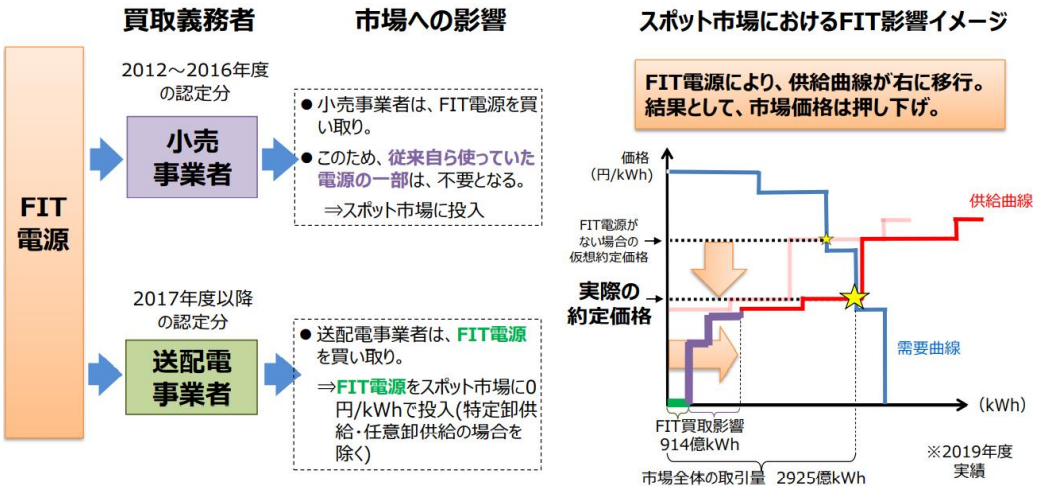


図 3.6.1-7 スポット市場における FIT の影響 [1)]

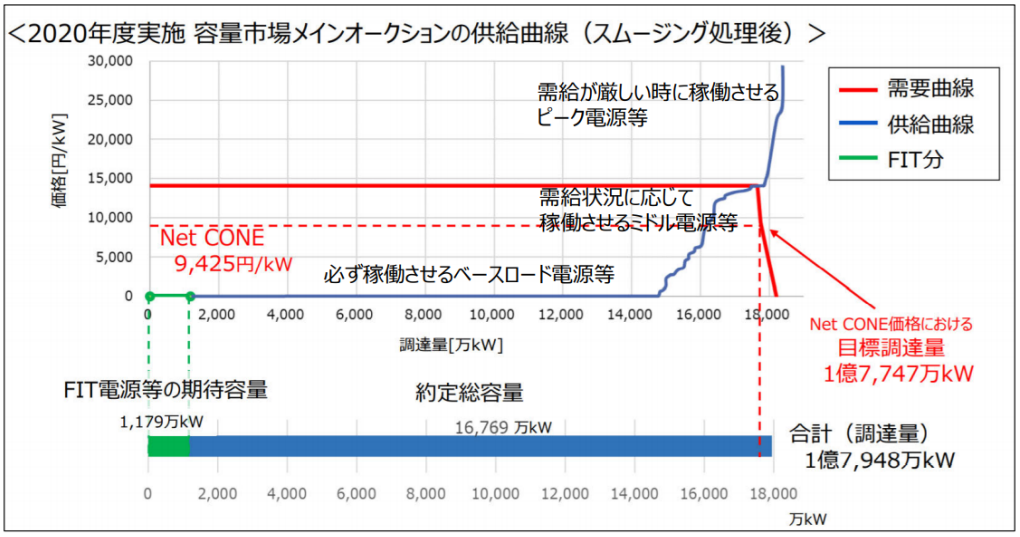
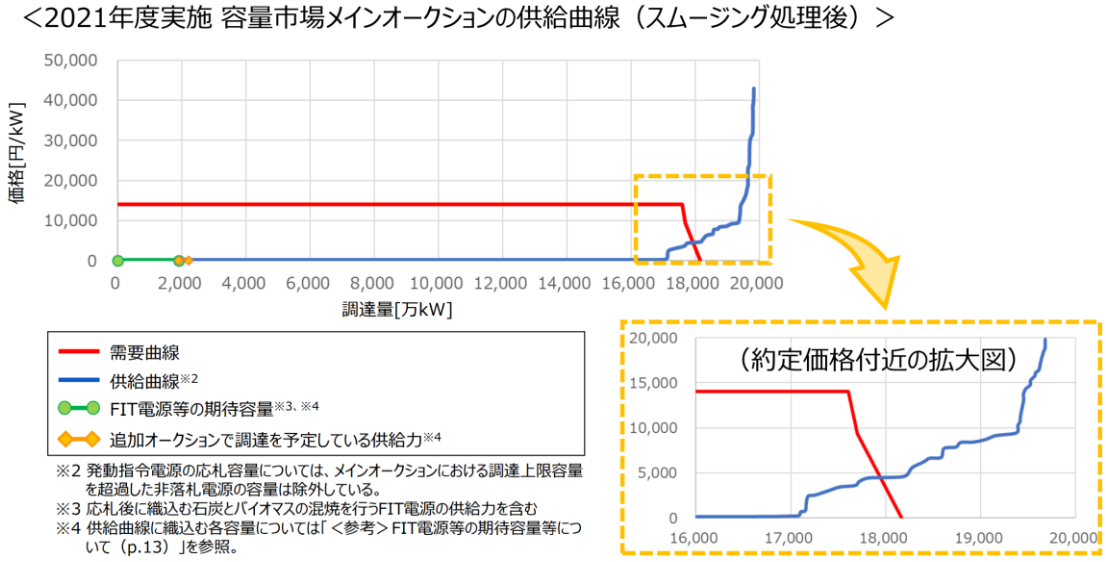


図 3.6.1-8 2020 年度容量市場オークション結果 [1)]

■ 2021年度 容量市場メインオークション（対象実需給年度：2025年度）は、以下の結果となった。
- 約定総容量※1 ：1億6,534万kW（165,342,148kW）
- エリアプライス
  - ✓ 北海道エリア ：5,242 円/kW
  - ✓ 北海道・九州エリア以外 ：3,495 円/kW
  - ✓ 九州エリア ：5,242 円/kW
- 経過措置を踏まえた約定総額 ：5,140億円（514,010,582,305円）
- 特記事項
  - ✓ 約定処理上の市場分断※2により北海道、九州、北海道・九州以外のブロックに分かれた。
  - ✓ エリアプライスの関係から、北海道エリア・九州エリアではマルチプライス方式※3が適用された。
  - ✓ 発動指令電源の応札容量は、メインオークションにおける調達上限容量※4を超過した※5。
- 落札電源一覧（応札事業者名、電源ID※6、落札容量[kW]）については別紙に示すとおり。



※2 発動指令電源の応札容量については、メインオークションにおける調達上限容量を超過した非落札電源の容量は除外している。
※3 応札後に織込む石炭とバイオマスの混焼を行うFIT電源の供給力を含む
※4 供給曲線に織込む各容量については「＜参考＞FIT電源等の期待容量等について（p.13）」を参照。

図 3.6.1-9 2021 年度容量市場オークション結果 [3)]

市場開設からまだ 2 年しか経過していないため、長期的な運用によって、価格の安定性を得ていくことは重要と考えられるが、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 3.6.1-10 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。現在、アンモニア発電や水素発電等も念頭に電源投資を促せるような制度設計にすべく、カーボンニュートラルに資する新規電源投資に対する投資予見性の向上に資する制度設計がスタートしたところであり、引き続き、制度設計の詳細な検討を行う必要性があると考えられる。

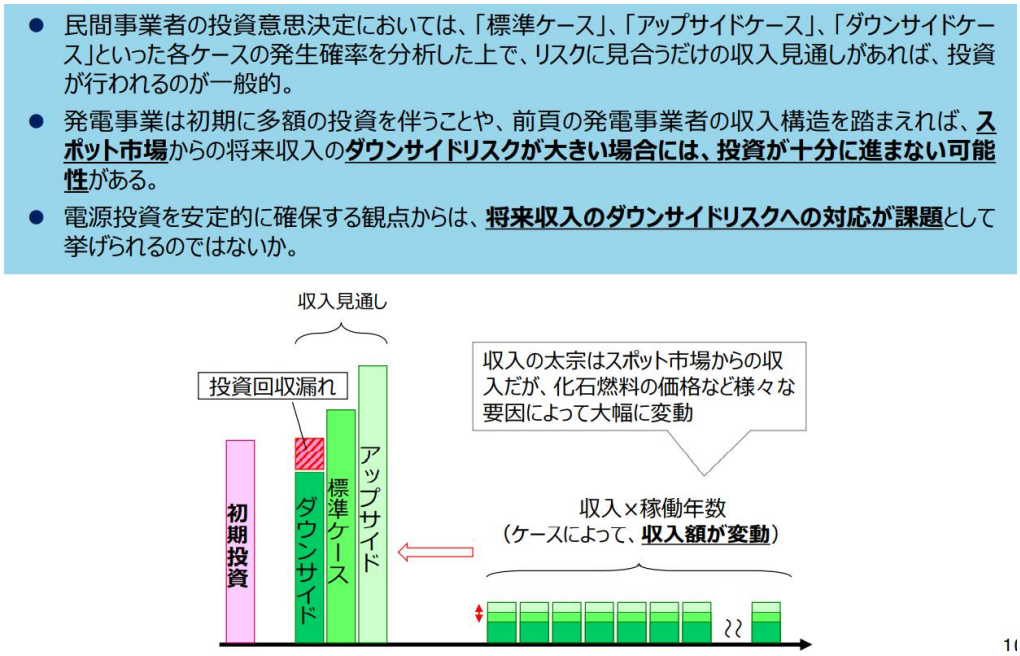


図 3.6.1-10 投資リスクの課題 1)

グローバル企業を中心に、非化石電気での製造を求められるような状況が見られているおり、開設されたばかりの非化石価値取引市場の修正の要望が強まった（図 3.6.1-11）。そのため、非化石価値取引市場は、再エネ価値取引市場と高度化法義務達成市場に分割された（図 3.6.1-12）。そして、再エネ価値取引市場は、最低価格をまずは 0.3 円/kWh とした上で、小売電気事業者のみならず、幅広い需要家が直接購入可能な制度へと変更がなされた。これは、グローバル企業を中心に、非化石電気での製造を求められるような状況に対して、機会を提供するためである。ただし、再エネ価値取引市場への供給の大部分は、FIT 電気であり、供給過多の状況であり、現時点の構造的には基本的に最低価格に張り付く形である。そして、再エネ価値取引市場は、2021 年 11 月に初回オークションが実施された。加重平均の約定価格は 0.33 円/kWh となり、経済合理的な入札行動をとらなかったとも考えられる市場参加者がいたこととなる。また、FIT は電力需要家が幅広く費用を負担して導入したものであり、その内、再エネ価値が取り出され、一部の需要家のみに、安価に提供されることの是非についての議論は多くなされた。また、安価に再エネ価値を得られることになることから、需要家が新たに非 FIT の再エネ電気の調達をするインセンティブが損なわれ、新規の非 FIT 再エネの拡大を阻害する懸念も指摘される。国際競争力を維持しながら、CO_2 排出削減費用の需要家の適正な負担方法については、この再エネ価値取引市場や高度化法義務達成市場の設計のみならず、全体の制度のあり方として、望ましい制度について、引き続き、議論、検討が必要と考えられる。

	現状	需要家の声
論点1 価格	FIT非化石証書の最低価格は1.3円。市場収益は、FIT賦課金による国民負担軽減に活用。（非FIT非化石証書は最低価格なし）	➢ 国際的に認められる非化石価値を少しでも安く調達したい。 ➢ 海外に比べて、調達コストが高い。
論点2 直接購入	非化石価値取引市場は、高度化法により義務を課されている小売電気事業者の目標達成を後押しする制度であるため、その趣旨に照らして、購入対象を小売電気事業者に限定している。	➢ 需要家が直接非化石証書を購入できるようにしてほしい。
論点3 利便性	FIT非化石証書については、トラッキングの実証中。量に限りはあるが、RE100に活用可能。	➢ 小売電気事業者経由で電力メニューとして購入することになるため、他の証書の方が使い勝手がよい。 ➢ 環境価値の由来である発電所のトラッキングをできる証書がFIT非化石証書のみとなっている。

図 3.6.1-11 非化石電気へのアクセスの要望 [4)]

市場名称（仮称）	再エネ価値取引市場	高度化法義務達成市場
市場の目的	需要家の再エネ価値の安定的な調達環境の整備	高度化法の目標達成の後押し及び再エネ等カーボンフリー電源の投資促進
取引対象証書	FIT非化石証書	非FIT非化石証書
取引参加者（売り側）	GIO（低炭素投資促進機構）	発電事業者
取引参加者（買い側）	小売電気事業者、需要家	小売電気事業者
証書の用途	①温対法排出係数の低減 ②証書の環境価値を表示・主張	①高度化法における非化石電源比率への参入 ②温対法排出係数の低減 ③証書の環境価値を表示・主張
証書発行量規模感（20年度発電量実績（一部推計あり））	約900億kWh	約900億kWh ※相対取引含め

図 3.6.1-12 再エネ価値取引市場と高度化法義務達成市場の特徴 [5)]

3.6.2 エネルギーインフラにおける気候変動への適応

近年、日本において大型台風や大雨による災害が相次いでいる。例えば、2018 年 9 月の台風 21 号では関西地域が、2019 年 9 月の台風 15 号では関東地域に大きな被害が生じ、送電の鉄塔や電柱の倒壊の被害も発生した。また、そもそも、送電設備の多くは 1970 年代に建設されており、老朽化も進展し、建て替えや大規模修繕の必要性が高まってくる状況にある。このような中、今後も当面は世界 CO_2 排出量の増大傾向と気温上昇傾向は継続すると考えられ、大きな被害発生の頻度が増大していく可能性がある。よって、様々な適応が必要である。エネルギーインフラにおいても、それに適応した強靭なシステム構築が求められてきている。一方で、電力システム改革が進展してきており、送配電部門は総括原価が維持されているものの、効率化が求められている中で、大きな投資が必要となってきている。

2020 年 6 月には「エネルギー供給強靭化法」が成立した。託送料金制度改革としては、従来の総括原価方式をベースとしたものから、「レベニューキャップ制度」への移行が決まった（2023 年 4 月開始予定）。事業者の投資計画などを踏まえて収入上限を設

定して、経済効率的に、送電網の更新等を促して、持続的な電力システム構築を目指そうとするものである。レベニューキャップ制度の具体的な制度設計も進められた。

また、自然災害時のレジリエンス確保を巡っては、関係機関との連携などをあらかじめ定めておく「災害時連携計画」を一般送配電事業者が協力して作成し届け出ることを義務づけた。また、送配電事業者が仮復旧等に係る費用を予め積み立て（積み立て基準額 94 億円）、被災した送配電事業者に対して交付する相互扶助制度も創設された。2020 年度および 2021 年度の災害の交付申請は 2021 年 12 月時点で図 3.6.2-1 のようになっている。

このような対応は、気候変動影響への適応という点からも重要な政策措置と考えられる。

	No.	申請/交付対象事業者	災害件名（略称）	災害基準 適用要件	最大停電軒数	交付決定額
2020年度分災害	1	沖縄電力	台風8号	発災直後の降雨量	574	**0.01億円**
	2	沖縄電力	台風9号	発災前要件（非常に強い台風） 発災直後の最大風速	36,970	**1.15億円**
	3	沖縄電力	台風10号	発災前要件（非常に強い台風）	3,930	**0.30億円**
	4	中部電力パワーグリッド	7月豪雨	発災前要件（大雨特別警報）	7,580	**0.36億円**
	5	東北電力ネットワーク	福島沖地震	最大震度6弱以上	91,897	**0.24億円**
	6	九州電力送配電	台風9号	停電軒数10万以上	147,000	申請額 計17億円程度
	7	九州電力送配電	台風10号	停電軒数10万以上 発災直後の最大風速、降雨量	476,000	
	8	九州電力送配電	7月豪雨	1時間降水量80mm以上	12,000	
2021年度分災害	7-8月に西日本で発生した豪雨、沖縄地方を襲った台風につき、現時点で計8件程度の申請を予定					

図 3.6.2-1 相互扶助制度の 2020 年度および 2021 年度の災害の交付申請額 [5)]

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 資料 (2021)
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 (2022)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/044_03_01.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 制度検討作業部会 (2021)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/060_04_01.pdf
4) 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 (2021)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/047_04_00.pdf
5) 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 (2021)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/049_04_00.pdf

6) 電力広域的運営推進機関 運営委員会 (2021)
https://www.occto.or.jp/iinkai/unei/2021/files/siryo3a_unei6.pdf

3.7 グリーンファイナンスの動向とモデル分析例の整理

3.7.1 金融部門における気候関連リスク分析の取り組みと背景

近年では金融部門の役割に関する議論が高まり世界的な取り組みが拡大している。2006 年に国連が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)」を提唱した [1)]。また、世界主要 25 ヶ国、金融規制当局、中央銀行総裁が参加メンバーとなっている国際機関、金融安定理事会(FSB)の「気候関連財務情報開示タスクフォース(TCFD: Task Force on Climate-related Financial Disclosures)」は 2017 年 6 月に「気候変動関連の財務情報開示」に関する最終報告書を発表した [2)]。同報告書は賛同する企業に対してシナリオ分析を基に、投資家に向けて自社の気候変動による財務影響把握及び情報開示をもとめている。

同様に金融部門における低炭素化に向けてサステナブルファイナンスの役割が期待されていると同時に、気候変動が金融システムに影響を与えると考えられているため、近年、金融部門における気候リスクに関するシナリオ分析が加速している。2017 年 12 月 12 日にパリで開催された One Planet Summit において、中央銀行及び金融監督当局による「気候変動リスク等に係る金融当局ネットワーク（NGFS: Network for Greening the Financial System)」が設立した。

NGFS の目的は、パリ協定の目標達成に必要な世界の対応を強化することに貢献し、グリーン及び低炭素投資に向けた資本を動員、そしてリスクマネジメントにおける金融システムの役割を強化することである [3)]。2021 年 11 月 2 日現在、NGFS は 100 の金融監督当局と中央銀行及び 16 のオブザーバーから構成され、日本からは日本銀行及び金融庁もメンバーとして加盟している [4)]。これまで NGFS は 2019 年 4 月に気候変動リスクへの対応に関する 6 つの提言、2020 年 6 月に第一弾の気候シナリオ、そして 2021 年 6 月には第二弾の気候シナリオの内容を公表した。第二弾のシナリオは第一弾のシナリオに比べて国レベルの影響評価を含み、様々なマクロ経済指標や移行及び物理的変数を含んでいる。気候シナリオのデータベース及び分析方法の技術的詳細は、NGFS のポータルサイト [5),6)]から入手することが可能である。

本節は、金融部門における気候シナリオの設定およびその課題について、特にマクロ経済評価に焦点を当てて考察をすることを目的とする。

3.7.2 NGFS による気候シナリオの概要

(1) シナリオ全般

本節は NGFS の公開資料 [7),8)]に基づいて以下に概要を示す。NGFS の気候シナリオはアカデミック・コンソーシアム（International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)、Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)、Center for Global

Sustainability at the University of Maryland (UMD)、Climate Analytics (CA)、Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (ETHZ)、National Institute of Economic and Social Research (NIESR)）とのパートナーシップによって開発されている。

NGFS シナリオの目的は、経済や金融システムに対する気候リスクを分析する際の共通のシナリオを、主に中央銀行及び金融監督当局に対して提供するものである。分析対象とする気候リスクは物理的リスクと移行リスクに分けられる。物理的リスクとは「気候変動によって資本及び労働等が受ける影響」であり、急性リスク（熱波、台風・洪水等）及び慢性リスク（気温上昇、降水量、海面上昇等）に分けられる。一方、移行リスクとは、「低炭素経済への移行に伴って生じる政策や技術革新、及び消費者嗜好等の変化に起因した損失に対するリスク」であり、石炭の座礁資産化がその一例である。気候リスクは、ミクロ（家計及び企業）及びマクロ経済への伝送チャネルを通じて金融システムに影響（金融リスク）を与える。尚、第二弾の NGFS シナリオ分析では、物理的影響の中でも慢性リスクによる経済及び金融システムに与える影響は考慮されているが、急性リスクによる同影響は組み込まれていない。また、土地利用や穀物生産への影響など広範囲のセクターをカバーしているのが特徴である。

NGFS シナリオは、「気候影響推計」、「移行パス推計」、「経済評価」の各分野において様々なモデルが使用されている。「気候影響推計」には、国際プロジェクト ISIMIP(The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project)に参加している気候モデル及び CLIMADA(CLIMate ADAptation)が使用されている。一方、「移行パス」は、GCAM5.3、MESSAGEix-GLOBIOM1.1、REMIND-MAgPIE2.1-4.2 といった三つの統合評価モデル(IAMs)によって推計され、最後に経済影響は、マクロ経済モデルである NiGEM(National Institute's Global Econometric Model)を用いて 6 つのシナリオを基に、18 の経路（6 シナリオ×3 機関）が算出されている。基本的に全ての IAMs では GDP 及び人口成長は社会経済シナリオの SSP2（中間的シナリオ）を想定している。

以下がシナリオの内容である。

Orderly シナリオ（気候政策を早期に導入、段階的に強度を高める政策）

- Net Zero 2050：野心的な気候変動政策及びイノベーションを通じて世界の気温上昇を 1.5℃に抑制し、2050 年頃に世界でネットゼロ CO_2 排出量を達成
- Below 2℃：気候変動政策の強度を段階的に高め、67%の確率で世界の気温上昇を 2℃未満に抑制

Disorderly シナリオ（気候政策の遅れやセクター間の政策が異なるため移行リスクが比較的高い）

- Divergent Net Zero：2050 年頃にネットゼロを達成するが、セクター間で導入される政策が異なるため高い費用を要する。
- Delayed transition：2030 年までは年間の排出量は減少せず、2℃以下に抑制するために強度のある政策が必要。また、CO_2 除去に制約がある。

Hot house world シナリオ（一部では対策を実施しているが世界全体としては不十分な対策のため、物理的リスクが深刻）

- NDCs：パリ協定の下での国別貢献を反映（分析では 2020 年 12 月時点の NDCs を使用）
- Current policies：現行政策を反映

表 3.7-1 は NGFS による 6 つのシナリオをまとめたものである。

表 3.7-1　NGFS による 6 つのシナリオ

カテゴリー	シナリオ	物理的リスク	移行リスク			
		気温上昇	気候変動対策	技術変化	CO_2 除去	政策の地域差
Orderly	Net Zero 2050	1.5℃（低）	早急、円滑（中）	急速（高）	中位（低）	中位（中）
	Below 2℃	1.7℃（中）	早急、円滑（中）	緩やか（中）	中位（低）	低位（低）
Disorderly	Divergent Net Zero	1.5℃（低）	早急、不一致（高）	急速（高）	低位（中）	中位（中）
	Delayed transition	1.8℃（中）	遅延（高）	遅い/急速（高）	低位（中）	高位（高）
Hot house world	NDCs	～2.5℃（高）	NDCs（低）	遅い（低）	低位（中）	低位（低）
	Current policies	3℃（高）	特段の対策なし、現行政策（低）	遅い（低）	低位（中）	低位（低）

（出典）NGFS [7)]p.9 を基に RITE 作成。括弧内はエクスパートジャッジメントに基づいた金融リスク度を示す。

図 3.7.2-1 は、各シナリオにおける CO_2 排出量パスを、図 3.7.2-2 は炭素価格パスを示したものである（REMIND モデル結果を適用）。

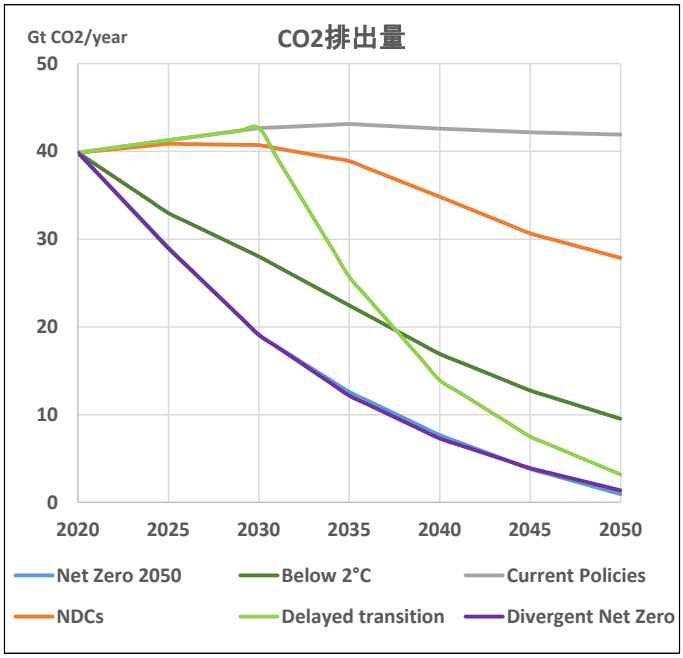


図 3.7.2-1 各シナリオにおける CO_2 排出量のパス

（出典）IIASA[6]、REMIND モデル結果を基に時点間の線形補完をし、著者作成

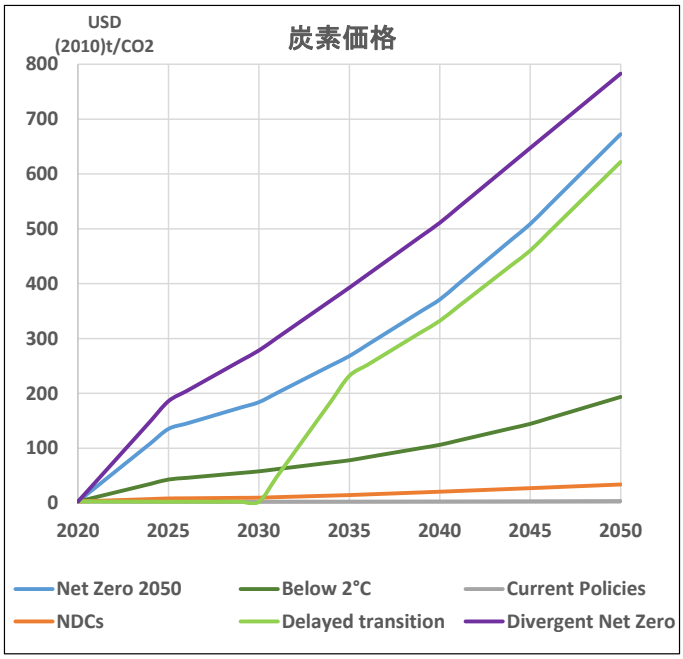


図 3.7.2-2 各シナリオにおける炭素価格のパス

（出典）IIASA[6]、REMIND モデル結果を基に時点間の線形補完をし、著者作成

(2) マクロ経済評価

次に、経済評価方法のシナリオ（表 3.7-2）について公開資料 7),8),9)を基に以下に考察する。第二弾の NGFS シナリオ構築において、新たに NIESR が分析に参画し、経済モデルである NiGEM を用いて詳細なマクロ経済分析を実施している。NGFS シナリオの第二弾から NiGEM が使用された目的は、気候変動が特定のチャネルを通じて（例

えば、異常気象の可能性の増加が世界経済に与える影響）幅広いマクロ経済変数に与える影響を明らかにするためである。

具体的にはNGFSの分析において、3つのIAMsから得られた移行のインプット（GDP、人口、燃料別一次エネルギー消費、及び炭素税など）及び慢性の物理リスクの推計値をショックとしてNiGEMに組み込みシミュレーションを実施するものである。

物理的リスクが経済に与える影響には大きな不確実性が存在することが広く認識されている。しかし、ここでは、先行研究から得られた一つの推計から得られた被害推計例[10]をショックとして外生的にモデルに与えている。また、気温上昇のデータに基づいてシナリオ毎に国別の影響を推計する。全てのリスク（海面上昇、低確率の影響が大きい事象など）を含むわけではないことに留意が必要である。

一方、移行リスクはNiGEM内で以下のチャネルを通じて表現される。

- エネルギーショック：供給側において、高いエネルギーコストはエネルギー利用を減少させる。エネルギー輸出のシェアが高い国は大きな影響を受ける。
- 政策ショック：（IAMs から得られた）炭素価格（間接法人税として表現）が費用を増加させ需要にショックを与える。Orderlyシナリオでは需要に与える負の影響は炭素税収によってオフセットされる。
- 慢性的な物理的リスク：IAMsにおける被害関数から得られたGDP影響は、生産能力に対するショックとしてNiGEMに内生的に導入され、需要及び供給にショックを与える。その結果、生産能力の低下、低需要となりGDP及び雇用に影響を与える。
- 不確実性：Disorderlyシナリオにおいて、政策及び投資に係る不確実性は高い投資リスクプレミアムをもたらす。

使用モデルであるNiGEMは2050年（単年毎）までの合理的期待及び完全予見を仮定した世界マクロ計量モデルであり、主な行動方程式は過去のデータに基づいて推計される。同モデルは四半期毎の予測やシナリオ構築及び金融業界におけるストレステスト（金利変動等の外的ショックによる金融部門における損失の評価等）を目的とし、英国財務省、OECD等で広く使用されている[11]。以下はモデルの詳細である[7),8),9)]。

NiGEMは全てのOECD諸国及び一部の途上国が個別にモデル化され、その他国は地域ブロックとして扱われる。また、財・サービス貿易及び統合した資本市場を通じて各国がリンクしている。NiGEMは4つのエージェント（家計、企業、政府、金融当局）を想定しており、合理的期待（デフォルト）あるいは適応的期待（過去の事象を基に将来期待を形成）を想定している。家計は現在そして期待将来可処分所得、そして資産から得る富（wealth）を基に実質消費を決定する。金融的なwealthは、利子率によって影響を受ける可処分所得から構成される。長期消費のダイナミクスは主にデータに基づいて調整される。

表 3.7-2　NGFS のシナリオ（経済モデルにおける想定）

カテゴリー	シナリオ	物理的リスク	移行リスク	財政ルール
Orderly	Net Zero 2050	期待される気温プロファイルを GDP 被害ターゲットに利用	・ 世界カーボンプライシング ・ エネルギーミックス変更 ・ エネルギー効率性	炭素税収は政府投資を介して還元
	Below 2℃			所得税減税により民間消費が増加
Disorderly	Divergent Net Zero			所得税減税により民間消費が増加（景況感への追加的な負のショック）
	Delayed transition			所得税減税により民間消費が増加（景況感への追加的な負のショック）
Hot house world	NDCs	95 パーセンタイル値の気温プロファイルを GDP 被害ターゲットに利用	（制限付き）カーボンプライシング	所得税減税により民間消費増加
	Current policies		無し	無し

（出典）NGFS [8)]p.39-40 を基に著者作成

企業の生産に関しては、生産要素（資本と労働）は CES 型関数で労働増加的技術進歩を想定し、生産要素と石油投入はコブ・ダグラス型関数で構成される。

労働及び資本需要は企業の利潤最大化から導出され、長期の労働・生産率は実質賃金コスト及び技術進歩に依存するが、長期の資本・生産率は資本の実質ユーザーコストに基づく。資本のユーザーコストは実質長期利子率及びリスクプレミアムに依存する。

政府予算式は、歳入（所得税、法人税、間接税）と歳出（政府投資及び消費）から構成される。デフォルトで予算ルールの下では、公債比率が目標とする同比率から乖離した際に各種税率で調整される。

最後に金融当局は、インフレ率と生産ギャップ、物価水準、名目生産高に依存するフィードバックルールに基づいて短期の名目金利を設定する。金融政策の様々なルールが定義されているが、二本柱戦略がデフォルトとなっている。つまり、金融政策の二本柱戦略では、名目 GDP に対する名目 GDP 目標値の比率とインフレ期待値とインフレ目標値の差の関数として、短期金利を設定する。

基本的には金融及び財政当局において広く使用されている DSGE（動学的確率的一般均衡）モデルの特徴を多く有したニューケインジアン構造に基づいているが、純粋な DSGE と異なる点は、過去のデータに基づいている点である。そのため、理論とデータとのバランスがとれていることが特徴といえる。また、NiGEM は財政政策ショック（炭

素税等による所得税及び法人税調整、税収による政府投資拡大等）及び金融政策ショック（名目利子率上昇等）さらに、生産性ショック（労働生産性等）を反映したシミュレーションが可能である。

表 3.7-2 は、NiGEM における NGFS のシナリオ想定を表している。Net Zero 2050 では、財政ルールとして炭素税収は政府投資を介して還元されるが、一方、その他のシナリオでは Current policies シナリオ以外は基本的に所得税減税を想定している。

図 3.7.2-3 は NiGEM による各シナリオ群における GDP への影響（以前のトレンド比）を示したものである。Net Zero 2050 シナリオにおいては、移行リスクによる GDP への影響は正となるが、これは高い炭素価格による需要減の負の影響が税収の還元によって相殺されるためである。一方、Delayed transition シナリオでは、移行リスクのスピードや投資の不確実性が企業の投資及び家計の消費に影響を与えるため全体として GDP 影響は負となる。

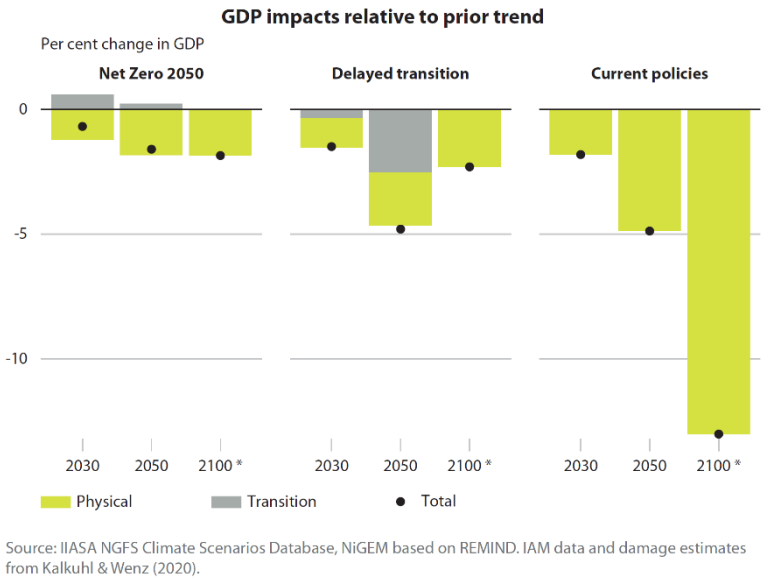


図 3.7.2-3 物理的リスク及び移行リスクが GDP に与える影響

（出典）NGFS[7], p. 36 より抜粋

図 3.7.2-4 は Net Zero 2050 シナリオにおける各国の GDP への影響（ベースライン比）を示したものである。

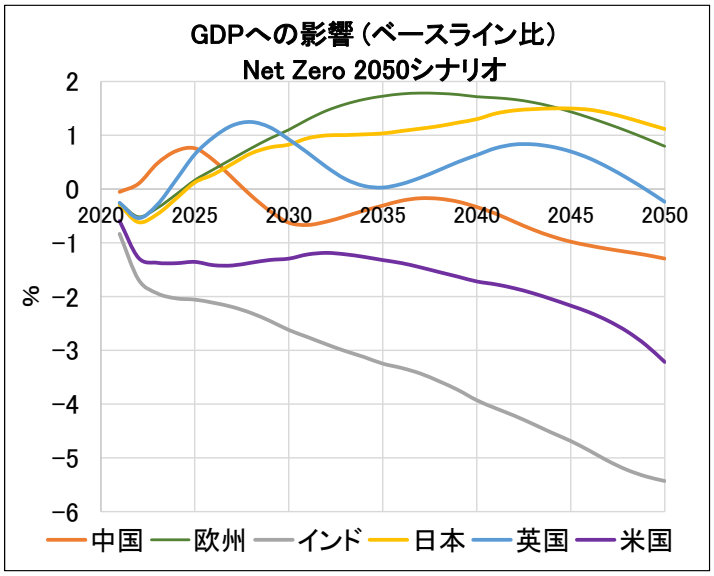


図 3.7.2-4 各国 GDP への影響（Net Zero 2050 シナリオ）

（出典）IIASA[6]NiGEM NGFS v1.21 (with REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 inputs)を基に著者作成

Net Zero 2050 シナリオ下では、国によって GDP への影響は大きく異なる。欧州及び日本では GDP 成長率が緩やかに上昇する一方、インド及び米国の GDP 成長率は大幅に低下する。GDP への影響に関し、NGFS シナリオ分析では具体的なメカニズムは説明されていない。

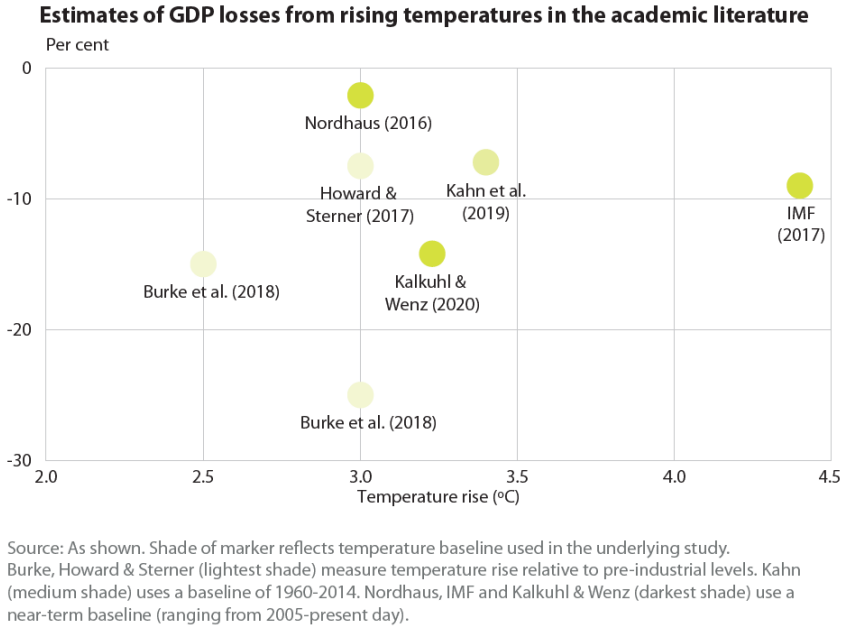


図 3.7.2-5 物理的リスクによる影響：気候変動被害の想定

（出典）NGFS[7]

物理的リスクによる GDP への影響には不確実性があることが指摘されている。図 3.7.2-5 は様々な気候変動被害の推計例を示している。NGFS シナリオ分析では Kalkuhl & Wenz[10]の気候変動被害関数を使用しており、一般的に広く引用される Nordhaus による推計値よりも比較的高い被害を想定していることがわかる。

図 3.7.2-6 は Net Zero 2050 シナリオにおける各国のインフレーションを、図 3.7.2-7 は同シナリオ下の長期金利を示したものである。

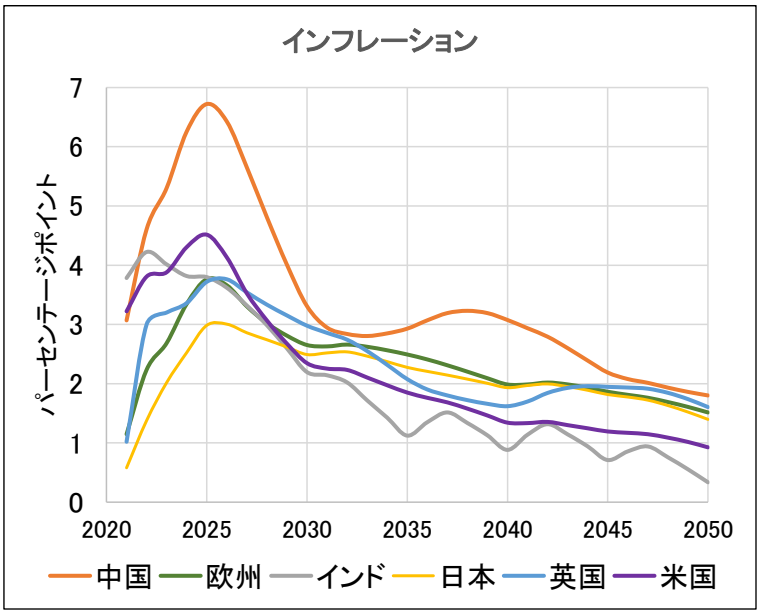


図 3.7.2-6 Net Zero 2050 シナリオにおける各国のインフレーション

（出典）IIASA[6] NiGEM NGFS v1.21 (REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 inputs)を基に著者作成

（注）ベースラインシナリオの値に Net Zero シナリオ下の各国の変化分を著者計上

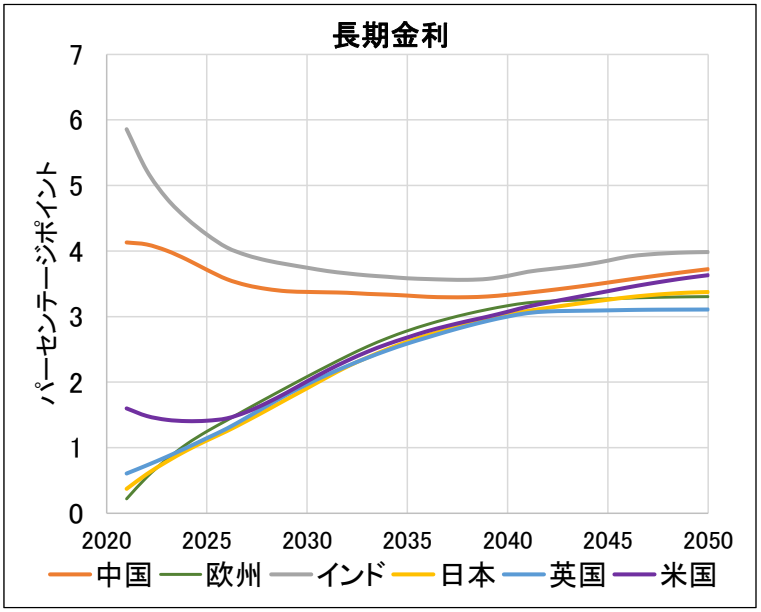


図 3.7.2-7 Net Zero 2050 シナリオにおける各国の長期金利

（出典）IIASA[6] NiGEM NGFS v1.21 (REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 inputs)を基に著者作成

（注）ベースラインシナリオの値に Net Zero シナリオ下の各国の変化分を著者計上

炭素税導入は短期的にはエネルギーコストを上昇させ、インフレ率が増加し、（主に先進国の）長期金利が押し上げられる傾向にあるが、国によって気候変動対策によるインフレーション及び長期金利に与える影響は大きく異なることがいえる。

3.7.3 NGFS シナリオに基づいた使用例

NGFS は 2021 年 10 月に、NGFS メンバーである 31 の金融監督当局に対して実施したアンケート結果をまとめた報告書を発表した[12]。31 の金融当局は、気候シナリオ分析実施済、進行中あるいは今後実施を予定しており、シナリオ分析をする目的として、「気候リスクが金融システム及び経済に与える影響の評価（ミクロ/マクロプルーデンス及びマクロ経済リスク評価）」、そして「対応能力の開発（組織内、もしくは金融機関セクター内）」が挙げられている。各機関のシナリオ分析の想定は対象分野（経済全体、セクター）、対象気候リスク（物理的・移行リスクの両方、あるいはいずれか）、対象期間（短期、中期、長期）と様々である。今後、NGFS は中央銀行並びに金融監督局間との知識共有のプラットフォームとしてこれらのシナリオ開発及びデータ活用をさらに進めていく方針である。

一方、民間の金融機関もシナリオ分析が進んでいる。日本の事例として三井住友フィナンシャルグループは、移行リスク評価の際に NGFS のシナリオ（Current policies シナリオ、Net Zero 2050 シナリオ）及び IEA の Net Zero Emissions シナリオを使用し、GHG 排出量が大きいエネルギー・電力セクターを対象とし、移行リスク評価を実施している[13]。まず、NGFS 及び IEA のシナリオを使用して、CO_2 排出量抑制に伴う変化（炭素価格、資源価格及びエネルギー需要変化等）を基に、これらの変化が営業利益及び設備投資等に与える影響について財務影響分析を実施し、この情報を基に信用リスク影響を推計するストレステストモデルに組み入れ、与信関係費用（不良債権処理に伴う金融機関が被る損失）を推計した。その結果、2050 年にかけて毎年約 20～240 億円の与信関係費用が推計されている。

上記のように、近年、金融部門においてシナリオ分析を実施する動きが加速しており、以前は IEA のシナリオや IPCC のシナリオ等が使用されていたが、今後は NGFS シナリオが共通のシナリオとなる可能性が高いといえる。

3.7.4 考察

本節では、金融部門における気候変動リスクシナリオ分析についての動向を考察した。これまでは、TCFD の提言に沿ったシナリオ分析に関し、各企業が選択する方法及び仮定で実施されてきたが、今後、NGFS シナリオは、企業及び金融機関において共通のシナリオとなる可能性が高い。また、昨年公表された第二回目の NGFS シナリオは、マクロ経済モデル NiGEM による推計結果が初めて加わり、マクロ経済への影響を詳細に分析できるという点で有益である。しかし、以下の点に注意が必要である。

- マクロ経済影響評価に関しても、その他のマクロ経済モデルを使用し比較検討することが必要であると考えられる。マクロ計量モデルは金融部門を詳細に表すことに優れているため、マクロ計量モデルが使用されたと推測される。しか

し、概して、マクロ計量モデルの強みは短・中期のシミュレーション分析であり、行動方程式が過去のデータから導出されていることから、長期の気候変動問題を取り扱う際には十分に注意する必要がある。

- NGFS の報告書にも言及されているが、物理的リスクが経済に与える影響には大きな不確実性が存在する。しかし、シナリオ分析は一つの推計例のみが使用されているため、今後は物理的リスクによる影響の不確実性を考慮した分析が望まれる。
- NGFS について、他の国際機関のシナリオと比べて NGFS のシナリオは国別かつ産業別に示されているが、地域毎の推計精度に課題があることが指摘されている。NiGEM の強みは、多国モデルであることだが、地域別特徴を十分に反映した想定になっているかどうか、検討の余地があると思われる。それによって各地域の詳細なモデルとの比較、調整を通じたより頑健性の高い分析が可能となる。

今後はこの点に関し、特に気候変動の移行リスクに関し、他の機関の研究結果との比較を行いながら考察を深めていく予定である。

参考文献（第 3.7 節に関するもの）

1) United Nations: Secretary-General launches ‘Principles for responsible investment’ backed by world’s largest investors, https://www.un.org/press/en/2006/sg2111.doc.htm (accessed on November 25, 2021).
2) TCFD: Final Report - Recommendations of the task force on climate-related financial disclosures, June 2017.
3) NGFS: Origin and purpose, https://www.ngfs.net/en/about-us/governance/origin-and-purpose (accessed on November 25, 2021)
4) NGFS: NGFS Glasgow declaration committed to action, November 3rd, 2021.
5) NGFS: Scenarios portal, https://www.ngfs.net/ngfs-scenarios-portal/ (accessed on November 25, 2021)
6) IIASA: NGFS scenario explorer, https://data.ene.iiasa.ac.at/ngfs/#/login?redirect=%2Fworkspaces (accessed on November 25, 2021).
7) NGFS: NGFS climate scenarios for central banks and supervisors, June 2021.
8) NGFS: NGFS climate scenarios database: Technical Documentation V2.2, June 2021.
9) Hantzsche, A., Lopresto, M., and Young, G.: Using NiGEM in uncertain times: introduction and overview of NiGEM, National Institute Economic Review, No. 244, May 2018.
10) Kalkuhl, M and Wenz, L.: The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions, Journal of Environmental Economics and Management, 103, 102360 (2020).
11) OECD: Forecasting methods and analytical tools, https://www.oecd.org/economy/outlook/forecastingmethodsandanalyticaltools.htm (accessed on November 25, 2021).
12) NGFS: Scenarios in action: A progress report on global supervisory and central bank climate scenario exercises, October 2021.

13) 三井住友フィナンシャルグループ: TCFD リポート 2021、
https://www.smfg.co.jp/sustainability/materiality/environment/climate/pdf/tcfd_report_j_2021.pdf#page=37
（アクセス日 2021 年 11 月 24 日）

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

効率的な温暖化政策を進めていくと、経済的に弱い立場にある人々の負担が不均衡に増大する、いわゆる不衡平性(inequality) 、分布的影響(distributional effect)を引き起こす可能性が従来より指摘されてきている。2015 年の国連サミットにおいて採択された持続可能な開発目標(SDGs)[1)]では、貧困の撲滅、安価で持続可能なモダンエネルギーアクセスへの提供、国内及び国家間の不衡平性の低減、気候変動への対応を含む 17 の目標が掲げられており、効率性と衡平性の双方に配慮した温暖化政策の推進 SDGs 達成の観点からも重要である。

日本は 2020 年 10 月に、国としての 2050 年カーボンニュートラルを宣言した。これはパリ協定の気温目標である 1.5℃未満の気温上昇に抑制するシナリオと整合性があるとされる目標である。RITE は総合資源エネルギー調査会基本政策分科会の要請を受けて、日本の 2050 年カーボンニュートラルについて複数のシナリオを想定した分析結果を 2021 年 5 月に提示した。ここで示された日本全体のエネルギーシステムコストの上昇は、温暖化政策が持つ逆進的性質によって、経済的弱者に対してより大きな負担をもたらし、費用負担の世帯間の格差が拡大していく可能性が考えられる。これまで、温暖化政策による世帯間の衡平性への影響分析は Berry[2)]などにより数多く行われてきている。炭素税制度の導入による家庭への逆進的影響については、Berry[2)]によるフランスを対象とした分析、Fremstad and Paul [3)]及び Goulder et al.[4)]による米国を対象とした分析などがある。Andersson[5)]は、スウェーデンの世帯における所得不均衡が炭素税の分布に与える影響を分析し、同国においては Gini 指標が 30 以上の場合に炭素税は逆進的となることを示している。永田ら [6)]は日本における再生可能エネルギー固定価格買取制度の衡平性に関する評価で、制度の導入により低所得層においてより負担が増大し逆進性が拡大することを指摘している。

パリ協定気温目標に基づく不衡平性の分析も行われてきている。Jaccard et al. [7)]は 2050 年 1.5℃目標に整合する欧州 28 か国の家庭エネルギー消費量及び排出の分布の分析において、低所得層では低効率の技術が導入されているためエネルギーの不衡平性は大きいとした上で、最良の技術を導入することによりエネルギー消費量が削減可能であることを示している。Soergel et al. [8)] は IAM を用いて 1.5℃緩和政策による所得分布の変化と貧困率への影響を分析し、累進的な再配分がなければ貧困層はベースラインよりも大幅に増加することを指摘している。

温暖化政策の強化に伴う逆進性に加え、電力システム改革の下での新しい小売電力料金体系の進展によって、更に逆進性が強まる可能性も考えられる。さらには、産業構造の変化によって引き起こされ得る所得格差の拡大など、日本のエネルギー及び産

業の将来動向によっても温暖化対策費用負担の世帯間の格差は影響を受ける可能性がある。

そこで本節では、2050 年カーボンニュートラルのシナリオ分析結果を基に、日本の家庭部門における温暖化対策費用負担に着目した分析結果について報告する。最初に、2050 年カーボンニュートラルの下での日本のエネルギーシステムコストの国民負担について述べる。次に、カーボンニュートラルの下での温暖化政策による日本の家庭部門の費用負担と世帯間の格差への影響をシナリオ別に分析した結果を述べる。さらに、電力小売り自由化の下での家庭用電力料金による感度分析を通して、自由化料金の進展による電力コスト負担の世帯間の格差への影響に関して考察する。なお、日本は 2050 年カーボンニュートラルと整合的で野心的な目標として 2030 年の GHG 排出量を 2013 年比▲46%とする目標（NDC）を 2021 年に発表しており、この NDC におけるエネルギーシステムコストの負担、及び家庭部門の費用負担に関する分析についても行った。本分析のベースとなる 2050 年カーボンニュートラル、2030 年▲46%の対策費用は、DNE21+モデルによって推計したものを用いたが、この▲46%分析にあたっては将来の GDP 想定を COVID-19 の影響を考慮したものに更新しており、一方で 2050 年カーボンニュートラル分析は旧 NDC 及び更新前 GDP に基づく分析であり前提条件が整合的でないことに留意されたい。そのため、2050 年と 2030 年について別々に考察を示す。

3.8.2 分析における想定

本分析に用いたデータ及びシナリオについて以下に記述する。RITE は、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会の要請を受けて、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+モデルを用いて、日本の 2050 年カーボンニュートラルについて複数のシナリオを想定した分析結果を提示している [9]。本節では、このシナリオのうち参考値のケース、再エネ 100%、再エネイノベ、需要変容の 4 シナリオに基づき分析を行った。排出シナリオは 1.5℃シナリオで、これは世界 CO_2 排出が概ね 2050 年に正味ゼロに、世界 GHG 排出が概ね 2065 年に正味ゼロとなる排出経路である。さらに、日本を含め 2050 年カーボンニュートラルを宣言している国については、2050 年に GHG 排出量が正味ゼロ、それ以外は全体で正味ゼロを想定している。

表 3.8.2-1 に想定シナリオを示す。参考値のケース、再エネ 100%のシナリオにおいては各種技術想定をモデルの標準想定通りとし、再エネイノベシナリオでは再エネのコスト低減の加速、需要変容シナリオでは完全自動運転車の実現、普及によりカーシェア、ライドシェアの導入が進むことによる移動需要の低減を想定している。なお、電源構成については、再エネ 100%シナリオでは再エネのシェアをシナリオ想定に基づき 100%とし、その他のシナリオはモデル計算による最適化結果である。また、DAC 無しでは実行可能解が得られないため、すべてのシナリオで DAC が利用可能と想定している。人口、GDP は社会経済シナリオ SSP2 に基づきシナリオ間で共通の想定とした。その他の詳細な想定については文献 9)を参照されたい。

表 3.8.2-1　分析シナリオの想定

		2050 年 GHG 排出削減	各種技術の想定（コスト・性能）	各種技術の導入シナリオ
参考値のケース		▲100% （日本以外については、欧米はそれぞれ▲100%、それ以外は、全体で▲100%を想定	モデルの標準想定 （注：ただし、再エネ比率が高いシナリオでは、疑似慣性力が実現し、普及していることが暗黙の前提となる）	モデルで内生的に決定（コスト最小化）。ただし原子力は上限 10%で制約。CO_2 貯留量制約想定
参考値のケースのモデル想定下で再エネ比率が変化した場合のコスト等を推計	再エネ 100%			再エネほぼ 100%（原子力 0%）
それぞれの技術課題が克服され、より利用が拡大すると想定したシナリオ	再エネイノベ		再エネのコスト低減加速	モデルで内生的に決定。ただし原子力は上限 10%で制約。CO_2 貯留量制約想定
	需要変容		カー・ライドシェア拡大	完全自動運転車実現・普及により、カーシェア・ライドシェアが劇的に拡大すると想定。その他は参照シナリオの想定と同じ

その上で、DNE21+では、民生部門を家庭部門と業務部門に明示的に区分していないため、家庭部門エネルギー消費量は、モデル分析結果における民生部門エネルギー消費と、IEA[10]における 2019 年の部門別エネルギー消費量に基づく比率により推計した。なお、本研究における家庭部門のエネルギーコスト負担には、ガソリン等の運輸費用、製品やサービスに体化されたエネルギーコスト増分の負担、家庭用太陽光発電を含めた家庭用エネルギー機器の設備費分等は含まれない。図 3.8.2-1 に、2050 年における日本の家庭部門最終エネルギー消費を示す。ベースラインと比較すると、いずれのシナリオにおいても大幅な省エネが進むことが示される。電力、ガスが主として消費されるほか、合成メタンの導入も見られる。再エネ 100%のケースでは、電力限界費用の大幅上昇により電化率が他シナリオと比較して低下する。

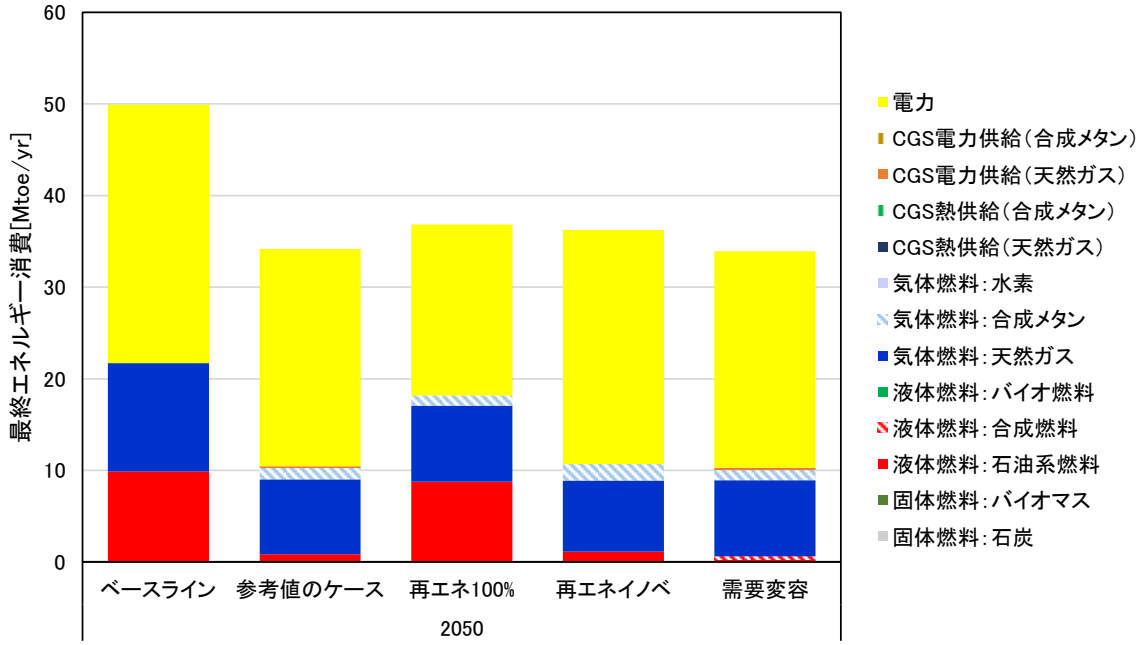


図 3.8.2-1 日本の家庭部門最終エネルギー消費（2050 年）

また、DNE21+では世帯収入分布別のエネルギー需要をモデル化していない。本研究では、世帯の累積収入分布は総務省家計調査 [10]を基に算定した。同統計における世帯収入十分位階級（世帯の年間収入の分布を調整集計世帯数の上で十等分したもの）毎の平均世帯年収と総世帯数を基に、各分位の年収合計を算定して分位別収入分布を推計し、2050 年まで共通とした。結果を図 3.8.2-2 に示す。また各分位の年収合計は SSP2 シナリオ想定における GDP 成長率に基づき増大していくと想定した。シナリオに基づく GDP 成長を考慮しているため、ベースライン比での全体での収入減は想定していない。

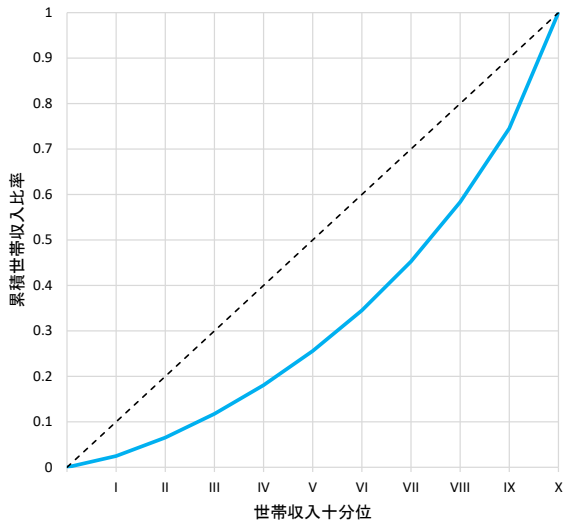


図 3.8.2-2 累積世帯収入分布の想定

エネルギー消費量における世帯収入分位別構成は、家庭部門の CO_2 排出実態調査 [11] における年間世帯収入別世帯当たり年間エネルギー種別消費構成を基に想定し、2050 年まで共通とした。結果を図 3.8.2-3 に示す。その上で、モデル計算結果に基づく家庭部門エネルギー消費量が、これら分布及び構成比の想定に基づき消費されるよう推計した。なお、文献 11)の世帯収入別エネルギー消費構成では、石油系燃料消費の構成比が下位～中位の収入の世帯において上位の収入の世帯と比較すると高い。地域別では北海道や東北、北陸など寒冷地において灯油需要の構成比が温暖な地域と比較すると高いことが示されており、地域要因が世帯収入別の消費構成にも影響を与えている可能性がある。本分析では地域要因は考慮していない。

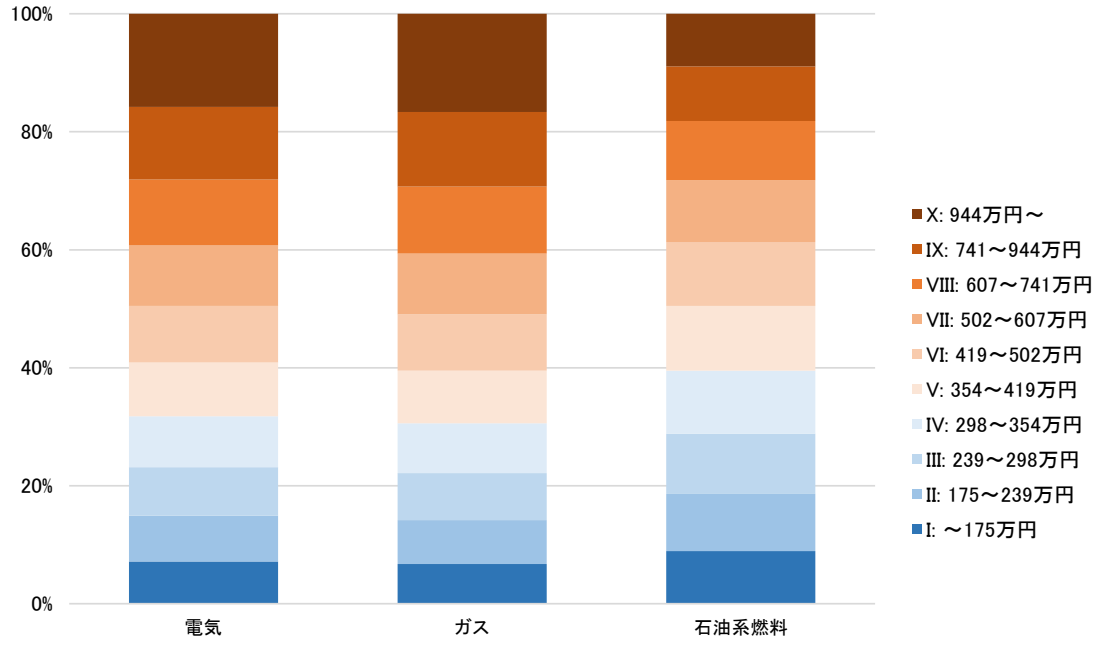


図 3.8.2-3 世帯収入分位別消費構成

3.8.3 分析結果

最初に、日本全体のエネルギーシステムコストについて考察する。2050 年における日本のエネルギーシステムコスト、及び一人当たり費用負担額を表 3.8.3-1 に示す。参考値のケースにおける日本のエネルギーシステムコストは、特段の温暖化対策を考慮しないベースラインと比較すると 194 billion US$/yr 増大する。再エネ 100%のケースではさらに増大するが、再エネ技術のイノベーション進展によりコストが低位となるケースではコスト上昇は再エネ 100%ケースの 1/2 程度に抑制される。技術進展がもたらす需要変容ケースでは、エネルギーコストはベースラインよりも抑制されうる。

エネルギーシステムコストの変化分を総人口で除した一人当たりの年費用負担額は、SSP2 シナリオで想定している日本の 2050 年人口水準（1 億 230 万人）も要因となり、需要変容以外のケースではベースライン比で約 1500～2900 US$/yr 程度高位となる。

表 3.8.3-1　日本のエネルギーシステムコスト（2050 年）

分析シナリオ	2050 年のエネルギーシステムコスト [billion US$/yr]*1		一人当たり費用負担 [US$/yr]*1
ベースライン	986	-	-
参考値のケース	1180	[+194]	[+1898]
再エネ 100%	1282	[+297]	[+2902]
再エネイノベ	1142	[+156]	[+1524]
需要変容	909	[-77]	[-750]

*1 [ ]内はベースラインからの変化

続いて、日本の家庭部門に着目した分析を示す。図 3.8.2-1 の家庭部門最終エネルギー消費量と図 3.8.2-3 の世帯収入分位別エネルギー消費構成、モデル分析における 2 次エネルギー種別限界価格により算定した世帯収入分位別エネルギーコスト負担額を図 3.8.3-1 に示す。図 3.8.2-1 では CN 下において家庭部門の省エネが進むことが示される一方、エネルギー限界費用が高位となるため家庭部門におけるエネルギーコスト負担額はいずれのシナリオにおいてもベースラインよりも増大し、再エネ 100%シナリオで最も増大する。

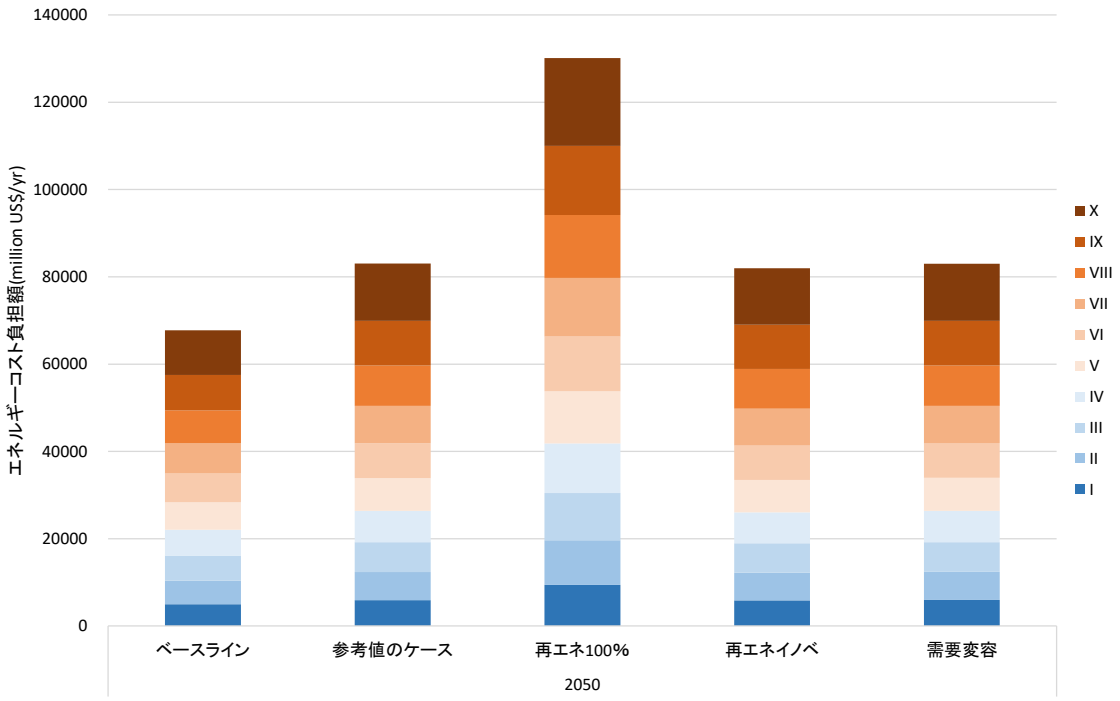


図 3.8.3-1　日本の家庭部門エネルギーコスト負担（2050 年）

図 3.8.3-2 に、参考値のケースにおける累積世帯収入分布と累積エネルギーコスト負担額の分布を示す。収入の分布では高収入世帯側（～第 X 分位）に偏りが見られるのに対し、総エネルギーコスト負担は均等分布に近いことから、低収入世帯側の負担が

より大きいことが示唆される。なお、本稿では割愛しているが、他のケースにおけるエネルギーコスト負担分布においても、エネルギー構成に小規模の差異はあるものの参考値のケースと同様の傾向を示している。

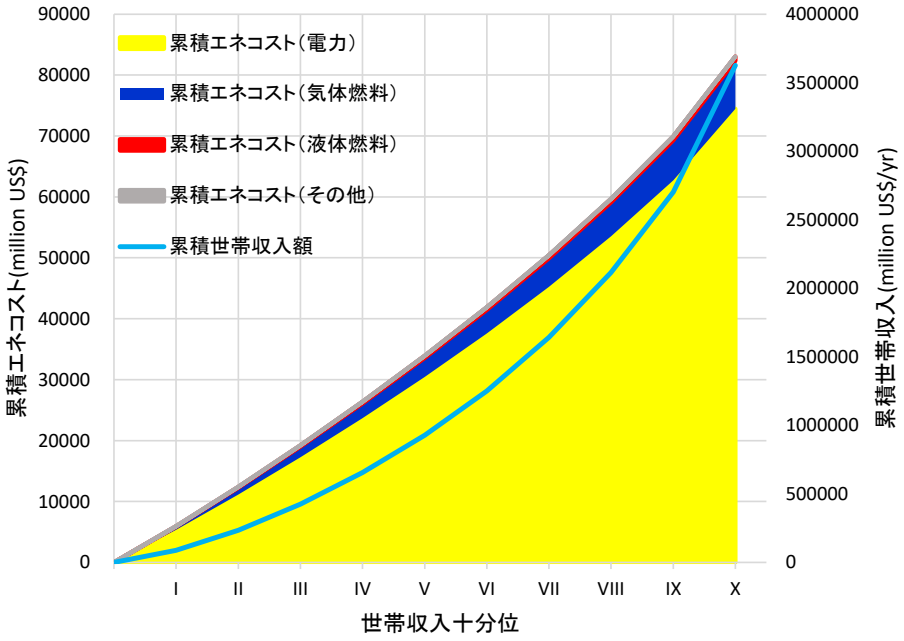


図 3.8.3-2 世帯年収とエネルギーコスト負担の分布（参考値のケース、2050 年）

図 3.8.3-3 に、世帯収入分位毎のエネルギーコスト負担額と、世帯収入に対するエネルギーコストの比率（負担感）、第 I 分位と第 X 分位の間の負担感の比（格差）を示す。いずれのケースにおいても、エネルギーコスト負担額は高収入世帯ほど高く、負担感は低収入世帯ほど高い。ベースラインにおける第 I 分位の負担感は第 X 分位の負担感の 5 倍程度に達する。カーボンニュートラルシナリオにおける第 I 分位と第 X 分位間の負担感の比は、再エネ 100%のシナリオにおいて 4.88 と他のカーボンニュートラルシナリオよりも高く、世帯間の格差が拡大することが示唆される。カーボンニュートラル下において最適なエネルギー構成をとることにより全世帯のエネルギーコスト負担は軽減するとともに、世帯間の格差は低減の方向に向かうことが示唆される。

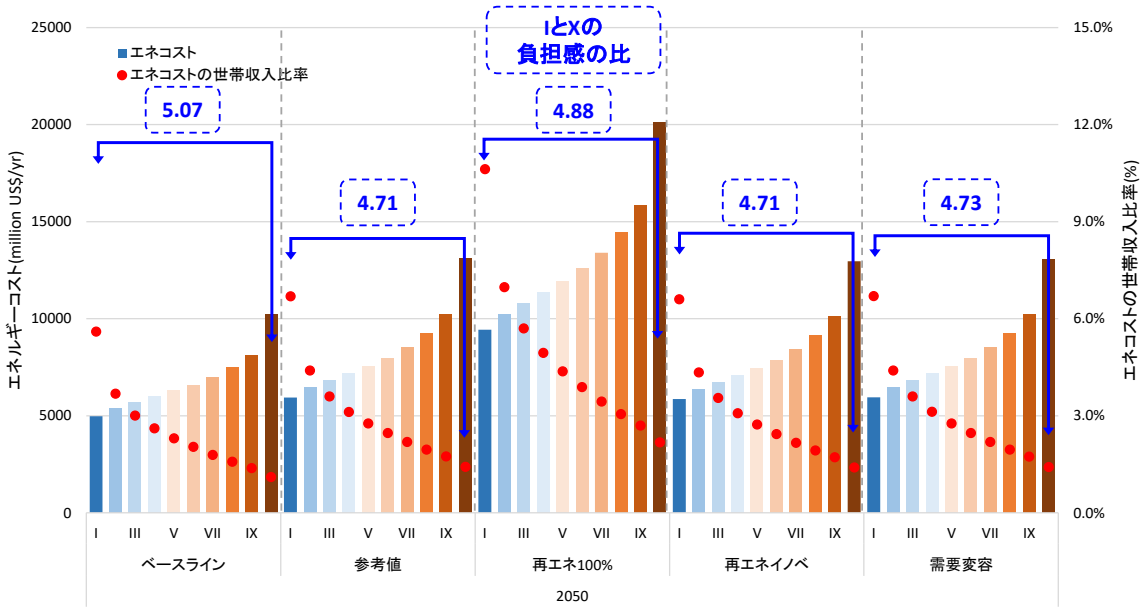


図 3.8.3-3　世帯収入分位別エネルギーコスト負担額と負担感（2050 年）

3.8.4　感度分析：費用効率的な電力料金の進展による影響の感度分析

3.8.1 で述べたとおり、家庭向け電力小売事業が自由化され、安価な電力料金体系が進展することにより、世帯間の格差が拡大する可能性が考えられる。電力自由化前の規制料金では、基本料金部分に加え、消費した電力量に応じた三段階料金設定が取られ、消費電力量が増大するほど単価が上がる逓増型の料金体系であったため、図 3.8.4-1 に示すように一般的に電力消費量の多い高収入世帯にとっては負担が増大する仕組みであった。一方、2016 年 4 月の小売全面自由化以降、参入各社による様々な料金プランが提示されてきている。逓増型料金体系が見直され、全体としてより安価な電気料金価格が実現されれば、世帯にとっての電力コスト負担は軽減されうるが、一方で料金プランの選択の自由に伴い、電力多消費の家庭が逓増型以外の料金体系へ移行すれば、結果として電力消費量の多い世帯にとっては単価が安価に、電力消費量の少ない世帯には割高となるリスクがあり、電力コスト負担における世帯間の格差が一層増大する可能性が考えられる。本節では、自由化以降の新規電気料金体系の導入による家庭の電力コスト負担への影響を、規制料金（経過措置料金）及び自由化料金メニューを用いて、2050 年参考値のケースにより感度分析を行った。具体的には、参考値のケースにおける 2050 年家庭部門電力消費量と、規制料金（経過措置料金、三段階料金体系）及び自由化料金メニュー（基本料金なし、単一の料金単価）により年間電気料金支払額を算定し、比較分析を行った。なお電気料金単価に再エネ賦課金は含み、燃料費調整額は含まない。

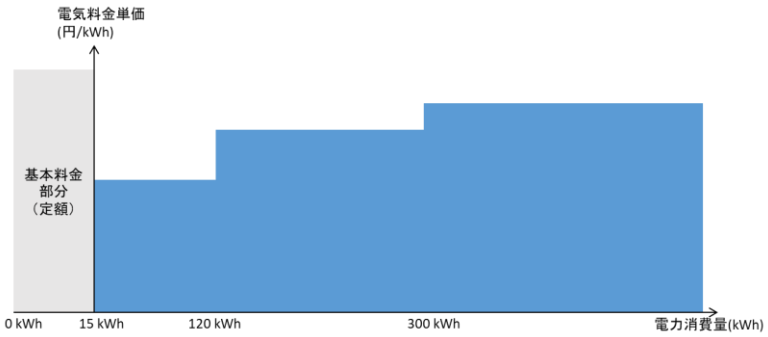


図 3.8.4-1　電力料金体系における三段階料金制度のイメージ

試算の結果を図 3.8.4-2 に示す。自由化以降の新規電気料金メニューが普及すれば家庭における電力コスト負担はいずれの収入分位においても低減されるが、第 I 分位と第 X 分位の間の電力コストの負担感の比は 4.30 から 4.73 へ上昇しており、低収入世帯での負担が相対的に重くなることが示された。

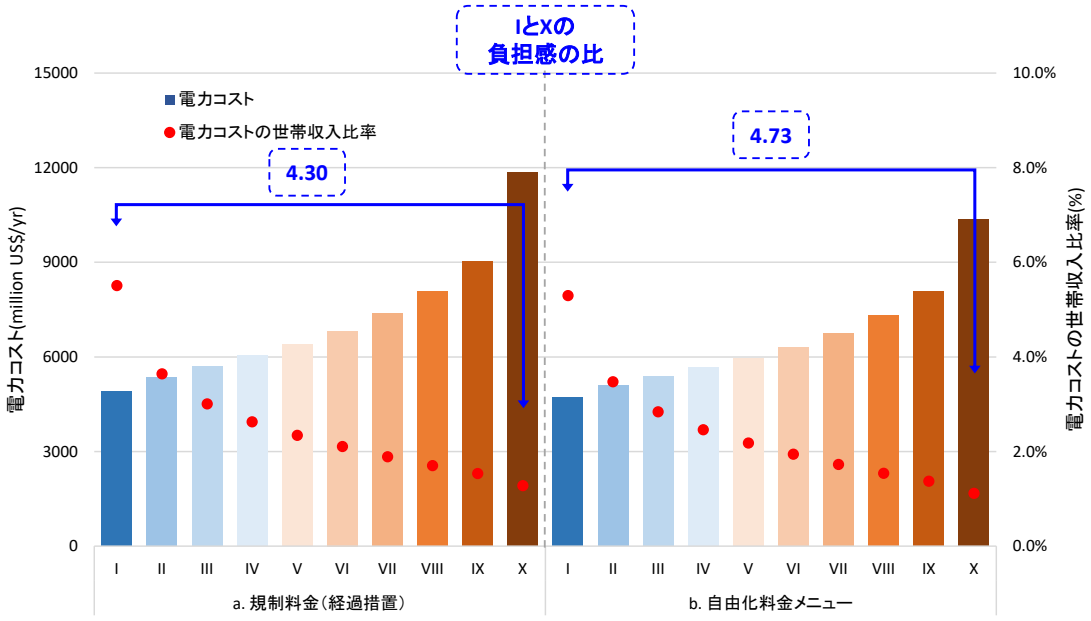


図 3.8.4-2　自由化以降の電気料金体系による家庭の電力コスト負担の試算（参考値のケース、2050 年）

3.8.5　2030 年新 NDC に基づく分析

菅首相は 2021 年、2050 年カーボンニュートラルと整合的で野心的な目標として 2030 年に GHG 排出量の 2013 年比 46%減を目指し、さらに 50%減の高みを目指して挑戦すると表明した。これを踏まえ、同年 10 月に日本の NDC を決定し UNFCCC に提出した。各国が更新した NDC に基づく分析は第 4 章に示しているが、本節ではこの新 NDC に基づく日本のエネルギーシステムコストの国民負担、及び家庭部門の費用負担と世帯間の格差への影響の推計について紹介する。分析における技術想定は DNE21+における

標準想定に基づく。世帯収入分布、及び世帯収入分位別エネルギー消費構成は 2050 年カーボンニュートラルに基づく分析と共通の想定を用いている。なお、本節冒頭で述べたとおり、NDC 分析にあたっては将来の GDP 想定を COVID-19 の影響を考慮したものに更新しているのに対し、2050 年カーボンニュートラルに基づく分析では従来の GDP 想定を用いておりかつ 2030 年排出量は旧 NDC に基づくものであるため、結果の比較解釈には留意が必要である。GDP 想定の差異については第 4 章を参照されたい。

新 NDC 目標に基づく 2030 年の日本のエネルギーシステムコストは、ベースライン比で 89 billion US$/yr 増加すると推計された。また一人当たり費用負担はベースライン比で 760 US$/yr 程度増加すると推計された。8 年間で大幅な増大が見込まれる結果である。

図 3.8.5-1 に日本の 2030 年家庭部門最終エネルギー消費量、及び 2030 年家庭部門エネルギーコスト負担を示す。なお、2050 年カーボンニュートラルに基づく分析と同様、家庭のエネルギーコスト負担は家庭での最終エネルギー消費に基づく推計であり、ガソリン等の運輸費用、製品やサービスに体化されたエネルギーコスト増分の負担、家庭用太陽光発電を含めた家庭用エネルギー機器の設備費分等は含まれない。新 NDC における 2030 年エネルギー消費量は、ベースラインと比較すると▲32%と大幅な省エネが見込まれる結果である。天然ガスの消費が減少し合成メタンが導入される。一方、家庭におけるエネルギーコスト負担は、エネルギー限界費用の上昇によりベースライン比で 50%程度増大する結果である。導入量の大きい電力の限界費用がベースライン比でおよそ 2 倍となるほか、限界費用の高い合成メタンの導入が進むことが要因となる。

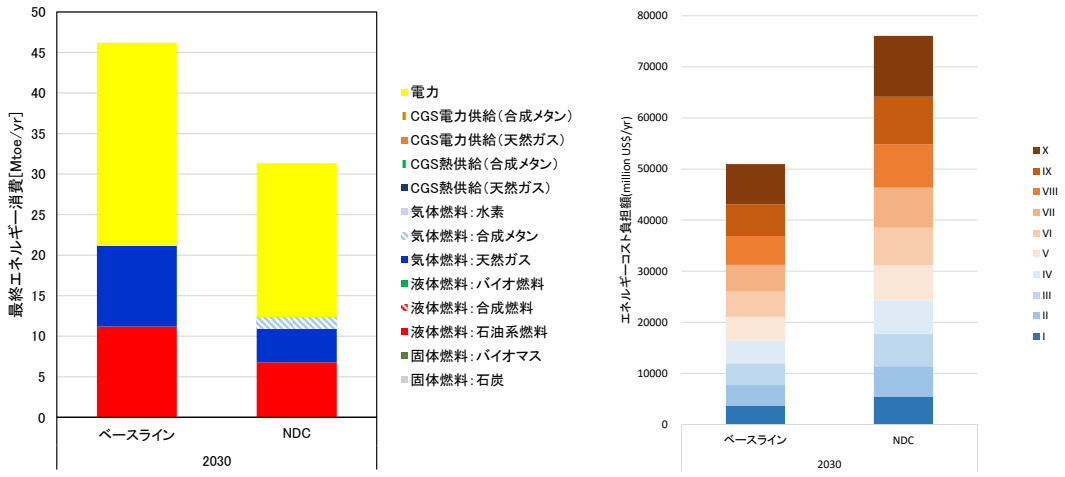


図 3.8.5-1 日本の家庭部門最終エネルギー消費量(左)、エネルギーコスト負担(2030 年)

図 3.8.5-2 に 2030 年の世帯収入分位別エネルギーコスト負担額と負担感を示す。NDC においては家庭部門のエネルギーコスト負担額が大きいためいずれの分位においてもエネルギーコスト負担額は高く、高収入世帯ほど高い。一方、負担感は低収入世帯ほど高い。第 I 分位と第 X 分位の間の負担感の格差は、NDC ケースではベースラインよ

りも緩和される。これらは 2050 年カーボンニュートラルに基づく分析と同様の傾向にある。なお、GDP 想定等が異なるため 2030 年から 2050 年にかけての世帯間格差の推移を単純に比較考察することはできないが、ベースラインにおける世帯間格差は 2030 年では 4.89 であるのに対し 2050 年では 5.07 と拡大する傾向にあるが、排出削減シナリオでは 2030 年の 4.78 に対し 2050 年は再エネ 100%シナリオ以外では 4.71～4.73 であり同等もしくは緩和される傾向にあると言える。今後、GDP 想定や排出経路等を整合させたうえでシナリオ別に考察する必要がある。

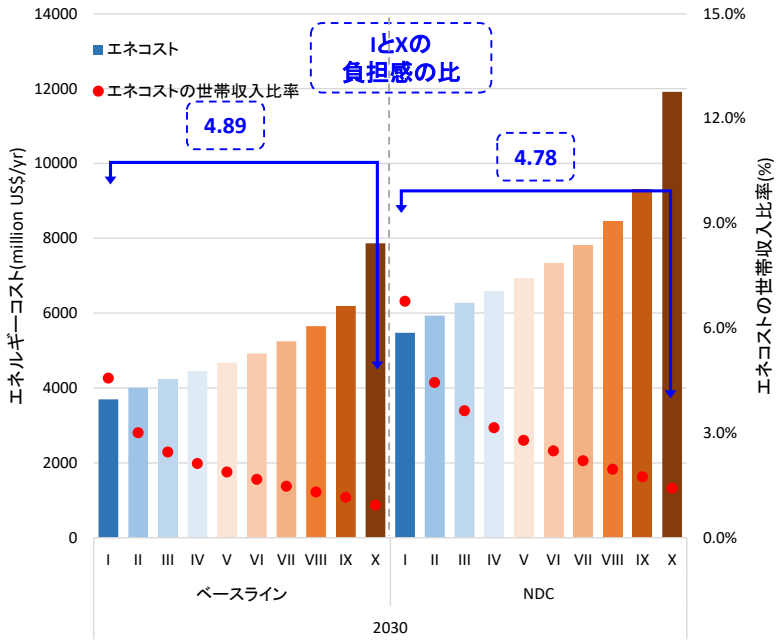


図 3.8.5-2　世帯収入分位別エネルギーコスト負担額と負担感（2030 年）

3.8.6　まとめ

本節では、2050 年カーボンニュートラルの下でのエネルギーシステムコストのモデル分析結果を基に、カーボンニュートラル達成に向けた温暖化政策が日本のエネルギーシステムコスト負担及び世帯負担の格差にもたらす影響の分析を行った。その結果、2050 年カーボンニュートラルにおけるエネルギーシステムコスト（エネルギー消費額及び設備費）の国民負担は、一部のシナリオを除きベースライン比で一人当たり 1500～2900 US$/yr 程度増大することが示された。また、カーボンニュートラルの下での家庭部門の 2050 年エネルギー消費量はいずれのシナリオもベースラインより低位であるが、エネルギー限界費用が高位であるため家庭におけるエネルギーコスト負担額はいずれのシナリオにおいてもベースラインより増大し、再エネ 100%シナリオで最も増大することが示された。世帯収入分位別分析の結果、日本の家庭におけるエネルギーコスト負担は高収入世帯ほど高い一方、負担感は低収入世帯ほど高く逆進性が認められる。低収入世帯と高収入世帯の間の負担感の比は、本分析で想定したカーボンニュー

トラルシナリオの中では再エネ比率を外生的に想定した再エネ 100%シナリオで最も拡大する。様々な技術進展の実現や需要側の行動変容を促進しつつ、経済的に最適なエネルギー構成を許容することは、全体のエネルギーコスト増大の抑制と逆進性の緩和の同時達成に寄与しうるといえる。

また、電力小売自由化以降の新規電気料金体系の普及による、家庭の電力コスト負担への影響の感度分析の結果、低収入世帯と高収入世帯の間の負担感の比は自由化料金体系の下では上昇する傾向にあることが示された。

以上の分析から、カーボンニュートラル達成に向けエネルギーコスト負担が増大する中、低収入世帯にはさらなる負担増となる可能性があることが示された。これらリスクを認識しつつカーボンニュートラルの下での温暖化対策を進めていくことが重要と考えられる。

本文中にも記載したとおり、今回の分析では、家庭部門エネルギーコスト負担において、ガソリンなど世帯の運輸エネルギー費用や製品・サービスに体化されたエネルギーコスト増分、また家庭用太陽光発電など家庭用エネルギー機器の設備費は考慮していない。また、価格の高い電気自動車や家庭用蓄電池の購入は高収入世帯においてなされやすいが、周辺機器も含めこれらは補助金支給の対象になりやすく、補助金受給も含めた家庭における負担としては更に格差が広がる可能性があり、政策による補助金支給に偏りが起こらないよう、更なる制度検討が必要である。さらに、将来の産業構造の変化などを要因として世帯の所得格差が拡大する可能性も指摘されている[13)]が、世帯収入分布の変化や、地域性に基づくエネルギー消費構成の際、所得弾性値に基づくエネルギー需要の変化などについても今回の分析では考慮していない。これらを考慮した上で、家庭のエネルギー貧困に関するリスクを分析するとともに、リスクを緩和しうる社会福祉政策などについて考察を進めていくことは今後の重要な課題である。

参考文献（第 3.8 節に関するもの）

1) 国連：Sustainable Development Goals, (2015)
2) Audrey Berry: The distributional effects of a carbon tax and its impact on fuel poverty: A microsimulation study in the French context, Energy Policy 124, (2019), pp. 81-94
3) Anders Fremstad and Mark Paul: The Impact of a Carbon Tax on Inequality, Ecological Economics, Volume 163, (2019), pp. 88-97
4) Lawrence H. Goulder, Marc A.C. Hafstead, GyuRim Kim, Xianling Long: Impacts of a carbon tax across US household income groups: What are the equity-efficiency trade-offs?, Journal of Public Economics 175, (2019), pp. 44-64
5) Julius Andersson and Giles Atkinson: The distributional effects of a carbon tax: The role of income inequality, Centre for Climate Change Economics and Policy Working Paper No. 378, (2020)
6) 永田他：再生可能エネルギー固定価格買取制度の衡平性に関する評価、第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2018)

7) Ingram S Jaccard, Peter-Paul Pichler, Johannes Tobben and Helga Weisz: The energy and carbon inequality corridor for a 1.5 ◦C compatible and just Europe, Environmental Research Letters 16, (2021)
8) Bjorn Soergel, Elmar Kriegler, Benjamin Leon Bodirsky, Nico Bauer, Marian Leimbach & Alexander Popp: Combining ambitious climate policies with efforts to eradicate poverty, Nature communications 12, (2021)
9) 秋元圭吾、佐野史典：総合資源エネルギー調査会基本政策分科会（2021 年 5 月 13 日）資料 (2021) https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/043/043_005.pdf
10) IEA: World Energy Balances (2021)
11) 総務省：家計調査(2019)
12) 環境省：平成 31 年度家庭部門の CO_2 排出実態統計調査(2021)
13) 山口雅生：サービス経済化と所得分布の変化、季刊経済理論第 51 巻第 4 号, (2015)

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）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。本章では、最新の NDCs の排出削減目標の分析・評価を行った。まず、第 4.1 節で最新の NDCs の排出削減目標の状況について整理しつつ、最新の経済動向を踏まえ、複数の指標を用いて排出削減目標の排出削減努力に関する分析・評価を行った。第 4.2 節においては、NDCs の経済影響の分析を行うとともに、国際競争力への影響、また炭素国境調整税の効果についても分析した。第 4.3 節においては、関連する既往研究の調査・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: Nationally Determined Contributions）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、2021 年 11 月 11 日までに国連に提出された NDCs の 2030 年目標、および公表されている NDCs や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	提出済み NDCs の 2030 年目標	公表されている NDCs、CN 宣言*
日本	2013 年比▲46%	2050 年 CN
米国	2005 年比▲50%～▲52%	2050 年 CN
EU **	1990 年比▲55%	2050 年 CN
英国	1990 年比▲68%	2035 年に 1990 年比▲78% 2050 年 CN
スイス	1990 年比▲50%	2050 年 CN
豪州	2005 年比▲26%～▲28%	2050 年 CN
カナダ	2005 年比▲40%～▲45%	2050 年 CN
韓国	2017 年比▲24.4%	2030 年に 2018 年比▲40% 2050 年 CN
メキシコ	BAU 比▲22% （BAU2030: 991MtCO_2eq/yr）	
トルコ	2021.10.11 NDC(conditional)提出	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	GDP あたり CO_2 排出量を 2005 年比▲65%	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する。2060 年 CN
インド	GDP あたり GHG 排出量を 2005 年比▲33%～▲35%	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▲20% （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	2030 年頃に GHG 排出量のピーク（65Mt CO_2eq/yr）達成。GDP あたり GHG 排出量を 2005 年比▲36%	
ブラジル	▲43%（2005 年比）	2060 年 CN
インドネシア	BAU 比▲29% （BAU2030：2.869GtCO_2eq/yr）	2060 年 CN

注) * 2020 年の気候野心サミット、2021 年の気候変動サミットで公表された、またはそれ以降に公表されたもの

** 2020 年 12 月 31 日以降は英国に適用されない

また、参考として、一部の EU 加盟国について個別の削減目標を表 4.1.1-2 に示す。

表 4.1.1-2 一部の EU 加盟国の独自の削減目標

国名	2030 年排出削減目標、CN 目標
ドイツ	1990 年比▲65%、2045 年 CN
ポーランド	2005 年比▲7%（ETS 対象外セクター）
ハンガリー	1990 年比▲40%、2050 年 CN
チェコ	2005 年比▲30%
フランス	1990 年比▲40%、2050 年 CN
イタリア	2005 年比▲33%（ETS 対象外セクター）
スペイン	1990 年比▲23%、2050 年 CN
ポルトガル	2005 年比▲45%～▲55%、2050 年 CN

参考文献（第 4.1.1 節に関するもの）

1) UNFCCC; All NDCs, https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/All.aspx (最終アクセス日：2021 年 11 月 11 日)

4.1.2 直近の社会経済情勢のモデル分析への反映

(1) はじめに

本節では、COVID19 の影響の部分的な反映など、直近の社会経済情勢を反映した GDP を推計し、それに基づき、DNE21+モデルの各種入力シナリオに反映した。

(2) GDP の想定

① GDP の更新方法

平成 28 年度 [1)]に想定した SSP2 社会経済シナリオ（旧シナリオ）の 2015 年以降各国 GDP を、2100 年まで更新した。人口については、文献 1)と同じと想定した。2015-2019 年については、IEA 統計 2020[2)]の実質 GDP の実績値（2015 年米ドル）、及び IMF の World Economic Outlook（IMF-WEO、2021 年 4 月）[3)]を用いて各国の GDP 成長率を整理し、実質 GDP を更新した。2020 年以降については、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の影響を評価するため、COVID-19 の影響なし（シナリオ A）と影響あり（シナリオ B）の二つのシナリオを想定した。シナリオ A の 2020 年以降には旧シナリオの各国 GDP 成長率を使用した。シナリオ B では、COVID-19 による影響を受けた 2020-2021 年の GDP 成長率について、日本は内閣府の中長期の経済再生に関する試算（2021 年 7 月）[4)]、その他の国は IMF-WEO 等の文献から引用し、2022 年以降は、旧シナリオの GDP 成長率を使用し、現時点での文献をもとに COVID-19 の影響を考慮した。

GDP シナリオの想定を表 4.1.2-1、IEA 統計 2020 と、DNE21+モデルデータベースの国別対応表を表 4.1.2-2 に示す。また、シナリオ B の GDP 更新において、IMF-WEO

に GDP 成長率の国別見通しがない国について、IMF-WEO 地域別 GDP 成長率を使用した国を表 4.1.2-3、IMF-WEO 以外の資料を参照した国を表 4.1.2-4 に示す。

表 4.1.2-1　GDP シナリオの想定

シナリオ	実績値	想定値
旧シナリオ（2016 年版）	2014 年まで IEA 統計（2016）	2015 年以降、人口想定（国連中位推計）と一人当たり GDP から国別に推計。IPCC で利用している SSP2（共有社会経済パスの注意シナリオ）と調整している。
シナリオ A（COVID19 の影響無）	2015-2019 年まで IEA 統計（2020）、2019 年実績値がない国は IMF-WEO より各国 GDP 成長率を整理した。	2020 年以降は、旧シナリオの GDP 成長率を利用した。
シナリオ B（COVID19 の影響無）		2020-2021 年の GDP 成長率に関して、日本については、内閣府・中長期の経済再生に関する試算（2021 年 7 月）を利用。その他の国は、IMF-WEO の各国 GDP 成長率を利用し COVID-19 の影響を反映した。IMF-WEO にデータがない国に関しては、World Bank（2021）等を利用した。 2022 年以降は、旧シナリオの GDP 成長率を利用した。

表 4.1.2-2　IEA 統計 2020 と DNE21+モデルデータベースの国別対応表

対応	IEA 統計 2020	DNE21+モデルデータベース
IEA 統計 2020 の Region's GDP を、DNE21+モデルデータベース該当国の想定人口の比率に基づき、各国に配分	Other non-OECD Americas	United States Virgin Islands, Puerto Rico, Bahamas, Guadeloupe, Saint Vincent and the Grenadines, Grenada, Dominica, Saint Lucia, Saint Kitts and Nevis, Barbados, Antigua & Barbuda, Belize, Guyana, French Guiana
	Other non-OECD Asia	Guam, Papua New Guinea, Fiji, French Polynesia, Kiribati, Nauru, New Caledonia, Solomon Islands, Tonga, American Samoa, Vanuatu, East Timor, Afghanistan, Bhutan, Maldives
	Other Africa	Djibouti, Somalia, Uganda, Rwanda, Burundi, Malawi, Swaziland, Lesotho, Madagascar, Seychelles, Comoros, Reunion, Burkina Faso, Cape Verde, Central African Republic, Chad, Gambia, Guinea, Guinea-Bissau, Liberia, Mali, Mauritania, Sao Tome and Principe, Sierra Leone, Western Sahara
IEA 統計 2020 の各国 GDP の合計を DNE21+モデルデータベース該当国に適用	Sudan, South Sudan	Sudan
	Serbia, Kosovo, Montenegro	Yugoslavia

*1 IEA 統計 2020 記載の以下の国々については GDP を考慮していない。
Monaco, San Marino, Vatican City, Azores (Port.), Greenland, Liechtenstein, Andorra, Faeroe Islands, Zaire, Bermuda

表 4.1.2-3　IMF-WEO（2021）の地域別 GDP 成長率を使用した国

DNE21+モデルデータベース	IMF-WEO 適用地域
United States Virgin Islands	Caribbean
Guam	Pacific Islands
Gibraltar	Europe
French Polynesia	Pacific Islands
New Caledonia	Pacific Islands
Syrian Arab Republic	Middle East
Sudan	Sudan*[2]
Cuba	Caribbean
Netherlands Antilles	Caribbean
Yugoslavia	Serbia*[3]

*2 IMF-WEO には Sudan、South Sudan が掲載されているが、2018 年 GDP の約 9 割を Sudan が占めるため Sudan のみの成長率を使用した。
*3 IMF-WEO には Serbia、Kosobo、Montenegro が掲載されているが、2018 年 GDP の約 8 割を Serbia が占めるため Serbia のみの成長率を使用した。

表 4.1.2-4　IMF-WEO（2021）以外の資料を参照した国

DNE21+モデルデータベース	参照資料
Japan	内閣府・中長期の経済財政に関する試算（2021 年 7 月）
Democratic People's Republic of Korea	Bank of Korea, Fitch Solutions による最新報告に関する Bloomberg 記事 [5)]
Lebanon	World Bank “Global Economic Prospects”（2021 年 6 月）[6)]

IMF-WEO と DNE21+モデルデータベースの国名対応表を表 4.1.2-5 に示す。

表 4.1.2-5　IMF-WEO と DNE21+モデルデータベースの国名対応表

IMF-WEO	DNE21+モデルデータベース
Timor-Leste	East Timor
Eswatini	Swaziland
North Macedonia	The former Yugoslav Republic of Macedonia

② 更新した GDP シナリオ

1990－2100 年における GDP 世界合計額を図 4.1.2-1、世界全体の一人当たり GDP の推移を図 4.1.2-2 にシナリオ別に示す。COVID-19 による世界経済の停滞は、2007－2010 年の世界金融危機同様、世界合計 GDP 額に大きな影響を与えているものの、長期的な増加傾向は大きく変わらない。

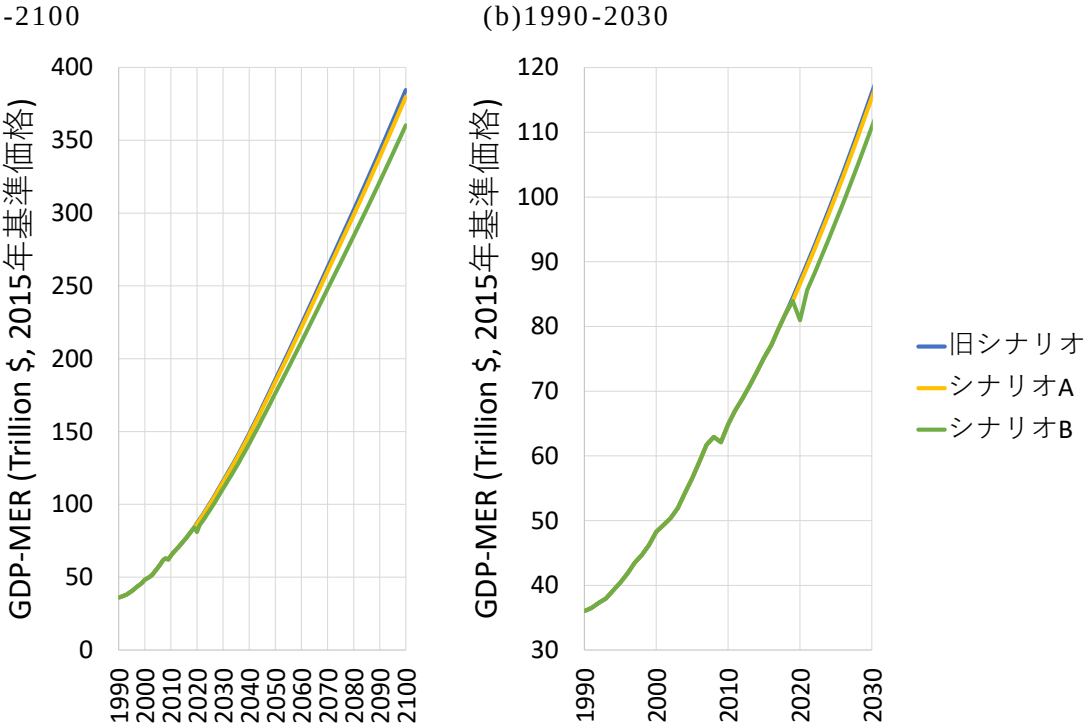


図 4.1.2-1 1990－2100 年における世界 GDP（SSP2）

（注）2019 年まで IEA 統計 CO_2 Emissions from Fuel Combustion 2020 に基づく実績値。

(a)1990-2100　　(b)1990-2030

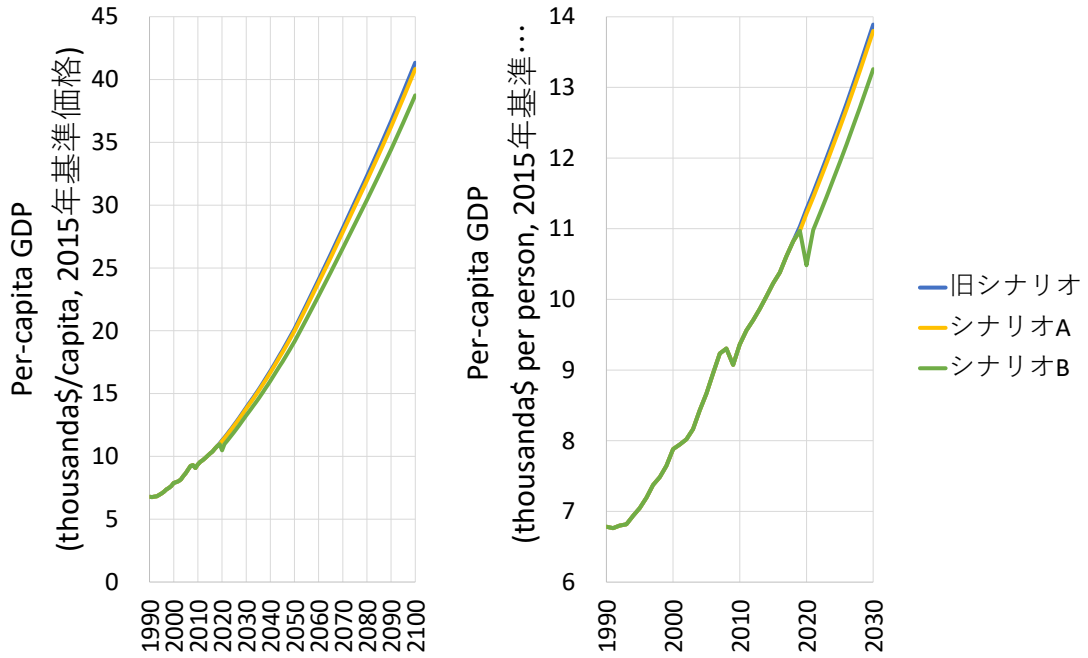


図 4.1.2-2　1990－2100 年における世界全体の一人当たり GDP の推移（SSP2）

（注）2019 年まで IEA 統計 CO_2 Emissions from Fuel Combustion 2020 に基づく実績値。

図 4.1.2-3 にシナリオ B における 1990－2050 年地域別 GDP の推移を示す。また、シナリオ B における地域別一人当たり GDP の推移を図 4.1.2-4 に示す。COVID-19 による影響は特に北米、欧州、日本、オセアニアで顕著に表れている。

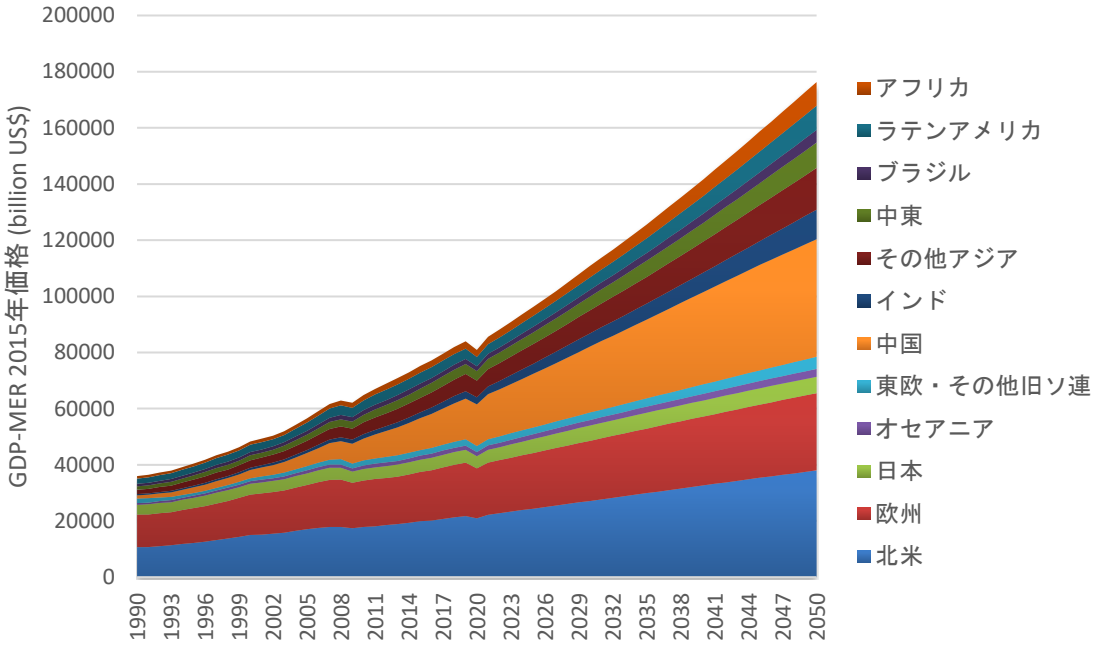


図 4.1.2-3 シナリオ B における 1990－2050 年の地域別 GDP－MER の推移（SSP2）

（注）2019 年まで IEA 統計 CO_2 Emissions from Fuel Combustion 2020 に基づく実績値。

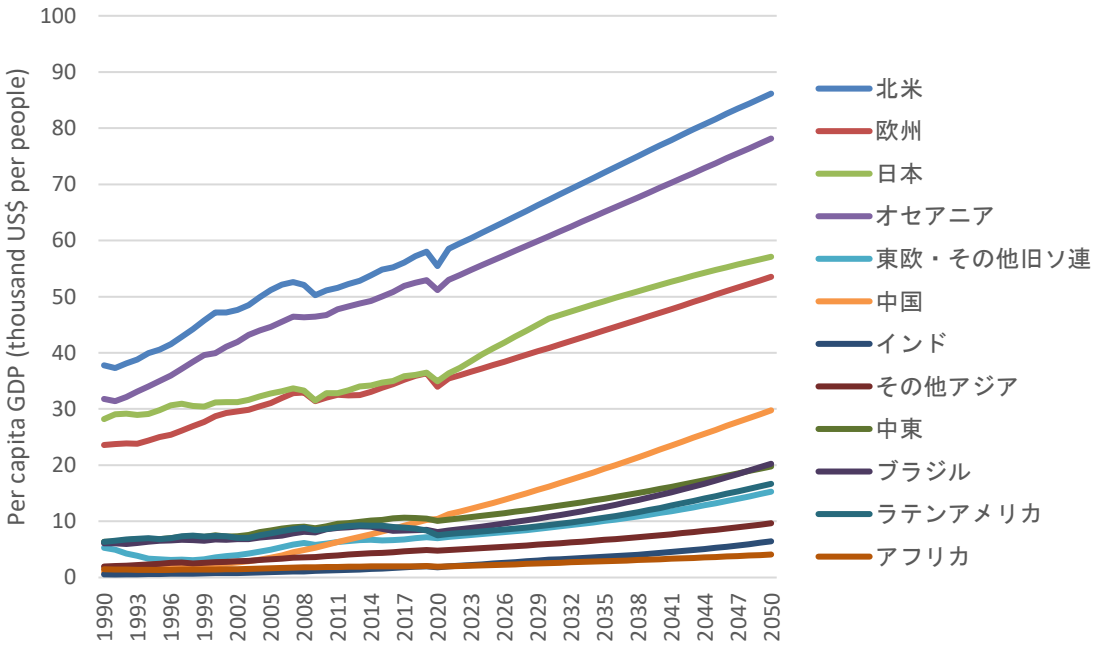


図 4.1.2-4 シナリオ B における 1990－2050 年の地域別一人当たり GDP の推移（SSP2）

（注）2019 年まで IEA 統計 CO_2 Emissions from Fuel Combustion 2020 に基づく実績値。

主要国の 2015－2030 年、2015－2020 年、2020－2030 年の GDP 年平均成長率の比較を表 4.1.2-6 に示す。2015－2030 年の世界の実質 GDP 年成長率は、旧シナリオ、シナリオ A 、B で、それぞれ 2.7%、2.7%、2.4%と想定した。COVID19 の影響により（シナリオ A、B の比較）、同期間の世界 GDP は、約 0.3%の落ち込みが推計された。2015

－2020 年の旧シナリオ、シナリオ A の GDP 成長率を比較すると、米国、イギリス、日本、インドで 0.3～0.7%抑えられ、EU・中国・ロシアでは 0.2～0.8%高くなっている。一方、シナリオ B では COVID-19 の影響を受け、中国・ロシアを除くすべての国で 2015－2020 年に 0.6～3.7%成長率が下がる。中国は、COVID-19 からの回復が世界に先駆けて圧倒的に早かったことが大きく反映されている[1]。しかし、多くの国では、2020 年に GDP が大きく落ち込み、2022 年以降に従来想定の経済成長に戻ると想定したために、シナリオ B の 2020-2030 年の GDP 成長率が高くなっている。

[1] 中国が大きく落ち込んだのは 2020 年 1-3 月期のみで、2020 年 4-6 月期以降は投資増となり、7-9 月期以降は GDP 成長もコロナ前レベルに戻っている（文献 7)）。

表 4.1.2-6　主要国 GDP 成長率の比較（年成長率%、MER 換算[2000 年価格]）

		2015－2030 年	2015－2020 年	2020－2030 年
米国	旧シナリオ	2.4	2.6	2.2
	シナリオ A（COVID-19 の影響無）	2.2	2.2	2.2
	シナリオ B（COVID-19 の影響有）	2.1	1.1	2.6
EU 27 ヶ国	旧シナリオ	1.5	1.6	1.5
	シナリオ A	1.7	1.9	1.5
	シナリオ B	1.3	0.3	1.8
イギリス	旧シナリオ	1.9	2.0	1.9
	シナリオ A	1.8	1.7	1.9
	シナリオ B	1.2	-0.8	2.2
日本	旧シナリオ	1.9	1.9	1.8
	シナリオ A	1.6	1.2	1.8
	シナリオ B	1.4	-0.2	2.3
中国	旧シナリオ	4.8	5.8	4.2
	シナリオ A	4.8	6.0	4.2
	シナリオ B	4.8	5.2	4.6
インド	旧シナリオ	6.3	7.1	5.9
	シナリオ A	6.1	6.5	5.9
	シナリオ B	5.4	3.4	6.5
ロシア	旧シナリオ	1.5	0.6	2.0
	シナリオ A	1.8	1.4	2.0
	シナリオ B	1.7	0.6	2.2
世界計	旧シナリオ	2.7	2.9	2.7
	シナリオ A	2.7	2.6	2.7
	シナリオ B	2.4	1.2	3.0

*4 EU 27 ヶ国内訳は以下の通り。France, Germany, Italy, Spain, Portugal, Belgium, Netherlands, Denmark, Sweden, Finland, Austria, Ireland, Greece, Luxembourg, Malta, Cyprus, Estonia, Latvia, Lithuania, Hungary, Poland, Czech Republic, Bulgaria, Romania, Slovakia, Croatia, Slovenia

(3) 主要な各種活動量の想定

前述の GDP 更新に伴い、DNE21+モデルの直接の前提条件である各種活動量の想定を以下のように更新した。なお、本年度は前節のシナリオ B を新シナリオとして前提条件を想定し、モデル分析を行った。

① 粗鋼生産量

図 4.1.2-5 に粗鋼生産量の想定を示す。旧シナリオに比べ、足下の時点では中国の生産量が多いこと等を踏まえ、修正を行った。

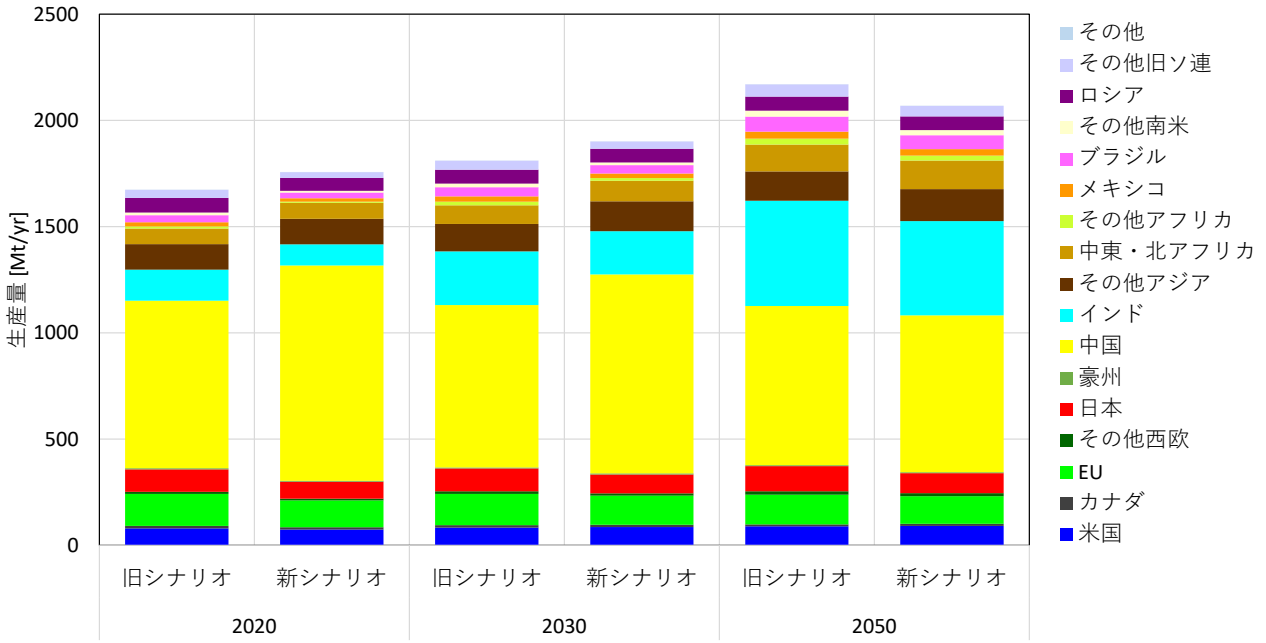


図 4.1.2-5 主要活動量想定の更新（粗鋼生産量）

② 紙・板紙生産量

図 4.1.2-6、図 4.1.2-7 は、FAOSTAT[8)]のデータから、新聞巻取紙と情報印刷用紙の消費量を推計し、1 人当たり消費量について 1 人当たり GDP との相関を示したものである。デジタル化の影響もあり、近年、先進国のみならず発展途上国でも消費量が頭打ちになっている傾向が確認できる。こうした状況を踏まえ、紙・板紙生産量は、旧シナリオから下方修正を行った（図 4.1.2-8）。

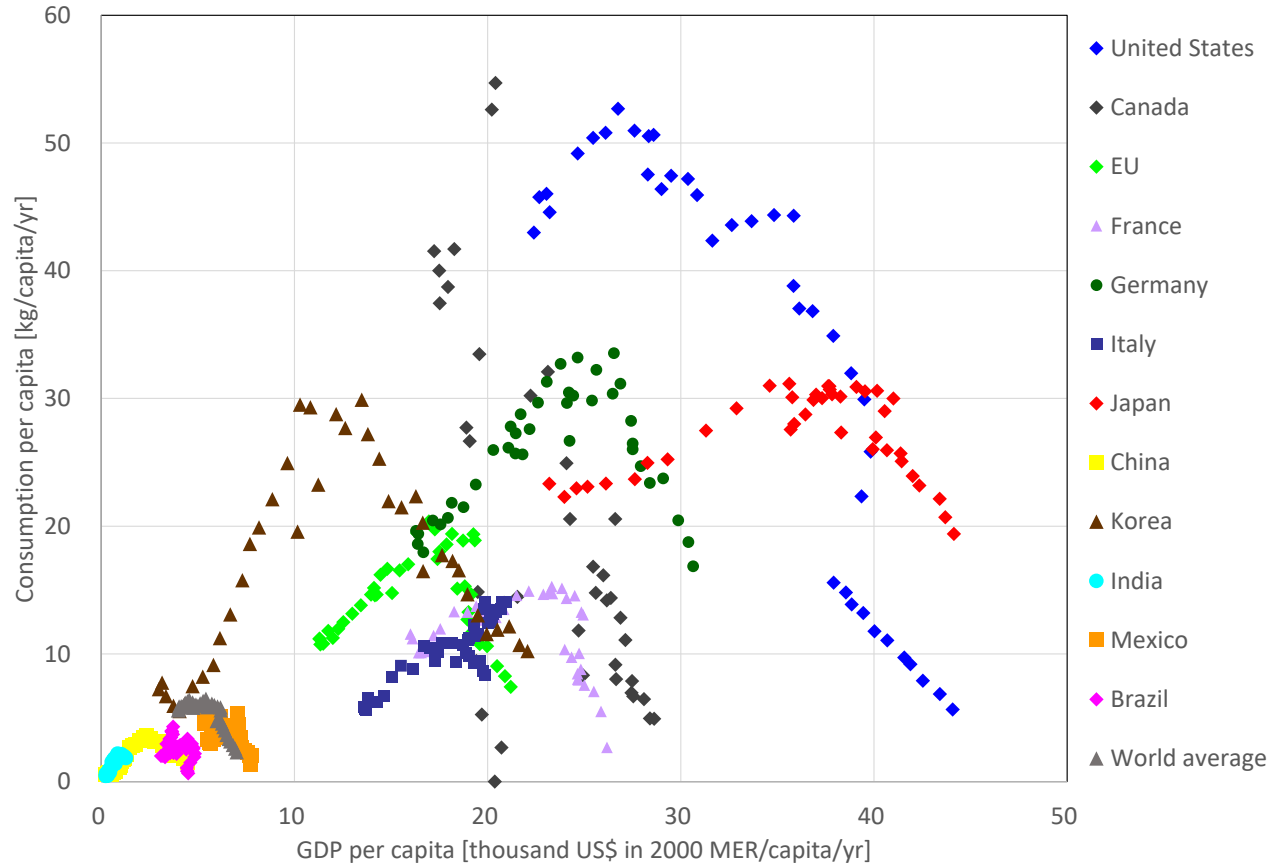


図 4.1.2-6 1 人当たり GDP と 1 人当たり新聞巻取紙消費量の相関 [8)]

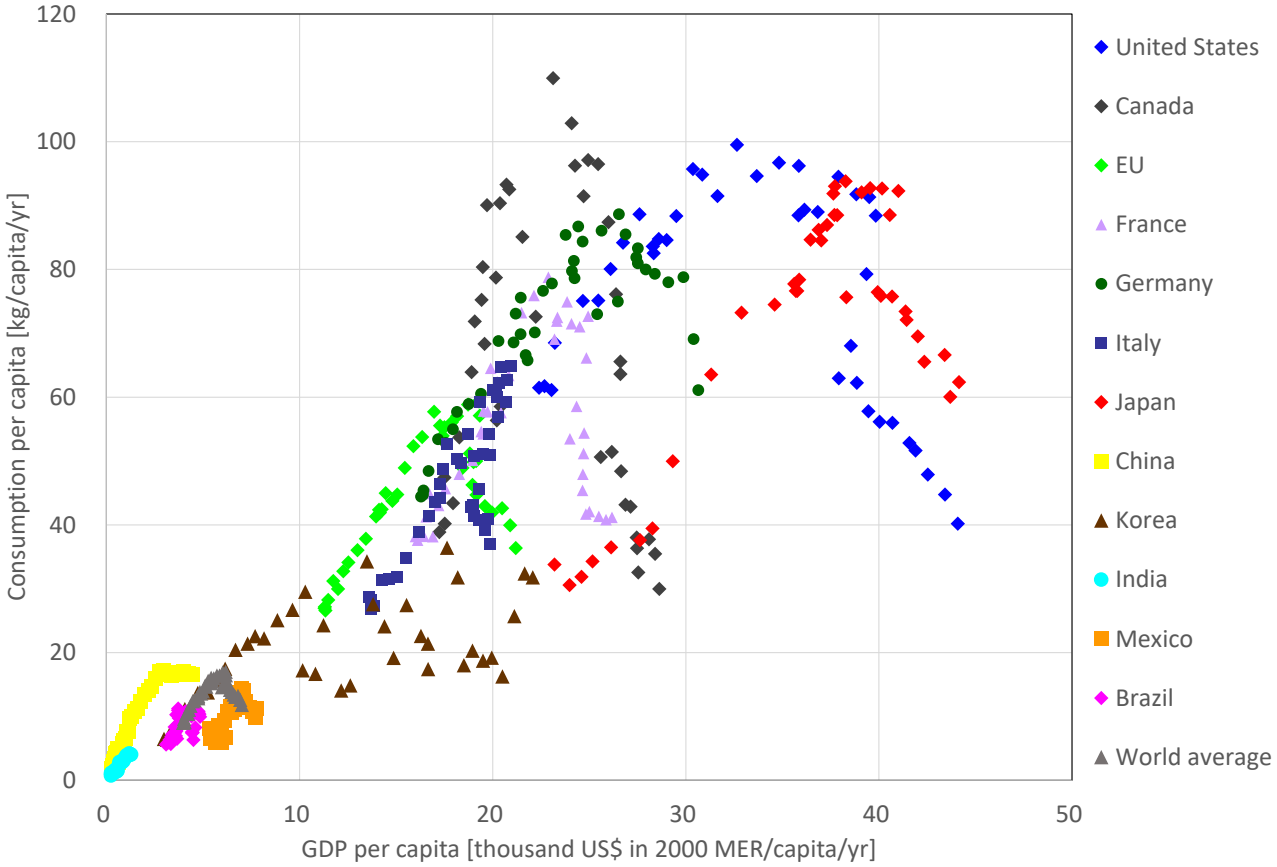


図 4.1.2-7 1 人当たり GDP と 1 人当たり印刷情報用紙消費量の相関 [8)]

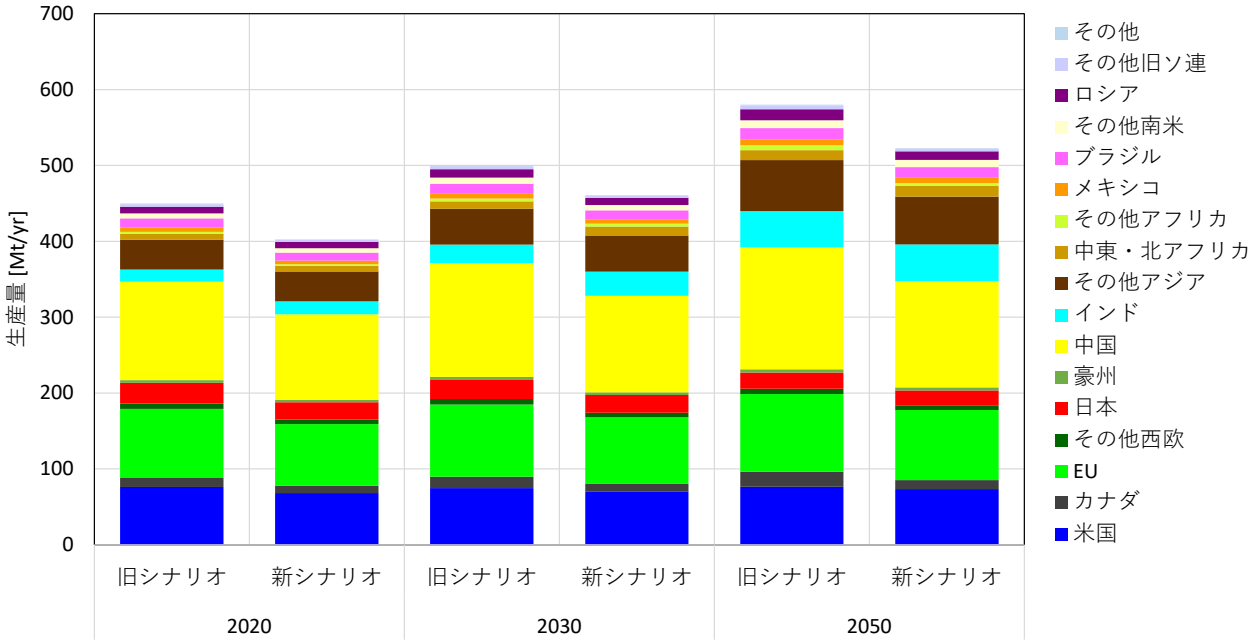


図 4.1.2-8 主要活動量想定の更新（紙・板紙生産量）

③ アンモニア生産量

アンモニアについては、日本は METI の生産動態統計 [9]、海外の国は USGS の統計 [10] に基づき、実績値を更新した。世界全体の生産量は旧シナリオから下方修正を行っているが、米国、インド、中東・北アフリカ、ロシアなどは近年の生産動向に基づき、旧シナリオから上方修正を行った。

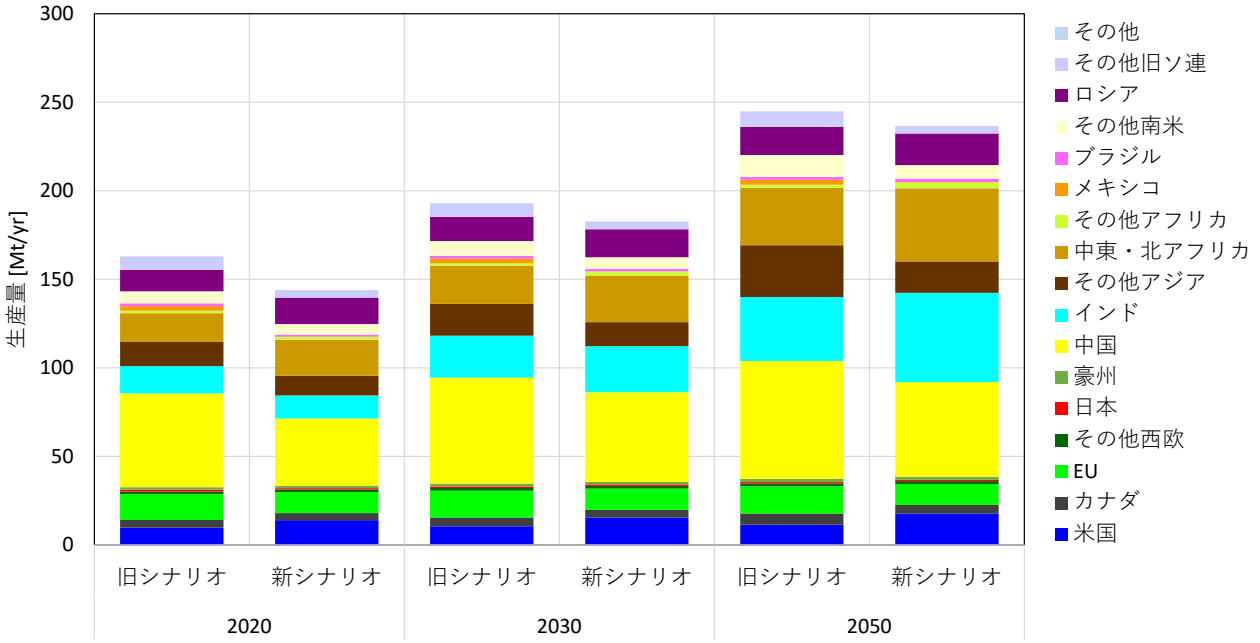


図 4.1.2-9 主要活動量想定の更新（アンモニア生産量）

④　石油化学製品生産量

石油化学製品であるエチレン・プロピレンと BTX については、図 4.1.2-10、図 4.1.2-11 に示すように想定した。実績値や足下の動向については、文献 9)の他、文献 11)～13)を参考とした。足下の時点での生産量は、旧シナリオの下での見通し程増加していないため（米国や中東）、下方修正した。

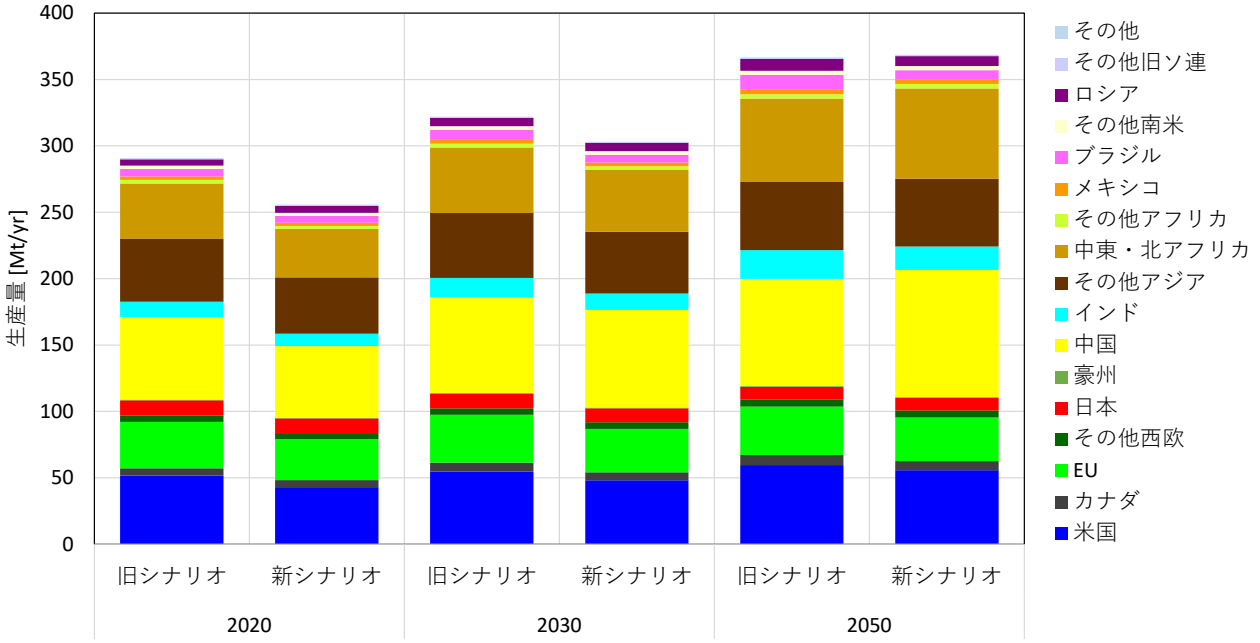


図 4.1.2-10 主要活動量想定の更新（エチレン・プロピレン生産量）

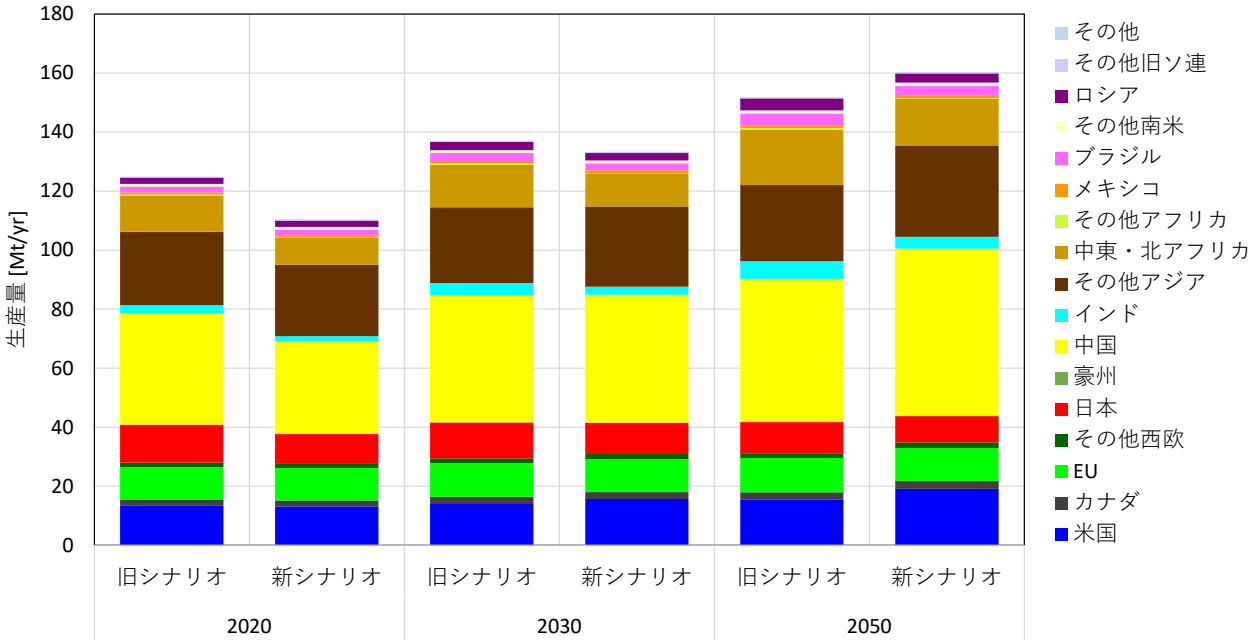


図 4.1.2-11 主要活動量想定の更新（BTX 生産量）

⑤　乗用車輸送サービス

図 4.1.2-12 は、1 人当たり GDP と乗用車保有台数の相関を示している（乗用車保有台数は文献 14)、15)等に基づき整理)。1 人当たり GDP の上昇に伴い、乗用車の保有台数は増加してきている。しかしながら、米国等、先進国ではその伸びが鈍化している傾向が見て取れる。また、人口密度が高い日本、韓国、台湾は、欧米に比べ、保有台数は相対的に少ない傾向が確認できる（図 4.1.2-13 も参照)。

ここでは、図 4.1.2-12 の関係から、1 人当たり GDP シナリオに基づき、将来の乗用車保有台数シナリオを想定した（シグモイド関数に従って保有台数は飽和すると想定)。その上で、文献 16)～19)等を参考にしつつ乗用車一台当たり年間走行距離と乗用車一台当たり乗車人数を想定して乗用車輸送サービス需要（p-km）のシナリオを想定した。

想定したシナリオを図 4.1.2-14 に示す。文献 19)を参考に、2020 年の輸送サービス需要は短期的に落ち込むと想定している。但し、旧シナリオに比べ、足下の時点で乗用車保有台数が増加している中国については上方修正となっている。なお、その他アジアの国については、旧シナリオでは一台当たり年間走行距離が 25000km 以上と想定していた国もあったが、他国の情報も参考に 10000km 程度に下方修正したため、輸送サービス需要も小さくなっている。

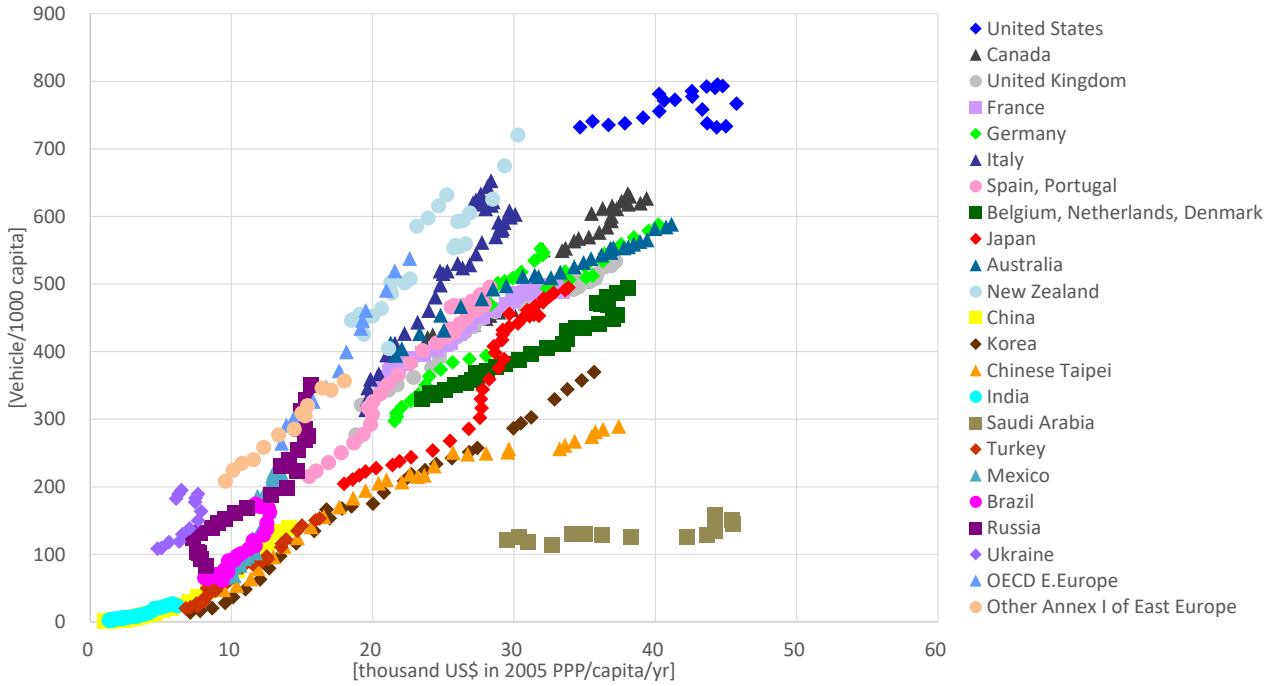


図 4.1.2-12 1 人当たり GDP と乗用車保有台数の相関

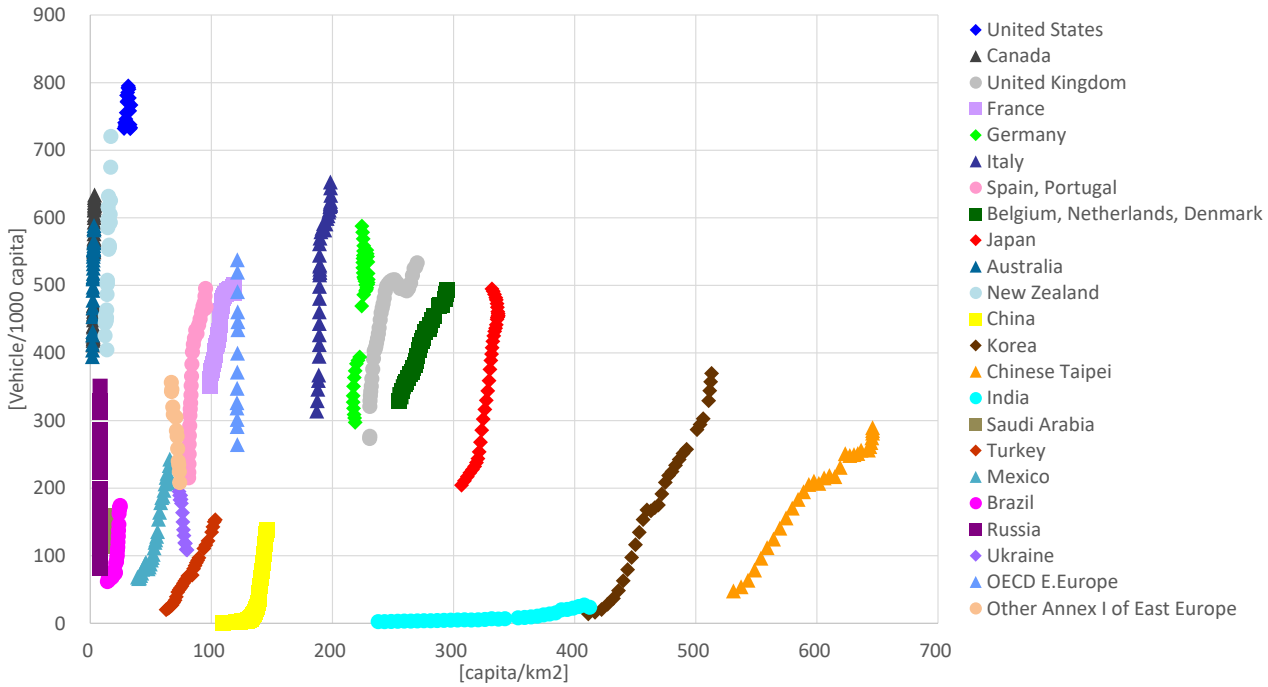


図 4.1.2-13 人口密度と乗用車保有台数の相関

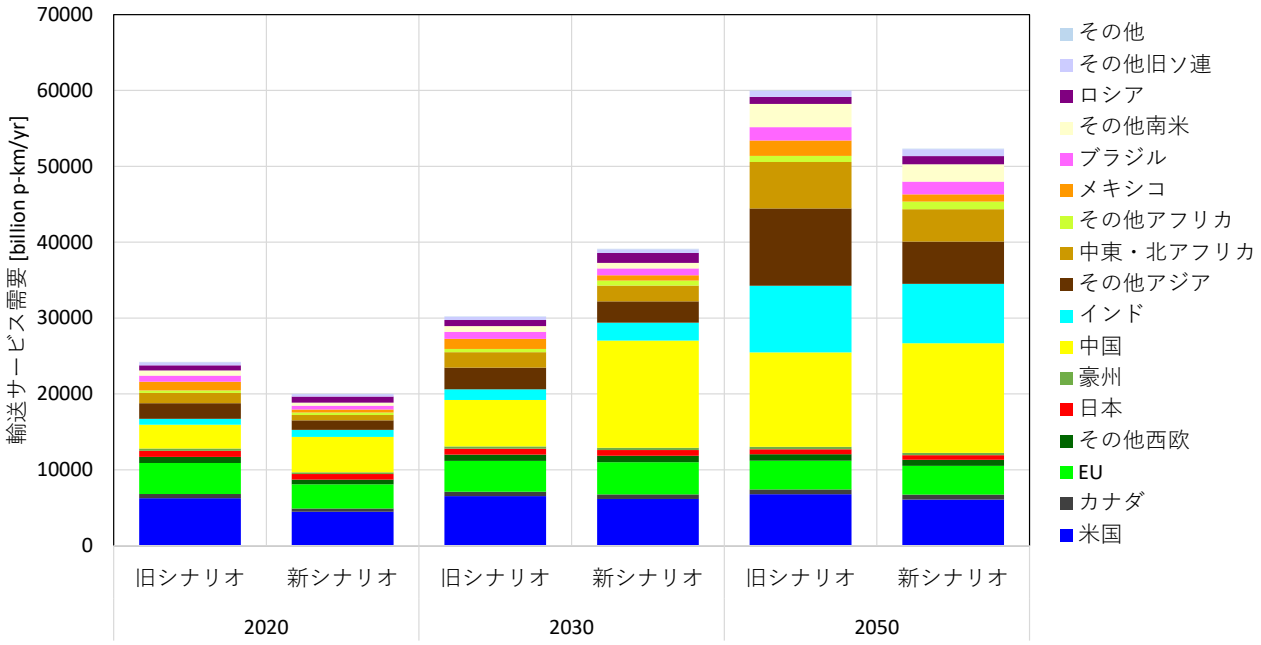


図 4.1.2-14 主要活動量想定の更新（乗用車輸送サービス需要）

⑥ トラック輸送サービス

図 4.1.2-15 は、1 人当たり GDP と 1 人当たりトラック貨物輸送サービスの相関を示している（トラック貨物輸送サービスは、文献 16)、17)、20)に基づき整理）。1 人当たり GDP の上昇に伴い、図 4.1.2-12 に示した乗用車保有台数と同様にサービス需要は増加している。なお、乗用車保有台数の傾向と比較すると、トラック貨物輸送サービスについては、人口密度が高い日本や韓国だけでなく、西欧（英仏独伊等）で需要が少ない傾向が見られる。

このような状況を参考に、将来の人口、GDP シナリオに従って想定したトラック輸送サービス需要を図 4.1.2-16 に示す。先進国のように十分な実績値が得られない発展途上国については、文献 18),19),21)等を参考に足下の時点の需要を更新した。旧シナリオに比べ足下の時点の需要が上方修正されているが、文献 19)における貨物輸送全体で 2019 年比▲4%との記載に基づき、2020 年断面では一時的な落ち込みがあると想定している。

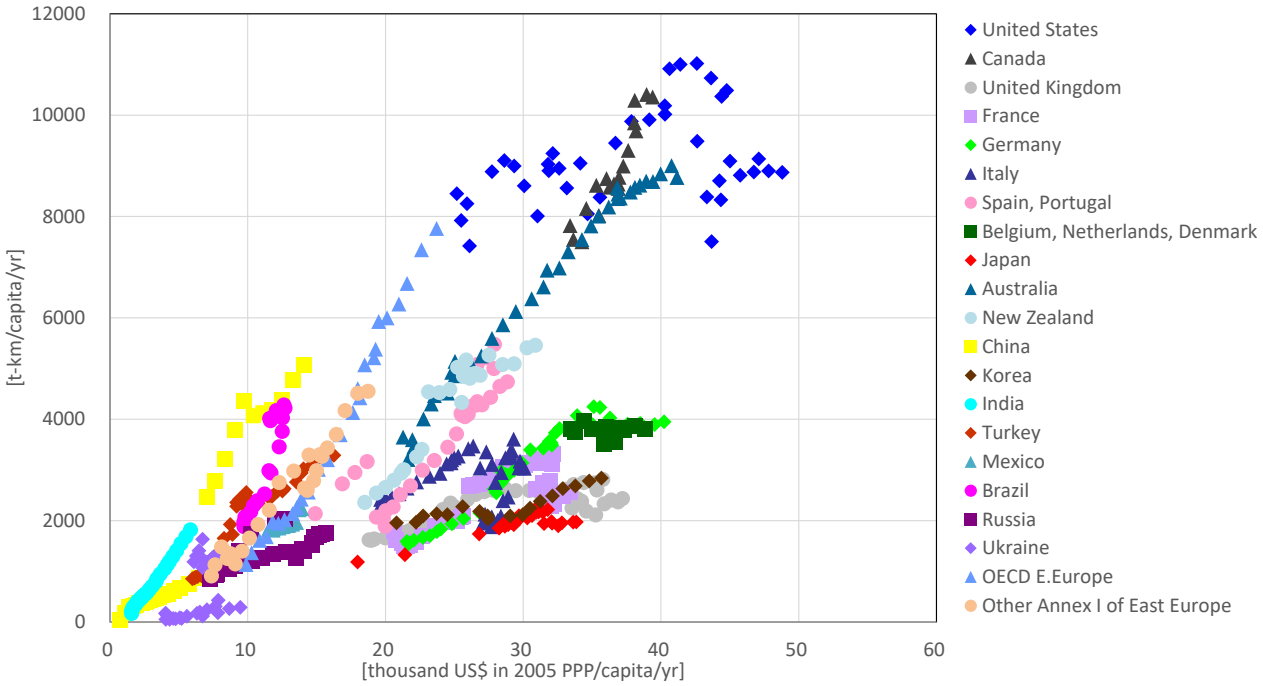


図 4.1.2-15 1 人当たり GDP と 1 人当たりトラック貨物輸送サービスの相関

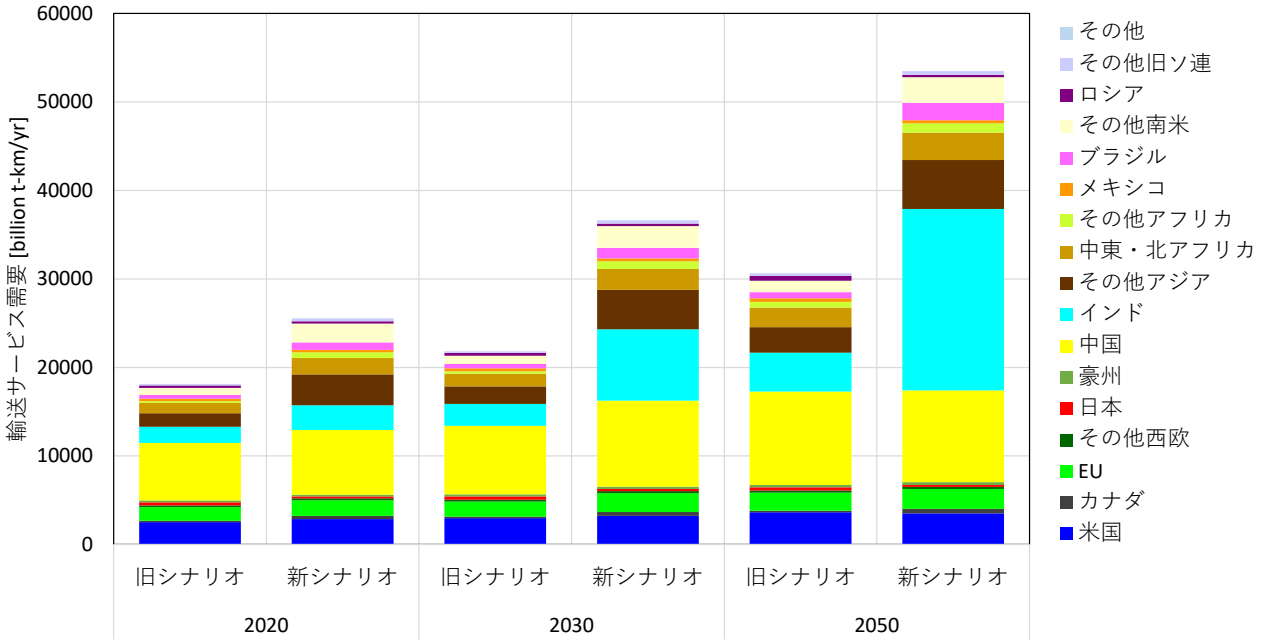


図 4.1.2-16 主要活動量想定の更新（トラック輸送サービス需要）

参考文献（第 4.1.2 節に関するもの）

1) RITE, “長期緩和シナリオ分析、平成 28 年度報告書,” (公財)地球環境産業技術研究機構, 2017.
2) IEA, CO_2 Emissions from Fuel Combustion 2020
3) IMF, World Economic Outlook Data: April 2021 Edition, https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2021/April（最終アクセス日 : 2021 年 6 月 18 日）
4) 内閣府, “中長期の経済財政に関する試算（令和 3 年 7 月 21 日経済財政諮問会議提出）,” https://www5.cao.go.jp/keizai2/keizai-syakai/shisan.html（最終アクセス日：2021 年 8 月 23 日）
5) Bloomberg, “北朝鮮は今年ほぼゼロ成長、昨年はマイナス 8.5%－フィッチ最新報告, ” https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2021-04-26/QS5K6FT1UM1001（最終アクセス日 : 2021 年 6 月 25 日）
6) World Bank, June 2021 Global Economic Prospects, https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/35647/9781464816659.pdf（最終アクセス日：2021 年 6 月 25 日）
7) METI、通商白書 2021、https://www.meti.go.jp/report/tsuhaku2021/pdf/01-02-03.pdf（最終アクセス日：2022 年 3 月 9 日）
8) FAOSTAT, https://www.fao.org/faostat/（最終アクセス日：2021 年 11 月 30 日）
9) METI、生産動態統計
10) USGS, Nitrogen Statistics and Information (2020)
11) METI、世界の石油化学製品の今後の需給動向（2019）
12) JPEC、令和元年度燃料安定供給対策に関する調査（製油所の競争力に係る技術動向に関する調査）調査報告書（2020）
13) Cefic, Petrochemical production statistics (2021)
14) 日本自動車工業会、世界自動車統計年報（2019）
15) 日本自動車工業会、日本の自動車工業（2020）
16) MLIT、自動車輸送統計調査
17) OECD Statistics, https://stats.oecd.org/ （最終アクセス日：2021 年 12 月 3 日）
18) Fulton L, Eads G, IEA/SMP Model Documentation and Reference Case Projection (2004)
19) ITF, Transport Outlook (2021)
20) IEA, Energy efficiency indicators
21) DNV, Energy transition outlook 2021

4.1.3 NDCs の排出削減努力の評価

(1) 評価の指標・手法

各国がプレッジした NDCs の排出削減目標は、適切にレビューを行うことが重要である。各国の事情に差異がある中で、各国の事情を踏まえつつ、排出削減努力が平滑化されることが重要である。そのために、適切な指標を選択し、排出削減努力を計測することが必要である。ここでは、過去の検討[1)]に基づき、以下で述べるような指標について、評価を行った。

排出削減努力を計測することは、PDCA（Plan-Do-Check-Act）サイクルを確立する上で重要と考えられる。各国の排出削減努力の指標について、文献 2)は Comparability metrics として以下の原則を上げている。

- Comprehensive: 努力を包括的に捉えること
- Measureable: 計測できることが必要
- Replicable: 再現性があり、透明性があること
- Universal: できる限り多くの国に適用可能なこと

その上で、公平性・衡平性を一意に決める指標は存在しないので、複数の指標を多面的に評価することが必要としている。

各国 NDCs は、基準年（各国によって異なった基準年）からの排出削減率の目標、CO_2 排出原単位目標、成り行きケース（明確に定義されている場合もあれば、されていない場合もある）からの排出削減量・削減率目標など様々である。衡平な排出削減努力を測り、世界において効果的な排出削減を実現していくためには、これら約束草案を比較可能な形で指標化することが必要である。各種指標は、以下のように分類が可能である。

- 簡単な指標（簡単に計測、再現が可能）
  - 同一の基準年に換算して算出した排出削減率　　等
- より高度な指標（より良く比較できるが、予測が必要）
  - ベースライン排出量からの排出削減率
  - GDP あたりの排出削減量・削減率　　等
- 更に高度な指標（最も包括的に比較できるが、モデル推計が必要）
  - エネルギー価格への影響
  - CO_2 限界削減費用
  - GDP あたりの排出削減費用　　等

これらを総合的に見ることによって、各指標の短所を補って、排出削減努力をより適切に評価できると考えられる。

本研究における NDCs の排出削減目標の「排出削減努力」の評価では、2015 年時に評価した手法と同様、各国間で能力、排出削減可能性など、差異がある中で適切に「排出削減努力」を評価できるように、表 4.1.3-1 に整理した指標を選択した。

なお、ここで述べる手法は、基本的に、文献 3)において、査読論文としても採択されているものである（ただし、そこで例示されていない指標（たとえば一人当たり排出量）についてもここでは採用し評価している。）。

本研究調査で、排出削減努力の比較評価対象とした国は表 4.1.1-1 であるが、これらの国が 2019 年において世界全体に占めるエネルギー起源 CO_2 排出量と GDP（MER）の比率を図 4.1.3-1、図 4.1.3-2 にそれぞれ示す。エネルギー起源 CO_2 排出量については、中国の 29.5%、米国の 14.1%を含んだ上で、評価対象国全体で世界の 83.8%を占めてい

る。また、GDP（MER）についても、世界の 87.1%を占める国々が評価対象である。なお、NDCs の排出削減目標が 2030 年の世界 GHG 排出量として期待できる水準の推計においては、表 4.1.1-1 以外の NDCs も含めて分析を行った。

表 4.1.3-1 本研究で採用した排出削減努力の評価指標

排出削減努力評価の手法		概要	留意点等
排出量基準年比削減率（OECD諸国もしくは附属書I国にのみ適用）	1990年比／2005年比／2013年比など	ベースラインで排出が横ばいに近い場合には、単純に削減率の大きさを比較することで、BAU比削減率の代用とできる（BAU推計が不要となるメリット有）。OECD諸国等にのみ採用（潜在的に大きな排出増が予想される国に適用するには不適当なため）	各国それぞれの基準年に合わせて比較
	2019年比など最新年基準		最新実績からの削減率となるため、今後の削減努力の計測として相対的に良い。
一人あたり排出量（非OECD諸国かつ非附属書I国にのみ適用）	絶対値水準	OECD諸国等については、この指標を採用せず、基準年比削減率で評価	経済活動の大きさや国土の状況等に依拠しやすく、排出削減努力の指標とは言い難い面がある。
GDP比排出量（CO_2原単位）	絶対値水準	経済活動の大きさに見合ったCO_2排出量水準を表すもの	GDPが低い国は悪い数値になりやすい。産業構造に依拠する。
	改善率（2019年比など）	排出量基準年比削減率に比べ経済成長率の違いが除きやすく、削減努力を測りやすい	GDPが低い国は、高いGDP成長率に伴って原単位改善率が良くなりやすい。
BAU比削減率		経済成長の違いなどを考慮できる。	過去の省ｴﾈ努力（更なる省ｴﾈの困難さ）、再ｴﾈ等の削減ﾎﾟﾃﾝｼｬﾙは無視される。
CO_2限界削減費用（炭素価格）		経済成長、過去の省エネ努力、再エネなどの削減ポテンシャル等、各国の諸々の差異を含む指標で、削減努力の計測として妥当性が高い。	エネルギー税などによる既往の対策は外枠となる（ただしそれによって省エネが既に実現していれば限界削減費用も高く推計されるため、これも考慮されたものとも考えられる）。
2次エネルギー価格（電力、ガス、ガソリン・軽油）	2019年比など最新年の実績で加重平均）	限界削減費用は追加的な削減努力を表しやすい指標だが、本指標はベースラインに含まれる削減努力も含むような指標と考えられる。	事後評価であれば、市場価格で観測ができるが、事前評価においてはモデル推計となり、推計の不確実性が高い。
GDP比削減費用		限界削減費用は、経済力に応じた負担能力が考慮されないが、本指標は負担能力を含めた評価が可能	モデル推計となり、推計の不確実性が高い。

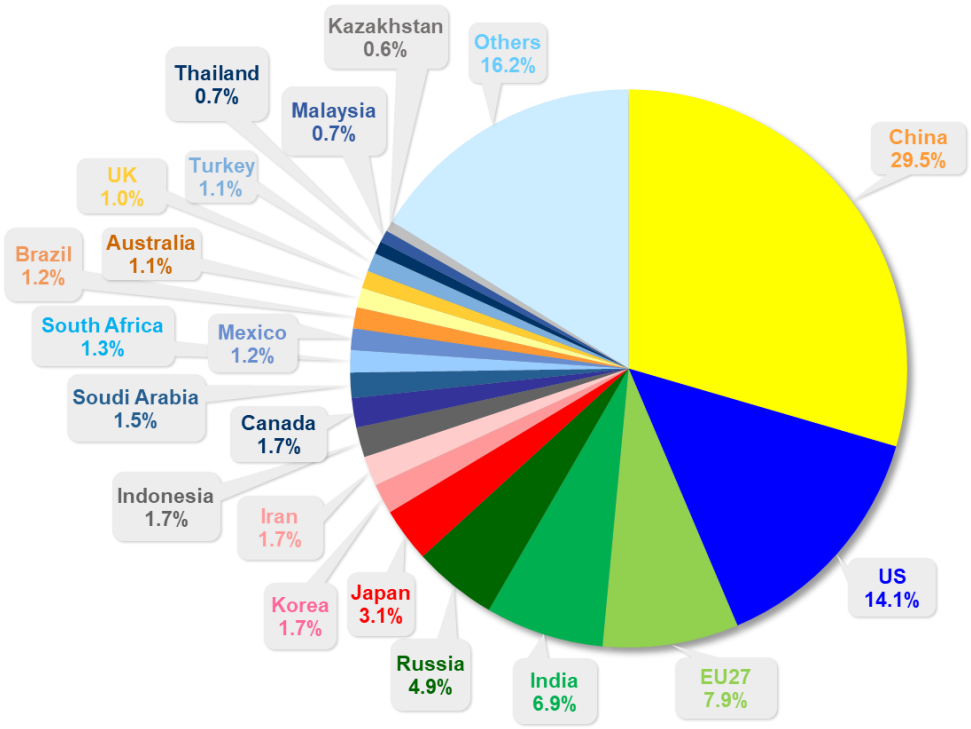


図 4.1.3-1 各国のエネルギー起源 CO_2 排出量の比率（2019 年）

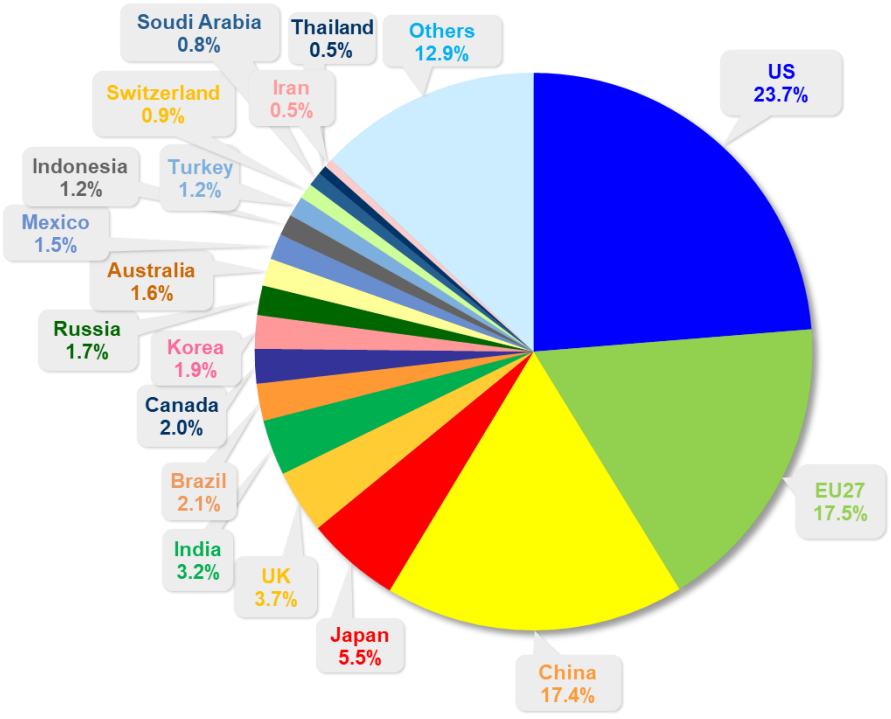


図 4.1.3-2 各国の GDP(MER)の比率（2019 年）

以下に NDC の排出削減努力の評価における留意点を列挙しておく。

- 各国の LULUCF 排出見通しや、排出削減については不確実性が大きく、その評価が困難であるため、本研究では基本的に取り扱っていない。

- 基準年比排出削減目標を提出している国については、基準年の排出実績（LULUCF 起源除く）に基づいて 2030 年の排出総量を算定し、評価した。なお、基準年の排出実績は、日本は温室効果ガスインベントリオフィス、日本以外の附属書 I 国は UNFCCC、その他の国は IEA のものを用いている。
- GDP 原単位改善目標を提出している国については、GDP の将来想定に基づいて 2030 年の排出総量を算定し、評価した。
- BAU 比削減目標を提出している国については、BAU の排出量についても NDC に明記されている場合、その値に基づいて 2030 年の排出総量を算定し、評価した。BAU の排出量が不明の場合は、明示的な評価を行わなかった（DNE21+モデルを用いる分析では、2030 年まで炭素価格を$0/tCO$_2$とした）。
- その他、対象年の排出総量の算定が困難な国（例：NDC において、個別の行動目標のみを記載）についても、上記の BAU 排出量が不明な場合と同じく、明示的な評価は行わなかった。
- 今回の NDC の排出削減努力の評価においては、2030 年 NDCs の CO_2 限界削減費用推計への影響を小さくするため、2030 年以降については、相対的に緩やかな 2℃（>66%）のカーボンバジェットを世界全体に想定して計算を行った。

以上の方針の下、23 カ国・地域について、全ての指標の評価を行った。

(2) 各国排出削減努力の分析・評価結果

以下に表 4.1.3-1 で示した指標について、各国 NDCs の評価を行った結果を示す。

図 4.1.3-3、図 4.1.3-4 に、それぞれ 2005 年比および 2013 年比の排出量を示す。また、表 4.1.3-2 に 1990 年比、2015 年比、2019 年比の排出量についても示す。英国の排出削減目標は、これらの基準年比の削減率で見てかなり高い数字となっている。一方、今後、経済成長が大きく見込まれるような国は、削減率でみれば不利な形に見える。このようにこの指標は、極めて簡便であるものの、排出削減努力を評価するには、とりわけ途上国まで含めて評価すると不適当と考えられる。

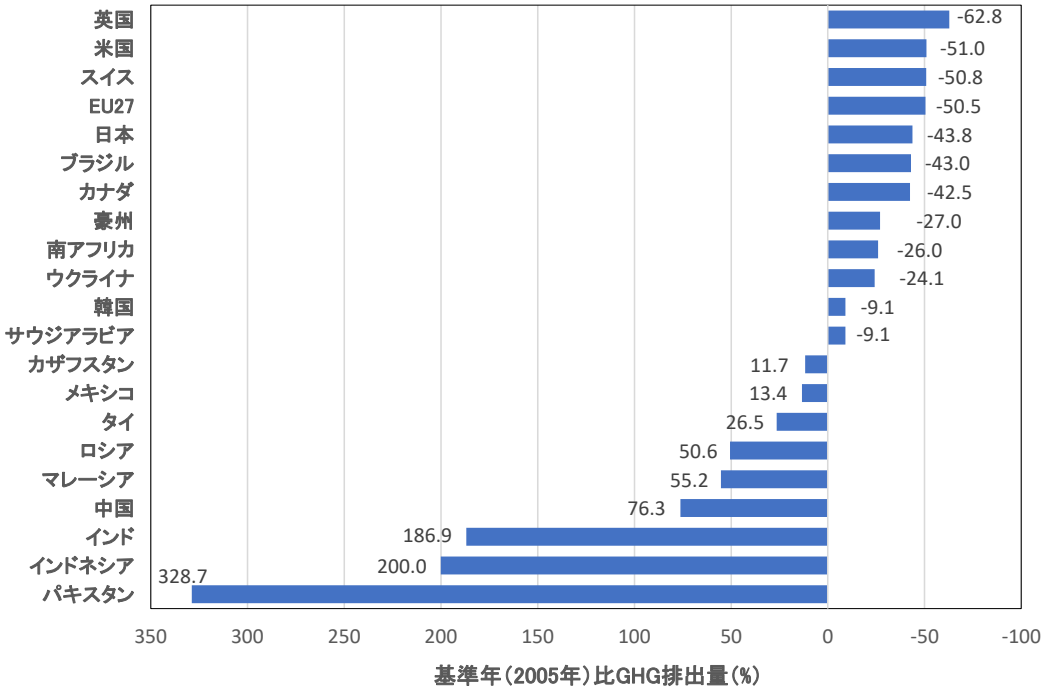


図 4.1.3-3 各国の 2030 年 GHG 排出量（2005 年比）

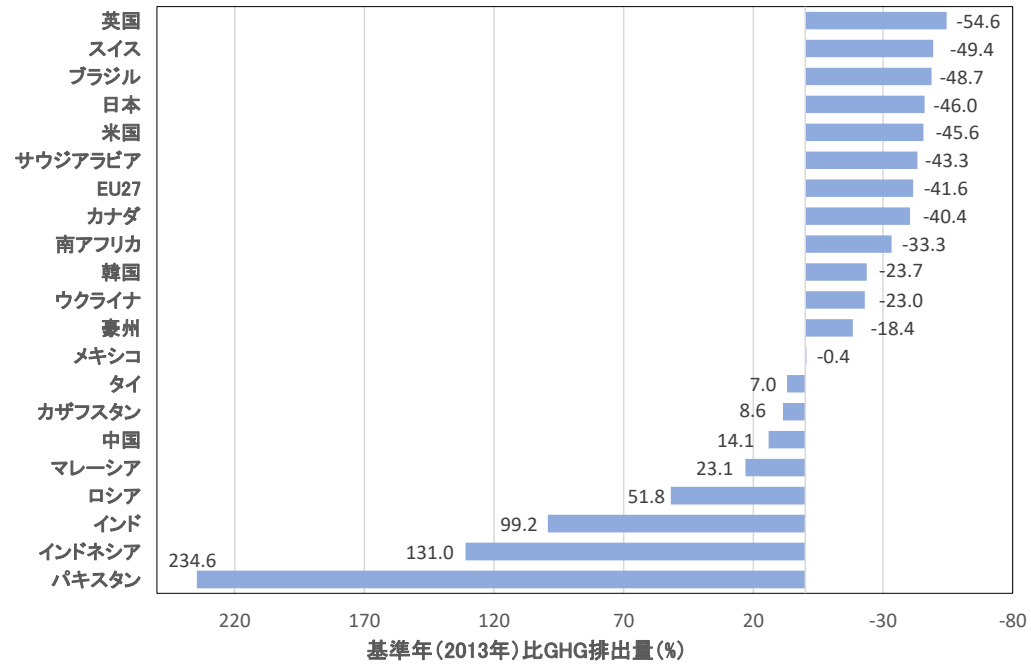


図 4.1.3-4 各国の 2030 年 GHG 排出量（2013 年比）

表 4.1.3-2　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% ［公表値：1990年比▲78%（2035年）］	▲68% ［▲78%］	▲63% ［▲74%］	▲55% ［▲69%］	▲50% ［▲65%］	▲43% ［▲61%］
スイス：1990年比▲50%	▲50%	▲51%	▲49%	▲44%	▲42%
豪州：2005年比▲26%～▲28%	▲26～▲28%	▲26～▲28%	▲17～▲20%	▲15～▲17%	▲13～▲15%
カナダ：2005年比▲40%～▲45%	▲18～▲25%	▲40～▲45%	▲38～▲43%	▲38～▲44%	▲39～▲45%
韓国：2017年比▲24.4% ［公表値：2018年比▲40%］	+62% ［+29%］	▲9% ［▲28%］	▲24% ［▲39%］	▲24.4% ［▲40%］	—
メキシコ：BAU比▲22% （BAU2030：991$MtCO_2eq/yr$）	+67%	+13%	0%	+4%	—
トルコ：Conditional目標のみ	—				
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% ［公表値：2005年比▲65%以上］	+274%	+76%	+14%	+12%	—
インド：GHG排出原単位2005年比▲33%～35%	+353～+340%	+191～+183%	+102～+96%	+91～+85%	—
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▲20% （BAU2030：約555$MtCO_2eq/yr$）	+112%	+27%	+7%	+10%	—
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：2030年頃にピークを65$MtCO_2eq/yr$ GHG排出原単位2005年比▲36%	+90%	+33%	+6%	+9%	—
ブラジル：2005年比▲43%	▲19%	▲43%	▲49%	▲47%	—
インドネシア：BAU比▲29% （BAU2030：2.869$GtCO_2eq/yr$）	+338%	+200%	+131%	+113%	—

注）

・各基準年比欄の[]内の数字は公表値の場合

・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）

・シンガポールは排出量目標に対する評価のみ

図 4.1.3-5 には、2015 年実績の 1 人当たり GHG 排出量を、図 4.1.3-6 には 2030 年時点の同排出量を示している。2030 年時点では、ブラジル、スイス、英国は小さい。また、インドは英国に次いで 1 人当たり GHG 排出量は小さいが、2015 年実績よりは排出が増加する見通しである。また、日本と中国は 2015 年実績では 1 人当たり GHG 排出量は近い水準（約 10tCO_2eq/人）であるが、中国は、2030 年には 1 人当たり排出量で見ても、日本よりも大きな数字になると推計される。

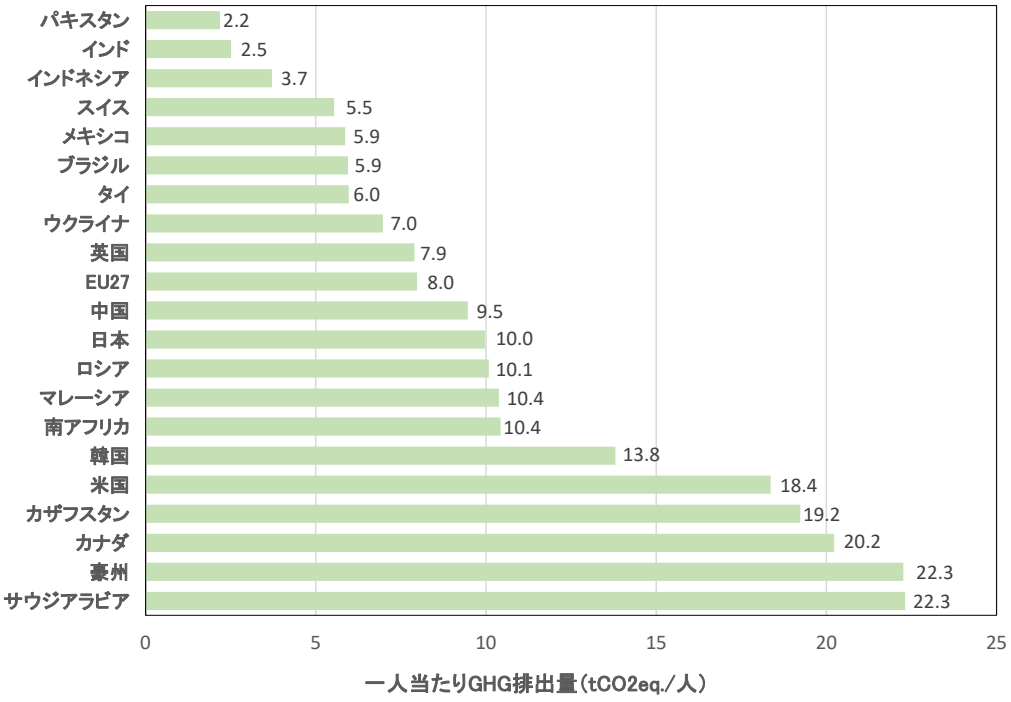


図 4.1.3-5 各国の 1 人当たり GHG 排出量（2015 年）

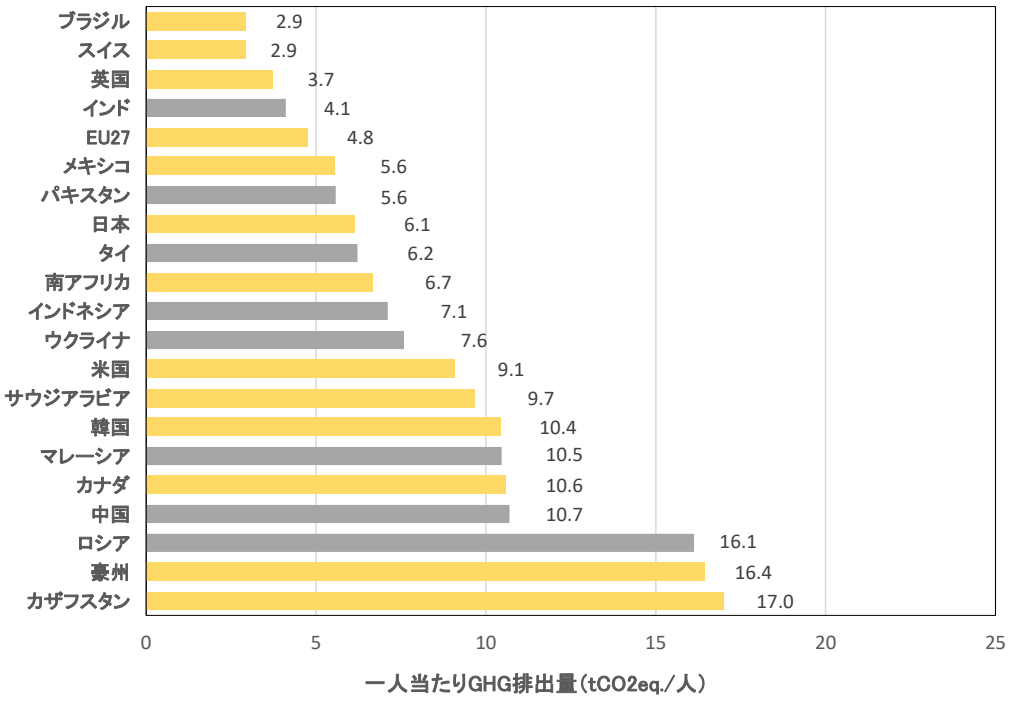


図 4.1.3-6 各国の 1 人当たり GHG 排出量（2030 年）
（2015 年比で 1 人当たり GHG 排出量が減少している国は黄色、増加している国は灰色で表示）

図 4.1.3-7 には 2030 年時点の GDP 当たり排出量を、図 4.1.3-8 にはその 2019 年比（非附属書 I 国は 2015 年比）での変化率を示す。スイス、英国、EU27、米国、日本の順で、

GDP 当たり排出量が小さいと推計される。なお、GDP 当たり排出量は、産業構造にも影響される他、水力発電などの利用可能性にも大きく影響を受け、これらは排出削減努力とは無関係に決まっている面もあることは理解しておく必要がある。2019 年もしくは 2015 年比での削減率でみると、米国、サウジアラビア、カナダ、英国、スイスの削減率が高い。サウジアラビアはそもそも GDP あたり排出量が大きいため、削減余地も大きいと見られる一方、米国、サウジアラビア、カナダ、スイスは、GDP あたり排出量が小さいにも関わらず、削減率が高いため、約束草案の排出削減努力は大きいと見られる。

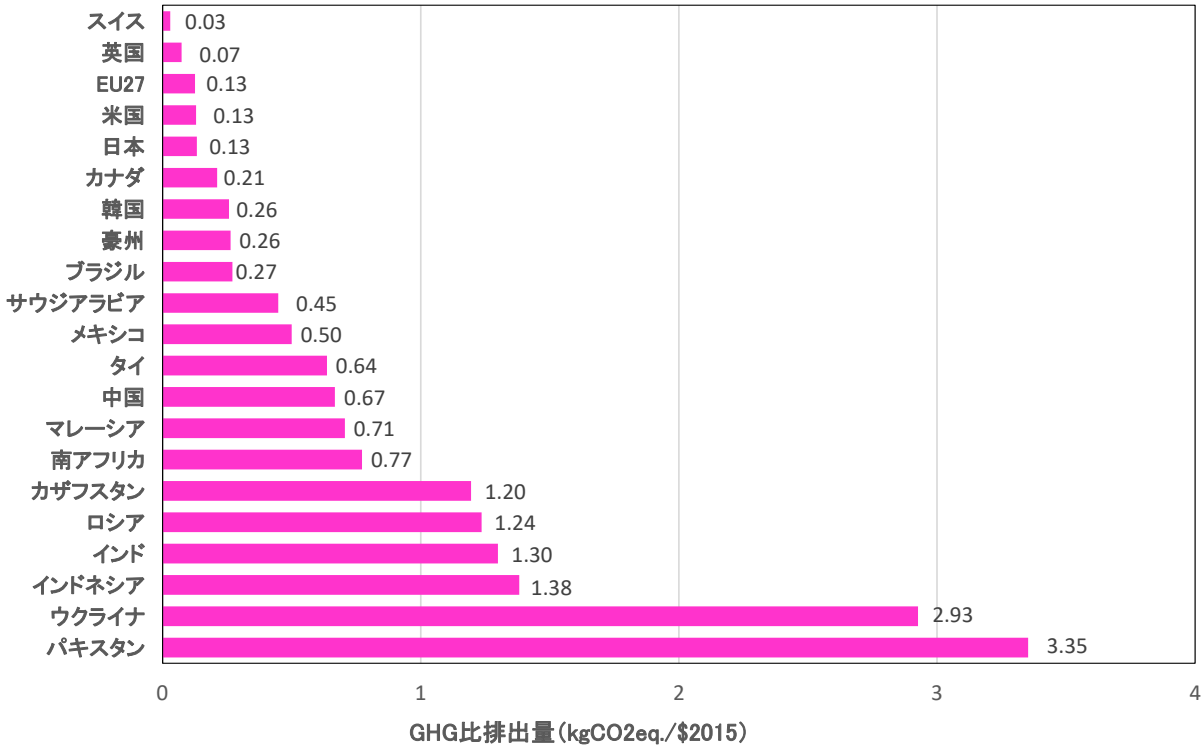


図 4.1.3-7 各国の GDP(MER)当たり GHG 排出量（2030 年）

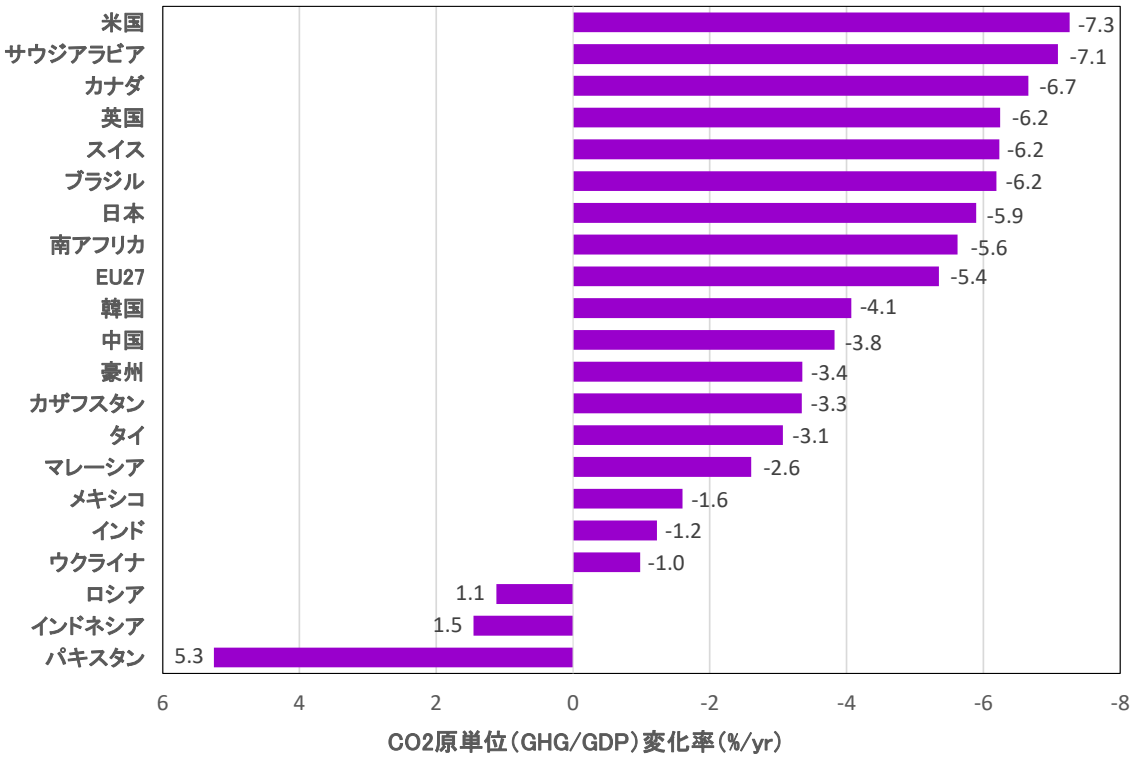


図 4.1.3-8 各国の GDP(MER)当たり GHG 排出量の変化率
（附属書Ⅰ国：2019～2030 年、非附属書Ⅰ国：2015～2030 年）

図 4.1.3-9 には、DNE21+モデルによるベースライン排出量の見通しを、図 4.1.3-10 には 2030 年のベースライン比排出量をそれぞれ示す。ベースライン比の削減率でみると、英国、サウジアラビア、カナダ、米国、南アフリカといった国の削減率が大きい。但し、南アフリカやカナダ、サウジアラビアは、図 4.1.3-9 に示すようにベースラインで排出量の増加が相対的に大きく見込まれていることに注意されたい。

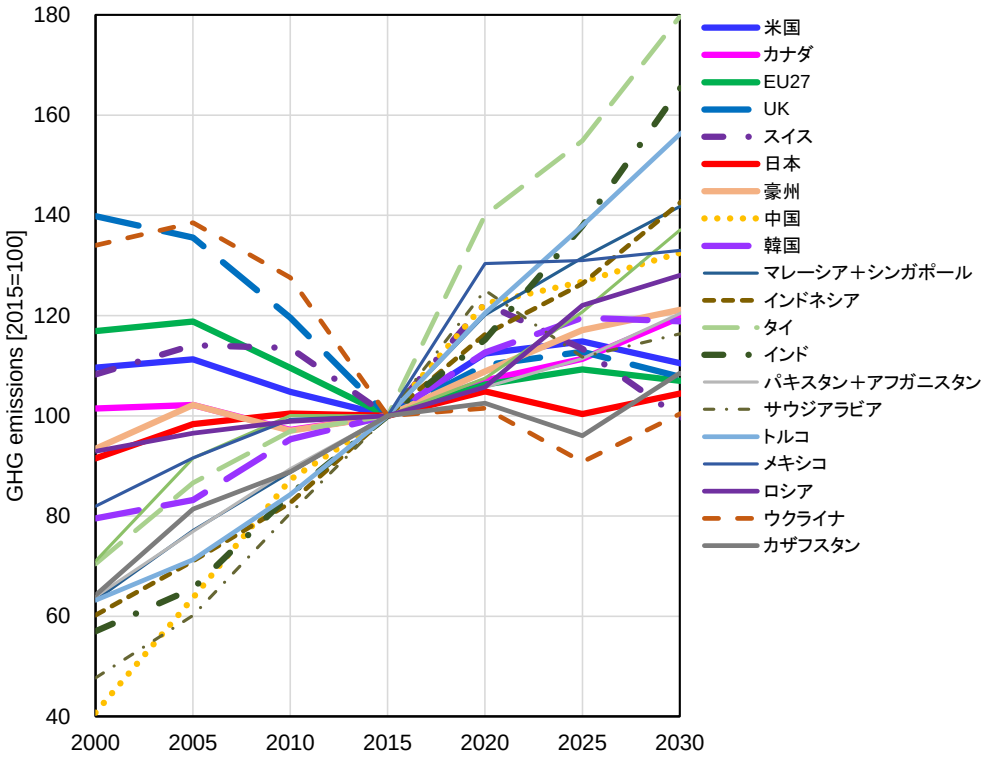


図 4.1.3-9 各国のベースライン GHG 排出量の見通し

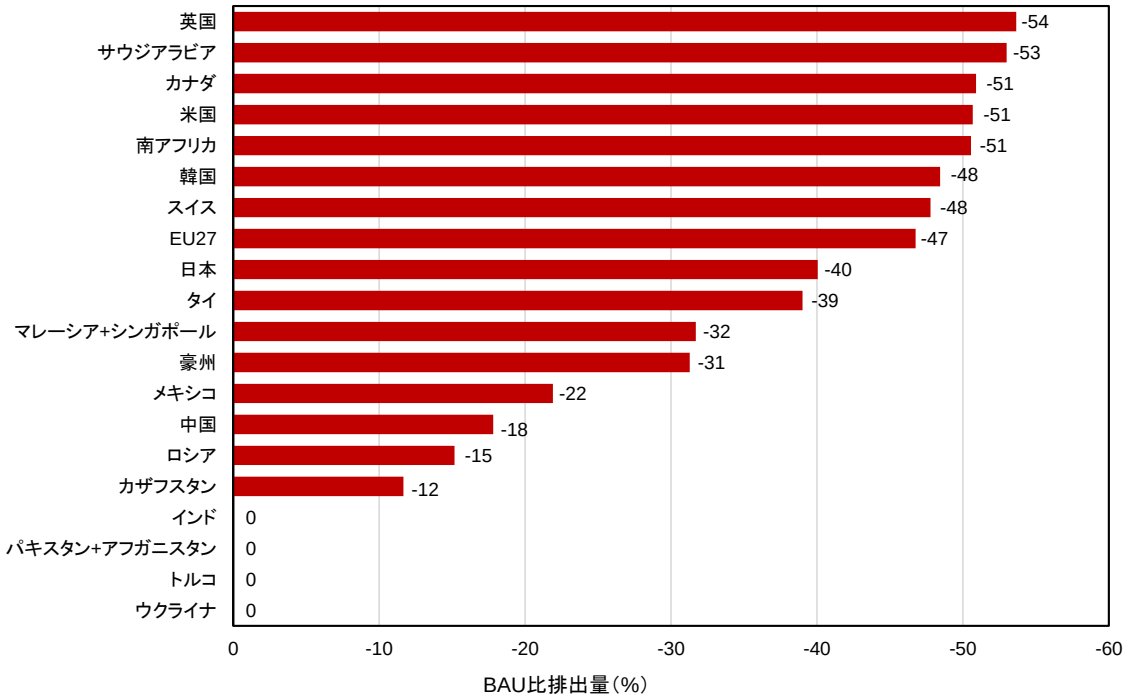


図 4.1.3-10 各国のベースライン比排出量（2030 年）

図 4.1.3-11 には、DNE21+モデルで評価した、各国の限界削減費用を示す。また、図 4.1.3-12 には EU 域内主要国の限界削減費用を示す。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（EU27 が、共同達成ではなく、表 4.1.1-2 に

示した独自の削減目標を仮にそれぞれ真水で達成するとすれば、イタリアやドイツの限界削減費用が高い)、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た。

各国の CO$_2$限界削減費用の評価は、2015 年時の評価(後述の図 4.1.4-1 参照)と同様に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。パリ協定は、プレッジ&レビューの仕組みにより、多くの国の参加を得たものの、限界削減費用の各国間の差異は大きいままであり、パリ協定以外によるパリ協定を補完する枠組を志向する動きも強まってくると考えられる(例えば、EU の炭素国境調整措置(CBAM)提案やドイツの気候クラブ(Climate Club)提案等[4])。

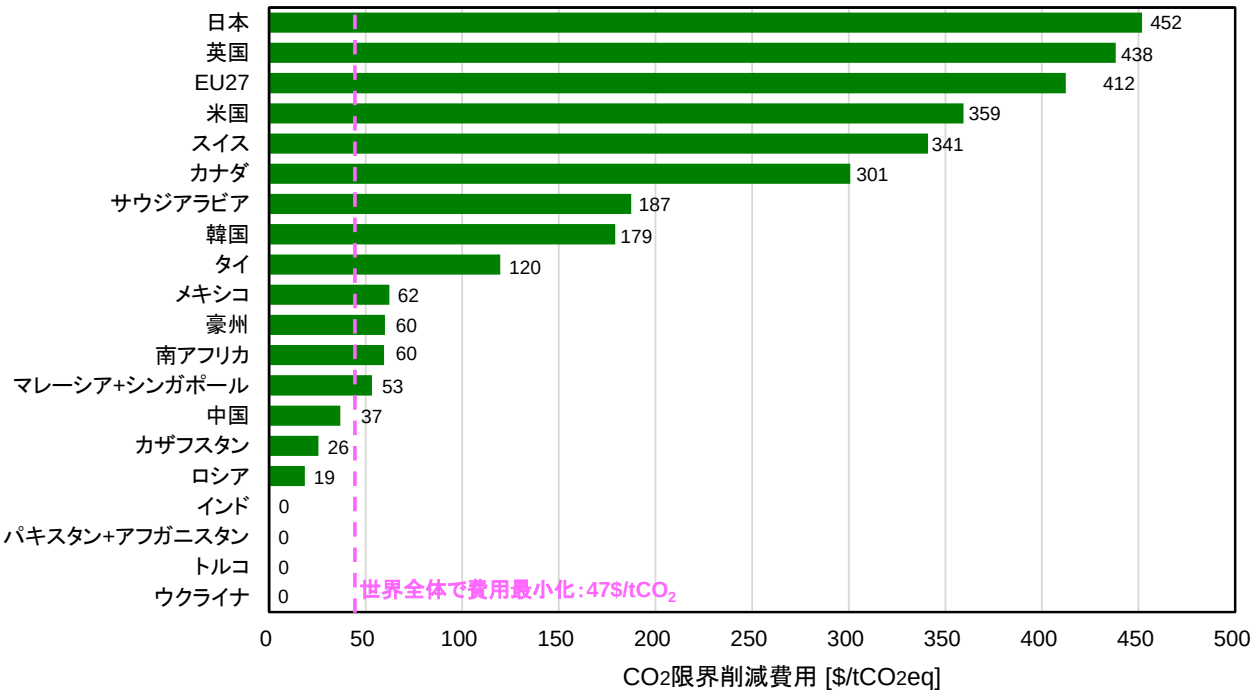


図 4.1.3-11 各国の CO$_2$限界削減費用(2030 年)

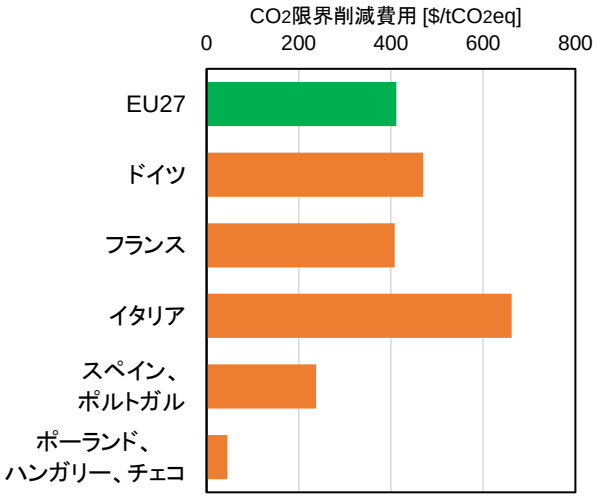


図 4.1.3-12 EU 内主要国の CO_2 限界削減費用（2030 年）

図 4.1.3-13 は、各国の 2 次エネルギー価格として、電力（家庭）価格の比較を示している。2020 年時点の実績ではドイツやベルギー、デンマークの価格が高く、30 UScent/kWh を超えている [5]。2030 年の NDCs の排出削減目標達成時には、日本、英国が 35 UScent/kWh を超える高い価格になると評価された（2020 年時点の日本、英国の電力（家庭）価格はそれぞれ 26 UScent/kWh、24 UScent/kWh[5]）。なお、電力需要に応じて重み付け平均を取ると EU27 の電力価格は 35 UScent/kWh と評価されたが、現状既に価格が高いドイツは、45 UScent/kWh と評価された。

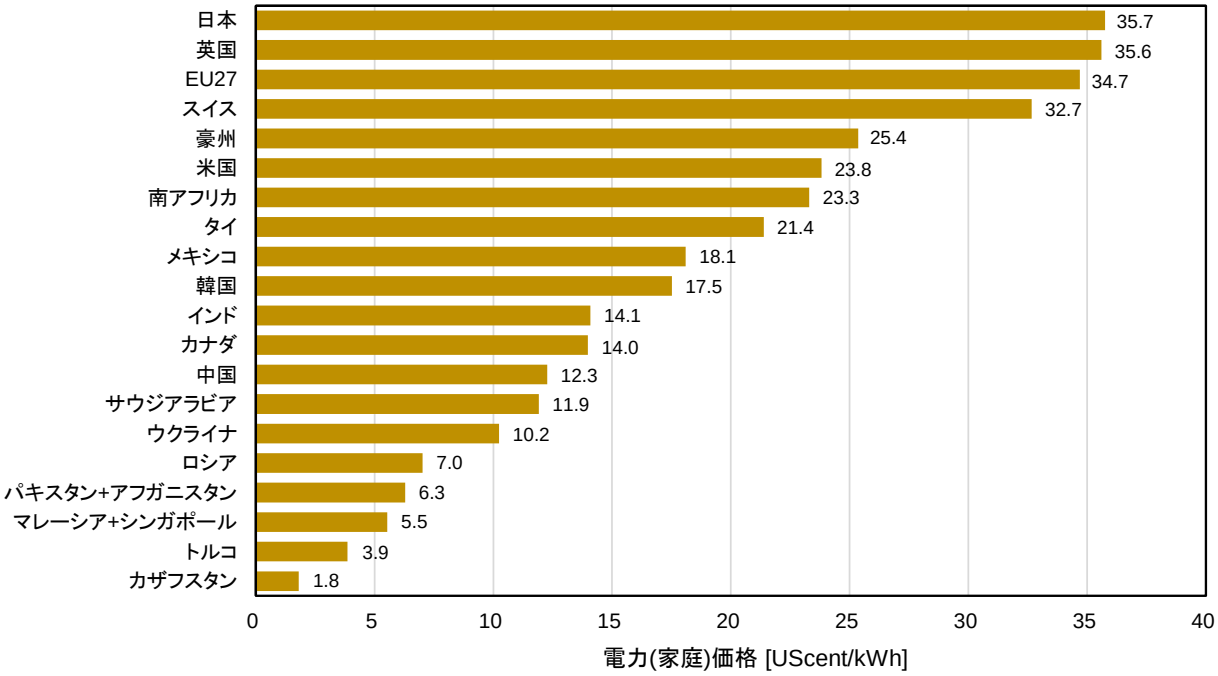


図 4.1.3-13 各国の 2 次エネルギー価格（電力）（2030 年）

図 4.1.3-14 には、DNE21+モデルで評価した、NDCs の GDP 比の排出削減費用を示す。図 4.1.3-11 に示したように、先進国は、限界削減費用は発展途上国と比べて高いもの

の、GDP が大きいため、GDP 当たり費用では 0.5～1.5%程度に分布している。一方、サウジアラビアの GDP 比排出削減費用は正味費用で 9.2%と最も高くなっている。これは、NDCs の排出削減により、原油や石油製品の輸出が減少するため、その正味費用が増大（売上の減少）することによる影響が大きい（7.5%）。

なお、日本等のエネルギー輸入国でも化石燃料・石油・ガス製品の輸出入減の正味費用が正となっているのは、価格が安い石炭から価格高いガスへの転換が進む影響等も含まれている。また、石油・ガス製品の輸出も、限界削減費用が高い国から低い国へと移行する傾向も見られた。

なお、世界全体での GDP 比排出削減費用は、1.04%と評価された。一方、図 4.1.3-11 で示した、世界全体で費用最小化を図った場合（CO_2 限界削減費用：47$/t$CO_2$）の同費用は 0.46%と評価された。NDCs で見られるように、限界削減費用に大きな差異がある中では、世界の GDP 比排出削減費用は費用最小化の世界に比べ、2.2 倍程度と大きな費用になると推計される。

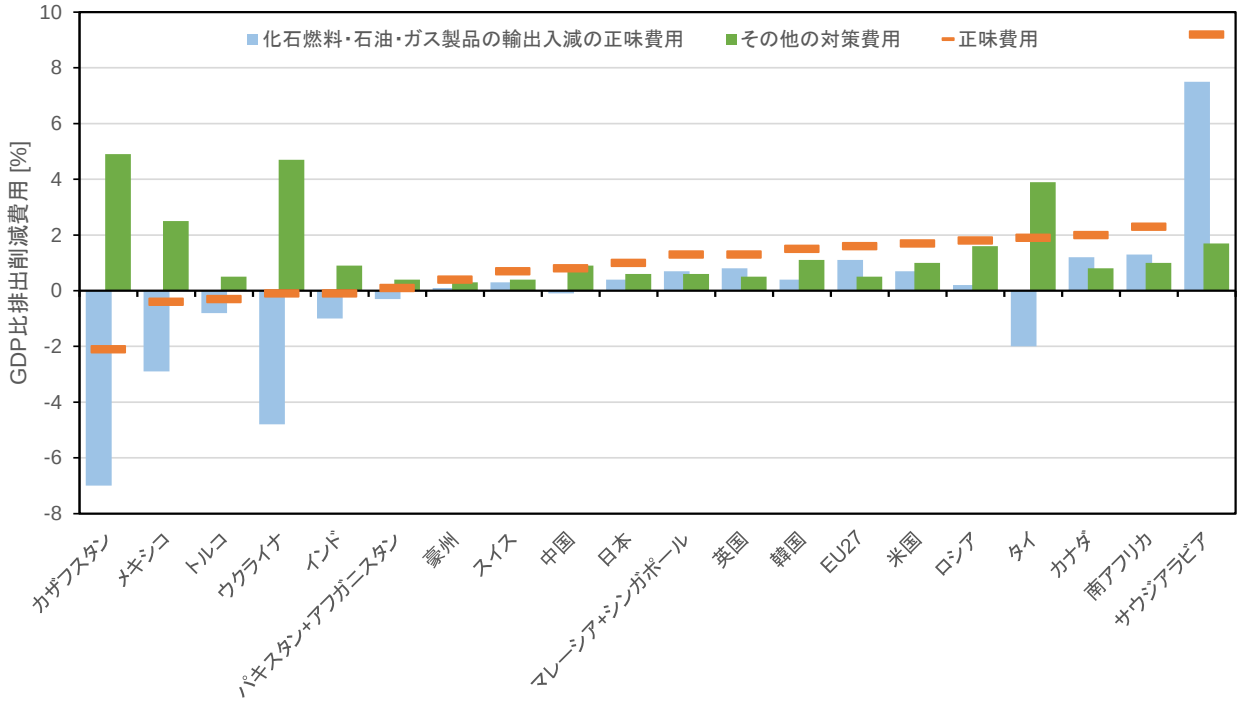


図 4.1.3-14 各国の GDP 比排出削減費用（2030 年）

(3) NDCs による世界全体での排出削減量の分析・評価結果

図 4.1.3-15 は、世界全体での NDCs の期待排出削減量の推計結果を示している。2030 年における世界全体の GHG 排出量は 50 $GtCO_2eq/yr$ 程度と推計され、UNFCCC 事務局による Synthesis レポートによる評価 [6]の 52.4 $GtCO_2eq.$（LULUCF 除く）や、UNEP による評価 [7]の約 50～52 $GtCO_2eq.$等と整合的である（第 4.3.1 節も参照）。なお、UNEP のレポートでは、NDCs の期待排出削減量と 2℃、1.5℃排出経路とのギャップが強調されている。今回の DNE21+モデルによる推計では、DACCS 等の CDR を想定したカーボンバジェットでの最適化計算によると、気温の一定程度のオーバーシュートを許容す

るなら、必ずしも 2030 年 NDCs は 2℃、1.5℃が不可能な水準という訳ではなく、寧ろ費用効率的な排出経路になり得る可能性も示唆される。

図 4.1.3-16 に示すように、1.5℃実現の世界 CO_2 排出経路は、様々な可能性があると整理されている [8)]。BECCS の場合、食料供給や生物多様性とのトレードオフの懸念は大きいが、DACCS の場合、これらの懸念は小さい。費用対効果の高い対策をとることが重要であるので、様々な技術の活用を前提に、負排出の可能性を必ずしもネガティブに捉える必要はないと考えられる。

先述のように、また図 4.1.3-15 でも記載しているように、NDCs で期待される世界排出削減量を世界費用最小で達成しようとすれば、47 $/tCO_2$ の限界削減費用相当と計算された。一方、日本の NDC の 2013 年比 46%減を達成するための限界削減費用は、DNE21+の計算では 452 $/tCO_2$ 相当であったが、この限界削減費用が世界全体で均等化した場合には、世界 GHG 排出量は 32 $GtCO_2/yr$ 程度と推計された。このとき、UNEP が参照している 1.5℃シナリオの 2030 年推計値とほぼ整合的と言える。ただ、この場合、途上国の大幅な NDCs 排出削減目標の深堀が必要であり、現実性はかなり乏しいと言わざるを得ない。この点からも、CDR を含む技術革新によって、2030 年以降の大幅排出削減に注力することが、1.5℃シナリオ実現の可能性としてはまだ高いように思われる。

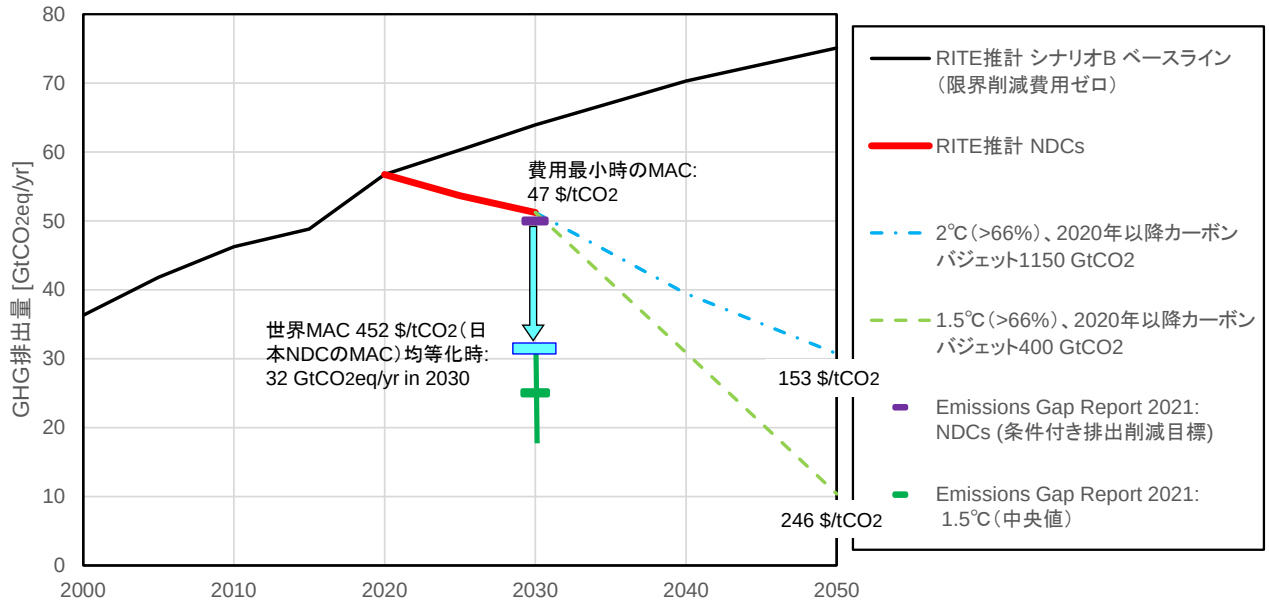


図 4.1.3-15 世界全体での NDCs の期待排出削減量推計

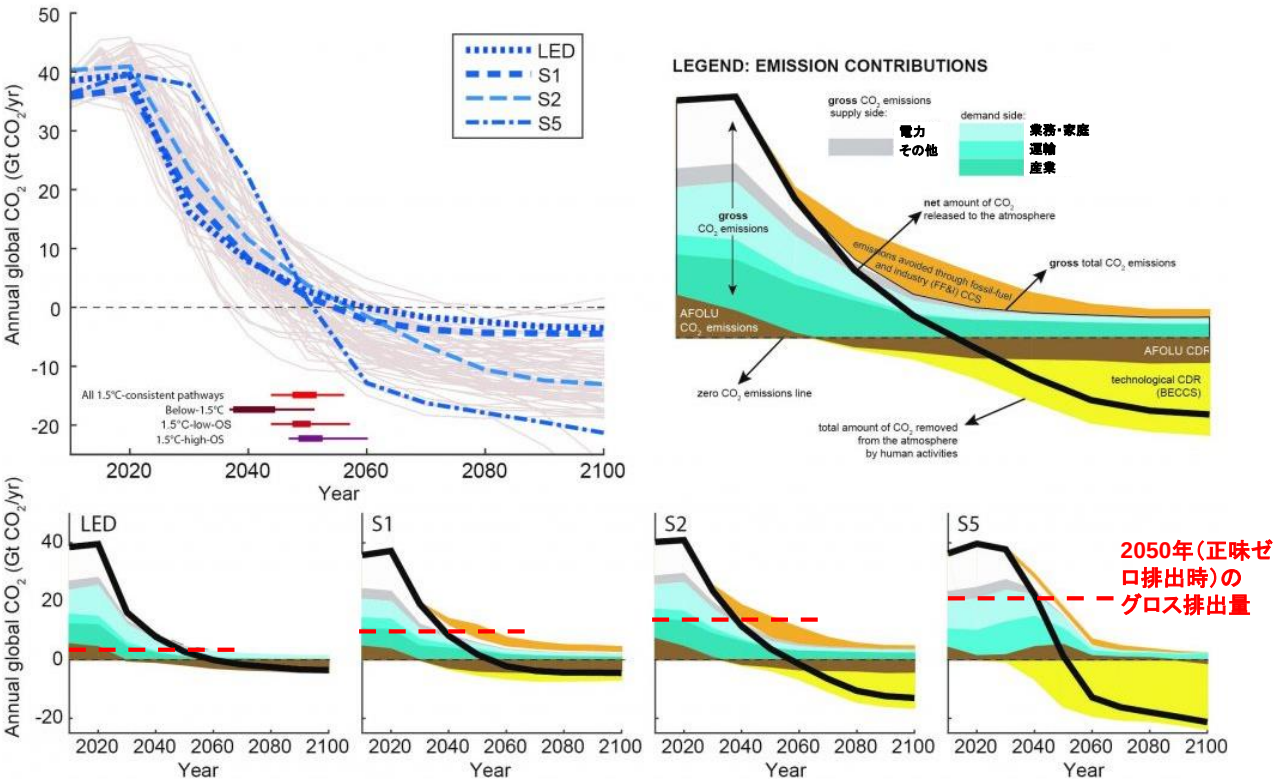


図 4.1.3-16 1.5℃実現の世界 CO_2 排出経路：様々なカーボンニュートラルの姿 [8)]

参考文献（第 4.1.3 節に関するもの）

1) RITE、平成 27 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、2016
2) J. Aldy, B. Pizer, Comparability of effort in international climate policy. Harvard Project on Climate Agreements Discussion Paper 14-62, 2014
3) J. Aldy, B. Pizer, K. Akimoto, Comparing emission mitigation efforts across the countries, Climate Policy, Vol.17, Issue 4, pp. 501-515, 2017
4) 産業技術環境局・資源エネルギー庁、カーボンニュートラル実現に向けた国際戦略、第 4 回産業構造審議会産業技術環境分科グリーントランスフォーメーション推進小委員会/総合資源エネルギー調査会基本政策文化会 2050 年カーボンニュートラルを見据えた次世代エネルギー需給構造検討小委員会合同会合、2022
5) IEA, OECD Energy Prices and Taxes quarterly, 2021
6) United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): Nationally determined contributions under the Paris Agreement – Synthesis report by the secretariat, September 17 (2021).
7) UNEP, Emission Gap Report 2021
8) IPCC, Special Report on Global Warming of 1.5℃, 2018

4.1.4 過去の NDCs の排出削減費用推計との差異の検討

図 4.1.4-1 は、2015 年推計時の各国の CO_2 限界削減費用を示している。当時の評価と比べると、4.1.1 節で述べたように排出削減目標の引き上げが行われたことに加え、

4.1.2 節で述べたように社会経済情勢も異なったものとなってきている。そこで、本節では、当時の推計と本年度行った推計との差異の要因について検討を行った。

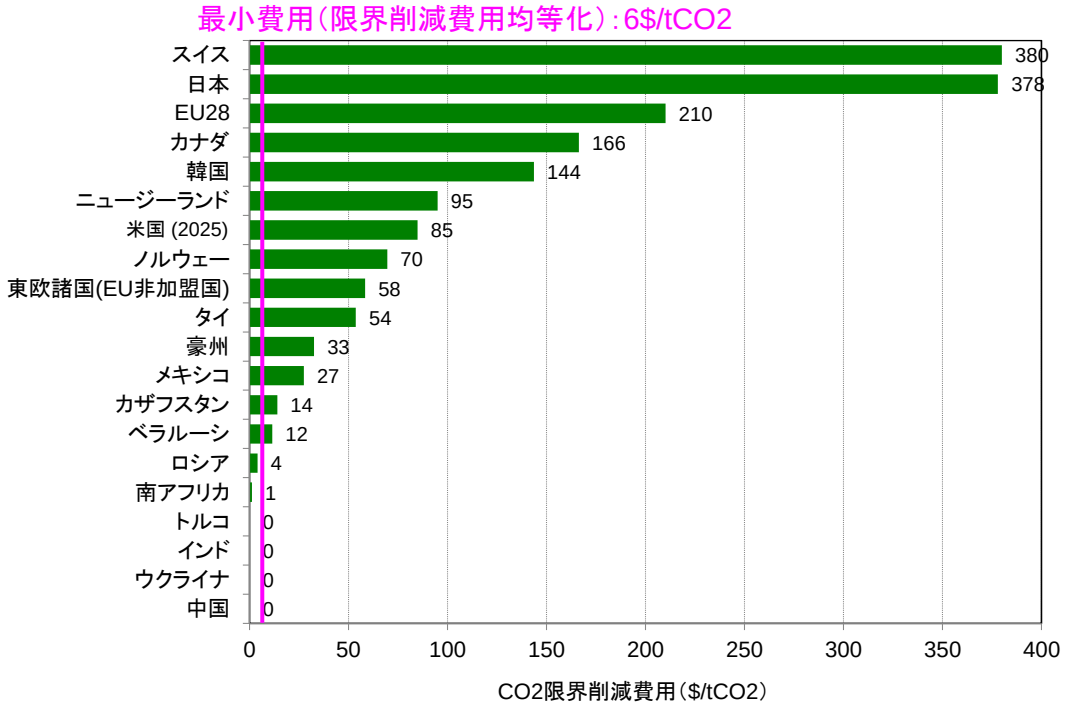


図 4.1.4-1 2015 年推計：約束草案の CO_2 限界削減費用 [1)]

図 4.1.4-2 は、日本の CO_2 限界削減費用について、図 4.1.4-1 における 378$/t$CO_2$ と図 4.1.3-11 における 452$/t$CO_2$ の差異を、6 ケースの計算結果に基づいて要因分解したものである。

まず、2015 年推計の 378$/t$CO_2$ は、政府の見通しである CO_2▲25%+2015 年エネミックス（発電電力量シェアを石炭：26%、石油：3%、ガス：27%、原子力：20%、再エネ：24%と制約）に基づいて評価すれば、242$/t$CO_2$ まで低下すると評価されている。この低下は、CO_2 削減率が GHG▲26%に比べて小さくてすむことに起因する（DNE21+モデルによる評価では、Non-CO_2 GHG での排出削減ポテンシャルは政府の見通しに比べて小さいと見込んでおり、GHG▲26%達成のためには CO_2 でより削減を行う必要がある）。更に、2015 年エネミックスの制約を緩和し、原子力 20%のみを制約として評価すると、石炭火力からガス火力への転換をより進め、エネルギー需要部門での排出削減量が緩和されることで、限界削減費用は 165$/t$CO_2$ まで低下すると評価されている。

本年度の各種前提条件の下で CO_2▲25%+原子力 20%制約のみを評価すると、限界削減費用は 51$/t$CO_2$ と評価された。これより、2015 年推計当時に比べ、経済見通しが低下したことや、より技術進展が進むと見込んだことにより、限界削減費用は 114$/t$CO_2$ 低下したと説明できる。次に、現在の NDC の下での目標（CO_2▲45%）を原子力 20%制約のみで評価すると、CO_2 限界削減費用は 237$/t$CO_2$ と推計され、排出削減目標の引き上げによって限界削減費用は 186$/t$CO_2$ 上昇したと説明できる。更に、2021 年エネミックス（発電電力量シェアを石炭：19%、石油：2%、ガス：20%、原子力：20%、再

エネ：38%と制約）とした場合、2015 年推計と同じ理由で（原子力 20%制約であれば、石炭火力からガス火力への転換等がより進むと評価される）、CO_2 限界削減費用は 299$/t$CO_2$ まで上昇する。最後、GHG▲46%の下では、DNE21+モデルによる評価では CO_2▲50%が必要と推計されるため、CO_2▲45%との差で 153$/t$CO_2$ 上昇したと説明できる。

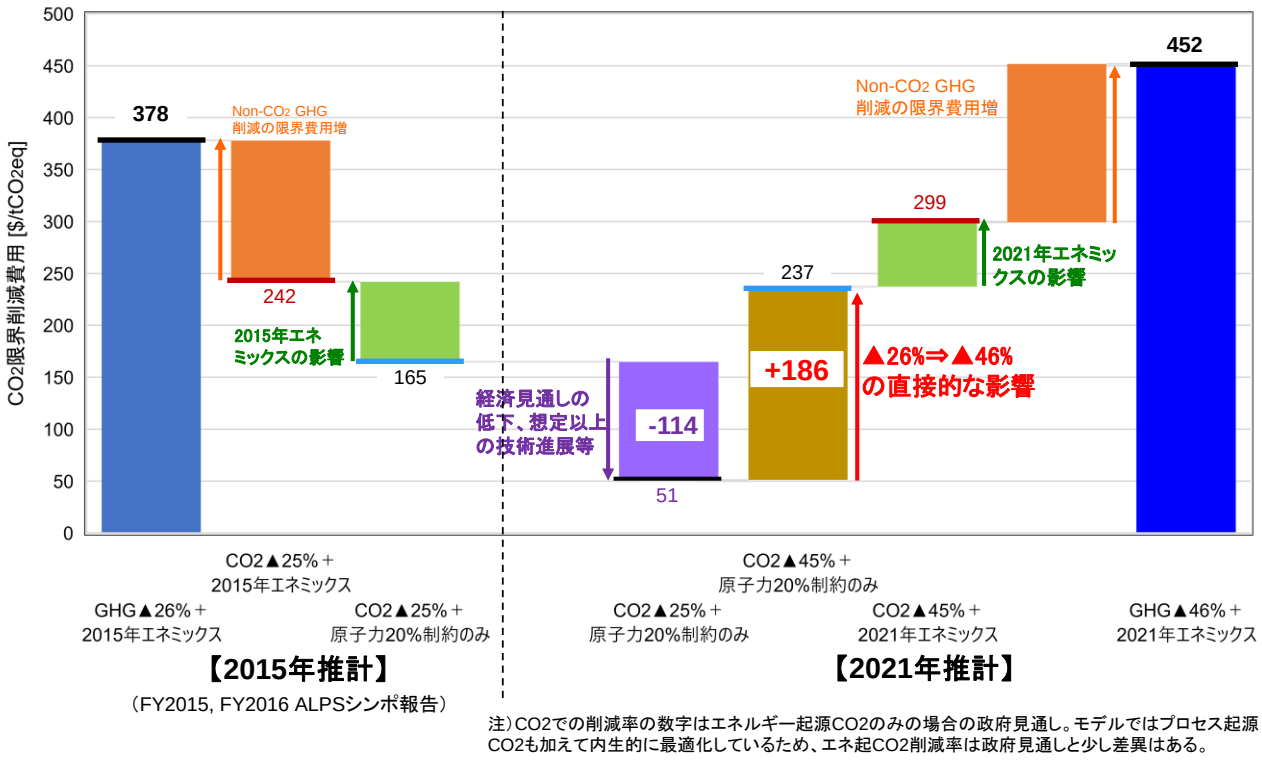


図 4.1.4-2 2015 年推計からの変化に関する要因：日本

図 4.1.4-3 は、中国とインドについて、GDP、ベースライン CO_2 排出量、ベースライン CO_2/GDP の指標が 2015 年推計と今年度の推計でどのような差異があるかを整理している。

中国については、GDP は 2015 年推計の下での 7.3%/yr に対し、今年度推計の下では 6.3%/yr と 1.0%ポイント下方修正された。その一方で、CO_2 排出量の見通しは、2015 年推計、今年度推計それぞれで 3.2%/yr、3.1%/yr と大きな差異はない。これは、4.1.2 節で示したように、粗鋼生産量や乗用車輸送サービス需要の見通しが上方修正された影響も含まれている。結果、今年度推計ではベースラインで CO_2/GDP の改善が進まないため、2015 年推計では排出削減目標はベースラインで達成可能と見込まれていたが、今年度推計では CO_2 限界削減費用は 37$/t$CO_2$ と評価された（図 4.1.3-11）。

インドについては、2015 年推計に比べ、今年度推計では GDP もベースライン GHG も若干下がる（GDP：6.6%/yr→6.2%/yr、GHG：4.4%/yr→3.7%/yr）。GHG 変化率の低下は、ベースラインにおいても石炭火力からガス火力への転換がある程度見込まれた影響も含まれている。結果として、今年度推計でもベースライン GHG/GDP の改善は進む

ため、インドの排出削減目標は変わらずベースラインでも達成可能と評価された（図4.1.3-11）。

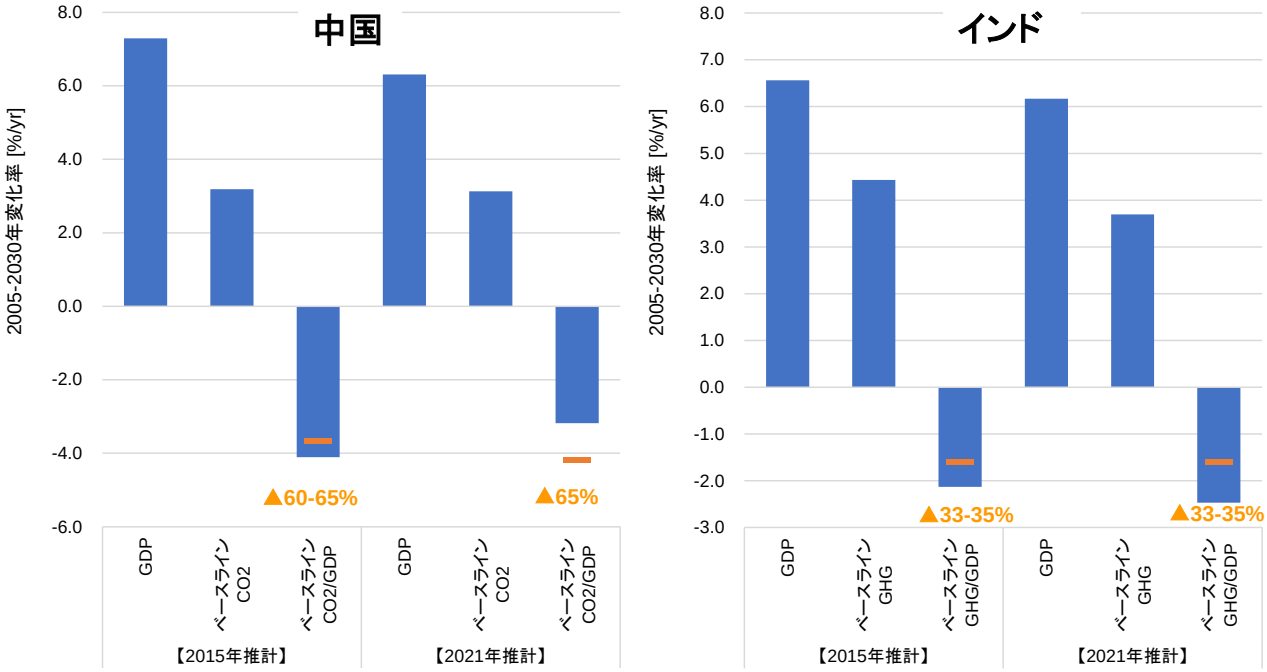


図 4.1.4-3 2015 年推計からの変化に関する要因：中国、インド

参考文献（第 4.1.4 節に関するもの）

1) K. Akimoto, F. Sano, B. Shoai Tehrani, “The analyes on the economic costs for achieving the nationally determined contributions and the expected global emission pathways”, Evolutionary and Institutional Economics Review, Vol. 14, Issue 1, pp.193-206, 2017

4.2 国際競争力への影響・国境炭素調整の評価

4.2.1 はじめに

2030 年 NDCs の排出削減目標の深堀がなされたが、前節で記載のように、日本や先進国では相当高い CO_2 限界削減費用が推計され、また NDCs の CO_2 限界削減費用には国間で大きな差異が見られた。本節では、2030 年 NDC 排出削減目標に関する経済影響に焦点を当て分析を行った。第 4.2.2 節では、2030 年の日本の 46%削減目標・エネルギーミックスに関する経済影響分析を行った。46%削減目標とそれに対応した第 6 次エネルギー基本計画 [1]・エネルギーミックスの影響を分析し、また、従来の目標であった 26%削減（2013 年度比）・第 5 次基本計画の経済影響の比較を行った。先進国を中心に NDCs 排出削減目標の深堀が進んだ一方、途上国の深堀はあまり進まず、CO_2 限界削減費用の国間の差異が広がると、エネルギー多消費産業を中心に国際競争力への懸念が強まり、また炭素リーケージの懸念も大きくなる。このような中、EU は国境炭素調整

措置の導入を計画し、具体的な制度設計を進めている。そこで、第 4.2.3 節では、30 年 NDC 目標下における国境炭素調整措置に関する分析を行った。なお、各国の NDC 目標等に関する詳細は第 4.1 節を参照されたい。

4.2.2 2030 年の日本の NDC 排出削減目標に関する経済影響分析

日本の 2030 年 NDC 排出削減目標（2013 年比▲46%）に関する経済影響に焦点を当て、2030 年の日本の 46%削減目標・エネルギーミックス（詳細は第 4.1 節参照）に関する経済影響分析を行った。

(1) 分析方法

本分析で用いた世界エネルギー経済モデル DEARS[3),4)]は、世界を 18 地域に分割し、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を統合した構造を持つ。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（一般均衡モデル型）では、国際産業連関表データベース GTAPver.9 [5)]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。エネルギーモジュールでは、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、エネルギーミックスの制約として各電源シェアを外生的に与えることが可能である。

ベースライン GDP は、COVID19 の影響が一部考慮された「内閣府・中長期の経済財政に関する試算 [7)]」(2021 年 7 月)の経済成長実現ケース(10-30 年平均成長率は約 1.4%/年）を 2030 年まで想定した。2020 年の CO_2 排出量は炭素価格ゼロとして想定し、COVID-19 による排出減の影響は、GDP 想定を介して反映した。ベースラインにおける 2030 年発電構成は、2019 年比固定と想定した。▲46%ケースの電源構成は、第 6 次エネルギー基本計画 [1),2)]の 2030 年度のエネルギーミックスに基づき、石炭火力 19%、LNG 火力 20%、石油火力 2%、太陽光 16%、風力 5%（そのうち、洋上風力は 1000 万 kW を想定)、水力地熱 12%、原子力 20%と想定した。各電源の発電コストの想定に関して、発電コスト WG[6)]の新設データを反映した。新設の発電単価は、年割引率 5%を想定し、各電源の諸元一覧をもとに想定した。VRE 導入時の統合費用についても、発電コスト WG [6)]の「電源立地や系統制約を考慮しない機械的な試算」を参照した。米国の 2030 年の削減目標は GHG▲50%（05 年比)、EU は▲55%（90 年比）を想定した。その他の国については炭素価格ゼロを想定した。

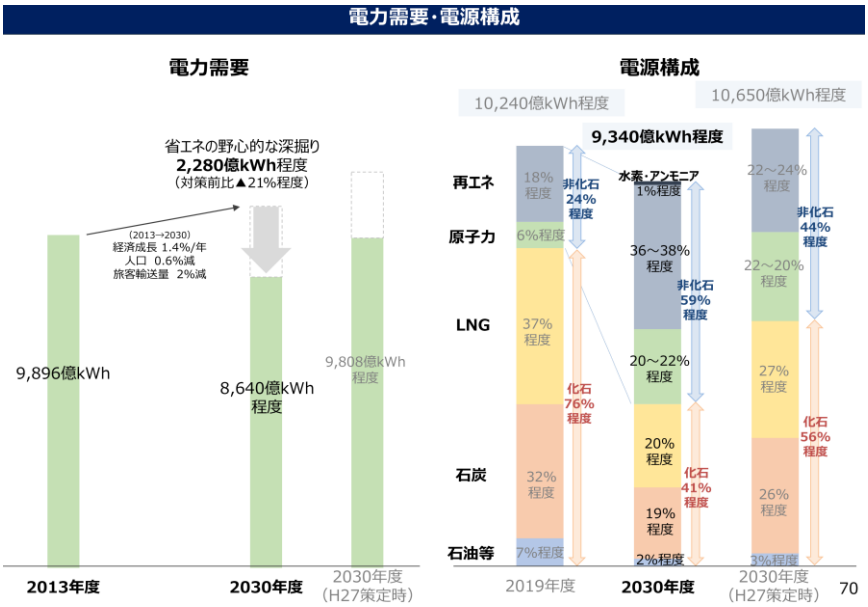


図 4.2.2-1 日本の 2030 年電源構成

出典：資源エネルギー庁 [1)]

(2) ▲46%排出削減目標の経済影響

▲46%削減目標と、従来の削減目標であった▲26%の経済影響を比較した。図 4.2.2-2 には、ベースライン、▲26%、▲46%ケースの GDP を示した。▲26%ケースでは約 0.5%（約▲3 兆円、ベースライン比）の GDP 減少であるが、▲46%ケースでは約 4.2%（約▲28 兆円）の減少と大きな経済影響が推計される。削減目標に必要な炭素価格は、▲26%、▲46%ケースでそれぞれ 105、534 $/tCO$_2$ と推計された。GDP 変化の要因分解を示した図 4.2.2-3 から、▲46%ケースにおいて、低炭素・脱炭素エネルギーに対する投資の増加の効果はあるものの、製造業等の競争条件の悪化（貿易財に関する輸出の相対価格の悪化）による純輸出の低下、また消費の低下の影響が大きく、GDP が低下すると推計された。

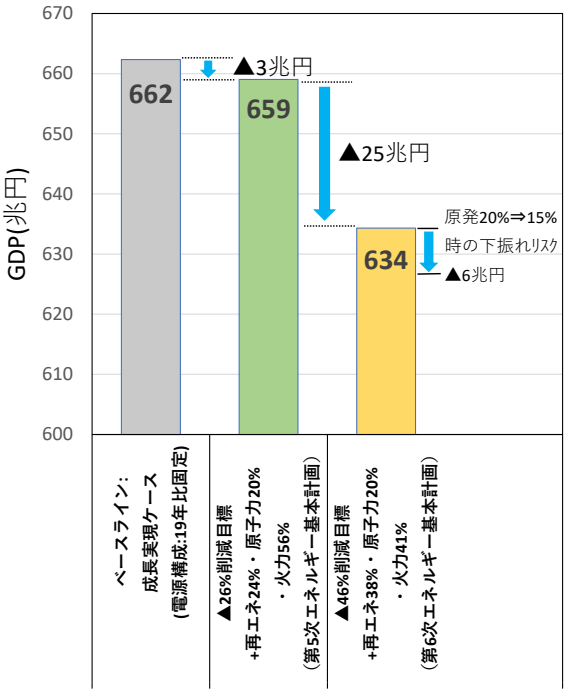


図 4.2.2-2 GDP への影響（日本、2030 年）[2]

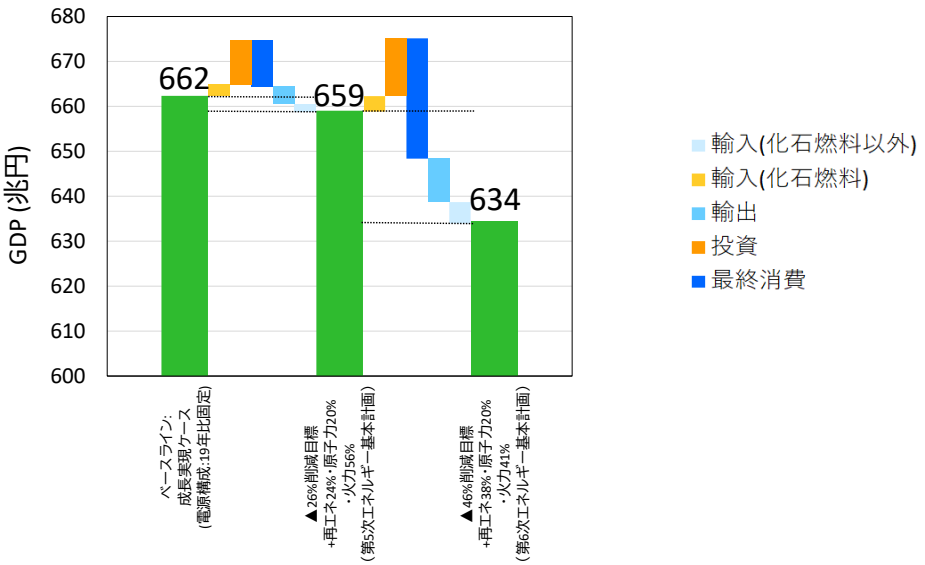


図 4.2.2-3 GDP 変化の要因分解（日本、2030 年）

[2] 参考までに、COVID19 による GDP 影響は、内閣府のデータを利用して、以下のように推計される。内閣府「中長期の経済財政に関する試算」の推計を利用して、COVID-19 直前に公開された GDP 推計（内閣府 2020 年 1 月推計）（COVID-19 影響が含まれない）と、COVID-19 の影響が部分的に考慮された推計（内閣府 2021 年 7 月推計、本分析で利用）を比較する。両推計の差分を COVID-19 による影響とみなすと、COVID-19 による 2030 年の日本 GDP 減少は、約 7 兆円減少（2010-2030 年成長率で 0.05%ポイント低下）と推計される。

過去に実施した▲26%の経済影響の推計 [4]と比較すると、本推計の▲26%では GDP ロスや炭素価格が小さく推計されている。これらは、文献 [4]と比較すると、本分析におけるベースライン GDP の低下（10-30 年成長率：▲約 0.2%/年）や、再エネの発電コスト想定の低下などに起因する。

図 4.2.2-4 には、▲26%、▲46%ケースにおける産業別の生産量変化を示す。エネルギー多消費で国際競争に晒されやすい製造業である鉄鋼産業や化学産業などでは、産業平均を表す GDP 変化よりもかなり大きい 12～14%程度の生産量減少が見込まれる。

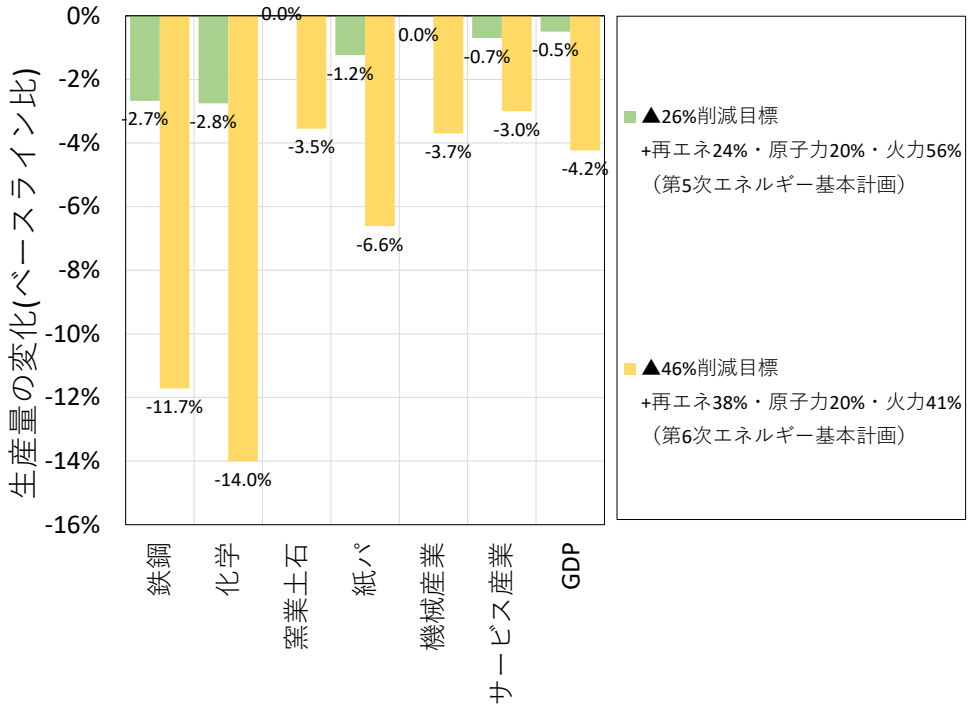
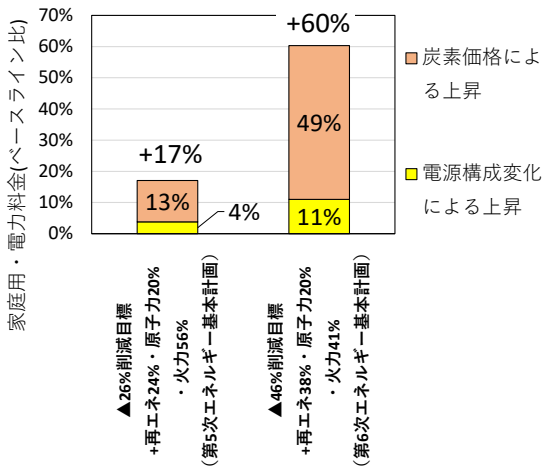


図 4.2.2-4 産業別生産への影響（日本、2030 年）

図 4.2.2-5 には、▲26%、▲46%ケースの家庭用・産業用の電気料金（平均）の変化を示した。電力料金は、▲26%ケースに比べ、▲46%ケースでは大幅に増加すると推計された。主な要因は、炭素価格が火力発電に上乗せされたコスト増加による要因である。電源構成変化による料金上昇はそれほど大きな影響とはならないと推計された。家庭用・光熱費も同様に、▲46%ケースでは大幅に増加すると推計された（図 4.2.2-6）。

(a)家庭用



(b)産業用

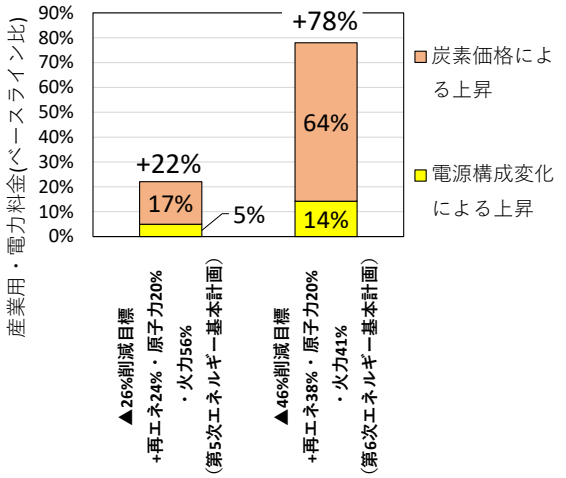


図 4.2.2-5 電気料金（平均）への影響（日本、2030 年）

（注）「炭素価格による上昇」は、電源構成を変化させた上で、排出削減目標のための炭素価格を火力発電のペナルティとして追加した際の価格影響を示す。

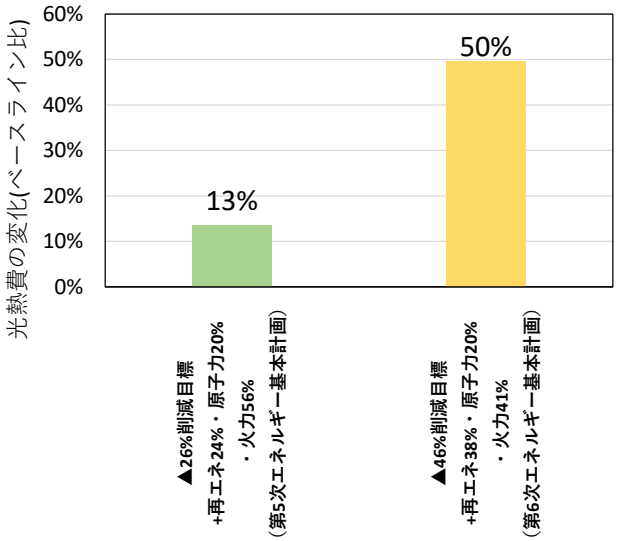


図 4.2.2-6 家庭用・光熱費への影響（日本、2030 年）

(3) 排出削減水準に関する感度分析

図 4.2.2-7 には、排出削減水準（再エネ・火力比率）に関する感度分析の結果を示す。ここでは、原発はいずれも 20%を想定した。▲35%と▲50%削減水準の再エネ・火力の比率は、▲26 と▲46 目標におけるシェアの内挿、外挿によりそれぞれ想定した。▲35%と▲50%削減水準の火力発電内の比率は、第 6 次エネルギー基本計画の石炭（19%）・ガス（20%）の比率をもとに比例的に想定した。再エネ内の想定も同様である。

削減目標が▲35%から▲46%にかけて、GDP ロスが大幅に上昇すると推計された。主な要因は、厳しい削減目標に伴う炭素価格の上昇によるものである。炭素価格上昇によってエネルギー価格が上昇し、需要側の対策の負担が大きくなり、大幅な GDP ロスにつながることを示している。一方、排出量目標を除外し、電源構成の変化のみの GDP

影響をみると、それほど大きな GDP ロスではないことが示された。排出削減水準が厳しくなるにつれ、エネルギー供給側の対策の余地が小さくなり、生産活動の低下を含む需要側の対策の対応の必要性が高まることを示している。

図 4.2.2-8 には、鉄鋼産業の生産変化の内訳を、国内利用と輸出需要に分離して示した。削減目標が厳しくなるにつれ、GDP 変化よりも、鉄鋼産業の国内生産ロスは大幅に上昇する。鉄鋼産業の国内生産ロスは、削減量が相対的に小さい▲26%ケースでは国際競争力低下による輸出減の影響の割合が比較的大きいが、削減目標が厳しくなるにつれ、鉄鋼製品の国内利用の低減による要因がより大きくなると推計された。

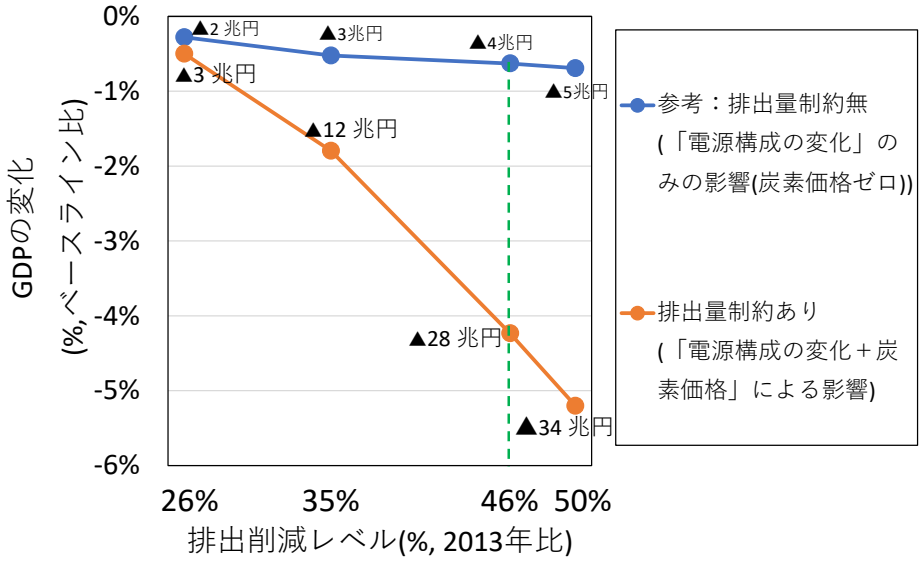


図 4.2.2-7 排出削減水準を変化させた場合の GDP への影響

（注）原発はいずれも 20%を想定。▲35%と▲50%削減水準の再エネ・火力の比率は、▲26 と▲46 目標におけるミックスの内挿、外挿によりそれぞれ想定した。▲35%と▲50%削減水準の火力内の比率は、第 6 次エネルギー基本計画の比率をもとに比例的に想定した。

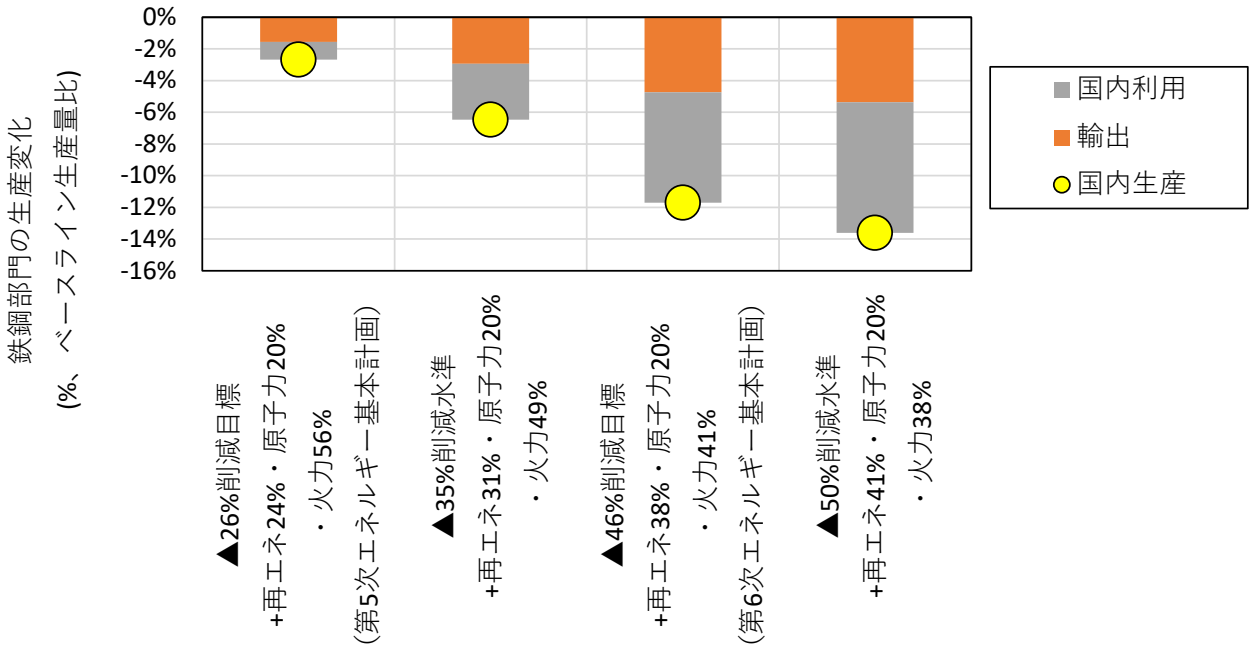


図 4.2.2-8 排出削減水準を変化させた場合の鉄鋼産業への影響

（注）原発はいずれも 20%を想定。▲35%と▲50%削減水準の再エネ・火力の比率は、▲26 と▲46 目標におけるミックスの内挿、外挿によりそれぞれ想定した。▲35%と▲50%削減水準の火力内の比率は、第 6 次エネルギー基本計画の比率をもとに比例的に想定した。

(4) 原発比率に関する感度分析

図 4.2.2-9 には、原発比率を 20%から 15%へ低下させた場合の GDP 影響を示した。ここでは、原発比率の低下分を火力発電で代替すると想定した。電力部門で代替が難しい場合、供給側の対策の余地は小さくなり、生産活動の縮小のような需要側の一層の低下が必要となり、経済影響はより悪化する。▲46%ケースでは、原発比率を 20%から 15%まで低下させると、GDP ロスは約 6 兆円増加すると推計された。

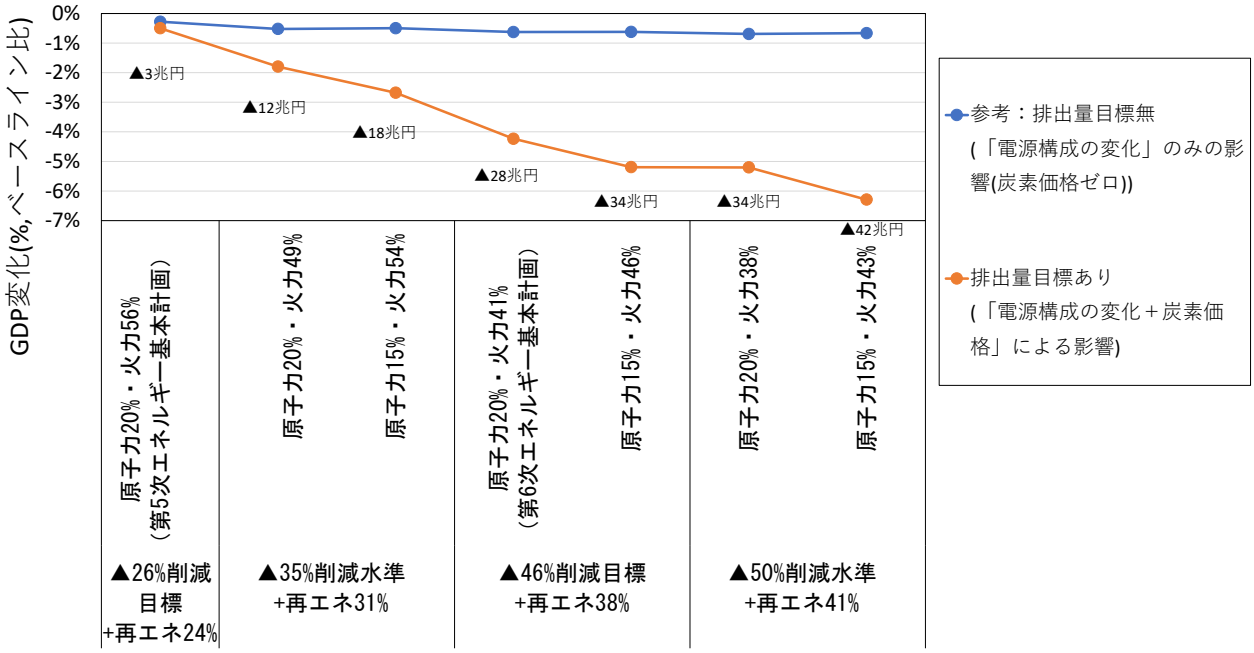


図 4.2.2-9 原発比率を変化させた場合の GDP への影響

注記：原発比率の低下分を火力発電で代替を想定。▲26%以外の各ケースの火力内の比率は、第 6 次エネルギー基本計画の石炭(19%)・ガス（20%）の比率をもとに比例的に想定

(5) 負担のリバランスに関する分析

本節では、電気料金に限定した負担のリバランスに関する分析を行った。▲46%ケースにおいて、電気料金上昇の負担分を、産業部門から家庭部門に寄せた場合、すなわち、電力料金の負担のリバランスに関する影響について分析した。ここでは、▲46%ケースで必要となる電気料金上昇分（▲26%削減ケース比）を、産業部門から家庭部門に負担を増加させた場合を想定し分析した。

図 4.2.2-10 には、負担のリバランスの違いによる GDP 変化を示した。家庭部門に負担を寄せるリバランスにより、NDC 削減目標▲46%を達成するためにマクロ経済全体の悪影響は、やや軽減する可能性がみられる。想定したリバランスによって、エネルギー多消費産業や機械産業などの投資増加を促されると推計された（図 4.2.2-11、図 4.2.2-12）。これは、日本の産業構造や家計の消費構造に依存すると思われる。しかし、今回の想定に基づく、電気料金に限定した負担のリバランスを行ったとしても、マクロ経済への悪影響を大きく軽減するまでには至らないと推計された。また、産業部門の電気料金の負担を軽減する一方、▲46%削減目標を達成するために必要な炭素価格は、想定したリバランスによって増加する。そのため、これらのリバランスにより、家庭部門の電気料金は大きく上昇するために、家庭部門の光熱費は大きく上昇し、負担が増加することが推計された。

一般均衡モデルで解いているため、負担をリバランスした際には、当初（リバランス無）の最適解から乖離するため、基本的に炭素価格（限界削減費用）が増加する。ただし、現実には家庭用料金が最適化されているわけではなく、低位に抑制されている可能性は考えられる。また、今後の課題として、国内で実施する負担のリバランス

はさまざまな組合せが考えられ、経済影響を軽減するような可能性があり、今後の詳細な分析・検討が重要と考えられる。

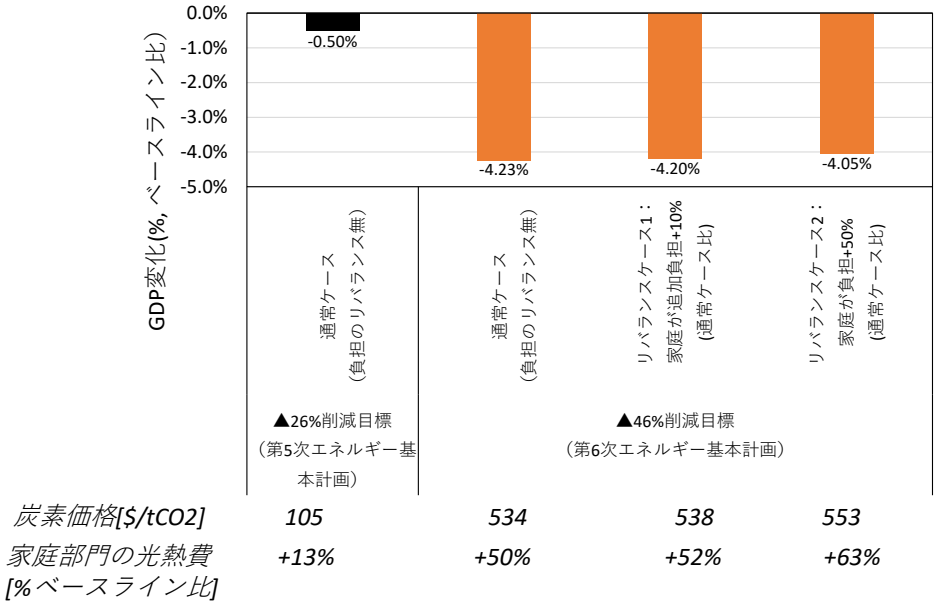


図 4.2.2-10 負担のリバランスによる GDP 変化の違い

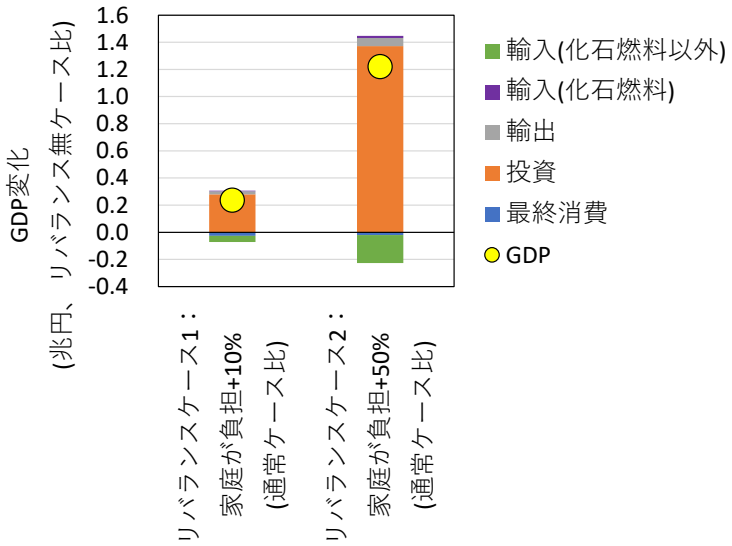


図 4.2.2-11 ▲46%リバランスケース（電気料金）における GDP 変化の要因分解

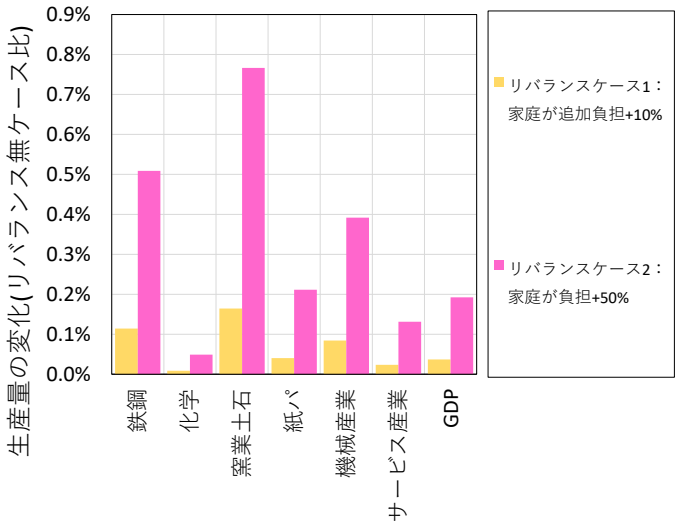


図 4.2.2-12 ▲46%リバランスケース（電気料金）における産業別生産への影響

(6) 環境と経済の好循環の条件の検討

▲46%削減目標・エネルギーミックスを達成するためには、日本経済が、産業部門においても家庭部門においても、大きい悪影響が生じうることが推計された。そこで、そのような状況のもとで「環境と経済の好循環」を達成するために必要な条件を検討した。ここでは、その条件の検討として、「海外での設備投資額増に伴う日本製品の輸出増分」と「回避し得る影響被害」を考慮した。

「海外での設備投資額増に伴う日本製品の輸出増分」は、日本の CO_2 削減技術の輸出増加を明示的に考慮した。現在の DEARS モデルでは、全部門の温暖化対策オプションやそれらの輸出までは明示的に考慮できていない。そこで、海外で必要となる設備投資額については、DNE21＋モデルの結果（第 4.1 節参照）を利用した。NDC を達成する際に必要となる CO_2 削減技術（運輸、家電・その他）の海外投資額を DNE21+モデルの分析結果から算出した。次に、機器資材率 53%を想定し（文献 [8]の調査国平均値に基づく)、世界に占める日本の輸出シェア（各ケースの輸送機械とその他機械の輸出シェア）を用いて、当該技術の日本の輸出額を推計した。輸出シェアは、 各ケースの日本の輸送機械産業（運輸の設備投資）と機械産業（家電・その他の設備投資）の輸出シェアを DEARS モデル結果から推計した。2030 年のベースラインの輸送機械とその他機械の輸出シェアは、それぞれ 13.8%と 10.3%（加重平均すると約 11%）である。また、海外の想定は、NDC 全地域遵守（MAC 差異あり）と日本 MAC レベルまで実施（MAC 差異なし）の 2 種類を想定した。MAC 差異なしのケースは、現実的には実現性が非常に難しいケースであるが、海外で必要となる投資額が非常に大きいケースとなり、海外で必要となる投資状況によって日本の条件が変わることを示すために設定した。

表 4.2.2-1　2030 年の日本の輸出シェア（対世界輸出量）

	輸送機械	その他機械
ベースライン	13.8%	10.3%
▲26%	13.7%	10.2%
▲46%	12.5%	9.2%

「回避し得る影響被害」は、起こりうる影響被害が温暖化緩和策の導入によって回避し得ると想定した。ここでは、SCC(social cost of carbon)アプローチ[14]と同様に、2300 年までの影響被害を考慮した。SCC は限界影響被害であるが、影響被害は SCC の積分値に相当するものとして考慮した。年割引率は、USG-SCC アプローチ[14]と同様に、2.5%、3.0%、5.0%を想定した。影響被害は不確実性が大きいため、影響被害の推計値として、IMF-WEO2020Oct[9]に用いられた Nordhaus[10]と Burke et al.[11]、NGSF2021[12]で用いられた Kalkul&Wenz[13]を採用した。影響被害は、IMF[9]をベースに、IMF[9]の BAU の影響被害額と約 1.5℃（IMF[9]の 2030 年における BAU の全球平均気温に相当）の被害額の差分を想定した（IMF[9]では BAU と 2010 年気温の被害額の差分を示しているので、2030 年基準へと補正した）。気候感度は、IMF[9]で想定している 3.0℃である。被害額でみると、Nordhaus[10]、Kalkul&Wenz[13]、Burke et al.[11]はそれぞれ低位、中位、高位の推計となる。IMF[9]や NGSF[12]では、いずれも 2100 年までの評価であるため、2100 年以降は、USG-SCC[14]の全球気温の中位シナリオ（USG-SCC[14]の主要 6 シナリオの平均）に 2300 年に収束することを想定した。また、IMF[9]や NGSF[12]では、世界全体の影響被害額のみが公開されているので、Nordhaus-RICE モデルの世界と日本の損害額比（2.5℃における世界被害 1.5%（世界 GDP 比）に対する日本の被害 0.5%（日本 GDP 比）の比率 1/3、RICE モデルによる推計[15]）の関係が不変であると想定し、3 文献に基づく世界の損害額を日本の被害額に換算した。

図 4.2.2-13 には、「海外での設備投資額増に伴う日本製品の輸出増分」と「回避し得る影響被害」、削減目標・電源ミックスによる GDP 変化を示した。「海外での設備投資額増に伴う日本製品の輸出増分」と「回避し得る影響被害」を考慮したとしても、NDC 目標下での日本の国際競争力は低下するために、被害の高位推計 Burke et al.[11]（かつ割引率が低中位）の場合を除き、成長実現ケースの経済成長を上回ることは難しい。

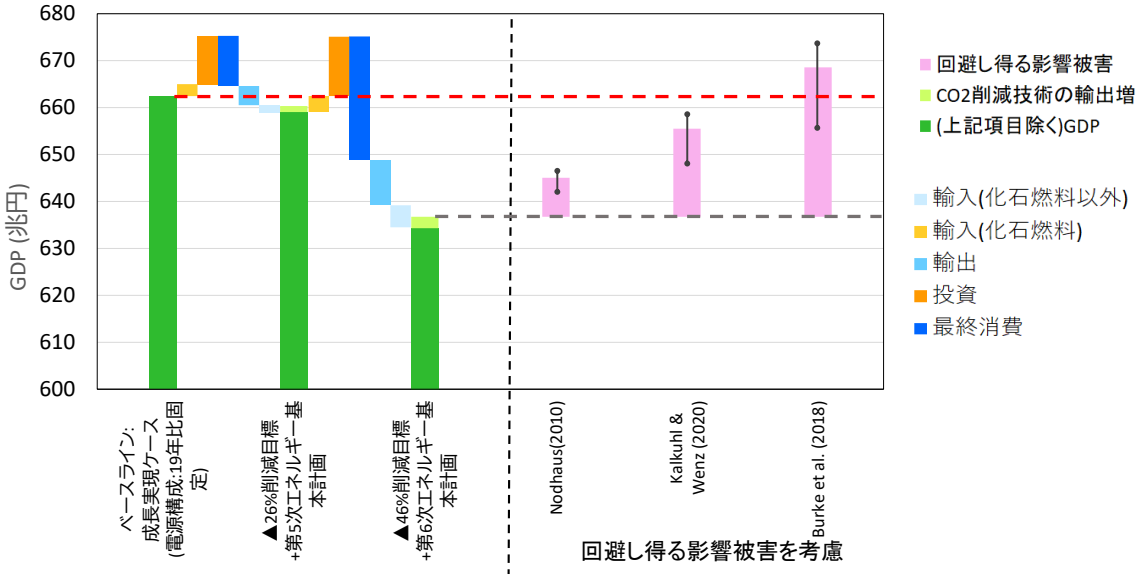


図 4.2.2-13 「海外での設備投資額増に伴う日本製品の輸出増分」と「回避し得る影響被害」を考慮した GDP 変化

（注）削減技術の設備投資額のうち設備資材率 53%を想定（文献 [8]の調査国平均値に基づく）。海外は各国 NDC 削減目標達成を想定。回避し得る影響被害（RICE モデル [15]に基づき日本の被害額のみを換算）は、USG-SCC アプローチ [14]と同様に、2300 年まで考慮し、割引率 2.5 ～5.0[%/年]を想定し推計（棒グラフ表示は 3.0%）。海外は、NDC 全地域遵守（MAC 差異あり）を想定。

図 4.2.2-14 は、MAC 差異の有無による GDP 変化を示した。「MAC 差異あり」は、これまで示してきた各国が 30 年 NDCs 削減目標を達成する場合を示す。「MAC 差異なし」は、各国が日本の限界削減費用と同レベルの削減を実施する場合である。

成長実現ケース GDP を上回るために必要となる、CO_2 削減対策製品の日本のシェアは、低位被害推計 Nordhaus[10]に基づくと、「MAC 差異あり」では 79%（割引率中位の場合）と推計され、ベースラインの日本製品の輸出シェアは約 11%に比べ、相当に大きな輸出シェアの獲得が必要となることが示された。一方、「MAC 差異なし」の場合には、必要なシェアが 30%まで縮小される。中位被害推計 Kalkul&Wenz[13]に基づくと、「MAC 差異あり」と「MAC 差異なし」の場合には、必要なシェアが 37%、14%（割引率中位の場合）と推計された。このように、成長実現ケース GDP を上回るためには、「海外での設備投資額増に伴う日本製品」のシェアを、大幅に上昇させる必要がある。また、日本と世界各国の限界削減費用に差がない場合には、達成に必要となる輸出シェアの上昇を低下させることが可能であり、排出削減努力の国際的な協調化は重要であることを示唆された。

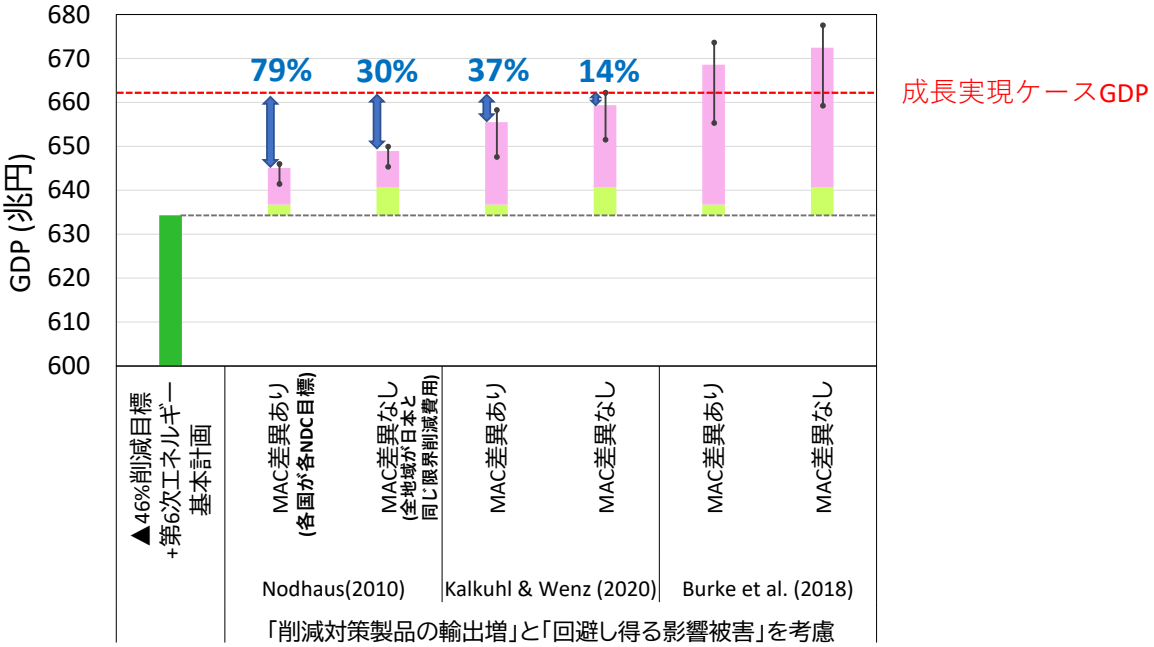


図 4.2.2-14　MAC 差異の有無による、削減対策製品の輸出、回避し得る影響被害と、GDP 変化

（注）青値は、成長実現ケース GDP を上回るために必要となる、CO_2 削減対策製品の日本のシェアを表す。ベースラインの当該産業の日本のシェアは約 11%。削減技術の設備投資額のうち設備資材率 53%を想定（文献 [8]の調査国平均値に基づく）。回避し得る影響被害（RICE モデル [15]に基づき日本の被害額のみを換算）は、USG-SCC アプローチ [14]と同様に、2300 年まで考慮し、割引率 2.5 ～5.0[%/年]を想定し推計（棒グラフ表示は 3.0%）。

(7) まとめ

日本政府は、国内外での気候変動緩和の強化の要請を受け、2030 年の排出削減目標を▲46%に引き上げたが、GDP で▲4%程度の影響が推計された。投資は増大するものの、貿易の競争条件の悪化による純輸出の低下と財・サービス価格の上昇に伴う家計消費の低下の影響は大きい。また、エネルギー多消費で国際競争に晒されやすい製造業である鉄鋼や化学産業などでは、産業平均に相当する GDP ロスよりもかなり大きい 12～14%程度の生産量減少が見込まれる。また、家庭部門においても、電力料金や光熱費が大幅に上昇する可能性が示された。

環境と経済の好循環の条件を検討したが、▲46%の目標を実現しつつ、成長実現ケースの GDP を上回るには、「海外での設備投資額増に伴う日本製品」のシェアを、大幅に上昇させる必要がある。限界費用に差が小さい場合には、達成に必要なシェアを小さくすることが可能であり、排出削減努力の世界協調化は重要である。しかし、現時点では▲46%は厳しすぎる数値目標と見られ、「環境と経済の好循環」を実現し得る条件は極めて狭いものと考えられる。

本分析では、一般均衡型モデルによる均衡後の解が示されている。現実社会の移行過程においては、特定の産業においてより厳しい悪影響となる可能性がある点に留意

が必要である。また、国際的な炭素価格の差異が極めて大きく推計されており、特定の産業においては価格弾性による影響が非連続的に働く可能性もあり、分析結果の解釈には十分な留意が必要である。

ファイナンス面など、国際的なビジネス環境が、厳しい排出削減目標への取り組みを強く促す状況にあり、気候変動への取り組み強化は不可欠である。一方、▲46%目標は、経済に大きな悪影響をもたらすリスクもあり、イノベーションを誘発しつつ、適切なトランジションを進めていくことの重要性が示唆される。

参考文献（第 4.2.2 節に関するもの）

1) 経済産業省（2021）、第 6 次エネルギー基本計画（令和 3 年 10 月）、https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/
2) 資源エネルギー庁（2021）、2030 年度におけるエネルギー需給の見通し、https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/opinion/data/03.pdf
3) T. Homma & K. Akimoto (2013),” Analysis of Japan's energy and environment strategy after the Fukushima nuclear plant accident “, Energy Policy 62, 1216–1225
4) 本間隆嗣他、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、Vol.41, No.5, (2020)
5) Global Trade Analysis Project (GTAP), https://www.gtap.agecon.purdue.edu/
6) 資源エネルギー庁，発電コスト検証ワーキンググループ令和 3 年 9 月報告書、(2021)
7) 内閣府（2021），中長期の経済財政に関する試算（令和 3 年 7 月 21 日経済財政諮問会議提出）、https://www5.cao.go.jp/keizai2/keizai-syakai/shisan.html
8) 日本機械輸出組合（2015）、2015 年 PCI / LF、https://www.jmcti.org/planthomepage/report/2015PCI_LF_summary.pdf
9) IMF(2020), World Economic Outlook (2020/Oct), https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2020/09/30/world-economic-outlook-october-2020
10) W. D. Nordhaus (2010). DICE model as of April 26, 2010. Ann Arbor, MI: Interuniversity Consortium for Political and Social Research
11) M. Burke et al. (2015). Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic Production. Nature 527 (7577): 235–239
12) NGSF (2021). NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors. https://www.ngfs.net/sites/default/files/media/2021/08/27/ngfs_climate_scenarios_phase2_june2021.pdf
13) Kalkuhl, M., & Wenz, L. (2020) The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions. Journal of Environmental Economics and Management, 103, 102360.
14) EPRI (2015). Understanding the Social Cost of Carbon: A Technical Assessment. https://www.epri.com/research/products/3002004657
15) K. de Bruin et al., Economic aspects of adaptation to climate change, OECD Environment Working Papers vol.6 (2009)

4.2.3 2030 年 NDC 排出削減目標下における国境調整措置に関する分析

(1) はじめに

近年、パリ協定のプレッジ&レビュー方式のもとで、先進国を中心により野心的な目標として NDC 削減目標が大きく引き下げられている一方、削減努力に差異があり、経済や環境、政治的な観点から、課題を提起している（各国の NDC の動向・分析については第 4.1 節を参照）。特に、炭素価格（明示的な価格だけではなく暗黙的な価格も含む）が地域によって大きく異なる場合、国際競争力や排出量リーケージに悪影響を及ぼす可能性がある。本節では、2030 年 NDC 排出削減目標下における国境調整措置（以下、BCA(Border Carbon Adjustment)と記す）に関する分析を行った。エネルギー多消費産業の BCA に焦点を当て、BCA が導入された際の影響分析を実施した。世界エネルギー・経済モデル DEARS による、世界各国 NDCs の下での経済影響と BCA の効果の評価を行った。また、米国 RFF やイタリア CMCC と共同研究を行い、2 つのモデルを用いて、ベースライン GDP 等の前提条件を調整したうえで、NDC 排出削減目標下における BCA のシナリオ分析を行った。BCA に関する最近の動向については、第 4.3.2 節を参照されたい。なお、EU の制度では CBAM(Carbon Border Adjustment Mechanism)と呼ばれる。

(2) シミュレーションケース概要

第 4.2.2 節と同様に、産業別の貿易マトリックス構造を明示的に扱うことが可能であり産業の国際競争力を評価できる、世界エネルギー・経済モデル DEARS を用いて、国境調整措置（BCA）の分析を行う。BCA の分析のために設定したシミュレーションケースを表 4.2.3-1 に示す。本分析での BCA は輸入品に限定すると定義した。ここでは、2 つのクラブを想定した。Club1 は欧州のみ、Club2 は欧州、米国、日本をメンバーと想定した。ここでのクラブは、クラブ内で NDC 削減目標を共同で達成する（すなわち、クラブ内では同一炭素価格）とし、また BCA や輸出リベートを実施する際にも共同で実施するものと想定した。

Club1 ケース、Club2 ケースでは、クラブと非クラブはともに各国の NDC 削減目標（第 4.1 節参照）を実施すると想定したケースである。ただし、クラブ内では、NDC 削減目標のクラブ合計削減量が共同達成される（その時は、クラブ内で同一炭素価格）。Club1-CTAX0、Club2-CTAX0 ケースでは、クラブのみが削減目標を共同達成し、非クラブは削減目標に関する制約がない（炭素価格ゼロ）と想定した。すなわち、非クラブはフリーライダーとなる。Club1-CTAX0+BCA(EITE)、Club2-CTAX0+BCA(EITE)ケースでは、それぞれ Club1-CTAX0、Club2-CTAX0 ケースのもとで、非クラブからのエネルギー多消費産業 EITE(Energy-Intensive and Trade-Exposed)の輸入品に対して、クラブが BCA（輸入品に限定）を実施する（すなわち、非クラブからの EITE の輸入品に炭素関税を課す）場合である。同様に、Club1-CTAX0+BCA(I&S)、Club2-CTAX0+BCA(I&S)ケースでは、BCA の対象が鉄鋼産業（I&S）の輸入品に限定された場合である。最後に、Club1-CTAX0+BCA(EITE)+ExporetRebate、Club2-CTAX0+BCA(EITE) +ExporetRebate ケースでは、それぞれ Club1-CTAX0+BCA(EITE)、Club2-CTAX0+BCA(EITE)ケースに、輸

入限定の BCA に加え、クラブが輸出リベート（クラブが生産した輸出品の（生産時に課されていた）炭素価格分の減免）を実施した場合である。なお、BCA（輸入限定）と輸出リベートを課す場合には、クラブと非クラブの貿易時にのみ発生し、クラブ内での貿易では考慮されない。

BCA 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。また、輸出リベート（輸出品の炭素価格分の減免）は、100%減免を想定した。ここでの「欧州」は 、EU と非 EU 欧州諸国（英国、ノルウェイ、スイス、アイスランド）を表す。 エネルギー多消費産業 EITE は、鉄鋼、化学、非鉄金属、窯業土石、紙パルプを表す。本分析の BCA の課税の排出量範囲は、scope1（化石燃料の直接排出）と scope2（電力・熱の間接排出）を対象とした。なお、本分析では、炭素価格・炭素関税による税収は、政府収入として政府消費（例えば、日本の場合は社会サービス消費の割合が多い）に用いられると想定した。税制中立などの税収の扱いによる影響は今後の課題として考えられる。

本分析のベースラインの GDP と CO_2 排出量は、IEA-WEO 2018 [3]の current policies scenario に基づいた。よって、COVID-19 影響は含まれていない。 日本のベースライン想定[2010-2030 年]：GDP +1.0%/年、CO_2 ▲0.4% /年と想定した。前述の第 4.2.2 節とは想定が異なることに注意されたい。

表 4.2.3-1 国境調整措置（BCA）の分析に関するシミュレーションケース

ケース名	Club*				Non-Club	
	対象国	排出削減目標	BCA (輸入に限定) **, ***	輸出リベート	対象国	排出削減目標
Club1	Club1 (欧州)	NDC削減目標 (Club1内で共同削減)	BCA無	無	米国、日本、その他	NDC削減目標
Club1-CTAX0						削減目標無(炭素価格ゼロ)
Club1-CTAX0 +BCA EITE			non-clubに対して、BCA(EITE)	無		
Club1-CTAX0 +BCA I&S			non-clubに対して、BCA(鉄鋼のみ)	無		
Club2	Club2 (欧州、米国、日本)	NDC削減目標 (Club2内で共同削減)	BCA無	無	その他	NDC削減目標
Club2-CTAX0						削減目標無(炭素価格ゼロ)
Club2-CTAX0 +BCA EITE			non-clubに対して、BCA(EITE)	無		
Club2-CTAX0 +BCA I&S			non-clubに対して、BCA(鉄鋼のみ)	無		
Club2-CTAX0 +BCA EITE +Export Rebate			non-clubに対して、BCA(EITE)	有		

（注）*クラブメンバー内では ETS を想定（クラブ内では同一炭素価格）。**BCA（国境炭素調整）による炭素関税は、エネルギー多消費産業(EITE; Energy-Intensive Trade-Exposed)または鉄鋼産業(I&S)のみを対象とした。***炭素関税は、club と non-club の炭素価格差に基づいて決定される。

(3) DEARS モデルによる分析結果

図 4.2.3-1 には、DEARS モデルによる、2030 年の主要国の限界削減費用（炭素価格）を示した。各国が各 NDC 削減目標を達成するための推計炭素価格は、国によって大きく異なる。また、Club2 ケースでは、欧州、米国、日本がメンバーであり 3 地域合計の削減量を共同達成したときは、217[$/tCO$_2$]と推計された。

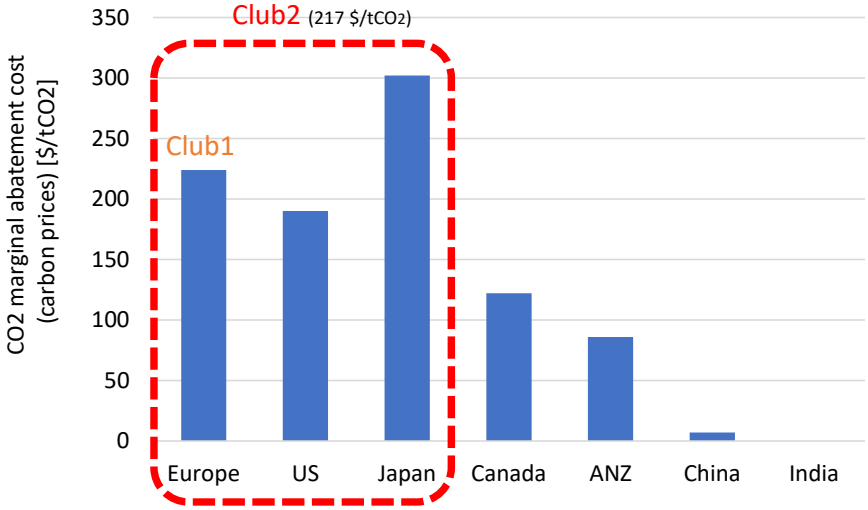


図 4.2.3-1　2030 年の主要国の限界削減費用（炭素価格）

図 4.2.3-2 には、Club2 ケース、Club2-CTAX0 ケースの、2030 年のクラブ合計（欧州、米国、日本の合計）の産業別生産への影響を示した。 いずれも、BCA が実施されない場合である。炭素価格が高い国々の経済への悪影響が推定される。 特に、鉄鋼や化学などのエネルギー多消費産業では大きな悪影響を及ぼす。また、炭素価格が低い中国やその他アジアなどの一部の地域では、エネルギー多消費産業の生産が増加することが推計された（図 4.2.3-3）。

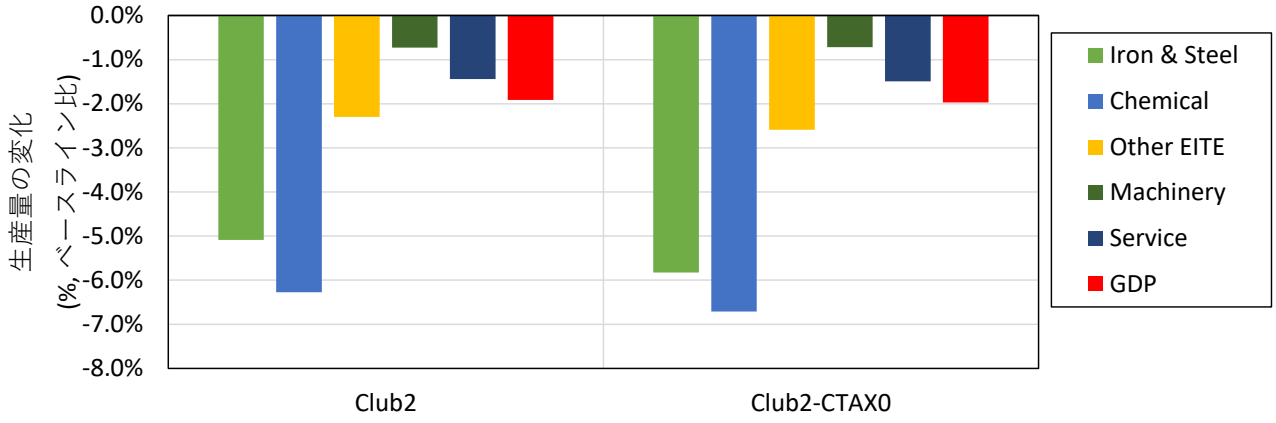
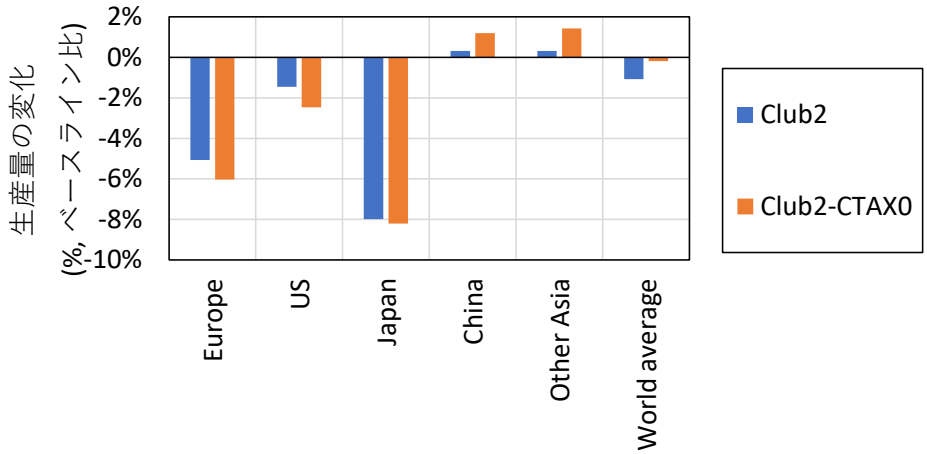


図 4.2.3-2　BCA 無ケースの、産業別生産への影響（Club2 合計 （欧州、米国、日本）、2030 年）

(a)鉄鋼産業



(b)化学産業

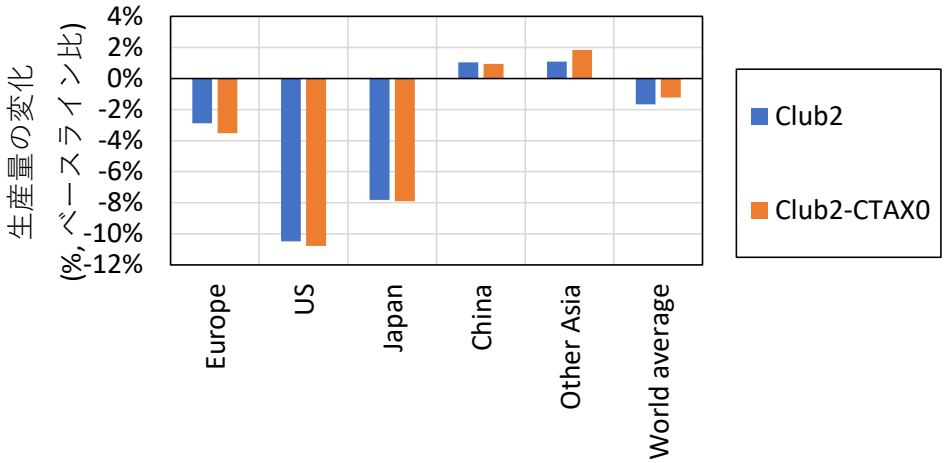


図 4.2.3-3　BCA 無ケースの、鉄鋼業と化学産業への地域別生産影響（2030 年）

図 4.2.3-4 には、BCA（輸入限定）の CO_2 リーケージに与える影響を示す。CO_2 リーケージ率は、クラブ合計の排出量減少（ベースライン比）に対する、非クラブ合計の排出量増加の比率として定義される。非クラブの炭素価格ゼロのもとでは、エネルギー多消費産業への BCA 実施によって、CO_2 リーケージ率が約 1%ポイント（約 3 分の 1）軽減する。BCA の炭素関税の対象が鉄鋼部門に限定されると、CO_2 リーケージの軽減効果は縮小される。

(a)Club1-CTAX0 ケース　　(b)Club2-CTAX0 ケース

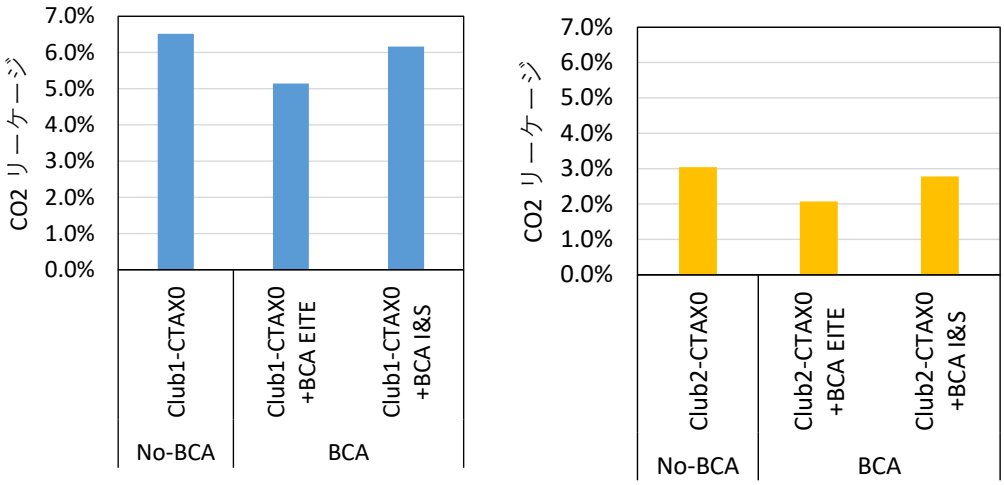


図 4.2.3-4　NDC 目標下の、BCA (輸入限定)によるリーケージ軽減効果

（注）CO_2 リーケージ率は、クラブ合計の排出量減少（ベースライン比）に対する、非クラブ合計の排出量増加の比率として定義

図 4.2.3-5 には、NDC 目標や BCA （輸入限定）が、Club2（欧州・米国・日本）の鉄鋼産業の国際競争力へ与える影響を示した。図の左上に行くほど、ベースライン比で生産量が低下し、純輸入が増加（輸出は低下し、輸入が増加する傾向）となるため、国際競争力が低下することを表している。Club2 ケースでは、BCA 無しで Club2 の野心的な NDC 排出削減目標を実施するための、生産と貿易の悪影響が示された。そして、Club2（欧州・米国・日本）の削減目標は変わらずに、非クラブが削減目標緩和（炭素価格ゼロ）でフリーライダーになる Club2-CTAX0 ケースでは、さらに、Club2 の生産と貿易が悪化する。そこで、Club2（欧州・米国・日本）がエネルギー多消費産業の輸入品に対して BCA（輸入限定）を実施した Club2-CTAX0+BCA EITE ケースでは、Club2 の生産と貿易が若干改善する。Club2-CTAX0 と Club2-CTAX0+BCA EITE ケースの差が、BCA による競争力の改善効果とみることができる。しかし、BCA の改善効果の大きさは、NDC 削減目標による競争力の低下を決定的に改善するわけではない。

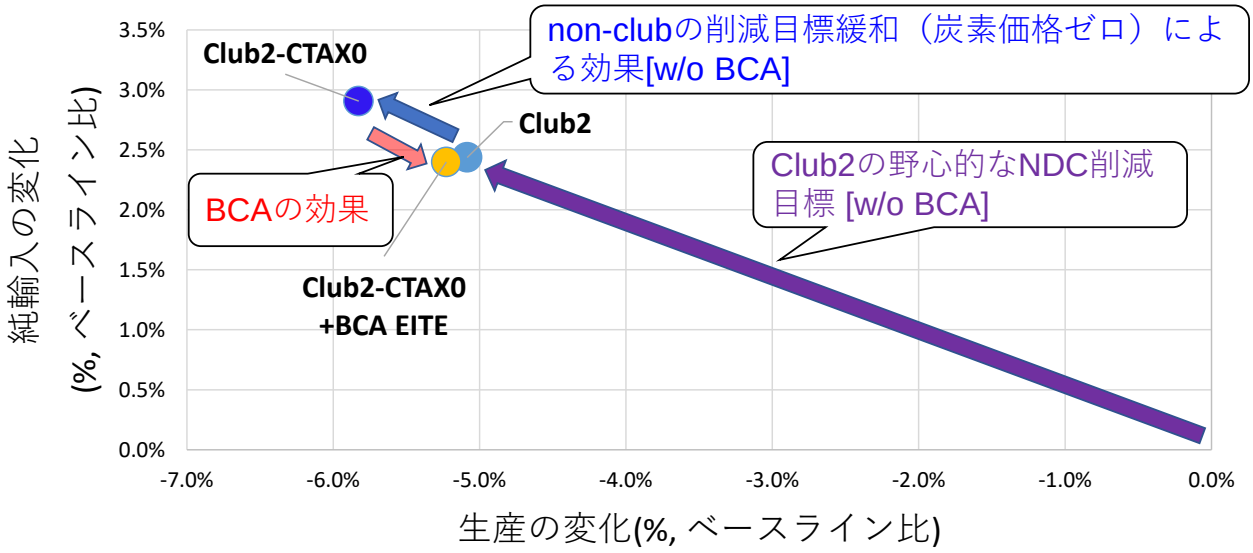


図 4.2.3-5　NDC 目標下の、BCA (輸入限定)が、鉄鋼産業の国際競争力へ与える影響 (Club2 (欧州、米国、日本) 、2030 年)

（注）変化（%）は、ベースライン生産量を用いて規格化している。

次に、Club2（欧州・米国・日本）が BCA の実施に加え、輸出リベート（輸出品の炭素価格分の減免）まで実施した場合の影響を推計した。図 4.2.3-6 には、BCA(輸入限定)と輸出リベートがリーケージに与える影響を示した。BCA に輸出リベートを追加した場合、リーケージは大きく減少することが示された。ただし、輸出リベートは、国内対策の制度によっては WTO ルールと不整合の可能性が大きい点に留意されたい[3]。

図 4.2.3-7 には、Club2（欧州・米国・日本）が輸出リベート（輸出品の炭素価格分の減免）の実施による鉄鋼産業の国際競争力への影響を示した。輸出リベートを追加実施することで、Club2 の生産と輸出の損失を大きく軽減し、ベースラインに近いレベルまで、国際競争力を改善することが推計された。鉄鋼産業においては、輸出リベートの影響が、輸入に限定された BCA よりもはるかに高い可能性がある。これは、高炉法の比率が高い日本と欧州では鉄鋼業は輸出超過であるため（電炉比率の高い米国はわずかに輸入超過)、輸入品に対する課税よりも、輸出品に対する減免の効果が大きくなったと考えられる。

[3] 国内制度が ETS 制度などの場合には、WTO ルールと不整合の可能性が大きい点に留意されたい。一方、国内制度が炭素税の場合には、すでに日本で実施されているような消費税の輸出時の還付と同様に、炭素税分の輸出時の還付になり、大きな不整合とはならない可能性がある。

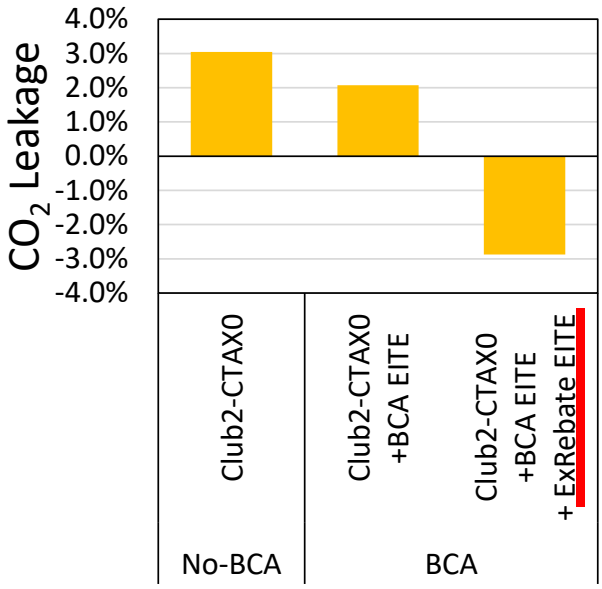


図 4.2.3-6　NDC 目標下の、BCA (輸入限定) ＋輸出リベートによるリーケージ軽減効果

（注）CO_2 リーケージ率は、クラブ合計の排出量減少（ベースライン比）に対する、非クラブ合計の排出量増加の比率として定義

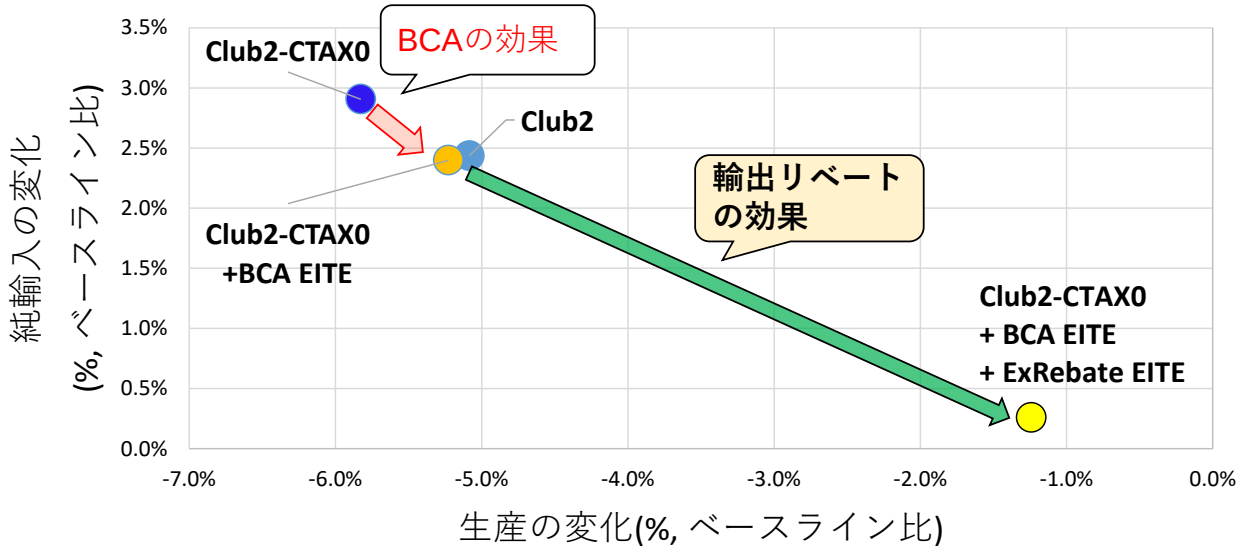


図 4.2.3-7　NDC 目標下の、BCA (輸入限定)＋輸出リベートが、鉄鋼産業の国際競争力へ与える影響 (Club2 (欧州、米国、日本) 、2030 年)

（注）変化（%）は、ベースライン生産量を用いて規格化している。

図 4.2.3-8 には、エネルギー多消費産業（あるいは鉄鋼産業）の BCA（輸入限定）を実施した際の、BCA 対象外の産業への影響を示した。BCA を実施した際には、BCA の対象範囲ではない産業の一部に悪影響を及ぼす可能性がある。Club2（欧州・米国・日本）では、BCA の対象であるエネルギー多消費産業（あるいは鉄鋼産業）の輸入価

格は上昇し、国際競争力が改善するたえに、輸入が減少し、代わりに国内生産や輸出が増加する。一方、club 2 の NDC 排出目標を達成する必要があるために、BCA 実施によるエネルギー多消費産業の生産量の増加の影響を相殺するためには、BCA 対象範囲外産業の生産量を、Club 2 ケースよりも減少させる必要が生じる。そのため、BCA の対象範囲ではない、サービス産業などの一部の産業に悪影響を及ぼす可能性が推計された。BCA を実施する際には、対象とする産業だけではなく、対象外の産業への影響も考慮する必要があり、包括的な産業政策を考慮しつつ、より望ましい制度設計を構築する必要がある。

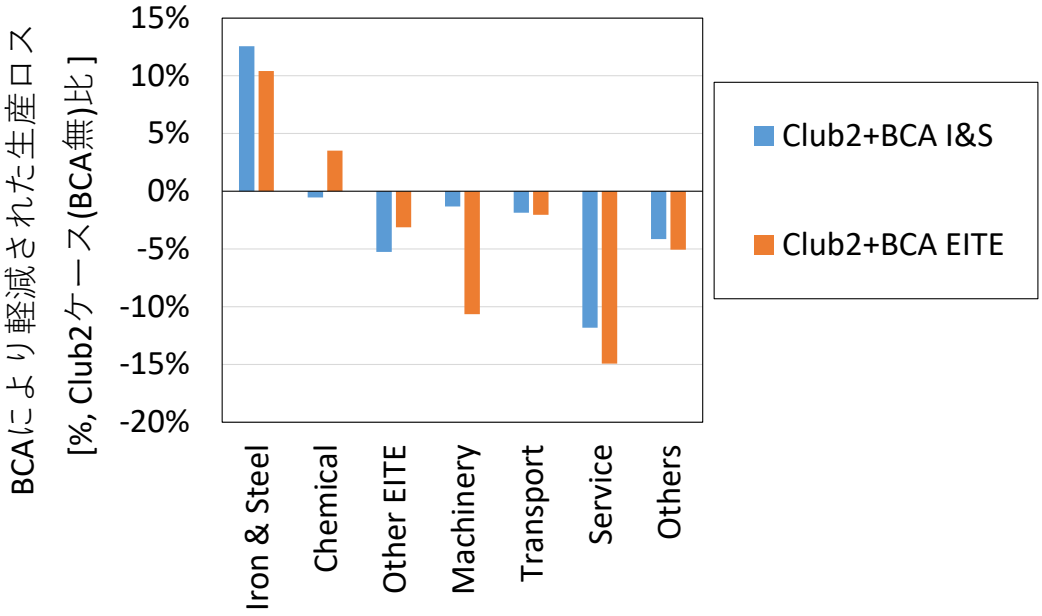


図 4.2.3-8　BCA 実施時における、BCA 対象外の産業への影響

(4) 分析結果のモデル間比較

ここでは、DEARS モデルの他に、イタリア CMCC による ICES モデルを追加し、BCA による国際競争力の変化を比較した。2 モデル間では、ベースラインにおける GDP 成長や CO_2 推移は概ね合致するように調整した。また、NDC 排出削減目標や各ケース内容は合致している。

図 4.2.3-9、図 4.2.3-10、図 4.2.3-11、図 4.2.3-12 には、各ケースにおける、欧州、米国、中国、インドの国際競争力をそれぞれ表示している。図の点線の 45 度対角線は、製造業の生産が 1 ドル減少するごとに、その産業で製造された商品の純輸入が 1 ドル増加すること（競争力率が 100%であること）を表す。欧州では、2 つのモデルで、Club1+CTAX0 ケース（Club1+Free riding）では、約 2～8%のエネルギー多消費産業の生産の減少が推計された。概ね、欧州のエネルギー多消費産業は、ベースラインと比較して、生産量が減少している。すべての制約ケースにおいて、生産量の減少は純輸入量の増加を大幅に上回っている。競争力率は、概ね 50%以下、場合にはよってはゼロに近く、欧州のエネルギー多消費産業が負担する悪影響のほとんどは、排出削減目標の緩いあるいはない海外の競争相手からの競争圧力ではなく、自国の NDC 削減目標

を達成するためのコストと考えられる。米国についても同様の傾向が言える。産業によっては、Club1+CTAX0 ケース（Club1+Free riding）において（米国は炭素価格ゼロ）、エネルギー多消費産業の生産がやや増加するが、他のシナリオでは緩やかに減少し、純輸入も増加する。ほぼすべてのケースでは、2 モデルともに、競争力率は 100%未満であり、欧州のようにゼロに近いケースも推計された。グラフ表示したケースにおける、クラブの競争力率の中央値は約 34%と推計された。

一方、途上国の中で、中国は、想定した各ケースのもとでは、生産と純輸入に顕著な変動がないことが示された。これは 2 つの要因によると考えられる。第一に、中国における炭素価格は、すべてのケースで 0-3[$/tCO$_2$]程度と小さい（ベースラインの想定が IEA-WEO2018-Current Policies[3)]に従っているため、中国の GDP は比較的高位で排出量は低い）。第二に、中国のエネルギー多消費産業の生産は世界の大きな割合を占め、その多くは国内市場に集中しているため、気候政策による貿易の変動は国内需要に比べ控えめである。また、インドは、中国に比べると世界における生産規模が小さいため、中国に比べると、各ケースに対する反応が見られる。CTAX0（フリーライド）のもとでは、生産の利得が比較的大きく、BCA が実施されたとしても、ベースライン比での生産増加と純輸入減少が維持される場合もある。

2 モデルの比較分析から、エネルギー多消費産業においてエネルギーコスト増となる厳しい排出削減政策の実施は、国際貿易や貿易相手国による緩和政策の影響は小さく、国内の生産を大幅に減少させる。緩和策を実施しない地域からの純輸入の増加に関連する影響は約 3 割程度である。また、BCA（輸入限定）によって、純輸入の増加は減少するものの、解消するほど大きな効果は見込めない可能性が大きい。同様に、炭素リーケージに対しても、BCA（輸入限定）で抑制はするものの、すべてを解消することはない。野心的な排出削減努力を実施する地域範囲を拡大することが、不均質な各国の削減目標によって生じる悪影響を抑制する上で、大きな効果が期待される。

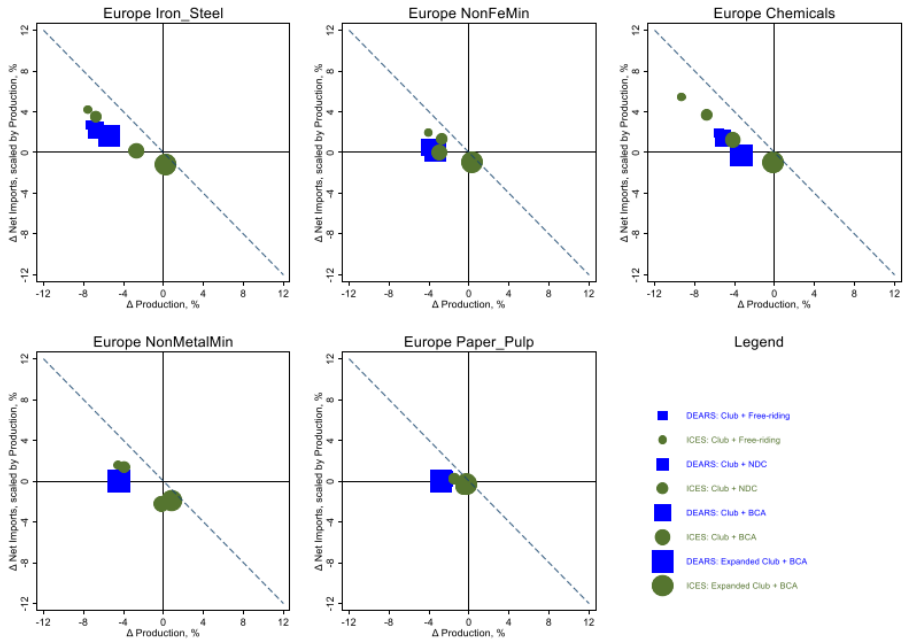


図 4.2.3-9 DEARS・ICES モデルによる、2030 年の欧州の国際競争力評価

（注）Club1 ケース（Club+NDC）、Club1+CTAX0 ケース（Club1+Free riding）、Club1+CTAX0＋BCA EITE ケース（Club1+BCA）、Club2+CTAX0＋BCA EITE ケース（Club2+BCA）。変化（%）は、ベースライン生産量を用いて規格化している。

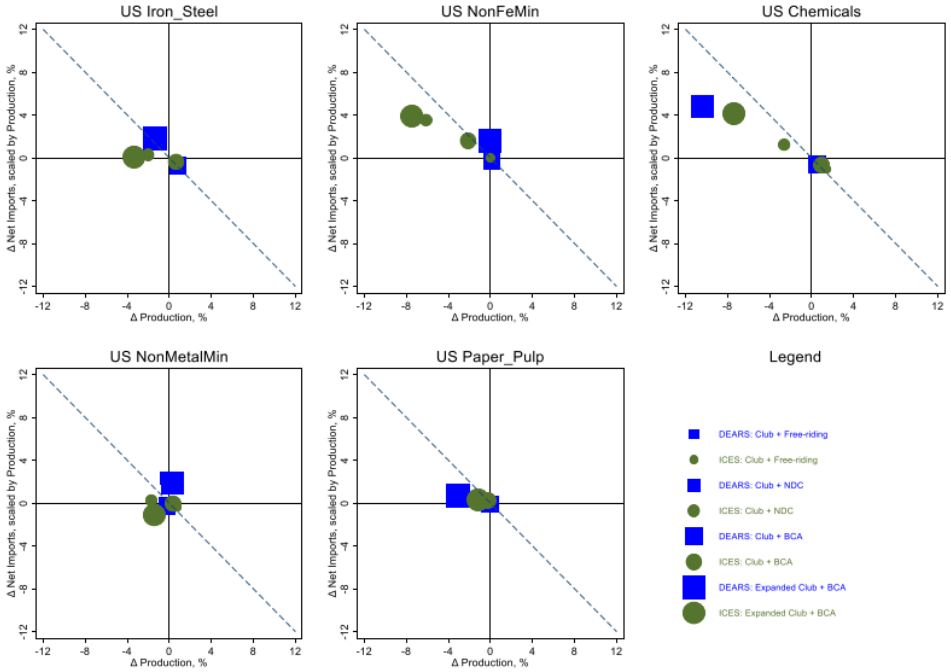


図 4.2.3-10 DEARS・ICES モデルによる、2030 年の米国の国際競争力評価

（注）Club1 ケース（Club+NDC）、Club1+CTAX0 ケース（Club1+Free riding）、Club1+CTAX0＋BCA EITE ケース（Club1+BCA）、Club2+CTAX0＋BCA EITE ケース（Club2+BCA）。変化（%）は、ベースライン生産量を用いて規格化している。

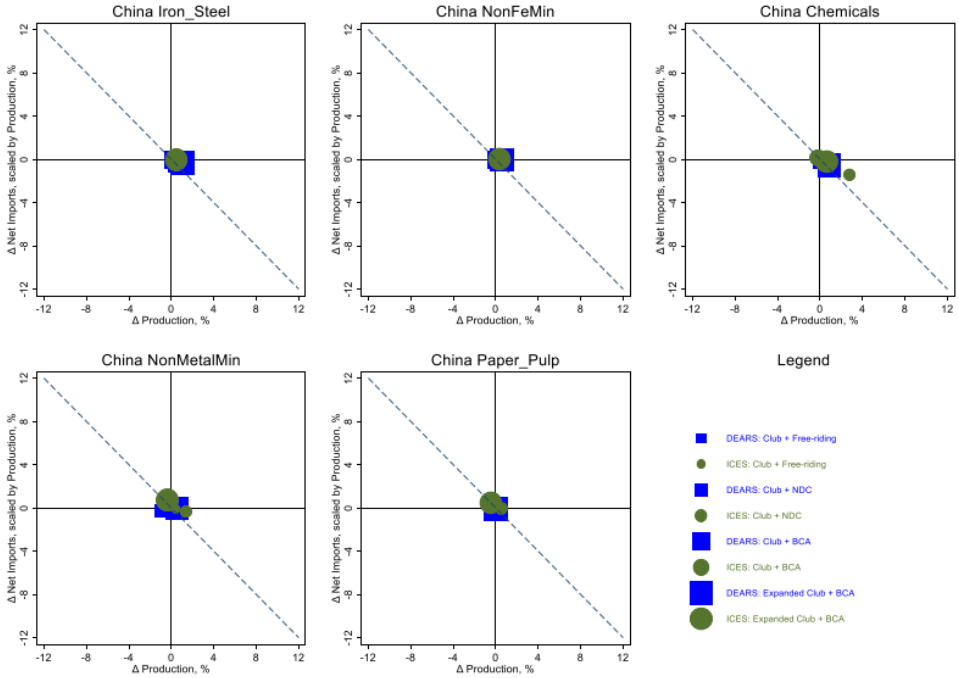


図 4.2.3-11　DEARS・ICES モデルによる、2030 年の中国の国際競争力評価

（注）Club1 ケース（Club+NDC）、Club1+CTAX0 ケース（Club1+Free riding）、Club1+CTAX0＋BCA EITE ケース（Club1+BCA）、Club2+CTAX0＋BCA EITE ケース（Club2+BCA）。変化（%）は、ベースライン生産量を用いて規格化している。

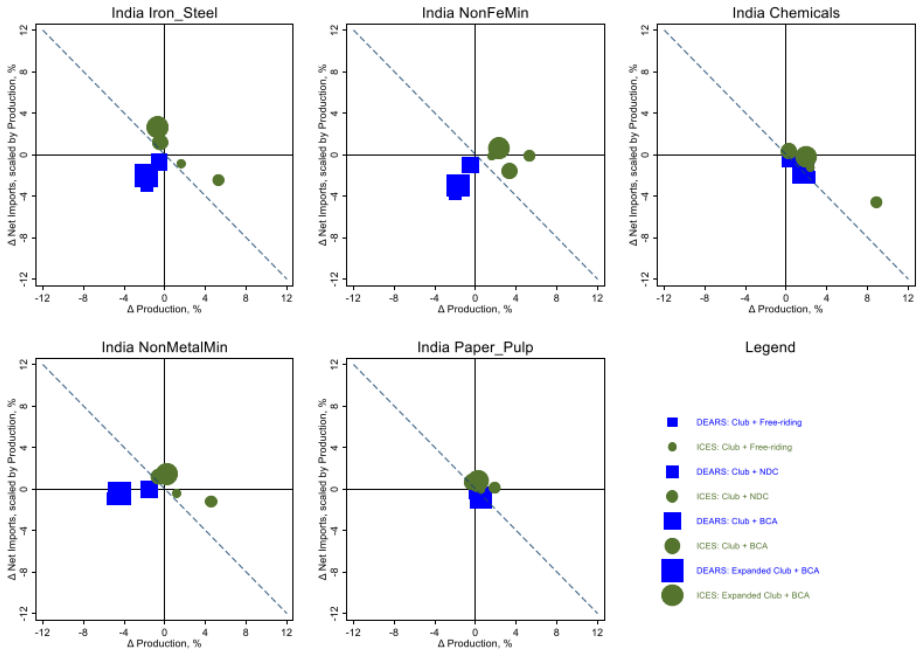


図 4.2.3-12　DEARS・ICES モデルによる、2030 年のインドの国際競争力評価

（注）Club1 ケース（Club+NDC）、Club1+CTAX0 ケース（Club1+Free riding）、Club1+CTAX0＋BCA EITE ケース（Club1+BCA）、Club2+CTAX0＋BCA EITE ケース（Club2+BCA）。変化（%）は、ベースライン生産量を用いて規格化している。

(5) まとめ

NDC 達成のための炭素価格は国によって大きく異なっている、すなわち、排出削減に必要な努力は異なることが示された。このような各国の NDC 削減目標の下で、Club2（欧州、米国、日本）では、エネルギー多消費産業を中心に、炭素リーケージが見込まれる。BCA（輸入限定）を用いると、エネルギー多消費産業からのリークを 3 分の 1 程度（約 1%ポイント）軽減することが可能と推計された。さらに、輸出リベート（輸出品の炭素価格分の減免）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。ただし、輸出リベートは、国内政策との対応によっては（特に ETS 制度などのもとでは）WTO ルールを満たさない可能性が高い。また、BCA の効果は国によって異なる。 エネルギー多消費産業の製品を輸入する国では、大規模な輸入国ではない国よりも BCA の効果が大きくなりうる。しかし、BCA によって貿易紛争が引き起こされる可能性があり、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。

BCA（輸入限定）が炭素リーケージや競争力を改善する効果は限定的である可能性が高い。リーケージを防ぐ観点からは、BCA よりも、世界的に協調された炭素価格（暗示的価格を含む）の方が重要であり、引き続き、NDCs の排出削減努力の協調化を図っていくことは重要と考えられる。

いずれにしても、欧州は BCA の導入に動き始めているが、EU と日本とでは産業構造、輸出入の構造が異なっており、BCA のメリット、デメリットは日本とは異なる。日本においては、欧州の動向に流されることなく、引き続き慎重に BCA のメリット、デメリットを見極めることが必要と考えられる。

参考文献（第 4.2.3 節に関するもの）

1) T. Homma & K. Akimoto (2013),” Analysis of Japan's energy and environment strategy after the Fukushima nuclear plant accident “, Energy Policy 62, 1216–1225
2) 本間隆嗣他、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、Vol.41, No.5, (2020)
3) IEA, World Energy Outlook 2018

4.3 排出削減努力等の研究事例の調査

4.3.1 現状および NDCs の排出削減努力の評価

本節は、他機関による排出削減努力の評価例として、UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)、UNEP(United Nations Environment Programm)、及び IEA（International Energy Agency）の分析を以下に紹介する。

(1) UNFCCC 事務局による Synthesis レポート

UNFCCC 事務局は、英国のグラスゴーで開催された COP26 前に、パリ協定の下での 164 ヶ国の NDCs（2021 年 7 月 30 日時点）をまとめた報告書を 2021 年 9 月に公表した。

これらの国の GHG 排出量は、2019 年における世界 GHG 排出量の 93.1%を占め、52.4GtCO₂eq.（LULUCF 除く）となる。

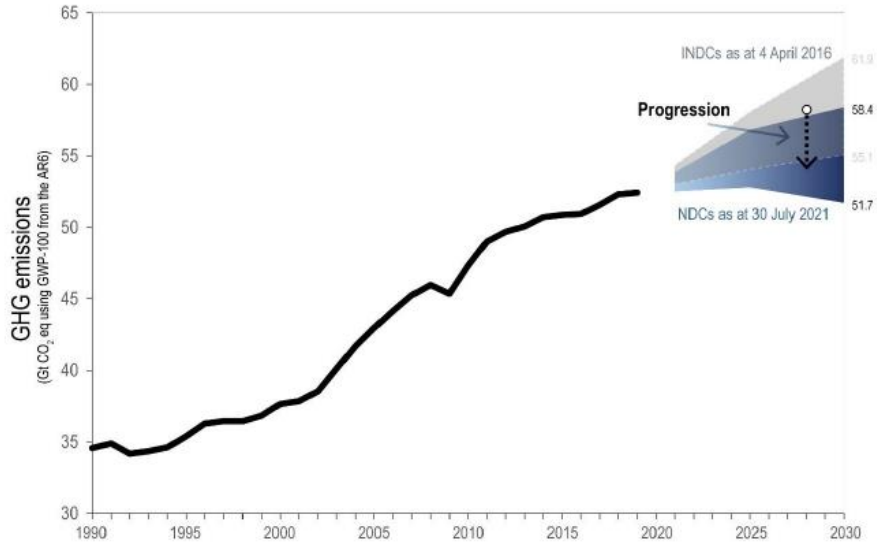


図 4.3.1-1 NDCs 下の GHG 排出量パス

図 4.3.1-1 は NDCs 下の GHG 排出量のパスである。推計幅で高い排出量は条件が無い場合、低い排出量は条件がある場合を示している。また、国際航空からの排出量は 2030 年まで 2019 年レベルで一定とし（～628MtCO₂）、国際海運からの排出量は 2018 年時点の 755MtCO₂から 2030 年まで線形に伸びると仮定し、2050 年まで 2008 年レベル比で半減する目標に向かうと想定する。NDCs を実施した場合の世界の GHG 排出量（LULUCF 除く、条件付きと条件無しの場合の平均値）は 2025 年で 54.8 (52.8-56.8)GtCO₂eq.、2030 年で 55.1(51.7-58.4)GtCO₂eq.と推計されている。

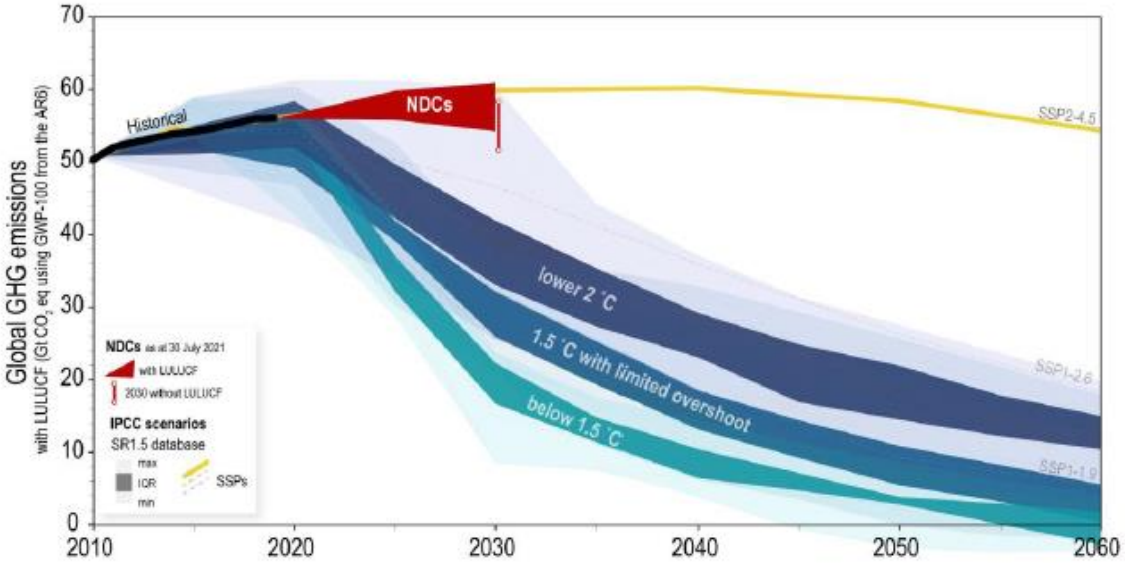


図 4.3.1-2 IPCC 1.5℃報告書で評価されたシナリオにおける世界排出量と NDCs 下における世界排出量との比較（LULUCF 含む）

図 4.3.1-2 は IPCC1.5℃報告書（SR1.5）で評価された 3 つのシナリオ（below 1.5℃、1.5℃ with limited overshoot、lower 2℃）における世界排出量と NDCs 下における世界排出量を比較したものである。SSP2-4.5（黄色の線）は今世紀終わりには気温上昇が約 2.7（工業化前と比して+2.1-3.5）℃を想定している。SR1.5 によると、2050 年頃にネットの CO_2 排出量は 2030 年までに 2010 年比で約 45%減少させる必要があると指摘している。

最新の NDCs を反映した 2030 年における世界の GHG 排出量のレベルは 2010 年比で 16.3%増加するため、野心目標向上の必要性があると強調している。また、50%の確率で 1.5℃を達成するカーボンバジェットの観点からは、NDCs を考慮すると 2020 年から 2030 年における累積 CO_2 排出量は残りのカーボンバジェットの 89%まで使用するため、2030 年以降のカーボンバジェットは約 55GtCO_2 となる。

(2) UNEP による Emission Gap Report 2021

2021 年 10 月に、UNEP は Emission Gap Report 2021 を公表した。Emission Gap Report は UNEP が毎年発表しているものであり、本報告書は第 12 版となる。本報告書では現行政策や NDCs を実施した場合の各国の排出量見通しと二酸化炭素排出削減目標との乖離を示している。同報告書は前述の UNFCCC 報告書の結果を再確認するものとなっており、新しく更新された NDCs に加えて各国の緩和プレッジを考慮した評価である。つまり、NDCs は 2021 年 9 月 30 日の時点で提出されているものを対象としているが、この時点では NDCs として提出していない中国、日本及び韓国については新しく公表した緩和プレッジ（2021 年 8 月 30 日までに公表）を評価に入れている。

表 4.3.1-1　異なるシナリオの下での世界 GHG 排出量、気温上昇及び排出量ギャップ（2030 年）

Scenario (rounded to the nearest gigaton)	Number of scenarios in set	Global total emissions in 2030 [$GtCO_2e$]	Estimated temperature outcomes			Closest corresponding IPCC SR1.5 scenario class	Emissions gap in 2030 [$GtCO_2e$]		
			50% chance	66% chance	90% chance		Below 2.0°C	Below 1.8°C	Below 1.5°C
Year 2010 policies	6	64 (60–68)							
Current policies	9	55 (52–58)					15 (12–18)	22 (19–25)	30 (28–33)
Unconditional NDCs (updated NDCs and announcements)	8	52 (49–55)					13 (10–16)	19 (16–22)	28 (25–30)
Conditional NDCs (updated NDCs and announcements)	8	50 (46–52)					11 (7–13)	17 (13–19)	25 (22–28)
Below 2.0°C (66% chance)	71	39 (33–49)	Peak: 1.7–1.8°C In 2100: 1.3–1.7°C	Peak: 1.8–2.0°C In 2100: 1.5–1.9°C	Peak: 2.2–2.4°C In 2100: 1.9–2.4°C	Higher-2°C pathways			
Below 1.8°C (66% chance)	23	33 (27–41)	Peak: 1.6–1.7°C In 2100: 1.2–1.6°C	Peak: 1.7–1.8°C In 2100: 1.4–1.8°C	Peak: 2.0–2.2°C In 2100: 1.8–2.2°C	Lower-2°C pathways			
Below 1.5°C (66% chance in 2100 with no or limited overshoot)	26	25 (17–33)	Peak: 1.5–1.6°C In 2100: 1.0–1.3°C	Peak: 1.6–1.7°C In 2100: 1.2–1.5°C	Peak: 1.9–2.1°C In 2100: 1.5–1.9°C	1.5°C with no or limited overshoot			

（出典）UNEP[2)]

表 4.3.1-1 及び図 4.3.1-3 は、異なるシナリオの下での世界 GHG 排出量、気温上昇及び排出量ギャップ（2030 年）を示したものである。現行政策シナリオでは、2030 年の世界 GHG 排出量は約 55$GtCO_2eq.$である。ここでは、各国の気候政策の進展や COVID-19 による経済への影響を考慮しているため、前回の 2020 年報告書と比べて GHG 排出量の推計が減少していると述べられている。NDCs を実施した場合、同排出量は約 50～52$GtCO_2eq.$となり、UNFCCC の報告書における同排出量の範囲内である。

一方、2030 年の排出量ギャップは、1.5℃、1.8℃、2℃目標を最小コストで達成する場合の世界の排出量と各国の NDCs が実施された場合の世界全体の排出量との乖離として定義されている。例えば、1.5℃を達成するためには、条件無しの NDCs の下では 2030 年にさらに 28$GtCO_2eq.$削減する必要がある。COP26 までに NDCs の深堀はなされ

たものの、引き続き 1.5℃目標のみならず、2℃目標とも大きな排出ギャップが存在すると指摘されている。

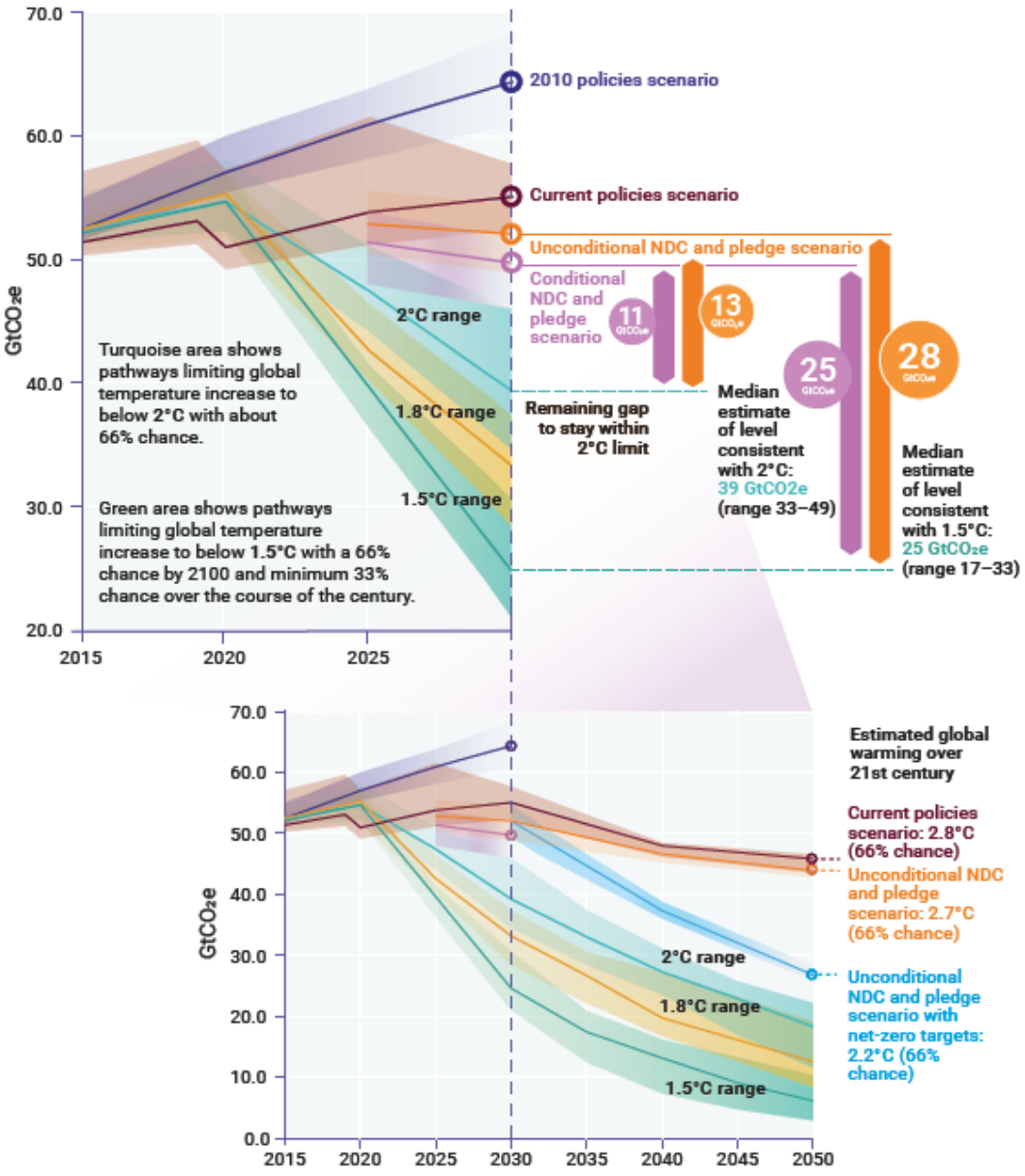


図 4.3.1-3 異なるシナリオ下における世界の GHG 排出量と排出ギャップ（中央値及び 10～90 パーセンタイル範囲）

（出典）UNEP[2)]

(3) IEA による World Energy Outlook 2021

IEA は COP26 開催前の 2021 年 10 月に World Energy Outlook 2021[3)]を公表した。

表 4.3.1-2 WEO-2021 シナリオにおける気温上昇（℃）

Scenario	2030		2050		2100	
Confidence level:	50%	33% – 67%	50%	33% – 67%	50%	33% – 67%
Stated Policies	1.5	1.4 – 1.6	2.0	1.8 – 2.1	2.6	2.4 – 2.8
Announced Pledges	1.5	1.4 – 1.6	1.8	1.7 – 2.0	2.1	1.9 – 2.3
Sustainable Development	1.5	1.4 – 1.6	1.7	1.5 – 1.8	1.6	1.4 – 1.7
Net Zero Emissions by 2050	1.5	1.4 – 1.5	1.5	1.4 – 1.7	1.4	1.3 – 1.5

（出典）IEA[3)]

（注）数値は 33%、50%、67%の信頼レベルの最大気温上昇を示す。

表 4.3.1-2 は WEO-2021 の各シナリオ（Stated Policies、Announced Pledges、Sustainable Development、Net Zero Emissions by 2050）における気温上昇を示したものである。たとえ、全ての目標プレッジが完全に予定通りに実施されたとしても、2100 年までには気温上昇が 2.1℃に達するため、気候リスクが増加することが示された。

しかしその後、2021 年 11 月 3 日の時点のインドの 2070 年カーボンニュートラル宣言及びメタン削減プレッジ等を含む COP26 におけるプレッジを反映し更新した IEA の最新の分析[4)]によると、各国の目標が完全に実施されれば、気温上昇を 2100 年までに 1.8℃に抑えられるとの見解が示されている。

参考文献（第 4.3.1 節に関するもの）

1) United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): Nationally determined contributions under the Paris Agreement – Synthesis report by the secretariat, September 17 (2021).
2) United Nations Environment Programme (UNEP): Emission Gap Report (2021).
3) International Energy Agency (IEA): World Energy Outlook 2021, IEA
4) International Energy Agency (IEA): Commentary, November 4, 2021, https://www.iea.org/commentaries/cop26-climate-pledges-could-help-limit-global-warming-to-1-8-c-but-implementing-them-will-be-the-key (accessed on March 9, 2022)

4.3.2 国境調整税に関する動向調査とモデル試算例

(1) 国境炭素調整に関する動向調査

国内の単独の気候変動対策は、国内のエネルギー集約的・貿易依存型産業の国際競争力に影響を与え、また、気候変動対策が不十分な他国へのカーボンリーケージを生み出す恐れがある。これらの懸念に対応するためのオプションの一つとして、国境炭素調整（Border Carbon Adjustment、以下 BCA と記す）が議論されている。一般的に BCA は気候変動対策が不十分な国からの輸入財における炭素含有量に応じて課税される。また、国内産業からの輸出財においては炭素費用分の還付がなされる場合もある（輸出リベート）。さらに、間接排出量の考慮及び調整レベル（国内あるいは海外の平均排出量か、あるいは best-available technologies なのかなど）に関する議論もある[1)]。BCA

は世界貿易機関（WTO）のルール違反となる恐れや貿易相手国からの報復措置を受けるリスクがあり、さらに各財の炭素含有量の推計は複雑で容易ではなく技術的な問題もあることが指摘されている。

2019 年 12 月 11 日、欧州委員長であるフォンデアライエン氏は、エネルギー、農業、製造業やインフラなど複数の分野を網羅する環境分野の包括的な政策を含む「The European Green Deal[2)]」を発表した。2050 年までに温室効果ガス排出量の実質ゼロを目標とし、以降 3 年間で各国のルール・規制を改定するというものであった。項目の一つである炭素国境調整（Carbon border adjustment mechanism: CBAM）に関するロードマップ [3)]によると、2021 年に同メカニズムと対象セクターに関する提案書を作成し、カーボンリーケージのリスクを減らすため、輸入価格に炭素含有量を正確に反映させることが CBAM 導入の目的である。2020 年 3 月に欧州委員会は CBAM に関する Incept Impact assessment を行い、国内外の意見を募った（フィードバック期間は 2020 年 3 月 4 日から同年 4 月 1 日まで）[4)]。

その後、2021 年 7 月 14 日に、欧州委員会は EU の 2030 年の温室効果ガス削減目標（1990 年比 55%削減）の達成に向けた気候変動政策パッケージ [5)]（Fit for 55）の一環として CBAM の規則案 [6),7)]を公表した。同規則案の主な内容は以下の通りである（表 4.3.2-1）。

表 4.3.2-1　CBAM の規則案 [6),7)]の主な内容

項目	内容
対象とする財の範囲	輸入品のみ調整対象。EU からの輸出品に対する炭素価格分の還付は行わない
対象部門	セメント、電気、肥料、鉄鋼、アルミニウム
排出量の範囲	各輸入品に含まれる排出量は「直接排出量（スコープ 1）／生産量」で算出。間接排出については今後検討。
手続等	輸入者は輸入品に含まれる排出量 1 トンに対応する CBAM 証書の購入が必要。証書の価格は EU-ETS 価格と連動。輸入者は原産地国で既に支払われた炭素価格に応じて、CBAM 証書数の削減請求が可能。
EU-ETS の無償配布との関係	CBAM は段階的に EU-ETS 下の無償配布を代替。10 年の移行期間において、2026 年以降毎年 10%ポイント段階的廃止。2035 年には無償配布を 0%とする。
実施時期	2023 年から 2025 年はパイロットあるいは移行期間（報告・データ収集）。完全実施は 2026 年以降。
証書販売収入の用途	CBAM 証書の販売収入は EU 予算に充当。

前述したように、国境炭素調整は WTO のルールに抵触する可能性があり、また輸入財の炭素含有量の推計及び税率の調整など技術的な課題がある。

(2) BCA 分析例

これまで数多くの BCA に関する研究があるが、以下に最新の Böhringer et al.[8]によるレビュー論文を紹介する。同論文では、BCA によるカーボンリーケージ、競争力、費用効果性、衡平性に関する経済及び環境への影響についてまとめている。結論としては、BCA の実行可能性は現在の法的・実践的な実施に対する制約によって大幅に減少する可能性があることを指摘している。

カーボンリーケージは炭素集約的・貿易の影響を受けやすい（EITE）製品における排出原単位及び国際貿易のパターンにおける地域差から生じる。図 4.3.2-1 から図 4.3.2-4 は 2014 年時点の GTAP データに基づいて EITE 製品の炭素含有量、炭素含有量の輸出、EITE 製品の輸入・輸出シェアをそれぞれ表している。

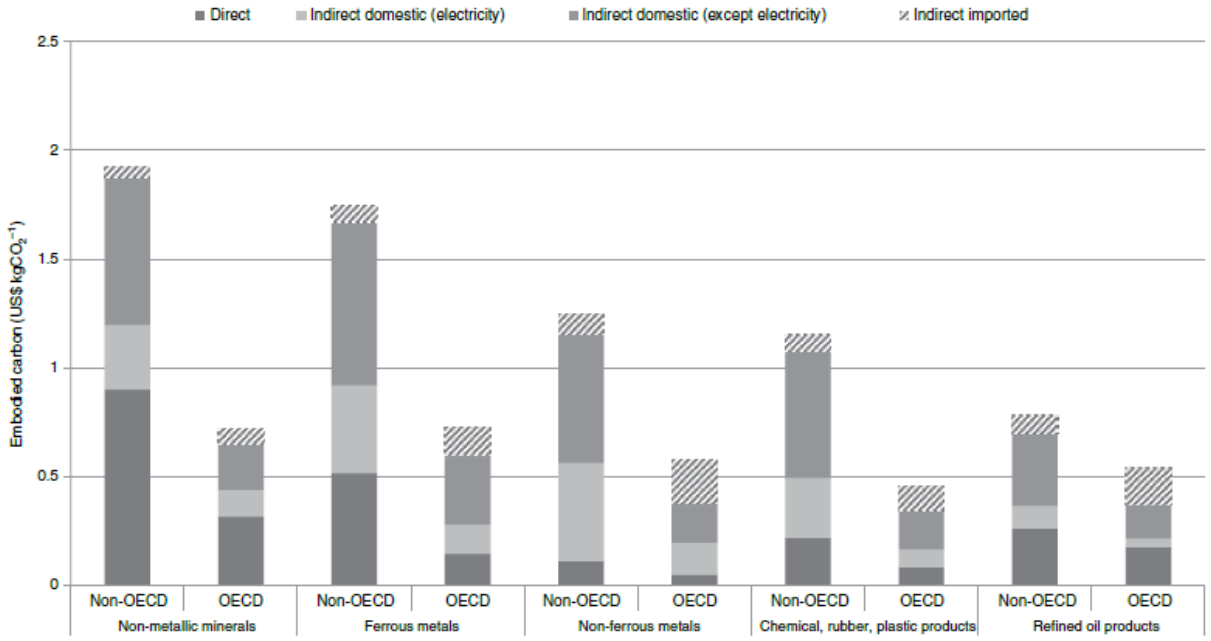


Fig. 1 | Composition of carbon content for EITE goods between OECD and non-OECD countries. The domestic carbon content is stated in kilograms of CO_2 emitted in the production of a good per dollar of output value. Total domestic carbon content is parsed into direct emissions, indirect emissions from domestic electricity generation, other indirect emissions embodied in all other domestic intermediates used in production and emissions embodied in imports. Data from ref. [87].

図 4.3.2-1 OECD 及び非 OECD 諸国における EITE 製品に対する炭素含有量の構成
（出典）Böhringer et al.[8]

図 4.3.2-1 は OECD 及び非 OECD 諸国における EITE 製品に対する炭素含有量の構成を示したものである。国内の炭素含有量は生産価値の 1 ドルあたりの生産における CO_2 排出量で評価される。国内の炭素含有量は直接排出量、発電からの間接排出量及びその他の国内中間財に付随する間接排出量、そして輸入財に含まれる間接排出量に分解される。国内の間接排出量が全体の炭素含有量に占める割合が非常に高く、地域によって大きな差がある。したがって、直接排出量のみを考慮した輸入調整は EITE 製品に含まれる排出量を過小評価することが示唆される。

図 4.3.2-2 は非 OECD G20 諸国から OECD 諸国あるいは非 OECD 諸国への EITE 貿易における輸出品の炭素含有量を示している。炭素含有量は製品の排出原単位に二国間

の貿易額を掛け合わせたものと定義される。非 OECD 諸国の中で、輸入調整の対象として圧倒的に重要な国は中国である。

一方、図 4.3.2-3 は OECD G20 諸国から OECD 諸国及び非 OECD 諸国への EITE 貿易における輸出品の炭素含有量を示している。OECD 諸国の中で、輸出調整で最も恩恵を受けるのは EU-27 であることがいえる。

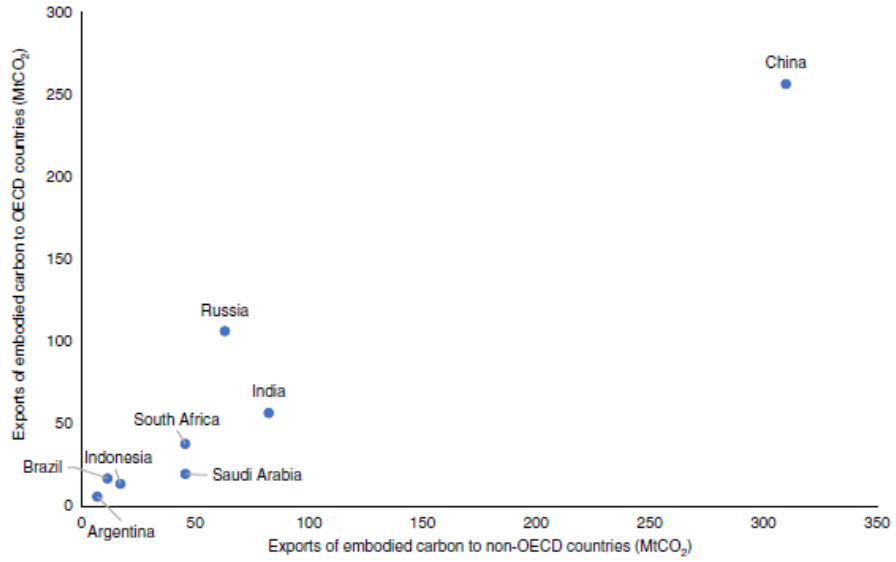


Fig. 2 | Exports of embodied carbon in EITE goods from non-OECD G20 regions to OECD and non-OECD countries. Embodied carbon is the product of emission intensities and the dollar value of export flows summed across EITE goods. Data from ref. [87].

図 4.3.2-2 非 OECD G20 諸国から OECD 諸国あるいは非 OECD 諸国への EITE 貿易における輸出品の炭素含有量

（出典）Böhringer et al.[8)]

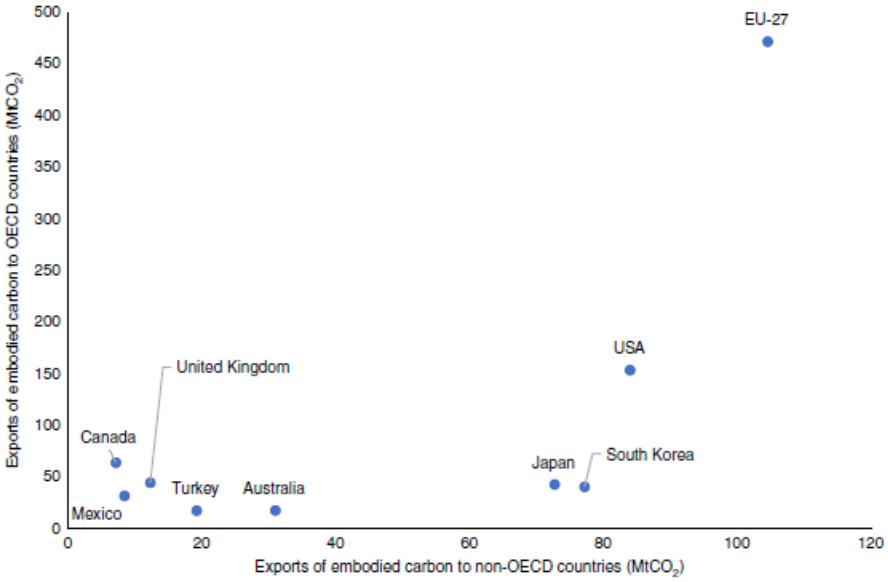


Fig. 3 | Exports of embodied carbon in EITE goods from OECD G20 regions to OECD and non-OECD countries. Embodied carbon is as defined in Fig. 2. Data from ref. [87].

図 4.3.2-3　OECD G20 諸国から OECD 諸国及び非 OECD 諸国への EITE 貿易における輸出品の炭素含有量

（出典）Böhringer et al.[8)]

2014 年の時点では、非 OECD 諸国から OECD 諸国への EITE 輸出における炭素含有量は非 OECD 諸国の全排出量の 5.3%、OECD 諸国の全排出量の 7.9%を占める。

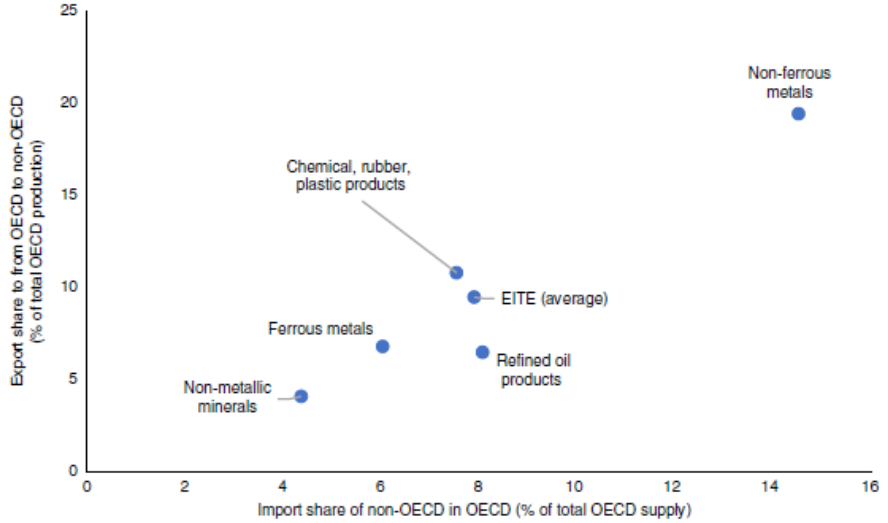


Fig. 4 | Import and export shares for EITE industries. Import shares are computed by dividing the value of the import from non-OECD to OECD countries by the value of domestic market demand in OECD. Export shares are computed by dividing the value of the export from OECD to non-OECD countries by the value of OECD production. Data from ref. [87].

図 4.3.2-4　EITE 産業の輸入及び輸出シェア

（出典）Böhringer et al.[8)]

図 4.3.2-4 は非 OECD 諸国から OECD への EITE 産業の輸入シェアと OECD 諸国から非 OECD 諸国への EITE 産業の輸出シェアを示している。輸入シェアは非 OECD 諸国か

ら OECD 諸国への輸入価値を OECD における国内需要の価値で除したものである。一方、輸出シェアは OECD から非 OECD 諸国への輸出価値を OECD の生産価値で除したものである。EITE 産業が右（上）に位置するほど、輸入調整（輸出リベート）は国内の EITE 生産を保護する上で効果的である。したがって、OECD 諸国と非 OECD 諸国間の炭素の取引は大きく、EITE 製品の炭素強度は OECD 諸国より非 OECD 諸国の方がはるかに高いことがいえる。このことから、BCA は炭素リーケージに対応する上で需要な役割を果たす可能性があるが、炭素の多くは間接排出に由来しているため BCA の実践は非常に困難であるといえる。

次に、厳しい炭素価格付けに付随するカーボンリーケージ率のレビューがなされている。応用一般均衡（CGE）モデル分析を中心としたメタ分析や第 29 回の Energy Modeling Forum (EMF)の推計によると、先進国におけるリーケージ率は 5%から 30%、であるが、炭素価格や削減の提携（coalition）のサイズ、貿易及び化石燃料供給の弾力性の想定によって異なる。一方、企業の異質性及び市場構造を詳細にみた部分均衡型のセクター分析によると、セメント、アルミニウム及び鉄鋼産業に対するリーケージ率は 20%から 70%となり、国内の EITE 生産における大幅な排出削減は、海外で増加した排出量を相殺する可能性がある。

BCA は炭素価格がある国と無い国との間の炭素価格差を縮小し、一律でない炭素価格から生じる効率性のロスを抑制する。しかし、海外の排出量のごく一部しか対象とならないため、効率性の便益の程度は限定的である。モデル分析の先行研究によると EITE 産業に対して実施された場合、BCA による費用削減効果は限定的であることが示されている。EMF の研究によると、先進国による炭素価格付けにより 20%排出量を削減するため、BCA の適用は世界全体の経済調整費用を 10%まで節約することができると結論づけている。

参考文献（第 4.3.2 節に関するもの）

1) Branger, F. and Quirion, P.: Would border carbon adjustments prevent carbon leakage and heavy industry competitiveness losses?, Insights from a meta-analysis of recent economic studies, Ecological Economics, 99, pp.29-39, (2014)
2) European Commission: Communication from the commission to the European parliament, the European council, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions; The European green deal, https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf (accessed March 9, 2022)
3) European Commission: Annex to the Communication from the commission to the European parliament, the European council, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions; The European green deal, https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication-annex-roadmap_en.pdf (accessed March 9, 2022)

4) European Commission: EU Green Deal (carbon border adjustment mechanism), https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12228-Carbon-Border-Adjustment-Mechanism (accessed March 9, 2022)
5) European Commission: Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality, COM/2021/550 final, July 14, 2021 (accessed March 9, 2022)
6) European Commission: Proposal for a regulation of the European Parliament and of the council establishing a carbon border adjustment mechanism, COM/2021/564 final, July 14, 2021 (accessed March 9, 2022)
7) European Commission: Annexes to the Proposal for a regulation of the European Parliament and of the council establishing a carbon border adjustment mechanism, COM/2021/564 final, July 14, 2021 (accessed March 9, 2022)
8) Böhringer, C., Fischer, C., Rosendahl, K.E., Rutherford, T.F.: Poential impacts and challenges of border carbon adjustments, Nature Climate Change, Vol. 12, 22-29 (2022).

第5章　長期緩和シナリオ分析

本章では、長期の温暖化緩和シナリオ分析について記述する。パリ協定では、全球平均気温上昇を産業革命前に比べ２℃未満に十分に低く（“well below”）抑える。また1.5℃に抑えるような努力を追求する。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、とされている。2019 年 9 月に開催された国連気候行動サミットに合わせて、世界では、2050 年の実質ゼロ排出を目指す動きが加速した。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、2021 年 10 月には、これに沿った形で、エネルギー基本計画 [1]、地球温暖化対策計画 [2]、パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略 [3]が閣議決定された。

2050 年カーボンニュートラルに向けた各種技術の展望の不確実性は大きい。このような状況において、長期的に実質ゼロ排出を実現する、世界全体が整合的な姿を分析することが重要と考えられる。一方、第 2 章でも記述したように、不確実性が大きい中で、不確実性を考慮したリスクマネージメントが重要であり、そのため、複数のシナリオによる分析が求められる。本章では、このような戦略への道筋について、コストの視点を含め、全体整合性をもって評価するため、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル等も用いながら、分析・評価を行った。

まず、5.1 節においては、大幅排出削減に寄与し得ると考えられる技術について調査を行い、具体的には、5.1.1 節においては、需要サイドの対策の可能性について、昨今の動向を踏まえて記述した。次に、5.1.2 節には再エネの動向を中心に記述した。更に、5.1.3 節では特に二酸化炭素除去技術 CDR の動向、国際的な評価事例について記述した。そして、5.1.4 節では、水素、合成燃料の技術動向について記載した。

その上で、5.2 節において、2050 年カーボンニュートラル（1.5℃シナリオに相当）の排出削減シナリオについて、将来の技術進展や各種制約の不確実性も考慮しつつ、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+によって、全体整合的なシナリオ分析を行った結果を記載した。5.2.1 節では共通的なモデルの概要と前提条件の記載を行い、5.2.2 節では日本のシナリオを、5.2.3 節では世界のシナリオについて記載した。5.2.4 節では特にそのうち、全体システムとしての理解が必要な水素について、深堀した検討を行った。また、5.2.5 節では、バイオ燃料（SAF）や、水素、合成液体燃料等、様々な可能性が考えられ、一方、排出削減が容易ではないとされている、航空におけるシナリオを取り出して分析した結果をまとめた。

更に、定量的な分析の扱いが簡単ではないために、本年度モデルでは反映できなかったものの、エネルギー需要側の対策の余地はまだ多く存在していると考えられ、それらに関する調査、分析も行った。5.3 節では、日本における生活行動の変化とその潜在的な影響の可能性等について、アンケート調査も実施して生活行動の把握を行った。これは、住環境計画研究所に協力を頂いて実施した。また、5.4 節には、様々な需要の変化が、素材製品需要にどのような影響をもたらし得るかについての調査、試算結果

を記載する。これは、国際応用システム分析研究所（IIASA）に協力を頂いて実施した。更に 5.5 節には、情報技術の革新が、食品廃棄の削減等を誘発し、それがもたらすエネルギー需要や CO_2 排出削減に与える影響についても分析を行い、記載した。

また、5.6 節には、DACCS 等、CDR を含む地球温暖化対策が、土地利用・食料アクセスにどのような影響を及ぼすかについての分析を行い記載した。

5.1 長期温暖化対策技術（ゼロエミッションに向けた技術等）の調査

5.1.1 需要サイドの対策の動向、調査等

(1) ファッション消費に伴うエネルギー消費・CO_2 排出評価[1]

近年、ファッション産業は製造から廃棄に至るまでのエネルギー使用量やライフサイクルの短さなどから、環境負荷が高い産業であるとの指摘を受けている。Niinimäki et al.は、地球環境に対してファッション産業は次のような 5 つの問題点を有すると指摘する [1)]。ファッション産業は世界の CO_2 排出量の 8-10%（年間 40～50 億トン）を占め、水を大量消費（年間 79 兆リットル）し、繊維加工や染色による工業用水汚染の約 20%の原因となっている上、海洋マイクロプラスチック汚染の約 35%（年間 19 万トン）を占め、新品の売れ残り製品を含めて不要になったアパレル商品は膨大な量の繊維廃棄物（年間 9200 万トン以上）となり、その多くは埋め立てや焼却処分される。世界全体の CO_2 排出量を削減するためには、もはや市民レベルでプラスチックストローを紙製のストローに変更したり、買い物袋をマイバッグにするだけでは間に合わない状況である。

ファッション業界も生分解可能（biodegradable）な新素材の開発など様々な対策を講じているものの、ファストファッションの台頭やインフルエンサー消費の拡大によってファッション消費は今後も伸び続けることが予測されており、ファッションが地球環境に及ぼす影響は今後も深刻化するであろうことは容易に想像できる。このような状況を鑑み、本稿はファッション消費に伴うエネルギー消費並びに CO_2 排出評価を行い、ファッション業界をより持続可能なものに変えていくための様々な技術的取組事例を紹介し、これらの技術が果たす役割について考察した。

① ファッション産業のエネルギー消費・CO_2 排出評価

ファッション産業は、繊維や糸、テキスタイルの生産工程における水や化学物質の使用、衣服の製造、流通、消費過程における CO_2 排出など、サプライチェーンのあらゆる段階で環境に影響を与えている（図 5.1.1-1）。

[1] 本節は木谷ら（2021）[2)]に基づく。

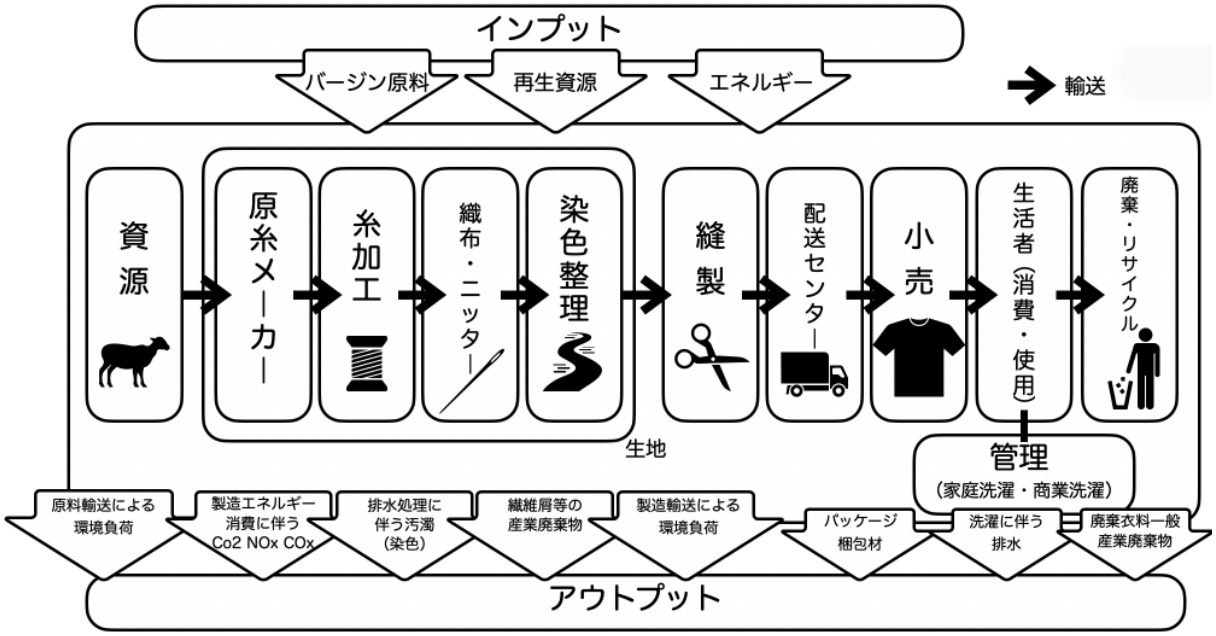


図 5.1.1-1　衣料品のライフサイクルと環境負荷の概念図

（出典：田村・稲葉・山口・佐藤[3]を元に作成）

ファッション消費に伴うエネルギー消費と CO_2 排出量は、主に原料の繊維製造と衣料品が消費者の手に渡った後の洗濯やアイロンがけなどの使用段階、および航空輸送を使用する場合の輸送の際に発生する。しかし、ファッション産業の環境負荷を正確に評価することは原材料の繊維生産段階からアセスメントしなければならない上に、衣服生産のグローバル化が進んだことからも、正確な評価は極めて困難になっている。例えばウールなどの動物由来の繊維は、家畜が排出する温室効果ガスなども考慮に入れる必要があり、ウール生産が環境に与える影響を数値化することは難しい。さらに、ファッション消費に伴うカーボンフットプリントは、各国で使用されるエネルギーの供給源の影響を受ける。例えば、石炭ベースのエネルギーに依存する中国は、ヨーロッパで製造された繊維製品よりも 40%程度大きなカーボンフットプリントとなる[4]。また、中国産の T シャツとジーンズをスウェーデン人が使用した場合、スウェーデンでは衣類を洗濯・乾燥するためのエネルギーのほとんどが原子力発電で賄われるため、ファッション消費における CO_2 排出量は中国での衣料品生産によるものが全体の 71%を占める。その一方で、一般的なヨーロッパの洗濯機は衣類の素材別に洗う温度が設定されており、綿、リネン、合成繊維、混紡などは 30-40℃、ジーンズは 40℃、リネンなどを殺菌する場合は 90℃の熱湯で洗濯するため、高温で洗濯する際にはエネルギー消費は比例して高くなってしまう。尚、国連はファッション産業が世界の温室効果ガス排出量の 10%を占めていると主張しているが、この推計の根拠は明確に示されていない[5]。

2011 年の Carbon Trust のデータによると、ヨーロッパの家庭における衣料品の使用（洗濯、乾燥、アイロンなど）に伴う CO_2 排出は年間 5 億 3,000 万トンであると概算されている[6]。衣料品の使用方法や同じ衣服を何回着るのかという維持管理は消費者個

人の選択に依存するため概算しかできないが、Carbon Trust によると平均的な T シャツの着用と管理に伴う CO_2 排出量は、T シャツ 1 枚のライフサイクルにおける排出量の半分を占めている。例えば、綿の T シャツのライフサイクル排出量を試算すると、50 回洗濯した場合、CO_2 排出量の 35%は繊維生産に起因し、52%は使用段階で発生することが判明している。しかし、T シャツ 1 枚の管理方法も繊維の種類によって異なるため、ポリエステルの T シャツとコットンの T シャツでは排出量は異なるだろう。また、天然繊維は石油原料の合成繊維に比べて生地の生産段階における CO_2 排出量は少ないが、天然繊維は合成繊維に比べて洗濯、乾燥、アイロンがけに必要なエネルギーが大きいため、生産時の低カーボンフットプリントは、使用段階で相殺される可能性がある。

② ファストファッションの大量生産・大量消費モデル

近年、アパレルの売り上げは飛躍的に伸びており、その背景にあるのがファストファッションの台頭である。ファストファッションとは、1990 年代後半から 2000 年代前半にかけて登場した衣料販売チェーンの業態のことを差し、その特徴は短いサイクルで流行のデザインを追いながら衣料品を大量生産し、低価格で販売することによって消費者に大量消費を促すというものである。ファストフードの衣料品版としてファストファッションという名称がつけられているが、ファストフード・チェーンの多くがアメリカの企業であるのに対し、ファストファッション・チェーンは H&M（スウェーデン）、ZARA（スペイン）、Mango（スペイン）、Topshop（イギリス）などヨーロッパのブランドも多い。上記のブランドは実店舗を持つ「伝統的な」ファストファッション・ブランドであるが、近年は実店舗を持たず、SNS 上で宣伝し、急速にシェアを拡大している新興のファストファッション・ブランドも存在する。1990 年代後半以降に生まれてインターネットやスマホ環境に慣れ親しんだ Z 世代の間でよく知られているのが SHEIN（中国）、Boohoo（イギリス）、Pretty Little Thing（イギリス）、Missguided（イギリス）、ASOS（イギリス）など、SHEIN 以外イギリスに拠点を持つオンライン・ベースのブランドである。このようなブランドは、 YouTube や Instagram で人気コンテンツの「購入品紹介（clothing haul）」をファッション・インフルエンサーに配信して貰う形で知名度を上げている。さらに、アフィリエイト・プログラムを導入し、インフルエンサーが発行する固有のプロモーション・コードを利用して商品を購入した消費者には 10-20%の割引を提供し、インフルエンサーにはコミッションを支払うというウィン・ウィンの構造を生み出している。このようなファッション・インフルエンサー・マーケティングの規模は 2019 年には 15 億米ドルに到達した上、2020 年から 2027 年にかけて、年平均成長率 35.7%で拡大すると予想されている [7]。インフルエンサー自身が服のブランドを立ち上げたり、マーチ（merchandise の略）を販売するケースも増加しており、マーチが巨大アパレル・ブランドへと成長した例がイギリスのアスレジャー（athleisure、スポーツウェアと普段着を兼ねたファッション）メーカーの Gymshark である。

上記のようなブランドに代表されるファストファッションは「計画的旧式化（planned obsolescence）」という、次々と新しい商品を投入することによって意図的に商品の寿命を短く設定し、消費者に商品を購入させ続ける手法を用いている。アパレル企業にお

いて衣服のコレクション発表の回数は、慣習的に年間春と秋の 2 シーズンであったが、ファストファッションの場合は有名ブランドが発表した服のデザインを模倣し、数週間で商品化するという生産工程の迅速さから、新コレクションの発表はより頻度が高い。例えば ZARA は毎年 24 の新コレクションを発表し、H&M は 12 から 16 のコレクションを発表している。ファストファッションは上述の計画的旧式化によって寿命が短く安価なため、消費者は安価な衣料品を「ほぼ使い捨て」の生鮮品と見なし、7-8 回着ただけで捨ててしまう傾向が強くなっている [8]。加えて、使用済みファストファッションの製品は市場価値がほとんど無くなり、セカンドハンド製品を扱うサービスも原則引き取らないため、リサイクルすることは難しい。

衣類の年間生産枚数は 2000 年から倍増し、2014 年には初めて 1000 億枚を突破した。これは年間 1 人当たり約 14 着の衣料品が生産されている計算となり、一人当たりの衣料品購入数は約 60%増加した [9]。世界中でアパレル商品の売上高は伸びているが、特にブラジル、中国、インド、メキシコ、ロシアなどの新興国 5 カ国では、衣料品の売上がカナダ、ドイツ、イギリス、アメリカなどと比較して 8 倍の速さで伸びている。アパレル産業の環境効率が向上しないまま新興国の人々が欧米並みの衣料品消費レベルに達した場合、アパレル産業の環境フットプリントはより大きくなることが予想されている。

③ ファッション廃棄の問題

不要になった衣料品を、ペットボトルのように新しい商品へ再生することができるようにすることが理想的であるが、現在の技術では使用済み衣料品を原材料となる繊維まで確実に戻すことは困難であるとされている。シュレッダーや化学分解などのリサイクル技術も未だ発展途上にある上、衣類をリサイクルすることで得られるはずの素材量を吸収できるほど大きな市場も存在していないのが現状である。その結果、毎年 5 着の衣服が生産されるごとに、3 着が埋立地や焼却場に運ばれていると言われている。ドイツは、使用済み衣類のほぼ 4 分の 3 を回収し、その半分を再利用、4 分の 1 をリサイクルしており、ほとんどの国より優れたリサイクル・システムを有している。他の国々における回収率ははるかに低く、米国では 15%、日本では 12%、中国では 10%となっている [9]。

高田と田原による日本の繊維製品のリサイクル率に関するデータでは、紙およびプラスチックのリサイクル率が約 60%、スチール缶およびアルミ缶が約 90%であるのに対し、毎年約 200 万トンに達する使用済み繊維製品の内、リサイクルされる率は約 11%に留まると試算されている [10]。その理由としては次の 3 点があげられている。1 つ目は、ファッション性を有する製品であるために商品展開が幅広く、同種の製品を一定規模以上回収することが難しいこと、2 つ目は、素材の複合度が高いため個々の素材に分離・分解することが難しいこと、3 つ目は、再商品化してもその用途の拡大が見込めなかったりすることである。また、高田と田原は日本で毎年約 200 万トンに達する使用済み繊維製品が発生している理由として、衣料品の生産流通構造が多層構造であるために各階層で廃棄物や在庫品が発生することや、衣類の低価格化が進んだことによ

って製品の使い捨て傾向が強まったこと、そして流行や着る人の体型の変化等によって製品はその寿命を待たずして廃棄されること、などをあげている。

また、ファッション業界全体で見ると、平均的な売れ残り在庫は 17-20%であるとHarvard Business Review は見積もっている [11]。McKinsey & Company は、購入した衣類の 60%がわずか 1 年で捨てられるとも推定している [12]。また、イギリスの保険会社の推計によると、2005 年には価格にして 73 億 9,000 万英ポンド相当の衣類がイギリスにおいて一度も使用されずに捨てられていることが判明している。これは、2005 年の国民総支出の 19%に相当する [12]。このようなことが起きている理由としては、ファストファッションの製品が安価であることから消費者が不要な衣服まで買ってしまうことや、e コマースの流行で試着をせずにサイズやイメージと合わない衣服を買ってしまうことなどがあげられる。

④ ファッション業界の取り組み

ファッション業界も非難の矛先が向けられていることを認識しており、多くの女性ファッション誌では毎号で「エシカル」「サステナ」というキーワードが必ずどこかに登場し、エシカル（倫理的）、あるいはサステナビリティ（持続可能性）を謳う商品を紹介する特集ページが組まれている。例えば VOGUE の 2022 年 1 月号（2021 年 11 月発売）では、見開き 2 ページでサステナビリティとウェルビーイングの特集が組まれており、環境や社会に配慮した製品が紹介されている。ただし、同誌で紹介される商品は高級ブランドがほとんどであるため、掲載されているのは Chloe の環境低負荷型の素材を使用したスニーカー（99,000 円）、イッセイ・ミヤケの一部植物由来原料のポリエステルと綿ポリエステル糸を混織した一枚の布から成形されたジャケット（69,300 円）などである。当然、ファストファッションの価格帯より何倍も高いため、たとえ環境に配慮された商品であっても、社会に浸透してファッション産業がもたらす環境負荷を軽減させることができるほどの影響力を持つことはあまり期待できないか、結果が出るまでには長い時間がかかるだろう。

また、衣料品の廃棄やリサイクルは消費者の手に委ねられている部分も多いため、仮に消費者が環境に配慮した生分解可能なヴィーガン・レザーの靴を購入しても、一定期間使用した後に可燃ゴミとして捨ててしまった場合、一般の廃棄物（ファッション・ロス）と同じになってしまう。消費者の購買行動を今すぐ転換させることは困難であるため、ファッション・ロスを削減するためにはシステム的な変革が必要である。効果は限定的ではあるものの、生産・消費・廃棄の各段階でエネルギー消費やファッション・ロスを減らすいくつかの取り組みを次節以降で紹介する。

a. 生産段階

生産段階でエネルギー消費やファッション・ロスを減らすには、まずは現行のリニアなライフサイクルを、デザイン段階からサーキュラーなシステムに転換させる必要がある。ECAP（European Clothing Action Plan）は循環型衣服システムを導入するための対策を提案し、サーキュラー・ファッションを次のように図式する（図 5.1.1-2）。

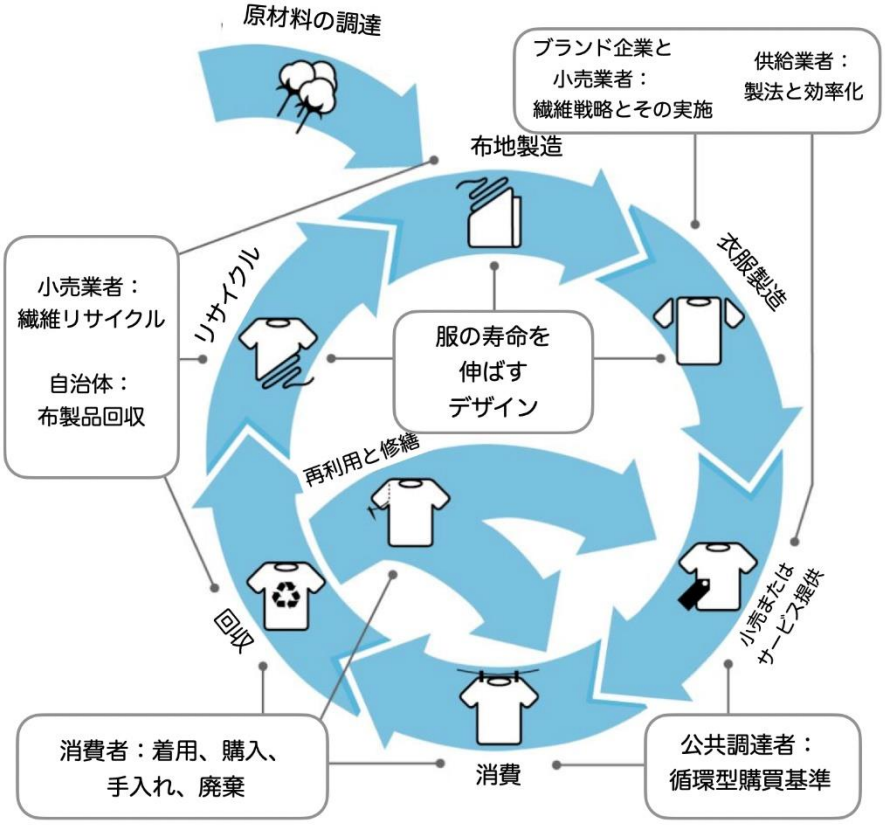


図 5.1.1-2　サーキュラー・ファッションの概念図
（出典：Gray[7]を元に作成）

このサーキュラー・ファッションの概念図では、まずデザインの段階で使い捨てにならないような丈夫なもの、全季節型のもの、単一素材を使うなどしてリサイクルしやすいものを生産することを提案している。

ECAP の取り組み以外では、アパレル CAD（Computer Aided Design System）を利用して余白の少ないパターンを作成し工場から廃棄される生地の量を最小限に留めることや、韓国の企業 CLO Enterprise によって開発された 3DCAD を使用し、縫製を行う前に立体のデジタル・モデルで製品の完成状態を確認することによってサンプルの作成や輸送にかかる環境負荷をほとんどゼロにするなどの取り組みがなされている。また、縫製のオートメーションを進めることによって、オンデマンド生産を可能にしたり、カスタマイズによって付加価値を付与することによって、生産段階で廃棄量を減少させることも可能である。縫製のオートメーションは、アスレジャーの業界で流行しているシームレス・レギンス（縫い目のないレギンス）やニットドレスなどの生産でフル・オートメーションが可能になっている。また、Amazon は現在 AI デザイナーを開発中であり、流行の分析によって自動的にデザインを作成したり、消費者が自由に衣服のカスタマイズをすることを AI デザイナーが手助けするようになることが予測されている[13]。

b. 消費段階

近年、シェアリング・サービスやサブスクリプション・サービスが様々な業態で提供されているが、ファッション業界でもそのトレンドは拡大傾向にある。また e コマースの成長によって実店舗を持たないブランドも増えてきており、この傾向は今後も続くと予測されている（図 5.1.1-3）。

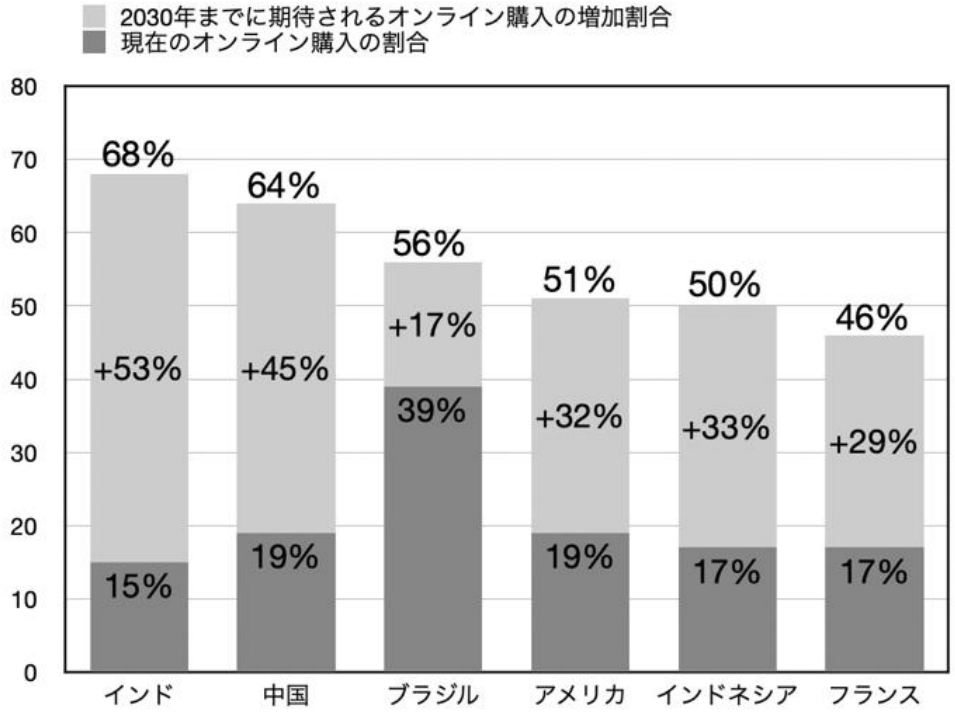


図 5.1.1-3 増加する衣料品のオンライン購入
（出典：Deloitte[14]を元に作成）

E コマースでの販売によって、ブランド企業は実店舗を維持することによるエネルギー消費や在庫を抱える必要がない。しかし、上述したように試着をせずに e コマースを通して衣服を購入してしまうと、サイズが合わなかったり、イメージが違っていたりするため、未使用で捨てられる服を増やしてしまうという側面がある。そのような問題を解決する方法としてバーチャル・フィッティングや体型を自動的に計測する技術などが開発されている。バーチャル・フィッティングは Quantum Matrix が先駆的企業であるが、その方法は、消費者自らが様々な角度で自分の写真を撮影し、そのデータをオンラインにアップロードすることによってアバターが作成され、そのアバターに衣服を試着させることができるというものである [15]。また、ZOZOTOWN が開発した ZOZO スーツは、ボディースーツに複数のマーカーが印字されており、そのマーカーをスマホのカメラで読み取ることによって自動採寸を行うという仕組みになっている。ZOZO スーツの初期型は測定値が不正確であるとされたが、改良版はマーカーを 50 倍増やし、より精緻な 3D モデル生成が可能となっている。このように正確に体型を測定

できるため、消費者はその測定値を参考に、自分の体型にフィットする服をオンラインで購入することができる[16]。

c. 廃棄段階

2018年にEUは循環型経済包括提案(circular economy package)を欧州議会で採択し、これによって遅くとも2025年までにすべてのEU加盟国で繊維製品の分別収集を徹底させることが決定している。また、欧州議会はすでに衣類・繊維製品に対するエコラベルの認証制度も導入している。その審査基準は厳格で、例えば人体や環境に有害な物質の使用制限、水質・大気汚染をもたらす度合い、衣類の寿命を延ばすための基準（洗濯・乾燥時の縮みにくさ、摩擦・光の照射に対する耐色性）などが細かく設定されている[17]。加えて、EU諸国の企業によっては、自主的にカーボン・フットプリントを製品表示する取り組みも行われている。

欧州議会の包括提案のように、日本でも繊維製品の分別収集が開始されたならば、ビン、缶、ペットボトルなどと同様に衣服や繊維製品を資源ゴミとしてリサイクルに回すことができるかもしれない。実際、自治体によってはすでに拠点回収などを実施している市町村もある。しかしながら、衣料品は複数の素材が組み合わせられているため、回収した後のリサイクルは容易ではない。例えばワンピース1着にしても、布地のコットンとプラスチック製のボタンや金属製のジッパーは分けておかなければリサイクルできないだろう。複数のマテリアルを使用する衣料品のリサイクルを考えるならば、原材料のデータを持つメーカーによる衣料品回収が理想的であろう。たとえばユニクロなどは各店舗における衣料品回収を実施したり、ダウンジャケットを集めてリサイクル・ダウンを使用したジャケットを生産するなどの活動を実施している[18]。

⑤ パンデミック後とメタバース時代のファッション

新型コロナウイルス流行は、従来のファッション産業における生産流通構造の脆弱性を浮き彫りにした。ILO（国際労働機関）の報告によると、2020年のアジアの衣料品生産国からの輸出量は、パンデミックの影響を受けて、最大で70%も急減している[18]。従来の生産流通構造とは、アメリカや中国の大型施設で生産された繊維原料を中国やインドで紡績して織物にし、中国やバングラデシュ、ベトナムなどの労働賃金が安い国で縫製し、完成した製品をアメリカ、ヨーロッパ、北東アジアなどに輸送するというサプライチェーンのことである。このようにファッション産業の生産流通構造は国境を越えることを前提にしているため、新型コロナウイルス流行によってどこかの国でロックダウンが実施されたならば、全てのサプライチェーンに影響を及ぼすことになる。

JuddとJacksonは、パンデミック後のファッション産業の未来について、repeat（繰り返す）、regain（取り戻す）、renegotiate（再交渉する）という3つのシナリオを提示する[19]。第1のrepeatはその名の通り、パンデミック前のファッション産業をパンデミック後も同様に繰り返すシナリオである。第2のregainは、従来のブランド企業が持つガバナンスを維持しつつ、生産流通構造を改善するというシナリオである。第3のrenegotiateは、業界の生産流通構造、ガバナンスなどを持続可能な形態に統合し、

それと共に、ファッション業界に携わる人々がディーセント・ワーク（ILO の定義で、働きがいのある人間らしい仕事のことを意味する）に就くことができるようにすることを目指すものである。具体的に目標としてあげられているのは、パンデミックによって浮き彫りにされたサプライチェーンの脆弱性に対処すること、業界内のガバナンスを改革をすることによってバイヤー、サプライヤー、労働者の間で公正な契約が再交渉されること、業界に関わる者全てが社会的・環境的持続可能性への移行を重視し革新的な循環型ビジネスモデルを実現させること、オートメーションなどの技術は労働者を削減させるためではなく労働者を補助するものとして発展させること、などである。

一方、パンデミックがきっかけとなって技術開発が加速度的に進められているのがメタバースである（ネット上のサーバーに構築する 3 次元グラフィックの仮想空間や社会のことを意味する）。Facebook が名称を Meta に変更し、メタバース事業を牽引することを発表したことからも判るように、今後はリアルとバーチャルが融合したメタバース上の社会が広がっていくだろう。そこで注目されるのがデジタル・ファッションの流行によるファッションの非物質化（dematerialization）である。すでに GUCCI や Dolce&Gabbana はデジタル・ファッションを NFT（non-fungible token、非代替性トークン）として販売するイベントなどを実施している。ゲームや SNS 上でもデジタル・ファッションの販売は開始されており、消費者は物理的に所有できない衣服の購入を始めている。例えば DRESSX のウェブサイトではあらゆるデジタル・ファッションが販売されており、最も安価なものでも T シャツが 25 ドルで売られている [20]。消費者は DRESSX で購入する前に自分の写真をアップロードし、試着することも可能である。購入後は、下着などなるべく布地が少ないものを着た写真を DRESSX に送信し、デジタル・アーティストが体型やポーズに沿って消費者が購入したデジタルの衣服を着せてくれるという仕組みになっている。Z 世代はそもそも Instagram などの SNS に写真を掲載するためだけに衣服を大量に購入するため、実際に所有することなくデジタル画像の中でデジタル・ファッションを楽しむことができれば好都合であるし、ゲーム上のアイテムの課金制度などにも慣れ親しんでいる Z 世代からすると、デジタル・ファッションの購入にもさほど違和感を覚えない場合も多い。今後はメタバース上により多くのファッション・ブランドが登場したり、既存のファッション・ブランドがメタバース上で衣料品を販売したりするようになり、消費者は現実世界で着る服よりも仮想空間で自分のアバターに着せる服を購入するようになる可能性もある。

⑥　おわりに

以上述べてきたように、ファッション・サプライチェーンはグローバルに展開されている上、多層構造を持つため、原材料の繊維生産から紡績、染色、縫製、流通まで、各階層におけるエネルギー消費及び CO_2 排出量を網羅的にアセスメントすることは容易ではない。また、各階層の工程を担う国のエネルギー供給源によってもアセスメントに違いが出てくる。さらに、ファッションの流行はサステナビリティなどの側面も含めて移り変わりが激しいため、10 年先のことも不確実な部分が多い上、パンデミックなどの想定外の出来事によってサプライチェーンが壊滅的な打撃を受けることもあ

る。今後も一定期間はオンライン販売をベースとするファストファッションがシェアを拡大することが予想されるが、一方で非物質化されたデジタル・ファッションを購入する人々も増えるだろう。いずれにしても、ファッション産業が世界の CO_2 排出量の 8-10%を占めているのであれば、世界的に脱炭素社会の実現を目指す上でも、ファッション業界全体が対策を講じていくことは喫緊の課題である。

(2) 3D プリンティング／アディティブ・マニュファクチャリング

近年、3D プリンターに代表されるアディティブ・マニュファクチャリング（以下、AM）技術の進展が見られる。AM では、従来の金型を作っての成形や切削による造形等に比べ、複雑な形状を作成でき、同じ強度でも軽い製品を作成できるという利点がある。その適用は、消費財・電子機器、自動車、医療、産業機械といった幅広い分野におよび、注目されている技術である。さらに、それぞれのニーズに合わせた製品製造が可能で、大量生産や大量廃棄を回避できる可能性があり、また軽量化により輸送のための燃料消費の削減も期待できことから、ライフサイクルでのエネルギー消費量の低減や CO_2 排出の削減に大きな効果を有する可能性がある。本節では、AM が世界のエネルギー需要に与える影響について評価した、L. A. Verhoef et al.[21]の論文について紹介する。

① 分析の概要

まず、2050 年の世界の社会政治状況を示す Shell Energy Scenario for 2050 の Blueprints シナリオと Scramble シナリオ、および AM の普及と効果が高い（high）場合と低い（low）場合を組み合わせた、下記 4 つのシナリオを想定する。

- シナリオ SH：グローバル化とイノベーション促進が乏しい、AM インパクト大
- シナリオ BH：グローバル化進展・イノベーション促進、AM インパクト大
- シナリオ SL：グローバル化とイノベーション促進が乏しい、AM インパクト小
- シナリオ BL：グローバル化進展・イノベーション促進、AM インパクト小

そして、航空宇宙セクターと建設セクターについて、2050 年のエネルギー消費量（AM 無し、ベースケース）を予測し、バリューチェーンの各フェーズ（原料、輸送、加工、使用、メンテナンス等）における 2050 年の想定に基づき、AM がエネルギー消費に与える影響（エネルギー削減量）を算出する。さらに、2 つのセクターの分析結果から、特定のフェーズのエネルギー削減率を使用して他セクターにおけるエネルギー削減率を計算し、世界全体の削減量（率）の集計を行う。

② 分析の結果

航空宇宙セクターの 2050 年エネルギー消費予測（ベースケース）は、Scramble シナリオでは 35.4EJ/yr、Blueprints シナリオでは 20.1EJ/yr となり、AM による効果を考慮すると 5-25%のエネルギー低減の可能性がある。建設セクターの 2050 年エネルギー消費予測は、Scramble シナリオでは 173EJ/yr、Blueprints シナリオでは 159EJ/yr となり、AM による効果を考慮すると 4-21%のエネルギー低減の可能性がある。これらの結果に

基づき、2050 年の世界エネルギー需要の 26-138EJ/yr（5-27%）の低減が可能である（図 5.1.1-4）。

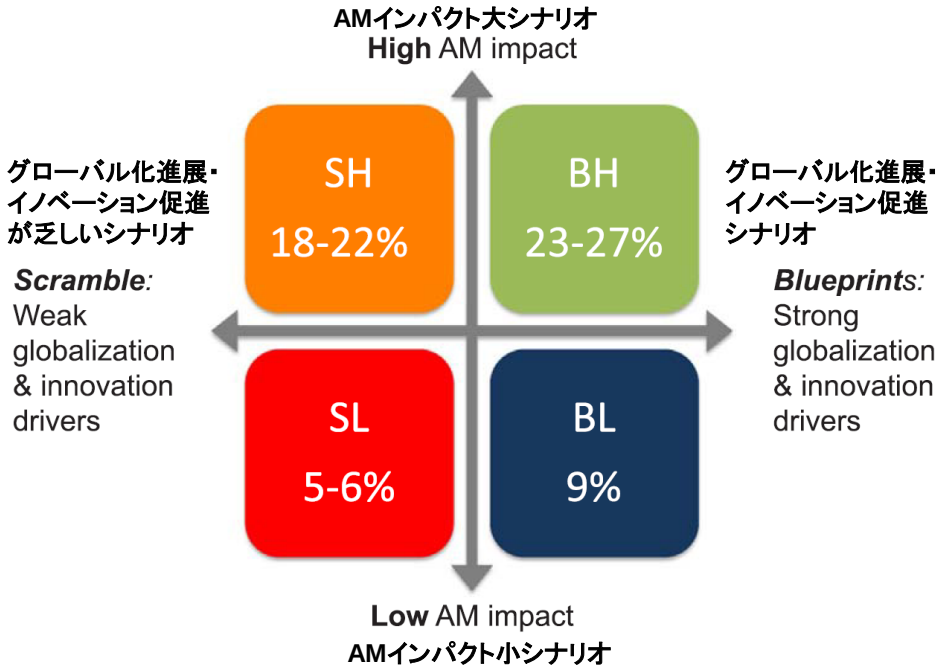


図 5.1.1-4　AM による世界のエネルギー需要削減ポテンシャル

参考文献（第 5.1.1 節に関するもの）

1) Kirsi Niinimäki, Greg Peters, Helena Dahlbo, Patsy Perry, Timo Rissanen and Alison Gwilt: The environmental price of fast fashion, Nature Reviews Earth & Environment, 1 (2020), pp.189-200.
2) 木谷佳楠、秋元圭吾：ファッション消費に伴うエネルギー消費・CO_2 排出評価、第 38 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス 20-5（2021）
3) 田村照子、稲葉敦、山口庸子、佐藤真理子：低環境負荷型ファッション文化に関する研究、服飾文化共同研究報告 (2010)、pp.1-8.
4) Laili Wang, Yi Li, Wanwen He: The energy footprint of China's textile industry: Perspectives from decoupling and decomposition analysis, Energies, 10-1461 (2017), pp.1-11.
5) United Nations Climate Change: https://unfccc.int/news/un-helps-fashion-industry-shift-to-low-carbon (アクセス日 2021.12.10)
6) Glen Peters, Chris Webber, Jan Minx and Peter Grace; International carbon flows: Clothing, Carbon Trust (2011), pp.1-17.
7) Grand View Research: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/fashion-influencer-marketing-market (アクセス日 2021.12.10)
8) Sarah Gray: Mapping clothing impacts in Europe: the environmental cost, European Clothing Action Plan (2017), pp.1-41.

9) McKinsey & Company: https://www.mckinsey.com/ business-functions/sustainability/our-insights/ style-thats-sustainable-a-new-fast-fashion-formula (アクセス日 2021.12.10)
10) 高田亜佐子、田原聖隆 ; 衣類におけるライフサイクルアセスメントの現状と課題、廃棄物資源循環学会誌、21-3 (2010)、pp.148-156.
11) Harvard Business Review: Harvard Business Review on managing supply chains (2011) , pp. 1-205.
12) Statista, Consumer expenditure on clothing in the United Kingdom (UK) 2005-2020: https://www.statista.com/statistics/289999/consumer-spending-on-clothing-in-the-united-kingdom-uk/ (アクセス日 2021.12.1)
13) MIT Technology Review: https://www.technologyreview.com/2017/08/24/149518/amazon-has-developed-an-ai-fashion-designer/ (アクセス日 2021.12.10)
14) Deloitte: Garment 2025: What new business models will emerge?, Deloitte Digital (2020) , pp.1-17.
15) Quantum Matrix: https://quantum-matrix.ai (アクセス日 2021.12.8)
16) ZOZO: https://corp.zozo.com/news/20201029-12001/ (アクセス日 2021.12.10)
17) Nikolina Šajn: Environmental impact of the textile and clothing industry: What consumers need to know, European Parliamentary Research Service, European Union (2019), pp.1-10.
18) RE.UNIQLO: https://www.uniqlo.com/jp/ja/contents/sustainability/planet/clothes_recycling/re-uniqlo/product/ (アクセス日 2021.12.8)
19) Jason Judd and J. Lowell Jackson: The post-COVID future of the apparel industry, Better Work Discussion Paper 42 (2021), pp.1-75.
20) DRESSX: https://dressx.com (アクセス日 2021.12.8)
21) L. A. Verhoef et al.: The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach, Energy Policy, 112 (2018), pp.349-360.

5.1.2 再エネの技術動向とグリーンイノベーション基金等の政策動向

再生可能エネルギーは、発電コストが急速に低減し、他の電源と比べてもコスト競争力のある電源となってきており、世界的に導入量が増加している。

第 6 次エネルギー基本計画 [1)]では、「再生可能エネルギーについては、主力電源として最優先の原則の下で最大限の導入に取り組む」こととされた。本節では、再生可能エネルギーの内、太陽光・洋上風力のコスト・技術動向及びグリーンイノベーション基金の動向について報告する。

(1) 太陽光発電のコスト・技術動向

① 太陽光発電モジュールのコスト動向

太陽光モジュールの価格は世界の累積導入量に従い低下している。図 5.1.2-1 に世界における太陽電池モジュールの累積出荷量と平均モジュール販売価格を示す。太陽光

発電モジュールのコストは 23.2%（1976~2018 年）の習熟率[2]で低減している [2]。文献 3)によれば、より長期の習熟率は 23.8%（1976~2020 年）と報告されている。

短期（2006~2018 年）の習熟率は 39.8%であるが、世界的なシリコン不足により太陽電池モジュール価格は高騰（2005~2008 年）、その後の市場圧力による価格低下（2016~2017 年）など市場の影響も受けている。

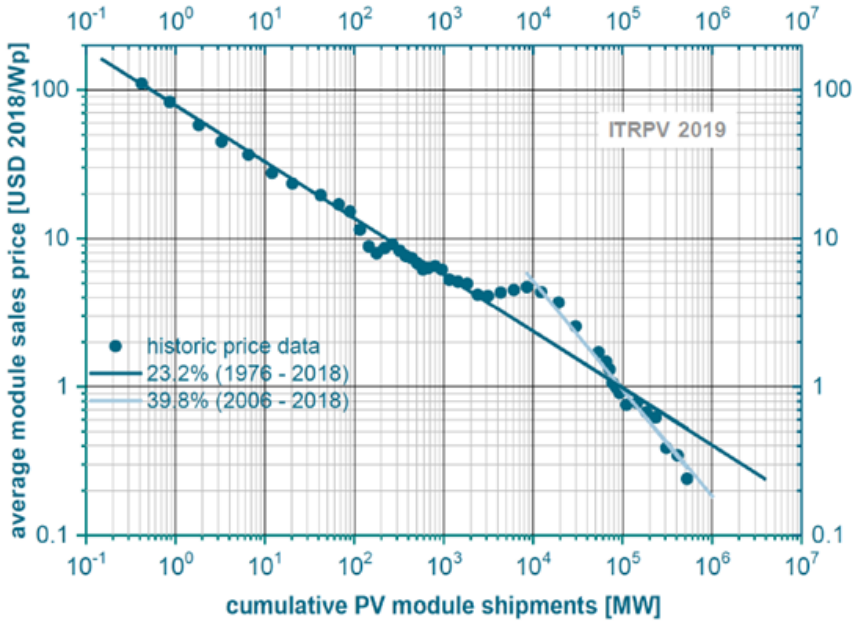


図 5.1.2-1 太陽電池モジュール累積出荷量と平均モジュール販売価格 [2]

なお、太陽光モジュールのワット当たりのコストの低減要因は大きく 2 つに分けられる。一つは a.製造コスト低減であり、もう一つは b.セルの効率向上である [2]。

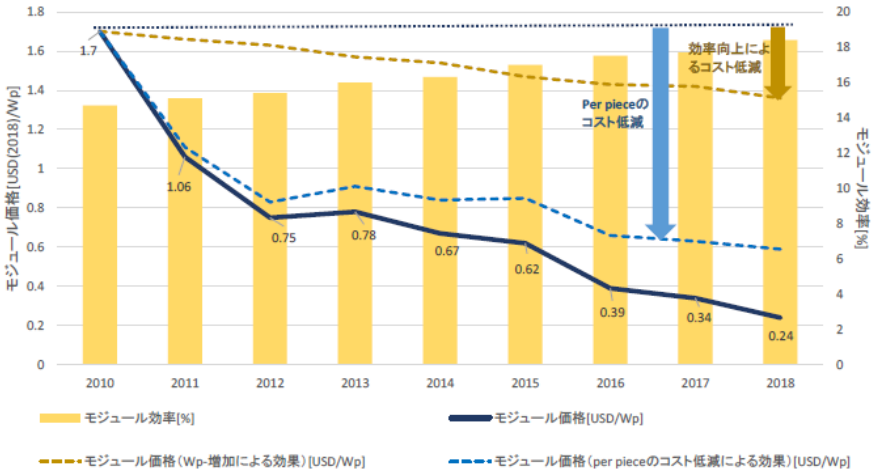
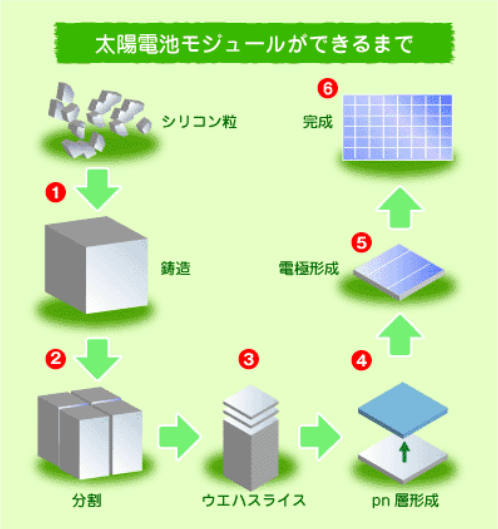


図 5.1.2-2 太陽電池モジュール価格の低減と二つの要因 [2]

[2] 習熟率：累積生産量が 2 倍になる毎に減少するコストの割合

a. 製造コスト低減

図 5.1.2-3 に太陽電池の製造工程を示す。製造コスト削減は、シリコン使用量を削減、ウエハスライス工程における材料ロスの削減、高価な電極材の使用量削減や工作機械の改良／自動化などによる生産効率の向上などがあげられる。



製造工程の改善	・ダイヤモンドワイヤ導入や遊離砥粒加工の改善により、ウエハ切断工程の材料ロスを削減 ・製造工程の自動化や歩留まり向上　など
材料使用量削減	・シリコンの使用量の低減 ・銀など高価な材料の使用量削減(銅ペーストへの変更など)

図 5.1.2-3　太陽電池の製造工程と製造コスト低減 [4),5)]

b. セルの効率向上

現在普及しているシリコン系太陽電池の変換効率の推移を図 5.1.2-4 に示す。結晶シリコン太陽電池(ヘテロ接合バックコンタクト型)では変換効率が 26.7%[6),7)]となるなど、効率が向上している。

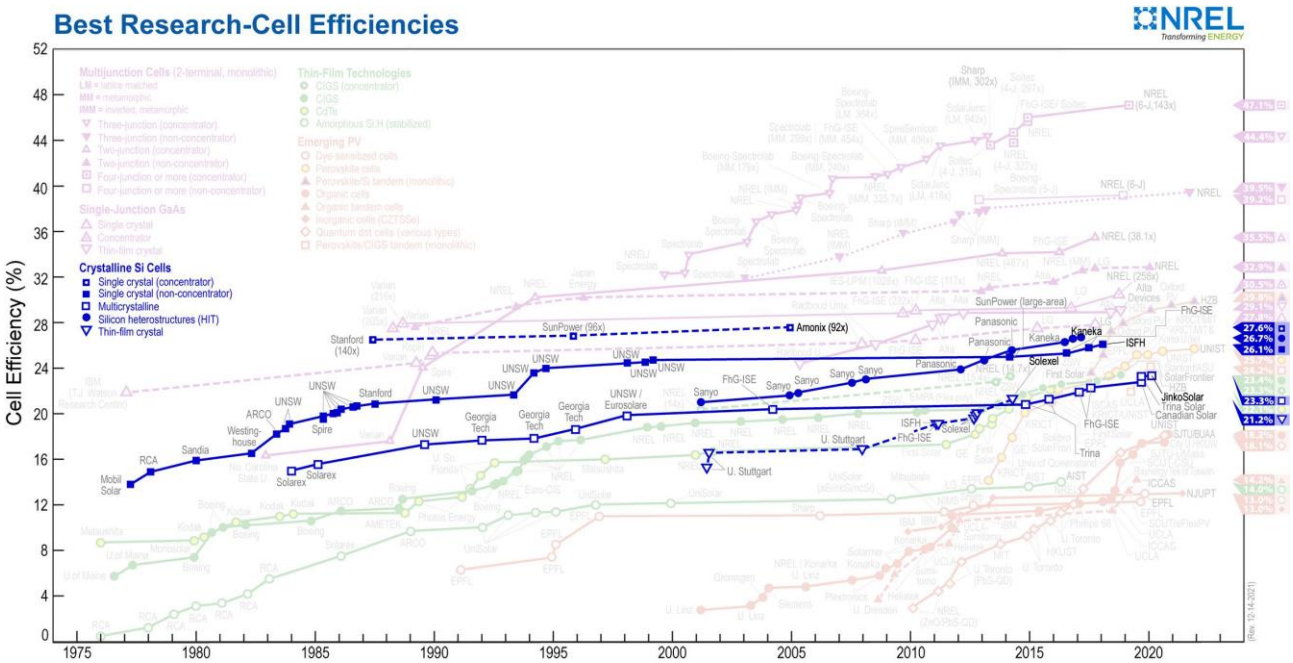
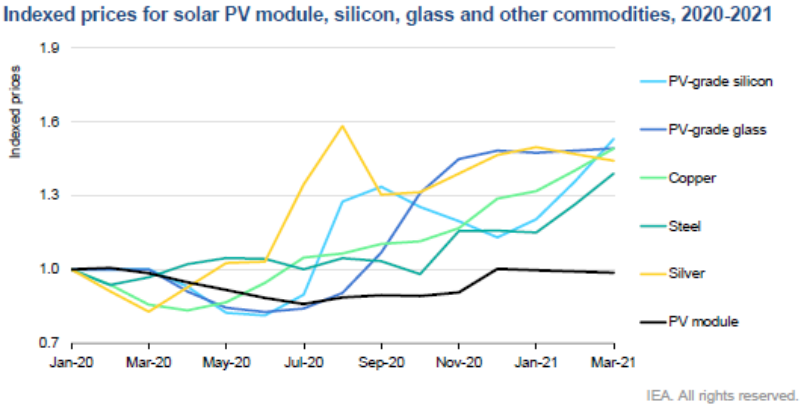


図 5.1.2-4　シリコン系太陽電池の変換効率の推移 [6)]

② 2020 年 7 月~2021 年 4 月における太陽光モジュールコスト上昇

長期では太陽光発電モジュールの価格は低減しているが、足元では価格上昇がみられた(2020.7~2021.4)。これは、中国-新疆ウイグル自治区のシリコン製造工場の火災(2020.7)により、中国の総シリコン生産量がほぼ半減し、シリコン価格が 60%上昇したこと、2020 年下半期には太陽光グレードのガラス価格が 50%上昇したこと、鉄鋼と銅の価格も 40%上昇(2020.9~2021.3)したことなどが原因である [8)]。



Sources: pvxchange (2021), Solar price index, https://www.pvxchange.com/Price-Index; FBX (2021), Freight index, https://fbx.freightos.com/.

図 5.1.2-5 太陽光モジュール、シリコン、ガラスとその他商品の価格 [8)]

③ 太陽光発電の LCOE 推移

世界における大規模太陽光の LCOE は、0.37USD/kWh(2010)から 0.085USD /kWh(2018)へ 77%下落したとされる。これは太陽光モジュールを含む設置コストの低下に加え、設備利用率の向上も寄与ししている。設備利用率の向上は、1）日射条件の良い場所への設置、2）太陽光の追尾システム採用の増加、3）PCS の変換効率改善などによる発電システム全体での電力損失の低減などが要因とされている。

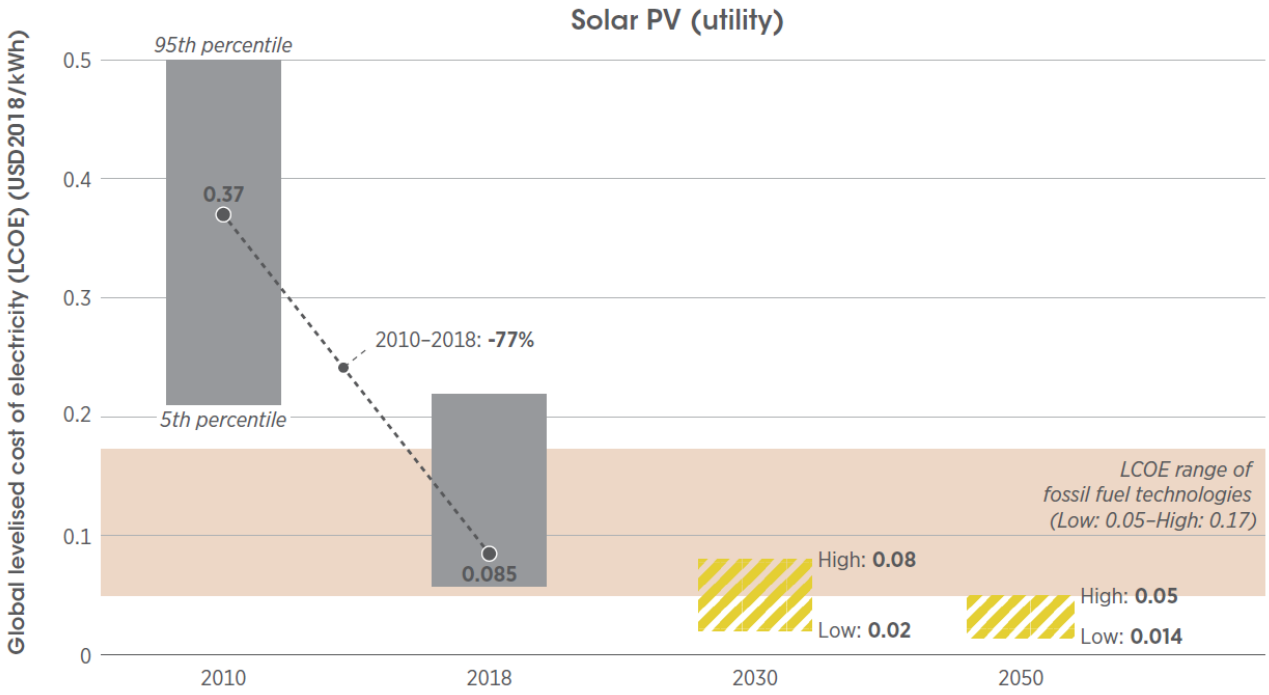


図 5.1.2-6 世界における大規模太陽光の LCOE 推移 [9)]

④ 太陽光発電の種類と技術動向

a. 太陽光発電セル

太陽電池は大きくシリコン系、化合物系、有機系の 3 種類に分類されており、現在普及している太陽電池の 95%以上はシリコン系太陽電池である。シリコン系以外の太陽電池の一部は、既に実用化しているものの、現状ではコストを含む性能面でシリコン系に対して競争力を持つ見込みが立っていない状況である。

一方、ペロブスカイト太陽電池は直近 7 年間で変換効率が 2 倍に向上するなど、飛躍的な成長を遂げており、シリコン系に対応しうる太陽電池として有望視されている [10)]。

太陽電池の種類概要及び特徴について図 5.1.2-7、表 5.1.2-1 に示す。



図 5.1.2-7 太陽電池の種類概要 [10)]

表 5.1.2-1　太陽電池の種類と主な特徴

種類		主な特徴
シリコン系	単結晶	・単結晶のシリコンインゴット（シリコンの塊）をスライスして製造する。 ・高効率（普及しているものでは最も効率が高い）であり、耐久性・信頼性ともに優れる。 ・製造コストが高い。
	多結晶	・小さい結晶が集まった多結晶のシリコンインゴットをスライスして製造する。 ・単結晶型より低効率であるものの比較的安価であり、性能とコストのバランスが良い。 ・現在最も広く普及している。
	薄膜系 （結晶系以外）	・アモルファス（非晶質）シリコンや微結晶シリコン薄膜を基板上に形成して作製するため、大面積での量産が可能である。 ・結晶系に比べて省資源、安価、軽量であるが、発電効率が低い。 ・高温時の出力低下が少ない。
化合物系	CIS 系	・銅(Cu)・インジウム(In)・セレン(Se)等を原料とする薄膜型。 ・レアメタルを使用しているため、資源制約の影響を受ける可能性がある。 ・シリコンを使用しないため、シリコン価格変動の影響を受けにくい。 ・結晶系に比べて省資源であり、かつ量産性に優れる。 ・今後、より一層の高効率化の可能性がある。 ・高温時の出力低下が少ない。
	CdTe 系	・カドミウム(Cd)・テルル(Te)を原料とするため、シリコン価格変動の影響を受けにくい。 ・比較的量産が容易であり、製造コストが低い。 ・有毒のカドミウムを使用することに対する配慮が必要。

	III-V 族系	・Ⅲ族元素（ガリウム等）とⅤ族元素（ヒ素等）からなる化合物半導体を用いた太陽電池。 ・光吸収係数が大きく変換効率が高い。 ・宇宙線などの放射線損傷に対し高い耐久性を持つため、宇宙用太陽電池として有効である。 ・現状では高コストであるため、集光技術と組み合わせて利用されることが多い。
有機系	色素増感	・酸化チタンに吸着した色素が光を吸収して発電する、他の種別とは異なる原理からなる太陽電池。 ・色素の種類を変えることによって色彩の付与が可能。 ・製造が容易であり、材料も安価なことから大幅な低コスト化の可能性があるが、現状では効率・耐久性ともに低い。
	有機薄膜	・有機半導体を用いた太陽電池であり、塗布工程のみで製造可能。 ・極めて容易な製造方法で作製可能なため、大幅な低コスト化の可能性があるが、現状では効率・耐久性ともに低い。
	ペロブスカイト系	・2009 年の原理発見以降、急速に研究開発が進められている。 ・原材料を溶剤に溶解或いは分散したインクを用いて、塗布により形成されるため、製造コストが安価である。 ・基板にフィルムを用いることで、フレキシブル性、軽量性があるため、様々な用途への展開の可能性がある。 ・結晶は容易に溶解するため、湿度の高い条件に対応できず、耐久性に課題がある。 ・薄く塗布するなど透明度をコントロールすることで、農業などとのソーラーシェアリングが可能。

出典）文献 2),9),11)に基づき作成

b. 太陽光発電システム

太陽光発電システムは、設置場所の拡大に資する設置形態や、電力以外の付加価値を備えたシステムが将来の技術トレンドとして挙げられている。

表 5.1.2-2 太陽光発電システム[5)]

フロート PV	・水上へ設置した浮体式太陽光発電システム ・土地（陸地）への制約がある地域（島しょ部など）において、安価な設置場所として需要が拡大
建材一体型 (Bilding-Integrated PV Panels)	・屋根、窓、壁面などの機能を持ち合わせた太陽光パネル ・建材と太陽光パネルの両者を一体型太陽光に置き換えることでトータルコストの低減が可能 (建築費の増加分を発電電力で相殺)
ソーラーツリー	・樹木の形状を模して太陽光パネルを配置した設置形態 ・平置きでの設置と比較して必要スペースが少なく、土地制約のある場所への設置ソリューションとなる
太陽光発電脱塩 (淡水化)	・太陽光発電の電力を利用した、「持続可能な」淡水化プラント ・大規模な熱源を必要としない、膜技術を用いた淡水化手法が対象
ソーラーカーポート	・駐車場の屋根として設置する太陽光発電システム ・EV との親和性があり、また既存の土地を有効に活用して設置が可能
太陽光発電 ・熱システム	・太陽光パネルに冷却システムを併設し、電力と熱の両方を一体化して利用するシステム ・熱利用によりパネルが冷却され、発電量が向上する相乗効果を持つ
ソーラー シェアリング （APV: Agrophotovoltaic）	・農地の上部に太陽光パネルを設置し、発電と農業を同一の土地で実施する形態 ・土地の有効利用や、日よけ効果・水使用量の削減など農業への好影響も有する

c. O&M 技術

スマート管理技術や、発電所ベースにおける発電量改善ソリューション、発電量の低下抑制などが将来の技術トレンドとして注目されている。

表 5.1.2-3　O&M 技術 [5)]

ドローン監視	・ドローンを活用した発電所のインテリジェント監視
発電量予測	・シミュレーションモデルと気象予測技術を活用した、太陽光の高精度な発電量予測技術
発電所スマート監視	・メンテナンス自動化（予防管理、異常時対応）、アラーム・発電量データに基づく管理、過去データに基づく信頼性予測、などの手法で発電所をスマート監視
冷却化	・太陽光発電・熱システムや、セルへの赤外線反射コーティングなどによって太陽光パネルを冷却し、発電量の向上や長寿命化を行う
パネル汚染防止	・ロボット洗浄機やコーティングなどでパネル表面の汚染（土埃、汚れ）を防止して発電量の低下を抑制
雑草対策	・地上設置型の発電所において、防草シートや植物種類の適切な選定を行い、雑草の繁殖を予防・管理 ・太陽光パネルへの雑草の陰による発電量低下を防止

⑤　グリーンイノベーション基金を活用した技術開発

a.　太陽光におけるグリーンイノベーション基金 [12)]

日本は既に国土面積あたりの導入量は主要国で 1 位であり、太陽光発電の適地が不足している点が懸念されている。そこで既存の技術では設置できなかった場所にも導入を進めるため、軽量・柔軟等の特徴を兼ね備え、性能面（変換効率や耐久性等）でも既存電池に匹敵する次世代型太陽電池の開発が不可欠である。前述のペロブスカイト太陽電池は、シリコン系に対抗しうる太陽電池として有望視されており、グリーンイノベーション基金事業「次世代型太陽電池の開発」プロジェクトでは、ペロブスカイト太陽電池の社会実装に向けた支援を行っている。

ｱ）「次世代型太陽電池の開発」プロジェクト概要

既存の太陽光電池では技術的な制約のある壁面等に設置可能な次世代型太陽電池の実用化と新市場創出を図るため、次世代型太陽電池や関連製品の社会実装に向けた実証等に取り組むとしている。（2021.12.28 採択済み）

〔目　標〕

研究開発段階から、製品化、生産体制の確立までをそれぞれ、

①次世代型太陽電池基盤技術開発事業

②次世代型太陽電池実用化事業

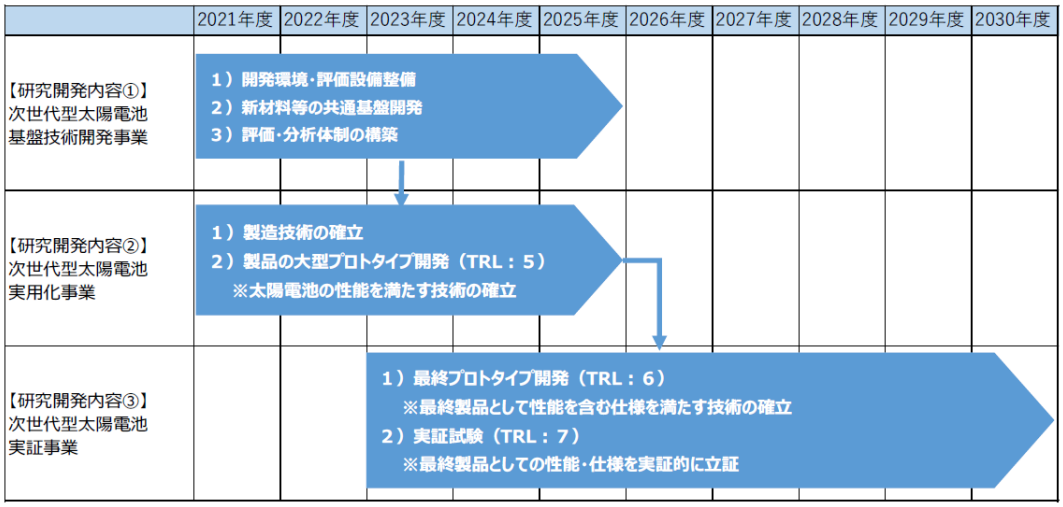
③次世代型太陽電池実証事業

の 3 事業で取り組み、2030 年度までに一定条件下（日射条件等）での発電コスト 14 円/kWh 以下の達成を目標としている。事業概要は表 5.1.2-4 の通り。

表 5.1.2-4 「次世代型太陽電池の開発」プロジェクト概要

①次世代型太陽電池基盤技術開発事業	ペロブスカイト太陽電池の最適な材料組成や変換効率と耐久性を両立する電池の要素技術、分析・評価技術の研究開発。
②次世代型太陽電池実用化事業	上記①の基盤技術を活用しつつ、製品レベルの大型化を実現するための各製造プロセスの個別要素技術の確立。
③次世代型太陽電池実証事業	上記②で確立した各製造プロセスについて、連動した一連の生産プロセスとして高いスループットや高い歩留まりの実現する技術開発を実施。また、フィールド実証を行い、必要に応じて検証結果を踏まえた改良を実施。

表 5.1.2-5 プロジェクトの想定スケジュール（例）



注)表中の TRL 定義及びレベルは、IEA の 11 段階指標に基づく(表 5.1.2-6 参照)。

表 5.1.2-6　IEA における TRL の定義と仮訳 [13)]

TRL1	Initial idea: basic principles have been defined 基本原理・現象の解明
TRL2	Application formulated: concept and application of solution have been formulated　原理・現象の定式化
TRL3	Concept needs validation: solution needs to be prototyped and applied 技術コンセプトの実験的な証明
TRL4	Early prototype: prototype proven in test conditions 試験環境下での初期プロトタイプ実証
TRL5	Large prototype: components proven in conditions to be deployed 想定使用環境下での機能別大型プロトタイプ実証
TRL6	Full prototype at scale: prototype proven at scale in conditions to be deployed　想定使用環境下での統合プロトタイプ実証
TRL7	Pre-commercial demonstration: solution working in expected conditions 商用前実証によるソリューション検証
TRL8	First-of-a-kind commercial: commercial demonstration, full-scale deployment in final form　実機での初期的商用稼働
TRL9	Commercial operation in relevant environment: solution is commercially available, needs evolutionary improvement to stay competitive 実環境下での商用稼働
TRL10	Integration at scale: solution is commercial but needs further integration efforts　他要素との大規模統合
TRL11	Proof of stability: predictable growth 安定性の証明

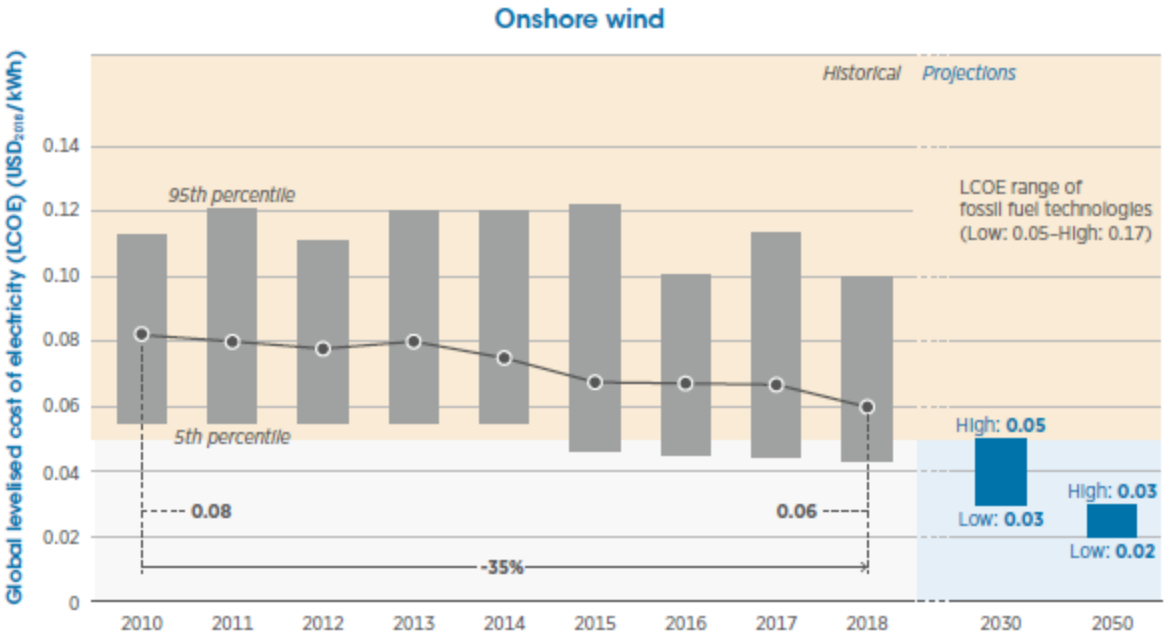
(2) 風力発電のコスト・技術動向

風力発電の建設場所は陸上と洋上に大別される。その適地は年間を通して良好な風況や建設時に風車輸送に伴う大規模な造成工事を要しないなどが条件となる。日本では山岳地に設置されてきたが、適地は減少している。

洋上は陸上よりも年間を通して受ける平均風速が速く、輸送上の制約も陸上より少ないことから、洋上風力発電への取組もなされている。

① 風力発電のコスト動向

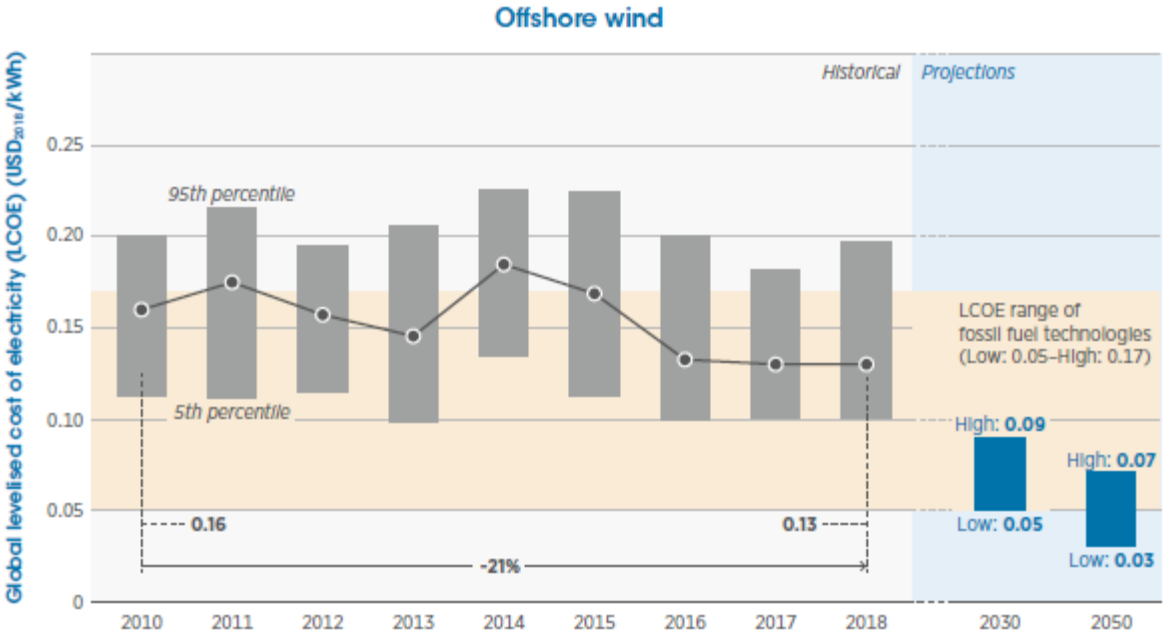
図 5.1.2-8 は世界における LCOE の推移である。文献 14)によると、2018 年にける陸上風力プロジェクトの世界の LCOE は、0.056 米ドル/ kWh であり、2017 年より 13%低く、2010 年より 35%低くなっている（図 5.1.2-8)。 これは風車技術の継続的な改善やサプライチェーンの最適化・効率化などが要因である。なお、Wiser et al[15)]は陸上風力の LCOE の場合、長期的な過去の習熟率は 10~20%と報告している。



Source: Historical data based on IRENA, 2019c and future projections based on IRENA's forthcoming report: Solar and wind cost reduction potential to 2030 in the G20 countries (IRENA, n.d.).

図 5.1.2-8 陸上風力の LCOE 推移 [14)]

一方、洋上風力発電所の主なコスト要素は、風車（タワーを含む）、基礎、海岸への電力線接続、および設置である。風車は最大のコスト要素であり、洋上風力発電の総設置コストの最大 45%を占める。洋上風力発電所のコスト低減は、設備コスト、O&M コスト、およびプロジェクトリスクの低下に伴う資本コストの低下に加えて、設備利用率の向上(平均 38%(2010)→平均 43%(2018))などが要因である。全体として、2018 年の洋上風力発電の世界の LCOE は 0.127 米ドル/ kWh で、2010 年よりも 20%以上低下している [14)] (図 5.1.2-9)。



Source: Historical data based on IRENA (2019c), and future projections based on IRENA's forthcoming report Solar and wind cost reduction potential to 2030 in the G20 countries (IRENA, n.d.)

図 5.1.2-9　洋上風力の LCOE 推移 [14)]

② 風力発電の技術動向

風力発電技術開発は主に風車の大型化、a.風車の大型化、b.O&M の高度化、c.洋上風力をテーマに技術開発が進められている。

a. 風車の大型化

一般に、風は地上から上空に向かうほど強くなるため、風車の高さ（ハブ高さ）を高くしたほうが取得エネルギーは増大し、発電量は増加する。また、風車の取得エネルギーは風車の羽根（ブレード）の回転面の受風面積に比例するため、ブレードを長く（ローター直径を大きく）することでも取得エネルギーは増大する。このため、ハブ高さは 2016 年では 100m を超え、ローター直径も 150m を超える大きさとなってきている。

一方、風速の上昇率は上空に行けば行くほど小さくなることに加え、同じ年平均風速であれば、風車の大型化はコスト上不利[3]になることや、運搬上の制約[4]から陸上風力発電では大型化の傾向は鈍化しつつある。一方、洋上風力については、一基当たりの施工費及び基礎費用が陸上に比べて大きいため、単機当たりの発電量がより重要であることや、輸送上の制約が小さいことなどから大型化の傾向である [16),17)]。

[3] 大型化により、受風面積は直径の 2 乗に比例して増加するのに対し、体積は 3 乗に比例して増大し、より強固な構造が求められるため、受風面積当たりの材料費が増加する

[4] 道路などの耐荷重の問題やタワー直径の制約など(運搬時は輪切り状に切断したタワーを運搬するため、底辺部の直径が道路の高さ制限を受ける)

Wiser,R et al.[15]により予想された 2035 年の陸上及び風力のサイズを図 5.1.2-10 に示す。

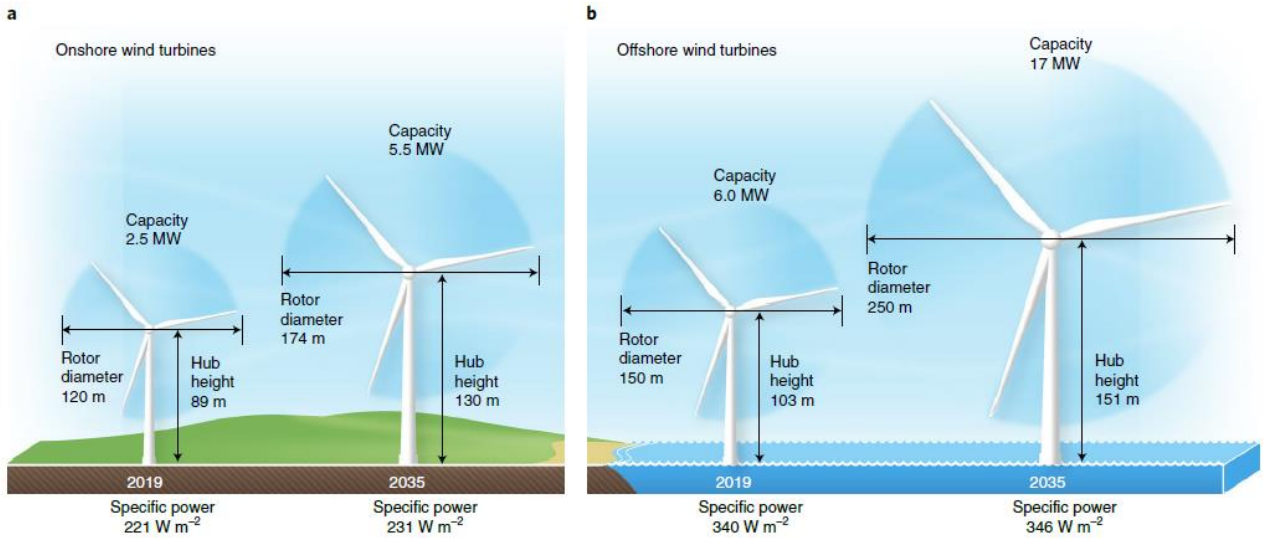


Fig. 6 | Expected turbine size in 2035 for onshore and offshore wind, compared with 2019 medians. a,b, The survey asked respondents to estimate the median turbine size for newly built projects in 2035. Results for the median respondent are presented here, contrasted with median-turbine sizes for projects installed in 2019. For offshore wind, a global 2019 median is depicted[37]. For onshore wind, a US median is depicted given lack of data to estimate a global median[31]. Panels show results for onshore (**a**) and offshore (**b**) wind. For offshore, respondents were asked to predict turbine size considering both fixed-bottom and floating applications.

図 5.1.2-10　2035 年に予想される風車サイズ

b.　O&M の高度化

これまで、風力発電機の遠隔監視装置は導入されてきたが、簡単な点検業務を遠隔で実施できるようなシステムの導入や、各種センサーで取得した振動データなどを基にした故障診断技術などの導入も進められている[16]。

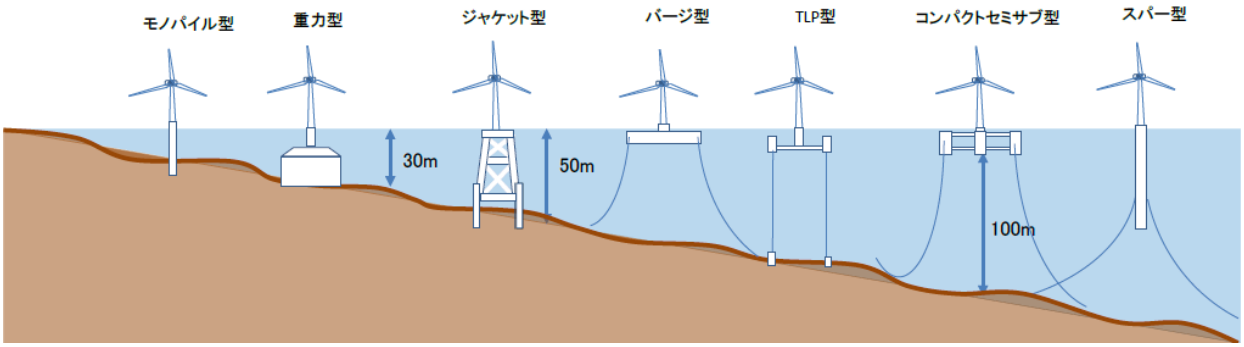
表 5.1.2-7　O&M 技術[5]

高度な運転データ管理	・システムの冗長性確保、遠隔監視や自己診断システムを利用して、オンサイトでの点検・修理の頻度や期間を削減することでコストを低減。
予防的メンテナンス	・自己診断システムやリアルタイム負荷応答などの監視・管理手法と過去の不具合データの蓄積から故障を予兆し、予防的なメンテナンスを実施

c.　洋上風力

陸上風力の適地減少などにより、洋上風力発電の開発が進められている。洋上と陸上の技術的な差異は塩害対策や洋上施工技術などがあるが、陸上よりも高コストになりやすいため、そのコスト低減に向けた取り組みが進められている[16]。

図 5.1.2-11 に代表的な洋上風力の種類を示す。一般的に経済性の観点から、水深が 50m 以下の海域では、着床式洋上風力発電に優位性があり、水深が 50m 以上では、浮体式洋上風力発電が優れているとされる。基礎は海底の状況等により選択される。



	着床型			浮体型			
	ﾓﾉﾊﾟｲﾙ型	重力型	ｼﾞｬｹｯﾄ型	バージ型	TLP 型	ｺﾝﾊﾟｸﾄ ｾﾐｻﾌﾞ型	スパー型
長所	・施工が低コスト ・海底の整備が原則不要	・保守点検作業が少ない	・比較的深い水深に対応可 ・設置時の打設不要	・構造が単純で低コスト化可 ・設置時の施工が容易	・係留による占用面積が小さい ・浮体の上下方向の揺れが抑制される	・港湾施設内で組立が可能 ・浮体動揺が小さい	・構造が単純で製造容易 ・構造上、低コスト化が見込まれる
短所	・地盤の厚みが必要 ・設置時に汚濁が発生	・海底整備が必要 ・施工難易度が高い	・構造が複雑で高コスト ・軟弱地盤に対応不可	・暴風時の浮体動揺が大 安全性等の検証が必要	・係留システムのコストが高い	・構造が複雑で高コスト ・施工効率、コストの観点からコンパクト化が課題	・浅水域では導入不可 ・施工に水深を要し設置難

図 5.1.2-11 洋上風力の種類（着床型と浮体型） [21)]

文献 18)によると、洋上風力発電は世界で 120,000 GW 以上、年間 42 万 TWh 以上のポテンシャルがあると推定されている(ポテンシャルの分布は図 5.1.2-12 参照)。

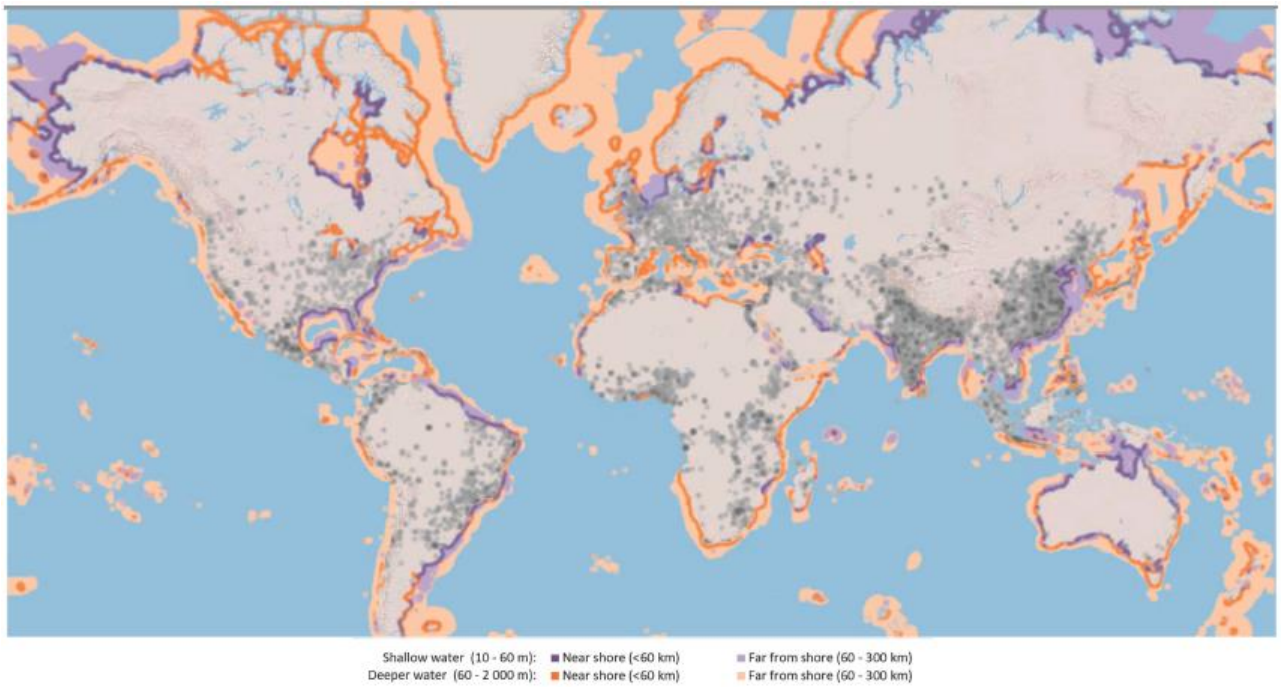


図 5.1.2-12　洋上風力のポテンシャルマップ

なお、洋上風力から陸上への送電は、交流送電と直流送電の 2 種類がある。短距離では交流送電がコスト面で優位であるが、長距離では、電力損失が少なく経済的に優れるとされる高電圧直流（HVDC）送電も採用されている。

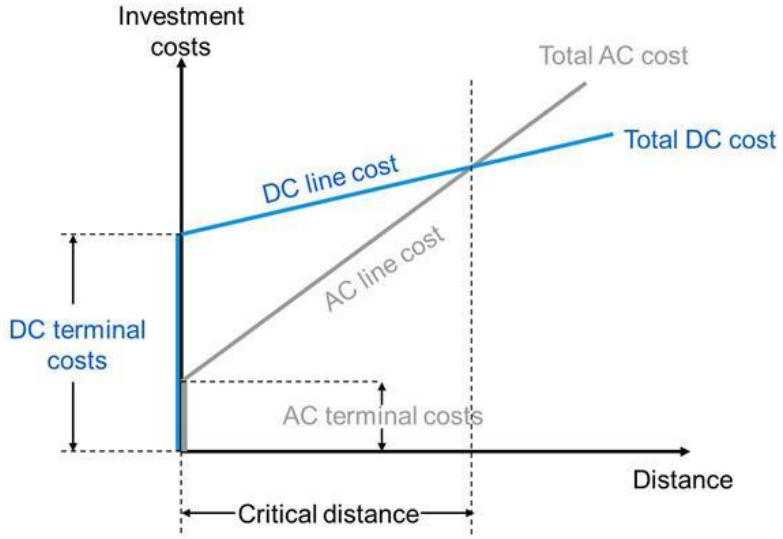


図 5.1.2-13　海岸からの距離と電源線コストの関係（交流と直流）[19)]

表 5.1.2-8　直流送電と交流送電の比較 [20)]

	長　所	短　所
直流送電	･特に長距離の送電は交流に比べ電力損失が小さく、経済性に優れる	･変圧が困難である ･事故時の遮断が難しい
交流送電	･変圧が容易であるため、超高圧の大容量で送電しやすい ･事故時の遮断が容易である	･電圧が高くなると電波障害が発生する場合がある ･特に長距離の送電は直流に比べ電力損失が大きく、経済性に劣る

③　グリーンイノベーション基金を活用した技術開発（洋上風力）[22)]

洋上風力発電は、大量導入やコスト低減が可能であるとともに、経済波及効果が期待されることから、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札とされている。

これまで欧州を中心に洋上風力発電の導入が拡大しているが、2050 年にかけてはアジア市場の急成長が見込まれる。特に、急深な地形が広がる日本・アジアにおいて、低風速・台風・落雷等の気象条件や海象等を踏まえて最適化するニーズが高まっている。

グリーンイノベーション基金事業「洋上風力発電の低コスト化」プロジェクトでは、浮体式を中心とした洋上風力発電の早期のコスト低減を行い、導入拡大を図ることとしている。

a. 「洋上風力発電の低コスト化」プロジェクトの概要と目標

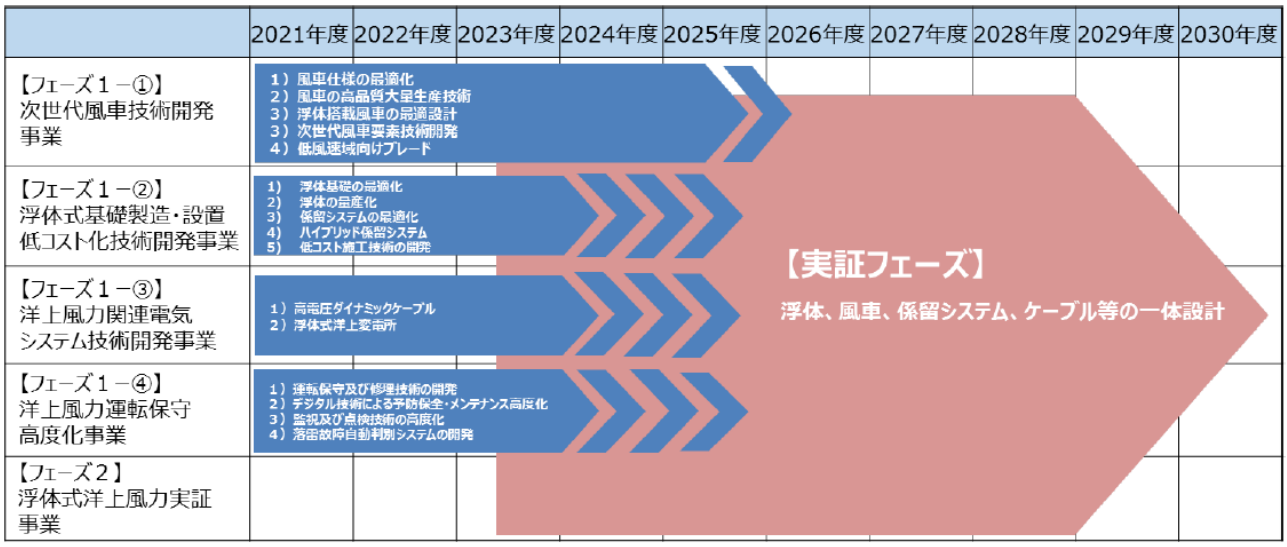
2030 年までに一定条件下で着床式洋上風力発電の発電コストが 8～9 円/kWh となることを見通せる技術及び浮体式洋上風力発電を国際競争力のあるコスト水準で商用化する技術の確立を目指す。

また、これまで取り組んできた実証事業等による知見も踏まえ、浮体式を中心とした洋上風力発電の早期のコスト低減を行い、導入拡大を図る。事業概要は表 5.1.2-9 の通り。(2022.1.21 採択済み)

表 5.1.2-9「洋上風力発電の低コスト化」プロジェクトの概要

フェーズ 1―① 次世代風車技術開発事業	風車仕様の最適化、風車の高品質大量生産技術等に関する技術開発を推進
フェーズ 1―② 浮体式基礎製造・設置低コスト化技術開発事業	浮体基礎や係留システムの最適化、低コスト施工技術の開発等に関する技術開発を推進
フェーズ 1―③ 洋上風力関連電気システム技術開発事業	日本・アジアの特性である台風等の厳しい気象条件やうねり等の海象に適応するため高電圧ダイナミックケーブル、浮体式洋上変電所に関する技術開発を推進
フェーズ 1―④ 洋上風力運転保守高度化事業	コストの 3 割超を占めるメンテナンスの高度化に向けて運転保守及び修理技術、監視及び点検技術の高度化等に関する技術開発を推進
フェーズ 2 浮体式洋上風力実証事業	発電事業者を巻き込んでプロジェクト全体の発電コスト低減にコミットする形で、システム全体として関連技術を統合した実証

表 5.1.2-10 プロジェクトの想定スケジュール（例）



参考文献（第 5.1.2 節に関するもの）

1) 経済産業省：第 6 次エネルギー基本計画(2021)
2) NEDO: 太陽光発電開発戦略 2020 (2020)
3) VDMA: International Technology Road map for Photovoltaic (ITRPV) 12th Edition (2021)
4) 太陽光生活ドットコム HP： https://taiyoseikatsu.com/words/tyg000014.html (2021.5.27 アクセス))
5) NEDO：戦略策定調査事業 再生可能エネルギー導入可能性に関する調査 成果報告書（2021）
6) NREL: Best Research-Cell Efficiency Chart, https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/cell-pv-eff-crysi-rev211214.pdf (2022.2.14 閲覧)

7) 株式会社カネカ：2020 年 7 月 31 日ニュースリリース　カネカ高性能太陽電池　トヨタの低速自動運転 EV「e-Palette」に採用, https://www.kaneka.co.jp/topics/news/2020/nr2007311.html (2022.2.14 閲覧)
8) IEA: Renewable Energy Market Update Outlook for 2021 and 2022(2021)
9) IRENA：Future of Solar photovoltaic (2019)
10) 経済産業省：第 2 回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 グリーン電力の普及促進分野ワーキンググループ 資料 3　(2021)
11) NEDO: 太陽光発電分野の技術戦略策定に向けて, TSC Forsight, Vol11(2016)
12) 経済産業省：グリーンイノベーション基金事業 「次世代型太陽電池の開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(2021)
13) 経済産業省：第 5 回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会　資料 2 (2021)
14) IRENA: Future of wind (2019)
15) Wiser,R., Rand,J., Seel,J., Beiter,P., Baker,E., Lantz,E., Gilman,P.: Expert elicitation survey predicts 37% to 49% declines in wind energy costs by 2050, Nature Energy, VOL6, 555–565(2021)
16) NEDO: 風力発電分野の技術戦略策定に向けて, TSC Forsight, Vol27(2018)
17) NEDO：再生可能エネルギー白書　第二版（2014）
18) IEA: Offshore Wind Outlook 2019 (2019)
19) Strathclyde University HP：
http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/16-17/WindAndTidal/gridConnection.html　(2022.2.16 閲覧)
20) 経済産業省：第 1 回 長距離海底直流送電の整備に向けた検討会　資料 4　(2021)
21) 経済産業省：第 2 回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 グリーン電力の普及促進分野ワーキンググループ 資料 5　(2021)
22) 経済産業省：グリーンイノベーション基金事業 「洋上風力発電の低コスト化」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(2021)

5.1.3 二酸化炭素除去（CDR）の技術動向

二酸化炭素除去（Carbon Dioxide Removal: CDR）などの負の排出技術は、1.5℃目標達成に向けた重要な要素であり、残余の二酸化炭素排出を相殺し、オーバーシュート分を補う。本節では、様々な文献のレビューを通して CDR を俯瞰し、シナジー（コベネフィット）とトレードオフ、リスクについて示すとともに、CDR 技術のポテンシャルとコストについても示す。緩和ポテンシャルが最も大きいと評価されている技術は海洋アルカリ化(1–100 $GtCO_2$/year) (技術成熟度 TRL 1–2)、次いで DACCS (5–40 $GtCO_2$/year) (TRL 6)、BECCS (0.5–11 $GtCO_2$/year) (TRL 5–6)の 3 つであった。CDR 技術のうち最もコストが低いと評価されているのは土壌炭素隔離と風化促進であり、コスト範囲はそれぞれ 45–100 USD/tCO_2 と 100–300 USD/tCO_2 であった。次にコストが低いのは海洋アルカリ化と DACCS であり、それぞれ 40–260 USD/tCO_2 と 100–300 USD/tCO_2 であった。一方、いずれの技術についても、ポテンシャル、コストともに大きな不確実性があり、技術開発普及を通してポテンシャル、コストの更なる見極めをしていく必要がある。技術成熟度とポテンシャルの点から DACCS は有望であり、

DACCS 技術のコストは BECCS と比較すると近い将来大幅に低減することが見込まれる。

Executive Summary

Negative emissions technologies such as Carbon Dioxide Removals (CDRs) are key components of pathways towards 1.5°C global warming levels, offsetting residual emissions and compensating for overshoot. This section provides global overview on the CDR through the review of various literature along with its synergies (co-benefits), trade-offs and risk. In addition to that, the cost and potentials of CDR technologies are also provided. It is estimated that the three highest mitigation potentials are ocean alkalinity enhancement (1–100 $GtCO_2$/year) (Technology Readiness Level: TRL 1–2) followed by DACCS (5–40 $GtCO_2$/year) (TRL 6), and BECCS (0.5–11 $GtCO_2$/year) (TRL 5–6). The estimated lowest costs of the CDR are soil carbon sequestration and enhanced weathering which range 45–100 USD/tCO_2 and 100–300 USD/tCO_2 respectively. The estimated second lowest costs are ocean alkalinity enhancement and DACCS which range 40–260 USD/tCO_2 and 100–300 USD/tCO_2 respectively. Meanwhile, each technology has great uncertainties in its potential and cost, and therefore it is necessary to conduct further assessment of their potentials and costs over the technology development and deployment processes. DACCS is the prospective technology considering the technology maturity and potential, and the cost of DACCS technology is expected to rapidly decline in the near future compared to BECCS.

(1) Introduction

Alongside emission reduction (ER), carbon dioxide removal (CDR) is a key component of pathways to achieve net-zero emissions and the goals of the Paris Agreement, and essential if future generations aim for net-negative emissions. Net zero is now targeted by many countries, cities, and businesses. The role of CDR in strategies is perceived to carry risks to successful mitigation, however, and separating out targets for ER and CDR has been proposed to reduce these risks (Smith, S.M[1)]). CDR methods refer to a set of techniques for removing CO_2 from the atmosphere (IPCC[2)]).

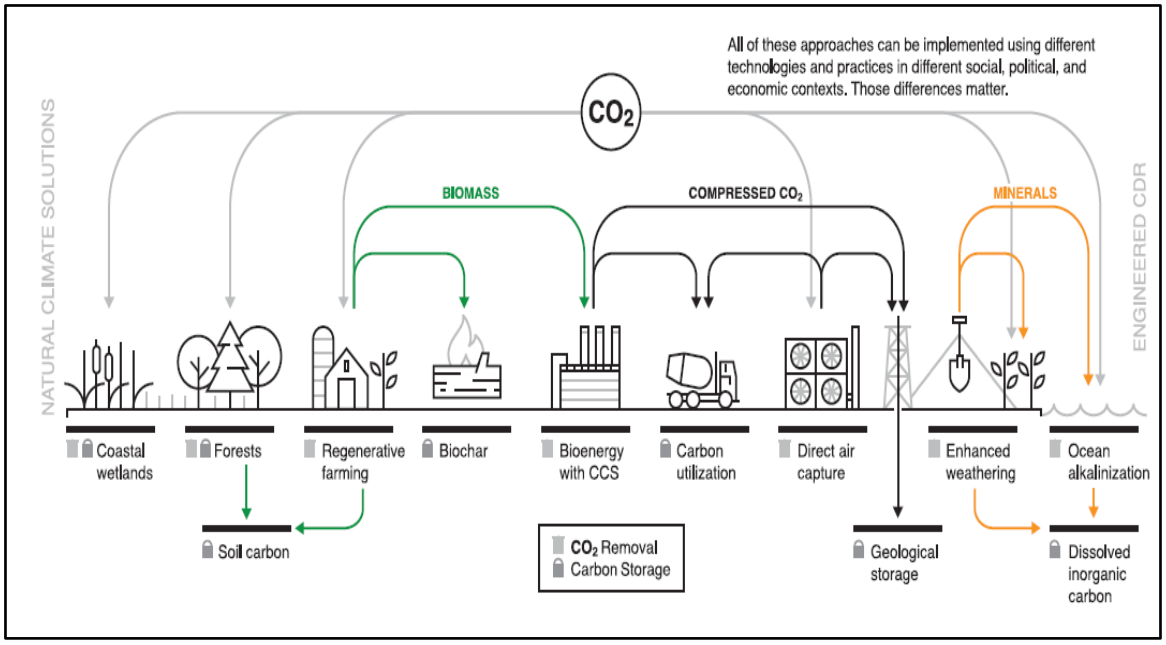


Figure 5.1.3-1. The CDR Technology pathway (Morrow et al.[5]).

Most 1.5°C and 2°C pathways are heavily reliant on CDR at a speculatively large scale before mid-century. There are several knowledge gaps associated which such technologies. There is uncertainty in the future deployment of CCS given the limited pace of current deployment, the evolution of CCS technology that would be associated with deployment, and the current lack of incentives for large-scale implementation of CCS. Evaluating the potential from BECCS is problematic due to large uncertainties in future land projections due to differences in modelling approaches in current land-use models, and these differences are at least as great as the differences attributed to climate scenario variations. There is substantial uncertainty about the adverse effects of largescale CDR deployment on the environment and societal sustainable development goals. It is not fully understood how land-use and land-management choices for large-scale BECCS will affect various ecosystem services and sustainable development, and how they further translate into indirect impacts on climate, including GHG emissions other than CO_2 (IPCC[3]). In the context of 1.5°C-consistent pathways CDR serve to offset residual emissions and, in most cases, achieve net negative emissions to return to 1.5°C from an overshoot (IPCC[4]).

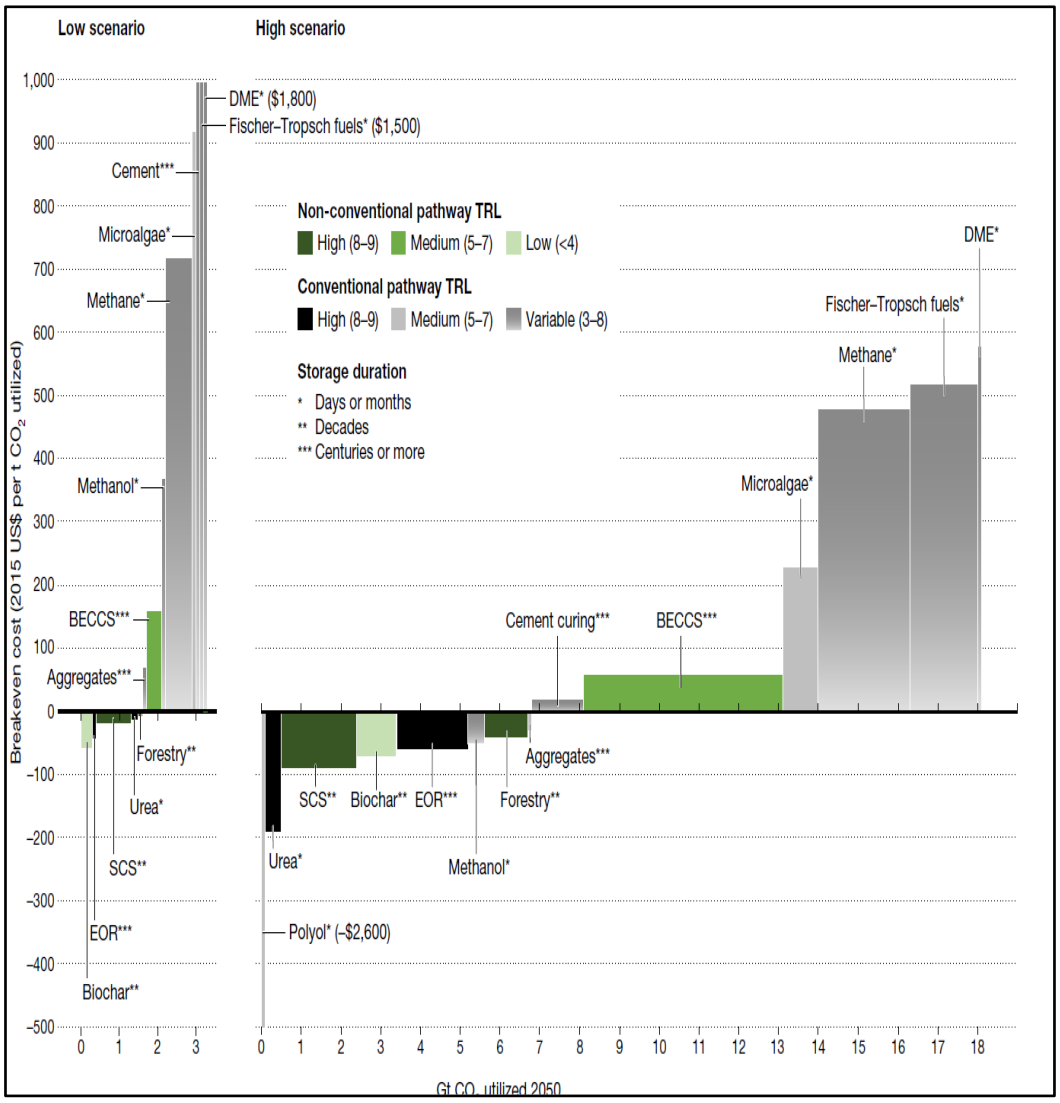


Figure 5.1.3-2. The CDR Technology cost (Hepburn et al.[6]).

All pathways that limit global warming to 1.5°C with limited or no overshoot project the use of carbon dioxide removal (CDR) on the order of 100–1000 $GtCO_2$ over the 21st century. CDR would be used to compensate for residual emissions and, in most cases, achieve net negative emissions to return global warming to 1.5°C following a peak. CDR deployment of several hundreds of $GtCO_2$ is subject to multiple feasibility and sustainability constraints (high confidence). Significant near-term emissions reductions and measures to lower energy and land demand can limit CDR deployment to a few hundred $GtCO_2$ without reliance on bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) (IPCC[2]).

The CDR technology pathways has been showed in Figure 5.1.3-1**.** It was shown that there are three pathways: natural based solutions (wetland and coastal blue carbon, afforestation/reforestation, biochar, soil carbon sequestration), combined based bioenergy carbon capture and storage (BECCS) and technological based (direct air carbon capture and storage (DACCS), enhanced weathering (EW), ocean alkalinity (OA), carbon capture and utilization (CCU)). All pathways that limit global warming to 1.5°C with limited or no

overshoot project the use of carbon dioxide removal (CDR) on the order of 100–1000 $GtCO_2$ over the 21st century. CDR would be used to compensate for residual emissions and, in most cases, achieve net negative emissions to return global warming to 1.5°C following a peak. CDR deployment of several hundreds of $GtCO_2$ is subject to multiple feasibility and sustainability constraints (high confidence). Significant near-term emissions reductions and measures to lower energy and land demand can limit CDR deployment to a few hundred $GtCO_2$ without reliance on bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) (IPCC[2)]).

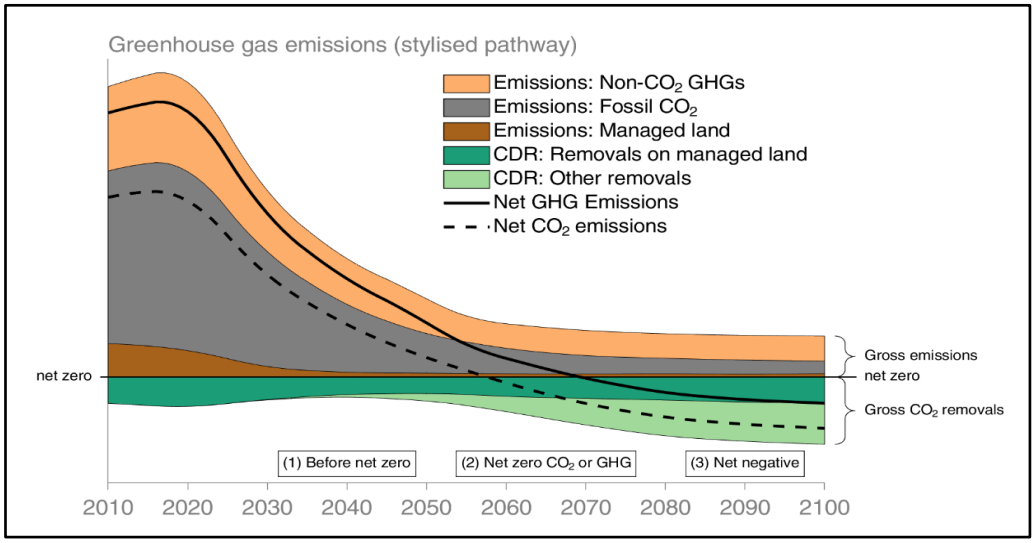


Figure 5.1.3-3. Roles of CDR in global or national mitigation strategies (IPCC [8)]).

The breakeven cost is the incentive, measured in 2015 US$ per ton of CO_2, that is required to make the pathway economic. Negative breakeven costs indicate that the pathway is already profitable, without any incentive to utilize CO_2 (such as a tax on CO_2 emissions in cases in which utilization avoids emissions, or a subsidy for CO_2 removed from the atmosphere in the case in which utilization removes CO_2). Utilization estimates are based on 2050 projections. Many technologies are in the very early stages of development, and cost optimization via research and development could substantially change these estimates. Color shadings reflect the Technological Readiness Level (TRL) of the pathways, which again vary markedly within each pathway. CDR measures are no different than other mitigation measures in that they may interact with societal priorities other than climate.

CDR measures that require conversion of agricultural lands to either forest or bioenergy production such as afforestation and BECCS could create competition for land to grow crops resulting in higher crop prices, thus creating tradeoffs with societal priorities such as food security and hunger eradication. In addition, expansion of BECCS could result in increased water demand through irrigation resulting in tradeoffs with societal priorities related to water scarcity. Some of these synergies and tradeoffs could also extend beyond domestic boundaries to have international consequences. An example is the food price implications of CDR measures such as BECCS and afforestation that could very well extend

beyond domestic boundaries due to the globally traded character of most food crops (Iyer et al.[7]). Figure 5.1.3-3 shows that CDR technologies based on managed land will be stable from 2010 untill 2100 howver it tends to be stagnant. On the other hand, the increment will be from CDR technologies based on non land such as DACCS, etc. The objective of the study is to provide gloval overview on the CDR from technology perspective based on the latest scientific literatures. In addition to that the cost and potentials of CDR technologies are also provided.

(2) CDR Technology

This section will describe CDR technologies potentials along with the latest development. The taxonomy of CDR technology method along implementation option, earth system, storage medium under different removal process and timescale of storage was depicted in Figure 5.1.3-4. Carbon capture and utilization is not considered in CDR since the CCU is not removal the CO_2 but recycle the CO_2 that eventually will release to the atmosphere.

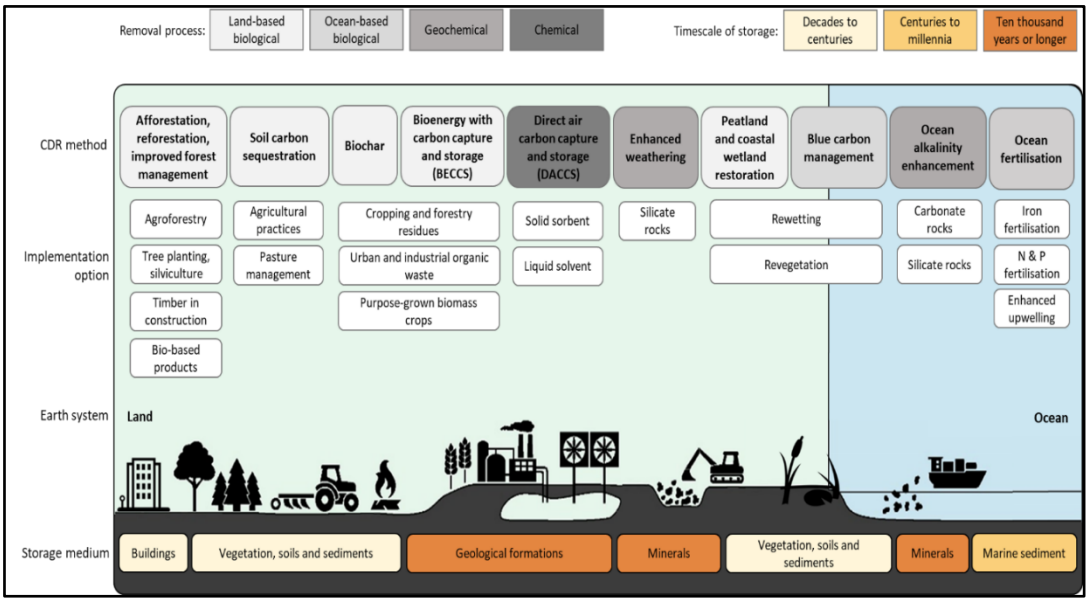


Figure 5.1.3-4. Taxonomy of CDR (IPCC [8]).

① Afforestation, reforestation, and improved forest management

Afforestation refers to the planting of trees on placed which not yet been forested recently, while reforestations are defined as restocking trees or forests on recently depeleted land (Terlouw et al.[9]). This method was utilized the CDR through forest management i.e.: agroforestry, tree planting, timber construction and biobased products. Countries with abundant forest resources such as Brazil, Indonesia and Congo have a lot of potential to develop this CDR method. The timber and biobased products could be stored in buildings, living vegetation, as as well in soil and sediments. There is positive co benefits impact such as enhanced employment and local livelihoods, improved biodiversity, improved renewable wood products provision, soil carbon and nutrient cycling. Possibly less pressure on primary

forest. The trade offs that could be occurred is inappropriate deployment at large scale can lead to competition for land with biodiversity conservation and food production. The risk of this CDR is the reversal through forest fire, disease, and pests. Also, there is possibility of reduced catchment water yield and lower groundwater level if the tree species and biome are inappropriate (IPCC [8)]). (TRL 8– 9).

② Soil carbon sequestration

The soil carbon sequestration refers to removal of CO_2 from the atmosphere due to increase carbon sequestration in soil organic matter, arising from improved management practices (e.g.: due to land use change/ LUC) (Terlouw et al.[9)]). The co-benefits of SCS are improved soil quality, resilience, and agricultural productivity. The trade- offs are the cost and yield of agriculture production might be imbalance. In SCS, there is risk of increased nitrous oxide emissions due to higher levels of organic nitrogen in the soil; risk of reversal of carbon sequestration (IPCC [8)]). (TRL 8– 9).

③ Biochar

Biochar can be defined as a carbon rich material derived from the thermal degradation of biomass, under liited oxygen conditions. Within a biochar system, CO_2 is removed from the atmosphere due to sequestration of carbon by photosynthesis microorganism. This harvested biomass is subsequently used to produced biochar, derived from a thermochemical conversion process, such as slow pyrolysis, fast pyrolysis, gasification, or torrefaction (Terlouw et al.[9)]). The co benefits of biochar is increased crop yields and reduced non-CO_2 emissions from soil, and resilience to drought. The trade offs are the environmental impacts associated particulate matter as well as competition of biochar for other biomass utilizations. The risk from biochar is particulate and GHG emissions from production and threatened biodiversity and carbon stock loss from unsustainable biomass harvest (IPCC [8)]). (TRL 6–7).

④ Bioenergy with Carbon capture and Storage (BECCS)

BECCS is the capture and permenent squestration of biogenic CO_2 during an energy conversion process from biomass (e.g.: to produce energy within a power plant). BECCS can result in net negative GHG emissions when the amount of CO_2 extratected from the atmosphere (and the permanent storage) offsets GHG emissons from the life cycle of BECCS systems (Terlouw et al.[9)]). This method also brings the synergies such as reduction of air pollutants; fuel security, optimal use of residues, additional income, health benefits and if implemented well can enhance biodiversity, soil health and land carbon. The tradeoff is competition for land with biodiversity conservation and food production. This is caused the risk of competition for land and water resources, to grow biomass feedstock. Biodiversity and carbon stock loss if from unsustainable biomass harvest (IPCC [8)]). (TRL 5–6).

⑤ DACCS

DACCS can be described as the capturing CO_2 from ambient air, due to the use of sorbent materials, and the subsequent storage of captured CO_2 in a permanent way (Terlouw et al.[9]).

Direct air capture (DAC) is a chemical process to capture ambient CO_2 from the atmosphere. Captured CO_2 can be stored underground (direct air capture carbon and storage, DACCS) or utilised in products (direct air capture carbon and utilisation, DACCU). DACCS shares with conventional CCS the transport and storage components but is distinct in its capture part. Because CO_2 is a well-mixed GHG, DACCS can be sited relatively flexibly, though its locational flexibility is constrained by the availability of low-carbon energy and storage sites. Capturing the CO_2 involves three basic steps: a) contacting the air, b) capturing on a liquid or solid sorbent or a liquid solvent, c) regeneration of the solvent or the sorbent (with heat, moisture and/or pressure). After capture, the CO_2 stream can be stored underground or utilised. Another key consideration is the net carbon CO_2 removal of DACCS over its life cycle demonstrated that the life-cycle net emissions of DACCS systems can be negative, even for existing supply chains and some current energy mixes. It was found that the GHG-intensity of energy sources is a key factor. DAC options can be differentiated by the specific chemical processes used to capture ambient CO_2 from the air and recover it from the sorbent. The main categories are a) liquid solvents with high-temperature regeneration, b) solid sorbents with low temperature regeneration and c) regenerating by moisturising of solid sorbents. Other approaches such as electro-swing have been proposed but are less developed. Compared to other CDR methods, the primary barrier to upscaling DAC is its high cost and large energy requirement which can be reduced through innovation. It has therefore attracted entrepreneurs and private investments (IPCC [8], Dietz and Bardouw [10], Madhu et al. [11]). (TRL 6).

⑥ Enhanced weathering

Enhanced weathering is a practice to stimulate the process of rock decomposition, while simultaneously increasing cation release to produce alkalinity and geogenic nutrients to enhance atmospheric CO_2 capture. In enhanced weathering systems, CO_2 is removed from the atmosphere due to additional CO_2 update from the accelerated weathering of rocks. The extracted CO_2 can be considered as permanently stored in deep ocean layers (Terlouw et al.[9]). The co-benefit of this method is enhanced plant growth, reduced erosion, enhanced soil carbon, reduced pH, soil water retention. Trade-off might occurred from potentially increased emissions from water supply and energy generation. The risk is from the mining impacts; air quality impacts of rock dust when spreading on soil (IPCC [8]). (TRL 3-4).

⑦ Peatland and coastal wetland restoration

Protecting and restoring soil organic matter delivers many benefits for people and provides a comprehensive solution for climate change such as tropical peatland. Peatland is

the moisture soil which contained high organic carbon element. Peatlands are critical for climate change and the global carbon cycle (Jupesta et al. [12]). There are synergies such as enhanced employment and local livelihoods, increased productivity of fisheries, improved biodiversity, soil carbon and nutrient cycling. The trade offs are the competition for land for food production on some peatlands used for food production. The risk of peatland restoration is that high intitail cost for restore hydrological cycle, increase in methane emissions, and displace and damage local food production/supply (IPCC [8]). (TRL 8– 9).

⑧ Blue carbon management

The term “blue carbon” was used originally to refer to biological carbon sequestration in all marine ecosystems, but it is increasingly applied to CDR associated with rooted vegetation in the coastal zone, such as tidal marshes, mangroves, and seagrasses. Potential for carbon sequestration in other coastal and non-coastal ecosystems, such as macroalgae (e.g., kelp), is debated. In this report, blue carbon refers to CDR through coastal blue carbon management (IPCC [8]). (TRL 2-3).

⑨ Ocean alkalinity enhancement

CDR through ‘ocean alkalinity enhancement’ or ‘artificial ocean alkalinisation’ can be based on 1) the dissolution of natural alkaline minerals that are added directly to the ocean or coastal environments; 2) the dissolution of such minerals upstream from the ocean (e.g., ‘enhanced weathering’); 3) the addition of synthetic alkaline materials directly to the ocean or upstream; and 4) electrochemical processing of seawater. In the case of 2), minerals are dissolved on land and the dissolution products are conveyed to the ocean through runoff and river flow. These processes result in chemical transformation of CO_2 and sequestration as bicarbonate and carbonate ions (HCO_3^-, CO_3^{2-}) in the ocean. Imbalances between the input and removal fluxes of alkalinity can result in changes in global oceanic alkalinity and therefore the capacity of the ocean to store C. Such alkalinity-induced changes in partitioning of C between atmosphere and ocean are thought to play an important role in controlling climate change on timescales of 1000 years and longer. The residence time of dissolved inorganic carbon in the deep ocean is around 100,000 years. However, residence time may decrease if alkalinity is reduced by a net increase in carbonate minerals by either increased formation (precipitation) or reduced dissolution of carbonate. The alkalinity of seawater could potentially also be increased by electrochemical methods, either directly by reactions at the cathode that increase the alkalinity of the surrounding solution that can be discharged into the ocean, or by forcing the precipitation of solid alkaline materials (e.g., hydroxide minerals) that can then be added to the ocean (IPCC [8]). (TRL 1–2).

⑩ Ocean fertilization

Ocean fertilization (OF) can be described as geoengineering practice to enhance biological processes in oceans to stimulate the uptake of atmospheric CO_2. The goal of ocean

fertilization is to permanently store significant ampunts of atmospheric CO_2 in deep oceanic layers. OF can be reached by mixing and supplying limiting nutrients, such as Phosphorous (P), nitrogen (N), and iron (Fe), to enhance growth rates of marine species (e.g.: algae) (Terlouw et al.[9]). The co-benefits of this method is increased productivity and fisheries, reduced upper ocean acidification. The trade-off is the possibility of subsurface ocean acidification, deoxygenation; altered meridional supply of macro-nutrients as they are utilized in the iron-fertilized region and become unavailable for transport to, and utilization in other regions, fundamental alteration of food webs, biodiversity. There is risk that nutrient redistribution, restructuring of the ecosystem, enhanced oxygen consumption and acidification in deeper waters, potential for decadal-to-millennial-scale return to the atmosphere of nearly all the extra carbon removed, risks of unintended side effects. (TRL 1-2).

(3) CDR Cost and Potentials

Synergies and tradeoffs of CDR with other societal priorities – both domestical and international – highlight the need for designers of net-zero strategies to incorporate governance mechanisms and account for local and global contexts to limit trade-offs and maximize synergies from CDR deployment. Given the crucial, zero-sum character of mitigation and CDR, and the resulting potential necessity of CDR, consideration of synergies and tradeoffs needs to extend beyond mitigation – assessment of synergies and tradeoffs of CDR will be critically important for assessing net-zero strategies and ultimately achieving net-zero CO_2 emissions (Iyer et al.,[7]). A study has bean conducted on the peak potential of selected CDR technologies: DACCS, BECCS, AR, enhance weathering, soil carbon sequestration and biochar (Rueda et al. [13]). Among all CDR technologies, the highest potential is DACCS (0.7-7 $GtCO_2$/year) followed by enhance weathering (2.5-5 $GtCO_2$/year), soil carbon sequestration (2-5 $GtCO_2$/year), BECCS (0.5-5 $GtCO_2$/year), Afforestation/Reforestation (0.5-3.6 $GtCO_2$/year) and biochar (0.5-2 $GtCO_2$/year). However, this study is not comprehensive enough since not include other CDR methods: peatland restoration, blue carbon, ocean alkalinity, and ocean fertilization.

Table 5.1.3-1 depicts the cost and potential of all CDR technology. It was shown that three highest mitigation potential are ocean alkalinity enhancement (1–100 $GtCO_2$/year) (TRL 1–2) followed by DACCS (5–40 $GtCO_2$/year) (TRL 6), and BECCS (0.5–11 $GtCO_2$/year) (TRL 5–6). The lowest cost of the CDR are soil carbon sequestration and enhanced weathering which ranges 45–100 USD/tCO_2 and 50–200 USD/tCO_2 respectively. The second lowest cost are ocean alkalinity enhancement and DACCS which ranges 40–260 USD/tCO_2 and 100–300 USD/tCO_2 respectively. The third lowest cost are BECCS and ocean fertilization with cost ranges between 15–400 USD/tCO_2 and 50–500 USD/tCO_2 respectively. Hence, among all CDR options the DACCS is the best option considers the technology maturity and potential. According to the integrated assessment modeling (IAM), DACCS will be able to dramatically reduce emission reduction costs and alleviate dependence on BECCS

(Akimoto et al. [14]). The cost of DACCS technology is expected to be decline in the future thanks to intensive R&D from public, nonprofit institution such as Climeworks (Dietz and Bardouw[10]) as well as philantrophists such as Amazon, Tesla, Microsoft (Joppa et al. [15]), etc.

Table 5.1.3-1.The cost and potential of CDR (IPCC [8]).

CDR option	Status (TRL)	Cost (USD tCO_2^{-1})	Mitigation Potential ($GtCO_2\ yr^{-1}$)
DACCS	6	100–300 (84–386)	5–40
Enhanced weathering	3–4	50–200 (24–578)	2–4 (<1–95)
Ocean alkalinity enhancement	1–2	40–260	1–100
Ocean fertilisation	1–2	50–500	1–3
Blue carbon management in coastal wetlands	2–3	Insufficient data, estimates range from ~ 100 to ~ 10000	<1
BECCS	5–6	15–400	0.5–11
Afforestation/Reforestation	8–9	0–240	0.5–10
Biochar	6–7	10–345	0.3–6.6
Soil Carbon Sequestration in croplands and grasslands	8–9	45–100	0.6–9.3
Peatland and coastal wetland restoration	8–9	Insufficient data	0.5–2.1
Agroforestry	8–9	Insufficient data	0.3–9.4
Improved Forest management	8–9	Insufficient data	0.1–2.1

(4) Conclusions

The study on CDR from technology perspective along with its synergies (co-benefits), trade-offs and riskhas been done. The cost and potentials of CDR technologies were also provided. There are ten CDR methods has been explained in this study. Among those methods, several CDR are highly stable that could be stored till 10,000 years period such as DACCS, BECCS, enhanced weathering and ocean alkalinity enhancemenmt. The other CDRs, which is land based (forest, biochar, soil carbon sequestration, peatland, blue carbon) tend to be unstable and reversal which could be lasting decades to millenia. It was shown that three highest mitigation potential are ocean alkalinity enhancement (1–100 $GtCO_2$/year) (TRL 1–2) followed by DACCS (5–40 $GtCO_2$/year) (TRL 6), and BECCS (0.5–11 $GtCO_2$/year)

(TRL 5–6). The lowest cost of the CDR are soil carbon sequestration and enhanced weathering which ranges 45–100 USD/tCO_2 and 50–200 USD/tCO_2 respectively. The second lowest cost are ocean alkalinity enhancement and DACCS which ranges 40–260 USD/tCO_2 and 100–300 USD/tCO_2 respectively. The third lowest cost are BECCS and ocean fertilization with cost ranges between 15–400 USD/tCO_2 and 50–500 USD/tCO_2 respectively. Hence, among all CDR options the DACCS still the best option considers the technology maturity and potential. DACCS will be able to dramatically reduce emission reduction costs and alleviate dependence on BECCS. The cost of DACCS technology is expected to be decline in the near thanks to the intensive R&D from public, nonprofit institution such as Climeworks as well as philantrophists such as Amazon, Tesla, Microsoft, etc.

参考文献 （第 5.1.3 節に関するもの）

1) Smith, S.M.: A case for transparent net-zero carbon targets, Communications Earth and Environment, No. 24. (2021) https://www.nature.com/articles/s43247-021-00095-w

2) IPCC: Summary for Policymakers. in Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C Above Preindustrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty (World Meteorological Organization, 2018a).

3) IPCC: Chapter 2. Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C Above Preindustrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty (World Meteorological Organization, 2018b)

4) IPCC: Chapter 4. Strengthening and Implementing the Global Response. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C Above Preindustrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty (World Meteorological Organization, 2018c).

5) Morrow et al.: Principles for thinking about Carbon Dioxide Removal in Just Climate Policy, One Earth, Vol.3, No.2, pp. 150-153 (2020).

6) Hepburn et al.: The technological and economic prospects for CO_2 utilization and removal, Nature, 575, pp.87–97 (2019).

7) Iyer et al.: The role of carbon dioxide removal in net-zero emissions pledges, Enegry and Climate Change, Vol. 2, 100043 (2021).

8) IPCC: Chapter 12. Cross Sectoral Perspetives. IPCC 6th Assessment Report. (World Meteorological Organization, 2022).

9) Terlouw, T., bauer, C., Rosa, L., Mazzotti, M.: Life cycle assessmnt of carbon dioxide removal technologies: a critical review, Energy and Environmental Science, 4, 14, pp.1701–1721 (2021).

10) Deutz, S. and Bardow, A.: Life cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature vacuum swing adsorption, Nature Energy, 6, 203- 213 (2021).

11) Madhu, K., Paulik, S., Dhathri, S., Creutizg, F.: Understanding environmental trade offs and resource demand of direct air capture technologies through comparative life cycle assessment, Nature Energy 6, pp.1035–1044 (2021).

12) Jupesta, J., Supriyanto, A.A., Martin, G., Piliang, J., Yang, S., Purnomo, A., Neville, A., Caliman, J.P.: Establishing Multi-Partnerships Environmental Governance in Indonesia: Case of Desa Makmur Perduli Api (Fire Free Village) Program, in: Food security and land use change under conditions of climatic variability: A multidimensional perspective, edited by: Squire, V.R., and Gaur, M. K., Springer Nature Publisher, (2020).

13) Rueda, O., Mogollon, J.M., Tukker, A., Scherer, L.: Negative emissions technology portfolios to meet the 1.5° C target, Global Environmental Change, Vol.67, 102238 (2021).

14) Akimoto, K., Sano, F., Oda, J., Kanaboshi, H., Nakano, Y.: Climate change mitigation measures for global net zero emisisons and direct air capture, Energy and Climate Change, Vol.2, 100057 (2021).

15) Joppa, L., Luers, A., Willmot, E., Friedmann, S.J., Hamburg, S.P., Broze, R.: Microsoft's million-tonnes removal purchase-lessons for net zero, Nature Energy, commentary article (2021). https://www.nature.com/articles/d41586-021-02606-3

5.1.4 水素、アンモニア、合成燃料の技術動向

(1) 水素の技術動向

水素は電力分野のみならず運輸部門や電化が困難な産業部門等の脱炭素化も可能とする二次エネルギーであり、カーボンニュートラルの実現に向け、分野毎に具体的な社会実装を見据えた取組が進められている。また、天然ガス・石炭・再生可能エネルギー(以下、再エネ)・原子力など多様なエネルギー源から製造することが可能である。また、水素と同じく代替燃料として研究開発が進められているアンモニア、合成燃料の原料となることからも水素への関心がより一層高まっている。

本節では水素のサプライチェーンにかかわりのある水素の製造、輸送、及び燃焼の技術動向について報告する。

① 水素製造

水素は、水の電気分解により製造する方法や化石燃料を熱化学反応により分解（改質）製造する方法がある。水素製造法の内、水電解、天然ガス改質、褐炭改質の概要は以下の通りである。

a. 水電解水素

水電解水素は電力を使用するが、水を電気で分解するには大規模な量の電力が必要となることから電解効率の向上や、大型化・モジュール化、膜や触媒に関する技術開発が進められている。主要な水電解技術はアルカリ水電解、固体高分子型水電解（PEM）、および固体酸化物電解セル（SOEC）の三種類であるが、それらの特徴は表 5.1.4-1 の通りである。

表 5.1.4-1 水電解システムの比較

	アルカリ水電解	PEM 水電解	SOEC
電解効率(LHV,%)	63-70	56-60	74–81
資本コスト(USD/kW)	500-1400	1100-1800	2800–5600
ｽﾀｯｸ寿命（時間）	60,000-90,000	30,000-90,000	10,000–30,000
電解温度	60–80	50–80	650–1000
圧力(bar)	1-30	30-80	1
長　所	・水電解システムの中で最も確立された技術 ・貴金属材料が不要 ・設備コストが安価で大規模化に有利	・簡素な設備構成 ・多孔質隔膜が不要 ・水素純度が高い ・漏洩電流が少ない ・高出力密度の電解槽が得られる	・水電解に必要なエネルギーが少なく高効率が期待できる ・貴金属材料が不要 ・原料水の管理が容易

出典）文献 1),2)に基づき作成

b. 天然ガス改質水素

現状では水素の大部分は、天然ガスやナフサなどの化石燃料を改質して製造されている。現在主流の改質法として水蒸気改質法（SMR：Steam Methane Reforming）がある。ここで、SMR の改質反応は以下の通りである。

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$

生じた CO は、CO 変成器で水を反応させ、水素と CO_2 を得る(シフト反応)。

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

製造された水素の純度を高めるために圧力変動吸着法(PSA)[5]を用いることが多い。なお、SMR は工業的に確立しており、技術的課題は少ないとされる [3)]。

[5] 圧力変動吸着法(PSA:Pressure Swing Adsorption): 吸着剤に対する吸着力が異なる性質を利用し、高圧下で対象となる物質を吸着し、減圧と共に脱離してくる物質を分離する技術。これにより水素では 99.999%程度の純度を確保できる。

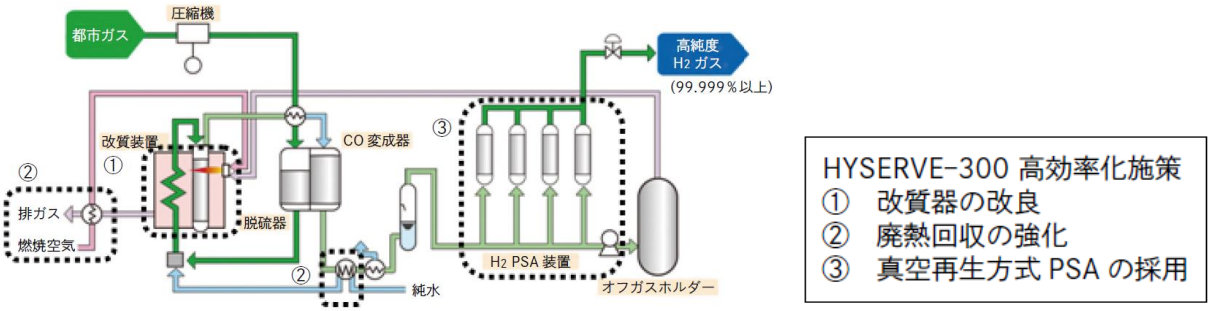


図 5.1.4-1 水蒸気改質装置の例（大阪ガス製 HYSERVE） [3)]

c. 褐炭改質水素

褐炭から水素を製造するプロセスは、図 5.1.4-2 に示すように大きく 2 つのプロセスに分けられる。原料となる褐炭から水素・CO・CO_2 を主成分とする生成ガスを製造するガス化プロセスと生成ガス中の CO_2 や微量な不純物を除去して水素を取り出すガス精製プロセスである [4)]。

なお、褐炭改質水素は、天然ガス改質に比べ水素 1t 製造当たり 2 倍となる 19t-CO_2/tH_2 の CO_2 が発生する [1)]。

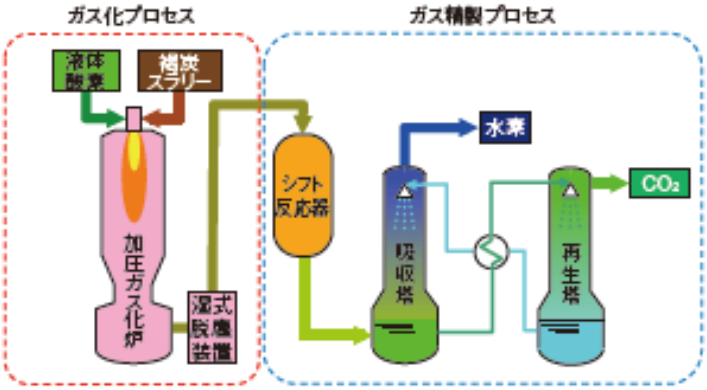


図 5.1.4-2 褐炭ガス化水素製造プロセス [4)]

d. 水素製造コスト比較 [1)]

図 5.1.4-3 に水素製造における天然ガス・電力コストの関係を示す。例えば、天然ガス価格が 3USD/MBtu の場合、再エネが 10USD/MWh 以下であれば、電気分解が CCUS 付き天然ガス改質水素と同等の製造コストとなる。一方、天燃ガス価格が 11USD/MBtu の場合、再エネが約 30~45USD/MWh であれば同等の製造コストとなる。天然ガス改質及び水電解の水素製造コストは、原材料である天然ガス・電力コストに大きく影響を受けることが分かる。

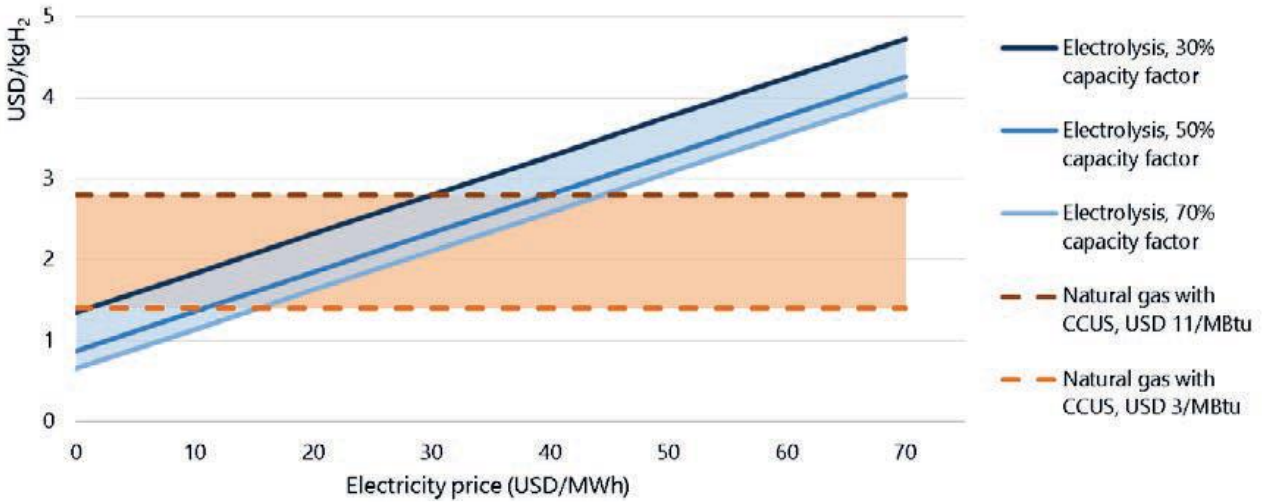
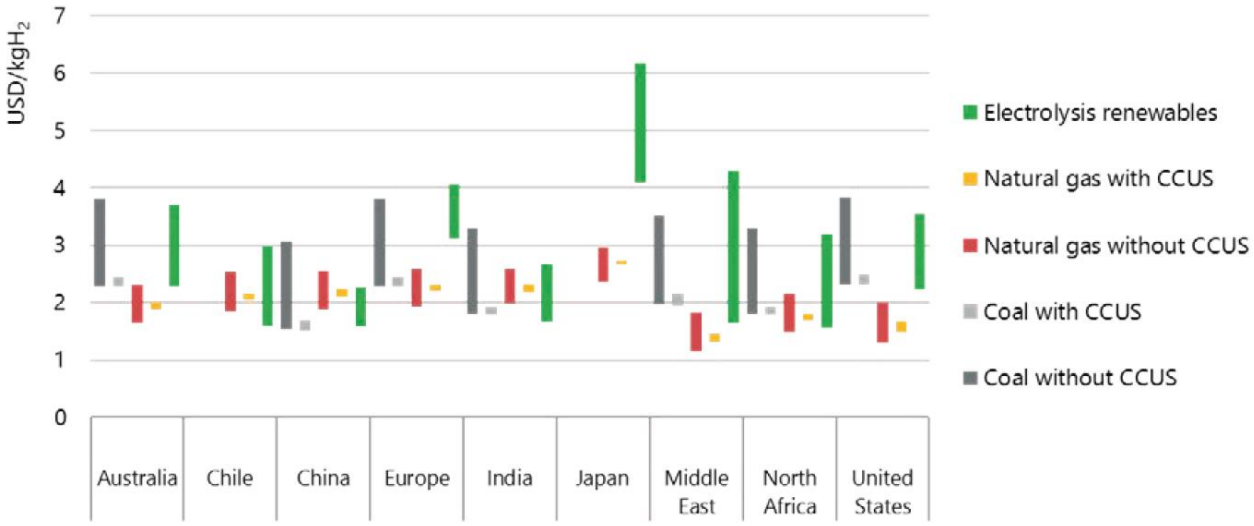


図 5.1.4-3 電気および天然ガスからの水素製造コストの比較(2030) [1)]

IEA による中長期の国別水素製造コストを図 5.1.4-4 に示す。例えば、再エネのコストが安価な中国などでは再エネによる水素が安価となるが、CCUS 付き化石燃料改質による水素製造がコスト優位性を持つ国も多いと想定されている。



Notes: Bars indicate range between near- and long-term hydrogen production costs, which include a CO_2 price of USD 25/t CO_2 in the near term and USD 100/tCO_2 in the long term. For options from coal and natural gas, the higher value indicates the long-term costs (due to the increasing CO_2 price), whereas for hydrogen from renewable electricity the lower value indicates the long-term costs.

Source: IEA 2019. All rights reserved.

図 5.1.4-4 水素製造コスト比較（国別、2030 以降） [1)]

② 輸送技術

a. 液化技術

液化水素の体積は気体の 1/800 であり、輸送・貯蔵に有効であることから、液化技術の開発がなされている。液化には-253℃まで冷却する必要があるが、水素ガスを冷媒と

した水素液化機[6](約 5t~25t/日)の技術が確立 [5),6)]されており、また水素液化設備の大型化・高効率化開発 [5)]が進められている。

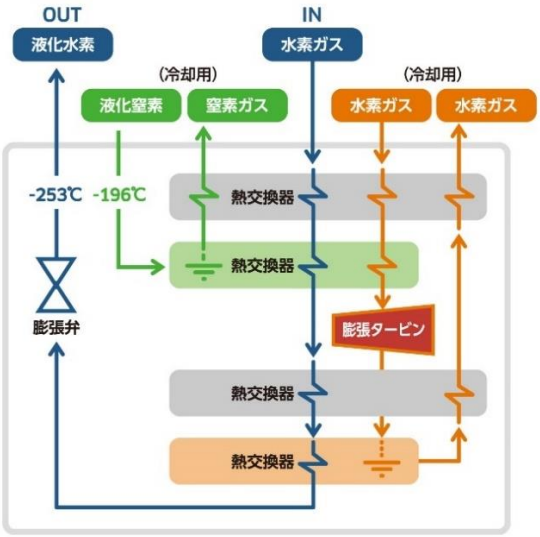


図 5.1.4-5 水素液化システムの構成図 [6)]

b. 貯蔵タンク

HySTRAプロジェクトでは神戸港に2,500m^{3}の貯蔵タンクを設置し実証試験が行われているが、貯蔵タンクの大型化の取り組みとして 11,200m^3 の液化水素貯蔵タンクが設計されている。なお、本タンクは外槽球殻と内槽球殻を重ねその間を真空断熱層とすることで外気温からの熱伝導や対流熱伝達を遮る真空二重殻断熱構造となっている [7)]。

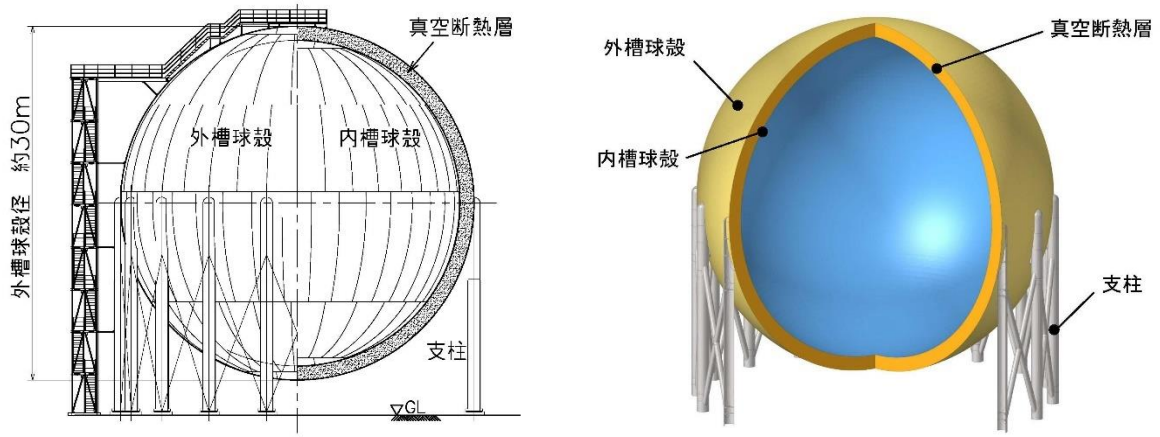


図 5.1.4-6 液化水素貯蔵タンク(11,200m^3)の構造 [7)]

[6] 本液化機は、液化される原料の水素ガスとは別に、冷却用の窒素ガスと水素ガスが複数の熱交換器の間を循環して原料の水素ガスを冷やす仕組み。

c. 輸送船

HySTRA プロジェクトでは、水素タンクに真空断熱二重殻構造を採用した実証船「すいそふろんてぃあ」が豪州ビクトリア州 Hastings 港の液化水素積荷基地に着桟し(2022.1.20)、液化水素荷役試験や各種機器点検など、試験が進んでいる。



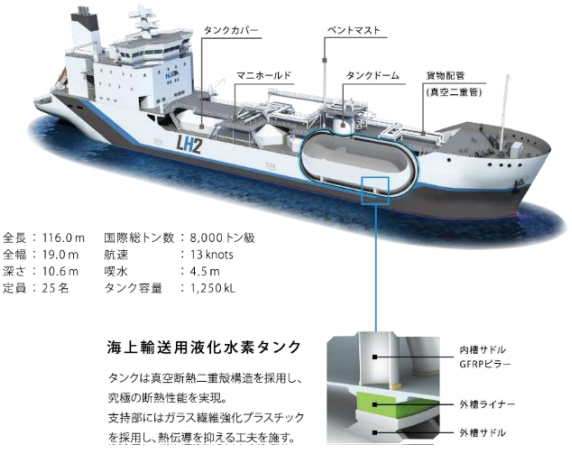


図 5.1.4-7 豪州 Hastings 港の水素輸送船「すいそふろんてぃあ」とその構造 [8)]

③ グリーンイノベーション基金を活用した技術開発（水素）[9),10)]

水素の社会実装を促すためには、供給設備の大型化による供給コストの削減と、大規模な水素需要の創出が必要であるが、長期の水素需要量が不確実なため、民間事業者が大規模なインフラ投資に踏み出し難いという問題がある。この不確実性を減らすために水素供給量の増大と水素需要の創出を行うことを可能とするモデルを構築する必要がある。このモデルを構築の構築に関し、グリーンイノベーション基金事業では 2 プロジェクトを推進している。

a. 「大規模水素サプライチェーンの構築」プロジェクト

水素運搬船を含む輸送設備の大型化などとともに、水素発電の実証試験（混焼・専焼）等を実施することで、水素の大規模需要の創出とともに、供給コスト低減を可能とする技術を確立し、2030 年に水素供給コスト 30 円/Nm^3、2050 年に 20 円/Nm^3 以下の達成を目指すとしている。（2021.8.26 採択済 [11)]）

ｱ) 研究開発 1：国際水素サプライチェーン技術の確立及び液化水素関連機器の評価基盤の整備

化石燃料に十分な競争力を有する水準(20 円/ Nm^3 以下)の水素供給コストを達成するために、水素キャリアである液化水素及び MCH(メチルシクロヘキサン)による大規模水素サプライチェーン構築のための商用化事業及び水素供給コストの低減に資する革新的液化技術・直接 MCH 電解合成技術の開発を行う。

また、液化水素の製造、輸送・貯蔵、利用に関わる機器等の低コスト化を実現するために、材料の機械特性などを統一的に評価する上で基盤の整備を行う。

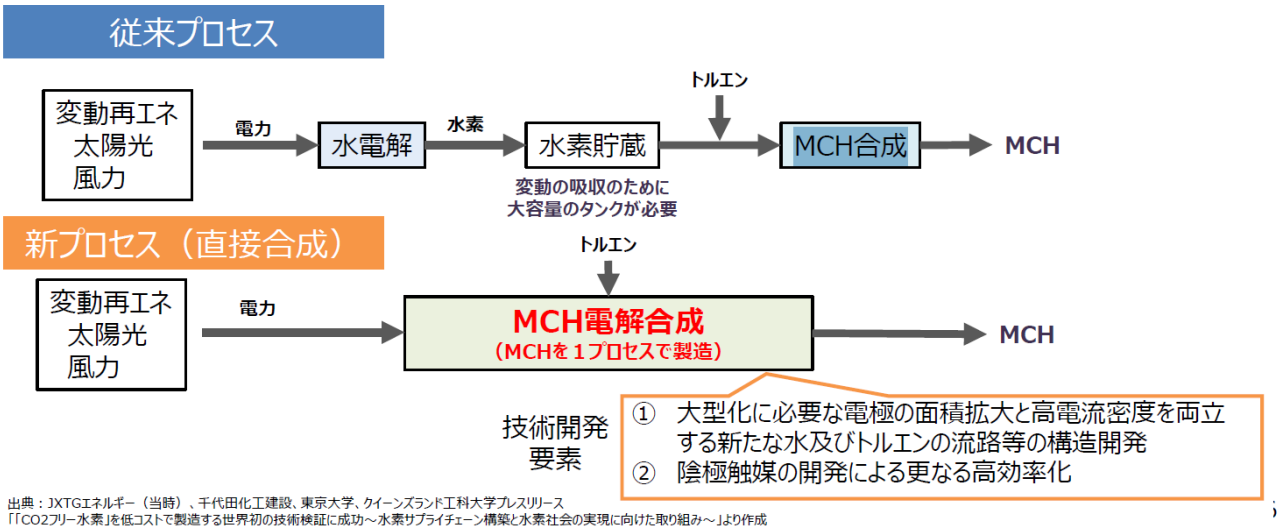


図 5.1.4-8 革新的な液化、水素化、脱水素技術の開発 [12)]

ｲ) 研究開発 2：水素発電技術（混焼、専焼）を実現するための技術の確立

大規模需要を創出する水素ガスタービン発電技術を 2030 年までに商用化するために、これまでの事業で開発された燃焼器などを実際の発電所に実装して、混焼・専焼における燃焼安定性などの検証を行う。

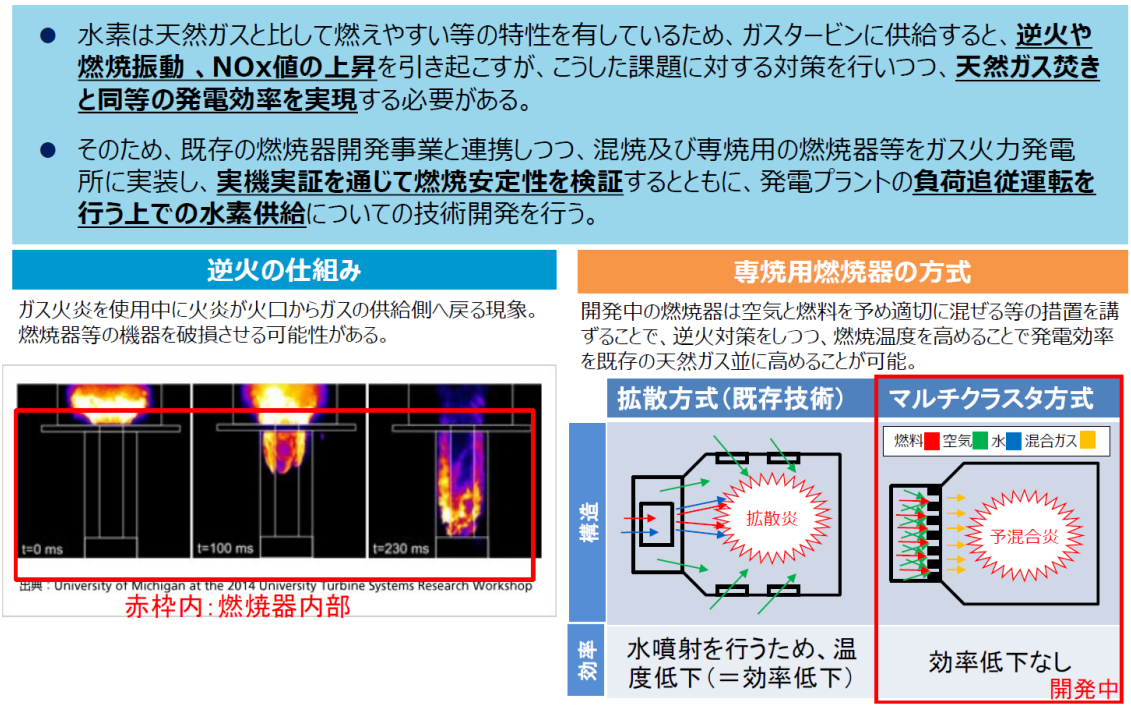


図 5.1.4-9 水素発電技術（混焼、専焼）の実機実証 [12)]

b. 「再エネなど由来の電力を活用した水電解による水素製造」プロジェクト

本プロジェクトでは、国内の水素製造基盤の確立及び海外市場の獲得に向け、商用化に近い技術水準にあるアルカリ型水電解装置の設備コスト 5.2 万円/kW、PEM 型水電解装置の設備コスト 6.5 万円/kW を見通せる技術の実現を目指す。(2021.8.26 採択済 [11)])

ｱ) 研究開発 1：水電解装置の大型化技術などの開発、Power to X 大規模実証

2030 年までにアルカリ型水電解装置、PEM 型水電解装置の低コスト化を見通せる技術を実現するために、量産可能かつスケーラブルな特徴を備えた水電解装置の大型化・モジュール化に係る技術の開発、膜や触媒などの重要な部素材を水電解装置に実装する技術の開発、水電解装置を用いた産業プロセス等における化石燃料・原料等を水素で代替する最も効率的なシステム運用方法の開発を行う。

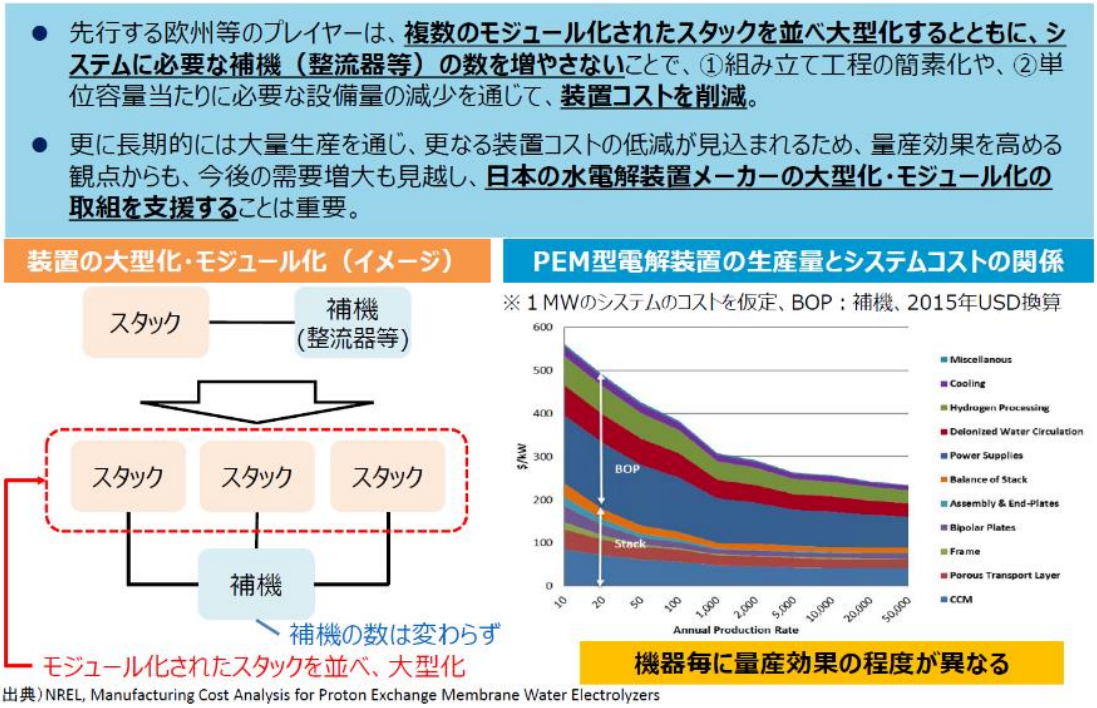


図 5.1.4-10 水電解装置の大型化技術 [12)]

ｲ) 研究開発 2：水電解装置の性能評価技術の確立

アルカリ型水電解装置及び PEM 型水電解装置を対象とし、様々な運転条件下（再エネを模擬した出力変動、高圧運転）においてスタックの性能（効率、耐久性等）を評価する技術の開発を行う。

表 5.1.4-2 水電解装置の運転動作・環境の例とその評価事項 [12)]

水電解装置の運転動作・環境の例	評価事項
再エネ出力を模した急峻な起動・停止	電極や膜の劣化状況
スタック内の高圧化	
異なる周波数帯での運転	電解効率への影響
低負荷運転	ガスの純度

(2) アンモニアの技術動向

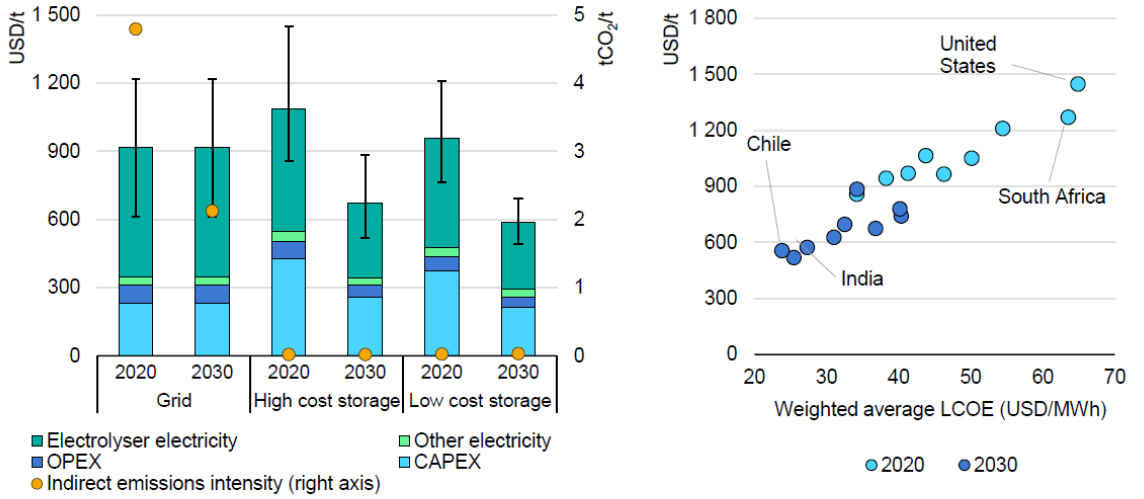
① アンモニアのエネルギー利用

アンモニアは、水素と同様に燃焼時に CO_2 を排出せず、水素キャリアとしても利用可能で、また、既存のインフラを活用することで、安価に製造・輸送可能であることから、燃料として注目されている。

a. アンモニア製造コスト

図 5.1.4-11 にハーバー・ボッシュ法(以下、HB 法)によるアンモニアの均等化製造コストを、表 5.1.4-3 にコスト試算に使用された各国データ(抜粋)を示す。また、図中の High Cost Storage、Low Cost Storage は水素の貯蔵コストによる場合分けを示しており、再エネを使用したケースである。

アンモニアの原料となる水素を水電解で製造しているため、全てのケースで水電解用の電力コストが過半を占めており、製造コストは地点毎の再エネ電力コストの影響を受ける。



IEA, 2021.

Notes: On the column chart, the nine sites summarised in Table 2.1 are presented in aggregate in the “High-cost storage” and “Low-cost storage” VRE result groupings, with the top of the columns showing the midpoint of the range of sites, and the error bars displaying the range from the lowest to the highest cost sites. The weighted average LCOE is a function of the costs and shares of solar PV and wind electricity at each selected site. Emissions intensities of electricity generation in 2020 and 2030 are the global average values in the Sustainable Development Scenario: 474 g CO_2/kWh and 210 g CO_2/kWh respectively. See Table 2.1 notes for the main techno-economic parameters used.

図 5.1.4-11 アンモニアの均等化製造コスト [13)]

表 5.1.4-3　アンモニア均等化製造コスト試算に使用した各国のデータ（抜粋）[13)]

Site	Year	Solar PV CF	Wind CF	Solar PV LCOE (USD/MWh)	Wind LCOE (USD/MWh)	Hydrogen LCOH (USD/kg)	Electricity curtailment
Calama, Chile	2020	32%	36%	41	55	4.3	8%
	2030	32%	36%	26	51	2.2	7%
Karnataka, India	2020	24%	44%	35	33	3.7	7%
	2030	24%	44%	23	30	2.0	5%
Kleinsee, South Africa	2020	28%	38%	62	65	5.5	11%
	2030	28%	38%	38	59	3.1	15%
Nevada, United States	2020	26%	26%	55	83	6.0	16%
	2030	26%	26%	34	79	2.9	19%

Notes: CF = capacity factor; LCOE = levelised cost of electricity; LCOH = levelised cost of hydrogen. For each site, hourly data for one year are used for the calculation of all parameters. The LCOH and electricity curtailment result from an optimisation of a hybrid wind/solar system. Main cost assumptions (incl. EPC): solar PV CAPEX (varies by country) = USD 580-1 140/kW in 2020, USD 310-657/kW in 2030; wind CAPEX (varies by country) = USD 1 039-1 737/kW in 2020, USD 955-1 597/kW in 2030; electrolyser CAPEX = USD 1 477/kW in 2020, USD 559/kW in 2030.

b.　アンモニアの燃焼技術

アンモニアはメタンなどの燃料に比べ燃焼速度が遅く、火炎温度が低いことに加え、燃料中窒素分による NOx の抑制が必要であるが、石炭混焼に向け、アンモニア混焼バーナーの開発が進められている。本技術開発では大型燃焼試験炉においてのアンモニア混焼率 20%で安定な燃焼状態が得られ、微粉炭専焼の場合と同等の NOx 排出量と未燃分量を達成している。部分負荷運用状態を模擬した条件においても、良好な結果が得られ、実機適用が可能であると報告されている。

また、モデルプラントを対象とした石炭専焼とアンモニア混焼の火炉の数値解析の結果、アンモニア 20%混焼においては、ボイラ本体の耐圧部を含め、伝熱部、通風系統、環境設備の改造が不要であるとされている [14)]。

なお、2021 年度から NEDO 事業として 100 万 kW 級石炭火力におけるアンモニア 20%混焼の実証研究(2021-2024)が実施されている [15)]。

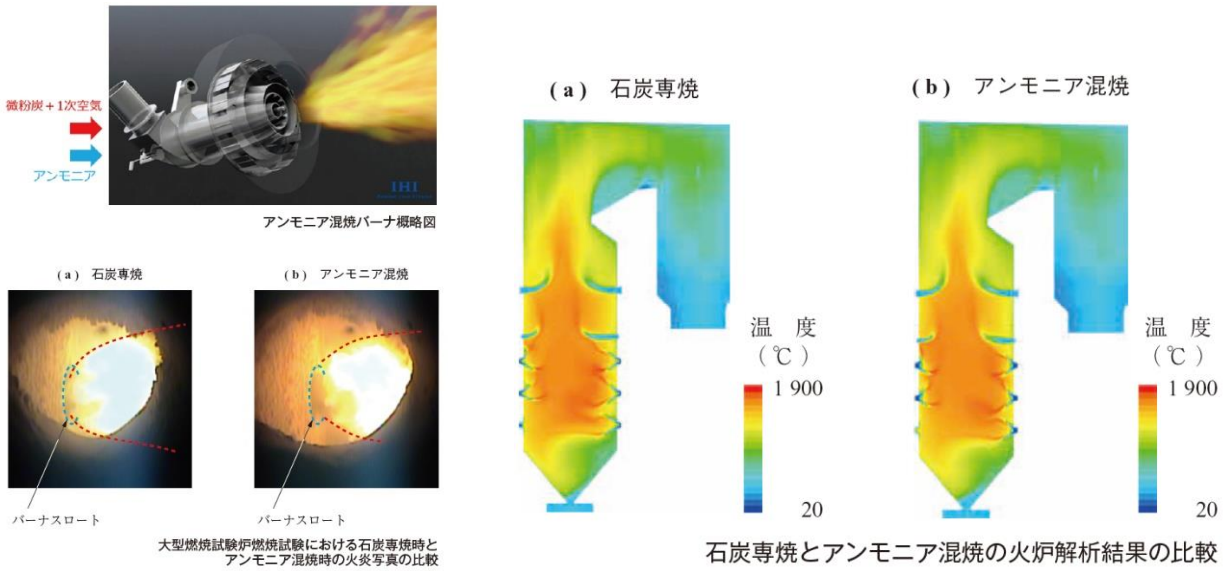


図 5.1.4-12 アンモニア混焼バーナーの燃焼状態(左)と火炉の数値解析結果(右) [14)]

② グリーンイノベーション基金を活用した技術開発（アンモニア） [16),17)]

現時点でアンモニアは燃料用途で利用されていないため、アンモニアを燃料として活用する社会の実現にあたっては、アンモニアの利用拡大、安定供給確保、コスト低減といった課題がある。

グリーンイノベーション基金事業では、アンモニアの供給コストの低減に必要な技術の確立(供給面)と、アンモニアの発電利用における高混焼化・専焼化技術の確立(需要面)を目標とし「燃料アンモニアサプライチェーンの構築プロジェクト」が公示・採択されている。

a. 燃料アンモニアサプライチェーンの構築プロジェクト

本プロジェクトでは、2030 年に 10 円台後半/Nm^3 （熱量等価での水素換算）の実現に必要な技術や、2050 年国内導入 3000 万トン/年に必要な技術の確立を目指している。(2022.1.7 採択済み [16)])

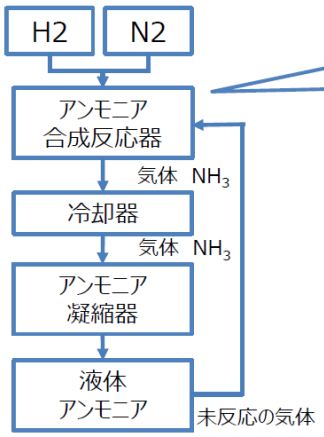
ｱ) 研究開発 1：アンモニア供給コストの低減

既存の HB 法に劣らない効率でのアンモニア製造を実現しつつ、海外ライセンサーに依存しない生産体制の構築と、再生可能エネルギーから水素を経由しないで直接アンモニアを製造する技術の開発を目指している。

ｱ)-1 アンモニア製造新触媒の開発・実証

これまでアンモニアの製造方法として高温高圧での製造を行う HB 法が採用されてきた。HB 法の場合、鉄系の触媒での合成を行っているが、400～500℃の温度と、10～30MPa の圧力が必要となる。このため、新触媒を開発し、温度及び圧力を下げることで、合成時に必要なエネルギーを削減する。十分な耐久性・安定性を前提として、既存の HB 法に劣らない効率での製造を実現しつつ海外ライセンサーに依存しない生

産体制を構築するとともに、開発した触媒の価格低減に取り組むことで製造コスト全体の低減、製造時の CO_2 排出量の低減を目指す。



<HB法>
触媒を活用した400～500℃、10～30MPaでの反応
⇒反応温度、反応圧力を下げることで、OPEXの低減を目指す。

製造方法	ハーバーボッシュ法	新規触媒の例	
	鉄系触媒	Ru系触媒/Ni系触媒	Ru系触媒
原料	水素・窒素	水素・窒素	水素・窒素
反応温度	400~500℃	300~400℃	350℃
反応圧力	10~30MPaG	3~5MPaG	1MPaG
設備規模	数十万～数百万t/年	3千～10万t/年	実証中（7t/年）
開発状況	-	小規模パイロットプラント存在	

図 5.1.4-13 アンモニア製造新触媒の開発・実証 [18)]

ｱ)-2 グリーンアンモニア電解合成技術の開発・実証

これまでは、水を電気分解して水素を製造（水電解）し、その後 HB 法でアンモニア製造を実施していたが、本開発・実証では従来の製造方法を大幅に簡略化する技術として、水から直接アンモニアを製造する電解合成技術を開発する。

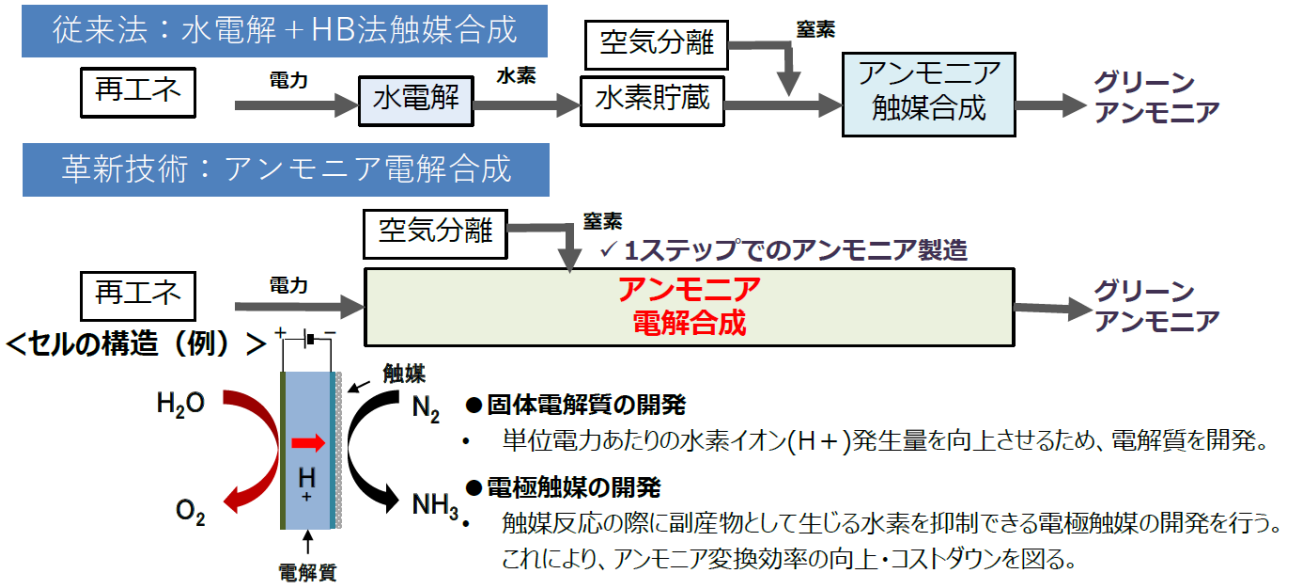


図 5.1.4-14 従来技術とアンモニア電解合成の比較 [18)]

ｲ) 研究開発 2：アンモニアの発電利用における高混焼化・専焼化 [17)]

石炭火力発電におけるアンモニアの 20%混焼をさらに発展させて、アンモニアの高混焼化・専焼化の技術を確立する。その際、石炭ボイラにおいて混焼率を高める方法に加え、石炭火力発電所をリプレースする需要も想定し、ガスタービンでのアンモニア専焼化に必要な技術開発も対象としている。

ｲ)-1 石炭ボイラにおけるアンモニア高混焼技術（専焼技術含む）の開発・実証

2050 年カーボンニュートラルの実現のため、石炭火力発電設備のアンモニア専焼化への段階的移行に必要な技術を開発し、５万 kW 規模以上の実機での実証を行う。

表 5.1.4-4　アンモニア混焼率に応じた技術課題の比較 [18)]

	20%混焼	高混焼	専焼
バーナー設計	本年度よりNEDO当初予算にて実機実証。 微粉炭バーナーに、アンモニア投入ポートを追加する形。	**20%混焼バーナーの石炭ノズルに多量のアンモニアを注入。** そのため、**バーナーの形状変更及び新たな素材の技術開発が必要。**	**ベースが（石炭の投入をしない）ガスバーナーになるため、異なる形状のバーナーの開発が一から必要。**
NOx対応	石炭火力並みまで低減するバーナーを開発。 今後、実機実証に着手。	**窒素分が増加することから、アンモニアの吹き込み位置、流速等の調整が必要。** **併せて、窒素濃度向上に伴う窒化、腐食に対応した素材の開発が必要。**	窒素が増加するため、アンモニアの吹き込み位置や流速の調整に加え、**ガスの導入方向の調整や、ノズルの本数等の調整が必要。**
着火、燃焼の安定性	対応済み。 今後、実機実証に着手。	石炭の流量が少なくなることから、火炎安定化に向けた燃焼方法の調整が必要	石炭の量がなくなるため、着火や火炎の安定化が困難
活用ケース	早期にアンモニア混焼を進めたいケース。	**ボイラの切り替えが不要な範囲で、ボイラ全体での高混焼化を達成したいケース。** **特に、アジアにおいては既存のアセットを活用する観点から高混焼が現実的。**	**ボイラの切り替えも行った上で、ボイラ全体での専焼化を達成したいケース。**

ｲ)-2 ガスタービンにおけるアンモニア専焼技術の開発・実証

ガスタービン向け専焼バーナーを開発した上で、2000kW 規模以上の実機での専焼の実証を行い、吹き込み位置や流速等を最適化し、アンモニア燃焼技術を確立する。

(3) 合成燃料の技術動向

合成燃料は、CO_2 と H_2 を合成して製造される燃料である。大きく液体合成燃料と気体合成燃料に区分され、サバティエ反応の等のメタネーションによって製造される合成メタンが気体合成燃料に該当し、FT 合成反応などによって製造されるガソリン・灯油・軽油などの混合物が液体燃料に該当する。なお、再エネ由来の水素を用いた場合は、e-fuel と呼ばれる。

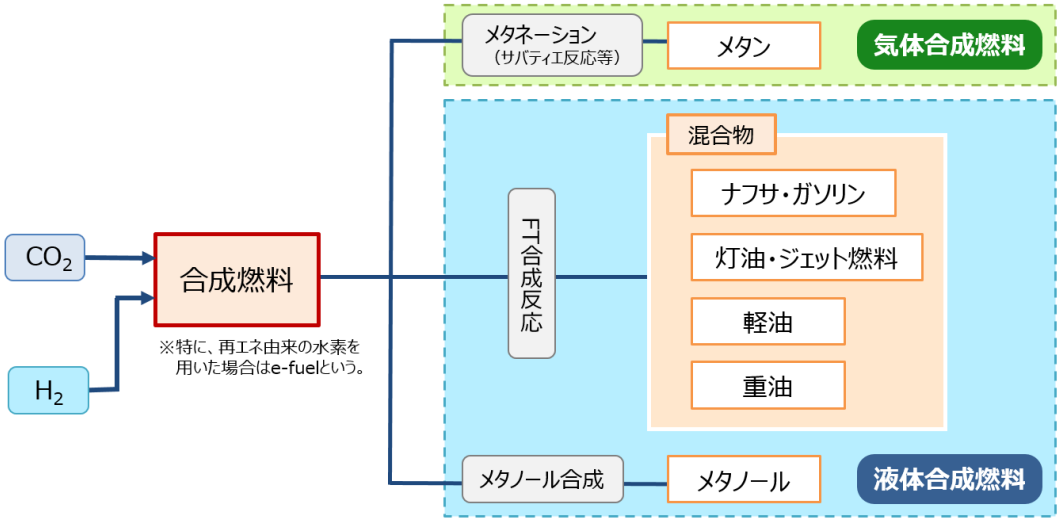


図 5.1.4-15 合成燃料の概要図 [19)]

① 合成燃料の製造

a. 気体合成燃料（メタン）

水素を使用したメタンの合成は、触媒を用いて熱化学的にメタンを製造するサバティエ反応などがあり、反応式は $CO_2+4H_2 \rightarrow CH_4+2H_2O$ で表される。

図 5.1.4-16 に文献 20)で試算された合成メタン製造のコスト構造を示す。設備利用率を 30%とし電力コストで感度分析を行った結果、50US$/MWh 以上の場合は水電解向けの電力コストが支配的になっている。これはメタン 1Nm³ の合成に水素 4Nm³ が必要であることや、将来の水電解効率の向上を織り込んでも 1Nm³ の水素製造に 4.05kWh の電力を消費するためである。

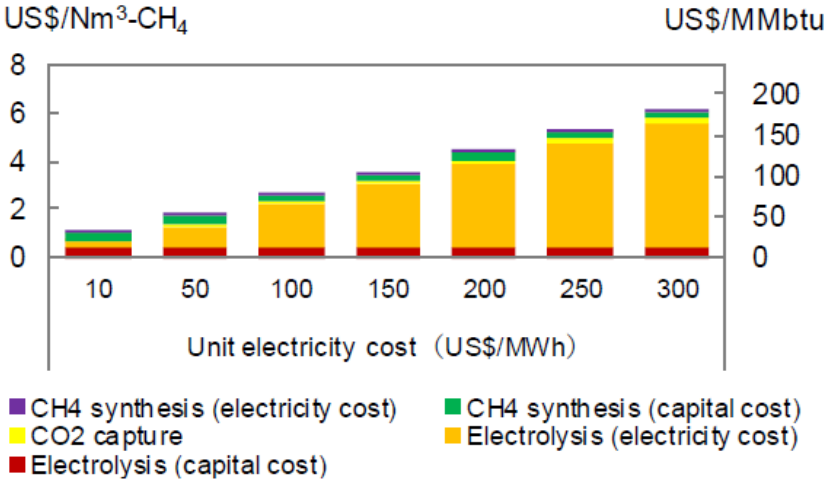


図 5.1.4-16 水電解水素による合成メタン製造のコスト構造 [20)]

b. 液体合成燃料（FT 合成反応）

ｱ) 液体合成燃料製造技術(メタノール除く)

現在、合成燃料は CO_2 から CO に転換し（逆シフト反応）、CO と H_2 を反応（FT 合成反応）させて作られるが、製造効率の向上が課題である。

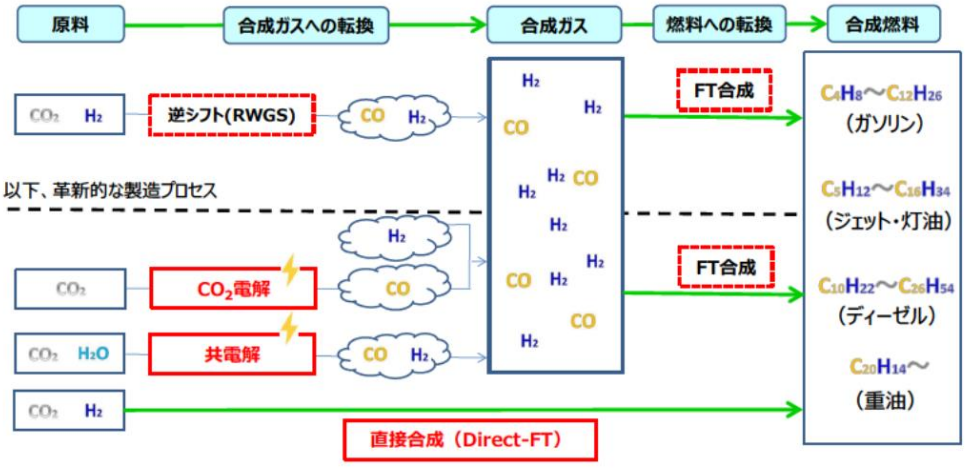


図 5.1.4-17　液体合成燃料の製造プロセス [21)]

ｱ)-1　逆シフト反応（ＲＷＧＳ）[21),22)]

概　　要　・水素製造を目的としたシフト反応($CO+H_2O \rightarrow H_2+ CO_2$)を逆向きに進行させる反応
・高温下(600℃以上)で触媒を用いて反応を行う必要あり

技術課題　・600℃以上という温度は、シフト反応よりもはるかに高温のため、シフト反応用の触媒の使用が困難
・高温に耐えうる触媒を開発する必要あり

化 学 式　$CO_2+ H_2 \rightarrow CO+H_2O$

ｱ)-2　FT 合成 [21),22)]

概　　要　・CO と H_2 から触媒(Co,Fe)を用いて合成燃料に転換

技術課題　・ガソリン・灯油・ディーゼルなど、目的とする留分（燃料）を効率的に得るための触媒を開発する必要あり

化 学 式　$nCO + (2n+1)H_2 \rightarrow C_nH_{2n+1} + nH_2O$

$nCO + 2nH_2 \rightarrow C_nH_{2n} + nH_2O$

ｱ)-3　CO_2電解　（革新的技術）[21)]

概　　要　・電解装置を用いて、電極上でCO_2をCOに電気化学的に還元する手法

・低温下でも反応が進行するため高耐久性が期待され、長時間運転への対応が可能

技術課題　・現存する電解装置では、大規模かつ安定的にCOを生成することができないため、複数の電解装置を一体運用するための設計開発が必要

化 学 式　$CO_2 \rightarrow CO+1/2O_2$

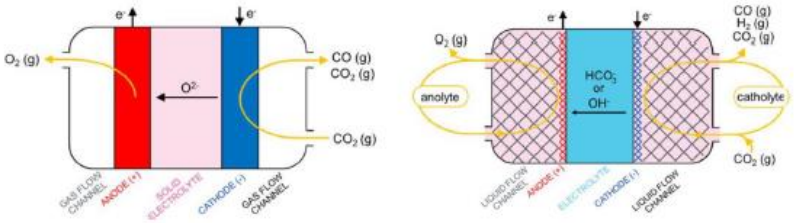


図 5.1.4-18　固体酸化物電解質(高温、左)と液体電解質(低温、右)の概念図 [22)]

ｱ)-4　共電解　（革新的技術）[21)]

概　　要　・水電解とCO_2電解を同時に行う手法

・合成ガスへの転換をワンストップ化することにより、効果的な製造が可能

技術課題　・CO_2電解と同様、電解装置の大型化が必要

・高温下の反応で電解装置の劣化や副反応が起こるため、電解装置の耐久性向上や副反応の制御が課題

化 学 式　$H_2O+ CO_2 \rightarrow H_2+CO+O_2$

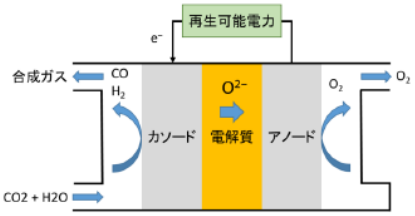


図 5.1.4-19　固体酸化物型セルによる共電解概念図 [22)]

ｱ)-5　直接合成(Direct FT)　（革新的技術）[21)]

概　　要　・逆シフトと FT 合成を同時に実現し、CO_2 と H_2 から直接、炭化水素を製造する手法

技術課題　・基礎研究段階

・逆シフト反応と FT 合成反応のいずれの反応も進行させ、かつ連鎖成長率が高い触媒を開発する必要がある

化 学 式　$nCO_2+mH_2 \rightarrow CnH_{2(m-2n)}+2nH_2O$

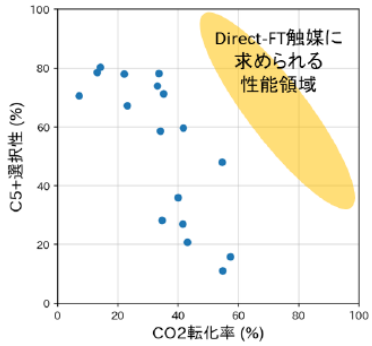


図 5.1.4-20　Direct-FT 触媒に求められる性能(青点は試験事例)[22)]

ｲ)　合成燃料のコスト

文献 22)に示されている、ｲ)-1 共電解＋FT 合成、ｲ)-2 水電解＋逆シフト反応＋FT 反応及び、ｲ)-3 合成燃料事業（欧州）におけるコストの試算例について示す。なお、試算では電力コストが過半を占めている。

ｲ)-1　共電解＋FT 合成ケースのコスト

図 5.1.4-21 に石炭火力発電所の排ガスから回収した CO_2 と水で共電解と FT 合成を一貫して行い、液体燃料を製造するプロセスを示す。なお、製造拠点は国内（火力発電所近傍）としている。

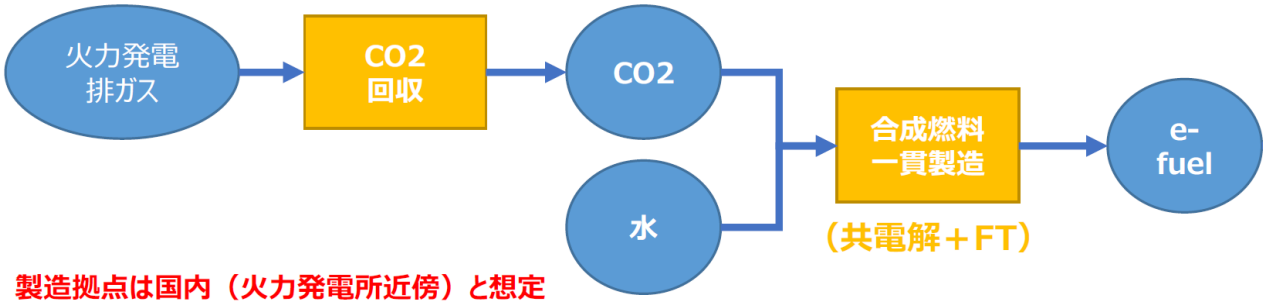


図 5.1.4-21　共電解＋FT 合成による合成燃料製造プロセス[22)]

本ケースにおける試算結果を図 5.1.4-22 に示す。本試算では系統電力利用の合成燃料が最も安価であるが、ガソリン価格の 3 倍程度となっている。

コスト構造を見ると、電力コスト＞固定費・変動費＞CO_2 回収コストであることがわかる。

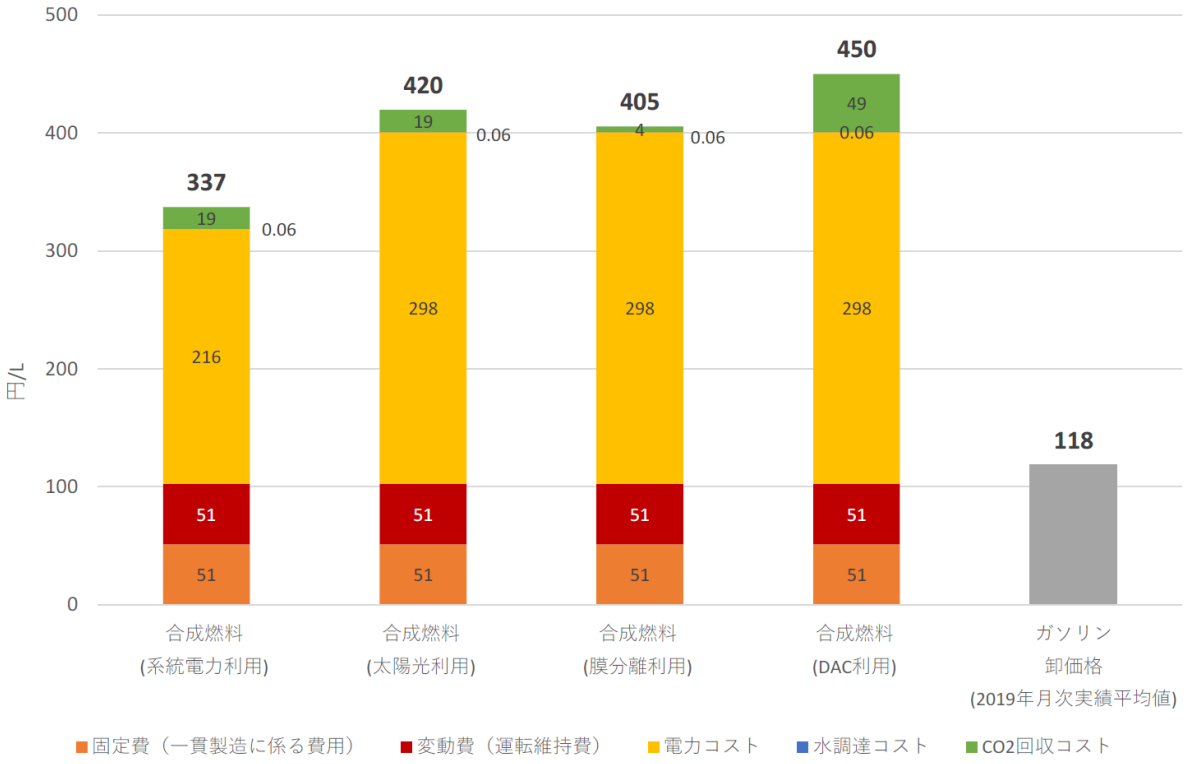


図 5.1.4-22　共電解＋FT 合成ケースにおける合成燃料の試算結果 [22)]

【参考】図 5.1.4-22 の試算条件　(詳細は文献 22)を参照)

表 5.1.4-5　共電解＋FT 合成ケースのコスト試算の想定

		系統電力利用	太陽光利用	膜分離利用	DAC 利用
合成燃料の製造	方法	共分解＋FT 合成			
	拠点	国内（火力発電所近傍）			
CO_2 回収	方法	火力発電所排ガスから化学吸収法		火力発電所から膜分離法	DAC
	拠点	合成燃料製造拠点近傍			
	輸送	パイプライン輸送			DAC から直接供給
エネルギー	電気	国内系統電力	太陽光発電		
	熱	燃料製造システムの排熱利用			

表 5.1.4-6　原料・エネルギーのコスト

項目		コスト
CO_2	化学吸収法	4,200 円/t-CO_2
	膜分離法	1,000 円/t-CO_2
	DAC	11,050 円/t-CO_2
水	水	29 円/kℓ

項目		コスト
電気	系統電力	12 円/kWh
	太陽光	17 円/kWh
熱	―	- ※

※廃熱利用のため外部調達無し

ｲ)-2 水電解＋逆シフト反応＋FT 合成（海外水素（MCH)、国内水素（トラック輸送））

石炭火力発電所の排ガスから回収した CO_2 と水素による製造プロセスを示す。なお、水素は、海外の再エネを用いた水電解により製造した MCH（メチルシクロヘキサン)、国内の太陽光を用いた国内水素(トラック輸送)などを想定している。

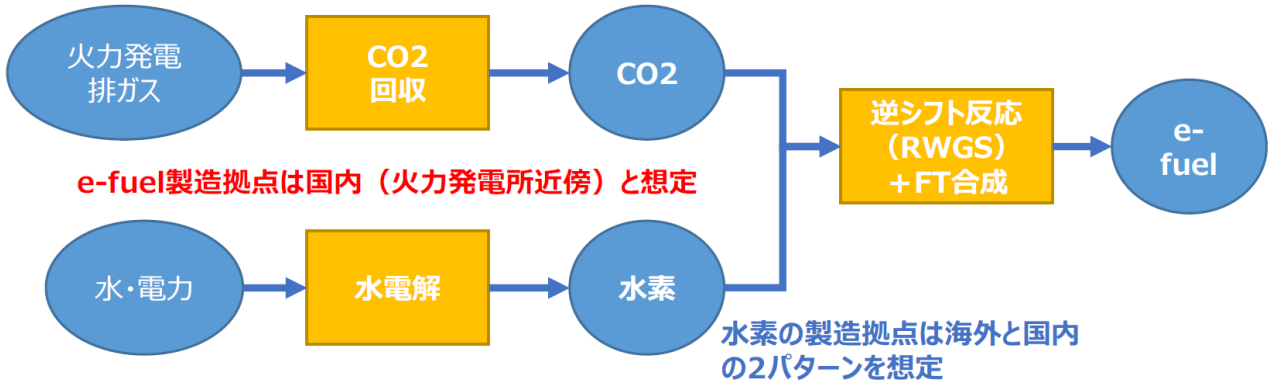


図 5.1.4-23 水電解＋逆シフト反応＋FT 合成による合成燃料製造プロセス [22)]

本試算結果では、海外から輸入した MCH 水素利用ケースで、ガソリン卸価格の 4 倍強、国内再エネ水素利用ケースで 7 倍強となっている。

コスト構造を見ると、水素調達コストがその大半を占めており、変動費（運転維持費、電力・熱コスト)、固定費、CO_2 回収コストが続く。

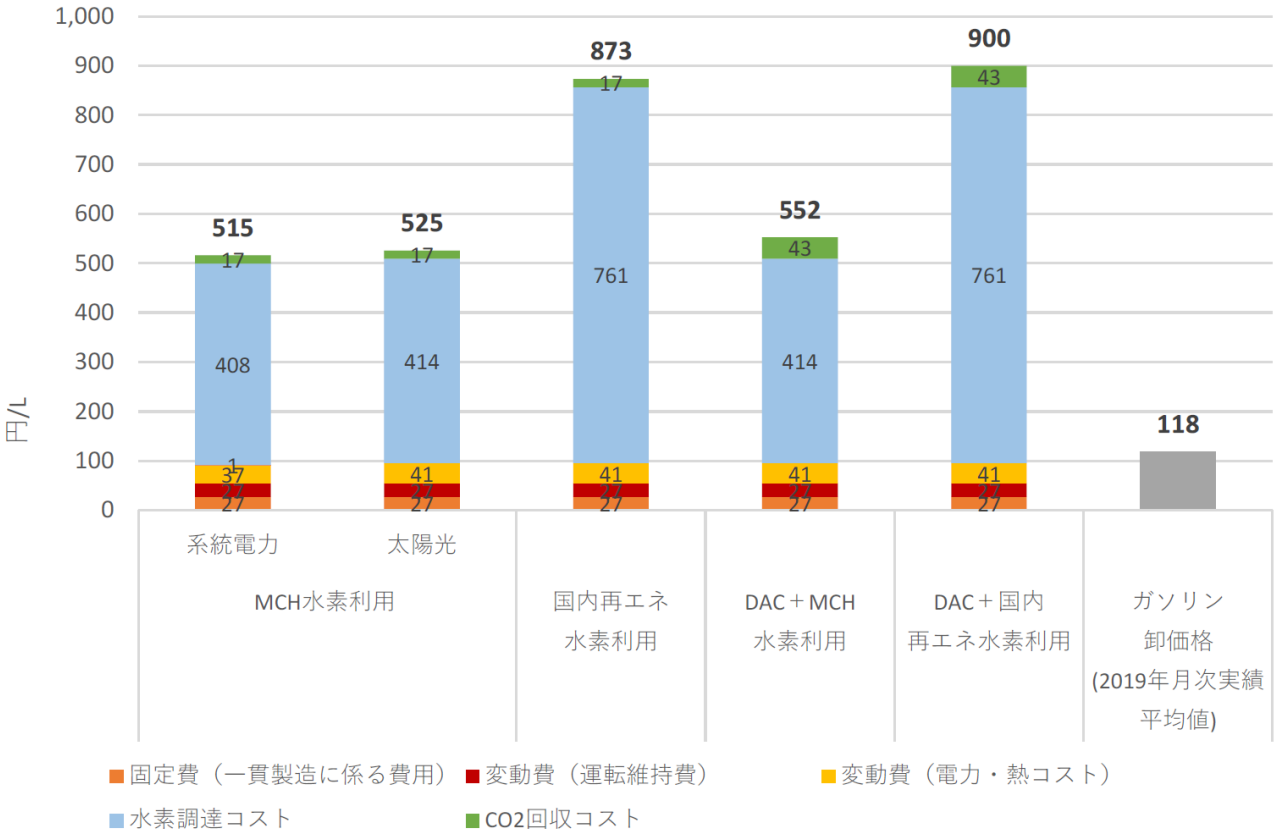


図 5.1.4-24 水電解＋逆シフト反応＋FT 合成における合成燃料の試算結果 [22)]

【参考】図 5.1.4-24 の試算条件 (詳細は文献 22)を参照)

表 5.1.4-7 水電解＋逆シフト反応＋FT 合成ケースのコスト試算の想定

		MCH 水素利用(輸入)		太陽光水素利用	DAC+MCH 水素	DAC+太陽光水素
		系統電力	太陽光			
合成燃料の製造	方法	CO_2と水素による逆シフト反応＋FT 合成				
	拠点	国内（火力発電所近傍）				
CO_2回収	回収	火力発電所排ガスから化学吸収法			DAC	
	拠点	合成燃料製造拠点近傍				
	輸送	パイプライン輸送			DAC から直接供給	
エネルギー（国内）	電気	系統電力	太陽光発電			
	熱	燃料製造システムの排熱利用				
水素	製造/輸送方法	海外再エネ水素を MCH にし、海上輸送 (脱水素は系統電力、熱は天然ガス)	海外の太陽光水素を MCH にし、海上輸送 (脱水素は太陽光、熱は天然ガス)	国内の太陽光水素を液体水素にし、陸上輸送	海外の太陽光水素を MCH にし海上輸送 (脱水素は太陽光、熱は天然ガス)	国内の太陽光水素を液体水素にし、陸上輸送

表 5.1.4-8 原料・エネルギーのコスト(詳細は文献を参照)

項目		コスト
CO_2	化学吸収法	4,200 円/t-CO_2
	膜分離法	1,000 円/t-CO_2
	DAC	11,050 円/t-CO_2
水素	海外 MCH 水素 (脱水素:系統電力)	65.5 円/Nm^3
	海外 MCH 水素 (脱水素:太陽光)	66.4 円/Nm^3
	国内太陽光水素	122.2 円/Nm^3

項目		コスト
電気	系統電力	12 円/kWh
	太陽光	17 円/kWh
熱	天然ガス	90 円/Nm^3

ｲ)-3 欧州における合成燃料プロジェクトのコスト試算の例

AUDI 社で計画された E-Diesel プロジェクトをモデルとし、試算された合成燃料コスト構成を図 5.1.4-26 に示す。1 日 1 バレル生産に比べ 1 日 1,800 バレル生産の場合は、固定費・CAPEX が製造コストに占める割合は低下するものの、水電解などに使用され

る電力コスト及び CO_2 調達コストなどのコストは低下せず、本試算では 75%以上を占めている。

また、産業用排ガスから CO_2 を調達(100USD/ton-CO_2)として計算しているが、DAC を CO_2 の供給源とすると更に高コストになると予想される。なお、AUDI は e-fuel に焦点を合わせたため、本プロジェクトを断念している [22]。

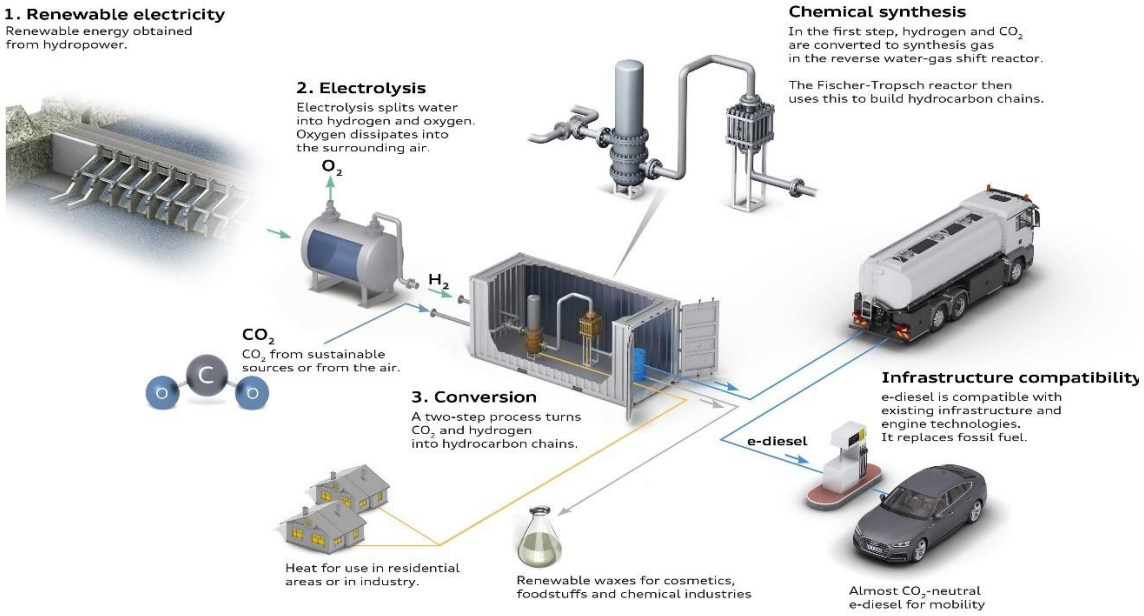
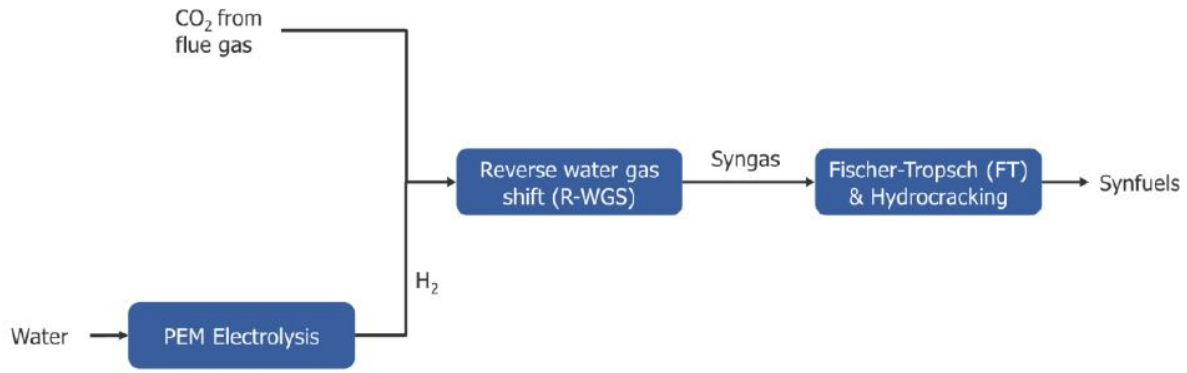
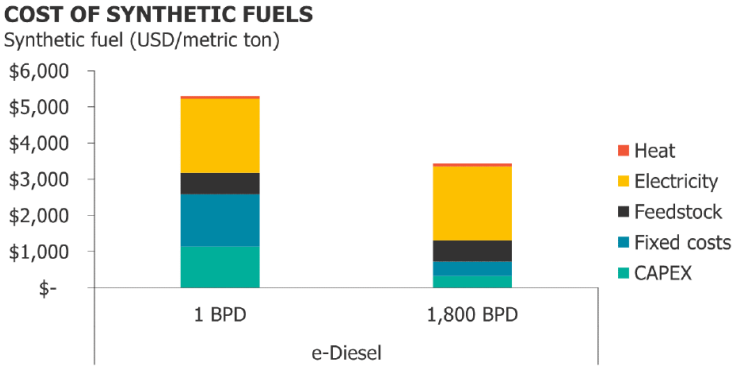


図 5.1.4-25 e-Diesel プロジェクト [23]





	1 BPD	1,800 BPD
Heat	$77	$77
Electricity	$2,050	$2,050
Feedstock	$584	$584
Fixed Costs	$1,449	$393
CAPEX	$1,144	$332
Total	$5,305	$3,436

図 5.1.4-26 製造プロセスとコスト試算結果 [22]

【参考】図 5.1.4-26 の試算条件 (詳細は文献 22)を参照)

表 5.1.4-9 E-Diesel プロジェクトのコスト試算の想定

生産能力	1BPD(パイロット)、1800BPD(商用)の 2 条件
装置寿命	20 年
稼働率	90% (1 日 24 時間運転、年間 350 日運転)
電力価格	0.05USD/kWh (系統電力)
熱エネルギー価格	0.05USD/kWh
水原料費	カウントしない
二酸化炭素	100USD/t-CO_2 (産業用排気ガス回収の卸価格と想定)
水素供給源	PEM 型水電解と想定

② グリーンイノベーション基金を活用した今後の技術開発（合成燃料）

a. CO_2などを用いた燃料製造技術開発プロジェクト

「脱炭素燃料」は海外の化石燃料に依存する我が国のエネルギー需給構造に変革をもたらす可能性があり、エネルギー安全保障の観点からも重要である。既存インフラを活用することで、導入コストを抑えられるメリットが大きく、製造技術に関する課題を解決することで、社会実装を目指しており、グリーンイノベーション基金事業では、「CO_2等を用いた燃料製造技術開発」プロジェクトが公募された（2022.1.20 公募済み)。本報告では、当該プロジェクトのうち液体燃料（輸送用燃料）から「液体燃料収率の向上に係る技術開発」、気体燃料（産業用・家庭用）から「合成メタン製造に係る革新的技術開発」について記す。

ｱ) 技術開発 1：液体燃料(輸送用燃料)

ｱ)-1 液体燃料収率の向上に係る技術開発

本事業では、CO_2を H_2により還元して CO を製造する逆シフト反応の確立と、CO と H_2から炭化水素を製造する FT 合成、FT 合成粗油から製品へのアップグレーディングによる一貫製造プロセスの開発を実施する。

なお、パイロットスケール（300BPD 規模を想定）での液体燃料収率 80%達成の先に 2040 年までの商用化実現を目指している長期の研究開発である。

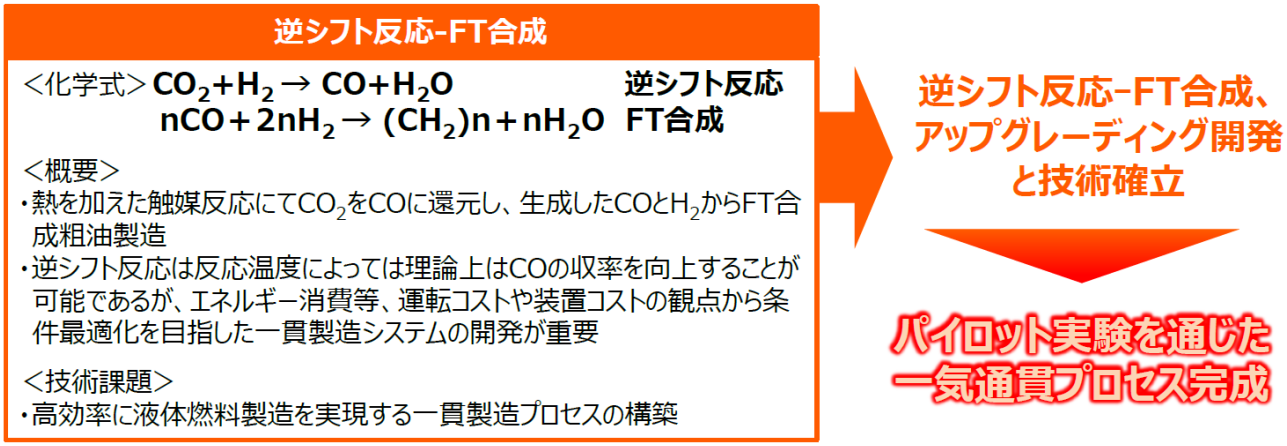


図 5.1.4-27 合成燃料の製造技術と課題 [19)]

ｲ) 気体燃料(産業・家庭用)

ｲ)-1 合成メタン製造に係る革新的技術開発

2030 年度までに、①再生可能エネルギー等の電力から製造した水素と、②その水素と回収した CO_2からメタン合成（メタネーション）する合成メタン製造に係る一連のプロセスの総合的なエネルギー変換効率が 60%を上回る合成メタン製造が見通せる革新的技術によるメタネーションの実現を目指す。

- 合成メタン製造には、以下①②の**複数プロセス**を要する。②は**発熱反応**であり、社会実装に向けた大型化に当たっては、**大量に生じる排熱の有効利用が課題**。このため、投入電力量に対する**総合的なエネルギー変換効率は50%程度と低い**。

①再エネ電力等による**水電解により水素を製造**

②その**水素と回収したCO_2をメタン合成（サバティエ反応によるメタネーション）**

- 2050年に向けて合成メタンの価格を現在のLNG価格と同水準とするためには、安価な再エネ電力（水素供給）の確保だけなく、**熱マネジメントの課題を解決できる方式**であって、①②による**合成メタン製造に係る一連のプロセスの総合的なエネルギー変換効率を高めることが必要**。

※ 合成メタン製造コストは、単純化すれば水素コストの4倍（$CO_2+4H_2 \rightarrow CH_4+2H_2O$）、エネルギー変換効率等を考えれば更なるコストを要する。

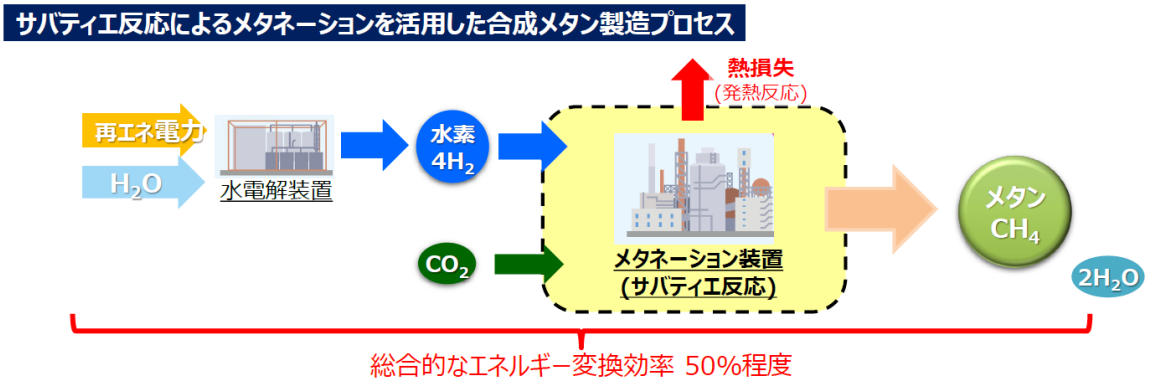


図 5.1.4-28 サバティエ反応によるメタネーションを活用した合成メタン製造の課題 [19)]

参考文献（第 5.1.4 節に関するもの）

1) IEA: The Future of Hydrogen (2019)
2) 再生可能エネルギーの大量導入に向けた水素利用発電技術調査専門委員会 ; 再生可能エネルギーの大量導入に向けた水素利用発電技術，電気学会技術報告第 1509 号(2021)
3) NEDO：水素エネルギー白書(2015)
4) 足利貢, 熊田憲彦, 村岡利紀, 大畑祐吾, 谷口達也, 石川七彩: 水素をつくる －水素製造技術の開発－, 川崎重工技報 182 号(2020)
5) 川崎重工 : プレスリリース「液化コスト低減を目指した水素液化機の大型化・高効率化開発を開始」（閲覧日 2022.2.7）, https://www.khi.co.jp/pressrelease/detail/20211228_1.html
6) 川崎重工 HP「新時代のエネルギー供給を支える水素液化システム」(閲覧日 2022.2.7), https://answers.khi.co.jp/ja/energy-environment/20171031j-01/?_gl=1*mopqf1*_ga*NTkwNDAzNDgyLjE2NDQyMTMwNjk.*_ga_GRRCX7N19P*MTY0NDk4OTI3NC4yLjEuMTY0NDk4OTQxNC4w&_ga=2.41420130.158696329.1644989275-590403482.1644213069
7) 川崎重工 HP「世界最大級の「11,200m³球形液化水素貯蔵タンク」の基本設計を完了」(閲覧日 2022.2.16), https://www.khi.co.jp/pressrelease/detail/20201224_1.html
8) 技術研究組合 CO_2 フリー水素サプライチェーン推進機構(HySTRA)　HP(2022 年 2 月 7 日閲覧), https://www.hystra.or.jp/project/
9) 経済産業省：グリーンイノベーション基金事業「大規模水素サプライチェーンの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画　(2021)
10) 経済産業省：グリーンイノベーション基金事業「再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(2021)
11) NEDO HP「大規模水素サプライチェーンの構築」(2022.2.7 閲覧)：https://green-innovation.nedo.go.jp/project/hydrogen-supply-chain/
12) 経済産業省：第 2 回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ　資料 3　水素関連プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性 (2021)
13) IEA: Ammonia Technology Roadmap (2021)
14) 花岡 亮：アンモニアでカーボンニュートラル火力発電へ, IHI 技報 Vol.61 No2 (2021)
15) NEDO ニュースリリース「アンモニア混焼技術の実用化へ向けた技術開発を加速」(2022.2.7 閲覧)：https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101432.html
16) NEDO HP「燃料アンモニアサプライチェーンの構築」(2022.2.28 閲覧): https://green-innovation.nedo.go.jp/project/building-fuel-ammonia-supply-chain/
17) 経済産業省：グリーンイノベーション基金事業「燃料アンモニアサプライチェーンの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(2021)
18) 経済産業省：第 5 回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ　資料 5「燃料アンモニアサプライチェーンの構築」プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性　(2021)

19) 経済産業省：第 8 回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ　資料 5「CO_2 等を用いた燃料製造技術開発」プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性(2021)
20) 大槻貴司､柴田善朗 : 日本国内でのメタネーションの可能性 : 電力･都市ガス需給モデルによる CO_2 回収・水電気分解・サバティエ反応システムの技術経済的評価, Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 41, No. 6 (2020)
21) 経済産業省（合成燃料研究会）：合成燃料研究会中間とりまとめ(2021)
22) NEDO : 次世代火力発電等技術開発／次世代火力発電技術推進事業／CO_2 からの液体燃料製造技術に関する開発シーズ発掘のための調査（一般)石油エネルギー技術センター、みずほ情報総研株式会社）(2020)
23) AUDI　JAPAN プレスリリース,Audi 合成燃料の研究をステップアップ(2022.2.15 閲覧) : https://www.audi-press.jp/press-releases/2017/b7rqqm000000jirm.html
24) 経済産業省（三菱総合研究所受託）：令和２年度エネルギー需給構造高度化対策に関する調査等事業（水素・燃料電池戦略ロードマップの進捗確認及び国内外における水素・燃料電池利活用状況調査）報告書（2021）
25) 経済産業省：グリーンイノベーション基金事業　「CO_2等を用いた燃料製造技術開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画（2022）

5.2　長期緩和策分析とそのインプリケーション

本節では、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+（文献 4,5)など）を用い、1.5℃シナリオ（2050 年カーボンニュートラル）に対応した排出削減シナリオ分析について述べる。2100 年までの全期間、世界各国間、そして技術間の整合性がとれた、想定した前提条件下で経済合理的な世界のエネルギーシステムを定量的に分析したものである。

5.2.1　長期緩和策分析のモデル概要

(1) DNE21+モデルの概要

本節では、カーボンニュートラル分析に合わせて、より多様な技術オプションの考慮など､モデル改良も行ってきたため､世界エネルギー･温暖化対策評価モデル DNE21+の概要を改めて記載する。DNE21+は以下のような特徴を有している。図 5.2.1-1 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 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。

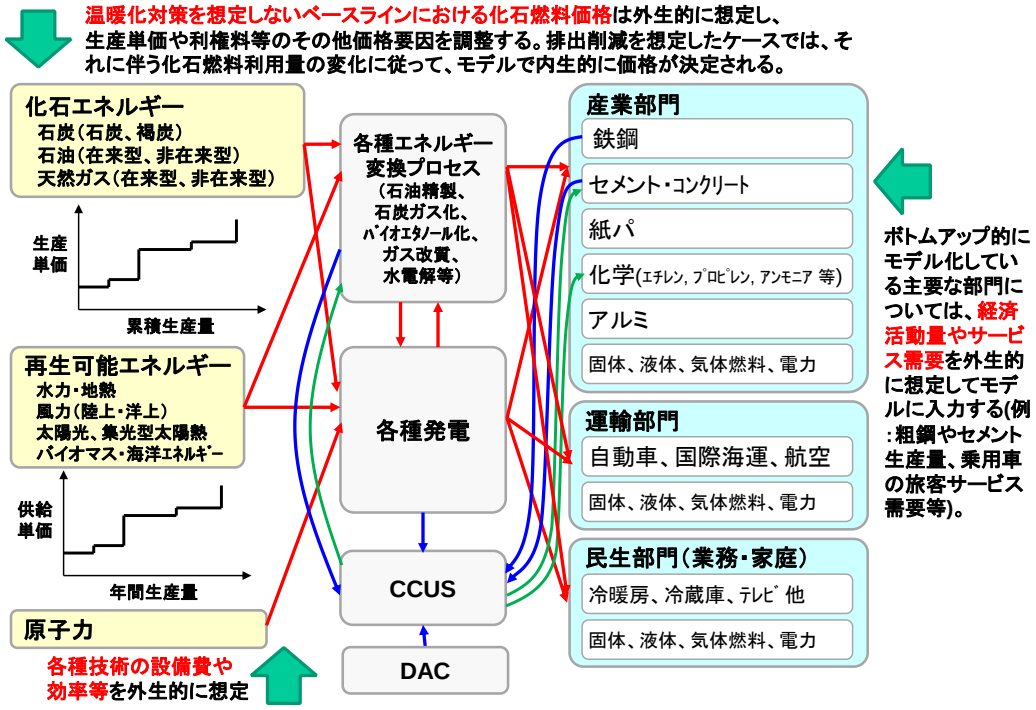


図 5.2.1-1 DNE21+におけるエネルギーフローの全体概要

2050 年カーボンニュートラルを前提としつつ、第 6 次エネルギー基本計画策定に向けた議論が行われた。その議論に資するように、DNE21+モデル分析は、2021 年 5 月 13 日の基本政策分科会に提示した [6]。その分析において想定した対策技術とその前提条件等の概要は、表 5.2.1-1、表 5.2.1-2 のとおりである。

表 5.2.1-1 DNE21+において考慮している具体的な対策技術等とその想定（1/2）

部門		想定方法	想定例	補足
人口		国連中位推計	別途記載	DNE21+モデルはエネルギーシステムモデルであり、人口、GDPは外生。モデルでは直接利用しておらず、サービス需要等の想定に活用
GDP		人口想定と一人当たりGDP等から国別に推計。IPCCで利用のSSPsシナリオと調整している。		
サービス需要等	鉄鋼、セメント、化学、紙パ、アルミ、道路交通、国内航空、国際航空、国際海運	過去の実績、人口、GDP等からモデル分割の国・地域別に推計鉄鋼については、全粗鋼生産量の他、その内数として、鉄スクラップの利用可能量推計を基に、電炉鋼生産量についても想定 化学は、エチレン、プロピレン、BTX、アンモニアを具体的に想定 道路交通は、自動車（小型、大型）、バス、トラック（小型、大型）別に需要想定。航空については4距離帯別に需要を想定	別途、一部部門について記載	排出削減対策により、排出削減費用が大きくなり、GDP損失が大きくなった場合、また、国間で対策費用の差異が大きくなった場合には、サービス需要が大きく低減する可能性があるが、部分均衡モデルであるため、そのフェードバックは考慮していない。推計された費用等によっては留意が必要
化石燃料	資源量	石油・ガス：米国地質調査所（USGS）、石炭：世界エネルギー会議（WEC）のレポート（Survey of Energy Resources 1998）ベース 非在来型石油・ガス：H-H. Rogner (1997)論文より想定	世界全体では、在来型石油（NGL含む）：241 Gtoe、在来型天然ガス：243 Gtoe、石炭(褐炭含)：2576Gtoeなど	
	価格	採掘コスト：H-H. Rogner (1997)論文。ただし、利権料等が大きいため、ベースラインシナリオのFOB価格を、IEA WEO等を参考に利権料として調整	別途記載	
バイオマス	残渣系	食料残渣、木材残渣等を国別に推計	2050年時点では、世界全体で9EJ/yr程度のﾎﾟﾃﾝｼｬﾙ	
	プランテーション系および植林ポテンシャル	RITE農業土地利用・水資源評価モデルGLaWで、グリッド別にポテンシャル推計：食料消費量、気候予測等から食料生産性を推計。それらを基に食料生産のための必要土地利用面積を推計、余剰耕地等を推計。プランテーション系バイオマスポテンシャル（および植林ポテンシャル）を推計	2050年時点では、世界全体で900 Mha程度が利用可能	
水素		化石燃料由来（グレー水素）、化石燃料＋CCS由来（ブルー水素）、再エネ由来（グリーン水素）など、各種水素製造技術を想定。排出削減目標下で費用最小となるようにモデルで内生的に決定される。長距離水素輸送方法は特に特定していないが、液化水素輸送コスト報告例を参考に輸送コストをモデル化	別途記載	メタネーションは、サバティエ反応およびSOEC共電解の2種類を想定
	合成燃料(CCU)	石油系合成燃料、合成メタンを想定。合成に必要なCO_2は、バイオマス、DACに加えて、化石燃料からのCO_2も想定。排出削減目標下で費用最小となる製造方法がモデルで内生的に決定。		
発電	化石・バイオマス	OECD/NEA、コスト等検証委員会等の報告を参考に設備費を想定 燃料費は、化石燃料の項に記載のFOB価格に、輸送距離を踏まえた輸送費等を考慮しCIF価格として想定	別途記載	
	原子力	OECD/NEA、コスト等検証委員会等の報告を参考に設備費を想定	別途記載	原子力を導入しないとしている国については経済合理性と無関係に導入無しと制約。日本については、2030年のエネルギーミックスの原子力比率20%とし参照シナリオでは2050年10%を上限値として制約。感度解析実施
	再エネ	太陽光：NASAによるGISベースの日射量データと土地利用データから、グリッド別の太陽光ポテンシャルを推計 風力：NOAAによるGISベースの風速データと土地利用データから、グリッド別の太陽光ポテンシャルを推計 VREは、別途、総発電電力量に占める比率上昇とともに増加する系統対策費を想定（東大-IEEJ電源構成モデルを援用） 水力：WEC Survey of Energy Resources 1998を基に国別にコスト・ポテンシャルを想定 地熱：各種文献より発電費用172$/MWh～258$/MWhと想定 集中型太陽熱：NASAによるGISベースの日射量データと土地利用データからグリッド別の集中型太陽熱発電ポテンシャルを推計	別途記載	推計は、世界全体で整合的となるよう、世界地図ベースのGISデータから推計。設備費については外生的に時間とともにコスト低減するシナリオを想定。 GISの精度や土地利用コストなど、日本の精度については精査の余地有

表 5.2.1-2 DNE21+において考慮している具体的な対策技術等とその想定（2/2）

部門		想定方法	想定例	補足
CCS	回収	CO_2回収設備の設備費とCO_2回収に要するエネルギー量を各種文献を基に想定	別途記載	貯留ポテンシャル推計は、世界全体で整合的となるよう、世界地図ベースのGISデータから推計。日本の精度については精査の余地有
	輸送	パイプライン、液化CO_2輸送（タンカー）を想定	別途記載	
	貯留	米国地質調査所USGSのGISベースの地質データ等から貯留ポテンシャルを推計（Akimoto et al., IEA GHG, 2004参照）		
大気CO2直接回収（DAC）		M. Fasihi et al., (2019)（DAC関連の多くのサーベイを実施した論文）を基に、2種類の方式の設備費と回収に要するエネルギー量を想定	別途記載	回収後のCO2は、CCS欄に記載の輸送、貯留と共通。また、CCU利用の場合は、合成燃料の欄と共通
産業部門	鉄鋼	各種省エネ技術（COURSE50など）、CCS、ガス直接還元製鉄、水素直接還元製鉄を想定。設備費、エネルギー収支等を各種文献等を参考に想定（J. Oda et al., Energy Economics, 2007など） 電炉はスクラップ鉄の利用可能量によって導入可能量は制約される。	水素直接還元製鉄、スクラップ鉄の利用可能量は付録参照	高炉転炉法＋CCSは、30%程度のCO_2排出削減は可能だが、ゼロ排出にはできない。
	ｾﾒﾝﾄ・ｺﾝｸﾘｰﾄ	各種省エネ技術、石炭からガス、水素、合成メタンへの燃料転換、CCS（CCSは3000 t-クリンカ/日以上の規模のみ可）を想定。それらは全体最適の中でモデル内で内生的に決定。設備費、エネルギー収支等を各種文献等を参考に想定 ｺﾝｸﾘｰﾄにおけるCCUを想定	ｺﾝｸﾘｰﾄCCU 最大11.9kgCO2/tセメント（自然吸収されるCO2量の低下も加味した正味の吸収量をモデル化）	
	化学	エチレン、プロピレン、BTX、アンモニアの製造方法を想定。各製造方法毎に省エネ技術を想定している他、エチレン、プロピレンはエタンからの製造も想定し、更に、エチレン、プロピレン、BTXはメタノール経由の製造も想定（水素とCO_2からのメタノール（CCU）も想定）		
民生部門	家庭、業務	冷蔵庫、照明、調理用機器、給湯、冷暖房需要をそれぞれ想定しつつ、ヒートポンプ、コジェネ機器などの各種機器をモデル化。都市ガスインフラコストも想定。	都市ガスを水素への転換の場合は配送インフラに要する費用は、ガス、合成メタンの2倍と想定	
運輸部門	道路交通	乗用車（小型、大型）、バス、トラック（小型、大型）の区分毎に、従来型内燃機関車（ガソリン、軽油、ﾊﾞｲｵ燃料）、HV、PHV、EV、FCVを想定。販売価格や将来コスト低減見通しを参考に車両価格を想定。EV, FCVはインフラ利用の追加費用も想定（ただし2050年に向けて大きく低減）。合成燃料も想定 完全自動運転車によるカーシェア・ライドシェア誘発シナリオも想定	乗用車（小型）の例は付録参照。 カーシェア・ライドシェアシナリオ想定はp.36に記載	完全自動運転車によるカーシェア・ライドシェア誘発シナリオでは、2031年から可能と想定
	航空	省エネ、ジェット燃料からバイオ燃料、合成ジェット燃料への転換、水素航空機、電動航空機を想定。技術によって距離別需要を満たすことができる範囲を想定。燃料費はモデルで内生的に決定。機体コストは各種文献を参考に想定		
	国際海運	重油、軽油、バイオディーゼル燃料、LNG船、水素船を想定		

- 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。

  a) 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。

  b) 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。

(2) 日本の VRE 詳細評価のための IEEJ 電源構成モデルの概要

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。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

(3) モデルの主要な前提条件

モデルは多くの前提条件の下で構築されているが、下記に主要な前提条件について記載する。

① 人口・GDP・主要需要の想定

今回の分析では、人口、潜在的 GDP（ベースラインの GDP）等の社会経済シナリオの想定は、基本的に IPCC 等での利用を想定して国際的に策定された共有社会経済パス Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)の中位シナリオ SSP2[7)]に準拠させ、以下のように行っている。表 5.2.1-3 は世界全体の、表 5.2.1-4 は日本の想定である。

表 5.2.1-3 世界の社会経済シナリオの想定

	2030年	2050年	2100年
人口（億人）	**83.6** (81.4-85.9)	**92.1** (86.1-100.5)	**93.1** (70.0-127.3)
GDP（%／年）	**2.7** (2.4-3.1) [2010年～]	**2.2** (1.3-2.8) [2030年～]	**1.4** (0.6-2.2) [2050年～]
粗鋼生産量（億トン）	**19.6** (18.8-20.0)	**21.3** (19.3-22.7)	**22.9** (14.7-26.5)
セメント生産量（億トン）	**41.6** (39.0-43.0)	**44.0** (38.5-46.6)	**44.7** (29.4-59.1)
道路部門の旅客輸送需要（兆p-km）	**30.2** (31.2-37.3)	**60.0** (56.8-74.2)	**83.3** (66.8-88.8)

注）太字が SSP2 で今回の分析で利用。括弧内は、SSP1～5 までのシナリオの幅。なお、エネルギー需要や発電電力量はモデルで内生的に計算される

表 5.2.1-4 日本の社会経済シナリオの想定

	2030年	2050年	2100年
人口（億人）	**1.18** (1.16-1.26)	**1.02** (0.96-1.22)	**0.84** (0.47-1.05)
GDP（%／年）	**1.6** (1.3-1.9) [2010年～]	**0.4** (-0.1-1.2) [2030年～]	**0.4** (-0.9-1.5) [2050年～]
粗鋼生産量（億トン）	**0.90** (0.81-0.97)	**0.95** (0.73-1.11)	**0.85** (0.45-0.90)
セメント生産量（億トン）	**0.54** (0.50-0.68)	**0.44** (0.31-0.75)	**0.40** (0.23-0.65)
道路部門の旅客輸送需要（兆p-km）	**0.77** (0.69-0.85)	**0.64** (0.61-0.82)	**0.61** (0.51-0.70)

注）太字が SSP2 で今回の分析で利用。括弧内は、SSP1～5 までのシナリオの幅。なお、エネルギー需要や発電電力量はモデルで内生的に計算される

② 発電設備費と発電効率の想定

各種発電設備の設備費と発電効率は、それぞれ表 5.2.1-5、表 5.2.1-6 のように想定した。

表 5.2.1-5 発電効率の想定（単位：LHV%）

		2010	2020	2030	2050
石炭火力	低効率(在来型(亜臨界)、現在の途上国での利用)	23.0	24.0	25.0	27.0
	中効率(主に現在の先進国での利用(超臨界)～将来、複合発電化(IGCC)を含む)	37.8	39.6	41.4	45.0
	高効率(現在先進国で利用～将来複合発電化(IGCC、IGFC))	44.0	46.0	48.0	58.0
	CO_2回収付IGCC/IGFC	34.0	35.5	38.5	50.3
石油火力	低効率(ディーゼル発電等)	23.0	24.0	25.0	27.0
	中効率(亜臨界)	38.6	40.2	41.8	45.0
	高効率(超臨界)	52.0	54.0	56.0	60.0
	CHP*1	39.0	41.0	43.0	47.0
ガス火力	低効率(蒸気タービン)	27.2	28.4	29.6	32.0
	中効率(複合発電)	39.8	41.6	43.4	47.0
	高効率(高温型複合発電)	54.0	56.0	58.0	62.0
	CHP*1	40.0	42.0	44.0	48.0
	天然ガス酸素燃焼発電	40.7	41.7	43.7	48.7
バイオマス	低効率(蒸気タービン)	22.0	22.5	23.5	25.5
	高効率(複合発電)	38.0	40.0	42.0	46.0
水素発電(GT/FC)		54.0	56.0	58.0	62.0

*1 排熱回収効率はエネルギー需給バランスを考慮して想定することとし、地域によって5～20%の範囲で想定

表 5.2.1-6 発電設備費の想定

			2000年価格設備費 [US$/kW]	2018年価格設備費 [US$/kW]
石炭発電	低効率(在来型(亜臨界)、現在の途上国での利用)		1000	1458
	中効率(主に現在の先進国での利用(超臨界)～将来、複合発電化(IGCC)を含む)		1500	2187
	高効率(現在先進国で利用～将来、複合発電化(IGCC、IGFC))		1700	2479
石炭・バイオマス混焼	(中、高効率石炭発電への追加費用)	バイオマス混焼率:～5%	+85	+124
		バイオマス混焼率:～30%	+680	+992
石炭・アンモニア混焼	(中、高効率石炭発電への追加費用)	アンモニア混焼率:～20%	+264 – +132	+385 – +193
		アンモニア混焼率:～60%	+271 – +135	+395 – +197
石油発電	低効率(ディーゼル発電等)		250	365
	中効率(亜臨界)		650	948
	高効率(超臨界)		1100	1604
	CHP		700	1021
天然ガス発電	低効率(蒸気タービン)		300	437
	中効率(複合発電)		650	948
	高効率(高温型複合発電)		1100	1604
	CHP		700	1021
天然ガス・水素混焼	(中、高効率天然ガス発電への追加費用)	水素混焼率:～20%	+55	+80
バイオマス発電(専焼)	低効率(蒸気タービン)		2720–2400	3967–3500
	高効率(複合発電)		3740–3030	5454–4419
原子力発電			2743	4000
CO_2回収付IGCC/IGFC			2800–2050	4083–2989
天然ガス酸素燃焼発電			1900–1400	2771–2042
水素発電(FC/GT)			1160	1692
アンモニア発電(専焼)			3040–1444	4433–2106
電力貯蔵(揚水発電等)			1000	1458

注 1) DNE21+モデルでは基準年としている 2000 年価格で想定。表示の 2018 年価格は米国の GDP デフレータを用いて換算して表記したもの。
注 2) 設備費は表中に示す範囲において時点の経過と共に低減するように想定している。
注 3) 本数値は米国の想定値であり、国・地域によってロケーションファクターを乗じており若干の差異がある(日本は最大+3%)。

③ VRE の想定

太陽光、風力発電の変動性再生可能エネルギー(VRE)のコストについて、設備費の将来の低下を想定し、日本については、屋根置き太陽光発電は図 5.2.1-2、大型太陽光発電は図 5.2.1-3、陸上風力は図 5.2.1-4、洋上風力は図 5.2.1-5 のように想定した。後述のように、標準のコスト低減シナリオ(参考値のケースなど)と、再エネコストが低位のシナリオ(再エネイノベケース)を想定した。標準のコスト低減シナリオは、実績のコスト低減を踏まえつつ、政府による 2015 年の発電コスト検証[8)]における 2030 年見通しを踏まえて想定を行った。

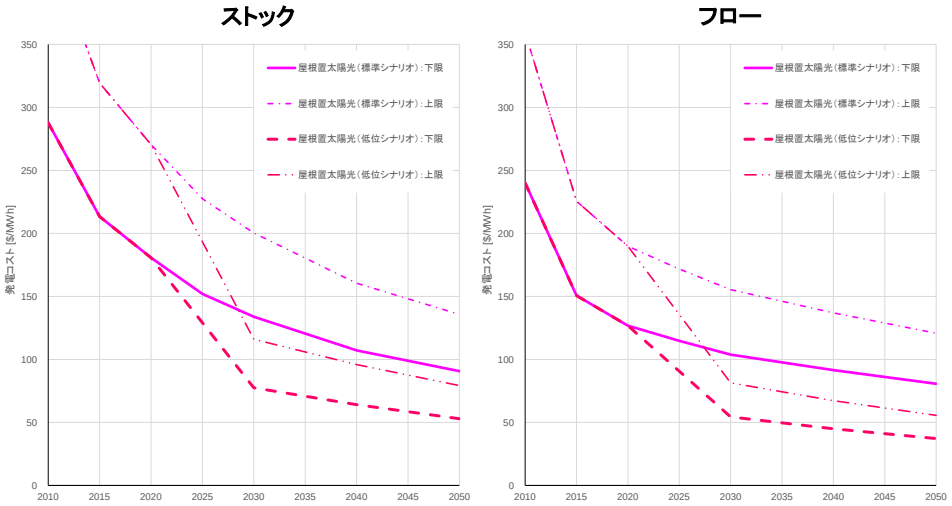


図 5.2.1-2 日本の屋根置太陽光発電コストの想定：時系列

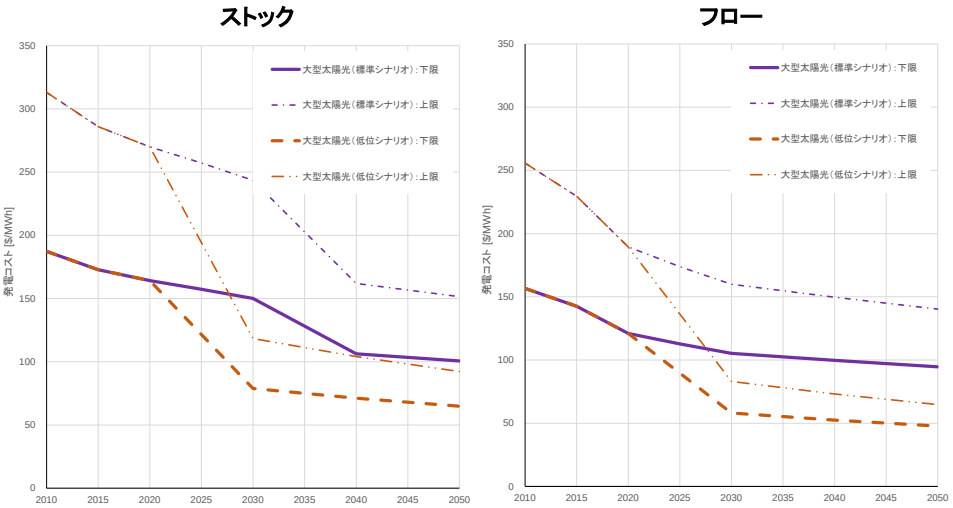


図 5.2.1-3 日本の大型太陽光発電コストの想定：時系列

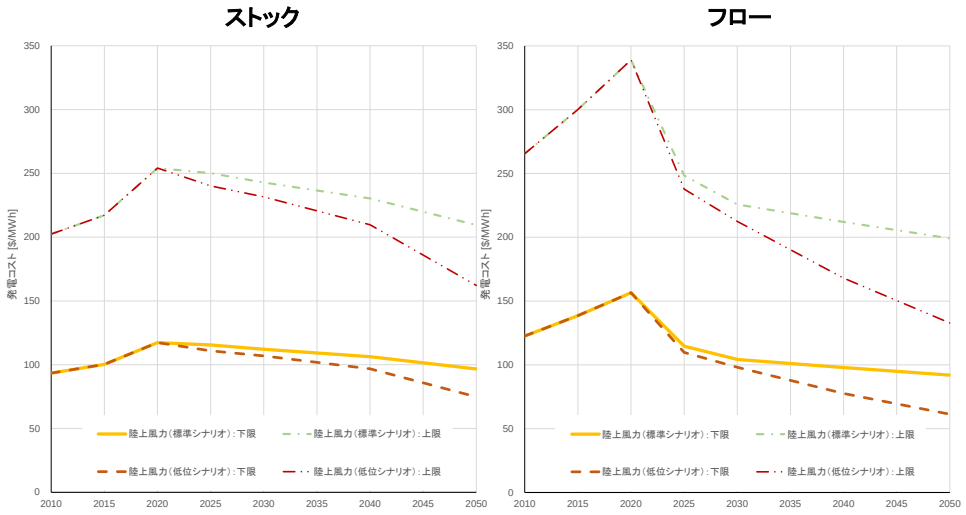


図 5.2.1-4 日本の陸上風力発電コストの想定：時系列

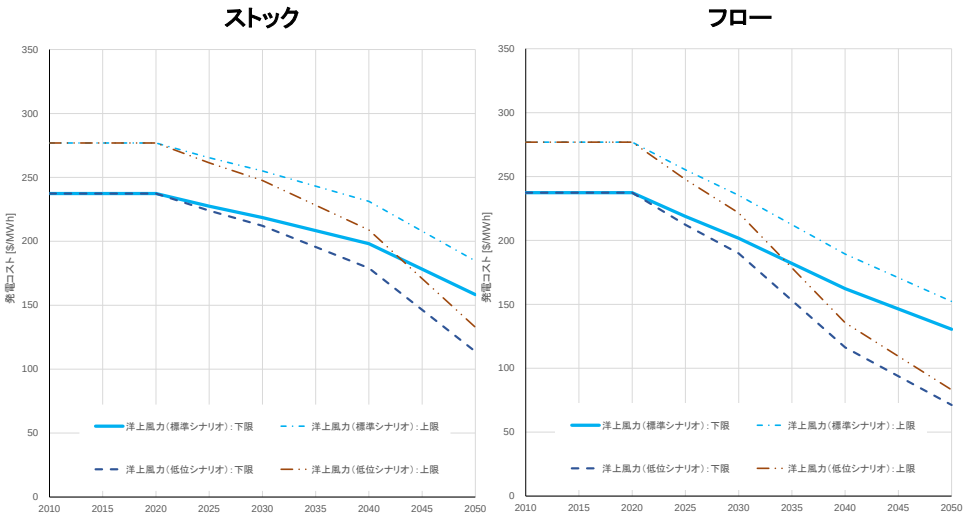


図 5.2.1-5 日本の洋上風力発電コストの想定：時系列

VRE は、日射量、風速等により、ポテンシャル、コストが変化する。太陽光発電、風力発電については、日射量と風速の世界全体をカバーした GIS データを基に、推計している。図 5.2.1-6 に、日本における、VRE の 2050 年断面でのコスト・ポテンシャル曲線を示す。ここで示しているコスト幅が、図 5.2.1-2～図 5.2.1-5 で示している 2050 年のコストの幅に相当する。なお、土地利用の制約は想定しているが、図でも記載しているように、それぞれの土地の状況によっては、VRE の利用拡大とともに利用条件の悪い土地を利用する必要が生じ、それによって建設費がさらに増大する可能性もあるが、それについては考慮していない。

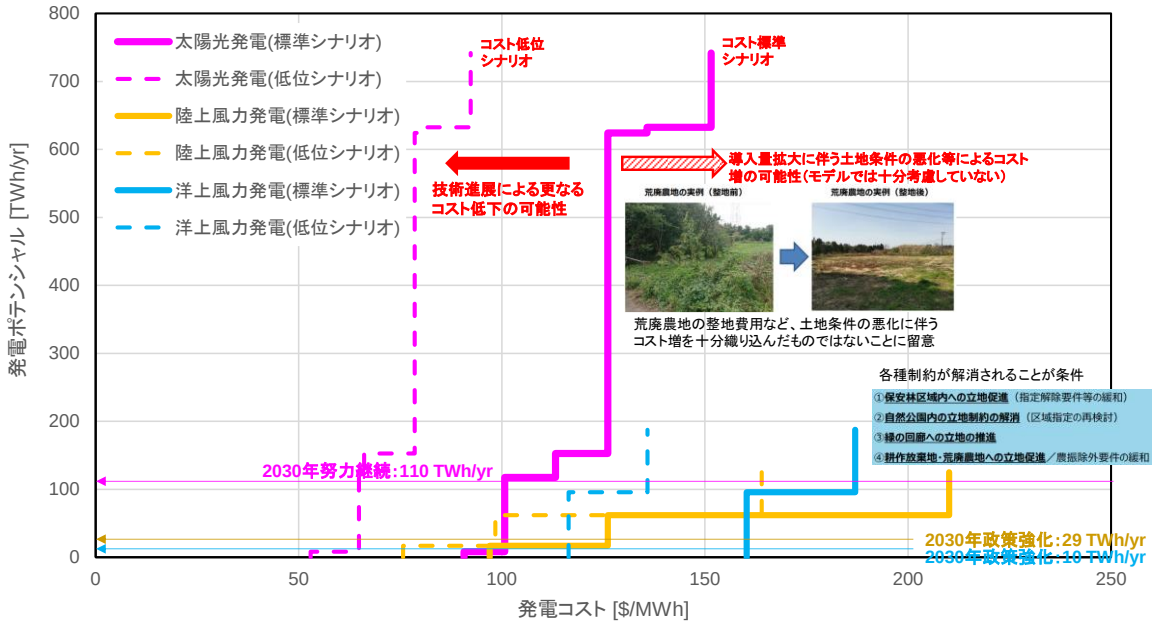


図 5.2.1-6 日本の変動性再エネコスト・ポテンシャルの想定（2050 年）

図 5.2.1-7 は日本エネルギー経済研究所の電源モデルにより推計された VRE の系統統合にかかる費用（総費用）である。DNE21+においてこれを用いるため、本来、同じ VRE 比率であっても、太陽光と風力の比率の組み合わせ次第で、費用が少し異なってくるが、この結果を利用しつつも、DNE21+モデル計算の便宜上、太陽光と風力にそれぞれ分解して費用を想定した。図 5.2.1-8 は、限界費用で示した、今回 DNE21+で想定した VRE の系統統合に伴う日本の限界費用である。

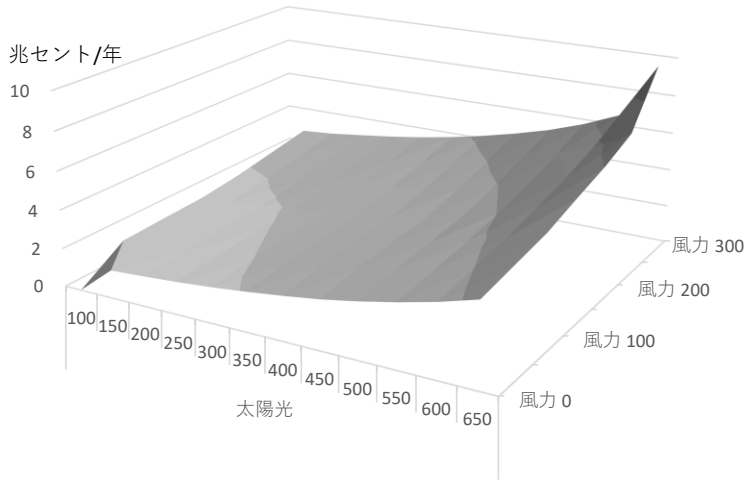


図 5.2.1-7 系統対策における統合費用（総費用）の推計値（2050 年）

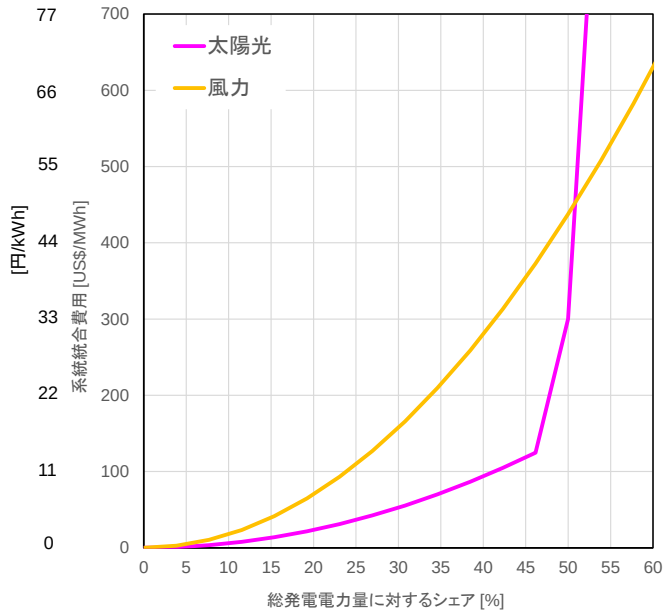


図 5.2.1-8 系統対策における統合費用（限界費用）の想定（2050 年）

④ CCUS、水素関連の想定

本節では、CCUS、水素関連技術のモデル想定について記載する。

表 5.2.1-7 には CO_2 回収技術の想定を、表 5.2.1-8 には CO_2 貯留技術の想定を示す。CO_2 削減費用については、エネルギー価格等から内生的に決まるが、CO_2 回収費用（輸送、貯留含まず）としては 2050 年時点では 2000～5000 円/tCO_2 程度である。

表 5.2.1-7 CO_2 回収技術の想定

	2000年価格設備費 ($/kW)	発電効率(LHV%)	CO_2回収率(%)
CO_2回収付IGCC/IGFC*1	2800 – 2050	34.0 – 58.2	90 – 99
天然ガス酸素燃焼発電*1	1900 – 1400	40.7 – 53.3	90 - 99
	2000年価格 設備費(1000$/(tCO2/hr))	必要電力量(MWh/tCO2)	CO_2回収率(%)
石炭発電からの 燃焼後CO_2回収*1	851 – 749	0.308 – 0.154	90
天然ガス発電からの 燃焼後CO_2回収*1	1309 – 1164	0.396 – 0.333	90
バイオマス発電からの 燃焼後CO_2回収*1	1964 – 1728	0.809 – 0.415	90
ガス化CO_2回収*1	62	0.218	90 – 95
製鉄所高炉ガスからの CO_2回収*1	386 – 319	0.171 – 0.150	90
	2000年価格 設備費(1000$/(tCO2/hr))	必要燃料(GJ/tCO_2) 回収電力量(MWh/tCO_2)	CO_2回収率(%)
クリンカ製造からの CO_2回収*2	2485 – 2246	4.87 – 3.66 0.199 – 0.150	90

表 5.2.1-8 CO_2 貯留の想定

	貯留ポテンシャル (GtCO2)		【参考値】IPCC SRCCS (2005) (GtCO2)	貯留費用 ($/tCO2)*1
	日本	世界		
廃油田 (石油増進回収)	0.0	112.4	675–900	92 – 227*2
廃ガス田	0.0	147.3 – 241.5		10 – 132
深部帯水層	11.3	3140.1	10^3–10^4	5 – 85
炭層 (メタン増進回収)	0.0	148.2	3–200	47 – 274*2

表 5.2.1-9 には水素製造技術の想定を、表 5.2.1-10 には液化技術の想定を示す。また、表 5.2.1-11 には輸送費用の想定について示す。

表 5.2.1-9 水素製造技術の想定

	設備費 (US$/(toe/yr))	転換効率 (%)
石炭ガス化	1188～752	60%
ガス改質	963～733	70%
バイオマスガス化	1188～752	60%
水電気分解	2050～667	64～84%

表 5.2.1-10 液化技術の想定

	設備費 (US$/(toe/yr))	消費電力 (MWh/toe)
天然ガス/合成メタン	226	0.36
水素	1563	1.98

表 5.2.1-11 CO_2、水素等の輸送コストの想定

		設備費	可変費*1
		電力：$/kW その他エネルギー：US$/(toe/yr) CO_2：US$/($tCO_2$/yr)	エネルギー：US$/toe CO_2：US$/tCO_2
電力*2		283.3+1066.7L	-
水素	パイプライン*3	210.0L	5.0L
	タンカー	69.5L	7.26+0.60L
CO_2	パイプライン*3	99.4L	2.35L
	タンカー	47.5L	1.77L
天然ガス（合成メタンも同様）	パイプライン*2	128.3L	3.5L
	タンカー	35.1L	8.09+0.39L

表 5.2.1-12 は、メタネーション（合成メタン製造）におけるエネルギー・CO_2 バランスの想定である。SOEC 共電解メタン合成については、革新的な合成メタン製造技術として、その効率向上、設備費低減を表 5.2.1-13、表 5.2.1-14 に示すように複数想定した。具体的なシナリオとの関係は後述する。また、合成液体燃料製造については、

メタネーションと同様にモデル化しており、表 5.2.1-15 に示すようにエネルギー・CO_2 バランスを想定した。なお、ガソリン、灯油・ジェット燃料、軽油がそれぞれ独立に製造可能としている。合成燃料（合成メタン、合成液体燃料）は、正味ではカーボンニュートラルとなるが、CO_2 の帰属の問題が大きな課題である。合成メタン、合成液体燃料の燃焼による CO_2 排出はゼロとみなし、逆に合成メタン製造・輸出元での回収 CO_2 は、当該国の排出削減には計上しない形で評価を行った。

表 5.2.1-12 メタネーションにおけるエネルギー・CO_2 バランスの想定（2050 年）

サバティエ反応	水素	1.22 toe	⇒	メタン	1 toe
	CO_2	2.33 tCO_2			
SOEC 共電解	電気	15.7 MWh (=1.35 toe)	⇒		
	CO_2	2.33 tCO_2			

表 5.2.1-13 革新的メタン合成（SOEC 共電解メタン合成）の効率向上の想定

	2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
標準シナリオ	64%	69%	74%	85%
合成メタン製造効率向上加速シナリオ	64%	69%	85%	85%

表 5.2.1-14 革新的メタン合成（SOEC 共電解メタン合成）の設備費低減の想定 [million US$/(ktoe/day)]

	2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
標準シナリオ	606	473	335	335
合成メタン製造設備費低位シナリオ	606	473	287	287
合成メタン製造設備費低下加速シナリオ	606	438	186	186

表 5.2.1-15 合成液体燃料製造におけるエネルギー・CO_2 バランスの想定（2050 年）

水素	1.25 toe	⇒	合成石油	1 toe（ｴﾈﾙｷﾞｰ利用可能分：0.71 toe）
CO_2	3.02 tCO_2			
電気	0.02 toe			

表 5.2.1-16 には、DAC のエネルギー消費量と設備費の想定を示す。本モデル分析では、Fasihi らによる Base と Conservative 2 種類のシナリオのうち、Conservative を採用した。また、Fasihi ら [9]の想定では、低温システム（LT DAC）は廃熱の利用を想定したシステムと考えられるが、DNE21+では温度帯別の熱のフローをモデル化していないこともあり、熱は別途、水素やガスで供給するものと想定した（具体的な想定は、文献 10)）。

また、別途、6.3.2 節においては、IEA NZE シナリオとの比較を行うにあたって、感度解析として、DAC のエネルギー消費量、設備費が 2020 年値から低下しないケースについても分析を行った。

表 5.2.1-16 DAC のエネルギー消費量と設備費の想定 [9)]

	エネルギー消費量 (/tCO2)			設備費(Euro/(tCO2/yr))	
		2020年	2050年	2020年	2050年
高温(電化)システム(HT DAC)	電力 (kWh)	1535	1316	815	222
低温システム(LT DAC) 熱は水素もしくはガス利用を想定した	熱 (GJ)	6.3 (=1750 kWh)	4.0	730	199
	電力 (kWh)	250	182		

⑤ 排出削減シナリオの想定

パリ協定では、「全球平均気温上昇を産業革命前に比べ 2℃未満に十分に低く(”well below”)抑える。また 1.5℃に抑えるような努力を追求する。」とされている。一方、1.5℃シナリオ、それと整合的とされる 2050 年カーボンニュートラルを目指す動きが加速している。本分析においては、世界全体について、1.5℃シナリオを想定して分析を行った(CO_2 排出量は図 5.2.1-9、GHG 排出量は図 5.2.1-10。なお、今回の分析では直接利用していないが、図中の 2℃シナリオは、IEA ETP2017[11)] を参考に想定したものである。)。また、日本および米欧等の主要先進国については、2050 年に GHG 排出量で正味ゼロ排出となるシナリオを想定して分析を行った(一部、比較評価のため、例外のシナリオ有)。図で見られるように、世界全体の GHG 排出量は 2065 年頃に正味ゼロとなる、また、CO_2 排出量は 2050 年頃に正味ゼロとなる。

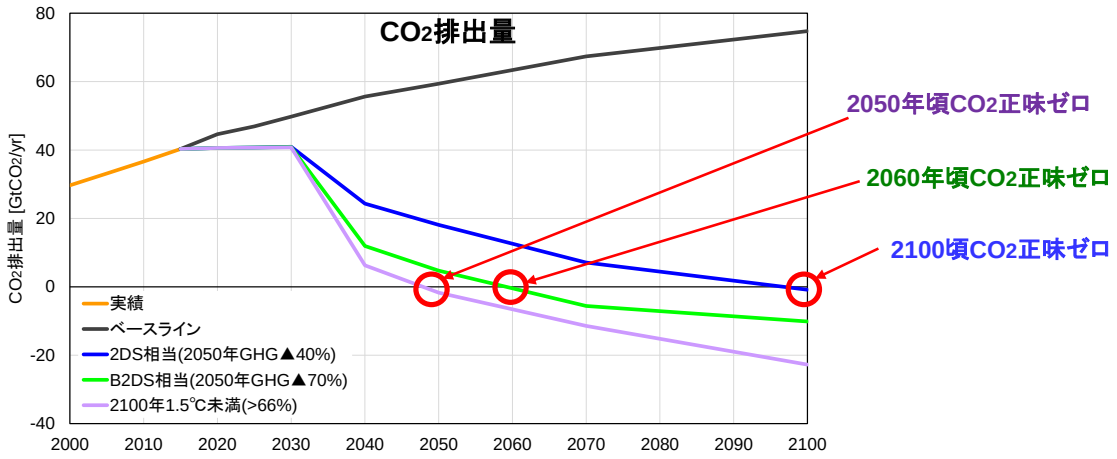


図 5.2.1-9 ベースラインの世界排出量と想定した 2℃、1.5℃排出シナリオ(CO_2)

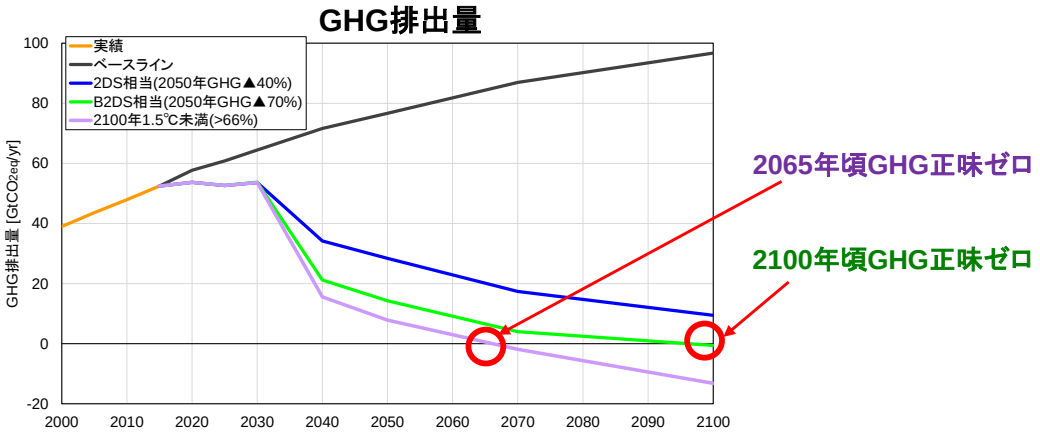


図 5.2.1-10 ベースラインの世界排出量と想定した 2℃、1.5℃排出シナリオ（GHG）

(4) カーボンニュートラル達成の対策（定性的な理解）

DNE21+モデルを用いた定量的な分析の前に、シナリオ分析の理解を容易にするために、カーボンニュートラル（CN）達成の対策の定性的な姿について解説する。CN のためには、一次エネルギー供給としては、省エネをしつつ、原則、原子力、再エネ、CCS（CCS 無しの化石燃料利用の場合は、BECCS、DACCS、植林等の負排出技術 NETs（≒ CO_2 除去技術 CDR）でオフセット）のみで構成することが必要である（図 5.2.1-11）。一方、国内では、原子力に社会的制約が大きいこと、CO_2 貯留についてもコストやポテンシャル制約、また社会的制約も考えられること、同様に、再エネについても、コストやポテンシャル制約、また社会的制約も考えられることから、これら制約が、より緩やかな海外の一次エネルギー源を活用することが考えられる。日本は、送電線が海外と連系していないため、再エネや CCS 付き化石燃料（燃焼前 CO_2 分離）を活用するには、水素等に転換する必要がある。一般的に、再エネ由来はグリーン水素、CCS 由来はブルー水素と呼ばれる（図には記載していないが、原子力由来の水素もあり得、パープル水素と呼ばれる。ただし、原子力が電力需要以上に余剰となる国は、ごく一部の国に限定されると考えられる）。また、利便性を増すために、窒素 N を付加してアンモニアに、また炭素 C を付加して合成メタンや合成液体燃料にして活用するオプションもあり得る。それぞれの対策において、将来の技術進展（コスト低減）や社会的な制約の強度等の不確実性が大きいため、その不確実性を考慮しつつ、全体整合的なシナリオ分析を行うことが重要である。

また、図 5.2.1-12 は、電力、非電力の区分で、最終エネルギー消費量側から対策を示したものである。非電力の対策が難しいので、電化を進めつつ、残る化石燃料は水素や合成燃料、バイオエネルギー等に転換が求められる。また、図 5.2.1-11 でも示したように、残り得る CCS 無しの化石燃料燃焼排出に対しては、BECCS、DACCS、植林等の負排出技術でオフセットすることとなる。

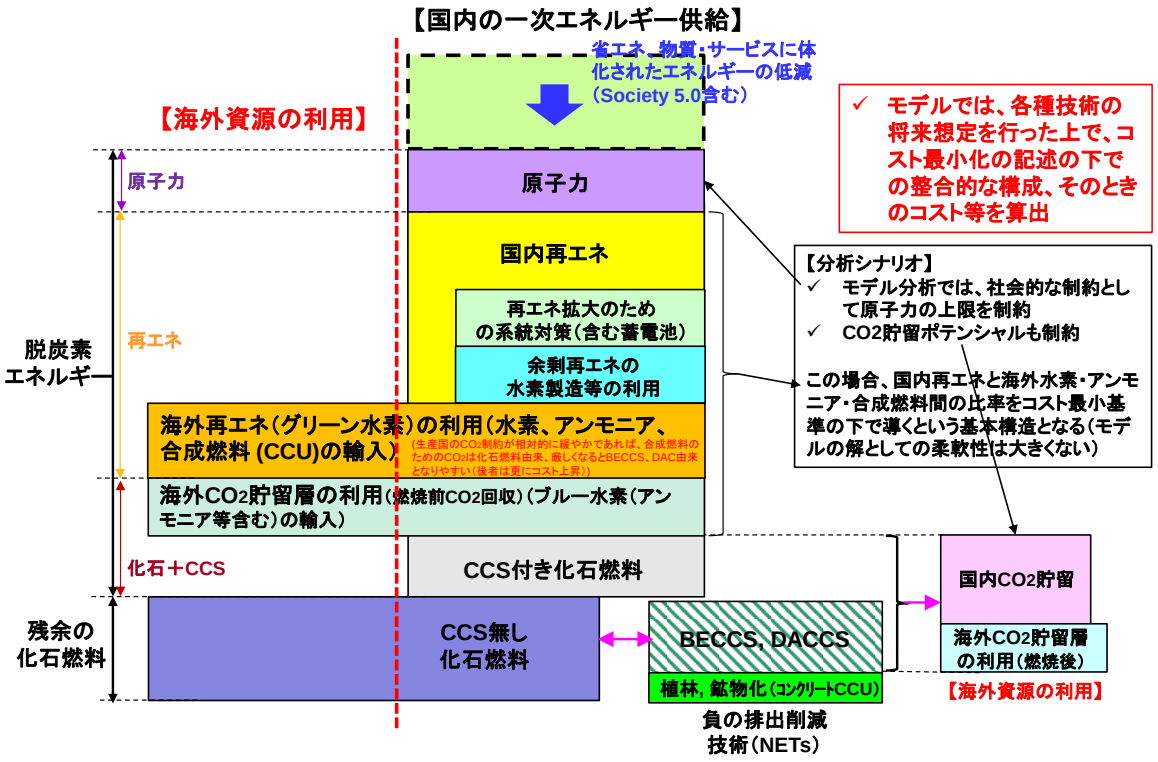


図 5.2.1-11 正味ゼロ排出のイメージ（1/2）

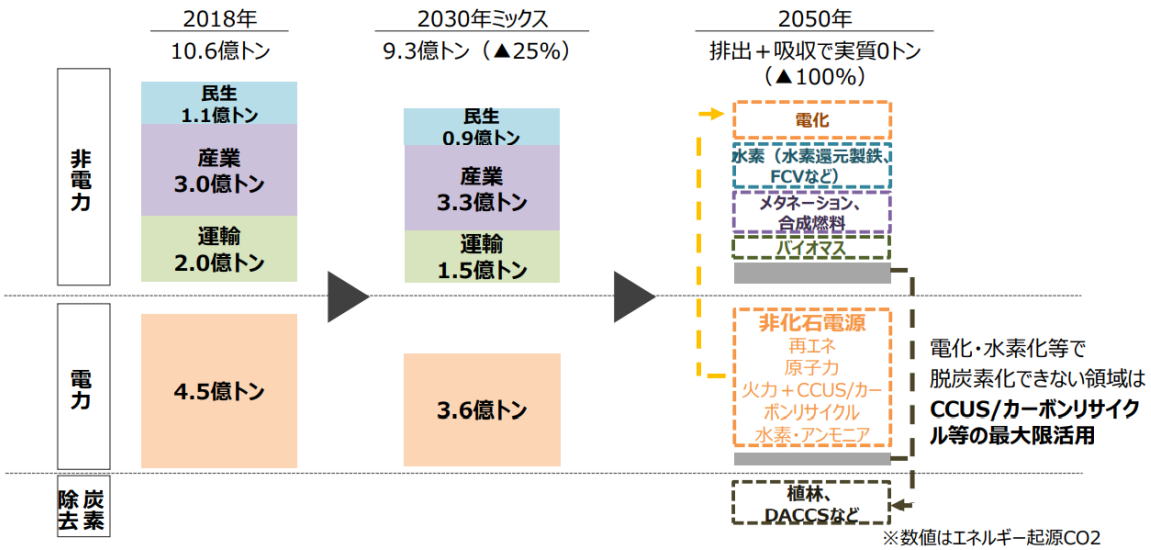


図 5.2.1-12 正味ゼロ排出のイメージ（2/2）（出典：基本政策分科会資料 [12)]）

5.2.2 日本の CN シナリオ分析

本節では、日本の 2050 年 CN 達成における費用効率的な対策についての分析結果を示す。本分析は、第 6 次エネルギー基本計画の議論に資するために、2021 年 5 月に総

合資源エネルギー調査会基本政策分科会に提示した[6]。本報告書では、より幅広い目標達成の可能性を理解するために、更に 2 シナリオを追加した結果を示す。

(1) モデル分析のケース想定

表 5.2.2-1 に 2050 年 CN シナリオ分析のケース想定を、表 5.2.2-2 にはその技術シナリオの詳細について示す。「参考値のケース」は、経済産業省があらかじめ提示した 2050 年 CN 下での発電電力量構成比率（再エネ：50～60%程度、CCUS＋原子力：40～30%程度、水素・アンモニア：10%程度）に近い発電電力量構成比率がモデルの費用最小化計算結果として導出されるシナリオである。

ただし、将来の技術の見通しの不確実性は大きいことから複数のケースを想定して分析を行った。ケース②の再エネイノベケースの再エネ想定については、図 5.2.1-2～図 5.2.1-6 に示した、コスト低位シナリオを想定した。ケース④の水素イノベケースでは、表 5.2.1-9～表 5.2.1-11 に記載の水素関連の製造、液化、輸送の設備費が標準想定の半分に低下すると想定した（なお、この際、SOEC 共電解メタン合成は、水素製造との類似性もあるため、革新的メタン合成（SOEC 共電解メタン合成）の設備費の一定の低減も見込んだ（表 5.2.1-14 の合成メタン製造設備費低位シナリオ））。ケース⑥については、再エネのコスト低減の加速、水素製造の設備費が標準想定の半分と想定し、革新的な合成メタン製造技術として効率向上と設備費低減の加速を想定し（表 5.2.1-13 の合成メタン製造効率向上加速シナリオ、表 5.2.1-14 の合成メタン製造設備費低下加速シナリオ）、かつ回収 CO_2 の海外輸送がないものと想定した。ケース⑦の想定は表 5.2.2-3 に示すが、より詳細には文献 10, 13)を参照されたい。

表 5.2.2-1 モデル分析のケース想定

		2050年GHG排出削減	各種技術の想定 （コスト・性能）
海外クレジット活用ケース（世界費用最小化＝世界限界削減費用均等化）		国内削減率はモデルで内生的に決定	モデルの標準想定 （注：ただし、再エネ比率が高いシナリオでは、疑似慣性力が実現し、普及していることが暗黙の前提となる）
参考値のケース		▲100% （日本以外については、欧米はそれぞれ▲100%、それ以外は、CO_2について全体で▲100%を想定（GHGは2065年頃▲100%）：1.5℃シナリオ）	
参考値のケースのモデル想定下で再エネ比率が変化した場合のコスト等を推計	① 再エネ100%		
それぞれの技術課題が克服され、より利用が拡大すると想定したシナリオ	② 再エネイノベ		再エネのコスト低減加速
	③ 原子力活用		原子力の導入拡大
	④ 水素イノベ		水素のコスト低減加速
	⑤ CCUS活用		CO_2貯留可能量拡大
	⑥ 合成燃料活用		再エネのコスト低減加速 +水素のコスト低減加速 +メタネーションのコスト低減加速 +CO_2海外輸送無
	⑦ 需要変容		カー・ライドシェア拡大

表 5.2.2-2 モデル分析の技術シナリオの想定

シナリオ名	再エネコスト	原子力比率	水素コスト	CCUS (貯留ポテンシャル)	完全自動運転 (カー・ライドシェア)
参考値のケース*1	標準コスト	10%	標準コスト	国内貯留：91MtCO_2/yr、海外への輸送：235MtCO_2/yr	標準想定 （完全自動運転車実現・普及想定せず）
①再エネ100%		0%			
②再エネイノベ	低位コスト	10%		国内貯留：91MtCO_2/yr、海外への輸送：235MtCO_2/yr	
③原子力活用*2	標準コスト	20%			
④水素イノベ		10%	水電解等の水素製造、水素液化設備費：半減		
⑤CCUS活用			標準コスト	国内貯留：273MtCO_2/yr、海外への輸送：282MtCO_2/yr	
⑥合成燃料活用	低位コスト*3		水電解等の水素製造：半減 革新的メタネーション技術：効率向上+設備費低減	国内貯留：91MtCO_2/yr、海外への輸送：0MtCO_2/yr	
⑥需要変容	標準コスト		標準コスト	国内貯留：91Mt、海外への輸送：235Mt	2030年以降完全自動運転実現・普及し、カー・ライドシェア拡大、自動車台数低減により素材生産量低下

*1：DAC無しでは実行可能解が無く、全てのシナリオでDACが利用可能と想定。
*2：原子力活用シナリオは別途、比率50%まで分析を実施。
*3：国内は②再エネイノベと同じコスト・ポテンシャル想定。海外は更に安価な再エネコスト・ポテンシャルを想定。

表 5.2.2-3 需要変容シナリオにおけるカーシェアリング・ライドシェアリングの想定 10, 13)

	非完全自動運転車（自家用車）	完全自動運転車（シェアカー）
車両価格	別途、車両タイプにより、それぞれ車両価格を想定	2030: +10000$ 2050: +5000$ 2100: +2800$ (非完全自動運転車比)
車の寿命	13–20 年	4-19 年
一台あたり平均乗車人数	2050: 1.1–1.5 人 2100: 1.1–1.3 人	2050: 1.17–2.06 人 2100: 1.11–1.89 人

(2) シナリオ分析結果

① 部門別排出量

図 5.2.2-1 に日本の 2050 年の部門別排出量を示す。カーボンニュートラルの場合でも、排出をグロスでゼロにすることは費用対効果が良くなく、DACCS 等の CDR を活用して正味でゼロを実現する方が経済合理的となっている。グラフでも見られるように、非 CO_2 GHG 排出が大きく、また、民生部門からの CO_2 排出も残余となりやすい。また、1.5℃シナリオを世界全体で費用最小化で実現するシナリオ（海外クレジット活用ケース）では、日本国内では、63%減までに留め、残余の 37%排出は海外での DACCS 等での CDR でオフセットすることが経済合理的となっている。

⑥合成燃料ケースは、CO_2 の海外への輸送を想定しないようにしたケースである（合成燃料の排出帰属は合成燃料生産国側と想定）。この場合、DACCS による排出オフセット機会が小さくなるかわりに、合成燃料（ガス、液体燃料）で天然ガス・石油を代替する結果が見られる。

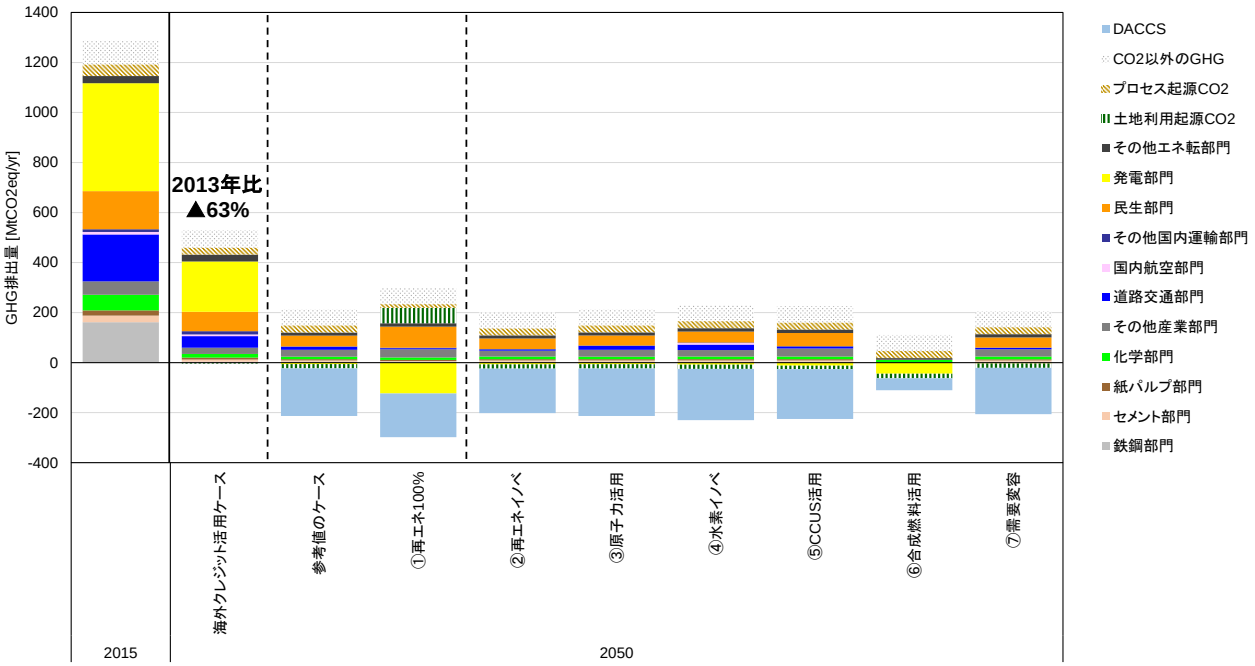
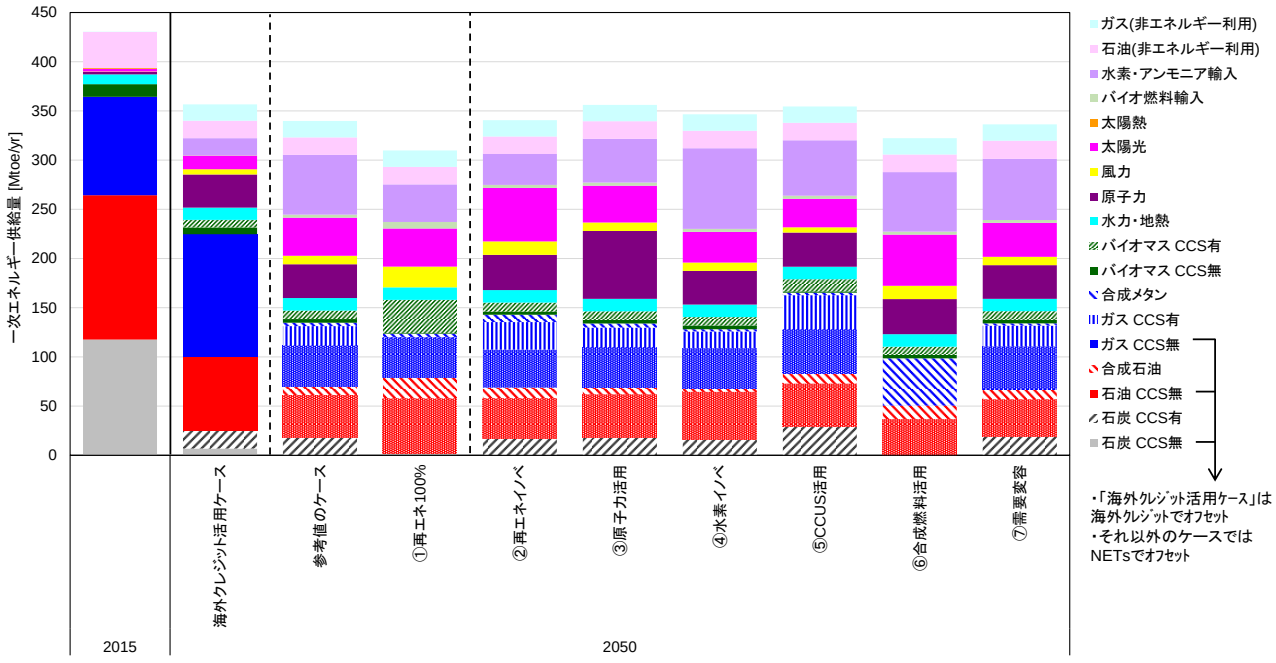


図 5.2.2-1 CN の日本の部門別排出量（2050 年）

② エネルギー供給・転換

図 5.2.2-2 には日本の一次エネルギー供給量を、図 5.2.2-3 には発電電力量、また図 5.2.2-4 には電源種の比率を示す。一次エネルギーでは、いずれのシナリオでも、2015 年比で 25%前後のエネルギー低減が見られる。なお、これは、VRE の大幅拡大による蓄電池のロスや、CCUS などの増エネ効果も含まれたものである。また、いずれのシナリオにおいても、2050 年には相当量の水素・アンモニア・合成燃料の輸入が見られる。ただし、図 5.2.2-1 で見られたように、海外クレジット活用ケースでは、海外で DACCS 等の CDR で排出のオフセット、その他のケースでは、国内で排出のオフセットを行うことが経済合理的との結果のため、CCS 無しの石油や天然ガス利用も相応量残っている。

発電電力量では、再エネ比率が参考値のケースから上昇すると、統合費用が上昇し、特に「再エネ 100%」では、日射条件や風況の悪い条件の太陽光や風力発電まで活用することになること（図 5.2.1-6）や、統合費用の急上昇により電力供給の限界費用が相当上昇するため（図 5.2.1-8 を参照）、電力需要を大きく低減させる結果となっている。また、化石燃焼＋CCS のかわりに、再エネ 100%を満たしつつ、需給調整等は必要なため BECCS が増大する結果となっている。



注1）一次エネルギー換算はIEA統計に準じている。バイオマス以外の再エネ：1 TWh=0.086 Mtoe、原子力：1TWh=0.086÷0.33 Mtoe
注2）CCSなしの化石燃料は、負排出技術でオフセットされており、カーボンニュートラル化石燃料となっている。

図 5.2.2-2 CN の日本の一次エネルギー供給量（2050 年）

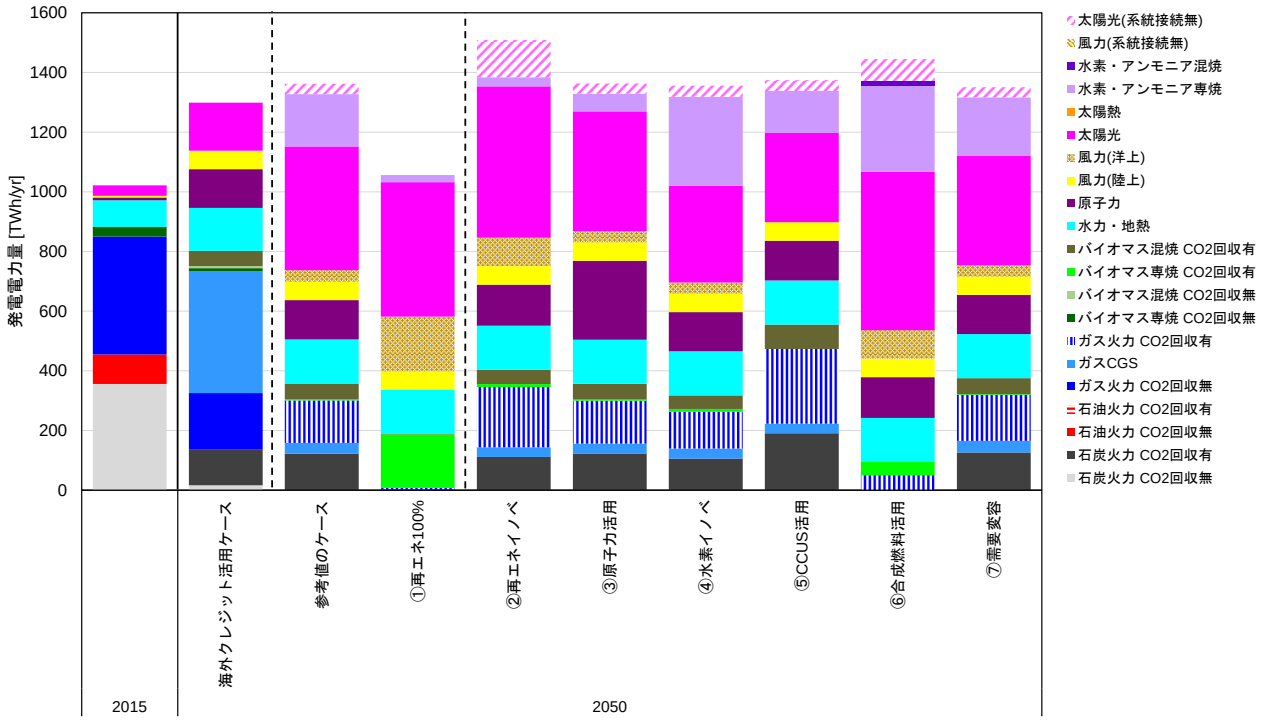


図 5.2.2-3 CN の日本の発電電力量（2050 年）

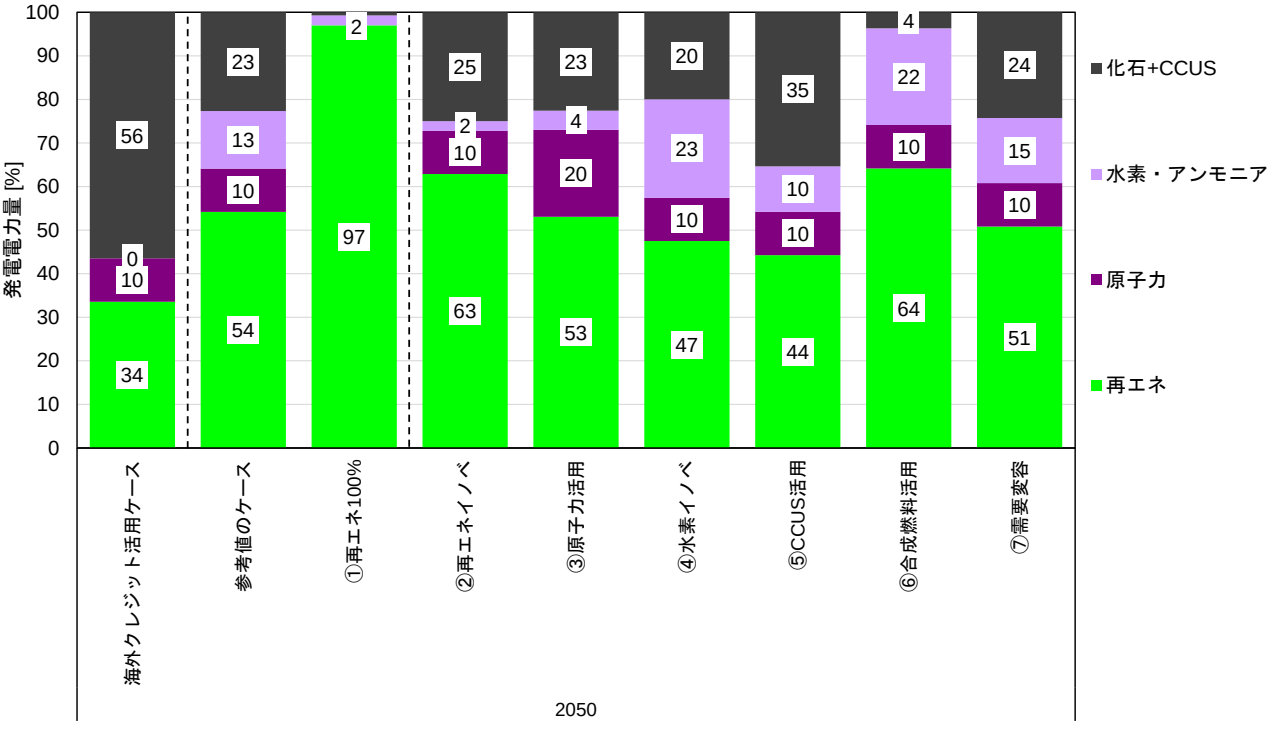


図 5.2.2-4 CN の日本の発電電力量比率（2050 年）

図 5.2.2-5 には日本の水素バランスを、図 5.2.2-6 には CO_2 バランスを示す。水素の大部分は輸入となっている。これは国内の再エネコストや CCS ポテンシャルと海外との差異によるものである。水素の利用は直接水素還元製鉄用と DAC の CO_2 回収エネルギー用が大きい結果となっている。

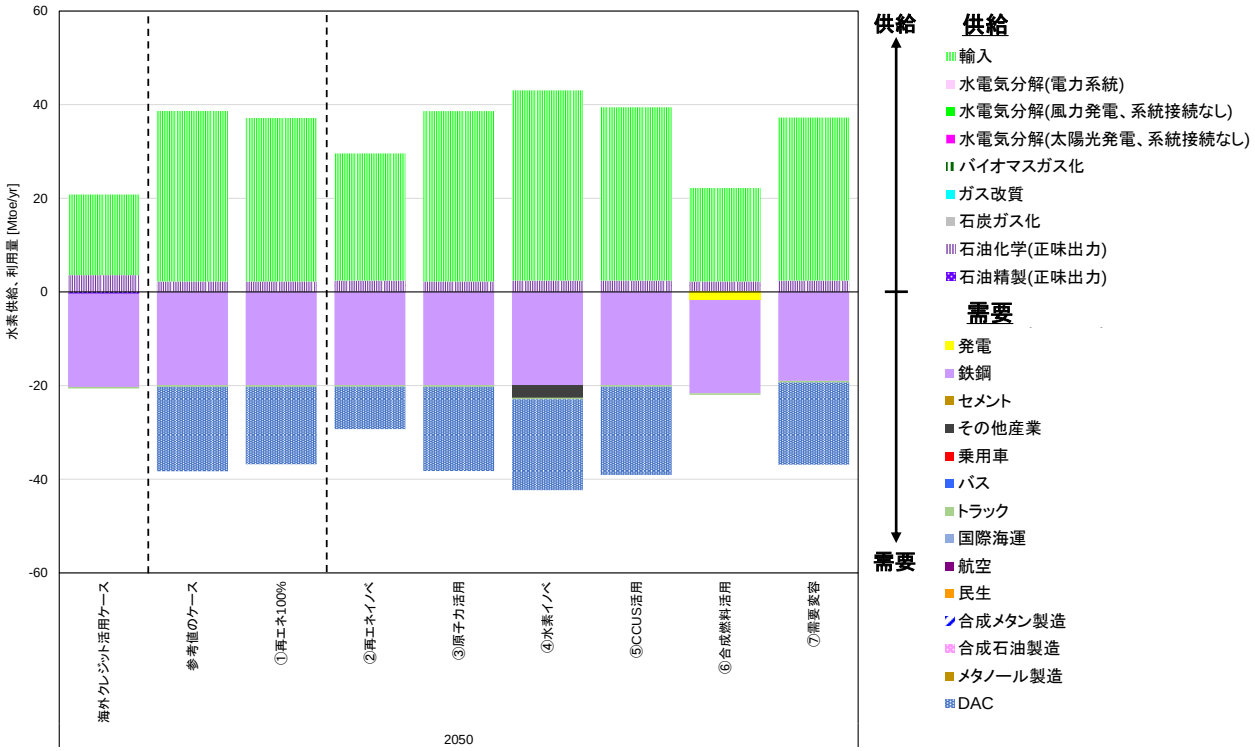


図 5.2.2-5 CN の日本の水素バランス（2050 年）

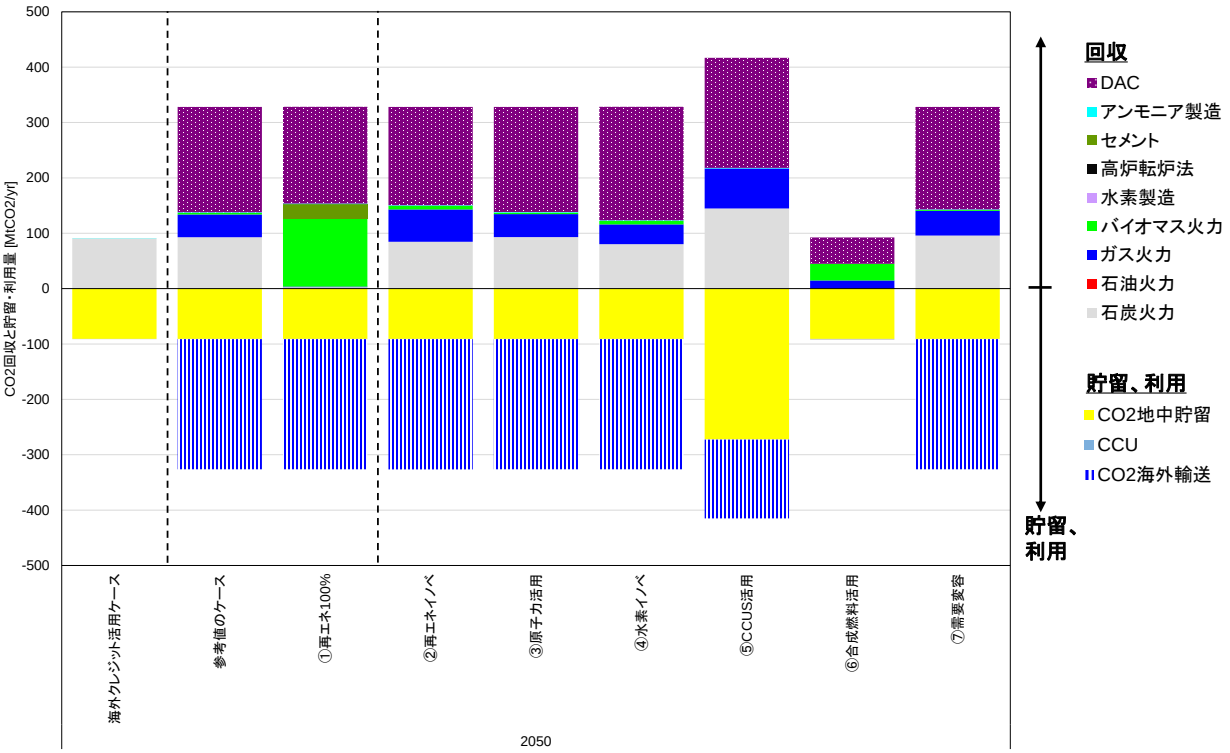
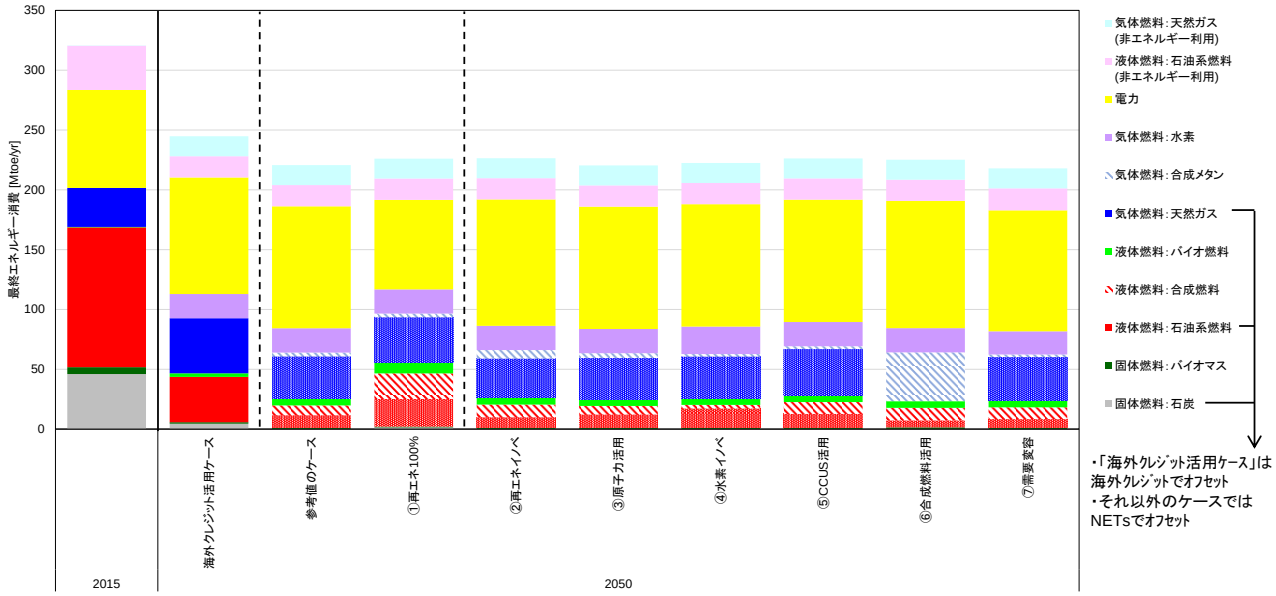


図 5.2.2-6 CN の日本の CO_2 バランス（2050 年）

③ エネルギー需要

図 5.2.2-7 に日本における最終エネルギー消費量を示す。相当な省エネルギーが求められる結果であり、また、電力比率の増大が見られる。ただし、①再エネ 100%ケース

では、電力コストの増大により（後述の表 5.2.2-4 を参照）、電力利用の抑制が見られる。水素の多くは鉄鋼の水素直接還元製鉄向けとなっている。合成メタン、合成液体燃料の利用も見られる。特に⑥合成燃料活用ケースでは、都市ガスも 100%が合成メタンとなっている。



注）CCSなしの化石燃料は、負排出技術でオフセットされており、カーボンニュートラル化石燃料となっている。産業部門などでは石炭からガスへの転換が見られるが、電化が難しい部門もあり、ガスが残りやすい。

図 5.2.2-7 CN の最終エネルギー消費量（2050 年）

④ コスト

表 5.2.2-4 に、2050 年における日本の CO_2 限界削減費用、エネルギーシステム総コスト、および、電力限界費用を示す。排出削減費用については、1.5℃シナリオを世界全体で費用最小となる対策（海外クレジット活用ケース）では、世界共通となる CO_2 限界削減費用（炭素価格）は 168 \$/tCO_2 と推計されるが、国内で CN を達成する、例えば参考値のケースでは、525 \$/tCO_2 と大きな費用が推計された。2050 年のエネルギーシステムコストは、海外クレジット活用ケースでは年間 58 billion US$、参考値のケースでは 193 billion US$の増大と推計された。ただし、想定した各種イノベーションシナリオによって、コストは低減する可能性は示されており、様々な技術・社会イノベーションを誘発していく必要がある。

電力コスト（発電端での限界費用。ただし、再エネの系統統合費用は含まれる）は、現状（モデルでの推計値）で 123 US$/kWh に対して、海外クレジット活用ケースでは 184 US$/kWh、参考値のケースでは 221 US$/kWh と推計された。①再エネ 100%ケースとなると、限界価格が急上昇し 485 US$/tkWh と推計された。バランスの良い電源構成、エネルギー構成によって、カーボンニュートラル達成の可能性を高めるようにしていくことが重要と考えられる。

表 5.2.2-4 CO_2 限界削減費用、エネルギーシステム総コスト、電力限界費用：日本

	2050年のCO2限界削減費用 [US$/tCO2]	2050年のエネルギーシステムコスト [billion US$/yr][*1]		2050年の電力限界費用 [US$/MWh][*2]
ベースライン	―	986	―	121
海外クレジット活用	168	1044	[+58]	184
参考値のケース	525	1179	[+193]	221
①再エネ100%	545	1284	[+299]	485
②再エネイノベ	469	1142	(-37)	198
③原子力活用[*3]	523～503	1166～1133	(-13～-45)	215～177
④水素イノベ	466	1160	(-19)	213
⑤CCUS活用	405	1150	(-29)	207
⑥合成燃料活用	507	1175	(-4)	190
⑦需要変容	509	909	(-270)	221

*1 [](青字)はベースラインからのコスト増分。()赤字は「参考値のケース」からのコスト変化
*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123 US$/MWh
*3 原子力活用シナリオは、原子力比率20%～50%の下での結果

5.2.3 世界の CN シナリオ分析

本節では、世界エネルギー・温暖化対策モデル DNE21+を用いて、CO_2 限界削減費用の水準別に、どのような技術・対策が費用効率的か、どの程度の排出削減ポテンシャルが期待されるかについて分析を行った。ただし、将来的に導入される対策技術は今後の技術進展に伴うコスト低下などにより、様々に異なってくると考えられる。そのため、将来の技術進展シナリオを複数想定して分析を行った。分析結果は、世界全体および日本を含めた主要国別に提示し、地域による差異も示す。

(1) シナリオ想定

2050 年の CN を分析するシナリオについて、将来的には様々な不確定要素があり、また、どのようなイノベーションが起きるかを予測することは難しい。本研究では、以下に説明するシナリオ A, B の 2 種類のシナリオについてコスト別、技術別排出削減ポテンシャル推計を行った。

シナリオ A は、前節提示の「参考値のケース」に相当するシナリオである。2050 年までに負の CO_2 排出削減技術である大気中 CO_2 直接回収貯留（DACCS）や鉄鋼部門における水素直接還元製鉄（水素 DRI）が利用可能になっているとしている。更に、CO_2 の貯留について、国内貯留だけでなく、国外へ輸送し貯留することも可能としている。水素・アンモニア・カーボンリサイクル燃料について、供給上限は特に設定せず、大

規模な輸送インフラの整備が可能としている。原子力発電について、原子力を導入しないとしている国については経済合理性と無関係に導入しないと想定した。

一方で、IEAが2021年5月に公表した「Net Zero by 2050:A roadmap for the global energy sector」における Net Zero by 2050（NZE）シナリオは、再生可能エネルギーへの依存が大きかったり、CO_2負排出技術の利用が相当に少なかったりという特徴のあるシナリオである（IEA NZE の概要や DNE21+との比較は第 6.3 節参照）。そこで、一次エネルギー供給総量及び再エネ、原子力、化石燃料間の比率が IEA のシナリオに近くなるものを、シナリオ B として想定した。シナリオ B では、電気自動車（EV）のバッテリーや再生可能エネルギーのコストが大きく低下するとしている。一方で、DAC のコストが2020 年以降下がらないとし、バイオマス資源の供給量上限はシナリオ A の半分程度に制限する。さらに、CO_2貯留地の確保が困難となり、貯留可能量がシナリオ A のおおよそ十分の一程度まで少なくなるとした。本シナリオ B は、第 6.3.2 節のケース III に相当する。これらのシナリオについて、世界温暖化対策評価モデル DNE21+を用いて、主要国別・コスト別に分析した結果を考察する。

(2) 部門別・技術別の排出削減効果の算定

2050 年の各部門別・技術別の排出削減ポテンシャル及びコストの推計について、CO_2排出削減効果の分解は下記の定義式(5.2.3-1)を用いた。

$$
\begin{aligned}
&E_N^{CP1} - E_N^{CP2} \\
&= (S^{CP2} - S^{CP1}) \\
&\quad + EI^{CP2} \frac{EI_F^{CP2}}{EI^{CP2}} \left(\frac{E_{G,Elec}^{CP1}}{EI_F^{CP1}} - \frac{E_{G,Elec}^{CP2}}{EI_F^{CP2}} \right) \\
&\quad + EI^{CP2} \frac{E_{G,Elec}^{CP1}}{EI_F^{CP1}} \left(\frac{EI_F^{CP1}}{EI^{CP1}} - \frac{EI_F^{CP2}}{EI^{CP2}} \right) \\
&\quad + EO^{CP2} \frac{E_{G,Elec}^{CP1}}{EI^{CP1}} \left(\frac{EI^{CP1}}{EO^{CP1}} - \frac{EI^{CP2}}{EO^{CP2}} \right) \\
&\quad + \sum_{Non-elec\,sec\,tors} \left\{ \left(E_{G,Fossil}^{CP1} - E_{G,Fossil}^{CP2} \right) + \left(\frac{E_{G,Elec}^{CP1}}{EI^{CP1}} \frac{EI^{CP1}}{EO^{CP1}} \left(ED_{Elec}^{CP1} - ED_{Elec}^{CP2} \right) \right) \right\} \\
&\quad + \frac{E_{G,Elec}^{CP1}}{EI^{CP1}} \frac{EI^{CP2}}{EO^{CP2}} \left\{ \left(EO^{CP1} - \sum_{Non-elec\,sec\,tors} ED_{Elec}^{CP1} \right) \right. \\
&\qquad\qquad \left. - \left(EO^{CP2} - \sum_{Non-elec\,sec\,tors} ED_{Elec}^{CP2} \right) \right\} \\
&\quad + \delta
\end{aligned}
\qquad (5.2.3\text{-}1)
$$

ここで、E:CO_2排出量、S:CO_2隔離量、EI:発電エネルギー投入量、EO:発電出力量、ED:最終エネルギー需要部門における電力消費量、$CP1$:炭素価格$CP1$\$/tCO_2のケース、$CP2$:炭素価格$CP2$\$/tCO_2のケース、G:グロス、N:ネット、F:化石燃料とする。また、右辺第一項から順に、CO_2隔離、発電部門における化石燃料転換、非化石エネルギーへの代替、火力発電の高効率化、その他部門における排出削減（ここでは、CO_2隔離分は含まない）、送配電ロスの改善、その他エネルギーの配送ロスの改善の効果を表す。各シナリオA・Bにおいて、$CP1$を0\$/tCO_2（ベースライン）、$CP2$を25\$/tCO_2として、式(1)に基づいて部門別・技術別の排出削減効果を算定した。その後、炭素価格水準を引き上げながら、同様に排出削減効果を算定した。

(3) 世界全体の分析結果

まず、世界全体での排出削減ポテンシャルとコストの推計を示す。シナリオAでの世界全体の排出削減ポテンシャル及びコストの推計を図 5.2.3-1 に示す。世界全体で見ると、技術毎の効果としてはCO_2限界削減費用が25 \$/tCO_2の時点では発電部門や化学部門において、石炭利用からガス（以降、特に断りない限りガスは天然ガスを指す）利用への転換が見られる。50 \$/tCO_2になると、民生部門等でも石炭利用が削減されていき、バイオマスなどの環境負荷の低いものに代替されていくようになる。また、引き続き利用される石炭火力発電には、二酸化炭素回収・貯留（CCS）が導入され、セットで運用されるようになる。さらに、発電部門以外の鉄鋼、化学、セメント部門においてもCCSが導入され始める。125 \$/tCO_2からはDACCSが費用対効果を持ち始める。そして、200 \$/tCO_2付近で世界全体としてのCO_2でのCNが達成される推定となる。

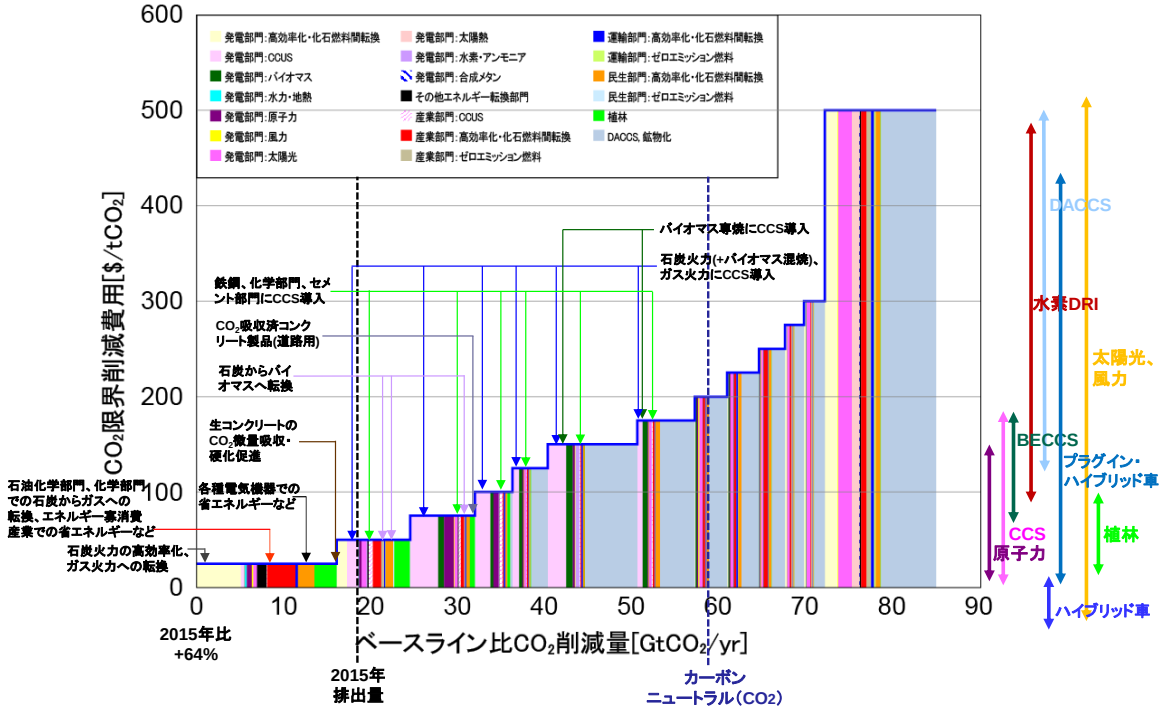


図 5.2.3-1 シナリオAでの2050年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：世界全体

次に、シナリオ B での世界全体の排出削減ポテンシャル及びコストの推計について図 5.2.3-2 に示す。25$/tCO$_2$ の時点ではシナリオ A と同じく、各部門での石炭からガスへの転換が進んでいる。また、シナリオ A と比較し、再生可能エネルギーコストが低減している影響で、太陽光発電が多く導入されていることが分かる。50$/tCO$_2$ 以降はシナリオ A と同様に、様々な分野で CCS が導入されていくが、DACCS の導入は 225$/tCO$_2$ 以降と大きく遅れている。その結果、CN は 400$/tCO$_2$ 付近での達成と推定される。この比較から、DACCS の技術進展・コスト低下が CN 達成のための限界削減費用を押し下げることに重要な役割を果たすことが分かる。

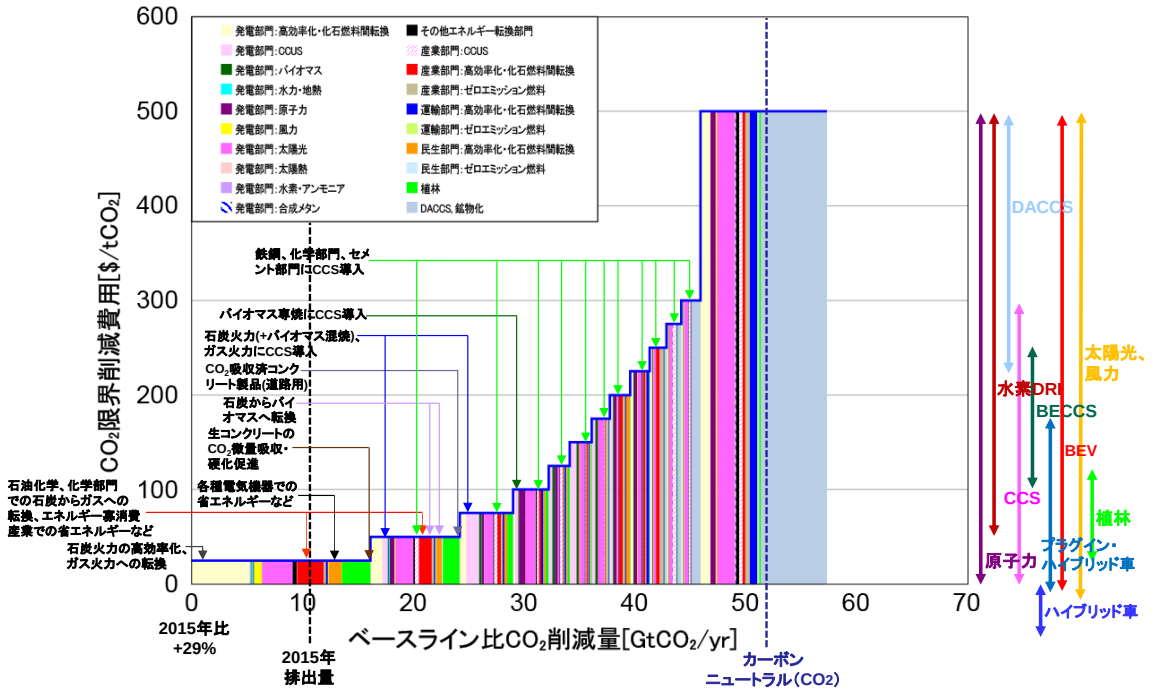


図 5.2.3-2 シナリオ B での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：世界全体

(4) 主要国別の分析結果

次に、2050 年の各部門別・技術別の排出削減ポテンシャル及びコストの推計について、日本、米国、EU、中国、インドの結果を整理した。これらの国々で、世界の CO_2 排出量の凡そ 6 割（2015 年時点）[14]を占める。

① 日本

日本におけるシナリオ A の排出削減ポテンシャル・コストを図 5.2.3-3 に示す。他国の限界削減費用との関係によって、自国の限界削減費用も異なってくることに留意されたい。今回の分析に際し、世界全体の限界削減費用に対し、日本は常に 2 倍のコストとなるように設定している。つまり、世界全体が 100$/tCO$_2$ となるときに日本では 200$/tCO$_2$ の、世界全体が 200$/tCO$_2$ となるときに日本では 400$/tCO$_2$ の限界削減費用となるようにしている。これは、元々日本での環境対策として世界的に見て高水準の

技術が既に導入されており、余り低コストでの改善の余地が無いことから、日本視点においてCNを達成する際には他国と比べて、限界削減費用が非常に高くなる可能性があるということに基づいている。

以上を踏まえて、50$/tCO₂の時点を見てみると、限界削減費用が低いコスト帯において、世界全体では石炭火力発電の高効率化やガス火力への転換が大きな削減ポテンシャルを持っていたが、日本では見られない。代わりに、削減効果が大きいと予測されるのが、原子力であり、相対的に費用の小さい対策であることが分かる。次に、100$/tCO₂では、石炭火力発電からガスコージェネレーションシステム（ガスCGS）への転換が多くなってくる。また、日本では鉄鋼業の比率が比較的大きいので、水素DRIが大きな削減ポテンシャルを持っている。200$/tCO₂を超えてくると、アンモニア発電が多く導入されるようになる。本分析では、日本の発電量に占める原子力の比率は最大で10%と設定しており、また、前述の太陽光、風力発電の高コストもあり、利用可能な脱炭素電源が限られている。その制約の中でCN達成のためには、アンモニア発電は重要な地位を占めると考えられる。その後は350$/tCO₂付近からDACCSが導入されるようになり、CNを達成するという推定となる。

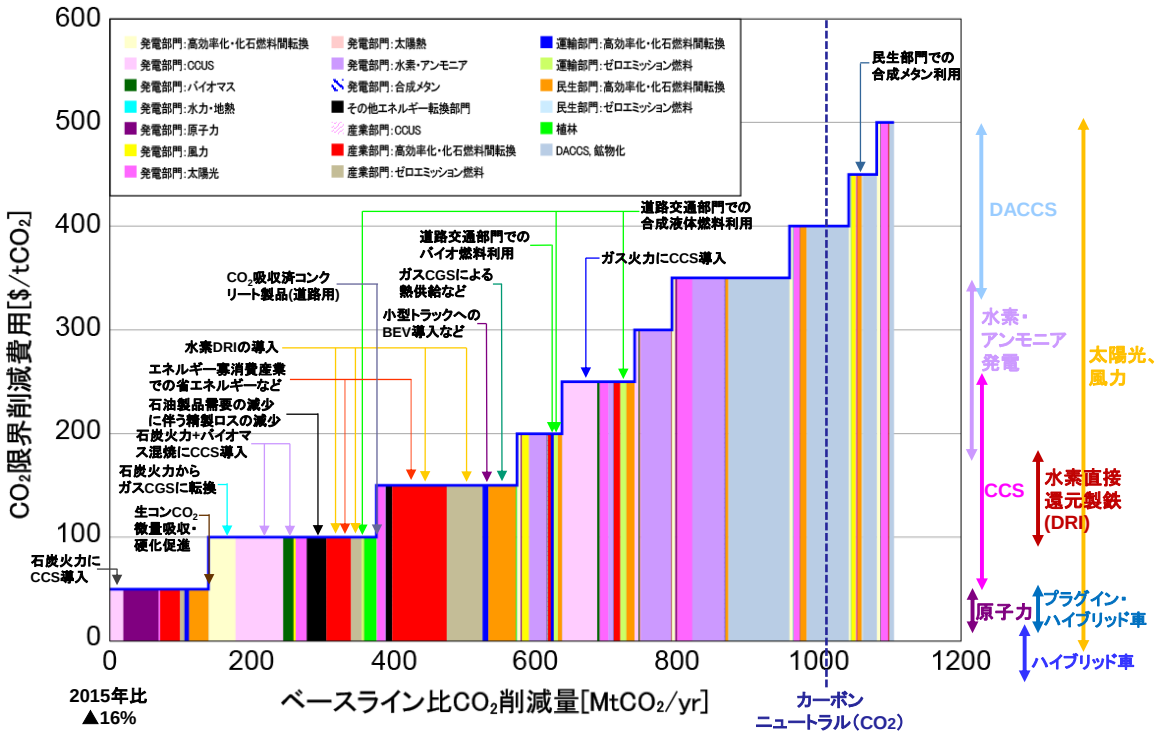


図 5.2.3-3 シナリオAでの2050年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：日本

次に、シナリオBでの日本の排出削減ポテンシャル及びコストの推計について図5.2.3-4に示す。低コスト帯においてのシナリオAとの大きな違いは100$/tCO₂付近で大きな削減効果を持っていた石炭火力及びバイオマス混焼火力発電とCCSのセットがほとんど見られなくなったことである。CCS時のCO₂貯留先としては、国内と海外があり得るが、国内から優先的に使用していくことになる。シナリオBではシナリオA

よりも CO_2 貯留可能量を少なく想定している。この時点では、国内の貯留ポテンシャルを使い切ったが、海外にはまだ CO_2 の貯留ポテンシャルは十分に残されている。しかし、輸送コスト等を考慮すると、このコスト帯では海外での貯留は選択されることはなく、CCS が導入され難いという結果になっている。また、400$/t$CO_2$ 付近では、シナリオ A で見られた DACCS は余り見られず、産業部門、民生部門での水素・合成メタンの利用が拡大している。2 つのシナリオを比較して考えると、CO_2 の貯留可能量及び DACCS のコスト水準が、日本での CN 達成時の水素・合成メタンの導入量に強く影響していることが分かる。

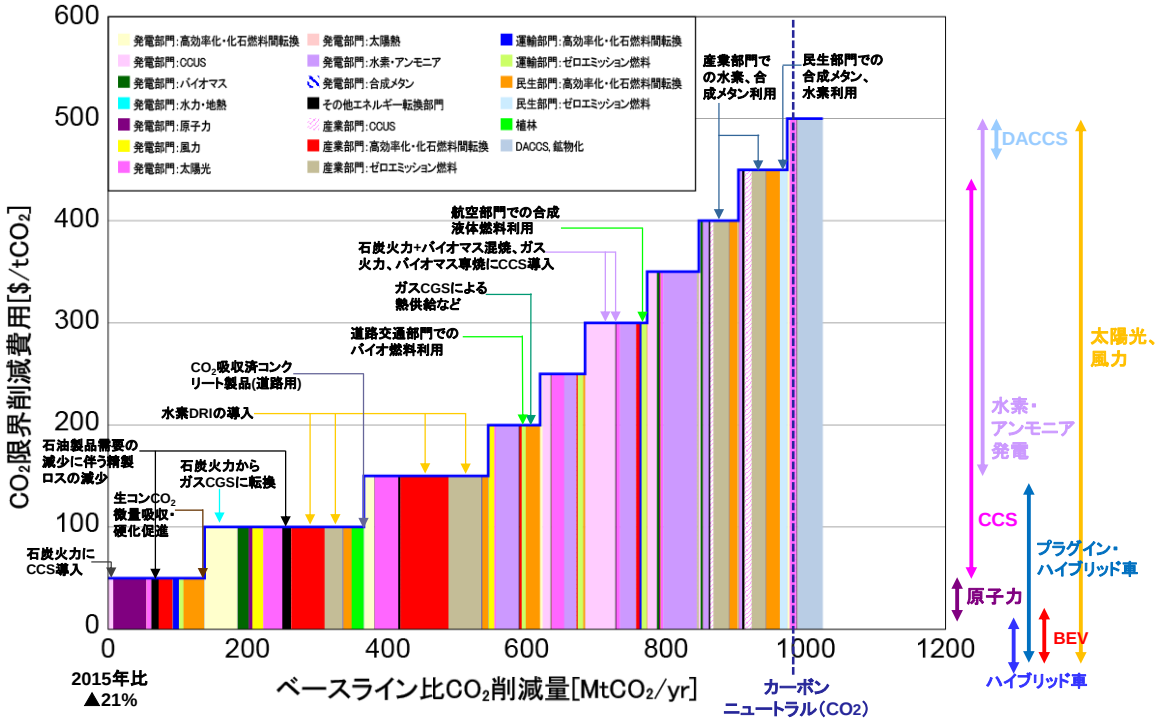


図 5.2.3-4　シナリオ B での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：日本

② 米国

次に、米国のシナリオ A での排出削減ポテンシャル及びコストの推計について図 5.2.3-5 に示す。米国の図は 100$/t$CO_2$ 以前が主に石炭、バイオマス混焼、ガス火力発電への CCS 導入が大きな削減効果を持っており、100$/t$CO_2$ 以降は DACCS が大きな削減効果を持つというシンプルな傾向が見られる。米国は国土も広く、CO_2 の貯留可能量がかなり大きいため、一度 DACCS が導入されると次々に導入される。

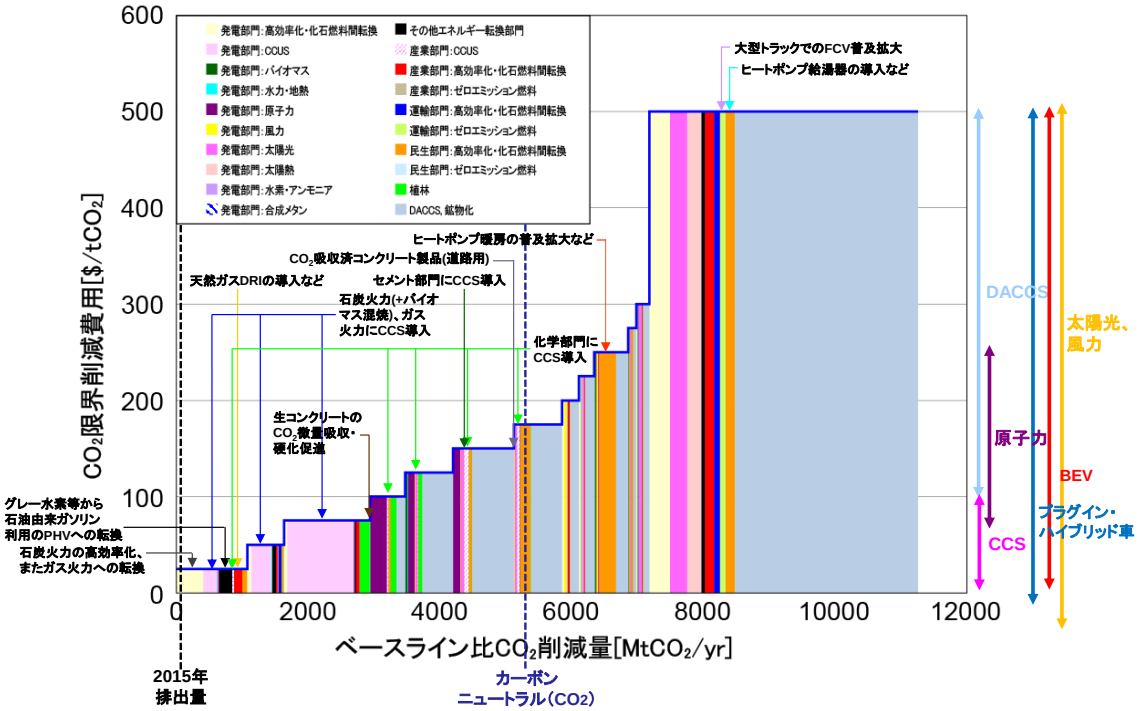


図 5.2.3-5 シナリオ A での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：米国

次に、シナリオ B での米国の排出削減ポテンシャル及びコストの推計について図 5.2.3-6 に示す。シナリオ A と比べると、100$/tCO$_2$ 以前が CCS 中心になっているのは変わらないが、100$/tCO$_2$ 以降に大きな効果を持っていた DACCS が 300$/tCO$_2$ 付近まで導入が見られないようになっている。CN 達成時の限界削減費用に注目してみると、シナリオ A では、200$/tCO$_2$ 未満だったものが、シナリオ B では、300$/tCO$_2$ を軽く超えている。日本でも同様の傾向ではあったが、DACCS が十分に活用できない状況になると、限界削減費用は大きく上がる懸念があることが分かる。一方、DACCS の代わりに導入される技術は多岐にわたっているが、100～200$/tCO$_2$ 付近で相対的に目立つのは原子力発電である。経済合理性の観点から見ると、原子力発電が CN 達成に対して、重要な立ち位置にあることが、この米国の結果から良く分かる。

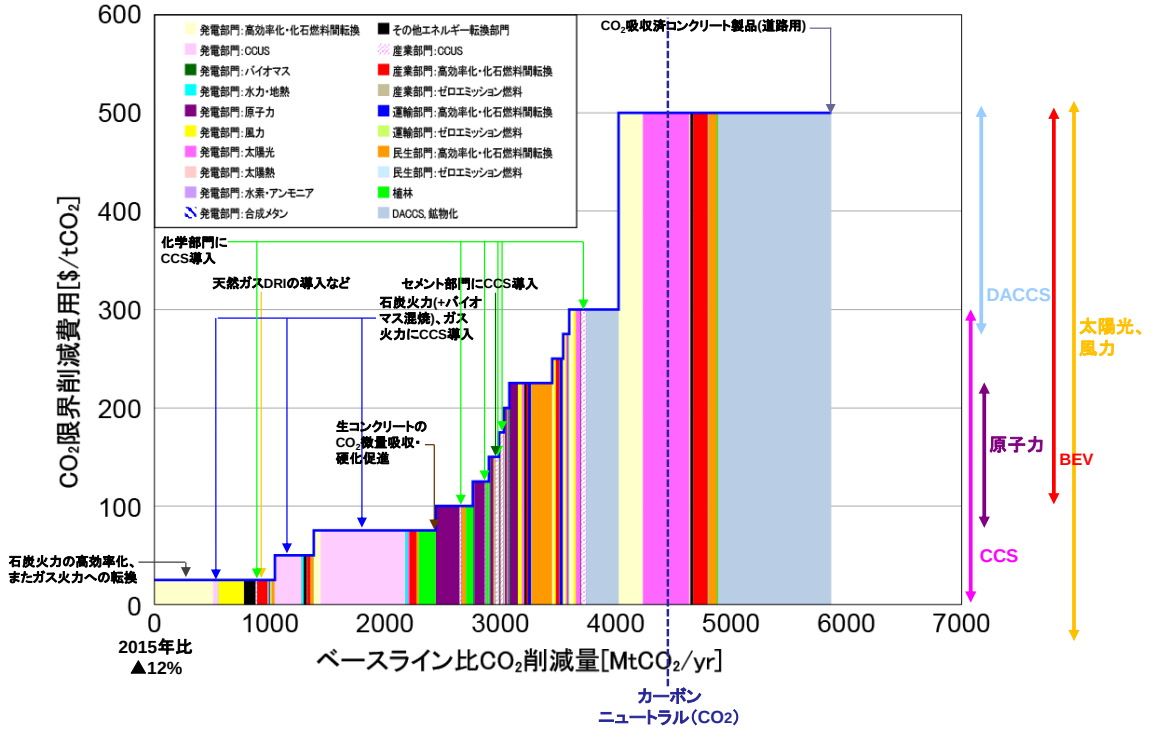


図 5.2.3-6　シナリオ B での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：米国

③　EU

EU のシナリオ A での排出削減ポテンシャル及びコストの推計について図 5.2.3-7 に示す。EU は特定の削減技術が大きな効果を持つというよりは、様々な技術の複合により排出削減をしているように見える。ただ、全体的な傾向としてはシナリオ A での米国に似ており、100$/tCO$_2$までは発電部門での CCS の効果が大きく、100$/tCO$_2$以降は DACCS の効果が大きく見られる。

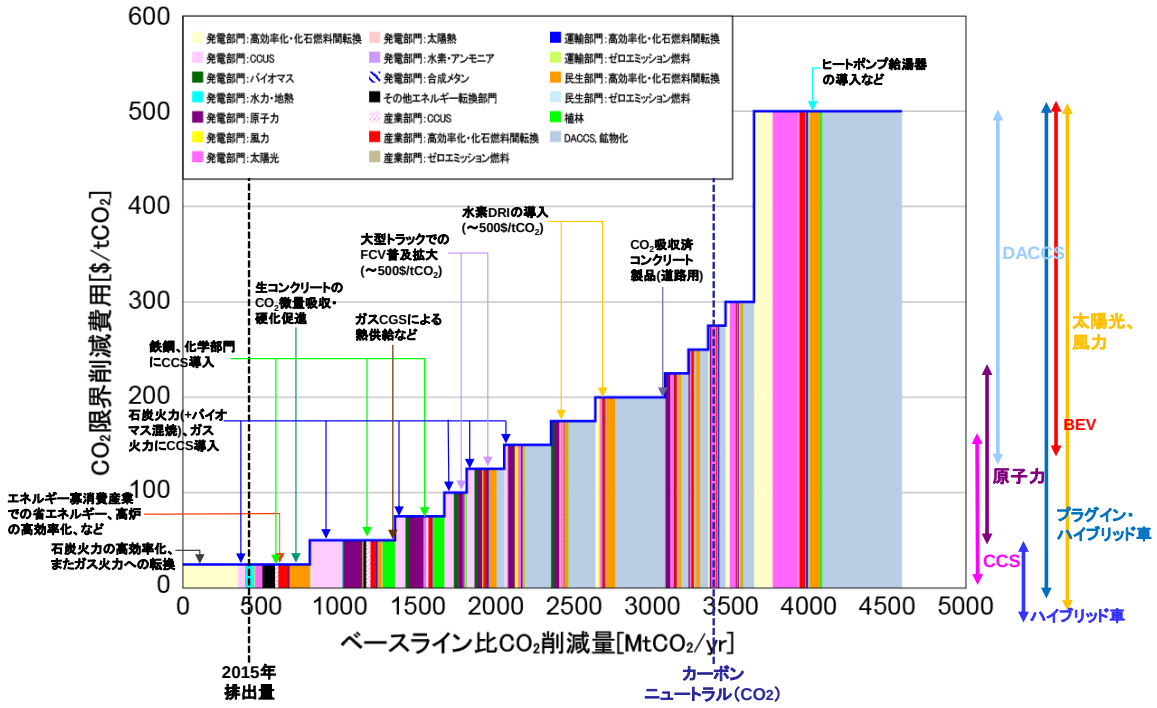


図 5.2.3-7 シナリオ A での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：EU

次に、シナリオ B での EU の排出削減ポテンシャル及びコストの推計について図 5.2.3-8 に示す。こちらではシナリオ A よりも更に細かく複数の技術が順次導入されている。例えば、シナリオ A で 150$/tCO$_2$ まで削減効果を示していた火力発電への CCS 導入はシナリオ B では 250$/tCO$_2$ 付近まで緩やかに続く。これは再生可能エネルギーのコストが低減したことで、優先的に太陽光・風力が導入されるようになり、相対的に発電部門での CCS 導入が遅れたことによる。その後、250$/tCO$_2$ 以降は DACCS も導入され、CN を達成していくという流れとなる。

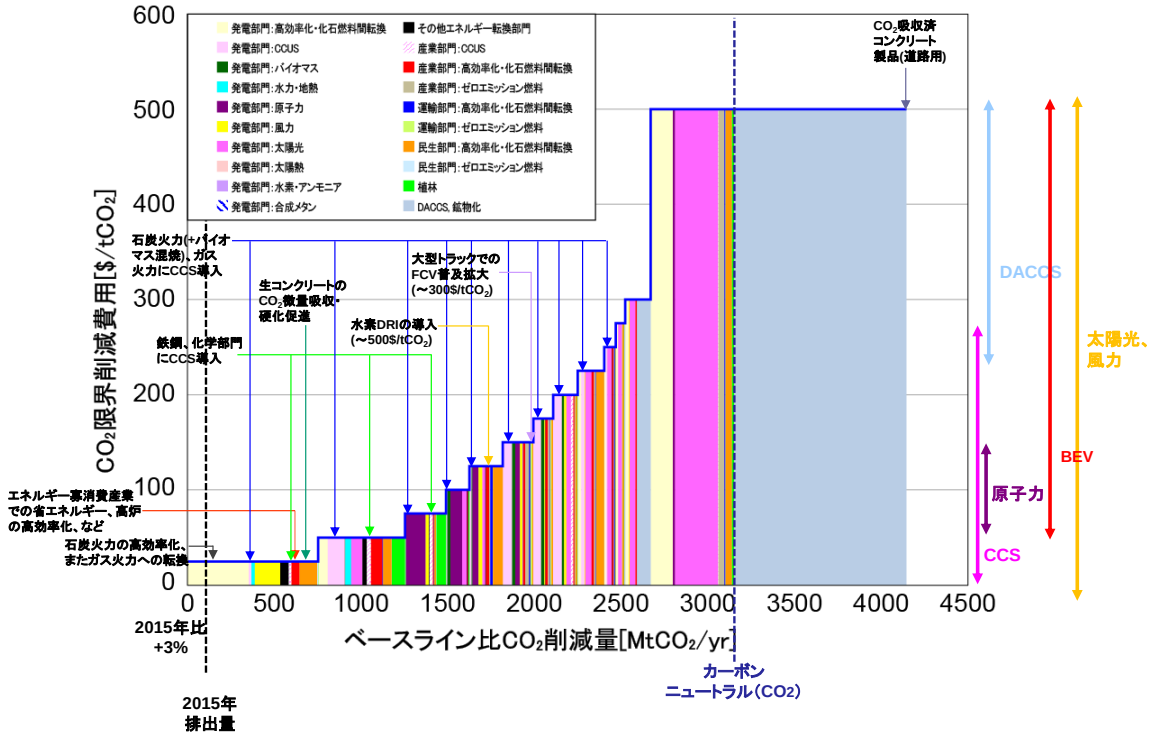


図 5.2.3-8　シナリオ B での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：EU

④　中国

次に、中国のシナリオ A での排出削減ポテンシャル及びコストの推計について図 5.2.3-9 に示す。今回の分析では、世界全体として CN を達成する水準まで分析しており、負排出になる国もあれば、排出が残っている国もあるという結果になっている。中国で見ると、500$/tCO$_2$ 時点でも CN は達成されておらず、排出量が残るが、世界全体としては CN に達しているということである。先進国と比べると、石炭火力発電のガス転換、発電部門での CCS の導入は同様に大きな削減効果を持っているが、DACCS がほぼ見られない。他の排出削減余地が残っている影響で、DACCS をする前にやるべき費用対効果の良い対策が残っているということである。

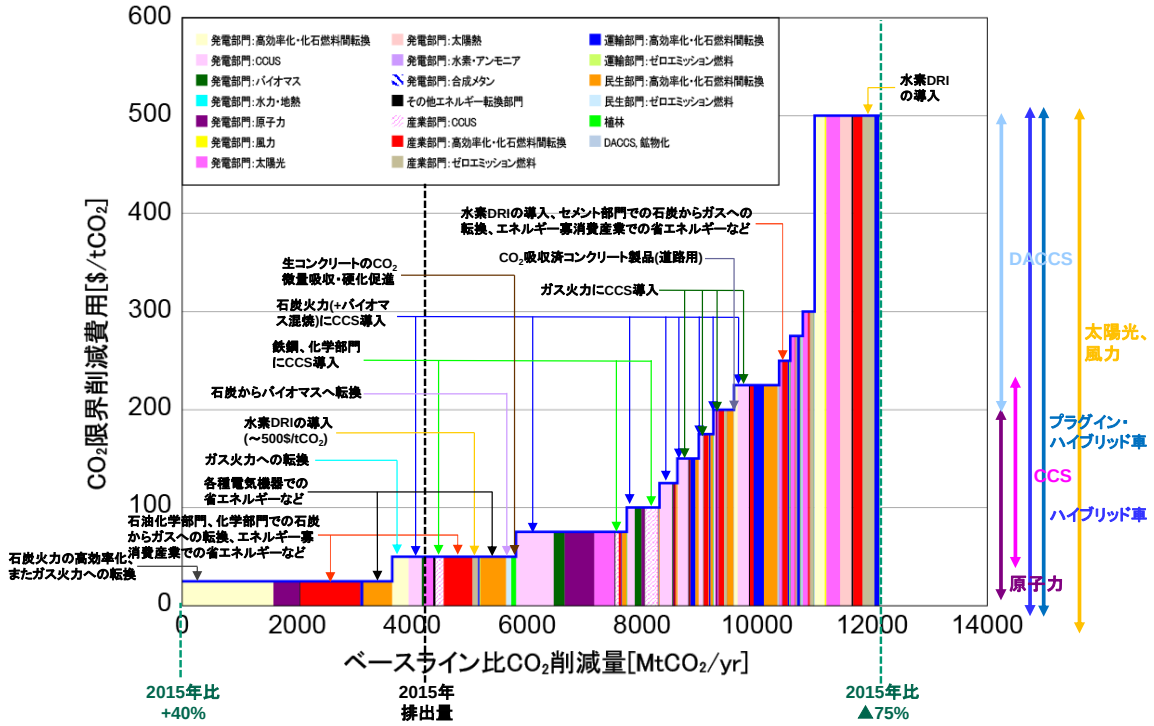


図 5.2.3-9　シナリオ A での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：中国

次に、シナリオ B での排出削減ポテンシャル及びコストの推計について図 5.2.3-10 に示す。シナリオ A では 100$/tCO$_2$ までの原子力、50～225$/tCO$_2$ の発電部門での CCS がそれなりの削減効果を持っていたが、シナリオ B ではそれらが少なくなり、代わりに太陽光発電が非常に多く導入されている。中国は太陽光の導入余地が多く残っており、再エネのコストが下がったシナリオ B では非常に多く導入される結果となっている。

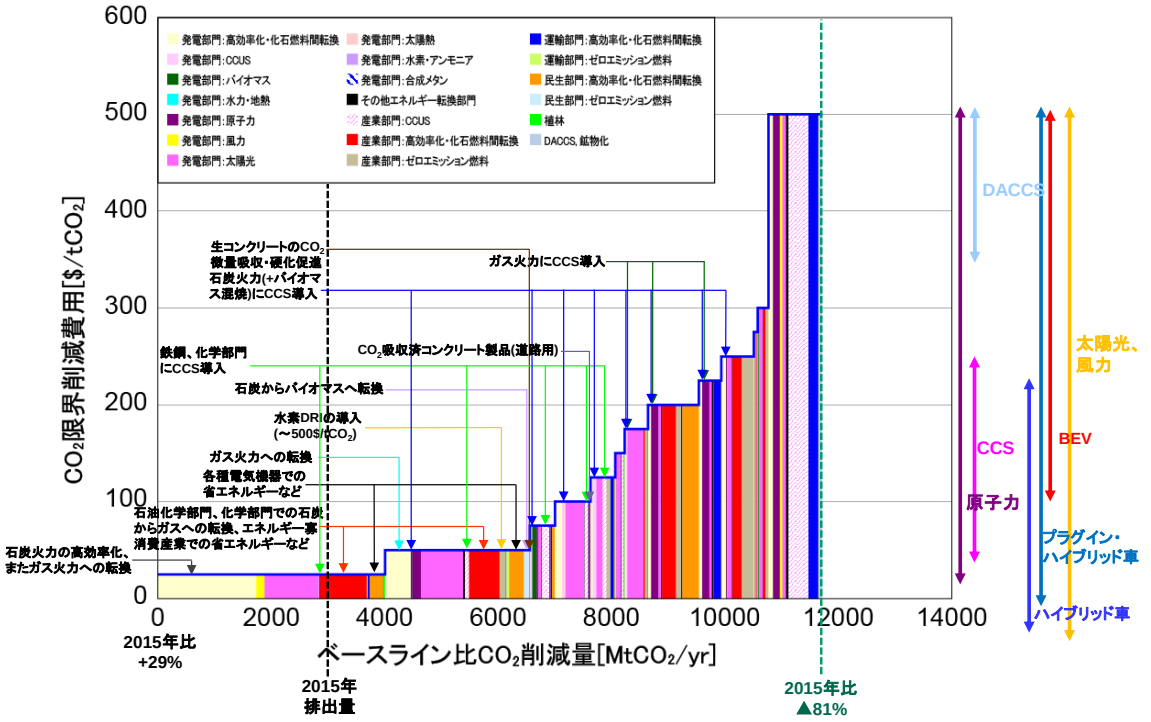


図 5.2.3-10　シナリオ B での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：中国

⑤　インド

次に、インドのシナリオ A での排出削減ポテンシャル及びコストの推計について図 5.2.3-11 に示す。インドも中国と同じく、500$/tCO$_2$ 時点でも CN は達成しない結果となり、削減効果の大きい技術も中国と似た傾向となっている。100$/tCO$_2$ までで見てみると、中国では多少原子力が目立ったが、インドではそれほど導入量は多くなく、石炭火力発電の高効率化及びガス転換が多く見られる。また、75～175$/tCO$_2$ では発電部門の CCS が非常に多く導入されており、排出削減の中心となっている。

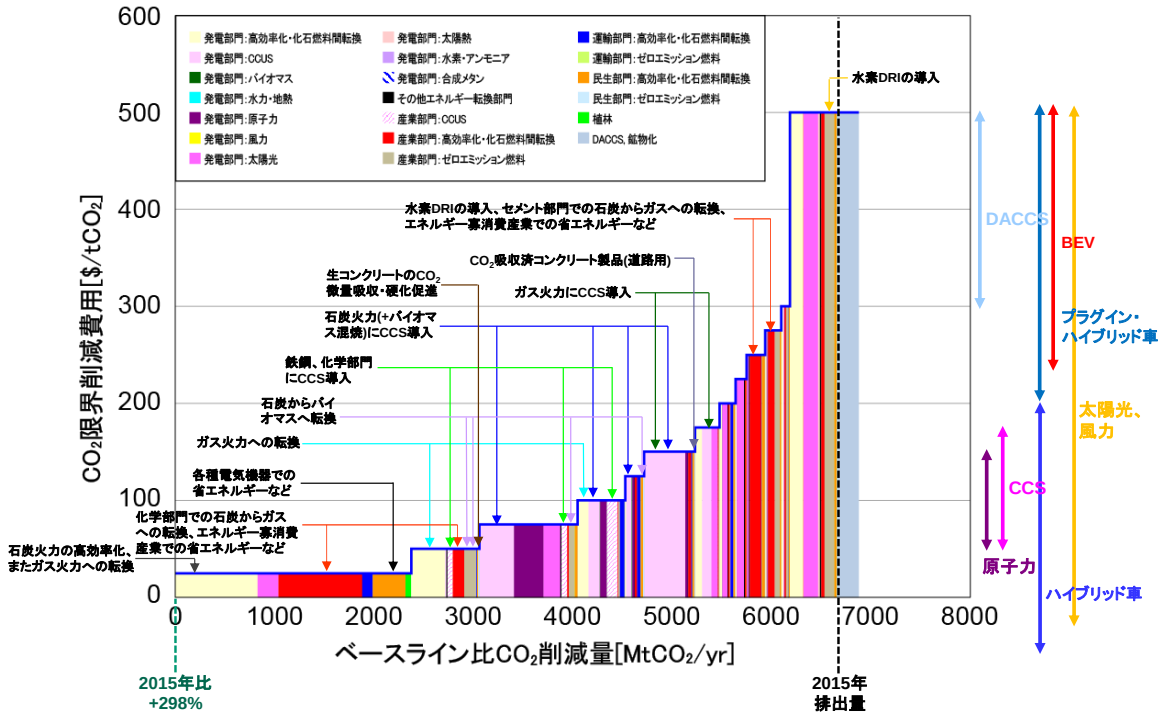


図 5.2.3-11　シナリオ A での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：インド

最後に、シナリオ B でのインドの排出削減ポテンシャル及びコストの推計について図 5.2.3-12 に示す。こちらも 500$/tCO$_2$ 時点で CN は達成しない結果となっているが、シナリオ A のインドと比べると、大きな削減効果を持っていた CCS がほぼ見られなくなり、削減の大部分を太陽光発電が担っている。

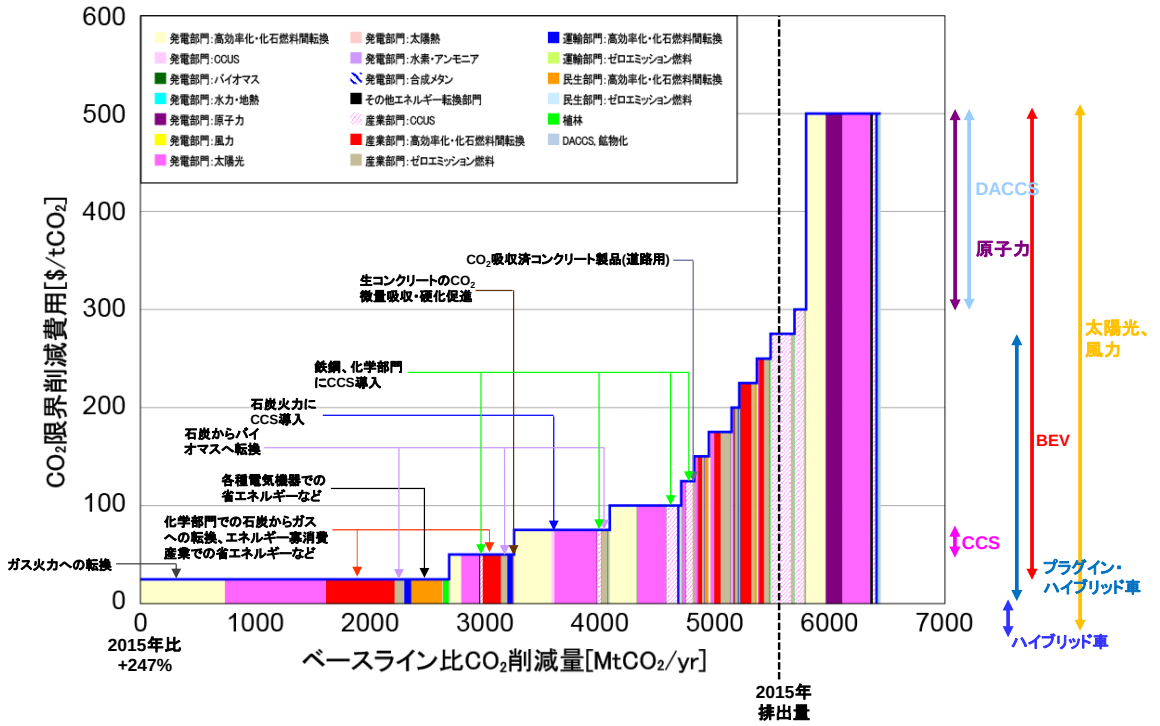


図 5.2.3-12 シナリオ B での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：インド

(5) 分析のまとめ

標準シナリオとしてのシナリオ A と、再生可能エネルギーコストが大きく下がる等のシナリオ B の二つを分析した。両シナリオにおける多くの国に共通した傾向として、コストの低い順に、石炭火力発電のガス転換、発電部門への CCS 導入、DACCS の導入が多く見られた。ただし、それらの比重はシナリオ・国により大きく異なる。

なお、中国、インドは、ベースライン（＝限界削減費用が 0）で CO_2 排出量が大幅に増加するため、世界全体で CN を達成し得る限界削減費用水準において、自国内において排出量が残っている。ポテンシャルが大きい対策としては、石炭火力発電のガス転換、シナリオ A では CCS、シナリオ B では再エネが大きい。また、日本においては、他国と比較して、再生可能エネルギー、CCS 共に高コストになると見込まれているため、両シナリオにおいて、水素・アンモニアが多く活用されている。

今回の分析では、様々な技術のコスト低減の想定をおいてシナリオを設定したが、世界全体で CN を達成するためには、相当に高い排出削減費用が必要とみられた。各国が各々排出削減の努力をしなければならないが、再生可能エネルギーのコストや CCS の貯留ポテンシャルの大小など、地域によって、そのハードルは異なる。そのため、パリ協定第 6 条のような国際協調システムが活用されることで、世界全体で少しでも経済的負荷が少なくなることが必要であると考えられる。

参考文献（第 5.2.3 節に関するもの）

1) 第 6 次エネルギー基本計画 (2021)
2) 日本政府「地球温暖化対策計画」https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html (2021)
3) 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
4) K. Akimoto, et al.; Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost, Energy Policy, 38(7), 3384-3393 (2010)
5) 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), 246-256 (2014)
6) 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会 (2021) https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/043/
7) K. Riahi et al., The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview (2017). https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016300681
8) 長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告 (2015) https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/01/01_09.pdf
9) Fasihi et al., “Techno-economic assessment of CO_2 direct air capture plants”, Journal of Cleaner Production 224 (2019)
10) RITE、2020 年度 ALPS 報告書 (2021)
11) IEA Energy Technology Perspectives 2017 (2017)
12) 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会 (2020)
13) K. Akimoto, F. Sano, J. Oda, 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 (2022).
14) IEA; CO_2 Emissions from Fuel Combustion 2020

5.2.4 水素関連の分析

前節まで、DNE21+モデルで全体システムの分析を行い、その中で水素システムの評価も行った。本節では、カーボンニュートラル達成のため、重要と考えられる水素について、より具体的に経済性の検討を付加した。

(1) 輸入水素/国内水素製造及び活用に関する検討

グリーンイノベーション基金プロジェクトでは、2030 年 30 円/Nm^3、2050 年 20 円/Nm^3 を目標として技術開発が進められている [1)]が、ここでは文献 2),3)などに示される水素サプライチェーンに関する諸元を用いコスト試算を行った。また、DNE21+の分析結果と比較することで、水素の製造及び活用について考察した。

① 試算条件

a. サプライチェーン

図 5.2.4-1 に本稿で日本における水素供給コスト推計のために想定した水素サプライチェーンと製造地点を示す。輸入水素の製造は、CCS 付きの褐炭改質・天然ガス改質及び水電解である。輸出港では、水素の液化及び貯蔵、海運は水素輸送船、受入港では受入貯蔵、その後、導管を使用した供給を想定した。国内水素は、都市郊外で水電解水素を製造し、導管で都市中心部の拠点への輸送を想定した。

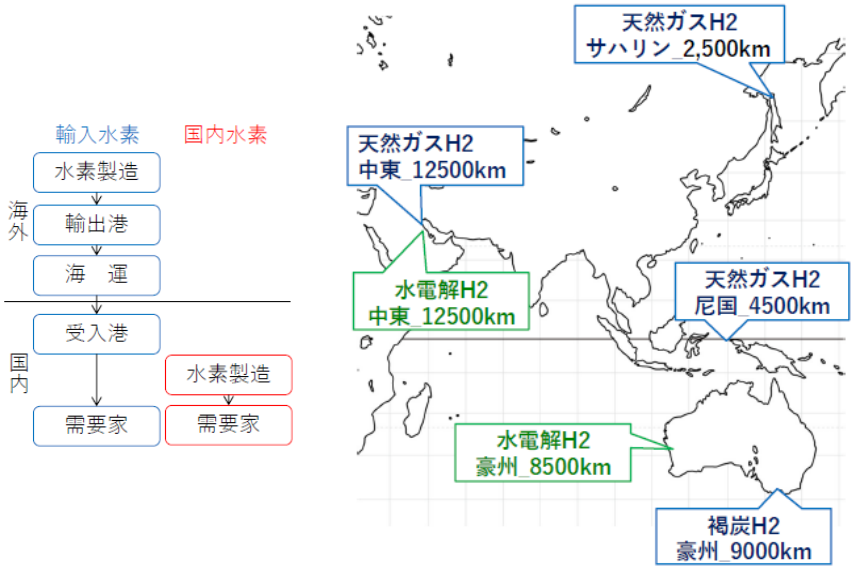


図 5.2.4-1 水素サプライチェーンと想定した製造地点

b. コスト・計算式

式（5.2.4-1）及び主に文献 2)の Annex のデータを使用し試算した（主な想定値は参考：試算条件参照）。

$$LCOH = \sum_{n=1}^{N} \frac{\sum_{t=0}^{t=tmax}\left(I_{n,t} + M_{n,t}\right)(1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^{t=tmax}\left(E_t(1+r)\right)^{-t}} \qquad (5.2.4\text{-}1)$$

$I_{n,t}$ ：設備 n の t 年における設備費、$M_{n,t}$：設備 n の t 年における運転維持費

E_t :t 年における水素製造量、r ：割引率（5%/yr）、t ：年、t_{max}:使用期間

設備利用率：90%、ただし水電解装置は 15%または 45%

また、文献 2)の Annex の Long term を将来（2050 年）として使用した。

② 試算結果

a. 足元（2018 年）での試算結果

足元（2018 年）の水素コストの試算を図 5.2.4-2 に示す。水素製造コストは、天然ガス<褐炭<水電解である。

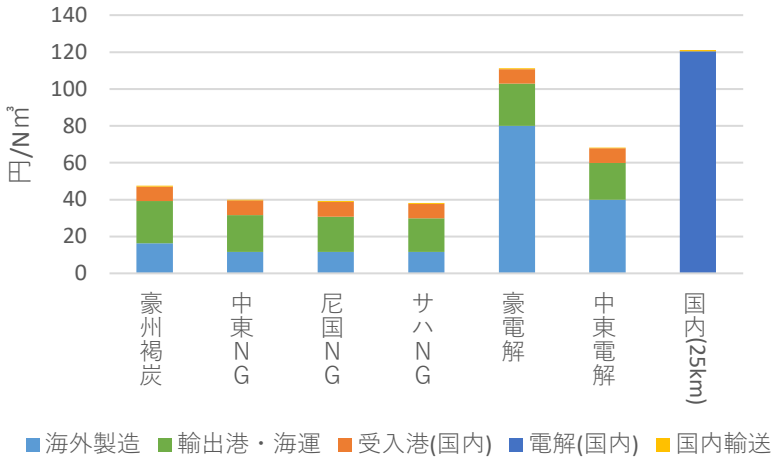


図 5.2.4-2 足元（2018 年）での水素コスト試算結果

b. 将来（2050 年）の試算結果

将来（2050 年）では、天然ガス改質装置・水電解装置の設備コストが低下し、また、水電解装置の効率が向上しているが、主に水素の液化工程・水電解に使用する電力調達コストの上昇により水素コストは増加しており、政府目標 CIF20 円/Nm³ をクリアする地点は見られない。

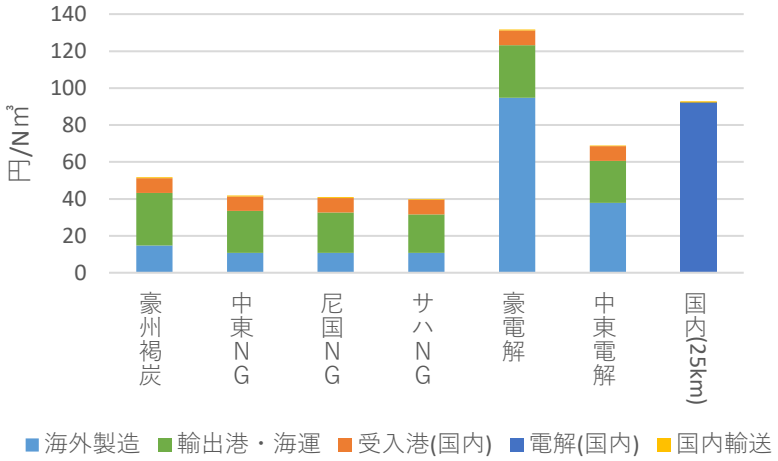


図 5.2.4-3 将来（2050 年）の水素コスト試算結果

③ 水素コストの低減検討

a. 液化・製造コスト低減

図 5.2.4-3 において、20 円/Nm³ をクリアする地点が無かったことから、電力調達コスト及び水電解装置の利用率について再検討した。

ｱ) 電力調達コスト（液化工程、水電解水素製造工程）

輸出港の液化工程、水電解水素の製造工程のコストの低減のため、将来（2050 年)では、主に、再エネから受電を想定し、電力調達コストを変動再エネ価格（以下、VRE コスト）に変更した。

表 5.2.4-1 電力調達コスト [2)]

	系統(USD/MWh)		VRE (USD/MWh)
	2018	将来(2050)	将来(2050)
豪州	86	163	31
中東	19[7]	55[1]	25
ｲﾝﾄﾞﾈｼｱ	70[8]	108[2]	31[2]
ｻﾊﾘﾝ	70[2]	108[2]	31[2]
日本	156	158	63
米国	70	108	31
最小	19	55	18

ｲ) 利用率（水電解水素製造工程）

水電解装置の利用率を高めれば固定費は低下する一方で、電力調達コストの上昇に伴い製造コストが上昇することから、最適な利用率の検討が必要である [2),4)]。図 5.2.4-2、図 5.2.4-3 では、昼間帯の余剰電力を受電することを想定し水電解装置の利用率を 15%（12 時±2 時間程度）としていたが、本検討では図 5.2.4-4 で製造コストが鍋底状となる 20%-70%の中間である 45%を利用率とした。

（なお、本試算では電力調達コストの影響を把握するため、電力調達コストはｱ)の値を使用した）

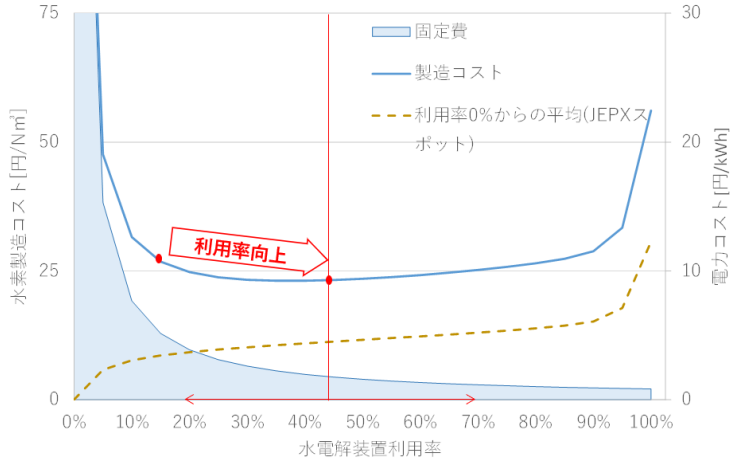


図 5.2.4-4 利用率と水素製造コストの関係

[7] 文献 2)に予想値が示されていないこと及び資源が豊富な地域であることを考慮し最小値を使用
[8] 文献 2)に予想値が示されていないため、米国値で代替

b. VRE コスト・高利用率想定の試算結果

ｲ) 、ｱ)の条件下での試算結果を図 5.2.4-5 に示す。主に輸入水素の海運コスト及び国内の電力調達コストの影響により、CIF 価格 20 円/Nm³ 程度を満たす地点は見られなかった。

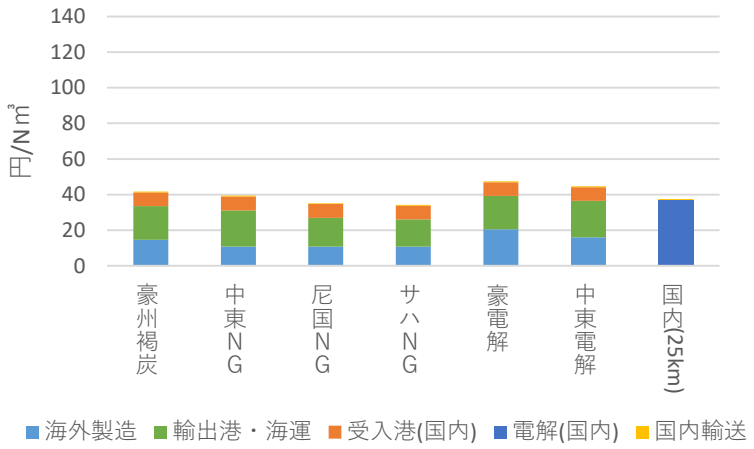


図 5.2.4-5 VRE コスト・高利用率想定ケース（2050 年）

④ 更なる水素コスト低減検討

a. 海運コスト、国内電力調達コスト低減

更なるコスト低減の可能性を検討するため、海運コストと電力調達コスト（国内）について再検討した。

ｱ) 海運コスト見直し

文献 2)では将来（2050 年）の海上輸送コストを別途想定していないことから、文献 3)の想定値（2050 年に水素の最大導入ケース）を低海運コストケースとした。

表 5.2.4-2 海上輸送関連施設のコスト比較[9]

		文献 2)	低海運ｺｽﾄ 3)
液化設備	千 USD/t_{H2}/yr	5.4	2.6
輸出貯蔵	千 USD/t_{H2}	91	49
船舶	千 USD/t_{H2}	37	19
受入貯蔵	千 USD/t_{H2}	90	52

ｲ) 国内電力調達コストの見直し

2050 年政府目標である 20 円/Nm³ になる電力調達コストを参考として試算した。水電解水素の場合、電力調達コストが 3 円/kWh 台前半であった。

[9] 比較のため本表はコスト/容量に換算している

b. 低海運・低電力コスト（国内）想定ケースの試算結果

ｱ)、ｲ)の条件にて試算した結果を図 5.2.4-6 に示す。CIF20 円/Nm³ 程度となる地点も見られる。なお、国内港湾コスト込みでは 25～36 円/Nm³ である。

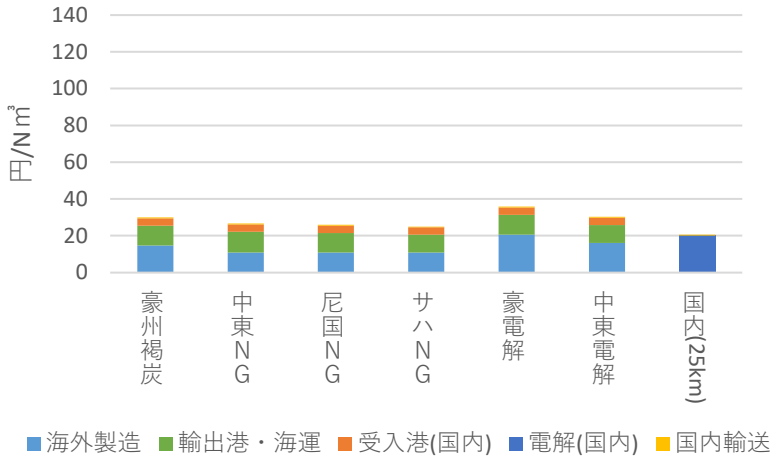


図 5.2.4-6 低海運コスト・低電力コスト想定ケース（2050 年）

⑤ 水素活用

a. コスト比較

表 5.2.4-3 では、文献 4)に示されたパリティーコストに 2050 年のカーボンプライス（160USD/t）[2)]を加算した水素コストと図 5.2.4-6 の試算結果と比較した。

この結果より、水素の用途は FC トラック・水素還元製鉄など、発電以外の分野に優先して供給される可能性があると考えられる。また、水素の活用には国内外を問わず水素の製造・海運コストの削減が必要であり、発電に使用する場合は 20 円/Nm³ 台前半の水素が必要となると考えられる。

表 5.2.4-3 カーボンプライス込みの水素コストと試算結果の比較（円/Nm³）

用途		図 5.2.4-6	合計 (=①+②)	① ﾊﾟﾘﾃｨｰｺｽﾄ	② 環境価値
FC トラック	軽油代替 (FC 車効率)	輸入水素 25～36 円/Nm³ （参考：国内 20 円/Nm³)	69.3 円/N ㎥	50.3	19.0
水素還元製鉄	原料炭代替 (還元)		27.0 円/N ㎥	8.5	18.5
水素発電	LNG 代替 (熱等価)		23.6 円/N ㎥	14.3	9.3

b. DNE21+による日本の水素バランス（2050 年断面）の分析結果との試算結果の比較

図 5.2.4-7 に DNE21+による 2050 年日本における水素バランスの分析結果を示す(分析シナリオなどは 5.2.2 節参照)。供給面では、国内-石油化学部門からの供給がみられるが水電解水素は見られず、多くは輸入により供給されている。

国内でカーボンニュートラルを前提とした場合、需要面では水素還元製鉄、FC トラック、DAC での使用がみられ、水素イノベケースではその他産業において若干の使用がみられるが、すべての分析ケースで水素発電に利用されていない。カーボンプライスを加味したコスト（表 5.2.4-3）においても FC トラック、水素還元製鉄が水素発電よりも高コストの水素を許容できており同様の傾向であった。

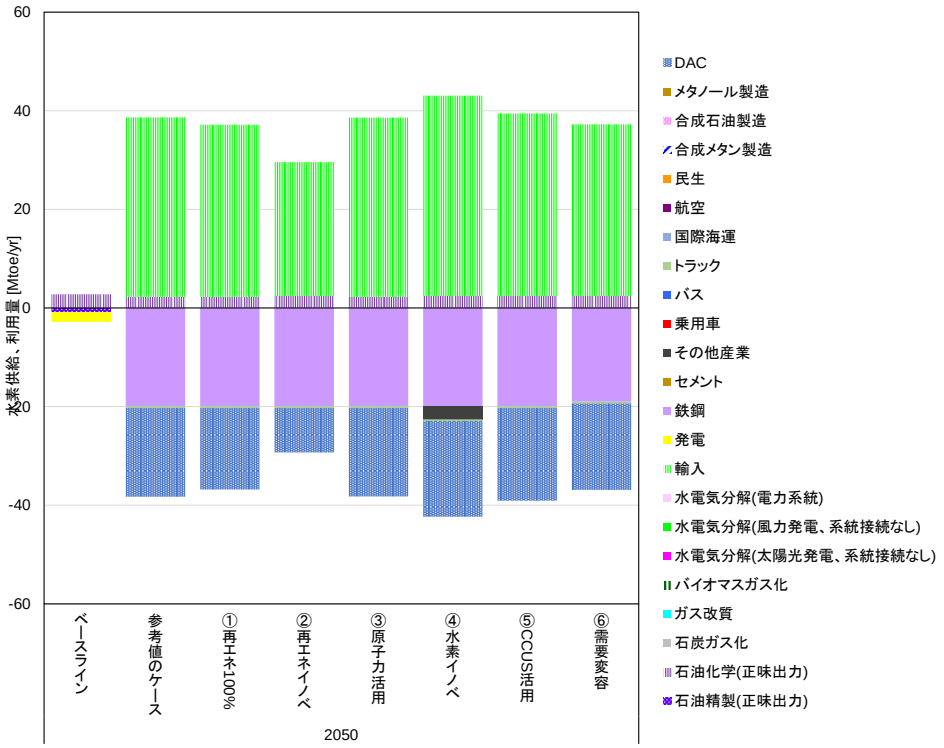


図 5.2.4-7　CN の日本の水素バランス（2050 年）　（5.2.2 節（再掲））

⑥　まとめ

運輸・産業部門の脱炭素化、合成燃料・合成メタンの製造、電源のゼロエミッション化などの用途に加え、水電解装置・燃料電池の周波数調整能力[5]など、再生可能エネルギーの効率的な活用に多様な貢献が期待できるため、水素は重要なオプションの一つである。水素の活用により、カーボンニュートラルを達成するためには、安価な水素が必要となることから、本稿ではサプライチェーン全体のコストとコスト低減について検討した。本検討における主な結果は下記の通りである。

- 水素は様々な分野で脱炭素化が可能であるが、水素還元製鉄、DAC（熱）、FC トラックなど、電化では代替が困難な分野で優先的に使用される可能性があることを確認した。
- 一方で、水素の利活用には
  需要側：需要拡大に資する技術開発（鉄鋼、運輸、発電他）
  供給側：製造設備・輸送設備などサプライチェーンをカバーする技術開発
  　　設備の高利用率運用

安価な電力調達

など、水素コスト低減にむけた幅広い取り組みが必要である。

- 水素の社会実装には、各種政策措置も必要なため、今後の制度設計の動向の注視も必要である。

【参考】試算条件

表 5.2.4-4 CCS 付き水素製造装置 [2)]

		単位	足元(2018)	将来(2050)
CCS 付き褐炭改質	CAPEX	USD/kW	2,780.0	2,780.0
	効率	%	58.0	58.0
	運転費	CAPEX×%	5.0	5.0
CCS 付き天然ガス改質	CAPEX	USD/kW	1,680.0	1,280.0
	効率	%	69.0	69.0
	運転費	CAPEX×%	3.0	3.0
水電解	CAPEX	USD/kW	900.0	450.0
	効率	%	64.0	74.0
	運転費	CAPEX×%	1.5	1.5

表 5.2.4-5 電力調達コスト [2)]

	系統(USD/MWh)		VRE (USD/MWh)
	足元(2018)	将来(2050)	将来(2050)
豪州	86	163	31
中東	19[※1]	55[※1]	25
インドネシア	70[※2]	108[※2]	31[※2]
サハリン	70[※2]	108[※2]	31[※2]
日本	156	158	63
米国	70	108	31
最小	19	55	18

※1: 文献 2)に予想値の記載がないこと及び資源が豊富な地域であることを考慮し最小値を使用

※2: 文献 2)に予想値の記載がないことから、米国値で代替

表 5.2.4-6　天然ガス/褐炭価格 [2)]

	ガス(USD/Mbtu)		褐炭(USD/Tonne)	
	足元(2018)	将来(2050)	足元(2018)	将来(2050)
豪州※3	—	—	30.1	10.4
中東※3	2.9	3.4	—	—
尼国※3	2.9	3.4	—	—
サハリン※3	2.9	3.4	—	—
最小	2.9	3.4	30.1	10.4

※3: 文献 2)に予想値の記載がなかったこと及び資源が豊富な地域であることを考慮し最小値を使用

表 5.2.4-7　海上輸送関連施設 [2)]

	容量	CAPEX	運転費	使用電力
液化設備	260ktH_2/y	1400MUSD/台	4%	6.1kWh/kgH_2
輸出設備	3,190tH_2/tank	290MUSD/tank	4%	0.61kWh/kgH_2
船　舶	11,000tH_2/隻	412MUSD/隻	4%	—
受入設備	3550tH_2/tank	320MUSD/tank	4%	0.2kWh/kgH_2

表 5.2.4-8　海上輸送関連施設(文献 3)より換算)

	容量	CAPEX	運転費	使用電力
液化設備	270ktH_2/y	707MUSD/台	4%	6.1kWh/kgH_2
輸出設備	13,600tH_2/tank	670MUSD/tank	4%	0.61kWh/kgH_2
船　舶	11,000tH_2/隻	210MUSD/隻	4%	—
受入設備	15,800tH_2/tank	815MUSD/tank	4%	0.2kWh/kgH_2

表 5.2.4-9　国内輸送 [2)]

	容量	CAPEX	OPEX
基　幹	340ktH_2/y	1.21MUSD/km	CAPEX×2%
ローカル	38ktH_2/y	0.5MUSD/km	CAPEX×2%

(OPEX は 2%と想定)

(2) WITCH モデルによる水素の評価 [6)]

前節では水素の経済性について検討したが、長期的な水素需要・製造について、WITCH（World Induced Technical Change Hybrid）モデルを用い分析した。なお、WITCH は、CMCC が開発しており、環境・エネルギー・土地利用・経済などを統合し、気候変動の緩和と適応の方針を調査のための動的最適化統合評価モデルである。

① シナリオ概要

本分析では、3 シナリオを用いて水素の製造にあたえる影響を分析している。想定したシナリオは、炭素税やカーボンバジェットを採用しないシナリオ A、炭素税があるシナリオ B、カーボンバジェットを導入したシナリオ C である。

表 5.2.4-10 分析シナリオ

A	ベースラインシナリオ（炭素税、カーボンバジェットなし）
B	2020 年から炭素税を課すシナリオ（2020 年の炭素税は 30$/t-$CO_2$）
C	カーボンバジェットを実施するシナリオ（2019-2100 の CO_2 の総量は 800Gton）

② 分析結果：水素需要と水素製造シェアの推移

水素需要を図 5.2.4-8 に示す。シナリオ B,C では、水素の需要は上昇を続けており炭素税が高ければ（図 5.2.4-10 参照）水素の需要高くなることが示されている。

また、水電解、天然ガス改質（SGR:Steam Gas Reformng）及び CCS 付き天然ガス改質（SGR+CCS）の水素生産シェアの推移を図 5.2.4-9 に示す。

シナリオ A では、2050 年頃まで CCS 無し天然ガス改質（SGR）により水素が生産される。これは、天然ガスが利用可能である一方で、水電解が高価なためである。その後、電解槽がより安価になり、より多くの再生可能エネルギー利用可能なり、水電解のシェアは増加する。

シナリオ B においても当初はシナリオ A と同様、天然ガス改質により水素が製造される。ただし、このシナリオでは、シナリオ A より再生可能エネルギーが多いため、水電解により水素が製造される。また、SGR + CCS も導入されるが、水電解による製造が主流になると考えられる。これは CO_2 回収にコストが必要であることと、水素製造プロセスで発生する CO_2 を 100%回収できないためである。

シナリオ C はシナリオ A,B に比べ炭素税が高いため、製造プロセスで CO_2 を発生しない水電解が水素生成の大部分を占め、次いで SGR + CCS となる。再生可能エネルギーの割合が高い地域では、電気分解法が主流になるが、天然ガスの生産地域では SGR + CCS により水素を製造すると考えられる。

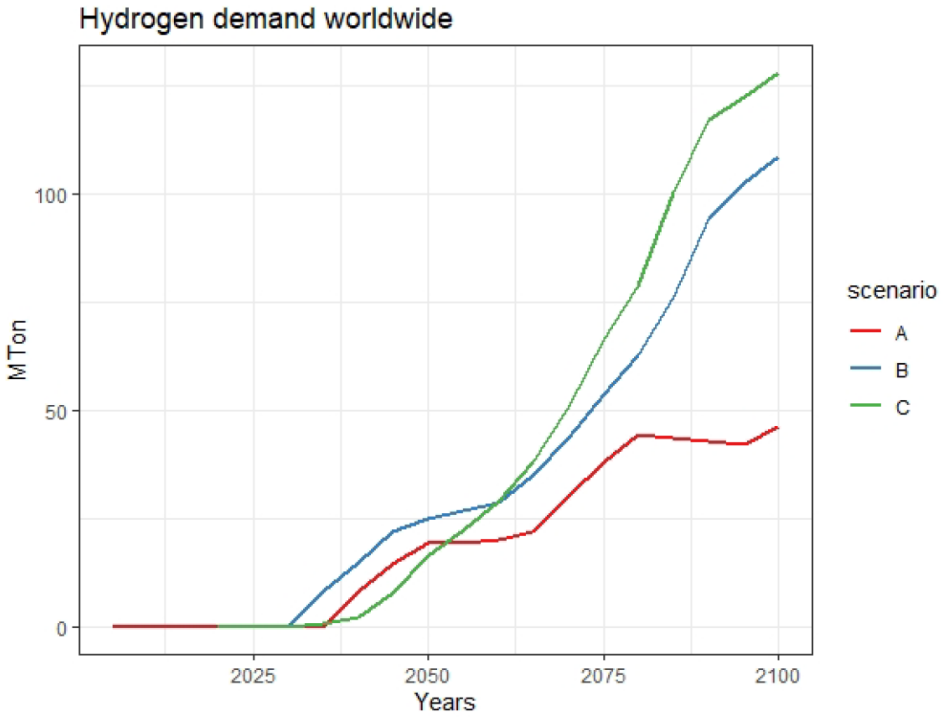


図 5.2.4-8 水素需要（世界）

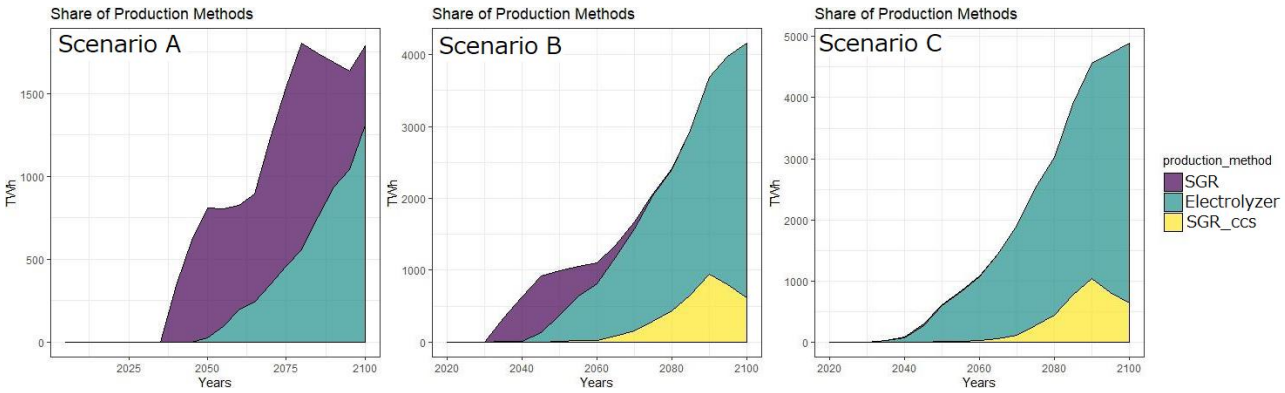


図 5.2.4-9 水素製造シェアの推移

〔補足：本分析における炭素税、CO_2累積量、気温変化〕

本モデルで算出された炭素税の推移を図 5.2.4-10 に示す。シナリオ C の炭素税が最も高く、次いでシナリオ B となっている。なお、シナリオ A は炭素税を課さないシナリオであるため 0 で推移している。また、各シナリオにおける CO_2累積量と気温変化を図 5.2.4-11 に示す。

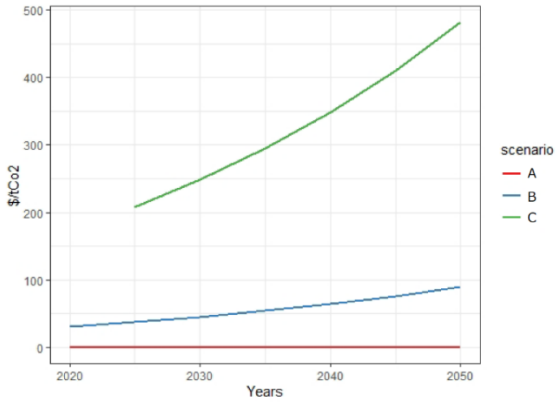


図 5.2.4-10 炭素税の推移

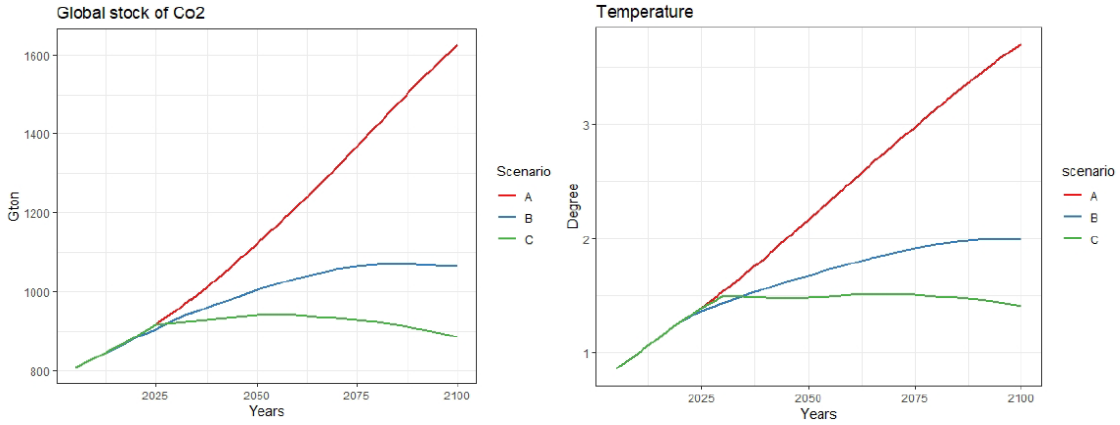


図 5.2.4-11 CO_2 累積量（左）と気温変化（右）

参考文献（第 5.2.4 節に関するもの）

1) 経済産業省：第 2 回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ 資料 3 水素関連プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性(2021)

2) International Energy Agency; The Future of Hydrogen, https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen（ｱｸｾｽ日 2021.11.1）.

3) 新エネルギー・産業技術総合研究機構；水素利用等先導研究開発事業 ｴﾈﾙｷﾞｰｷｬﾘｱｼｽﾃﾑ調査・研究 ｴﾈﾙｷﾞｰｷｬﾘｱｼｽﾃﾑの経済性評価と特性解析,（2016）.

4) 経済産業省 資源エネルギー庁 新エネルギーシステム課/水素・燃料電池戦略室；今後の水素政策の課題と対応の方向性 中間整理（案),（2021）.

5) 再生可能エネルギーの大量導入に向けた水素利用発電技術調査専門委員会；再生可能エネルギーの大量導入に向けた水素利用発電技術，電気学会技術報告第 1509 号,（2021）.

6) H.Nagash, G.Marangoni, L.Drouet,M.Tavoni; Modeling Hydrogen & Fuel cell in Transportation & Energy Sectors through Different Climate Change Policies, RFF-CMCC （2021）

5.2.5 航空部門関連の分析

世界で脱炭素化に向けた動きが加速する中、航空部門は脱炭素化が困難な部門の一つとされている 1),2),3)。2018 年の航空部門エネルギー消費量は 337 Mtoe/yr で、そのほとんどが化石燃料である。また 2018 年の航空部門 CO_2 排出量は 1.0GtCO_2 である。一方、航空運輸における将来需要は大幅増加が見込まれている。例えば ITF は 2050 年需要見通しを 2019 年実績値のおよそ 3 倍（重量換算ベース）と見込んでいる。このような規模の需要増加の下では、既存技術の進展や運航オペレーション改善のみに依存した大幅排出削減は難しいと考えられる。IEA は、航空部門などの脱炭素化には、未だ利用されていない新規技術の開発が必要と指摘している 3)。

航空部門の脱炭素化に貢献しうる技術として電動航空機、水素航空機、合成燃料、バイオ燃料を中心とした SAF(Sustainable Aviation Fuel)が近年注目されてきており、世界でこれら脱炭素化技術の検討、開発が進められている。機体技術については開発プロジェクトの多くが小型機を対象としているが、100 人程度が搭乗可能な機体の開発も進められている。これらの将来技術が長期脱炭素経路及び世界エネルギーシステムにもたらす影響の評価は重要であるが、これら技術を詳細にモデル化し分析可能な統合評価モデルは現時点では殆ど見られない。RITE では世界エネルギーモデル DNE21+においてこれらの航空部門における脱炭素化技術をモデル化し、世界エネルギーシステムへの影響を分析した [4)]。分析の結果、電動航空機、水素航空機、合成燃料は長期排出削減に貢献しうること、特に B2DS などより厳しい排出削減目標においては大きな経済的便益をもたらしうることが示された。検討した排出削減シナリオのうち 2DS においては合成燃料が、B2DS においては電動航空機と水素航空機の導入がエネルギーシステム全体により影響を及ぼすことが示された。B2DS においては、電動航空機と水素航空機の導入がなされない場合は 2100 年の合成燃料及び水素消費量、BECCS への依存度、発電量、一次エネルギー供給量などの増大をもたらし、世界排出削減費用は増大するとの結果であった。また、ジェット燃料は石油精製における連産品の一つであり、B2DS で 2100 年に電動航空機、水素航空機、合成燃料の利用が不可の場合、ジェット燃料に頼ることとなるが、ジェット燃料の大幅増産に伴いそのほかの石油製品も連産品として必然的に生産され、この消費が B2DS の下では許容されずエネルギー需給バランスが維持できないため実行可能解が得られないとの結果であった。

上記の分析の後、航空部門の脱炭素化に関連する技術動向や各国の取り組みなどに様々な更新が見られている。本稿では、これらの状況を踏まえた分析結果について述べる。

(1) 航空部門に関連する排出削減目標、規制

航空部門の排出削減取り組みに関して、国内航空部門は各国の排出削減目標において進められており、国際航空部門については UNFCCC の規制対象外であるため、国連の専門機関である国際民間航空機関(ICAO)により進められることとされている。この枠組みの下、国際航空における排出抑制目標として、2050 年まで年平均 2%の燃費効率改善と、2020 年以降の GHG 排出増加ゼロが ICAO において決議された。当初、各国

における GHG 排出増加ゼロの基準となる排出量は 2019～2020 年の各国排出量平均とされ、このベースラインを超過する各国排出量について国際航空における市場メカニズム CORSIA によりオフセットを行うものとしていた。しかし、COVID-19 による国境封鎖に伴い 2020 年の航空輸送量が大幅に下落することが予想され、これを基準値とすることは適切でないとの議論が行われた結果、2019 年の排出量を各国のベースラインとすることが 2020 年 6 月に決定された。IEA[5]によると 2019 年の国際航空部門排出量は 618MtCO_2 であり、国際航空部門は CORSIA により概ねこの排出量を目指すことになる。

航空部門関連団体による環境目標としては上記の他、国際航空運送協会(IATA)が 2009 年に発表した目標がある。これは 2020 年まで年平均 1.5%の燃費効率改善、2020 年以降の CO_2 排出量安定化、2050 年 CO_2 排出量の 2005 年比 50%削減であったが、排出量目標に関してはパリ協定 1.5℃目標に整合するよう見直され、2050 年までに航空部門としてネットゼロ排出を達成するとの目標を 2021 年 10 月に決議した[6]。この目標達成手段として、SAF の利用、新技術、インフラ・オペレーション改善、オフセット/CCUS を挙げている。このうち SAF による排出削減への寄与度を 65%と考えており、2050 年における SAF 生産量を 4490 億リットルに上ると推計している。また、ネットゼロに貢献する新技術として電動航空機と水素航空機を挙げており、小型の電動航空機は 2025 年までに、100～150 席の水素航空機が 2035 年までに実現しうるとの見通しを示している。オフセットについては技術進展が進むまでの過渡的な位置付けであり 2050 年に向けてオフセットへの依存度は低減していくものとし、その代わりに CCUS を SAF 製造に利用しうるものとして有望視している[7]。

国、地域においては、代替燃料の利用促進を目的とした推進策や規制の導入に向けた動きが見られている。EU においては、欧州委員会は航空部門に対し、先進的なバイオ燃料とカーボンフリーの e-fuel に移行すべきであるとの見解を 2018 年に示している[8]。2021 年には、航空燃料における SAF あるいは合成燃料の混合を 2025 年から義務付ける提案を行っている[9]。ノルウェーは 2020 年に航空燃料におけるバイオ燃料の混合義務を公表している。英国は 2021 年に、航空燃料に対する SAF の 2025 年以降の混合義務導入を提案し検討段階にある[10]。ドイツでは連邦環境汚染防止法に基づき、ドイツで提供される航空燃料に対する PtL 合成燃料の 2026 年以降の混合義務が課されることになっており、2022 年には世界初となる再生可能エネルギー由来の電力による合成ジェット燃料の量産プラントが稼働する予定である[11]。米国では 2021 年 5 月、SAF の混合利用に対するインセンティブ付与や SAF 製造工場の増設に対する補助金交付などを盛り込んだ Sustainable Skies Act を導入した。また同年 9 月、SAF の年間製造量を 2030 年までに 30 億ガロンまで増大させるための税額控除策を発表している[12]。

このように各国政府による SAF への期待は高く、利用促進に向けた取り組みが進んでおり、早期導入の実現が期待される。

(2) 革新的航空機技術

脱炭素化に貢献しうる機体技術として、水素航空機への期待が高まっている。Roland Berger[13]によると、水素航空機 7 プロジェクトが世界で進行中であり、このうちの

ZeroAvia によるプロジェクトは 2023 年に商用サービスを開始すると 2020 年に同社より発表されている。このプロジェクトは英国政府の支援を受けているが、英国政府は他にも H2GEAR、FlyZero、Project Fresson といった水素航空機開発プロジェクトにも支援を行っている。さらに、エアバスが 120～200 人乗り水素航空機の 2035 年商用化を 2020 年に発表しているほか、スウェーデンの国家プロジェクトである H2JET、オランダのデルフト工科大学による Phoenix プロジェクト、米国 Universal Hydrogen によるプロジェクトなどが進行中である。

電動航空機の開発プロジェクトについては小型機に関する発表がほとんどであるが、Wright Electric は、100 人が搭乗可能な航続距離 800 マイルのフル電動機の開発を行っており、2026 年に商業サービスを開始すると表明している [14]。

(3) 機体コスト

表 5.2.5-1 に、DNE21+モデルにおける航空機機体コストの想定を示す。ジェット機については、文献 15)や航空機製造各社の公表データ等を参考に、平均値を算定することにより想定している。また電動航空機と水素航空機のコストは、既往文献におけるコスト推計手法に基づき、ジェット機価格を基準としたコスト想定を行っている。その一方で、ジェット機のコストに関しては、多くの航空会社は新規機体購入時に大幅な価格割引を受けているとの情報が見られている [16]。実際の購入価格は購入時期や購買条件により異なると考えられるが、仮にジェット機のコストがモデルにおける想定よりも安価であった場合、電動航空機と水素航空機も現在の想定より安価に実現する可能性も考えられ、その場合の技術選択やエネルギーシステムコストに与える影響についても分析しておくことは重要と考えられる。そこで本項では、ジェット機コストがモデル想定の半額であるケースについて感度分析を行った結果を報告する。

表 5.2.5-1 航空機の機体コストの想定（標準ケース）（million US$/機）

		2015 年	2030 年	2040 年	2050 年	2100 年
広胴機	従来型ジェット機	300	300	300	300	300
細胴機	従来型ジェット機	100	100	100	100	100
	電動航空機（短距離帯）	-	-	94	93	92
	電動航空機（中距離帯）	-	-	-	94	94
	水素航空機（中距離帯）	-	-	116	116	116
	水素航空機（長距離帯）	-	-	116	131	138

表 5.2.5-2 に、機体コスト割引ケースにおける機体技術別コストの想定を示す。このケースにおいてはジェット機コストを標準想定の半額としている。なお、電動航空機のコストはジェット機コストからガスタービンコストを減じ、モーターコストと電池コストを追加して推計しているため、機体コスト割引ケースにおけるコストは標準コストケースの 50%とは想定されない。

表 5.2.5-2 航空機の機体コストの想定（機体コスト割引ケース）（million US$/機）

		2015 年	2030 年	2040 年	2050 年	2100 年
広胴機	従来型ジェット機	150	150	150	150	150
細胴機	従来型ジェット機	50	50	50	50	50
	電動航空機（短距離帯）	-	-	49	48	47
	電動航空機（中距離帯）	-	-	-	49	50
	水素航空機（中距離帯）	-	-	58	58	58
	水素航空機（長距離帯）	-	-	58	66	69

表 5.2.5-3 に分析シナリオを整理した結果を示す。航空機機体技術シナリオ、燃料技術シナリオは昨年度の分析と同様それぞれ 3 通りと 2 通りである。排出削減シナリオも昨年度と同様ベースライン、2DS、B2DS である。そのほかの前提条件として、社会経済シナリオは SSP2、太陽光発電コストは低位、DAC の利用は無しとしている。

表 5.2.5-3 分析シナリオ

シナリオ名	排出シナリオ	革新型航空機（電動航空機、水素航空機）の導入可能時期	航空部門における合成燃料の利用可否	機体コスト
REF_StdAT	ベースライン (特段の CO_2 排出制約なし)	2040 年～	利用可	標準コスト
2DS_StdAT	2℃未満（>50%）: IEA ETP2017 2DS 相当	2040 年～	利用可	
2DS_StdAT_NoSynf			利用不可	
2DS_LowAT		導入無し	利用可	
2DS_LowAT_NoSynf			利用不可	
B2DS_StdAT	2℃未満（>66%）: IEA ETP2017 B2DS 相当	2040 年～	利用可	
B2DS_StdAT_ NoSynf			利用不可	
B2DS_MidAT_NoSynf		2070 年～	利用不可	
B2DS_LowAT		導入無し	利用可	
B2DS_LowAT_NoSynf			利用不可	
B2DS_StdAT_DC		2040 年～	利用可	割引後コスト

図 5.2.5-1 に、航空運輸のサービス需要単位当たり年経費における設備費、燃料費の構成を機体コスト標準ケース(B2DS_StdAT)、機体コスト割引ケース(B2DS_StdAT_DC)で比較したものを示す。ここでは例として細胴機、旅客輸送における 2100 年のコスト内訳を示す。設備費、燃料費とも、単位当たり費用（million US$/billion t-km/yr）で算定し、機体コスト標準ケースにおけるジェット機の値を 1 とし基準化して表示している。設備費は主観的割引率、運転・メンテナンス費用、稼働率を考慮した費用である。

燃料費は炭素価格を含み、幅は国による差異を示す。ジェット機における燃料費比率はジェット燃料の場合を示したものである。機体コスト標準ケースでは、ジェット機は年経費における燃料費の比率が高い一方、電動機と水素機では設備費の比率が高く、全体経費に占める比率は電動機が 67-80%、水素機は 60-67%である。機体コスト割引ケースでは、年経費に対する設備費の比率は標準ケースと比較すると 12-20pp 低減し、設備費比率は電動機で 52-65%、水素機で 43-51%である。

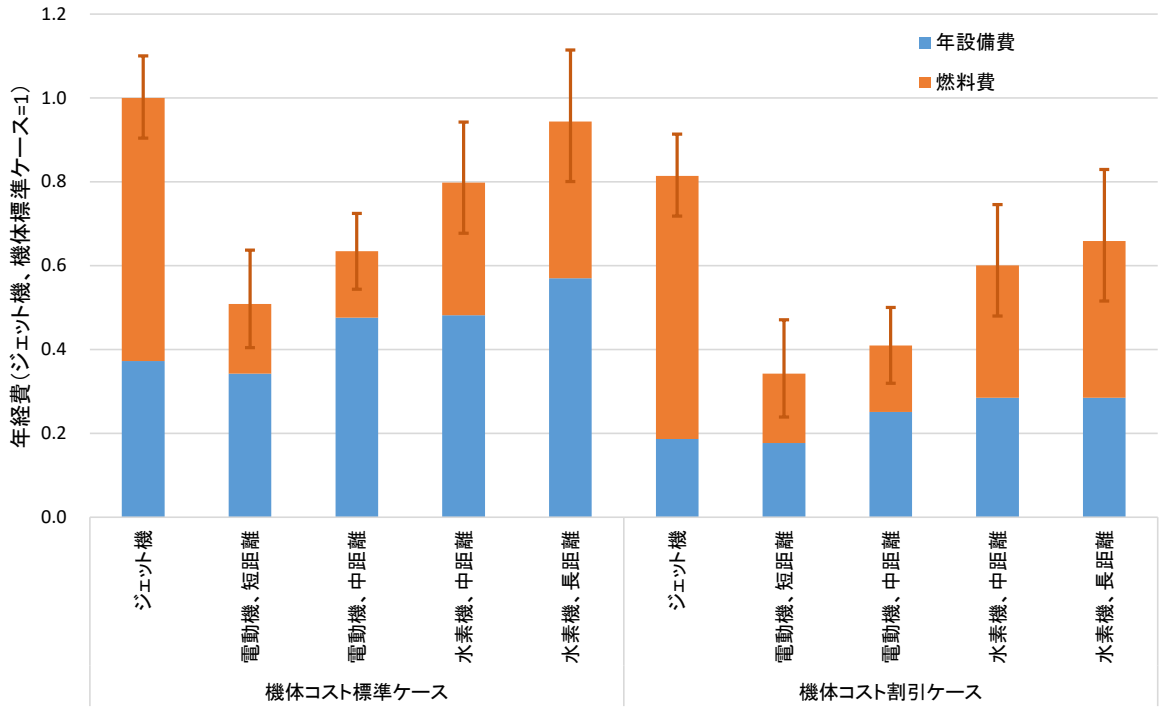


図 5.2.5-1 年経費における設備費、燃料費の構成（B2DS, 2100 年）

(4) 分析結果

主な分析結果について、昨年度以降の追加分析、及び機体コスト割引ケースに関する分析を中心に記述する。表 5.2.5-4 は、2100 年の CO_2 限界削減費用と世界排出削減費用を示したものである。機体コスト割引ケースにおける限界削減費用 1166 US$/tCO$_2$ と、B2DS シナリオの中で最も安価となる。世界排出削減費用は。標準コストシナリオでは 12139 billion US$/yr であるのに対し、機体コスト割引ケースでは 11713 billion US$/yr と▲426 billion US$低減する。標準コストケースにおいては、B2DS の下で年経費における設備費の比率が電動機、水素機で 60～80%と高く排出削減費用を押し上げているが、機体コスト割引ケースでは電動機、水素機の設備費比率が年経費の 50～60%程度に低減し、排出削減費用の増大を抑制するものと考えられる。その他、後述するように機体コスト割引ケースにおける限界費用の高い合成燃料（気体、液体とも）の 2100 年の消費量の減少、一次エネルギー及び電源構成における BECCS の減少なども排出削減費用を低減する要因と考えられる。

表 5.2.5-4　2100 年の CO_2 限界削減費用及び世界排出削減費用

	2℃, >50% [2DS]				2℃, >66% [B2DS]				
	2DS_StdAT	2DS_MidAT	2DS_LowAT	2DS_LowAT_NoSynf	B2DS_StdAT	B2DS_MidAT	B2DS_LowAT	B2DS_LowAT_NoSynf	B2DS_LowAT_DC
CO_2 限界削減費用 ($/tCO_2$)	336	341	361	404	1529	1526	5718	実行可能解無し	1166
CO_2 削減費用* (billion US$/yr)	6135	6158	6220	6644	12139	12223	14882		11713**

*REF-StdAT 比

**REF_StdAT_DC 比

図 5.2.5-2 に航空部門最終エネルギー消費を示す。機体コスト割引ケース(B2DS_StdAT_DC)においては、水素機の経済性が向上することから 2050 年から水素消費の増大が見られ、2100 年の導入量は標準コストケースと比較し約 2 倍の 908Mtoe/yr に達する。電動機が導入不可の長距離帯（2500～10000km）において、水素機によるジェット機の代替が見られており、主として合成燃料の減少がみられる（268Mtoe/yr->57Mtoe/yr)。また、水素航空機の燃費効率想定は他技術よりも劣るため、水素の導入量が増大する機体コスト割引ケースでは航空部門の最終エネルギー消費総量を押し上げることとなり、標準コストケースと比較すると 193 Mtoe/yr 増大し全ケースの中で最大となる。電動機は航続距離上限が導入状の制約となり大幅な導入拡大は見られない。バイオ燃料は 2DS においては 2100 年にやや拡大するが、B2DS では BECCS が選択されることから 2100 年に向けてバイオ燃料の導入量は減少する。

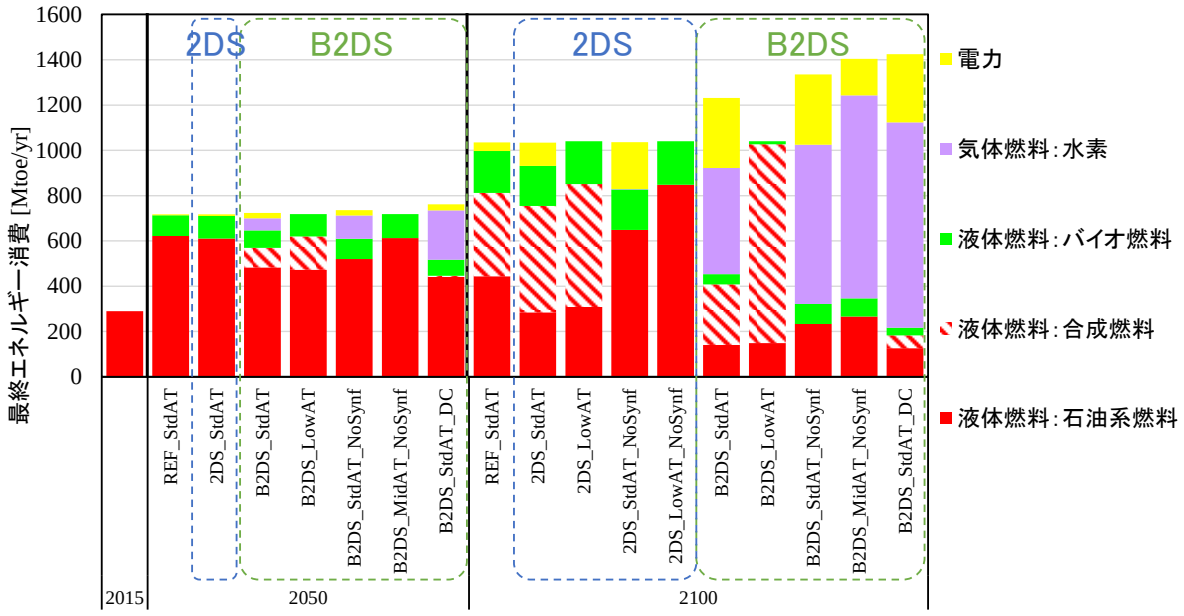


図 5.2.5-2 航空部門の最終エネルギー消費

図 5.2.5-3 に航空部門からの CO_2 排出量を示す。2050 年排出量は全シナリオで 1.0GtCO_2 以上に達し、2015 年排出量を大きく上回る。2100 年においては、航空輸送需要が 2015 年比の約 6 倍に増大するとの想定下でも、2DS で合成燃料が利用不可の場合を除き排出量は 1.0Gt 以下に抑制される。B2DS で革新型航空機が導入される場合は、国内航空輸送は概ね脱炭素化されるとの結果である。

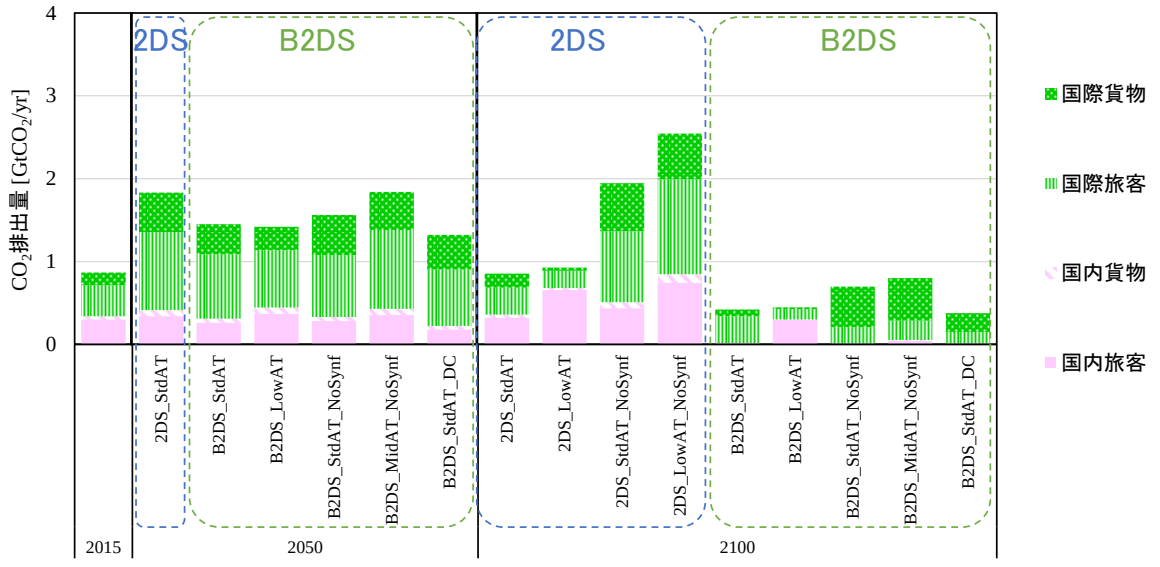


図 5.2.5-3 航空部門 CO_2 排出量

図 5.2.5-4 に世界全体の最終エネルギー消費を示す。2DS では、航空部門で合成燃料が利用不可の場合、2100 年に航空部門向けジェット燃料の供給量が増大することにより、連産品である軽油、重油などの製造、供給が経済合理的となり石油消費が増大し、

ガス、石炭の消費が低位となる。B2DS では、革新型航空機の導入がない場合は 2100 年に合成燃料（気体、液体とも）の消費が増大し天然ガスと水素が低位となる。機体コスト割引ケースにおいては、図 5.2.5-2 で示した通り航空部門の最終エネルギー消費は標準コストケースと比較すると 2100 年に 193 Mtoe/yr 増大するが、最終エネルギー消費合計では 107 Mtoe/yr の増大にとどまり、全体として大きな影響とはならない。機体コスト割引ケースにおける 2100 年の合成燃料（液体及び気体燃料）消費量は 428Mtoe/yr で、標準ケースの 848Mtoe/yr のおよそ半分となり、B2DS シナリオ中最も低位となる。また、天然ガスの 2100 年の消費量は B2DS シナリオ中最も高位となり、水素の消費量は B2DS_MidAT_NoSynf に次いで 2 番目に高位となる。

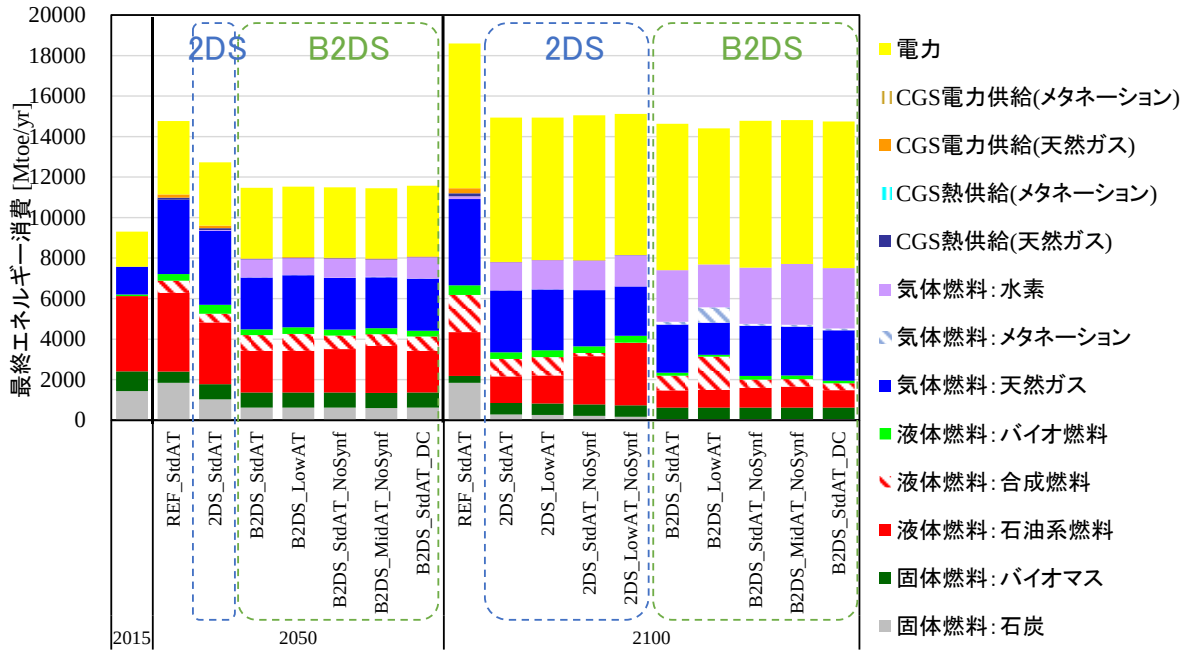


図 5.2.5-4 世界最終エネルギー消費（産業、民生、運輸計）

図 5.2.5-5 に世界一次エネルギー供給量を示す。2DS では、合成燃料の利用可否による影響が大きい。2100 年に航空部門で合成燃料が利用不可の場合、ジェット燃料の供給量増大に伴い他部門（産業、民生、その他運輸）向け石油系燃料が連産品として供給されることから、CCUS 無し石油の供給量が増大しガス、石炭が低位となる。B2DS では、合成燃料の利用可否による違いはほとんど見られない。革新型航空機技術の導入がない場合（Low_AT）、合成燃料の導入が進むため、合成燃料及びその原料の水素の製造のためのエネルギー供給が増大し、その多くは BECCS、原子力、PV による。機体コスト割引ケースにおいては、StdAT と比較すると 2050 年で▲10 Mtoe/yr、2100 年で▲186 Mtoe/yr 減少し、航空部門における最終エネルギー消費増大の影響はみられない。エネルギー種別にみると、機体コスト割引ケースにおいては 2050 年に StdAT 比で石炭 CCUS の増大、BECCS の減少がみられる。2100 年には天然ガスの役割が増大し、CCUS 無しバイオマスの増大も見られる。機体コスト割引ケースにおける BECCS 導入量は標準コストケースから約 400 Mtoe/yr 減少し、全シナリオの中で BECCS 導入量は最も低位となる。

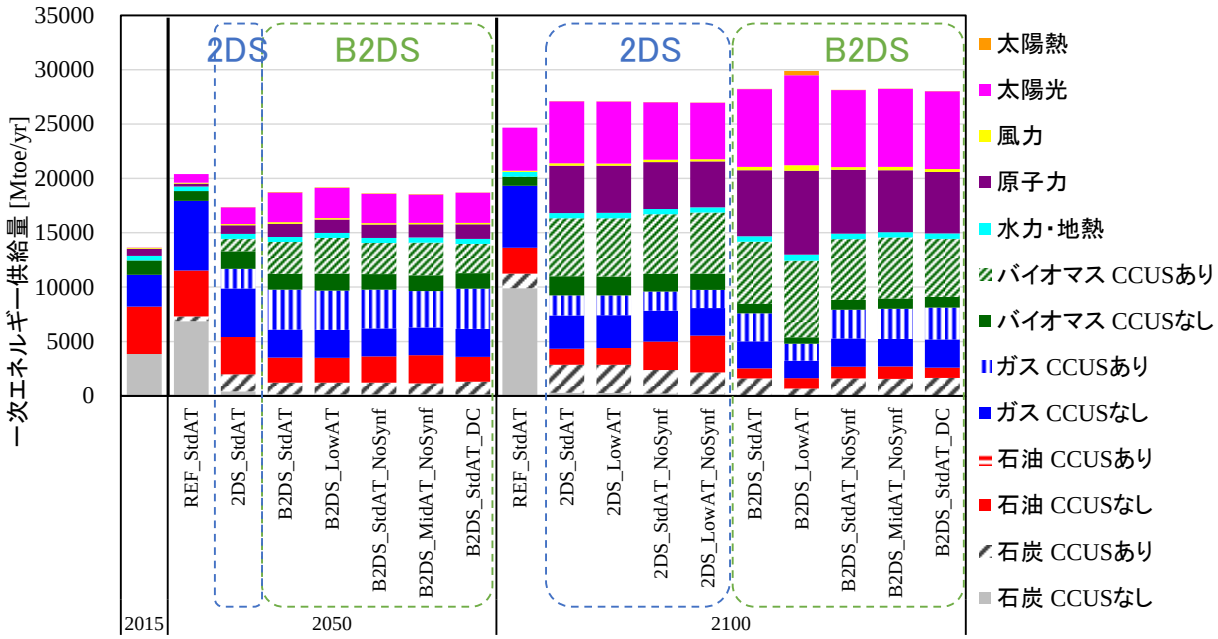


図 5.2.5-5 世界一次エネルギー供給量

図 5.2.5-6 に世界発電電力量を示す。機体コスト割引ケースにおける 2100 年の総発電量は、航空部門におけるエネルギー消費及び水素消費量増大の影響はほとんど見られず、B2DS における他シナリオとほぼ同程度である。電源構成としては、StdAT と比較すると水素製造用 PV がやや増大するほか、CCUS 付き天然ガスの増大、原子力と BECCS 発電の低減が見られる。BECCS は B2DS シナリオ中最も低位となる。

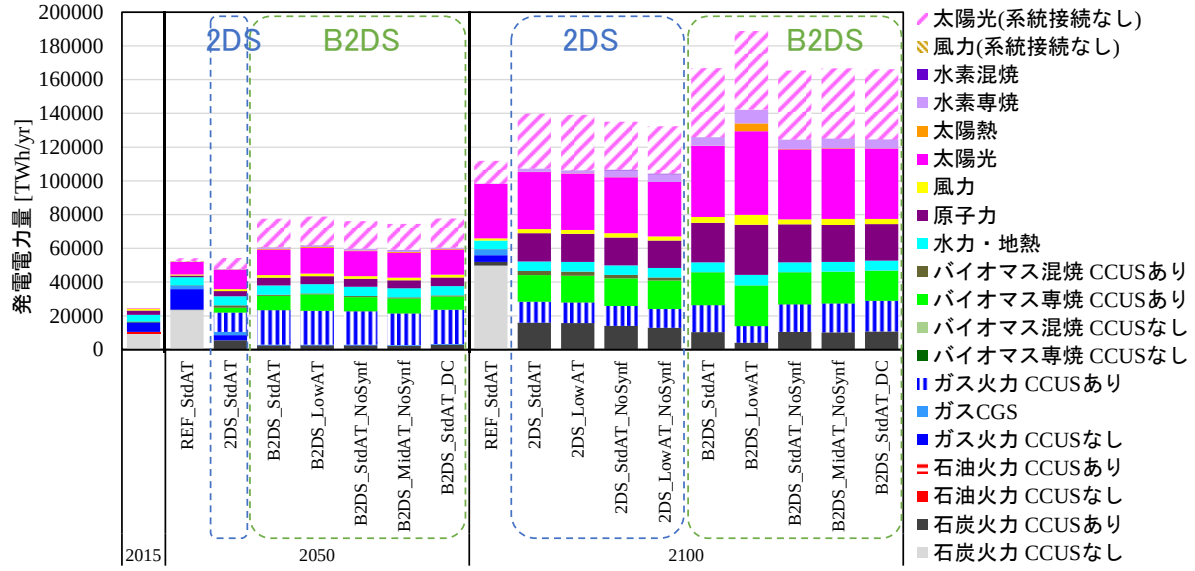


図 5.2.5-6 世界発電電力量

図 5.2.5-7 に世界の CO_2 バランスを示す。2DS では、航空部門で合成石油が利用可能な場合、2100 年の CO_2 回収量が増大し、石炭 CCS が高位となる。B2DS で革新型航空

機の導入がない Low_AT においては、2100 年に運輸部門と民生部門で合成石油と合成メタンの消費が増大し、合成石油、合成メタン向け CO_2 利用量が増大し貯留量が低減することから、BECCS による負排出がさらに必要となる。

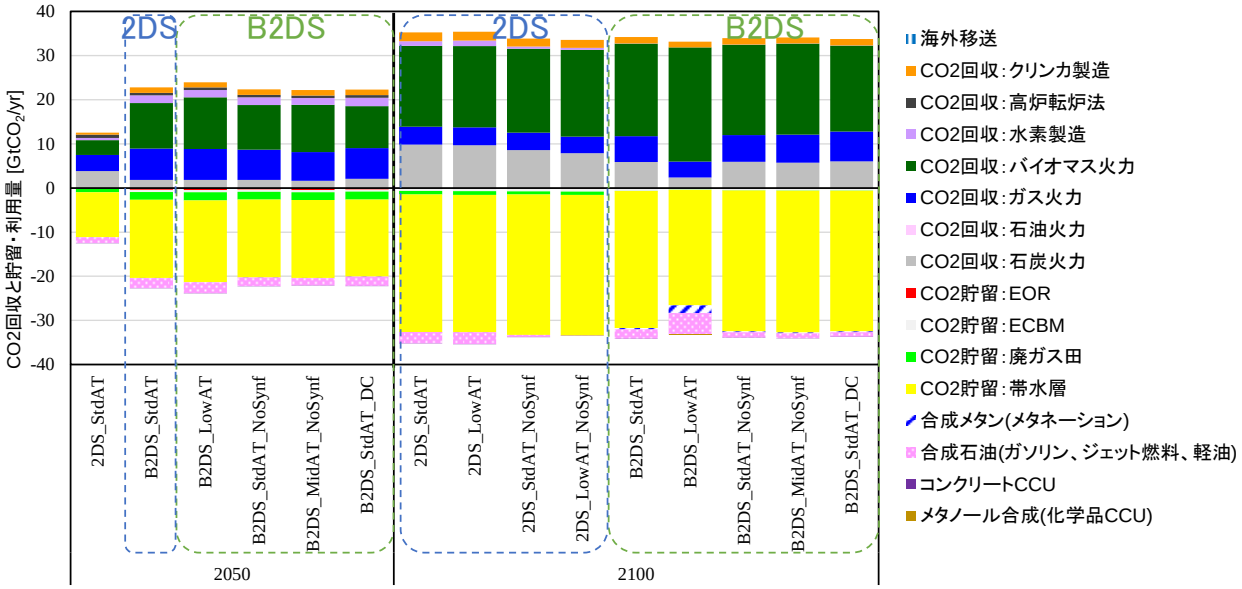


図 5.2.5-7 世界の CO_2 バランス

図 5.2.5-8 に世界の水素需給バランスを示す。2100 年時点において、航空部門で合成燃料が利用可能なケースでは、水素の利用先は直接利用よりも合成燃料製造（液体、気体とも）のほうが多く、水素需給量のスケールに影響を及ぼす。B2DS では運輸における水素の直接利用もそれなりに進む。

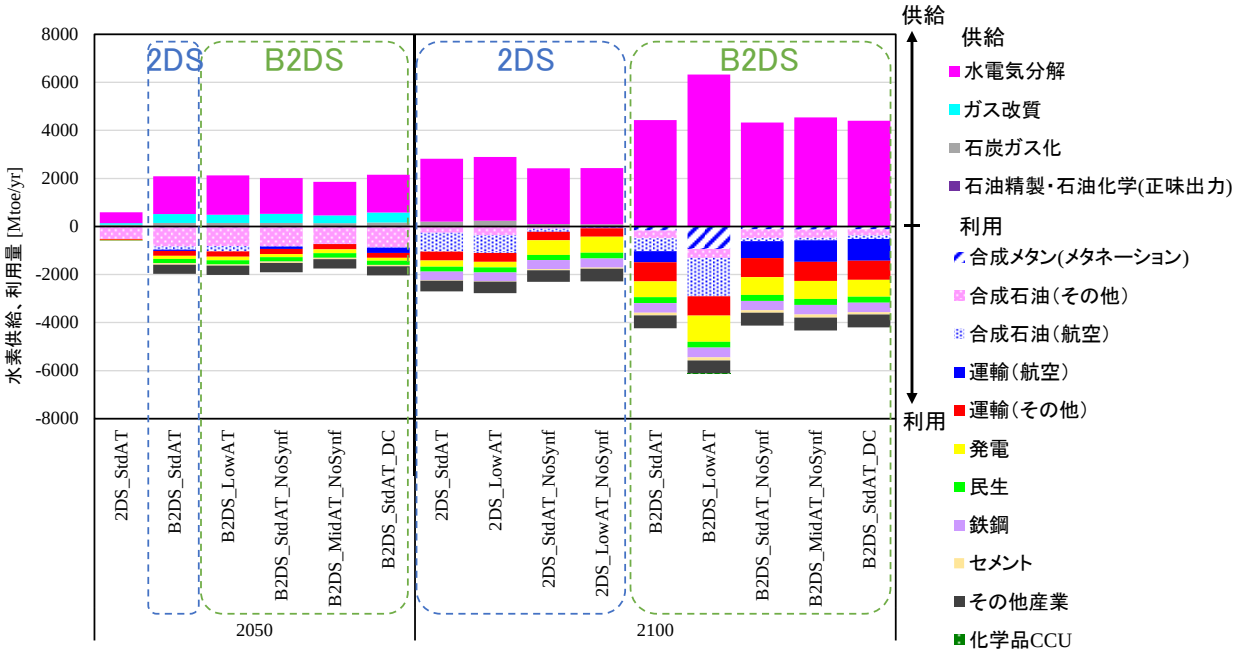


図 5.2.5-8 世界の水素需給バランス

(5) まとめ

本節では、航空部門における最新の政策及び技術動向について総括するとともに、世界エネルギー需給への影響の分析結果について記載した。航空部門における革新型航空機及び合成燃料の導入は、経済的な長期排出削減に貢献しうることが示された。特により厳しい排出削減目標である B2DS シナリオにおいては大きな便益となりうる。2DS においては合成燃料の航空部門への導入が、B2DS においては革新型航空機（電動航空機、水素航空機）の実現がエネルギー需給及び経済性により大きく影響する。B2DS において革新型航空機技術の導入がなされない場合は、2100 年における合成燃料及び水素消費量、BECCS への依存度、発電量、一次エネルギー供給量の増大をもたらし、排出削減費用は増大する。さらに航空部門で合成燃料も利用できないケースでは排出削減目標達成は困難となる。

ジェット機の想定機体コストを標準の 50%と想定した機体コスト割引ケースの感度分析を B2DS_StdAT で行った結果、水素航空機の導入が進み合成燃料の消費が低位となる。また 2100 年における CO_2 限界削減費用が大幅に低位となり、また排出削減コストは標準コストケースから▲426 billion US$/yr 低減することが示された。排出削減費用の低減要因については、水素航空機の年経費における設備費比率が標準コストケースでは高く、機体コスト割引ケースでは低減することが寄与するほか、世界全体の合成燃料の消費が標準コストケースから減少すること、BECCS 導入量が低減することも要因として考えられる。

B2DS シナリオの下では、航空部門における水素の役割は長期的には大きいものとなる。水素航空機が導入されるケースでは直接燃焼用として消費が進み、合成燃料が利用できないシナリオにおいて電動航空機が航続距離の上限制約により導入されない場合はより消費が進む。水素航空機が導入されないケースにおいては合成燃料製造用としての水素供給量が増大する。欧州を中心に水素航空機の商用化への期待や合成燃料の導入促進に向けた動きが加速する中、水素は重要な役割を持つことが予想される。

今後の検討課題として、長期航空輸送需要の不確実性、COVID-19 や flight-shaming などによる航空移動に対する消費者の行動変容、炭素コスト上昇に伴う航空運賃上昇による需要への影響などを考慮した分析があげられる。また、e-VTOL などの新規輸送モード、デジタルインフラの整備による移動の効率化などが今後大規模に導入されていく可能性もあり、これらを考慮した分析は今後の研究課題である。また、電動航空機の電池コストは DNE21+における自動車用の電池コストの想定に基づくものであるが、航空機技術のモデル化において想定している蓄電池の重量エネルギー密度（1800wh/kg）は現在の技術とは異なる次世代技術により実現する可能性が高く、次世代技術のサーベイに基づく蓄電池コストを反映した機体コストの検討は重要な検討課題の一つである。

参考文献（第 5.2.5 節に関するもの）

1) IPCC: SR15 (2018)
2) ITF: Tranport Outlook 2019 (2019)
3) IEA：Energy Technology Perspectives (2020)
4) 中野優子、佐野史典、秋元圭吾：航空部門の温暖化対策技術の展望と世界エネルギー需給への影響分析、第 37 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2021)
5) IEA: GHG Emissions from Energy 2021 edition (2021)
6) IATA: Net-Zero Carbon Emissions by 2050 (2021) https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/ (accessed 2022-02-18)
7) IATA: Airline commitment to Net Zero 2050 (2021) https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/presentations/environment-net-zero-carbon-at-iata-agm-2021/ (アクセス日：18/02/2022)
8) European Commission: A Clean Planet for all: A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy (2018) https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0773. (accessed 2021-04-26)
9) European Commission: Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport (2021) https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:00c59688-e577-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF. (accessed 2022-01-06)
10) The UK government: Mandating the use of sustainable aviation fuels in the UK (2021) https://www.gov.uk/government/consultations/mandating-the-use-of-sustainable-aviation-fuels-in-the-uk (accessed 2022-02-25)
11) ドイツ連邦政府：For a better CO_2 balance in aviation (2021) https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimafreundliches-fliegen-1965130 (accessed 2022-02-25)
12) IATA: Fact Sheet: EU and US policy approaches to advance SAF production (2021) https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/fact-sheet---us-and-eu-saf-policies.pdf (accessed 2022-02-25)
13) Roland Berger: Hydrogen: A future fuel for aviation? (2020)
14) Wright Electric: The Wright Spirit (2021) https://www.weflywright.com/ (accessed 2022-02-28)
15) JADC：民間航空機関連データ(2019) http://www.jadc.jp/data/associate (accessed 2019-09-12)
16) Simple Flying: Airbus Reveals On Average Airlines Get 50% Off Airline List Prices (2019) https://simpleflying.com/airbus-reveals-on-average-airlines-get-50-off-airline-list-prices/ (accessed 2021-12-23)

5.3 日本における家庭の財、サービス需要：生活行動の長期的な変化の検討

5.3.1 はじめに

従来のエネルギーシステムでは需要は所与として与えられ、需要を満たす供給計画がたてられてきた。しかしながら、近年デジタル技術・デジタルサービス（以下、デジタル化）の発展により需要構造が大きく変化し、需要を所与として与えることには限界がきている。

例えば在宅勤務が増える場合、家庭部門の空調・照明需要が増加する一方、移動需要、オフィスの空調・照明需要が減少する可能性があり、消費者の生活行動が様々な部門に影響を及ぼしうる。また、移動時間の減少により空いた時間は新しい需要を生み出す可能性もある。このように、代替も含めて整合的に需要を想定するためには、需要を直接想定するのではなく、需要の発生メカニズムを理解すること、すなわち生活行動から発生する需要を構造化することが必要となる。

昨年度は、既報告書 の平成 31 年度に検討された分析フレームワークの具体化及び改良を行うため、具体的な事例として「ネットショッピングの増加」と「在宅勤務の増加」を取り上げ、既存の 13 区分の生活行動に場所とエネルギーの視点を加え、22 区分の生活行動に改良した。また、上記 2 つの事例に対して複数の生活行動モデルを構築した。

今年度は、昨年度検討した生活行動モデルの定量化の検討を行う。

5.3.2 調査概要

昨年度構築した「ネットショッピングの増加」と「在宅勤務の増加」の生活行動モデルに対して、既往統計や既往研究の情報収集、生活行動に関するアンケート調査を行い、これらの調査結果を基に生活行動モデルの定量化を検討する。

a. 生活行動とエネルギー消費量に関する既往研究や既往統計の情報収集

生活行動とエネルギー消費量に関する既往研究の情報収集を行い、研究の対象範囲、取り扱っている指標・変数、分析手法等を整理する。既往統計では、家計調査の品目分類から「在宅勤務の増加」に影響があると考えられる項目を整理し、b で実施するアンケート調査の選択肢を検討する際の参考とする。

b. 生活行動・消費行動に関するアンケート調査

生活行動については社会生活基本調査、世帯の消費支出については家計調査、エネルギー消費量と機器の使い方については環境省 家庭部門の CO_2 排出実態統計調査（以下、家庭 CO_2 統計）でそれぞれ調査されているが、生活行動、消費支出、エネルギー消費量を一体的に把握した統計は見られない。そこで、需要を生活行動の結果として捉えるため、生活行動に加え、需要の代替変数となりうる消費支出、エネルギー消費量を一体的に把握するアンケート調査を行い、これらの関係性を分析する。

調査にあたっては、居住環境や家族類型などによってモデルの細分化が可能となるよう属性情報も含めた調査設計とする。また、上記の公的統計（社会生活基本調査、家計調査、家庭 CO_2 統計）との比較ができるよう調査設計に留意する。

c. 生活行動モデルの定量化

上記調査を基に、「ネットショッピングの増加」と「在宅勤務の増加」といった生活行動の変化を、生活時間等を指標として定量化する。定量化の手法は複数検討することとする。また、構築したモデルを用いて「ネットショッピングの増加」と「在宅勤務の増加」が及ぼす需要への影響についても考察する。

5.3.3 生活行動とエネルギー消費量に関する既往研究や既往統計の情報収集

本章では、生活行動（在宅勤務）とエネルギーに関する既往研究として、以下に示す在宅勤務によるエネルギー消費や二酸化炭素排出量への影響に関する既往文献について整理を行う。また、後述のアンケート調査結果の妥当性を確認するために、既存統計や調査から関連情報を別途収集している。詳細は 5.3.4 節を参考されたい。

(1) テレワークによる温室効果ガス消費への影響に関するレビュー論文

出典）Erasmia Kitou, Arpad Horvath, Energy-Related Emissions from Telework[1)]

■ **研究内容**

本研究では、電子機器・家電製品、冷暖房、照明の使い方、並びに移動需要の変化も考慮したテレワークに関する包括的なモデルを用いて、シナリオ想定の下で在宅勤務と職場で働く場合の正味の環境負荷を定量的に算定することを目的とする。これにより、在宅勤務によるエネルギー消費量や GHG 排出量の変化を把握し、より多くの情報に基づいた意思決定が可能になる。

在宅勤務実施の可能性が高い米国の 5 つの州（カリフォルニア州、ジョージア州、イリノイ州、ニューヨーク州、テキサス州）を対象に、在宅勤務非実施者が週に 1 日、3 日、5 日在宅勤務を実施した場合、在宅勤務の様々な構成要素やパラメーターが GHG 排出量に与える影響を明らかにする。

■ **研究手法**

ｱ) システムモデル

- ウェブベースのツール(The Telework Impact Estimation Tool[10])と、確率論的分析を可能にするモンテカルロシミュレーション（Monte Carlo simulation、MS Excel 版）を利用する。

$$EI_{TW\ or\ NTW} = EI_{TR} + EI_{EE} + EI_{OS} + EI_{HS} \qquad (5.3.3\text{-}1)$$

[10] http://greenmfg.me.berkeley.edu/green/SoftwareTools/Telework/index.html

$$NEI_{TW} = EI_{TW} - EI_{NTW} \qquad (5.3.3\text{-}2)$$

EI_{TW}：在宅勤務時のエネルギー消費量
EI_{NTW}：職場勤務時（在宅勤務非実施時）のエネルギー消費量
EI_{TR}：移動需要によるエネルギー消費量
EI_{EE}：電子機器・家電製品のエネルギー消費量
EI_{OS}：職場勤務時の冷暖房や照明使用によるエネルギー消費量
EI_{HS}：在宅勤務時の冷暖房・照明使用によるエネルギー消費量

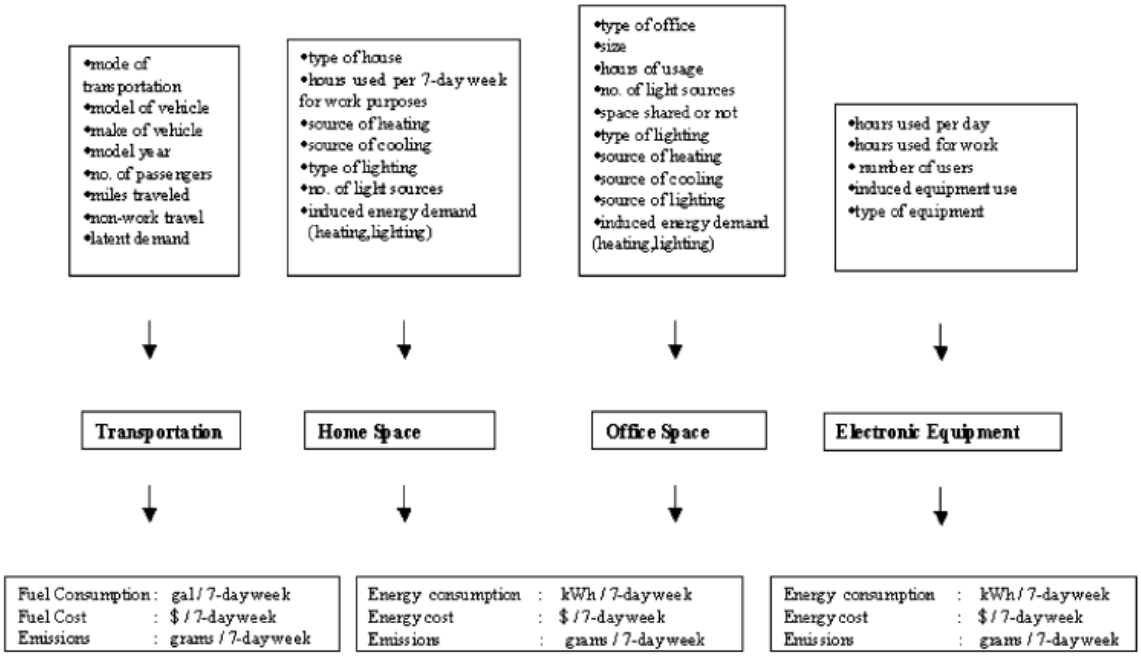


図 5.3.3-1 システムモデル

ｲ) 在宅勤務時のパラメーターの想定

- 移動
  - 交通手段として乗用車、通勤高速バス、公共交通、通勤鉄道、フェリー、飛行機等あるが、本研究では、米国における最も使用頻度の高い乗用車からの排出量を計算する。
  - 計算にあたり、乗用車の年式、メーカー、モデル、排ガス認証、乗用定員人数のパラメーターを決定する必要がある。
  - 乗用車は、米国で代表的な中型セダン（Honda Accord、1994 年モデル/米国環境保護庁 EPA の環境保全性評価によると、この車種は全米の平均水準であるという）を対象にし、通勤距離の片道を 12 マイル（約 19.3 km）と想定。

- 在宅勤務が増えることにより、通勤時の自動車走行距離（VMT）は減るが、余暇時間を充実する目的で増える移動需要のリバウンド効果に影響を与えると考え、ここでは、様々な調査結果を参考に、1日当たりの仕事以外の移動距離を6マイル（約9.6 km）と想定。

- 電子機器や家電機器
  - 在宅勤務実施者の45%は、自宅での専有執務スペースを有する。
  - デスクトップPC、ノートPC、複写機、プリンター、電話機（有線・無線）の電力消費量、設定モード、使用時間、設備機器の使用人数をパラメーターとする。
  - 在宅勤務中の電子機器の使用状況を測ることは困難であるため、職場での典型的な使用パターンを代入。また、在宅勤務の場合は、仕事と直接関係のない家電機器の使用によるリバウンド効果を定量的に把握するのが難しいことから、ここでは在宅勤務実施者に対し、テレビ、ステレオシステム、ガスレンジやオーブン、食洗器、洗濯機・選択乾燥機等の家電製品は、在宅勤務時間が長いほど使用頻度等を加味して、家庭内の電力消費量を想定。
- 冷暖房・照明
  - 暖房設備においては、職場及び在宅ともにガスボイラー（セントラルヒーティング）を想定。
  - 照明については家庭では白熱電球、職場では天井の面積に基づき照明の使用状況を想定。在宅勤務実施者と職場での勤務中に使用する冷暖房、照明の重複カウントしないように留意。
- 執務環境
  - 執務場所やスペースの広さ、執務時間を想定。
- 在宅勤務のパターン
  - 文献、アンケート調査、個人へのインタビュー調査に基づき想定。

■ **研究結果**

- 全体のGHG排出量
  - 在宅勤務が増えると、GHG排出量が減少傾向になる。具体的にCO_2は2%～80%、NO_xは20%～100%、PM10とCOはそれぞれ10%～100%減少。一方、SO_2は冷暖房の使用日やリバウンド効果の有無によって40%増減。電気機器・家電機器の使用によるGHG排出量は、テレワークの頻度が増えると増加。これは、在宅勤務中に様々な電気機器や家電機器をより多く使用するという前提条件が左右されたと思われる。
  - 在宅勤務実施（図 5.3.3-2の右）の場合は、在宅勤務非実施（図 5.3.3-2の左）に比べCO_2排出量は約10%減少。具体的にみると、移動、照明、冷暖房によるCO_2排出量は、在宅勤務実施の場合が非実施に比べ、それぞれ、33%減、24%減、5%減となった一方、電子機器・家電製品の方は17%増加の結果となった。これは、従業員が在宅勤務中に、他の家電製品の使用頻

度も増えるという想定に基づくものである。今後の研究では、リバウンド効果を排除した試算が重要である。

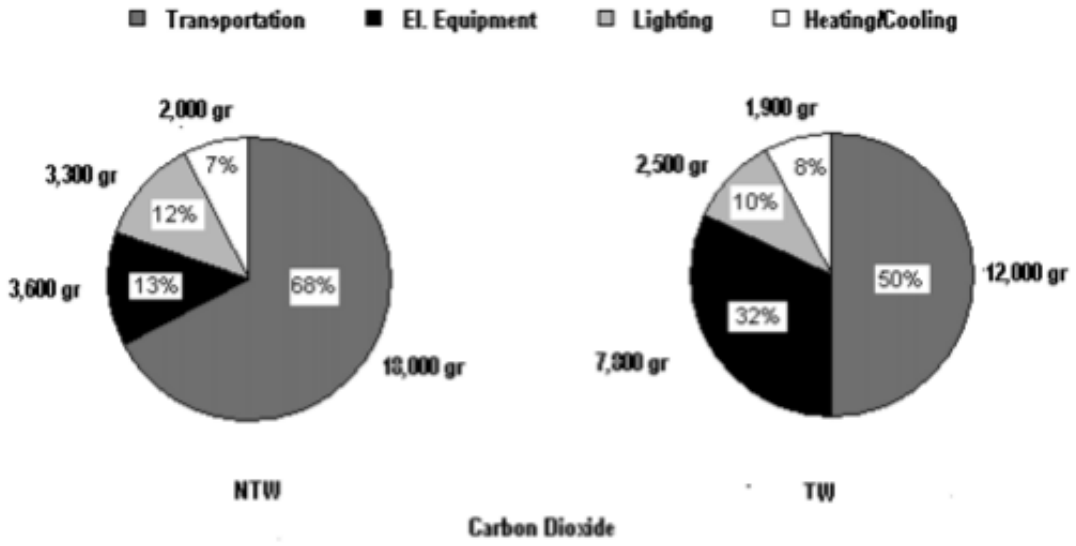


図 5.3.3-2 在宅勤務実施有無別の CO_2 排出量と内訳

- 地域による差異
  - CO_2 排出係数や季節などにより地域差が生じる。例えば、暖房期間中において 3 日間在宅勤務を実施した場合、ある州では CO_2 排出量が 10%削減するが、別の州では 30%増加している。これに対して、冷房期間中は全て減少傾向にある。
- リバウンド効果
  - 在宅勤務頻度が増えると通勤による移動需要は減るが、他方で自宅時間の増加に伴う様々なリバウンド効果により、その削減分が相殺する可能性がある。
- 在宅勤務への影響要因（移動）
  - 在宅勤務実施の場合：移動手段の利用者数と移動の往復回数、在宅勤務実施頻度
  - 在宅勤務非実施の場合：移動手段の利用者数や移動手段の排出係数
- 在宅勤務への影響要因（電子機器と家電製品）
  - 在宅勤務実施の場合：家電製品の使用時間と消費電力、在宅勤務実施頻度、排出係数（電気）
  - 在宅勤務非実施の場合：デスクトップ PC とコピー機の消費電力量、排出係数（電気）
- 在宅勤務への影響要因（照明）
  - 在宅勤務実施＆在宅勤務非実施の場合（共通）：執務スペース（面積）、職場の種類、排出係数（電気）
- 在宅勤務への影響要因（冷暖房）
  - 在宅勤務実施の場合：執務スペース（面積）、ガス消費量及び排出係数

- 在宅勤務非実施の場合：執務スペース（面積）、職場の利用率、排出係数（ガス）

- このモデルは世界中で適用可能
  - パラメーターは世界共通にしても、その値は国や地域によって異なると思われる（例えば米国では乗用車が主たる通勤手段、日本や欧州では公共交通。通勤形態や距離、リバウンド効果、冷暖房の効率、CO_2 排出係数の国による差異）。
- 今後の課題
  - レジャーなどの要素も含む様々なリバウンド効果の定量化、乗用車の運転条件による燃費への影響、制度面や今後の人々の意思決定の不確実性も考慮したモデルに拡張することが重要である。

(2) テレワーク推進による省エネ効果に関するレビュー論文（日米の事例）

出典）H. Scott Matthews and Eric Williams, Telework Adoption and Energy Use in Building and Transport Sectors in the United States and Japan[2)]

■ **研究内容**

在宅勤務の交通分野に及ぼす影響に関する研究は多いが、業務・家庭部門のエネルギー消費への変化を含む既往研究は少ない。

そこで、本研究では、在宅勤務の進展に伴う運輸・民生部門におけるエネルギー消費の変化についてマクロ的に推定し、テレワーク推進がもたらす省エネ効果を検討する。対象国は米国と日本である。

■ **研究手法**

在宅勤務実施者数や部門別のエネルギー消費量に関する既存統計値を参考に、単純な線形モデルで推定するアプローチを採用している。

- 在宅勤務実施者数の想定

まず、既存文献に基づき在宅勤務実施が可能な情報系労働者の数を想定する。

- 米国：米国労働統計局の調査に基づき、専門職、技術職、営業職を含む情報系の労働者が総労働人口の約 40%に当たる 5,300 万人であると想定。
- 日本：総務省統計の調査に基づき、専門職、技術職、管理職、事務職、営業職を含む情報系の労働者が総労働人口の約 44%に当たる 2,800 万人であると想定。

表 5.3.3-1 職種別労働者数の分布（日米）

Table 1. United States Working Population by Category (2002)

Category	Percent	Population (million)
Professional specialty	16.2	21.9
Management	15.2	20.5
Service workers	13.7	18.5
Administrative support	13.6	18.3
Sales (including retail)	11.7	15.8
Precision production	10.6	14.3
Machine operators	4.8	6.5
Transportation	4.2	5.7
Laborers	3.9	5.3
Technical support	3.3	4.5
Agriculture	2.3	3.1
Household service	0.5	0.7
Total	—	100

Table 2. Japan Working Population by Category (2001)

Category	Percent	Population (million)
Factory, construction	28.2	17.7
Clerical	19.8	12.4
Specialty, technical	13.7	8.6
Service	8.7	5.5
Sales	7.5	4.7
Retail	7.4	4.7
Agriculture	5.2	3.3
Transport, communication	3.7	2.3
Management	3.0	1.9
Security, maintenance	1.6	1.0
Other	1.2	0.7
Total	100	62.9

- 運輸部門と民生部門におけるエネルギー消費水準の想定

次に、運輸部門と民生部門におけるエネルギー消費水準を想定する。

ｱ) 業務部門

- 米国：米国エネルギー情報局（以下、EIA と略す）の統計データより、オフィスワーカーは 2,900 万人、エネルギー消費量は 38GJ/人、また執務専用スペースは 13 ㎡/人と想定（全体の 1/3）。
- 日本：総務省統計やエネルギー・経済統計要覧（以下、EDMC と略す）より、オフィスワーカーは 2,870 万人、エネルギー消費量は 11.8GJ/人、また執務専用スペースは 5.5 ㎡/人と想定（全体の 33%）。
- 事務所の場合は、会議室や廊下等の共用部が占める割合が大きいため、在宅勤務者用の執務スペースを縮小したとしても、事務所全体のエネルギー消費の削減効果が比例するとは言えない。例えば、日本 IBM では、営業職が週 4 日という在宅勤務制度があることから、営業職の執務スペースを 25%縮小したが、エネルギー消費量の削減効果はわずか 6%であったという。

ｲ) 家庭用エネルギー消費への影響

- 米国：EIA の統計より、97GJ/世帯と想定。また、週 5 日の在宅勤務の場合、10%（9.7GJ/世帯）増加すると想定。
- 日本：EMDC を参考に 14.3GJ/世帯と想定。また、週 5 日の在宅勤務の場合、3.2GJ/世帯増加すると想定（エアコンや照明の消費電力と使用時間を想定した計算結果）

ｳ) 交通分野に及ぼす影響

- 米国：既存統計や研究機関の既往調査結果から、自家用車と乗り合いタクシーを使用して通勤する場合の年間走行距離、平均燃費、燃料消費量をそれぞれ想定し試算した結果、42GJ/人であった。
- 日本：EDMC や総務省調査結果から、1 人当たりの移動時のエネルギー消費量、移動時間、移動人数を想定し試算した結果、14.4GJ/人であった。

表 5.3.3-2 部門別エネルギー消費原単位（日米）

Table 3. Annual Energy Use Per Worker/Household in Building and Transport Sectors

	United States (MJ)	Japan (MJ)
Office Bldgs (per worker)	38,000	11,800
Residential (per household)	97,000	14,250
Commuting (per worker)	42,000	14,400

- 在宅勤務のシナリオの想定

最後に、米国の調査（Survey of Income Program and Participation）や日本のテレワーク協会の調査結果に基づいて、在宅勤務のシナリオを想定する。

➢ シナリオ 1

米国：290 万人が、週 1 日在宅勤務

日本：250 万人が、週 1 日在宅勤務

➢ シナリオ 2：自営業の在宅勤務者を含めて想定

米国：930 万人、週 4 日在宅勤務

日本：410 万人、週 4 日在宅勤務

➢ シナリオ 3：

米国：情報系労働者の 50%（2,630 万人）が、週 4 日在宅勤務

日本：情報系労働者の 50%（1,380 万人）が、週 4 日在宅勤務

■ **研究結果**

シナリオ想定に基づく試算結果をみると、在宅勤務の実施に伴いエネルギー消費量が米国では 0.01%～1.2%削減、日本では 0.03%～1.3%削減するという結果が得られた。

なお、米国においては自動車の燃費を 20%改善すれば、米国の総エネルギー需要の 5.4%を節約できることになると言われており、それに比べると在宅勤務の実施による直接的なメリットは比較的小さいことが示唆される。

表 5.3.3-3 シナリオに基づく分析結果（日米）

Table 4. United States Energy Savings According to Telework Adoption Scenarios

Scenario	Telework population (millions)	Average intensity (days/week)	Transport savings (10^{10} MJ)	Commercial building savings (10^{10} MJ)	Resid. Increase (10^{10} MJ)	Total savings (10^{10} MJ)	Share of total energy
1 (with 0% office savings)	2.9	1	1.9	0.0	0.6	1.4	0.01%
1 (with 16% office savings)	2.9	1	1.9	1.8	0.6	3.1	0.03%
2 (with 60% office savings)	9.3	4	25.0	21.2	7.4	38.8	0.39%
3 (with 70% office savings)	26.3	4	70.7	70.0	21.0	119.6	1.2%

Table 5. Japan Energy Savings According to Telework Adoption Scenarios

Scenario	Telework population (millions)	Average intensity (days/week)	Transport savings (10^{10} MJ)	Comm. building savings (10^{10} MJ)	Resed. increase (10^{10} MJ)	Total savings (10^{10} MJ)	Share of total energy
1 (with 0% office savings)	2.5	1	0.6	0	0.2	0.9	0.03%
1 (with 16% office savings)	2.5	1	0.6	0.5	0.2	0.4	0.06%
2 (with 60% office savings)	4.1	4	3.8	2.9	1.0	5.6	0.36%
3 (with 70% office savings)	13.8	4	12.7	11.4	3.5	20.6	1.3%

(3) テレワークによる交通分野のエネルギー消費量への影響に関するレビュー論文

出典）Miao Fu, J. Andrew Kelly, J. Peter Clinch, Fearghal King, Environmental policy implications of working from home: Modelling the impacts of land-use, infrastructure, and socio-demographics[3)]

■ 研究内容

本研究では、アイルランドにおける在宅勤務による交通（通勤）エネルギー消費量や CO_2 排出量への削減効果を明らかにするとともに、在宅勤務が土地利用パターン、公共交通網、インターネットインフラの整備等の環境政策面に与える影響についても言及している。

アイルランド国勢調査の調査内容である勤務地（Place of Work Census of Anonymised Records：POWCAR 2006）に関する統計データに基づき、ロジットモデル（ロジスティック回帰分析）を用いて、在宅勤務を選択するか否かを目的変数、業種や職種、移動距離や移動手段といった指標を説明変数とし推計を行う。

■ 研究手法

- モデル（分析手法）：ロジットモデル（ロジスティック回帰分析）
- アンケート・調査項目：統計データ（約 165 万サンプル）を用いる
  目的変数：在宅勤務を選択するか否か
  説明変数：以下の通り
  - 一般変数（量的変数の正規化<0、1 に変換>）：平均通勤距離、鉄道・道路の公共交通網質（quality index）、インターネット接続率、住宅・商業・産業部門別の面積の比率、車両の保有台数（車、バン）、世帯人数、年齢
  - ダミー変数：教育水準、性別、19 才以下の片親世帯、結婚状況、住宅の所有状況、一昨年前の居住状況、業種や職種（農業、製造業、建設業、商業、交通、公共、教育/会社員、高度・一般専門職、技術者、自営業、農家、他）

➢ TREMOVE Ireland[11]というツールを用いて、各変数（職種・業種別）におけるエネルギー消費の係数（ECPCA）を算定

■ 研究結果

- アイルランド人口の 5%がフルにテレワーク実施に切り替わった場合、2010 年の交通エネルギー消費量を 0.36%削減、最終エネルギー消費量を 0.14%削減することが可能である。
- 在宅勤務率が高い傾向：42 才が最も高い（年齢が高い程高い）/男性/片親世帯/職種別傾向有（専門職等は高い）/インターネット・鉄道といったインフラの整備状況との相関有（整備状況がいい程高い）/自動車の所有状況と関係有/住宅の所有状況とは特段関係ない/都市計画との相関有（住宅地、商業地、工業地の分散化が進むことは、在宅勤務の拡大を促進するのに役立つ）。

表 5.3.3-4 職種・業種別エネルギー消費の係数（ECPCA）

Table 3
ECPCAs of different industrial sectors and SEGs.

SEG	ECPCA(GJ)	Industry	ECPCA (GJ)
Employer&Man	0.0746	Agri, F & F	0.0405
H professional	0.0736	Manufacture	0.0734
L professional	0.0721	Construction	0.0930
Non-manual	0.0464	Commerce	0.0528
Manual skilled	0.0774	Trans, S & C	0.0657
Semi-skilled	0.0509	Public	0.0750
Unskilled	0.0454	Edu, H & S	0.0603
Own account	0.0706	Other	0.0362
Farmers	0.0311	Not stated	0.0331
Agri workers	0.0478		
Others	0.0324		

Data sources: Calculated based on POWCAR 2006 and energy consumption factors from TREMOVE Ireland.

表 5.3.3-5 分析結果

Table 5
Regression results of the logit model on working from home.

Variables	Coef.	Stddev	Variables	Coef.	Stddev	Variables	Coef.	Stddev
General variables			*SEG dummies*			*Industrial dummies*		
avgkmn	0.9149***	0.1482	empman	1.4732***	0.0397	manu	−0.958***	0.0345
builtrn	−0.2905***	0.0343	hprof	1.8814***	0.0420	construct	−0.6273***	0.0362
indrn	−0.9901***	0.0774	lprof	1.9677***	0.0410	commerce	−0.5663***	0.0323
roadqn	−0.1622**	0.0824	nmanual	0.7208***	0.0406	transcom	−0.7018***	0.0386
railqn	0.1403*	0.0743	manskill	0.1115**	0.0437	public	−1.5967***	0.0420
othintrn	0.2768***	0.0467	semiskill	0.4345***	0.0436	eduhs	−1.6837***	0.0347
carvann	0.1047***	0.0263	othgain	−0.7841***	0.0620	other	−0.0579*	0.0337
respersonn	0.4132***	0.0335						
agen	3.1675	0.0397				cons	−5.8358***	0.0624
Other dummies								
edu	0.112***	0.0124	lparent	0.286***	0.0204	married	0.0629***	0.0142
hsowner	−0.1881***	0.0150	female	−0.0854***	0.0116	movein	−0.0837***	0.0177

Notes: (1) The reference group for SEG is unskilled workers, and the reference sector for industrial groups is the average level of 'not stated' group. (2) Workers in Agri, F & F sector and own account workers have been excluded.

* Significant at 10%.
** Significant at 5%.
*** Significant at 1%.

[11] https://www.asser.nl/upload/eel-webroot/www/documents/TREMOVEreport.Pdf

(4) まとめ

本節では、在宅勤務によるエネルギー消費や二酸化炭素排出量への影響に関する海外文献について調査・整理した。

a. テレワークによる温室効果ガス消費への影響に関するレビュー論文

在宅勤務実施の可能性が高い米国の 5 つの州を対象に、ウェブベースのツールと確率論的分析を可能にするモンテカルロシミュレーションを用いて、在宅勤務の様々な構成要素やパラメーターが GHG 排出量に与える影響を明らかにした。

試算結果をみると、在宅勤務が増えることにより GHG 排出量が減少傾向になった(在宅勤務実施の場合は、在宅勤務非実施に比べ CO_2 排出量は約 10%減少)。具体的には、移動、照明、冷暖房による CO_2 排出量は、在宅勤務実施の場合が非実施に比べ、それぞれ、33%減、24%減、5%減となった一方、電子機器・家電製品の方は 17%増加の結果となった。これは、従業員が在宅勤務中に、他の家電製品の使用頻度も増えるという想定に基づくものである。今後の課題として、レジャーなどの要素も含む様々なリバウンド効果の定量化、乗用車の運転条件による燃費への影響、制度面や今後の人々の意思決定の不確実性も考慮したモデルに拡張することが重要であると指摘している。

b. テレワーク推進による省エネ効果に関するレビュー論文（日米の事例）

本研究では、米国と日本を対象に在宅勤務の進展に伴う運輸・民生部門におけるエネルギー消費の変化についてシナリオ想定に基づきマクロ的に推定（在宅勤務実施者数や部門別のエネルギー消費量に関する既存統計値を参考に、単純な線形モデルで推定するアプローチ）し、在宅勤務推進がもたらす省エネ効果を検討した。

在宅勤務の実施に伴うエネルギー削減効果として、米国では 0.01%～1.2%削減、日本では 0.03%～1.3%削減するという試算結果が得られた。米国においては自動車の燃費を 20%改善することで米国の総エネルギー需要の 5.4%を節約できることになると言われており、それに比べると在宅勤務の実施による直接的なメリットは比較的小さいことが示唆された。

c. テレワークによる交通分野のエネルギー消費量への影響に関するレビュー論文

本研究では、アイルランドにおける在宅勤務による交通（通勤）エネルギー消費量や CO_2 排出量への削減効果を明らかにするために、アイルランド国勢調査の統計データに基づき、ロジットモデルを用いて在宅勤務を選択するか否かを目的変数、業種や職種、移動距離や移動手段を説明変数とした場合の推計を行うとともに、TREMOVE Ireland というツールを用いて、各変数（職種・業種別）におけるエネルギー消費へ影響度を算定した。

結果として、アイルランド人口の 5%がフルにテレワーク実施に切り替わった場合交通エネルギー消費量と最終エネルギー消費量はそれぞれを 0.36%と 0.14%削減するという試算結果が得られた。

参考文献（第 5.3.3 節に関するもの）

1) Erasmia Kitou, Arpad Horvath: Energy-Related Emissions from Telework, Environmental Science & Technology, Volume 37, Issue 16, 3467-3475, June (2003)

2) H. Scott Matthews and Eric Williams: Telework Adoption and Energy Use in Building and Transport Sectors in the United States and Japan, Volume 11, Issue 1, Journal of Infrastructure Systems, March (2005)
3) Miao Fu, J. Andrew Kelly, J. Peter Clinch, Fearghal King: Environmental policy implications of working from home: Modelling the impacts of land-use, infrastructure, and socio-demographics, Energy Policy, Elsevier, vol. 47(C), 416-423, (2012)

5.3.4 生活行動・消費行動に関するアンケート調査

(1) 調査概要

需要を生活行動の結果として捉えるため、生活行動に加え、需要の代替変数となりうる消費支出、エネルギー消費量を一体的に把握する「生活行動アンケート調査」を行い、これらの関係性を分析する。特に「ネットショッピングの増加」と「在宅勤務の増加」といった生活行動の変化が及ぼす影響を把握するため、それらの利用実態・実施状況やそれに伴うライフスタイルの変化を測る設問を設ける。

調査実施概要を表 5.3.4-1 に示す。本調査は、調査項目が多く、回答負荷が高いことから、3 回に分割して WEB アンケート調査を行った。調査実施期間は 10 月上旬から 11 月上旬であり、この時期は、8 月頃に急増した新型コロナ感染者数が低減し、緊急事態宣言やまん延防止等重点措置が全面解除された期間である。

表 5.3.4-1 調査実施概要

調査内容	調査実施期間
①スクリーニング調査	2021 年 10 月 8 日～10 月 15 日
②生活時間等に関する調査 （以下、生活時間調査）	2021 年 10 月 22 日～11 月 2 日
③消費支出等に関する調査 （以下、消費支出調査）	2021 年 11 月 5 日～11 月 9 日

a. 調査対象

本調査は、(株)インテージの WEB アンケートモニターのうち、以下条件に該当する回答者を対象とする。

- 2020 年 10 月～2021 年 11 月末まで転居がない世帯
- 居住地域：東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県
- 世帯構成：単身（就業者）、夫婦のみ（就業者あり）

ここで、居住地域を東京近郊の 4 都県に限定したのは、調査実施時期に在宅勤務の実施がある程度普及しており、在宅勤務を実施する世帯を抽出することができるためである。

世帯構成について、単身・夫婦世帯のみとしたのは、複数人の同居家族の生活行動や消費支出を回答する難易度が高いことを考慮した。また、就業者がいる世帯のみとしたのは、在宅勤務の増加による影響を見るためである。

b. 調査回収率

目標回収数と回収率を表 5.3.4-2 に示す。スクリーニング調査では「単身世帯または夫婦のみ世帯」かつ「世帯年収 100 万円以上 2,000 万円未満」のモニターにランダム配信を行う。次に、生活時間調査では、スクリーニング調査において本調査協力に許諾した回答者のうち、回答矛盾がなく、かつ詳細な生活時間や消費支出の調査に回答できる可能性が高いモニターを抽出して配信する。さらに消費支出調査は、生活時間調査の調査項目全てを回答したモニターに配信する。各調査の回収率は、19%、86%、66%である。

表 5.3.4-2 目標回収数と回収率

調査	目標回収数	配信数	回収数 ()内は回収率	調査許諾数
①スクリーニング調査	25,000	145,103	27,401 (19%)	6,301
②生活時間調査	1,600～ 1,800	2,499	2,142 （86%）	
③消費支出調査	1,200	2,142	1404 (66%)	

注）調査許諾数とは、生活時間調査と消費支出調査の概要を事前に説明し、それらの調査に協力できると回答したモニター数を指す。

なお、本来、目標回収数を「ふだんの世帯における在宅勤務実施頻度」と「ふだんの世帯におけるネットショッピングの利用頻度」により、単身世帯 4 区分、夫婦世帯 4 区分で割り付けることが望ましい。しかし、調査難易度が高く、目標回収数に達しない可能性があることから、目標回収数の割付を行わずに全体で 1,200 とし、配信数を各層がほぼ同等のサンプルサイズとなるよう設計する。表 5.3.4-3 に生活時間調査における配信数を示す。

表 5.3.4-3 生活時間調査における配信数

単身世帯		ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度		
		2 週に 1 回以上	月に 1 回以下	合計
ふだんの世帯の在宅勤務実施頻度	週 5 日以上	312	254	566
	週 4 日以下	347	367	714
	合計	659	621	1280
夫婦世帯		ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度		
		2 週に 1 回以上	月に 1 回以下	合計
ふだんの世帯の在宅勤務実施頻度	週 5 日以上	321	173	494
	週 4 日以下	471	355	826
	合計	792	528	1320

c. 集計対象

調査回収した回答のうち、回答矛盾のないものを抽出して集計対象とする。有効回答数は下表のとおりである。

なお、本調査では、回答者自身に関する設問と、配偶者に関する設問を設けており、下表では、配偶者の設問における有効回答数も示す。

また、生活時間の調査項目と、属性・消費支出の調査項目で、有効回答数が異なる。これは、生活行動時間調査では、30 分単位での生活行動の回答に、矛盾のある内容が多く見られ、有効回答数が大幅に減ることから、それぞれ独立して有効回答を抽出したためである。

表 5.3.4-4 有効回答数

調査項目	有効回答数	
	回答者に対する設問	配偶者に対する設問
生活時間	401	170
属性・消費支出	769	360

各調査項目について、有効回答率を表 5.3.4-5 に示す。生活時間の調査項目は特にその割合が低く、19%となっている。また、生活時間の項目と消費支出の項目、全てが有効である回答の割合は 16%である。

表 5.3.4-5 有効回答率

調査項目	回収数	有効回答数 (回答者に対する設問)	有効回答率
生活時間	2142	401	19%
消費支出	1404	769	55%
生活時間・消費支出の全回答が有効	1404	230	16%

なお、アクティブモニター（PCでの調査回答が可能、かつ、ふだんの調査回答率が高いモニター)、スクリーニング調査配信モニター、回収モニター、集計対象モニターそれぞれの属性比率は**表 5.3.4-6** に示すとおりである。アクティブモニターは女性が64%と多い一方、配信モニターでは女性比率が44%まで下がり、20～30代の比率が5～10%低下している。さらに、回収モニターと集計対象モニターの比率はどちらも男性が6割、年代は20代が少なく、年齢が高い傾向にある。

世帯構成（単身/夫婦のみ）や世帯年収、就業者の有無により、調査対象を抽出している他、調査全体を通して回答負荷が高いことから、高年齢層の男性比率が高まった可能性がある。

表 5.3.4-6 属性比率

	回答者性別			回答者年代					
	男性	女性	合計	20-29歳	30-39歳	40-49歳	50-59歳	60-64歳	合計
アクティブモニター	111,832	196,650	308,482	60,784	69,510	75,680	75,316	27,192	308,482
	36%	64%	100%	20%	23%	25%	24%	9%	100%
スクリーニング調査配信モニター	81,736	63,367	145,103	15,047	26,012	35,600	47,339	21,105	145,103
	56%	44%	100%	10%	18%	25%	33%	15%	100%
回収モニター	896	508	1,404	66	209	361	532	236	1,404
	64%	36%	100%	5%	15%	26%	38%	17%	100%
集計対象モニター	495	274	769	31	108	183	309	138	769
	64%	36%	100%	4%	14%	24%	40%	18%	100%

d. 調査項目

本調査の主な調査項目を以下に示す。

ｱ) スクリーニング調査

- 性別
- 年齢
- 転居の有無
- 居住地域
- 世帯構成
- ふだんの世帯の在宅勤務実施頻度(1週間の平日のうち在宅勤務している人が一人以上いる日数)
- ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度

ｲ) 生活時間調査

- 基本属性
  - 同居家族の人数
  - 配偶者の年齢
- 就業状況、勤め先の状況
  - 就業有無（回答者/配偶者）
  - 職種（回答者/配偶者）
  - 業種（回答者/配偶者）
  - 1週間あたりの就業時間
  - 2021年10月の在宅勤務の実施頻度（回答者/配偶者）
  - 直近1年間の在宅勤務の実施頻度（回答者/配偶者）
  - 新型コロナウイルス発生前後でのオフィス面積の変化
- 住宅属性
  - 建て方
  - 所有関係
  - 建築時期
  - 延床面積
- 住まいの設備や機器の使用状況
  - テレビ、パソコンの平均使用時間
  - 調理食数
  - 入浴回数
  - 在宅勤務時の日中の照明の使用状況
- 生活行動時間

  （回答対象日：10/23(土)～10/31(日)の期間で任意の平日1日、休日1日を選択）
  - 30分単位での在宅状況（平日/休日）（回答者/配偶者）
  - 30分単位での生活行動（平日/休日）（回答者/配偶者）
  - 回答対象日の天候
  - 回答対象日の状況（出張、旅行等、特別な用事があったか）
  - 回答対象日の勤務時間の長さ（ふだんより長かったかどうか）

ｳ) 消費支出調査

- 家計支出の状況
  - 支払総額と内訳（2021年10月分）
- 宅配便の利用状況
  - 宅配便の荷物を受け取った回数、不在票が入った回数（2021年10月分）
  - 不在時の宅配受取りサービス（宅配ボックス等）の利用状況
- 食事に関する支出頻度
  - 食料品の購入経路別購入頻度、外食頻度（回答者/配偶者）（2021年10月分）
- 光熱費、エネルギー使用量
  - 電気、都市ガス、LPガスの使用有無、支払金額、使用量（2021年10月分）

- 灯油、ガソリン、軽油の購入有無、支払金額、購入量（2021 年 10 月分）

- 消費行動
  - 購入製品、購入の種類（買替/新規/買い増し）、購入に至った背景、購入形態（直近 1 年間分）
  - 衣服、かばん等の購入金額、主な購入形態（直近 1 年間分）
  - ビジネス用衣服のクリーニング代（2021 年 10 月時点）
  - 定期券の交通費、定期券以外の交通費（2021 年 10 月時点）
  - 化粧品、整髪剤の購入金額、主な購入形態（直近 1 年間分）
  - 家事雑貨等の購入頻度、主な購入形態（2021 年 10 月分）
- サービスの利用状況
  - サブスクリプションサービスの利用状況（2021 年 10 月時点）
  - 理美容サービス、保健医療サービスの利用頻度（直近 1 年間分）
- その他ライフスタイルや志向
  - ふだんの実店舗で買い物をするスタイル（仕事帰りに立ち寄り、買い物のために都度外出等）
  - 在宅勤務を実施するメリット
  - ネットショッピングを利用する理由

支払総額と内訳は、日常生活を営むに当たり必要な商品やサービスを購入して実際に支払った金額と定義し、毎月発生するものではない不定期な支払を含めないとしている。

本調査における「支払総額」と「内訳」に含まれない項目の具体例について、以下に整理する。

- 住居費
  住宅または土地の購入・新築・増改築、住宅の設備工事に伴う出費を含まない。
- 交通費
  旅行費用・定期券代を含まない。
- その他
  住民税・所得税等の税金や社会保険料等（非消費支出）の支払、株・有価証券・投資、自動車・家電・家具の購入費、学校・塾・教室の入学・入会金、冠婚葬祭費、入院・治療費、年間一括払いの保険料、エステティックサロンの契約金等を含まない。

(2) 調査設計

① スクリーニング調査

a. スクリーニング調査項目の検討

スクリーニング調査はその後に実施する生活時間調査および消費支出調査の対象者の絞り込みのため実施するものである。

調査項目の検討にあたって、回答負荷等の観点から、項目数を 10 項目以下とすることとして、調査項目の選定を行う。

調査項目うち性別、年齢、世帯構成、居住地域、個人・世帯収入を基本属性として把握する。うち、個人・世帯収入については(株)インテージの WEB アンケートモニター情報より取得する。また、調査対象者絞り込みのため転居の有無を調査項目とする。

加えて、生活時間調査の配信数の割付のため、ふだんの世帯における在宅勤務実施頻度およびふだんの世帯におけるネットショッピングの利用頻度を調査項目とする。割り付け方法については前述のとおりである。

b. スクリーニング調査後の調査対象者の絞り込み要件

以下、調査対象者の絞り込みに用いた項目について絞り込み要件とその事由を示す。

- 年齢：20 歳～64 歳
  - 調査対象世帯を一般的な勤労世帯に限定する。
- 世帯構成：単身（就業者）、夫婦のみ（就業者あり）
  - 複数人の同居家族の生活行動や消費支出を回答する難易度が高いことを考慮し、世帯構成は単身・夫婦世帯のみとする。また、在宅勤務の影響を調査するため、就業者がいる世帯に限定する。
- 居住地域：東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県
  - 在宅勤務を実施する世帯を抽出するため、居住地域は調査実施時期に在宅勤務の実施がある程度普及していると考えられる東京近郊の 4 都県に限定する。
- 個人収入：100 万円以上、2000 万円以下
  - 収入が支出や生活時間に及ぼす影響を考え、収入が極端に少ない世帯、極端に多い世帯を除外するため、個人収入が 100 万円以上、2000 万円以下の世帯に限定する。
- 転居の有無：2020 年 10 月～2021 年 11 月末まで転居がない世帯
  - 調査の対象期間内に転居があると、主に支出等に転居前後で差が生じると考えられるため、2020 年 10 月～2021 年 11 月末まで転居がない世帯に限定する。

最後に、3 つの調査の最後に行う消費支出調査への回答参加意思の確認として、2021 年 10 月分の各支出項目について世帯のおおよその支出額の回答が可能かどうかを確認しており、回答可能な支出項目がほとんどない場合は、その後の調査対象から除外している。

② 生活時間等に関する調査

a. 調査項目の検討

生活時間等に関する調査項目は、大きく分けて世帯・住宅の基本属性、住まいの設備や機器の使用状況、回答者（と配偶者）の就業状況、および生活行動時間の 4 つである。

ｱ) 世帯・住宅の基本属性

消費支出調査を含む本調査全体で、分析時に使用する属性情報として設ける。

ｲ) 住まいの設備や機器の使用状況

在宅勤務やネットショッピングの増加に伴い、使い方に変化を及ぼす可能性があるものを中心に調査する。

ｳ) 回答者（と配偶者）の就業状況

就業者の職種や業種、個人単位（回答者または配偶者）の在宅勤務実施頻度や就業時間を把握するための設問である。

なお、スクリーニング調査では、世帯の在宅勤務実施頻度の調査項目を設けたが、ここでは、個人単位で回答される生活行動時間との関係を整理するため、個人の在宅勤務実施頻度を設けている。

また、消費支出調査の一部調査項目では、直近 1 ヶ月ではなく直近 1 年間の支出を調査項目としており、その関係を整理するために直近 1 年間の在宅勤務実施頻度も設けている。

ｴ) 生活行動時間

回答者、および配偶者（夫婦世帯のみ）の仕事日・休日における 1 日の生活行動を把握するため、日誌式の調査項目を設ける。

需要発生の要因となる生活行動を把握するためには詳細な情報を得ることが望ましいが、一方で、本調査の中でも最も回答負荷の高い設問である。調査対象日の日数や生活行動の分類数等は最低限になるよう留意する。

b. 生活行動時間の調査設計

生活行動時間の調査設計にあたっては、総務省「社会生活基本調査」（以下、社基調）と NHK 放送文化研究所「国民生活時間調査」（以下、NHK 調査）の調査票を参考に設計を行う。図 5.3.4-1 に社基調の調査票を、図 5.3.4-2 に NHK 調査の調査票を示す。本調査においては、両調査の行動分類を基本としつつ、在宅勤務やネットショッピングの増加により生活行動に変化が生じる可能性があるものについて、変更を加える。

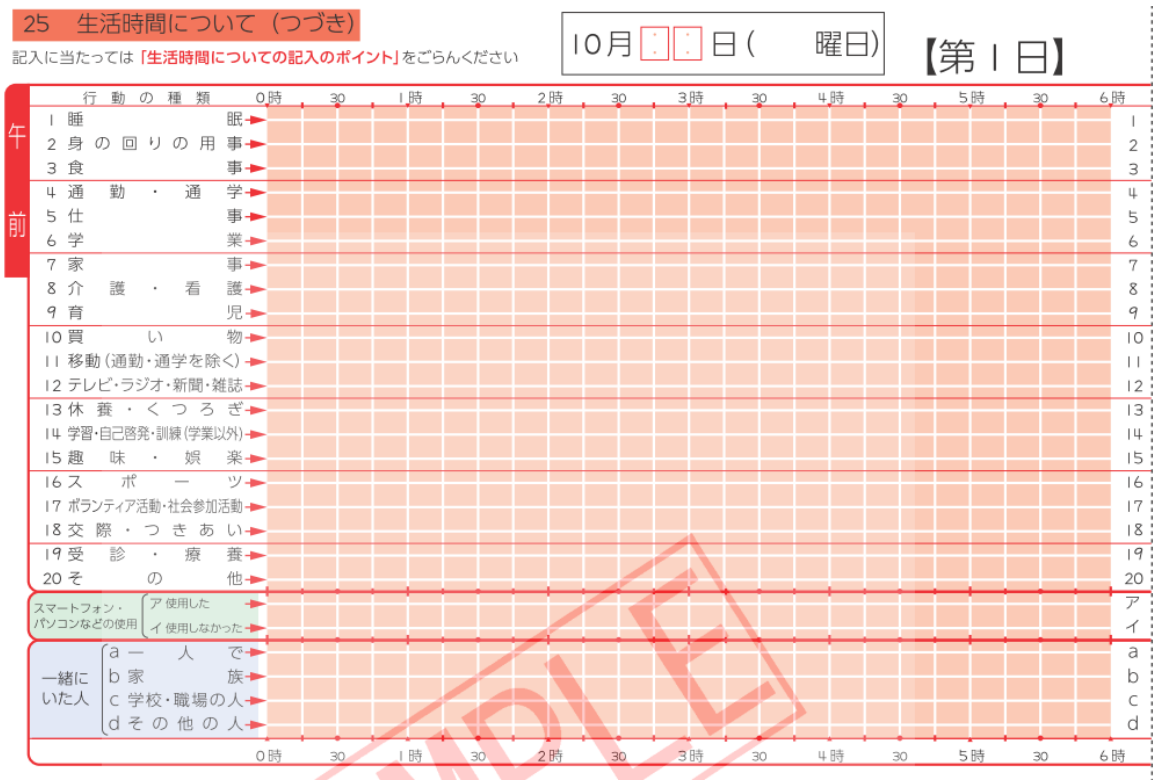


図　5.3.4-1 社会生活基本調査　調査票 A

出典）総務省「令和 3 年　社会生活基本調査」

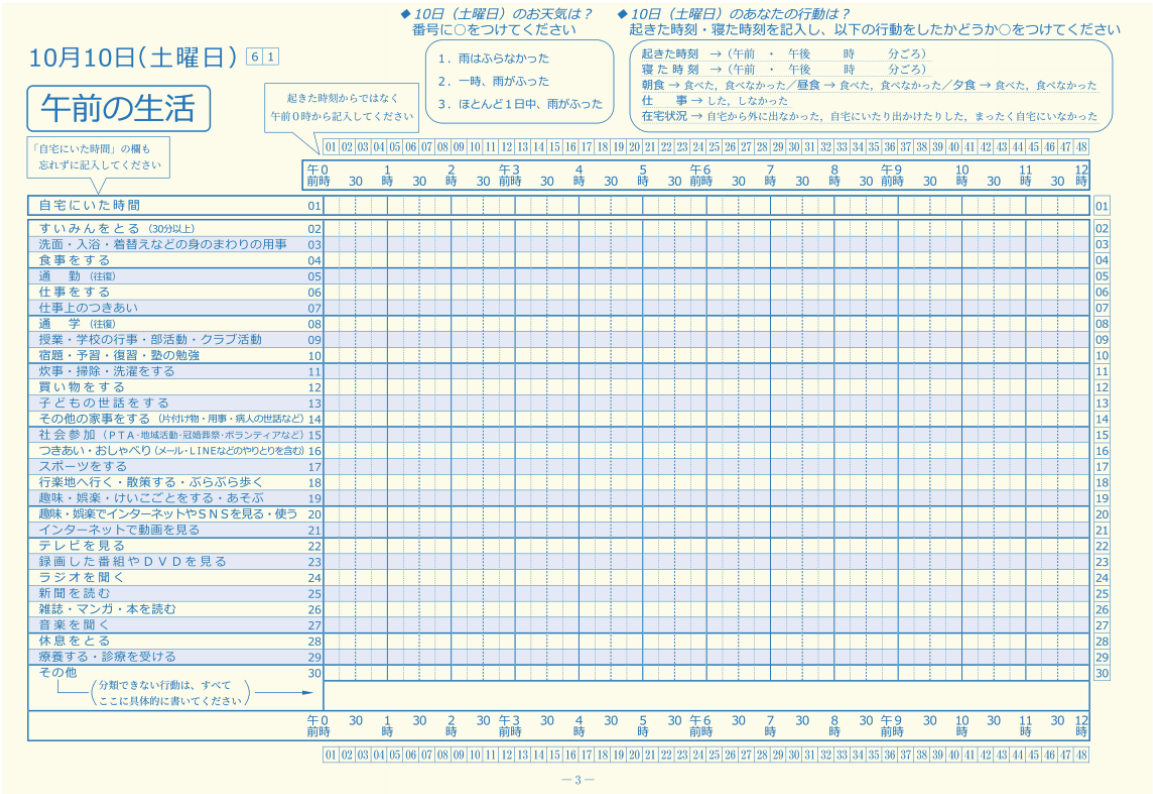


図　5.3.4-2 国民生活時間調査　調査票

出典）NHK 放送文化研究所「2020 年　国民生活時間調査」

ｱ) 生活行動の分類

社基調では生活行動を 20 項目に分類し、NHK 調査では 29 項目に分類している。いずれの分類も、行動内容によってのみ整理されており、行動をした場所については整理されていない。

本調査において、在宅勤務により影響が生じると考えられる行動（食事、入浴、仕事、余暇活動）については、自宅または自宅外での行動に分類する。同様に、在宅勤務やネットショッピング増加による影響が生じると考えられる行動（移動、買い物）については、行動種類によって細分化する。移動は、通勤・通学、通勤以外の仕事に伴う移動、その他の 3 つに分類し、買い物（本調査においては「買い物・サービスの入手」）は、実店舗、インターネット等によるものの 2 つに分類する。

表 5.3.4-7 に行動分類とその内容例を示す。なお本表は、生活時間調査を実施する際に調査画面で参照できるようにしている。

ｲ) 配偶者の生活行動時間の調査設計

社基調では、各時間帯の行動に加えて、一緒にいた人も尋ね、他人との同時行動を把握できるようにしている。一方、NHK 調査では、回答者自身の行動のみ尋ねている。

本調査では、家庭における需要発生要因を詳細に把握するため、同居家族（今回は配偶者）の行動についても独立で調査する。ただし、配偶者の行動を回答者自身が全て把握し、回答することは難易度が高いことが想定されるため、表 5.3.4-7 に示した行動分類を一部統合し、以下の 8 分類とする。

- 睡眠
- 食事
- 入浴、身の回りの用事（身支度や散髪など）
- 仕事
- 住宅・生活の管理（家事など）、家族の世話
- 移動
- 余暇活動
- その他（上記で分類できないもの）

表 5.3.4-7 行動分類別の内容例

行動分類	内容例	備考
睡眠	睡眠、仮眠、ベッドで眠りに落ちるのを待つ	・就寝から起床までの時間をいう
自宅での食事	自宅での飲食、出前	
自宅外での食事(外食)	飲食店での飲食	
自宅外での食事(その他)	仕事場での飲食(社内食堂等を含む)、学校給食、屋外での飲食(屋台等を含む)	
入浴(自宅)	自宅での入浴	・入浴のため浴室に滞在している時間をいう
入浴(自宅外)	入浴施設やジム等での入浴	
身の回りの用事(日常の身だしなみ)	身支度、着替え、化粧、整髪、洗顔	・自分のための用事をいう
身の回りの用事(その他)	自宅・ジムでの運動、散髪等(理美容室の利用)、エステ・ネイル等	・自分のための用事をいう ・美容に関するサービスの利用を含む
受診・療養	病院等での受診・治療、療養、整体院等の利用	・身体のメンテナンスに関するサービスの利用を含む
仕事(自宅)	在宅勤務での仕事・準備・後片付け、自家営業	・収入を伴う仕事をいう ・副業・内職・アルバイトを含む ・休憩時間など仕事をしていない時間は「休養・くつろぎ」とする ・出先への 20 分以上の移動は「移動(通勤以外の仕事に伴う移動)」とする
仕事(自宅外)	職場・出先での仕事・準備・後片付け、出先への短時間(20 分未満)の移動(通勤や出張、出先への 20 分以上の移動は除く)	
学業	学校の授業や宿題、ホームルーム、学校行事、家庭教師・塾での学習	・必修科目として行うものでないクラブ活動・部活動は「余暇活動」とする
移動(通勤・通学)	自宅と仕事場の行き帰り、自宅と学校の行き帰り	・途中で寄り道した場合も、普段の経路を大きく外れない場合はここに含む
移動(通勤以外の仕事に伴う移動)	出張のための移動、出先への 20 分以上の移動	・出先への短時間(20 分未満)の移動は「仕事(自宅外)」とする
移動(その他)	通勤・通学や仕事以外での移動	・目的地のない移動(散歩等)は「余暇活動(自宅外)」とする
住宅・生活の管理(炊事、食事の後片付け)	炊事、食事の後片付け	・炊事のための買い物は「買い物・サービスの入手」とする
住宅・生活の管理(掃除、洗濯)	掃除、洗濯、アイロンかけ、衣類の整理片付け	・クリーニングやコインランドリーの利用を含む
住宅・生活の管理(その他)	家計簿の記入、銀行・市役所などの用事、車の手入れ	
家族の世話	育児、子供のつきそい・勉強・遊び相手、介護・看病	・子供の教育に関する行動を含む
買い物・サービスの入手(実店舗)	実店舗での買い物・レンタル・旅券等の手配	・商品を選んでいる時間やウインドウショッピングを含む
買い物・サービスの入手(インターネット等)	インターネットや通信販売での買い物・レンタル・旅券等の手配、動画・音楽配信サービスの入手	・商品の検索・閲覧時間を含む ・配信サービスを利用した動画・音楽等の視聴は「余暇活動」とする
交際・付き合い	冠婚葬祭、挨拶まわり、知人との電話・会話	・知人との飲食は「食事」、買い物は「買い物・サービスの入手」、娯楽やスポーツは「余暇活動」とする
余暇活動(自宅)	テレビの視聴、音楽・動画の視聴、読書、ペットの世話・遊ぶ、ゲーム機で遊ぶ	・左記に示す行動でも外出先で行っている場合は「余暇活動(自宅外)」とする
余暇活動(自宅外)	スポーツ、旅行、映画館等での鑑賞、ドライブ、ボランティア・社会参加活動	・左記に示す行動でも自宅で行っている場合は「余暇活動(自宅)」とする
学習・自己啓発・訓練(学業以外)	講座・教室への参加、社会通信教育を受ける、自動車教習	・個人の自由時間に行う学習をいう ・仕事で受けた研修は「仕事」とする
休養・くつろぎ	家族との団らん、仕事場・学校の休憩時間	・テレビなどを視聴しながらくつろいだ時間は「余暇活動」とする
その他(上記で分類できないもの)	調査票に回答する	・上記行動分類のいずれにも当てはまらないものはすべてここに含む

ｳ) 生活時間の粒度、調査対象日数の検討

社基調、及び NHK 調査では、15 分単位の調査となっている。しかし、本調査においては、回答負荷が高いことや、回答精度が低下する可能性があることを考慮し、30 分単位の調査とする。

生活時間の回答日は、回答率向上の観点から任意の月日を選択できるようにする。調査対象日数については、以下 5 方式を検討し、回答負荷や本調査の趣旨への適合性等により、「仕事日・休日の 2 日」の方式を採用する。

- 連続した 3 日
  - 回答負荷が非常に高い。
  - 休日が選定されるとは限らず、ネットショッピング増加による影響が把握しにくい。
- 在宅勤務日、自宅外での勤務日、休日の 3 日
  - 回答負荷が非常に高い。
  - 1ヶ月あたりの在宅勤務日数､自宅外での勤務日数､休日数を把握できれば、月単位での生活行動時間も把握することが可能。
- 仕事日・休日の 2 日
  - 仕事日に在宅勤務日が選定されるか、自宅外での勤務日が選定されるかは不明であるが、在宅勤務頻度が高い人は、在宅勤務日を選定して回答することを想定する。
- 在宅勤務日と自宅外での勤務日の 2 日
  - 休日の行動が把握できず、ネットショッピング増加による影響が分析できない。また在宅勤務のみまたは自宅外での勤務のみの回答者に適さない。
- 在宅勤務日、または自宅外での勤務日のどちらか 1 日
  - 休日の行動が把握できず、ネットショッピング増加による影響が分析できない。
  - 回答負荷は低い。

③ 消費支出等に関する調査

a. 収支項目分類の整理と調査項目の検討

消費支出等に関する調査項目の検討にあたっては、世帯全体の消費実態を網羅的に把握するため、まず、総務省の家計調査における収支項目分類を整理し、参考とする。

家計調査における収支項目分類と本調査における調査項目の検討事項を**表 5.3.4-8** に示す。本調査の調査項目を検討するにあたり、留意した点を以下に整理する。なお、本調査の対象は単身・夫婦世帯のみとなるため、子供がいる世帯特有の収支項目（教育など）は対象外とし、また、在宅勤務やネットショッピングの影響を受けづらいと考えられる収支項目（たばこなど）は対象外とする。

- 在宅勤務の増加による影響を受けると考えられる収支項目の抽出

- 在宅勤務をすることで消費が増える、または減ると考えられるものを整理する。

- ネットショッピングの利用増加による影響を受けると考えられる収支項目の抽出
  - ネットショッピングでよく購入されると想定されるものを整理する。
- 購入・サービス利用の目的の整理
  - 購入・サービス利用の背景として、在宅勤務の増加による影響を受けているのか、それ以外にライフステージの変化や嗜好の変化による影響があるのかを切り分ける必要があると考えられる項目を整理する。
- 回答対象期間の検討
  - 製品・サービスの種類により、購入頻度や利用頻度が異なるため、アンケート調査では直近 1 か月分の消費を尋ねる設問と直近 1 年間分の消費を尋ねる設問を分ける。
- 回答単位（個人/世帯）の検討
  - 製品・サービスの種類により、世帯全体の消費実態を回答できるものと、世帯全体分の把握が難しい（回答難易度が高い）ものがある。本調査は、個人での消費実態を尋ねる設問と世帯全体の消費実態を尋ねる設問に分ける。

表 5.3.4-8 家計調査における収支項目分類と本調査における調査項目の検討事項

		設問内容案	個人の在宅勤務により消費が変化する項目		世帯の在宅勤務による影響項目	ﾈｯﾄｼｮｯﾋﾟﾝｸﾞで購入するもの	購入・サービス利用等の目的				回答対象期間		回答単位	
			増加	減少			執務環境の改善	生活環境の改善※1	可処分時間の増加	健康の維持・向上	月単位	年単位	世帯	個人
食料品（出前での食料調達を含む）		・購入頻度or支出額 ・自分が支払う分のみor各世帯員分ごとor世帯全体（andの場合もあり）	○		○	○					○		○	○
外食		外食頻度、1回当たり支出の変化	○	○	○				○		○		○	○
住居費用	家賃（共益費・管理費を含む）	ー	○		○		○	○				○	○	
	設備修繕・維持	ﾘﾌｫｰﾑ、設備修繕の実施有無	○		○		○	○				○	○	
	住居購入、引っ越し	住居購入・引っ越しの実施有無	○		○		○	○				○	○	
光熱・水道	電気	支出額（実費）、何月分の支払額かを聞く	○		○						○		○	
	都市ガス	支出額（実費）	○		○						○		○	
	LPガス	支出額（実費）	○		○						○		○	
	灯油	支出額（実費）	○		○						○		○	
	水道	支出額（実費）、トイレ・風呂の回数	○		○						○		○	
家具・家事用品	キッチン家電※2	直近1年の購入有無、支出額	○		○	○		○				○	○	
	洗濯・掃除家電※3	直近1年の購入有無、支出額	○		○	○		○				○	○	
	空調・季節家電※4	直近1年の購入有無、支出額	○		○	○	○					○	○	
	照明器具	直近1年の購入有無、支出額	○		○	○	○					○	○	
	一般家具、寝具、インテリア※5	直近1年の購入有無、支出額	○		○	○		○				○	○	
	家事雑貨※6	購入頻度	○		○	○		○			○			○
	家事用消耗品※7	購入頻度	○		○	○					○			○
	家事サービス	利用頻度	○		○			○			○		○	
被服及び履物	ビジネス服、私服、履物	購入頻度		○		○						○		○
	被服関連サービス※8	利用頻度		○							○			○
保健医療	医薬品、健康保持用摂取品※9	（肩こり等貼り薬の）購入頻度	○			○				○	○			○
	保健医療用品・器具※10	（健康家電の）直近1年の購入有無	○		○	○				○		○	○	
	保健医療サービス※11	（整骨院・マッサージの）利用頻度	○						○	○	○			○
交通・通信	交通（公共輸送機関,公共輸送施設の	公共交通機関の利用頻度（通勤目的/私用目的）		○							○			○
	自動車等関係費（自動車等購入,燃料	ﾏｲｶｰ、ﾚﾝﾀｶｰ、ｶｰﾘｰｽ、ｶｰｼｪｱの利用頻度	○	○	○						○		○	○
	通信（郵便,電話,携帯,運送）	携帯の月額料金（実費）、当月の使用通信料	○				○	○	○		○		○	
教育	授業料、教材料													
	補習教育（学習塾等）		○						○				○	
教養娯楽	AV機器※12	直近1年の購入有無、支出額	○		○	○		○	○			○	○	
	PC機器（タブレット含む）	直近1年の購入有無、支出額	○		○	○	○	○	○			○	○	
	書斎・学習用机・椅子	直近1年の購入有無、支出額	○		○	○	○	○	○			○	○	
	教養娯楽用品※13	直近1年の購入有無	○			○	○	○	○			○	○	
	書籍・他の印刷物	紙の書籍or電子書籍の購入頻度	○			○					○			○
	教養娯楽サービス※14	利用頻度	○		○	○			○		○		○	
諸雑費	理美容サービス(銭湯,美容院,エステ	利用頻度		○								○		○
	理美容品（ｼｬﾝﾌﾟｰ,化粧品,整髪剤）	購入頻度		○	○	○					○			○
	美容家電※15	直近1年の購入有無	○		○	○				○		○	○	
	身の回り用品（鞄,ｱｸｾｻﾘｰ）	購入頻度		○								○		○
	たばこ													
	信仰,冠婚葬祭,保険,保育,介護	保育、介護サービスの利用頻度		○	○				○		○		○	
	交際費	付き合いの飲み会や食事会等の頻度		○							○			○

b. 調査項目の選定

WEB アンケート調査では、設問数の多い場合や設問の尋ね方が細かすぎる場合、回答を負担に感じ、調査票の最後まで回答せずに離脱してしまうケースや、実際と異なる回答をしてしまうケースもあり、調査回収数の減少・回答精度の低下につながる。そのため、a で整理した収支項目に優先順位をつけ、必要最低限の調査項目を選定する。

表 5.3.4-9 に調査項目の選定表を示す。研究員 4 名がそれぞれ、以下の項目に留意し、各調査項目に 4 段階の優先順位（1：必ず調査項目に入れるべきもの、2：優先的に入れるべきもの、3：設問数に余裕があれば入れるべきもの、4：調査対象外になり得るもの）をつけ、その平均点と分散を算出することで調査項目を選定する。

- 当該項目に関する購入・サービス利用する世帯の出現頻度の考慮
  - 2020 年家計調査における購入頻度を参照し、出現頻度が低いと考えられるものは優先順位を下げる。
- 在宅勤務増加による影響、ネットショッピングの利用増加による影響の大きさによる比較
  - 上記生活行動の変化が与える影響が大きいと考えられるものは優先順位を上げる。

表 5.3.4-9 調査項目の選定

		設問内容案	家計調査における購入頻度 (2020年結果,100世帯当たり,年間)	調査項目選定の優先順位 平均点		判定の分散 FLG				調査票採用有無	
						Max		FLG			
				WFH	NS	WFH	NS	WF	NS	WFH	NS
食料品（出前での食料調達を含む）		・購入頻度or支出額 ・自分が支払う分のみor各世帯員分ごとor世帯全体（andの場合もあり）	全国：343,132、大都市：349,775（出前含まない）	1.0	1.0	1	1	0	0	●	●
外食		外食頻度、1回当たり支出の変化	全国：7,376、大都市：8,494（出前含む）	1.0	1.0	1	1	0	0	●	●
住居費用	家賃（共益費・管理費を含む）	ー	全国：165、大都市：221	3.0	4.0	3	4	0	0		
	設備修繕・維持	ﾘﾌｫｰﾑ、設備修繕の実施有無	全国：554、大都市：494	3.0	4.0	3	4	0	0		
	住居購入、引っ越し	住居購入・引っ越しの実施有無		3.0	4.0	3	4	0	0		
光熱・水道	電気	支出額（実費）、何月分の支払額かを聞く	全国：1,131、大都市：1,118	1.0	4.0	1	4	0	0	●	
	都市ガス	支出額（実費）	全国：862、大都市：976	1.0	4.0	1	4	0	0	●	
	LPガス	支出額（実費）	全国：316、大都市：142	1.0	4.0	1	4	0	0	●	
	灯油	支出額（実費）	全国：310、大都市：183	1.0	4.0	1	4	0	0	●	
	水道	支出額（実費）、トイレ・風呂の回数	全国：722、大都市：645	1.0	4.0	1	4	0	0	●	
家具・家事用品	キッチン家電※2	直近1年の購入有無、支出額	全国：103、大都市：95	2.0	1.8	1	1	0	0	●	●
	洗濯・掃除家電※3	直近1年の購入有無、支出額		2.0	1.8	1	1	0	0	●	●
	空調・季節家電※4	直近1年の購入有無、支出額	全国：65、大都市：60（冷暖房用器具）	1.8	1.8	1	1	0	0	●	●
	照明器具	直近1年の購入有無、支出額	全国：16、大都市：14	1.8	1.8	1	1	0	0	●	●
	一般家具、寝具、インテリア※5	直近1年の購入有無、支出額	全国：32、大都市：32（一般家具） 全国：199、大都市：187（寝具類） 全国：248、大都市：225（室内装備・装飾品(照明器具含む)）	2.0	1.8	2	1	0	0	●	●
	家事雑貨※6	購入頻度	全国：3,821、大都市：3,850	2.5	1.8	2	1	0	0	●	●
	家事用消耗品※7	購入頻度	全国：12,886、大都市：13,062	2.0	1.5	2	1	0	0	●	●
	家事サービス	利用頻度	全国：475、大都市：381	2.5	3.3	2	1	0	1	●	
被服及び履物	ビジネス服、私服、履物	購入頻度	全国：4,600、大都市：4,563（被服及び履物 全体）	1.5	1.8	1	1	0	0	●	●
	被服関連サービス※8	利用頻度	全国：364、大都市：374（被服関連サービス）	1.8	3.3	1	1	0	1	●	
保健医療	医薬品、健康保持用摂取品※9	（肩こり等貼り薬の）購入頻度	全国：417、大都市：430（肩こりの貼り薬等を含む、「他の外用薬」） 全国：312、大都市：341（健康保持用摂取品）	2.8	1.5	2	1	0	0	●	●
	保健医療用品・器具※10	（健康家電の）直近1年の購入有無	全国：147、大都市：145（健康器具等を含む、「他の保健医療用品・器具」）	2.8	1.8	2	1	0	0	●	●
	保健医療サービス※11	（整骨院・マッサージの）利用頻度	全国：204、大都市：229（整骨・鍼灸院治療代） 全国：63、大都市：73（マッサージ料金等(診療外)）	2.8	4.0	2	4	0	0	●	
交通・通信	交通（公共輸送機関,公共輸送施設の	公共交通機関の利用頻度（通勤目的/私用目的）	全国：1,393、大都市：2,205	1.0	2.5	1	1	0	1	●	
	自動車等関係費（自動車等購入,燃料	ﾏｲｶｰ、ﾚﾝﾀｶｰ、ｶｰﾘｰｽ、ｶｰｼｪｱの利用頻度	全国：1,484、大都市：926（ガソリン代） 全国：11、大都市：20（ﾚﾝﾀｶｰ・ｶｰｼｪｱﾘﾝｸﾞ料金）	1.0	1.3	1	1	0	0	●	●
	通信（郵便,電話,携帯,運送）	携帯の月額料金（実費）、当月の使用通信料	全国：1,043、大都市：1,038（携帯電話通信料）	1.5	2.0	1	1	0	0	●	
教育	授業料、教材料			3.5	2.8	2	1	0	1		
	補習教育（学習塾等）		全国：122、大都市：140	3.5	2.8	2	1	0	1		
教養娯楽	AV機器※12	直近1年の購入有無、支出額	全国：7、大都市：6（テレビ） 全国：62、大都市：65（他の教養娯楽用耐久財）	1.8	1.3	1	1	0	0	●	●
	PC機器（タブレット含む）	直近1年の購入有無、支出額	全国：52、大都市：63（パソコン）	1.5	1.3	1	1	0	0	●	●
	書斎・学習用机・椅子	直近1年の購入有無、支出額	全国：4、大都市：5（書斎・学習用机・椅子）	1.8	2.0	1	1	0	0	●	●
	教養娯楽用品※13	直近1年の購入有無	全国：7,079、大都市：6,609	2.3	2.0	2	1	0	0	●	●
	書籍・他の印刷物	紙の書籍or電子書籍の購入頻度		2.8	1.0	2	1	0	0	●	●
	教養娯楽サービス※14	利用頻度	全国：2,755、大都市：2,941	1.8	1.5	1	1	0	0		●
諸雑費	理美容サービス(銭湯,美容院,エステ	利用頻度	全国：785、大都市：795	2.3	4.0	2	4	0	0	●	
	理美容品（ｼｬﾝﾌﾟｰ、化粧品,整髪剤）	購入頻度	全国：5,579、大都市：5,655（「理美容品」全体）	1.8	2.0	1	1	0	0	●	●
	美容家電※15	直近1年の購入有無	全国：40、大都市：41（理美容用電気器具）	2.3	1.8	2	1	0	0	●	●
	身の回り用品（鞄,ｱｸｾｻﾘｰ）	購入頻度	全国：666、大都市：722	2.3	2.0	1	1	1	0	●	●
	たばこ			4.0	3.5	4	2	0	0		
	信仰,冠婚葬祭,保険,保育,介護	保育、介護サービスの利用頻度	全国：63、大都市：62（保育費用） 全国：84、大都市：89（介護サービス）	2.5	3.3	2	1	0	1		
	交際費	付き合いの飲み会や食事会等の頻度	全国：332、大都市：273（つきあい費）	1.3	2.8	1	1	0	1	●	

(3) 調査結果

① 属性情報

集計対象の居住地域は下図に示す通りで、東京都が最も多く 46%を占める。なお、令和 2 年国勢調査の不詳補完値による人口は、埼玉県 20%、千葉県 17%、東京都 38%、神奈川県 25%であるため、本調査においては東京都の出現頻度が高い傾向にある。

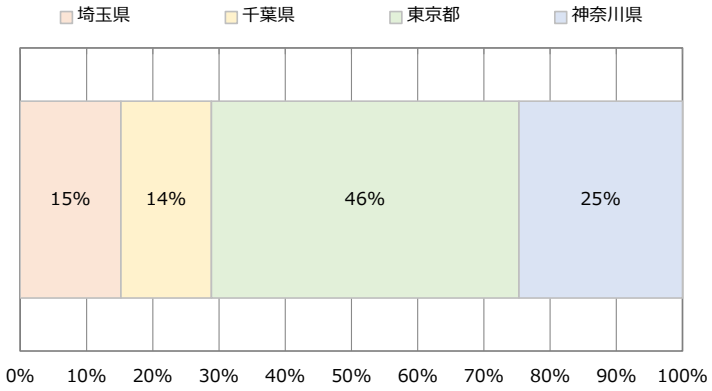


図 5.3.4-3 居住地域（n=769）

また、住まいの建て方は戸建住宅が 19%、集合住宅が 81%となっている。なお、平成 30 年度住宅・土地統計調査では、全国で戸建住宅 55%、集合住宅（共同住宅）45%、埼玉県・千葉県・東京都・神奈川県の 4 都県で戸建住宅 41%、集合住宅 59%であることから、本調査における集合住宅の比率は高い傾向にある。

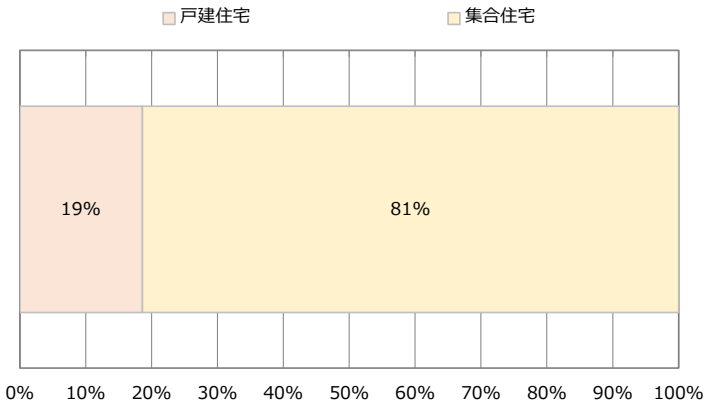


図 5.3.4-4 住まいの建て方（n=769）

住まいの所有関係を図 5.3.4-5 に示す。持ち家・分譲住宅が 44%、民営賃貸住宅が 50%を占める。なお、平成 30 年度住宅・土地統計調査では、全国で持ち家住宅 61%、民営借家 29%、埼玉県・千葉県・東京都・神奈川県の 4 都県で持ち家住宅 55%、民営借家 33%であることから、本調査において民営賃貸住宅の出現頻度は高い傾向にある。

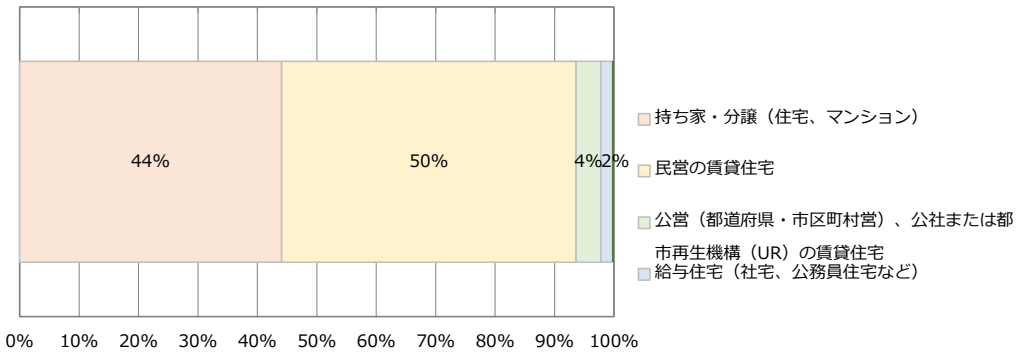


図 5.3.4-5 住まいの所有関係（n=769）

② 在宅勤務の実施頻度別の結果

a. 在宅勤務実施者の特徴

回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別の個人年収を図 5.3.4-6 に示す。個人年収の平均値は週 1～4 日の群が最も高く 584 万円、次いで週 5 日以上が 524 万円、週 0 日が 403 万円となっている。このことから、在宅勤務をしている人は、在宅勤務をしていない人に比べ年収が高い傾向にあることが分かる。

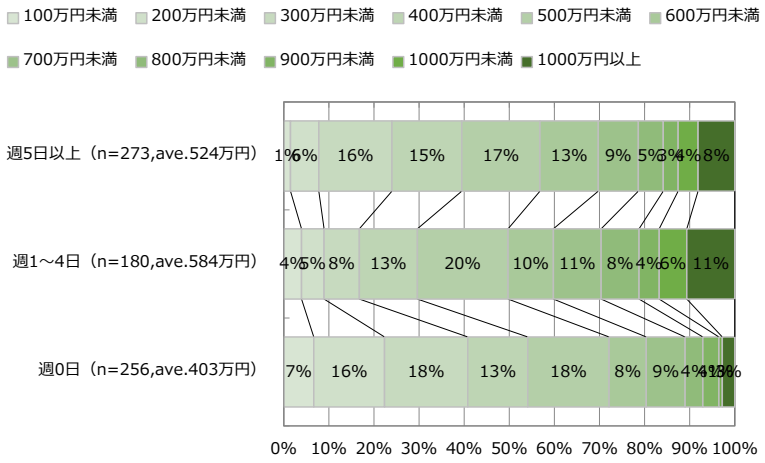


図 5.3.4-6 回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別 個人年収

注）回答者が就業者の世帯のみの集計結果となるため、サンプル数合計は 709 件である。

図 5.3.4-7 に示すとおり、テレワーク人口実態調査では、企業規模が大きいほどテレワーク比率が高まることを示しており、本調査においても、在宅勤務実施層は大企業に属する比率が高く、年収が高いことが考えられる。

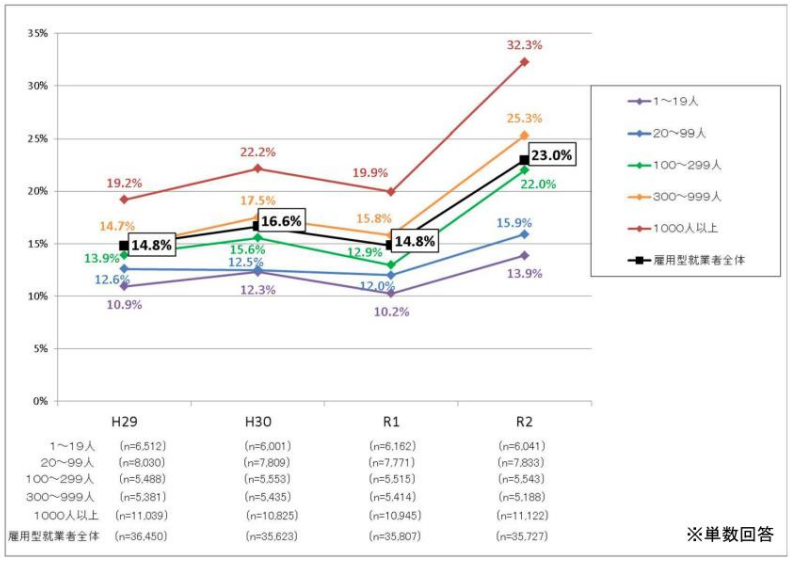


図 5.3.4-7 企業規模別 テレワーカーの割合

出典）国土交通省：令和 2 年度テレワーク人口実態調査

回答者の業種別に在宅勤務の実施頻度を図 5.3.4-8 に示す。在宅勤務比率が高い業種は、情報通信業、金融・保険業、不動産・物品賃貸業、学術研究・専門・技術サービス業となっている。一方、在宅勤務比率が低い業種は、生活関連サービス・娯楽業、医療・福祉業である。オンラインで仕事を進められる業種と、対面で行う必要のある業種で差が開いている。

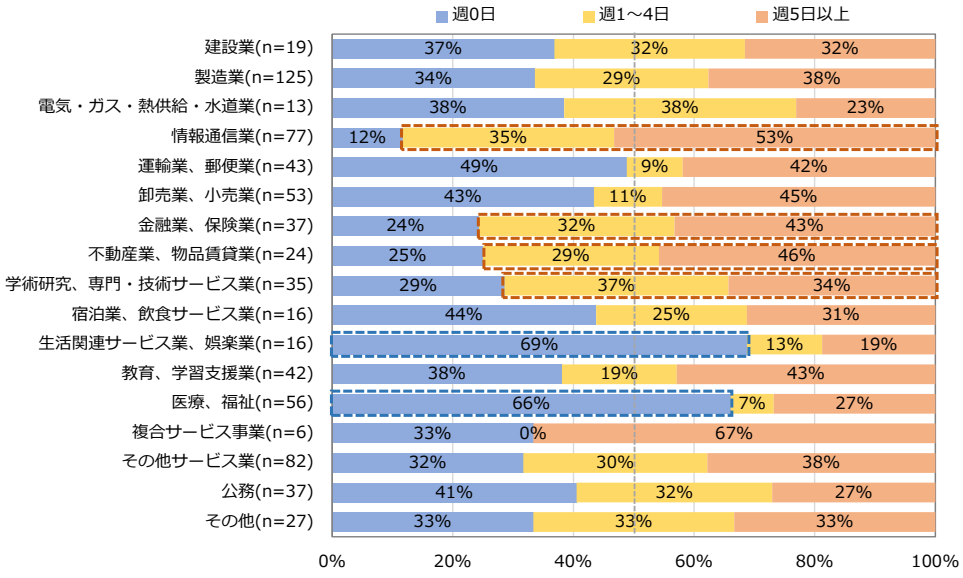


図 5.3.4-8 業種別 回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度

テレワーク人口実態調査では、情報通信業、学術研究、専門・技術サービス業、金融・保険業等でテレワーカーの比率が高い。一方、医療・福祉業、宿泊業・飲食業等のテレワーカーの比率は低い。これらは概ね本調査と同様の傾向を示している。

なお、本調査では、在宅勤務の実施頻度が高い層（週 5 日以上）と低い層（週 4 日以下）で同程度のサンプル数を確保する設計としたため、テレワーク人口実態調査の数値と乖離がみられる。

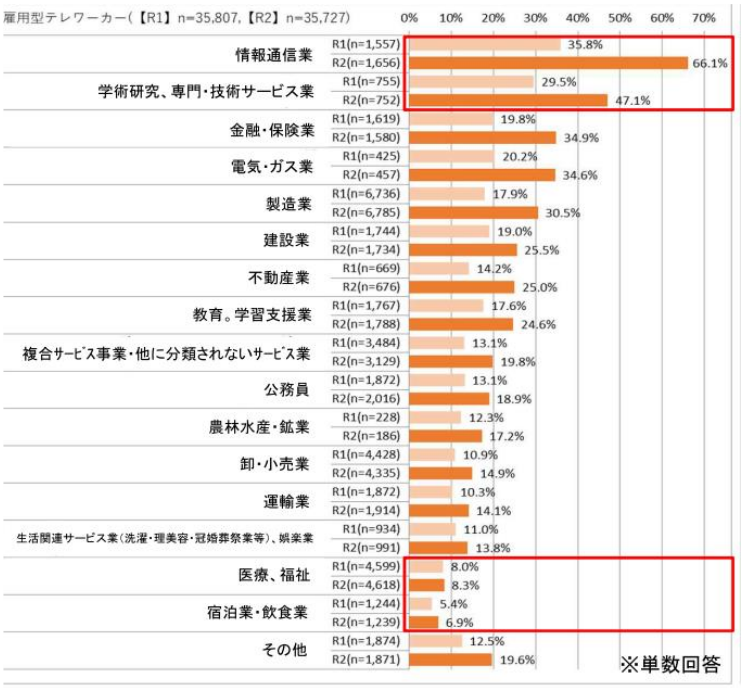


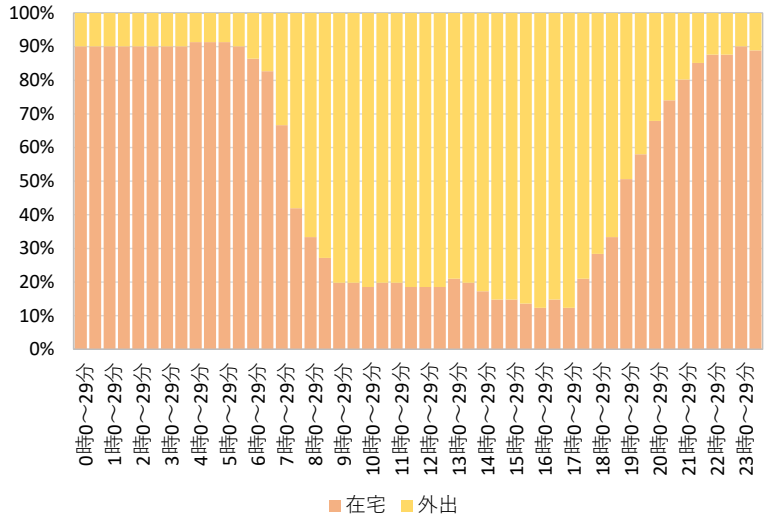
図 5.3.4-9 業種別 雇用型テレワーカーの割合

出典）国土交通省：令和 2 年度テレワーク人口実態調査

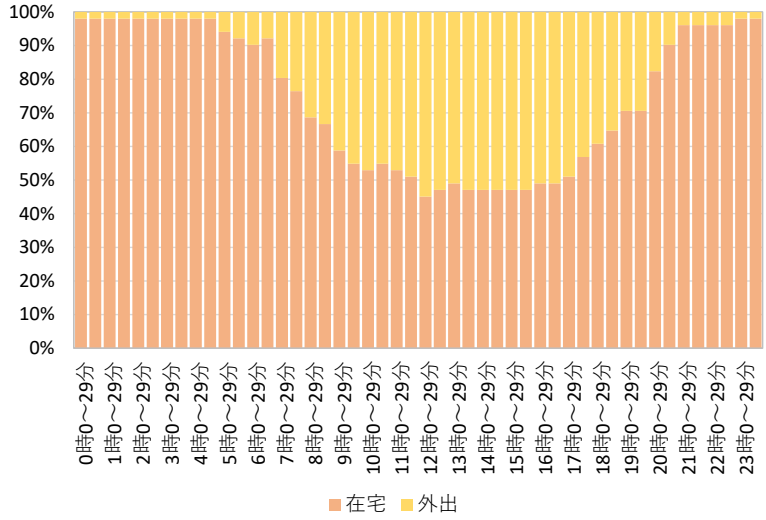
b. 生活行動の変化

回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別に、仕事日における時刻別在宅者率を図 5.3.4-10 に示す。在宅勤務実施頻度が高いほど、在宅者率が高いことが確認できる。

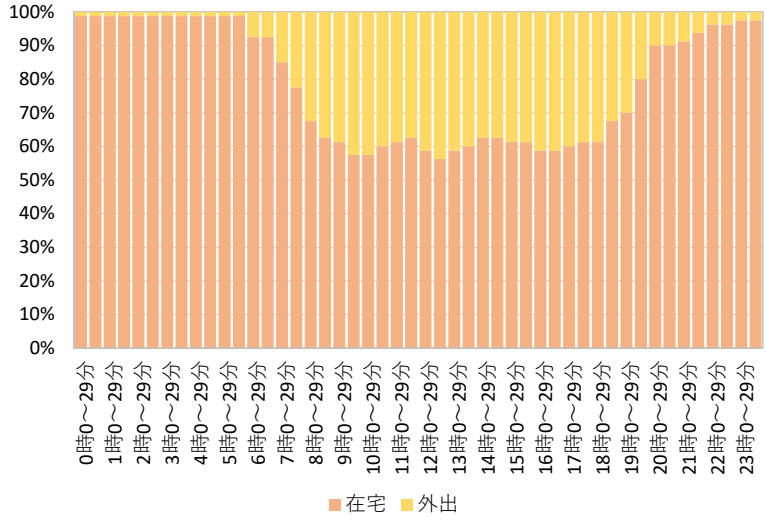
なお、本図は、回答者自身の生活行動を示している。また、在宅勤務 週 5 日の群にも「外出」が含まれる。これは、在宅勤務実施頻度が「2021 年 10 月の在宅勤務のおおよその実施頻度」という平均的な回答である一方、生活時間の回答対象日は、任意の一日を選択した回答であることから、在宅勤務でない日が選択された場合があるためである。



(1)在宅勤務実施頻度 週 0 日 （n=81）



(2)在宅勤務実施頻度 週 1～4 日 （n=51）



(3)在宅勤務実施頻度 週 5 日 （n=80）

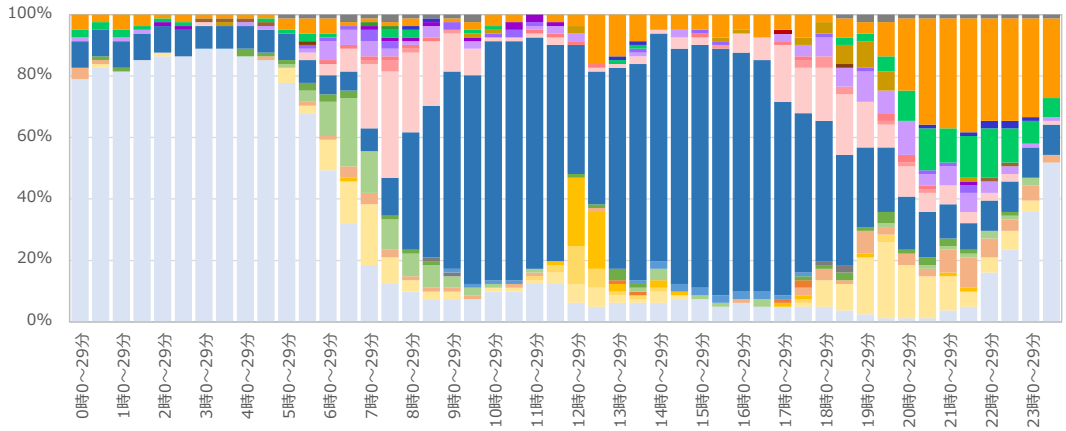
図 5.3.4-10 回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別 時刻別 在宅者率（仕事日）

回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別に、仕事日における時刻別生活行動の行為者率を図 5.3.4-11 に示す。生活行動の分類の定義は P.455 の表 5.3.4-7 を参照。

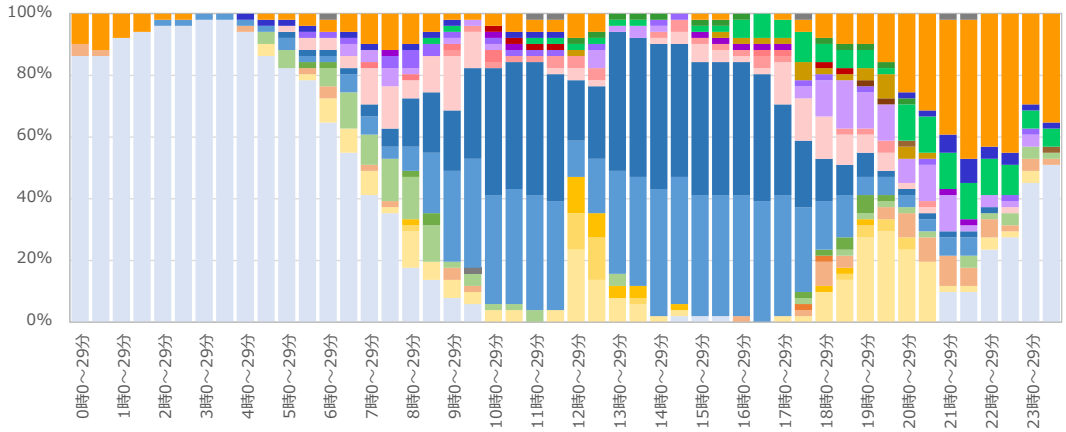
在宅勤務 週 0 日の群は、深夜帯における「仕事（自宅外）」の行為者率が相対的に高い。このことから、夜勤のある職種は在宅勤務が進んでいないと考えられる。

また、在宅勤務週 1 日以上の群では、「余暇活動（自宅）」の行為者率が 15 時頃から増加しており、通勤時間が減少した結果、早い時間から余暇活動をし始める傾向にあると思われる。

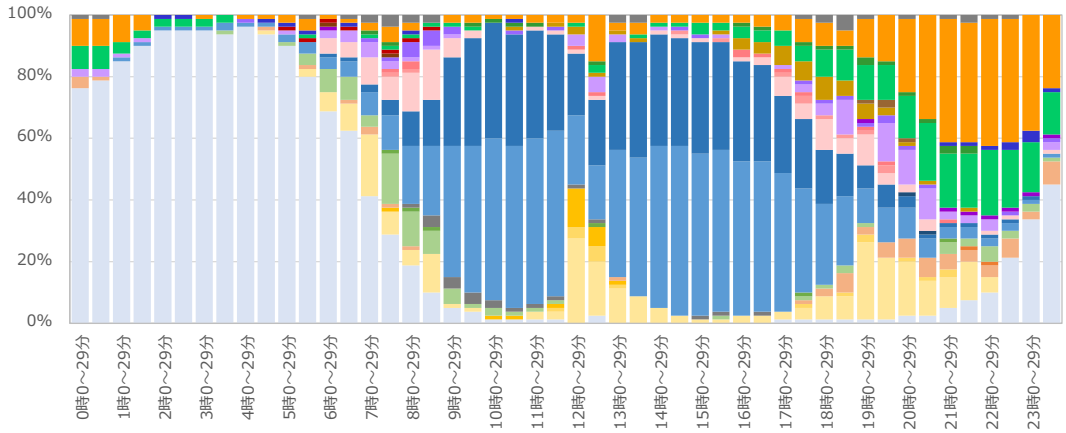
なお、在宅勤務週 5 日の群にも「仕事（自宅外）」が含まれる。これは、在宅勤務実施頻度が「2021 年 10 月の在宅勤務のおおよその実施頻度」という平均的な回答である一方、生活時間の回答対象日は、任意の一日を選択した回答であることから、在宅勤務でない日が選択された場合があるためである。



(1)在宅勤務実施頻度 週 0 日 （n=81）



(2)在宅勤務実施頻度 週 1～4 日 （n=51）



(3)在宅勤務実施頻度 週 5 日 （n=80）

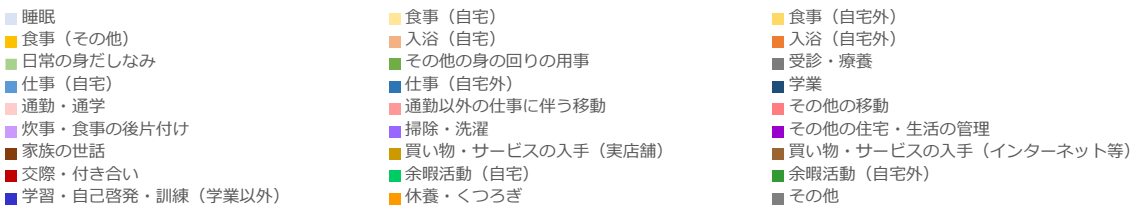
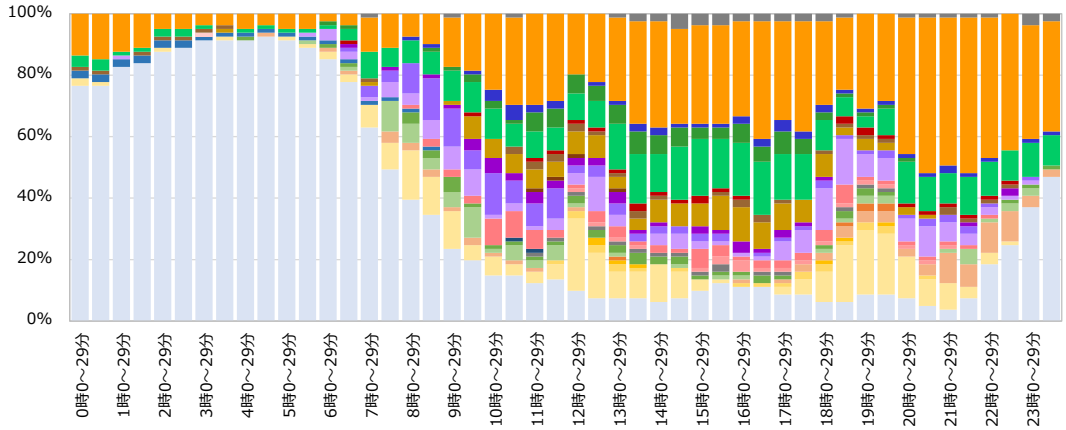


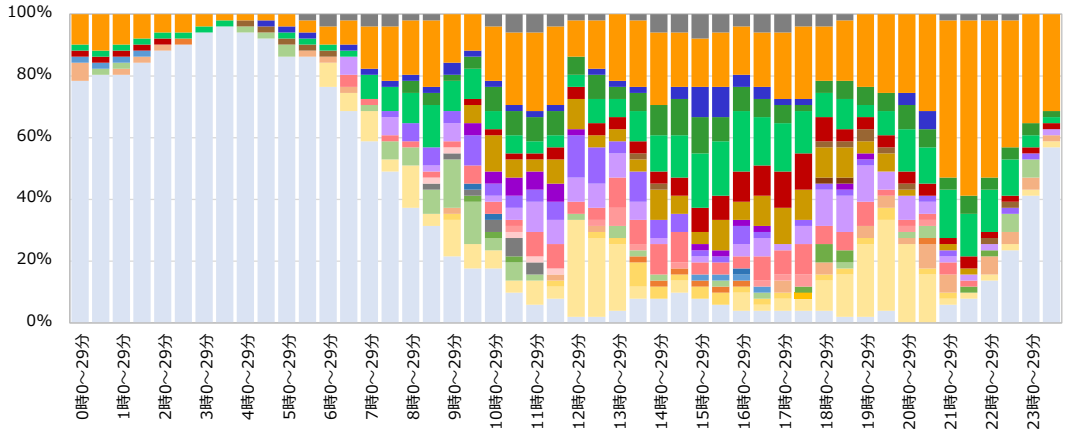
図 5.3.4-11 回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別時刻別生活行動の行為者率（仕事日）

回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別に、休日における時刻別生活行動の行為者率を図 5.3.4-12 に示す。在宅勤務 週 0 日の群は、日中も「睡眠」の行為者率が相対的に高い。これは、夜勤のある職種が多いことが影響している可能性がある。

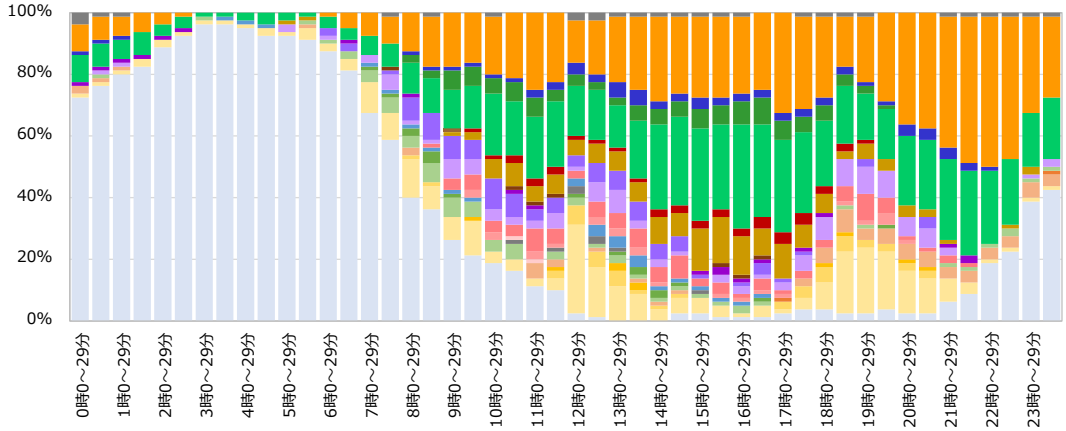
また、在宅勤務 週 5 日の群は、休日も「余暇活動（自宅)」の行為者率が高い。在宅勤務をした平日に、自宅での余暇活動を行う習慣がつくと、休日も継続して行うようになる可能性がある。あるいは、元々自宅にいることを好む人が、結果的に在宅勤務頻度が高く、週 5 日となっている可能性もある。



(1)在宅勤務実施頻度 週 0 日 （n=81）



(2)在宅勤務実施頻度 週 1～4 日 （n=51）



(3)在宅勤務実施頻度 週 5 日 （n=80）

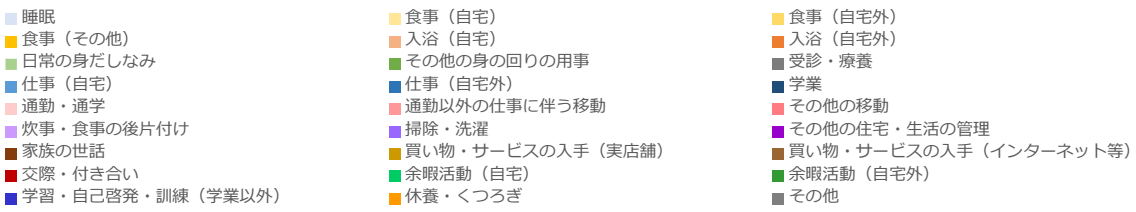


図 5.3.4-12 回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別時刻別生活行動の行為者率（休日）

回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別に、仕事日における生活行動の平均時間を図 5.3.4-13 に示す。在宅勤務の実施頻度が高いほど、生活行動の平均時間は以下のように変化する傾向にあることが整理できる。

- 通勤時間が短くなる
  - 週 0 日の群で 1.5 時間に対し、週 1～4 日の群で 0.9 時間、週 5 日以上の群で 0.6 時間となっている。
- 自宅での余暇活動、または休養・くつろぎの時間が長くなる
  - 休養・くつろぎの時間は、週 0 日の群で 2.1 時間に対し、週 1～4 日の群では 2.4 時間と長い。
  - 自宅における余暇活動の時間は、週 0 日の群で 0.6 時間に対し、週 1～4 日の群では 0.7 時間、週 5 日以上の群では 1.3 時間である。
- 睡眠時間が長くなる
  - 週 0 日の群で 7.0 時間に対し、週 1～4 日は 7.5 時間、週 5 日以上では 7.3 時間である。
- 自宅での食事時間が長くなる
  - 週 0 日の群で 1.1 時間に対し、週 1～4 日は 1.3 時間、週 5 日以上では 1.4 時間である。

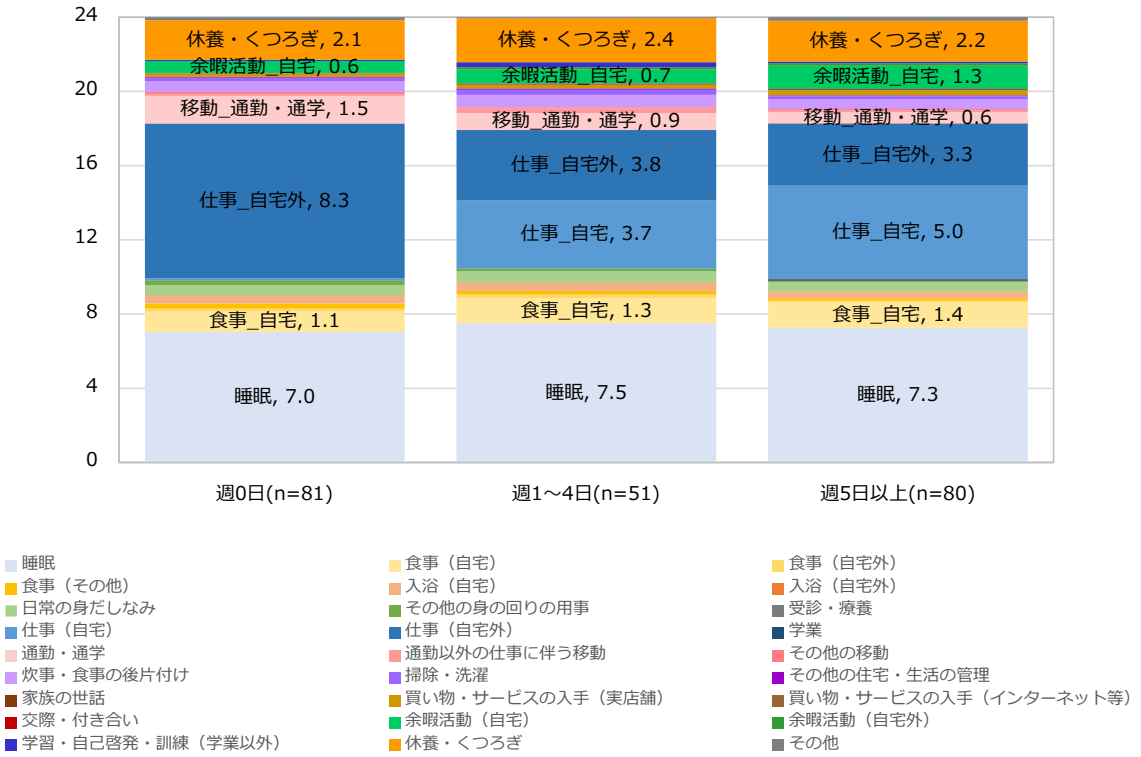


図 5.3.4-13 回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別 生活行動の平均時間（仕事日）

注）回答者自身の生活行動の平均時間

回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別に、休日における生活行動の平均時間を図 5.3.4-14 に示す。在宅勤務の実施頻度が高いほど、生活行動の平均時間は以下のように変化する傾向にあることが整理できる。

- 休養・くつろぎの時間が短くなる
  - 休養・くつろぎの時間は、週 0 日の群で 5.6 時間に対し、週 1～4 日、週 5 日以上の群では 4.5 時間である。
- 自宅、または自宅外での余暇活動の時間が長くなる
  - 週 0 日の群で合計 2.5 時間に対し、週 1～4 日は合計 2.8 時間、週 5 日以上では合計 4.3 時間である。

また、在宅勤務 週 1～4 日の群では、自宅外での余暇活動が 1.0 時間、交際・付き合いの時間が 0.7 時間となっており、他の群に比べ長い傾向にある。

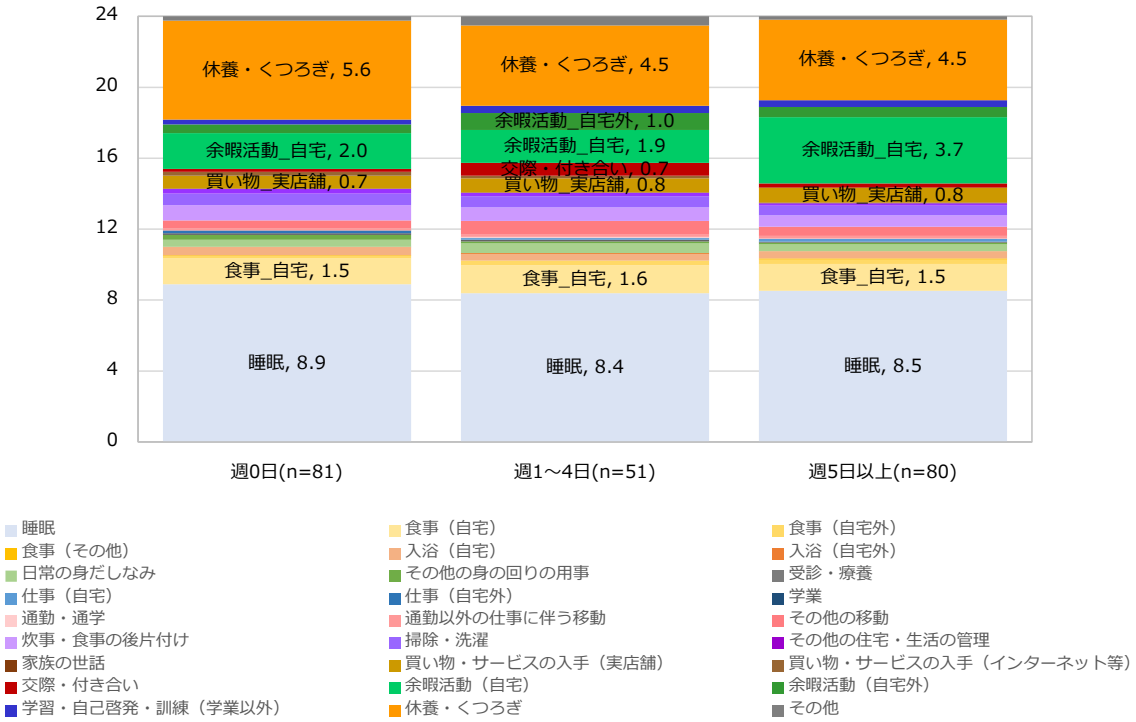


図 5.3.4-14 回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別 生活行動の平均時間（休日）

注）回答者自身の生活行動の平均時間

図 5.3.4-13、図 5.3.4-14 では、在宅勤務週 5 日の群にも「仕事（自宅外）」が含まれているため、ここでは、在宅勤務の実施頻度に関わらず、生活時間の回答対象日に終日在宅勤務をしていた人、終日自宅外で勤務していた人に区分して整理する。図 5.3.4-15 に回答者の終日在宅勤務/終日自宅外勤務別の仕事日における生活行動平均時間を示す。

終日在宅勤務の群では、「通勤時間がない」、「自宅での余暇活動、休養・くつろぎの時間が長い」、「睡眠時間が長い」、「自宅での食事時間が長い」といった前述の傾向が確認できる。

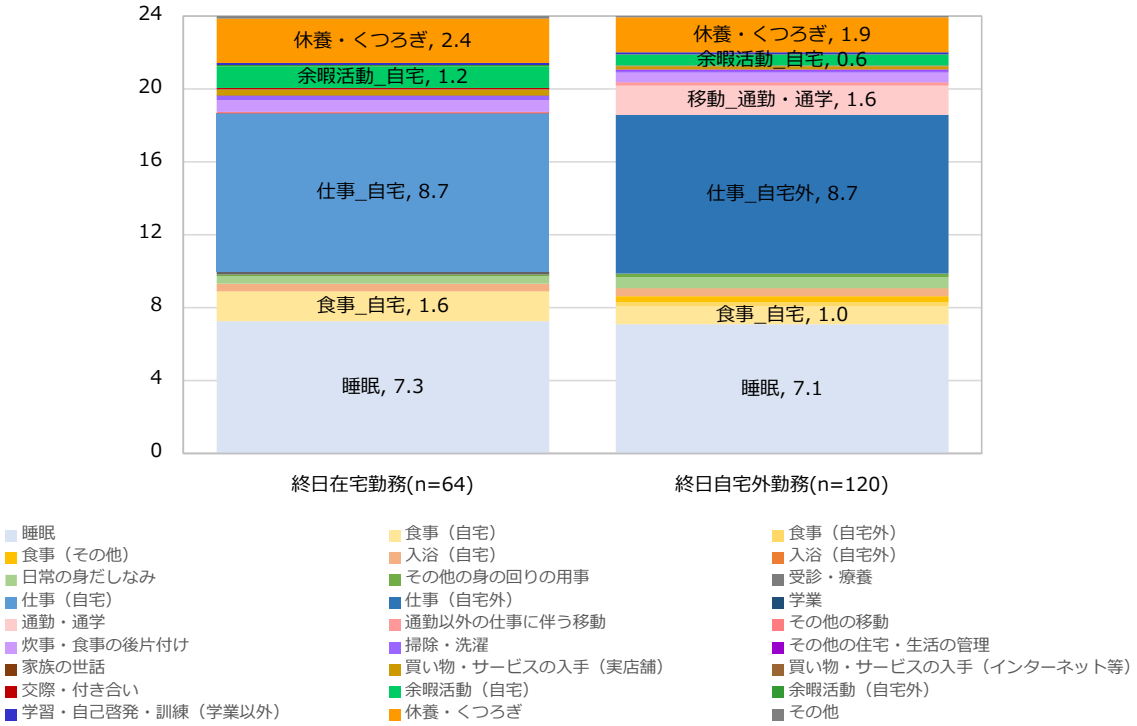


図 5.3.4-15 回答者の終日在宅勤務/終日自宅外勤務別
生活行動の平均時間（仕事日）

注 1）回答者自身の生活行動の平均時間

注 2）一日のうち、在宅勤務と自宅外勤務を両方行った人はサンプル数が少ないため、省略している。

注 3）1 日の仕事時間が 5 時間未満の回答も見られたため、ここでは当該回答を除外している。

図 5.3.4-16 に、回答者の仕事日が終日在宅勤務/終日自宅外勤務別の休日における生活行動平均時間を示す。終日在宅勤務の群では、「休養・くつろぎの時間が短い」、「自宅、または自宅外での余暇活動の時間が長い」といった前述の傾向が確認できる。

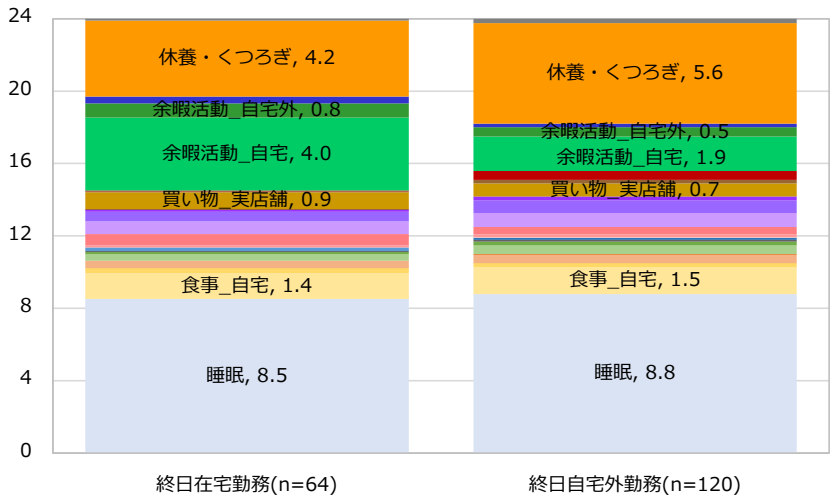


図 5.3.4-16 回答者の仕事日が終日在宅勤務/終日自宅外勤務別生活行動の平均時間（休日）

注 1）回答者自身の生活行動の平均時間

注 2）仕事日一日のうち、在宅勤務と自宅外勤務を両方行った人はサンプル数が少ないため、省略している。

c.　家計消費の変化

図 5.3.4-17 にふだんの世帯の在宅勤務実施頻度別の 2021 年 10 月における家計消費支出の平均を示す。支払総額は、在宅勤務の実施頻度が高いほど、高くなっている。また、交通費は、週 5 日以上が最も低くなっており、6,576 円である。

在宅勤務を実施している世帯は相対的に年収が高いため、それに伴って支払総額も高くなっていると考えられるが、交通費はその傾向は見られない。在宅勤務が増えることにより、移動する機会が減るため、交通費が減少していると考えられる。

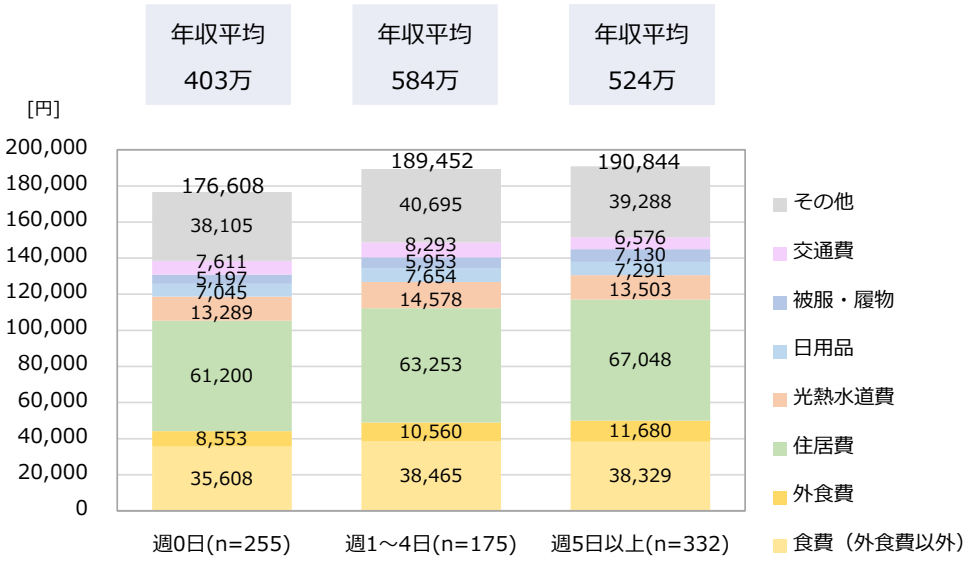


図 5.3.4-17 ふだんの世帯の在宅勤務実施頻度別
2021 年 10 月の家計消費支出（平均）

注）世帯全体の消費支出を示す。

d.　自宅での調理頻度の変化

図 5.3.4-18 に世帯類型別・ふだんの世帯の在宅勤務実施頻度別の 2021 年 10 月 1 週間あたりの調理食数を示す。なお、ここにおける「調理食数」とは、コンロ、クッキングヒーターを使用した調理で作った食事の量である。

単身世帯においては、週 5 日以上の群で「週に 6 食以上」(1 日 1 食以上は調理する)の割合が高い。また、夫婦世帯では、在宅勤務実施頻度が高いほど、「調理しない」の割合が高い。

「在宅勤務が増えるほど、調理頻度も増える」と仮説を立てていたが、必ずしもそうとは限らない。平日の自宅での食事時間が増える中、毎度調理する手間を負担に感じる家庭では、調理頻度が減る可能性がある。

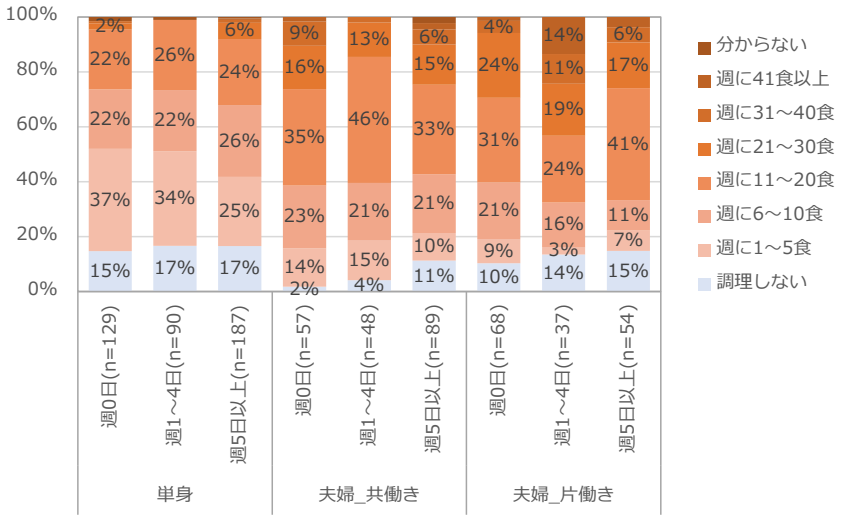


図 5.3.4-18 世帯類型別・ふだんの世帯の在宅勤務実施頻度別 2021 年 10 月の 1 週間あたりの調理食数

注 1）調理食数には、お弁当、作り置きも含んでいる。
注 2）世帯全体での調理食数を示している。
毎日 3 回、2 人分の調理をした場合、2(食)×3(回/日)×7(日)=42 食となる。
注 3）卓上のコンロやクッキングヒーターによる調理も含む

e. 身だしなみにかける負担の変化

図 5.3.4-19 に回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別の直近 1 年間のビジネス用衣服の購入金額平均値を示す。ビジネス用衣服の購入金額は在宅勤務の実施頻度が高い程低くなっている。これは、在宅勤務を実施している人の年収が高い傾向に反する傾向である。

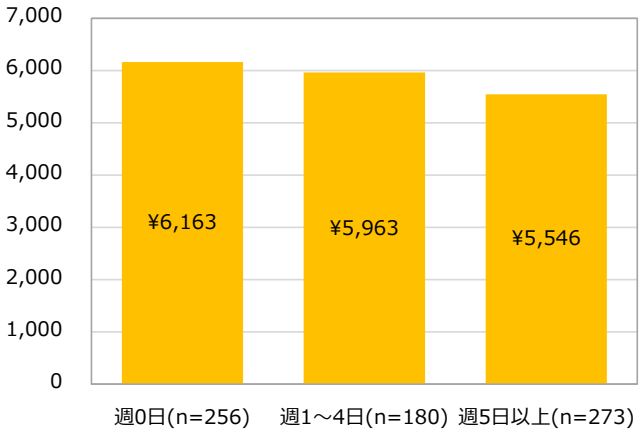


図 5.3.4-19 回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別 直近 1 年間のビジネス用衣服の購入金額（平均）

注）回答者自身の購入金額を示している。

図 5.3.4-20 に、回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別の直近 1 年間の化粧品、整髪剤の購入金額平均値を示す。特に化粧品の購入金額において、在宅勤務の実施頻度が高い程低くなっている。これは、在宅勤務を実施している人の年収が高い傾向に反する傾向である。

これらのことから、身だしなみに関わる商品の購入金額が減っており、「在宅勤務が増えるほど、身だしなみにかける負担が減る」という傾向を確認することできる。

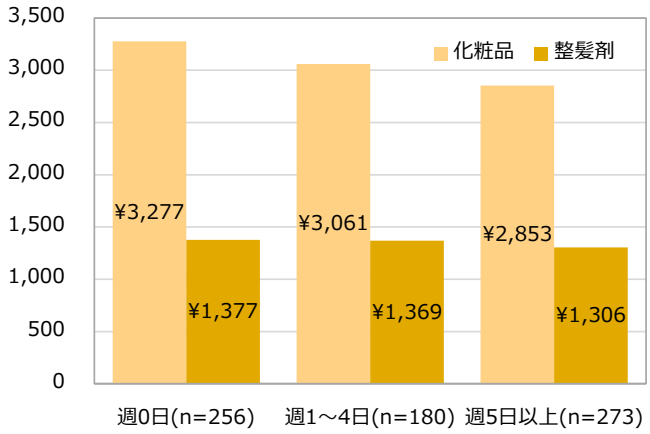


図 5.3.4-20 回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別直近 1 年間の化粧品、整髪剤の購入金額（平均）

注）回答者自身の購入金額を示している。

f.　今後も在宅勤務は増えていくのか

図 5.3.4-21 に回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別の新型コロナウイルス前後のオフィス面積の変化を示す。在宅勤務の実施頻度週 1 日以上の群では、「勤務先のオフィス面積が縮小した」または「縮小することが決まっている」とした回答比率が 1 割に上っている。

新型コロナウイルス感染症が拡大したことで、在宅勤務の普及が急速に進んできたが、今後も在宅勤務を前提とした体制を検討している企業が増えていることが窺える。

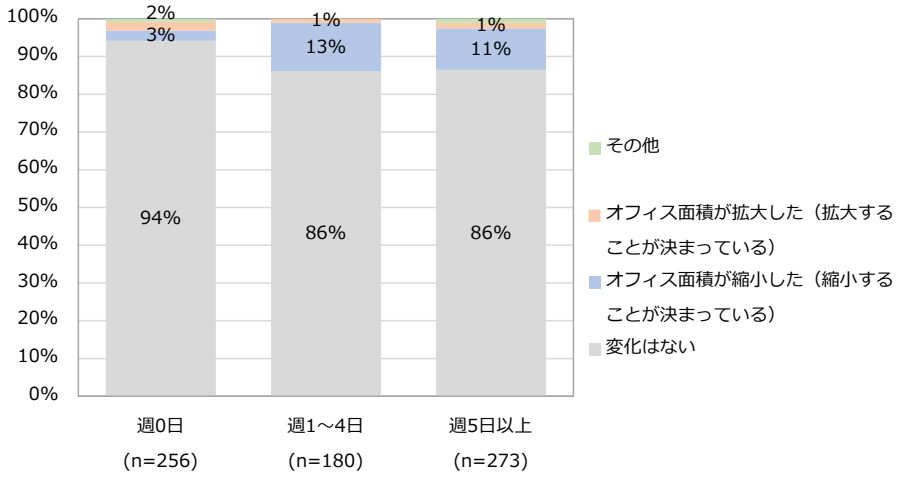


図 5.3.4-21 回答者の 10 月における在宅勤務実施頻度別
新型コロナウイルス前後のオフィス面積の変化

図 5.3.4-22 に在宅勤務を実施するメリットを示す。「通勤時間を削減できる」、「身支度のための時間やコストをかけなくて済む」、「新型コロナウイルスの感染リスクを下げることができる」の順で「当てはまる」（7 段階評価中、5 以上）の回答率が高い。一方、「個人的には出社したいが、会社方針に従って在宅勤務を行っている」に「当てはまらない」（3 以下の評価）とする割合は過半数となっている。

このことから、コロナ禍の会社方針でやむを得ず在宅勤務をする人は少なく、今後も勤労者個人としては在宅勤務が志向されることが予想される。

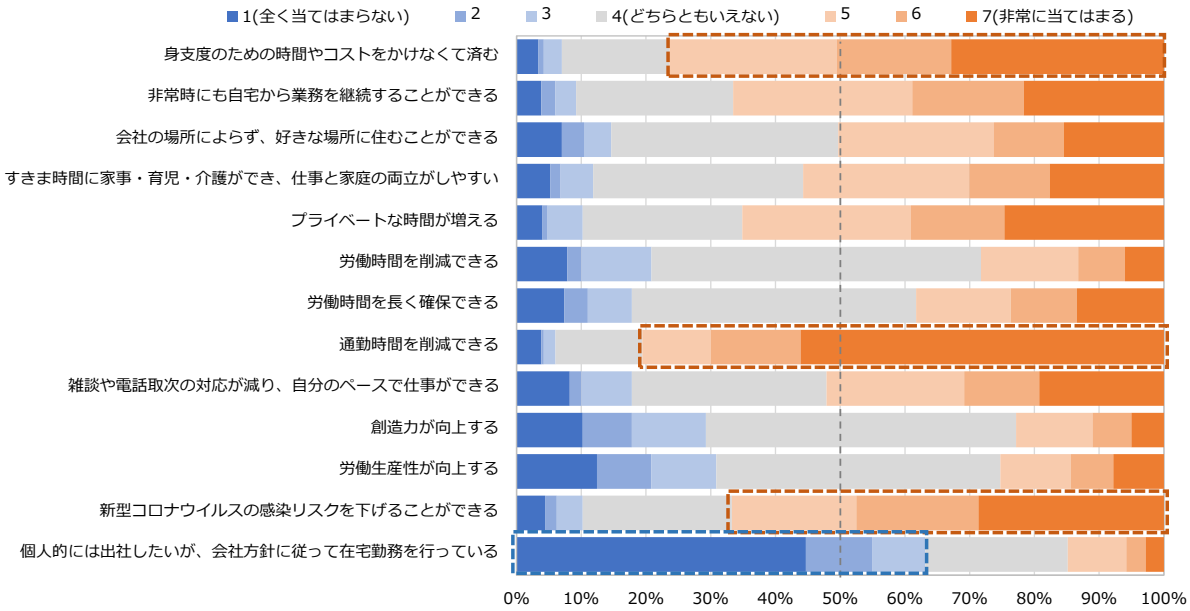


図 5.3.4-22 在宅勤務を実施するメリット（n=499）

注）回答者には、在宅勤務が可能な職種・職場であるが、2021 年 10 月時点で全く実施していない人も含む。

一方で、総務省の通信利用動向調査では、テレワーク実施経験がない人のテレワーク希望率が 18%となっており、職種の性質上、テレワークが馴染まない場合等には、今後もテレワークが進まない可能性もある。

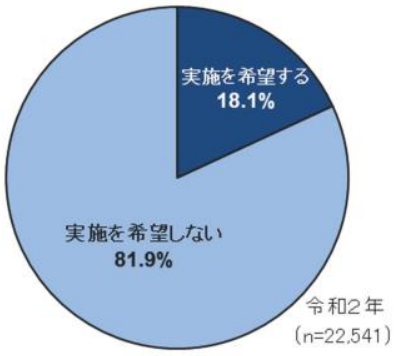


図 5.3.4-23 テレワーク実施希望の有無

出典）総務省「令和 2 年通信利用動向調査」

③　ネットショッピングの利用頻度別の結果

a.　ネットショッピング利用世帯の特徴

ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別に、ふだんの世帯の在宅勤務実施頻度を図 5.3.4-24 に示す。ネットショッピングの利用頻度が高い世帯は、在宅勤務の実施頻度が高い世帯の比率が高い。

在宅勤務を実施する人がいる世帯では、在宅時間が長いことから、ネットショッピングを利用する機会が増える可能性がある。

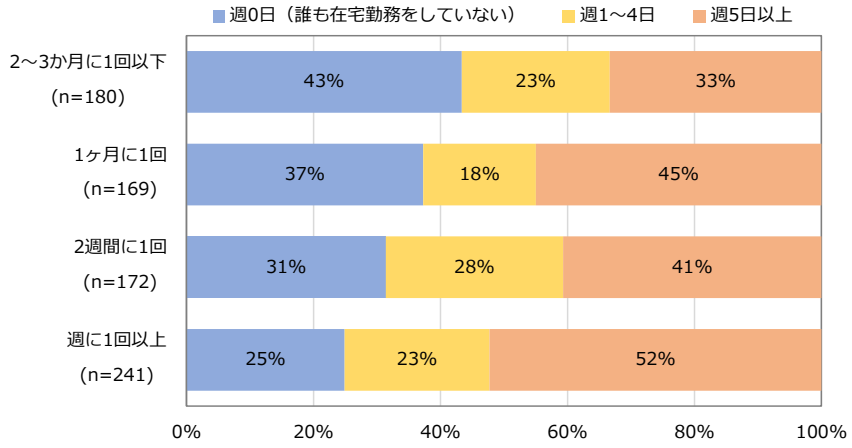


図 5.3.4-24 ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別
ふだんの世帯の在宅勤務実施頻度

図 5.3.4-25 にふだんの世帯のネットショッピングの利用頻度別の世帯年収を示す。ネットショッピングの利用頻度が 2 週間に 1 回以下では、利用頻度が高いほど年収が高い。一方で、ネットショッピングの利用頻度が週に 1 回以上では、上記傾向と異なる。

このことから、年収が高いほどネットショッピングの利用が増える可能性はあるが、週に 1 回以上の高頻度でネットショッピングを利用する世帯は、年収に関係なく他の要因により、利用頻度が高まっていると考えられる。

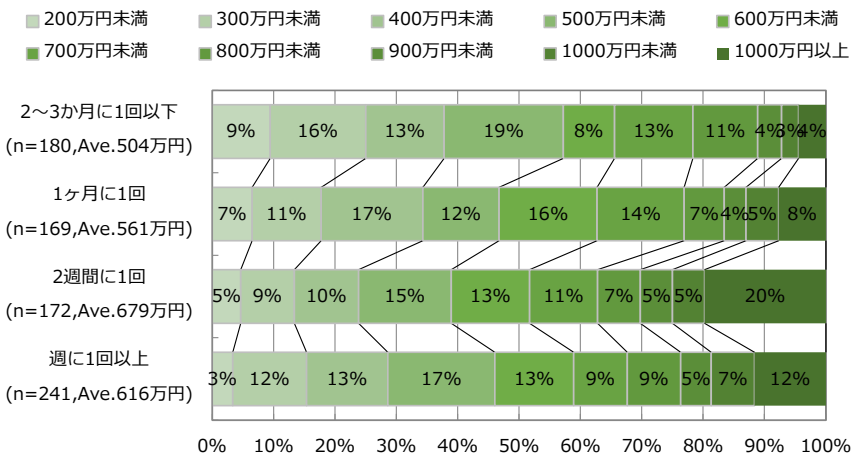


図 5.3.4-25 ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別 世帯年収

b.　生活行動の変化

図 5.3.4-26 にふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別の休日における生活行動平均時間を示す。ネットショッピングの利用頻度が高いほど、生活行動の平均時間は以下のように変化する傾向にある。

- 休養・くつろぎの時間が短くなる
  - 2～3ヶ月に1回以下の群では5.9時間に対し、1ヶ月に1回以上の群では、4.8時間以下となっている。
- 自宅、または自宅外での余暇活動の時間が長くなる
  - 2～3ヶ月に1回以下の群では合計2.4時間に対し、1ヶ月に1回以上の群では、合計2.9時間以上となっている。

ネットショッピングの利用頻度が高い世帯は在宅勤務の実施頻度も高い傾向にあり、上記の生活行動の変化は在宅勤務の増加による影響が強い可能性がある。



図 5.3.4-26 ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別生活行動の平均時間（休日）

注）回答者自身の生活行動の平均を示している。

図 5.3.4-27 にふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別の食料品の 1 ヶ月あたりの購入回数平均値を示す。実店舗での食料品購入の平均回数は、ネットショッピングの利用頻度に関わらず、月 17 回前後となっている。一方、ネットでの食料品購入の平均回数は、ネットショッピングの利用頻度が高いほど多くなっている。

このことから、ネットショッピングの利用頻度が増えても、実店舗に行く生活行動は大きく減少する可能性は低いと考えられる。今後、ネットショッピングの利用が増えた際、実店舗に出向いて買い物をする頻度が大きく変わらず、一方でネット購入の回数が増えたとすると、結果として全体の輸送量は増加すると推察される。ただし、東京近郊に居住する、就業者のいる世帯に限定した調査結果となるため、交通の便が悪い地域に居住世帯や、就業者のいない世帯では傾向が異なる可能性もある。

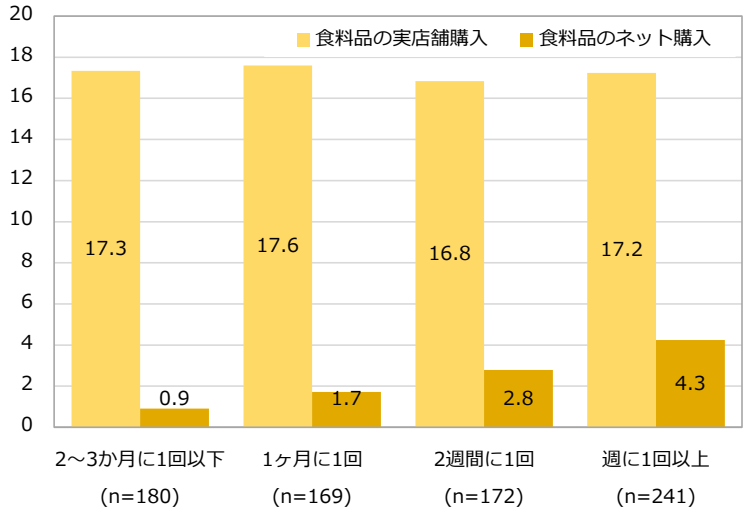


図 5.3.4-27 ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別
食料品の 1 ヶ月あたりの購入回数（平均）

注）世帯全体の購入回数を示している。

c. 家計消費の変化

図 5.3.4-28 にふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別の 2021 年 10 月の家計消費支出（平均値）を示す。支払総額は、ネットショッピング利用頻度が高いほど、高くなっている。また、2 週間に 1 回の群に比べ、週に 1 回以上の群では交通費や被服・履物、日用品、光熱水道費、食費（外食費以外）が高い傾向にある。

ネットショッピングの利用頻度 2 週間に 1 回以下では、利用頻度が高いほど年収が高いため、それに伴って支払総額も高くなっていると考えられるが、週に 1 回以上の群は、2 週間に 1 回の群より年収が低い一方、複数の支払項目が高く、年収に関係なく消費支出の多いライフスタイルの世帯が多い可能性がある。

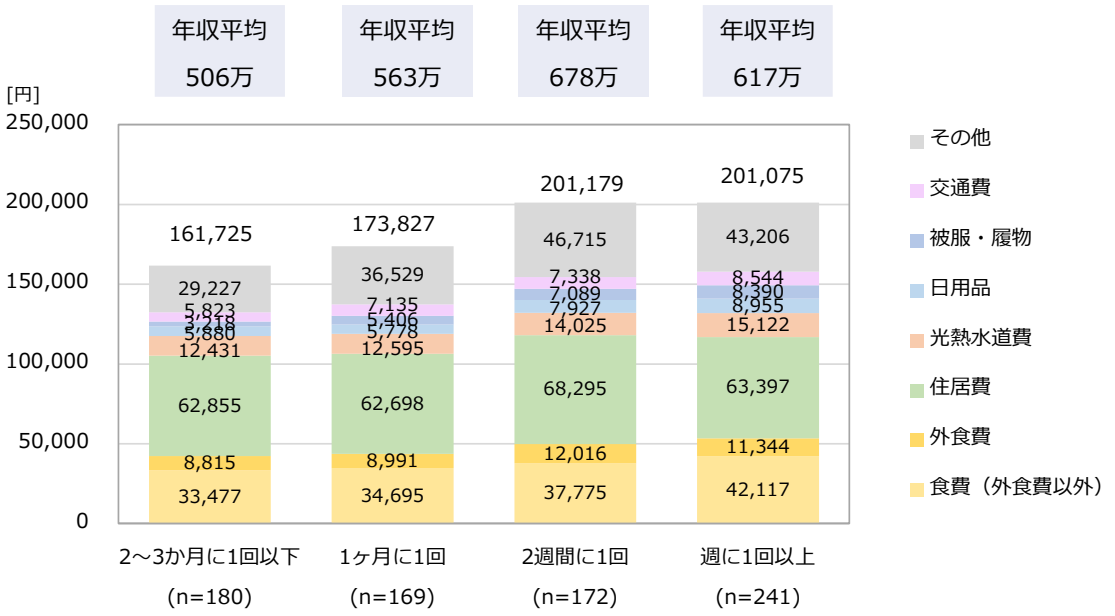


図 5.3.4-28 ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別
2021 年 10 月の家計消費支出（平均）

注）世帯全体の消費支出を示している。

d. 宅配便の再配達への影響

図 5.3.4-29 にふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別 宅配便の不達率を示す。ここで、不達率とは宅配便を配達に行った回数のうち、住人不在で不達となった回数の割合を指す。ネットショッピングの利用頻度が 2 週間に 1 回以上では、1 ヶ月に 1 回未満の群に比べ、3～5%ポイント低くなっている。

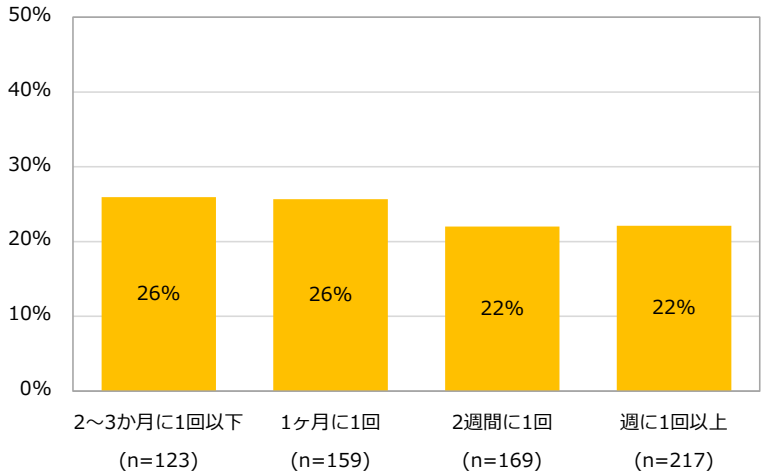


図 5.3.4-29 ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別 宅配便の不達率

注 1）2021 年 10 月に宅配便を受け取った世帯のみを示している。

注 2）不達率=不在票が入った回数/（不在票入った回数＋荷物を受け取った回数）

ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別に、不在時の宅配便受取りに利用しているサービスを図 5.3.4-30 に示す。2～3 ヶ月に 1 回以下では置き配の利用率が 32%であるのに対し、1 ヶ月に 1 回以上では、5 割前後となっている。

これらのことから、ネットショッピングの利用頻度が高い世帯では、置き配（宅配ボックスや置き場所指定）の利用が多く、再配達が低減されていると考えられる。

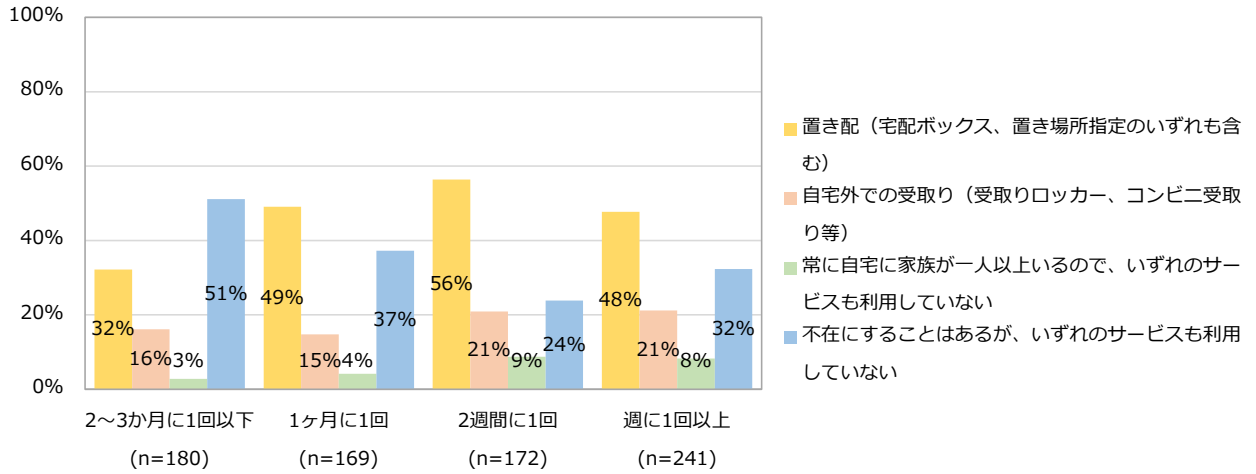


図 5.3.4-30 ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別
不在時の宅配便受取りに利用しているサービス

なお、令和 3（2021）年 10 月に国土交通省が調査した再配達率は、表 5.3.4-10 に示すとおり、都市部近郊で 11.3%となっている。本調査における不達率の数値は、国土交通省が公表する再配達率に比べ数値が高いが、本調査は単身（就業者）・夫婦（就業者あり）世帯のみに限定している点や、回答者の主観で回数が回答されている点等が影響していると考えられる。

表 5.3.4-10 宅配便の再配達率

【調査結果】　　単位：個

	（今回調査）令和 3 年 10 月（調査期間:R3/10/1～10/31）			（参考:前年同月調査）令和 2 年 10 月（調査期間:R2/10/1～10/31）			（参考:前々年同月調査）令和元年 10 月（調査期間:R1/10/1～10/31）		
	総数	再配達数	再配達率	総数	再配達数	再配達率	総数	再配達数	再配達率
都 市 部	979,872	127,031	13.0%	990,957	115,631	11.7%	839,143	139,158	16.6%
都市部近郊	1,500,622	169,903	11.3%	1,559,643	175,134	11.2%	1,325,342	189,901	14.3%
地 方	145,449	15,175	10.4%	150,202	16,487	11.0%	130,910	15,080	11.5%
総 計	2,625,943	312,109	11.9%	2,700,802	307,252	11.4%	2,295,395	344,139	15.0%

※大手宅配事業者 3 社の合計数値

注 1）再配達率=再配達数÷総数

注 2）都市部：東京 23 区で人口密度が高く単身世帯の占める割合が高い区

都市部近郊：東京都郊外の市町村で世帯人口が多いところ

地方：人口の少ない都道府県の市町村で人口密度が低く世帯人口が多いところ

出典）国土交通省「宅配便の再配達率サンプル調査」令和 3 年 10 月期

e. ネットショッピングでよく購入されるもの

図 5.3.4-31 にふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別の衣服・服飾品のネット購入率を示す。衣服・服飾品のネット購入率は、ネットショッピングの利用頻度が高いほど高くなり、ネットショッピングの利用頻度が 2 週間に 1 回以上では 3 割以上となっている。

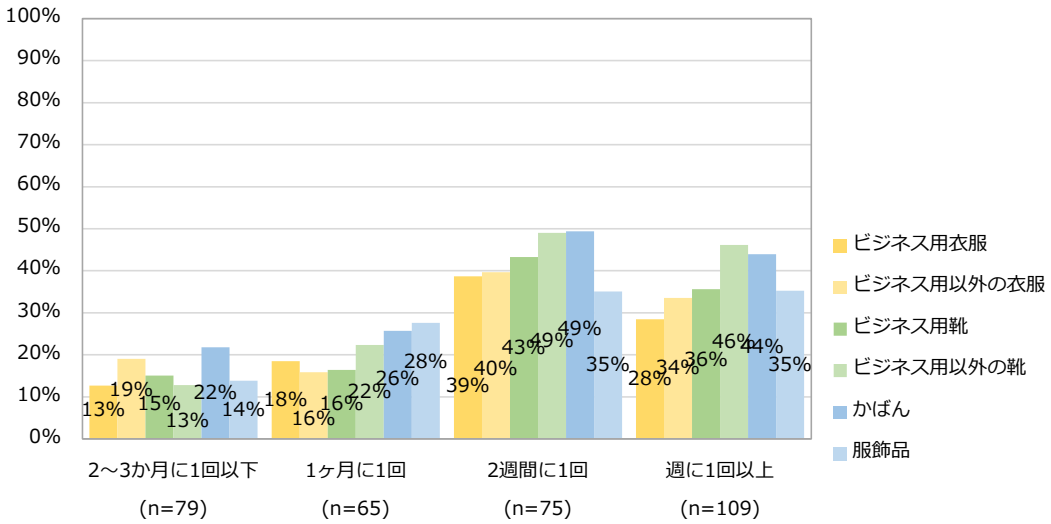


図 5.3.4-31 ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別
衣服・服飾品のネット購入率

注）各商品の主な購入先がネットショップである回答者の割合

図 5.3.4-32 にふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別の日用品・書籍のネット購入率を示す。健康保持用摂取品や保健医療用品、書籍（紙媒体）等の商品は、ネットショッピングの利用頻度が高いほど、ネット購入率が高まる傾向が見られる。特に健康保持用摂取品はネット購入率が最大で 65%と他の商品に比べ非常に高い。

健康保持用摂取品等は、SNS やインターネットにおいて広告が頻繁に表示されることも多く、ネットショッピングの利用増加につながる可能性がある。また、健康保持用摂取品は定期購入形式である場合が多く、結果的に世帯全体の「ネットショッピングの利用頻度」が高まっている可能性もある。

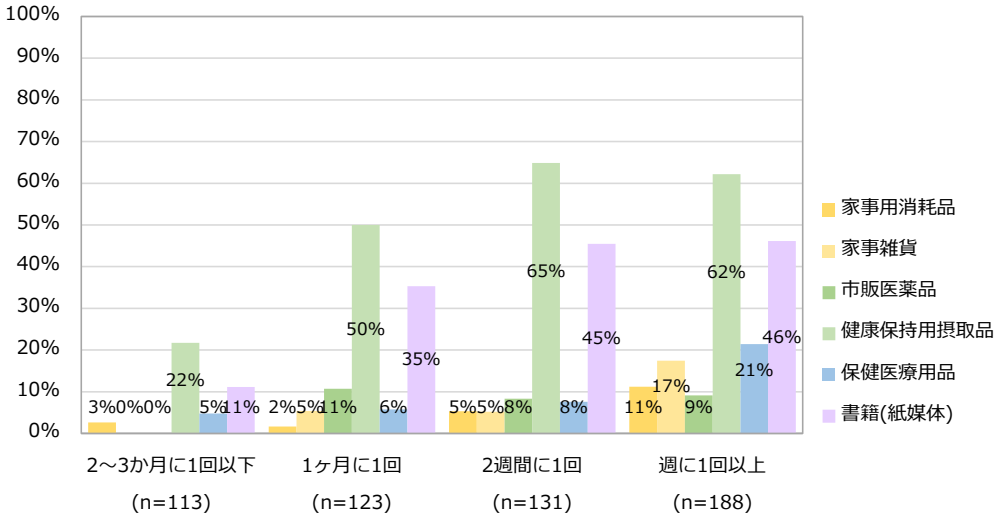


図 5.3.4-32 ふだんの世帯のネットショッピング利用頻度別
日用品・書籍のネット購入率

注 1）各商品の主な購入先がネットショッピングである回答者の割合
注 2）家事用消耗品：洗剤、ラップ、ポリ袋、ティッシュ、トイレットペーパー等
家事雑貨：食器、食卓用品、台所用品等
市販の医薬品：風邪薬、胃腸薬、栄養剤、外傷・皮膚病薬、その他外用薬等
健康保持用摂取品：サプリメント、青汁等
保健医療用品：おむつ、マスク、生理用ナプキン、入浴剤等

ネットショッピング利用頻度の高い世帯では、衣服や健康保持用摂取品、保健医療用品、書籍（紙媒体）等のネット購入率が高くなっている。このことから、今後ネットショッピングの増加した場合、これらの販売量が増加する可能性がある

表 5.3.4-11 に本調査と電子商取引実態調査（経済産業省）における各種商品のネット購入率の比較を示す。電子商取引実態調査では、衣服・服装雑貨等が 19.44%（2020 年度）、書籍・映像・音楽ソフトが 42.97%（2020 年度）となっており、本調査と同様に、特にネットショッピングを利用した購入である割合が高いことが確認できる。

なお、電子商取引実態調査は、BtoC-EC 全体の市場規模により EC 化率を求めている。一方、本調査は単身（就業者）・夫婦（就業者あり）世帯のみに限定している点、回答者の主観で「主な購入先」が回答されている点が電子商取引実態調査と異なる。

表 5.3.4-11 本調査と電子商取引実態調査における各種商品のネット購入率の比較

本調査		電子商取引実態調査		
品目	ネット購入率(全体平均)	品目	EC 化率 2019 年	EC 化率 2020 年
食料品	–	食品、飲料、酒類	2.89%	3.31%
化粧品	33.8%	化粧品、医薬品	6.00%	6.72%
市販医薬品（風邪薬、胃腸薬、栄養剤、外傷・皮膚病薬、その他外用薬等）	8.0%			
衣服、服飾品関係	30.1%	衣類、服装雑貨等	13.87%	19.44%
家事用消耗品（洗剤、ラップ、ポリ袋、ティッシュ、トイレットペーパー等）	5.9%		–	–
家事雑貨（食器、食卓用品、台所用品等）	9.3%	生活雑貨、家具、インテリア	23.32%	26.03%
健康保持用摂取品（サプリメント、青汁等）	56.1%		–	–
保健医療用品（おむつ、マスク、生理用ナプキン、入浴剤等）	11.5%		–	–
書籍（紙媒体）	38.2%	書籍、映像、音楽ソフト	34.18%	42.97%

出典）経済産業省「電子商取引実態調査」2019,2020 年度

f. 今後もネットショッピングの利用は増えていくのか

図 5.3.4-33 にネットショッピングの利用する理由を示す。ほとんどの項目でネットショッピングを利用する理由として「当てはまる」（7 段階評価中、5 以上）の回答率が 50%以上となっている。

ネットショッピングの利用が便利であると認識する世帯は多く、今後もネットショッピング利用は増加していく可能性がある。

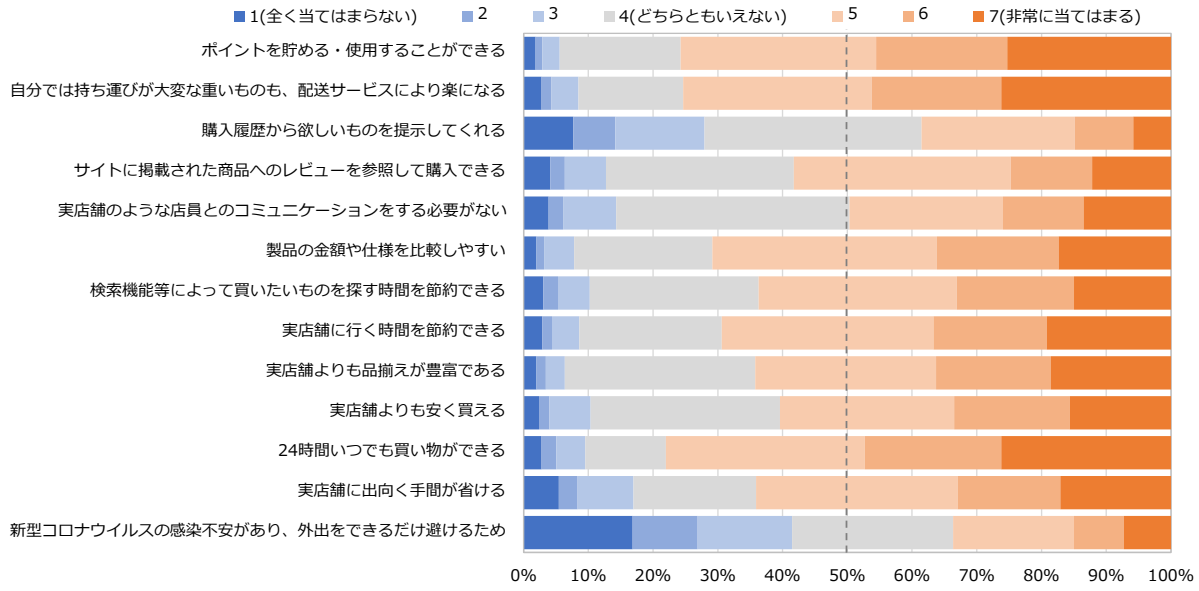


図 5.3.4-33 ネットショッピングを利用する理由（n=755)

注）ネットショッピングを全く利用しない人を除く

(4) まとめ

生活行動・消費行動に関するアンケート調査では、生活行動に加え、需要の代替変数となりうる消費支出、エネルギー消費量を一体的に把握し、これらの関係性について考察した。特に「ネットショッピングの増加」と「在宅勤務の増加」といった生活行動の変化が及ぼす影響に焦点をあてている。

a. 在宅勤務の増加による影響

在宅勤務の増加による生活行動や消費支出の変化として、以下のように整理される。

- 通勤時間がなくなることにより、在宅勤務を行う人は、仕事日における自宅での余暇活動や休養・くつろぎの時間が増える。一方、休日には、休養・くつろぎの時間は短くなり、自宅・自宅外での余暇活動の時間が長くなる。
- 在宅勤務を行う人は通勤時間がなくなることから、出社日より起床時間を遅らせることができ、睡眠時間が長くなる。
- 在宅勤務を行うことで、平休日含め移動の機会が減り、交通費が減少する傾向にある。
- 在宅勤務により自宅での食事時間が増え、毎度調理する手間を負担に感じる家庭では、調理頻度が減る可能性がある。
- 在宅勤務を行う人は、身だしなみにかける負担が減る傾向にある。

b. ネットショッピングの増加による影響

ネットショッピングの増加による生活行動や消費支出の変化としては、以下のように整理される。

- ネットショッピングの利用頻度が高い世帯においても、実店舗に出向いて買い物をする頻度は大きく変わらないため、結果として全体の輸送量は増加する可能性がある。
- ネットショッピングの利用頻度が高い世帯では、置き配（宅配ボックスや置き場所指定）の利用が多くなっており、再配達が低減されていると考えられる。
- 各商品の中でも特に衣服関係や健康保持用摂取品、保健医療用品、書籍（紙媒体）などをネットショップで購入されることが多く、ネットショッピングの増加によりこれらの販売量が増加する可能性がある。

なお、本調査では、単身・夫婦世帯の就業者がいる世帯、かつ東京近郊に居住する世帯を抽出した結果を整理した。同居家族が 3 人以上いる世帯や就業者がいない世帯、居住地域によっても、傾向は異なることが推測される。より多様な世帯属性を考慮した際に、どのような傾向の違いが生じるかを検討する必要がある。

5.3.5　生活行動モデルの定量化

本章では、アンケート調査結果を用いて生活行動モデルの定量化を行う。

(1) 検討するモデルについて

モデルの構築にあたっては、重回帰分析と共分散構造分析（以下、SEM：Structural Equation Modeling という）を用いる。重回帰分析は目的変数と説明変数の関係を直接分析する手法であり、SEM は観測データを基に構成概念間や観測変数間の関連性を検討することが可能な手法で重回帰分析の上位モデルと位置付けることができる。

図 5.3.5-1 に重回帰分析と SEM の違いのイメージを示す。重回帰分析では在宅勤務の増加と家庭の光熱費支出の変化を直接分析するできる有用な手法でモデルの構築は比較的容易である。一方、SEM は重回帰分析と違いモデル構築の難易度が高いが、例えば、在宅勤務の増加によって、自宅と会社での勤務時間に影響を及ぼしその結果、光熱費支出に影響を及ぼすという構造をモデルで表現することができる。

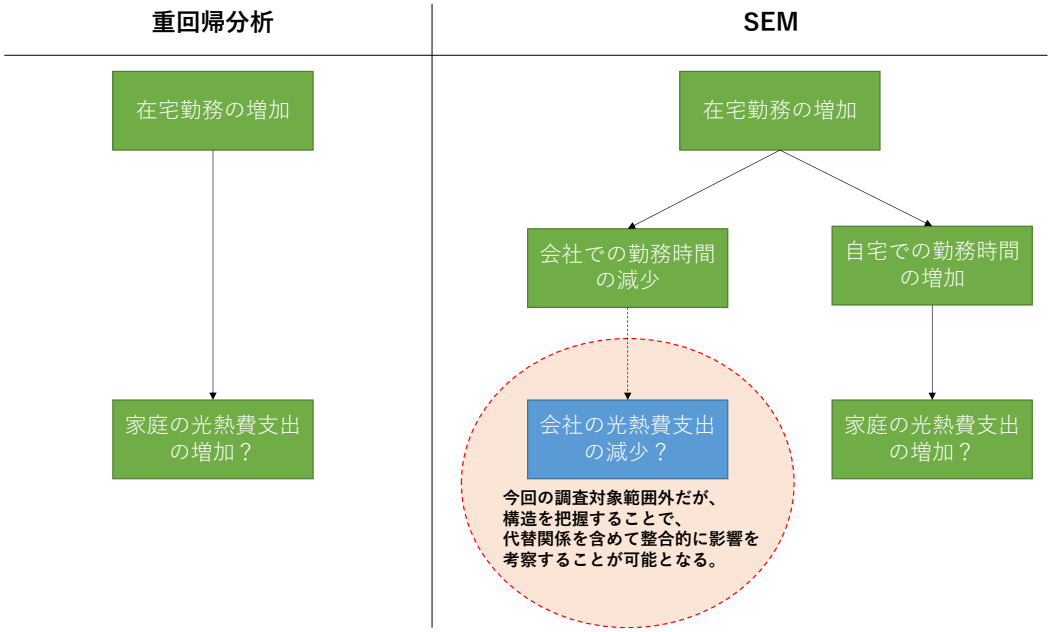


図 5.3.5-1 重回帰分析と SEM の違いのイメージ

(2) モデルに用いるデータ概要

表 5.3.5-1 にクロス集計有効世帯数と SEM 有効世帯数を示す。SEM の分析を行うため、各変数の不明、無回答、分からないなどを全て除いた結果、164 世帯となった。性別、年齢、世帯構成についてはクロス集計有効世帯と大きな偏りは見られない。

表 5.3.5-1　クロス集計有効世帯数と SEM 有効世帯数

回答者性別

	男性	女性	n
クロス集計有効世帯	69%	31%	709
SEM有効世帯	62%	38%	164

回答者年齢

	20～29歳	30～39歳	40～49歳	50～59歳	60～65歳	n
クロス集計有効世帯	4%	14%	24%	40%	18%	709
SEM有効世帯	4%	18%	22%	38%	18%	164

就業を加味した世帯構成

	一人暮らし_就業	夫婦_共働き	夫婦_片働き	その他	n
クロス集計有効世帯	57%	27%	14%	1%	709
SEM有効世帯	53%	35%	12%	0%	164

図 5.3.5-2 に基本属性と支出の関係を示す。支出については 5.3.4 節(1) d. ｳ)に示す定義となっている。世帯人数と支出については正の相関がみられ、食料品費と光熱水道費の相関係数が特に高い。世帯年収と支出についても正の相関がみられるものの、年収が高くなるについて支出の増加率が小さくなっている。また、住居費については、上に凸の分布となっており、世帯年収が高い世帯は持ち家が多くなることで住居費が少なくなっている可能性がある。在宅勤務頻度と支出については、全体的に相関係数が小さく傾きも小さい。交通費については負の相関となっており、在宅勤務が多くなると通勤の定期代支給がなくなり、定期券を使った休日の移動ができないため、交通費が多くなると予想していたが逆の結果となった。要因として、コロナ禍の影響で在宅勤務が多い世帯は休日の外出が少なくなっている可能性が考えられる。

次節以降、重回帰分析と SEM による統計解析を行う。一部非線形関係も含まれているものの、線形を仮定しても分析に大きな影響はないと判断し分析を進める。

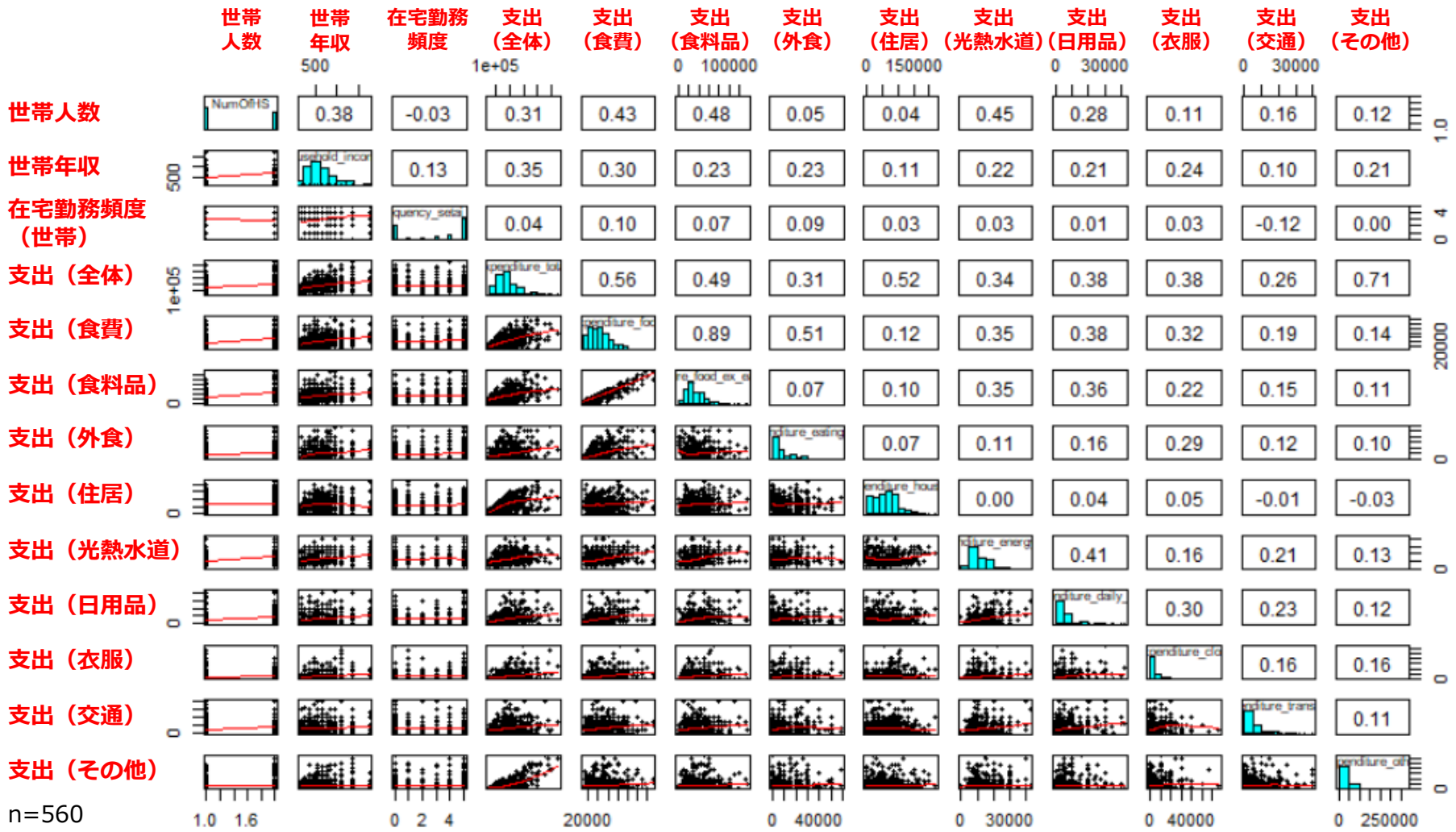


図 5.3.5-2 基本属性と支出の関係

注）図中の数値は相関係数

(3) 重回帰分析によるアプローチ

本節では、重回帰分析を用いて生活行動時間、使い方、支出を目的変数に分析を行う。決定係数を高めるためにはステップワイズを用いる方法もあるが、その場合、説明変数の選択が目的変数によって変化し、モデル間の偏回帰係数の関係性に意味がなくなる。そこで、基本属性である世帯人数、年収、在宅勤務日数の 3 変数を説明変数として分析を行う。

a. 生活行動時間

表 5.3.5-2 に各生活行動時間（平日）に関する重回帰分析結果を示す。在宅勤務日数が $p<0.05$ の生活行動時間は下記の 6 種類であった。通勤の時間と自宅外での仕事時間が減少する分、自宅での仕事時間、自宅での余暇活動時間が増加している。

- 食事_自宅外_その他　　：－0.04 時間/日
- 身の回りの用事_その他　　：－0.04 時間/日
- 仕事_自宅　　：＋1.1 時間/日
- 仕事_自宅外　　：－1.1 時間/日
- 移動_通勤・通学　　：－0.2 時間/日
- 余暇活動_自宅　　：＋0.1 時間/日

注）上記の値は在宅勤務日数が 1 週間に 1 日増加する場合の影響である。

表 5.3.5-2　各生活行動時間（平日）に関する重回帰分析結果

	切片	世帯人数	個人年収	在宅勤務日数（回答者）	n	R2	調整済R2
単位	時間	時間/人	時間/万円	時間/（日/週）	世帯	-	-
睡眠	**7.0**	0.3	-0.0	0.1	164	0.04	0.02
食事_自宅	0.6	0.4	0.0	0.1	164	0.05	0.03
食事_自宅外_外食	**0.3**	-0.0	-0.0	-0.0	164	0.01	-0.00
食事_自宅外_その他	**0.3**	-0.1	0.0	**-0.04**	164	0.07	0.05
入浴_自宅	**0.4**	0.0	0.0	-0.0	164	0.00	-0.02
入浴_自宅外	0.1	-0.0	0.0	-0.0	164	0.03	0.01
身の回りの用事_日常の身だしなみ	**0.8**	-0.1	-0.0	-0.0	164	0.03	0.01
身の回りの用事_その他	0.2	-0.0	0.0	**-0.04**	164	0.04	0.03
受診・療養	0.0	-0.0	0.0	0.0	164	0.02	-0.00
仕事_自宅	-0.5	-0.2	**0.0**	**1.1**	164	0.39	0.38
仕事_自宅外	**8.7**	-0.7	0.0	**-1.1**	164	0.36	0.35
学業	0.0	-0.0	-0.0	0.0	164	0.02	0.00
移動_通勤・通学	**1.4**	0.1	-0.0	**-0.2**	164	0.16	0.14
移動_通勤以外の仕事に伴う移動	0.4	-0.1	-0.0	-0.0	164	0.01	-0.01
移動_その他	-0.1	0.1	-0.0	-0.0	164	0.02	0.00
住宅・生活の管理_炊事、食事の後片付け	**0.8**	0.1	**-0.0**	-0.0	164	0.08	0.06
住宅・生活の管理_掃除、洗濯	**0.2**	0.0	**-0.0**	0.0	164	0.09	0.07
住宅・生活の管理_その他	0.0	0.0	0.0	-0.0	164	0.00	-0.02
家族の世話	-0.1	0.0	**0.00**	-0.0	164	0.07	0.05
買い物_実店舗	**0.5**	**-0.2**	-0.0	0.0	164	0.06	0.04
買い物_インターネット等	0.0	0.0	-0.0	-0.0	164	0.00	-0.02
交際・付き合い	0.1	-0.0	0.0	0.0	164	0.02	-0.00
余暇活動_自宅	0.5	0.3	-0.0	0.1	164	0.05	0.03
余暇活動_自宅外	0.1	-0.1	0.0	0.0	164	0.02	-0.00
学習・自己啓発・訓練_学業以外	0.1	-0.0	0.0	0.0	164	0.02	0.00
休養・くつろぎ	**2.3**	0.0	-0.0	0.1	164	0.01	-0.01
その他	-0.1	0.2	-0.0	0.0	164	0.02	0.00

注）$p < 0.05$：黄色のハイライト、$p < 0.01$：太字

b.　使い方

表 5.3.5-3～表 5.3.5-4 に機器等の使い方に関する重回帰分析結果を示す。在宅勤務日数の増加に伴い、PC 使用時間が増えている。TV 使用時間、調理食数については、有意差は見られないものの係数は正となっている。また、回答者の使い方については在宅勤務日数が増えるほどシャワーのみ入浴回数、照明の使用頻度が高くなっている。シャワーのみ入浴回数が増えるのは、本調査を実施した時期は秋で気温が高くも低くもなく、外出していないことからシャワーだけで済ます人が増えたためと思われる。

表 5.3.5-3　世帯における機器等の使い方に関する重回帰分析結果

	切片	世帯人数	世帯年収	在宅勤務日数（世帯）	n	R2	調整済R2
単位の分母 / 目的変数[単位の分子]	－	人/世帯	万円	日/週	世帯	－	－
TV使用時間 [時間/日]	**3.2**	0.5	-0.0	0.1	560	0.01	0.00
デスクトップPC使用時間 [時間/日]	**2.4**	-0.6	-0.0	**0.2**	560	0.03	0.02
ノートPC使用時間 [時間/日]	**2.0**	-0.1	0.0	**0.4**	560	0.05	0.04
調理食数 [食/週]	1.9	**6.1**	-0.0	0.3	560	0.11	0.10
PC使用時間（合計）［時間/日］	**4.5**	-0.8	0.0	**0.6**	560	0.06	0.05

注）PC 使用時間（合計）＝デスクトップ使用時間＋ノート PC 使用時間

注）p < 0.05：黄色のハイライト、p < 0.01：太字

表 5.3.5-4　回答者における機器等の使い方に関する重回帰分析結果

	切片	個人年収	在宅勤務日数（回答者）	n	R2	調整済R2
単位の分母 / 目的変数[単位の分子]	－	万円	日/週	世帯	－	－
シャワーのみ入浴回数（回答者）［回/週］	**3.7**	-0.0	0.1	560	0.01	0.01
湯はり回数（回答者）［回/週］	**2.9**	0.0	-0.1	560	0.01	0.00
在宅勤務時の照明の使用頻度（回答者）［－］	**1.1**	**0.0**	**0.3**	560	0.24	0.24

照明の使用頻度は順序尺度を間隔尺度とみなして分析している。 1. 全く使用しない、2. ほとんど使用しない、 3. 時々使用する、 4. よく使用する、 5. 常に使用する

注）p < 0.05：黄色のハイライト、p < 0.01：太字

c. 支出

表 5.3.5-5 に世帯の 2021 年 10 月の支出金額に関する重回帰分析結果を、表 5.3.5-6 に世帯の 10 月ごろの電気代に関する重回帰分析結果を示す。在宅勤務日数による有意な差が見られたのは食料品費と交通費である。食料品費の増加は自宅で食事をすることが多くなるためと考えられる。交通費は在宅勤務日数が多くなると定期券がなくなり、休日の私用のための交通費が増えると予想したがそうならなかった。要因としては、在宅勤務日数が高い世帯ほど外出を自粛している世帯が多い可能性がある。また光熱水道費については有意な差が見られなかったため、より影響が出ると思われる電気代に限定して分析を行った。仮説通り正の影響は見られたものの有意差は見られなかった。要因として中間期の電気代であったことも影響していると考えられ、在宅勤務を行うことで空調の使用時間の延びる夏季、冬季であれば明確な差が出る可能性がある。

表 5.3.5-5 世帯の支出金額に関する重回帰分析結果（2021 年 10 月）

	切片	世帯人数	世帯年収	在宅勤務日数（世帯）	n	R2	調整済R2
単位	円	円/（人/世帯）	円/万円	円/（日/週）	世帯	-	-
支払総額	**96,306**	**34,614**	**65**	510	560	0.16	0.15
食料品費	4,608	**20,160**	2	809	560	0.24	0.23
外食費	**6,239**	-766	**8**	310	560	0.06	0.05
住居費	**55,881**	-359	13	197	560	0.01	0.01
光熱水道費	**3,884**	**6,073**	1	131	560	0.20	0.20
日用品	1,115	**3,315**	**2**	14	560	0.09	0.09
被服・履物	2,076	249	**6**	-5	560	0.06	0.06
交通費	**5,046**	**1,910**	1	**-411**	560	0.04	0.03
その他	17,457	4,032	**31**	-536	560	0.05	0.04
食費	**10,848**	**19,394**	**10**	1,119	560	0.22	0.21

注）食費＝食料品費＋外食費

注）$p < 0.05$：黄色のハイライト、$p < 0.01$：太字

表 5.3.5-6 世帯の電気代に関する重回帰分析結果

	切片	世帯人数	世帯年収	在宅勤務日数（世帯）	n	R2	調整済R2
単位	円	円/（人/世帯）	円/万円	円/（日/週）	世帯	-	-
電気代（10月ごろの1か月）	**1,750**	**2,604**	0.1	62	309	0.20	0.19

注）アンケート調査の設問では、光熱水道費とは別に電気、ガス、灯油の消費量（購入量）と支出金額（購入金額）を調査している。電気、ガス、灯油のエネルギー種別にデータ精査を行い、使用エネルギー種の数値が全て有効である世帯を有効データとしているため、光熱水道費のサンプルサイズに比べ少なくなる。

注）$p < 0.05$：黄色のハイライト、$p < 0.01$：太字

(4) 共分散構造分析（SEM）によるアプローチ

本節では構造を把握するため SEM を用いて分析を行う。

① 生活行動時間の整理

生活行動時間は 27 項目と詳細な分類となっているため、仕事日、休日別に下記の 8 項目に纏め、その他時間を除く 14 変数に仕事日、休日の各在宅時間を加えた 16 変数で因子分析を行い、因子を抽出する。表 5.3.5-7 に 27 項目と 8 項目の生活行動対応表を示す。

- 睡眠時間
- 食事時間
- 身の回りの用事時間
- 仕事時間
- 移動時間
- 住宅の管理、家族の世話時間
- 余暇活動時間
- その他時間

表 5.3.5-7 生活行動細分類と大分類の対応表

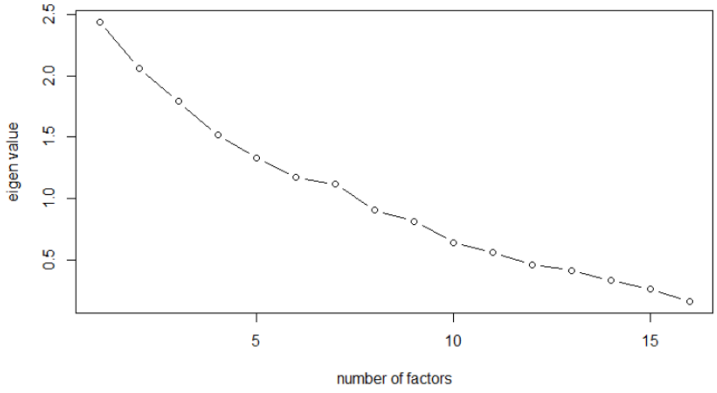
No.	生活行動（細分類）	生活行動（大分類）
1	睡眠	睡眠
2	食事_自宅	食事
3	食事_自宅外_外食	食事
4	食事_自宅外_その他	食事
5	入浴_自宅	身の回りの用事
6	入浴_自宅外	身の回りの用事
7	身の回りの用事_日常の身だしなみ	身の回りの用事
8	身の回りの用事_その他	身の回りの用事
9	受診・療養	その他
10	仕事_自宅	仕事
11	仕事_自宅外	仕事
12	学業	仕事
13	移動_通勤・通学	移動
14	移動_通勤以外の仕事に伴う移動	移動
15	移動_その他	移動
16	住宅・生活の管理_炊事、食事の後片付け	住宅の管理、家族の世話
17	住宅・生活の管理_掃除、洗濯	住宅の管理、家族の世話
18	住宅・生活の管理_その他	住宅の管理、家族の世話
19	家族の世話	住宅の管理、家族の世話
20	買い物_実店舗	その他
21	買い物_インターネット等	その他
22	交際・付き合い	その他
23	余暇活動_自宅	余暇活動
24	余暇活動_自宅外	余暇活動
25	学習・自己啓発・訓練_学業以外	余暇活動
26	休養・くつろぎ	余暇活動
27	その他	その他

因子の抽出は最尤法、回転はプロマックス法を用いて行う。

図 5.3.5-3 にスクリープロットと因子数別の適合度指標を示す。スクリープロットを見ると大きく折れ曲がっている部分はなく、緩やかな右下がりとなっている。そこで固有値が 1 を超える因子数 7 までに対して、RMSEA[1]と BIC[2]の適合度指標を計算したところ、RMSEA は 6 因子、BIC は 4 因子の時に良いモデルと判断された。ここでは因子数の少ない 4 因子を採用し、因子の解釈を行う。表 5.3.5-8 に因子分析結果を示す。因子負荷量の大きさから、因子 1 を「在宅勤務」、因子 2 を「休日在宅派」、因子 3 を「家事重視」、因子 4 を「余暇重視」とする。これら 4 因子を用いて SEM の検討を行う。

[1] Root Mean Square Error of Approximation。適合度指標の一つで 0.05 以下であれば当てはまりが良く、0.1 以上であれば当てはまりが悪いと判断される。

[2] ベイジアン情報量規準（Bayesian Information Criterion）。適合度指標の一つで複数のモデル間の相対的な良さを比較するための規準。BIC の絶対値に意味はなく、複数のモデル間において BIC の値が最も小さなモデルを良いモデルと判断する。



	num_of_factors	RMSEA	BIC
CASE1	1	0.14747023	-54.82323
CASE2	2	0.14057840	-75.89177
CASE3	3	0.12053172	-128.33674
CASE4	4	0.10614200	-139.25739
CASE5	5	0.09228974	-134.84392
CASE6	6	0.09182650	-105.72377
CASE7	7	0.09450404	-76.24231

図 5.3.5-3　スクリープロット（左図）と因子数別の適合度指標（右図）

表 5.3.5-8　因子分析結果

	因子1	因子2	因子3	因子4
睡眠時間（仕事日）	0.10	0.00	0.01	-0.29
食事時間（仕事日）	0.06	0.01	0.03	0.01
身の回りの用事時間（仕事日）	-0.14	-0.07	0.19	-0.24
仕事時間（仕事日）	0.05	-0.03	**-0.49**	-0.08
移動時間（仕事日）	**-1.05**	0.11	0.07	0.24
住宅の管理、家族の世話時間（仕事日）	0.33	-0.12	**0.78**	-0.13
余暇活動時間（仕事日）	0.11	0.02	0.07	**0.59**
在宅時間（仕事日）	**0.77**	-0.05	0.10	0.04
睡眠時間（休日）	-0.01	0.32	-0.10	-0.34
食事時間（休日）	-0.03	-0.03	0.25	0.03
身の回りの用事時間（休日）	-0.09	-0.10	0.09	-0.10
仕事時間（休日）	0.04	-0.09	-0.06	-0.09
移動時間（休日）	0.01	**-0.83**	-0.00	0.13
住宅の管理、家族の世話時間（休日）	0.11	0.21	**0.69**	-0.13
余暇活動時間（休日）	0.10	-0.15	-0.11	**0.78**
在宅時間（休日）	-0.02	**0.85**	0.09	0.00

	因子1	因子2	因子3	因子4
因子負荷量平方和	1.76	1.49	1.45	1.24
寄与率	0.11	0.09	0.09	0.08
累積寄与率	0.11	0.20	0.29	0.37

注 1）$p < 0.05$：黄色のハイライト、$p < 0.01$：太字
注 2）数値≧|0.3|：黄色のハイライト、数値≧|0.4|：太字

② 生活行動モデルの構築

前節で分析した探索的因子分析と、重回帰分析の結果を参考に、初期モデルを構築し、その後、適合度指標を確認しながらモデルを改良する。なお、目的変数である支出が複数あるため、目的変数を変更して計算する際には、因子間の関係は変更せずに分析を行う。

目的変数は在宅勤務との関係が想定される「外食費」「食料品費」「光熱水道費」「交通費」「衣服費」の 5 変数とする。

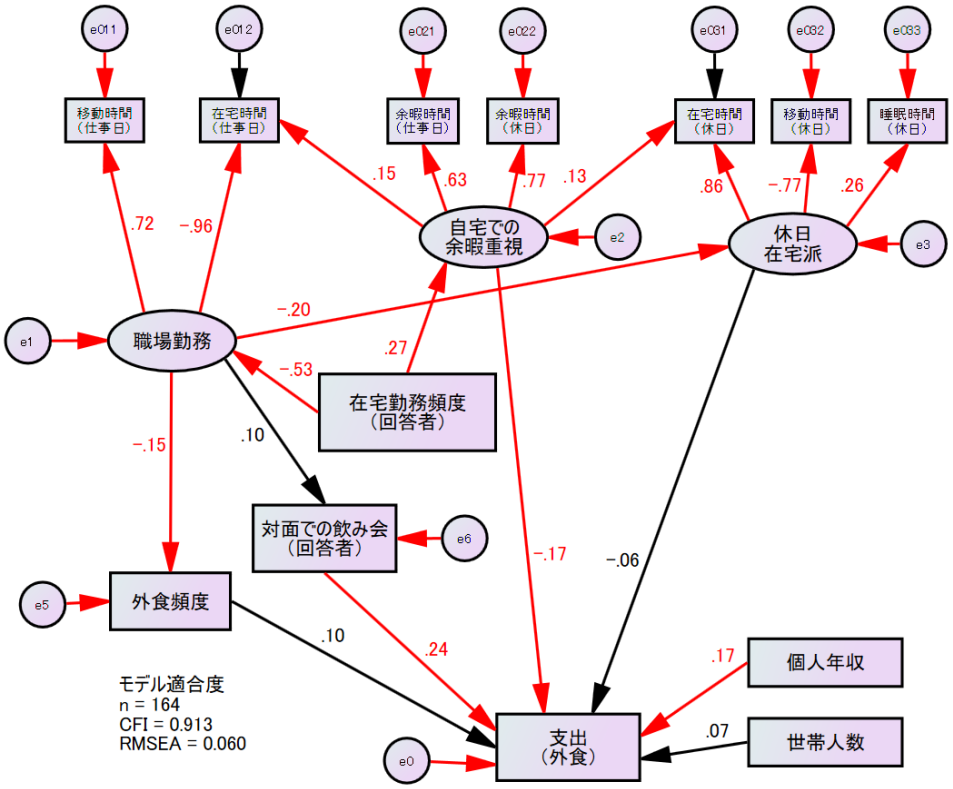
なお、探索的因子分析で分析した4つの因子を用いてモデル化を検討したところ、「家事重視」を含めないほうがモデル適合度が高くなったため、当該因子を削除し、3つの因子でモデルを構築している。また、因子1で命名した「在宅勤務」だが、SEM上では符号が逆転しているため、「職場勤務」として分析を行う。

a. 外食費

図 5.3.5-4に支出（外食）に関する生活行動モデルを示す。モデル適合度指標であるCFI[3]は0.913、RMSEAは0.060となっている。在宅勤務が増えると職場勤務が減少する一方で、自宅での余暇重視が増加している。職場勤務が増加すると対面での飲み会が増加する一方で、外食頻度全体は減少している。外食には、平日夜の食事会、平日の昼食、平日の帰りがけの外食、休日の昼/夜の食事が考えられ、どの外食頻度が減っているかは不明である。また、職場勤務が減ると休日在宅派が増えるのは、在宅勤務している世帯がもともとインドア派の人が多くなっている可能性があることや、平日に人との接触が少ないので、休日も外出を控えるコロナ禍の特殊事情の可能性が考えられる。

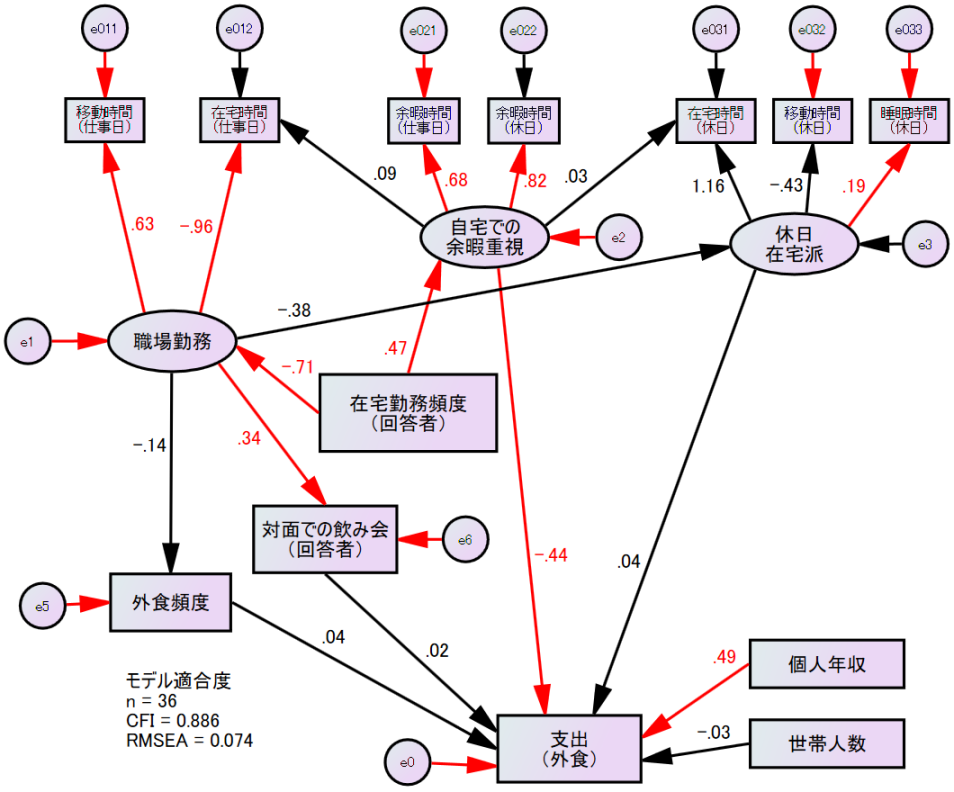
在宅勤務が支出に影響を及ぼす間接効果のパスは①外食頻度を経由するルート、②対面での飲み会を経由するルート、③自宅での余暇重視を経由するルート、④休日自宅を経由するルートの4ルートがある。間接効果はパス係数の積で表現されるため、①外食頻度ルート+0.00795（＝-0.53×-0.15×0.10）、②対面での飲み会ルート-0.01272（＝-0.53×0.10×0.24）、③自宅余暇重視ルート-0.0459（＝0.27×-0.17）、④休日在宅派ルート-0.00636（＝-0.53×-0.20×-0.06）となり、直接効果のパスはないため、総合効果は-0.05703となる。このうち、最も効果が高いのは③自宅余暇重視ルートで総合効果の約8割を占めている。図 5.3.5-5に回答者年齢を20、30代に限定、図 5.3.5-6に40歳以上に限定した分析結果を示す。モデル適合度指標について、20、30代のCFIは0.886、RMSEAは0.074、40歳以上のCFIは0.923、RMSEAは0.058となっている。20、30代のモデルの適合度は低く、またサンプルサイズが36と小さいため参考ではあるが、20、30代のモデルは40歳以上のモデルに比べ、職場勤務と対面での飲み会（回答者）の関係が強いこと、自宅での余暇重視と外食費の負の関係が強いことなどが異なっている。また、職場勤務と外食頻度の関係について、両モデル共に負の関係となっているが、20、30代では有意差が見られず、40歳以上では有意差が見られる結果となっている。

[3] 比較適合度指標（Comparative Fit Index）。適合度指標の一つで値が0から1までの範囲に収まる指標。1に近いほど適合が良く、一般には0.95以上であればよいモデルと言える。



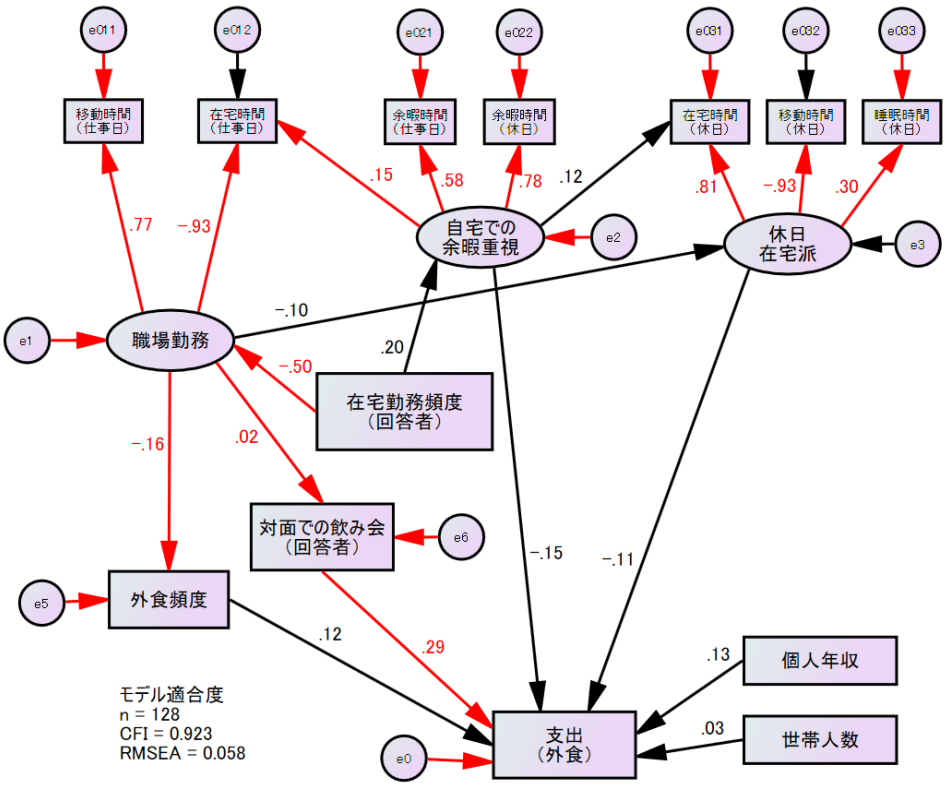
注）赤いパスは10%以下で有意、係数は標準化推定値

図　5.3.5-4　支出（外食）に関する生活行動モデル



注）赤いパスは10%以下で有意、係数は標準化推定値

図　5.3.5-5　【参考】支出（外食）に関する生活行動モデル（回答者年齢 20,30 代）



注）赤いパスは10%以下で有意、係数は標準化推定値

図 5.3.5-6 【参考】支出（外食）に関する生活行動モデル（回答者年齢 40 歳以上）

b.　食料品費

図 5.3.5-7 に支出（食料品費）に関する生活行動モデルを示す。モデル適合度指標である CFI は 0.944、RMSEA は 0.045 となっている。在宅勤務が増えると職場勤務が減少する一方で、自宅での余暇重視が増加し、実店舗での食料品購入頻度が減少しているのは外出頻度が下がることでまとめ買いをしているためと考えられる。実店舗での食料品の購入頻度が高くなるほど食料品費は増加しているのはついで買いによる影響が表れている可能性がある。また、自宅での余暇が増えると食料品費が増える結果となっており、自炊など家で食事をする機会が増えるためと思われる。また、ネットショッピング（以下、NS）が食料品費に及ぼす効果はプラスとなっているが、有意差は見られない結果となっている。

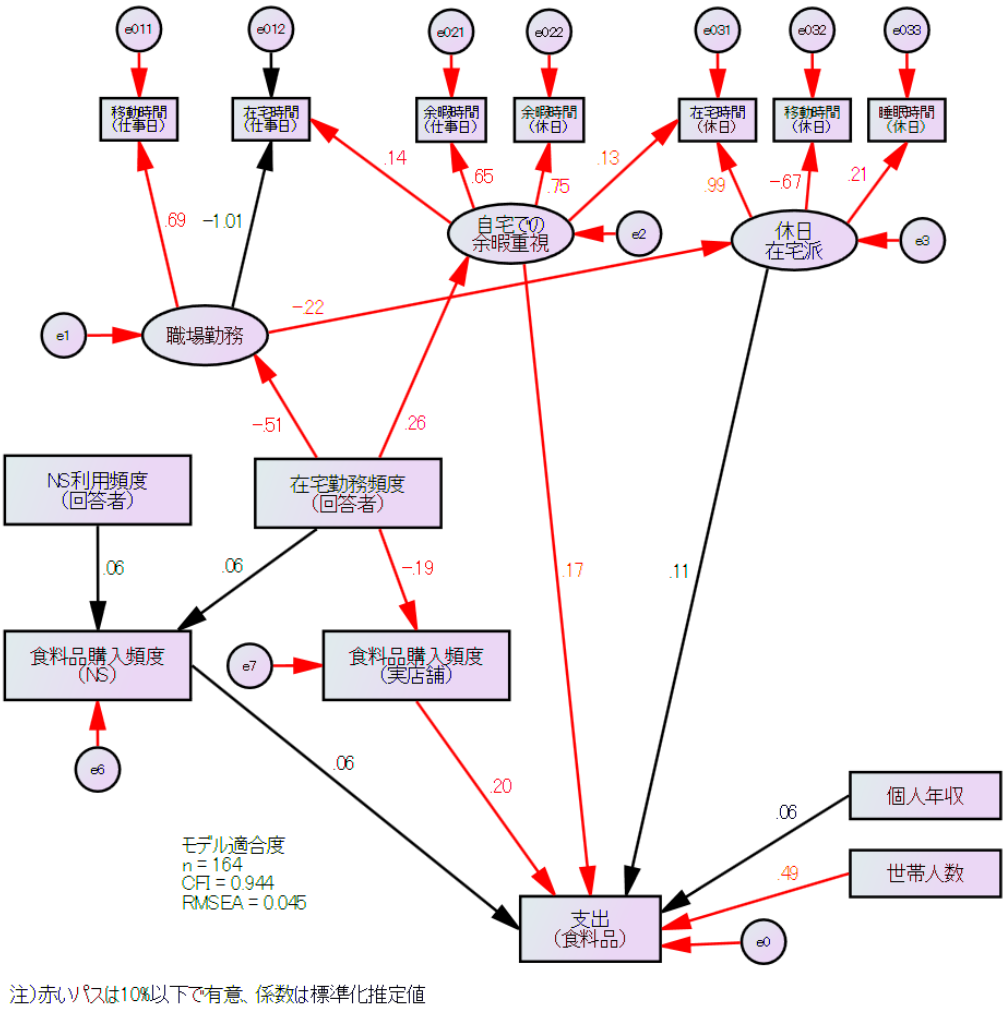


図 5.3.5-7　支出（食料品費）に関する生活行動モデル

注）NS：ネットショッピング

c.　光熱水道費

図 5.3.5-8 に支出（光熱水道費）に関する生活行動モデルを示す。モデル適合度指標である CFI は 0.907、RMSEA は 0.060 となっている。このモデルにおいても在宅勤務が増えると職場勤務が減少する一方で、自宅での余暇重視が増加している。職場勤務が減少するほど TV 使用時間が増加し、また休日に在宅で過ごすことが増える。TV 使用時間が増加することで、光熱水道費も併せて増加する関係も見て取れる。

今回のモデルでは、光熱水道費を目的変数としているが、TV 使用時間を目的変数とした生活行動モデルとし、DNE21+モデルの外生変数を整理するためのモデルとして活用することも可能である。その際は DNE21+モデルの外生変数として用いている活動量として、TV 使用時間だけでなく、照明の使用時間やエアコンの使用時間などの複数の使い方を目的変数としたモデルを構築することで DNE21+モデルへの接続が可能となる。

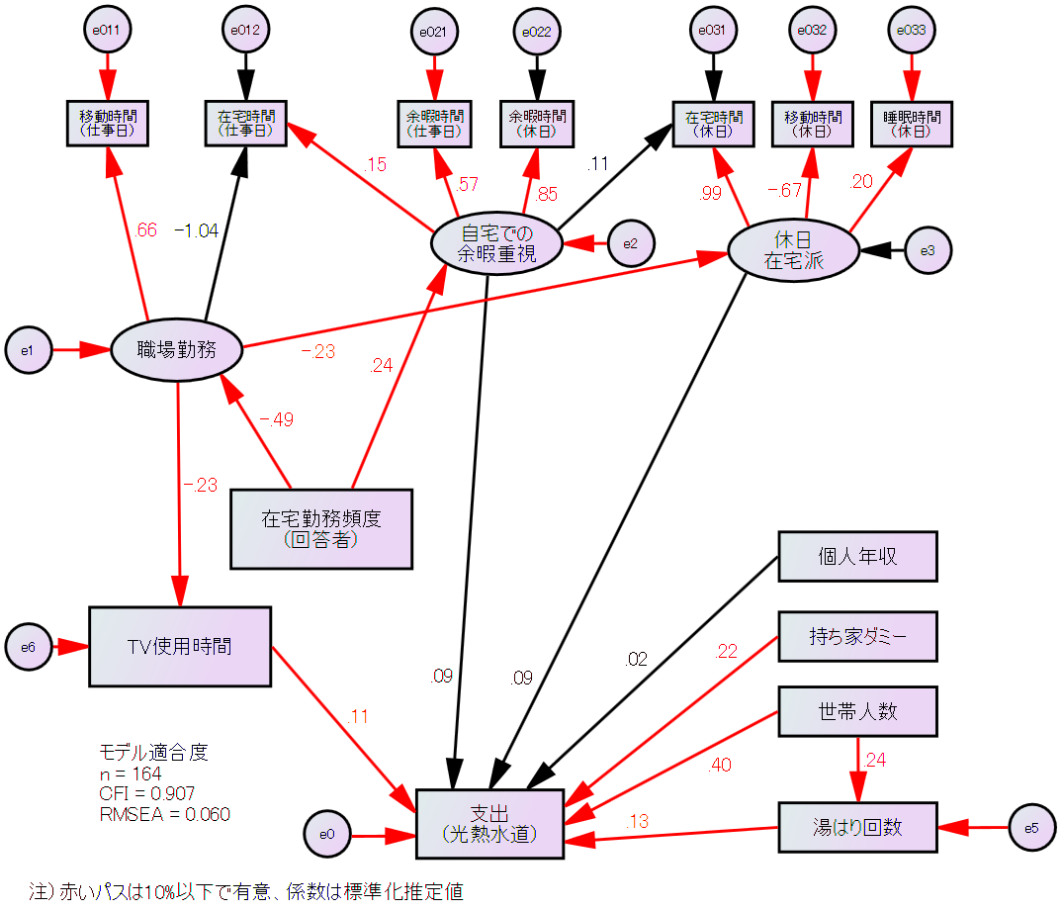
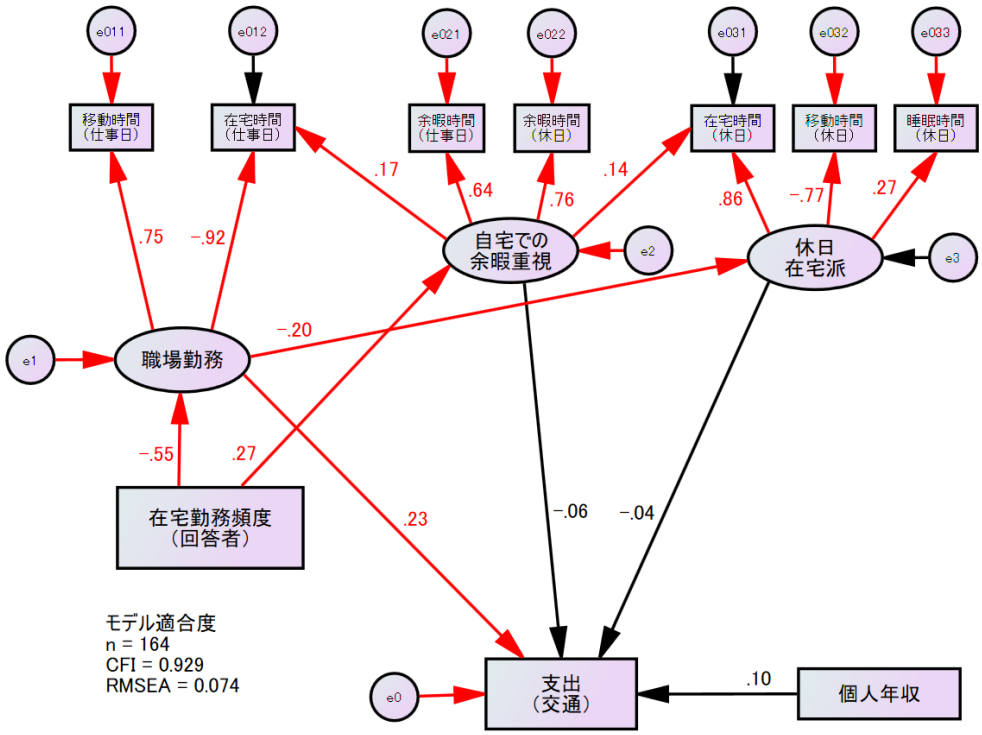


図 5.3.5-8　支出（光熱水道）に関する生活行動モデル

d. 交通費

図 5.3.5-9 に支出（交通）に関する生活行動モデルを示す。モデル適合度指標である CFI は 0.929、RMSEA は 0.074 となっている。このモデルにおいても在宅勤務が増えると職場勤務が減少する一方で、自宅での余暇重視が増加している。職場勤務が増えるほど交通費は増加する関係となっており仮説と異なる結果となっている。更なる研究が必要だが、要因として在宅勤務している世帯がもともとインドア派の人が多くなっている可能性があることや、平日に人との接触が少ないので、休日も外出を控えるコロナ禍の特殊事情の可能性が考えられる。

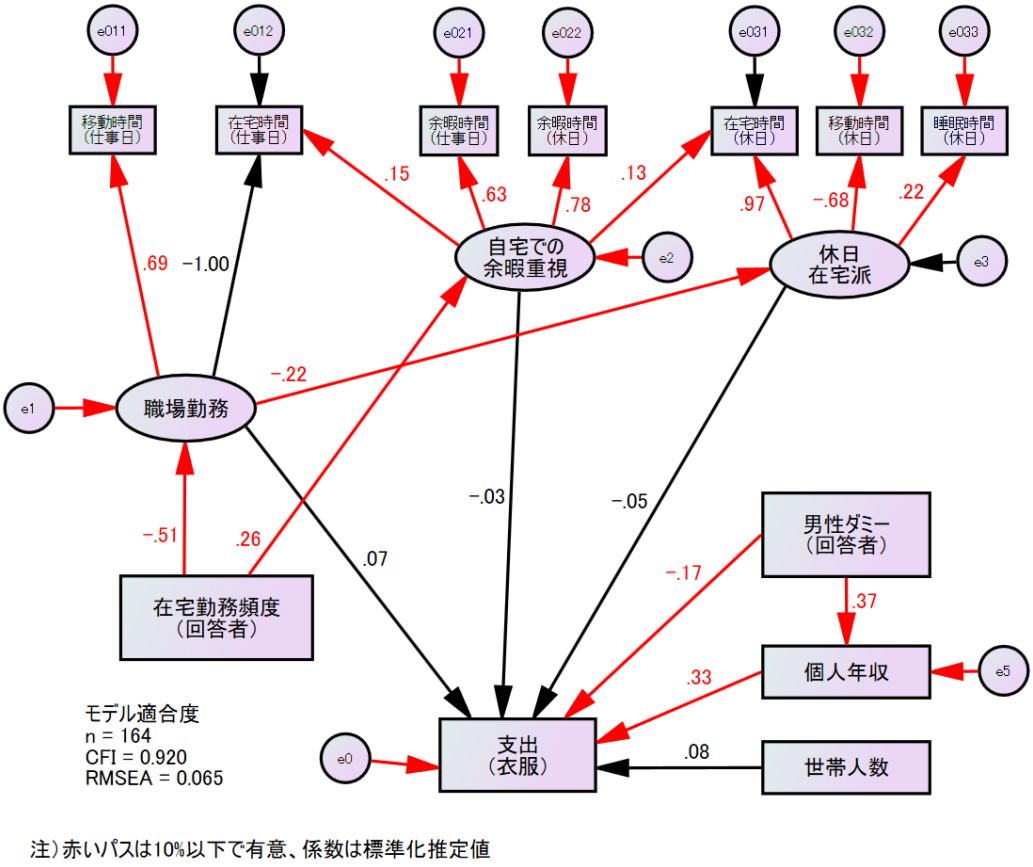


注）赤いパスは10%以下で有意、係数は標準化推定値

図 5.3.5-9 支出（交通）に関する生活行動モデル

e. 衣服費

図 5.3.5-10 に支出（衣服）に関する生活行動モデルを示す。モデル適合度指標である CFI は 0.920、RMSEA は 0.065 となっている。このモデルにおいても在宅勤務が増えると職場勤務が減少する一方で、自宅での余暇重視が増加している。衣服費に影響を与える有意な差が出ている変数は男性ダミー（回答者）と個人年収であり、生活行動時間に関係する変数は有意な差が出ていない。



注）赤いパスは10%以下で有意、係数は標準化推定値

図 5.3.5-10 支出（衣服）に関する生活行動モデル

(5) まとめ

本章では需要を生活行動の結果として捉えるため、属性、生活時間、支出を一体的に把握するアンケート調査データを用いて生活行動モデルの定量化を行った。得られた主な結果は下記の通り。

- 重回帰分析を用いて世帯人数、年収の影響を除いた在宅勤務日数と平日の生活行動時間の影響を分析し、在宅勤務日数が週に 1 日増加することで、自宅での仕事時間が＋1.1 時間/日、自宅での余暇時間が+0.1 時間/日、通勤による移動時間が-0.2 時間/日、自宅外での仕事時間が-1.1 時間/日変化することが分かった。
- SEM による生活行動モデルを構築することで、在宅勤務日数と支出の関係を構造的に把握した。例えば、外食費については、外食による影響と自宅での過ごし方による影響を分離して把握した。
- 生活行動モデルの考察から、在宅勤務している世帯がもともとインドア派の人が多くなっている可能性があることを示した。

モデルは、変数間の構造を含めた生活行動モデルにすることで、より深い理解、考察を得ることができた。例えば、外食費への影響については、在宅勤務が増加することで職場勤務が減少し外食頻度が減少することで外食費が減少する影響と、自宅での過ごし方に影響を与えることで外食費が減少する影響が見られた。これは、職場勤務が減少することによるオフィスへの影響、外食頻度が減少することによる飲食業への影響、余暇重視による何らかの需要の増加による影響と、直接、間接的な経済、エネルギーへの影響を、整合を取った形で表現できていると言える。

生活行動モデルについては SEM を用いた先行研究が見当たらなかったことから、結果の値やモデル構造については研究の積み重ねが必要である点に留意されたい。また、今回のアンケート調査は非常に複雑な調査であったため、モデル化に用いたサンプルサイズが回収した数より大幅に少なくなった点が課題である。これはサンプルバイアスによる非標本誤差が懸念され、今後同様の分析を行う際には、有効世帯数の増加、回答精度の向上のための工夫が必要である。

加えて、今回は首都圏に住む単身世帯、勤務者のいる夫婦世帯に限定して調査を行ったため、世帯人数の拡張、地域性による各変数と支出の影響の違いなどについては今後の課題である。

5.3.6 まとめ

(1) 生活行動とエネルギー消費量に関する既往研究や既往統計の情報収集

生活行動とエネルギー消費量に関する既往研究として、在宅勤務によるエネルギー消費や二酸化炭素排出量への影響に関する海外文献について調査・整理した。

a. テレワークによる温室効果ガス消費への影響に関するレビュー論文

在宅勤務実施の可能性が高い米国の 5 つの州を対象に、ウェブベースのツールとモンテカルロシミュレーションを用いて、在宅勤務の様々な構成要素やパラメーターがGHG 排出量に与える影響を明らかにした。

試算結果として､在宅勤務が増えることにより GHG 排出量の減少傾向が得られた(在宅勤務実施の場合は、在宅勤務非実施に比べ CO_2 排出量は約 10%減少)。具体的には、移動、照明、冷暖房による CO_2 排出量は、在宅勤務実施の場合が非実施に比べ、それぞれ、33%減、24%減、5%減となった一方、電子機器・家電製品の方は 17%増加の結果となった。これは、従業員が在宅勤務中に、他の家電製品の使用頻度も増えるという想定に基づくものである。

今後の課題として、レジャーなどの要素も含む様々なリバウンド効果の定量化、乗用車の運転条件による燃費への影響、制度面や今後の人々の意思決定の不確実性も考慮したモデルに拡張することが重要であると指摘されている。

b. テレワーク推進による省エネ効果に関するレビュー論文（日米の事例）

本研究では、米国と日本を対象に在宅勤務の進展に伴う運輸・民生部門におけるエネルギー消費の変化についてシナリオ想定に基づきマクロ的に推定（在宅勤務実施者数や部門別のエネルギー消費量に関する既存統計値を参考に、単純な線形モデルで推定するアプローチ）し、在宅勤務推進がもたらす省エネ効果を検討した。

在宅勤務の実施に伴うエネルギー削減効果として、米国では 0.01%～1.2%削減、日本では 0.03%～1.3%削減するという試算結果が得られた。米国においては自動車の燃費を 20%改善することで米国の総エネルギー需要の 5.4%を節約できることになると言われており、それに比べると在宅勤務の実施による直接的なメリットは比較的小さいことが示唆された。

c. テレワークによる交通分野のエネルギー消費量への影響に関するレビュー論文

本研究では、アイルランド国勢調査の統計データに基づき、ロジットモデルを用いて在宅勤務を選択するか否かを目的変数、業種や職種、移動距離や移動手段を説明変数とした場合の推計を行うとともに、TREMOVE Ireland というツールを用いて各変数（職種・業種別）におけるエネルギー消費へ影響度を算定した。

アイルランド人口の 5%がフルにテレワーク実施に切り替わった場合交通エネルギー消費量と最終エネルギー消費量はそれぞれを 0.36%と 0.14%削減するという試算結果が得られた。

(2) 生活行動・消費行動に関するアンケート調査

生活行動・消費行動に関するアンケート調査では、生活行動に加え、需要の代替変数となりうる消費支出、エネルギー消費量を一体的に把握し、これらの関係性について考察した。特に「ネットショッピングの増加」と「在宅勤務の増加」といった生活行動の変化が及ぼす影響に焦点をあてている。

a. 在宅勤務の増加による影響

在宅勤務の増加による生活行動や消費支出の変化として、以下のように整理される。

- 通勤時間がなくなることにより、在宅勤務を行う人は、仕事日における自宅での余暇活動や休養・くつろぎの時間が増える。一方、休日には、休養・くつろぎの時間は短くなり、自宅・自宅外での余暇活動の時間が長くなる。
- 在宅勤務を行う人は通勤時間がなくなることから、出社日より起床時間を遅らせることができ、睡眠時間が長くなる。
- 在宅勤務を行うことで、平休日含め移動の機会が減り、交通費が減少する傾向にある。
- 在宅勤務により自宅での食事時間が増え、毎度調理する手間を負担に感じる家庭では、調理頻度が減る可能性がある。
- 在宅勤務を行う人は、身だしなみにかける負担が減る傾向にある。

b. ネットショッピングの増加による影響

ネットショッピングの増加による生活行動や消費支出の変化としては、以下のように整理される。

- ネットショッピングの利用頻度が高い世帯においても、実店舗に出向いて買い物をする頻度は大きく変わらないため、結果として全体の輸送量は増加する可能性がある。
- ネットショッピングの利用頻度が高い世帯では、置き配（宅配ボックスや置き場所指定）の利用が多くなっており、再配達が低減されていると考えられる。
- 各商品の中でも特に衣服関係や健康保持用摂取品、保健医療用品、書籍（紙媒体）などをネットショップで購入されることが多く、ネットショッピングの増加によりこれらの販売量が増加する可能性がある。

なお、本調査では、単身・夫婦世帯の就業者がいる世帯、かつ東京近郊に居住する世帯を抽出した結果を整理した。同居家族が 3 人以上いる世帯や就業者がいない世帯、居住地域によっても、傾向は異なることが推測される。より多様な世帯属性を考慮した際に、どのような傾向の違いが生じるかを検討する必要がある。

(3) 生活行動モデルの定量化

本章では需要を生活行動の結果として捉えるため、属性、生活時間、支出を一体的に把握するアンケート調査データを用いて生活行動モデルの定量化を行った。得られた主な結果は下記の通り。

- 重回帰分析を用いて世帯人数、年収の影響を除いた在宅勤務日数と平日の生活行動時間の影響を分析し、在宅勤務日数が週に 1 日増加することで、自宅での仕事時間が＋1.1 時間/日、自宅での余暇時間が+0.1 時間/日、通気による移動時間が-0.2 時間/日、自宅外での仕事時間が-1.1 時間/日変化することが分かった。
- SEM による生活行動モデルを構築することで、在宅勤務日数と支出の関係を構造的に把握した。例えば、外食費については、外食による影響と自宅での過ごし方による影響を分離して把握した。
- 生活行動モデルの考察から、在宅勤務している世帯がもともとインドア派の人が多くなっている可能性があることを示した。

モデルは、変数間の構造を含めた生活行動モデルにすることで、より深い理解、考察を得ることができた。例えば、外食費への影響については、在宅勤務が増加することで職場勤務が減少し外食頻度が減少することで外食費が減少する影響と、自宅での過ごし方に影響を与えることで外食費が減少する影響が見られた。これは、職場勤務が減少することによるオフィスへの影響、外食頻度が減少することによる飲食業への影響、余暇重視による何らかの需要の増加による影響と、直接、間接的な経済、エネルギーへの影響を、整合を取った形で表現できていると言える。

生活行動モデルについては SEM を用いた先行研究が見当たらなかったことから、結果の値やモデル構造については研究の積み重ねが必要である点に留意されたい。また、今回のアンケート調査は非常に複雑な調査であったため、モデル化に用いたサンプルサイズが回収した数より大幅に少なくなった点が課題である。これはサンプルバイアスによる非標本誤差が懸念され、今後同様の分析を行う際には、有効世帯数の増加、回答精度の向上のための工夫が必要である。

加えて、今回は首都圏に住む単身世帯、勤務者のいる夫婦世帯に限定して調査を行ったため、世帯人数の拡張、地域性による各変数と支出の影響の違いなどについては今後の課題である。

5.4 最終需要サイドの分析の開発

5.4.1 最終需要部門の変化に伴う統合的な分析

本節は、国際応用システム分析研究所（IIASA）に調査を依頼し、それをまとめたものである。IIASA では、Low Enegy Demand (LED)シナリオを提示し、IPCC SR15 でも注目された。本研究は、LED シナリオを更により良く表現するモデル開発を行った。

(1) はじめに

需要側の変化により期待されるのは、効率的かつゼロ排出となるようなサービス提供の実現が、供給側にも変化をもたらし、脱炭素化を加速的に促進することである。

つまり、居住用建物、交通、食料といったある種のサービス活動において、需要側の変化が、最終需要と中間需要の双方で、他のサービス需要にも影響をもたらす。例えば、居住用建物の場所・種類の変化がモビリティの需要に影響を与え、食品廃棄物の削減やデジタルサービスが物流や素材需要を減少させることがあげられる。ここで報告する研究の中核となるのは、需要カテゴリー（快適性、移動性、消費財）と関連する中間サービス（商業・公共サービス、物資輸送、材料）間のシステム的な関連性である。

従来の需要シナリオでは、サービス需要のベクトルをボトムアップ型で評価してきた。活動量×原単位＝需要量として各活動を個別に分析し、それを集約して需要ベクトルを決定している。しかし、複数の異なる需要カテゴリーをまたがるような相互依存関係は、このアプローチでは内生的に解くことができない。そのため、需要カテゴリー間の相互関係は、反復型シナリオ開発の中で事後的に検討するか、シナリオの整合性を保ちつつ定性的に考慮する必要がある。

2021 年度の ALPS 事業ではこうした相互関係を内生化するためのプロトタイプモデルを開発した。DETRAS (DEmand Tansformations Across Systems or DEmand TRAnsformation Simulator) は、シナリオ策定の初期段階で、複数の異なる需要パターンについて、需要パターンの変化とその相互関係（居住用建物と交通手段、消費者の選択と素材需要等）を検証・記述し、整合性を確認する需要シミュレーションツールである。開発にあたり、以下四つの簡略化表現を使っている。第一に、LED シナリオの最終需要と中間需要のカテゴリーでは、エネルギーのみに焦点を当て、食料、水・衛生、その他のインフラは除外している。第二に、単一代表の消費者グループというオリジナルの LED シナリオにおける簡略化表現を継続使用した。プロトタイプの初期実装において、詳細なデータがなく消費者の異質性を含めることができなかったためである。(「人間らしく生きられる適切な生活水準」に達していない人口の明示的評価については、消費財部門の項目を参照。) 第三に、LED シナリオ同様、世界を 2 つのマクロ地域（グローバル・ノースとグローバル・サウス）でみることで、地理的な複雑さを簡潔に表現している。第四に、今回の実現可能性研究では、重要な部門間の連関の一つである「素材」のみに焦点を当てた。他の重要な部門間の連関については、例示はしているが、実装には至っていない。本節では、DETRAS の枠組みと方法論を概説したのち、DETRAS における ASI 分析の基礎となっている LED シナリオの部門別需要について、新たなデータや修正後の数値を提供する。さらに、シナリオ整合性確認のため、LED シナリオで需要変化を促進する ASI 要因の役割を詳細に検討するとともに、部門間の整合性を高めるようシナリオ値を変更した場合の影響を示している。また、各部門の需要変化がもたらす素材需要への影響を例に、部門間の連関を取り上げる。最後に、結論と今後の研究の必要性とモデリングの方向性について簡単な展望を述べる。

(2) 概念と方法論

図 5.4.1-1 は、DETRAS スキームの概要と、シナリオ形成プロセスにおける主な用途を示したものである。

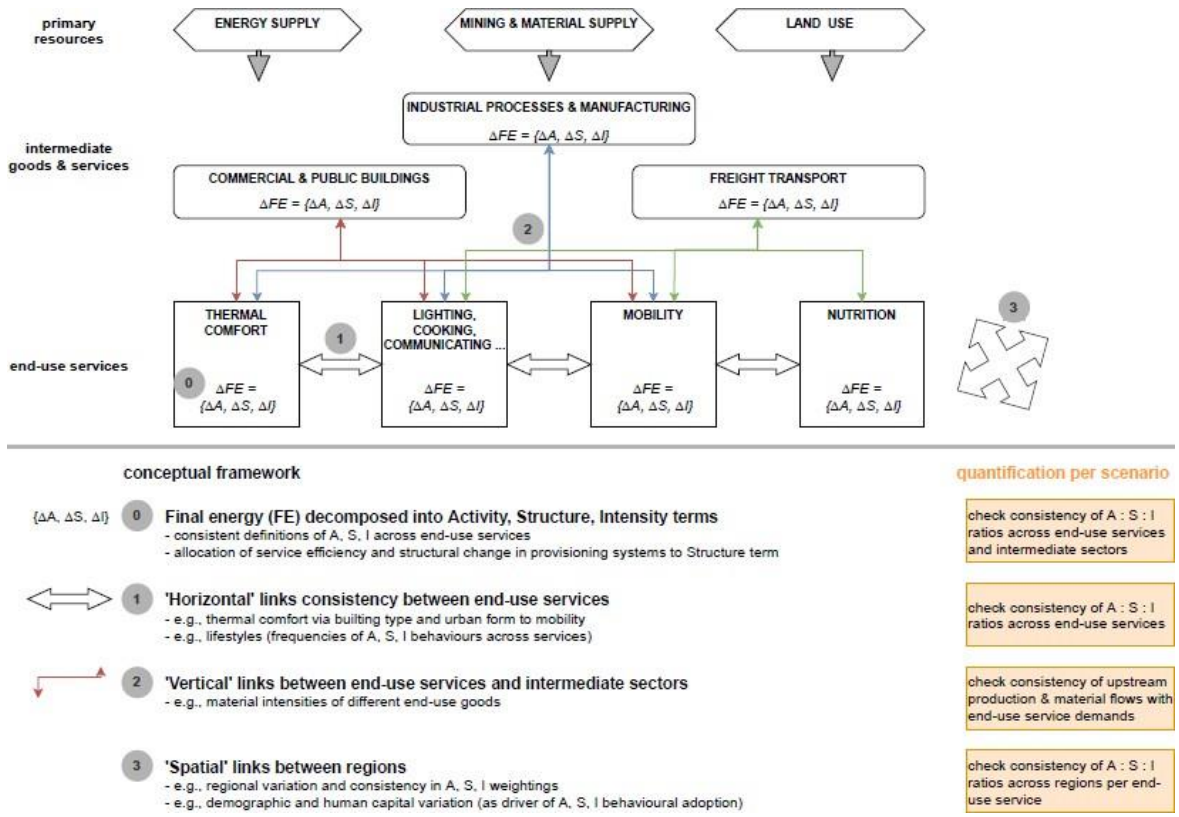


図 5.4.1-1 DETRAS の枠組みと用途

まず、最終需要におけるサービス（温熱快適性、消費財、移動性）と中間財・サービス（商業・公共建築、貨物輸送、工業プロセス）を区別することから始めた。工業プロセスは今回、素材生産に限定している。また図 5.4.1-1 には示していないが、今後の研究課題として、これまで産業部門にまとめられてきた製造業、建設業、インフラ整備などの中間的な部門を拡張することが重要になるだろう。

次に、各部門の 2020 年から 2050 年までの需要変化について ASI 分析を行い、整合性の確認と、部門間の連関を検討する基礎資料を作成した。

ここでは、「水平」方向の連関、すなわち最終需要または中間段階に位置する部門間での連鎖と、「垂直」方向の連関、すなわち最終需要と中間投入部門の間での連鎖を区別している。水平方向の連関の例としては、建物の種類や都市形態（密度や利用構成）の変化がモビリティに与える影響などが挙げられる。垂直的連関の例として、モビリティをシェア化した結果、個人所有の車両が減少し素材需要へ影響を与えることなどがあげられる。第 3 の連関は、図 5.4.1-1 の十字の矢印と③で示す、空間的次元で定義される地域連関である。この連関の代表例が、地域間取引やイノベーションの波及効果である。グローバル・ノースとグローバル・サウスのみで空間解像度が粗いため、今回これらの空間的連関をより詳細に検討することはできなかった。ASI 分析の地域差は、主にシナリオの内部整合性を確認する目的で使用している。「水平方向」と「垂直方向」のつながりについては、今回、居住構造とモビリティの間の初期見解と定量化を「モビリティ」の項目で示すに留める。また、「垂直」方向のつながりは、産業部門を除くすべての部門間の素材フローで示すことに焦点を絞った。産業部門については、

今後、素材、製造、建設、主要なインフラ（輸送、水・衛生、エネルギー、健康・教育などの公共財）をさらに細分化して検討する。

需要変化の根底にある要因を再認識し、構造的な影響をよりよく説明するために、LED シナリオで採用された分析（活動×k）を ASI 型の分析（活動量、構造、原単位）に拡張した。

At: t 期における活動総量
At,x: t 期における技術 x の活動量
Et: t 期における最終エネルギー総量
Et,x: t 期における技術 x の最終エネルギー量
It,x: t 期における技術 x のエネルギー原単位

L: 対数平均

$$L(x,y) = \begin{cases} \dfrac{x-y}{\ln(x)-\ln(y)} & if\ x \neq y \\ x & if\ x = y \end{cases} \tag{5.4.1-1}$$

D_{tot}: 乗算分解

$$D_{tot} = {}^{E_1}\!/_{E_0} = D_{activity} * D_{structure} * D_{intensity} \tag{5.4.1-2}$$

$D_{activity}$: 活動量

$$D_{activity} = \frac{A_1}{A_0} \tag{5.4.1-3}$$

$D_{structure}$: 構造

$$D_{structure} = exp\left(\frac{\sum_i L\left(\frac{E_{1,i}}{E_1}, \frac{E_{0,i}}{E_0}\right) ln\left({}^{A_{1,i}}\!/_{A_1} \Big/ {}^{A_{0,i}}\!/_{A_0} \right)}{\sum_j L\left(\frac{E_{1,j}}{E_1}, \frac{E_{0,j}}{E_0}\right)} \right) \tag{5.4.1-4}$$

$D_{intensity}$: 原単位

$$D_{intensity} = exp\left(\frac{\sum_i L\left(\frac{E_{1,i}}{E_1}, \frac{E_{0,i}}{E_0}\right) ln\left(\frac{l_{1,i}}{l_{0,i}}\right)}{\sum_j L\left(\frac{E_{1,j}}{E_1}, \frac{E_{0,j}}{E_0}\right)}\right) \quad (5.4.1\text{-}5)$$

DE_{tot}: 加法分解

$$DE_{tot} = E_1 - E_0 = DE_{activity} + DE_{structure} + DE_{intensity} \quad (5.4.1\text{-}6)$$

$\Delta E_{activity}$: 活動量変化

$$\Delta E_{activity} = ln\left(\frac{A_1}{A_0}\right) L(E_1, E_0) \quad (5.4.1\text{-}7)$$

$\Delta E_{structure}$: 構造変化

$$\Delta E_{structure} = \frac{\sum_i L\left(\frac{E_{1,i}}{E_1}, \frac{E_{0,i}}{E_0}\right) ln\left(\frac{A_{1,i}/A_1}{A_{0,i}/A_0}\right)}{\sum_j L\left(\frac{E_{1,j}}{E_1}, \frac{E_{0,j}}{E_0}\right)} L(E_1, E_0) \quad (5.4.1\text{-}8)$$

$\Delta E_{intensity}$: 原単位変化

$$\Delta E_{intensity} = \frac{\sum_i L\left(\frac{E_{1,i}}{E_1}, \frac{E_{0,i}}{E_0}\right) ln\left(\frac{l_{1,i}}{l_{0,i}}\right)}{\sum_j L\left(\frac{E_{1,j}}{E_1}, \frac{E_{0,j}}{E_0}\right)} L(E_1, E_0) \quad (5.4.1\text{-}9)$$

単に資源効率を変えるのではなく、サービス提供方法を変える構造的な影響を把握するため、LED 論文（Grubler et al. 2017）の SI シナリオの記述に部分的に基づきつつ、さらに詳細に解釈しなおし、構造的影響をよりよく表現できるようにする必要があった。新たなシナリオデータの例として、建物の種類や暖房システム、使用する消費財の種類（住宅・商業用途別に 26 分類）、シェアモビリティスキームの効果を明示的に含めた交通機関、素材の種類（バージン・リサイクルの別を含む）による素材（産業）部門のより詳細な推計が含まれる。次に、これらの新たなデータセットをまとめ、各活動、構造、原単位の変化がもたらす影響について議論する。

(3) ASI 分析

① 温熱快適性（居住用建物）

図 5.4.1-2 は LED シナリオを修正・拡張したシナリオ表現である。都市化による居住用建物構造への影響を考慮し、一戸建て（SFH）と多世帯住宅（MFH）を区別した。

また、設計と改修による変化を考慮し、従来型（conv）、高効率（eff）、ゼロエネルギー（passivhaus-standard）（ZEB）の住宅を区別ししている。さらに、産業部門との垂直的なつながりを探るため、従来の建築類型に基づく建材構成を使用、暖房システムの変化として従来型（記載なし）とヒートポンプ（HP）の対比を考慮している。

	2020_GlobalNorth			2050_GlobalNorth		
	Activity (bn m2)	Intensity (MJ/m2)	Final Energy (EJ)	Activity (bn m2)	Intensity (MJ/m2)	Final Energy (EJ)
SFH conv	25.0	727.0	18.2	0.0	360	0.0
SFH eff	0.0	220.0	0.0	0.7	220	0.2
SFH eff HP	0.0	73.3	0.0	1.1	73	0.1
SFH ZEB	0.0	110.0	0.0	1.1	110	0.1
SFH ZEB HP	0.0	36.7	0.0	4.5	37	0.2
MFH conv	19.2	600.0	11.5	0.0	350	0.0
MFH eff	0.0	200.0	0.0	4.3	200	0.9
MFH eff HP	0.0	66.7	0.0	6.5	67	0.4
MFH ZEB	0.0	100.0	0.0	8.6	100	0.9
MFH ZEB HP	0.0	33.3	0.0	20.0	33	0.7
Total	44.2	671.9	29.7	46.8	71.6	3.4

	2020_GlobalSouth			2050_GlobalSouth		
	Activity (bn m2)	Intensity (MJ/m2)	Final Energy (EJ)	Activity (bn m2)	Intensity (MJ/m2)	Final Energy (EJ)
SFH conv	70.4	330	23.2	4.7	190	0.9
SFH eff	0.0	130	0.0	7.4	130	1.0
SFH eff HP	0.0	43	0.0	11.1	43	0.5
SFH ZEB	0.0	70	0.0	4.1	70	0.3
SFH ZEB HP	0.0	23	0.0	16.2	23	0.4
MFH conv	63.2	253	16.0	18.7	180	3.4
MFH eff	0.0	110	0.0	22.3	110	2.5
MFH eff HP	0.0	37	0.0	52.0	37	1.9
MFH ZEB	0.0	65	0.0	16.2	65	1.1
MFH ZEB HP	0.0	22	0.0	64.9	22	1.4
Total	133.6	293.6	39.2	217.6	60.5	13.2

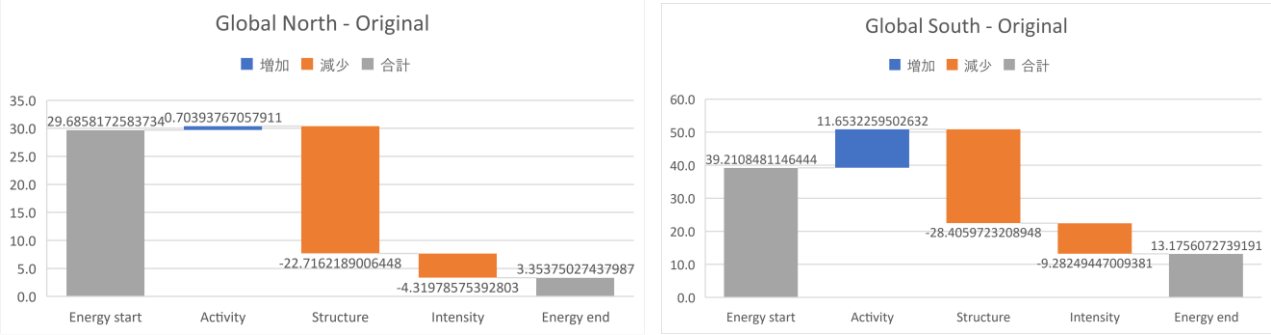


図 5.4.1-2 グローバル・ノース（左図）とグローバル・サウス（右図）における居住用建物の ASI 分析（上図）とエネルギー需要への影響（下図）

（注）下図青＝増加、オレンジ＝減少、グレー＝2020 年／2050 年最終エネルギー、単位：EJ。表中の青色の数値は LED シナリオから引き継いだ元の値、緑色の数値はシナリオの整合性を高めるために修正した値を示す。

分析で考慮した建物の種類や暖房システムにおいて、エネルギー原単位の整合性を取るため、オリジナル LED のデータを微修正した。2050 年の最終エネルギーは、グローバル・ノースで 3.4EJ（オリジナル LED シナリオでは 7.6EJ）、グローバル・サウスで 13.2EJ（オリジナル LED シナリオでは 8.9EJ）と予測された。地域区分の見直しは、世界全体の合計には影響を与えず、2050 年の居住用建物については、オリジナル LED シナリオの 16.5EJ から基本的に変化していない。

ASI の構造分析により、居住用建物のエネルギー需要の変化要因に大きな違いがあることが明らかになった。グローバル・ノースは飽和状態にある一方で、グローバル・サウスではサービスレベルの拡大が見られた。グローバル・ノースでは、建物構造（建物の種類、外殻、暖房システムの変化）がエネルギー需要の削減予測に大きな影響を与えているが、エネルギー原単位は比較的緩やかな改善にとどまっている。逆に、グ

ローバル・サウスでは、ほとんどが新築建物によるエネルギー原単位の改善が建物構造による効果を上回ったが、原単位の改善と構造による効果の双方を合わせると活動量の増加の影響を補って余りあるため、グローバル・サウスでも居住用建物のエネルギー需要の絶対量が削減されると予測された。構造による効果を明示的に考慮することは、予測されるエネルギー原単位の改善幅を新たな視点で評価するのにも有用である。グローバル･サウスでは構造による効果を除きエネルギー原単位が 1/3 に削減する。これは、エネルギー原単位の年平均改善率が 1.5%であることに相当し、過去の実績値の範囲内にある。このことから、構造的な影響を明示的に考慮すると原単位の改善はそれほど困難ではないこと、従来のエネルギー原単位の改善と同等かそれ以上にサービスの提供方法が重要であることがわかる。

② 消費財（民生機器）

図 5.4.1-3 は、民生機器を家庭用と業務用で 26 種別に分類し、さらに複数世帯で共有できる機器の台数について推定した ASI 分析の入力データである。なお、機器の数には、テレビなど従来のエンドユース機器がスマートフォンに置き換わるデジタルコンバージェンスの効果も含まれている（図 5.4.1-3 のグローバル・ノースでは 2050 年までにゼロになり、グローバル・サウスでは減少している)。図 5.4.1-4 は昨年度の報告書で推計した機器数変化を、改訂版 LED ベースシナリオで再計算し、成長率（LEDbase)、人間らしく生きられる適切な生活水準の保証（＋)、デジタルコンバージェンス（-)、機器の共有（-）の影響に分けて示している。図 5.4.1-5 は、図 5.4.1-3 のデータの分析結果である。図 5.4.1-6 では DETRAS のフレームワークの元、グローバル・サウスですべての人々に DLS を保証するという想定による民生機器需要への影響を分けて示した。(グローバル・ノースでは DLS はほぼ満たされている為、計算されない。元のシナリオへの追加的な「連関」として計上している。)

	2020_GlobalNorth			2050_GlobalNorth		
	Activity Million units	Intensity kWh/unit	Final Energy TWh	Activity Million units	Intensity kWh/unit	Final Energy TWh
RESIDENTIAL						
Lamps	17176	11	182	20195	8	159
Lamps-SH	107	21	2	424	16	7
Washing machine	459	295	135	70	98	7
Washing machine-SH	3	590	2	112	195	22
Water heater	478	1063	509	407	431	175
Water heater-SH	3	2127	6	26	862	22
Refrigerator	507	190	96	565	148	84
Refrigerator-SH	3	380	1	12	297	4
Freezer	258	355	92	313	305	95
Freezer-SH	2	710	1	7	610	4
(electric) Stove	320	137	44	536	49	26
(electric) Stove-SH	2	273	1	11	97	1
(electric) oven	87	122	11	169	41	7
(electric) oven-SH	1	589	0	4	230	1
Television	525	294	155	0	115	0
Television-SH	3	589	2	0	230	0
Mobile phone	1303	2	2	1387	2	2
PC (internet access)	856	101	86	0	67	0
PC (internet access)-SH	5	201	1	0	133	0
Fan	411	22	9	762	16	12
Fan-SH	3	44	0	0	32	0
Portable air conditioner	44	1823	79	62	1715	107
Portable air conditioner-SH	0	3647	1	4	3430	14
Loads: set-top box, rooters, etc.	1704	116	197	859	86	74
Loads: set-top box, rooters, etc.-SH	11	231	2	0	172	0
COMMERCIAL				0	0	0
Lamps	11359	35	396	14300	17	248
Washing machine	23	1006	23	32	624	20
Water heater	396	4607	1824	71	2300	164
Water heater-SH	0	4607	0	64	4600	296
Commercial refrigeration	21	1848	39	41	1479	60
Industrial refrigeration	2	144300	241	3	115466	353
(electric) Stove	193	273	53	408	97	40
Television	529	294	156	853	115	98
PC (internet access)	737	193	142	0	133	0
Fan	413	22	9	762	16	12
Portable air conditioner	11	1823	20	2	1715	3
Portable air conditioner-SH	0	1823	0	2	3430	6
Power in agriculture, fishery, etc.	29	13806	394	51	241	12
Heating in agriculture, fishery, etc.	3	1216	4	6	24	0
total	**37986**	**129.5**	**4920**	**42520**	**50.2**	**2136**

	2020_GlobalSouth			2050_GlobalSouth		
	Activity Million units	Intensity kWh/unit	Final Energy TWh	Activity Million units	Intensity kWh/unit	Final Energy TWh
RESIDENTIAL						
Lamps	10284	17	171	50832	9	441
Lamps-SH	64	33	2	992	17	17
Washing machine	593	64	38	704	35	25
Washing machine-SH	4	128	0	263	70	18
Water heater	544	575	313	1705	227	386
Water heater-SH	3	1149	4	58	453	26
Refrigerator	743	163	121	2015	120	242
Refrigerator-SH	5	326	2	36	240	9
Freezer	170	341	58	647	246	160
Freezer-SH	1	683	1	13	493	6
(electric) Stove	226	137	31	1951	49	95
(electric) Stove-SH	1	273	0	18	97	2
(electric) oven	98	122	12	2063	41	84
(electric) oven-SH	1	589	0	7	337	2
Television	855	294	252	271	168	46
Television-SH	5	589	3	0	337	0
Mobile phone	4864	2	9	6823	2	12
PC (internet access)	346	101	35	325	88	28
PC (internet access)-SH	2	201	0	0	175	0
Fan	818	94	77	1647	33	54
Fan-SH	5	189	1	0	66	0
Portable air conditioner	73	1686	122	2069	596	1232
Portable air conditioner-SH	0	3373	2	6	1191	7
Electric loads: set-top boxes, rooters, etc.	1500	116	173	2207	80	177
Electric loads: set-top boxes, rooters, etc.-SH	9	231	2	0	160	0
COMMERCIAL	0	0	0	0	0	0
Lamps	6898	43	299	39694	17	689
Washing machine	30	1006	30	96	615	59
Water heater	447	4607	2058	141	2300	325
Water heater-SH	0	9214	0	127	4600	584
Commercial refrigeration	24	1848	44	81	1389	112
Industrial refrigeration	2	144300	272	6	108449	656
(electric) Stove	218	273	59	806	97	78
Television	864	294	254	2093	168	353
PC (internet access)	426	193	82	0	175	0
Fan	826	94	78	1647	33	54
Portable air conditioner	18	1686	31	4	596	2
Portable air conditioner-SH	0	3373	0	4	1191	4
Power in agriculture, fishery, etc.	30	14382	434	99	170	17
Heating in agriculture, fishery, etc.	9	1646	15	14	17	0
total	**31005**	**164**	**5086**	**119463**	**40**	**6003**

図 5.4.1-3 グローバル・ノース（左図）とグローバル・サウス（右図）における消費財の ASI 分析

（注）活動内容＝機器数（百万台）、原単位（kWh/機器）、エネルギー使用量

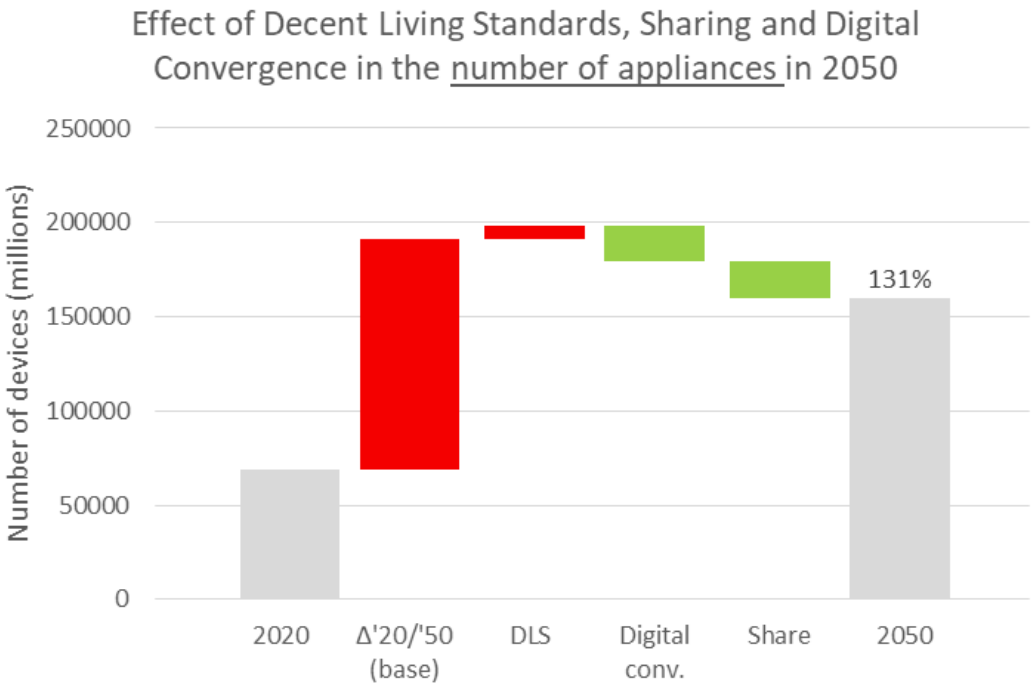
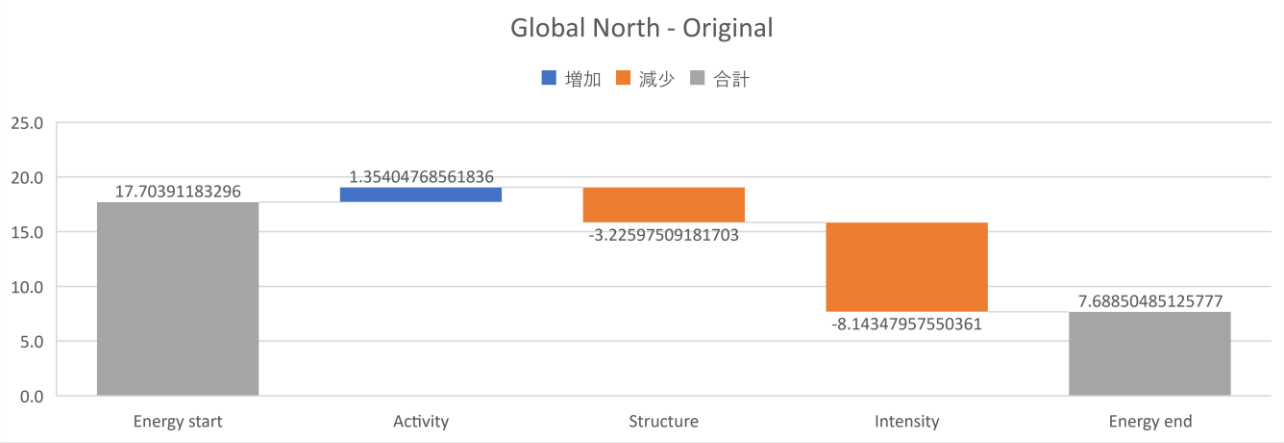


図 5.4.1-4 2050 年の消費財家電数の伸び

（注）改訂版 LED ベースシナリオの成長率（LEDbase）、LED ベースシナリオの改訂による最低限の生活水準（DLS）、デジタルコンバージェンス、シェアリングエコノミー効果に分解している。



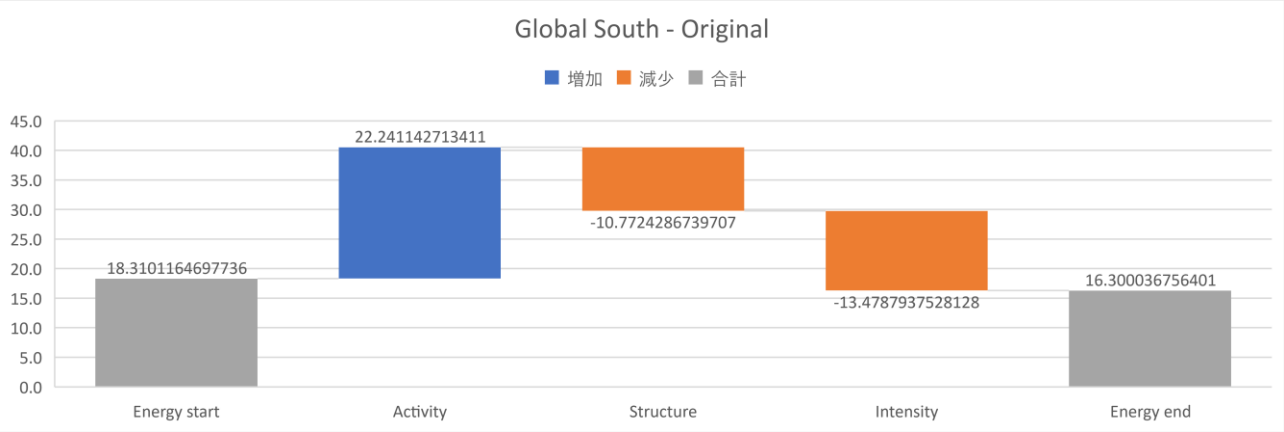


図 5.4.1-5 グローバル・ノース（上図）とグローバル・サウス（下図）における消費財の ASI 分析（LEDrev シナリオ）とエネルギー需要への影響

（注）青＝増加、オレンジ＝減少、グレー＝2020/2050 年最終エネルギー、単位：EJ

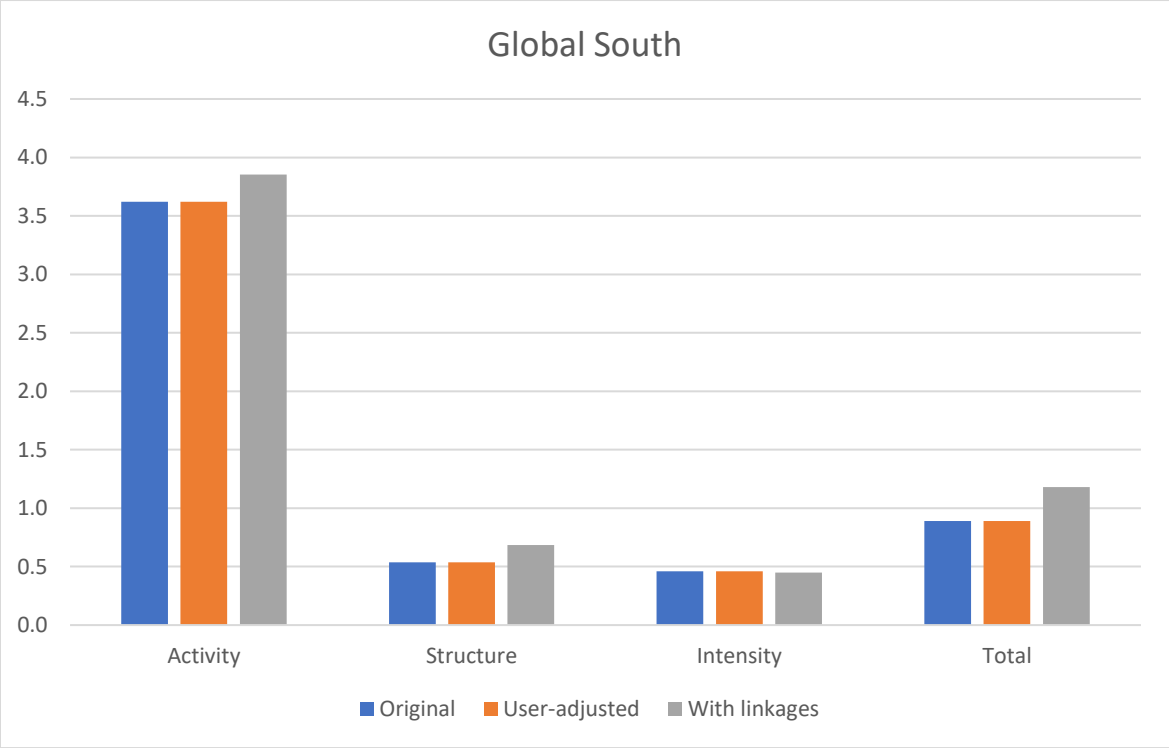


図 5.4.1-6 ASI 分析における「グローバル・サウス」の全人口に DSL 基準を確保することを検討した場合の民生機器需要への影響（グレー）（2020/2050 年の変化要因）

修正後の数値は、オリジナルの LED シナリオよりも大幅に改善された。オリジナルの LED シナリオにおいて、民生機器はエネルギー・資源需要の増加を示す唯一のカテゴリーだった。オリジナルの LED シナリオでは、家電製品の種類別内訳がかなり少なかった。シナリオの再計算ではなく、予測方法を見直し、DLS の保証やデジタルコンバージェンス、機器共有の効果を明示したことで、数量が LED シナリオのストーリーと一致するようになり、他のすべての LED 需要カテゴリーと同様、エネルギー需要の絶対値のトレンドもわずかに減少することが示された。民生機器シナリオの主な相違点は、以下の表 5.4.1-1 にまとめている。

表 5.4.1-1 LED シナリオの違い（オリジナル LED、ベースライン、改訂版）による 2050 年シナリオ値の違い

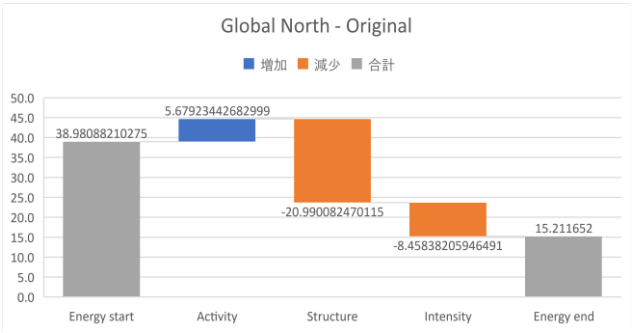
	LED original	LED base	LED rev
N activity	67	54	43 billion devices
S activity	186	137	119 billion devices
N energy	3.6	4.1	2.1 PWh
S energy	7.8	4.1	6.0 PWh
W activity	253	191	162 billion devices
W energy	11.5	12.7	8.1 PWh

③ 輸送機関

図 5.4.1-7 は輸送機関での ASI 分析とエネルギー需要への影響を示したものである。入力データは、オリジナル LED シナリオと比較してほぼ変わっていない（わずかな数値の違いは、端数処理によるものである）。なお「活動的」な移動（徒歩と自転車）は、最終的なエネルギー投入量がゼロになるため、本報告書の計算では除外している。

	2020_GlobalNorth			2050_GlobalNorth		
	Activity (bn p.km)	Intensity (MJ/p.km)	Final Energy (EJ)	Activity (bn p.km)	Intensity (MJ/p.km)	Final Energy (EJ)
ICEV	13284	2.5	32.6	624	2.1	1.3
EV	33	0.8	0.0	9362	0.7	6.6
EVshared	1	0.4	0.0	2766	0.4	1.0
2W-3W	587	0.9	0.5	875	0.3	0.3
rail	1256	0.3	0.4	2237	0.2	0.5
bus	2909	0.7	2.2	5859	0.3	1.6
air	1554	2.1	3.3	2850	1.4	3.9
total exc. active	19626	*2.0*	39.0	24574	*0.6*	15.2

	2020_GlobalSouth			2050_GlobalSouth		
	Activity (bn p.km)	Intensity (MJ/p.km)	Final Energy (EJ)	Activity (bn p.km)	Intensity (MJ/p.km)	Final Energy (EJ)
ICEV	11321	1.5	16.4	427	0.8	0.4
EV	28	0.5	0.0	5550	0.3	1.5
EVshared	1	0.2	0.0	3027	0.1	0.4
2W-3W	9573	0.3	2.8	19559	0.1	1.2
rail	4722	0.2	0.9	17615	0.2	2.7
bus	5813	0.8	4.5	25184	0.1	1.9
air	1562	2.3	3.5	2220	1.4	3.1
total exc. active	33020	*0.9*	28.2	73582	*0.2*	11.2



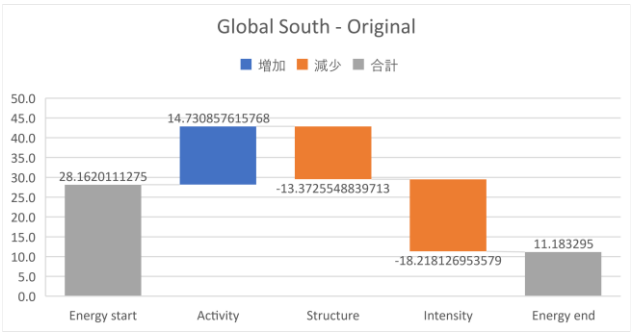


図 5.4.1-7 グローバル・ノース（左図）とグローバル・サウス（右図）におけるモビリティの ASI 分析（上図）とエネルギー需要への影響（下図）

（注）青＝増加、オレンジ＝減少、グレー＝2020 / 2050 年最終エネルギー、単位：EJ。表中の青色の数値は、オリジナル LED シナリオから引き継いだ値、緑色の数値は、シナリオの整合性を高めるために修正した値を示す。

この分析により、LED シナリオの 2050 年予測におけるモビリティの違いを概観することができる。グローバル・ノースでの活動の増加は少ないが、グローバル・サウスではより大幅な増加が見られる。エネルギー需要への影響という点では、構造的変化

（交通機関の変化、シェアモビリティの増加）が、グローバル・サウスにおけるエネルギー需要の主要な削減要因であり、エネルギー原単位の適正化（燃費を向上した車両）の役割はあまり大きくない。グローバル・サウスでの状況は逆に、原単位の改善による効果が、構造的変化による効果を圧倒する。発展の遅れを取り戻すことによる、自家用車の増加といった負の構造的効果が、巨大都市における公共交通機関へのモーダルシフトや、シェアモビリティの拡大によって部分的に緩和されている。この 2 つの効果が組み合わさることで、LED のシナリオに沿って、活動レベルの増加にもかかわらず、グローバル・サウスにおける輸送エネルギー使用の絶対量が削減される。

素材（産業）部門との垂直的なつながりを探るため、DETRAs 内でシンプルな自動車の在庫モデルを開発し、想定寿命と組み合わせることで、一年間の自動車の売上率を簡略化して表現した。2021 年の Pauliuk らによる一般車両の素材構成を用い、車両の売上率の計算に必要な年間素材量を導き出している。

また、DETRAS の枠組みにおける水平連鎖の定式化、すなわち都市密度の増加と土地利用への影響についても分析する必要が生じた。高密度・多目的な都市設計の特徴として、より環境に優しく健康的な都市交通の選択肢を増やす可能性があること（Creutzig et al.）があげられる。この都市形態の変数の代用として、DETRAS では住宅床面積に占める多世帯住宅の割合を定量化した。2020 年にグローバル・ノースで 43%、グローバル・サウス 47%から、2050 年にグローバル・ノース 84%、グローバル・サウス 80%へと増加する。都市形態と都市密度に対する輸送機関の暫定的な弾力値として、自家用車は-1.5%、シェアカーは+0.5%、公共交通機関、二輪・三輪自動車、アクティブな移動は+0.2%を適用した。 都市形態がシナリオのベースライン（2050 年までに世界全体で 50%と仮定）に対して何%変化したかに応じて、輸送機関が変化し、この構造的効果により輸送エネルギー需要も変化する。（構造的効果に焦点を当てた分析のため、モードごとの強度は基本値として維持される。）このように、建築環境（建物）と輸送手段の水平的なつながりを例示的に定量化した結果を図 5.4.1-8 に示す。

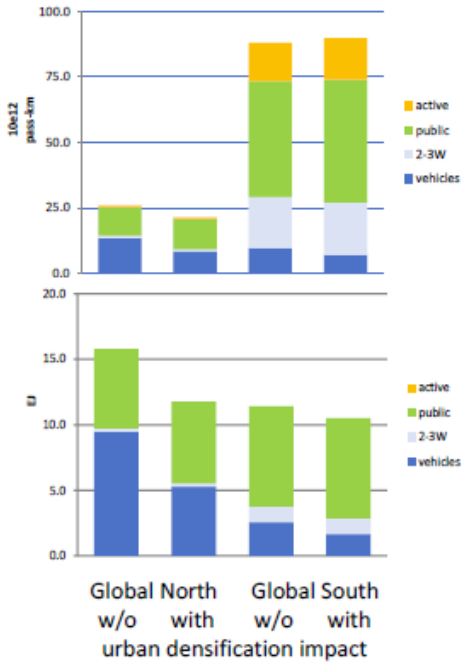


図 5.4.1-8 モビリティとエネルギー需要への影響のシミュレーション

（注）都市密度と土地利用の機能性を高めることで、移動距離が短くなり、アクティブな移動（徒歩と自転車）がしやすくなった場合を想定し、その他の条件は一定。上図がモビリティの影響（Trillion pass-km）、下図がエネルギー需要への影響（EJ）（徒歩や自転車などのアクティブな移動は外部からのエネルギー投入を必要としないため表示していない）。2050 年のグローバル・ノース（左 2 本）とグローバル・サウス（右 2 本）、および都市の高密度化（住宅数に占める多世帯住宅の割合で表す）を行わない場合と行う場合についてシミュレーションした。

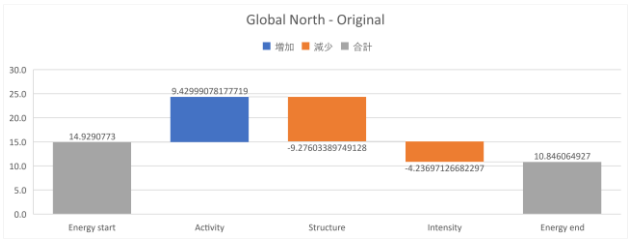
この感度分析から、2 つの重要な結論が得られた。第一に、モビリティが輸送エネルギー需要に与える影響は非常に大きいため、DETRAS の今後の開発にこの水平方向のつながりを明確に含めるべきであるという示唆が得られた。第二に、定量的な影響は地域ごとに多様である。グローバル・ノースでは、都市空間の再編と高密度化がモビリティとエネルギー需要により顕著な影響を与えるが、グローバル・サウスでは、都市の高密度化と土地利用の多目的化による、徒歩や自転車などのアクティブな移動の促進といった移動手段の選択への影響はわずかに増加するだけである。これはベースラインのシナリオにおいて公共交通機関と二輪・三輪自動車の割合が高いことに起因していると思われる。しかし、今回の暫定的な分析結果から、都市の高密度化と土地利用の政策が、低エネルギー需要への転換において明らかな影響を持ちうることが確認された。この影響は、都市の高密度化による他の部門（インフラ、商業・公共建築物、輸送車両の素材など）への水平的な連関が考慮されれば、さらに大きくなる可能性がある。

④　貨物輸送

次に、中間的な部門として、貨物輸送部門を取り上げる。LED シナリオのモードを拡張し、長距離輸送と短距離輸送、ラストワンマイル輸送、化石燃料と電化促進システムも含めた。さらに、デジタル化が物流のオペレーション効率に与える影響も考慮し、標準物流と最適化物流（空荷輸送が少ない）を区別している。図 5.4.1-9 に LED シナリオのデータをさらに分解し、ASI 分析を行った結果を示す。修正した商品輸送シナリオの数値と、オリジナル LED シナリオと修正シナリオを比較した ASI 展開として報告している。

	2020_GlobalNorth			2050_GlobalNorth		
	Activity (bn t.km)	Intensity (MJ/t.km)	Final Energy (EJ)	Activity (bn t.km)	Intensity (MJ/t.km)	Final Energy (EJ)
ICE truck (long distance) - standard	5197	2.0	10.3	2769	1.4	3.8
ICE truck (long distance) - optimised	577	1.5	0.9	1187	1.1	1.3
EV truck (long distance) - standard	0	0.7	0.0	2769	0.4	1.2
EV truck (long distance) - optimised	0	0.5	0.0	1187	0.4	0.4
ICE van (short distance) - standard	2227	1.0	2.3	554	0.7	0.4
ICE van (short distance) - optimised	247	0.8	0.2	237	0.6	0.1
EV van (short distance) - standard	0	0.3	0.0	2769	0.2	0.6
EV van (short distance) - optimised	0	0.3	0.0	1187	0.2	0.2
micro EV (last mile) - standard	0	0.1	0.0	2215	0.1	0.2
micro EV (last mile) - optimised	0	0.1	0.0	949	0.1	0.1
rail	6645	0.2	1.3	15331	0.2	2.5
shipping	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
aviation	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
Total	14894	1.00	14.9	31153	0.35	10.8

	2020_GlobalSouth			2050_GlobalSouth		
	Activity (bn t.km)	Intensity (MJ/t.km)	Final Energy (EJ)	Activity (bn t.km)	Intensity (MJ/t.km)	Final Energy (EJ)
ICE truck (long distance) - standard	10821	1.1	12.4	3689	1.2	4.3
ICE truck (long distance) - optimised	1202	0.9	1.1	1581	1.0	1.5
EV truck (long distance) - standard	0	0.7	0.0	1845	0.5	1.0
EV truck (long distance) - optimised	0	0.5	0.0	791	0.4	0.3
ICE van (short distance) - standard	7214	0.5	3.5	1845	0.5	0.9
ICE van (short distance) - optimised	802	0.4	0.3	791	0.4	0.3
EV van (short distance) - standard	0	0.3	0.0	922	0.3	0.3
EV van (short distance) - optimised	0	0.2	0.0	395	0.2	0.1
micro EV (last mile) - standard	0	0.1	0.0	922	0.1	0.1
micro EV (last mile) - optimised	0	0.1	0.0	395	0.1	0.0
rail	9123	0.2	1.5	37828	0.2	7.7
shipping	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
aviation	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
Total	29162	*0.64*	18.8	51003	*0.32*	16.6



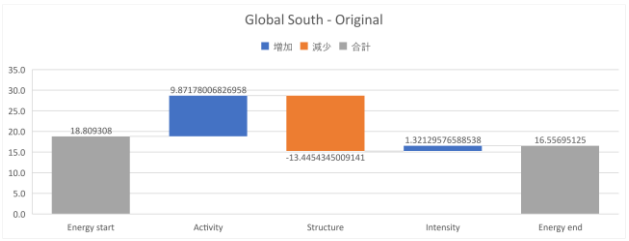


図 5.4.1-9 グローバル・ノース（左図）とグローバル・サウス（右図）における貨物輸送の ASI 分析（上図）とエネルギー需要への影響（下図）

（注）青＝増加、オレンジ＝減少、グレー＝2020 /2050 年の最終エネルギー、単位：EJ、オリジナル LED シナリオ

この例で、診断ツールとしての分析と分解カスケードでの可視化の価値が明らかになる。LED シナリオの部門別予測の見直しと精査に多大な労力を費やしたにもかかわらず、オリジナルの商品輸送シナリオ（活動レベルは主に GEA Efficiency シナリオに由来）は満足のいかないものだった。まず、シナリオの整合性という点で、グローバル・ノースの活動の増加（2 倍）がグローバル・サウスの活動より高いだけでなく、デカップリングと循環型社会というシナリオのストーリーや、素材の絶対使用量減少の予測とも矛盾している。そこで、今回の改訂では、商品輸送の伸びを LED のシナリオの素材使用予測に関連付けた。さらに、グローバル・サウスでは、農村から都市への移転とグローバル化の進展による供給変動の長期化を想定した。

また、LED の最終エネルギーの総量を維持するためには、グローバル・サウスのエネルギー原単位の改善率が基本的にゼロに近づき、むしろわずかにプラスに転じる必

要がある。このことからも、貨物輸送部門については、オリジナルの LED シナリオを抜本的に見直す必要があることがわかる。DETRAS では、これは容易に行うことができる。図 5.4.1-10 に示すように、ユーザーがシナリオ値を（元のシナリオ値を維持したまま）変更し、影響を直接比較することができるからである。

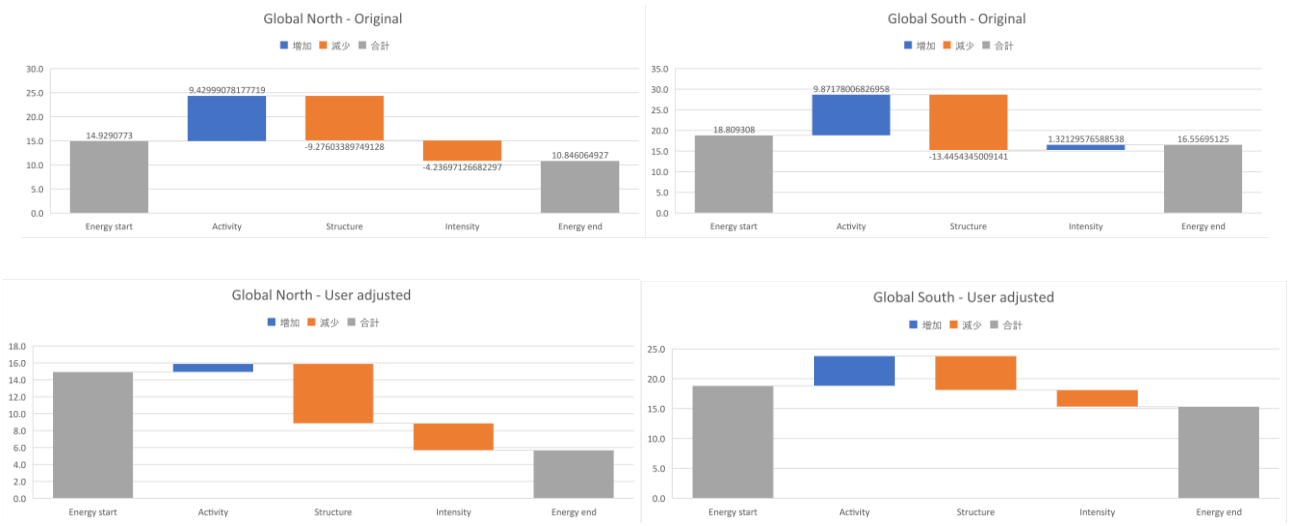


図 5.4.1-10 グローバル・ノース（左図）とグローバル・サウス（右図）における オリジナル LED シナリオ（上図）と シナリオの整合性を高めた修正版シナリオ（下図）

貨物輸送の修正値を表 5.4.1-2 に記載した。シナリオの整合性を高めるため、活動量、貨物輸送の最終エネルギー原単位をオリジナル LED シナリオから修正した。なお、これらの修正は予備的なものであり、貨物輸送部門におけるオリジナル LED シナリオ開発チーム全体による更なる分析と精査、最終的には再修正を待つものであることに留意されたい。素材との垂直的な関連性については、自家用車の場合と同じ手順を踏んでいる。トラックの素材ニーズは Wolff et al. 2020 から引用した。

表 5.4.1-2 貨物輸送の修正値

	2020_GlobalNorth			2050_GlobalNorth		
	Activity (bn t.km)	Intensity (MJ/t.km)	Final Energy (EJ)	Activity (bn t.km)	Intensity (MJ/t.km)	Final Energy (EJ)
ICE truck (long distance) - standard	5197	1.97	10.3	1441	1.37	2.0
ICE truck (long distance) - optimised	577	1.55	0.9	618	1.11	0.7
EV truck (long distance) - standard	0	0.68	0.0	1441	0.44	0.6
EV truck (long distance) - optimised	0	0.53	0.0	618	0.36	0.2
ICE van (short distance) - standard	2227	1.01	2.3	288	0.69	0.2
ICE van (short distance) - optimised	247	0.79	0.2	124	0.56	0.1
EV van (short distance) - standard	0	0.34	0.0	1441	0.22	0.3
EV van (short distance) - optimised	0	0.26	0.0	618	0.18	0.1
micro EV (last mile) - standard	0	0.11	0.0	1153	0.07	0.1
micro EV (last mile) - optimised	0	0.09	0.0	494	0.06	0.0
rail	6645	0.20	1.3	8235	0.17	1.4
shipping						
aviation						
total	**14894**	***1.00***	**14.9**	**16471**	***0.35***	**5.7**
LED original	*14894*	*1*	*15*	*31153*	*0*	*11*

	2020_GlobalSouth			2050_GlobalSouth		
	Activity (bn t.km)	Intensity (MJ/t.km)	Final Energy (EJ)	Activity (bn t.km)	Intensity (MJ/t.km)	Final Energy (EJ)
ICE truck (long distance) - standard	10821	1.15	12.4	6570	0.95	6.3
ICE truck (long distance) - optimised	1202	0.90	1.1	2816	0.77	2.2
EV truck (long distance) - standard	0	0.66	0.0	3285	0.43	1.4
EV truck (long distance) - optimised	0	0.52	0.0	1408	0.35	0.5
ICE van (short distance) - standard	7214	0.49	3.5	3285	0.40	1.3
ICE van (short distance) - optimised	802	0.38	0.3	1408	0.33	0.5
EV van (short distance) - standard	0	0.31	0.0	1643	0.23	0.4
EV van (short distance) - optimised	0	0.24	0.0	704	0.19	0.1
micro EV (last mile) - standard	0	0.10	0.0	1643	0.08	0.1
micro EV (last mile) - optimised	0	0.08	0.0	704	0.06	0.0
rail	9123	0.16	1.5	15643	0.16	2.5
shipping						
aviation						
total	**29162**	***0.64***	**18.8**	**39109**	***0.39***	**15.3**
LED original	*29162*	*1*	*19*	*51003*	*0.32*	*16.6*

（注）シナリオの整合性を高めるため、貨物輸送の活動量、最終エネルギー原単位をオリジナル LED シナリオより修正した。

⑤ 商用・公共施設

このカテゴリーは、大きなデータギャップがあり、グローバルモデルにおいてあまり表現されていない。今回、EU、日本、米国をグローバル・ノースの代理として、詳細な統計が入手可能な唯一の主要国である中国をグローバル・サウスの代理として、入手可能な統計データを使用し商業ビルと公共ビルの分解を行った。このデータギャップは、特に健康と教育分野における SDGs 分析に関わる建物利用形態別のより細かい解像度での拡張を難しくしている。次に、ヒートポンプシステムの適用可能性を想定し、燃料や最終エネルギー効率を変更することで構造的な効果も把握した。

この分析では、建物の種類や地域ごとのシナリオの整合性を高めるため、オリジナル LED シナリオに変更を加えた。図 5.4.1-11 はオリジナルシナリオ と 修正シナリオの数値とグラフである。全体的な差は比較的小さい（オリジナル LED シナリオと比較して、世界全体で+1EJ）結果となった。両地域とも、2 つの建物タイプにのみ集約した

結果、構造的な影響は軽微であることがわかる。なお、シナリオの整合性を高めるため、グローバル・サウスでのエネルギー原単位の改善幅を小さくしている。

	2020_GlobalNorth			2050_GlobalNorth		
	Activity (bn m2)	Intensity (MJ/m2)	Final Energy (EJ)	Activity (bn m2)	Intensity (MJ/m2)	Final Energy (EJ)
commercial conv	15.1	538.0	8.1	9.0	152.9	1.4
commercial HP	0.0			3.8	51.0	0.2
public conv	8.9	538.0	4.8	9.1	125.1	1.1
public HP	0.0			3.9	37.5	0.1
Total	24.0	538.0	12.9	25.8	110.5	2.8

	2020_GlobalSouth			2050_GlobalSouth		
	Activity (bn m2)	Intensity (MJ/m2)	Final Energy (EJ)	Activity (bn m2)	Intensity (MJ/m2)	Final Energy (EJ)
commercial conv	21.8	443.0	9.7	30.5	110.0	3.4
commercial HP	0.0			7.6	36.7	0.3
public conv	17.2	443.0	7.6	30.4	100.0	3.0
public HP	0.0			7.6	33.3	0.3
Total	39.0	443.0	17.3	76.1	91.0	6.9

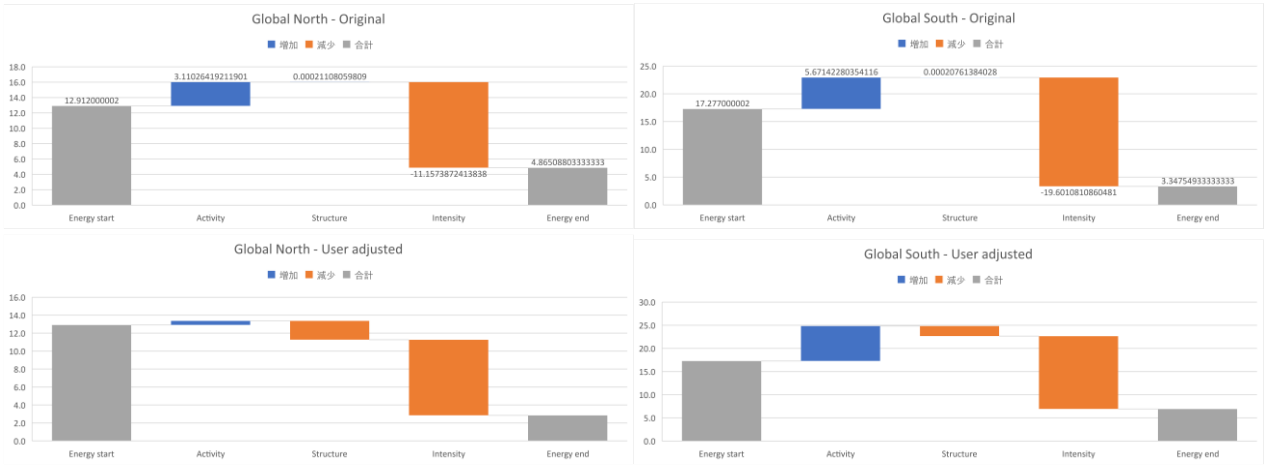


図 5.4.1-11 グローバル・ノース（左図）とグローバル・サウス（右図）における商用・公共施設の ASI 分析（上図）とエネルギー需要への影響（下図）

（注）下図青＝増加、オレンジ＝減少、グレー＝2020 年／2050 年の最終エネルギー単位：EJ。オリジナルシナリオ：上段、修正シナリオ：下段。表中の青色の数値は、オリジナル LED シナリオから引き継いだ値、緑色の数値は、シナリオの整合性を高めるため修正した値を示す。

素材部門との垂直的な関連性については、商用・公共施設の素材量に関する実証文献が極めて少ないため、一次近似値を使用した。この推計では、集合住宅（Pauliuk et al., 2022）の素材利用率を、高層集合住宅と比較的階数の少ない商業・公共施設（オフィスタワーを除く）の設計の違いを反映した容積率でスケーリングしている。

⑥ 素材部門

図 5.4.1-12 は素材の入力データを示したものである。オリジナル LED シナリオを維持しつつ、脱素材の取り組み（軽量化、長寿命化、修理可能性等）の効果も含めることで分析を拡張した。脱炭素化の取り組みは、素材効率／原単位指標に集約され、オリジナルベースラインシナリオ（IEA ETP 2DS, IEA, 2017）に適用している。この場合、エネルギー原単位と明らかに類似しているが、「素材原単位」も、素材使用における出力ミックスや特性を大きく変化させる構造変化項であることに留意されたい。また、素材リサイクルなどの循環性を考慮すると共に、ASI 分析に必要な「その他の素材」に

相当する換算を推計した。「その他の素材」はオリジナル LED シナリオではエネルギー項でのみ考慮されていた。

構造項として、素材原単位と構造変化（リサイクルの割合が高い）の両方を考慮すると、素材部門も他の部門の結論、すなわち構造変化が LED シナリオで示される需要変化の主要な部分を構成することが再確認される。2020 年／ 2050 年で世界全体の最終エネルギーは、構造変化による削減を含めた合計 58 EJ 削減され、そのうちエネルギー原単位の変化は 33 EJ 近くを占める。この数字は非常に大きく見えるが、年変化ベースで考えると、エネルギー原単位は年率 1%～1.5%（グローバル・サウス）変化しているに過ぎない。

また、DETRAS における素材フローモデルの内生化により、他の需要部門から素材への垂直連関の影響と LEDs シナリオ構造の影響を比較することができる（詳細は 5 節参照）。素材連関による素材需要への影響は 9Gt（2050 年の 55%）、素材関連エネルギー需要への影響は 25EJ（2050 年の 27%）近くに相当する。一方、構造による影響は、素材部門における 2020 年／2050 年のエネルギー需要の変化のうち 25EJ（2020 年 58EJ →2050 年 33EJ）を占める。したがって、双方が同等の影響力を持つ。このことは、DETRAS を用いたエネルギー需要のモデル化において、構造変化と部門間の連関の両方を考慮することの重要性を裏付けている。なお、垂直的な素材連関の影響は第 5 節で詳しく説明するため、図 5.4.1-12、図 5.4.1-13 では示していない。

	2020_GlobalNorth				2050_GlobalNorth			
	Activity base Gte	Material intensity t/te	Energy intensity GJ/t	Final energy EJ	Activity base Gte	Material intensity t/te	Energy intensity GJ/t	Final energy EJ
Steel virgin	0.20	1.00	19.73	**3.92**	0.08	0.25	19.00	0.39
Steel recycled	0.31	1.00	15.76	**4.91**	0.47	0.25	10.00	1.16
Al virgin	0.02	1.00	60.00	**1.10**	0.01	0.31	167.51	0.38
Al recycled	0.02	1.00	30.00	**0.59**	0.04	0.31	25.00	0.32
Cement	0.49	1.00	6.05	2.94	0.54	0.80	1.96	0.85
Paper virgin	0.08	1.00	20.00	**1.58**	0.04	0.50	10.16	0.20
Paper recycled	0.15	1.00	17.00	**2.55**	0.22	0.50	7.00	0.78
Petrochemicals	0.21	1.00	51.38	11.00	0.19	0.75	11.69	1.71
Other	1.27	1.00	10.00	12.68	1.32	1.00	10.00	13.23
Feedstocks	0.27	1.00	72.13	19.43	0.15	0.68	68.97	7.08
Total	3.02	1.00	20.13	**60.70**	1.59	0.64	25.73	26.10
	1.75			59.7				25.7

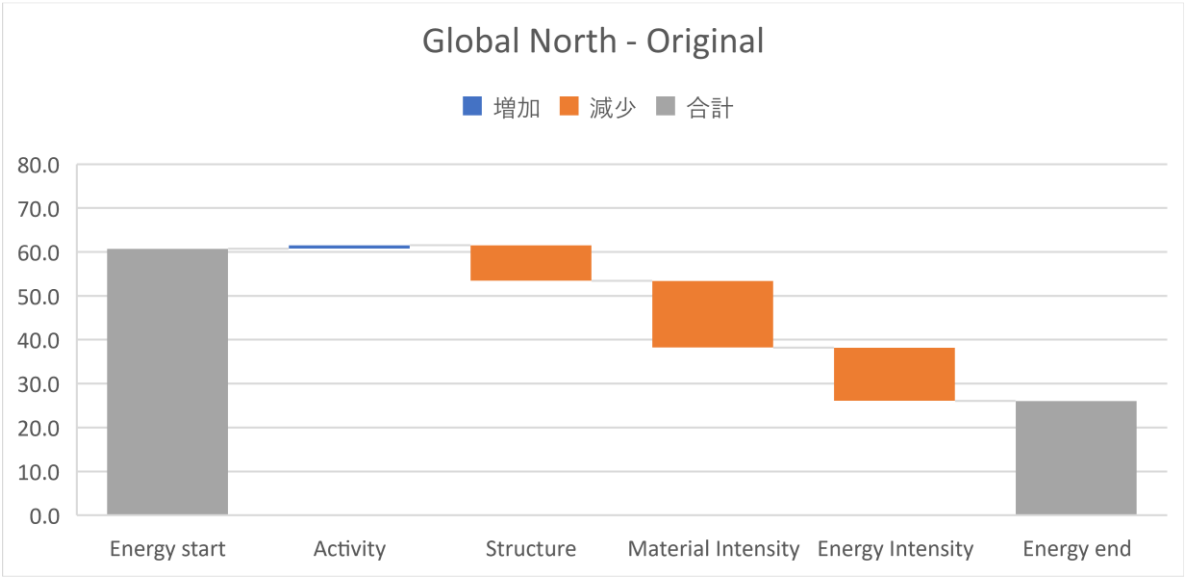
*excludes "other materials"

	2020_GlobalSouth				2050_GlobalSouth			
	Activity base Gte	Material intensity t/te	Energy intensity GJ/t	Final energy EJ	Activity base Gte	Material intensity t/te	Energy intensity GJ/t	Final energy EJ
Steel virgin	0.93	1.00	22.00	20.49	0.24	0.25	19.17	1.14
Steel recycled	0.31	1.00	15.76	4.89	1.37	0.25	15.00	5.06
Al virgin	0.05	1.00	53.75	2.44	0.03	0.31	137.12	1.31
Al recycled	0.05	1.00	30.00	1.47	0.17	0.31	25.00	1.35
Cement	3.86	1.00	2.17	8.37	4.55	0.80	1.98	7.20
Paper virgin	0.08	1.00	25.00	1.92	0.04	0.50	13.00	0.23
Paper recycled	0.12	1.00	17.00	1.96	0.20	0.50	7.00	0.70
Petrochemicals	0.21	1.00	68.44	14.16	0.81	0.75	15.80	9.58
Other	4.61	1.00	10.00	46.14	4.23	1.00	10.00	42.30
Feedstocks	0.57	1.00	26.95	15.48	0.86	0.68	25.63	15.00
Total	10.78	1.00	10.88	117.30	12.50			83.86
	6.17			105.41	8.27			81.65

*excludes "other materials"

図 5.4.1-12 グローバル・ノース（上図）とグローバル・サウス（下図）における素材の ASI 分析

（注）データ表中の青の数字は、オリジナル LED シナリオから引き継いだ値、緑の数字は、シナリオの整合性を高めるために修正した値を示す。



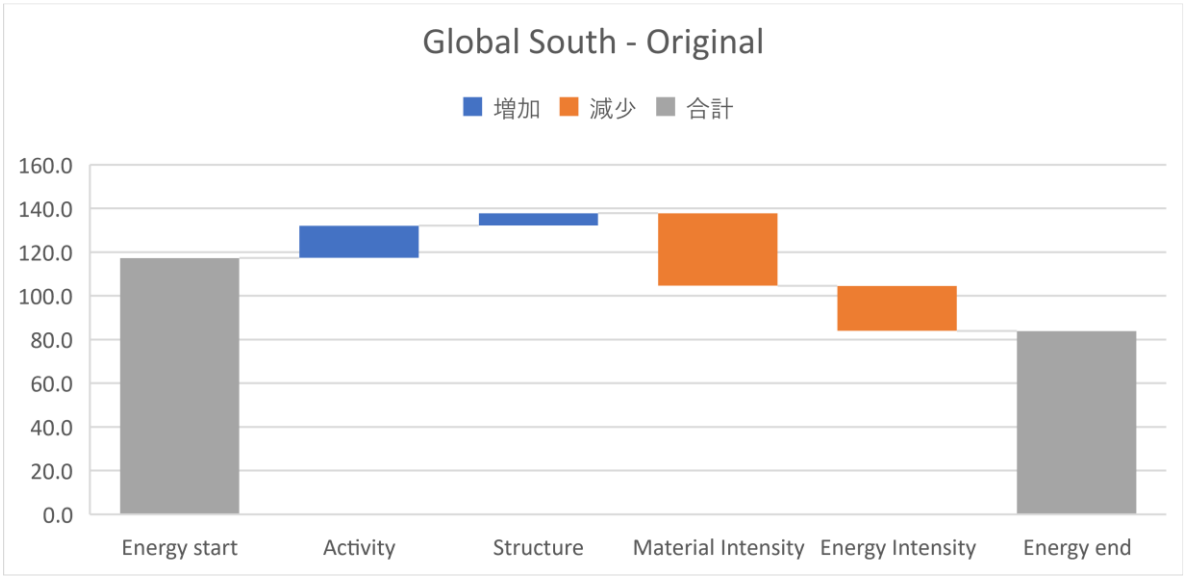


図 5.4.1-13 グローバル・ノース（上図）とグローバル・サウス（下図）におけるエネルギー需要に対する ASI 分析と影響

（注）青＝増加、オレンジ＝減少、グレー＝2020 年／2050 年の最終エネルギー、単位：EJ

(4) ASI 分析によるシナリオの整合性評価

図 5.4.1-14 では、3 章で行った分析と ASI 分析（活動、構造、原単位）の結果を、グローバル・ノースとグローバル・サウスに分け、オリジナル LED シナリオと本研究による修正シナリオに基づき、各種需要カテゴリーで比較した結果を示している。

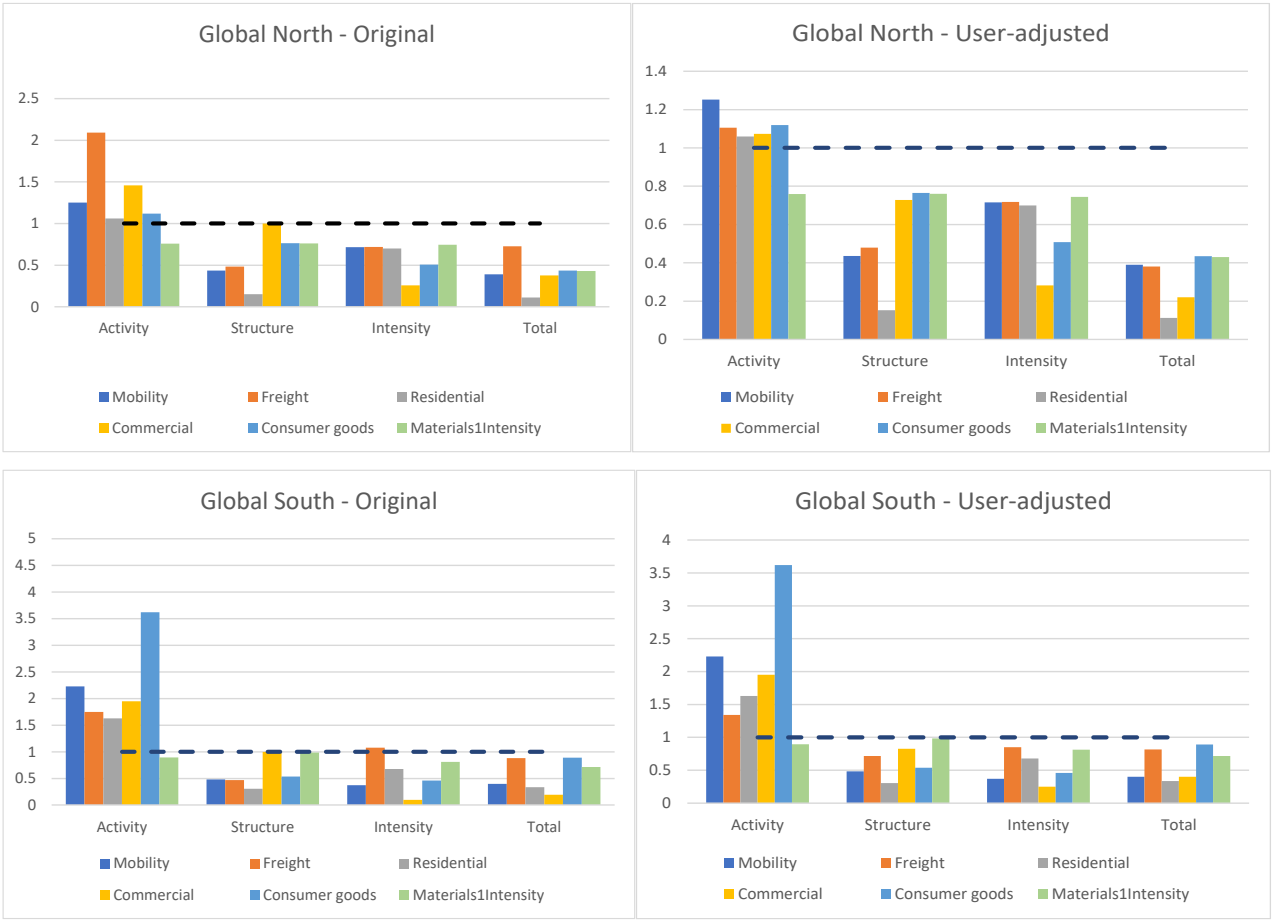


図 5.4.1-14 ASI 分析から見た DETRAS の全需要カテゴリーにおける
2020 年／2050 年の変化要因
グローバル・ノース（左図）、グローバル・サウス（右図）

（注）1 以上の値は増加、1 未満の値は減少を示す。オリジナル LED シナリオ（上図）、本研究による修正シナリオ（下図）。素材の intensity_2 変数は、素材効率の向上を示しており、これは原単位であると同時に構造項でもある。

活動変数は、グローバル・サウスにおいて他の項目より著しく高い。これは人口増加と必要な開発を反映しており、該当する LED シナリオのストーリーライン・ナラティブ（Grubler et al. 2017）で説明され、定量化されている。グローバル・サウスにおける活動変数の伸びは、消費財とモビリティにおいて特に目を見張るものがある。グローバル・ノースの活動変数は高いレベルで飽和すると予測され、（もともとデジタルコンバージェンスとシェアを想定していなかった）オリジナルの LED シナリオでみられた商品輸送と消費財の非整合的な大きな乖離が、この改訂で修正されている。

構造変化は、すべての分野と地域において重要な要因となった。オリジナルシナリオになかった消費財での構造変化が、デジタルコンバージェンス、シェア、そしてすべての人に適正な生活水準を保証するという意味での成長を詳細に表現することで追加された。居住用建物と輸送（乗客・貨物）は、構造変化による需要インパクトが最も大きい需要カテゴリーである。これは、ここでの構造項に含まれている、サービス提供方法（従来の建物からゼロエネルギー型の建物へ、あるいは自動車による個別輸

送からシェアモビリティや公共輸送へ）や、対応するエネルギーサービスの提供方法（ヒートポンプや電気自動車の影響）の変化に幅広い選択肢があることを反映している。その他の需要カテゴリーでは、構造変化の影響はより小さく、一般的に 2020 年と 2050 年の間に対応するエネルギー需要削減の 3 分の 1 に相当する。

素材や追加した素材原単位も含むエネルギー原単位は、グローバル・サウスにおける貨物輸送のエネルギー原単位の悪化を鑑みたとしても、オリジナル LED では非常に不均一であった。修正後、エネルギー原単位は部門間で一貫して改善しているが、いくつかの原単位の改善予測（グローバル・ノースの商業・公共施設、グローバル・サウスの輸送機関）はかなり楽観的で、さらなる精査と分析が必要である。全体的に、構造変化の影響を考慮した後のエネルギー原単位の改善は、通常であれば 30%から 40%程度である。その結果、年間原単位改善率は 1～1.5%となり、過去の実績とほぼ一致する。したがって、LED のような低エネルギー需要シナリオでの需要の変化が、技術的にみて楽観的もしくはエネルギー効率が高いエンドユース技術の導入という点で非現実的であるとは言い難い。設計上、シナリオがより急進的になるのは、サービス提供方法における構造変化であるが、そこでも（居住用住宅のストック以外では交通機関選択の重要性が低い）シナリオ予測は、特に過去の類似例（近代調理技術や運搬車両による従来のバイオマスの置き換え、あるいは馬から自動車への移行）と比較すると、あまり急進的とは言えない（図 5.4.1-14 の指標では構造変化項は 0.3 である）。

エネルギー総需要において、今回の LED の改訂は重要な分水嶺となっている。想定されている 2 つの地域双方とも、どの需要カテゴリーにおいても絶対量の増加がみられなかった。（オリジナル LED シナリオでは、商業・公共施設と消費財において、最終エネルギー需要の絶対量が増加していた。）これは、「より少ないものでより多くのものを」という LED シナリオの全体的なシナリオに沿ったものであり、より少ない資源使用量でより高いレベルのサービス提供と物質的豊かさを実現するものである。

需要モデリングの方法論として、DETRAS で提案した拡張分解と ASI 分析のアプローチは、整合的な分析枠組みにおいて、様々なエネルギーの最終需要を比較し、多様な需要間における整合的な変化のダイナミクスを達成するという、長年の問題に対して非常に有効であることを証明したと結論付けている。ASI 分析（図 5.4.1-14）により、部門間の類似点と相違点を素早く概観することができ、また、ユーザー定義のシナリオを追加することで、感度分析やシナリオの修正を素早く行うことが可能である。ASI 分析のカスケード集計（世界レベルの分析については図 5.4.1-15 を参照）により、需要サイドの主な変化要因について簡単に把握することができる。

しかし（同様の需要サイドの変化と、従来の基本ケースをいくつか含めるような）より多くのシナリオサンプルがあれば、分解と ASI 分析よるシナリオの傾向の比較評価により有用であるだろう。このようなシナリオをただ入れることは容易だが、有用なデータ入手の問題に直面した。分析を可能にする詳細な需要サイドシナリオがまだ開発されておらず、今回紹介したような LED に関する詳細なデータセットを見つけることができなかった。また、第三者シナリオの詳細なシナリオ解釈を自ら作成する人的・時間的資源もなかった。しかし、EDITS イニシアチブのようなコミュニティの継続的な努力によって、このデータ入手の問題が最終的に軽減されることを期待してい

る。そうでなければ、ビル・ノードハウス（1973）がかつて「データなき測定」と呼んだジレンマに、需要サイドのアプローチは直面し続けることになるだろう。

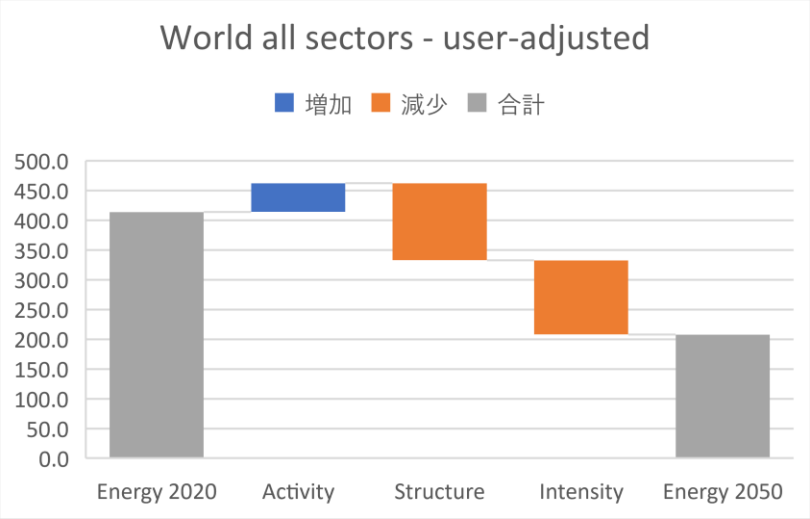


図 5.4.1-15 LED シナリオ 2020 年／2050 年改訂版の ASI 分解（単位：EJ）、部門間の連関効果を除く

また、需要フレームワークの中で内生化した構造変化やエネルギー原単位改善率の定量的な指標を持てると非常に望ましい。今回達成できなかったが、当初、構造変化率を人的資本の変化や新しいライフスタイルの出現・普及に連動させるような定式化のプロトタイプを開発・検証する計画があった。同様に、エネルギー原単位の改善率を資本回転率、政策、経済変数と関連付け、シナリオ予測の整合性と妥当性の評価に使える境界値を提案できるようにする予定であった。感染症の世界的な流行による国際共同研究の難しさから、これらの計画は遅れてしまったが、今後の優先的研究課題として位置づけている。

(5) 部門間の連関の探求

① 水平的連関

今回の DETRAS プロトタイプの実現可能性研究では、時間の制約から需要部門間の水平的連関を完全に内生化することはできなかった。しかし、(3)において、2 つの水平的連関がもたらす 2 つの影響について説明してきた。居住用住宅に代表される都市形態（密度や複合用途化）がモビリティに与える影響と、素材需要の変化が貨物輸送に与える影響（上記(3)で述べた貨物輸送シナリオの見直しを参照）である。いずれの場合も、定量的なシナリオの影響は大きくなっている。

都市集落の高密度化と複合用途化の影響により、グローバル・ノースでは旅客輸送レベルが低下し、公共交通機関とアクティブな移動（徒歩と自転車）の割合が高まるという大きな構造変化が生じる。その結果、旅客輸送エネルギー需要にも大きな影響が及んでいる。グローバル・サウスでも、若干その傾向がみられ、徒歩と自転車といったアクティブな移動が輸送における総活動レベルを若干上昇させる。今回の叙述シ

ナリオでは、都市の高密度化と土地の機能的利用の組み合わせの改善により、世界における旅客輸送のエネルギー使用量は 20%近く（約 5 EJ）減少する。この効果は明らかに他の需要分野（商業・公共施設、貨物輸送、垂直的な関連性を通じた素材部門など）にも影響を与え、旅客輸送で定量化された影響を増幅させるだろう。

水平連関の第二の例として、素材生産・使用と商品輸送量の連関を探った。オリジナル LED シナリオでは、各地域のマテリアルフットプリントでは、素材の効率化戦略（修理可能性、軽量化などによる商品寿命の延長）によるデカップリングが増加し、循環（再利用とリサイクルの増加）することで素材需要の増加が抑えられる。逆に、（GEA 効率化シナリオのテンプレートに沿った）オリジナルの LED シナリオの貨物輸送分野では、貨物輸送量が大幅に増加し、2050 年までに全世界で倍増すると予測された。この二つの部門間の連関を考慮すると、オリジナル LED シナリオと比較して物資輸送量は 50 数％減少する。しかし、大量生産の素材フローが減ることで、割に合わない鉄道やパイプラインの代わりにトラック輸送の割合が増える負の構造的効果のために、貨物輸送エネルギー削減量は物資輸送量に比例せずわずか（マイナス 5%）である。この結果は予備的ではあるが、部門別のエネルギー需要を検討する際には、部門間の関連性やシナリオの整合性に注意する必要があることを示唆しており、DETRAS の枠組みの根拠となっている。

② 素材の垂直的連関

これまでの分析と上記(3)節で述べた主な最終需要部門別の素材使用量概算を基に、DETRAS のフレームワークにおける部門間の「縦のつながり」の例として素材のつながりをまとめ、オリジナル LED シナリオと比較してみることにする。この比較では、LED における素材需要は、素材効率化戦略を考慮しない「総需要」（Gt-換算、Gte）と、製品の軽量化、寿命延長、再利用、再加工などの素材効率化戦略の影響を含む「正味需要」（Gt）の 2 つの指標によって表される。

ここでは、輸送車両（自動車とトラック）、建物（居住用建物と商業・公共施設）、家電製品およびその他の消費財からの素材連関を考慮する。インフラ、産業（機械、資本ストック）、その他の最終需要（包装など）に対する素材需要は、ここで報告した部門別連関には含まれていない。この省略が、モデル化した素材連関でどのくらい大きなバイアスを与えるか、製品／用途別の素材使用量の詳細なデータがないため現在のところ包括的な比較は不可能であるが、入手可能な鉄鋼の利用収支詳細（Cullen et al.、2012 年）により定量化は可能である。DETRAS の連関でモデル化された製品／用途カテゴリーは、世界の鉄鋼使用量の 55%を占めている。すなわち、省略バイアスは 45%で、産業機器（16%）、インフラ（14%）、その他の製品（包装材料などの金属製品、その他の材料、列車や船舶などの道路以外の輸送手段 15%）でほぼ均等に配分されている。この分析結果は、インフラや産業部門独自の素材ニーズを含めることで、将来的に DETRAS の拡張版で素材需要の大部分をカバーできると考えられる。

図 5.4.1-16 は、ユーザー指定による改訂版 LED シナリオにおいて、世界的な DSL 達成による影響だけでなく、素材の垂直的な連関も考慮した場合の集計を示したものである。ここでは、エネルギー需要、活動、構造、原単位、最終的なエネルギー変化

等、すべての特徴的な決定要因の連関を考慮している。最終エネルギーに関しては、連関を考慮しない場合と考慮した場合の差は 34EJ であり、本研究で考慮した部門間の連関が限定的であることを考えると、16%の変化となる。

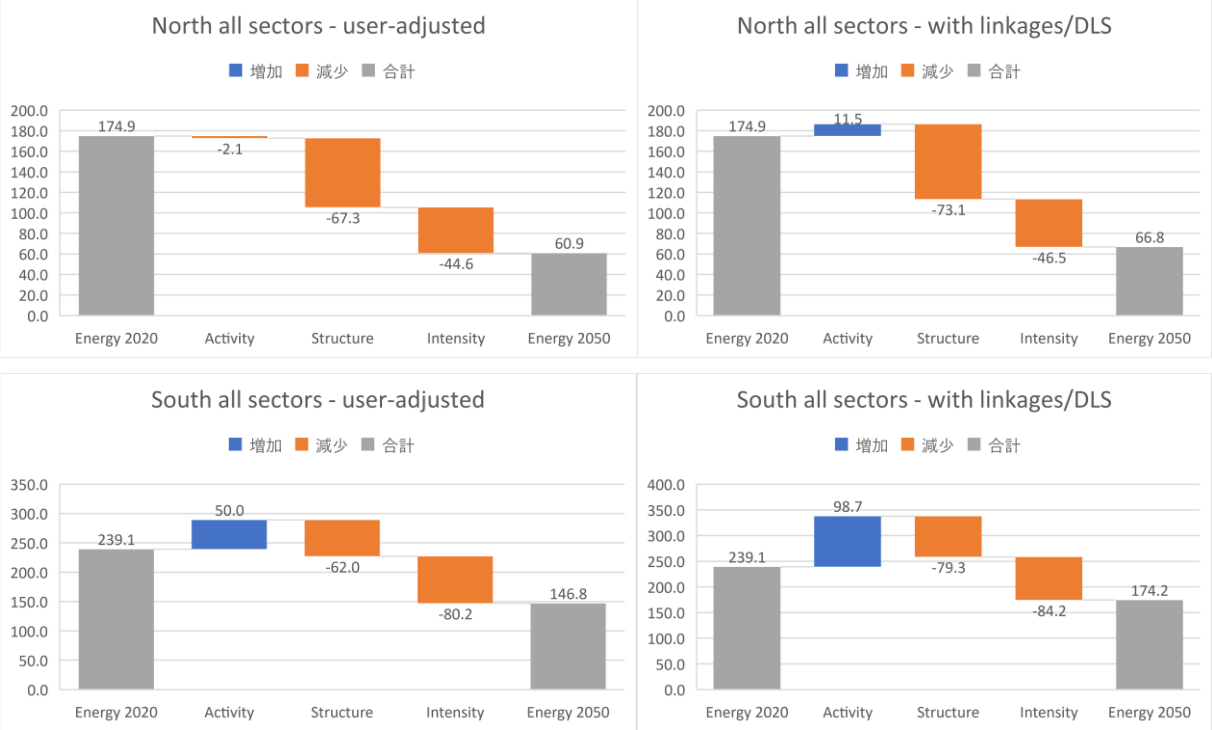


図 5.4.1-16 素材と DSL の部門間の需要連関を考慮しない場合（左図）と考慮した場合（右図）の ASI 分解（寄与度別 EJ 単位）
グローバル・ノース（上図）とグローバル・サウス（下図）

以下の表 5.4.1-3 は、DETRAS で内生化した素材連関を世界規模でまとめ、LED シナリオにおける素材フローの総量および正味量（素材効率化戦略を含む）と比較したものである。全体として、垂直方向の素材連関は、素材総量の 56%、正味量の 74%を占めている。

表 5.4.1-3 2050 年までの世界の素材需要

World 2050										
	LED	*LED*	Activity from sectorial linkages							
	original	*w. mat_eff*	freight	mobility	res_bld	comm_bld	cons-goods	total	% of LED	% of LED
	Gte	*Gt*	Gte	Gte	Gte	Gte	Gte	Gte	Gte	Gt
Steel	*2.2*	*0.5*	0.563	0.260	0.783	0.246	0.189	2.0	94	383
Al	*0.3*	*0.1*	0.162	0.018	0.014	0.004	0.015	0.2	85	272
Cement	*5.1*	*4.1*	0.000	0.006	4.448	1.396	0.000	5.8	115	144
Paper	*0.5*	*0.2*	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0	0
Petrochemicals	*1.0*	*0.8*	0.045	0.017	0.000	0.000	0.000	0.1	6	8
Other	*5.6*	*5.6*	0.163	0.000	0.000	0.000	0.000	0.2	3	3
Feedstocks	*1.0*	*0.7*	0.000	0.000	0.217	0.064	0.051	0.3	33	48
Total	*15.6*	*11.9*	0.933	0.301	5.462	1.710	0.254	8.7	56	73

（注）LED シナリオの総量（素材効率化戦略なし、Gte）と正味（素材効率化戦略あり w. mat.eff、Gt）と、DETRAS でモデル化した最終需要部門別の素材連関（材料効率化なし、Gte）との比較。

この素材連関の推定は、特に鉄鋼、アルミニウム、セメントなどクリティカルマテリアルを考慮した、オリジナル LED シナリオにおける 2050 年の野心的な素材需要予測の妥当性を評価するためにも使用することができる。ここでは、内生的な素材連関が、LED の予測素材需要総量のほぼ全体（85%から 115%の範囲）を占めており、オリジナル LED シナリオの素材需要が過小評価されている可能性があることを示唆している。LED の正味の素材フロー（素材効率化戦略を含む）を考慮すると、状況はさらに劇的となり、部門間の連関でモデル化したこれら 3 つの商品は、LED の正味素材需要（Gt）の 140%から 400%を占めている。しかし、この結果は、部門間の連関が現在の自動車、家電、建物の素材構成に基づいてモデル化され、素材効率化戦略を一切考慮していないことを考えれば、驚くにはあたらない。しかしながら、これらの結果は、今後、設備やインフラのマテリアルフットプリントの LCA 研究で、素材効率の設計変更とビンテージターンオーバーモデル（寿命延長、再製造と再利用）の双方において、素材効率戦略を部門別需要モデリングに明示的に含める研究を行う必要性を示唆している。

上述の結果に関わらず、LED シナリオの素材需要予測は予備的なものであり、将来的に再修正される可能性があるため、現段階では修正を控えることとした。代わりに、現在欠けている素材需要に産業とインフラといった重要な部門を含め、部門別の素材推定に素材効率化戦略を明示的に含めることに、新たな努力を傾ける必要があると結論付けた。このことによって、オリジナルの LED シナリオにおけるやや楽観的な素材需要を最終的にどの程度見直す必要があるのかを判断するためのより包括的な数値的根拠を得ることができる。しかし、今年度実施した LED の数値修正により、2050 年の素材部門の最終エネルギー需要がオリジナル LED から 12 EJ 引き下げられたことを考えると、産業部門の 2050 年 LED の最終エネルギー需要の 108 EJ と比べるとかなり小さいとはいえ、素材部門を拡大できる余地があることとなる。

(6) 結論と今後の研究展望

本研究により、DETRAS 需要計算シミュレーションツールの提案は概念的にも技術的にも実現可能であり、既存の需要シナリオを確認・修正し、新たなシナリオ開発に結びつけるシンプルなフォーマットを提供できることが結論付けられた。ただしこれは当初予定していたすべての機能、すなわち複数の水平・垂直連鎖の適用や、構造・エネルギー原単位の変化に対する動的指標の提供（これらは現在の枠組みではまだ外生的に定式化しなければならない）を実現できなかったという条件下での結論である。また、ここで報告された研究や以下のような枠組みの制限も影響している。

- 世界 2 地域の粗い地域区分
- インフラ、製造、食料、水と衛生等の需要部門／活動が未反映
- シナリオ分析および修正プロセスに使える比較可能なシナリオ（ベースラインおよび低需要）の欠如
- パイロット版ソフトウェアの実装サイズ（スプレッドシート形式）が複雑で容量の限界に近いこと（特に埋め込みグラフィックス）

したがって、いくつかの領域については今後の研究および提案する DETRAS フレームワークの拡張・再設計の検討において特に注意を払うべきものである。

今後の研究課題は、ASI 分解が可能で、少なくとも世界 5 地域をカバーできるような、シナリオ用の詳細で適切なデータ ベースを確保することである。データがない場合、必然的にオリジナル LED シナリオによる需要シミュレーションに限定されるため、このツールを需要研究に広く適用できない可能性がある。

第二に、最終的に決定すべきモデルの部門別解像度を優先的に研究する必要がある。インフラ、製造業等、エネルギーと素材の使用に関わる重要な活動を含める必要があり、食料や水・衛生などエネルギー以外の SDGs に関連する部門／活動も DETRAS に含めるよう検討する必要がある。

第三に、各需要カテゴリー内の消費者集計に関する研究がある。当初、サービスが行き届いていない人口の割合、すなわち「人間として生きられる最低限の生活水準」（DSL）の閾値を下回っている人口を明示的に含めた拡張を提案し、必要な需要の伸びを枠組みの中で明らかする予定であった。消費財に関する研究では、この明示表現の実現可能性と影響を実証しているため、このモデルを他の部門でも踏襲するべきである。そのため、IIASA によるすべての人のための DSL がエネルギーにもたらす影響のモデル化に向けたデータ整備とモデリングの進展（Kikstra et al. 2022）は非常に重要である。

第四に、当初計画していた水平方向と垂直方向の素材部門間の連関を完成させることである。これまでの経験から、部門間の連関が多すぎると、ユーザーもモデルソフトウェアもすぐに圧倒されてしまうことがわかっている。したがって、望ましい反映と運用の妥協点を見つける必要があるだろう。水平方向の連関においては、都市の形態、密度、関連するすべての活動／部門の用途の組み合わせ、および素材と物資の輸送の連関を優先させるべきである。水平方向の連関については、脱物質化戦略を考慮する際に矛盾が生じないよう、部門ごとの素材需要と素材総量／産業部門との間の「循環経済」の連関によって、既存の素材の連関を完成・拡大する必要がある。

最後に、優先順位の高い順に、当初計画していたシナリオダイナミクスの内生的ガイドラインを検討する。DETRAS に組み込むのが望ましいが、上記の優先順位の高い研究領域に取り組み、結果の複雑性とフレームワークの使いやすさがより十全に評価されるまで待つ必要がある。フレームワークの階層が複雑化した結果、フレームワークに望まれるシンプルさ、使いやすさ、迅速なシナリオチェックと修正の機能が損なわれる危険性があるからである。

参考文献（第 5.4.1 節に関するもの）

1) Ang, B.W., 2004, Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? Energy Policy, 32:1131-1139, DOI: 10.1016/S0301-4215(03)00076-4
2) Ang, B.W., 2005, The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide, Energy Policy, 33:867-871. DOI: 10.1016/j.enpol.2003.10.010
3) Ang, B.W., 2015. LMDI decomposition approach: A guide for implementation. Energy Policy 86, 233–238. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.07.007

4) Bento, N., (2022 in preparation), The potential of digital convergence and sharing to lower the energy demand and the material consumption from consumer goods in 2050.
5) Berrill, P., Gillingham, K.T., and Hertwich, E.G., 2021, Drivers of change in US residential energy consumption and greenhouse gas emissions, 1990–2015, Environmental Research Letters, Volume 16, Number 3. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abe325/data
6) Creutzig, F., Roy, J., Devine-Wright, P., Diaz-José, J., Geels, F., Grubler, A., Maïzi, N., Masanet, E., Mulugetta, Y., Onyige Chioma, D., Perkins, P.E., Sanches Pereira, A., Weber E.U., (in press), Chapter 5: Demand, services and social aspects of mitigation, WGII 6th Assessment Report, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
7) Cullen J.M., Allwood, J.M., Bambach, M.D., 2012, Mapping the global flow of steel: From steelmaking to end-use goods, Environ. Sci. Technol. 46 13048–55. https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es302433p
8) Grubler A., Wilson C., Bento N., Boza-Kiss B., Krey V., McCollum D.L., Rao N.D., Riahi K., Rogelj J., De Stercke S., Cullen J., Frank S., Fricko O., Guo F., Gidden M., Havlík P., Huppmann D., Kiesewetter G., Rafaj P., Schoepp W.,Valin H., 2018, A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °c target and sustainable development goals without negative emission technologies Nat. Energy 3 515–27. http://dx.doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6
9) International Energy Agency (IEA), 2017, Energy Technology Perspectives 2017 – Catalysing Energy Technology Transformations, OECD/IEA, Paris, France.
10) Kikstra, J.S., Mastrucci, A., Min, J., Riahi, K., Rao, N.R., 2021, Decent living gaps and energy needs around the world, Environ. Res. Lett. 16 095006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c27
11) Krey, V., Grubler, A., Bento, N., Boza-Kiss, B., Creutzig, F., Mastrucci, A., Min, J., Ünlü, G., 2021, Upstream Sector Implications of Demand-side Transformations: The Case of Materials (LED-MAT), ALPS Report 2020: ALternative Pathways toward Sustainable development and climate stabilization (ALPS), Report to RITE, Japan, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
12) Moreau, V., De Oliveira Neves, C.A., Vuille, F., 2019. Is decoupling a red herring? The role of structural effects and energy policies in Europe, Energy Policy 128:243-252. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.028.
13) Nordhaus, W.D., 1973, World Dynamics: Measurement Without Data, The Economic Journal 83, 332:1156-1183
14) Pauliuk, S. Heeren, S., Berrill, P., Fishman, T., Nistad, A., Tu, Q., Wolfram, P., Hertwich, E.G., 2021, Global scenarios of resource and emission savings from material efficiency in residential buildings and cars, Nature Communications 12, 5097. https://www.nature.com/articles/s41467-021-25300-4
15) Riahi, K., F. Dentener, D. Gielen, A. Grubler, J. Jewell, Z. Klimont, V. Krey, D. McCollum, S. Pachauri, S. Rao, B. van Ruijven, D. P. van Vuuren and C. Wilson, 2012: Chapter 17 -Energy Pathways for Sustainable Development. In Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, pp. 1203-1306.
16) Reuter, M., Patel, M.K., Eichhammer, W., 2019, Applying ex post index decomposition analysis to final energy consumption for evaluating European energy efficiency policies and targets, Energy Efficiency 12:1329–1357. https://link.springer.com/article/10.1007/s12053-018-09772-w

17) Wolff, S., Seidenfus, M., Gordon, K., Alvarez, S., Kalt, S., Lienkamp, M., 2020, Scalable Life- Cycle Inventory for Heavy-Duty Vehicle Production, Sustainability 12(13), 5396. https://doi.org/10.3390/su12135396

5.4.2 サービス需要のトランスフォーメーションの素材需要・供給分析のモデル開発

(1) はじめに

鉄鋼、アルミニウム、セメント、プラスチックのプリカーサーとしての石油化学製品等、エネルギー集約型の素材生産は、世界の産業部門の CO_2 排出量の約 70%、産業の最終エネルギー消費の約 50%を占めており（IEA 2021）、昨年の ALPS プロジェクトの一環として開発してきた MESSAGEix-Materials のフレームワークにプロセスレベルで実装されている。また、鉄鋼生産の 20%、セメント生産の 16%、アルミニウム生産の 25%を担う住宅、小型車、発電部門の素材需要も MESSAGEix-Materials で表現されている。

当初のシナリオ分析から、持続可能な低炭素型エネルギーシステムへの変革に向けた課題をより理解するためには、内生的な素材需要の範囲を拡大し、素材需要の進展要因を生産段階とライフサイクル終了段階に結びつけることが極めて重要であるということである。電力部門など、現時点では年間の素材生産総量の比較的小さな割合しか消費しない部門や用途であっても、LED（Gruebler et al. 2018）のような変革的な低炭素開発シナリオにおいては、素材原単位の削減を促す対策をしていなければ、素材需要を大幅に押し上げ、10 年も経たないうちに相当量の素材を消費する。

これらの考察に基づき、MESSAGEix-Materials を 3 つの次元で拡張した。

①モデルの枠組みにおいて、素材需要を内生化する割合をより大きくし、素材の意味合いをより強固に理解すること、②原料抽出、前処理、再利用、リサイクルを含む素材のバリューチェーンを拡張することで、「ゆりかごから墓場」までの素材のライフサイクルのすべてをカバーすること、③エネルギー用の素材供給が地域に対して持つ意味と原材料と加工材の売買／貿易による排出量を調査することである。

低炭素化が資源と排出に与える影響の全体像を把握するため、内生的な素材需要の割合を拡大した。部門別では、鉄鋼とコンクリートの需要に大きく寄与するものとして、商業ビル部門を優先した(2)。素材サプライチェーンは、一方では原料や原材料の採掘、必要に応じて中間処理工程を、他方では特に非金属の再利用とリサイクルをより包括的に含めるように拡張した。この改良のため、プラスチックを重点分野として選んだ(3)。多くの素材において、貿易は原料、中間材、最終材という異なるレベルで行われている。このことを説明するため、窒素肥料を例として選んだ。窒素肥料では、原料（ほとんどが天然ガス、石油、石炭）、最終製品（窒素肥料）、そして肥料が投入される農産物のレベルで売買／貿易が行われている(4)。(5)では、モデル開発で得られた知見をまとめ、次のステップと今後の研究の必要性について展望を述べる。

(2) 素材需要の内生化：商業ビル

① 手法

MESSAGEix-Buildings 枠組み（Mastrucci et al. 2021）を用いて、商業ビルの在庫回転率、エネルギー需要、素材需要およびスクラップ化をモデル化している。MESSAGEix-Buildings はボトムアップ型の枠組みで、①日々変化する温度に基づき空間冷暖房需要を計算する工学ベースモデル（CHILLED）、②異なる社会経済・気候・技術予測下での建物の在庫展開を評価するマテリアルフロー分析に基づく在庫回転モデル（STURM）が含まれている。このモデルは、地理的文脈、社会経済条件、建物の特性などによる多様な特性を柔軟に考慮することができる。

既存の居住用建物モデルをベースに、MESSAGEix-Buildings の枠組みを拡張し、商業ビル部門を表現した。モデルのコア構造は変わらないものの、商業ビル部門を実装するにあたり、いくつかの変更が必要であった。特に、分析単位を一人当たりの床面積に変更した（住宅部門では、住宅戸数またはアパート数が基本単位となっている）。また、業務用の最終需要を、空間暖房、空間冷房、温水、その他（事務機器、照明、換気、調理を含む）に見直した。基本となる気候データ（Lange 2019）と社会経済データ（Riahi et al. 2017）に加え、商業ビルの特性、活動、エネルギー使用に関するデータを収集し、モデルに入れて基準年キャリブレーションを実行した。一人当たりの床面積と他の最終需要エネルギー予測を作成し、シナリオを実行した。他の研究（Harvey 2014）と同様、ロジスティック関数に基づき、一人当たりの床面積の伸びを一人当たりの GDP の伸びと関連付けた。

ここでは、SSP2 シナリオに焦点を当て、5 年おきに 2100 年までのシミュレーションを行った。12 地域（MESSAGEix モデル 11 地域＋中国）に分け、場所（農村部、都市部）や建物（既存非改修、既存改修、新築）特性による異質性を考慮している。人口動態、社会経済発展、都市化については SSP 予測（Riahi et al.）、商業部門の建物特性は住宅に関する先行研究（Mastrucci et al. 2021）に基づき設定した。年間改修率は、欧州の現在の改修率に合わせグローバル・ノースで 1.5%、グローバル・サウスで 0.5%に固定した。

先行研究（Deetman et al. 2020; Marinova et al. 2020）に基づき、単位床面積当たりの素材（主要素材であるアルミニウム、コンクリートとその中心成分であるセメント、銅、ガラス、鉄、木材の 6 種類）原単位を地域別に作成した。コンクリートのセメント含有率は、一般的なコンクリート組成の平均値である 15.6%と仮定した（Wassermann et al.）素材在庫は、商業床面積に素材原単位を適用することで、経時的に推定される。素材の需要と廃棄は、在庫回転率モデルにより建設と取り壊しの床面積を計算し、素材需要原単位を適用することにより評価される。改修に伴う素材需要と廃棄は不確実性が高く、現在のところモデルでは表現されていないが、将来的には対象となる予定である。

② 結果

図 5.4.2-1 は、世界 12 地域の居住用建物と商業施設の床面積予測である。商業施設は現在、地域によって総床面積の 10%から 30%を占めており、世界平均は 20%程度で

ある。商業施設の床面積は居住用建物よりも早いペースで拡大し、2050 年には世界の総床面積の 25%以上を占めると予想される。人口増加と豊かさの向上により、特にグローバル・サウスでの商業用床面積が増加する。例外は中国で、2040 年頃に頭打ちとなり、SSP2 で想定される人口減少により減少に転じる。



図 5.4.2-1 居住用建物および商業ビルの床面積予測

商業部門は、床面積は住宅部門より小さいものの、かなりのエネルギー需要を担っている（図 5.4.2-2）。商業部門のエネルギー需要は、床面積の増大とエネルギー使用の集約化により、グローバル・サウスで劇的に増加すると予測される。多くの発展途上国、特にサハラ以南のアフリカ（AFR）と南アジア（SAS）では、空間冷房とその他の商業用途の電力が大幅に増加することが予想される。グローバル・ノースのほとんどの地域では、厳しい建築規制によるエネルギー効率の改善により、エネルギー需要、特に空間暖房が緩やかに減少する。

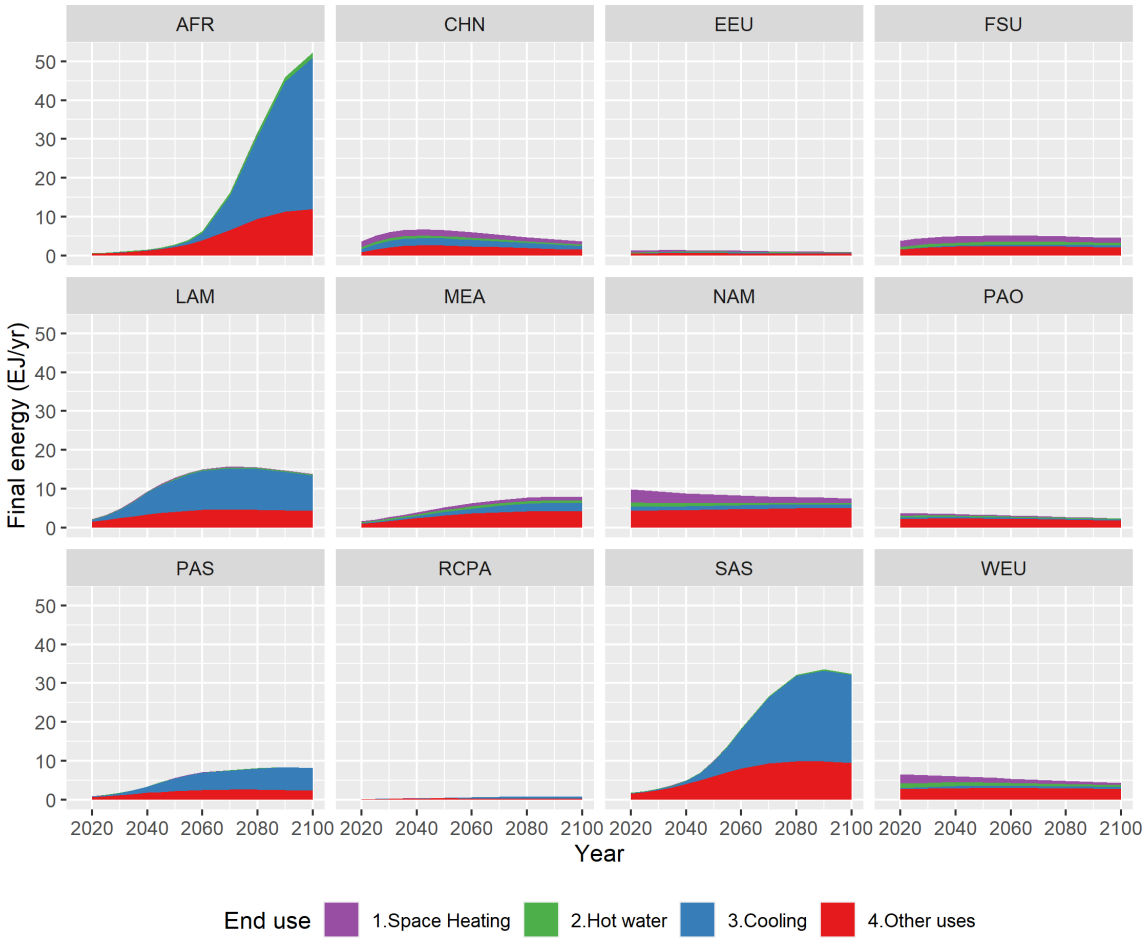


図 5.4.2-2 商業部門の最終需要別エネルギー需要予測

商業部門は素材需要とスクラップ発生の多くを担っている（図 5.4.2-3）。今後商業フロアの増加により、相当量の素材が必要となり、既存のインフラの入れ替わりによりスクラップ発生量が増加する。商業部門の素材需要は、AFR や SAS を含む多くの発展途上地域で著しく増加すると予測される（図 5.4.2-4）。逆に、中国とグローバル・ノースのほとんどの地域では、素材需要が減少する。特別な政策介入がなければ、建設素材のうち、コンクリートはすべての地域で圧倒的に高い需要があり、鉄鋼と木材が続く。

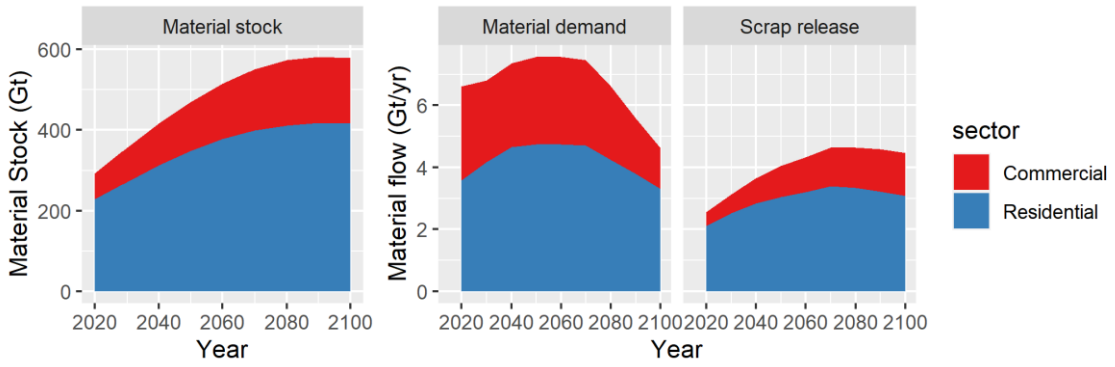


図 5.4.2-3 世界での居住用建物および商業用建物の素材ストックとフローの予測

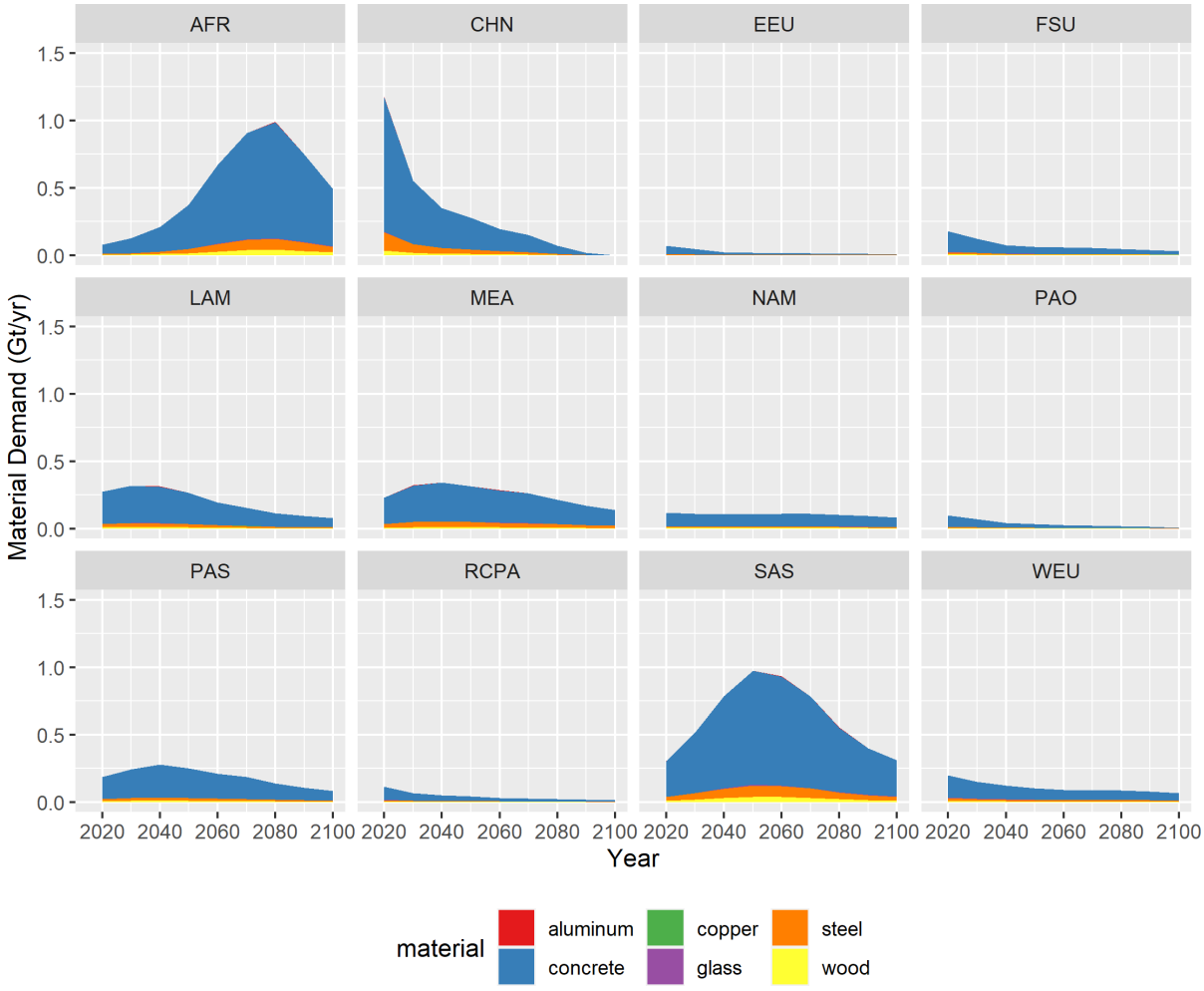


図 5.4.2-4 商業ビルの建材別需要予測

(3) 素材サプライチェーンの拡張：プラスチック

① 手法

MESSAGEix-Materials のモデル開発では、素材のバリューチェーンを拡張し、ゆりかごから墓場までの素材ライフサイクル全体を扱うことを目指している。そのため、化学部門を優先してサプライチェーン表現を拡張した。MESSAGEix-Materials における化学部門表現には、上流の HVC（High Value Chemicals）であるエチレン、プロピレン、BTX（ベンゼン、トルエン、キシレン）の生産が含まれる。さらにサプライチェーンをプラスチック生産（化学重合反応）にまで拡張することで、異なる最終需要部門におけるプラスチック使用を追跡し、再利用とリサイクルの選択肢をより包括的にカバーすることが可能になる。

サプライチェーンをさらに拡張するため、まず文献調査を行い、モデル化する最も関連性の高いプラスチックの種類を決定した。包装（36%）、建設（16%）、消費財（10%）、輸送（7%）が、プラスチック需要全体でシェアの高い非繊維の最終需要部門である（Geyer et al.2017）。これらの部門は、プラスチック需要全体の約 70%を占める熱可塑性プラスチックのうち、低密度または高密度ポリエチレン（LDPE/HDPE）、ポリプロピ

レン（PP)、ポリ塩化ビニル（PVC)、ポリエチレンテレフタレート（PET）といった種類のプラスチックを主に使用している。図 5.4.2-5 に見られるように、残る世界のプラスチック需要は、ポリアミドとアクリル（PP&A)、ポリスチレン（PS)、熱可塑性プラスチック（PUR）等が構成している。

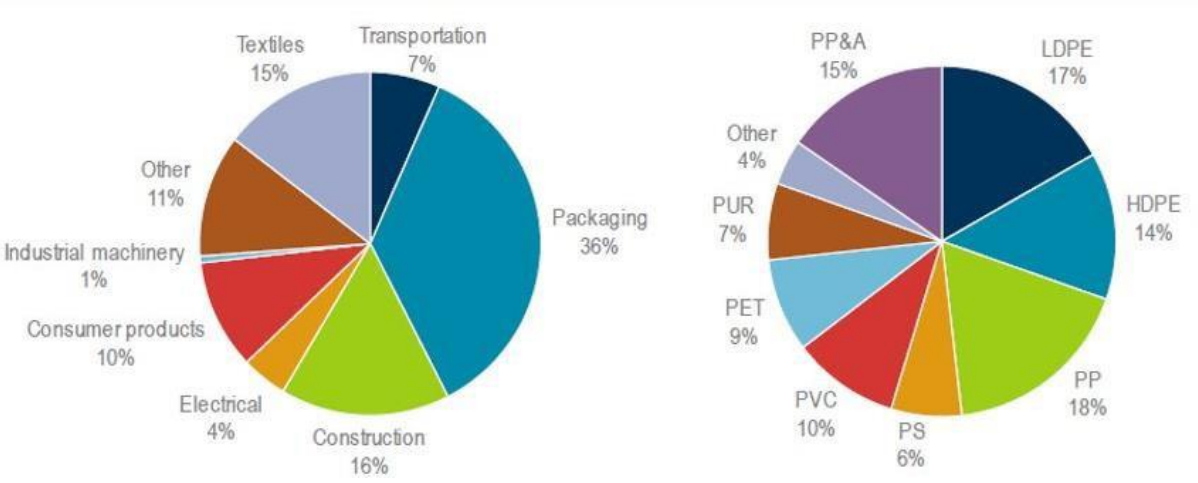


図 5.4.2-5 最終需要部門別（左)、樹脂別（右）の
プラスチック消費量の推計
（IEA, 2018）

図 5.4.2-6 に、モデルに追加する加工ステップの決定の為の参考図を示す。重合工程を明示的に表現するため、上記のプラスチック類についてプロセスレベルのデータを収集する。残りの熱可塑性プラスチックと、プラスチックのもう一つの主要グループである熱硬化性樹脂（PUR）は、すべてのプラスチック生産をカバーできるよう一般化して表現している。これらのプロセスには、すでにほとんどをモデル化している上流の高額化学製品がインプットされる。プラスチックのシェアは、建設と包装の最終需要部門に割り当てられ、「その他」の最終需要カテゴリーの次に、それぞれ表現される。この二つの部門においてカテゴリーを分けした理由は、包装部門は最終需要部門でも最大のシェアを持っているからであり、建設部門は、住宅と商業部門を含む MESSAGEix-Buildings モデルにリンクされているからである。

プラスチックの処分方法には、埋め立てや焼却の他、ケミカルリサイクル、メカニカルリサイクル、廃棄物発電といったさまざまな選択肢を追加した。メカニカルリサイクルは、現在主に行われている簡単で低コストなプラスチックの二次生産方法である。回収・選別されたプラスチック廃棄物を洗浄・切断し、再度溶融する。このリサイクル方法では、ポリマーの化学構造は変わらない。しかし、プラスチックに含まれる不純物の影響で、従来のプラスチックに比べ、再生プラスチックの品質が低下する可能性がある。ケミカルリサイクル、またはモノマー化リサイクルは、プラスチック廃棄物を再び従来のプラスチックのモノマーに変換するプロセスである。化学反応が必要なため、メカニカルリサイクルに比べてより多くの費用が必要となる。リサイクルされた製品の品質が従来の製品と同じであることが多いため、同じ製品を何度もリ

サイクルすることができるという利点があるが、現状では一次生産方式で従来のプラスチックを生産するよりも経済面で不利である。廃棄物発電はもう一つの廃棄物処理方法で、非再生プラスチックを再び石油に戻し、その中に取り込まれたエネルギーを利用する。燃焼を伴うため、経済性が低く、排出量も多くなる。埋め立てと焼却は、プラスチックを処理するための最も安価なオプションだが、環境には深刻な影響を及ぼす。リサイクルを奨励し、埋め立てを減らすためには、廃棄物処理政策が重要である（例：埋め立てに高い税金をかけるなど）。MESSAGEix-Materials にこれらの選択肢を追加することで、使用済みプラスチックの処理による環境影響を包括的に追跡する機会ができる。本節のモデルパラメータ化には、①欧州における各プラスチック種別の部門シェア（Plastics Europe 2020 および Geyer et al. 2017）、②技術経済データとインプット（欧州委員会、2007）を用いた。

全ての化学製品部門を網羅するため、ベースケミカルとしてメタノール生産もモデルで表現した。メタノールは現在、アンモニアや高額化学製品と比較して石油化学市場でのシェアは小さいが、生産量の伸びがこのグループの中で最も高い（IEA 2018）。したがって、将来の工業生産を適切に表現するためにモデルに含めることが重要である。メタノールの用途は、燃料関連と一次化学原料に分けられる。MESSAGEix-Materials では、様々な原料（天然ガス、石炭、バイオマスなど）からのメタノール生産は以前から表現されているが、石油化学部門での使用は未拡張であり、モデル実装の焦点となる。また、メタノールは、ホルムアルデヒドや酢酸などの二次化学品の原材料としての需要が最も大きい（Dalena et al. 2018）。さらに、特に中国で高い投資をうけている為、メタノールからエチレン系炭化水素を生産するプロセスを、もう一つの重要な原材料需要とした。したがって、MESSAGEix-Materials でこのプロセスを、先に説明したプラスチックのプロセスにリンクさせることができる。最終需要との連関には、最も関連性の高い製品が含まれる。ホルムアルデヒド樹脂は、人口木材に使用されるため、建設部門に含めることができる。酢酸からの製品は、主にプラスチックや接着剤の製造に投入されるため、建設やプラスチック生産にも連動させている。現在の原料シェアに基づくと、メタノール原料需要の 3 分の 2 以上はこの 3 つのカテゴリでカバーされることになる。

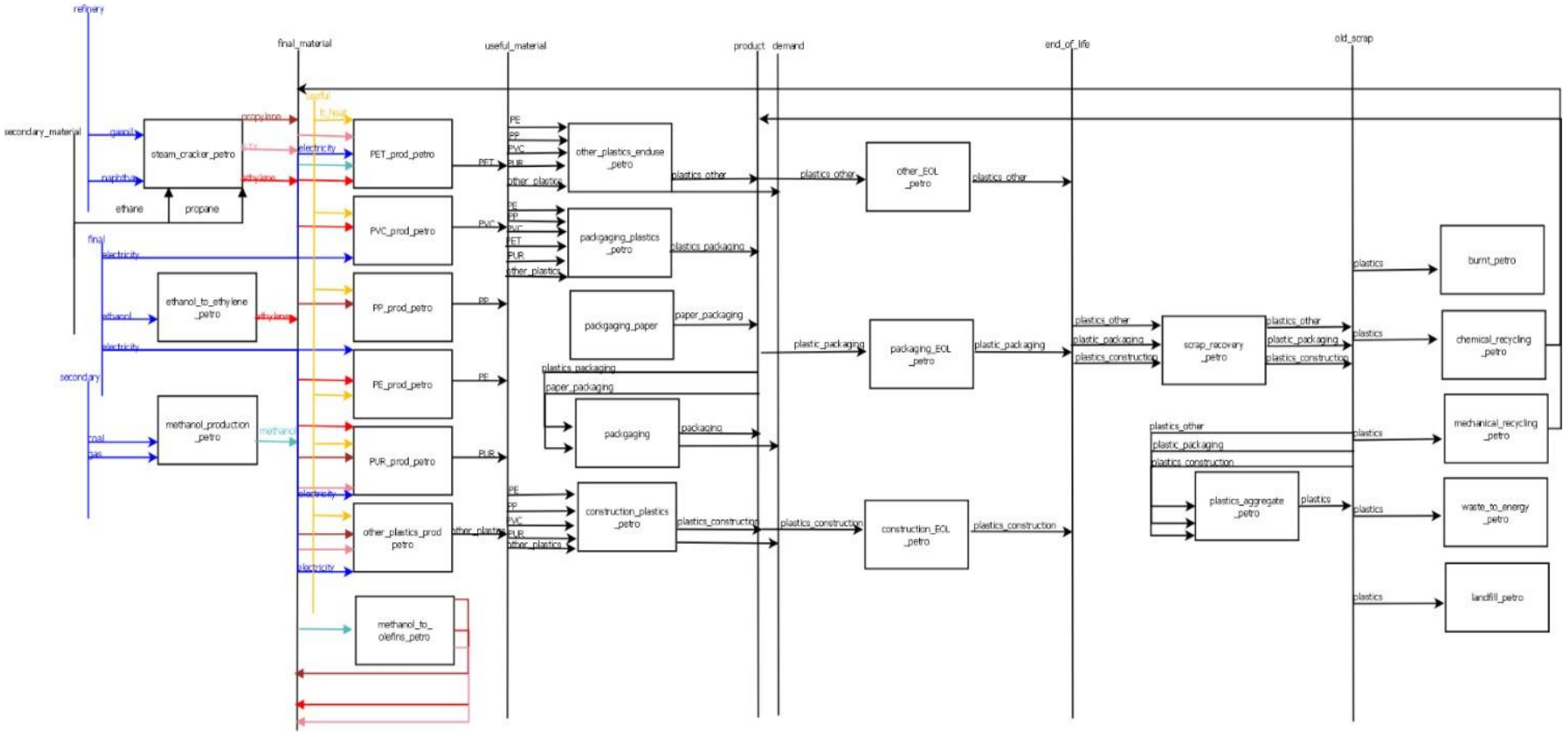


図 5.4.2-6 エネルギー・素材のシステム基準：MESSAGEix-Materials における化学製品分野の拡張

(4) 消費財の貿易：窒素肥料

① 方法

MESSAGEix モデルはグローバルエネルギーシステムモデルであり、エネルギー商品の貿易の流れを表現している。これは、エネルギー市場貿易が行われている世界貿易地域を含み、国際海運の船舶燃料需要、ウラン資源採掘、核燃料サイクルを表現することで実現している。世界エネルギー市場では同種の鍵となる商品をいくつか扱っているが、素材貿易（およびそれに対応する素材の「最終需要」）が製品のライフサイクルにおける様々な段階を意味するため、これらのモデル化作業を複雑にしている。鉄鋼の例では、貿易の流れに鉄鉱石、鋼材、加工品、鉄スクラップが含まれている。窒素肥料のライフサイクルでは、原料としてのエネルギーキャリア（例えば、今日ではほとんどが天然ガス、石油、石炭）、中間体（アンモニア）、製品（窒素肥料）、最終消費財としての農産物などが含まれている。

アンモニアはすべての窒素肥料生産プロセスで投入され、世界のアンモニア生産量の約 10%が取引されている（IEA 2021）。2020 年のアンモニア総生産の 72%は天然ガス系で、26%は石炭系である。窒素肥料製品のうち、尿素肥料が最大のシェア（2015 年 58%）を占め（Yara 2018）、生産量の約 30%が取引されている（IEA 2021）。2020 年の世界のアンモニア生産は、最終エネルギー消費の約 2%（8.6EJ）を占める（IEA 2021）。

MESSAGEix-Materials は、現在 5 種類の原料でアンモニアと窒素肥料を生産するプロセスを表現している。また、グリーン水素を用いたアンモニア製造（「グリーンアンモニア」とも呼ばれ、図 5.4.2-7 では elec_NH3 と表記）や炭化水素原料における炭素回収・貯蔵（CCS）技術の使用（*_ccs）など低炭素化プロセスもモデル化している。グリーンアンモニアルートは主に Tuna et al.（2014）、従来技術は IEA（2007）に基づきパラメータ化した。窒素肥料の需要予測は、IIASA の土地利用管理モデル GLOBIOM のシナリオに基づく土地利用エミュレータをリンクし、需要予測を直接取り込んでいる。窒素の物質循環がもたらすエネルギー・排出量への影響を明らかにするため、窒素肥料の種類は特定せず、集約化した商品種別として扱っている。現在、MESSAGEix-Materials で最終的な窒素肥料貿易、GLOBIOM で農産物貿易をモデル化しており、アンモニアの貿易はまだモデル化されていない。アンモニアは、より安全な水素輸送手段や発電所での代替燃焼燃料として重要性を増しているため、貿易フローのモデル化が次の重要なステップとなるだろう。

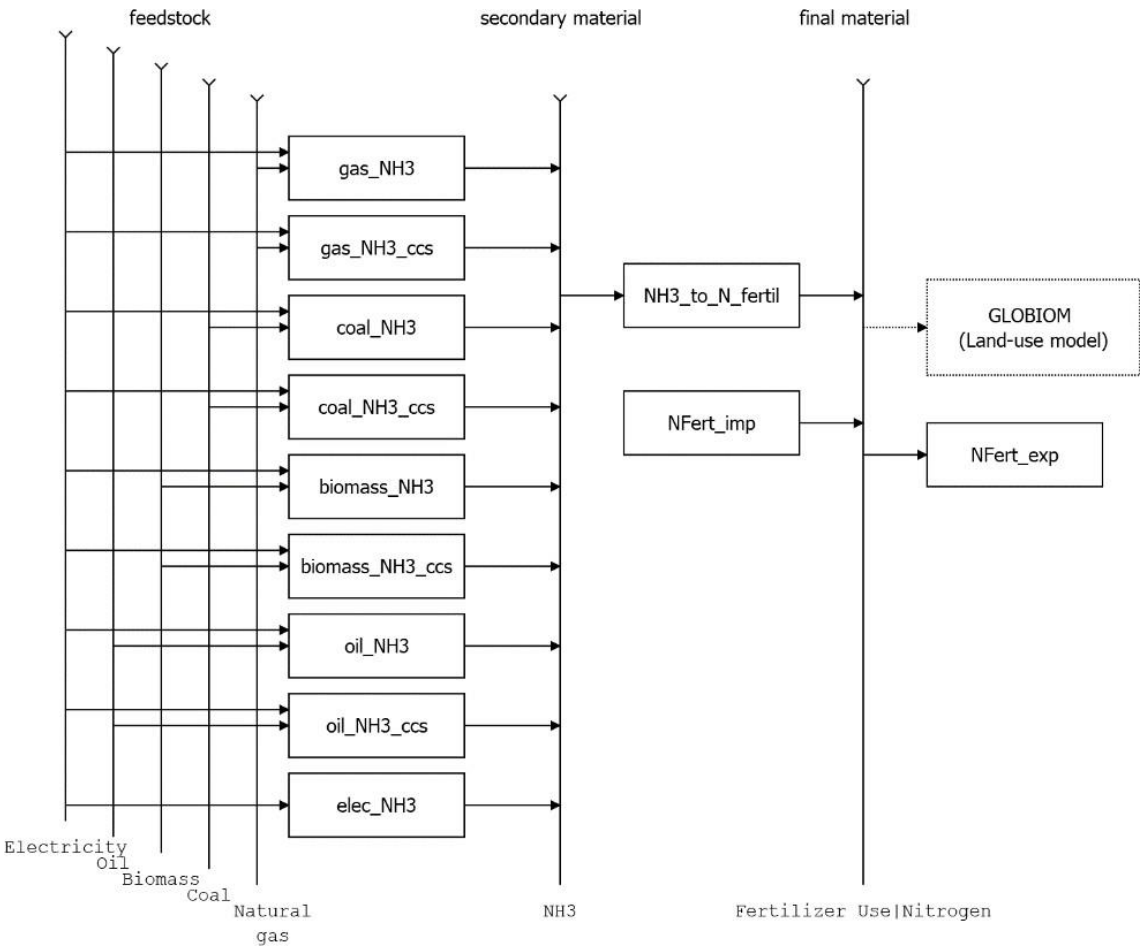


図 5.4.2-7 MESSAGEix-Materials における窒素肥料製造工程

② 結果

窒素肥料モジュールの例として、(i)気候政策なしのベースライン、(ii)世界のカーボン・バジェットに対応した 2℃シナリオ、の 2 種類の実装を作成した。図 5.4.2-8 は、土地利用モデル GLOBIOM による窒素肥料の需要予測を示しており、ベースラインとは対照的に、2℃シナリオでは全地域で需要が減少していることがわかる。

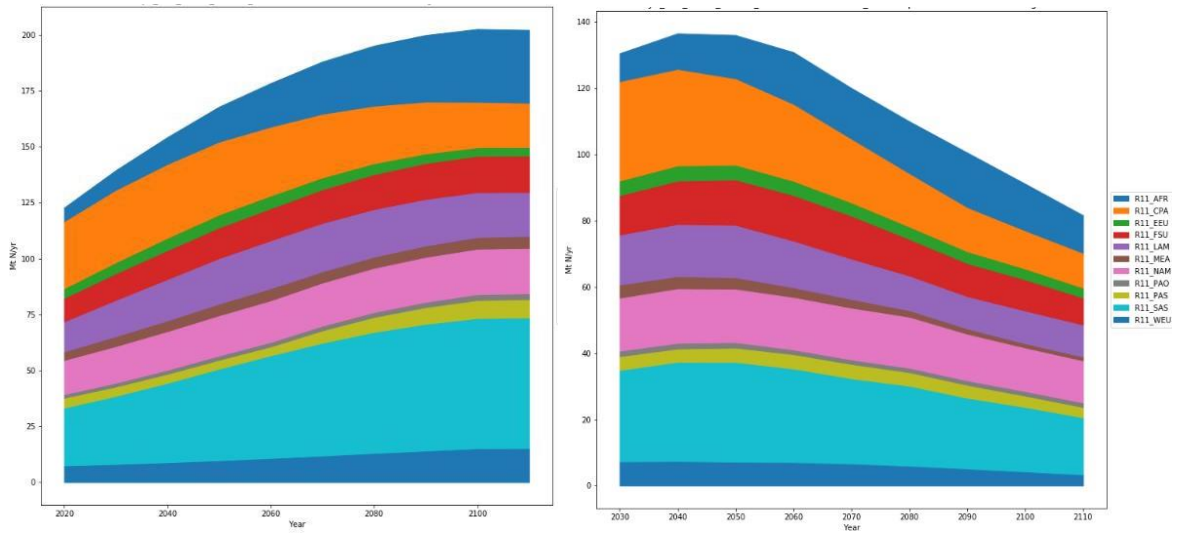


図 5.4.2-8 ベースラインシナリオと 2℃シナリオにおける窒素肥料需要

さらに、ベースラインシナリオの窒素肥料生産の最終エネルギー需要は化石燃料（今回の予備的なパラメータ化では主に石炭）で満たされ続けるが、2℃シナリオでは需要が減少し、CCS 付バイオマス由来の生産で満たされるため、排出量は正味でマイナスになると考えられる。これは、中国が石炭から生産するアンモニアのコスト優位性（ベースライン）と、バイオマスベースの CCS 技術の排出削減ポテンシャル（2℃）に大きく左右されるという予備的な結果である。化石燃料ベースから低炭素プロセスへの転換が観察されたことは有意義であるが、生産方法の地域差を反映した技術・経済パラメータのキャリブレーションや、中間製品としてのアンモニア取引を組み入れる必要がある。

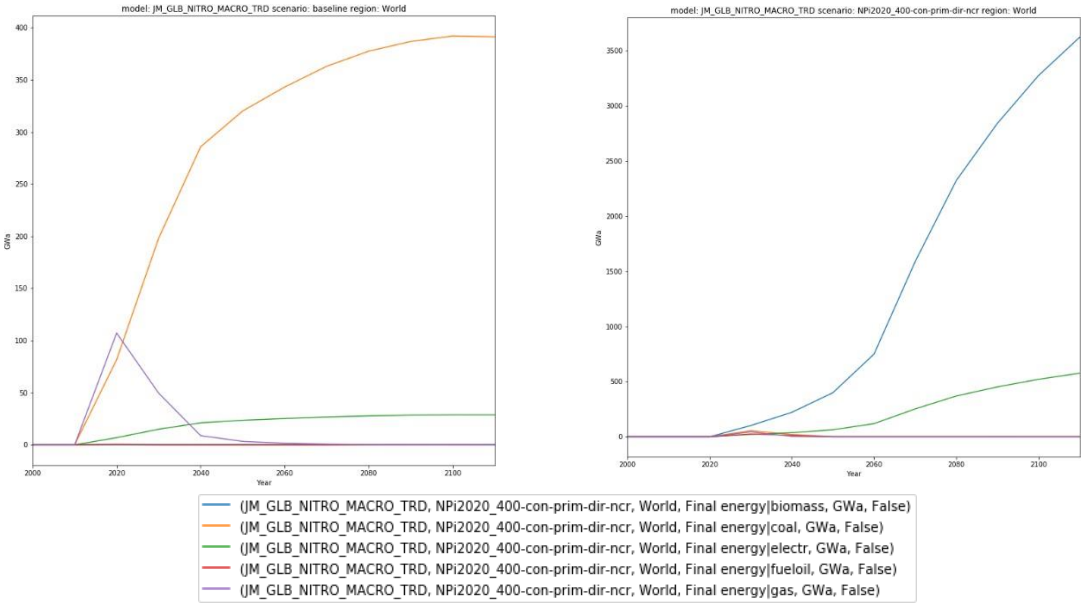


図 5.4.2-9　世界の窒素肥料生産の最終エネルギー総投入量：
ベースラインシナリオ（左図）と 2℃シナリオ（右図）

貿易結果を可視化するために、農産物の純輸入国として 2 つの大国、2040 年の中国とインドを選んだ。2015 年の窒素肥料の最大の輸出国が中国であり、最大の輸入国がインドである（Yara 2018）。どちらのシナリオでも、MESSAGEix の CPA 地域と SAS 地域においてこの 2 国が優位となっており、短期的にはこのような挙動を示し続けている。しかし、炭素排出量を制約した 2℃シナリオでは、生産コストの増大と全地域の生産における化石燃料への依存度の低下により、世界的に肥料貿易量は減少し、肥料貿易の比較優位性が低下する（図 5.4.2-10）。その結果、肥料の生産は地域的に多様化していることがわかった。また、CPA 地域の農産物純輸入量は 2 つのシナリオで同じレベルに留まるが、SAS 地域の農産物需要は 2℃シナリオで大幅に減少し、輸入の必要性が半減以上となることがわかる。

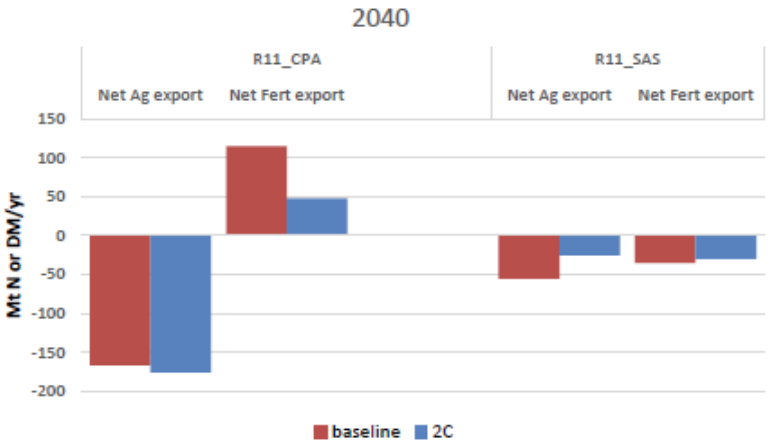


図 5.4.2-10 2040 年における 2 つのモデル地域（CPA と SAS）の
農産物と窒素肥料の純貿易額の変化

(5) 要約と研究展望

MESSAGEix-Materials モデルの拡張は、一方では内生的な素材需要の割合を増やし、他方では生産とリサイクルプロセスの表現を拡張するものである。一般的に、素材分野を追加するには、様々なソースからのデータ収集が必要であり、それらを整合的に結びつけるのには時間がかかる。よって今回、需要側は産業界で最大の素材生産部門となっている鉄鋼とセメントを含むバルク材に絞り込み、バルク材の需要が大きな割合を占める商業ビル部門に焦点を当てた。供給側は化学部門に焦点を当て、最も一般的な 4 種類のプラスチックの生産とリサイクルプロセス、および埋め立てやゴミ焼却などの一般的な廃棄物処理方法を追加し、対象品目を拡大した。また、化学部門を拡張し、土地利用や農業との関連性が高く、バイオマスや電力などの原料転換で供給側の脱炭素化が見込める窒素肥料に焦点を当てた。

様々なモデル開発の予備的な結果が示すように、統合評価モデルにおいてエネルギーと物質のネクサスを表現することは、気候変動の緩和策の選択肢の幅を大きく広げるものである。従って、この研究分野は、エネルギーと土地利用分野における従来の緩和策を補完するため、さらに発展し、新たな分析・洞察を生み出す機会を提供し続けるものと期待される。特に、昨年の ALPS 報告書で検討した需要側オプションとの精密な組み合わせや、 5.4.1 節で述べた DETRAS 需要シミュレーションツールと本 5.4.2 節で述べたモデルの革新性を活用することで、より効果的な緩和策を提案できる。

今後の展開として、素材の種類、生産、利用、利用後の各段階を継続的に拡大することが重要と考えられる。これには、低炭素技術に不可欠な特殊材料（電池用のリチウムやコバルトなど）だけでなく、バルク材料（パルプや紙、ガラス、銅など）の追加が含まれる。同様に、内生的に表せる素材需要のシェアをさらに拡大することが、需要側の素材関連の戦略を補完する上で引き続き役割を果たしうるだろう。より広範な素材が対象となり、需要のより多くの部分が内生的になることで、代替素材の投入が検討すべき興味深い気候変動緩和オプションになりうる。例えば、パッケージング分野における紙とプラスチックの材料代替が想定されるが、そのためには、まず MESSAGEix-Materials にパルプと紙の生産量を追加する必要がある。

参考文献（第 5.4.2 節に関するもの）

1) Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7). https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782
2) IEA (2007), Tracking Industrial Energy Efficiency and CO_2 Emissions, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/tracking-industrial-energy-efficiency-and-co2- emissions
3) IEA. (2018). The Future of Petrochemicals - Towards more sustainable plastics and fertilisers.
4) IEA (2021), Ammonia Technology Roadmap, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap
5) European Commission. (2007). Best Available Techniques in the Production of Polymers Plastics Europe. (2020). The Facts 2020: An analysis of European plastics production, demand and waste data

6) Dalena, F., Senatore, A., Marino, A., Gordano, A., Basile, M., & Basile, A. (2018). Methanol Production and Applications: An Overview. https://doi.org/10.1016/B978-0-444- 63903-5.00001-7
7) Deetman, S., Marinova, S., van der Voet, E., van Vuuren, D. P., Edelenbosch, O., & Heijungs,
8) R. (2020). Modelling global material stocks and flows for residential and service sector buildings towards 2050. Journal of Cleaner Production, 245. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118658
9) Harvey, L. D. D. (2014). Global climate-oriented building energy use scenarios. Energy Policy, 67, 473–487. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.026
10) Lange, S. (2019). EartH2Observe, WFDEI and ERA-Interim data Merged and Bias-corrected for ISIMIP (EWEMBI). V. 1.1. GFZ Data Services. https://doi.org/https://doi.org/10.5880/pik.2019.004
11) Marinova, S., Deetman, S., van der Voet, E., & Daioglou, V. (2020). Global construction materials database and stock analysis of residential buildings between 1970-2050. Journal of Cleaner Production, 247. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119146
12) Mastrucci, A., van Ruijven, B., Byers, E., Poblete-Cazenave, M., & Pachauri, S. (2021). Global scenarios of residential heating and cooling energy demand and CO_2 emissions. Climatic Change, 168(3–4), 1–26. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03229-3
13) O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven,
14) B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Global Environmental Change, 42, 169–180. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004
15) Riahi, K., Vuuren, D. P. Van, Kriegler, E., Edmonds, J., Neill, B. C. O., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Crespo, J., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., … Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. 42, 153–168. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
16) Tuna, P., Hulteberg, C., & Ahlgren, S. (2014). Techno-economic assessment of nonfossil ammonia production. Environmental Progress & Sustainable Energy, 33(4), 1290– 1297. https://doi.org/10.1002/EP.11886
17) Wassermann, R., Katz, A., & Bentur, A. (2009). Minimum cement content requirements: A must or a myth? Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 42(7), 973– 982. https://doi.org/10.1617/s11527-008-9436-0
18) Yara (2018), Yara Fertilizer Industry Handbook https://www.yara.com/siteassets/investors/057-reports-and-presentations/other/2018/fertilizer-industry-handbook-2018.pdf/

5.4.3 消費者の多用性を考慮した需要サイドのモデル分析の検討

(1) 需要サイドの行動変容が CO_2 排出量に与える影響：エージェントベースモデルを用いた分析例の紹介

脱炭素化社会の実現には電力及び製品の供給サイドのみならず需要サイドの取り組みが重要である。合理的な代表的個人を想定する統合評価モデルでは表現できない

個々の多様性を考慮したエージェントベースモデル（ABM）分析が注目を浴びている。本節では、Niamir et al.[1]による需要サイドの行動変容が CO_2 排出量に与える影響について、ABM を用いて分析した論文を考察する。

① はじめに

従来の最適化モデルでは、家計の多様性を十分に表現できず、完全情報の下で家計は合理的な経済主体として扱われている。しかし、現実は意思決定プロセスにおいて多様な嗜好の下で決断し、社会経済状況、行動バイアス及び社会的同調（ピア）の影響を受けている。

本論文の目的は、アンケート調査（Overijssel, オランダ）を基に、エージェントベースモデル（BENCH-v.2: Behavioral change in ENergy Consumption of Households model)を用いて、家計の電力需要に関する様々な行動及び気候シナリオを分析することである。また、多様な個人のエネルギー消費行動に関する発見的規則（heuristic rule)を抽出する。

② 行動変容のタイプとアンケート調査

行動変容は以下の 3 つのタイプを想定する。

Action 1: 投資（太陽光パネル設置、エネルギー効率が高い機器の購入）

Action 2: 省エネ（日々のルーチンや習慣を変える。温度調整等）

Action 3: 他の電力供給業者への切替え（gray/brown electricity to the brown/green one)

BENCH-v.2 モデルでは、上記 3 つの行動に関する決断には、経済的ドライバー（価格、所得）に加えて、心理的及び社会的要因が影響を与えると想定している（図 5.4.3-1)。また、行動を起こす前の 3 つのステップとして、①Knowledge activation (regarding climate change, energy, environment), ②Motivation, ③Consideration を想定する。①について、行動を起こす前には、家計は気候変動に関し、あるレベルの知識や認識が必要となる。②に関し、もし、個人が十分に気づいていれば、罪を感じる（Feeling of guilt: component of Norm Activation Theory)。そして、個人的規範と主観的規範（行動に対する他者の態度）が motivation に加わる。③に関し、motivation があれば、何か行動を起こす責任を感じる。ただ、行動を起こすには経済状況（住宅環境など)、習慣、自己の行動変容への能力を consider する必要がある。意思があるレベルに達したら意思決定をし、行動する。分析期間は 2030 年まで推計する。そして、オランダの Overijssel 州を対象にオンラインアンケート調査を実施する（N=1383 世帯)。アンケート結果は、BENCH-v.2 モデルにおけるエージェントルールの経験的ミクロ基盤となる。

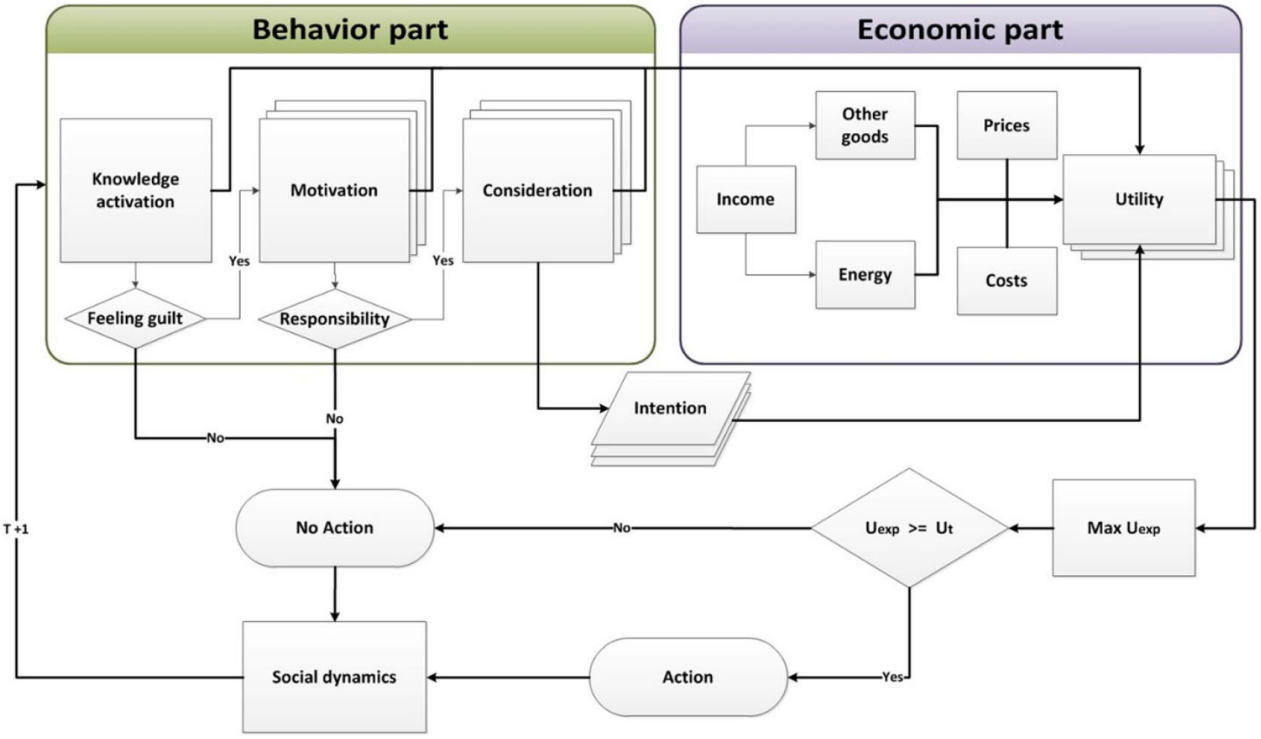


図 5.4.3-1 BENCH-v.2 モデルにおける家計の意思決定アルゴリズム

（出典）Niamir et al.[1)]

BENCH-v.2 モデル

Intention が高ければ、utility 評価に進む。ここでは行動及び経済要因が反映されている。もし行動要因が経済要因を上回れば、経済的バリアを克服しなければならない。アンケート調査では、個々の再エネに対する支払い意思が経済的要因を超えた場合に相当する。経済パートでは、3 つの行動に関する効用が計算され、比較される。

Social dynamics と learning algorithms では家計の 2 つの相互作用をシミュレーションする。炭素価格シナリオを想定し、シナリオ間で個々の行動が排出量に与える影響を分析する。家計エージェントは社会・経済的な特徴、嗜好、気候変動に対する認識において多様である。詳細には、次の 6 つの経済的要素において多様である：①年間所得、②年間電力消費量（kWh）、③家計がどのタイプの発電ユーザーか（gray, brown, green）、④住居（所有か賃貸か）、⑤住居のエネルギーラベル（A から F）、⑥家計のエネルギー利用に関する習慣や癖（あるエネルギー消費行動を実施する頻度について調査）。これらの変数のデータはアンケートに基づいている。

社会経済変数（Overijssel province の家計所得、電力消費、その他財の消費）の年間成長率は EXIOMOD CGE モデルから計算される。家計のエネルギー選択に影響を与える行動及び社会的要素はエージェント間で異なり、①personal norm（省エネ機器を利用することによる喜び等）、②subjective norms（近所、家族、友人のエネルギー関連行動から誘発される行動や社会的圧力等）、③perceived behavioral control を含む。これらの行動及び社会変数は social dynamics 及び learning procedures を経て期間を通じて更新される。

アンケート調査で得られたデータを基に、knowledge 及び motivation が定量的に評価される。Knowledge activation, motivation 及び consideration に関する全ての変数はリッカート尺度（アンケートでは 1 (lowest)～ 7 (highest)の範囲）で評価される。5 の値を閾値とし、5 以上であれば knowledge が高いとみなす。その後、それらの家計は”feeling guilt”とタグ付けされ、motivation を評価する次のステップへと進む。

家計の motivation は personal norm (PN)と subjective norm（SN)によって決まる。また、3 つの行動毎に motivation は異なる。例えば、太陽光パネル設置には高い motivation が必要であり、これらの家計は”responsible”としてタグ付けされ、次のステップ”consideration”に進む。次は行動選択のコスト及び効用を評価するために心理的（自身の能力)、構造的（住宅)、制度的（補助金）要因を consider する。ここで高いレベルの consideration であれば、high intention とタグ付けされる。consideration も同様に、行動毎に異なると想定する。同時に、エネルギー利用の習慣を変えることや、その他のエネルギー供給者に変更することは高い motivation に達成しないかもしれないため、その場合は次の consideration ステップには進まない。投資する（A1）場合、住宅所有と投資に関する perceived behavioral control （PBC1）が評価される（δ1:action’s intention)。

省エネ行動（A2）や他の電力会社への変更（A3）の場合は、住宅所有は必要ではないが、action’s intention （δ2, δ3）は perceived behavioral control (PBC2, PBC3)に基づいて算出される。

【行動パート】

$$K = \frac{AVG(CEEK, CEEA, EDA)}{7};$$

$$M_n = \frac{AVG(PN_n, SN_n)}{7};$$

$$If(n = 1\ and\ SF = 1)\left(\delta_1 = \frac{PBC_1}{7}\right)\ else\ (\delta_1 = 0);$$

$$If(n = 2)\left(\delta_2 = \frac{PBC_2}{7}\right); If\ (n = 3)\left(\delta_3 = \frac{PBC_3}{7}\right)$$

(5.4.3-1)

n: three actions {n=1, 2, 3}
K：Knowledge and awareness
M: Motivation
CEEK：Climate-energy-environment knowledge
CEEA: Climate-energy-environment awareness
EDA: Energy-related decision awareness

PN: Personal norm
SN：Subjective norm,
SF: owner or renter,
PBC：perceived behavioral control over a certain action
δ：action’s intention

【経済パート】

経済パートでは、3 つの行動から導かれる個々のエージェントの効用を推計する。エネルギー経済学では、家計は予算制約の下でエネルギー（green, brown, gray）消費及び合成財（Z）から構成される効用を受け取ると仮定する（式(5.4.3-2)）。

本分析では式(5.4.3-2)に K（knowledge)、M (motivation）を考慮し、action’s intention (δ)で重みづけをする（式(5.4.3-3)）。δ はサーベイデータを使用して算出する。

$$U = Z \cdot \alpha + E \cdot (1 - \alpha) \qquad (5.4.3\text{-}2)$$

$$U = \big(Z \cdot \alpha + E \cdot (1 - \alpha)\big) \cdot (1 - \delta_n) + (K + M_n).\delta_n \qquad (5.4.3\text{-}3)$$

U：utility, Z: composite good, E: energy
α: share of individual annual income spent on the composite good
K: knowledge, M: motivation, δ: action’s intention

【社会的ダイナミクスと学習】

多様な家計間では相互作用があり、他者から学ぶ。近隣の人達との情報交換を通じ、時には自身の知識や認識、モチベーションが変わる。ここでは、Opinion dynamics モデルを想定している。エージェントは行動要因（知識、認識、モチベーション）の価値を近隣と比較し、調整する。

表 5.4.3-1　エンドユーザーシナリオの想定

BENCH.v2 scenarios	Social dynamics	Carbon price
Scenario SD	Slow dynamics *In an active neighborhood:* *households interact with maximum two neighbors*	–
Scenario FD	Fast dynamics *In an active neighborhood:* *households interact with all available neighbors*	–
Scenario SDC	Slow dynamics *In an active neighborhood:* *households interact with maximum two neighbors*	25 Euro/ton by 2030
Scenario FDC	Fast dynamics *In an active neighborhood:* *households interact with all available neighbors*	25 Euro/ton by 2030

（出典）Niamir et al.[1)]

表 5.4.3-1 はシナリオの内容である。さらに、ベースラインシナリオを設定する。分析は SSP2 の下で、CGE である EXIMOD モデル結果を使用（合理的な代表的個人を想定）する。EXIMOD モデルから得られた家計の電力消費量を使用し、地域レベルにダウンスケールする。家計の多様性（所得、電力消費）、social dynamics (ボトムアップ) 及び炭素価格（トップダウン）が個々や全体の家計の行動にどのような影響を与えるかを分析する。

全てのシナリオにおいて、地域レベルで 3 つのタイプ（①投資（太陽光パネル設置、省エネ機器購入等)、②習慣を変える（温度調整、節電)、③グリーン電力供給会社への移行）の行動波及及び排出削減を評価する。分析期間は 2016 年から 2030 年で、シミュレーション回数は各シナリオ 100 回実施する。

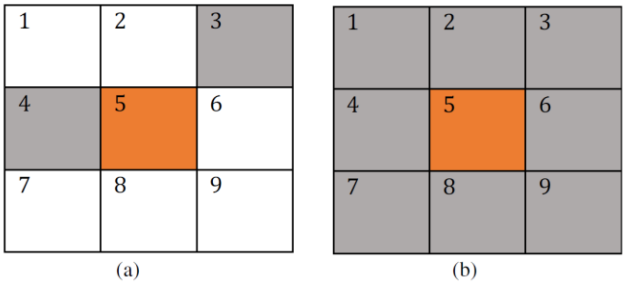


図 5.4.3-2　社会的ダイナミクス及び学習の想定

（出典）Niamir et al.[1)]

図 5.4.3-2 は社会的ダイナミクス及び学習の想定である。Slow dynamics の場合、家計は 2 つの近隣（3 と 4）と関わり、近隣全体の平均の価値よりも家計の価値が低ければ現在の価値を 5%増加させる。一方、Fast dynamics の場合、全ての家計は情報交換する（式(5.4.3-4)）。既に行動を実施している家計（No. 5）の perceived behavior control (PBC) は 5%上昇する（式(5.4.3-5)）。

$$X = \{CEEK, CEEA, EDA, PN_n, SN_n\}, n = \{1, \dots 9\};$$

$$If\ Max\left(mean\left(X_n^t\right), median\left(X_n^t\right)\right) \geq X_3^t \quad \left(X_3^{t+1} = X_3^t + 0.05 \cdot X_3^t\right); \qquad (5.4.3\text{-}4)$$

$$If\ Max\left(mean\left(X_n^t\right), median\left(X_n^t\right)\right) \geq X_4^t \quad \left(X_4^{t+1} = X_4^t + 0.05 \cdot X_4^t\right)$$

$$PBC_5^{t+1} = PBC_5^t + 0.05 \cdot PBC_5^t; \qquad (5.4.3\text{-}5)$$

X: 行動要因（知識、認識、モチベーション）の価値
PBC: perceived behavior control

本分析では、空間的距離を基に social dynamics を考慮したが、今後のテーマとして、ソーシャルメディアからのビッグデータを基に、空間的距離を超えたソーシャルネットワーク形成（例えば、友人、家族その他を通じたもの）の検討や、省エネ行動タイプを差別化した social dynamics の形成の検討が考えられると言及している。

【CO_2 排出量】

家計の電力消費に基づき CO_2 排出量を算出する。その際、異なる燃料を使用した発電を考慮する（表 5.4.3-2）。電力に対する CO_2 排出ファクターは電力供給に対する燃料投入からの CO_2 排出量の割合を基に算出する。核燃料タイプの CO_2 排出ファクターは IPCC (2006)を使用する。また、3 つのタイプ（gray, brown, green）の電力供給者を考慮し、家計はこの中から選択する。

表 5.4.3-2 電力供給タイプと CO_2 排出ファクター

Supplier type	% Coal	% Gas	% Renewable	tCO_2/kWh
Grey	100	0	0	0.0009
Brown	0	100	0	0.0003
Green	0	0	100	0

（出典）Niamir et al.[1)]

③ 結果

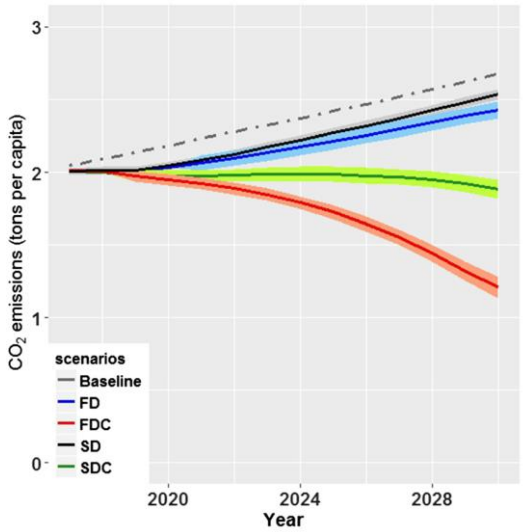


図 5.4.3-3 各シナリオの一人当たり CO_2 排出量

（出典）Niamir et al.[1)]

図 5.4.3-3 は、各シナリオの一人当たり CO_2 排出量を示している。合理的な代表的個人を想定したベースラインと比較して、 家計の多様性のみを考慮（SD シナリオ（黒直線））することにより 2030 年までに家計からの CO_2 排出量が約 5%減少する。近隣との相互作用がある FD シナリオ（青直線）では、2030 年までに SD シナリオを比較してさらに 4.3%の削減が達成される。炭素価格がある場合、炭素価格が無い場合と比較して、家計のエネルギー関連の行動の数が増加し、その結果、排出量が減少する（SDC、FDC）。

表 5.4.3-3 行動別の CO_2 削減への寄与（気候政策無し、2030 年）

Actions	Scenarios	
	SD	FD
A1: investment	0.01 (9.3%)	0.03 (10.7%)
A2: conservation	0.04 (26%)	0.08 (26.1%)
A3: switching	**0.10 (64.8%)**	**0.20 (63.3%)**

（出典）Niamir et al.[1)]

表 5.4.3-3 は気候政策がない場合の行動別の CO_2 削減への寄与を示している。炭素価格が無い場合（SD、FD）、A1（投資）は 9～11%、A2（省エネ）は 26%、A3（電力会社の切替）は 63～65%を占める。行動選択において First best は A3 の切替えで、Second best は A2 の省エネである。アンケート調査によると、Overijssel の 11%の家計は既に投資をしており、それらの家計は切替えや省エネを選択している。

表 5.4.3-4　行動別の CO_2 削減への寄与（気候政策有り、2030 年）

Actions	Scenarios	
	SDC	FDC
A1: investment	0.07 (18.4%)	0.30 (17.4%)
A2: conservation	0.04 (9.6%)	0.16 (9.0%)
A3: switching	0.27 (72%)	1.27 (73.6%)

（出典）Niamir et al.[1)]

表 5.4.3-4 は気候政策が有る場合の行動別の CO_2 削減への寄与を示している。炭素価格は 2017 年に導入し、以降は線形的に増加する。2030 年で 25Euro/ton になると想定する。Slow dynamics の場合、炭素価格は他の電力会社への切替えを選択する家計の数を、（SD と比べて）3.5 倍増加させる（表に数値はなし）。一方、fast dynamics の場合、SD と比べて切替えを選択する家計は 4.8 倍、投資を選択する家計は 5.5 倍となる（表に数値はなし）。炭素価格がある場合は、行動選択において First best は A3 の切替えで、Second best は A1 の投資となる。この理由は、炭素価格によってよりグリーンな電力会社への切替えや投資が経済的だと判断するからである。また、炭素価格によって省エネを選択する家計の数は増加するが、dynamics の影響はあまり受けない。

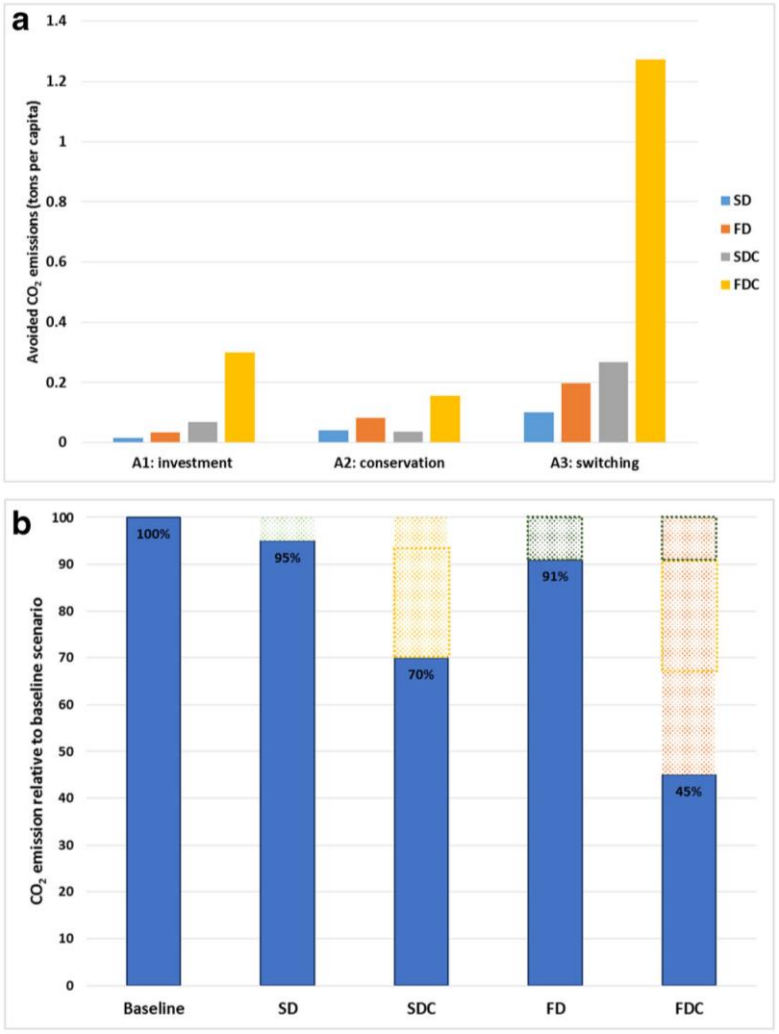


図 5.4.3-4　非線形の削減効果

（出典）Niamir et al.[1)]

社会的ダイナミクスが高い場合、CO_2 削減量も多い（SD と FD で 4%の差、SDC と FDC で 23%の差）。SDC と FDC を比較すると、A1（投資）と A3（切替）はそれぞれ、削減量が 4 倍、5 倍となる（図 5.4.3-4a）。これは、情報の政策によって炭素価格の効果が上がることを示している。炭素価格の影響について、SD と SDC を比較すると、炭素価格によって追加的に 25%排出量が減少する（図 5.4.3-4b）。炭素価格及び社会的ダイナミクスが両方ある場合は、BAU 比で 55%の削減となる（図 5.4.3-4b）。

④　感度分析

図 5.4.3-5 は Fast dynamics を想定した場合の、異なる炭素価格における一人当たり CO_2 排出量を表している。高い炭素価格は、より多くの削減効果があることが示唆される。

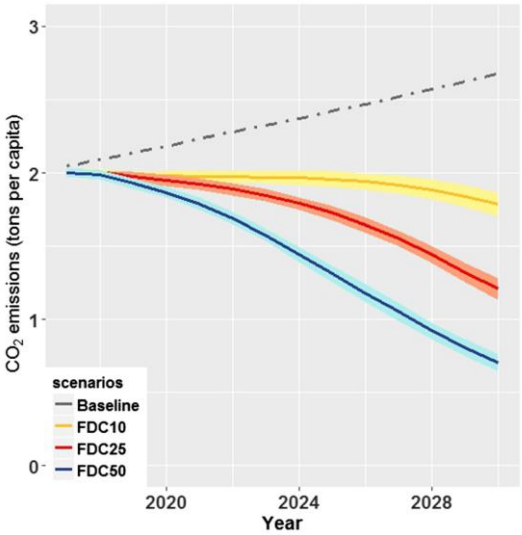


図 5.4.3-5　異なる炭素価格の下での一人当たり CO_2 排出量（Fast dynamics）

（出典）Niamir et al.[1)]

⑤　考察

本分析では、ABM（BENCH-v.2)を用いて、オランダの Overijssel のアンケートを基に、多様性、社会ダイナミクス及びカーボンプライシングがエネルギー関連の個々の決断にどのような影響を与えるかを分析している。4 つのシナリオの下で、ボトムアップの要因（社会ダイナミクス、情報普及の学習）及びトップダウンの市場政策（カーボンプライシング）が排出量に与える影響を示している。個人の多様性及び社会ダイナミクスのみを考慮した場合（炭素価格が無い場合）は、2030 年までベースライン比で排出量が約 5-9%減少し、一方、これに炭素価格を考慮すると、ベースライン比で約 55%の削減となることが示唆された。今回の分析は電力市場の需要サイドのみに焦点をあてており、今後は、供給側との統合が図られる模様である。個々の多様性、行動変容、ピア効果、情報・コミュニケーションがエネルギー需要に与える影響を分析するには、ABM は有用である。

本分析の興味深い点は、アンケートから得られたデータに基づいた ABM（+CGE）を実施している点である。実際にどのようなアンケートの質問内容となっているかが興味深い。今後は、エネルギー・環境関連の ABM 分析を引き続き調査し、行動ルールを定めた意思決定理論についても考察していきたい。

(2) IIASA の需要サイドモデル化研究事例の紹介

最終需要サイドのモデル化研究事例として、Grubler et al.[2)]の研究内容を紹介する。当該研究では、統合評価モデル（Integrated Assessment Model、以下 IAM と表記）、離散選択モデル（Discrete Choice Model、以下 DCM と表記）、エージェントベースモデル（Agent-Based Model、以下 ABM と表記）の 3 つを使い分けて、車両需要のモデル化及び分析を行っている。

① PART I:DCM の挙動を表現するための IAM の変更

従来、著者らが使用している通常の IAM（今回のモデル:MESSAGE-Transport）は消費者の行動を合理的に決定する。具体的には、合理性 1:消費者の好みは固定（行動にランダム性はない)、合理性 2:効果・効用を最大化するように行動、合理性 3:行動の選択肢についての完全な知識（行動の結果どうなるか分からないということが無い)、という 3 つの性質持って、行動を決定している。そのため、例えば、補助金を導入した途端に全消費者が AFV に乗り換えたりするなど、現実的には考えづらい挙動を示すことがある。さらに、現実の消費者は常に完全に合理的な行動を取るとは限らない。一方で、行動決定のモデルとして、DCM（今回のモデル:MA^{3}T）は一般的に活用されている。そこで PART I では、エネルギー消費と CO_2 排出に強く影響する運輸部門に注目し、電気自動車・天然ガス車などの代替燃料自動車（Alternative Fuel Vehicle、以下 AFV と表記。）への乗り換え行動に焦点を当てる。既存の IAM に DCM の要素を統合し、自動車の購入行動を上手にモデル化することを目的とする。

モデルの変更方法について説明する。既存の IAM に対し、車両購入の際の行動に DCM の要素を足すようにする。1 つ目の変更として、一律であった消費者を複数に分解する。これは、どこに住む/働くか（都市/郊外/地方)、新しい技術に興味があるか（アーリーアダプター/アーリーマジョリティ/レイトマジョリティ)、どれくらい運転するか（頻繁/平均/少し)、でグループ分け（合計 27 組）する。ここで、アーリーアダプターなどとは、イノベーター理論 [3]にて使用される用語で、新商品に対する態度で消費者を 5 つに分けたものである。1.イノベーター:新商品に飛びつく人、2.アーリーアダプター(初期採用者）:比較的早く、新商品を買う人、3.アーリーマジョリティ（初期多数派）:流行し始めたものを買う人、4.レイトマジョリティ（後期多数派）:多くの人が買ったら買う人、5.ラガード:定番商品になったら買う人、という 5 つの分類を用いる。2 つ目の変更として、車両の購入コストに選好コスト（好み）を追加する。ここで、選好コストは消費者グループにより異なる。例えば、電気自動車の走行可能距離への不安など、購入コスト以外の要因を換算して車両コストに加えるようにする。選好コストは 6 種類設定し、①走行距離不安症（電気自動車の場合。長距離走れない不満でコスト増)、②ガススタンドの利用可能性、またはその欠如（天然ガス車・水素自動車の場合。補給に掛かる時間分コスト増)、③リスクプレミアム（新技術に対する好み/忌避でコストを上下。新技術が広まると 0 に近づく)、④車両の多様性（提供されている選択肢が少ないとコスト増)、⑤電気自動車充電ステーションの設置（電気自動車の場合。家庭/職場への設置費用、或いは公共への設置費用の一部を負担)、⑥消費者の収入による補正（平均より収入の多い人はガソリン車とのコスト差を低く見積もり、少ない人は多く見積もる)、とする。以上を踏まえ、選好コストを仮定し、IAM の計算を実施後、算出された車両やガススタンド/給電所の普及具合から、選好コストを再設定し、更に IAM の計算を実施、というサイクルを収束するまで繰り返す（4~8 回程度で収束）ことで、モデルを設定する。

変更したモデルで 4 つの北米の自動車市場シナリオをシミュレートし、社会的影響（ネットワーク外部性・ピア効果）の影響を検証する。ここで、ネットワーク外部性とは、同じ商品の消費者が増えるほど、その商品の便益が増える現象のことである。

例えば、最初に電話を買った人は相手が居ないため、価値は 0 だが、二人目は一人目と電話出来るので、価値 1、三人目は価値 2 など、価値が上がっていく様子を表す。また、ピア効果（バンドワゴン効果）とは、周囲の評判を判断材料にする心理のことである。みんなが買っているから買う、などの心理を表す。

一つ目のシナリオ A を反事実シナリオとする。これは選好コストの内、⑥消費者の収入による補正を除外したシナリオである。また、社会的影響は、消費者グループ内および消費者グループ間で発生するとする。これにより、社会的影響が AFV の購入に与える影響を検証する。シナリオ A の結果として、価格が下がらないので、2010 年から 2050 年の間に AFV の導入は見られない。例えば、BEV(Battery Electric Vehicle)はガソリン車に比べ、2050 年で 5,000~8,000 米ドル高いと想定された。

次に、二つ目のシナリオ B を参照シナリオとする。これはシナリオ A と同様だが、⑥消費者の収入による補正も含むシナリオである。これにより、車両コストへの消費者の認識を世帯収入に結び付けることによる影響を検証する。シナリオ B の結果として、AFV を実際のコストより安いと感じた、裕福な地域（都市、郊外）の頻繁に運転するアーリーアダプターが BEV と PHEV(Plug-in Hybrid Electrical Vehicle)を最初に購入し始める。普及に伴い、新技術への不安、車両の多様性への不満が低減すると共に、公共の急速充電ステーションが増える。これにより、アーリーマジョリティ、レイトマジョリティの選好コストが低下し、これらのグループの頻繁に運転するドライバーにも普及する。ただし、走行距離が少ないドライバーは BEV と PHEV の燃費メリットを享受できないため、ガソリン車に乗り続けた。

次に、三つ目のシナリオ C を参照シナリオ（社会的影響）とする。これはシナリオ B と同様だが、社会的影響が同じ消費者グループ内にのみ影響し、消費者グループ間では影響しないシナリオである。例えば、頻繁に運転する人の間で AFV が広まっても、あまり運転しない人の新技術への不安は低減されないことになる。これにより、社会的影響の範囲が AFV 購入に与える影響を検証する。シナリオ C の結果として、図 5.4.3-6 を示す。シナリオ B[実線]では、頻繁に運転するドライバー[赤]の選好コストが下がるのに合わせて、平均的なドライバー[青]の選好コストも下がる。しかし、シナリオ C[破線]では、消費者グループ間で社会的影響が出ないため、頻繁に運転するドライバー[赤]の選好コストが下がっても、平均的なドライバー[青]の選好コストは下がらなかった。

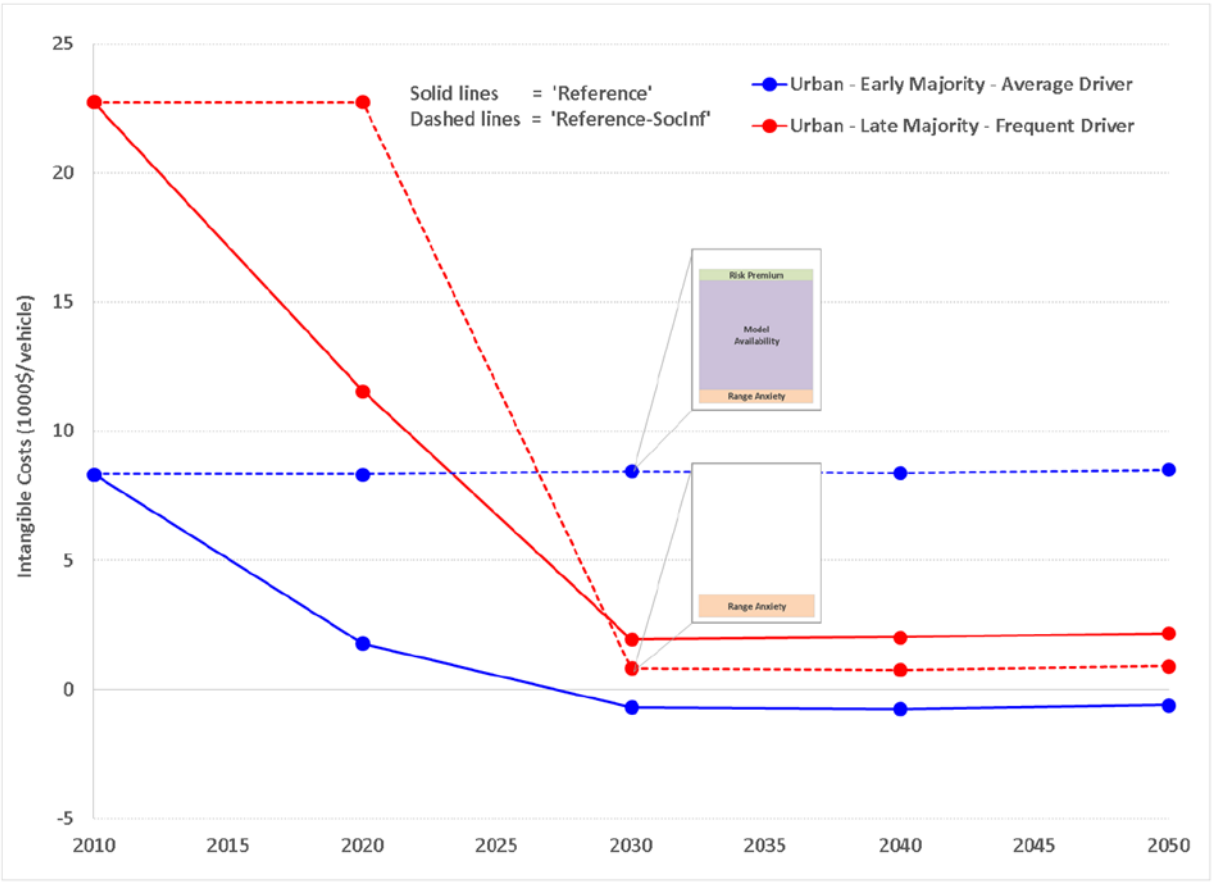


図 5.4.3-6 BEV の内生的に推定された選好コストの軌跡

（出典）Grubler et al.（2017）[2)]

最後に、四つ目のシナリオ D を参照シナリオ（補助金）とする。これはシナリオ B と同様だが、すべての AFV のコストが助成され、ガソリン車と同額になるシナリオである。これにより、補助金による AFV 購入に与える影響を検証する。シナリオ D の結果として、AFV の展開に劇的な影響があり、2030 年で 2 億 2500 万台（乗用車の 20%）、2050 年で 4 億 5000 万台（乗用車の 28%）普及が見られた。また、大部分は天然ガス ICE(Internal-Combustion Engine) / HEV(Hybrid Electric Vehicle)で、2030 年には 1 億 3000 万台、2050 年には 1 億 7000 万台となった。

以上から、IAM に DCM の要素を組み込むことで、AFV に対する消費者の変化していく態度を表現することができた。消費者の態度の表現には、モデル化において、消費者の収入を考慮することが重要である。AFV の購入で利益を得るのは頻繁に運転するドライバーであり、走行距離の少ないドライバーは利益を得る可能性は低い（少なくとも今回のシミュレーション条件において）。頻繁に運転するドライバーによる早期の AFV の購入が、AFV 全体の速やかな普及に重要である。社会の中で情報が自由に伝わり、消費者が互いに影響を受ける場合、アーリーアダプターはその他の消費者が新技術に関して抱く不安を減らすのに役立つと考えらえる。また、改良した IAM は ABM に近づいただけと思われるかもしれないが、今回のエージェント数（27 体）は通常の ABM（数千~数万体）より遥かに少なく済んでいることは重要である。

② PART II:ABM と DCM の手法とシナリオについての調整

既存の DCM での履歴データとシナリオ予測を再現するために、ABM のキャリブレーションを行う。(ABM の結果が DCM の結果に近くなるようにパラメータを設定すること。)これにより、調整を行った ABM が DCM の挙動を再現できるかを調べ、その後、ABM 固有のソーシャルネットワークの相互作用・ピア効果の影響を特定することを目的とする。まず、この作業に当たっての 2 つの仮説を立てる。仮説の一つ目は、DCM の結果には、ソーシャルネットワーク効果が既に含まれていると考え、ABM のキャリブレーション後、その効果をオフにすることで、効果が無い時の負の影響（AFV 普及の遅延）を調べることが出来る、とすることである。仮説の二つ目は、DCM の結果には、ソーシャルネットワーク効果が含まれていないと考え、ABM のキャリブレーション後、その効果をオンにすることで、効果が有る時の正の影響（AFV 普及の加速）を調べることが出来る、とすることである。ただし、現実の世界はこれらの中間にあると想定される。

まず、ABM の変更を行う。消費者の効用関数として、式(5.4.3-6)を導入する。

$$\begin{aligned}\mu = {} & (1-w_p) * \mu_5 \\ & -w_p * \left[p + \varepsilon * l * \left(1 - \frac{3}{4}A_5\right) + \vartheta * l * T_C * (1 - A_5)\right] \\ & -\epsilon * (1 - S_{0.7}) * [Max(0, A_5 - 0.7)]^2\end{aligned} \tag{5.4.3-6}$$

ここで、$\mu_5 = (A_1 + \cdots + A_5)/5$、$A_1$:安全性、$A_2$:パフォーマンス[例:加速、パワー]、$A_3$:快適性、$A_4$:デザイン、$A_5$:$CO_2$ 排出性能である。第一項は機能的効用、第二項は費用効用、第三項は不便な効用を表す。シミュレーション内にて、1990 年以降、車両メーカーは製品性能パラメータに CO_2 排出性能を表すA_5を加え、一定確率で改善するようになる。車両はA_5が大きくなるにつれ、次世代の車に変わっていく。具体的には、$A_5 = [0,0.3)$にてガソリン車（ディーゼル、天然ガス車含む）、$A_5 = [0.3,0.7]$にて HEV、$A_5 = (0.7,1]$にて EDV とした。正の値を取る機能的効用は製品性能μ_5が高いほど大きい。また、消費者毎に異なる係数w_pによって重み付けされる。次に、負の値を取る費用効用は車両価格p、運転距離l、炭素税T_Cが高いほど大きく、CO_2 排出性能A_5が高いほど小さい。また、機能的効用と同様に、消費者毎に異なる係数w_pによって重み付けされる。ここで、ε、ϑは係数である。以上から、例えば、$w_p = 0$の場合、その消費者は費用を全く気にせず性能と不便さで購入を判断する。また、$w_p = 1$の場合、その消費者は性能を全く気にせず、費用と不便さで購入を判断する。その時の費用効用はA_5によって、大きく増減する。次に、負の値を取る不便な効用は CO_2 排出性能A_5が高いほど大きく、EDV のシェア$S_{0.7}$が高いほど小さい。ここで、ϵは係数である。つまり、EDV では不便さが発生するが、EDV のシェアが伸びるほど、その不便さは小さくなっていく、というモデル化である。

次に、各数値データの設定について説明する。2005 年の車両販売台数など DCM シナリオの市場を初期値とし、2006～2013 年の履歴データと DCM で生成された 2050 年までのシナリオ予測を再現するようにシミュレーションを実行する。消費者行動を決定する効用関数の各係数は DCM データから決定する。車両コストについて、ABM では

内生的に決定され、生産量が増えるにつれ、コストは下がっていくが、2050 年の想定コストに合わせるため、下限値を設定する。2020 年に 100\$/tCO₂ の炭素税を導入し、2050 年まで年率 5%で引き上げる（2050 年で 432\$/tCO₂）。

ここで、追加的なモデルの変更について説明する。CO₂ 排出性能A_5について、その性能改善曲線を制御するパラメータの変更を行う。性能改善曲線は式(5.4.3-7)とする。

$$y = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x-\theta)}} \tag{5.4.3-7}$$

これにより、累積開発費xがθを超える辺りで、製品性能y（ここではA_5）が一気に改善されることを表現する。ここで、DCM の結果には元々ピア効果が含まれていると考えてシミュレーションする場合には$\alpha = 0.38$、$\theta = 1300$とし、ピア効果が無いと考えてシミュレーションする場合には$\alpha = 0.44$、$\theta = 1010$とした。ピア効果無しの場合に、開発費が若干少ない状態でより急激に性能が改善される様子を表す。また、技術進展による車両コストの低減について下限値は元コストの 58%、効用関数の不便な効用について係数$\epsilon = 1.2$と設定した。

ここから、２つの仮説のため、シミュレーション結果の比較を行う。まず、検証のために使用するピア効果について、2 種類の設定を行う。ピア効果は式(5.4.3-8)とする。

$$w_p^t = \rho_p w_p^{t-1} + (1 - \rho_p)\bar{w}_p^{t-1} \tag{5.4.3-8}$$

ここで、ρ_pは隣人の影響の受け難さを表す係数[0,1]であり、消費者毎にランダムに決定する。ピア効果 1 を使用する場合、消費者pについて、シミュレーションの現時点tの重みw_p^tを前のステップの重みw_p^{t-1}と隣人たちの平均重み$\bar{w}_p^{t-1}$の加重平均とする。一方、ピア効果 2 を使用する場合、消費者pについて、シミュレーションの現時点tの重みw_p^tを前のステップの重みw_p^{t-1}と、それよりも高い値を持つ隣人たちのみの平均重み$\bar{w}_p^{t-1}$の加重平均とする。これにより、ピア効果 1 は消費者の選好が平均に向かって収束する状況を表し、ピア効果 2 は消費者の選好が一番環境に配慮した消費者（w_pが 1 に近い人）に収束する状況を表す。

以上を踏まえ、まず、DCM の結果には元々ピア効果が含まれていると考えて、ピア効果 1、2 それぞれを設定した ABM に対し、キャリブレーションを行う（キャリブレーション条件 1)。同じ 2005 年の初期値を与え、DCM の結果に近くなるように ABM の各パラメータを調整した。その後、100 回シミュレーションを繰り返した平均値をグラフ化したものを図 5.4.3-7、図 5.4.3-8 に示す。2005 年までの履歴データは実線、2005 年以降は以前計算していた DCM の結果を破線、今回計算した ABM の結果を実線で示している。また、黒線は車両の合計台数、赤線はガソリン車、青線は HEV、緑線は EDV を表す。各車両の販売台数の推移について、特に DCM の結果（破線）とピア効果 2 で調整された ABM の結果（実線）は非常に近しいものとなった。

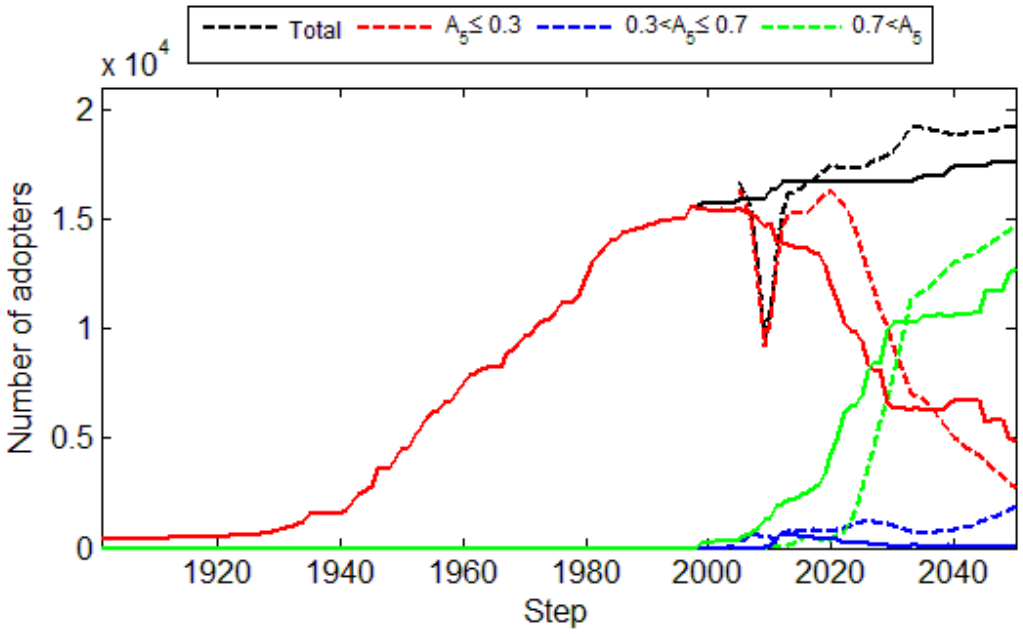


図 5.4.3-7　ピア効果 1 を使用する ABM でのシミュレーション結果
（キャリブレーション条件 1 のパラメータにて）

（出典）Grubler et al.（2017）[2)]

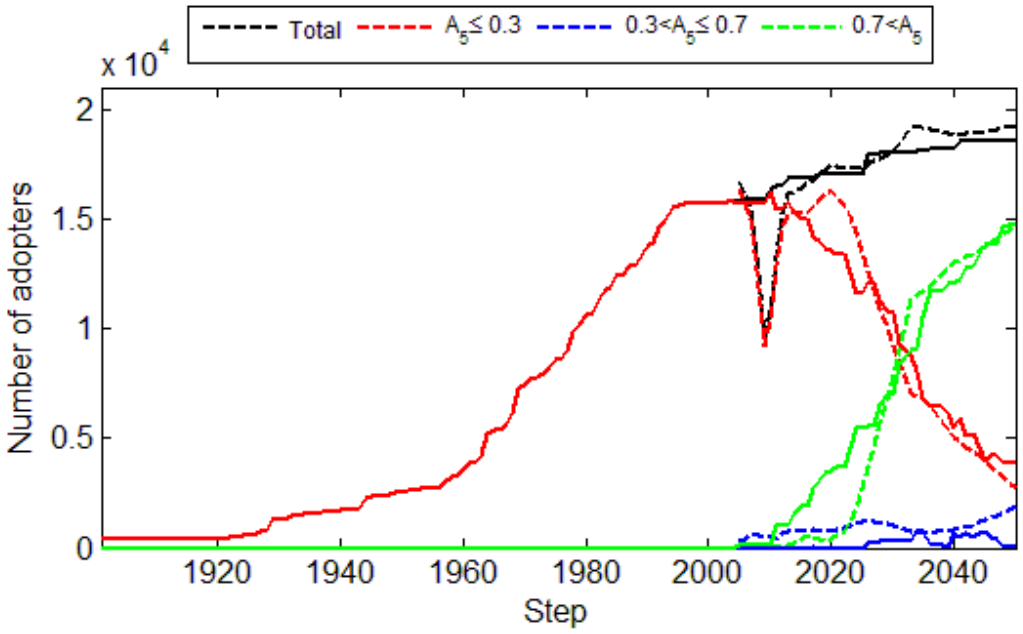


図 5.4.3-8　ピア効果 2 を使用する ABM でのシミュレーション結果
（キャリブレーション条件 1 のパラメータにて）

（出典）Grubler et al.（2017）[2)]

次に、ABM の各パラメータをそのままにして、ピア効果を無くした（w_pが更新されない）シミュレーションの結果を図 5.4.3-9 に示す。ピア効果が無いと、EDV の普及が大きく遅れる。それに伴い、総販売台数にも影響し、大きく減少している。これはピ

ア効果が無いために、消費者の環境への興味が育たず、EDV の普及が遅いが、ガソリン車の新車販売台数の減少はピア効果が有るときと余り変わらない。つまり、同じ車に乗りながら、市場の様子を伺っている状況を表現しており、これは DCM では表現出来なかったことである。

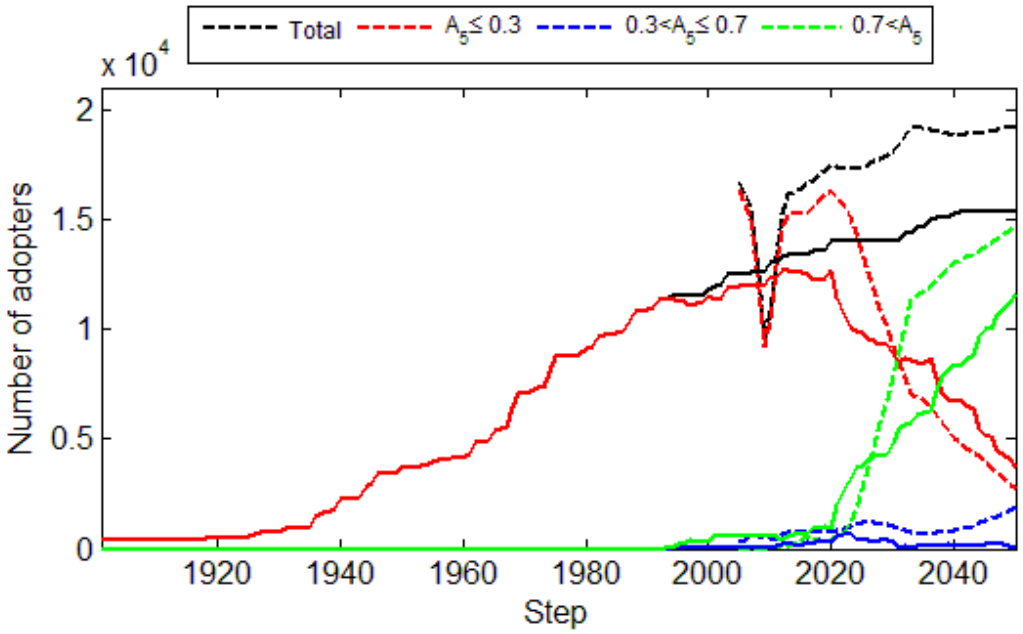


図 5.4.3-9　ピア効果を使用しない ABM でのシミュレーション結果
（キャリブレーション条件 1 のパラメータにて）

（出典）Grubler et al.（2017）[2)]

次は、DCM の結果には元々ピア効果が含まれていないと考えて、ピア効果を無くした ABM に対し、キャリブレーションを行う（キャリブレーション条件 2)。先のシミュレーションと同様に、同じ 2005 年の初期値を与え、DCM の結果に近くなるように ABM の各パラメータを調整した。その後、100 回シミュレーションを繰り返した平均値をグラフ化したものを図 5.4.3-10 に示す。各車両の販売台数の推移について、DCM の結果（破線）とキャリブレーション条件 2 で調整された ABM の結果（実線）は非常に近しいため、ピア効果の有無に関わらず、DCM と ABM 間で調整を行うことで同じシナリオを再現出来ると言える。

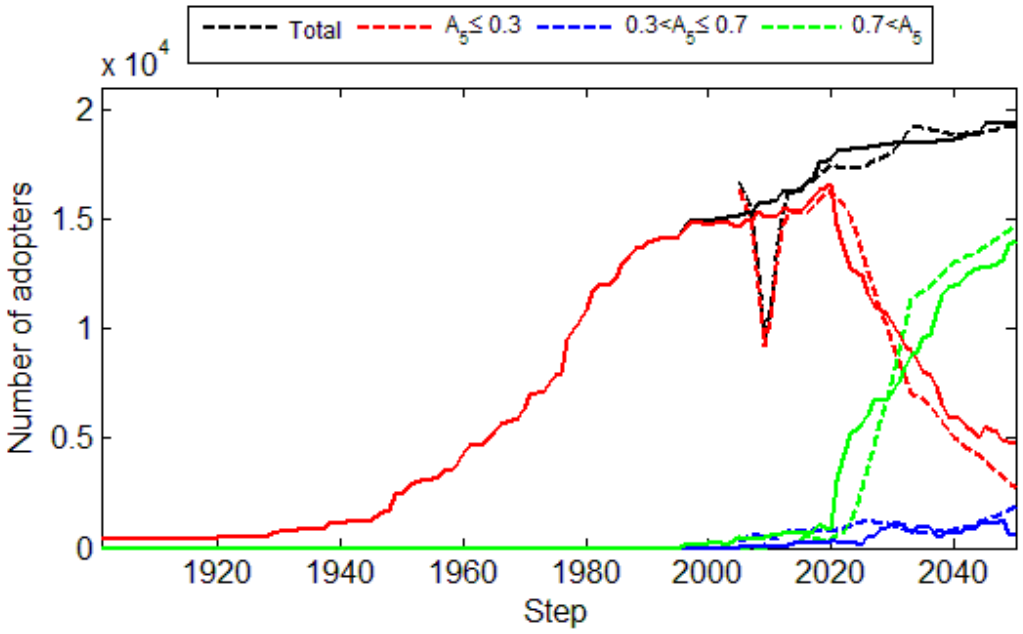


図 5.4.3-10　ピア効果を使用しない ABM でのシミュレーション結果
（キャリブレーション条件 2 のパラメータにて）

（出典）Grubler et al.（2017）[2)]

次に、ABM の各パラメータをそのままにして、ピア効果 1、2 を追加したシミュレーションの結果を図 5.4.3-11、図 5.4.3-12 に示す。ピア効果 1、2 共に、EDV の普及を 10 年以上加速している。これは選好が一番環境に配慮した消費者に収束するピア効果 2 で、より顕著である。ガソリン車と EDV はほぼ 1 対 1 で置き換わっており、HEV の出番はない。総販売台数は増えないので、需要の伸びは見られないと言える。

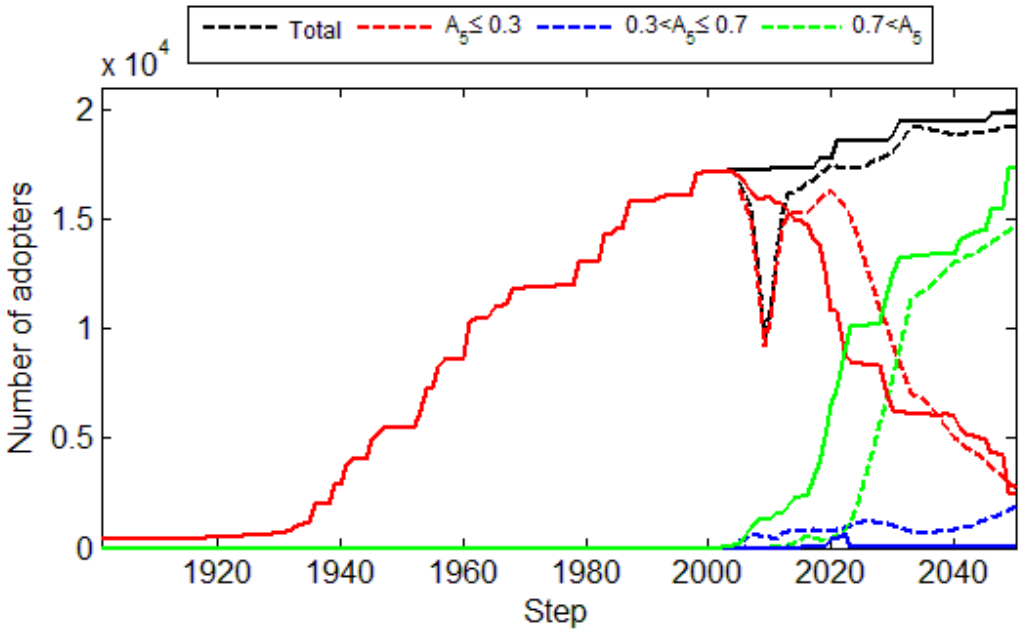


図 5.4.3-11　ピア効果 1 を使用する ABM でのシミュレーション結果
（キャリブレーション条件 2 のパラメータにて）

（出典）Grubler et al.（2017）[2)]

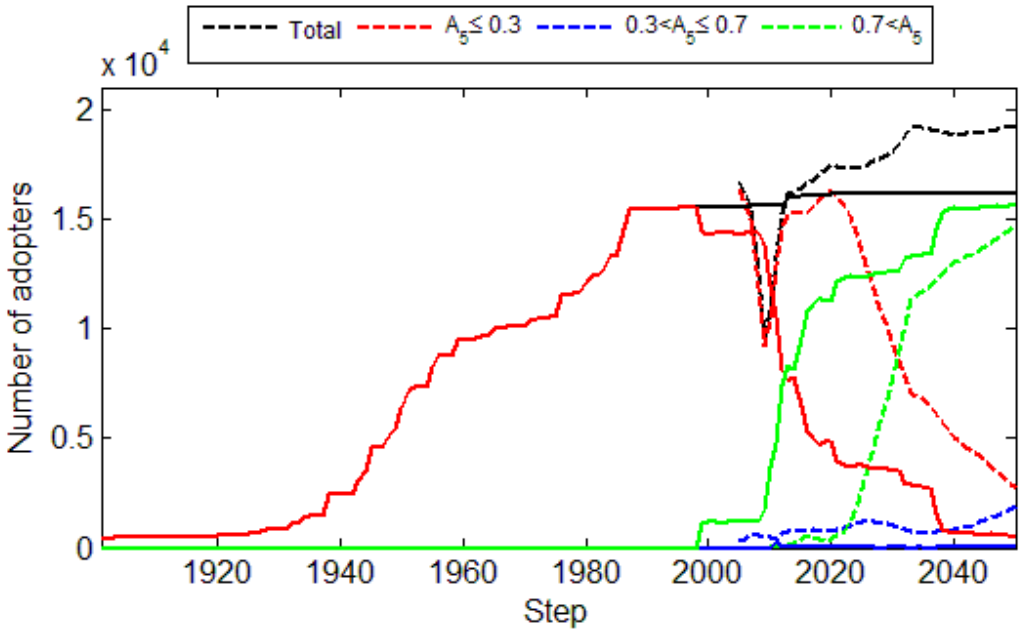


図 5.4.3-12　ピア効果 2 を使用する ABM でのシミュレーション結果
（キャリブレーション条件 2 のパラメータにて）

（出典）Grubler et al.（2017）[2)]

以上から、ABM と DCM で同じシナリオを表現できるが、需要と供給による内生的な技術進化など、ABM でしか表現できない要素もある。DCM でそれを解決するために

は、技術と需要の双方の変化にも対応した膨大な「シナリオテーブル」を提供することが必要である。

次に、ピア効果をそれに相当する炭素税という形で定量化出来るかどうかを検討する。ここまでの炭素税設定は 2020 年に 100$/tCO$_2$ で導入し、その後、毎年 5%で増加するという形である。そこで、ピア効果を含まないシミュレーションに対し、炭素税の導入時期はほぼ変えず、金額を変更し、ピア効果と同等の結果を目指す。2021 年に 160$/tCO$_2$ で炭素税を導入し、その後、毎年 5%で増加する設定でのシミュレーションにより図 5.4.3-13 の結果が得られた。2021 年視点で、ピア効果があるとき 105$/tCO$_2$ の炭素税であったものが 160$/tCO$_2$ でほぼ同じグラフが得られたため、ピア効果と同等の市場効果を得るためには、54%の増税が必要となる結果となった。

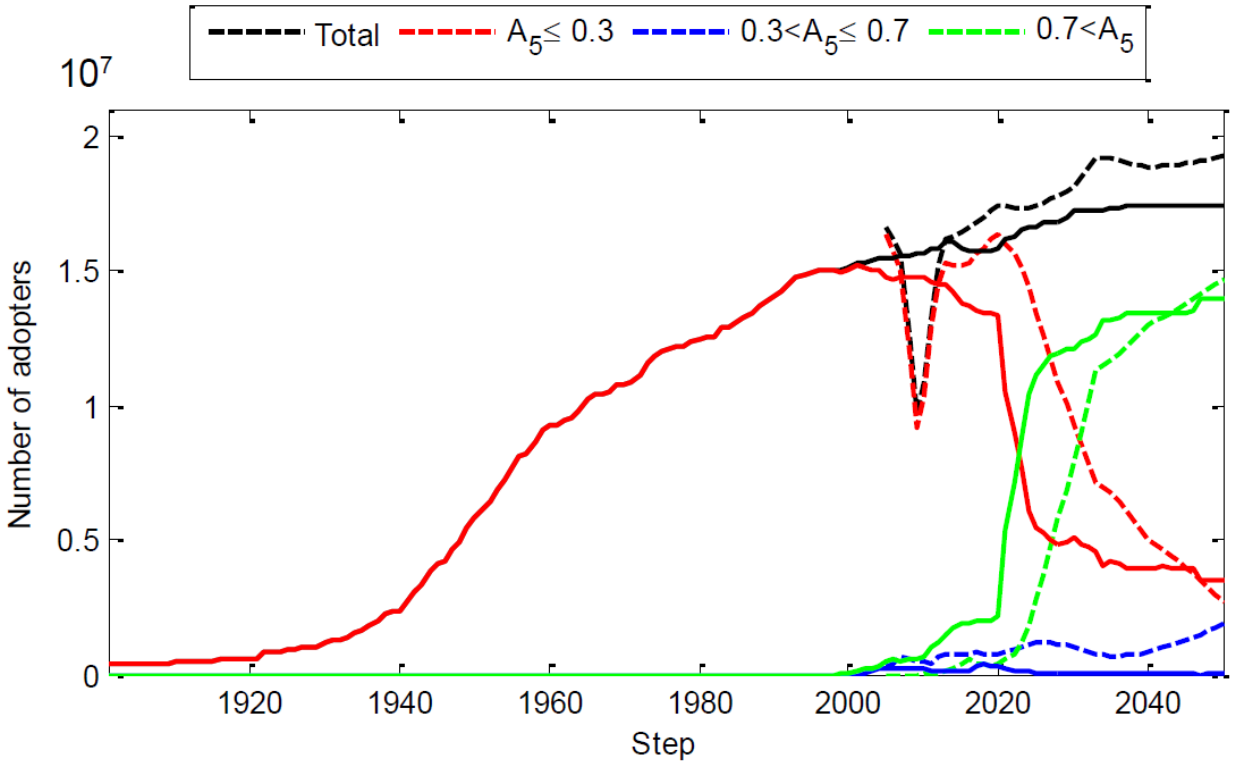


図 5.4.3-13 ピア効果を使用せず、炭素税を増額した ABM でのシミュレーション結果（キャリブレーション条件 2 のパラメータにて）

（出典）Grubler et al.（2017）[2)]

次に、ピア効果を含まないシミュレーションに対し、炭素税の導入時期を約 10 年前倒した上で、金額を変更し、ピア効果と同等の結果を目指す。2011 年に 120$/tCO$_2$ で炭素税を導入し、その後、毎年 5%で増加する設定でのシミュレーションにより図 5.4.3-14 の結果が得られた。ピア効果があり、2021 年視点で 105$/tCO$_2$ の炭素税であったグラフと、ピア効果が無く、2011 年視点で 120$/tCO$_2$ の炭素税であったグラフで、ほぼ同じものが得られたため、10 年の炭素税導入前倒しの条件で、ピア効果と同等の市場効果を得るためには、14%の増税で済む結果となった。

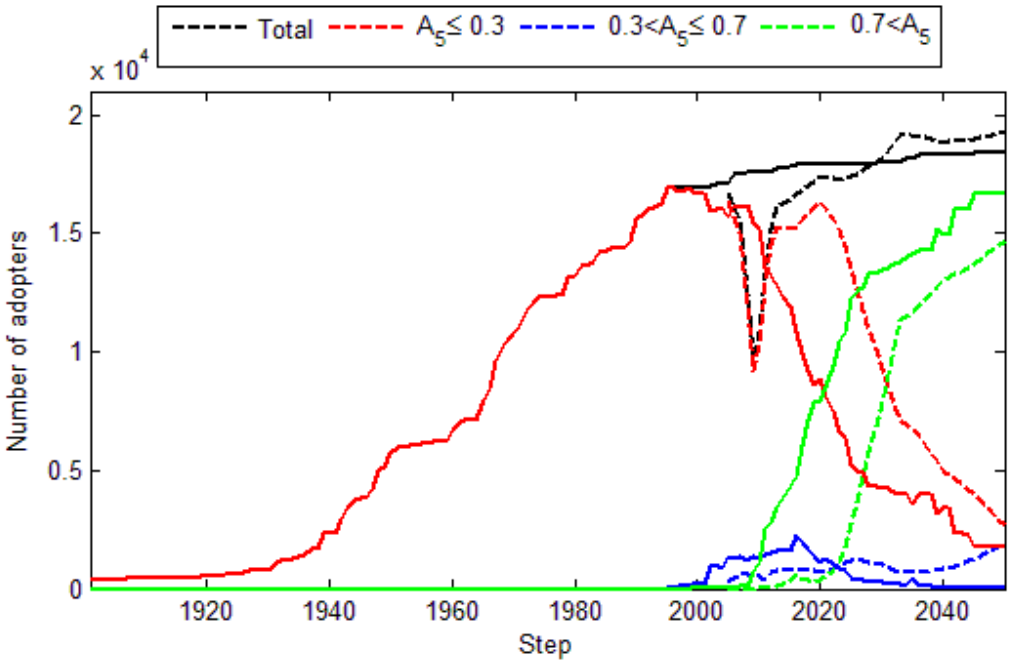


図 5.4.3-14　ピア効果を使用せず、10 年前倒しで炭素税を増額した ABM でのシミュレーション結果（キャリブレーション条件 2 のパラメータにて）

（出典）Grubler et al.（2017）[2)]

以上から、DCM と ABM はパラメータを調整することで、同じシナリオを再現できる。ここで、DCM は経験的に推定されたモデルのパラメータを利用できることが強みであり、ABM はソーシャルネットワークの相互作用・ピア効果の組み込み、新技術に対する需要と供給（生産者と消費者）の相互作用の組み込みが出来ることが強みである。また、ABM のソーシャルネットワークの相互作用・ピア効果と同等の経済政策（炭素税）は定量化でき、1.5℃の気候目標では、政策の 10 年の違いが絶対的に重要になる可能性がある。DCM には外因性のシナリオ（将来的なコスト低下など）が必要であり、そのシナリオには別途裏付けが必要であるが、ABM はそのシナリオ製作に役立つことが出来る。

③　PART III:中国の上海での車両販売の経験的データに合わせてキャリブレーションされた ABM

次の目的は、ABM のキャリブレーションに過去データを使用し、現在及び過去の市場を再現できるかをテストすることである。対象市場として、中国の上海を選択する。これまで対象としてきた北米などのほぼ成熟した市場とは異なり、中国の大都市ほど急速に成長している市場は無い。例えば、上海での自動車登録は 1995 年の 8000 台から 2015 年には 200 万台以上に増加した。また、EV(Electric Vehicle)と充電ステーションの普及も活発である。2015 年だけで上海に約 5 万台の EV が登録され、約 8000 の充電ステーションがある（米国のカリフォルニア州全体に匹敵）。

そこで、3つの重要なデータである、消費者の好み、EV用インフラ、経済変数（EVの購入価格、補助金）を収集する。まず、消費者の好みとして、既存のYanping[4]の調査を使用する。これは経験的消費者調査であり、156人の回答を得ている。このような小さなサンプルサイズは、この分野の学術研究では一般的であり、これらの研究で最も豊富な調査データサンプルでさえ1,000人の回答者をはるかに下回っている（例:Wolf et al.[5]）。この調査結果に対し、クラスター分析を使用して、6つの特徴的な消費者グループを仮定する。社会的影響はまずグループ内に表れ、その後グループ間に広がるとする。次に、EV用インフラは車両性能（走行可能距離を急速充電時間で割ったもの）と充電ステーション密度の積としてパラメータ化する。また、車両の増加と渋滞を抑えるため、上海では新車登録時、宝くじシステムか、競売によってナンバープレートを取得する必要がある。その費用は高く、2015年は85,000元（12,000米ドル以上）であった。しかし、EVはこれを免除されているため、政府の補助金に加えて大きな金銭的メリットがあり、これも考慮する。

キャリブレーションをする前に、いくつかのモデル修正を行う。一つ目の修正として、エージェント数の修正を行う。1995年から2015年で上海の人口は約1,400万人から約2,400万人に増加した。それに伴い、消費者エージェントの数を14,000から24,000に増加させる。つまり、各エージェントは同じ好みを持った1000人の消費者を表している。二つ目の修正として、これまでシナリオ毎に100回のシミュレーションを行っていたが、時間短縮のため、今回は20回のシミュレーションとする。三つ目の修正として、通常のDCMでは車両性能及び価格･所得が一定の閾値（消費者によって異なる）を超えた場合のみ、ある確率で製品を購入するが、閾値の内、価格・所得に対する閾値を外生的に時間経過で低下するように変更する。その量はガソリン車で7～10%/年、EVで35～40%/年の低下を想定する。これは上海では、可処分所得の伸びが平均11.4%/年と非常に高くなっており、その影響で高価な製品が急速に手頃な価格になることを表現している。

以上を踏まえて、キャリブレーションを行った結果を図 5.4.3-15、図 5.4.3-16 に示す。特にピア効果2（黒実線）を採用したシミュレーションにて、過去の市場（赤実線）をうまく再現できた。北米などの成熟した市場では社会的影響による消費者の好みの変化が市場動向の主要因であったが、上海では急速な所得の伸びが市場拡大の主要因であると考えると、ピア効果の有無の差異があまり大きくないことはおかしなことではない。ただし、EVについては過去データの期間が短く、また、外生的に購入閾値の35%/年の低下を導入しており、信頼性は低いので、将来の改善に期待している。

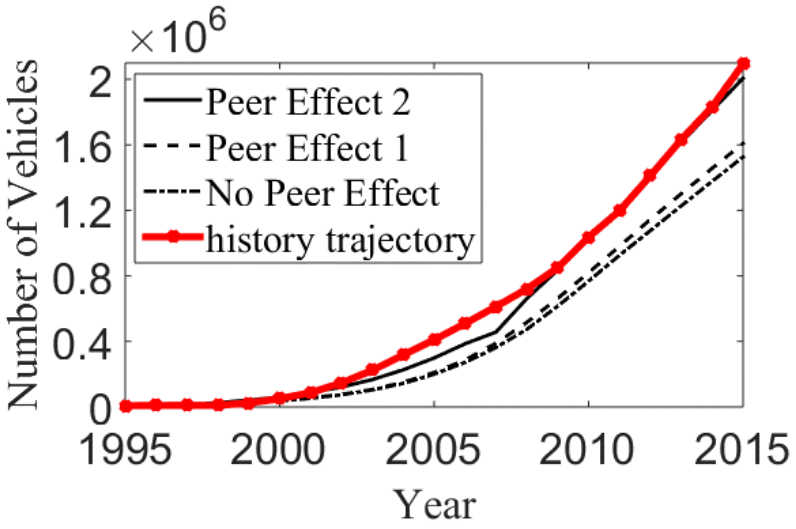


図 5.4.3-15 ガソリン車の販売台数推移

（出典）Grubler et al.（2017）[2)]

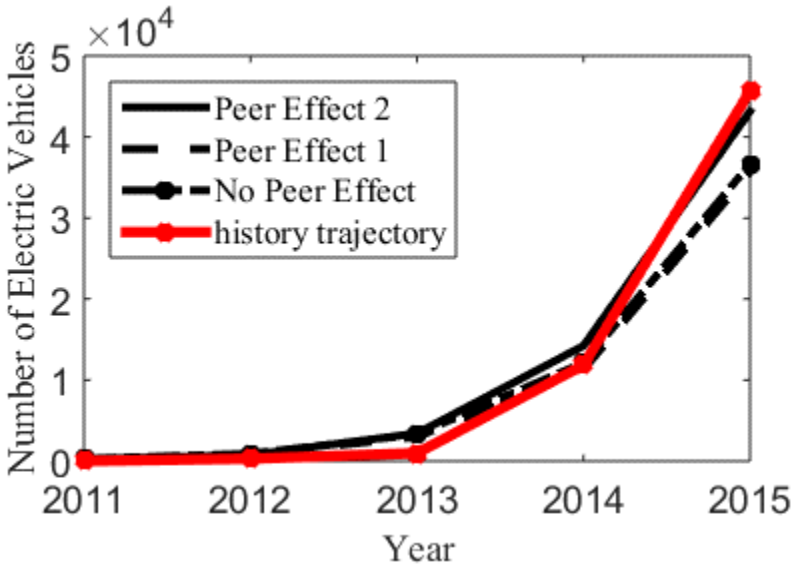


図 5.4.3-16 EV の販売台数推移

（出典）Grubler et al.（2017）[2)]

以上より、ABM による分析は先進国以外でも、適切なデータを収集することで可能であると実証できた。ただし、外生的な項目を導入しなければならなかったことは改善が必要である。よって、急速に成長している新興国の市場を ABM で表現するにはモデリング手法の再検討が必要である。

参考文献（第 5.4.3 節に関するもの）

1) Niamir, L., Kiesewetter, G., Wagner, F., Schöpp, W., Filatova, T., Voinov, A., and Bressers, H.: Assessing the macroeconomic impacts of individual behavioral changes on carbon emissions, Climatic Change, 158, 141-160, (2020).

2) Grubler et al., New Approaches for Modeling Energy End-use Technology Adoption and Behavior in IAM Frameworks, Energy (ENE) and Transitions to New Technologies (TNT) Programs, IIASA, (2017).
3) エベレット・ロジャーズ著、三藤利雄訳：「イノベーションの普及」、翔泳社、(2007)
4) Yanping, Y.: Evolutionary Analysis of Battery Electric Vehicle Based on Fuzzy Cognitive Map. MA thesis, East China University of Science and Technology, Shanghai, China, (2016).
5) Wolf, I., Schröder, T., Neumann, J., & de Haan, G.: Changing minds about electric cars: An empirically grounded agent-based modeling approach. Technological Forecasting and Social Change, 94, 269-285, (2015)

5.5 IT 等の進展による食料システムにおける排出削減の分析

5.5.1 背景と目的

気候変動は人類共通のリスクであり、2016 年に発効したパリ協定の下、人為起源温室効果ガス（GHG）排出の正味ゼロに向け、エネルギーの脱炭素化、省エネルギー、CH_4・N_2O 低排出型の農業、森林・農地炭素固定等、複数の排出削減機会の検討が求められている。本節で取り上げる、食料システムにおける食品ロスの低減は、食品に体化されたエネルギーや GHG、他各種資源の削減に寄与することから、省エネルギー・省資源タイプの削減策として注目されるオプションの一つである。

これまでの各種報告によると、農水産物生産から加工、輸送、小売、調理等を含む食料システム全体のエネルギー消費量は、世界最終エネルギー消費量の約 30%を占め[1)]、また、GHG 排出は人為起源 GHG 総排出量の約 21～37%を占める[2)]。一方、人の消費のために生産された食品の約 1/3、約 13 億 t が損失・廃棄されているとの報告もある[3)]。2015 年に採択された国連の持続可能な開発目標（SDGs）のターゲット 12.3 では、「2030 年までに小売・消費レベルにおける世界全体の一人当たりの食料の廃棄を半減させ、収穫後損失などの生産・サプライチェーンにおける食料の損失を減少させる」という目標が掲げられた[4)]。これに関連し、日本、米国、EU、アフリカ連合[5),6)]等複数の国・地域で、2030 年頃までの食品ロス低減目標が策定されている。各国・地域の食品ロス低減目標は、食品ロスとして考慮する範囲（可食部のみ/可食部と非可食部）、低減を目指す部門（収穫後の取り扱い/食品業と家庭/サプライチェーン全体）、さらに目標設定の基準（一人当たり量/地域全体量）等多様であるものの、食料システムは上述の通り多くの部門から成り立っていることより、食品ロス低減の影響は関連部門に波及し、エネルギー消費・GHG 排出の削減に寄与すると考えられる。

食品ロス低減による GHG 排出削減効果の分析として、例えば、国連食糧農業機関（FAO）は、世界の小売・消費段階の食品ロスを半減し、それより上流段階の食品損失も削減した場合、世界の GHG 排出量は▲14 億 t CO_2 eq/yr[1]、と推計している[0]。米国を対象とした Birney らによると、小売・消費段階の食品廃棄が半減した場合、国内の廃棄物埋め立ての GHG 排出が▲40%、農業生産・加工・流通等の GHG 排出が▲17%と推計される[8)]。Springmann ら[9)]は、世界の農業 CH_4・N_2O 排出について、2050 年まで

[1] 土地関連 CO_2 排出の変化は含まない。食品の国際輸送による排出は少ないとして無視。

の食料需要増大を考慮すると、2010 年に比べ約 85%増大するが、同時に食品ロスを半減する場合は約 75%の増大に留まると推計している。これらは先行研究として有益であるが、食品ロス低減のための具体的方策や、関連各部門に及ぶ影響は示されていない。また、日本の食品ロス低減影響の分析は限られる。

そこで本研究では、まずは日本を対象に、家庭、食品業、青果農業で食品ロスが低減した場合に国内外の各部門に及ぶ影響を産業連関表（I-O 表）を用いて分析してきた[10),11)]。ここで、食品ロス低減の手段として、実証実験で低減効果が確認されている需要予測技術をはじめ、普及、進展が著しい情報技術の活用を想定した。分析の結果、日本の食品ロス低減は日本をはじめ、北米、アジア等の多数の部門に及び、エネルギー消費、GHG 排出の削減に寄与することが示された。ただ、日本は海外に比べ食品ロス率が低く（例：表 5.5.1-1)、世界全体としての影響は限られる。そこで今年度は、世界各地域で食品ロスが低減する場合の影響を分析した。

なお､可食部･非可食部のどちらもエネルギー消費や GHG 排出に寄与することより、本節では断りが無い限り「食品ロス」は可食部・非可食部の両方を含むものとする。

表 5.5.1-1 地域別・段階別食品ロス率（%）[3)]（果物・野菜の例）

	段階	一次生産	収穫後取扱	加工	卸・小売・他流通	消費
地域	Japan	10	11	2	8	9
	OECD Americas	20	4	2	12	28
	OECD Asia, Oceania	20	4	2	12	28
	OECD Europe	20	5	2	10	19
	Africa	10	9	25	17	5
	Middle East	17	10	20	15	12
	Non-OECD Americas	20	10	20	12	10
	Non-OECD Europe, Eurasia	20	5	2	10	19
	China	10	8	2	8	15
	Non-OECD Asia	15	9	25	10	7

出典）文献 3)。但し、日本の「収穫後取扱」段階は FAO food balances[22)] の Tomatoes and products、「消費」段階は食品ロス統計調査（世帯調査）[12)]を参考に設定。

5.5.2 分析方法

(1) 食品ロス低減策と費用、低減率の想定

① 食品ロス低減策

食品ロス低減策は各地の食料システムによって異なりうる。本分析では、世界的に導入され、食品ロスの低減に寄与する可能性が考えられるものとして、日本や米国、ナイジェリア、インド等の小売や飲食サービスで検討されている POS システムを用いた需要予測[13),14)]を取り上げた（表 5.5.2-1)。また、家庭の対策として、日本や米国を参考に、買物・献立管理のアプリの活用を想定した[13), 15), 16)]。倉庫整備は、特にアフリカやアジア等の途上地域で、農家の作物貯蔵やその他流通設備の不備によるロスが大きく[3)]、保存環境の改善が課題とされている[6), 17)]ことを考慮したものである。これらの地域で課題とされる倉庫が整備された上で、食品業の需要予測や、家庭の買物・献立管理の対策も取りうると想定した。

表 5.5.2-1　食品ロス対策と部門

対策	部門
需要予測	・食品加工、小売、飲食サービス
買物・献立管理	・家庭
倉庫整備（一部地域*1のみ）	・農畜水産、倉庫

*1: Africa, Middle East, Non-OECD America, Non-OECD Asia

② 対策費用と食品ロス低減率

POS システムを用いた需要予測について、まず、2014 年の POS 普及率を、世界各地域の成人 10 万人あたり POS ターミナル数 [18]を参考に、2%（Africa）～42%（OECD Americas）と推計した。さらに、小売、飲食サービスに関し、各地域の POS 普及率を 60%（米国で 2020 年代後半に予想される値）に引き上げる場合に必要な POS ターミナルの費用と、需要予測の費用を算定した。ここで、POS ターミナルの費用は、タブレット・周辺機器を利用する場合は 364 US$/個/yr [10]、スマートフォンを利用する場合は 0 US$/個/yr とした。需要予測の費用は 491 US$/店舗/yr [19]とした。また、POS 普及率が 60%まで上昇した場合の各地の食品ロス低減率を、POS 有無毎の推計ロス率を基に、表 5.5.2-2 のように想定した。

食品加工に関し、需要予測による食品ロス低減率は小売と同じとし、対策費用は、食品加工の廃棄費用低減×小売の単位廃棄費用低減当たり対策費用、より設定した。

家庭における買物・献立管理アプリは、スマートフォン等既存の端末機器で利用するとし、アプリの利用料のみ 9 US$/世帯/yr [20]を計上した。これによる、家庭の食品ロス低減率は、米国で期待されている数値 [13]や SDGs ターゲット 12.3 を参考に 50%とした。

倉庫整備について、文献 21)のコールドチェーン普及率（例えば果物・野菜の場合：先進地域 95%、 西アフリカ 10%、南アジア 10%、中南米 30%等）を参考に、コールドチェーン普及率が低い途上地域の普及率を先進地域並みに上げる場合の費用と、それによる食品ロス低減率を設定した。ここで、収穫後倉庫整備の費用には、果物野菜、穀物、イモ類、油糧種子、生乳、魚介類の生産量 [22] に対して、追加的に必要な倉庫（0.008 US$/$m^3$/day；コンテナ型収蔵倉庫 [23]を参考に設定）と冷却機器・電気の費用を、流通倉庫は、倉庫自体はあるものの冷蔵設備が不十分なものに冷却機器・電気費用が必要になるとした。

表 5.5.2-2　対策による食品ロスの低減率（%）（乳製品の例）

対策		倉庫整備		需要予測			買物・献立管理
食品ロスが低減する部門		農畜水産(収穫後)	倉庫（流通）	食品加工	小売	飲食サービス	家庭
地域	Japan	–	–	48	48	28	50
	OECD Americas	–	–	30	30	27	50
	OECD Asia, Oceania	–	–	30	30	27	50
	OECD Europe	–	–	45	45	37	50
	Africa	67	67	58	58	12	50
	Middle East	24	25	56	56	39	50
	Non-OECD Americas	60	61	48	48	30	50
	Non-OECD Europe, Eurasia	–	–	53	53	44	50
	China	–	–	50	50	39	50
	Non-OECD Asia	64	67	56	56	25	50

(2) I-O 分析の手順

食品ロス低減による世界各地域・各部門への影響波及を考慮するため、I-O 表を用いて分析する。I-O 表として、国際貿易分析プロジェクト（GTAP: Global Trade Analysis Project）のデータベース ver.10[24]より 2014 年データを入手し、世界 10 地域（表 5.5.2-3）毎に区分した。表 5.5.2-4 に、GTAP10 の産業 65 部門を示す。

表 5.5.2-3　世界の地域区分

1. Japan

2.	OECD Americas	Includes Canada; Chile; Mexico and the United States.
3.	OECD Asia Oceania (excluding Japan)	Includes Australia; Israel[1]; Korea and New Zealand.
4.	OECD Europe	Includes Austria; Belgium; the Czech Republic; Denmark; Estonia; Finland; France; Germany; Greece; Hungary; Iceland; Ireland; Italy; Latvia; Lithuania; Luxembourg; the Netherlands; Norway; Poland; Portugal; the Slovak Republic; Slovenia; Spain; Sweden; Switzerland; Turkey and the United Kingdom. Estonia, Latvia, Lithuania and Slovenia are included starting in 1990. Prior to 1990, data for Estonia, Latvia and Lithuania are included in Former Soviet Union and data for Slovenia in Former Yugoslavia.
5.	Africa	Includes Algeria; Angola; Benin; Botswana (from 1981); Cameroon; Republic of Congo (Congo); Côte d'Ivoire; Democratic Republic of Congo; Egypt; Eritrea; Ethiopia; Gabon; Ghana; Kenya; Libya; Mauritius; Morocco; Mozambique; Namibia (from 1991); Niger (from 2000); Nigeria; Senegal; South Africa; South Sudan; Sudan, United Republic of Tanzania (Tanzania); Togo; Tunisia; Zambia; Zimbabwe and **Other Africa.** Note that Africa is identical to Memo: Africa (UN).
7.	Non-OECD Americas	Includes Argentina; Plurinational State of Bolivia (Bolivia); Brazil; Colombia; Costa Rica; Cuba; Curaçao [2]; Dominican Republic; Ecuador; El Salvador; Guatemala; Haiti; Honduras; Jamaica; Nicaragua; Panama; Paraguay; Peru; Suriname (from 2000); Trinidad and Tobago; Uruguay; Bolivarian Republic of Venezuela (Venezuela) and **Other non-OECD Americas**.
6.	Middle East	Includes Bahrain; Islamic Republic of Iran; Iraq; Jordan; Kuwait; Lebanon; Oman; Qatar; Saudi Arabia; Syrian Arab Republic; United Arab Emirates and Yemen.
8.	Non-OECD Europe and Eurasia	Includes Albania; Armenia; Azerbaijan; Belarus; Bosnia and Herzegovina; Bulgaria; Croatia; Cyprus[3]; the Republic of North Macedonia (North Macedonia); Georgia; Gibraltar; Kazakhstan; Kosovo[4]; Kyrgyzstan; Malta; Republic of Moldova (Moldova); Montenegro; Romania; Russian Federation; Serbia[5]; Tajikistan; Turkmenistan; Ukraine; Uzbekistan; Former Soviet Union (prior to 1990) and Former Yugoslavia (prior to 1990). Prior to 1990, data for Estonia, Latvia and Lithuania are included in Former Soviet Union and data for Slovenia in Former Yugoslavia.
10.	Non-OECD Asia (excluding China)	Includes Bangladesh; Brunei Darussalam; Cambodia (from 1995); Democratic People's Republic of Korea; India; Indonesia; Malaysia; Mongolia (from 1985); Myanmar; Nepal; Pakistan; Philippines; Singapore; Sri Lanka; Chinese Taipei; Thailand; Viet Nam and **Other non–OECD Asia**.
9.	China (P.R. of China and Hong Kong, China)	Includes the People's Republic of China and Hong Kong, China.

注）IEA2019[24),25),26)]の地域区分に基づく。但し、OECD Asia Oceania から日本を分離。

表 5.5.2-4　GTAP10 の産業 65 部門と本研究分析結果表示の集約部門

GTAP10の65部門		集約部門	
1	Paddy rice	1	耕種農
2	Wheat	1	耕種農
3	Cereal grains nec	1	耕種農
4	Vegetables, fruit, nuts	1	耕種農
5	Oil seeds	1	耕種農
6	Sugar cane, sugar beet	1	耕種農
7	Plant-based fibers	1	耕種農
8	Crops nec	1	耕種農
9	Bovine cattle, sheep and goats	2	畜産・水産
10	Animal products nec	2	畜産・水産
11	Raw milk	2	畜産・水産
12	Wool, silk-worm cocoons	2	畜産・水産
13	Forestry	20	その他
14	Fishing	2	畜産・水産
15	Coal	12	鉱業
16	Oil	12	鉱業
17	Gas	12	鉱業
18	Minerals nec	12	鉱業
19	Bovine meat products	3	食品加工
20	Meat products nec	3	食品加工
21	Vegetable oils and fats	3	食品加工
22	Dairy products	3	食品加工
23	Processed rice	3	食品加工
24	Sugar	3	食品加工
25	Food products nec	3	食品加工
26	Beverages and tobacco products	3	食品加工
27	Textiles	6	繊維・木材・紙・皮
28	Wearing apparel	6	繊維・木材・紙・皮
29	Leather products	6	繊維・木材・紙・皮
30	Wood products	6	繊維・木材・紙・皮
31	Paper products, publishing	6	繊維・木材・紙・皮
32	Petroleum, coal products	13	石炭・石油製品
33	Chemical products	7	化学製品
34	Basic pharmaceutical products	7	化学製品
35	Rubber and plastic products	7	化学製品
36	Mineral products nec	8	金属・鉱産品
37	Ferrous metals	8	金属・鉱産品
38	Metals nec	8	金属・鉱産品
39	Metal products	8	金属・鉱産品
40	Computer, electronic and optic	9	計算・通信機器
41	Electrical equipment	10	電気機器・用品
42	Machinery and equipment nec	10	電気機器・用品
43	Motor vehicles and parts	11	その他機械
44	Transport equipment nec	11	その他機械
45	Manufactures nec	11	その他機械
46	Electricity	14	電気
47	Gas manufacture, distribution	15	ガス
48	Water	19	廃棄物処理
49	Construction	20	その他
50	Trade	4	卸・小売
51	Accommodation, Food and servic	5	飲食・宿泊
52	Transport nec	16	輸送
53	Water transport	16	輸送
54	Air transport	16	輸送
55	Warehousing and support activi	17	倉庫
56	Communication	18	情報・通信サービス
57	Financial services nec	20	その他
58	Insurance	20	その他
59	Real estate activities	20	その他
60	Business services nec	20	その他
61	Recreational and other service	20	その他
62	Public Administration and defe	20	その他
63	Education	20	その他
64	Human health and social work	20	その他
65	Dwellings	20	その他

分析は大きく 3 つのステップから成る。ステップ 1 では、地域毎に、対策を行う部門（表 5.5.2-1 参照）の投入構造について対策費用の追加と、食品ロス低減に伴う食材・エネルギー・廃棄物処等の減少を設定する。

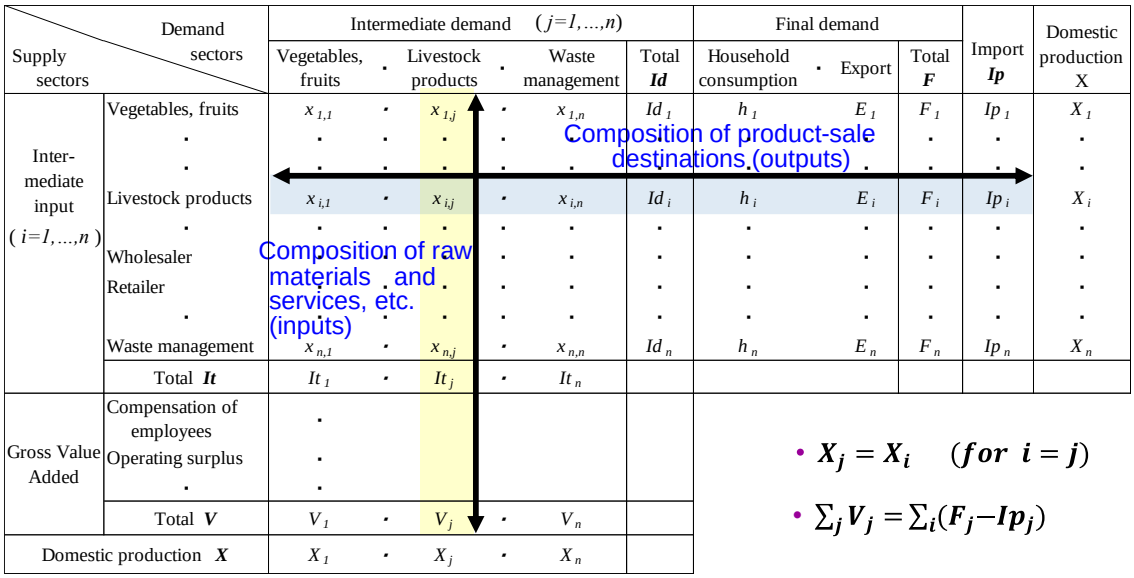


図 5.5.2-1　産業連関表の概念図

図 5.5.2-1 に I-O 表の概念図を示す。一般に、I-O 表で需給バランスは(5.5.2-1)式で表現される。

$$Id_i + (Fd_i + E_i) = Ip_i + (Xd_i + Xe_i) \qquad (5.5.2\text{-}1)$$

Id_i: 中間需要、Fd_i: 国内消費、E_i: 輸出、Ip_i: 輸入、
Xd_i: 国内消費用国内生産、Xe_i: 輸出用国内生産$(= E_i)$

ステップ 1 で、食品ロス低減により、中間需要＋国内消費$(Id_i + Fd_i)$が変化するが、この変化率 $m_i = (Id_i^{'} + Fd_i^{'})/(Id_i + Fd_i)$ と同率だけ、輸入(Ip_i)と国内消費用国内生産(Xd_i)も変化してバランスするとした。さらに、行方向の国内生産（$X_i^{'} = Xd_i^{'} + Xe_i^{'}$）と、列方向の値（$X_j$）との乖離率 $k_i = X_i^{'}/X_j \ (i = j)$ を算出する。それを列方向の費用構成に乗じて調整する。この調整を繰り返し、国内生産を行と列でバランスさせると共に、影響を関連部門に波及させる。

ステップ 2 では、ステップ 1 で算出した各地域の輸入変化が、それ以外の地域の輸出に及ぼす影響を GTAP の貿易構造に基づき算定する。

ステップ 3 では、ステップ 2 で算出した輸出(E_i)の変化に伴い、各地域の輸出用国内生産（Xe_i）が変化するとした。さらに、行と列の国内生産をバランスさせつつ、影響を波及させる。

最後に、$(X_i^{'} - X_i)/X_i$ より、食品ロス低減影響に伴う、各部門の生産額変化率を算定する。

なお、本分析では、食品ロス低減に伴う価格の変化は特に想定していない。また、食品ロス低減に伴い、例えば、廃棄物由来の有機肥料が減少する場合に化学肥料で補う、といった代替補充も特に考慮していない。これは、GTAP において食品廃棄物の再生利用の扱いが不明瞭であったためで、留意が必要である。

以下、食品ロス低減を特に考慮しない場合を基準ケース、考慮する場合を食品ロス低減ケースと呼ぶ。

(3) エネルギー消費・GHG 排出への影響

食品ロス低減による最終エネルギー消費への影響は、地域毎に、基準ケース（食品ロス低減を考慮しない。2014 年値）における石炭・石油、電力・熱、ガスの各エネルギー消費量[25]に、食品ロス低減ケースの石炭・石油製品、電力・熱供給、ガスの各部門の生産額変化率を乗じて推計した。なお、途上国の家庭では、調理用エネルギーにバイオマス利用も少なくない[24),25)]ことより、家庭部門については、木材製品の投入変化率を基にバイオエネルギー消費量変化も考慮した。

GHG 排出への影響は、基準ケースにおける、燃料燃焼 CO_2、工業プロセス CO_2、エネルギー関連 CH_4、農業 CH_4・N_2O、廃棄物 CH_4、工業プロセス N_2O、農業 N_2O、その他 N_2O（以上は文献 26)）、及び土地関連 CO_2[22)]の各排出量に対し、主な関連部門（表 5.5.2-5）の生産額変化率を乗じて推計した。

表 5.5.2-5　エネルギー消費・GHG 排出に関連する主な部門

GTAP10の65部門		Energy-coal/oil	Energy-gas/heat	Energy-ele	Energy-Biofuels/waste	CO_2-Energy(Direct)	CO_2-Energy(Indirect)	CO_2-non Energy	CH_4 - Energy	CH_4 - Agriculture	CH_4 - Waste	N_2O - Ind. processes	N_2O - Agriculture	N_2O - Other	Lnad-use change
1	Paddy rice									x			x		x
2	Wheat												x		x
3	Cereal grains nec												x		x
4	Vegetables, fruit, nuts												x		x
5	Oil seeds												x		x
6	Sugar cane, sugar beet												x		x
7	Plant-based fibers														x
8	Crops nec														x
9	Bovine cattle, sheep and goats									x			x		
10	Animal products nec												x		
11	Raw milk									x			x		
12	Wool, silk-worm cocoons									x			x		
13	Forestry														
14	Fishing														
15	Coal								x						
16	Oil								x						
17	Gas								x						
18	Minerals nec														
19	Bovine meat products														
20	Meat products nec														
21	Vegetable oils and fats														
22	Dairy products														
23	Processed rice														
24	Sugar														
25	Food products nec														
26	Beverages and tobacco products														
27	Textiles														
28	Wearing apparel														
29	Leather products														
30	Wood products				x										
31	Paper products, publishing														
32	Petroleum, coal products	x				x									
33	Chemical products							x				x			
34	Basic pharmaceutical products														
35	Rubber and plastic products														
36	Mineral products nec							x							
37	Ferrous metals														
38	Metals nec														
39	Metal products														
40	Computer, electronic and optic														
41	Electrical equipment														
42	Machinery and equipment nec														
43	Motor vehicles and parts														
44	Transport equipment nec														
45	Manufactures nec														
46	Electricity			x			x								
47	Gas manufacture, distribution		x			x									
48	Water										x			x	
49	Construction														
50	Trade														
51	Accommodation, Food and servic														
52	Transport nec														
53	Water transport														
54	Air transport														
55	Warehousing and support activi														
56	Communication														
57	Financial services nec														
58	Insurance														
59	Real estate activities														
60	Business services nec														
61	Recreational and other service														
62	Public Administration and defe														
63	Education														
64	Human health and social work a														
65	Dwellings														

注）文献 27)を参考に設定。

5.5.3　分析結果

(1) 産業部門別影響

図 5.5.3-1 に、アフリカで倉庫整備により食品ロスを低減した場合の各部門の生産額変化を示す。収穫後倉庫、流通倉庫において冷却機器と電力が追加的に必要と想定したため、電気機器や電力・熱供給部門で生産が増大すると分析された。但し、耕種農業、畜産・水産、食品加工をはじめ、化学製品、石炭・石油製品等多くの部門では生産額が減少する。これらの部門では、食品ロスに体化されていた生産活動が節減されるといえる。

また、大半の影響はアフリカで生じるが、化学製品は OECD Europe や China 等、輸入先各地域での節減にも寄与すると分析された。

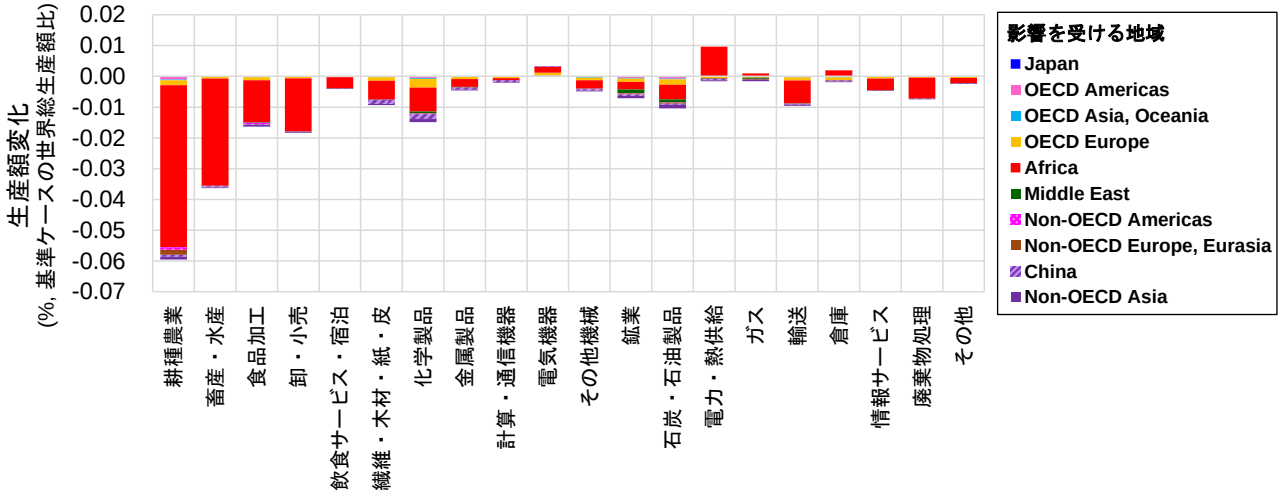


図 5.5.3-1　アフリカで倉庫整備により食品ロスを低減した場合の部門別生産額変化

注）基準ケース：2014 年値（食品ロス低減想定無）。産業 65 部門を 20 部門に集約表示。

世界の全地域で倉庫整備、需要予測、家庭の買物・献立管理により食品ロスを低減した場合は図 5.5.3-2 に示すように、計算・通信機器、情報サービス業の生産活動は、世界全体で 1%程増大する。一方、廃棄物処理は 7%、農畜水産、食品加工は 5～6%、化学製品は 1%、金属製品は 0.5%、石炭・石油製品、電力・熱供給、ガスは 1～2%節減される、と分析された。

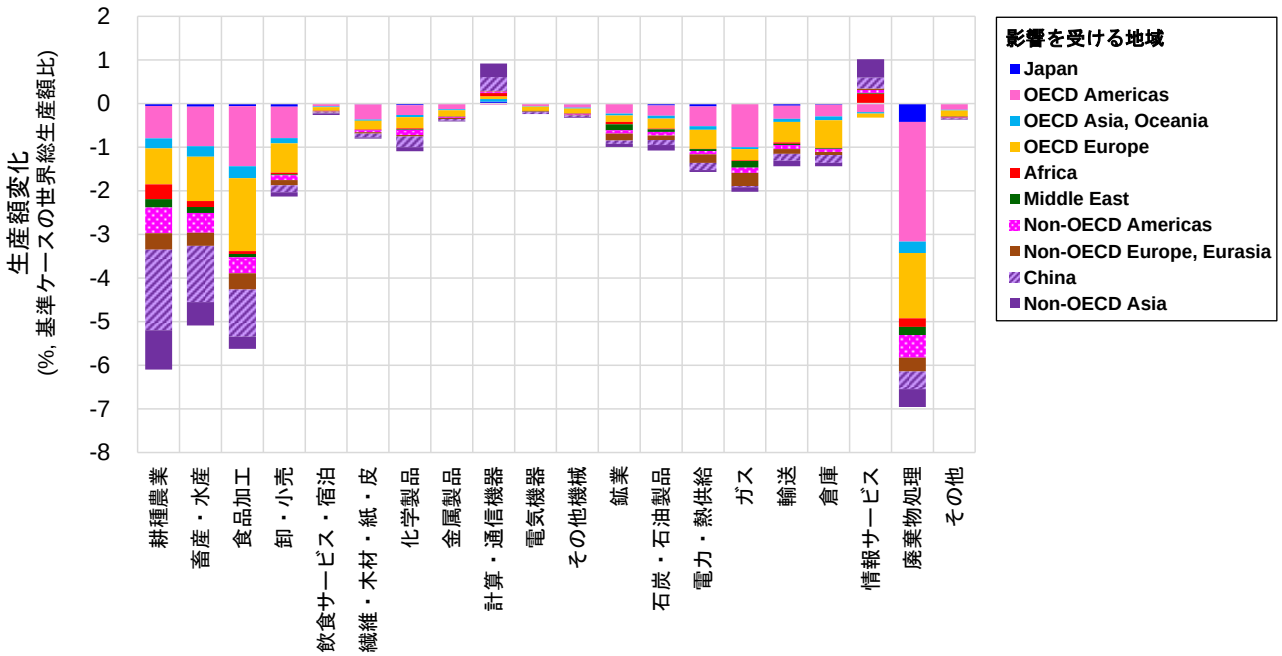


図 5.5.3-2　世界の全地域で想定した想定した全対策により食品ロスを低減した場合の部門別生産額変化

注）基準ケース：2014 年値（食品ロス低減想定無）。産業 65 部門を 20 部門に集約表示。

(2) エネルギー消費、GHG 排出への影響

世界の全地域で想定した全対策により食品ロスを低減した場合の、各地域のエネルギー消費量変化を図 5.5.3-3(a) に示す。OECD Americas で 1.7 EJ/yr、OECD Europe や China で 1 EJ/yr、世界全体で 6.3 EJ/yr（基準ケースの最終エネルギー消費量の 1.6%）の省エネルギーに寄与すると算定された。

GHG 排出量（図 5.5.3-3 (b)）は、世界全体で 11 億 tCO_2 eq/yr（基準ケースの GHG 排出量の 2.1%）の削減に寄与すると算定された。どの地域も燃料燃焼 CO_2 の他、CH_4、N_2O 等の排出が削減される。さらに、Non-OECD Americas、Non-OECD Asia、Africa では、食品ロスに体化された農作物生産が節減されるに伴い、耕地拡大による土地関連 CO_2 排出も抑制される。このように、多岐にわたり、省エネルギー、GHG 排出削減に寄与すると考えられる。

なお、世界全体で 11 億 tCO_2 eq/yr の削減という数字は、対象年他、各種想定が異なるため比較は出来ないが、5.5.1 節で述べた FAO の 14 億 tCO_2 eq/yr とオーダー的に同程度の値となっている。

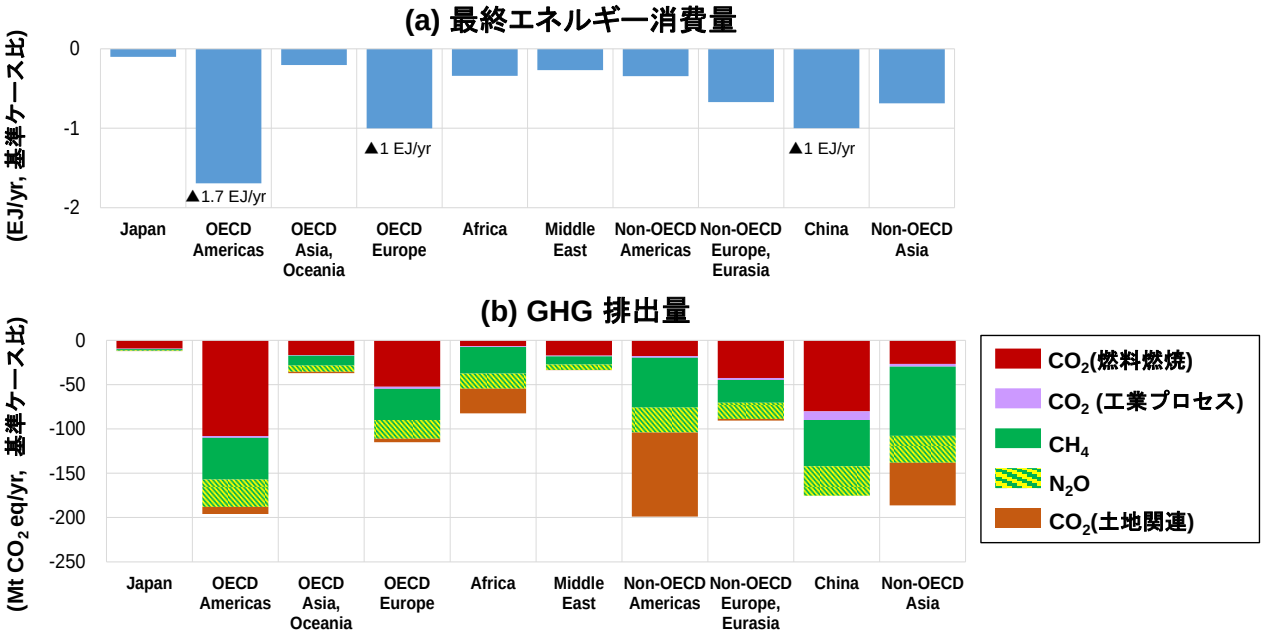


図 5.5.3-3　世界の全地域で倉庫整備、需要予測、家庭の買物・献立管理により食品ロスを低減した場合の地域別(a)最終エネルギー消費量と(b)GHG 排出量の変化

注）基準ケース：2014 年値（食品ロス低減想定無）。

(3) 食品ロス低減の正味費用と GHG 削減量

参考までに、各地域の食品ロス低減策について、対策を行う部門の、追加費用（情報機器、アプリ利用料等）と食品ロス低減に伴う材料や廃棄物処理などの投入減少の合計を「食品ロス低減の正味費用」として算出した。さらに、それを「世界全体の GHG 削減量」で除し、「世界平均 GHG 削減費用」として算出した。表 5.5.3-1 に、世界平均 GHG 削減費用が安価と算定された順に示す。

これより、次のような傾向が読み取れる。想定した対策のほとんどは、正味費用が負、すなわち便益が生じると算定される。中でも、Middle East での倉庫整備は、世界平均 GHG 削減費用が最も安価な対策と推計された。これは収穫後や流通の倉庫整備により主に同地域の農業 CH_4、N_2O が削減されることによるが、GHG 削減量は限られる。続いて、買物・献立管理アプリを活用した家庭の食品ロス低減は、世界のどの地域で実施した場合も、比較的安価な GHG 排出削減策と評価される。対策に特別な機器追加の必要が無く、アプリ費用のみを想定したことに加え、食品ロス低減の影響がサプライチェーンの上流に向け広く及ぶことが要因と考えられる。ただ、日本の家庭のみで食品ロスを低減した場合、海外への影響波及を考慮しても▲7 百万 tCO_2 eq/yr に留まる。家庭の食品ロス率が高いとされる OECD Americas、China（表 5.5.1-1 参照）をはじめ、全地域の家庭で食品ロスを半減した場合は▲7 億 tCO_2 eq/yr に寄与すると考えられる。

需要予測による食品業（飲食サービス・小売・食品加工）での食品ロス低減に伴う世界の GHG 削減量は、家庭での食品ロス低減に伴う GHG 削減量程大きくないものの、

世界全体で実施した場合▲3 億 tCO_2 eq/yr GHG 排出削減に寄与すると考えられる。Non-OECD Asia、Africa で実施する場合 GHG 削減費用が正となったが、これは、同地域の POS 導入率がいずれも 2%と低く、これを 60%までに引き上げる費用が必要と想定したことによる。

Non-OECD Americas、Non-OECD Asia、Africa の倉庫整備による食品ロス低減も、投入原料の節約という便益をもたらしながら、▲1 億 tCO_2 eq/yr に寄与すると算定された。

このように、食品ロスの低減は、家庭や食品業に便益をもたらすと同時に、世界全体で 11 億 tCO_2 eq/yr 程度の GHG 排出削減に寄与する可能性が考えられる。これまで家庭や食品業で食品ロスが発生している背景には、家にある食材の期限や量を忘れる/知らないため二重に購入する、又、食品業が販売機会を失わないように多めに発注や生産を行う等の状況があげられる。今回想定した買物・献立アプリや需要予測による食品ロス低減の実行性には不確実性があり、さらなる精査が必要であるが、情報技術の活用によって上述した状況が改善され、食品ロスが低減するとすれば、GHG 排出削減の観点からも、有効な対策と期待される。

表 5.5.3-1 食品ロス低減策別の世界の GHG 削減量と世界平均 GHG 削減費用

食品ロスを低減する地域	食品ロス低減策	世界平均 GHG削減費用 (US$/t CO_2eq)	世界の GHG削減量 ($MtCO_2$eq)
Middle East	倉庫整備	-276	1
OECD Europe	買物・献立管理	-165	99
Japan	買物・献立管理	-157	7
OECD Europe	需要予測	-151	56
Japan	需要予測	-128	9
OECD Americas	買物・献立管理	-123	165
OECD Americas	需要予測	-119	46
OECD Asia, Oceania	買物・献立管理	-104	32
OECD Asia, Oceania	需要予測	-101	12
Non-OECD Europe, Eurasia	買物・献立管理	-71	61
China	買物・献立管理	-65	126
Middle East	買物・献立管理	-56	25
Non-OECD Europe, Eurasia	需要予測	-52	25
Africa	倉庫整備	-44	15
China	需要予測	-44	59
Non-OECD Asia	倉庫整備	-44	45
Non-OECD Americas	買物・献立管理	-41	69
Middle East	需要予測	-37	8
Non-OECD Americas	倉庫整備	-32	43
Non-OECD Asia	買物・献立管理	-28	71
Africa	買物・献立管理	-23	38
Non-OECD Americas	需要予測	-23	55
Non-OECD Asia	需要予測	37	45
Africa	需要予測	55	17

5.5.4 まとめと課題

世界的に導入され食品ロス低減に寄与する可能性が考えられるものとして、POS システムを用いた需要予測、家庭における買物・献立アプリの活用、及びこれらの活用に向け一部途上地域で必要な収穫後・流通倉庫の整備を取り上げた。そして、これら対策による食品ロス低減が、世界の各地域各部門の生産、エネルギー消費、GHG 排出に及ぼす影響を分析した。分析対象年は 2014 年で、GTAP10 の I-O 表他、各種関連データを用いた。主な結果は、以下のようにまとめられる。

- 想定した対策が全て実施され世界の食品ロスが低減した場合、計算・通信機器、情報サービス業は、世界全体で生産が 1%程増大する。一方、廃棄物処理は 7%、農畜水産業、食品加工は 5～6%、化学製品は 1%、金属製品は 0.5%、石炭・石油製品、電力・熱供給、ガスの各部門では 1～2%、節減される。
- その結果、世界全体で、最終エネルギー消費量は食品ロス低減を想定しない場合に比べ 6.3 EJ/yr（1.6%）、GHG 排出量は 11 億 t CO_2 eq/yr（2.1%）削減される。すなわち、食品ロス低減の影響は多くの部門に波及し、これまで食品ロスに体化されていたエネルギー、GHG の削減、及び省物質化に寄与すると考えられる。
- 食品ロス低減を行う部門の、追加費用（情報機器、アプリ利用料等）と食品ロス低減に伴う材料や廃棄物処理などの投入減少額を「食品ロス低減の正味費用」とすると、ここで想定した対策のほとんどは、追加費用より投入減少額の方が大きく、正味費用は負と算定される。
- このような手頃な費用で、食品ロス低減が促進されるとすれば、情報技術の活用は、温暖化緩和、そして省資源化の観点からも、有望な対策と期待される。

なお、対策費用や対策による食品ロス低減率の設定については、各種実証データの充実に留意しつつ、引き続き精査・改善が必要である。また、情報化と消費者ニーズの多様化に伴い、食品のオンライン販売も今後拡大すると見込まれる。その際に考えられる食品ロス低減策や影響についても、調査・検討が必要である。さらに、パリ協定下での正味ゼロ排出目標への貢献という点では、今世紀中頃までの食料需要増大、技術進展シナリオ下での影響分析が必要であり、今後の課題である。

参考文献（第 5.5 節に関するもの）

1) FAO; Energy–smart food for people and climate, (2011). http://www.fao.org/3/i2454e/i2454e00.pdf (ｱｸｾｽ日 2019.1.12)
2) IPCC; Climate Change and Land (2019)
3) FAO; Global food losses and food wastage: extent, causes and prevention. FAO, Rome (2011)
4) UN; Sustainable Development Goals, https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300 (accessed 2019.10.10)

5) 農林水産省; 食品リサイクル法の基本方針改正案等について　資料 4, https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/syokusan/recycle/h31_1/attach/pdf/index-15.pdf (ｱｸｾｽ日 2021.9.28)
6) African Union Commission; Malabo Declaration on Accelerated Agricultural Growth and Transformation for Shared Prosperity and Improved Livelihoods (2014)
7) FAO; Food wastage footprint & Climate Change (2015), Rome, 4 pp. http://www.fao.org/3/a-bb144e.pdf (ｱｸｾｽ日 2019.11.17)
8) C. I. Birney, Franklin K. F., Davidson F. T. and Webber M. E.; An assessment of individual foodprints attributed to diets and food waste in the United States. Environ. Res. Lett., 12 (2017) 105008
9) M. Springmann et al.; Options for keeping the food system within environmental limits, Nature, 562, 519–525 (2018)
10) 林礼美, 本間隆嗣, 秋元圭吾; 情報技術等の活用による日本の食品廃棄低減が各部門のエネルギー消費と GHG 排出に及ぼす影響：産業連関表を用いた分析, エネルギー・資源, 41-3, 87-97 (2020).
11) 林礼美, 本間隆嗣, 秋元圭吾; 情報技術等の活用による日本の食品廃棄低減が世界のエネルギー消費と GHG 排出に及ぼす影響の分析, 第 37 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集 (2021)
12) 農林水産省；平成 26 年度食品ロス統計調査報告（世帯調査）
13) ReFED; Explore solutions to food waste, https://insights-engine.refed.org/solution-database?dataView=total&indicator=us-dollars-profit (ｱｸｾｽ日 2021.10.10)
14) Symphony Retail; CPG Shelf Planning, https://www.symphonyretailai.com/cpg/shelf-planning/ (ｱｸｾｽ日 2021.10.3)
15) App Store; pecco - 冷蔵庫レシピ献立料理アプリ (ｱｸｾｽ日 2021.10.8)
16) B. Bajželj et al.; The role of reducing food waste for resilient food systems, Ecosystem Services, 45 (2020) 101140
17) T. Stathers et al.; A scoping review of interventions for crop postharvest loss reduction in sub-Saharan Africa and South Asia, Nature Sustainability, 3, 821–835 (2020)
18) World Bank; Data Bank, POS terminals per 100,000 adults
19) Ginesys; Ginesys Subscription Pricing, https://www.ginesys.in/pricing (ｱｸｾｽ日 2021.10.5)
20) Cookpad dining; クックパッドダイニングプラン, https://cookpad.com/dining/about/360 (ｱｸｾｽ日 2021.9.20)
21) Food Waste Reduction & Cold Chain Technologies; Assessing the potential of the cold chain sector to reduce GHG emissions through food loss and waste reduction, (2015), https://www.corporate.carrier.com/Images/Global-Food-Cold-Chain-GHG-Emissions-Study_v2_tcm558-77711.pdf (ｱｸｾｽ日 2021.9.27)
22) FAO; FAOSTAT data, https://www.fao.org/faostat/en/#data
23) Jiji; Sell faster buy, smarter, https://jiji.ng/301-containers (ｱｸｾｽ日 2021.10.13)
24) GTAP; GTAP 10 Data Base, https://www.gtap.agecon.purdue.edu/databases/v10/index.aspx, (ｱｸｾｽ日 2021.9.15)
25) IEA; World energy balances 2019 edition (2019)

26) IEA; CO_2 emissions from fuel combustion 2019 edition (2019)
27) Z. B. Irfanoglu, D. van der Mensbrugghe; Development of the version 9 non-CO_2 GHG database (2015), p.34, https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/7813.pdf (ｱｸｾｽ日 2020.8.20)

5.6 地球温暖化対策と土地利用・食料アクセスに関する分析

5.6.1 背景と目的

2015 年 12 月に国連気候変動枠組条約の第 21 回締約国会議（COP21）で採択されたパリ協定では、気候変動の脅威に対する世界全体の対応として、全球平均気温上昇を産業革命前比 2℃のレベルを十分に下回るように抑え、また 1.5℃に抑える努力を追求する、という長期気温目標が掲げられた。また、その達成のため、人為起源温室効果ガス（GHGs）の発生を、21 世紀後半には正味ゼロにする、とされた [1)]。人為起源 GHG 排出量は現在約 50 Gt CO_2 eq/yr [4)]、今後世界の人口増加や経済発展に伴い人間活動がさらに増大すると見込まれる中で、パリ協定の気温目標達成に向けては、省エネルギーやエネルギーの炭素依存度低減による CO_2 排出の抑制、森林伐採等土地関連 CO_2 排出の抑制、非 CO_2 排出の抑制他、抑制しきれない GHG 排出を相殺するための CO_2 負排出技術等、様々な削減策が必要とみられている [3)]。

一方、2015 年 9 月には国連持続可能な開発サミットにおいて持続可能な開発目標（SDGs）が採択され、貧困や飢餓の解消、近代的エネルギーへのアクセス、気候変動対応、生態系保全等の諸目標が掲げられた [4)]。当然のことながら、気候変動対策は、これら持続可能な開発との調和性を考慮しながら進める必要がある。

このような背景から、ALPSIII プロジェクトでは、2℃、1.5℃目標に向けた排出削減シナリオ下で考えられる土地利用と食料アクセスへの影響に関する分析を行ってきた。これまでの分析 [5),6),7),8),9),10)]によると、世界を 32 に区分したほぼ全ての地域で、長期気温目標下では、特段の気候変動緩和を行わない場合に比べ食料アクセス指標（FAI: Food Access Indicator）が悪化し、経済発展に伴って期待される食料アクセス改善を鈍らせる。但し、昨年度の分析では、CO_2 排出削減策として大気中 CO_2 直接回収(DAC)を考慮した場合に、上述した食料アクセス悪化が幾分緩和される可能性が示された [12)]。ここで、FAI の悪化を招く主な要因は、(i) 緩和策実施による GDP ロスと、(ii) バイオマスのエネルギー利用や植林による森林炭素固定の急速な拡大に伴う土地代上昇が穀物等食料の価格上昇ひいては食料消費額増大をまねくことであり、とりわけ、後者の寄与度が大きい。

そこで今年度は、昨年度実施した DAC の有無による FAI への影響について、価格推計パラメータに対する感度分析を行った。さらに、DAC 以外の技術について、5.2 節に想定したように利用が拡大された場合の影響を分析した。

5.6.2　FAI 分析の枠組み

(1) 食料アクセス指標 FAI

FAO によると、食料安全保障は、availability、access、stability と utilization の 4 要素から成る [13]。本分析で用いる FAI はその 4 要素のうち acccess に関する指標である。「GDP に占める食料消費額割合」で定義され、数字が大きい程、食料にアクセスするための負担が大きく脆弱性が高いことを意味する。参考までに、FAO によって提案されている栄養不足人比率（Prevalence of Undernourishment in the total population: PoU）は「一人一日当たり食料摂取エネルギーが最低必要エネルギーを下回る人口の割合」で定義され、上記 4 要素のうち availability に関する指標である [14]。FAI と PoU では定義が異なるものの、図 5.6.2-1 のように、FAI が高い地域（カンボジア・ラオス等、バングラデシュ等、南西部アフリカ等）では、PoU も概して高い傾向が見られる。

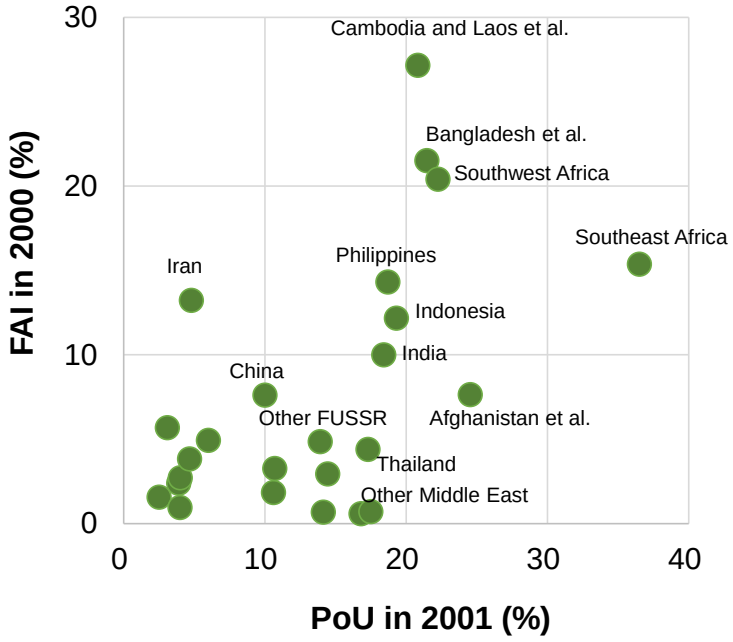


図 5.6.2-1　2000 年の FAI（本分析）と 2001 年の PoU[15]の比較

注）PoU が算定されている 25 地域（主に発展途上国）について表示

(2) FAI 分析の手順

FAI は、将来のエネルギーシステム、温室効果ガス（GHG）排出量、気候変動、農業土地利用等を考慮するため、図 5.6.2-2 に示すように複数のモデルを用いて分析する。

このうち GLaW (Grid-based model for agricultural Land-use and Water resource assessment) モデル [16),17)]では、将来の社会経済発展シナリオ下で想定される世界各地域の食料需要を満たすために必要な耕地面積を、農作物の生産性向上と気候変動影響を考慮して推計する。食用作物には、8 種の作物（小麦、米、トウモロコシ、サトウキビ、大豆、菜種、オイルパーム、その他作物）を含む。その上で、食料生産との競合や、生物多様性への影響が少ないと考えられる余剰耕地と草地を対象に、単収、土地アク

セス、水資源、保護地区外の条件を満たす土地をバイオエネルギー生産や炭素固定植林等、気候変動緩和のために利用可能な潜在地として推計する。そして、その結果をDNE21+モデルへ引き渡す。エネルギー作物として、可食作物の他、非可食作物（セルロース系）を想定している。

DNE21+モデル[18),19),20)]では、将来のエネルギー需要や CO_2 排出制約を満たしつつ、世界のエネルギーシステムコストが最小になるようなエネルギー・CO_2 排出削減技術の組み合わせを分析する。技術オプションには、CO_2 の負排出技術（BECCS、植林、DACCS）も含む。

これら GLaW モデル、DNE21+モデルの出力値、及び関連シナリオの値を用い、FAI モデル[5),6),7)]により、食料消費額（FE）、GDP、FAI を世界 32 地域毎に算出する。

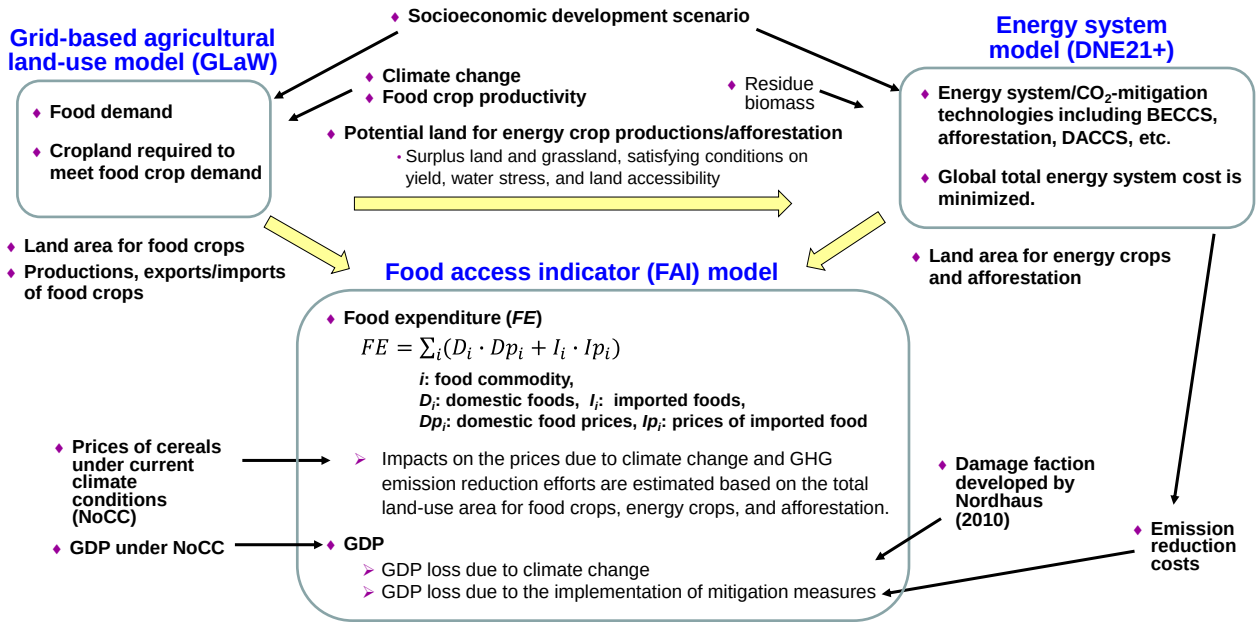


図 5.6.2-2 FAI 分析の手順

(3) FAI モデルにおける食料消費額と GDP の算定方法

① 食料消費額の算定方法

地域 r の食料消費額は(5.6.2-1)式のように、食品目 i の地域内生産品消費量（$D_{r,i}$）、地域生産価格（$Dp_{r,i}$）、輸入品消費量（$I_{r,i}$）、国際価格（I_i）より算出する。

$$FC_r = \sum_i (D_{r,i} \cdot Dp_{r,i} + I_{r,i} \cdot Ip_i) \qquad (5.6.2\text{-}1)$$

ここで、地域内生産品の消費量（$D_{r,i}$）と輸入品の消費量（$I_{r,i}$）は GLaW モデルの出力値を用いる。但し、FAI モデルでは簡便のため食品目は小麦、米、トウモロコシの三穀物に限定している。三穀物で、その他の食料（その他穀物・野菜、植物油、砂糖・甘物、動物性食品）の消費熱量もカバーするように、三穀物の消費熱量割合に応じて按分している。

価格は、まず温暖化無（No Climate Change: NoCC）ケースの国際価格シナリオを設定する（図 5.6.2-3）。続いて地域毎の生産価格（$Dp_{r,i}$）シナリオも、2000 年の各地域の実績値[20]を基に、将来の国際価格シナリオと整合するように延長、作成する。

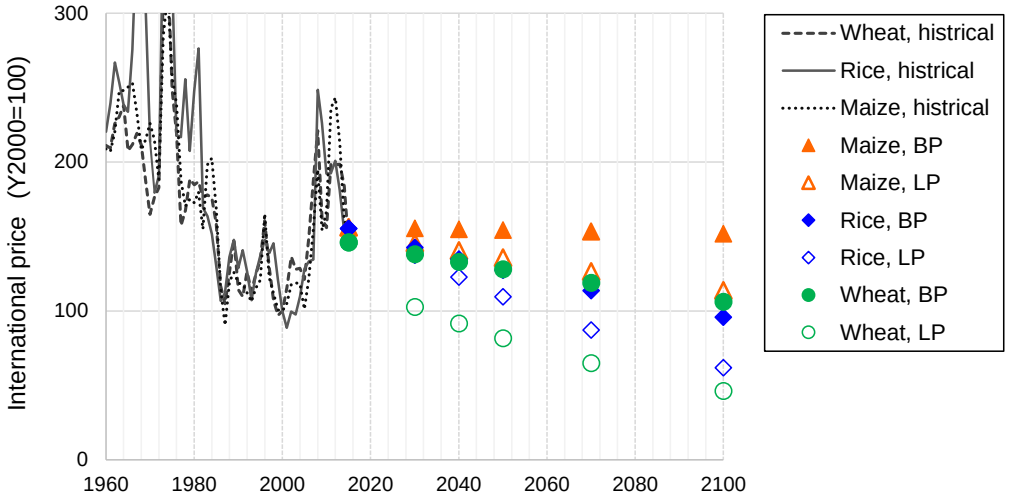


図 5.6.2-3 温暖化無 (NoCC) ケースにおける三穀物の国際価格シナリオ

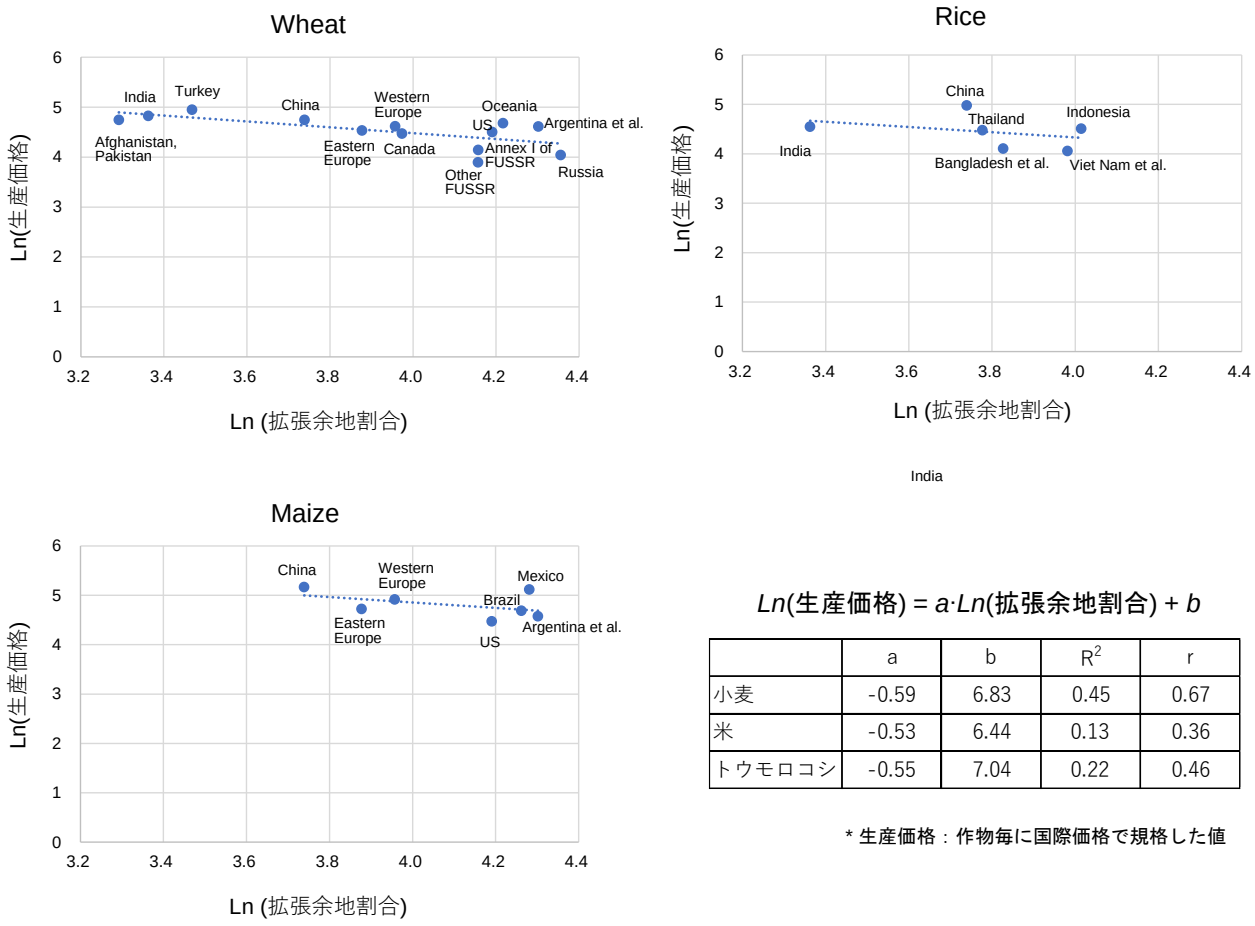
注）BP：World Bank の 2015-2030 年予測[22]に依拠し、その変化率を将来に延長したシナリオ。

LP：国際研究機関による SSPs シナリオ分析[23),24)]を参考に設定（低食料需要・高生産性により価格が低下する SSP1 シナリオ相当）。

NoCC 以外のケースの価格については、土地利用面積増大に伴う地代上昇により各地の生産価格が上昇するとして、各時点の NoCC ケース比生産価格上昇率(PR)を (5.6.2-2)式より推計する。

$$PR_r = a \cdot (ER_r - ER_{r,NoCC})/ER_{r,NoCC} \qquad (5.6.2\text{-}2)$$

ここで、ER_rは各地域の拡張余地割合（ER_r = 1－総作付面積/潜在的耕地面積）を意味する。潜在的耕地とは耕地になる可能性が考えられる土地であり、GLaW モデルによると、構造物域以外の土地で作物生産ポテンシャルと土地アクセスの条件を満たすものが、世界全体で約 3000 million ha（2000 年耕地の約 2 倍）と見積もられる[6]。係数 a は、拡張余地割合が少ない地域程、穀物生産価格が高いという関係（図 5.6.2-4）より設定している。



Ln(生産価格) = *a*·*Ln*(拡張余地割合) + *b*

	a	b	R^2	r
小麦	-0.59	6.83	0.45	0.67
米	-0.53	6.44	0.13	0.36
トウモロコシ	-0.55	7.04	0.22	0.46

＊生産価格：作物毎に国際価格で規格した値

図 5.6.2-4　拡張余地割合と穀物の生産価格の関係

注）各穀物の生産量上位国（1998-2002 年平均）[20]についてプロット

② GDP の算定方法

NoCC ケースの値は本節(4)項の通りシナリオとして設定し、その他のケースについては、温暖化影響と緩和策実施によるロスを考慮する。このうち、温暖化影響によるロスは全球平均気温上昇に対するダメージ関数[26]に基づき算定する。緩和策実施によるロスは DNE21＋モデルで算出されたエネルギーシステムの CO_2 削減費用（EC）に基づき推計する。これは、IPCC 第 5 次評価報告書の各種シナリオ分析[27]でも示されてい

るように、GHG 削減費用が大きい程、GDP ロスも大きいという関係を参考にしたものである [12]。

(4) 社会経済シナリオ

社会経済シナリオには、SSP2 シナリオ [3]を用いた。世界人口は 2010 年の 70 億人から、2050 年に 92 億人、2100 年に 93 億人まで増大する。世界 GDP の増大率は、2010-2050 年 2.4%/yr、2050-2100 年は 1.4%/yr である。世界の食料供給量は人口増加と経済成長に伴い、2050 年頃まで 2010 年の 1.5 倍まで増大するが、その後は微増にとどまる。なお、図 5.6.2-5 のように、地域毎の特徴を考慮したシナリオとなっている。

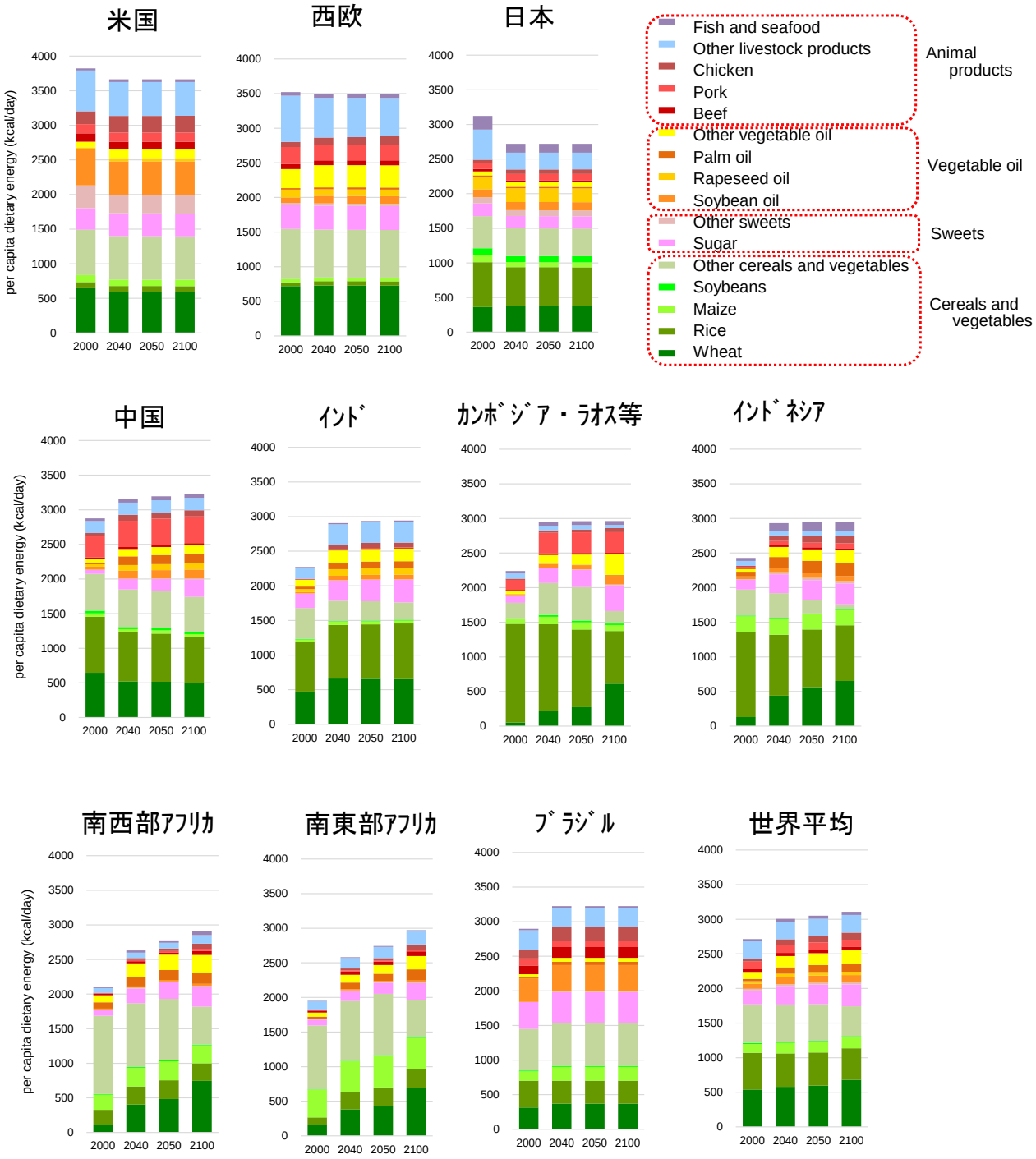


図 5.6.2-5 一人当たり食料供給量シナリオ（32 地域中の主要地域と世界平均）

5.6.3 大気中 CO_2 直接回収(DAC)の影響：食料価格推計に対する感度分析

(1) 分析ケースの設定

GHG 排出削減レベルと DAC オプションの想定を表 5.6.3-1 に示す。昨年度同様に、特段の GHG 排出制約が無い NoCC ケースと Reference ケース、そして産業革命前比全球平均気温上昇が 2℃又は 1.5℃におさまるよう GHG 排出を抑制するケースで、排出抑制ケースにはさらに DAC オプションの有無を設定した。但し、1.5℃-NoDAC ケースは DNE21+モデルで解を見出せなかったことより記載していない。図 5.6.3-1 に、各ケースの CO_2、GHG 排出パスを示す。1.5℃、2℃ケースは、2030 年までは各国の国別貢献 NDCs に相当する排出削減を達成し、その後は限界削減費用均等化の下、世界全体で最も費用効率的に排出削減を行うと想定している。CO_2 排出は各 2050 年頃、2060 年頃に正味ゼロ、GHG 排出は各 2065 年頃、2100 年頃に正味ゼロに達する。

表 5.6.3-1 GHG 排出削減レベルと DAC オプションに関する設定

	GHG 排出制約	DAC オプション	全球平均気温上昇(℃) *1	
			2050	2100
NoCC	特に無	―	0.8*2	0.8*2
Reference	特に無	―	2.3	4.0
2℃-NoDAC	>66%で 2℃未満	無	1.8	1.5
2℃-DAC	>66%で 2℃未満	有		
1.5℃-DAC	>66%で 2100 年 1.5℃未満	有	1.7	1.3

*1: 1850-1900 年比全球平均気温上昇。MAGICC6[27]により平衡気候感度 3ºC で計算。
*2: 気候は 2000 年のまま（比較のための仮想的ケース）。

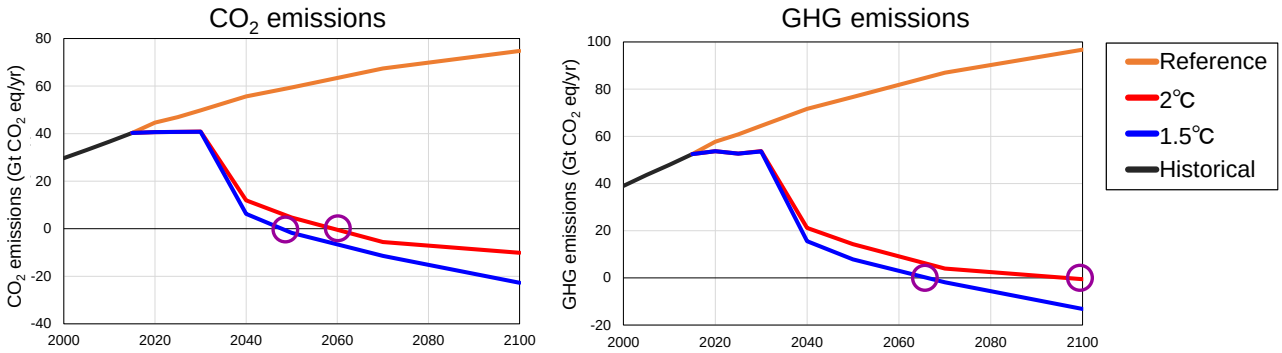


図 5.6.3-1 CO_2、GHG 排出パス

今年度は、さらに食料価格推計パラメータに対する感度分析として、国際価格シナリオと生産価格の拡張余地弾性値を表 5.6.3-2 のように設定した。このうち国際価格の BP、LP シナリオは図 5.5.3-3 に示した通りであり、昨年度までの分析に用いた基準シナリ（BP）と、国際価格がより低下するシナリオ（LP）の 2 つである。生産価格の拡張余地弾性値は、図 5.6.2-4 に示したように、小麦、米、トウモロコシの生産量上位国

について、拡張余地割合と穀物の生産価格の関係から推計した-0.55 と、昨年度までの分析に使用していた-0.39（主要地域の拡張余地割合と小麦の生産価格の関係から推計[6]）の 2 つである。

表 5.6.3-2 食料価格推計における、国際価格シナリオと拡張余地弾性値に関する設定

	国際価格シナリオ	生産価格の拡張余地弾性値
BP-E55	基準：BP	-0.55
BP-E39	基準：BP	-0.39
LP-E55	低価格：LP	-0.55

(2) 分析結果

① 土地利用

食用作物、エネルギー作物、炭素固定植林の土地面積は、昨年度報告書の通り、2℃-NoDAC ケースで 2030～2050 年の期間に約 800 million ha と急速に増大するが、2℃-DAC、1.5℃-DAC ケースではこの期間の増大は 550～600 million ha に留まる。これは、DAC 無で 2℃目標レベルの排出削減を行う場合に必要と分析された BECCS が、DAC を考慮した場合に減少し、特にエネルギー作物用の土地が少なくて済むと分析されたことによる。地域内訳を図 5.6.3-2 に示す通り、DAC を考慮すると DAC を考慮しない場合に比べ、ロシア、ブラジル、南西部アフリカ、南東部アフリカのエネルギー作物用地が減少する。

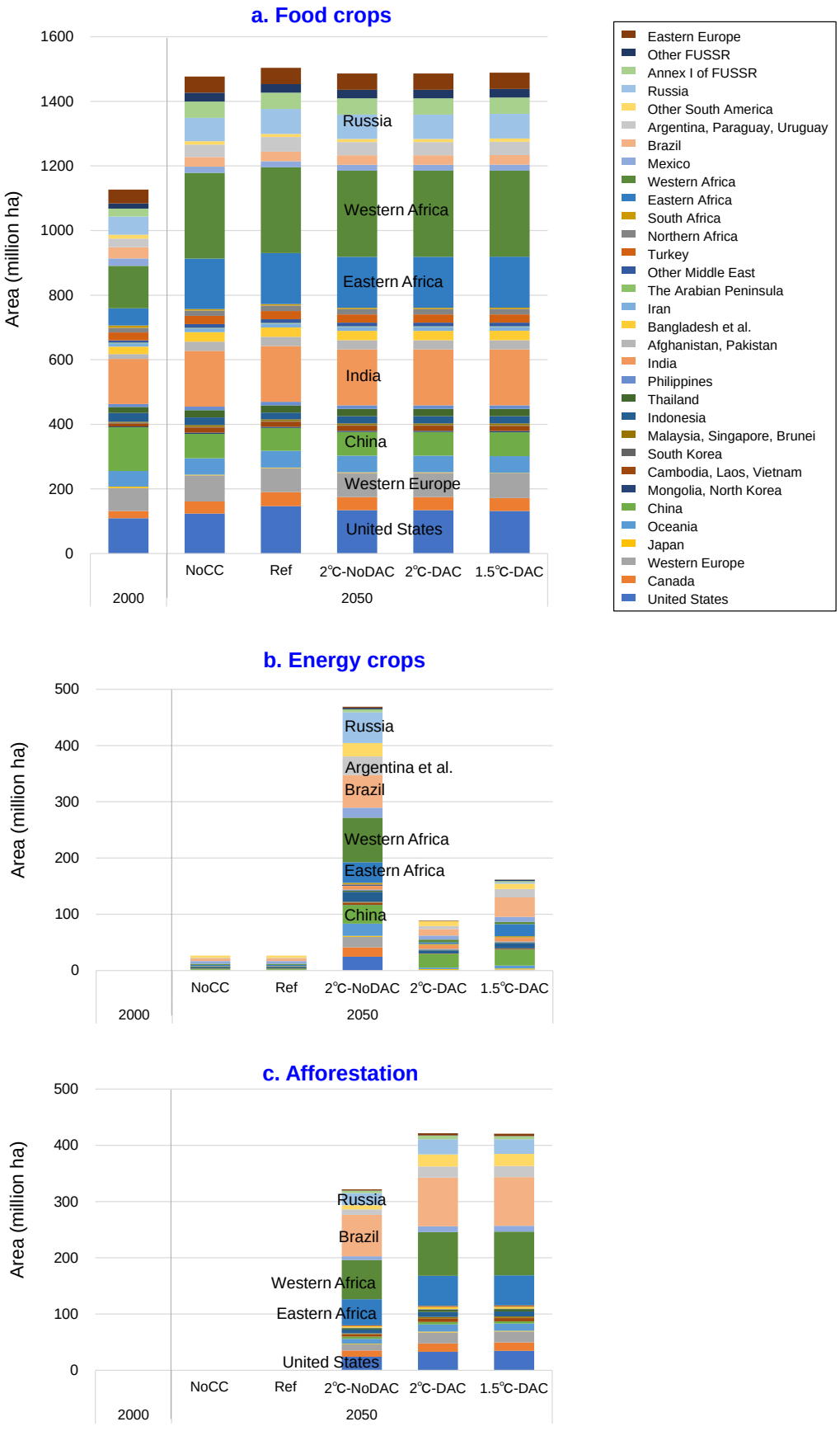


図 5.6.3-2 32 地域別土地利用（2000 年と 2050 年）

② 食料価格と食料消費額

図 5.6.3-3 に穀物の生産価格、図 5.6.3-4 に穀物の国際価格を、そして**図** 5.6.3-5 に一人当たり食料消費額を、GHG 排出削減レベル・DAC オプション別に示す。食料価格推計のパラメータには BP-E55 を用いている。

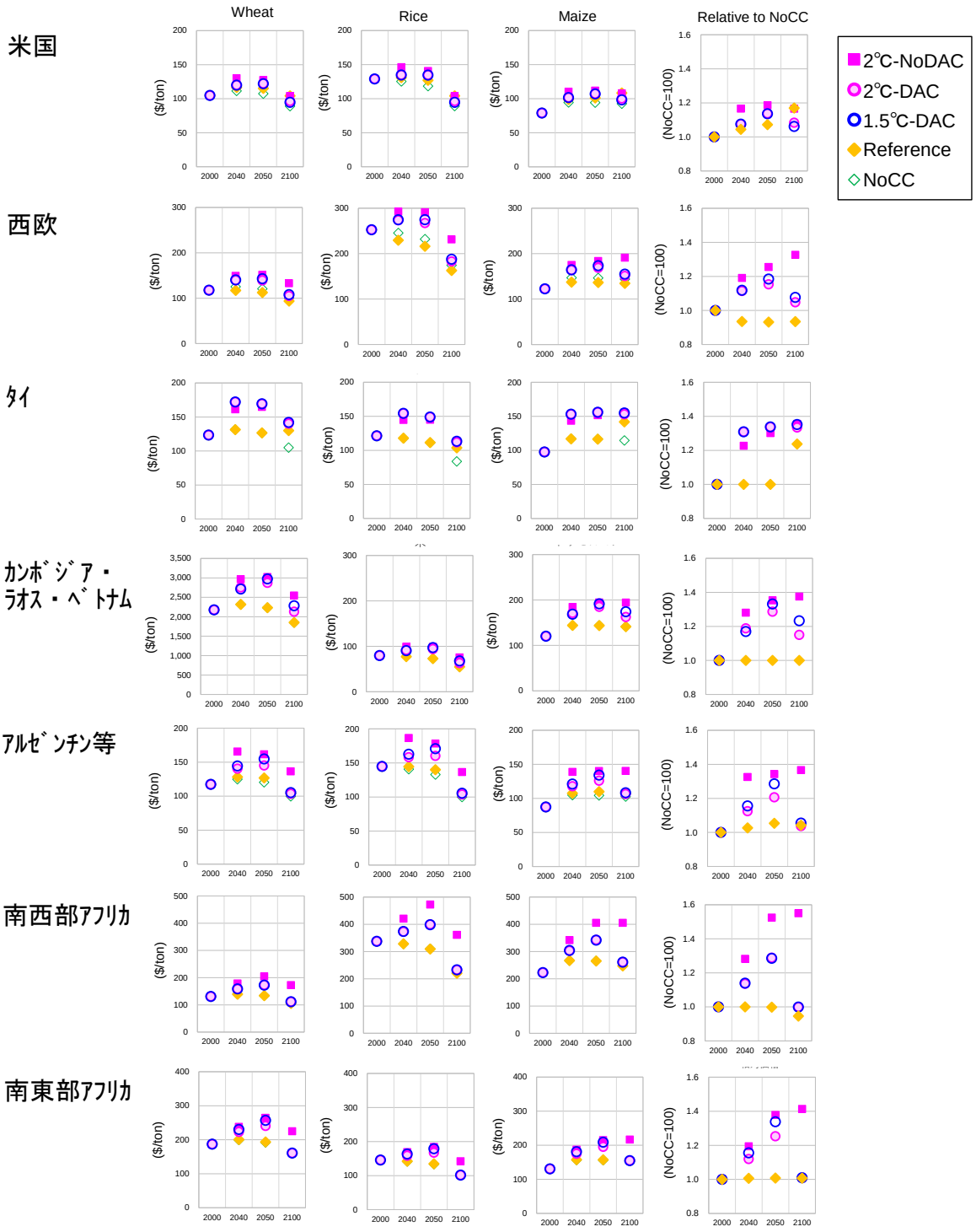


図 5.6.3-3 穀物の生産価格（主要地域）

注）食料価格推計パラメータには BP-E55 を使用

図 5.6.3-3 に示すように、どの地域も穀物の生産価格は、5 つのケースのうち 2℃-NoDAC ケースで最も高く算定されている。図 5.6.3-2 で述べたように、2℃-NoDAC ケースでは主にエネルギー作物用の土地利用が増えることによる。2050 年に着目すると、南西部アフリカ、南東部アフリカで、2℃-NoDAC ケースに価格が NoCC ケース比 1.4～1.6 倍まで上昇する。BECCS 導入に伴う急速な土地利用拡大の影響が顕著に表れている。

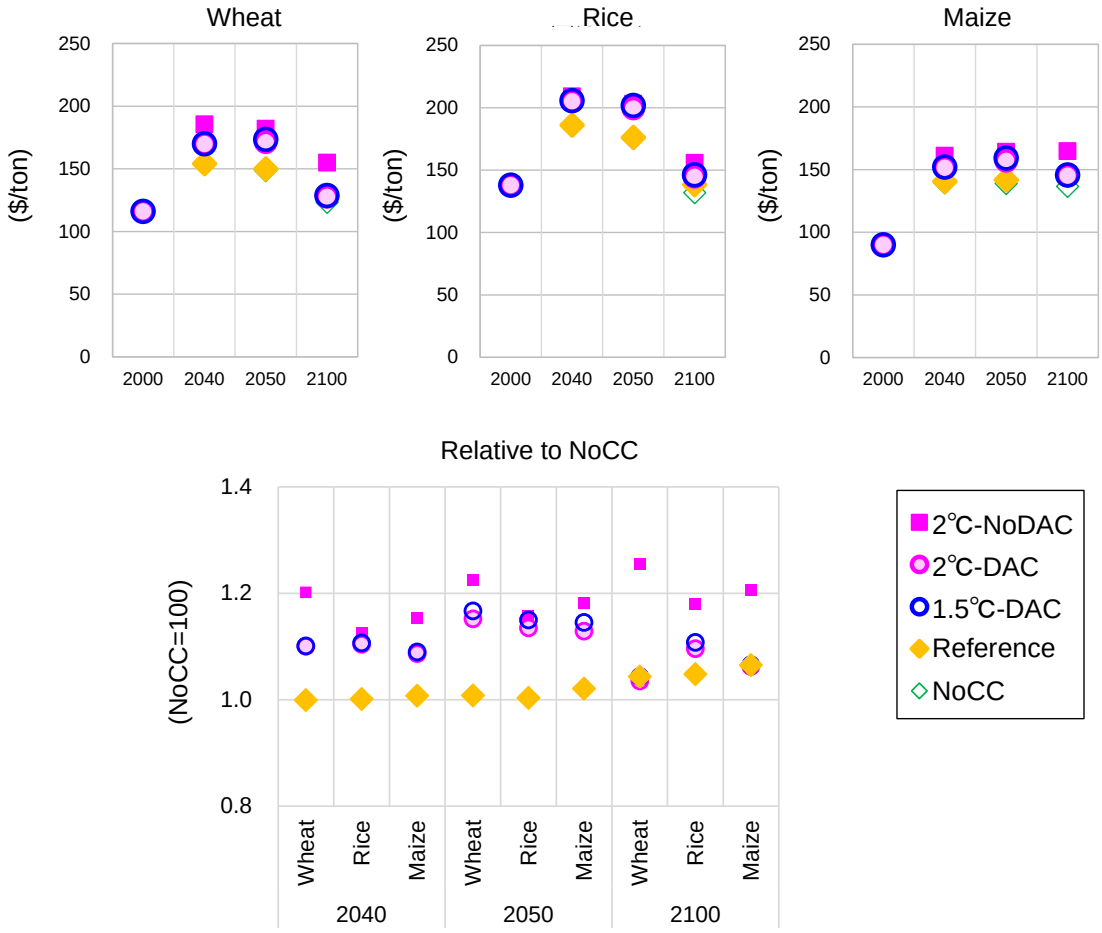


図 5.6.3-4 穀物の国際価格

注）食料価格推計パラメータには BP-E55 を使用

これらの価格上昇により、食料消費額も 2℃-DAC ケースに最も上昇する。**図 5.6.3-5** に一人当たり消費額推計値の内訳を示すように、南西部アフリカでは、主に域内産トウモロコシや米、そして輸入小麦の価格上昇の影響を受ける。なお、FAI モデルでは、5.6.2 節(3)①で述べたように、小麦、米、トウモロコシの三穀物で、その他の食料（その他穀物・野菜、植物油、砂糖・甘物、動物性食品）の消費熱量もカバーするように、三穀物の消費熱量割合に応じて按分している。このように調整された穀物消費量と前述の価格から算定する食料消費額は、動物性食品が一般に穀物より高価格であることや、食品の加工・流通・サービス時に上乗せされる費用を考慮しておらず、低めの推

計となっている可能性がある。気候変動と緩和策の影響を一定ロジックに基づいて考慮し、第一近似的に算定したものである。

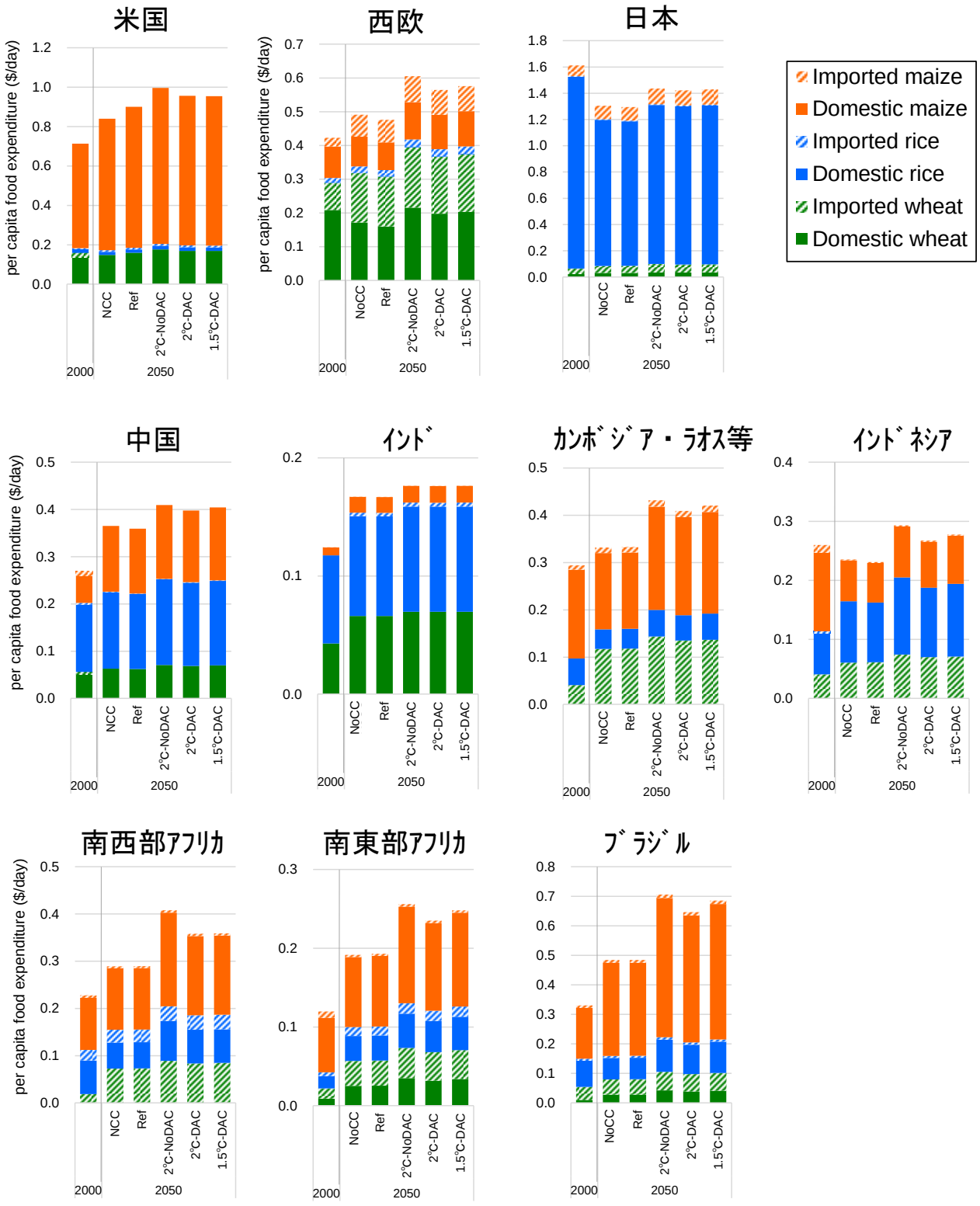


図 5.6.3-5 一人当たり食料消費額推計値（2000 年と 2050 年）

注）食料価格推計パラメータには BP-E55 を使用

③　食料アクセス指標（FAI）

図 5.6.3-6 に NoCC ケースの FAI を示す。穀物国際価格に標準的なシナリオ(BP)と低価格シナリオ(LP)を適用した場合のいずれも FAI は次第に小さくなり、食料アクセスが改善すると分析された。これは、食料消費額の増大を上回る GDP 成長を想定したことによるが、過去約 20 年間に多くの途上地域で PoU が経済成長に伴って改善したこととも合致する。

標準価格シナリオと低価格シナリオでは、当然ながら後者の方が食料消費額は小さく、FAI も小さく算定される。注目すべきは、低価格シナリオ下であっても、南西部アフリカ、南東部アフリカ、カンボジア・ラオス等一部の地域では、2050 年の FAI が未だ 4-8%と分析される点で、これらの地域では食料アクセスの脆弱性が残ると考えられる。

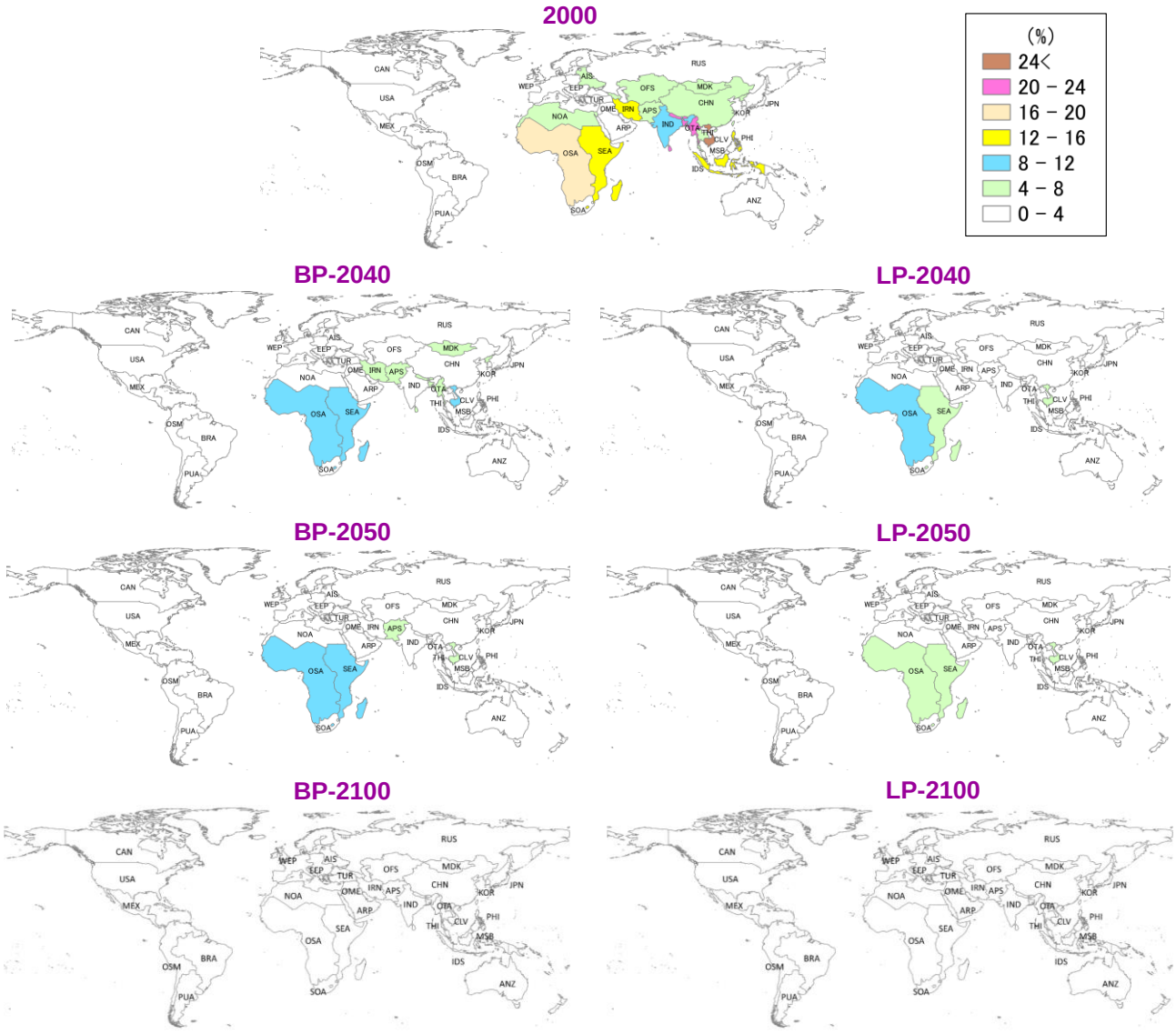


図 5.6.3-6 NoCC ケースの FAI　（左）標準価格シナリオ、（右）低価格シナリオ

そこで、低価格シナリオ下でも 2050 年に食料アクセスの脆弱性が残ると分析された 3つの地域を取り上げ、食料価格パラメータ設定によって FAI に生じる違いを図 5.6.3-7 に比較する。これより、2℃-NoDAC ケースの FAI は、食料価格推計パラメータが BP-E55 ＞BP-E39＞LP-E55 の順に小さくなるものの、NoCC ケースとの差は残る。すなわち、DAC 無で 2℃目標相当の GHG 削減を行うと食料アクセスが脆弱な地域の FAI を悪化させることが、食料価格パラメータの設定に依らず分析されている。

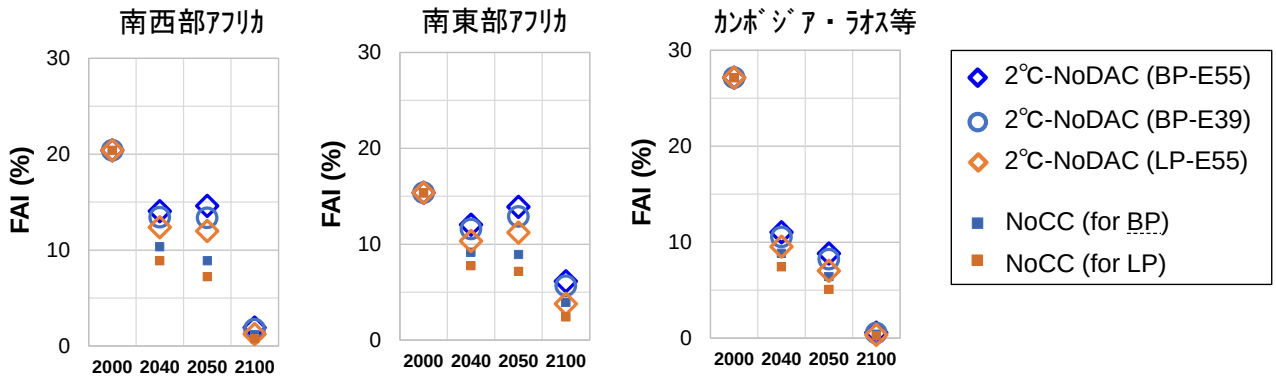


図 5.6.3-7　2℃-NoDAC ケースの FAI（食料価格推計パラメータに対する感度分析）

最後に、DAC を考慮した場合に FAI 悪化がどの程度緩和されるかを図 5.6.3-8 に示す。例えば南西部アフリカについて、食料価格推計に BP-E55 のパラメータを用いた場合、2℃-NoDAC ケースに FAI が NoCC 比+50%（悪化）と分析されるところ 2℃-DAC ケースでは同比+30%にとどまる。BP-E39 パラメータを用いた場合、2℃-NoDAC ケースで+41%のところ 2℃-DAC ケースでは+24%となる。LP-E55 パラメータを用いた場合、（FAI の数値自体は図 5.6.3-7 に示すように BP-E55 のパラメータを用いた場合より若干下がるものの、）増加率は BP-E55 パラメータを用いた場合と同じである。これより、どちらのパラメータでも、DAC を考慮することによって FAI 悪化の程度が、DAC 無の場合の約 60%に縮小すると分析される。なお、DAC 考慮による FAI 悪化の縮小程度は地域・時点によるが、上記と同様の傾向が分析される。

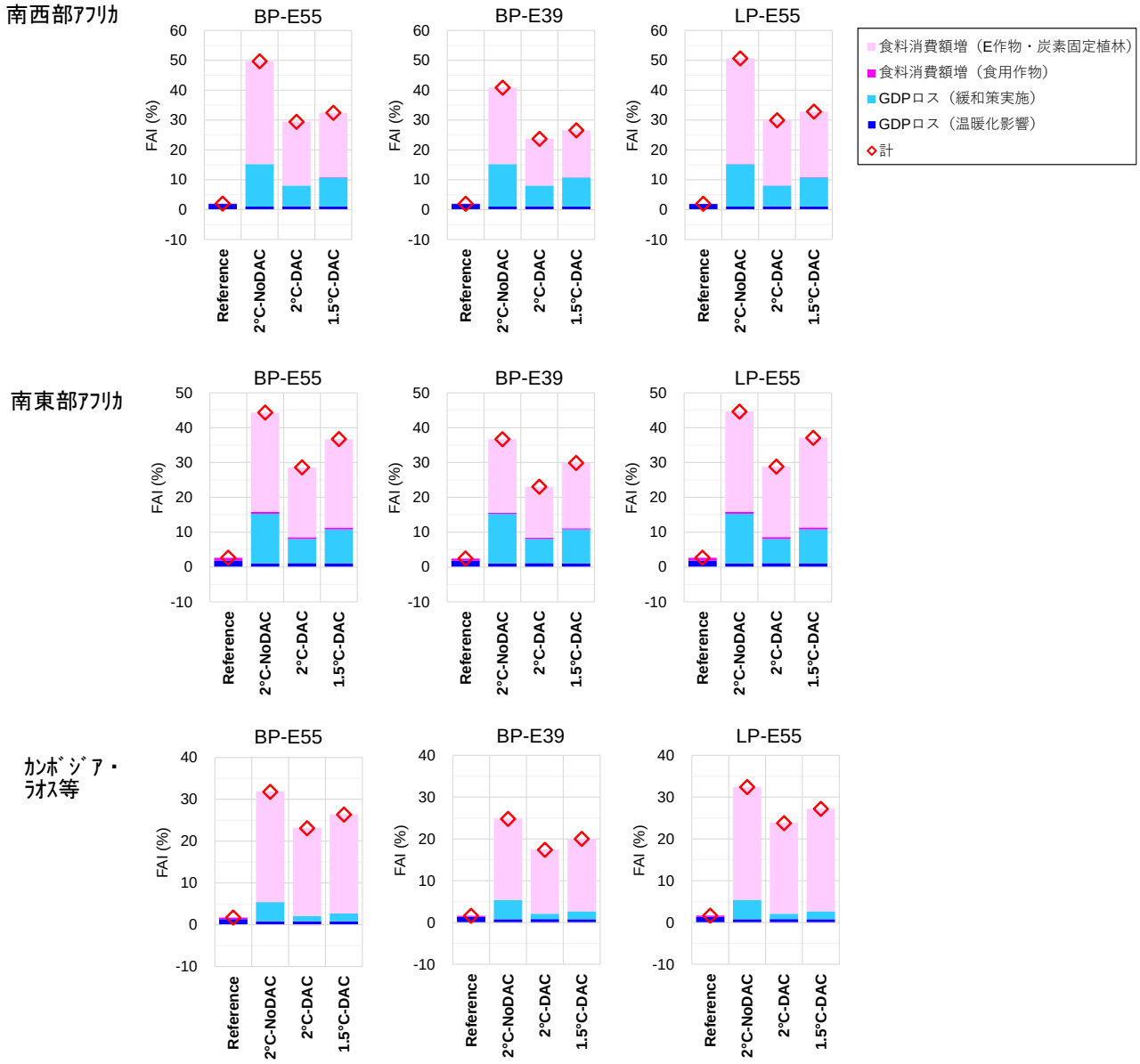


図 5.6.3-8 FAI の変化要因（2050 年、食料アクセスが未だ脆弱と分析される地域）
食料消費関連パラメータの設定毎に表示

以上をまとめると、食料価格推計パラメータの設定を変えても、

- 南西部アフリカ、南東部アフリカ、カンボジア・ラオス等一部の地域では、2050 年でも食料アクセスの脆弱性が残ると分析される。
- 気温目標に相当する GHG 排出削減シナリオ下で、DAC を考慮しない場合にこれら地域の FAI は増大し、食料アクセスに悪影響を及ぼす可能性が考えられる。
- DAC を考慮した場合、これら地域の FAI 増大（食料アクセス悪化）が幾分緩和されると分析される。

と、昨年度同様の結論が得られた。

5.6.4 その他技術の利用拡大による影響

本節では、DAC 以外の温暖化緩和技術について、第 5.2 節で想定したように主な課題が解決され利用が加速された場合の FAI への影響について述べる。

(1) 分析ケースの設定

GHG 排出パスは、図 5.6.3-1 の Reference、1.5℃のパスと同じで、後者は 2050 年頃に CO_2 正味ゼロ、2065 年頃に GHG 正味ゼロ（以下、これを 2050 年カーボンニュートラル(CN)と呼ぶ）になるものである。分析ケースは、表 5.5.2-2 に示すように、NoCC、Reference の他に、CN ケースとして 4 つを設定した。DAC は全ての CN ケースで利用可としている。

食料価格推定パラメータには、5.5.3 節の表 5.5.2-1 に示す BP-E55（穀物の国際価格は標準的、生産価格の拡張余地弾性値は小麦、米、トウモロコシの生産量上位国から推計した-0.55）を使用した。

表 5.6.4-1 温暖化緩和策技術の利用想定

ケース名		温暖化緩和策技術の利用想定
NoCC		―
Reference		―
CN	参考値	2050 年 CN に向けた参考的な想定
	CCS 活用	参考値ケースより、CO_2 貯留可能量拡大
	水素イノベ	参考値ケースより、水素・アンモニア製造・輸送コスト低減加速
	再エネイノベ	参考値ケースより、太陽光発電、風力発電のコスト低減加速

注）各ケースの詳細は、5.2 節参照。

(2) 分析結果

① 土地利用

2000 年と 2050 年の食用作物、エネルギー作物及び炭素固定植林の土地面積を図 5.6.4-1 に示す。CN ケースでは 2050 年にエネルギー作物・植林に土地が利用される。但し、ケースによって違いがあり、参考値ケースや水素イノベケースでは世界全体で 690 million ha のところ、CCS 活用ケースでは 620 million ha、再エネイノベケースでは 640 million ha にとどまる。CCS 活用ケースや再エネイノベケースでは、参考値ケースや水素イノベケースに比べ、南西部アフリカ、南東部アフリカ、南米のエネルギー作物・植林用地が減少すると分析された。

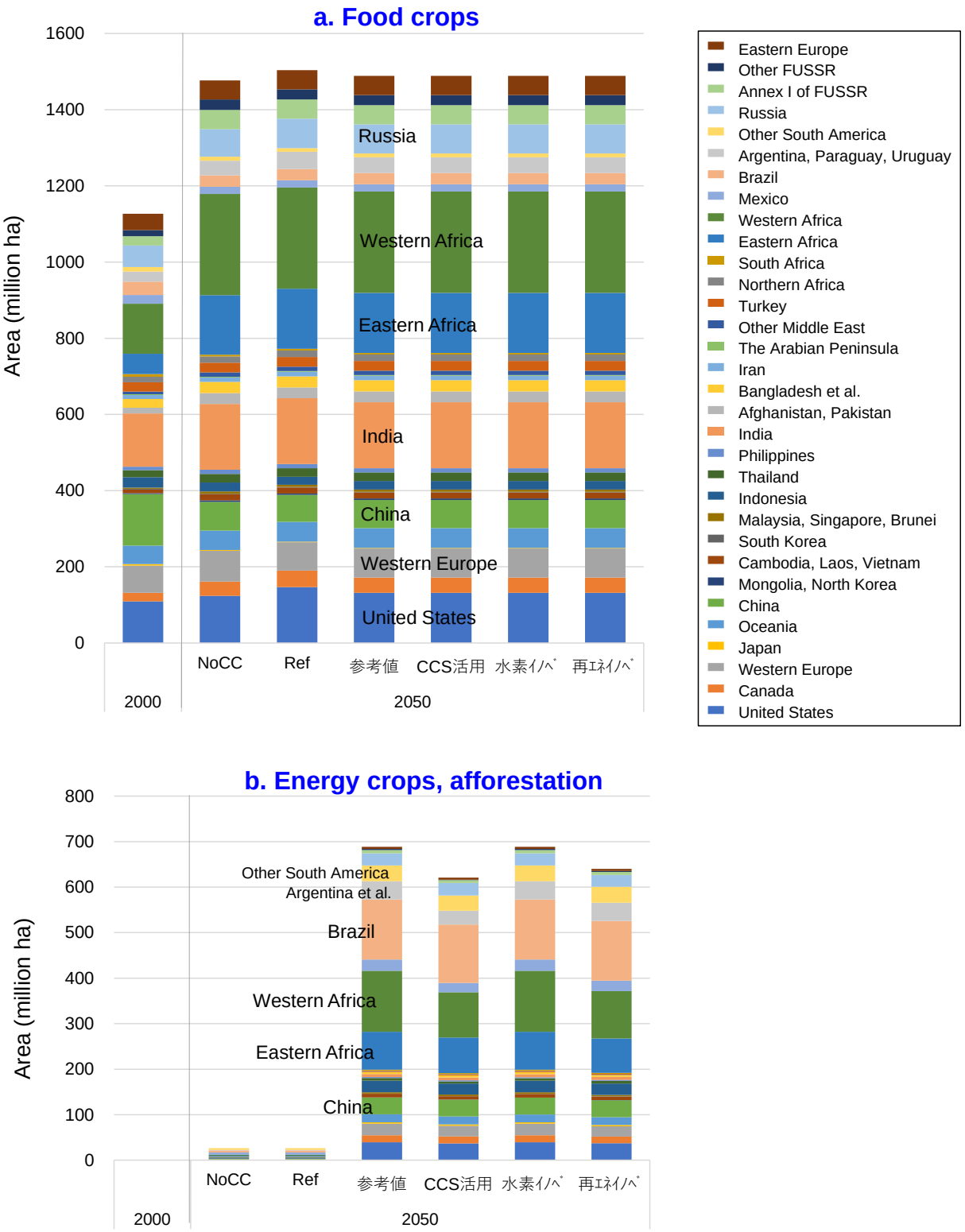


図 5.6.4-1　32 地域別土地利用（2000 年と 2050 年）

② GDP ロス

表 5.6.4-2 に温暖化影響による GDP ロス、表 5.6.4-3 に緩和策実施による GDP ロスを示す（世界平均値、及び 2000 年に FAI が 10%を上回り食料アクセスが脆弱とみられ

る地域に対する値)。温暖化影響による GDP ロスの値は、緩和策実施による GDP ロスの値に比べ小さい傾向が見られる。これは、2050 年頃までに限ると全球平均気温上昇が比較的低い（Reference ケースでも約 2.3℃）ためと考えられる。なお、極端な気象現象の影響は十分に考慮できておらず、今後の課題である。

緩和策実施による GDP ロスは、2050 年までの世界平均値でみると、CCS 活用ケース、再エネイノベケースで、参考値ケースや水素イノベケースに比べ小さい。但し、地域による違いがあり、サブサハラアフリカでは CCS 活用ケースに GDP ロスが増大する。これは CO_2 貯留可能量の増大により DAC 利用が増えエネルギーシステムコストが増えると分析されたことによる。

表 5.6.4-2　温暖化影響による GDP ロス推定値（NoCC 比, %）

	2040年		2050年		2100年	
	Reference	CN	Reference	CN	Reference	CN
インドネシア	1.0	0.8	1.3	0.8	3.4	0.5
東南・南アジア（インド・ｲﾝﾄﾞﾈｼｱを除く）	1.0	0.8	1.3	0.8	3.4	0.5
中東・北アフリカ	1.2	0.9	1.5	0.9	3.6	0.6
サブサハラアフリカ	1.4	1.1	1.9	1.2	4.5	0.7
世界	0.7	0.6	1.0	0.6	2.7	0.3

表 5.6.4-3　緩和策実施による GDP ロス推定値（NoCC 比, %）

	2040年				2050年				2100年			
	参考値	CCS活用	水素ｲﾉﾍﾞ	再エネｲﾉﾍﾞ	参考値	CCS活用	水素ｲﾉﾍﾞ	再エネｲﾉﾍﾞ	参考値	CCS活用	水素ｲﾉﾍﾞ	再エネｲﾉﾍﾞ
アジア（日本・中国を除く）	2.5	1.7	2.5	2.0	2.0	1.1	1.9	1.1	2.0	2.3	2.0	0.5
中東・北アフリカ	4.3	2.4	4.3	4.1	6.3	2.7	6.3	5.7	7.5	8.3	7.5	3.9
サブサハラアフリカ	9.6	13	9.6	7.7	13	18	13	10	7.5	7.3	6.6	6.3
世界	2.6	2.2	2.6	2.3	3.5	3.2	3.5	3.0	5.2	5.3	5.1	3.5

③　FAI

図 5.6.4-2 には、2000 年の FAI が 10%を上回ると分析された 7 地域について 2100 年までの推移を示す。図 5.6.4-3 には、2050 年の FAI について NoCC ケース比の変化率と要因を示す。CN ケースのうち、参考値ケースとその他ケースとの比較から、技術利用拡大による FAI への影響は、地域と拡大を想定する技術によって異なることが読み取れる。

例えば、南東部アフリカでは 2050 年の FAI が、CCS 活用ケースに NoCC ケース比+48%と分析され、参考値ケースの+43%より悪化の度合いが大きい。その要因として、CCS 活用ケースではエネルギー作物・植林による食料消費額の上昇が抑制されるものの、緩和策実施による GDP ロスが増大することがあげられる。つまり、CO_2 貯留可能量の増大に伴い、エネルギー作物・植林用の土地利用が減少し食料価格増大が抑制される

ものの、DACCS の導入量が増大し当地域の GDP ロス増（エネルギーシステムコスト増）に寄与すると分析されたことによる。

一方、イランでは、エネルギー作物・植林の土地が少ないため、どの CN ケースでも、エネルギー作物・植林による食料消費額増大の影響は少なく、むしろ、FAI は緩和策実施による GDP ロスの影響を受けやすい。そのような地域では、CCS 活用ケースに、化石燃料＋DACCS の活用増加が緩和策 GDP ロスを抑制し、FAI の悪化も抑制されると分析された。このように、CCS 活用拡大による FAI への影響は地域によって異なる。

太陽光発電、風力発電のコスト低減加速（再エネイノベ）ケースは、南西部アフリカ、南東部アフリカで、参考値ケースよりエネルギー作物・植林の土地利用の抑制、緩和策 GDP ロスの抑制に寄与し、FAI 悪化を抑制すると分析された。その他の地域でも、FAI は参考値ケースと同程度からやや改善となった。

水素イノベケースは、どの地域も、参考値ケースと FAI に大差は見られない。水素・アンモニアのコスト低減加速が、ここで注目している食料アクセスが脆弱な地域の土地利用やエネルギーシステムに及ぼす影響は小さいと分析されたことによる。

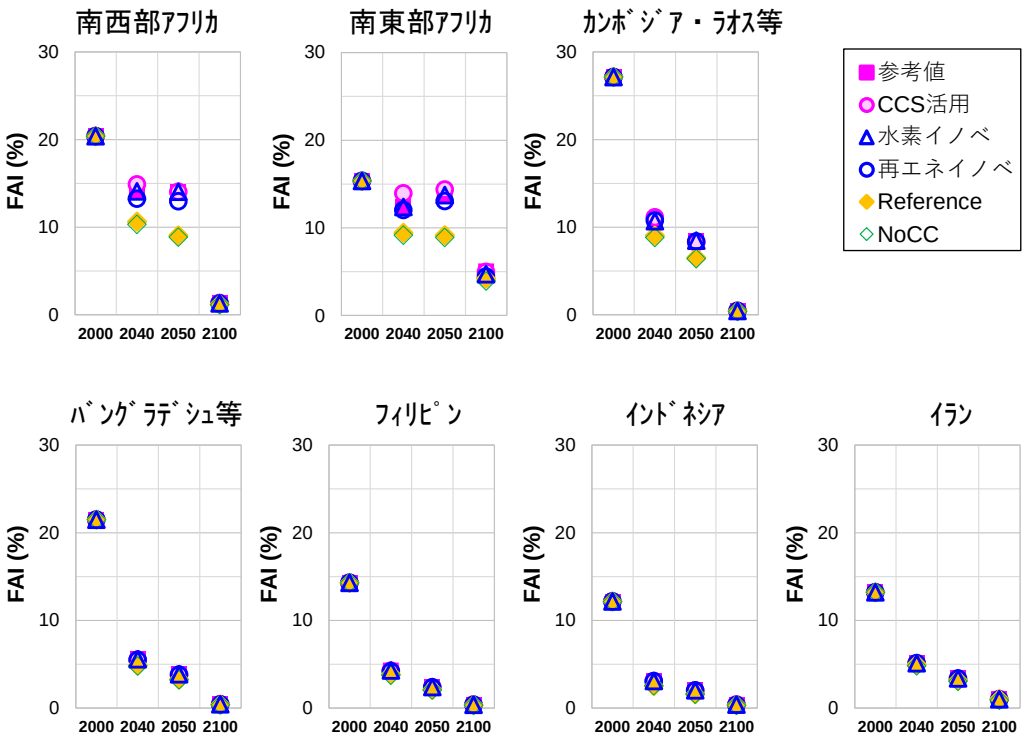


図 5.6.4-2 FAI の推移（2000 年に FAI が 10%を上回る地域）

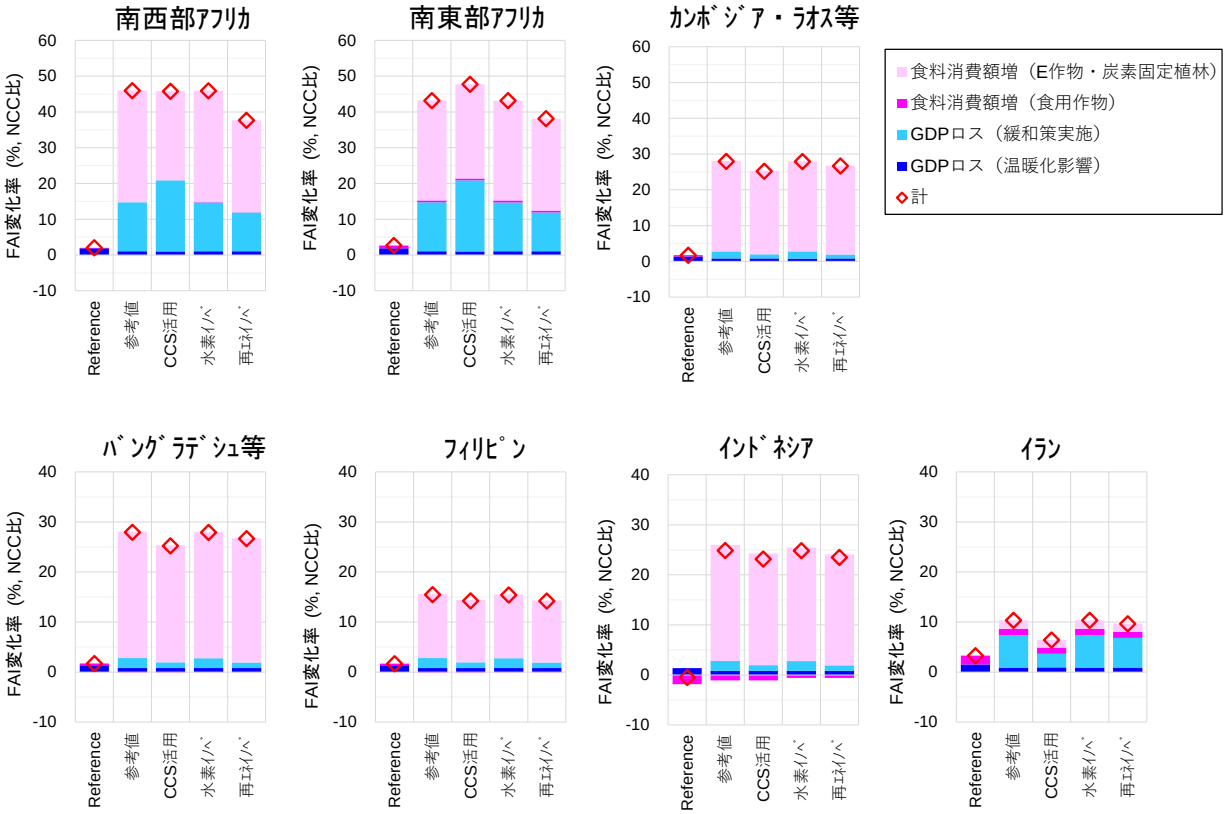


図 5.6.4-3 FAI の変化要因
（2000 年に食料アクセスが脆弱と分析される地域の 2050 年）

以上のように、DAC はもとより、その他のエネルギー・CO_2 削減技術についても、その想定によって、食料アクセスの評価も変わり得ることが示された。CN シナリオと持続可能な開発との整合性に関心が高まるにつれ、FAI のようにエネルギー・CO_2 削減技術の想定を反映した指標での分析がより重要になっていくと考えられる。なお、ここでは、食料アクセス指標に着目したが、エネルギーアクセス、健康等の指標と合わせることにより、より包括的な議論につながると考えられる。

5.6.5 まとめと課題

温暖化緩和策としての DAC 有無による食料アクセス指標 FAI への影響について、価格推計パラメータに対する感度分析を行った。その結果、食料価格推計パラメータの設定を変えても、昨年度同様の結論が得られた。すなわち、

- 食料消費額増大を上回る GDP 成長のシナリオ下で世界各地の FAI は次第に改善すると見込まれるが、南西部アフリカ、南東部アフリカ、カンボジア・ラオス等一部の地域では、2050 年でも FAI は他地域より高く、食料アクセスの脆弱性が残ると見込まれる。

- 2℃、1.5℃目標に相当するGHG削減により、これらの地域では、エネルギー作物生産や植林への土地利用に伴う食料価格上昇と、エネルギーシステムコスト上昇に伴うGDPロスのため、FAIの改善が鈍るという悪影響が考えられる。
- 但し、DACを考慮した場合、GHG削減によるこれら地域でのFAIへの悪影響が幾分緩和される。
- つまり、持続可能な開発に重要な食料アクセス改善を考慮しつつ2℃、1.5℃目標を目指すという観点から、DACは有益なオプションと評価される可能性が考えられる。

さらに、5.2節で想定した2050年CO_2正味ゼロ排出（CN）シナリオのうち、関連技術の課題解決により利用の拡大を想定した3つのケース：CO_2貯留可能量拡大（CCS拡大）ケース、水素・アンモニア製造・輸送コスト低減加速（水素イノベ）ケース、太陽光発電・風力発電のコスト低減加速（再エネイノベ）ケースについて、FAIが脆弱な地域への影響を分析した。その結果、次のような示唆が得られた。

- CO_2貯留可能量の拡大は、南西部アフリカ、南東部アフリカでは、エネルギー作物・植林の土地利用面積縮小に寄与し食料価格増大が抑制されるものの、一方でDACCSの導入量増大がGDPロス増に寄与し、FAIはCO_2貯留可能量の拡大を特に想定しない参考値ケースより悪化する可能性が考えられる。但し、イラン等のように化石燃料への依存度が非常に高い地域では、CO_2貯留可能量の拡大により化石燃料＋DACCSが増大し、CNに伴うGDPロス及びFAIの悪化を抑制する可能性も考えられる。
- 太陽光発電、風力発電のコスト低減加速は、南西部アフリカ、南東部アフリカ等で、エネルギー作物・植林の土地利用増大に伴う食料価格増大、緩和策GDPロスを抑制し、CNに伴うFAI悪化を緩和すると考えられる。
- 水素イノベケースでは、参考値ケースと比べFAIに大差は見られない。水素・アンモニアは二次エネルギーであり、ここで注目している食料アクセスが脆弱な地域の土地利用やエネルギーシステムへの影響は、CCS拡大や、再エネイノベケースに比べると小さいと考えられる。
- このように、エネルギー・CO_2削減技術の進展想定によっても、食料アクセスの評価は変わりうる。CNと持続可能な開発の文脈で、FAIのように、エネルギー・CO_2削減技術想定を反映した地域毎の分析がより重要になっていくと考えられる。

今後の課題として、食品ロスの低減等需要サイドの変化に伴う土地利用や食料アクセスへの影響分析があげられる。さらにBECCSや植林の他にCO_2除去技術として近年注目が高まっている土壌炭素貯留やバイオ炭の考慮がある。また、各種大きな不確実性があるが森林管理による炭素貯留の可能性についても動向調査が必要である。

参考文献（第5.6節に関するもの）

1) 外務省；パリ協定 http://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000196735.pdf

2) Edenhofer, O. et al.: Technical Summary, Climate Change 2014: Mitigation of climate change, 33–107 (2014)
3) Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K. et al.: Mitigation pathways compatible with 1.5°Cin the context of sustainable development, Global Warming of 1.5 ºC, 93–174 (2018)
4) UN; Sustainable Development Goals, https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300 (accessed 2019.10.10)
5) 本間隆嗣他；CO_2 排出制約下における地域別の食料セキュリティ指標，第 28 回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，講演 25-5 (2012)
6) RITE:「脱地球温暖化と持続可能な経済社会実現のための対応戦略の研究」、平成 23 年度報告書 (2011)
7) Akimoto, K. et al.; Consistent assessments of pathways toward sustainable development and climate stabilization, Natural Resources Forum, 32-4, 231–244 (2012)
8) 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」、平成 29 年度報告書 (2018)
9) 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」、平成 30 年度報告書 (2019)
10) 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」、令和 1 年度報告書 (2020)
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」、令和 2 年度報告書 (2021)
12) Schmidhuber J., Tubiello F. N. Global food security under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(50), 19703-19708 (2007)
13) FAO. The State of Food security and nutrition in the world 2020 (2020).
14) FAO. Sustainable Development Goals, Indicator 2.1.1 - Prevalence of undernourishment, https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/211/en/
15) Hayashi, A. Akimoto, K. Tomoda, T., Kii, M.: Global evaluation of the effects of agriculture and water management adaptations on the water-stressed population, Mitigation and Adaptation of Strategies for Global Change, 18-5, 591–618 (2013)
16) Hayashi, A., Akimoto, K., Sano, F.: On the feasibility of cropland and forest area expansions required to achieve long-term temperature targets, Sustainability Science, 15, 817–834 (2020)
17) Akimoto, K. et al.: Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost. Energy Policy 38, 3384–3393 (2010)
18) Akimoto, K. 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, 246–256 (2014)
19) Akimoto, K., Sano,F., Oda,J., Kanaboshi, H., Nakano, Y. 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)
20) FAO: FAOSTAT database https://www.fao.org/faostat/en/#data
21) World Bank: World Bank Commodity Price Data (The Pink Sheet), http://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets (accessed 2017.8.2)
22) Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S., Havlik, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., et al.: Land-use futures in the shared socio-economic pathways. Global Environmental Change, 42, 331-345 (2017)

23) Kriegler, E., Bauer, N., Popp, A., Humpenöder, F., Leimbach, M., Strefler, J., et al.: Fossil-fueled development (SSP5): an energy and resource intensive scenario for the 21st century. Global environmental change, 42, 297-315 (2017)
24) Nordhaus, W.D.: Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment, PNAS, 107-26, 11721-11726 (2010)
25) Clarke L, Jiang K　et al.: Assessing Transformation Pathways, Climate Change 2014: Mitigation of climate change, 413–510 (2014)
26) O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S.,et al.: The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Global environmental change, 42, 169-180 (2017)
27) Meinshausen, M., Raper, S. C., Wigley, T. M. Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6–Part 1: Model description and calibration. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(4), 1417-1456 (2011)

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　主要国の長期正味ゼロ排出等に関するモデル分析の動向

6.1.1　長期低排出戦略

パリ協定第4条第19項では「全ての締約国は、各国の異なる事情に照らした共通に有しているが差異のある責任及び各国の能力を考慮しつつ、第2条の規定に留意して、温室効果ガスについて低排出型の発展のための長期的な戦略を立案し、及び通報するよう努力すべき」ことが記されている。2022年2月末現在、日本（2021年10月提出）を含む50ヶ国が長期戦略を策定し、UNFCCCに提出している[1]。また、2021年10月31日から11月13日に開催されたグラスゴー気候変動会合（通称COP26）では、各国に対し長期低排出発展戦略を、入手可能な最新の科学に沿って適宜、定期的に更新することを招請し（CMAカバー決定パラ32)、事務局に対し長期排出発展戦略の統合報告書を準備することを求めている（CMAカバー決定パラ34)。

当該条項の中で触れられている第2条はパリ協定の目的を定めており、その第1項(a)において「世界全体の平均気温の上昇を工業化以前よりも摂氏2度高い水準を十分に下回るものに抑えること並びに世界全体の平均気温の上昇を工業化以前よりも摂氏1.5度高い水準までのものに制限するための努力」することが目的の1つとして掲げている。そのため各国が提出する長期排出発展戦略もこの目的に整合したものが求められる。

UNFCCC事務局はCOP26に先立ち2021年7月30日までに提出された164カ国の国別貢献（NDCs）の情報を取りまとめ、評価した統合レポート [1)]を発表している。図6.1.1-1はNDCs実施による排出見通しと2℃及び1.5℃目標に向けた排出経路を示したものである。NDCs実施により2030年の排出量は世界全体で53.8 (50.8-56.9) Gt CO_2 eqになると見込まれるのに対し、1.5℃に抑えるための排出経路では2030年において2010年比-45%の排出水準、2℃に抑えるためには同-25%の排出水準となっており、パリ協定の目的達成には一層の削減努力が必要であることが示唆されている。これを踏まえグラスゴー気候合意でも「1.5℃に抑制するためには、急速かつ深く持続的な取り組みが必要であり、世界的なCO_2の排出量を2030年までに2010年比で45%削減し、今世紀半ばには正味ゼロにすることを認識する」ことが盛り込まれた（CMAカバー決定パラ22)。

[1] https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies

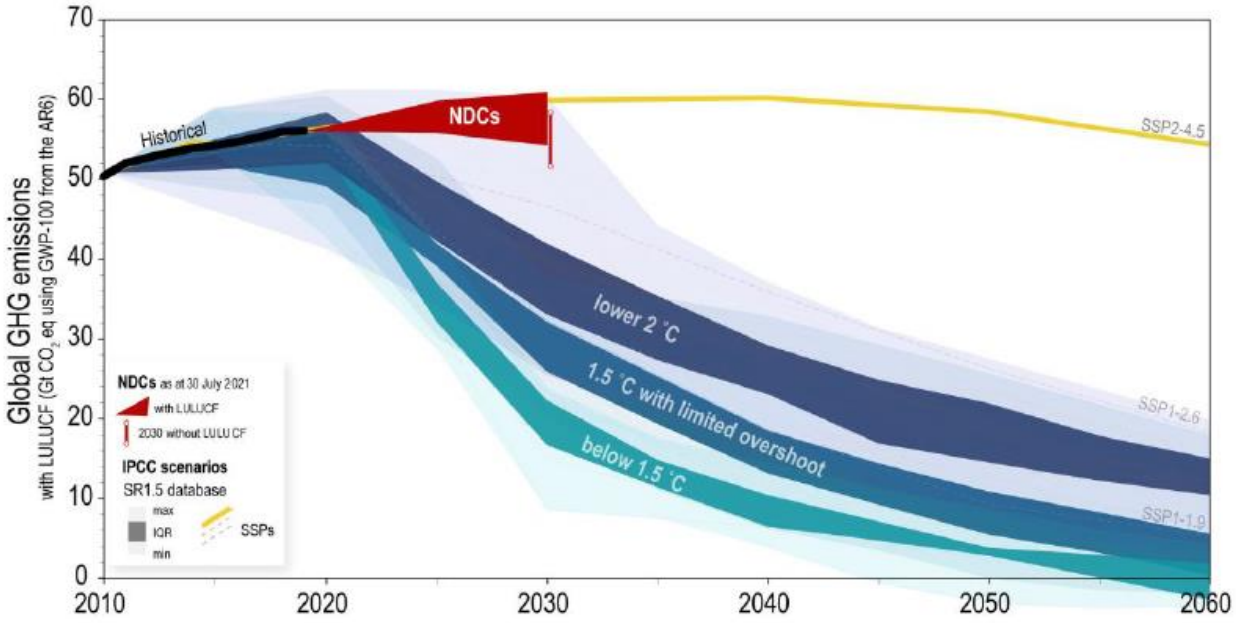


図 6.1.1-1　NDCs 実施による排出見通しと 2℃及び 1.5℃目標に向けた排出経路
出典）UNFCCC[1)]

6.1.2　正味ゼロ排出目標の状況

パリ協定が採択された 2015 年の COP21 では IPCC に対し「工業化以前の水準から 1.5℃の地球温暖化による影響、及び関連する世界の温室効果ガス（GHG）の排出経路に関する特別報告書」を作成することが招請された（Decision 1/CP21, para 21）。これを受け IPCC は 2016 年 4 月の第 43 回 IPCC 総会において UNFCCC の招請を受諾し、「気候変動の脅威への世界的な対応の強化、持続可能な開発及び貧困撲滅への努力の文脈における、工業化以前の水準から 1.5℃の地球温暖化による影響及び関連する地球全体での温室効果ガス（GHG）排出経路に関する IPCC 特別報告書（1.5℃特別報告書）」を準備することを決定し、2018 年の第 48 回 IPCC 総会（2018 年 10 月 1～6 日、韓国・仁川）において、「1.5℃特別報告書」の政策決定者向け要約（SPM）が承認され、特別報告書本体が受諾された。SPM には「地球温暖化を 1.5℃に抑える排出経路においては、世界全体の人為起源の CO_2 の正味排出量が、2030 年までに、2010 年水準から約 45%（四分位範囲 40～60%）減少し、2050 年前後に（四分位範囲 2045～2055 年）正味ゼロに達する（確信度が高い）」（IPCC SR1.5 SPM C1.）ことも記されている。

この IPCC による「1.5℃特別報告書」の発表を契機に、多くの国がネットゼロ排出目標を掲げるようになった。Net Zero Tracker によると 2022 年 2 月末日時点で、ネットゼロ排出もしくはカーボンニュートラルを達成した国はブータンやガイアナなど 9 カ国、目標として法制化もしくは政策文書化した国は 75 ヶ国、提案中や検討中の国は 92 ヶ国にのぼる（図 6.1.2-1）。

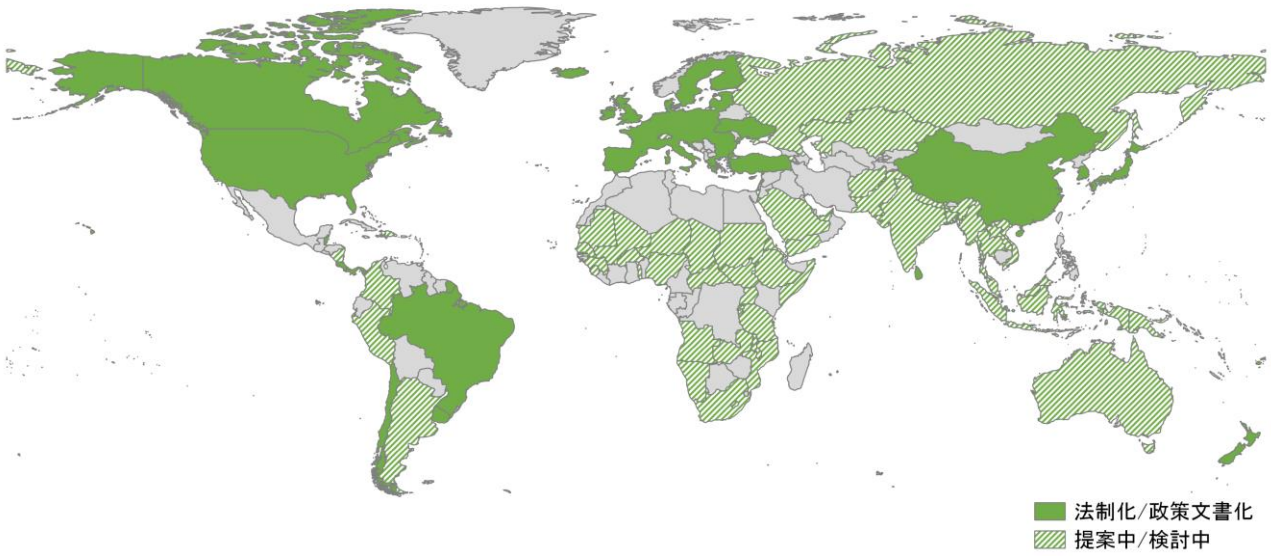


図 6.1.2-1 各国の正味ゼロ/カーボンニュートラル目標の状況
出典）Net Zero Tracker[2)]を元に RITE 作成

6.1.3 正味ゼロ排出目標の気温上昇への影響

N. Höhne, et al.[3)]は各国でネットゼロ排出目標を掲げる動きが活発化していることを踏まえ、仮にこれらの目標が完全に実現されたとしたら 2100 年の平均気温上昇にどのような影響を与えるか分析している。正味ゼロ目標の評価としては UNEP 式と Climate Action Tracker 式の 2 つのアプローチを用いている。UNEP 方式は累積排出量をもとに 2100 年時点の温度上昇を評価しているのに対し、Climate Action Tracker は各国の排出経路を作成した上で簡易気候モデルを用いて評価している。評価シナリオは現在実施されている政策を反映させた「現行政策」シナリオ、NDC を考慮した「現行プレッジ」シナリオ、さらにネットゼロ目標を織り込んだ「現行プレッジ＋ネットゼロ目標」シナリオを想定している。

Climate Action Tracker のアプローチを用いると、ネットゼロ目標全体では、現行政策シナリオだと 66%以上の確率で 3.1℃（中央値 2.9℃）上昇となるのに対し、ネットゼロ目標の場合、2.2℃（中央値 2.0℃）上昇まで抑えられることがわかった。UNEP アプローチの場合、現行政策シナリオは 3.5℃（レンジ：3.4-3.9℃）上昇、ネットゼロ目標は 2.5℃（レンジ：2.3-2.8℃）と評価している。どちらの評価も、ネットゼロ目標がもたらす正味の効果は、現行政策の排出量と比較して 0.8-0.9℃の抑制になると推定している。両者の違いは、Climate Action Tracker は 2030 年の排出量をより低めに評価していること、UNEP が非 CO_2 排出について保守的に見積もっていることに起因しているとされている。

いずれのアプローチでも正味ゼロ目標によりパリ協定目標実現に向けた可能性が拓けてきたことが示唆されている。なお、評価は 2021 年 5 月時点のものであり、COP26 で 2070 年ネットゼロ目標を掲げたインドなどは評価対象に入っていない。そのため、

データを最新の情報にアップデートすれば、さらに気温上昇が抑制された評価になる可能性がある。

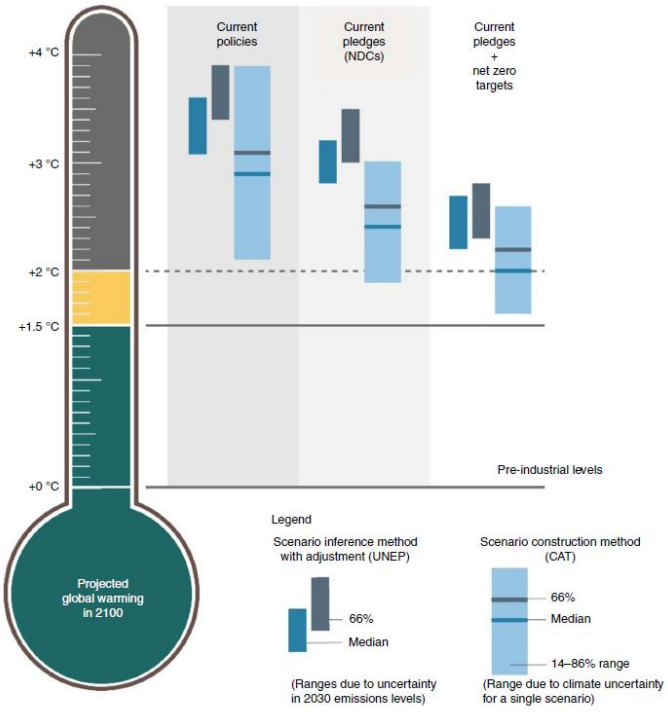


図 6.1.3-1 シナリオ別の 2100 年における気温上昇の評価
出典）N. Höhne, et al.[3)]

6.1.4 国やセクターによる正味ゼロ排出目標の違い

正味ゼロ排出目標を掲げる国や組織は増えてきているが、その定義はまだ共通化されていないことに留意が必要である。CO_2 排出だけを対象としている国がある一方で全ての GHG を対象としている国もある。用語の使い方も曖昧なものが多く、「カーボンニュートラル」や「気候ニュートラル」は、CO_2 や GHG のネットゼロ排出と同義のケースもあれば、そうでない場合もある。企業が目標を掲げている場合、当該企業から直接排出されたもののみを対象とするものもあれば、サプライチェーン全体や製品の使用・廃棄時の排出量を含めるもの、オフセットによって補うものなど多様であり、単純にそれらの目標を比較することはできない。

J. Rogelj, et al.[4)]は正味ゼロ排出目標に関し、対象範囲（Scope）、適切性/公平性（Adequacy and Fairness）、ロードマップの 3 側面を明確にすることの必要性を説いている。

対象範囲としては、排出源、対象ガス（CO_2 か GHG）、ネットゼロになるタイミング、手段（削減/除去/オフセット）を明確にする必要がある。ガスによっても気候への影響は異なり、CO_2 は長寿命だがメタンは短寿命であり、また、メタンの排出量をゼロにすることは現時点では不可能であり、CO_2 のように技術的に大気中から除去できないことを指摘している。国や地域によっても対象は異なっており、EU は 2050 年までに GHG

のネットゼロ排出を目指しているが、中国は 2060 年までに CO_2 のみをネットゼロ（カーボンニュートラル）にすることを目標にしている点でも違いがある。

適切性と公正に関しても、国によって発展段階、資金、資源、地球温暖化への貢献度などが異なり、何をもって「公正」とするかは国ごとに違う。例えば、シンガポールは人口密度の高い小さな国のため自然エネルギーを導入するポテンシャルは小さいが、経済水準は高いので行動に必要な資金を調達できる。他方、イエメンは太陽エネルギーに恵まれているが政治情勢が不安定な後進国であり、必要な投資を呼び込めていないことなどが挙げられている。

ロードマップについては、正味ゼロ目標にマイルストーン（例えば 2030 年目標など中途で達成すべき目標）や実施計画などが含まれていれば、より実現可能性や信頼性が高まることを指摘している。

IPCC の 1.5℃特別報告書では、2050 年前後に人為起源の CO_2 の正味排出量をゼロにすることが言及されているが、これはグローバルの排出についてのものである。しかし、経済水準、資源の賦存、地理的条件によって利用できる資金や技術が異なっているため国によって正味ゼロ排出となるタイミングには違いが生じる。H. L. van Soest, et al.[5]は国際的なモデル比較プロジェクトの成果である CD-LINKS のデータベースを用いて主要 10 ヶ国の CO_2 及び GHG 排出がネットゼロになるタイミングを分析している。この評価には主に AIM（国立環境研究所）、MESSAGE（IIASA）、REMIND（PIK）、IMAGE（PBL）、POLES（JRC）、WITCH（CMCC）モデルによるデータが用いられている。図 6.1.4-1 は 2℃及び 1.5℃の実現に向けて各国が CO_2/GHG ネットゼロ排出になるタイミングを示したものである。GHG 排出について 2℃シナリオの場合、世界平均より早いタイミングでネットゼロになる国はブラジル、日本、ロシア、米国となっており、1.5℃シナリオの場合は上記の国に加えカナダも早いタイミングで正味ゼロ排出になる。なお、日本については比較的早いタイミングでネットゼロを達成する必要があるという結果が出ているが、一部モデル（IMAGE モデル）の評価結果に引っ張られているためと考えられる。当該モデルは極端な評価に振れやすく（図 6.1.4-1 にあるように IMAGE モデルを示す▲印は評価幅の一番左、もしくは一番右に位置しているケースが多い）、それぞれのモデルの特性を把握して評価結果を解釈する必要がある。

CO_2 のみを対象にした場合、ブラジル、米国が世界平均より早いタイミングでネットゼロになる。中国と EU はほぼ世界平均に近いタイミングでネットゼロとなる。また、CO_2 排出がネットゼロになる時期について、全ての CO_2 を対象とした場合と化石燃料由来の CO_2 のみを対象とした場合を比較すると、土地利用が排出源となっている国（例：インドネシア）では、全ての CO_2 を対象とした方がネットゼロのタイミングが早く、土地利用による排出削減が比較的安価な国（例：カナダ）ではその逆となっている。

さらに、どのような要因がゼロ排出年のタイミングが影響するかについて「CCS による CO_2 吸収量の割合」、「植林・再植林による CO_2 吸収量」、「CO_2 総排出量に占める運輸部門の割合」、「GHG 総排出量に占める非 CO_2 排出量の割合」、「一人当たり国内総生産（GDP）」、「全土地被覆に占める森林の割合」を変数として回帰分析を行っている。その結果、CCS や植林の吸収量が多いほど、より早いタイミングでのネットゼロ排出

になり、逆に非 CO_2 排出量の割合が高いほど脱炭素化は難しくなり、ネットゼロ排出のタイミングが遅れやすいことを明らかにしている。

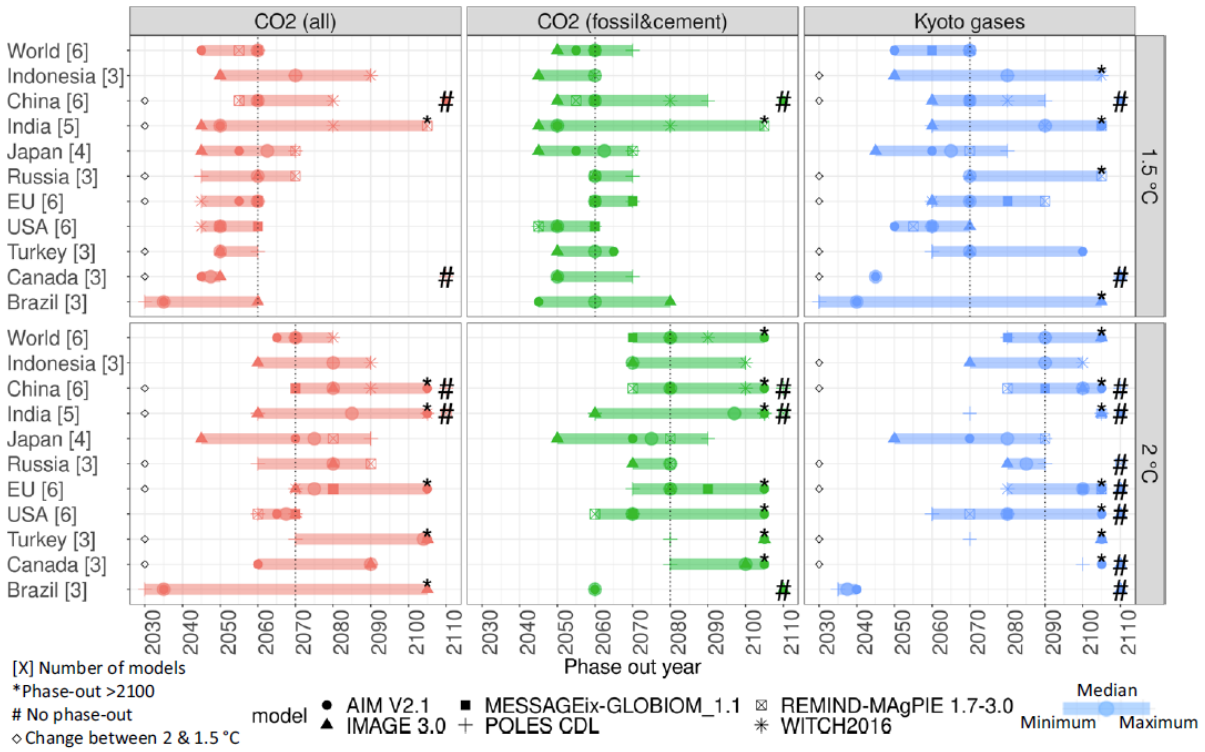


図 6.1.4-1 主要国の CO_2/GHG ネットゼロ排出になるタイミング

出典）H. L. van Soest, et al.[5)]

1.5℃や 2℃目標に向け、正味ゼロ排出となるタイミングは対象ガスやセクターによっても違いがある。図 6.1.4-2 で示すように、グローバルでみると電力部門からの CO_2 排出が最も早くネットゼロ排出を達成し、次いでエネルギーシステム及び産業プロセスの CO_2 排出がネットゼロとなり、経済全体の GHG 排出がネットゼロ排出となるのは最も後のタイミングになる。

I. Azevedo, et al.[7)]は正味ゼロ排出時点のエネルギーシステムにはどのような特徴があるのかを整理し、以下のような特徴が各国に共通して見られることを明らかにしている。

- ネットゼロ・エネルギーシステムにおいて化石燃料を使い続けるには 2 つの方法しかなく、CO_2 を排出しないよう炭素回収・貯留（CCS）と組み合わせるか、化石燃料利用に伴う排出をエネルギーシステム全体の中で吸収して排出量を相殺する。劇的な技術革新により CCS が非常に安価にならなければ、利用できる化石燃料の量は非常に限られたものになる。エネルギー密度の高さと原料としての有用性から化石燃料需要で残るのは主に石油とガスになると考えられる。
- 正味ゼロ・エネルギーシステムでは脱炭素化された、あるいはネットで負の排出となる電力システムへ大きく依存することになる。電力部門には比較的低コストの脱炭素技術オプションがあり、また、多くのシナリオでネガティブ排出の技術として CCS 付きのバイオ燃料発電（BECCS）の導入が見込まれている。

変動性の再生可能エネルギー、エネルギー貯留技術、需要側管理などは技術、政策、市場という面で不確実性があるが、今日よりも大きな役割を担うことが見込まれる。

- 旅客輸送（例えば、小型電気自動車、二輪及び三輪自動車、バス、鉄道）及び建物のエネルギー利用（照明、冷却）、軽工業部門など最終需要部門の電化が進む。バッテリーのコストが下がり、急速充電のためのインフラが整備されれば、貨物輸送においても電化が進む可能性もある。
- 長距離貨物輸送、長距離航空輸送、高温工業加熱など、電化に適さないセクターでは、水素、バイオ燃料など低炭素エネルギーキャリアに頼る必要がある。合成炭化水素は水素、酸素、炭素をもとに製造することができるが、コストと環境や健康への潜在的な影響が主な障壁となる。
- エネルギー効率と物質効率性の向上は、費用対効果が高く大規模展開の可能性がある。LED 照明、建物のリノベーション、鉄鋼やセメントのリサイクルなどの手段がある。
- 電力、燃料、熱資源など様々なエネルギーキャリアを横断的に計画・運用し、最終的なサービス需要に対応するエネルギーシステムの統合（セクターカップリング）が重要となる。カーボンニュートラルなエネルギーシステムでは通信、データ、分析システムを活用した相互接続性が高まる。水素インフラは電化の進展度合いや、水素の製造方法（化石燃料改質によるものか電気分解によるものか）によって変わってくる。
- 脱炭素化が困難な部門からの排出を相殺し、大気中に蓄積された過去の排出を除去するため二酸化炭素除去（CDR）技術が必要となる。ネットゼロ排出時点で 5-12Gt CO_2/年程度の自然・技術的 CDR が見込まれている。
- コスト、資源保有量、産業構成、既存のインフラ、地理、ガバナンス、国民の受容、政策の優先順位などは国や地域による違いが大きく、これらの理解を深めることが重要である。

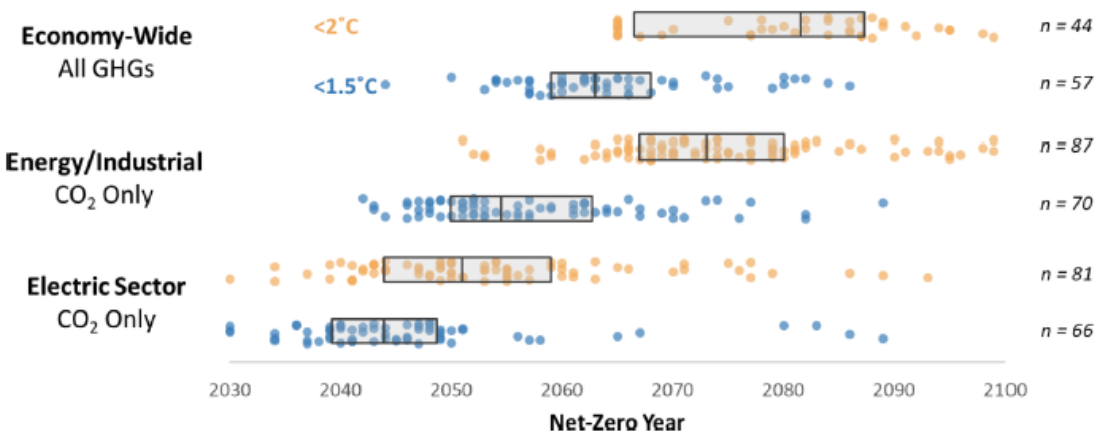


図 6.1.4-2 GHG、経済全体の CO_2 排出、電力部門 CO_2 排出のネットゼロ年

出典）I. Azevedo, et al.[7)]

6.1.5 実現可能性の評価

統合評価モデルによる評価は、移行に伴う現実世界の社会的・制度的課題を捉えていないといった批判を受けることがあるが、E.Brutschin, et al.[8]は 1.5℃シナリオの実現可能性について地球物理学的、技術的、経済的、社会文化的、制度的な側面から定量的に検証している。この分析では実現可能性を「特定の期間において社会が変化できる能力の範囲内にシナリオがあるかどうか」と定義した上で、地球物理学的、技術的、経済的、社会文化的、制度的な実現可能性についての指標を特定し、それぞれの指標についての閾値を設定した上で、実現可能性の懸念レベルを高/中/低で評価している。

図 6.1.5-1 は 1.5℃シナリオの実現可能性について要素ごとに実現可能性を評価し、高く位置しているほど実現可能性の懸念レベルが大きいことを表している。評価対象は①地球物理学的実現可能性（バイオマス、太陽光、風力の発電量）、②経済的実現性（炭素価格、GDP ロス、エネルギー投資、座礁資産化した石炭火力発電）、③技術的実現可能性（BECCS の拡大速度を含む、発電部門や運輸部門の変革速度）、④社会・文化的実現可能性（主要セクターにおけるエネルギー需要の削減、食料需要の削減、森林や牧草地の被覆の変化）、⑤制度的実現性（政府のガバナンス水準、一人当たり CO_2 排出量）の 5 要素である。なお、①の地球物理学的実現可能性については、どのシナリオにおいてもポテンシャル内に収まっており、実現可能性の懸念はないとして図 6.1.5-1 には記載されていない。残りの②~⑤の中でもとりわけ制度的側面の実現可能性については懸念が大きく、緩和努力の水準と緩和能力の間にミスマッチがある（政府のガバナンス水準が低い途上国においても大きな排出削減が必要となる）ことが示唆されている。

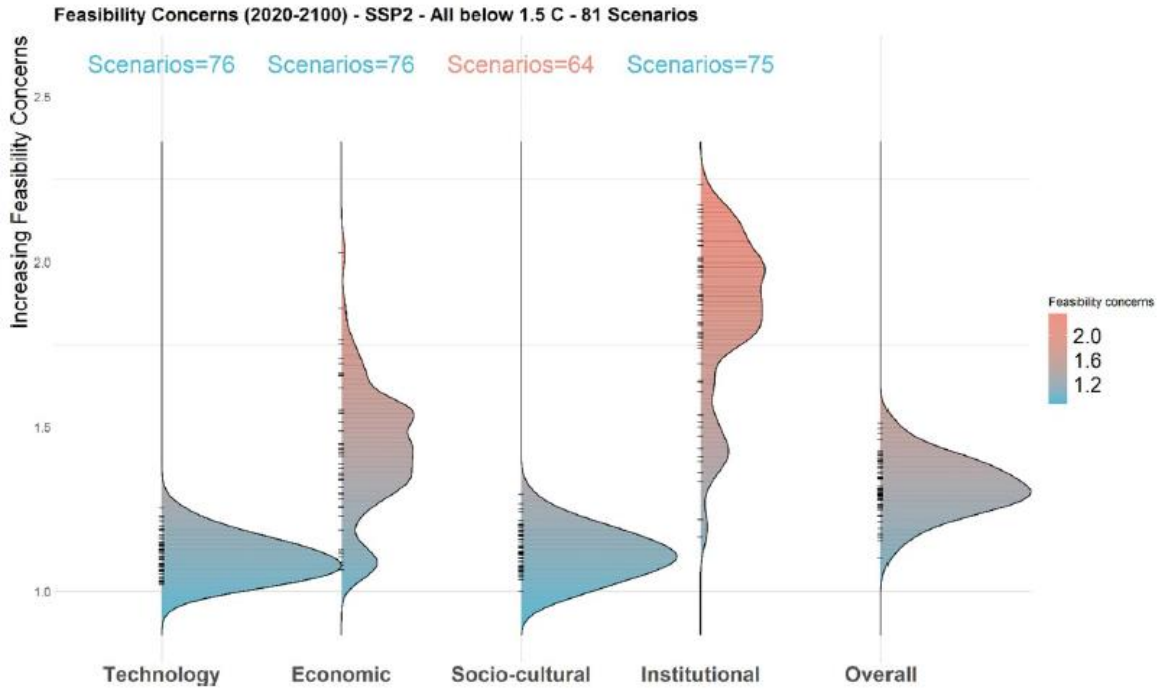


図 6.1.5-1 1.5℃シナリオの実現可能性評価

出典）E.Brutschin, et al.[8]

6.1.6　米国の事例

米国では 2020 年 1 月にバイデン政権が誕生し、2021 年 4 月に 2005 年比 50~52%排出削減という 2030 年目標を盛り込んだ NDC を UNFCCC に提出し、また 2021 年 11 月には 2050 年正味ゼロ排出目標を掲げた長期戦略（The long-term starategy of the United States – Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emission by 2050）を提出している。本節では米国が提出した長期戦略の概要をレビューした上で、先行研究をもとに正味排出に向けた課題を考察する。

米国の目標にはいくつかのマイルストーンがある。まずは 2030 年に国全体の GHG 排出を 2005 年比で 50~52%の排出削減すること、次いで 2035 年までに電力部門の脱炭素化、最後に 2050 年に GHG の正味ゼロ排出を達成する形になっている（図 6.1.6-1）。これを実現するには 2030 年に向けて排出削減のペースを加速する必要があり、電気自動車やヒートポンプなどの新技術を急速に拡大するなど、今後 10 年間の緩和策が長期目標の実現に大きな意味を持つことになる。

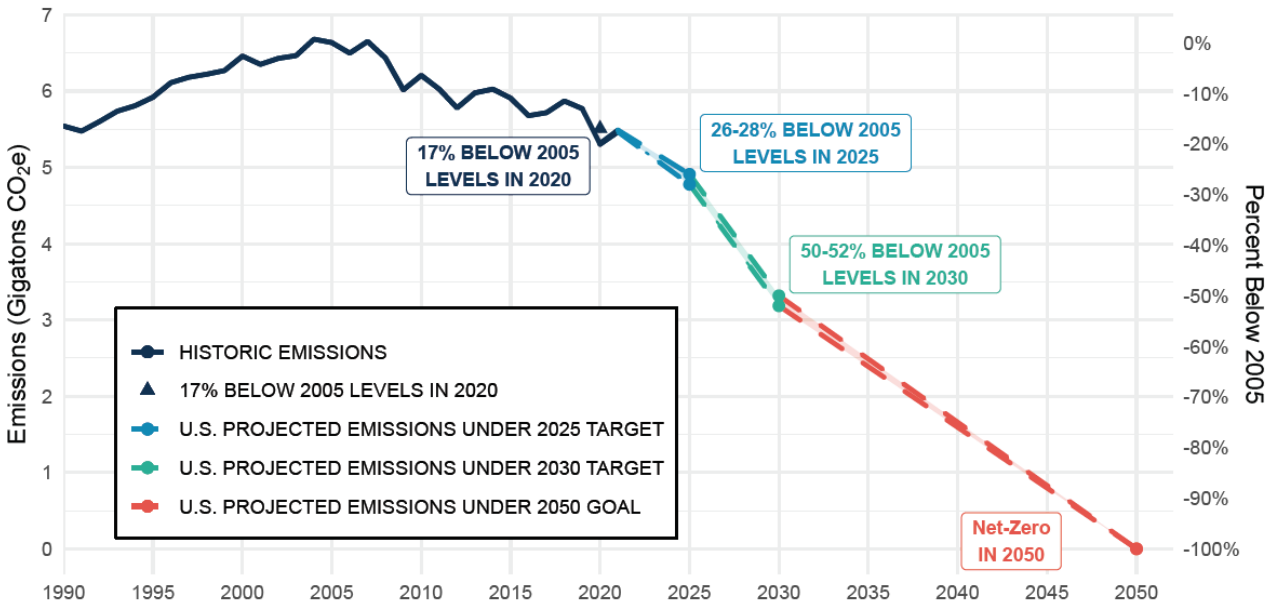


図 6.1.6-1 2050 年正味ゼロ排出に向けた排出軌道
出典）米国国務省/ホワイトハウス [9)]

米国の長期戦略では、主に Global Change Assessment Model （GCAM）と Office of Policy – National Energy Modeling System（OP-NEMS）2 つのモデルを使って正味ゼロ排出に向けたセクター別の排出経路や電源構成や燃料種の変化などを分析している。人口や GDP などのマクロ経済想定については SSP2 シナリオを適用している。また、セクターごとに（炭素除去、電力、運輸、産業、建物、Non-CO_2）技術水準の想定を変えたシナリオセット（図 6.1.6-2）を用いて技術進展の不確実性を考慮した代替経路の評価を行っている。

LTS Scenario	Technology Assumptions by Sector						Model(s) Used	
	Carbon Removal	*Electricity*	*Transportation*	*Industry*	*Buildings*	*Non-CO_2*	*GCAM*	*OP-NEMS*
Balanced Advanced	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	
Lower Non-CO_2	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	**Lower**	x	
Lower Buildings	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	**Lower**	Advanced	x	
Lower Industry	Medium	Advanced	Advanced	**Lower**	Advanced	Advanced	x	
Lower Transportation	Medium	Advanced	**Lower**	Advanced	Advanced	Advanced	x	
Lower Electricity	Medium	**Lower**	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	
Lower Removals	**Lower**	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	x
Higher Removals / Lower Technology	**Higher**	Advanced	**Lower**	**Lower**	**Lower**	**Lower**	x	x
High Oil & Gas Price	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	
Low Oil & Gas Price	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	
High Population & GDP	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	
Low Population & GDP	Medium	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	Advanced	x	

図 6.1.6-2 2050 年正味ゼロ排出に向けたシナリオ
出典）米国国務省/ホワイトハウス [9)]

基準年である 2005 年排出は 6.6Gt CO_2e であるが、これを 2050 年までに正味ゼロとするには、省エネ、電力部門の脱炭素化、電化と燃料転換、非 CO_2 対策、CO_2 除去が必要となる。図 6.1.6-3 の左図は 2050 年正味ゼロ排出に向けた代表経路におけるそれぞれの対策の寄与、右図は代替経路（図 6.1.6-2 の上位 7 シナリオに対応）における各対策の寄与を示している。

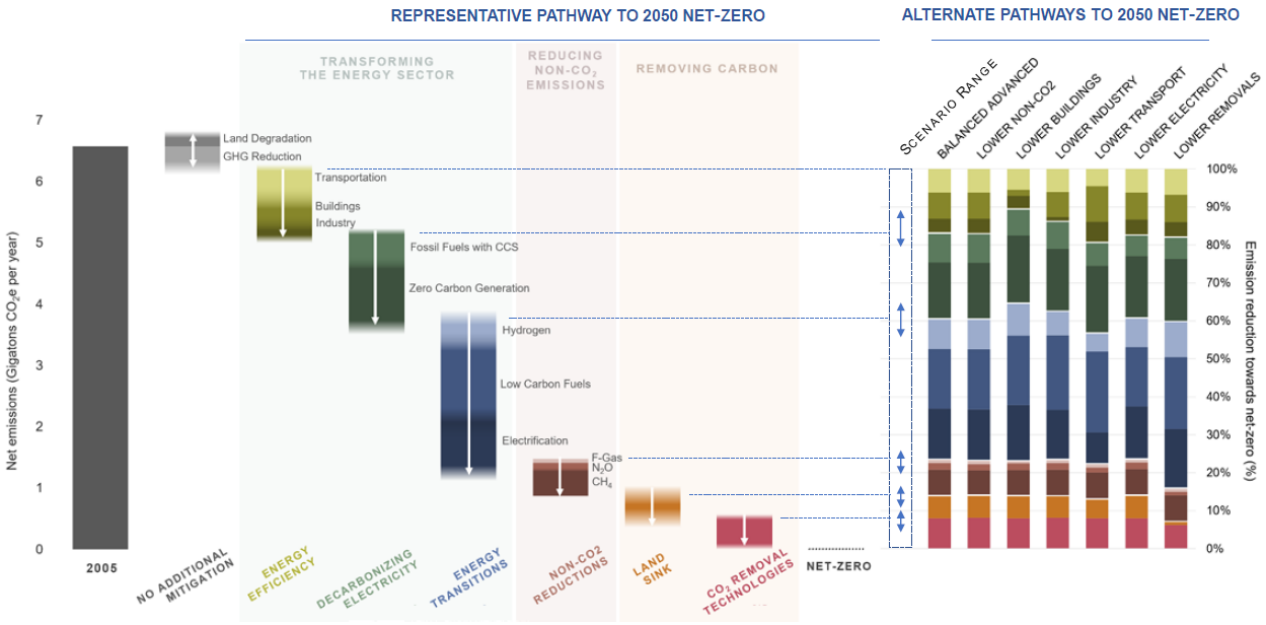


図 6.1.6-3 2050 年正味ゼロ排出に向けた代表経路（左）と代替経路（右）
出典）米国国務省/ホワイトハウス [9)]

米国の長期戦略では目標達成に向け、特に重要な要素として上述の 5 分野における対策を挙げている。

(1) 省エネ: より効率的な家電製品、新規および既存建物の効率性向上、持続可能な製造プロセスなど、既に実証されている多様なアプローチによって達成可能

(2) 電力部門の脱炭素化: 太陽光や風力のコストダウンや政策により近年急速に進んでいる。2035 年までにクリーンな電力を 100%導入する。

(3) 電化とクリーン燃料への転換: 自動車から建物、工業プロセスまで、経済の大部分を手頃な価格で効率的に電化できる。航空、船舶、一部の産業プロセスなど、電化が難しい分野では、水素や持続可能なバイオ燃料などのクリーン燃料へ転換する。

(4) 非 CO_2 対策: メタン、ハイドロフルオロカーボン（HFC）、亜酸化窒素（N_2O）などの非 CO_2 ガスは、温暖化に大きく寄与している。石油・ガスシステムのメタン漏洩対策や、冷媒を HFC から低 GWP のものに代替することなど低コストオプションが多数ある。また、「グローバル・メタン・プレッジ」を通じて、2030 年までに世界のメタン排出量を少なくとも 30%削減する。

(5) CO_2 除去: 農業からの非 CO_2 排出など、今世紀半ばまでに完全に脱炭素化することが困難な分野もあるため、正味ゼロ排出を達成するためには、土地の吸収源拡大や大気中から CO_2 を除去する必要がある。

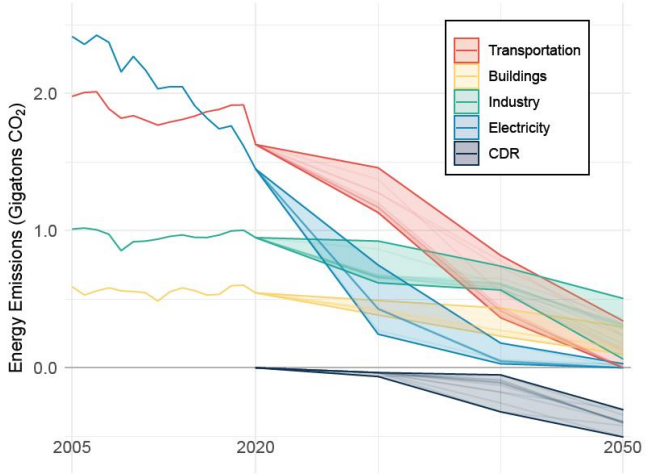


図 6.1.6-4 セクター別 CO_2 排出経路
出典）米国国務省/ホワイトハウス [9)]

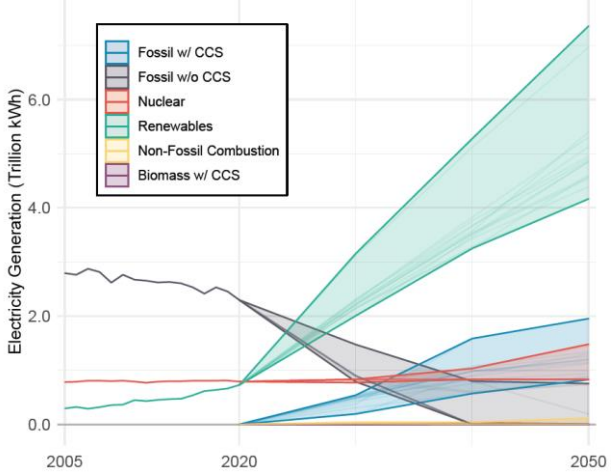


図 6.1.6-5 電源別発電電力量
出典）米国国務省/ホワイトハウス [9)]

図 6.1.6-4 はセクター別の CO_2 排出経路を示しており、すべてのシナリオで電力、運輸、建物、産業部門からの CO_2 排出量は減少するが、電力部門の削減が最も大きく、次いで運輸部門の排出減が大きい。

図 6.1.6-5 は 2005-2050 年の電源別発電電力量を示しており、電化の進展により総発電電力量が増大し、電源別では再生可能エネルギーが大幅に伸びる見通しが示されている。J. H. Williams, et al.[10)]は複数の研究事例をもとに米国のネットゼロ目標のインプリケーションを整理しており、その中で 2030 年まで現在のガス火力発電容量を維持す

ることは信頼性のために不可欠であり、それ以降も残るが稼働率は低下すること、石炭火力発電が廃止されるにつれ、信頼性維持のためガス火力発電の役割が高まることを指摘している。変動性の再生可能エネルギーの割合が高まると、それ以外の電源の稼働時間が短くなり、資本コストの高い原子力、地熱、CCS 付き火力よりも資本コストの低いガス火力発電の方が経済的に有利になると考えられる。また、稼働率の低いガス火力発電であれば CO_2 排出も比較的少ないため、エネルギーシステム内のネガティブ排出によって相殺できる、としている。

その他の課題として J. H. Williams, et al.[10]は緩和コストそのものより、縮小する化石燃料産業の雇用への影響など、経済におけるエネルギー関連の資金フローが劇的に変化することにともなう政治経済的な課題が大きいことを指摘している。また、すべての正味ゼロ排出シナリオにはトレードオフが伴っていることも留意する必要がある。例えば太陽光や風力、バイオマスのための土地利用を大幅に増やすと生物多様性、農業、森林に対する懸念が生じる。これを制限しようとすると、より多くの化石燃料が必要となり、より多くの CCS や原子力が必要となる。社会的圧力のために電化が遅れれば、より多くのバイオマスや合成燃料、土地が必要となる。そのため、より多くの緩和策があるほど、全体的なコスト、資源利用、社会的混乱を最小限に抑えながらネットゼロに到達できる可能性が高くなると考えられる。

米国の排出削減を実現するための施策としてバイデン大統領は 2020 年 7 月に 2021 年からの 4 年間で総額 2 兆ドルを投資する「近代的で持続可能なインフラと公正なクリーンエネルギーの未来の構築のための計画」を発表した。もしこの法案が通過し、順調に実施されれば米国が目標としている 2030 年までに GHG を 2005 年比で 50%削減する道筋をつけることができるとされているが、2022 年 2 月末時点ではこの計画を盛り込んだ「Build Back Better（BBB）」法案はまだ可決されていない。この法案では 5,500 億ドル以上がエネルギー・気候プログラムに割り当てられる。これには風力、太陽光、電気自動車、原子力などのクリーンエネルギー技術に投資する企業や個人への 3,200 億ドル（10 年間）の減税、鉄道網近代化のための 660 億ドル、公共交通への 900 億ドルの投資、クリーンエネルギーのためのグリッドインフラや EV 用充電ステーションへの 725 億ドルの投資が含まれている。プリンストン大学の研究チームによるモデル分析では既に可決されているインフラ法と BBB 法案を合わせ、2030 年までに年間排出量を 7.39 億～13 億トンの削減効果があり、2005 年比で 50%削減するという公約をほぼ達成するのに十分な量となると評価している（J. Tollefson[11]）。

6.1.7 EU の事例

EU は 2019 年 12 月、「欧州グリーンディール」を発表し 2050 年までに GHG 排出を実質ゼロにする目標に掲げ、2020 年 3 月に長期低排出発展戦略（Long-term low greenhouse gas emission development strategy of the European Union and its Member States）を UNFCCC へ提出している。また、EU 理事会の承認を受け 2020 年 12 月 17 日に NDC を再提出し、それまでの 2030 年に 1990 年比で 40%以上削減するという目標を引き上げ、同 55%以上削減とした。その後、2021 年 6 月 28 日に EU 理事会が「欧州気候法」

を採択し、2030 年までに GHG 排出量を 55%以上削減するという目標が法的拘束力をもつものとなった。また同法では、2050 年の正味ゼロ排出目標に取り組み、その達成に向けてガバナンス体制を整備することも義務付けている。2021 年 7 月 14 日には欧州委員会がこの目標を実現するための政策パッケージとして「Fit for 55」を発表した。これには EU 排出量取引制度（EU ETS）の改正、加盟国の排出削減の分担に関する規則（ESR）の改正、炭素国境調整メカニズム（CBAM）に関する規則案、土地利用・土地利用変化および林業（LULUCF）に関する規則の改正、気候変動対策社会基金の設立、再生可能エネルギー指令の改正、エネルギー効率化指令の改正といったものが含まれている。さらに 2021 年 12 月 15 日に欧州委員会は「Fit for 55」を補完する政策パッケージ（域内ガス規則の改正案、エネルギー部門から排出されるメタンガスの削減に関する新規則案、建物のエネルギー性能指令の改正案など）も発表している。2022 年に欧州議会および EU 理事会（閣僚理事会）において、これら一連の政策パッケージの検討と審議が進められる予定になっている。

EU の正味ゼロ排出シナリオは、2018 年 11 月に欧州委員会が発表した EU 長期戦略ビジョン“A Clean Planet for All”に付随する文書 [13]の中で 1.5TECH シナリオと 1.5LIFE シナリオの 2 つが提示されている。1.5TECH シナリオは各種技術の進展及び大量の炭素回収・貯留（BECCS）を伴うバイオマスの拡大に依存しているのに対し、1.5LIFE シナリオは、ビジネスと消費パターンがより循環型経済へと向かうことを想定している。具体的には炭素集約度の低い食生活へのシフト、輸送におけるシェアリングエコノミー、航空輸送需要の伸びの抑制、冷暖房用エネルギー需要のより合理的な利用が含まれている。また、LULUCF の吸収拡大も想定している。図 6.1.7-1 は、これらのシナリオにもとづき PRIMES モデル、GAINS モデル、GLOBIOM モデルを用いて分析した排出経路を示している。両シナリオとも最も早く削減が進むのが電力部門からの排出で、また、排出削減が難しいのは非 CO_2 排出という点では共通している。それに対し、炭素の回収、貯留、利用（CCUS）が大きく異なっており、1.5TECH シナリオでは 2040 年以降 CCUS が拡大し、2050 年に 600 $MtCO_2$/年の回収が見込まれている。

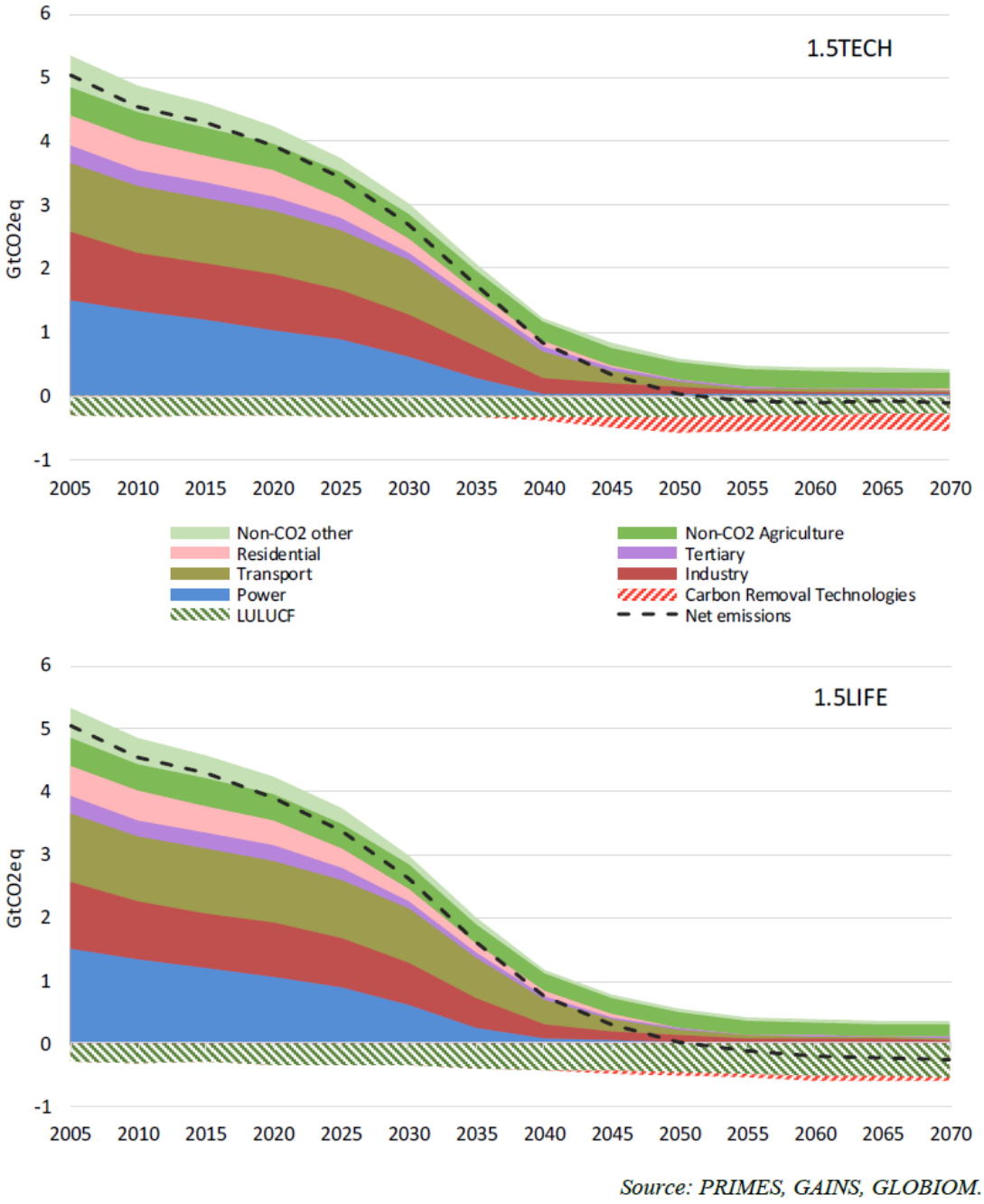


図 6.1.7-1 正味ゼロ排出に向けた 2 つのシナリオ

出典）European Commission[13)]

欧州委員会が示した正味ゼロ排出シナリオに対し、R. J. Tol[14)]は実現可能性や費用便益の観点から批判している。EU は 1990 年から 2019 年にかけて GHG 排出を 1%/年の割合で減らしてきたが、2030 年の目標実現はこのペースを加速し約 4%/年のペースで削減していくことが求められ、2050 年目標はさらに加速させる必要がある。しかし、実施が容易な対策は既に導入されており、今後、排出を減らしていくにはこの数字以上の大きな努力が必要となる。また、これまでは風力や太陽光といった再生可能エネルギーが排出削減のドライバーになってきたが、これらの電源の割合が増えていくにつれて出力変動への対応や系統統合などの課題が出てくる。また電力部門は比較的脱

炭素化が容易な部門であり、脱炭素化が難しい運輸や産業、農業といった部門での対策も必要になってくることを指摘している。

モデルによって緩和コストの評価は大きく異なっているが、IIASA の SSP データベースによると、パリ協定の目標を達成するには 2050 年に GDP の 0.5%から 10.5%、平均は約 3%（2100 年時点では 1%から 21%、平均は約 5%）のコストがかかると推計されている。炭素価格は 2050 年には€500/tCO2、2100 年には€2,000/tCO_2 以上に上昇すると見積もられている。ただし、これらのコスト試算は理想的な条件の下、費用対効果の高い気候変動政策が実施されることを前提としている点に留意が必要である。現実には合理的な制度設計が行われることは稀であり、モデルで想定されているものよりも遥かに高いコストがかかる可能性がある。気候変動政策による便益について、「政策あり」と「政策なし」の 2 つのシナリオを比べた場合、2030 年時点で両者に大差なく、2050 年時点では「政策あり」シナリオの方が「政策なし」シナリオよりも世界所得の 0.3%程度（約€2200 億相当）便益が大きくなる。GHG 排出削減の総費用は GDP の 3%以上になる可能性があるのに対し、便益は GDP の 0.3%に過ぎない。また GHG 削減の限界費用は 2050 年までに€500/tCO_2 に達するが、限界便益は€150/tCO_2 以下となっており、費用に見合った便益がないことから、EU の気候政策の費用は便益を上回っていると結論している。

6.1.8 中国の事例

2020 年 9 月、国連総会の中で中国の習近平国家主席が 2060 年以前の炭素中立実現に向けて努力することを表明した。これを受け 2021 年 5 月に排出をピークアウトさせカーボンニュートラルの実現に向けた作業計画を強化するため、国務院副総理を長とするカーボンニュートラルに関する主導グループを設置した。同年 10 月 24 日には中国共産党中央委員会と国務院が「カーボンピークアウトとカーボンニュートラルの完全、正確かつ全面的な実施に関する見解」を発表し、2025 年、2030 年、2060 年のマイルストーンを設けた。2025 年までに大幅な省エネを実現し、2030 年までに CO_2 排出をピークアウトさせ、2060 年までにカーボンニュートラルを達成するという方針を示した。また、中国国務院は同年 10 月 26 日、「2030 年までのカーボンピークアウトに向けた行動方案」を発表し、2030 年のカーボンピークアウトに向けて、具体的な取り組みや目標などを掲げた。その上で同年 10 月 28 日に中国政府は UNFCCC に長期低 GHG 排出開発戦略を提出している。この戦略の中では具体的な数値目標や施策として以下のことが盛り込まれている。

- NDC を強化し、2030 年までに CO_2 排出をピークアウトし、2060 年までにカーボンニュートラルを達成することを目指す（2020 年 9 月の国連総会において習主席が表明）
- 2030 年に向けて、中国は GDP 単位当たりの二酸化炭素排出量を 2005 年比で 65%以上削減し、一次エネルギー消費に占める非化石燃料の割合を 25%程度まで高め、森林蓄積量を 2005 年より 60 億立方メートル増やし、風力・太陽光発電の

合計設備容量を 12 億キロワット以上とする（2020 年 12 月 12 日の気候サミットで習主席が表明）

- 非化石エネルギーの割合を高め、2030 年までにエネルギー消費に占める非化石エネルギーの割合を約 25%、風力および太陽光発電の総設備容量を 12 億 kW 以上にする。
- 2060 年までに、エネルギー消費に占める非化石燃料の割合を 80%以上にし、クリーンで低炭素、安全で効率的なエネルギーシステムを完全に確立する。
- 2025 年までに都市における新築建物の 100%がグリーンビルディング基準を満たすものとし、新築公共建設物と新築工場建物の 50%は屋上太陽光発電を導入するよう努力する。
- 2030 年までに、新エネルギーとクリーンエネルギーを動力源とする自動車の割合を新車販売の約 40%を達成し、陸上運輸における石油消費をピークアウトさせるよう努力する。

中国政府はこれらの目標に関する分析を公式には明らかにしていない。清華大学の Jiankun He 教授を中心とする研究チームは、元中国気候変動対策特別代表の解振華らとともに中国のカーボンニュートラリティに関する研究プロジェクトに携わっており、公式見解に近い見通しを持っていると考えられるため、彼らの研究成果 [17]を参照に中国の排出経路やエネルギー構成の変化について概観する。

この研究では NDC シナリオ、NDC 強化シナリオ、2℃シナリオ、1.5℃シナリオ等を分析しているが、1.5℃シナリオが概ね 2060 年カーボンニュートラル目標と整合したものになっている。エネルギーシステムには慣性があり、直ぐには変革できないため、2030 年までは緩やかに GHG 排出が増えていくとすると、その後は急激に排出を削減する必要があり、2030 年から 2050 年にかけて平均 9.3%/年のペースで削減をしていくことになる（図 6.1.8-1）。また、ネットゼロ排出を達成するためには吸収源の拡大も必要となり、2050 年までに、農林業や土地利用による 7.8 億トン CO_2/年の炭素吸収増加と、CCS や BECCS による 8.8 億トン CO_2/年の貯留を見込んでいる。

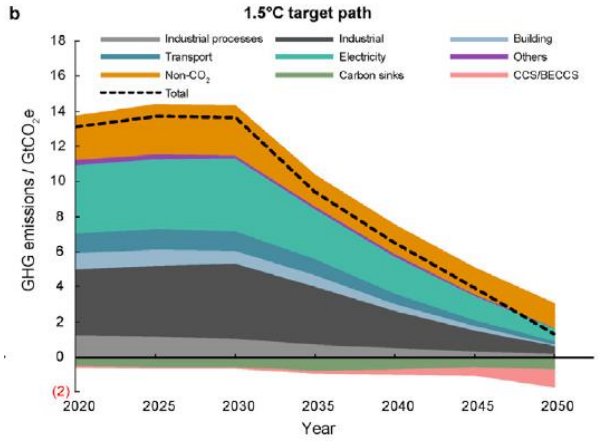


図 6.1.8-1 セクター別 GHG 排出経路

出典）He, Jiankun, et al.[17)]

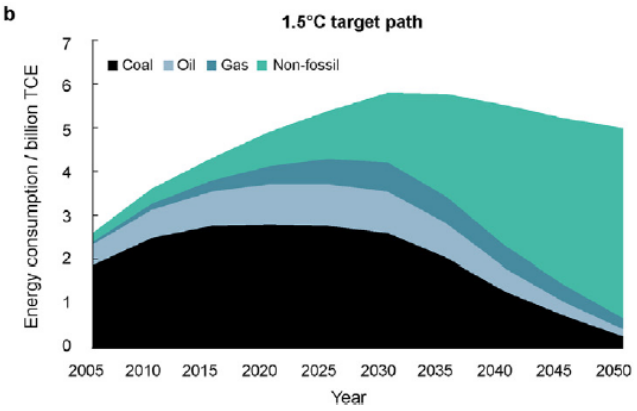


図 6.1.8-2 エネルギー構成

出典）He, Jiankun, et al.[17)]

エネルギー消費については、特に 2030 年以降に化石燃料からの脱却を加速させ、またエネルギー効率の向上や家庭におけるエネルギー消費パターンの変化などによりエネルギー需要自体を減らすことも想定されている。（図 6.1.8-2）

電力部門に関しては電化の進展とグリーン水素の製造により電力需要が大きく伸びることが見込まれている（図 6.1.8-3）。2020 年と比較すると、2050 年の中国の電力需要は 1.5℃シナリオで約 3 倍近い水準となる。2050 年の電源構成は設備容量の 93%以上、発電電力量の 90%以上が再生可能エネルギーを中心とした非化石発電が占めるようになる。CCS と BECCS の技術開発は、中国の将来の電源構成において石炭と天然ガスを残すための柔軟性を提供するとしており、1.5℃シナリオでは、2050 年に CCS 付石炭火力発電所の設備容量が 149GW となり、年間 600Mt-CO_2 を回収し、BECCS の設備容量は 48GW、280Mt-CO_2 の回収に寄与するとしている。

これらを実現するためには膨大な投資需要が必要となり、1.5℃シナリオの場合、エネルギーインフラだけで年間 GDP の 2.6%に相当する投資が必要となるとしている。

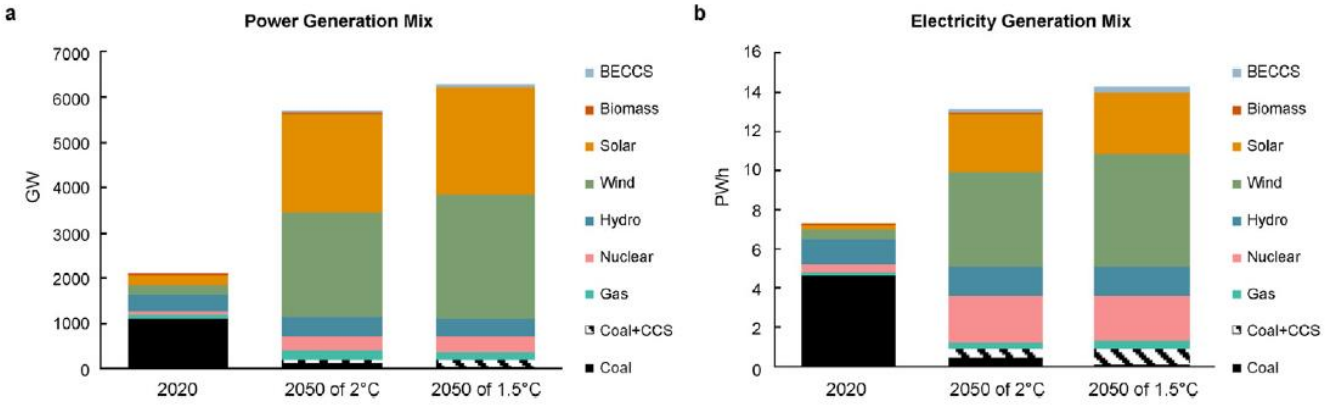


図 6.1.8-3 電源別の設備容量（左）と発電電力量（右）

出典）He, Jiankun, et al.[17)]

Zhu Liu, et al.[18]は中国のカーボンニュートラル目標に向けた課題として、石炭火力を減らすことの難しさやネガティブ排出技術への依存度の大きさを挙げている。中国ではこれまで老朽化した小規模で非効率な石炭火力を廃止してきたが、現在稼働している石炭火力発電所の大半は 1990 年代半ば以降に建設された大規模で近代的な発電所であり、設計運転寿命は 30 年以上ある。さらに、今後数年間におよそ 200 基の石炭火力発電所が建設される予定であり、既存のインフラと合わせると、耐用年数中に約 250Gt の CO_2 を排出することになり、これは全世界排出の半分に相当する。中国電力委員会によると、中国は 2030 年までに約 130 万 kW の石炭火力発電設備容量のピークを達成することを目指しているが、その後の急速な脱石炭が必要となる。石炭火力発電の設備容量の目標は第 14 期中期計画では公式に設定されていない。

また、2060 年までにカーボンニュートラルを達成するためには、従来の原単位削減のための対策だけに依存するわけにはいかず、化石燃料ベースのエネルギー供給システムのロックインを打破し、ネガティブ排出技術を開発する必要がある。再生可能エネルギーとエネルギー効率改善が 2060 年までの累積排出量削減の約 75%に寄与すると見込まれているが、残りの排出はネガティブ排出技術によるオフセットが必要となるが、CCUS はまだ技術的に未成熟で 2060 年までの貢献は限定的である可能性が高い（図 6.1.8-4）。

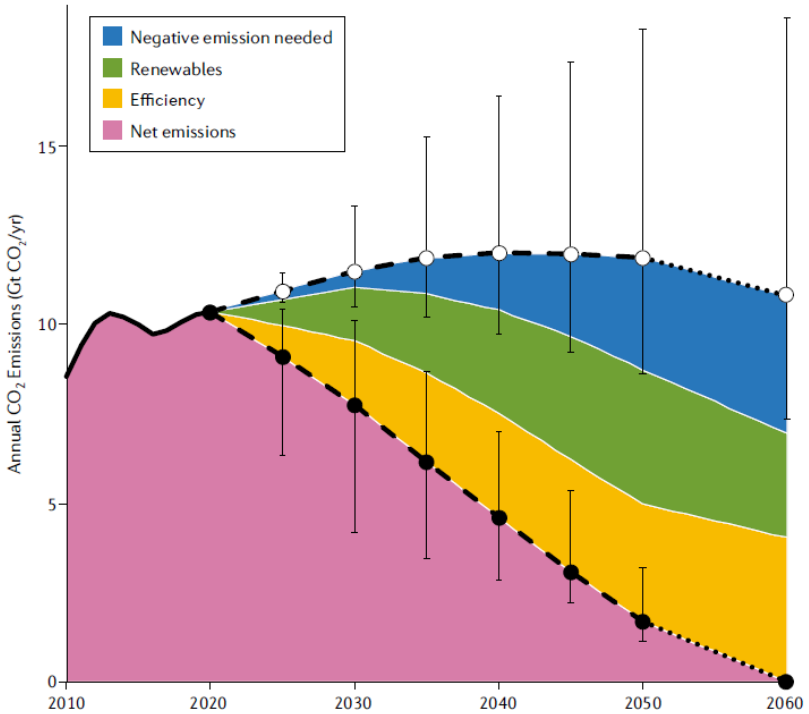


図 6.1.8-4 カーボンニュートラルに向けた対策別の寄与

出典） Liu, Zhu, et al.[17]

参考文献（第 6.1 節に関するもの）

1) UNFCCC: Nationally determined contributions under the Paris Agreement, Synthesis report by the secretariat; FCCC/PA/CMA/2021/8 (2021)
2) Net Zero Tracker. https://www.zerotracker.net/, (accessed 2022-02-24).
3) Höhne, Niklas, et al. "Wave of net zero emission targets opens window to meeting the Paris Agreement." Nature Climate Change 11.10: 820-822 (2021).
4) Rogelj, Joeri, et al. "Three ways to improve net-zero emissions targets." Nature 591.7850: 365-68 (2021).
5) Van Soest, Heleen L., Michel GJ den Elzen, and Detlef P. van Vuuren. "Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement." Nature communications 12.1 (2021)
6) Schreyer, Felix, et al. "Common but differentiated leadership: strategies and challenges for carbon neutrality by 2050 across industrialized economies." Environmental Research Letters 15.11 (2020).
7) Azevedo, Inês, et al. "Net-zero emissions energy systems: what we know and do not know." Energy and Climate Change 2 (2021).
8) Brutschin, Elina, et al. "A multidimensional feasibility evaluation of low-carbon scenarios." Environmental Research Letters 16.6 (2021).
9) The United States Department of State and the United States Executive Office of the President. "The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050." 1 November 2021.
10) Williams, James H., Ryan A. Jones, and Margaret S. Torn. "Observations on the transition to a net-zero energy system in the United States." Energy and Climate Change 2 (2021).
11) Jeff Tollefson. "What Biden’s $2-trillion spending bill could mean for climate change." Nature, 17 December 2021.
12) The European Union (EU) and its Member States. "Long-term low greenhouse gas emission development strategy of the European Union and its Member States. " 6 March 2020.
13) European Commission. “In-Depth Analysis in Support of the Commission Communication” COM (2018) 773, (2018)
14) Tol, Richard SJ. "Europe’s Climate Target for 2050: An Assessment." Intereconomics 56.6: 330-335 (2021).
15) Evans, Stuart, et al. "Border carbon adjustments and industrial competitiveness in a European Green Deal." Climate Policy 21.3: 307-317 (2021).
16) China. "China’s Mid-Century Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy. " 28 October 2021.
17) He, Jiankun, et al. "Towards carbon neutrality: A study on China's long-term low-carbon transition pathways and strategies." Environmental Science and Ecotechnology 9: 100-134 (2022).
18) Liu, Zhu, et al. "Challenges and opportunities for carbon neutrality in China." Nature Reviews Earth & Environment (2021).

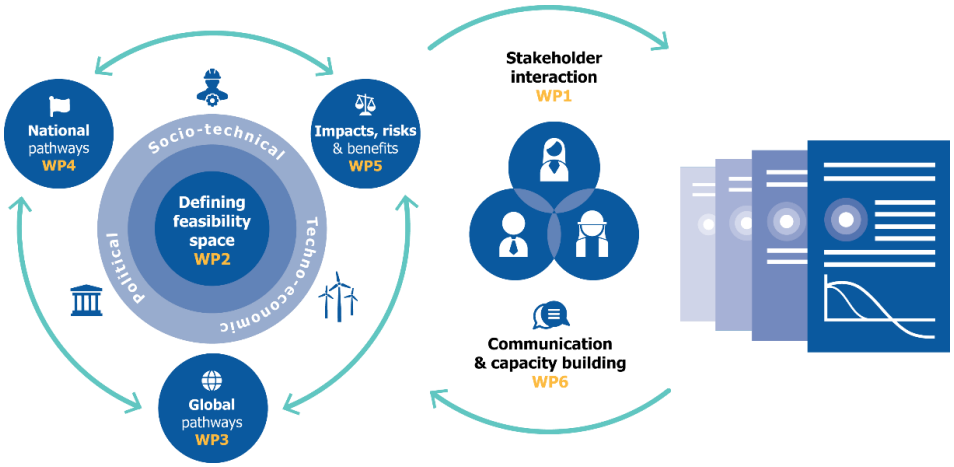
6.2　国際モデル比較プロジェクト分析等の動向（ENGAGE）

ENGAGE（Exploring National and Global Actions to reduce Greenhouse gas Emissions）は、2019 年 9 月から 2023 年 8 月までのプロジェクトであり、EU の Horizon2020 から

出資されている。本年度は、2021 年 10 月 14 日に第 4 回会合（オンライン）、そして、2022 年 2 月 28 日から 3 月 4 日にかけて第 5 回会合（オンライン）が開催された。ENGAGE では、パリ協定達成に向けたコスト効率的かつ技術に基づいた社会的・政治的に実現可能な経路の設計に向けたモデル分析が実施されている。その目的は以下の通りである。

- 知識の協創
- 多次元の実行可能性の概念化と運用
- 気候変動の回避された影響の定量化とコベネフィットの最大化およびトレードオフの最小化
- 多次元の実行可能性とパリ協定を反映した次世代の脱炭素経路の開発
- IPCC AR6 への貢献

図 6.1.8-1 は、ENGAGE の Working Package（WP）である。ステークホルダーとの相互作用（WP1）とキャパシティビルディング（WP6）によってプロジェクト外とのやり取りを行い、実行可能性空間の定義（WP2）を中心として、世界全体の経路分析（WP3）、国別の経路分析（WP4）、気候変動の影響・コベネフィット・トレードオフの分析（WP5）から構成されている。表 6.2-1 は、ENGAGE の Task である。RITE は WG4 (Task 4.1 及び Task 4.4)及び WG5 に参加している。2022 年 3 月現在、ENGAGE プロジェクトの研究成果が多くの学術雑誌に掲載されている [1)]。



1. Stakeholder process, co-development of pathways, and outreach
2. Understanding and conceptualising evolving feasibility of decarbonisation in different contexts
3. Global pathways reflecting the Paris Agreement
4. National mid-century strategies
5. Avoided impacts, co-benefits, and eradicating trade-offs
6. Capacity building, research exchange, communication tools and documentation

図 6.1.8-1 ENGAGE の Working Package

表 6.2-1 ENGAGE プロジェクトの Task

WP	Task	内容	他の WP との関係性
WP1	T1.1	Implement a stakeholder process to co-design global decarbonization pathways: Three global workshops	Establish stakeholder process to co-develop feasibility (WP2), pathways (WP3 and 4), assessment of impacts/co-benefits/trade-offs (WP5) and development of communication tools (WP6)
	T1.2	Stakeholder dialogue on national decarbonization pathways: Four national level workshops (Brussels, China, India, Brazil)	
	T1.3	Documenting the stakeholder engagement process	
	T1.4	Outreach activities	
WP2	T2.1	Update of the policy database and analysis of the policy gaps	
	T2.2	Analysis of national constraints and enablers to decarbonization: Renewable electricity expansion; Energy efficiency and energy demand in key sectors; Phasing out unabated coal; Renewable energy technology innovation	
	T2.3	Analysis of international constraints and enablers to decarbonization: Institutional complexity; Design options for global collaboration	
	T2.4	Feasibility space for decarbonization pathways: Constraints define a feasibility space; Techno-economic, socio-technical, political constraints; Soft and dynamic constraints	
WP3	T3.1	System transformations for balancing sinks and sources of GHG emissions	Selection of game changers (WP1), Communication & capacity building (WP6), Feasibility framework and application / more feasible pathways (WP2), Interactions with national pathways (WP4)
	T3.2	Game-changing societal trends and innovations: Demand, lifestyles & behavioural change; Digitalization; Power-to-X and deep electrification; Sustainable innovations in agriculture and land use	
	T3.3	Comparative feasibility analysis of decarbonization pathways: Ex-post feasibility analysis; feasibility constraints	
	T3.4	Transition from the currently fragmented global climate policy regime overcoming	

		feasibility barriers	

WP4	T4.1	Development of national pathways and mid-century strategies	Input from WP1, Work together with WP2 and WP3, Design model protocol national pathways
	T4.2	Produce a summary roadmap for the EU energy system transition	
	T4.3	Multidimensional feasibility of national pathways	
	T4.4	Frame national strategies in different equity principles and their ethical implications	
	T4.5	Consistency of national mid-century strategies and policies with the overall objectives of the Paris Agreement and identification of potential for strengthening current policies	
WP5	T5.1	Minimizing potential trade-offs of mitigation policies (global teams, national teams, develop policy portfolios)	
	T5.2	Co-benefits of climate change mitigation at the country level (global teams, national teams, new set of pathways, develop policy portfolios)	
	T5.3	National benefits of avoided impacts of climate change	
	T5.4	Integrated analysis of avoided impacts of climate change, and trade-offs and co-benefits of mitigation policies	
WP6	T6.1	Capacity building	
	T6.2	Research exchange programme	

2021 年 10 月 31 日～11 月 12 日に開催された COP26 ではこれまでの ENGAGE の研究成果を発表するサイドイベント [2)]を開催し、いくつかの Policy brief を発表した。

以下は、一部の Policy brief について概要を紹介する。

6.2.1 実現可能なパス（WP2 Task 2.4）

統合評価モデルは通常、ある気候目標の下で最も費用効果的な削減シナリオを推計するが、それらがどの程度実現可能どうかは評価していない。そこで、ENGAGE プロジェクトでは、実現可能性を評価するためのフレームワーク（図 6.2.1-1）を開発した [3)]。

これには 5 つの実現可能性の側面がある：①Geophysical（バイオマスポテンシャル、風力ポテンシャル、太陽光ポテンシャル）、②Economic（GDP ロス、炭素価格、投資、座礁化した石炭資産）、③Technological（風力、太陽光、原子力、BECCS、化石燃料 CCS）、

④Socio-cultural（エネルギー需要変化、土地利用変化、食事の嗜好変化）、⑤Institutional（緩和スピード、組織的なキャパシティ）である。各側面は主要となる指標（例：炭素価格）によって評価される。このフレームワークの下で、先行研究やデータから得られた知見に基づいて、各指標の異なる価値に対して実現可能性の懸念レベル（低、中、高）を提示する。シナリオを分析するために、最後のステップとして、各指標に対する実現可能性の懸念を集計する。その結果、今世紀中のシナリオの実現可能性及び経時的な 5 つの側面をまたぐ実現可能性の内訳を検討することが可能である。

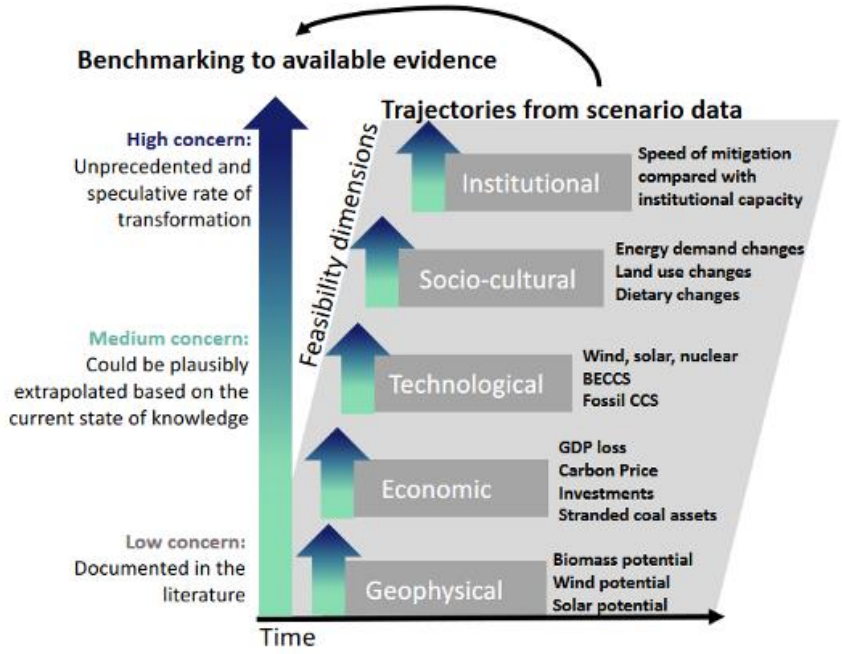


Figure 1 Multidimensional Feasibility Framework. Based on the framework developed in Brutschin et al. 2021. This figure was also developed for the IPCC's Sixth Assessment Report, Working Group III, Chapter 3.

図 6.2.1-1 実現可能性フレームワーク

（出典）IIASA[3)]

初期の分析における結果は以下の通りである。

- 気候変動対策の喫緊性を確認し、早急な移行は対策が遅れる場合よりも実現可能性の懸念が低い。
- 組織が主要な懸念である。多くの地域では、政府や組織は急激な緩和のキャパシティがない。
- 需要と供給側における緩和のバランスが必要である。

各結果について、以下に詳しく説明する。

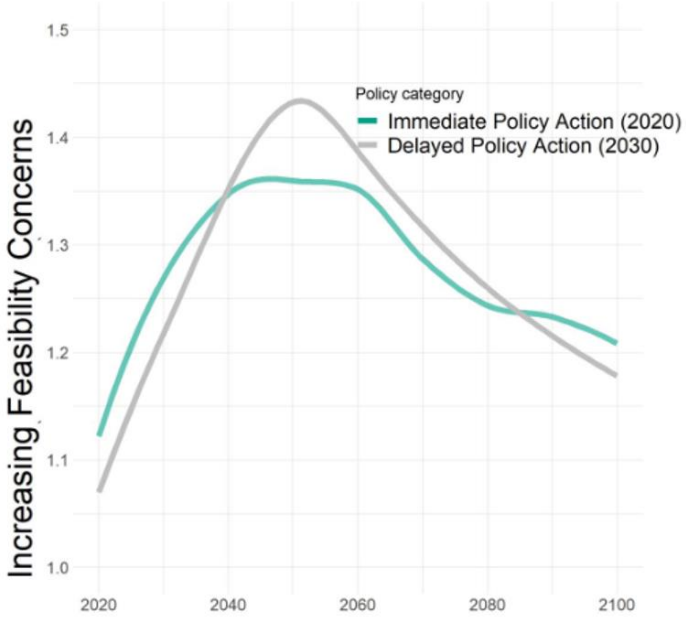


Figure 2 Feasibility of two scenarios, both aiming to limit warming to 1.5°C. One assumes ambitious global mitigation starting immediately, the other delays ambitious action till 2030. Source: Brutschin et al. 2021

図 6.2.1-2 二つのシナリオの実現可能性

（出典）IIASA[3)]

IPCC 1.5℃報告書におけるシナリオ（Immediate policy action 及び delayed policy action）を適用すると、このフレームワークの下では急速な行動の価値が示された。急激なシステム移行を必要とする野心的なアプローチは、短期では高い実現可能性の懸念があるが、今後数十年は全体的に実現可能性の懸念が低下する（図 6.2.1-2）。

また、このフレームワークの下では、組織のキャパシティに対する実現可能性の懸念が最も高いことが示唆された。つまり、気候緩和には効果的なガバナンスが重要である。より良いガバナンスがある国は、より効果的な気候政策を実施しており、高い炭素価格、石炭の廃止及び再エネに積極的である国が該当する。ENGAGE プロジェクトでは、世界銀行の Worldwide Governance Indicators と Environmental Performance Index を用いて、厳しい気候政策には高いガバナンスが必要であることを示した。統合評価モデルは通常、ガバナンスレベルを考慮していないため、一人当たり GDP、教育レベル、教育における男女平等をガバナンスレベルの指標として用いた。さらに、これらの指標を用いて各国の将来のガバナンスレベルを推計している。ガバナンスのレベルと一人当たり CO_2 排出量との比較を行い、将来のガバナンスレベルが低い地域における急速な緩和を必要とするシナリオは実現可能性の懸念が高いことが示唆される。これらを解決するためには、実現可能性の観点からは、先進国における削減負担の増加や、国際協調や教育への投資の必要性が挙げられている。

最後に、本分析では需要と供給の両方に取り組むことで、実現可能性が高まるということを示した。例えば、IIASA で開発された低エネルギー需要シナリオ（LED）は、行動変容やエネルギー効率の改善を通じて、エネルギー需要を減少させることに焦点を当てている。これは、低炭素電力や炭素回収・貯留といった供給側の技術的解決策のリスクを回避するものであるが、世界的に急速な行動の変化が求められるため、最初の 10 年間は実現可能性に対する懸念が比較的高い。一方、多くのシナリオは、主に供給側の選択肢に焦点を当てており、その実現可能性は、需要削減がある程度進めば向上する。

6.2.2 オーバーシュートの回避

世界の気温のオーバーシュートはリスクを含む。ENGAGE プロジェクトにおける分析では、オーバーシュートを回避する長期の経済便益のシナリオを示し、投資を実現する必要性を指摘した [4)]。大半の気候シナリオは、今世紀末の遠い気温目標に焦点を当てている。これによって今世紀半ばにカーボンバジェットを超える CO_2 排出量となり、一時的に気温のオーバーシュートを認める形となっている。

そこで、ENGAGE プロジェクトでは、ネット・ゼロ排出量を達成する時点でカーボンバジェットをバランスさせるシナリオを分析した。分析の主な結果は以下の通りである。

- 現在の NDCs では 1.5℃は達成できない。
- ネット・ネガティブのシナリオは危険なレベルのオーバーシュートにつながる。1000Gt の CO_2 バジェットを考慮すると、ネット・ネガティブ排出に依存するシナリオでは、ネット・ゼロの時点でバジェットを達成した場合よりも今世紀半ばのピーク気温が最大で 0.15℃高くなる。これは、気候への影響が大幅に大きくなり、ティッピングポイントに到達するリスクがあることを意味する。
- オーバーシュートを避けるためには、低炭素電力への投資を 2030 年までに少なくとも 2 倍にする必要がある（バジェットが 1000Gt の場合）。これは主に、太陽光、風力、送電網、蓄電等である。
- 先行投資は長期的な経済便益をもたらす。オーバーシュートを回避するシナリオでは今世紀末の GDP はより高くなる。
- 炭素除去技術の早急な開発と普及が必要である。ネット・ネガティブ排出量を避けるシナリオにおいてさえ、近い将来の緩和を加速し、緩和が困難なセクターからの排出を相殺するために CO_2 除去が必要である。

分析の詳細は、Nature Climate Change に今後掲載される予定である。

6.2.3 今後の予定

RITE が関与している WG4 の Task 4.1 (Development of national pathways and mid-century strategies)は、各機関（表 6.2-2）の推計結果をまとめ、論文化に向けて取

り組んでおり、Task 4.4 (Frame national strategies in different equity principles and their ethical implications)及び WG5 は現在推計、及び検討中である。

表 6.2-2 Task 4.1 国内分析参加機関

モデルチーム	分析モデル名	国
COPPE	BLUES	Brazil
TERI	MARKAL	India
IIM	AIM/Enduse	India
KU	AIM/Hub-India 2.2	India
ERI	IPAC-AIM/technology	China
KU	AIM/Hub-China 2.2	China
TU	China TIMES	China
NCSC	PECE	China
NIES	AIM/CGE → AIM/Hub-Japan 2.1	Japan
NIES	AIM/Enduse-Japan 2.1	Japan
RITE	DNE21+	Japan
HCMCIU	AIM/CGE → AIM/Hub-Vietnam 2.2	Viet Nam
UoS	AIM/CGE → AIM/Hub-Korea 2.0	Korea
KAIST	MESSAGE	Korea
KAIST	GCAM	Korea
SIIT-TU	AIM/CGE → AIM/Hub-Thailand 2.2	Thailand
UMD	GCAM-USA	USA
CREP	AIM/CGE	Indonesia
HSE	RUSSIA-TIMES	Russia
E3M	PRIMES → GEM-E3	EU

参考文献（第 6.2 節に関するもの）

1) ENGAGE: Publications. http://www.engage-climate.org/publications/ (accessed March 10, 2022)
2) ENGAGE: COP 26 UNFCCC side event, Transitioning towards low-carbon and climate resilient pathways by 2050, https://www.engage-climate.org/cop-26-unfccc-side-event-transitioning-towards-low-carbon-and-climate-resilient-pathways-by-2050/ (accessed March 10, 2022)
3) IIASA: Policy Brief #29, Finding a feasible path, https://previous.iiasa.ac.at/web/home/resources/publications/IIASAPolicyBriefs/pb29.html (accessed March 10, 2022)

4) IIASA: Policy Brief #30, Avoiding overshoot, https://previous.iiasa.ac.at/web/home/resources/publications/IIASAPolicyBriefs/pb30-short.html (accessed March 10, 2022)

6.3 国際エネルギー機関 IEA のシナリオに関する調査

6.3.1 WEO2021 の概要と課題

国際エネルギー機関（IEA）から毎年発刊される World Energy Outlook（WEO）は、世界で最も信頼されているエネルギー関連書籍の一つと言える。将来のエネルギー需給分析を行う場合には、信頼できる想定として WEO が参照されることが多く、日本の長期エネルギー需給見通しのベースの一部「発電コスト検証 WG 報告書」でも、燃料価格は WEO を参照している。昨年度の報告書では、WEO2010 から WEO2020 までの 11 年間の WEO のシナリオの変化を分析した結果について報告した。本稿では、最新の WEO2021 の概要と分析に基づく課題とインプリケーションについて述べる。

(1) WEO2021 の概観（本文から）

WEO2021 の章構成は以下の通りである。なお、WEO2021 は、気候変動とクリーンなエネルギー移行を加速する COP26 気候変動会議のハンドブックとして設計されている。また、WEO2021 における分析はオンラインで無料[2]で利用できる（WEO2021 発刊のプレスリリース[3]におけるファティ・ビロル IEA 事務局長発言）。

1 章 概観（54 ページ）
2 章 現状（32 ページ）
3 章 1.5℃への野心のギャップ（58 ページ）
4 章 複数の将来の探索：需要と電力（46 ページ）
5 章 複数の将来の探索：燃料（36 ページ）
6 章 確実な移行（42 ページ）

2 章のシナリオ説明（2.3.2）において、WEO2021 では 3 つのメインシナリオに注目して分析を行ったと記載しており、シナリオ別の CO_2 排出量と 2100 年の温度上昇の中央値[4]は図 6.3.1-1 に示されている通りである。

- NZE(Net Zero Emissions by 2050)：2050 年ネットゼロ達成、2100 年の温度上昇 1.5℃
- APS(Announced Pledges Scenario)；ネットゼロ宣言国は全て達成、2100 年の温度上昇 2.1℃

[2] これまでの WEO は、シナリオ別のエネルギー関連指標の詳細を主要な国、地域別に記載している AnnexA が巻末に掲載されていたが、無料の WEO2021 の AnnexA は世界合計値のみと簡素化されており、詳細データについては有料。

[3] https://www.iea.org/news/world-energy-outlook-2021-shows-a-new-energy-economy-is-emerging-but-not-yet-quickly-enough-to-reach-net-zero-by-2050

[4] 正確には、2100 年における産業革命以前からの温度上昇の各種文献の中央値。中央値で示すのは、図 6.3.1-1 右図のように、炭素バジェットの不確実性と達成確率により幅があるため。

- STEPS(Stated Policies Scenario)： 2021 年 6 月時点の NDC と整合、2100 年の温度上昇 2.6℃

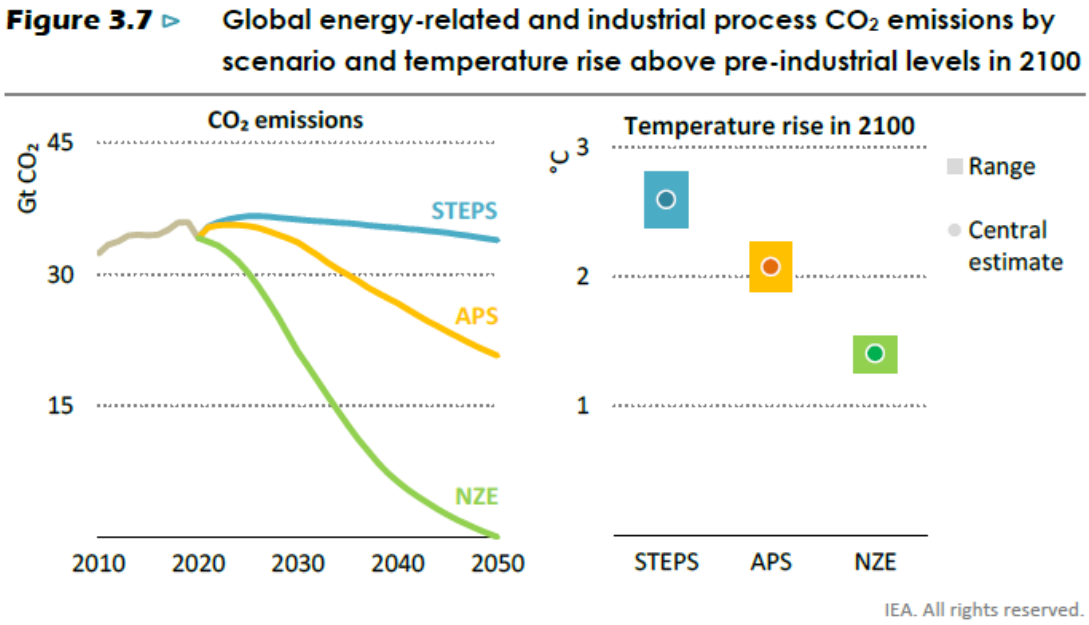


図 6.3.1-1 WEO2021 に示された３つのメインシナリオ

この３つのメインシナリオの他に、WEO2020 まではレギュラーシナリオの位置づけだった SDS(Sustainable Development Scenario)を含めて、WEO2021 に描かれている４つのシナリオについて、その歴史、WEO2021 本文中の記載回数[5]、巻末の Annex A 記載のエネルギー関連指標の地域区分および対象年、について整理すると下表のようになる。WEO2021 では、シナリオについて規範的（normative）、探索的（explorative）という分類をしていることも特徴の一つである。

[5] シナリオの略称およびフルネームでの記載回数を合計

表 6.3.1-1 WEO2021 のシナリオ

シナリオ名 （分類）	初登場	本文中の 記載回数	Annex A 記載の エネルギー関連指標 地域区分×対象年
NZE (規範的シナリオ)	WEO2021	911	世界 × 2030/2040/2050 年
APS (探索的シナリオ[6])	WEO2021	837	
STEPS (探索的シナリオ)	WEO2010[7]	552	
SDS (規範的シナリオ)	WEO2017	40	

表 6.3.1-1 に示すように NZE はメインのシナリオの中でも、本文中の記載回数が最多で 900 回を超えており、全体構成から見ても WEO2021 の主役であると言える。SDS は WEO2008 初登場の 2℃シナリオを引き継いで WEO2017 からレギュラーシナリオとして定着していたが、WEO2021 においての言及は NZE の 1/20 以下である。

探索的シナリオ STEPS は、最新動向をベースとした需要、燃料価格、技術コストの想定に基づく forecasting アプローチで将来のエネルギー需給の整合的な姿を計量経済モデルによって「展望」するもので、従来の WEO ではこのような探索的シナリオが中心であった。しかし、WEO2021 では固定した将来の実現手法を Backcasting アプローチで探るという規範的シナリオ NZE が主役となっている。これは、シナリオのプライオリティーが変化したということだけでなく、WEO が将来展望（アウトルック）ではなく目的地への道標（ガイドブック）へと変化していることを示唆している[8]。

これらシナリオの前提条件として、人口[9]と GDP 成長率[10]は全シナリオ共通の想定を置き、燃料価格とカーボン価格についてはシナリオ別に以下の表のように想定されている。

[6] WEO2021 は APS を探索的シナリオと記載しているが、ネットゼロ宣言を達成すると想定した国、地域については規範的シナリオ、そうでない国は探索的シナリオであるので、正確には規範的シナリオと探索的シナリオとハイブリッドである。

[7] STEPS という名称が用いられたのは WEO2019 からであるが、2010 年に登場した NPS（New Policies Scenario）からの名称変更であることから 2010 年とした。

[8] CO_2 排出量を 2℃相当（SDS）や 1.5℃相当（NZE）を前提とするため、規範的シナリオとされているが、対策費用が温暖化影響被害回避額を大きく上回るようであれば、規範的シナリオとは言えない。あくまで 2℃や 1.5℃というパリ協定長期目標に照らして「規範的」シナリオと解釈すべきであって、何を目的に置くか次第で「規範」は変わるし、「規範」はそれほど単純には定義できないことに留意が必要と考えられる。

[9] 国連予測(United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2019)の中央値と整合をとった、と注記している。

[10] 出典は「Oxford Economics Global Economic Model 2021 改訂版と IMF World Economic Outlook 2021 改訂版をベースとした IEA による分析」と記載している。

表 6.3.1-2 シナリオ別燃料価格

Table 2.2▷ Fossil fuel prices by scenario

			Net Zero Emissions by 2050		Sustainable Development		Announced Pledges		Stated Policies	
Real terms (USD 2020)	2010	2020	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
IEA crude oil (USD/barrel)	92	42	36	24	56	50	67	64	77	88
Natural gas (USD/MBtu)										
United States	5.2	2.0	1.9	2.0	1.9	2.0	3.1	2.0	3.6	4.3
European Union	8.8	4.2	3.9	3.6	4.2	4.5	6.5	6.5	7.7	8.3
China	7.9	6.3	5.3	4.7	6.3	6.3	8.5	8.1	8.6	8.9
Japan	13.0	7.9	4.4	4.2	5.4	5.3	7.6	6.8	8.5	8.9
Steam coal (USD/tonne)										
United States	60	43	24	22	24	22	25	25	39	38
European Union	109	50	52	44	58	55	66	56	67	63
Japan	127	69	58	50	67	63	73	63	77	70
Coastal China	137	89	61	51	72	66	77	65	83	74

表 6.3.1-3 シナリオ別カーボン価格

Table B.2 ▷ CO_2 prices for electricity, industry and energy production in selected regions by scenario

USD (2020) per tonne of CO_2	2030	2040	2050
Stated Policies			
Canada	55	60	75
Chile, Colombia	15	20	30
China	30	45	55
European Union	65	75	90
Korea	40	65	90
Announced Pledges			
Advanced economies with net zero pledges[1]	120	170	200
China	30	95	160
Emerging market and developing economies with net zero pledges	40	110	160
Sustainable Development[2]			
Other advanced economies	100	140	160
Other selected emerging market and developing economies	-	35	95
Net Zero Emissions by 2050			
Advanced economies	130	205	250
Major emerging economies[3]	90	160	200
Other emerging market and developing economies	15	35	55

Note: The values are rounded.

石油価格想定に注目すると、NZE では石油価格は 2050 年には 24 ドル／バレルと現状から大きく下落するのに対して、他のシナリオでは今後上昇、STEPS では倍増と、想定が大きく異なる。ガス、石炭も概ね同じ傾向である。この理由は、下図（図 6.3.1-2）が説明している。STEPS、APS では化石燃料の需要は今後緩やかに低下するのに対して、

NZE では化石燃料の需要が大幅に低下するため、需給が緩和されて価格が低下するというロジックである。

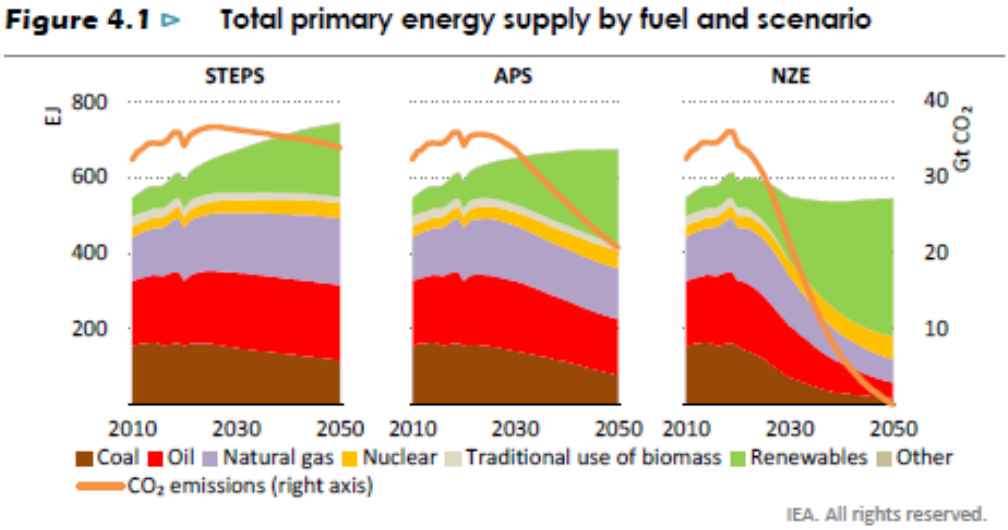


図 6.3.1-2 シナリオ別一次エネルギー需要とその燃料構成

上図から、NZE では石炭が大きく減少し、2050 年にはほぼゼロになっていることがわかる。石炭は発電用燃料としての需要が大きく、現状でも世界の発電電力量において石炭が最大の電源である。シナリオ別の電力需要とその電源構成は下図（図 6.3.1-3）の通りである。

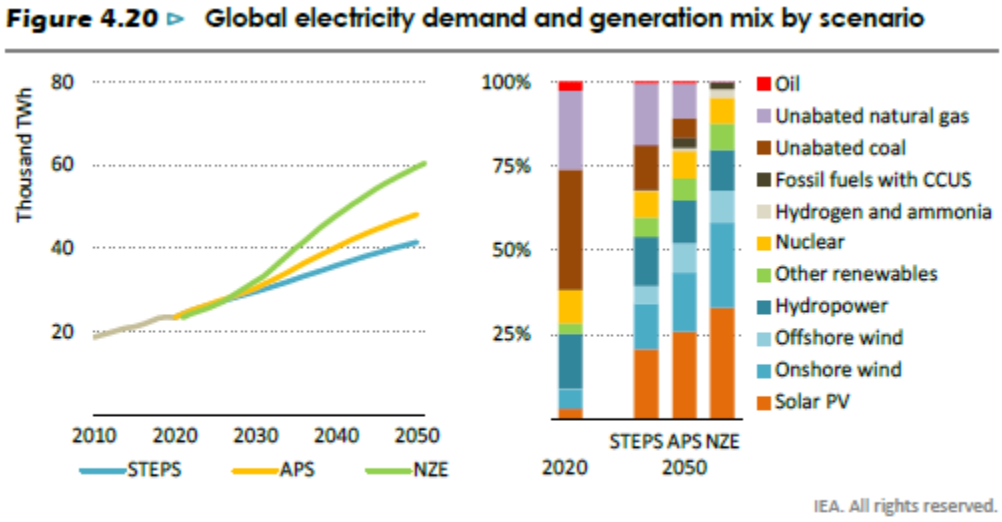


図 6.3.1-3 シナリオ別電力需要と 2050 年の電源構成

電力需要（左図）は NZE＞APS＞STEPS であり、脱炭素が進むほど電力需要が大きくなることを示している。電源構成（右図）からは、現状では 6 割を超えている火力発電（石炭＋ガス＋石油）が 2050 年には STEPS で半減、APS では 1/3 に減少、NZE ではほぼゼロになっていて、その減少分は太陽光と風力が増加して補っている。前掲の表 6.3.1-2 で示したように NZE で燃料価格は 2050 年に半額程度になるが、

表 6.3.1-3 で示したカーボン価格（2050 年に先進国で 250 ドル/t-CO_2、主な途上国で 200 ドル/t-CO_2）の効果により、化石燃料は発電用燃料としての経済性を失っていることを意味する。

(2) 地域、国別データの検証（有意義な分析は可能か？）

① 地域、国別のデータ

本稿では STEPS、APS、SDS のシナリオ別の主要な地域、国別のエネルギー指標を基に整理を行った（NZE に関しては、世界合計値のみの掲載で、主要な国・地域別の詳細データの提供はなされていない）。シナリオ別に利用可能なデータについてまとめると以下の表のようになる。

表 6.3.1-4 シナリオ別データアベイラビリティ

<table>
<tr><th>シナリオ名
（分類）</th><th>有料 Annex A 記載のエネルギー関連指標
地域区分×対象年</th><th>無料版 Annex A 記載
のエネルギー関連指標
地域区分×対象年</th></tr>
<tr><td>NZE
(規範的ｼﾅﾘｵ)</td><td>世界 × 2030/2035/2040/2045/2050 年</td><td rowspan="4">世界
×
2030/2040/2050 年</td></tr>
<tr><td>APS
(探索的ｼﾅﾘｵ)</td><td rowspan="3">世界、北米、米国、中南米、ブラジル、欧州、EU、アフリカ、中東、ユーラシア、ロシア、アジア太平洋、中国、インド、日本、東南アジア、OECD、非 OECD、新興国および途上国、先進国（記載順）
×
2030/2035/2040/2045/2050 年</td></tr>
<tr><td>STEPS
(探索的ｼﾅﾘｵ)</td></tr>
<tr><td>SDS
(規範的ｼﾅﾘｵ)</td></tr>
</table>

② Annex A 記載のデータ

WEO の AnnexA には、エネルギーバランス、発電電力量、CO_2 排出量などの最新実績およびシナリオ別の将来の値が記載されているが、WEO2021 ではその項目や記載に変化が見られる。具体的な AnnexA 記載項目を WEO2020 と比較して示す。

表 6.3.1-5 AnnexA 記載エネルギーバランスのデータ項目

WEO2021	WEO2020
一次エネルギー需要合計(Mtoe)	**一次エネルギー需要合計(Mtoe)**
再生可能エネルギー	石炭
太陽光	石油
風力	天然ガス
水力	原子力
モダンバイオエネルギー	水力
旧式バイオマス利用	バイオエネルギー
原子力	その他再生可能エネルギー
天然ガス	電力部門
石油	石炭
石炭	石油
電力部門	天然ガス
再生可能エネルギー	原子力
原子力	水力
天然ガス	バイオエネルギー
石油	その他再生可能エネルギー
石炭	その他エネルギー部門
その他エネルギー部門	電力
最終エネルギー消費合計(Mtoe)	**最終エネルギー消費合計(Mtoe)**
電気	石炭
液体燃料	石油
石油	天然ガス
水素ベース	電気
気体燃料	熱
天然ガス	その他再生可能エネルギー
水素ベース	産業部門
固体燃料	石炭
石炭	石油
熱	天然ガス
産業部門	電気
電気	熱
液体燃料	その他再生可能エネルギー
気体燃料	輸送部門
削減対策なし天然ガス	石油
固体燃料	電気
削減対策なし石炭	バイオエネルギー
運輸部門	その他燃料
電気	民生・業務（Buildings）部門
液体燃料	石炭
石油	石油
気体燃料	天然ガス
天然ガス	電気
民生部門	熱
電気	バイオエネルギー
液体燃料	うち旧式バイオマス
気体燃料	その他再生可能エネルギー
天然ガス	その他部門
固体燃料	石油化学中間製品
石炭	
その他	

エネルギーバランスでは慣習として、化石燃料（石炭、石油、天然ガスの順)、原子力、水力、その他再エネという順番で記載されるのが常で、WEO2020 まではそれを踏襲してきたが、WEO2021 では再生可能エネルギーが最初に記載されており、これは WEO2021 におけるプライオリティーを示唆していると考えられる。また、再生可能エネルギーの内訳として太陽光、風力の値が示されていることは、再生可能エネルギーの中で太陽光、風力が目覚ましく増加している現状を反映していると考えらえる。ま

た、最終エネルギー消費において、化石燃料の項目が従来の WEO では燃料種別（石炭、石油、天然ガス）であったのが、WEO2021 では液体燃料、気体燃料、固体燃料という分類に変更されており、また、従来の WEO にあった「熱」と「その他再生可能エネルギー」の項目が消えている。この変更により、エネルギータイプ別最終エネルギー消費については、WEO2021 とこれまでの WEO との比較ができなくなってしまっている。

表 6.3.1-6 AnnexA 記載の電力および CO_2 のデータ項目

WEO2021	WEO2020
発電電力量(TWh) 再生可能エネルギー 太陽光 風力 水力 バイオエネルギー 原子力 水素およびアンモニア CCUS つき化石燃料 削減対策なし石炭 削減対策なし天然ガス 石油 電力 CO_2 排出係数(gCO_2 per kWh) **発電設備容量 (GW)** 再生可能エネルギー 太陽光 風力 水力 バイオエネルギー 原子力 水素およびアンモニア CCUS つき化石燃料 削減対策なし石炭 削減対策なし天然ガス 石油 バッテリー貯蔵容量 **CO_2 排出量 (Mt CO_2)** 合計値 燃焼由来 石炭 石油 天然ガス バイオエネルギー・廃棄物 電力・熱供給部門 石炭 石油 天然ガス バイオエネルギー・廃棄物 その他エネルギー部門 最終消費部門 石炭 石油 天然ガス 産業 運輸 民生 CO_2 除去量合計 CO_2 回収量合計	**発電電力量(TWh)** 石炭 石油 天然ガス 原子力 水力 再生可能エネルギー 水力 バイオエネルギー 風力 地熱 太陽光 太陽熱 海洋 **発電設備容量合計(GW)** 石炭 石油 天然ガス 原子力 水力 再生可能エネルギー 水力 バイオエネルギー 風力 地熱 太陽光 太陽熱 海洋 **CO_2 排出量合計(Mt-CO_2)** 石炭 石油 天然ガス 電力・熱供給部門 石炭 石油 天然ガス 最終消費部門 石炭 石油 天然ガス プロセスからの排出

AnnexA の電力と CO_2 の記載についても、WEO2021 では変化が見られる。再生可能エネルギーが最初に、化石燃料が後ろになっているのは、エネルギーバランスと同様にプライオリティーの変化を表している。

また、発電電力量と発電設備容量の化石燃料の項目が、従来の石炭、石油、天然ガスから、「削減対策なし(unabated)の石炭」、「削減対策なし(unabated)の天然ガス」、石油、「CCUS つきの化石燃料」に変化していることは、WEO2021 では火力発電の燃料種別より削減対策の有無が重要であることを示している。発電電力量と発電設備容量の再生可能エネルギーの項目について、地熱、太陽熱、海洋が消失している[11]ことは、再生可能エネルギーの種類にプライオリティーがあることを示唆している。また、CO_2 排出については、最終消費からの排出について部門別の内訳が示され、除去量、回収量の項目が追加されるなど情報が増加しており、WEO2021 において CO_2 の重要性が更に増していることを示唆している。

③ APS の国・地域別の排出プロフィール（ネットゼロ宣言国の特定）

WEO2021 での APS は「2021 年半ばにおいてネットゼロ宣言している国が達成したと想定」と説明されているが、具体的にどの国がネットゼロ宣言しているのか不明である。そこで、AnnexA の国・地域別のデータで、2050 年における STEPS と APS の排出量を比較してみたところ、下表の通りであった。この数字が 100%の国・地域はネットゼロ宣言が想定されていないということになる。即ち、ロシア、インド、ユーラシア、ASEAN は APS のネットゼロ想定の対象から除外される。

[11] 発電電力量、発戦設備容量の世界合計値には、地熱、太陽熱（CSP）、海洋、の項目はあるが、主要な国・地域別のシートにはこれらの項目がない。

表 6.3.1-7 STEPS 排出量比の 2050 年 APS 排出量

国・地域	2050 年 STEPS 比
米国	4%
ブラジル	36%
ロシア	100%
中国	21%
インド	100%
日本	4%
北米	17%
中南米	65%
欧州	47%
ＥＵ	11%
アフリカ	85%
中東	99%
ユーラシア	100%
アジア太平洋	57%
ASEAN	100%
OECD	25%
非 OECD	70%
先進国	25%
新興国・途上国	71%

次に、2050 年 APS 排出量を 2020 年排出量と比較してみたのが表 6.3.1-8 である。

表 6.3.1-8 2020 年 CO_2 排出量比の 2050 年 APS の CO_2 排出量

国・地域	2050 年 STEPS 比	2020 年排出量比
米国	4%	3%
ブラジル	36%	45%
ロシア	100%	101%
中国	21%	15%
インド	100%	160%
日本	4%	2%
北米	17%	13%
中南米	65%	81%
欧州	47%	29%
ＥＵ	11%	5%
アフリカ	85%	150%
中東	99%	142%
ユーラシア	100%	113%
アジア太平洋	57%	55%
ASEAN	100%	161%
OECD	25%	16%
非 OECD	70%	78%
先進国	25%	16%
新興国・途上国	71%	78%

この表から、米国、日本、EU は 2020 年実績比でほぼゼロであり、2050 年ネットゼロが反映されていることが確認できる。中国も大きく減少しており 2060 年ネットゼロが反映されていると考えられる。一方でブラジルは、中国同様に 2060 年ネットゼロ宣

言をしているが、2050 年の排出量は 2020 年の 45%であり、中国に比べて 2060 年ネットゼロへの進捗が遅い（実現が難しい）と想定されていることが伺える。

APS の 2050 年までの世界の CO_2 排出量を、米国、日本、EU、中国（ネットゼロ宣言が反映されている）と印露（ネットゼロ宣言が反映されていない）、その他、の内訳で示すと下図のようになる。米国、EU、日本は 2050 年ネットゼロ、中国も 2060 年ネットゼロに向かって排出量が減少している。一方で、インドは増加、ロシアとその他はほぼ変わらず、2050 年にも 20Gt-CO_2 以上の CO_2 排出量が残り、現状からの半減にも届かないことが示されている。

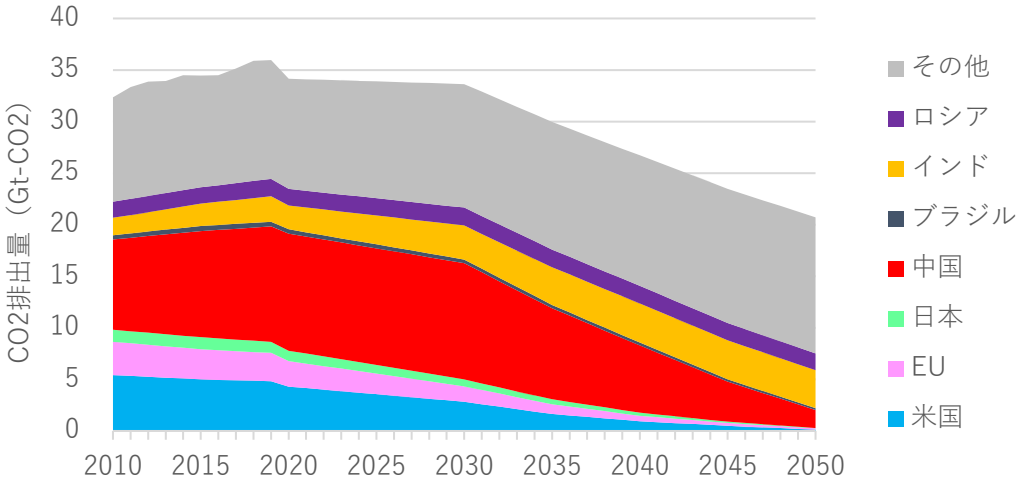


図 6.3.1-4 APS の世界 CO_2 排出量と主要な国・地域の内訳

また、STEPS 排出量から APS 排出量への削減を主な国・地域別に描くと以下のようになる。世界全体の STEPS から APS への必要削減量の約半分が中国による削減であり、次いで米国の貢献が大きい。残念ながら日本の削減はほとんど目に見えない。

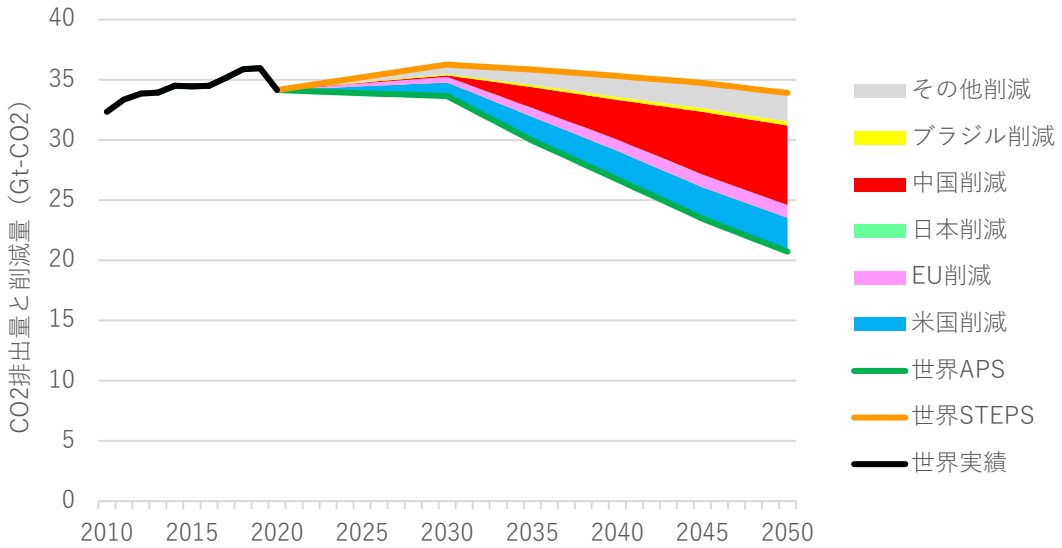


図 6.3.1-5 STEPS から APS への世界 CO_2 削減量と主要な国・地域の内訳

以上より、ネットゼロ宣言が反映されている日本、米国、EU、中国（EU は地域であって国ではないが、簡素化のため以下「4 カ国」と呼ぶ）の APS を比較分析することによって、それぞれのネットゼロへのアプローチの特性を明らかにし、日本の 2050 年ネットゼロを検討する上で参考になると考えられることから、Annex A に基づき APS の分析および考察を行った。

(3) ネットゼロ宣言国の分析：基本的な指標

① 一次エネルギー需要

APS における 4 カ国の一次エネルギー需要とそのエネルギー源構成を図 6.3.1-6 に示す。縦軸のスケールは同一でなく、日本：EU：中国：米国＝1：3：10：5 であり、絶対量を比較する際はそれを考慮する必要がある。

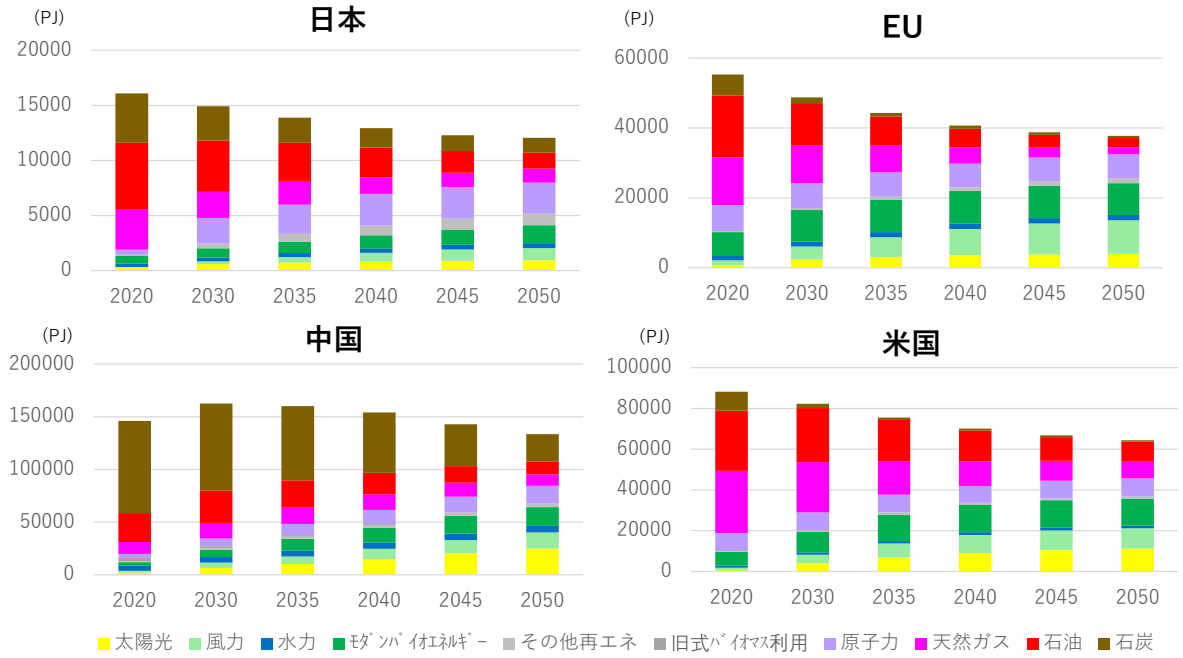


図 6.3.1-6 4 カ国のエネルギー源別一次エネルギー需要（APS）

日本、EU、米国は 2020 年から、中国は 2030 年からエネルギー需要が低下する。また、その構成において現状は 7～9 割を占めている化石燃料がいずれに国においてもその割合は 2050 年に向けて低下し、太陽光、風力、モダンバイオエネルギーが増加する点は共通している。

② 最終エネルギー消費

a. 部門別

最初に、4 カ国の部門別の最終エネルギー消費を棒グラフで示す。縦軸の比は、日本：EU：中国：米国＝1：4：10：5 である。

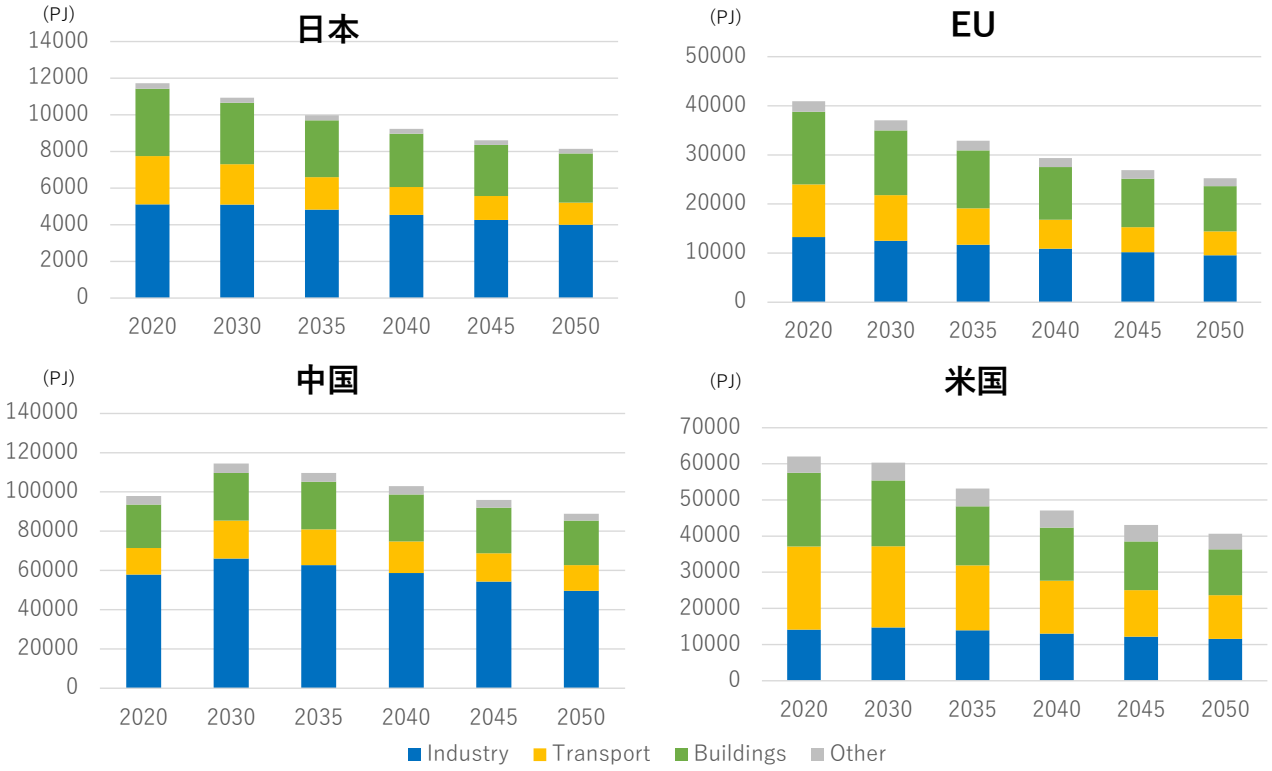


図 6.3.1-7 4 カ国の部門別最終エネルギー消費（APS）

この図の縦軸のスケールが示すように、中国のエネルギー消費量は他より圧倒的に大きい。国によって、日本と中国は産業が大きく、米国においては運輸が大きいなど部門構成が異なることも示されている。その中で、いずれの国においても、産業部門のエネルギー消費量の低下は見えにくいという共通点がある。これは、経済性を追求する産業部門では既に省エネを図っているので、更なる省エネが難しいということを示している。

次に、4 カ国の部門別の最終エネルギー消費を APS と STEPS で比較して示す。縦軸のスケールの比は、日本：EU：中国：米国＝1：2：7：3 である。破線は STEPS、実践は APS を示しており、この 2 つの線のギャップが大きいほど、ネットゼロ実現のコスト的、技術的な課題が大きいことを表している。

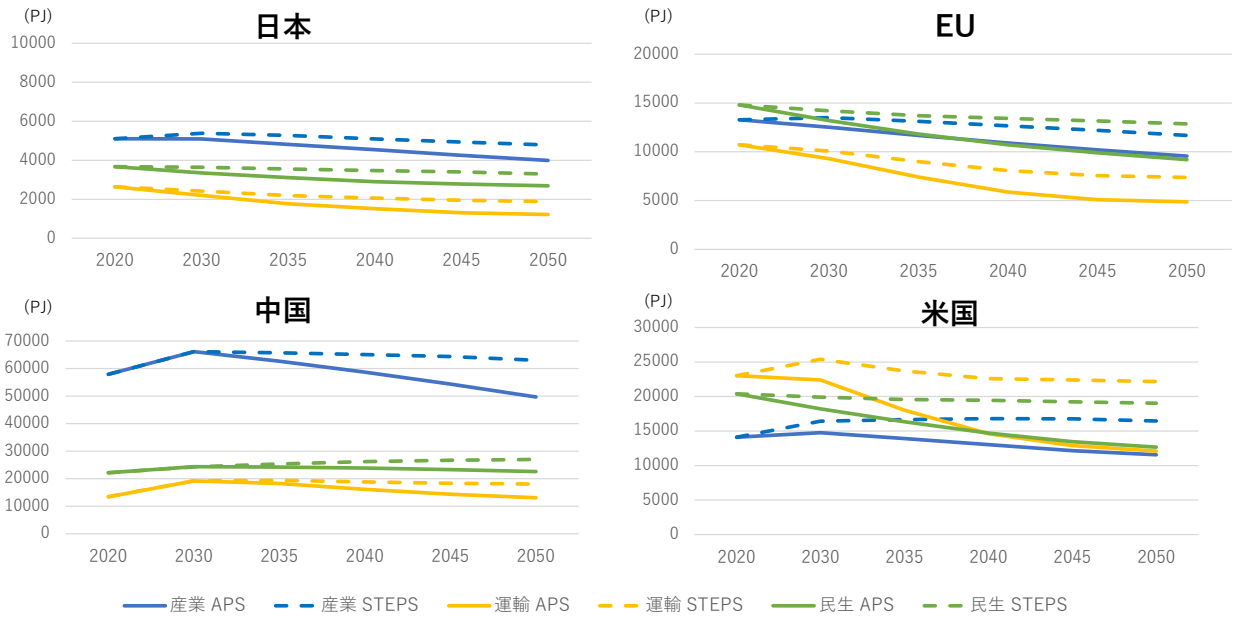


図 6.3.1-8 シナリオ別 4 カ国の部門別最終エネルギー消費

中国では、産業部門のエネルギー消費が他を大きく上回り、同国が世界の工場であることを示している。中国の最終エネルギー消費の大きさは、産業＞民生＞運輸という順番で、日本も同様の順番であることは「ものづくり大国」「鉄道網が整備された国」に共通している傾向とも言える。同様に鉄道網が整備されている EU においても、運輸が最低という点は共通している。

一方で、自動車大国の米国では最終エネルギー消費の大きさは、運輸＞民生＞産業であり、その傾向は 2050 年までほぼ変わらないが、APS では運輸が 2030 年以降急激に減少し、2050 年には民生と同等となる。米国の運輸における STEPS と APS のギャップは際立って大きく、APS の実現の（EV の普及のための充電時間短縮やインフラ整備を含めて）コスト的、技術的な課題が大きいことがわかる。EU は現在、民生＞産業＞運輸であり、APS では（EV の普及により）運輸が最大の削減、次いで民生が大きく削減して産業とほぼ同定度になる。

b. エネルギータイプ別最終エネルギー消費

APS における 4 カ国のエネルギータイプ別最終エネルギー消費を図 6.3.1-9 に示す。縦軸のスケールの比は、日本：EU：中国：米国＝1：4：10：5 である。

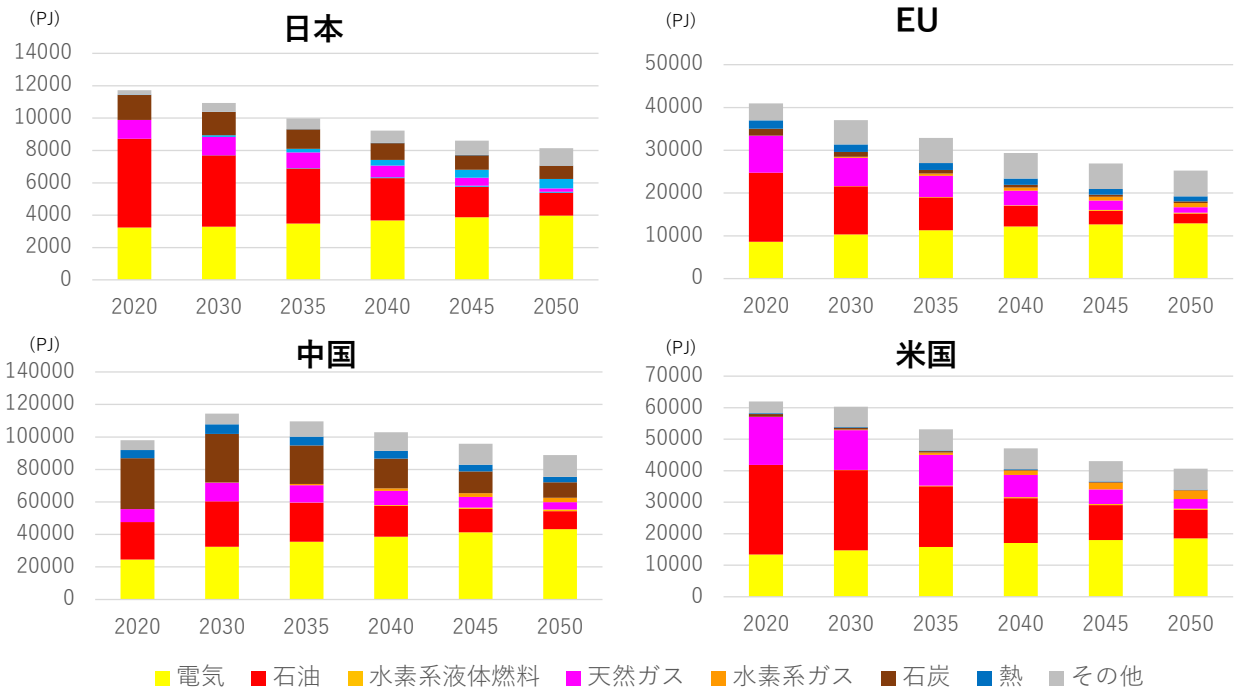


図 6.3.1-9　4 カ国のエネルギー種別最終エネルギー消費（APS）

APS では、日米 EU で直ちに、中国では 2030 年以降、合計エネルギー消費は低下していく。2020 年比の 2050 年のエネルギー消費量は、日本 69%、EU62%、中国 91%、米国 69%である。利用エネルギータイプ別に見ると、減っているのは石油、ガス、石炭の化石燃料で、一方で、電気の利用は増加している。合計値が減少していく中で電気利用は存在感を増し、2050 年にはエネルギー利用全体の約 5 割が電気になる、という共通点がある。

次に、部門ごとのエネルギー種別最終エネルギー消費を示す。最初に APS における 4 カ国の産業部門のエネルギー種別エネルギー消費量を示す。縦軸のスケールの比は、日本：EU：中国：米国＝1：2：10：3 である。

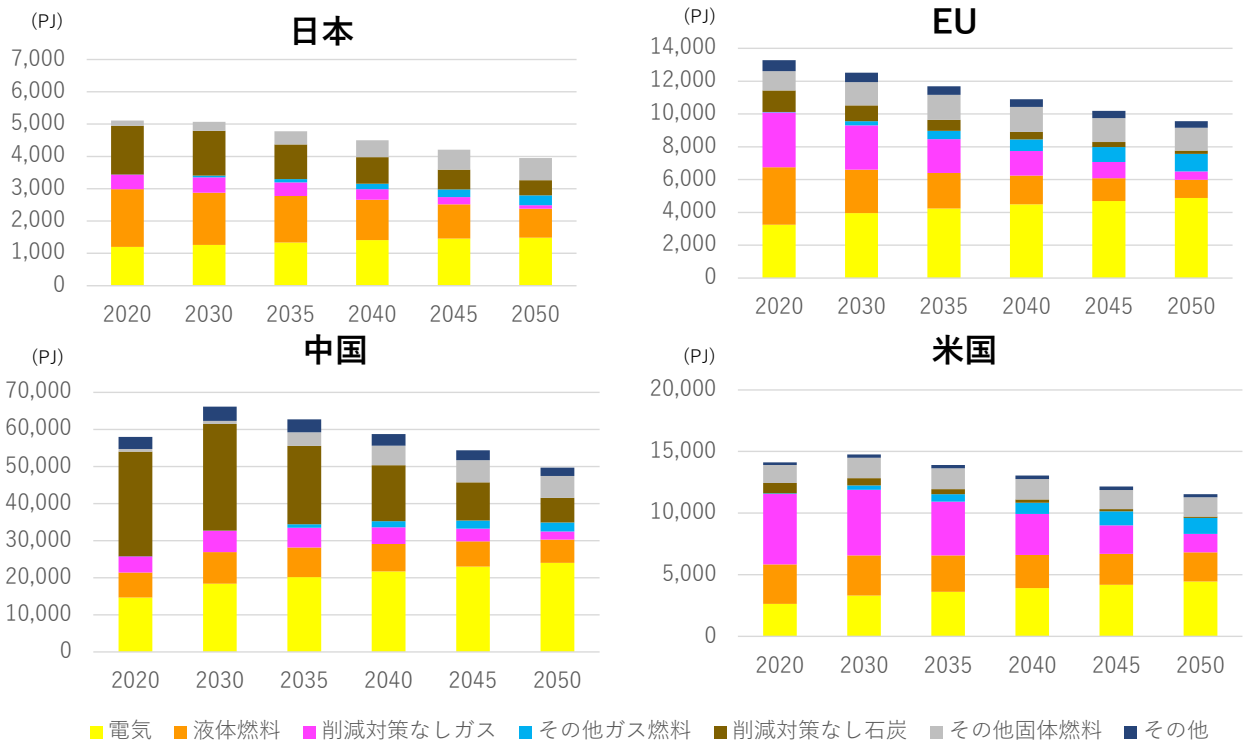


図 6.3.1-10　4 カ国の産業部門のエネルギー種別最終エネルギー消費（APS）

次に、APS における 4 カ国の運輸部門のエネルギー種別エネルギー消費量を示す。縦軸のスケールの比は、日本：EU：中国：米国＝1：5：8：10 である。この部門でのみ、米国が中国を上回っている。

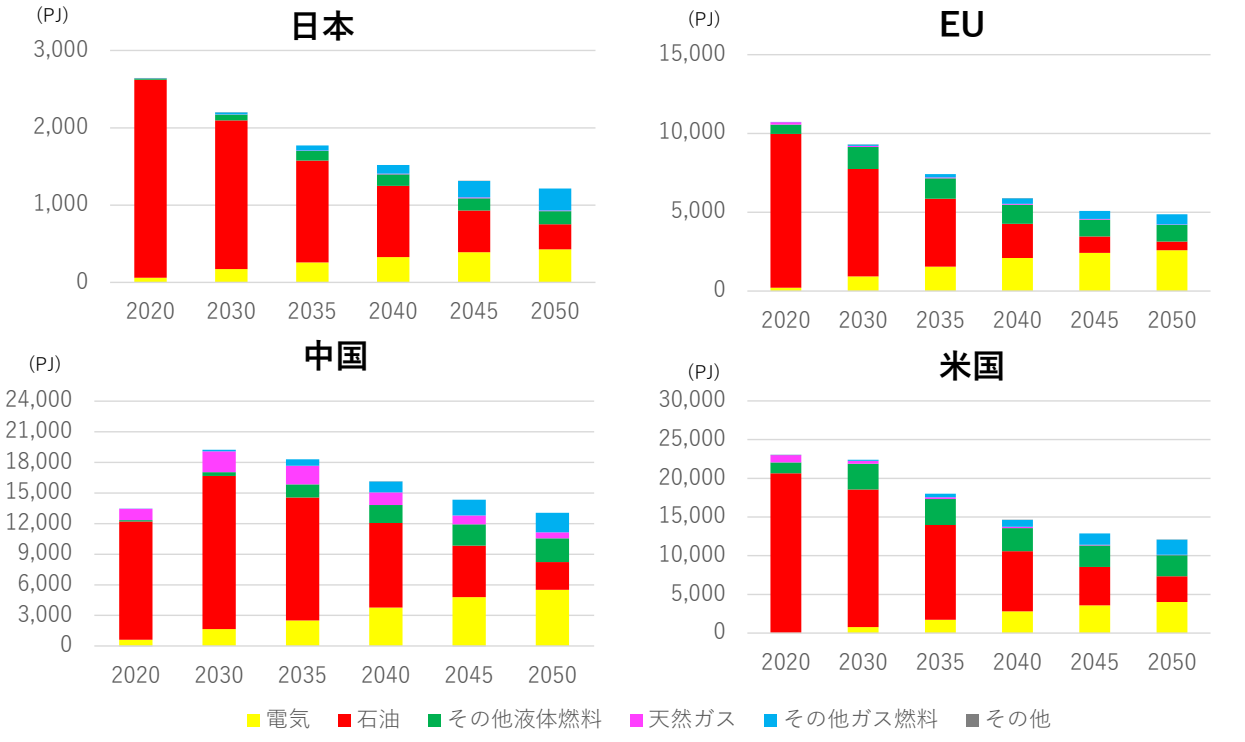


図 6.3.1-11　4 カ国の運輸部門最終エネルギー消費（APS）

運輸部門の特徴は、石油の割合が大きいことで 2020 年時点ではどの国においても 9 割以上が石油である。いずれの国においても石油が大きく低下していき、電化が進んでいくことは共通である。電気以外の石油の代替燃料として、日本ではその他ガス燃料[12]が、中国では天然ガスが、EU と米国においてはその他液体燃料[13]が目立って増加しているという特徴がある。

次に、APS における 4 カ国の民生部門のエネルギー種別エネルギー消費量を示す。縦軸のスケールの比は、日本：EU：中国：米国＝1：4：6：6 である。

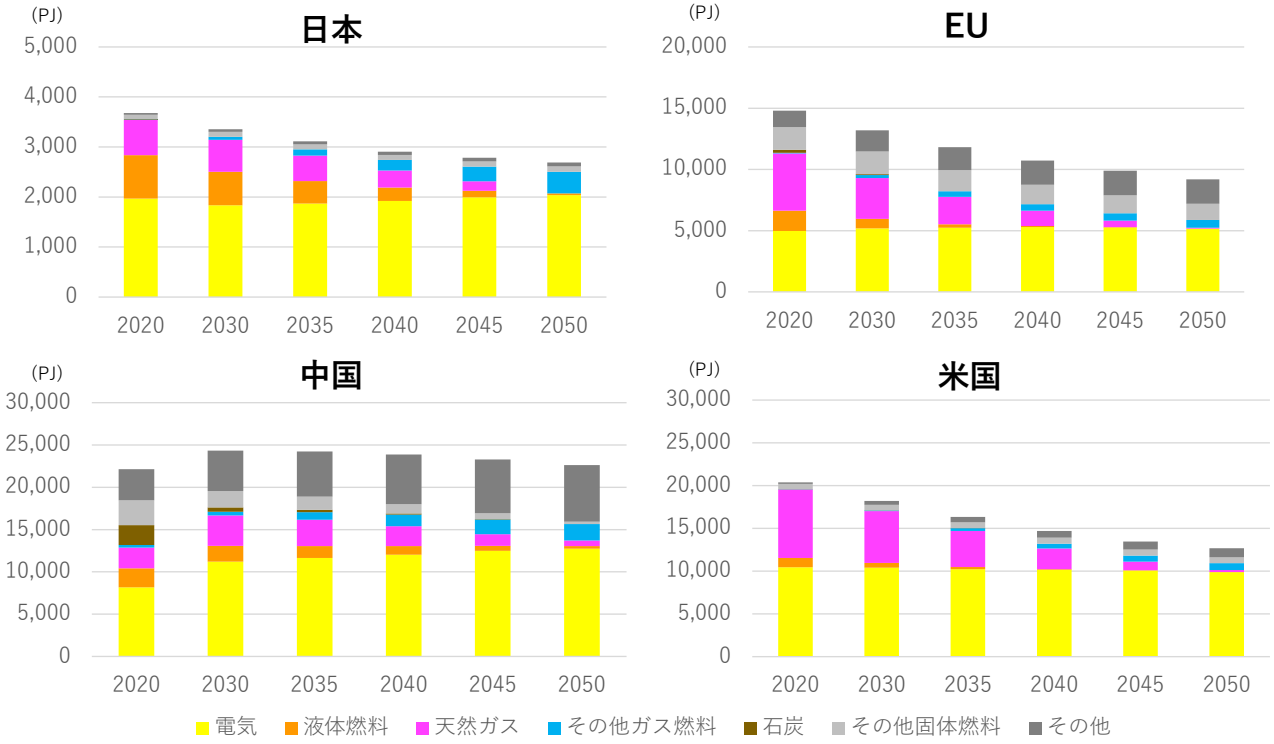


図 6.3.1-12　4 カ国の民生部門最終エネルギー消費（APS）

民生部門はもともと電化が進んでいる部門である。上図からは、民生部門のエネルギー消費が低下していく中で、電気の消費量は漸増してその割合が高まっていくことが示されている。EU と中国において 2050 年まで残るその他固体燃料は、無排出のバイオマスと考えられる。中国の「その他」については不明である。

③　発電電力量

次に、4 カ国の APS の発電電力量とその電源構成を示す。縦軸のスケールの比は、日本：EU：中国：米国＝1：3：10：5 である。

[12] 燃料電池車用の水素と思われるが、表 6.3.1-5 に示す通り Annex A からは定かではない。
[13] バイオ燃料と水素と炭素による合成燃料（いわゆる e-fuel）の 2 つの可能性があるが、表 6.3.1-5 に示す通り Annex A にその区分は示されていない。

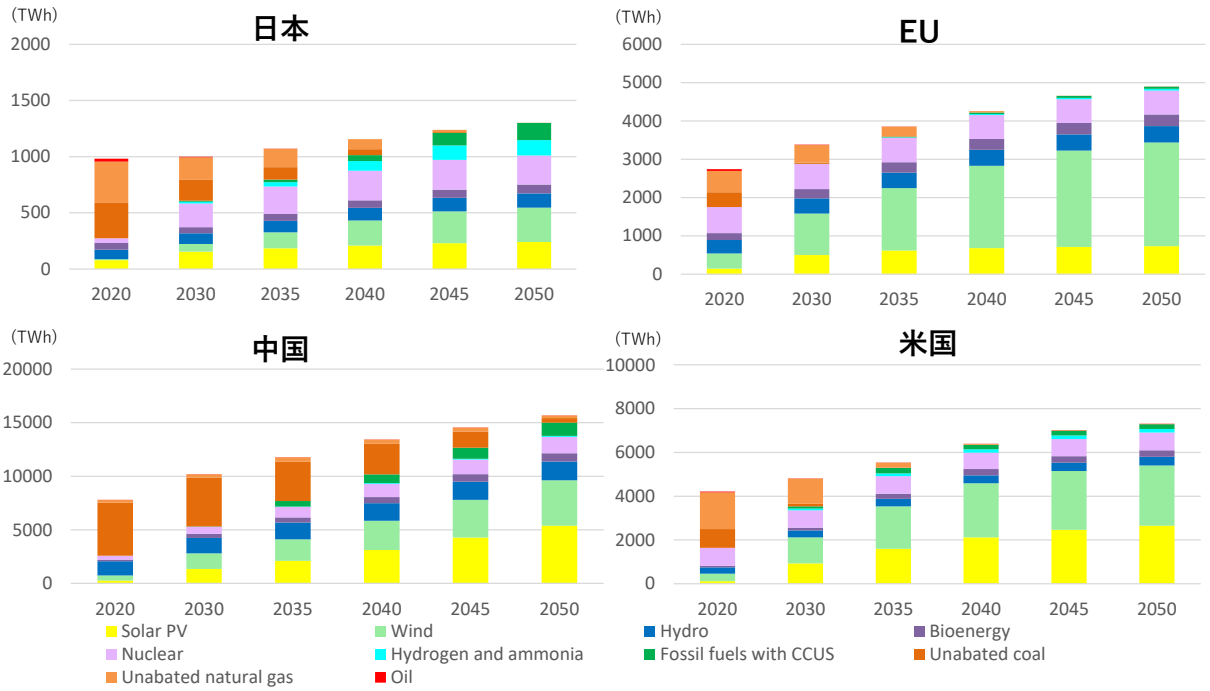


図 6.3.1-13 4 カ国の発電電力量とその電源構成（APS）

日本、EU、米国は、2050 年には化石燃料の発電がなくなっているが、その電源構成は異なっている。EU と米国では 2050 年に、変動性再エネ（VRE）である太陽光と風力の合計が 7 割となっている。一方で、日本では 2050 年に、VRE の割合は 4 割、再エネ合計で 6 割、原子力が 2 割、水素・アンモニア＋CCUS 付き火力が 2 割である。これは、日本の電力系統が欧米のようにメッシュ状ではなく串型でグリッド間連系が弱く、融通性および柔軟性に乏しいこと、地理的な制約から経済的な VRE 導入に限界があること、VRE と共に増加する調整力ニーズをアンモニア・水素発電（石炭・LNG 火力発電所の燃料転換）、CCUS 付き火力により提供する必要があること、などを IEA が考慮しているためと考えられる。以下に、4 カ国における水素・アンモニアの割合を示す。

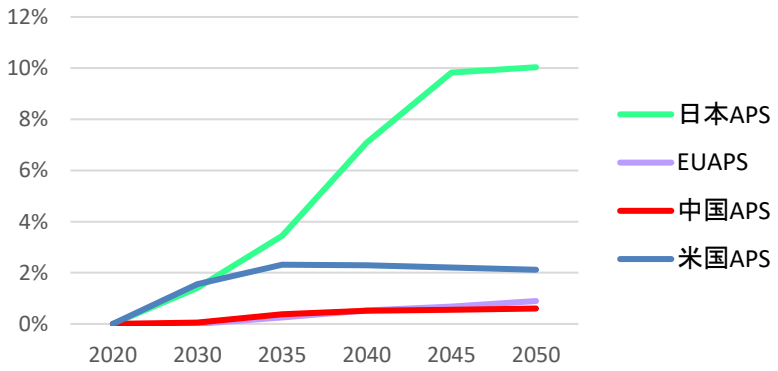


図 6.3.1-14 4 カ国の発電電力量に占める水素・アンモニアの割合（APS）

日本が際立って高い増加を示しているが、絶対量で比較すると 2050 年の米国の水素・アンモニア水素・アンモニアの発電電力量は日本とほぼ同量である。

④　発電設備容量

次に、APS における 4 カ国の発電設備容量の電源構成を示す。縦軸のスケールの比は、日本：EU：中国：米国＝1：3：10：5 である。

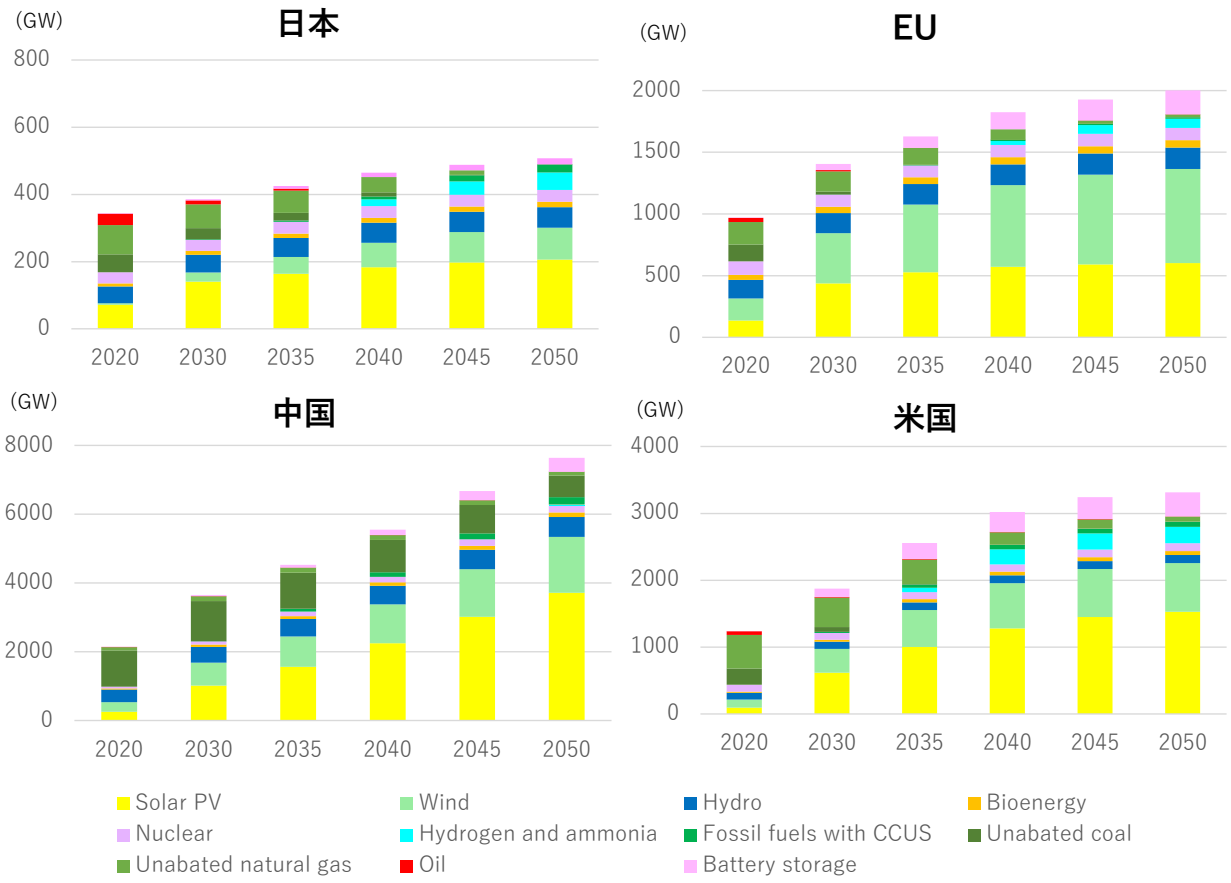


図　6.3.1-15 4 カ国の電源別発電設備容量（APS）

発電電力量の電源構成と同様に、発電設備容量についてもその電源構成は国によって異なっている。いずれの国においても太陽光が最大の設備容量、次いで風力となっており、これは利用率の違いを反映している。原子力に注目するために、上図では太陽光と風力のボリュームとの対比で見えにくいことから、原子力単独で STEPS との比較を行った図を以下に示す。

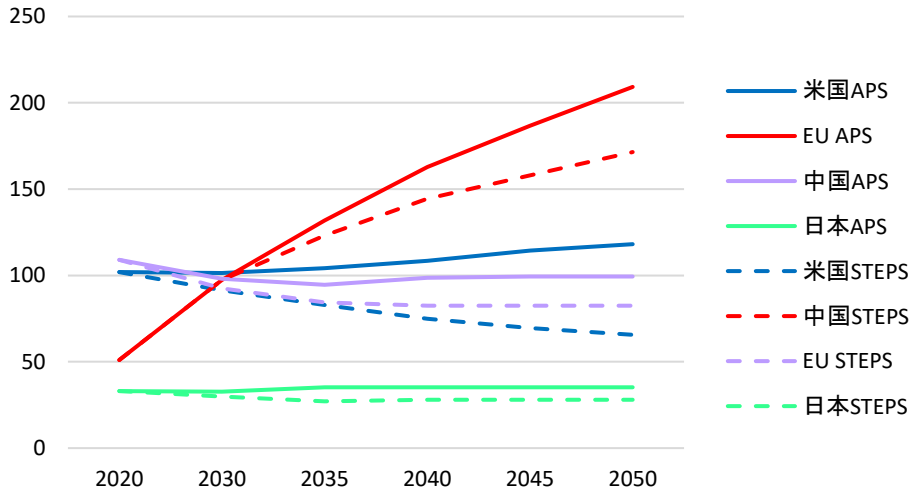


図 6.3.1-16 4カ国の原子力の発電設備容量（APS）

いずれの国においても、APSではSTEPSより原子力の設備容量は大きくなっている。日本と米国ではSTEPSでは現状から減少するが、APSでは増加している。即ち、いずれの国においても、原子力がネットゼロ達成に一定の役割を担っていることが示されている。

次に、改めて日本の電源構成に焦点を絞ってみたい。以下に、APSにおける日本の発電電力量の電源別シェアと発電設備容量を示す。

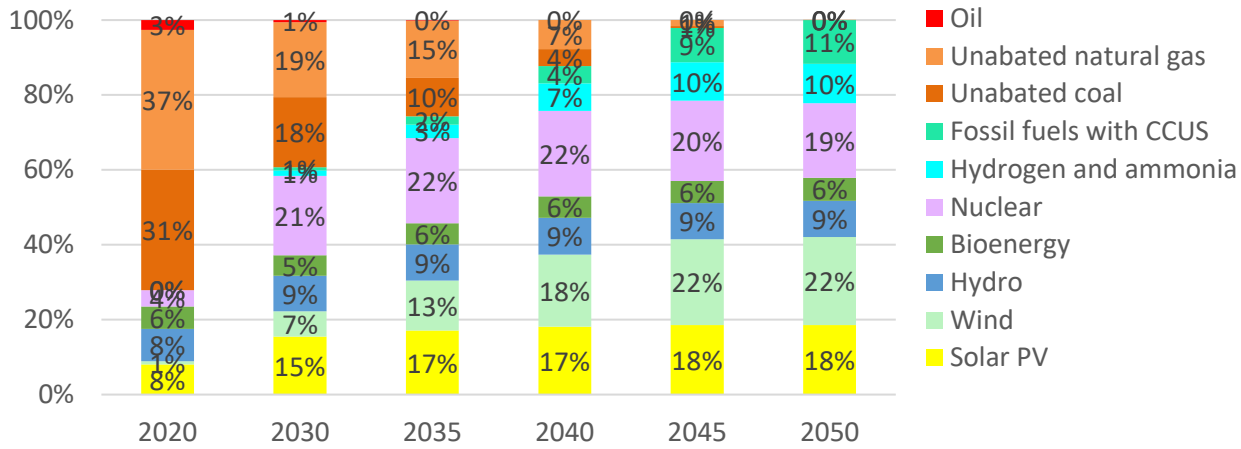


図 6.3.1-17 日本の発電電力量における電源別シェア（APS）

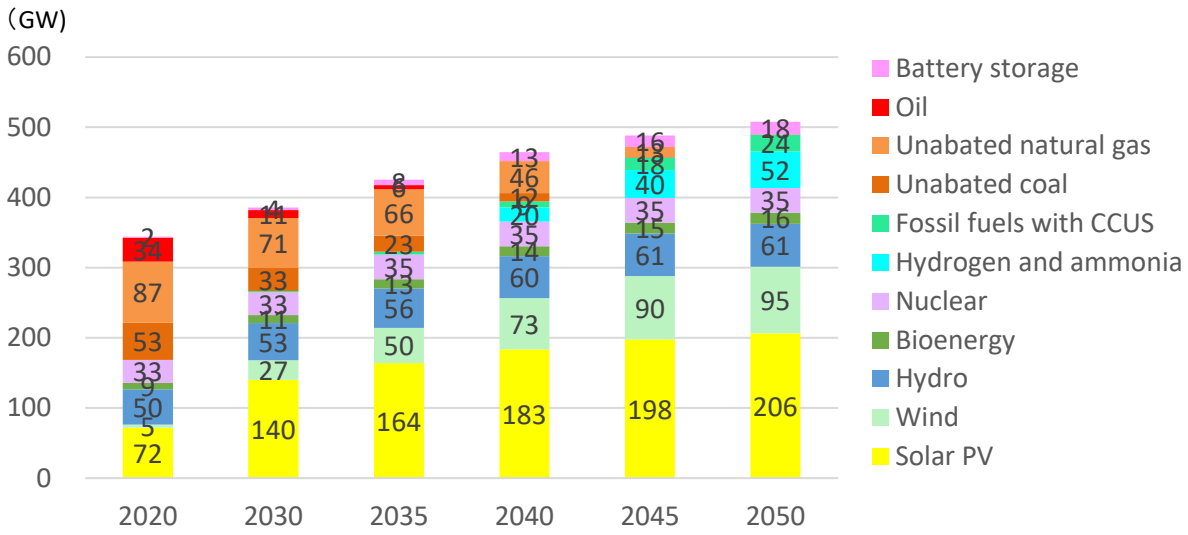


図 6.3.1-18 日本の発電設備容量（APS）

発電電力量シェアにおいてはほぼ横ばいの太陽光は、設備容量で見ると着実に増加しており、2050 年には 200GW を上回り、断トツで日本最大規模の電源である。風力は 2045 年には発電電力量で最大のシェアを占める電源となり、2050 年には 95GW（現状の LNG 火力発電所を上回る量）になる。太陽光と風力を合計した VRE は、2050 年には発電電力量シェアでは 4 割、発電設備容量は 6 割を占める。

原子力に注目すると、図 6.3.1-17 が示すように原子力のシェアは 2030 年以降約 20%で維持されている。これだけのシェアを維持するための設備容量を示す図 6.3.1-18 によれば、2030 年から 2035 年にかけて原子力発電所は 2 GW 増加して、その後 35GW を 2050 年まで維持している。これは、2 GW の原子力発電所が新増設されたことを意味するだけでなく、既存の原子力発電所の年齢を考慮すると、多くの原子力発電所の寿命が延長され、また寿命で廃止されていく容量を補うだけのリプレースが行われると想定されていることを意味する。

なお、現状で日本は合計 28GW の揚水発電所を保有するが、表 6.3.1-6 に示す通り WEO2021 の AnnexA には揚水の項目はなく、水力（Hydro）として揚水を含めた値が記載されている。

⑤ CO_2 排出、回収・除去

APS における 4 カ国の CO_2 排出量、回収・除去量を示す。CO_2 排出量はネット電力部門（黄）、ネットその他エネルギー部門（茶）、ネット最終消費部門（グレイ）に区分している。縦軸のスケールは、日本：EU：中国：米国＝1：3：10：5 である。なお、表 6.3.1-6 に記載した通り、排出量についてはネット（オフセット後）のデータのみでグロス（オフセット前）のデータがないこと、回収、除去については合計値のみで部門別の値がないため、どの部門のグロス排出がどれだけオフセットされているのかは不明[14]である。

[14] 不明ではあるが、後段で、日本の産業部門のグロス排出量と CO_2 回収量の試算を示している。

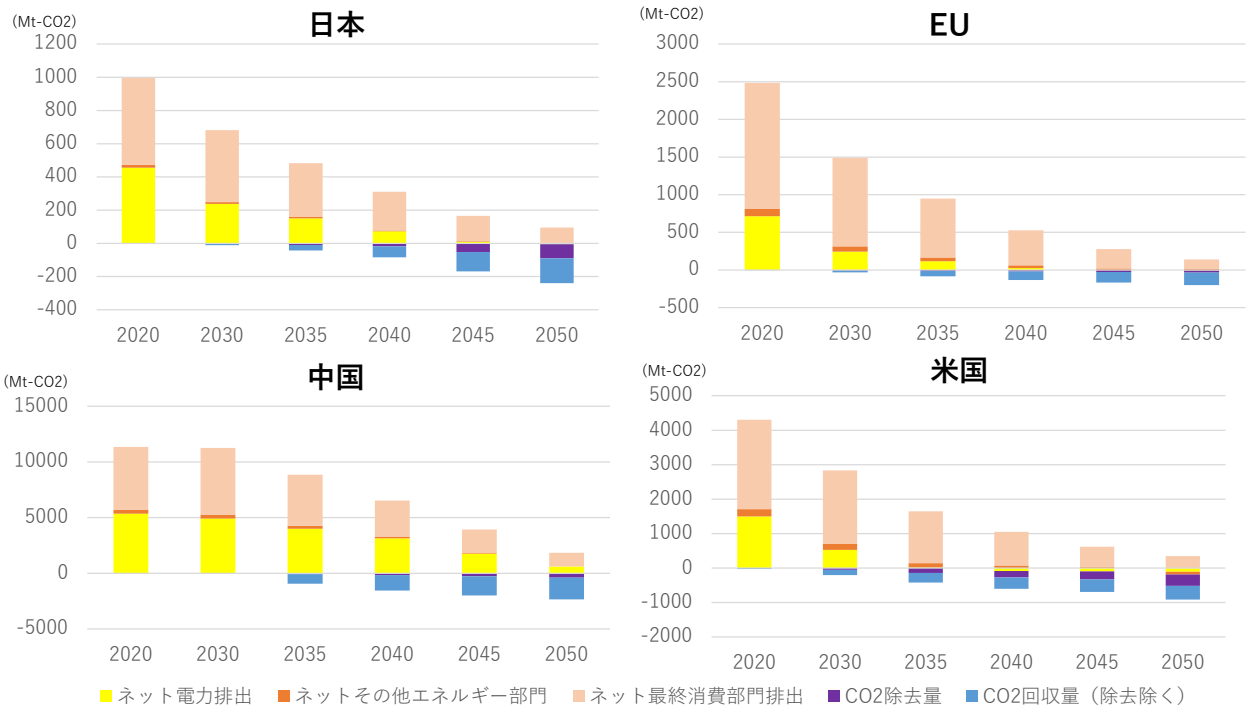


図 6.3.1-19　4 カ国の CO_2 排出および回収・除去（APS）

日本は、CO_2 回収の開始時期は 4 カ国の中で最も遅いが、その伸び率は大きく、2050 年の回収量（2.3 億 t-CO_2）は EU を上回り、除去量(8500 万 t-CO_2)は 3 倍以上である。中国は、排出量と同様に回収量も世界最大で、2050 年時点では 23 億 t-CO_2 と世界の CO_2 回収量の 6 割を占める。一方で除去量は 2050 年に、中国が 3.6 億 t-CO_2、米国が 3.3 億 t-CO_2 とほぼ同等で、この 2 カ国合計で世界の除去量の約 8 割を占める。

(4) ネットゼロ宣言国の分析：電化に注目

以上の分析により、ネットゼロには電化が大きな役割を果たすことが示されたことから、電化に焦点を当てた分析を行った。

以下に、4 カ国の発電電力量を APS と STEPS の比較で示す。

① 発電電力量

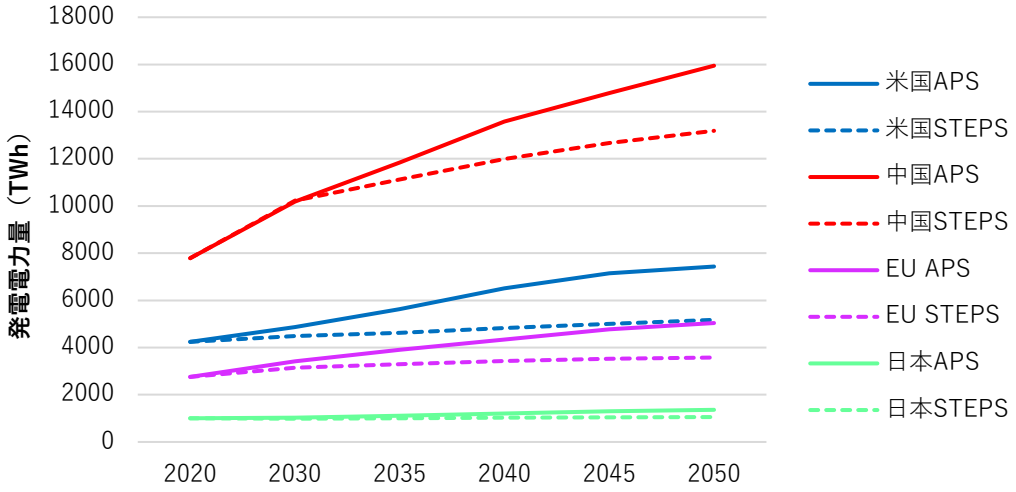


図 6.3.1-20 4カ国のシナリオ別発電電力量

いずれの国においても、APSの発電電力量がSTEPSを上回る。2020年から2050年にかけてのAPSの発電電力量の増加率は、日本30%、EU80%、中国100%、米国75%であり、日本が他より増加率が低いことがわかる。この理由は、以下の部門別電力消費量により説明が可能である。

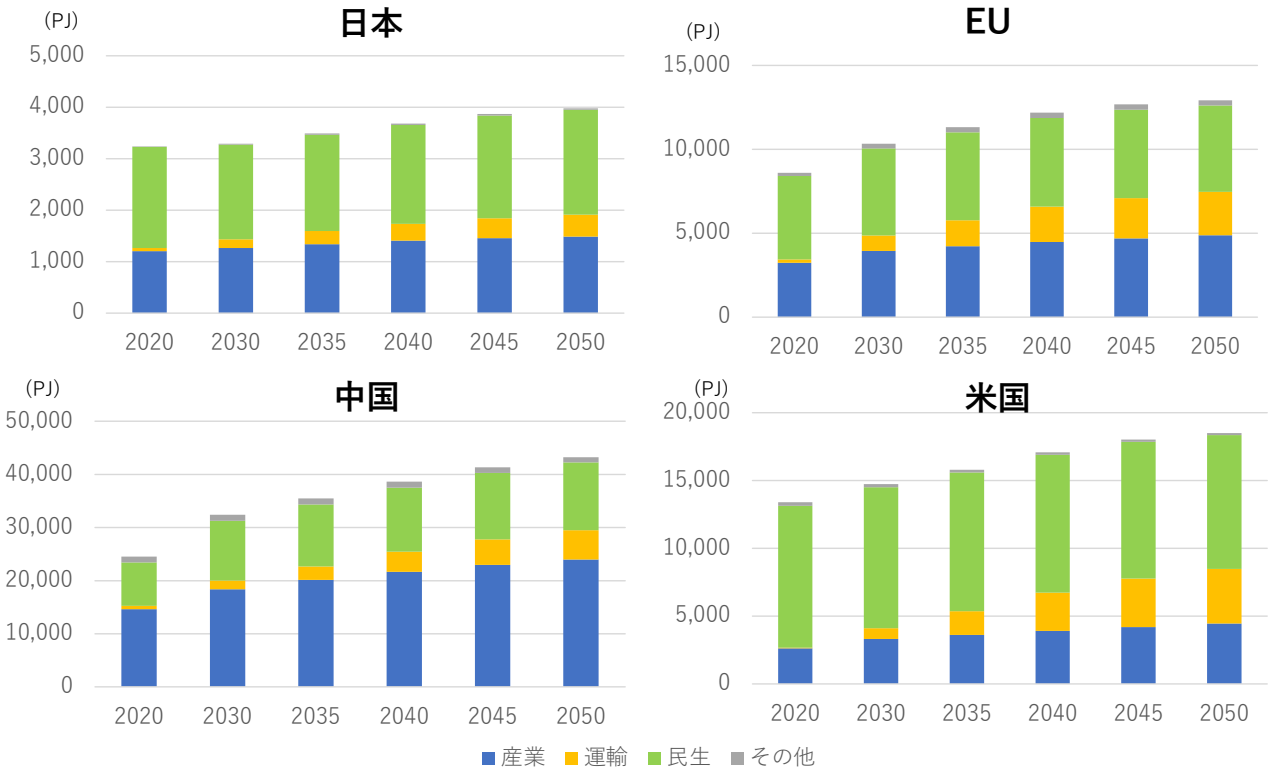


図 6.3.1-21 4カ国の最終エネルギー消費部門別電力消費（APS）

EU、米国では運輸部門で電力消費が大きく増加しているのに対して、日本では運輸部門の増加もそれほど大きくないのが、その差である。中国は EU、米国とは様相が異なり、2030 年までは排出制約がないため全ての部門で大きく電力消費が増加し、その後は産業で大きく、運輸で EU、米国よりは低い伸び率で電力消費が増加していく。

② 排出係数

次に、4 カ国の電力の CO_2 排出係数を APS、STEPS の比較で示す。

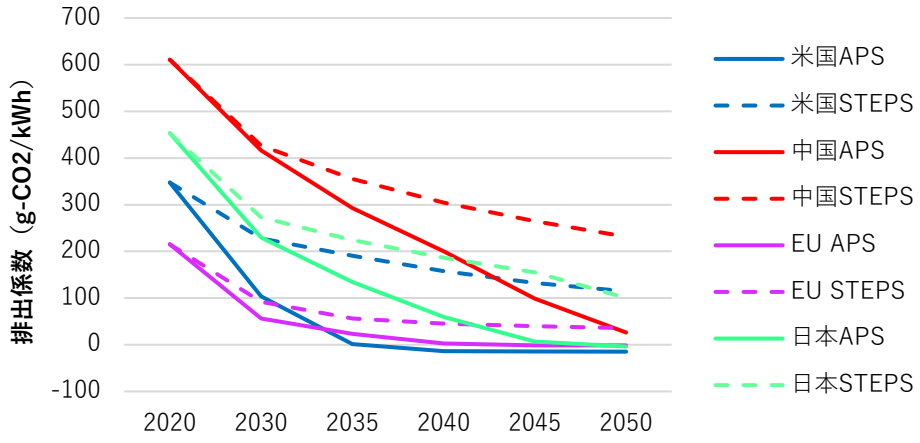


図 6.3.1-22 4 カ国のシナリオ別電力 CO_2 排出係数

米国は APS では 2035 年に排出係数がゼロになって NDC 通りに電力部門が炭素フリーになり、その後はマイナスに転じる。日本と EU も APS では 2050 年に排出係数がマイナスになる。中国の 2020 年の排出係数は EU の 3 倍と高い値であるが、APS では中国の排出係数は 2050 年に約 25g-CO_2/kWh と現状比で約 1/25 に低下する。

③ 部門別の電化率

以下は 4 カ国のシナリオ別部門別の電化率を示す。ここで電化率は最終エネルギー消費に占める電気エネルギーの割合とする。

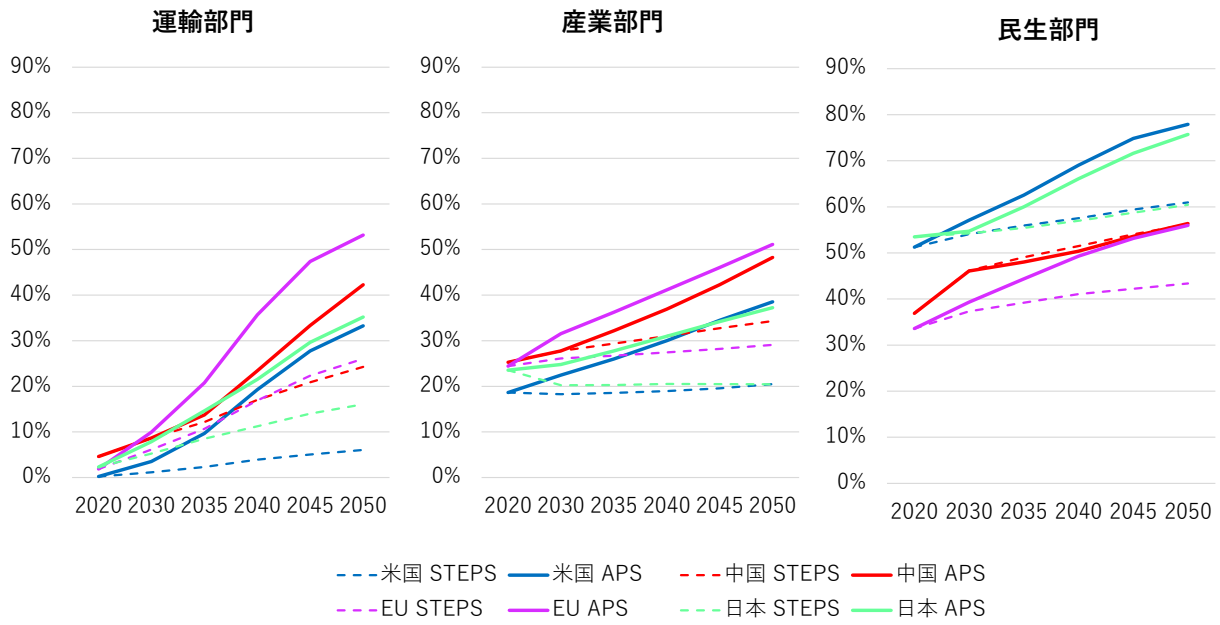


図 6.3.1-23　4 カ国のシナリオ別部門別電化率

運輸部門の電化が最も進むのは EU で 2050 年には 50%を超え、次いで中国、日本、米国の順である。

産業部門でも EU が先行、中国が欧州により近い位置で 2 位、日米が 3 位グループを形成しているが、その増加率（傾斜）には差がない。

民生では、現状でも電化が進んでいる米国と日本の電化が進み、2050 年には 80%近くに達する。現状でも電化率の低い中国と欧州は 2050 年にも 55%に留まる。日本、EU、米国の増加率には差がないが、中国は 2030 年以降の成長率が他より低い。

④　非電力の脱炭素

それでは、電化が難しい産業部門ではどのようにネットゼロを達成するのかということを考えてみる。以下に、APS における 4 カ国の最終消費部門別の CO_2 排出量を示す。

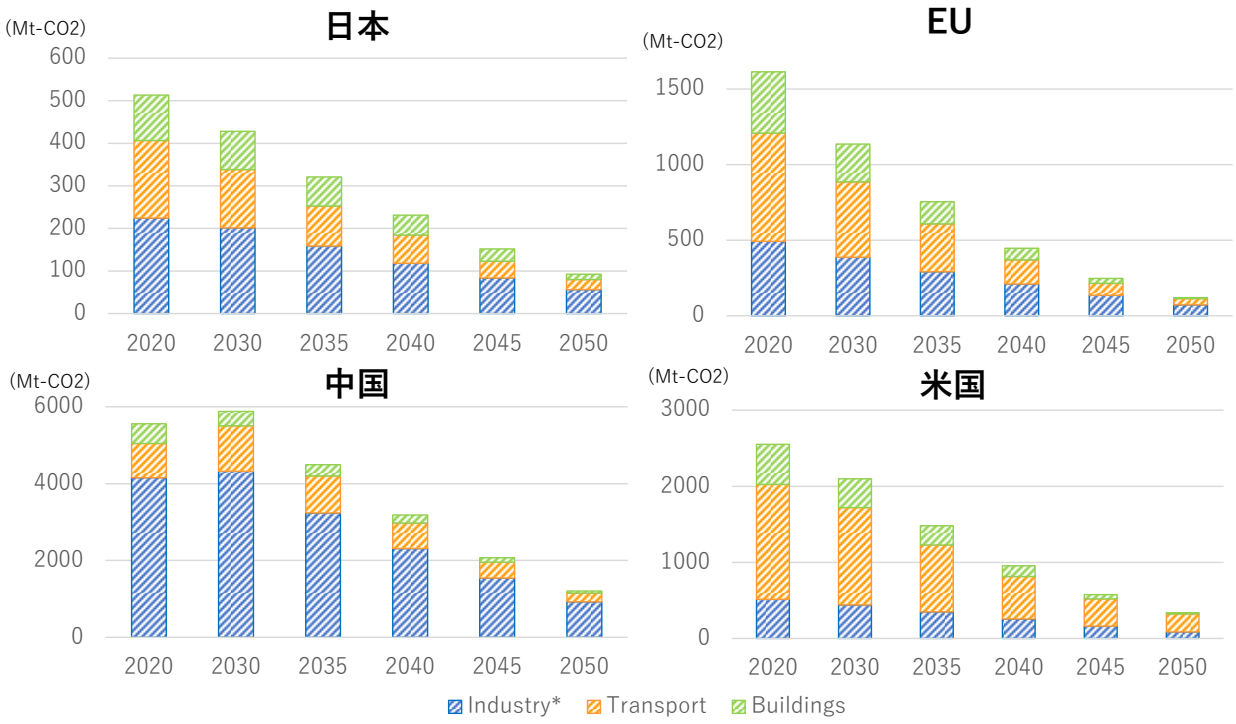


図 6.3.1-24 4 カ国の部門別の最終消費部門 CO_2 排出量（APS）

図 6.3.1-7（部門別最終エネルギー消費）は、産業部門のエネルギー消費量の経年の低下は小さいことを示していたが、上図では産業部門の CO_2 排出量が大きく低下していることが示されている。図 6.3.1-10（産業部門のエネルギー種別エネルギー消費）からは、産業部門には化石燃料が 2050 年まで残ることが示されており、それに伴う CO_2 排出が相当量あると考えられる、にも関わらずである。そこで、日本の産業部門について、2020 年の最終消費部門における燃料種別 CO_2 排出係数（g-CO_2/kJ）を算定[15]して、そこからグロスの産業部門 CO_2 排出量と、回収（CCUS）量を試算した。

[15] 燃料種別の最終エネルギー消費量と、最終消費部門における燃料種別 CO_2 排出量から、TFC 共通の石炭、石油、天然ガスの排出係数を算定可能。2020 年実績値から算定された値が 2050 年まで変わらないとして燃料別のグロス排出量を算定して、その合計値とネット排出量の差から CO_2 回収量を算定。

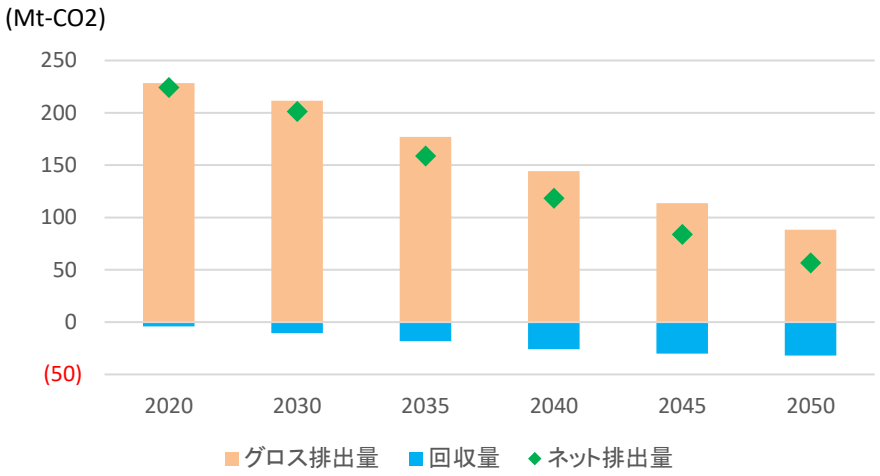


図 6.3.1-25 日本の産業部門の CO_2 バランス（APS）

この試算から、産業部門においては電化のみならず CO_2 回収を行って CO_2 排出量を低下させていることが確認された。2050 年には産業部門で 32Mt-CO_2 回収を行っている。鉄、セメントなどのいわゆる”hard to abate”とされる産業では、CCUS がネットゼロ達成の重要な役割を果たすということは、IEA の”Net Zero by 2050”に記載されており、WEO2021 でも同様の想定をしているということが確認できた。

6.3.2 IEA NZE と DNE21+の CN シナリオとの比較

IEA は、2021 年 5 月に、2050 年までに正味ゼロ排出を実現するためのシナリオとして、Net Zero Emissions by 2050 (NZE)シナリオを提示した [1)]。また、World Energy Outlook (WEO) 2021[2)]にも NZE シナリオが掲載された（前節参照）。シナリオ分析は、従来から計量経済モデルを用いてシナリオ策定を行っている WEO（文献 3)など）と、技術積み上げの最適化型モデルでエネルギー対策技術の分析・評価を行っている Energy Technology Perspectives (ETP)[4)]の合同作業として策定したとされている。ただし、全体のシナリオの整合性は、WEO の計量経済モデルで策定されているとみられる。

図 6.3.2-1 に NZE における世界の部門別 CO_2 排出量の推移を示す。2050 年では若干の負排出は見られるものの（1 $GtCO_2$/yr 程度）、各部門ともにほぼグロスでゼロ排出となっている。図 6.3.2-3 に NZE における世界の最終エネルギー消費量を示す。産業部門で一部、CCS 無しの化石燃料利用が見られるものの、基本的にいずれの部門でも電力利用が大幅に増加し、その他として、バイオマス、水素系燃料の拡大が少し見られるというシナリオとなっている。これは、図 6.3.2-1 で見られるように負排出が小さいことと連動した結果である。発電部門では、再エネ比率が相当高いシナリオとなっている（後述の図 6.3.2-7 を参照）。

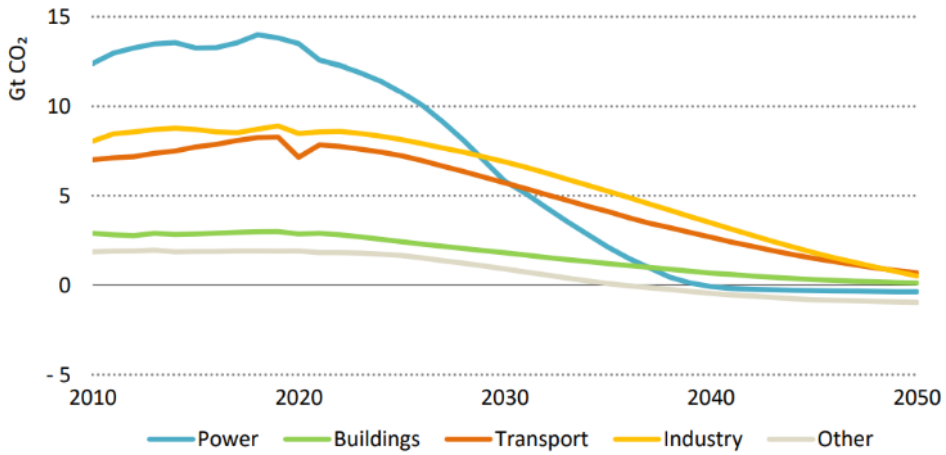


図 6.3.2-1 IEA NZE の世界の部門別 CO_2 排出量 [1)]

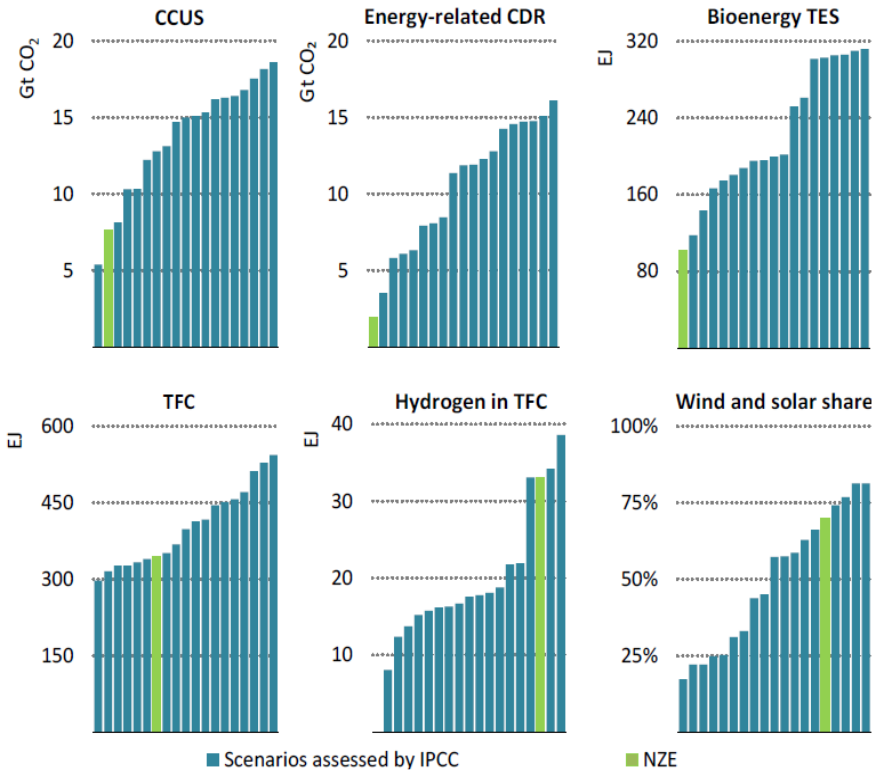


図 6.3.2-2 IEA Net Zero by 2050 (NZE)シナリオと IPCC SR15 シナリオとの比較 [1)]

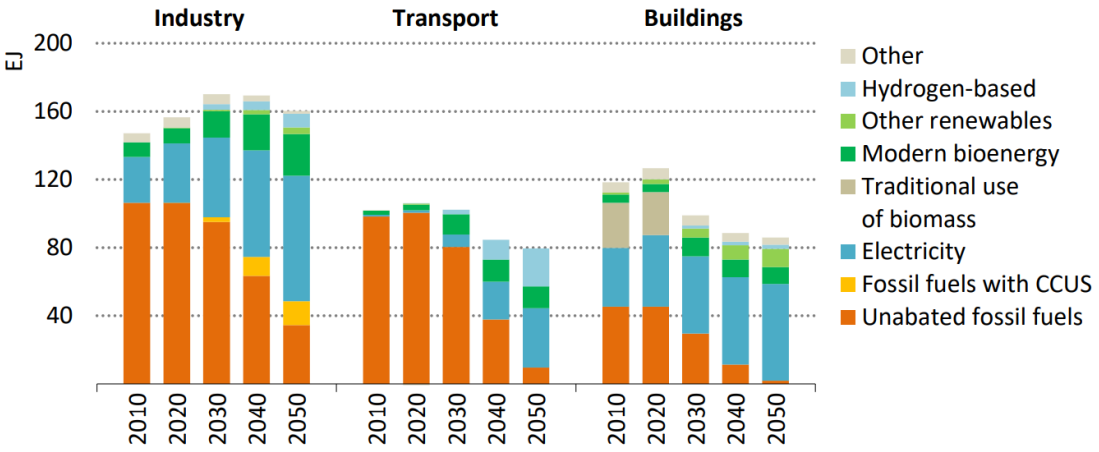


図 6.3.2-3 IEA NZE の世界の最終エネルギー消費量 [1)]

このように、IEA NZE は、再エネ＋電化に強く依拠したシナリオとなっている。しかし、第 5 章で示した DNE21+によるシナリオ分析結果や、また、IPCC 第 5 次評価報告書（AR5）[5)]や 1.5℃特別報告書（SR15）[6)]では、2℃や 1.5℃シナリオにおいて収集された多くの統合評価モデル（IAM）によるシナリオは、負の排出技術に依拠したシナリオを提示する傾向が強い。そこで、本節では DNE21+のモデル前提条件を修正して、IEA NZE シナリオに近いエネルギー対策が費用効果的な結果として推計される条件を探索した。

(1) 感度解析ケースの想定

IEA NZE シナリオに近いエネルギー対策が費用効果的な結果として推計される条件を探索するため、表 6.3.2-1 のような感度解析ケースを想定して分析を行った。ケース(I)の EV 関連を含む乗用車の車両コストの想定は表 6.3.2-2 に、変動性再エネのコスト・ポテンシャルの想定は図 6.3.2-4 に記載した。

表 6.3.2-1 将来技術想定の感度分析ケース

感度解析の想定ケース	説明
参考値のケース	総合資源エネルギー調査会提示シナリオ
(I)EVコスト、再エネコスト低位	【再エネ＋電化が促進しやすい条件設定】 ・自動車用バッテリーのコストが総合資源エネルギー調査会提示の「参考値のケース」よりも大幅に低下すると想定 ・再エネコストが「再エネイノベケース」以上に風力発電のコストが低下すると想定、同時に風力発電のポテンシャルも標準想定よりも大きいと想定
(II)DACコスト高位、バイオマス資源量低位	【負の排出技術の利用が難しい想定に】 (I)に加え、 ・DACのコストが2020年想定値（実績値に近いもの）からコスト低減しないと想定 ・商用バイオマスの供給量の上限を世界全体で年間50EJと想定（非商用と合わせると73EJ。参考値のケースの分析結果の半分程度）
(III)CO2貯留可能量低位	【CO_2貯留の利用が難しい想定に】 (II)に加え、 ・標準の技術想定シナリオでは、国内／地域の総貯留ポテンシャルに対し、2030年までは年間0.02%、それ以降は年間0.04%ずつ貯留量を拡大可能と想定しているが、CO_2貯留の拡大率を保守的に見積もり、全ての時点で年間0.004%と想定

表 6.3.2-2 感度分析ケースの小型乗用車に関する想定

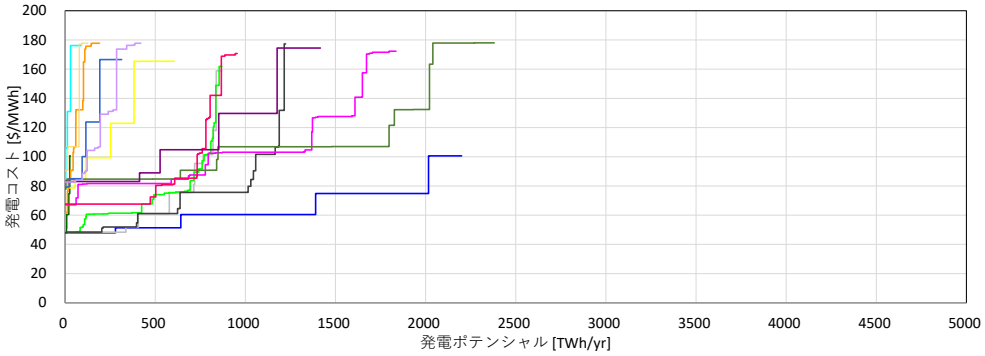
参考値のケース

	2015	2020	2030	2050
在来型内燃自動車	170.0	170.0	180.0	185.0
ハイブリッド車（ガソリン）	210.0	208.6	202.4	201.2
プラグインハイブリッド車（ガソリン）	270.3	248.3	219.2	209.6
純電気自動車（EV）	311.0	305.0	265.0	225.0
燃料電池自動車（FCV）	597.5	514.3	387.7	244.4

EV コスト低位ケース

	2015	2020	2030	2050
在来型内燃自動車	170.0	170.0	180.0	185.0
ハイブリッド車（ガソリン）	210.0	208.0	201.2	200.6
プラグインハイブリッド車（ガソリン）	270.3	243.5	209.6	204.8
純電気自動車（EV）	311.0	285.0	225.0	205.0
燃料電池自動車（FCV）	597.5	514.3	387.7	244.4

参考値のケース



再エネコスト低位ケース（風力）

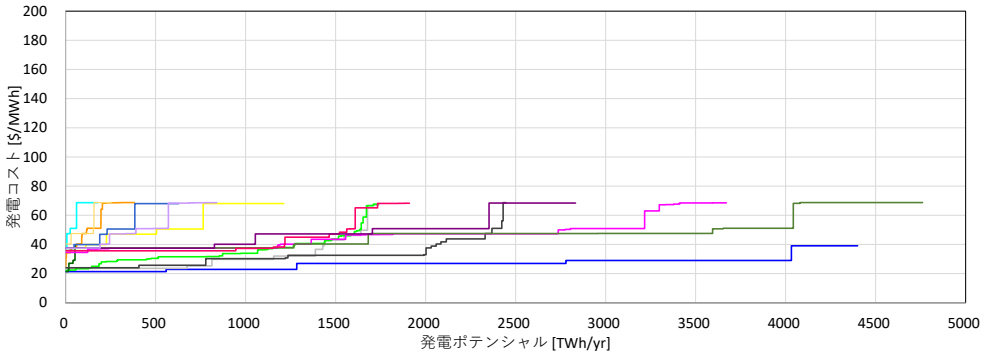


図 6.3.2-4 感度分析ケースの風力コスト・ポテンシャルの想定

(2) 分析結果

表 6.3.2-1 に示した感度解析ケースについて、DNE21+モデルを用いて分析を行った。図 6.3.2-5 に世界の部門別 CO_2 排出量を、図 6.3.2-6 に世界一次エネルギー供給量を、図 6.3.2-7 に世界発電電力量を、図 6.3.2-8 に世界最終エネルギー消費量を示す。

図 6.3.2-5 で見られるように、参考値のケースでは、世界排出量は半減くらいまでで、残る排出量については植林、BECCS や DACCS 等の CDR でオフセットすることが経済合理的である。再エネコストおよび EV コストを更に低減する想定をおいた場合（ケース I)、若干 CDR の利用が低下するものの、大きな差異は見られない。DAC の費用低下を想定せず、また、バイオマス利用制約を厳しく想定した場合（ケース II)、負の排出量が半分程度になるが、それでも大きな依存が見られる。CO_2 貯留可能量を直接的に制約すると（ケース III)、負排出も抑制されるが、それでも 10 $GtCO_2/yr$ 程度残っている。

図 6.3.2-6 は一次エネルギー供給量で示したものである。ケース(III)になると、BECCS、DACCS を含めて、CCS 制約が強まることで、結果として、再エネによるエネルギー供給量が増大している。ケース(III)では、風力と太陽光の内訳の差異は残っているものの、再エネ、原子力、化石燃料間の比率およびエネルギー供給総量については、NZE と近い推計になった。

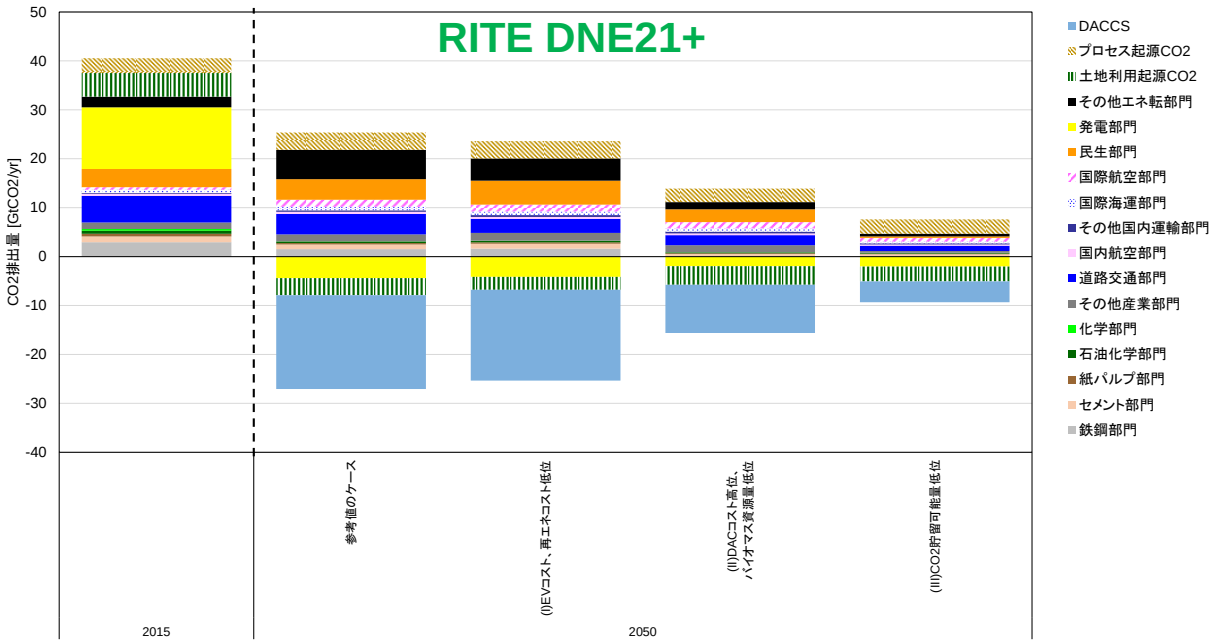


図 6.3.2-5 感度分析ケース別の世界の部門別 CO_2 排出量

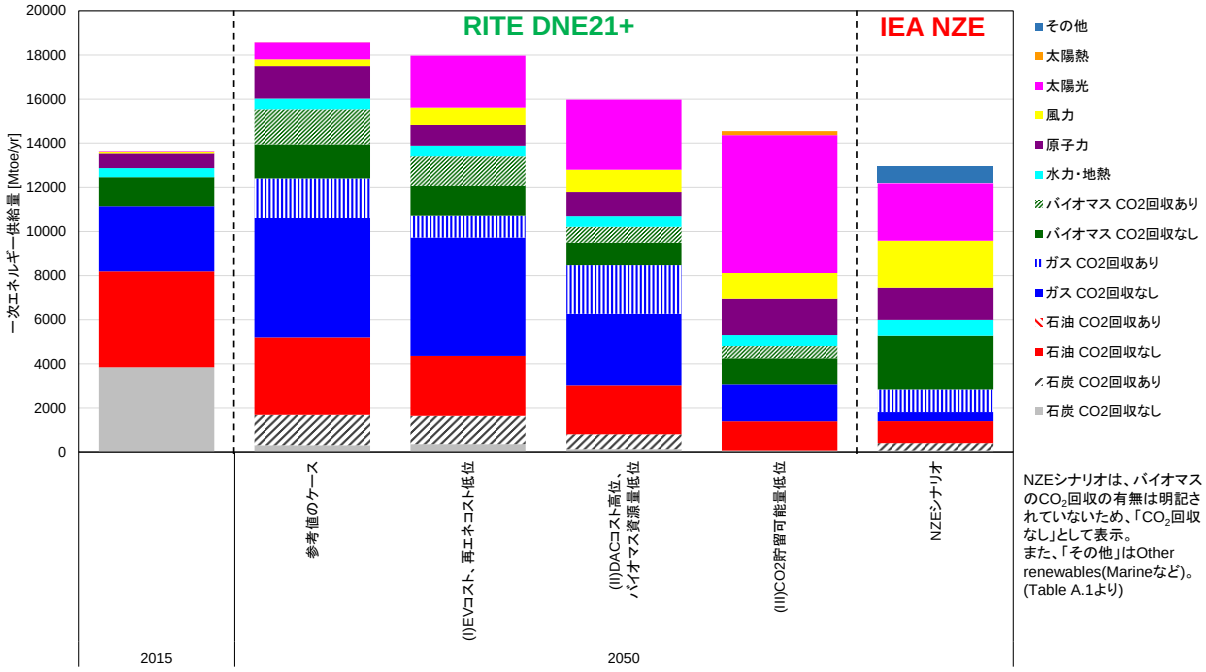


図 6.3.2-6 感度分析ケース別の世界一次エネルギー供給量－ IEA NZE シナリオとの比較－

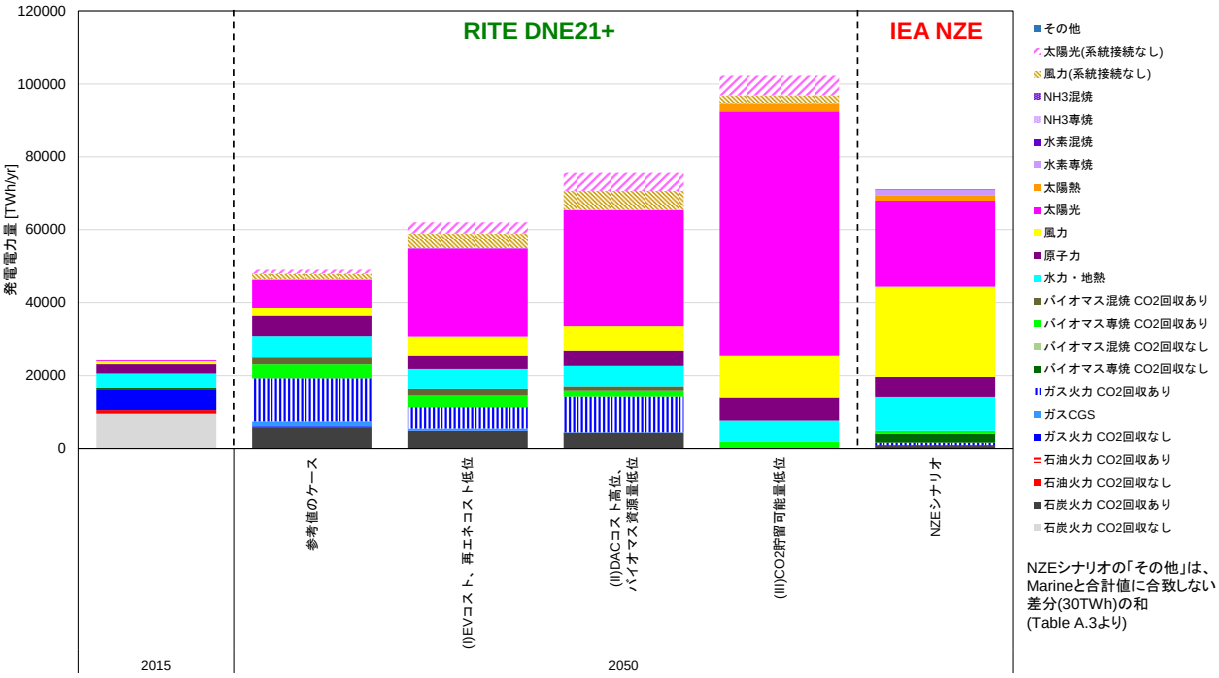


図 6.3.2-7 感度分析ケース別の世界発電電力量－ IEA NZE シナリオとの比較－

図 6.3.2-7 の発電電力量で比較すると、総発電電力量はケース(II)で DNE21+と NZE が似通った結果であり、総発電電力量の再エネ比率でみると、ケース(III)でようやく DNE21+と NZE が似通った結果になっている。ただし、ケース(III)では、DNE21+は、変動性再エネの導入量の増大に伴って蓄電ロスが大きくなっており、総発電電力量は NZE よりも大きくなっている。次に示す最終エネルギー消費量の図 6.3.2-8 では、電力消費量は DNE21+のケース(III)と IEA の NZE では似通っていることからすると、NZE では蓄電ロスを DNE21+よりも小さく想定しているように推察される。

図 6.3.2-8 では、DNE21+のシナリオでは、最終エネルギー消費量が、参考値のケースおよびケース(I)～(II)では天然ガス利用がむしろ伸びる結果を示している（その分、CDR でオフセット）。ケース(III)では、それらシナリオに比べると、だいぶ抑制されているが、それでも NZE はより小さなエネルギー消費量となるシナリオとなっている。一方、エネルギー構成としてはケース(III)と NZE は比較的に近く、電力化率が相当高いシナリオとなっている。

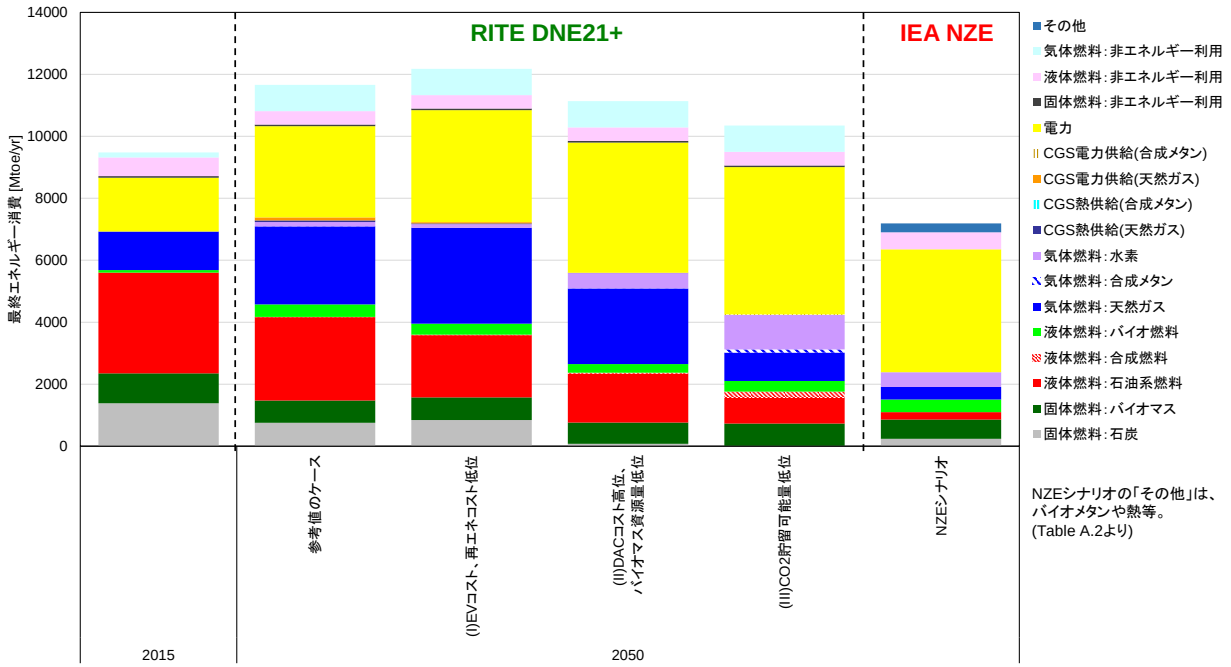


図 6.3.2-8 感度分析ケース別の世界最終エネルギー消費量－ IEA NZE シナリオとの比較－

表 6.3.2-3 に各ケースにおける 2050 年の CO_2 限界削減費用（炭素価格）と、IEA NZE および IPCC SR15 において収集、整理された 1.5℃シナリオの炭素価格を示す。IPCC のシナリオにおいては、この時点で DACCS を考慮したシナリオ分析はないとされる。DACCS が少ないケース(III)と比較すると、IPCC SR15 と DNE21+のシナリオ分析結果の限界削減費用は整合性の高いものとなっている。一方、DNE21+のシナリオ分析における「参考値のケース」の限界削減費用と IEA NZE の限界削減費用を比べると、日本を除けば、IEA NZE と大きな差異はない。しかし、NZE に相対的に近いエネルギー構成を示したケース(III)の炭素価格を NZE と比較すると、ケース(III)の炭素価格は、NZE よりも相当高い水準に評価された。このように、NZE と IPCC SR15 もしくは DNE21+の評価を比較すると、NZE の炭素価格は、相当低い水準を想定していることがわかる。

技術の将来見通しには大きな不確実性が伴うため、NZE が不適切ということは言えないが、本感度解析結果や IPCC での多くの IAM の分析結果からすると、IEA NZE は相当楽観的に再エネ、電化を想定して、結果、炭素価格は相当低く、CDR への依拠が小さいシナリオとなっているように見受けられる。一方、先進国や中国での炭素価格は 200～250 $/tCO_2$ と見込まれており、安価とは言え、この水準であれば費用効率的には、DACCS はともかく、それ以外の CDR についてはもう少し経済性が高く評価されても良いようにも思われる。経済性とは関係なく、社会的な制約を想定した上でのシナリオとなっている可能性もあるように思われるが、それはモデルの評価基準の不透明性にもなってしまうため、シナリオをより良く理解しておく必要がある。

表 6.3.2-3 各ケースにおける 2050 年の CO_2 限界削減費用（炭素価格）比較

	日本	米国	EU	中国	その他
DNE21+					
参考値のケース	780	248	314	241	
(I)EVコスト、再エネコスト低位	618	169	223	169	
(II)DACコスト高位、バイオマス資源量低位	778	330	330	330	
(III)CO2貯留可能量低位	1209	905	905	905	
IEA NZE	250			200	55
IPCC SR15					
Below 1.5C	700～4000程度(25-75%タイル) (全レンジ：245～14300)				
1.5C low OS	400～1000程度 (25-75%タイル)				

単位： USD/tCO2 (in 2019 price)、ただしSR15は (in 2010 price)

(3) IEA NZE との比較からの示唆

本節では、2050 年カーボンニュートラルについて、将来の様々な技術変化や社会制約の変化の可能性についてシナリオ分析した結果を示した。そこでは、IPCC AR5 や SR15 で示されたような IAM による多くのシナリオ分析結果と同様に、費用対効果の高い対策として、1)再エネの拡大、電化の促進という方向性は示されたが、一方で、これも他の IAM 同様に、2) CDR などの負の排出技術（NETs）の活用も費用対効果が高い対策という結果が示された。一方、IEA NZE では、前者の 1)に極めて強く依拠したシナリオとなっており、後者 2)についての依拠が小さいシナリオとなっている。

そこで、ここでは、IEA NZE に近い 1)に強く依拠したシナリオが経済合理的なシナリオとして導き出される条件の探索を行った。将来の技術の見通しは不確実であるものの、再エネと EV の更なる相当なコスト低減を想定したとしても、経済合理的な対策としては、NZE シナリオに近いシナリオを得ることはできなかった。CCS 等について、社会的な制約などが強いという暗黙的な想定をおいて初めて、似通ったシナリオが導出された。しかしこのときは、NZE が示しているような排出削減費用よりも、ずっと高い排出削減費用が推計された。WEO が利用している、World Enregy Model はシミュレーション型の計量経済モデルであり、必ずしも全体最適化されておらず、NZE シナリオについては、ここで分析した点などについて、慎重に留意する必要があると考えられる。

参考文献（第 6.3.2 節に関するもの）

1) IEA, Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector (2021)
2) IEA, World Energy Outlook (WEO) 2021 (2021)
3) IEA, World Energy Outlook (WEO) 2020 (2020)

4) IEA, Energy Technology Perspectives (ETP) 2017 (2017)
5) IPCC WG3, Fifth Assessment Report (2014)
6) IPCC, Specian Report on 1.5 °C (2018)

6.4 エネルギーイノベーションのビジネスモデルの調査

多くの国が正味ゼロ目標やカーボンニュートラル目標を表明し、速やかに低/非排出型のエネルギーシステムへ移行することが求められるようになっている。低炭素エネルギー技術開発の重要性が増しており、本節はスタンフォード大学の報告書[1)]などをもとにエネルギー技術に関連するイノベーションについて考察する。

図 6.3.2-1 は世界の特許取得数について 2000 年を 100 とした場合の推移を示している。2000 年以降、低炭素エネルギー技術に関する特許は増加しているが近年は増加のペースがやや緩やかになっているのに対し、化石燃料に関する特許は 2015 年以降減少傾向にあることが示されている IEA[4)]によると、太陽光のような低炭素エネルギー技術は市場が成熟しつつあり 2012 年以降の特許取得は減少しているのに対し、近年は最終需要部門関連の特許が増えており、特に、運輸部門は技術革新が活発になっている。それ以外にもバッテリー、水素、スマートグリッド、CCUS などの特許も増えている。

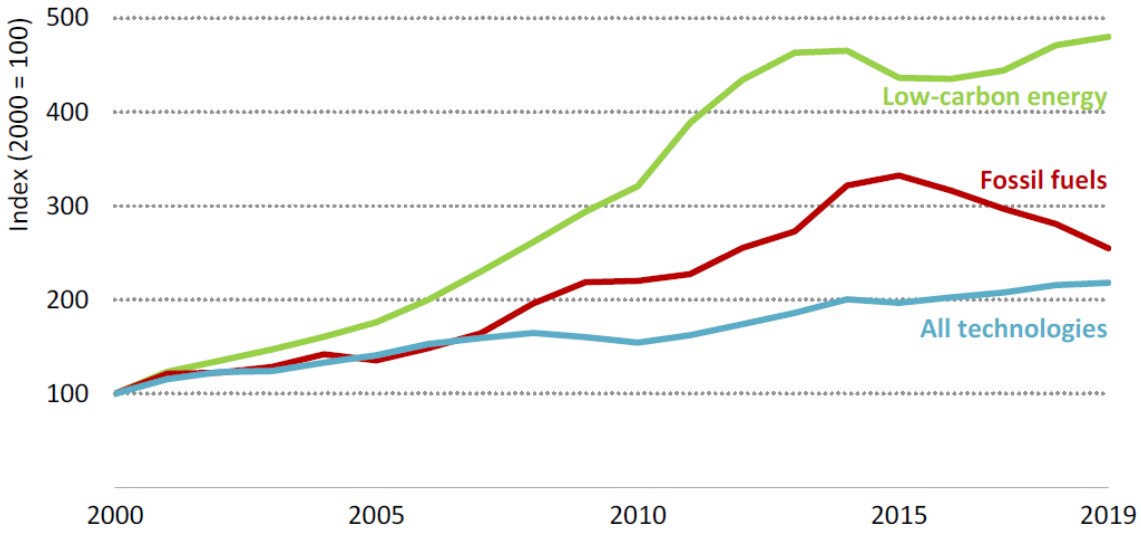


図 6.3.2-1 エネルギー技術に関する特許取得数（グローバル）
出典）IEA[4)]

Nemet[2)]は太陽光を事例にクリーンエネルギーのイノベーションがどのように成功したかを考察している。具体的には、太陽光技術は以下のプロセスをたどって技術が進展したことが示されている。

(1) 1800 年代から 1900 年代初頭にかけて、分子構造が光に反応することについての基本的な科学的知見が得られた。
(2) 1954 年、米国の企業研究所で PV デバイスを実用化するブレークスルーがあった。
(3) 1970 年代に米国で政府の大規模な研究開発と公共調達の取り組みが行われた。
(4) 1980 年代に日本の電機メーカーが市場に参入。1994 年に世界初の屋根置き PV 補助金制度が始まった。
(5) 2000 年にドイツで固定価格買取制度が導入され、PV 市場が 4 倍に拡大した。
(6) オーストラリアで育成された起業家たちが、2000 年代に中国にギガワット規模の工場を建設し、2013 年以降、世界最大の PV 市場が形成された。

これらの要因によって PV の価格は 2 桁下がり、30 年近く 30%/年以上のペースで市場が成長した。この経験から低炭素技術イノベーションを市場に導入していくために必要な要素を以下のように整理している。

- 研究開発に対する継続的な資金提供。研究開発投資がブームとバーストを繰り返していると技術進歩を遅らせる。日本が 1980 年代に太陽光発電の主導権を握ったのは継続的な研究開発を続けてきたため。
- 科学者や技術者、ビジネスパーソンの存在。豪州のニューサウスウェールズ大学、米国の国立再生可能エネルギー研究所、ドイツの ISI Fraunhofer、日本の NEDO などに人材が集積していた。
- 知識の保存と体系化。PV では技術的なブレークスルーがおこるたびにイノベーションの中心が別の場所に移った。知識は企業独自のものであるため、中心企業が移り変わっていくとそれまでの暗黙知が失われ、人的資本が浪費される。
- 堅牢な市場。エネルギー価格の下落、政策支援の停止、ニッチ市場の飽和といった不利な変化に対しても、PV の全体的な需要は堅調であったため、最終的に PV は火力発電と競合するようになった。
- 他分野からの知識波及。太陽光発電は、他の産業からの技術進歩の恩恵を受けている。材料、機器、製造の知識はコンピュータ産業からの恩恵を受けており、風力産業とともに新しい政策や規制の枠組みを開拓してきた。
- グローバルな知識フロー。アイデア、人、モノの国際的な流れにより、各国は PV バリューチェーンの中で最も競争力のある部分に集中することができた。
- 政治経済的な恩恵。既存技術によって大きな既得権益を持つ企業は新技術の市場導入を阻もうとする。PV が急速に普及したのは、1998 年のドイツや 2010 年の中国のように、支持団体を集めることができた時。
- 革新的な資金調達。必要な技術の初期費用が高額で投資回収期間が長くなると、投資の意思決定を阻むことになる。米国で太陽光発電の導入が進んだのは、プロバイダーがハードウェアを所有・保守し、それを消費者にレンタルすることで、地域の電力会社よりも安い電気料金をネットで提供するような資金調達面での革新があったため。

Weyant, et al,[3)]はクリーンテック革命における政府の役割の重要性を指摘している。新技術が普及・拡大する局面では既存技術と競合するようになるが、通常、既存技術

はビジネスモデルも成熟しており効率的な運営が行われているのに対し、新興企業のオペレーションは非効率であり非対称性がある。ただし、最近ではクリーンエネルギー技術に携わる知識や人材層の蓄積も進みつつある。そのような中、政策的にクリーンエネルギー業界が利用できるような多様で安定的な資金源を用意していく必要がある。また、イノベーションのプロセスにおいて、公共政策と民間部門は異なる役割を担い、相互に補完し合っているので、民間部門と協力が必要となる。国、州、自治体といったアクター同士の協力だけでなく、IT、国家安全保障、水、食糧、健康などエネルギー革新と関連する他分野との協力も必要となる。他方、民間部門や投資家としても市場を創造、整備していくためにも政府の協力を必要としている。

多くの国が正味ゼロ排出目標を掲げるようになり、ここ数年、クリーンテクノロジー開発による新たなビジネスモデルが生まれ、市場の中で評価されるようになってきている。例えば、テスラのように世界トップ企業 2500 社のリストに載るような、非常に大規模な上場クリーンテック・ベンチャーが急速に増えてきている（表 6.4-1）。また、従来のエネルギー企業や自動車メーカーも、その資産の多くをクリーンテック事業に振り向けるようにもなってきている。

表 6.4-1 電気自動車世界最大手企業（時価総額ベース:2021 年 12 月 19 日現在）

	会社名	時価総額	国
1	Tesla	$936.54 B	米国
2	Rivian	$86.30 B	米国
3	Lucid Motors	$65.87 B	米国
4	NIO	$47.71 B	中国
5	XPeng	$37.27 B	中国
6	Li Auto	$31.92 B	中国
7	Arrival	$5.09 B	英国
8	Fisker	$5.04 B	米国
9	Nikola	$4.06 B	米国
10	Canoo	$2.13 B	米国

出典）J. P. Weyant[1)]

IEA は WEO2021[4)]の中で 1.5℃目標を実現するためには、①クリーン電化の大規模な推進、②エネルギー効率の最大限の実現、③化石燃料事業におけるリーケッジ防止の協調的努力、④クリーンエネルギー革新の後押しが重要としており、技術開発には不確実性が伴うが、政府の適切なサポートにより世界全体でクリーンテックを普及・拡大していくことが期待される。

参考文献（第 6.4 節に関するもの）

1) J. P. Weyant: The Impact of New Business Models on The Rate of Introduction of New Sustainable Energy Technology Innovations. Stanford University (2022)

2) Nemet, G. F. (2019). How Solar Energy Became Cheap: A Model for Low-Carbon Innovation. Routledge
3) J.P. Weyant, Ernestine Fu, and Justin Bowersock (2018). Renewed Energy: Insights for Clean Energy's Future, Kauffman Fellows Press
4) IEA, World Energy Outlook 2021, Paris. (2021)

6.5 長期正味ゼロ排出目標に関する海外分析事例の調査

6.5.1 はじめに

本節では、長期正味ゼロ排出目標に関する海外分析事例について報告する。第 6.5.2 節では、ソーラージオエンジニアリングに関する社会科学研究を推進するための方向性などについて報告する。第 6.5.3 節では、正味ゼロ排出目標における、DAC の実施が経済効率性と公平性に与える影響について報告する。第 6.5.4 節では、統合評価モデル WITCH を用いた、再生可能エネルギー由来の炭化水素に関する分析について報告する。

6.5.2 ソーラージオエンジニアリングに関する社会科学研究

(1) はじめに

本節では、Aldy 他 [1)]による、ソーラージオエンジニアリング（Solar Geoengineering; 以下、SG と記載）に関する社会科学研究について報告する。全球平均気温が 1.5℃を超える可能性が高まっている中、温暖化緩和策と適応策では不足するリスク軽減効果を、SG で補完することへの関心が高まっている。 例えば、成層圏エアロゾルを注入して地球を冷却すれば、大気中の温室効果ガスが一定量蓄積された場合、温暖化の一部を相殺することが可能である [2)]。しかし、SG に関する物理科学および社会科学の既往研究は、温暖化緩和策や適応策に比べ、まだわずかしか存在しない。そこで、SG に関して、社会科学の側面からの研究を推進するための 3 つの研究テーマを概説する。(i) SG の費用と便益、リスク、不確実性、(ii) SG の政治経済、(iii) 気候戦略ポートフォリオにおける SG の役割である。

SG をめぐる議論では、いくつかの懸念が注目されており、社会科学的なエビデンスと理解を深める必要がある。例えば、一部の利害関係者は、SG 研究を実施すると、排出削減努力を阻害することになり、一種のモラルハザードが生じる可能性があると指摘している。しかし、この主張に対して異議を唱えている主張もある。また、将来の世代が検討したいと考えるような政策選択を隠そうとする倫理に疑問を呈する研究者もいる。また、排出削減に対する強いただ乗り（フリーライダー）誘因があることを考えると、SG が排出削減の阻害要因となることは明らかではない。しかし、これらの疑問に対して、多種多様な主体を考慮した現実的なモデルでさらに検討する必要性が指摘されている [2),3)]。

さらに、SG 実施の技術力を有する主要経済国が実施を決定する場合、特に後発開発途上国や小島嶼国の人々にとって、公平・公正の観点が重要になる。これらの観点に基づくと、意思決定プロセスにおいてこうした人々が発言権を持つかどうかという手続き上の正義と、SG 介入決定に伴う結果の配分上の正義を検討する必要がある。この

ような正義は、SG 介入を行うか行わないかの決定に関係なく生じるものである。SG 実施の正義について評価することで、政府の意思決定に関する経済学的な実証評価がより充実したものになると考えられる。

SG は、新しいジオエンジニアリングの一つである。CDR（第 5.1.3 節参照）とは対照的に、SG は技術的・財政的なハードルが低く、気温に対する即効性がより速いと考えられる。実際には、最大の先進国と発展途上国（米国と中国）は、数年以内に実施可能な SG のための資源と技術力を有している。

SG は気候変動リスクを軽減する可能性があるにもかかわらず、国際社会は、国連気候変動枠組条約の下でソーラージオエンジニアリングの議論を行っていない。また、国家的なプログラムやガバナンスも乏しい。このように限られた政策の状況は、SG の制度・政策・ガバナンスの設計に情報を提供する、新しい社会科学研究の機会を提供している。

(2) ソーラージオエンジニアリングの費用、便益、リスク、不確実性

SG の評価には、不確実性、潜在的な直接費用、リスク間のトレードオフを認識した上で、SG の費用と便益の評価が必要である。SG 介入を実施するための直接費用は、年間約 50 億ドルであり [4]、推定される気候変動被害や野心的な排出緩和の費用 [5]よりも 2～3 桁小さい。しかし、これらの推計は、SG 介入策を展開するための直接的な工学的費用である。SG に関するより広範な評価により、意思決定のためのより良い情報を提供することが可能である。代替技術やオプション選択、潜在的な小規模実験、気候変動と SG 介入による影響評価など、SG の展開に関する物理科学と工学に基づくべきである。例えば、高い空間解像度に基づく気候変動モデリングは、便益と費用の推定をより正確に行うことができ、公的な経済統計データが限られている社会科学からのデータニーズを特定するのに役立つ。物理的及び社会経済的な影響を高解像度で表すことによって、SG 介入による費用と便益を分けて説明することができる。気候変動と同様に、SG 介入は、地域的にも時間的にも不均質な影響を与えることとなり [6]、このことは社会厚生や公平性、正義、社会的及び政治的な観点から重要な意味を持つと考えられる。SG に関する研究は、紛争や移民、健康、労働生産性、農業生産性などの気候変動の実証的な研究と統合することができる。

このような分析の結果は、結果の平等と正義のウェイトの置き方によって異なる社会効用関数を用いたモデルに反映される可能性がある。また、政治経済や国際関係のモデルへの入力としても利用できる。SG の評価に多目的評価の枠組みを用いることで、SG による影響の選好やトレードオフのための調査も行うことができる。また、開発途上国から研究参加者を集めることにより、気候変動の影響を最も受けやすい人々の意識や嗜好をどのように反映するかという懸念に対処する上で有用である。

科学的、工学的、経済学的な分析を統合することにより、SG の設計や意思決定における利益と費用の不確実性に対処することができる。統合的な評価枠組みは、リスク分析と意思決定理論を組み込み、不確実性を低減することができる。

SG 介入に関する統合評価は、モニタリングコスト、属性、冗長性、評価、更新、必要なリスク管理メカニズムについても考慮する必要がある。このような分析では、情報の価値という枠組みを通じて、学習による利益も考慮することができる。

SG 介入は、単に気候変動を元に戻すということではない。海洋酸性化など、SG が直接的に与える影響が小さい影響事象もある。一方、意図しない付随的なリスクをもたらす可能性もある（例、呼吸器系健康被害など）[7]。SG 介入は、一般的な統合評価モデル（IAM）で使用される被害関数（通常、気候変動の代理変数とした気温に基づく）の修正が必要となる可能性もある[8]。

(3) ソーラージオエンジニアリングの政治経済

SG に関する既往研究は、通常、単一のグローバルな行動主体、または、行動主体間の戦略的相互作用に関する定型化に焦点を当ててきた。SG のインセンティブ、制度、規範、国際関係の役割を理解するために、今後、SG の相互作用や政治経済に関するより現実的なシナリオや政治経済のダイナミクスを開発することが必要になる[2]。例えば、グローバルに調整された SG レジームのためには、強力な国際的ガバナンスが必要である。弱い国際的ガバナンスでは、SG 介入によるフリーライダーが生じる懸念がある。社会科学の研究では、グローバルな SG プロジェクトやローカルな介入（例えば、海上雲の輝度向上など）について、オプションやインセンティブに関する調査が可能である。

また、排出量削減への取り組みが不十分なため、国境税調整などの措置が進められている。このような措置は、大幅な削減に抵抗し SG 開発を行う国家を標的とした、対抗手段の可能性を示唆している[9]。軍事介入や貿易制裁など、対抗的な手段によって対応することができるかという指摘もある[10]。このような対応は、SG 進展のインセンティブ、国際紛争、SG 介入の有効性や費用、便益に影響を与える可能性がある。これは、国家安全保障の専門家を招集し、関連する国際問題から導き出される理論やモデル、エビデンスを理解するための、新しい社会科学的な研究を示唆するものである。

また、より少数の国々が協力して、集団的に管理して SG 介入を行うことも可能である。このようなクラブ方式によるガバナンスでは、正当性や国際政治的な体制、および有効性に関して新たな疑問が生じる。クラブは、信頼できる気候変動対応戦略としての SG に対する相互信頼を構築するために、技術・ガバナンスのレジームを検証することができる。このようなクラブの構成や意思決定は、戦略的に SG に対する信頼性を高めるか、あるいはクラブ外の国の懸念に拍車をかけるかを決定する上で重要な役割を果たすと考えられる。これは、意思決定理論とゲーム理論を組み合わせて、起こりうる結果と均衡を評価することを示唆している。

さらにもう一つの可能性は、相互抑制協定である。各国は、SG 開発能力を構築したうえで、SG 開発能力のある他の国々と、一方的な配備を抑制する相互協定に合意する可能性がある。これは軍備管理条約に類似したものである。ゲーム理論や実験に加え、このような条約に関する法的専門知識や経験を活用することで、さまざまな疑問に答えることができる可能性を示唆している。

SGのインセンティブと政治経済には、利益や費用、リスク、公平性、正義に関する評価が反映される。その結果、SG の意思決定の制度設計も、SG の効果や結果に影響を及ぼすことになる。交渉を通じて浮上するリスク管理も、SG 開発の収益に影響を与える可能性がある。費用便益分析で評価される SG の価値とリスクのトレードオフも、緩和策や適応策の組み合わせや、それらとの相互影響に大きく依存すると考えられる。

(4) 気候戦略ポートフォリオにおけるソーラージオエンジニアリングの役割

政策立案者は長い間、気候変動に対応するために、単一の政策手段ではなく、多様な政策やプログラムを追求してきた。当初は補助金や義務的規制、カーボンプライシングなどを通じて排出量を緩和する方法に焦点を当て、近年では気候変動の影響に対するレジリエンスの強化を進めてきた。しかし、将来の政策ポートフォリオは、SGを含めて拡大される可能性がある。

温暖化緩和策と適応策とともにSGを考慮することで、経済や政治、意思決定科学に関する重要な問題が生じうる。最近の分析では、特定の気温目標を達成するためのコストを最小化する戦略（緩和策、CDR、適応策、SG）の組み合わせを最適化するシナリオが検討されている[8),11),12),13)]。このような最適化された枠組みは、SG を緩和策及び適応策と組み合わせることによって、大きな利益が得られる可能性があることを示すものである。しかし、これらの研究は、SGプロジェクトによって生じうる戦略的・行動的反応については触れていない。過去数十年の排出削減に関して、最適化から乖離した不十分な政策をみると、SGの意思決定に影響を与える要因や最適化とは乖離した政策の可能性をより現実的に扱うことで、これらの研究を進展させることができると考えられる[14)]。

意思決定者がSGのオプションを検討することで、一般の人々にとって気候変動がより野心的な排出削減への支持が得られる可能性がある[5),15)]。厳密な理論分析と、適切に設計された調査・実験を組み合わせることによって、SGが排出削減の緩和にどのような影響を及ぼすかについて、より良く理解することができるだろう。また、行動科学の研究と統合することによって、政治家が気候変動に対する「緩和＋適応＋SGアプローチ」の有効性に関する情報をどのように解釈し行動するかを探ることができるだろう。

気候変動とSGに関する不確実性を考慮すれば、不確実性のもとでの意思決定は、気候変動戦略間の相互作用に関する研究につながる。例えば、意思決定者は、気候変動が予想以上に深刻である場合に、SGを実施し、気候変動により強いインフラに投資すること（適応策）で対応することができる。このようなSGと適応策に関する政策に対する反応関数を表す意思決定モデルを構築することは、最適な緩和戦略や自動車の社会的費用の推定に影響を与える。より深刻な気候変動に対する積極的な政策反応としてSGを予測することは、最も極端な気候変動の被害を防ぐことができる一方、SGに付随する影響によるリスクを高める可能性もある。このような潜在的なリスクとリスク間のトレードオフを特徴付けるための社会科学的研究の進展は、意思決定者により良い情報を提供することになると考えられる。

SG を実施しても気候変動リスクが持続することを考慮すると、SG の長所と短所を知ることによって、将来の適応策をどのように導くことができるかを検討することが可能となる。例えば、SG の介入によって気温の上昇を効果的に食い止めることができたとしても、CO_2 排出の継続によって海洋酸性化は悪化する。あるいは、SG の実施が遅すぎて、大幅な海面上昇を防ぐことができず、今後数世紀にわたって世界中で沿岸を管理する必要性が生じるかもしれない。

(5) ソーラージオエンジニアリング研究の今後の進展

今後の SG の研究課題に取り組むために、社会科学の分野からのさまざまなアプローチで貢献することを想定している（表 6.5.2-1）。この研究に関して、科学界や政策決定者、一般市民が効果的にコミュニケーションをとることにより、SG をより広範囲の気候変動研究の評価や IPCC に統合することも可能である。社会科学的な研究に関するガバナンスについても、科学・工学の研究のガバナンスと連動して進める必要がある。

また、社会科学的な SG 研究の進展は、世界中の学者を巻き込むべきである。気候政策の正義に関する検討は、より包括的なアプローチをとることにより、より豊かで信頼性の高いものにすることができる。気候変動と SG が発展途上国に大きな影響を与える可能性を考慮すると、次世代の SG 研究は、発展途上国の新しい研究者の育成に貢献するものでなければならない。

表 6.5.2-1 ソーラージオエンジニアリングへの社会科学的アプローチ

ソーラージオエンジニアリングへの社会科学的アプローチ
• 意思決定に最も関連するソーラージオエンジニアリングの理解におけるギャップに対処するための、社会科学者と自然科学者の学際的な作業。
• ソーラージオエンジニアリングと国際関係の専門家を集め、ゲーム理論や行動実験・シミュレーションを駆使して、ソーラージオエンジニアリングの戦略や対抗手段の展開の可能性をより深く理解する。
• 気候システムと社会システムを統合し、相互作用が一貫した枠組みの中でどのように「加えられるか（add up）」を理解するための数値モデリング
• 新しい技術が政策余地（policy space）に参入する際に、規範や文化がどのように進化するかを理解するための社会学者、文化人類学者、科学技術研究者による評価
• ソーラージオエンジニアリングやその他の気候リスク削減戦略に関して、政府や社会全体の関連する意思決定者のメンタルモデルを探るための行動科学の応用。

出典：Aldy et al.[1)]

気候変動が経済社会に与える影響のエビデンスが増加していることを考慮すると、新しい排出削減政策の策定や、レジリエンスや適応力に対する公的支出は、気候変動への新しい対応方法に対して、意思決定者が大きな関心を持っていることを示してい

る。SG の社会科学的研究を推進し、物理科学的な研究と統合することによって、気候変動のリスクを低減するために SG がどのような役割を果たすかについて有益な情報を提供すると考えられる。

参考文献（第 6.5.2 節に関するもの）

1) Aldy, J.E.,et al(2021). Social science research to inform solar geoengineering, Science, Vol.374, Issue 6569, https://www.science.org/doi/10.1126/science.abj6517
2) National Academies of Sciences (2021). Engineering, and Medicine, Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance (National Academies Press).
3) E. T. Burns et al., Earths Futur. 4, 536 (2016).
4) W. Smith, G. Wagner, Environ. Res. Lett. 13, 124001 (2018).
5) J. E. Aldy, R. Zeckhauser, South. Econ. J. 87, 3 (2020).
6) D. Heyen, T. Wiertz, P. J. Irvine, Clim. Change 133, 557 (2015).
7) K. Grieger, T. Felgenhauer, O. Renn, J. Wiener, M. Borsuk, Environ. Syst. Decis. 39, 371 (2019).
8) M. Belaia, J.B. Moreno-Cruz, D.W. Keith. Clim. Chang. Econ. 2150008 (2021).
9) D. Heyen, J. Horton, J. Moreno-Cruz, J. Environ. Econ. Manage. 95, 153 (2019). https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.03.005
10) A. Parker, J. B. Horton, D. W. Keith, Earths Futur. 6, 1058 (2018).
11) G. Heutel, J. Moreno-Cruz, S. Shayegh, J. Environ. Econ. Manage. 87, 24 (2018).
12) J. Emmerling, M. Tavoni, Glob. Environ. Change 53, 244 (2018).
13) S. Tilmes et al., Earth Syst. Dyn. 11, 579 (2020).
14) A. Ghosh, “Environmental Institutions, International Research Programmes, and Lessons for Geoengineering Research” in Geoengineering our Climate? Ethics, Politics, and Governance, J. J. Blackstock, S. Low, Eds. (Earthscan-Routledge, 2018).
15) C. Merk, G. Pönitzsch, K. Rehdanz, Environ. Res. Lett. 11, 054009 (2016).

6.5.3 パリ協定に基づく長期シナリオ下で、DAC が経済効率と不平等に与える影響

(1) はじめに

本節では、Andreoni 他 [1]に基づき、パリ協定に基づく長期シナリオにおける、DAC(Direct Air Capture)の実施が経済効率性と公平性に与える影響について報告する。

現在の国際社会は、2100 年に地球の気温上昇を 2℃以下に抑えることを公約に掲げている。そのためには、世界の二酸化炭素排出量が今後 10～20 年の間に急激に減少し、2050 年までにカーボンニュートラルに到達しなければならないと記載されている [2]。しかし、各国が提出した NDC 削減目標（詳細は第 4.1 節参照）は、長期目標には不十分である可能性が大きく、将来の排出量の軌道は横ばいか緩やかに減少すると予測されている [3),4)]。

短期的に排出削減が遅れれば遅れるほど、パリ協定の長期気温目標を遵守するために今世紀後半に必要となるネガティブ排出量は大きくなる[1),4)]。これらの技術は、CO_2排出量を減少させ、気温のオーバーシュートから回復させる全球気温の「逆転のスイッチ」を提供することができる。

ネガティブ排出技術（以下、NETsと記す）は、現時点では未成熟あるいは投機的な技術であるため、短期的な緩和策の進展を阻害するという批判があるが、多くのモデルによるシナリオ分析では、オーバーシュート無しのシナリオにおいても、NETsの大幅な展開が予測されている[2),6)]。現時点におけるNETsの研究開発に対する投資レベルは既往文献[2),6)]と整合的ではなく、既存のプロジェクトは民間企業によって推進されている。

また、ネガティブ排出技術の資金調達についても懸念されている。排出量がゼロになるまでの間、炭素税からの収入は炭素除去のためのコストよりも高いため、炭素市場で発行する政府から見れば純収入源となる。しかし、その後、炭素除去の正味マイナス分を公的に賄うために、増税や国債発行、歳出削減のいずれかの方法で政府予算を変更する必要がある。Bednar et al.[7)]によれば、炭素市場の価格で報酬を得る場合、ANNEX I 諸国では正味排出量に GDP 比 15% のコストがかかる可能性がある。

完全な先見性と情報を持つ、完全に均衡した経済では、今世紀後半のこの負担は、今世紀前半に炭素税収入を市場金利で投資して得た資本と利益で賄うことができ、それはまたHotelingルールに従って炭素価格の上昇を規制している[8)]。

しかし、現実の炭素価格は必ずしも最適な経路をたどらない可能性が大きく、また、政府は完全な先見性のあるプランナーとして行動しない可能性がる。炭素価格の収入は、他の減税（所得税や一般税など）、グリーン研究開発の促進、あるいは単に気候政策で損害を受けた人への補償や構造的不平等の解消のために社会に還元するなど、より魅力ある方法で使うことが可能である。そのため、資金を調達するための異時点間、市場主導型の政策手段が提案されているが、効果的な実施には規制や確実な長期排出量目標が必要と考えられる[8)]。

さらに、気温のオーバーシュートから回復するための大規模な正味ネガティブ排出への経路は、気候システムの不確実性が大きいため、気候の被害が予想を大きく上回ることが明らかになった場合に展開される緊急対策となりうる。このようなシナリオでは、政府がNETsに資金を供給するための「セーフティネット」措置を導入している可能性は極めて低い。したがって、将来の資金負担を軽減しつつ、予算増によるNETsの資金調達の含意を探ることが重要である。

そこで、Andreoni他[1)]では、統合評価モデルを用いて、NETs実施が経済効率性と公平性に与える影響を分析した。Nordhausによる地域細分化した統合評価モデルRICEの発展型NICEモデル[9)]をベースに、NETsの代表的技術として直接空気捕捉（DAC）をモデルに組み込んだ[13)]。1.5℃と2℃のシナリオで、CDRが炭素価格の収入をもとに補助され、利益が企業の株主を利する市場ベース（DACが民間部門に完全に所有された場合）と、政府・規制当局が管理する政府ベースの2種類を想定し、NETsの富と不平等への影響を検証する。これらのシナリオは、排出削減とCDRが同じ分配効果を持

ち、炭素税の収入が中立的に経済に再分配されるという意味で、ベースライン設定に対して分配中立であることが考慮されている。

(2) 分析結果

図 6.5.3-1(a)は、1.5℃と 2℃の経路における、総排出量と炭素除去量を示す。図 6.5.3-1(b)は、1.5℃と 2℃の経路における、世界平均での資金の内訳をまとめたものである。正味コスト（青の点線）は、ベースライン GDP 比の追加的な正味コストであり、削減コストと DAC コスト（資本費＋O&M 費）の合計である。一方、支払われた税は、完全に経済に再分配される。つまり、炭素税とその他の税の合計は、各期間において、トランスファーと DAC 収入の合計と等しくなければならない。つまり、政府の（暗黙的）予算はベースラインと変わらず、炭素税収入を他の税金の削減（または公的債務の削減）に使うことはできないと仮定している。同様に、正味ゼロ排出達成後に発生する財政赤字を補填するために追加増税することだけが可能であり、他の支出を減らしたり、負債を増やしたりすることは許されないと想定した。

世界合計を見ると、削減コストは緩和策にかかる費用であり、DAC の設置・運用コストは削減コストに比べて 1 割程度であり小さい。2070 年代をピークに、政策コスト全体は 1.5℃シナリオで GDP 比 4%程度、2℃シナリオで 2.5%強に達する。短期的には緩和コストは低くなるが、今世紀前半に排出量が激減する一方で炭素価格が上昇するため、炭素税の総負担は大きく、GDP 比 2%前後でほぼ一定となる。その後、負担の総量は減少に転じ、総排出量がゼロになる今世紀後半にはゼロに近付く。2℃シナリオでは、炭素税が低いため、1.5℃ 世界と比較して、短期的には炭素税の総コストが低いピークに達する。しかし、2℃シナリオでは、炭素税は長期的に必要であり、1.5℃シナリオでは税収がゼロである 2080 年においても、世界の GDP の 1%程度を占めている。

政府の観点からは、炭素税の収入は経済に還元されるか、CDR の補助金に使われるかのどちらかである。今世紀半ばまでは、その両方をカバーするのに十分な額である。しかし、2050 年以降、各国は正味ゼロ排出に達し、財政を均衡させるために炭素税以外の税金を増やす必要が出てくる。ピーク時には、世界の GDP の 2.5%近くが増税される。

しかし、世界平均の結果だけでは、地域間や各地域内の所得分布におけるこれらのフローの違いは明確ではない。図 6.5.3-1(c)は、1.5℃シナリオにおける各地域と十分位ごとの各項目の変動性（正味現在価値換算）を、各十分位所得との関係で示したものである。地域によって緩和のコストと再分配の便益の支払いが大きく異なることを示している。政府支出の増加額が GDP の 20%に達する国もある（グラフでは外れ値を非表示）。図 6.5.3-1(d)は、地域間でそれぞれのフローの最大値がいつ発生するのかを示している。地域内では、所得階層によって費用と便益に直面する。削減コストと炭素税はほとんどの国において逆進的な費用であるが、その他の税の増加は分配中立となるようにモデル化され、DAC コストは（収入として）主に上位 2 階層によって支払われる。トランスファーは累進的であり、下位層に対して有利な分配となるように設計されている。対照的に、DAC の収入は、上位 2 層に有利である。

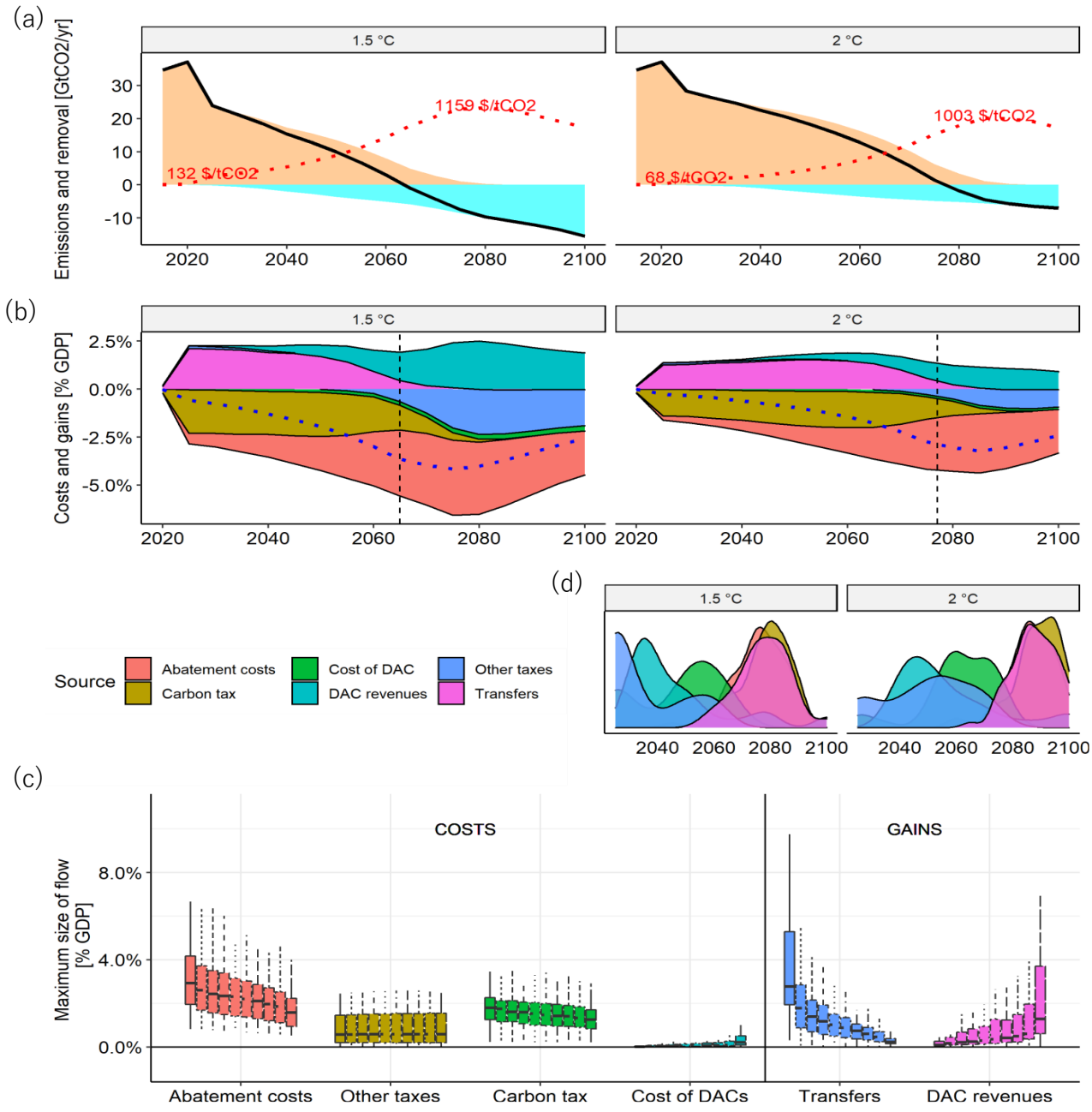


図 6.5.3-1 (a)世界の CO_2 排出量 (b)世界全体のコストと利益 (c) 2020 年から 2100 年までの正味現在価値の十分位 (d) 各地域で各フローの規模が最大となる年の密度プロット

(a)世界の正味 CO_2 排出量（黒線）、総排出量（ベージュ）と炭素除去量（青）と GDP 加重世界平均炭素価格（赤点線）を強調したもの。(b)市場ベース（DAC が民間部門に完全に所有された場合）における緩和政策とリサイクルによる世界全体のコストと利益、BAU に対する相対的な比較。正味費用はハイライト表示（青点線）。黒い点線は、シナリオの中で正味のゼロ排出年を強調している。(c) 各フローの 2020 年から 2100 年までの正味現在価値を地域ごと、十分位（線種）ごとに示したもの。外れ値は省略。(d) 各地域で各フローの規模が最大となる年の密度プロット。

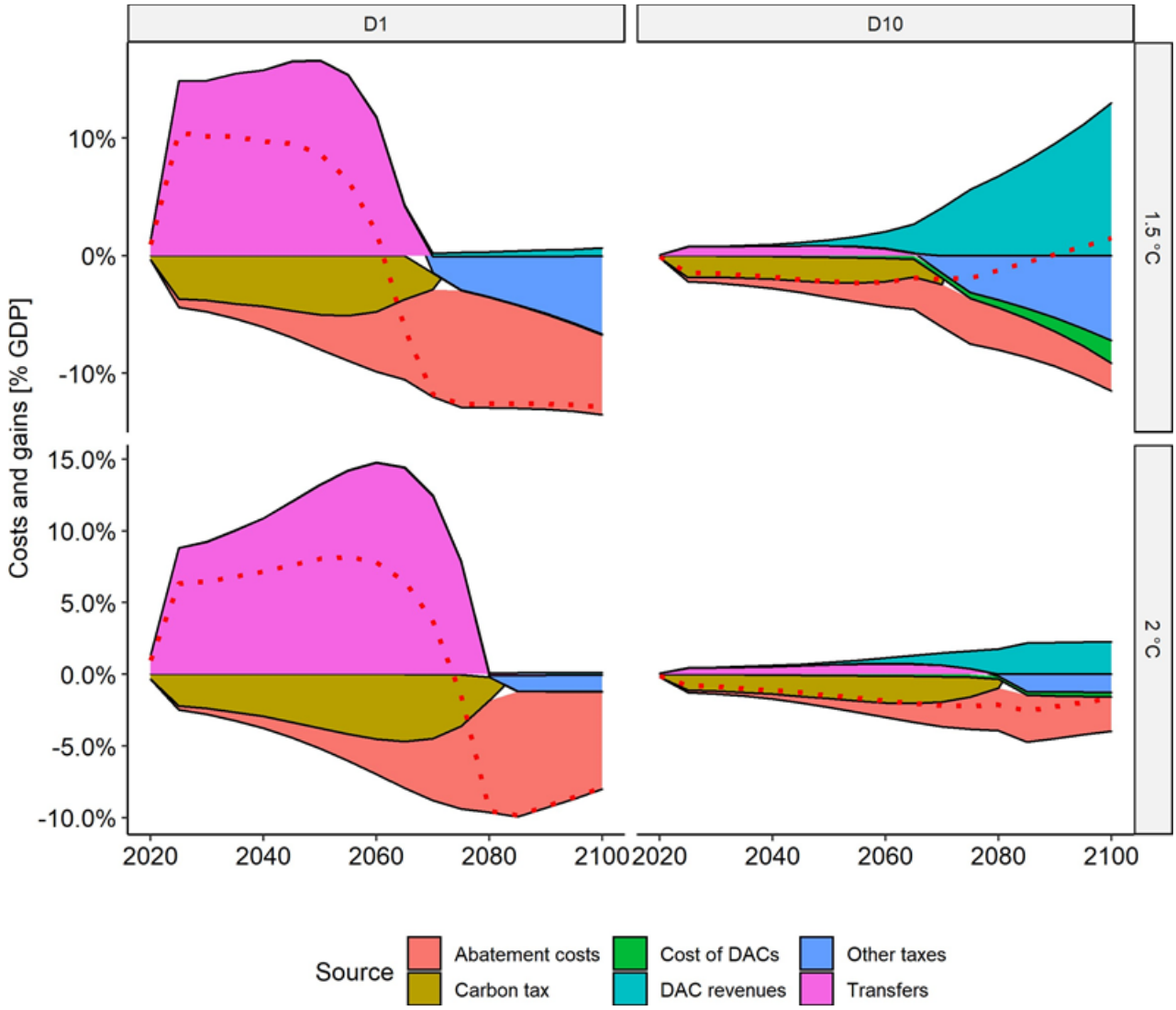


図 6.5.3-2　1.5℃および 2℃シナリオにおける、市場ベースにおける所得分布の下位(D1)、上位(D10)世帯の米国のコストと利益

図 6.5.3-2 は、DAC が大量に導入される米国の費用と便益を示す（D1 が最下位層、D10 が最上位層）。最下位層では、炭素税の一人当たり平等な再分配は、今世紀の前半に大きな利益を生み、所得の純増をもたらす（既往研究の Budolfson et al.[10] と一致する）。しかし、2060 年以降、収入は急速に枯渇し、削減コストに加え、DAC のための資金調達が必要になり、財政負担が増加する。所得分布の上位層にとっては、再分配は今世紀前半にはあまり意味を持たず、所得損失を完全に相殺することはできない。しかし、今世紀後半には、DAC の所有者が炭素価格で炭素除去の報酬を受けることによる利益が、今世紀後半に大きな収入をもたらす可能性がある。2℃シナリオの場合、炭素価格が下がるだけでなく、DAC があまり利用されないため、DAC の収益は大幅に縮小するが、それでも上位 10%の所得全体の約 3-5%を占め、気候変動緩和による損失を一部補填する。このように、所得階層によって気候政策のコストと便益が大きく異なる。

図 6.5.3-3(a)は、正味現在価値所得に対するジニ係数の変動（ベースライン比）を示した。図 6.5.3-3(b)は、時系列のジニ係数の変動を示した。ジニ係数の変動は、地域によって非常に異なる。北半球に位置する多くの地域では、後半に実施される NETs が全体として逆進的な効果をもたらす。(a)の符号は、世紀前半に生じる炭素税の分配による累進的効果と、世紀後半に生じる NETs への逆進的補助金に対する相対的大きさに依存する。 主要な結果は以下の通りである。第一に、NETs を多く導入する国では、CDR のために NET 企業（市場ベース）により多くの補助金を支払わなければならない。第二に、 経済規模が小さい国ほど、同じ額の NETs 補助金を支払っても、より大きな影響を受ける。緩和目標が厳しい場合、市場ベースの NETs は、今世紀後半に著しい不平等を引き起こす可能性が大きい。この影響は、CDR が大量に導入される地域、特にロシアやカナダのような比較的小規模経済圏では、より深刻である。第三に、炭素税が同じであれば、MAC 曲線がより急な勾配を持つ国の方が、累進的に利用できる炭素税収入をより多く集めることができる。

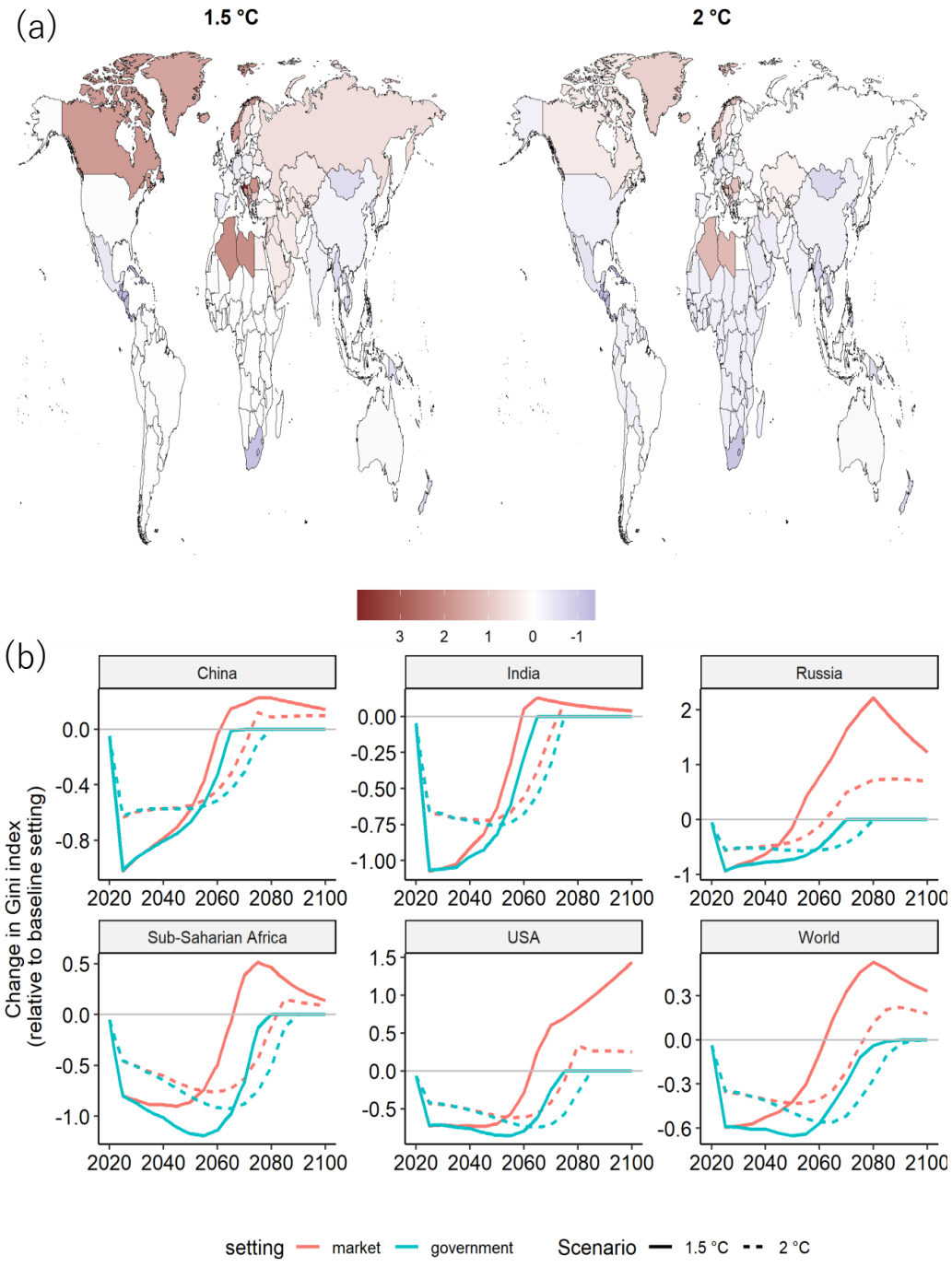


図 6.5.3-3 (a)現在価値換算した所得に対するジニ係数の変動 (b)ジニ係数の時系列変動

（注）(a) 2020 年から 2100 年までの所得を正味現在価値換算した（年割引率 1.5%）市場ベースにおけるジニ係数の変動（ベースライン比） (b)市場ベースと政府ベース

(3) まとめ

文献[1)]では、大規模な NETs の利用により、厳しい温度目標を達成するための総コストを大幅に削減できる一方で、DAC が民間部門に完全に所有された場合、高い炭素価格と大規模な CDR の組み合わせにより、不平等が大幅に増加することを明らかにした。

NETs 導入によって、特に NETs を多く展開する経済規模の小さい国において、貧しい者から豊かな者への事実上の移転が生じる。

政府による解決策を検討することは、市場ベースの CDR の副作用に対処することになるが、規制することで、実質的な経済的な非効率性につながり、コストを下げることができない可能性が大きい。政府による解決策は、最終的に低所得世帯にとってさらに悪影響をもたらすことになりかねない。

しかし、政府系ファンドや年金基金などを通じて、すでに黎明期にある企業に政府が大きく関与することで、NETs の分配面での負の効果を軽減することができると考えられる。このような関与は、技術の成熟に必要な研究開発に資金を提供するだけでなく、分配上の偏りが少ない所得構造を確保することにもなる。

本分析で示した不公平感の評価のみでは、CDR の政府ベースの優位性を述べることはできないが、NETs に対する補助金の政策メカニズムを設計する際、また、NETs 開発のための民間企業への補助金を検討する際に考慮すべき重要な要素となりうることを示唆している。

参考文献（第 6.5.3 節に関するもの）

1) P. Andreoni,et al(2021). The implications of Direct Air Capture deployment for economic efficiency and inequality in the context of Paris compliant scenarios, A report of the RFF-CMCC European Institute on Economics and the Environment
2) IPCC. Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5C. IPCC SR1.5C. (World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2018).
3) Roelfsema, M. et al. Taking stock of national climate policies to evaluate implementation of the Paris Agreement. Nature Communications 11, (2020).
4) Heleen L. van Soest et al. Global roll-out of comprehensive policy measures may aid in bridging emissions gap. , Nature communications (2021).
5) van Vuuren, D. P., Hof, A. F., van Sluisveld, M. A. E. & Riahi, K. Open discussion of negative emissions is urgently needed. Nature Energy 2, 902–904 (2017).
6) Drouet, L., Bosetti, V., Padoan, S., Aleluia Reis, L. & Bertram, C. Net zero emission pathways reduce the physical and economic risks of climate change. Nature Climate Change (2021) doi:doi:10.1038/s41558-021-01218-z.
7) Johannes Bednar, Michael Obersteiner, & Fabian Wagner. On the financial viability of negative emissions. Nature Communications (2019) doi:10.1038/s41467-019-09782-x.
8) Johannes Bednar et al. Operationalizing the net-negative carbon economy. Nature (2021) doi:10.1038/s41586-021-03723-9.
9) Francis Dennig et al. Inequality, climate impacts on the future poor, and carbon prices. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (2015) doi:10.1073/pnas.1513967112.
10) Budolfson, M. et al. Climate action with revenue recycling has benefits for poverty, inequality and well-being. Nature Climate Change 11, 1111–1116 (2021).

11) Jan Christoph Steckel et al. Distributional impacts of carbon pricing in developing Asia. Nature Sustainability 1–10 (2021) doi:10.1038/s41893-021-00758-8.
12) Nils Ohlendorf, Michael Jakob, Jan Minx, Carsten Schröder, & Jan Christoph Steckel. Distributional Impacts of Carbon Pricing: A Meta-Analysis. Environmental and Resource Economics 78, 1–42 (2020).
13) Realmonte, G. et al. An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways. Nat. Commun. 10, 3277 (2019).

6.5.4 WITCH モデルによる、再生可能エネルギー由来の炭化水素に関する分析

(1) はじめに

本節では、Naghash 他 [1]に基づき、統合評価モデル WITCH[2]を用いた、再生可能エネルギー由来の炭化水素（RHCs; renewable hydrocarbons）の長期分析について報告する。

合成燃料は、化学変換プロセスによって製造される炭素ベースの液体燃料である。合成燃料の中でも、RHCs は、二酸化炭素や一酸化炭素と水素を使用して製造される。水素が風力や太陽光、原子力などのゼロエミッション電力から製造される場合、RHCs は従来型の炭化水素と同じ最終消費技術の形態を維持しながら、輸送部門を脱炭素化することが可能となる。生産と消費の両面から既存の資本設備機器を活用でき、既存の行動や規範を維持することが可能であることは、EV に比べ、RHCs の明確な利点である（表 6.5.4-1）。電気から合成燃料を製造するには、少なくとも 2 つの主要な変換ステップ、すなわち電気分解と炭化水素合成が必要である。また、RHCs の製造には二酸化炭素が必要であり、WITCH モデルでは、必要な炭素の主な供給源として DAC が利用されている（表 6.5.4-2）。

表 6.5.4-1 RHCs の利点と欠点 [1]

Advantages	Disadvantages
Perfect replacements for diesel, fuel oil and kerosene	Large energy losses due to long chain processes from manufacturing to final use
High energy density	
Existing infrastructure can be used for distribution, storage and delivery	They are currently more expensive than traditional hydrocarbons
Can be designed to burn cleanly to reduce particulates and nitrogen oxides	
They can be manufactured where most convenient	

表 6.5.4-2 WITCH モデルにおける DAC の想定 [1)]

Initial CAPEX	**876 $/ton CO_2**
CAPEX floor cost	100 $/ton CO_2
OPEX	5% of CAPEX
Lifetime	20 years
Electricity demand	1.6 GJ/ton CO_2
Heat demand	6.3 GJ/ton CO_2
Progress ratio	6%
Efficiency improvement rate	0.6% per year
Initial cumulative capacity	1 Mton CO_2 at world level

（注）WITCH モデルでは、DAC は 2020 年から利用可能と想定。

従来の WITCH モデルに対して、次の 5 点を改良し、RHCs オプションを含めた長期分析を行った。

- 競合する 2 つの技術による RHC の生産プロセスの追加（学習効果あり）
- DAC の炭素サイクルにおける RHC 製造プロセス。
- RHC 製造のための再生可能エネルギー発電の利用の追加
- 航空・海上輸送用燃料の需要に対応した新モジュールの追加（図 6.5.4-1）
- 道路交通モジュールの改良 （図 6.5.4-1）

これらのモデル拡張により、「炭素価格シナリオにおける RHC 生産への投資」を検討することが可能になった。

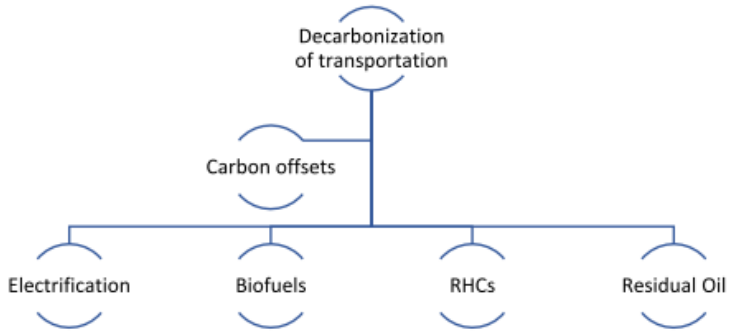


図 6.5.4-1 RHCs を追加した WITCH モデルの輸送部門の構造 [1)]

2100 年までの分析シナリオは、ベースライン（BAU）と、炭素価格シナリオ 3 種類である（図 6.5.4-2）。炭素価格シナリオは、いずれも世界同一炭素価格を想定している。

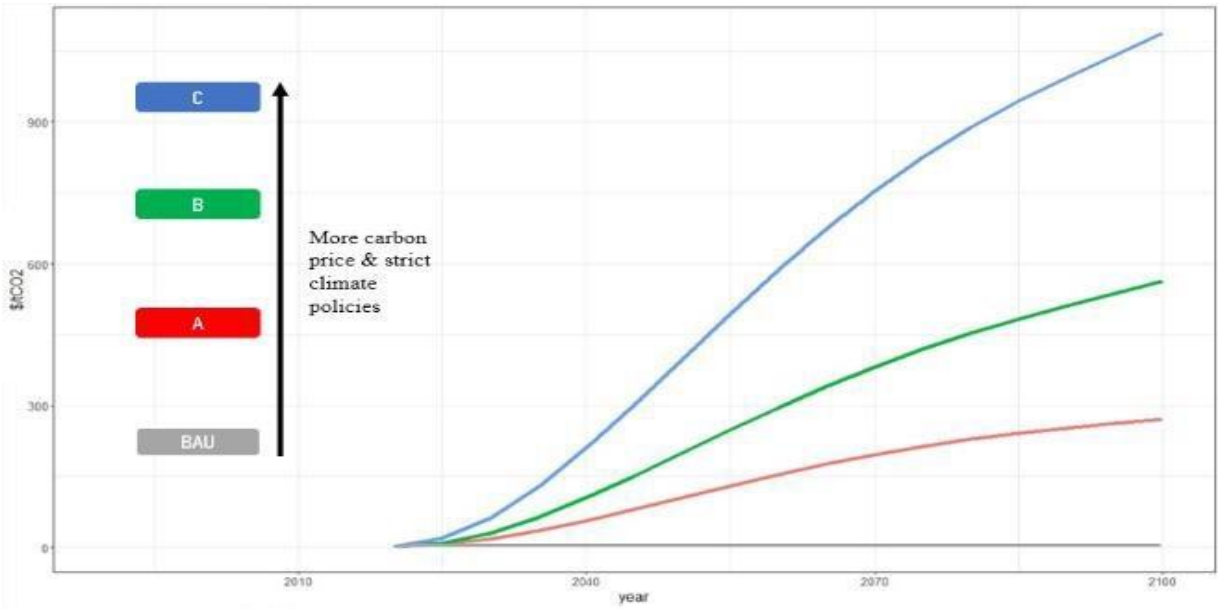


図 6.5.4-2 想定した炭素価格シナリオ [1)]

(2) 分析結果

図 6.5.4-3 には、各シナリオの CO_2 濃度と全球平均気温を示す。BAU シナリオでは、今世紀中は排出量が増え続け、2100 年には CO_2 濃度が 700ppm に達する。世界平均気温は産業革命前と比較して 3.5℃上昇する。炭素税 A は、気温上昇を 2℃程度に安定化させる。炭素税 B は、2100 年の気温上昇を 1.5℃で安定させるが、今世紀全体では 1.5℃より高い気温となる。最も高い炭素税 C だけが、気温上昇を常に 1.5℃未満に抑えることができる。

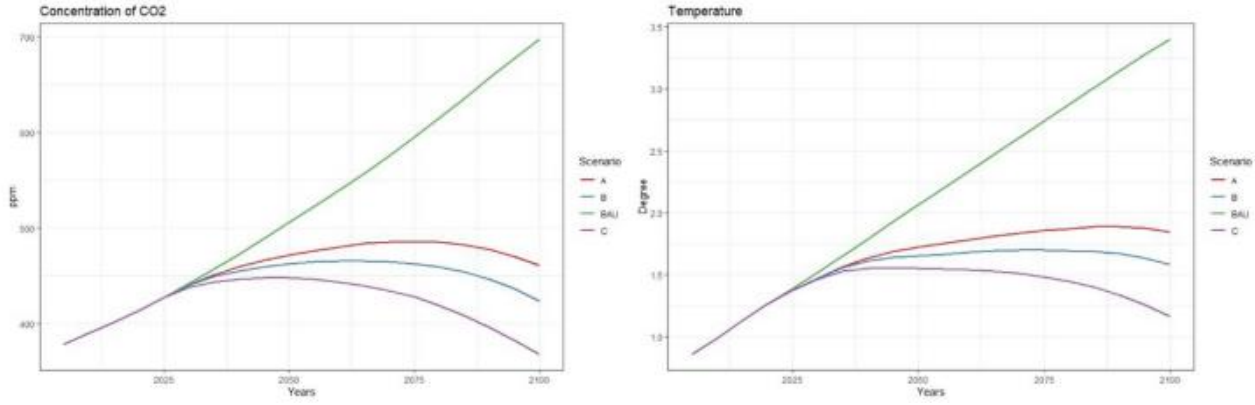


図 6.5.4-3 CO_2 濃度と全球平均気温 [1)]

図 6.5.4-4 には、各シナリオの RHCs 消費量を示す。炭素税が高いほど、RHCs の使用量は多くなる。炭素税が最も高い場合でも、2050 年以前には大規模な導入は行われない。BAU シナリオでは、炭素税が低い 2 つのシナリオよりも RHCs が早く使用されるという結果が推計された。これは、BAU シナリオでは、炭素価格がなくても、RHCs が石油の経済的な代替品となるためである。低炭素税シナリオでは、RHCs は競争力のある排出削減方法とはならないことを示している。

図 6.5.4-5 と図 6.5.4-6 には、それぞれ航空部門、海上輸送部門のエネルギー需要を示す。図 6.5.4-7 には、小型自動車における燃料シェアを示す。RHCs は、炭素価格が高い場合には、航空輸送、海上輸送、道路輸送の脱炭素化に貢献できることが示唆された。

図 6.5.4-8 には、DAC による回収量を示した。DAC が回収する炭素の量は、RHCs の製造に必要な量の数倍になると推計された。また、DAC は RHCs よりも経済的で、より早期に多くの地域で導入される。

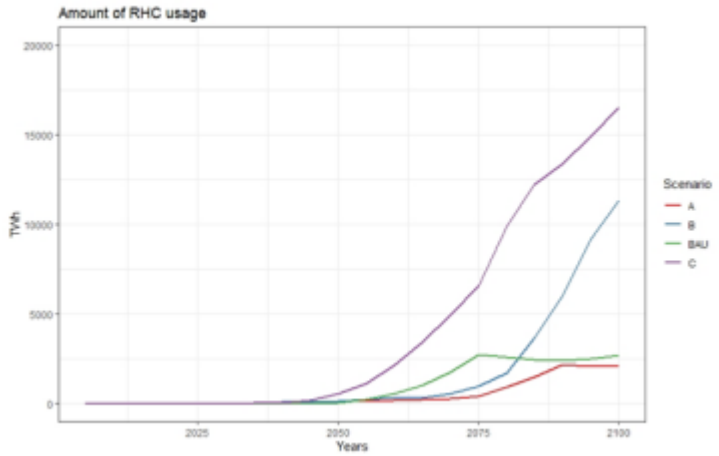


図 6.5.4-4 RHCs 消費量 [1)]

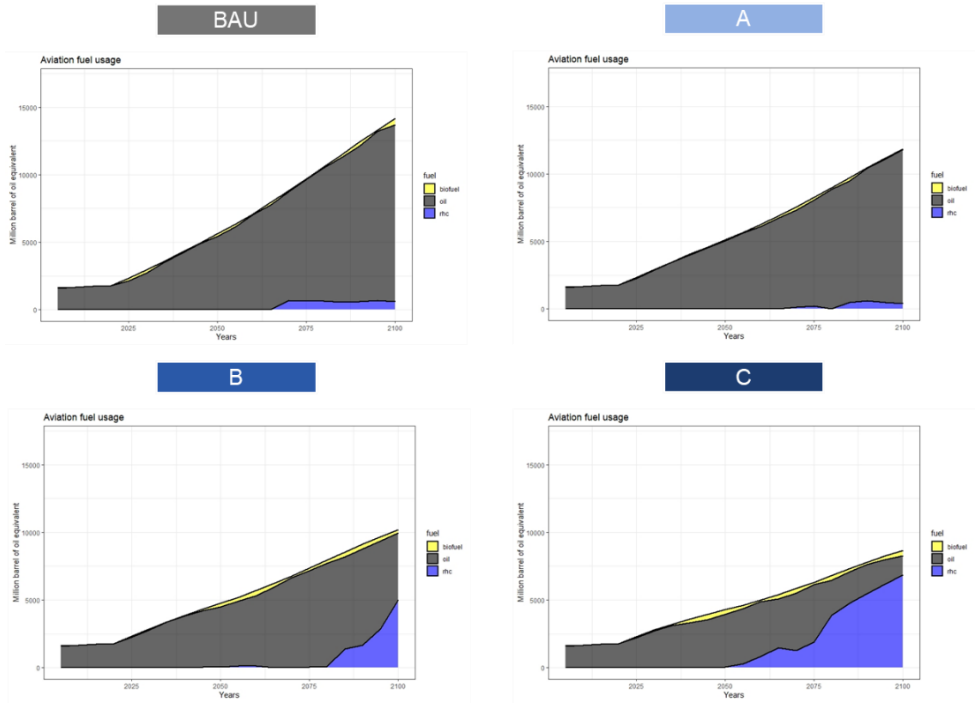


図 6.5.4-5 航空部門におけるエネルギー消費量 [1)]

（注）黄色、灰色、青色は、それぞれバイオ燃料、石油系燃料、RHCs を表す。

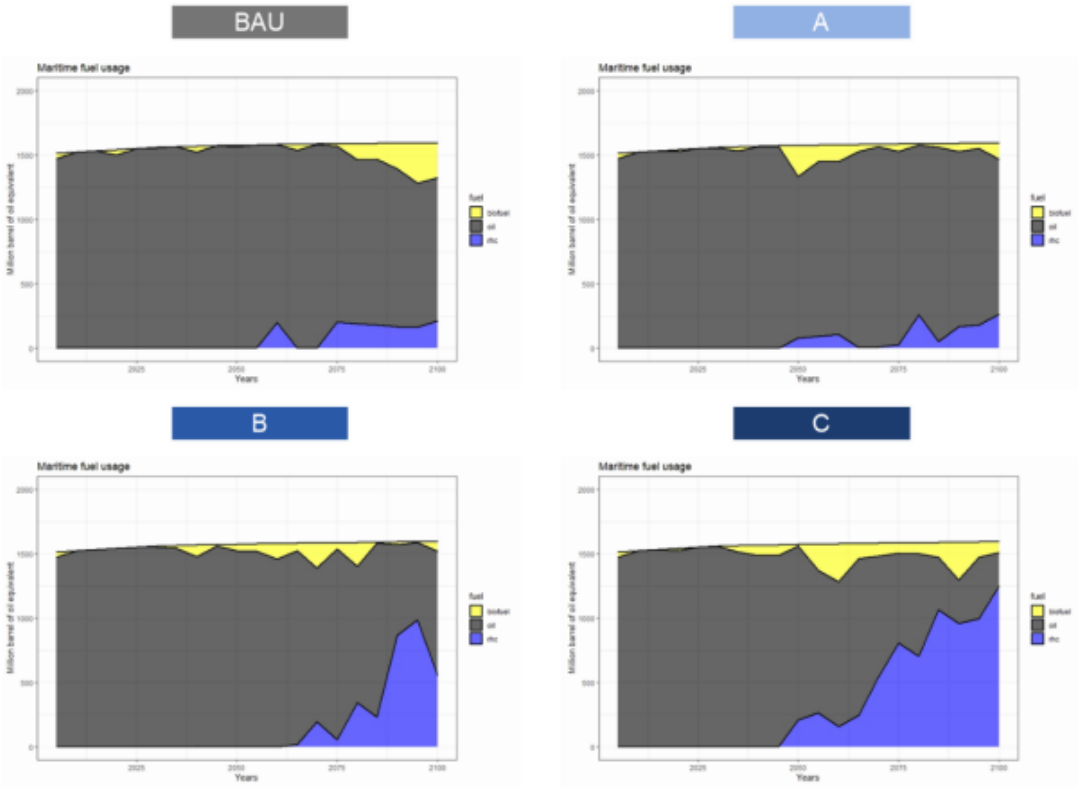


図 6.5.4-6　海上輸送部門におけるエネルギー消費量 [1)]

（注）黄色、灰色、青色は、それぞれバイオ燃料、石油系燃料、RHCs を表す。

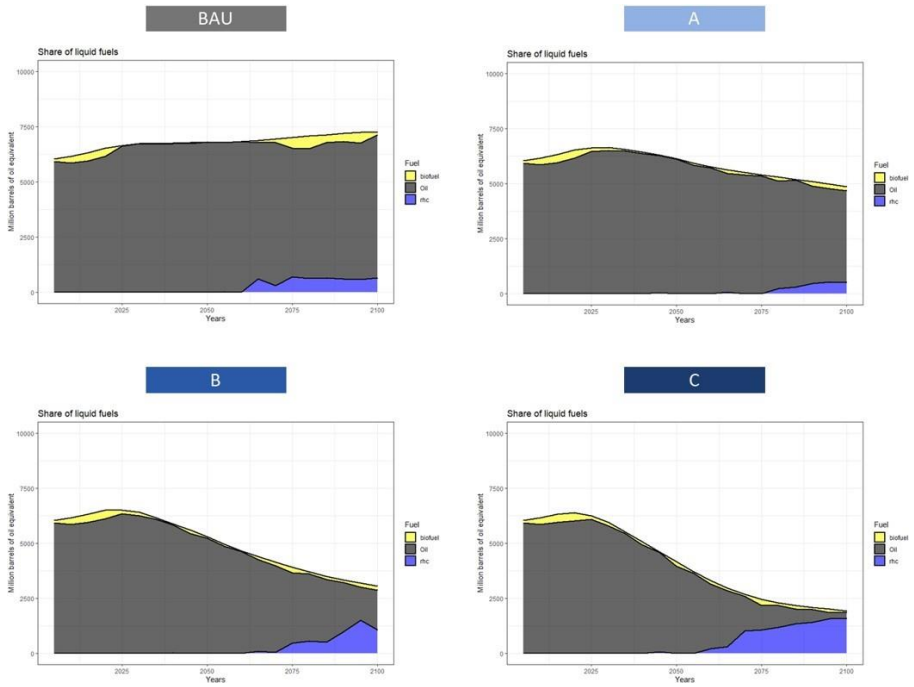


図 6.5.4-7　小型車の総エネルギー需要に占める RHCs と石油のシェア [1)]

（注）黄色、灰色、青色は、それぞれバイオ燃料、石油系燃料、RHCs を表す。

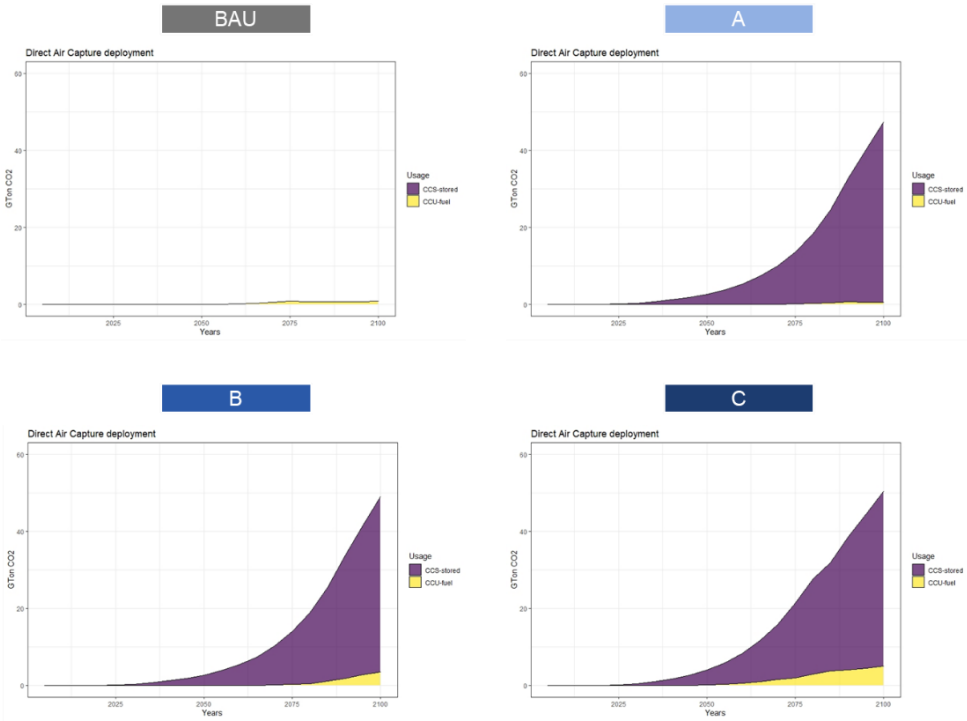


図 6.5.4-8　DAC 導入量 [1)]

（注）黄色、紫色は、それぞれ貯留（CCS）、燃料利用（CCU）を表す。

(3) まとめ

Naghash 他 [1)]に基づき、統合評価モデル WITCH における再生可能エネルギー由来の炭化水素（RHCs）の明示化と、代表的な 3 つの炭素税政策下での RHC を明示的なオプションとして含め長期分析を実施した。

RHCs は、炭素価格が高い場合には、航空輸送、海上輸送、量はさほど多くないものの道路輸送の脱炭素化に貢献できることが示唆された。また、DAC が回収する炭素の量は、RHC の製造に必要な量の数倍になると推計された。DAC は RHCs よりも経済的で、より早期に多くの地域で導入されると推計された。RHCs は、航空、海上輸送、小型自動車の ICE において、従来型燃料をほぼ完全に置き換える可能性がみられた。

参考文献（第 6.5.4 節に関するもの）

1) Naghash,H. et al(2021). Integrated Assessment of Renewable Hydrocarbons, A report of the RFF-CMCC European Institute on Economics and the Environment

2) Bosseti, V. et al. (2006) The WITCH Model: Structure, Baseline, Solutions, https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=960746

3) Stefan Siegemund, M. T. (2017). The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU (DENA). DENA.

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）やグリーンファイナンス、各国・各産業の気候変動対策について総合的な分析・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、IPCC WG1 および WG2 の最新の評価報告書の知見の概要についても整理した。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。また、日本における製品等に体化された間接的な電力輸入の推計、エネルギー価格変動に対する日本経済の耐性の評価、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、グリーン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（2030 年頃）に関する分析・評価を行った結果をまとめた。先進国を中心に多くの国が NDC の 2030 年の排出削減目標の深堀を行った。そこで、本研究では最新の動向をふまえ、排出削減費用を含む、複数の指標を採用し、各国 NDCs の排出削減努力の国際比較を実施した。また、日本の新たな 2030 年の排出削減目標-46%について、その経済影響についても分析・評価を行った。日本の排出削減目標実現には、大きな排出削減費用と経済影響が推計された。更に、炭素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、2030 年 NDCs を踏まえ、炭素国境調整税に関する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。これらは、世界全体のみならず、日本についても詳細に分析を行った。

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、国際モデル比較プロジェクトの各種動向、国際エネルギー機関 IEA 等のシナリオについてもその概要等を記載した。

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。一方で世界は多様であり、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。それ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。国間で限界削減費用に大きな差異が生じれば、グローバルな排出削減の効果は限定的となる可能性が高い。

現実の世界がどうなっているかは定量的データを基に、より良く分析する作業は、将来の実効ある排出削減方策を考える上で、極めて重要である。過去、世界の GDP と CO_2 排出量は強い正の相関関係があり、大きなトレンドで見ると、ほとんどこの関係性は崩れていないと見られる。また、世界の GDP と電力消費量の関係は、より強固に正の相関関係がある。日本国内で見ると、近年、GDP は成長しても、CO_2 排出量は低下傾向にあり、電力消費量でさえ低下傾向となっている。しかし、先進国共通で見られる現象であるが、多くは途上国への産業移転によって生じていると見られ、製品やサービスに体化された CO_2 や体化された電力として輸入される傾向が見られる。

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。そこで、次善の策として、欧州や米国は、自国の製造業等の国際競争力の低下を防ぎつつ、グローバルな排出削減を促すために、炭素国境調整措置の導入の検討を進めようとしている。しかしながら、本研究調査の分析でも示されたように、これは効果がないわけではないものの、日本のように、欧米よりも製造業が相対的に強く、輸出超過のような国における効果は大きくないと見られる。まして、報復措置がとられ、貿易戦争のような様相になるリスクを考えると、日本にとって望ましい戦略とは考えにくい。炭素国境調整措置のオプションは残しておくべ

きではあるが、あくまで、グローバルに排出削減努力の協調を目指していくことが世界および日本のグリーン成長にとって望ましいと考えられる。

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。

このような中、世界、日本、地方自治体、企業で、「2050 年カーボンニュートラル」を目指すとする動きが加速した。しかし、現状もしくは現状延長線上の技術進展では、2050 年カーボンニュートラルの実現は極めて大きなコストが必要と見られ、達成は極めて困難と考えざるを得ない。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。第 6 次エネルギー基本計画では、「あらゆる選択肢を追求する」とされた。

IPCC 1.5℃特別報告書（SR15）においては、典型的な 4 種類のシナリオが提示された。そのうちの極端な 2 種類について言及する。1 つは、徹底的な省エネシナリオであり、Low Energy Demand (LED)シナリオとして知られるものである。エネルギー需要サイドには本来必要な水準を大きく超えるエネルギーが利用されている。それはデジタル化技術の進展等により大きく低減できる可能性がある。それに社会変化が伴って低エネルギー需要、低 CO_2 排出社会を実現する可能性が示されたシナリオである。SR15 で引用された LED シナリオでは、CDR（Carbon Dioxide Removal）技術の利用は想定されていない。もう一つの典型的なシナリオは、化石燃料が引き続き安価な中、カーボンニュートラルを実現するシナリオであり、化石燃料を利用しながら、大量の CDR 技術を利用するものである。CDR には CCUS に加え、負の排出を実現する CCS 付バイオマス（BECCS）、大気中 CO_2 直接回収貯留（DACCS）等が含まれる。複数のシナリオを有しつつ、カーボンニュートラルの実現性を高めていくことが望まれる。カーボンニュートラルのためには、一次エネルギーとしては、原則、再生可能エネルギー、原子力、CO_2 回収貯留（CCS）付きの化石燃料のみで構成することが必要となる。IPCC も指摘しているように、ロバストな対策は、電力化率向上と電力の低炭素化・脱炭素化である。費用対効果の点から、再エネ、原子力、CCS の利用の組み合わせが重要である。一方、非電力をすべて電化することは困難であり、非電力のエネルギーを水素、合成燃料、バイオ燃料等に転換することが必要となる。ただ、これらは 2 次エネルギーであり、その元となる一次エネルギーは、再エネか CCS ということになる（＋一部、原子力もあり得る）。ただし、最終エネルギー消費で化石燃料利用が全く利用されないというのは技術的にも難しく、仮にできても急激なコスト増を導く可能性が高いため、

BECCS や DACCS のような負排出技術（NETs）の利用が重要になると考えられる。BECCS を大規模に実現するには相当大きな土地面積が必要であるため、DACCS への期待は大きくなる。一方、DACCS は大量のエネルギーを消費するが、余剰の変動性再エネを活用するなどしたシステム的な対応の可能性も示唆される。いずれにしても経済効率的に大幅な排出削減を実現するためには、技術間、部門間を統合したシステムとしての対応が重要であり、また、国、地域を跨いだ対策が重要である。よって、システムを横断した対策が進展するような組織、制度の構築が重要と考えられ、また、国、地域を跨いだ対策が促進されるような国際的な枠組み、制度の構築が重要である。

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どう誘発させ、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、「グリーン成長」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「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１　ALPS 国際シンポジウム

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）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。

2022 年 3 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 ―2030 年の排出削減に向けた対策・政策、国際競争力への影響―」を開催した。当日は、ハーバード大学ケネディスクール、未来資源研究所、カリフォルニア大学、国際応用システム分析研究所、欧州大学研究所における、この分野に造詣の深い著名な専門家より講演いただくとともに、先進的に温暖化対策に取り組んでいる JFE スチール㈱、電源開発㈱、トヨタ自動車㈱、アセットマネジメント One㈱といった企業の方から、2030 年の目標達成に向けた対応や国際競争力を維持するための取り組みについてご紹介いただいた。企業、官公庁、大学、研究機関、その他団体等から約 250 名超が参加（会場ならびに Web 配信にて）した。2050 年のカーボンニュートラル社会を目指し、2030 年の 46%削減目標達成を実現するために必要な取り組みについて、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になった。

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/2022/02/alpsfy2021.html)

開催年月日　2022 年 3 月 8 日（火）　10:00-17:30
開催場所　WEB 配信およびベルサール東京日本橋
（東京都中央区日本橋２丁目７－１）
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

プログラム

講演	**COP26 をどう読むか(The Outcome of COP26 and the Path Ahead)** Dr. Robert Stavins A. J. Meyer Professor of Energy and Economic Development, John F. Kennedy School of Government, Harvard University
講演	**気候変動対応に伴う国際競争力への影響と対応** **Carbon Border Measures: What Happens with Ambitious Climate Policies?** Dr. Billy Pizer Vice President for Research and Policy Engagement, Resources for the Future (RFF)
講演	**Climate Club のコンセプト・直近の動向(Making the Idea of Climate Clubs a Reality)** Dr. David Victor Professor, University of California, San Diego (UCSD)
パネル討論	**上記パネリストを交えた議論** (モデレーター) 有馬 純　東京大学公共政策大学院 特任教授 (パネリスト) Dr. Robert Stavins, Dr. Billy Pizer, Dr. David Victor
講演	**2030 年国別貢献 NDCs の排出 削減努力の評価とその含意** 秋元 圭吾 地球環境産業技術研究機構 システム研究グループ グループリーダー
講演	**産業の国際競争力への影響と国境炭素調整の評価** 本間 隆嗣 地球環境産業技術研究機構 システム研究グループ 主任研究員
パネル討論	**企業による「2030 年に向けた対応、産業の国際競争力」に関する意見交換** (モデレーター) 山地 憲治　地球環境産業技術研究機構 理事長 研究所長 (パネリスト) 手塚 宏之　JFE スチール株式会社 専門主監（地球環境） 中山 寿美枝 電源開発株式会社 執行役員 饗場 崇夫　トヨタ自動車株式会社 ＣＮ先行開発センター 環境エンジニアリング部 担当部長 寺沢 徹　アセットマネジメント One 株式会社 運用本部 責任投資グループ長
講演	**脱炭素化のシナリオ分析と排出削減の実現可能性** **Net zero emissions pathways, related feasibility challenges and enabling conditions** Dr. Keywan Riahi Program Director, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)
講演	**国境炭素調整に関する EU の政策動向(EU Climate Change Policy)** Dr. Jos Marie R. Delbeke Part-time Professor of European University Institute (EUI)

COP26 をどう読むか
(The Outcome of COP26 and the Path Ahead)

Dr. Robert Stavins
A. J. Meyer Professor of Energy & Economic Development,
John F. Kennedy School of Government, Harvard University

GHG 排出は排出する場所が直接影響を受けるわけではないためフリーライダーの問題であり、もしそれぞれの国や地域が、直接受ける気候上の利益と負担するコストだけを見たとしたら、自ら行動を起こさず他の国が行動を起こすのを待つことになる。だからこそ国際的な協調が不可欠となる。これは気候クラブの議論につながってくるかもしれない。時間的側面も考慮する必要があり、メタンのような短寿命の GHG もあるが CO_2 は長寿命であり、気候政策の効果が現れるのは数十年後になる。コストが先行し、享受する便益が遅れるため、将来の世代にコストを負わせるという政治的インセンティブが働きやすい。

COP26 では NDC の野心向上が見られた。石炭の段階的廃止と化石燃料への補助金廃止も注目されたが、COP26 直前の G20 では合意できず、COP26 でも表現が修正された。気候資金に関する 1,000 億ドルのコミットメントは、まだそれが達成されていないにも関わらず、それをさらに増やすことが促された。ロス&ダメージも議論となり、今後の検討のために対話の機会が設けられた。米中の共同声明があったが、他国に影響を与えるようなものではなかった。ようやく完成した 6 条のルールブックは、完璧ではないものの、懸念するほど悪いものではなかった。メタンプレッジなど国連気候変動枠組み条約（UNFCCC）外の行動もたくさん見られた。

個人的に大きな課題と考えることは、アメリカの NDC 目標（2030 年までに 2005 年比 50～52%削減）が本当に達成できるのかどうかということである。かなり野心的な気候変動法が成立しないと実現は難しい。風力発電や太陽光発電、CCS、技術イニシアティブ、EV のリベートに関するいくつかは成立するかもしれないが、包括的な法案が成立する可能性は低い。規制的なアプローチは議会の承認は必要なく、行政府で実施できるが、司法で阻まれる可能性がある。

最後にアメリカの政策行動に対する楽観的な見方を 2 つ紹介する。まず 1 つ目は、州レベルの政策や行動が効果的であるということ。特に西海岸、北東部、中西部では、州レベルの政策や行動が効果的である。ワシントンでの行動が不十分なこともあり、州レベルの政策はますます支持されるようになってきている。もう 1 つは、現政権はパンデミックの話でも気候変動の話でも、科学やその他の専門知識を受け入れているということ。専門家の力で健全な気候政策を立案できるかもしれない。

気候変動対応に伴う国際競争力への影響と対応
(Carbon Border Measures: What Happens with Ambitious Climate Policies?)

Dr. Billy Pizer
Vice President for Research and Policy Engagement,
Resources for the Future(RFF)

各国・地域が掲げるNDCはその野心度に大きな差がある。ここでは「非常に野心的な政策を掲げているにも関わらず、一部の国・地域だけが積極的な行動を取った場合に何が起きるか」を排出リーケージと国際競争力の点から分析、検証する。炭素価格がトン当たり$15の場合、エネルギー集約型産業の一部で生産が1%程度海外にシフトする可能性がある、という分析は以前に行ったが、今回は炭素価格がトン当たり$100かそれを上回る状況についての分析である。

分析には、EIEEのICESモデルとRITEのDEARSの2つのモデルを用いた。4つのシナリオの分析結果を紹介する。

シナリオ1：全ての国がNDCを達成した場合、リーケージは発生しないが、各国・地域の炭素価格が異なるため、競争力に影響を及ぼす可能性がある。

シナリオ2:ヨーロッパだけがNDCを達成､他の国は何もせずフリーライドの場合、排出リーケージが発生し、ヨーロッパで削減する40～50%は、他の国・地域での排出増によって相殺される。競争力にも影響を及ぼす。

シナリオ3：シナリオ2と同様、NDC達成はヨーロッパのみだが、エネルギー集約型産業のヨーロッパへの輸入品に国境炭素調整を行う場合、ヨーロッパ内のエネルギー集約型産業を保護できるが、リーケージには必ずしも有効でない。

シナリオ4:ヨーロッパ､アメリカ､日本が一つのクラブとして野心的に行動する（排出取引や税制により炭素価格の調和を図る）場合。4つのシナリオの中で最も削減量が大きい。その他の地域での排出量は若干増えるものの、日本、米国が達成する排出削減量に比べると小さい。競争力について、例えば、EUの国境措置によってヨーロッパの鉄鋼業界は、生産量減少及び、生産量に対する純輸入量の増加が抑制され、競争力への悪影響が緩和される。

まとめとして、リーケージに対しては、すべての国が目標を持ち、どんなに弱くてもその目標を達成するようにすること、競争力に対しては、貿易相手国と価格を調和させるか国境措置を取ることが、対応策として考えられる。

Climate Club のコンセプト・直近の動向
(Making the Idea of Climate Clubs a Reality)

Dr. David Victor
Professor, University of California, San Diego(UCSD)

気温上昇予測は 10 年前までは 4～5℃程度だったが、現在は 2.5～3℃ほどに下がってきており、幾らかの進展が見られる。パンデミックにより排出が大きく低下したが、その後のリバウンドで元の排出軌道に戻っている。

気候クラブの必要性に対する議論が高まっている。全ての国は排出や気候に与える影響という点で様々であるが、排出の多い大国については、それらの国々で協力や連携が始まる必要がある。

技術的なフロンティアを推進する政策が重要である。日本は鉄鋼、水素等の分野でそれらの中心的な位置にあるが、国内あるいは国を越えた形で、企業や国が協力し合う体制が現れつつある。

グラスゴーで行われた COP26 の場で、それらのセクターベースの気候クラブの出現が見られたのは望みがあることである。国や企業が技術的フロンティアを推し進めようとしている。

気候クラブの核となるアイデアは何か。意欲の連携（coalition of willing）と言うことができる。COP26 を主催した英国政府はセクター毎のクラブベースの様々な活動を精力的に調整した。そしてこれからは気候クラブが機能するためのインセンティブが必要となる。

気候は最終的には貿易と結び付くことは避けられず、CBAM が欧州や米国で提案されている。これらの国境対策はあらゆる種類の活動とリンクしているため、実際の対策に発展させる時には大きな課題が考えられる。

COP を行う意味は何か。それは全ての協力や連携が合法化するためのアンブレラであり、そのアンブレラは機能しなくてはならない。パリ協定第 6 条は単なるキャップ&トレードの問題でなく、我々はこのアンブレラを作成し、国がその下で特定のセクターにおいて活動するための許可も作り出している。

COP27 については多くの懸念がある。参加しない国、参加しても同意を拒否する国が出てくる可能性が高まっている。そのようなことが起きれば、主にクラブベースによる更なる脱炭素化の取り組みに悪い影響を与える。

上記講演者によるパネル討論
(モデレーター)
有馬 純
東京大学公共政策大学院 特任教授
(パネリスト)
Dr. Robert Stavins
A. J. Meyer Professor of Energy and Economic Development,
John F. Kennedy School of Government, Harvard University

Dr. Billy Pizer
Vice President for Research and Policy Engagement,
Resources for the Future(RFF)

Dr. David Victor
Professor, University of California, San Diego(UCSD)

先に講演した 3 名の米国人研究者とともに、有馬教授のモデレートの下で、COP26 の総括、COP27 に向けた展望、アメリカ国内政治問題やウクライナの問題を含めた国際的なエネルギー問題、米中関係、気候クラブの取り組みなどについて議論がなされた。

2030 年国別貢献 NDCs の排出 削減努力の評価とその含意

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

2021 年に米国ではバイデン政権が誕生し、2021 年 4 月に気候変動サミットが開催された。それに向けた米国からの要請等により、先進国を中心として 2030 年 NDCs の引き上げがなされた。日本政府も従来の 26%削減から 46%削減、さらに 50%削減の高みを目指すとした。一方、中国やインド、ロシアなど従来通りの目標という国もあり、NDCs の排出削減努力に一層の差異が出てきている可能性もある。

各国目標は、基準年が異なっており、また原単位での目標も含まれている。さらに各国間での潜在的な経済成長や省エネの実現度も異なり、再生可能エネルギー等の対策費用にも差異がある。そのため、排出削減努力の評価をすることは簡単ではない。

本報告では、排出削減目標の歳出削減努力の複数指標を用い、NDCs の排出削減努力の分析・評価を実施した結果を提示した。

これにより、先進国を中心に、NDCs 達成の CO_2 限界削減費用は相当に高いと推計され、炭素リーケージの懸念もあることがわかる。排出削減努力が小さいとみ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。

一方で、このようなギャップが埋まる可能性は低いとの認識も必要である。パリ協定は移出削減目標について国別貢献を提出しそれをレビューするといったプレッジ&レビューの仕組みにより、多くの国の参加を得たものの、限界削減費用の各国間の際は大きいままであり、パリ協定以外によるパリ協定を補完する枠組みを志向する動きも強まってくると考えられる。

産業の国際競争力への影響と国境炭素調整の評価

本間 隆嗣
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 主任研究員

産業競争力への影響に焦点を当て、日本の 2030 年▲46%削減目標・エネルギーミックスに関する分析を実施した。また、NDCs 削減目標の下での国境炭素調整措置の影響についても分析した。

▲46%では大きな経済影響（▲26%と比較して GDP▲25 兆円）と推計され、原発比率の低下（火力代替を想定）は、さらに大きな GDP 損失（▲６兆円）をもたらすと推計された。これは、エネルギー価格上昇による製造業等の競争条件の悪化による輸出の低下、財・サービス価格の上昇に伴う消費の低下による。▲50%を目指して、削減水準を厳しくすると、更に GDP ロスが大きくなっていく。例えば、鉄鋼部門に注目すると、輸出量が減ると共に、国内利用も減っていく。逆に、成長実現ケースの GDP を上回るには、「海外での設備投資額増に伴う日本製品」のシェアを、大幅に上昇させる必要がある。例えば、想定する被害関数によっては、成長実現ケースの GDP を上回るために、日本がシェアの 79%を占める必要がある場合もあるが、これは限界削減費用の地域差を小さくすることで、必要なシェアを少なくすることが出来る。

次に、エネルギー多消費産業に適用される国境炭素調整(以下、BCA）に焦点を当て、2030 年 NDC 目標下において、BCA が導入された際の影響分析を実施した。まず、BCA 無しの分析において、EU、米国、日本(Club2)は炭素価格が高く、経済への悪影響が推定される。特に、鉄鋼、化学部門が顕著である。一方、炭素価格が低い中国などの一部の地域では、エネルギー多消費産業の生産が増加する。次に、BCA 有りの分析において、Club2 の NDC 削減目標のもとでは、Club2 全体の鉄鋼産業の国際競争力は、生産量の減少、純輸入の増加により、大きく悪化する。ここで、輸出リベートを追加すると、例えば、鉄鋼セクターでは輸入に限定された BCA よりもはるかに生産と輸出の損失を軽減することができる。ただし、BCA の対象範囲ではない産業の一部に悪影響を及ぼす可能性がある。また、輸出リベートが WTO ルールに抵触する可能性があり、貿易紛争の懸念もあるので注意が必要である。そのため、リーケージを防ぐ観点からは、BCA よりも、世界的に協調された炭素価格の方が重要であり、NDCs の排出削減努力の協調化を図っていくことが重要であると考えられる。

企業による「2030年に向けた対応、産業の国際競争力」に関する意見交換
(モデレーター)
山地 憲治　　公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)
理事長 研究所長
(パネリスト)
手塚 宏之　　JFEスチール株式会社 専門主監（地球環境）
中山 寿美枝　　電源開発株式会社 執行役員
饗場 崇夫　　トヨタ自動車株式会社 ＣＮ先行開発センター
環境エンジニアリング部 担当部長
寺沢 徹　　アセットマネジメントOne株式会社 運用本部
責任投資グループ長

各社ごとのビジョンや対策の取り組みについて、紹介していただくとともに、気候変動対策の目標が厳しくなっている中、事業を進める上でのリスク、逆に新たなチャンスとして認識しているか、また金融市場からの排出削減取り組みに対する声は厳しくなっているが、国際競争を勝ち抜くための対応、さらには金融市場の側からどのような状況にあるかなど、幅広い意見交換を実施した。

炭素化のシナリオ分析と排出削減の実現可能性
(Net zero emissions pathways, related feasibility challenges and enabling conditions)
Dr. Keywan Riahi
Program Director, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

本講演では、最新のネットゼロ排出パスに焦点をあて、目標を実現するためのシステム変化や移行変化についても紹介し、異なる側面から実現可能かどうかを検討する。また、気温のオーバーシュートを避ける排出パスについても触れる。

一つの例として、RITEを含む9つの国際研究機関が参加しているENGAGEプロジェクトでは、気温のオーバーシュートを避けるものを含むいくつかの排出パスを検討し、全てのセクターにおける削減や早急な技術のポートフォリオの必要性を示した。また、行動変化やライフスタイル変化も同様に重要である。さらに、ネットゼロ排出量を達成するためには削減が困難な産業の排出量を相殺するため CO_2 回収技術（CDR）も非常に重要である。例えば、2050年までにおよそ5GtのCDRが必要であると推計されている。これが意味することは、2030年から2050年の間に世界的に大規模施設を毎日建設する必要がある。したがって、非常に甚大なR&D、デモンストレーション、スケールアップの加速が必要となり、例えば過去の太陽光発電などの技術普及スピードと同じでは、ネットゼロに貢献できず手遅れとなってしまう。

運輸、建築といった需要セクターは排出量をゼロにすることは困難である。そのため、エネルギー供給サイド、森林、土地利用における負の排出量によって相殺される。

カーボンニュートラル達成のタイミングは、全ての国・地域によって異なる。なぜなら、ネットの負の排出量を長期的に達成するためには、国によってポテンシャルが異なるからである。例えば、世界で費用最小化の場合、ラテンアメリカ等の土地が豊富な地域では負の排出を達成するポテンシャルが高いため、正の排出となるアジアや中東における排出量をいくらか相殺することができる。また、サービス部門、産業及び運輸部門におけるイノベーション及び脱炭素化が必要である。

IPCC 報告書においてシナリオパスの評価に使用された Conceptual フレームワークがある。これは 5 つの実現可能性の側面がある：①Geophysical（バイオマスポテンシャル、風力ポテンシャル、太陽光ポテンシャル)、②Economic（GDP ロス、炭素価格、投資、座礁化した石炭資産)、③Technological（風力、太陽光、原子力、BECCS、化石燃料 CCS)、④Socio-cultural（エネルギー需要変化、土地利用変化、食事の嗜好変化)、⑤Institutional （緩和スピード、組織的なキャパシティ）である。

消費者の嗜好変化、ニュービジネスモデル（シェアリング、循環経済)、デジタル化などのエネルギー需要側の行動変容も重要である。グラニュラー技術や統合されたデジタルサービスにおける急速なイノベーションが必要である。

また、ガバナンスと排出削減とは重要な関係がある。Government Effectiveness も実現可能性には重要な要素である (公共サービスの質､政治的プレッシャーからの独立性の程度、政策実施の質、政策のコミットメントの信頼性が評価対象となる)。

国境炭素調整に関する EU の政策動向
(EU Climate Change Policy)

Dr. Jos Marie R. Delbeke
Part-time Professor of European University Institute (EUI)

気候政策に関する国際状況を説明する。

パリ協定は多国間アプローチである。気候変動は西欧諸国の産業化によるものであるが、今後は新興国の産業化に関わってくる。欧州は気候変動に責任があると同時に機会であると考えている。

過去の排出量と GDP の推移をみると、排出量は 25%削減を達成し GDP は増加している。EU Green Deal を通して更に排出削減を行い､ネットゼロを目指し 2030 年に 55%削減する目標である。エネルギー部門からの排出は 2030 年にはほぼなくなり、運輸と産業部門ではそれ以降に徐々に削減していく。

EU Green Deal は巨大な投資が必要で､多くはエネルギー向けとなる他､運輸や建物、産業も対象となる。運輸と建物は電化が中心となり、産業は水素、CCUS、バイオケミカルなどの低炭素技術への投資を行う。

EU の気候変動政策は市場ベース、基準とベンチマーク、ガバナンスの 3 本柱で進める。市場ベースでは ETS の他、気候情報開示により透明性を高め、柔軟性とコスト効率性を追求する。基準では省エネや自動車排出､F ガスなどに厳しい標準を課している。ガバナンスは重要で、京都議定書を基に作成した MRV を EU27 か国で行い、トレースを行っている。

EU の気候変動政策は ETS（電力、産業、航空部門）と Non-ETS（運輸、家庭など小規模排出）の 2 ブロックで構成されている。ETS はメンバー国共通で、2030 年までに-61%削減の野心的目標を設定している。Non-ETS における削減目標は-40%で、国により差異を設けている。

EU ETS は 2005 年に開始され、大幅な排出削減を実現してきた。EU ETS 価格は 10€以下まで低下したこともあったが近年では 98€程度まで上昇し、市場は機能し始めていると言える。低炭素エネへの移行のシグナルとなっているがウクライナ問題が危機的状況となっており、別の懸念事項となっている。EU ETS 政策をレビューし、カーボンリーケージ対策として CBAM が提案されたほか、海運や国際航空への拡大、別の ETS の設置などが提案されている。

CBAM について説明すると、CBAM は EUA により価格付けされ、排出量に基づき決定される。当初は 6 部門が対象。スコープ 1 では直接排出のみ、その後間接排出も検討していく。無償排出は徐々に減らしていく。輸出国における明示的炭素価格政策のみが控除対象となる。2023～2025 年のパイロットフェーズでは報告とモニタリングのみで実際の支払いはない。

最終エネルギーにおける再エネシェアの 2030 年目標は、Fit for 55 の下、32%から 40%に引き上げる。

炭素価格は燃料転換の重要なツールで、ガスへの転換を促してきたがウクライナ危機で再エネがより重要になる。

EU のエネルギーミックスは大きく変化する。2030 年までに化石燃料の減少と原子力の維持、再エネの大幅増加のほか、エネルギー効率改善、EV やヒートポンプなどの電化が対策の中心であったが、ウクライナ危機で省エネ、再エネ、石炭など全ての技術や対策が再検討されることになる。

ファイナンスに関しては、持続可能なファイナンスに向けグリーンファイナンスの legislation が行われており、これにより透明性を高めていく。

結論として、これまで欧州は排出削減を実行してきた。炭素価格は注目を集め、排出削減に寄与し、その役割を果たしてきた。今後、更なる透明性向上を進めていく。また、55%削減というラディカルな目標に向け、投資は奨励されていく必要がある。化石燃料の代替として再エネ、ストレージ、デジタル化による柔軟性、エネルギー効率を中心に据えており、これまで市場は機能してきたがウクライナ危機で今後は流動的である。

付録２　国際競争力・国境炭素調整措置に関する WS 概要

はじめに

本事業では、地球温暖化問題研究で世界的に著名な米国未来資源研究所（RFF: Resources for the Future）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。本節では、2021 年 11 月 3 日、9 日に、RFF と RITE の主催で開催された、国境炭素措置に関するオンラインワークショップの概要について報告する。正味ゼロ排出を達成するための野心的な気候政策は、国際貿易を介することによって、排出源が排出削減の野心度の低い地域に移動しリーケージをもたらす場合、排出削減効果を減じるリスクにさらされることとなる（詳細は第 4.3 節、第 4.4 節）。これらのオンラインワークショップでは、より野心度の高い政策シナリオに基づく排出リーケージの範囲を検証した。またリーケージを緩和するための炭素国境調整措置の効果を、特に経済的影響を受けやすい部門について議論がなされた。

第 1 回：国境炭素措置：野心的な気候政策で何が起こるのか？（2021 年 11 月 3 日開催）[1]

Carbon Border Measures: What Happens with Ambitious Climate Policies?

＜スピーカー・パネリスト＞

- Carolyn Fischer　米国未来資源研究所（RFF）、世界銀行
- 本間 隆嗣　地球環境産業技術研究機構（RITE）
- Ramiro Parrado　RFF-CMCC 欧州経済環境研究所（EIEE）

＜パネル討論（モデレーター）＞

- Billy Pizer　米国未来資源研究所（RFF）

RITE 本間と RFF-CMCC の Parrado 氏により、各モデルの分析結果の説明がなされ（詳細は第 4.3 節参照）、CBAM が炭素リーケージや国際競争力に与える影響、CBAM の対象外の産業への影響、クラブ（削減目標の共同達成や CBAM を共同実施すると想定）を変化させた場合の影響などが示された。

削減目標が厳しい国が CBAM を実施することによって炭素リーケージや国際競争力を改善する効果はみられるものの、その効果は、炭素リーケージの約 2-3 割を改善させる程度であり、それほど大きな改善にならないことが示された。CBAM による改善効果は、野心的な削減目標による悪影響を上回ることはない可能性が大きい。RFF・世界銀行の Fischer 氏からも同様の知見が示された。

[1] https://www.rff.org/events/rff-live/carbon-border-measures-ambitious-climate-policies-emissions-leakage/

また、分析結果の注意点としては、すべての政策がカーボンプライシング（暗示的価格含め）によって実施されているという前提で分析されている点である。現実的には、明示的なカーボンプライシングを導入している国・地域でさえ、経済全体に課せられているわけではない、導入対象となっていない部門などが多い点に留意が必要である。すなわち、現実には、今回の分析で想定されているような想定ではなく、フリーアロケーションなどの優遇措置が取られているため、炭素価格のシグナルが小さくなっている。より現実的な政策をモデル分析に反映するのは、今後のモデル分析の課題といえる。また、GDP 影響だけではなく、社会厚生の変化を評価することも有益と考えられる。

第 2 回：国境炭素措置：リーケージに対応し気候野心を促進する政策（2021 年 11 月 9 日開催）[2]

Carbon Border Measures: Policies to Combat Leakage and Encourage Climate Ambition

＜スピーカー・パネリスト＞

- 秋元 圭吾　地球環境産業技術研究機構（RITE）
- Jos Delbeke　欧州大学研究所、ルーベン・カトリック大学
- Carolyn Fischer　世界銀行、米国未来資源研究所（RFF）
- Suzi Kerr　環境防衛基金（EDF）
- Massimo Tavoni　RFF-CMCC 欧州経済環境研究所（EIEE）

＜パネル討論（モデレーター）＞

- Raymond Kopp　米国未来資源研究所（RFF）

欧州大学研究所の Delbeke 氏は EU-CBAM の概要（対象セクター、対象排出量、EU-ETS における無償配布の対応等）を発表し、その後、RFF の Kopp 氏からは、G20 で定められた米国と EU 間の鉄鋼及びアルミニウムに関する貿易協定の概要が説明された。この協定では炭素集約度についての対応が含まれている。そして、RITE 秋元からは DEARS モデルの分析結果（詳細は第 4.2 節参照）が示された。さらに、CMCC の Tavoni 氏からは COP26 に発表されたインド、南アフリカ、ロシアの目標及びメタン削減宣言を反映したカーボンニュートラル目標による影響分析が紹介された。これらの目標を反映すると、IEA の最新の分析と同様、1.5℃と 2℃の気温上昇の間となることが示された。また、カーボンニュートラル達成には非常に高い炭素価格が必要であることが強調された。次に、世界銀行の Fischer 氏からは気候政策による費用増加の二つの構成要素が紹介された。費用は直接的な削減費用と排出量に含まれる費用から構成され、EU-CBAM は後者に該当する。また、カーボンリーケージのいくつかのチャネルについても言及があった。最後に、EDF の Kerr 氏からは、CBAM を途上国における衡平性か

[2] https://www.rff.org/events/rff-live/carbon-border-measures-policies-to-combat-leakage-and-encourage-climate-ambition/

らの観点からみると、解決法としては、最貧国を除外することやペナルティではなく利益を与えるメカニズムにすることが重要であるとの言及があった。

パネルディスカッションでは、輸出リベートの法的及び政策的問題や CBAM の WTO との整合性、炭素含有量の推計の困難さ等が議論された。



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