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

令和３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 地球環境研究センター 副研究センター長
	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
	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） 兼）技術企画部 地球環境グループリーダー
	中上英俊	（株）住環境計画研究所 代表取締役会長
	野村浩二	慶應義塾大学産業研究所 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 社会環境システム研究センター 統合環境経済研究室 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 プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員
	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	国立研究開発法人 国立環境研究所 地球環境研究センター

		主席研究員
	山　本　博　巳	（一財）電力中央研究所 エネルギーイノベーション創発センター 上席研究員
	横　木　裕　宗	茨城大学大学院 理工学研究科 都市システム工学専攻 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
	伏　見　温　子	RITE システム研究グループ 主任研究員

＜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
	小　田　潤一郎	RITE システム研究グループ 主任研究員
	金　星　春　夫	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
	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
	金　子　洋　之	日産自動車（株） 企画・先行技術開発本部 技術企画部 シニアエンジニア
	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
	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）

	種子田　克　哉	（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 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	（一財）日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット 需給分析・予測グループ 研究主幹
	松　橋　啓　介	国立研究開発法人 国立環境研究所 社会環境システム研究センター 環境政策研究室 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 システム計画室 室長
	佐　野　史　典	RITE システム研究グループ 主任研究員
	小　田　潤一郎	RITE システム研究グループ 主任研究員
	金　星　春　夫	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 宇宙輸送技術部門 H3 プロジェクトチーム（併） 主任研究開発員
	中　山　寿美枝	電源開発（株） 審議役
	野　村　浩　二	慶應義塾大学産業研究所 教授
	古　橋　　真	ソニー（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
	金　星　春　夫	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 副理事長 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 地球環境研究センター 副研究センター長
	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 社会環境システム研究センター 副センター長
	平　林　由希子	芝浦工業大学 工学部 土木工学科 教授
	松　尾　雄　司	(一財)日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット 需給分析・予測グループ 研究主幹
	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
	小　田　潤一郎	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
	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 15

1.1 背景 16

1.1.1 世界の温室効果ガス排出の動向 16
1.1.2 気候変動枠組条約パリ協定 18
1.1.3 国連持続可能な発展目標 18
1.1.4 日本のエネルギーおよび地球温暖化政策の動向 19
1.1.5 IPCC 関連の動向 32

1.2 本研究の目的と実施内容 32

第 2 章 気候変動リスクマネージメント 37

2.1 気候変動リスクマネージメントの考え方 37

2.2 気候変動リスクと COVID-19 リスク 45

2.2.1 世界の CO_2 排出量の現状と新型コロナによる影響 46
2.2.2 新型コロナと地球温暖化のリスク対応 47
2.2.3 コロナ後のエネルギー・温暖化対策：脱炭素化に向けて 51
2.2.4 COVID-19 からの気候変動対応へのレッスン 52

2.3 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 53

2.3.1 日本政府による気候変動関連のイノベーション創出に向けた取り組み 54
2.3.2 企業のイノベーションを考える上でのポイント：日米企業の比較を踏まえて 56
2.3.3 日本企業によるイノベーション戦略の事例研究と課題の考察 57
2.3.4 まとめ 59

第 3 章 グリーン成長の限界と機会 61

3.1 グリーン成長の限界と機会―理論と観測 61

3.1.1 デカップリング・カップリングに関する状況 61
3.1.2 CO_2 排出量と GDP の連関に関する分析 64

3.1.3 デカップリング・グリーン成長の定性的理解 66

3.2 エネルギー価格変動に対する経済耐性の評価 68

3.2.1 はじめに 68
3.2.2 分析フレームワーク 70
3.2.3 エネルギー価格およびコストの日米水準比較 74
3.2.4 日本の RUEC 上昇の要因分解 79
3.2.5 RUEC 変化の産業起因 90
3.2.6 結び 94
3.2.7 補論 A：推計結果表 97
3.2.8 補論 B：エネルギー分析用の生産性統計 99

3.3 間接的な電力輸入 102

3.3.1 はじめに 102
3.3.2 フレームワーク 104
3.3.3 データ 107
3.3.4 測定結果 108
3.3.5 結び 125

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 127

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 128
3.4.2 エネルギーおよび CO_2 排出に関する世界主要国との比較分析からの日本の排出削減への取り組み評価 129
3.4.3 低炭素社会実行計画の産業・エネルギー転換部門参加業種における排出削減努力の分析 132
3.4.4 まとめ 136

3.5 再生可能エネルギー導入の国内外の動向 138

3.5.1 世界における再生可能エネルギーの導入状況 138
3.5.2 再生可能エネルギーのコスト動向 144
3.5.3 日本における再生可能エネルギーの導入状況 146
3.5.4 日本における再生可能エネルギー拡大のための系統対策 150

3.6 エネルギーシステム改革と温暖化対策 153

3.6.1 電力自由化の市場と温暖化対策 153
3.6.2 エネルギーインフラにおける気候変動への適応 160

3.7 サステナブルファイナンスの動向とモデル分析例の整理 160

3.7.1 サステナブルファイナンスに関する背景と動向 160

3.7.2 グリーン・ファイナンスの使途：グリーンボンド原則と EU タクソノミー 161
3.7.3 トランジション・ファイナンス 164
3.7.4 サステナブルファイナンスの定量分析例 165
3.7.5 サステナブルファイナンスの定量分析の検討：DNE21+モデルを用いて 166
3.8 気候変動政策に伴う費用負担の格差拡大の課題 168
3.8.1 Best et al. (2021) による太陽光発電補助金の分析 168
3.8.2 V. Lekavicius et al. (2020) による家庭向けエネルギー機器導入補助制度の分析 173
3.8.3 気候変動政策に伴う費用負担の格差拡大分析に関する課題 178
第 4 章 中期緩和対策（パリ協定国別貢献 NDCs）分析 179
4.1 2020 年以降の排出削減目標（NDCs）に関する分析・評価 179
4.1.1 NDCs の排出削減コスト等の評価 179
4.1.2 国際競争力への影響評価 182
4.2 NDCs 評価の他研究の調査 210
4.2.1 近年発表された NDCs に関する研究 210
4.2.2 UNEP による評価 212
4.3 国境調整税に関する動向調査とモデル試算例 216
4.3.1 国境調整税に関する国際動向 216
4.3.2 国境炭素調整に関する先行研究事例 217
4.3.3 国境調整税に関する DEARS モデルによる試算例 223
第 5 章 長期緩和シナリオ分析 243
5.1 ゼロエミッションに向けた長期温暖化対策技術の調査 244
5.1.1 完全自動運転車実現に伴うカーシェア・ライドシェア誘発のモデル化の更新 246
5.1.2 国際航空を中心とした技術動向等 259
5.1.3 水素、CCU・合成燃料、DAC の技術動向 264
5.1.4 各種技術動向を踏まえたモデルの改良 298
5.2 Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)の更新 309
5.2.1 鉄鋼部門 309

5.2.2 セメント部門 312
5.3 長期緩和策分析とそのインプリケーション 315
5.3.1 長期緩和策分析 315
5.3.2 航空部門の世界エネルギー需給影響分析 331
5.4 生活行動に基づく需要発生メカニズムの調査 338
5.4.1 はじめに 338
5.4.2 調査概要 339
5.4.3 生活行動とエネルギーに関する既往研究や統計の情報収集 341
5.4.4 with/after コロナの生活行動に与える影響の情報収集 364
5.4.5 分析フレームワークの具体化及び改良 389
5.4.6 「隠れた費用」に関する情報収集 411
5.4.7 まとめ 427
5.5 最終需要部門の変化に伴う各種基礎素材生産への影響分析-IIASA 報告書より 433
5.5.1 はじめに 433
5.5.2 背景・位置づけ 433
5.5.3 素材需要量に関するシナリオ分析 433
5.5.4 素材供給部門のモデル化・分析 438
5.5.5 素材需給の内生的分析結果 440
5.5.6 最終需要部門の変化に伴う各種基礎素材生産への影響分析（IIASA 報告書）のまとめ 443
5.6 情報技術等を活用した日本の食品廃棄低減による世界のエネルギー消費と GHG 排出への影響分析 443
5.6.1 背景と目的 443
5.6.2 分析方法 445
5.6.3 分析結果 457
5.6.4 まとめ 466
5.7 Non-CO_2 GHG 排出削減の最新評価に関する調査 469
5.7.1 EPA(2019)の概要 469
5.7.2 EPA(2019)の主な分析結果 470
5.7.3 まとめ 471
5.8 地球温暖化対策と土地利用・食料アクセスに関する分析 472
5.8.1 はじめに 472
5.8.2 食料アクセス指標 473

5.8.3 分析方法 474
5.8.4 分析結果 479
5.8.5 まとめ 489

5.9 温暖化緩和による大気汚染低減コベネフィット評価に関する調査 .. 491

5.9.1 はじめに 491
5.9.2 GHG 排出削減費用と PM2.5・オゾン低減コベネフィットの分析例 492
5.9.3 今後の課題 500

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 502

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 502

6.1.1 ネットゼロ排出戦略 502
6.1.2 ネットゼロ排出に関する先行研究 505
6.1.3 米・中・EU のネットゼロ排出シナリオ 508

6.2 ENGAGE 516

6.3 IEA WEO の分析 521

6.3.1 WEO シナリオの変遷 521
6.3.2 IEA WEO2020 シナリオと本研究での分析シナリオとの比較 553

6.4 水素エネルギーシナリオのレビュー 558

第 7 章 まとめ 564

付 録 ALPS 国際シンポジウム 571

要　　約

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」報告書

要　約

本報告書は、令和２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。2019 年の第 25 回締約国会議（COP25）では、協定実施に係る詳細ルールの策定の内、COP24 で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たが、合意を見ず、先送りとなった。また、2030 年目標の深堀りを促す方法についても意見が分かれた形となった。2020 年の COP26 で再び議論される予定であったが、COVID-19 の影響により 2021 年に延期となった。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。中国も 2060 年までに実質ゼロ排出を目指すとし、また、2021 年 1 月に発足した米国バイデン政権も、パリ協定への復帰を宣言し、2050 年までに実質ゼロ排出を選挙公約とするなど、意欲的な排出削減を目指す動きが国際的にも加速してきている。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。

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、気候変動影響および適応策の経済影響・経済効果の分析、評価を行った。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。早期の実質ゼロ排出実現への要請が強まってきている状況を踏まえ、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、従来以上に多様な排出削減に寄与し得ると考えられるオプションを考慮して分析を行った。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や IPCC の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等について記載した。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。人為的な起源によって地球温暖化がおこり、気候変動が引き起こされることはほぼ疑いの余地がない。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℃目標などを決めたとしても、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・経済効果の分析例についても記載した。

更に、COVID-19 のリスクとリスクマネージメントを踏まえ、気候変動リスクとリスクマネージメントとの比較をし、COVID-19 からの教訓についても検討を行った。大幅

な排出削減のためには、様々な技術のイノベーションが必要であり、イノベーション誘発の戦略も気候変動リスクマネージメント戦略全体と調和を図ることの重要性を指摘した。IoT、AI 等の進展が見られ、それらがシェアリングエコノミーを誘発し、それが他の様々部門にも影響を及ぼし、気候変動対策に与える可能性について議論を行った。気候変動対策の直接的な技術ではなく、基礎的な研究、技術を含め、要素技術の広範なる進展が気候変動対策においても極めて重要であることを指摘した。

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。

また、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、入手可能な最新データに基づき、世界主要国の消費ベース CO_2 排出量の分析を行った。そして、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。

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。パリ協定の枠組みにおいては、NDCs の国際的なレビューが重要となる。本研究においては、特に主要国について、各国の技術展開の制約やエネルギー安全保障等、温暖化対策以外の目的への配慮、また政治的な事情等の制約により、NDCs の排出削減目標達成の費用等がどのように変化するのかについてモデル分析によって評価を行った。各種制約によって、削減費用は相当大きく増大する可能性があることが示された。最近の各国 GDP 動向の変化を反映した NDCs の限界削減費用等の推計も実施した。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、また米国でも国境調整税導入の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、国境調整税導入の影響に関する試算を行った。

第 5 章では、世界エネルギー・温暖化対策技術評価モデル、および、経済モデルによって、長期の温暖化対策・政策の総合的な分析を行った。日本政府は、2050 年にカーボンニュートラルを目指すとした他、国際的にも早期の実質ゼロ排出実現への要請が強まってきている。そして、日本政府は、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」を発表している。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について、従来以上に多様な排出削減に寄与し得ると考えられるオプションを考慮して分析を行った。

具体的には、昨年度に引き続き、航空部門の低炭素化、脱炭素化に向けた対策技術を積み上げる形でモデル化の精緻化を行った。また、CO_2回収利用（CCU）の一つである合成燃料についてもモデル化を行った。更に、大気中からの直接 CO_2 回収（DAC）についてもモデル化を行い、カーボンニュートラルに向けた多様な技術オプションを評価できるようにした。そして、下記のカーシェアリング・ライドシェアリングの効果を含めて、2050 年までを含む、複数の実質排出ゼロに向けた排出シナリオの下で、DNE21+モデルを用いて、総合的なシナリオ分析を行い、トランジションを含め、どのような技術がどのような寄与を果たすことが期待されるのか、そのときの排出削減費用がどの程度なのか等について推計を行った。

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などを実施した。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、IPCC 等の動向および国際的な政策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。また、IPCC では第 6 次評価報告書（AR6）が本格化している中、それを見据え新たな国際モデルプロジェクトが動き出しており、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。また、国際エネルギー機関（IEA）による世界エネルギー展望 WEO2020 の概要について、過去の展望の変遷を含めてまとめるとともに、本事業の分析との比較についてもとりまとめた。

パリ協定では、すべての国が参加する排出削減枠組みに合意でき、パリ協定実施に係る詳細ルールについても、市場メカニズム関連のルール以外は合意がなされ、2020 年からパリ協定が実施段階に入ったところである。しかし、提出された各国 NDCs の排出削減努力には大きな差異があるとも見られる。国際的な協調がなければ世界全体での実効ある排出削減にはつながらない。また、パリ協定では、2℃目標のみならず、1.5℃目標、さらには 21 世紀末に実質ゼロ排出とする目標も言及され、また、2050 年までの実質ゼロ排出の実現を目標として掲げる国も増加してきている。しかし、意欲的な長期目標の宣言と、短中期の排出削減の取り組みにはギャップが大きいと見られる国もあり、現状の世界の排出量推移や NDCs から予想される排出量からは、これら

の長期目標は極めて実現が困難な目標と見ざるを得ない状況とも考えられる。COVID-19による大幅な排出の低減は、短期的な事象と考えるべきであり、世界排出の増加基調は大きくは変わっていないと見るべきである。ただし、実現の不確実性は大きいものの、技術、社会のイノベーションにより、大幅なエネルギー需要低減の機会も存在している。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」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 2020: 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. At the COP25 in 2019, the guidance for Article 6 of the Paris Agreement (market and non-market approaches), an unresolved item of the Paris Rulebook negotiation, was discussed. It was scheduled to be discussed again at COP26 in 2020, but was postponed to 2021 due to COVID-19 pandemic. 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. Furthermore, the Biden administration in the United States, which was inaugurated in January 2021, declared its intention to return to the Paris Agreement and made a campaign pledge to achieve net zero emissions by 2050. While global community generally recognizes the need to increase climate ambition, there are wide differences in their specific actions. The upcoming Sixth Assessment report and Special Reports are being drafted and are expected to provide the most recent scientific knowledge regarding climate change.

Within this project, we assess 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. 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 reviwed the trend and modelling-based analyses on green finance. In Chapter 4, we analyse 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. In light of the growing interests in achieving net zero carbon emissions by 2050 or earlier, we’ve upgraded our integrated assessment model in incorporating diverse mitigation options more than ever to assess the effects of emissions reduction in both the demand and supply side of energy systems.

Chapter 6 describes the latest overseas climate policies and IPCC activities as well as the various model analysis that were conducted within each international model comparison project. 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 paragraph.

Chapter 2 addresses the issue of climate risk management. Today, there is almost no room left for any doubt regarding the argument that climate change and global warming have an anthropogenic origin. 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, 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 includes analysis of the economic impact and effectiveness of climate change adaptation.

Furthermore, based on the risks and risk management of COVID-19, a comparison was made between climate change risks and risk management, and lessons learned from COVID-19 pandemic were also discussed.

We point out the necessity to harmonize risk management strategies and innovation strategies since technology innovation will be necessary to achieve large emissions cuts. As we observe an important development of AI, IoT, which induce sharing economy and have impacts on other sectors, we discussed the effect it could have on climate mitigation measures. It is essential to note that, beyond technologies directly linked with climate change mitigation, widespread development of such underlying technology, including basic research and technological development, is exceedingly important.

Chapter 3 examines limits and potential of green growth using data and quantitative analysis as far as possible.

Moreover, it examines the opportunities for green growth – while properly recognizing its limits – through the estimation of consumption-based CO_2 emissions with available latest data. We also 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 preliminaly 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. We discussed issues to be addressed in promoting global warming mitigation under deregulation of electric power. Furthermore, we summarized the trend in Green Fiance and its challenges based on the modeling analysis.

In Chapter 4, we analyse and assess the post-2030 targets of the Nationally Determined Contributions (NDCs) contained in the Paris Agreement. Given the framework of the Paris Agreement, such an international review of NDCs is essential. In this study, we used model to assess NDC implementation costs for major countries and observe how these costs change according to the constraints of each country in terms of technological development and

energy security, to their own concerns aside from climate change mitigation and to the state of their political affairs. For each type of constraint, we find that there is a possibility that this constraint might cause a huge increase in emissions reduction costs.

Estimates of the marginal abatement cost of NDCs reflecting recent changes in GDP trends in each country were also made. We conducted a literature review and sorted peer-reviewed publications regarding NDCs assessment. In addition, since the European Commission as well as the United States are plannig a border tax adjustment we conducted broad research on border tax adjustment policy and upgraded our energy-economic model to analyze the impacts of the policy.

Chapter 5 carries out a comprehensive analysis of long-term global warming measures and policies using integrated assessment model and global energy-economic model. The Japanese government has announced the "Green Growth Strategy associated with Carbon Neutrality in 2050" in December 2020. Given the growing interest in calling for net zero carbon emissions, we have upgraded our integrated assessment model, DNE21+ model, in incorporating diverse mitigation options more than ever and assessed these options from both demand-side and supply-side of the energy systems in emissions reduction.

Continuing from last year, we carried out modeling analysis for low-carbonization and decarbonization of the aviation sector.in detail, taking into consideration of their mitigation technologies and practices in a bottom up manner. Synthetic fuels, one of the CO_2 capture and utilization (CCU) options, were also modeled. In addition, direct air capture (DAC) was modeled to enable the evaluation of various technology options for carbon neutrality. We also evaluated the effects of car sharing and ride sharing described below. With all these variety of options we conducted a comprehensive analysis for energy transion scenario, including net zero emissions up to 2050, with our DNE21+ model to identify what technologies could contribute to emissions reduction, and to estimate their costs associated with mitigation.

On the energy demand side, we studied the impacts of IoT and AI technologis on lowering energy demand, such as effects of the realization of fully automated vehicles on car sharing and ride sharing and their application to food systems for reducing food waste. 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 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 latest trends for IPCC and international policies, and summarizes the current situation for international inter-modeling comparison projects. Moreover, as the Sixth Assessment Report (AR6) preparation is in progress, international inter-modeling comparison projects are being run in view of contributing to it: ENGAGE (Exploring National and Global Actions to reduce Greenhouse gas Emissions) to analyze and evaluate the mitigation pathways that can technically, socially and politically viable for the Paris Agreement goals. This chapter also summarizes the World Energy Outlook (WEO) 2020, including the transition from the past outlook, published by the International Energy Ageny (IEA), comparing with our research results.

The Paris Agreement managed to set up a framework where all countries should participate in emission reductions and a rulebook to make the Paris Agreement work in practice was agreed except for the Article 6 mechanisms, and the Paris Agreement has finally entered the implementation phase from 2020. However, we can see that there are large differences of emissions reduction efforts among NDCs of different countries. The world will not achieve effective emissions reduction without international cooperation. Moreover, the Paris Agreement not only aims at a 2ºC target, but seeks efforts to a 1.5ºC target, and the number of countries which set net zero-emission targets by 2050 is increasing. However, there appears to be a large gap between the declaration of ambitious long-term goals and efforts to mitigate emissions in the short and medium term in some countries, and given the current trends in global emissions and projected emissions from NDCs, these long-term targets are considered to be extremely challenging in the current context. The significant reduction in emissions due to COVID-19 pandemic should be considered as a short-term event, and the upward trend in global emissions remains largely unchanged. Still, since there are huge uncertainties around its implementation, there could be opportunities for large reductions in energy demand stemming from technological and social innovations. It is thus vital to create a socioeconomic environment ripe for extensive innovation.

As an ambitious target does not neccessarily 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. 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（具体的には 2030 年もしくは 25 年）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。また、2019 年 9 月には国連で国連気候行動サミットが開催された。そして、66 カ国・地域が 2050 年までに温室効果ガス（GHG）排出量を実質ゼロにすると約束するなど、実質ゼロ排出（脱炭素化）への動きが加速している（ただし、宣言した国は世界の全排出量の 13%程度）。また、2019 年 12 月 3 日時点で、1219 の地方政府・自治体（住民総数は約 7 億 9800 万人）が気候非常事態宣言を行うなど、気候変動危機への懸念も広がってきた [1)]。日本でも、2020 年 11 月に衆参両院において、気候非常事態宣言が採択された。

このように気候変動への対応が強まってくる一方で、必ずしも世界の足並みが揃っているわけではない。2019 年 6 月に大阪で開催された G20 会合でも気候変動に関する文案は最後まで揉めて、首脳宣言には、異例な形で、米国の考え方が別途記載された。また、2019 年 12 月のマドリードで開催された COP25（議長国はチリ）においても、各国間で意見の対立があり、大きな点で合意を見ることはできなかった。COP25 終了後、国連のグテーレス事務総長は、「COP25 の結果には失望している。国際社会は、気候危機に立ち向かうための緩和策・適応策・資金提供に対する意欲の高まりを世に示す重要な機会を逃した。」と発言した。なお、2020 年に英国グラスゴーで開催予定であった COP26 は、COVID-19 により 2021 年開催へと延期となった。

EU は、2019 年 12 月にフォン・デア・ライエン体制が発足し、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。

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たところである。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。

日本政府は、2019 年 6 月の大阪 G20 会合に合わせる形で、「パリ協定に基づく長期戦略」[2)]を策定した。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」とした。そして、2020 年 1 月に「革新的環境イノベーション戦略」[3)]を策定した。そこでは、全 5 分野について、重要かつ共通的な 16 の技術課題に分類し、GHG 削減量が大きく、日本の技術力による大きな貢献が可能な 39 テーマを設定した。革新的技術を 2050 年に確立することを目指し、39 テーマそれぞれについて、①イノベーションの目標となる具体的コスト、社会的インパクトを明確にするための世界での GHG 削減量、②技術開発内容、③実施体制、④要素技術開発から実用化・実証開発までの具体的なシナリオとアクションを示した。更には、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、『脱炭素社会』実現を加速させる方向性を示した。そして、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」[4)]を策定した。この「グリーン成長戦略」は、14 の重要分野を選定しそれぞれについて高い目標を掲げて、現状の課題と今後の取組、予算、税、規制改革・標準化、国際連携などの政策を盛り込んだ実行計画となっている。

世界における「グリーン成長の実現」が重要であり、これは言い換えれば、「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、地球温暖化問題や「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）[5)]。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 のパンデミック後は再び上昇すると考えられる。各国のインフラ形成状況を踏まえると、長期的な基調は依然として排出増大要因が大きいと考えられる。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。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。

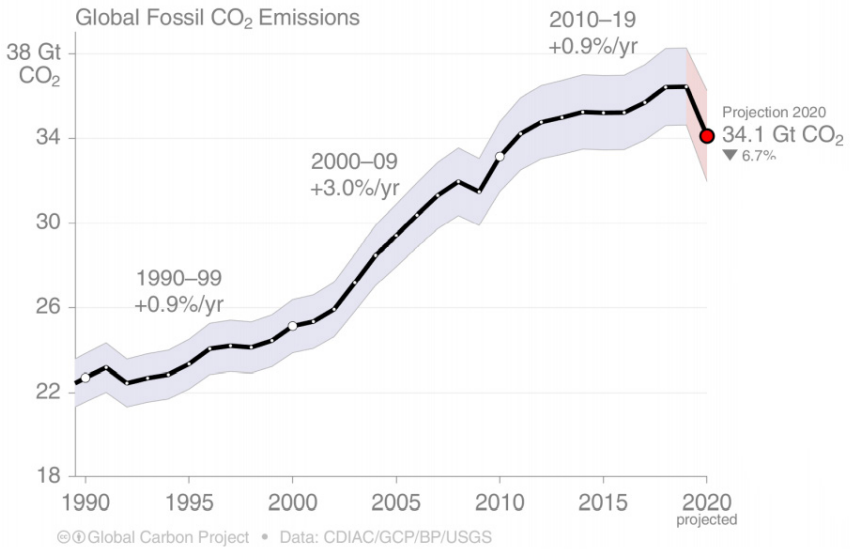


図 1.1.1-1 世界の CO_2 排出量推移（化石燃料燃焼および産業プロセス）
（出典：Global Carbon Project[5)]）

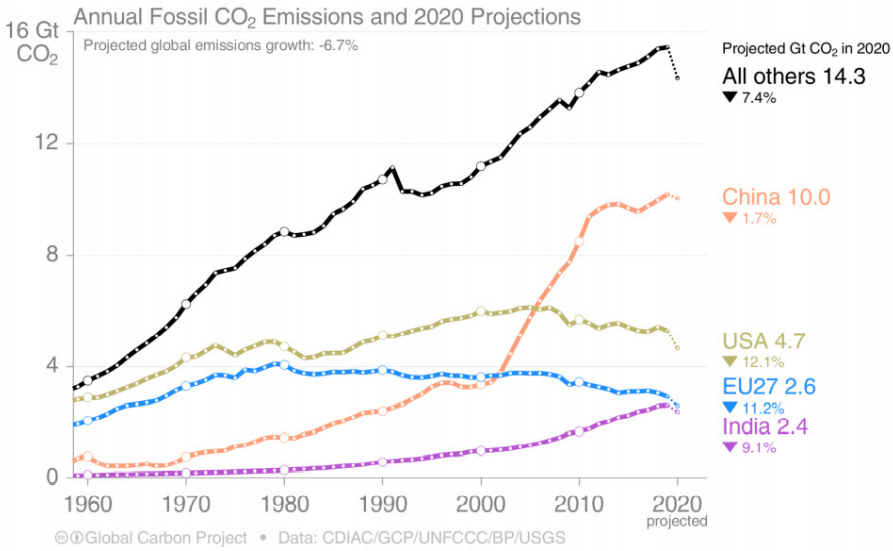


図 1.1.1-2 主要国別の CO_2 排出量推移（化石燃料燃焼および産業プロセス）
（出典：Global Carbon Project[5)]）

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。COP25 では、COP24 で詳細ルールが合意できなかった協定 6 条に関わる市場メカニズム関連のルールの合意を目指したものの、COP24 に続いて合意に至らず、COP26 に持ち越しとなっている。ともあれ、2020 年からパリ協定は実施がなされた状況となっている。

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）。特に、様々な国内政策によって、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。

パリ協定では、各国に対し、長期低排出発展戦略（主に 2050 年頃の目標と認識されており、既に多くの先進国が 2050 年の目標（ただしいずれの国もビジョンの位置づけ）の提出を行っている）の 2020 年までの提出を求めている。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」[2)]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ている。ただし、菅首相の「2050 年カーボンニュートラル」宣言を受け、今後、再提出の可能性もある。

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（5.6、5.8、5.9 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[6)]）

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）[7)]。2019 年排出量（速報値）も前年比で減少した。

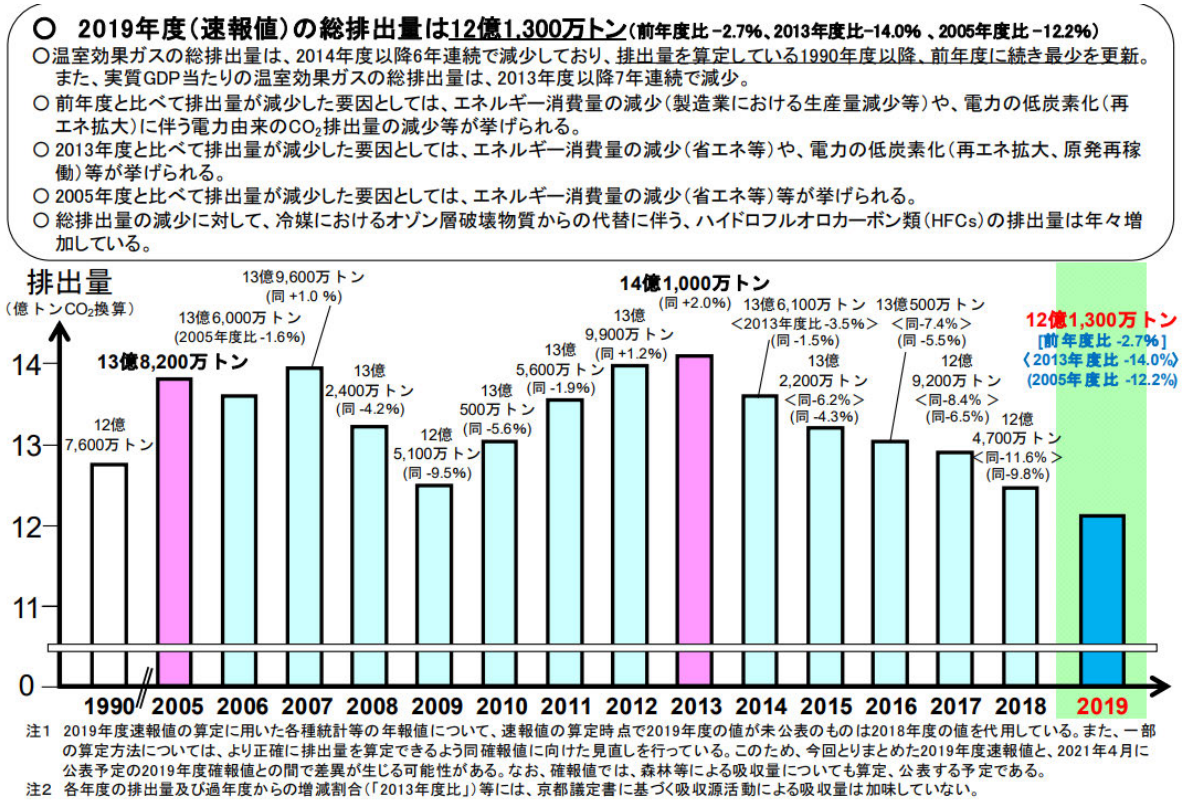


図 1.1.4-1 日本の GHG 排出量推移（出典：環境省 [7]）

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、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 [8]。そこでは、1)エネルギー自給率は震災前を上回る水準（概ね 25%程度）まで改善、2)電力コストを現状よりも引き下げる、3)欧米に遜色ない温室効果ガス削減目標を掲げる、その上で、徹底した省エネルギー・再生可能エネルギー導入を進め、原発依存度は可能な限り低減させるとした。

長期エネルギー需給見通しでは、電源構成については、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。）

図 1.1.4-2 は、エネルギーミックスの各種目標に対して、現状を俯瞰したものである。目標値に対して既に達成している指標やまだ大きなギャップがある指標など混在している。しかし、いずれの場合であっても要因をよく分析する必要があると思われる。例えば、電力コストは目標値よりも下がっているが、その主要な要因は、石油ガス価格の低下によるところが大きく、一旦、目標値よりも大きく下がったが、油価の上昇とともに再び上昇傾向にある。また、省エネもそれなりに進展しているようにも見えるが、製造業等エネルギー多消費産業の経営環境が良くなく、生産が縮小した影響が大きいことによるものではないか、など、引き続き詳細な検討が必要と考えられる。

日本政府は、低炭素化、脱炭素化の要請が強まる中、2030 年の電源ミックスの石炭 26%の目標値と比べ、足元の実績が大きな比率となっている石炭火力の内、非効率石炭火力のフェードアウトに向け、追加的な政策措置の検討を始めた。CO_2 排出削減と、経済、雇用の維持の観点を踏まえたバランスをいかに図っていくかは難しい課題である。石炭火力比率の増大は、電力自由化、原子力の再稼働が進んでいないことが大きな要因とも考えられ、様々な政策課題を俯瞰的に見た対応が必要と考えられる。また、国際的にも SDGs の視点から、Just Transition（公正な移行）といった視点も大きく議論されており、日本においてもどのようにして移行していくかは引き続き、慎重な対応が必要と考えられる。

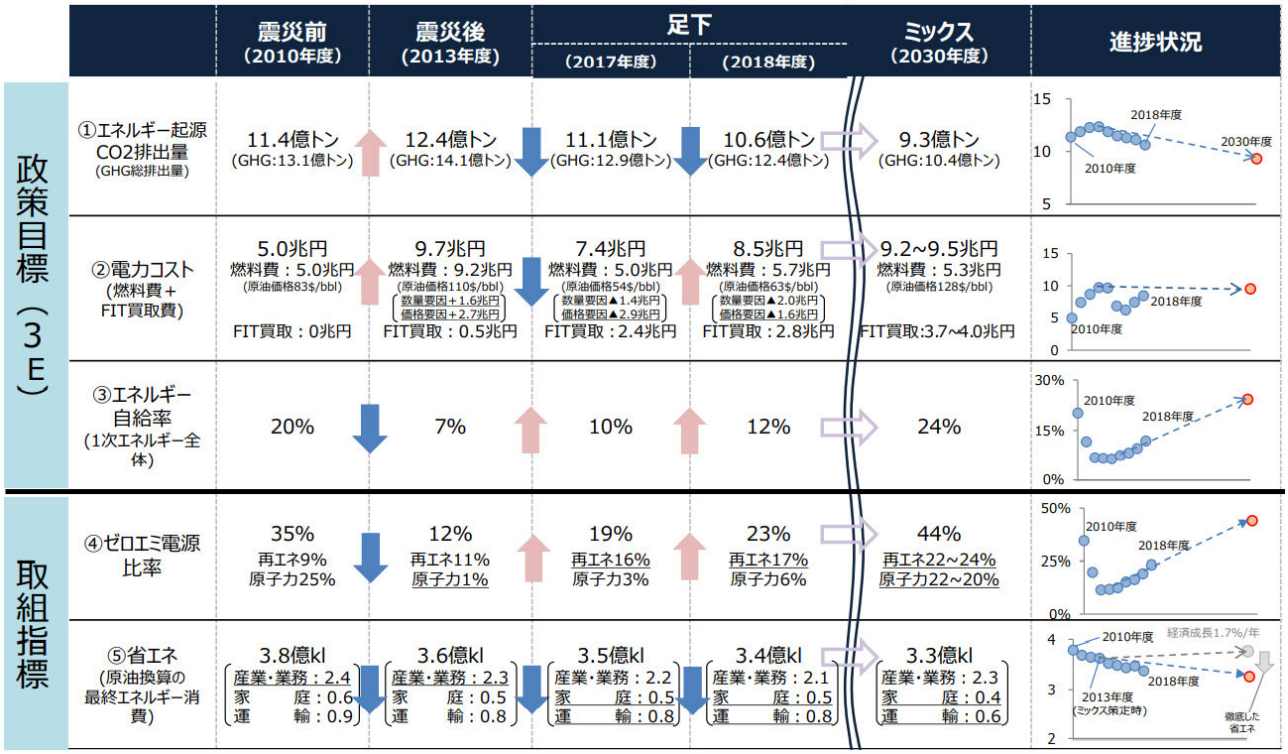


図 1.1.4-2 日本の 2030 年エネルギーミックスと現状（出典：経済産業省 [9]）

(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」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（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 [12]））、様々な形で排出削減を促す形となっている。

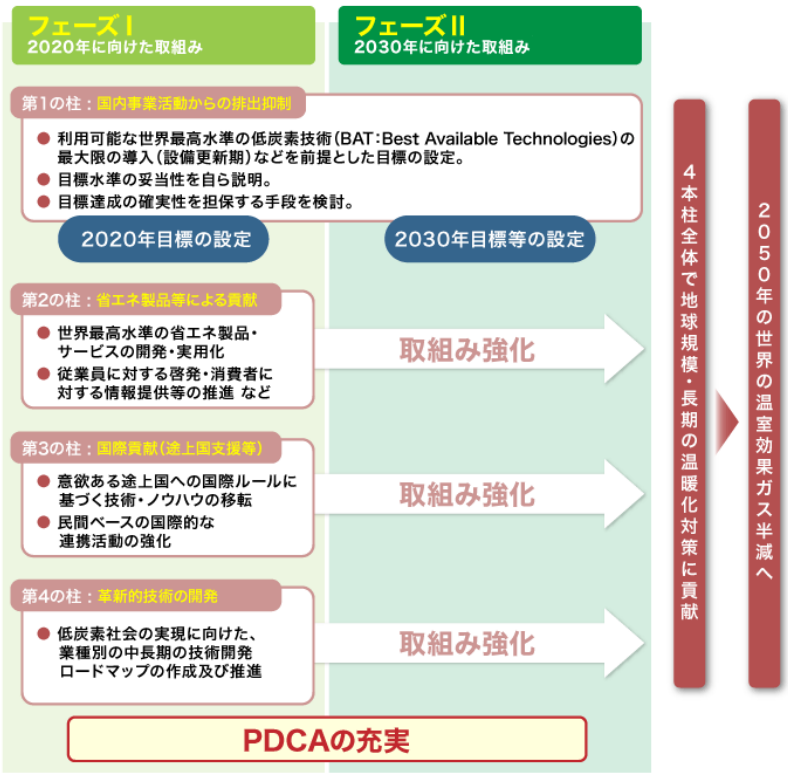


図 1.1.4-3 経団連低炭素社会実行計画（出典：経団連[10]）

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]。

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 2018 年度実績のレビュー結果である[12]。多くの業種において、2020 年度目標を達成済みであるが、一部ではまだ目標を下回っている業種も残っている。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 [12]）

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。しかしながら、特に太陽光発電については FIT の固定買取価格が機動的に価格引き下げすることに失敗し、実際のコストとの間に大きな差が生じ、バブルが発生する状況が見られた。これによって、太陽光発電の導入量は増えるものの、そのコスト負担が大きくなり、電力料金が上昇し、負担感が大きくなっている（表 1.1.4-2）。日本では年間 2.4 兆円の負担となっている（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。不適切な再生可能エネルギーの拡大は、グリーン成長を阻害する可能性を秘めていることに注意しなければならない。（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、大規模事業用太陽光発電については Feed-In Premium (FIP)へ移行が計画され、FIP の具体的な制度設計も進められてきている。

表 1.1.4-2 日本の再生可能エネルギー導入容量と認定容量（2020 年 3 月末時点）
（出典：調達価格委員会[13]資料）

<2020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年度の導入量（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	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	９６．９万kW（211,005件）	１３０．７万kW（288,118件）	８２．１万kW（206,921件）	８５．４万kW（178,721件）	７９．４万kW（161,273件）	６６．１万kW（133,205件）	７３．５万kW（146,633件）	７７．２万KW（152,098件）	**691．3万kW**（1,477,974件）	**７１２．０万kW**（1,515,145件）
太陽光（非住宅）	約９０万kW	７０．４万kW（17,407件）	５７３．５万kW（103,062件）	８５７．２万kW（154,986件）	８３０．６万kW（116,700件）	５４３．７万kW（72,656件）	４７７．２万kW（53,417件）	４９０．０万kW（54,888件）	４８６.9万KW（49,164件）	**４３２９．５万kW**（622,280件）	**６，７１９．４万kW**（776,888件）
風力	約２６０万kW	６．３万kW（5件）	４．７万kW（14件）	２２．１万kW（26件）	１４．８万kW（61件）	３１．０万kW（157件）	１７．５万kW（322件）	１７．２万kW（517件）	４６．８万KW（335件）	**１６０．４万kW**（1,437件）	**９０７．１万kW**（7,965件）
地熱	約５０万kW	０．１万kW（1件）	０万kW（1件）	０．４万kW（9件）	０．５万kW（10件）	０．５万kW（8件）	０．６万kW（22件）	０．９万kW（11件）	４．８万KW（6件）	**７．８万kW**（68件）	**１０．１万kW**（88件）
中小水力	約９６０万kW	０．２万kW（13件）	０．４万kW（27件）	８．３万kW（55件）	７．１万kW（90件）	７．９万kW（100件）	７．５万kW（86件）	４．８万kW（85件）	１４．７万KW（89件）	**５０．９万kW**（545件）	**１２９．３万kW**（715件）
バイオマス	約２３０万kW	１．７万kW（9件）	４．９万kW（38件）	１５．８万kW（48件）	２９．４万kW（56件）	３３．３万kW（67件）	４０．９万kW（77件）	４４．８万kW（63件）	４９．０万KW（60件）	**２１９．８万kW**（418件）	**８５３．１万kW**（690件）
合計	約2,０６０万kW	１７５．６万kW（228,440件）	７１４．２万kW（391,260件）	９８６．０万kW（362,045件）	９６７．７万kW（295,638件）	６９５．８万kW（234,261件）	６０９．９万kW（187,129件）	６３１．２万kW（202,197件）	６７９．２万kW（201,752件）	**5,459.7万kW**（2,102,722 件）	**９，３３１．１万kW**（2,301,491件）

58.5%

※ 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（2020年3月時点で確認できているもの）を反映済。

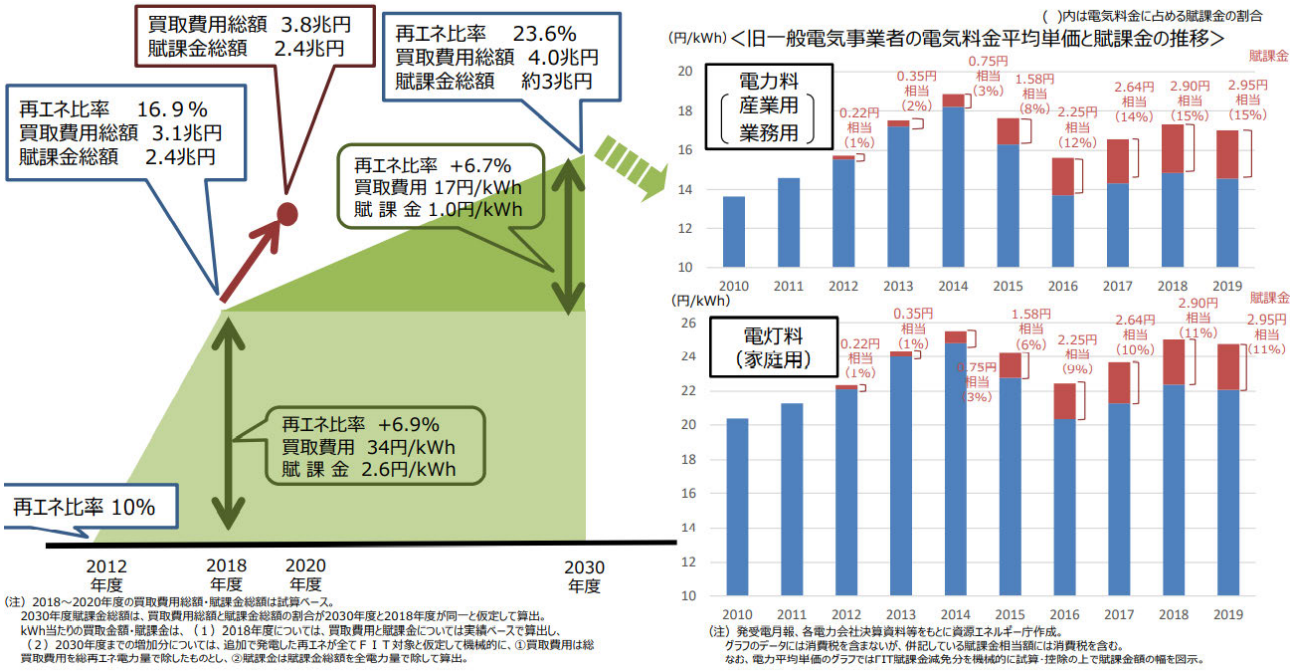


図 1.1.4-4 再生可能エネルギーの費用負担の推移
（出典：経済産業省[14]）

(4) エネルギーシステム改革

一方、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ている（電力システム改革のスケジュールは図 1.1.4-5 参照）。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。そして、様々な市場の導入が検討されている。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（図 1.1.4-6）。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（図 1.1.4-7）。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）。

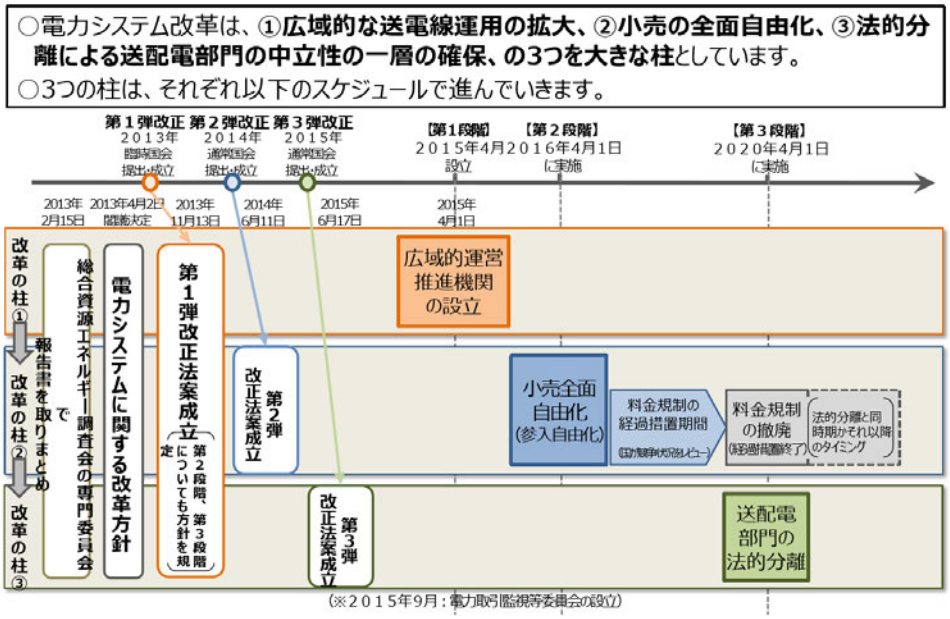


図 1.1.4-5 電力システム改革のスケジュール（出典：経済産業省 [15]）

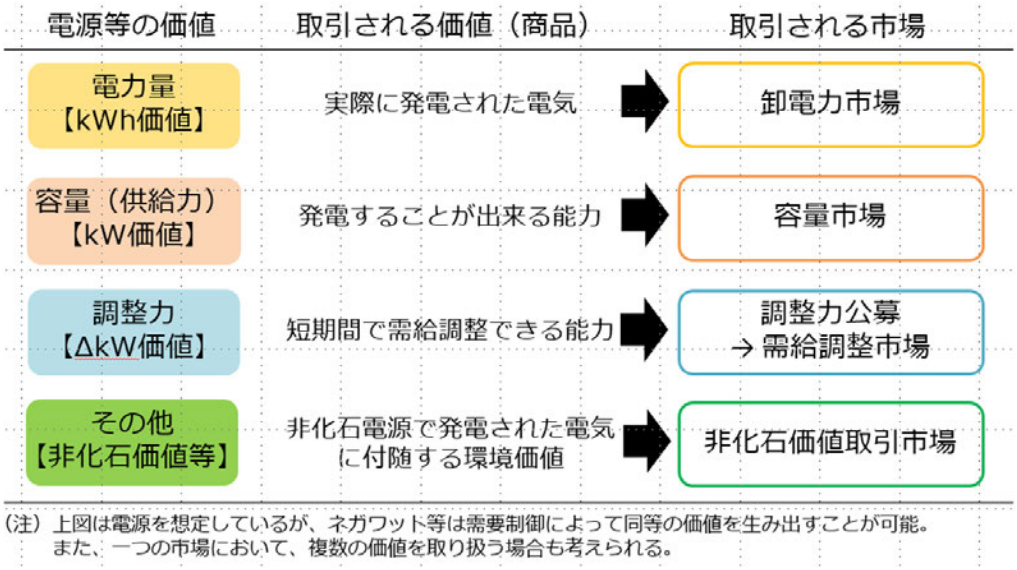


図 1.1.4-6 電力における新たな市場設計の検討（出典：経済産業省 16)）

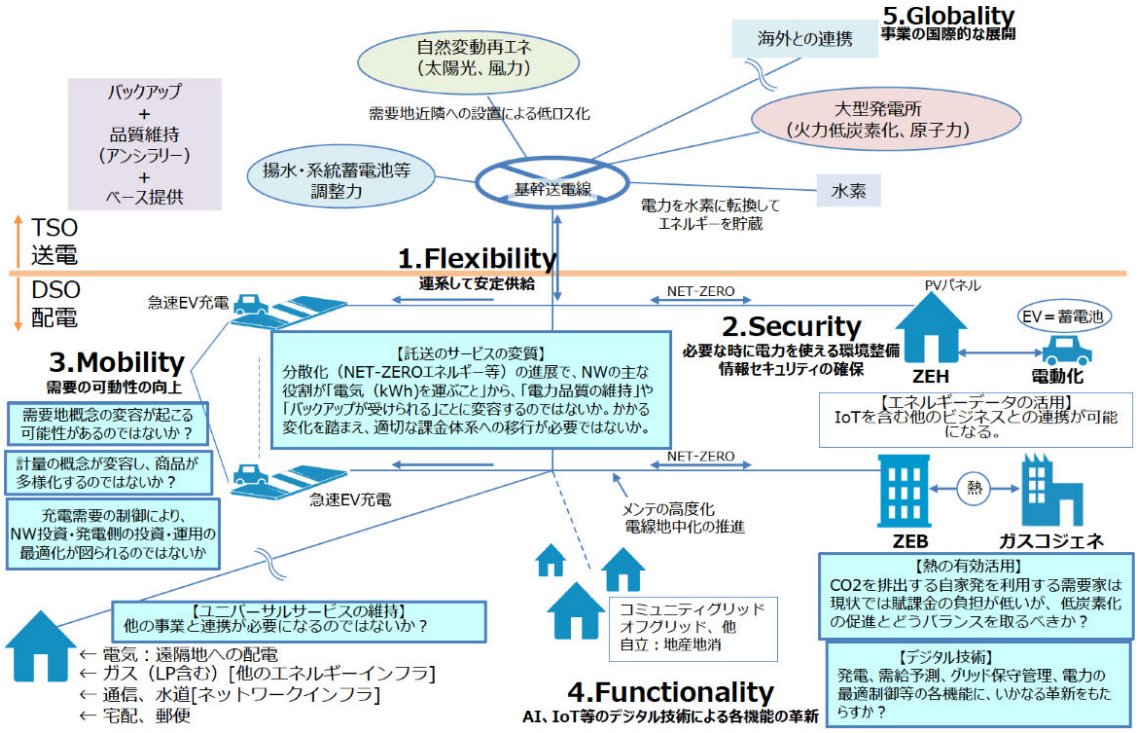


図 1.1.4-7 電力ネットワークシステムにおける可能性と課題（出典：経済産業省 17)）

(5) エネルギー基本計画

第 5 次エネルギー基本計画 18)は、2018 年 7 月に閣議決定がなされた。図 1.1.4-8 にあるように、エネルギー選択を考えるにあたって、時代に即した考慮しなければならない課題があり、一方で、3E+S と呼ばれる安全を優先しつつ、経済、エネルギー安全保障、環境のバランスを図る必要がある。第 5 次計画では、2050 年に向けてはパリ協定を踏まえた温暖化対応は重要事項との認識が共有され、大きな方向性として「脱炭

素化」が打ち出されている。一方、様々な不確実性が存在しており、「野心的なビジョン」を持ちつつ、多様な選択肢による「複線シナリオ」であたるとした（図 1.1.4-8）。

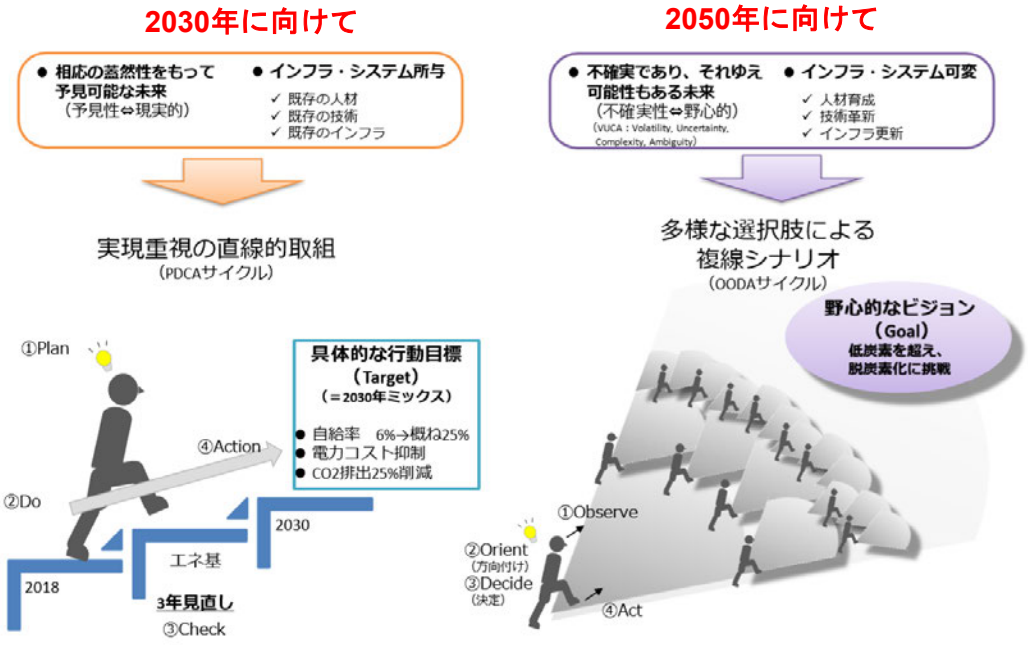


図 1.1.4-8 第 5 次エネルギー基本計画（2030 年と 2050 年に向けた戦略）
（出典：経済産業省 [19]）

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いる。2020 年には、第 6 次エネルギー基本計画に関する検討がスタートした。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 [20]では、第 5 次計画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る。これらの視座や、「2050 年カーボンニュートラル」宣言を踏まえた、新たなエネルギー基本計画が策定される見込みである。

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

(6) 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」[5]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。

図 1.1.4-9 は、決定されたパリ協定長期成長戦略である。「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。

経団連は、2020 年 6 月に、パリ協定が目指す脱炭素社会を一日も早く実現するためには、企業自らが脱炭素社会への挑戦を重要な経営課題と位置付け、革新的な技術を早期に開発し、社会実装する「チャレンジ・ゼロ」を立ち上げた。



図 1.1.4-9 パリ協定長期成長戦略（概要）（出典：文献 [5]）

(7) 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」[3]を策定した（図 1.1.4-10）。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「グリーン成長戦略」[4]も策定された。

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 2.3 節）。

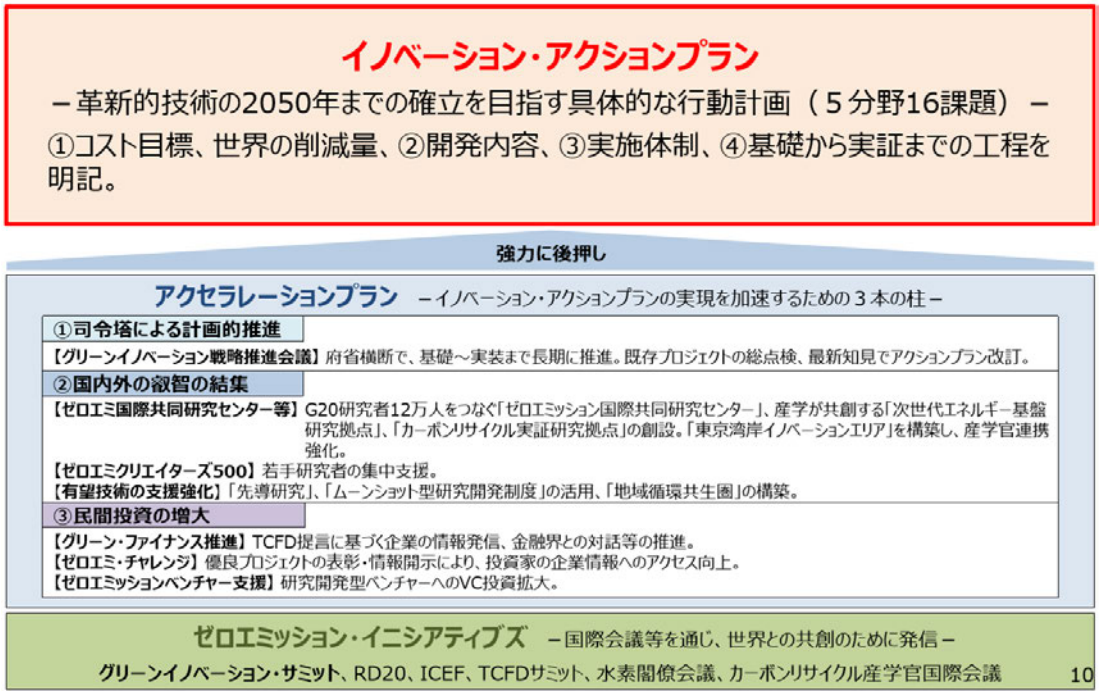


図 1.1.4-10 革新的環境イノベーション戦略（全体像）（出典：文献 [3]）

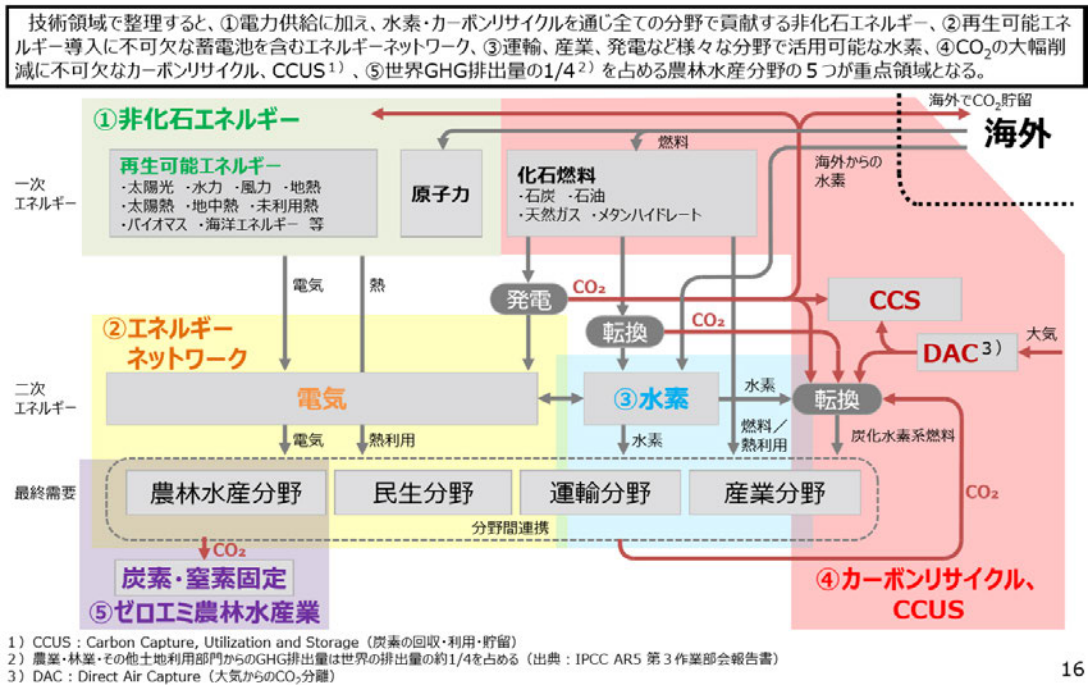


図 1.1.4-11 革新的環境イノベーション戦略：イノベーション・アクションプランの重点領域（出典：文献 3)）

(8) グリーンファイナンス

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。

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。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。

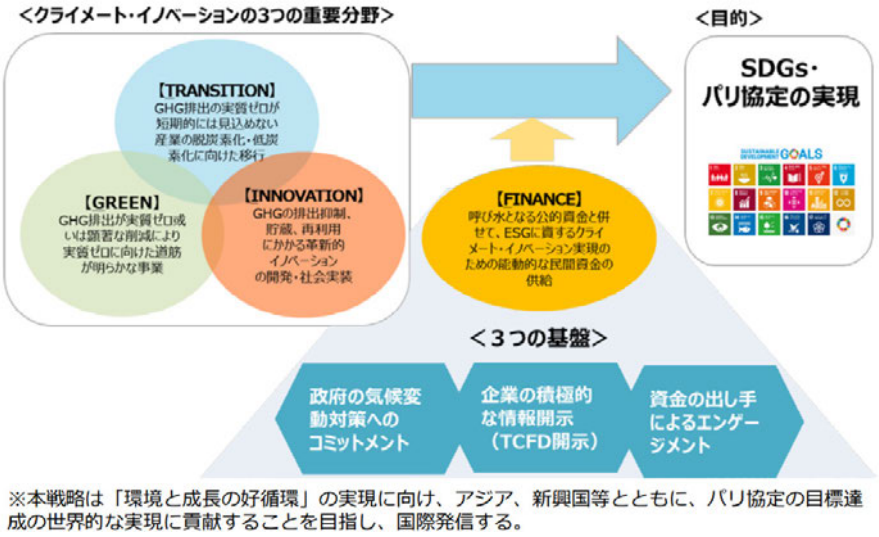


図 1.1.4-12 クライメート・イノベーション・ファイナンス戦略 2020 の概要（出典：文献 [21])

(9) 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 [22]。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」[23]がとりまとめられた。

1.1.5 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、WGIII の執筆者会合は 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（第 3 回会合は COVID-19 の影響によりオンライン）が開催され、第 2 次ドラフトが 2020 年 1 月に政府、専門家レビューにかけられた状況である。

1.2 本研究の目的と実施内容

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

(1) コンピュータモデルを用いた総合的な分析・評価

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

(1－1) IPCC の要請を受けて、国際的に議論が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、評価を行う。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う。

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する。

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

(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。

また、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気候変動対応戦略について、国際的な分析・評価を調査しつつ、それを踏まえて戦略の考え方をとりまとめる。加えて、気候変動対応に付随する不確実性について、気候変動対応に大きな影響を及ぼし得る要因について特定し、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) 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、会議出席を行う

(8－6) 国際モデル分析比較プロジェクト Energy Modeling Forum (EMF)の動向を調査した。

(8－7) 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) 気候非常事態宣言、
https://climateemergencydeclaration.org/climate-emergency-declarations-cover-15-million-citizens/
2) 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
3) 統合イノベーション戦略推進会議、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
4) 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
5) Global Carbon Project, Global Carbon Budget 2020,
https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/20/files/GCP_CarbonBudget_2020.pdf
6) United Nations, Sustainable Development Goals,
http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/
7) 環境省、2018 年度（平成 30 年度）温室効果ガス排出量（速報値）、
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/emissions/2018gaiyou_s.pdf
8) 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

9) 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
10) 経団連 低炭素社会実行計画概要 http://www.kkc.or.jp/ondanka/kikou-hendou/page2_1.html
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) 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
13) 経済産業省 調達価格等算定委員会 資料 (2020)、
https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/061_01_00.pdf
14) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会資料 (2019)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/029/pdf/029_005.pdf
15) 経済産業省、電力システム改革について (2015)
http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/electricity_liberalization/pdf/system_reform.pdf
16) 経済産業省 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（第 11 回）資料 (2017)
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/denryoku_gas_kihon/seido_kento/pdf/011_04_00.pdf
17) 経済産業省 次世代技術を活用した新たな電力プラットフォームの在り方研究会 資料 (2018)
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) 第 5 次エネルギー基本計画の構成 (2018)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703_02.pdf
20) 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
21) 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
22) 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
23) 気候変動影響評価報告書 (2020) http://www.env.go.jp/press/files/jp/115261.pdf

第2章　気候変動リスクマネージメント

人為的な起源によって地球温暖化がおこり、気候変動が引き起こされることはほぼ疑いの余地がない。累積 CO_2 排出量と気温上昇にほぼ線形に近い関係が見られることから、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。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そうとする動きが加速してきている。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未だ大きな不確実性が存在する。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、また、ジオエンジニアリング（DAC: CO_2 直接空気回収、SRM：太陽放射管理）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、第 2.2 節には COVID-19 のリスク、リスクマネージメントを気候変動問題と比較しながら、気候変動リスクマネージメント戦略への示唆を記載した。そして、第 2.3 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、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、ジオエンジニアリング（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。
- 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。

- 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。まして、合理的な各国の排出削減経路を見出すことは更に不可能である。なお、一般的には費用便益分析からは少なくとも 21 世紀中の正味ゼロ排出が導出されることは極めて稀と考えられる。それはゼロ排出のような厳しい排出削減になればなるほど（ゼロリスクに近づけようとすればするほど)、対策費用が急激に増大する傾向があるため、費用便益分析からは正当化されないことが多いためである。
- 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 [1)]や第 5 次エネルギー基本計画 [2)]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。そして、パリ協定長期成長戦略 [3)]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ともに、2050 年までに 80%の削減に大胆に取り組む」とされ、また、2020 年 10 月には菅首相が「2050 年カーボンニュートラル」宣言を行った。やはり、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 [1)]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 2.1-1 でイメージを整理したが、IPCC 1.5℃特別報告書（SR15）[4)]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。



図 2.1-1 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[5)-7)]。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[6)]から AR5[7)]に向けて、平衡気候感度は下限値が引き下げられたが、AR6 に向けて上方の推計値の報告も散見されているなど、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（図 2.1-2）。

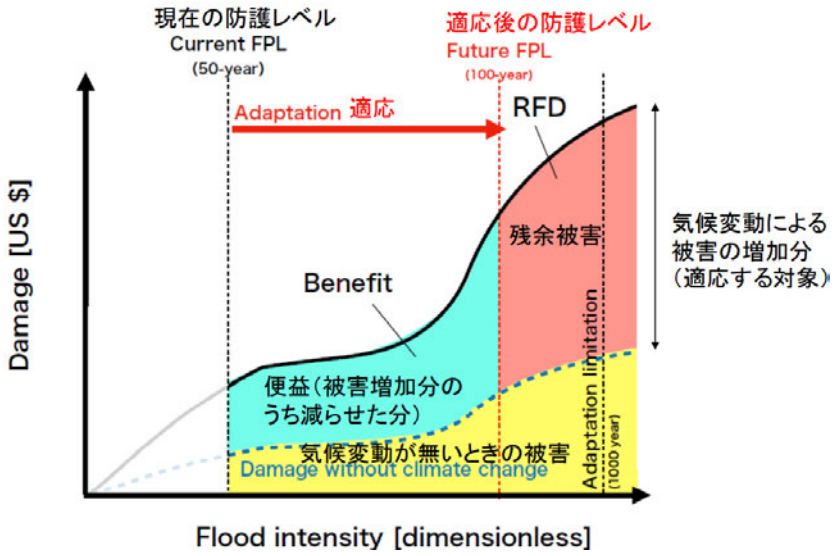


図 2.1-2 河川洪水の適応費用と残余被害の推計例（平林委員提供資料）

【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 2.1-3）[8)]。

- 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。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 [4]。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 [9]。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 2.1-4）[10]。

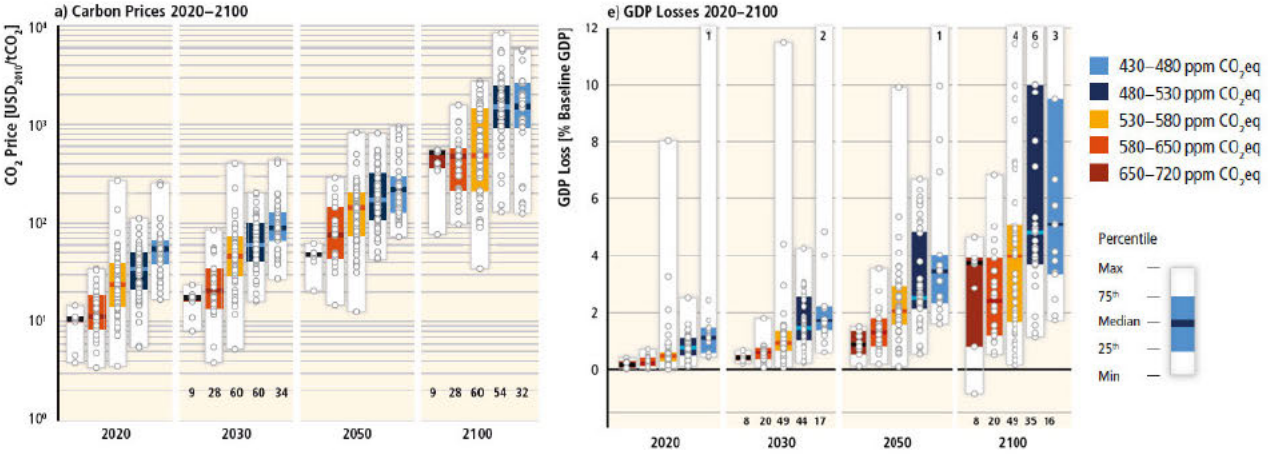


図 2.1-3 濃度レベル別の世界の CO_2 限界削減費用と GDP ロス [8]

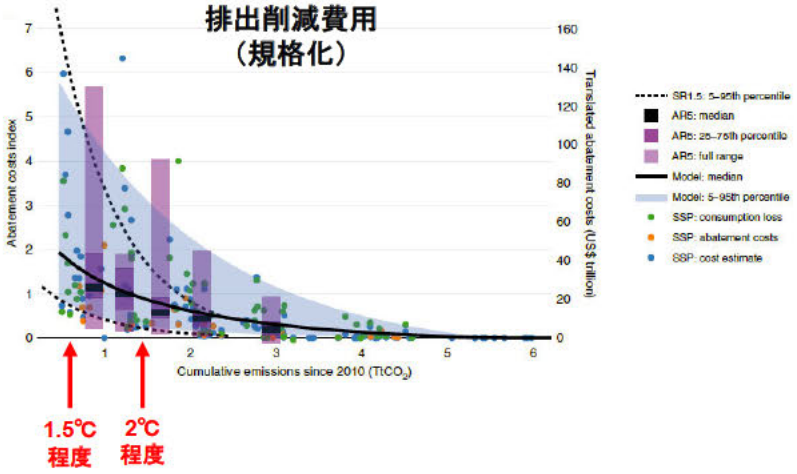


図 2.1-4 世界の各種モデルによる排出削減費用推計 [10]

- 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、パリ協定約束草案に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。NDCs の限界削減費用の不均一性により、世界全体で費用最小化（限界削減費用均等）の場合と比べ、RITE の推計では 6.5 倍程度の費用になると推計される。
- 更にトランプ政権などに見られるように、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。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（第 4.1 節）。
- 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 2.1-5）。

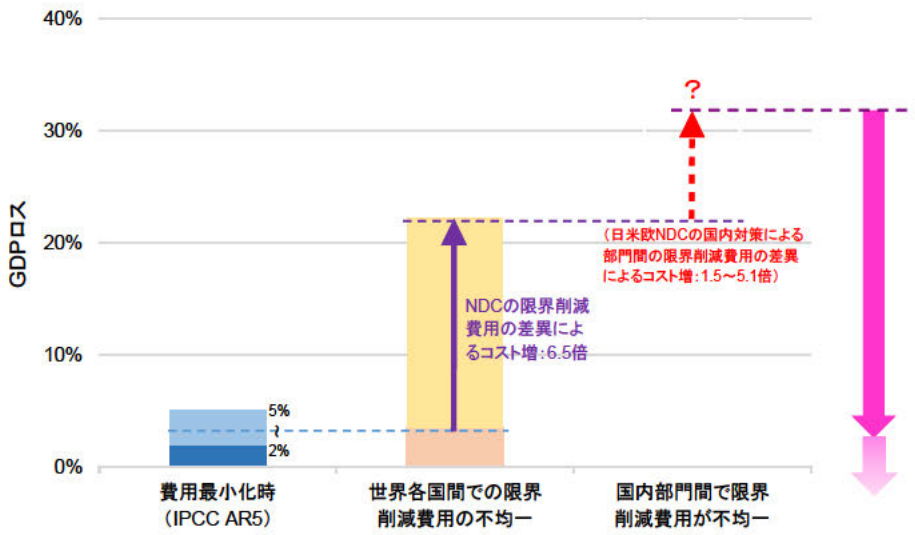


図 2.1-5 2℃目標時の世界 GDP 損失のイメージ（費用最小化と現実社会で予想される費用とイノベーションの役割）

- 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。

【ジオエンジニアリングの位置づけ】

- ジオエンジニアリングは、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。（第 5.1.3 節）
- 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と思われる。

【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り、その差は益々広がっている（図 2.1-6。2020 年において、民主党支持者では 78%が気候変動問題を最優先課題とすべきと考えている一方、共和党支持者では 21%に留まっている。）[11]。

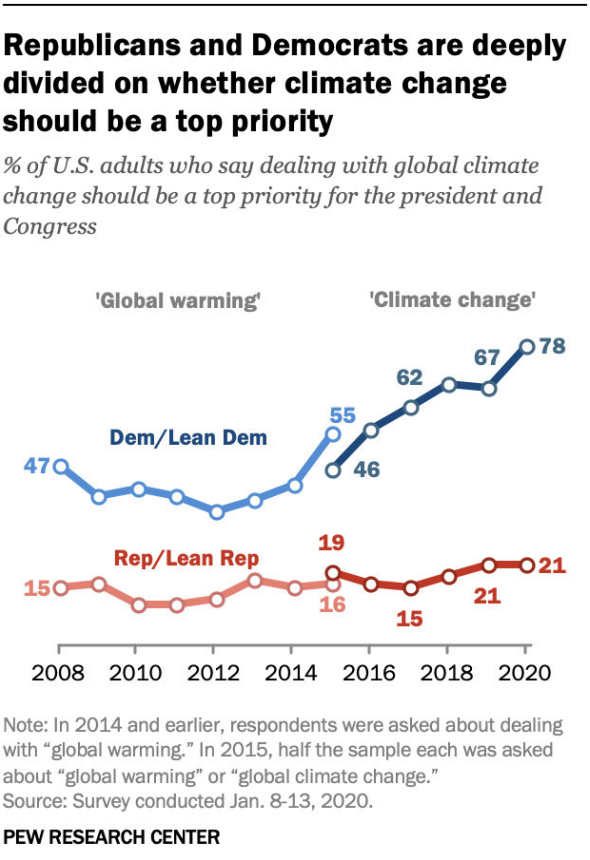


図 2.1-6 米国の気候変動問題に対する認識 [11]

【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。
- 16 歳（2019 年 9 月時点）のスウェーデンの環境活動家グレタ・トゥンベリ氏が 2018 年 8 月に始めた、強力な気候変動対応の行動を求める「学校ストライキ」は、全世界的にその活動は広がった。国連気候行動サミット前後には、世界 185 カ国以上で若者を中心とした約 760 万人がデモ行進をした [12)]。

参考文献（第 2.1 節に関するもの）

1) 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
2) 経済産業省、第 5 次エネルギー基本計画、2018
3) 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
4) IPCC, Special Report on Global warming of 1.5 °C (SR15), 2018
5) IPCC WG1, Third Assessment Report, 2001
6) IPCC WG1, Fourth Assessment Report, 2007
7) IPCC WG1, Fifth Assessment Report, 2013
8) IPCC WG3, Fifth Assessment Report, 2014
9) Carbon Brief
10) D. van Vuuren et al., Nature Climate Change (2020)
11) Pew Research Center, 2019
12) The Washington Post (2019); How Street Protests Have Changed the Climate Debat. https://www.washingtonpost.COm/business/energy/how-street-protests-have-changed-the-climate-debate/2019/10/18/887a0118-f15c-11e9-bb7e-d2026ee0c199_story.html

2.2 気候変動リスクと COVID-19 リスク

COVID-19（新型コロナウイルス）のパンデミックが起こり、社会は大きな変化が求められている。一方、コロナ禍によって、短期的には世界の CO_2 排出量は大きく減少している（第 1.1 節参照）が、とりわけ途上国の今後のインフラ形成を考えると、潜在的には世界の CO_2 排出量は増加の要因が多くあり、継続的な温暖化対策は不可欠である。欧州は、コロナ後の経済回復を目指し、その投資は気候変動対策投資などを中心に行う方針を示している。COVID-19 と地球温暖化問題は当然ながら全く異なった問題であるが、リスク、リスク認知、リスクマネージメントという視点からは、共通的に考えられるべき点も多い。本節では、両者のリスク、そして、リスク対応について比

較し、そこからの示唆を踏まえつつ、コロナ後の温暖化対策を展望する。なお、本節では COVID-19 のリスクの視点で記載しており、with コロナ、after コロナにおけるライフスタイル変化への影響は、第 5.4 節で記載した。

2.2.1 世界の CO_2 排出量の現状と新型コロナによる影響

2020 年に入って、新型コロナウィルスが全世界に急速に拡大し、感染防止対策が取られ、需要は大きく落ち込んだ。それに伴い、世界 CO_2 排出量は急速に低下した（図 2.2.1-1）[1)]。2020 年 10 月時点での国際エネルギー機関（IEA）による予測では、2020 年のエネルギー起源 CO_2 排出量は前年比で 7%減と大きな低下を予想している [2)]。移動の制約によって、とりわけ運輸需要の落ち込みが大きい [1)]。2009 年の世界経済危機を大きく上回る、排出低下となったと見られる。しかし 2009 年時と同様、大きな経済損失と引き換えにした排出の低下であって、望ましい姿では決してない。

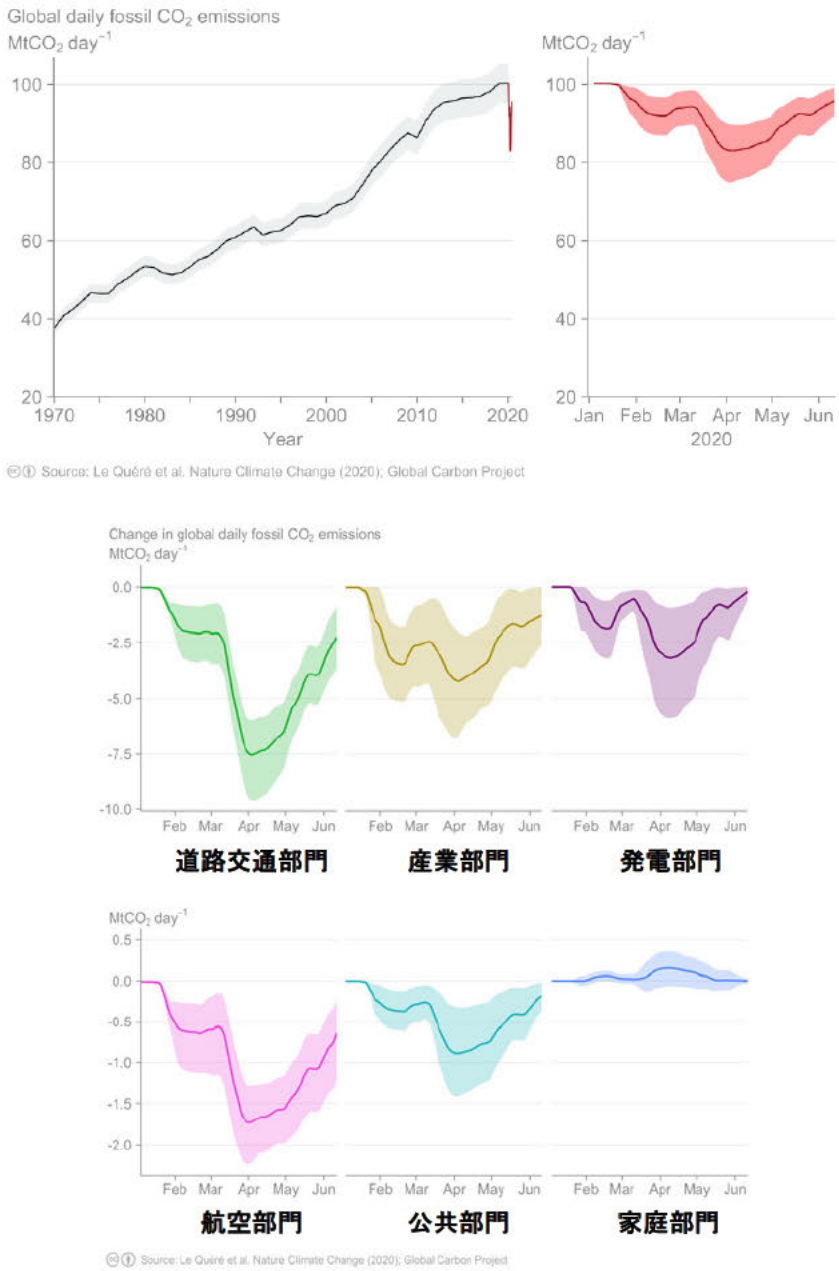


図 2.2.1-1 世界の CO_2 排出量の推移：COVID-19 のインパクト [1)]

2.2.2 新型コロナと地球温暖化のリスク対応

地球温暖化影響被害への懸念は大きく、対策が急がれるが、温暖化対策を含め、多くの対策は、費用対効果を踏まえることは重要である。リスク全体を最小化することが重要であり、リスクは、被害額×発生確率と定義され、これもコストであるため、総コスト（費用）を最小化するような、つまり費用便益分析に基づいた対策が求められる。ただし、被害額、発生確率ともに不確実であることも多く、その場合、費用便益分析には限界が生じるため、費用便益を踏まえつつも、予防的な対策を加味することとなる。

温暖化影響被害の推計には依然として大きな不確実性がある。新型コロナはだいぶわかってきたが、依然として不確実性が大きいし、少なくとも感染流行の初期段階では大きな不確実性があった。以降、COVID-19 に関するリスク関連の情報を簡単に整理する。

COVID-19 を季節性インフルエンザと比較すると、COVID-19 の致死率はインフルエンザよりも特に高齢者において高いとされている。日本の 2018 年のインフルエンザによる死亡者数は 3,300 人程度とされている。COVID-19 の 2021 年 3 月 13 日時点で死亡者数は累計で 8500 人程度となっている。インフルエンザと比べて高いものの、劇的に大きいわけでもない。また、COVID-19 対策として、マスク着用や手洗い、消毒などが強化されているためと考えられるが、インフルエンザ発生は例年と比べ劇的に抑制されている（図 2.2.2-1）。

コロナおよびコロナ対策によって様々な影響が生じ、インフルエンザの他にも、死亡者数全体に影響する。超過死亡者数としては、少なくとも現時点までにおいて、日本は COVID-19 による悪影響をほとんど受けていないとされ、年間死亡者数は 11 年ぶりに減少（2020 年の国内の死亡数は 2019 年比では約 9 千人減少）したとされる。前年比での死亡者数増加の死因別では、COVID-19 起因を除く肺炎の減少が最も多く、その他、心疾患、インフルエンザ、外出自粛に伴う不慮の事故の減少などが見られる。いずれも、COVID-19 の対策が間接的な効果をもたらしたと考えられる。一方、増加要因は、直接的な COVID-19 による死因の他、高齢化の進展が主要因と考えられる老衰による死亡者数の増加、恐らく医療を受けにくくなったという原因と考えられる癌による死因増などが見られている（厚生労働省人口動態統計より）。

ただし、英国などでは、第 2 次世界大戦以降で最大の超過死亡者数が観測されており、国によって異なっている。

いずれにしても、リスクは総合的に把握する必要があり、総合的な視点からのリスクマネージメントが求められる。

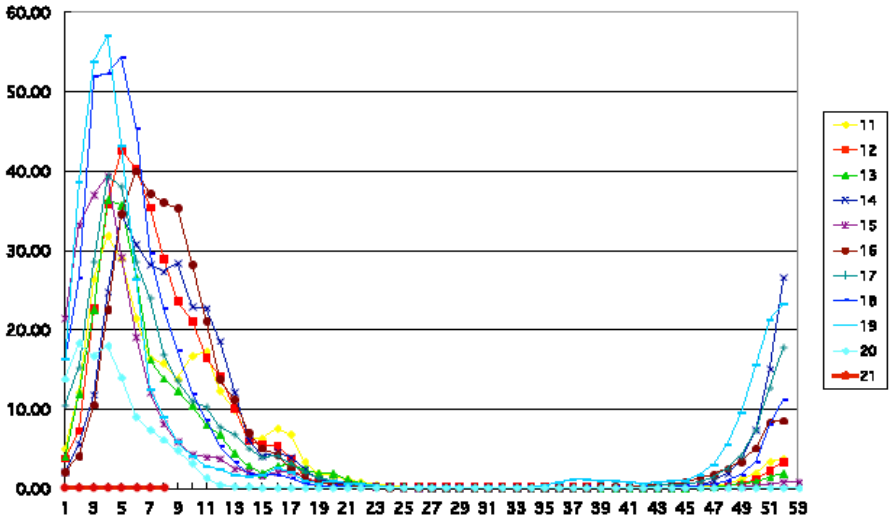


図 2.2.2-1 日本におけるインフルエンザ感染者数（2011～2021 年、横軸は週、縦軸は定点あたり報告者数）（出典：国立感染症研究所 [3)]）

表 2.2.2-1 に、リスク対応の視点からの COVID-19 と地球温暖化を整理した。COVID-19 は現時点でも猛威を振るっているが、長くても数年以内には終息すると考えられる。一方、地球温暖化影響は、COVID-19 のように高い死亡率が予想されるわけではないが、より長期に亘って様々なリスクに晒される。ただ、何よりも両者ともに、影響被害の低減と経済活動とのバランスおよび両立をどう図っていくのかが最大の課題である。

なお、リスクの評価とともに、個々人におけるリスク認知の大きさは、また異なった側面がある。社会全体のリスクと、個々人のリスク認知にギャップが生じる場合も多い。そのギャップを埋めるよう、政策や広報などが必要であるが、個々人のリスク認知をある程度、尊重した対策が必要となる場合もあると考えられる。

表 2.2.2-1 リスク対応の視点からの新型コロナと地球温暖化

	新型コロナ（COVID-19）	地球温暖化（気候変動）
特徴	・全世界的リスク ・短中期（感染から数日～2週間ほどで顕在化） ・感染直後は気づきにくい。 ・リスクの不均一性（若年層のリスクは小。若年層の行動範囲の広さが感染拡大加速している可能性も） ・個人の行動で、ある程度はリスク回避可能	・全世界的リスク ・中長期（徐々に蓄積） ・排出直後は影響に気づきにくい。 ・リスクの不均一性（先進国のリスク相対的に小さい可能性。先進国の排出の影響大） ・個人では相対的にリスク回避困難
リスクの推計	リスクを正しく推計できているか？（致死率、感染率、計測の問題、超過死亡率、・・・）	気温推計等は正しいか？ 気候変動影響被害の推計は適切か？
リスク認知	リスク評価の科学的知見は十分とは言えず、特に初期において、過小と過大の両方の反応あり。一般的には、”unknown”な事象へのリスク認知は大きいことが多い。	リスク評価の科学的知見は十分とは言えず、過小と過大の両方の反応あり。 ただし、被害発生は地域、産業、社会全体にわたり、徐々に顕在化するため、本質的には、リスク認知は緩慢になりやすい。
リスクマネージメント	＜短期＞ワクチン、治療薬がない中、また、感染・症状進展等に関する科学知識が不十分な中での感染抑制を優先することは相応に合理的とも考えられる。しかし、時間経過とともに経済活動維持とのバランスが不可欠に。公衆衛生と私権制限とのコンフリクト。スウェーデンのように長期戦を覚悟し、ロックダウン選択しない戦略も。 ＜短中期＞ワクチン、治療薬の開発。COVID19およびその感染に関する科学知識の拡大・充実と、それによる、より適切な対応戦略の策定	・科学が容易には解決できない不確実性が（低減はするが）将来にわたって継続。不確実性下での意思決定が大きな特徴。 ・地域間、世代間の公平性など価値観を伴う問題を含む。
緩和策	マスクの着用、3密を避ける、ロックダウン（経済影響大）、ワクチン（イノベーション）	省エネ、燃料転換（化石燃料間、再エネ、原子力）、二酸化炭素回収利用貯留（CCUS）、負の排出技術（NETs）
適応策	治療薬の開発、治療技術の向上、集団免疫	各種の気候変動適応策有（護岸、堤防、エアコン、夏季の外出控え、農作物の品種改良 等）
国際協調	グローバル化した現在においては協調も重要。ただし、WHOを中心に貧困国への支援が整備されようとしているが、「自国第一」は否めない状況	地球規模の課題であり、協調は必須。見かけ上の国際協調が多いが、実際は、自国経済優先の側面も。
副次影響・副次効果	・病院の逼迫や通院回避により、他の病気が進行 ・風邪、インフルエンザ等の別の感染症の低下（⇐マスク着用の効果） ・大気汚染等、環境汚染の低下（⇐ロックダウンの効果）	・CO_2排出削減により、大気汚染等、環境汚染の低下につながる可能性は高い
他の目標とのバランス	・経済（雇用含む）とのバランスの問題。 ・強制力をもって行動を抑制することの是非の問題	・経済（雇用含む）とのバランスの問題

新型コロナ対策としては、初期の段階において、ウィルスの危険性や感染力等について科学的に不確実性が高い状況下で、欧米ではロックダウンのような強硬な措置がとられ、日本でも非常事態宣言が出され、日本の場合は強制的な措置ではないものの、

それでも他国と遜色ない水準で抑制された。これは、リスクの大きさが不透明な段階での対応としては妥当性の高いものと考えられる。しかしながら、一方でこれは非常にコストがかかる対策で経済への影響は大きく、長期間の持続が難しい。よって、いずれの国も、一定の受容可能と考えられるリスクとなった段階で、リスクは残っていても、ロックダウンや非常事態宣言を解除した。そして、新しい生活様式への変化を含め、コロナに適応しようとしている。治療薬やワクチン開発等が行われ、ワクチン接種が進み始めたところである。これは、ロックダウンのような莫大な費用がかかる対策ではなく、費用が安価な対策を創出しようとしているということである。

温暖化対策も、大幅な排出削減を実現しようとすれば、現在の技術ではとても高い費用が必要である。ロックダウンと同じである。そしてそのような対策は長期の継続が難しい。よって、温暖化への適応も考えていかざるを得ない。しかし、徐々に増していく温暖化のリスクに対応するため、コロナにおける治療薬やワクチン開発のように、温暖化対策の革新的な技術開発を行い、対策コストを下げ、温暖化のリスクを低減することが必要である。

見方は多々あると考えられるが、例えば、温暖化対策としての原子力発電は、コロナ対策で考えると、マスクのようなものとも考えられる。もちろん、原子力だけではなく、比較的安価な省エネ対策なども同様である。マスクをしても完全にはコロナ感染のリスクをゼロにできない。原子力が温暖化対策として万能なわけではない。また、マスクをすると息苦しかったりし、また例えば猛暑でマスクをつけて運動することは死亡リスクを生じることさえある。しかし、万能な治療薬やワクチンがない状況で、安価なコロナ対策としては、マスクはとても重要である。原子力も事故のリスクは確かに存在する。しかし、なかなか安価に大量に CO_2 排出を抑制できる技術がない中で、相対的に安価な原子力発電の活用は、温暖化のリスクを低減させることができる。もちろん、マスクと同じく、適切な利用が必要である。さもなければ、別のリスクを生み、全体としてリスクを増大させてしまう危険性もある。

結局のところ、COVID-19、地球温暖化ともに、影響被害の拡大を抑制し、適応的な対策時間を稼ぎながら、COVID-19 はワクチン開発を、地球温暖化は大幅な排出削減を可能とする技術、社会のイノベーションを実現していく、というのが大きな対策の方向性となると考えられる。

2.2.3 コロナ後のエネルギー・温暖化対策：脱炭素化に向けて

世界は、脱炭素化（正味ゼロ排出）に向けた対応を打ち出してきている。EU 等は、1.5℃目標に対応し、2050 年までの正味ゼロ排出を実現する対策を加速化してきている。また、2020 年 10 月に、菅首相は、「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。しかし、1 節で述べたように、直近では新型コロナによって排出は減少したものの、世界排出量の基調としては依然として増大傾向にあり、また、パリ協定に従って提出されている、2030 年に向けた国別貢献（NDCs）を積み上げても、2℃目標に対してさえ、大きな排出ギャップが存在している [4)]。脱炭素化の実現には大きなハードルがある。温暖化政策として、大きな経済損失や雇用損失をしてま

でして、CO_2を減らし続けることは政治的に不可能である。そして、コロナ禍によって経済が落ち込んだため、今後当面、世界の投資意欲は減退すると考えられる。短期的な雇用対策としての政策はあるとしても、脱炭素化対策によって、長期的に電力料金の大きな上昇を誘発するような対策は、当面、各国ともに採用しにくい。更に、先進各国は、中国などに依存していた製造業の国内回帰も図りたいところであり、その際には、安価で安定的、かつ、CO_2削減にも寄与する電力供給は大変重要となる。

COVID-19による短期的な排出減は極めて大きいが、COVID-19による直接的な排出減は、長期的な世界の気温上昇トレンドには大きくは効かず、むしろ投資の減退の効果の方が大きく、長期ではより大きな排出となる可能性さえある。持続的な対策が必要な温暖化対策は継続しなければならない。欧州主要国は、グリーンニューディール政策によって、再生可能エネルギーや電気自動車などへ、政府支援を行って投資拡大して需要を創出しようと考えているようである。しかし、COVID-19によって、各国とも財政は大きく悪化し、企業も余力が小さくなってしまったため、資本生産性の低い高価な対策をあまり進めすぎれば、財政の悪化を招くとともに長期的な生産性を悪化させかねない。よって、比較的安価で効果的な温暖化対策がこれまで以上に求められる。このような中、コロナと両立する社会システムのあり方を今後追求すべきである。リモートワークなど、デジタル化の加速によって、COVID-19のような感染症拡大を抑制しつつ、省エネルギーにも寄与し、また、労働生産性を向上させるような複合効果を有する対策を、技術によって加速させることは重要である。

2.2.4 COVID-19からの気候変動対応へのレッスン

我々は、新型コロナ対策を通して「リスク」を少し身近に考えるようになったはずである。地球温暖化対策においても、温暖化影響被害と対策費用全体について、リスクを最小化する戦略が重要である。また、温暖化対策としての原子力発電、また、再生可能エネルギーであっても、風力、太陽光発電など、それぞれの技術にはそれぞれのリスクも付随している。リスクにはトレードオフ（相反）があるので、総合的にリスクを管理することが重要である。

2020年度末時点では、未だCOVID-19は終息していない。リスク対応に関する評価という点からも結論を下す段階ではなく、引き続き、リスク対応のあり方という視点で情報収集、検討が必要と考えられる。しかし、COVID-19はいずれは終息するだろう。COVID-19におけるリスク対応の教訓も生かしつつ、より長期的な戦いである地球温暖化リスクへの対応を行っていくべきである。そして、COVID-19後の復興を地球温暖化対策にも結びつけていくことは、経済との両立のためにも重要である。感染症リスクにも柔軟かつ強靭に対応できるような社会の構築が必要であり、そのためにはデジタル化という大きな技術進展を更に社会システムに組み込むような投資を積極的に行って、それが社会全体としての省エネルギー、脱物質化につなげていくことが重要と考えられる。これは、地球温暖化対策のみならず、より広範に、持続可能な開発目標（SDGs）を含む、持続可能な発展に資することもできると考えられる。

参考文献（第 2.2 節に関するもの）

1) C. Le Quéré et al., Temporary reduction in daily global CO_2 emissions during the COVID-19 forced COnfinement, Global Carbon Project (2020).
2) IEA, World Energy Outlook 2020.
3) 国立感染症研究所 (2021)
4) UNEP, Emissions Gap Report (2020)

2.3 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

地球温暖化によって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不確実性が大きいことは本章冒頭でも指摘した。世界で 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ているものの、この動きを取り巻く政治的、社会的な不確実性もまた大きく、これらを包括的に考慮した気候変動緩和策や適応策を現時点で利用可能な対策により実行しようとするとその費用は膨大なものとなりうる。世界が脱炭素化と経済成長の同時達成を目指すにおいてイノベーションの重要性が指摘されるのは、イノベーションにより大幅な排出削減を低廉な費用で実現する可能性にある。イノベーションの技術が排出削減に直接利用されるものでなくとも、広範な領域における技術進展を促進することで、社会全体がカーボンニュートラル達成に要するコストを低減させる可能性があり、社会における受容性の向上を促進し持続可能な発展に寄与していくと考えられる。各国の政策においてイノベーションを活発に促進しうる枠組みを構築していくことは重要である。

日本政府は、2020 年 1 月に策定した「革新的環境イノベーション戦略」[1)]において、エネルギー・環境分野において革新的なイノベーションを創出し、社会実装可能なコストを実現し、温室効果ガスの国内での大幅削減とともに世界全体での排出削減に貢献することを表明した。また、イノベーション・アクションプランにおいて 2050 年までの確立を目指す革新的技術領域を定めるとともに、推進を実行する司令塔としてグリーンイノベーション戦略推進会議を設置することとし、7 月に発足した。脱炭素社会に不可欠なイノベーションのあり方が議論され、次期エネルギー基本計画にも情報を提供することとされている。このような中、菅総理自らが日本の排出削減目標として 2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことを 10 月に宣言した。12 月に発表された「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」[2)]では、2050 年カーボンニュートラルへの挑戦を、産業構造や経済社会の変革を通じた成長の機会と捉え、「経済と環境の好循環」を作っていく産業政策がグリーン成長戦略であるとしている。また、政府の役割としては、革新的なイノベーションの推進に向け、大胆な投資を行いイノベーションを起こすといった民間企業の挑戦を全力で応援する、具体的な見通しを示し高い目標を掲げて民間企業が挑戦しやすい環境を作ることにあると述べている。

本事業では、気候変動リスクマネジメントにおけるイノベーションの役割について検討をしてきており、これまで汎用技術の役割の検証とあり方、ESG 投資やグリーンファイナンス分析の動向について専門家を交えて議論、分析してきた。また、イノベ

ーションを誘発しうる政策や社会経済環境についても、様々な事例を基に検証を進めてきた。日本のネットゼロ排出達成目標が 2050 年となり、革新的イノベーションの更なる加速と確実な社会実装が求められる中、経済効率的に排出削減を実現しうるイノベーションを促進する枠組みが重要となる。

このような認識の下、本節では日本におけるイノベーション促進に係わる最近の政策、制度と課題を整理した。

2.3.1 日本政府による気候変動関連のイノベーション創出に向けた取り組み

政府がこれまでに実施した研究開発プログラムとしては、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）、革新的研究開発推進プロジェクト（ImPACT）、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）などがある。2018 年には「ムーンショット型研究開発制度」が創設されている。ここでは 2050 年までに達成すべき 6 つの目標を策定し、そのうち、目標 4 は「地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」とされている。研究開発プロジェクトとして温室効果ガスを回収、資源転換、無害化する技術の開発が推進されていくとされている。

政府戦略においても、環境関連技術でイノベーションの確立が望まれる分野が明記され、投資促進や需要創出などに向けた支援体制も示されている。革新的環境イノベーション戦略ではイノベーション・アクションプランにおける重点領域として非化石エネルギー、エネルギーネットワーク、水素、カーボンリサイクル・CCUS、ゼロエミ農林水産業の 5 領域が明示されている（図 2.3.1-1）。また有望技術の支援強化にあたってはムーンショット型研究開発制度を活用することとされている。

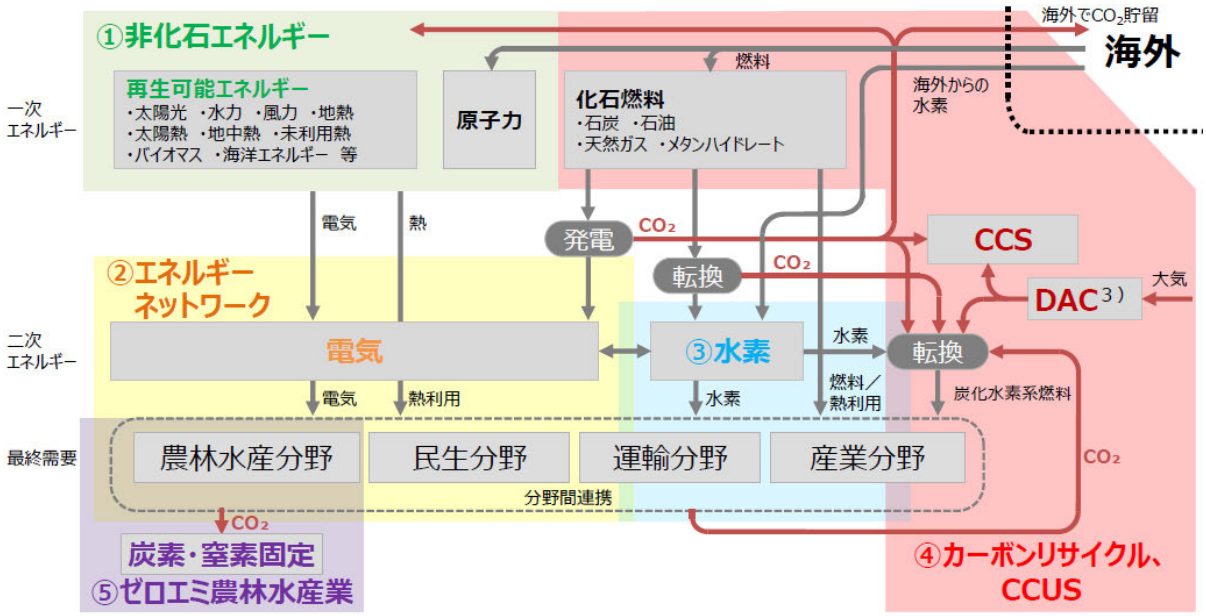


図 2.3.1-1 イノベーション・アクションプランの重点領域 [1)]

グリーン成長戦略においては、2050 年カーボンニュートラルを実現するうえで不可欠な重点産業 14 分野（図 2.3.1-2）を特定し、年限を明確化した目標、研究開発・実証、規制改革・標準化などの制度整備、国際連携などを盛り込んだ実行計画を策定している。

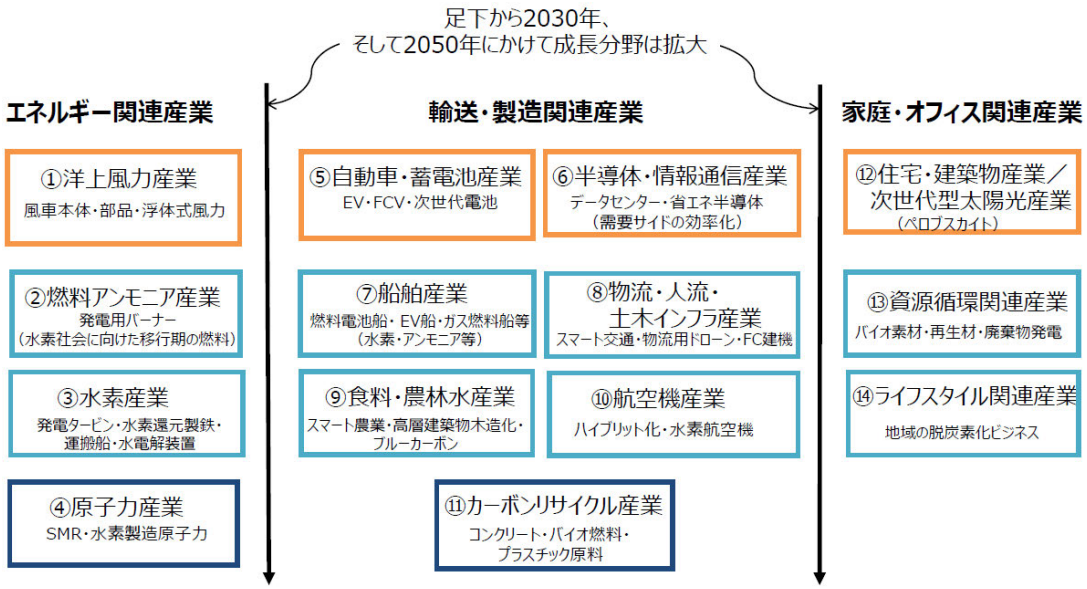


図 2.3.1-2　グリーン成長戦略における重要産業分野 [2)]

政策ツールとしては、予算、税制、金融、規制改革・標準化の推進などにより需要創出と価格低減を促進する狙いである。予算については NEDO に 10 年間で 2 兆円の基金を造成し、これを呼び水として民間企業の研究開発・設備投資を誘発する狙いである。税制では投資促進税制の創設、研究開発税制の拡充などが行われる。金融面においては、イノベーション・ファイナンス関連としてゼロエミ・チャレンジ（革新的環境イノベーションに取り組む企業の明示化）、グリーン投資促進ファンドなどのリスクマネー支援、TCFD を通じた情報開示、ESG 資金の取り込み、カーボンニュートラルに向けたファイナンスシステムの整備などが推進される。規制改革・標準化においては水素、洋上風力、自動車・蓄電池などの需要創出、拡大を図るための規制緩和と強化、イノベーション及び投資促進につながる市場メカニズムの導入検討を行うとしている。

このように、重要分野を明らかにしたうえで政策や制度による支援を実行していくことは、技術開発や投資を決定、推進する際のシグナルとなり革新的イノベーションに資すると考えられる。一方、将来の不確実性とイノベーションの長期性を考慮したとき、研究開発が安定的に行われていく社会基盤も重要であるし、さらにイノベーションの社会実装まで見たときに企業が必要とする要素は何かを企業の視点で考え、柔軟に取り入れていくことは重要である。

以下に、企業によるイノベーションの研究事例を基に、望ましい制度の在り方について議論する。

2.3.2 企業のイノベーションを考える上でのポイント:日米企業の比較を踏まえて

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。

- 日本の大企業は、創業からの年数を年齢に例えると、13 歳から 14 歳の頃が稼ぐ力のピークを迎え、以降は減少していく傾向にある。アメリカの場合、そのピークは 50 歳くらいであり、その後も多少は減少するものの高い収益性を保つ傾向にある。このような違いが日米でなぜ生まれるのかがポイントとなる。
- 答えの 1 つとしてガバナンスの違いがある。日本の場合、株式を会社同士で持ち合っていたため、株主からの収益追求へのプレッシャーが低かったが、アメリカの場合は収益を上げ高い ROE をあげていかなければならない環境にある。
- 他の答えとして、雇用に関する考え方が挙げられる。日本では従業員の整理解雇をしにくいので不採算ビジネスであっても整理をできず、長期的に継続する傾向が強い。一方でアメリカでは整理解雇をしやすいため、競争力がなくなった部門を整理しやすいことも大きな要因となっている。
- 今後の企業のイノベーションを考える上で、労働市場の流動性を高めることが重要である。これができないと企業の収益性の回復は難しく、イノベーションも出にくいこととなる。しかしながら、現在のまま単に流動性を上げる（整理解雇を積極的に実施）と、基盤的な技術開発の水準が落ちてしまうことや、経済格差が広がることで社会全体の不安定化にもつながってしまう。
- これからのグリーン・イノベーションにとって重要なことは新規企業の参入である。破壊型のイノベーションは新規参入が起こることによって始まるものであり、新規参入がしやすい政策が必要である。アメリカでの自動車業界の事例からも、CO2 排出量を減らす規制をかけると、ビッグ 3 といった伝統的な企業は反対したが、ホンダなどの日本企業が参入した結果、新しい高性能なエンジンができてきた。このように新規参入ができるような産業政策をとることが重要である。
- 日本はどこに参入してもらうのがよいか考えると、企業の視点では、自社に強みがある領域の補完部分が重要である。つまり自社の強みを磨いていくだけではなく、むしろボトルネックであった部分を伸ばすことで顧客が享受する価値が高まることになる。その手法としてオープンイノベーションが考えられる。
- オープンイノベーションの成功事例として、GE によるジェットエンジンのブラケットの開発を挙げる。この開発は、機体の軽量化につながり、燃費が向上することからできるだけ軽くしたいとの一方、さまざまな圧力がかかることからジェットエンジンを支えるだけの高い強度が必要との相反する課題があり、大変難しい。そこで GE では圧力などのデータを公開し、新しいブラケットの設計を世界中に広く募ったところ、インドネシアの若いエンジニアが最も優れたデザインに選ばれた。

- ブラケットなどの設計がボトルネックとならないよう、設計などをオープンに公開することで、参入障壁を下げたことで、優秀なデザインを獲得し、結果的に顧客価値の向上につながったことがわかる。
- この例から示唆として得られることは、日本でも政策としてやらなければならないことは、グリーン・イノベーションで他に負けないテクノロジーを考え、その補完財の部分において参入障壁を下げるべきである。そのことが日本の企業競争力の向上に資することとなる。
- 日本でなかなかオープンイノベーションがうまくいかないというのは、日本の企業や製造業はサプライヤーを一緒に育てるビジネスモデルであったことも一因である。
- トヨタが水素関連の特許の公開を行ったことはまさにこのような補完財の部分での戦略にたっている。自社が特許で保護されている技術の使用を無料にすることで、新規参入者を補完財に呼び込むことができることを狙っているものである。
- アメリカの SBIR（中小事業技術革新制度）などのスタートアップを狙って、既存の大企業が強みを持っている補完の部分でビジネスを行うと、日本の収益性も高まる。日本だけで試行錯誤をしていても難しいこともあり、アメリカの制度を利用するよう戦略的に動くことが必要である。
- いろいろなところに使える技術（蒸気機関とか AI 等）を生み出せるかどうかは社会にとって重要なものである。社会の生産性を挙げるような技術としての Genearal Purpose Technology（GPT）はある程度のレベルになると、研究者はアプリケーションの開発に移りたがる。AI 研究者もアプリ開発側に引き抜かれていく。労働市場の流動性が高いとスピンアウトが多くなり、基盤技術開発からアプリケーション側への移行が前倒しとなると、累積的な技術開発水準が落ちてしまう理由はここにある。日本の場合は労働市場の流動性が低かったので、大企業においてはスピンアウトがなく、既存企業による累積的な研究開発ができた。アメリカは国防予算が下支えしてきたが、日本のそれは少ないので、下支えがないまま流動性を高めてしまうと GPT が磨かれる素地がなくなってしまう。

グリーン・イノベーション戦略との関係では、再生エネルギー技術の普及促進政策として、国産技術化の推進など自前主義にこだわることのリスクは大きいと考える。政策的にも既存大企業に加え、その周辺の補完分野でのオープンイノベーションなど、参入がしやすい制度づくりが重要である。

2.3.3 日本企業によるイノベーション戦略の事例研究と課題の考察

長期温暖化目標の達成とグリーン成長の同時実現に向けては、社会基盤において多種かつ広範囲にわたるイノベーション実現が必要である。イノベーションを効率的に引き起こし社会システムに実装していくには、過去のイノベーション成功事例の分析

に基づき望ましい環境醸成や制度整備への示唆としていくことが重要である。一方でイノベーションは都度の刺激策により短期に実現しうるものではなく、その基礎となる技術まで遡れば長期にわたる開発プロセスを経てやっと社会に貢献しうる姿に結実する。このような長期イノベーションは長い歴史をもつ大企業により引き起こされ得る一方、基盤技術を土台としながら新しい技術、事業領域に挑戦するスタートアップ企業により破壊的イノベーションが引き起こされるケースも見られる。これらの様々なイノベーションが引き起こされたメカニズムを事例に基づき検証、分析していくことは、イノベーション政策立案に有用な情報をもたらすと考えられる。そこで、イノベーションの長期メカニズム研究で実績のある研究者による分析事例を調査し、望ましい制度の在り方について議論を行った。

- イノベーション活動はそもそも逸脱活動である。イノベーションを興すには多くの資源が必要となるが、不確実性のリスクを有すること、説明責任など合理的行動が求められる。高い不確実性の下で、合理性を求める組織の中でイノベーション活動を推進していくための方策の調査、分析は重要である。
- 大企業によるイノベーションの長期メカニズムの事例として、海水淡水化に用いられる逆浸透膜の長期開発がある。東レ、日東電工、東洋紡の 3 社がそれぞれ半世紀かけて結実させた技術であり、降水量が多く水が豊かな日本という国において、企業が様々な不確実性に直面しながらも長期にわたって開発を続けることができた結果である。不確実性を技術、顧客、競争、組織・社会の 4 タイプに分類し、各社の開発経路を調査、分析した。
- 東レは海水淡水化を明確な目的としていた。海水淡水化に向けた道のりを検討し、早期事業化と事業拡大期で異なる技術を使うことを決定し 2 つの技術の並行開発を行った。日東電工は全社での収益圧力の中、新規事業の一環として膜ビジネスを検討しており、その一つに逆浸透膜があった。当初は事業の方向性は明確でなく、開発品を様々な客先に展開し用途を検討した結果、延長線上に海水淡水化があった。東洋紡は紡糸技術を転用した多角化事業を志向しており、海水淡水化は視野に入っていたがなかなか事業化に至らず厳しい状況に陥った。同じ事業セグメントの他商品の好調に助けられ、目立たない位置で膜事業として存続することができ、事業化に結び付いた。
- 利益率の面では、東レ、日東電工は全社平均と比較すると厳しい状況である。両社が採用するポリアミド系平膜型技術は業界のデファクトスタンダードであるため、更新需要を得る間口は広いものの価格競争にさらされる。東洋紡のみ酢酸セルロース系の中空糸膜型を採用しており、更新時に競合はなく利益率は良い。
- 社会課題解決型のイノベーションのように収益が見えづらいタイプのイノベーション活動を推進していくには、超長期の開発力をどう維持するかが鍵である。3 社の事例分析からは、各社の価値観、文化に沿った開発正当化が事業化につながったと言える。経営トップの力量も影響を持つ。また息の長いイノベーションであるがゆえに、早期からビジネスモデルを考えることが重要である。

- 温暖化対策と競争優位性構築の成功事例としてダイキン工業の取り組みが参照できる。環境規制がなかった当時の中国において、地元大手メーカーと組み自社のコア技術のうちインバーター技術を供与して、中国で厳しい環境規制が導入された際に市場優位性を獲得した。ただしこれは圧倒的な技術優位性を保有していることが前提となる。
- スタートアップによるイノベーションは、開業率の低さが日本は問題であり米国、英国が 9～14%程度で推移しているのに対し日本は 6%未満である。労働市場の流動性の低さが原因である。このような環境の中、起業家たちが、大企業のような資源を持たない中イノベーションを進めてきているこれまでの事例では、創業経営者が長期一貫した理念で取り組むこと、資金面での支援や人材紹介など有力プレイヤーの支援が重要であることが示唆される。大企業 OB 人材による支援は日本特有のメカニズムと言える。大企業によるスタートアップ支援は企業側にも有益であり促進すべきである。起業における課題としては、日本は米国と比較すると様々な情報が起業者に入ってくる環境になく、改善すべき点である。また起業の仕組みとして、金融機関から資金を得て起業後に倒産すると、ほぼ二度と復活できない風土が日本にはあり、社会でどう認めていくかが課題である。
- 補助金に関して、用途を限定した補助の在り方はイノベーションを停滞させる可能性がある。逆浸透膜や脱塩技術は海水淡水化のみが用途ではなく、幅広い用途に共通で利用され得る技術であり、幅広く技術のみに支援がなされた。その後、様々な用途を検討するプロセスで技術が発達していった。
- 温暖化対策で、政府は内閣府、SIP、ムーンショットなどの制度を通して多くの予算を拠出している。やむを得ない点ではあるが公費による補助金は合理性を求められ、説明責任が多くイノベーションが進まない可能性が示唆されるが更なる分析を要する。一方、国が認めた企業、プロジェクトなどは、信用を得るという点では投資家に対し重要なシグナルとなる。

2.3.4 まとめ

世界がカーボンニュートラルと経済成長の同時達成を目指す中で、気候変動による多様な不確実性の評価を行うとともにイノベーションを広範に引き起こしうる政策、制度を検討し導入していくことは重要である。日本においても 2050 年ネットゼロ排出目標が宣言され、経済と環境の好循環を創出していくとされたことにより、革新的かつ非連続のイノベーション創出の加速がさらに強く求められることとなった。グリーン技術が経済効率的に社会システムに実装され、排出削減目標とグリーン成長の同時達成を実現するには、国全体として研究開発活動や投資活動が安定的に行われうるような政策や制度の実行が望まれる。企業の事例研究を基にした議論を通して、企業がイノベーション活動を効果的に推進していくにあたり重要であると示唆される項目を以下にまとめる。

- イノベーションを興すのに必要な超長期の研究開発活動を維持しうる基盤の整備。日本における累積的な技術開発水準の維持にも有用
- 早期の段階から事業モデルを検討することは重要であるものの、最終的なアウトプットを限定しないイノベーション活動を認め、補助金や投資の付与において柔軟性を持たせる
- コア技術を持つ企業同士による補完型の事業活動を形成するプラットフォーム作り
- 新規企業の参入、敗者復活を容易にする仕組み作り。規制強化などもプレイヤーを変える機会となる。技術開発水準を維持しつつ労働の流動性の向上を図る
- 大企業を含む広範な出資者による支援と関与
- 国による戦略の方向性のシグナルや、制度や企業に対する認証の提示

経済と環境の双方に資するイノベーションがより効率的に引き起こされる仕組みづくりに向けて、これらを考慮した研究開発支援制度としていくとともに、制度の事後評価と改善を行っていくことは引き続き重要である。

参考文献（第 2.3 節に関するもの）

1) 統合イノベーション戦略推進会議、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
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）
3) https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-1.pdf

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。

そのような中で、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 3.1.1-1 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。

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、エネルギー価格変動に対する日本経済の耐性評価を行った。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。これは 2019 年度の本事業で実施した消費ベース CO_2 排出量にも関連が深い内容である。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、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―理論と観測

3.1.1　デカップリング・カップリングに関する状況

本節では、世界における GDP と CO_2 排出量もしくはエネルギー消費量とのデカップリング（GDP は成長しているが、CO_2 排出量は減少）の現状について記載する。

まず、図 3.1.1-1 に、1971～2018 年の間の世界の GDP とエネルギー起源 CO_2 排出量との関係を示す。2013～2016 年にかけては、世界の CO_2 排出量は横ばい傾向にあった

が、2017 年には再び上昇に転じ、2018 年も上昇傾向が見られる。文献 1)、2)でも記載したように、長期の傾向で見ると、2009～13 年の間の急上昇が 2013～2016 年の間で調整されたと見ることができる。その背景としては、中国を中心とする鉄鋼、セメント生産の生産調整等の影響が大きいと考えられる。

図 3.1.1-2 には、世界の GDP と総一次エネルギー消費量（IEA 統計による一次エネルギー換算）の関係、また図 3.1.1-3 には世界の GDP と電力消費量の関係を示す。いずれも線形に近い関係が見られ、カップリングしている。世界 GDP と電力消費量については、一次エネルギー以上に強い線形の関係が見られ、経済成長に伴って電力消費の比率も高まるという構造がうかがえる。

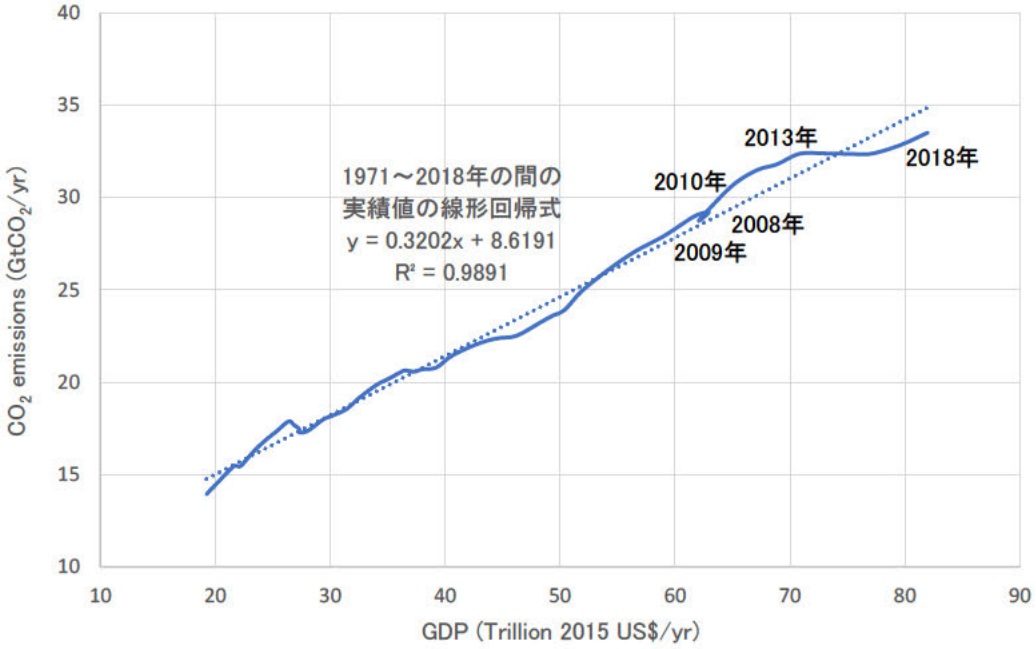


図 3.1.1-1　世界の GDP とエネルギー起源 CO_2 排出量の関係 [3)]

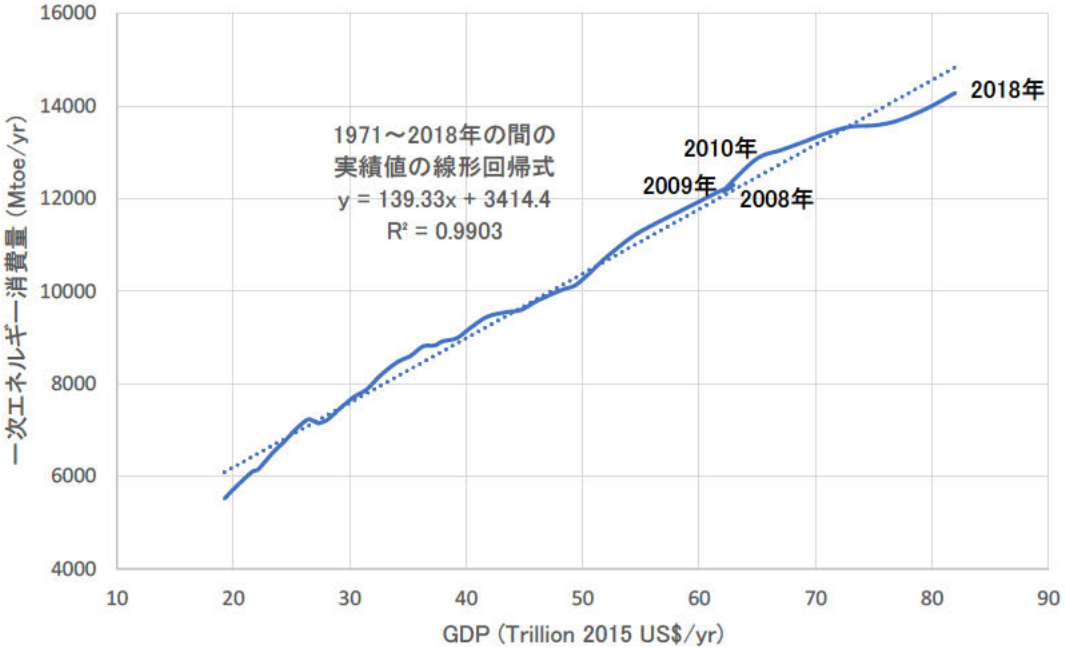


図 3.1.1-2 世界の GDP と一次エネルギー消費量の関係 [4)]

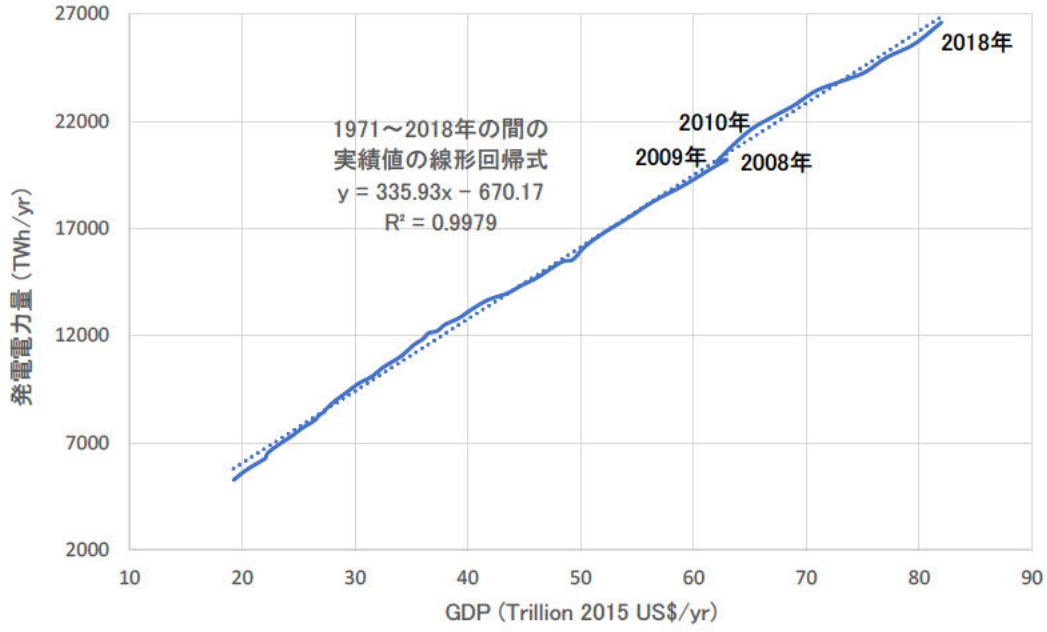


図 3.1.1-3 世界の GDP と電力消費量の関係 [4)]

参考文献（第 3.1.1 節に関するもの）

1) 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) 平成 31 年度報告書 (2020)

2) 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) 平成 30 年度報告書 (2019)

3) IEA: CO_2 Emissions from Fuel Combustion 2020 (2020)

4) IEA: World Energy Balances 2020 (2020)

3.1.2 CO_2 排出量と GDP の連関に関する分析

(1) 背景および分析手法

デカップリングに関する議論は主に欧米にて行われているが、欧米は産業構造の変化、エネルギー集約的な財の輸入増大も進展している。そのため、地域によって GHG 排出と GDP 成長の関係は異なることが予想される。また、よりマクロにグローバルな視点から見て、世界の GHG 排出総量と世界の GDP の連関について過去の実態がどのように推移したのかについて定量的に把握することは、今後のデカップリングの可能性を探る上で重要と考えられる。

以上の問題意識に基づき、本節では 2000 年～2018 年のエネルギー起源 CO_2 排出量と GDP 成長の関係について、次の(3.1.2-1)式および(3.1.2-2)式を用いて分析を行う。(3.1.2-1)式は地域別の関係式、(3.1.2-2)式は世界合計に着目したマクロな関係式である。両式は、CO_2 排出量と強い関係を持つ粗鋼生産量、セメント生産量、発電向け石炭消費量を明示的に区分し、これら以外の CO_2 排出量と GDP の関係を見出そうとすることを意図している。係数 a_i, b_i, c を所与とすることで、単回帰式となり d_i を推定できる。d_i が正であれば GDP と CO_2 排出量はリンク（カップリング）しており、d_i が正でなければ GDP と CO_2 排出量はリンクしていない（デカップリングしている）と解釈する。

$$\begin{aligned}\text{時点}t\text{における地域}i\text{のエネ起}CO_2\text{排出量} &= a_i \times \text{地域}i\text{の粗鋼生産量}t \\ &+ b_i \times \text{地域}i\text{のセメント生産量}t + c \times \text{地域}i\text{の発電向け石炭消費量}t \\ &+ d_i \times \text{地域}i\text{の GDP(PPP, 実質)}\, t + e_i\end{aligned} \tag{3.1.2-1}$$

$$\begin{aligned}\text{時点}t\text{における世界のエネ起}CO_2\text{排出量} &= a \times \text{世界の粗鋼生産量}t \\ &+ b \times \text{世界のセメント生産量}t + c \times \text{世界の発電向け石炭消費量}t \\ &+ d \times \text{世界の GDP(PPP, 実質)}\, t + e\end{aligned} \tag{3.1.2-2}$$

なお、粗鋼当たりの CO_2 排出を意味する係数 a_i さらにセメント当たりの CO_2 排出を意味する係数 b_i について、年次と共に若干変化しているが、本分析では簡素化のため、a_i、b_i について（地域差異は設けるものの）年次によらず一定とする。

(2) 分析結果

入力データは次の通り設定した。エネルギー起源 CO_2 排出量は IEA[1]、粗鋼生産量は worldsteel[2]、セメント生産量は主に USGS[3]、発電向け石炭消費量は IEA[4]、GDP(PPP, 実質)は World Bank[5]をそれぞれ参照した。なお、ここでの発電とは自家発電や CHP を含む。係数 a_i, b_i,は Oda et al.[6]等に基づき表 3.1.2-1 の通りとした。係数 c は IEA デフォ

ルト値の 3.96tCO₂/toe を参照した。なお、本分析では欧州として英国を含む EU-28 を参照した。

結果を表 3.1.2-2 に示す。GDP(PPP, 2017 年実質)当たりの CO_2 排出量の係数 d_i は本分析の地域区分において何れも有意水準 1%にて統計的に有意である。日米欧を除き何れの地域も d_i は正であり、これは GDP と（粗鋼生産量、セメント生産量、発電向け石炭消費量の影響を除く）CO_2 排出量が連動（カップリング）していることを意味している。マクロで見た世界の結果についても同様である。日米欧の d_i は負であり、2000 年～2018 年において GDP 成長と CO_2 排出低減が同時に進んだことを意味する。この点に着目すれば GDP が成長するほど CO_2 排出量が低下したとも解釈でき、デカップリングの議論に大きな影響を与えたと考察できる。他方、産業構造の変化、エネルギー集約的な財の輸入増大も日米欧において進んでおり、かつ世界計の結果からもカップリング状態であるのが明らか（世界計における d_i が正）であるため留意が必要である。

表 3.1.2-1 係数の想定値（時点によらず一定）

	a_i：粗鋼当たりの CO_2 排出量 (tCO_2/t 粗鋼)	b_i：セメント当たりの CO_2 排出量 (tCO_2/t セメント)
中国	2.6	0.40
インド	2.6	0.37
日米欧	1.5	0.35
その他の地域	2.2	0.40
世界	2.3	0.39

表 3.1.2-2 単回帰の結果

	d_i：GDP(PPP, 2017 年実質)当たりの CO_2 排出量 ($tCO_2/10^6$ international $))	
	推定値	t 値
中国	29.3**	3.0
インド	75.3**	18.6
日米欧	-64.2**	-4.9
その他の地域	118.1**	36.9
世界	60.6**	13.7

補足:*有意水準 5%で有意、**有意水準 1%で有意

(3) まとめと今後の課題

本節は 2000 年～2018 年におけるエネルギー起源 CO_2 排出量と GDP 成長の関係について中国、インド、日米欧、その他地域、世界計それぞれについて簡易な回帰式を導入し分析を行った。そこでは（GDP との連関はそれほど強くないものの）CO_2 排出量に直結する粗鋼生産量、セメント生産量、発電向け石炭消費量を明示的に考慮した。その結果、日米欧を除く何れの地域も GDP と（粗鋼生産量、セメント生産量、発電向

け石炭消費量の影響を除く）CO_2排出量が連動（カップリング）している結果を得た。日米欧はGDPとCO_2排出量がデカップリングしている結果を得たが、世界計で見れば連動（カップリング）しているとの結果を得た。すなわち、日米欧の状況が世界全体で進行しているとは言い難い点に留意が必要と言える。

本節で実施した分析はごく簡易な手法に基づいており、電力需要やガス火力の効率向上、再エネ普及、冷暖房エネルギー需要、運輸部門や（鉄鋼、セメントを除く）産業部門のエネルギー需要、さらには国際貿易（素材や自動車・機械等）を明示的に考慮していない。このような詳細分析を進めることは今後の課題の一つである。

参考文献（第 3.1.2 節に関するもの）

1) IEA: CO_2 Emissions from Fuel Combustion 2020 (2020)
2) worldsteel: Steel Statistical Yearbook 2020, Concise version (2020)
3) USGS, Cement Statistics and Information (各年)
   https://www.usgs.gov/centers/nmic/cement-statistics-and-information, (accessed 2021-02-23)
4) IEA: World Energy Balances 2020 (2020)
5) World Bank: World Development Indicators, https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.PP.KD, (accessed 2021-02-25)
6) Oda, J., Akimoto, K., Tomoda, T., Nagashima, M., Wada, K., Sano, F.: International Comparisons of Energy Efficiency in Power, Steel, and Cement Industries, Energy Policy, Vol. 44, pp.118-129 (2012)

3.1.3 デカップリング・グリーン成長の定性的理解

デカップリングやグリーン成長の定性的理解については、平成30年報告書[1)]に記載したが、ここで改めて記載しておく。なお、「グリーン成長」、「デカップリング」とは、GDPは上昇するが、一次エネルギー消費量もしくはCO_2排出量そのものが減少する傾向を指すこととする。

表 3.1.3-1にグリーン成長の機会について類型化して整理を行った。基本的には世界全体で排出削減努力が高度に協調されることが必要である。例えば、環境外部費用を内部化することは短期では投資の増大でGDPが上昇するかもしれないが、中期では資本生産性の悪化によってGDPは低下する可能性がある。一方、環境費用の内部化は長期で見れば温暖化影響被害を低下させることでトータルでGDPを増大させる可能性があり、グリーン成長につながる可能性がある。しかしながら、温暖化影響被害費用は大きな不確実性が存在し、どの程度の炭素価格を内部化すれば良いかが不透明であり、最適値を超えた内部化は長期でも経済を悪化させてしまう。また、仮に高い炭素価格が真の値だったとしても、それが不透明な中では炭素価格の国際的な協調は実際には困難と考えられる。

表 3.1.3-1 グリーン成長の機会

	グリーン成長の機会	内容
[I] 長期、世界全体でのグリーン成長の実現	温室効果ガス排出による外部費用となっている気候変動影響被害の内部化	具体的な施策としては、政府による規制、基準、ラベリング、明示的カーボンプライシング政策等、企業による自主的取り組み、インターナルカーボンプライス、金融機関による ESG 投資等。長期で見たときには環境外部費用を内部化しないよりも成長につながるが、短期的には経済成長を鈍化させる方向となる。**【世界全体での排出削減が前提】**
[II] 中長期、世界全体でのグリーン成長の実現	温室効果ガス低減につながるイノベーションの実現	経済自律的な排出削減が進展するようなイノベーションの実現（IT, AI によるシェアリングエコノミーの進展など）、それを後押しする施策（法人税の減税など民間投資の促進政策、良い経済環境の実現、必要性の乏しい規制の撤廃等）。**【世界全体での排出削減への取り組みがなくても、イノベーションの実現による効果は世界に広がる可能性大】**
[III] 中長期での対象国のグリーン成長の実現	優れた温暖化対策技術・製品の海外市場展開による輸出額の増大に伴う対象国の所得の上昇	**【世界全体での排出削減が前提。環境調和型技術開発能力が高い国でのグリーン成長機会】**
	CO_2 排出削減への取り組みに伴う化石燃料価格低下を通した輸入額の減少に伴う対象国の所得上昇	**【世界全体での排出削減が前提。化石燃料輸入依存度が高い国でのグリーン成長機会】**
	化石燃料資源輸入から資本集約的技術への代替による経済成長の機会	資本生産性、エネルギー生産性が低下するかもしれないが、資源生産性を高めることで、全要素生産性の向上となる機会 **【化石燃料輸入依存度が高く、環境調和型技術開発能力が高い国でのグリーン成長機会】**

一方、イノベーションが高度に進化した場合は、（広義での）カーボンプライスがなくても、CO_2 排出削減につながる機会は存在すること考えられる。グリーン成長実現のために一番のキーとなるのはイノベーションと考えられる。政府もイノベーションを強調しており、正しい方向ではある。しかしながら、意欲的な目標を掲げ、イノベーションの方向性を指し示すことは、イノベーション誘発のためにも重要であるが、具体的にどうイノベーションを誘発していくかについては、簡単ではなく、引き続きより良い対応のあり方を検討していく必要性があると考えられる。

なお、気温安定化を図るために、長期的には CO_2 のほぼゼロ排出が必要だが、この場合であっても、ただ技術的に脱炭素化が達成できるということではなく、安価に脱炭素化が実現できるようにならなければ、結局は現実社会では実現しない可能性が高い。いずれにしても、安価に大幅に排出削減が可能な技術が開発され、グリーン成長に資することが大幅排出削減の条件と考えることは自然である。

参考文献（3.1.3 に関するもの）

1) RITE, ALPS 報告書 (2019)

3.2 エネルギー価格変動に対する経済耐性の評価

3.2.1 はじめに

エネルギー安全保障の分析上の課題は、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二つの側面へと分離できる[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は近年高まっている[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（EIA, 2018）。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の低下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とみるべきだろう。

エネルギー安全保障における第二の課題に対しては、エネルギー価格高騰に対する経済としての耐性が分析されてきている。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モデル分析に基づき、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したと評価している[4]。しかし近年、こうした耐性に対する懸念は世界的に高まっている。

欧州委員会による報告書（European Commission, 2014）では、1995-2009 年を測定期間として、その期間には世界的に実質単位エネルギーコスト（real unit energy cost:

---

[1] 本節は野村（2019）に基づくが、2020 年度 ALPS III 第 2 回「地球温暖化対策国際戦略技術委員会」（11 月 26 日）の議論に基づき改訂されたものである。

[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が生じうる危機感を持つべき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に向かっている。

[4] 「エネルギー白書 2007」での分析は原油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波及効果を考慮した上でのマクロ的に集計された影響は、本節での RUEC の時系列比較（図 3.2.4-1）とおおむね整合する。

RUEC）における緩やかな上昇傾向が見いだされることを指摘している。後述（3.2.2節）するように、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（energy productivity improvement: 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ていることを意味している。同報告書によれば、欧州（EU27）の製造業では、この期間において年率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は同期間において年率1.5%で改善しているものの、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年ほどからは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としての上昇率では年率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ものの、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ポイントほど上回る水準であり、エネルギー価格高騰に対する耐性の脆弱化は日本においてより顕著である。

エネルギー安全保障上の二つの課題では、日本経済の抱えるリスクはその双方において増大している。3.2節では、その第二の課題として、エネルギー価格変動に対する経済の耐性についての分析をおこなう。脆弱性の評価指標としてのRUECは、その指標自体の水準よりも、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。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2015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論じる。2010年代の測定値を含むことでは、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ていることが示される。

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、大きく二つの要因へと分解される。エネルギー生産性という数量側の分析（3.3節）に対し、本節で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には、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節(2)項では、実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1/3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ている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。一般的な生産性勘定では、二次エネルギーへの転換のためのエネルギー消費が識別されておらず、また高炉ガスや転炉ガス、自家蒸気など副産物の発生と投入の描写も不十分であり、エネルギーの視点から十分な分析をおこなうことは困難である。3.2.3 節および 3.2.5 節での測定は、エネルギー投入構造の分析のために開発されたデータベースに基づいている [5]。また、とくに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 [6]。3.2.6 節は結びとする。

3.2.2 分析フレームワーク

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 trans-log 指数によって定義される集計産出量から、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)、

[5] エネルギー消費表の概要は 3.2.8 節補論 B を参照。

[6] 一国全体の EPI を整合的に消費主体別寄与度へと分解する際のひとつの困難性は、家計の取り扱いにある。エネルギー統計における国内の最終エネルギー消費は、経済統計では大きく産業による中間消費と家計による最終消費とに分離される。ここでは家計も含めて一国経済の整合的な描写をおこなうため、家計部門をひとつの産業部門として定義し、そのアウトプットを、家計の所有する住宅（含む土地）と耐久消費財の帰属サービス量、およびエネルギー消費量の集計値によって定義する。また家計所有住宅の使用料は国民経済計算体系（System of National Accounts：SNA）において「帰属家賃」として古くから GDP に加算されている概念である。それは不動産業にも格付けられるが、エネルギー分析用に拡張された産業別生産性統計（3.2.8 節）では、帰属家賃を家計部門（家計サービス）に格付けている。また家計所有耐久消費財の資本サービス価値はユーザーコスト・アプローチによって推計され、同部門の産出に加算されている 。たとえば家計所有の自家用車やテレビ、エアコン、PC など、耐久消費財によってもたらされるサービスは住宅とともに家計によるサービス生産として定義される。家計部門で消費されるエネルギーは、基本的に住宅や耐久消費財の利用に伴って消費されるものであり、エネルギー生産性は住宅や耐久消費財機器のサービス量との関係として定義される。たとえば PC における消費電力の低下は家計部門の EPI となり、住宅の断熱性能の改善はエネルギー消費を低下させながら生産されるサービスの拡大でもあり EPI を実現していく。こうした家計部門の内生化によって、測定される一国集計レベルの EPI は、（家計部門を含んで拡張された）産業部門ごとの EPI へと完全に分解される。

[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。

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。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・サービス量の測定量として、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と式(3.2.2-3)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。

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

式(3.2.2-4)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集計指標である。

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

式(3.2.2-5)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）あたりの産出量によって定義し、その成長率（τ）を

[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、全体として169の資産に基づく資本サービス価格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価格からの集計値として測定される。

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

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。このもとで式(3.2.2-5)をあらためて、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）、エネルギー生産性改善（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）（E_p）あたりの品質調整済みエネルギー投入量（E）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]。産業別のE_jは、j産業別にiエネルギー種間の品質の相違を考慮したトランスログ指数により、次のように定義される。

$$\Delta \ln E_j = \sum_i \bar{v}_{ij} \Delta \ln E_{f,ij}, \tag{3.2.2-10}$$

$\Delta \ln E_{f,ij}$は産業別エネルギー種別の最終エネルギー消費量の成長率であり、$\bar{v}_{ij}$は産業別最終エネルギー消費額に占めるエネルギー種別コストシェアの二期間平均値である（$\sum_i \bar{v}_{ij}$=1）。熱量あたりの単価はエネルギー種ごとに異なる。トランスログ指数による式(3.2.2-10)は、エネルギー種別の相対価格差がエネルギー投入量に対する寄与度の差異である（エネルギーとしての質の相違を反映している）と仮定したもとで、そうした品質の相違を統御しながら集計されたエネルギー投入量の成長率を定義している。それを品質調整済みエネルギー投入量（quality-adjusted energy input）と呼ぼう。産業別E_jから、マクロでの集計エネルギー投入量（E）をトランスログ指数により定義する。

$$\Delta \ln E = \sum_j \bar{w}_j^E \Delta \ln E_j, \tag{3.2.2-11}$$

ここで$\bar{w}_j^E$は、一国の最終エネルギー消費額に占める産業別シェアの二期間平均値である（$\sum_j \bar{w}_j^E$=1）。

いまπが一定のもとでは、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。他方、EPI はπの上昇によっても誘発され、その比率τ/πはエネルギー生産性の価格弾性値である。π上昇が RUEC を高める直接的な効果は、誘発した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エネルギー生産性である式(3.2.2-6)のτには、各産業部門における省エネ投資などによる EPI に加えて、エネルギー多消費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しまっている。式(3.2.2-6)による

[9] エネルギー品質に関する詳細は野村（2018）を参照されたい。

τ定義を、グロスのエネルギー生産性（gross energy productivity）と呼ぼう。その成長率（τ）は産業構造要因（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_*）へと分解される（野村, 2018）。

$$\tau = \Delta\ln\sigma + \Delta\ln q_* + \tau_*. \tag{3.2.2-12}$$

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）を考慮した上で測定される、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_*と式(3.2.2-9)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。式(3.2.2-8)に式(3.2.2-12)を代入して、

$$\Delta\ln RUEC = \pi - \Delta\ln\sigma - \tau_* + \mu, \tag{3.2.2-13}$$

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）、それを調整した上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、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、エネルギー多消費産業の相対的な縮小は一国経済の 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、

$$\mu = \Delta\ln q - \Delta\ln q_*, \tag{3.2.2-14}$$

として定義されている。3.2.4 節(1)項では、式(3.2.2-13)に基づき日本経済における RUEC の変化要因を分析する。

式(3.2.2-13)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。式(3.2.2-1)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 TFP 成長率を trans-log 指数によって定義する。

$$\tau^T = \sum\nolimits_\theta \bar{v}_\theta \Delta\ln P^\theta - \Delta\ln P^X \ (\theta = KLE). \tag{3.2.2-15}$$

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）。式(3.2.2-15)を式(3.2.2-7)へと代入して、式(3.2.2-13)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。

$$\pi = \bar{v}_K\pi^K + \bar{v}_L\pi^L + \tau^T. \tag{3.2.2-16}$$

ここでπ^Kおよびπ^Lとは、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、

$$\pi^K = \Delta\ln P^E - \Delta\ln P^K \tag{3.2.2-17}$$

および

$$\pi^L = \Delta \ln P^E - \Delta \ln P^L \qquad (3.2.2\text{-}18)$$

として定義される。式(3.2.2-16)は実質エネルギー価格の変化率を、資本投入価格変化による寄与（右辺第一項)、労働投入価格変化による寄与（第二項)、そして TFP による寄与（第三項）の三つの要因へと分解している。3.2.4 節(2)項では、式(3.2.2-16)に基づき、日本経済における実質エネルギー価格の変化の構造について考察する。

3.2.3 エネルギー価格およびコストの日米水準比較

(1) エネルギー投入価格

本節では日米格差の視点から、エネルギー消費の価格差における戦後の両国経済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、国際市況としてのエネルギー価格の影響を両国が等しく受けるものであれば、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両国においてエネルギー消費における内外価格差が存在しており、それは（本節での考察のように）長期的に安定している。エネルギー価格高騰への耐性としての日本経済の課題を評価するためには、エネルギー価格や RUEC における内外格差の分析が必要である。

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価格における格差を上回るものであれば、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をすべて相殺はしないとしても、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）。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の対象ではない。こうした問題を補うため、Nomura, Miyagawa, and

[10] 3.2.3 節での日米比較は Jorgenson, Nomura, and Samuels（2016）での測定に基づくものであり、エネルギー種別としての細分化の程度は両国において必ずしも統一されていない。またエネルギー転換や最終消費に関する定義が日米の生産性統計では異なることから、日米比較評価では（家計部門を除く）産業集計レベルでの測定としている。またここでの産出は付加価値ベースによっており、エネルギーコストを加えている 3.2.4 節での日本経済の分析とは異なっていることに留意されたい。

Samuels（2019）では日米国際産業連関表のフレームワークに基づきながら、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を測定している。また Jorgenson, Nomura, and Samuels（2016）では、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上で、資本・労働投入における日米価格差を産業別に推計している。本節はこうした推計値に基づき、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、1955-2015 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、それぞれの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している。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。

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となっており、過度の円高が進行した 1990 年代半ばを除く、ここでのすべての観察期間において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、プラザ合意（1985 年）を転機として米国よりも 10-50%ほど高い水準へと変化している [11]。それに対してエネルギー価格では、観察期間のすべてにおいて、日本は米国に比して 1.5-3.0 倍の価格差に直面している。

エネルギー消費における日米価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 67%も過大であると評価されるほどに円高となった（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る。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。その後緩やかにエネルギーの PLI は低下するものの、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消失してしまう（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 倍の水準に拡大している。

[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。

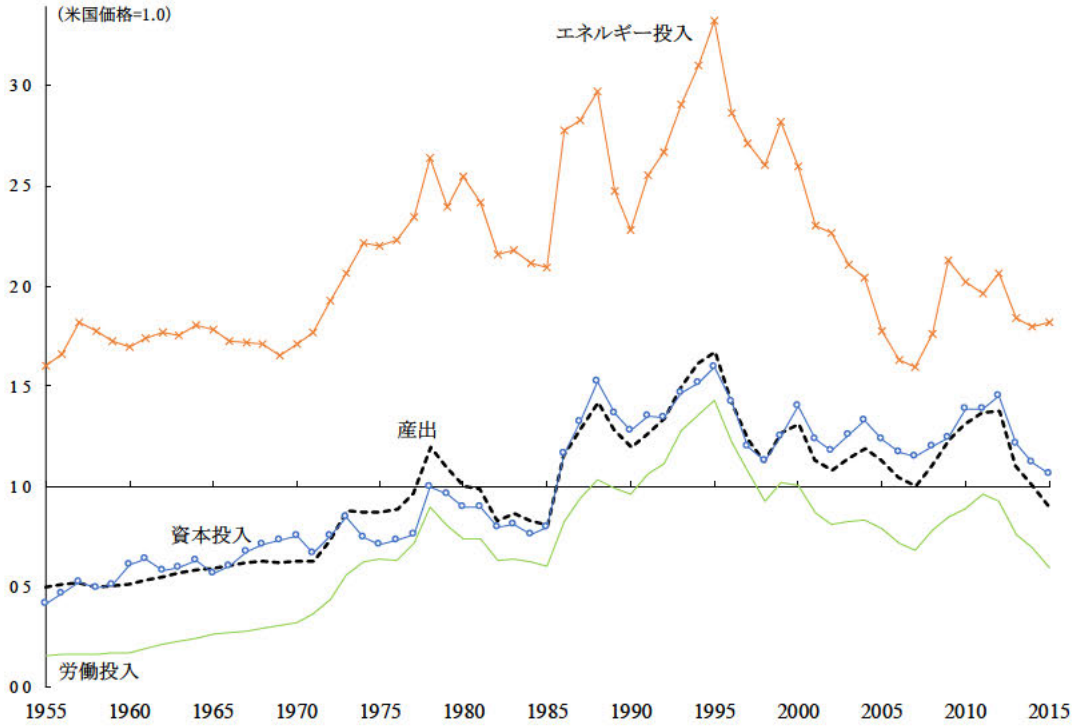


図 3.2.3-1 エネルギー、資本・労働投入の日米価格水準指数

単位：各年におけるそれぞれの米国価格を 1.0 と基準化（1955-2015 年）。

注：Jorgenson, Nomura, and Samuels（2016）での産出、エネルギー・資本・労働投入それぞれの購買力平価を、各年の年平均為替レートで除した価格水準指数。

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価格差となる（図 3.2.3-2）。図 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 3.2.3-2 ではそれを含まずより安定的となる[12]。実質エネルギー価格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（3.5 倍ほど）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。二度のオイルショックを挟みながらも、実質エネルギー価格における日米格差は半世紀もの間緩やかに縮小してきた。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は相対的には安価なものへと推移してきている。近年においてその転換点ともみえるのは 2011 年であり、その後には再び実質エネルギー価格における日米格差は拡大に転じている。米国ではシェール革命による恩恵を受けるものとなったが、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）などにより電力価格が上昇している。

[12] ここで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）を含んでおり、総資産に占める土地のシェアは日本でより大きいものの、資本サービス全体としての実質価格における日米格差はこの長期の観察期間においてわずかな幅に収まっている（図 3.2.3-2）。

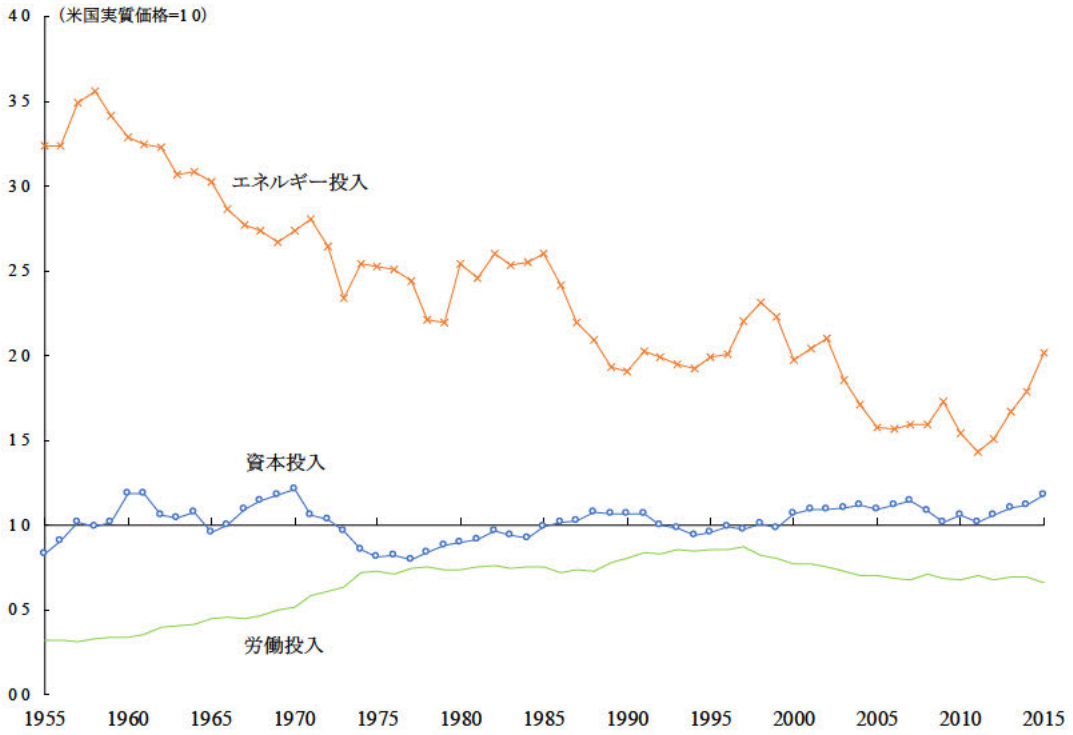


図 3.2.3-2 エネルギー、資本・労働投入実質価格の日米価格差

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（1955-2015 年）。注：図 3.2.3-1 より算定。

(2) 実質単位エネルギーコスト（RUEC）

エネルギー価格高騰への耐性を評価するため、その総合的な評価指標として RUEC 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れば、経済への影響は相殺されてしまう。またエネルギー価格とは独立に、たとえば世界における日本の生産物への需要が高まるなどにより、一国経済の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は強化される。逆に、日本の生産物が陳腐化し、その産出価格が低下することを余儀なくされるような状況においては、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 3.2.3-3 は日米両国における RUEC の推移を比較している。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 年代初めまでの十年間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 3.2.3-4 では両国の RUEC の格差指数とともに、要因分解を示している [13]。この 20 年間に日米 RUEC 格差がわずかなものとなっていることは、日本は米国の 2 倍を超える実質エネルギー価格に直面しながらも（図 3.2.3-2）、

[13] ここでの分解は式(3.2.2-8)に相応するが、エネルギー生産性はエネルギー品質（q）の影響を含んでいる。

米国に比して 2 倍以上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 [14]。

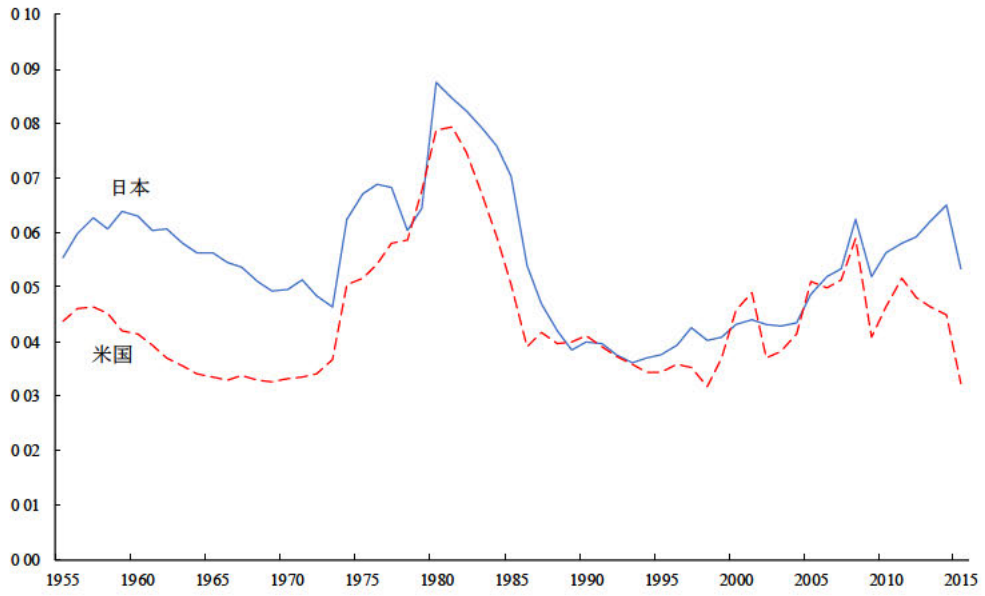


図 3.2.3-3 日米両国の RUEC

単位：日米両国で各年名目付加価値額=1.0（1955-2015 年）。

注：Jorgenson, Nomura, and Samuels（2016）より算定。

1995 年から 2000 年代後半までの RUEC は、欧州委員会（European Commission, 2014）の測定値と同様に日米両国で上昇傾向にある（図 3.2.3-3）。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は、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」（ANRE, 2008）での産業連関モデルによる価格波及分析によれば、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。本節での RUEC はエネルギー消費における価格全体を包括しているため、その対象は原油に限らないが、おおむねその耐性強化の傾向は整合している。しかし電力価格、天然ガス・石炭を含めたエネルギーコスト全体では、1990 年代半ばより RUEC における上昇傾向が始まっている。

2000 年代後半期までの RUEC 上昇傾向は日米で共通しているが、2009 年ほどからは、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ものの、米

[14] エネルギー消費に関する両国生産性統計の概念差もあり、ここでは日米両国における産業構造の相違を考慮していない。3.2.4 節では日本における産業構造要因を統御しているが、もし日米両国において構造要因における格差を推計できれば、両国のエネルギー生産性格差は縮小すると考えられる。日本が高い実質エネルギー価格に直面してい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影響は、ここでの生産性格差のグロス指標の内に含まれてしまっている。

国ではシェール革命の恩恵が表れている（図 3.2.3-3）。図 3.2.3-4 における日米 RUEC 格差でみれば、日米格差は 2015 年には 60%ほどまで拡大した。日本での 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 3.2.3-3）、国際競争力の観点から日米格差として評価すれば、拡大した格差水準は高度経済成長期に匹敵する。

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、日米エネルギー生産性格差の縮小である（図 3.2.3-4）。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（むしろ省エネ政策としては強化されている）ものの、米国経済の半分以下のスピードとなっている。安価になっていく省エネ技術は資本財へと自ずと体化され、意図的な省エネ投資を必ずしも目的とせずとも、更新投資のタイミングなどにより経済体系へと組み込まれていく。1995 年には 60%ほどあった日本のエネルギー生産性における優位性は、2015 年にはその半分にまで縮小している。

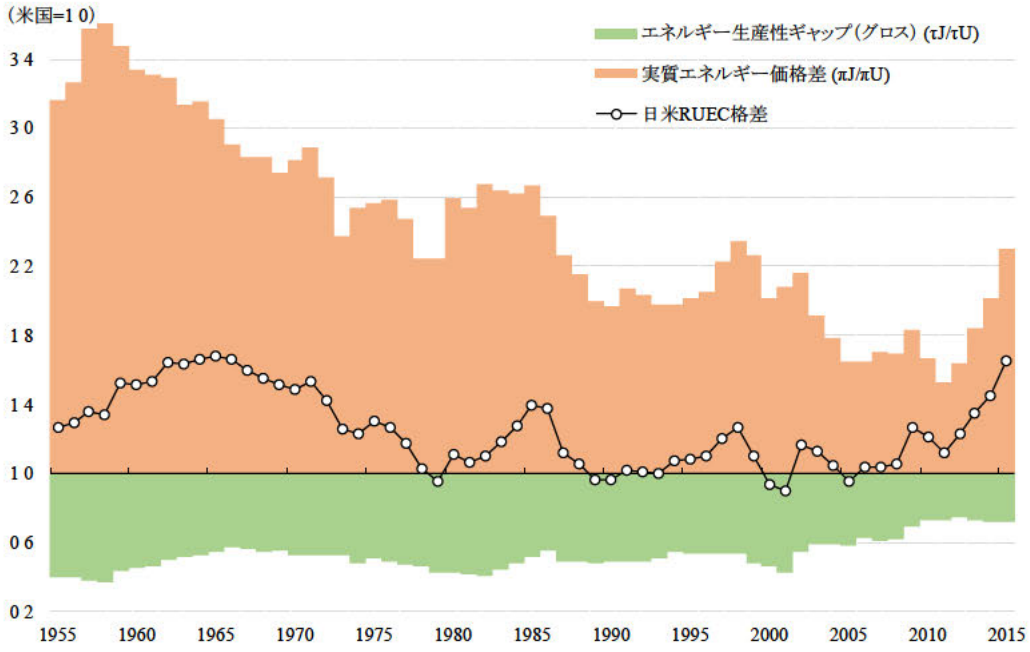


図 3.2.3-4 日米 RUEC 格差の要因分解

単位：各年における米国水準=1.0（1955-2015 年）。注：Jorgenson, Nomura, and Samuels（2016）より算定。

3.2.4 日本の RUEC 上昇の要因分解

(1) RUEC 変化要因

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（その計数は表 3.2.7-1 に与えられている）。高度経済成長期には、実質エネルギー価格（π）が低下しているにも関わらず、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[15]。そのことはエネルギー生産性のグロス指標（τ）には表れていないが、調整済みのエネルギー生産性指標（τ_*）における改善傾向として見いだされる。

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、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出されず、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のひとつの特性と言える。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）の大きく二つに分けられる。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を高めるなどより多くのエネルギー・サービスを消費するものとなり、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。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、未導入である経済主体の更新投資や買い替え需要に伴い経済体系へと組み込まれていく。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、その両者の相殺した姿として捉えられる[16]。

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、しばらく EPI は見出されないものの、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している。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・節電による効果を含むものであるが、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と測定される（野村, 2018）。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は含まれており、図 3.2.4-1 における調整済みのエネルギー生産性（τ_*）にもグロス的な性格が残っている。

[15] 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出されている。

[16] Hoshino（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における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ものの、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的であり、価格弾性における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。

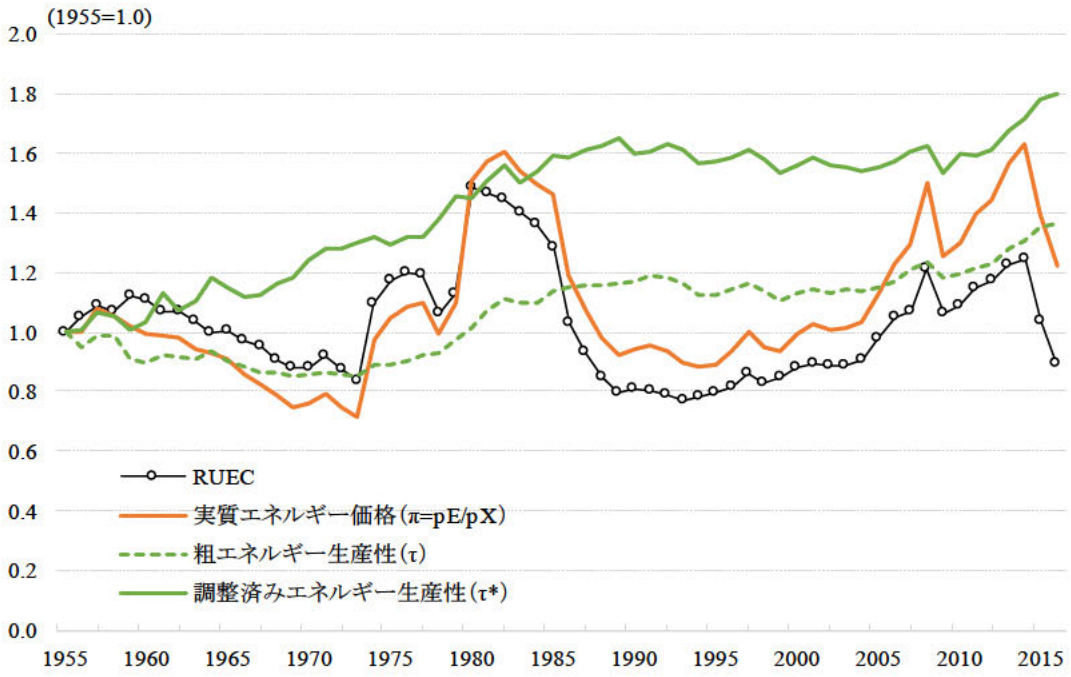


図 3.2.4-1 日本経済の RUEC、実質エネルギー価格とエネルギー生産性

単位：1955 年値=1.0（1955-2016 年）。注：RUEC は式(3.2.2-5)による。

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、観測期間を実質エネルギー価格の上昇期と下降期の両者を含むものとして、

第 I 期　　高度経済成長期　　（1955-1973 年）
第 II 期　　オイルショック後　　（1973-1995 年）
第 III 期　　RUEC 上昇期　　（1995-2016 年）

の大きく三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 期のマイナス 1.0%と第 II 期マイナス 0.2%から、第 III 期にはプラス 0.6%へと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。

RUEC 変化における 1990 年代半ばの転換期は、大きく三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 期のマイナス 1.9%（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 1.0%へと転じ、そして第 III 期にはさらに 1.5%へと拡大している。こうした変化要因の詳細は(2)項において考察するが、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率は大きく抑制されているものの、実質エネルギー価格の上昇率はむしろ高まっている。

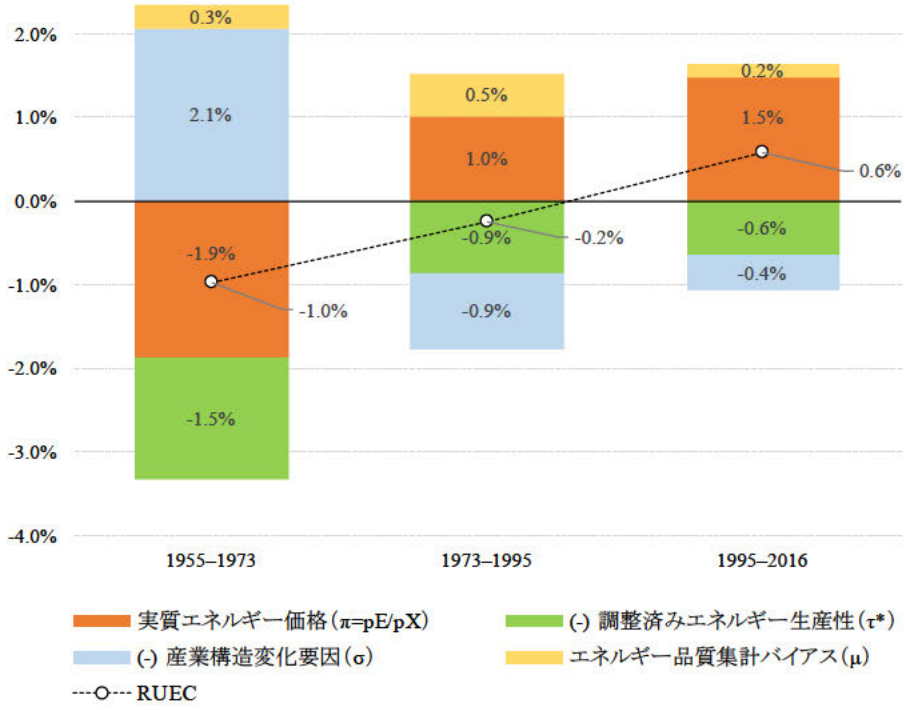


図 3.2.4-2 日本経済の RUEC 変化要因

単位：%（年平均成長率）。注：RUEC の要因分解は式(3.2.2-13)による。

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関わらず、産業構造変化要因を統御したエネルギー生産性指標（τ_*）でみれば EPI は第 I 期の 1.5%改善から第 II 期 0.9%へ、そして第 III 期には 0.6%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-0.84 から第 III 期には-0.44 へと半減している。安価に利用できる省エネ技術が枯渇していく中で、実質エネルギー価格が上昇しようとも、エネルギー生産性の改善によって相殺していく効果は逓減していると解される。

第三に、第 II 期には一国経済構造としてのエネルギー多消費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 0.9%低下させているが、第 III 期にはそれが 0.5 ポイント縮小している。サービス化の進行など産業構造変化は、RUEC 上昇を緩和させる効果を持つが、そうした構造要因も 1990 年代半ば以降には縮小している。

(2) 実質エネルギー価格の変化要因

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（その計数は表 3.2.7-1 を参照されたい）。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、図 3.2.4-3 での単位は右軸による。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、その傾向の把握は観察期間の設定に大きく依存するけれども、長期のトレンドとして

それは上昇傾向にある。日本経済においては、資本投入価格が 1990 年代初めより、労働投入価格が 1990 年代後半より低下していることと対照的である。

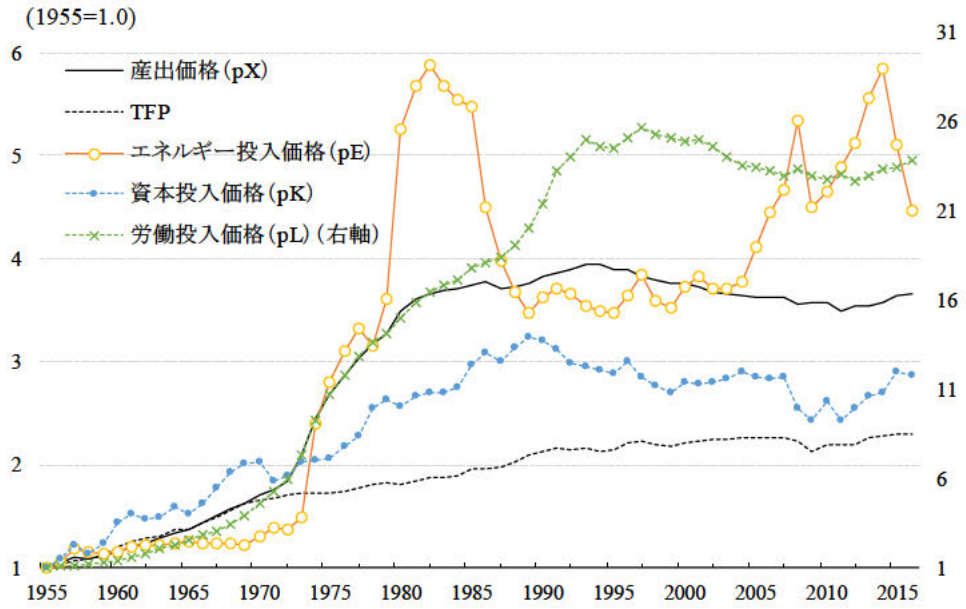


図 3.2.4-3 産出価格および KLE 投入価格と全要素生産性

単位：1955 年値=1.0（1955-2016 年）。注：各価格指数および TFP 指数は式(3.2.2-16)などによる。

図 3.2.4-4 では、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を示している。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 [17]。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 期において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。また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となっている。そうした推移を反映して、第 III 期の名目エネルギー価格としての上昇率は、第 II 期の 1/3 にまで低下している。

[17] エネルギー消費データは 3.2.7 節を参照。図 3.2.4-4 はエネルギー種別最終エネルギー消費量を trans-log 指数によって四つのグループへと集計している。

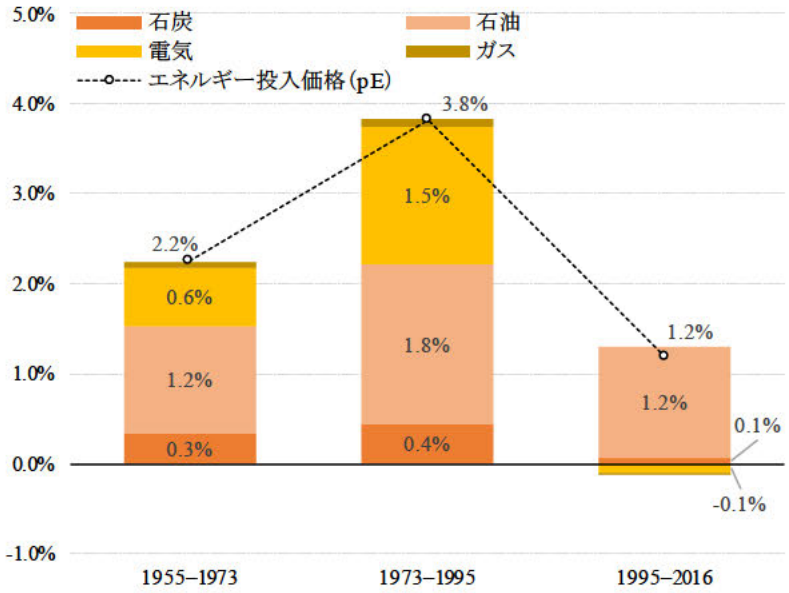


図 3.2.4-4 エネルギー価格変化率に対するエネルギー種別寄与

単位：%（年平均成長率）。注：資料は KDB-E（3.2.8 節）による。

図 3.2.4-3 での価格指数より、式(3.2.2-14)および式(3.2.2-15)において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 3.2.7-1 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 年の二時点である。二つのピーク時では、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 1.7 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 2.2 倍である。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二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耐用年数よりもだいぶ短い。短期的なエネルギー価格高騰を受けても、それは長期化しないという期待は、民間企業による拙速な省エネ投資の実施を躊躇させる。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している（Gillingham, Newell, and Palmer, 2009）。拙速な導入は、長期的には資本コストの負担のみとなり、競争力を棄損させかねない。

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、1973-2016 年に 2.1 倍ほどの上昇であり、年率にして 1.7%の上昇として捉えられる。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。Smil（2017）は、エネルギーに関する超長期の考察から、ひとつの特徴として、長期的な傾向としてのエネルギー価格の低下を掲げている。しかしそれは少なくとも半世紀近く前からは成立していない。将来の技術

革新によってはこの半世紀が例外的な期間であったと評価されるかもしれないが、現在としては、第一次オイルショックは過去数百年のトレンドを変える転換期となったと見るべきだろう。

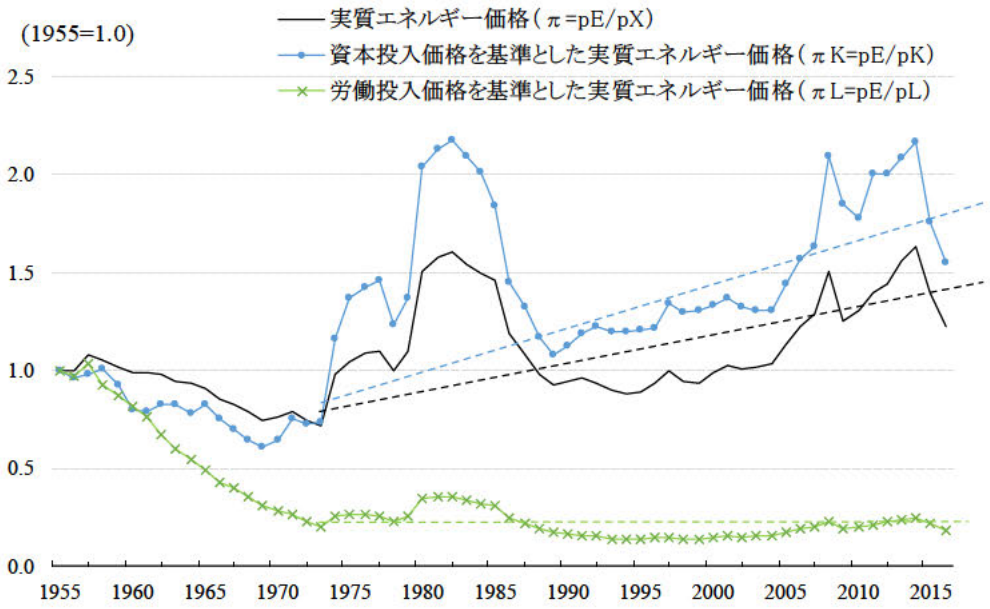


図 3.2.4-5 実質エネルギー価格

単位：1955 年値=1.0（1955-2016 年）。注：実質エネルギー価格は式(3.2.2-16)から式(3.2.2-18)による。

エネルギーの名目価格（P^E）では、第 I 期には年率 2.2%の上昇から、二度のオイルショックを含む期間である第 II 期には年率 3.8%にまで拡大し、そして第 III 期には 1.2%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−1.9%から、第 II 期には 1.0%上昇、そして第 III 期には 1.5%上昇へと逓増している。図 3.2.4-6 は式(3.2.2-16)に基づく要因分解を示している。第 I 期において実質エネルギー価格がむしろ年率 1.9%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（3.0%）を相殺するに十分なものとなっている [18]。

[18] 完全競争市場のもとでは、式(3.2.2-16)にみるように TFP（全要素生産性）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。

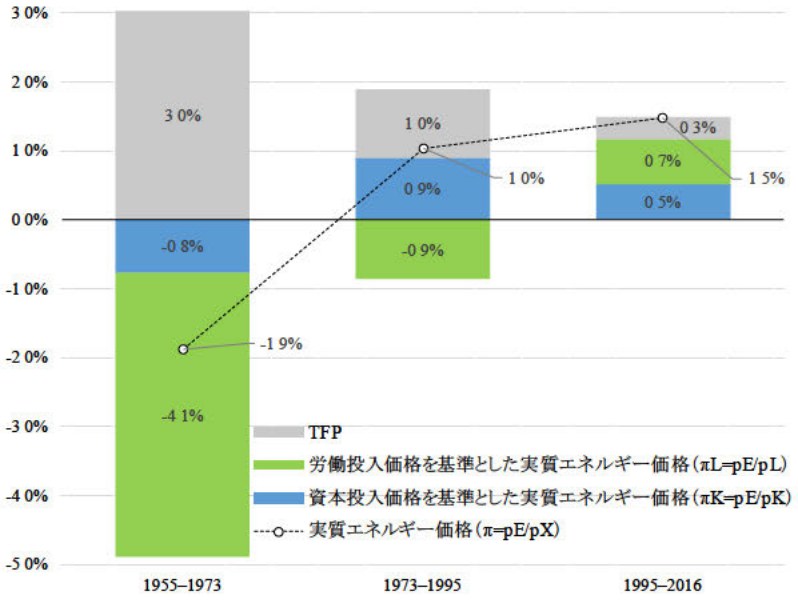


図 3.2.4-6 実質エネルギー価格の変化要因

単位：%（年平均成長率）。注：実質エネルギー価格（π）の分解は式(3.2.2-16)による。

(3) エネルギーに対する資本深化

実質エネルギー価格がプラスへと転じた第 II 期には、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、π^Kがプラスへ転じている。第 II 期以降のπ^K上昇は、エネルギー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価格代替の視点から、日本経済の経験を描いたものが図 3.2.4-7 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（$\pi^K = P^E/P^K$）、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）。ここではK/Eの上昇（一単位の資本がより少ないエネルギー投入を必要とするような技術変化）をエネルギーに対する資本深化（capital deepening）と呼ぼう [19]。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。資本深化は、一単位のエネルギーの投入がより多くの資本サービスを稼働することを可能とする技術変化である。

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は、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 3.2.4-7 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 3.2.4-7 において左下から右上

[19] 資本深化や(4)項での労働浅化について、その産業レベルでの定式化と分析は 3.3 節でおこなう。

へと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 年代半ば以降の情報通信資本の拡大期を含めても、一単位のエネルギー投入はより多くの資本サービスを稼働させることができるような技術変化がみられるのである [20]。

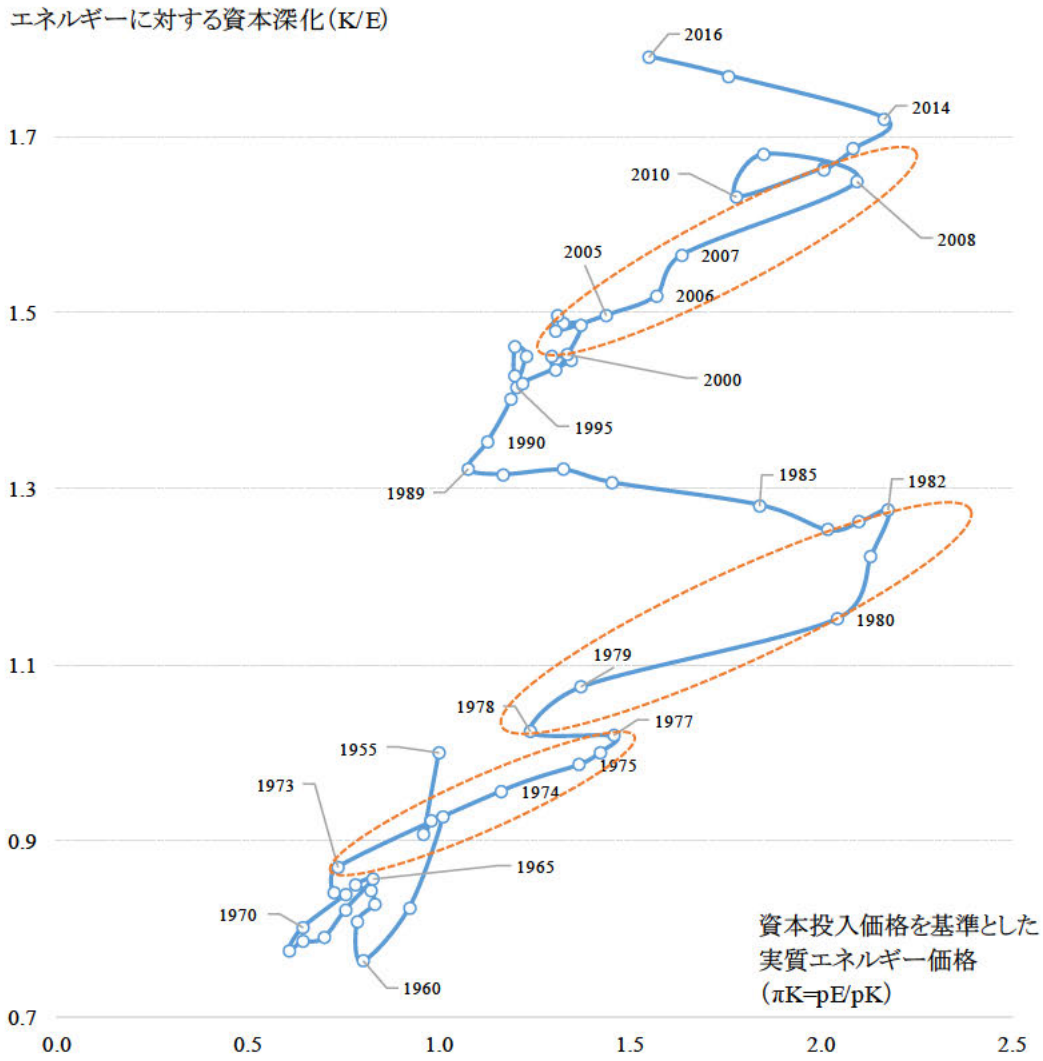


図 3.2.4-7 エネルギーに対する資本深化

単位：1955 年値=1.0（1955-2016 年）。

注：資本投入価格を基準とした実質エネルギー価格は式(3.2.2-17)による。

[20] 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。図 3.2.4-7 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。

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「意図せざる省エネ」と、資本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「意図した省エネ」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「意図した省エネ」の時期として、図 3.2.4-7 で右上がりとなる楕円で囲んだ三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 0.230、1978–82 年には 0.389、2004–08 年には 0.230 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（「意図した省エネ」）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、対象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（「意図せざる省エネ」）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みえるこうしたラチェット効果が見いだされる。

(4) エネルギーに対する労働浅化

RUEC が上昇を始める第 III 期（1995-2018 年）には、名目エネルギー価格（P^E）の上昇率は第 II 期（1973-1995 年）におけるそれの 1/3 にまで大きく抑制されたが（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 [21]。第 III 期以降での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ような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 3.2.4-8 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（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 3.2.4-7 における資本深化とは対象的に、図 3.2.4-8 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な動きとなっている。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

[21] 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、KDB（3.2.8 節補論 B）における学歴や年齢、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、先進国における経済成長の経験からも極めて特殊な日本経済における労働投入価格の低下は 1997 年から 2012 年までの 15 年間継続している。

倍にする」としている[22]。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）の品質を高めていく技術変化である[23]。経済成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、資本を仲介者とした2つの技術変化の結果としても捉えられる。

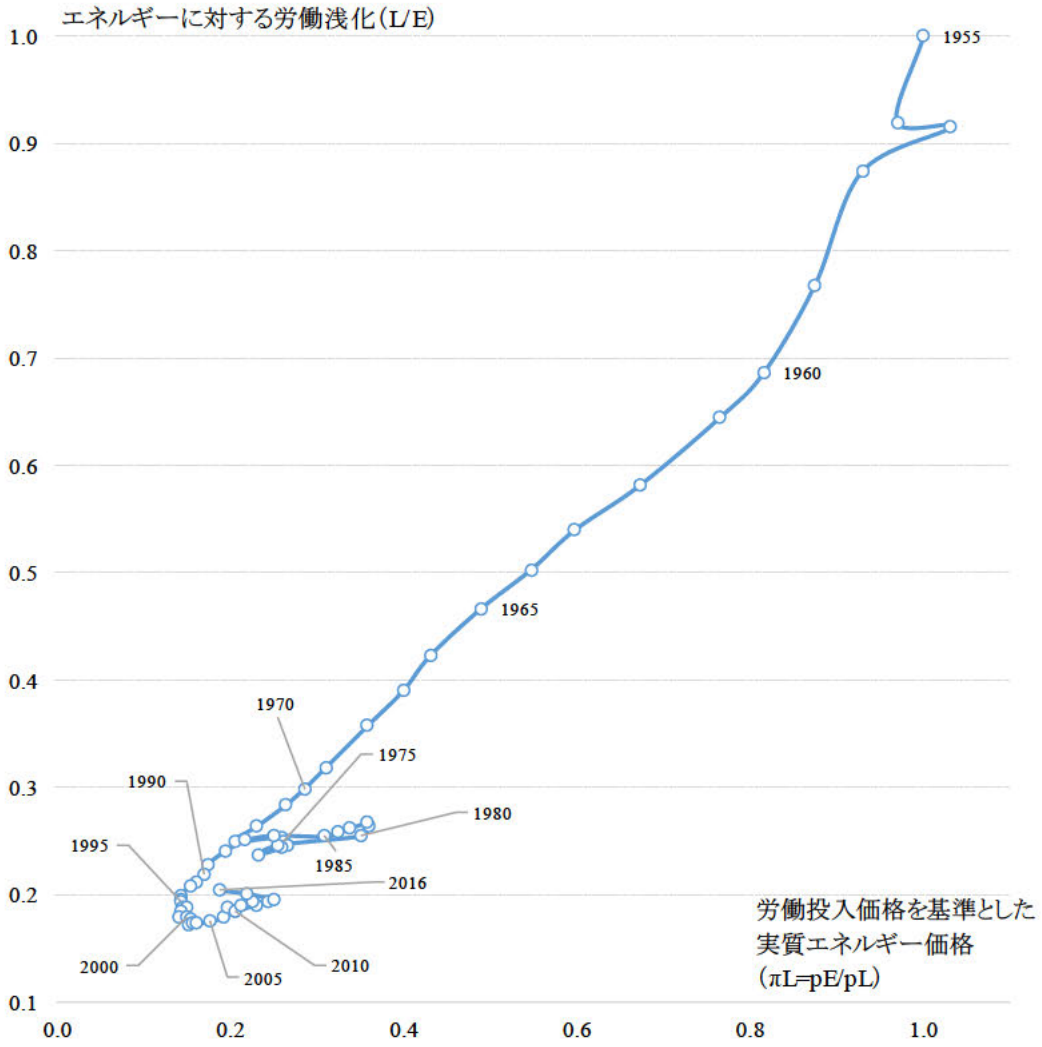


図 3.2.4-8 エネルギーに対する労働浅化

単位：1955年値=1.0（1955-2016年）。

注：労働投入価格を基準とした実質エネルギー価格は式(3.2.2-18)による。

[22] “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。

[23] 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）拡大による品質変化は反映されず、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ていくことに寄与するのである。

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）が上昇する中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。そこではデフレ経済における賃金率の低下傾向を反映してπ^Lがむしろ相対的に上昇し、それを受けて労働浅化が逆行（L/Eが上昇）している。π^Lが上昇してもL/Eが上昇しないような、（図 3.2.4-7 の資本深化にみられた）ラチェット効果はこの期間には見いだされない。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らしているのである。

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直接的な現象は、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、あるいは ESCO 事業など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ビジネスの拡大などに相応するとも捉えられる。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していく技術変化の停滞を反映するものであろう。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得なければ、リーソン氏の 60 年前の観察とは逆行して、労働生産性改善を停滞あるいは退行させるものとなろう。2000 年代後半以降において加速する 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。

3.2.5 RUEC 変化の産業起因

一国経済における RUEC 変化の産業起因を分析しよう [24]。本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（1995-2016 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 3.2.7-2 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、2016 年値を基準として並んでいる。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。

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。エネルギー多消費産業である 10.紙パルプ製品製造業、18.鉄鋼製品製造業、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。そのトップは 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 1/3 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適用されている。

---

[24] 一国全体の RUEC の変化率の産業要因への分解は$\Delta \ln RUEC = \sum_j (\bar{w}_j^E \Delta \ln V_j^E - \bar{w}_j^X \Delta \ln V_j^X)$に基づいている。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、各産業部門（$j$）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。

エネルギー多消費産業に加えて、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している産業群もこの 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二番目に位置し、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%ほどに到達するなど、高い RUEC は低付加価値を主要因としている。現在の RUEC は 33.航空輸送業と同水準であるが、エネルギー価格変動に対する脆弱性の評価としては大きく異なるであろう。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、また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は、国際市場において非対称的な競争力の毀損を余儀なくされる。

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象的である（図 3.2.5-1)。ここでの観測期間の初期においては、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。2016 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すことが困難な状況の中で、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してきていることで RUEC は低下している [25]。

[25] 中間財の輸入代替による効果は、ここでの RUEC の低下に含まれている。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が重要であることを指摘している。

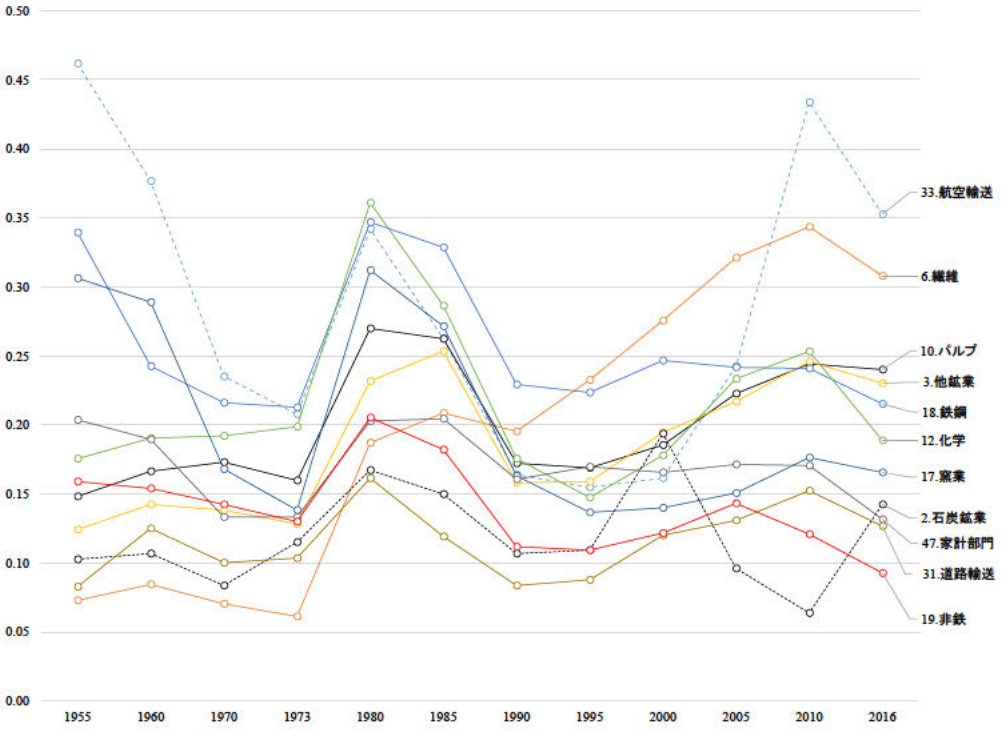


図 3.2.5-1 産業別 RUEC（Panel-A）

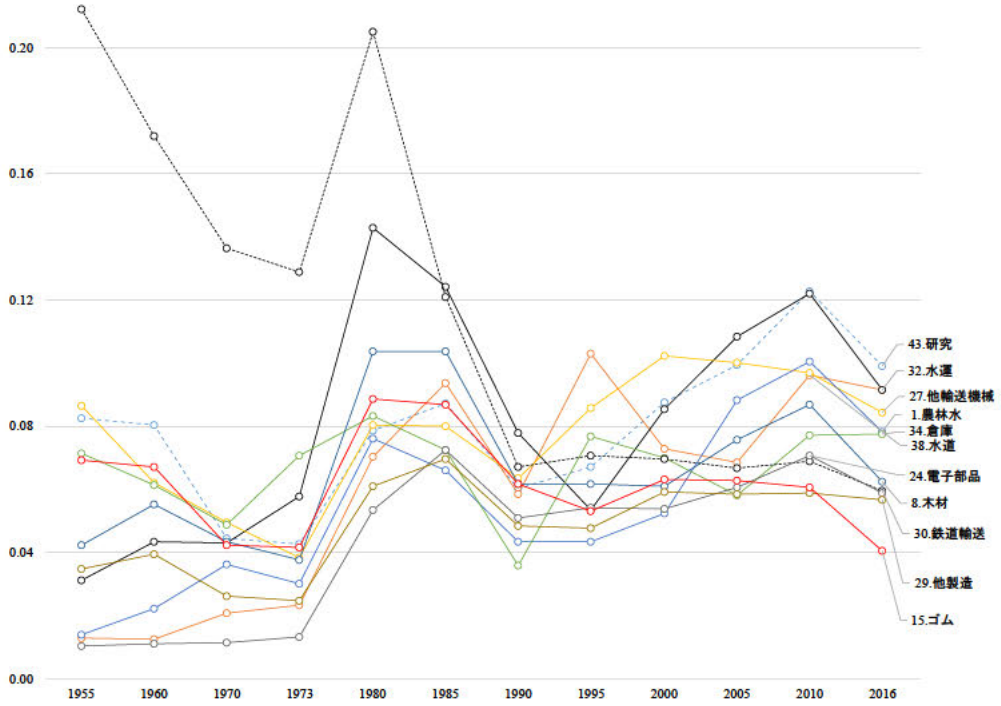


図 3.2.5-2 産業別 RUEC（Panel-B）

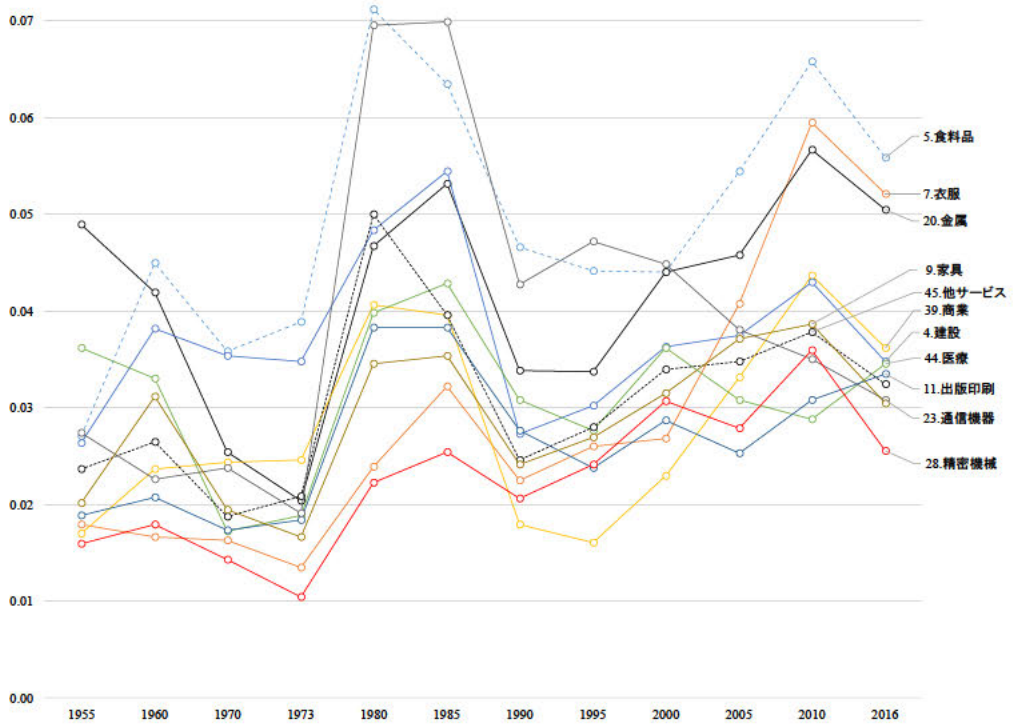


図 3.2.5-3 産業別 RUEC（Panel-C）

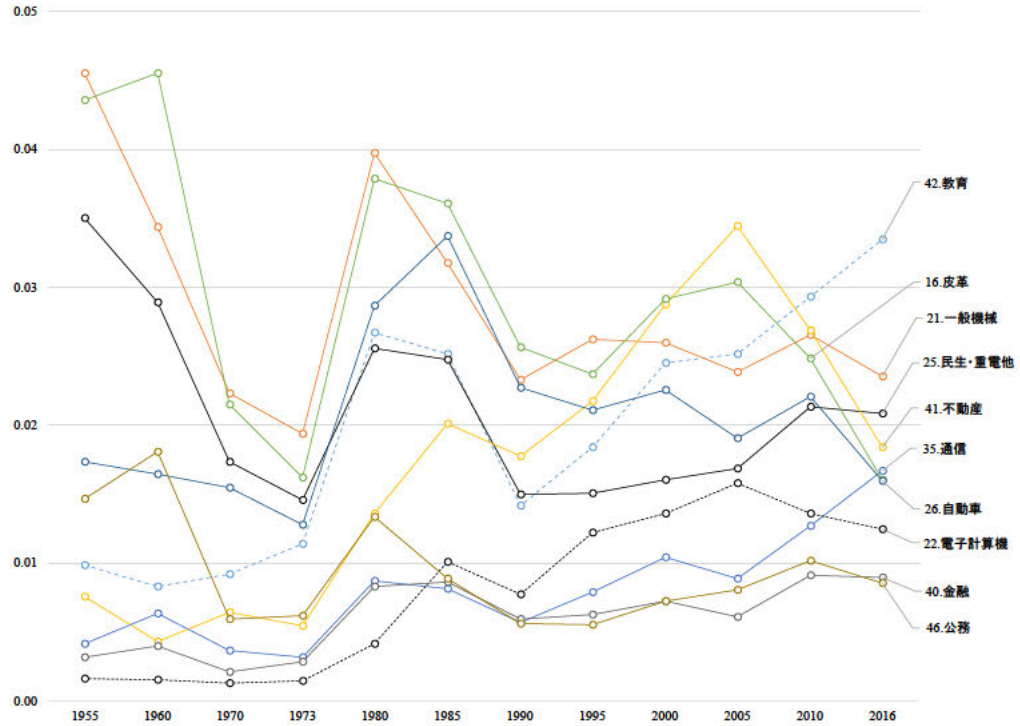


図 3.2.5-4 産業別 RUEC（Panel-D）

一国全体の RUEC の変化率（図 3.2.4-2）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、エネルギー寡消費産業（Panel-C と Panel-D）

における RUEC の低下がそれを押し下げるものとなっている。しかし両者の乖離は縮小する傾向にあり、全体としての RUEC は拡大している。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（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。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。

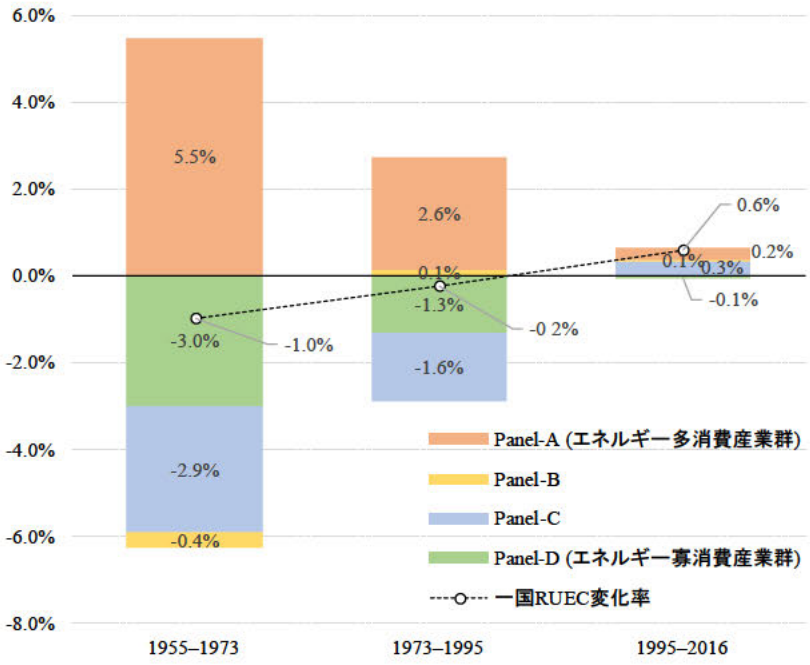


図 3.2.5-5 日本経済の RUEC 変化における産業起因

単位：%（年平均成長率）。注：その定式化は脚注 24 による。

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 年以降からは日米の 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 60%ほど高い RUEC に直面するものとなっている。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としての日本の優位性はこの 20 年で半減している。拡大した日米 RCGW 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匹敵するものである。

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。それは大きく二つの変化を反映している。第一に、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は、第 II 期（1973-1995 年）から第 III 期（1995-2016 年）にかけてその上昇率がさらに高まったことである。同期間、名目エネルギー価格としての上昇率は 1/3 にまで低下したものの、賃金率低下によって誘導されたアウトプット価格（付加価値価格）の低下を起因とするデフレ型の実質エネルギー価格上昇が進行した。デフレ型の RUEC 上昇は、エネルギー多消費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弱体化させる影響を持っている。

第二に、エネルギー生産性改善の低迷である。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ているにも関わらず、エネルギー生産性の改善率は逓減している。安価に利用できる未導入の省エネ技術が枯渇していく中で、実質エネルギー価格が上昇しようとも、エネルギー生産性の改善による RUEC 上昇の抑制効果は限定的なものとなっている。

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。本章の分析によれば、エネルギー投入を軸とした日本経済の構造変化としての基調として、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を提供することを可能とするような技術変化（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していくような技術変化（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していくことによって、労働サービスの提供の品質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）労働生産性の改善におけ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 回復は、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。その移行期間では、必ずしも現在値と目的地との直線上に位置づけられるものではない、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。日米貿易不均衡を緩和させる効果や輸入調達先の多様化としての効果は期待されてはいたものの、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 [26]。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

[26]「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。

力を削いでいく。拙速なエネルギー転換によって RUEC を高めるとすれば、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自主行動計画（2013 年度からは低炭素社会実行計画）などによるエネルギー消費抑制的な行動制約は、国内への投資を躊躇させ、海外へと向かわせるかもしれない。時間をかけてより安価になっていく省エネ技術は、補助金で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導入されていく。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れば、労働生産性の改善と経済成長とを犠牲とするものとなろう。

3.2.7 補論 A：推計結果表

表 3.2.7-1 日本経済の RUEC とその要因分解

	RUEC		価格指数とTFP					実質エネルギー価格			エネルギー生産性		
			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)	1 053	1 054	1 095	1 087	1 032	0 999	0 962	0 969	0 984	0 943	1 006
1957	0 069	(1 09)	1 191	1 104	1 217	1 155	1 074	1 080	0 979	1 032	1 029	0 932	1 068
1958	0 067	(1 07)	1 148	1 087	1 135	1 235	1 089	1 056	1 011	0 929	1 024	0 952	1 054
1959	0 071	(1 12)	1 135	1 113	1 231	1 298	1 129	1 020	0 922	0 875	0 945	0 910	1 012
1960	0 070	(1 11)	1 148	1 154	1 435	1 408	1 215	0 995	0 800	0 816	0 932	0 873	1 040
1961	0 067	(1 07)	1 199	1 207	1 525	1 568	1 258	0 994	0 786	0 765	0 964	0 832	1 134
1962	0 068	(1 07)	1 221	1 241	1 472	1 817	1 287	0 984	0 830	0 672	0 953	0 867	1 079
1963	0 065	(1 04)	1 222	1 288	1 486	2 045	1 315	0 949	0 823	0 598	0 949	0 842	1 113
1964	0 063	(1 00)	1 244	1 330	1 596	2 277	1 386	0 936	0 780	0 546	0 972	0 802	1 193
1965	0 063	(1 01)	1 256	1 374	1 520	2 567	1 386	0 914	0 827	0 489	0 943	0 805	1 161
1966	0 061	(0 97)	1 235	1 438	1 632	2 865	1 440	0 859	0 756	0 431	0 918	0 810	1 123
1967	0 060	(0 95)	1 239	1 499	1 774	3 105	1 492	0 826	0 698	0 399	0 899	0 786	1 130
1968	0 057	(0 91)	1 241	1 566	1 929	3 465	1 564	0 792	0 643	0 358	0 903	0 762	1 170
1969	0 055	(0 88)	1 222	1 629	2 011	3 949	1 626	0 751	0 608	0 310	0 886	0 733	1 191
1970	0 056	(0 88)	1 303	1 711	2 026	4 578	1 667	0 762	0 643	0 285	0 897	0 711	1 249
1971	0 058	(0 92)	1 394	1 748	1 847	5 306	1 681	0 798	0 755	0 263	0 902	0 702	1 290
1972	0 055	(0 87)	1 375	1 831	1 899	5 988	1 722	0 751	0 724	0 230	0 893	0 700	1 287
1973	0 053	(0 84)	1 499	2 089	2 038	7 343	1 732	0 717	0 736	0 204	0 888	0 687	1 309
1974	0 069	(1 10)	2 393	2 422	2 055	9 263	1 740	0 988	1 165	0 258	0 937	0 704	1 343
1975	0 074	(1 17)	2 812	2 648	2 056	10 74	1 744	1 062	1 368	0 262	0 939	0 721	1 325
1976	0 075	(1 20)	3 112	2 826	2 190	11 77	1 773	1 101	1 421	0 264	0 955	0 718	1 355
1977	0 075	(1 19)	3 330	2 987	2 282	12 91	1 801	1 115	1 459	0 258	0 970	0 737	1 352
1978	0 067	(1 07)	3 155	3 127	2 547	13 66	1 844	1 009	1 238	0 231	0 982	0 721	1 410
1979	0 071	(1 13)	3 611	3 224	2 629	14 16	1 863	1 120	1 374	0 255	1 032	0 712	1 497
1980	0 094	(1 49)	5 255	3 410	2 574	15 00	1 858	1 541	2 041	0 350	1 076	0 740	1 509
1981	0 093	(1 47)	5 682	3 521	2 670	15 85	1 893	1 614	2 128	0 358	1 141	0 761	1 576
1982	0 091	(1 45)	5 890	3 577	2 707	16 48	1 919	1 647	2 176	0 357	1 182	0 769	1 630
1983	0 088	(1 40)	5 678	3 603	2 708	16 81	1 919	1 576	2 097	0 338	1 166	0 793	1 569
1984	0 086	(1 36)	5 548	3 619	2 751	17 18	1 940	1 533	2 017	0 323	1 166	0 772	1 608
1985	0 081	(1 28)	5 477	3 661	2 979	17 80	2 014	1 496	1 839	0 308	1 212	0 783	1 660
1986	0 065	(1 03)	4 496	3 697	3 092	18 08	2 012	1 216	1 454	0 249	1 223	0 802	1 648
1987	0 059	(0 93)	3 985	3 632	3 001	18 37	2 024	1 097	1 328	0 217	1 224	0 797	1 666
1988	0 054	(0 85)	3 673	3 665	3 141	19 04	2 074	1 002	1 169	0 193	1 225	0 797	1 677
1989	0 050	(0 79)	3 482	3 697	3 234	20 04	2 132	0 942	1 077	0 174	1 230	0 794	1 695
1990	0 051	(0 81)	3 620	3 763	3 212	21 39	2 164	0 962	1 127	0 169	1 234	0 820	1 646
1991	0 051	(0 81)	3 709	3 803	3 120	23 26	2 212	0 975	1 189	0 159	1 255	0 836	1 651
1992	0 050	(0 79)	3 661	3 831	2 985	23 98	2 189	0 956	1 227	0 153	1 253	0 833	1 676
1993	0 049	(0 77)	3 541	3 875	2 952	24 98	2 197	0 914	1 199	0 142	1 230	0 835	1 658
1994	0 050	(0 79)	3 486	3 888	2 915	24 63	2 161	0 897	1 196	0 142	1 185	0 835	1 609
1995	0 050	(0 79)	3 480	3 827	2 894	24 53	2 184	0 909	1 203	0 142	1 188	0 832	1 612
1996	0 052	(0 82)	3 652	3 827	3 003	25 14	2 252	0 954	1 216	0 145	1 209	0 837	1 632
1997	0 054	(0 86)	3 843	3 769	2 860	25 69	2 273	1 020	1 344	0 150	1 228	0 837	1 663
1998	0 052	(0 83)	3 593	3 728	2 776	25 29	2 243	0 964	1 294	0 142	1 204	0 856	1 622
1999	0 053	(0 85)	3 529	3 696	2 703	25 09	2 226	0 955	1 306	0 141	1 169	0 853	1 577
2000	0 056	(0 88)	3 738	3 694	2 798	24 93	2 259	1 012	1 336	0 150	1 193	0 859	1 604
2001	0 056	(0 89)	3 823	3 664	2 784	25 04	2 280	1 043	1 373	0 153	1 211	0 861	1 635
2002	0 056	(0 89)	3 721	3 622	2 805	24 61	2 291	1 027	1 326	0 151	1 198	0 868	1 604
2003	0 056	(0 89)	3 720	3 596	2 838	23 99	2 291	1 035	1 311	0 155	1 208	0 871	1 602
2004	0 057	(0 91)	3 776	3 587	2 899	23 56	2 300	1 053	1 303	0 160	1 202	0 880	1 588
2005	0 062	(0 98)	4 114	3 565	2 859	23 46	2 307	1 154	1 439	0 175	1 221	0 884	1 606
2006	0 066	(1 05)	4 455	3 552	2 839	23 22	2 308	1 254	1 569	0 192	1 240	0 882	1 631
2007	0 067	(1 07)	4 680	3 546	2 862	22 92	2 313	1 320	1 635	0 204	1 281	0 891	1 666
2008	0 077	(1 21)	5 350	3 477	2 558	23 31	2 286	1 539	2 091	0 230	1 316	0 901	1 696
2009	0 067	(1 06)	4 497	3 509	2 434	22 95	2 173	1 282	1 848	0 196	1 253	0 925	1 587
2010	0 069	(1 09)	4 658	3 504	2 620	22 79	2 245	1 329	1 778	0 204	1 267	0 892	1 657
2011	0 072	(1 15)	4 886	3 424	2 434	23 04	2 244	1 427	2 008	0 212	1 291	0 917	1 649
2012	0 074	(1 17)	5 127	3 470	2 553	22 71	2 252	1 477	2 008	0 226	1 306	0 911	1 674
2013	0 077	(1 22)	5 555	3 464	2 666	22 94	2 324	1 604	2 084	0 242	1 361	0 908	1 747
2014	0 079	(1 25)	5 856	3 490	2 702	23 34	2 350	1 678	2 167	0 251	1 395	0 908	1 794
2015	0 065	(1 03)	5 102	3 565	2 902	23 44	2 357	1 431	1 758	0 218	1 436	0 904	1 855
2016	0 057	(0 90)	4 465	3 580	2 880	23 87	2 341	1 247	1 550	0 187	1 444	0 903	1 864

単位：RUEC は名目付加価値=1.0。それ以外および括弧内は 1955 年値=1.0。

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エネルギー生産性。

表 3.2.7-2 産業別 RUEC

	1955	1960	1970	1973	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2016
Panel-A												
33.航空輸送	0.462	0.376	0.235	0.208	0.342	0.262	0.164	0.155	0.161	0.243	0.434	0.353
6.繊維	0.073	0.085	0.070	0.061	0.187	0.208	0.195	0.232	0.275	0.321	0.344	0.308
10.パルプ	0.148	0.166	0.173	0.159	0.270	0.263	0.173	0.169	0.185	0.223	0.244	0.240
3.他鉱業	0.124	0.142	0.138	0.129	0.231	0.254	0.158	0.159	0.195	0.217	0.246	0.230
18.鉄鋼	0 339	0.243	0 216	0.212	0.347	0.328	0.229	0.223	0.246	0.241	0.241	0.216
12.化学	0.176	0.190	0.192	0.198	0 361	0.287	0.176	0.147	0.178	0.234	0.254	0.189
17.窯業	0.306	0.289	0.168	0.138	0.312	0.272	0.163	0.136	0.140	0.150	0.177	0.166
2.石炭鉱業	0.103	0.107	0.083	0.115	0.167	0.150	0.106	0.109	0.194	0.096	0.064	0.143
47.家計部門	0.204	0.190	0.134	0.133	0.202	0.205	0.161	0.170	0.166	0.171	0.170	0.132
31.道路輸送	0.083	0.125	0.100	0.103	0.162	0.119	0.083	0.087	0.120	0.130	0.152	0.127
19.非鉄	0.159	0.154	0.143	0.130	0.205	0.182	0.112	0.109	0.121	0.144	0.121	0.093
Panel-B												
43.研究	0.082	0.080	0.044	0.043	0.078	0.087	0.060	0.067	0.088	0.099	0.123	0.099
38.水道	0.013	0.013	0.021	0.023	0.070	0.094	0.058	0.103	0.073	0.068	0.096	0.091
32.水運	0.031	0.043	0.043	0.058	0.143	0.124	0.078	0.053	0.085	0.108	0.122	0.091
27.他輸送機械	0.087	0.062	0.050	0.038	0.080	0.080	0.063	0.086	0.102	0.100	0.097	0.084
1.農林水	0.014	0.022	0.036	0.030	0.076	0.066	0.043	0.043	0.052	0.088	0.100	0.078
34.倉庫	0.071	0.061	0.049	0.071	0.083	0.072	0.036	0.077	0.070	0.058	0.077	0.077
8.木材	0.042	0.055	0.043	0.038	0.103	0.103	0.062	0.061	0.061	0.076	0.087	0.062
30.鉄道輸送	0.212	0.172	0.136	0.129	0.205	0.121	0.067	0.071	0.069	0.067	0.069	0.060
24.電子部品	0.010	0.011	0.011	0.013	0.053	0.072	0.051	0.054	0.054	0.061	0.071	0.059
29.他製造	0.035	0.039	0.026	0.025	0.061	0.069	0.048	0.048	0.059	0.058	0.059	0.056
15.ゴム	0.069	0.067	0.042	0.041	0.089	0.087	0.061	0.053	0.063	0.063	0.061	0.041
Panel-C												
5.食料品	0.027	0.045	0.036	0.039	0.071	0.063	0.047	0.044	0.044	0.054	0.066	0.056
7.衣服	0.018	0.017	0.016	0.014	0.024	0.032	0.023	0.026	0.027	0.041	0.060	0.052
20.金属	0.049	0.042	0.025	0.020	0.047	0.053	0.034	0.034	0.044	0.046	0.057	0.050
39.商業	0.017	0.024	0.024	0.025	0.041	0.040	0.018	0.016	0.023	0.033	0.044	0.036
4 建設	0.026	0.038	0.035	0.035	0.048	0.055	0.027	0.030	0.036	0.038	0.043	0.035
44.医療	0.036	0.033	0.017	0.019	0.040	0.043	0.031	0.028	0.036	0.031	0.029	0.035
11.出版印刷	0.019	0.021	0.017	0.018	0.038	0.038	0.028	0.024	0.029	0.025	0.031	0.034
45.他サービス	0.024	0.027	0.019	0.021	0.050	0.040	0.025	0.028	0.034	0.035	0.038	0.032
23.通信機器	0.027	0.023	0.024	0.019	0.070	0.070	0.043	0.047	0.045	0.038	0.035	0.031
9.家具	0.020	0.031	0.020	0.017	0.035	0.035	0.024	0.027	0.032	0.037	0.039	0.030
28.精密機械	0.016	0.018	0.014	0.011	0.022	0.025	0.021	0.024	0.031	0.028	0.036	0.026
Panel-D												
42.教育	0.010	0.008	0.009	0.011	0.027	0.025	0.014	0.018	0.024	0.025	0.029	0.033
21.一般機械	0.045	0.034	0.022	0.019	0.040	0.032	0.023	0.026	0.026	0.024	0.027	0.024
25.民生・重電他	0.035	0.029	0.017	0.015	0.026	0.025	0.015	0.015	0.016	0.017	0.021	0.021
41.不動産	0.008	0.004	0.006	0.005	0.014	0.020	0.018	0.022	0.029	0.034	0.027	0.018
35.通信	0.004	0.006	0.004	0.003	0.009	0.008	0.006	0.008	0.010	0.009	0.013	0.017
16.皮革	0.044	0.046	0.021	0.016	0.038	0.036	0.026	0.024	0.029	0.030	0.025	0.016
26.自動車	0.017	0.016	0.015	0.013	0.029	0.034	0.023	0.021	0.023	0.019	0.022	0.016
22.電子計算機	0.002	0.001	0.001	0.001	0.004	0.010	0.008	0.012	0.014	0.016	0.014	0.012
40.金融	0.003	0.004	0.002	0.003	0.008	0.009	0.006	0.006	0.007	0.006	0.009	0.009
46.公務	0.015	0.018	0.006	0.006	0.013	0.009	0.006	0.005	0.007	0.008	0.010	0.009

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

3.2.8 補論 B：エネルギー分析用の生産性統計

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（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。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していくようなアプローチでは、エネルギー生産性の測定指標は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した上で、物量と価格指数から名目金額を先決していくような生産性統計としての構築が求められる。

また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ませることにより、エネルギー消費は経済成長の文脈のもとで理解することが可能となろう。

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、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限り維持しながら、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 2020）、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。エネルギー統計および経済統計との接合のため、いくつかの調和がされている。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は上回るものとなる。

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お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は、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 3.2.8-1 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) 35水力 36原子力 37その他再エネ	$P_{ij}E^{T}_{ij}$		0		$P_{if}E^{T}_{if}$		$P_iE^{T}_{i}$
		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) 35水力 36原子力 37その他再エネ	E^{T}_{ij}		0		E^{T}_{if}	0	E^{T}_{i}
	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) 35水力 36原子力 37その他再エネ	$c_iE^{T}_{ij}$		0		$c_iE^{T}_{iM}$	0	$c_iE^{T}_{i}$
	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) 35水力 36原子力 37その他再エネ	$\varepsilon_ic_iE^{T}_{ij}$		0		$\varepsilon_ic_iE^{T}_{iM}$	0	$\varepsilon_ic_iE^{T}_{i}$
	最終消費(C) 1原油 ・ ・ ・ 27自家蒸気(投入)	$\varepsilon_ic_iE^{C}_{ij}$	$\varepsilon_ic_iE^{C}_{if}$	$\varepsilon_ic_iE^{C}_{if}$				$\varepsilon_ic_iE^{C}_{i}$

参考文献（第 3.2 節に関するもの）

1) Energy Information Administration (2018) Annual Energy Outlook 2018, the U.S. Energy Information Administration.
2) European Commission (2014) Energy Economic Developments in Europe, European Economy 1, Brussels: European Commission.
3) Eurostat-OECD (2012) Eurostat-OECD Methodological Manual on Purchasing Power Parities, 2012 edition, Eurostat Methodologies and Working Papers, European Union/OECD.
4) Gillingham, Kenneth, Richard G. Newell, and Karen Palmer (2009), "Energy Efficiency Economics and Policy", Annual Review of Resource Economics, Vol.1, No.1.
5) 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.
6) Jorgenson, Dale W., Koji Nomura, and Jon D. Samuels (2016) "A Half Century of Trans-Pacific Competition: Price Level Indices and Productivity Gaps for Japanese and U.S. Industries, 1955–2012," in D. W. Jorgenson, et al. (eds.) The World Economy – Growth or Stagnation?, Cambridge: Cambridge University Press, Chap.13.
7) 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.
8) Konishi, Yoko and Koji Nomura (2015) "Energy Efficiency Improvement and Technical Changes in Japanese Industries, 1955-2012," RIETI Discussion Paper Series 15-E-058.
9) Lack, Simon (2018) "America's Path to Energy Independence: The Shale Revolution," Forbes, June 4.
10) Nomura, Koji, Kozo Miyagawa, and Jon D. Samuels (2018) "Benchmark 2011 Integrated Estimates of the Japan-U.S. Price Level Index for Industry Outputs," BEA Working Paper, Bureau of Economic Analysis, the U.S. Department of Commerce.
11) Royal, Todd (2018) "Shale 2.0 – Is There a Geopolitical Dark Side?," The National Interest, February 8.
12) Smil, Vaclav (2017) Energy and Civilization: A History, The MIT Press (塩原通緒訳『エネルギーの人類史 上・下』青土社, 2019 年).
13) 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.
14) 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.
15) 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.
16) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット (2020) 『EDMC エネルギー・経済統計要覧』省エネルギーセンター.
17) 日経産業新聞（2017）「米シェール輸入開始ーLNG 価格抑える取引力急務」, 2017 年 3 月 9 日.
18) 野村浩二（2018）「日本の長期エネルギー生産性―エネルギー品質と産業構造要因―」, RCGW Discussion Paper, No.61，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.

19) 野村浩二（2019）「エネルギー価格変動に対する日本経済の脆弱性－実質単位エネルギーコストの変化要因」, RCGW Discussion Paper, No.63, 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.
20) 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－国際比較のための分析枠組みの検討－」, 『エネルギー・資源』, Vol.34, No.1.

3.3 間接的な電力輸入

3.3.1 はじめに

2000 年代後半からの日本経済の電力需要は、野心的と考えられていた政府による節電・省エネを織り込む目標を上回るスピードで減少してきた [27]。2008-16 年における産業と家計とを包括する測定では、リーマンショック（世界金融危機）および東日本大震災の影響を受けた家計部門における節電・省エネへの努力も顕著であった（一国経済における改善の 30%ほどを説明する要因である）ものの、非家計部門での改善の 8 割近くは化学業や鉄鋼業などエネルギー多消費的な産業におけるエネルギー生産性の改善による貢献であると分析される（野村, 2018）。しかしこうした産業において、主要な省エネ技術の導入はおもに高度経済成長期と第一次オイルショック後に進行したものであり [28]、近年に技術的なエネルギー消費量原単位としての顕著な改善例を見いだすことは難しい [29]。

産業レベルの測定に見いだされるエネルギー生産性改善の要因は、産業内における生産物の構成変化によってその多くが説明される事例もある。化学業において 7 桁の生産物分類レベルまで統御した測定では、2008-16 年におけるエネルギー生産性改善の 7 割ほど（年率 3.6%の改善のうちの 2.6 ポイント）が、当該産業が国内生産する生産物の構成変化に起因すると分析されている（野村, 2018）。それは化学業で観察されるエネルギー生産性改善は、生産プロセスにおける狭義の技術的な改善によるよりも、エネルギー多消費的な生産物の国内生産が縮小し、エネルギー寡消費的で付加価値率の高い生産物の生産へとシフトしてきたことを意味している。

1990 年代からのグローバル化の進展や、世界金融危機、そして東日本大震災を契機とした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てきたと考えられる。エネルギー多消費的な部品生産の輸入へ

[27] 経済産業省による「長期エネルギー需給見通し」では 2005 年の見通しまで将来の電力需要を過小評価(エネルギー効率改善を過大評価)するものであったが、2008 年および 2009 年の見通しは（策定当時は野心的な政策ターゲットであると解されていたものの）、事後的には実際の電力需要はそれを下回って減少するものとなった（野村（2018）の図 1 を参照）。
[28] 一例として澤田（1998）では、エチレン生産においては 1990 年代後半でも「極限に近い段階まで省エネルギー化が進んでいる」と評価されている。
[29] 産業部門、エネルギー転換部門、業務部門、運輸部門における温室効果ガス抑制およびエネルギー効率性の改善に向けた企業努力は、経団連低炭素社会実効計画のフォローアップに詳しい。

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は、集計生産量としての実質付加価値を分子とした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。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 年以降にはエネルギー消費量原単位が減少傾向にあるとする（資源エネルギー庁, 2020b）。政府がそうした減少のすべてを技術的な効率改善として錯覚すれば、省エネ推進のための補助金政策や規制強化などの効果を過大評価するものとなろう。

本節は日本経済における最終需要構造や国際分業を反映した、輸入電力への実効的な依存度を示す総合化した指標を構築し、1960 年代からの長期の測定により、日本の経済成長に伴う電力消費の構造変化を評価することを目的とする [30]。国際的な送電網に接続していない日本経済では、電力消費における直接的な輸入依存はゼロであり、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。しかし、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は、間接的に電力を輸入しているものと解される。それは経済統計やエネルギー統計において直接には観察されない現象である。本節では産業連関分析のフレームワークに基づき、直接・間接的な生産波及のすべての段階における電力消費量を考慮することによって、間接的な電力輸入量を評価する指標として実効輸入依存度（Effective Import Dependency：EID）を定式化する。

一国経済の電力 EID の変化は、最終需要構造の変化によっても影響される。そうした影響の抽出のため、本節ではすべての電力生産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需要源泉依存度（Ultimate Demand Source Share：UDS）という指標も構築される。電力サービスはほぼすべての生産過程において投入されるが、そうした電力需要は究極的にはなんらかの最終需要項目（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。電力 UDS は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。

以下、第 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、最終需要項目別 EID/UDS、また商品別 EID/UDS の定式化をおこなう。第 3.3.4 節では、1960 年から 2015 年までのベンチマーク年を測定対象とした複数の接続産業連関表に基づき、電力 EID／UDS の両指標を測定していく。測定結果によれば、長期の日本経済において大きく三つの変動期が見いだされるが、とくに第 III 期となる 1995 年からの 20 年間には一国経済の電力 EID が倍増していることが指摘される。一国経済の電力 EID の変化に対しては、最終需要項目別測定（3.3.4 節(2)項）および商品別測定（3.3.4 節(3)項）を通じてその変化要因へと接近していく。第 3.3.5 節は結びとする。

[30] 本節は、野村（2020）に基づくが 2020 年度 ALPS III 第 3 回経済 WG（11 月 9 日）での議論に基づき改訂されたものである。

3.3.2 フレームワーク

(1) 一国経済の EID

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ものしている。日本の産業連関表では、最終需要および付加価値ともに家計外消費支出という項目が存在する特殊な形式をとっているが、本節の測定ではそれは中間投入へと内生化する [31]。

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

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

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。

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

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。式(3.3.2-4)に定義される波及生産ベクトルによれば、式(3.3.2-2)における一国経済の生産量は次のように分解される。

$$x = x^{\mathrm{C}} + x^{\mathrm{G}} + x^{\mathrm{I}} + x^{\mathrm{E}} - x^{\mathrm{M}}. \tag{3.3.2-5}$$

式(3.3.2-5)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。式(3.3.2-5)においてx^{M}を移項して、需要と供給のバランスとして次式をえる。

$$x^{\mathrm{C}} + x^{\mathrm{G}} + x^{\mathrm{I}} + x^{\mathrm{E}} = x + x^{\mathrm{M}}, \tag{3.3.2-6}$$

[31] 各年次における産業連関表において、内生部門のうちの分類不明と合算して部門を定義している。

式(3.3.2-6)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。

導かれた式(3.3.2-6)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

$$\varphi_k^z = x_k^z/\left(x_k + x_k^{\mathrm{M}}\right), \tag{3.3.2-7}$$

としよう（$z = \mathrm{C},\ \mathrm{G},\ \mathrm{I},\ \text{and}\ \mathrm{E}$）。式(3.3.2-7)は波及生産量の一国集計値における最終需要項目別需要源泉依存度であり、各シェアの合計（$\varphi_k^C + \varphi_k^G + \varphi_k^I + \varphi_k^E$）は 1.0 である [32]。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。ここではこうした需要源泉依存度を UDS（Ultimate Demand Source Share）と呼ぶ。UDS では中間財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式(3.3.2-6)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。

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

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 [33]。

(2) 特定商品の EID

式(3.3.2-8)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（$m_{(z)}$）

[32] 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。

[33] 海外生産における電力消費の効率性が日本よりも劣るとすれば、輸入相手国における実際の生産における電力消費量はより大きなものとなるかもしれない。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測定精度としての課題は大きなものとなり、本節での EID は国内効率性基準のもとで評価する。

を競争輸入モデルにより算定すれば[34]、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。

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

式(3.3.2-9)は一国経済におけるレオンチェフ生産体系を示す式(3.3.2-2)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（$\mathrm{A}x_{(z)}$）の両者における輸入量を評価している。

式(3.3.2-3)のレオンチェフ逆行列（輸入財を含む）を用いて、式(3.3.2-4)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。

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

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

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

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

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

として定義される。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（式(3.3.2-1)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）、式(3.3.2-12)は自動車という特定商品の直接・間接の生産段階を総合化して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、式(3.3.2-7)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。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、式(3.3.2-1)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、式(3.3.2-8)に定義される一国経済の EID（ε_k）は、最終需要項目別 EID（$\varepsilon^{\mathrm{z}}_{k}$）の加重平均値として次のように分解される（$z = \mathrm{C},\ \mathrm{G},\ \mathrm{I},\ \text{and}\ \mathrm{E}$）。

$$\varepsilon_k = \textstyle\sum_z \varphi^{\mathrm{z}}_{k} \varepsilon^{\mathrm{z}}_{k}, \quad z = \mathrm{C},\ \mathrm{G},\ \mathrm{I},\ \text{and}\ \mathrm{E} \tag{3.3.2-13}$$

ここでウェイトとなるφ^{z}_{k}は、式(3.3.2-7)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。

$$\Delta\varepsilon_k = \textstyle\sum_z (\bar{\varphi}^{\mathrm{z}}_{k} \Delta\varepsilon^{\mathrm{z}}_{k} + \bar{\varepsilon}^{\mathrm{z}}_{k} \Delta\varphi^{\mathrm{z}}_{k}), \quad z = c, i, g, e \tag{3.3.2-14}$$

---

[34] 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（$\hat{\mathrm{M}}$）によって、レオンチェフ逆行列として$(\mathrm{I} - (\mathrm{I} - \hat{\mathrm{M}})\mathrm{A})^{-1}$によって国内生産量$x_{(z)}$を算定し、加えてその中間財（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。

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。式(3.3.2-14)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大きく二つの要因に分解される。

3.3.3 データ

時系列的な比較可能性を高めるため、本節での電力の EID/UDS 指標の測定においては連続する数時点の産業連関表基本表を接合した接続産業連関表（接続表）を用いる。表 3.3.3-1 は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。ここでの統合分類（かつての統一分類）とは、商品×商品表とする産業連関表において、行と列の商品分類数を同一とした正方行列となるための分類である。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[35]。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。

表 3.3.3-1 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)

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・小分類や独自分類に基づく。

一般に、粗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精度が損なわれ、その一方、細かい分類によれば測定精度や商品表としての行・列部門の対応における整合性としての課題が生じるものとなろう。分析される部門分類は原則としては時系列的に統一されていることが望ましいが、実際の生産物

[35] 長期接続表は野村浩二（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）による。

の質的変化や産業構造の変化のもとでは、分析する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。ここ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、複数の接続表に基づく重複した測定年次における測定結果の比較から、電力 EID/UDS 指標としての精度を確認していくというアプローチをとっている [36]。

3.3.4 測定結果

(1) 一国経済の電力 EID

表 3.3.3-1 での産業連関表に基づき、式(3.3.2-8)において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 3.3.4-1 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 [37]、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。

式(3.3.2-8)に定義される EID（ε_k）は総供給量（国内生産量と輸入量の合計）に対して占め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 27.9%に相応する。資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」による当該年における電力需要量 1.05 兆 kWh（発電端）によって換算すれば、電力の間接輸入量は 0.3 兆 kWh ほどに相応すると換算される。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、130 億 kWh もの国内電力需要を減少させる効果を持っている。

利用する接続表や統合商品分類に依存して推計値には差異はあるものの、図 3.3.4-1 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 36)、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

[36] 1993SNA や 2008SNA への準拠やさまざまな経済統計的な定義変更など、同一接続表内のベンチマーク年次では概念的に整合していることが原則となるが、本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は 2005-2011-2015 年接続表のみであり、中間消費と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。

[37] 2020 年 8 月末に公表された最新の総務省（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 3.3.4-1)。

分は調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 3.3.4-1 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(2)項での最終需要項目別電力 EID として測定されるように) 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 [38]。

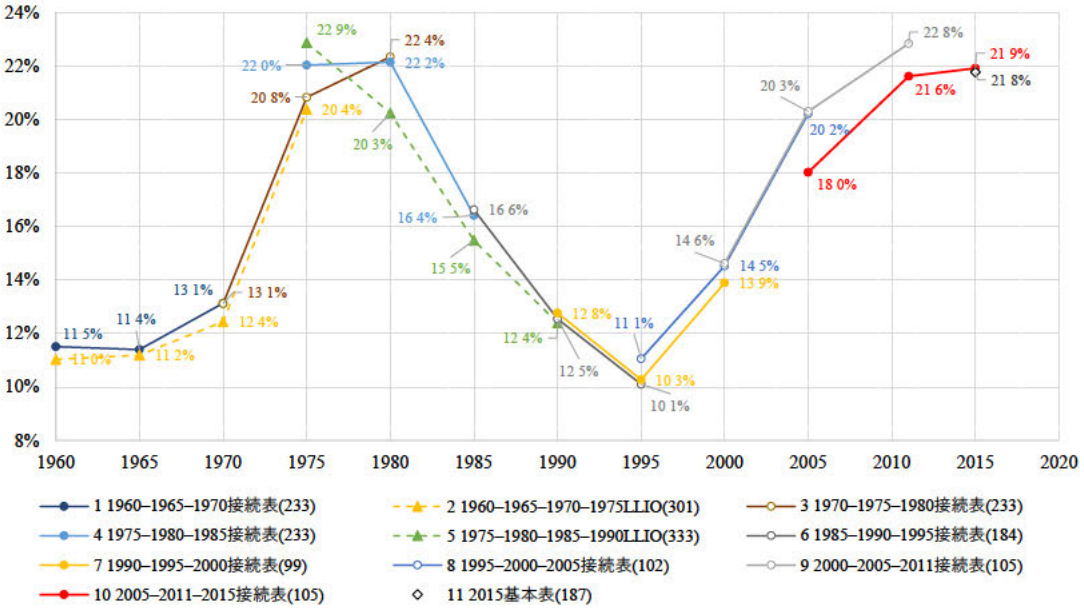


図 3.3.4-1 一国経済の電力 EID

出典：表 3.3.3-1 の接続表および基本表に基づく推計値。注：各産業連関表の括弧内は分析における統合商品分類数を示している。一国経済における EID の定義は式(3.3.2-8)による。

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していることが確認される（図 3.3.4-1） [39]。本節の測定期間となる 1960-2015 年において、大きく三つの変動期として、

[38] 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。次節以降では、表 3.3.3-1 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。

[39] 二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 3.3.3-1 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、

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 2015 年までの電力 EID 上昇期
を見いだすことができる。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%ほどの水準にまで大きく低下している。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%へと 1970 年代後半の水準にまで上昇している。

(2) 最終需要項目別 EID/UDS

一国経済の電力 EID における変化要因やその構造的な特性へと接近するため、本項と次項では接続表 1,4,7,10（表 3.3.3-1）に基づき分析していく。図 3.3.4-2 は式(3.3.2-7)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。電力 UDS 指標では、すべての電力の波及生産量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である。直接的に観察される電力消費としては、2015 年にはその 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。それに対して電力 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るものとなり、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%）の二倍を超える 55.8%に上る。高度経済成長期を含む長期にわたる本節での測定期間において、サービス化の進行など需要構造の変化も大きいものの [40]、図 3.3.4-2 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 50-60%と安定している。

表 3.3.3-1 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 3.3.4-1）。

[40] 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%にまで拡大している。

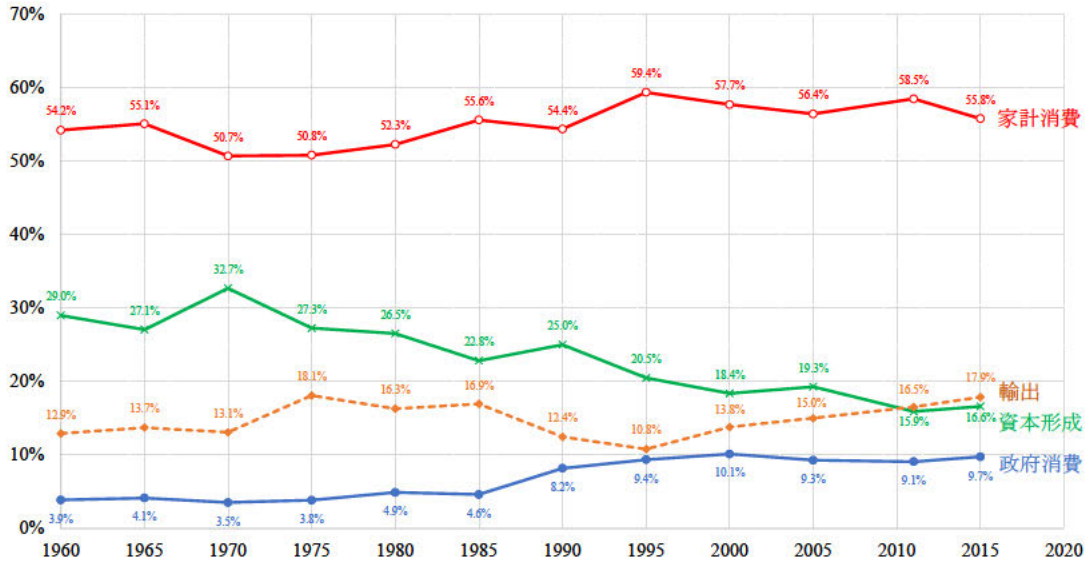


図 3.3.4-2 電力の最終需要項目別の電力 UDS

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。

注：最終需要項目別電力 UDS の定義は式(3.3.2-7)を参照されたい。

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 指標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り、残りを資本形成（在庫純増を含む）と輸出に依存している。

日本経済における資本形成は、金額評価としては近年でも輸出を 60%ほど上回るものの、資本形成による電力 UDS 指標によっては輸出によるそれを下回る水準にある。それは平均的な輸出財の生産が（平均的な資本財に比して）より電力多消費的であることを意味しており、電力の価格高騰や安定供給への懸念は、国際競争力の棄損へと直接的に結びつきやすい性質を持っている。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であると解される [41]。

日本経済の長期的な傾向としては、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する傾向にあり、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 は拡大傾向にある（図 3.3.4-2）。とくに家計消費では 1975

[41] 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の定義（式(3.3.2-7)）では資本形成による電力 UDS がより大きく評価される。

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%にまで倍増している [42]。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ている。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、2015 年には 17.9%に拡大している。

最終需要項目別の電力 EID の推計値は図 3.3.4-3 のとおりである。それは最終需要ごとの複合財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ものの、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二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が [43]、最終需要項目別の電力 EID としての差異（図 3.3.4-3）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 3.3.4-2）は、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。

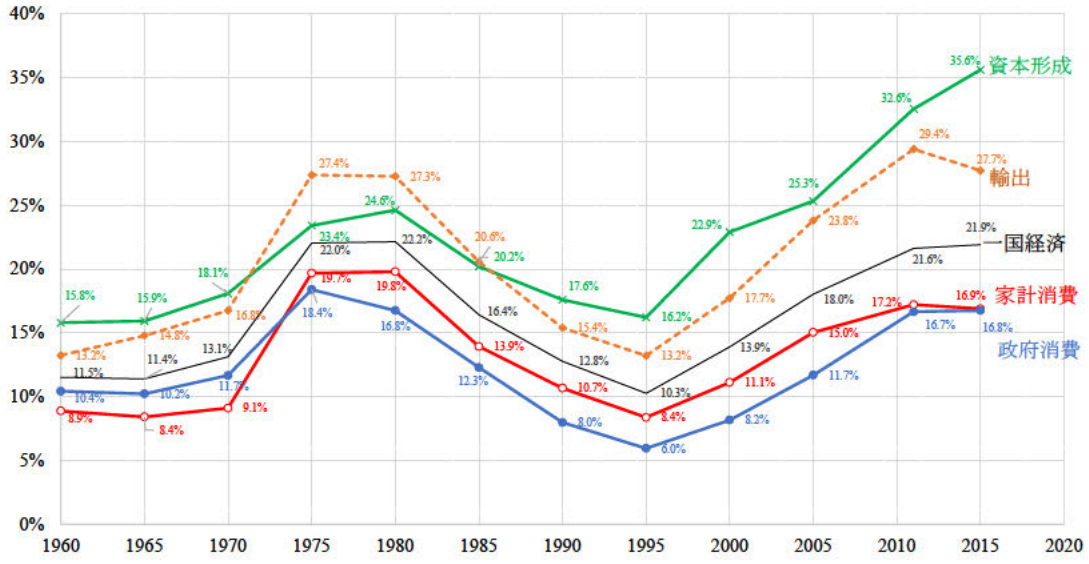


図 3.3.4-3 最終需要項目別の電力 EID

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。

注：最終需要項目別電力 EID の定義は式(3.3.2-12)を参照されたい。

[42] 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を含んでいることに留意されたい。

[43] 商品別の電力 EID の傾向は(3)項で測定される。

(1)項で定めた一国経済の電力 EID における三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 3.3.4-3）。後述する(3)項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 3.3.4-4 では一国経済の電力 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 における三つの転換年（1970 年、1980 年、1995 年）は輸入比率におけるそれと一致している。電力 EID が急上昇した第 I 期（1970-80 年）には、当時発電の 7 割以上を石油火力に依存していた日本経済に対する第一次オイルショックの影響により、電力価格は 3 倍以上へと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。諸外国においてもオイルショックによる影響は大きいものの、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の輸入への切り替えがより大きく進行したことを示唆している。

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ている。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 年度までの間において、電灯・電力平均では約 3 割低下している（資源エネルギー庁, 2020a）。また第 II 期は電力の安定供給としての改善も高く評価される。石油からの代替が求められる日本経済は、LNG 火力発電では 1970 年に 1.5%であった発電シェアから 1980 年には 15.4%、1995 年には 22.4%へ、原子力発電は同期間に 1.6%から 16.9%、そして 34.0%にまで拡大させることに成功している。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 年の 237 時間から 1995 年には 10 時間へと劇的な改善を実現している [44]。安定供給のもたらす電力 EID への影響としての数量的な評価は困難であるが、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が国内電力消費における価格や安定供給への懸念を後退させ、第 II 期には輸入比率低下の影響を上回る電力 EID 低下の実現に寄与するものであった可能性は大きい [45]。

---

[44] 資源エネルギー庁（2020）の第 214-1-7 による 10 電力合計値（元データは電気事業連合会「電気事業のデータベース」）であり、1988 年までは沖縄電力が含まれていない。

[45] 第 II 期には国内電力価格の低下が実現しているものの、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は安価であることによれば、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。国際競争の観点からみれば、第 II 期における電力 EID 低下の加速においては、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かもしれない。

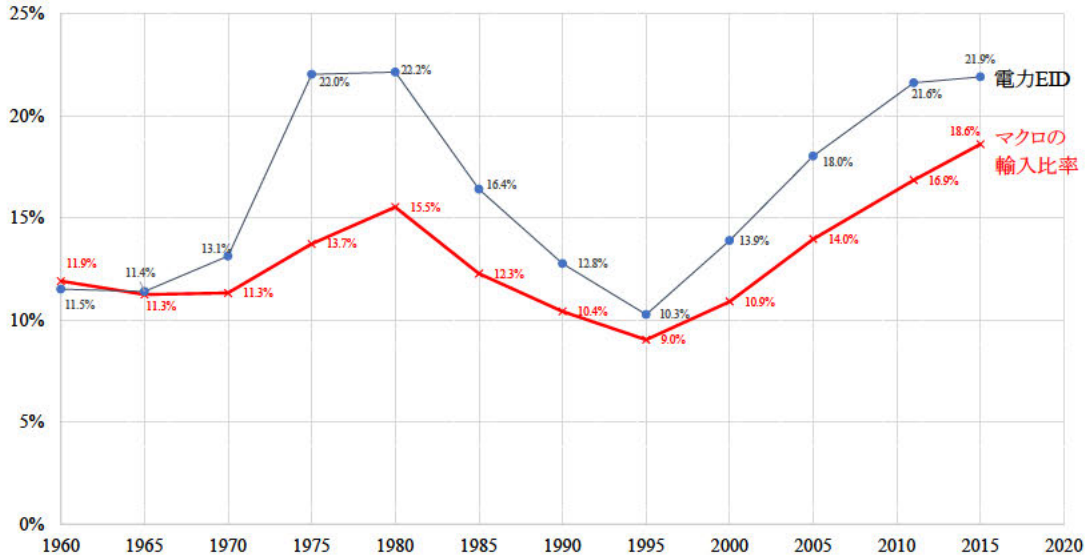


図 3.3.4-4 マクロ輸入比率と電力 EID

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）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。

電力 EID が再上昇する第 III 期（1995-2015 年）では、基調としてのマクロの輸入比率は 9.0%から 18.6%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（2005-15 年）ではむしろその逆の推移となる（図 3.3.4-4）。図 3.3.4-3 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%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 年の水準（16.9%）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 3.3.4-1 では式(3.3.2-14)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 3.3.4-1 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（2005-2015 年）におけるマイナスの寄与度が▲0.8 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 3.3.4-1 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 31%へと拡大している。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の反映と捉えられる。

表 3.3.4-1 一国経済の電力 EID 変化の要因分解

		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	1995–2015	11.7	4.9	1.0	3.6	2.1	11.6	-0.5	0.0	-1.0	1.4	0.0
			(0 42)	(0 09)	(0 31)	(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	2005–2015	3.9	1.0	0.5	1.8	0.6	4.0	-0.1	0.1	-0.8	0.7	-0.1
			(0 26)	(0 12)	(0 46)	(0 16)	(1 00)					

単位:パーセンテージポイント。注:表 3.3.3-1 における 1,4,7,10 の接続表に基づく推計値。分解は式(3.3.2-14)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 に見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関連投資（IT 投資）のシェア拡大に起因している。図 3.3.4-5 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ている。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そのハードウェアの名目シェアが低下する中で、コンピューター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している。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 3.3.4-2）、その電力 EID を上昇させる効果を持っている（図 3.3.4-3）。

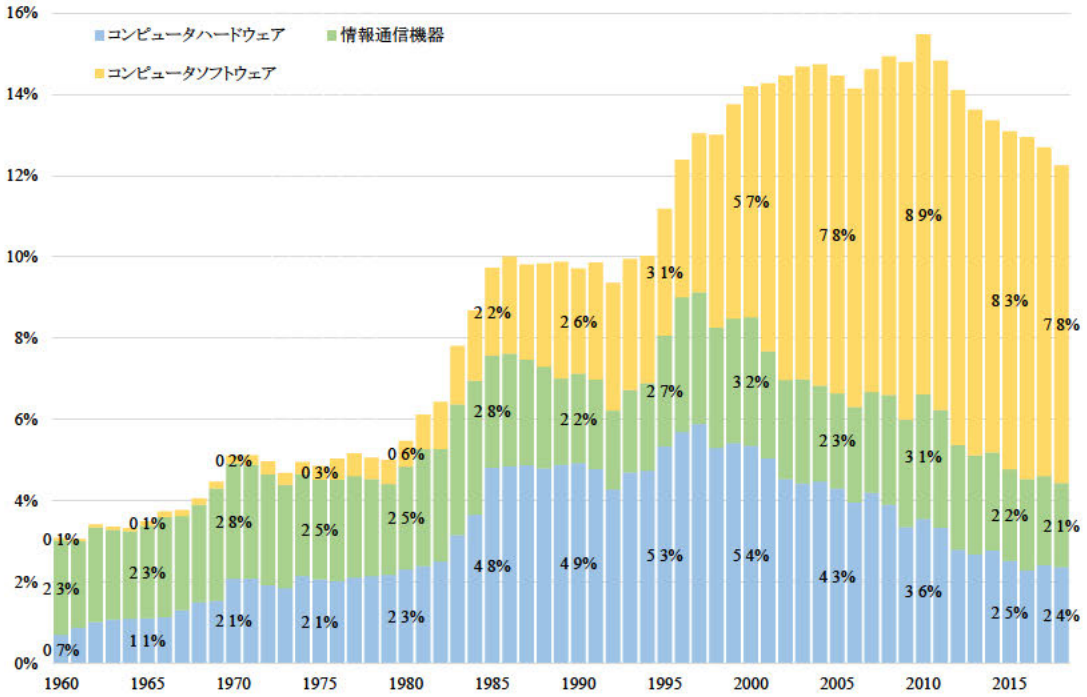


図 3.3.4-5 資本形成における情報通信投資シェア

出典：内閣府経済社会総合研究所（2020）、KEO Database 2020（慶應義塾大学産業研究所：3.2.8 節補論 B 参照）, Asian Productivity Database （APO, 2020）による長期遡及推計値に基づき作成。

(3) 商品別 EID/UDS

前項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・サービスごとの需要構成としての変化を反映したものであった。表 3.3.4-1 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てきたが、さらにそれを商品別におこなうことは（商品分類の異なる接続表に基づく）本項での制約により困難である。本項では、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 [46]。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 3.3.4-8 および図 3.3.4-9 に、商品別電力 UDS は図 3.3.4-10 および図 3.3.4-11 においてその推移を示している。また図 3.3.4-12 および図 3.3.4-13 では、製造品全体（すべての財の複合財）とサービス全

[46] 本項における商品レベルでの測定も接続表 1,4,7,10（表 3.3.3-1）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）ではあるものの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 3.3.4-8 および図 3.3.4-9）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 3.3.4-10 および図 3.3.4-11）ではその影響はより大きいことに留意されたい。

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 3.3.4-2 を参照されたい [47]。

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 の跛行性は大きいことである。直近となる 2015 年の推計値によれば、図 3.3.4-6 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として大きな乖離がある。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 1/3 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。

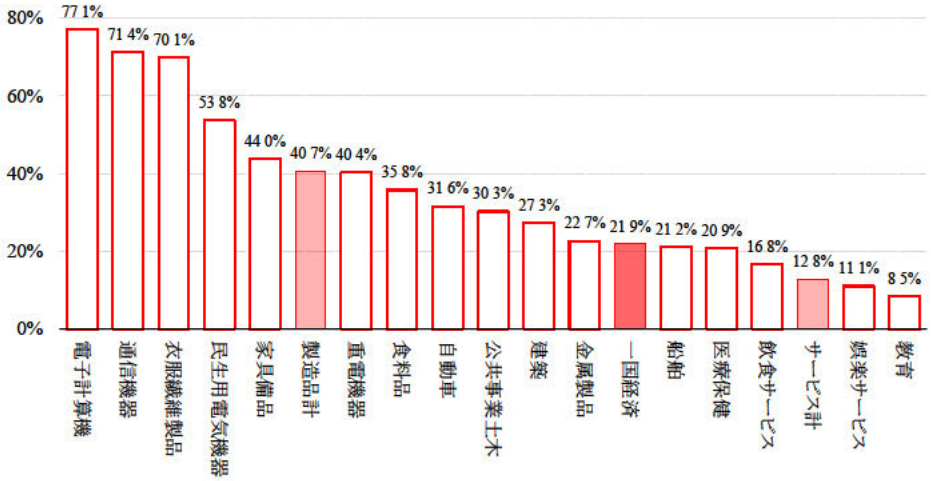


図 3.3.4-6 2015 年における電力 EID の商品別比較

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。注：商品別 EID の定義は式(3.3.2-12)に基づく。

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 3.3.4-6）、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 3.3.4-7 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

[47] 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 3.3.4-8 および図 3.3.4-10）に属してい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 3.3.4-9 および図 3.3.4-11）に属してい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。

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 3.3.4-13 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 3.3.4-11）、医療保健サービスでは 1970 年代半ばから大きく上昇し（図 3.3.4-10）、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。

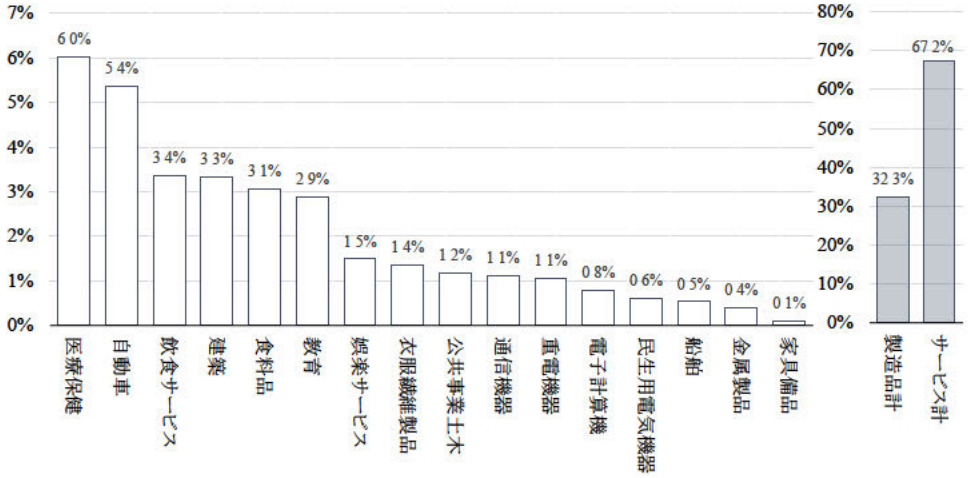


図 3.3.4-7 2015 年における電力 UDS の商品別比較

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。注：商品別電力 UDS の定義は式(3.3.2-7)に基づく。

第三に、一国集計レベル（図 3.3.4-1）および最終需要項目レベル（図 3.3.4-2）で観察される電力 EID における三期間ごとの変動は、図 3.3.4-8 および図 3.3.4-9 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している。三つの変動期ごとの、商品別の電力 EID（横軸）と UDS（縦軸）の推移は、それぞれ図 3.3.4-14、図 3.3.4-15 そして図 3.3.4-16 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 3.3.4-14）、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 3.3.4-16）。第 III 期後半には、マクロ的な電力 EID 上昇は減速しているが（図 3.3.4-4）、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、三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 3.3.4-8）や電子計算機・同付属装置（図 3.3.4-9）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 [48]、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 3.3.4-8）や通信機器（図 3.3.4-9）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。

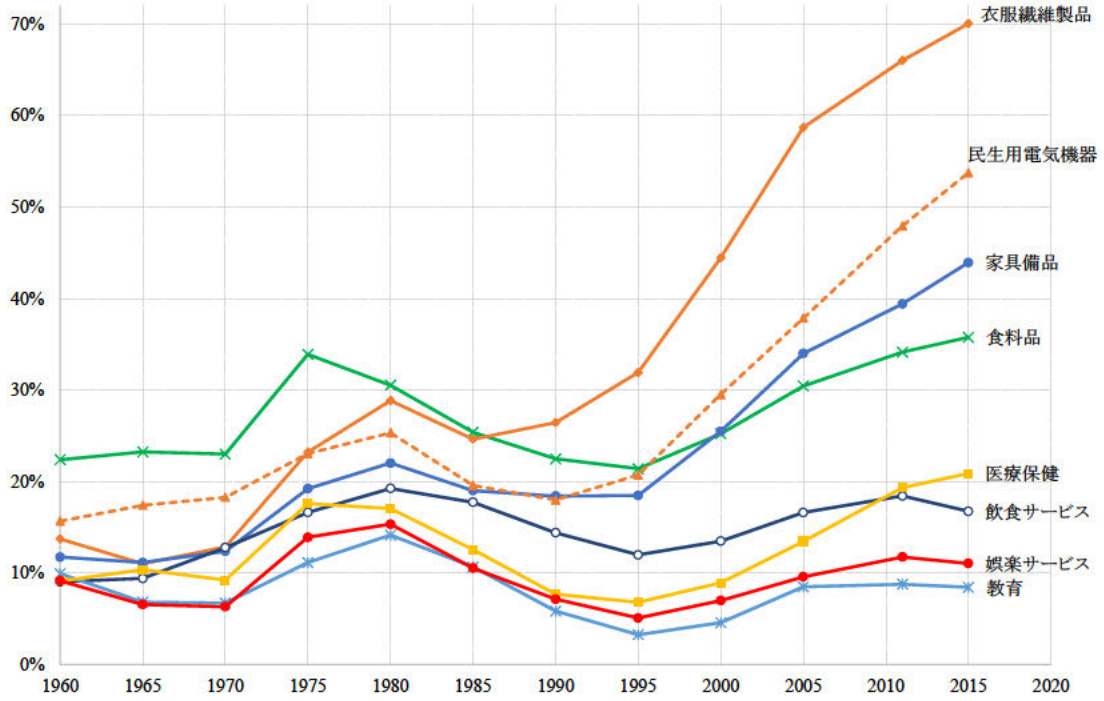


図 3.3.4-8 消費財の商品別電力 EID

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。注：商品別電力 EID の定義は式(3.3.2-12)に基づく。

[48] 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%(表 3.3.3-1 の接続表 10)であり、1985 年でのそれぞれ 8.5%および 6.9%(表 3.3.3-1 の接続表 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なものとなっている。

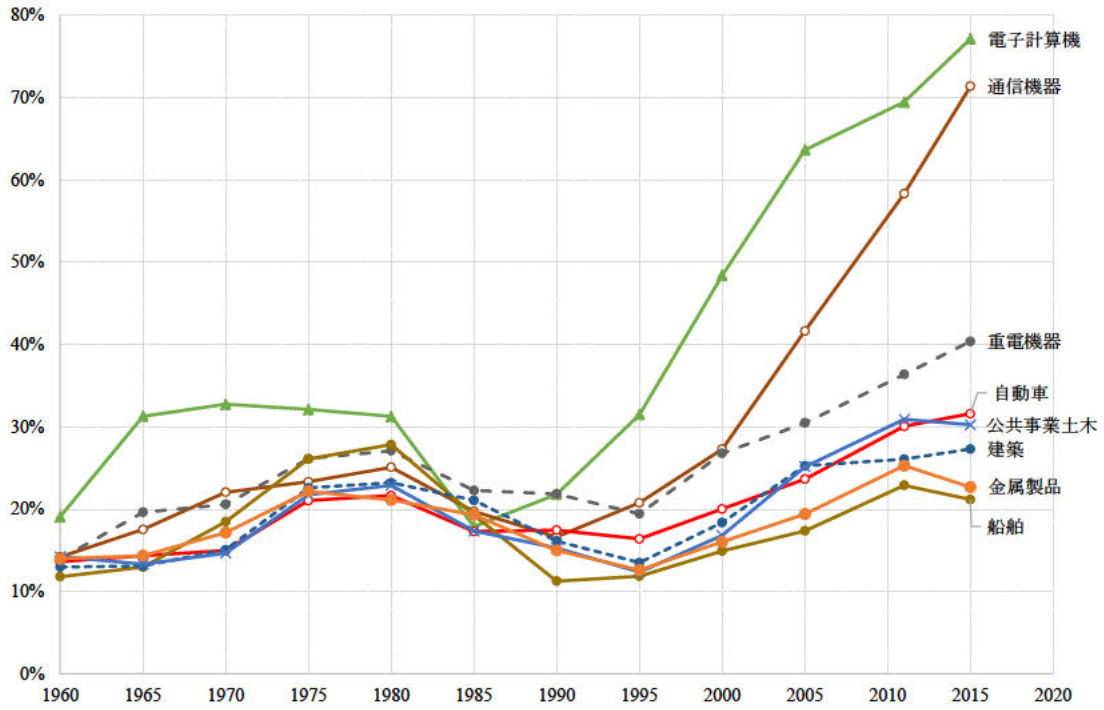


図 3.3.4-9 資本財の商品別電力 EID

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。注：商品別電力 EID の定義は式(3.3.2-12)に基づく。

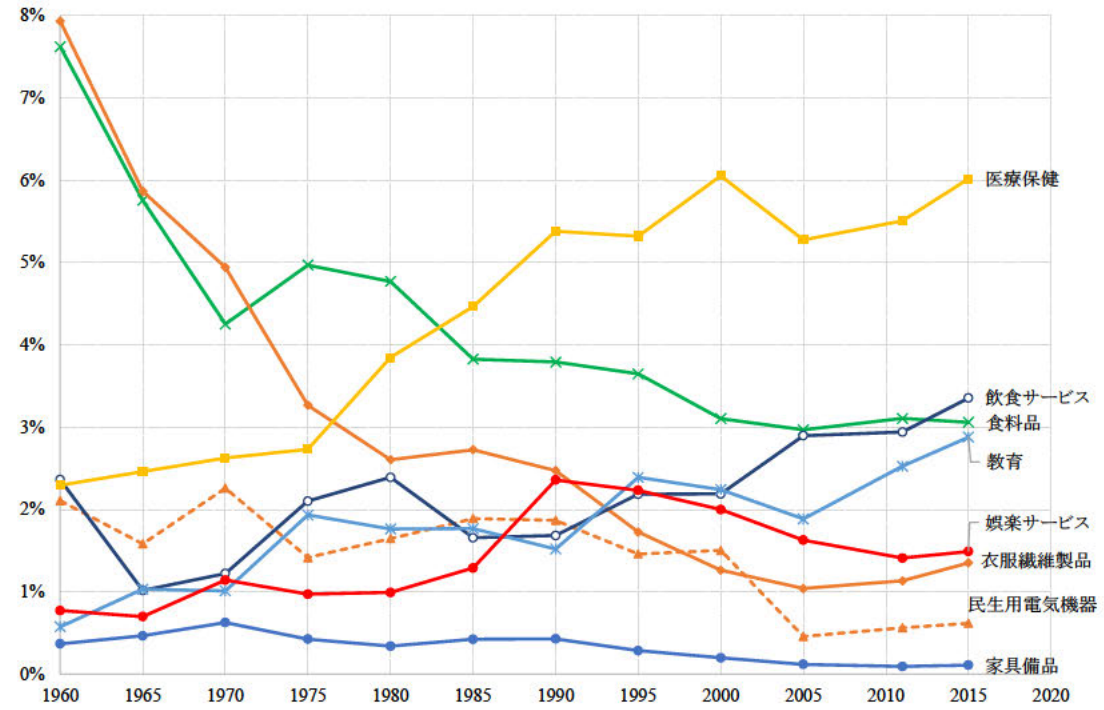


図 3.3.4-10 消費財の商品別電力 UDS

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。注：商品別電力 UDS の定義は式(3.3.2-7)に基づく。

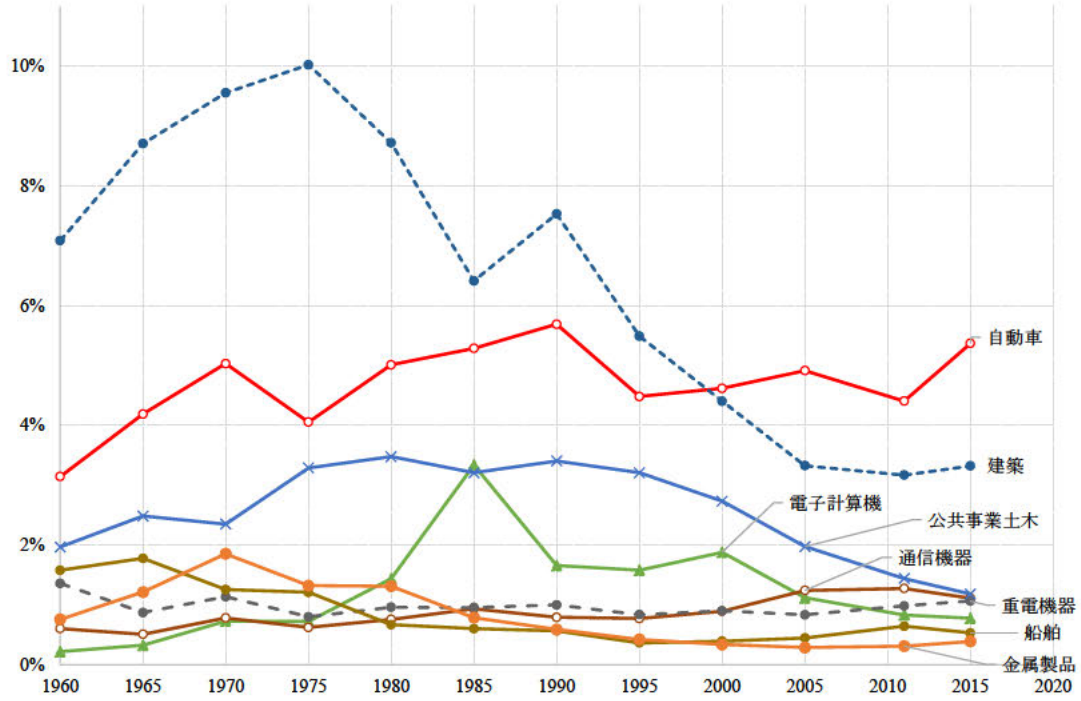


図 3.3.4-11 資本財の商品別電力 UDS

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。注：商品別電力 UDS の定義は式(3.3.2-7)に基づく。

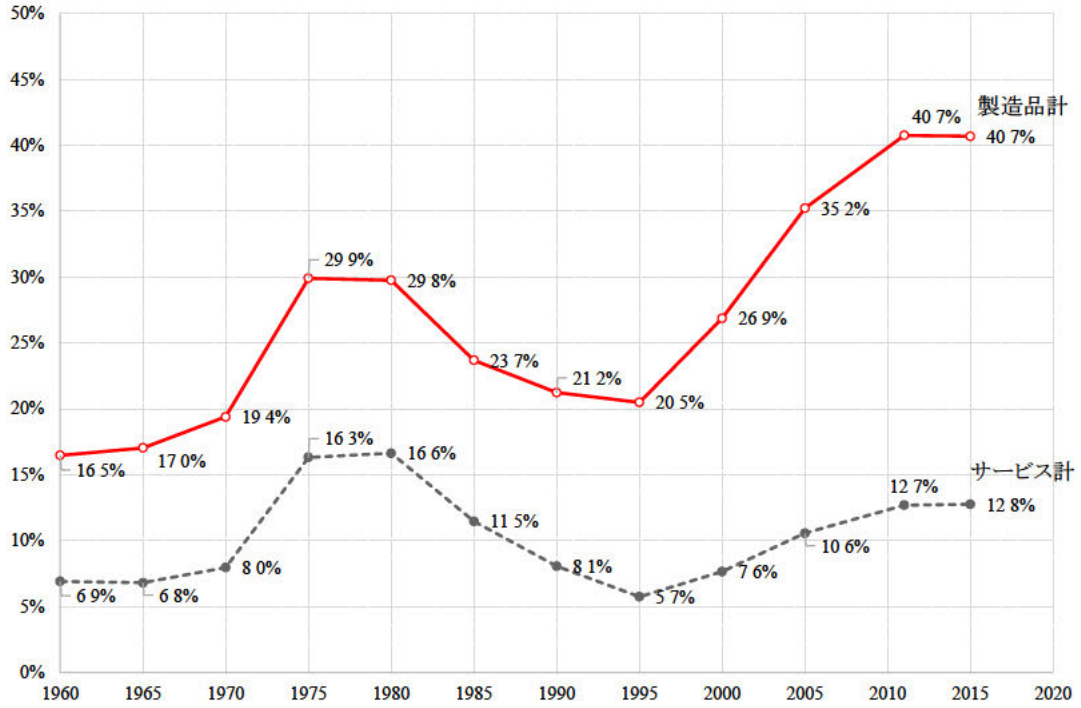


図 3.3.4-12 集計財と集計サービスの電力 EID

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。注：商品別電力 EID の定義は式(3.3.2-12)に基づく。

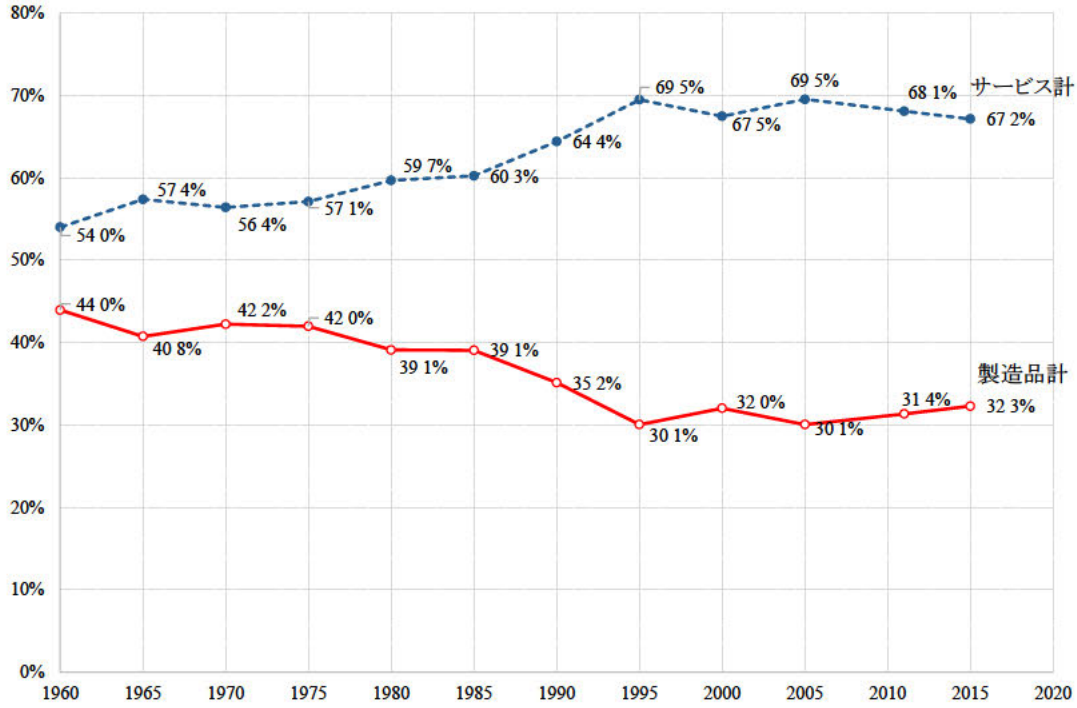


図 3.3.4-13 集計財と集計サービスの電力 UDS

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。注：商品別電力 UDS の定義は式(3.3.2-7)に基づく。

表 3.3.4-2 商品別 EID/UDS 推計値

	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

	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

	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

単位：%。注：商品別電力 EID および電力 UDS の定義はそれぞれ式(3.3.2-12)と式(3.3.2-7)を参照されたい。

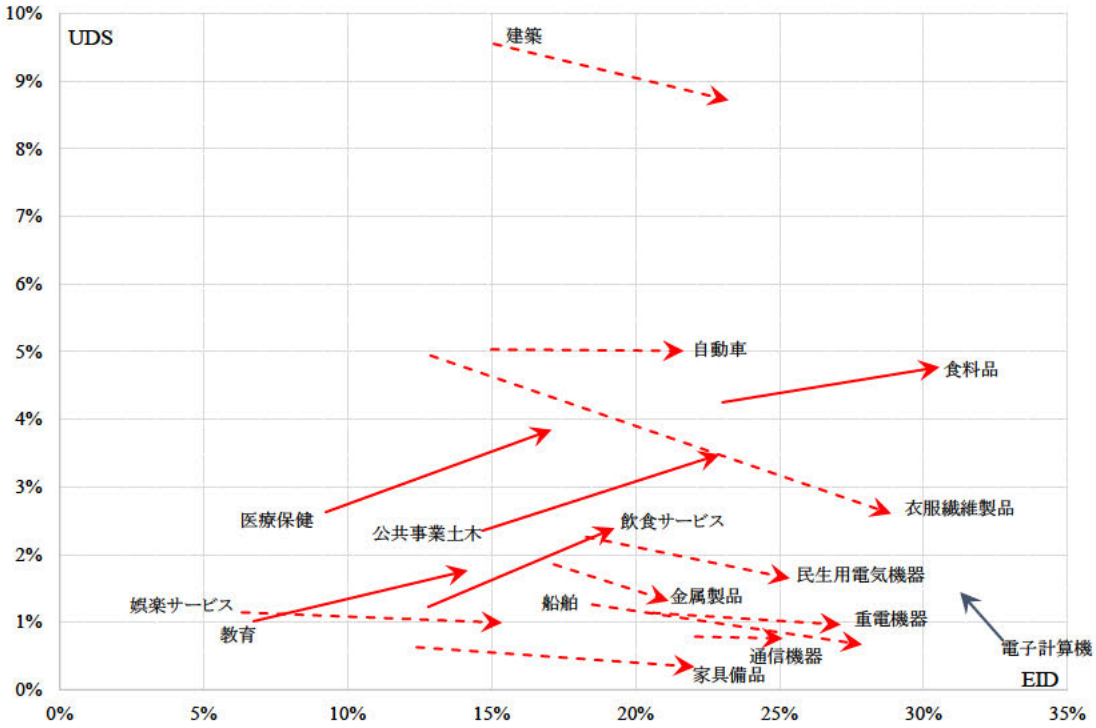


図 3.3.4-14 第 I 期における商品別電力 EID/UDS 変化

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。矢印の始点は 1970 年値、終点は 1985 年値。電力 EID の上昇は赤色、その低下は青色、UDS の上昇は実線、その低下は破線。

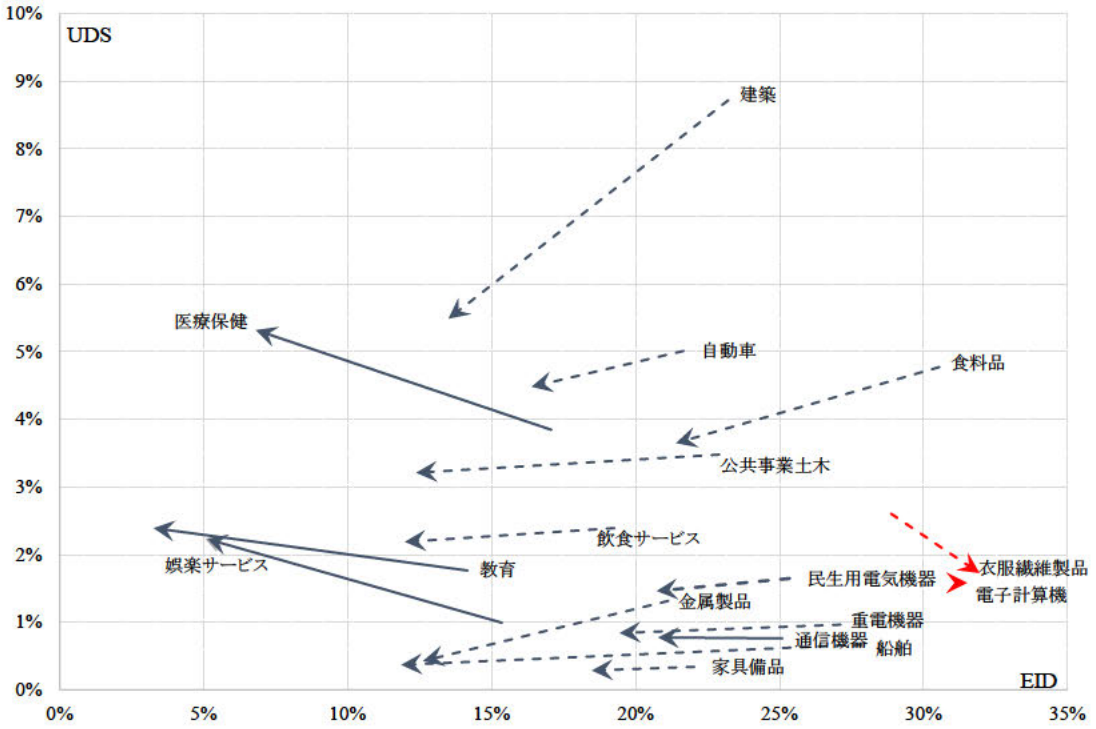


図 3.3.4-15 第 II 期における商品別電力 EID/UDS 変化

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。矢印の始点は 1980 年値、終点は 1995 年値。電力 EID の上昇は赤色、その低下は青色、UDS の上昇は実線、その低下は破線。

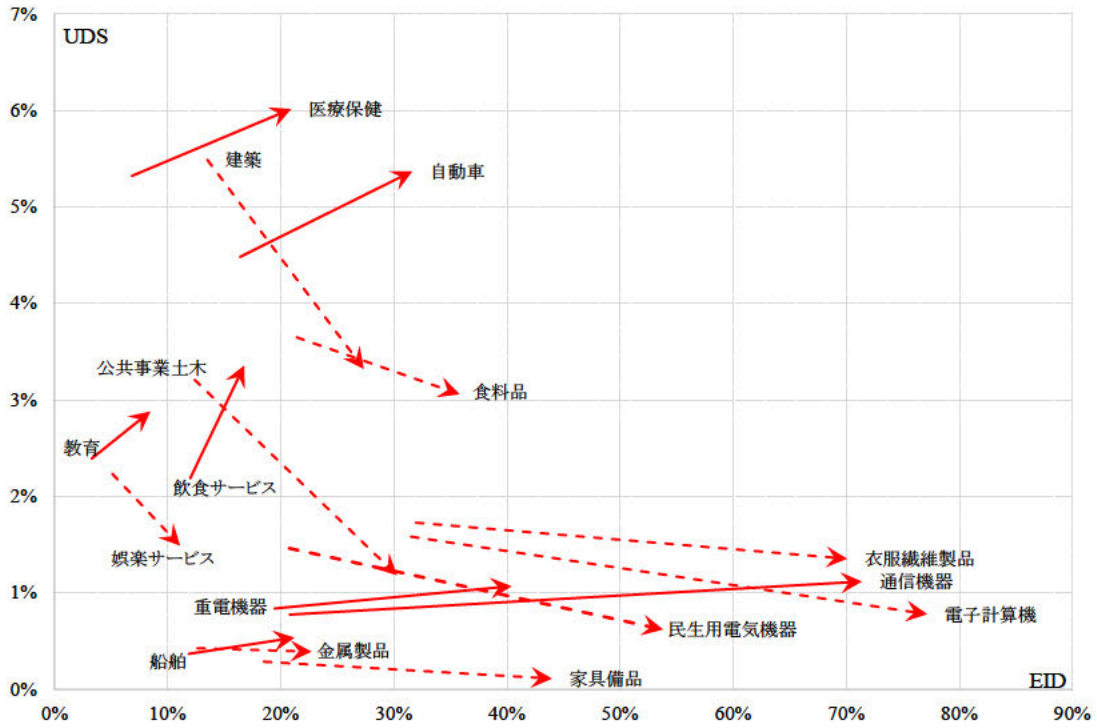


図 3.3.4-16 第 III 期における商品別電力 EID/UDS 変化

出典：表 3.3.3-1 の接続表（1,4,7,10）に基づく推計値。矢印の始点は 1995 年値、終点は 2015 年値。電力 EID の上昇は赤色、その低下は青色、UDS の上昇は実線、その低下は破線。

3.3.5 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、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。本節での測定は以下のように要約されよう。

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三つの変動期として、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 2015 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%にも高まっている。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%に接近する。

第二に、オイルショック後に高まった 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てきた。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など経済におけ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、電力の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 [49]。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、コンピューター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一国経済の電力 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 2015 年の 21.9%へと倍増した。電力 EID における 11 ポイントもの上昇幅は、1400 億 kWh の電力の間接輸入に相当する。

近年の日本における国内電力需要の低迷の背景には、間接的な電力輸入量の大きな拡大がある。それは日本経済において、電力消費的な財の生産が海外へとシフトしていることを示唆する。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棄損への懸念を拡大させる再エネ推進や電力自由化などは、すでにこうした変化を促進してきたのかもしれない。安価に利用可能な省エネや低炭素技術が制約され、追加的な対策は産業競争力を棄損させる懸念が拡大する中で、企業の適応による海外への有効需要の漏れは、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、IoT や 5G 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をより拡大させるだろう。本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も超える。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による電力 EID を低下させる効果は減衰すると考えられる中で、将来における商品別 EID は近年の上昇を継続するのか、それとも 1980 年代のように低下へと転じさせることができるかは、今後のエネルギー環境政策に依存するだろう。これまで築かれてきた電力安定供給の基盤を棄損させてはならない。拙速な石炭火力からのフェードアウト、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の規制強化などによれば、日本国内の温室効果ガス排出抑制に「成功」するかもしれない。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

[49] 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 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。

依存度をさらに高めることにより実現される虚構性を多分に含み、有効需要の不足は日本経済のさらなる低迷をもたらす。

参考文献（第 3.3 節に関するもの）

1) Asian Productivity Organization (2020) APO Productivity Databook 2020, Tokyo: Keio University Press, October.
2) 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.
3) 経済産業省（2015）「長期エネルギー需給見通し」7 月.
4) 澤田豊（1998）「化学工業における省エネルギー対策への取り組み」,『紙パ技協誌』, 第 52 巻 11 号.
5) 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.
6) 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.
7) 内閣府経済社会総合研究所（2020）「国民経済計算年報」7 月.
8) 野村浩二（2018）「日本の長期エネルギー生産性―エネルギー品質と産業構造要因―」, RCGW Discussion Paper, No.61, 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.
9) 野村浩二（2020）「間接的な電力輸入－日本経済における電力の実効輸入依存度の測定」, RCGW Discussion Paper, No.65, 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.
10) 総務省（2019）「平成 27 年産業連関表」, 6 月.
11) 総務省（2020）「平成 17-23-27 年接続産業連関表」, 8 月.

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」を発表し、環境問題への取り組みが企業の存在と活動に必須の要件であることを明確にし、環境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た。そして、1996 年 7 月の「経団連環境アピール」の発表を契機に、1997 年に「自主行動計画」が発表された。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「低炭素社会実行計画」の基本方針が発表され、2013 年に自主行動計画を引き継ぐ形で低炭素社会実行計画の取り組みが開始された。

自主行動計画に関する分析および評価は、2014 年 4 月に、2012 年度までの経団連を中心とした産業界の取り組みについて有識者による検討内容を総括的にとりまとめた「自主行動計画の総括的な評価に係る検討会とりまとめ」（文献 1)）として公表された。本節では、自主行動計画の目標期間終了以降の低炭素社会実行計画の下での取り組みについて分析し、2014 年の分析との比較も踏まえ評価を行った内容を説明する。

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)「経団連自主行動計画」の概要

まず、経団連自主行動計画の概要を記す。1997 年 6 月に製造業を中心とした 37 業種による経団連環境自主行動計画が発表され、各業種における温暖化対策の目標に加えて、経団連としても産業部門およびエネルギー転換部門からの CO_2 排出量の抑制を目指すとした。この発表を受けて、1997 年 12 月、通商産業大臣は産業構造審議会等における自主行動計画のフォローアップの実施を決定し、翌 1998 年度よりフォローアップが開始された。自主行動計画は、産業界における対策の中心的役割を果たしているものとして位置付けられ、政府の関係審議会等による定期的なフォローアップも行われた。計画策定業種は、1997 年度当初の経団連傘下の 37 業種から、2012 年度には経団連傘下の 61 業界団体・企業を含む全 114 業種まで増加した。計画策定業種のエネルギー起源 CO_2 排出量に占める割合についても、産業部門・エネルギー転換部門の約 8 割、日本全体の約 5 割を占めるに至った。

自主行動計画の成果については、2013 年度フォローアップ結果（2012 年度実績）（文献 2)）によると、同フォローアップ調査に参加した産業・エネルギー転換部門 34 業種からの CO_2 排出量は 4 億 5,369 万 t-CO_2 と、1990 年度比で 10.3％減少（2011 年度比で 0.2％減少）となった。「2008 年度～2012 年度の平均における産業・エネルギー転換部門からの CO_2 排出量を 1990 年度レベル以下に抑制するよう努力する」という統一目標に対し、2008 年度～2012 年度平均で 1990 年度比 12.1％削減という、目標を大幅に上回る成果を上げた。

(2)「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

自主行動計画の総括的な評価に係る検討会とりまとめの中で、自主行動計画はこれまで十分に高い成果を上げてきたと評価され、引き続き産業界の自主的取り組みを我が国の温暖化対策の中心として位置付け、中長期的に取り組むに当たっては、経団連が率先して 2020 年以降の目標を掲げて取り組むことが必要である、とされている。このような経緯を経て、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、取り組みが続けられている。

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（文献 3）参照)。

② 「経団連低炭素社会実行計画」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 2)の個別業種版を参照)。

表 3.4.1-1 目標指標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（文献 5)参照)。

3.4.2 エネルギーおよび CO_2 排出に関する世界主要国との比較分析からの日本の排出削減への取り組み評価

低炭素社会実行計画における自主的取り組みを評価するにあたり、まず日本の産業界を含む日本全体のエネルギー効率や二酸化炭素排出増減の要因の全体的な傾向を、世界主要国との比較を交えて概観することにした。

(1) エネルギー原単位の評価

日本の長期的な日本のエネルギー原単位（GDP あたりの一次エネルギー供給量）の推移を図 3.4.2-1 に示す（分析に用いたデータは文献 6)）。産業界を含む日本全体のエネルギー効率について、GDP あたりの一次エネルギー供給量の長期的な傾向を見ると、石油危機後の省エネ努力によって 1975 年頃から 1990 年頃までにかけて原単位が大きく改善した。その後しばらく横ばいだったが、2000 年頃から再び改善傾向が見られ、その後も継続的に改善してきている。

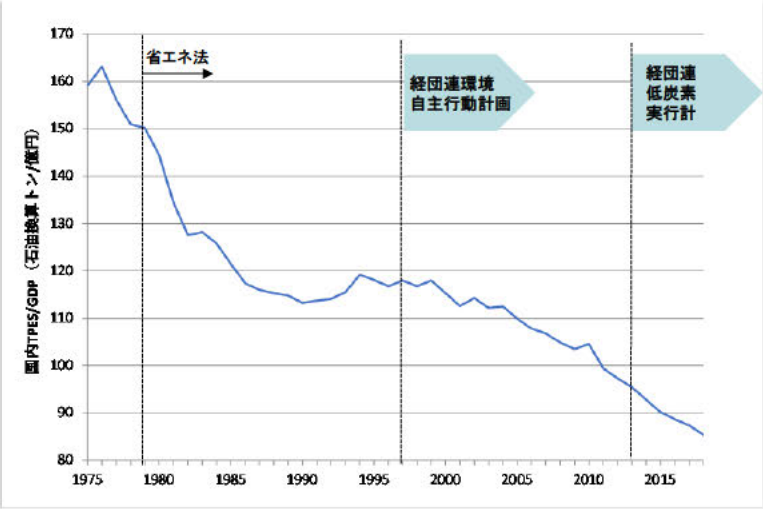


図 3.4.2-1 日本のエネルギー原単位（TPES/GDP）の推移（文献 6)より作成）

2013 年と 2018 年における、主要国のエネルギー原単位（GDP あたりの一次エネルギー供給量(TPES)：TPES/GDP）を図 3.4.2-2 に示す（分析に用いたデータは文献 7)）。GDP は 2015 年の為替換算を用いた。GDP あたり一次エネルギー供給量は為替の影響、産業構造等にも影響されるため、この結果だけで省エネルギーや CO_2 排出削減努力の程度の評価はできないが、主要国間での相対的な位置を見ると日本のエネルギー効率は高水準にあると言える。

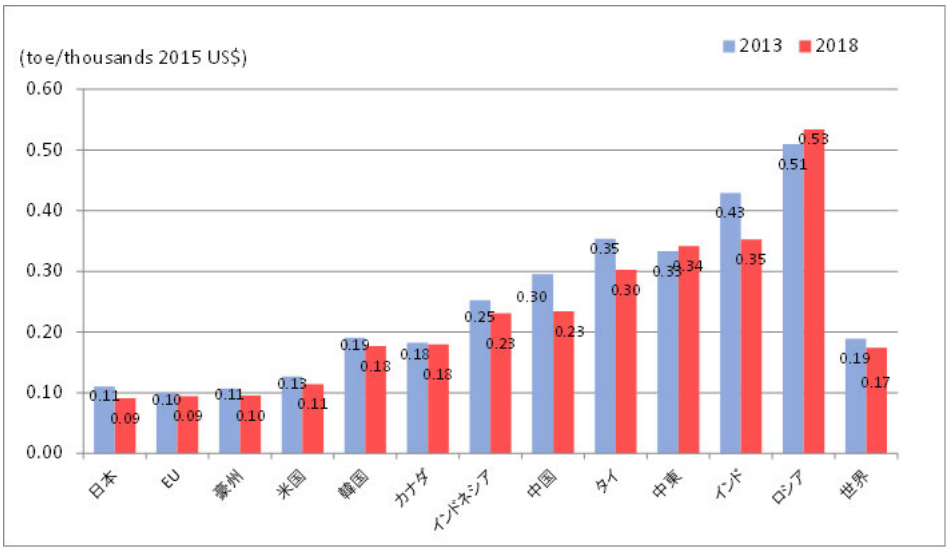


図 3.4.2-2 エネルギー原単位（TPES/GDP）の国際比較（文献 7)より作成）

注）GDP は 2015 年の為替換算を使用

(2) CO_2 排出量増減の要因分析

CO_2 排出変化の特徴を把握するために、日本および欧米を含めた主要 4 か国における、CO_2 排出量（化石燃料燃焼起因）の増減について茅恒等式の手法を用いた要因分析を行った。人口（以下 POP と略す）、一人当たり GDP（GDP/POP）、GDP 当たり最終エネルギー消費量（TFC/GDP）、最終エネルギー消費量当たり一次エネルギー消費量（TPES/TFC）、TPES 当たり CO_2 排出量（CO_2/TPES）に要因を分解し、1997 年から 2018 年までの間について、主要国それぞれにおける CO_2 排出量および各要因の 3 年毎および 20 年間の年平均変化率を求めた。図 3.4.2-3 にその結果を示す（分析に用いたデータは文献 7)）。

日本および欧米主要 4 か国全てにおいて 2018 年の CO_2 排出量は 1997 年比で減少している。また、いずれの国でも一人当たり GDP 成長率（GDP/POP）はほぼ好調だったが、2006～2009 年は世界経済危機の影響でマイナスとなり、この期間の CO_2 排出量も連動してマイナスに変動している。 GDP 当たり最終エネルギー消費量（TFC/GDP）については全体的に改善している。また、個別の増減には各国それぞれの事情が反映されていると言える。日本については、CO_2 原単位（CO_2/TPES）は震災による原発停止の影響が大きく出て 2009～2012 年に大幅に悪化している。ただし、2013 年以降の改善率は比較的大きい。

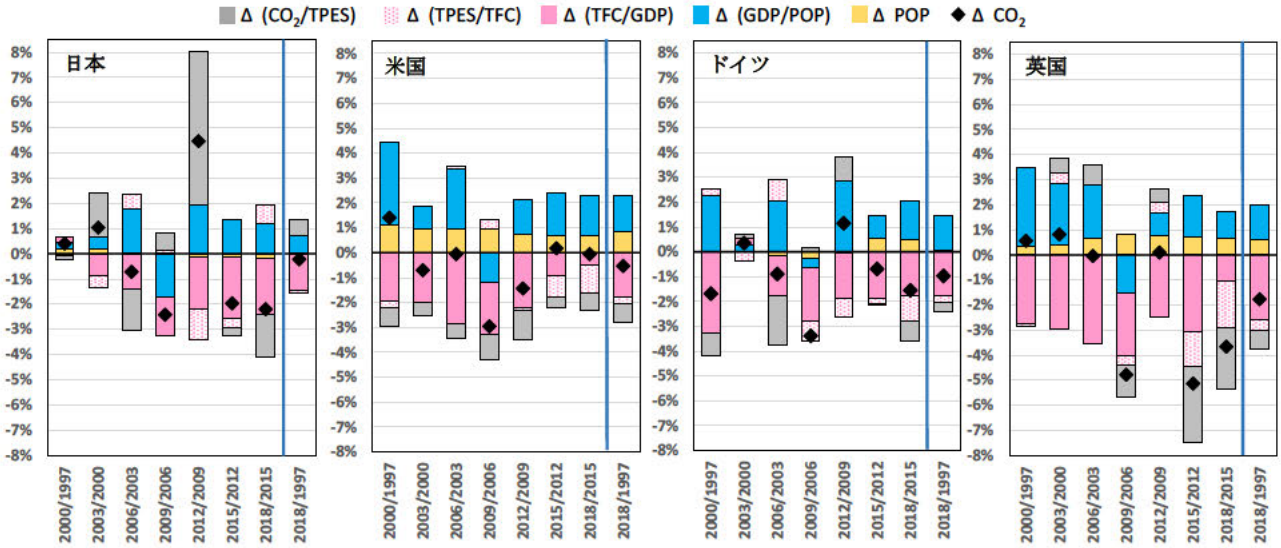


図 3.4.2-3 日米欧主要 4 か国の CO_2 排出量の要因分解（文献 7)より作成）

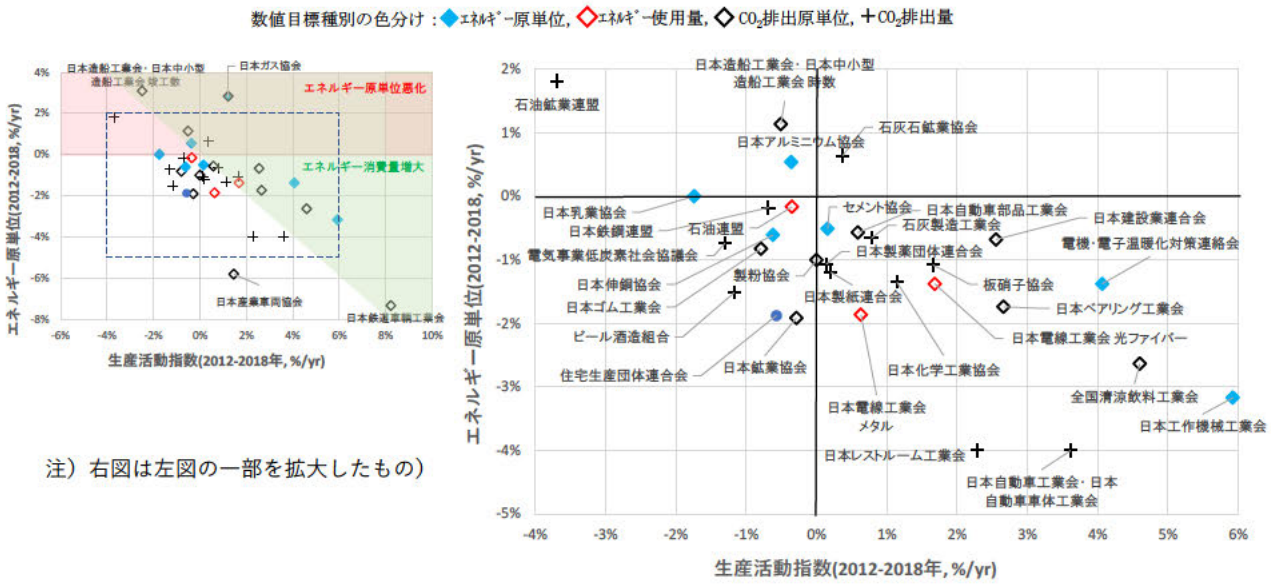
注）GDP は 2015 年の為替換算を使用

3.4.3 低炭素社会実行計画の産業・エネルギー転換部門参加業種における排出削減努力の分析

2019 年度フォローアップにおいては、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、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。今回の分析では、このような指標に依らない排出削減努力のより良い評価のために、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 排出原単位の全体的な傾向と業種間の比較等から考察を行った。分析・評価においては、業界団体間の比較を定量的に評価するの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た。分析には、「経団連低炭素社会実行計画 2019 年度フォローアップ結果<2018 年度実績> 」の公表データ（文献 8)）を用いた。

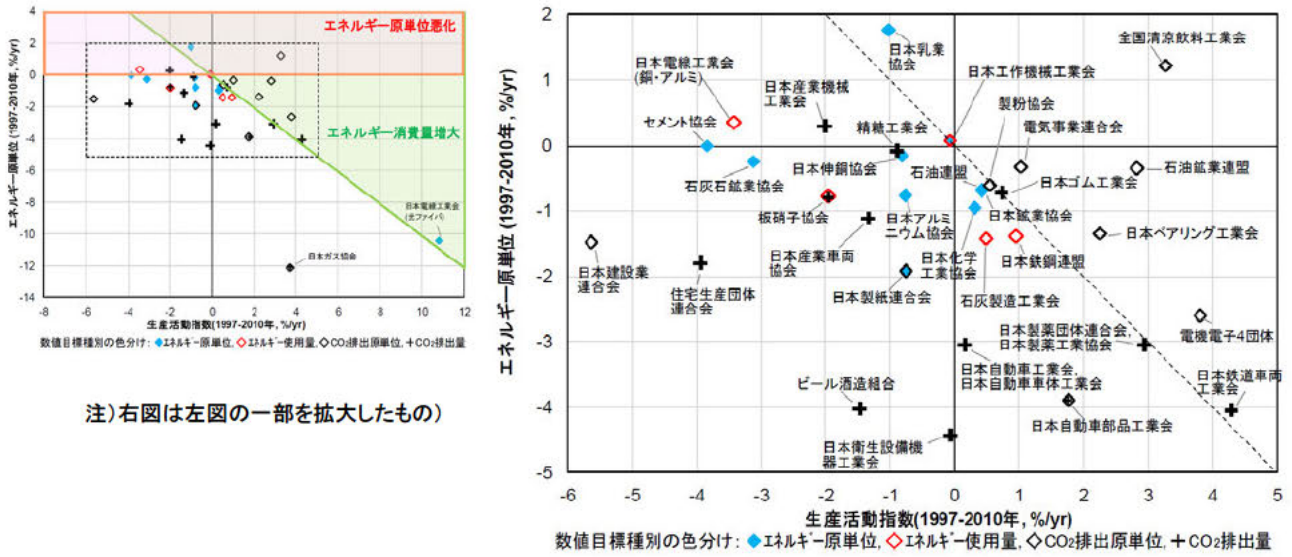
(1) 業種毎の生産活動指数とエネルギー原単位変化の関係

自主行動計画からの継続した取り組みとして評価するために、2012～2018 年の期間について、図 3.4.3-1 に、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。また、2014 年に行われた評価における同様の分析（1997～2010 年の期間）の結果を図 3.4.3-2 に示す（文献 9)より引用)。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。



注）右図は左図の一部を拡大したもの）

図 3.4.3-1 生産活動指数とエネルギー原単位の関係（2012～2018 年）



注）右図は左図の一部を拡大したもの）

図 3.4.3-2 生産活動指数とエネルギー原単位の関係（1997～2010 年）（出典：文献 9））

全体的な傾向としては、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ほとんどで、エネルギー原単位は概ね改善している。しかし、図 3.4.3-2 に示す前回の分析において、生産活動指数が悪かった業種が多かったのに対し、今回は生産活動指数が良かった業種が多く、一般に生産活動が活発になればエネルギー効率が良くなることから、生産活動の向上によりエネルギー原単位が改善した可能性もある。

また、石灰石鉱業協会、日本ガス協会など生産活動指数が良かったにも関わらずエネルギー原単位が悪化した業種もある。しかし、日本ガス協会については、図 3.4.3-2 にあるように、自主行動計画において 1997～2010 年で既に大幅なエネルギー原単位削減を実現（2010 年のエネルギー原単位は 1997 年比約 11%減少）している。今回の分析結果だけを見て評価すべきではない。

(2) 業種毎のエネルギーと CO_2 原単位変化の関係

2012～2018 年における、エネルギー原単位と CO_2 排出原単位（CO_2 排出量/エネルギー使用量）変化の関係を図 3.4.3-3 に示す。また、2014 年に行われた評価における同様の分析の結果を図 3.4.3-4 に示す（文献 9)より引用）。

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 年の期間でほぼ全業種において改善しており、2014 年実施の同様の分析結果との比較においても、全体的に CO_2 排出原単位が大きく向上した。しかし、3.4.2 での CO_2 排出量の要因分解で見たように、日本では 2011 年の東日本大震災による原発停止で火力発電が増え、その影響で 2012 年には CO_2 原単位が大幅に悪化していたため、そこを起点とした 2018 年までの 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。

日本造船工業会・日本中小型造船工業会、日本アルミニウム協会は、エネルギー原単位は悪化しているが、CO_2 排出原単位は改善、すなわちエネルギーの低炭素化が進んでいる。また、石灰石鉱業協会、日本ガス協会は、図 3.4.3-1 で生産活動指数が良かったにもかかわらずエネルギー原単位は悪化しているが、一方、図 3.4.3-3 の CO_2 排出原単位は改善している。

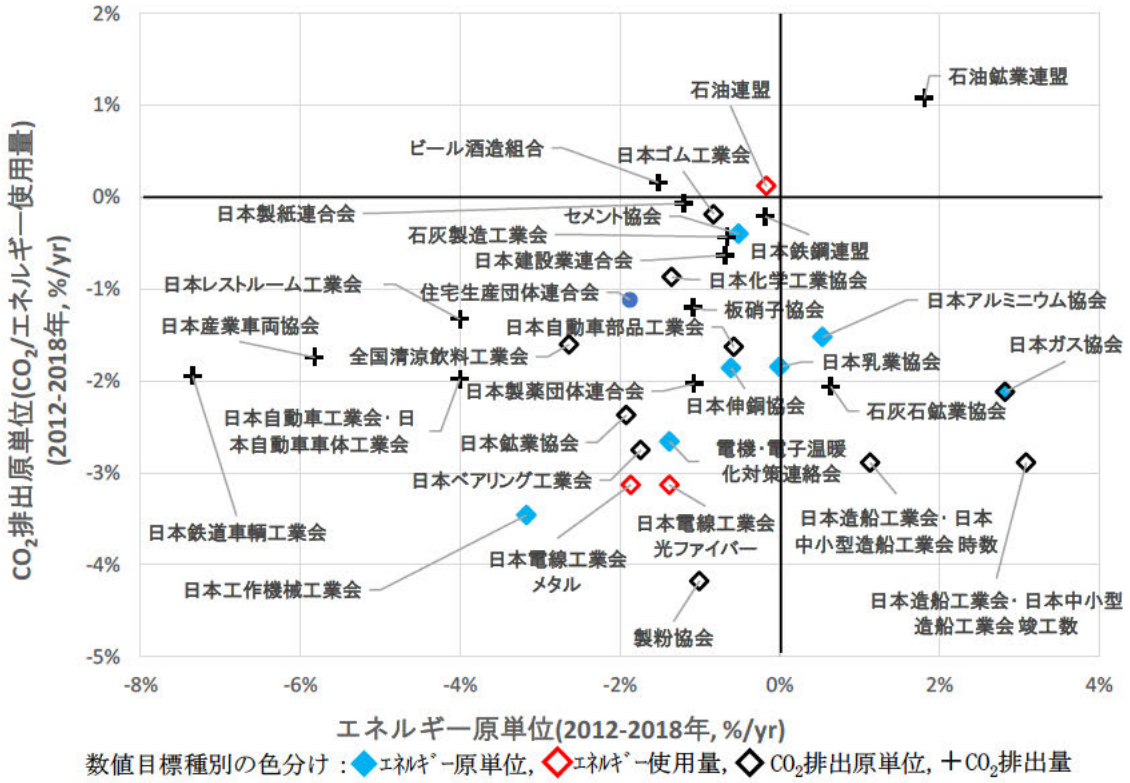


図 3.4.3-3 エネルギー原単位と CO_2 排出原単位（CO_2 排出量/エネルギー使用量）の関係（2012～2018 年）

注）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。

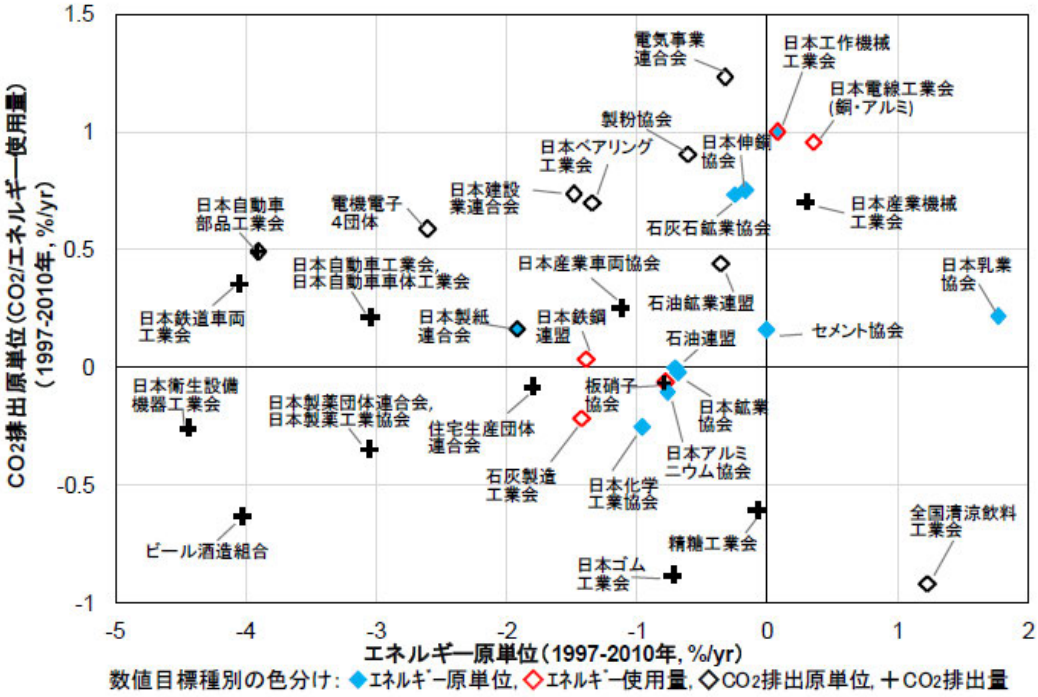


図 3.4.3-4 エネルギー原単位と CO_2 排出原単位（CO_2 排出量/エネルギー使用量）の関係（1997～2010 年）（出典：文献 9))

上述した外的要因による影響を除いた評価のために、CO_2 排出原単位が大幅に向上した幾つかの業種について、仮に電力係数を固定した場合の試算を行った。例えば、日本造船工業会・日本中小型造船工業会および製粉協会は、電力化率が比較的高い業種であるが、固定した基礎排出係数（実排出係数）を用いて試算すると、2012 年（製粉協会については 2013 年）からの CO_2 排出量/エネルギー使用量の変化率は、前者については殆ど変化なし、後者については若干の改善という結果であった。また日本電線工業会については、2019 年度フォローアップにおける個別報告 [10]を見ると、メタル（銅・アルミ）、光ファイバーのいずれも製造における購入電力の占める割合が大きく、CO_2 排出量の増減は炭素排出係数に大きく左右され、2013～2018 年で CO_2 排出量が減少している主な要因として CO_2 排出係数の減少を挙げているなど、原単位向上の理由は主に購入電力の排出係数の向上によるものと考えられる。しかし、このような電力排出係数の影響が少なからずあったものの、今回の分析において CO_2 排出原単位が悪化した業種が殆どなかった点は評価できるのではないかと考える。

(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 3.4.3-5 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。また、低炭素社会実行計画における数値目標の種別も示す。

領域 A は経済活動の変化に関わらずエネルギー原単位改善を達成していることを示しており、一定程度の業種が経済活動の変動に因らず温暖化対策等を進めたことにより原単位改善を達成したと言える。

日本アルミニウム協会のエネルギー原単位の悪化は、生産活動量の悪化による可能性が高い。2019 年度フォローアップ個別業種報告（文献 10)）では、生産活動量（圧延量）が 2009 年以降は減少傾向にあり、エネルギー原単位の寄与率の高い製品の生産が減ってしまい、エネルギー原単位の大幅な悪化につながったとあり、本分析の結果と一致する。また、石灰石鉱業協会は、2010 年からの年間の変化で見るとエネルギー原単位の悪化が生産活動の変動によるという説明性が高い。一方、本分析の結果からは、石油鉱業連盟のエネルギー原単位悪化は生産活動の変動によるという説明性が低い。

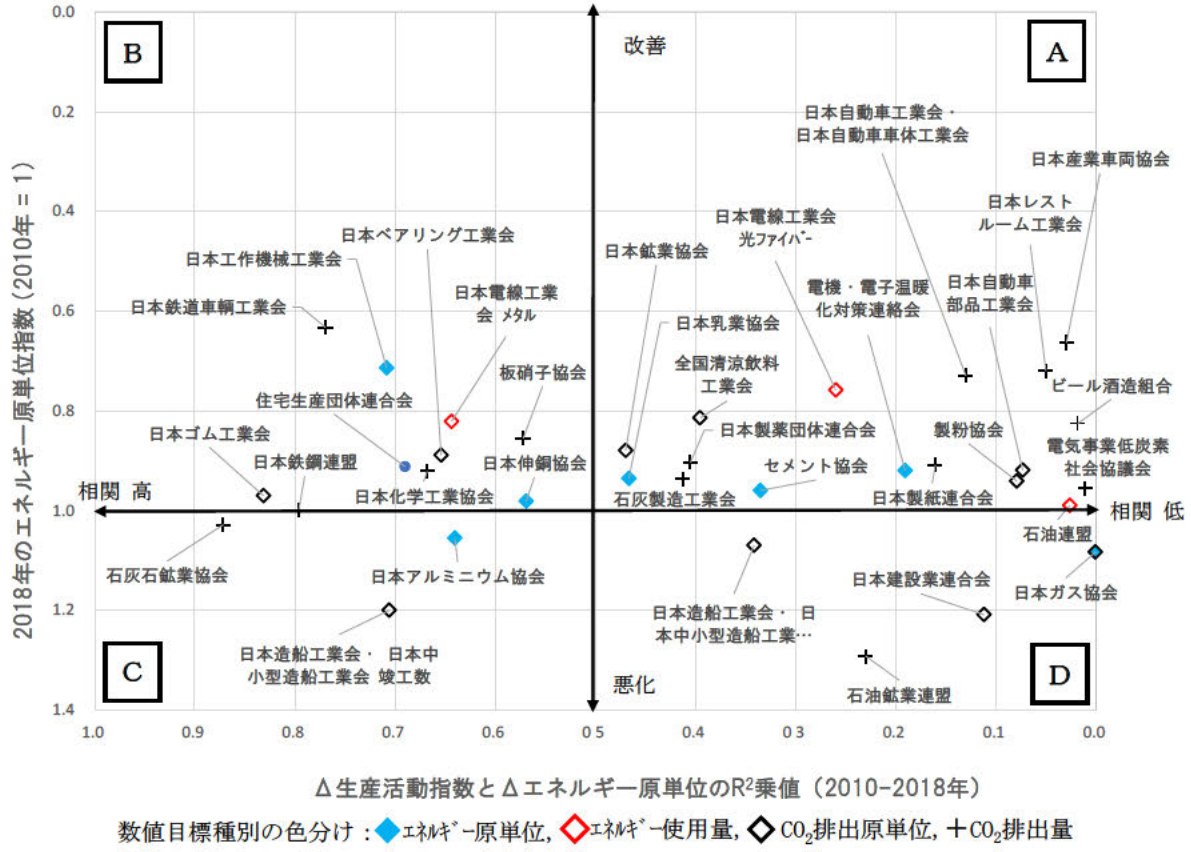


図 3.4.3-5 産業部門参加業種におけるエネルギー原単位変化と原単位変化に対する生産活動変化の説明性（R^2）の関係（2010-2018 年）

3.4.4 まとめ

本節では、日本の産業界を代表する経団連における温室効果ガス排出削減の自主的取り組みについて、自主行動計画に続く低炭素実行計画に関する分析・評価を行った。

これらの取り組みを評価するにあたり、日本の排出削減への取り組みを世界主要国との比較を交え分析した。日本全体のエネルギー効率は、石油危機後、大幅に改善されてきており、世界の主要国と比べても高いエネルギー効率の水準にある。また、CO_2 排出量の要因分解から、日本および欧米主要 4 か国において 1997～2018 年で CO_2 排出量は減少しており、GDP あたり最終エネルギー消費量も全体的に改善している。一方、CO_2 排出量や各要因の寄与度の増減には各国個別の事情もある。日本においては、震災による原発停止の影響で CO_2 原単位が 2009～2012 年に大幅に悪化したものの、2013 年以降の改善率は比較的大きい。

低炭素社会実行計画の産業・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 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行った。2012～2018 年において、エネルギー原単位（生産活動あたりのエネルギー使用量）は全体的に改善している。また、CO_2 排出量/エネルギー使用量で見た CO_2 排出原単位も減少しており、1997～2010 年における分析よりもさらに進展が見られる。年間のエネルギー原単位変化が年間生産活動指数変化によってどの程度説明されるかを見ると、経済活動の変化に関わらずエネルギー原単位改善を達成している業種は一定程度あるという結果になった。

対象とする期間によって結果は異なってくるため、ある特定の期間のみの分析で削減対策の度合いを決定づけるべきではない。また、削減努力の評価にあたっては、目標に対する進捗や達成度だけでなく幾つかの視点からの分析・考察が必要である。本節では複数の指標を用いて業種横断的な比較分析を試みた研究を行ったが、産業界の排出削減努力をより良く評価するための幾つかの有益な手法を提供し得ると考える。

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) 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）
3) 低炭素社会実行計画 第三者評価委員会　2019 年度低炭素社会実行計画 第三者評価委員会 評価報告書（2020）
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) 産業構造審議会 産業技術環境分科会 地球環境小委員会・中央環境審議会 地球環境部会 低炭素社会実行計画フォローアップ専門委員会　2019 年度低炭素社会実行計画 評価・検証結果及び今後の課題等（概要資料）（2020）
6) 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編：EDMC エネルギー・経済統計要覧 2020 年度版、省エネルギーセンター（2020）
7) IEA, CO_2 Emissions from Fuel Combustion (2020)
8) 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）

9) 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), pp.1-9
10) 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 個別業種版、https://www.keidanren.or.jp/policy/2019/103.html

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。2020 年は COVID-19 危機がエネルギー需要へ大きな影響を与えたが、IEA[1)]によると、2020 年に再エネ以外の燃料源のエネルギー需要が低下するのとは対照的に、再エネ需要全体としては前年比で約１％増加すると予測されている。本報告では主に、2019 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

まず、図 3.5.1-1 に、2015～2019 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設備の容量は 2015 年には約 2,000GW 程度まで増加し、石炭火力発電での設備容量を超えた。その後も再生可能エネルギー発電の容量は順調に増加している。図 3.5.1-2 は、2010 年および 2019 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、2019 年には 27%まで伸びている。

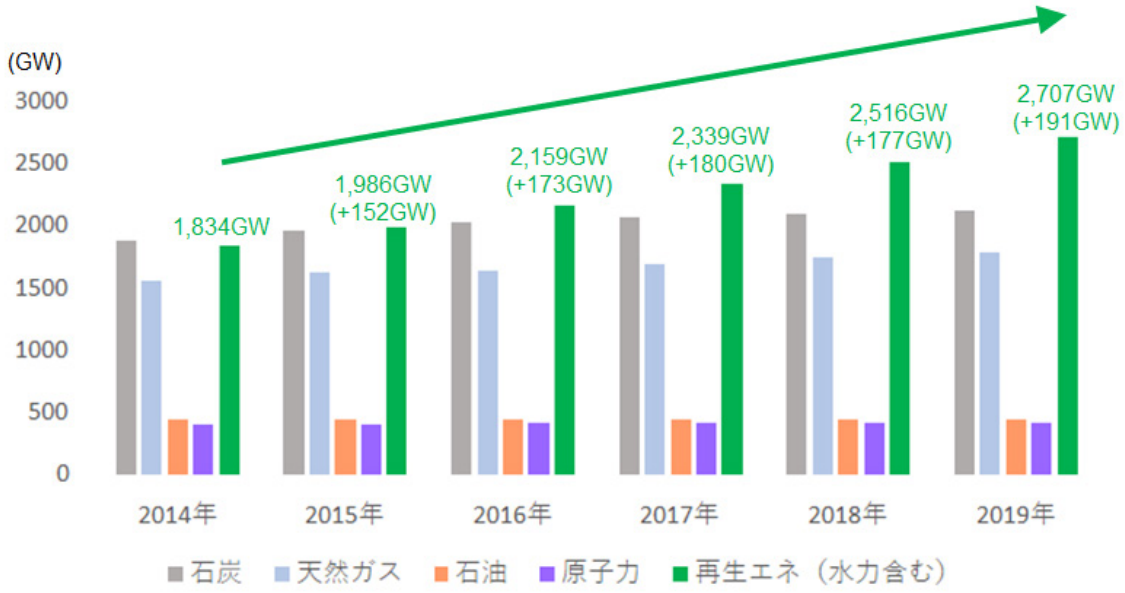


図 3.5.1-1 2014～2019 年における世界全体の発電設備容量（ストック）（World Energy Outlook 2016～2020 年度版より作成：文献 2)～6)）

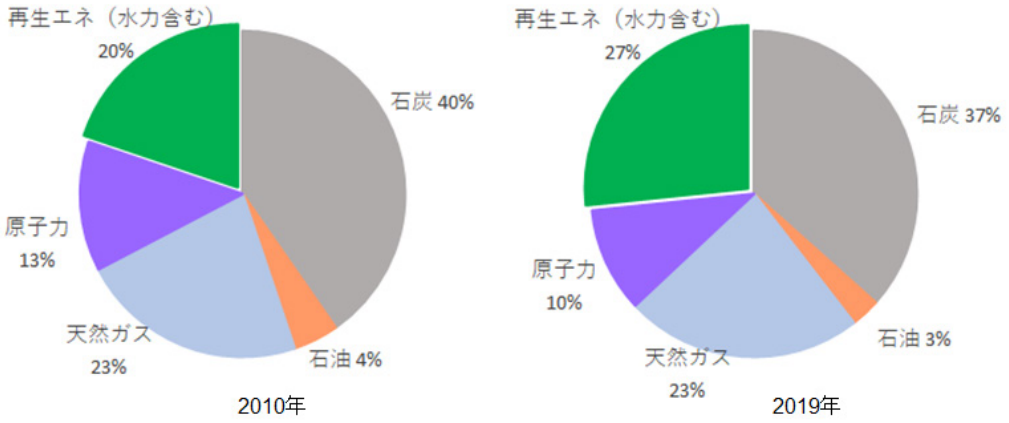


図 3.5.1-2　2010 年と 2019 年における世界の発電電力量に占める燃料源の割合
（World Energy Outlook 2020 年度版より作成：文献 6)）

また、図 3.5.1-3 に示す IRENA[7]による統計では、再生可能エネルギーの 2019 年導入容量は 176GW（+7.4%）で、太陽光が 98GW（+20%）で最も増加が大きく、続いて風力 59GW（+10%）と、太陽光と風力が 2019 年のその増加の 90%を占めた。

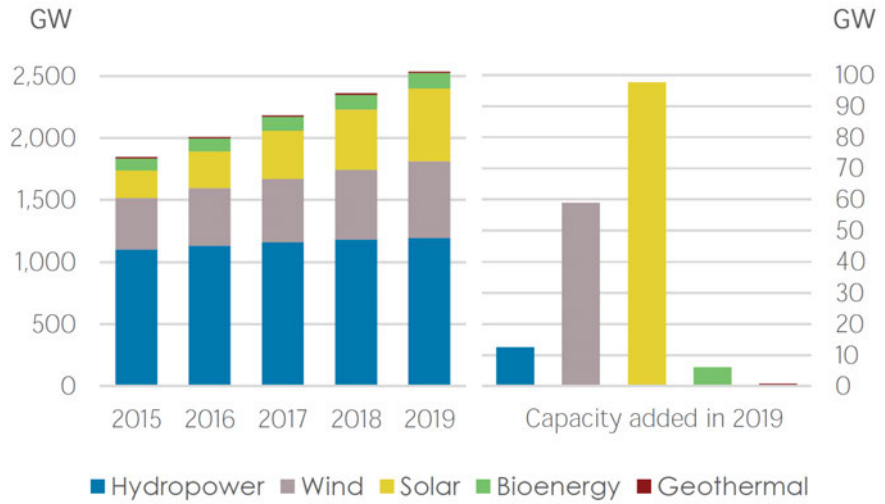


図 3.5.1-3　2015-2019 年の世界の再生可能エネルギー発電容量の推移および 2019 年導入容量（出典：7)）

(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 3.5.1-4、図 3.5.1-5 はそれぞれ、世界の太陽光発電（PV）の 2019 年の年間導入量と 2011～2019 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。世界における PV の 2019 年における年間導入容量は 111.6GW だった。中国が 2019 年

まで 7 年連続で年間導入容量の首位で、2019 年には 30.1GW 以上を導入した。同国は 2017 年には世界導入容量の半分以上を占めたが、太陽光発電に関する支援策の見直しにより以降の導入が減速する傾向にある（2017 年の導入容量は 52.9GW、2018 年は 44.3GW)。2 位の米国は 2018 年を大きく上回る 13.3GW を導入した。3 位はインド（10.1GW)、4 位は日本（7GW）となっている。EU の成長も大きく、スペイン、ドイツ、オランダが主要なマーケットである。

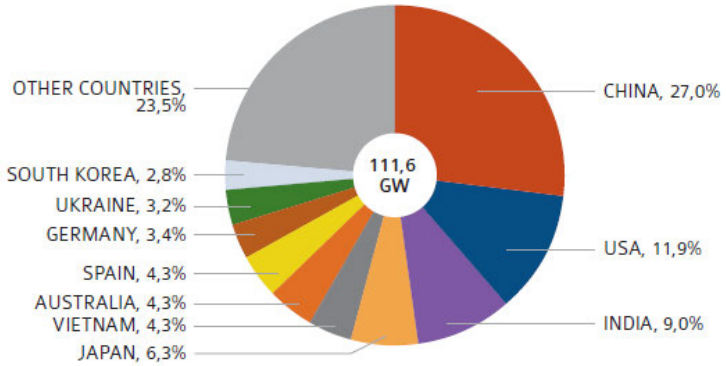


図 3.5.1-4　世界の太陽光発電（PV）の 2019 年の年間導入容量（出典：文献 8)）

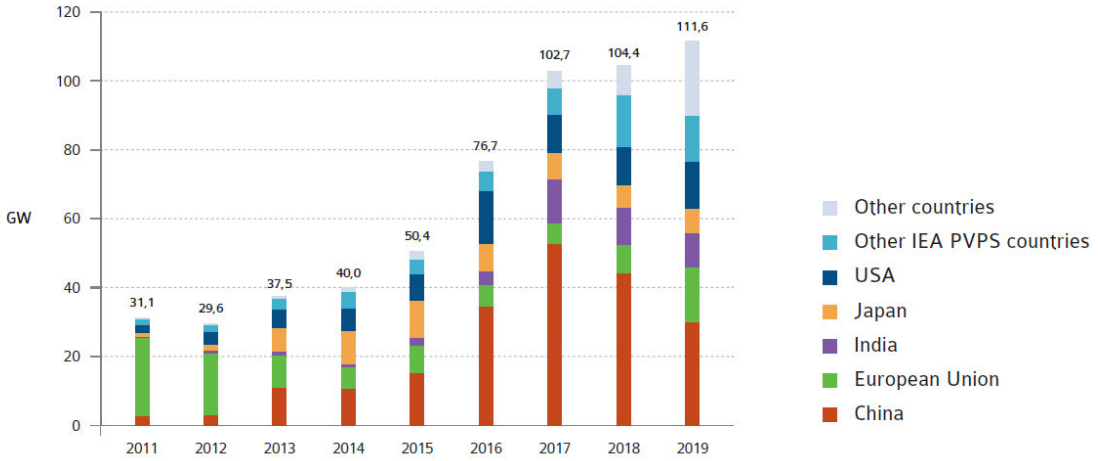


図 3.5.1-5 世界の太陽光発電（PV）の年間導入容量の推移（出典：文献 8)）

2019 年までの世界の累積 PV 導入量は、図 3.5.1-6 にあるように、623.2GW となった。累積 PV 導入量の 1 位は中国、2 位は米国、3 位は日本であった。また、図 3.5.1-7 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 導入容量において上位 10 か国が全体の 75%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がわかる。一方、その割合はここ数年で低下しており、その他の国々が市場全体の成長に、より貢献し始めていることがうかがえる。

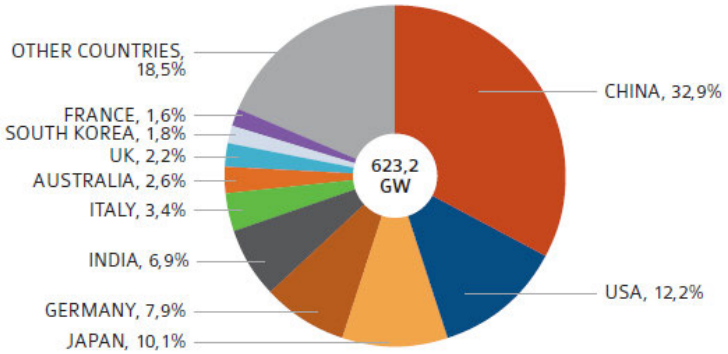


図 3.5.1-6　世界の太陽光発電（PV）の 2019 年までの累積導入容量（出典：文献 8)）

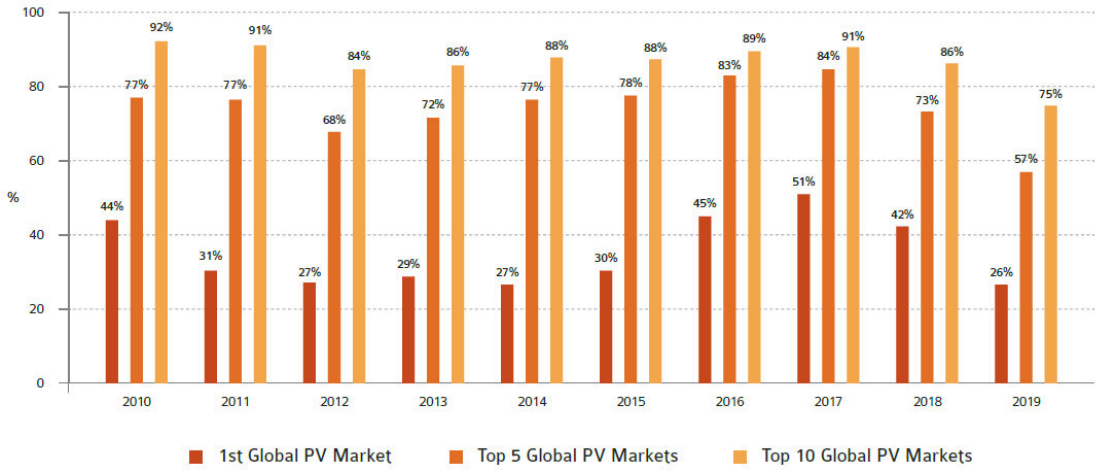


図 3.5.1-7　世界の太陽光発電（PV）導入容量における上位国が占める割合の推移（出典：文献 8)）

② 風力発電

図 3.5.1-8 に、世界の風力発電（陸上、洋上）の 2015～2019 年における年間導入容量を示す。2019 年の導入容量は陸上、洋上合わせて 60.4GW だった。2015～2018 年において年間導入容量は減少していたが、2019 年は前年比 19%増と飛躍的に成長した。陸上風力発電の 2019 年の導入容量は 54.2GW、洋上風力発電は 6.1GW であった。また、図 3.5.1-9 は 2019 年における世界の陸上風力発電の導入容量およびその上位 5 か国の割合を示している。上位 5 か国は中国、米国、英国、インド、スペインで、これらの 5 か国で全体の 70%を占めた。

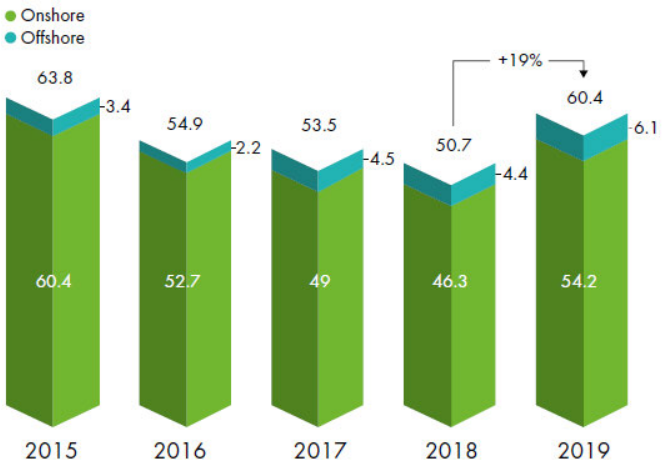


図 3.5.1-8 世界の風力発電（陸上、洋上）の 2015～2019 年の年間導入容量（GW）（出典：文献 9)）

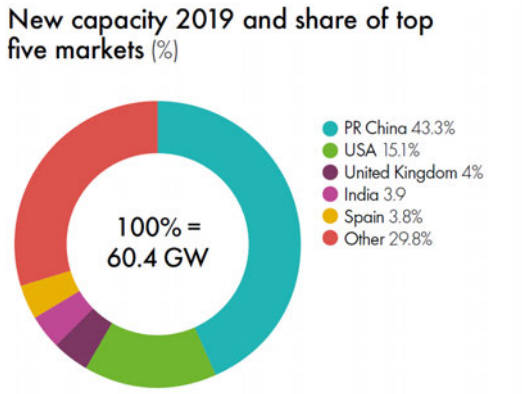


図 3.5.1-9 世界の陸上風力発電の 2019 年の年間導入容量と上位 5 か国の割合（出典：文献 9)）

図 3.5.1-10 に、世界の風力発電（陸上、洋上）の 2019 年までの累積導入容量の推移を示す。2019 年までの累積導入容量は世界全体で 651GW だった。特に全体に占める洋上風力発電の割合が伸びている。また、図 3.5.1-11 は、世界の陸上風力発電の 2019 年までの累積導入容量および国別の割合を示す。2019 年までの累積導入容量は 621GW だった。陸上風力発電の最大のマーケットである中国では、2019 年に 23.8GW が導入され、累積導入容量は 230GW となった。これは入札制度が導入されたことと、China-FiT の適用のために駆け込みで導入が進んだことが大きな要因である。2 位の米国では、2019 年に 9.1GW が導入され、累積導入容量は 100GW を超えた。

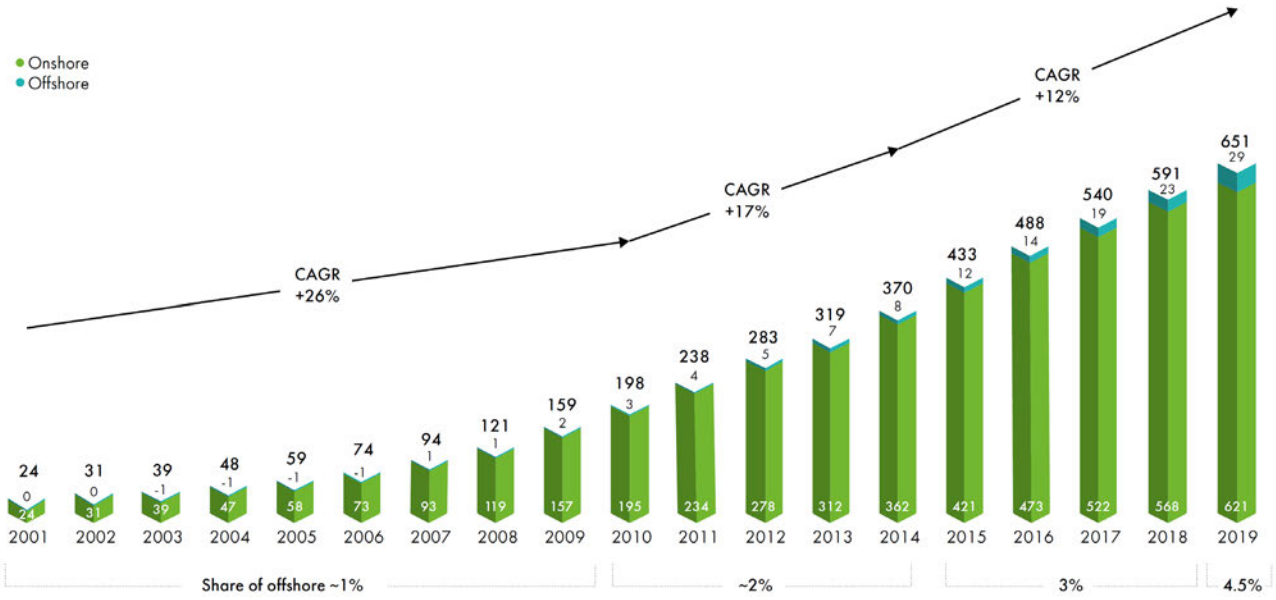


図 3.5.1-10 世界の風力発電（陸上、洋上）の 2019 年までの累積導入容量の推移（GW）（出典：文献 9)）

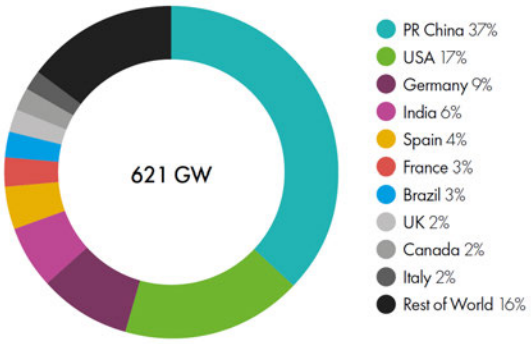


図 3.5.1-11 世界の陸上風力発電の 2019 年までの累積導入容量（出典：文献 9)）

(3) 2020 年の再生可能エネルギーをめぐる状況

2019 年までの世界における再生可能エネルギーの導入状況について概観したが、ここで 2020 年の COVID-19 対策のロックダウン等により世界経済が大きな影響を受けた中での再生可能エネルギーの状況について、少し触れる。

本節の冒頭で述べたように、IEA[1)]が 2020 年 11 月に発表した Renewables 2020 では、再エネ需要は全体として前年比で約 1％増加すると予測されている。これは、発電に利用される再エネが、電力システムにおける優先的な接続や設備の増加等により 7%増加するが、一方、経済活動の停滞で産業や輸送に使用されるバイオエネルギーやバイオ燃料が低下するため、全体としては 1%の需要増加になるということである。また、IEA[10)]が 2021 年 3 月頭に公表した速報 [10)]によると、2020 年の一次エネルギー需要は前年比で 4%減少し、化石燃料需要が落ち込んだため 2020 年の世界全体の CO_2 排出量が前年比 5.8%減少した一方、PV や風力に代表される低炭素燃料源が世界のエネルギーミックスに占める割合は、年間シェアとしては過去最高の 20%に達した。また、発電に

占める再生可能エネルギーの割合は、2019 年の 27%から 2020 年には 29%に拡大した。パンデミックの中においても再エネの強靭さが発揮されたと言える。

3.5.2 再生可能エネルギーのコスト動向

(1) LCOE コストの推移

図 3.5.2-1 は、IRENA[11]が 17,000 件のプロジェクトから収集したコストデータに基づいた、世界の各種再生可能エネルギーの 2010 年と 2019 年における LCOE コスト（Levelized Cost of Electricity）を示している。この報告によると、再生可能エネルギーの LCOE は過去 10 年間に急速に低下しており、太陽光発電（PV）の LCOE は 2010 年から 2019 年で 82%低下、集中型太陽熱発電（CSP）は 47%、陸上風力発電は 39%、洋上風力発電は 29%の低下となった。また、2018 年（昨年の報告（文献 12)）にあるグラフを参照）と 2019 年とでコストを比較すると、PV は 2018 年には 0.085 USD(2018USD)/kWh だったが 2019 年には 0.068 USD(2019USD)/kWh、CSP は 2018 年が 0.185 USD(2018USD)/kWh で 2019 年が 0.182 USD(2019USD)/kWh、洋上風力発電は 2018 年が 0.127 USD(2018USD)/kWh で 2019 年が 0.115 USD(2019USD)/kWh、そして陸上風力発電は 2018 年が 0.056 USD(2018USD)/kWh で 2019 年が 0.053 USD(2019USD)/kWh であった。一方、バイオエネルギー、地熱、水力と言った成熟した技術のコストは既に低い価格帯にあり、例えば水力発電は LCOE が 2010 年に 0.037 USD(2019USD)/kWh だったのが 2019 年には 0.047 USD(2019USD)/kWh と上昇したが、それでも新規の化石燃料による火力発電プロジェクトの中でも低い価格帯と同等レベルである。

上述したように、太陽光発電による発電コストは 2010 年から 2019 年までに大幅に低下した。図 3.5.2-2 にあるように、その主な要因はモジュール価格の低下によるが、バランス・オブ・システム（BoS）と呼ばれる周辺機器のコスト低下も貢献している。また設備利用率の向上も貢献している。

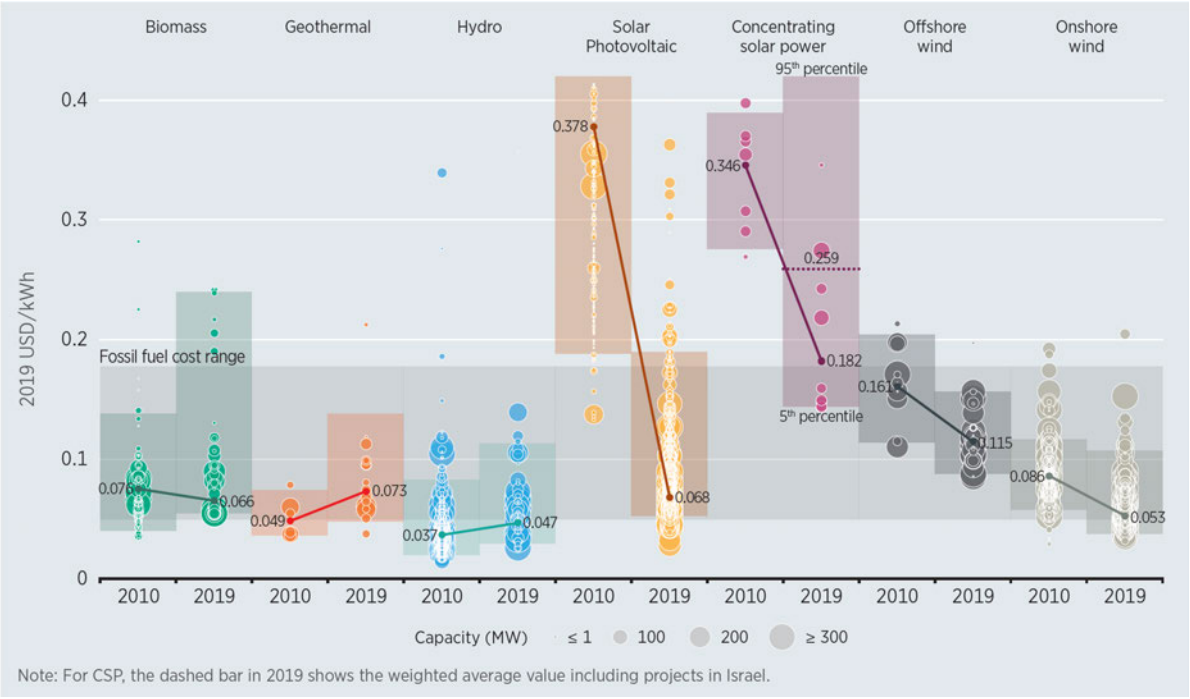


図 3.5.2-1 世界の各種再生可能エネルギーの LCOE コスト（出典：文献 11)）

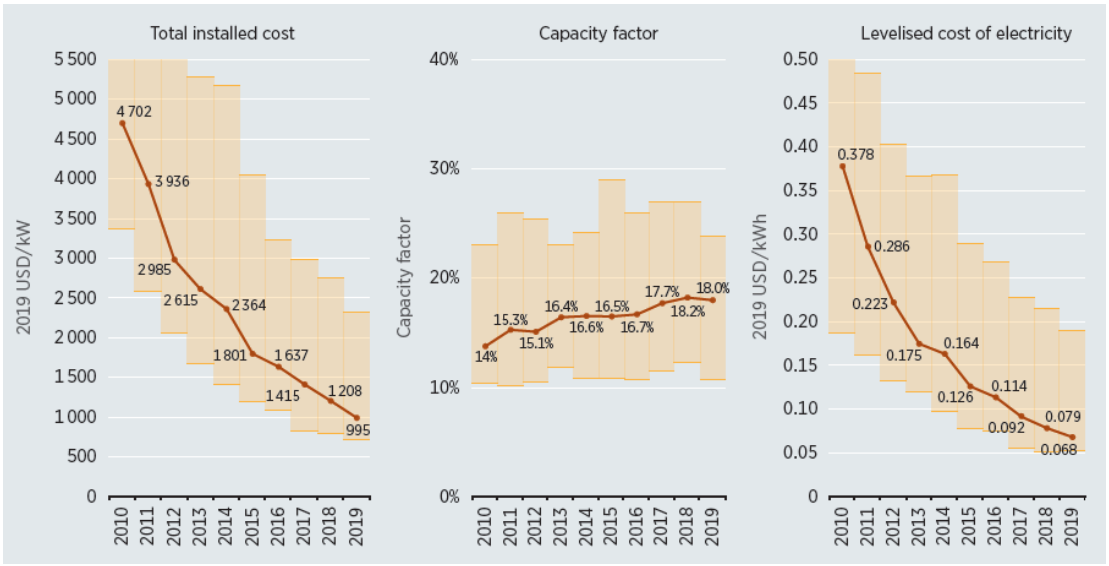
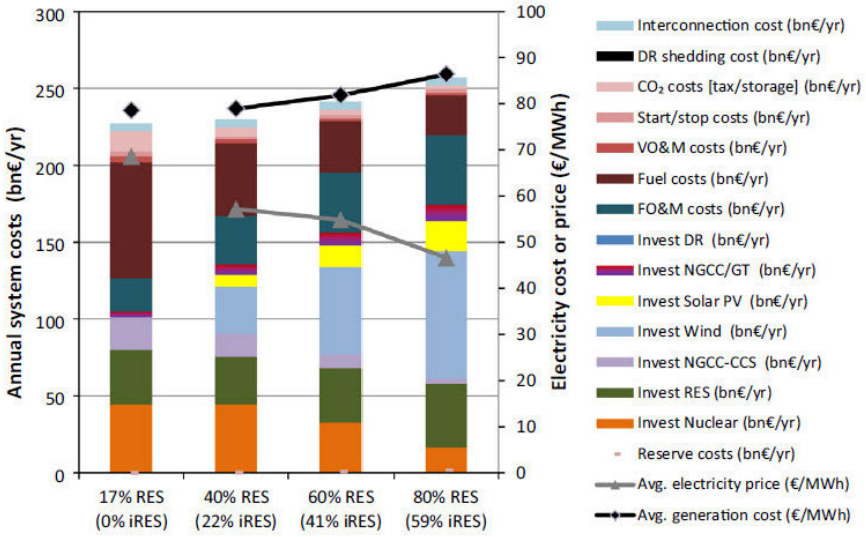


図 3.5.2-2 2010～2019 年における世界の PV の加重平均総設備費用、設備利用率、LCOE の推移（出典：文献 11)）

(2) 変動性再生可能エネルギー導入拡大による影響

PV、風力発電といった変動性再生可能エネルギー（VRE）の導入が進むに従い、従来の発電コストのみでなく、グリッドレベルのコスト、常時適正な発電能力を維持するためのプロファイルコスト等を含めたコストを検証することが重要であると言われてきている。松尾[13]による「再生可能エネルギー大量導入時の電力部門の経済性評価」では、LCOE は全ての電源のコストを統一的に評価するために OECD/NEA、IEA において用いられている計算手法であるが、今後 VRE の導入拡大により LCOE を超える指標の評価が重要となる、としている。そのような新たな指標の一つである統合費用（シ

ステムコスト）の評価として紹介している欧州の試算例では、最適点（コスト最小となる電源構成）は比較的 VRE 比率が低いところに存在し、VRE 比率が上がるにつれて総システム費用は緩やかに上昇する、とされている。



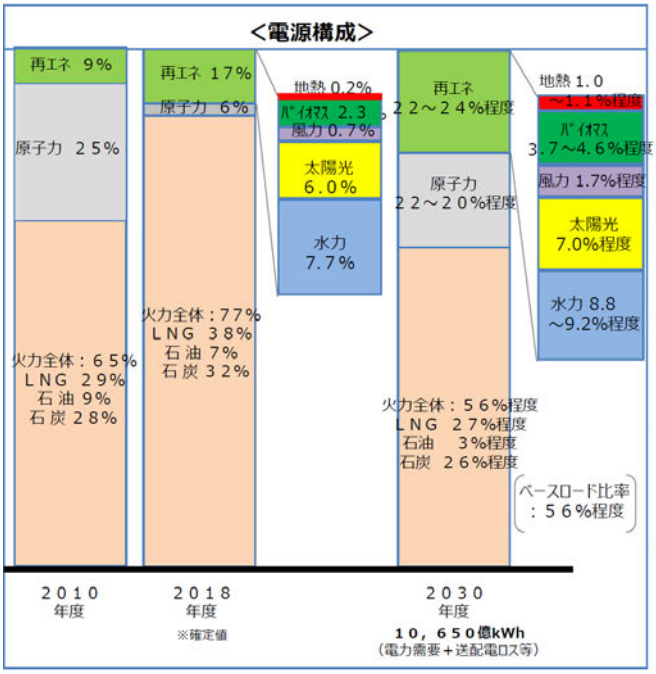
Total annual system costs in the core scenarios in Western Europe in 2050, as well as the average production cost and market price per MW h.

図 3.5.2-3　2050 年欧州における電力システムコストの推計例（出典：文献 14)）

注）iRES：VRE 比率

3.5.3　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。こうした努力により、2018 年度実績において日本全体の発電量に占める再エネ比率は 17%まで向上した。



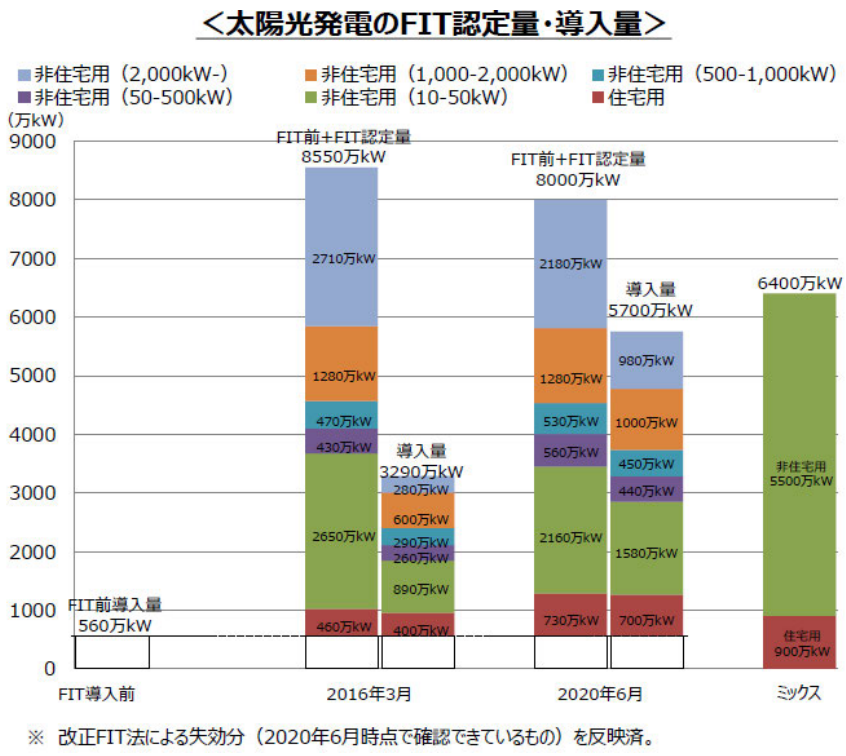
(kW)	導入水準 (20年3月)	FIT前導入量 +FIT認定量 (20年3月)	ミックス (2030年度)	ミックスに対する導入進捗率
太陽光	5,580万	7,990万	6,400万	約87%
風力	420万	1,160万	1,000万	約42%
地熱	59万	62万	140～155万	約40%
中小水力	980万	1,000万	1,090～1,170万	約86%
バイオ	450万	1,080万	602～728万	約68%

※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（2020年3月時点で確認できているもの）を反映済。
※地熱・中小水力・バイオマスの「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 3.5.3-1 日本における再生可能エネルギーの導入状況（出典：文献 15)）

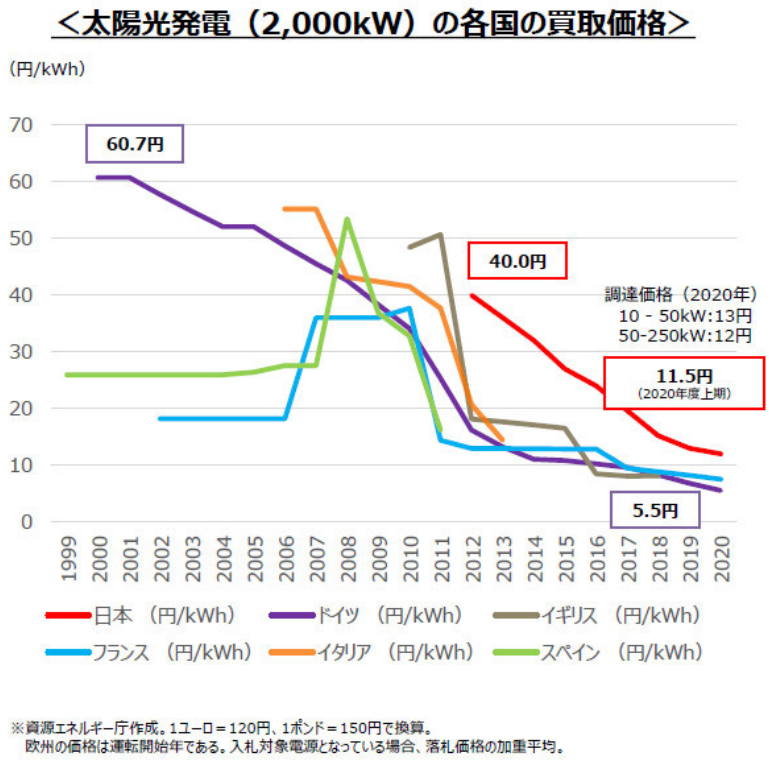
(1) 太陽光発電

エネルギーミックス（6,400 万 kW）の水準に対して、2020 年 6 月時点における FIT 制度開始前導入量+FIT 認定量は 8,000 万 kW、導入量は 5,700 万 kW となった。2020 年度の買取価格は、事業用（50kW 以上 250kW 未満）が 12 円/kWh 等だが、海外の買取価格と比べて高い。事業用（250kW 以上）は入札対象となっており、2020 年度上期入札（250kW 以上が対象）の加重平均落札価格は 11.48 円/kWh である。



※ 改正FIT法による失効分（2020年6月時点で確認できているもの）を反映済。

図 3.5.3-2 太陽光発電の FIT 認定量と導入量（出典：文献 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 3.5.3-3 太陽光発電（2,000kW）の各国の買取価格（出典：文献 16)）

(2) 風力発電

エネルギーミックス（1,000 万 kW）の水準に対して、2020 年 6 月時点における FIT 制度開始前導入量+FIT 認定量は 1,160 万 kW、導入量は 440 万 kW となった。洋上風力

発電については導入案件は少ないものの、今後の導入拡大が見込まれる。買取価格は、他国に比べて依然として 2 倍程度の高い水準である。

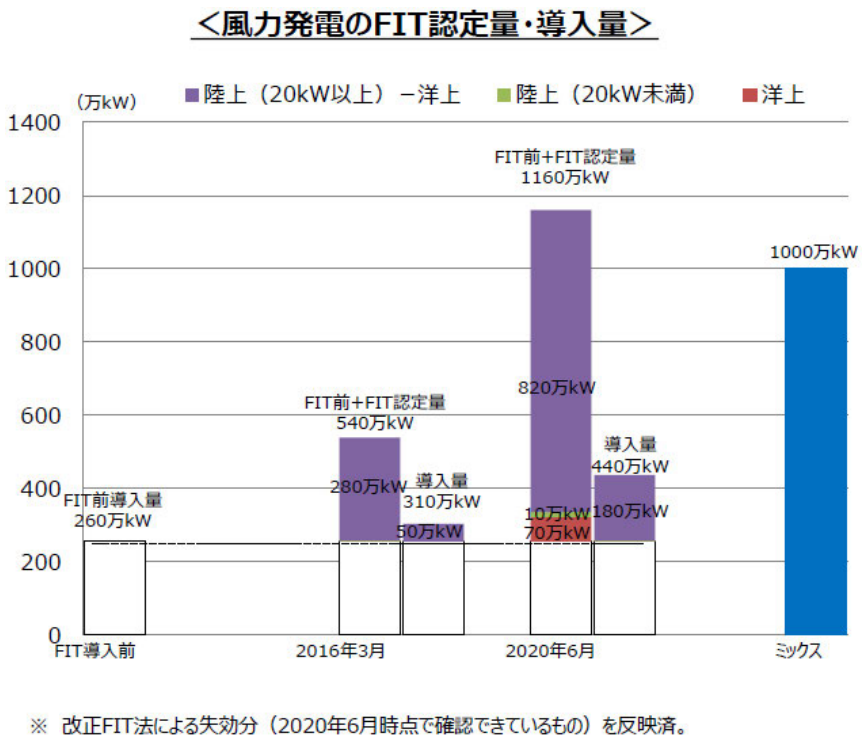


図 3.5.3-4 風力発電の FIT 認定量と導入量（出典：文献 17)）

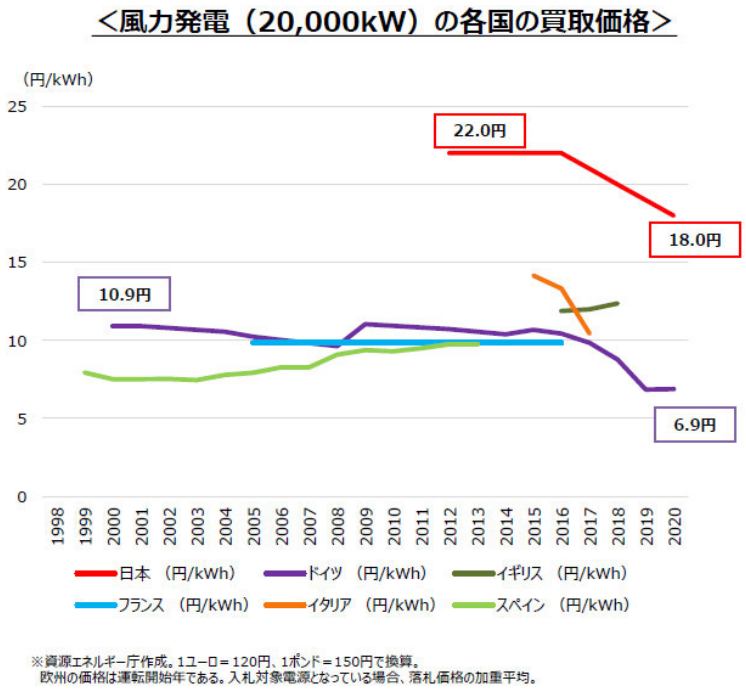


図 3.5.3-5 風力発電（20,000kW）の各国の買取価格（出典：文献 17)）

(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。政府の総合資源エネルギー調査会の関連小委員会の合同会議資料によると、2020 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 2.4 兆円となっている。これまでは再エネ比率 10%→16.9%（+6.9%）に約 2 兆円/年の賦課金を投じ、今後 7.1%を+約 1 兆円/年で実現する必要がある。今後、賦課金総額を抑制・減少させていくためには、早期の価格引き下げ、FIT からの自立化が重要である。

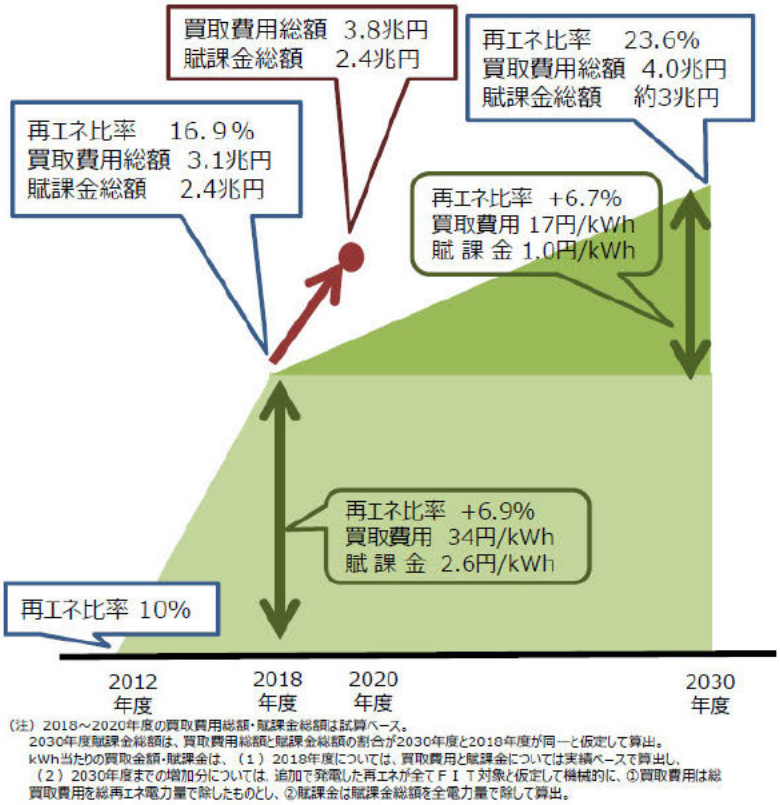


図 3.5.3-6 FIT 制度における買取費用総額、賦課金の推移（出典：文献 15))

3.5.4 日本における再生可能エネルギー拡大のための系統対策

大幅な排出削減を目指す上で、太陽光発電、風力発電の変動性再生可能エネルギー（VRE）の一層の導入拡大が不可欠である。しかしながら、VRE の導入が拡大すると、需給バランスを確保するために、VRE の出力制御を行う必要性が高まる。特に日本の電力系統は北海道、九州等との接続が送電線の容量制約を受けやすく、出力制御が必要となりやすい。出力制御が多くなると、VRE の事業採算性が低下する。コスト抑制のため、蓄電池、水素、デマンドレスポンス（DR）などの対策があり得るが、出力制御と比較しながら、いずれが費用対効果が高い対策かを見極めながら導入していくことが必要である。ただ、いずれにしても現状では相当高い費用が必要となると見られる。更に VRE が拡大していけば、慣性力の低下の懸念も生じる。

そのため、政府は、系統の増強も含めた総合的な対策の検討を進めている。当然ながら系統の増強も大きな費用と建設に長い時間を要する。そのため、将来の VRE 等の電源ポテンシャルを踏まえ、プッシュ型で系統形成を行う方針とし、そのためのマスタープランの策定を行い、その増強費用を全国で支える仕組みの整備を試みている（図 3.5.4-1）。系統増強の判断にあたっては、費用便益評価を実施し、便益が費用を上回る系統増強について、具体的な整備の検討を進める方針とした。

また、既存系統の有効活用の観点から、系統混雑時に出力抑制を前提とした上で、新規系統接続を認める「ノンファーム型接続」を試験的に開始したが、域内基幹系統についてその全国展開を行うことも決定した（図 3.5.4-2）。また、VRE は限界費用がゼロであるため、接続された電源はなるべく出力抑制させない方が経済合理的であるため、これまでは先に系統接続した電源による利用が優先されるという利用ルールとなっていたが、それを再エネが火力よりも優先的に系統を利用できるように、利用ルールの見直しを進めている（図 3.5.4-3）。

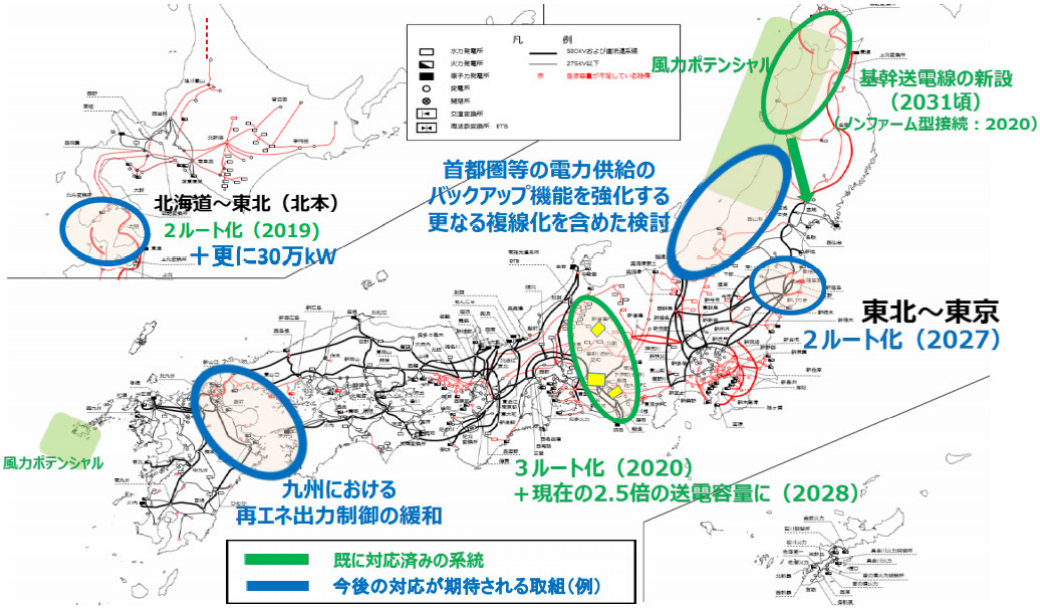
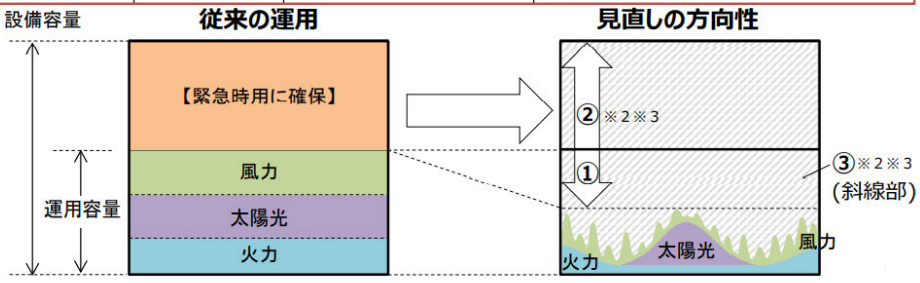


図 3.5.4-1　プッシュ型の系統形成（出典：文献 15)）

	従来の運用	見直しの方向性	実施状況
①空き容量の算定	全電源フル稼働	実態に近い想定（再エネは最大実績値）	2018年4月から実施 ※1 **約590万kW**の空き容量拡大を確認
②緊急時用の枠	半分程度を確保	事故時に瞬時遮断する装置の設置により、枠を開放	2018年10月から一部実施 ※1 **約4040万kW**の接続可能容量を確認
③ノンファーム型の接続	通常は想定せず	一定の条件(系統混雑時の制御)による新規接続を許容	**2019年9月から千葉エリア、2020年1月から北東北エリア及び鹿島エリア**において**先行的に実施**。その他の地域でも、今後、**展開を図っていくことが必要**。



※1 最上位電圧の変電所単位で評価したものであり、全ての系統の効果を詳細に評価したものではない。
※2 周波数変動等の制約により、設備容量まで拡大できない場合がある。
※3 電制装置の設置が必要。

図 3.5.4-2 日本版コネクト＆マネージとノンファーム接続の全国展開（出典：文献15)）

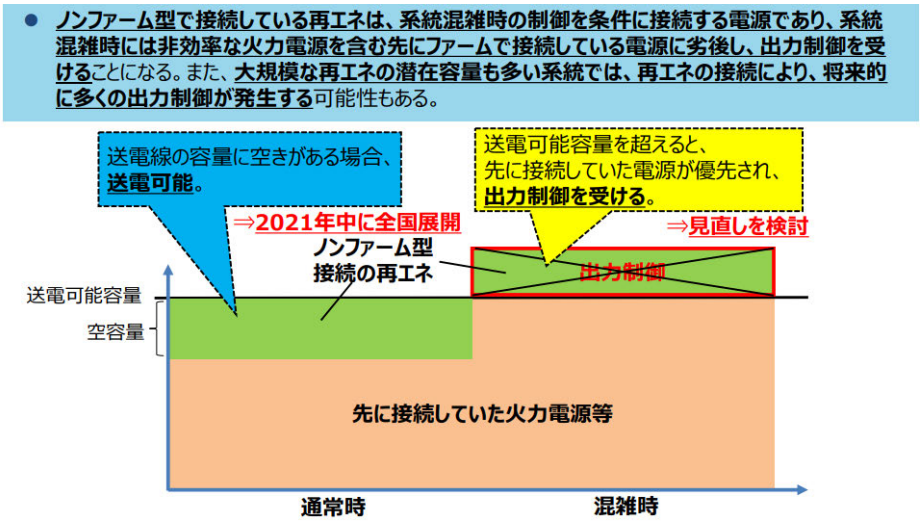


図 3.5.4-3 ノンファーム接続と送電線利用ルールの見直し（出典：文献15)）

VRE を中心に再エネのコスト低減は大きく進展してきており、部分的には競争力を持ってきている。しかし、導入量を大幅に拡大していくと、条件の悪い地点の VRE を活用していくこととなり、単価の上昇要因となり得る。また、導入量を増せば、出力抑制が必要となってくる。できるだけ費用効率的に再エネを拡大する必要がある。そのためには、系統利用のルールを適正化することは重要であり、更に、系統増強、蓄電池、水素、DR 等、様々な方策の中から、総合的に費用対効果が高い対応策見出していくことが求められる。ただし、民主国家である以上、過去に決めたルールのルール変更によって生じ得る損失への配慮も重要であり、総合的に配慮した上で、適切な再エネ拡大とそれに伴って生じる必要な対策をとっていくことが重要である。

参考文献（第 3.5 節に関するもの）

1) IEA, Renewables 2020
2) IEA, World Energy Outlook 2016
3) IEA, World Energy Outlook 2017
4) IEA, World Energy Outlook 2018
5) IEA, World Energy Outlook 2019
6) IEA, World Energy Outlook 2020
7) IRENA, Renewable Capacity Highlights（2020）
8) IEA, PVPS Trends in Photovoltaic Applications 2020
9) GWEC, Global Wind Report 2019（2020）
10) IEA, Global Energy Review: CO_2 Emissions in 2020, https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020
11) IRENA Renewable Power Generations Costs in 2019（2020）
12) 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） 平成 31 年度報告書（2020）
13) 日本エネルギー経済研究所 松尾雄司 :「再生可能エネルギー大量導入時の電力部門の経済性評価」、『温室効果ガス低減に向けた長期発展戦略の策定のための情報と視点の整理と方法論』シンポジウム（2019）
14) Brouwer et al., Least-cost options for integrating intermittent renewables in low-carbon power systems, Applied Energy, 161, 48-74 (2016)
15) 総合エネルギー調査会 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　基本政策分科会 再生可能エネルギー主力電源化制度改革小委員会　合同会議資料「再エネ型経済社会の創造に向けて ～再エネ主力電源化の早期実現～」（2020）、https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/018_02_00.pdf
16) 調達価格等算定委員会（2020） https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/063_01_00.pdf
17) 調達価格等算定委員会（2020） https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/063_02_00.pdf
18) 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)

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

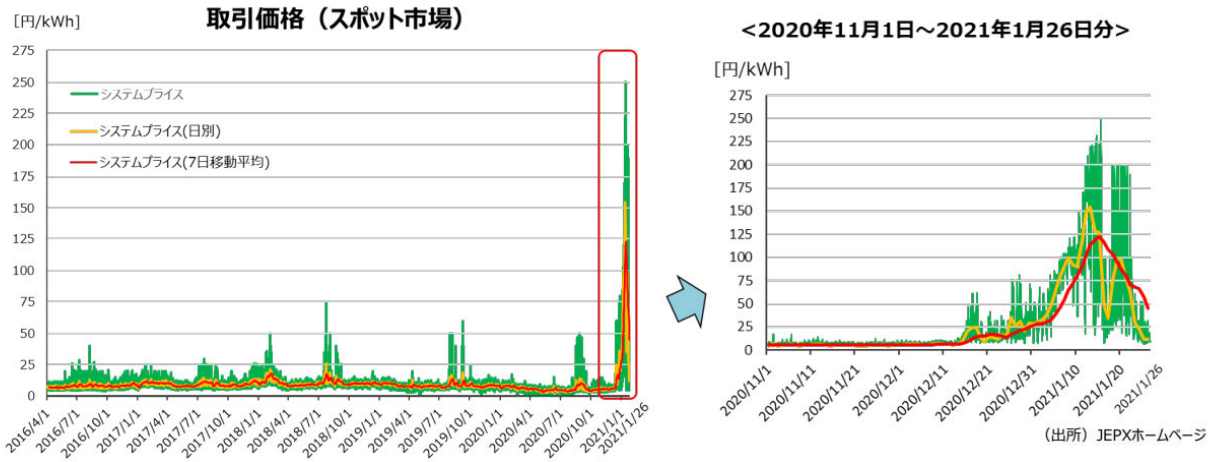
日本では、コスト効率化や電力以外の事業との融合による新たなサービスの創出等を狙って、電力システム改革が行われてきている。また、ガス事業についても同様にガスシステム改革が行われてきている。図 3.6.1-1 は、電力システム改革後の事業形態を示している。全面自由化後は、発電事業、送配電事業、小売電気事業の 3 事業に分割され、送配電事業については、中立性を担保するために 2020 年 4 月に法的分離が行われたところである。送配電部門は、引き続き、総括原価方式による地域独占・料金規制が維持されるが、発電事業、小売事業は全面自由化で、一部、小売りの規制料金（経過措置料金）は残るものの、一連の電力システム改革は一旦終了した。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」という新たな政策目標が掲げられたこともあり、それと整合的な制度改革が必要となっている。



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)]

一方、地球温暖化対策という点からは、電力システム改革は、新たに難しい課題を提示してきている。そして、それは、先行して自由化を進めてきた欧米でも同様の課題に直面している。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 30～40%程度となっている。図 3.6.1-2 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。これは、寒い日が連続したこと、降雪により太陽光発電の出力が低迷したこと、原子力発電の定期点検と重なったこと、LNG 供給が複合的な要因で滞ったことなどが重なったことにより、生じたと考えられる。市場メカニズムの活用という点では、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、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。市場活用の難しさが露呈したと言え、引き続き、制度の改良の必要性があると考えられる。



	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度(～1/27)
平均価格（円/kWh）	16.5	14.7	9.8	8.5	9.7	9.8	7.9	12.1
最高価格（円/kWh）	55	44.6	44.9	40.0	50.0	75.0	60.0	251.0
200円/kWh超えの時間帯	0	0	0	0	0	0	0	56
100～200円/kWhの時間帯	0	0	0	0	0	0	0	287
(参考)0.01円/kWhの時間帯※	0	0	0	0	0	0	22	224

図 3.6.1-2 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 [1)]

政府は、図 3.6.1-3 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、また、需給調整市場は 2021 年 4 月開設予定となっている。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。

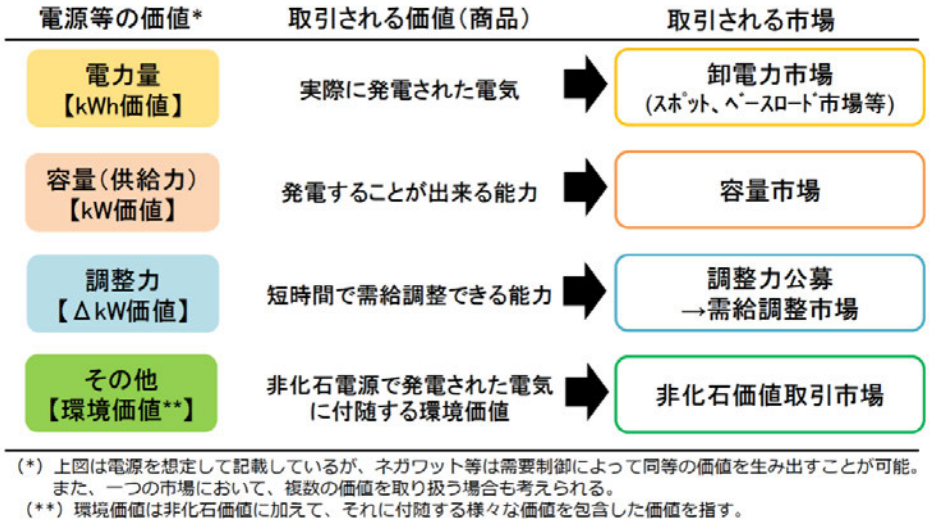


図 3.6.1-3 日本における導入済みもしくは導入予定の電力関連の取引市場 [1)]

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 3.6.1-4）。固定費は回収しにくいが、図 3.6.1-2 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いくこととなる。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 3.6.1-5）。そうすると、例えばガス複合発電のような限界電源となりやすい電源も、設備利用率が低下して、投資回収が難しくなってしまう。また、限界電源になりにくい電源（石炭火力など）でも、市場価格が低下して、売電収入が低下し、利益を得にくい構造になってしまう。結果として、火力発電を中心とした、電力の安定供給のために必要な電源が過小となってしまう。これは「ミッシングマネー」問題と言われる。

そこで、政府は、容量市場を創設し、稼働していない電源でも、kW 価値に応じて収入が得られる仕組みを創設し、2020 年に開始した。これにより、固定費の一部は、容量市場で実際の運用の 4 年前というタイミングで、予見性を高めることで、電源の維持をして、持続的な電力システムを構築しようとしてきている。そして、開始した、2020 年度容量市場オークション結果は図 3.6.1-6 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。つまり、電力システム改革下では、不採算になりやすい電源は退出させ、利益を確保しようとする中で、相当高い価格でなければ維持が難しくなっているという状況と考えられる。ただし、制度的な問題も残っていると考えられる。特に、4 年後という期間がある中で、4 年後に確実に電力供給できるかどうかが不確実であると、オークションに参加できない電源が一定程度あったと考えられる（特に自家発や原子力）。そういった確実性はないものの、期待可能な電源の入札をどう確保するかは、安定供給と経済性の両方を睨みながら、より良い制度設計がないかの検討が必要と考えられる。

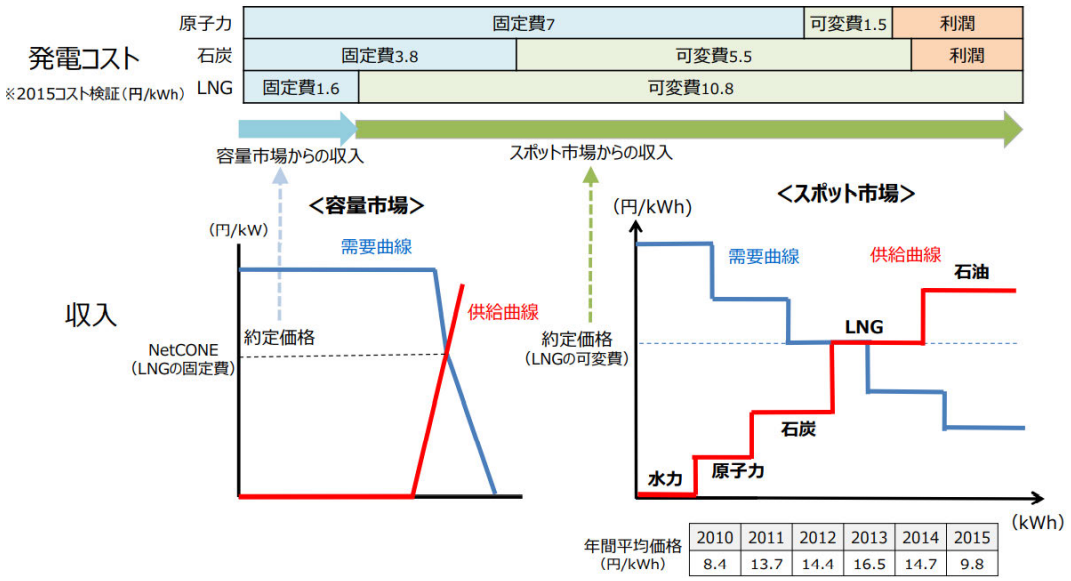


図 3.6.1-4 発電投資回収のイメージ [1)]

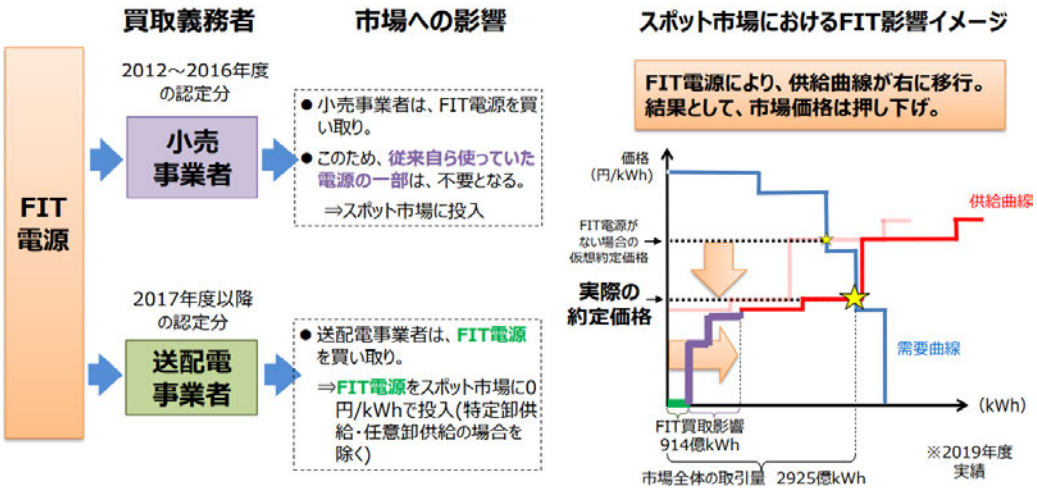


図 3.6.1-5 スポット市場における FIT の影響 [1)]

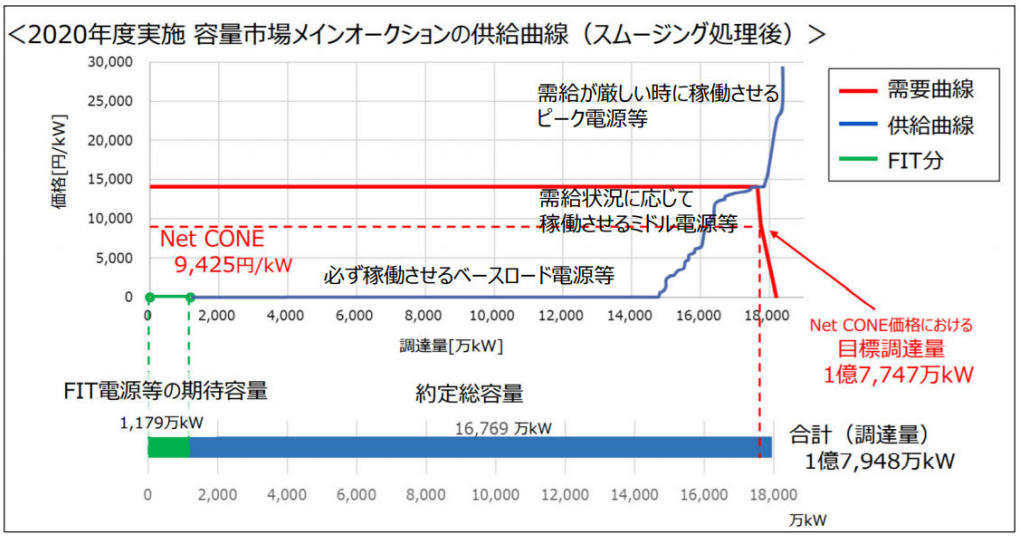


図 3.6.1-6 2020 年度容量市場オークション結果 [1)]

また、電源投資の点からも、この容量市場についても課題が残っている。容量市場では、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（図 3.6.1-7）。しかし、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 3.6.1-8 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。したがって、現在、設計されている市場だけで、今後の温暖化対策として、また安定的な電力供給のための投資を促す仕組みとして十分なのかについて、引き続き、検討を行う必要性があると考えられる。

- 北海道のブラックアウトの教訓も踏まえ安定供給を支える多様な電源・供給力の確保が必要。特に、**設備年齢（ビンテージ）が高経年化**する中で、**再エネの大量導入**に対応していくためにも、**中長期的に適切な供給力・調整力のための投資を確保し、最新の電源の導入や多様化・分散化を促進していく**ことが必要。
- 電力自由化による競争活性化は電力料金の抑制に貢献しているが、**償却が終わった効率性の低い老朽電源が温存され、多額の資金が必要な電源への投資が進まない**可能性。

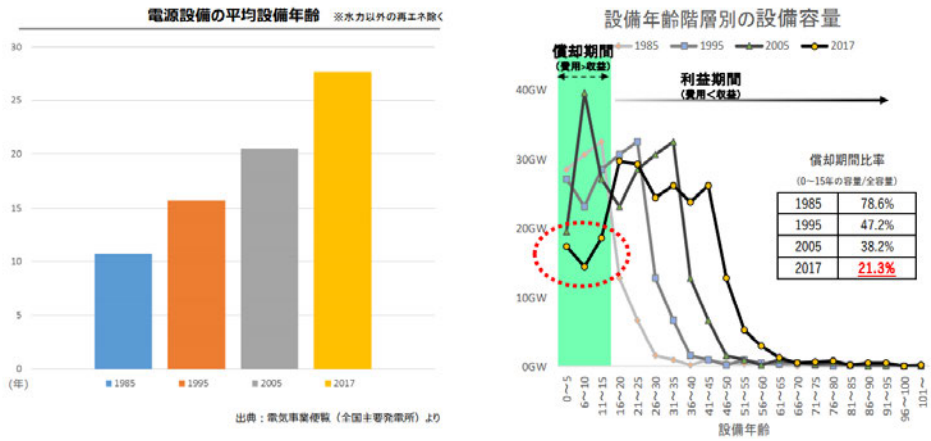


図 3.6.1-7 設備の高経年化の課題 [1)]

- 民間事業者の投資意思決定においては、「標準ケース」、「アップサイドケース」、「ダウンサイドケース」といった各ケースの発生確率を分析した上で、リスクに見合うだけの収入見通しがあれば、投資が行われるのが一般的。
- 発電事業は初期に多額の投資を伴うことや、前頁の発電事業者の収入構造を踏まえれば、**スポット市場**からの将来収入の**ダウンサイドリスクが大きい場合には、投資が十分に進まない可能性**がある。
- 電源投資を安定的に確保する観点からは、**将来収入のダウンサイドリスクへの対応が課題**として挙げられるのではないか。

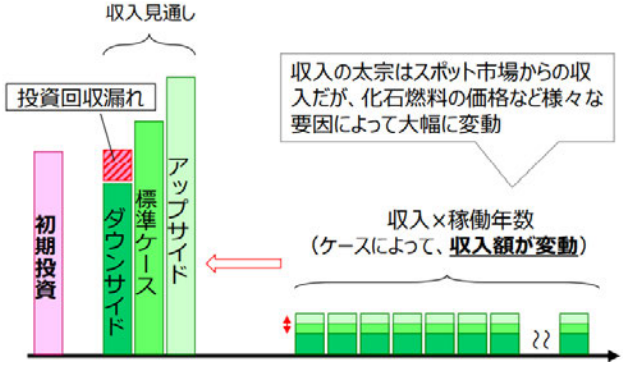


図 3.6.1-8 投資リスクの課題 [1)]

なお、石炭火力については、政府は、非効率石炭火力の 2030 年頃までのフェードアウト方針を決定した。温暖化対策の点から必要な方向性ではあるが、製造業の生産活動と一体的に運転している自家発石炭火力の扱いなど、難しい課題である。政府は、規制的措置を検討しつつ、容量市場における支払いを非効率石炭火力についても減額させる方向で調整中である。しかしながら、先に指摘した 2021 年 1 月に発生した、スポット市場の価格高騰を見ても、LNG に依存し過ぎるとリスクが大きくなる場合もあり、適切な電源ミックスも重要であり、いかに複数の政策課題をバランスさせるかは大きな課題である。

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。個別の災害について、CO_2 排出増との因果関係は明確になっているわけではないが、関連性はあると考えられる。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。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。

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、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することとなった。

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であり、実現が望まれるところである。

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)

3.7 サステナブルファイナンスの動向とモデル分析例の整理

3.7.1 サステナブルファイナンスに関する背景と動向

2015 年に国連で持続可能な開発目標（SDGs）が採択され、また同年に国連気候変動枠組み条約においてパリ協定が合意された。SDGs の達成及び大幅な気候変動緩和に向けた低炭素技術への投融資を促進するためには公的資金のみでは不十分であり、民間資金を動員することが不可欠である。そのため、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。

パリ協定の目標を達成するためには脱炭素社会の実現に向けた大規模なインフラ投資が必要である。IEA WEO 2019 によると、2019 年から 2040 年までに世界全体で累積 58 兆 7,950 億ドル（公表政策シナリオ）から 71 兆 3,290 億ドル（持続可能な開発シナ

リオ）のエネルギー関連（燃料、発電及びエンドユース）投資が必要であると推計している[1)]。

また、環境関連に対するファイナンスの選定基準に関しても近年議論が進展している。2014年にグリーンプロジェクトに該当する資金を調達するために発行される債券に関するガイドライン（グリーンボンド原則：GBP）を国際資本市場協会（ICMA）が策定したことを契機に、近年グリーンボンド市場が拡大している。

さらに、欧州委員会が設置したサステナブルファイナンスに関するテクニカル・エクスパート・グループ（TEG）は2019年6月18日に、環境関連の持続的な経済活動・技術の分類を示した「EU タクソノミー[2)]」を発表した。これはサステナブルファイナンス推進を目的としたアクションプランの一部であり、これまでサステナビリティファイナンスの定義が存在しなかったことから、一つのファイナンス指針となるものである。

一方、イングランド銀行のマーク・カーニー総裁は、これらのグリーンボンド基準及びEUタクソノミーの取り組みを肯定しつつも、グリーン事業に対するファイナンスは低炭素への移行を実現するためには不十分であると言及している。また、これらの基準はグリーンかブラウンかの二進法的になっているため、持続可能な投資を主流にするためには「50段階の意味合いのグリーン」を示すより豊富なタクソノミーが必要であると主張している[3)]。

炭素集約型の産業における低炭素化への移行に向けて、その資金調達方法として掲げられているのがトランジション・ファイナンスである。現在のサステナブルファイナンスの枠組みは主に既にグリーンな資産に向けられており、温室効果ガス排出量の多い産業における低炭素経済への移行活動に対する投資が大幅に少ないことが懸念されている。以下では、サステナブルファイナンスの取り組みについて主に緩和における発電・エネルギー分野のグリーン活動及びトランジショナル活動の定義に焦点をあてて考察し、定量分析に向けたシナリオ策定の検討を行う。

3.7.2 グリーン・ファイナンスの使途：グリーンボンド原則とEUタクソノミー

(1) グリーンボンド原則（GBP）

2020年11月現在の最新版であるグリーンボンド原則（2018年版）の中で定められた、エネルギー関連分野の適格性のあるグリーンプロジェクトは主に以下が挙げられている[4)]。

- 再生可能エネルギー（発電、送電、装置、商品を含む）
- エネルギー効率（エネルギー貯蔵、地域暖房、スマートグリッド、装置など）
- 汚染防止及び抑制（大気排出の削減、温室効果ガス抑制、省エネ・省排出型の廃棄物発電など）
- クリーン輸送（電気自動車、ハイブリッド自動車、公共交通、鉄道など）

GBPはグリーンボンドに対する国際的な基準として世界中で広く認識されており、後述するトランジション・ファイナンスにおいても参照とされている基準である。

(2) EU タクソノミー規則と最終報告書

① EU タクソノミー規則

2018 年 3 月に欧州委員会は「Action plan: Financing sustainable growth」を発表し、これは 10 項目からなる行動計画で構成される。アクションプランを次々に実行するために 2018 年 5 月に 3 つの法案が提出された。その一つとして持続可能な投資を促進するフレームワークの確立を目的とした「タクソノミー規則（EU 規則 2020/852)」がある[5)]。

タクソノミー規則は 2020 年 4 月に欧州理事会で修正案が採択、2020 年 6 月 17 日に欧州議会で採択された。その後、タクソノミー規則は詳細な技術スクリーニング分類（つまりタクソノミー最終報告書）を含む委託法によって補完される。

タクソノミー規則の中には気候変動緩和に対する実質的な貢献（第 10 条）として以下の経済活動を分類している。

(i)パリ合意の長期気温目標に整合的な温室効果ガス濃度安定化に大いに貢献する経済活動

a. 再生可能エネルギーによる発電、送電、蓄電、配電及び利用
b. エネルギー効率改善（但し、固体化石燃料を使用する発電は除く）
c. クリーンまたは気候中立なモビリティ
d. 持続的かつ再生可能な材料への転換
e. 環境的に安全な炭素の回収・利用（CCU）及び炭素回収・貯留（CCS）の利用増加
f. 土地による二酸化炭素吸収の強化
g. エネルギーシステムの脱炭素化を可能にするエネルギーインフラの確立
h. 再生可能あるいは炭素中立な材料を用いたクリーン及び効率的な燃料製造
i. a と h に関する活動を可能にするもの

(ii)トランジショナルな活動

技術的及び経済的に実現可能な低炭素の代替手段が無い場合、気温上昇を 1。5℃以内に抑えるための経路と整合的な気候中立経済への移行を支援する経済活動であれば気候変動緩和に実質的に貢献するとみなされる（固体化石燃料からの排出を段階的に減らすことも含む)。以下はトランジション活動の要件である。

a. 業界でベストパフォーマンスに相当する温室効果ガス排出レベルをもつ活動
b. 低炭素化代替手段の開発と展開を妨げない活動
c. 資産の経済寿命を考慮し、炭素集約型資産のロックインにつながらない活動

尚、他の活動を 1 つ以上の環境目的に実質的に貢献することを「可能にする」活動（第 16 条）を定義、そして技術的スクリーニング分類の条件として固体化石燃料による発電が環境的に持続可能な経済活動に適合しないことを保証することが謳われている（第 19 条 3 項)。

② EU タクソノミー最終報告書

2020 年 3 月 9 日に EU の Technical Expert Group on Sustainable Finance （TEG）は、EU タクソノミーに関する技術報告書[2)]を公表した。今回のタクソノミーで考慮している環境目的は主に気候変動の緩和及び適応である。緩和に関する電力、ガス、蒸気、空調供給に関しては、発電 1kWh あたりのライフサイクルの温室効果ガス排出量の閾値は 100gCO_2e/kWh だが、2050 年にはゼロとなるよう 5 年毎に基準を厳しくしていくものであり、エネルギー発生技術に関係なく共通の閾値である。表 3.7.2-1 は発電部門における技術スクリーニング分類を示したものである。太陽光、風力、水力、ガス燃料、海洋エネルギー、地熱、バイオエネルギーによる発電は含まれているが石炭及び石油火力発電はタクソノミーに含まれていない。ガス火力発電（天然ガスに限定せず）は CCS 付随の場合タクソノミーの下で削減活動が適合するかどうかを示さなければならない。

表 3.7.2-1 技術スクリーニング分類：気候変動の緩和

経済活動	気候変動緩和		
	Own performance 活動自体が環境目的に貢献	Transitional activities 気候中立経済への移行を促進する活動	Enabling activities 他活動による環境目的への貢献を可能とする活動
太陽光	✓		
集光型太陽熱	✓		
風力	✓		
海洋エネルギー	✓		
水力	✓	✓	
地熱	✓	✓	
ガス火力	✓	✓	
バイオエネルギー	✓	✓	
DAC			✓
CO_2 回収			✓
CO_2 貯留	✓		

（出典）EU TEG (2020) [2)]本編 p.57 を基に著者作成

さらに、原子力発電はゼロエミッションであるが、一方で高レベル放射性廃棄物の長期的なマネジメントに関する課題があるため現時点ではリストに掲載されておらず、今後、課題に関する更なる技術作業を行い検討される。

以上より EU タクソノミーでいわゆるグリーンの発電として認められる条件は非常に厳しいものであり、トランジショナルな発電に関してもガス火力に対しては条件つきであるものの、水力及び地熱、バイオエネルギーといった再生可能エネルギーの発電が含まれることからトランジショナルな発電として認められる条件も比較的厳しいことがわかる。

3.7.3 トランジション・ファイナンス

既に発行されたトランジション・ボンドの事例をみると、2017 年に香港の電力会社キャッスル・ピーク・カンパニー・リミテッド（CAPCO）の「エネルギー・トランジション・ボンド」は、親会社の CLP ホールディングスが策定した「気候アクション・ファイナンス・フレームワーク（CAFF)」に基づいて、石炭火力から 550MW 規模のガス発電（世界で最も効率が良いガス火力発電の一つである最新の H クラスの CCGT 技術使用）への建設に対し（償還年数を 10 年とした）5 億ドルのエネルギー・トランジション・ボンドを発行している[6]。CAFF に基づくとエネルギー・トランジション・ボンドは、再生可能エネルギーが限られた市場における石炭火力発電からガス火力発電への転換によりベースロードで 450gCO_2/kWh 以下の CO_2 排出量を達成する場合に発行される。一方、「ニュー・エネルギー・ボンド」は、再生可能エネルギー、エネルギー効率改善、低炭素輸送インフラが使途として挙げている。

その後、2019 年以降、様々な機関においてトランジション・ファイナンスに対する取り組みが開始した。例えば、2019 年 6 月に仏アクサ・インベストメント・マネージャーズは現状ではブラウン企業ではあるが将来的にはグリーン企業に移行するという目標を掲げている企業への資金提供を目的とした独自の「トランジション・ボンド」のガイドラインを公表した[7]。ガイドラインによると、対象は「素材、採掘、化学、輸送等の温室効果ガス集約型産業」において「現段階では資金調達が可能なグリーン資産を保有せず将来もそのような資産を持てない可能性はあるが、自社の事業活動や製品・サービスの温室効果ガス排出量を削減するための資金調達が確実にある産業」である。調達資金が適格な気候移行関連活動に相当するプロジェクトに使用されるものであり、例えば、エネルギー関連についていえば、炭素回収・貯留（CCS)、ガスを燃料とした熱電併給（CHP)、より炭素強度の低い燃料への切り替え可能なガス輸送インフラ、石炭からガスへの燃料転換（CO_2 排出回避実績があるもの)、廃棄物のエネルギー転換である。

さらに、2019 年 7 月、 フランスの金融機関であるクレディ・アグリコルは 1 億ユーロ相当の「トランジション・ボンド」を発行した[8]。資金使途は、低炭素経済への移行に貢献しうる炭素集約的な産業におけるプロジェクト（LNG 燃料船、石炭火力発電に依存する国におけるガス火力発電への移行、エネルギー効率が高い産業）である。また、2020 年 3 月に英国のガス供給会社のカデントは「トランジション・ボンド」を発行した[9]。資金使途はガス送配電網の改修（水素及び他の低炭素ガスの統合を促進するためのパイプラインの取替、及び現存する既に水素対応がなされているガスパイプラインの改修・取替が対象で、ガス網拡大は除外とされている)、再生可能エネルギー、クリーン輸送、省エネ建物である。

さらに、2020 年 12 月にグリーンボンド原則の策定などを行っている国際資本市場協会（ICMA）は温室効果ガス排出量が多いブラウンな産業の脱炭素化を実現するため金融的支援を行う「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」[10]を発表した。当該ハンドブックは、トランジション・プロジェクトの定義やタクソノミーを提示せず、開示要素（戦略、環境面の重要課題、科学的根拠、透明性）が明確

化されている。その後、2021 年には中国銀行（BOC）が「クライメート・トランジション・ボンド」[11]を発表しており、上記 ICMA のハンドブックに従い、EU タクソノミーを考慮した上で、資金使途プロジェクトを提示している。その中には、ガス火力発電と熱供給が含まれている。

既に実施されているトランジション・ボンドの事例の外部評価によると現地の再生可能エネルギー発電状況が不利である場合は、ガス火力発電は石炭と再生可能エネルギーをつなぐ燃料（bridging fuel）と国際的に認知されていること、そして現地の政府の政策に準ずるものであれば、石炭火力からガス発電への転換は環境面において便益があると評価されている [12]。そのため、石炭火力発電から化石燃料であるガス火力発電への転換もトランジション・ファイナンスの対象となっている。

全体的に現状ではグリーン・ファイナンスとトランジション・ファイナンスの境界に関する統一的な定義は存在しない。石炭発電からガス発電への移行を認めるかどうかははっきりと定義されておらず個別事例によるため、「グリーンウォッシング」の可能性を指摘する意見もある。

3.7.4 サステナブルファイナンスの定量分析例

表 3.7.4-1 は金融部門を考慮した経済モデルを用いた分析例である。

表 3.7.4-1 金融部門を考慮した定量分析例

著者	分析モデルタイプ	結論
Dafermos et al. (2017)[13]	Stock-flow-consistent model (SFC)	従来型の投資が減少するため経済活動が減少、また、グリーン投資の割合が増加するため CO_2 排出量は減少。
Safarzynska and van den Bergh (2017)[14]	エージェントベースモデル	再エネの投資増加は銀行間の連結性を減らし（一部の銀行に多額のローンが集中）、銀行の失敗の確率を上げる。最適解として、ガス（CCGT）と再エネのコンビネーションが金融システムを阻害しない。
Glomsrød and Wei (2018)[15]	CGE	石炭産業あるいはエネルギー多消費産業における企業利益が減少するが、労働集約的な産業（サービス、製造、農業）における経済活動及び賃金が増加し、それらが GDP を BAU 比で増加させる（GDP は企業利益と給与によって構成される）。
Paroussos et al. (2020)[16]	CGE	イタリアを対象とし、低コストの資金源（貸出金利が低い）が利用可能な場合の経済評価を推計。低炭素エネルギーシステムの実現には、低コストのファイナンスへの継続的なアクセスが必須。

金融部門を明示化した経済モデル分析は増えているが、金融部門を明示化する統一的な方法は現在のところ存在していない。モデル構造上、技術別及び地域別の詳細な利子率の変化（つまり、トランジション・ファイナンスを考察する前に必要となる要素）による影響を表現するのは困難であるといえる。

3.7.5 サステナブルファイナンスの定量分析の検討：DNE21+モデルを用いて

脱炭素化社会の実現には、排出量が多い産業における低炭素な活動への移行を促進することが必要である。また、各国経済・産業構造の違いも考慮し、各国の政策基準に適合する削減活動に対してもファイナンスの優遇措置を講じることによって持続可能な成長が達成しうる。現在、トランジション・ファイナンスの資金使途に関する統一的な定義は存在しないが、グリーンプロジェクトのみならず低炭素社会への移行を実現する幅広い技術に対して資金支援をした場合の定量的な評価を検討する。

RITE のエネルギー・環境評価モデル（DNE21+）は設備投資の主観的割引率を考慮しており、完全予見の下であれば主観的割引率は利子率相当の割引率と設備寿命から

計算された率に相当するものをかけて算出される。主観的割引率の一部は借入利率として捉えられるため、融資の優遇措置として借入れ時の金利負担を軽減することにより当該投資が促進される。通常、DNE21+モデルにおいて発電部門に関する主観的割引率は原子力を除く発電技術間で差別化はせず、先進国と後進国に分けて経済事情に応じて主観的割引率設定をしている。

サステナブルファイナンスの影響を評価する際、以下のシナリオが考えらえる。

① グリーンな活動と定義されている発電技術に対する融資の優遇措置を想定し、当該技術の主観的割引率を低下させる。その他の発電技術に対しては同割引率の現状維持を想定する（もしくは融資のペナルティを課す）。

② グリーンな発電に対しては①と同様の主観的割引を想定し、さらに石炭火力からガス火力への燃料転換を含むトランジショナルな活動、そして各発電における BAT 技術への移行に対しても資金優遇措置の対象とする。

一方、資金の優遇措置によって借入利子率を低下させるということは、その分の費用を金融機関あるいは投資家が負担するということを意味するため、ベースライン比の追加的費用を算出する。

今後は、上記シナリオを基に、サステナブルファイナンスの影響評価を行う。

参考文献（第 3.7 節に関するもの）

1) IEA: World Energy Outlook 2019.
2) EU TEG: Technical report – Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance, March 2020.
3) Carney, M.: Fifty shades of green, Point of view, Finance & Development, December 2019.
4) ICMA: Green bond principles – Voluntary process guidelines for issuing green bonds, June 2018.
5) EU: Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088, Official Journal of the European Union.
6) CLP: 2017 Climate action finance report.
7) AXA Investment Managers: グリーン移行を支える投資- トランジションボンド・ガイドライン, (2019), https://www.axa-im.co.jp/documents/24491/0/AXA+IM_Transition+Bond+Guidline_FINAL.pdf/b2fd9c3d-bb3e-1905-06f4-49240cd519f5?t=1564106833950, (accessed on November 30, 2020).
8) Crédit Agricole: Press release - Crédit Agricole CIB issues a EUR 100 million transition bond subscribed by AXA, November 2019.
9) Cadent: Cadent transition bond framework. https://cadentgas.com/about-us/our-company/investor-relations/overview/transition-bond-framework (accessed on November 30, 2020).
10) ICMA: Climate transition finance handbook- Guidance for issuers, December 2020.

11) Bank of China: Appendix I. Description on Bank of China Hong Kong Branch's 2021 Transition Bonds, (2021).
12) DNV GL: CLP Climate action finance frame work DNV GL Second party opinion. https://www.clpgroup.com/en/Investors-Information-site/Documents/CLP%20Climate%20Action%20Bond%20Second%20Opinion.pdf (accessed on November 30, 2020)
13) Dafermos, Y., Nikolaidi, M., and Galanis, G.: A stock-flow-fund ecological macroeconomic model, Ecological Economics, 131, (2017), pp.191-207.
14) Safarzyńska, K., and van den Bergh J.C.J.M.: Financial stability at risk due to investing rapidly in renewable energy, Energy Policy, 108, (2017), pp. 12-20.
15) Glomsrød, S., and Wei, T.: Business as unusual: The implications of fossil divestment and green bonds for financial flows, economic growth and energy market, Energy for Sustainable Development, 44,(2018), pp.1-10.
16) Paroussos, L., Fragkiadakis, K., and Fragkos, P.: Macro-economic analysis of green growth policies: the role of finance and technical progress in Italian green growth, Climatic Change, 160, (2020), pp. 591-608.

3.8 気候変動政策に伴う費用負担の格差拡大の課題

温暖化対策を進めて行くと、効率性と負担の衡平性のトレードオフが生じる可能性がある。また、炭素税についても逆進的な効果を及ぼすとの懸念がある。逆に、衡平性に配慮すると効率性が損なわれ、通常モデルが提示するような費用よりも高い費用が必要になる。世界で2050年脱炭素化への動きが本格化し、より厳しい温暖化対策が取られていくとみられる一方、公正な移行(just transition)を確保した脱炭素化はSDGの観点から不可欠であり、双方をバランスよく進めていくための指針となる定量的評価を行っていくことは重要である。このような問題意識の下、RITEではこれまでに、再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）及び省エネ住宅向け補助政策が所得階層別に及ぼす影響について分析を行ってきた[1),2),3)]。また、より定量的な影響分析を行っていくための検討として、統合評価モデルを用いた所得階層別影響評価に関連する既往文献に関して調査を行い、課題を整理した。本年度は、温暖化対策による衡平性への影響に関する最新の分析と具体的な手法に関する調査を行い、モデル分析に向けた検討を行った。

3.8.1 Best et al. (2021) による太陽光発電補助金の分析

本節では、R. Bestらによる、オーストラリアにおける小規模太陽光発電導入に係る補助金政策の衡平性の定量分析[4)]について紹介する。

オーストラリアにおける小規模太陽光発電導入の補助制度として、初期投資に対する補助金である小規模再エネスキーム(SRES)と、発電に対する固定価格買取制度(FiT)の2種がある。前者は国家による制度、後者は州による制度であり、1件の導入につき両方を受給することが可能である。SRESによる補助金額は設置容量に比例し、かつ日照時間の多い地域においてはより高い係数を乗じて補助金額が決定される仕組みであるため、高日照地域における導入を促進する制度であるといえる。FiTは、太陽光発電

による電力の売電 1kWh につき世帯に支払われるもので、期間と支払い率は時期と州によって異なる。これら 2 制度それぞれが国民一人にもたらすコスト増加は 2018 年時点で 20 オーストラリアドル/年と推計されている。なお、オーストラリアの総発電量における小規模太陽光発電の比率は 2019 年時点で 5%を超えたとされている。

分析の動機として、一般的に、環境政策の導入において、分配の衡平性に関する懸念はその障害となりうること、公正な移行は政策の効率性に優先するとの観点から、著者らはこの 2 制度に対して世帯間の衡平性、普及への有効性、導入規模への有効性を定量的に分析し、公正な分配に関して考察を行っている。

分析の特徴としては、①世帯の所得ではなく富(wealth)の差異間の不衡平性を対象としたこと、②世帯レベル及び地域レベルの詳細なデータを用いた分析であること、③PV 導入決定要因に関する分析を並行して行ったことである。①に関しては、PV 導入補助金制度の衡平性に関する数少ない既往研究の中で、FiT は高所得の世帯に利するとされているのに対し、この研究では初期投資に対する補助金制度も対象とし、また PV 導入規模への影響も分析対象とすることから、世帯所得間の不衡平性ではなく世帯の富、すなわち保有資産額に基づく階級間の衡平性に着目し分析したとしている。

分析の根拠となる詳細な世帯データについては、オーストラリア統計局による所得・住宅調査（2017 年版、2019 年版）と家計エネルギー消費調査（2013 年）を利用し、資産の十分位階級で整理している。PV 導入率は、保有資産階級が下位から上位となるに従い高くなるが、上位 4 分位では大きな差はみられない（図 2.3.1-1）。PV 導入容量は、全世帯平均でみると保有資産階級が上位であるほど大きく、上位 3 分位では大きな差はない（図 3.8.1-2）が、PV 導入世帯平均でみると大きな差は見られず、上位 3 分位がやや高位である（図 3.8.1-3）。

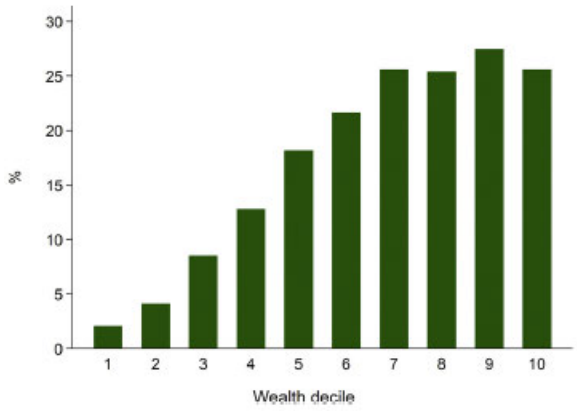


図 3.8.1-1 世帯資産階級別の PV 導入率（2015～2016 年）

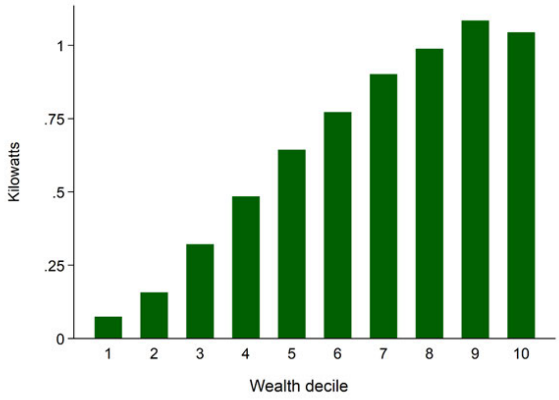


図 3.8.1-2　世帯資産階級別の PV 導入容量（2015～2016 年、全世帯平均）

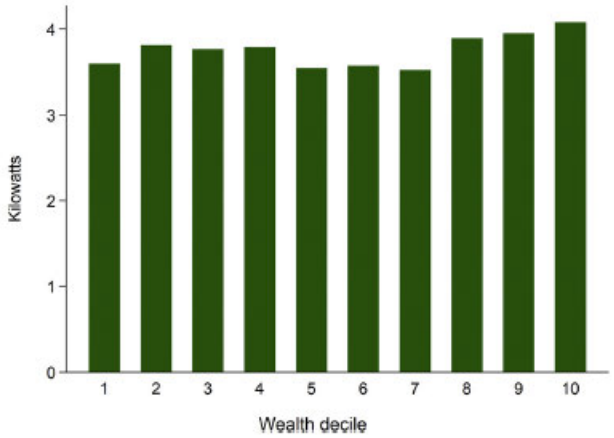


図 3.8.1-3　世帯資産階級別の PV 導入容量（2015～2016 年、PV 導入世帯平均）

FiT により世帯に支払われる金額は、全世帯平均でみると上位ほど大きく（図 3.8.1-4）、PV 導入世帯平均ではややその傾向は弱まるもののやはり高資産保有世帯ほど大きい傾向が見られる（図 3.8.1-5）。これは高資産保有世帯において導入容量がやや大きいことと、FiT の買取金額が比較的高かった時期に導入したためとされている。

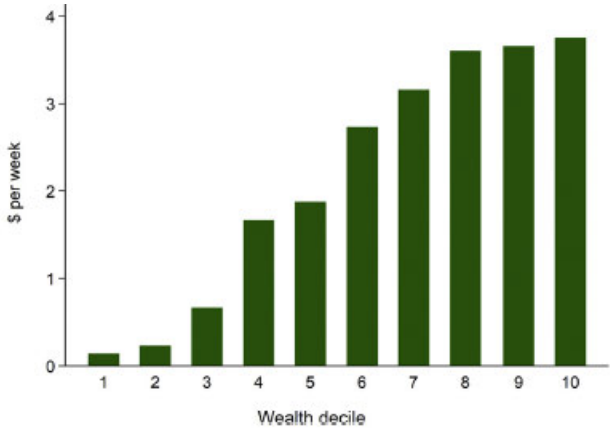


図 3.8.1-4　FiT による世帯受領金額（2015～2016 年、全世帯平均）

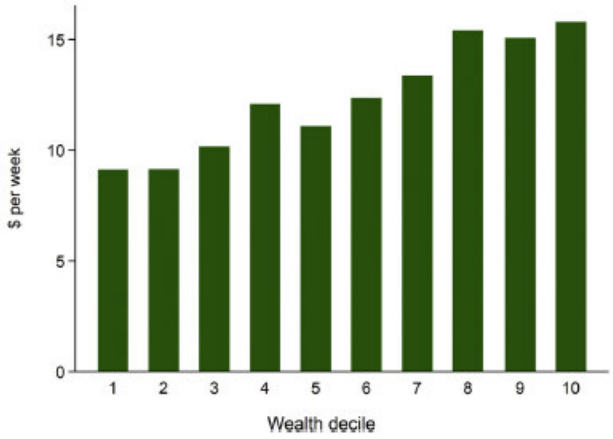


図 3.8.1-5　FiT による世帯受領金額（2015～2016 年、PV 導入世帯平均）

分析は、計量経済モデルを用いて行われている。主な変数は、FiT 受領金額、SRES 補助金、資産、PV 導入の有無、PV 導入容量（kW）である。その他の制御変数として家屋の規模、不動産保有状況、賃貸住宅、集合住宅、年齢、家族構成なども考慮している。主たる説明変数は資産で、総資産から負債額を控除して算出し、十分位に区分している。世帯調査に基づく資産のデータは国によって質が異なり[5]、信頼性が懸念されうるが、オーストラリアはマクロデータとミクロデータの比較により資産データに関する分析を継続的に行っていると OECD が評価しており、この分析では世帯調査データを用いたことにより信頼性に関する懸念を低減したとしている。

衡平性に関する分析結果として、保有資産の階級間で不衡平性が存在するとしている。FiT に関する分析では、表 3.8.1-1 において下位の分位は上位よりも受領金額が有意に少ないことが示されており、図 3.8.1-4 と整合している。その他の要因との関係性分析では、住宅規模が大きい世帯では受領金額が多く、賃貸住宅や若年の扶養家族がいる一人親世帯では少ないとされている。住宅規模が大きい世帯で受領金額が多い原因は、導入スペースが大きいことと、電気代が高いためより多くの容量を導入するインセンティブが働くことが原因との考察である。

表 3.8.1-1　世帯資産階級と FiT 受領金額の関係

Wealth decile (binary explanatory variable)	Coefficient	Standard error
1	−2.179***	0.377
2	−2.531***	0.361
3	−2.684***	0.355
4	−2.159***	0.353
5	−2.165***	0.337
6	−1.290***	0.345
7	−0.787**	0.357
8	−0.325	0.350
9	−0.154	0.349

SRES 補助金に関する分析でも同様に、資産の少ない階級は高い階級よりも受給金額が有意に低いとの結果である（表 3.8.1-2）。その他の要因との関係性の分析では、住宅規模が大きいと金額が高く、賃貸住宅だと低いという点は FiT と同様である。階級

を可処分所得による十分位とした場合は有意な結果は得られず、資産のみ、または資産＋所得とすることにより有意な結果が得られる。

表 3.8.1-2　世帯資産階級と SRES 補助金受給額の関係

Wealth decile (binary explanatory variable)	Coefficient	Standard error
1	−0.513***	0.109
2	−0.566***	0.106
3	−0.638***	0.105
4	−0.645***	0.101
5	−0.582***	0.098
6	−0.429***	0.099
7	−0.269***	0.099
8	−0.151	0.102
9	0.016	0.101

PV 普及と導入容量に関する分析についても付記しておく。PV 普及に対する影響の分析から、SRES 補助金、世帯資産は正の影響を持つが可処分所得はやや弱い影響のみもたらし、かつ統計的に有意ではないとの結果である。

導入容量に関する影響分析では、変数を対数変換して弾性値による分析がなされている。世帯資産は導入容量に正の影響を与えている。SRES 補助金に関しては、他の影響を除去し分析すると有意な結果は得られなかったことから、補助金額の増大は導入容量の増大につながらないことが示されている。

著者らの結論として、オーストラリアにおける小規模 PV 補助スキームには世帯資産間での不衡平性が存在しており、政策を修正していく必要があるとされている。SRES 制度に関しては、補助金額増大による導入容量の引き上げ効果がないことから、富裕層に利するような導入容量に応じた補助金額設定をやめ一定にすべきであるとしている。また、世帯資産に応じた補助金交付は EU 諸国のうち 6 か国で実践されており、これを太陽光補助金スキームにも適用とすべきとしている。

本研究の意義は、世帯資産に基づく分析により温暖化政策の衡平性を評価したことである。世帯間の衡平性の分析において、所得ではなく資産での階級とするべきであることは以前から指摘されてきた。リタイア層のように勤労所得はないが資産を多く保有する世帯を年間所得で階級付けすることは、世帯の経済的余裕を正しく表現できておらず誤った分析結果につながりうる。その点で、本分析は世帯の実質的な経済状況を反映した分析となっており、有意義であると言える。資産ベースでの分析は有意な結果であるのに対し、SRES の分析においては所得ベースの分析は有意な結果をもたらさないと示されており、世帯資産もしくは世帯資産と所得の両方を考慮した分析とすべきであることが示されている。一方、この手法の分析を行う場合は世帯資産データの入手可能性及びデータの質に課題があると考えられる。オーストラリアは質の高い詳細な世帯データがあるとされており上記のような分析が可能となりえた。データの入手可能性の調査を進めていくことが必要である。なお、論文中でも言及のあった Credit Suisse Research Institute による Global Wealth Databook は各国における世帯別の富の分布を十分位で提供しており、利用可能なデータベースの一つである。

一方、課題としてはSRESと比較しFiTの分析結果が少ないことがあげられる。所得ベースでの分析は有意でないとされたのはSRES制度の分析においてのみであり、FiTにおける所得ベースでの分析結果は示されていない。一般的に、FiTのほうが長期間にわたり世帯への支払いが行われ費用負担額が増大しているとの課題が強く認識されており、FiT政策の効率性についても分析を深めることは重要である。また、本論文ではエネルギーが明示的に取り扱われていないが、RITEでこれまで行ってきたように、家庭へのPV導入によるエネルギー消費の変化を考慮した上で、世界エネルギーシステムモデルにより衡平性に関する問題を分析していくことが望ましいと考えられる。

3.8.2 V. Lekavicius et al. (2020) による家庭向けエネルギー機器導入補助制度の分析

本節でサーベイする研究[6]は、リトアニアにおける家庭用再生可能エネルギー技術導入に対する補助金制度の分配効果を、独自のマイクロシミュレーションモデルにより分析し、脱炭素に向けたエネルギー移行における公正と政策の効率性を評価したものである。

リトアニアの人口は2018年時点で280万人程度であり、近年は他国への移住及び少子化により減少傾向である。家庭部門におけるエネルギー消費量はバイオマス、地域熱供給、電力、天然ガスの順で、地域熱供給以外の燃料の多くは熱エネルギー用途である。また家庭部門全体のエネルギー支出合計は10億ユーロ/年であり、部門全体の4%を占めるが、この比率は家庭によって大きな差がある。

家庭のエネルギー関連投資向け補助金制度は主として3種ある。‘Utilisation of renewable energy sources in individual residential buildings’は、家屋への再エネ源導入のための支援制度で、国のSpecial Programme of Climate Changeを資金源としている。2012年度に運用が開始され導入事例は1336件である。そのほかの制度としては‘replacement of old biomass boilers’と‘installation of RES electricity generation sources in households’があり、どちらも2019年に導入されたものである。この2制度はEU構造基金による資金提供を受けており、家庭部門におけるより野心的な再エネ開発目標を見越した国家エネルギー独立戦略とも整合するものである。これら制度の対象となる技術はPV、太陽熱温水器、小規模風力、ヒートポンプ、高効率バイオマスボイラーの導入（旧タイプボイラーのリプレース含む）で、単位出力当たり補助金が支給されるが、2019年に導入された制度では、技術のコスト低減を考慮し、PVの単位出力当たり補助金はわずかではあるが低減された。また、旧型バイオマスボイラーの利プレースメント補助に関しては、2012年の制度では単位出力当たり補助金額が設定されていたのに対し、2019年の制度では機器の規模にかかわらず標準投資額の50%の補助額と規定された。一般的に機器の規模が大きくなるほど単位出力当たりコストは低下するため大規模機器向け補助の強度は実質的には低減されたこととなる（表 3.8.2-1）。補助制度が利用できる技術的条件としては、風力発電では容量（～10kW）、PVではFITを受領していないこと、旧型バイオマスボイラーのリプレースでは地域熱供給に接続し

ないことなどがある。これらの補助制度のほか、運用時に利用可能な制度として PV ではネットメータリング、高効率バイオマスボイラーでは燃料削減分の VAT がある。

表 3.8.2-1　リトアニアにおける家庭用エネルギー機器導入補助制度

Energy technology	Short name	Support intensity	Additional support means available
Utilisation of renewable energy sources in individual residential buildings			
Solar photovoltaic	–	336 EUR/kW	Net metering
Solar collectors for water heating	Solar HW	128–160 EUR/m^2	–
Small wind power plants (up to 10 kW)	Wind	557–683 EUR/kW	–
Heat pumps (ground–water)	Ground heat pumps	343 EUR/kW	
Heat pumps (air–water)	Air heat pumps	193 EUR/kW	
Heat pumps (air–air)	–	121 EUR/kW	
Efficient biomass boilers (to replace fossil fuels)	Biomass	41 EUR/kW	Reduced fuel VAT
The replacement of old biomass boilers			
High efficiency biomass boilers (to replace existing inefficient biomass boilers)	Biomass to biomass	50% of standard investment (48.75–122.92 EUR/kW)	Reduced fuel VAT
Heat pumps (ground–water)	Biomass to ground heat pumps	50% of standard investment (202.9–726.75 EUR/kW)	
Heat pumps (water–water)	–	50% of standard investment (202.9–726.75 EUR/kW)	
Heat pumps (air–water)	Biomass to air heat pumps	50% of standard investment (213.51–551.88 EUR/kW)	
Installation of RES electricity generation sources in households			
Solar PV	Solar PV	323 EUR/kW	Net metering

分析フレームワークを図 3.8.2-1 に示す。分析の中心であるマイクロシミュレーションモデルは、家計調査（HBS）及び所得・生活調査（SILC）の 2 つのミクロデータにおける 4808 世帯のデータ（家屋の状況、社会経済状況、投資・貯蓄選好、補助金制度に対する適格性など）により構成されている。このモデルにより各補助制度のシミュレーションを行い、分析結果として制度の到達範囲と分配効果が得られる。世帯所得の分位については EUROSTAT の概念を基に五分位を算定しているとのことである。

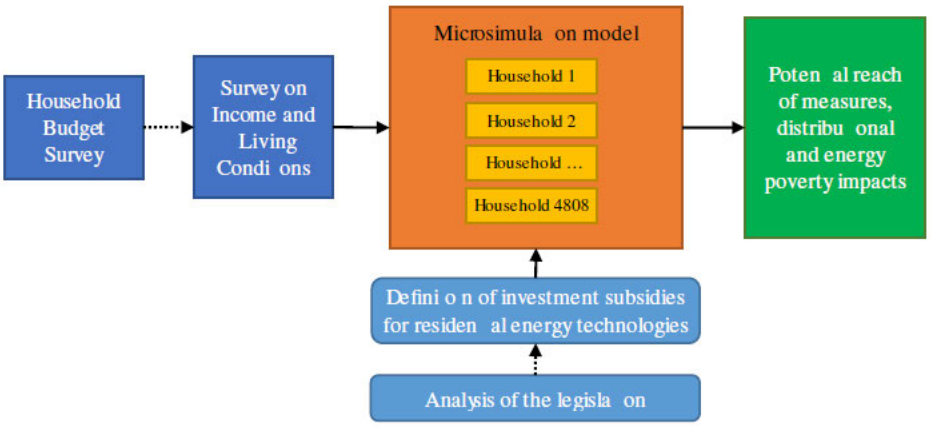


図 3.8.2-1　分析のフレームワーク

この研究の特徴の一つとして、制度の評価において eligibility（適格性）に加え affordability（購入能力）の基準で行ったことである。購入能力は、補助金受給後の投資残コストを世帯が支払う主観的能力とされている。世帯はそれぞれ異なる消費選好と投資・貯蓄志向を持っているため、主観的な認知は世帯の現状の認識と投資決定に影響を与える。このため、マイクロシミュレーションモデルでは世帯の所得と認知された消費ニーズの差を考慮して投資の可能性を評価している。SILC には世帯の可処分所得に加え家計収支に必要な最小金額のデータも含まれており、これを世帯の消費ニーズとして取り扱っている。購入能力を表す投資可能費用（affordable investment cost）は、可処分所得から最小の消費ニーズを控除し累積投資期間を 5 年として算定している。

分析結果についてみていく。補助金を受給する可能性のある適格世帯数は図 3.8.2-2 のように推計される。適格世帯総数（青色グラフ）に対し、適格かつ購入能力を持つ世帯の数は 1/2～1/3 にまで減少する（橙色グラフ）。また、PV など高額技術の導入ではより下がる傾向がみられる。図 3.8.2-3 は、購入能力を考慮したケースにおける適格世帯の十分位別の比率を示しており、どの技術においても購入能力を考慮すると低位の分位の比率は極めて小さく、上位 3 分位が全体の半数程度を占める結果となっている。なお、技術間の比率の差異の要因は、補助金額、投資コスト、世帯グループの投資可能費用によるとされている。このように、潜在的受益者の多数が高所得世帯であることが示されており、これらの補助金制度は逆進的であるとの結果である。

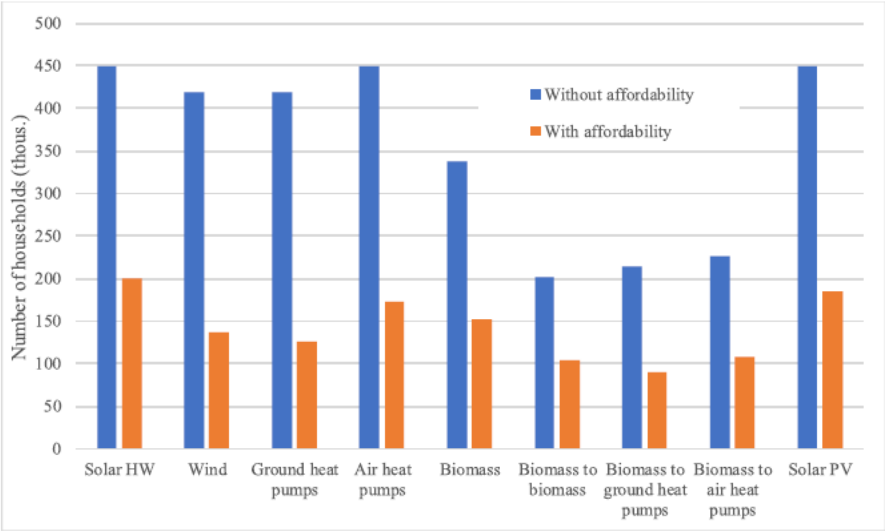


図 3.8.2-2 補助金を受給可能な世帯数

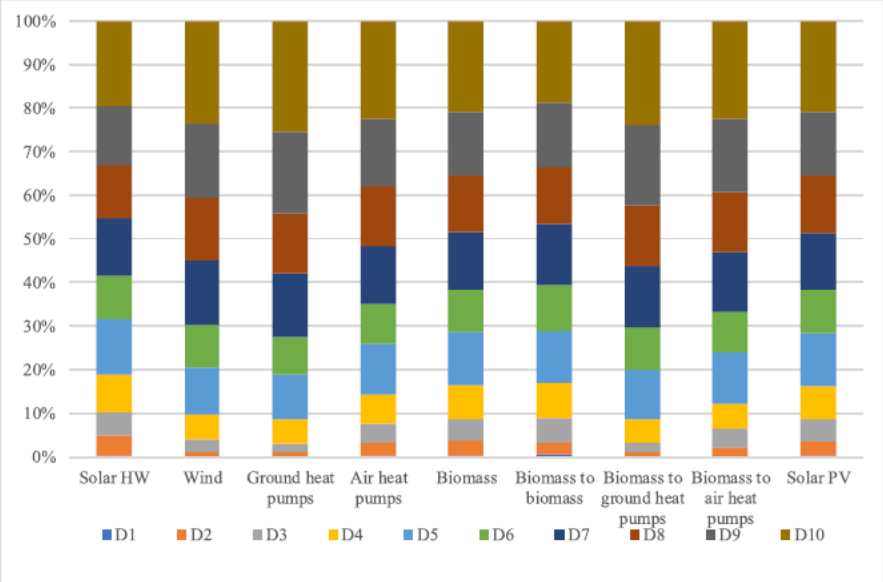


図 3.8.2-3 補助金を受給可能な世帯数の十分位別シェア（購入能力保有世帯のみ）

別の視点による問題点として、エネルギー貧困に焦点を当てた分析でも同様の結果が示されているとしている。エネルギー貧困はここでは「適切な暖房が利用可能（ability to keep the home adequately warm）」かどうかを基準としており、高所得世帯でも適切な暖房が利用できない世帯が多く存在すると指摘しているが、具体的な基準と推計方法が示されておらず詳細は明らかである。図 3.8.2-4 では、適切な暖房が利用できない世帯のシェアを、補助金適格世帯（青色グラフ）と、補助金適格かつ購入能力を有する世帯（橙色グラフ）の別に示している。これによると、エネルギー貧困世帯のうち補助金適格かつ購入能力を持つ世帯は 5%未満に過ぎない。これを補助金を受給する世帯（補助金に対する適格性があり購入能力を有する世帯）の視点から見ると、そのうち 10%程度のみがエネルギー貧困世帯であり、エネルギー貧困世帯を十分支援できていない証左であるとしている。先述した通りエネルギー貧困世帯の定義が明らかでない

ことは問題であるが、補助金制度が逆進的な性質を有することが示される例であるとされる。

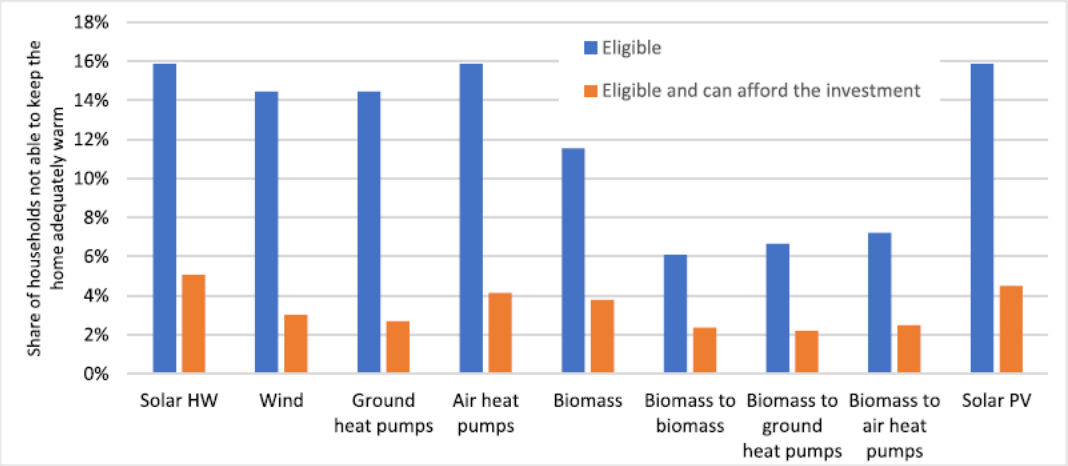


図 3.8.2-4 適切な暖房が利用できない世帯の比率

分析内容を総括する。リトアニアにおける家庭向けエネルギー技術の補助金制度の衡平性を、世帯の実際の経済状況を用いた分析と、エネルギー貧困の視点からの分析により評価している。著者らは、既存の支援はエネルギー政策の観点から重要であるが、より高収入の世帯により多くの便益をもたらし、不衡平性を増大させ、分配効果を引き起こしうると結論付けている。補助金を必要とする所得の低い世帯の多くは集合住宅や賃貸住宅に居住しており補助金制度の適格性を欠いているケースが多い。さらには、最貧世帯はそもそも投資を行う能力が低い。結果として、補助金制度により低所得世帯で実際に補助金を受給しうると考えられる世帯は非常に少ないこと、エネルギー貧困世帯に対する支援が十分に行われていないことが明確に示されている。

考察に当たり、分析手法に関する説明が十分でない部分がある点は留意すべきである。例えば世帯所得について、ミクロデータは五分位で表現されるとしているのに対し、図 3.8.2-3 では十分位で示されており、この変換に関する説明が不足している。また、エネルギー貧困世帯の定義及び推計方法が示されておらず解釈が難しい面もある。リトアニアにおけるエネルギー消費では暖房が重視されていることがこの基準の前提とされていることもあろうが、家庭部門におけるその他用途のエネルギーも必要不可欠なものであり、包括的な基準とするほうが望ましい。しかし、著者らが結論付けた内容は既往研究と整合的であり、また実際の購入能力を考慮した分析としている点は、より世帯の実経済を反映した結果であると考えられる。'Replacement of old biomass boilers'における単位出力当たり補助を傾斜配分としたことによる逆進性緩和効果の分析を追加することにより、政策への示唆により貢献しうるものと考えられる。

3.8.3 気候変動政策に伴う費用負担の格差拡大分析に関する課題

本項では、温暖化政策による衡平性への影響に関し、モデルを用いた最新の分析事例を調査した。所得分位別に温暖化政策の衡平性を分析する試みは多く行われているが、本項で取り上げた 2 つの分析では、ミクロデータを利用して所得以外の変数を検討し世帯の実経済状況を分析に反映させる試みが取られており、興味深い手法であると言える。着目したパラメータがそれぞれ世帯資産、世帯の投資購入能力と異なっているが、制度の分析結果としていずれも逆進性が示されている点は既往研究と同様である。一方、実際の投資判断において世帯は資産、投資購入能力、所得すべてを考慮に入れると考えられるが、世界モデルにおいてこれらのパラメータすべてを考慮し世界全体を対象に世帯の経済状況の実情を表現することは効率性の点で問題となる。この 2 つの研究における手法と、過去にサーベイした論文や Best[4)]で利用されている世帯経済データベースを参考にしつつフレームワークを検討し、効率的なモデル分析に反映させていく必要がある。

補助金制度そのものについては、画一的な基準による初期投資補助は不衡平性をもたらすとの結論が導かれており、今後の分析において、FIT のように継続的な補助が行われる制度も含め、より衡平性をもつ制度の在り方の提言につながるシナリオ設定が求められる。

参考文献（第 3.8 節に関するもの）

1) 永田敬博 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、Jan (2018)
2) 中野優子 他、省エネ住宅向け補助政策の所得階層別影響分析、第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、Jan (2018)
3) T. Nagata, et al., Assessment of Equity of Feed-in Tariff in Japan, 2018 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE) (2018)
4) Rohan Best et al., Equity and effectiveness of Australian small-scale solar schemes, Ecological Economics Vol. 180 (2021)
5) Credit Suisse Research Institute, Global Wealth Databook 2019 (2019)
6) V. Lekavicius et al., Distributional impacts of investment subsidies for residential energy technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 130 (2020)

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。

NDCs の野心度の向上については重要なテーマとなりつつある。米国バイデン政権は、2021 年 4 月に気候サミットを主催し、このサミットにおいて、米国の新たな NDCs の排出削減目標が公表されると見られている。そして、世界各国に NDCs の排出削減目標の深堀を促すと見られている。

一方、各国の NDCs 間で限界削減費用に大きな差異が出て、国際競争力への懸念が存在するため、新たに欧州委員会の委員長に選任されたフォン・デア・ライエン氏は、重要視する温暖化政策の方針として、2019 年 12 月に「A European Green Deal」を示した、その中で、注目されるのが「WTO ルールと整合的な国境調整炭素税（Carbon Border Tax）の導入」であり、具体策を 2021 年までに示すとされた。また、米国バイデン政権も国境調整炭素税の導入を検討するとしている。このような中で、4.1 節において NDCs の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。また、海外の NDCs の評価事例についても引き続き調査を進め、4.2 節に記載した。そして、4.3 節において、国境調整炭素税に関する議論の動向や過去の分析結果を整理するとともに、世界エネルギー経済モデル DEAES を用いて、国境調整炭素税に関する試算を行った。

4.1　2020 年以降の排出削減目標（NDCs）に関する分析・評価

本節ではまず、4.1.1 節において、パリ協定 NDCs の排出削減費用に関する分析を中心にまとめた。更に、4.1.2 節では各国の NDCs の各種産業部門の国際競争力に及ぼす影響について分析・評価を行った。

4.1.1　NDCs の排出削減コスト等の評価

パリ協定は、各国が自主的に目標と達成方法を決めそれを UNFCCC に提出し、レビューを受けるというボトムアップ型の枠組みであり、これはトップダウン型の枠組みである京都議定書とは異なるものである。この仕組みにあったレビューを行うことで、

より実効ある形で排出削減を実現していくことが重要である。その認識の下、本事業ではこれまでに複数の指標によって、各国提出 NDCs の排出削減努力を評価する手法について提案を行ってきた。その評価のための万能な指標は存在しないが、それぞれの指標に特徴があることも指摘してきた。その中で排出削減費用は推計の不確実性は大きいという欠点はあるものの、「排出削減努力」を比較的適切に評価できることも指摘してきた（トップダウン型の枠組みの場合、推計の不確実性が大きいことは大きな欠点となり得るものの、ボトムアップ型のパリ協定の枠組みの下では、推計の不確実性が大きいという欠点は、相対的には小さくなると考えられる）。なお、COP24 で合意されたレビューの仕組みからすれば、直接的に各国 NDCs が不十分であるといった指摘ができるルールにはなっておらず、UNFCCC の枠組みの中で排出削減目標の深堀を促すことは難しいと考えられる。UNFCCC の公式なレビューの場ではなく、様々な分析結果が国際的に幅広く提示され、それを間接的に参照しつつ、深堀への暗黙的な圧力としていくことになると考えられる。そういった中で、2019 年の COP25 において NDCs の深堀が目指されたが、国連事務総長は「失望した」と述べるなど、必ずしも排出削減の深堀につながらなかった。米国バイデン政権が 2021 年 4 月に予定している気候サミット、そして COP26 に向けて、再び、排出削減の深堀を目指される見通しである。

昨年度までの日本の NDC の排出削減コスト等の評価は、文献 1)の GDP 成長見通しにおける経済再生ケースを前提としていた。今年度は、GDP や各種生産活動量、エネルギー需要の見通し、更には各種の技術想定を更新した DNE21+モデルを用いて評価を行った。GDP 等については、2018 年までの実績に基づいて更新している。文献 1)における実績は 2013 年までであり、2018 年までの実質成長率は 1.29%/yr と見込まれていたが、実際の実質成長率は 0.92%/yr[2)]と見通しほど経済成長は進んでいない。

分析においては、対象を GHG とし、2030 年の電源構成の比率は政府のエネルギーミックスに合わせて、石炭：26%、石油：3%、ガス：27%、原子力：20%、再生可能エネルギー：24%（再生可能エネルギーの内訳はモデル計算における費用最小化の下で決定する）を達成することとした（図 4.1.1-1 の電源構成参照）。CO_2 回収・貯留は 2030 年までは行わないとしている。

表 4.1.1-1 は CO_2 限界削減費用と GDP 比排出削減費用を示している。また、図 4.1.1-2 は日本の最終エネルギー消費量について、これまでの評価と今回の評価の比較をそれぞれ示している。2030 年における CO_2 限界削減費用は、143$/$tCO_2$、GDP 比排出削減費用は 0.21%と評価された。これまでの評価[1), 2)]においては、GHG を対象とし、2030 年の電源構成の比率を政府のエネルギーミックスに合わせた場合には CO_2 限界削減費用は 378$/$tCO_2$ と評価されるなど、より高い費用が推計されていた。今年度の評価でより安い費用で NDC の達成が可能と評価されたのは、上述のように 2018 年までの実績に基づいて前提条件を見直すことにより、将来の粗鋼生産量の見通しが下方修正され鉄鋼部門の石炭消費が減少したこと、自動車の燃費向上の見通しを含め、各部門における将来の液体燃料需要の見通しが下方修正されたこと、などによる。今回の評価では

COVID-19 による影響は考慮しておらず、その影響を踏まえた評価は今後も継続して必要である。

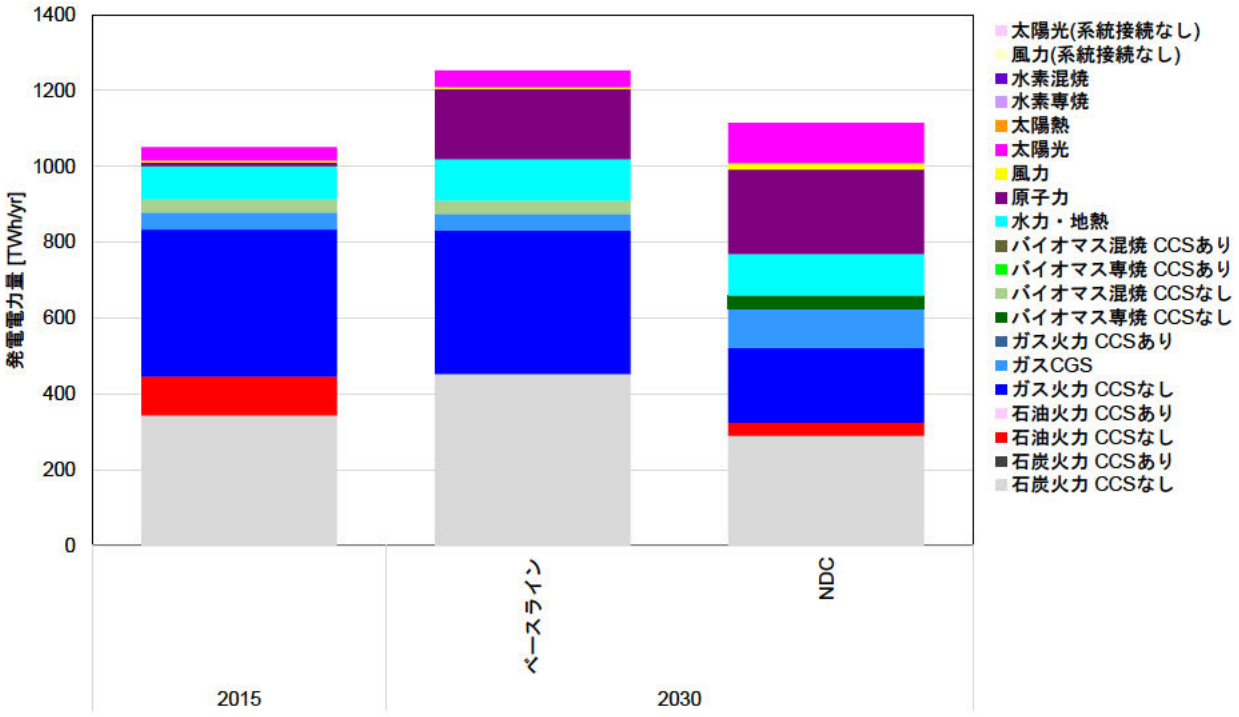


図 4.1.1-1 日本の電源構成

表 4.1.1-1 日本の CO_2 限界削減費用および GDP 比排出削減費用

	2030 年
CO_2 限界削減費用 ($/tCO_2$)	143
GDP 比排出削減費用 (%)	0.21%
GDP (billion US$/yr)	7043 (2020 年～ : 1.83%/年)

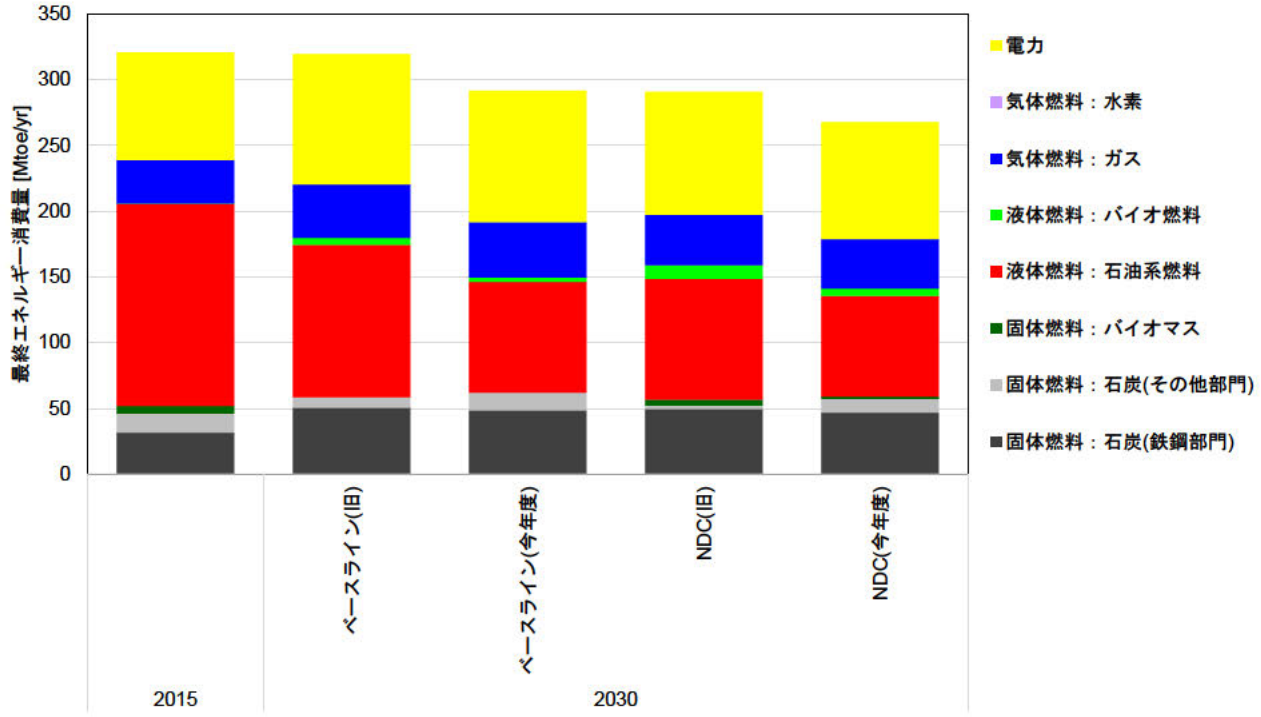


図 4.1.1-2 日本の最終エネルギー消費量

参考文献（第 4.1.1 節に関するもの）

1) 内閣府、中長期の経済財政に関する試算（平成 27 年 2 月 12 日経済財政諮問会議提出） (2015)
2) IEA, CO_2 emission from fuel combustion (2020)
3) 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 31 年度成果報告書 (2020)
4) RTIE、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 28 年度成果報告書 (2017)

4.1.2 国際競争力への影響評価

パリ協定で合意されたプレッジ&レビューの仕組みは、気候変動を緩和するための世界的な取り組みを定期的にレビューし、各国の取り組みを更新することで、継続的な政策枠組みとして機能することを意図している。本節では、まず、現状の気候・エネルギー政策を考慮した、2030 年の各国の NDC 目標による国際競争力への影響について評価した。また、NDC の透明性メカニズム、国際競争力と国境炭素調整措置、ジオエンジニアリングの可能性についても論じた。パリ協定の枠組みの下での透明性メカニズムの実施は、今後の排出削減プレッジにおいて重要な役割を果たすと考えられる。透明性メカニズムがうまく機能すれば、各国が NDC を更新する際に、隣国や所属する経済グループ、その他の関連国が同じように野心的な行動をとっていると確信できるような情報を提供することができる。国境炭素調整措置に関して、野心的な緩和政策が国内の製造業にコストを増加させることを懸念する国は、パリ協定の枠組みの中で行動の野心度を高めることができなくなることに対するオプションとして検討した。

最後に、パリ協定の目標に沿った温暖化防止のための十分な排出削減ができなかった場合、ジオエンジニアリングの可能性について論じた。

(1) 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

① はじめに

2016 年に発効されたパリ協定では、多くの国の参加を促すため、プレッジ・アンド・レビューの仕組みが採用された。実際にそれは有効に働き、ほぼすべての国が排出削減に取り組む枠組みが構築された。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(National Determined Contributions、NDCs)として 5 年ごとに提出することとなっている（第 4 条 2 項、第 4 条 9 項)。第 4 条 3 項では、目標見直しにあたって従前の目標に比べて前進させるよう求めている。また、第 13 条では、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。パリ協定の下、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 の適切さや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。

既往研究では、NDCs の削減費用や排出削減量などの観点から、国別の比較分析などが行われてきた。Hof et al.[20]による NDCs の削減費用の推計や、Aldy et al.[21]による複数の緩和評価モデルを用いた限界削減費用の比較などがあげられる。これらの分析では、NDCs の削減費用は各国間で大きな差異があることが示された。一方、Robiou du Pont et al.[22]では、気温目標から推計される世界排出量に対して、能力や衡平性などに関する複数の指標をもとに、トップダウン的に各国への排出割り当てを想定し、各国 NDCs 目標との差異を比較する分析が実施されてきた。また、Akimoto et al. [23]は、各国の約束草案に対する限界削減費用を推計するとともに、その他の複数の指標も用いて、各国約束草案の「排出削減努力（野心度)」を多面的・総合的に評価した。

しかし、既往研究では、NDCs を実施する際の費用推計や、複数の観点からの排出割当による NDCs 目標との比較にとどまり、NDCs 実施による国際競争力への影響の分析は評価されていない。産業部門毎の国際競争力への影響を含め、各国の NDCs による経済影響を総合的に評価することが重要と考えられる。

Aldy[24]によると、国内緩和政策が国際競争力に負の影響を与え、次の 2 点の気候政策リスクが生じる。第一に、エネルギー価格変化が高い国内から、低い（あるいはゼロである）海外へと、製造業の生産拠点がシフトすることにより、経済費用と失業が生じる可能性である。第二に、他の地域への移転が生じ、炭素リーケージにより国内の排出削減が相殺された場合には、緩和政策の便益が低下する可能性がある。

本研究では、国別貢献 NDCs の評価として、世界エネルギー経済モデル DEARS[25]を用いて、NDCs の排出削減費用について、排出量削減目標やエネルギー関連の各種数値

目標をモデルの制約条件として与え評価を行い、産業の国際競争力への影響について分析を行った。

既往文献によると、現在提出されている NDCs のもとでは各国間で限界削減費用に大きな差異があることが報告されている[21)23)]。そのため、大きな削減費用が推計される地域ではエネルギー多消費産業を中心に国際競争力が低下し、NDCs 実施による産業のリーケージの可能性が予想され、本報告ではこれらを定量的に評価した。

② 分析ケースの想定

ベースラインは、特段の温暖化・エネルギー政策を考慮しないケースを示す。ベースラインの社会経済シナリオは、国際的分析において用意された SSP[28)](Shared Socioeconomic pathways)に整合する中位シナリオ SSP2 を想定した[29)]。これらの想定は、一部の国で NDC に記載されている GDP 見通しの想定と必ずしも一致しているわけではない点に留意が必要である。

2030 年の NDCs の産業別の国際競争力への影響を分析するために、以下のケースを想定した（表 4.1.2-1）。Case1 では、パリ協定でプレッジされた各国 NDC の排出削減目標あるいは原単位目標に加え、記載された 2030 年における各種の主要なエネルギー関連の数値目標を同時にモデルで考慮して分析した。ここでは、表 4.1.2-1 に記載された、モデルの制約条件として反映可能な数値目標に限定し、定性的に記載された政策は含まれない点に留意されたい。

表 4.1.2-1 分析ケースの想定

地域	Case 1: 各国NDCを実施したケース(排出削減量目標以外の，NDC 記載の対策等を含む)		Case 2: 各国 NDCs の排出削減量目標のみを制約としたケース	Case 3: 国際協調ケース(世界各国の限界削減費用均等化; CO_2国際取引有)
	排出削減目標（2030 年）	その他の関連政策	排出削減目標(2030 年)	排出削減目標(2030 年)
US	26% GHG 排出量削減(2025 年)	電力部門の CO_2 原単位：462gCO_2/kWh， 再エネシェア 27%(一次エネルギー供給量比)	Case1 の地域別の排出削減目標と同等	Case1 の各国の排出削減目標の総量を，世界全体で達成
EU	40% GHG 排出量削減(1990 年比)	再エネシェア 20% （一次エネルギー供給量比）		
Japan	26% GHG 排出量削減（2013 年比）	発電電力量におけるシェア：再エネ 24%，石炭 26%，原子力 20%		
China	GDP 当たり CO_2 排出量の 65%削減 （2005 年比）	非化石シェア 20%(一次エネルギー供給量比)		
India	GDP 当たり GHG 排出量の 35% 削減（2005 年比）	非化石シェア 40%（電力量比）		
Brazil	43% GHG 排出量削減（2005 年比）	再エネシェア 45%(一次エネルギー供給量比)		
South Africa	GHG 排出量 398MtCO_2eq.	-		
Russia	27.5%GHG 排出量削減（1990 年比）	-		

Case 2 は、パリ協定でプレッジされた各国の排出削減目標のみを制約としたケースであり、Case1 から個別エネルギー数値目標を除いたケースである。このケースでは、気候政策無しのベースラインに対して、不均一な国別炭素価格のみによって生じる国際競争力への影響を調査する。Case 3 は、パリ協定でプレッジされた排出削減量の合計値と一致する排出量を達成する世界共通炭素価格（限界削減費用が世界均等化）を想定する国際協調ケースである。この場合には、排出の初期割り当ては Case2 の各地域の排出量を想定し、世界の限界削減費用と合致する世界共通炭素価格での CO_2 排出枠の国際取引を想定した。よって、Case2 と Case3 の排出量差が CO_2 取引量を示す。また、Case4 では、Case1 に加え、表 4.1.2-2 の 2020 年の目標達成に向けた気候・エネルギー政策を考慮したケースを想定した。これらの政策の有無が NDC 達成に与える経済影響を比較する。ここでは、 Climate Policy Database[30]や Gi et al.[31]を参考に、主要国について 2015 年までに施行された気候・エネルギー政策の中から、CO_2 削減に大きな影響を与えうる政策を考慮し、モデルに反映した。ここでは、主要国における主要な CO_2 削減目標や一次エネルギー供給量などを対象とした。

表 4.1.2-2 考慮した 2020 年に向けた気候・エネルギー政策

地域	政策目標	数値目標
US	原油の輸入量上限	▲50%（2010 年比）
EU	CO_2 排出量削減	▲20%（1990 年比）
	エネルギー消費上限（一次エネルギー供給量）	▲20%（1990 年比）
China	CO_2 原単位（GDP 当たり CO_2 排出量）改善	▲18%（2015 年比）
	エネルギー消費上限（一次エネルギー供給量）	165EJ/年
	エネルギー消費上限（石炭供給量）	86.5EJ/年
	非化石燃料シェア（一次エネルギー供給量比）	15%
India	産業部門・エネルギー消費量上限	▲185PJ/年（ベースライン比）

③ 分析結果

図 4.1.2-1 と図 4.1.2-2 に、2030 年の主要国における各ケースの排出量と限界削減費用を示す。Case3 を除き、日米 EU では、大きな限界削減費用が推計される。一方、中国やインドなどの排出目標または排出原単位目標は、想定した GDP 成長率を前提とすると、ベースラインで達成できるために、CO_2 限界削減費用はゼロと推計される。限界削減費用価格がゼロまたは非常に小さい途上国が多く、日米 EU 以外の国では、NDC 削減目標による影響は小さいと推計された。

図 4.1.2-3 に、国際競争力に及ぼすマクロ経済影響の分析結果を示す。世界の GDP 影響をみると、Case1、2、3、4 はそれぞれ▲1.2%、▲0.7%、▲0.3%、▲1.6%（ベースライン比）と推計された。日本では、Case1、2 の GDP 変化はそれぞれ▲1.8%、▲0.7%（ベースライン比）と推計された。政府目標のエネルギーミックスの制約が、限界削減費用を増加させ、GDP や産業別生産量の大きな減少をもたらす。ただし、エネルギーミックスはコスト効率性の他にエネルギーセキュリティなども考慮されて決定されている点には留意が必要である。

米国では、Case1、2 の GDP 変化はそれぞれ▲1.6%、▲0.8%（ベースライン比）と推計された。Case1 の GDP 減少が Case2 よりも大きいのは、提案された CPP(Clean Coal Plan)によって電力部門の CO_2 原単位が制約され、効率的ではないため、限界削減費用が大きくなり、その経済影響が大きいと考えられる。日本や米国では、Case1 では電源に制約が与えられている一方、Case2 では電源構成が制約されていないために効率化により発電部門においてより大きく排出削減が可能となる。そのため、Case1 では、特に産業部門や運輸部門において、価格上昇によるエネルギー消費量低減や生産量の縮小による排出削減量が、Case2 よりも大きくなると推計された。

EU28 では、再生可能エネルギー対策（Case1）が、90 年比▲40%排出削減目標においては効率的であるとしてモデルで選択されるため、Case1、2 の GDP 変化はほぼ同程度（▲1.8%（ベースライン比））と推計された。

また、中国やインド（Case1、2）やブラジル（Case1）では、正の GDP 変化が推計された。これらの途上国の限界削減費用がゼロであり、日米 EU に比べ、国内価格が相対的に小さくなり、途上国の貿易財の輸出価格が優位となる。そのため、日米 EU の生産・輸出が低下する一方、需要の一部を満たすために、リーケージとしてこれらの途上国の生産や GDP が増加したと解釈される。

同じ排出削減目標である Case1 と Case2 の比較は、NDC のための政策の効率性による経済影響の差を示し、Case1 の GDP ロスは、Case2 に比べ、世界平均（約 1.7 倍）、米国（2.0 倍）、EU（0.9 倍）、日本（2.6 倍）とそれぞれ大きな費用が推計された。また、費用最小の Case 3 と比べると、Case 1 では、世界平均（約 4.0 倍）、米国（16 倍）、EU（9.0 倍）、日本（6.0 倍）とそれぞれ費用が大きく推計される。世界で協調的に実施される Case 3 では、先進国の費用が大きく軽減されることが推計された。

なお、中国の排出量の低減の効果は、本分析では Case1 の「非化石シェア 20%（一次エネルギー供給量比）」の制約の効果が大きく、正の CO_2 限界費用が推計された Case3 よりも大きいと推計された。ただし、この結果は、ベースラインやエネルギー供給コストの想定等に依拠する可能性がある点には留意が必要である。

2020 年に向けた政策を考慮した Case4 の GDP ロスは、Case2 と比べ、世界平均（約 2.3 倍）、米国（約 2.5 倍）、EU（約 1.2 倍）、日本（約 2.7 倍）とそれぞれ推計された。2020 年に向けた政策の有無による費用の差は、Gi et al. 11)によるエネルギーモデルから推計された対策コストの比較と似た傾向を示している。 Case1 と Case4 の比較から、Case4 の負の経済影響が大きいことから、NDCs を達成するためには、2020 年に向けた気候・エネルギー政策が、2030 年の NDC 達成のためには必ずしも費用効率的な政策で

はなく、国際競争力の悪化を軽減する方策にはなっていない可能性が示唆された。NDCs の国際的な水準の差異だけではなく、費用対効果の高い国内エネルギー政策も、2 次エネルギー価格の上昇を抑制することにより、各産業の生産低下を軽減し、また国内価格と国際価格の差異を抑制するなど、産業の国際競争力の阻害を一部低減できる。そのため、 2020 年に向けて既に実施されている政策を含め、整合的かつ効果的なエネルギー政策の再構築が重要であることを示唆している。エネルギー政策は必ずしも温暖化対策に特化されて実施されているわけではないものの、温暖化対策や経済成長と両立しうる効果的な政策を追求するのは重要と考えられる。

NDCs を達成する際には、先進国のエネルギー多消費産業の生産に、大きな負の影響を与える（図 4.1.2-4a)。一方、一部の途上国には生産に対して正の影響が推計され、炭素リーケージが推計される。また、Case2 においては、概ね先進国の負の影響が若干軽減される（図 4.1.2-4b)。Case2 では、Case1 で想定したパリ協定の実施のための各種政策の非効率性を含まないため、その分だけ負の影響が基本的に軽減される。ただし、すべての国・地域が一律に同じ傾向を示すわけではない点に留意されたい。モデルでは、消費効用最大化に基づき、世界全体の消費効用は Case1 よりも Case2 の方がよいものの、地域別の GDP が必ずしも大きくならない場合もありうる。例えば、EU やブラジルなどでは、Case1 よりも Case2 の方が 2030 年の GDP が低下する結果である。これは、特に中国において Case2 の国内価格（Case1 比）が低下したことにより（図 4.1.2-5)、中国の輸出財が優位となり、Case2 の EU などの付加価値額が Case1 と逆転するケースがみられると解釈される。Case1 や Case2 の結果から途上国へのリーケージが推計され、これは、世界全体でみると、世界全体の排出量を増加させる要因となりうる。

さらに、国際協調ケース（限界削減費用均等化）のもとでは、先進国の国内価格の上昇が抑制され（図 4.1.2-5)、負の影響は大きく軽減される（図 4.1.2-4c)。

これらの結果は、主に以下のメカニズムによる影響と考えられる。限界削減費用に地域間差異があるケース(Case1、 Case2、 Case4)では、限界費用の高い地域のエネルギー価格の上昇をまねき、エネルギー価格の上昇に伴い製造業の生産コストの上昇をもたらす。エネルギー消費の大きいエネルギー多消費産業では特にその上昇が大きくなる。その場合、国際市場にリンクした輸出価格は上昇し、対策強度の高い地域の製品価格は、強度の低い地域と比べると相対価格が上昇する。結果として、対策強度の高い地域における、エネルギー多消費かつ貿易取引の多い産業の国際競争力を弱体化する可能性を示している。ただし、モデルでは相対価格変化による影響だけではない点に留意が必要である。例えば、Case1 では、途上国の相対価格は安く優位となるが、途上国の輸出先である先進国の需要そのものが低下し、途上国の輸出・生産にも悪影響を与える可能性が含まれる。さらに、産業連関構造による波及効果などにも影響し、モデル解はこれらの要素が複雑に組み合わされた結果と解釈される。

一方、Case3 では全世界でエネルギー価格が若干上昇するケースであり、多くの途上国のエネルギー原単位が劣っているため、多くの途上国では、負の影響として、国内生産への影響に加え、輸出の相対価格が上昇による影響がある一方、途上国の輸出先である先進国の需要低減の幅がその他のケースよりも小さいため正の影響があり、こ

れらの影響が組み合わされた結果と解釈される。全体の費用効率性の観点に基づけば、世界が協調した限界削減費用均等化のケースは望ましい。しかし、これまでの国際交渉の状況を踏まえると、世界に共通して炭素価格を均等化するアプローチは非常に難しいと考えられる点に留意が必要である。

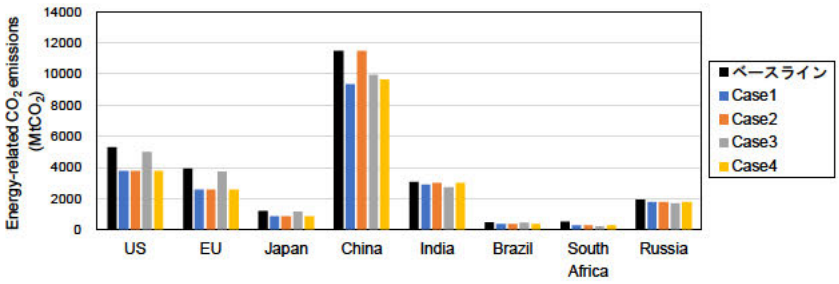


図 4.1.2-1 2030 年の主要地域のエネルギー起源 CO_2 排出量

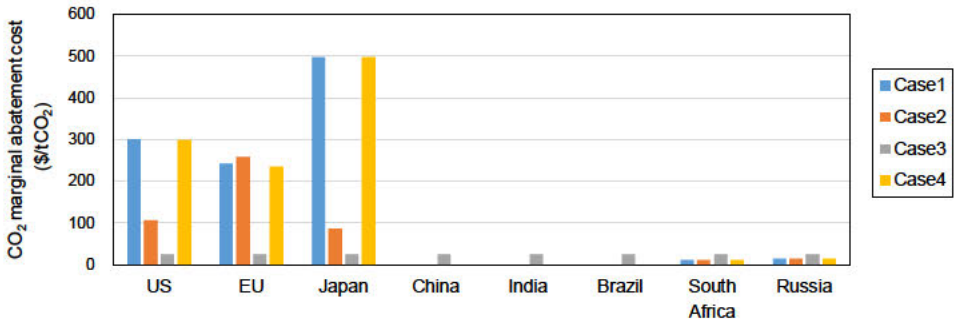


図 4.1.2-2 2030 年の主要地域の CO_2 限界削減費用

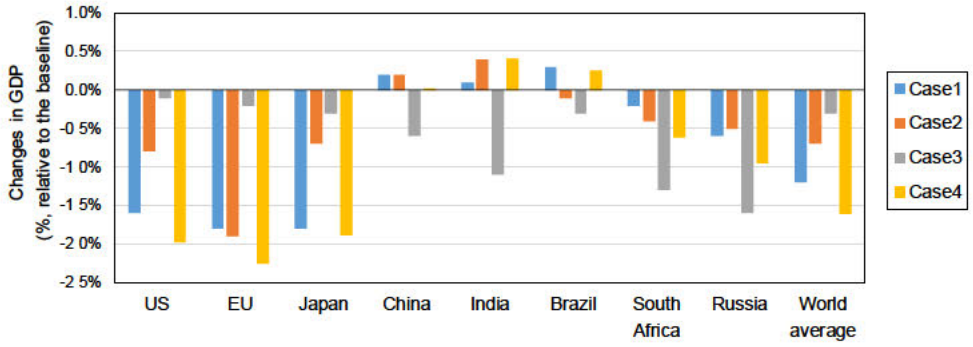


図 4.1.2-3 2030 年の主要地域の GDP 変化（ベースライン比）

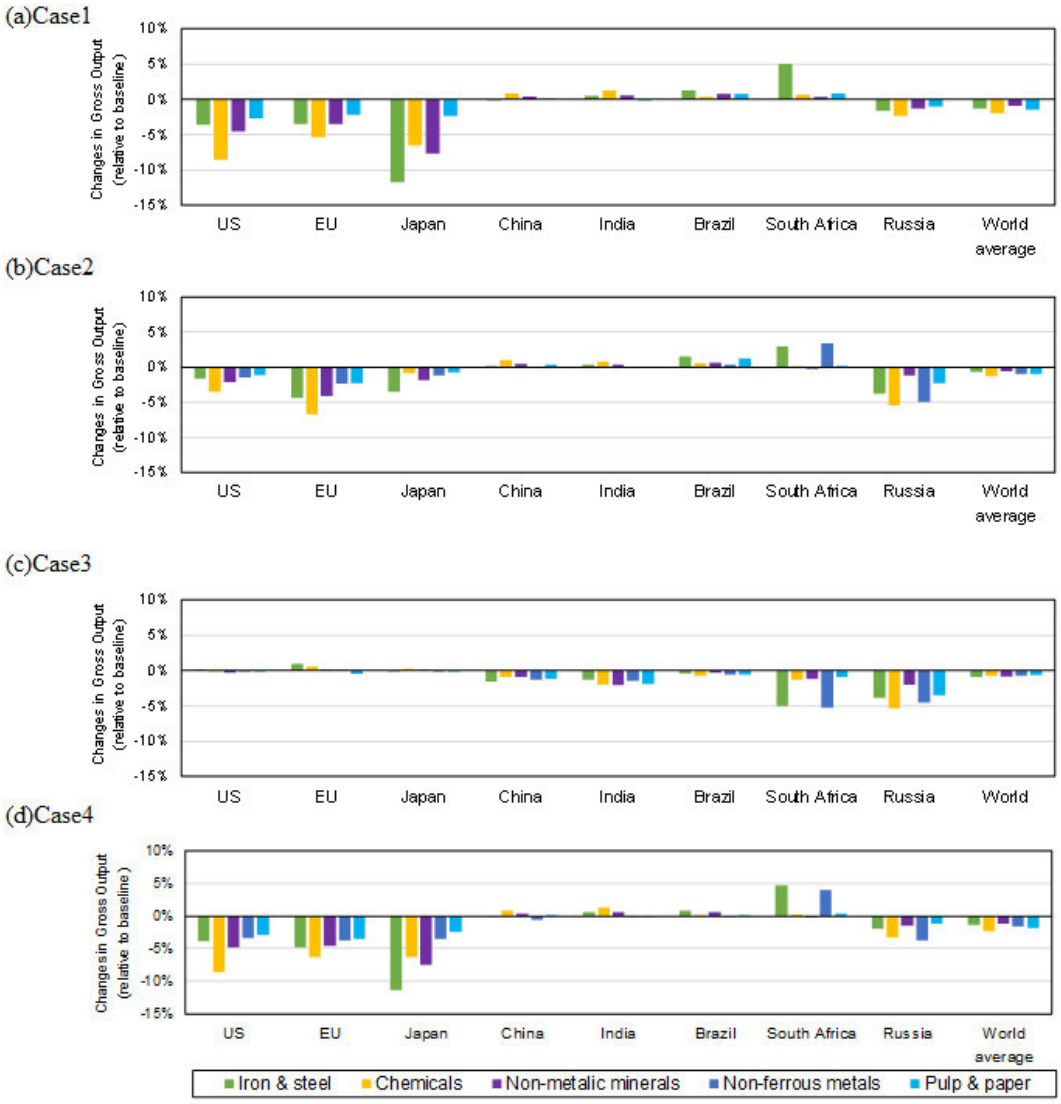


図 4.1.2-4　2030 年の主要地域のエネルギー多消費産業の生産量（実質生産額）への影響（ベースライン比）

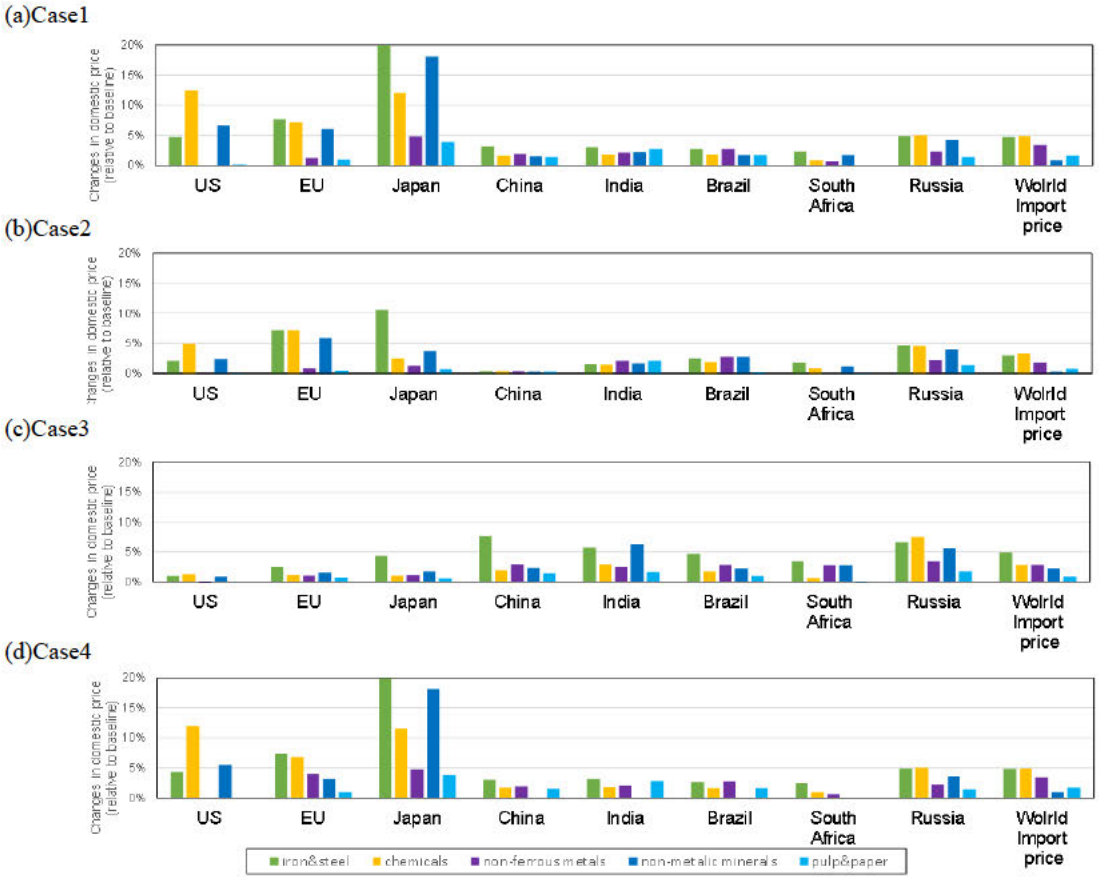
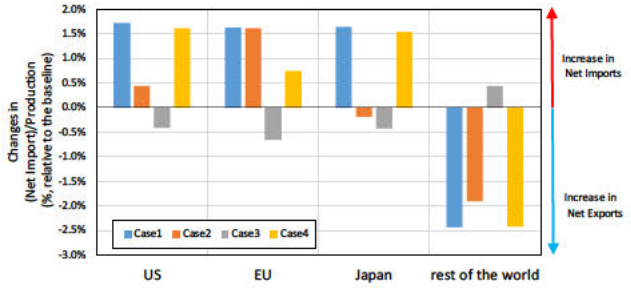


図 4.1.2-5　2030 年の主要地域のエネルギー多消費産業の生産価格への影響（ベースライン比）

図 4.1.2-6 には、化学と鉄鋼における、ベースラインからの実質純輸入額（生産額比）の変化を示した。エネルギー多消費産業の貿易への影響をみると、NDCs は化学や鉄鋼などのエネルギー多消費産業の国際貿易バランスに大きな影響を与える。特に、国際価格（輸入価格と同等）に対する国内価格（輸出価格と同等）が相対的に上昇すると推計された日本の鉄鋼部門や日米 EU の化学部門では、純輸入が増加する、すなわち国際競争力が低下すると推計された。一方、世界協調ケース（Case3）のもとでは、先進国では、輸入価格に対する国内価格が相対的に減少し優位となるため、先進国の貿易への影響は小さくなると推計された。

ただし、これらの結果は、モデル枠組みの中で相対価格による代替性を考慮した結果であり、各産業の製品種類の内訳や質に対する検討までは十分に考慮されていない点については留意が必要である。例えば、米国の鉄鋼への影響が、日本に比べて軽微であると評価された。その主な理由は、モデルでは鉄鋼部門を 1 部門として表現し、転炉鋼・電炉鋼の生産プロセスの区別ができないためである。そのため、原単位の大きい転炉鋼の比率が高い日本ではより大きな生産影響が推計され、米国では軽微な影響にとどまると解釈される。

(a)鉄鋼



(b)化学

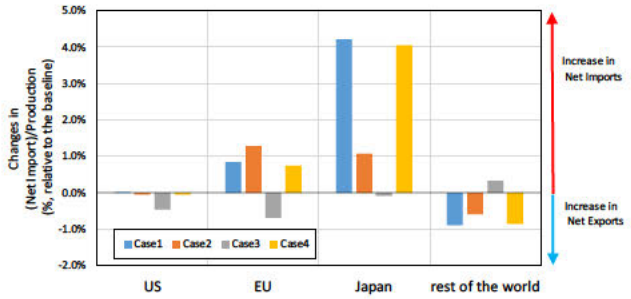


図 4.1.2-6　エネルギー多消費産業の実質貿易（純輸入）額への影響（ベースライン比）

④　まとめ

NDCs のマクロ経済影響を評価すると、比較的野心的な目標を掲げる先進国では、特にエネルギー多消費産業の生産に負の影響を与えると推計された。政策による削減強度に国際的な大きな差異が生じると、国際貿易を通じて炭素リーケージが誘発され、世界全体での排出削減の実効性が著しく小さくなる危険性があり、大きな懸念事項と考えられる。一方、いくつかの途上国では、NDCs を達成する際の炭素価格がほとんどゼロであり、特段の温暖化政策がなくても NDCs の達成が可能であることを示している。途上国における経済への悪影響は小さく、むしろリーケージとして生産シフトにより生産が増加する場合も推計された。また、世界で均一化された削減強度の政策においては、エネルギー多消費産業へコスト影響はわずかな大きさにとどまる可能性が大きいことが示された。

国際競争力への影響は、排出削減の国際貢献の観点からも重要である。先進国の国際競争力への過度な悪影響は、企業活動や生産性の低下を導き [31)32)]、環境調和型製品の海外投資が縮小し、国際貢献の減少を導く可能性が大きい [33)]。悪影響として技術開発の遅れや停滞につながり、環境調和型製品の技術移転の低迷につながる可能性がある。本分析の結果から、日本の鉄鋼部門や先進国 3 地域の化学部門などにその可能性があると考えられる。ただし、本モデルの産業部門の解像度による限界があるために、今後の課題として、産業別により詳細に検討する必要がある。

原単位の優位な地域（主に先進国）の産業の国際競争力への悪影響を抑えつつ、世界全体の大幅な削減を目指すためには、グローバル・ストックテークなどを通じて、

特に安価な削減ポテンシャルの大きい地域に対して、PDCA サイクルによる国別貢献のさらなる深堀が重要と考えられる。また、それらと整合的かつ効率的なエネルギー政策の立案も重要である。

産業の国際競争力を維持するための一つの方策として、EU では、輸入時に炭素関税を賦課する国境調整アプローチが検討されている（本報告書の第 4.3 参照）。理論上は国際競争力への負の影響を軽減する効果を持つと考えられが、技術的な困難性や WTO との整合性、実施による報復関税措置の可能性などの大きな問題点があり、慎重かつ効果的な制度設計が必要となる。

本分析の課題について、以下の 2 点があげられる。第一に、本分析では中位的な人口・経済シナリオに基づき分析を行ったが、人口や経済成長に関する将来の不確実性を考慮した追加的なシナリオ分析も重要である。第二に、現状制約や NDC の中には、現在のモデル構造では表現するのが難しい定量的な目標や定性的な政策も多くあり、これらを含めた評価は本分析の範囲外であった。これらの政策をモデルで考慮するように拡張し分析することによって、より詳細な影響分析が可能となり、国際競争力の評価に役に立つと考えられる。

(2) NDC の透明性メカニズム

① はじめに

2015 年のパリ協定では、世界の温室効果ガス排出量の 95%を占める国々が排出削減プレッジを提出するなど、国際的な気候政策への参加がかつてないほど広がっている。国政府は自主的な排出量目標を提出し（プレッジ）、その目標達成に向けたパフォーマンスは、報告や分析、評価の対象となる（レビュー）。パリ協定で NDC と呼ばれるプレッジは、経済全体の温室効果ガス排出量を過去の基準年の何%に抑えるか（例：EU、米国、日本）、政策なしで予測した将来の排出量から何%削減するか（例：コロンビア、韓国）、経済生産の炭素集約度を下げるか（例：中国、インド）、その他の追加的な政策目標の形をとっている。これらの NDC の環境への意欲とそれに伴う経済的影響を評価するには、各国が排出量を削減するために行っている努力を理解する必要がある。

しかし、国際コミュニティが、各国政府の排出量緩和の実績を、実際に検証した経験は限られており、かなり非効率的である（Thompson[37]; Aldy[38]）。国連気候変動枠組条約（UNFCCC）の下で行われてきた透明性や政策に関する調査は、排出量の監視が不完全であること、国の排出量報告が大幅に遅れている問題や、ある時点での国同士の比較やある国の長期的な傾向の評価が制限される問題が継続的に続いている。各国の排出量の削減努力を理解するには、単に排出量をカウントして、それを削減プレッジや目標と比較するだけでは不十分である。

国の過去の実績を確認するためには、排出削減量を定量化するために、実現した排出量を測定するとともに、排出削減プログラムを実施しなかった場合の排出量を推定する必要がある。また、その国の将来的なパフォーマンスを評価するためには、同様に、排出削減量を定量化することで、NDC などの緩和策の実施がない場合の排出量を推定し、NDC で設定された目標と比較する必要がある。参照シナリオと呼ばれる、実

施しなかった場合の仮想的な反実例（counterfactual）シナリオは、事後評価と事前評価の両方に役立つ。しかし、大規模な経済国を除き、政策が実施されない場合の国別の排出量のシナリオはほとんど存在しない。

現在、世界のほぼすべての国を対象とした緩和策のプレッジが行われていることを考えると、緩和策のパフォーマンスとレビューを評価するためのツールを追加することで、パリ協定の下で生まれつつある透明性のあるメカニズムに反映させることが可能である。排出削減量の推定（ある国の実際の排出量と、気候変動政策がなかった場合の排出量との差）は、緩和努力の最も包括的な測定方法の 1 つである（Aldy and Pizer[39]）。そのためには、ある国がプレッジした緩和策を実現するための行動を取らなかった場合に、その国の排出量がどうなっていたかを評価する必要がある。

本分析では、経済学と機械学習の知識を活用した一連の統計的予測ツールを開発・導入し、緩和政策が実施されなかった場合の国別の排出量予測を行った。この予測を用いて緩和努力を評価するために過去を振り返り、2000 年以降の自主目標、京都議定書における 2008 年から 2012 年の排出目標、そして 2020 年のコペンハーゲン合意のプレッジについて、排出量の「バックキャスト」（人口と経済活動の実現値の関数としての反事実上の排出量）を用いて、このような事後評価を説明する（COVID-19 が 2020 年の排出量に与える影響を考慮して、2019 年の代理目標をベースにした）。統計モデルに GDP と人口の独立した予測を組み合わせることで、国別の野心度、すなわちパリ協定に参加する国の予想される緩和努力を評価し、比較することができる。これまで数多く実施されてきたシミュレーション・モデルにおける分析を補完することも可能となる。また、各国の予測を、各国政府が隔年報告書で発表している予測や、予測ベースライン排出レベルからの削減率に基づく NDC の予測と比較することも可能である。また、本分析のモデルを用いて、パリ協定の下で行われる世界的なストックテイクに反映されるであろう世界全体の排出量削減努力をどのように示すことができるかを検討する。

パリ協定のプレッジ&レビューの枠組みでは、次の 3 つの観点から、排出削減量の透明な評価が役立つと考えられる。第一に、地球全体の事実上の排出量を見積もることで、グローバル・ストックテークを行うことが可能となる。第二に、多国間の気候政策のもとで、ある国の予測される政策がなかった場合の排出量を推定することで、NDC のプレッジ段階における緩和の透明性を高めることができる。排出量予測に基づく事前分析を行うことで、各国の NDC プレッジの下でどれだけの排出削減努力が期待できるかを推定することができる。第三に、国が定期的に専門家やピアレビューを受け、NDC を達成するためのパフォーマンスを振り返る際に、政策がなかった場合の排出量の推定（排出量の「バックキャスト」）に基づく事後分析を行うことで、国のパフォーマンスを理解することができる。また、排出量削減に多大な努力をした国を特定することで、他の国が見習うべき効果的な排出量削減政策に注目することが可能となりうる。

② 分析方法

本分析では、統計モデルや機械学習を用いて排出量削減のパフォーマンスを前向きおよび後ろ向きに分析するフレームワークを開発した。経済発展と排出量の関係を統計的に推定し、政策がなかった場合の国別の排出量を構築する。過去の経済データと排出量データに基づいて排出量予測モデルを推定し、比較するために、計量経済学と機械学習の様々なアプローチを用いた（Auffhammer and Steinhauser[40]を参照）。これらのモデルを用いてパリ協定の下での排出量削減をプレッジしたすべての国の国別排出量を推定することができる。遡及的にそれを行うために、過去の気候政策がなかった場合の排出量を推定するためのバックキャストや観察された経済データを考慮して、数十年分のデータを作成した。

これらのモデルを構築するために、まず、世界のほとんどの国のどの政府も排出削減政策を実施しなかった期間の経済データと排出量データを用いた。すべての国を対象としたモデルを構築することで、経済発展のさまざまなレベルにおける経済成長が排出量にどのように寄与するかを説明することが可能となる。また、国ごとの排出量だけでなく、世界の経済成長に基づく世界全体の排出量を算出するための整合的な枠組みを構築することが可能となる。パリ協定の下で行われるグローバル・ストックテークの情報として利用することも可能と考えられる。

予測問題を 3 つの異なる期間に分けて考えた。1 つ目は、統計モデルが推定される気候変動対策前の期間である。第 2 の期間は、統計モデルが評価されるもう一つの気候変動前の政策期間を表している。つまり、この第 1 の期間で推定されたモデルが、第 2 の期間の排出量をどの程度予測できるかということを検証する。サンプル外の予測誤差が比較的小さいモデルは、（政府や国際機関が公表している経済活動や人口などのモデルの主要構成要素の予測と合わせて）第 3 期の将来の排出量を予測するのに適した候補となる。ここでは、サンプル外の予測誤差を最小化することを前提とした 2 つのモデル探索アプローチに焦点を当てた Auffhammer and Steinhauser[40]の経済学的モデル探索のフレームワークを採用し、経済活動と人口の変数を統計モデルで何千通りもの組み合わせを検討した。このフレームワークでは、第 1 期のデータを用いてモデルを推定し、第 2 期以降のデータを用いてモデルの性能を検証する。また、機械学習の手法を用いて、何十万通りものモデルを検索し、モデルの性能を評価する。モデルを推定するためにサンプルから数年分のデータを無作為に除外し、この除外されたサンプル期間でモデルの性能をテストする。

例として、このアプローチを用いた UNFCCC1992 の 2000 年目標の評価方法を以下に説明する。まず、1960 年から 1985 年までのデータを用いて計量経済学的モデルを推定し、1986 年から 1990 年までのモデルの性能を検証した。そして、予測と実現排出量の二乗誤差を最小化するモデルを特定し、そのモデルを用いて、実現した経済データを用いて 1990 年から 2000 年までの政策がなかった場合の仮想的な排出量をバックキャストした。機械学習の枠組みにおいても同様のアプローチを採用し、1990 年までのデータを用いてモデルを推定し、期間サンプル外のパフォーマンスを評価した。

また、パリ協定でプレッジされた将来の評価に使用するモデルについては、データの年数が増えたことと、2005 年の京都議定書発効前の世界的な排出削減努力の証拠がほとんどないことから、2004 年までのデータを用いて ML モデルと AS モデルを推定した。そして、2012 年までのサンプル期間外予測と、ML モデルの場合は 1960 年から 2004 年までの二酸化炭素モデルと同様の無作為化クロスバリデーション法を用いて、最も性能の高いモデルを特定した。

このように、数十万のモデルを評価することで、機械学習フレームワークは、（サンプル期間外の）予測力の観点において、既往文献の CO_2 排出量予測モデルを上回る予測モデルを選択する。また、多くの既往の経済分析が化石燃料由来の二酸化炭素排出量のみに焦点を当てているのとは対照的に、ここでは、二酸化炭素排出量と温室効果ガス排出量の両方の予測モデルを推定した。各国の「最適な」予測モデルを推定することで、プレッジ目標の達成に必要な予想排出削減量を評価し、各国の緩和努力を比較し、政策がなかった場合の予測された排出量からの排出削減に対して、計画している国がプレッジで説明する BAU 排出量を過大評価する傾向があるかどうかを調査することが可能となる。以下、Auffhammer and Steinhauser 法を AS 法、機械学習法を ML 法とそれぞれ記す。

これらのモデルは、「Global Carbon Project」、「WRI CAIT」、「BP Statistical Outlook」の各データベースの排出量データを用いて推計した。また、世界銀行（2019 年）の世界開発指標、USDA Economic Research Service（2019 年）、Penn World Tables（Feenstra et al.[41]）など、さまざまな経済生産データセットを採用した。しかし、モデリングの結果は、経済データソースの選択に影響されないことが明らかになった。

一方、排出量予測との比較のために、先進国については、UNFCCC への隔年報告書から排出量予測のデータセットを用いた。また、BAU からの削減率で NDC を規定している途上国については、その国の NDC および UNFCCC への関連提出資料で報告された排出量予測を使用した。CO_2 排出量のみを対象とする場合は、温室効果ガスの排出量目標を、実現した最新の排出量データから変化率に換算し、その変化率をその国の CO_2 排出量に適用した。

③　分析結果

図 4.1.2-7 には、統計モデルや機械学習モデルを用いて、気候変動政策がなかった場合に世界の CO_2 排出量がどのようになると予想されるかを示した。2000 年から 2018 年までの期間について、実現された世界の排出量、最も性能の高い AS モデルと最も性能の高い ML モデルによる世界の排出量のバックキャスト、およびこの期間の開始時までに発表された 3 つの著名な排出シナリオ（IPCC IS92a シナリオ、2000 年 IEA-WEO、2000 年 EIA international outlook）を示している。AS モデルと ML モデルは、この 20 年間の世界の排出量をほぼ正確にトレースし、2005 年以降のどの年においても、実現した排出量とバックキャストされた排出量は、事前の排出量予測よりも概ね 2～3$GtCO_2$ 多くなっている。このことは、実現した経済的成果を考慮して、政策がなかった場合

の排出量予測を更新することの重要性を示している。また、この時期には、世界的に排出量削減の努力がほとんどなされていないことも明らかになった。

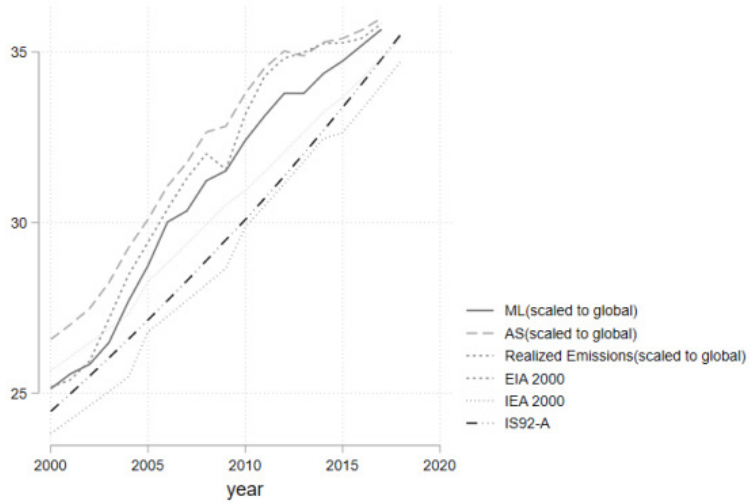


図 4.1.2-7　2000-2008 年の世界 CO_2 排出量（実際排出量と予測排出量）

次に、過去 30 年間に合意された 3 つの緩和目標とターゲット（UNFCCC2000 年目標、京都議定書、コペンハーゲン合意）を評価するために、排出量の統計モデルを使用した。まず、UNFCCC に加盟している附属書 I 国の 2000 年の二酸化炭素排出量の実測値と、本分析で開発した統計モデル、および実現された経済データを用いた場合の排出量の推定値（バックキャスト）を比較した。次に、2008 年から 2012 年までの京都議定書の定量的な排出目標について、比較を行った。最後に、コペンハーゲン合意とカンクン合意で定められた 2020 年の自主目標について、代理指標として 2019 年のデータを用いて分析を行った。

1990 年から 2000 年にかけての附属書 I および世界の排出量を、実現された経済データに基づいてバックキャストした結果、機械学習モデルは実現された排出量をかなり忠実にトレースできることがわかった（図 4.1.2-8）。これらの結果から、1990 年代には緩和努力がほとんど行われなかったこと、また、附属書 I の排出量の減少は、この 10 年間に多くの国で経済生産が減少したことで完全に説明できることがわかる。

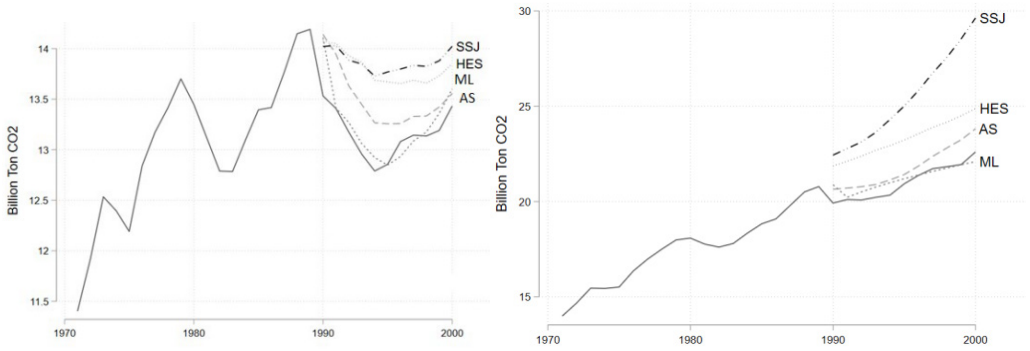


図 4.1.2-8　1990-2000 年の世界排出量比較（左：附属書 I 国、右：世界）

実際の経済データに基づいた 2012 年までの附属書 I 国および世界の排出量のバックキャストをみると、機械学習モデルは、政策がなかった場合の予測排出量を経済生産高の関数として明確に推定していることを示している（図 4.1.2-8、図 4.1.2-9）。機械学習モデルでは、2009 年の世界的な景気後退をより適切に考慮して、政策がなかった場合の排出量を算出しており、これも実現排出量にかなり近いものとなっている。世界の実現排出量が ML のバックキャスト排出量をわずかに上回っているが、これは、これらのモデルが急成長している途上国の排出量をまだ過小評価している可能性を示唆している。この点については、今後の研究課題である。

実現された排出量と ML 予測の差として緩和努力を計算すると、カナダ、ドイツ、イタリア、フランス、イタリア、英国、米国では比較的大きな CO_2 排出量の削減が推計された。AS 予測では、いくつかのケースでは、これらの国の経済活動を考慮した場合に予想されたよりも排出量が多かったことを示している。これらの結果は、京都議定書の第一約束期間において、排出量削減政策と低炭素エネルギーおよび機器の技術革新が、先進国の排出量削減にささやかな効果をもたらしたことを示唆している。

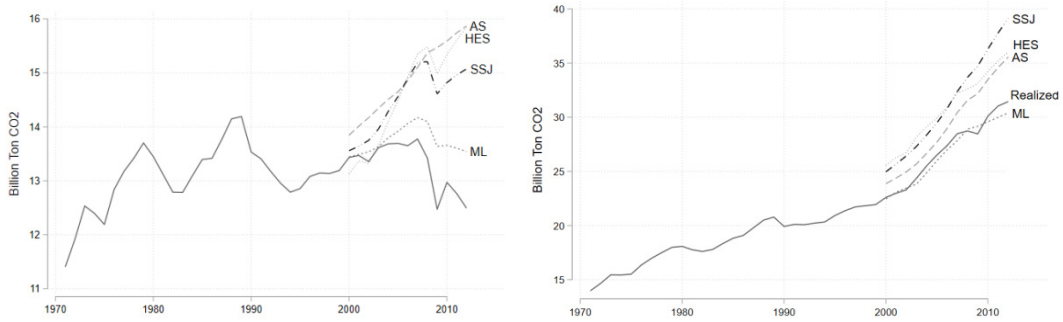


図 4.1.2-9　2000-2012 年の世界排出量比較（左：附属書 I 国、右：世界）

次に、2009 年のコペンハーゲン合意に基づく、先進国と途上国が 2020 年までの排出量削減の評価を行った。COVID-19 とそれに伴う経済的混乱が今年の排出量に与える影響により、2020 年のコペンハーゲン目標の達成度を評価することが非常に困難であり、

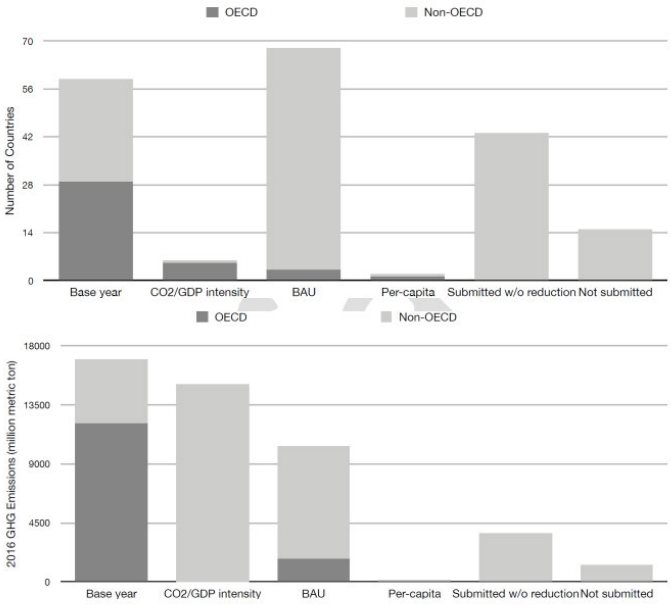
偏りが生じる可能性があることから、2020 年の目標を 2019 年の代理指標として、コペンハーゲン合意に基づく緩和努力の事後評価を行った（表 4.1.2-3）。

先進国では、ML 法は、AS 法よりも大きな排出削減量を概ね示している。オーストラリアやカナダなど、いくつかのケースでは、実現した排出量が AS 法の予測値を上回っている。一般的に、途上国は掲げた目標に対して、先進国よりも多くの排出量を削減しているように見えるが、先進国は政策がなかった場合の予測排出量レベルに対して排出量を削減しているように見える。このようなモデルの違いにより、中国とインドの原単位目標の解釈が難しくなっている。

表 4.1.2-3　2020 年の CO_2 排出量

Country	Realized Emissions	AS Backcast	ML Backcast	CA 2019 Target	"Effort" vs. Target	"Effort" vs ML Backcast	"Effort" vs AS Backcast	CA Target (Type, %, base year)
Australia	428	376	475	341	87	-47	49	Base Year,2000-5%
Canada	556	491	641	457	100	-85	65	Base Year,2005-17%
France	299	360	450	296	3	-151	-61	Base Year,1990-20%
Germany	684	632	924	813	-129	-240	52	Base Year,1990-20%
Italy	325	330	501	320	5	-175	-5	Base Year,1990-20%
USA	4965	5091	7150	4941	23	-2186	-126	Base Year,2005-17%
Brazil	441	341	387			55	100	BAU-35%
Indonesia	632	459	366	713	-81	267	173	BAU-25%
Mexico	455	521	488	616	-161	-33	-66	BAU-30%
South Africa	479	513	514	490	-11	-35	-34	BAU-34%
China	9826	11162	5717	9364	462	4109	-1336	CO2 Intensity,2005-45%
India	2480	2660	1361	2731	-251	1120	-180	CO2 Intensity,2005-25%

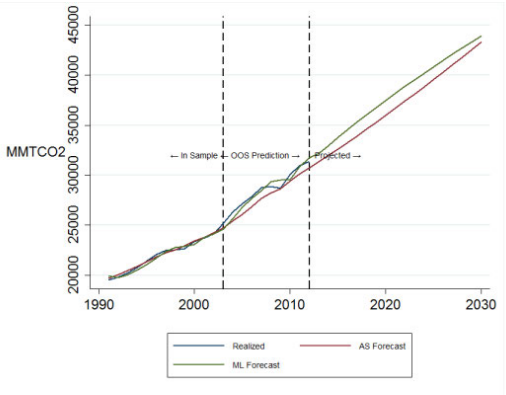
最後に、2030 年の NDC に対する評価を実施した。各国の 2015 年パリ協定の緩和誓約に関連する暗黙の緩和努力を評価するために、すべてのプレッジを 2030 年の予想排出量に変換した。図 4.1.2-10 は、国別に評価し、データベースに登録されている最新年度の排出量で重み付けした場合の、緩和策のプレッジの種類の違いを示している。炭素強度のプレッジをしているのはわずか 3 カ国であるが、中国とインドが含まれる。この図は、パリ協定の枠組みのプレッジの下では、世界全体で緩和策の種類が大きく異なることを示している。



Notes. The top figure plots the number of countries that chose each pledge type by OECD status. ``Base year'' refers to pledges that define aggregate reduction from a historical year (e.g., 30\% reduction from 1990 emissions), ``BAU'' refers to pledges that define aggregate reduction from a business-as-usual emission forecast in a future year (e.g., 30\% reduction from a business-as-usual forecast of 100 million metric tons in 2030). The bottom figure plots the 2016 GHG emissions including land use, land use change and forestry (LULUCF) of OECD vs. non-OECD countries under each pledge type.

図 4.1.2-10　NDC プレッジの種類別分布

ML 法は、サンプル外の 2005 年から 2012 年でより良いパフォーマンスを示している。2030 年の世界の CO_2 排出量の予測は、世界のエネルギー経済モデルによる BAU の推定値（例えば、Aldy et al.[39]）と同様である。



Notes: The Auffhammer-Steinhauser (AS) and machine learning (ML) models are estimated on data through 2004 and the selected models for forecasting through 2030 are based on their forecasting accuracy over 2005-2012.

図 4.1.2-11　NDC プレッジの種類別の国分布

表 4.1.2-4 は、先進国の隔年報告書における 2030 年の排出量予測と、ML モデルによる予測との比較を示す。EU、日本、米国の隔年報告書の排出量は、ML 法の予測値を下回っている。これは、EU や日本、米国が 2015 年および 2016 年の報告書でこれらの予測を発表した際に、既存の排出削減政策やプログラムを考慮していることを反映していると考えられる。対照的に、ロシア、ノルウェー、ニュージーランドなどの資源

集約国は、ML モデルから予測される値よりも高い排出量予測を報告している。これは、これらの国の戦略的なインセンティブを反映している可能性がある。すなわち、排出量を削減するという外見と、化石燃料や農業活動における排出量削減の負担を最小限にするという利益のバランスを取ろうとしているのかもしれない。透明性のない高い排出量予測は、重要な国内気候政策がなくても、実際の排出量が高い予測を下回ったときに、排出量を削減しているように見せかけることを可能にする。先進国の 2030 年の排出量予測の合計は、ML 法の合計よりも約 5%低いレベルとなっている。

表 4.1.2-4　2030 年における、ML 法予測値と隔年報告書値の比較（先進国）

Nation / Region	%age vs. ML Forecast
Canada	-11
EU-28	-14
Japan	-5
New Zealand	21
Norway	26
Russia	7
Switzerland	-41
United States	-4

注：The percentages in the table correspond to (biennial report forecast/ML forecast)-1.

表 4.1.2-5 は、途上国の ML モデルによる予測との比較を示す。過去の排出量データと経済・人口予測データの両方が十分にあり、独自の排出量予測を行っている約 70 の途上国のうち、45 の国を挙げている。途上国の多くは、ML 法の予測値を大きく上回る独自の排出量予測（NDC に記載された）を行っていることが明らかとなった。各国の独自の予測値が ML 法予測値と同程度かそれ以下である国は、小規模な発展途上国である傾向があり、小島嶼国に偏っている。中所得国や大規模な発展途上国では、本分析の ML 法予測値よりも高い排出量予測を行っていることが多い。

表 4.1.2-5　2030 年における、ML 法予測値と隔年報告書値の比較（途上国）

Na ion	%age vs. ML Forecast	Nation	%age vs ML Forecast	Na ion	%age vs. ML Forecast
Afghanistan	37	Ghana	-17	Namibia	-9
Angola	-10	Guatemala	8	Niger	192
Bangladesh	-41	Haiti	98	Paraguay	226
Barbados	-34	Honduras	-50	Peru	-23
Benin	-9	Indonesia	22	Sao Tome & Principe	-19
Burkina Faso	172	Jamaica	-6	Senegal	-43
Burundi	16	Jordan	-13	Seychelles	-48
Central African Republic	103	Kenya	61	South Korea	4
Chad	-46	Lebanon	41	St. Lucia	-42
Colombia	17	Madagascar	224	Thailand	21
Comoros Islands	-39	Maldives	26	Togo	158
Cote d'Ivoire	6	Mauritania	34	Trinidad and Tobago	153
Djibouti	162	Mauritius	-18	Turkey	163
Ethiopia	117	Mexico	48	Vietnam	232
Georgia	115	Morocco	95	Yemen	32

注：The percentages in the table correspond to (nationally determined contribution forecast/MLforecast)-1

④ まとめ

本分析では、統計モデルや機械学習モデルを用いて、気候変動政策がなかった場合の各国の CO_2 排出量を推計し、隔年報告書や NDC に記載された BAU 排出量との比較を行った。分析結果から、BAU から排出量を削減することを約束した途上国については、NDC に記載した BAU 予測が大幅に過大評価していることがわかった。これは、公約を実現するために必要な緩和努力が隔年報告書よりも実際には少ないことを示唆している。また、資源集約型の先進国（ロシア、ノルウェー、ニュージーランドなど）では、本分析のモデルで予測した値よりも高い排出量を予測している可能性が高いことが示された。また、途上国の多くは、ML 法の予測値を大きく上回る独自の排出量予測（NDC に記載された）を行っていることが明らかとなった。

(3) WITCH を用いた主要国の 50 年目標の分析

① はじめに

最近、いくつかの主要国が野心的な脱炭素化計画として、今世紀半ばまでに新たな気候変動へのコミットメントを発表し、また国別貢献度（NDC）を改定した国もみられる。これらの変更された公約が世界的にどのような影響を及ぼすかは、他国がどのような行動をとるかに依存するため、不明瞭である。ここでは、WITCH の統合評価モデルを用いて、これまでの公約を評価し、パリ協定の長期目標達成への影響を評価した。WITCH モデルの大きな特徴は、技術の波及効果と技術変化を内生的に表現している点である。

② 分析方法

表 4.1.2-6 には、最近 NDC2030 年目標を更新した国を示す。表 4.1.2-7 には、2050 年（中国は 2060 年）の各国の削減目標（mid-century strategies (MCS)）を示す。これには、中国、EU、米国、日本、韓国のカーボンニュートラルと、メキシコやカナダの排出削減目標などが含まれる。本分析のシナリオは、条件付き NDC が実施される 2030 年までは、現行の政策を反映している。

表 4.1.2-6　NDCs を更新した国の目標

Gas	Region	Target years	Target reduction(faction)	
GHG	Argentina	2030	0.26	wrt to the previous target
GHG	Chile	2030	2 MtCO2e lower than previous	peak in GHG by 2025 (not implemented)
GHG	Ethiopia	2030	213 MtCO2e	higher than previous
GHG	EU	2030	0.55	wrt 1990
CO2	Kenya	2030	0.32	wrt BAU
GHG	Norway	2030	0.55	wrt 1990
GHG	UAE	2030	0.325	wrt BAU
GHG	UK	2030	0.68	wrt 1990 (Implemented within EU)

表 4.1.2-7　各国の 2050 年削減目標

Gas	Region	Target years	Target reduction(%)
GHG	Japan	2050	100%
GHG	South Korea	2050	100%
GHG	USA	2050	100%
GHG	EU	2050	100%
CO2	China	2060	100%
GHG	Mexico	2050	50%
GHG	Canada	2050	80%

③　分析結果

図 4.1.2-12 と図 4.1.2-13 には、各シナリオにおける世界および地域別の GHG 排出量をそれぞれ示した。NDC 継続という比較的緩やかな削減シナリオ（NDC_continuation）であっても、2060 年までに、排出量は現行政策シナリオ（CurPol）と比較して 52.2%減少する。この排出量の削減は、世界の気温を 2℃以下に維持するために必要なものの 60%近くに相当する。もし NDC が収束する場合（NDC_convergence [1]）には、すなわち他の国の気候変動への緩和策がさらに強化されれば、2℃の排出ギャップの最大 91%を埋めることができる。これらの結果は、カーボンニュートラルの発表が気候政策に与える大きな影響を浮き彫りにすると同時に、国際協力の関連性を強調している。また、パリ目標を遵守するためには、削減目標プレッジのさらなる強化が必要であることを示している。

[1] 2050 年までに世界各国が OECD 諸国の平均炭素価格に収束するケース。

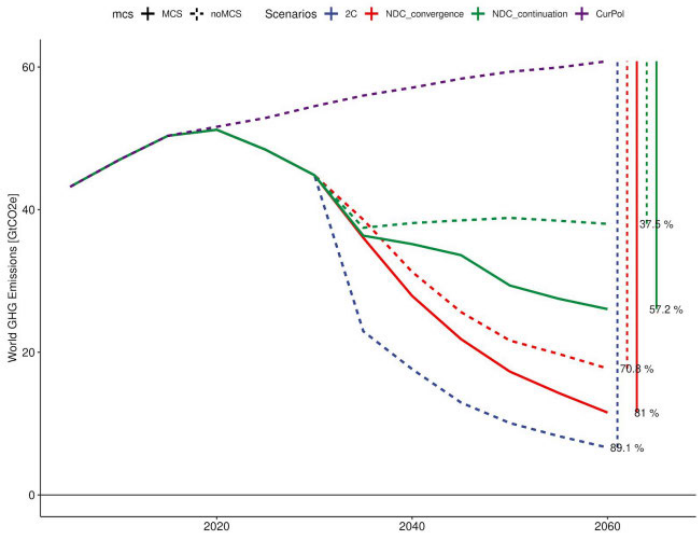


図 4.1.2-12　WITCH モデルによる、各シナリオの世界 GHG 排出量

注：Vertical bars represent the reduction, in percentage, with respect to the CurPol scenario by 2060. Dashed lines represent the scenarios without mid-century strategies (MCS).

カナダ、中国（2050 年まで）、メキシコ、EU などの一部の地域では、掲げている mid-century strategies (MCS)は 2℃への最適経路よりも緩いため、これらの地域は排出削減の野心をさらに高めることを目指すべきである。一方、米国、日本、韓国（2050 年以降）、中国（2050 年以降）では、世紀半ばの戦略は、パリ目標に沿って、2℃への最適な排出経路と同等かそれ以上に野心的なものとなっている。

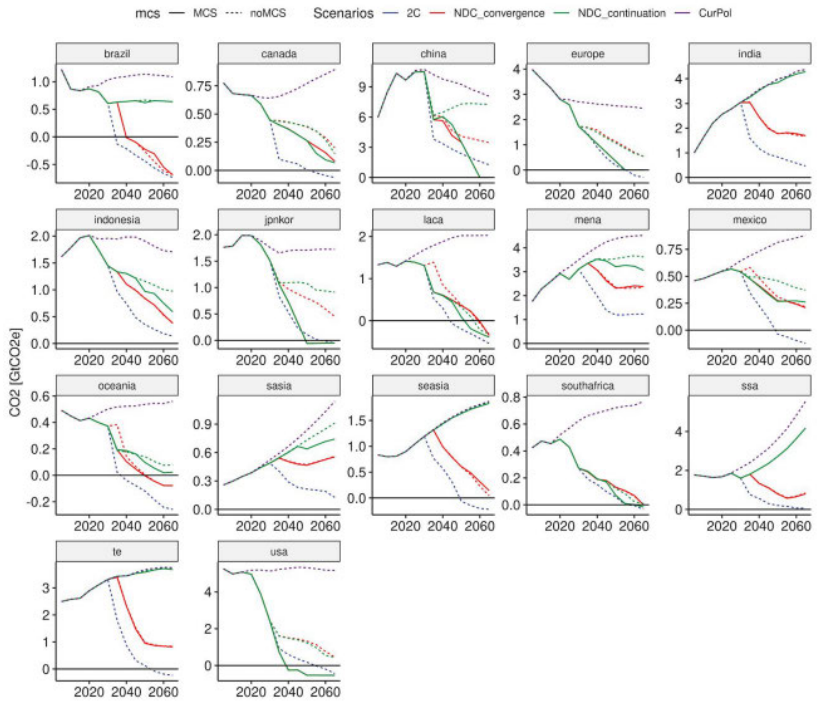


図 4.1.2-13　WITCH モデルによる、各シナリオの地域別 GHG 排出量

図 4.1.2-14 には、WITCH モデルによる、各シナリオ（NDC 継続・MCS と、2 度目標）の地域別投資額をエネルギー技術別に示している。欧州、日本、韓国、中国、米国では、交通機関の電化に大規模な投資が必要になると推計されている。NDC 継続・MCS では、2℃ケースに近い投資が必要と推計される。脱炭素化の鍵である電力セクターについては、電力市場の機能を確保するために、再生可能エネルギーや電力貯蔵に大規模な投資が集中すると予想される。MCS の投資ニーズは、欧州では 2℃を満たすために必要とされる投資ニーズと一致しているが、その他の主要国では MCS の投資ニーズは相対的に低い。また、技術別にみると、MCS では風力と太陽光への投資が減少し、CCS と DAC への投資シフトが見られる。

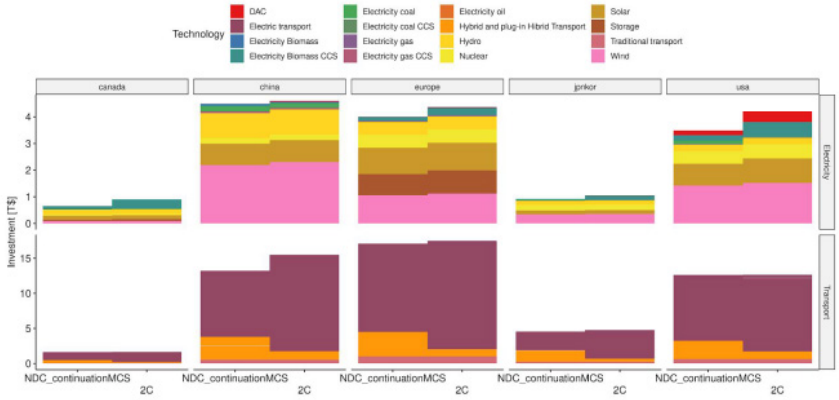


図 4.1.2-14　WITCH モデルによる、各シナリオの地域別投資額

図 4.1.2-15 と図 4.1.2-16 は、WITCH モデルによる各シナリオの GDP ロス（現在価値換算）と排出削減量をそれぞれ示している。主要な先進国では、MCS により GDP ロスが拡大する傾向がみられる。気候変動政策が経済的に逆進性（炭素集約的な国（多くは途上国）への影響が相対的に大きい）を持ち、炭素集約国の経済に大きな打撃を与えることを示している。しかし、このような分配上の悪影響は、主要な中高所得国の MCS によって部分的に緩和されることを示している。この傾向は、推計されるジニ係数においても確認された。また、MCS は大気汚染による死亡率の低下というコベネフィットも生じる可能性が確認された（図 4.1.2-17）。

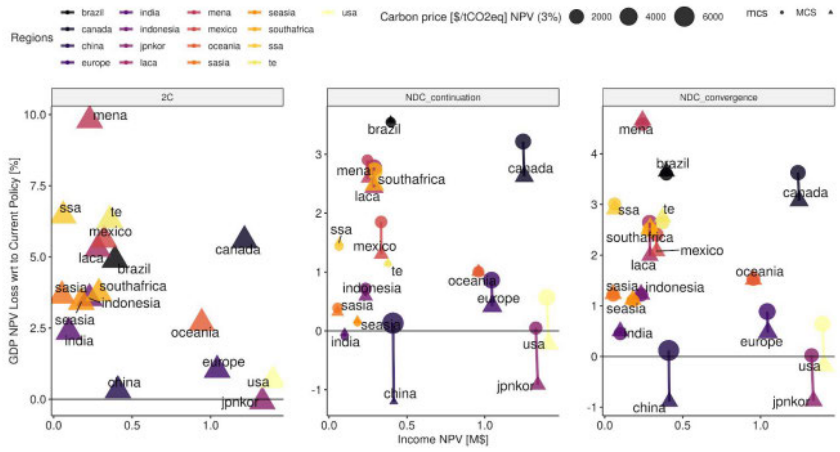


図 4.1.2-15　WITCH モデルによる、各シナリオの GDP ロス

注：Triangles and circles represent scenarios without and with mid-century strategies. Size of symbols represents the regional carbon prices.

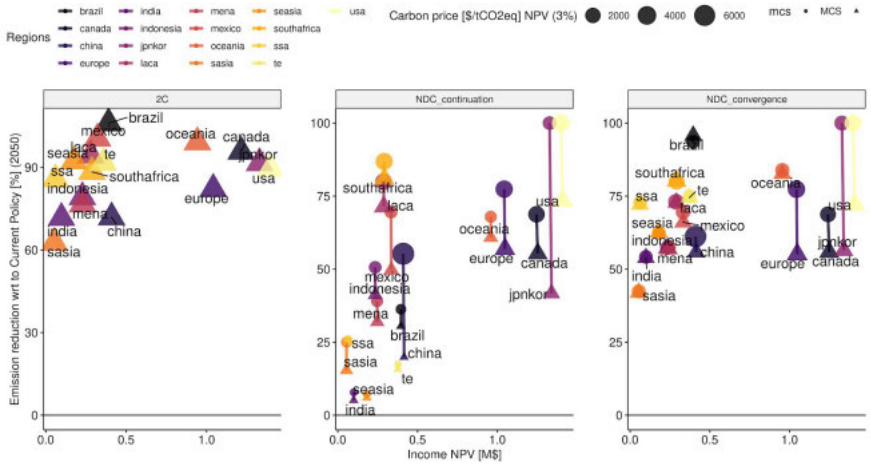


図 4.1.2-16　WITCH モデルによる、各シナリオの排出削減量

注：Triangles and circles represent scenarios without and with mid-century strategies. Size of symbols represents the regional carbon prices.

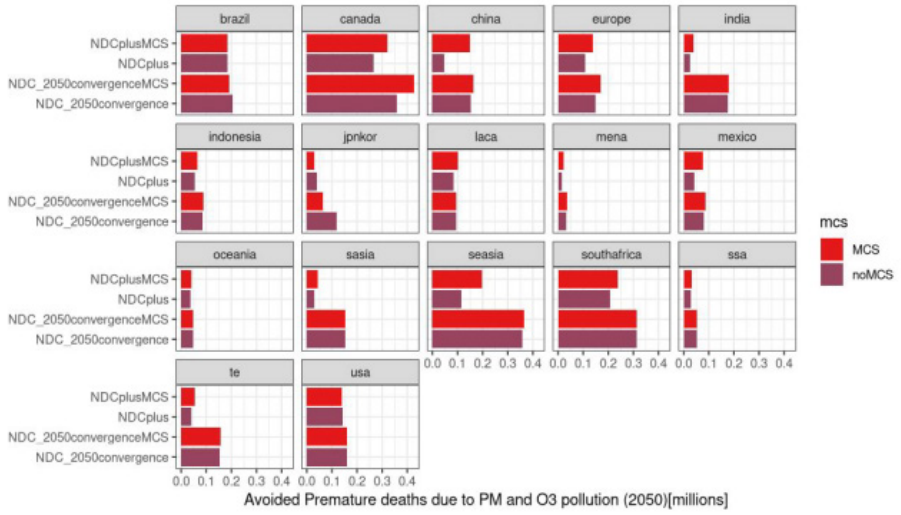


図 4.1.2-17　FASST(R)モデルによる、大気汚染起因の回避死亡数

④　まとめ

統合評価モデル WITCH を用いて、いくつかの主要排出国が発表したカーボンニュートラルを含むパリ協定の長期的な気温目標を評価した。その結果、現在の掲げられている地域別の削減目標は、パリ協定の長期目標をまだ満たしていないと評価された。しかし、各国の 2050 年戦略は、排出量を削減し、世界の気候政策とのギャップを部分的に埋めていることが確認された。さらに、不平等の拡大を緩和し、大気汚染による死亡率の低下というコベネフィットも評価された。

(4) CMCC-ICES モデルによる、ネットゼロ排出ナリオにおける国境炭素調整の分析

①　はじめに

本分析では、ネットゼロ排出を目指すパリ協定に沿う「高い」炭素価格を誘導する政策の実現に、国境炭素調整措置が果たす役割を調査した。

②　分析方法

CMCC-ICES モデル（図 4.1.2-18、一般均衡モデル）を用いて国境炭素調整措置の分析を行った。ベースラインは、「World Energy Outlook（WEO）2018」（IEA, 2018）における 2030 年までの地域別の GDP と CO_2 排出量の推移に従った。リファレンス緩和シナリオ（REF）は、1.5℃目標の経路に沿って、2050 年までに 400Gt の CO_2 バジェットを達成する「高い野心」を反映している。これは、2030 年の世界の CO_2 排出量を 2011 年比で 33%削減することに相当する。この目標は、EMF36 で使用された方法に基づく。目標（炭素強度に関する目標も含む）は、明示的または暗黙的な炭素税によって実施されると想定した。国際的な排出量取引は想定せず、各地域が独立して行動すると想定した。

また、国境炭素調整として、次の 2 種類を考慮した。

（１） 国内に炭素市場を持つ気候クラブ（クラブに属する国間での排出量取引を認める）であるが、国境炭素調整は行わない（Club1)。ここでのクラブは、EU、日本、韓国と想定した。
（２） 炭素市場と国境炭素調整を有する気候クラブ。国境調整は、貿易商品の炭素含有量と、クラブ内の炭素価格と輸入元国の炭素価格との価格差に基づいて計算される追加輸入関税としてモデル化される。

（２）と（１）を比較すると、国境炭素調整によって、緩和目標が厳しいクラブと、目標が緩和されている地域の間で、気候政策のコストをより均等に分配することができる。シミュレーション（２）は、さらに 2 種類の想定を置いた。

(2a) クラブ外の国からの漏出に対する潜在的な効果を検証するために、（１）で推計された税金は一定のままとし、国境炭素調整のみを有効とする（Club1-BCAS2a)。
(2b) クラブ内外の国の GDP コストに対する国境炭素調整の効果を検証するため、元の排出量（または炭素強度）目標に正確に一致するように税を再計算した（Club1-BCA-S2b)。

Regions			*Sectors*	
EUR	Europe		AGR	Agriculture
jpn	Japan		col	Coal
kor	South Korea		CRU	Crude oil
usa	USA		EIT	Energy intensive trade exposed
can	Canada		ele	Electricity
bra	Brazil		gas	Gas
chn	China		MFR	Manufacturing
ind	India		oil	Oil products
ANZ	Australia & New Zealand		SER	Services
AFR	Africa		TRN	Transport
rus	Russia		FD	Final demand
MEA	Middle East			
OAM	Other Americas			
OAS	Other Asia			

図 4.1.2-18　ICES モデルの地域分類・産業分類

③ 分析結果

炭素価格が国境炭素調整を行わずに排出削減目標の達成を可能にする水準に固定される条件の下で、国境炭素調整が実施された場合（Club1-BCAS2a）には、クラブに属する国の国際競争力が増加し、排出量はクラブ内で増加し、クラブ外では削減される。すなわち、国境調整措置により、カーボンリーケージが軽減される。しかし、その効果はかなり限定的である。また、本分析では、産業別にみると、国境調整は炭素集約産業（EITE）に有利に働き、軽工業には悪影響がみられ、今後詳細に検討が必要である。

一方、国境炭素調整を実施し、同時にクラブ内外の排出削減プレッジが変更されない場合（Club1-BCA-S2b）には、クラブ内で排出削減量が再分配される。欧州では排出量が増加し、日本と韓国では排出量が減少すると推計された。ただし、Club1-BCAS2a とは異なり、海外では顕著な影響は見られない。

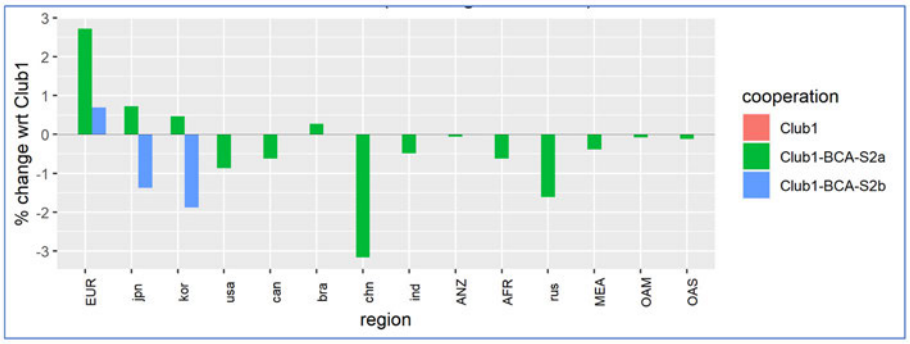


図 4.1.2-19 国境炭素調整の実施による CO_2 排出量変化（Club1 比）

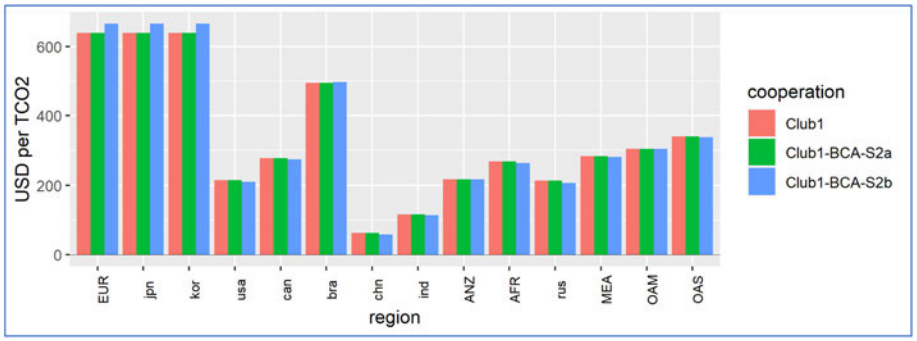


図 4.1.2-20 各シナリオの炭素価格

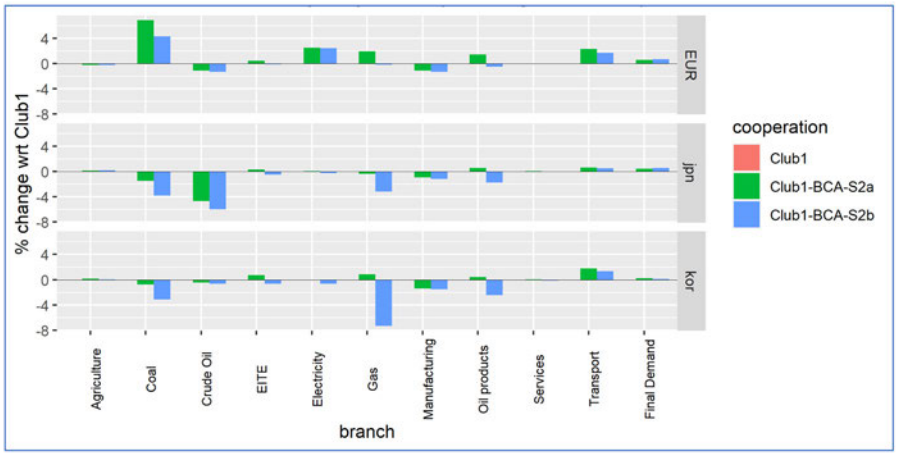


図 4.1.2-21 国境調整措置による、クラブ参加地域の産業別生産への影響

(5) パリ協定とジオエンジニアリング戦略

Abatayo[42]では、パリ協定とジオエンジニアリング戦略について検討した。パリ協定の目標に沿った温暖化防止のための十分な排出削減ができなかった場合には、地球工学的介入の可能性が問われることになりうる。しかし、ジオエンジニアリングを管理することは困難である。気候に対する選好は国によって異なるため、社会的に最適な

レベルに比べて、ジオエンジニアリングによる過剰な導入が行われる可能性がある。Abatayo[42)]では、公共の善悪ゲームの実験を通して、サイドペイメント（補償）がこのガバナンス問題に対処できるかどうかを分析した。ジオエンジニアリングの「フリードライブ」の問題を、サイドペイメントで解決できるかどうかを分析した。現段階では、大規模なジオエンジニアリングの実施例がないため、ジオエンジニアリングのガバナンスに関する洞察を得るために、実験室での実験を実施した。サイドペイメントは理論的には有効であるが、実験結果によると、特に多国間ではサイドペイメントが結果に与える影響はわずかであることが明らかになった。

参考文献（第 4.1.2 に関するもの）

1) A.F. Hof et al.; Global and regional abatement costs of Nationally Determined Contributions (NDCs) and of enhanced action to levels well below 2°C and 1.5°C, Environmental Science and Policy, 71 (2017), pp.30-40.
2) J. Aldy et al.,; Economic tools to promote transparency and comparability in the Paris Agreement, Nature Climate Change, 6 (2016), pp. 1000-1004.
3) Y.Robiou du Pont et al.,; Equitable mitigation to achieve the Paris Agreement goals, Nature Climate Change, 7 (2017), pp.38–43.
4) K. Akimoto et al.,; The analyses on the economic costs for achieving the nationally determined contributions and the expected global emission pathways, Evolutionary and Institutional Economics Review, 14-1 (2017), pp. 193–206.
5) J. Aldy; Frameworks for evaluating policy approaches to address the competitiveness concerns of mitigating greenhouse gas emissions, National Tax Journal, 70-2 (2017), pp.395–420.
6) T. Homma and K. Akimoto; Analysis of Japan's energy and environment strategy after the Fukushima nuclear plant accident, Energy Policy, 62 (2013), pp.1216–1225.
7) Global Trade Analysis Project (GTAP),
8) https://www.gtap.agecon.purdue.edu/ (アクセス日 2021.2. 1)
9) B. C. O'Neill et al.,; A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways, Climatic Change, 122 (2014), pp.387–400.
10) 本間隆嗣他; SSP ストーリーラインに基づいた将来の経済社会シナリオの策定, 第 30 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, 22-2 (2014)
11) Climate Policy Database, http://climatepolicydatabase.org/ (アクセス日 2021.2. 1)
12) K. Gi et al.; An analysis on global energy-related CO_2 emission reduction and energy systems by current climate and energy policies and the Nationally Determined Contributions, Journal of the Japan Institute of Energy, 97-6 (2018), pp.135-146.
13) D. G. Rassier and D. Earnhart; The effect of clean water regulation on profitability: testing the Porter hypothesis, Land Economics, 86-2 (2010), pp.329–344.
14) Paul Lanoie, Jérémy Laurent-Lucchetti, Nick Johnstone and Stefan Ambec; Environmental policy, innovation and performance: new insights on the Porter hypothesis, Journal of Economics and Management Strategy, 20-3 (2011), pp.803-842.

15) RITE; 平成 29 年度 長期的な温室効果ガス排出削減に向けた貢献量分析に関する調査報告書 (2018), https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000549.pdf (アクセス日 2021.2. 1)
16) Climate Change News; How von der Leyen could make a carbon border tax work, https://www.climatechangenews.com/2019/07/22/von-der-leyen-make-carbon-border-tax-work/ (アクセス日 2021.2. 1)
17) 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
18) Thompson, A., 2006. Management under anarchy: the international politics of climate change. Climatic Change 78(1): 7-29
19) Aldy, J.E. 2014. The Crucial Role of Policy Surveillance in International Climate Policy. Climatic Change 126(3-4): 279-292.
20) Aldy, J.E. and W.A. Pizer. 2016. Alternative Metrics for Comparing Domestic Climate Change Mitigation Efforts and the Emerging International Climate Policy Architecture. Review of Environmental Economics and Policy 10: 3-24.
21) Auffhammer, M. and Steinhauser, R., 2012. Forecasting the path of US CO_2 emissions using state-level information. Review of Economics and Statistics 94(1): 172-185.
22) Feenstra, R.C., R. Inklaar, and M.P. Timmer. 2015. The Next Generation of the Penn World Table. American Economic Review 105(10): 3150-3182, available for download at www.ggdc.net/pwt
23) A.L. Abatayo et al; Governing Climate Geoengineering: Side-Payments Are Not Enough, RFF working paper, 2021, https://www.rff.org/publications/working-papers/governing-climate-geoengineering-side-payments-are-not-enough/

4.2 NDCs 評価の他研究の調査

2018 年度の RITE 報告書[1)]では 2019 年 3 月までに入手可能であった NDCs 評価、即ち UNEP2018 年版[2)]、Data Driven Yale et al.[3)]、PBL[4)]、CAT2018 年版[5)]の概要について整理・紹介した。また 2019 年度の RITE 報告書[6)]では、2019 年 4 月以降に発表された UNEP 2019 年版[7)]、Mills-Novoa and Liverman[8)]、CAT2019 年版[9)]の概要について整理・紹介した。

本節では、その後入手した文献[10)11)]を簡易的に紹介した後、UNEP 2020 年版[12)]の概要について記す。

4.2.1 近年発表された NDCs に関する研究

(1) Siriwardana and Nong (2021)[10)]

NDCs を各国があるいは国際的な連携の下、達成するための経済影響と環境に関する帰結を分析するため、著者らは GTAP-E モデルの気候変動政策バージョンを利用した。その結果、以下の示唆を得た。

- 途上国は NDCs 達成のための費用が、先進国よりも低位である。中国やインドは大量のカーボンクレジットを他の地域に販売することが可能と見られる。
- 各国がそれぞれ NDCs を達成しようとすると、国際排出権取引を行った場合と比べ費用が高くなることを確認した。
- 中国・インドが国際排出権取引市場に加われば、炭素価格は US$1.62/tCO$_2$eq まで低下する。また実質 GDP の低下は 0.1%にとどまり、多くの国の電力部門のロスも電力部門の売上のわずか 1%にとどまる。先進国は中国・インドが国際排出権取引市場に加わることで経済コスト負担を大幅に低減できる（図 4.2.1-1 参照）。
- 低コストで GHG 排出削減が可能な国であっても、国際排出権取引市場で得られた収益の利用について適切な戦略がない場合、便益を享受できない場合もある。

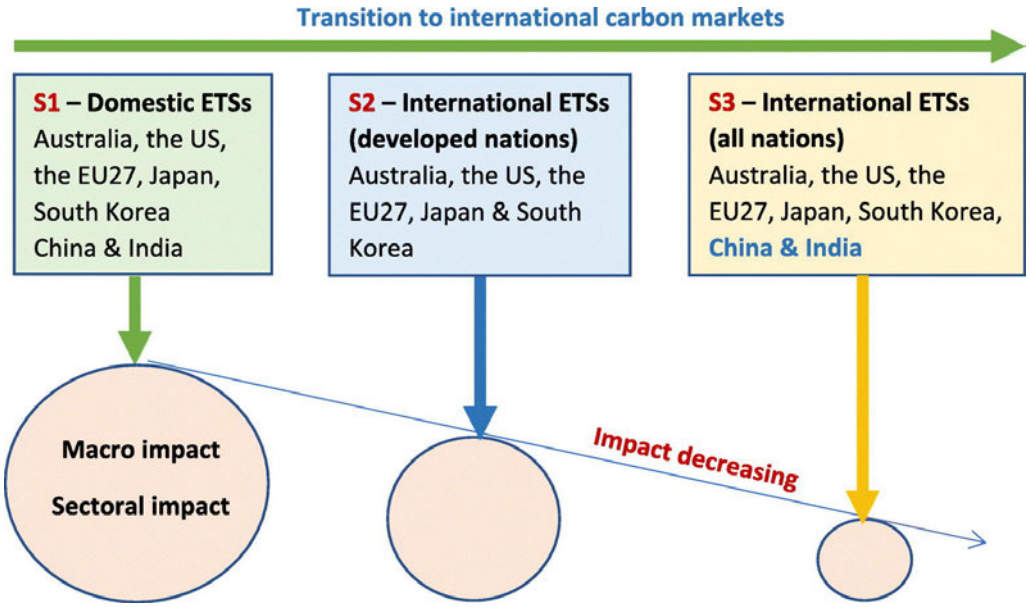


図 4.2.1-1 Siriwardana and Nong (2021)[10]のグラフィカルアブストラクト

(2) Weikmans et al (2020) [11]

パリ協定の透明性が各国の公約の野心度を高めることにつながるのではないか、と期待されている。そこで、パリ協定は締約国の温室効果ガス排出量、NDCs の実施と達成の進捗状況、適応行動、および財政に関する情報を報告およびレビューするための新しい「強化された透明性のあるフレームワーク(Enhanced Transparency Framework; ETF)」を導入した。ただし、透明性と野心度の向上の関係はほとんど検証されていない。

本論文では、最初に透明性が野心度向上につながりうるいくつかのパスについて概説する。これらのパスは、特に締約国のパフォーマンスに関する比較可能で完全かつタイムリーな情報の入手可能性に依存する。そのような情報の提供を阻害しうる 4 つの課題を特定し、将来、NDCs がより野心的となるようこれら 4 つの課題に対する対処法を提案する。

以下の 4 つの課題、すなわち

- ETF が持ち合わせている柔軟性が途上国にとって不完全で比較が難しい情報の生成をうながしうること
- 異質で定性的かつ条件付きの NDCs となっていること
- 気候変動への取り組みの進捗状況を定量化するための指標にばらつきが生じること
- 気候変動への取り組みと支援に関する報告方法（ガイドライン）が弱い（十分には明確となっていない）こと

により NDCs の達成に向けて締約国が（仮に継続的に努力していたとしても、その）実施した内容を評価および比較することは困難となる。

ETF の（政治と直結しない）設計だけでは、NDCs の野心のレベルを評価すること、あるいは締約国が NDCs を達成しているかどうかを評価すること、には必ずしもつながらない。また ETF は ETF 自体に参加することを政治的に望まない国に対処する準備ができていない。

4.2.2 UNEP による評価

UNEP「排出ギャップレポート 2020 年版」[12]は本文 100p 程度からなり、これまでの UNEP レポート [2)7)]の分量（80p 前後）から増加傾向にある。UNEP 2020 年版 [12]についても前半は「1.5℃目標あるいは 2℃目標の排出経路と NDCs 達成時の排出経路のギャップを提示する内容」、後半は「ギャップを埋めるための方策（トピック）」という構成を踏襲している。COVID-19 の影響を受け（これまでの UNEP レポート [2)7)]と比べ）書きぶりがかなり異なる変更された個所もある一方、「COVID-19 の影響を加味する前の見通し」も混在しており留意が必要である。以下、詳述する。

(1) UNEP「排出ギャップレポート 2020 年版」[12]の前半

UNEP 2020 年版 [12]の前半は、これまでのレポート [2)7)]同様に「1.5℃目標あるいは 2℃目標の排出経路と NDCs 達成時の排出経路の間に大きなギャップが存在すること」を提示している。さらに Excecutive summary 内を含め次の指摘を行っている。

- 2050 年までに正味ゼロ排出となる目標を表明した国が増加したことは、2020 年の気候変動政策として最も重要かつ推奨すべき進展である。正味ゼロ排出の実現に向けてその信頼性を高めるためにも、直ちに足元の気候政策や行動へ反映させるべきであり、NDCs も修正すべきである。

(2) UNEP「排出ギャップレポート 2020 年版」[12]の後半

後半で取り上げられた「ギャップを埋めるための方策（トピック）」は次の通りである。

- Chapter 4 Bridging the gap – implications of current COVID-19 fiscal rescue and recovery measures

- Chapter 5 Bridging the gap – the role of international shipping and aviation
- Chapter 6 Bridging the gap – the role of equitable low-carbon lifestles

以下、これら 3 方策について記載されている内容を順に示す。

Chapter 4 は COVID-19 の影響に対する救済措置と経済回復方策が低炭素に寄与する設計となっているかを確認する章となっている。その一部を抜粋し図 4.2.2-1 に示す。図 4.2.2-1 は建物・建築に関する方策をサーベイした結果を抜粋したものである。正味 7p にわたって個々の政策措置を「低炭素へ寄与するもの（例：図 4.2.2-1 上部の緑枠）」と「低炭素へ寄与しないもの（例：図 4.2.2-1 下部の赤枠）」に区分し提示している。

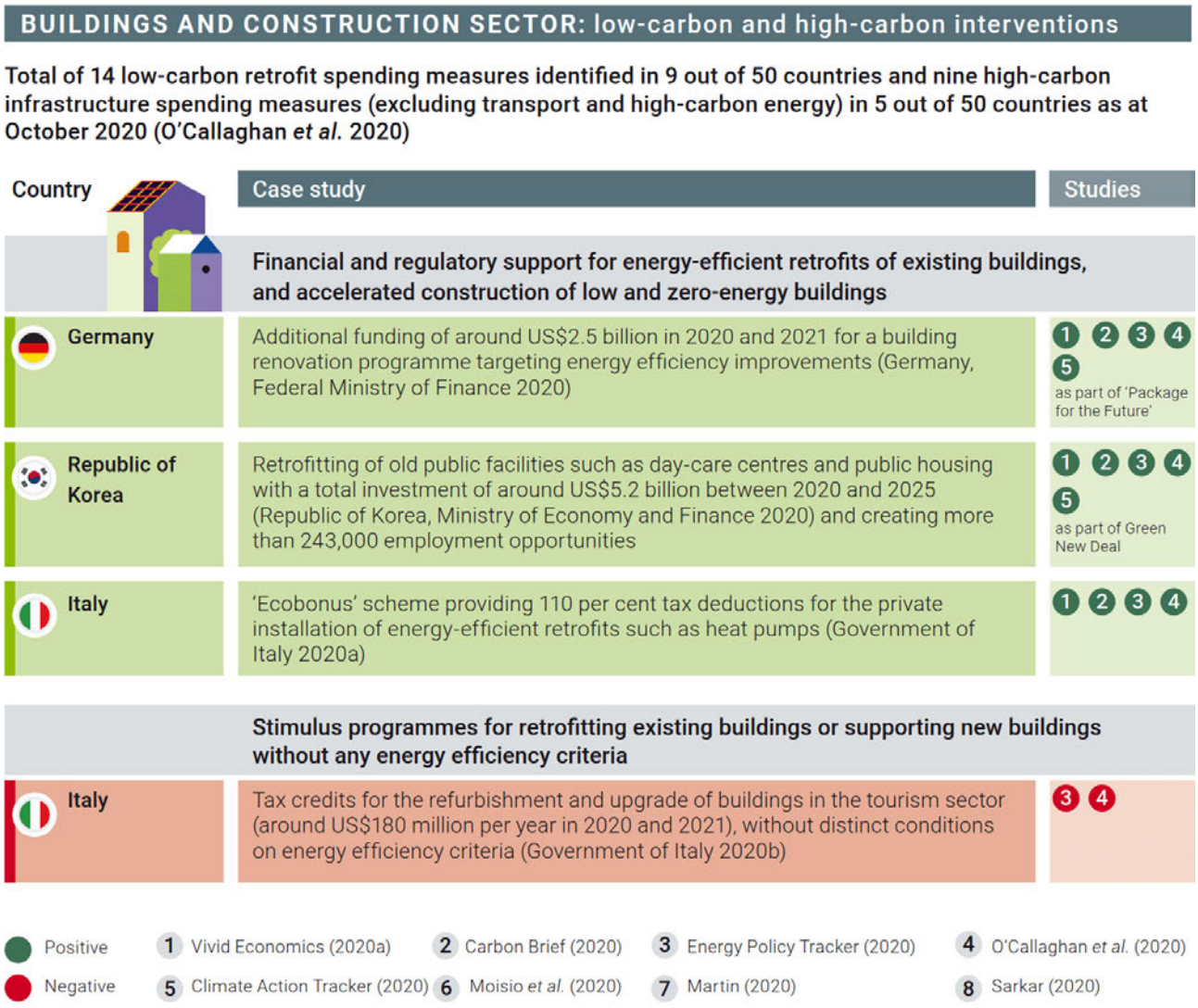


図 4.2.2-1 COVID-19 の影響に対する救済措置と経済回復方策の評価
：建物・建築に関する方策（出典：UNEP[12)]）

その上で、次の指摘を（Excecutive summary 内など含め）行っている。

- 2020 年の CO_2 排出量は COVID-19 の影響により 2019 年と比較し 7%（2-12%の範囲で）低下する見込みである。ただし CO_2 以外の GHG はそれほど影響を受けてないこともあり、大気中 GHG 濃度は 2020 年も上昇した。
- COVID-19 の影響、CO_2 排出低下は一時的なものであり（COVID-19 の影響は 2050 年の気温を 0.01℃低下させるにすぎず）長期的な影響は小さい。2030 年の GHG 排出を大幅に低下させるには強力な脱炭素政策を伴う経済回復が不可欠である。
- 現時点で、低炭素化への移行加速がなおざりなまま経済を刺激しようと財政資源を投入している。初期の経済刺激策（と低炭素・脱炭素への移行政策）は政策決定者に対し中期的将来へ向けた有用な洞察を提供する。

Chapter 5 は国際輸送貨物、国際航空に着目している。Chapter 5 は COVID-19 の影響を考慮する前の段階での将来見通し示している。国際輸送貨物、国際航空合計の排出量だけで、1.5℃シナリオにおいて 2050 年に許容される CO_2 排出の 60%～220%を占めるとしている。

Chapter 6 はライフスタイルや CO_2 排出量の格差に着目している。（Excecutive summary 含め）次の指摘を行っている。

- GHG 排出削減を持続的に進めるため、また排出ギャップを埋めるため、ライフスタイルの変更は必須である。消費ベースで計上すると世界の 2/3 の CO_2 排出は個人の家庭の活動に紐づいている。ライフスタイル変更によって排出削減を進めるためには、幅広いシステム変更と個人の行動変化の両方が必要である。
- 衡平性はライフスタイルに対応するための中心的課題である。世界人口の所得トップ 1%が排出する CO_2 量は、世界人口のボトム 50%が排出する CO_2 量よりも多い（図 4.2.2-2 参照）。

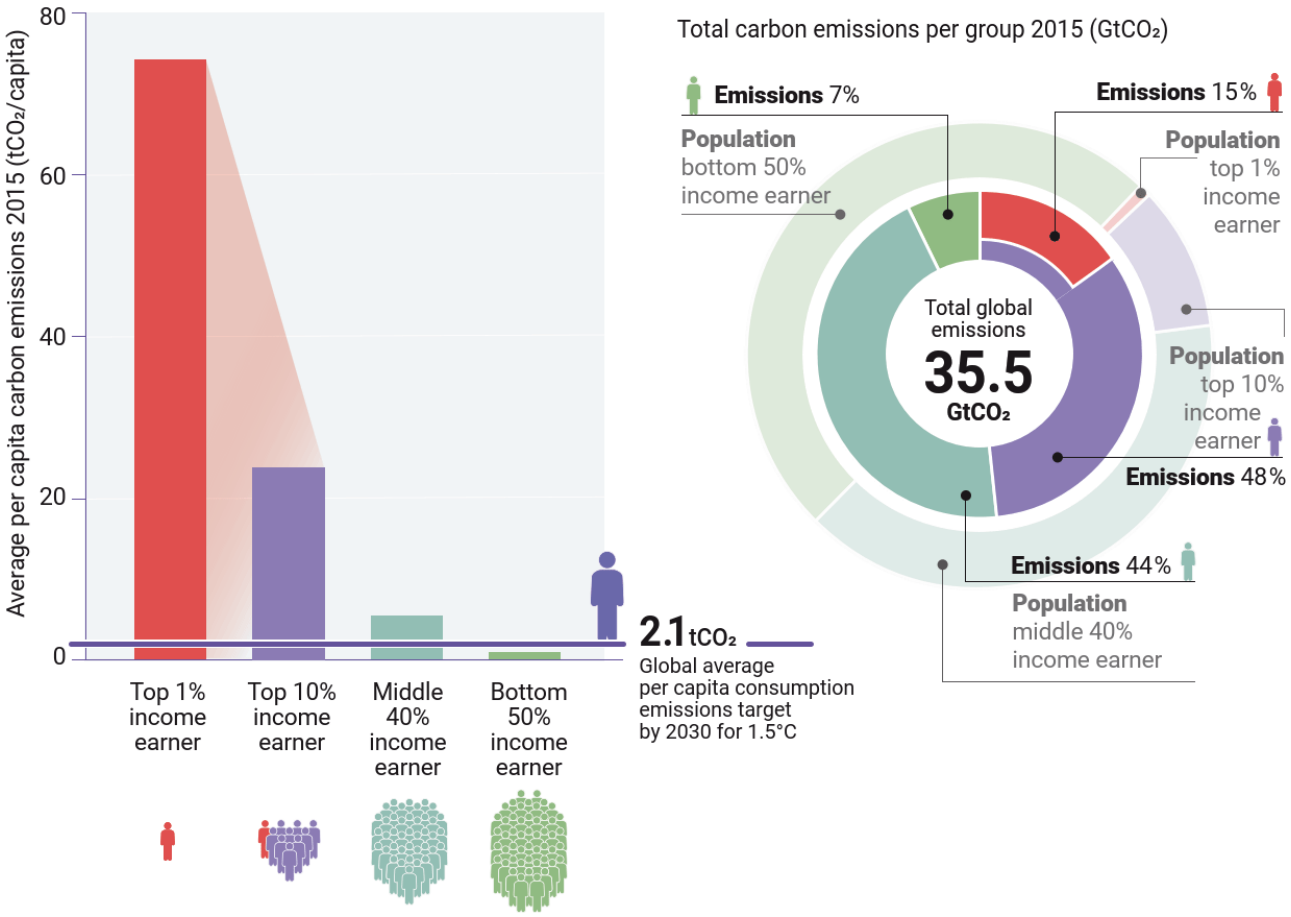


図 4.2.2-2 所得水準別の一人当たり CO_2 排出量・CO_2 排出総量（出典：UNEP[12)]）

参考文献（第 4.2 節に関するもの）

1) 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」、(公財)地球環境産業技術研究機構 平成 30 年度報告書 (2019)
2) UNEP: Emissions Gap Report 2018 (2018)
3) Data Driven Yale et al.: Global Climate Action from Cities, Regions, and Businesses (2018)
4) den Elzen et al.: Are the G20 Economies Making Enough Progress to Meet Their NDC Targets, Energy Policy, 126, 238-250 (2019)
5) CAT: Climate Action Tracker: Warming Projections Global Update, December 2018 (2018)
6) 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」、(公財)地球環境産業技術研究機構 令和 1 年度報告書 (2020)
7) UNEP: Emissions Gap Report 2019 (2019)
8) Mills-Novoa, M., Liverman, D.M.: Nationally Determined Contributions: Material Climate Commitments and Discursive Positioning in the NDCs, WIREs Climate Change, e589 (2019)
9) CAT: Climate Action Tracker: Warming Projections Global Update, December 2019 (2019)
10) Siriwardana, M., Nong, D.: Nationally Determined Contributions (NDCs) to Decarbonise the World: A Transitional Impact Evaluation, Energy Economics, 97 (2021)

11) Weikmans, R., van Asselt, H., Roberts, J.T.: Transparency Requirements under the Paris Agreement and their (Un)likely Impact on Strengthening the Ambition of Nationally Determined Contributions (NDCs), Climate Policy, 20(4), 511-526 (2020)
12) UNEP: Emissions Gap Report 2020, 9 December (2020)

4.3 国境調整税に関する動向調査とモデル試算例

4.3.1 国境調整税に関する国際動向

ある国・地域の温室効果ガスの削減費用負担が他の国・地域よりも大きくなる[2]と、当該国・地域のエネルギー多消費産業の国際競争力に影響を与えるとともに、CO_2排出量が他の国・地域にリーケージ（国内製品の海外製品による代替および生産拠点の海外移転）する可能性がある。これに対処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 は排出削減努力が不十分である国からの輸入品に対して国内産品と同等の負担を課す国境措置である。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。

1992 年に採択された国連気候変動枠組み条約の第 3 条 5 項[2)]では「(前略）気候変動に対処するためにとられる措置（一方的なものを含む）は、国際貿易における恣意的若しくは不当な差別の手段又は偽装した制限となるべきではない。」とし、国際貿易に対する言及がなされている。2009 年にデンマークのコペンハーゲンで開催された第 15 回国連気候変動枠組み条約（UNFCCC）締約国会議（COP15）において、国境炭素調整を巡って、欧米諸国を含む先進国と中国及びインドといった新興国との間で議論が対立し、最終的に合意には至らなかった[3)]。その後、COP の場で国境炭素調整に関し具体的な議論は行われていない。

しかし、その後、再び国境炭素調整に関する政策の議論が高まりつつある。2019 年 12 月 11 日、新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[4)]」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、今後 3 年間で各国のルール・規制を改定していく。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[5)]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、CO_2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を目的としている。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）[6)7)]。その中

[2] 例えば、NDC2030 年目標を地域別に比較分析した Aldy et al.(2016)など。

で、CBAM の主要な目的は CO_2 リーケージを避けることによる気候変動対策とし、CBAM の制度設定において考慮する要素として次の 3 つを挙げている。

1) 政策手法の種類：法的及び技術的実現可能性及び WTO 等のルールとの整合性を考慮する。様々なオプションの中には、特定の製品に対する炭素税（輸入財に対する新しい炭素関税あるいは輸入財に対する EU-ETS の拡張）も含まれる。

2) 輸入財における炭素含有量及び炭素価格の評価：EU-ETS で使用されているベンチマークを使用することもオプションの一つだが、代替アプローチも検討する。

3) 対象セクター：最も CO_2 リーケージのリスクが高いセクターを考慮する。

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。

4.3.2 国境炭素調整に関する先行研究事例

RITE(2020)[8]では、「応用一般均衡モデルを用いたモデル比較分析例」、「部分均衡モデルを用いた分析例」、そして「BCA のメタ分析例」を考察した。BCA の効果分析を行った文献はこれまで数多くあり、BCA が CO_2 リーケージ率を減少させ、エネルギー集約産業・貿易依存産業の生産ロスを改善する効果があることが示唆された。ここで用いられている先行研究は各国が同時に意思決定をする静学ゲームに基づいている。

小節では BCA の制度設計に関する包括的なレビューを整理し、これまで参照してきた静学ゲームではなく、各国が順序に従って他のプレーヤーの行動をみながら自身の行動をする（動学あるいは逐次ゲーム）を適用した研究例、そして最後に BCA の代替案を考察する。

(1) 制度設計に関するレビュー

Cosbey et al. (2019)[9] は、BCA の制度設計に関して包括的なレビューを行い、BCA の政策提案及び研究上での優先的事項を明らかにしている。

まず、経済的観点から CO_2 リーケージには次の 4 つのチャネルがあることを指摘している。

①競争力チャネル

カーボンプライシングにより生産コストが増加することにより、規制が不十分な国からの輸入品が競争力をもつ。その結果、国内製品から割安な輸入品に対する消費者の需要が高まり、国内生産者の市場シェア及び利潤が減少する。その結果、海外における生産量及び排出量が増加する。さらに、海外への産業移転をもたらす。

②エネルギー市場チャネル

排出規制が厳しい国における化石燃料需要が減少することにより世界の化石燃料価格が低下する。その結果、規制が不十分な国における燃料消費が増加し、排出量が増加する。

③所得チャネル

カーボンプライシングによる緩和コスト及び相対価格変化は交易条件を大きく変え、世界の所得分配に影響を与える。理論的にはこのような所得分配の変化は、海外

における排出量を上昇もしくは減少させるといわれている。また、規制国における投入需要の変化が賃金及びクリーンな投入価格を上昇させるならば、生産に対して間接的な影響を与え、潜在的には規制が緩い国の生産及び排出量を増加させる。

④技術スピルオーバー

技術スピルオーバーは海外における排出量低下の可能性を高める。この場合、カーボンプライシングはグリーン技術のイノベーションを促進し、その技術が規制の緩い国へスピルオーバーすることによって排出量を減少させる。

上記のような背景の下で、環境効率性の目的と国際法の遵守、並びに実務的な実現可能性との関係を考慮しながら、以下に BCA を実施する際のガイダンスを個別項目毎に提示している。

・BCA 政策目的

政策立案者は BCA 実施に向けて様々な目的がある。例えば、CO_2 リーケージ及び産業競争力のロスを減少させることや、規制が緩い国における緩和策を促すことを目的としている。いかなる目的であっても、BCA の制度設計は WTO における GATT 第 20 条の一般的例外条項の下で、BCA を正当化するものでなければならない。その意味では、当該条項には競争力維持は含まれていないことに注意が必要である。同様に、経済分析の先行研究では、BCA の効果を高めるために規制が緩い国に対する貿易制裁による効果を分析しているが、制裁が国内の炭素コストよりも過剰なものであれば、法的には貿易差別として受け取られる。さらに、BCA を用いて国内レベルもしくは国際レベルで特有の気候変動対策（キャップアンドトレード等）の適用を促すことは、UNFCCC の CBDR（共通だが差異ある責任）の原則に抵触する可能性がある。したがって、WTO ルールに整合的な唯一の BCA の目的は炭素排出量を減少させることである。

・調整の対象となる政策

国内製品と輸入品を同等に扱う唯一の国内政策は価格に基づいた気候変動対策であり、BCA はパフォーマンス基準やその他の非価格規制と共には適用することができない。

・調整の対象となる製品

先行研究において BCA の対象は、すべての製品あるいはエネルギー集約的かつ貿易の影響を受けやすい産業（EITE 産業）が挙げられているが、先行研究において CO_2 リーケージを緩和する便益が高いのは後者を対象とする場合であることが示唆されている。また、基準化が難しい経験値に基づく貿易感応度指標ではなく、シンプルな貿易集約度指標を用いることが提唱されている。

・貿易に体化した排出量

BCA を実施する際、製品の炭素含有量の推計が必要となる。システムのバウンダリーは製品のライフサイクルにおけるどの排出量が BCA の計算に含まれるかを規定する。排出量には次の 3 つのカテゴリーがある。Scope 1 は、ある製品の生産過程における直接排出量であり、Scope 2 は、エネルギー使用（オフサイトで生成され購入された電力、蒸気または熱）に伴う間接排出量を、そして Scope3 は間接的な生産に関連する排出量で Scope 2 でカバーされていないものである（例えば、インプットあるいは下流の活動に内包する排出量）。

システムバウンダリーが一旦決まれば、各スコープにおけるベンチマーク排出量が決定される。国内の排出量割当においてこれらは既に議論しているところもあるが、BCA を実施するためには、実際のデータあるいは部門毎のベンチマークを使用するのかなど、海外製品に対しても規定しなければならない。

ベンチマーク設定に関して、次の 3 つの選択がある。一つ目は、ベンチマークレベルに関するもので、効率の悪い技術あるいは効率のよい技術をベンチマークとする。二つ目は、ベンチマークの数に関するもので、製品の中には複数の製造プロセスがあり、各プロセスにおいて排出量原単位が異なる。例えば、鉄鋼は高炉・転炉法と電炉法と異なる製造プロセスがあることから、複数のベンチマークを設定することが望ましいと考える。三つ目は、ベンチマークは、国・地域特有の変数に基づいて輸出業者を区別する必要がある。輸出国のデータはすぐには利用可能ではなくデータ収集も容易ではない。また、国・地域特有のベンチマークは GATT の最恵国待遇条項に抵触する可能性もあり、高い原単位ベンチマークを設定された国からの積み替えを防ぐ条項が必要となる。

通常の経済モデル分析では部門内の排出量の異質性を考慮していない。様々な排出量の推計における経済的トレードオフに関する更なる研究が必要とされる。

・調整価格

製品に内包される排出量の推計方法が決まれば、BCA に適用する炭素価格を設定する。BCA 実施国内の企業が炭素税を負担している場合は、この炭素税が輸出国企業に対して価格を賦課する場合の基準となる。もし、BCA 実施国がキャップアンドトレードを適用している場合は、輸入業者は排出枠を購入するかあるいは排出枠の市場価格に基づく排出枠価格を支払う。あるいは、輸入業者もしくは海外生産者が、ある調整レベルまで国際炭素オフセットを購入することも認められ得る。いずれの場合においても、BCA 価格は可能な限り国内企業が直面する価格と同等なものにする必要がある。

・免除

貿易相手国による気候変動対策を基準とした免除は、BCA で広く考慮されている。免除には次の 5 つの方法が考えうる。①国内排出量上限を設定した国を免除対象とする、②国内の排出量上限よりも“適切な”国内の気候変動対策を実施した国を免除対象とする、③部門別排出量上限を設定した国の部門を免除対象とする、④後発開発途上

国や低所得国を免除対象とする、⑤BCA が対象とする製品の貿易がごくわずかな国に対しては運営・管理費を減らす。

尚、原産地に基づくいかなる差別化は積み替え問題を引き起こす可能性が高いことにも留意が必要である。

・輸出調整

国内で生産された製品で輸出するものに対して、製品に附随する炭素支払いと同等の輸出リベート（払い戻し）を行う。それにより、規制が緩い国で生産された製品と同等の条件で競争することが可能となる。また、国内と海外における二重課税を防ぐものでもある。この輸出リベートの効果については研究によって様々である。例えば、メタ分析 [9]によると輸出リベートは CO_2 リーケージを削減する重要な役割を果たす。一方、BCA からのリーケージ削減の大半は輸入調整のみを含む制度によって生じることが他の研究で示されている（ただし、BCA 対象製品の純輸入国のみに該当する結果である）[11]。

輸出に対する BCA の WTO ルールの下での法的扱いは不明である。さらに、輸出品に対する BCA を、輸入調整から免除品を切り出す手法と調和させることは難しい。

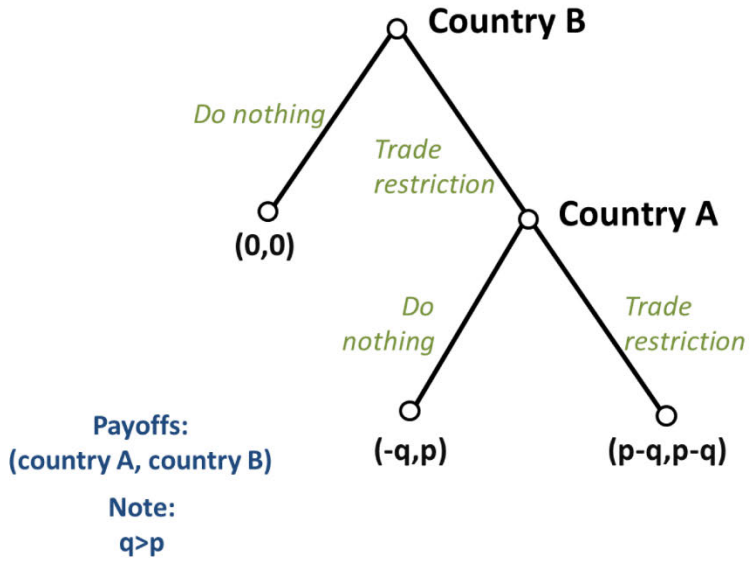
・税収の使途

税収を開発途上国へ直接支援もしくは技術移転を通じて使用することにより、前述の GATT 条項及び CBDR 原則遵守、そして CO_2 リーケージを防ぐためにも有効である。したがって、BCA の税収は BCA 実施国の一般会計として使用されるべきではなく、海外の支援と共に BCA を実施することが望ましい。

今後の研究課題としては、産業間の異質性に関するより詳しい検討を実施することが重要であり、それにより排出強度の計測およびベンチマーク及び影響を評価することにつながる。さらに、モデル分析においてはリーケージリスクの評価を向上させるべきであり、特に、CGE モデルは非エネルギー投入の代替性を評価することに課題がある（炭素集約的な商品の消費を減少させる重要な余地とみなされる）。このように、より厳密な分析が BCA の制度設計に役立つものであると結論づけている。

(2) 動学ゲーム理論を用いた BCA の考察

Helm et al.(2012)[12]はゲーム理論に基づいて複数の観点から EU の BCA を考察している。2011 年のダーバン気候変動会議での実質上交渉が進展しなかった理由の一つは貿易問題、特に CO_2 リーケージへの取り組みが失敗したことである。本論文では適切なゲーム構造を提案しており、そこでは各国は単独かつある順序に従って他のプレーヤーの行動をみながら行動をする（動学ゲーム）。適切に構築された BCA が貿易の歪みを減らし、競争力の影響を制限し、よりグローバルな行動のための幅広い利害関係を構築するのに役立つことが示されている。



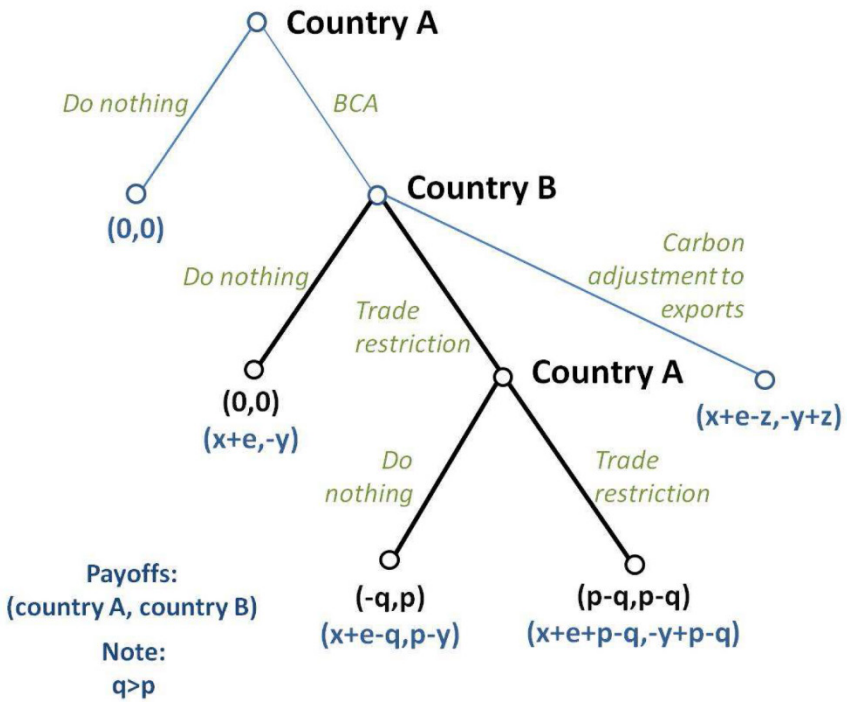
Note: *p* represents the absolute values of the domestic gains from a trade measure imposed by a country. *q* represents the losses imposed on a country by a trade restriction imposed by its trading partner.

（出典）Helm et al. (2012) [12)]

図 4.3.2-1　国際貿易ゲーム構造

図 4.3.2-1 は国際貿易ゲーム構造を表したものである。貿易制限は勝者と敗者をもたらすが、結果として累積の効用ロスをもたらす。貿易制限を課す大国は政治的な純利潤（p に相当）を得ることができ、制限を課された国は何もしない場合、効用ロス（-q）をうける。ここで q>p という仮定をおいているが、これは貿易制限が累積効用において純ロスであることを示している。

国際貿易ゲームの描写はどのように世界が自由貿易と共に均衡を維持することができるかを表している。調整メカニズムが無い場合、各国は同時に行動する。そのような場合、相互に貿易制限を課すことにより（ナッシュ）均衡が達成される。貿易協定は同時ゲームを動学ゲームへと移行させる。WTO メカニズムの下では 2 ヶ国のうち 1 ヶ国が最初に行動し、貿易ルールに違反した行動をとれば、次に他国が行動をとり、報復する権利を有する。このような信憑性のある脅しは、最初に行動した国が貿易制限を課すことを抑制する効果がある。



（出典）Helm et al. (2012) [12)]

図 4.3.2-2　BCA ゲーム構造

図 4.3.2-2 は BCA のゲーム構造を表したものであり、BCA ゲームの利得（青で表記）は、貿易ゲームの利得（黒で表記）の下に示している。BCA ゲームは前述の貿易ゲームを次のように補完する。例えば、A 国（EU のようなリーダーを想定）が最初に行動し、(i)BCA を課すあるいは(ii)いかなる貿易行動もとらない（世界全体の気候変動協定に向けた交渉が行われると想定）、という行動をとる。BCA が課される B 国は、(i) 何もしない、(ii)報復する、(iii)B 国の輸出に炭素調整をする、という 3 つの戦略がある。尚、報復するという選択をした場合、第二段階のゲームが行われる。つまり、A 国は更なる貿易制限を課すか、あるいは、何もしないかの行動をとる。

A 国は BCA を課して、もし B 国が何も行動をしない場合、A 国は純経済便益 x（交易上の便益から消費者及び生産者の余剰を引いたもの）及び環境便益 e からなる利得を得る。一方、BCA を課された B 国は消費者余剰から生産者余剰を引いたもの（-y）に相当する利得を得る。

ここで BCA のゲームの均衡点（部分ゲーム完全均衡:SPNE）を後ろ向き帰納法（backward induction）によってもとめる。A 国による BCA の緩和を要求するため、BCA を課せられた B 国が自身の輸出に炭素調整を実施すると想定する。その方法として炭素輸出税を賦課すれば B 国の政府収入が増え、あるいは、輸出に附随する排出量の制限をした場合、生産者の超過利潤（レント）が増えるであろう。その結果、BCA によって生じる生産者の厚生ロスを一部オフセットする（この時の便益を z とする）。したがって、B 国の観点からいえば、輸出税を課した場合の方が何もしない場合よりも利得

が高い（-y<-y+z）。また、A 国側から見ても、B 国による輸出税によって A 国の政府収入が減るため（z に相当）、B 国が輸出税を課した場合 A 国の利得は x+e-z となる。

しかし、A 国は何もしない場合よりは利得がよい（つまり、x+e-z>0 であるため）。この場合、部分ゲーム完全均衡は、A 国は BCA を課すこと、一方、B 国は輸出税を課すことである。現実の世界においてはこのような状況がみられる。例えば、EU-ETS に航空部門を含むかどうかについて EU とその他地域（ROW）において現在紛争がある（航空部門を EU-ETS に含むということは炭素価格を課すことである）。この場合、ROW は EU の BCA 対策として自国の輸出に対して炭素輸出調整をすることが最適である。例えば、中国は国際航空便に対する乗客税から得た税収を航空部門の排出量削減に使用することを示唆していた。したがって、このシンプルなモデルから示唆されることは、EU が BCA を実施すれば、ROW は貿易紛争を開始するよりもむしろ、自国の炭素輸出調整もしくは国内の炭素プライシングを実施するインセンティブが働くであろう。

この分析では妥当な仮定をしているが、WTO の整合性からも環境の便益が重要な役割を果たすため、BCA を課す国に対する財政フロー（x）と炭素輸出調整から得られる財政フロー（z）と環境便益の関係は、x+e>z となるように e が十分大きくなければならない。しかし、この分析では BCA を実施する A 国の輸出リベートは考慮していないため、すべての可能性がある行動を描写したものではなく、均衡解も異なり得るということに留意が必要である。

(3) BCA の代替案：Cooperative sectoral tariff reduction (CSTR)

一般的な BCA が非協力的に実施された場合、貿易保護主義及び報復を誘発する恐れがあることが指摘されていることから、Banks and Fitzgerald (2020)[12]は BCA の代替案として Cooperative sectoral tariff reduction (CSTR)を提案している。CSTR は企業の低炭素化を改善するインセンティブを与え、保護主義のために BCA が使用される機会を減らし、カーボンクラブを創設するのに役立つものである。

CSTR には通常の BCA と比較して、三つの特徴がある。一つ目は、低炭素化へのインセンティブを高めるために関税が軽減されること、二つ目は、部門毎に実施され、各部門において環境パフォーマンスに応じて関税を課すこと、三つ目は、CSTR は協力的に多国間で実施されるものであり、全体的に低い貿易障壁と共に排出緩和目的が達成される。

尚、Banks and Fitzgerald (2020)[13]は、CSTR を理論的あるいは実証的に評価しているものではないため、次節で RITE のエネルギー経済モデル（DEARS）を用いて、BCA と CSTR を評価する。

4.3.3 国境調整税に関する DEARS モデルによる試算例

(1) はじめに

本節では世界エネルギー経済モデルを用いて BCA の影響について分析を行った。代表的なエネルギー多消費産業である鉄鋼製品のみに焦点を当て、国境炭素調整が導入

された際の影響分析を行った。本節では、直接の鉄鋼製品のみに対する BCA を想定し、鉄鋼製品が利用される自動車製品等に対する BCA は今回の分析では考慮していない。各種想定シナリオの下で、BCA 導入に伴う、主要各国の利得を分析することで、各国が取りそうな戦略を理解するとともに、日本の戦略への含意を示した。

(2) 分析方法

本節で利用した DEARS[14]は、世界全体の消費効用最大化を目的関数としたトップダウン型経済モジュール（一般均衡型）と簡略化されたボトムアップ型エネルギーシステムモジュールの統合モデルである。経済モジュールでは、非エネルギー18 産業を想定し、国際産業連関表 GTAP に基づく産業連関構造を明示してモデル化している。貿易に関しては、多くの一般均衡型モデルと同様に、輸入財と国内財の代替性を考慮したアーミントン構造を定式化している。世界エネルギー経済モデルを用いて、代表的なエネルギー多消費産業である鉄鋼製品のみに焦点を当て、国境炭素調整が導入された際の影響分析を行った。本研究では、直接の鉄鋼製品のみに対する BCA を想定し、鉄鋼製品が利用される自動車製品等に対する BCA は今回の分析では考慮していない。

本研究におけるベースラインは、特段の温暖化・エネルギー政策を考慮しないケースを示す。ベースラインの社会経済シナリオは、温暖化問題関連の国際的分析において用意された SSP (Shared Socioeconomic pathways)に整合する中位シナリオ SSP2 を想定した[16]。

炭素価格・炭素関税・報復関税は、EU-ETS の EUA 価格（2019 年 7 月）を参照し 32$/tCO$_2$ を 2020 年に想定した。30 年については 45$/tCO$_2$ を想定した（IEA-WEO2019 の長期の価格上昇率に基づく）。炭素関税は、個々の製品は、製造プロセス等によって CO$_2$ 原単位が異なるが（例えば、転炉鋼と電炉鋼では原単位が大きく異なるし、どのような効率を有する製鉄所で製造されたのかによっても異なる）、製品別、国別の平均的な炭素含有率を適用して、それぞれ輸入量に基づき課されると想定した。本分析では鉄鋼製品は区別なく 1 製品と想定した。価格に対する感度分析も実施した。炭素関税などの税収は政府消費（一般会計）に用いられると想定した。本研究における課税対象は電気・熱配分後排出量とした。また、国内対策により上昇した価格が輸出時に相殺される輸出リベートを想定した。国境調整措置に対抗した報復措置はさまざまな方法が考えられるものの、ここでは報復関税として炭素関税と同率を、同じ鉄鋼製品に対して課されると想定した。報復措置としてのダンピングは考慮しない。鉄鋼製品の輸入財と国産財の需要に関する代替性の想定は、代替弾力性 1.5（地域によらず一律）を想定した[7]。

(3) 分析ケースの想定

表 4.3.3-1 には、BCA 関税に関するケース想定を示す。ケース(1)は、日米 EU の 3 極に限定した提携メンバーにおいて、国内排出削減対策だけを実施するケースである（図 4.3.3-1）。ケース(2)は、世界が協調し、日米 EU 以外の地域も提携メンバーへと移行した全提携（Grand Coalition）の場合である（図 4.3.3-2）。ケース(3)は、日米 EU が

国内対策に加え、EU が単独でその他地域に対して BCA を実施するケースである（図 4.3.3-3）。一方、ケース(4)は、ケース(3)に対して、その他地域が対抗して、BCA を実施した EU のみが報復を受ける場合である（図 4.3.3-4）。ケース(5)は、日米 EU が国内対策に加え、日米 EU が協調してその他地域に対して BCA を実施するケースである（図 4.3.3-5）。ケース(6)は、ケース(5)に対して、その他地域が対抗して、BCA を実施した日米 EU が報復を受ける場合である（図 4.3.3-6）。

表 4.3.3-1　モデル分析のための BCA 関税に関するケース想定（鉄鋼製品対象）

	ケース名	国内の削減対策を実施する地域	国内対策を実施しない地域ROWからの輸入財に対する炭素関税	ROWからの報復関税 (-R)
(1)	TRI	日米EU	×	×
(2)	WLD	世界限界削減費用均等	×	×
(3)	TRI-BCA(EU)	日米EU	BCA[EU単独で実施*]	×
(4)	TRI-BCA(EU)-R	日米EU	BCA[EU単独で実施*]	○[EUのみが報復を受ける]
(5)	TRI-BCA	日米EU	BCA[日米EUが実施]	×
(6)	TRI-BCA-R	日米EU	BCA[日米EUが実施]	○[日米EUが報復を受ける]

注記：ROW(rest of the world)は、日本・米国・EU 以外の地域を表す。*「EU 単独で実施する BCA」は、国内削減対策を実施している日本と米国に対しては適用しないと想定した。

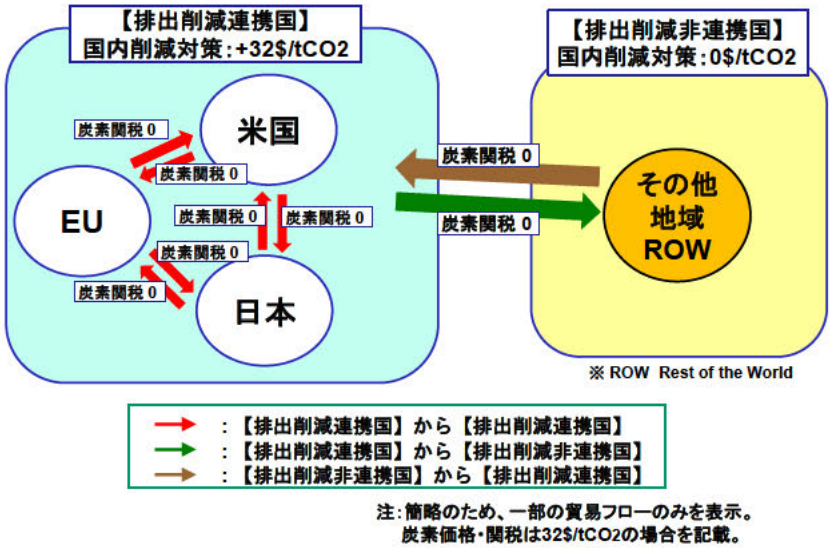


図 4.3.3-1 ケース(1)TRI （日米 EU のみ排出削減対策）の説明図

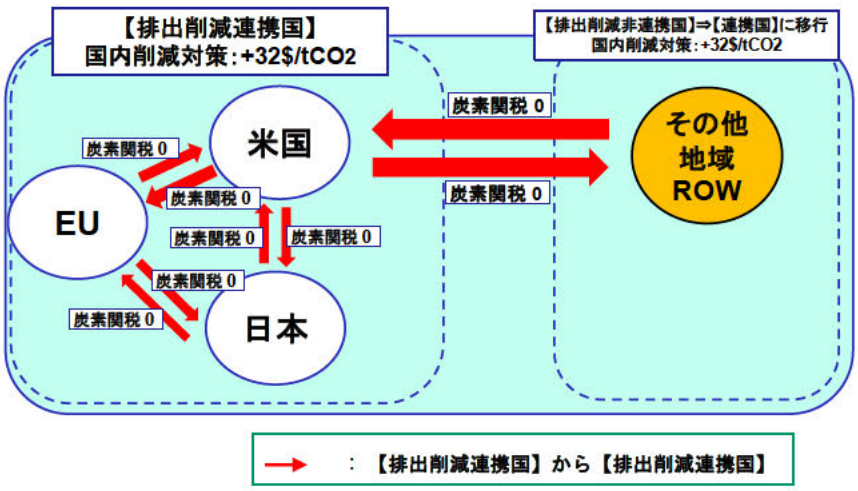


図 4.3.3-2 ケース(2)WLD（世界限界削減費用均等）の説明図

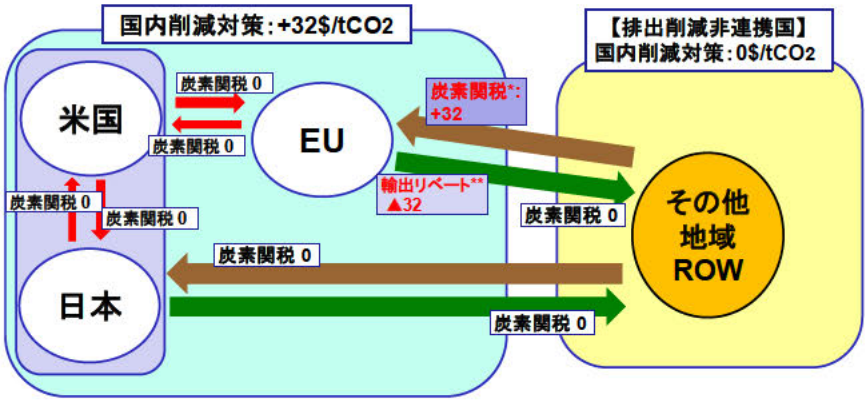


図 4.3.3-3 ケース(3)TRI-BCA(EU)の説明図

注：*炭素関税は、個々の製品は、製造プロセス等によって CO_2 原単位が異なるが（例えば、転炉鋼と電炉鋼では原単位が大きく異なるし、どのような効率を有する製鉄所で製造されたのかによっても異なる）、製品別（本分析では鉄鋼製品は区別なく 1 製品と想定）、国別の平均的な炭素含有率を適用して、それぞれ輸入量に基づき課されると想定。** 輸出リベートにより、輸出価格は、国内対策による国内生産価格の増分が減免されると想定

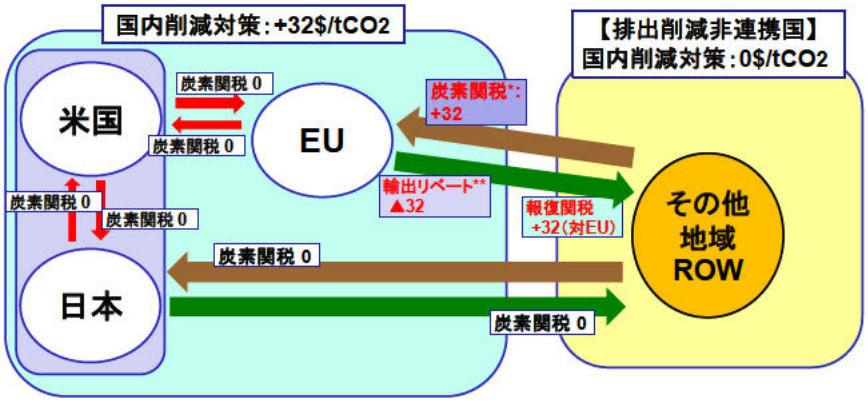


図 4.3.3-4 ケース(4)TRI-BCA(EU)-R の説明図

注：*炭素関税は、個々の製品は、製造プロセス等によって CO_2 原単位が異なるが（例えば、転炉鋼と電炉鋼では原単位が大きく異なるし、どのような効率を有する製鉄所で製造されたのかによっても異なる）、製品別（本分析では鉄鋼製品は区別なく 1 製品と想定)、国別の平均的な炭素含有率を適用して、それぞれ輸入量に基づき課されると想定。** 輸出リベートにより、輸出価格は、国内対策による国内生産価格の増分が減免されると想定

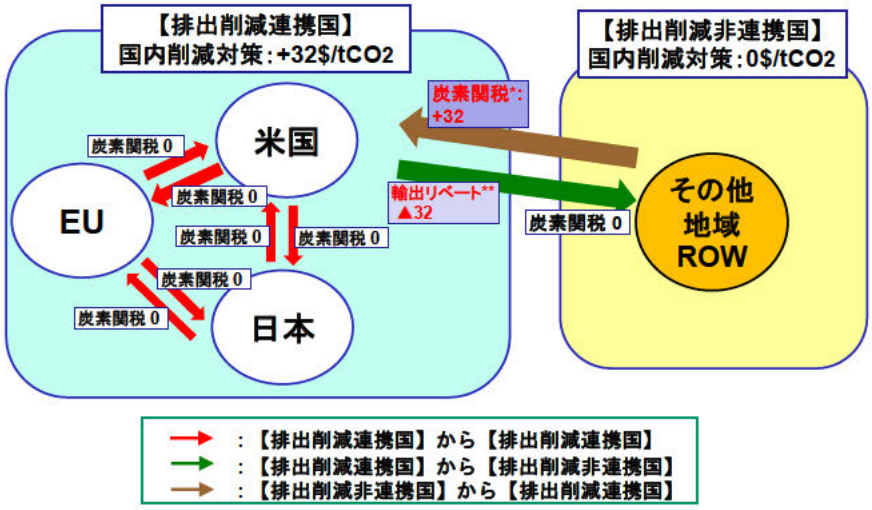


図 4.3.3-5 ケース(5)TRI-BCA の説明図

注：*炭素関税は、個々の製品は、製造プロセス等によって CO_2 原単位が異なるが（例えば、転炉鋼と電炉鋼では原単位が大きく異なるし、どのような効率を有する製鉄所で製造されたのかによっても異なる）、製品別（本分析では鉄鋼製品は区別なく 1 製品と想定)、国別の平均的な炭素含有率を適用して、それぞれ輸入量に基づき課されると想定。** 輸出リベートにより、輸出価格は、国内対策による国内生産価格の増分が減免されると想定

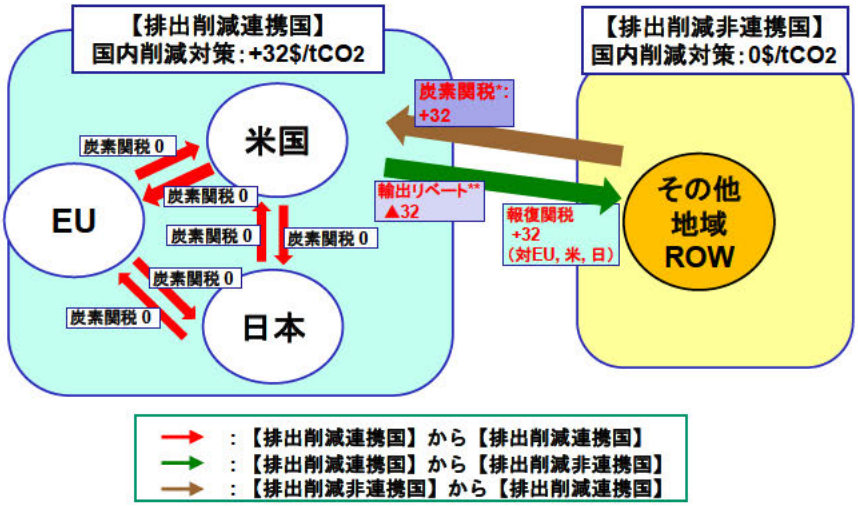
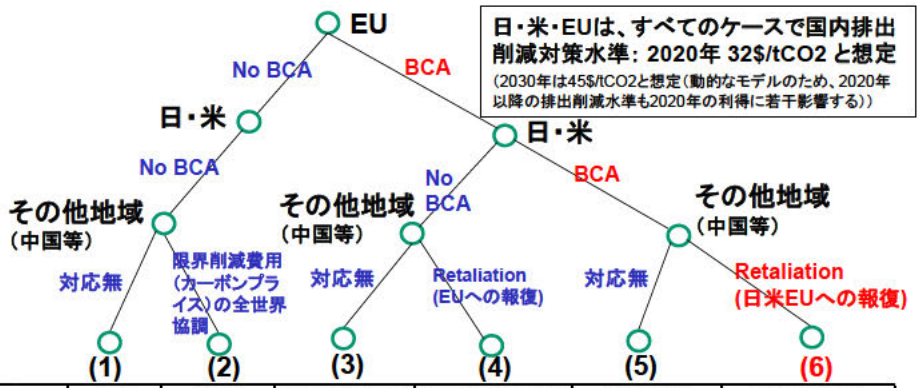


図 4.3.3-6 ケース(6)TRI-BCA-R の説明図

注：*炭素関税は、個々の製品は、製造プロセス等によって CO_2 原単位が異なるが（例えば、転炉鋼と電炉鋼では原単位が大きく異なるし、どのような効率を有する製鉄所で製造されたのかによっても異なる） 、製品別（本分析では鉄鋼製品は区別なく 1 製品と想定)、国別の平均的な炭素含有率を適用して、それぞれ輸入量に基づき課されると想定。** 輸出リベートにより、輸出価格は、国内対策による国内生産価格の増分が減免されると想定

(4) 分析結果

図 4.3.3-7 には、各ケースにおける国別の利得（鉄鋼生産量）および世界 CO_2 排出量（2020 年）を示した。中国では、EU 単独または日米 EU により BCA が実施されるならば、報復関税を実施する方が利得は大きい。これらは、ケース(3)と(4)、または、ケース(5)と(6)の生産量変化の比較により示されている。国境調整措置を実施する米国では、鉄鋼製品の輸出量よりも輸入量が大きいため、BCA 実施のメリットが大きく、報復による悪影響も小さい。一方、日本では、鉄鋼製品の輸入量よりも輸出量が非常に大きいため、日本からの輸出に対する報復の悪影響が大きい。鉄鋼製品の生産量変化の利得の観点からは、中国などによる報復の可能性も高いと考えると、日本にとって、BCA はあまり得策とは言えないとことが示唆された。世界全体が協調して排出削減を行うケース(2)は世界全体の排出量が大きく減少し、世界全体の排出量を効率的に低減させる観点からは理想的であるものの、現実の国際交渉の中では実現が容易ではないと考えられる。そのため、BCA のオプションを有し対応の可能性を持っておきつつ、ケース(2)を目指す戦略が求められる。



		TRI	WLD	TRI-BCA(EU)	TRI-BCA(EU)-R	TRI-BCA	TRI-BCA-R
鉄鋼製品の生産量の変化 (%,ベースライン比) +: 利得, -: 損失	米国	-0.28%	+0.81%	-0.31%	-0.27%	+0.19%	-0.02%
	EU	-0.60%	+0.49%	-0.01%	-0.42%	-0.04%	-0.41%
	日本	-1.07%	+0.31%	-1.12%	-1.08%	-0.12%	-1.01%
	中国	+0.11%	-0.43%	+0.06%	+0.09%	-0.03%	+0.07%
鉄鋼製品の世界CO2排出量 (MtCO2)		3,497	3,191	3,495	3,496	3,494	3,496

図 4.3.3-7 各ケースにおける国別の利得（鉄鋼生産量）および世界 CO_2 排出量（2020年）

図 4.3.3-8 には、炭素価格水準の感度分析として、2020 年の炭素価格・炭素関税・報復関税が 32$/t$CO_2$、60$/tCO_2、120$/t$CO_2$の場合の、日本・米国・EU の鉄鋼製品の地域別の生産量変化を示した。日米 EU の 3 地域の中で比較すると、米国への影響は相対的に小さい。転炉鋼・電炉鋼の区分がない鉄鋼製品全体のもとでの枠組みにおける、鉄鋼製品の価格の上昇率は、「日本（転炉高炉比率が高い）＞EU＞米国（電炉比率が高い）」の順に大きくなるためである。そのため、米国にとっては、その他地域からの報復があったとしても、鉄鋼製品の BCA を実施するインセンティブが高い。一方、日本は、鉄鋼製品の輸入量よりも輸出量の比率が大きいため、国境調整措置による効果が小さく、一方、報復関税による悪影響が相対的に大きい。2020 年のベースラインにおける輸入量に対する輸出量の比率は、日本 5.0、米国 0.9、EU2.0、中国 1.5 と推計される。

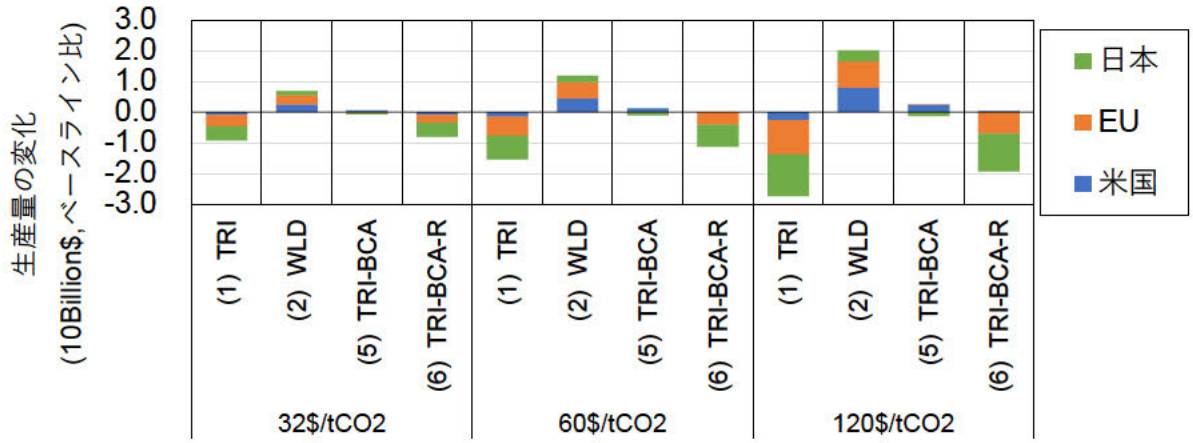


図 4.3.3-8 排出削減費用水準（炭素価格水準）による鉄鋼生産量の感度

図 4.3.3-9 には、ベースラインにおける、日本の鉄鋼製品の貿易量に関して、輸出量については輸出先の国別に、輸入量については輸出元の国別に示した。図 4.3.3-10 は、炭素価格 32$/tCO$_2$ のもとでの、日本の鉄鋼製品の生産量・輸出量・輸入量の変化（ベースライン比）をそれぞれ示した。日米 EU のみが国内削減対策を行った場合に、日本の生産量・輸出量は減少し、輸入量は増加となる。貿易相手として影響が最も大きい地域は、東・東南アジアと中国である。国際協調として全世界で同一の炭素価格で国内対策を実施すると、日本では生産はむしろ増加し、国際協調を実施するインセンティブは大きい。

日米 EU が国境調整を導入した場合、輸出リベートのために、東・東南アジアや中国などへの輸出量は影響が小さい。日本は鉄鋼製品の輸出量が輸入量に比べて大きいため、日米 EU の国境調整に対抗した報復措置により、日本の国際競争力が低減する。また、転炉鋼・電炉鋼の区分がない鉄鋼製品全体のもとでの枠組みは原単位の優位性は小さく、日本の国際競争力への悪影響が大きい。

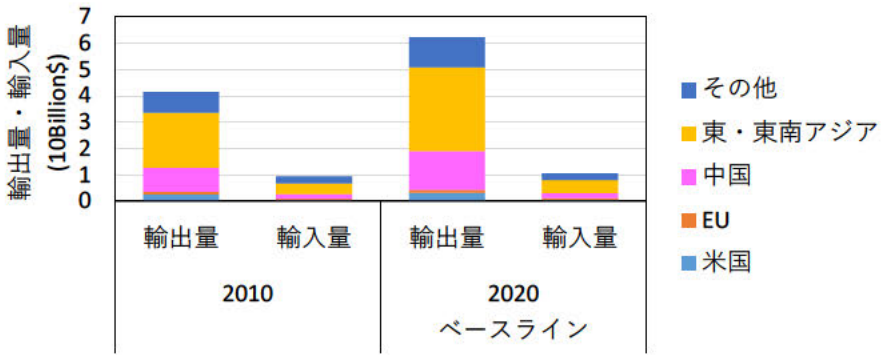
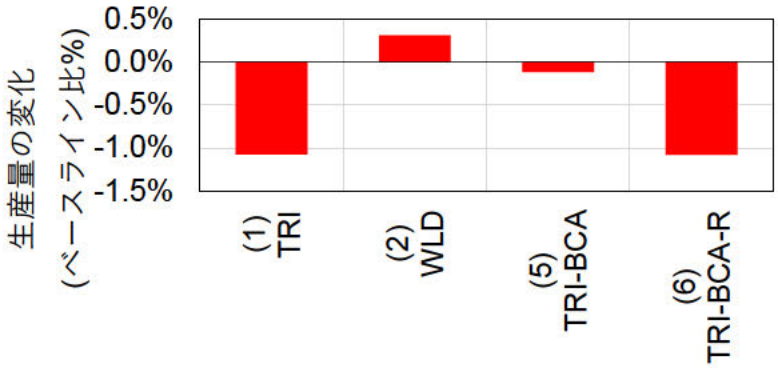
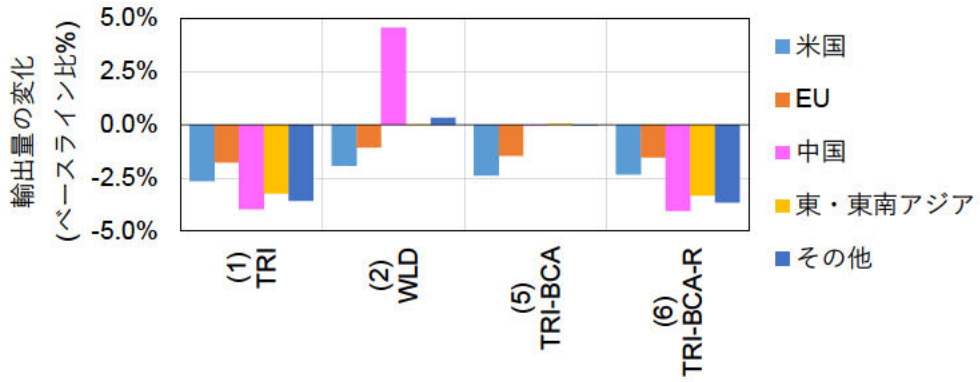


図 4.3.3-9 日本の鉄鋼製品・輸出入量（ベースライン）

(a) 生産量変化

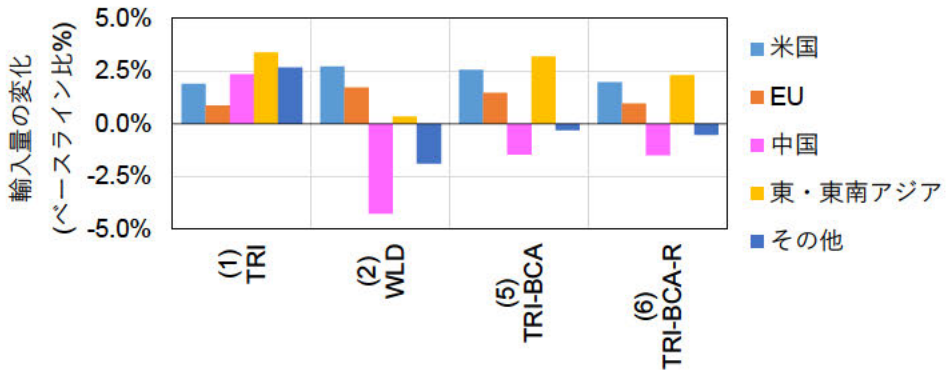


(b) 輸出量変化



注：地域は輸出先を示す

(c) 輸入量変化



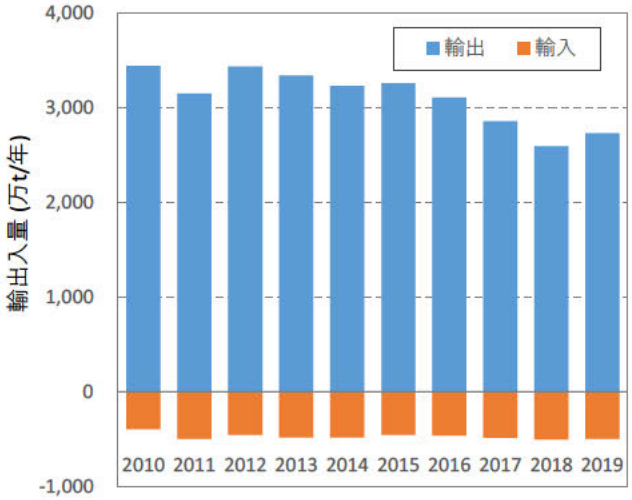
注：地域は輸出元を示す

図 4.3.3-10 日本の鉄鋼製品の生産・輸出・輸入の変化

図 4.3.3-11 は、代表的なエネルギー多消費産業である鉄鋼とセメントに関して、日本の輸出入量を示した。鉄鋼に関して、2019 年度の粗鋼生産量 7,490 万 t であり、生産した鉄鋼の内、約 4 割が輸出された。一方、輸入量は、輸出量に比べ、非常に小さい。セメントに関して、2019 年度のセメント生産量 5,690 万 t であり、生産したセメントの

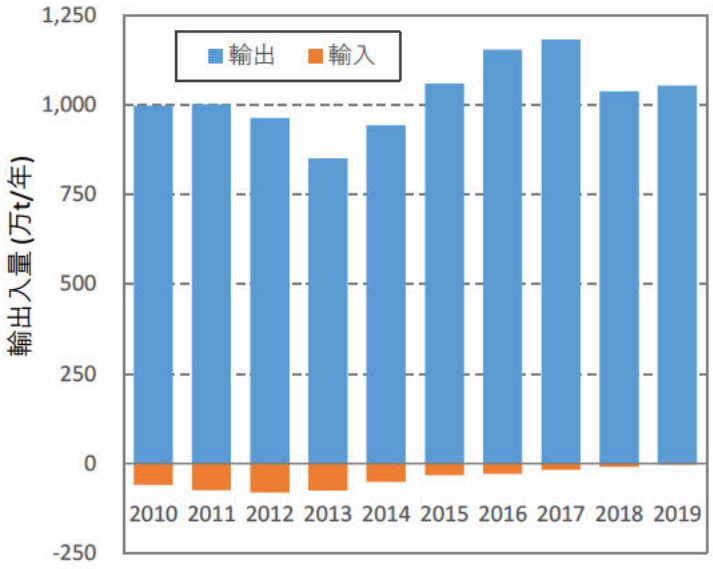
内、約 2 割が輸出された。鉄鋼と同様に、セメントの輸入量は、輸出量に比べ、非常に小さい。日本の代表的なエネルギー多消費産業である鉄鋼とセメントはいずれも国際競争力が高く、大幅な輸出超過の傾向が継続的に続いている。

(a)鉄鋼



出典：日本鉄鋼連盟, https://www.jisf.or.jp/data/

(b)セメント



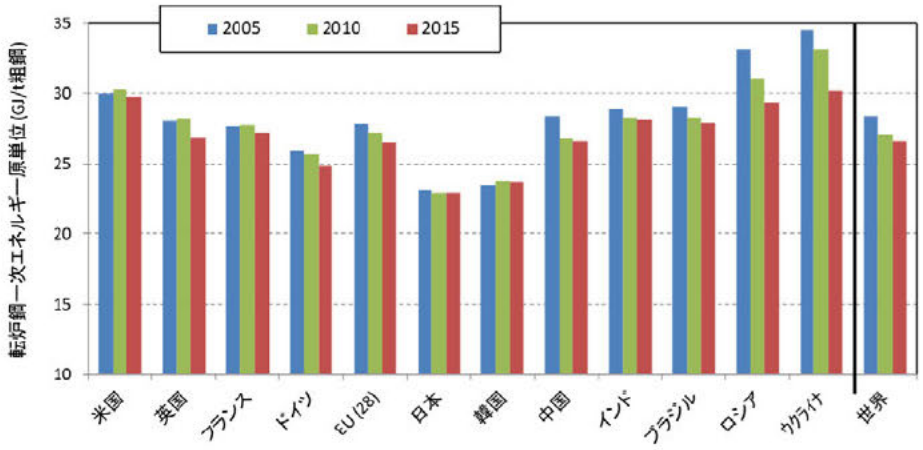
出典：セメント協会、セメントハンドブック(各年)

図 4.3.3-11 日本のエネルギー多消費産業の輸出入量

図 4.3.3-12 は、2005、2010、2015 年における、主要国の高炉・転炉法と電炉法におけるエネルギー原単位をそれぞれ示した。日本の転炉鋼のエネルギー効率は世界でも最も高い水準と推計される。高炉・転炉法と同様に、日本の電炉鋼のエネルギー効率

も同様に世界で最も高い水準と推計される。国間の差異は、電炉鋼よりも、転炉鋼の方が大きい傾向がみられる。このように、日本は、高炉・転炉法も電炉法もともに、個別の方法で国際比較すると、世界で最もエネルギー効率が高い。

(a) 転炉鋼



(b) 電炉鋼

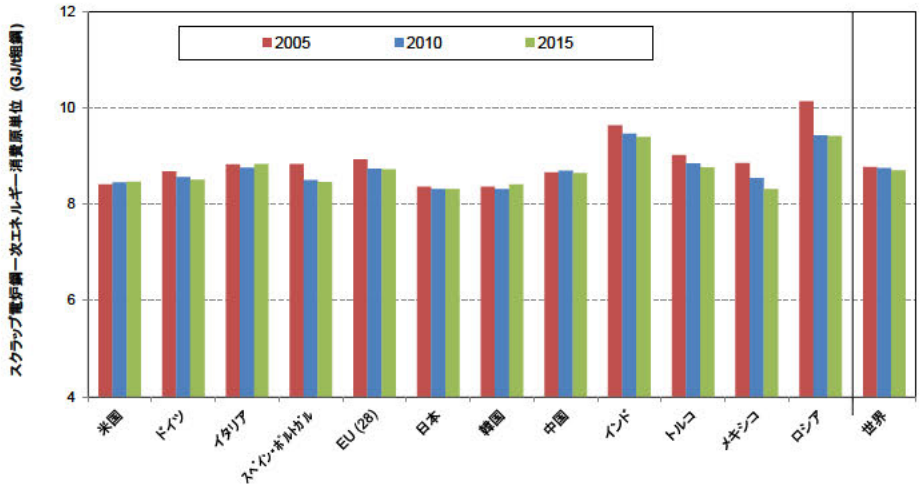


図 4.3.3-12 高炉・転炉法、電炉法におけるエネルギー原単位の国際比較

出典：RITE 推計

図 4.3.3-13 は、2015 年における、鉄鋼部門の電炉比率と CO_2 原単位との関係性を示した。電炉比率が高いほど、鉄鋼部門全体の CO_2 原単位は小さい傾向がみられる。鉄鋼部門としての CO_2 原単位は、高炉・転炉鋼、電炉鋼別の CO_2 原単位よりも、転炉、電炉鋼の比率により大きく依存する傾向がある。しかし、電炉鋼比率は、鉄スクラップの利用可能量や電力価格などによって決定される傾向が強く、それらは排出削減努力とはほとんど無関係である。国境炭素調整措置において、鉄鋼部門という分類のみ（鉄鋼製品における製法を区別することなく）とすると、日本の優位性は生じにくい。

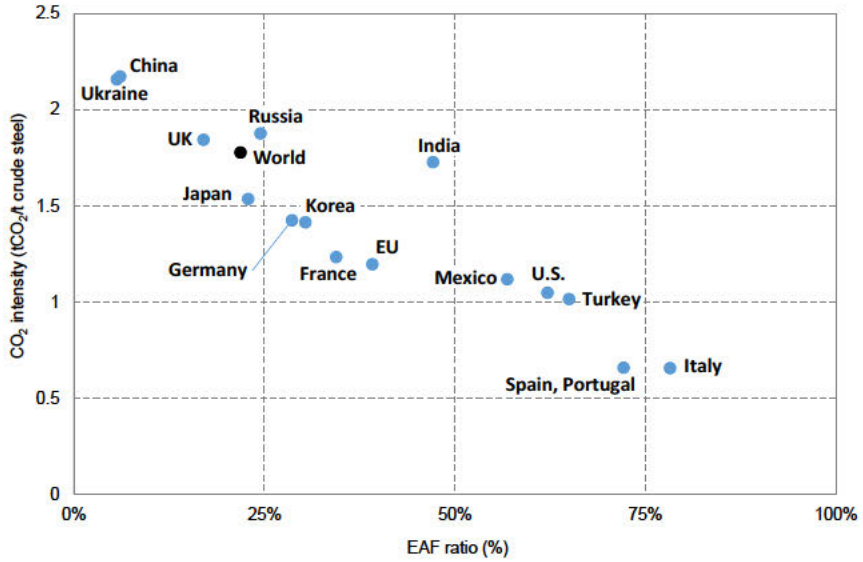
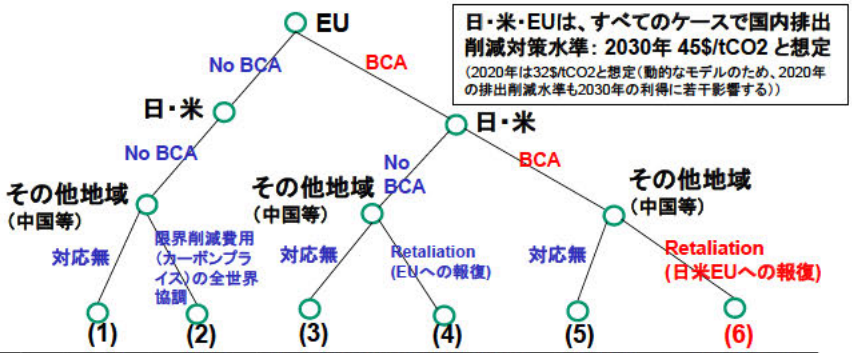


図 4.3.3-13 2015 年における鉄鋼部門の電炉比率と CO_2 原単位

出典：RITE 推計

図 4.3.3-14 には、2030 年における、各ケースにおける国別の利得（鉄鋼生産量）および世界 CO_2 排出量を示した。2020 年の結果と同様の傾向がみられる。日本では、鉄鋼製品の輸入量よりも輸出量が非常に大きいため、日本からの輸出に対する報復の悪影響が大きい。鉄鋼製品の生産量変化の利得の観点からは、中国などによる報復の可能性も高いと考えると、日本にとって、BCA はあまり得策とは言えないとことが示唆された。



		TRI	WLD	TRI-BCA(EU)	TRI-BCA(EU)-R	TRI-BCA	TRI-BCA-R
鉄鋼製品の生産量の変化 (%,ベースライン比) +: 利得, -: 損失	米国	-0.28%	+1.12%	-0 38%	-0.30%	+0.25%	-0.25%
	EU	-0.83%	+0.55%	-0 04%	-0.66%	-0.09%	-0.65%
	日本	-1.26%	+0.68%	-1 33%	-1.26%	-0.18%	-1.24%
	中国	+0.16%	-0.48%	+0 09%	+0.14%	-0.01%	+0.11%
鉄鋼製品の世界CO2排出量 (MtCO2)		4,950	4,422	4,948	4,949	4,945	4,949

図 4.3.3-14 各ケースにおける国別の利得（鉄鋼生産量）および世界 CO_2 排出量（2030 年）

(5) 国境炭素調整の対象産業の拡張による分析

本節では、代表的なエネルギー多消費産業である、鉄鋼、化学、土石非金属（セメント含む）の３部門が対象となった場合の分析結果を示す。炭素価格・炭素関税・報復関税は前節と同様に、2020 年に 32 $/tCO$_2$ を想定した。産業拡張以外の前提条件は、前節と同じである。前節の結果は、鉄鋼のみを対象にした分析であったが、本節の３部門同時に分析した場合の鉄鋼部門の結果は、単独の分析結果とは若干の差異が生じることに留意されたい。窯業土石産業は、セメント、ガラス、陶器等が含まれ（セメントは、この中でもエネルギー消費が非常に多いものの、生産額は窯業土石の 1/3 程度と推計される）、複合的な効果となっており、解釈に注意されたい。

図 4.3.3-15 と図 4.3.3-16 は、2020 年日本の化学と窯業土石の分析結果をそれぞれ示した。前節の鉄鋼と同様に、国境調整措置によって、報復があったとしても、わずかに生産量の軽減が概ね見込まれる。ただし、世界全体で削減に取り組むケース(2)が日本にとっては最も望ましい。

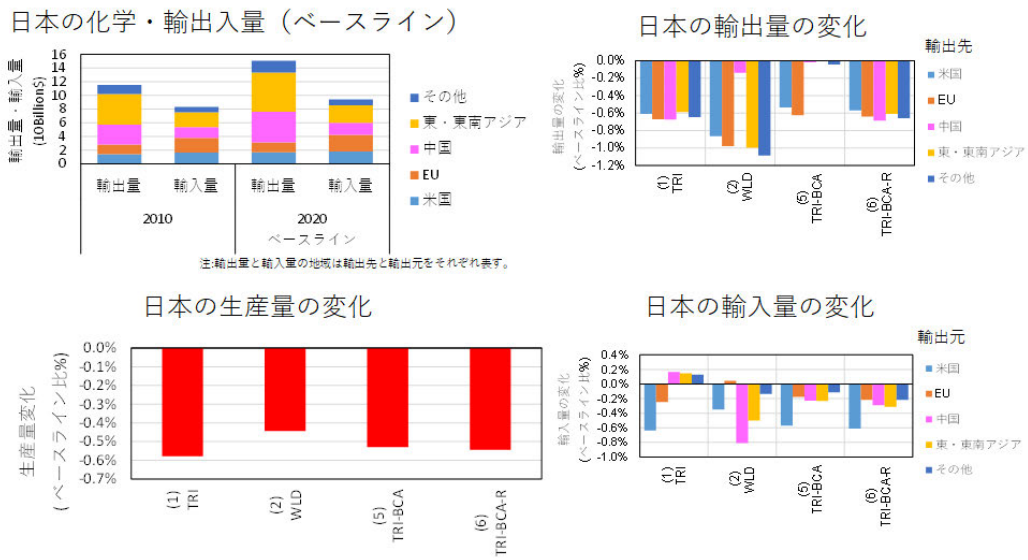


図 4.3.3-15 国境調整・報復による日本への影響：化学(2020 年)

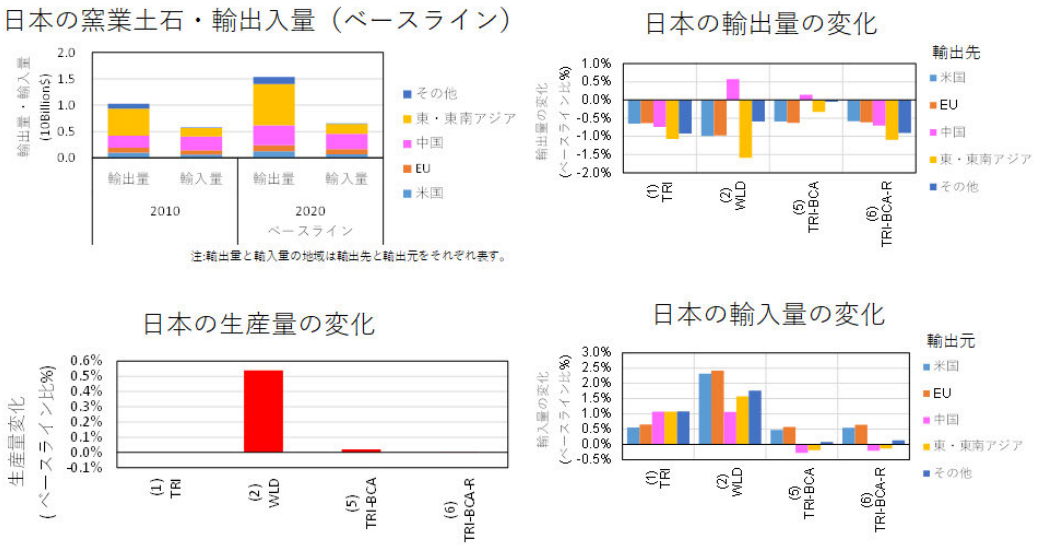


図 4.3.3-16 国境調整・報復による日本への影響：窯業土石(2020 年)

(6) 炭素関税方法を変更した場合の分析

① はじめに

一般的に、前述の標準的な BCA 関税は、輸入品に対して、テリトリアルで製品平均的な体化された CO_2 重量に応じて税率が決定される。この場合、同一製品内の異質性は考慮されていない。生産量当たりの体化された CO_2 重量を θ、 CO_2 重量当たり炭素関税を C とすると、 BCA 関税率（生産量当たりの炭素関税）は θC と表される。BCA では、製品平均値にもとづき税率が決定されるため、製品全体の CO_2 原単位向上のインセンティブが乏しい可能性がある。

Banks and Fitzerald[13]では、標準的な BCA への懸念として、標準的な BCA 関税の導入は保護主義を促進し、報復による貿易紛争をもたらし、非効率的な削減につながる可能性の指摘している。Banks and Fitzgerald[13]では、代替案として、炭素原単位に応じた課税やパフォーマンスが良い生産者に対する減免を考慮した CSTR(Cooperative Sectoral Tariff Reduction)の概念が提案されている。CSTR により、保護主義を緩和し、パフォーマンスが良い生産者への移行により、全体のパフォーマンス改善のインセンティブをもたらす可能性を指摘した。ただし、Banks and Fitzgerald[13]では、理論・定量分析は行っていない。

② 分析方法と前提条件

本研究では、標準的な BCA 関税とは異なる、CSTR 関税を検討した（図 4.3.3-17）。CSTR 関税は、同一製品内の異質性を考慮し、製品別の体化された CO_2 重量に応じて関税が課される。製品グループ j の生産量当たり CO_2 重量を ω_j とすると（ω_j の製品別加重平均が θと等しい）、CSTR 関税率は $\omega_j C$ と表される。BCA と対照的に、CSTR では、国境調整をする際に、製品グループの原単位に応じて課税されるため、原単位が相対的に優れた製品の生産や輸出へのシフトを促すオプションである。ただし、CSTR は一般的な BCA よりもさらに複雑な仕組みであり、CSTR 導入に伴う業務上の費用は BCA

よりも大きいと予想される。本分析ではこの費用は未考慮である。鉄鋼製品を、エネルギー原単位に対応した 3 種類の仮想的な製品グループ（世界共通）に分類した。原単位に関して、Good（0.10[GJ/$]）、 Middle（0.80）、 Poor（1.50）を想定した（以下、Good、Mid.、Poor と記す）。各国の生産分布の情報が得られないので、ここでは仮想的に想定した（図 4.3.3-18）。製品グループ間の需要については、代替弾力性 2.0 を想定した。

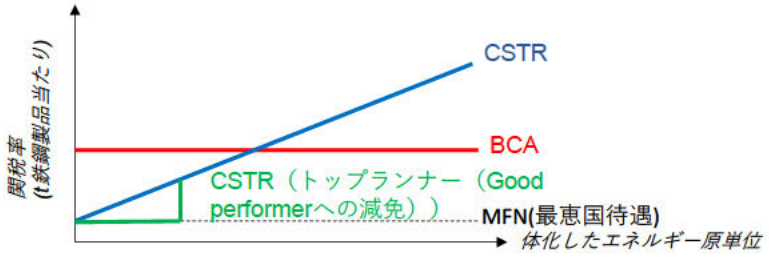


図 4.3.3-17 標準的な BCA 関税と CSTR 関税

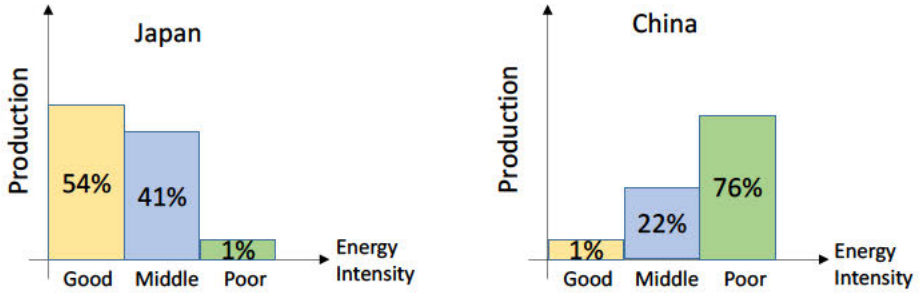


図 4.3.3-18 2020 年ベースラインにおけるエネルギー原単位に基づく鉄鋼製品グループの分布(左：日本、右：中国)

表 4.3.3-2 には、2 種類の炭素関税に関するケース想定を示した。ケース(6)は、日米 EU が標準的な BCA 関税を実施し、それに対抗した報復関税が実施される場合を表す(前節と同様)。ケース(7)は、日米 EU が CSTR 関税を実施し、それに対抗した報復関税が実施される場合を表す（図 4.3.3-19)。さらに、CSTR 関税のもとで、最も原単位の優れた製品グループを減免したケース(8)についても検討した（図 4.3.3-20)。

表 4.3.3-2　異なる炭素関税によるケース想定（鉄鋼製品対象）

	ケース名	国内の削減対策を実施する地域	国内対策を実施しない地域ROWからの輸入財に対する炭素関税	ROW からの報復関税(-R)	最良製品グループ(Good)の減免(-G)
(1)	TRI	[US, EU, JPN]	×	×	×
(6)	TRI-BCA-R	[US, EU, JPN]	BCA	○	×
(7)	TRI-CSTR-R	[US, EU, JPN]	CSTR	○	×
(8)	TRI-CSTR-G-R	[US, EU, JPN]	CSTR	○	○

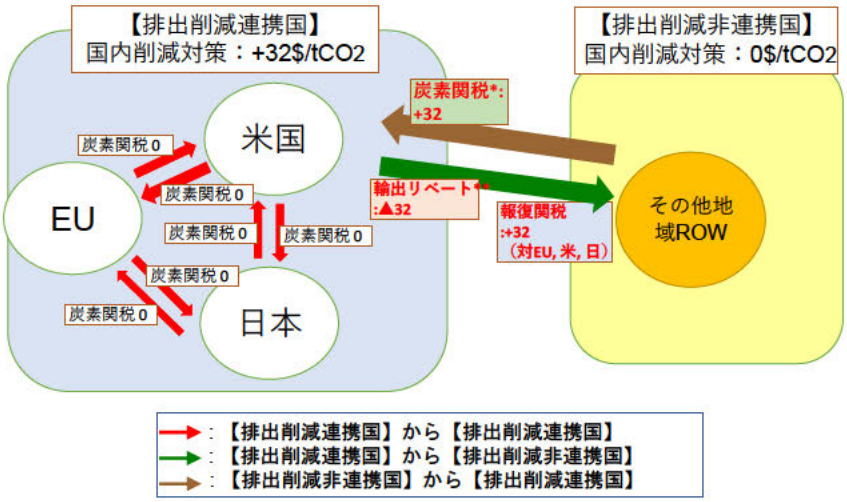


図 4.3.3-19 ケース(7)TRI-CSTR-R の説明図

注：*CSTR 炭素関税は、製品別の炭素含有率を適用して、それぞれ輸入量に基づき課されると想定。** 輸出リベートにより、輸出価格は、国内対策による国内生産価格の増分が減免されると想定

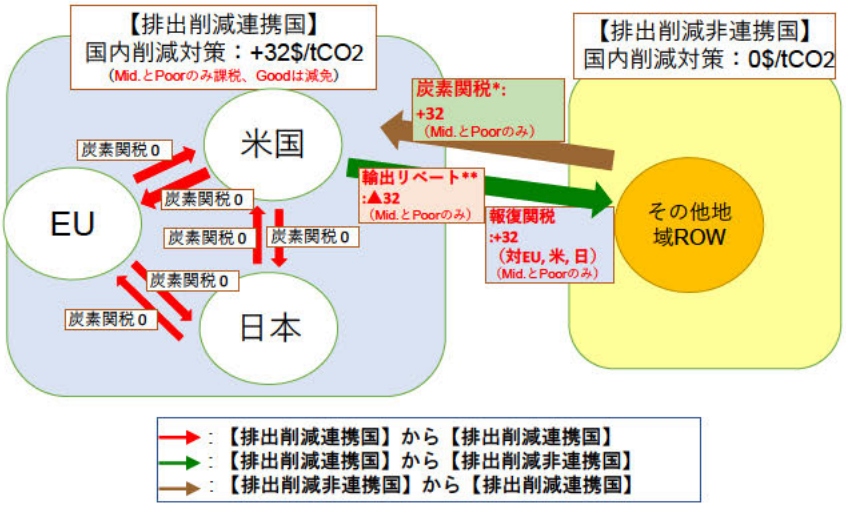


図 4.3.3-20 ケース(8)TRI-CSTR-G-R の説明図

注：*CSTR 炭素関税は、製品別の炭素含有率を適用して、それぞれ輸入量に基づき課されると想定。** 輸出リベートにより、輸出価格は、国内対策による国内生産価格の増分が減免されると想定

③ 分析結果

日米 EU が実施する BCA と CSTR は、いずれも、日米 EU の国際競争力低下を軽減し（図 4.3.3-21）、CO_2 リーケージを縮小する効果がみられる（表 4.3.3-3）。原単位の優れた製品グループ（Good）への生産シフトを促すが、課税方式による違いの影響はほとんどみられない。世界全体の CO_2 削減効果に関して、課税方式の違いによる差異はほとんどないと推計された。Good グループへの生産シフトに対する減免の効果はリーケージ縮小の観点において大きいものの、世界全体の排出削減効果はやや劣る。

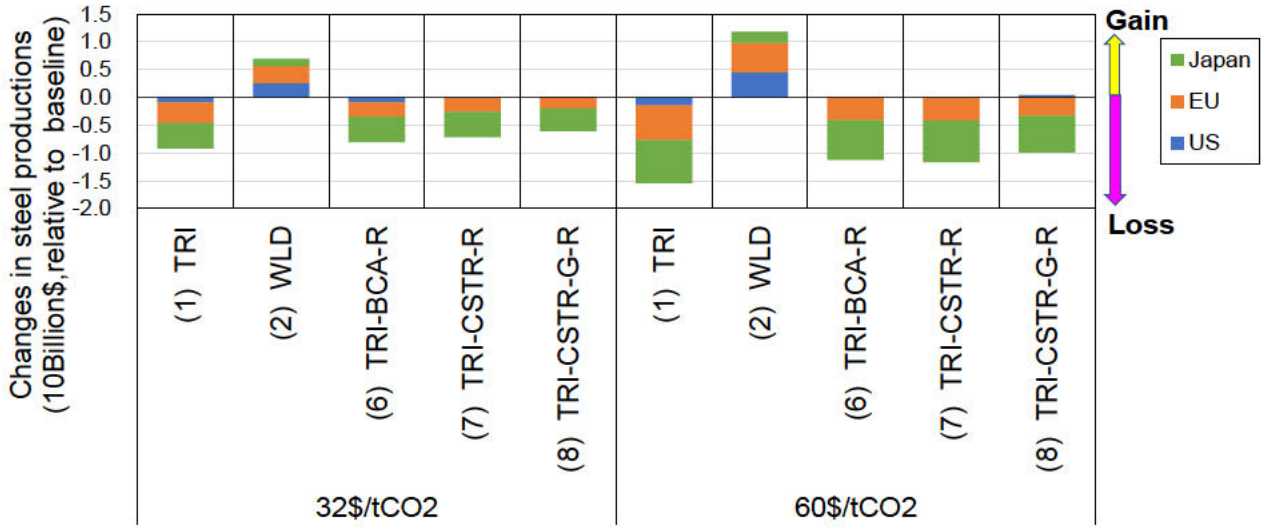


図 4.3.3-21 炭素関税方法と排出削減費用水準（炭素価格水準）による鉄鋼生産量の感度

表 4.3.3-3 CO_2 リーケージ率の比較（鉄鋼製品）

	(1)TRI	(6)TRI-BCA-R	(7) TRI-CSTR-R	(8)TRI-CSTR-G-R
CO_2リーケージ率(%)	+7.3%	+4.2%	+4.4%	+3.5%

注：日米 EU のベースライン比 CO_2 削減量（鉄鋼製品）に対する，その他地域の CO_2 増加量

(7) 生産・貿易パラメータの感度解析

既往文献において、一般均衡型モデルによる国境炭素調整の分析では、貿易パラメータが分析結果に影響を与えうることが示されていた。そこで、本分析では、輸入と国産の財の代替性（アーミントン代替）の弾力性（δ）に関して、感度分析を行った。また、本分析では、鉄鋼製品をエネルギー原単位に応じて 3 グループを想定したこと

から、それらの代替性の弾力性（σ）についても想定を置いているため、これについても感度分析を行った。

国内財と輸入財の代替性弾力性が大きい場合、TRI ケースでは、その他地域への移行が大きくなるために、標準ケースよりも CO_2 リーケージ率は増加する（表 4.3.3-4）。また、国境調整措置によるリーケージ縮小の効果はあるが、標準ケースよりもリーケージ率は増加する。また、課税方式による違いはほとんどみられない。次に、鉄鋼製品グループ間の代替弾性値（σ）の違いによる影響をみると、製品グループ間（σ）の代替性を大きく想定すれば、CO_2 リーケージ率は縮小する。また、国境調整措置によるリーケージ縮小の効果は大きい。同様に、炭素関税による違いは小さい。

表 4.3.3-4　輸入・国産の代替弾性値(δ)と製品グループ間の代替弾性値(σ)の違いによる影響

	製品グループ間の弾性値（σ）	輸入・国産の代替弾性値（δ）	国境調整無	国境調整有(＋報復関税)		
			(1) TRI	(6) TRI-BCA-R	(7) TRI-CSTR-R	(8) TRI-CSTR-G-R
中位ケース	2.0	1.5	7.3%	4.2%	4.4%	3.5%
δ高位ケース	2.0	2.8	16.3%	10.3%	10.6%	9.4%
σ高位ケース	6.0	1.5	0.8%	-1.2%	-1.1%	-1.2%

注：CO_2 リーケージ率は、提携メンバー（日米 EU）のベースライン比 CO_2 削減量（鉄鋼製品）に対する、非提携メンバー（その他地域）の CO_2 増加量を表す。

(8) まとめ

国境炭素調整措置（炭素関税）は、国内削減策による国際競争力低下を軽減し、CO_2 リーケージを縮小させる効果がみられた。一方、国境炭素調整に対抗する報復措置により、国境炭素調整措置を実施した国・地域の国際競争力は低下し、世界全体の排出量への影響は非常に小さいものの CO_2 リーケージが悪化すると推計された。この枠組みのもとでは、国境調整を導入するインセンティブは、国・地域の生産構造や貿易構造によって異なることが示唆された。

世界全体で費用効率的に排出削減を行うためには、とりわけ限界削減費用が小さいと推計される国の排出削減目標の野心度の引き上げることにより、原則的には限界削減費用が世界均で等化するような各国排出削減目標を目指すことが望ましい。また、２国間クレジットを活用するなど、日本と比較しての安価な対策の排出削減機会を海外においても実現していくことが求められる。炭素国境調整による対応は、各国間の排出削減強度が異なる場合、すなわち各国間に限界削減費用に大きな差異が生じたままの場合、そのオプションを有し対応の可能性を持っておくことは重要であるが、前述の対応が優先されるべきと考えられる。

日本の場合は、製造業が相対的に強く、鉄鋼製品など、輸入量に比べ輸出量が大きいために、炭素国境調整措置によって、相手国から仮に報復を受けた場合、影響は大きくなるケースも多いと考えられ、慎重な対応が必要と思われる。同じ先進国グループにおいても、欧米との影響の度合いは違うことの認識が必要である。

なお、炭素国境調整税は、製品の製造プロセスではなく、製品に対して課税されることとなる。例えば、鉄鋼で言えば、高炉・転炉法と電炉法では、エネルギー原単位が大きくことなるが、製品において転炉鋼と電炉鋼で代替可能性が存在すると、それらを区分することは難しくなる。しかし、真に排出削減に寄与する対策が評価されず、グローバルな排出削減に逆行する恐れがある。

EU が国境調整を導入する場合、今回のモデル分析では、日米 EU 間では国境調整を課さないという前提としたが、その前提が必ずしも満たされるとは限らない点には留意が必要である。また、日本と米国・EU が協力した対応が、日本にとっての利得が高くなる可能性も示唆された。よって、EU や米国をはじめ、国境調整の導入を検討する国・地域との連携の準備はしておくことは、重要と考えられる。

本報告では、炭素関税として、製品平均の原単位に基づく標準的な BCA 関税の他に、Banks and Fitzgerald[13)]によって提案された、各製品の原単位に基づく CSTR 関税の 2 種類の関税を比較したが、炭素関税方法による違いはほとんど見られなかった。

参考文献（第 4.3 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) United Nations: United Nations Framework Convention on Climate Change, 1992.
3) 経済産業省：補論 1　貿易と環境－気候変動対策に係る国境措置の概要と WTO ルール整合性－、2017 年版不公正貿易報告書、https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/tsusho_boeki/fukosei_boeki/pdf/2017_02_19.pdf（2017）.
4) 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（アクセス日 2021 年 3 月 8 日）.
5) 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（アクセス日 2021 年 3 月 8 日）
6) 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 （アクセス日 2021 年 3 月 8 日）

7) 有馬, 炭素国境調整メカニズムに対する欧州内外の見方, http://ieei.or.jp/2020/06/opinion200617/（アクセス日 2021 年 3 月 15 日）
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　成果報告書」、（公財）地球環境産業技術研究機構、平成 31 年度報告書（2020）
9) Cosbey, A., Droege, S., Fischer, C., and Munnings, C.: Developing guidance for implementing border carbon adjustments: Lessons, cautions, and research needs from the literature, Review of Environmental Economics and Policy, vol. 13, 1, pp. 3-22, 2019
10) 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)
11) Böhringer, C., Balistreri, E.J., Rutherford, T.F.: The role of border carbon adjustment in unilateral climate policy: Overview of an Energy Modeling Forum study (EMF29), Energy Economics, 34, pp. S97-S110, (2012)
12) Helm, D., Hepburn, C., and Ruta, G.: Trade, climate change, and the political game theory of border carbon adjustments, Oxford Review of Economic Policy, 28, 2, pp. 368-394, (2012)
13) Banks, G.D. and Fitzgerald, T.: A sectoral approach allows an artful merger of climate and trade policy, Climatic Change, 162, 165-173, (2020)
14) Homma,T., and Akimoto, K.: Analysis of Japan's energy and environment strategy after the Fukushima nuclear plant accident, Energy Policy 62, (2013), pp.1216–1225
15) Oda, J., Akimoto, K., Tomoda, T., Nagashima, M., Wada, K., Sano, F.: International Comparisons of Energy Efficiency in Power, Steel, and Cement Industries, Energy Policy (2012), 44, 118-129
16) O'Neill, B. C. et al.: A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. Climatic Change 122, (2014), pp.387–400

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。また、2019年6月に閣議決定されたパリ協定長期成長戦略[4)]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ともに、2050年までに80%の削減に大胆に取り組む」とされた。また、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も多くなった。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。

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、正味ゼロ排出への要請が強まっていることもあるため、従来以上に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、世界エネルギー・温暖化対策評価モデルのオプションとして考慮し分析を行った。具体的には、省エネルギーの中でもシェアリングエコノミーのような社会変化を誘発し得る対策オプションとして、5.1.1節において、完全自動運転車実現によるカーシェア、ライドシェア誘発に関する2019年度の分析を強化するため、更なる調査、分析を行った。次に、5.1.2節には航空部門の対策オプションについて、5.1.3節では水素、CCU・合成燃料、DACについて、技術動向、課題等を調査、整理した。それらを踏まえ、5.1.4節に世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+における具体的なモデル化、技術想定の更新等について記載した)。また、5.2節では、今般の社会経済状況も踏まえての社会経済シナリオの更新について記載した。

その上で、5.3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）を含む、複数の排出削減シナリオ、技術シナリオ等について、世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+によって分析した結果を記載した。

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。5.4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、COVID-19の影響も踏まえながら調査、整理を行った。これは、住環境計画研究所に協力を頂いて実施した。また、5.5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 5.6 節には、情報技術の革新が、食料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、5.7 節では、非 CO_2 GHG 排出削減に関する最新の分析動向について整理した。更には、長期の排出削減が、持続可能な発展に及ぼすコベネフィットやトレードオフについても調査、整理を行った。5.8 節には、地球温暖化対策と土地利用・食料アクセスに関する分析を記載した。特に今年度は、DACCS のインパクトを中心に調査、分析を実施した。最後に、5.9 節において、大気汚染排出・PM2.5 削減のコベネフィットに関する分析の文献調査を整理した。

5.1 ゼロエミッションに向けた長期温暖化対策技術の調査

図 5.1-1 に排出量で見た正味ゼロ排出のためのイメージを示す。排出低減のためには、大きくは、エネルギー需要を低減させる（省エネ）と排出原単位を低下させる方策に分けられる。極論すれば、仮に排出原単位をゼロに容易にできるのであれば、ゼロ排出において、省エネは不要とも言えるが、一般的にゼロに近づけていけばコストは急激に上昇する傾向もあるため、複合的な対策が重要である。CO_2 原単位について言えば、排出量を電力、非電力と分けると、電力の方が、非電力よりも CO_2 原単位を大きく低下させやすいため、電力化率を向上させることが一つの費用対効果の高い対策と考えられる。しかし、これも同様で、電力化率を高め過ぎようとすれば（それを目的化してしまえば）、コストが急激に上昇する可能性もある。よって、非電力での CO_2 原単位低下の対策も重要になる。更には、CO_2 原単位をゼロにすることでコストが急激に上昇すること、エネルギー需要も当然ながらゼロにできないこと、また、非 CO_2 の GHG で削減が難しい排出もあることから、負の排出技術（NETs）の役割も大きいと考えられる。CO_2 原単位をゼロにするには、一次エネルギーベースで、再エネ、原子力、化石燃料はすべて CCS とする必要があるが、熱利用分野ですべての化石燃料燃焼を止めるか、使うにしてもすべて CCS にすることはあまりに非現実的である。よって、DACCS、BECCS、そして、植林、鉱物での CO_2 固定といった NETs を組み合わせて活用することは、正味ゼロ排出という目標においては重要性が一層高まることとなる。

いずれにしても重要なことは、これらすべての対策オプションを検討の俎上に上げ、全体最適の視点で検討、分析を行うことである。IPCC 1.5℃特別報告書（SR15）においても、1.5℃シナリオ（2050 年頃に CO_2 排出正味ゼロ）を実現する、これら対策の組み合わせは複数あるとしている（図 5.1-2）。正味ゼロ排出に寄与し得る技術は、まだ技術開発途上にあるものも多く、不確実である。第 2 章でも議論したように、不確実性を前提としたリスクマネージメントが重要で、複数のシナリオを有し、対応していくことが環境と経済を両立しながら、カーボンニュートラルの実現性を高めることに有用と考えられる。それぞれの技術オプションの技術、ポテンシャル、コストの展望、課題を把握することは重要であり、そして何より全体システムとして分析、評価することが重要と考えられ、本研究でその視点で調査、分析、評価を行った。

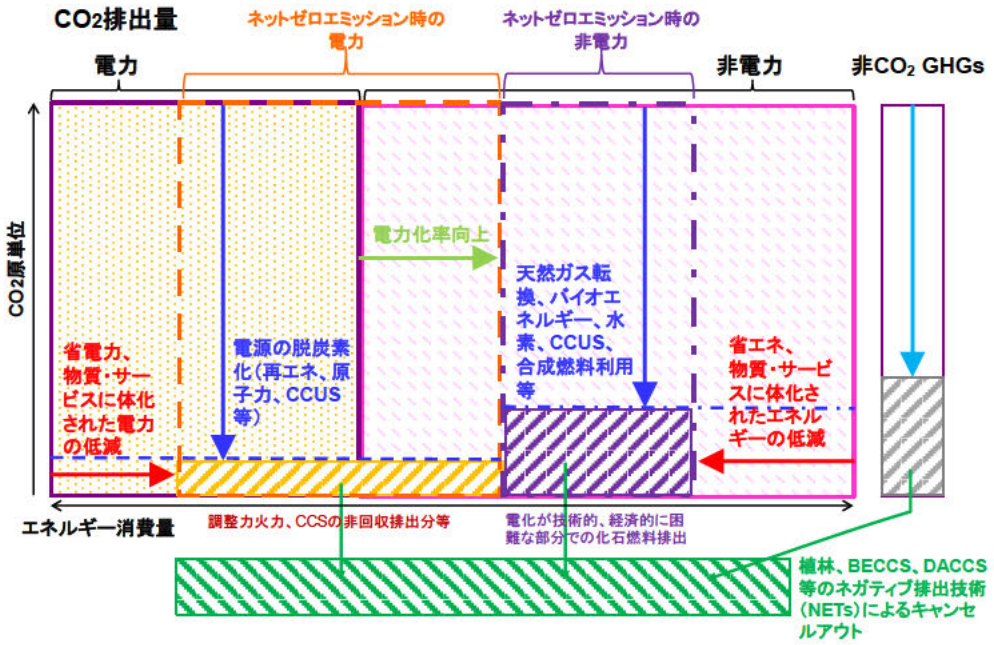


図 5.1-1 正味ゼロ排出のためのイメージ：CO_2 排出量（電力、非電力）、非 CO_2 GHG 排出量、NETs の関係性

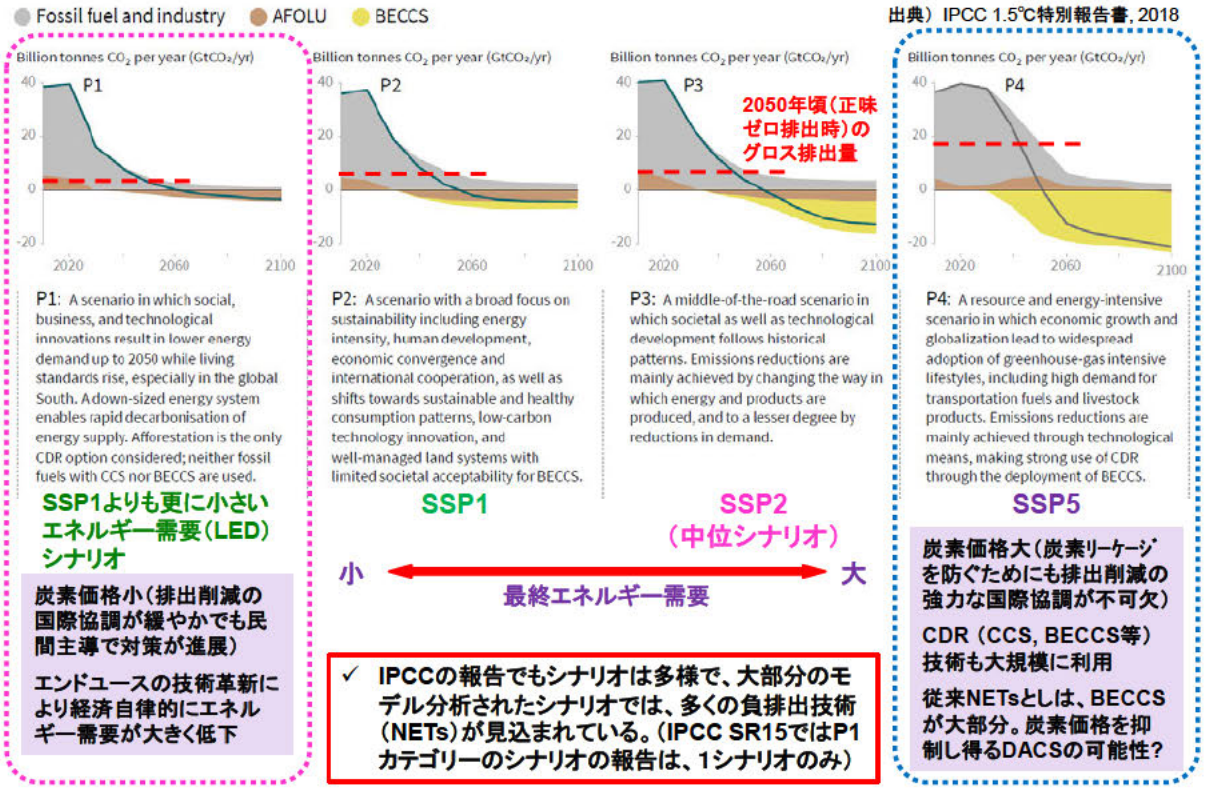


図 5.1-2 1.5℃シナリオ（2050 年頃に正味ゼロ排出）の複数のシナリオ（出典：IPCC SR15）

5.1.1 完全自動運転車実現に伴うカーシェア・ライドシェア誘発のモデル化の更新

デジタル化の進展はモビリティにも大きな影響を及ぼす可能性がある。Connected; Service & Shared; Autonomous; Electric (CASE)と呼ばれる変化が起こっている。自家用車の稼働率は 4～5%程度と推計され、多くの時間、自家用車は活用されていない。それは、高い費用を払っても、いつでもすぐにプライベート空間を確保しつつ移動が可能という利便性の高さのためである。しかし、完全自動運転車が実現すれば、ライドシェアリング、カーシェアリングとなっても、利便性を大きくは損なわず、また、稼働率の上昇によって、より安価な費用で利用可能となり得る。カーシェアの場合、車の傷みが進みやすくなる可能性もあるが、ユーザーも評価されるような仕組みがとられると、使用の仕方に注意が働き抑制効果も生じると考えられる。また、ライドシェアによって、プライベート空間の確保は阻害されるが、シェアを前提にした車の形の変化も進むと考えられる。そのため、ライドシェアリング、カーシェアリングが急激に進む可能性がある。そして、ライドシェアリングは直接的に自動車のエネルギー消費を低減し、カーシェアリングは自動車の台数を減らし、鉄やプラスチックなどの素材の利用を低減するとともに、その製造において必要なエネルギー消費を低下し得る。

例えば、OECD/ITF[1)]は、実際のデータ（人口分布、道路・公共交通ネットワーク、平日のトリップ需要（時間帯、OD (Origin-Destination)）、トリップ選好等）に基づいてモデルを構築し、分析を行っている。アイルランドのダブリンの場合、全ての自家用車をシェアカーに置き換えた場合はその 2%弱の車両台数で現在のモビリティを供給できるとしている。また、自家用車の 20%を置換した場合は（EV 無しでも）CO_2 排出量が 22%低減されるとしている（表 5.1.1-1）。

表 5.1.1-1 シェアカーによる必要車両台数等の推計例：ダブリンの例（出典：OECD/ITF[1)]）

シナリオ設定			シミュレーション結果：Baseline比の変化率 [%]					
#	Bus	Car	Passenger-km	Vehicle-km	CO_2 emissions	Congestion	Travel time	Equivalent private car vehicles
1	100% Replacement	100% of trips replaced	+51	▲38	▲31	▲37	+72	▲98
2	Keep		+32	▲42	▲31	▲43	+134	▲99
4	100% Replacement	20% of trips replaced	+16	▲23	▲22	▲7	+6	▲18
6	Keep trips where Bus with headway < 5min		+13	▲25	▲23	▲9	+6	▲18

(1) モデル改良と前提条件の想定

これまで本事業では、シェアモビリティの進展について、DNE21+に明示的にモデル化し、評価できるようにしてきた[2)]。しかし、シェアモビリティの想定は難しく、今年度は全体の変化をシステム的に考え、より整合的に評価できるよう、更にモデルの改良を行った。モデルの具体的な改良点としては、よりシステマティックに前提条件を想定した点と、カーシェアに伴う自動車台数の減少による鉄鋼需要、プラスチック製

品（エチレン・プロピレン）需要の低下に加え、自走式立体駐車場の低減に伴う、コンクリート需要、鉄鋼需要の低減を想定した点である。全体の相関性は図 5.1.1-1 のように想定し、また、完全自動運転車実現に伴うライドシェアリング、カーシェアリングに関係したパラメータ想定は図 5.1.1-2 のように想定した。

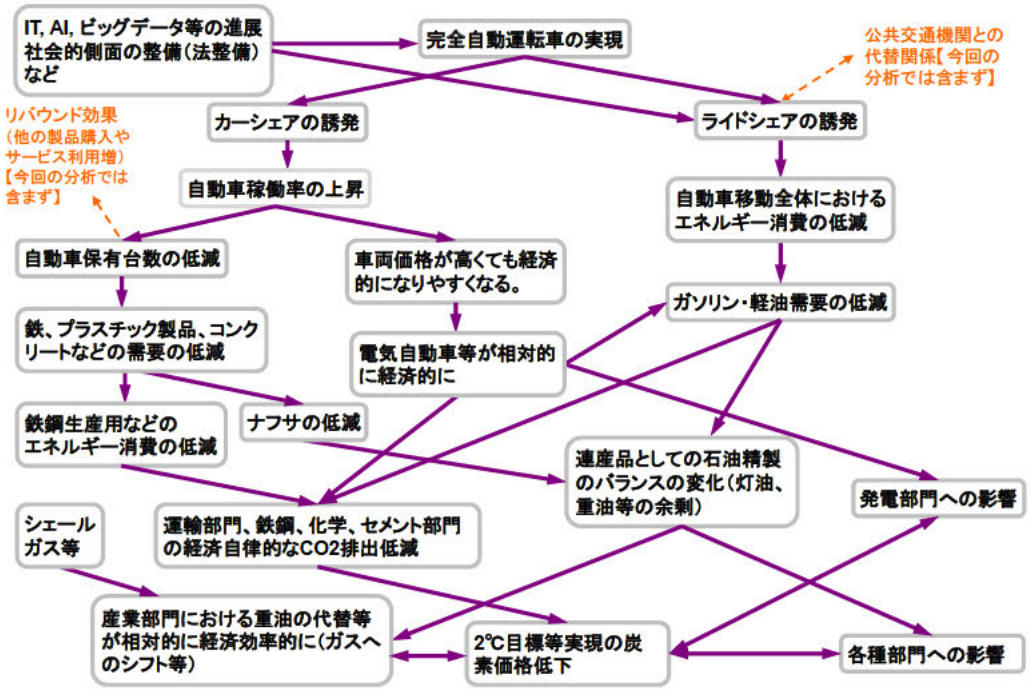


図 5.1.1-1 完全自動運転車に伴うカーシェア、ライドシェアの誘発に関するシナリオ分析とその波及

まず、表 5.1.1-2 に示すように、社会経済シナリオとして、SSP2 と SSP1 を取り上げて評価した。そして、完全自動運転車実現によるライドシェアリング・カーシェアリング誘発シナリオを想定した。

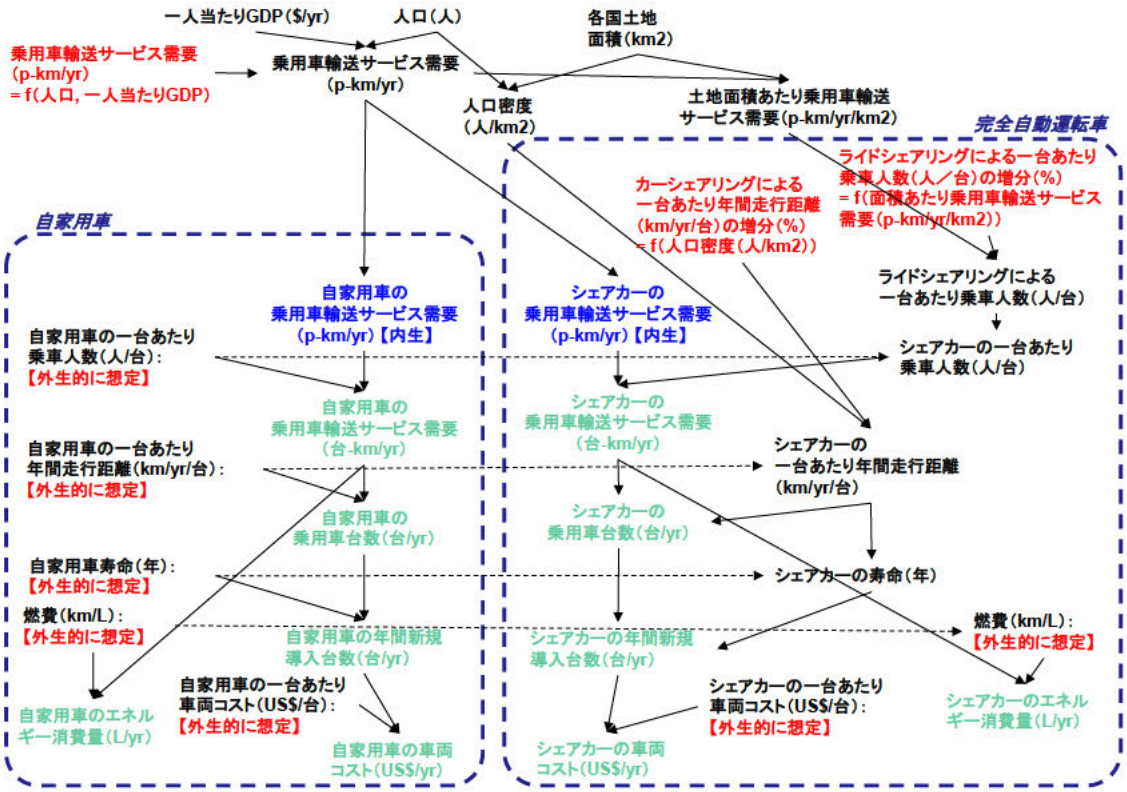


図 5.1.1-2 完全自動運転車と誘発されるシェアモビリティの想定

表 5.1.1-2 社会経済シナリオおよび完全自動運転車実現シナリオの想定

	社会経済シナリオ	
	SSP2	SSP1
基準シナリオ（完全自動運転車の広範な展開無し）	SSP2	SSP1
完全自動運転車実現によるライドシェアリング・カーシェアリング誘発シナリオ	SSP2_AC	SSP1_AC

ライドシェアリング、カーシェアリングがどの程度進展し得るかは、モビリティ需要の密度に大きく依存すると考えられる。それに加え、既存の公共交通機関の整備状況などによっても影響され得る。しかし、DNE21+モデルは、国・地域については比較的細かい分割を行ってはいるものの、世界モデルであり、国や地域内におけるモビリティ需要の分布まで考慮して分析することは現実的ではない。また、公共交通機関の整備状況の違いを踏まえた分析を行うことも大きな困難が伴う。図 5.1.1-2 に記載のように、カーシェアリングによる一台あたり年間走行距離の増加率が、人口密度によって説明できるとし、また、ライドシェアリングによる一台あたり乗車人数の増加率が、土地面積あたりの乗用車輸送サービス需要によって説明できると仮定した上で、ライドシェアリングについては図 5.1.1-3 で示すような 2 種類の想定を、カーシェアリングについては図 5.1.1-4 に示すような 2 種類の想定を行った。この想定を基に、図 5.1.1-2

のとおりに計算を行い、各種モデル想定値を推計した（これによって推計されたパラメータの一部を表 5.1.1-3、表 5.1.1-4 に示す）。完全自動運転車有のシナリオにおいては、完全自動運転車は 2030 年以降に利用可能と想定した。

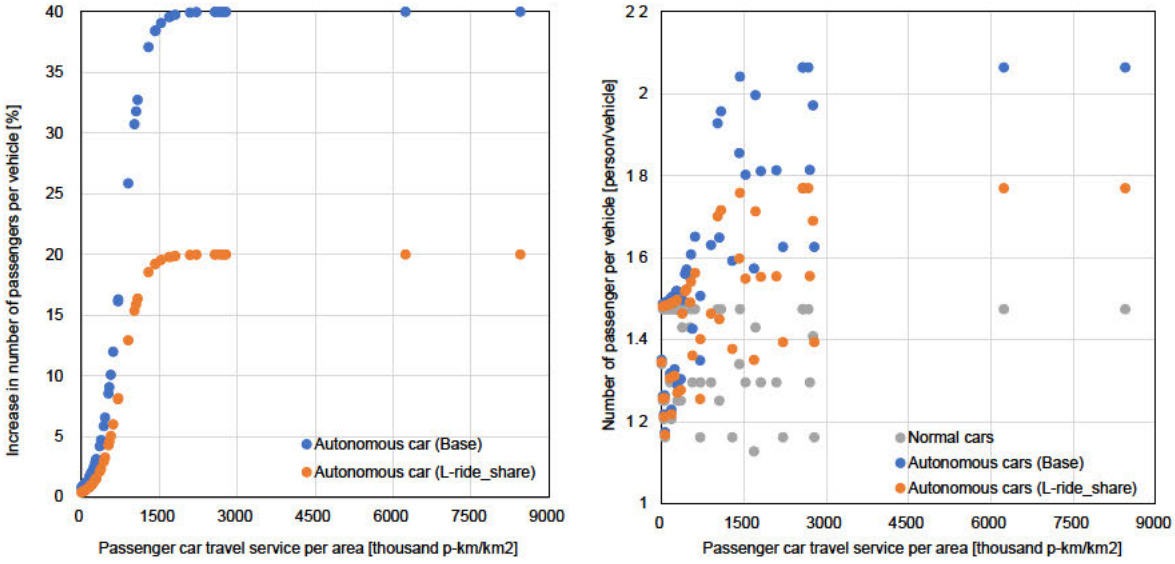


図 5.1.1-3 完全自動運転車によるライドシェア誘発の想定

注）図中プロットは、DNE21+における国・地域

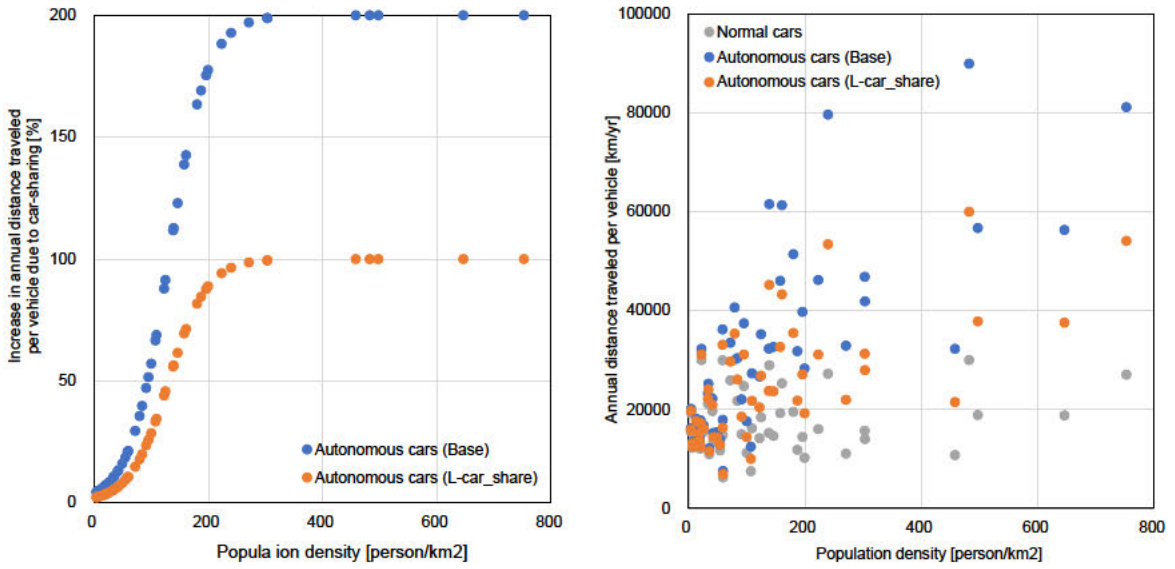


図 5.1.1-4 完全自動運転車によるカーシェア誘発の想定

注）図中プロットは、DNE21+における国・地域

表 5.1.1-3 完全自動運転車と誘発されるシェアモビリティの想定

	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

表 5.1.1-4 完全自動運転車と誘発されるシェアモビリティの想定（低位シナリオの感度）

	L-ride_share	L-car_share
車の寿命	Base シナリオに同じ	6–20 年
一台あたり平均乗車人数	2050: 1.17–1.77 人 2100: 1.11–1.60 人	Base シナリオに同じ

また、昨年度と同様に、自動運転車・シェアリング関連の機会費用についても考慮した。表 5.1.1-5 に示すように、時間コストとしては、完全自動運転車の運転フリー便益、一方、シェアカーとしての待ち時間等の利用コストを想定した。また、安全性コストとして、安全性向上の便益を想定した。

表 5.1.1-5 自動運転車・シェアリング関連の機会費用の想定

	時間コスト	安全性コスト
完全自動運転のみ有	賃金 ($/hour) = Per capita GDP ($/year)÷*2000* (hour/year; 一年あたりの労働時間) 移動時間 (hour/year) = 移動需要 (p-km/year) ÷*30* (v-km/hour; 車速) **運転フリー便益** ($/year)＝賃金 ($/hour)×*0.15* (便益率)×移動時間	**安全性向上便益** ($/year) = *0.1* ($/v-km)×(1 - 完全自動運転普及率)×移動需要 (v-km/year)
シェアリングのみ有	**シェアカー利用コスト** ($/year)＝賃金×*0.35* (便益率)×移動時間×*0.1* (移動時間増加率) ×(1 – シェアカー利便性)	
完全自動運転かつシェアリング	**運転フリー便益** ($/year) **シェアカー利用コスト** ($/year)	**安全性向上便益** ($/year)

(2) モデル試算例

DNE21+を用いた長期的なシナリオ分析の総括は、第 5.3 節に記載するが、ここでは、先に完全自動運転車によるライドシェア、カーシェア誘発に関する分析結果について記載する。

まず、完全自動運転車実現とそれによって誘発されるカーシェア・ライドシェアリングを想定しないシナリオにおける世界の乗用車保有台数の推計を図 5.1.1-5 に示す。特に途上国の乗用車保有台数の増大により、2050 年には SSP2、SSP1 ともに 2015 年比 2.5 倍程度と推計している。2100 年では SSP2 では 3.5 倍以上、SSP1 でも 3 倍程度と推計している。図 5.1.1-6 には、完全自動運転車実現とそれによって誘発されるカーシェア・ライドシェアリングを想定したシナリオ（シェアリング進展度合いは基準シナリオ Base の場合）における世界の乗用車保有台数の推計を示す。完全自動運転車実現を想定したシナリオでは、CO_2 制約を想定しない REF シナリオでも、経済自律的にシェアカーが選択され、2050 年では 2015 年比 1.3 倍程度、2100 年でも 1.6～1.7 倍程度と推計される。

また、図 5.1.1-6 で見ることができるように、シェアリングシナリオでは稼働率の上昇に伴い、初期費用が高くても燃料費が安価な電気自動車が経済合理的になりやすく、より多くの電気自動車が保有される結果となっている。ただし、2050 年までの世界全体においては、2DS、B2DS シナリオともに、HV、PHV の方が EV よりも主流となっている。2100 年になると、EV が主流になっている。

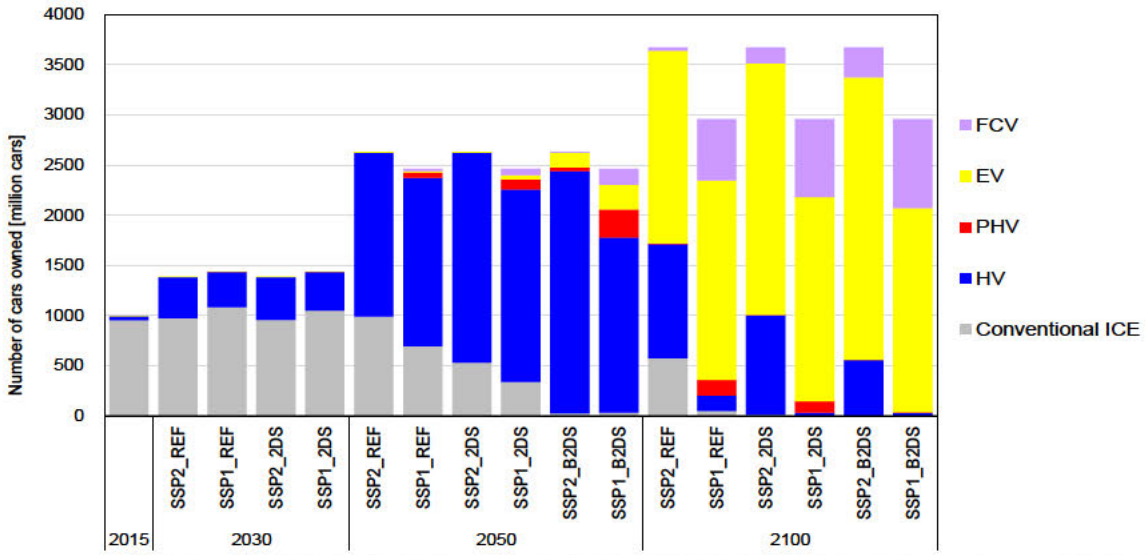


図 5.1.1-5 世界の乗用車保有台数：完全自動運転車実現（とそれによって誘発されるカーシェア・ライドシェアリング）を想定しないシナリオ

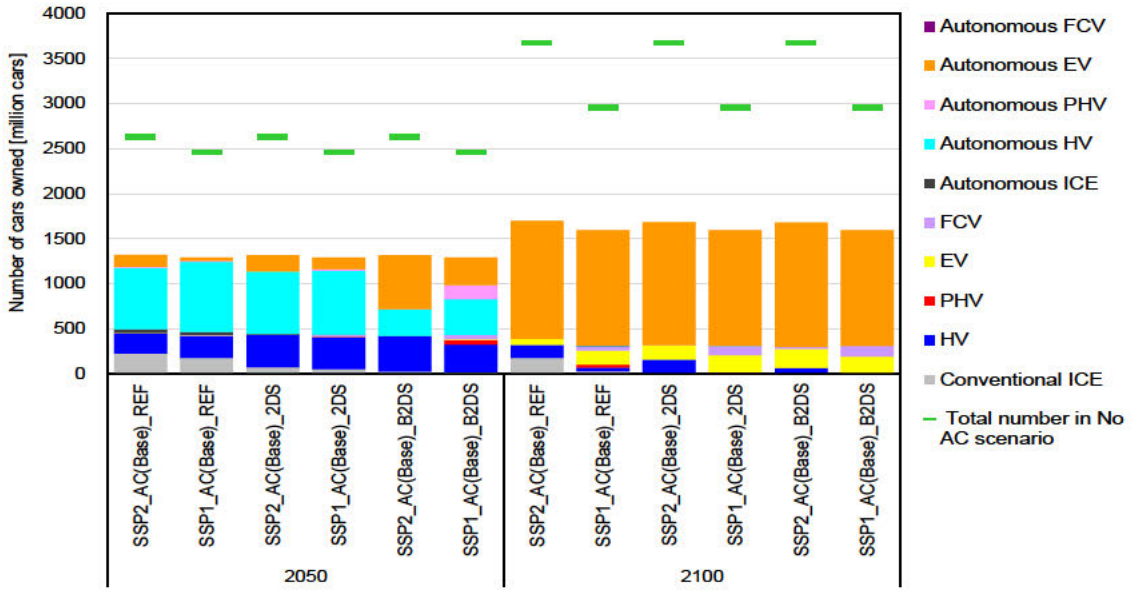


図 5.1.1-6 世界の乗用車保有台数：完全自動運転車実現（とそれによって誘発されるカーシェア・ライドシェアリング）を想定したシナリオ

図 5.1.1-7 に SSP2-AC× 2DS シナリオについて、世界主要国の 2050 年の車種構成と電力 CO_2 原単位の関係を示す。大きくは人口密度が高い国は、完全自動運転車の EV の比率が高い傾向があり、逆に低い国は、ハイブリッド車の比率が高い傾向が見られる。また、人口密度が高く EV 比率が高い国の中では、とりわけ電力の CO_2 原単位が小さい国は、完全自動運転車 EV 比率が、より一層、 高い傾向が見られる。

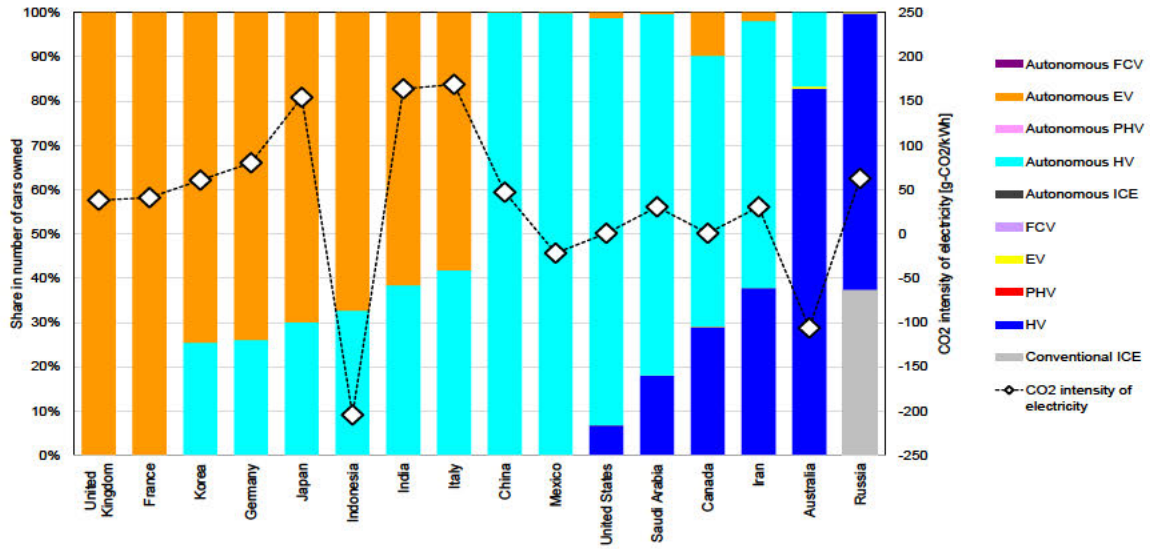


図 5.1.1-7 世界主要国の 2050 年の車種構成と電力 CO_2 原単位：SSP2-AC (Base シナリオ) × 2DS シナリオ

図 5.1.1-8 には、SSP2-AC× 2DS シナリオについて、地域による 2050 年の完全自動運転シェアカーの採用率を示す。人口密度が低い国においては、完全自動運転シェアカーの採用率が低い傾向の結果が見られている。ただし、図 5.1.1-3、図 5.1.1-4 の想

定値に必ずしも張り付いているわけではなく、モデル内で経済合理的な範囲で選択がされている。一方で、100%となっている地域、国も多く、これは、モデルでは、一地域・国内の分布等を考慮してないことによるもので、モデルは若干極端な結果を示していることには注意が必要である。

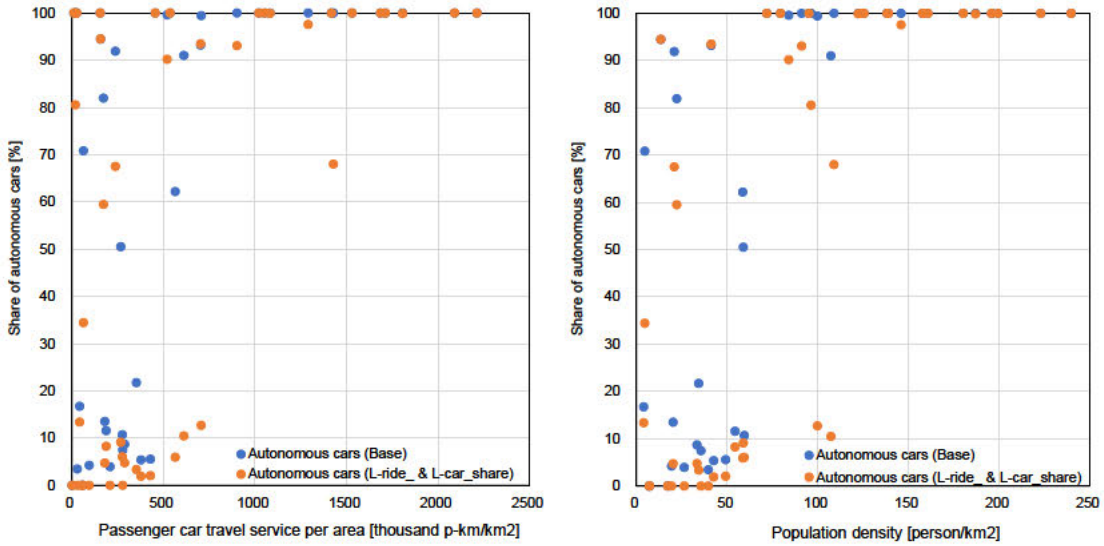


図 5.1.1-8 地域による 2050 年の完全自動運転シェアカーの採用率：SSP2-AC × 2DS シナリオ

図 5.1.1-9 には、SSP2-AC × 2DS シナリオにおける世界の車種別の乗用車保有台数について、カーシェア・ライドシェア誘発度合いに関する感度解析結果を示す。カーシェア・ライドシェア誘発度合いの想定により、保有台数の結果は大きく影響される。この前提条件に依拠しやすいことがわかる。

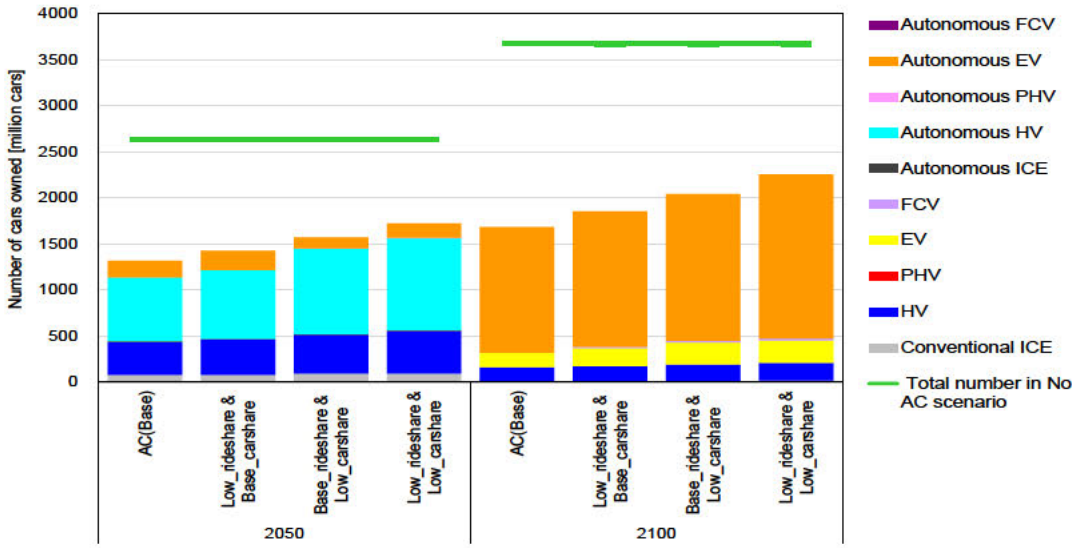


図 5.1.1-9 世界の車種別の乗用車保有台数：カーシェア・ライドシェア誘発度合いに関する感度解析（SSP2-AC × 2DS シナリオ）

世界の乗用車の最終エネルギー消費量を図 5.1.1-10 に示す。完全自動運転車シナリオにおいては、ライドシェアリングによって、エネルギー消費量が大きく低下し得る。2050 年の 2DS では、バイオ燃料の利用増加が見られるものの、2050 年の B2DS や 2100 年の 2DS および B2DS ではむしろ低下傾向が見られる。これは、バイオマス資源が発電等において CCS 付きの BECCS として利用し、負排出とした方が全体として経済合理的となるためである。

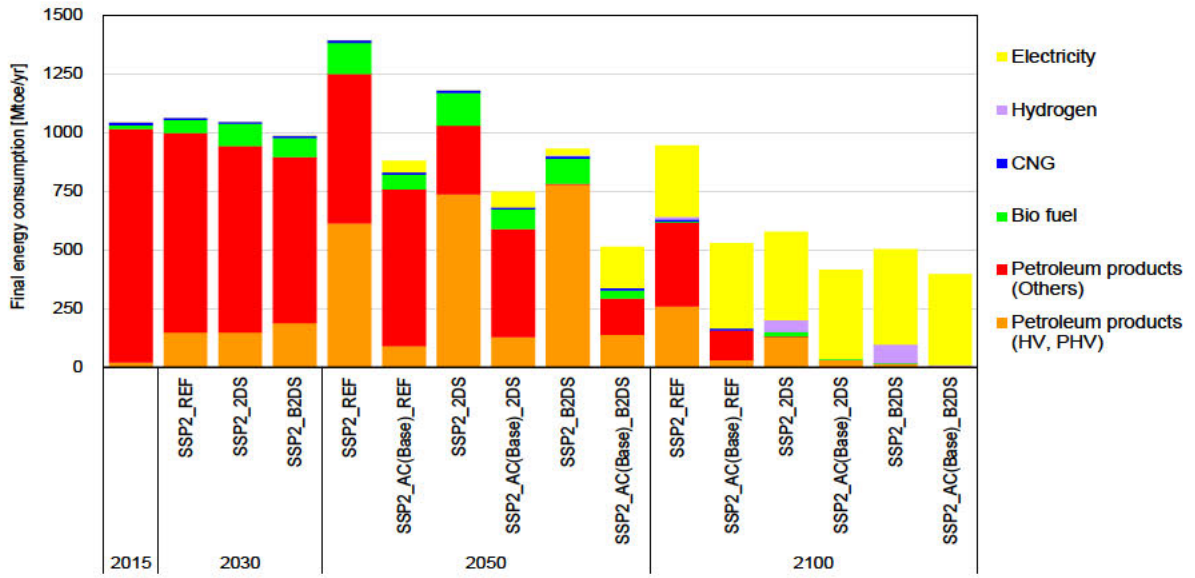


図 5.1.1-10 世界の部門別の最終エネルギー消費量：乗用車

表 5.1.1-6 には、2DS シナリオにおいて、完全自動運転シェアカーによる乗用車台数低下に伴う基礎素材の需要低下率を基準シナリオ比で示す。2050 年において、鉄鋼製品は▲3.7%、エチレン・プロピレンは▲1.1%、セメントは▲0.5%程度と推計された。必ずしも大きな低下ではないが、ライドシェアリングによる、自動車部門での直接的なエネルギー需要低下のみならず、エネルギー多消費の製品の需要低下による間接的なエネルギー需要低下も期待される。

図 5.1.1-11 には、世界の 2050 年における部門別 CO_2 排出量を示す。完全自動運転車シナリオでは、非完全自動運転車シナリオと比べ、運輸部門での排出低減が見られる。また、表 2.2.2-1 で示したような素材の生産量低下も加わる。そのため、特に発電部門での BECCS 利用が低下し、発電部門の排出が非完全自動運転車シナリオでは正味マイナスであるが、完全自動運転車シナリオでは正味排出はほぼゼロに変わっている。

表 5.1.1-6 2050、2100 年の世界の基礎素材の消費量（2DS シナリオ）

			鉄鋼	エチレン・プロピレン	セメント
2050 年	SSP2	AC: Base	-3.7%	-1.1%	-0.5%
		AC: L-ride_share and L-car_share	-2.2%	-0.5%	-0.4%
	SSP1	AC: Base	-2.9%	-0.8%	-0.5%
		AC: L-ride_share and L-car_share	-1.8%	-0.4%	-0.3%
2100 年	SSP2	AC: Base	-4.5%	-1.3%	-0.8%
		AC: L-ride_share and L-car_share	-3.1%	-0.9%	-0.6%
	SSP1	AC: Base	-4.4%	-0.7%	-0.8%
		AC: L-ride_share and L-car_share	-3.1%	-0.6%	-0.5%

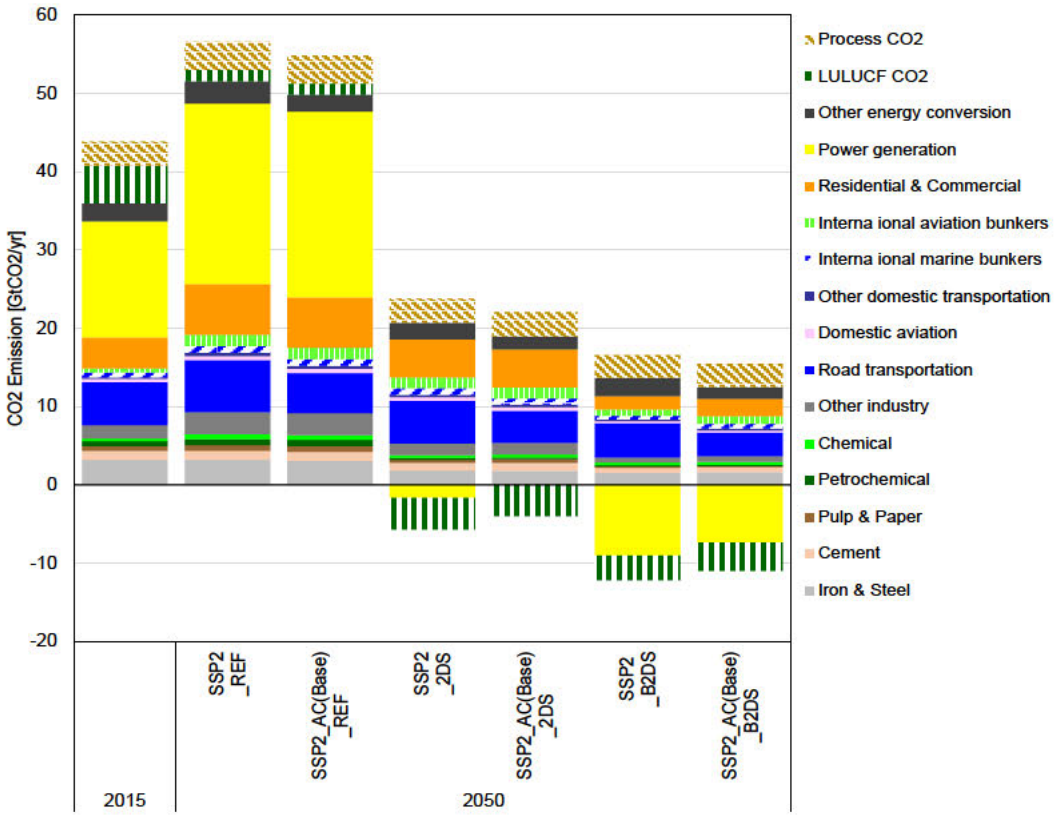


図 5.1.1-11 世界の 2050 年における部門別 CO_2 排出量

表 5.1.1-7 には、2050 年の CO_2 限界削減費用と排出削減費用を示す。2030 年以降も完全自動運転シェアカーを想定しないシナリオでは、2DS では限界削減費用が 169 \$/tCO_2 に対し、完全自動運転シェアカーを想定したシナリオでは 152 \$/tCO_2 と推計された。同様に、B2DS においては完全自動運転シェアカーを想定しないシナリオでは 524 \$/tCO_2 に対し、完全自動運転シェアカーを想定したシナリオでは 430 \$/tCO_2 と推計さ

れた。また、排出削減費用としては、完全自動運転シェアカーを想定したシナリオでは自動車の必要台数が低下し、そのコストが低減するため、排出削減費用を打ち消すほどの大きな効果が推計される。

表 5.1.1-7 2050 年の排出削減費用

	完全自動運転車実現（とそれにより誘発されるライドシェア、カーシェアリング）	想定せず	想定有：標準		想定有：ライド・カーシェア低誘発
	（カーシェアリング誘発に伴う）素材消費量の低減		想定せず	想定有	想定有
CO2限界削減費用 ($/tCO$_2$)					
2DS	SSP2	169	151	150	157
	SSP1	178	166	165	171
B2DS	SSP2	608	416	413	451
	SSP1	452	372	368	390
CO2排出削減費用 (trillion $/year); REFシナリオ（完全自動運転車実現を想定しないシナリオ）比					
2DS	SSP2	1.70	-9.21	-9.25	-4.89
	SSP1	1.43	-7.42	-7.45	-3.60
B2DS	SSP2	5.79	-5.82	-5.87	-1.36
	SSP1	4.75	-4.44	-4.48	-0.43

(3) リバウンド効果

上記の完全自動運転車がライドシェア、カーシェアを誘発する分析においては、リバウンド効果は考慮してないが、リバウンド効果は無視できないと考えられる。本項では、デジタル化技術のリバウンド効果について整理しておく。デジタル化技術（例えば ICT 技術）それ自体は、製造、運転、廃棄にエネルギーを消費する。一方で、デジタル化技術によって財・サービスのエネルギー効率が向上し、さらには既存の財・サービスからの代替が起きれば、従来の財・サービスと比べてエネルギー消費は低減し得る。また、特定の財・サービスの代替からのノックオン効果によって、財・サービスの生産のための技術への投資が進んでエネルギー効率が上がったり、経済的な構造が変化すれば、エネルギー消費は低減し得る。他方、変化後の財・サービス需要のコストが従来のものより低下すれば、実質的に可処分所得が増加するため、直接リバウンド効果として、エネルギー消費は増加し得る。さらに、変化後の財・サービスの利便性が高まったり、利用可能な時間が増加すれば、間接リバウンド効果として、エネルギー消費は増加し得る。

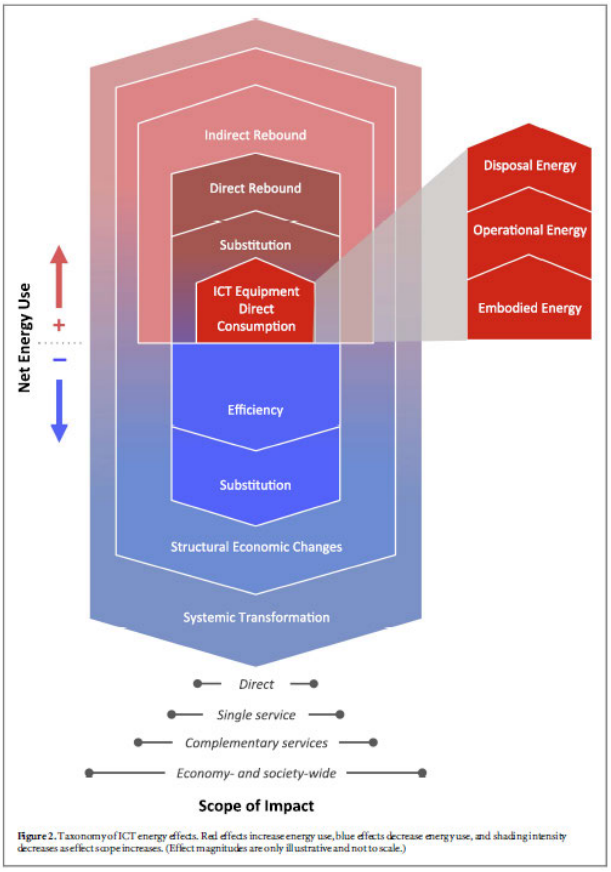


図 5.1.1-12 デジタル化技術がエネルギー需要に与える影響（出典：Horner et al.[3)]）

デジタル化の直接的なリバウンド効果の一つとして、データセンターの電力消費量の増加が挙げられる。例えば、Masanet et al.[4)]によると、世界のデータセンターの電力消費量は 2010 年に 194 TWh であり、2018 年には 205 TWh（世界全体の電力消費量の約 1%）に増加したと推計されている（図 5.1.1-12）。これは、同時期の計算インスタンスは+550%になったのに対し、電力消費量は+6%との推計になる。

エネルギー効率向上の主な要因は、サーバー効率化、仮想サーバー化、ストレージドライブ効率化・高密度化、データセンターインフラの効率化、サーバータイプの変化が挙げられている。

このように、数年先まではデータセンターによる電力消費の増加はさほど大きくないと推計されるが、ただ将来に向けては、政策補助、新規技術への公的投資、公的なデータ取得・モデリング能力の増強、といった政策立案者の行動も重要になるとされている。

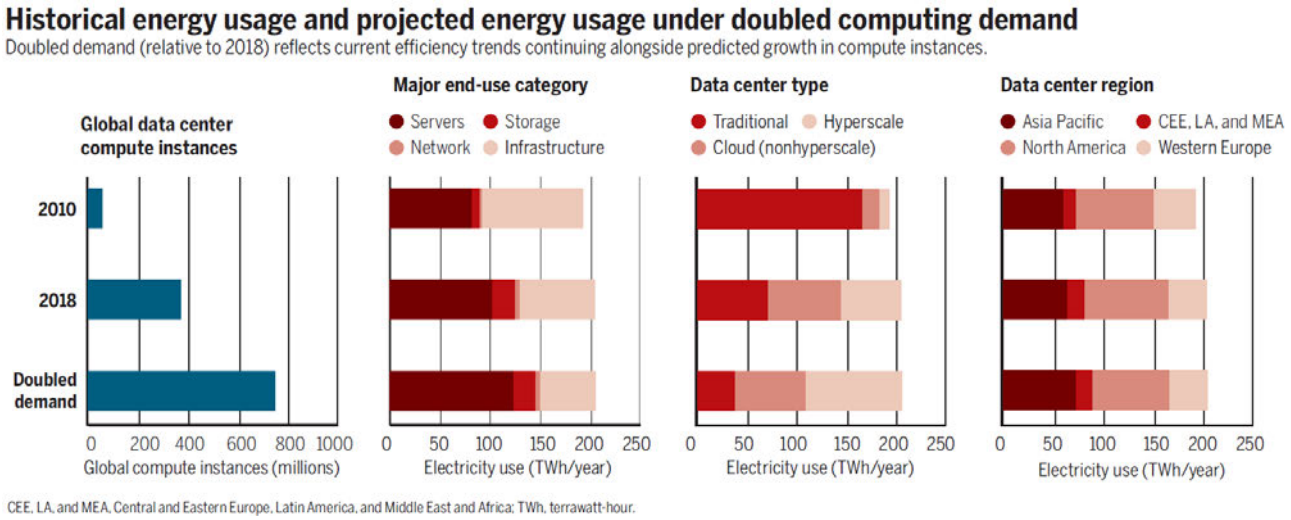


図 5.1.1-13 データセンターの電力消費としてのリバウンド効果の推定（出典：Masanet et al.[4)]）

表 5.1.1-8 に幅広くデジタル化に伴うエネルギー消費量の変化の文献レビュー結果を示す[5,6)]。基本的には、デジタル化によって、エネルギー消費量の低下が推計されている。しかし、どのような代替を想定するか、リバウンド効果の範囲をどう想定するか等により、エネルギー消費の変化量の推計は大きく異なる。

表 5.1.1-8 デジタル化によるエネルギー消費量変化の推計（文献[5,6)]レビュー）

対象	エネルギー消費の変化; [代表値]
E-publication	-90% to +3000%; **[-70%]**
E-news	-1400% to +550%; **[-70%]**
E-business	-91% to +179%; (Insufficient evidence)
E-music	-87% to +235%; **[-60%]**
E-videos and e-games	-70% to +450%; **[0%]**
Teleworking	-15% to -0.01%
Vehicle distance travelled	-20% to +3.9%
Person distance travelled	-19% to -11.9%

(4) まとめと今後の課題

デジタル技術によって、直接的に最終エネルギー消費量を低下させるだけではなく、サービス、財の無駄を省き、効率化することで、それらに体化されているエネルギーも低下させ得る。そして、完全自動運転車実現が、ライドシェアリング、カーシェアリングといった社会変化を引き起こす可能性について、本年度はモデル前提条件を昨年度よりもよりシステム的に想定することで、各種要因の連関を含めて、よりシステム的な形をとってモデル分析を行った。

一方で、リバウンド効果については留意が必要であり、リバウンド効果も含めた分析への拡張も実施していくことが今後の課題として挙げられる。また、需要サイドの分析では、特に消費者の選好の多様性についてのモデルでの考慮も大きな課題となる。これについても、より良いモデル化について検討を行っていく必要がある。

参考文献（第 5.1.1 節に関するもの）

1) OECD/ITF, Shared Mobility Simulations for Dublin (2018)
2) RITE、FY2019 ALPS 報告書 (2020)
3) Horner et al., “Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology” Environmental Research Letters (2016)
4) Masanet et al., “Recalibrating global data center energy-use estimates”, Science (2020)
5) Court et al., “Digitalisation of goods: a systematic review of the determinants and magnitude of the impacts on energy consumption”, Environmental Research Letters (2020)
6) Hook et al., “A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking”, Environmental Research Letters (2020)

5.1.2 国際航空を中心とした技術動向等

航空部門の排出削減取り組みに関しては、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、国内航空は各国の排出削減目標において進められている。この枠組みの下、ICAO により、国際航空における野心的目標として 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 2010 年に決議された [1)]。これら目標達成を実現する対策(basket of measures)として、ICAO は技術改善、運航方法の改善、代替燃料の活用、経済的手法の導入を推進していく方針をとっている。経済的手法に関しては、2021 年より国際航空における市場メカニズム CORSIA(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)が運用開始される予定である。一方で、ICAO は従来の技術改善や運航方法改善に基づく今後の燃費改善トレンドを 1.37%/yr と推計しており、2%には不足すると見込んでいる。また、従来の技術改善や運航方法改善による排出削減では 2020 年以降の排出増加ゼロ達成は実現せず、代替燃料によるジェット燃料の代替が相当量必要であるとの見通しを行っている [2)]。IEA は、航空など排出削減技術オプションが限定的な部門の脱炭素化には、今日実用化されていない新規技術の開発が必要であるとしており [3)]、世界的なネットゼロ排出への動きの中、航空部門の

大幅排出削減に貢献しうる革新的な航空機技術が求められてきている。このような状況の中、航空部門においても燃料として水素や電気の活用が検討されつつあり、航空機メーカーやスタートアップ企業による水素航空機や電動航空機の開発が進められ注目を集めている。そこで本節では水素航空機と電動航空機の技術動向について記載する。なお、ジェット燃料の代替である合成燃料に関しては 5.1.3 節を参照されたい。

(1) 水素航空機

水素航空機については古くから検討が行われているが、水素燃料タンクの大きさと重量、水素インフラの整備が進んでいないこと、あるいは水素の値段がジェット燃料に比べて遥かに高い、等の問題点があり、未だ商用化されていない。しかし近年は商用化を目指した開発プロジェクトが進められている。水素航空機に関する Roland Berger の調査 [4]によると、2020 年時点で 9 件の水素航空機開発プロジェクトが進行中であり、そのうちの一つを率いる英国のスタートアップ ZeroAvia は 2020 年 9 月、世界初の燃料電池航空機のテスト飛行に成功したと発表し、2023 年までに商業運航を開始するとしている [5]。これらプロジェクトの多くは数人～数十人乗りの小型飛行機が中心であり、航空部門からの実効的な排出削減への貢献には少なくとも 100 人程度を輸送可能な旅客機が必要となるが、旅客機クラスの水素航空機の開発方針が航空機大手 Airbus から 2020 年 9 月に発表されている [6]。同社は航空機のゼロ排出技術として水素航空機を most promising と位置づけ、具体的なコンセプトを発表し（図 5.1.2-1）、120～200 人クラスの機体を 2035 年までに商用化するとの方針を示した。



図 5.1.2-1 Airbus による水素航空機コンセプト [6]

水素航空機の技術的及び経済的な実現可能性に関しては、Clean Sky 2（航空の排出及び騒音削減技術に向けた EU プロジェクト）と FCH JU2(欧州燃料電池水素共同実施機構)が 2020 年に詳細な調査を行っている [7]。この報告書では、水素航空機（直接燃焼と燃料電池）による気候影響低減の技術的、経済的可能性を、従来ジェット機及び合成燃料（DAC 有）と比較評価している。その結果、水素航空機は将来の主要な推進技術の一つとなる可能性があり、気候への影響は直接燃焼方式で 50～75%、燃料電池で 75～90%低減されうること、脱炭素に適する技術オプションは中距離帯までは水素航空機、長距離帯は合成燃料であると結論付けている（図 5.1.2-2）。また年間の水素需要

は 2050 年に 40 to 130 Mton/yr との見通しを示している（図 5.1.2-3）。機体の市場導入時期は 2035 年頃としている。Roland Berger は、機体技術の面では水素航空機は細胴機による中距離帯市場においては電動機やバイオ燃料より有利となる可能性があるものの、水蒸気や NO_x などの GHG 排出による影響が明らかにされていないこと、サプライチェーン構築への投資の必要性などを課題として指摘している [4]。

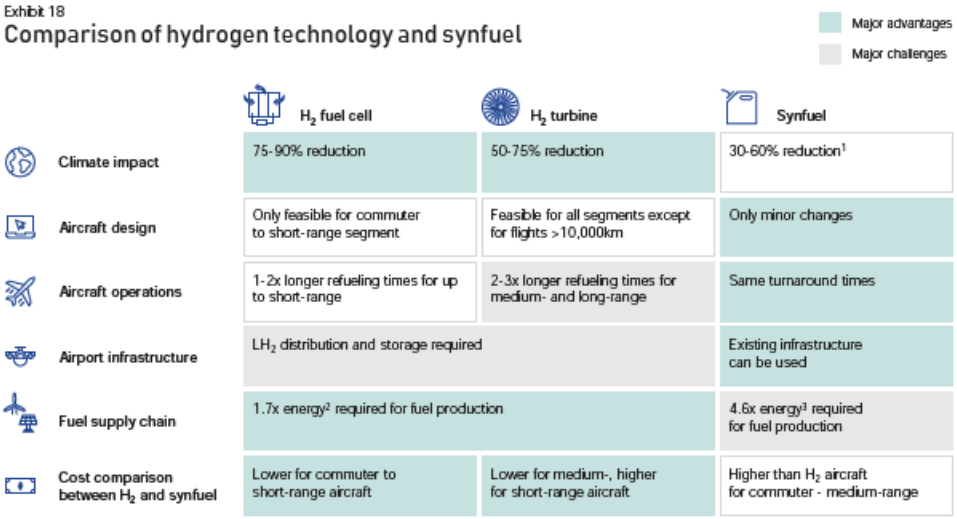


図 5.1.2-2 航空燃料としての水素と合成燃料の比較 [7]

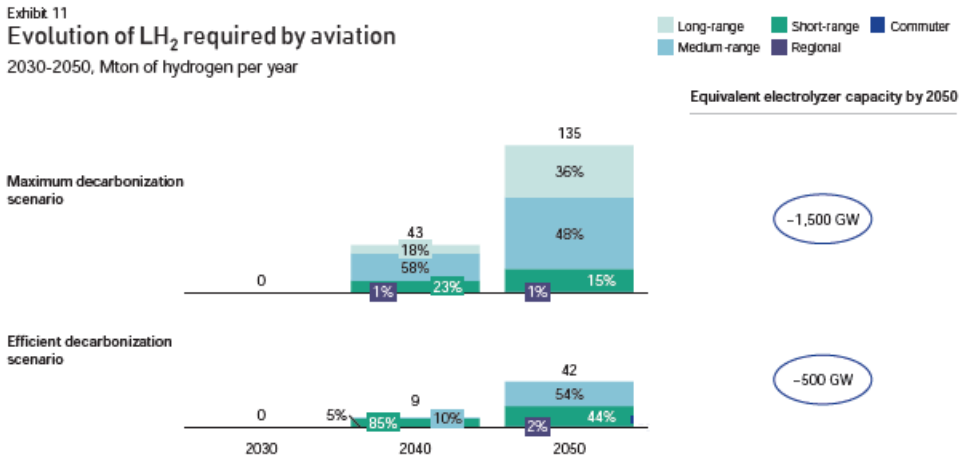


図 5.1.2-3 航空部門における水素需要 [7]

(2) 電動航空機

電動航空機については 60 以上の開発プロジェクトが進行中である [8]。これらプロジェクトについても水素機と同様に数人～数十人乗りの小型飛行機が中心であり、Siemens、Pipistrel などが試験飛行を成功させている（図 5.1.2-4）。機体の大型化にあたっては蓄電池の重量エネルギー密度の低さによる機体重量の増大などが課題であり旅客機サイズの機体の商用化には至っていないものの、Siemens は 2030 年までに 100 人乗りクラスの電動飛行機を完成させるとの方針を発表している [9]。日本では航空機電

動化（ECLAIR）コンソーシアムにおいて、航空機電動化における革新的技術開発を推進しており、2030 年代には細胴機クラスの旅客機に電動化技術を適用し実用化する（図 5.1.2-5）としている [10]。



図 5.1.2-4　Siemens の電動航空機プロトタイプ

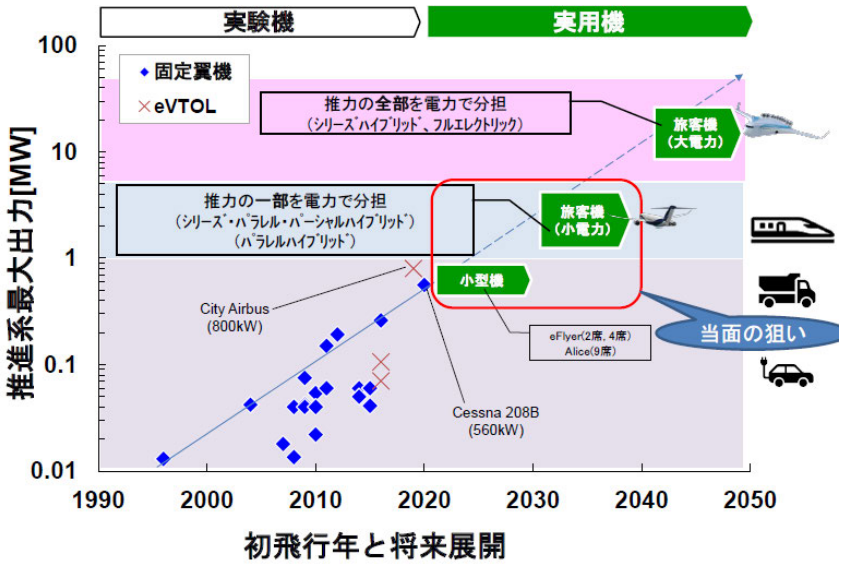


図 5.1.2-5　ECLAIR による航空機電動化技術動向 [10]

電動航空機の環境経済性分析としては文献 11), 文献 12)などがあり、排出削減を経済的に達成しうる電動航空機の実現には、二次電池の技術進展（重量エネルギー密度の向上）と電力の脱炭素化が重要であるとしている。

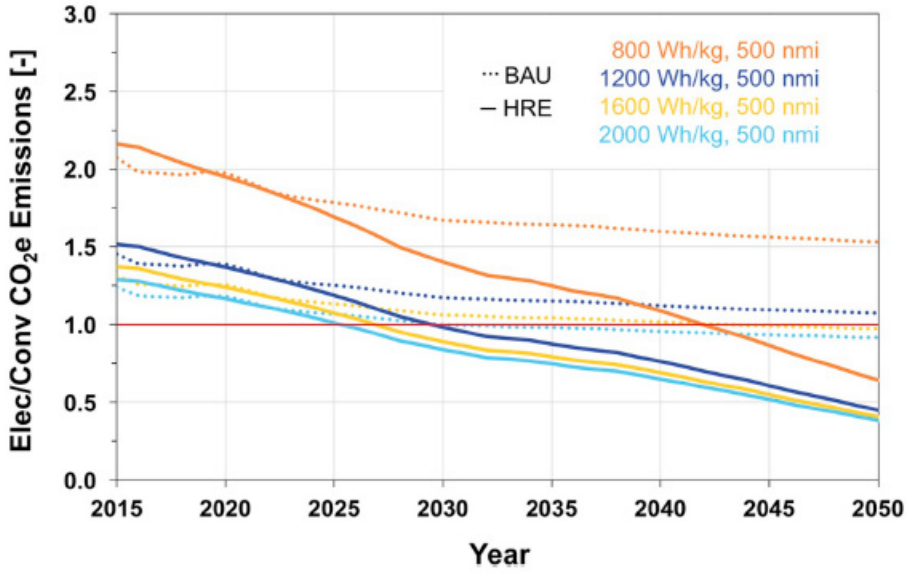


図 5.1.2-6 従来ジェット機と電動機の炭素集約度比較 [11)]

注：HRE:High Renewable Energy シナリオ

(3) まとめ

本節では、航空部門の大幅排出削減に貢献しうる機体技術である水素航空機、電動航空機の技術動向について記載した。どちらの機体についても技術的課題の点から旅客機クラスの機体サイズの実現化に向けては一定の時間を要すると見込まれ、また水素航空機においては燃料供給インフラ構築も課題となる。IEA[13)]は水素航空機、電動航空機の technology readiness level (TRL)を 3～4 としており（図 5.1.2-7）、メインシナリオである SDS では排出削減に貢献するのは 2070 年以降、技術革新が早期に進展する Faster Innovation Case では 2030 年ごろに商用化され 2050 年の排出削減に貢献するものとしている。

Readiness level (TRL)	Sector	Technology	Step in value chain	Importance for ↓ net-zero emissions	
6-9	Transport > **Aviation**	Geared Turbo Fan/ Ultra-High Bypass Ratio engine	End-use and operations	High	Details
4	Transport > **Aviation**	Open Rotor	End-use and operations	High	Details
6-7	Transport > **Aviation**	Electric taxiing and ground operations	End-use and operations	Moderate	Details
3-4	Transport > **Aviation**	Hybrid vehicle	End-use and operations	Moderate	Details
3	Transport > **Aviation**	Propulsion-Airframe Integration	End-use and operations	Moderate	Details
3	Transport > **Aviation**	Blended Wing Body Design	End-use and operations	Moderate	Details
3-4	Transport > **Aviation**	Hydrogen-fuelled engine	End-use and operations	Moderate	Details
3-4	Transport > **Aviation**	Battery electric vehicle	End-use and operations	Moderate	Hide

図 5.1.2-7 ETP2020 における航空部門技術の TRL[13)]

上記の IEA の展望によれば、航空部門の 2050 年大幅排出削減を実現するには現在ラボレベルの技術を 10 年以内に商用化するほどの急速な技術革新が必要とされることになる。一方、本節で示したように各国政府や産業界は意欲的な市場導入時期目標を掲げており、必要とされる基盤技術は広範囲にわたるものの、急速な技術進展が起こる可能性が示されており動向を注視していく必要がある。

参考文献（第 5.1.2 節に関するもの）

1) ICAO Resolution A37-19: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection – Climate change(2010)
2) ICAO Environmental Report (2019)
3) IEA Energy Technology Perspectives 2020 Special Report on Clean Energy Innovation (2020)
4) Roland Berger, Hydrogen: A future fuel for aviation? (2020)
5) ZeroAvia, https://www.zeroavia.com/press-release-25-09-2020 (2020)
6) Airbus, Zero Emission flight https://www.airbus.com/innovation/zero-emission.html
7) Clean Sky 2 and FCH2, Hydrogen-powered aviation, a fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 (2020)
8) Gnadt A.R. et al; Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft, Progress in Aerospace Sciences 105 (2019) pp.1-30
9) Siemens, https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/electric-motor-sets-two-speed-records
10) 航空機電動化コンソーシアム; 航空機電動化の動向とコンソーシアムの活動報告 (2020)
11) Gnadt A.R. et al; Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft, Progress in Aerospace Sciences 105 (2019) pp.1-30
12) Schäfer W. et al.; Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft, Nature Energy Vol.4 (2019), pp. 160-166
13) IEA ETP Clean Energy Technology Guide, https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide

5.1.3 水素、CCU・合成燃料、DAC の技術動向

本節では、カーボンニュートラル実現において重要な役割を担い得る水素、CCU・合成燃料、大気 CO_2 直接回収（DAC: Direct Air Capture）の技術動向およびその課題等について調査、整理した。

カーボンニュートラル実現においては基本的に、一次エネルギーとして、再生可能エネルギー、原子力、化石燃料についてはすべて CCS（CCS もなるべく未回収率をゼロに近付ける必要有）とする必要がある（図 5.1.3-1）。また、最終エネルギーにおいては、最終利用段階での CO_2 回収は困難さが増すため、原則、電気か水素（一部、バイオエネルギーや太陽熱の直接利用など）といった形態が必要となってくる（図 5.1.3-2）。ただし、水素をより広範に利用する方策として合成燃料（CCU の一つ）にして利用することも考えられる。ただし、一部は CCS が付かない化石燃料も必要と考えられるため、DAC 等の役割も重要になってくると考えられる（、図 5.1.3-2）。ただ、図 5.1.3-1 で見られるように、CCS が付かない化石燃料を利用するために、BECCS や

DACCS を行うとしても、CO_2 貯留が伴わなければ負排出として排出のキャンセルアウトができず、いずれにしても CO_2 貯留可能量によって制約を受けることとなる。燃料や化学品としての CCU の場合は、CO_2 は再び放出されるため、CO_2 回収による排出削減効果ではなく、水素として化石燃料を代替する手段として（更に水素の製造元を考えれば再エネなど）の排出削減効果として考えることが適当である（CCU の項で後述）。カーボンニュートラルを目指す場合、とりわけ非電力部門の CO_2 の削減が電力部門以上に困難であり、水素や合成燃料の利用が対策として重要と考えられる（図 5.1.3-2）。

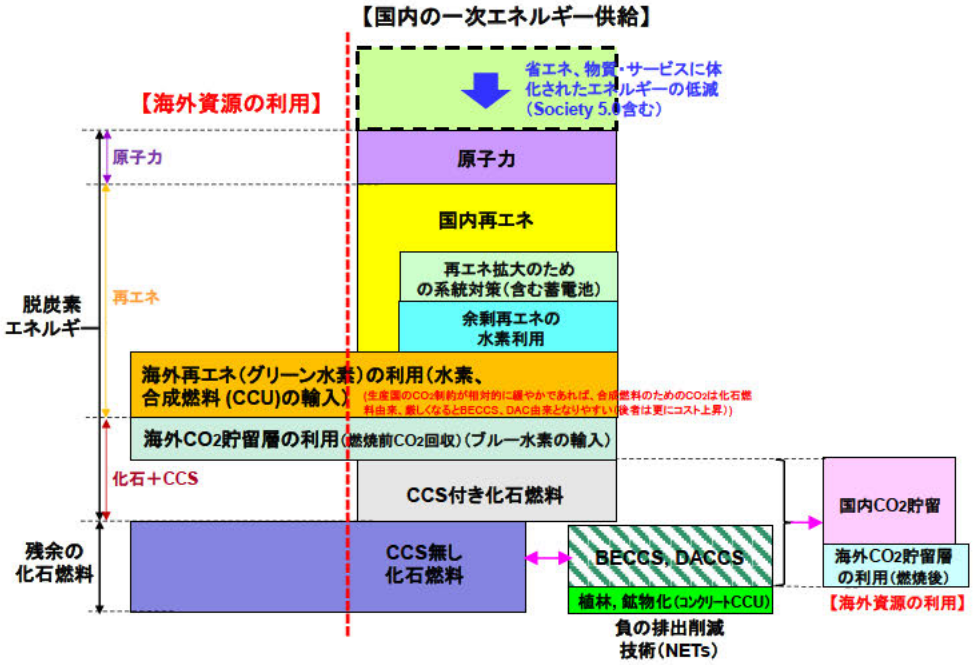


図 5.1.3-1 正味ゼロ排出のためのイメージ：一次エネルギー

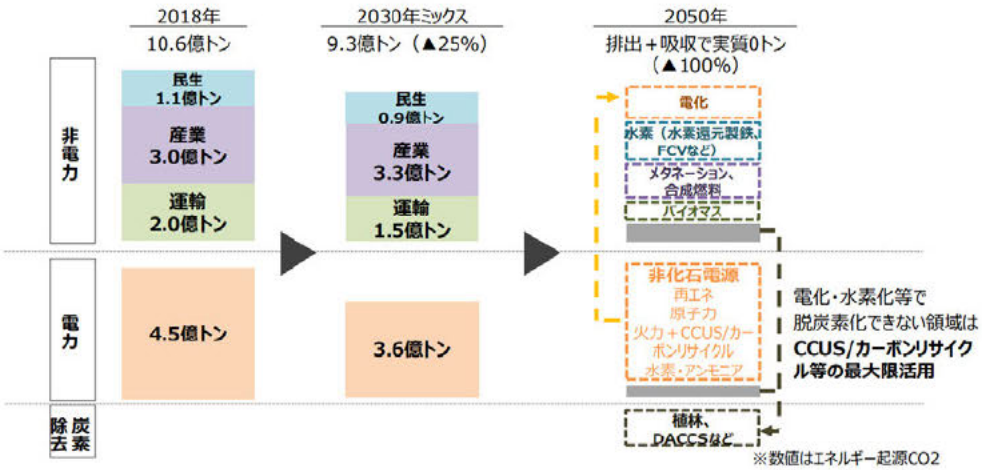


図 5.1.3-2 正味ゼロ排出のためのイメージ：最終エネルギー（電力、非電力）
（出典：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 [1)]）

なお、カーボンニュートラル実現においては、再エネの拡大が最も主要な役割を担うと考えられるが、再エネ自身の動向、再エネ拡大のための系統対策等の動向、そして、その課題については第 3 章の第 3.6 節に記載した。

(1) 水素

水素の利活用のイメージを図 5.1.3-3 に示す。再生可能エネルギーの拡大においては、太陽光、風力といった変動性再生可能エネルギー（VRE）が重要となるが、間欠性故に、大量に VRE を利用する場合には、電力需要を大きく上回る発電がなされる時間が多発してくる。その際、出力抑制がまずは相対的に安価な対策となるが、抑制量が大きくなれば、VRE の kWh 単価が実質的に上昇していくため、系統増強で対応するか、電力貯蔵で対応するといった対策が必要になってくる。電力貯蔵は、揚水発電や蓄電池等が考えられるが、前者は既に多くが開発されて拡大余地が少なく、後者は短時間の貯蔵には良いが、特に季節をまたがるような期間の貯蔵には向かないと考えられるなど、課題は多い。そのような中、VRE の拡大を補う手段として、水素の役割が期待される。この水素は、国際的には「グリーン水素」と呼ばれるようになってきている。

一方、CCS 由来の水素も重要性が高い。原則的には、水素で輸送するよりも、化石燃料で輸送する方が安価である。また、既存インフラも活用できる。しかし、CCS の大きな課題は、CO_2 貯留は化石燃料採掘可能な地点などの方が、適地が多いと考えられ、また地下構造の把握も進んでいることから実施がしやすい。エネルギーの需要地に近いと CO_2 貯留の困難さが増す。よって、本来、発電所や製鉄所などの排ガスから CO_2 を回収して貯留する方がコスト的に優位とも考えられるものの、このような点を踏まえると、化石燃料採掘地で化石燃料を CO_2 と水素に分離して、CO_2 は化石燃料採掘地近辺で貯留し、水素だけをエネルギー需要地に輸送する手段も有用な方法になり得る。これは、国際的に「ブルー水素」と呼ばれている。なお、もう 1 つの可能性としては、化石燃料として輸送し、需要国で燃焼し、回収した CO_2 を需要国で貯留せずに、再び、化石燃料資源国や貯留に適した国まで長距離輸送をして貯留をするという対策もあり得る。この場合は、化石燃料と CO_2 の両方を輸送することになるため、その分、コストが増大する。水素の輸送費用との比較が必要となる。

原子力由来の水素は、「パープル水素」と呼ばれることもあるが、原子力は間欠性があるわけではなく、また、社会的な制約により、大量の導入そのものが難しいため、原則的には水素に転換せずに、電力として利用することが経済的となる可能性が高く、「グリーン水素」や「ブルー水素」に比べて、役割は相当限定的と考えられる。

なお、現状では、化石燃料由来の水素（ブルー水素）が、再エネ由来の水素（グリーン水素）よりもコストが安価である。将来的には、再エネのコスト低減に伴い、グリーン水素もブルー水素並み、もしくはそれ以下にコストが下がる可能性もある（図 5.1.3-4）が、現時点ではまだ不確実性は大きいと見るべきであろう。グリーン水素の製造においては、VRE が余剰になる時間帯を利用すれば電力料金はほぼゼロやマイナス価格も期待できるが、余剰時間帯のみの利用とした場合、水電解の設備利用率が小さくなり、水電解の設備費相当分の単価が急激に上昇してしまう（図 5.1.3-5）。よっ

て、図 5.1.3-5 でも見られるように、ある程度の設備利用率（30～70%程度）を維持した運用が経済合理的と見られている。つまり、水素で貯蔵する場合であっても、ある程度、VRE は出力抑制をした上で利用するか（その分、VRE の kWh 単価は上昇）、化石燃料発電との組み合わせが現実的な運用と考えられる。

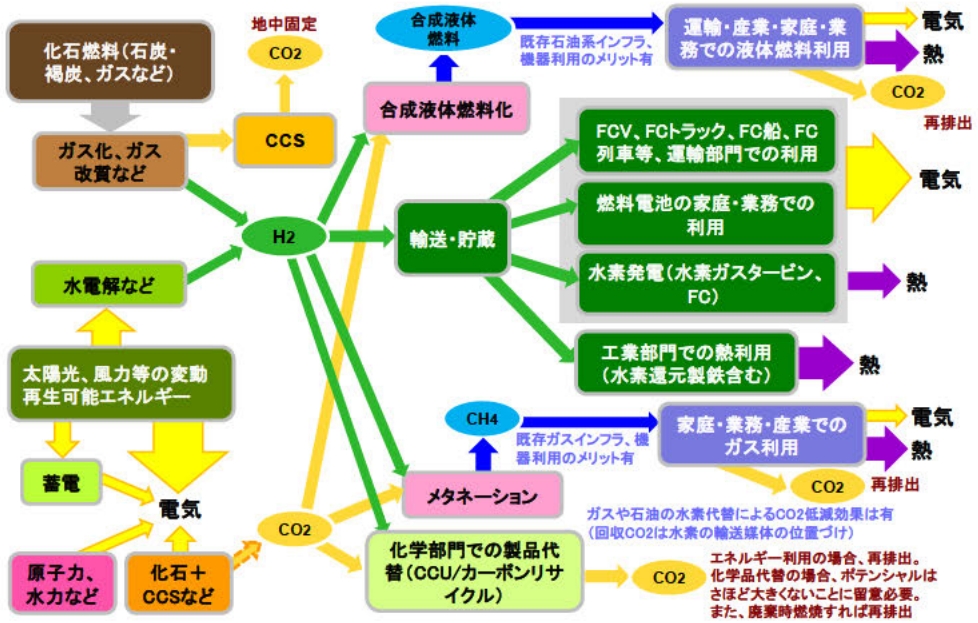


図 5.1.3-3 水素の利活用のイメージ

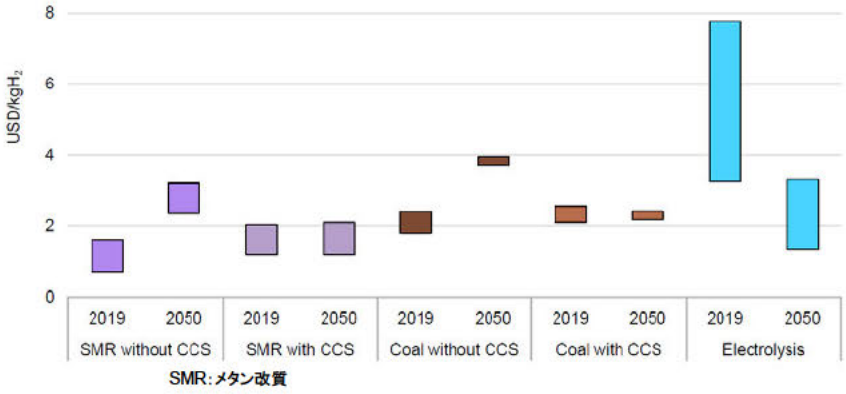
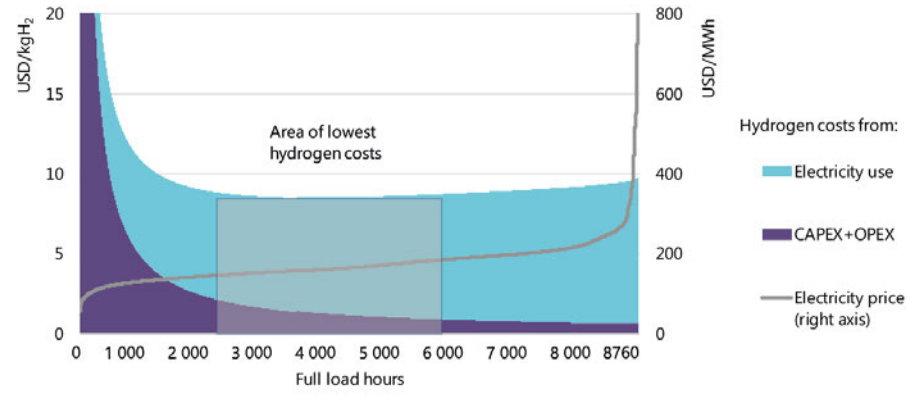


図 5.1.3-4 水素の製造コスト（出典：IEA, ETP2020 [2)]）



Notes: CAPEX = USD 800/kW$_e$; efficiency (LHV) = 64%; discount rate = 8%.
Source: IEA analysis based on Japanese electricity spot prices in 2018, JEPX (2019), *Intraday Market Trading Results 2018*.

図 5.1.3-5 水電解による水素製造コスト（利用電力の設備利用率との関係）
（出典：IEA, The Future of Hydrogen [3]）

図 5.1.3-6 は、各種水素の輸送方法とその特徴を示している。アンモニア、メタネーション（合成メタン）については、後の項でも整理を行うが、消費エネルギーとしては液化水素が優れている。ただし、有機ハイドライト、アンモニア、メタネーションについては、それぞれレベル感は異なるものの、既存インフラの一部や大部分を利用できる長所を有している。これまで、本事業で利用してきている、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+では、アンモニアやメタネーション（合成メタン）も水素の一形態として分離せずに評価してきたが、2050 年カーボンニュートラル（1.5℃目標相当）といった、従来よりも厳しい排出削減を分析する必要性が高まったことに対応して、今年度、アンモニアと合成メタン、更には、合成液体燃料を明示的にモデル化し、既存インフラ等の活用可能性も含めて、より精緻に分析できるようにした（第 5.3 節参照）。

- 最適な運搬方法は、運搬距離や量、用途等により左右されるが、主要な特性は以下のとおり。
- MCH・アンモニア・メタネーションはサブライチェーンの大部分で**既存インフラを活用できることが強み**であり、早期のサプライチェーン構築が見込めるが、**消費エネルギーは液化水素が潜在的には最も低くなる**見込みで、高純度化も容易。

	液化水素	有機ハイドライト（MCH）	アンモニア	メタネーション
体積(対常温常圧水素)	約1/800	約1/500	約1/1300	約1/600
状態・毒性	液体(-253℃、常圧) 毒性無	液体（常温常圧） トルエンは毒性有	液体（-33℃、常圧等） 毒性、腐食性有	液体(-162℃、常圧) 毒性無
高純度化*	高純度化が容易 （追加設備不要）	高純度化には追加設備が必要		
特性変化時の消費エネルギー（水素比率）	現在:25-35% 将来:18%	現在:35-40% 将来:25%	水素化:7-18% 脱水素:20%以下 ※将来はデータ無し	現在：-32% ※反応熱の有効利用で引き下げ余地有
技術的成熟度	• 国際運搬用の、大規模液化機、運搬船等は要技術開発 • 液化水素ローリー等の国内運搬設備は現在も利用し成熟	• 水素化・脱水素プラントは今年度で実証完了 • 国内外運搬には既存インフラ利用可能	• 脱水素設備以外成熟 • 国内外の既存サプライチェーン利用可能	• 国内外で実証試験が実施 • 国内外の既存サプライチェーン利用可能

図 5.1.3-6 水素の運搬方法（出典：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 [4]）

図 5.1.3-7 には、2019 年の水素・燃料電池戦略ロードマップにおけるコスト目標等を示す。化石燃料＋CCS のブルー水素による供給コスト目標は、2030 年で 30 円/Nm^3、その更に将来としては 20 円/Nm^3 とされている。再エネ水素のための水電解設備としては、5 万円/kW が目標とされている。また、モビリティにおける水素燃料電池自動車（FCV）についてはハイブリッド車（HV）とのコスト差を 300 万円から 2025 年には 70 万円に縮小する目標などが掲げられている。



図 5.1.3-7 水素・燃料電池戦略ロードマップ～水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン～

（出典：水素・燃料電池戦略ロードマップ, 2019 [5]）

最後にモデルによる総合的な分析結果としての水素の役割の評価について、代表的なシナリオ分析例を示す。まず、国際エネルギー機関（IEA）によるモデル分析結果であるが、おおよそ>66%確率の 2℃目標に相当する Sustainable Development Scenario (SDS)における世界の水素生産、利用量は図 5.1.3-8 のように評価されている。まず化石燃料由来のブルー水素の製造が拡大し、その後、再エネ由来のグリーン水素が増大する結果となっている。ただし、2050 年以降も両者同じ程度の量の生産が見込まれている。利用先は運輸、発電、合成燃料など多様である。図 5.1.3-9 は、部門別の水素需要（アンモニア、合成燃料を含む）の見通しである。2050 年時点では、世界の最終エネルギー消費量に占める水素系燃料の比率は 6%程度と推計している。部門別では、特に海運、航空において水素が占める比率が高い。

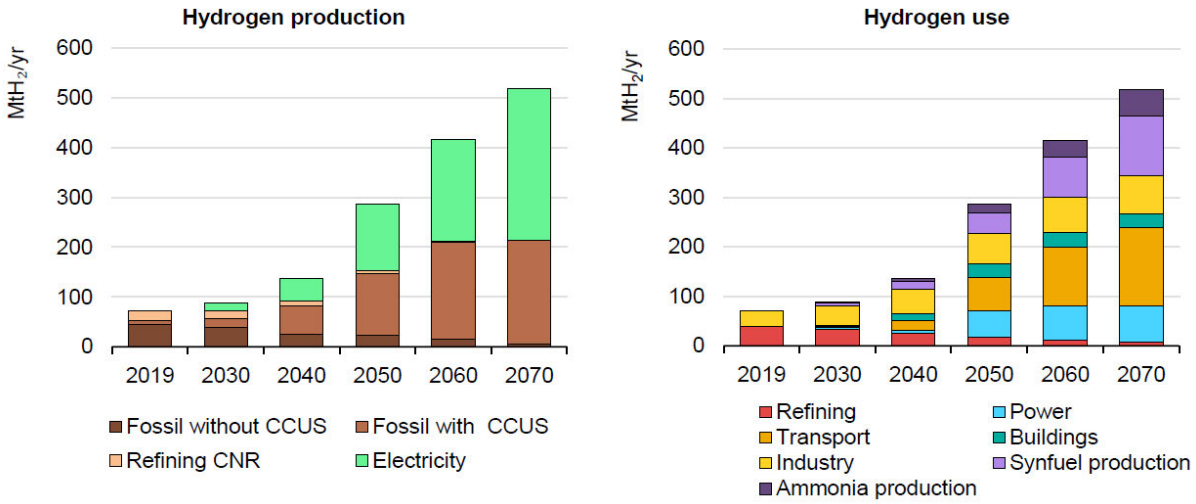


図 5.1.3-8 IEA による世界の水素生産、利用の見通し（出典：IEA, ETP2020 [2)]）

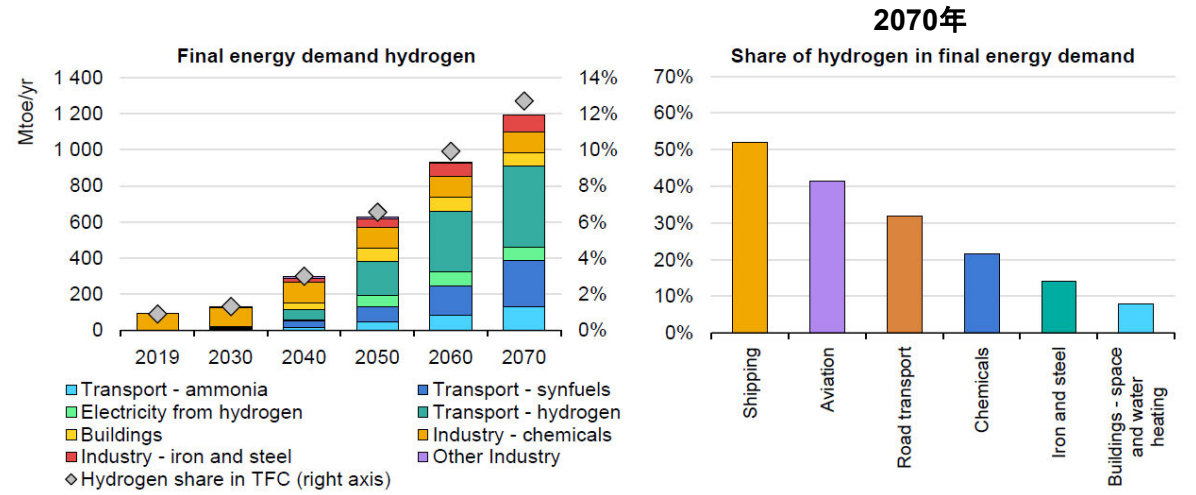


図 5.1.3-9 IEA による世界の最終エネルギーの水素需要（出典：IEA, ETP2020 [2)]）

図 5.1.3-10 は、EU の 2050 年シナリオであるが、水素が安価に製造可能と想定した▲80%～▲100%シナリオでは、水素による電力貯蔵が特に大きく見込まれている。図 5.1.3-11 は水素および合成燃料（合成ガス（e-gas）と合成液体燃料（e-liquid））の消費量を示している。水素を安価に見込み、かつ、厳しい排出削減になるに従って、合成燃料の利用への依存も高まる傾向が示されている。

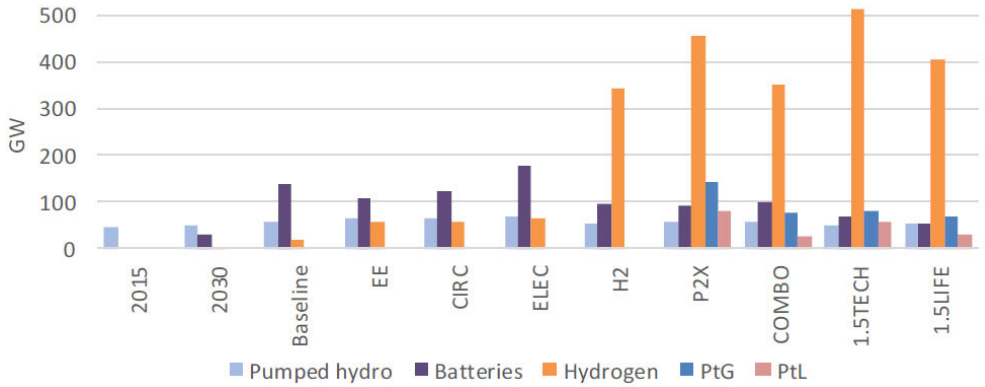


図 5.1.3-10 2050 年の電力貯蔵量（出典：EU [6)]）

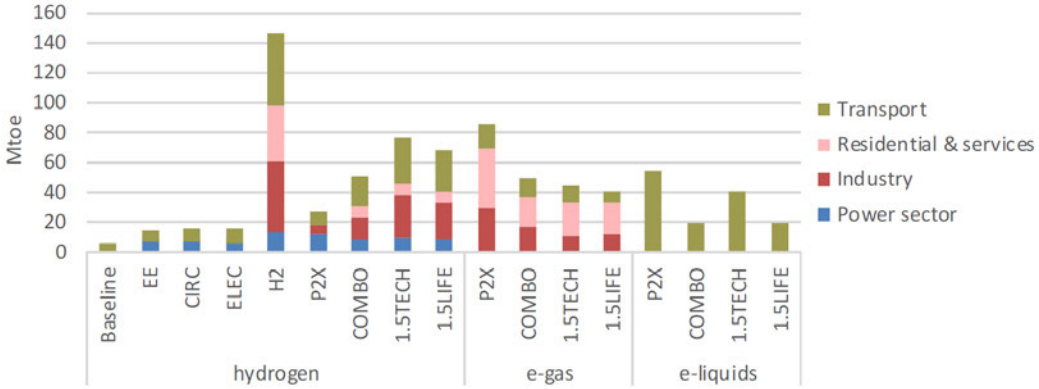


図 5.1.3-11 2050 年の水素、合成燃料消費量（出典：EU [6)]）

(2) CCU・合成燃料

二酸化炭素回収有効利用(Carbon dioxide Capture and Utilization、以下 CCU)は、厳しい排出削減が求められる中で、近年、注目されつつある。ただし、「有効利用」という語彙をそのまま（あるいは拡大）解釈し CCU を「安価かつ大量に CO_2 排出削減が可能な技術」ととらえて過大な期待を寄せる場合も一般にあるが、そもそも化石燃料燃焼他によりエネルギーを得た後に発生する CO_2 は極めて安定的であることなど、特性を正しく理解しておく必要がある（図 5.1.3-12）。例えば CO_2 を再び燃料に転換し利用する CCU を考えた場合、通常、エネルギー源は水素であり、水素は 2 次エネルギーであるため、そのエネルギー源は再生可能エネルギー等になる（前項も参考）。よって、水素と一体として検討、評価する必要がある。例えば柴田 [7)]も、CCU の一つであるメタネーション（合成メタン）の役割は、水素によって既存の化石エネルギーを代替する効果が主であり、CO_2 固定の CCU はあくまでそれを補う副の役割であると指摘している。この理解がないと、メタネーションによる合成メタンを過大に評価したり、逆に過小に評価したりしてしまう可能性がある（図 5.1.3-13）。例えば、Mac Dowell ら [8)]は、メタノールを例に CCU を CCS や CCS-EOR と CO_2 固定ポテンシャルを比較し、CCU は CCS の 1%にも満たないとしている。しかし、これは CO_2 の直接的な固定効果であって、水素の利用を助け、化石エネルギーを代替することによる CO_2 削減効果を考慮しない評価であり、CCU による副の面しか評価できていない。そのため、例えば、

Kätelhön ら[9]はより包括的な評価を行い、2030 年では世界の化学産業全体で CCU の排出削減の技術的ポテンシャルは、最大 3.5 $GtCO_2$ が存在するとしている。なお、合成メタン等のエネルギー利用の CCU によって、天然ガス等の化石燃料を代替して得られる CO_2 削減効果は、合成メタン等を製造する際に利用される CO_2 量と同量となる（柴田[10]）。

一方、図 5.1.3-12 でわかるように、鉱物化（コンクリート部門での CCU）のような方策は、原則的にエネルギー投入が不要である。ただし、この場合、自然界でも CO_2 を吸収していくため、人工的に CO_2 を固定させる場合は、CO_2 の削減量としてはその差分のみとなることに注意が必要である。よって、正味の CO_2 削減量としては大きな規模を稼ぐことができない可能性もある（昨年度報告書[11]も参照のこと）。

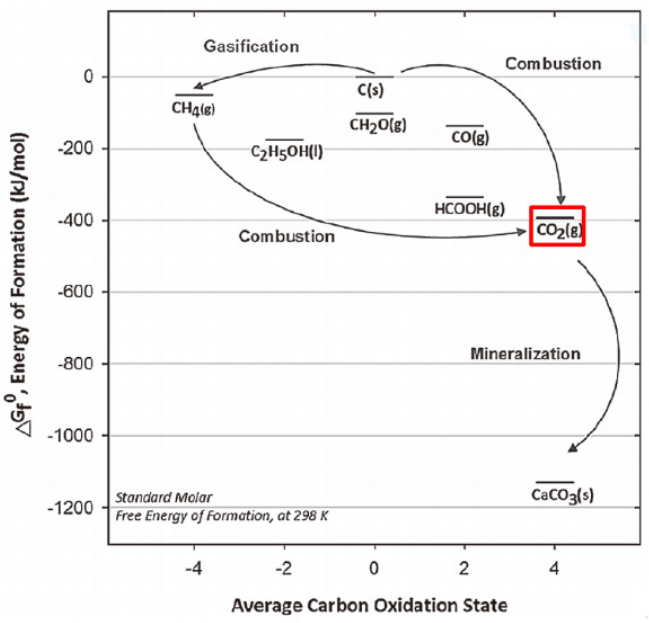


図 5.1.3-12 炭素化合物のギブスの自由エネルギー準位（出典：酒井奨、季報エネルギー総合工学[12]）

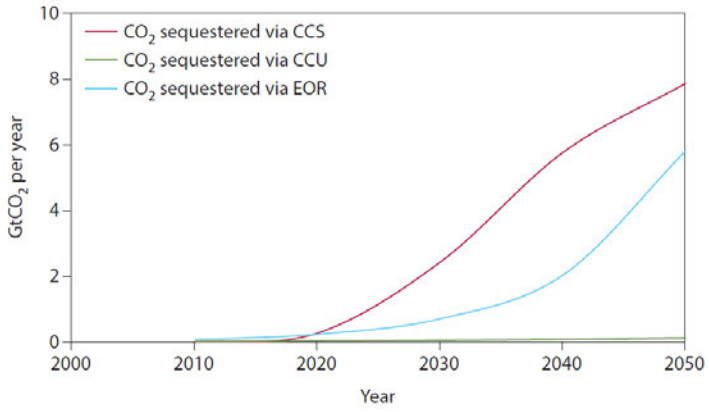


図 5.1.3-13 CCS と CCU の CO_2 固定効果
（出典：N. Mac Dowell, Nature Climate Change, 2017[8]）

① 合成メタン（メタネーション）

メタネーションは一般的には「メタン化」を意味するが、再エネ等のゼロエミッション電源や、化石燃料発電において CO_2 回収貯留（CCS）により CO_2 貯留した電源を用いて水電気分解により作られる水素などに、発電等から回収した CO_2 を合成してメタン化することを指すことが多い。このとき、バリューチェーン全体では正味ゼロエミッションとなる。なお、メタネーションに用いる CO_2 は、通常、合成メタン燃焼時に再び大気放出される。つまり、CO_2 はゼロエミッション水素の輸送媒体の役割として利用されるため、合成メタンは水素の一輸送形態と見ることができる。合成メタンの最大の利点は既存ガスインフラや既存の機器を利用できるという点である（図 5.1.3-14）。また、電気や水素の利用が難しく、炭化水素が求められるような一部の工業用途（溶接、ガラス製造など）でも、正味ゼロエミッションを実現できるという点も利点である。

メタネーションに用いる CO_2 は、大気直接回収（DAC）もしくはバイオエネルギーからの CO_2 排出回収に限定するような動向も見受けられる（例えば文献 6)）。しかしながら、メタネーションから合成メタン利用に至る閉じた系で評価すると、大気中に放出される CO_2 もしくは大気中に存在する CO_2 を回収する場合であれば、どこから回収された CO_2 であっても原理的には差異がなく、化石燃料燃焼に伴って排出される CO_2 を回収して利用しても差異はない。ただし、化石燃料燃焼 CO_2 回収の場合は、化石燃料排出が行われていることを基準とした状態からの、合成メタン利用の系で見たときに実質ゼロ排出の水素と同様であるため正味ゼロ排出となり、天然ガス等の化石燃料利用を代替することで、その分 CO_2 排出削減に寄与する。しかし、別途、化石燃料燃焼は行われるため、グロスでの排出ゼロは実現できない。そして、ネットでゼロ排出を実現するには、その化石燃料燃焼による CO_2 排出をキャンセルするために、別途、負排出技術（NETs）が世界のどこかで行われる必要がある。この点が、欧州委員会の合成メタンの位置づけ[6]に影響していると考えられる。しかし、CO_2 排出削減はグローバルでの対策、全部門での包括的な費用対効果の高い対策が求められるため、合成メタンの評価においては、経済効率性の評価を含め、定量的かつ包括的な分析が重要である。

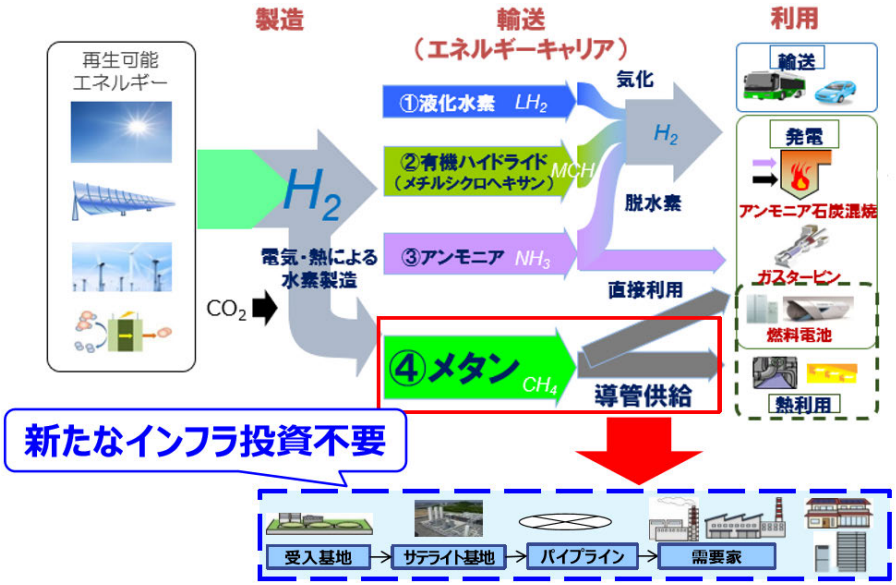


図 5.1.3-14 合成メタン（メタネーション）の位置づけ
（出典：日本ガス協会 [13]）

合成メタンの製造方法としては、水素と CO_2 からサバティエ反応によってメタンを製造する方法が技術的には確立されており一般的である。しかし、SOEC 共電解による合成メタン製造方法も提案、検討がなされている（図 5.1.3-15）。水電解水素―サバティエ反応メタン合成よりも、高いエネルギー効率でメタン合成ができる可能性があるとされている。

日本ガス協会は、2050 年に向けてカーボンニュートラルを目指し、そこでは、カーボンニュートラルメタン（合成メタン）を主に利用する方向性（2050 年では 90%程度を目指すとしている）を示している（表 5.1.3-1）。当初は、化石燃料燃焼回収 CO_2 を、将来的には化石燃料利用の低減を想定し、バイオマス燃料燃焼回収 CO_2 や大気直接回収 CO_2 を利用する方向性も示している。

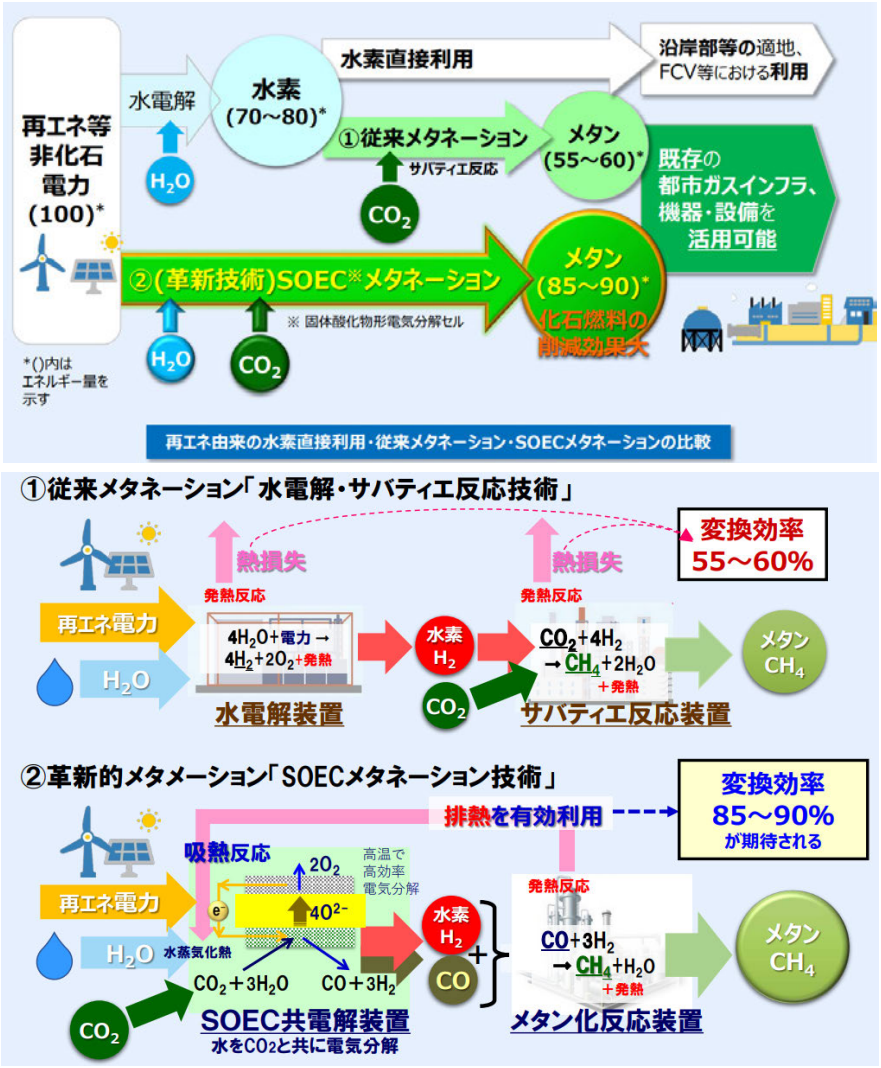


図 5.1.3-15 SOEC 共電解によるメタネーションの可能性
（出典：大阪ガス[14]）

表 5.1.3-1 ガス事業の展望における合成メタン等の役割（出典：日本ガス協会[15]）

	脱炭素化の手段	2050年※
ガス自体の脱炭素化	水素（直接利用）	5%
	カーボンニュートラルメタン	90%
	バイオガス	5%
脱炭素化に資する手立て	天然ガス＋CCUS	
	カーボンニュートラルLNG	
	海外貢献	
	DACCS	
	植林	

※上記数値はイノベーションが順調に進んだ場合の到達点の一例を示すもの
水素やCO2等は政策等と連動し、経済的・物理的にアクセス可能であるという前提

② 合成液体燃料

CCU の一つとして、合成メタン（メタネーション）と同様に期待されているのが合成液体燃料である。合成液体燃料は、合成メタンと同様に、水素の活用の利便性を高めるものであり、また、水素を製造する段階に立ち返って考えると、再エネの利便性を向上する役割も持つと言える。

特に、再エネによる電気分解から得られた水素と CO_2 とを触媒反応によって合成したものは e-fuel と呼ばれ、種類に応じて e-ガソリン、e-ディーゼル、e-ジェット燃料等がある。製造の一連の流れとして、e-ディーゼルの例を図 5.1.3-16 に示す。図 5.1.3-16 では再エネとして水力発電、CO_2 源として DAC からの回収を例として示しているが、いずれも限定されたものではない。また、生成物はディーゼルになっているが、水素と CO_2 から逆シフト反応により CO と水が生成し、更に CO と水素から FT 反応により炭化水素を生成するという流れは、ガソリンやジェット燃料に関しても共通で、反応条件（触媒等）を変えることで、目的とする生成物を工業的に得ることができる。

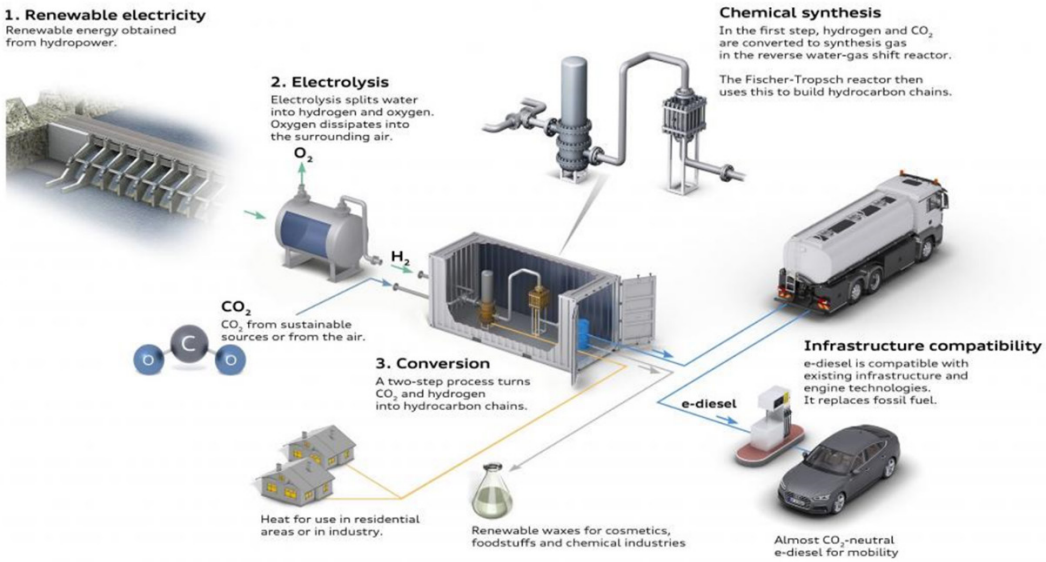


図 5.1.3-16 e-fuel 製造プロセスイメージ（出典：Audi 社 [16)]）

運輸部門でのゼロエミッションを考えた場合、自動車、船舶、航空機は移動体であるため、排ガスを回収して CCS を適用することが現実的に困難である。そのため、電動化のほか、バイオ燃料の導入が有効な手段となる。しかし、電動化では、蓄電池の重量（すなわち kWh/kg）が課題になり、また、バイオ燃料では食料との競合が課題となる。また、水素の場合は常圧で液体にするには-253℃にする必要がある。これに対し、合成液体燃料は水素と CO_2 から化学反応により工業的に製造するものであり、常温常圧で液体であり、従来の石油系燃料と同様に取扱うことができるほか、食料生産との競合もほとんど無く、大量生産に向いていると言える。特に自動車の場合は、車両、ガソリンスタンド、タンクローリーといった既存のハードをそのまま継続使用可能であるという利点がある。また、e-fuel の実用化・普及拡大が進めば、エンジン・トランスミッションなど主要部品産業の存続が可能であり、内燃機関車の性能向上、低燃費

等のブラッシュアップの重要性が高まる。更に、普及に至る過程で、水素コストの低減、石炭や石油の改質・クリーン燃料化、等様々な段階で温暖化ガス抑制につながる技術蓄積も期待できる。（図 5.1.3-17 を参照）

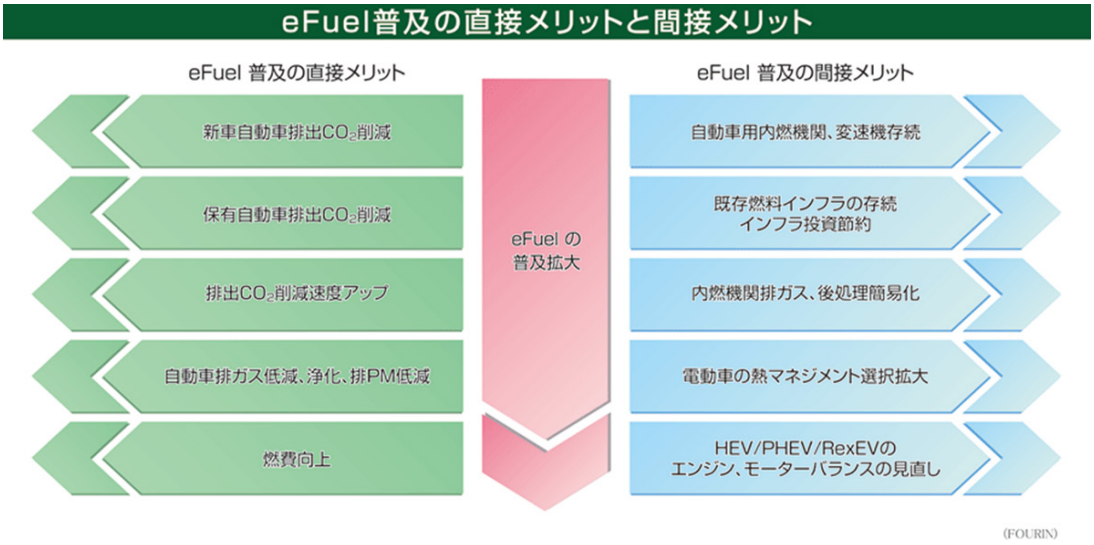


図 5.1.3-17 e-fuel 普及の直接メリットと間接メリット（出典：FOURIN[17)]）

技術開発では、ドイツの Audi 社が先行している。2017 年に研究施設を設立し、2018 年 3 月に、同じくドイツの Global Bioenergies 社と共同で 60 リットルの e-ガソリンの生産に成功したとのプレスリリース[18)]があった。製造された e-ガソリンは液体イソオクタン（C_8H_{18}）であり、バイオマスを原料としてイソブテン（C_4H_8）経由で製造するものである。性状としては、硫黄とベンゼンが含まれていないため、燃焼時に汚染物質の排出が特に少ない点が特徴である。テストエンジンでの燃焼性とエミッション特性の調査も行われており、非常に優れたノッキング性を備えた高純度な合成燃料として、エンジン圧縮比をさらに高め、効率を向上させる可能性を提供するものとされている。原料は先に記した通りバイオマスを使用しているが、中期的にはバイオマスを必要としないように生産プロセスの変更を目指すとしている。Audi 社では上記の e-ガソリンのほかに、e-ディーゼルの開発も進められている。Audi 社の協力パートナーである Sunfire が、2014 年後半から 2016 年 10 月まで e-ディーゼル製造のパイロットプラントを運用した。グリーン電力をエネルギー源とし、水（電気分解して水素）と CO_2 を原材料として使用するものである。2018 年 3 月の Audi 社のプレスリリース[18)]によると、新たなパイロットプラントを設置し、年間約 40 万リットル e-ディーゼルを生産する予定が発表され、初めて水力発電を唯一のエネルギー源として使用する計画としている。

航空燃料に関しては、業界をリードする各社がコンソーシアムとして協力し、技術開発を進める事例がある（図 5.1.3-18 参照）。Norsk e-Fuel[19)]は、ノルウェーで航空燃料用の e-fuel としてヨーロッパ初の商業プラントを計画するものである。この計画では、Sunfire が効率的かつ経済的な電解槽を、Climeworks が最先端の DAC を、そして、Paul Wurth が工業化のためのノウハウを提供して、2023 年までにプラントを稼働開始

し、ノルウェーとヨーロッパの燃料市場に年間 1 万キロリットルの燃料を供給することを目指すもので、2026 年までに年間 10 万キロリットルに拡大することとしている。

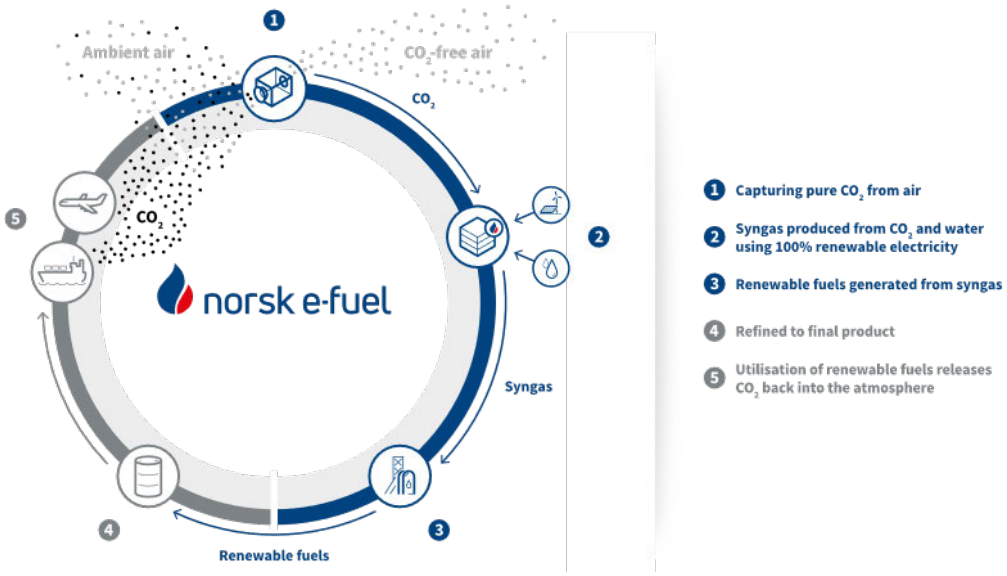


図 5.1.3-18 Norsk e-Fuel 製造プロセスイメージ（出典：Norsk e-Fuel[19)]）

以上の通り、欧州を中心に先行事例が認められているが、国内においても検討が徐々に始まっている。国内の自動車各社において、e-fuel 製造のための効率的な合成法や燃料の使用方法、事業モデルの検討等が進められている。また、石油会社においても例えば ENEOS も合成液体燃料開発のロードマップを公表し[20)]、開発を加速し始めている（図 5.1.3-19）。こういった動向において、NEDO は、合成燃料の技術開発に対して、2020～2024 年度について「CO_2 を原料としたカーボンリサイクル液体合成燃料製造技術の研究開発」（「次世代フィッシャー・トロプシュ（FT）反応の研究開発」と「再エネ由来電力を利用した液体合成燃料製造プロセスの研究開発」の 2 テーマで構成され、ENEOS 等が参加）の研究開発支援を決めている[21)]。

FT 合成反応は高温・高圧が求められ大量のエネルギーを消費することや、投入された水素と CO_2 に対して生成する炭化水素鎖の収率の低さ、製造コスト等が課題であるという認識のもと、触媒の改良により温度や圧力を抑えつつ、収率を高められる合成法の模索等が続けられている。

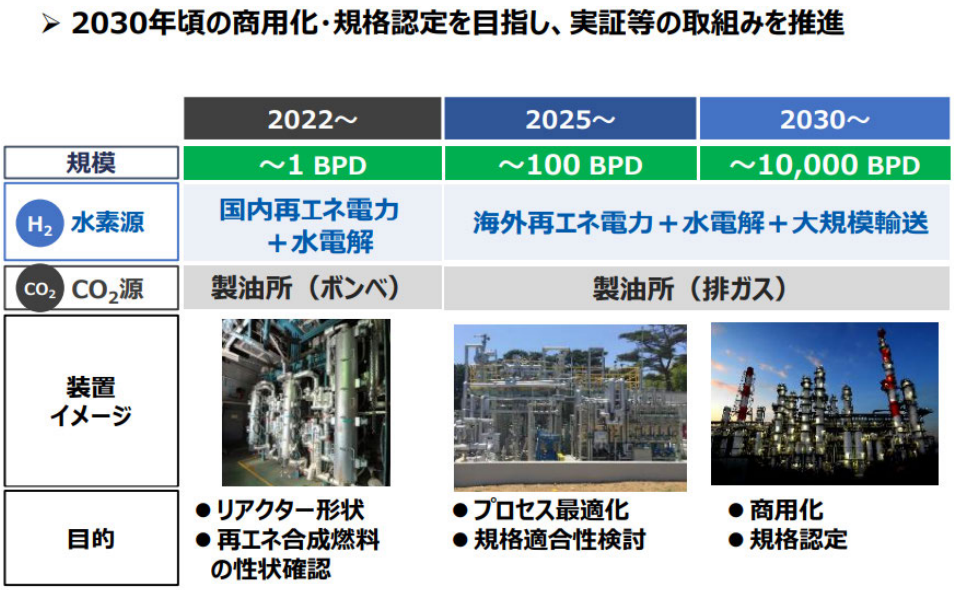


図 5.1.3-19 ENEOS の合成液体燃料開発ロードマップ（出典：ENEOS[20]）

FT 合成による水素から合成燃料への変換効率に関しては、IEA[3]が 73%（熱量換算）、Agora[22]が 79.9%（熱量換算）、Dietrich[23]が 73.0%（炭素換算）などの評価結果を示している。しかし、Marchese[24]の分析例が示すように、得られる生成物にはワックスなどエネルギー利用が困難な成分も多く含まれる（図 5.1.3-20）。Schmidt[25]が行った FT 合成による航空向け合成燃料の評価によると、現時点での効率は 39～47%、2050 年においても 42～53%と推計されている。Dietrich[23]による航空向け PtL の分析においても、燃料転換効率は 45%程度とされている。Li[26]は、従来の触媒技術を用いた FT 合成では選択率 50%超の生成物を得ることは困難としつつ、触媒組成の調整により生成物の種類によっては 70%超の選択率を得ることが将来的には可能としている。

Case A and Case B 0% RR mass balance.

Mass Flow Rate [kg/h]	Case A	Case B
Biogas Inlet	1745	1745
Captured CO_2	1002.8	1002.8
Biogas Up. CH_4	728	728
H_2O for electrolysis	1297.4	774.1
Naphtha C_{5-11}	26.1	31.4
Middle distillate C_{11-20}	31.3	37.0
Light wax C_{20-35}	20.9	24.9
Heavy wax C_{35+}	9.9	11.8
Steam to avoid C-deposition	0.0	0.0
Total condensed water	809.0	761.7
Combustion air	5022.1	5812.1
Exhaust gas	5549.0	6266.3
CRP	27.5%	34.2%
CO_2 Conversion at Syngas Section	*63.0%*	*75.0%*

図 5.1.3-20 FT 合成による生成物の質量バランス（再循環率 0%ケース）
（出典：Marchese[24]）

コストに関しては、現状では 1 リットルあたり 500 円前後との試算もあるが、IRENA 報告書（2019 年 9 月）[27]によると、今後数十年で 1 リットルあたり約 1USD まで低下するとの見通しも示されている。また、図 5.1.3-21 に示すように、現状は 1 リットルあたり 7€であるが、今後、規模の経済、学習効果、再生可能電力の価格低下によりコストが低減し、2050 年には 1 リットルあたり 1～3€（税抜）との予想もある。

世界におけるエネルギー消費量において石油は 1/3 程度を占めている。ゼロエミ実現に向けては石油の代替も重要であり、電化は重要の一オプションではあるが、既存インフラが活用できるなど、移行が容易な合成液体燃料も重要な役割を果たす可能性もある。合成メタン以上にコストを含む技術開発課題は大きいが、技術開発の加速も期待されるところである。

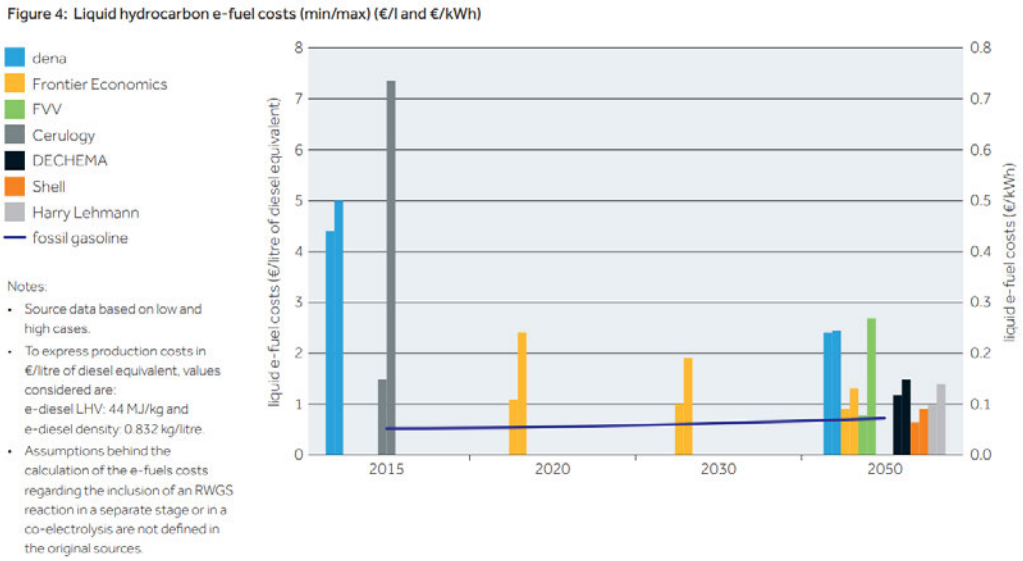


図 5.1.3-21 e-fuel コスト想定例（出典：Concawe Review[28]）

(3) アンモニア

アンモニアも水素を利用した合成燃料の一つではあるが、CO_2ではなく、窒素が利用される。アンモニアは常温常圧では無色透明の気体であるが、常圧で-33℃の比較的高温で液体となるため、水素やメタンに比べると輸送、貯蔵しやすい。これまで大規模なエネルギー利用はされてきていないが、窒素肥料に代表されるように、化学品利用は多くなされてきている。アンモニア製造方法としては、空気中の窒素と水素を鉄系の触媒で反応させるハーバー・ボッシュ法が、1913 年に工業的にアンモニア製造が行われて以降、100 年以上にわたって使われてきている。ただし、高温、高圧が必要であり、大きなエネルギーが必要である。より低温、低圧でアンモニア製造する技術の開発も行われている。

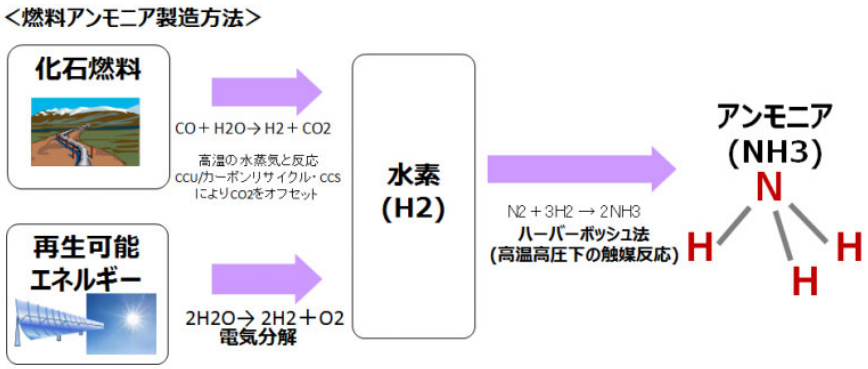


図 5.1.3-22 アンモニア製造

（出典：燃料アンモニア導入官民協議会[29]）

アンモニアの利用先として、大量に消費することにより水素の利用すなわち CO_2 削減に寄与することが期待されるのが発電部門である。その利用形態としては、石炭火力での使用（微粉炭との混焼）、ガスタービンでの使用（アンモニア専焼もしくは天然ガスとの混焼）等が考えられる。

石炭火力への適用事例として、国内では 2017 年 7 月に中国電力水島発電所 2 号機（石炭火力 156MW）において、120MW での発電時に 1MW 相当のアンモニアを混焼（約 0.8%相当）した実績がある。これは、事業用発電所でアンモニアを混焼した初の事例である。中国電力のプレスリリース[30]によると、供給したアンモニアはボイラ内で全て燃焼できたこと、また、一定の条件下では NOx が下がる傾向にあることを確認するなど、環境に大きな影響を与えることなく、アンモニアが燃料として発電に寄与することを確認したとしている。なお、バーナへのアンモニア供給は仮設配管によるもので、常設設備化して実運用を長期的に行ってはいない。

試験研究設備を通じた技術開発も活発に行われており、2017 年に IHI[31]において、燃焼試験設備におけるアンモニア・石炭混焼試験で熱量比率 20%のアンモニア混焼に成功している。日経新聞の報道[32]によると、国内の石炭火力を IHI が開発した混焼法に置き換えた場合、国全体の CO_2 排出量を 4%減らすことができる試算もあるとのことである。

一方、ガスタービンでのアンモニアの使用は、2015 年に産総研[33]でマイクロガスタービン（50kW）でのアンモニア専焼に成功（出力は 41.8kW）したほか、2019 年にトヨタエナジーソリューションズ[34]が 300kW 級のマイクロガスタービンにおいてアンモニア専焼で 295kW の発電に成功した事例等がある。また、混焼の場合は、IHI[35]の 2000kW 級ガスタービン試験設備で熱量比率 20%を達成した事例がある。（いずれも各社プレスリリース参照）

このように、各社において実機での実証や試験設備での技術開発は進められてきたが、燃料用途で活用されるアンモニアの導入及び活用拡大に対応するための技術的・経済的な課題や、その解決に向けたタイムラインを官民で共有し、一体となって取り組みを進めることが必要であるとの認識から、「燃料アンモニア導入官民協議会」が発足し、2020 年 10 月に第 1 回の協議会が開催、2021 年 2 月に中間報告[29]が取りまとめ

られた。協議会では、サプライチェーンの構築や利用技術の開発に係るロードマップの検討等、議論が進められており、図 5.1.3-23、図 5.1.3-24 に示すような発電コストや導入・拡大戦略等が検討されている。（詳細は、「燃料アンモニア導入官民協議会中間取りまとめ」[29] を参照）

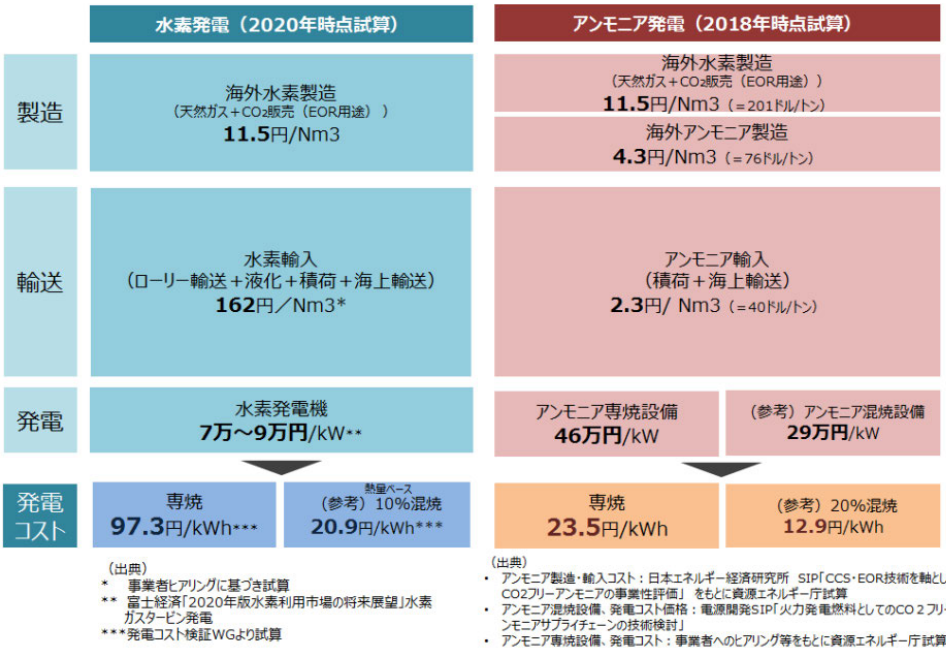


図 5.1.3-23 アンモニア発電コスト
（出典：燃料アンモニア導入官民協議会 [29]）

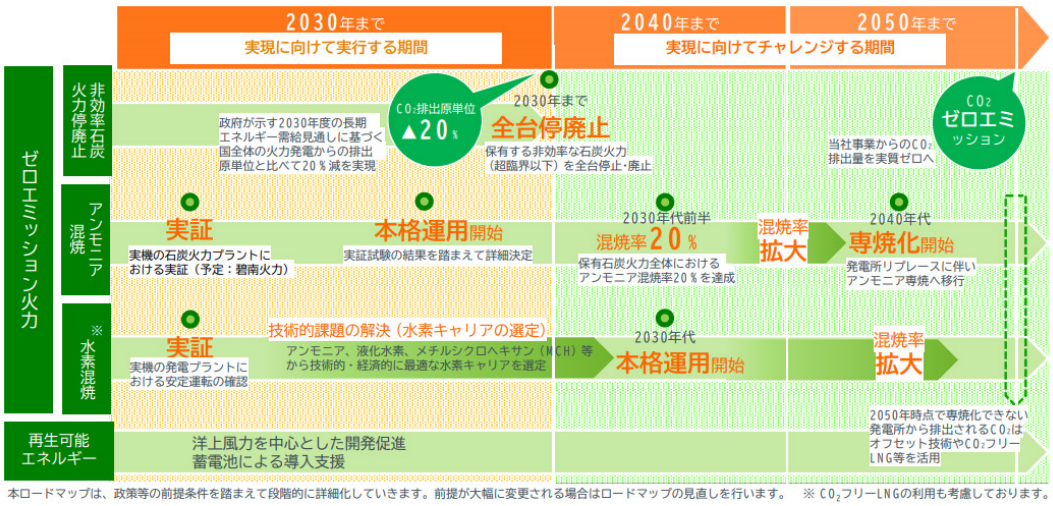


図 5.1.3-24 JERA のアンモニア発電を中心とした戦略
（出典：JERA [36]）

「中間取りまとめ」[29]でも言及があるが、アンモニアの利用先としては発電部門以外にも運輸部門や産業部門が考えられ、具体的には船舶での利用や工業炉での利用等（いずれもアンモニア直接燃焼）が期待される。

アンモニア船に関しては、今治造船ら[37]が共同開発を進めている案件の他、日本郵船ら[38]が進める案件など、複数の事例が確認できる。（各社プレスリリース参照）

また、工業炉での利用に向けて、10kW～100kW 級試験炉での燃焼技術開発[39][40]が行われるとともに、適用先として脱脂炉[41]やセメントキルン[42]を念頭に置いた実証試験やシミュレーション評価なども行われている。

アンモニアのエネルギー利用に関する経済性評価については、日本を中心に行われ始めてきているところである。脱炭素の観点から、安価な再生可能エネルギーが豊富に利用可能な地域において CO_2 フリーアンモニアを製造し、海上輸送にて日本に輸入するケースが考えられるため、アンモニアの海上輸送コスト、及びアンモニア混焼火力発電に係る追加設備コストが経済性評価において重要となる。アンモニアを火力発電に供する場合のコスト分析例としては、日本エネルギー経済研究所による、日本－サウジアラビア間の CO_2 フリー水素等の貿易に関する検討を行った報告書[43]に推計例がある。この中で、LNG 火力、石炭火力に匹敵するアンモニア発電を実現するためのアンモニア価格（発電プラント引き渡し）を 2030 年時点で 35 円/kg-NH_3(=\$350/t-NH_3)以下と推計している。この推計のベースとなる文献 44）では水素あるいはアンモニアなどのエネルギーキャリアに変換して貯蔵・輸送・利用するシステムのコスト分析を行っており、2030 年時点のアンモニアの海上輸送コスト（輸送距離：10,000km）は 3.21 円/Nm^3-H_2 と推計している（図 5.1.3-25）。日本エネルギー経済研究所は文献 45）で、海外プラントにおける CO_2 フリーアンモニア製造、日本への輸送、及びその国内石炭火力発電所への導入における経済性の検討を行った中で、2030 年のアンモニア輸送コストを 65.7\$/t としている。大槻ら[46]は船舶による 2030 年のアンモニア輸送コストを 700US\$/toe/yr 程度としている（図 5.1.3-26）。IEA は、船舶によるアンモニア輸送コストを 1500km あたり US\$1.2/kg-H_2 と推計している（図 5.1.3-27）。

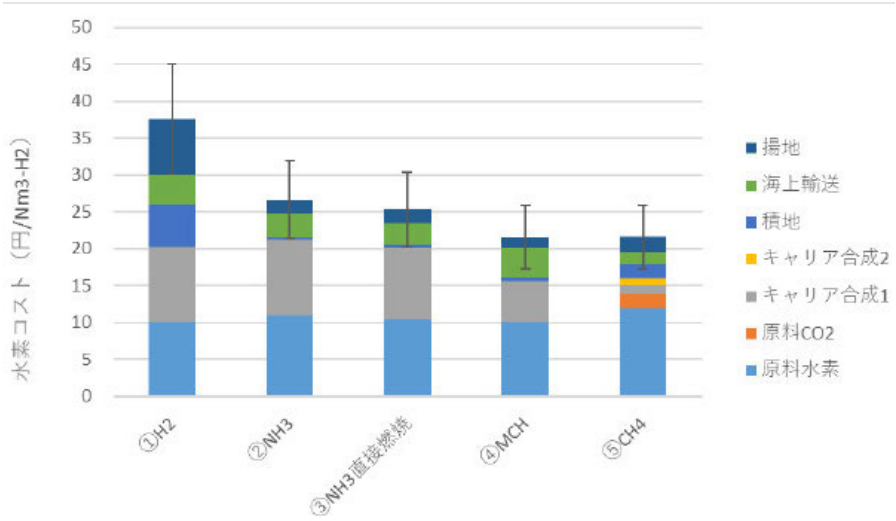


図 5.1.3-25 アンモニアの輸送コスト例（出典：エネルギー総合工学研究所[44]）

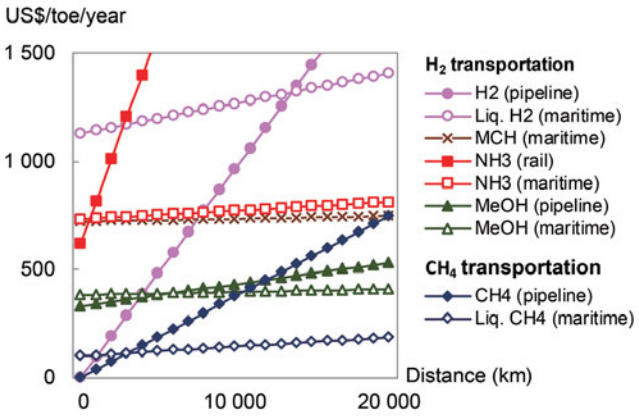


図 5.1.3-26 アンモニアの輸送コスト例（出典：大槻他[46)]）

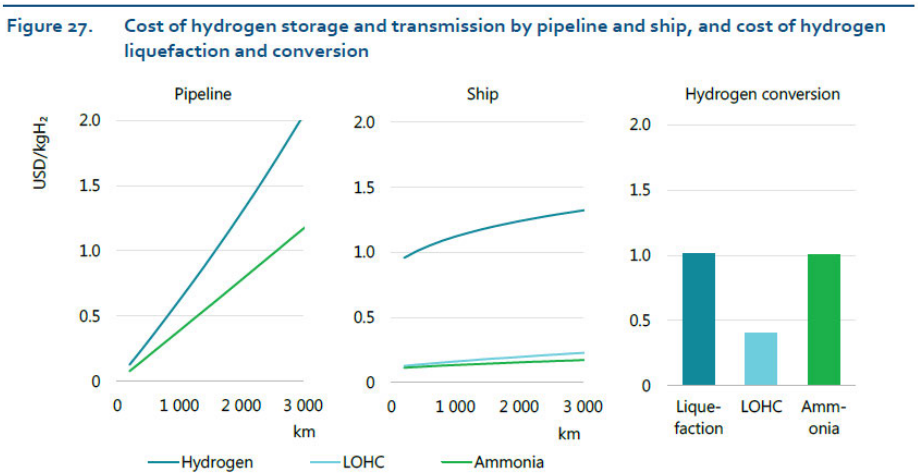


図 5.1.3-27 アンモニアの輸送コスト例（出典：IEA[47)]）

注）LOHC: liquid organic hydrogen carriers（有機ハイドライト MCH）

アンモニア混焼火力発電の追加設備コスト評価例については、電源開発[48)]、日本エネルギー経済研究所[45)]などがある。文献 48)では、石炭火力発電所におけるアンモニアの受け入れ、貯蔵、混焼の技術検討とコスト評価において、600MW 規模のプラントにおける追加設備コストを 250 億円としている。この設備にはアンモニアの受入・貯蔵設備、払出・気化設備、混焼設備の主要機器が含まれ、現時点での価格情報により推計されているものとみられる。文献 45)では、長期エネルギー需給見通し相当の排出削減目標下でのコスト最小化となるアンモニア混焼設備導入を分析し、図 5.1.3-28 の結果を示している。なお、この設備コストにはアンモニア受入設備や燃料供給設備などは含まれておらず、別途モデル内で考慮されているとのことである。時点の違い、また考慮した設備種の差異があるため単純な比較は適当でないが、単位出力当たり追加コストは前者で約 4.2 万円/kW、後者で約 2.6 万円/kW との結果となっている。

		2030		2035	
		Base1	N1-B	Base2	N2-JP
設備容量 [GW]	石炭専焼	51	43	49	32
	NH3混焼石炭	-	8	-	17
	LNG	72	72	69	69
燃料消費量 [百万t]	石炭	109	106	95	74
	NH3	-	3.5	-	4.9
	LNG	13	22	15	32
発電量 [TWh]	石炭	302	293	263	207
	NH3[1]	-	8	-	12
	LNG	107	183	120	260
燃料費 [十億円/年]		2,249	2,975	2,182	3,290
追加設備[2] [十億円]		-	188	-	402

図 5.1.3-28 アンモニア混焼火力発電の追加設備コスト
（出典：エネルギー経済研究所[45)]）

(4) DAC

前述のように、カーボンニュートラルを目指すにあたって、水素やCCUを含め様々な対策オプションが必要と考えられるが、その中にあって、負排出を実現できる大気中CO_2回収（DAC）も重要な一オプションと考えられる。

欧州科学アカデミー諮問委員会（EASAC）報告書（2018年2月公表）[49)]では、パリ協定の長期目標達成に向けて炭素バジェットが少なくなっていることを理由にネガティブエミッション技術（NETs）の必要性を指摘した上で、NETsの技術ポートフォリオと政策課題を提示している。表 5.1.3-2は、複数のNETsを多角的に評価した結果（技術開発状況、導入ポテンシャル、コスト、手法別のCO_2回収量の推計幅、除去したCO_2の長期安定性、CO_2放出による気候への逆効果、生物多様性・生態系への影響）を示す。BECCS（バイオエネルギーCCS）を含む他のNETsと比較してDACCSはコストが高い可能性が示されている一方、地層貯留をするため除去したCO_2の長期安定性や生物多様性・生態系への影響等の観点でDACCSは優れていることも伺える。

表 5.1.3-2 NETs の多角的評価（出典：EASAC[49]）

	AR	LM	BECCS	EW	DACCS	OIF	CCS
Technical status	Existing	Existing	Demonstration	Research	Demonstration/ commercial	Research	Commercial and demonstration
Potential in literature (Gt C/year)	1.1–3.3	2–3	3.3	1	3.3+	<1	4+
Cost	L	L	M	M	M/H	L/H	L
Is the amount of CO_2 removed consistent across different applications?	Case specific	Yes	Case specific	Rate uncertain	Yes	Uncertain	Yes
Carbon removal secure in long-term?	Vulnerable (1)	Vulnerable (2)	Vulnerable (1)	Yes	Yes (3)	Uncertain	Yes (3)
Possible reverse effects on climate? (4)	Yes	No	Yes	No	No	Yes	No
Large ecosystems and biodiversity effects likely	Yes	No	Yes	Uncertain	No	Yes	No

AR, afforestation and reforestation; LM, land management; EW, enhanced weathering. Approximate costs: L, less than €100/tCO_2; M, €100–400/tCO_2; H, more than €400/tCO_2. Notes: (1) To climate change, fires, pests, diseases, forestry policy changes. (2) Warming increasing soil respiration, return to intensive agriculture. (3) On assumption that secure geological sites used for storage. (4) For example, release of other GHGs, effects of land use change, albedo. **N.B.: this table is to assist in highlighting the strengths and weaknesses of the various NETs and should only be used as a guide to the main issues identified in the text and annexes, not as a definitive summary of this analysis.**

図 5.1.3-29 は、各種負排出技術（NETs）の特性を整理したものである。Smith ら[50]は、430–480 ppm CO_2eq に相当する 2℃シナリオの場合、複数のシナリオ分析の中央値で 2100 年において 3.3 GtC/yr（約 12 $GtCO_2$/yr）程度の BECCS が利用される結果となっているとし、それを基準に BECCS や DACCS 等の NETs の必要なエネルギー量、土地面積、水消費量等を評価している。BECCS はエネルギーを供給するが、DAC は大きなエネルギーを消費する。一方、BECCS は 3.3 GtC/yr の CO_2 削減のためには 380–700 Mha 程度の土地が必要で、植林では 970 Mha 程度必要と評価している。一方、DAC ではとても小さく、無視できる程度としている（ただし、別途、太陽光発電等のエネルギー供給する土地は必要）。鉱物化（EW）は必要な土地面積は小さいが、排出削減規模も限られるとしている。水の消費量は、植林、BECCS が大きく、EW は小さいと評価している。

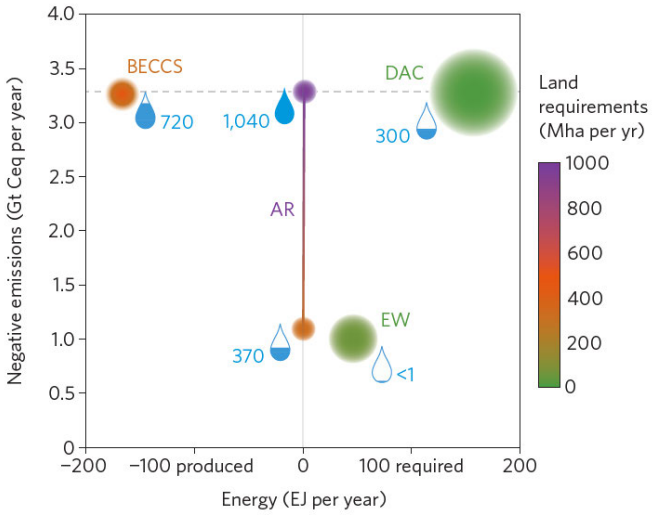


図 5.1.3-29 負の排出技術における DAC の特性
（出典：Smith et al. [50]）

同様に、Creutzig ら [51]も BECCS と DACCS の評価をしており、土地利用面積は、10 $GtCO_2$ を削減するためには、BECCS の場合、EU28 すべての面積が必要だが、DACCS の場合では、アイルランドのみの面積で済むとしている（図 5.1.3-30）。一方、エネルギーについては、BECCS はエネルギーを生産する一方、DACCS はエネルギーを大量に消費すると評価している（図 5.1.3-31）。まず、2℃と 1.5℃を比較すると、総エネルギー消費量（供給量）は、1.5℃の方が電力消費量が増大し、一方、非電力のエネルギー消費量が減少する傾向が示されている。その上で、1.5℃シナリオでは、BECCS では 4%程度の電力供給に寄与するものの、DACCS では 12%程度電力を消費するとしている。また、非電力では、BECCS では 29%程度供給に寄与するものの、DACCS では 59%も消費するとしている（後述の Marcucci et al. [52]のモデル分析結果に基づいた評価）。

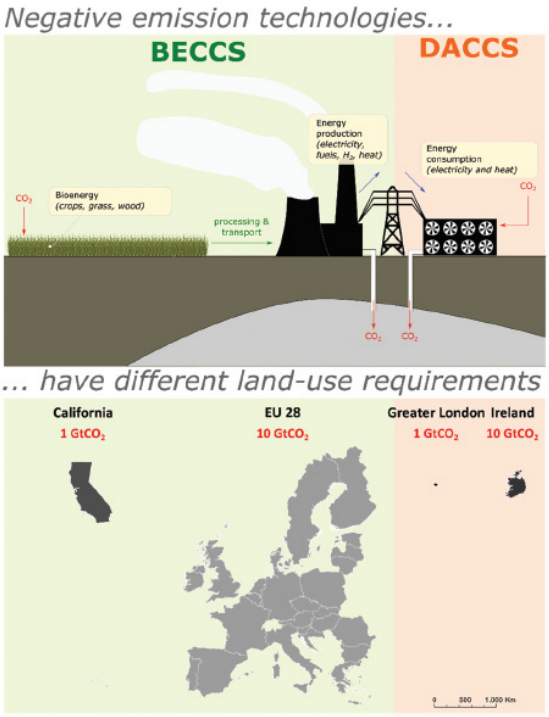


図 5.1.3-30 DACCS と BECCS の比較：土地利用面積
（出典：Creutzig et al. [51]）

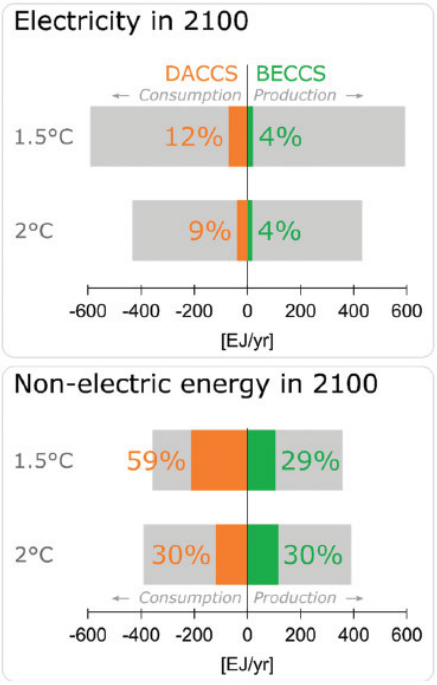


図 5.1.3-31 DACCS と BECCS の比較：エネルギー
（出典：Creutzig et al. [51]）

従来の統合評価モデル IAM による分析では、BECCS は考慮されていたが、DAC のコスト見通しの不確実性が高いため、多くの分析では DACCS については考慮されてこなかった。しかし、厳しい排出削減に対するシナリオ分析が増してくる中で、極めて

数は少ないものの、近年、DAC についても評価されるようにもなってきた。Marcucci らは、MERGE-ETL モデルを拡張し、DACCS の評価を行っている[52]。その評価における電力、非電力別のエネルギー生産量のシナリオを図 5.1.3-32 に示す。このモデル分析では、DAC を想定しない場合は、1.5℃目標に対応するシナリオの実行可能解はなかったとしている。また、Creutzig ら[51]の論文の紹介で触れたように、2℃と 1.5℃を同じ DAC を想定したシナリオ同士で比較すると、1.5℃では電力消費量が増大し、一方、非電力のエネルギー消費量が減少する傾向が示されている。DAC の有無で比較可能な 2℃、>66%確率のシナリオで比較すると、DAC がある場合、電力消費量が少しではあるが減少している。DAC は電力、熱が必要であるが、DAC があることで他のエネルギーを大きく利用する対策を回避できるためと考えられる。一方、非電力の消費量は DAC 有では DAC 無に比べ大きくなっている。DAC 用にガスや太陽熱の利用が大きくなっている。

また、図 5.1.3-33 は CO_2 回収量を示す。2100 年時点では、DAC による CO_2 回収量は全回収量に対して 2℃（>50%）では 23%、2℃（>66%）では 33%、1.5℃（>50%）では 38%と推計されている。なお、MERGE-ETL モデルは動的モデルで、また、CO_2 排出制約も動的に想定したとしており、そのため、2℃の DAC 想定有シナリオでは、2050 年以降、DACCS で負排出として比較的費用対効果が高く大幅に排出削減可能となることにより、2050 年以前の DAC 以外を含む CO_2 回収量そのものが少なくなるような結果を示しており、興味深い。

そして、図 5.1.3-34、図 5.1.3-35 には、それぞれ CO_2 限界削減費用、GDP ロスを示す。MERGE-ETL モデルの推計では、1.5℃シナリオでは、DAC があっても 2℃シナリオに比べ、2100 年の CO_2 限界削減費用は 4200 \$/tCO_2 程度としている。また、これに対応して相当大きな GDP ロスが推計されている。一方、2℃（>66%）で DAC の有無による差異を見ると、2100 年では DAC 無で 1750 \$/tCO_2 程度の推計が DAC 有では 1000 \$/tCO_2 程度と大きく低減している。なお、MERGE モデルは基本的に経済モデルであるため、対策量に対して非線形的なコスト上昇を見込むことが多く、DACCS をバックストップ技術といったモデル化になっていないように見られる。

MERGE-ETL モデルは、DNE21+モデルに比べると、技術の表現は簡略であり、DAC、BECCS、水素、CCUS 等を、DNE21+によって整合的かつ定量的に評価する重要性があると考えられる。

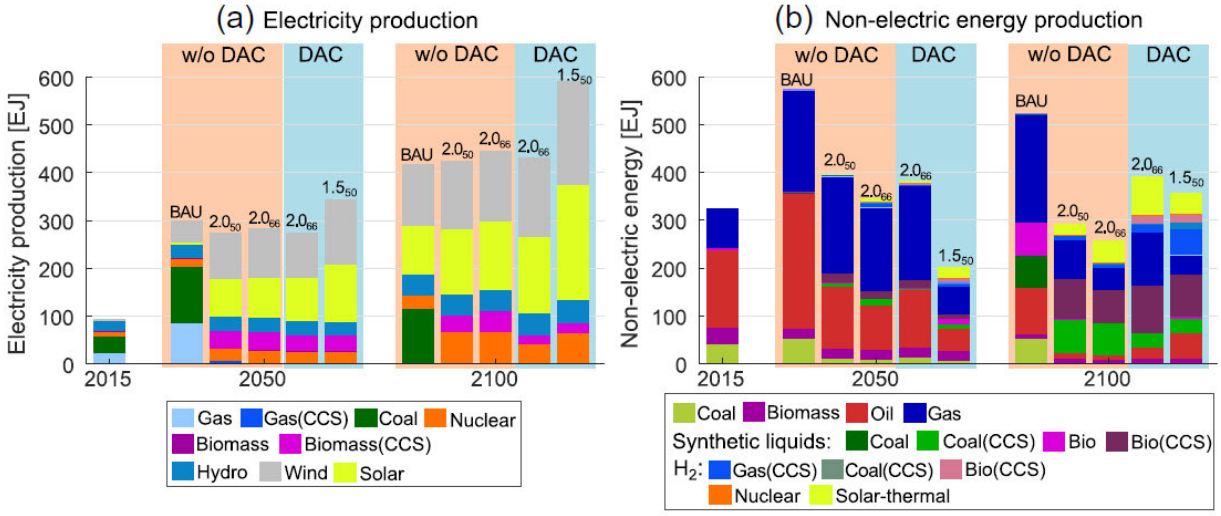


図 5.1.3-32 DAC 有、無におけるシナリオ分析例：エネルギー

（出典：Marcucci et al. [52]）

注）2.0_{50}：>50%確率の 2℃シナリオ、2.0_{66}：>66%確率の 2℃シナリオ、1.5_{50}：>50%確率の 1.5℃シナリオ。DAC を想定しない場合、1.5_{50} は実行可能解無

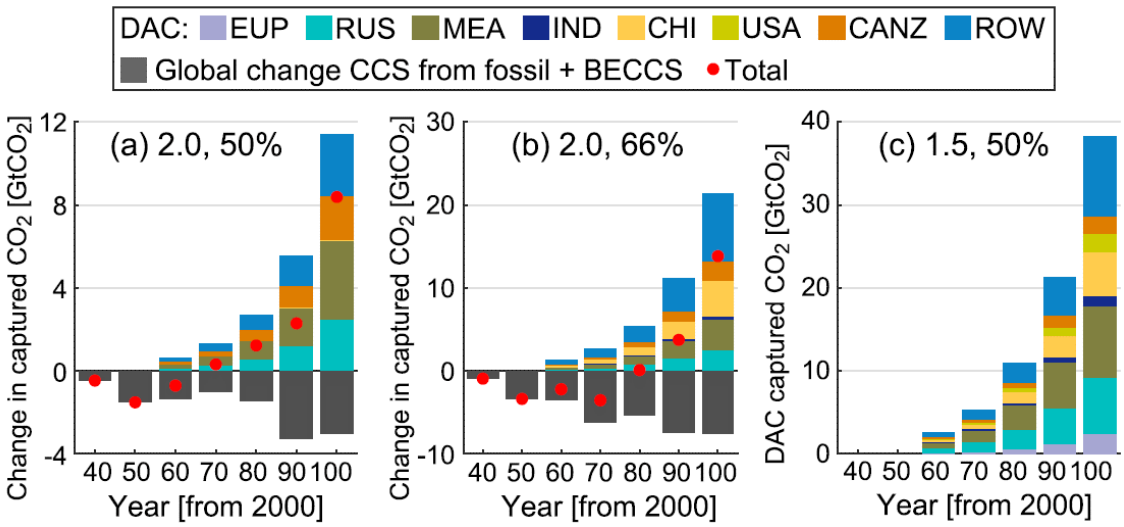


図 5.1.3-33 DAC 有、無におけるシナリオ分析例：CO_2 回収

（出典：Marcucci et al. [52]）

注）DAC 有―DAC 無。1.5_{50} は実行可能解無のため、負の表示無し

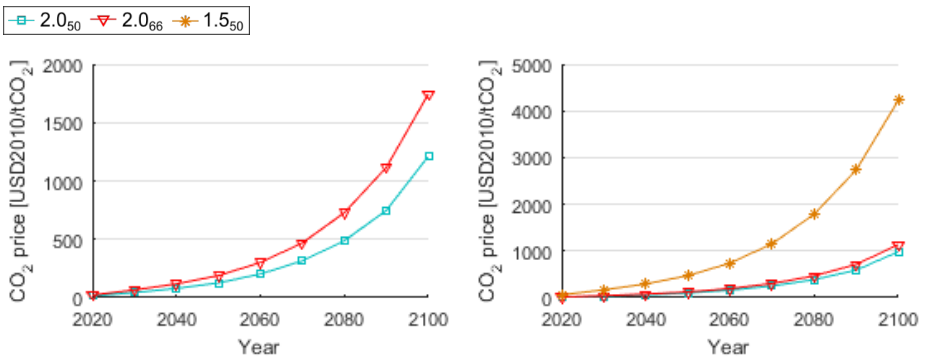


図 5.1.3-34 DAC 有、無におけるシナリオ分析例：CO_2 限界削減費用
（出典：Marcucci et al. [52]）

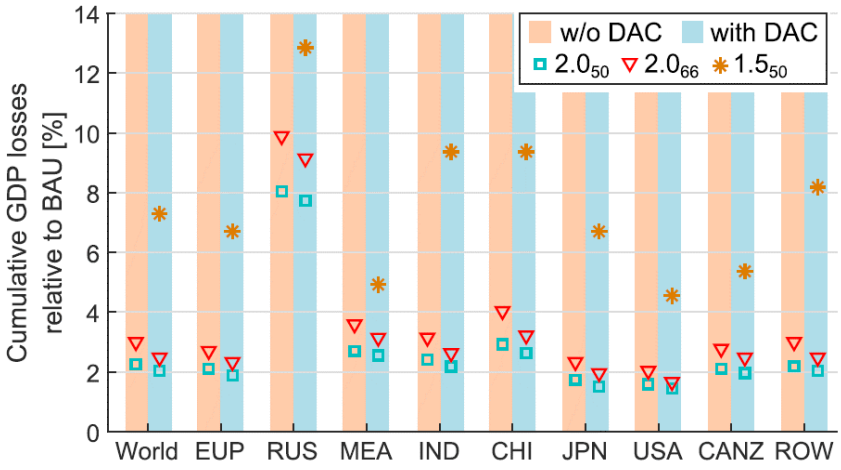


図 5.1.3-35 DAC 有、無におけるシナリオ分析例：GDP ロス
（出典：Marcucci et al. [52]）

次に、TIAM および WITCH の 2 モデルによる DAC の分析結果 [53]を示す。表 5.1.3-3 に 2030 年時点の世界の炭素価格（CO_2 限界削減費用）推計を示す。TIAM および WITCH モデルともに、1.5℃シナリオでは、BECCS, DACCS ともに想定しない場合は、実行可能解がなかったと報告している。また、DAC を想定しない場合に比べ、DAC を想定したシナリオでは、いずれのモデルにおいても、炭素価格が大きく低下する結果となっている。図 5.1.3-36 で見られるように、Marcucci et al. [52]のモデル分析結果と同様、DAC がある場合、電力消費量は減少する傾向が見られる。DAC により、エネルギーを大きく利用する他の対策を回避できるためと考えられる。図 5.1.3-37 に、植林、BECCS、DACCS（30 $GtCO_2$/yr 程度を想定）による、エネルギー、土地利用、水利用への影響を示す。これまで記載と同様であるが、DAC によって大きなエネルギー消費量が見込まれるが（250 EJ/yr 程度）、土地利用、水利用については、DACCS は、植林、BECCS よりも小さい利用に限られる（特に土地利用。ただし、これには DAC に PV 等のエネルギーを利用する場合は、PV の設置面積もかなり要することとなるが、その土地面積は含まれない）。

表 5.1.3-3 2030 年時点の世界の炭素価格（CO_2 限界削減費用）推計（出典：Realmonte et al. [53]）

Scenario	2 °C		1.5 °C	
	TIAM	WITCH	TIAM	WITCH
DAC	23	80	50	151
No DAC	117	194	2119	446
No NET	3711	272	Infeasible	

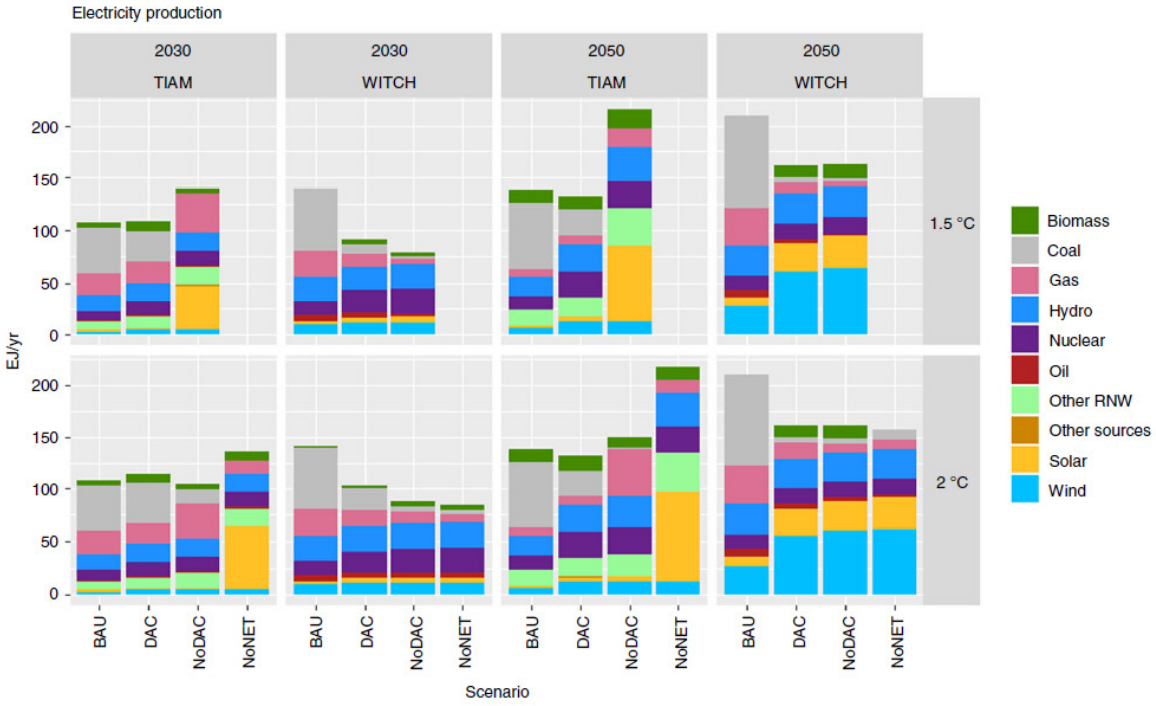


図 5.1.3-36 各種シナリオにおける世界発電量（出典：Realmonte et al. [53]）

注）BAU：特段の排出削減制約無（比較参照値）。DAC：DACCS, BECCS, 植林等、NETs オプション有。NoDAC：DAC 無、NoNET：DACCS, BECCS 無、植林のみ有

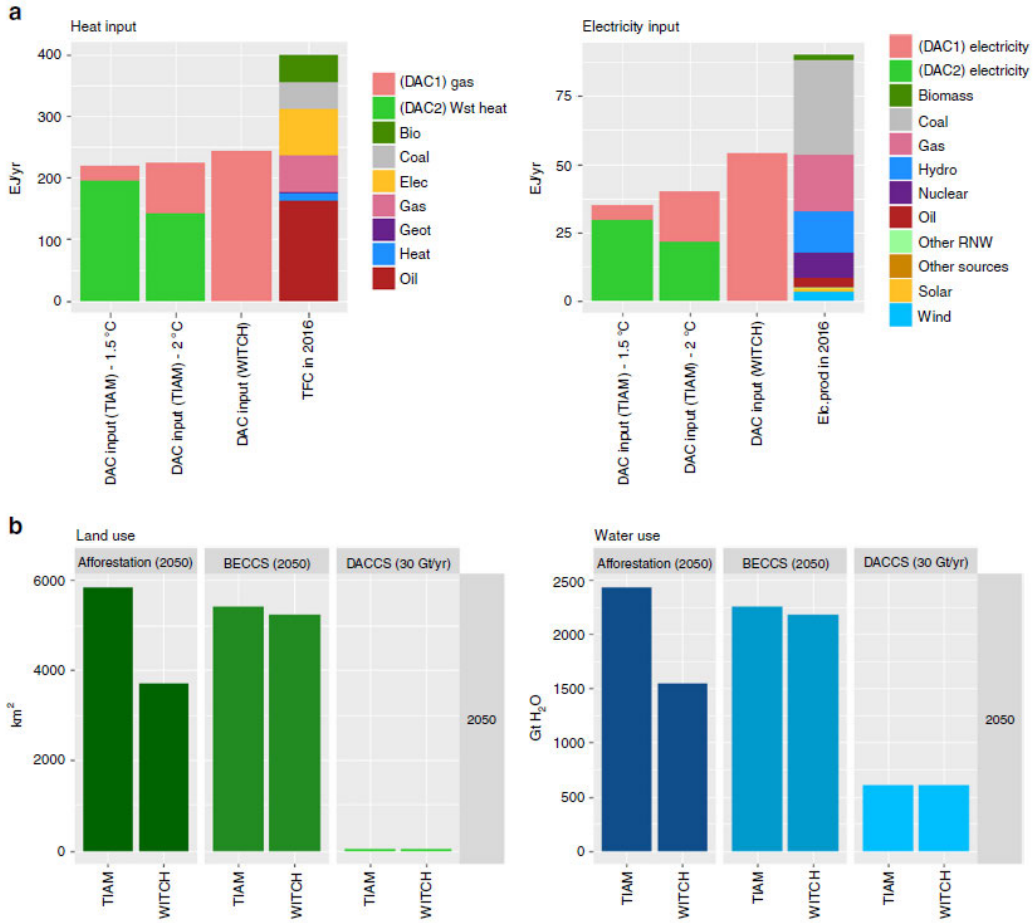


図 5.1.3-37 植林、BECCS、DACCS による、エネルギー、土地利用、水利用への影響
（出典：Realmonte et al. [53]）

注）DACCS を 2050 年 30 $GtCO_2$/yr 利用した場合の影響とそれに相当する植林、BECCS の場合の影響を示している。

2050 年カーボンニュートラルといった目標が掲げられるなどの状況の変化や、DAC に関するコスト情報などの蓄積といった変化を踏まえ、今年度の本事業において、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+に新たに DAC のオプションを明示的に考慮した（第 5.3 節参照）。

モデル化にあたっては、様々な文献を参照しつつ、主には、様々な文献をレビューし包括的に評価している、Fasihi et al. (2019)[54]を参考に想定した。Fasihi らは、DAC の技術開発動向から、高温利用の水溶性液、低温利用の固体吸着材に整理し（図 5.1.3-38）、それぞれの代表的なモデルプラントを想定して（図 5.1.3-39、表 5.1.3-4）コスト等の推計を行っている（図 5.1.3-40）。2030 年以降の DAC の普及シナリオに対応して、技術習熟が働き、DAC の設備費が低減すると見込まれており（図 5.1.3-39）、結果、DAC（CO_2 輸送・貯留は含まない）のコストとして 2050 年では、40～70 €/tCO_2 程度を見込んでいる（図 5.1.3-40）。

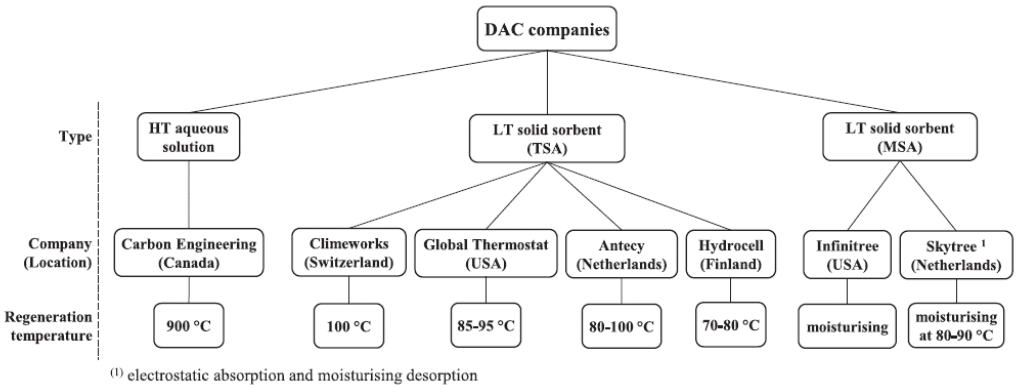


図 5.1.3-38 DAC 開発動向（出典：Fasihi et al.[54)]）

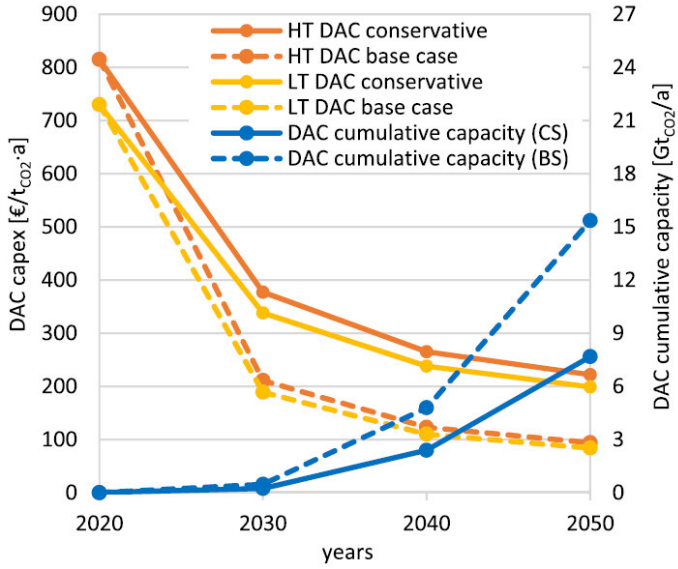


図 5.1.3-39 DAC 導入量とそれに対応した設備費のコスト低減の見通し
（出典：Fasihi et al. [54)]）

表 5.1.3-4 DAC のモデル想定（保守的なシナリオ）（出典：Fasihi et al. [54)]）

		unit	2020	2030	2040	2050
LT DAC	capex	€/t_{CO2}·a	730	338	237	199
	opex	% of capex p.a.	4%	4%	4%	4%
	lifetime	a	20	25	30	30
	el. demand	kWh_{el}/t_{CO2}	250	225	203	182
	LT heat demand	kWh_{th}/t_{CO2}	1750	1500	1286	1102
HT DAC (electrified)	capex	€/t_{CO2}·a	815	378	265	222
	opex	% of capex p.a.	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%
	lifetime	a	25	30	30	30
	el. demand	kWh_{el}/t_{CO2}	1535	1458	1385	1316

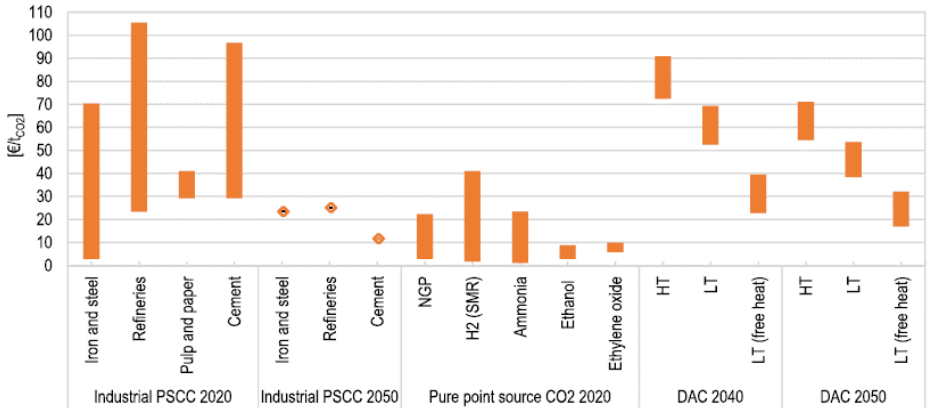


図 5.1.3-40 DAC のコストの見通し（出典：Fasihi et al. [54]）
注）DAC のレンジは、下限がベース想定、上限が Conservative 想定

(5) まとめ

本節では、水素、CCU・合成燃料、DAC の技術動向と既往のシナリオ分析について広く整理した。これらは、相互に関係しており、総合的に理解し、評価することが重要である。例えば、すでに記載したが、CCU については、CO_2 はエネルギー価値がほとんどない安定的な物質であり、特にエネルギーとしての有価物にして利用する場合においては、水素エネルギーの付加が必要であり、この場合、CO_2 は水素のキャリアとしての位置づけになる。事実上、回収利用された CO_2 そのものが CO_2 排出削減に寄与するのではなく、カーボンフリー水素（その一次エネルギーは再エネや化石燃料＋CCS）によって CO_2 削減が実現する。また、例えば、化石燃料発電＋CCS、ブルー水素発電、ブルー水素由来アンモニア発電は、グローバルな視点では化石燃料発電＋CCS という原理でカーボンフリーを実現しようとするものであって事実上同じである。差異があるのは、CO_2 貯留をどこで行うかの違いであり、CO_2 貯留の制約、コストの地域・国の差異によって、どのオプションを選択するのがコスト効率的かということになる。グローバル、セクター横断的に、どのような条件下であれば、どのようなシステムが費用対効果が高くなるかを、包括的、整合的に評価し、より有効な対策を見出していくことが求められる。

いずれにしても、2050 年カーボンニュートラル目標といった、従来以上に厳しい排出削減が目標として議論される中、水素、CCU・合成燃料、DAC といった技術は、再エネ、原子力、CCS の活用を拡大するために大変重要になってくることは間違いないと考えられる。

参考文献（第 5.1.3 節に関するもの）

1) エネ庁、総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 (2020)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/033/033_004.pdf
2) IEA, Energy Technology Perspectives 2020 (2020)
3) IEA, The Future of Hydrogen (2019)

4) エネ庁、総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 (2020) https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/035/035_004.pdf
5) 水素・燃料電池戦略協議会 水素・燃料電池戦略ロードマップ (2019) https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001-2.pdf
6) EU, IN-DEPTH ANALYSIS IN SUPPORT OF THE COMMISSION COMMUNICATION COM(2018) 773 (2018) https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_analysis_in_support_en_0.pdf
7) 柴田善朗：「低・脱炭素社会に向けたメタネーションの意義」, エネルギー・資源, 41(1), pp.32-33 (2020)
8) N. Mac Dowell, P.S. Fennell, N. Shah, G.C. Maitland, The role of CO_2 capture and utilization in mitigating climate change, Nature Climate Change 7, 243-249 (2017)
9) A. Kätelhöna, R. Meysa, S. Deutza, S. Suhb, A. Bardowa, Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry, PNAS 116-23, 11187-11194 (2019)
10) 柴田、CCU・カーボンリサイクルに必要な低炭素化以外の視点―CCUS という分類学により生じる誤解― (2020) https://eneken.ieej.or.jp/data/8821.pdf
11) RITE、FY2019 ALPS 報告書 (2020)
12) 酒井奨、季報エネルギー総合工学、2019 年 10 月号 (2019)
13) 日本ガス協会、2050 年のガス事業の在り方検討会 (2020)
14) 大阪ガス (2021) https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2021/__icsFiles/afieldfile/2021/01/25/210125_2_1.pdf
15) 日本ガス協会、2050 年のガス事業の在り方検討会 (2021)
16) Audi (2017) https://www.audi-mediacenter.com/en/press-releases/audi-steps-up-research-into-synthetic-fuels-9546
17) FOURIN、eFuel の可能性とインパクト (2020) https://www.fourin.jp/report/eFuel_expansion.html
18) Audi (2018) https://www.audi-mediacenter.com/en/press-releases/audi-advances-e-fuels-technology-new-e-benzin-fuel-being-tested-9912
19) Norsk e-Fuel ホームページ https://www.norsk-e-fuel.com/en/
20) ENEOS, ENEOS グループにおける ESG 経営 (2020) https://www.hd.eneos.co.jp/csr/meeting/pdf/esg_ex_20201202.pdf
21) NEDO, 「CO_2 からの液体合成燃料一貫製造プロセス技術の研究開発に着手」 (2021) https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101410.html
22) Agora, The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels (2018)
23) Dietrich, Power-to-liquids: synthetic fuels from a sustainable pathway (2015)
24) Marchese, Energy performance of Power-to-Liquid applications integrating biogas upgrading, reverse water gas shift, solid oxide electrolysis and Fischer-Tropsch technologies (2020)
25) Schmidt, Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review (2018)
26) Li, Integrated tuneable synthesis of liquid fuels via Fischer–Tropsch technology (2018)
27) IRENA、再生可能エネルギーの視点から見た水素 (2019)
28) Concawe Review Volume 28 (2019) https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/E-fuels-article.pdf

29) 燃料アンモニア導入官民協議会、中間取りまとめ (2021) https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/nenryo_anmonia/pdf/20200208_1.pdf
30) 中国電力 (2017) https://www.energia.co.jp/press/2017/10697.html
31) IHI (2018) https://www.ihi.co.jp/ihi/all_news/2017/technology/2018-3-28/index.html
32) 日本経済新聞 2018 年 3 月 28 日（電子版） https://www.nikkei.com/article/DGXMZO28682190Y8A320C1XA0000/
33) 産総研 (2015) https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2015/pr20150917/pr20150917.html
34) トヨタエナジーソリューションズ (2019) https://www.toyota-energy.co.jp/wp-content/uploads/2019/04/190408_press-release.pdf
35) IHI (2018) https://www.ihi.co.jp/ihi/all_news/2018/technology/2018-4-18/index.html
36) JERA、「JERA ゼロエミッション 2050 日本版ロードマップ」と「JERA 環境コミット 2030」(2020) https://www.jera.co.jp/information/20201013_539
37) 今治造船 (2020) https://www.imazo.co.jp/news/200430/
38) 日本郵船 (2020) https://www.nyk.com/news/2020/20200812_01.html
39) 科学技術振興機構 (2016) https://www.jst.go.jp/pr/announce/20161031-2/index.html
40) 村井他、日本燃焼学会誌、第 61 巻 198 号 (2019) 320-325
41) 沼田他、日本燃焼学会誌、第 61 巻 198 号 (2019) 326-330
42) SIP 終了報告書、アンモニア混焼セメントキルンの技術開発 (2019)
43) エネルギー経済研究所、サウジアラビアにおける低炭素エネルギーシステム構築に係るマスタープラン策定調査報告書(2018)
44) エネルギー総合工学研究所、エネルギーキャリアシステムの経済性評価と特性解析 (2016)
45) エネルギー経済研究所、CCS・EOR 技術を軸とした CO_2 フリーアンモニアの事業性評価
46) 大槻他、発電・自動車用燃料としての水素の導入可能性：地域細分化型世界エネルギーシステムモデルを用いた分析（2019）
47) IEA, The future of hydrogen, G20 Hydrogen report: Assumptions (2019)
48) 電源開発株式会社、火力発電燃料としての CO_2 フリーアンモニアサプライチェーンの技術検討（2019）
49) 欧州科学アカデミー諮問委員会（EASAC）報告書 (2018)
50) Smith et al. (2019)
51) F. Creutzig et al., The mutual dependence of negative emission technologies and energy systems, Energy Environ. Sci., 12, 1805 (2019)
52) Marcucci et al. Climatic Change (2017)
53) Realmonte, G., L. Drouet, A. Gambhir, J. Glynn, A. Hawkes, A.C. Köberle, M. Tavoni (2019) An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways, Nature Communications, 10:3277.
54) Fasihi et al., Journal of Cleaner Production 224 (2019)

5.1.4 各種技術動向を踏まえたモデルの改良

(1) 航空部門

本節では、航空部門のモデル改良に関連して、水素航空機の想定と国内航空需要の想定について記載する

① 水素航空機

水素航空機については、昨年度のモデル改良にてオプション追加した内容を基に、文献 1)を参照し航続距離別の詳細な想定を行った。航空輸送需要に関しては、水素航空機は水素の貯蔵量増加により必要なタンクの重量が増大すること、電動航空機は搭載電池重量が増大することから、長距離輸送における航続距離に限界があると見込まれ、競合する技術は距離帯によって異なるため、表 5.1.4-1 に示す 4 つの距離帯に区分してモデル化を行っている。短距離帯は 750km 未満、中距離帯は 750～2500km、長距離帯は 2500～10000km、超長距離帯は 10000km 以上である。この区分を基準とし、水素航空機の技術想定の見直しを行っている。

表 5.1.4-1 航空部門における距離帯の区分

	導入可能技術の想定
短距離帯：750km 未満	従来型ジェット機、電動航空機、水素航空機
中距離帯：750～2500km	従来型ジェット機、電動航空機、水素航空機
長距離帯：2500～10000km	従来型ジェット機、水素航空機
超長距離帯：10000km 以上	従来型ジェット機

文献 1)、及び Airbus 社発表内容 [2)]に基づく水素航空機の想定を表 5.1.4-2、表 5.1.4-3 に示す。航続距離については、中距離帯以下では航続距離を拡大しないオプションを想定し、長距離帯については文献 1)を参考に、航続距離上限を技術的に可能な限り拡大するオプションを想定した。航続距離は、2040 年：3700km、2050 年：7000km、2100 年：10000km と想定し、長距離帯の 2500～10000km に区分している需要のうち、この航続距離に収まる需要のみに導入が可能であるとし、モデルでは時点に応じた上限制約を想定している。コストは、文献 1)で示されている従来ジェット機に対する機体コスト増加率から、航続距離に応じて水素タンクコストが変動するものと想定して推計した。エネルギー原単位についても同様に、文献 1)における従来ジェット機に対する燃費増加率を基に、航続距離に応じて水素タンク重量が変動することにより燃費が変動するものとして推計し想定した。

水素航空機の燃料補給に関して、技術面では大きな制約はないとされているが、水素はジェット燃料よりもエネルギー当たりの量が大きいため、補給レートをジェット燃料と同じとし補給ポイントを倍増しても、補給時間は 2 倍となり、結果として稼働率は 5～10%程度減少するとされている [1)]。このため、従来ジェット機と比較し稼働率は 10%低下するものと想定した。

なお、水素インフラの整備状況により水素航空機運輸需要が制約を受ける可能性を考慮する必要がある。この点については、水素航空機に対する需要が増加すればそれに伴いインフラも整備されるものと想定し、インフラ普及段階である 2040 年に需要総量が上限 50%の制約を受けるものとし、2050 年以降はインフラ整備が進むことにより制約を与えないものとした。

表 5.1.4-2 水素航空機（短・中距離帯）の想定

	2040	2050	2100
航続距離 [km]	3700	3700	3700
エネルギー原単位 [toe/million t-km]	274	274	274
機体コスト [million US$/機]	116	116	116
従来機比稼働率 [%]	90	90	90

表 5.1.4-3 水素航空機（長距離帯）の想定

	2040	2050	2100
航続距離 [km]	3700	7000	10000
エネルギー原単位 [toe/million t-km]	274	300	324
機体コスト [million US$/機]	116	131	138
従来機比稼働率 [%]	90	90	90

モデルにおける航空機技術別のエネルギー原単位、航空機の機体コストの想定を整理して表 5.1.4-4、表 5.1.4-5、表 5.1.4-6 に示す。従来型ジェット機と電動航空機は昨年度報告書の内容、水素航空機の想定は表 5.1.4-2、表 5.1.4-3 の再掲である。ジェット機のエネルギー原単位は IEA 統計 [3]及び ICAO 統計 [4]より 2015 年実績に相当するエネルギー効率を想定し、文献 5)の将来シナリオにおける中程度の改善率を参考に、将来のエネルギー原単位の改善が進むと想定した。なお、統計値に基づく従来ジェット機のエネルギー原単位は、国際航空のほうが国内国空よりも相対的に優れているため、この差異に基づき国際航空と国内航空を区別して想定している。

表 5.1.4-4 国際航空における航空機のエネルギー原単位の想定（toe/million t-km）

	2015 年	2030 年	2040 年	2050 年	2100 年
従来型ジェット機	306	268	246	225	181
電動航空機（短距離帯）	-	-	198	184	161
電動航空機（中距離帯）	-	-	-	184	184
水素航空機（短・中距離帯）	-	-	274	274	274
水素航空機（長距離帯）	-	-	274	300	324

表 5.1.4-5 国内航空における航空機のエネルギー原単位の想定（toe/million t-km）

	2015 年	2030 年	2040 年	2050 年	2100 年
従来型ジェット機	397	348	319	292	235
電動航空機（短距離帯）	-	-	257	239	209
電動航空機（中距離帯）	-	-	-	239	239
水素航空機（短・中距離帯）	-	-	356	356	356
水素航空機（長距離帯）	-	-	356	389	421

表 5.1.4-6 航空機の機体コストの想定（million US$/機）

		2015 年	2030 年	2040 年	2050 年	2100 年
超長距離帯	従来型ジェット機	300	300	300	300	300
～長距離帯	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（短・中距離帯）	-	-	116	116	116
	水素航空機（長距離帯）	-	-	116	131	138

② 国内航空需要

昨年度、国際線の輸送需要の想定を行ったのに続き、国内線の輸送需要の想定を輸送距離帯別に行った。国際航空と同様、統計値に基づく単位当たり需要から将来の単位当たり需要を推計し、SSP シナリオに基づく人口や GDP の将来見通しを用いて、ITF[6]による 2050 年輸送需要見通しを考慮しつつ将来需要総量を想定する手順で行ったが、国内航空の単位当たり需要は各国の経済発展とともに増大すると考えられることから、過去の単位当たり需要と経済の関係を分析して将来の単位当たり需要を想定した。具体的には、ICAO[4]の 2009～2018 年輸送需要実績値を国土面積で基準化した値（旅客：p-km/p/km^2, 貨物：t-km/km^2）を単位当たり需要とし、旅客は一人当たり GDP、貨物は各国 GDP との関係性を分析した。

旅客輸送需要については、単位当たり需要は一人当たり GDP の増大に伴い上昇するが、両者の間に線形関係は見られず、変数の対数化によっても関係性は確認できなかった。グラフ上から各国ごとの傾向を見るとロジスティック曲線に近似しうる（図 5.1.4-1）。これは、個人が移動に割り当てることのできる時間に上限があることを考慮すると、一人当たり GDP の増加とともに一人当たり移動需要は増加するがやがて増加率は低減し次第に飽和するためと考えられる。これに基づき実績値の分析を行い、旅客の単位当たり需要:y は、一人当たり GDP:x に対し、y=1000/(1+150*e(-0.0002*x)により増減するものとした。この推計式と将来 GDP 見通しによる将来の単位当たり需要の時点間の増分を、モデル分析上の基準年である 2015 年の実績値に加算して、将来の単位当たり需要を推計した。

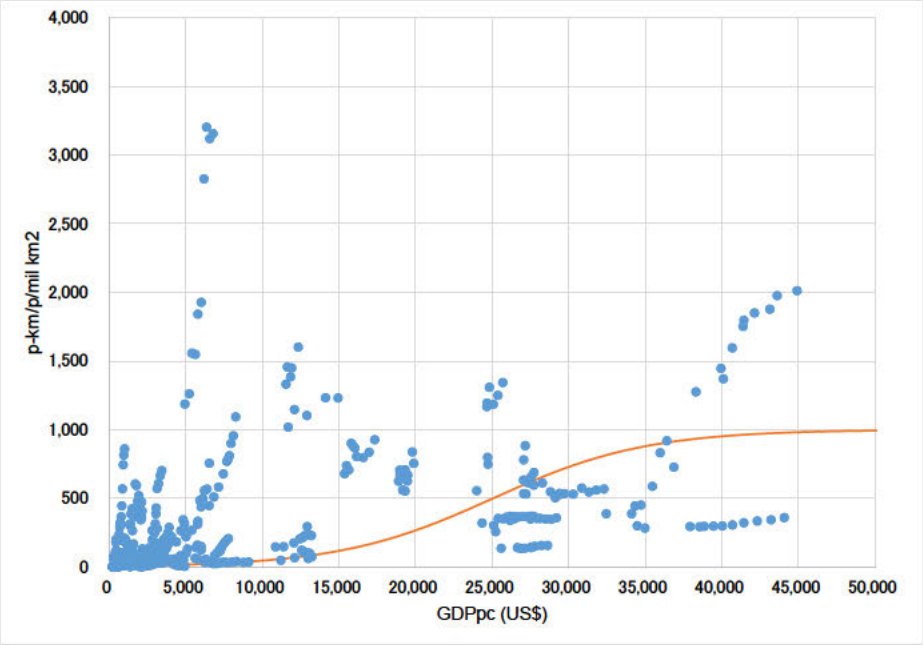


図 5.1.4-1 単位当たり旅客需要と一人当たり GDP の関係

貨物の単位当たり需要と各国 GDP は、線形の関係が確認されたことから、貨物の単位当たり需要:y は、GDP:x に対し、y=0.178 * x + 68.1 により変化するものとし、将来 GDP 見通しの適用により得られる算定値の時点間の増分をモデル分析上の基準年である 2015 年の実績値に加算して、将来の単位当たり需要を推計した。

以上により得られた単位当たり需要の将来想定値に、各国国土面積、さらに旅客では将来人口想定を乗じて、将来の国別輸送需要総量を想定した。モデルでの航空輸送想定値と、ITF による将来見通し[6]の比較をに示す。同程度か、モデルでの想定値がやや低位との結果である。

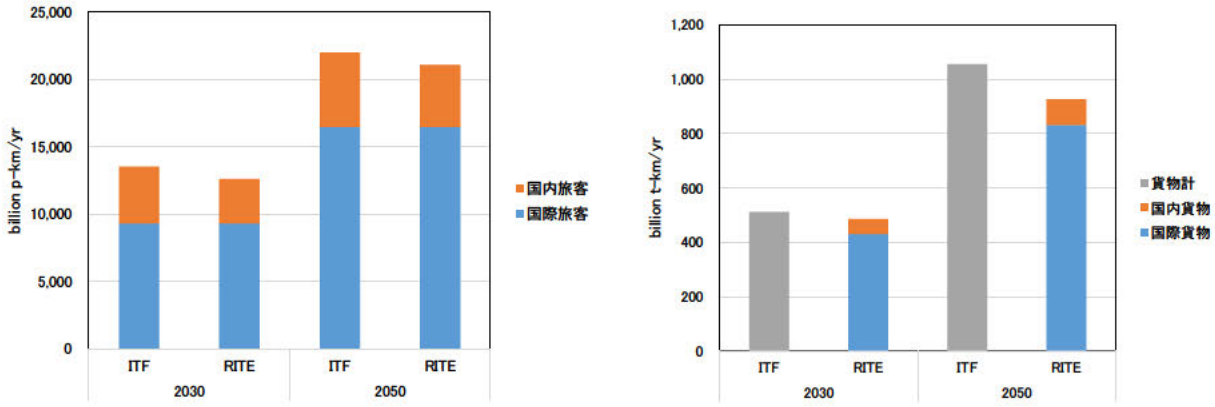


図 5.1.4-2 モデルにおける航空輸送需要将来見通しと ITF 見通しの比較(左:旅客、右:貨物)

上記の航空輸送需要総量に対し、各国状況に応じた距離帯別需要分布を想定して距離帯別輸送需要を推計する。距離帯別需要分布の推計においては、国際航空の分析と同様、距離情報を有するグローバルの実績値を利用することが望ましいが、現実には

数か国が独自で集計・公表している自国実績値のみが利用可能であった。そこで、これら利用可能な実績値を分析して国別の距離帯別需要分布の推計手法を検討し、世界全体に適用して距離帯別輸送需要を推計した。

推計の手順を以下に示す。まず、入手可能であった 7 か国（日本、米国、ドイツ、メキシコ、トルコ、インド、オーストラリア）5 時点（2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2017 年、インドのみ 2019 年も利用）の実績データ（旅客：25、貨物：19）からそれぞれの距離帯別需要分布を作成し、分布を決定する平均値 μ と標準偏差 σ をそれぞれ算定した。次に、分布は国土面積や GDP などにより影響を受けるとの想定を置き、平均値及び標準偏差と、国土面積や GDP との関係性を分析し、国土面積や GDP から分布の平均値及び標準偏差を推計する式を求めた。なお、分布については、正規分布と対数正規分布が考えられるが、各データから正規分布、対数正規分布それぞれに基づく確率密度関数を求め、この関数による分布と実データの分布との形状の比較及び誤差の状況から、対数正規分布に従うものとした。

実績データの平均値あるいは標準偏差と、7 か国の国土面積や GDP の関係性を回帰分析した結果、旅客、貨物とも、平均値は国土面積と、標準偏差は平均値との間に、線形の関係が示された。回帰分析から得られた平均値及び標準偏差の推計式を表 5.1.4-7 に示す。この推計式を DNE21+の 54 地域に適用して国・地域ごとの距離帯別分布を算定し、先述の需要総量に適用して距離帯別需要量を推計した。

表 5.1.4-7　国内航空需要の距離帯別分布推計式

	平均値（μ）	標準偏差（σ）
旅客	μ = 国土面積 ($1000km^2$) * 0.00006 + 6.383	σ = μ * 0.439 - 2.365
貨物	μ = 国土面積 ($1000km^2$) * 0.00012 + 6.280	σ = μ * 0.384 - 2.023

以上から得られた、国内航空輸送の距離帯別需要量の想定を図 5.1.4-3、図 5.1.4-4 に示す。

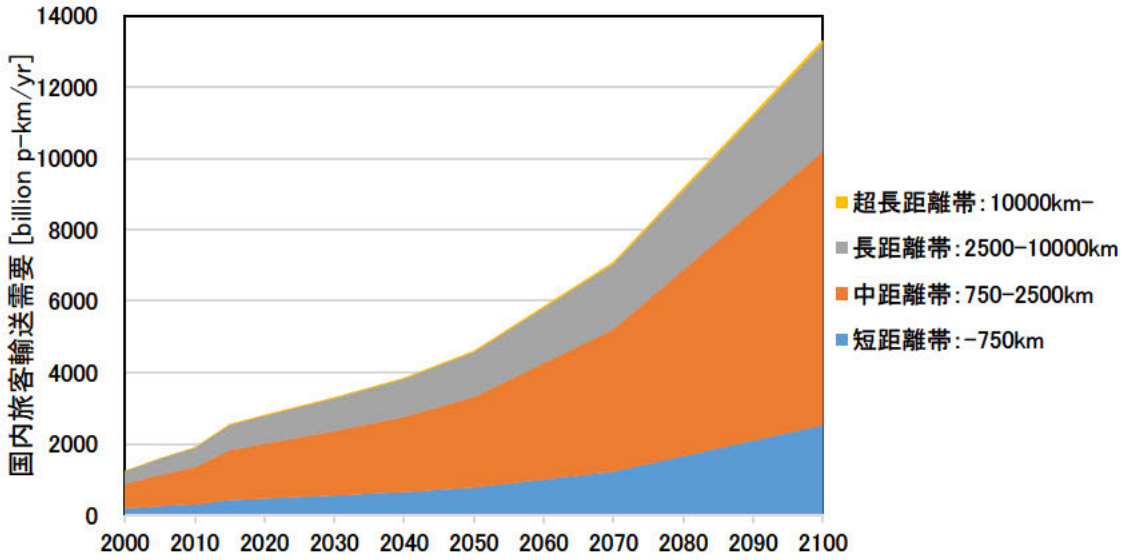


図 5.1.4-3 世界全体の国内旅客輸送需要の想定

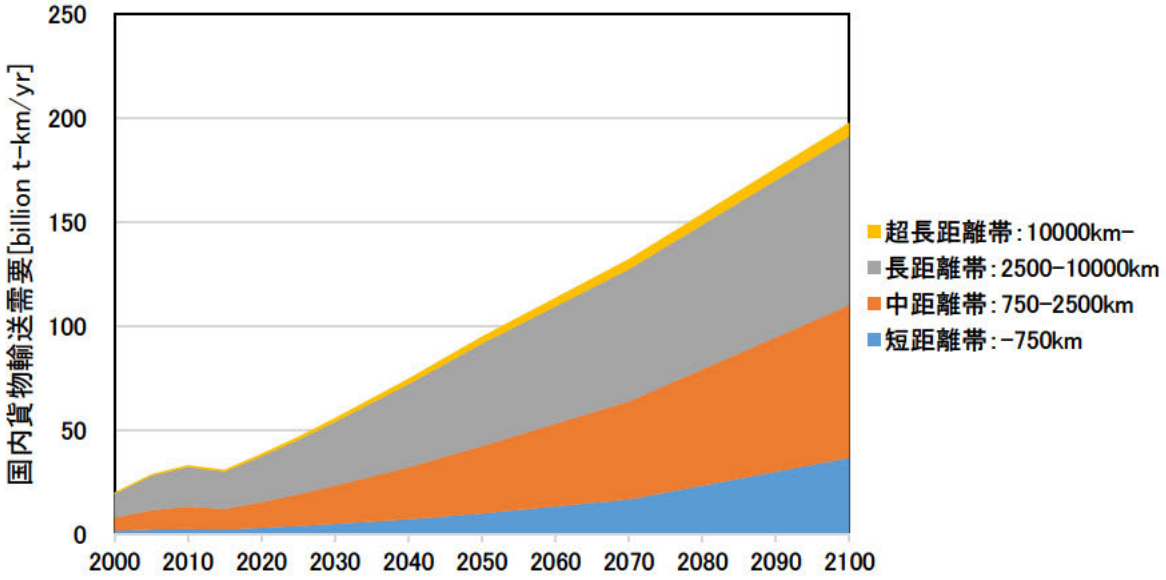


図 5.1.4-4 世界全体の国内貨物輸送需要の想定

国内航空輸送において、特に短距離帯の輸送は高速鉄道や鉄道、自動車などの他の輸送モードとの競合が考えられるため、更なる細分化などを行ったうえでの検討は今後の課題である。

(2) 合成メタン

合成メタンについては、昨年度、水素と CO_2 からサバティエ反応によってメタンを製造する方法をモデル化し、評価を行った。本年度は、5.1.3 節で述べた、水電解水素-サバティエ反応メタン合成よりも高いエネルギー効率でメタン合成ができる可能性があると期待されている、SOEC 共電解による合成メタン製造も新たにモデル化を行った。

表 5.1.4-8 は、水電気分解（水素製造）と SOEC 共電解（メタン製造）のエネルギー効率の想定を示している。SOEC 共電解による合成メタン製造は、メタン化反応装置からの排熱の有効利用を行うことにより通常の水素製造用の水電気分解より高いエネルギー効率でメタンが得られるとされているが、ここでは保守的に見積もり、両者のエネルギー効率は等しいと想定した。

表 5.1.4-9 は、水電気分解（水素製造）、メタン合成および SOEC 共電解（メタン製造）の設備費の想定を示している。SOEC 共電解（メタン製造）の設備費については十分な情報が得られなかったため、ここでは、水電気分解（水素製造）の設備費にメタン合成の設備費の 75%を加算した設備費を想定している（一体としたシステムとすることにより、個別の設備費よりも安価になると見込んだ）。

表 5.1.4-8　エネルギー効率の想定

	2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
水電気分解（水素製造）	64%	69%	74%	85%
SOEC 共電解（メタン製造）	64%	69%	74%	85%

表 5.1.4-9　設備費の想定（million US$/(ktoe/day)）

	2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
水電気分解（水素製造）	479	345	207	207
メタン合成（サバティエ反応）	182	182	182	182
SOEC 共電解（メタン製造）	616	482	344	344

(3) 合成液体燃料

合成液体燃料については、5.1.3 節で述べた FT 合成による水素からの製造のモデル化を行った。

表 5.1.4-10 は、合成燃料の熱量当たりの水素、電力、CO_2 の必要量の想定を示している。想定においては、文献 7)などを参考とした。但し、5.1.3 節でも述べたように、得られる生成物にはワックスなどエネルギー利用が困難な成分も多く含まれている。そこで、表 5.1.4-11 に示すように、表 5.1.4-10 のバランスから得られた生成物を実際に合成液体燃料として利用可能な割合を想定した。現状は 50%程度であるが、将来的には触媒組成の調整によって液体燃料の選択率を高めることが可能であると見込んでいる。

設備費については、文献 7)を参考に、表 5.1.4-12 に示すように想定した。

表 5.1.4-10　合成燃料当たりの必要エネルギーと CO_2 の想定

	2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
水素 (toe/toe)	1.25			
電力 (MWh/toe)	0.21			
CO_2 (tCO_2/toe)	3.02			

表 5.1.4-11　合成液体燃料として利用可能な割合

	2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
%	50	57	71	85

表 5.1.4-12　設備費の想定

	2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
$/kW_liquid	890	760	565	565

(4) アンモニア

表 5.1.4-13 は、アンモニア生産のエネルギー効率の想定を示している。アンモニア製造技術としては、従来からの技術であるガス、石炭からの製造と、電気分解の 3 種類を想定した。具体的なエネルギー効率については、文献 7)などを参考にしつつ、ガス及び石炭については低効率、中効率、高効率の 3 段階の技術レベルを想定した。また、ガス、石炭からの製造については CO_2 回収も想定し、その動力については同じく文献 7)などを参考にしつつ、表 5.1.4-14 に示す通り想定した。なお、CO_2 の回収率については 95%と想定している。

アンモニア製造設備および CO_2 回収設備の設備費については、表 5.1.4-15、表 5.1.4-16 に示すように想定した。想定においては、文献 7)などを参考とした。

アンモニアの利用技術については、本研究では石炭火力発電への混焼と専焼発電をモデル化した。アンモニア専焼発電の発電効率については、表 5.1.4-17 に示すように想定した。

アンモニア混焼発電および専焼発電の設備費は、表 5.1.4-18 に示すように想定した。混焼発電については、混焼のための追加設備の費用を示している。混焼率は、文献 8)などで検討されている 20%と、更に混焼率を高めた 60%の 2 種類を想定した。前者については文献 8)の検討に基づいて 2020 年の設備費を想定し、将来時点ではコスト低減が進むと見込んでいる。また、混焼率 60%については、設備費が混焼率 20%より 2.5%増になると見込んだ。専焼発電の 2020 年の設備費は文献 9)に基づいて想定し、混焼発電と同様に将来時点ではコスト低減が進むと想定している。

表 5.1.4-13　エネルギー効率の想定

		2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
ガス 低効率	ガス (toe/t-NH_3)	1.04	1.04	1.04	1.04
	電力 (MWh/t-NH_3)	0.083	0.083	0.083	0.083
ガス 中効率	ガス (toe/t-NH_3)	0.77	0.77	0.77	0.77
	電力 (MWh/t-NH_3)	0.083	0.083	0.083	0.083
ガス 高効率	ガス (toe/t-NH_3)	0.67	0.67	0.64	0.64
	電力 (MWh/t-NH_3)	0.083	0.083	0.083	0.083
石炭 低効率	石炭 (toe/t-NH_3)	1.35	1.35	1.35	1.35
	電力 (MWh/t-NH_3)	1.028	1.028	1.028	1.028
石炭 中効率	石炭 (toe/t-NH_3)	1.00	1.00	1.00	1.00
	電力 (MWh/t-NH_3)	1.028	1.028	1.028	1.028
石炭 高効率	石炭 (toe/t-NH_3)	0.87	0.87	0.83	0.83
	電力 (MWh/t-NH_3)	1.028	1.028	1.028	1.028
電気分解	電力 (MWh/t-NH_3)	10.5	10.5	9.2	9.2

表 5.1.4-14　CO_2回収動力の想定

	2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
電力 (MWh/tCO_2)	0.12	0.12	0.12	0.12

表 5.1.4-15　アンモニア製造設備費の想定（million US$/(kt-$NH_3$/day)）

		2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
ガス	低効率	145	145	145	145
	中効率	167	167	167	167
	高効率	251	251	251	251
石炭	低効率	233	233	233	233
	中効率	268	268	268	268
	高効率	402	402	402	402
電気分解		214	214	106	106

表 5.1.4-16　CO_2回収設備費の想定（million US$/(ktC/day)）

	2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
ガス	154	154	98	98
石炭	127	127	81	81

表 5.1.4-17　アンモニア専焼発電の発電効率の想定

	2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
% LHV	56	58	62	65

表 5.1.4-18　アンモニア混焼発電および専焼発電の設備費の想定（$/kW）

	2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
混焼追加設備 (混焼率 20%)	264	220	132	132
混焼追加設備 (混焼率 60%)	271	226	135	135
専焼発電	3040	3040	1444	1444

(5) DAC

DAC システムについては、5.1.3 節で述べたように、文献 10)を参考にモデル化を行い、高温(HT)利用の化学吸収液方式と、低温(LT)利用の固体吸着材方式の 2 種類を考慮した。

表 5.1.4-19 は DAC システムの CO_2回収量当たりのエネルギー消費量の想定を、表 5.1.4-20 は設備費の想定を示している。高温(HT)利用技術については、表 5.1.4-19 に示すように、CO_2 回収のためのエネルギーは電力のみと想定している。一方、低温(LT)利用技術については、熱と電力の両方が必要であり、熱については、天然ガスもしくは水素による供給が可能であると想定している。不確実性が大きいと考えられる技術進歩については、文献 10)の conservative と base case を参考に、将来の技術進歩を見込まない技術進歩低位ケースと、エネルギー消費量、設備費ともに改善を見込む技術進歩高位ケースの 2 種類を想定した。なお、大規模排出源からの回収エネルギーは、化

学吸収法で現状 2.5GJ/tCO_2程度、2030 年のターゲットは 1.5GJ/tCO_2とされており [11]、それと比べると、DAC の回収エネルギーは、技術進歩高位の 2050 年でも約 4.7GJ/tCO_2と、現状比で 2 倍程度、2030 年のターゲット比で 3 倍程度のエネルギーが必要との想定である。

表 5.1.4-19　DAC システムの CO_2 回収量当たりエネルギー消費量の想定

			2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
高温 (HT)	技術進歩低位	電力 (kWh/tCO_2)	1535	1535	1535	1535
	技術進歩高位	電力 (kWh/tCO_2)	1535	1458	1316	1235
低温 (LT)	技術進歩低位	熱 (GJ/tCO_2)	6.3	6.3	6.3	6.3
		電力 (kWh/tCO_2)	250	250	250	250
	技術進歩高位	熱 (GJ/tCO_2)	6.3	5.4	4.0	3.3
		電力 (kWh/tCO_2)	250	225	199	147

表 5.1.4-20　DAC システムの設備費の想定（Euro2016/(tCO_2/yr)）

		2020 年	2030 年	2050 年	2100 年
高温 (HT)	技術進歩低位	815	815	815	815
	技術進歩高位	815	378	222	163
低温 (LT)	技術進歩低位	730	730	730	730
	技術進歩高位	730	338	199	147

参考文献（第 5.1.4 節に関するもの）

1) Clean Sky 2 and FCH2, Hydrogen-powered aviation, a fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 (2020)
2) Airbus, Zero Emission flight https://www.airbus.com/innovation/zero-emission.html
3) IEA World Energy Balances (2020)
4) ICAO Annual Report of the Council (2019)
5) ICAO, 2019 Environmental Report (2019)
6) ITF Transport Outlook (2019)

7) IEA, The Future of Hydrogen (2019)
8) 電源開発株式会社、火力発電燃料としての CO_2 フリーアンモニアサプライチェーンの技術検討 (2019)
9) 燃料アンモニア導入官民協議会、中間取りまとめ (2021) https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/nenryo_anmonia/pdf/20200208_1.pdf
10) Fasihi et al., “Techno-economic assessment of CO_2 direct air capture plants”, Journal of Cleaner Production 224 (2019)
11) 経済産業省、カーボンリサイクル技術ロードマップ (2019)

5.2 Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)の更新

5.2.1 鉄鋼部門

これまで、2015 年の粗鋼生産量実績値まで参照しつつ作成した粗鋼生産シナリオ（およびスクラップ電炉鋼の上下限シナリオ）を DNE21+にて参照してきた。2016 年以降について中国、インド、ベトナムは生産規模の伸びが堅調である一方、日米欧は一貫製鉄所の集約化、高炉の閉鎖などが相次いでいる。また 2020 年は（中国を除くほぼ全ての地域で）COVID-19 の影響が顕著であり粗鋼生産量が低下した[1)2)]。2021 年以降についても地域によって COVID-19 の影響が尾を引くことも予想される。

本報告書では以上の状況を認識しつつ、2020 年の粗鋼生産量（およびスクラップ電炉鋼）の実績値（速報値）を参照しつつ、各 SSP のシナリオを更新した。SSP2 の粗鋼生産シナリオを図 5.2.1-1 に示す。足元において中国の粗鋼生産量規模が大きく、長期的にはインドの粗鋼生産量が増加するシナリオと言える。なお従来の SSP2 粗鋼生産シナリオと比較すると足元における中国の生産規模が 3 億 t/y ほど大きい一方、その分、鉄鋼蓄積量の飽和が早期に進むため、長期的には図 5.2.1-1 に示した新シナリオの方が粗鋼生産規模は低い（粗鋼生産量世界計は 2050 年 21.7 億 t から 21.3 億 t、2100 年 23.6 億 t から 23.0 億 t へそれぞれ更新）。

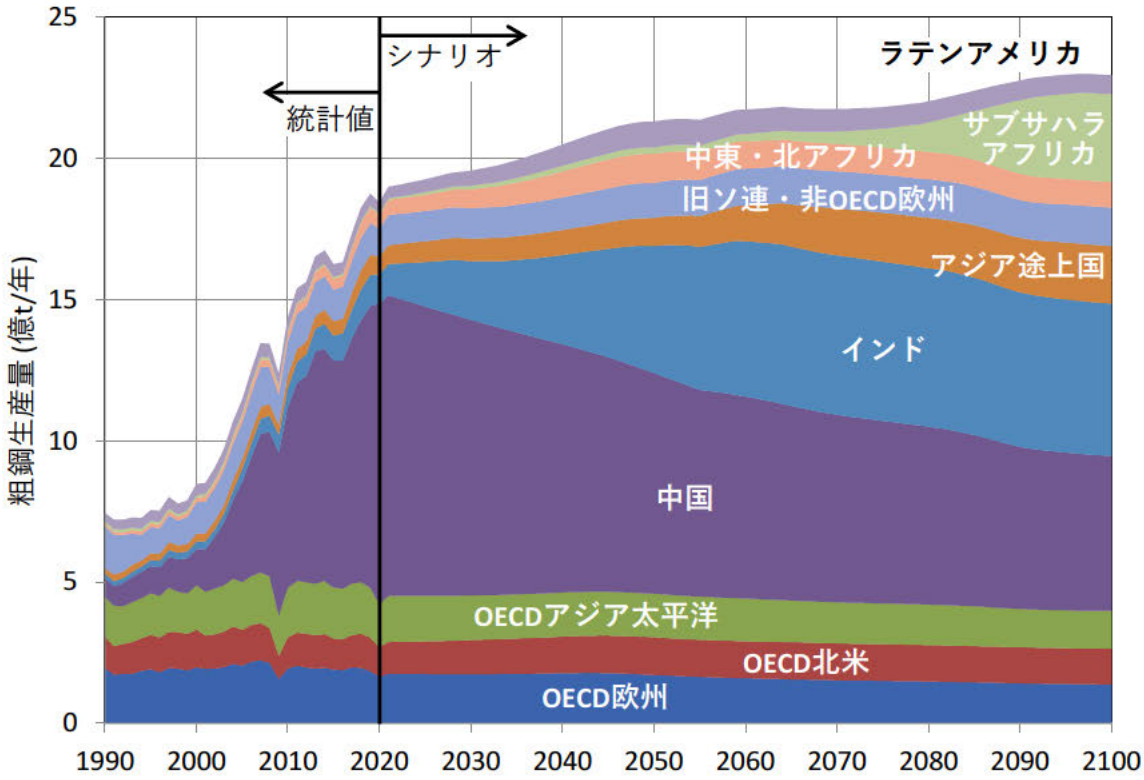


図 5.2.1-1 粗鋼生産シナリオ（SSP2・新）

SSP2 に加え、他の SSP の粗鋼生産シナリオについても更新を行った（図 5.2.1-2）。SSP1 と SSP4 は同じ水準の粗鋼生産規模をたどる。ただし、SSP1 は所得上昇・人口飽和が早期に進み一人当たり鉄鋼蓄積量が飽和し、結果的に粗鋼生産量が低下する。これに対し、SSP4 は低所得人口比率が高く一人当たり鉄鋼蓄積量が相対的に低位のまま粗鋼生産量が低下するという違いがある。SSP5 は 2050 年の粗鋼生産規模が 23 億 t と 5 つの SSP の中で最大の規模となるが、2100 年には鉄鋼蓄積量の飽和が進み粗鋼生産規模は SSP2 や SSP3 よりも低い水準となる。

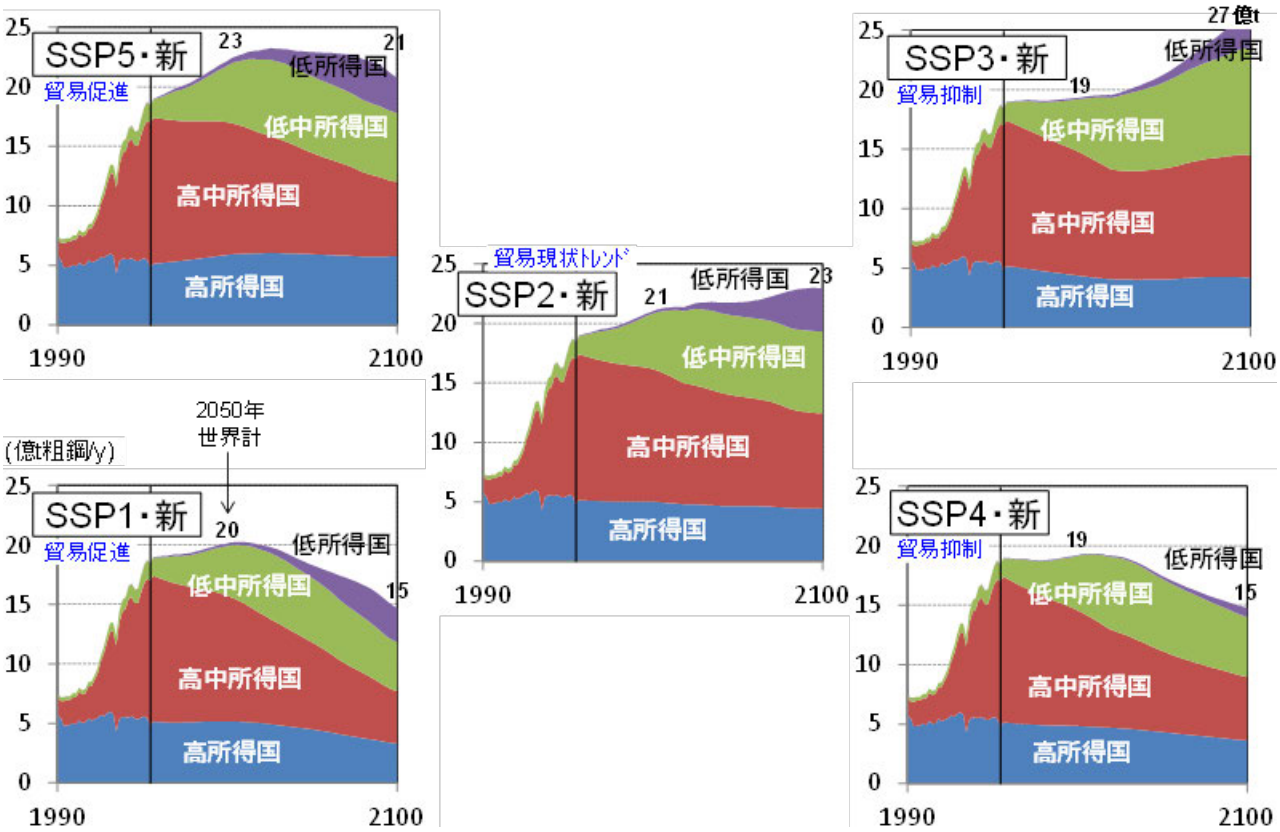


図 5.2.1-2 粗鋼生産シナリオ（SSP1～5・新）

カーシェア・ライドシェアが拡大した場合の粗鋼生産シナリオ（SSP1、SSP2）を図 5.2.1-3 に示す。シェア進展に伴う自動車生産台数の減少、さらには自走式立体駐車場の新設減少を考慮し粗鋼生産シナリオを作成した。自走式立体駐車場は世界で 4.8 億台分の規模となる見通しであるが、シェア進展によりこの半分の 2.4 億台分の自走式立体駐車場の新設が不必要になると想定した。さらに自走式立体駐車場の使用期間（寿命）を 30 年と想定した。以上の想定によりシェア進展に伴い鉄鋼製品の需要が年 1,800 万 t 減少することとなる。

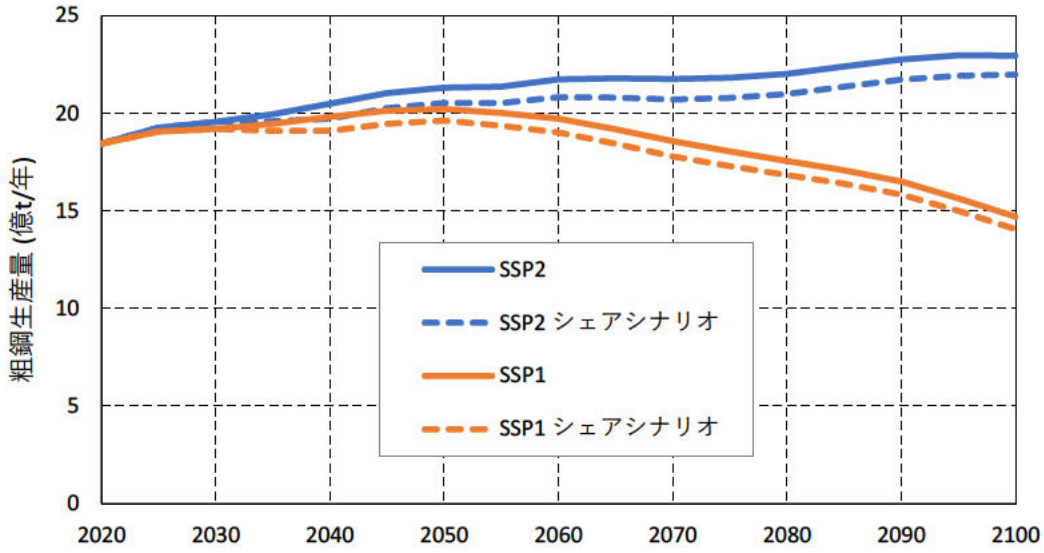


図 5.2.1-3 カーシェア・ライドシェアが進展した場合の粗鋼生産シナリオ

補足：シェアシナリオは、シェアシナリオ A・ベース・標準(1 台当たりの移動距離が max3 倍)のケースを参照した。

参考文献（第 5.2.1 節に関するもの）

1) worldsteel: Steel Statistical Yearbook 2020, Extended version (2020)

2) worldsteel: Press releases, https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/, (accessed 2021-02-25)

5.2.2 セメント部門

セメント生産シナリオについて、これまで継続的に更新を行ってきた。2021 年 3 月 1 日時点で入手可能なセメント生産量として、セメント生産主要国は 2020 年速報値（推計）のデータまで入手可能である [1)]。またセメント生産主要国以外は USGS[1)]に基づくと 2017 年実績まで入手可能である。以上の実績データを参照しつつ作成・更新した SSP2 のセメント生産シナリオを図 5.2.2-1 に示す。中国は既に生産量のピークを迎えたとするシナリオであり、長期的にはインド、（中印を除く）アジア途上国の生産量が増加するシナリオである。

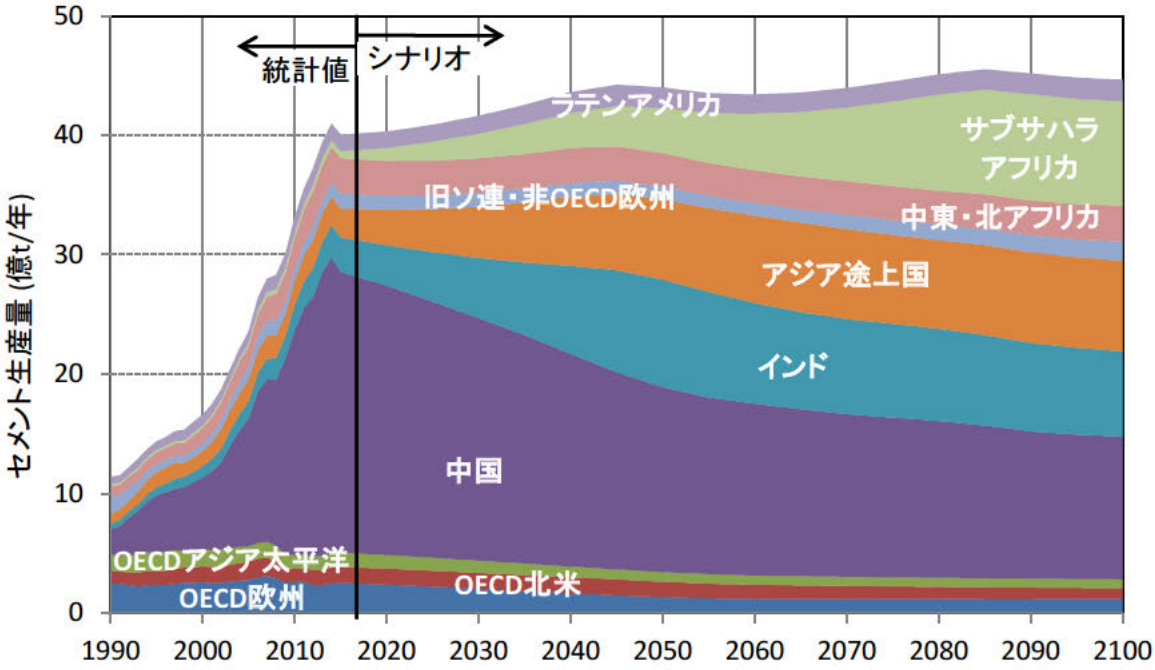


図 5.2.2-1 セメント生産シナリオ（SSP2）

補足：中国、インド、米国、日本、インドネシア、ブラジルなどのセメント生産主要国については 2020 年速報値（推計）[1]も参照した。ただし、セメント生産主要国以外は 2017 年の生産実績を参照しており、図中では 2017 年に便宜上線を記載した。

SSP2 に加え、他の SSP のセメント生産シナリオを図 5.2.2-2 に示す。SSP1 と SSP4 のセメント生産量世界計に着目すると、これらは同様の水準のセメント生産規模をたどる。ただし、SSP1 は所得上昇・人口飽和が早期に進み一人当たりセメント蓄積量が飽和し、結果的にセメント生産量が低下する。これに対し、SSP4 は低所得人口比率が高く一人当たりセメント蓄積量が相対的に低位のままセメント生産量が低下するという違いがある。SSP5 は一人当たりセメント蓄積量が早い段階で飽和するが、この SSP5 と対照的に SSP3 は人口が多く一人当たりセメント蓄積量の飽和は遅れ、2100 年時点でもセメント生産量が増加傾向となるシナリオである。

カーシェア・ライドシェアが拡大した場合のセメント生産シナリオ（SSP1、SSP2）を図 5.2.2-3 に示す。シェア進展により自走式立体駐車場の新設が減少するケースを想定した。自走式立体駐車場は世界で 4.8 億台分の規模となる見通しであるが、シェア進展によりこの半分の 2.4 億台分の自走式立体駐車場の新設が不必要になると想定した。さらに自走式立体駐車場の使用期間（寿命）を 30 年と想定した。以上の想定によりシェア進展に伴いセメントの需要が年 1,200 万 t 減少することとなる。

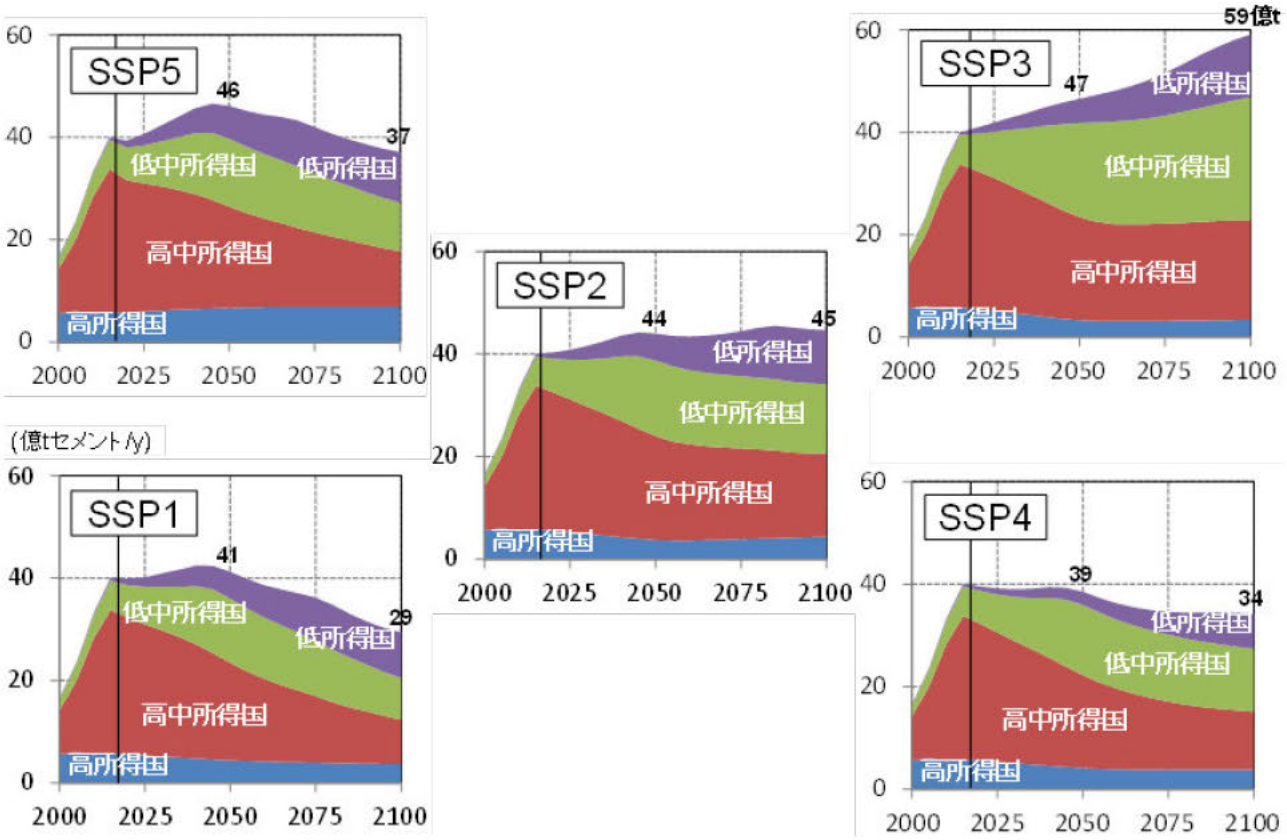


図 5.2.2-2 セメント生産シナリオ（SSP1～5）

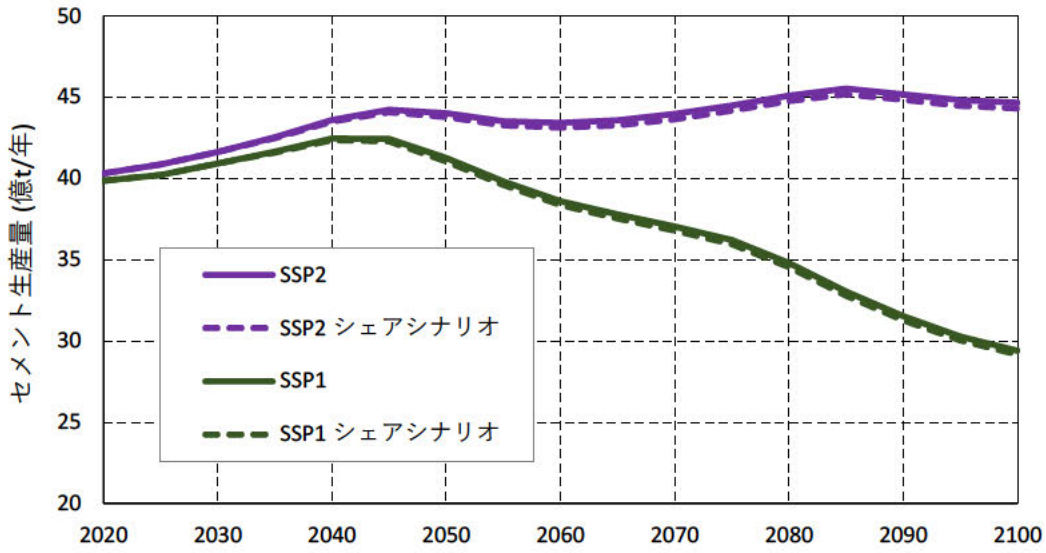


図 5.2.2-3 カーシェア・ライドシェアが進展した場合のセメント生産シナリオ

補足：シェアシナリオは、シェアシナリオ A・ベース・標準(1 台当たりの移動距離が max3 倍)のケースを参照した。

参考文献（第 5.2.2 節に関するもの）

1) USGS, Cement Statistics and Information (各年)
https://www.usgs.gov/centers/nmic/cement-statistics-and-information, (accessed 2021-03-01)

5.3 長期緩和策分析とそのインプリケーション

本節では、5.1.4 節で述べた、各種技術動向等を踏まえて改良した世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用い、パリ協定長期目標に対応した排出削減シナリオについて行った分析について述べる。分析は、パリ協定の長期目標に対応したシナリオ（長期的には正味ゼロ排出）、そして、各種技術の不確実性に対応したシナリオについて分析した。これによって、正味ゼロ排出を実現する技術ポートフォリオとそのときの排出削減費用、そして正味ゼロ排出に至るトランジションに注目した、世界のエネルギーシステムとして整合的な姿を定量的に示す。

5.3.1 長期緩和策分析

(1) 分析シナリオの想定

表 5.3.1-1 に想定した分析シナリオを示す。ここでは、特段の排出制約を想定しないベースライン、2℃目標に対応した 2 種類の排出削減シナリオと、2100 年の気温上昇を 1.5℃未満とする排出削減シナリオを想定し、分析を行った。技術シナリオの見通しについては、エネルギー供給側の技術として太陽光発電および風力発電を取り上げ、コスト低減について 2 種類のシナリオを想定し、分析を行った。エネルギー需要側の技術としては、完全自動運転車が実現し、カーシェアリング・ライドシェアリングが誘発され、その大規模な普及が進むシナリオ（シェアモビリティ進展シナリオ）を想定した（5.1.1 節参照）。更に、負排出技術については 5.1.4 節で述べたように新たに DAC をモデル化し、2100 年 1.5℃未満のシナリオについては、DAC 実現を見込んだ場合の評価を行った。なお、社会経済シナリオとしては、中位的な SSP2 を想定した。

表 5.3.1-1 分析シナリオの想定

シナリオ名	世界排出シナリオ	【供給側】再エネコスト（太陽光発電、風力発電コスト）	【需要側】シェアモビリティ進展（完全自動運転車実現）	【負排出技術】大気CO_2直接回収技術（DAC）
REF_1	ベースライン（特段のCO_2排出制約なし）	標準	想定せず	想定せず
2DS_1	2℃未満（>50%）：IEA ETP2017の[2DS]相当	標準	想定せず	想定せず
2DS_2		低コスト		
2DS_3			シェアモビリティ進展（完全自動運転車実現）	
B2DS_2	2℃未満（>66%）：IEA ETP2017の[B2DS]相当	低コスト	想定せず	想定せず
B2DS_3			シェアモビリティ進展（完全自動運転車実現）	
B1.5D_2	2100年1.5℃未満（>66%）：気温のオーバーシュート有	低コスト	想定せず	想定せず
B1.5D_3			シェアモビリティ進展（完全自動運転車実現）	
B1.5D_3_DAC				DAC実現（低位コスト）

本分析で想定した排出削減シナリオを図 5.3.1-1（CO_2排出量）および図 5.3.1-2（GHG排出量）に示す。2℃未満を 50%程度の確率で達成できるシナリオは、IEA ETP2017[1)]の 2DS シナリオ相当であり、このとき、2100 年頃に CO_2 排出量がほぼゼロとなる。GHG排出量では、2050 年に 2010 年比で▲40%相当のシナリオである。2℃未満を 66%程度の確率で達成できるシナリオは、IEA ETP2017[1)]の B2DS シナリオ相当であり、このとき、2060 年頃に CO_2 排出量がほぼゼロとなる。また、GHG 排出量は、2050 年に 2010 年比で▲70%程度であり、2100 年には GHG 排出量でもほぼゼロとなる。気温上昇については、確率 50%換算すると（期待値としては）、2100 年の気温上昇は 1.53℃上昇程度である。2100 年の気温上昇を 1.5℃未満（66%確率）とするシナリオは、2050 年頃に CO_2 排出量をほぼゼロとし、GHG 排出量では 2065 年頃にほぼゼロとするシナリオである。2100 年の気温上昇は、確率 50%換算すると（期待値としては）、1.3℃上昇程度と見込まれる。

なお、本排出削減シナリオの想定では、いずれのシナリオでも、2030 年までについては、各国が提出している国別貢献 NDCs を各国が順守するものと想定して分析を行った。それ以降の期間については世界全体の排出上限を費用最小化（限界削減費用均等化）で達成するものと想定して分析を行った。なお、国際海運部門と国際航空部門については、2030 年までは特段の排出制約を課さず、2030 年以降の排出上限に向けて費用効率的な対策を取るのみとした。

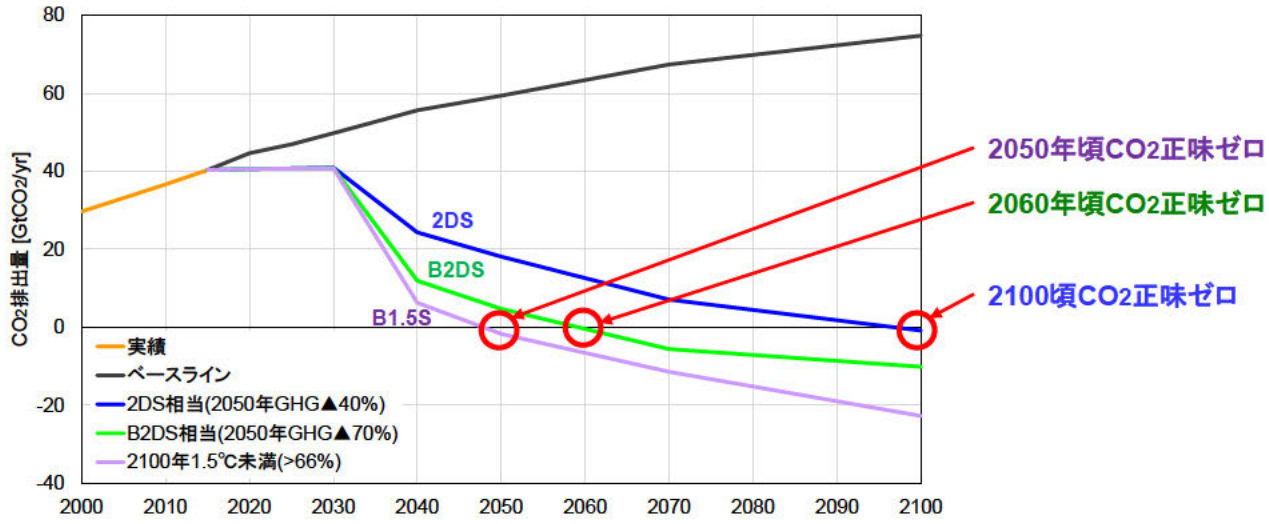


図 5.3.1-1 ベースラインの世界排出量と想定した 2℃、1.5℃排出シナリオ（CO_2）

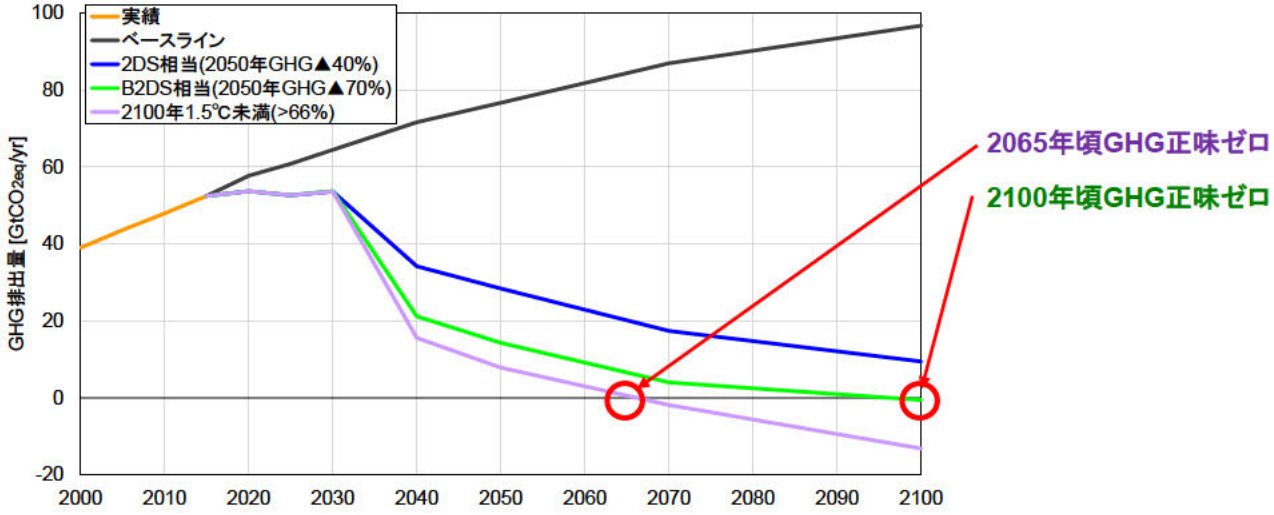


図 5.3.1-2 ベースラインの世界排出量と想定した 2℃、1.5℃排出シナリオ（GHG）

(2) モデル分析結果

表 5.3.1-2 に 2050 年における各シナリオの世界の排出削減費用を示す。2℃、>50%確率（2DS 相当）の排出シナリオでは、標準シナリオ（シナリオ 1）の限界削減費用が 160 \$/tCO_2 であるのに対し、再エネの更なるコスト低減を想定したシナリオ（シナリオ 2）では 152 \$/tCO_2 に低下し、更にカーシェアリング・ライドシェアリングの進展を想定したシェアモビリティ進展シナリオ（シナリオ 3）では 142 \$/tCO_2 にまで低下する。これでも、世界すべての国が限界削減費用均等化を想定したシナリオであるため、実現が容易とまでは言えないが、標準シナリオに比べると、かなり限界費用が低下し、達成の困難さは相当緩和される。そして、限界削減費用の低下とともに、排出削減費用についても大きく低下する。カーシェアリング・ライドシェアリングの進展を想定したシナリオ（シナリオ 3）では、ベースラインシナリオ（特段の排出削減無し）のシナリオ 1 との比較ではネガティブコストと算定された。2℃シナリオ実現のための排出削減費用は要するものの、自動車の車両コストは大きいため、完全自動運転車実現に

よって誘発されるシェアリングにより、それを超えてコストが低下し得る。正に、グリーン成長の可能性を示すシナリオである。

2℃、>66%確率の排出シナリオ（B2DS 相当）では、再エネの更なるコスト低減を見込んだシナリオ 2 の限界削減費用は 394 $/tCO$_2$ と推計された。これは 2℃、>50%確率の排出シナリオ（2DS 相当）に対して、2.6 倍程度となっている。カーシェアリング・ライドシェアリングの進展を想定したシナリオ（シナリオ 3）では 346 $/tCO$_2$ にまで低下する。ただ、それでも、2DS 相当シナリオに比べ、B2DS 相当のシナリオでは 2 倍以上の限界削減費用が推計される。

2100 年 1.5℃未満の排出シナリオになると、DAC の利用を想定しない場合、実行可能解は得られなかった。DAC 実現を見込み、その利用を可能とした B1.5D_3_DAC においては、CO$_2$ 限界削減費用は 137 $/tCO$_2$（DACCS の費用に相当する）と評価され、DAC の利用を想定していない 2DS_3 とほぼ同程度の水準と評価されている。

表 5.3.1-2 2050 年の世界の排出削減費用

	2℃、>50%			2℃、>66%		1.5℃ in 2100 (OS)、>66%		
	2DS_1 (標準)	2DS_2 (再エネコスト低)	2DS_3 (+カーシェア)	B2DS_2 (再エネコスト低)	B2DS_3 (+カーシェア)	B1.5D_2 (再エネコスト低)	B1.5D_3 (+カーシェア)	B1.5D_3_DAC
CO$_2$限界削減費用 ($/tCO$_2$)	160	152	142	394	346	実行可能解無し	実行可能解無し	137
CO$_2$削減費用 (billion US$/yr)	1885	1411	ネガティブ費用	4894	ネガティブ費用	実行可能解無し	実行可能解無し	ネガティブ費用

図 5.3.1-3 には、各シナリオにおける部門別の世界の CO$_2$ 排出量を示す。

まず、特段の排出削減を想定しないベースラインシナリオであるが、SSP2_1 では、世界排出量は 2050 年に 62 GtCO$_2$/yr、2100 年には 82 GtCO$_2$/yr 程度に上昇すると推計される。次に、2℃シナリオであるが、排出削減が厳しくなるにつれ、各種部門で様々な対策を導入することが必要になる。具体的な対策の導入状況については後に示すが、まず発電部門での削減（再エネ、原子力、CCS 等）、また、植林での CO$_2$ 固定、運輸部門での HV, PHV の拡大等が見られる。更に厳しい削減が必要となると、BECCS、鉄鋼部門での CCS、自動車の EV, FCV 化等が費用効率的になる。より一層厳しく、正味ゼロから負 CO$_2$ 排出となると、運輸部門トラックの FCV 化、メタネーション利用等が費用効率的になる。これらの順番は、それぞれの技術の単位 CO$_2$ 排出削減費用の高さを概ね表してもいる。

シェアモビリティ進展シナリオ（シナリオ 3）では、同じ排出削減シナリオであっても、それを達成するための CO$_2$ 限界削減費用が低下するため、特に 2050 年頃の発電での排出削減を緩和する。例えば、2DS 相当シナリオでは、標準シナリオ（シナリオ 1）

では発電部門からの排出を正味で負としているのに対し、シェアモビリティ進展シナリオ（シナリオ 3）では発電部門からの正の排出が認められる結果である。

DAC の利用を考慮している 1.5℃シナリオにおいては、2050 年、2100 年それぞれでおよそ 20 $GtCO_2/yr$、40 $GtCO_2/yr$ と大規模に DACCS が導入されており、負の排出としてキャンセルアウトされるため民生部門等の排出量は DAC の利用を想定していない B2DS より多くなっている。

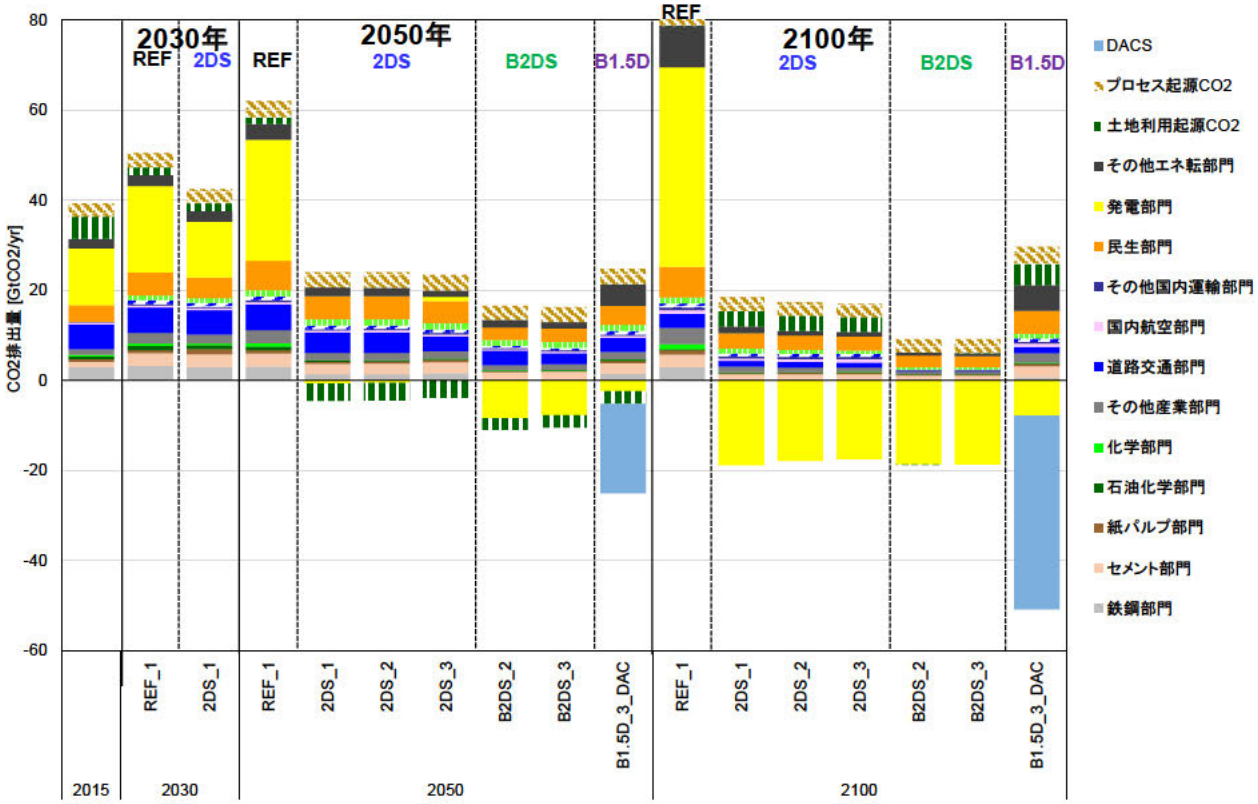


図 5.3.1-3 世界の部門別 CO_2 排出量

図 5.3.1-4 には、各シナリオにおける世界の一次エネルギー供給量を示す。

ベースラインにおいては、化石燃料、特に石炭の経済合理性が高く、大きく増大する結果が見られる。一方、2℃シナリオについては、2℃、>50%確率の 2DS 相当シナリオであっても、2050 年には石炭の利用は相当小さくなり、また、多くは CCS 利用といった結果が見られる。

図 5.3.1-5 は、各シナリオにおける世界の発電電力量を示している。

ベースラインにおける世界の発電電力量の伸びは一次エネルギー全体に比べて大きく、2050 年に約 52000 TWh/yr（2015 年比 2.1 倍）、2100 年に 97000 TWh/yr（2015 年比 4.0 倍）と見込まれており、その多くは石炭火力発電に大きく依存した電源構成になると評価されている。

2℃シナリオでは、2030 年に向けては石炭火力からガス火力への転換が最も大きな対策と言える。2050 年以降は、CCS の利用が費用効率的となってくる。ガス火力への転換は、2030 年に向けては主たる対策であったが、CCS なしの大規模火力発電の利用は

困難になり、2050 年時点で 2DS 相当の水準であればコジェネレーションの役割の重要性が増すことが確認できる。また、再エネや原子力発電の拡大も費用効率的な対策として導入が進む。BECCS 利用の増大も必要となり、特に B2DS 相当の水準では 2050 年時点で石炭火力発電を上回る発電電力量となっている。ただし、現実的にこのような大規模な BECCS 利用が可能かどうかは検討、議論が必要と考えられる。

シェアモビリティ進展シナリオにおいては、後に示すように運輸部門での排出削減が進むことから、発電部門に求められる排出削減が相対的に緩やかになり、特に 2050 年前後においては BECCS の役割が低下する。また、1.5℃シナリオにおいては DAC の利用を考慮していることから CO_2 限界削減費用は低下しており（表 5.3.1-2）、相対的に費用が高い BECCS の導入量は B2DS に比べて減少し、CCS 無しの大規模ガス火力の利用も見られる。

太陽光発電はコスト標準シナリオ（シナリオ 1）でも大規模に導入されるが、低コストシナリオ（シナリオ 2）では水素製造用も含めて普及を更に進める結果である。シナリオ 3 では限界削減費用が相対的には低くなるが、その場合でも相当高い限界費用となっている（表 5.3.1-2）。そもそもそのような高い費用で世界全体の対策が実現できるかは疑問もあり、これらのモデル分析結果で見られた対策は、その費用が前提となっていることを認識しておく必要がある。エネルギー需要サイドの更に広範な技術革新やそれに誘発される社会変化等によって、一層、経済自律的にエネルギー需要が低下する場合には、限界削減費用が低下して、同じ 2℃シナリオ、1.5℃シナリオであったとしても、エネルギー構成も更に異なったポートフォリオがあり得るかもしれないことに注意が必要である。

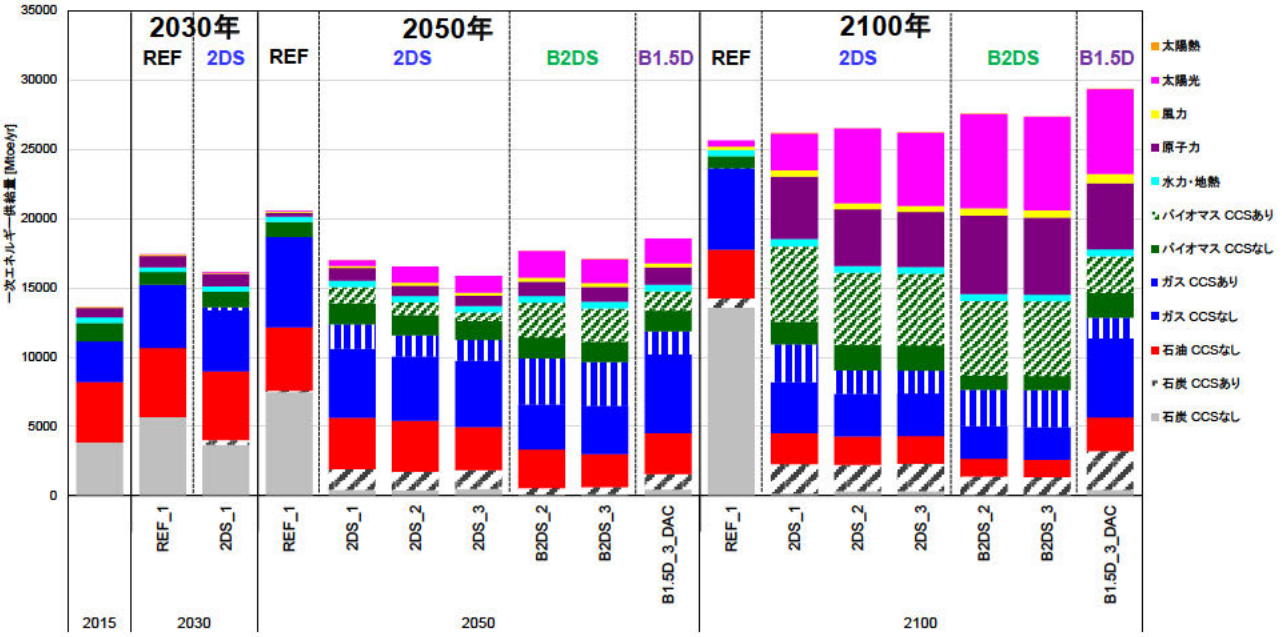


図 5.3.1-4　世界の一次エネルギー供給量

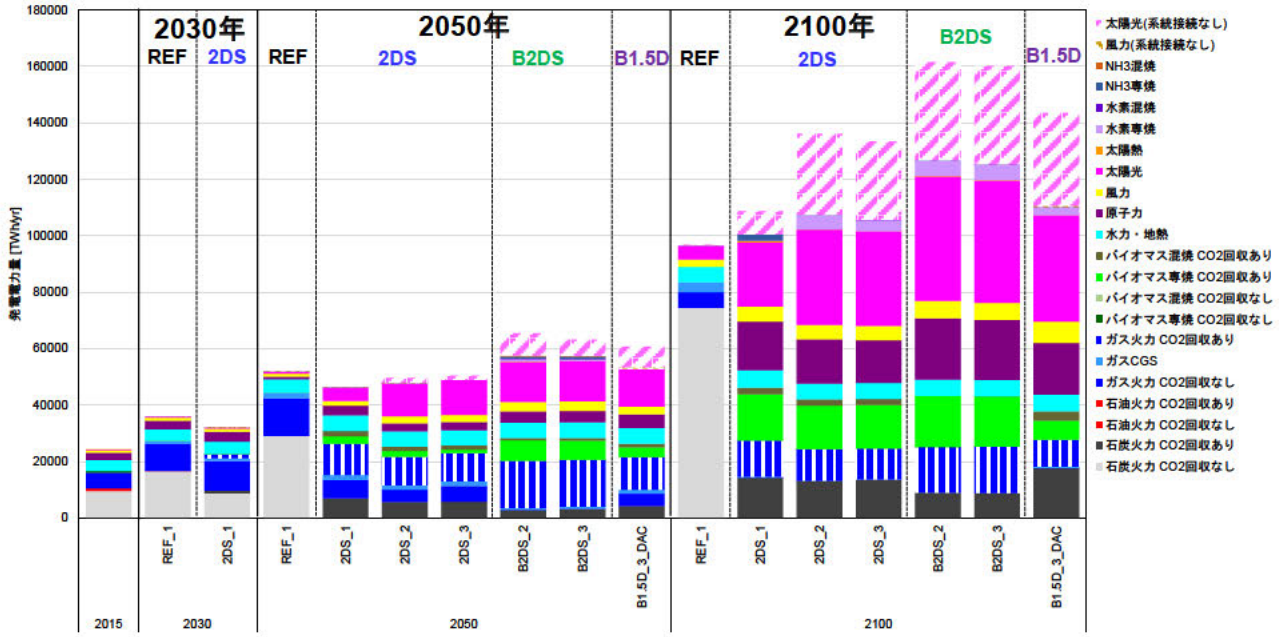


図 5.3.1-5 世界の発電電力量

図 5.3.1-6 に、石油製品別の石油精製量を示す。発電電力量と異なり、石油精製はベースラインでも将来に向けて減少する見通しである。2℃シナリオや 1.5℃シナリオになると、これまで燃料の大部分を石油に依存してきた運輸部門においても、後に示すように、石油系燃料から電力、水素、ガス、バイオ燃料などの代替燃料への転換が進むため、石油精製量は更に減少することとなる。

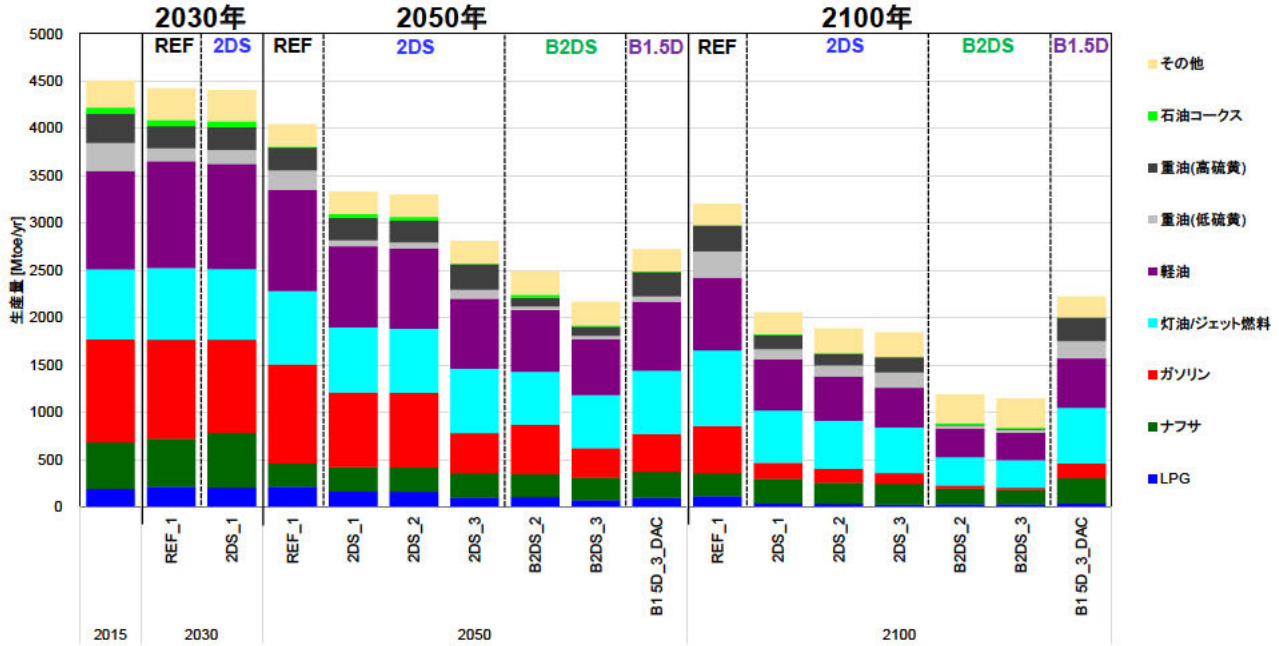


図 5.3.1-6 世界の石油精製量

次に、エネルギー需要部門の分析結果について述べる。図 5.3.1-7 に、産業部門の最終エネルギー消費量を示す。産業部門については、いずれのシナリオにおいても、電力、ガス比率の増大が見られる。2℃シナリオや 1.5℃シナリオでは、2050 年、2100 年では鉄鋼部門における高炉・転炉法から直接水素還元製鉄への転換（図 5.3.1-8）や、セメント生産における石炭からガスへの転換もある（図 5.3.1-10）ことから、石炭利用が大きく減少する。

鉄鋼部門については、本分析では 2031 年から直接水素還元製鉄が利用可能と想定しており、図 5.3.1-8 に示すように B2DS シナリオでは 2050 年に高炉・転炉法による粗鋼生産をほぼゼロとする等、劇的な変化を見込んでいる。直接水素還元製鉄は現在開発中の技術であり、その実現時期によって結果は大きく変わり得ることに注意されたい。また、セメント部門については、図 5.3.1-9 に示すように CCS が導入されるシナリオにおいては、CO_2 回収のための動力が必要となるため、ベースライン（REF）に比べて寧ろエネルギー消費量が増加すると評価されている（図 5.3.1-10）。コンクリートに関しては CCU を考慮しているが、2℃シナリオ、1.5℃シナリオ共に経済合理的であるとして導入されている（図 5.3.1-11）。

なお、全体に占める割合は大きくないものの、2100 年のように CO_2 限界削減費用が tCO_2 当たり数百ドルといった水準であれば、メタネーションも費用効率的であるとして導入されている。

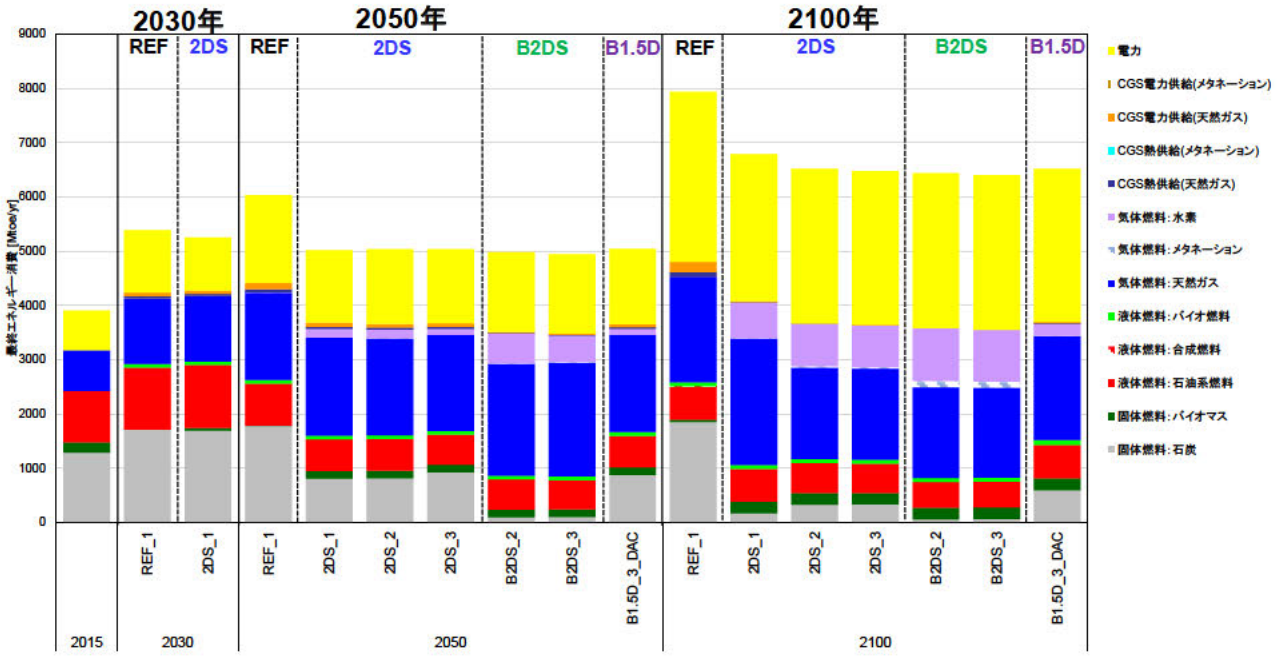


図 5.3.1-7　世界の産業部門の最終エネルギー消費量

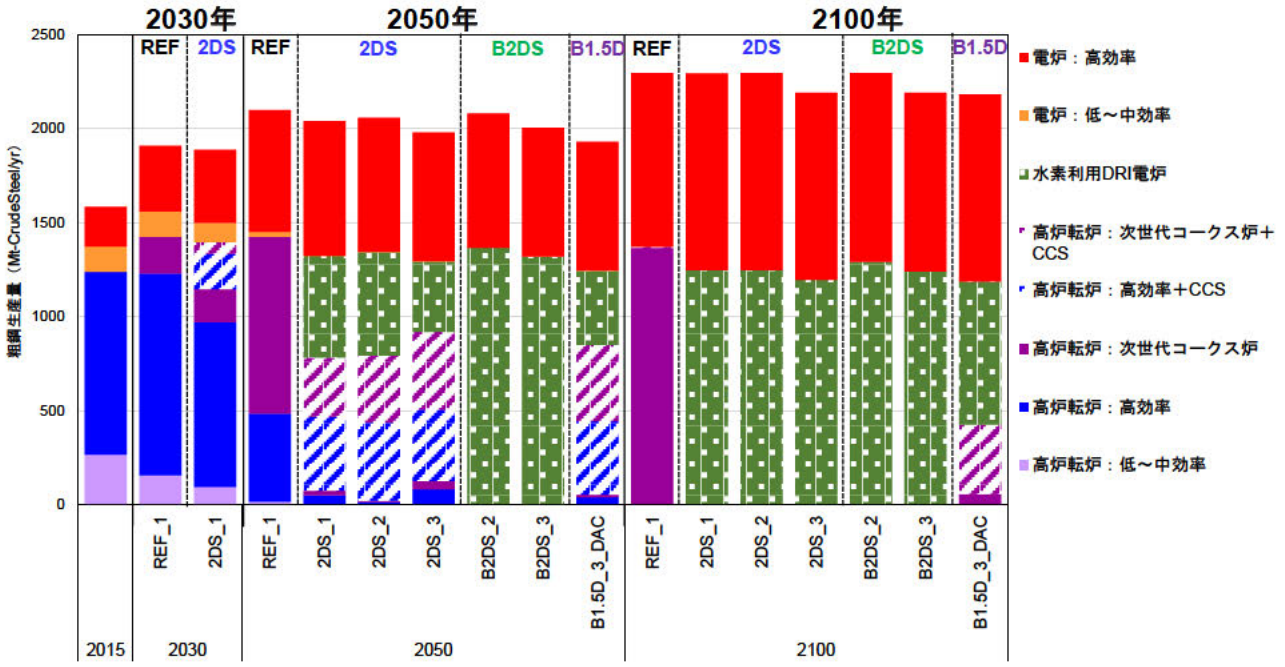


図 5.3.1-8 世界の技術別粗鋼生産量

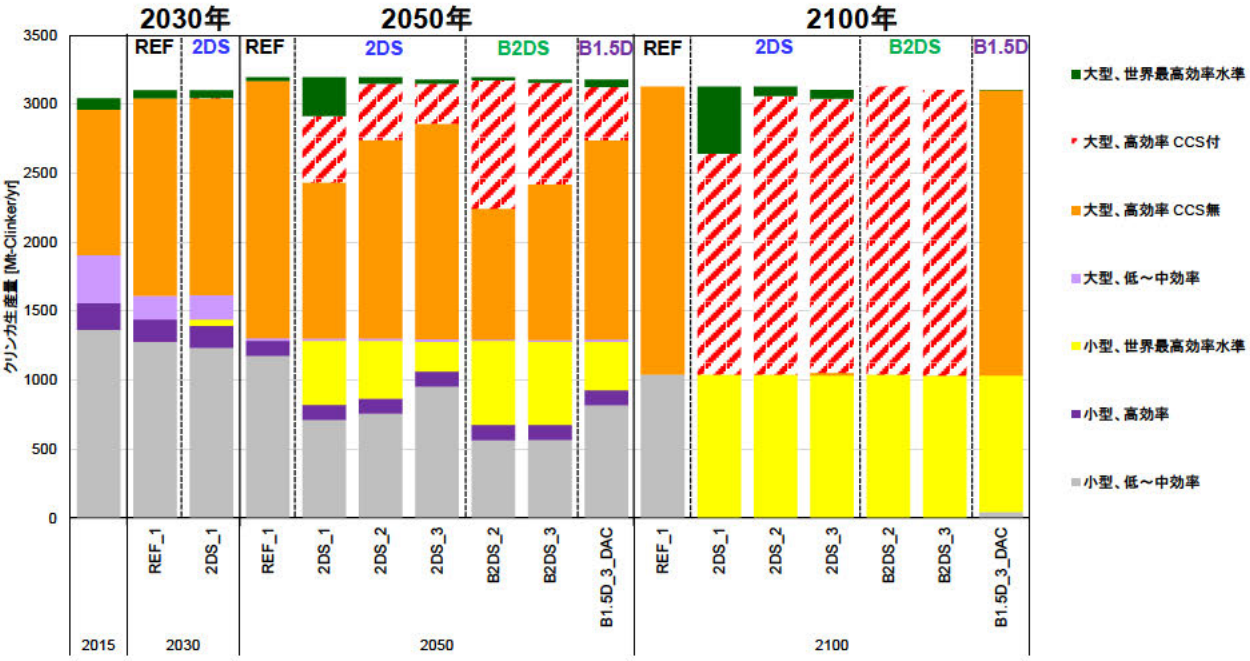


図 5.3.1-9 世界の技術別クリンカ生産量

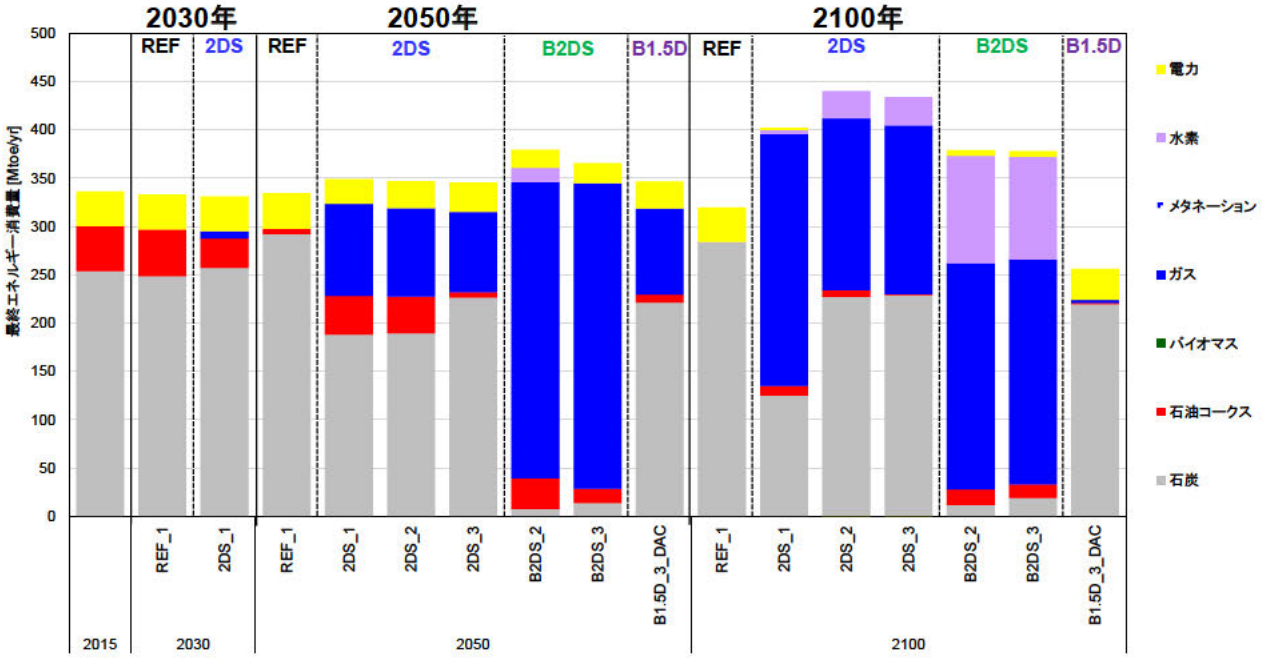


図 5.3.1-10 世界のクリンカ生産用エネルギー消費量

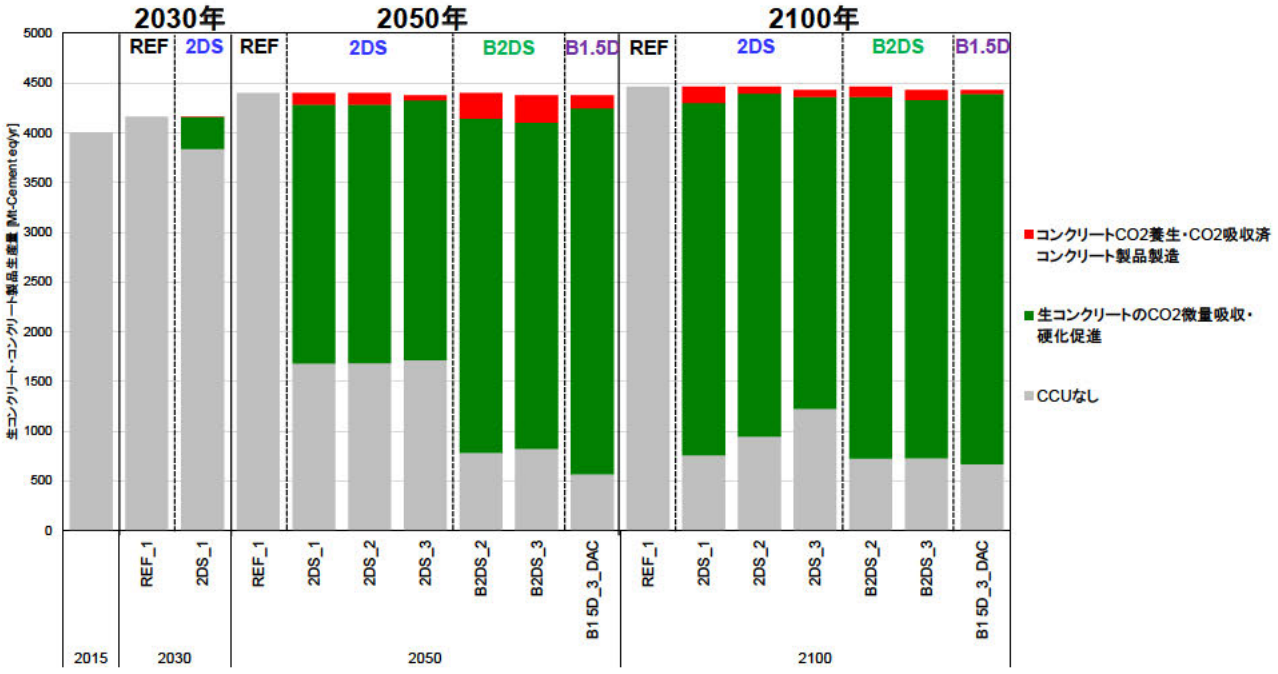


図 5.3.1-11 世界の技術別コンクリート生産量

民生部門について、図 5.3.1-12 は最終エネルギー消費量を示している。産業部門と同様に、電力、ガス比率の増大が見られ、2℃シナリオ、1.5℃シナリオでは、REF シナリオに比べ、特に電力化比率の増大が見られる。2DS の 2050 年ではコジェネレーションの利用も増大する。B2DS になると、2050 年以降、ガス利用は相当抑制が必要になってくるが、シェアモビリティ進展シナリオ（シナリオ 3）ではそれを達成するための CO_2 限界削減費用が低下するため、ガス利用に余裕が生じている。また、DAC の利用

を想定している 1.5℃シナリオにおいては、2℃シナリオより排出制約は厳しくなるものの、DACCS によるキャンセルアウトが可能であるため、B2DS よりガスの利用は多い。

産業部門と同様に、2℃シナリオで再エネコスト低位のシナリオでは、2100 年頃には都市ガスの一部をメタネーション利用に転換することが経済合理性を有するようになる。

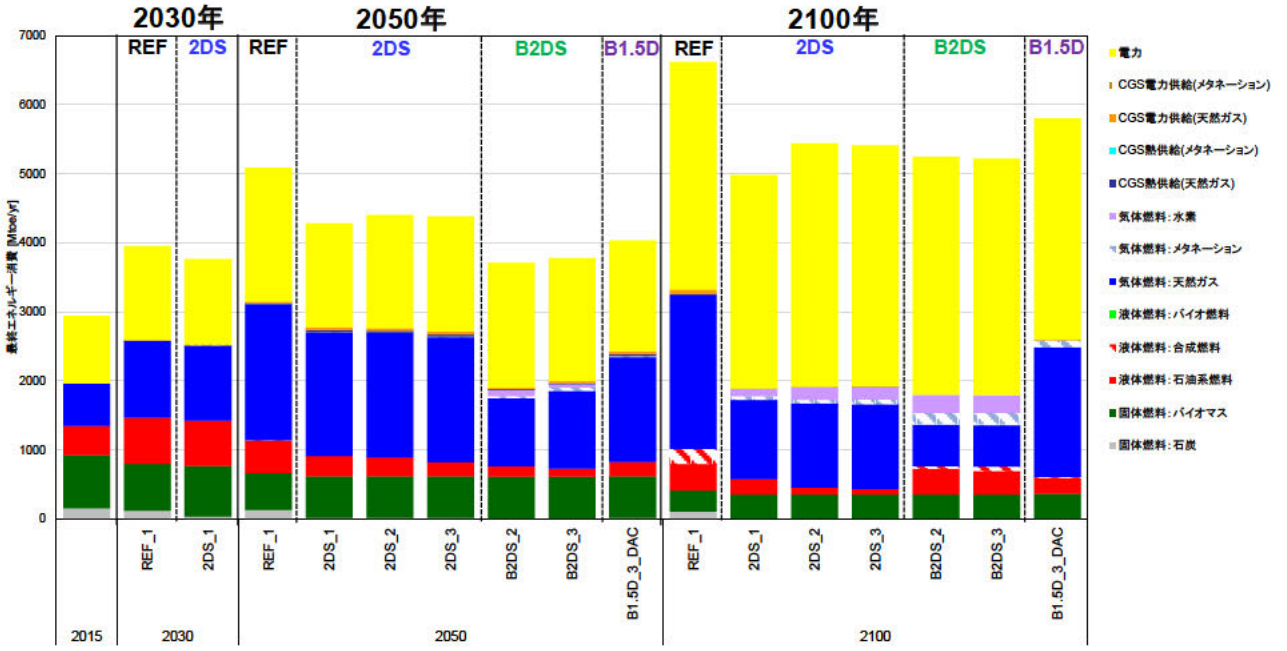


図 5.3.1-12 世界の民生部門の最終エネルギー消費量

運輸部門の最終エネルギー消費量は図 5.3.1-13 に示している。その内、道路交通部門の乗用車、トラックの最終エネルギー消費量は図 5.3.1-14、図 5.3.1-15 にそれぞれ示している。また、道路交通部門以外の運輸部門については、図 5.3.1-16 に国際海運部門、図 5.3.1-17 に航空部門のエネルギー消費量を示している。

運輸部門全体としては、2℃シナリオの下では、電力、水素、バイオ燃料、ガスの拡大が見られる。シェアモビリティ進展シナリオ（シナリオ 3）では、最も CO_2 限界削減費用が高い B2DS の下での石油系燃料のシェアは、2050 年では約 6 割にまで抑制されている。電力の拡大に関しては、乗用車の EV 化による所が大きい（図 5.3.1-14）。一方、水素の拡大については、乗用車ではなく、トラックの他、国際海運部門（図 5.3.1-16）、航空部門（図 5.3.1-17）での利用が大きいと言える。バイオ燃料については、運輸部門全体では、B2DS の 2100 年になるとバイオ燃料が減少するが、これは、発電部門での BECCS 利用の費用対効果が高い一方、バイオマス資源量に制約があるために、そのような選択が合理的となっている結果である。ガスの利用は、国際海運部門での利用が主である。

国際海運部門の最終エネルギー消費（図 5.3.1-16）については、IMO による SO_x、NO_x 規制の下では、2020 年以降、石油系燃料については、従来からの高硫黄重油を利

用しつつ船舶でスクラバー+EGR/SCR を装備する対応か、石油精製部門での対応により供給される低硫黄重油を利用する対応かが必要となるが、石油精製部門のバランスを考慮すると、どちらか一方の対応になるわけではなく、両者が選択される結果であった。また、2℃目標の下では、IMO の SO_x、NO_x 規制に対応しつつ、CO_2 排出が削減できるといったコベネフィットが得られる LNG 利用が、特に 2050 年頃において増加する。排出削減水準が厳しく CO_2 限界削減費用が高い B2DS になると、更に水素へと転換を進める必要があると評価されている。但し、シェアモビリティ進展シナリオ（シナリオ 3）ではそれを達成するための CO_2 限界削減費用が低下するため、水素への転換は再エネコスト低位シナリオ（シナリオ 2）程は進んでいない。

航空部門の最終エネルギー消費量は、図 5.3.1-17 に示している。2100 年においては、想定している技術進歩を反映し、短い距離帯での電動航空機の導入や、水素航空機の導入、また合成燃料の導入などで排出削減が進められる。航空部門に焦点をあてた分析は 5.3.2 節で述べているので参照されたい。

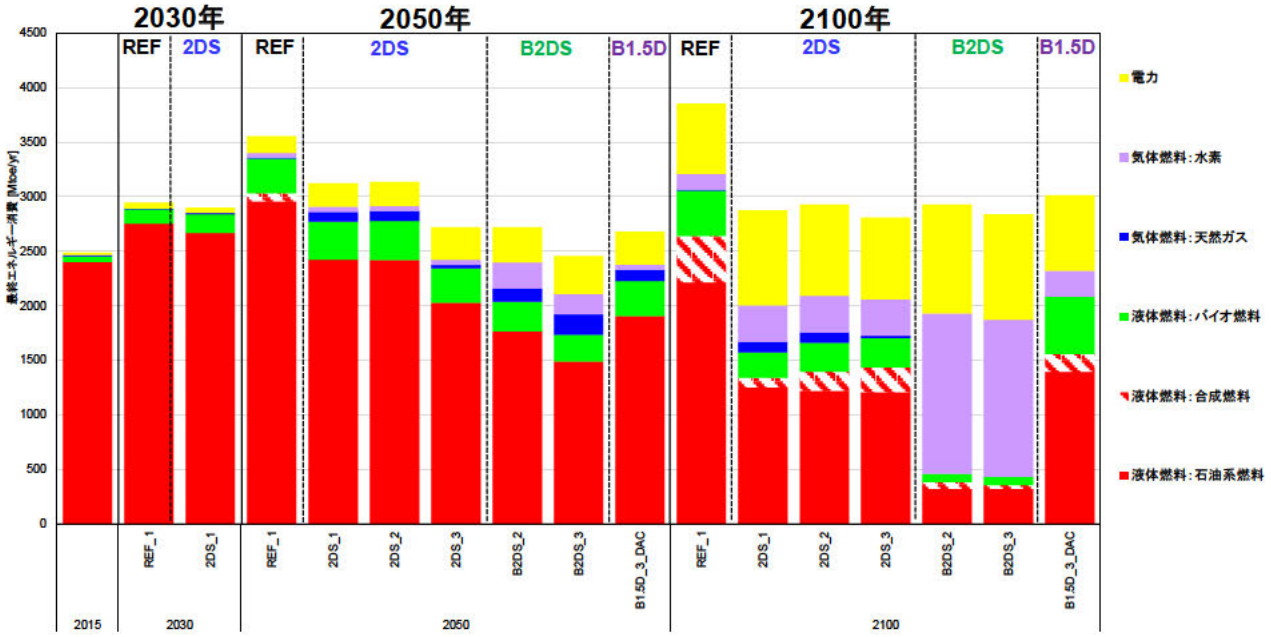


図 5.3.1-13 世界の運輸部門の最終エネルギー消費量

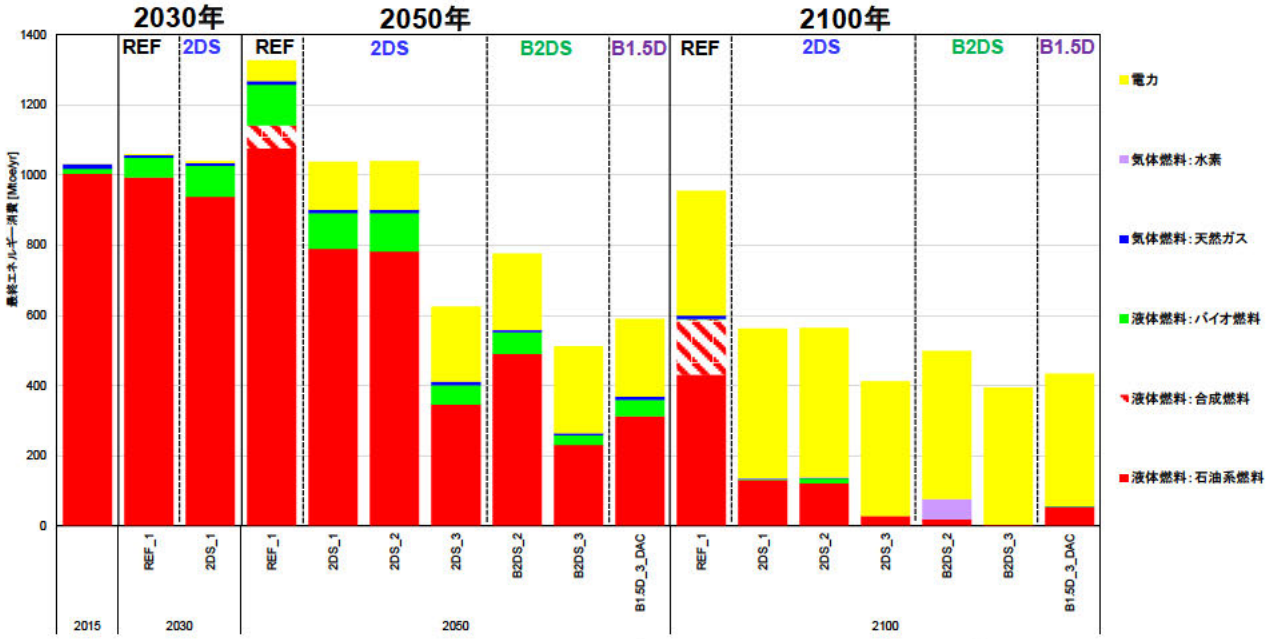


図 5.3.1-14 世界の乗用車の最終エネルギー消費量

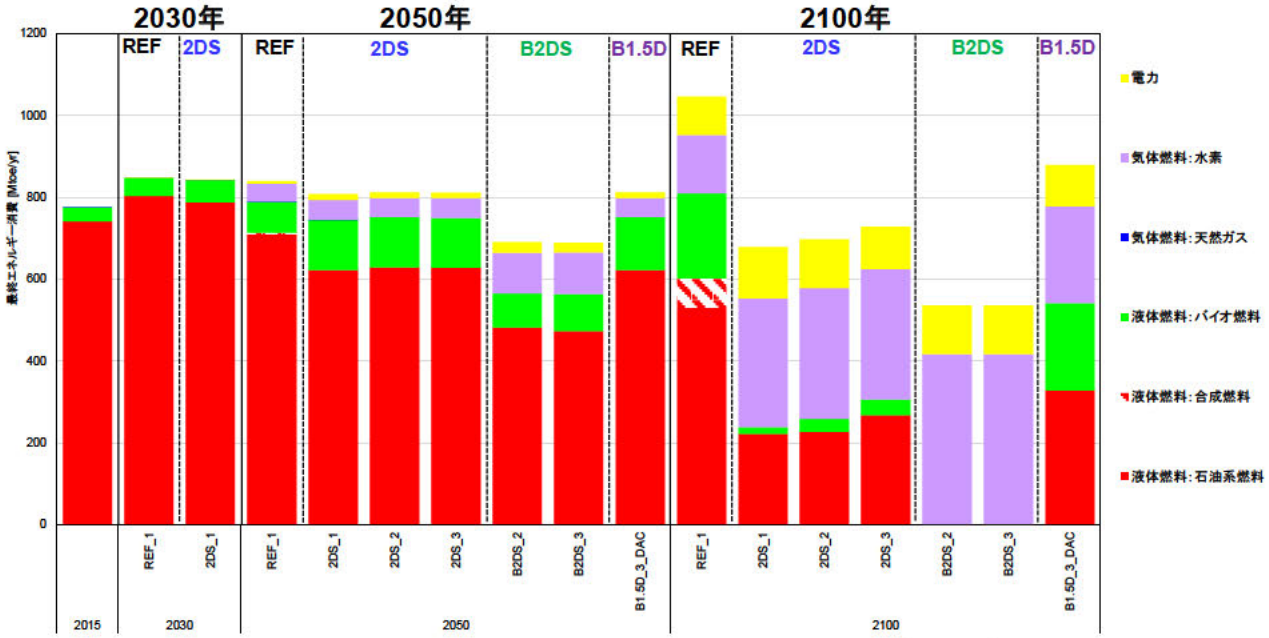


図 5.3.1-15 世界のトラックの最終エネルギー消費量

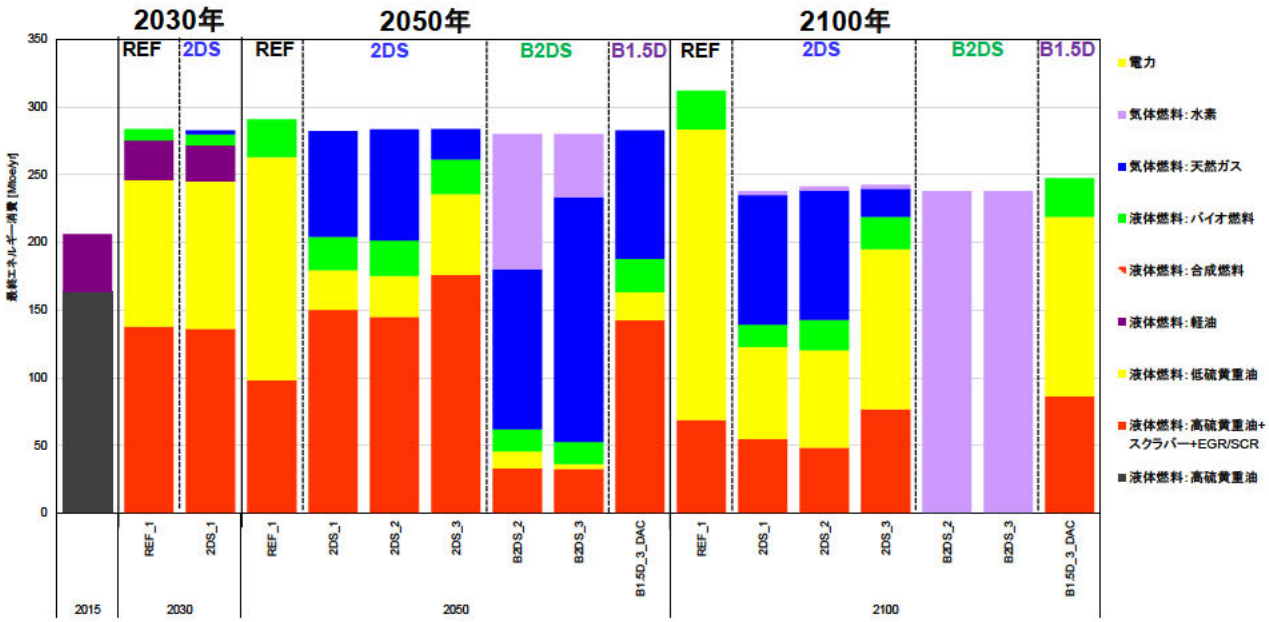


図 5.3.1-16 世界の国際海運の最終エネルギー消費量

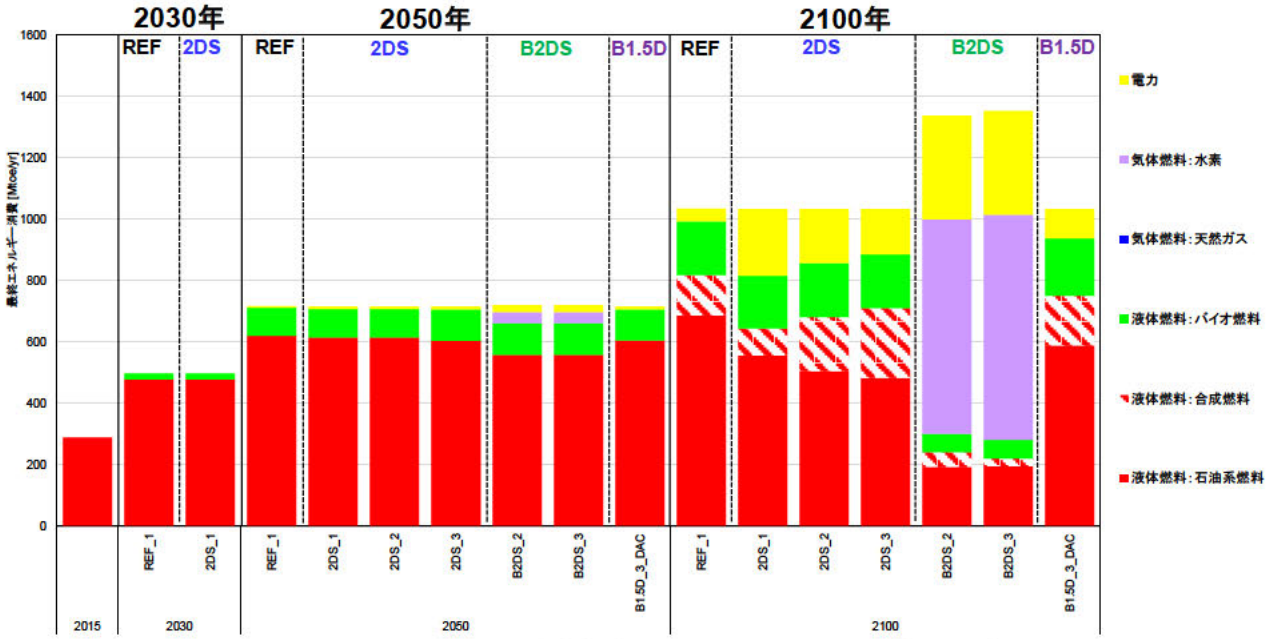


図 5.3.1-17 世界の航空部門の最終エネルギー消費量

図 5.3.1-18 に、世界の水素バランスを示す。水素製造は、PV コストが標準ケースの場合（シナリオ 1）は、ガス改質といった化石燃料からの製造＋CCS が経済合理的な傾向が見られる。一方、PV コストが低位の場合（シナリオ 2）、PV+水電気分解も経済合理的となる傾向がある。

水素の利用先については、発電、鉄鋼などの産業部門、運輸部門、民生部門と多岐に渡る。また、先に述べたように、メタネーションでの利用も一部で経済合理的となっている。

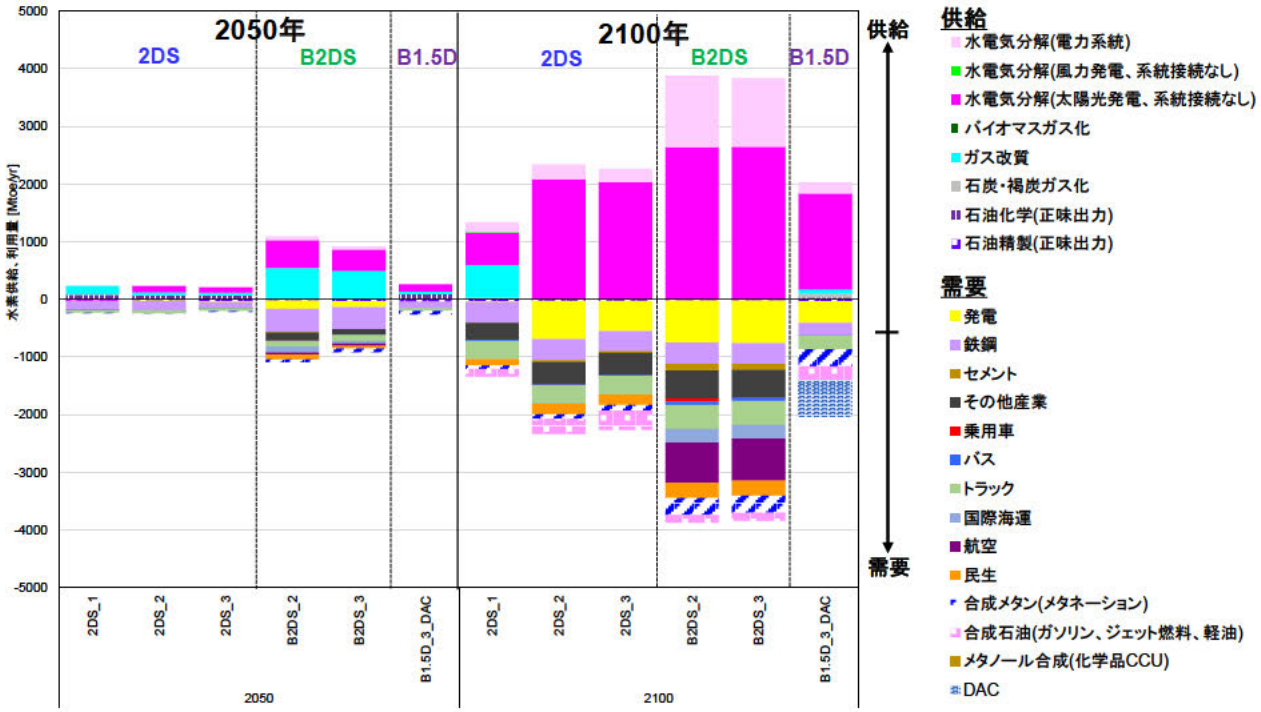


図 5.3.1-18 世界の水素需給バランス

図 5.3.1-19 に、世界の CO_2 回収、利用、貯留バランスを示す。当然ではあるが、排出削減が厳しい B2DS や B1.5D では、CO_2 回収量が増加する傾向が見られる。

2DS、B2DS においては、図 5.3.1-3 に示したように、2050 年、2100 年共に発電部門で正味負の排出とするため、バイオマス発電から大量に CO_2 を回収する結果である。また、DAC の利用を想定した B1.5D_3_DAC の下では DAC による CO_2 回収が導入され、その分同じ負の排出技術である BECCS の導入量は B2DS に比べて減少し、相対的に安価である石炭火力+CCS が増加する傾向が見られる。

CO_2 の利用、貯留については、各種 CCU の利用が経済合理的となるシナリオもあるが、規模としては最終的に貯留する量が圧倒的に多い。

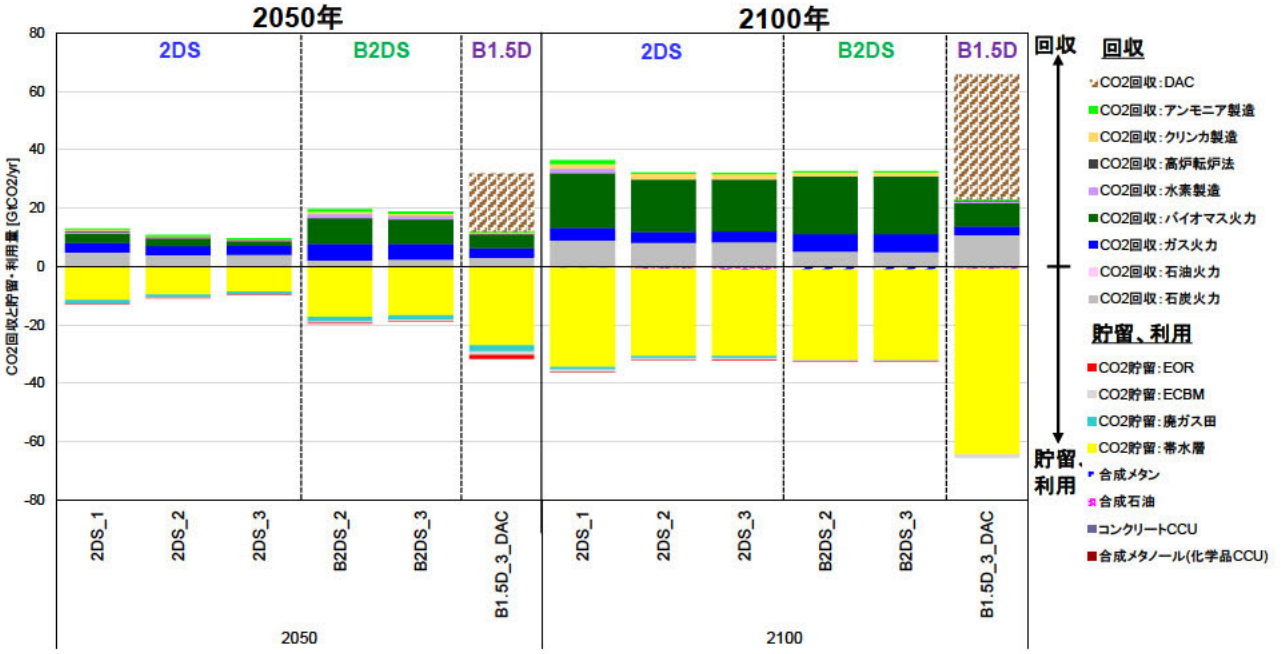


図 5.3.1-19 世界の CO_2 回収、利用、貯留バランス

(3) まとめ

本節では、各種技術動向等を踏まえて改良した世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用い、パリ協定長期目標に対応した排出削減シナリオについて行った分析について述べた。

パリ協定長期目標に対応した排出削減シナリオとしては、2℃未満を 50%程度の確率で達成できるシナリオ（2DS シナリオ）、66%程度の確率で達成できるシナリオ（B2DS シナリオ）、更に 2100 年の気温上昇を 1.5℃未満とする 1.5℃シナリオを想定して分析を行った。標準としたシナリオ（シナリオ 1）の下では、2050 年の CO_2 限界削減費用は 2DS シナリオで 160 \$/tCO_2 と評価された。太陽光発電、風力発電の更なるコスト低減や、完全自動運転車の実現によってカーシェアリング・ライドシェアリングが大規模に誘発されると想定したシェアモビリティ進展シナリオの下では、CO_2 限界削減費用は 2DS シナリオで 140～150 \$/tCO_2 程度、B2DS シナリオで 350～400 \$/tCO_2 程度と評価された。なお、1.5℃シナリオについては、DAC の利用を想定しなければ実行可能解は得られず、DAC の利用を想定した場合には DAC のコスト低減想定に従って CO_2 限界削減費用は 137 \$/tCO_2 と DAC の利用を想定しない 2DS シナリオと似た水準と評価された。

技術的な対策については、電力化率の向上と低炭素、脱炭素電源化が重要となる他、電力化が困難な部門については水素や合成燃料を利用して削減を進めること、更には 1.5℃シナリオのように非常に厳しい排出削減目標は負の排出技術（NETs）である DAC を考慮しなければ実行可能解が無く、その利用を考慮すれば DAC 無しでの 2℃シナリオよりエネルギーシステムにフレキシビリティがあること、などが定量的に示された。

CCU については、各種の技術を考慮して評価を行ったが、CCS を代替するほどの排出削減量を稼ぐことは困難であり、大幅な排出削減のためには CCS は重要であると言

える。また、DAC については、将来のコストの不確実性は大きいものの、負の排出を実現できるため、ネットゼロエミッションのような目標の下では重要な役割を果たすゲームチェンジャーとなり得る可能性が有ると言える。

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分析については、本年度は、5.1.1 節で述べたように、完全自動運転車実現によるカーシェア、ライドシェア誘発に関する分析について、誘発に関する前提条件を昨年度よりシステマティックに想定すると共に、自動車台数の減少に加え、自走式立体駐車場の減少を考慮した鉄鋼需要、プラスチック製品需要、コンクリート需要の低減を想定し、削減費用の低減等について定量的に分析を行った。しかしながら、そのリバウンド効果については考慮できておらず、その定量的かつ整合的な分析を行うことは、今後も引き続き検討を行うことが重要であると言える。

参考文献（第 5.3.1 節に関するもの）

1) IEA Energy Technology Perspectives 2017 (2017)

5.3.2 航空部門の世界エネルギー需給影響分析

本節では、5.1.2～5.1.4 節で述べた航空部門に関連する温暖化対策技術の動向に基づき、パリ協定長期排出削減目標における航空部門の温暖化対策技術の経済性及び世界エネルギー需給への影響を、DNE21+を用いて行った分析について述べる。この分析では、パリ協定長期目標に対応した排出削減シナリオと、航空部門の技術進展の不確実性を考慮した技術進展シナリオ、燃料技術の利用可能性シナリオについて分析した。結果に基づき、特定の部門における技術進展の影響が石油連産を介して世界のエネルギーシステムにもたらす波及効果と、ネットゼロ排出への経路において果たす役割について述べる。

(1) 分析シナリオの想定

表 5.3.2-1 に想定した分析シナリオを示す。排出削減シナリオは、特段の CO_2 排出制約を考慮しないベースラインと、2℃未満に対応した 2 種類の排出削減シナリオ（2DS、B2DS[1)]）を想定した。航空部門の技術進展シナリオは、技術進展の不確実性を考慮するため革新型航空機の導入時期について 3 種類の想定とした。燃料技術は、航空部門における合成燃料の利用可能性に関して 2 種類を想定した。

表 5.3.2-1　分析シナリオの想定

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導入
REF_StdAT	ベースライン（特段の CO_2 排出制約なし）	2040 年	利用可
2DS_StdAT	2℃未満（>50%）：IEA ETP2017 2DS 相当	2040 年	利用可
2DS_StdAT_NoSynf			利用不可
2DS_MidAT		2070 年	利用可
2DS_MidAT_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		2070 年	利用可
B2DS_MidAT_NoSynf			利用不可
B2DS_LowAT		導入無し	利用可
B2DS_LowAT_NoSynf			利用不可

航空部門の技術進展シナリオを表 5.3.2-2 に示す。電動航空機、水素航空機の導入時期がモデル想定通り 2040 年までに行われる StdAT、導入時期が遅れ 2070 年までに導入される MidAT、技術進展が進まず今世紀中の導入がされない LowAT の 3 通りである。StdAT における導入時期については 5.1.2 節、5.1.4 節で述べた通り各社が公表している開発検討状況などを基に想定している。IEA[2)]における早期イノベーション実現ケース(Faster Innovation Case)では 2050 年には電動航空機の導入を見込んでおり、StdAT シナリオに近いシナリオといえる。MidAT における革新型航空機の導入時期は、IEA[2)]の標準シナリオである SDS(Sustainable Development Scenario)を基に、StdAT と比較し 30 年後と想定した。

表 5.3.2-2　航空機技術のシナリオ別導入時期と航続距離

技術進展シナリオ	航空機技術	2040	2050	2070	2100
StdAT	電動航空機	750km	926km	1482km	2500km
	水素航空機	3700km	7000km	10000km	10000km
MidAT	電動航空機	N/A		750km	1482km
	水素航空機	N/A		3700km	10000km
LowAT	電動航空機	N/A			
	水素航空機	N/A			

本分析におけるそのほかのシナリオ想定として、社会経済シナリオの想定は SSP2、再エネコストの想定は低コストとした。排出削減シナリオと社会経済シナリオ、再エネコストの想定は 5.3.1 節と同様としている。また、本分析時のモデル想定では、合成燃料のコストをやや低位としているため、5.3.1 節における分析と比較評価することは適切でないことには留意が必要である。

(2) モデル分析結果

前節のシナリオに基づき、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+で分析、評価した主な結果を示す。

表 5.3.2-3 に、2100 年における CO_2 限界削減費用と排出削減費用を示す。2DS シナリオでは、革新型航空機が標準通り導入される場合の限界削減費用は 336\$/tCO_2 であるのに対し、導入されない場合は 361\$/tCO_2 に上昇する。B2DS においてはさらに影響は大きく、標準の 1529\$/tCO_2 から 5718\$/tCO_2 にまで上昇する。B2DS のようにより厳しい排出削減目標において技術オプションがない場合は、限界削減費用が世界で均等化している場合においても相当のコスト上昇となり目標達成は困難となる。また、革新型航空機技術の導入による 2100 年時点の便益(CO_2 削減費用における StdAT と LowAT の差)は、2DS では 85 billion US\$/yr、B2DS では 2743 billion US\$/yr であり、より厳しい排出削減目標においてはより大きな便益となる。革新型航空機の導入がない場合(LowAT)は、2DS においては CO_2 限界削減費用、排出削減費用ともそれほど大きな増大とはならないが、より厳しい排出削減シナリオである B2DS では、コスト増大幅はより大きなものとなる。革新型航空機に加え合成燃料も利用できない場合(LowAT_NoSynf)は、2DS においても大きなコスト上昇となる。一方、B2DS では、今回想定した条件の下では実行可能解が得られなかった。排出削減技術が利用できない場合、2100 年に向けジェット燃料の需要が大幅に増大するのに伴い、連産品としてその他の石油製品も製造されることになるものの、CO_2 排出を伴うこれら石油製品の消費が、厳しい排出削減目標の下では他部門（産業、民生、航空以外の運輸）において許容されず、エネルギー需給バランスが成立しないためである。

表 5.3.2-3　2100 年の CO_2 限界削減費用及び排出削減費用

	2℃, >50% [2DS]				2℃, >66% [B2DS]			
	2DS_StdAT	2DS_MidAT	2DS_LowAT	2DS_LowAT_NoSynf	B2DS_StdAT	B2DS_MidAT	B2DS_LowAT	B2DS_LowAT_NoSynf
CO_2 限界削減費用 ($/tCO_2$)	336	341	361	404	1529	1526	5718	実行可能解無し
CO_2 削減費用* (billion US$/yr)	6135	6158	6220	6644	12139	12223	14882	

*REF-StdAT 比

航空部門の最終エネルギー消費量を図 5.3.2-1 に示す。2050 年時点では主として従来燃料が利用される。2100 年には合成燃料が利用可能であれば導入が進むが 2DS で合成燃料が利用不可の場合はジェット燃料の消費が高位となる。B2DS では、2050 年から電動機、水素機の導入と合成燃料の利用がみられ、2100 年にはこれらの利用が拡大しバイオ燃料の利用は減少する。なお、水素機の導入の増大は、電動機の航続距離上限が導入上の制約となることにより水素機が選択されるためである。一方で水素機の燃費効率は他の技術より劣るためエネルギー消費総量は増加する。革新型航空機導入が遅れるケース(MidAT)では 2100 年における電動機の航続距離の想定が標準よりも短くなり、中距離帯(750～2500km)での電動機導入が減少するため、水素導入量はさらに増大する。

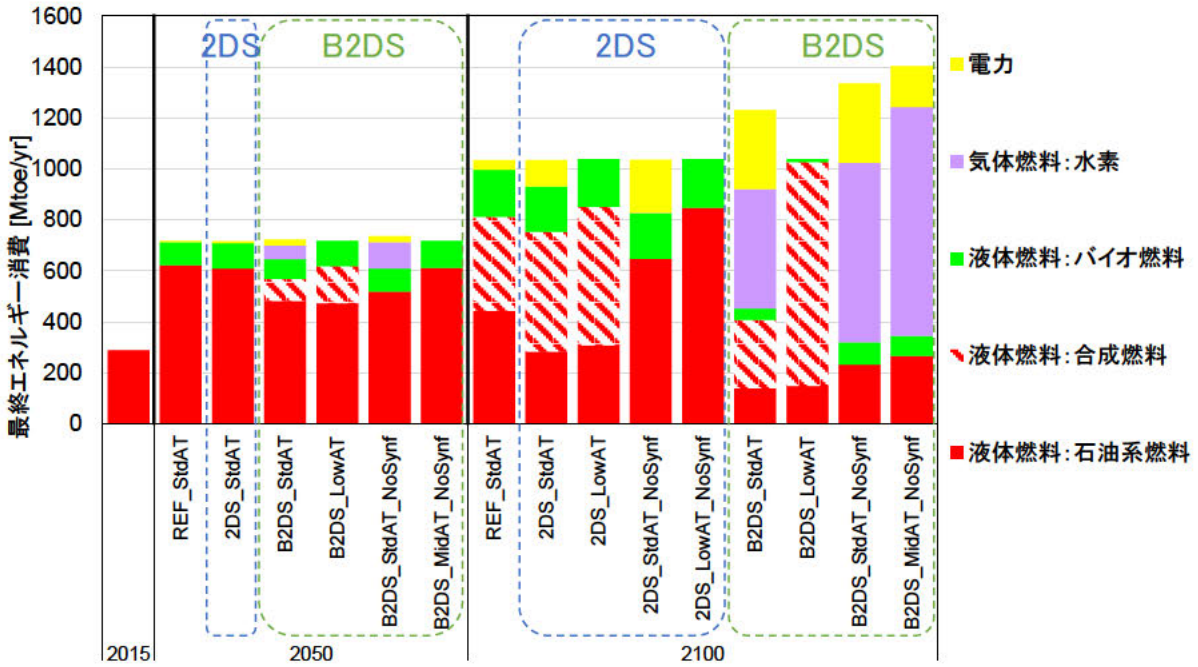


図 5.3.2-1 世界全体の航空部門の最終エネルギー消費量

図 5.3.2-2 に世界全体の部門別石油系燃料消費量を示す。2DS において航空部門で合成燃料が利用できずジェット燃料の消費が高位となる場合、連産品である石油系燃料の利用が経済合理的となるため、2100 年の道路交通、国際海運、その他産業、民生の石油燃料消費量が増大し、消費量総量も高位となりベースラインを上回る水準となる。世界でネットゼロ以下が実現している 2100 年 B2DS では、全体の石油製品生産量はそれほど影響を受けない。

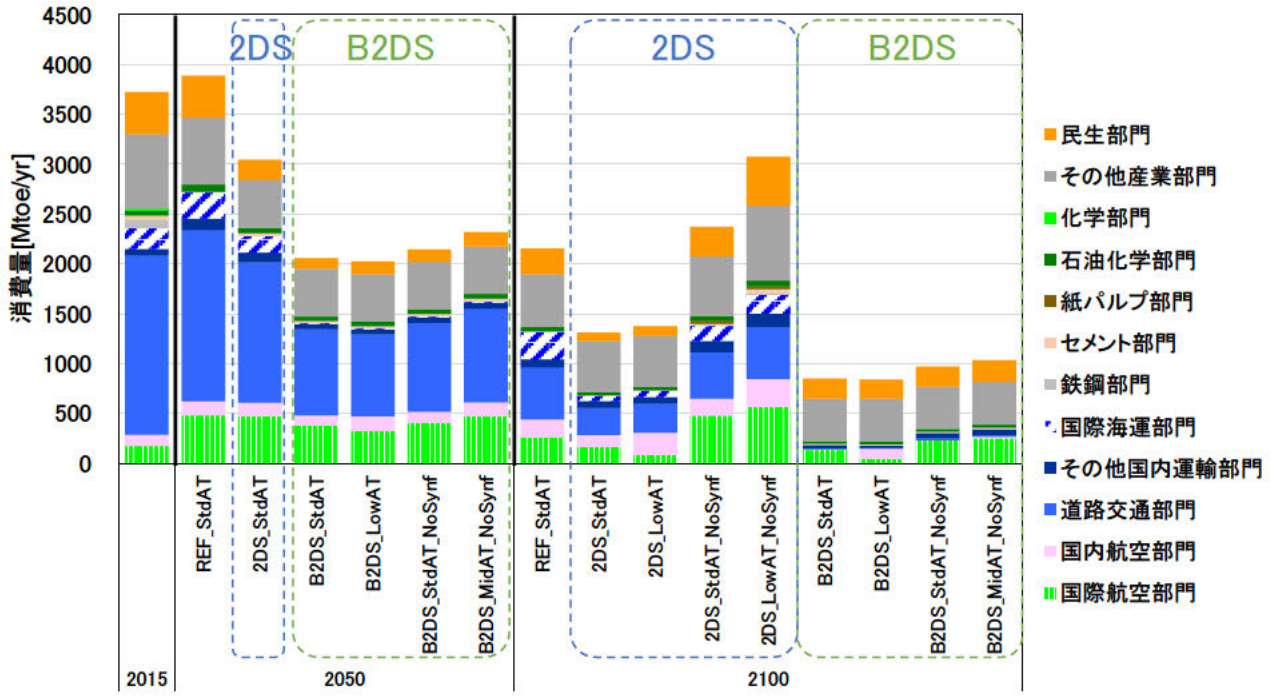


図 5.3.2-2 世界全体の部門別の石油系燃料消費量

図 5.3.2-3 に世界の発電電力量を示す。2DS で合成燃料利用不可の場合、利用可のケースと比較して 2100 年に CCS 付石炭火力と CCS 付ガス火力の減少、BECCS と水素の増大が見られ、総発電量は低位となる。一方、B2DS では革新型航空機技術が導入されないケースにおいて 2050 年、2100 年とも総発電量が増大し、2100 年では電源の低炭素化（ガスと石炭の減少、BECCS と原子力、PV、水素の増大）がみられる。

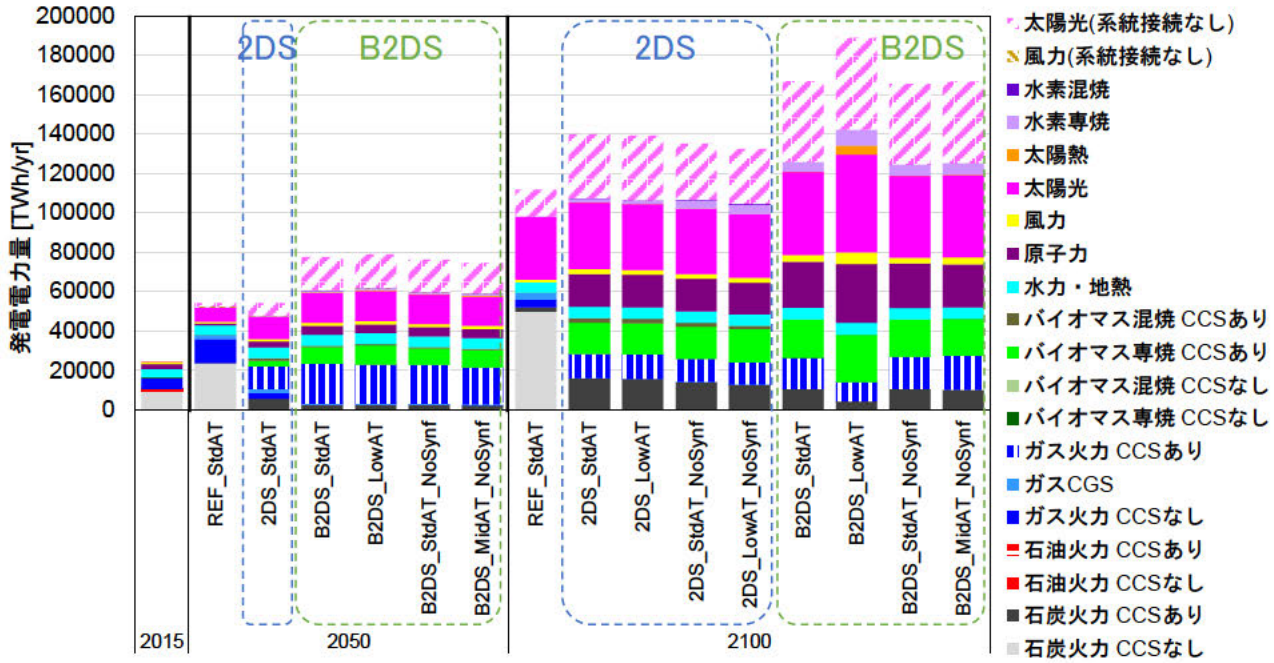


図 5.3.2-3 世界発電電力量

図 5.3.2-4 に部門別の CO_2 排出量を示す。2DS では、合成燃料利用不可の場合は 2100 年に航空部門の排出量は 1.9GtCO_2 に増大し発電部門での更なる負排出が必要とされる。さらに革新型航空機の導入がされない場合、航空部門の排出量は 2.5GtCO_2 となり更なる負排出が求められる。B2DS で革新型航空機の導入がされない場合では、導入されている場合と比較し 2050 年に発電部門での更なる負排出が必要とされる。2100 年には合成燃料の消費が運輸や民生部門で進みこれら部門での排出が低位となるが、発電部門での負排出が合成燃料消費を通して再排出されているためネット負排出量は減少する。

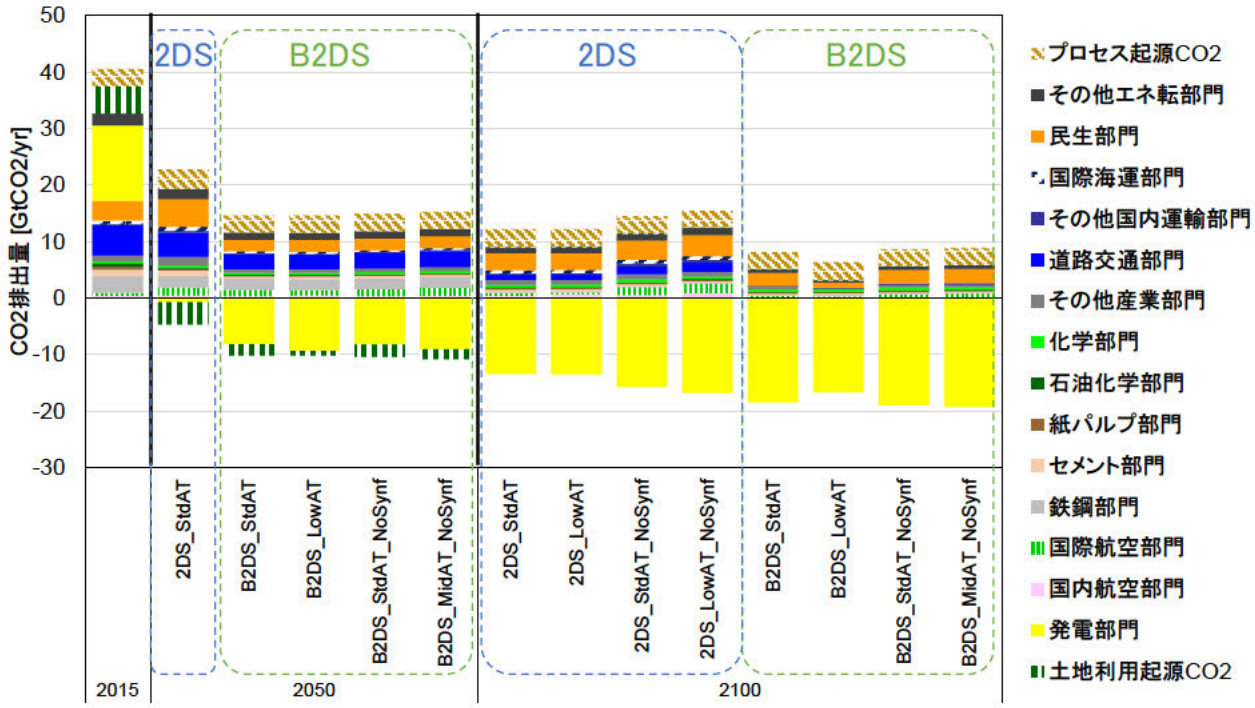


図 5.3.2-4 部門別 CO_2 排出量

(3) まとめ

本節では、パリ協定長期排出削減目標における航空部門の温暖化対策技術の経済性評価と、世界エネルギー需給及び温暖化対策にもたらす影響の分析を行った。パリ協定長期目標に対応するシナリオとして、2℃未満を 50%程度の確率で達成するシナリオ（2DS）と、66%程度の確率で達成するシナリオ（B2DS）を想定した。モデルにおける航空部門の技術進展の想定は IEA の早期イノベーション実現ケースに近く、この想定に基づく革新的航空機と合成燃料の導入が実現した場合、限界削減費用は 2DS で 336\$/tCO_2、B2DS で 1259\$/tCO_2 程度と評価された。厳しい排出削減目標において革新的航空機技術の導入がなされない場合は排出削減費用は 2700 billion US\$/yr 程度増大し、さらに航空部門で合成燃料も利用できない場合は排出削減目標達成は困難となるなど、長期排出削減目標において航空部門における技術進展が重要な役割を持つことが示された。

2DS においては、合成燃料の利用可否が全体のエネルギー構成に影響する。利用不可の場合、ジェット燃料消費量が増大するため負排出量の必要量も増大し電源構成における BECCS 及び水素の増大が見られるとともに、CCS 付化石燃料発電の許容量が低下するとの結果である。

より厳しい排出削減シナリオである B2DS においては、航空部門の温暖化対策技術が標準想定通り導入される場合、2100 年の航空向け燃料は従来燃料のほか水素、電気、合成燃料など多様な種類の燃料が利用され、バイオ燃料への依存は軽減されるが、革新型航空機の導入がない場合は、航空部門における合成燃料の消費量増大とそれに伴う水素需要の増大が見られるほか、エネルギーシステム全体では BECCS への依存の増大、電力の低炭素化の進展と総発電量の増大など全体に影響が波及する。

ジェット燃料は石油精製における連産品の一つであるため、航空部門の温暖化対策技術導入は全体のエネルギー構成に影響を及ぼす。航空部門で温暖化対策技術が利用できない場合、ジェット燃料の生産量増大に伴い他の石油製品も連産品として生産されることとなり、その利用が経済合理的となる。そのため、2DS では合成燃料が航空部門で利用できない場合、2100 年のジェット燃料製造量が増大するためその連産品である他部門向け石油製品の供給量が増大しガスや石炭を代替する。しかし、厳しい排出削減目標である B2DS の下では、温暖化対策技術の導入がない場合に石油系製品の供給量が増大するもののそれらを消費することは排出を伴うため許容されず、エネルギー需給バランスが成立しない。2050 年ネットゼロのような厳しい排出削減目標の下でのエネルギーシステムにおいては、航空部門における温暖化対策技術の早期導入はそのバランスを維持する上で重要であるとの結果である。モデルで想定している航空部門の技術進展は、開発側の公表内容に基づくものであるが、IEA の見通しではこれらは早期にイノベーションが実現するケースでの技術進展水準とされており、現実の技術開発状況を注視していく必要がある。

今後の課題としては、5.1.4 節でも述べたとおり、モデルにおける輸送需要想定において、短距離帯の航空輸送は高速鉄道や鉄道、自動車など、他の輸送モードとの競合が考えられるものの、現在はモード間の代替を考慮していない点である。輸送モード間の代替関係を考慮した上で技術進展によるエネルギーシステム全体に対する影響評価を行っていくことは重要と考えられる。

参考文献（第 5.3.2 節に関するもの）

1) IEA Energy Technology Perspectives 2017 (2017)
2) IEA Energy Technology Perspectives 2020 (2020)

5.4 生活行動に基づく需要発生メカニズムの調査

5.4.1 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、つまり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。

また、このような生活行動の変化が CO_2 排出量に及ぼす影響を分析することはパリ協定の長期目標を達成するうえで重要であり、そのためにも需要を生活行動の結果として捉えることは有意義である。

そこで、本調査では生活行動に基づく需要に焦点をあてた検討を行う。

5.4.2 調査概要

生活行動は睡眠や食事など必要不可欠なものから、通勤・通学、労働、家事、育児、余暇活動など多岐にわたる。本調査では、生活行動のうちデジタル化による社会変化が観測されている消費行動、購買行動について検討を行う。始めに、既往研究成果の図 5.4.2-1 を基に分析フレームワークの具体化および改良を行う。既往研究成果では物質的財・サービス需要の分析フレームワークを整理し、推計式についても検討しているが、概念的な表現に留まっているため、具体的な事例を用いて検討する。([3])

第 2 に、分析フレームワークの定量化に資すると考えられる統計を整理する。定量化についてはまずは日本モデルで検討していくこととするが、RITE の DNE21+モデルは世界モデルであるため、世界モデルへの展開を視野に入れ、各国の統計も並行して調査する。([1])

第 3 に、現在、新型コロナウイルスの感染拡大により大きな社会変化が生じており、この社会変化を分析することは生活行動を理解する上での一助になると考えられるため、with/after コロナが及ぼす生活行動への影響及び家庭内のエネルギー消費量に与える影響を検討する。([2])

第 4 に、多くのモデルは完全合理的な行動をする前提で最適計算されるが、人は非合理的選択をすることが多く、現実世界との行動のギャップに課題があった。この点について既往文献 [1]では「隠れた費用」の概念を取り込むことで非合理的な行動＋隠れた費用＝完全合理的な行動と整理されている。そこで、より現実に即した購買・選択行動モデルの構築に資する調査を行う。([4])

[1] 生活行動とエネルギーに関する既往研究や統計の情報収集

[1] Mattauch et al., “Happy or liberal? Making sense of behavior in transport policy design”, Transportation Research Part D (2016)

生活行動とエネルギーに関する既往研究や統計の情報収集を行う。既往研究については、既報告書[2]でも収集しているところであり、新たな文献が発見された場合は調査を行う。統計については、例えば各国の生活時間や機器使用時間などの統計、また、例えばモバイル空間統計のようなビッグデータを使用することで昼間/夜間人口密度がわかり、移動需要の検討に資する可能性があるため、ビッグデータも調査対象とする。

調査する資料は日本語、英語、中国語の文献を基本とする。

[2] with/after コロナの生活行動に与える影響の情報収集

新型コロナウイルスが生活行動やエネルギー消費量に与える影響は、研究者や企業から報告されており、今後も増えていくと予想される。ここでは、日本だけでなく、海外の文献も含めて調査し、with/after コロナの生活行動に関する考察を行う。

[3] 分析フレームワークの具体化及び改良

既報告書[2]において平成 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。検討にあたっては、モデル内で取り扱う変数を決定するため、具体的な事例を用いて影響範囲を検討した後、モデル上で表現する変数を検討する。

[4] 「隠れた費用」に関する情報収集

人間は、限定合理性や限定自制心[3]により、理想的な意思決定や最適な行動（生活行動、購買行動など）がとられない場合がある。例えば、省エネ型製品の導入を検討する際、本来であれば、財の将来価値は現在価値に換算して計算するのが合理的であるが、人々は近視眼的な選好にとらわれ、将来ではなく目先の利益と不利益を過度に重視する傾向がある。このように、非合理性による意思決定は、省エネ型製品を選択する際の潜在的な阻害要因にもなると考えられる。なお、合理的に物事を判断させるためには、行動科学や行動経済学の理論に基づき行動変容を促す手法が有効であるという先行事例も多数ある。

そこで、上述のような人間の非合理性により潜在する要素もモデリングに反映する必要があると考えられ、本研究では、行動科学や行動経済学を活用した先行文献に基づいてメタ分析を行い、「非合理的選択」が消費者の行動に及ぼす影響について考察する。

---

[2] 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（H27 年度～H31 年度）, RITE

[3] 限定合理性は、認知能力の限界のことであり、人間の問題解決を制限すること。限定自制心は、時として人は長期的な利益に反する選択をするということを意味する。
出所）OECD の環境ナッジの経済学－行動変容を促すインサイト

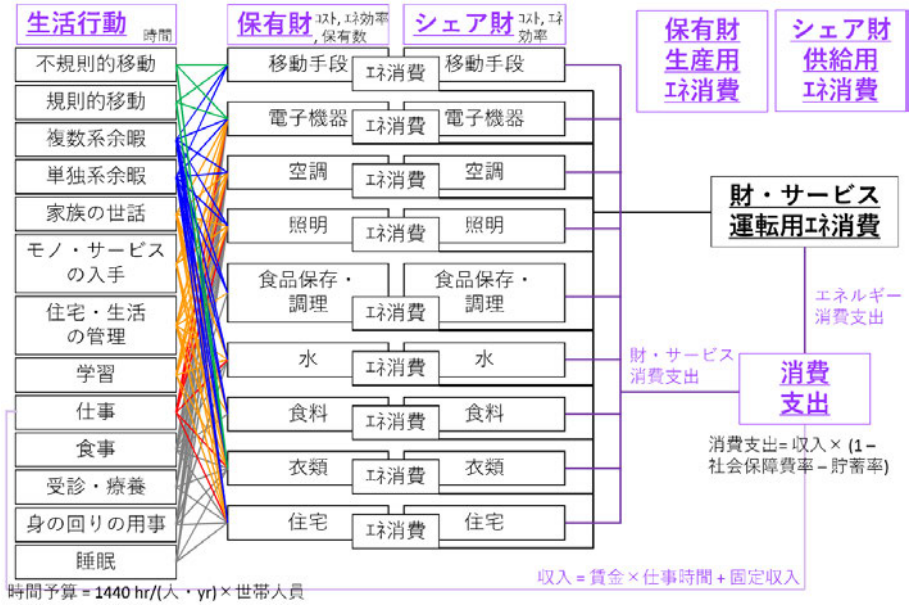


図 5.4.2-1 物質的財・サービス需要の分析フレームワーク

出典）魏ら：日本における家庭の財・サービス需要：公的統計ミクロデータを用いた現況の分析と生活行動の長期的な変化の検討，第 36 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，2020.1

5.4.3 生活行動とエネルギーに関する既往研究や統計の情報収集

本節では、生活行動とエネルギーに関する既往研究や統計の情報収集を行う。既往研究については、既報告書でも収集しているところであり、新たな文献が発見された場合は調査を行う。

統計については、例えば各国の生活時間や機器使用時間などの統計、また、モバイル空間統計のようなビッグデータを使用することで昼間/夜間人口密度がわかり、移動需要の検討に資する可能性があるため、ビッグデータも調査対象とする。

調査する資料は日本語、英語、中国語の文献を基本とする。

(1) 生活行動とエネルギーに関する既往研究の情報収集

生活行動とエネルギーに関する既往研究として、2020 年に発表された 2 つのレビュー論文について知見の調査・整理を行う。

2 つの論文ではそれぞれ「テレワーク」によるエネルギー消費量への影響と「物品のデジタル化」によるエネルギー消費量への影響に関連する既往研究がレビューされている。ここでは論文の概要に加え、特に重要な表およびリバウンド効果に関する記述について、日本語化して情報を整理する。日本語化にあたり、意味が分かりにくくなる場合は、適宜、内容を意訳または省略し、キーワードを統一して整理している。

① テレワークによるエネルギー消費量への影響に関するレビュー論文

出典）Andrew Hook et el. (2020), A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking[1)]

a. 論文の概要

i) 背景

情報通信技術（ICT）により、従業員が自宅やその他の場所で仕事をすること（テレワーク）が可能となってきている。本研究では、テレワークによって職場への移動の必要性がどの程度削減され、その結果として経済全体のエネルギー消費にどのような影響があるかを調査する。

ii) 手法

テレワークによって職場への移動の必要性がどの程度削減され、その結果として経済全体のエネルギー消費量にどの程度の影響があるかを調査するため、テレワークによるエネルギー消費量への影響に関する現在の知見を体系的にレビューする。これには、通勤時の移動を減らすことによるエネルギー削減効果と、仕事以外の移動や家庭でのエネルギー利用の変化に関連したエネルギー消費量への間接的な影響が含まれている。本論文の目的は、テレワークが経済全体のエネルギー消費量の削減につながる条件と、意図しないエネルギーの増加につながる可能性がある条件を明らかにすることである。

iii) 結果

公表されている 9,000 件の論文を網羅的に検索して抽出した 39 件の研究結果をまとめている。39 件の研究のうち、テレワークによりエネルギー消費量の削減を示唆しているのは 26 件で、エネルギー消費量の増加又は変化しないことを示唆しているのは 8 件のみである。しかしながら、それぞれの研究の方法論、対象範囲、前提条件の違いにより、“平均的な”省エネルギー効果を評価することは困難である。エネルギー削減の主な要因は、通勤のための移動距離の短縮であり、オフィスのエネルギー消費量の削減にも寄与する可能性がある。しかし、より広範囲の影響（例えば、仕事以外の移動や家庭でのエネルギー消費量の増加など）を考慮している研究では、削減効果は全体的に低く評価される傾向にある。

iv) 議論

省エネルギーの取り組みとしてのテレワークは一般的に肯定的な評価を得ているにもかかわらず、実際の効果や潜在的な効果については多くの不確実性や曖昧さがある。これらは、テレワークが仕事以外の移動や家庭でのエネルギー消費量を予測できないほど増加させる可能性を示唆しており、仕事以外の移動や家庭でのエネルギー消費量の増加は、仕事での移動の減少によるエネルギー削減量を上回る可能性がある。現在の知見では、テレワークによる経済全体のエネルギー削減効果については、全体的に控えめなものであり、多くの状況において効果が低下するか、全く効果がない可能性がある。

b. 論文中の図表

論文中に掲載されている図表のうち、レビュー対象の研究結果を要約した表を日本語化したものを表 5.4.3-1 に示す。

論文中で”telework”（または”teleworking”）と記載されている場合、基本的には「テレワーク」と表記しており、”work from home”や”telecentre-based”など、テレワークの拠点が特定できる記載がある場合のみ「在宅勤務」や「テレセンター勤務」と表記している。

c. リバウンド効果に関する記述

論文中でまとめられているリバウンド効果に関する定性的な記述を日本語化し、箇条書きにして整理したものを以下に示す。

i) 居住地の変化に伴う通勤距離の増加

- テレワーク勤務日に通勤距離を削減することで得られる効果は、オフィス勤務日における長距離の通勤移動によって、部分的または完全に相殺される可能性がある。
  - テレワーカーは非テレワーカーよりも通勤時の移動距離が長い傾向にある。
  - テレワーカーは 1 週間で（週 1 回の在宅勤務頻度とすると)、非テレワーカーよりも長い距離を移動する可能性がある。
- テレワークの導入は、環境便益の一部を相殺する居住地の長期的変化を誘発する可能性があることを示唆している。
- この影響の大きさは、都市部と都市周辺地域との間の不動産価格の差や通勤移動にかかる金銭的・時間的コストなど、状況に応じた要因によって異なることが予想される。

ii) 仕事以外の移動の増加

- テレワークは仕事以外の移動を促進する可能性がある。
  - テレワーカーが日々の通勤の回避による移動距離の削減は、テレワーカーが仕事以外の移動を追加的に行うことで、部分的または完全に相殺される可能性がある。
- 通勤していない労働者は、通勤の途中での効率的な移動ができないため、仕事以外の行動のため特定の移動が必要となる。
  - 仕事以外の行動のために移動する距離は、自宅から学校、小売店、その他の目的地までの距離など、地理的な状況によって異なる。
- 通勤移動が仕事以外の移動(例えばレジャー移動)に置き換わる代替効果により、毎日・毎週の移動量を増加させる可能性がある。

iii) 世帯内の移動動態による仕事以外の移動への影響

- 上述したリバウンド効果は、世帯内の移動動態によってさらに増大する可能性がある。
  - 片働き世帯では、テレワークの頻度が高ければ高いほど、すべての移動手段、特に車による移動量が多くなる。一方で、共働き世帯では、移動量の増加は遥かに少ない。
    - 共働き世帯での移動量の増加が少ないのは、家事やその他移動を伴うタスクが労働者間でより多く共有されているためだと考えられる。

- 韓国では、世帯主が在宅勤務を行うと、他世帯員の車の使用量が増加するという副次的な影響が確認されている。
  - この影響は就労者1人当たりの車の所有率が1台未満の世帯でのみ有意となっている。

表 5.4.3-1 テレワークの環境負荷に関する主要な結果

調査番号	主著者名と出版年	対象となる地域	分析手法	評価指標	対象範囲（影響カテゴリーの数）	評価基準への影響	定量的な推定値を含む影響の性質と規模	研究の方法論的頑健性に対する評価
1	Asgari, H. & Jin, X. (2018)	アメリカ	調査データの分析	フレックス通勤（1日の一部の時間にテレワークを行う）により、混雑の緩和が可能かどうか	1（通勤・通学移動のみ）	不明瞭	ピーク時の移動時間帯にテレワークを行うことで、混雑した移動（すなわち渋滞）を20%削減できる可能性がある。	乏しい
2	Atkyns et al. (2002)	アメリカ	調査データの分析	在宅勤務で削減される車の移動距離	1（通勤移動のみ）	削減	AT&Tの従業員の5分の1が週に1日在宅勤務することで、車の移動距離を110,000マイル削減、ガソリン使用量を510万ガロン削減し、二酸化炭素排出量を48,450トン削減できる可能性がある。	並
3	Balepur et al. (1998)	アメリカ	テレワーク実証実験の評価	テレセンターへの車と人の移動距離（テレセンター勤務 vs テレワーク併用）	2（通勤移動、非通勤移動）	削減	テレセンターへの通勤頻度を週1日とした場合、毎日出勤する場合と比較して、1週間の総移動距離が19%（17マイル）、1週間の車の移動距離が19%（10マイル）削減される。	良い
4	Bussière, Y. & Lewis, P. (2002)	カナダ	シナリオモデリング	在宅勤務によるピークタイムの移動回数の削減	1（通勤移動のみ）	削減	20年間（1996～2016年）の在宅勤務率が、モントリオールで3.3%、ケベックで3.6%と仮定すると、通勤ピーク時の移動回数はモントリオールで2.3%、ケベックで2.5%削減される。	乏しい
5	Chakrabarti, S. (2018)	アメリカ	調査データの分析	一人当たりの車の年間移動距離	2（通勤移動、非通勤移動）	増加	非テレワーカーに比べて、テレワーカーは毎年5.9%、臨時のテレワーカーは8.0%多くの距離を車で移動している。これは、テレワーカーがオフィスに勤務する日の通勤距離が長くなることで、テレワークをしている日の削減分が相殺されてしまうためである。	良い
6	Choo et al. (2005)	アメリカ	調査データの分析	出勤と比べて在宅勤務により削減される乗り物移動距離	1（通勤移動のみ）	削減	労働者の 12%が週に 1 回在宅勤務をすることで、米国の車での年間総移動距離（推定 2.4 兆マイル）が 0.8%削減される。	良い
7	De Abreu e Silva, J. & Melo, P. C. (2018)	イギリス	調査データの分析	片働き世帯および共働き世帯における移動距離：在宅勤務vsオフィス出勤	2（通勤移動、非通勤移動）	増加	週に 1 回在宅勤務を行っている片働き世帯では、平均 9.7 マイルの移動距離の増加が見られる（内訳は車で 9.0 マイル（3.9%）、公共交通機関で 0.5 マイル（2.4%）、それ以外で 0.2 マイル（3.8%））。共働き世帯では、週に 1 日在宅勤務を行うことで、車での移動距離が 1.6 マイル（または 0.4%）増加する。共働き世帯では、移動を共にするため、片働き世帯よりも増加量が小さい。	良い
8	Dissanayake, D. & Morikawa, T. (2008)	タイ	シナリオモデリング	バンコク首都圏の郊外に5つのサテライトテレセンターを最適配置することによる車の移動距離と排出量の削減	1（通勤移動のみ）	削減	サテライトテレセンターでテレワークを行うシナリオでは、当該地域の自家用車の使用量が 18～20%減少する。	乏しい
9	Ellder, E. (2017)	スウェーデン	調査データの分析	テレワークによる総移動距離の削減の有無	2（通勤移動、非通勤移動）	増加	テレワーカーは、テレワークしている日としていない日の両方において、非テレワーカーよりも移動距離が長い。非テレワーカーの1日の平均移動距離は46kmであるのに対し、テレワーカーはテレワーク日に54km、非テレワーク日に64km移動する。	良い
10	Fu et al. (2012)	アイルランド	調査データの分析	在宅勤務とオフィス通勤のライフスタイルの違いによるエネルギー消費量	2（通勤移動、家庭のエネルギー消費量）	削減	アイルランドの人口の5%がフルタイムで在宅勤務をした場合、最終エネルギー消費量は0.14%減少する。	良い
11	Giovanis, E. (2018)	スイス	調査データの分析	テレワークによる交通量と汚染物質の削減	1（通勤移動のみ）	削減	人口の8.43%がテレワークをすることで、交通量が平均1.9%減少し、様々な汚染物質も同等に削減される。	並
12	Gubins et al. (2019)	オランダ	調査データの分析	ICTを活用した在宅勤務による通勤距離の削減	1（通勤移動のみ）	不明瞭	ICT の存在は、1996 年から 2010 年の間に、各労働者の通勤距離を 13%増加させている。	並
13	Helminen, V. & Ristimäki, M. (2007)	フィンランド	調査データの分析	テレワークによる通勤距離の削減	1（通勤移動のみ）	削減	調査対象のテレワーカーは、非テレワーカーよりも通勤距離が3.7km長い。しかし、フィンランドの労働力の4.7%がテレワーク（週1回以上）を利用しているため、フィンランドの労働者の総通勤距離は、全労働者を非テレワーカーと仮定した場合の総通勤距離に比べ0.7%削減される。	良い

調査番号	主著者名と出版年	対象となる地域	分析手法	評価指標	対象範囲（影響カテゴリーの数）	評価基準への影響	定量的な推定値を含む影響の性質と規模	研究の方法論的頑健性に対する評価
14	Henderson et al. (1996)	アメリカ	テレワーク実証実験の評価	日々の通勤の削減による、通勤距離と排出量の削減	2（通勤移動、非通勤移動）	削減	テレワークを実施しない日のVMT（車での移動距離）は、非テレワーカーと比較して、テレセンター勤務のテレワーカーは91%高く、在宅勤務のテレワーカーは54%高いことから、テレワーカーは通常の通勤者よりも職場から離れた場所に住んでいることを示唆している。またテレワーク日の移動距離は、非テレワーカーと比較して、在宅勤務のテレワーカーは67%少なく、テレセンター勤務のテレワーカーは54%少ない。	並
15	Hjorthol, R. J. (2006)	ノルウェー	調査データの分析	日々の通勤の削減による、通勤距離の削減	1（通勤移動のみ）	削減	在宅勤務のテレワーカーは、非テレワーカーに比べて月当たりの車での移動量が8%少ない。	乏しい
16	Jaff, M. M. & Hamsa, A. A. K. (2018)	マレーシア	シナリオモデリング	日々の通勤の削減による、通勤距離の削減	1（通勤移動のみ）	削減	サンプルに基づいて、女性労働者の 2%が週 3 回テレワークをした場合、ピーク時間帯の交通量は 1.3～7.8%減少する可能性がある。女性労働者の 2%が週 1 回テレワークを行った場合、ピーク時間帯の交通量は 0.6～3.7%減少する可能性がある。	乏しい
17	Kim et al. (2015)	韓国	調査データの分析	世帯主のテレワークにより回避される移動距離	2（通勤移動・非通勤移動）	増加	共働き世帯では、テレワーク者のいない世帯と比較して、テレワーク者の通勤移動量は少ないが、他の 4 種類の移動量（テレワーク者の非勤務移動、テレワーク者以外の世帯員の勤務・非勤務移動）は多い。その結果、世帯主がテレワークをしていることで減少した車の移動距離（1 日あたり-7.8km）は、テレワーク者の非通勤移動（+24.2km）及び非勤務移動（+11.7km）、他の世帯員の非勤務移動（+1.5km）で相殺される。これは、車（韓国では1 世帯あたり 0.91 台の保有率（米国は 1.79 台））をテレワーク者以外の世帯員が他の目的で使用することが多いためである。	良い
18	Kitou, E. & Horvath, A. (2003)	アメリカ	シナリオモデリング	在宅勤務によるCO2排出量の削減	3（通勤移動、オフィスのエネルギー消費量、家庭のエネルギー消費量）	不明瞭	在宅勤務を週1、3、5回行うことで、CO2排出量は約2～80%減少する。	良い
19	Koenig et al. (1996)	アメリカ	テレワーク実証実験の評価	日々の通勤の削減による、通勤距離と排出量の削減	2（通勤移動、非通勤移動）	削減	テレワーカーの勤務日の一日の平均移動距離は10.2マイルであるのに対し、非テレワーカーは32.7マイルである。テレワーカーの非通勤移動頻度は1日1回増加しているが、テレワーク日に限ると非通勤移動距離は 34.6 マイルから 33.9 マイルへと 0.7 マイル減少する。テレワーカーのオフィス勤務日の移動距離は36.9 マイルであり、非テレワーカーの 移動距離（約 32 マイル）よりもやや長く、テレワーカーは通常の通勤者よりも職場から遠く離れた場所に住んでいることが示唆される。	良い
20	Lachapelle et al. (2018)	カナダ	調査データの分析	在宅勤務による移動時間の短縮	1（通勤移動のみ）	ニュートラル	フルタイムの在宅勤務では、1日の移動時間が13分短縮される。一方で、1日の一部の時間のみの在宅勤務は、移動時間に影響を与えない。	並
21	Lari, A. (2012)	アメリカ	調査データの分析	テレワークによる移動距離の削減によるCO2排出量の削減	1（通勤移動のみ）	削減	テレワーク日の一人当たりの移動距離は、オフィス通勤日に比べて 27.96 マイル減少する。全体では、678人のテレワーカーの総移動距離はテレワークによって年間746万マイル減少した。移動距離1マイル当たり1.10ポンド-CO2と想定した場合、4,070トンのCO2削減となる。	乏しい
22	Larson, W. & Zhao, W. (2017)	アメリカ	シナリオモデリング	日々の通勤回避による、通勤距離と排出量の削減	2（通勤移動、家庭のエネルギー消費量）	不明瞭	労働者の20%が週に1日在宅勤務をした場合、通勤によるエネルギー消費量は20%減少するが、家庭のエネルギー消費量は5.3%増加する。結果として、世帯（家庭＋自動車）の総エネルギー消費量は 0.4%増加する。	乏しい

調査番号	主著者名と出版年	対象となる地域	分析手法	評価指標	対象範囲（影響カテゴリーの数）	評価基準への影響	定量的な推定値を含む影響の性質と規模	研究の方法論的頑健性に対する評価
23	Mamdoohi, A. R. & Ardeshiri, A. (2011)	イラン	シナリオモデリング	政府職員の36%のテレワークによる通勤ピーク時間の回避	1（通勤移動のみ）	削減	148,551 人の政府職員の 36%が週に 1 回テレワークを行った場合、53,898 人の通勤ピーク時の移動を回避できる。	乏しい
24	Martens, M. J. & Korver, W. (2000)	オランダ	シナリオモデリング	テレワークで回避できる通勤移動	1（通勤移動のみ）	削減	オランダでは、テレワーク率を20%から 60%の間と仮定した場合、毎日の通勤移動が 71,000 件から 529,000 件の間で削減できる可能性がある。これは、通勤時の移動量を最大 5%削減し、全体の移動量を 1%削減することに等しい。	乏しい
25	Matthews, H. S. & Will ams, E. (2005)	アメリカ、日本	シナリオモデリング	在宅勤務による正味のエネルギー削減量（移動によるエネルギー消費量と建物のエネルギー消費量による）	3（通勤・通学移動、オフィスのエネルギー消費量、家庭のエネルギー消費量）	ニュートラル	現在推計されている在宅勤務実施人口とその実施状況（米国(全労働日数の0.4%が週に1回)、日本(現在250万人の労働者が週に1回)）では、国レベルの省エネ効果は米国では 0.01～0.4%、日本では 0.03～0.36%にすぎない。情報労働者の50%が週4日在宅勤務を行う場合、米国と日本の国民の省エネ効果は、どちらの場合も1%程度と推定される。	良い
26	Mitomo, H. & Jitsuzumi, T. (1999)	日本	シナリオモデリング	通勤ピーク時の混雑緩和	1（通勤移動のみ）	削減	900 万～1400 万人の労働者が毎日テレワークを行っている場合、通勤ピーク時の混雑率は 18%～28%削減される。	乏しい
27	Mokhtarian et al. (2004)	アメリカ	テレワーク実証実験の評価	テレワークによる通勤距離の削減	2（通勤移動、非通勤移動）	削減	一人当たりの3か月平均通勤距離は、一般的にテレワーカーの方が非テレワーカーよりも15%低い。これは、テレワークを頻繁に行っているため、片道の通勤時間が長い（テレワーカーが平均16マイルであるのに対し、非テレワーカーは11マイルである）ことを十分に補っていることを示している。	良い
28	Mokhtarian , P. L. & Varma, K. V. (1998)	アメリカ	テレワーク実証実験の評価	テレセンターを利用したテレワークにより回避される通勤移動距離と移動関連排出量	2（通勤移動、非通勤移動）	削減	テレセンターを拠点とするテレワーカーの通勤移動距離は、通常のオフィス勤務者と比較して、51人マイル（58%）と35台マイル（53%）と大幅に減少する。テレワーク勤務日の仕事以外の移動距離の増加は見られない。テレワーク勤務の頻度（週に1回）で重み付けした場合、非テレワーカーと比較して、テレワーカーの1週間の総移動距離は平均11.9%、車での移動距離は11.5%減少する。	良い
29	Nelson et al. (2007)	アメリカ	テレワーク実証実験の評価	テレワーク実証試験によって削減されたCO2排出量	1（通勤移動のみ）	不明瞭	有意な推定なし。	乏しい
30	O'Keefe et al. (2016)	アイルランド	調査データの分析	テレワークによる移動距離の削減によるCO2排出量の削減	2（通勤移動、非通勤移動）	削減	サンプルデータのパターン（グレーターダブリン地域の人口の44%が月に1回テレワークをしており、特定のセグメントがどのように通勤しているかを示している）に基づいて、人口の20%から50%が週に1回テレワークをすると、年間31,000トンから78,000トンのCO2排出量の削減に貢献すると考えられる。	良い
31	Pratt, J. H. & Trb. (2002)	アメリカ	調査データの分析	テレワークにより削減された1日の移動距離	1（通勤移動のみ）	削減	非常勤のテレワーカーは、オフィス勤務の労働者よりもテレワーク日の仕事関連の移動距離が3.6マイル（または17%）少ない。	乏しい
32	Röder, D. & Nagel, K. (2014)	ドイツ	調査データの分析	在宅勤務によるエネルギー需要の削減の可能性	3（通勤・通学移動、オフィスのエネルギー消費量、家庭のエネルギー消費量）	ニュートラル	本モデルでは、サンプルの10%が在宅勤務（頻度は不特定）を行うと、通勤距離と交通機関のエネルギー消費量が10%削減されるが、家庭で消費されるエネルギーはほぼ同量増加する。対照的に、オフィスのエネルギー消費量はほとんど影響を受けない。	並

調査番号	主著者名と出版年	対象となる地域	分析手法	評価指標	対象範囲（影響カテゴリーの数）	評価基準への影響	定量的な推定値を含む影響の性質と規模	研究の方法論的頑健性に対する評価
33	Roth et al. (2008)	アメリカ	シナリオモデリング (Henderson et al. (1996) の仮定に基づく)	在宅勤務によるエネルギー消費量、排出量、ガソリン消費量の削減	3（通勤移動、オフィスのエネルギー消費量、家庭のエネルギー消費量）	削減	400 万人の米国人労働者（総労働力の 3%）が週に 1 日以上在宅勤務を行うことで、年間の一次エネルギー消費量を 0.13～0.18%、CO2 排出量を 0.16～0.23%削減できる可能性がある。また、米国の小型車のガソリン消費量を 0.8%減少させることができる。	並
34	Shabanpour et al. (2018)	アメリカ	シナリオモデリング	テレワークによる通勤距離と排出量の削減	2（通勤移動、非通勤移動）	削減	労働者の50%が「フレキシブルな勤務スケジュール」を持つ場合、1日の車の移動距離（VMT）と車の移動時間（VHT）をそれぞれ最大0.69%、2.09%削減できる。本仮定で考えると、この対策により温室効果ガス排出量を最大0.71%削減できる可能性がある。	並
35	Shimoda et al. (2007)	日本	シナリオモデリング	家庭用エネルギー消費量の増加と業務用エネルギー消費量の削減によるエネルギー消費量の変化	2（オフィスのエネルギー消費量、家庭のエネルギー消費量）	削減	在宅勤務率の上昇に伴いオフィスビルの床面積が減少するとすれば、全体の60%の人が在宅勤務を行うことで、大阪市内の家庭部門および業務部門の総エネルギー消費量の0.6%を削減することができる。	並
36	Van Lier et al. (2014)	ベルギー	調査データの分析	テレワークにより減少する通勤距離	1（通勤移動のみ）	削減	在宅でテレワークを行うことで通勤距離が1日45km削減され、サテライトセンターでテレワークを行うことで1日の通勤距離が60kmから22kmへと38km減少する。	乏しい
37	Vu, S.T. & Vandebona, U. (2007)	オーストラリア	シナリオモデリング	テレワークにより削減される車の移動距離	1（通勤移動のみ）	削減	通勤距離が60km、一人乗りの運転者の割合が70%と仮定すると、ニューサウスウェールズ州の全労働者の18%が週1回のテレワークを実施することで、2001年までに車の移動距離を300万キロ（全体の4.2%）削減でき、2021年までには全体の15.5%の削減が可能である。	並
38	Will ams, E. D. (2003)	日本	シナリオモデリング	在宅勤務により削減される全体的なエネルギー消費量（移動行動の変化、オフィスおよび家庭のエネルギー消費量（冷暖房）を考慮したもの）	3（通勤移動、オフィスのエネルギー消費量、家庭のエネルギー消費量）	削減	移動販売や専門・技術系の労働者（全労働者の約14%）が週4日の在宅勤務を実施することで、全国のエネルギー消費量を1.0%削減することが可能である。事務系労働者（全労働力の約23%）も在宅勤務を導入すれば、さらに 1.1%の削減が可能となる。	乏しい
39	Zhu, P. Y. (2012)	アメリカ	調査データの分析	テレワークによる全体の移動距離（仕事と非仕事の両方）の削減	2（通勤移動、非通勤移動）	増加	2001 年のテレワーカーの通勤距離は非テレワーカーより 34.2%長く（テレワーカー39km、非テレワーカー29km）、非通勤移動距離は 17.1%長い（テレワーカー39km、非テレワーカー33km）。また、テレワーカーは非テレワーカーより仕事以外の移動が多く、1日あたりの移動回数は4.39回（非テレワーカーは3.87回）となる。2009 年のテレワーカーの通勤距離は非テレワーカーより 43.3%長く（テレワーカー43km、非テレワーカー30km）、非通勤移動距離は 15.7%長い（テレワーカー36km、非テレワーカー32km）であり、テレワーカーの仕事以外の移動頻度は、非テレワーカーに比べて低下しており、1日あたりの移動回数は4.18回（非テレワーカーは3.87回）である。全体としては、テレワーク率が 3%の場合、1 ヶ月の往復の通勤移動距離への影響は軽微である。	良い

注） Andrew Hook らの文献 1)より Table 4 を参照し、日本語化したもの

② 物品のデジタル化によるエネルギー消費量への影響に関するレビュー論文

出典）Victor Court and Steven Sorrell (2020) , Digitalisation of goods: a systematic review of the determinants and magnitude of the impacts on energy consumption[2)]

a. 論文の概要

i) 背景

低炭素経済社会に対する情報通信技術（ICT）の寄与度は明らかになっていない。これまでの研究では、ICTの環境負荷を決定する具体的な要因を評価する必要性は強調されてきたが、それらの要因をエネルギー消費量や二酸化炭素排出量への影響の大きさに結びつけるものはなかった。本研究では、このエビデンスギャップを埋めることを目的としている。

ii) 手法

分析対象は物品のデジタル化に限定する。物品のデジタル化は、電子的な等価物質による材料製品の部分的または完全な代替として定義する。本研究では物品のデジタル化がエネルギー消費に与える直接的または間接的な影響に関する体系的な文献レビューを実施する。

iii) 結果

関連する31件の研究を以下の5つのカテゴリーに分類する（電子出版物、電子ニュース、電子業務処理、デジタルミュージック、ストリーミングビデオ・ゲーム）。31件の研究のうち1件を除いて、すべてがライフサイクル分析を用いている。これらの研究では、直接効果と代替効果によって、電子出版物、電子ニュース、デジタルミュージックにおける潜在的なエネルギー削減の可能性が示唆されており、また電子業務処理、ストリーミングビデオ・ゲームからも前者よりは少ないがエネルギー削減の可能性が示唆されている。しかしながら、主要な変数（ユーザーデバイスの寿命やエネルギー効率、個人移動の代替の程度、物的製品やデジタル製品のユーザー数など）に対する仮定次第では、ライフサイクルでのエネルギー消費量が増大するなど、推定結果は大きく異なる可能性がある。また、ほとんどの研究では、デジタル製品が材料製品を完全に代替すると仮定しており、それらすべてでリバウンド効果が考慮されていない。

iv) 議論

利用可能なエビデンスの多様性と特殊性を考慮すると、頻繁に使用されている楽観的な仮定（デジタル製品への完全代替など）やリバウンド効果を無視していることからも、材料製品のデジタル化がこれまでに有意なエネルギー削減をもたらしたと結論付けることは難しく、将来的にそうなる可能性があるとも言い切れない。

(2) 生活行動とエネルギーに関する統計の情報収集

家庭の財・サービス需要シナリオの構築に向けて分析フレームワークを検討する際に、フレームワークの各項の設定をするため、既存の公的統計データを用いて、代表的な個人や世帯の生活行動、消費支出、エネルギー消費を定量的に整理・分析することができる。

そこで、本項では、生活時間や家電製品などの普及・使用状況、ネットショッピングの利用状況に関するデータが取得できるかを確認するため、国内外の各種統計情報を収集する。加えて、モバイル空間統計のような人流の解析データから人々の移動需要の検討に資する可能性があるため、ビッグデータも調査対象とする。

① 生活行動に関連する統計や調査

a. 国際機関における生活時間統計に関する動向

国連や欧州連合統計局（以下、Eurostat という）等の国際機関は、各国が生活時間調査をスムーズに実施できるように、生活時間調査に関するガイドラインを作成している（表 5.4.3-2）。ガイドラインには、調査方法における勧告事項や調査に必要な各種様式（調査票や生活行動分類リストなど）が整理されており、多くの国では、これらのガイドラインで整理されている行動分類に準じて、自国で生活時間の調査を実施している。

国連統計部は、1997 年に「国連生活時間統計のための試験的行動分類（International Classification of Activities for Time Use Statistics：国際統一生活時間分類（以下、ICATUS という）」を発表した（最新は 2016 版）[3]。最新版 ICATUS では 9 種類の大分類の行動区分として構成されており、特徴としては、当時、まだ生活時間調査を実施していない途上国の指針づくりを念頭において、活動の国際分類に、自給農業、有償・無償労働等、特に国民経済体系を意識した点であるという [4]。

また、2013 年に、国連欧州経済委員会（United Nations Economic Commission for Europe（以下、UNECE という））タスクフォースは、生活時間調査に関するガイドライン（Guidelines for Harmonizing Time-Use Surveys）を公表した。UNECE は、①統計学者や政策立案者に生活時間調査の重要性をより良く理解・認識してもらうため、②各国で生活時間調査を実施する際の調査設計に役立てるため、③国レベルでの生活時間結果の相互比較を改善するための目的から本ガイドラインを策定した。現在、世界中の 30 数ヵ国が本ガイドラインの行動分類を参照している [5]。特に、本ガイドラインの行動分類として挙げられている、無償労働分野（アンペイドワーク）の情報に基づく政策の企画立案は極めて重要であると言われており、国連統計部も世界 85 ヵ国の有償・無償労働（ペイドワークと家事・育児・介護などのアンペイドワーク）別の生活時間の比較データを公表している [6]。

Eurostat は、欧州統一生活時間調査（Harmonised European Time Use Surveys（以下、HETUS という））の実現を目指したプロジェクトを 1990 年代から発足し、2000 年に HETUS ガイドラインを発行し、その後、HETUS ガイドラインは数回改訂され、2018 に最新版を公表している [7]。現在、EU 加盟国や他の欧州諸国では、HETUS のガイドラインに準じて、各国の統計局を中心に、生活時間調査を実施している。日本の生活時間統計としては、NHK が 1960 年から 5 年毎に実施している「国民生活時間調査」と総務省統計局が 1976 年から 5 年毎に実施している「社会生活基本調査（以下、社基調という）」がある。2006 年に「社基調」では、「調査票 B」の行動分類を有償労働と無償労働の大分類を新たに組み込み、HETUS の行動分類（表 5.4.3-4）との整合性を考慮して項目の見直しが行われ、現在、HETUS と比較できるようになっている。

多国間生活時間調査（Multinational Time Use Study（以下、MTUS という））は、各国の統計機関に呼び掛けて収集した生活時間統計情報に基づき、生活行動分類に組み替えてデータベース化したものである。MTUS は、いち早く、欧米諸国、オーストラリア、南アフリカ、韓国等世界中の国々の生活時間に関する情報の集積拠点を構築し、統一

された行動分類によるミクロ統計データを提供している点で、国際比較研究にとって貴重な存在であったという[4]。今後は、さらに、中国、インド、ペルー、ガーナの情報も統合すると発表している[8]。

表 5.4.3-2 国際機関における生活時間に関連するガイドラインやデータベースの一覧

No.	実施機関	ガイドライン/調査名	実施年	行動分類
1	国連統計局 UNSD（United Nations Statistics Division）	国際統一生活時間分類 International Classification of Activities for Time Use Statistics（ICATUS）	1997年～2016年版（最新）	• 行動分類：大区分12（雇用関連の活動、自己の最終使用のための財の生産、世帯及びその構成員のための無償家事サービス、世帯及びその構成員のための無償ケア提供サービス、無償ボランティア活動、研修活動や他無償労働、学業、付き合い及びコミュニケーション、コミュニティ参加及び宗教的実践、文化・娯楽・マスメディア・スポーツ活動、セルフケア及びメンテナンス） • 当時、生活時間調査をまだ実施していない発展途上国の指針づくりが念頭におかれ、活動の国際分類に自給農業、有償・無償労働等、特に国民経済計算体系（System of National Account: SNA）を意識して作成
2	国連欧州経済委員会 UNECE（United Nations Economic Commission for Europe）	統一生活時間ガイドライン Guidelines for Harmonizing Time-Use Surveys	2013年	• 統計学者や政策立案者に、生活時間調査の重要性をより良く理解したもらうため • 各国が生活時間調査を実施する際の調査設計に役立つため • 国際的相互比較を可能にするため • 現在30数ヵ国が使用中
3	欧州連合統計局（Eurostat）	欧州統一生活時間調査のガイドライン Harmonised European Time Use Surveys（HETUS）	2000年～2018年版（最新）	• 欧州各国は、HETUSガイドラインに準拠（ただし、全く同一ではない）して、自国で生活時間調査を実施 • 各国の統計局により収集した生活時間調査を欧州統計局が中心にデータベース化（欧州23か国のデータ収録） • 行動分類は10の大分類、35の中分類、116の小分類 • 10分毎の生活行動、自記式（10歳以上）
4	オックスフォード大学・生活時間研究センターCTUR（Centre for Time Use Research）	多国間生活時間調査 Multinational Time Use Study（MTUS）	1980年中頃～	• 各国の統計機関に呼び掛けて収集した生活時間統計情報に基づき、生活行動分類に組み替えてデータベース化 • 収録されているデータは、国によって異なる（例えば、米国の場合は1965年からのデータ有） • 現在は、欧州諸国、米国、オーストラリア、南アフリカ、韓国が対象国であるが、今後は、中国、インド、ペルー、ガーナーも追加予定

注）各種情報を参考に住環境計画研究所が作成

表 5.4.3-3 国際統一生活時間分類（ICATUS）

No.	大分類
1	**雇用及び雇用関連の活動** **Employment and related activities**
2	**自己の最終使用のための財の生産** **Production of goods for own final use**
3	**世帯及びその構成員のための無償家事サービス（自己使用のためのサービス生産）** **Unpaid domestic services for household and family members**
4	**世帯及びその構成員のための無償ケア提供サービス（自己使用のためのケアサービス生産）** **Unpaid caregiving services for household and family members**
5	**無償ボランティア活動、研修活動及びその他無償労働** **Unpaid volunteer, trainee and other unpaid work**
6	**学業** Learning
7	**付き合い及びコミュニケーション、コミュニティ参加及び宗教的実践** Socializing and communication, community participation and religious practice
8	**文化・娯楽・マスメディア・スポーツ活動** Culture, leisure, mass-media and sports practices
9	**セルフケア及びメンテナンス** Self-care and maintenance

注）ICATUS の行動分類表を参考に住環境計画研究所が作成

表 5.4.3-4 欧州統一生活時間調査のガイドライン HETUS の行動分類

No.	大分類	中分類
1	パーソナルケア	・睡眠、食事、その他のパーソナルケア等
2	労働	・主業・副業、労働に関する行動等
3	学習	・学校、大学、宿題、インターンシップ、自習学習等
4	家事	・食事の準備、皿洗い、備蓄やストック管理、家事、庭掃除、ゴミ分別、洗濯、アイロンかけや服を畳む等 ・ペットの世話、犬の散歩 ・建設・修理・補修、買い物（オンラインショッピング含む） ・子供の世話、子供への教育・読み聞かせ・会話等
5	無償労働/活動	・ボランティア活動、他の家庭への支援・手伝い ・無料または少額参加費用の活動 ・宗教活動等
6	社会生活と エンターテインメント	・友人宅への訪問 ・エンターテインメント・カルチャ ・休憩、食事会、冠婚葬祭 ・SNSを通じたコミュニケーション ・映画・芸術・図書等
7	スポーツとアウトドア活動	・各種スポーツ活動、散歩やハイキング、釣り等
8	趣味	・コレクション、芸術、インターネット関連等
9	マスメディア	・読書、テレビ・ビデオ鑑賞等
10	移動とその他	・出勤・退勤、通学、買い物に関する移動、子供送迎、レジャーに関する移動等

注）HETUS の行動分類表を参考に住環境計画研究所が作成

b. 世界各国の生活時間統計や調査の一覧

i) 北米、欧州、オセアニア地域

米国では、労働省労働統計局が 1965 年から American Time Use Survey（ATUS）[9]を実施しており、2003 年以降は、毎年、調査結果を公表している。2003 年には約 2 万人を対象に調査を実施したが、2014 年から 2019 年の間は毎年、約 9,500 人から 14,000 人の調査規模になっている。行動分類は大分類 17 種類と小分類数百種類の構成になっており、生活行動を 10 分毎に自記式で回答してもらったデータが格納されている。

カナダでは、カナダ統計局が 1985 年から 5 年毎に生活時間調査（General Social Survey-Time Use）[10]を実施しており、最新調査年の調査規模は約 6 万世帯（1 世帯から 1 人を対象）である。調査票の行動分類は、HETUS を参考に作成している。

欧州諸国では、前述のように、HETUS[7]ガイドラインの行動分類に準じて、自国の統計機関や研究機関が生活時間調査を実施している。調査頻度や調査規模は国により異なり、また、調査日数については、多くの国では日記式で 24 時間或は 48 時間（連続した 2 日）の行動を 10 分刻みで調査票に記入する方法を採用している。

オーストラリアでは、国の統計局が 1992 年から 2006 年の間に 3 回の生活時間調査（Time Use Survey）[11]を実施しており、調査票は簡易版と詳細版に分けて、48 時間の行動を簡易版では 5 分毎、詳細版では 62 種類の行動について 15 分毎に回答してもらっている。また、ニュージーランドでは 1989 年/90 年と 2009 年/10 年の 10 年毎に 2 回の生活時間調査（Time Use Survey）[12]を実施している。

表 5.4.3-5 各国の生活時間統計や調査一覧（北米・欧州・オセアニア編）

No.	国	調査機関	調査名	実施年/頻度	調査規模/調査対象	備考
1	米国	米国労働省/労働統計局	American Time Use Survey（ATUS）	1965年～2003年以降は毎年結果公表	• 調査年によって異なる • ここ数年は毎年約1万人（15才以上） • 2003年～2019年で計21万人	• 行動分類：大分類17 • 調査日数：1日 • 生活時間記入の単位：10分毎
2	カナダ	カナダ統計局	General Social Survey-Time Use (GSS)	1985年～5年毎	• 2015-16調査：6.15万世帯（15才以上、1世帯から1人を対象）	• 行動分類：大分類9（HETUSを参考に分類） • 調査日数：1日 • 生活時間記入の単位：10分毎
3	欧州	各国の統計局や研究機関	各国のTime Use Survey	国により異なる	• 国により異なる（例：イギリスは1.4万人、フランス：1.5万人、ドイツ：1.3万人）	• 行動分類：欧州連合統計局（Eurostat）のHETUSガイドラインに準じた行動分類 • 調査日数：国により異なる（1日、2日、3日、1週間等） • 生活時間記入の単位：10分毎 • Eurostatが欧州23ヵ国のデータを公表
4	オーストラリア	オーストラリア統計局	Time Use Survey	1992年、1997年、2006年	• 2006年調査：約3,643世帯の7,000人（15才以上）	• 行動分類：大分類11 • 調査日数：連続2日
5	ニュージーランド	ニュージーランド統計局	Time Use Survey	1989/90、2009/10	• 約8,500人（12才以上）	• 行動分類：大分類4、中分類11、小分類71、細分類126（New Zealand Activity Classification for the Time Use Surveyに準じた行動分類） • 調査日数：連続2日

注）各国の生活時間調査の関連資料を参考に、住環境計画研究所が作成

ii) 東アジア地域

日本以外の東アジア諸国でも、生活時間調査が定期的に行われている。

中国では、これまで、2008 年と 2018 年に 2 回の「時間利用調査」[13]を実施している。直近の 2018 年では、北京市や上海市の 2 つの直轄市と河北省、黒竜江省、浙江省、安徽省、河南省、広東省、四川省、雲南省、甘粛省の 9 つの省の都市部と農村部に分けて、約 2 万世帯の 15 才以上の 4.86 万人を対象に調査を実施している。行動分類においては、大分類 20（睡眠・休憩、身支度＜洗顔・沐浴、化粧・散髪・エステ、トイレ、喫煙など＞、飲食、仕事、家庭内生産＜農業・漁業・畜産業等職種や活動別の生活時間＞、家事や家のメンテナンス、子供の世話、子供の塾通いのための送迎、介護、ショッピング・サービス、通院、公益活動、トレーニング、ラジオ・音楽・テレビ視聴、読書、レジャー・エンターテインメント、社会活動＜学校行事、冠婚葬祭、宗教活動、SNS 関連等＞、学校などの施設での学習、スマホ・タブレット・オンライン学習、移動時間）が含まれている。

韓国でも日本と同様に、韓国放送公社 KBS（日本の NHK）が 1981 年から 1995 年の間に「国民生活時間調査」[14]を計 6 回実施した。その後、国民の 24 時間の生活活動および意識に対する資料を収集し、国民の平均的な生活様式を把握することを目的に、韓国統計庁が 1999 年から 5 年毎に、「韓国の生活時間調査」を実施している。調査結果は、国民の生活の質、仕事と家庭の両立、家事などの無償労働の経済的価値の評価、各種福祉、文化、交通の関連政策、ならびに学術研究等の基礎資料として活用されている。調査票は、世帯関連（12 項目）、個人関連（14 項目）、時間日誌（11 項目）の 3 部構成になっており、国際比較ができるように行動分類を設定している。

表 5.4.3-6 各国の生活時間統計や調査一覧（東アジア編）

No.	国	調査機関	調査名	実施年/頻度	調査規模/調査対象	備考
1	日本	NHK	国民生活時間調査	1960年～5年毎	• 1.26万人（10才以上）	• 行動分類：大分類4、中分類5、小分類27 • 調査日数：連続2日 • 生活時間記入の単位：15分毎
		総務省統計局	社会生活基本調査	1976年～5年毎	• 調査票A：約18万人 • 調査票B：約1万人（10才以上）	• 行動分類：調査票A20、調査票Bは大分類6、中分類22、小分類85（HETUSの行動分類との整合性を考慮、国際比較可能） • 連続2日 • 生活時間記入の単位：15分毎
2	中国	中国国家統計局	時間利用調査 ※全国規模の調査ではない	2008年、2018年	• 2018年：約2万世帯の4.8万人（15才以上） • うち、都市部は約61%、農村部は約39%	• 対象地域：11省/市 • 行動分類：大分類20 • 調査日数：1日（24時間） • 生活時間記入の単位：15分毎
3	韓国	韓国統計庁	生活時間調査	1999年～5年毎	• 調査年により異なる • 2019年：約1.24万世帯の2.9万人（10才以上）	• 行動分類：大分類11 • 調査日数：1日（24時間） • 生活時間記入の単位：10分毎

注）各国の生活時間調査の関連資料を参考に、住環境計画研究所が作成

iii) 他の地域

表 5.4.3-7 は、国連統計部が整理している世界 85 ヵ国の生活時間統計や調査の取りまとめ資料を参考に、アジア諸国（東アジア以外）や南米、アフリカにおける生活時間調査の概要を整理したものである。

試験的に調査を実施する国もあれば、タイ、イラン、南アフリカでは 5 年～10 毎に定期的に実施している場合もある。

表 5.4.3-7 各国の生活時間統計や調査一覧
（南アジア・東南アジア・西アジア編、南米・アフリカ編）

No.	国	調査機関	調査名	実施年/頻度	調査規模や調査対象等
1	インド	統計・事業実施省	Pilot Time Use Survey	1998-99年	• 対象地域：6つの州の都市部と農村部 • 約1.86万世帯（6才以上）
2	インドネシア	中央統計庁	Pilot Time Use Survey	1998-99年、2004年、2005年	• 1998-99調査：1.2万世帯（10地域と12つの省） • 2004調査：約1,000世帯（5都市）、15才以上 • 2005調査：360世帯（4つの省）、10才以上
3	タイ	国家統計局	Time Use Survey	2001年、2004年、2009年、2014年	• 行動分類：ICATUSに準じた行動分類 • 2014調査：約8.4万世帯（6才以上）
4	フィリピン	国家統計局	Pilot Time Use Survey（TUS）	2000年	• 調査日数：1日（24時間） • 240世帯の960人
5	マレーシア	女性・家族開発省と統計局共同	Unpaid work survey	2003年	• 調査日数：連続2日 • 3.2万人（15才～64才）
6	イラン	イラン統計センター	Time Use Survey in Urban Areas	2008-2009年、2014-2015年	• 行動分類：ICATUSに準じた行動分類 • 2008-2009調査：3,220世帯 • 2014-2015調査：4,228世帯（15才以上）
7	イラク	イラク統計・情報技術センター	Time Use Survey in Iraq as Module of Iraq Household Socio-Economic Survey-HSES	2007年	• 調査日数：1日 • 約1.8万世帯の2.5万人（10才以上）
8	カタール	開発計画・統計省	Time Use Survey	2012-13年	• 約1.8万人（15才以上）

No.	国	調査機関	調査名	実施年/頻度	調査規模/調査対象
1	アルゼンチン	経済・統計部と大学	Time-use and Volunteer Activities Survey	2010年	• 1,000世帯（15才以上）
		研究機関	1a Encuesta sobre Trabajo No Remunerado y Uso del Tiempo 2013	2013年	• 約6.5万人（18才以上）
		研究機関	Encuesta de uso del tiempo en Encuesta Anual de Hogares 2005	2005年	• 行動分類：ICATUSに準じた行動分類 • 2005調査：件数は不明（15才～74才） • 生活時間記入の単位：30分毎
2	ブラジル	ブラジル地理統計院（IBGE）	Pilot Time use survey	2009年	• 行動分類：ICATUSに準じた行動分類 • 調査日数：1日 • 約4万サンプル（10才以上）
3	チリ	国立統計研究所	Encuesta sobre el Uso del Tiempo (EUT)	2008年	• 行動分類：ICATUSに準じた行動分類 • 1,571世帯（12才以上）
4	南アフリカ	統計局	Time Use Survey	2000年、2010年	• 2000年調査は約1万世帯、2010年調査は3万世帯（10才以上）
5	エチオピア	中央統計局	Ethiopian Time Use Survey	2013年	• 行動分類：ICATUSに準じた行動分類 • 調査日数：1日 • 約2万世帯（10才以上）
6	ガーナ	政府統計局	Ghana Time Use Survey	2009年	• 行動分類：ICATUSに準じた行動分類 • 調査日数：1日 • 4,800世帯（10才以上） • 生活時間記入の単位：60分毎

注）国連統計部(United Nations Statistics Division)の Time-use Statistics に基づき、住環境計画研究所が作成

② 家電製品に関連する統計や調査

各種家電製品の普及状況や使用状況においては、欧米諸国、および東アジア諸国（中国、韓国）を対象に、各国が実施している家庭部門のエネルギー消費に関する統計や調査から、関連データの有無を確認する。

米国では、1978 年から、米国エネルギー省（DOE）エネルギー情報局（EIA）が、Residential Energy Consumption Survey（以下、RECS[15]という）という家庭用エネルギー消費統計を継続的に実施している。RECS では、電化製品、暖房器具、冷房器具、台所用、給湯器、その他家電の 6 大分類の計 38 種類の機器、および車両について保有台数別・車種別に詳細情報が収録されている。

カナダは、カナダ天然資源省/エネルギー効率局（NRCan）が 1994 年より、約 1.3 万世帯を対象に Households and the Environment Survey (HES)[16]を実施しており、20 数種類の家電製品や照明、車両別の保有台数、使用状況、容量や設定状況等のデータが収録されている。

欧州では、各国の統計局や研究機関を中心に家庭用エネルギー消費統計や調査を実施している国がある一方で、Enerdata 社は Odyssee[17]と呼ばれる EU 加盟国のエネルギー効率データベース（産業、民生、運輸部門とサービス部門の最終用途別エネルギー効率指標、さらに詳細なエネルギー消費データ等）を有料で提供している。

イギリスでは、Energy Consumption in the United Kingdom[18]という家庭用エネルギー消費調査が 1970 年から実施されており、家電製品のストック台数以外に EuP 指令(2009/125/EC)に基づいた試験手順に準じて計測された一部機器の消費電力量や待機電力の計測値も入手することができる。

日本においては、過去の成果報告書（H31 年度の成果報告書の 5.5 節）に記載されているように、全国消費実態調査と家庭部門の CO_2 排出実態統計調査（以下、家庭 CO_2 統計という）の公的ミクロデータを活用して、主要耐久消費財の保有台数や使用時間等を整理しているため、ここでは割愛する。

中国においては、1981 年から国家統計局が 2 年毎に実施している「中国統計年鑑 [19]」に家電製品や車両の保有台数が収録されている。

韓国では、日本の家庭 CO_2 統計とほぼ同時期の 2009 年より家庭用エネルギー消費実態調査（Household Energy Consumption Survey[20]）が毎年実施されており、34 種類の家電製品、照明、車両別の保有台数、使用時間または使用頻度、容量やサイズ、エネルギー効率、スマート家電か否かの指標も収録されている。

表 5.4.3-8 各国の家庭用エネルギー消費統計・調査における家電製品の関連指標

国	調査機関	統計/調査名	実施年/頻度	対象機器	関連指標
米国	エネルギー省/エネルギー情報局	Residential Energy Consumption Survey (RECS)	1978年～現在 1993年以降は4年毎 最新調査年：2015年	• 電化製品（16品目）：洗濯機、衣類乾燥機、テレビ・周辺機器、PC・モニター、プリンタ、ファックス、コピー機、加湿器、除湿器、電気ポンプ、カーヒーター、水槽、蒸発冷却器、ステレオ、電話機 • 暖房器具（4品目）：サーモスタット、セントラル暖房機器、暖炉 • 冷房機器（3品目）：サーモスタット、セントラル冷房機器、シーリングファン • 台所用（10品目）：コンロ、オーブン、電子レンジ、屋内外グリル、トースター、コーヒーメーカー、食器洗い機、冷蔵庫、冷凍庫 • 給湯器（2品目）：貯湯式・瞬間式別 • その他（6品目）：照明、温水プール、温水浴槽、窓の数、窓ガラスの種類 • 車両：車種別・保有台数別	• 保有台数 • 使用頻度/時間 • 容量、機能、設定状況等 • 購入時期 • energy star適否 • 車両については、台数、年式、メーカー、モデル、購入時期、走行距離
カナダ	カナダ天然資源省/エネルギー効率（NRCan）	Households and the Environment Survey (HES) (Survey of Household Energy Use (SHEU))	1994年～現在 2007年以降は毎年 最新調査年：2019年	• 電化製品（23品目以上）：冷蔵庫、冷凍庫、コンロ、オーブン、電子レンジ、食器洗い機、洗濯機、衣類乾燥機、加湿器、除湿器、シーリングファン、換気、テレビ・周辺機器、携帯、ホームシアター、ステレオなどの音響機器、タブレット、ノートPC、プリンター、スキャナー、固定電話、ルーター、他 • 暖房器具 • 照明（部屋別・種類別） • 車両（種類別） • 給湯器 • 省エネ改修や高効率機器の導入状況	• 保有台数 • 使用頻度/使用時間 • 容量、設定状況等
欧州	Enerdata社	エネルギー効率データベー（Odyssee） 欧州31ヵ国のデータ収録	1990年～現在 毎年データ更新 最新調査年：2020年	• 6品目（テレビ、冷蔵庫、冷凍庫、エアコン、洗濯機、食器洗い機）	• 台数普及率 • ストック台数
英国	ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）	Energy Consumption in the United Kingdom (ECUK)	1970年～現在 毎年データ更新 最新調査年：2019年	• 冷蔵庫・冷凍庫、洗濯機、衣類乾燥機、ドライヤー、食器洗い機、テレビ、PC、オーブン、IHコンロ、掃除機、セントラルヒーティング（暖房） • 照明（種類別）	• ストック台数 • エネルギー効率ラベル適否 • 機器別消費電力量と待機電力（テレビ、小型キッチン設備、テレビ、ビデオ）
中国	中国国家統計局（NBS）	中国統計年鑑	1981年～現在 2年毎実施 最新調査年：2019年	• 洗濯機、冷蔵庫、電子レンジ、カラーテレビ、エアコン、温水器、レンジフード、携帯電話、パソコン、カメラ • 車両、バイク、電動アシスト自転車	• 台数普及率（都市・農村別、直轄市・省別）
韓国	韓国エネルギー経済研究員（KEEI）	家庭用エネルギーパネル調査（旧家庭用エネルギー消費実態調査）	2009年～現在 毎年データ更新 最新調査年：2019年	• テレビ、洗濯機及び衣類乾燥機、エアコン、扇風機、冷蔵庫、冷凍庫、冷蔵・冷凍庫、食器洗い機、PC、炊飯器、掃除機、空気清浄機、その他（34種類） • 照明 • 車両	• 台数 • 使用時間/使用頻度 容量/サイズ、消費電力、エネルギー効率、スマート家電適否

③ ネットショッピングに関連する統計や調査

ネットショッピングにおいては、日本国内の関連情報のみ収集する。

経済産業省が継続的に実施している「電子商取引実態調査 [21)]」では、企業及び消費者における電子商取引利用の発展・拡大による経済社会の変化や影響等を分析することを目的としている。主な調査項目として、物販系、サービス系、デジタル系の 3 つの分野の企業間及び消費者向け電子商取引の市場規模、電子商取引化率、企業・消費者における電子商取引の利活用動向などが挙げられる。中には、個人の消費動向として、「財（商品）」および「サービス」の側面から個人消費の動向を捕捉しており、家計調査をもとに、1 世帯あたりの財（商品）およびサービス支出の年間支出金額も公表している。

シェアリングエコノミーの市場規模等を明らかにするとともに経済社会への影響等に関する定量的な検討を行うための基礎資料を得ることを目的に、「シェアリングエコ

ノミーに関する実態調査[22]」が実施されている。具体的には、①モノを出品し、購入又は賃貸を希望する利用者をマッチングする事業、②場所を提供し、一時的な利用を希望する利用者をマッチングする事業（ただし、民泊の仲介事業は除く）、③スキルや能力を提供し、活用を希望する利用者をマッチングする事業における事業開始年月、年間取引額、年間手数料収入額等を調査項目としている。

総務省が実施している「家計消費状況調査[23]」では、インターネットを利用した購入状況として、世帯における世帯主、配偶者、その他の世帯員別に、毎月のインターネットを利用した商品・サービスへの支出（ネットショッピング）の総額及び内訳として商品・サービス22品目（食料、贈答品、衣類・履物、家電、旅行関係費、家電・家具、チケット、チケット以外の教養関係費＜書籍、音楽、映像ソフト、パソコン用ソフト等＞、保険・医療＜医療品と健康食品＞、保険、その他＜化粧品、自動車関係用品等＞等）について調査している。

「通信利用動向調査[24]」は世帯及び企業における情報通信サービスの利用状況等について調査している。世帯や個人のインターネット利用状況として、スマートフォン、パソコン、タブレット、インターネットに接続できるテレビ、家庭用ゲーム機、携帯電話のインターネット利用機器の利用状況、世帯別の主な情報通信機器の保有状況、ソーシャルネットワークサービスの利用動向が項目として挙げられている。また、産業別のテレワークの導入状況、導入形態（モバイルワーク、在宅勤務、サテライトオフィス勤務）のデータも格納されている。

また、日本通信販売協会[25]においては、当協会会員428社（2019年度時点）を対象に、衣類品、家庭用品、雑貨、食料品、通信教育・サービス、その他の6つの商品分類について、業界全体の通信販売市場の売上高調査を年1回実施している。

表 5.4.3-9 国内のネットショッピングに関する統計/調査

統計/調査	概要
電子商取引実態調査	• 実施主体：経済産業省 • 実施開始時期/頻度：1998年～毎年 • 調査項目 ☑企業および消費者向けの分野別電子商取引の市場規模、企業・消費者における電子商取引の利活用動向など（BtoC-EC、CtoC-EC、BtoB-EC、越境EC） ① 物販系分野：食品、飲料、酒類、生活家電、PC、書籍、化粧品、生活雑貨、家具、衣類、自動車‥等 ② サービス系分野：旅行、飲食、チケット販売、金融、理美容、医療、保険‥等 ③ デジタル系分野：電子書籍、有料音楽や動画配信、オンラインゲーム‥等
シェアリングエコノミーに関する実態調査	• 実施主体：経済産業省 • 実施開始時期/頻度：2019年/1回限り • 調査手法：郵送調査、オンライン調査 • 調査項目：以下に示す3つの事業別の年間取引件数や金額‥等 ☑提供者がモノを出品し、購入又は賃貸を希望する利用者をマッチングする事業：個人・自動車やバッグ、法人・設備 ☑提供者が場所を提供し、一時的な利用を希望する利用者をマッチングする事業：法人・自社会議スペースや駐車場 ☑提供者が空き時間にスキルや能力を提供し、活用を希望する利用者をマッチングする事業：家事代行、育児や介護
家計消費調査	• 実施主体：総務省 • 実施開始時期/頻度：2002年～毎月 • 調査項目 ☑世帯の状況に関する事項 ①世帯に関する事項、②電子マネーの利用状況 ③インターネットを利用した購入状況（世帯人員別の商品・サービスの購入金額、最も多く購入に使用した機器＜媒体＞） ☑毎月の特定消費等に関する事項 ①世帯に関する事項（前月の変更）、②特定の商品・サービスの購入金額 ③インターネットを利用した商品・サービスの購入金額（宿泊、食料、家電、衣類、保険などの商品・サービス別の購入金額）
通信利用動向調査	• 実施主体：総務省 • 実施開始時期/頻度：世帯調査は平成2年～毎年、企業調査は平成5年～毎年 • 調査項目（世帯調査と企業調査）： ☑通信サービスの利用状況、情報通信関連機器の保有状況等（インターネットの利用目的・用途としてネットショッピングの利用率データはあるが金額はない、産業別テレワーク導入状況、テレビ等でのインターネット接続状況‥等）
インターネット通信販売利用実態調査 ※有料	• 実施主体：公益社団法人　日本通信販売協会（JDMA） • 実施開始時期/頻度：2008年～毎年 • 調査項目：通信販売の利用状況（回数、金額、商品、販売会社、利用目的、今後の利用意向など）、宅配ボックスの利用状況、インターネット利用頻度（オークションやフリマサイトの利用頻度など）‥等 ※品目別の通信販売売上高の月別データ有

④　その他

ビッグデータを使用することで、昼間/夜間人口密度や移動需要の検討に資する可能性があることから、民間企業が実施している関連調査を以下の通り整理する。

モバイル空間統計[26)]は、“いつ”“どんな人が”“ドコから”“ドコに”動いたか分かる、全国の 1 時間ごとの人口分布の時間変動とその属性分布データが収録されている新たな人口統計である。本統計を用いて、「性別」「年代」「居住エリア」「国・地域」などの切り口から人口を分析、また、エリアの特徴（分布）や人々の動き（移動）を時間帯ごと（推移）に把握することができる。

また、wifi 人口統計データ[27]は、wifi の接続情報を基にした人流解析データで、人々がどんな場所に行っているかなどの行動を把握することができ、ダイナミック情報をマーケティングや人流解析に活用するためのビッグデータである。

表 5.4.3-10 人流や移動に関するビックデータ

統計/調査	概要
NTTドコモ（モバイル空間統計）	• 概要：ドコモの携帯電話ネットワークのしくみを使用して作成される人口の統計情報/日本全国の1時間ごとの人口分布 ☑いつ・どんな人：人口分布の時間変動とその属性（性・年代）分布データ ☑ドコからドコへ：ドコ（居住地）から、どれだけの人が来ているか（国内＆訪日外国人） • 活用分野：商圏分析、観光客の調査、広告エリア選定、出店のエリア選定、販売促進プロモーション、防災計画‥等
Wi-Fi人口統計データ	• 実施主体：国際航業株式会社 • 概要：wi-fiの接続情報を基にした人流解析データで、人々がどんな場所やお店に行っているかなどの行動を把握可能 （ダイナミック情報をマーケティングや人流解析に活用するためのビッグデータ） • 活用分野：商圏分析、顧客分析、回遊調査、人流計測、観光/防災 • 調査項目：詳細は不明※資料請求する必要有

(3) まとめ

本節では、生活行動とエネルギーに関する既往研究および既存の統計情報を収集し、整理を行った。

① 生活行動とエネルギーに関する既往研究の情報収集

本節(1)では、生活行動とエネルギーに関する既往研究として、2020 年に発表された 2 つのレビュー論文を日本語化して知見の調査・整理を行った。

主な知見を以下に示す。

a. テレワークによるエネルギー消費量への影響に関するレビュー論文

- 39 件の研究うち、テレワークによりエネルギー消費量の削減を示唆しているのは 26 件で、エネルギー消費量の増加又は変化しないことを示唆しているのは 8 件である。
- エネルギー削減の主な要因は、通勤のための移動距離の短縮であり、オフィスのエネルギー消費量の削減にも寄与する可能性がある。しかし、より広範囲の影響を考慮している研究では、削減効果は低く評価される傾向にある。
  - ➢ 仕事以外の移動や家庭でのエネルギー消費量の増加は、仕事での移動の減少によるエネルギー消費削減量を上回る可能性がある。
- リバウンド効果については以下の 3 つが挙げられている。
  - ➢ 居住地の変化に伴う通勤距離の増加
    - ✧ テレワークの導入は、居住地の長期的変化を誘発する可能性があり、テレワーカーは非テレワーカーより通勤時の移動距離が長い傾向にあるため、テレワーク勤務日に通勤距離を削減することで得られる効果

は、オフィス勤務日における長距離の通勤移動によって、部分的または完全に相殺される可能性がある。

- 仕事以外の移動の増加
  - テレワークは仕事以外の移動を促進する可能性があり、通勤していない労働者は、通勤の途中での効率的な移動ができないため、仕事以外の行動のため特定の移動が必要となる。日々の通勤の回避による移動距離の削減は、テレワーカーが仕事以外の移動を追加的に行うことで、部分的または完全に相殺される可能性がある。
- 世帯内の移動動態による仕事以外の移動への影響
  - 片働き世帯では、テレワークの頻度が高ければ高いほど、すべての移動手段、特に車による移動量が多くなる。就労者 1 人当たりの車の所有率が低い（1 台未満）の世帯では、世帯主が在宅勤務を行うと、他世帯員の車の使用量が増加するという副次的な影響が確認されている。

b. 物品のデジタル化によるエネルギー消費量への影響に関するレビュー論文

- 31 件の研究のうち 1 件を除いて、すべてがライフサイクル分析を用いている。これらの研究では、直接効果と代替効果によって、電子出版物、電子ニュース、デジタルミュージックにおける潜在的なエネルギー削減の可能性が示唆されており、また電子業務処理、ストリーミングビデオ・ゲームからも前者よりは少ないがエネルギー削減の可能性が示唆されている。
  - しかしながら、主要な変数（ユーザーデバイスの寿命やエネルギー効率、個人移動の代替の程度、物的製品やデジタル製品のユーザー数など）に対する仮定次第では、ライフサイクルでのエネルギー消費量が増大するなど、推定結果は大きく異なる可能性がある。
  - ほとんどの研究では、デジタル製品が材料製品を完全に代替すると仮定しており、それらすべてでリバウンド効果が考慮されていない。

② 生活行動とエネルギーに関する統計の情報収集

本節(2)では、①生活時間、②家電製品などの普及・使用状況、③ネットショッピングの利用状況、④人流の解析データから人々の移動需要を把握できるビッグデータについて、国内外の既存統計から入手可能なデータの有無を確認した。これらの統計データは、家庭の財・サービス需要シナリオの構築に向けた分析フレームワークの各項の設定を検討する際に参考材料となり得ると考えられる。

a. 生活時間に関する統計情報

生活時間に関する統計情報として、国連や eurostat など国際機関が、各国の生活時間調査を順調に進めるため、かつ国レベルでの生活時間を比較できるように、調査設計の要領や生活行動分類についてガイドラインを提供しており、これらのガイドラインを参考に、世界各国で生活時間調査を実施している。国連統計部が取りまとめている世界 85 ヵ国の生活時間に関する統計や調査概要をみると、先進国に限らず、発展途上国においても、生活時間に関する関連データの存在が確認できた。

b. 家電製品に関する統計情報

家電製品や車両の保有状況および使用状況においては、欧米や東アジア諸国が実施している家庭用エネルギー消費に関する統計や調査から、関連データの有無を確認した。今回の対象国の中、多くの国においては、保有状況および使用状況に関する統計データが存在することが確認できた。

c. ネットショッピングに関する統計情報

ネットショッピングに関する統計や調査においては、日本の関連情報のみ収集しており、商品やサービスの細分類別の市場規模や利用状況を収録されていることが確認できた。必要に応じて、今後は欧米やアジア諸国においても関連情報の有無について確認したい。

d. その他統計情報

その他の情報として、人流のビッグデータを用いて人々の移動需要を予測するような国内の民間事業者が公表している統計について確認した。必要に応じて、今後は欧米やアジア諸国においても関連情報の有無について確認したい。

参考文献（5.4.3 に関するもの）

1) Andrew H, Victor Court, Benjamin K Sovacool and Steve Sorrell: A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking, Environmental Research Letters, Volume 15 (2020)
2) Victor Court and Steve Sorrell: Digitalisation of goods: a systematic review of the determinants and magnitude of the impacts on energy consumption, Environmental Research Letters, Volume 15 (2020)
3) 国連の生活時間統計のための試験的行動分類：ICATUS 行動分類 https://unstats.un.org/unsd/demographic-social/time-use/icatus-2016/,(accessed 2021-02-08).
4) 水野谷武志：生活時間統計による国際比較研究の到達点と課題：「社会生活基本調査」と HETUS による国際比較統計を素材に, 経済志林, 法政大学経済学部学会, 法政大学学術機関リポシトリ, https://core.ac.uk/download/pdf/223191026.pdf, (accessed 2021-02-08).
5) 国連の生活時間調査に関するガイドライン：UNECE ガイドライン https://unece.org/statistics/ces/time-use-surveys, (accessed 2021-02-08).
6) 国連統計部の世界各国の生活時間データ：UNSD のデータベース https://unstats.un.org/unsd/gender/timeuse/index.html, (accessed 2021-02-08).
7) 欧州統一生活時間調査：HETUS 行動分類 https://ec.europa.eu/eurostat/web/time-use-surveys/data/database, (accessed 2021-02-08).
8) 多国間生活時間調査：MTUS データベース http://www.timeuse.org/mtus/, (accessed 2021-02-08).
9) 米国：American Time Use Survey (ATUS) https://www.bls.gov/tus/, (accessed 2021-02-08).
10) カナダ：General Social Survey-Time Use (GSS) https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV.pl?Function=getSurvey&SDDS=4503, (accessed 2021-02-08).

11) オーストラリア：Time Use Survey
https://www.abs.gov.au/websitedbs/d3310114.nsf/home/time+use+survey#:~:text=Australia's%20Time%20Use%20Survey,to%20make%20a%20real%20difference, (accessed 2021-02-08).
12) ニュージーランド：Time Use Survey
https://catalogue.data.govt.nz/dataset/time-use-survey-2009-10, (accessed 2021-02-08).
13) 中国：時間利用調査
http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201901/t20190125_1646796.html, (accessed 2021-02-08).
14) 韓国：生活時間調査
https://meta.narastat.kr/metasvc/index.do?confmNo=101052, (accessed 2021-02-08).
15) 米国：Residential energy consumption survey (RECS)
http://www.eia.gov/consumption/residential/, (accessed 2021-02-19).
16) カナダ：Households and the Environment Survey (HES)
https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV.pl?Function=getSurvey&SDDS=3881, (accessed 2021-02-19).
17) 欧州：Odyssee データベース
https://www.enerdata.jp/research/energy-efficiency-odyssee-database.html, (accessed 2021-02-19).
18) 英国：Energy consumption in the UK
https://www.gov.uk/government/statistics/energy-consumption-in-the-uk, (accessed 2021-02-19).
19) 中国：中国統計年鑑
http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm, (accessed 2021-02-19).
20) 韓国：Household energy consumption survey
http://www.kesis.net/sub/sub_BbsView.jsp, (accessed 2021-02-19).
21) 日本：電子商取引実態調査
https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/statistics/outlook/ie_outlook.html, (accessed 2021-02-19).
22) 日本：シェアリングエコノミーに関する実態調査
https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/share_eco/index.html, (accessed 2021-02-19).
23) 日本：家計消費状況調査
https://www.stat.go.jp/data/joukyou/index.html, (accessed 2021-02-19).
24) 日本：通信利用動向調査
https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/statistics05a.html, (accessed 2021-02-19).
25) 日本：インターネット通信販売利用実態調査
https://www.jadma.or.jp/statistics/sales_amount/, (accessed 2021-02-19).
26) 日本：モバイル空間統計
https://mobaku.jp/, (accessed 2021-02-19).
27) 日本：Wi-Fi 人口統計データ
http://dynamic.kkc.co.jp/, (accessed 2021-02-19).

5.4.4 with/after コロナの生活行動に与える影響の情報収集

(1) はじめに

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は 2019 年末に中国で初の報告がなされて以降、世界中に感染が拡大し、社会に甚大な影響を与えている。Johns Hopkins Coronavirus Resource Center[1)]によると、2021 年 2 月 12 日時点で、世界の感染者数は 1 億人超で死者数は 236 万人超となっている。日本では 2020 年 1 月 16 日に初の感染事例が報告されて以降、先ず大都市を中心に拡大し、その後徐々に全国各地に拡大した。国内の感染者数は、同じく 2021 年 2 月 12 日時点で 33 万人超、死者数は 4,300 人超となっている。2021 年 2 月現在、世界ではワクチン開発が進んでおり、一部の国では接種も開始されてはいるものの、未だ収束の目途は経っておらず、長期化が予想されている。

感染拡大に伴い、世界各国で様々な拡大防止策が取られ、都市封鎖（ロックダウン）が発令された国々もある。日本でも 2020 年 2 月 27 日に全国の小中学校、高等学校、特別支援学校が臨時休校となり、その後全国を対象とした緊急事態宣言が発令され、不要不急の外出や店舗等の営業に対する自粛要請等がなされた。その後 5 月末に宣言は解除されたが、うがい、手洗いや 3 密（密集、密接、密閉）回避の徹底等を実践する「新しい生活様式」が求められ、人々の生活は様々な場面で急激かつ大幅に変容を迫られた。

COVID-19 の感染拡大はエネルギー消費にも大きな影響を与えている。IEA[2)]は、2020 年の世界のエネルギー需要が 2019 年比で 5%減少すると予測している。エネルギー種別には化石燃料（石炭および石油）の消費量が最も大きな影響を受け、最も影響の小さなエネルギーは再生可能エネルギーであるため、2020 年の世界の CO_2 排出量は 7%近く減少すると予想している。また、2020 年の世界のエネルギー部門の設備投資は前年比 18%減少し、新規の石油・天然ガス供給への投資に大きな影響が及び今後数年間のエネルギー市場に大きな影響を与えると予想している。

家庭部門のエネルギー消費については、Russell[3)]が Oracle 社の米国内の顧客情報から消費電力データを分析し、ロードカーブにおける朝のピークが遅れ、日中のエネルギー消費量が増加していること、光熱費は前年比 50%以上増となった世帯が 38%に上り、低所得者層とそうでない層を比較しても同様の傾向が窺えることを報告している。日本国内については、住環境計画研究所[4),5)]が、総務省家計調査の月次報告を用いて、二人以上世帯における家庭内エネルギー（電気、都市ガス、プロパンガス、灯油）消費量を分析しており、我が国の家庭部門における二人以上世帯のエネルギー消費量は、2020 年 4～6 月四半期に前年同期間比 3.2%、同 7～9 月四半期に 3.7%それぞれ増加となっており、その大半は気温変化の影響では説明できない、という結果となっている。(図 5.4.4-1 参照)。また住環境計画研究所とインテージが共同で実施した調査[6)]では、集合住宅に住む単身世帯では在宅勤務実施がエネルギー消費量に与える影響が大きいという結果となっている。しかしこの増加の要因は構造的には明確ではない。在宅勤務の増加や外出自粛による在宅時間の増加等がエネルギー消費量の増加の理由に含まれていると考えられるが、その定量的な影響評価は現状では難しい。

そこで本節では、COVID-19 感染拡大に伴う家庭部門への影響を検討する際の基礎情報として、ライフスタイルに生じた変化に関する情報を整理することを目的とし、文献調査を実施する。さらに、将来のエネルギー消費シナリオを検討する上で重要な観点となる、COVID-19 収束後のライフスタイルについても可能な限り情報を収集するとともに、それらから想定されるライフスタイルを考察する。

なおここでは、COVID-19 の感染が社会問題となり始めた 2020 年初頭から社会生活における COVID-19 の感染不安が落ち着くまでの時期を「with コロナ期」、それ以降を「after コロナ期」と考えた。COVID-19 の収束がいつになるのかは現時点では不明瞭である。しかしここでは、仮に今後 2～3 年程度以内には収束し、社会生活において COVID-19 の感染不安が落ち着くものと想定した。つまり「after コロナ期」は 2030 年や 2050 年のような遠い将来ではなく、比較的近い将来について検討することとした。

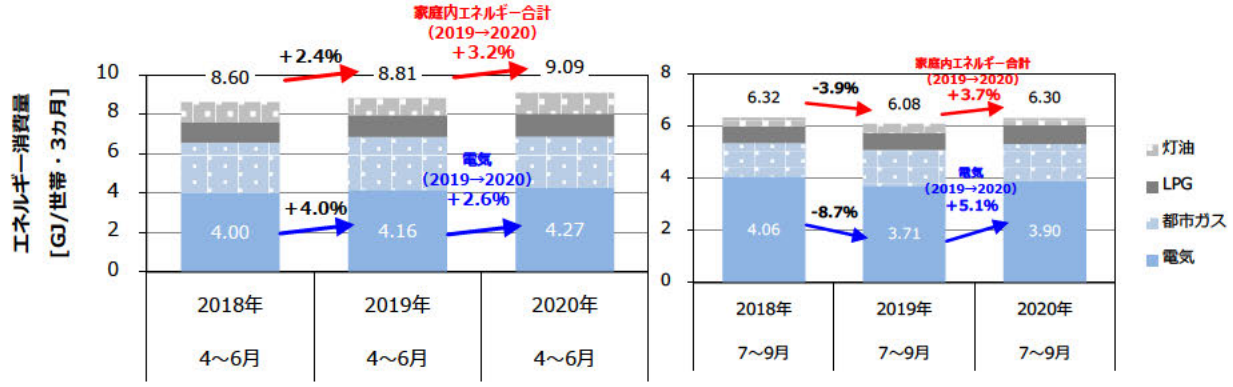


図 5.4.4-1 家計調査を用いた家庭のエネルギー消費量（電気・ガス・灯油の合計）の前年同期間比較 [4),5)]（左図：4～6 月／右図：7～9 月）

(2) 調査方法

本業務では主に文献調査により with/after コロナの生活行動に関する情報を収集し、考察をする。COVID-19 が生活行動やエネルギー消費量に与えた影響は、研究者や企業から報告されているが、学術的な研究の報告がまだ少ないことに加え、世の中のタイムリーな動向把握を目的としているため、学術文献だけでなく、企業の自主研究やプレスリリースも調査対象とする。with コロナ期に関する情報については、収集した文献から、感染拡大に伴う変化（主影響）と、それにより生じた変化（従属影響）を抽出し、それらがどのような関係性にあるのかを整理し、with コロナ期のシナリオを想定する。一方で after コロナ期については当然ながら未だ到来していないため、事実を論じる文献は存在せず、考察や提言といった情報に限られ、不確実性が高い。ここでは、with コロナ期のシナリオを踏まえ想定される after コロナ期のシナリオを示すこととする。

(3) 文献リスト

本調査で収集した文献を一覧にして表 5.4.4-1 に示す。このうち特に重要なものについては本節(4)にて言及する。

表 5.4.4-1 収集文献一覧

No.	文献	文献種類
1	久我尚子, 井上智紀：コロナ禍の 10 代で増えた行動、減った行動―第 1 回 新型コロナによる暮らしの変化に関する調査～10 代編―, ニッセイ基礎研レター2020-07-14（ニッセイ基礎研究所 HP）, 14th Jul.(2020)	企業自主調査
2	久我尚子：感染不安と消費行動のデジタルシフト―第 1 回 新型コロナによる暮らしの変化に関する調査―, ニッセイ基礎研レポート 2020-08-18（ニッセイ基礎研究所 HP）, 18th Aug.(2020)	企業自主調査
3	村松容子：ウィズコロナ時代における高齢家族と同居する人の不安・行動の変化, ニッセイ基礎研レポート 2020-08-24（ニッセイ基礎研究所 HP）, 24th Aug.(2020)	企業自主調査
4	内閣府政策統括官：新型コロナウイルス感染症の影響下における生活意識・行動の変化に関する調査, 内閣府 HP, 21th Jun.(2020)	政府調査
5	株式会社日本リサーチセンター営業企画本部営業企画部：新型コロナウイルス感染症による生活の変化と収束後の継続意向, NRC レポート（日本リサーチセンターHP）, 20th May(2020)	企業自主調査
6	大久保敏弘, 井上敦：第 2 回 テレワークに関する就業者実態調査報告書, NIRA 総合研究開発機構 HP, 5th Aug.(2020)	大学調査研究
7	Laura Di Renzo, et al.: Eating habits and lifestyle changes during COVID-19 lockdown: an Italian survey, Journal of Translational Medicine 18, 229, 8th Jun.(2020)	研究論文
8	Zhao Hu, et al.: Impact of the COVID-19 Epidemic on Lifestyle Behaviors and Their Association with Subjective Well-Being Among the General Population in Mainland China: Cross-Sectional Study, Journal of Medical Internet Research, vol.22 (8), e21176, p.1, 25th Aug.(2020)	研究論文
9	尾谷悠介ら：都市公園における新型コロナウィルス感染症の流行が公園利用に及ぼす影響, 日本都市計画学会関西支部研究発表会講演概要集 18 巻, 25th Jul.(2020)	講演論文
10	東京ガス株式会社都市生活研究所：新型コロナウイルスによる暮らしの変化とおうち時間を楽しむアイデア～緊急事態宣言後の生活調査より～, 東京ガス株式会社都市生活研究所都市生活レポート, May(2020)	企業自主調査
11	四方田健二：新型コロナウイルス感染拡大に伴う不安やストレスの実態～Twitter 投稿内容の計量テキスト分析から～, 体育学研究 Vol. 65, p.757-774, 1st Oct.(2020)	研究論文
12	株式会社博報堂生活総合研究所：『生活定点 1992-2020』の最新結果を発表 ―2018 年から 2020 年にかけて大きく変化した生活者―, 博	企業自主調査

No.	文献	文献種類
	報堂生活総研プレスリリース, 4th Nov.(2020)	
13	水門善之ら：携帯電話 GPS データを用いた消費動向の計測と COVID-19 が消費者の行動特性に与えた影響, 行動経済学会 第 14 回大会, P02, 9th-15th Dec.(2020)	講演論文
14	Russell M. Meyer: Changes in residential energy consumption following the outbreak of COVID-19, Behavior, Energy, and Climate Change Conference, online, Dec.(2020)	講演論文
15	株式会社デルフィス：コロナ禍のおでかけは「同一県内の日帰りドライブ」が主流。感染不安以上に周囲の目が気になる今、応援消費がおでかけの理由に, デルフィス News Release, 26th Aug.(2020)	企業自主調査
16	GasBuddy: GasBuddy Study Finds 45% FewerTravelers on the Road ThisThanksgiving, Gas Prices Projected toBe Lowest Since 2016, News Release 18th Nov.(2020)	企業自主調査
17	Bernstein, E. et al: ワーク・フロム・ホームの実態 オフィスに集まらずに生産性をいかに高めるか, Harvard Business Review, p.33-43, Nov.(2020)	雑誌記事
18	Users Technology Collaboration Programme and International Energy Agency: Behavioural Insights for Demand-side Energy Policy and Programmes—An Emvironment Scan, Behavioural insights for demand-side energy policy and programmes report, Dec.(2020).	コラム
19	Crow, D. and Millot, A.: Working from Home Can Save Energy and Reduce Emissions. But how Much?, IEA Commentary, 12th Jun.(2020)	コラム
20	永倉直武, 井上隆, 高瀬幸造, 渡辺青岳：新型コロナウイルス感染防止に係る行動変容が住宅内のエネルギー・水消費量に及ぼす影響～首都圏集合住宅における長期詳細実測データに基づく検討～, 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, 4-5, Jan.(2021)	講演論文
21	日本経済新聞：コロナでオフィスの姿は～岡田正志氏/荒川陽子氏/今関豊和氏～, 日本経済新聞朝刊, 21th Jan.(2021)	新聞記事
22	オムロンヘルスケア株式会社：テレワークとなった働き世代 1,000 人へ緊急アンケート 新型コロナウイルスによる、働き方・暮らしの変化により「肩こり」「精神的ストレス」などの身体的不調を実感, オムロンヘルスケア HP, 28th Apr.(2020)	企業自主調査
23	オムロンヘルスケア株式会社：新型コロナウイルス感染症の流行における意識と生活習慣の変化～30,000 人アンケートで見えてきた高血圧管理のポイント～, オムロンヘルスケア HP, 15th May(2020)	企業自主調査

No.	文献	文献種類
24	オムロンヘルスケア株式会社：65 歳以上の高齢者 1000 人に聞いた"with コロナ"実態調査 新型コロナウイルス感染症の感染拡大前より、50%以上が運動量減少を実感 全国の緊急事態宣言解除から一ヶ月、日常生活の変化により生じた不調のトップ 3 は「膝の痛み」「腰痛」「目の疲れ」，オムロンヘルスケア HP, 13th Jul.(2020)	企業自主調査
25	PwC コンサルティング合同会社：国内シェアリングエコノミーに関する意識調査 2020, 31th Jul.(2020)	企業自主調査
26	株式会社野村総合研究所未来創発センター：「移動のニューノーマル」に対応し新たな成長を実現する～コロナ対策を経た「移動変容」が運輸・旅行サービスに迫る変化（前編）～，野村総合研究所 HP, 5th Jun.(2020)	企業自主調査
27	株式会社電通：電通、新型コロナウイルスによる生活者意識の変化を日米で定点調査 日米には生活者の心理ステージ/感情/生活者意識/生活行動などに大きな差，電通 HP, 14th May(2020)	企業自主調査
28	株式会社電通：電通、新型コロナウイルス日米定点生活者意識調査第 2 回目を実施 ネガティブ意識は回復傾向も日常生活に戻るには「ワクチン開発」必要，26th May(2020)	企業自主調査
29	株式会社電通：電通、新型コロナウイルス日米定点生活者意識調査第 3 回目を実施 日本では外出の危険を感じて「行楽・レジャー」「運動」などの自粛ムードは継続も、全体的には収束の兆しが見え、気持ちは前向きに，電通 HP, 16th Jun.(2020)	企業自主調査
30	株式会社電通：電通、新型コロナウイルス日米定点生活者意識調査第 4 回目を実施 外出自粛緩和するも、日米ともに第二波に対して高い懸念。日本の外出時の感染への危機意識は米国よりも 30%高い，電通 HP, 30th Jun.(2020)	企業自主調査
31	株式会社電通：電通、新型コロナウイルス日米定点生活者意識調査第 5 回目を実施 外出自粛緩和するも、消費者心理は停滞・長期化へ。 日米共に第二波に対する懸念が高く、日本では外出緩和が早すぎると感じる層が 7 割以上，電通 HP, 15th Jul.(2020)	企業自主調査
32	株式会社電通：電通、新型コロナウイルス日米定点生活者意識調査第 6 回目を実施 日米共に感染再拡大で心理ステージが後退、日本は 5 月上旬頃の水準に。日本では夏休みの予定「特に予定していない」層が 7 割と「自粛の夏」の予想，電通 HP, 29th Jul.(2020)	企業自主調査
33	株式会社電通：電通、電通、新型コロナウイルス日米定点生活者意識調査第 7 回目を実施 日米ともに 6 月中旬以降からの感染の広がりに混乱・動揺を感じる層が増加。 日本では感染の再拡大により「できる限り外出しないようになった」人が約 3 割，電通 HP, 29th	企業自主調査

No.	文献	文献種類
	Sep.(2020)	
33	株式会社電通：電通、新型コロナウイルス日米定点生活者意識調査 第 7 回目を実施 日米ともに 6 月中旬以降からの感染の広がりに混乱・動揺を感じる層が増加。 日本では感染の再拡大により「できる限り外出しないようになった」人が約 3 割，電通 HP, 9th Sep.(2020)	企業自主調査
34	株式会社電通：電通、新型コロナウイルス日米定点生活者意識調査 第 8 回目を実施 日米ともに心理変容ステージが推移し、生活者の感情もポジティブ寄りに。一定の危機感を持ちながらも活動の再開が進む，電通 HP, 16th Oct.(2020)	企業自主調査
35	株式会社電通：電通、新型コロナウイルス日米定点生活者意識調査 第 9 回目を実施 日本は心理変容ステージが進行、感情もポジティブに推移。米国は後退。GoTo キャンペーンの利用意向はトラベルもイートも 41%，電通 HP, 19th Nov.(2020)	企業自主調査
36	株式会社電通：電通、新型コロナウイルス日米定点生活者意識調査 第 10 回目を実施 日本では「コロナ疲れ」を感じている人が 69%。ワクチンは「いち早く接種したい」が日本で 1 割未満、米国では約 3 割，電通 HP, 4th Dec.(2020)	企業自主調査
37	株式会社デルフィス：新しい日常に向け、プライベート空間としてのクルマニーズが高まる。クルマは、“新たな移動様式”を支えるパートナーへ，デルフィス News Release, 19th May(2020)	企業自主調査
38	株式会社ヴァリューズ：コロナ禍で起きた消費者行動変化をネット行動ログで緊急調査 ハローワークや ZOOM、手作りマスクや PC 用品など利用急増，株式会社ヴァリューズ調査リリース，30th Apr.(2020)	企業自主調査
39	柴田重信，田原優，道江美貴子：コロナ禍の外出自粛により生活リズムが変化 ～3 万人規模の調査成果～，早稲田大学プレスリリース，11th Sep.(2020)	大学・企業調査研究
40	博報堂生活総合研究所アセアン：新型コロナウイルスに関するアセアン生活者の意識調査，博報堂生活総合研究所アセアン調査レポート，2nd Oct.(2020)	企業自主調査
41	Toyotaro Suzumura, et al.: The Impact of COVID-19 on Flight Networks, arXiv.org, arXiv:2006.02950, 4th Jun.(2020).	研究論文
42	Shuhei Nomura, et al.: Time to Reconsider Diverse Ways of Working in Japan to Promote Social Distancing Measures against the COVID-19, Journal of Urban Health, vol.97, p457, 30th Jun.(2020)	研究論文

No.	文献	文献種類
43	木村美也子、尾島俊之、近藤克則：新型コロナウイルス感染症流行下での高齢者の生活への示唆：JAGES 研究の知見から，日本老年学的評価研究プレスリリース，210-20-1，8th Apr.(2020)	既往研究レビュー
44	斧田佳純，浅野礼子，鈴木俊博：ウィズ・アフターコロナ時代におけるモバイルビッグデータの活用可能性，第 11 回横幹連合コンファレンス予稿集，C-4，8th Oct.(2020)	講演論文
45	及川晴，及川昌典：ウィズ・アフターコロナ時代におけるモバイルビッグデータの活用可能性，第 11 回横幹連合コンファレンス予稿集，C-4，8th Oct.(2020)	学会誌寄稿
46	遠藤薫：ポストコロナ未来社会と横幹知，第 11 回横幹連合コンファレンス予稿集，A-3，8th-9th Nov.(2020)	講演論文
47	森川正之：新型コロナウイルスと在宅勤務の生産性，独立行政法人経済産業研究所 HP 特別コラム，19th Mar.(2020)	コラム
48	森川正之：緊急事態宣言と在宅勤務の生産性」独立行政法人経済産業研究所 HP 特別コラム，11th May(2020)	コラム
49	株式会社三菱総合研究所，ポストコロナの世界と日本―レジリエントで持続可能な社会に向けて―，MRI NEWS RELEASE，14th Jul.(2020)	企業自主提言
50	奥村隆一：ポストコロナを俯瞰する その 3 コロナ危機を契機とした地方創生推進のポイントは？，三菱総合研究所 HP コラム，30th Nov.(2020)	コラム
51	UN Women: Whose Time to Care? Unpaid Care and Domestic Work During COVID-19，25th Nov.(2020)	国際機関調査

(4) COVID-19 感染拡大がライフスタイルに与える影響

ここでは、本節(3)に掲載した文献のうち主たるものについて取り上げ、with コロナ期における生活行動への影響を、「仕事」「家族関係」「生活」「意識」「その他」の 5 つの視点で整理する。

① 仕事

博報堂が 2 年おきに実施している生活定点調査（調査は 1992 年から偶数年に実施。調査地域は首都 40km 圏と阪神 30km 圏の 20～69 歳の男女で、2015 年国勢調査の人口構成比で割り付けして訪問留置法で実施）の 2020 年調査結果（調査期間は 2020 年 6 月 24 日～7 月 31 日、調査人数は 2,597 人）[7]によると、在宅勤務の実施率が 2018 年の 3%から 19%へと急増しており、人々の働き方が COVID-19 感染拡大により大きく変化したことが窺える（ただし、調査対象者の大半が在宅勤務を実施していないということにも留意すべきと考える）。

内閣府は、国内居住のインターネットパネル登録モニターを対象にオンライン調査を実施し（2020 年 5 月 25 日～6 月 5 日、回収数 10,128 件）[8]、COVID-19 感染拡大下における生活や行動の意識の変化について調査している。その結果、仕事の状況や働き方については主に以下の変化が確認されている。

- 仕事よりも生活を重視するように変化した割合が半数で、仕事重視は 5%に留まる。
- 小売業、農業漁業、医療・福祉・保育関係等の業種でテレワーク [4]実施率が低い。また、正規雇用者に比べ、非正規雇用者のテレワーク実施率は半分以下の水準となっている。地域別に見ると、東京圏と比べ地方圏でのテレワーク実施率は約半分程度の水準となっている。
- テレワーク実施率の高い業種において、テレワークの実施により労働時間が減少しているが、生産性 [5]の向上には寄与していない。
- 今後のテレワーク利用意向が高く、完全テレワークから部分的なテレワーク導入までを含め、何らかの形でテレワークを利用したいと考えている人の割合は約 4 割となっている。

これより、日常における優先順位で仕事を重視する割合が減少し、労働時間が減少したことが窺える。本調査の調査時期は、全ての都道府県で緊急事態宣言が解除された 5 月 25 日からの 2 週間弱という時期で、新たな勤務環境に徐々に慣れ始めてはいるものの、未だ初期の課題が多く残っている時期と考えられる。本調査ではテレワークの実施が（主観的）生産性に寄与していないとの結果があるが、これは新たな環境への順応の問題を含んでいると考えられるため、テレワークと生産性の関係については継続的な結果の確認が必要と考えられる。一方で、負の影響を感じながらも、テレワークの利用意向は高いことから、テレワークの after コロナ期においてもテレワークの実施傾向は継続するものと考えられる。ただし、職種や雇用形態、地域によってテレワークの実施状況にはばらつきがあることから、一様な導入には様々な障壁があることが窺える。

大久保らは、感染拡大による全国の就業者の働き方、生活、意識の変化や、業務への影響等の実態を捉えることを目的に、全国の満 15 歳以上の就業者を母集団とした調査を実施し（日経リサーチ提携モニターの中の就業者が対象で、調査期間は 2020 年 6 月 5 日～6 月 18 日、サンプル数は 12,138 件）[9]、以下の結果を得ている。

---

[4] 一般社団法人日本テレワーク協会の定義によると、テレワークとは、情報通信技術を活用した、場所や時間にとらわれない柔軟な働き方を指し、働く場所によって、自宅利用型テレワーク（在宅勤務）、モバイルワーク、施設利用型テレワーク（サテライトオフィス勤務など）の 3 つに分けられる。しかし COVID-19 感染拡大下で実施しているテレワークはほぼ全て在宅勤務と考えられる。
（参考）一般社団法人日本テレワーク協会 HP, https://japan-telework.or.jp/tw_about-2/, (accessed 2021-01-21).

[5] ここでいう「生産性」は、経済学で扱われるような定量的に計量可能なものではなく、労働者の作業への集中度のような主観的なものであると考えられる。

- テレワークの実施により減少した項目として最も高いのは、「同僚や社外の人とのコミュニケーションのしやすさ」で 28%、次いで、「仕事のアドバイス・相談・指導を行ったり、受けること」22%、「組織・事業としての結束や一体感」22%、「趣味、社会活動、ボランティア活動」17%など、社員間や市民間のインタラクションが必要とされる項目で減少が大きい。
- 逆に増加した項目として最も高いのは「家族とのコミュニケーション」19%、次いで「リラックスした環境での業務」16%、「仕事中の何もしていない時間」15%と、家族との時間やリラックスしたマイペースな就業に関する項目で増加が目立つ。
- 一方で、変化についての調査項目全てにおいて「どちらともいえない、変化なし」と答えている人が 70%程度見られる。
- 2020 年 6 月時点で、週 1 回以上テレワークをしたいと回答した人の割合は 52%、逆に「毎日出勤したい」と答えた人は、半数未満。性別による違いはみられないが、若い人ほどテレワークによる勤務を希望している（50 代以上では、「毎日出勤したい」人は過半数）。
- 男女間でテレワーク利用率には大きな差がある（男性の方が高い）。
- テレワーク利用者の 86%は週 1 回以上のテレワークを希望している。
- 2020 年 3 月時点と比べて 6 月時点では、全体の 59%の人は労働時間に変化なし、減少した人は 32%。
- 仕事の総量は 58%の人は変化なし、29%が減少、13%が増加。
- 所得は 66%の人は変化なし、28%が減少。増加は 5%のみ。
- 仕事全体の満足感は 68%の人は変化なし、26%が減少。

この結果より、現在のテレワークは、自身のペースで業務に取り組むことができるというメリットがあるものの、会社内外問わずコミュニケーションを図ることや指導・教育といった対人関係をベースとした業務の実施に難点があり、組織の結束や一体感が得られ難いことが窺える。この課題は with コロナ期特有のものではなく、現状のテレワークが抱えるものであり、after コロナ期の働き方を考える上での重要な論点になると考えられる。一方で前述の内閣府の調査[8)]と同様に労働時間には減少傾向が見られており、仕事の満足度も減少していることが窺える。ただしこれについても、新たな環境への順応の問題も含まれているものと考えられる。また with コロナ期のテレワークには強制的な側面があることから、本来のテレワークにあるはずの自由度が少なく、満足度の低下に繋がっていることも考えられる。

Bernstein et al.は、米国で働く多様なホワイトカラー600 人超を対象に 2020 年 3 月後半から 5 月まで 2 週間ごとにアンケート調査（回答者は 43 州に分散しており、男女比はほぼ半々、既婚者がほぼ半数、子供のいる人が 3 分の 1 超、マネージャー以上の役職者は約 40%）[10)]を実施した結果によると、最初の 2 週間は仕事への満足度やエンゲージメントが急降下したものの、開始から 2 か月が経過した時点では環境の変化に順

応したことで急回復し、（主観的）生産性は以前と同等であるとの回答が得られた、とのことである。このことからも、順応の速度には差はあるものの、徐々に（主観的）生産性や仕事への満足度は上昇してくるものと思われる。

一方で、Bernstein et al.によると、組織リーダーの多くは自社の従業員アンケートから「コロナ前の状態に戻ったなら、たまには出勤して仕事をする機会も得たい」と考えている人が大多数であったことを知った、という。また、普段は一緒に仕事をしない人同士がふと鉢合わせし、偶然の出会いや交流等により新しいアイディアや大きな成果を得る機会があることが物理的なオフィスの利点であり、そのような機会により構築される緩やかな結び付きは、新情報や補完的な専門性をもたらし、組織目標の達成に重要な役割を果たすことが証明されているという。

岡田は、企業は今後、オフィスと在宅勤務を使い分けることになると予想しており、これからのオフィスはコミュニケーションの活発化やストレス低減、仕事の効率化を図ることで、在宅勤務の労働環境より働きやすくなる余地がある、と述べている[11)]。

② 家族関係

前述の内閣府調査[8)]によると、感染拡大前と比べて、仕事よりも生活を重視するように変化した割合が半数を占めている。また、男性の家事負担が増え、家事への向き合い方の意識が変わった割合が半数超となっており、特に小学生までの子供がいる世帯でその傾向は顕著になっている。普段仕事を優先していた男性が、在宅勤務や外出自粛に伴う家庭生活時間の増加により、家事・育児に割く（もしくは割かざるを得ない）時間が増え、意識が変わったものと思われる。

前述の大久保らによる調査[9)]では、以下の結果が示されている。

- 家事・育児・介護時間は76%の人が変化なし、18%は増加。未成年の子どもと同居している人、特に女性で増加した人が顕著に多くなっている。
- 余暇時間は、変化がない人が60%、増加した人が26%、減少した人が13%。
- 睡眠時間は、変化がない人が74%、増加した人が14%、減少した人が13%。
- 生活全体の幸福感は、6月時点で3月と比べて変化がない人の割合が65%、減少した人が27%で、心身の健康は22%の人が低下。

また、東京ガス都市生活研究所の自主調査（東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県の20代以上の、同研究所が保有するアンケートモニター男女1,200名を対象にオンライン調査で、調査期間は2020年4月24日～27日）[13)]では、以下の結果が示されている。

- 「家事の仕方」が変わった人は、女性30～50代で半数以上。
- 料理・掃除・育児時間の増加は男女差が大きく、特に女性30代では料理・掃除ともに6割以上が増加。
- 30～40代既婚女性は、ストレス解消のため「ひとりになれる場所・時間を作ること」を実現できていない。

さらに、国連女性機関による自主調査（世界 38 か国の 18～86 歳の男女を対象にオンライン調査や電話調査等を実施、サンプル数は一国当たり 612 名～8198 名、調査期間はコロナ発生後 2020 年 11 月 7 日までの期間）[13)]では、以下の結果が示されている。

- 家事・育児・介護の負担が増えた人は、女性で 60%、男性で 54%。
- 老人や病人、障害者の世話の負担が増えた人は、女性で 20%、男性で 21%。
- 女性が育児に費やした時間は、16 か国平均で、コロナ前の 26 時間/週から、コロナ禍で 31 時間/週に増加。一方、男性はコロナ前の 20 時間/週に対し、コロナ禍で 24 時間/週に増加。

日本や世界各国の女性の家事・育児・介護時間が増加していることについては、女性の就業状態や家庭での役割等の面における従来からのジェンダーギャップが反映されている可能性がある。幸福感や心身の健康の低下傾向も見られており、with コロナ期に学校の休校や外出自粛等といった不自由な生活において、家事・育児・介護に向き合う時間が長くなることの悪影響が窺える。after コロナ期においては不自由な面は解消されるものと思われるが、改めて浮き彫りになった従来からの課題について、どのように向き合うのかは、after コロナ期におけるライフスタイルを考える上での重要な視点となると考えられる。

③ 生活

PwC コンサルティング合同会社は、全国の消費者のシェアリングエコノミー[6]に対する意識について、2017 年より継続して調査している。4 回目となる 2020 年の調査では、16 歳～70 代の国内全域の一般消費者を対象に WEB アンケート調査を実施し（調査期間は 2020 年 5 月 9 日～5 月 11 日。10,001 名にスクリーニング調査を実施し、うちシェアリングエコノミーのサービスのいずれかを知っていると回答した 1,000 名、いずれも知らないと回答した 1,000 名の合計 2,000 名に本調査を実施。）[14)]、以下の結果を示している。

- スクリーニング調査では、シェアリングエコノミーのサービスの認知度は 50.7%。前年調査から伸び率は鈍化しているが、引き続き上昇し、2020 年に初めて半数に到達した。
- カテゴリー別のサービスの認知度では、「場所・空間 [7]」(64.0%)、「移動手段 [8]」(77.8%)、「モノ [9]」(76.1%)と、過去調査と同様の傾向を示す。一方、認知度の

6 本調査において、「シェアリングエコノミー」とは、個人等が保有する「遊休資産」などを、インターネット上のプラットフォームを介して他の個人等が必要なタイミングで利用することを可能にする経済活動の総称と定義している。ソーシャルメディアが有するコミュニケーション機能が活用されるのもその特徴の一つ。

7 カテゴリー「場所・空間」とは、宿泊場所、駐車場、会議室、荷物預かりサービス等を提供するものを指す。

8 カテゴリー「移動手段」とは、自動車（移動手段の提供を含むものも対象）、自転車等を提供するものを指す。

9 カテゴリー「モノ」とは、洋服や家電、子供用品等を提供するものを指す。

増加率が高いのは、「モノ」(4.5pt 増)、「家事・手伝い・シッターなどのスキルや労働力 [10]」（5.1pt 増）であった。

- シェアリングエコノミーのサービスの複数回利用者の割合は、2017～2019 年にかけて増加していた「場所・空間」が減少し、逆にこれまで減少していたスキル系カテゴリーが 2020 年には増加する結果となった。(「ビジネスプロフェッショナルスキル」は前年から 7.7pt 増、「家事・手伝い・シッターなどのスキルや労働力」は前年から 4.8pt 増)。
- 2 年後に自らシェアリングエコノミーのサービスを利用していると思うと回答したのは 22.1%にとどまるが、前年調査の結果と比較すると 4.4pt 増加した。

COVID-19 の感染拡大した状況では、生活のあらゆる場面で人との接触機会を減らすことが試みられたが、こうしたライフスタイルの変容がシェアリングエコノミーの利用傾向にも表れてきたと考えられる。人との接触や空間の共有を伴うサービスの利用の減少や、スキル提供等の無形資産のサービス利用の増加は、感染不安によって利用意向が変化した可能性があり、after コロナ期においても利用が定着するかは不透明である。しかし、今後のサービス利用継続意向が増加していることから、サービス利用のメリットを見出した一定数の消費者には定着していく可能性がある。

Di Renzo et al.は、COVID-19 のパンデミックに伴う食生活やライフスタイルの変化について、12～86 歳のイタリア国民を対象に WEB アンケート調査を実施し（調査項目は、人口統計学的情報、体格情報、食生活情報、食生活習慣情報。調査期間は 2020 年 4 月 5 日～24 日で有効回収数は 3,533 件）[15)]、以下の結果を報告している。

- 生活習慣の変化について、回答者の 46.1%は変化なし、37.2%は悪化、16.7%は向上。
- 全体的な傾向として、喫煙習慣は減少し、睡眠時間が増加。ロックダウン中にトレーニングをするようになった割合が高い。
- 回答者の 48.6%は体重が増加。喫煙者の 3.3%が喫煙を決意。
- 在宅勤務者や普段の仕事を停止している人は、これまで通りの働き方をしている人と比べて体重が増えたと感じている割合が高い。またそのような人々の多い地域で運動をするようになった人の割合も高い。
- 18～30 歳の集団では、若年者と高齢者に比べて地中海式食事様式 [11]の遵守率が高くなっている。回答者の 15%が農家や有機栽培の野菜や果物を購入するようになり、特にイタリアの北部と中部ではその傾向が強く、BMI 値が低い。

[10] カテゴリー「家事・手伝い・シッターなどのスキルや労働力」とは、家事全般、子育て支援、料理、介護、庭仕事等を提供するものを指す。

[11] 柳川によると、地中海食の特徴は全粒穀物、野菜、果物、オリーブオイル、n-3 脂質が多く、赤身肉が少ないことが挙げられ、健康への効果が認められており、米国では糖尿病学会等で治療食として推奨されている、とのことである。
（参考）柳川達生：地中海食の応用と糖尿病の管理, 月刊糖尿病#119, 11(5), p.74-75 (2019)

この結果から、COVID-19 感染拡大で外出が困難となったことで運動不足となり、それに伴い健康への悪影響が生じたものの、そのことに意識的になった人たちは健康志向が高まったこともと考えられる。また、イタリア北部及び中部と南部とで BMI 値に差がある理由は明確に文献に記載されているわけではないが、イタリア南北間にある経済・産業・労働市場の構造の格差に起因するライフスタイルの差の影響が大きいものと考えられ、規模の差はあるものの、同様の理由で日本でも地方差や職業差が健康状態に与える影響があるのではないかと考えられる。

Hu et al.は 2020 年 5 月に、中国本土の一般層を対象に、COVID-19 の発生に伴うライフスタイルの変化およびそれに伴う主観的な幸福感（subjective well-being; SWB）の変化をオンラインで調査を行い（調査項目は余暇における運動や映像視聴時間、食事摂取量などのライフスタイル行動の他、社会人口統計学的要因、身体の健康状態、社会的な支援の状況、孤独感等。有効回答数は 1,033 件で、年齢は 18～60 歳、男女比は概ね半々。7 割強が都市部在住）[16]、以下の結果を報告している。

- 回答者の約 7 割は、映像視聴（TV、スマートフォン等）に多くの時間を費やしている。
- 回答者の約 3 割は、コロナ後の生活で野菜と果物の摂取頻度が増加している。
- 運動不足、野菜・果物の摂取頻度が低いこと、朝食を抜くことは、社会人口統計学的要因、身体健康状態、社会的支援状況、孤独感での調整後の SWB の低下と関連している。

また、前述の東京ガス都市生活研究所の調査[13]によると、インターネット・テレビに係る時間は全年代で増加率が高いこと、また、睡眠時間が増加した割合は高齢者以外では 3 割超であることが報告されている。インターネット・テレビは手軽に時間を「潰せる」手段であることから、明確な目的が無いまま自宅で過ごす時間が増えたことで、映像視聴の時間が増加したのではないかと考えられる。また睡眠時間の増加については、通勤が無くなったことで生活リズムが休日に近くなったことが影響しているものと考えられる。

睡眠時間やそれによる健康への影響については、早稲田大学と（株）asken による調査研究[17]でも明らかにされている。asken の提供する食事管理アプリ「あすけん」の利用者に対し、COVID-19 感染拡大による外出自粛中の生活リズムの変化についてアンケート調査を行い（調査期間：2020 年 5 月 25 日～6 月 1 日、調査対象：アプリ利用者の 10 代～70 代男女 30,275 名）、以下の結果が示されている。

- 特に 10 代から 30 代の若者において、平日の寝る時間、起きる時間が遅くなり、生活リズムが夜型化。一方、休日は生活リズムに変化は見られず、これまで問題視されていた平日と休日の生活リズムの差（社会的時差ボケ）が大きく解消。
- 睡眠時間は平日に全年齢で増加。

- 外出自粛により平日・休日に関わらず、睡眠時刻が朝型化（早寝、早起き）した人が痩せ、夜型化（遅寝、遅起き）した人が太ったことが明らかに。
- 太った人は痩せた人に比べ、外出自粛中に活動量が低下し、ダイエットに挑戦しなかったと答えた人が多く、間食も増え、さらに睡眠の質も低下したと回答。

コロナ禍では、強制的に外出自粛の生活となり、これまでとは異なるライフスタイルを強いられた。その結果、生活リズムや睡眠、健康状態への良い影響・悪い影響、両方の側面が見えてきた。こうした経験や研究が蓄積されることにより、今後、社会的な制約（学校や就業先等）に合わせたライフスタイルから、健康面も考慮した、人々にとって最適なライフスタイルへと変化していく可能性もあるのではないだろうか。

また、外出自粛による高齢者の健康影響については、木村らが日本老年学的評価研究（JAGES）に蓄積された研究のレビューを行い[18]、外出自粛や交流の減少により、どの程度のリスクが予想されるかをまとめている。以下にレビュー内容を抜粋する。

- 歩行時間が1日30分未満、外出頻度が少ない、友人と会う頻度が月1回未満、地域の会への参加がない、仕事・家事をしていない高齢者は、3年間で要支援以上の要介護認定になりやすい。
- 男女ともに外出・買い物・料理をしない人、男性では園芸、女性ではスポーツをしていない高齢者は、これらをしている人に比べ、3年後に認知症を発生するリスクが約2倍になることが明らかに。
- 地域で運動グループの参加者が10%増加すると、その人自身が参加しているか否かに関わらず、地域の高齢者全体の抑うつ発症リスクが11～4%減少していた。

with コロナ期においては、ふだん外出や交流の習慣がある高齢者も、その習慣を継続できない状況にある。COVID-19の影響が長期化する中、健康面の悪影響に注意を払う必要がある。また、after コロナ期には高齢者の外出・交流の機会は再び増えていくと考えられる。

移動については、米GasBuddy社が2020年の感謝祭休暇の旅行計画について調査を実施しており（調査実施時期は2020年10月25～28日、回答数は1,860件）[19]、以下の結果を報告している。

- 米国では2020年のガソリン価格が2016年以降最低水準となったにも関わらず、感謝祭休暇に車で旅行すると回答した割合は35%に留まり、2019年の65%から急減[12]。

[12] GasBuddy[19]によると、米国ではホリデーシーズン中はコストを重視しない傾向にあり、ガソリン価格が3ドル超の時でも多くの人は感謝祭旅行を躊躇しなかった、という（2020年は2.17ドル）。

- 一方で1時間未満の近距離旅行をすると回答した人は2019年比で75%増加。

また日本では、トヨタ系列の（株）デルフィス（2021年1月1日よりトヨタ・コニック・プロ（株））が、全国の18～69歳の男女を対象に、コロナ禍における「移動」「クルマ」に関する意識調査をインターネット調査により実施しており（サンプル数は計1,000件、性年代別の人口構成比に合わせて対象者を割付、調査時期は2020年8月17～19日）[20]、2020年の傾向として以下の点を報告している。

- 帰省習慣のある人の49%が今夏の帰省を見送り。
- 「同一県内の日帰りレジャー」が主流。
- クルマは感染リスクの観点で安全な移動手段と認識され、実際に購入に踏み切った人も存在するなど、購入意向も高い。
- 自動車の利用頻度は全国で上昇。一方で東京では減少。

尾谷らは、COVID-19流行下における兵庫県内の県立都市公園の利用実態と利用者意識を調査し（公園の利用者に対面式のアンケートを実施。調査内容は属性、来園目的、公園の利用内容、兵庫県の感染症対策や今後の取り組みに対する評価。調査時期は2020年3月25、26日と、2020年4月25、26日の計4日、回答者数は合計216名）[21]、主な傾向として以下の点を報告している。

- COVID-19感染を避ける来園者は都市部の公園（明石公園）よりも郊外部の公園（播磨中央公園）を選択する傾向がある。
- 都市部の明石公園を利用する人の意識は、普段の利用意識と変わらない。
- ピクニックのような集団での利用が減少し、散歩のような個人利用が増加。

これらの傾向より、COVID-19感染拡大下においては、外出することへの抵抗感が増し、移動が減少していること、外出する場合も混雑する中心地や遠方への外出は減少し、近郊の郊外でのレジャーが増えていること、また、他人との物理的距離を保った移動が増えていることが窺える。

④ 意識

前述の内閣府、大久保ら、東京ガス都市生活研究所の各調査[8),9),13)]では、外出自粛生活の中で、人々が家庭を重視する割合が増加したこと、また、家事等に割く時間が増加したことが報告されている。また、その変化を促した要因のひとつである在宅勤務については継続意向が高いことから、afterコロナ期においても、家庭を重視する割合はこれまでと比べると高い水準となることが考えられる。

また、同じく前述のDi Renzo et al.及びHu et al.の各報告[15),16)]からは、外出制限による運動不足により健康状態が悪化したことで、健康意識が高まったことが窺える。また東京ガス都市生活研究所の調査結果[13)]では、ストレス軽減に重要と思うこととして「睡眠」「運動」「おいしいもの」の3つが挙げられており、withコロナ期においては身

体的なストレスと精神的なストレスの両面に対し、家庭内でケアすることのニーズが高まっていることが窺える。この点については、外出制限の無いafterコロナ期に、この影響がどの程度残るのかは不明である。

（株）電通は、外出自粛が強いられたwithコロナ期における生活者の意識の変化について定点調査（調査対象は全国20～69歳の男女1,000名、調査期間は4月23日～11月22日の期間に計10回）[22)]を実施している。（株）電通グループの海外連結子会社Dentsu Aegis Network US Holdings, Inc.が米国において、COVID-19における生活者意識の変化を調査したものと同じ内容を調査し、以下のような結果を示している。

- 日本における緊急事態宣言から1～2週間が経過した時期（4月23日～24日）の第1回調査では、生活者の心理を5つのステージ[13]で表したところ、8割が初期2ステージ「混乱・動揺」、「変化への対応」にあると回答。一方、米国では、新規感染者数や死者数が継続して高く、事態が長期化している時期（4月17日～18日）の第4回調査で、ステージ3「順応・適応」以降がすでに46%を占めた。
- 外出自粛のゴールデンウイークが明け感染者数が3月以降初めて100人を下回った時期（5月11～13日）の第2回調査では、ステージ3以降への移行が増えて42%。米国の49%（4月24日）に比べると低い結果となった。
- 全国で緊急事態宣言が解除されてから2週間後（6月9～11日）の第4回調査では、ステージ3以降の回答比率が52%と収束へと気持ちが向かった。米国では50の州全てで経済が再開した時期（5月22日）における調査で、ステージ3以降は49%と日本より低いが、両国で半数を占める結果となった。
- 9～10月にかけて感染者数が減少していた中、再び感染者が増加し、国内の感染者数が過去最高を記録した時期（11月19日～22日）の第10回調査では、ステージ3以降の割合が第9回調査（10月21日～23日）の51%から37%まで後退。米国では、1日の感染者数が10万人を突破し、感染者数が急激に拡大している時期（11月11日）の調査で、ステージ1の割合が減少し、ステージ3以降の割合が50%まで回復した。

この調査では、感染拡大から間もない頃には混乱・動揺の感情が広がるが、一定の期間を経ていくと、変化に対応し、順応・適応していく様子が見られた。また、感染が再拡大すると再び混乱に陥る様子が日本では見られたが、感染者数が急激に拡大した時期の米国では、順応・適応の状態にある人々も多く、感情が飽和してしまったようにも思える。

こうした危機的状況における感情の変化は、及川らによる研究[23)]でも明らかにされている。2009年における日本を含む世界的な緊急事態の一つであった新型インフルエンザの流行に伴い、新型インフルエンザの継続的な報道が、視聴者の知識量、感情状

[13] ステージ1：混乱・動揺、ステージ2：変化への対応、ステージ3：順応・適応、ステージ4：収束の兆し、ステージ5：収束後の生活へ

態、予防行動に及ぼした影響を調査（調査対象：都内大学生 112 名（うち、全調査に回答した 79 名を分析対象)、調査時期：感染拡大初期の 4 時点（4,5,6,7 月））している。

- 新型インフルエンザの関連報道に対する感情飽和について、「マスコミは騒ぎすぎだと思う」「同じようなニュースの繰り返しに感じる」の 2 項目に対する合意得点を調査した結果では、時点 1[14]（2009 年 4 月 29 日）よりも時点 2[15]（2009 年 5 月 29 日)、時点 2 よりも時点 3[16]（2009 年 6 月 24 日）の感情飽和得点が高かった。時点 3 と時点 4[17]（2009 年 7 月 29 日）の得点には有意な差は認められなかった。
- 新型インフルエンザに対する不安感情への合意得点では、時点 1 よりも時点 2、時点 2 よりも時点 3 の不安得点が低かった。時点 3 と時点 4 の得点には有意な差は認められなかった。なお、感情飽和と不安感情の間には有意な負の相関が認められた。
- 他者の感染リスクの見積もりについて、時点 1 に比べて時点 2 においてリスクの見積もりは急激に高まり、時点 3、時点 4 と有意に下降していた。
- 一方、自分が感染するリスクの見積もりについては、時点による有意な差は認められなかった。また、いずれの時点においても、自分のリスクは他者のリスクよりも低く見積もられていた。

この事例は今回の COVID-19 感染拡大と非常によく似た状況であるが、人々は、危機的状況に長期間晒されると、自身には影響しないだろうと考え、危機的状況に対する積極的な対応を控えるようである。with コロナ期においても、生活に大きな変化がないとする人が一定数見られたが、その要因のひとつとして、こうした「楽観性バイアス」が影響している可能性も考えられる。このような人々にとっては、with コロナ期を経て after コロナ期に至っても、ライフスタイルは before コロナ期から大きくは変化しないこともあり得るのではないかと考えられる。

⑤ その他

前述の博報堂生活総研の生活定点調査[7)]によると、テレビ電話（ビデオ電話）を利用している割合や、携帯電話・スマートフォンで日常的に支払いをしている割合は、それぞれ 2018 年の 15.0%および 10.7%から、2020 年は 46.0%および 32.0%と急増している。この増加分全てが COVID-19 感染拡大の影響とは言えないが、その影響が多分に含まれているものと考えられる。

[14] 時点 1：ウイルス発生初期。調査 2 日前に WHO が警戒レベルをフェーズ 4 に、日本政府が「新型インフルエンザ宣言」を出した。
[15] 時点 2：日本で感染者が確認され始めた時期。
[16] 時点 3：調査大学における 1 週間の自宅待機が明けた 2 日後。
[17] 時点 4：日本の全都道府県で感染者が確認され、感染が特別なことではなくなり、インフルエンザの毒性が低いことも認識されるようになっていた時期。

⑥ 影響の抽出

①～⑤で言及した文献も含め表 5.4.4-1 に掲載した文献から、感染拡大に伴う変化（主影響）と、それにより生じた変化（従属影響）に関する情報を抽出した。その関係性を表 5.4.4-2 に示す。表中の数値は文献数である。調査文献のテーマや質には偏りやばらつきがあるため、数字の大小が主影響と従属影響の関係性の強弱を説明するものではないが、with コロナ期の生活行動を考える上で、これらは考慮すべきポイントであると考えられる。

表 5.4.4-2 with コロナ期における変化とそれに伴う影響

従属影響		主影響要因・ベクトル											
		外出自粛・ロックダウン			外出自粛に伴う在宅勤務増			感染不安増			混雑回避		
		増える	増える／減る	減る	増える	増える／減る	減る	増える	増える／減る	減る	増える	増える／減る	減る
仕事	在宅勤務	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	労働時間	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	（主観的）生産性	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	収入	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
家族関係	家事・育児・介護	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	調理	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	自宅時間・家族と過ごす時間	3	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
生活	オンラインショッピング	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	オンラインコミュニケーション	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	オンライン教育	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	シェアリング	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	マイカー利用	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	運動	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	映像視聴	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	趣味・余暇	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	郊外レジャー	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	近距離移動	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	混雑回避	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
	旅行	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	対人コミュニケーション	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
	睡眠	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	生活・食生活習慣	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	健康状態	0	1	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
意識	健康意識	2	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0
	感染不安	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	社会不安	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	精神的ストレス	3	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0
	家庭重視	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
その他	デジタル化	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(5) COVID-19 感染拡大が家庭のエネルギー消費に与える影響

本節(4)で述べたような生活者の行動や意識の変化のひとつひとつが、エネルギー消費にどのような影響を与えるのかは明確ではない。一方で COVID-19 感染拡大下における家庭のエネルギー消費の状況についてはいくつか報告がある。

Users TCP のレポート[24]によると、在宅勤務実施により、業務用途の電気を自宅で使うようになったことに加え、料理や掃除の頻度も増え、そのことで家庭のエネルギー消費量が増加している、と報告されている。ロックダウン中のオランダのスマートメータのデータを分析したところ、白物家電、キッチン家電、食器洗い機、照明、ホームエンターテイメントの使用が 10～15%増加したとのことである（一方で、電気自動車の充電は 5～10%減少している）。

Crow and Millot による IEA のコラム[25]では、米国では人々が自宅で過ごす時間が増えた結果、平日のロードカーブが通常時の日曜日のそれに類した形状となっており、一部地域では平日の平均的な家庭用電力使用量が 20%～30%増加したと報告されている。また英国ではロックダウン開始後の数日間で家庭の電力消費量が 15%増加したとのことである。加えて同コラムでは、住宅の広さ、冷暖房の必要性、家電製品の効率等によるものの、在宅勤務はオフィス勤務時と比べて家庭のエネルギー消費量を 1 日当たり 7%から 23%増加させる可能性がある、との推計結果に言及している。

永倉らは、著者らが 2015 年から実測により継続的にエネルギーデータを取得している東京都内の全電化集合住宅 117 世帯における 2020 年春から夏までのデータを、過年の傾向と比較している[26]。主な結果は以下の通りである。

- 2020 年 4～8 月の電力および水の消費量は前年比で 1 日当たり約 2 割増加。緊急事態宣言期間中では平日日中の消費量は前住戸平均で約 5 割と大幅に増加。
- 電力および水の消費量がピークとなる時間帯や変動パターンが前年と大きく異なっている。電力については、緊急事態宣言期間中は日中の消費量が大幅に増加し、夜間のピークが早まった。宣言解除後は日中の大幅増は確認されなくなったものの、夜間のピークは引き続き早まっている。
- 緊急事態宣言期間中に前年比で大幅に増加した電力消費量は、6～7 月には前年との差が縮小したものの、8 月には 3 割増まで再度差が拡大。

これらの結果より、在宅勤務含め家庭内で生活する時間の増加により、with コロナ期の家庭のエネルギー消費量は増加する方向に変化したことがわかる。一方で、エネルギー消費量の変化は、ライフスタイルの変化に大きく影響を受ける。前述の大久保らの調査結果[9]では、with コロナ期においても生活に「変化がない」との回答が目立っている。そのような世帯では、生活に変化があった世帯と同様のエネルギー消費量の変化があったとは言い切れない。当然ではあるが、エネルギー消費量への影響を考える上では、生活の変化に応じた影響を見込むことが重要となると考えられる。

(6) with コロナ期のシナリオ

文献調査とその考察を踏まえ、以下のような with コロナ期におけるシナリオを想定した。

① 外出自粛に伴う在宅勤務の増加の影響

- 家で過ごす時間が増え、その結果、家事・育児・介護が増え、家庭を重視する（重視せざるを得ない）割合が増え、労働時間が減少する。（特に女性）
- 労働生産性が低下し、精神的ストレスが増す。ただし徐々に環境への順応が進む。
- 運動不足により健康状態が悪化し、そのことで健康意識が高まり、運動や健康志向の食生活への改善など、健康意識が向上する。

- 趣味や余暇に充てる時間が増える。

② 感染不安の増加・混雑回避の影響

- 外出への抵抗感が増し、在宅で商品を購入できるオンラインショッピングが増加する。
- 外出する場合も、混雑する中心地や遠方への外出は減少し、近郊の郊外でのレジャーが増える。また、他人との物理的距離を保った移動が増える。
- 感染不安に伴う精神的ストレスが増し、健康意識が向上する。特に高齢者や小さな子供のいる家庭ではこの傾向が強くなる。
- 高齢者にとっては外出への抵抗感が増し、医療的なリスクが増加する。

with コロナ期については、自身の意向とは異なる理由による外出制限や、感染への不安といった要因により突然引き起こされた変化であるため、人々が対応しきれない側面があり、負の影響が伴っている。このような強制的なものは、after コロナ期には解消されることになると考えられる。

エネルギーの観点では、在宅勤務・在宅時間の増加や、調理や家事に割く時間の増加に伴い、家庭のエネルギー消費量は増加する。また、平日と休日のロードカーブの形状の差が小さくなる。

(7) after コロナ期のシナリオ

with コロナ期において生じた負の影響の解消が、どのような方法によってなされるのかが、after コロナ期のシナリオで重要となると考えられる。単に強制的で、人々の価値観に反するもの（外出自粛、対面での面会不可、等）は、徐々に解消されるのではないかと考えられる一方、以下のものは、そのまま定着したり、選択肢のひとつとして定着したりするものと考えられる。

- 使い方によっては便益を得ることができるもの（在宅勤務、オンラインショッピング等）
- 状況に対応・順応できるようになるもの（オンライン飲み会、通信環境や居住環境の整備等による在宅勤務、等）
- before コロナ期の生活に既に潜んでいた様々な問題（女性の家事・就労問題、都心一極集中、満員電車等）に対する解決方法になり得るもの

上記の考えに基づき、after コロナ期のシナリオとして、以下のようなものを想定した。

① 仕事への影響

- テレワーク（在宅勤務含む）とオフィスワークのハイブリッド化が進み、ライフステージによって働き方が選べるようになる。地方差や職種差はあるものの、徐々に、多くの人が同じように働けるような DX 技術が進展する。
- 職業観に変化が生じ、一部で副業が増加する可能性がある。

＜エネルギーへの影響＞

- オフィスのタスクアンビエント化・個室化が進む（この進展が無いと、ベースロードが大きなオフィスではオフィス利用が減少してもエネルギー消費量の減少には繋がらない可能性がある）。
- オフィスの規模縮小に伴い、オフィスビル建設に係る資材需要が減少する。

② 生活への影響

- 仕事に縛られない居住地の選択が進む。ライフステージや興味関心によって居住地や暮らし方が選べるようになる。それに伴い、移動が減少する。
- 対面機会の取捨選択が進むとともに、コミュニケーション可能な人の範囲が広くなる。
- 生活エリアの利便性が向上する。
- DX 技術の進展に伴い、オンライン診療等が普及し、医療が身近に感じられる方向に進む。

＜エネルギーへの影響＞

- 移動に伴うエネルギー消費量が減少する。

③ 住宅への影響

- 住宅は私的領域だけでなく、公的領域（職場空間）を有するようになり、同一住宅内で公私の切り替えがスムーズにできる工夫がなされるようになる。

＜エネルギーへの影響＞

- 自宅で生活する時間の増加に伴い、住宅の性能に意識が向き、性能向上に繋がる。

④ 地方への影響

- 居住地の選択に自由度が増すことで、年齢構成や職種構成等の地方間差異は縮まる方向に進む。

＜エネルギーへの影響＞

- 人口減少地域へ人口が流入する可能性がある。都市のコンパクト化とは逆の流れが一部で起こり、そのことがインフラ維持等の観点で課題になる場合が出てくる可能性がある。

いずれについても、モノ、時間、空間の有効利用が進み、様々な場面で、場所の制約が小さくなる方向に進むと想定した。またそのような時代においては、エネルギー家庭内でのエネルギー消費機会が増加するとともに、家庭部門と業務部門の境界が曖昧になり、エネルギーを消費する場所が「部門」という概念から分離すると考えられる。

(8) まとめ

本節では、主に文献調査により with/after コロナの生活行動に関する情報を収集し、COVID-19 が生活行動やエネルギー消費量に与えた影響について考察し、with/after コロナ期のシナリオを想定した。

① with コロナ期のシナリオ

a. 外出自粛に伴う在宅勤務の増加の影響

- 家で過ごす時間が増え、その結果、家事・育児・介護が増え、家庭を重視する（重視せざるを得ない）割合が増え、労働時間が減少する。（特に女性）
- 労働生産性が低下し、精神的ストレスが増す。ただし徐々に環境への順応が進む。
- 運動不足により健康状態が悪化し、そのことで健康意識が高まり、運動や健康志向の食生活への改善など、健康意識が向上する。
- 趣味や余暇に充てる時間が増える。

b. 感染不安の増加・混雑回避の影響

- 外出への抵抗感が増し、在宅で商品を購入できるオンラインショッピングが増加する。
- 外出する場合も、混雑する中心地や遠方への外出は減少し、近郊の郊外でのレジャーが増える。また、他人との物理的距離を保った移動が増える。
- 感染不安に伴う精神的ストレスが増し、健康意識が向上する。特に高齢者や小さな子供のいる家庭ではこの傾向が強くなる。
- 高齢者にとっては外出への抵抗感が増し、医療的なリスクが増加する。

c. エネルギーへの影響

- 在宅勤務・在宅時間の増加や、調理や家事に割く時間の増加に伴い、家庭のエネルギー消費量は増加する。
- 平日と休日のロードカーブの形状の差が小さくなる。

② after コロナ期のシナリオ

a. 仕事への影響

- テレワーク（在宅勤務含む）とオフィスワークのハイブリッド化が進み、ライフステージによって働き方が選べるようになる。地方差や職種差はあるものの、徐々に、多くの人が同じように働けるような DX 技術が進展する。
- 職業観に変化が生じ、一部で副業が増加する可能性がある。

＜エネルギーへの影響＞

- オフィスのタスクアンビエント化・個室化が進む（この進展が無いと、ベースロードが大きなオフィスではオフィス利用が減少してもエネルギー消費量の減少には繋がらない可能性がある）。
- オフィスの規模縮小に伴い、オフィスビル建設に係る資材需要が減少する。

b. 生活への影響

- 仕事に縛られない居住地の選択が進む。ライフステージや興味関心によって居住地や暮らし方が選べるようになる。それに伴い、移動が減少する。
- 対面機会の取捨選択が進むとともに、コミュニケーション可能な人の範囲が広くなる。
- 生活エリアの利便性が向上する。
- DX 技術の進展に伴い、オンライン診療等が普及し、医療が身近に感じられる方向に進む。

＜エネルギーへの影響＞

- 移動に伴うエネルギー消費量が減少する。

c. 住宅への影響

- 住宅は私的領域だけでなく、公的領域（職場空間）を有するようになり、同一住宅内で公私の切り替えがスムーズにできる工夫がなされるようになる。

＜エネルギーへの影響＞

- 自宅で生活する時間の増加に伴い、住宅の性能に意識が向き、性能向上に繋がる。

d. 地方への影響

- 居住地の選択に自由度が増すことで、年齢構成や職種構成等の地方間差異は縮まる方向に進む。

＜エネルギーへの影響＞

- 人口減少地域へ人口が流入する可能性がある。都市のコンパクト化とは逆の流れが一部で起こり、そのことがインフラ維持等の観点で課題になる場合が出てくる可能性がある。

いずれについても、モノ、時間、空間の有効利用が進み、様々な場面で、場所の制約が小さくなる方向に進むと想定した。またそのような時代においては、エネルギー家庭内でのエネルギー消費機会が増加するとともに、家庭部門と業務部門の境界が曖昧になり、エネルギーを消費する場所が「部門」という概念から分離すると考えられる。

参考文献（5.4.4 に関するもの）

1) Johns Hopkins Coronavirus Resource Center: COVID-19 Dashboard by the Centerfor Systems Science and Engineering at Johns Hopkins Unidersity, https://coronavirus.jhu.edu/map.html, (accessed 2021-02-12).
2) International Energy Agency: World Energy Outlook 2020, Oct.(2020) https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020, (accessed 2021-01-18).
3) Russell M.: Changes in Residential Energy Consumption Following the Outbreak of COVID-19, Behavior, Energy, and Climate Change Conference 2020, Dec.(2020)

4) (株)住環境計画研究所：新型コロナウイルス（COVID-19）の感染拡大及びその防止に伴う家庭のエネルギー消費への影響分析（第二報），住環境計画研究所 NEWS RELESE, 17th Aug.(2020) http://www.jyuri.co.jp/3283/, (accessed 2021-01-18).
5) (株)住環境計画研究所：新型コロナウイルス（COVID-19）の感染拡大及びその防止に伴う家庭のエネルギー消費への影響分析（第三報），住環境計画研究所 NEWS RELESE, 27th Nov.(2020) http://www.jyuri.co.jp/3375/, (accessed 2021-01-18).
6) (株)住環境計画研究所, (株)インテージ：新型コロナウイルス（COVID-19）の感染拡大に伴う外出自粛による家庭のエネルギー消費への影響分析―第一報：在宅勤務とエネルギー消費の関係および在宅勤務実施世帯の特徴，住環境計画研究所&インテージ NEWS RELESE, 9th Sep.(2020) http://www.jyuri.co.jp/3301/, (accessed 2021-01-18).
7) 株式会社博報堂生活総合研究所：『生活定点 1992-2020』の最新結果を発表 ―2018 年から 2020 年にかけて大きく変化した生活者―，博報堂生活総研プレスリリース, 4th Nov.(2020) https://seikatsusoken.jp/newsrelease/16345/, (accessed 2021-01-21).
8) 内閣府政策統括官：新型コロナウイルス感染症の影響下における生活意識・行動の変化に関する調査，内閣府 HP, 21th Jun.(2020) https://www5.cao.go.jp/keizai2/manzoku/pdf/shiryo2.pdf, (accessed 2021-01-21).
9) 大久保敏弘，井上敦：第 2 回 テレワークに関する就業者実態調査報告書, NIRA 総合研究開発機構 HP, 5th Aug.(2020) https://www.nira.or.jp/outgoing/report/entry/n200805_983.html (accessed 2021-01-21).
10) Bernstein, E. et al: ワーク・フロム・ホームの実態 オフィスに集まらずに生産性をいかに高めるか, Harvard Business Review, p.33-43, Nov.(2020)
11) 日本経済新聞：コロナでオフィスの姿は～岡田正志氏/荒川陽子氏/今関豊和氏～，日本経済新聞朝刊, 21th Jan.(2021)
12) 東京ガス(株)都市生活研究所：新型コロナウイルスによる暮らしの変化とおうち時間を楽しむアイデア～緊急事態宣言後の生活調査より～,都市生活研究所都市生活レポート, May (2020) https://www.toshiken.com/report/life58.html, (accessed 2021-01-21).
13) UN WOMEN: WHOSE TIME TO CARE? UNPAID CARE AND DOMESTIC WORK DURING COVID-19, UN WOMEN HP,25th Nov. (2020) https://data.unwomen.org/publications/whose-time-care-unpaid-care-and-domestic-work-during-covid-19, (accessed 2021-01-26)
14) PwC コンサルティング合同会社：国内シェアリングエコノミーに関する意識調査 2020, PwC HP, 31th Jul.(2020) https://www.pwc.com/jp/ja/knowledge/thoughtleadership/2020/assets/pdf/sharing-economy2007.pdf, (accessed 2021-01-27)
15) Di Renzo, L., Gualtieri, P., Pivari, F., Soldati, L., Attinà, A., Cinelli, G., Leggeri, C., Caparello, G., Barrera, L., Scerbo, F., Esposito, G., and De Lorenzo, A.: Eating Habits and Lifestyle Changes During COVID-19 Lockdown: an Italian Survey, Journal of Translational Medicine, 18, 229 (2020)
16) Hu, Z., Lin, X., Kaminga, A.C., and Xu, H.: Impact of the COVID-19 Epidemic on Lifestyle Behaviors and Their Association with Subjective Well-Being Among the General Population in Mainland China: Cross-Sectional Study, Journal of Medical Internet Research, 22 (8), e21176, p.1 (2020)

17) 柴田重信, 田原優, 道江美貴子：コロナ禍の外出自粛により生活リズムが変化 ～3 万人規模の調査成果～, 早稲田大学プレスリリース, 早稲田大学 HP, 11th Sep.(2020)
https://www.waseda.jp/top/news/70080, (accessed 2021-01-28)
18) 木村美也子, 尾島俊之, 近藤克則：新型コロナウイルス感染症流行下での高齢者の生活への示唆：JAGES 研究の知見から, 日本老年学的評価研究プレスリリース, 210-20-1,8th Apr.(2020)
https://www.jages.net/library/pressrelease/?action=cabinet_action_main_download&block_id=3333&room_id=549&cabinet_id=224&file_id=7203&upload_id=8684, (accessed 2021-01-28)
19) GasBuddy: GasBuddy Study Finds 45% Fewer Travelers on the Road ThisThanksgiving, Gas Prices Projected toBe Lowest Since 2016, GasBuddy News Release, 18th, Nov.(2020)
https://www.globenewswire.com/news-release/2020/11/18/2129117/0/en/GasBuddy-Study-Finds-45-Fewer-Travelers-on-the-Road-This-Thanksgiving-Gas-Prices-Projected-to-Be-Lowest-Since-2016.html, (accessed 2021-02-04)
20) (株)デルフィス：コロナ禍のおでかけは「同一県内の日帰りドライブ」が主流。感染不安以上に周囲の目が気になる今、応援消費がおでかけの理由に, デルフィス News Release, 26th Aug.(2020)
https://www.delphys.co.jp/activities/detail.php?id=37, (accessed 2020-12-14)
21) 尾谷悠介, 嶽山洋志, 山本聡, 薬師寺恒治, 中瀬勲：都市公園における新型コロナウィルス感染症の流行が公園利用に及ぼす影響, 日本都市計画学会関西支部研究発表会講演概要集, 18 (2020)
22) (株)電通：新型コロナウイルス日米定点生活者意識調査（第 1 回～第 10 回）, 電通プレスリリース, 14th May.(2020)～4th Dec.(2020)
https://www.dentsu.co.jp/news/release/2020/0514-010052.html, (accessed 2021-01-29)
https://www.dentsu.co.jp/news/release/2020/0526-010055.html, (accessed 2021-01-29)
https://www.dentsu.co.jp/news/release/2020/0616-010066.html, (accessed 2021-01-29)
https://www.dentsu.co.jp/news/release/2020/0630-010082.html, (accessed 2021-01-29)
https://www.dentsu.co.jp/news/sp/release/2020/0715-010093.html, (accessed 2021-01-29)
https://www.dentsu.co.jp/news/sp/release/2020/0729-010106.html, (accessed 2021-01-29)
https://www.dentsu.co.jp/news/sp/release/2020/0909-010128.html, (accessed 2021-01-29)
https://www.dentsu.co.jp/news/sp/release/2020/1016-010247.html, (accessed 2021-01-29)
https://www.dentsu.co.jp/news/sp/release/2020/1119-010289.html, (accessed 2021-01-29)
https://www.dentsu.co.jp/news/sp/release/2020/1204-010305.html, (accessed 2021-01-29)
23) 及川晴, 及川昌典:危機的状況での認知､感情､行動の変化, 心理学研究 2010 年, 81(4), p.420-425, 20th Apr.(2011)
24) Users Technology Collaboration Programme and International Energy Agency: Behavioural Insights for Demand-side Energy Policy and Programmes−An Emvironment Scan, Behavioural insights for demand-side energy policy and programmes report , Dec.(2020)
https://userstcp.org/wp-content/uploads/2020/12/Users-TCP-and-IEA-Dec-2020-BI-report.pdf, (accessed 2021-01-29).
25) Crow, D. and Millot, A.: Working from Home Can Save Energy and Reduce Emissions. But how Much?, IEA Commentary, 12th June (2020)
https://www.iea.org/commentaries/working-from-home-can-save-energy-and-reduce-emissions-but-how-much, (accessed 2021-01-29).

26) 永倉直武, 井上隆, 高瀬幸造, 渡辺青岳 : 新型コロナウイルス感染防止に係る行動変容が住宅内のエネルギー・水消費量に及ぼす影響～首都圏集合住宅における長期詳細実測データに基づく検討～, 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, 4-5, Jan.(2021)

5.4.5 分析フレームワークの具体化及び改良

(1) はじめに

図 5.4.2-1 に示す既往研究成果では、物質的財・サービス需要の分析フレームワークを 13 項目の生活行動に区分し､各生活行動とエネルギー消費を紐づけて整理している。しかしながら概念的な整理となっているため、具体的な事例を用いて分析フレームワークの具体化及び改良を行う。具体的な事例としては、デジタル化の発展により需要構造が大きく変化するもののうち、今年度は「ネットショッピングの増加」と「在宅勤務の増加」を取り扱う。

ネットショッピングの種類は非常に多岐にわたるため、ここではインターネットを利用した商品・サービスの購入のうち、amazon や楽天などのネットショップで商品を販売している BtoC 取引を対象とする。

在宅勤務は表 5.4.5-1 に示す総務省が定義する雇用型テレワークの形態の中の「在宅勤務」とする。

分析にあたっては、事象間の関係や因果関係の整理ができ、影響範囲も把握しやすいパス図を用いる。

表 5.4.5-1 雇用型テレワークの形態と在宅勤務の定義

形態	定義
在宅勤務	自宅を就業場所とするもの
モバイルワーク	施設に依存せず、いつでも、どこでも仕事が可能な状態なもの
施設利用型勤務	サテライトオフィス、テレワークセンター、スポットオフィス等を就業場所とするもの

出典）総務省 [1)]

(2) ドライバーの整理

本項では、2 つの事例で取り扱う「ネットショッピング」と「在宅勤務」が増加する要因として考えられるドライバーの整理を行う。これらの事例が影響を及ぼす生活行動の変化は背景となるドライバーによって異なり、例えば家族との時間を大切にすることが在宅勤務のドライバーである場合は育児や介護の時間が多くなり、生活の改善が在宅勤務のドライバーである場合は掃除・洗濯などの身の回りの用事の時間が多くなると考えられる。ドライバーを整理することは、個人の生活行動を整理する際に有益であることに加え、日本全体の社会変化を把握するうえでも重要である。

ドライバーを整理する手順として、まず「ネットショッピング」と「在宅勤務」を利用・導入する理由や目的について、公的な統計や調査による調査項目等を参考にして項目の抽出を行う。次に、ドライバーの主体（例えば、個人と企業）によって各項

目との関連の強さが異なると考えられるため、ドライバーの主体別に関連の強さを整理する。最後に上記で抽出した項目を似通った項目ごとにグループ化し、各グループの共通因子を抽出してドライバーの種類として整理する。

① ネットショッピングの増加

a. ネットョッピングの利用理由

最新（2021 年 2 月 5 日公表）の総務省「家計消費状況調査」[2]によると、2020 年のネットショッピング利用世帯の割合（12 か月分のネットショッピング利用世帯の割合の単純平均）は 48.8%となっており、2019 年比で 6.0 ポイント上昇している。年々、ネットショッピングの利用率は上昇傾向にあり、コロナ禍でその傾向はさらに強まっている。これは今まで利用しなかった（考えていなかった）人がコロナ禍をきっかけに利用するようになったためと考えられる。アフターコロナのネットショッピングの利用状況としては、コロナ禍で新規に利用した人の一部がネットショッピングを継続し、コロナ前以上の水準で利用率は推移すると考えられる。

平成 28 年に実施された総務省「IoT 時代における新たな ICT への各国ユーザーの意識の分析等に関する調査研究」[3]では、ネットショッピングの利用目的が調査されている（図 5.4.5-1）。利用理由として最も多いのは“実店舗に出向かなくても買い物ができる”や“24 時間いつでも買い物ができる”といった利便性に関わる項目である。次いで“実店舗よりも安く買える”や“実店舗より品揃えが豊富”といった実店舗と比較した価格や品揃えの有利性となっている。また“実店舗に行く時間を節約できる”といった時間の節約（効率化）に関する項目や、“レビューを参照して購入できる”や“自宅に持ち帰るのが大変な重いものが手軽に買える”といったネットショッピングならではの付加価値に関する項目が利用する理由として多くなっていた。

一方、ネットショップを運営する企業側のメリットとしては、対象顧客や販売エリアの拡大、24 時間年中無休の稼働、コストの削減、顧客情報の入手、データ（会計、受発注、在庫）管理のシステム化などが考えられる。

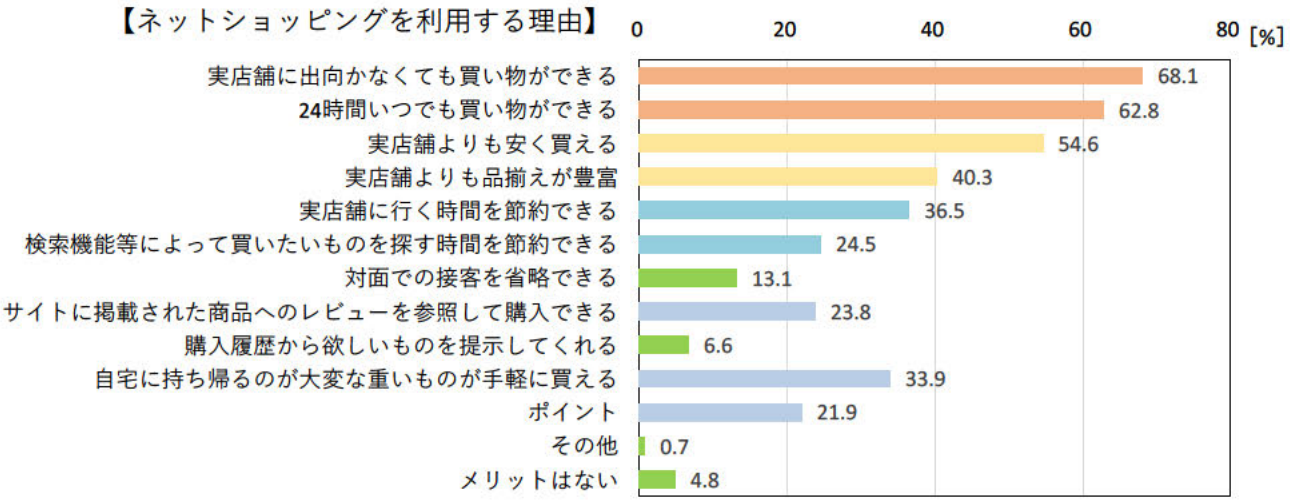


図 5.4.5-1 ネットショッピングを利用する理由

注）割合が 20%を超えているものについて、目的種別を分類して色分けしている

出典）総務省「IoT 時代における新たな ICT への各国ユーザーの意識の分析等に関する調査研究」の集計表 3)より住環境計画研究所が作成

b. ネットショッピング増加のドライバー

a 項で整理した項目を参考に、ドライバーの主体別（利用者（買い手）側、企業（売り手）側）に関連の強さの程度で分類して、似通った項目はグループ化し各グループの共通因子を抽出してドライバーの種類として整理する。以下に整理した結果を示す。

表 5.4.5-2 ネットショッピング増加のドライバー

ドライバーの種類	具体的な項目	ドライバーの主体と関連の強さ	
		利用者（買い手）側	企業（売り手）側
利便性の向上	どこにいてもネットがあれば利用できる	○	○
	24 時間年中無休の稼働	○	○
実店舗と比較した有利性	実店舗より安く買える	○	△
	実店舗より品揃えが豊富	○	○
時間の節約	実店舗に行く時間を節約できる	○	－
	検索機能等により買いたい物を見つけやすい	○	○
ネットショッピングならではの付加価値	配送サービス	○	△
	サイトでのレビューを参考にして商品を購入できる	○	△
	ショップポイントの付与	○	○
商品とのマッチング／販売精度・規模の向上	対象顧客や販売エリアの拡大	○	○
	顧客情報の活用（購入・検索履歴からおすすめの商品を表示するなど）	△	○
コスト削減	実店舗規模の縮小・削減	－	○
	人件費の削減	－	○
システム化（効率化）	会計管理のシステム化	－	○
	受発注・在庫管理のシステム化	－	○
	対面での買い物・接客を省略できる	△	○

注）関連の強さは○（関連強）、△（関連中または小）、－（殆ど関連なし）で表記

② 在宅勤務の増加

a. 在宅勤務（テレワーク）の導入目的

令和元年に実施された総務省「通信利用動向調査」4)によると、テレワークを導入している企業または導入予定がある企業は合わせて約 3 割（前年度比で 3 ポイント上昇）

であり、年々増加傾向となっている。テレワークの導入形態として最も多いのはモバイルワーク（63.2%）で、次いで在宅勤務（50.4%）、サテライトオフィス勤務（16.4%）と続いている。その中でも在宅勤務は、前年度比で約 13 ポイント増となっており、加えて 2020 年に発生した新型コロナウイルス感染症の影響により、現在ではより多くの企業で在宅勤務がより身近なものとして定着していると考えられる。

通信利用動向調査[4]では、テレワークを導入している企業を対象として、テレワークの導入目的が整理されている（図 5.4.5-2）。導入目的として最も割合が多いのは労働生産性あるいは業務の効率性の向上といった生産性・業務効率にかかわる項目である。次いで、勤務者のワーク・ライフ・バランスの向上、長時間労働や通勤時間の短縮といった勤務者の生活への配慮がみられる項目となっている。また、障がい者、高齢者、介護・育児中の社員への対応や非常時の事業継続に備えてといった、多様な人材の確保、BCP（事業継続計画）対策に関する項目も一定数考えられている。

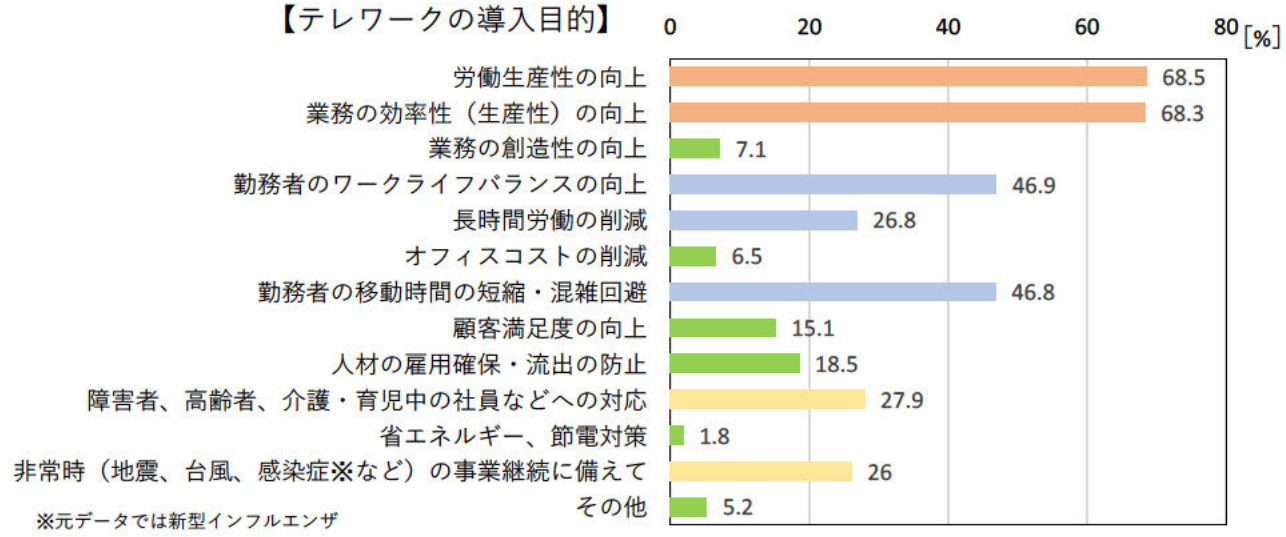


図 5.4.5-2 企業のテレワークの導入目的

注）割合が 20%を超えているものについて、目的種別ごとに色分けしている
出典）総務省「令和元年通信利用動向調査」の集計表[5]より住環境計画研究所が作成

また、総務省のウェブサイトではテレワークの意義・効果が以下の様にまとめられている。

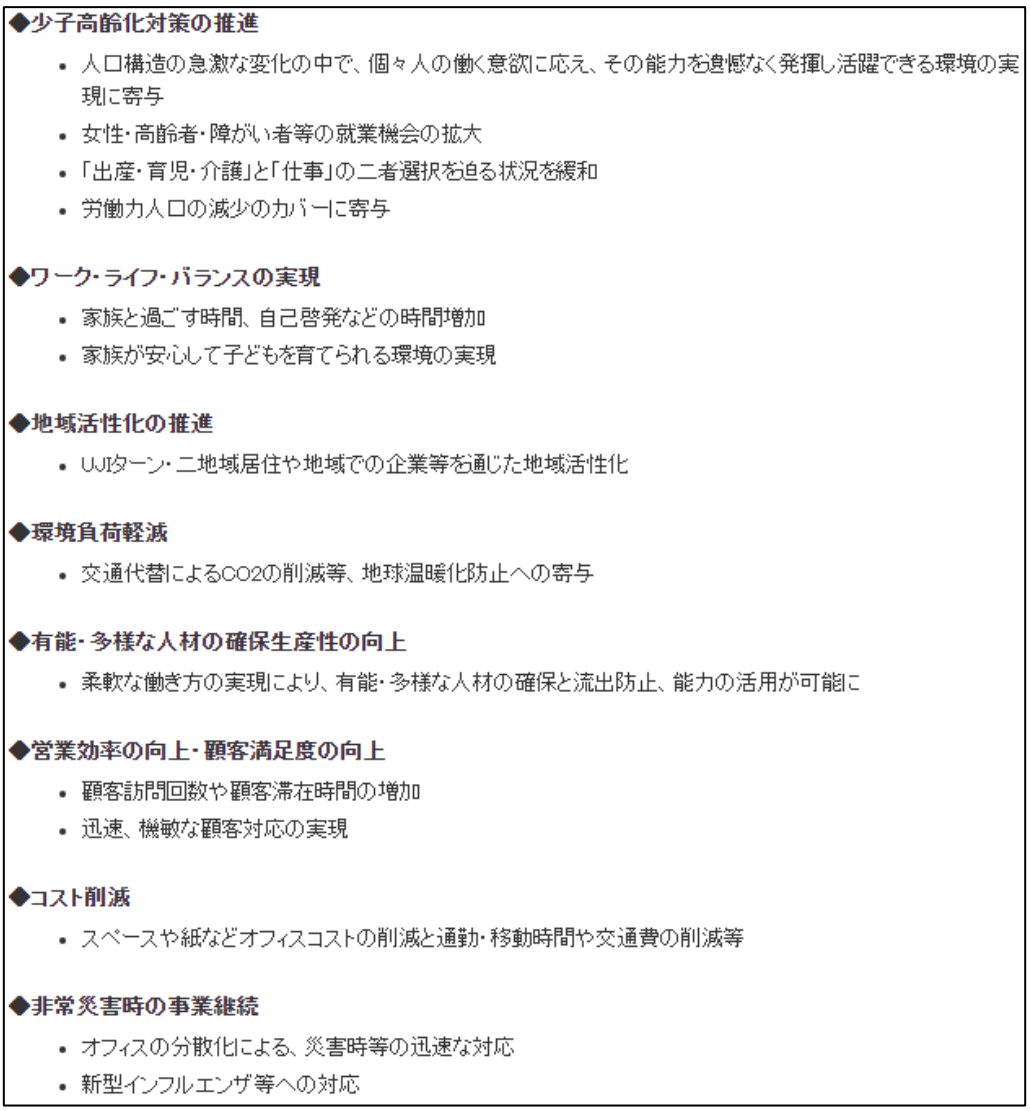


図 5.4.5-3 テレワークの意義・効果

出典）総務省 [1)]

b. 在宅勤務増加のドライバー

在宅勤務が増加するドライバーを整理するにあたり、技術的な要件（例えば家庭の通信環境の整備や会社でのコラボレーションプラットフォームの整備など）を満たす環境が整備されていることを前提条件として考える。また現在のコロナ禍の状況ではなく、アフターコロナの社会状況として、在宅勤務とオフィス勤務のどちらの選択も制限されない状況を想定して検討する。

a 項で整理した項目を参考に、ドライバーの主体別（個人・家庭、企業、国・社会）に関連の強さの程度で分類して、似通った項目はグループ化し各グループの共通因子を抽出してドライバーの種類として整理する。以下に整理した結果を示す。

表 5.4.5-3 在宅勤務増加のドライバー

ドライバーの種類	具体的な項目	ドライバーの主体と関連の強さ		
		個人・家庭	企業	国・社会
生産性・業務効率の向上	通勤時間の削減	○	○	－
	長時間労働の削減	○	○	△
	自分のペースで（好きな時間に）仕事が可能	○	△	－
	不要な業務、雑談等の削減	○	△	
	業務の創造性の向上	△	○	－
ワーク・ライフ・バランスの向上	プライベート時間の増加（通勤時間の削減、長時間労働の削減等による）	○	△	－
	安心して家事・育児・介護ができる環境の実現	○	○	○
	好きな場所に住める	○	△	－
有能・多様な人材の確保	柔軟な働き方の実現による、有能・多様な人材の確保と流出防止	○	○	△
	障がい者、高齢者、介護・育児中の社員などへの対応	○	○	○
BCP（事業継続計画）対策	非常時（地震、台風、大雪、感染症の流行など）に対する事業継続への備え（対応）	○	○	△
コスト削減	省エネルギー、節電対策	△	○	△
	オフィスコストの削減（紙の削減、執務スペースの縮小など）	－	○	－
	通勤のための交通費の削減	△	○	－
	身支度にかかる時間やコスト（被服費等）の削減	○	－	－
営業効率・顧客満足度の向上	顧客訪問回数や顧客滞在時間の増加	－	○	－
	迅速、機敏な顧客対応の実現	－	○	－
少子高齢化対策	労働力人口減少のカバーに寄与	－	－	○
地域活性化の推進	UJI ターン・二地域居住や地域での企業等を通じた地域活性化	－	△	○
環境負荷軽減	地球温暖化防止への寄与（交通代替による CO_2 の削減等）	－	△	○
資金的インセンティブ	テレワーク実施助成金（対企業）	△	○	○
	テレワーク実施助成金（対従業員）	○	△	○

注）関連の強さは○（関連強）、△（関連中または小）、－（殆ど関連なし）で表記

(3) 詳細パス図の検討

本項では、2 つの具体的事例の影響範囲の把握や事象間の関係を整理するため、できるだけ詳細かつ発散的なパス図を検討する。その際個人の生活行動に焦点をあてて検討するが、生活行動が及ぼす影響の範囲を把握するため、企業や家計、エネルギー、社会への影響も含めて整理する。パス図の検討にあたっては、年代、性別、家族構成の異なる下記の 7 名にヒアリングを行い作成する。

表 5.4.5-4 ヒアリング者の属性

No.	年代	性別	家族構成
1	40 代	男性	夫婦＋子
2	30 代	女性	夫婦＋子
3	30 代	男性	夫婦＋子
4	30 代	女性	単身
5	20 代	男性	単身
6	20 代	男性	単身
7	20 代	女性	単身

① ネットショッピングの増加に関する詳細パス図

図 5.4.5-4 にネットショッピングの増加による影響範囲を示す。ネットショッピングが増加すると、店舗でのショッピング時間の減少、購入に係る PC・スマホの利用時間の増加、買い物時間の減少が生じると考えられる。また、例えば店舗でのショッピング時間が減少すると外出時間が減少し、外出が減ることで移動時間や外食時間が減少し、自由時間が増える。これら生活行動が変化することで、企業や家計、エネルギーへ影響に影響を及ぼす。

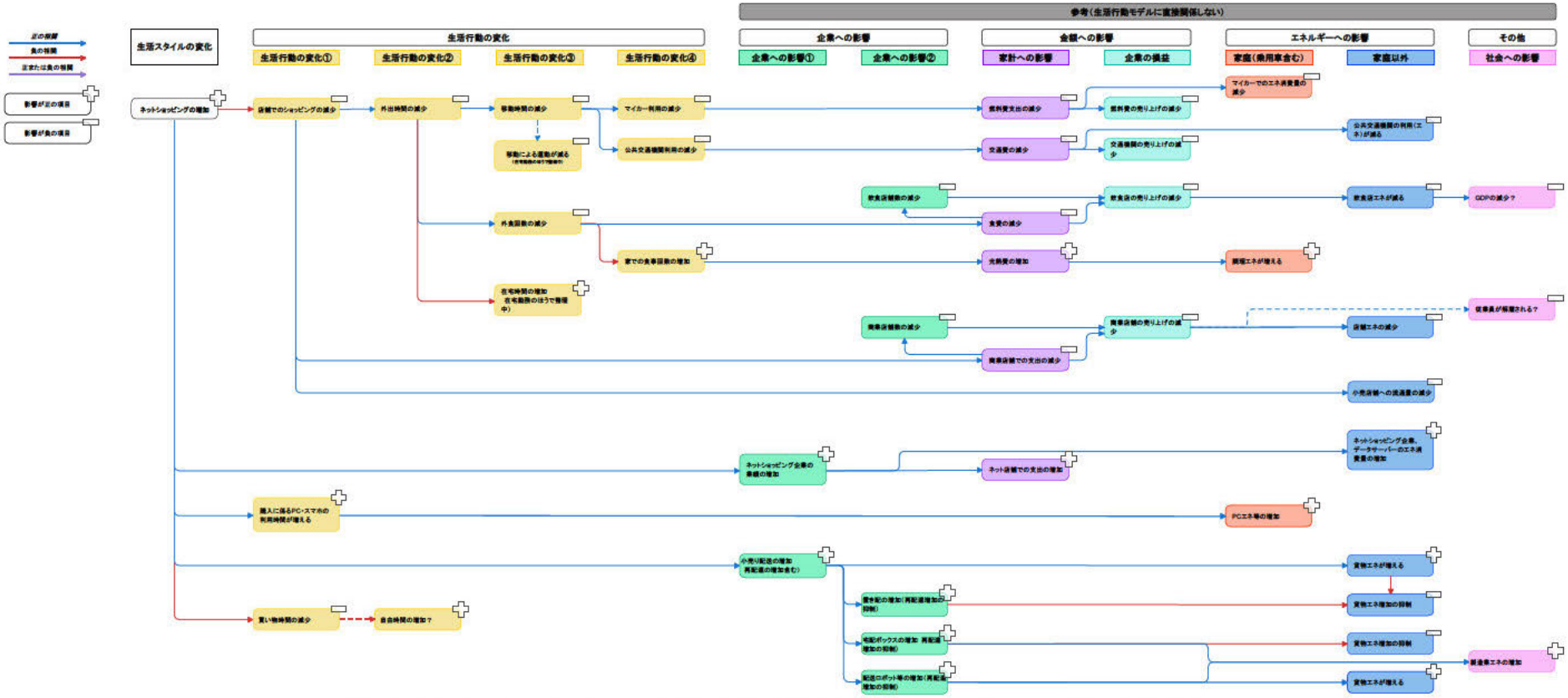


図 5.4.5-4 ネットショッピングの増加による影響範囲（詳細パス図）

② 在宅勤務の増加に関する詳細パス図

図 5.4.5-5 に在宅勤務の増加による影響範囲を示す。在宅勤務が増加すると、在宅での労働時間、仕事以外の在宅時間が増加する一方、通勤にかかる時間、会社での労働時間が減少すると考えられる。在宅時間が増加することで、生活行動としては自宅での食事の増加や、通勤に要する時間がなくなることで介護・育児や娯楽、掃除頻度の増加、自宅の環境整備など、様々なことに時間を費やすことになると考えられる。エネルギーへの影響範囲としては、家庭部門の空調、調理、照明、家電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と考えられる。産業への影響としては、例えば出勤回数が減ることでスーツや化粧品、クリーニング、外食などの需要が減少する一方で、自宅を仕事のうえでも生活するうえでもより快適な環境に整えるため、OA 機器や家具、生活用品等の新しい需要が創出されると考えられる。また、在宅勤務の環境が整備されると地理的制約が弱くなる。これにより二地域居住やセカンドハウス保有が増える可能性があり、住まいのあり方が多様化すると考えられる。

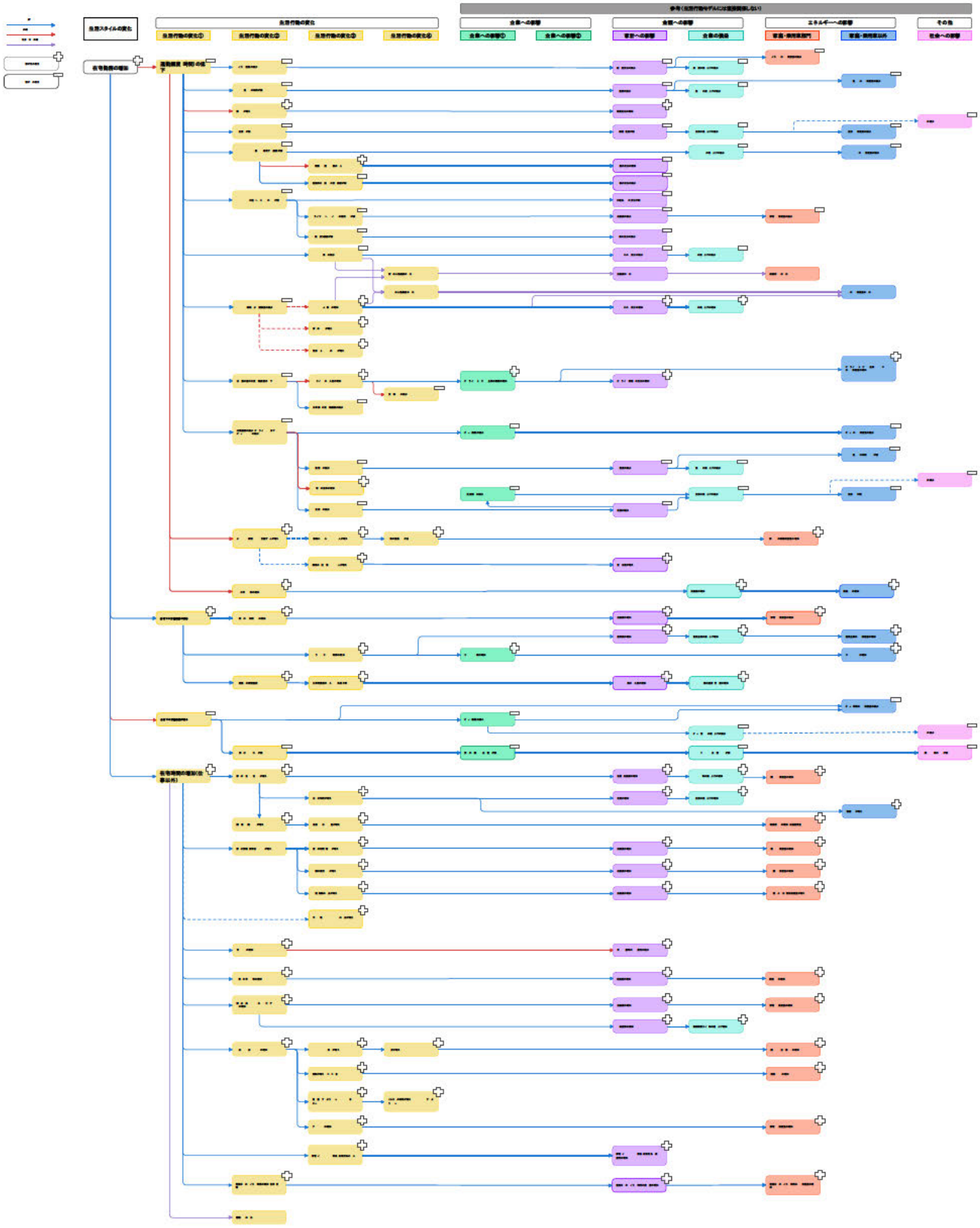


図 5.4.5-5 在宅勤務の増加による影響範囲（詳細パス図）

(4) 生活行動の分類の再整理

本項では、(3)で検討した詳細パス図の生活行動を図 5.4.2-1 の 13 区分に該当する生活行動に分類し再整理を行う。その結果、下記 2 点の課題を抽出した。

- 「仕事」は「オフィス勤務」と「在宅勤務」でエネルギーの使用場所が異なるが、現状では同一区分とみなされる。
- 「身の回りの用事」は「(外出のために) 身だしなみを整える」と「入浴」の両方が含まれており、エネルギー密度（例えば、行為当りエネルギー消費量）が大きく異なる行動が一括りにされている。

そこで、現行の 13 区分に場所とエネルギーの視点を加え再整理する。

表 5.4.5-5 に生活時間における行動分類の再整理結果を示す。身の回りの用事は場所、エネルギーの視点から①家での入浴、②外での入浴、③身だしなみ、④その他の 4 区分に細分化、食事は場所の視点から①自宅での食事・出前、②外食、③その他に細分化、仕事は場所の視点から在宅勤務（WFH：Work From Home）と在宅勤務以外の 2 区分に細分化、住宅・生活の管理はエネルギーの視点から①炊事、食事の後片付け、②掃除、洗濯、③その他の 3 区分に細分化、不規則的移動は在宅勤務の事例で必要なため、①仕事に伴う移動、②その他の 2 区分に細分化する。また、単独系余暇活動、複数系余暇活動は人数ではなく場所の視点から①外出を伴わない余暇活動、②外出を伴う余暇活動の 2 区分に変更する。以上より生活行動を 13 区分から 22 区分に改良する。

表 5.4.5-5 生活時間における行動分類の再整理結果

大区分	小区分（2019年度ALPS分類）	平成28年社会生活基本調査 調査票Aの分類	平成28年社会生活基本調査 調査票Aの内容例示	提案する区分		影響範囲（＋：時間増、△不明、－時間減）	
				家の中	家の外	在宅勤務の増加	オンラインショッピングの増加
Self care	睡眠	睡眠	夜間の睡眠、昼寝、仮眠、ベッドで眠りに落ちるのを待つ	睡眠		睡眠時間△	
	身の回りの用事	身の回りの用事	洗顔、入浴、トイレ、身じたく、着替え、化粧、整髪、ひげそり、理美容室でのパーマ・カット、エステ、巡回入浴サービスを利用した入浴	身の回りの用事（家での入浴（巡回入浴サービスを利用した入浴を含む））		家での入浴△	
					身の回りの用事（外での入浴）	外（ジム？）での入浴△	
				身の回りの用事（身だしなみ（身じたく、整髪、ひげそり））		身だしなみ（ドライヤー、ヘアアイロン、化粧など）－、着替え－	
				身の回りの用事（その他）			
	受診・療養	受診・療養	病院での受信・治療、自宅での療養		受診・療養		
	食事	食事	家庭での食事・飲食、外食店などでの食事・飲食、学校給食、仕事場での食事・飲食	食事（自宅での食事・出前）		自宅食事＋、家飲み＋、出前＋	外食－、自宅食事＋
					食事（外食）	外食－	
				食事（その他）			
Paid work	仕事	仕事	通常の仕事、仕事の準備・後片付け、残業、自宅に持ち帰ってする仕事、アルバイト、内職、自家営業の手伝い、仕事中の移動	仕事（WFH）		在宅勤務＋	
					仕事（WFH以外）	会社勤務－	

大区分	小区分 （2019年度ALPS分類）	平成28年社会生活基本調査 調査票Aの分類	平成28年社会生活基本調査 調査票Aの内容例示	提案する区分		影響範囲 （＋：時間増、△不明、－時間減）	
				家の中	家の外	在宅勤務の増加	オンラインショッピングの増加
Unpaid work	学習	学業	学校（小学・中学・高校・高専・短大・大学・大学院・予備校など）の授業や予習・復習・宿題、校内清掃、ホームルーム、家庭教師に習う、学園祭の準備	学習			
	住宅・生活の管理	家事	炊事、食事の後片付け、掃除、ゴミ捨て、洗濯、アイロンかけ、つくろいもの、ふとん干し、衣類の整理片付け、家族の身の回りの世話、家計簿の記入、株価のチェック・株式の売買、庭の草とり、銀行・市役所などの用事、車の手入れ、家具の修繕	住宅・生活の管理（炊事、食事の後片付け）		炊事＋、食器洗い＋	
				住宅・生活の管理（掃除、洗濯）		掃除＋、洗濯等＋	
				住宅・生活の管理（その他）			
	モノ・サービスの入手	買い物	食料品・日用品・電化製品・レジャー用品など各種の買い物、DVDのレンタル	モノ・サービスの入手（にかかる時間）		洋服△、出退勤途中の買い物－、eコマース＋、仕事用設備や家具・生活用品の購入＋	店舗での買い物－、eコマース＋、買い物時間－
	家族の世話	介護・看護	家族・他の世帯にいる親族に対する日常生活における入浴・トイレ・移動・食事などの手助け、看病	家族の世話		＋	
		育児	乳幼児の世話、子供のつきそい、子供の勉強の相手、子供の遊びの相手、乳幼児の送迎、保護者会に出席				
Leisure	単独系余暇活動 複数系余暇活動	テレビ・ラジオ・新聞・雑誌	テレビ・ラジオの視聴、新聞・雑誌の購読、テレビから録画した番組を見る、インターネットでニュースを読む	外出を伴わない余暇活動	外出を伴う余暇活動	ジム△、散歩△、ジョギング△、娯楽（テレビ、PC等）＋、ゲーム＋	
		休養・くつろぎ	家族との団らん、仕事場または学校の休憩時間、おやつ・お茶の時間、食休み、うたたね、家族の見舞い				
		学習・自己啓発・訓練（学業以外）	学級・講座・教室、社会通信教育、テレビ・ラジオによる学習、クラブ活動・部活動で行うパソコン学習など、自動車教習				
		趣味・娯楽	映画・美術・スポーツなどの観覧・鑑賞、観光地の見物、ドライブ、ペットの世話、ゲーム機で遊ぶ、趣味としての読書（漫画を含む）、クラブ活動・部活動で行う楽器の演奏				
		スポーツ	各種競技会、全身運動を伴う遊び、家庭での美容体操、クラブ活動・部活動で行う野球など（学生が授業などで行うスポーツを除く）つり				
		その他	求職活動、墓参り、仏壇を拝む、調査票を記入する				
		ボランティア活動・社会参加活動	（ボランティア活動） 道路や公園の清掃、施設の慰問、点訳、手話、災害地などへの援護物質の調達、献血、高齢者の日常生活の手助け、民生委員、子供会の世話、美術館ガイド、リサイクル運動、交通安全運動、スポーツ大会の運営 （社会参加活動） 労働運転、政治活動、布教活動、選挙の投票				
		交際・付き合い	知人と飲食、冠婚葬祭、同窓会への出席・準備、あいさつ回り、友人の見舞い、友達との電話・会話、手紙を書く				
Travel	規則的移動	通勤・通学	自宅と仕事場の行き帰り、自宅と学校（各種学校・専修学校を含む）との行き帰り		規則的移動	通勤（マイカー、電車、バス等）－	
	不規則的移動	移動（通勤・通学を除く）	電車やバスに乗っている時間・待ち時間・乗換え時間、自動車に乗っている時間、歩いている時間		不規則的移動（仕事に伴う移動）	出張に伴う移動－	車、電車、バスなどの移動－
					不規則的移動（その他）		

(5) 簡略パス図の検討

本項(3)で検討した詳細パス図は影響範囲の検討を主な目的としており、定量化することはデータの制約等により困難である。そこで、生活行動モデルを定量化するために単純化、整理した簡略パス図を検討する。簡略パス図の検討にあたっては、本項(4)で改良した生活行動の分類を用いる。簡略パス図モデルを検証するためのデータがな

いため、本報告書では複数の簡略パス図を検討し、次年度にモデルの定量化を検討する。

① ネットショッピングの増加に関する簡略パス図

図 5.4.5-6～図 5.4.5-7 にネットショッピングの増加の簡略パス図①～②を示す。簡略パス図①は最も簡単なモデルで、ネットショッピングの増加が、改良した 22 区分の生活行動に直接影響を及ぼしている。またネットショッピングにより余裕のできた時間を自由時間と定義し、22 区分の行動の全てが変化し得るとして整理している。簡略パス図②は因果関係を理解しやすいよう簡略パス図①に中間変数を追加して作成している。

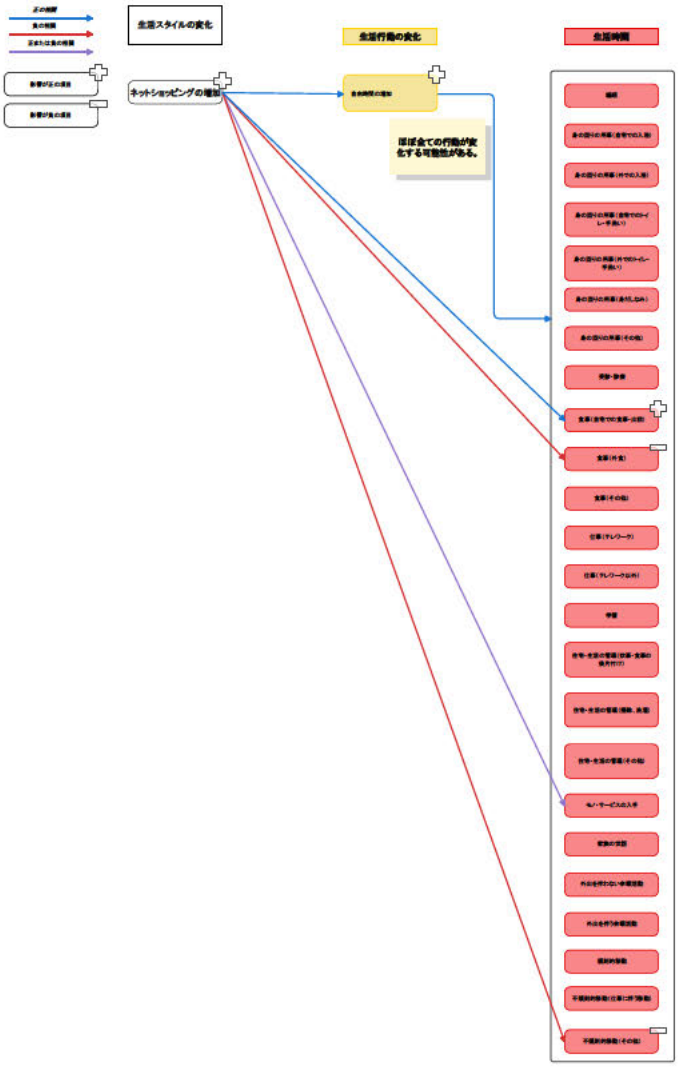


図 5.4.5-6 ネットショッピングの増加の簡略パス図①

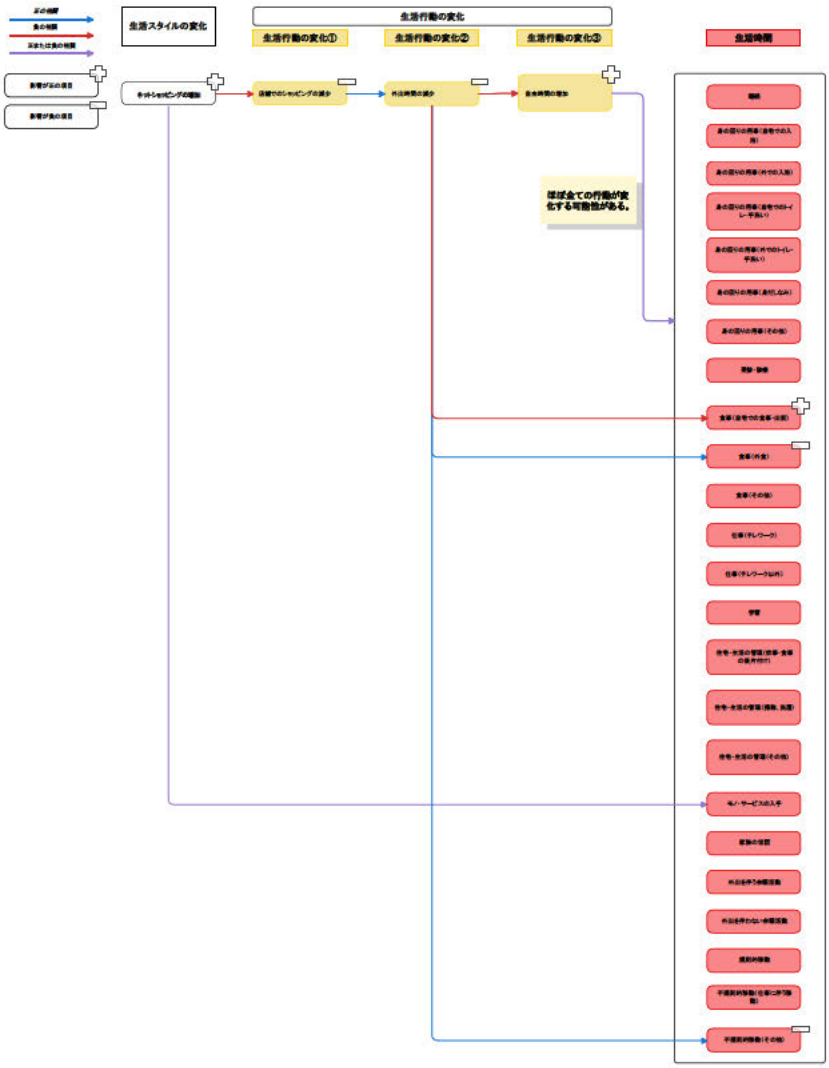


図 5.4.5-7 ネットショッピングの増加の簡略パス図②

② 在宅勤務の増加に関する簡略パス図

図 5.4.5-8～図 5.4.5-10 に在宅勤務の増加の簡略パス図①～③を示す。簡略パス図①は最も簡単なモデルで、在宅勤務の増加が、改良した 22 区分の生活行動に直接影響を及ぼしている。簡略パス図②は在宅勤務の増加がまず 4 つの生活行動（在宅勤務以外の仕事時間、在宅での仕事時間、仕事以外の在宅時間、通勤時間）に影響を及ぼすと考え、4 つの生活行動の変化の影響によって様々な生活行動が変化するモデルを想定する。簡略パス図③は簡略パス図②に中間変数を加え、因果関係を理解しやすいモデルとして作成している。

なお、詳細パス図で記述している「より良い住環境に住む（引越す）人が増える」については、住む場所が変わるとそもそもの使用エネルギー種が変わる可能性がある。ここでは同じ家に住んでいる場合の影響を整理しているため今後の課題とし、ここでは取り扱わない。

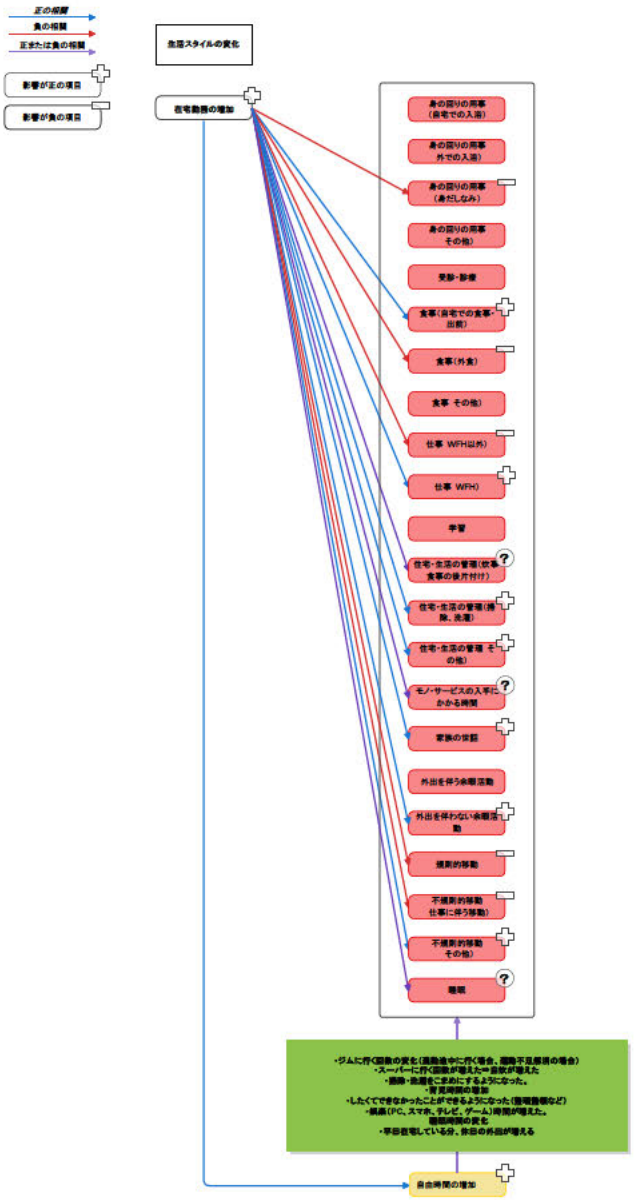


図 5.4.5-8 在宅勤務の増加の簡略パス図①

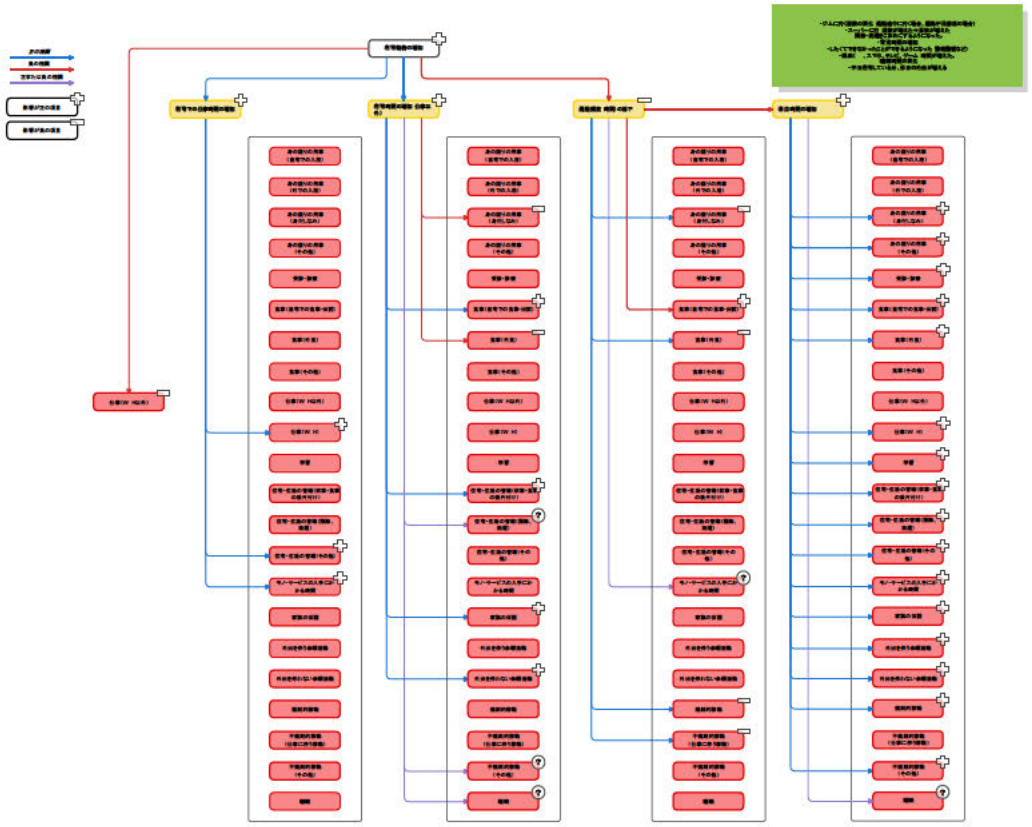


図　5.4.5-9 在宅勤務の増加の簡略パス図②

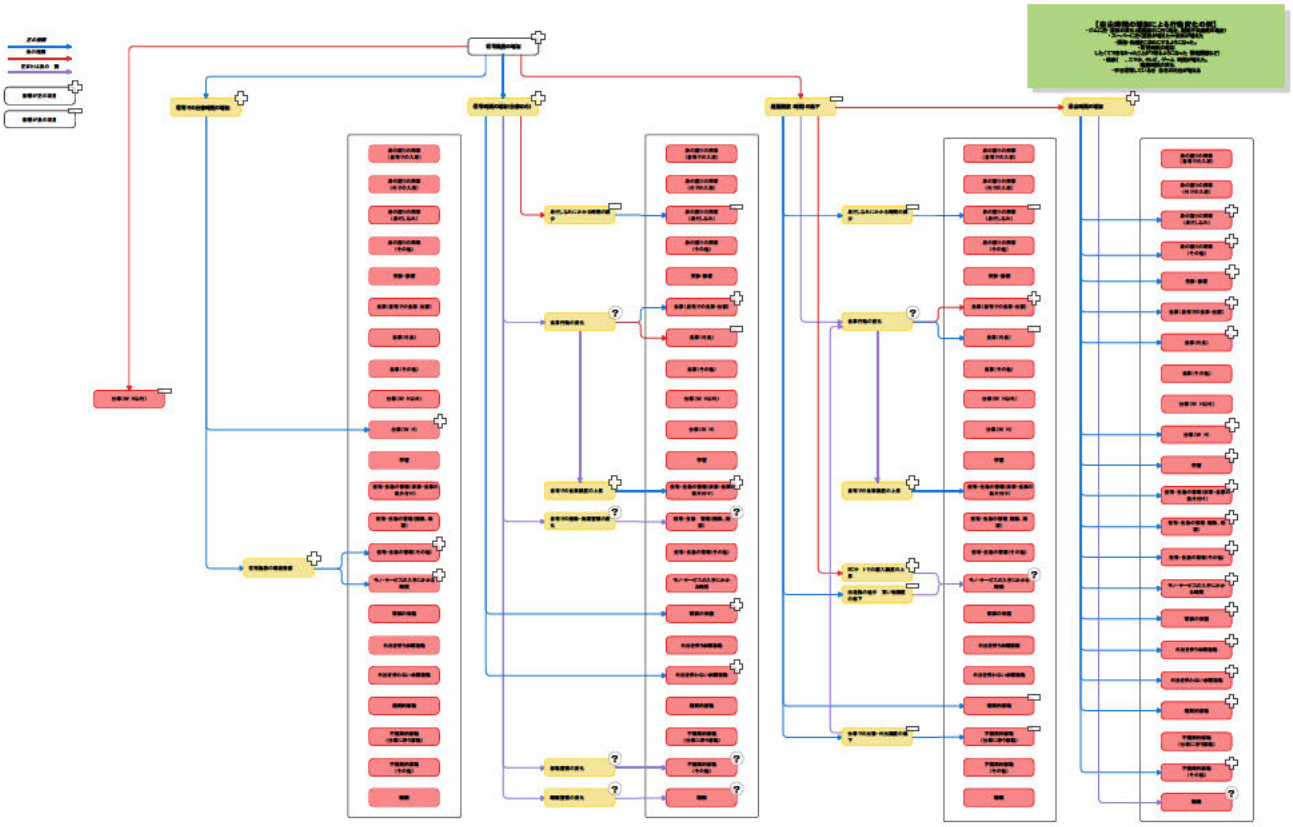


図 5.4.5-10 在宅勤務の増加の簡略パス図③

(6) パス図の定量化のための統計・調査情報の整理

パス図の定量化にあたって、パス図変数の代替変数となる可能性のある項目が取得できる既存の統計・調査情報について検討する。本項(3)で検討した簡略パス図の内、ネットショッピングの増加は簡略パス図②（図 5.4.5-7）、在宅勤務の増加は簡略パス図③（図 5.4.5-10）について、パス図変数とその代替変数となる可能性のある項目が取得できる統計・調査の名称、実施団体や取得可能な項目、頻度および媒体、取得制限、データの活用可能性（取得可能項目や頻度、取得制限を加味して高：○、中：△、低：×で評価）などについて整理を行う。本検討で整理した統計・調査のリストを表 5.4.5-6 に、整理した結果をまとめたものを表 5.4.5-7、表 5.4.5-8 に示す。本結果は日本国内の全統計情報を完全に網羅したものではないが、一般に公開されている公的統計はカバーしている。

結果をみると、データの活用可能性が×となっている変数は、「モノ・サービスの入手（にかかる時間）」、「自由時間」、「在宅勤務の環境整備」、「出退勤の途中の買い物頻度」に関するものであり、これらは対応する統計データが乏しい項目である。このような既存統計で十分に把握できないものについては、新規調査の必要性の検討が求められる。また、民間企業がデータベースを運営しており、データ取得が有料となる統計として『モバイル空間統計』[7]があり、データの購入に値する情報が得られるものであるか検討が必要である。

その他の課題としては、各統計・調査の取得頻度が統計によってバラバラであり、また項目ごとのデータの密度（間隔）が異なるため、データ同士の結合が必要となる場合にどのようにデータを補完するのかといった、定量化のための検討の中で想定される課題もある。今回の整理でカバーしきれていない統計データが存在する可能性もあるため、今後、定量化の検討を進めていく中で、統計データとの対応の整理も引き続き並行して実施する必要がある。

表 5.4.5-6 整理した統計・調査のリスト

No.	統計・調査名称	実施団体
1	家計消費状況調査 [8)]	総務省
2	売上高調査（統計） [9)]	日本通信販売協会
3	SC 販売統計調査 [10)]	日本ショッピングセンター協会
4	日本百貨店協会自主統計 [11)]	日本百貨店協会
5	国民生活時間調査 [12)]	NHK 放送文化研究所
6	モバイル空間統計 [7)]	NTT ドコモ
7	国民健康・栄養調査 [13)]	厚生労働省
8	JF 外食産業市場動向調査 [14)]	日本フードサービス協会
9	社会生活基本調査 [15)]	総務省
10	毎月勤労統計調査 [16)]	厚生労働省
11	通信利用動向調査 [17)]	総務省
12	テレワーク人口実態調査 [18)]	国土交通省
13	家計調査 [19)]	総務省

表 5.4.5-7 パス図変数と代替変数となる可能性のある既存統計・調査（ネットショッピングの増加）

変数No	パス図内変数名（簡略パス図②より）	統計・調査名称	実施団体	取得可能項目	取得可能頻度	取得可能媒体	取得制限	データ活用可能性
1	オンラインショッピングの増加	①家計消費状況調査 ②売上高調査（統計）	①総務省 ②日本通信販売協会	①インターネットを通じて注文をした世帯数、支出総額 ②通信販売売上高	①各月 ②各月	①e-stat ②Webページ	なし	○
2	モノ・サービスの入手（にかかる時間）の変化	家計消費状況調査	総務省	インターネットを利用した支出総額	各月	e-stat	なし	× （直接的な統計なし）
3	店舗でのショッピングの減少	①SC販売統計調査 ②日本百貨店協会統計	①日本ショッピングセンター協会 ②日本百貨店協会	①ＳＣ・百貨店・チェーンストア売上高 ②百貨店売上高	①各月 ②各月	①Webページ ②Webページ	なし	○
4	外出時間の減少	①国民生活時間調査 ②モバイル空間統計	①NHK放送文化研究所 ②NTTドコモ	①時刻別行為者率 ②エリア別の人口分布、動態	①5年ごと ②1時間ごと	①Webページ ②CSVデータ他（要購入）	①なし ②有料	△
5	食事（自宅での食事・出前）の増加	国民健康・栄養調査	厚生労働省	朝、昼、夕別にみた１日の外食・中食の食事構成比	各年	e-stat	なし	○
6	食事（外食）の減少	JF外食産業市場動向調査	日本フードサービス協会	外食利用客数	各月	Webページ	なし	○
7	不規則的移動（その他）の減少	社会生活基本調査	総務省	行動時間（移動(通勤・通学を除く）	5年ごと	e-stat	なし	△
8	自由時間の増加							× （直接的な統計なし）
9	身の回りの用事（身だしなみ）の増加	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（身の回りの用事） ②時刻別行為者率（身のまわりの用事）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
10	身の回りの用事（その他）の増加	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（身の回りの用事） ②時刻別行為者率（身のまわりの用事）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
11	受診・診療の増加	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（受診・療養） ②時刻別行為者率（療養・静養）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
12	食事（自宅での食事・出前）の増加	国民健康・栄養調査	厚生労働省	朝、昼、夕別にみた１日の外食・中食の食事構成比	各年	Webページ	なし	○
13	食事（外食）の増加	①国民健康・栄養調査 ②JF外食産業市場動向調査	①厚生労働省 ②日本フードサービス協会	①朝、昼、夕別にみた１日の外食・中食の食事構成比 ②外食利用客数	①各年 ②各月	①e-stat ②Webページ	なし	○
14	仕事（WHF）の増加	①毎月勤労統計調査 ②社会生活基本調査	①厚生労働省 ②総務省	①所定外労働時間 ②行動時間（その他の仕事関連、無償労働）	①各月 ②5年ごと	①e-stat ②e-stat	なし	△
15	学習の増加	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（学習・自己啓発・訓練(学業以外)） ②時刻別行為者率（趣味・娯楽・教養）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
16	住宅・生活の管理（炊事、食事の後片付け）の増加	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（家事） ②時刻別行為者率（炊事・掃除・洗濯）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
17	住宅・生活の管理（掃除、洗濯）の増加	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（家事） ②時刻別行為者率（炊事・掃除・洗濯）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
18	住宅・生活の管理（その他）の増加	社会生活基本調査	総務省	行動時間（園芸、住まいの手入れ・整理）	5年ごと	e-stat	なし	△
19	モノ・サービスの入手（にかかる時間）の増加							× （直接的な統計なし）
20	家族の世話の増加	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（介護・看護、育児） ②時刻別行為者率（子どもの世話、家庭雑事）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
21	外出を伴う余暇活動の増加	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（趣味・娯楽） ②時刻別行為者率（行楽・散策、レジャー活動）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
22	外出を伴わない余暇活動の増加	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（テレビ・ラジオ・新聞・雑誌、趣味・娯楽） ②時刻別行為者率（マスメディア接触、レジャー活動）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
23	規則的移動の増加	社会生活基本調査	総務省	行動時間（家事関連に伴う移動、家事的趣味に伴う移動）	5年ごと	e-stat	なし	△
24	不規則的移動（その他）の増加	社会生活基本調査	総務省	行動時間（ボランティア活動に伴う移動、その他の移動）	5年ごと	e-stat	なし	△
25	睡眠習慣の変化	①国民生活時間調査 ②国民健康・栄養調査	①NHK放送文化研究所 ②厚生労働省	①睡眠時間帯 ②一日の平均睡眠時間	①5年ごと ②各年	①Webページ ②e-stat	なし	○

注）データ活用可能性は高：○、中：△、低：×として整理

表 5.4.5-8 パス図変数と代替変数となる可能性のある既存統計・調査
（在宅勤務の増加）

変数No	パス図内変数名（簡略パス図③より）	統計・調査名称	実施団体	取得可能項目	取得可能頻度	取得可能媒体	取得制限	データ活用可能性
1	在宅勤務の増加	①通信利用動向調査 ②テレワーク人口実態調査	①総務省 ②国土交通省	① 個人のテレワーク実施割合（在宅、サテライトオフィス、外出先（モバイルワーク）別） ②個人のテレワーク実施割合	②各年 ②各年	①e-stat ②Webページ	なし	○
2	仕事（WFH）の減少	①毎月勤労統計調査 ②テレワーク人口実態調査	①厚生労働省 ②国土交通省	①月間実労働時間及び出勤日数 ②テレワーク（在宅）の仕事時間	①各月 ②各年	①e-stat ②Webページ	なし	○
3	仕事（WFH）の増加							
4	在宅勤務の環境整備	家計調査	総務省	消費支出（家具・家事用品）	各月	e-stat	なし	× （直接的な統計なし）
5	在宅時間の増加	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間 ②時刻別行為者率	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
6	身だしなみにかかる時間の減少	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（身の回りの用事） ②時刻別行為者率（身のまわりの用事）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
7	食事行動の変化	①国民健康・栄養調査 ②JF外食産業市場動向調査	①厚生労働省 ②日本フードサービス協会	①朝、昼、夕別にみた１日の外食・中食の食事構成比 ②外食利用客数	①各年 ②各月	①e-stat ②Webページ	なし	○
8	自宅での食事頻度の上昇	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（家事） ②時刻別行為者率（炊事・掃除・洗濯）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
9	自宅での掃除・洗濯習慣の変化	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（家事） ②時刻別行為者率（炊事・掃除・洗濯）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
10	家族の世話の増加	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（介護・看護、育児） ②時刻別行為者率（子どもの世話、家庭雑事）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
11	外出を伴わない余暇活動の増加	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（テレビ・ラジオ・新聞・雑誌、趣味・娯楽） ②時刻別行為者率（マスメディア接触、レジャー活動）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
12	移動習慣の変化	①社会生活基本調査 ②モバイル空間統計	①総務省 ②NTTドコモ	①行動時間（移動(通勤・通学を除く)） ②エリア別の人口分布、動態	①5年ごと ②1時間ごと	①Webページ ②CSVデータ他（要購入）	①なし ②有料	△
13	睡眠習慣の変化	①NHK生活時間調査 ②国民健康・栄養調査	①NHK放送文化研究所 ②厚生労働省	①睡眠時間帯 ②一日の平均睡眠時間	①5年ごと ②各年	①Webページ ②e-stat	なし	○
14	通勤頻度（時間）の低下	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（通勤） ②時刻別行為者率（通勤）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	○
15	身だしなみにかかる時間の減少	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（身の回りの用事） ②時刻別行為者率（身のまわりの用事）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
16	食事行動の変化	国民健康・栄養調査	厚生労働省	朝、昼、夕別にみた１日の外食・中食の食事構成比	各年	Webページ	なし	○
17	自宅での食事頻度の上昇	国民健康・栄養調査	厚生労働省	朝、昼、夕別にみた１日の外食・中食の食事構成比	各年	Webページ	なし	○
18	ECサイトでの購入頻度の上昇	①家計消費状況調査 ②売上高調査（統計）	①総務省 ②日本通信販売協会	①インターネットを通じて注文をした世帯数、支出総額 ②通信販売売上高	①各月 ②各月	①e-stat ②ウェブページ	なし	○
19	出退勤の途中の買い物頻度の低下							× （直接的な統計なし）
20	規則的移動の減少	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（通勤） ②時刻別行為者率（通勤）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
21	仕事での出張・移動頻度の低下	①社会生活基本調査 ②国民生活時間調査	①総務省 ②NHK放送文化研究所	①行動時間（主な仕事中の移動） ②時刻別行為者率（仕事関連）	①5年ごと ②5年ごと	①e-stat ②Webページ	なし	△
22	自由時間の増加	以下、オンラインショッピングの増加で整理したものと同様であるため省略						
～	～	～						

注）データ活用可能性は高：○、中：△、低：×として整理

(7) まとめと課題

本節では、具体的な事例を用いて分析フレームワークの具体化及び改良を行った。具体的な事例としては「ネットショッピングの増加」と「在宅勤務の増加」を取扱い、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。生活行動モ

デルは次年度以降定量化を検討する予定であり、定量化にあたっては、本節(6)で整理した通り、既存統計だけでは不十分であることから、新規調査や有料データの購入を検討することが望ましい。

下記に今後の課題を示す。

- 生活行動モデルの定量化のための分析手法の検討及び定量化
  - 分析手法としては、①在宅勤務の頻度別に生活行動とエネルギー消費量を集計する方法と、②簡略パス図で示す生活行動モデルを定量化する方法の 2 種類が考えられる。
- 個人の生活行動と世帯の生活行動の整理と両者の接続方法の検討
  - エネルギー消費量は個人として使用する場合（車利用、在宅勤務の PC 利用など）と世帯（居室単位の場合もある）で使用する場合（車利用、空調、照明など）がある。
- 生活行動とエネルギー消費量の新規調査の検討
  - 上記 2 つの具体的な事例による生活行動とエネルギー消費量の関係及び、個人と世帯の生活行動の関係を把握するための調査を検討する必要がある。
- 世界モデルも視野に入れた簡略パス図の調整
- 個人の同時行動の取り扱い
  - 現状は主となる行動によって行動区分を分類している。しかしながら、例えば通勤中にスマホで買い物をするなど同時行動が起こっており、見かけの買い物時間が減少している可能性がある。そのため、現状のまま主となる行動のみを取り扱うか、同時行動における複数の行動を別々に取り扱うか整理する必要がある。
- 生活行動モデルの細分化
  - 今年度作成した生活行動モデルは平均的な世帯を想定したものであるが、世帯人数や年代、性別などで生活行動モデルは異なることが予想される。また、地方と都市でも同様である。このように平均的な世帯をどのような視点で細分化することが適当か検討する必要がある。
- 潜在因子のモデル内での取り扱い
  - 現行の生活行動モデルは観測変数のみを用いているが、生活行動の変化の背景にある潜在因子のモデル内での活用方法は今後の課題である。
- 今回のモデルでは時間予算（1 人 1 日 24 時間）については検討しているが、モノ・サービスの入手に関する消費支出と所得の制約条件等の必要性については今後の課題である。
- ネットショッピングとして取り扱う対象範囲の拡大
  - 本報告書では「インターネットを利用した商品・サービスの購入のうち、amazon や楽天などのネットショップで商品を販売している BtoC 取引」としているが、Uber Eats、CtoC 取引や商品だけでなくサービスの取扱い、ま

た所有に加えシェアの取扱いなど対象とする範囲の拡大は今後の課題である。

- 「より良い住環境に住む（引越す）人が増える」の取扱い
  - 在宅勤務の環境が整備されると地理的制約が弱くなる。これにより二地域居住やセカンドハウス保有が増える可能性があり、住まいのあり方が多様化すると考えられる。エネルギーの視点でも住まいが変わると使用エネルギー種が変わる（ガス併用住宅、全電化住宅など）可能性があるため、より広い視点で生活行動モデルを整理する必要があると考えられる。
- パス図変数と既存統計・調査との対応関係
  - 既存の統計・調査で十分に把握できないものや有料のものは新規調査やデータ購入の必要性を検討する必要がある。また、各統計・調査の取得頻度が統計によってバラバラであり、また項目ごとのデータの密度（間隔）が異なるため、データ同士の結合が必要となる場合にどのようにデータを補完するのかといった、定量化のための検討の中で想定される課題もある。

参考文献（5.4.5 に関するもの）

1) 総務省：テレワークの意義・効果, 総務省 HP
https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/telework/18028_01.html, (accessed 2021-02-06).
2) 総務省：家計消費状況調査 ネットショッピングの状況について（二人以上の世帯）－2020 年（令和 2 年）12 月分結果－, 総務省統計局 HP, 5th Jan.(2021)
https://www.stat.go.jp/data/joukyou/pdf/n_joukyo.pdf, (accessed 2021-02-06).
3) 総務省：「IoT 時代における新たな ICT への各国ユーザーの意識の分析等に関する調査研究」, 総務省統計局 HP, Feb.(2016)
https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/link/link03_h28.html, (accessed 2021-02-06).
4) 総務省：令和元年通信利用動向調査の結果, 情報通信統計データベース, 29th May.(2020)
https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/data/200529_1.pdf, (accessed 2021-02-06).
5) 総務省：令和元年通信利用動向調査 / 企業編, e-Stat, 29th May.(2020)
https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200356&tstat=000001140586&cycle=0&year=20190&month=0&tclass1=000001140587, (accessed 2021-02-06).
6) 天野 了一：ネットショップ：その誕生とインパクト（特集 商品と商店：ショップとストア), 同志社大学学術リポジトリ, 同志社大学人文科学研究所 (2020)
https://doshisha.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=27083&item_no=1&page_id=13&block_id=100, (accessed 2021-02-06).
7) NTT ドコモ：モバイル空間統計, モバイル空間統計 HP
https://mobaku.jp/, (accessed 2021-02-03).
8) 総務省：家計消費状況調査, 総務省統計局 HP
https://www.stat.go.jp/data/joukyou/index.html, (accessed 2021-02-03).
9) 日本通信販売協会：売上高調査（統計）, 日本通信販売協会 HP
https://www.jadma.or.jp/statistics/sales_amount/, (accessed 2021-02-03).

10) 日本ショッピングセンター協会：SC 販売統計調査, 日本ショッピングセンター協会 HP
http://www.jcsc.or.jp/sc_data/data/salesdata, (accessed 2021-02-03).
11) 日本百貨店協会：日本百貨店協会自主統計, 日本百貨店協会 HP
https://www.depart.or.jp/store_sale/, (accessed 2021-02-03).
12) NHK 放送文化研究所：国民生活時間調査, NHK HP
https://www.nhk.or.jp/bunken/yoron-jikan/, (accessed 2021-02-03).
13) 厚生労働省：国民健康・栄養調査, 厚生労働省 HP
https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kenkou_eiyou_chousa.html, (accessed 2021-02-03).
14) 日本フードサービス協会：JF 外食産業市場動向調査, 日本フードサービス協会 HP
http://www.jfnet.or.jp/data/data_c.html, (accessed 2021-02-03).
15) 総務省：社会生活基本調査, 総務省統計局 HP
https://www.stat.go.jp/data/shakai/2016/index.html, (accessed 2021-02-03).
16) 厚生労働省：毎月勤労統計調査, 厚生労働省 HP
https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/30-1.html, (accessed 2021-02-03).
17) 総務省：通信利用動向調査, 総務省 情報通信統計データベース
https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/statistics05.html, (accessed 2021-02-03).
18) 国土交通省：テレワーク人口実態調査, 国土交通省 HP
https://www.mlit.go.jp/crd/daisei/telework/p2.html, (accessed 2021-02-03).
19) 総務省：家計調査, 総務省統計局 HP
https://www.stat.go.jp/data/kakei/index.html, (accessed 2021-02-03).

5.4.6 「隠れた費用」に関する情報収集

(1) はじめに

本節では、行動科学や行動経済学を活用した先行文献に基づいて「非合理的選択」が消費者の行動に及ぼす影響について考察する。加えて、デジタル技術の発展がもたらした消費に関する意思決定構造の変化が非合理的選択にどのような影響をもたらすかを検討する。

(2) 省エネ技術普及における隠れた費用

① 省エネルギーギャップと省エネバリア

消費者や企業が省エネ技術に対する投資をするかについての意思決定を行う際、エネルギー効率改善に対して行った追加の投資が消費エネルギーの削減費用に見合うかどうかという基準において判断することが考えられる。一方で、長期的に投資回収を行う上において各期に得られるリターンは常に一定ではなく、将来に対するリスクの見積もりの大きさによって徐々に減少するように見積もられる。将来において得られる価値（効用）を現在の価値（効用）に引き戻す際に、暗黙のうちに想定する割引率は主観的割引率と呼ばれ、主観的割引率が高いほどより短い投資回収年数において投資判断を取るようになる。加えて生産性や省エネ性以外の投資効果との比較により、一見して省エネによる高い見返りが得られるはずの投資が見過ごされてしまうという

事象が観察される。消費者が家計や社会経済にとって最適とされるものよりもエネルギー効率の低い製品を選択するということによるエネルギー不経済性のことを省エネルギーギャップと呼び、そのような現象をもたらすような様々な障壁（省エネバリア）について検討がなされている。

省エネバリアの主な要因について、市場における製品の経済効率性が見合っていないといった市場の失敗によるものの他に、現在価値の観点からエネルギーコストを正しく理解して判断しているかといった非合理的な選択に基づく要因や、省エネ機会に関する情報の欠如、オーナー・テナント問題など関係するアクター間の思惑が一致せず取り組みが進まないといった動機の分断、認知計算能力の限界による限定合理性、投資可能な資金が得られないという資金調達力、情報探索や交渉等の隠れたコスト、技術への信頼性や将来の不確実性が挙げられている[1),2)]。

② 将来予測モデルと隠れた費用の関連

RITE の積み上げモデルにおいては、投資に関する意思決定における隠れたコストとして主観的割引率（時間割引率）を取り入れている。投資判断において単純な利子率ではなく意思決定における様々な比較判断要素を考慮した主観的な投資回収判断年数を想定することで、楽観的な予測や実現性の乏しい目標設定がモデルから導き出されないようにしている[3),4)]。

表 5.4.6-1 最新の DNE21+モデルにおける主観的割引率の想定

	上限（日本等の先進国）	下限（後進国）
発電	8%	20%
その他エネルギー転換	15%	25%
エネルギー集約産業	15%	25%
運輸（自動車）	30%	45%
環境購買層	10%	
トラック、バス等	20%	35%
民生（業務） コジェネ	15%	25%
民生（家庭）	30%	55%
給湯、冷暖房等	20%	35%
冷蔵庫、照明等	25%	40%

出典） RITE[4)]

行動経済学では、個人や組織の意思決定に影響する主観的な価値の重みづけとしての主観的割引率が用いられている。また、省エネルギー製品の購買意思決定の分野においても主観的割引率を求めている。

本調査においてはまず時間割引率の考え方について整理を行ったうえで、次に主に民生用の省エネ機器に関する割引率に関する研究を整理する。

(3) 主観的割引率に関する文献調査

① 文献調査の概要

文献調査に用いた検索サイトは以下の通りである。

- CiNii
- NDL Opac
- google scholar
- J-Stage

上記の検索サイトを用いて検索を行った。また、検索の参考とした関連用語として用いた検索ワードは以下の通りである。

- 時間割引率
- 量的効果（マグニチュード効果）
- 双曲割引
- 符号効果
- 期間効果

上記の 5 つの検索ワードを軸に､行動経済学と省エネ機器導入に関する主観的割引率に関連する論文を選定した。

② 時間割引率に関する概略

a. 時間割引率

時間割引率（Time discount rate：主観的割引率、時間選好率とも呼ばれる）とは、ある報酬の将来の価値（効用）が、現在の報酬の価値よりどれだけ低く感じられるかを時間による割引率で考えることであり、異なる時点間での選択行動を特徴づけるパラメーターである。木成ら[5)]によると、一般に報酬を得られるまでに待たなければならない期間が長ければ長いほど、その報酬に対する価値は大きく割り引かれるとされている。また、将来得られる報酬の価値 V は

$$V = \frac{A}{1 + KD} \tag{5.4.6-1}$$

として表すことができ、ここで A は報酬の絶対的な価値、K は割引率、D は報酬が得られるまでに待たなければならない期間を意味すると、廣田ら[6)]は述べている。

時間割引に関する問題は日常生活においても度々話題として取り上げられる。例えば喫煙や飲酒は今すぐの“快感”や“快楽”などの報酬が得られる一方で、現在の摂取を我慢すれば将来健康な身体という形で報酬を得ることができる。他にも宿題やダイエット等、時間割引に関わる問題は多数存在する。

このことから、時間割引率が生じる心理的要因として、現存する時間割引率に関する先行研究では、高橋[7)]や池田[8)]は個人の性格的属性や習慣、また高橋[9)]、平田[10)]は年齢や性別、さらに晝間ら[11)]は一個人の経済性などが大きな影響を与えるとの研究結果を示している。

b. 伝統的経済学と行動経済学での割引率の違い

従来の経済学（以下、伝統的経済学）では完全情報であることを前提とし、個々の主体が効用を最大化した状態で意思決定することになっている。例えば、選択や行動は合理的であり、効用が最大限得られるとされている。ここでの合理的な選択や行動とは、失敗しない、言い換えれば、所得を使い果たし効用最大のところまで消費するという意思決定が行われていることであると関川 [12]は述べている。しかし、現実には衝動買いや購入後に後悔するような買い物をしたり、またギャンブルなどで誤った損切りを経験したり、後悔する行動をとることが多い。これらの経済行動はまだ説明できないアノマリー（Anomaly）と呼ばれており、それらを説明するために心理学などの理論を経済学に取り入れたのが行動経済学である。行動経済学では将来に関する情報が完全であり、不確実性がない状況の下で、明確に定義された選好（好みは一定で変化しないこと）に基づいて、伝統的経済学が導き出す効用極大化を目指した理論的帰結が、現実の人間の行動原則とは乖離し、説明力を欠いていることを挙げ、経済人（ホモ・エコノミクス）ではなく非合理的な部分や不完全な認知能力を持ち合わせているヒューマンとしての意思決定理論を提唱し、時間割引率においてもそのような考えを取り入れている。

以下は、行動経済学と伝統的経済学の考え方の差異について示した表である（表5.4.6-2）。

表 5.4.6-2 行動経済学と伝統的経済学の差異

	伝統的経済学	行動経済学
情報の完全性	意思決定情報が完全である。	意思決定情報が不完全である。
人間像	与えられた完全な情報の下で、自らの効用を最大化する合理的な選択行動がとられる。	不完全な情報の下で、直感、感情等に左右される非合理な選択行動が起こり得る。
時間割引率	時間整合的（水平線）	時間非整合的（準双曲線型）
メリット	規範的なあるべき行動の説明となる。	現実の行動の説明に近つく。
デメリット	数学的なモデル化が容易	数学的なモデル化が困難

出典）荒井 [13]

情報の完全性は、意思決定をするうえで必要な物事の情報について、完全であるか否かである。伝統的経済学においてはこの情報は完全であるとされるが、行動経済学では必ずしも情報が完全でないとしている。また、人間像としては伝統的経済学にお

いては、前述の通り選択や行動は合理的であり効用を最大限得られるとされている。しかし、行動経済学では必ずしも合理的な選択ができるわけではないとしている。また、時間整合性とは時間に対する割引率が一定に変化していくことであり、伝統的経済学では時間整合性があるのに対して、行動経済学では時間とともに割引率が変化する（整合的ではない）としている。

c. 時間割引率の特徴（双曲割引・符号効果・量的効果）

前述の通り、行動経済学では時間とともに割引率が一定に変化することはないとしている（時間的非整合性）。現在の行動経済学における時間割引率の特徴として、先行研究では以下の 3 つの一般的経験則が確認されている[13),14)]。

1 つ目は双曲割引（Hyperbolic discounting）であり、割引率は一定ではなく、対象となる金額や効用の実現が近いほど割引率は大きくなることを表している（図 5.4.6-1）。例えば、今日か明日という近い将来に対する選択においては、報酬に対する割引率は高く、1 年後か 1 年と 1 日後かという遠い将来に対する選択においては、報酬に対する割引率は期間の隔たりが同様でも、低くなるとされる。

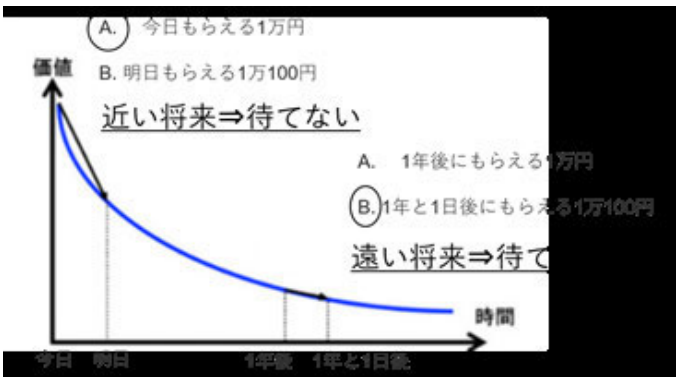


図 5.4.6-1 双曲割引

2 つ目は符号効果（sign effect）であり、利得に対する割引率は、同じ大きさの損失の割引率よりも高くなることを表している（図 5.4.6-2）。例えば、1 週間後に得る 1000 円と、1 週間後に失う 1000 円では、同じ金額であっても失う 1000 円の割引率が高くなる。

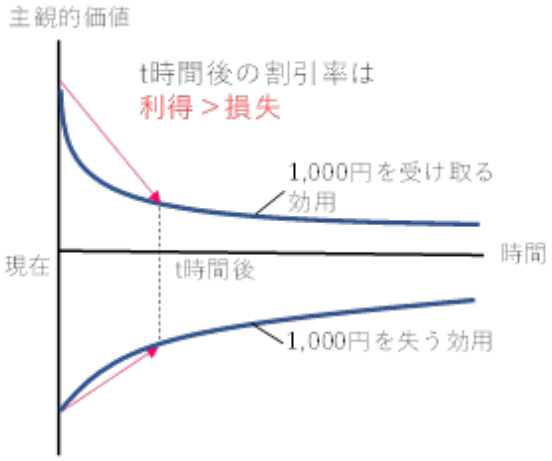


図 5.4.6-2 符号効果

3 つ目は量的効果（Magnitude effect）であり、割引の対象となる金額や効用が大きいほど、割引率は低くなることを表している（図 5.4.6-3）。例えば、一週間後に得るケーキ 1 個と、1 週間後に得るケーキ 2 個では後者の方が割引率は低い。

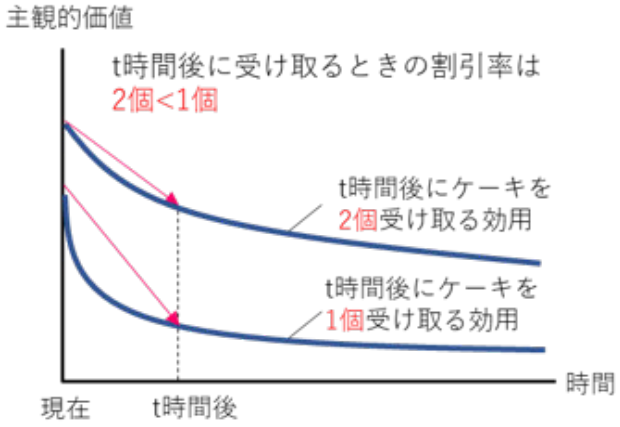


図 5.4.6-3 量的効果

d. 時間割引率に影響を与える諸要素

時間割引率に影響を与える要素として、不確実性（uncertainty）と限定合理性（bounded rationality）の 2 つを挙げることができる。

不確実性とは、将来に対する確信や可能性の“不確かさ”であり、不完全または不明な情報を含む認識論的な状況を指す語である。行動経済学は「先行きが不確実であるような場合や人の意思が明確でないような場合に、実際に人間はどのように行動するのか」を観察・調査する学問だと荒井 [15]は述べていることからも、この概念は非常に重要であるといえる。この背景には、人はリスクがゼロになる（つまり確実である）ことを希求する傾向がある。これはゼロリスク効果（Zero risk effect）と言われ、例えば交通事故率を同じ 10%ポイント減らすための投資に対する受容度を尋ねる際 60%から 50%に減らす場合に比べて、10%から 0%にする場合の方が受容されやすいといったことが挙げられる。

限定合理性とは、人間の認知能力や情報の処理能力、その場の環境等によって必ずしも合理的な選択ができないとする概念であり、複雑な問題を解決する人間の認知能力に存在する限界のことであると荒井[15]は述べている。意思決定においては、その場での直感や感情等によっても選択が左右されるため、時間割引率においても大きな影響を与えるといえる。

また、個人に帰属する要因を見てみると、割引率が与える影響の一部としては、先行研究において以下のような要因が確認されている。

高橋[9]の研究では、性格要因や性別等の個人差が報酬の価値割引率に及ぼす効果に関する実験を行っており、実証では性格特性に関しての実験として、報酬の時間割引に関する調査、時間的展望尺度（time perspective scale）などの性格検査が実施され、それぞれに対して被験者が回答した結果をもとに時間割引に関する考察を行っている。

その結果、女性よりも、男性の方がより割引率が高く、男性よりも女性の方が時間的展望傾向は大きいことが示された。ここでいう時間的展望とは「過去の出来事があったから今の自分がある」や、「未来の目標のために現在努力をしている」などと時間の流れと関連づけた認知や見通しをさしている。また、女性の方が細かさ、計画性があることが時間割引率に差が生じるひとつの要因とされ、また、男性においては男性ホルモンの一種であるテストステロン値が高い男性ほど時間割引率が高いとの関係性が考察されている。

畫間ら[11]の研究では、時間割引率に関する経済実験を、さまざまなシナリオ質問や心理学的設問を含んだ詳細なアンケート調査を用いて行っており、こうしたデータを多面的に利用することによって、収入やローンの有無などの経済性が時間割引率にどのように影響しているかを検討している。その結果、世帯収入が低いほど時間割引率が高い傾向が見られるとともに、借金の残高が多いほど、時間割引率は高く、時間割引には経済面的な影響があると示唆された。

また、平田[10]の研究では、総務省の家計調査における世帯 1 人当たりの総消費支出項目を用いて，日本における時間割引率の年齢別不均一性の度合をメタ分析している。

その結果、若年期から中年期にかけて時間割引率は有意に低下し、中年期から老年期にかけて時間割引率は有意に上昇していた。また、20 代後半が時間割引率は最も高く、逆に最も低いのは 40 代中頃としている（図 5.4.6-4）。

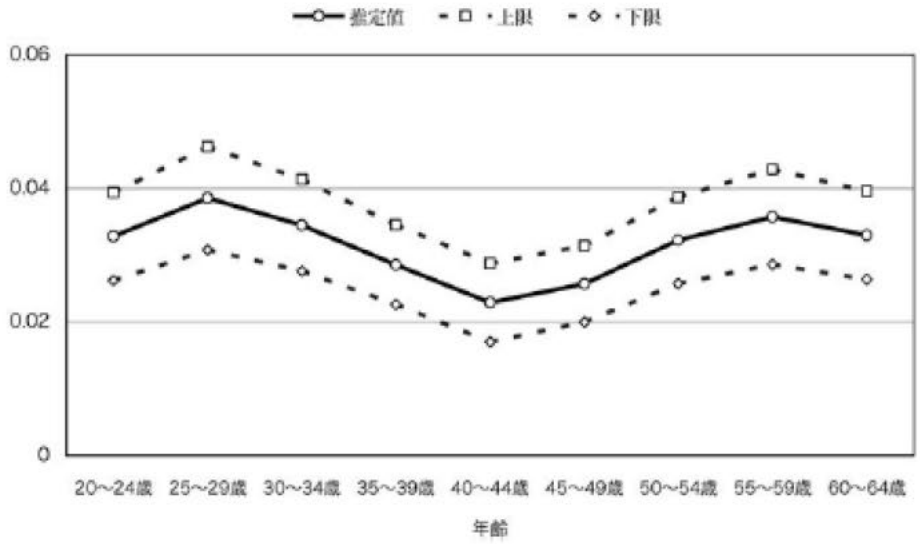


図 5.4.6-4 時間割引率の年齢による違い

出典）平田 [10)]

③ 省エネ設備投資における主観的割引率のレビュー

省エネ機器の投資に関する割引率の研究は、エネルギー効率性の議論が盛んになっていた 1970 年代後半より研究が行われてきている。本項では特に家庭用の省エネ機器の割引率に関する研究をレビューして考察を行う。

a. 家庭部門の機器導入における省エネ性能に対する割引率

家庭用の機器の省エネ性能に対する投資における割引率に関して収集した主な論文について表 5.4.6-3 において機器別に整理した。

家庭用の省エネ機器については特に消費電力量の大きいエアコンと冷蔵庫の研究が多い。また断熱や自動車、照明機器に関する割引率についても研究が行われている。

表 5.4.6-3 家庭用の省エネ機器の割引率に関する研究 [1]

著者	対象国	データ	モデル	割引率	備考
エアコン					
Hausman[16)]	アメリカ	アンケート	離散選択	29%（平均）	所得が低いほど割引率が高い傾向がみられる
Goett[17)]	アメリカ	アンケート	離散選択	3.2%	
Ruderman et al.[18)]	アメリカ	出荷データ	-	19%-22%	1972 年～1981 年のデータにおける年別の割引率の範囲
浜本 [19)]	日本	POS	ヘドニック	50.8%（平均）	

[1] 割引率の算出において、将来の電気代削減メリットを、使用期間の期末にすべて受領すると想定したために割引率が本来より低く計算されている事例もみられる。

森田ら[20]	日本	POS	ヘドニック	8.1%	エコポイントの効果に関する分析
Matsumoto[21]	日本	POS	離散選択 ヘドニック	7.5%-57.7%（離散選択） 19.6%-48.5%（ヘドニック）	同一のPOSデータによる複数のモデルによる分析
Matsumoto et al.[22]	ベトナム	POS	ヘドニック	11.7%-312%	
冷蔵庫					
Gately[23]	アメリカ	アンケート	エンジニアリング	45%-300%	
Meier et al.[24]	アメリカ	販売データ	エンジニアリング	35%-58%	省エネ性能の異なる2種類の冷蔵庫の販売状況を用いた算出
Ruderman et al.[18]	アメリカ	出荷データ	-	78%-105%	1972年～1981年のデータにおける年別の割引率の範囲
Revelt et al.[25]	アメリカ	アンケート	ロジットモデル	39%-46%	購入時のインセンティブとローンの影響を分析
高橋[26]	日本	POS	離散選択	9.1%（2008年） 14%（2009年）	エコポイントの影響に関する分析
浜本[19]	日本	POS	ヘドニック	41.6%（平均）	
小西ら[27]	日本	POS	ヘドニック	4.3%-7.8%（年間電力消費量） 0.7%-10.7%（省エネ基準達成率）	
自動車					
Dreyfus et al.[28]	アメリカ	POS	ヘドニック	11%	
Allcott et al[29]	アメリカ	公的データ	-	45%	中古車登録情報を基に分析

b. 割引率の算出方法による影響

家庭用の省エネ機器投資における時間割引率の計算方法やデータの取得方法は研究により違いが見られ、それにより研究ごとに割引率の高さに対してどのように説明できるかが異なる。

データ取得方法については大きく分けてアンケートにより実際に購入した機器について回答させたり、仮想の購買場面において省エネ性能に対して追加的に支払うことのできる金額を回答させたりする方法と、販売時点情報（POS データ）によって得られた市場に流通している製品ごとの販売シェアや販売価格を消費者の購買意思決定の反映として分析に用いる方法に分けられる。近年の研究においては POS データを用いた分析による結果が多く報告されている。POS データを用いることにより多くの考慮すべき属性をモデルに投入することができるようになり、省エネ投資に対する割引率をより正確に推計できるようになった可能性も指摘されている[30]。

また、分析モデルについては主に離散選択モデルとヘドニックモデルが主に用いられている。離散選択モデルはその製品の選択率で示される市場のシェアが価格を含む製品属性や意思決定者の属性によって説明できるというモデルである。ヘドニックモデルは製品価格を製品属性で説明するモデルである。Matsumoto[21]は日本における同一のエアコンの POS データからヘドニックモデルと離散選択モデルそれぞれを用いて割引率を計算したところ、ヘドニックモデルの割引率は離散選択モデルの割引率よりも高めの割引率になる傾向があることを報告している。どのようなデータやモデル選択を行うことでより正確な主観的割引率を求められるのかということについての議論は未だ発展途上の部分があると考えられる。

c. 製品の技術や性能による影響

割引率が製品属性によって異なることを報告している事例も見られる。例えば、冷蔵庫の容量ごとに割引率を求めた事例や、エアコンの冷房能力ごとに割引率を求めた研究が行われている。機器の容量や能力の大きさごとに割引率が異なる要因としては、低容量や低機能の製品の場合は単身向けや 2 台目以降の用途で使用されるために比較的短期間の使用が見込まれることや、高機能製品の場合は様々な付加機能が付随しており、省エネ性能の付加価値が相対的に低くなることなどにより主観的割引率に影響することが考えられる。

d. 個人の属性や政策の影響に関する研究

割引率に影響を与える要因の一つとして、研究の中では割引率の個人の属性や政策の影響を示唆するものもある、例えば Hausman[16]はエアコンの主観的割引率について、所得水準が低いほど割引率が高い傾向にあることを報告している。また、永井ら[31]は省エネ製品購入に影響する個人の性質として、環境意識、光熱費への関心、リスクテイカー思考、家計リスク、将来への展望といった要因について分析を試みている。

政策の影響として、高橋[26]は家電エコポイント導入前後における冷蔵庫の割引率の違いを、森田ら[20]はエコポイント制度のポイント変更による冷蔵庫の割引率の影響をそれぞれ POS データにより分析しており、エコポイントという経済的インセンティブが導入されることにより主観的割引率が高くなることを示唆する結果が報告されている。インセンティブの影響が主観的割引率を高める原因としては、ポイントをより効

率的に得ることを重視することにより、省エネ性能の比較に目を向けにくさせるといった限定合理性の影響が考えられる。

e. 企業の省エネ投資に関する割引率

民生分野の割引率に比べ、民間企業の投資における割引率の研究は少ない。浜本[32]は仮想シナリオを用いたアンケートを地域の民間事業者に回答させ、投資に対する割引率を計算している。研究が少ない要因として浜田は、ミクロデータの少なさを上げるが、後述するように家庭用の機器において所有の主体が個人から企業に移行することで利用の効率化が図られることになれば、企業の投資判断における割引率の研究の受容度は家庭部門における需要の予測においても重要になるのではないかと考えられる。

④ 文献調査のまとめ

本項においてはまず時間割引率に影響する個人の属性や、その他の諸要因をまとめている。特に個人の経済性や性格などの属性による時間割引率の影響については、性別や年齢、また性格や所得水準などの要因が報告されている。行動経済学における時間割引率の要因分析は個人レベルのものが主であるものの、経済性の要因は先進国と途上国のような社会間の経済水準の差と割引率の差との関連に影響する可能性がある。

続いて省エネ機器の割引率をメインのテーマとしている論文を整理したところ、推計された割引率は機器によって非常に大きな差異が見られる。また同一機器においても大きく異なることがわかった。しかし、これらの割引率の算出手法は研究間で一貫しておらず、割引率の妥当性を比較することができる段階ではないと考えられる。割引率に影響する要因としては行動経済学の論文と同様に所得水準の影響や、政策による経済的なインセンティブの影響が指摘されている。このほかにも、省エネルギーラベル等による情報提供が義務付けられることにより、製品の省エネ性を示す情報を消費者が知りやすくなったことが合理的な意思決定を促し割引率が過大になることを防いでいる可能性も考えられる。

(4) デジタル化による時間割引率への影響

デジタル技術の進展はこれまで使用されてきた製品をより効率的に運用することを可能にし、そのことにより省エネルギー性能に対する主観的割引率を低くすることができる側面がある。本項においてはその中で製品の陳腐化を防ぐソフトウェア更新型の製品設計と、シェアリングエコノミーによる機器の効率利用に関して仮説検討を行う。

① 陳腐化を回避する技術

a. 製品の陳腐化と主観的割引率の関連性

製品の陳腐化は消費者の製品に対する主観的な寿命を規定する重要な要因である。例えば、短い間隔で新しい技術や機能を持った製品が市場に投入されている機器は、物理的な寿命を迎えるよりも前に陳腐化によって製品が買い替えられてしまうことから、消費者も購入の際により短い投資回収期間を基に購入の意思決定を行うことになる。また、流行や市場における陳腐化の速度が速い場合、製品のライフサイクルの観点からも効率的なエネルギーや資源の活用を阻害する可能性がある。図 5.4.6-5 は欧州における各製品の実際の製品寿命と設計上の製品寿命、望ましいとされる製品寿命を比較したものである。図にあるスマートフォン、テレビ、洗濯機、掃除機においてはいずれも実際の製品寿命が望ましい製品寿命を下回っている。また、スマートフォンにおいては設計時の製品寿命が望ましい製品寿命を下回っており、市場において計画的な陳腐化を行っている可能性がある。

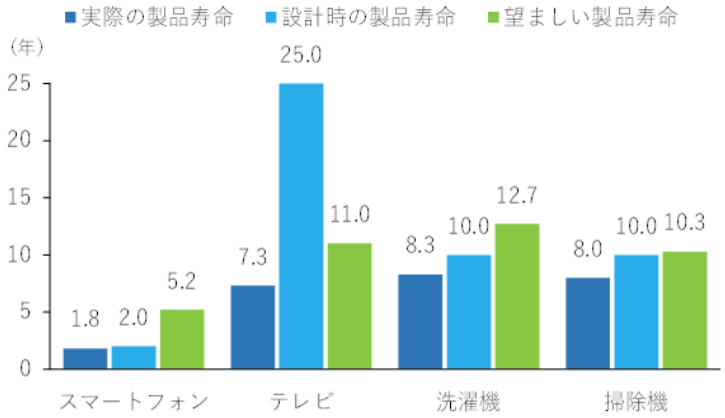


図 5.4.6-5 機器の理想的使用期間と実際の使用期間のギャップ

出所） 文献 34)

陳腐化には物理的な寿命である絶対的な陳腐化の他に、心理的・技術的・経済的といった相対的な陳腐化が挙げられている [33]。例えば、次々に新しい技術が生まれ現在使用している製品に用いられている技術が劣ってしまったり、一時的な流行の変化により周囲に合わせた製品への乗り換えが起こりやすかったりすることで、物理的な寿命やその製品自体の設計上の使用期間を迎える前に買い替えが起こることもある。

それらの相対的な陳腐化を分離して定量化することは困難であるが、物理的な寿命以外の要因が製品寿命に影響しているということについては、例えば消費動向調査における製品の買い替え理由と平均使用年数の関連から確認できる [35]。

図 5.4.6-6 では一例として消費動向調査におけるテレビとパソコンの買い替え理由と使用期間の推移を示している。主な買い替え理由が「故障」である場合は絶対的陳腐化による影響が、それ以外の理由の場合は相対的な陳腐化の影響が製品寿命により影響していると考えられる。テレビについては 2000 年以前には買い替え理由の 8 割前後が故障であり、平均使用年数も平均 9 年前後で推移しているが、2000 年代の液晶・

プラズマテレビと地上デジタルテレビ放送の登場で故障以外の理由による買い替えが増えたことにより平均使用年数が 7 年程度まで短くなり、その後買い替えが一巡し故障による理由の買い替え割合が増加することで平均使用年数は再び 9 年まで戻っている。パソコンについては 2002 年時点では主な買い替え理由が「上位製品」であり、故障が理由の割合は上位品目の半分程度であったため平均使用年数は 4.1 年であったが、その後買い替え理由が故障である割合が増加した結果 2017 年では平均使用年数は 6.4 年まで延びている。

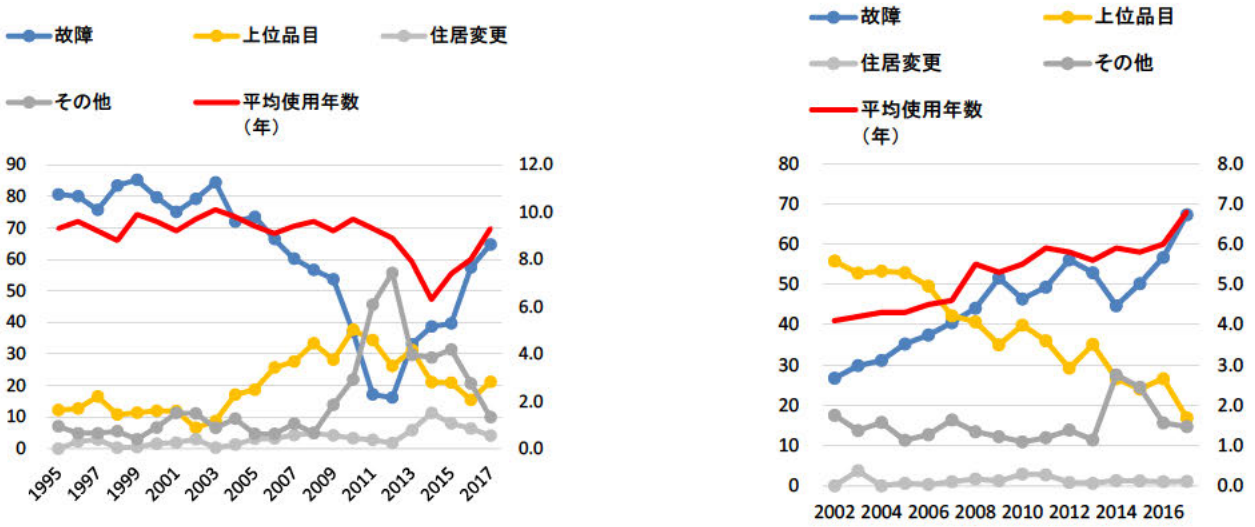


図 5.4.6-6 買替え理由と使用期間の推移（二人以上の世帯）
（左：テレビ、右：パソコン）

b. デジタル技術による陳腐化の回避

陳腐化を回避し、より合理的な投資判断を促すためには相対的な陳腐化を回避することが重要である。デジタル化やモノのインターネット化（IoT）はハードウェアの製品寿命を延ばしながらより効率的な機器利用をもたらし、製品に対する割引率をより合理的にすることができるのではないかと考えられる。

例えば、Tesla 社の車両には Wi-Fi 経由で定期的なソフトウェアアップデートが配信されている。これにより車両に新しい機能を追加したり、既存の機能をさらに向上させたりすることが可能になり、車両の安全性や機能が随時向上されるようになるとされている [36]。これまでの車両においては機器や車両そのものを買い替えなければ実現できなかったような機能や操作性の向上や改善も可能になることで、相対的な陳腐化を回避することが可能になり、製品の使用期間を長期化させることができる。このような技術は製品の技術が成熟した他の機器にも応用が可能であると考えられる。

一方で、デジタル家電は、①開発した機能の陳腐化が早い。②常に付加価値部分を積み上げて価値維持を図ろうとする。③多様な顧客層への対応による機種が増加する。といった要因により、短納期化、多機種化の加速が起こるという見方もある [37]。

② シェアリングエコノミー

カーシェアリングなどのシェアリングは、従来個人ごとに所有を必要としていた状態から、第三者が所有する機器を相互に利用しあうことにより効率的な機器利用が実現できる方法といえる。このような仕組みが成立するためには細かな需要管理やトラッキングなどのデジタル技術の発展が基盤となっていることは言うまでもない。また、所有の形態が個人ベースから企業の一括管理に変わることによって、使用する機器のエネルギー効率性に対してもより合理的な判断を行うことができるため、機器投資における省エネルギー効果に対してより長期的な投資回収判断を行うようになる可能性が考えられる。近年においては需要管理を行う事業者が車両等を持たず、個々人の所有する車両や部屋を運用する形態のシェアリングエコノミーも普及しており、そのような仕組みがシェアリング資源を持つ意思決定者の投資判断にどのような影響をもたらすのかについての研究が待たれるところである。

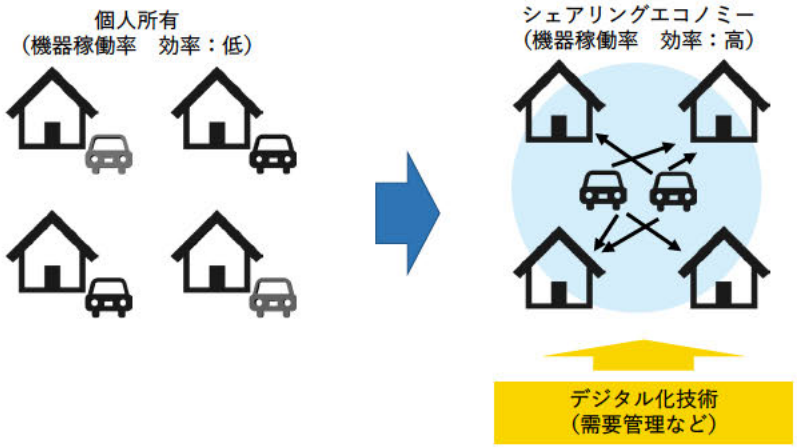


図 5.4.6-7 シェアリングのイメージ

(5) まとめ

本節では、人々の省エネルギー性能に対する合理的な投資を阻害する要素としての「隠れた費用」について検討し、特に定量的な研究が多く行われている主観的割引率に関する調査を実施した。個人や法人が省エネルギー性能の投資において意思決定を行う際における合理性からの乖離の程度を反映している主観的割引率は、市場の状況や経済状況、政策等の影響を定量的に反映できる点において貴重な指標であるが、観測される割引率には機器ごとや研究ごとに大きな幅が見られる。近年消費に関するリアルタイムなデータを取得できるようになってきたこともあり、今後継続的に省エネ性能に対する主観的割引率についての研究が重ねられることにより研究手法等の改善が図られることと考えられる。

また、近年のデジタル技術と割引率との関連について、陳腐化を避けるソフトウェア更新型の製品設計とシェアリングエコノミーによる所有形態の変化の 2 点について仮説的な検討を行った。これらの技術は広がりを見せ始めたばかりであり、普及とと

もに消費者や事業者の意思決定にどのような変化がもたらされるかについての研究が期待されるところである。

参考文献（5.4.6 に関するもの）

1) Gerarden, T. D., Newell, R. G. and Stavins, R. N., Assessing the energy-efficiency gap. Journal of Economic Literature, 55(4), 1486-1525 (2017)
2) Sorrell, S. and O'Malley, E., The Economics of Energy Efficiency: Barriers to Cost-Effective Investment. Edward Elgar Pub (2004)
3) RITE：投資回収年数（もしくは割引率）に関して 中期目標に関する議論と分析 (2009)
4) RITE：温暖化対策コスト評価およびその推計の前提となる投資の主観的割引率（投資回収判断年数）について (2018)
5) 木成勇介, 大竹文雄, 筒井義郎：時間割引率：逓減的時間割引率と期間効果, 第２回行動経済学ワークショップ報告論文 (2006)
6) 廣田敦士, 岡夏樹, 早川博章, 西崎友規子：身体姿勢と時間割引率の関係, 人工知能学会 全国大会（第 30 回）セッション ID: 4D1-5 (2016)
7) 高橋泰城：時間割引・不確実性下の意思決定の行動神経経済学, 行動経済学プロシーディングス第 1 回大会 第 1 巻, 69-71 (2008)
8) 池田新介：時間割引と肥満, 基礎心理学会シンポジウム講演論文集 28 巻 1 号, 156-159 (2009)
9) 高橋雅治：報酬の価値割引に影響を及ぼす心理学的要因の解明, 科学研究費助成金研究成果報告書（基盤研究 C）(2005)
10) 平田憲司郎：時間選好率の年齢別不均一性, 行動経済学プロシーディングス 第 1 回大会論文集 第 1 巻, 58-60 (2008)
11) 晝間文彦, 池田新介：経済実験とアンケート調査に基づく時間割引率の研究, 行動経済学コンファレンス報告論文 (2006)
12) 関川靖：比較を基準にした購買決定, 名古屋文理大学紀要 第 16 号, 5-11 (2015)
13) Benzion, U., Rapoport, A., Yagil, J.: Discount rates inferred from decisions: An experimental study, Management science, 35(3), 270-284 (1989)
14) Thaler, R.: Some empirical evidence on dynamic inconsistency, Economics letters, 8(3), 201-207 (1981)
15) 荒井俊行：行動経済学の理論とその日本における最近の活用に向けた論調を検証する, 土地総合研究, 2019 年秋号, 88-105 (2019)
16) Hausman, J. A.: Individual discount rates and the purchase and utilization of energy-using durables, The Bell Journal of Economics, 33-54 (1979)
17) Goett, A.: Household appliance choice: Revision of REEP behavioral models, Final Report for Research Project 1918-1, Electric Power Research Institute (1983)
18) Ruderman, H., Levine, M. D. and McMahon, J. E.: The behavior of the market for energy efficiency in residential appliances including heating and cooling equipment, The Energy Journal, 8(1) (1987).
19) 浜本光紹：家計における省エネルギー投資と割引率, 排出量取引と省エネルギーの経済分析―日本企業と家計の現状―（有村俊秀, 武田史郎 編著）, 日本評論社, 191-211 (2012)

20) 森田稔, 松本茂, 田崎智宏：省エネリベートプログラムの主観的割引率への影響―ヘドニック価格法による家電エコポイント制度の評価―, 環境経済・政策研究, 7(2), 24-36 (2014)
21) Matsumoto, S.: Consumer valuation of energy-saving features of residential air conditioners with hedonic and choice models, Empirical Economics, 55(4), 1779-1806 (2018)
22) Matsumoto, S. and Omata, Y.: Consumer valuations of energy efficiency investments: The case of Vietnam's Air Conditioner market, RIETI Discussion Paper Series, 15-E-063 (2015).
23) Gately, D.: Individual discount rates and the purchase and utilization of energy-using durables: Comment, Bell Journal of Economics, Vol.11, No.1, 373–374 (1980)
24) Meier, A.K. and Whittier, J.: Consumer discount rates implied by purchases of energy efficient refrigerators, Energy, Vol.8, No.12, 957–962 (1983)
25) Revelt, D. and Train, K.: Mixed logit with repeated choices: households' choices of appliance efficiency level, Review of Economics and Statistics, Vol.80, No.4, 647–657 (1998)
26) 高橋雅仁：販売データを用いた省エネ家電の機器選択モデルの検討－2008-09 年度冷蔵庫市場の場合－, 電力中央研究所報告, Y10022 (2010)
27) 小西葉子, 齋藤敬, 石川斗志樹：冷蔵庫の省エネ効率性に対する支払意思額と主観的割引率の推定：POS データを活用した「統一省エネルギーラベル」の評価, RIETI ディスカッションペーパー, RIETI 18-J-023 (2018)
28) Dreyfus, M. K. and Viscusi, W. K.: Rates of time preference and consumer valuations of automobile safety and fuel efficiency, The Journal of Law and Economics, 38(1), 79-105 (1995)
29) Allcott, H. and Wozny, N.: Gasoline Prices and the Fuel Economy Discount Puzzle, Princeton University, 1-51 (2009)
30) Cohen, F., Glachant, M. and Soderberg, M.: Consumer myopia, imperfect competition and the energy efficiency gap: Evidence from the UK refrigerator market, European Economic Review, Vol.93, 1-23 (2017)
31) 永井雄宇, 西尾健一郎：個人のリスク選好や意識が省エネ製品選択に与える影響, 第 31 回エネルギーシステム経済・環境コンファレンス論文集, 439-444 (2015)
32) 浜本光紹：民間事業所による省エネルギー投資行動に関する実証分析, 環境共生研究, (9), 1-13 (2016)
33) 小口正弘：製品寿命の様々な定義, 日本 LCA 学会誌, 14(1), 64-69 (2018)
34) European Environment Agency: Europe’s consumption in a circular economy: the benefits of longer-lasting electronics (2020)
35) 内閣府：消費動向調査 https://www.esri.cao.go.jp/jp/stat/shouhi/menu_shouhi.html, (accessed 2021-1-28).
36) テスラジャパン：サポート ソフトウェアアップデート https://www.tesla.com/jp/support/software-updates, (accessed 2021-2-19).
37) 春名修介：組み込み系ソフトウェア開発の今後の進むべき道とは, IESE/JEITA 共同ワークショップ資料 (2007) https://home.jeita.or.jp/is/committee/software/070906/materials/No.6-2_Panel_Discussion_Mr._Haruna.pdf, (accessed 2021-2-22).

5.4.7 まとめ

(1) 生活行動とエネルギーに関する既往研究や統計の情報収集

5.4.3 では、生活行動とエネルギーに関する既往研究および既存の統計情報を収集し、整理を行った。

① 生活行動とエネルギーに関する既往研究の情報収集

5.4.3 節(1)では、生活行動とエネルギーに関する既往研究として、2020 年に発表された 2 つのレビュー論文を日本語化して知見の調査・整理を行った。

主な知見を以下に示す。

a. テレワークによるエネルギー消費量への影響に関するレビュー論文

- 39 件の研究うち、テレワークによりエネルギー消費量の削減を示唆しているのは 26 件で、エネルギー消費量の増加又は変化しないことを示唆しているのは 8 件である。
- エネルギー削減の主な要因は、通勤のための移動距離の短縮であり、オフィスのエネルギー消費量の削減にも寄与する可能性がある。しかし、より広範囲の影響を考慮している研究では、削減効果は低く評価される傾向にある。
  - 仕事以外の移動や家庭でのエネルギー消費量の増加は、仕事での移動の減少によるエネルギー消費削減量を上回る可能性がある。
- リバウンド効果については以下の 3 つが挙げられている。
  - 居住地の変化に伴う通勤距離の増加
    - テレワークの導入は、居住地の長期的変化を誘発する可能性があり、テレワーカーは非テレワーカーより通勤時の移動距離が長い傾向にあるため、テレワーク勤務日に通勤距離を削減することで得られる効果は、オフィス勤務日における長距離の通勤移動によって、部分的または完全に相殺される可能性がある。
  - 仕事以外の移動の増加
    - テレワークは仕事以外の移動を促進する可能性があり、通勤していない労働者は、通勤の途中での効率的な移動ができないため、仕事以外の行動のため特定の移動が必要となる。日々の通勤の回避による移動距離の削減は、テレワーカーが仕事以外の移動を追加的に行うことで、部分的または完全に相殺される可能性がある。
  - 世帯内の移動動態による仕事以外の移動への影響
    - 片働き世帯では、テレワークの頻度が高ければ高いほど、すべての移動手段、特に車による移動量が多くなる。就労者 1 人当たりの車の所有率が低い（1 台未満）の世帯では、世帯主が在宅勤務を行うと、他世帯員の車の使用量が増加するという副次的な影響が確認されている。

b. 物品のデジタル化によるエネルギー消費量への影響に関するレビュー論文

- 31 件の研究のうち 1 件を除いて、すべてがライフサイクル分析を用いている。これらの研究では、直接効果と代替効果によって、電子出版物、電子ニュース、デジタルミュージックにおける潜在的なエネルギー削減の可能性が示唆されており、また電子業務処理、ストリーミングビデオ・ゲームからも前者よりは少ないがエネルギー削減の可能性が示唆されている。
  - しかしながら、主要な変数（ユーザーデバイスの寿命やエネルギー効率、個人移動の代替の程度、物的製品やデジタル製品のユーザー数など）に対する仮定次第では、ライフサイクルでのエネルギー消費量が増大するなど、推定結果は大きく異なる可能性がある。
  - ほとんどの研究では、デジタル製品が材料製品を完全に代替すると仮定しており、それらすべてでリバウンド効果が考慮されていない。

② 生活行動とエネルギーに関する統計の情報収集

5.4.3 節(2)では、生活行動とエネルギーに関する統計として、①生活時間、②家電製品などの普及・使用状況、③ネットショッピングの利用状況、④人流の解析データから人々の移動需要を把握できるビッグデータについて、国内外の既存統計から入手可能なデータの有無を確認した。これらの統計データは、家庭の財・サービス需要シナリオの構築に向けた分析フレームワークの各項の設定を検討する際に参考材料となり得ると考えられる。

i) 生活時間に関する統計情報

生活時間に関する統計情報として、国連や eurostat などの国際機関が調査設計の要領や生活行動分類に関するガイドラインを公表しており、これらのガイドラインに基づき、世界各国で生活時間調査を実施している。生活時間に関して、先進国のみならず発展途上国を含め、多くの国においても参考できるデータが存在することが確認された。

ii) 家電製品に関する統計情報

家電製品などの保有状況や使用状況においては、欧米と東アジア諸国が実施している家庭用エネルギー消費に関する統計や調査から、関連データの有無を確認した結果、今回の対象国の中、多くの国においては、両指標に関する統計データが存在することが確認された。

iii) ネットショッピングに関する統計情報

ネットショッピングに関しては日本の関連情報のみ整理したが、必要に応じて、今後は欧米やアジア諸国に関する統計情報の有無について確認したい。

iv) その他統計情報

その他の情報として、人流のビッグデータを用いて人々の移動需要を予測するような国内の民間事業者が公表している統計について確認したが、必要に応じて、今後は欧米やアジア諸国に関する統計情報の有無について確認したい。

(2) with/after コロナの生活行動に与える影響の情報収集

5.4.4 では、主に文献調査により with/after コロナの生活行動に関する情報を収集し、COVID-19 が生活行動やエネルギー消費量に与えた影響について考察し、with/after コロナ期のシナリオを想定した。

① with コロナ期におけるシナリオ

a. 外出自粛に伴う在宅勤務の増加の影響

- 家で過ごす時間が増え、その結果、家事・育児・介護が増え、家庭を重視する（重視せざるを得ない）割合が増え、労働時間が減少する。（特に女性）
- 労働生産性が低下し、精神的ストレスが増す。ただし徐々に環境への順応が進む。
- 運動不足により健康状態が悪化し、そのことで健康意識が高まり、運動や健康志向の食生活への改善など、健康意識が向上する。
- 趣味や余暇に充てる時間が増える。

b. 感染不安の増加・混雑回避の影響

- 外出への抵抗感が増し、在宅で商品を購入できるオンラインショッピングが増加する。
- 外出する場合も、混雑する中心地や遠方への外出は減少し、近郊の郊外でのレジャーが増える。また、他人との物理的距離を保った移動が増える。
- 感染不安に伴う精神的ストレスが増し、健康意識が向上する。特に高齢者や小さな子供のいる家庭ではこの傾向が強くなる。
- 高齢者にとっては外出への抵抗感が増し、医療的なリスクが増加する。

c. エネルギーへの影響

- 在宅勤務・在宅時間の増加や、調理や家事に割く時間の増加に伴い、家庭のエネルギー消費量は増加する。
- 平日と休日のロードカーブの形状の差が小さくなる。

② after コロナ期のシナリオ

a. 仕事への影響

- テレワーク（在宅勤務含む）とオフィスワークのハイブリッド化が進み、ライフステージによって働き方が選べるようになる。地方差や職種差はあるものの、徐々に、多くの人が同じように働けるような DX 技術が進展する。
- 職業観に変化が生じ、一部で副業が増加する可能性がある。

＜エネルギーへの影響＞

- オフィスのタスクアンビエント化・個室化が進む（この進展が無いと、ベースロードが大きなオフィスではオフィス利用が減少してもエネルギー消費量の減少には繋がらない可能性がある）。

- オフィスの規模縮小に伴い、オフィスビル建設に係る資材需要が減少する。

b. 生活への影響
- 仕事に縛られない居住地の選択が進む。ライフステージや興味関心によって居住地や暮らし方が選べるようになる。それに伴い、移動が減少する。
- 対面機会の取捨選択が進むとともに、コミュニケーション可能な人の範囲が広くなる。
- 生活エリアの利便性が向上する。
- DX 技術の進展に伴い、オンライン診療等が普及し、医療が身近に感じられる方向に進む。

＜エネルギーへの影響＞
- 移動に伴うエネルギー消費量が減少する。

c. 住宅への影響
- 住宅は私的領域だけでなく、公的領域（職場空間）を有するようになり、同一住宅内で公私の切り替えがスムーズにできる工夫がなされるようになる。

＜エネルギーへの影響＞
- 自宅で生活する時間の増加に伴い、住宅の性能に意識が向き、性能向上に繋がる。

d. 地方への影響
- 居住地の選択に自由度が増すことで、年齢構成や職種構成等の地方間差異は縮まる方向に進む。

＜エネルギーへの影響＞
- 人口減少地域へ人口が流入する可能性がある。都市のコンパクト化とは逆の流れが一部で起こり、そのことがインフラ維持等の観点で課題になる場合が出てくる可能性がある。

いずれについても、モノ、時間、空間の有効利用が進み、様々な場面で、場所の制約が小さくなる方向に進むと想定した。またそのような時代においては、エネルギー家庭内でのエネルギー消費機会が増加するとともに、家庭部門と業務部門の境界が曖昧になり、エネルギーを消費する場所が「部門」という概念から分離すると考えられる。

(3) 分析フレームワークの具体化及び改良

5.4.5 では、具体的な事例を用いて分析フレームワークの具体化及び改良を行った。具体的な事例としては「ネットショッピングの増加」と「在宅勤務の増加」を取扱い、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。生活行動モ

デルは次年度以降定量化を検討する予定であり、定量化にあたっては、(6)節で整理した通り、既存統計だけでは不十分であることから、新規調査や有料データの購入を検討することが望ましい。

下記に今後の課題を示す。

- 生活行動モデルの定量化のための分析手法の検討及び定量化
  - 分析手法としては、①在宅勤務の頻度別に生活行動とエネルギー消費量を集計する方法と、②簡略パス図で示す生活行動モデルを定量化する方法の 2 種類が考えられる。
- 個人の生活行動と世帯の生活行動の整理と両者の接続方法の検討
  - エネルギー消費量は個人として使用する場合（車利用、在宅勤務の PC 利用など）と世帯（居室単位の場合もある）で使用する場合（車利用、空調、照明など）がある。
- 生活行動とエネルギー消費量の新規調査の検討
  - 上記 2 つの具体的な事例による生活行動とエネルギー消費量の関係及び、個人と世帯の生活行動の関係を把握するための調査を検討する必要がある。
- 世界モデルも視野に入れた簡略パス図の調整
- 個人の同時行動の取り扱い
  - 現状は主となる行動によって行動区分を分類している。しかしながら、例えば通勤中にスマホで買い物をするなど同時行動が起こっており、見かけの買い物時間が減少している可能性がある。そのため、現状のまま主となる行動のみを取り扱うか、同時行動における複数の行動を別々に取り扱うか整理する必要がある。
- 生活行動モデルの細分化
  - 今年度作成した生活行動モデルは平均的な世帯を想定したものであるが、世帯人数や年代、性別などで生活行動モデルは異なることが予想される。また、地方と都市でも同様である。このように平均的な世帯をどのような視点で細分化することが適当か検討する必要がある。
- 潜在因子のモデル内での取り扱い
  - 現行の生活行動モデルは観測変数のみを用いているが、生活行動の変化の背景にある潜在因子のモデル内での活用方法は今後の課題である。
- 今回のモデルでは時間予算（1 人 1 日 24 時間）については検討しているが、モノ・サービスの入手に関する消費支出と所得の制約条件等の必要性については今後の課題である。
- ネットショッピングとして取り扱う対象範囲の拡大
  - 本報告書では「インターネットを利用した商品・サービスの購入のうち、amazon や楽天などのネットショップで商品を販売している BtoC 取引」としているが、Uber Eats、CtoC 取引や商品だけでなくサービスの取扱い、ま

た所有に加えシェアの取扱いなど対象とする範囲の拡大は今後の課題である。

- 「より良い住環境に住む（引越す）人が増える」の取扱い
  - 在宅勤務の環境が整備されると地理的制約が弱くなる。これにより二地域居住やセカンドハウス保有が増える可能性があり、住まいのあり方が多様化すると考えられる。エネルギーの視点でも住まいが変わると使用エネルギー種が変わる（ガス併用住宅、全電化住宅など）可能性があるため、より広い視点で生活行動モデルを整理する必要があると考えられる。
- パス図変数と既存統計・調査との対応関係
  - 既存の統計・調査で十分に把握できないものや有料のものは新規調査やデータ購入の必要性を検討する必要がある。また、各統計・調査の取得頻度が統計によってバラバラであり、また項目ごとのデータの密度（間隔）が異なるため、データ同士の結合が必要となる場合にどのようにデータを補完するのかといった、定量化のための検討の中で想定される課題もある。

(4)「隠れた費用」に関する情報収集

5.4.6 では、人々の省エネルギー性能に対する合理的な投資を阻害する要素としての「隠れた費用」について検討し、特に定量的な研究が多く行われている主観的割引率に関する調査を実施した。個人や法人が省エネルギー性能の投資において意思決定を行う際における合理性からの乖離の程度を反映している主観的割引率は、市場の状況や経済状況、政策等の影響を定量的に反映できる点において貴重な指標であるが、観測される割引率には機器ごとや研究ごとに大きな幅が見られる。近年消費に関するリアルタイムなデータを取得できるようになってきたこともあり、今後継続的に省エネ性能に対する主観的割引率についての研究が重ねられることにより研究手法等の改善が図られることと考えられる。

また、近年のデジタル技術と割引率との関連について、陳腐化を避けるソフトウェア更新型の製品設計とシェアリングエコノミーによる所有形態の変化の 2 点について仮説的な検討を行った。これらの技術は広がりを見せ始めたばかりであり、普及とともに消費者や事業者の意思決定にどのような変化がもたらされるかについての研究が期待されるところである。

5.5 最終需要部門の変化に伴う各種基礎素材生産への影響分析-IIASA 報告書より

5.5.1 はじめに

ALPS Report 2020「Upstream Sector Implications of Demand-side Transformations: The Case of Materials (LED-MAT)」が IIASA より提出された [2]。本報告書は本文 35p、(これとは別の) 付録 31p から構成される。付録には分析手法の詳細、世界 11 地域別の結果などが記載されている。ここでは主に本文に記載されている内容を要約し以下に示す。(以下、本節の内容は図 5.2.1-1 および図 5.5.5-2 の注の「RITE 補足」を除き全て IIASA 報告書の記載内容である)。

5.5.2 背景・位置づけ

これまで 1.5℃目標に関連して Low Energy Demand (LED)シナリオを開発してきた(ALPS Report 2017 を参照のこと)。LED シナリオではデジタル化、シェアエコノミーの進展に伴い需要側の変化が起き、これが素材需要にも影響を及ぼすことを主に定性的な手法に基づき示してきた。

最新の統合評価モデル(IAMs)の中には、供給サイドと需要サイドを内生的に解析する手法を採用する例も見られるようになってきている。例えば、バイオ燃料生産と食糧生産を内生的に解くモデルも存在する。他方、LED シナリオが素材生産部門に与える影響について、これまで手法上の理由から内生的には解析してこなかった。MESSAGEix-GLOBIOM のような IAMs では一般に(ごく一部の例外を除いて)素材需要を外生的に想定し分析してきた。

需要サイドの変化は素材需要量に大きな影響を与えうる。緩和策をとることで、例えば断熱材、鉄道ネットワーク構築のためのコンクリートや鉄、鉄道車両の鉄の需要が増大する。一方、デジタル化やシェアの進展は稼働率を高め、ひいては車両保有台数の減少、耐久消費財のストックの減少をもたらしうる。この場合、必要となる素材量は大幅に減少する。LED シナリオを開発した当初は、定性的かつ外生的な手法によって素材需要減少を扱っていた。

本報告書は LED シナリオの内部整合性を高め、オリジナルの LED シナリオで扱っていない側面にも焦点を当て、より解像度の高い LED 2.0 シナリオを構築するという長期目標の土台を準備する狙いがある。具体的に、本報告書は居住用建物、乗用車、消費財、発電所に使用される鉄、アルミ、石油化学製品、セメントに着目する。

5.5.3 素材需要量に関するシナリオ分析

乗用車保有台数のシナリオを図 5.5.3-1 に示す。各シナリオは次の通りである。

[2] レポートの中に、次のタイトル・執筆者が記されている。ALPS Report 2020, ALternative Pathways toward Sustainable development and climate stabilization (ALPS): Upstream Sector Implications of Demand-side Transformations: The Case of Materials (LED-MAT). Authors: Volker Krey, Arnulf Grubler, Nuno Bento, Benigna Boza-Kiss, Felix Creutzig, Alessio Mastrucci, Jihoon Min, and Gamze Ünlü.

- Counterfactual: 過去のトレンドを外挿した高成長シナリオ。乗用車の車両ストック構成が変化することの最大影響を評価するためのシナリオ。不確実性幅の上限を意味する。（LED シナリオとの間で）社会経済シナリオとしての比較可能性を有しない。
- GEA-Eff-rev: GEA の効率向上分析をした際に参照した中位的なシナリオ。LED シナリオとも比較可能性を持つ。
- 3 つのシェアモビリティーシナリオ(SM-1, SM-2, SM-3): 何れもシェアモビリティが進展した場合のシナリオ。SM-2 はシェア導入が若干遅れた場合のシナリオ。SM-3 は急速にシェア導入が進むシナリオ（その後ゆるやかに推移するシナリオ）。SM-1 は車両保有台数が線形で低下するシナリオ。

GEA-Eff-rev では 2050 年に 23 億台の乗用車ストックとなる。一方、シェアシナリオは 2050 年に何れも数億台となる。

車両 1 台当たり 900kg の鉄、200kg のアルミが使用されることを仮定し、2050 年の乗用車車両製造に必要となる素材量を図 5.5.3-2 に示す。Counterfactual は 2050 年に 2020 年の 3 倍から 4 倍の素材需要となる一方、シェアシナリオは 2020 年に近い水準となる。

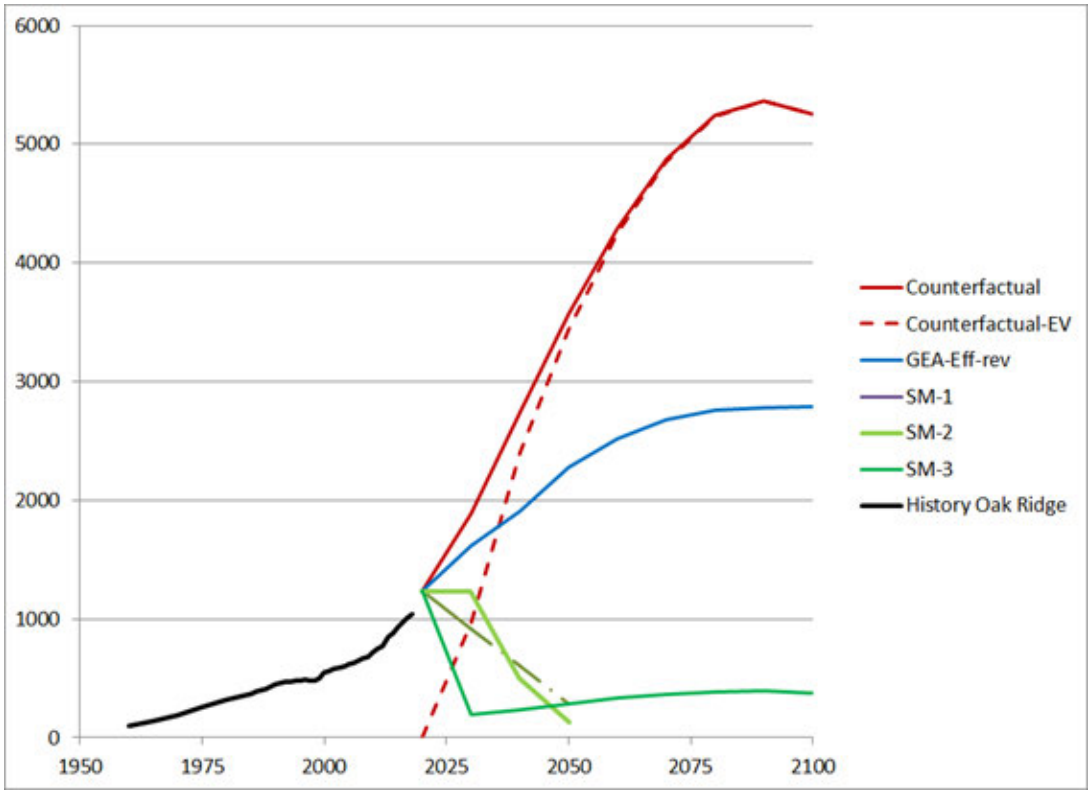
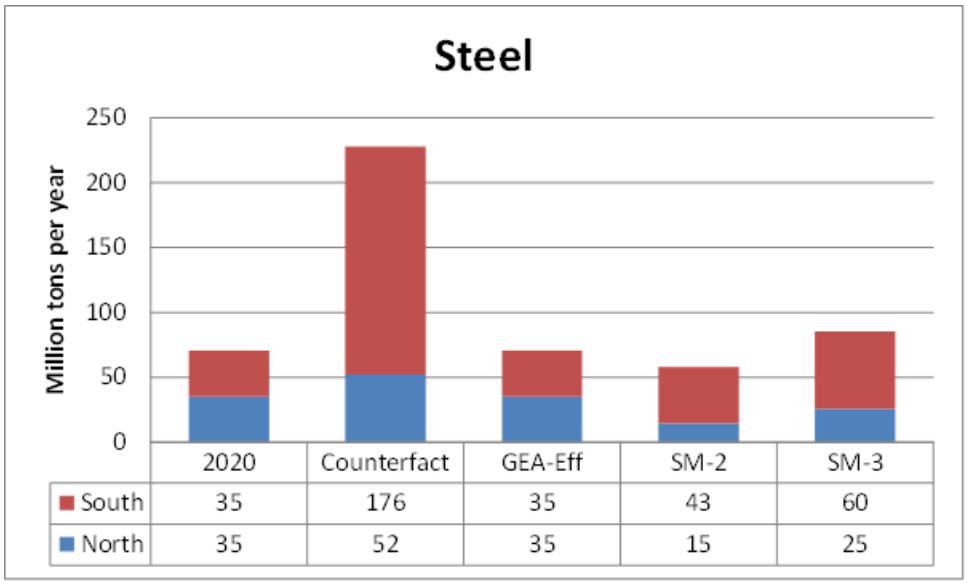


図 5.5.3-1 乗用車ストックのシナリオ（世界計、単位：100 万台）

RITE 補足：凡例の SM-1 の色は紫であるが、図中では濃い緑色の一点鎖線が SM-1 に該当する。



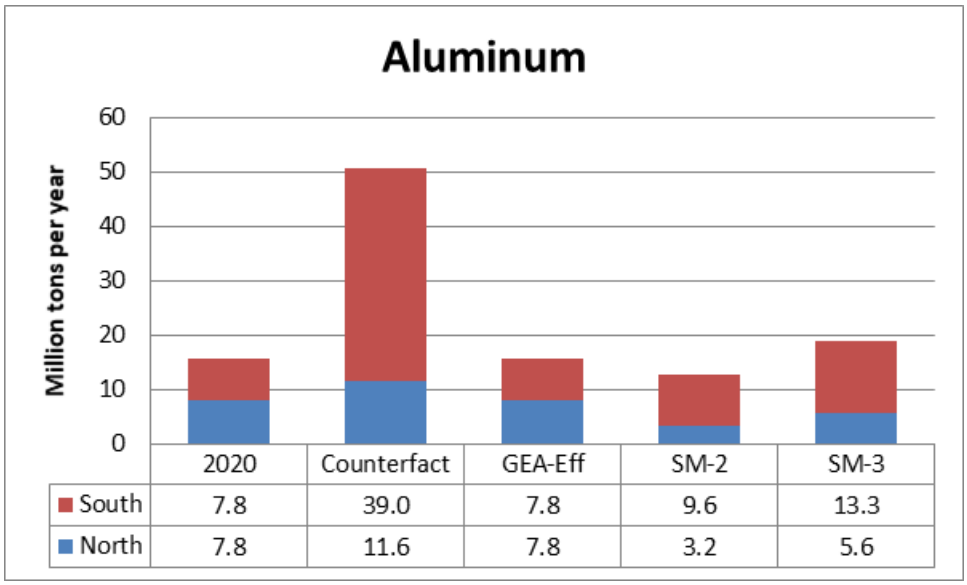


図 5.5.3-2 鉄鋼とアルミニウムの需要シナリオ（乗用車の車両）

消費財の保有数とエネルギー需要の分析内容を図 5.5.3-3 に示す。保有数は 2050 年に向けて(base)の増加が著しく、他の要因を含めて見て 2020 年比で+130%となる。一方、エネルギー消費はデジタル化やシェアによる影響が大きく 2020 年比で-28%となる。

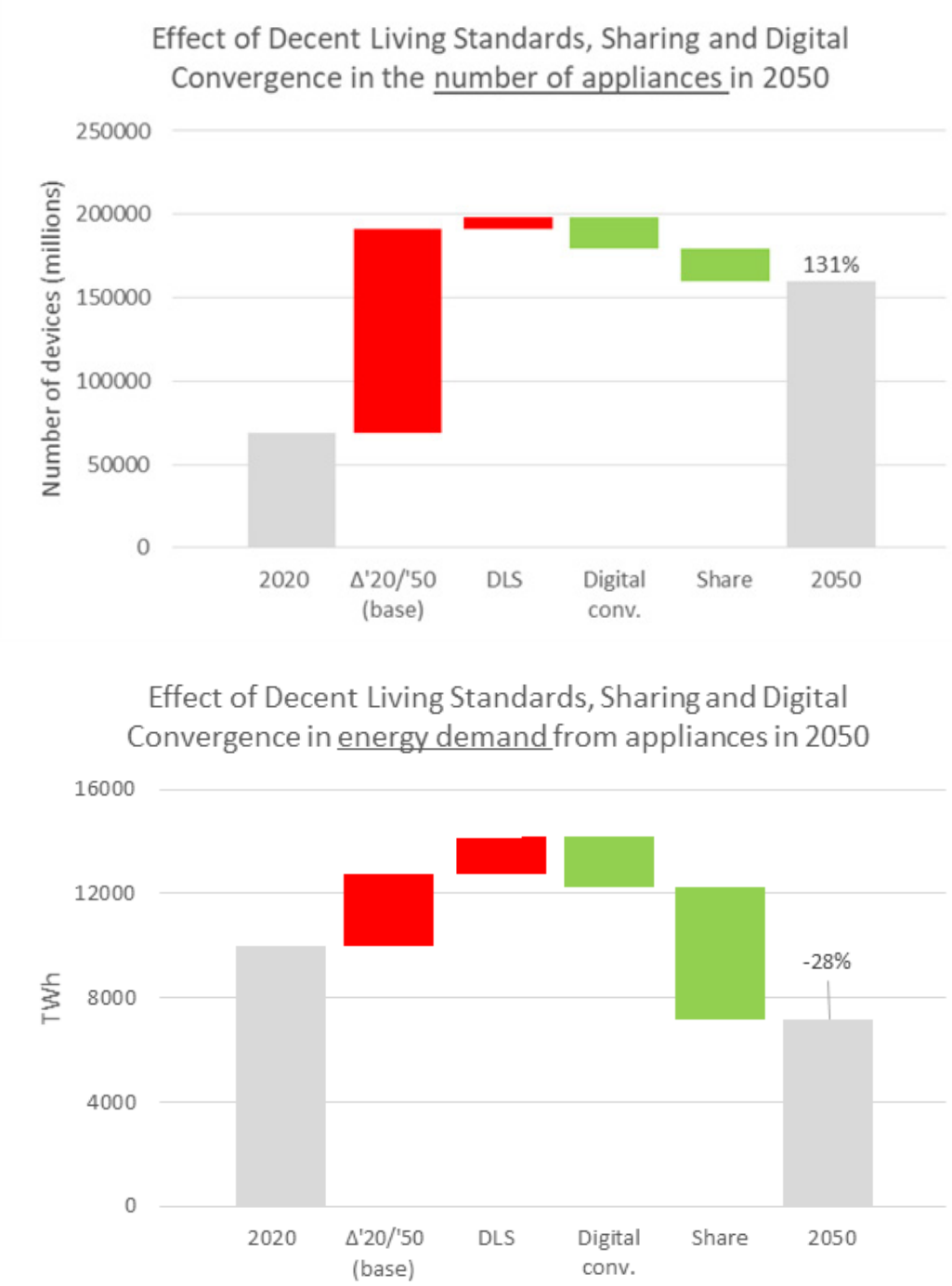


図 5.5.3-3 内生的成長モデルにおける 2050 年の消費財変化の要因分析

補足：生活の充足水準、デジタル機器利用の収斂、デバイス利用のシェアを考慮。

表 5.5.3-1 に世界 11 地域別の居住用建物の床面積、床面積当たりのエネルギー消費量を示す。2050 年の数値は LED シナリオを読み解いて算出した数値であり、LED シナリオと整合的である。

図 5.5.3-4 に居住用建物の素材量を家屋タイプ（sfh: 戸建て、mfh: 集合）別、場所（rur: 農村部、urb: 都市部）別に示す。素材重量として見るとコンクリートの比率が高

い。地域により差異があるものの、農村部の戸建て住宅に要する素材量（単位床面積当たり）が多い地域も散見される。

表 5.5.3-1 居住用建物の床面積とエネルギー原単位（LED シナリオ）

	2020 (base year)			2050		
	floorspace (billion m2)	floorspace per capita (m2/cap)	specific intensity (kWh/m2)	floorspace (billion m2)	floorspace per capita (m2/cap)	specific intensity (kWh/m2)
AFR	16	15.4	83	45	26.6	13
CPA	45	30.0	112	42	30.0	18
EEU	3	22.6	222	3	26.3	27
FSU	7	25.2	225	8	30.0	27
LAM	17	27.1	73	22	29.8	15
MEA	9	17.0	76	21	30.0	13
NAM	13	34.5	151	14	31.6	23
PAO	5	34.6	170	5	30.1	26
PAS	10	16.3	52	18	26.6	13
SAS	36	19.5	48	69	29.1	13
WEU	16	31.1	210	17	30.0	31
World	178	23.4	108	265	28.9	16

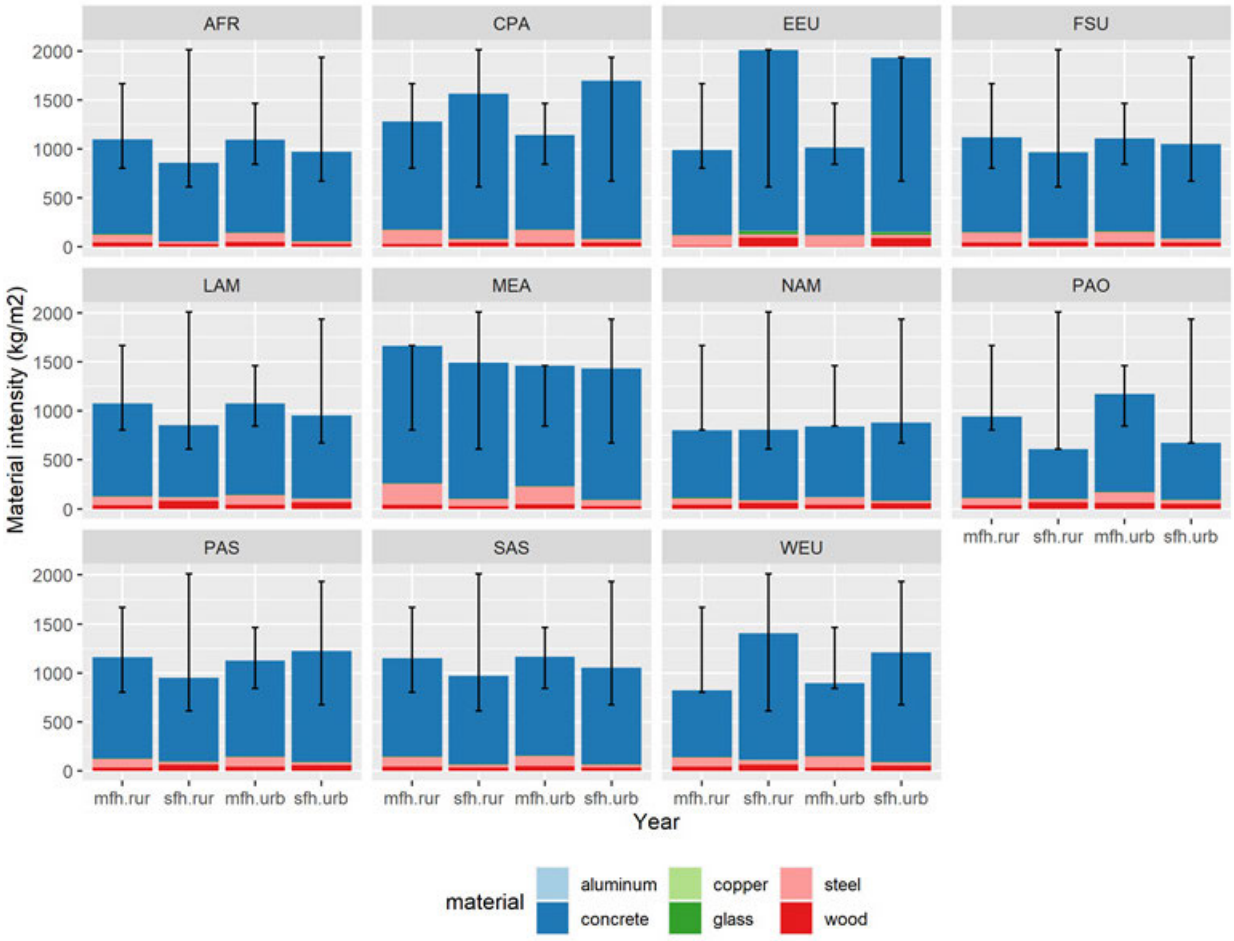


図 5.5.3-4 居住タイプ別の建物の素材原単位

補足：家屋タイプ（sfh: 戸建て、mfh: 集合）と場所（rur: 農村部、urb: 都市部）別に表示。

5.5.4 素材供給部門のモデル化・分析

鉄鋼、セメント、アルミニウム、石油化学製品の製造プロセスのモデル化を行う。鉄鋼とアルミについては、新断(new scrap)、老廃屑(old scrap)の回収利用（リサイクル）をモデル化する。新断は極めて低い追加コストで利用できるとした。一方、老廃屑を 3 区分し、区分ごとにそれぞれグレード、価格を持つ老廃屑供給曲線を想定した。以上により、簡素ではあるもののスクラップ利用を内生的に表現できるようになった。以下、それぞれの部門別の想定について述べる。

(1) 鉄鋼

鉄鋼部門について MESSAGEix-Materials モデルでは高炉転炉法、電炉法の 2 ルートをモデル化した。新断と老廃屑の利用についても考慮した。高炉転炉法はコークス炉、焼結炉／ペレット工場といった原料準備のプロセスについても考慮した（図 5.5.4-1 の(a)）。

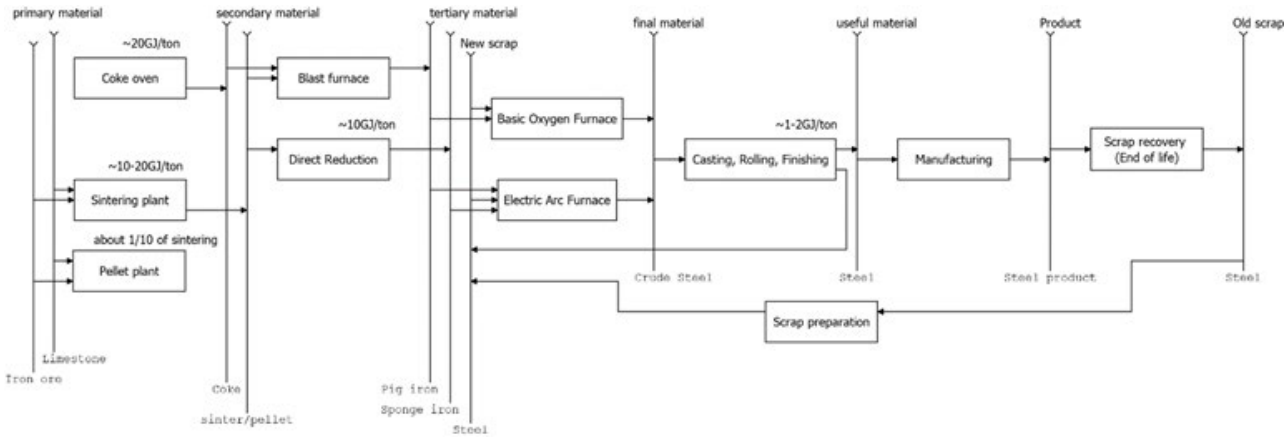
(2) セメント

セメント部門について MESSAGEix-Materials モデルではクリンカ製造プロセスとして乾式、湿式の 2 ルートをモデル化した。また CCS オプションをモデル化した。さらに粉砕工程として、ボールミル（どちらかと言えば従来型）と竪型ミル（高コストだがエネルギー効率がより高い）の 2 技術を考慮した（図 5.5.4-1 の(b)）。

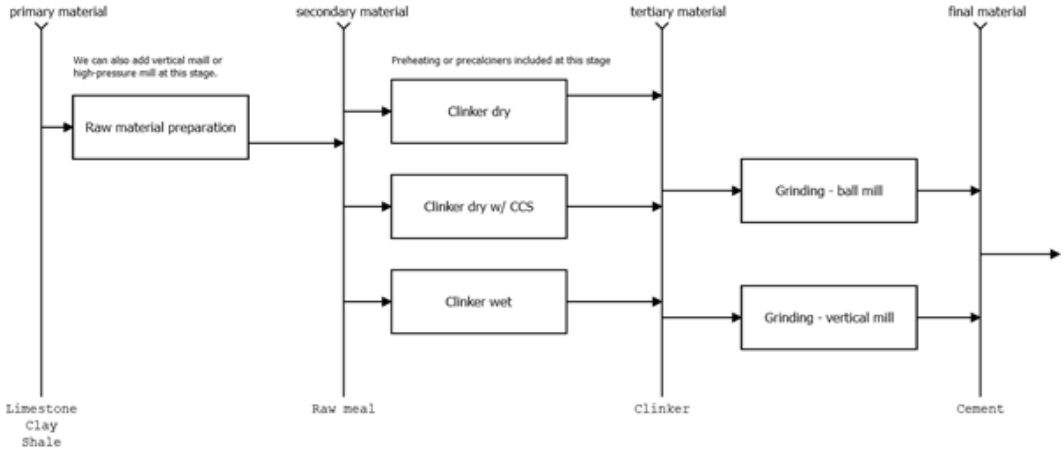
(3) アルミニウム

アルミニウム部門について MESSAGEix-Materials モデルでは（ボーキサイトを原料としてアルミナを製造するプロセスについてはモデル化せず）アルミナ製造後の製錬プロセスとして Soderberg と Prebaked の 2 方式をモデル化した。また新断と老廃屑の利用についても考慮した（図 5.5.4-1 の(c)）。

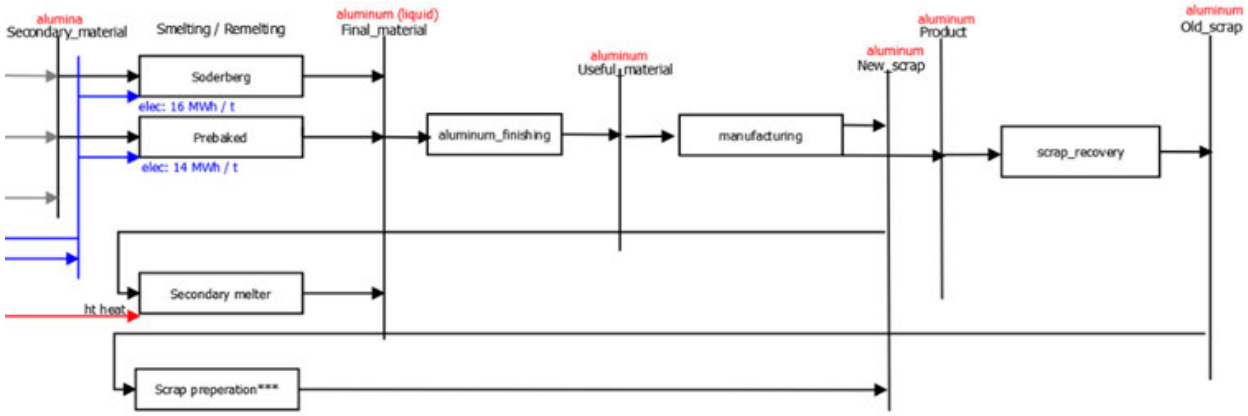
(a) 鉄鋼



(b) セメント



(c) アルミニウム



(d) 石油化学製品

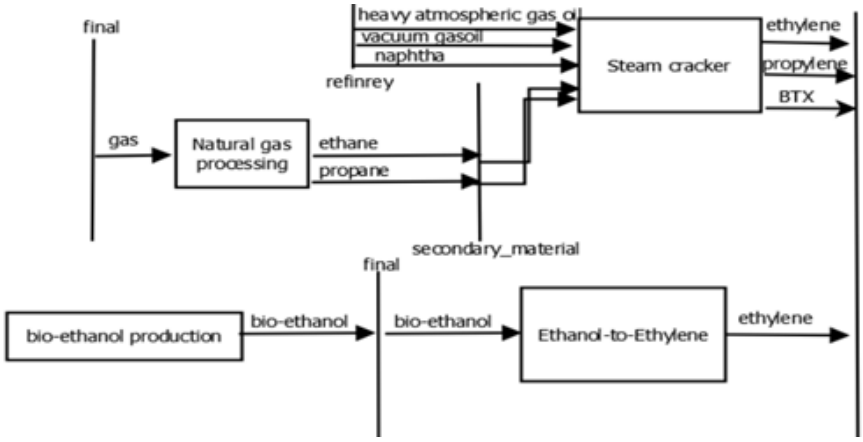


図 5.5.4-1 鉄鋼、セメント、アルミ、石油化学製品の想定フロー

(4) 石油化学製品

石油化学製品部門について MESSAGEix-Materials モデルでは、エチレン、プロピレン、BTX(高付加価値製品群)を同部門の主要製造物として代表させることとした。これらを製造するのにスチームクラッカーは主要な技術である。バイオエタノールからエチレンを製造するパスについても考慮した（図 5.5.4-1 の(d)）。

5.5.5 素材需給の内生的分析結果

LED シナリオを前提とした場合の鉄鋼、アルミ、セメントについて需要と供給を内生的に分析した結果を図 5.5.5-1 に示す。2020 年時点において明示的にモデル化した比率（分析カバー率）は鉄鋼 22%、アルミ 23%、セメント 16%にそれぞれとどまる。ただし、鉄鋼、アルミ部門は 2050 年に分析カバー率が大幅に上昇する。これは LED シナリオについて需要減を見込み過ぎていたとも解釈できる。セメント部門の分析カバー率は 2050 年においても横ばいである。

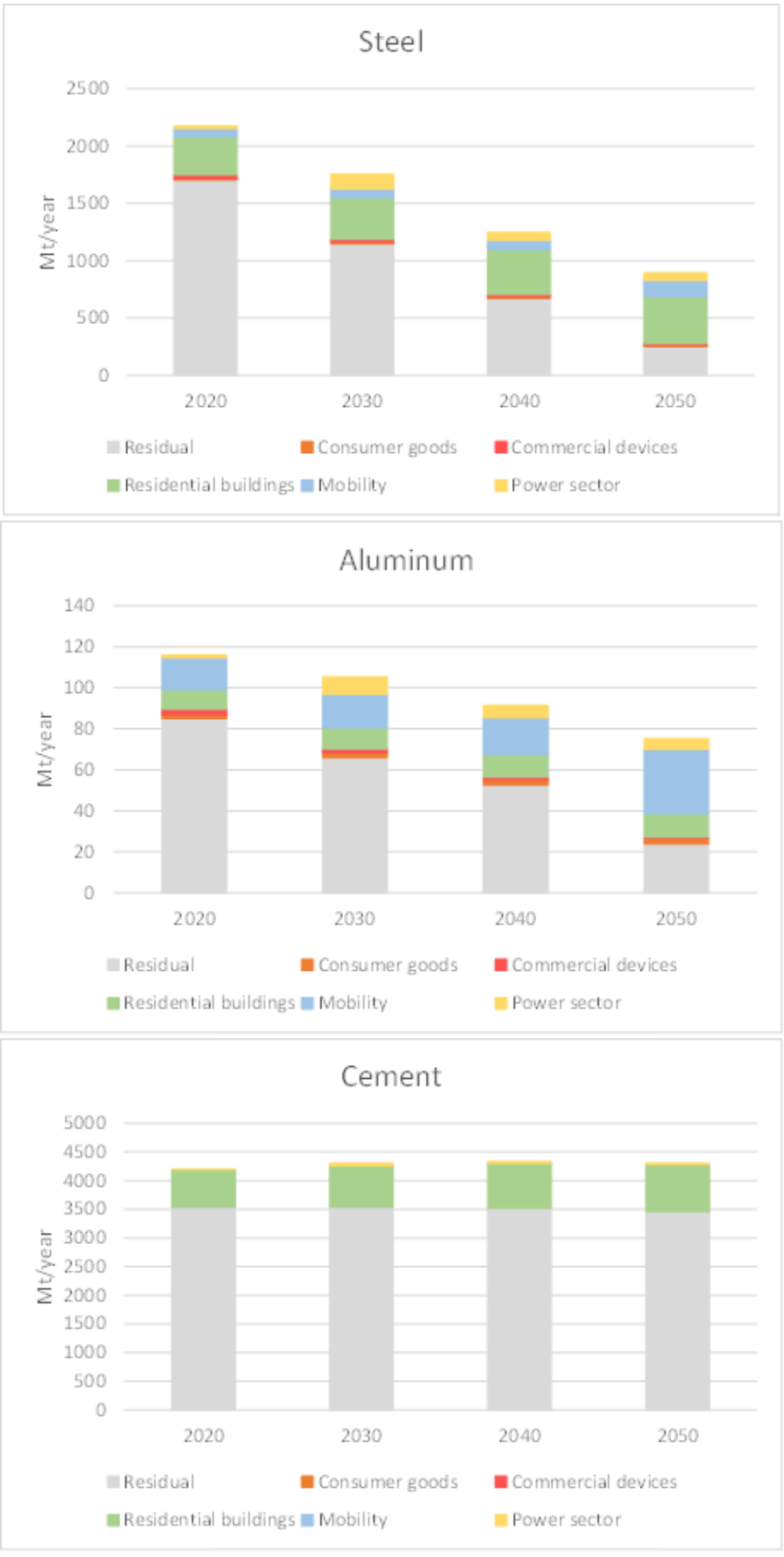


図 5.5.5-1 LED シナリオにおける素材需供の内生的分析結果

補足：本分析で明示的にカバーしていない区分計を灰色のバーで示した。

分析カバー率を上昇させるためには、土木（道路、鉄道、上下水道）や産業部門についてもカバーする必要があり、これは将来の素材分析を行う上で優先順位の高い研究課題の一つである。

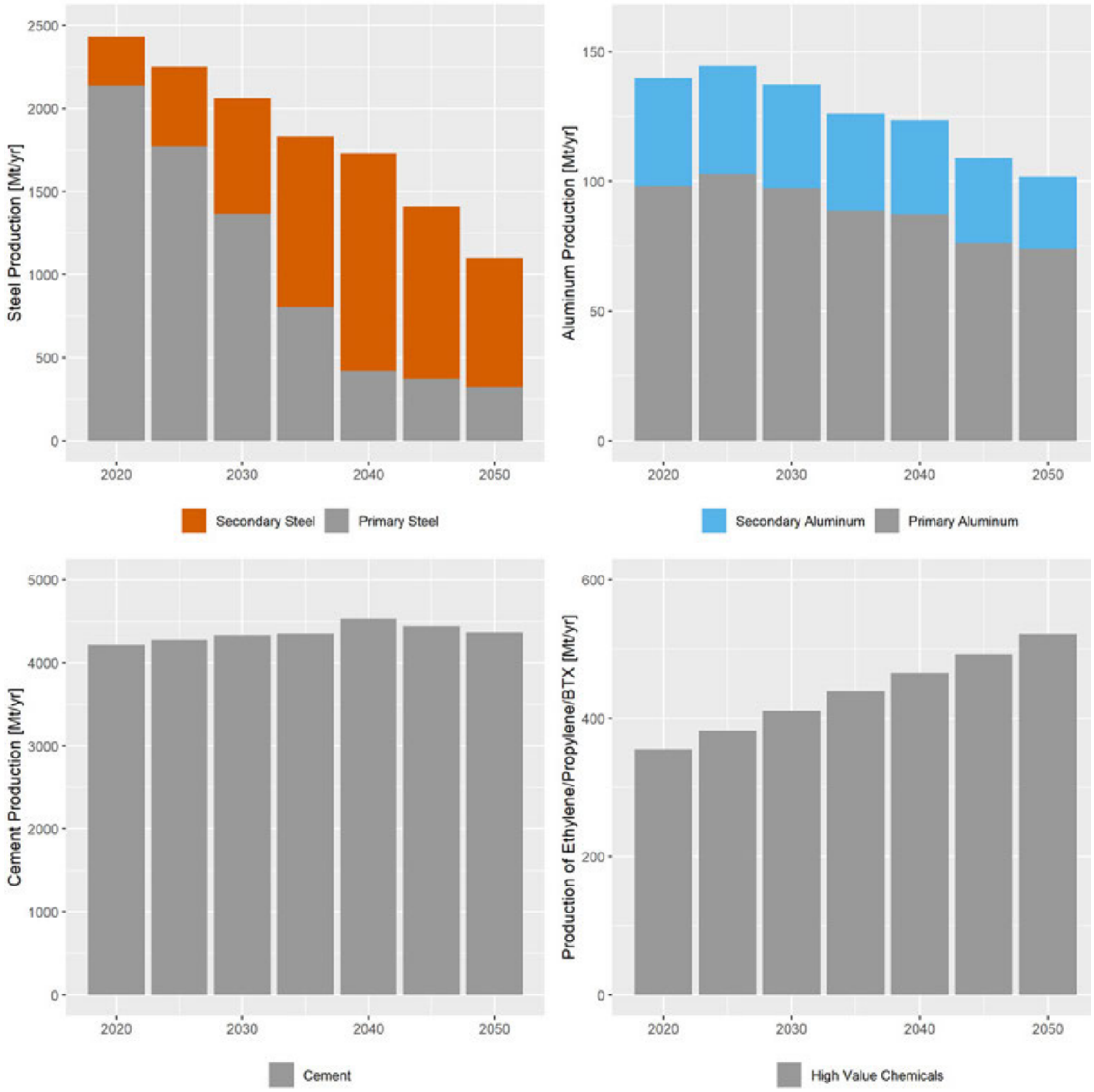


図 5.5.5-2 四つの主要素材の需要と関連生産量

IIASA 補足：鉄鋼、アルミ部門については、二次生産量（リサイクルされ生産された量）も併記した。

RITE 補足：2020 年の粗鋼生産量（worldsteel 速報値）は 1,860Mt であり、鉄鋼生産量について本図と差異がある点について留意が必要である。

二次生産量の結果を図 5.5.5-2 に示す。鉄鋼部門はとりわけ需要減少が著しく、二次生産比率が上昇している。需要減少はそれ自体の生産を回避できるという効果の他に

二次生産比率を上昇させる。二次生産は（相対的に低炭素化しやすい）電力の消費比率が高く、需要減少は CO_2 排出削減という観点から見て「二重の配当」をもたらす。需要減少によって、CCS や水素利用といった高価な緩和策への依存を著しく減少させることができる。

5.5.6 最終需要部門の変化に伴う各種基礎素材生産への影響分析（IIASA 報告書）のまとめ

本分析のカバレッジは限定的であるものの、鉄鋼、アルミ、セメント、石油化学製品について需給を内生的にモデル評価する枠組みを構築した。本分析は、概念を証明するもの、プロトタイプのモデルを実装しモデルランさせること、そして最初の定量的な洞察が得られたこと、という意味で重要である。

従来の分析において「需要は過去のトレンドに従って増加する」と想定するケースが多かったが、本評価フレームにより低需要シナリオ、さらには「circular economy」をより戦略的に分析することが可能となる。

シェア進展による影響をより深く洞察するためには、従来のモデル分析で注目されてきた乗用車同士の比較（どのような車種が購入されるか）だけではなく、どのような移動体を組み合わせるか、保有台数や稼働率、使用年数はどのように推移するか、といったことも含めフルスケールで分析することがより重要であることが示唆される。このような側面について本分析では十分扱うことができておらず、今後の課題の一つである。

このように見れば依然として研究課題は数多く存在するが、本分析はこのような課題に取り掛かるための確固たる基盤となる。この ALPS Report 2020 での経験に基づくと、単一の研究機関が複数年に渡って進める方法と、素材需給モデルという学際的な特性を考慮しつつ複数の研究機関が共同で進める方法のどちらかが必要である。EDITS は後者の方法に基づく研究の機会を提供しており、今後とも研究を進める上で重要である。

5.6 情報技術等を活用した日本の食品廃棄低減による世界のエネルギー消費と GHG 排出への影響分析

5.6.1 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では、長期目標として全球平均気温を産業革命前に比べ 2℃よりも十分に低く抑える又 1.5℃に抑える努力を追求する、そのため 21 世紀後半に人為起源 GHG 排出を正味ゼロにするという目標が掲げられた。世界の GHG 排出は 2010 年時点で約 50Gt CO_2 eq/yr、そのうち約 65%が化石燃料由来 CO_2、約 25%が非 CO_2-GHG（CH_4, N_2O 等）、約 10%が土地関連 CO_2 である [1)]。正味ゼロ排出の実現に向けては、脱炭素・省エネルギーはもとより、CH_4・N_2O 低排出型の農業、森林減少の抑制、農地炭素固定、さらには、ゼロにしきれなかった

GHG を相殺する負排出（植林、バイオエネルギー＋CCS）等、複数の削減機会の検討が求められている。

本節で取り上げる食品廃棄の低減は、食品に体化されたエネルギーや GHG の低減に寄与する対策として注目されるオプションの一つである。世界では人の消費のために生産された食品の約 1/3 が損失・廃棄されているとの推計があり[2]、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」が掲げられている[2]。つまり、本ターゲットの達成に向けた取り組みが、GHG 排出削減にも寄与するというシナジー効果が期待される。最近では、将来のエネルギーシステムに関するモデル分析でも、食品廃棄低減が進むシナリオが検討されつつある[4]。

食品廃棄低減による GHG 排出削減効果の評価について、例えば、国連食糧農業機関（FAO）によると、世界の小売・消費段階の食品廃棄を半減し、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/年としている（但し、国際輸送や土地関連の CO_2 排出の変化は考慮無）[5]。また、Birney らの米国を対象にした研究によると、小売・消費段階の食品廃棄が半減すると、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%とされる[6]。これらは先行研究として参考になるものの、食品廃棄が低減する具体的な方策は示されていない。また、食品の供給や消費は、農畜水産物の生産から加工、輸送、調理、廃棄に至る多数の部門に関連しており、食品廃棄低減の影響もそれらに及ぶはずであるが、部門毎の影響は明示されていない。さらに、日本については分析例がほとんど見受けられない。

そこで本研究では、昨年度、日本を対象に青果農業、食品業（食品加工・卸・小売・飲食サービス）、及び家庭で食品廃棄が低減した場合に、国内各部門に及ぶ影響を産業連関表に基づき分析した[7]。ここで、食品廃棄低減の手段として表 5.6.1-1 に示すように、実証実験で低減効果が確認されている高度需要予測技術をはじめ、近年普及・進展が著しい各種情報技術を活用するとした。その結果、食品廃棄低減の影響は関連各部門に及び、日本全体のエネルギー消費、GHG 排出の低減に寄与すると分析された。なお、昨年度の分析では食品廃棄低減に伴う関連産品の生産減少や、情報技術の導入に伴う通信機器や情報サービス業の生産増大は全て国内生産に現れ、輸入は変化しないと想定した。これは分析上の想定としてあり得るが、実際には食品、工業材料、機械、化石燃料等多くの産品を輸入していることより、日本での食品廃棄低減は、海外の生産活動や国際輸送にも影響を及ぼす。従って、今年度は、海外生産活動や国際輸送への影響も考慮して分析を行った。

表 5.6.1-1 日本における食品廃棄の発生理由と低減に寄与する情報技術等の想定

部門	食品廃棄の主な理由	情報技術等の想定
F：青果農業	・規格外品（収穫後、未出荷）	・卸市場、小売を経由しない個別販売・冷蔵貯蔵
I：食品業（食品加工、卸、小売）	・需要見込み違いによる過剰生産、返品	・POS システム、気象予測情報を用いた高度需要予測
I：食品業（飲食サービス）	・材料の保管期限切れ、過剰量の調理 ・食べ残し	・POS システム、SNS 広告 ・小ポーション
M：家庭	・過剰除去 ・食べ残し	・買い物、献立管理アプリの活用

これら技術による食品廃棄の低減効果として、例えば、気象予測情報を用いた高度需要予測技術については、冷やし中華つゆ廃棄が▲20～▲35%、豆腐廃棄▲30%が確認されている[8)]。その他の技術については低減効果の情報が限られるが、SDGs の「2030 年まで小売・消費段階での一人当たり廃棄半減」目標も考慮し、F、I、M どの部門も、食品廃棄が 20～50%低減すると想定した。

5.6.2 分析方法

(1) 分析の枠組み

分析は、図 5.6.2-1 に示すように、3 つのパートから成る。パート①は国内の分析で、F、I、M 部門における食品廃棄低減の影響が国内各部門に波及した場合に、削減されるエネルギー消費と GHG 排出の潜在量を算定する。パート②は、日本の輸入減少に伴う海外各地域の生産への影響、パート③は国際輸送減少の影響を分析する。

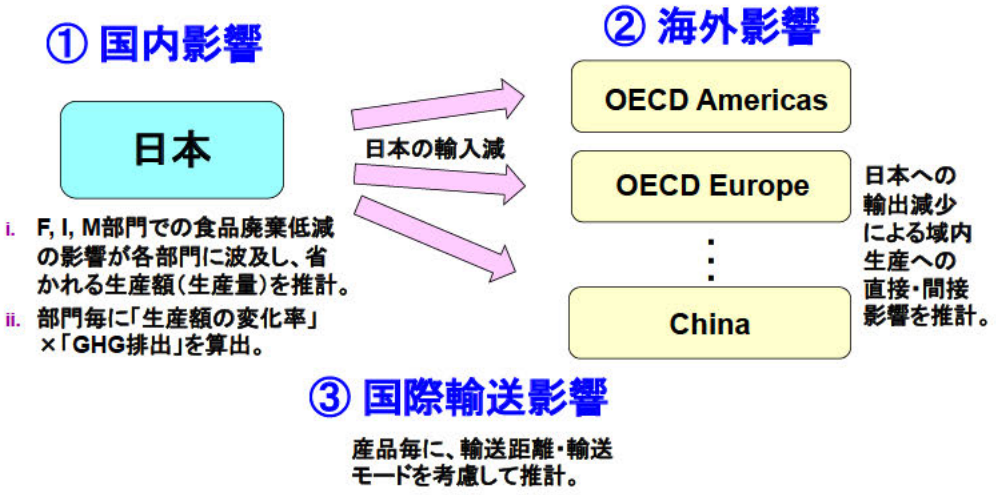


図 5.6.2-1 分析の枠組

(2) 国内影響分析

国内影響の分析は、大きく２つのステップから成る。ステップ１では食品廃棄低減の影響が各部門に波及し、省かれる生産量（額）を推計する。ここで、各部門への波及効果を考慮するため、産業連関表[9]を用いた。ステップ２では、ステップ１で推計した各部門の生産額変化率に、エネルギー消費量/ GHG 排出量を乗じ、エネルギー消費と GHG 排出の変化量を算出する。図 5.6.2-2 に産業連関表の概念図を、表 5.6.2-1 にステップ１の計算手順を示す。

Supply sectors \ Demand sectors		Intermediate demand (j=1,…,n)				Final demand		Import	Domestic production
		Vegetables, fruits	… Livestock products …	Waste management	Total *Id*	Household consumption … Export	Total *Fd*	*Ip*	X
Inter-mediate input (i=1,…,n)	Vegetables, fruits	x_{11} …	x_{1j} …	x_{1n}	Id_1	h_1	Fd_1	Ip_1	X_1
	Livestock products	x_{i1} …	x_{ij} …	x_{in}	Id_i	h_i	Fd_i	Ip_i	X_i
	Wholesaler / Retailer / Waste management	…	…	…	…	…	…	…	…
	Total *It*	It_1 …	It_j …	It_n					
Gross Value Added	Compensation of employees / Operating surplus / …	…							
	Total *V*	V_1 …	V_j …	V_n					
Domestic production X		X_1 …	X_j …	X_n					

販路構成 (産出)

費用構成 (投入)

図 5.6.2-2 産業連関表の概念図

表 5.6.2-1 国内影響分析、ステップ１での計算手順

i	青果農業(F)、 食品業(I)、 家庭(M)の各部門について、情報技術導入や食品廃棄低減に伴う投入構造（列方向）の変化を設定する。
ii	手順 i により、販路構成のうち、各部門iの中間需要（Id_i）や最終需要(Fd_i)が変化する。この時の変化率$m_i = (Id_i' + Fd_i')/(Id_i + Fd_i)$に対し、それと同率だけ国内生産（$X_i$）と輸入（$Ip_i$）も変化し、バランスを保つ。（ダッシュ付きは変化後の値）
iii	行方向と列方向の国内生産の乖離率$k_i = X_i'/X_j$ $(i=j)$ を算出する。これを各部門の費用構成$\{x_{1j}' x_{2j}', \cdots, x_{56j}', V_j'\}$に乗じ、投入を調整する。
iv	手順 ii 、 iii を繰り返し、食品廃棄低減の影響を各部門に波及させると共に、行方向と列方向のバランスを調整する（収束条件：各部門の行方向と列方向の国内生産の差が概ね 0.02%以下。国内総生産GDP'と国内総支出GDE'の差が 0.02%以下）。
v	$\Delta X_i = X_i' - X_i$より食品廃棄低減に伴って省かれる国内生産額を推計する。

ステップ１の手順ⅰ、ⅲ、ⅳ、ⅴは、基本的に昨年度の分析方法[7]と同様である。昨年度と異なる点は以下の通り。

- ステップ１の手順ⅱで、需要の変化（変化率：m_i）に対し、国内生産と輸入のどちらも同率だけ変化してバランスするとした。
- ステップ２で、各部門のエネルギー消費、GHG 排出原単位に、3EID データベース[10]の値を使用するのは昨年度と同じであるが、このうち食品廃棄が低減する F、I、M 部門については、投入構造変化に伴うエネルギー原単位とエネルギー起源 CO_2 排出原単位の改善を考慮した。
- 後述する海外影響、国際輸送影響の分析とソフトリンクのため、分析の部門構成を一部変更した（更新後の国内 56 部門は表 5.6.2-2）。
- さらに、国内と海外の分析結果を比較しやいように、国内エネルギー消費を 3EID の総発熱量表記から真発熱量表記に変更した（換算係数は文献 11)。発電部門のうち原子力発電のエネルギー表記は IEA に準拠[3]）。

この他、代替に関する以下の想定も昨年度と同様である。

a. 食品廃棄物の低減に伴い飼料としての再生利用が減少する。これを、同量の雑穀で代替する。
b. 有機肥料としての再生利用が減少する分を化学肥料で賄う。
c. 日本では廃棄物のゴミ焼却率が高く、厨芥は 93%、白色トレイ・プラスチック製容器や包装は 74%が焼却処理される[13]。さらに、廃棄物焼却で生じる余熱は、施設内暖房・給湯、温水プール、発電、地域熱供給等に利用される[26]。そこで、利用されていた熱のうち食品廃棄物の低減に伴って減少する分を、電力・ガス・熱供給で代替する。ここで、廃棄物焼却の総熱量は、焼却される廃棄物の熱量＋燃料熱量より算出する。それに、焼却施設のうち熱利用有施設の割合（一般廃棄物焼却施設の 65%[26]、産業廃棄物焼却施設の 31%[27]）と、余熱利用有施設での熱利用割合（値は表 5.6.2-8 参照）を乗じ余熱利用量を推計する。
d. 青果の個別販売増により、青果を購入する全部門で卸・小売の費用が減少する一方で、道路・鉄道（貨物・自家輸送）が増える。

なお、これらの詳細は文献 7)を参照されたい。

分析対象年は、2019 年 4 月時点で公開されていた産業連関表の中で最も新しい 2011 年である。なお、本分析でのエネルギー消費とは、特に断りが無い限り、直接エネルギー消費を意味する。GHG 排出量は、国内は前述の通り文献 10)、海外は次項で述べる通り文献 16)に基づいており、土地関連 CO_2 排出の変化は対象に含まない。また、食品廃棄低減に伴う価格変化は考慮していない。これらは、今後の課題にあげられる。

[3] 原子力発電の一次エネルギー換算発熱量について、3EID が参考にしている総合エネルギー統計は平均火力発電効率（41.9%）で除した値（文献 12) p13）、一方、IEA は一律 33%で換算した値（文献 14) p224）である。そこで 3EID の原子力発電の発熱量に 41.9/33 を乗じ補正した。

表 5.6.2-2 国内影響分析の産業部門区分

56 部門		国内集約部門	
1	Vegetables and fruits	S1	Vegetables and fruits cultivation
2	Other crops	S2	Other crops cultivation
3	Animal husbandry	S3	Animal husbandry, fishery, agricultural services
4	Feed		
5	Fishery		
6	Agricultural services		
7	Organic fertilizers	S4	Fertilizer and agrochemical production
8	Chemical fertilizers		
9	Agrochemicals		
10	Grain cleaning, milling	S5	Food-processing
11	Sugar, starch		
12	Oils, fats		
13	Condiments, seasonings		
14	Livestock products		
15	Fishery products		
16	Preserved agricultural products		
17	Bread, confections		
18	Miscellaneous processed foods		
19	Soft drinks		
20	Alcoholic drinks		
21	Tea, roasted coffee		
22	Manufactured ice		
23	Wholesale	S6	Wholesale, retail
24	Retail		
25	Eating & drinking service sector	S7	Eating & drinking service sector
26	Salt	S8	Industrial materials production
27	Fiber products		
28	Pulp, paper, wood products		
29	Miscellaneous chemical products		
30	Plastic products		
31	Rubber products		
32	Ceramic and clay/stone products		
33	Iron and steel, non-ferrous metals, metal products		
34	Electronic components		
35	Computers, information-communication electronics equipment	S9	Computers and information-communication electronics equipment manufacturing, information services
36	Information services, telecommunications		
37	Transportation equipment	S10	Miscellaneous machines manufacturing
38	Miscellaneous machinery		
39	Miscellaneous manufactured products		
40	Oil and gas extraction, coal mining	S11	Mining, petroleum and coal products production
41	Other mining		
42	Petroleum and coal products		
43	Energy utilities	S12	Energy utilities
44	Road/railway transport (passengers)	S13	Transport services
45	Road/railway transport (freight)		
46	Consigned freight forwarding		
47	Shipping		
48	Air transport		

49	Traffic control, services related to transportation		
50	Waste management	S14	Waste management, water supply
51	Water supply		
52	Hotels, ceremonial occasions	S15	Other industries
53	Finance, insurance, real estate		
54	Forestry		
55	Construction		
56	Other		

(3) 海外影響分析

海外は 9 地域（表 5.6.2-3）に区分し、各地域の生産活動への影響を分析した。各地域の産業連関表、貿易マトリックスに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.9[15]より 2011 年基準データを用い、日本への輸出量（額）変化に伴う地域内生産への直接・間接影響を $\left[I-(I-\widehat{M})\cdot A\right]^{-1}$型逆行列係数を用いて部門毎に算出した。ここで、 I、$\widehat{M}$、A は、それぞれ単位行列、輸入係数行列、投入係数行列を意味する。この生産額の変化率に、あらかじめ推計しておいた部門毎のエネルギー消費量/GHG 排出量を乗じ、変化量を算出する。

各地域のエネルギー消費量、GHG 排出量は、IEA のデータベース[14),16)]の値に基づく。但し、部門区分は、IEA データベースと本分析とで異なるため、文献 17),18)を参考に本分析用に再配分した。表 5.6.2-4 に海外影響分析の産業 31 部門区分を、図 5.6.2-3 と図 5.6.2-4 に、各地域の部門別エネルギー消費量/GHG 排出量を示す。

表 5.6.2-3 海外影響分析の地域区分

海外地域	地域内代表国	主要都市
OECD Americas	United States	New York
OECD Asia, Oceania (excluding Japan)	Australia	Melbourne
OECD Europe	France	Marseilles
Africa	Nigeria	Lagos
Middle East	Saudi Arabia	Ras Tanura
Non-OECD Americas	Brazil	Santos
Non-OECD Europe, Eurasia	Russia	St Petersburg
China	China	Shanghai
Non-OECD Asia	Indonesia	Jakarta

注）IEA データベースの 9 地域。但し、「OECD Asia, Oceania」から日本を除く。

表 5.6.2-4 海外影響分析の産業部門区分

31 部門		集約部門		日本の対応部門
oag	Crops	Crop	Crops	1,2,6
oan	Livestock	Livs	Livestock	3
fsh	Fishing	Fish	Fish, seafood	5
pcr	Processed rice	ProD	Processed food, drink	10
anp	Livestock products			14
sof	Sugar, other food products			11,15,16,17,18
vol	Vegetable oils and fats			12,13
b_t	Beverages and tobacco products			19,20,21,22
trd	Trade	Trad	Trade	23,24,25,52
tew	Textiles, wearing apparel	InMa	Industrial materials	27
lea	Leather products			39（一部）
pal	Wood products, paper products,			28
crp	Chemical, rubber, plastic prods			8,9,26,29,30,31
nmm	Mineral products nec			32
inm	Iron & steel, non-ferrous metal			33
fmp	Metal products			33（一部）
eom	Electronic equipment, machinery	Mman	Machinery, manufactures nec	34,35,38
omf	Manufactures nec			4,7,39
teq	Transport equipment			37
mie	Oil and gas extraction, coal mining	Mini	Oil, gas, minerals	40
omn	Other mining			41
p_c	Petroleum, coal products	PCPr	Petroleum, coal products	42
esl	Electricity, gas manufacture, distribution	EneU	Energy utilities	43
otp	Transport nec	Trans	Transport	44,45,46,49
wtp	Sea transport			47
atp	Air transport			48
cns	Construction	Cons	Construction	55
cmn	Communication	Pser	Communication services, public services (inc. waste management)	36
wos	Water, other services			50,51
frs	Forestry	Otrs	Others	54
otr	Others: finance, insurance, etc.			53,56

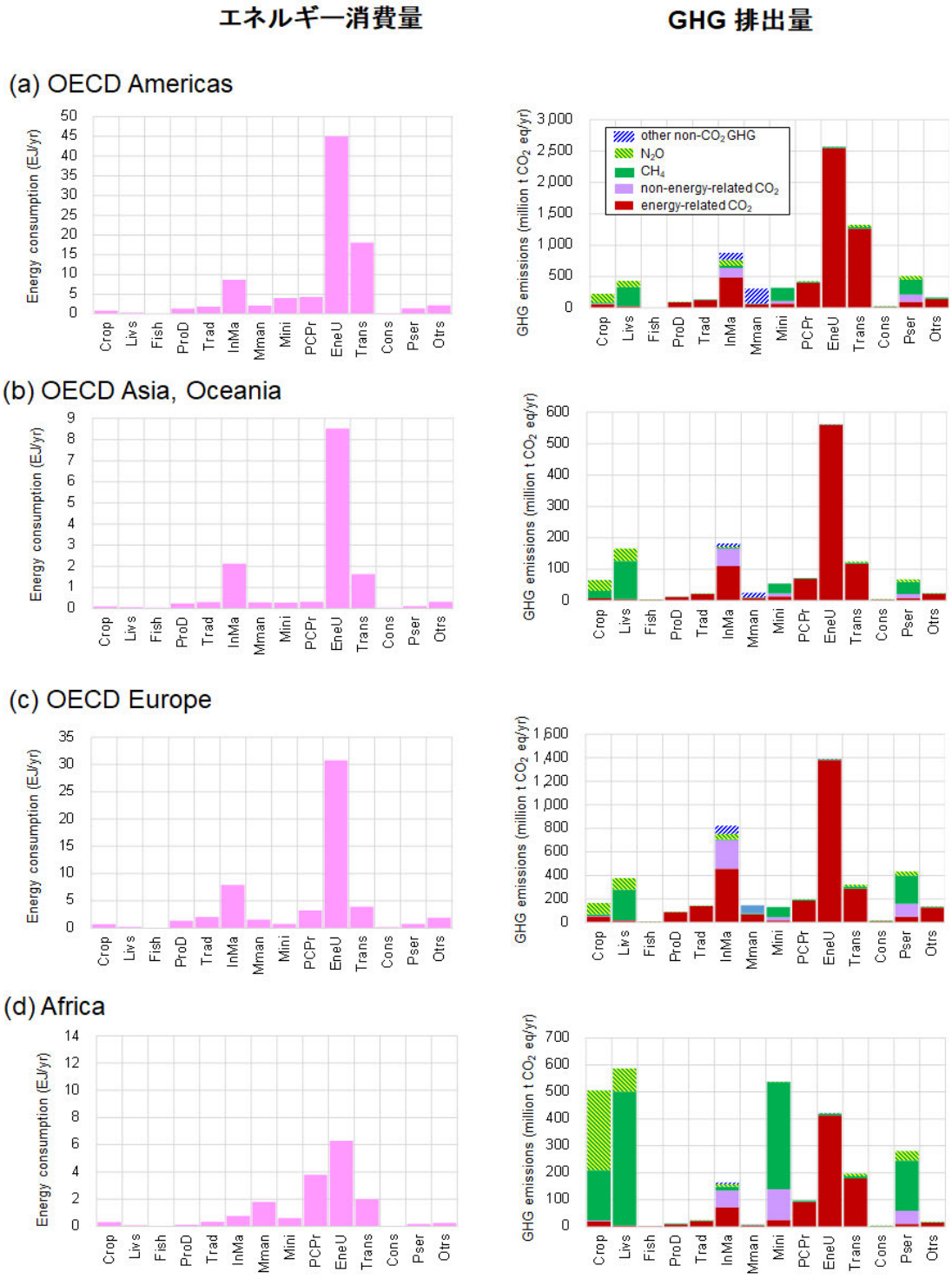


図 5.6.2-3 海外各地域の部門別エネルギー消費量と GHG 排出量(1/2)

注）産業 31 部門毎の値を 14 部門に集約表示。

Crop: Crops、 Livs: Livestock、 **Fish**: Fish, seafood、 **ProD**: Processed food, drink、 **Trad**: Trade、 **InMa**: Industrial materials、 **Mman**: Machinery, manufactures nec、 **Mini**: Mining、 **PCPr**: Petroleum, coal products、 **EneU**: Energy utilities、 **Trans**: Transport、 **Cons**: Construction、 **Pser**: Public services、 **Otrs**: Others

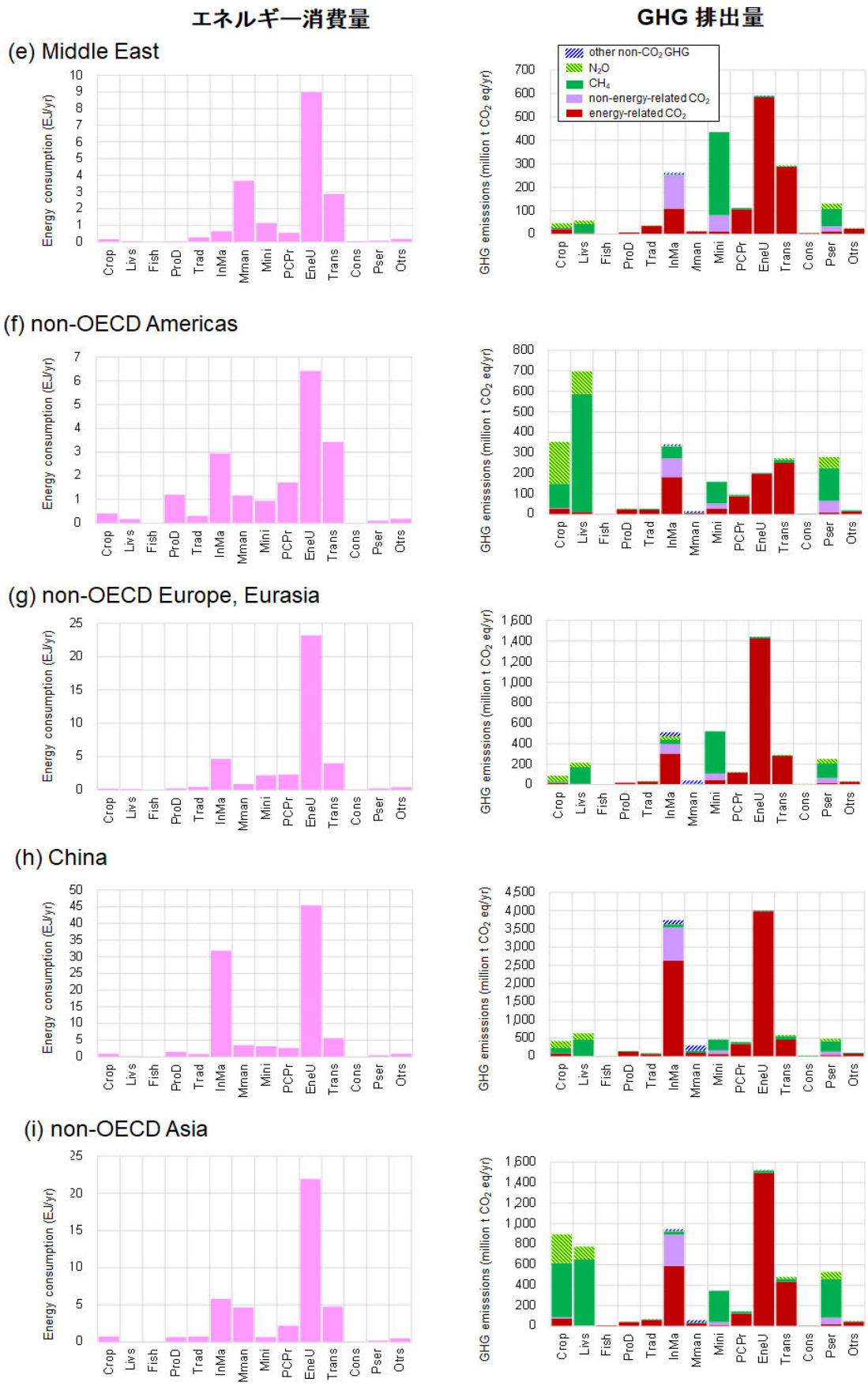


図 5.6.2-4 海外各地域の部門別エネルギー消費量と GHG 排出量(2/2)

(4) 国際輸送影響分析

国際輸送への影響（IT）は、(5.6.2-1)式に基づき算出した。

$$IT_{odc} = \sum_m VAL_{odc} \cdot WV_c \cdot OS_c^m \cdot DIST_{od}^m \cdot e^m \qquad (5.6.2\text{-}1)$$

o: 送付元（海外各地域）、d: 送付先（日本）、c: 産品
m: 輸送モード（海運又は空運）
VAL: 輸送品額
WV: 単位品額当たり重量
OS: 輸送モードの割合
$DIST$: 輸送距離
e: t-km 当たりエネルギー消費量（又は GHG 排出量）

ここで、VAL（輸送品額）にはパート①で推計した日本の輸入減少額を適用する。WV（単位品額当たり重量）は文献 9)、19)に基づき表 5.6.2-5 のように設定した。OS（輸送モードの割合）と e（t-km 当たりエネルギー消費量/GHG 排出量）は文献 19)より世界平均相当値（表 5.6.2-6、表 5.6.2-7）を適用した。$DIST$（輸送距離）は海外 9 つの地域毎に代表国を想定し、その主要都市（表 5.6.2-3 の右端列に表示）から東京までの距離とし、資料 20)の二都市間空運・海運距離を参考に設定した。このうち、海運距離について、運河経由と非経由のデータがある場合はその平均値とし、さらに、その二倍の値を適用した。後者の二倍については、海運の場合、二都市間を直行するとは限らずむしろ途中、複数の国や都市への寄港が一般的と考えられることより [21),22)]、文献 19)も参考に設定した。

表 5.6.2-5 単位品額当たり重量の想定

産品	単位品額当たり重量(kg/$)
Vegetables, fruits	0.50
Other crops	2.73
Processed food	0.50
Timber	6.79
Fish and shellfish	0.27
Minerals	12.68
Oil, gas	5.26
Textiles, apparel	0.11
Wood, paper products	1.00
Petroleum, coal products	3.93
Chemical, rubber, plastic products	0.69
Mineral products nec	1.90
Metals	0.89
Metal products	0.69
Motor vehicles, parts, transport equipment	0.11
Electronic equipment, machinery, and equipment nec	0.12
Manufactures nec	0.15

注）文献 19)の 2004 年時額は GDP デフレータ [23)]を用い 2011 年相当値に換算。なお、厳密には、海運と空運で単位品額当たり重量は異なると考えられるが、本分析でその違いは考慮していない。

表 5.6.2-6 海運と空運の輸送量割合の想定

産品	海運 (%)	空運 (%)
Vegetables, fruits	96	4
Other crops	100	0
Processed food	95	5
Timber	97	3
Fish and shellfish	62	38
Minerals	99	1
Oil, gas	100	0
Textiles, apparel	77	23
Wood, paper products	93	7
Petroleum, coal products	100	0
Chemical, rubber, plastic products	74	26
Mineral products nec	100	0
Metals	100	0
Metal products	100	0
Motor vehicles, parts, transport equipment	68	32
Electronic equipment, machinery, and equipment nec	51	49
Manufactures nec	46	54

注）文献 19)の世界平均相当の推計値（value ベース）。但し、海外から日本への陸運は考えられないことより、海運と空運で 100%となるよう調整した。

表 5.6.2-7 単位輸送量当たりのエネルギー消費/GHG 排出

産品	海運		
	船タイプ	ｴﾈﾙｷﾞｰ消費 (MJ/t-km)	GHG 排出量 (g CO_2 eq/t-km)
Vegetables, fruits	Container	0.16	12.1
Fish and shellfish			
Processed food			
Other crops	Bulk	0.06	4.5
Timber			
Oil, gas	Tanker etc.	0.09	7.0
Minerals			
Petroleum, coal products			
Chemical, rubber, plastic products	Chemical	0.13	10.1
Textiles, apparel	Container	0.16	12.1
Wood, paper products			
Mineral products nec			
Metals			
Metal products			
Motor vehicles, parts, transport equipment			
Electronic equipment, machinery and equipment nec			
Manufactures nec			

注）空運は産品に依らず、エネルギー消費：12.5 MJ/t-km、GHG 排出量：900 g CO_2 eq/t-km を適用。

(5) 感度分析

分析パート①、②、③の主要なパラメータについて、表 5.6.2-8 のように複数の値を想定し感度分析を行った。このうち、①、②、③のいずれも標準想定とした場合を Reference ケース、いずれも影響が小さく分析されるパラメータの組み合わせを Small-impact ケース、その逆を Large-impact ケースと呼び、主要パラメータの不確実性を考慮した場合の推計幅算定に用いた。

表 5.6.2-8 主要パラメータの想定

	パラメータ	標準想定	感度分析用想定	
①国内	U: 余熱利用あり廃棄物焼却施設の熱利用割合	総発熱量の50%	70%	30%
	T: 規格外青果の個別販売輸送費	卸・小売費用の100%	150%	50%
②海外	A: 農業 CH_4, N_2O 排出	IEA 値	IEA 値×0.7 *1	IEA 値×1.4 *1
	E: ｴﾈﾙｷﾞｰ CH_4 排出	IEA 値	IEA 値×0.5*2	IEA 値
③国際輸送	I: 国際海運の地域間距離	(直行距離)×2 *3	×1	×3 *3
		⇩	⇩	⇩
	ケース	Reference	Small- impact	Large- impact

*1：IPCC 土地関連特別報告書[24]より、世界計推定値の上下限幅を参考に設定。
*2：UNFCCC に報告された AnnexI 他、主要国の値[25]を参考に設定。
*3：文献 19), 21), 22)を参考に想定。

5.6.3 分析結果

(1) 国内外の部門別影響

本節では、Reference ケース（主要パラメータに標準想定値を適用、表 5.6.2-8 参照）において、青果農業（F)、食品業（I)、家庭（M）の食品廃棄が 30%低減するとした場合の結果を示す。以下、図中「baseline 比」とは、食品廃棄低減を考慮しない場合との差を意味する。

① 国内影響

図 5.6.3-1 に示すように、食品廃棄を低減した F、I、M 部門の他、その他耕種農業、畜産・水産・農業サービス、肥料・農薬、工業材料、電力・ガス・熱供給、廃棄物処理等多くの部門に影響が波及し、捨てられる食品に関連する生産が省かれる。一方、計算・通信機器・情報サービス部門では、食品廃棄低減のための情報技術導により生産が増大する。但し、エネルギー消費で見ると（図 5.6.3-1(b)）、この部門の増大は小さく、食品加工、工業材料、電力・ガス・熱供給、家庭等の部門のエネルギー消費がそれ以上に減少する。なお、M 部門で食品廃棄を低減した時に、電力・ガス・熱供給部門のエネルギー消費が増大するのは、廃棄物焼却時に利用されていた余熱の減少分を、電力・ガス・熱供給の投入増で補うと想定したことによる。特に一般廃棄物焼却施設は余熱利用設備の附帯率が 65%[26]と、産業廃棄物焼却施設の 31%[27]に比べ高いため、M 部門での食品廃棄低減時にその相殺分が比較的大きく推計された。また、F 部門で食品廃棄を低減した時に輸送部門のエネルギー消費が増大するのは、規格外青果物の個別販売の輸送増大を想定したことによる（5.6.2 節(2)項参照）。

GHG 排出は図 5.6.3-1 (c)のように、農業部門で CH_4、N_2O 排出が、食品加工、工業材料、電力・ガス・熱供給、家庭等の各部門でエネルギー起源 CO_2 排出が、廃棄物処理部門で非エネルギー起源 CO_2 排出と非 CO_2 排出が主に減少すると推計された。この他、国内影響の詳細については、昨年度報告[7]も参照されたい。

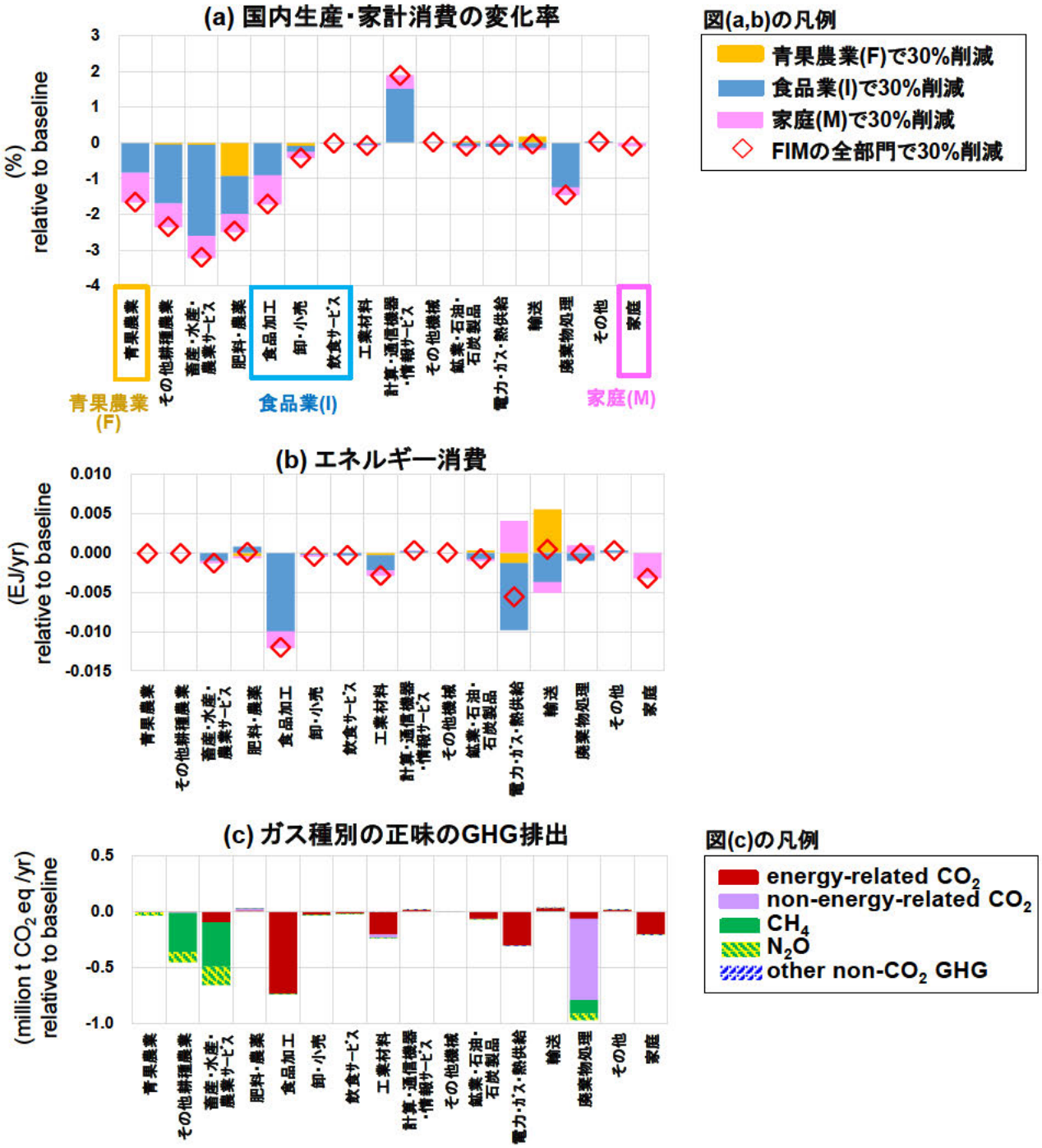


図 5.6.3-1 食品廃棄 30%低減による国内各部門への影響

注）産業 56 部門別に分析したものを集約表示。図中の四角囲みは食品廃棄低減を想定した部門。

② 海外各地域への影響

日本の食品廃棄低減に伴う輸入減少が、海外各地域に及ぼす影響を図 5.6.3-2 に示す。9 地域のうち、エネルギー消費、GHG 排出とも削減量が最も大きいと推計されたのは OECD Americas で、non-OECD Asia、OECD Asia Oceania、non-OECD Americas、China がそれに続く。上記 5 地域の削減量は、海外 9 地域の全削減量の 80%以上を占める。日本がこれらの地域から食品や関連産品を輸入していることを反映している。

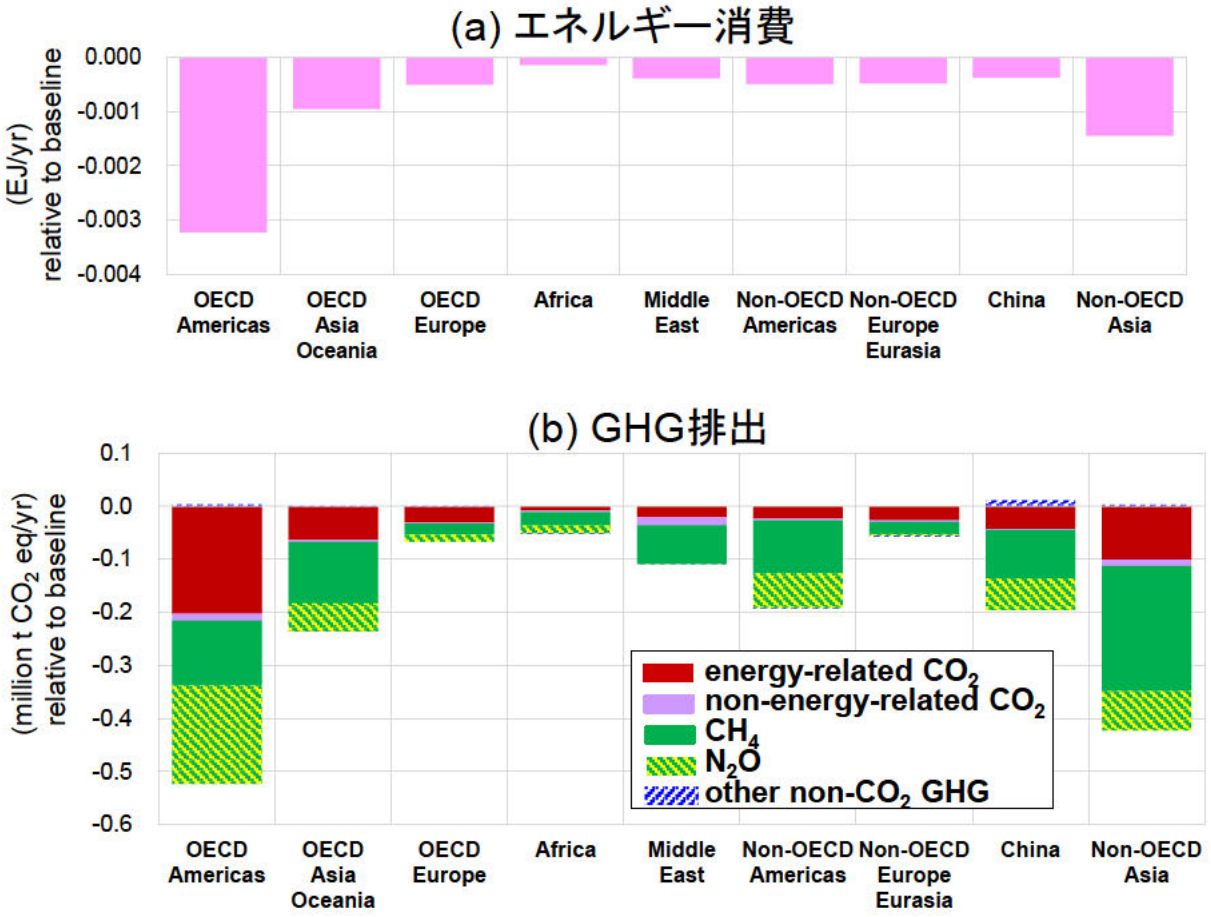


図 5.6.3-2 海外各地域の影響

図 5.6.3-3 には、上記 5 地域の GHG 排出への影響を部門別に示す。どの地域も作物栽培業（Crop）や畜産業（Livs）での減少が目立つ。興味深い点として、ガス種に地域毎の特徴がみられる。例えば、OECD Americas と non-OECD Asia の作物栽培業（Crop）で減少するガス種について、OECD Americas では主に N_2O とエネルギー起源 CO_2 であるのに対し、non-OECD Asia では CH_4 となっている。これは栽培作物や農業形態の違いを反映したもの、すなわち前者は化学肥料やエネルギーを投入したトウモロコシや小麦等の栽培、後者は水田における米栽培が盛んであることを反映した結果と考えられる。なお、China では、工業材料製造（InMa：金属、プラスチック、繊維・木製品等）

や機械（Mman）の GHG 排出が増加する。これは日本の情報技術等導入に伴い、中国の機械や関連材料の生産が増えることによる。

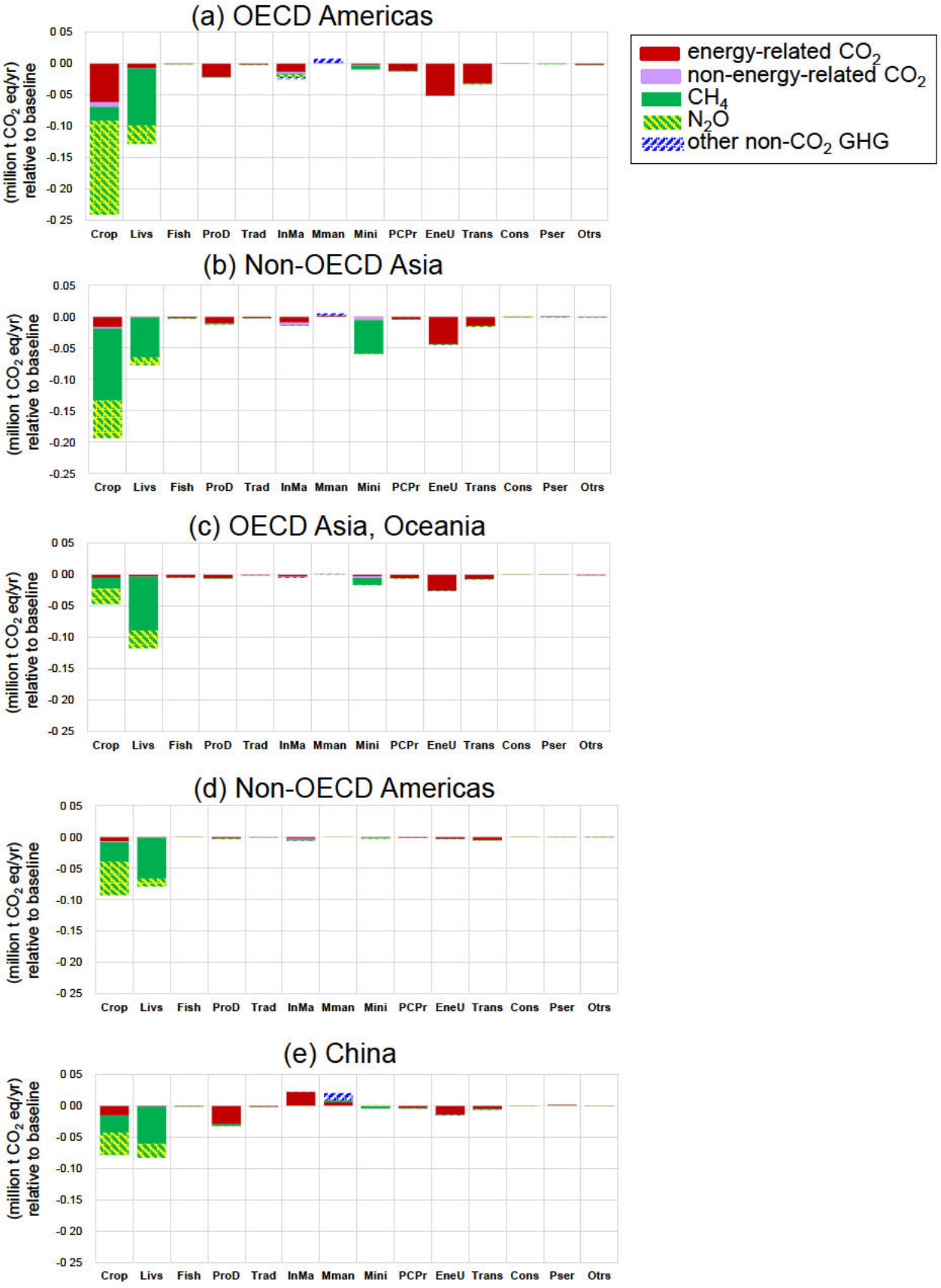


図 5.6.3-3 海外主要地域の部門別 GHG 排出への影響

注）産業 31 部門別に分析したものを集約表示。部門対応は、表 5.6.2-4 参照。

図 5.6.3-4 には、OECD Americas を例に、GHG 排出への直接影響と間接影響の内訳を示す。これより、作物栽培業（Crop）や食品加工業（ProD）での GHG 排出減少は、直接影響、すなわち、日本の食品廃棄低減に伴ってこれら部門の輸出が減少する影響が主流と算定されている。一方、畜産業（Livs）での GHG 排出減少は、食品加工業の輸出減少に伴い、その原料である家畜の生産も減少するという間接影響が主に算定されている。電力・ガス・熱供給、輸送の GHG 排出減少も間接影響による。

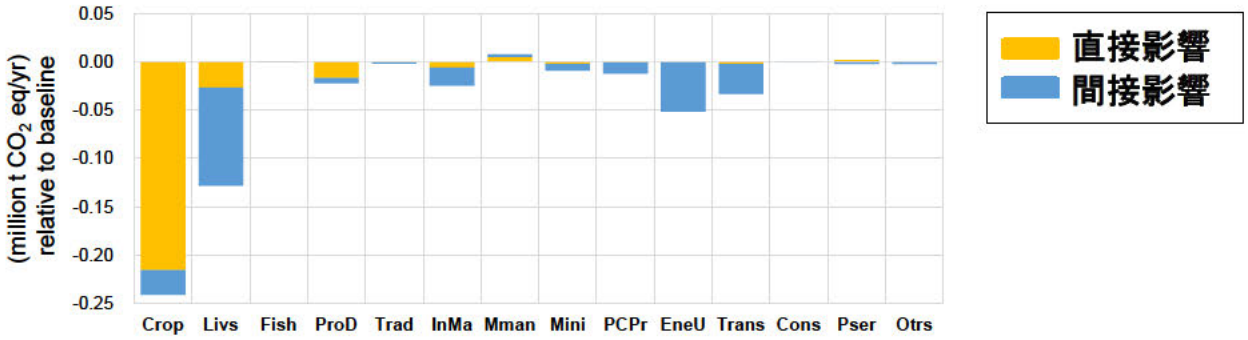


図 5.6.3-4 部門別 GHG 排出への直接・間接影響内訳（OECD Americas）

注）産業 31 部門別に分析したものを集約表示。部門対応は表 5.6.2-4 参照。

③ 国際輸送への影響

国際輸送は図 5.6.3-5 に示すように、主に農作物、加工食品、石炭・石油・ガス・鉱物で減少すると分析される。輸送量（図 5.6.3-5(a)）で見ると、これらの産品はほとんど海運に依存しており、空運割合は加工食品で 1%、農作物で 0.1%未満に過ぎない。但し、エネルギー消費や GHG 排出（図 5.6.3-5 (b, c)）で見ると、原単位が海運に比べ 1～2 桁大きい空運の寄与も無視し難いといえる。

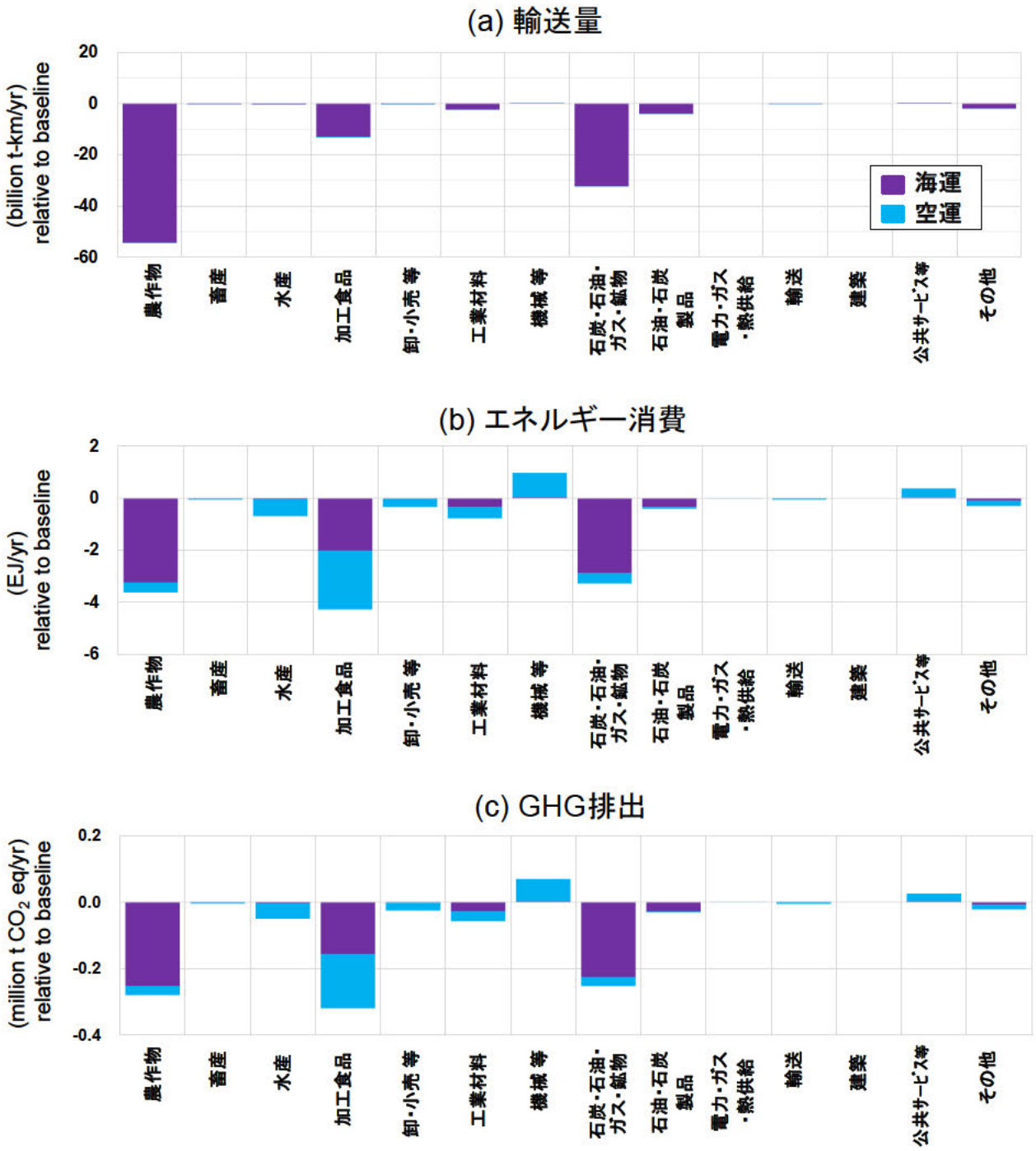


図 5.6.3-5 国際輸送への影響

④ 各種影響の合計

上述した各種影響の合計を図 5.6.3-6 に示す。日本の食品廃棄 30%低減による、国内、海外各地域、及び国際輸送への影響を合計すると、エネルギー消費は▲0.046 EJ/yr、GHG 排出は▲6.4 百万 t CO_2 eq/yr となる。いずれも、このうち約 60%は国内での減少であるが、残り約 40%は海外各地域と国際輸送での減少であり、日本での取り組みが国外の省エネルギー、GHG 排出削減にも寄与することを示している。

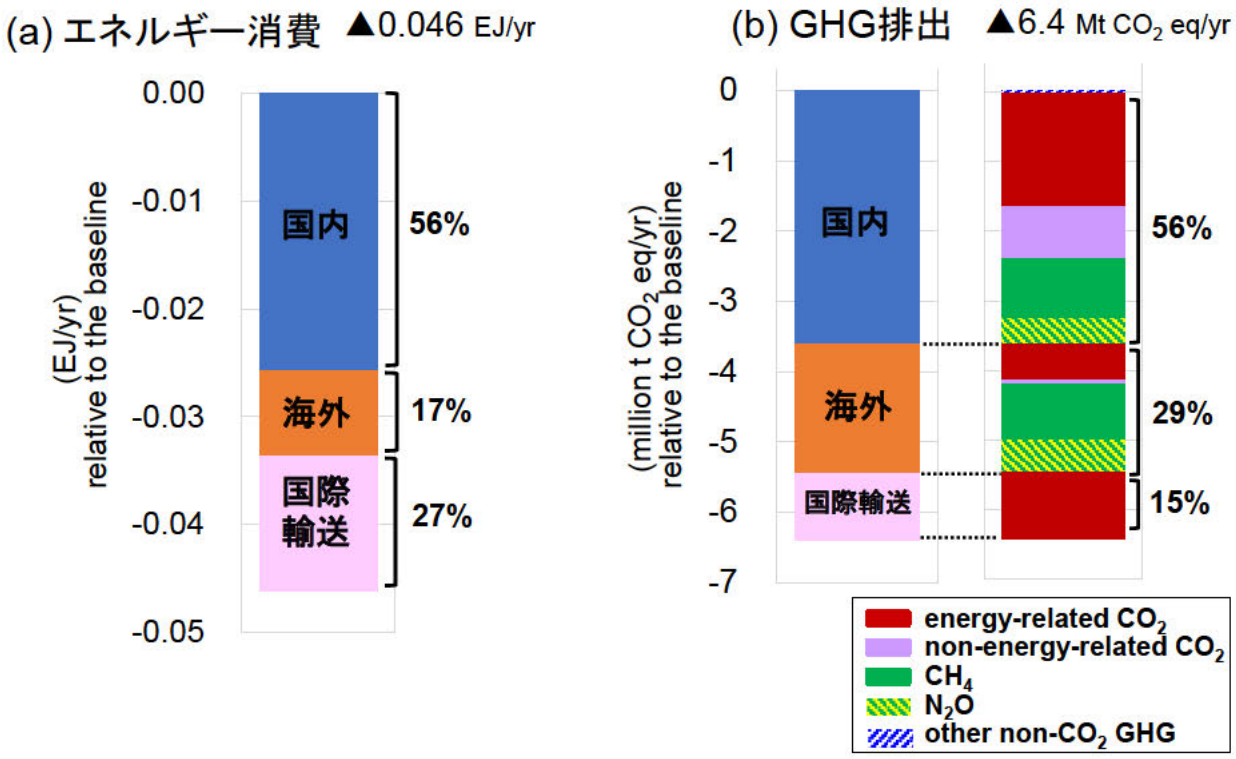


図 5.6.3-6 日本の食品廃棄 30%低減による影響の合計

なお、5.6.1 節で紹介した、食品廃棄低減による GHG 排出低減影響の評価事例 [5),6)] では、各種食品の GHG 排出原単位にメタ分析で得られた値 [28)]を利用しており、国内と海外各地域の影響の程度は不明であった。一方、本分析ではこれを定量的に示した。国際輸送についても、例えば文献 5)では、農産品の国際輸送の約 90%は排出原単位が小さい海運であることより、食品廃棄低減の影響は小さいとして評価していない。一方、本分析では、農産品以外の関連産品についても輸送量の減少を考慮し、さらに海運と空運の割合も考慮して分析した。その結果、食品廃棄低減は国際輸送にも無視し難い影響を及ぼす可能性のあることが示された。これについて、本分析の海外各地域や国際輸送での減少が全減少分の約 40%を占めるという結果は、食品をはじめ関連産品の海外依存度が高い日本に特徴的なものかもしれない。しかしながら、国際貿易の拡大傾向 [29)]を鑑みると、日本以外の地域における食品廃棄低減についても、地域外及び国際輸送への影響を明示的に評価するのが望ましいと考えられる。

(2) 感度分析

国内影響、海外影響、国際輸送影響の各分析における主要パラメータの不確実性（表 5.6.2-8 参照）を考慮した場合のエネルギー消費、GHG 排出への影響をそれぞれ図 5.6.3-7、図 5.6.3-8 に示す。ここで、食品廃棄の低減率は 5.6.1 節に記した通り、気象予測情報を用いた高度需要予測による食品廃棄低減効果の実証実験や SDGs の半減目標を参考に 20～50%とした。エネルギー消費については、図 5.6.3-7(d)の通り、日本の

食品廃棄を 50%低減すると、国内外と国際輸送への影響を合わせ全体で 0.06～0.12 EJ/yr だけ削減されると推計された。参考まで、これは世界の一次エネルギー供給の 0.01～0.02%、日本の同供給の 0.3～0.6%に相当する。また GHG 排出は、図 5.6.3-8 (d)の通り、日本の食品廃棄 50%低減により、全体で 9～15 百万 t CO_2 eq/yr（世界の正味 GHG 排出の 0.02～0.03%、日本の総排出の 0.7～1.1%に相当）だけ削減されると算定された。

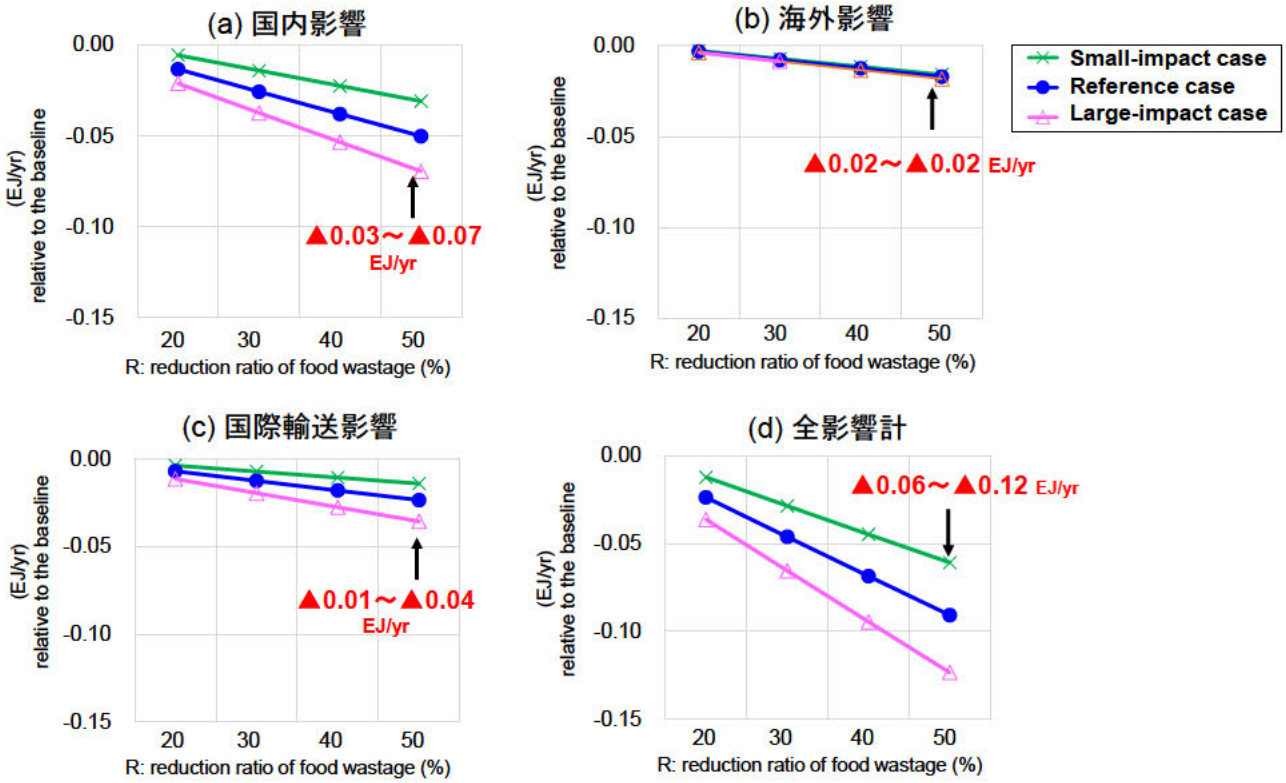


図 5.6.3-7 エネルギー消費への影響

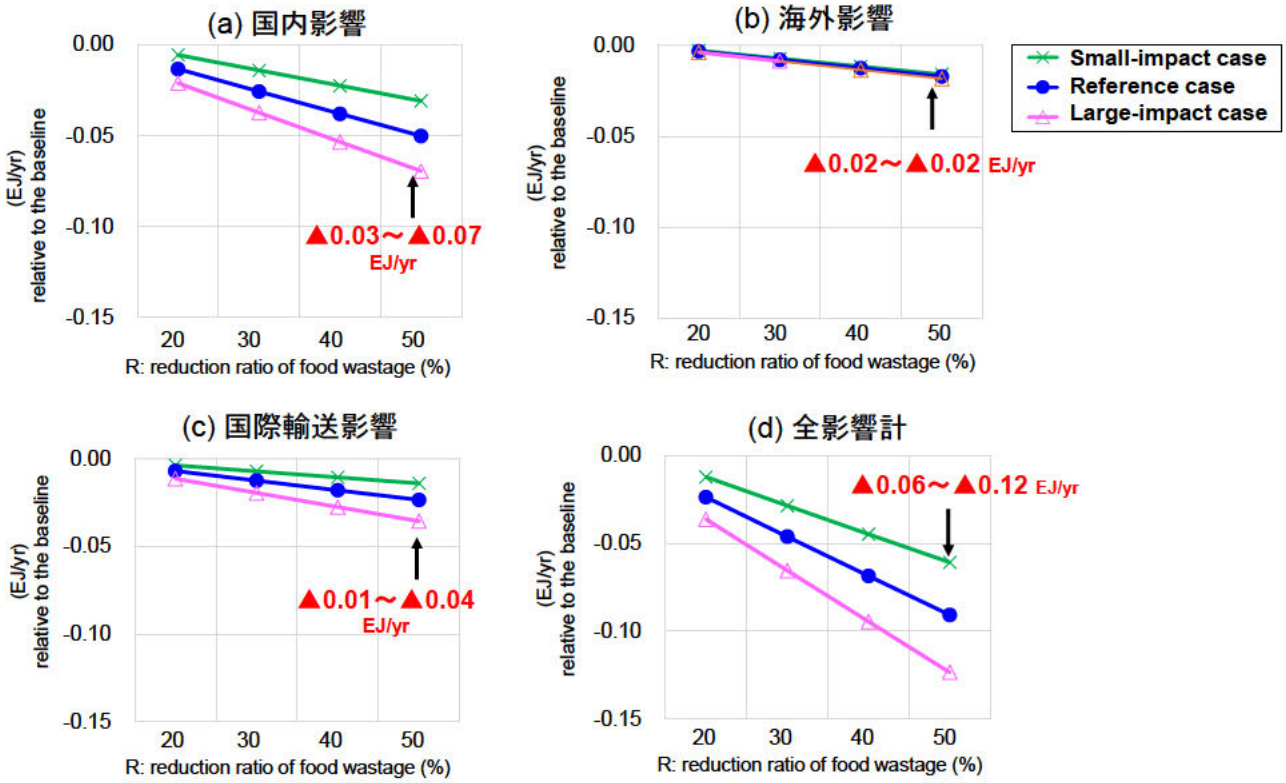


図 5.6.3-8 GHG 排出への影響

5.6.4 まとめ

情報技術等の活用により需給ミスマッチが改善し、日本の青果農業（F）、食品業（I）、家庭（M）における食品廃棄が低減するとした場合について、エネルギー消費、GHG 排出に及ぼす影響を、国内外各部門への波及効果及び国際輸送の変化を考慮し推計した。主な結果は、以下のようにまとめられる。

- 日本の食品廃棄低減により、国内外で行われる生産活動が省かれ、世界のエネルギー消費、GHG 排出（エネルギー起源 CO_2 排出、非エネルギー起源 CO_2 排出、非 CO_2-GHG 排出）の削減に寄与する。
- F、I、M 全ての部門で食品廃棄を半減した場合、世界のエネルギー消費は 0.06～0.12 EJ/yr （世界の一次エネルギー供給の 0.01～0.02%、日本の同供給の 0.3～0.6%に相当）、GHG 排出は 9～15 百万 t CO_2 eq/yr（世界の正味 GHG 排出の 0.02～0.03%、日本の総排出の 0.7～1.1%に相当）だけ削減される。
- 削減の約 4 割は海外各地域及び国際輸送への影響であり、日本での取り組みが国外の省エネルギー、GHG 排出削減にも寄与すると見込まれる。
- 海外各地域での削減分の 80%以上は OECD Americas、non-OECD Asia、OECD Asia Oceania、non-OECD Americas、China で推計される。これら地域の農畜産業の CH_4 や N_2O の排出削減、さらに食品加工やエネルギー供給業、輸送業のエネルギー消費とエネルギー起源 CO_2 排出の削減に寄与すると考えられる。
- 国際輸送については、日本の農産品、加工食品、石炭・石油・ガス等の輸入が

減少し、これらの国際輸送に係るエネルギー消費と CO_2 排出の低減が見込まれる。

なお、日本は食品の廃棄率が比較的小さく、食品廃棄低減のポテンシャルが小さい。例えば、穀類について、日本の家庭の廃棄率は 1～2%[30]に対し、英国家庭のパンで 25%[31]、米国の小売・消費段階で 31%[32]と報告されている。さらに、日本は廃棄物の焼却処分が主流である上、余熱利用も進められており、単位廃棄量当たりの GHG 削減ポテンシャルが小さい。一方、海外では埋め立て処分が主流の地域も少なくない。例えば、米国では廃棄食品の 76%、プラスチック容器の 69%が、中国やマレーシアでは都市ごみの 80%、90%がそれぞれ埋め立て処分されている [33]。埋立地から発生するメタンガスは、回収・エネルギー利用されるものもあるが、多くは大気に放出され温室効果に寄与するとみられている [28]。

そのような状況を踏まえると、これまでは、身近な日本での食品廃棄低減を対象に分析を行ってきたが、今後はより大きな削減ポテンシャルが見込まれる海外での食品廃棄低減の影響分析も課題としてあげられる。その際、日本で想定したような情報技術が海外の食品廃棄低減に活用できるか、活用できる場合に食品廃棄低減効果がこれまで評価されている以上に大きいか等、引き続き注目される。

なお、本分析では、食品廃棄低減によって生じた家計や各産業活動の余剰が新たな消費や活動につながる可能性や、コロナ禍に端を発するライフスタイルや食品生産構造の変化は考慮していない。より包括的な視点で、出来るだけ多くの GHG 排出削減機会を検討していく必要がある。

参考文献（第 5.6 節に関するもの）

1) O. Edenhofer et al.; Technical summary, In: Climate change 2014: mitigation of climate change, (2014), pp. 33-107.
2) FAO; Global food losses and food wastage: extent, causes and prevention. FAO, Rome (2011)
3) UN; Sustainable Development Goals (2015), https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300 (ｱｸｾｽ日 2019.11.10).
4) D. P. van Vuuren et al. ; Alternative pathways to the 1.5 C target reduce the need for negative emission technologies, Nat. Clim. Change, (2018), pp. 391-397.
5) 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)
6) 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. IEA: Energy Technology Perspectives 2012 - Pathways to a Clean Energy System, Paris (2012)
7) 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 (2020), pp.87-97.
8) 経済産業省；食品ロス削減に向けた経済産業省の取組 (2017) (ｱｸｾｽ日 2018.10.2). https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_policy/information/food_loss/conference/pdf/adjustments_index_10_170915_0006.pdf

9) 総務省；平成 23 年（2011 年）産業連関表.
10) 国立環境研究所地球環境研究センター；2011 年産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID), http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/datafile/embodied/2011/395.html (ｱｸｾｽ日 2018.10.1).
11) 資源エネルギー庁; エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数(2018 年度改訂)の解説.
12) 資源エネルギー庁; 総合エネルギー統計の解説 2018 年度改訂版（案）(2020).
13) 環境省；平成 23 年版環境分野分析用産業連関表（環境 IO）, https://www.env.go.jp/doc/toukei/renkanhyo.html (ｱｸｾｽ日 2019.8.20)
14) IEA; World energy balances 2019 edition (2019).
15) GTAP; GTAP 9 Data Base, https://www.gtap.agecon.purdue.edu/databases/v9/default.asp, (ｱｸｾｽ日 2019.6.10)
16) IEA; CO2 emissions from fuel combustion 2019 edition (2019).
17) 戒能一成; IEA エネルギーバランス表の概要とこれを応用した産業連関表形式エネルギー・CO2 物量表の作成手法について(2006), p.50. https://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/X0810GKA2.pdf (ｱｸｾｽ日 2020.8.10).
18) Z. B. Irfanoglu, D. van der Mensbrugghe; Development of the version 9 non-CO2 GHG database (2015), p.34, https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/7813.pdf (ｱｸｾｽ日 2020.8.20).
19) A. D. Cristea, D. Hummels, L. Puzzello, M. G. Avetisyan; Trade and the greenhouse gas emissions from international freight transport (2011), p.55. https://www.nber.org/system/files/working_papers/w17117/w17117.pdf (ｱｸｾｽ日 2020.7.20).
20) 一般社団法人サステナブル経営推進機構; 国・地域間距離データベース, https://ecoleaf-label.jp/entry/application_form.html#FD-02 (ｱｸｾｽ日 2021.2.23)
21) 東京都港湾局, 定期航路一覧, https://www.kouwan.metro.tokyo.lg.jp/business/koro/pdf/koro.pdf (ｱｸｾｽ日 2021.3.3)
22) 北九州港; 国際定期コンテナ航路一, 覧 http://www.kitaqport.or.jp/jap/business/route.html (ｱｸｾｽ日 2021.2.23)
23) World Bank; World Bank Commodity Price Data (The Pink Sheet), https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets (ｱｸｾｽ日 2020.9.6)
24) A. Arneth et al.; Summary for Policymakers, In: Climate Change and Land, (2019), pp.1-41.
25) UNFCCC; Greenhouse Gas Inventory Data, https://di.unfccc.int/detailed_data_by_party (ｱｸｾｽ日 2020.6.25)
26) 環境省；一般廃棄物の排出及び処理状況等（平成 23 年度）について (2013), http://www.env.go.jp/press/files/jp/21815.pdf (ｱｸｾｽ日 2019.6.18)
27) 環境省；熱回収施設の現状. https://www.env.go.jp/recycle/misc/thermal/ref.pdf (ｱｸｾｽ日 2019.6.18)
28) FAO; Food wastage footprint impacts on natural resources, Technical report (2013). http://www.fao.org/3/ar429e/ar429e.pdf (ｱｸｾｽ日 2018.6.10)
29) FAO; 2019. FAOSTAT database. http://www.fao.org/faostat/en/#data (ｱｸｾｽ日 2019.12.7)
30) 農林水産省；平成 26 年度食品ロス統計調査報告（世帯調査） http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/syokuhin_loss/（ｱｸｾｽ日 2019.7.18）

31) WRAP; Household food waste: restated data for 2007-2015 (2018).
32) 流通経済研究所；海外における食品廃棄物等の発生状況及び再生利用等実施状況調査 (2016) https://www.maff.go.jp/j/shokusan/recycle/syoku_loss/pdf/hokoku.pdf （ｱｸｾｽ日 2019.7.20）
33) 資源・リサイクル促進センター；リサイクルデータブック 2019, pp. 146-192, http://www.cjc.or.jp/data/databook.html (ｱｸｾｽ日 2019.9.27)

5.7 Non-CO_2 GHG 排出削減の最新評価に関する調査

RITE がこれまで開発してきた Non-CO_2 GHG 評価モデル [1),2)]は、米国環境保護庁 (EPA) の報告書のデータ [3)]を参照し、各種シナリオのもとでの Non-CO_2 GHG 排出量の削減量を推計し分析してきた。2019 年に EPA は、世界の Non-CO_2 GHG ベースライン予測および限界削減費用（MAC）に応じた削減ポテンシャルを評価する最新レポートを公開した（EPA2019[4)]）。RITE がこれまで開発してきた Non-CO_2 GHG 評価モデルの更新に資する情報を得るために、新たに更新された EPA2019[4)]の分析結果を調査し、日本、EU、米国、中国に関する部門別 Non-CO_2 排出量予測および MAC 別削減ポテンシャル評価の内容を整理する。

5.7.1 EPA(2019)の概要

EPA2019[4)]の MAC 分析では、ボトムアップのコストアプローチを使って、各削減オプションの推定削減ポテンシャルに対して平均損益分岐点炭素価格を推定し、各地域および各産業を対象に、限界費用価格とその削減量を推計している。平均損益分岐点炭素価格は各削減技術オプションの現在価値の便益と費用が一致する価格である。削減オプションは、費用の昇順でソートされ、階段状の MAC 曲線が推計されている。以下に、主要な前提条件を示した。

- 分析期間：2020 年から 2050 年までの 5 年間隔
- 分析地域：195 か国（地域）
- Non-CO_2 GHG のガス種：CH_4,N_2O,HFCs,PFCs,SF_6,NF_3
- Non-CO_2 GHG の CO_2 換算係数：IPCC 第 4 次評価報告書（AR4）の GWP100 値
- ベースラインの想定：将来の活動量の推移は考慮するが、排出係数固定（すなわち、技術固定ケースに相当すると考えられる。また、将来の社会シナリオ・GDP 想定などは明示的に記載されていない。）
- 緩和策オプション：EMS 製造業（太陽電池製造、フラットパネルディスプレイ）と排水部門が追加され、その他は EPA2013[5)]とほぼ同様であり、削減オプションがない排出源も存在する。EPA2019[4)]では、各技術に関する学習曲線を使用し、削減効率の改善を考慮している。また、地域と技術の成熟度の違いに基づき調整している。
- 限界削減費用 MAC：最大 100,000[$/t$CO_2$]まで分析。

- 割引率・税率の想定：割引率は年 5%（従来の分析では 10%を想定していた）。税率はゼロと想定。

また、EPA2019[4)]の分析の留意点・限界として、以下があげられる。

- MAC 分析は部分的な均衡状態を想定しているため、マクロ経済全体の整合性は必ずしも考慮されていない。
- 非市場の障壁は考慮されていない。そのため、MAC 分析ではネガティブコストで実施される技術オプションが推計されているが、障壁によっては導入が難しい可能性も考えられる。
- 現在の実装可能な削減技術オプションのみを評価している。一方、将来的に実装可能な技術については考慮していない。
- MAC 分析は市場の潜在力や技術の社会的受容性を考慮していない。
- EPA2019[4)]では技術オプションによる削減量の推計であり、レポートでは明記されていないものの、活動量の低下などの技術以外による要因による Non-CO_2 GHG 削減量は考慮されていないと考えられる。排出削減強度が非常に厳しいシナリオにおいて、石炭などの需要低下によって化石燃料の採掘量が減った場合に予想される Non-CO_2 GHG 削減量は考慮されていない可能性がある。

5.7.2 EPA(2019)の主な分析結果

表 5.7.2-1 には、EPA2019[4)]によって推計された、2050 年の Non-CO_2 GHG の排出量を主要国別に整理した。EPA2019[4)]では主に 2030 年の結果に焦点を当てて報告されているが、ここでは、ネットゼロ目標として注目される 2050 年について結果をまとめた。前述のように、EPA2019[4)]のベースラインは技術固定ケースに相当するため、技術固定ケースとそれに対する最大削減ケースの排出量を記載した。また、温暖化・エネルギー問題を扱う多くのエネルギーモデルや経済モデルでは、限界削減費用ゼロを基準ケースとする（費用効率的なオプションは基準ケースの中で選択されることを想定する）ことが多いため、ここでは、基準ケース（EPA2019[4)]の MAC0[\$/tCO_2]）の排出量についてもまとめた。RITE がこれまで開発してきた Non-CO_2 GHG 評価モデルも、MAC0[\$/tCO_2]を基準ケースとした枠組みとなっている。既往の温暖化問題の分析と整合的な観点からは、EPA2019[4)]の推計結果は、基準ケースからの削減量を評価するのがより望ましいと考えられる。

EPA2019[4)]のでは、2050 年の世界 Non-CO_2 GHG の排出量は、技術固定ケースで 16.5[$GtCO_2$eq.]、基準ケース（EPA2019[4)]の MAC0[\$/tCO_2]）で 12.3[$GtCO_2$eq.]と推計している。技術オプションにより最大限に削減を実施した場合（EPA2019[4)]の MAC100,000[\$/tCO_2]）には、10.8[$GtCO_2$eq.]（技術固定ケース排出量比で約 65%、基準ケース排出量比で約 87%）と推計している。前述のように、削減量の推計は、現在の実装可能な削減技術のみを考慮している点には留意されたい。最大限に削減したとし

ても残る Non-CO_2 GHG 排出量は、特に農業部門からの排出の寄与が大きいと推計されている。

EPA2019[4)]の分析に基づくと、世界で 50 年 GHG ネットゼロ目標を達成するためには、最大限削減に取り組んでもなお残る Non-CO_2 GHG 排出量の 10.8 [$GtCO_2eq.$]を相殺する、CO_2 のネガティブ排出技術（NETs）が必要になることが示唆される。また、Non-CO_2 GHG 排出削減の技術に関して、現在考慮されていない革新的な技術開発などが重要であることも示唆される。地域別にみると、主要国では、技術オプションにより最大限に削減を実施した場合の排出量は、約 85%～92%（基準ケース排出量比）と推計され、主要国間ではあまり大きな差異は見られない。各国が国内対策のみで GHG ネットゼロ目標を達成する場合においても、ネガティブ排出技術が重要であることが示唆される。

表 5.7.2-1　EPA（2019）による Non-CO_2 GHG のベースライン排出量と削減量（2050 年）

	技術固定ケースの排出量 [MtCO2eq.] (EPA2019ベースライン)	**最大削減ケースの排出量** [MtCO2eq.] (EPA2019の MAC100,000$/tCO2)	技術固定ケースに対する最大削減ケースの排出量 [%]	基準ケースの排出量 [MtCO2eq.] (EPA2019のMAC0$/tCO2)	基準ケースに対する最大削減ケースの排出量[%]
米国	1447.5	946.1	65.4%	1117.4	84.7%
EU	665.7	500.2	75.1%	541.3	92.4%
日本	89.5	62.1	69.4%	70.2	88.6%
中国	3422.2	1827.0	53.4%	2029.4	90.0%
世界計	16495.7	10780.7	65.4%	12329.6	87.4%

5.7.3　まとめ

EPA2019[4)]は Non-CO_2 排出ベースラインを更新し、最新の排出量予測に基づいて緩和策評価の結果を調査した。分析対象の地域数が世界 195 カ国別に増加し、2050 年までに分析対象期間が拡張され、また、いくつかの削減オプションが追加評価された。PA2019[4)]の推計結果に基づくと、世界で 50 年 GHG ネットゼロ目標を達成するためには、最大限削減に取り組んでもなお残る Non-CO_2 GHG 排出量の 10.8 [$GtCO_2eq.$]をオフセットするような CO_2 排出のネガティブ排出技術が必要になることが示唆された。また、Non-CO_2 GHG 排出の大幅な削減のためには、革新的な技術開発が重要であることも示唆される。今後の課題として、EPA2019[4)]の情報をさらに検証しつつ、RITE がこれまで開発してきた Non-CO_2 GHG 評価モデル [1),2)]のガス種別、地域別、部門別にパラメータを更新し、より信頼性の高いモデル分析ができるように拡張する予定である。

参考文献（第 5.7 節に関するもの）

1) K. Akimoto, F. Sano, T. Homma, J. Oda, M. Nagashima, M. Kii: Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost, Energy Policy. 38(7), 3384-3393 (2010)

2) RITE: 平成 23 年度 ALPS 成果報告書 (2012)

3) EPA: Global Anthropogenic Emissions of Non-CO_2 Greenhouse Gases: 1990-2020. U.S. Environmental Protection Agency (2006) https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/2000ZL5G.PDF?Dockey=2000ZL5G.PDF,

4) EPA: Global Non-CO_2 Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation Potential: 2015-2050. U.S. Environmental Protection Agency (2019) https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-09/documents/nonco2_methodology_report.pdf, (アクセス日 2021.3.1).
5) EPA: Global Mitigation of Non-CO_2 Greenhouse Gases: 2010 – 2030. U.S. Environmental Protection Agency (2013) https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/mac_report_2013.pdf

5.8 地球温暖化対策と土地利用・食料アクセスに関する分析

5.8.1 はじめに

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 と見積もられている [2)]。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、非常に高い目標であり、その達成に向けては、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 負排出技術が検討されている。CO_2 負排出技術の中でも、これまでのシナリオ分析で主に注目されたのが、バイオマスのエネルギー利用と CCS（Carbon Capture and Storage）を組み合わせた（BECCS）や、植林による森林炭素固定（AR）等、植物の炭素吸収能力を活用しながら CO_2 排出量を正味負にする技術オプション、いわゆる biomass-based NETs（Negative Emission Technologies）である。これらは、比較的安価で大きなポテンシャルがあるとされ、2℃や 1.5℃目標相当のシナリオ分析で、多く見積もられている [3)]。但し、1.5℃目標相当のシナリオでは、2010 年以降 2050 年までにエネルギー作物栽培地を 10～700 million ha 増大させ、また、特段の気候変動緩和制約が無い場合に▲200 million ha と推計される森林面積を＋950 million ha に転じさせる、これらに伴い牧草地は▲50～1100 million ha といった大幅な土地利用変化が報告され [3)]、食料供給や生態系への影響、土地利用に関する制度、社会の受容性等が課題になると考えられている [4),5)]。（参考までに 2010 年のエネルギー作物栽培地、森林、牧草地の面積は、それぞれ 0.01、3700～4200、3000～3500 million ha。）

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、平和的社会に向けての諸目標が掲げられた [6)]。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℃目標の達成に求められる土地利用変化や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 [7)-12)] 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。特に21世紀前半～中頃に、未だ食料アクセスに乏しいと推計される南西部アフリカ等において、無視し難い影響を及ぼす可能性が示唆された。なお、FAIの悪化を招く主な要因は、緩和策実施によるGDPロスと、biomass-based NETs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。

ところで、DNE21+モデルは、今年度も各種技術のモデル化を行った（5.1節）。NETsについては、これまでのBECCS、植林に加え、DAC（DACCS）のモデル化を行い、これらNETs間の競合も考慮して分析を実施した。DACを考慮したことにより、これまでBECCSや植林の大規模導入に伴って示唆されていた食料アクセスとのトレードオフの関係にも影響を及ぼしうる。そこで、本節では、2℃、1.5℃シナリオについて、DACを考慮したことによる、土地利用・食料アクセス評価への影響を分析、整理した。

5.8.2 食料アクセス指標

食料の安定的供給に関する指標としては、食料価格の変動指数[13]、急性食料不安人口[14]、栄養不足人口比率[15]等、複数提案されている。このうち、例えば食料価格変動や急性食料不安人口は短期的変化の把握に利用されるのに対し、「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」で定義される栄養不足人比率（Prevalence of Undernourishment in the total population: PoU）は、年平均値を基に評価され、経年分析[15),16)]や、将来のシナリオ分析[17)]に利用されている。

本分析では、複数の気候変動緩和シナリオへの適用性と、RITE各種モデル分析との整合性を考慮し、食料アクセス指標（Food Access Indicator: FAI）を用いる。これは「GDPに占める食料消費額割合」で定義される[7),8)]。概念的には、エンゲル係数（家庭の消費支出に占める食費の比率）に似ており、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。

参考まで図 5.8.2-1 に、本分析による2000年のFAIと、FAOによる2005年のPoUの値[16)]を示す。時点の違いに加え、PoUは数値が掲載された国の値から地域平均値を算出しており、厳密な比較は出来ないが、カンボジア・ラオス等、バングラデシュ等、南西部アフリカのようにFAIが高い地域では、栄養不足人口比率PoUも概ね高く、どちらの指標でも食料アクセスが脆弱と評価されていることが分かる。なお、PoUに全人口を乗じて算出される2005年の栄養不足人口（Number of undernourished people: NoU）の世界合計値について、FAOの2019年レポートでは9.4億人（PoU=14.4%）[15)]であったが、2020年レポートでは8.2億人（PoU=12.5%）[16)]に下方修正された。その差の大半は中国で計上され、原因として人口、食料供給量、食料消費の格差に関するデータの修正があげられている[16)]。このように、食料アクセス指標には、その多様性に加えデータの精度に起因する不確実性が存在する。

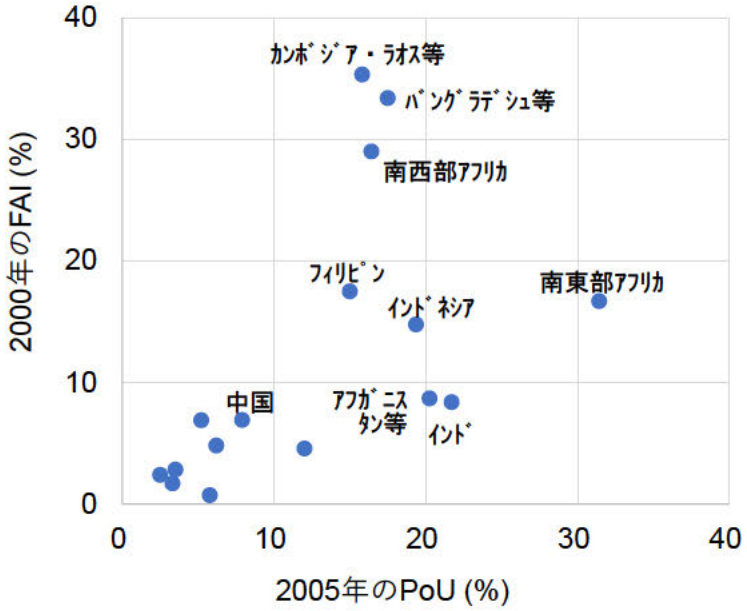


図 5.8.2-1　2000 年の FAI（本分析）と 2005 年の PoU[16)]の比較

5.8.3　分析方法

(1) 分析の枠組み

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、農業土地利用等との整合性を考慮するため、複数のモデルやモジュールを用いる。このうち、土地利用に関する分析は、GLaW (Grid-based model for agricultural Land-use and Water resource assessment)モデル[18), 19)]と DNE21+ (Dynamic New Earth 21+)モデル[20), 21)]で行う（図 5.8.3-1）。

GLaW モデルでは、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。ここで食用作物には、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。

一方、DNE21+モデルでは、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。技術オプションとして BECCS、植林も含んでおり、上述の潜在地のうち、エネルギー作物生産や植林に利用する土地面積も同時に算出する。

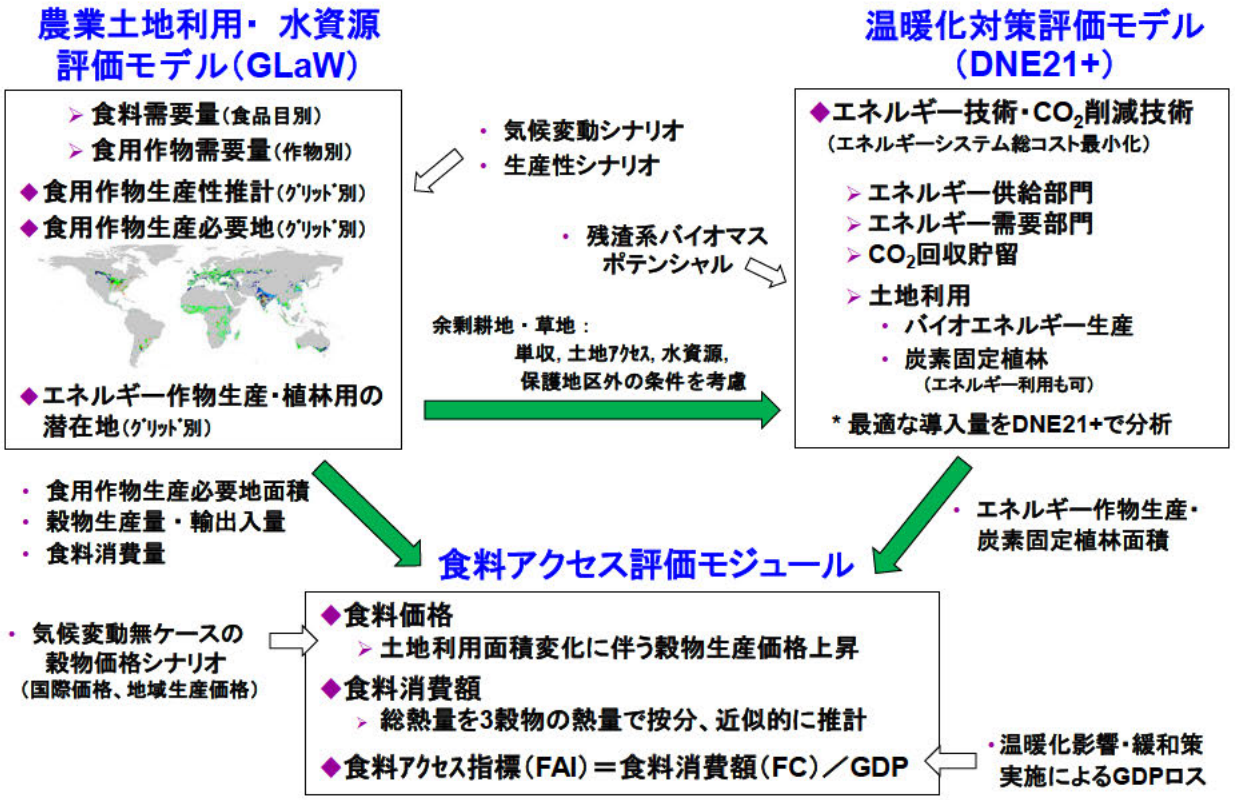


図 5.8.3-1 分析の枠組み

食料アクセス評価モジュール [8]では、世界 32 地域毎に食料消費額（FC）とそれを GDP で除した FAI を算出する。このうち、食料消費額は(5.8.3-1)式に示すように、地域内生産品の消費量（D）、地域生産価格（Dp）、輸入品の消費量（I）、国際価格（Ip）より算出する。(5.8.3-1)式の Σ は食品目の和を意味する。

$$FC = \sum (D \cdot Dp + I \cdot Ip) \qquad (5.8.3\text{-}1)$$

ここで、地域内生産品の消費量（D）と輸入品の消費量（I）は GLaW モデルの出力値を用いる。価格は、まず温暖化無（No Climate Change: NCC）ケースのシナリオを設定する。図 5.8.3-2 は、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国際価格（Ip）シナリオである。地域毎の生産価格（Dp）シナリオは、2000 年の実績値 [23]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。NCC 以外のケースについては、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、生産価格上昇率(PR)を (5.8.3-2)式より推計する。

$$PR = a \cdot (ER - ER_{NCC})/ER_{NCC} \qquad (5.8.3\text{-}2)$$

ここで、ER は各地域の拡張余地割合（ER = 1－総作付面積/潜在的耕地面積）を意味する。係数 a は、1990-2005 年の拡張余地割合と小麦の生産価格の関係から推計した値で、－0.39 [8]、を用いた。このように、NCC ケースの拡張余地割合(ER_{NCC})が小さい地域程、

拡張余地割合の単位減少当たり生産価格上昇率が大きく算定される仕組みになっている。NCC 以外のケースの国際価格は、各地域の生産価格と国際市場シェアに基づき算定する。

なお、簡便のため、価格推計は主要三穀物（小麦、米、トウモロコシ）に限る。食料全体の消費額は、食料の総供給熱量をこれら三穀物の供給熱量の割合で按分した量と、上述の価格から近似的に算出する。（参考まで、2000 年統計 [23]に基づくと、これら三穀物で世界の食料総供給熱量の約 50%を占める。）

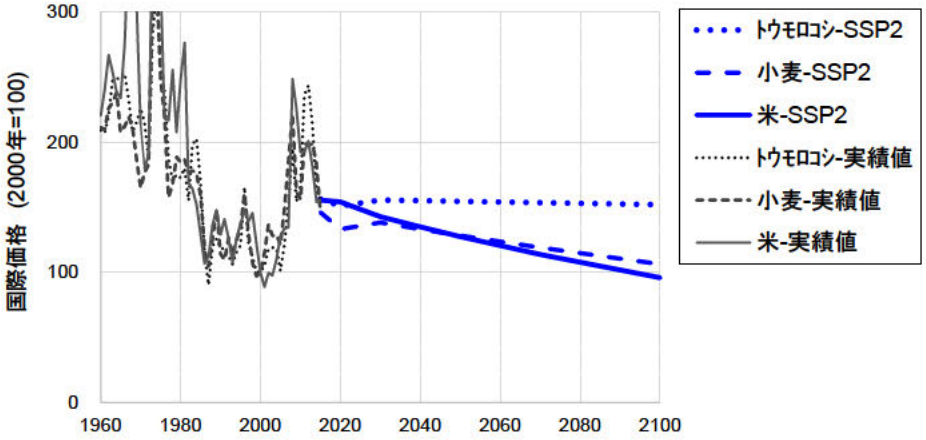


図 5.8.3-2　温暖化無しケースにおける三穀物の国際価格 [22]

GDP は、NCC ケースについてはシナリオとして与える（本節(2)項参照）。NCC 以外のケースについては、温暖化影響によるロス分と緩和策実施によるロス分を考慮する。このうち、温暖化影響によるロス分は全球平均気温上昇に対するダメージ関数 [24]に基づき算定する。緩和策実施によるロス分は DNE21＋モデルで算出されたエネルギーシステムコストの増分、つまり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 [25]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（図 5.8.3-3 参照）を参考にしたものである。 [4]

[4] 本分析では、表 5.8.3-1 で後述する 2℃-DAC 無ケースの世界平均 EC（%, GDP 比）と、図 5.8.3-3 の 430-480ppm シナリオ（2℃安定化相当シナリオ）の世界平均 GDP ロスの median（%, GDP 比）より、換算係数 k を時点毎に想定した。

世界平均 GDP ロス median $= k \cdot$ 世界平均 EC

なお、DNE21+モデルと図 5.8.3-3 のシナリオ分析モデル群とでは、モデル構造やパラメータ想定の違いがある。より厳密には、各種想定と整合的な経済モデルによる分析が望まれる。

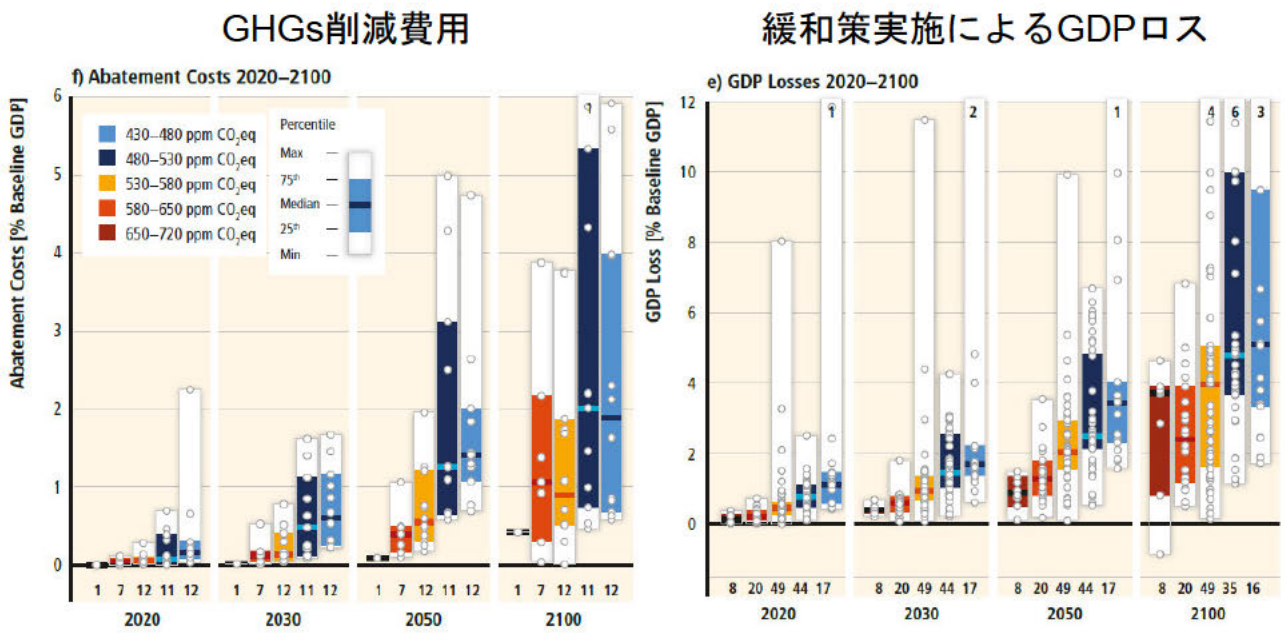


図 5.8.3-3 各種シナリオ分析の GHG 削減費用と緩和策実施による GDP ロス（世界平均値）[25)]

(2) シナリオ想定

社会経済シナリオには、共有社会経済経路（SSPs: Shared Socio-Economic Pathways）[25)]のうち、分析で最も取り上げられることが多い SSP2 シナリオを用いた。図 5.8.3-4 に、RITE で想定した世界の人口、一人当たり GDP、GDP を示す。

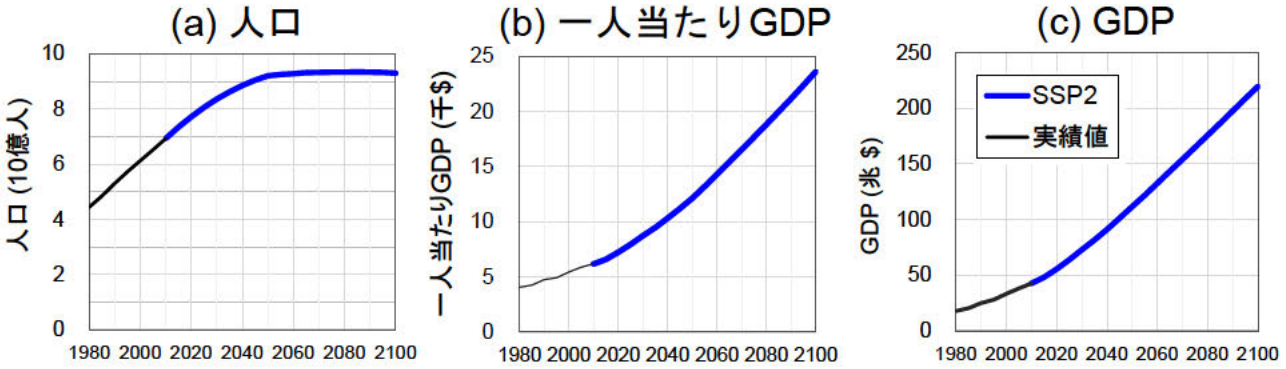


図 5.8.3-4 世界の人口、一人当たり GDP、GDP シナリオ

食料需要は、主に発展途上地域で人口増加と経済発展に伴う一人当たり需要の増大により 2050 年頃まで増大するが、その後は人口、一人当たり需要共ともに伸びが鈍化するため、ほぼ安定する（図 5.8.3-5(a)）。食料消費額（図 5.8.3-5(b)）も 2050 年頃まで増大するが、小麦や米の価格が次第に低減するという想定（図 5.8.3-2）を反映し、2100 年に向けて減少に転じる。

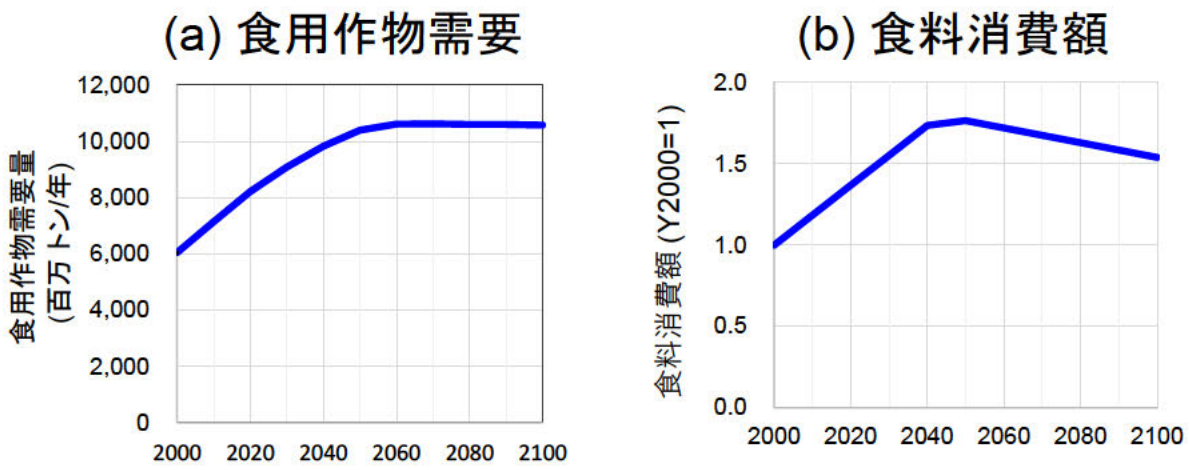


図 5.8.3-5 食用作物需要、食料消費額シナリオ

(3) ケース設定

分析ケースとして表 5.8.3-1 の 6 つのケースを設定した。このうち、Reference ケースは特段の気候変動緩和策が無いケースで、2100 年の産業革命前比全球平均気温は図 5.8.3-6 に示すように約 4℃まで上昇する。2℃、1.5℃ケースは、気候変動緩和策として DAC オプションが有るケースと無いケースを想定した。緩和策分析の詳細を 5.3 節に述べた通り、1.5℃の DAC 無ケースについては解を見出せなかったことより省略している。代わりに DAC の技術進展が低いケースと高いケースを設定した。

表 5.8.3-1 分析ケース

ケース名	説明
NCC	気候のみ 2000 年のまま。比較のための仮想的ケース。
Reference	特段の気候変動緩和策無。
2℃-DAC 無	>66%で 2℃未満・DAC 無
2℃-DAC 有(高位技術進展)	>66%で 2℃未満・DAC 有(高位技術進展)
1.5℃-DAC 有(低位技術進展)	>66%（気温オーバーシュート有）で 2100 年 1.5℃未満・DAC 有(低位技術進展)
1.5℃-DAC 有(高位技術進展)	>66%（気温オーバーシュート有）で 2100 年 1.5℃未満・DAC 有(高位技術進展)

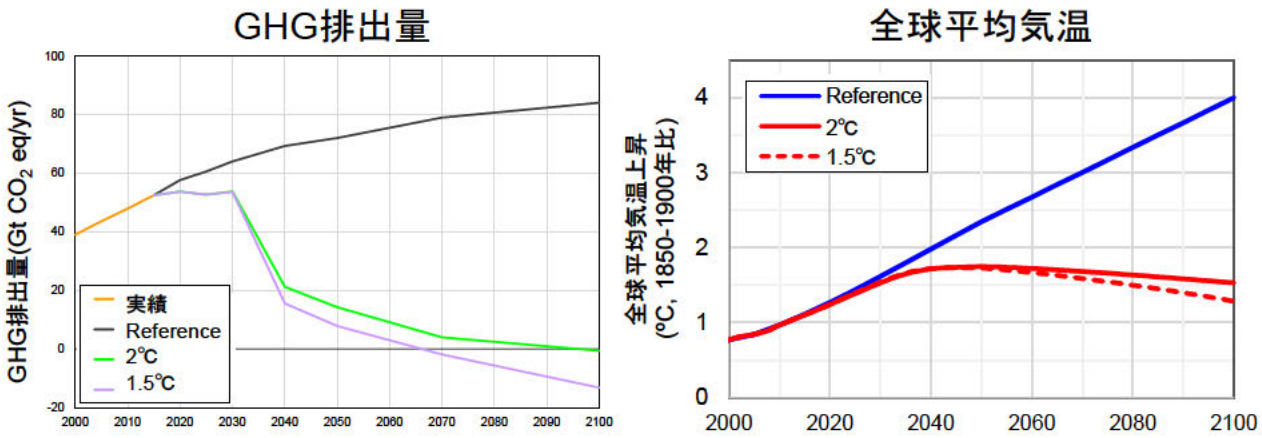


図 5.8.3-6 GHG 排出量、全球平均気温上昇

5.8.4 分析結果

(1) 土地利用

図 5.8.4-1 に世界の食用作物、エネルギー作物、炭素固定植林の面積を示す。図 5.8.4-1(d)に示すように、これらの総面積は気候変動緩和ケースの 2030～2050 年に、大幅に増大する。特に 2℃-DAC 無、1.5℃-DAC 有（低位技術進展）ケースでは、この 20 年間に約 800 million ha 増大すると分析された。一方、2℃-DAC 有（高位技術進展） ケース、1.5℃-DAC 有（高位技術進展）ケースでは、この期間の増大は 550～600 million ha に留まる。この違いは、主として DAC の技術進展が高位の場合に、エネルギー作物用の土地利用が減ることによる（図 5.8.4-1(b, c)）。なお、食用作物の土地面積はケースに依らず大差がない。この理由として、食料需要量は全ケースで同じと想定したことや本分析では CO_2 施肥効果を考慮しており食用作物への温暖化影響が比較的小さく分析されることがあげられる。

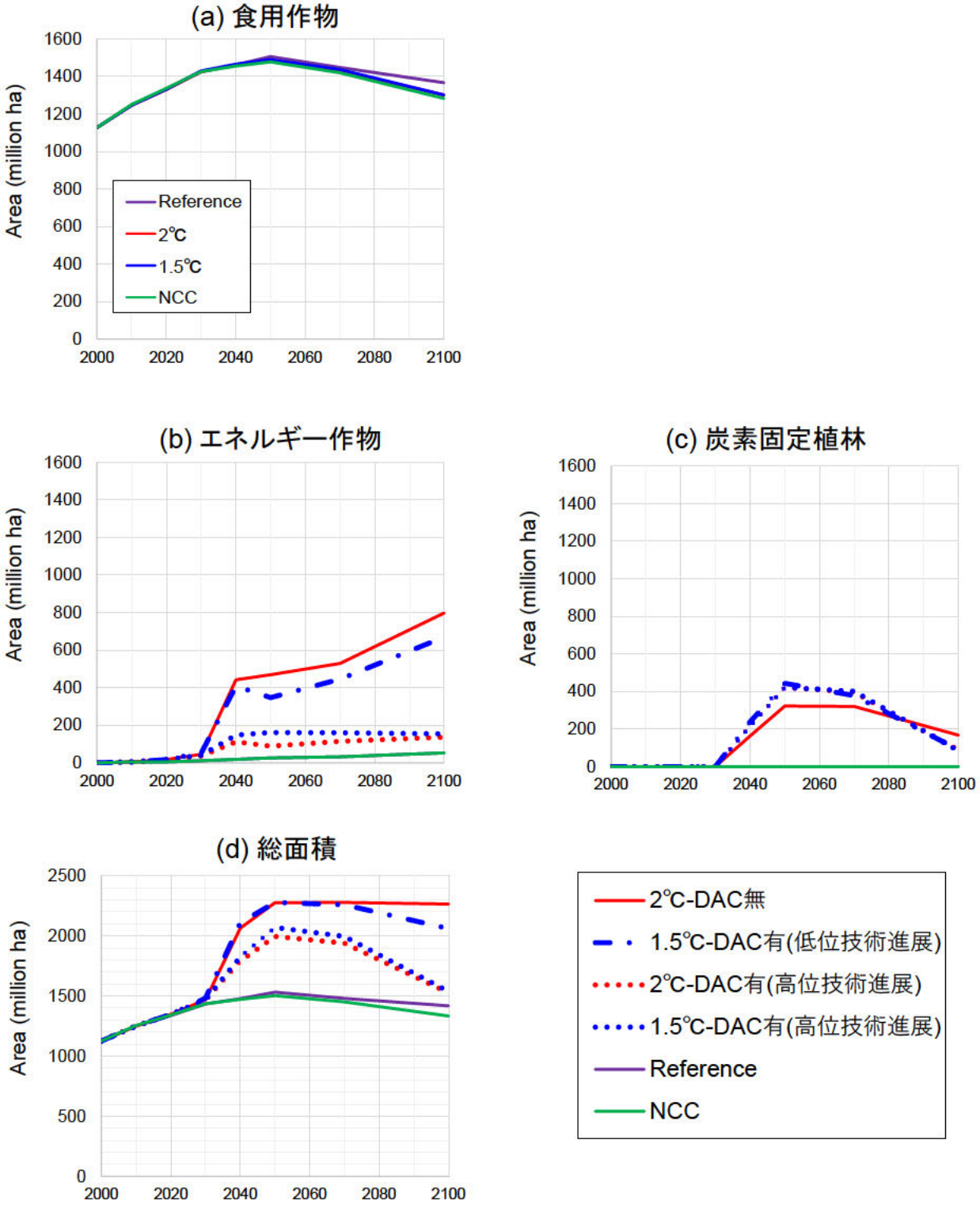


図 5.8.4-1 世界の土地利用面積

図 5.8.4-2 には、2000 年の FAI が比較的高く、食料アクセスが脆弱と推計された（図 5.8.2-1 参照）地域毎に、食用作物・エネルギー作物・炭素固定植林の総面積を示す。南西部アフリカ、南東部アフリカ、カンボジア・ラオス等、インドネシアで気候変動

緩和ケースの 2030～2050 年に土地利用面積が顕著に増大する。但し、南西部アフリカ、インドネシアでは、DAC の技術進展が高位の場合に、土地利用面積の増大が緩和されると分析された。一方、カンボジア・ラオス等では DAC の技術進展が高位な場合にも、エネルギー作物や炭素固定植林への土地利用面積が大幅には減らない。これらの地域では、エネルギー作物生産や炭素固定植林は相対的に安価な GHG 排出削減策と評価されていることが伺える。

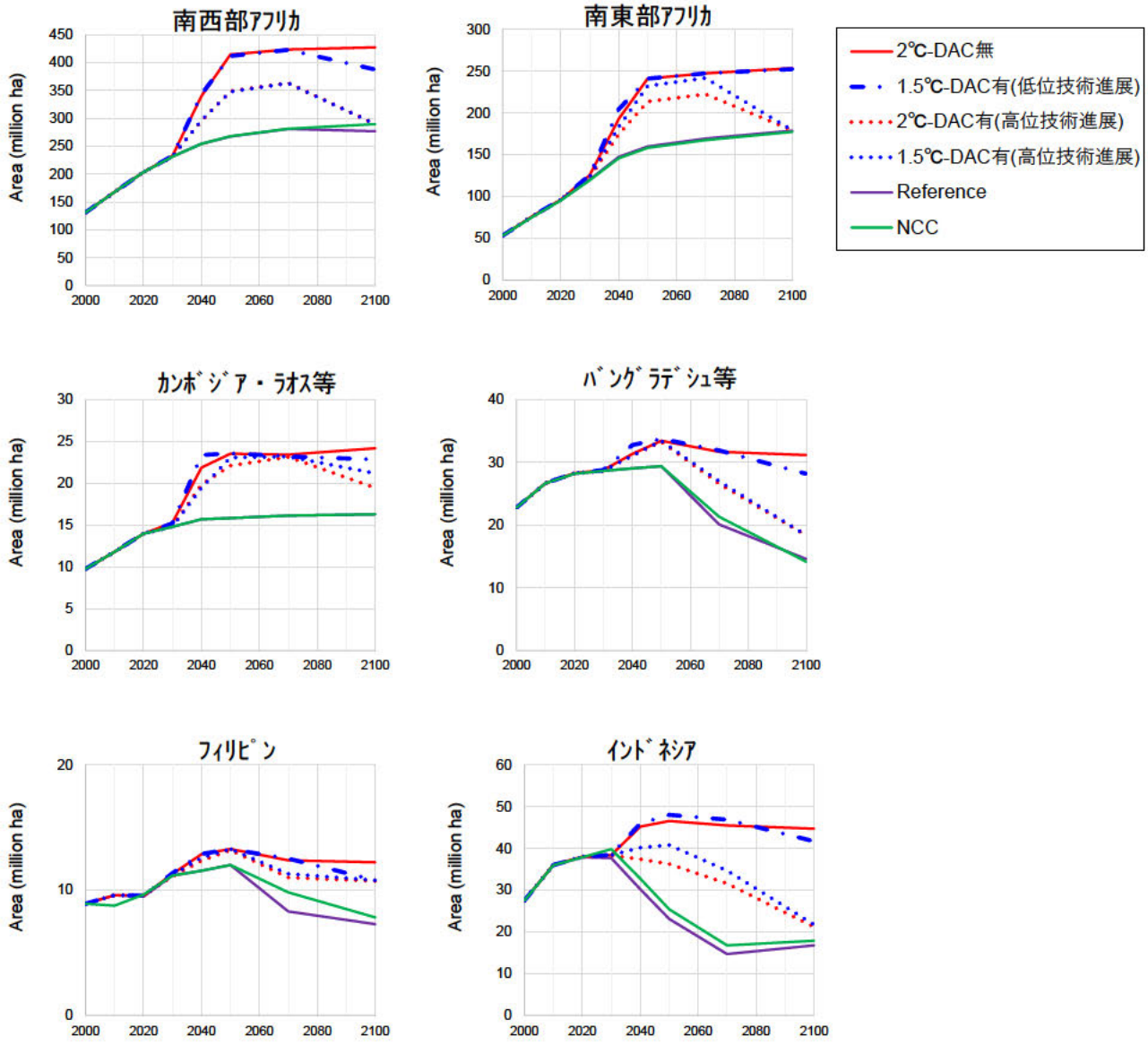


図 5.8.4-2 主要地域の土地利用面積
（食用作物、エネルギー作物、炭素固定植林の総面積）

(2) 穀物価格と食料消費額

図 5.8.4-3 に、南西部アフリカ、南東部アフリカ、そして参考までに米国と日本の穀物生産価格を示す。図中 NCC ケースの価格はシナリオとして想定した値であり、

Reference ケースと気候変動緩和ケースの価格は 5.8.3 節(1)項で述べたように、土地利用面積変化に伴う地代変化（NCC ケース比）を考慮して推計した価格である。右端の相対価格の図から分かるように、南西部アフリカでは 2050 年の穀物価格が NCC ケースに比べ 2℃-DAC 無ケースや 1.5℃-DAC 有(低位技術進展)ケースでは約 40%、2℃-DAC (高有位技術進展) ケースや 1.5℃-DAC 有(高位技術進展)ケースでは約 20%上昇すると分析されている。

これに対し、米国や日本は、穀物生産価格の上昇は比較的小さい。米国や日本では、エネルギー作物生産や植林への土地利用は相対的に高価と評価され、南西部アフリカや南東部アフリカ程、急激な土地利用拡大による圧迫が生じにくいと分析されている。

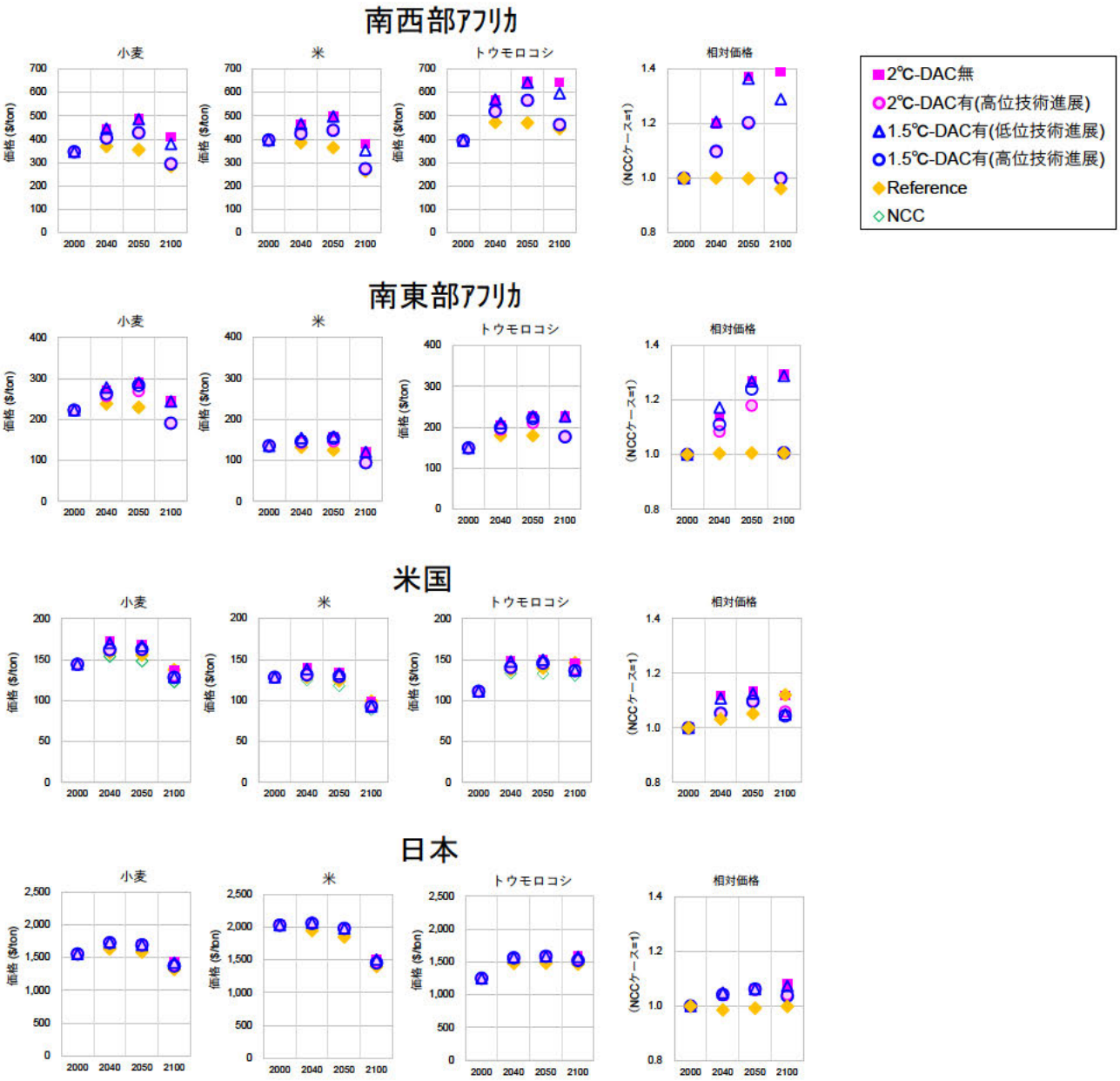


図 5.8.4-3 穀物の地域生産価格

図 5.8.4-4 に、各地域の生産価格と国際市場シェア考慮して推計した国際価格を示す。穀物や時点によるが、2℃、1.5℃ケースでは、NCC ケースに比べ国際価格が上昇する。特に、2℃-DAC 無ケースや 1.5℃-DAC 有(低位技術進展)ケースでは国際価格の上昇率が＋1～23%で、2℃-DAC 有(高位技術進展)ケースや 1.5℃-DAC 有(高位技術進展)ケースの＋3～15%より大きい傾向が見られる。

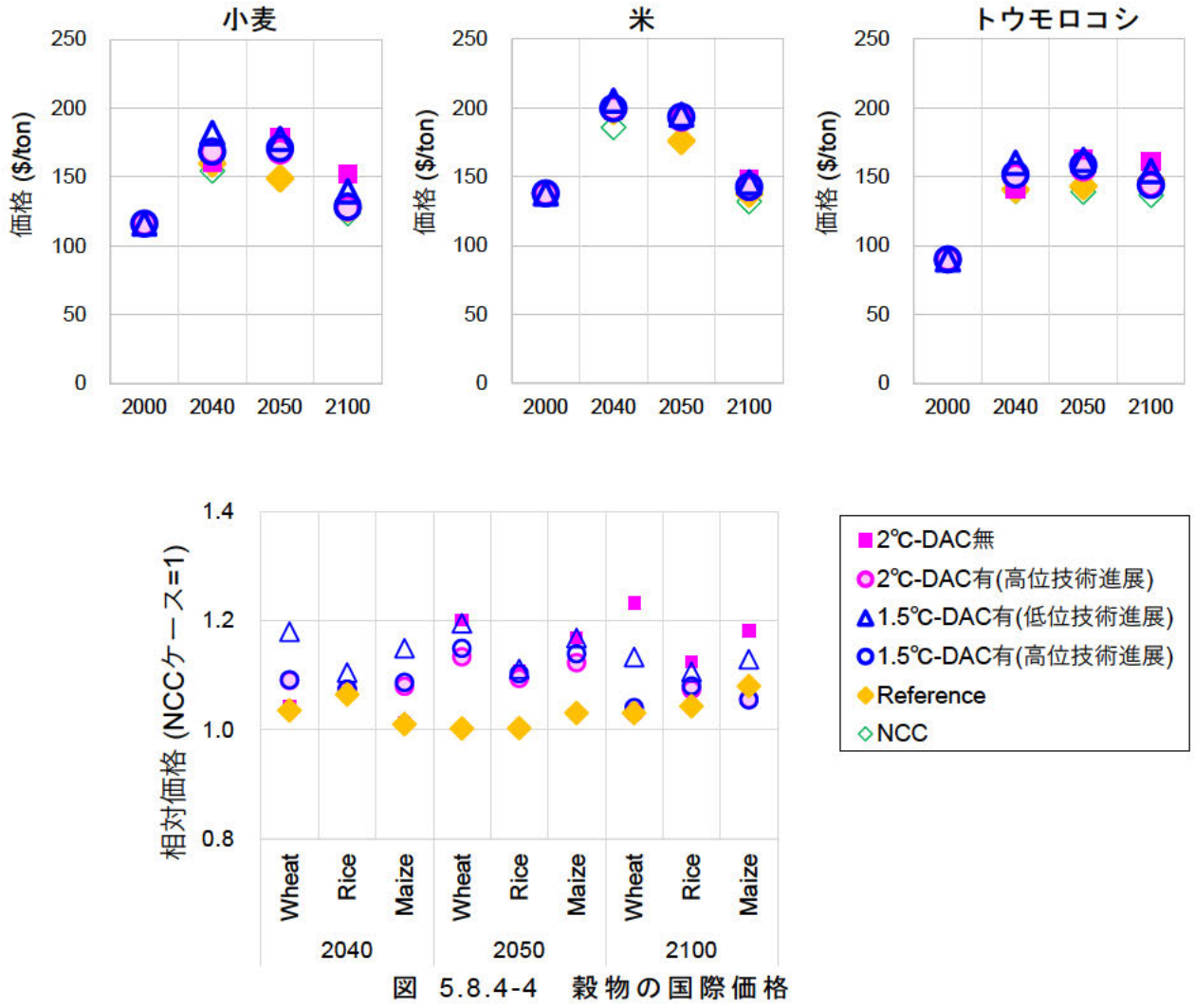


図 5.8.4-4 穀物の国際価格

参考まで、2050 年の世界平均食料価格について複数のモデル分析結果[17)]を図 5.8.4-5 に示す。これによると、例えば All crops の価格は気候変動無ケースに比べ RCP26 ケース（本分析の 2℃ケース相当）で数%～50%増大すると分析されている。モデルによる違いは大きく、前述した本分析の値は、これらモデルの推計幅に概ね含まれている。

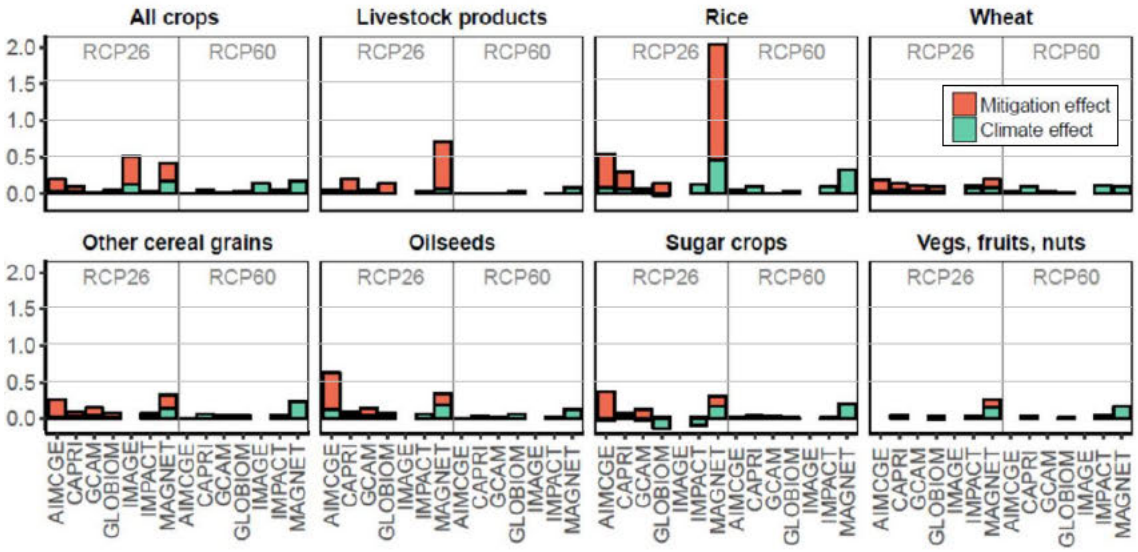


図 5.8.4-5 2050 年の世界平均食料価格変化

Baseline（気候が現在のまま）の価格を 1 として、それからの変化分。

出典 17)の Figure S12

図 5.8.4-6 には、主要地域の食料消費額推計値を示す。本節(1)項でも述べたように、本分析では、食料需要量はケースによって変わらないとしている。つまり、図中、ケース間の食料消費額の違いは、価格の違いを反映したものである。

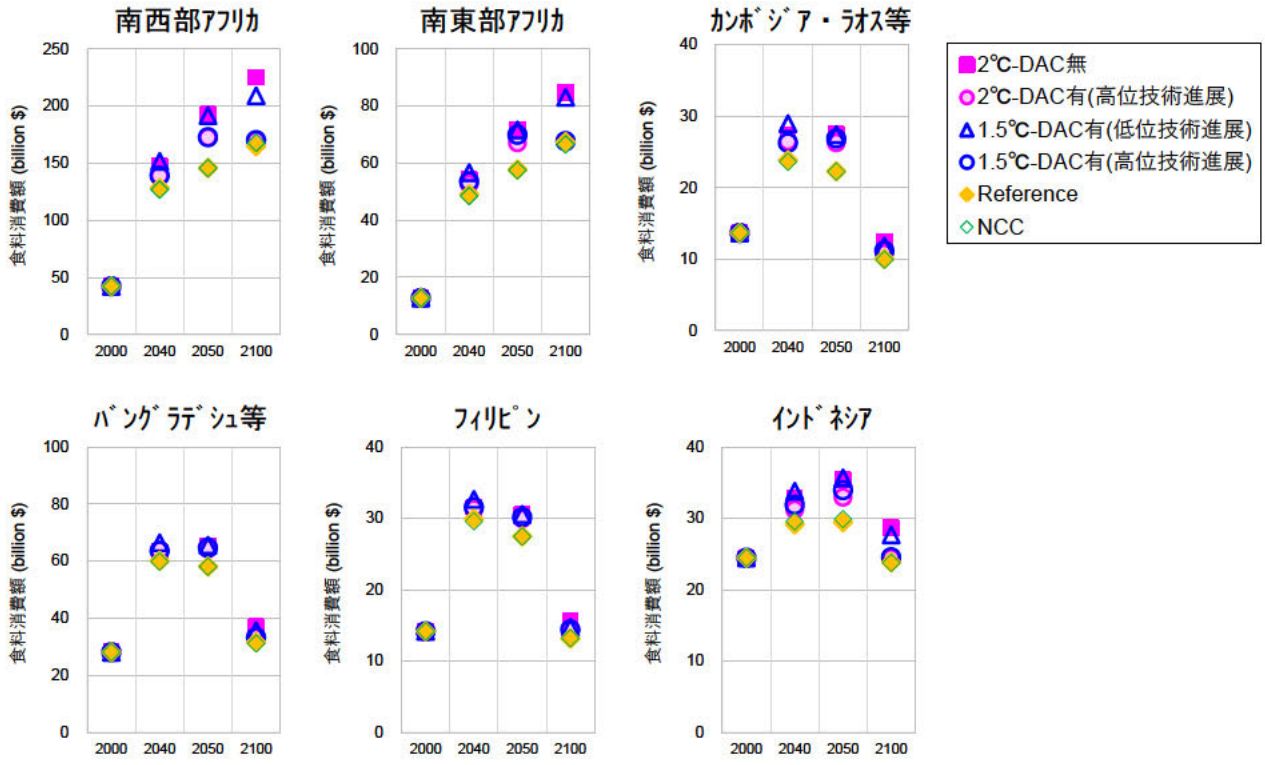


図 5.8.4-6 主要地域の食料消費額

(3) GDP ロス

表 5.8.4-1 に温暖化影響による GDP ロス、表 5.8.4-2 には緩和策実施によるに GDP ロスの推計値を示す。全体的に、温暖化影響による GDP ロスの値は、緩和策実施による GDP ロスの値に比べに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、2℃-DAC 無ケースに比べ 2℃-DAC 有（高位技術進展）ケースの方が、又 1.5℃-DAC 有（低位技術進展）ケースに比べ 1.5℃-DAC 有（高位技術進展）ケースの方が、GDP ロスが小さい。つまり、DAC の技術進展が高位の場合に、エネルギーシステムの CO_2 削減費用が抑制され、緩和策 GDP ロスが抑制される結果となっている。

表 5.8.4-1 温暖化影響による GDP ロス推定値（NCC 比, %）

分析ケース・年 / 地域	2040年			2050年			2100年		
	Reference	2℃	1.5℃	Reference	2℃	1.5℃	Reference	2℃	1.5℃
米国	0 5	0.4	0.4	0.8	0.4	0.4	2.2	0.3	0.2
カナダ	0.6	0.4	0.4	0.8	0.5	0.5	2.5	0.4	0.2
西欧	0.6	0.5	0.5	0.9	0.5	0.5	2.5	0.4	0.3
日本	0.6	0.5	0.5	0.9	0.5	0.5	2.6	0.4	0.3
豪・NZ	0.6	0.4	0.4	0.8	0.5	0.5	2.5	0.4	0.2
東欧・旧ソ連	0.4	0.3	0.3	0.6	0.3	0.3	1.8	0.3	0.2
中国	0.6	0.5	0.5	0.9	0.5	0.5	2.3	0.4	0.3
インドネシア	1.0	0.8	0.8	1.3	0.8	0.8	3.4	0.7	0.5
インド	1.5	1.2	1.2	1.9	1.3	1.2	4.4	1 0	0.8
その他アジア	1.0	0.8	0.8	1 3	0.8	0.8	3.4	0.7	0.5
中東・北アフリカ	1.2	0.9	0.9	1 5	1.0	0.9	3.6	0.8	0.6
サブサハラアフリカ	1.4	1.1	1.1	1 9	1.2	1.2	4.5	1.0	0.7
ブラジル	0.6	0.5	0.5	0 9	0.5	0.5	2.4	0.4	0.3
その他中南米	0.6	0.5	0.5	0.9	0.5	0.5	2.4	0.4	0.3
世界	0.7	0.6	0.6	1.0	0.6	0.6	2.7	0.5	0.3

表 5.8.4-2 緩和策実施による GDP ロス推定値（NCC 比, %）

分析ケース・年 / 地域	2040年				2050年				2100年			
	2℃		1.5℃		2℃		1.5℃		2℃		1 5℃	
	DAC有（高位技術進展）	DAC無	DAC有（高位技術進展）	DAC有（低位技術進展）	DAC有（高位技術進展）	DAC無	DAC有（高位技術進展）	DAC有（低位技術進展）	DAC有（高位技術進展）	DAC無	DAC有（高位技術進展）	DAC有（低位技術進展）
Nor h America	1.3	1.4	1.7	2.2	1.6	1.4	1.9	3.3	1.8	2.0	1.9	4 0
Western Europe	1.0	1.4	1.3	1.7	1.0	2.1	1.4	2.2	0.8	2.9	1.2	2.4
Japan	0.3	0.6	0.4	0.6	0.2	1 0	0.4	0.6	0.4	2.3	0.4	1 0
Oceania	5.8	4 5	6.8	15.5	10.6	4.8	12.1	28.1	11.8	2.9	21.5	41.7
China	1.8	2 9	2.3	2.9	1.0	3.2	1.5	2.1	1.6	5.8	2.0	2 8
Other Asia	1.8	3 3	2.4	3.3	1.3	4.5	1.9	3.0	1 2	4.6	1.5	2.1
M.East & N Africa	2.5	2 9	4.4	4.3	3.0	5.1	6.8	6.9	3 3	4.2	3.8	6.7
S.S.Africa	5.4	10.5	6.7	12.0	6.7	13 2	9.2	14.7	3 8	11 2	5.0	9 0
L.America	3.0	5.4	4.0	6.0	3.8	6.7	5.2	6.6	6 2	11.1	6.6	10.8
F.USSR & E.Europe	8.8	8 5	10.9	11.1	14.2	11 9	16.9	13.0	10.2	14.7	17.9	10.3
World	1.9	2.6	2.5	3.3	2.1	3.5	3.0	4.1	2.4	5.2	3.1	4 8

(4) 食料アクセス

図 5.8.4-7 には、2000 年の FAI が比較的高いと分析された地域の FAI を示す。どの地域も、次第に FAI は小さくなり、食料アクセスの脆弱性は改善すると推計されている。これは、食料消費額の増大を上回る GDP の増大を想定したことによる。但し、FAI の低減具合は地域によって異なる。フィリピンやインドネシアでは 2040 年には FAI がほぼ 5%以下まで低減するのに対し、南西部アフリカ、南東部アフリカ、カンボジア・ラオス等では 2040 年、2050 年の FAI がまだ 10%を上回り食料アクセスの脆弱性が残ると推計された。

気候変動緩和ケースでは、NCC ケースや Reference ケースに比べ FAI がさらに上昇する。すなわち将来の経済発展に伴って期待される FAI 低減が、気温目標に向けた取り組みによって鈍化するという、トレードオフの関係が示されている。なお、南西部アフリカ等一部の地域では、DAC が無い場合に比べ DAC の技術進展が高位な場合に、上述のトレードオフがわずかながら緩和される。その程度と要因を図 5.8.4-8 に示す。

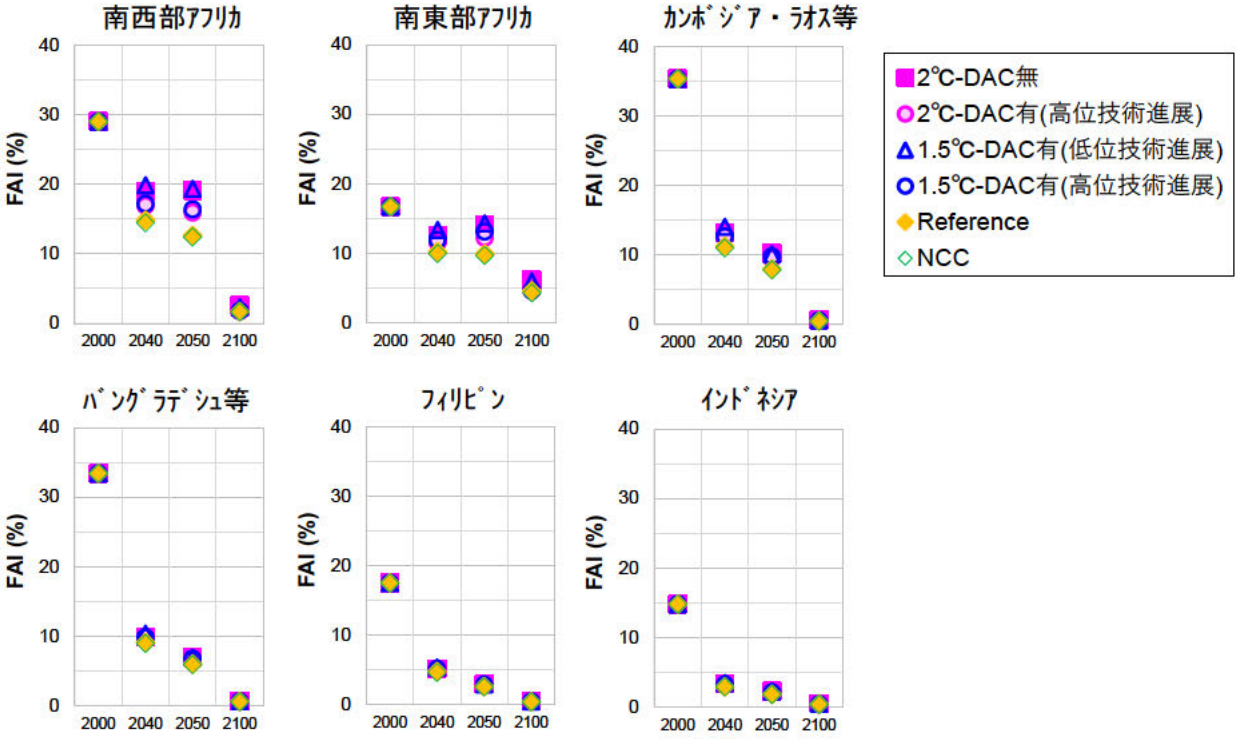


図 5.8.4-7 主要地域の FAI

図 5.8.4-8 には、主要地域の 2050 年の FAI について、NCC ケースに対する変化率と要因を示す。以下のことが読み取れる。

- 南西部アフリカについて、
  - Reference ケースでは温暖化影響による GDP ロスのため、NCC ケースに比べ FAI が約 2%上昇する。気候変動緩和ケースでは、さらに緩和策実施による GDP ロスと、エネルギー作物生産や炭素固定植林の土地利用面積増大に伴う食料消費額増大が FAI 上昇に寄与する。例えば 2℃-DAC 無ケース、1.5℃-DAC 有(低位技術進展)ケースの FAI は NCC ケース比＋43～44%まで増大する。
  - 気候変動緩和ケースの中でも、2℃-DAC 有(高位技術進展)ケースや 1.5℃-DAC 有(高位技術進展)ケースは、2℃-DAC 無ケースや 1.5℃-DAC 有(低位技術進展)ケースに比べ、FAI の上昇率は小さく＋25～28%に留まる。DAC の技術進展が高位の場合は、本節(1)(2)項で述べたようにエネルギー作物生産の土地利用面積増大が抑制され食料消費額増大が抑制されること、そして(3)項で述べたように緩和策実施による GDP ロスが抑制されることによる。
- 南東部アフリカについて、
  - 南西部アフリカと、概ね同様の傾向が分析されている。
- カンボジア・ラオス等について、

- Referenceケースに比べ、気候変動緩和ケースのFAIが大幅に増大する点は、南西部アフリカや南東部アフリカと同様である。
- ややや異なる点として、2℃-DAC無ケースと2℃-DAC有(高位技術進展)ケースの差や、1.5℃-DAC有(低位技術進展)ケースと1.5℃-DAC有(高位技術進展)ケースの差は、南西部アフリカや南東部アフリカで分析された程大きくない。これは、図 5.8.4-2で示したように、これらの地域ではDACの技術進展が高い場合にも、エネルギー作物や炭素固定植林への土地利用面積があまり減らないことによる。さらに表 5.8.4-2に示したように、この地域では、緩和策実施によるGDPロスが、2℃-DAC無ケースでも4.5%と、南西部アフリカや南東部アフリカの13.2%に比べると一桁小さい、すなわちDACの有無に依らず緩和策実施による食料アクセスへの悪影響が比較的小さいことも関係している。

- バングラデシュ、フィリピン、インドネシアについて、
  - 図 5.8.4-7で示したように、これらの地域は2050年頃にはFAIが7%以下まで改善する。すなわち、それだけのGDP成長を見込んでいる。このため、緩和策実施によって、食料消費額増大やGDPロスが生じたとしてもその影響は比較的小さいと推計されている。
- なお、どの地域も温暖化影響によるGDPロスが、FAIに及ぼす影響は小さい。これは、2050年頃までは温暖化影響によるGDPロスは、緩和策実施によるGDPロスに比べると小さいと推計された（表 5.8.4-1）ことを反映している。
- また、どの地域も食用作物への温暖化悪影響による食料消費額増大が、FAIに及ぼす影響は小さい。理由として本分析ではCO_2施肥効果を考慮しており、温暖化による農作物単収への悪影響が小さいこと、また、温暖化による単収への影響は地域・作物によって異なる（温暖化の程度が小さい場合、作物・地域によっては良い影響と評価される場合もある）ことがあげられる。
- なお、極端な気象現象による各種部門への影響は十分に考慮できておらず、今後の課題である。

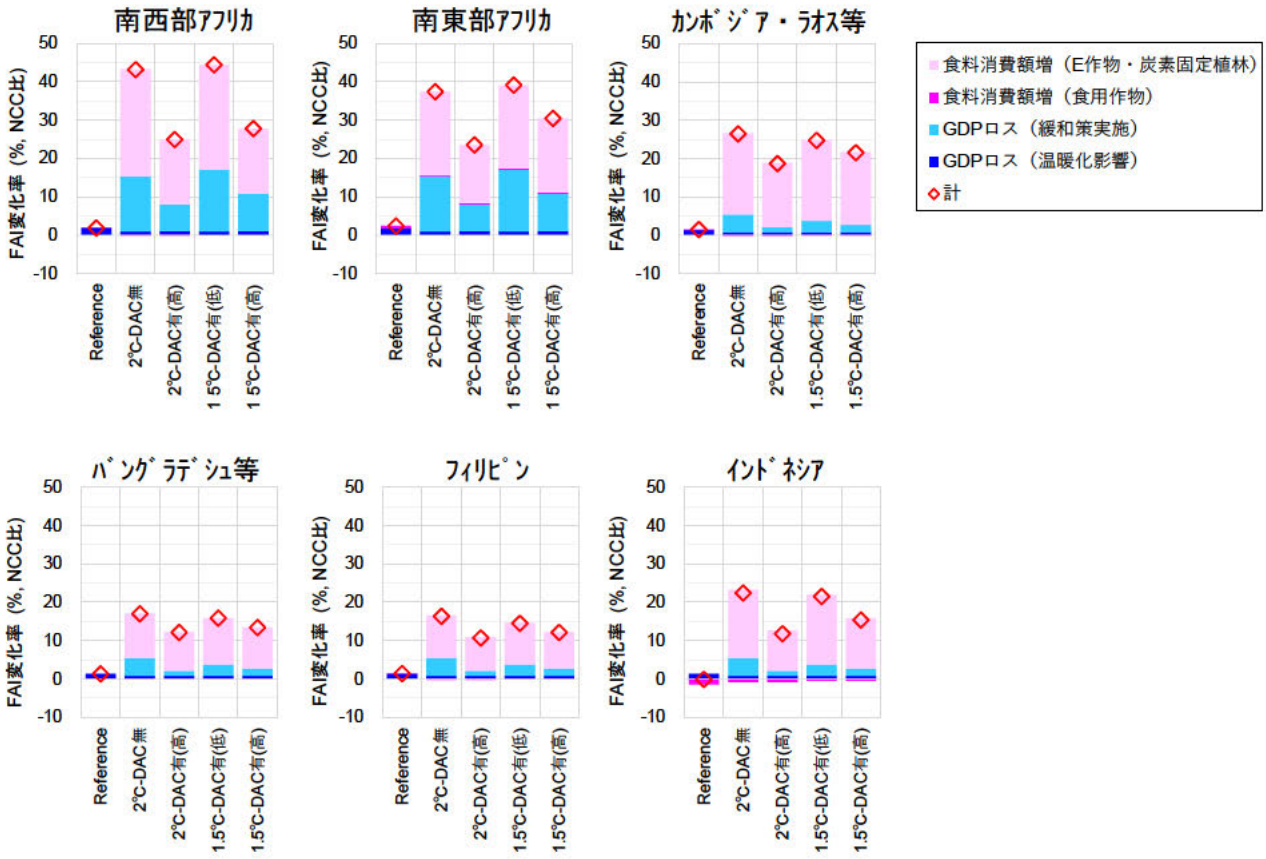


図 5.8.4-8 FAI 変化要因の内訳（2050 年）

* 各要因の寄与率は、対数差分にて算定。

5.8.5 まとめ

長期気温目標の達成に向け GHG 排出を今世紀後半に正味ゼロにするシナリオ下では、特段の気候変動緩和を行わないシナリオに比べ食料アクセス指標（FAI）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と分析される。特に今世紀中頃まで、未だ食料アクセスに乏しいと推計される南西部アフリカ等において、無視し難い影響を及ぼす可能性が示唆される。FAI の悪化を招く主な要因は、緩和策実施による GDP ロスと、エネルギー作物生産や炭素固定植林地の急速な拡大に伴う土地代上昇が食料の価格上昇を介し食料消費額増大をまねくことである。

DAC は、特に技術進展が高位の場合に、エネルギー作物生産用地の急速な拡大を抑制して食料価格の上昇を抑制すると同時に緩和策実施による GDP ロスも抑制し、上述した食料アクセスとのトレードオフ関係を緩和すると分析される。すなわち、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 GHG 排出正味ゼロ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。

但し、DAC のみでトレードオフ関係が全て解消されるわけではない。GHG 削減技術開発のさらなる促進、生活スタイルの変化に伴う GHG 排出削減余地等、多様なオプションの検討が引き続き必要である。

参考文献（第 5.8 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) Smith, P. et al.: Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions, Nature Climate Change, 6, 42–50 (2016)
5) Fuss, S. et al.: Betting on Negative Emissions, Nature Climatic Change, 4, 850–853 (2014)
6) UN; Sustainable Development Goals, https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300 (accessed 2019.10.10)
7) 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)
8) 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)
9) Akimoto, K. et al.; Consistent assessments of pathways toward sustainable development and climate stabilization, Natural Resources Forum, 32-4, 231–244 (2012)
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」、平成 29 年度報告書 (2018)
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」、平成 30 年度報告書 (2019)
12) 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)
13) 外務省: SDG グローバル指標 (SDG Indicators), https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/statistics/goal2.html (accessed 2021-2-1).
14) Food security information network; 2020 - Global Report on Food Crises (2020) https://www.wfp.org/publications/2020-global-report-food-crises?_ga=2.96371679.2144005297.1612141015-1080711787.1604980508.
15) FAO: The State of Food security and nutrition in the world (2019)
16) FAO: The State of Food security and nutrition in the world (2020)
17) Hasegawa, T. et al.: Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy, Nature Climate Change 8(8) (2018)
18) 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)
19) 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)
20) Akimoto, K. et al.: Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost. Energy Policy 38, 3384–3393 (2010)

21) 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)
22) World Bank; World Bank Commodity Price Data (The Pink Sheet), http://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets (accessed 2017.8.2)
23) FAO: Food and agriculture data, http://www.fao.org/faostat/en/#home (accessed 2017.11.28)
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., Riahi, K.et al.; The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century, Global Environmental Change, 42,(2017) 169–180.

5.9 温暖化緩和による大気汚染低減コベネフィット評価に関する調査

5.9.1 はじめに

大気汚染とは、大気中に排出された物質の量が自然の状態より増加し、人を含む生体系や物などに直接的・間接的影響を及ぼすこと定義される[1)]。大気汚染物質の発生源は、自然起源（火山排出物、森林火災、花粉の飛散、粉塵・黄砂、海塩粒子等）と人為起源（工場や発電所、自動車等化石燃料の燃焼による排出物、生産活動により生成するガスや粒子状物質）がある。このうち人為起源大気汚染物質は化石燃料燃焼由来のものが多いことより（図 5.9.1-1）、パリ協定下[3)]での GHG 排出削減（温暖化緩和）に向けたエネルギーシステムの転換は、大気汚染低減とシナジーの関係が期待されている。例えば、IPCC の第 5 次評価報告書では、大気質向上、エネルギーセキュリティ向上、温暖化緩和を統合した対策費用は、個別の対策費用の積み上げより小さいとしている[4)]。そのような状況を踏まえ RITE では、大気汚染物質の排出量と大気中濃度の評価モジュールを DNE21+モデルにリンク可能な形で開発し、大気汚染濃度低減と CO_2 排出削減の同時達成にコスト効率的なエネルギーシステムの分析を行ってきた[5),6),7)]。大気汚染物質としては、複数の汚染物質から構成される PM2.5 に着目し、直接生成の一次粒子（BC、OC）の他、SO_2、NO_x、VOC、NH_3 等が大気中で化学反応して生じる二次粒子を考慮している。

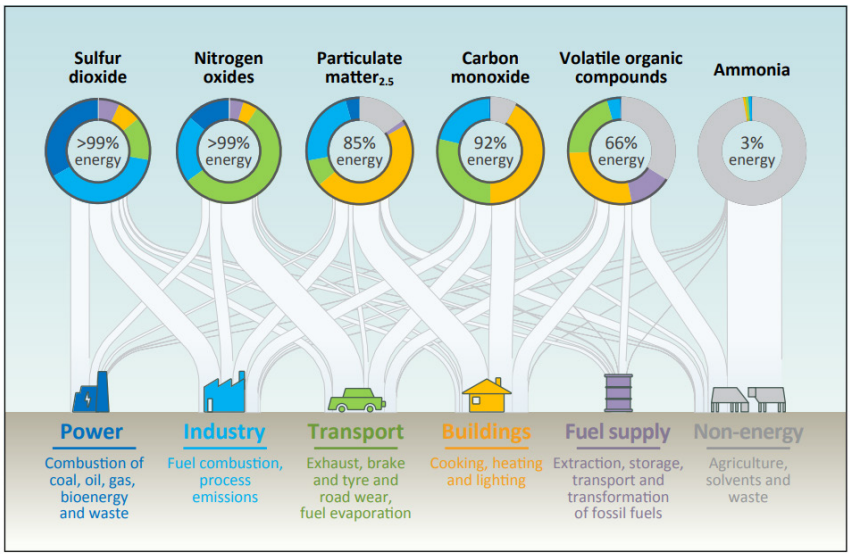


図 5.9.1-1 人為起源大気汚染物質の主な排出源 [2)]

なお、大気汚染による影響としては、経済発展が著しい新興国で PM2.5 による循環器・呼吸器の疾患・死亡が代表的で、国連の持続可能な開発目標では大気汚染による死亡の大幅な減少が掲げられている [13)]。ここで、温暖化緩和による大気汚染低減の効果とそれに必要な費用の評価は、新興国の温暖化緩和促進や国際的協調体制の強化に資すると期待される。エネルギーシステム転換によるコベネフィットの分析は、影響の金銭換算の不確実性もあり、かつては、米国の発電所に対する排出規制案のインパクト評価 [9)]等に限られたが、近年、世界全体を対象とした研究事例が少しずつ増えつつある。そこで、本節では、近年のモデル分析事例の中から、世界の GHG 排出削減費用と PM2.5 及びオゾン（NO_x、VOCs、CO が太陽光の下、化学反応により生成する）の低減によるコベネフィットを評価した文献を調査し、RITE における今後の温暖化緩和と大気汚染低減コベネフィット評価の課題を整理する。

5.9.2 GHG 排出削減費用と PM2.5・オゾン低減コベネフィットの分析例

(1) Markandya et al. (2018)[10)]

NDCs（nationally determined contributions）及び長期気温目標に合致する排出パスについて、GHG 排出の削減費用と PM2.5・オゾン低減による健康コベネフィットを地域毎に分析したもの。GHG 排出パスと GHG 排出削減費用は、統合評価モデル GCAM を用いて分析している。そのうち GHG 排出の結果を、大気質モデル TM5-FASST に与え PM2.5 濃度とオゾン混合比を、さらに WHO の疾病リスクデータを参考に健康影響（早期死亡と罹患）を算定している。健康影響の金銭換算には、統計的生命価値（value of statistical life: VSL）として、(5.9.2-1)式を用いている。社会経済シナリオは SSP2 である。

$$VSL_{c,t}=VSL_{OECD,2005}\times\left(\frac{Y_{c,2005}}{Y_{OECD,2005}}\right)^{b}\times(1+\%\Delta Y)^{b} \qquad (5.9.2\text{-}1)$$

c：国、t：時点、b：所得弾力性（一般に 0.8−1.2、ここでは 0.8 を使用）
$VSL_{OECD,2005}$：2005 年の OECD 地域の VSL（US$1.8−$4.5 million）
Y：一人当たり GDP、$\%\Delta Y$：一人当たり GDP の成長率

CO_2 排出シナリオは、特別な気候政策が無い（Baseline）シナリオ、NDCs シナリオ、及び 2℃、1.5℃シナリオである（図 5.9.2-1）。2℃、1.5℃シナリオについては、さらに排出割り当ての想定に応じ CER（現在の地域間の排出割合を保つ）、EPC（2040 年に一人当たり排出量が全地域で等しくなる）、CAP（一人当たり GDP の高い地域程、低排出）の 3 種類を想定している。

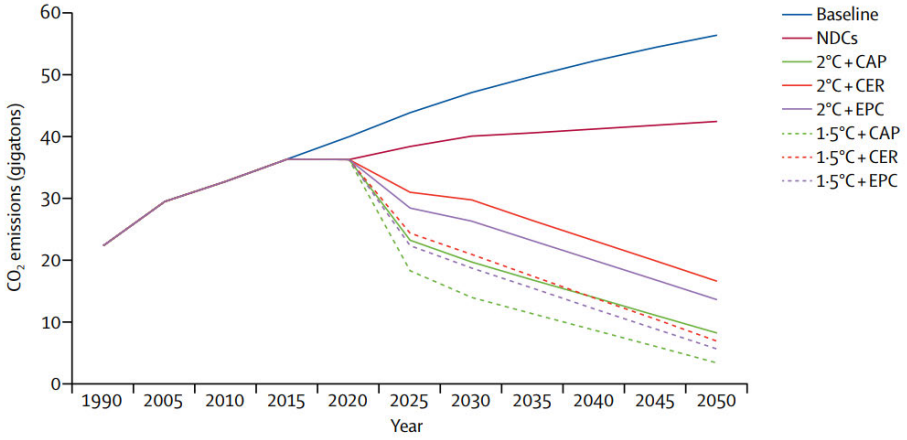


図 5.9.2-1 CO_2 排出シナリオ

図 5.9.2-2 に世界の健康コベネフィットと GHG 排出削減費用の 2020−2050 年累積値（割引率 3%）を示す。ここで、Baseline シナリオとの健康影響の差を「GHG 排出削減による健康コベネフィット」としている。図中、健康コベネフィットのエラーバーは、VSL の上下限値に対応している。図から、どのシナリオも、健康コベネフィットは GHG 排出削減費用を上回ると分析されている。GHG 排出削減費用は NDCs シナリオ、2℃シナリオ、1.5℃シナリオの順に高くなる。このうち、2℃、1.5℃シナリオの GHG 排出削減費用が CER＜EPC＜CAP の順に高くなるのは、図 5.9.2-1 の排出削減量の違いを反映している。2℃、1.5℃シナリオの、世界全体の費用対効果（健康コベネフィット/GHG 排出削減費用）は、VSL に median 値を想定した場合で、1.4 から 2.45、つまり、緩和費用の約 2 倍の健康コベネフィットがあると分析されている。

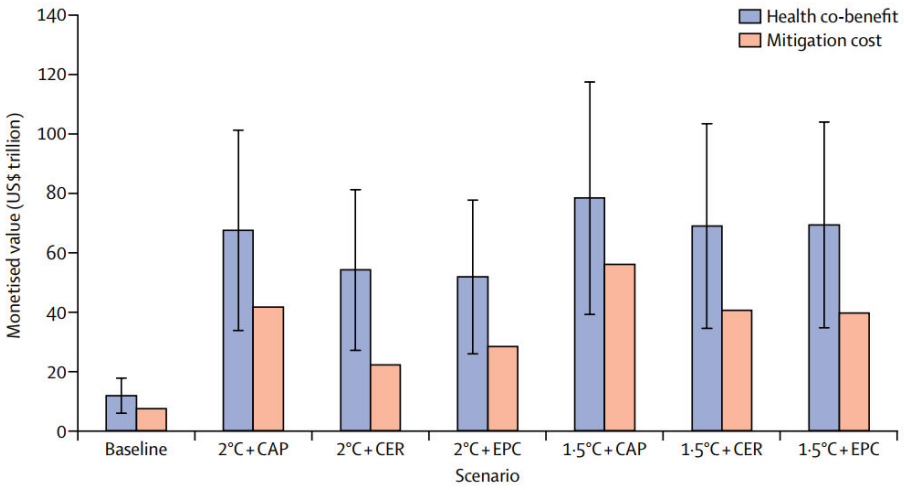


図 5.9.2-2 健康コベネフィットと GHG 削減費用の 2020-2050 年累積値

注）図中左下の「Baseline」は、「NDCs」の間違い。

但し、この費用対効果は地域によって大きく異なる。図 5.9.2-3 に示すように、健康コベネフィットは中国とインドに集中している。これらの地域の大気汚染は WHO の推奨濃度を上回り、大勢の人が大気汚染に曝されているためと述べている。

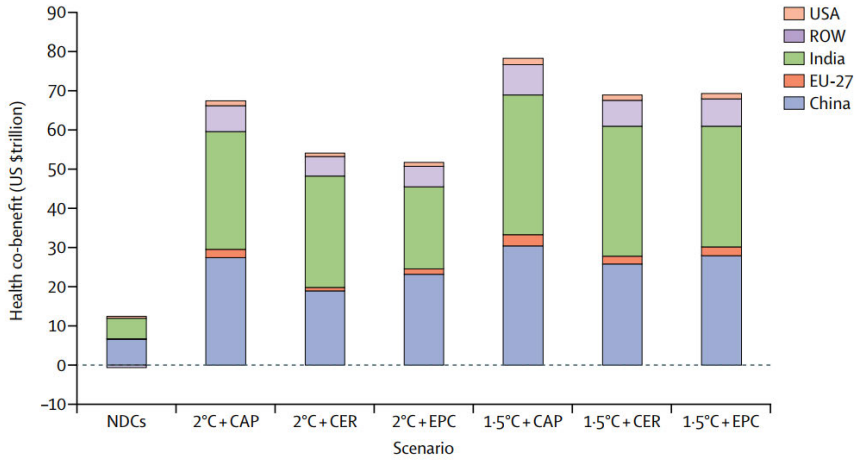


図 5.9.2-3 健康コベネフィット（2020-2050 年累積値）の地域内訳

図 5.9.2-4 は、各シナリオの地域毎に、正味便益（健康コベネフィットーGHG 削減費用）の値を示したものである。図より、インドは GHG 排出割り当ての違い（CAP、CER、EPC）や、VSL 想定に依らず、2℃、1.5℃シナリオは健康コベネフィットが GHG 削減費用を上回る。中国は、2℃シナリオの場合、インドと同様であるが、1.5℃シナリオの場合、VSL 想定に依っては健康コベネフィットが GHG 削減費用を下回る。米国や ROW（rest of the world）では、GHG 排出割り当ての違い（CAP、CER、EPC）や、VSL 想定によらず健康コベネフィットが GHG 削減費用を下回る、と分析されている。このように、温暖化緩和による健康コベネフィットは、主としてインド、中国にもたらされる可能性が高いことを示唆している。

Scenario			Region					
			China	EU-27	India	ROW	USA	Total
	NDCs		6·36 (3·06 to 9·66)	−2·01 (−2·08 to −1·93)	5·12 (2·52 to 7·72)	−0·72 (−0·38 to −1·06)	−4·42 (−4·68 to −4·16)	4·33 (−1·57 to 10·24)
	2°C	CAP	14·49 (0·77 to 28·21)	−2·70 (−3·74 to −1·67)	26·25 (11·18 to 41·33)	−5·01 (−8·29 to −1·73)	−7·12 (−7·76 to −6·48)	25·91 (−7·84 to 59·67)
		CER	14·89 (5·39 to 24·39)	−0·22 (−0·60 to 0·17)	23·40 (9·16 to 37·64)	−4·81 (−7·32 to −2·29)	−1·23 (−1·65 to −0·81)	32·03 (4·97 to 59·10)
		EPC	15·22 (3·62 to 26·82)	−1·22 (−1·88 to −0·56)	19·21 (8·73 to 29·70)	−4·42 (−7·05 to −1·79)	−5·33 (−5·85 to −4·81)	23·46 (−2·44 to 49·35)
	1·5°C	CAP	0·27 (−1·21 to 1·75)	−0·27 (−0·65 to 0·12)	3·76 (0·98 to 6·55)	−6·21 (−6·83 to −5·59)	−1·21 (−1·37 to −1·06)	−3·66 (−9·08 to 1·77)
		CER	2·08 (−1·32 to 5·47)	−0·60 (−1·20 to −0·01)	3·28 (0·93 to 5·63)	−5·92 (−6·76 to −5·08)	−2·47 (−2·70 to −2·24)	−3·63 (−11·05 to 3·78)
		EPC	2·31 (−0·05 to 4·67)	−0·19 (−0·68 to 0·31)	8·40 (3·53 to 13·28)	−3·46 (−4·32 to −2·60)	−0·93 (−1·11 to −0·76)	6·14 (−2·63 to 14·90)

図 5.9.2-4 正味便益（健康コベネフィット－GHG 削減費用）[US$ trillion]

*1: NDCs シナリオと 2℃シナリオは、Baseline シナリオ比の値
1.5℃シナリオは、2℃シナリオ比の値

*2: ( )内は、VSL 想定の違いによる差

*3: 緑色は、VSL 想定に依らず健康コベネフィットが GHG 削減費用を上回る。
黄色は、VSL 想定に依っては健康コベネフィットが GHG 削減費用を下回る。
赤色は、VSL 想定に依らず健康コベネフィットが GHG 削減費用を下回る。

(2) Vandyck et al. (2018)[11)]

将来の大気汚染対策の不確実性を考慮し、パリ協定の文脈の中で世界及び地域の大気汚染による早期死亡・罹患、及び農業の影響低減によるコベネフィットを評価したもの。将来のエネルギーシステムは POLES-JRC モデルで分析。GHG 排出量は、エネルギー関連は POLES-JRC モデル、土地関連は GLOBIOM モデル、その他は EPA の値を参考に推計している。大気汚染物質の排出量は GAINS モデルの排出係数に基づき算定。気温の計算は MAGICC6 モデルの確率版を使用。大気汚染物質の濃度は、大気汚染物質の排出シナリオに対し、TM5-FASST モデルを用いて推計している。

GHG 排出シナリオとして、気候政策が異なる 3 つ（図 5.9.2-5）を想定。このうち、Reference は、現在考えられている政策以上の特別な気候変動緩和政策無いシナリオ、NDC は、2025/2030 年までは NDCs（パリ協定下での資金協力あり）、それ以降も同様の世界 GHG 排出強度低減を想定したシナリオ、2℃は、2100 年の産業革命前比世界平均気温上昇を 75%以上の確率で 2℃に抑制するシナリオである。

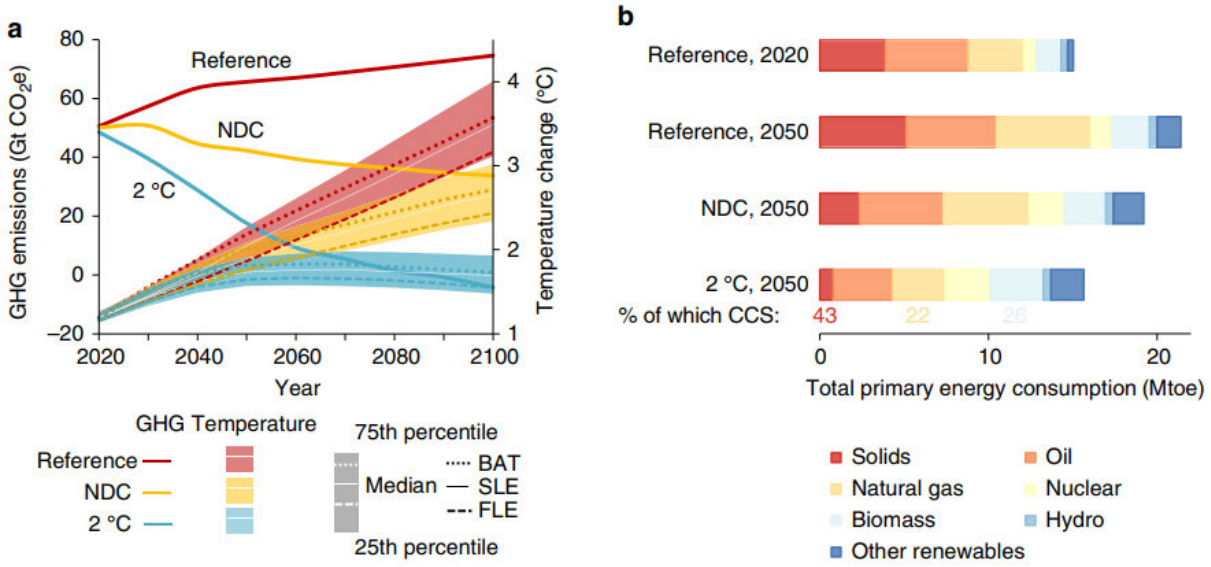


図 5.9.2-5　3 つの GHG 排出シナリオに対する全球気温変化とエネルギーシステム

将来の大気汚染対策として次の 3 ケースを想定。

- FLE：大気汚染物質排出削減技術が 2010 年レベルのまま
- SLE：大気汚染物質排出削減技術が緩やかに進化する
- BAT：考えられる削減技術を全て最大限に導入する

図 5.9.2-6 は、CO_2 排出削減率と各種大気汚染物質の排出低減率を示したもの。図中の黒丸は参考まで IPCC WG3 AR5 のモデル分析の値をプロットしたものである。SO_2、NO_x は概ねどのモデルでも、CO_2 排出削減率と正の相関がみられる。一方、CO や OC はモデルによっては負の相関を示し、評価の不確実性が大きいことを示している。なお、CO_2 排出削減率が同じ場合、将来の大気汚染対策レベルが最も低い（FLE）ケースに大気汚染の低減率は最も大きく、大気汚染対策が最も進んだ（BAT）ケースに大気汚染の低減率は最も小さく推計される。

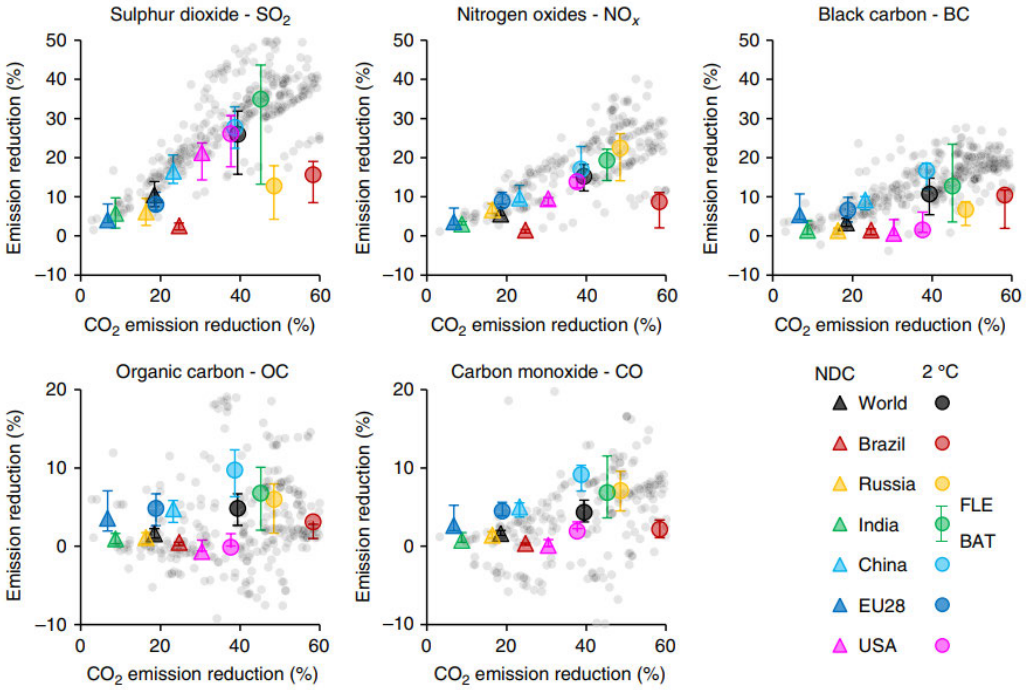


図 5.9.2-6 CO_2 排出削減率と大気汚染物質の削減率（2015-2050 年累積値）

図 5.9.2-7 は、大気汚染物質の排出、輸送、大気化学反応を考慮して推計した PM2.5 濃度とオゾン混合比をシナリオ間で比較したものである。下の c 図より、2℃シナリオでは Reference シナリオに比べ、PM2.5 の濃度が中国、インド、中東の一部地域で大きく低減すると推計されている。d 図よりオゾン混合比の低減影響は、PM2.5 に比べ広範囲に及ぶとみられている。

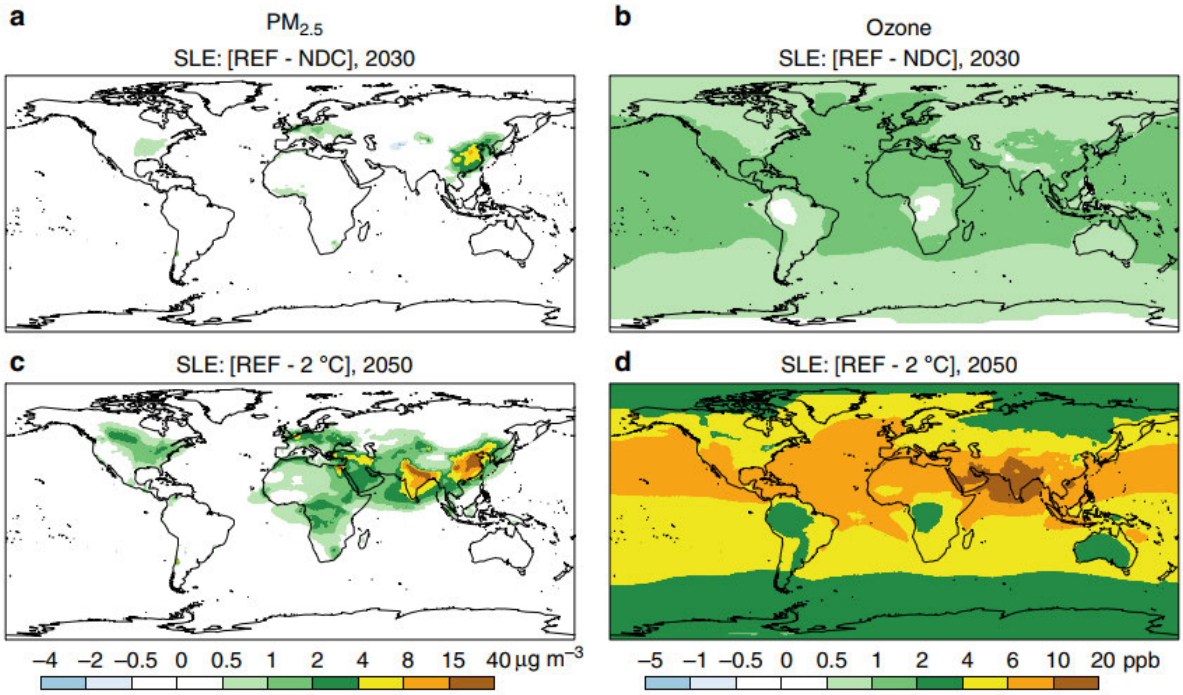


図 5.9.2-7 PM2.5 濃度とオゾン混合比

図 5.9.2-8 はオゾン低減による作物コベネフィットを示す。米国やブラジルで比較的大きなコベネフィットが推計されているのは、これらの地域でオゾン混合比の低減が大きいこと（図 5.9.2-7）、オゾンに敏感な作物（トウモロコシ、大豆、サトウキビ等）を栽培していることによる。

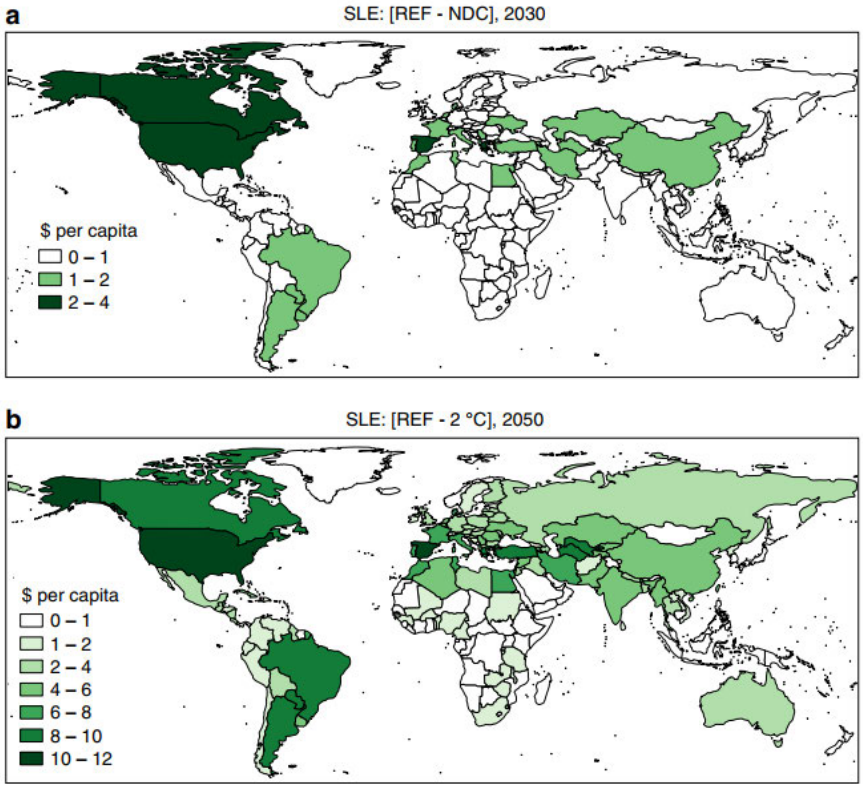


図 5.9.2-8 オゾン低減による作物コベネフィット

注）作物コベネフィット：作物収量の変化×2009-2013 年の生産価格/人口、より推計

図 5.9.2-9 に NDC、2℃シナリオにおける世界及び主要地域の大気汚染低減コベネフィットと GHG 削減費用を示す。図中エラーバーは VSL 想定の違いによる幅を、×印は VSL が地域や時点によらず一律（US$ 1.5million）とした場合の値である。NDC シナリオ、2℃シナリオ共、インドや中国で GHG 削減費用を上回る大気汚染低減コベネフィットが分析されている。前述の Markandya[10] が健康影響のみであったのに対し、本分析では農作物影響も考慮しているが、大きな傾向は両分析で類似している。なお、ヨーロッパにおける大気汚染低減コベネフィットは、主にヨーロッパ以外の地域で GHG 排出・大気汚染物質排出が低減し、ヨーロッパに輸送される大気汚染物質が減少するためとのことである。

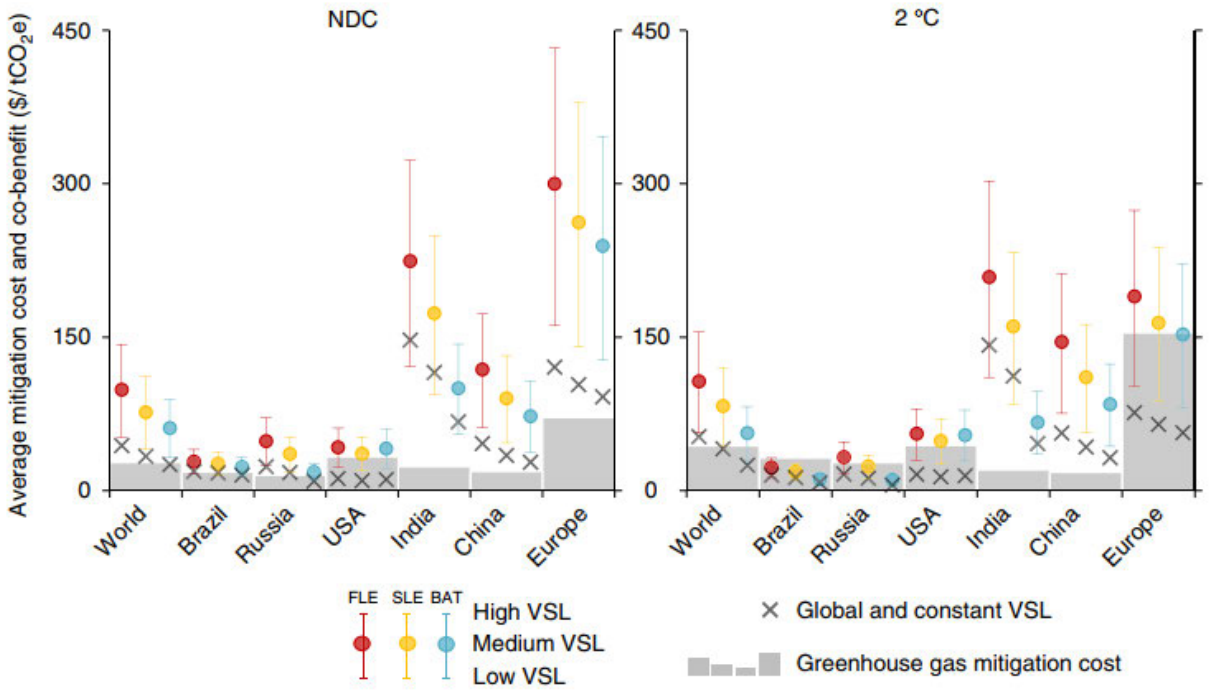


図 5.9.2-9 大気汚染低減コベネフィットと GHG 削減費用

5.9.3 今後の課題

温暖化緩和策の費用と大気汚染低減コベネフィットについて、先行研究における世界各地域の健康影響や農作物影響の評価方法等は、参考になると考えられる。但し、これら影響は局所的であることより、その分析に向けては、RITE 大気汚染濃度分析モジュールの分解能向上と、さらにはこれまで明示的に扱っていない大気汚染物質の越境変化の考慮が必要と考えられる。

なお、費用対効果の分析について、今回調査した事例はいずれも温暖化緩和の費用とそれに伴う大気汚染低減効果のみに着目していた。実際のエネルギーシステムは、GHG 排出削減と大気汚染物質排出低減の両方を視野に入れて計画されると考えられることより、費用対効果についても両対策費用の合計と、温暖化影響・大気汚染影響の低減効果との比較がより望ましいと考えられる。このうち両対策の費用については、これまで RITE モデルを用いて大気汚染濃度低減と CO_2 排出削減の同時達成にコスト効率的なエネルギーシステムの分析を行っており、対応が可能と見込まれる。

温暖化緩和と大気汚染低減に資する効率的なエネルギーシステムの構築に向け、適切な評価項目の検討と、多様なシナリオに対する分析が、引き続き必要である。

参考文献（第 5.9 節に関するもの）

1) 環境省；大気汚染の定義と汚染物質、
https://www.env.go.jp/earth/coop/coop/materials/02-apctmj1/02-apctmj1-012.pdf (アクセス日 2021. 3. 2)
2) IEA: Energy and Air Pollution, World Energy Outlook 2016 Special Report (2016)

3) 外務省；パリ協定 http://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000196735.pdf
4) Edenhofer, O. et al.: Technical Summary, Climate Change 2014: Mitigation of climate change, 33–107 (2014)
5) 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 28 年度報告書 (2017)
6) 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)
7) Gi, K. et al.: A model-based analysis on energy systems transition for climate change mitigation and ambient particulate matter 2.5 concentration reduction, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 24, 181-204 (2019)
8) 外務省: SDG グローバル指標 (SDG Indicators), https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/statistics/goal2.html (accessed 2021-2-1).
9) U.S. EPA: Regulatory Impact Analysis for the Clean Power Plan Final Rule (2015)
10) Markandya, A. Sampedro, Smith, S. J., Van Dingenen, R., Pizarro-Irizar, C., Arto, I., andGonzález-Eguino, M.: Health co-benefits from air pollution and mitigation costs of the Paris Agreement: a modelling study, The Lancet Planetary Health, 2-3, e126–e133 (2018)
11) Vandyck, T., Keramidas, K., Kitous, A., Spadaro, J. V., Van Dingenen, R., Holland, M., and Saveyn, B.: Air quality co-benefits for human health and agriculture counterbalance costs to meet Paris Agreement pledges, Nature Communications, 9 (2018) DOI: 10.1038/s41467-018-06885-9

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

2019年12月、EUは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た。2020年9月には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、米国でも2050年までのネットゼロ排出目標を掲げたバイデン大統領が誕生した。EUはこの目標に関する詳細な分析[12)]を実施し、いかにして目標を達成するか検討しているが、米国や中国は具体的に目標をどう達成するか明らかにしていない。そこで本節では先行研究を手がかりに、これらの国がどのような形でネットゼロ排出を達成しうるのか、また、それぞれの戦略の特徴や課題について考察する。

6.1.1　ネットゼロ排出戦略

パリ協定では「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保つともに，1.5 ℃に抑える努力を追求する（第2条）」という気温目標が掲げられ、この目標を達成するために「今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡を達成する（第4条 1項）」ことが盛り込まれている。2018年に作成されたIPCCの1.5℃特別報告書[13)]では「オーバーシュートしない、または限られたオーバーシュートを伴って地球温暖化を1.5℃に抑えるモデルの（排出）経路においては、世界全体の人為的なCO_2の正味排出量が、2030年までに、2010年水準から約45%（40-60%）減少し、2050年前後（2045-2055年）にネットゼロに達する(SR15 SPM C.1)」ことが示されている。

ネットゼロ排出を長期的な目標とすることは、濃度目標や気温目標よりも一般の人々にとってわかりやすく具体的な行動につなげやすいということもあり、各国で検討されるようになってきている（図 6.1.1-1）。既に英国、スウェーデン、ハンガリー、フランス、デンマーク、ニュージーランドの6ヶ国ではネットゼロ排出が法制化されており、それ以外にも多くの国がネットゼロ排出を目指す動きがでてきている。

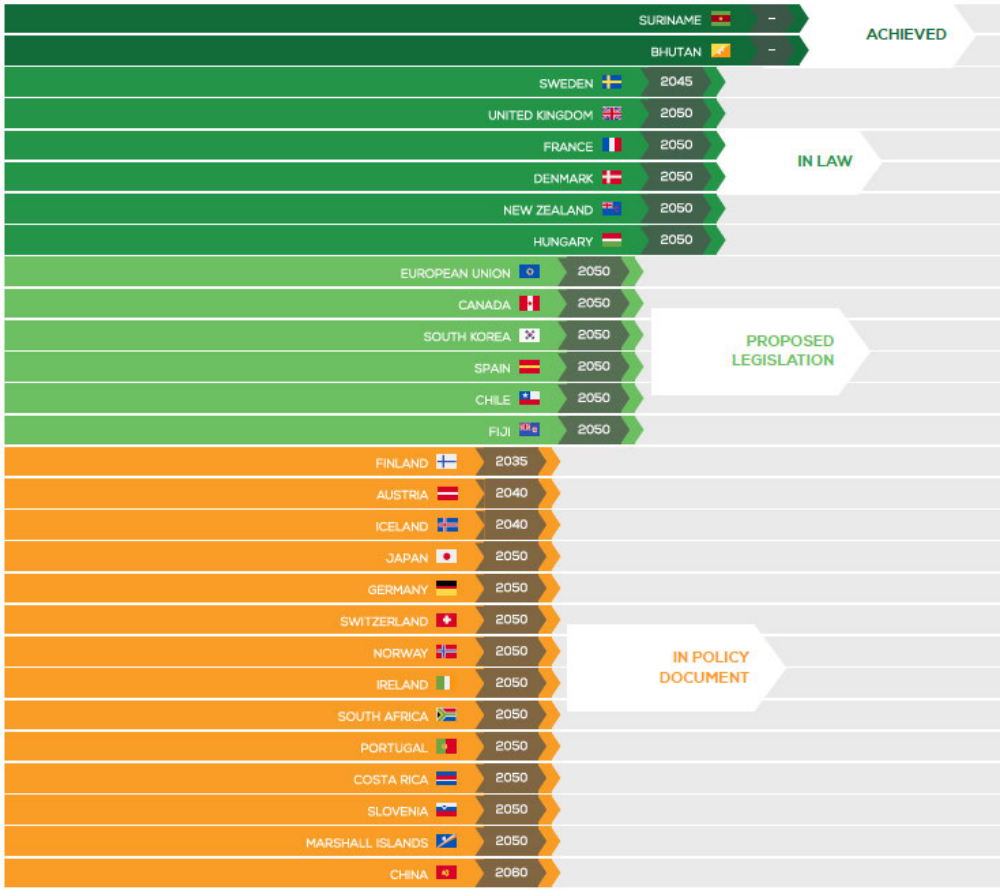


図 6.1.1-1 各国のネットゼロ排出目標の状況

（出典）Energy & Climate Intelligence Unit ホームページ

ネットゼロ排出の対象は CO_2 に限ったものなのか GHG 全般なのかによって必要となる削減努力は異なり、何を対象にした議論なのか留意しておく必要である。IPCC の第 5 次評価報告書では、グローバルな平均気温上昇は累積 CO_2 排出量に一次近似できることが示され、ある水準で気温を安定化させようとすれば、炭素バジェットと言われている累積 CO_2 排出量の上限が決まるため、いつかの時点で CO_2 排出（net CO_2 emissions）をネットでゼロにしなければいけないことが示唆されている。気候目標が厳しくなるほど炭素バジェットが小さくなり、早いタイミングで CO_2 排出をネットゼロにする必要がある。セクター別にみると、通常はゼロまたはネガティブエミッション技術のオプションが比較的多くある電力部門からの CO_2 排出をネットゼロとし、続いてエネルギーシステム全体からの CO_2 排出をネットゼロにしていくプロセスをたどる。さらに、CO_2 排出がネットゼロになった時点でも農業部門などから CO_2 以外の GHG 排出などが残っていると考えられるため、最終的にはこれをなんらかの形で削減・相殺することにより GHG 全体の排出をネットゼロ相当にする取り組みが必要となる。先行研究[15),16)]では、電力セクターからの CO_2 排出は 1.5℃のシナリオの場合 2050 年までに、2℃のシナリオでは 2055 年頃までにほぼゼロにすることが求められる。CO_2 排出については 1.5℃シナリオの場合で 2045-2060 年頃、2℃シナリオでは約 10～20 年遅れ 2060 年から 2075 年にネットでゼロにし、さらに GHG 排出については 1.5℃シナリオで 2055-2075

年頃、2℃シナリオの場合は 2090 年頃までにネットゼロ排出を実現する形になっている。

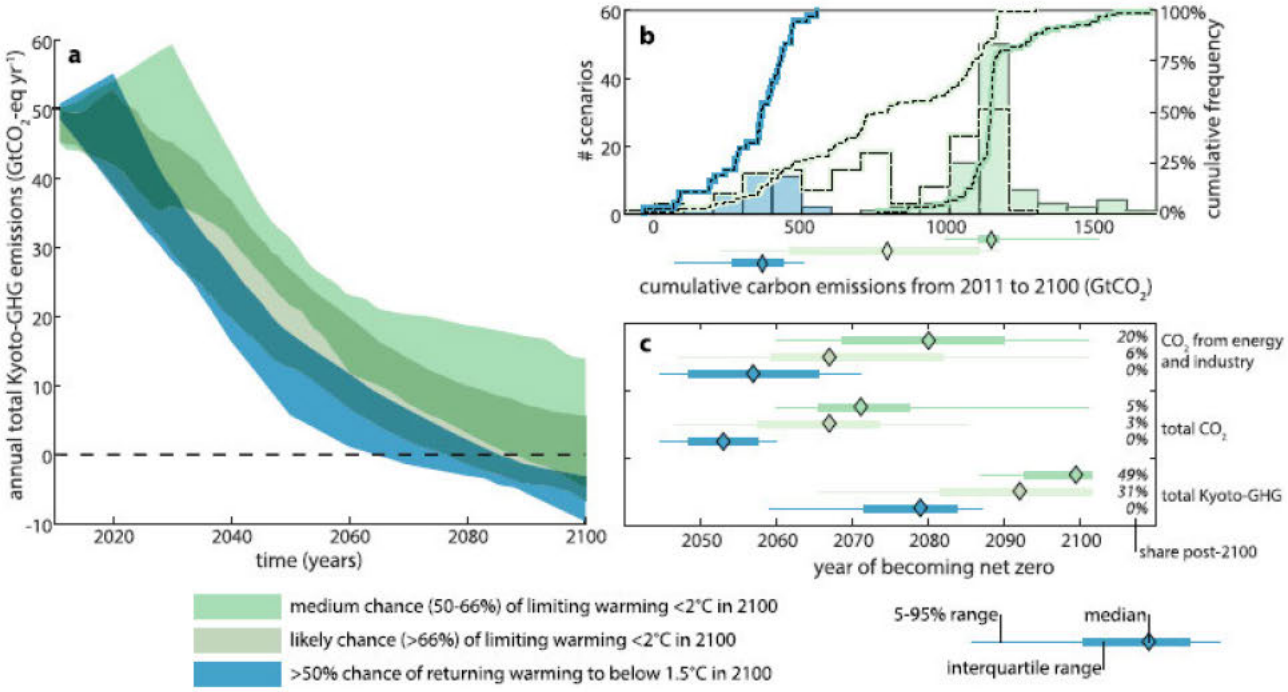


図 6.1.1-2 1.5℃と 2℃シナリオの排出パス(a)、累積排出(b)、ネットゼロ排出年(c)
（出典）Rogelj, J. et al. （2015）[15]

表 6.1.1-1 ネットゼロ排出のタイミング

	電力 (CO_2)	CO_2	GHG
1.5℃	2050 年以前	2045-2060 年	2055-2075 年
2℃	2050 年頃	2060-2075 年	2090 年以降

IPCC のレポート[13]や先行研究[16), 17)]によると、ネットゼロ排出に向けて必要な行動としては表 6.1.1-2 に整理したように概ね次の 5 つに分類できる：①エネルギー供給・転換側では、原子力、再生可能エネルギー、CCS などの技術オプションがある電力部門において低炭素化を進める、②エネルギー需要側ではエネルギー効率を向上させ、エネルギー需要を抑えるとともに、③冷暖房や調理，車両などの電化を進めることにより化石燃料の消費を減らし、④長距離輸送（貨物，空運，海運）や産業部門など電化が難しい部門ではバイオ燃料など代替燃料や水素の利用を進め、⑤どうしても残る CO_2 や GHG 排出を相殺するため BECCS や直接空気回収など炭素除去技術（CDR）を活用する。ただし、国や地域によって人口動態、経済構造、発展水準、資源の賦存量、土地利用形態等の違いがあり、どの行動が重視されるかはそれぞれ異なってくる。

表 6.1.1-2　ネットゼロに向けた 5 つの基本戦略

電源の低炭素化	エネルギー供給・転換側では、原子力、再生可能エネルギー、CCS などの技術オプションがある電力部門において低炭素化を進める
省エネ	エネルギー需要側ではエネルギー効率を向上させ、エネルギー需要を抑える
電化	冷暖房や調理、車両などの電化を進めることにより化石燃料の直接消費を減らす
燃料代替	長距離輸送（貨物，空運，海運）や産業部門など電化が難しい部門ではバイオ燃料など代替燃料や水素の利用を進める
CDR の活用	最後まで残る CO_2 や GHG 排出を相殺するため BECCS や直接空気回収など炭素除去技術（CDR）を活用する

6.1.2　ネットゼロ排出に関する先行研究

主要国のネットゼロ排出目標に関する先行研究としては、EU、米国、日本、オーストラリアの 4 ヶ国/地域について、統合評価モデル（REMIND モデル）を用いて 2050 年カーボンニュートラルに向けた課題や特徴を分析した Felix Schreyer et al. (2020)[18] がある。なお、この分析ではエネルギーシステムからの CO_2 排出に焦点を当てており、農業や産業における CH_4 や N_2O など CO_2 以外の GHG は対象としていない。

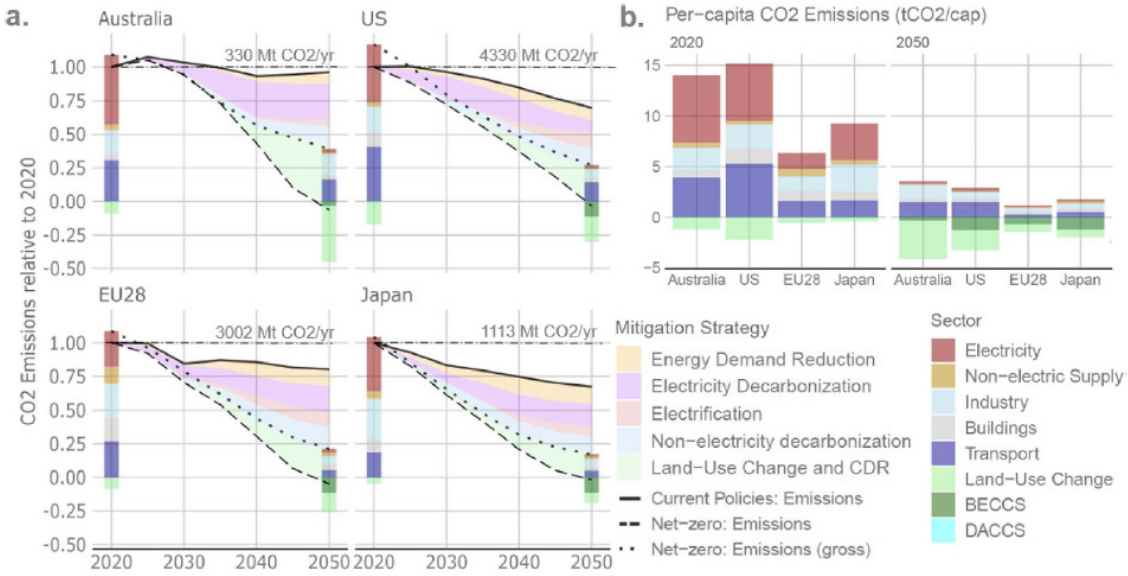


図 6.1.2-1 CO_2 排出シナリオと一人当たり CO_2 排出

（出典）Felix Schreyer et al. (2020)[18]

図 6.1.2-1 は EU、米国、日本、オーストラリアの CO_2 排出経路と一人当たり CO_2 排出を示したものである。現在のオーストラリアと米国の一人当たりの CO_2 排出量は、

EU や日本のほぼ 2 倍であるが（図 6.1.2-1 b)、これは輸送、産業、建築分野における一人当たりのエネルギー需要が高いことが起因している。他方、オーストラリアは土地利用変化による吸収源拡大の余地が大きく、2050 年における CDR によるオフセット量は 2020 年における排出の約 40%に相当する。対照的に、土地利用変化に制約がある日本のオフセットは 2020 年排出の 15%にとどまっている（図 6.1.2-1 a)。

シナリオ別の各国の電源ミックスとしては、技術の利用に制約のないネットゼロ基本シナリオ（図 6.1.2-2 a. Full-option）に加え、派生シナリオ（図 6.1.2-2 b. Sensitiity:2050）として原子力が 2040 年までにフェーズアウトするケース、原子力のフェーズアウトに加え変動性再生可能エネルギーに制約があるケース、現行政策継続ケース分析されている。現在の電源構成や CO_2 排出トレンドとしては、オーストラリアは約 60%を石炭に依存しているのに対し、EU は既に再生可能エネルギーが約 30%を占め、米国では石炭からガスに転換することで排出量を削減してきているが、日本は福島の事故以降、石炭とガスが原子力を代替し排出増加傾向にあるといった違いがある。低炭素電力への移行の形も 4 つの地域でそれぞれ異なっており、例えば日本では変動性再生可能エネルギー（VRE）のポテンシャルが限られているため、風力と太陽光のシェアは 50%にとどまり、原子力とバイオマスのシェアも比較的大きいことがわかる。これに対しオーストラリア、EU、米国では 2050 年に風力と太陽光のシェアが 80%以上に達している。

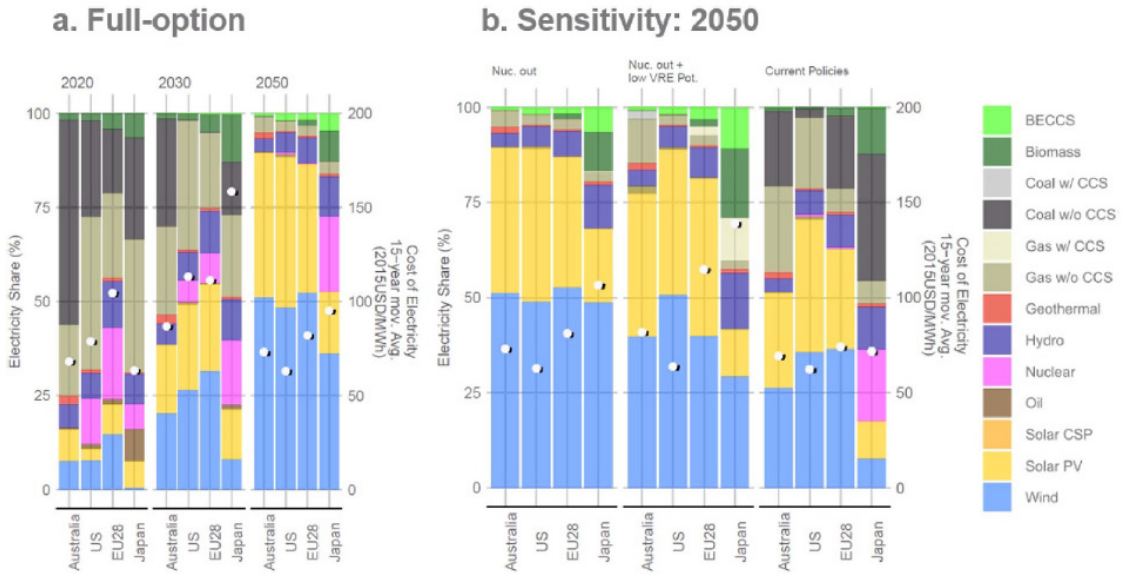


図 6.1.2-2 電源ミックス（左：ネットゼロ基本シナリオ、右：派生シナリオ）

（出典）Felix Schreyer et al. (2020)[18)]

2050 年までにカーボンニュートラルを達成するためには、すべての地域で 土地利用変化による吸収源の拡大、炭素回収・貯留を伴うバイオエネルギー（BECCS）が不可欠となる。ただし、土地ベースの CDR の利用可能性もオーストラリアでは大きく、日本では小さいといった地域差がある。

このようにEU、米国、日本、オーストラリアのネットゼロ排出に向けた戦略は再生可能エネルギーのポテンシャル、排出構造、土地の利用可能性、人口動態といった違いを反映してそれぞれ異なることが示されている。

R. Schaeffer et al.（2020）[19]による研究は、明示的にネットゼロ排出を分析対象としたものではないが、1.5℃や 2℃目標を対象としたシナリオを分析しており、その中のいくつかのシナリオがネットゼロ排出に相当したものになっている。この研究はモデル国際モデル比較プロジェクト（EU Horizon-2020 CD-LINKS）の結果をもとに、2050年までの主要7ヶ国/地域（米国、EU28、日本、中国、インド、ロシア、ブラジル）の排出経路について比較考察したもので、以下の 4 つのシナリオが検討されている。①NPi（National Policies implemented）は、現在実施されている政策が将来的にも続く（それ以上の対策は行わない）と仮定した基準シナリオ、②NPi1000 は 2011～2100 年における世界のカーボンバジェットが 1000GtCO$_2$ のシナリオで、2℃目標達成の可能性が66%以上あるシナリオに相当する、③NPi400 はカーボンバジェット 400GtCO$_2$ のシナリオで、1.5℃目標達成の可能性が 66%以上あるシナリオに相当する、④NDC1000 は 2030年までの排出は自国の NDC に沿った上で 2011-2100 年の世界のカーボンバジェットを1000GtCO$_2$ とするもので、気候変動緩和の遅れ（=NDC）の影響を評価するためのシナリオ。この中で米国の NPi1000（2℃相当）シナリオでは 2050 年に CO$_2$ 排出がネットゼロとなる排出経路や（図 6.1.2-3）、NPi400（1.5℃相当）シナリオにおいて 2050 年に米国ではネットゼロ GHG 排出、中国がネットゼロ CO$_2$ 排出になる経路が描かれている。

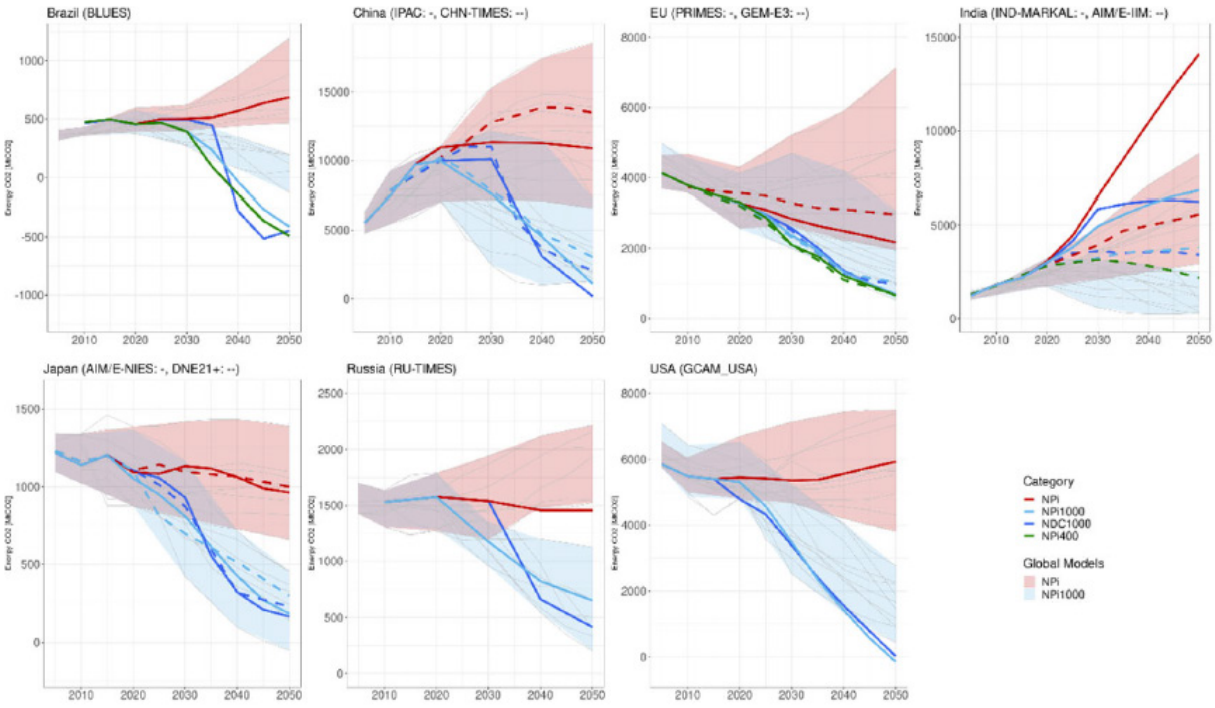


図 6.1.2-3 各国の排出経路

赤：基準シナリオ、青：2℃シナリオ相当、緑：1.5℃シナリオ相当

（出典）R. Schaeffer et al.（2020）[19]

6.1.3　米・中・EU のネットゼロ排出シナリオ

(1) 米国のシナリオ

2021 年 1 月 20 日アメリカの第 46 代大統領に就任したジョー・バイデン氏は同日、トランプ政権下で離脱していたパリ協定へ復帰するための文書に署名し、気候政策を転換する姿勢を示した。バイデン大統領は選挙期間中、政権公約として野心的な気候変動政策を掲げ、電力部門は 2035 年までに CO_2 排出をゼロにし、運輸部門では電気自動車の活用を加速（充電施設の整備，税額控除や省エネ基準の策定等）、民生部門では建築物のエネルギー効率を改善することなどにより、2050 年までにネットゼロエミッションを達成する目標を掲げていた [1]。

米国がオバマ政権下（2016 年 11 月）で UNFCCC へ提出した Mid-century Strategy では主に GCAM モデルの分析結果を使って 2050 年に GHG80%削減に向けた絵姿が描かれていたが、ネットゼロ GHG 排出については具体的な戦略がまだ明らかになっていない。そこで本節では同じ GCAM のモデルチームによる研究成果 [19), 20)]を参照して米国がどのようにネットゼロ排出を実現しうるかを考察する。この研究は CD-LINKS プロジェクトの成果であり、気候政策と持続可能な開発目標との関連や、パリ協定の気温目標に向けたグローバル/主要国の排出経路を分析している。米国については、1.5℃に向けた排出経路として 2025 年の米国の NDC 目標から 2050 年に GHG 排出量を正味ゼロにするまでの直線的な経路が示されている（図 6.1.3-1）。なお、2℃の経路としては 2050 年に GHG 排出が 80%削減、CO_2 排出がネットゼロとなることが想定されている。

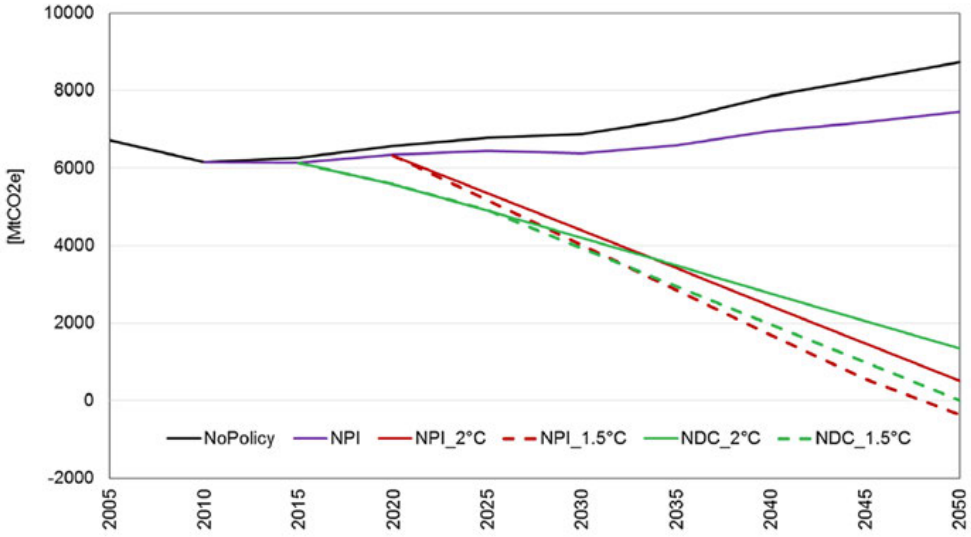


図 6.1.3-1　米国の排出経路

（出典）Felipe Feijoo, et al. (2020)[20)]

米国の Mid Century Strategy はおおむね 2℃シナリオ相当し、2025 年に GHG 排出を 2005 年比で 26～28%を削減し（NDC に相当）、2050 年には 80%削減するシナリオにな

[1] 対象が CO_2 か GHG かははっきりしていない（Ensure the U.S. achieves a 100% clean energy economy and reaches net-zero emissions no later than 2050. ）

っている。Felipe Feijoo, et al. (2020)[20]では気温目標と 2020 年までの政策シナリオと組み合わせ、①NPI_2℃：2020 年まで現行の NPI を実施し、その後 2℃を目指す経路、②NPI_1.5℃：2020 年まで現行の NPI を実施し、その後 1.5℃を目指す経路、③NDC_2℃：すぐに（2015 年から）削減を始め NDC を達成しつつ、2℃を目指す経路、④NDC_1.5℃：すぐに削減を始め NDC の達成を経て 1.5℃を目指す経路、⑤NoPolicy：政策を講じなかった経路、⑥NPI：現行の政策のみを実施した経路、の 6 シナリオを想定している。これらのシナリオはグローバルモデルである GCAM モデルにを拡張した GCAM-USA モデル（地域を 50 州及びワシントン D.C.の 51 に分割評価を可能にしたもの）を用いてセクター別の排出内訳や電源構成、州別のエネルギー構成などを分析している。本節では NDC の達成を経て 2050 年にネット GHG ゼロ排出を達成する経路である、NDC_1.5℃シナリオを参照する。

(2) 中国のシナリオ

中国の習近平国家主席は 2020 年 9 月の国連総会演説で、「二酸化炭素（CO_2）排出量を 2030 年までに減少に転じ，2060 年までに CO_2 排出量と吸収量を差し引きゼロにするカーボンニュートラル（炭素中立）を目指す」と表明した。中国はこれまで国別貢献（NDCs）として 2030 年前後に CO_2 排出量をピークアウトさせ、GDP 当たり CO_2 排出量を 2005 年比 60～65%削減すると公約しているが、パリ協定にもとづく長期戦略はまだ提出していない。そこで本節では上記 CD-LINKS プロジェクトにおける中国を対象とした研究成果 [19), 21)]と清華大学の研究チームによる分析 [22)]を参照して中国のネットゼロ排出目標について検討する。CD-LINKS の研究では 1.5℃目標にむけて 2050 年時点で中国における CO_2 排出がネットゼロとなるシナリオ（図 6.1.3-2）を分析しており、清華大学による分析も同様に 2050 年時点で CO_2 排出がほぼネットゼロを達成するものである。そのため習主席が示した 2060 年にネットゼロ CO_2 排出を達成する目標よりも目標強度はやや高くなっており、変化のスピードについては違いがあるが、ネットゼロ CO_2 排出達成するためのエネルギー構造や、そこに至るまでの課題という点では概ね一致したものになっていると考えられる。

Wang et al. (2019)[21]は中国の電力部門からの CO_2 排出に関し、以下の 4 つのシナリオ（図 6.1.3-2）が想定されている。①NPi：過去のトレンドと現行政策を踏まえ、電力部門の CO_2 排出量は 2045 年まで増加し続け、その後ピークアウトしていくシナリオ、②NPi2020_low：2℃の排出バジェットを想定し、2020 年以降に排出を削減するシナリオ、③INDC：現在の INDC に相当するシナリオ、④INDC2030_low：2030 年までは INDC と同じ排出経路を辿り、その後 2℃の排出バジェットに収まるよう急激に排出を削減するシナリオ。本節では 2℃に相当する②NPi2020_low シナリオと④INDC2030_low シナリオを参照している。両シナリオでは 2050 年時点における経済全体からの CO_2 排出はネットゼロ、電力部門からの CO_2 排出はマイナスとなっている。なお、デフォルトの設定では発電所の設備寿命は 30 年と想定されているが、設備寿命まで石炭火力発電を運転すると 2℃目標は達成できなくなるため、NPi2020_low シナリオでは 890GW、INDC2030_low シナリオでは合計 930GW の石炭火力発電所を設備寿命前に閉鎖する必

要があると試算しており、今後の石炭火力発電所への新規投資は慎重に検討する必要があることが示唆されている。

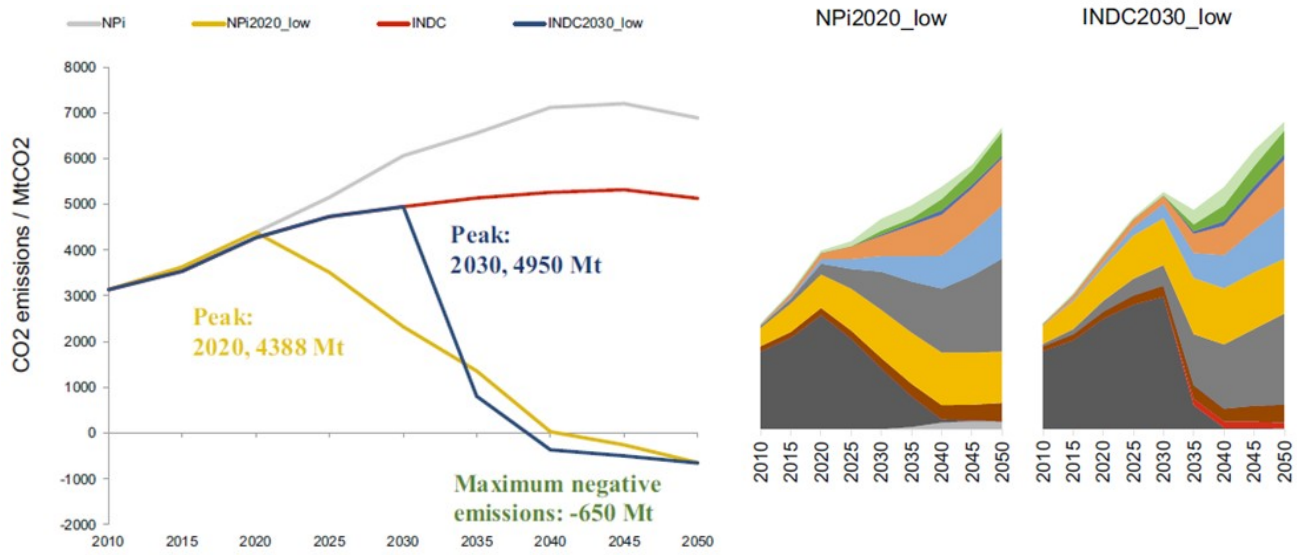


図 6.1.3-2 中国の電力部門からの CO_2 排出（左）と電源構成（右）

（出典）Wang et al. (2019)[21)]

(3) EU のシナリオ

EU が 2011 年に発表した長期ロードマップ[23)]では 2050 年までに GHG 排出を 80-95%削減するとしていたが、IPCC による 1.5℃特別報告書の情報を踏まえて目標を更新し、2050 年ネットゼロ排出を打ち出した。2018 年 11 月欧州委員会は、EU 長期戦略ビジョン“A Clean Planet for All”を発表し、これをもとに EU は 2050 年に気候中立（Climate Neutral）を達成するとした長期目標を 2020 年 3 月に UNFCCC へ提出している。長期戦略ビジョンに附随する文書[12)]の中ではネットゼロ排出シナリオの詳細な分析を行っており、本節では主にこのシナリオを参照しつつ、不足する情報については PRIMES モデルチームの研究成果[24)]や欧州委員会のテクニカルレポート[25)]を参照して補った。

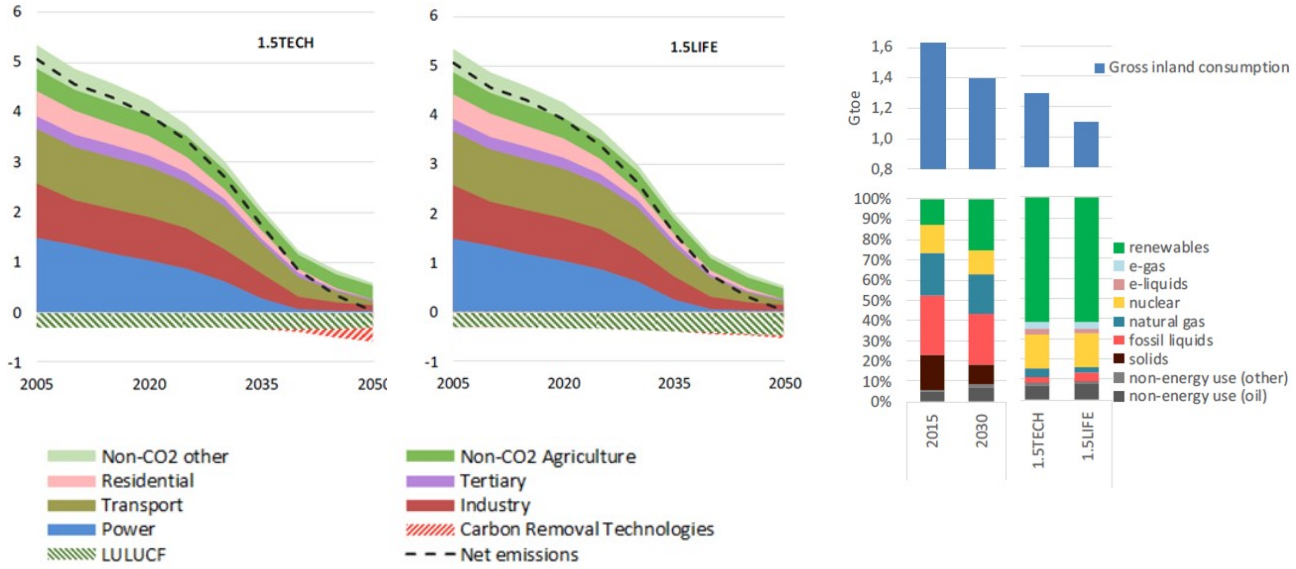


図 6.1.3-3 GHG 排出経路とエネルギー需給のシナリオ

（出典）欧州委員会 [12)]

(4) GHG 排出構造の比較

図 6.1.3-4 は 2050 年時点の米国、中国、欧州の GHG 排出内訳を示したものである。なお欧州については 2050 年 GHG 排出ネットゼロに向け、BECCS や CCS の活用に重点を置いたシナリオ（Tech）と持続可能性とライフスタイル変化を重視するシナリオ（Life）を示している。

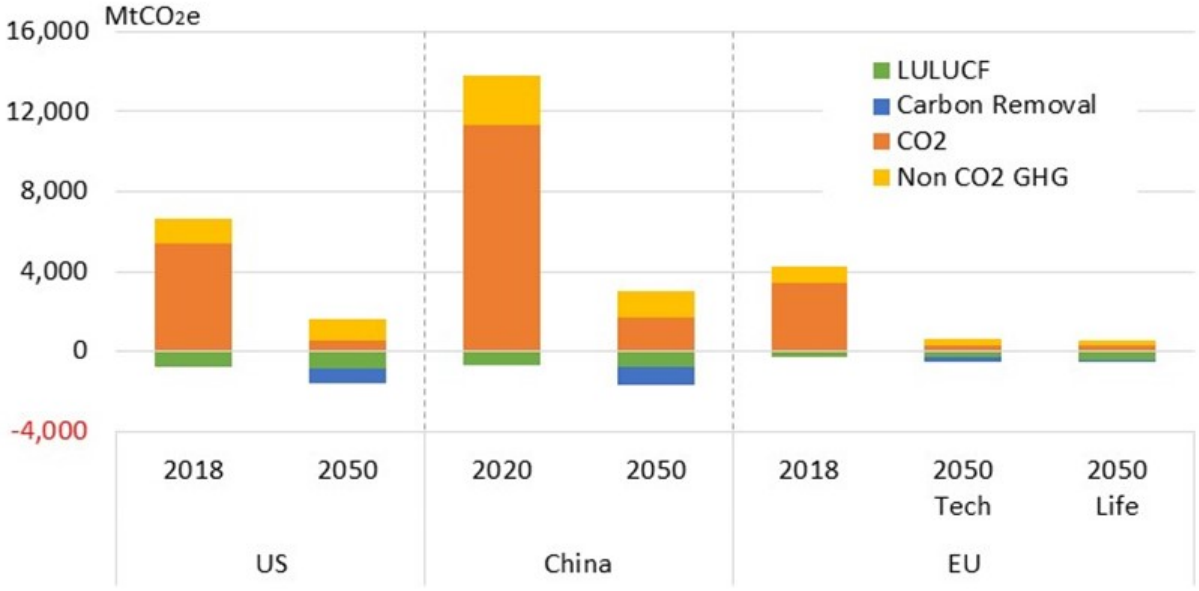


図 6.1.3-4 GHG 排出内訳

米国は 2018 年時点で 6677Mt CO2eq（シンクを含めると 5903Mt CO_2eq）の GHG 排出があり、そのうちの 81%は CO_2、19%が CO_2 以外の温室効果ガスであった。これに対し 2050 年には現状より CO_2 排出を約 90%、CO_2 以外の GHG を約 10%減らすとともに、シ

ンクを 10%程度拡大し、さらに BECCS 等を活用して約 700 Mt CO_2eq を吸収することにより GHG 排出をネットゼロにする絵姿が描かれている。

中国の清華大学が分析したシナリオでは CO_2 を約 85%削減し、また CCS や BECCS を活用することで約 880 Mt CO_2eq を除去することで 2050 年にネットゼロ CO_2 排出を達成し、CO_2 以外の GHG 排出が 1270 Mt CO_2eq 残る形になっている。

EU は 2018 年時点で 3893Mt CO_2eq の GHG 排出があり、CO_2 が約 81%、CO_2 以外の GHG は約 19%と米国とほぼ同様の内訳になっている。なお、LULUCF として 300 Mt CO_2eq 強の吸収源がある。これに対し 2050 年に向け CO_2 排出を 90%程度、CO_2 以外の GHG を半減した上で、Tech シナリオでは現状とほぼ同水準の LULUCF による吸収に加え、BECCS などで 255 Mt CO_2eq の炭素除去を想定している。他方、Life シナリオでは LULUCF を現状の 1.5 倍程度に拡大し、残った 55 MtCO_2eq を BECCS 等で吸収することにより GHG 排出をネットでゼロにする形になっている。

(5) 一次エネルギー消費構造の比較

図 6.1.3-5 は米国、中国、欧州における現在、及び GHG 排出ネットゼロを達成する時点（米国と欧州は 2050 年，中国は 2060 年）における一次エネルギー消費量とその構成を示したものである。

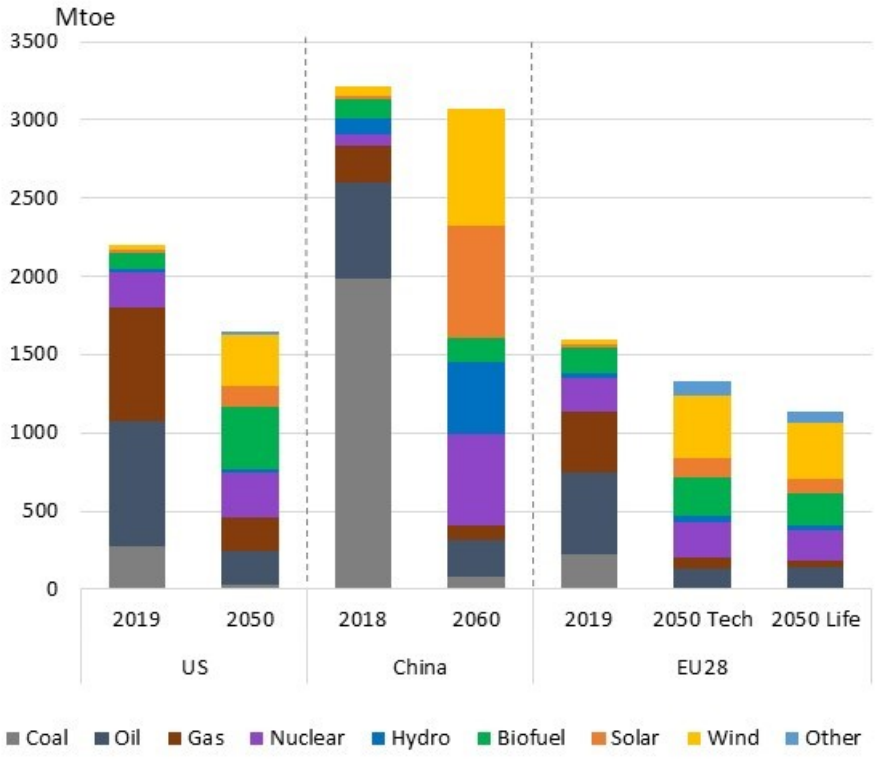


図 6.1.3-5 一次エネルギー消費量とその構成

米国、中国、欧州とも GHG 排出ネットゼロを達成する時点のエネルギー消費は現状より小さくなっており、米国では約 25%、欧州の Tech シナリオでは 20%弱、Life シナリオでは 30%近い削減になっている。中国の場合、現状比で 5%程度の抑制に過ぎない

が、エネルギー消費のピークは 2030 年頃、消費量は 5600Mtoe 程度と想定されており、ピーク時点から比較すると 30 年間で約 45%の削減をすることになる。

米国、中国、欧州とも化石燃料の割合を大きく減らしている点では共通しているが、それを代替するエネルギー源がそれぞれ異なっている。米国では 2050 年時点で最もシェアが大きいのがバイオ燃料の 24%であり、次いで風力の 20%、原子力の 17%となっている。中国では 2060 年時点で風力が 24%、太陽光が 23%とほぼ同程度になり、次いで原子力の 19%となっている。米国や欧州に比べ相対的にバイオ燃料の割合は小さいが（約 5%）、これは巨大な人口を抱える中国では食糧生産との競合が懸念されていることに加え、水不足が恒常的な問題になっており、バイオ燃料の生産拡大には制約があるためとされている。欧州では 2 つのシナリオともに風力が全体の 1/3 を超えており、次いでバイオ燃料が 20%弱を占めている。なお、その他に分類されているものが 7%程度あるが、ここには水素と CO_2 から合成するメタン（e-gas）や、炭化水素液体燃料やメタノールなど（e-liquids）が含まれ、運輸部門や産業部門の低炭素化に用いられることが想定されている。

(6) 電源構成の比較

図 6.1.3-6 は現在と 2050 年時点の米国、中国、欧州における電力需要と電源構成を示したものである。どの国・地域も電力需要が伸びており、2050 年時点で米国は現状の約 2.1 倍、中国は約 1.7 倍、欧州の Tech シナリオで約 2.5 倍、Life シナリオで約 2 倍になっている。これは経済の拡大に伴う電力需要の増加に加え、エネルギー源の電化が進み電力需要が拡大するためである。また、化石燃料を電源とする割合は 10%を切っており、そのほとんどは CCS を付帯したものになっている。

将来の電源構成は、再生可能エネルギーのポテンシャルなどの違いを反映し、3 カ国/地域それぞれで異なっている。米国では風力発電による発電量は現在の約 12 倍となり 40%程度のシェアを占め、原子力も約 3.7 倍に拡大し 34%のシェアを占めている。なお、米国のネットゼロ排出シナリオでは一次エネルギーにおいてバイオエネルギーの利用が進むが、発電用にはほとんど用いられておらず、運輸や産業など電化が難しい部門における代替燃料として利用されている。中国では現在約 2/3 を占めている石炭発電がほぼ姿を消し、代わって原子力が 30%を占め、次いで水力（18%）、太陽光（17%）、風力（16%）の順になっている。また、中国は現状の NDC に沿った取り組みを進めた後にネットゼロ排出に向かおうとする場合、2030 年までは石炭火力が増え続け、その後、急激に石炭火力を減らすことになる。ゼロ排出を達成するには石炭火力発電を設備寿命前に廃止する必要が生じるようになり、投資の無駄を回避するためにも 2030 年目標を強化し、石炭火力発電の新規建設を速やかに抑制していくことが示唆されている。欧州では風力が現状の 10 倍近くに拡大し、Tech シナリオで 4173TWh、Life シナリオで 3697TWh となり、ともに欧州の発電電力量の 50%以上を占めている。次いで太陽光が Tech シナリオで 1325TWh、Life シナリオで 1033TWh となり、両シナリオで変動型電源が 70%を超えるようになる。原子力発電も現在と同水準の発電電力量を維持すると見込まれているが、総発電電力量が大きくなるため、シェアとしては両シナリオとも 13%程度に留まっている。

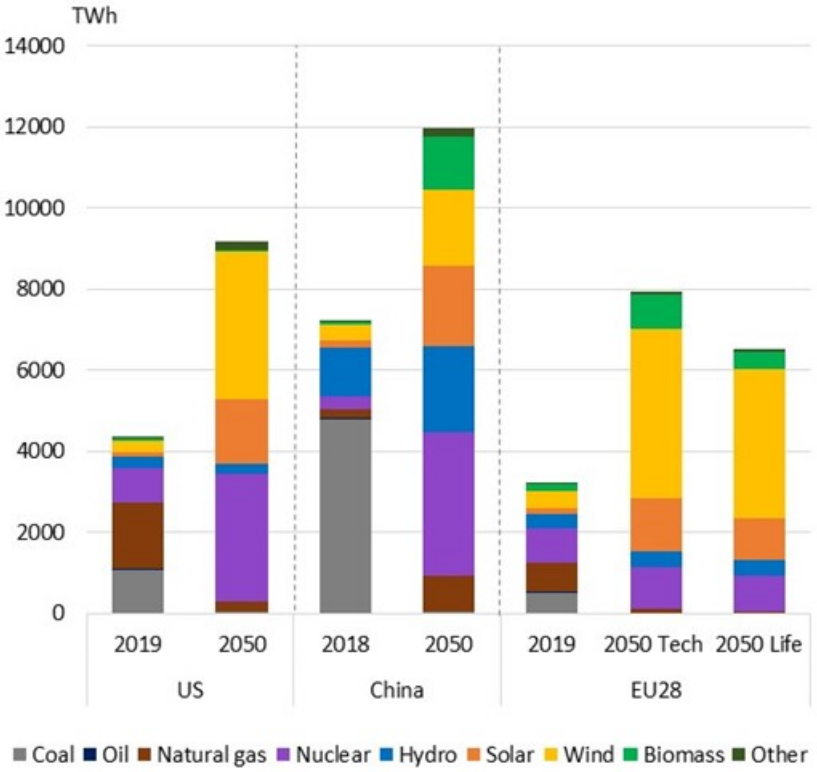


図 6.1.3-6 電力需要と電源構成

(7) まとめ

米国、中国、EU ともネットゼロ排出に向けた戦略として、エネルギー効率を高めてエネルギー需要を抑制すること、電化を進めること、電源構成における低炭素エネルギーの比率を高めることは共通している。他方、どのような低炭素エネルギーを活用するかは国や地域によって異なることがわかる。米国では一次エネルギーとしてはバイオ燃料への依存が大きく、電源構成としては風力と原子力の割合が高い。これに対し中国は、電源構成の中で原子力のシェアが最大となり、風力、太陽光、風力、水力などの再生可能エネルギーがこれに続いている。欧州では風力に依存する割合が極めて大きくなり、電源構成に占める再生可能エネルギーの割合が 85%を超えている。

このようなエネルギー構成/電源構成の違いにより 米国、中国、欧州でネットゼロ排出目標に向けた政策課題は異なるものになる可能性がある。例えば原子力発電の新設機運が停滞している米国で今後 30 年間に現状の 4 倍近い水準まで原子力発電を増やせるのか、変動性再生可能エネルギーを大量導入しても欧州は系統を安定的に運用できるのか、石炭依存の強いエネルギー供給構造を中国は急激に転換できるのかといった課題が考えられる。

本分析は 1 つのシナリオを示したに過ぎず、他のシナリオも考えられるが、参照したのは行政機関とつながりが深い専門家が開発したシナリオである。米国の GCAM モデルは民主党政権下で策定された Mid Century Strategy の分析に使われた実績があり、中国の清華大学も政府の温暖化政策に深く関与し、欧州の結果も公式文書をもとにし

ている。したがって、それぞれの国や地域の状況を反映した上で、将来のネットゼロ排出に向けたシナリオが描かれていると考えられる。

表 6.1.3-1 ネットゼロ排出戦略の相違点

	米国	中国	EU
共通戦略	エネルギー効率向上による需要の抑制、電化促進、電源の低炭素化		
主体となるエネルギー源	一次エネルギーとしてはバイオ燃料への依存が大きく、電源構成としては風力と原子力の割合が高い	電源構成の中で原子力のシェアが最大となり、風力、太陽光、水力などの再生可能エネルギーがこれに続く	風力に依存する割合が極めて大きくなり、電源構成に占める再生可能エネルギーの割合が 85%を超える
政策課題	原子力発電の新設機運が停滞している中、今後 30 年間に現状の 4 倍近い水準まで増やせるのか	石炭依存の強いエネルギー供給構造を急激に転換できるのか	変動性再生可能エネルギーを大量導入しても系統を安定的に運用できるのか

参考文献（第 6.1 節に関するもの）

1) European Commission. “In-Depth Analysis in Support of the Commission Communication” COM (2018) 773, (2018)
2) IPCC. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial 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 (2018)
3) Energy & Climate Intelligence Unit ホームページ（https://eciu.net/netzerotracker、アクセス日：2021 年 3 月 1 日）
4) Rogelj, J., et al.: Zero emission targets as long-term global goals for climate protection. Environ. Res. Lett., 10, 1–11, (2015).
5) Rogelj, J., et al.: Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C. Nat. Clim. Chang., 5, 519–527, (2015).
6) Luderer, Gunnar, et al. "Residual fossil CO_2 emissions in 1.5–2 C pathways." Nature Climate Change 8.7 (2018): 626-633.
7) 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)

8) Schaeffer, R., et al. "Comparing transformation pathways across major economies." Climatic Change 162.4 (2020): 1787-1803.
9) Feijoo, Felipe, et al. "US energy system transitions under cumulative emissions budgets." Climatic Change (2020).
10) Wang, Huan, et al. "Modeling of power sector decarbonization in China: comparisons of early and delayed mitigation towards 2-degree target." Climatic Change (2019).
11) He Jiankun. "Launch of the Outcome of the Research on China's Long-term Low-carbon Development Strategy and Pathway." (2020) （アクセス日：2020 年 11 月 25 日）
12) European Commission. “A Roadmap for moving to a Competitive Low Carbon Economy in 2050” (2011)
13) Capros, Pantelis, et al. "Energy-system modelling of the EU strategy towards climate-neutrality." Energy Policy 134 (2019).
14) Tsiropoulos I., Nijs W., Tarvydas D., Ruiz Castello P., Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050 – Insights from scenarios in line with the 2030 and 2050 ambitions of the European Green Deal, EUR 29981 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, (2020)
15) Rogelj, Joeri, et al. "Zero emission targets as long-term global goals for climate protection." Environmental Research Letters 10.10 (2015): 105007.

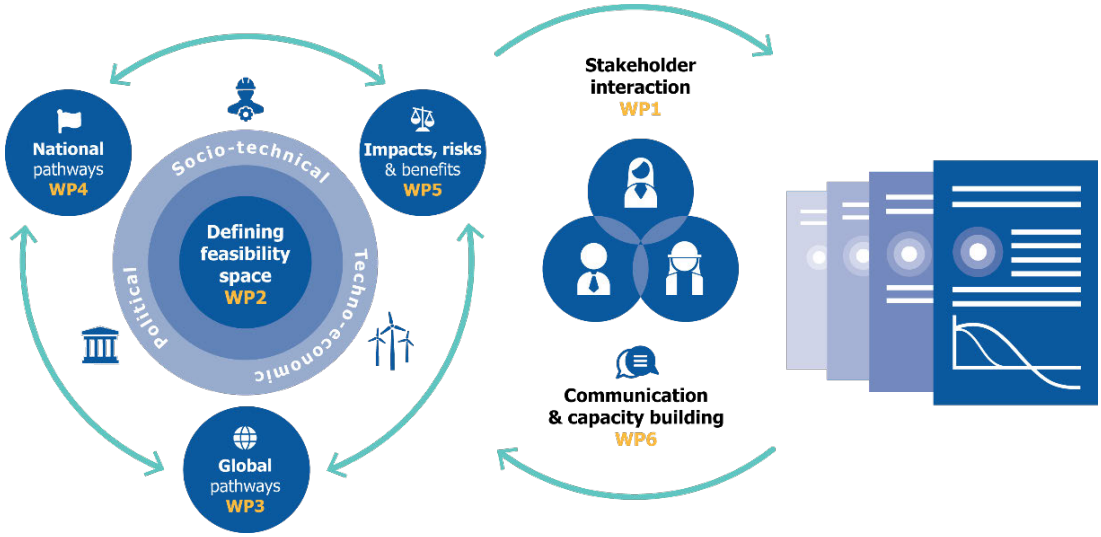
6.2 ENGAGE

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 3 月 1 日から 5 日にかけてオンラインで第 3 回会合が開催された。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、

1) 知識の協創
2) 多次元の実行可能性の概念化と運用
3) 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
4) 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
5) IPCC AR6 への貢献

である。本節では、ENGAGE の概要と第 3 回会合の結果、特に RITE が参画している Working Package（WP）に関する議論をまとめる。

図 6.2-1 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。



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 6.2-1 ENGAGE の Working Package

表 6.2-1 ENGAGE 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	

第 3 回会合では、各 WP・Task の進捗状況、そして次の会合までの実施事項の議論がなされた。以下では、RITE が参画している WP4 の Task 4.1 及び WP5 の中での主な議論をまとめる。

まず、WP4 Task 4.1 では国別の中期戦略を分析する。参加機関は表 6.2-2 の通りである。

表 6.2-2　Task 4.1 の参加機関

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

Task4.1 では分析シナリオの下で（表 6.2-3)、各国内レベルにおける現行そして実施される可能性のある気候変動対策の影響を分析する。

表 6.2-3　WP4 Task 4.1 の分析シナリオ

シナリオ名	詳細
ベースライン	ベースライントレンドに既に考慮されている以上の追加的気候政策が無いシナリオ
現行政策	NDCs 達成に向けた現在既に実施されている国内政策に基づいて、2030 年までのエネルギー、気候変動及び経済状態を分析する。
NDCs（条件無し)	条件無しの NDCs の影響を分析する。
NDCs（条件付き）	条件付きの NDCs の影響を分析する。
2050 年までの緩和シナリオ	シナリオは 2025 年から開始し、2050 年目標を達成する。（削減オプション：50%、100%削減など、国の状況を考慮して決定）

また、全ての分析チームは 2020 年における COVID-19 の影響を考慮し、全てのシナリオにおいて COVID-19 からの国内復興政策も含むことが要請されている。経済及び人口成長は SSP2 に基づく。第 3 回会合では、各機関のプレリミナリーな分析結果を基に分析機関でモデル比較を行い、今後は 2021 年 4 月末に最終報告を行う予定である。

次に WP5 の気候変動の影響・コベネフィット・トレードオフの分析については、第 3 回会合では、各分析機関によるプレゼンが行われ、現在の分析状況及び今後の分析の方向性について議論した。その中で、分析の優先順位が高いものは、大気汚染と健康、水、貧困とエネルギーアクセス、生物多様性が挙げられた。さらに、雇用に関する分析（E3M と PIK が既に実施中）も検討することが提案された。今後は、分析機関内で各指標の統一が必要であることが指摘され、更なる調整が必要である。

6.3　IEA WEO の分析

6.3.1　WEO シナリオの変遷

(1) WEO のシナリオ

① シナリオ名と分類

国際エネルギー機関（IEA）から毎年発刊される World Energy Outlook（WEO） は、世界と各地域のエネルギー需給の最新トレンドと将来の展望を示しており、世界で最も信頼されているエネルギー関連書籍である。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。

WEO のエネルギーの短中期的な将来の姿をシナリオに沿ってモデル分析した「展望」という形で示している。WEO2007 までは蓋然性が高い「リファレンスシナリオ」が詳細に記載され、感度分析のための比較シナリオがその時々で提示されるというスタイルが取られていた。気候変動関連のシナリオが登場したのは WEO2008 である。2008

年の洞爺湖サミットで IEA が「2050 年エネルギー起源 CO_2 半減シナリオ」を報告した後に発刊された WEO2008 で初めて、2℃安定化のシナリオ「450 シナリオ」が登場した。この後、WEO2010 でリファレンスシナリオは消え、中心シナリオは各国が導入を公表している政策を織り込んだ新政策シナリオ（NPS）と名前を変え、過去のトレンドが将来も続くという BAU 的な想定の現行政策シナリオ（CPS）が 450S と共にレギュラーの比較シナリオとして定着した。シナリオの凡その分類 [2]を表 6.3.1-1 に示す。

表 6.3.1-1 WEO のシナリオの分類

分類		WEO2008 以降の WEO シナリオ
レギュラーシナリオ	中心シナリオ	WEO2010～WEO2018：NPS（新政策シナリオ） → WEO2019～：STEPS（公表政策シナリオ） エネルギー需給予測に基づき、エネ起 CO_2 排出量に関しては各国の公表済みの新政策を反映したシナリオ WEO2015 以降は各国の INDC/NDC の排出削減目標と整合をとっている
	2℃シナリオ	WEO2008～WEO2016：450S（450 シナリオ） →WEO2017～：SDS（持続可能な開発シナリオ） 2℃抑制目標を達成するエネ起 CO_2 排出量と整合する backcasting 型シナリオ
	BAU シナリオ	WEO2010～WEO2019：CPS（従来政策シナリオ） WEO2020：該当シナリオなし 過去のエネルギー需給トレンドが継続する BAU シナリオ
特別シナリオ		各 WEO の特集や注目点に応じて、石油価格低迷シナリオ、電化進捗シナリオなどが想定されてきた

本稿では、レギュラーシナリオが定着した WEO2010 から最新の WEO2020 までを対象として、WEO の中心シナリオと 2℃シナリオの変遷について分析した結果を述べる。

② シナリオの展望年と開示データ

WEO では巻末に AnnexA として世界および主要な国・地域別のエネルギーバランスおよび電力・エネルギー起源 CO_2 排出量の最新実績および将来展望の値が記載されている。歴代 WEO の AnnexA に記載されている将来展望の対象年は表 6.3.1-2 に示す通りである。

[2] WEO2020 においては従来のシナリオの位置づけが変化している可能性があるが、それについては本節の最後に記載する。

表 6.3.1-2 中心シナリオと 2℃シナリオの名称と Aneex A 記載の実績年・展望年

	中心ｼﾅﾘｵ	実績		展望					
	2℃ｼﾅﾘｵ	基準	最新	2015	2020	2025	2030	2035	2040
WEO2010	NPS	1990	2008	○	○	○	○	○	
	450S				○		○	○	
WEO2011	NPS	1990	2009	○	○	○	○	○	
	450S				○		○	○	
WEO2012	NPS	1990	2010	○	○	○	○	○	
	450S				○		○	○	
WEO2013	NPS	1990	2011		○	○	○	○	
	450S				○		○	○	
WEO2014	NPS	1990	2012		○	○	○	○	○
	450S				○		○		○
WEO2015	NPS	1990	2013		○	○	○	○	○
	450S				○		○		○
WEO2016	NPS	1990	2014		○	○	○	○	○
	450S				○		○		○
WEO2017	NPS	2000	2015/2016			○	○	○	○
	SDS					○	○		○
WEO2018	NPS	2000	2016/2017			○	○	○	○
	SDS					○	○		○
WEO2019	STEPS	2010	2017/2018			○	○	○	○
	SDS						○		○
WEO2020	STEPS	2010	2018/2019			○	○		○
	SDS	2010	2018/2019			○	○		○

この表から、過去 11 年の WEO の展望を比較する場合、全てのデータが比較可能なのは 2030 年展望のみであり、更に先の将来を比較したい場合は WEO2014 以降の 7 年分の 2040 年展望が比較可能である。よって、本稿では WEO2010 から WEO2020 までの 2030 年展望、および WEO2014 から WEO2020 までの 2040 年展望の比較・分析を行った結果を示す。

AnnexA に示されている指標について、WEO2020 の例を表 6.3.1-3 に示す。過去 11 年間において再エネの内訳などに若干の変化があるものの、ほぼ変わらない。

表 6.3.1-3 Annex A に記載されているデータ項目（WEO2020 World の例）

エネルギーバランス	電力および エネルギー起源 CO_2
一次エネルギー需要合計(Mtoe) 　石炭 　石油 　天然ガス 　原子力 　水力 　バイオエネルギー 　その他再生可能エネルギー 電力部門 　石炭 　石油 　天然ガス 　原子力 　水力 　バイオエネルギー 　その他再生可能エネルギー その他エネルギー部門 　電力 最終エネルギー消費合計(Mtoe) 　石炭 　石油 　天然ガス 　電力 　熱 　その他再生可能エネルギー 産業部門 　石炭 　石油 　天然ガス 　電力 　熱 　その他再生可能エネルギー 輸送部門 　石油 　　うち国際バンカー 　電力 　バイオエネルギー 　その他燃料 民生・業務（Buildings）部門 　石炭 　石油 　天然ガス 　電力 　熱 　バイオエネルギー 　　うちトラディショナルバイオマス 　その他再生可能エネルギー その他部門 　石油化学中間製品 "	発電電力量合計(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) 　石炭 　石油 　天然ガス 電力部門 　石炭 　石油 　天然ガス 最終消費部門 　石炭 　石油 　　うち国際バンカー 　天然ガス 　プロセスからの排出

これらのデータが、世界全体の数値の他、主要な国・地域別に提供されている。表 6.3.1-4 は WEO2010 と WEO2020 の Annex A の例を記載順に示している。（地域分類や名称は発刊年によって変化する。）

表 6.3.1-4 Annex A に記載されている地域分類

WEO2010	WEO2020
世界	世界
OECD	北米
OECD アメリカ	米国
米国	中南米
OECD ヨーロッパ	ブラジル
欧州連合	ヨーロッパ
OECD 太平洋	欧州連合
日本	アフリカ
非 OECD	南アフリカ
東欧／ユーラシア	中東
カスピ海（沿岸諸国）	ユーラシア
ロシア	ロシア
非 OECD アジア	アジア太平洋
中国	中国
インド	インド
中東	日本
アフリカ	東南アジア
ラテンアメリカ	OECD
ブラジル	非 OECD
	新興市場および発展途上国
	先進国

(2) シナリオの変遷－中心シナリオと 2℃シナリオを比較－

① 一次エネルギー需要の展望の変化

WEO2010～WEO2020 の中心シナリオと 2℃シナリオにおける世界のエネルギー源別一次エネルギー需要の 2030 年展望を図 6.3.1-1 に示す。

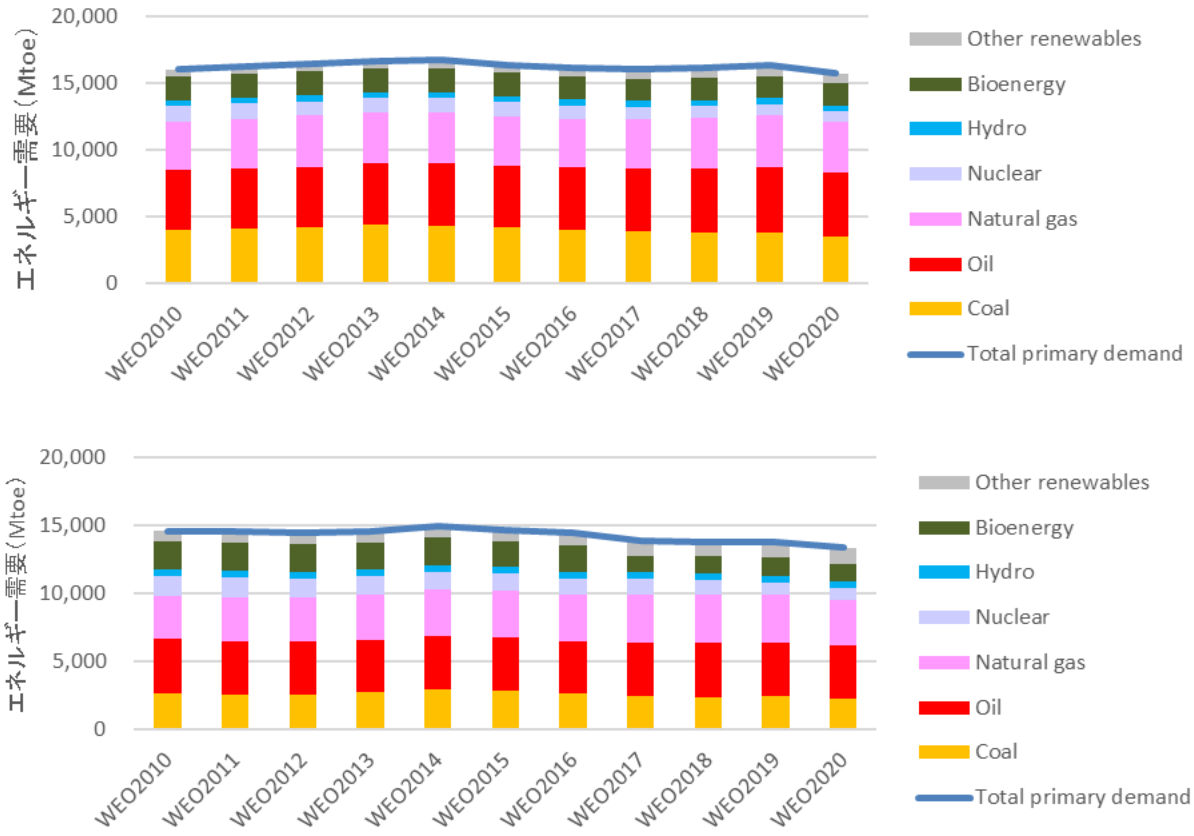


図 6.3.1-1 WEO2010～WEO2020 の世界一次エネルギー需要 2030 年展望（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

中心シナリオの世界一次エネルギー需要 2030 年展望は、平均値に対して－1～＋4%の範囲にあり、大きく変化はしていない。石油が最大のシェア（28～30%）を占めるという点、化石燃料合計のシェアは 75～77%を占めるという点は大きく変化していない。しかし、石炭とガスのシェアを比較すると WEO2017 までは石炭＞ガスであったのが、WEO2018 以降は石炭とガスの割合が逆転している。これは、ガスシフトのペースの想定を早めたことを意味する。

2℃シナリオの世界一次エネルギー需要 2030 年展望は、WEO2016 までは大きな変化はなかったが、WEO2017 で 5%低下（WEO2009～WEO2016 までの平均値比）し、WEO2020 では同 8%低下となっている。化石燃料は、合計値は平均値の±4%の範囲に、シェアは 74%±2%の範囲にあり、大きく変化はしていない。

中心シナリオと 2℃シナリオを比較すると、後者は前者に比べて低く、WEO2016 まではそのギャップは 10%前後であったが、WEO2017 から拡大しており WEO2020 では 16%となっている。

WEO2014～WEO2020 の中心シナリオと 2℃シナリオにおける世界のエネルギー源別一次エネルギー需要の 2040 年展望を図 6.3.1-2 に示す。

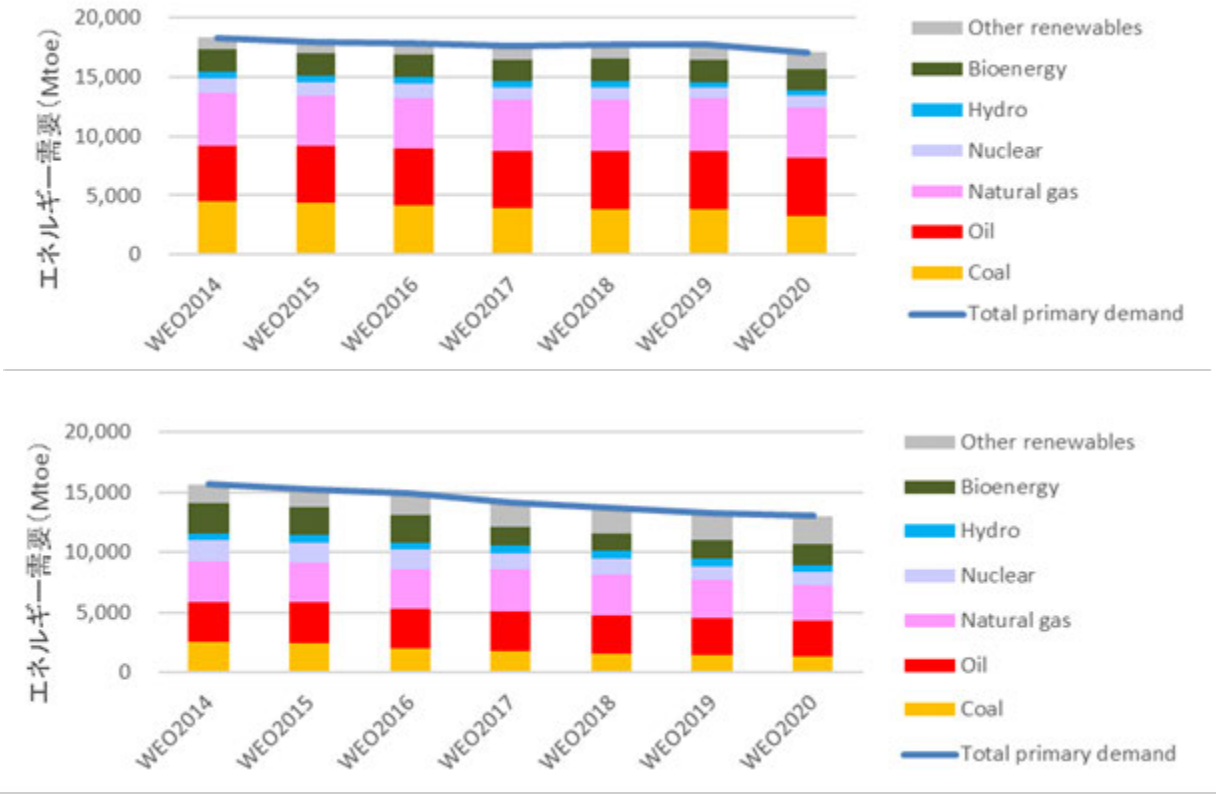


図 6.3.1-2 WEO2010～WEO2020 の世界一次エネルギー需要 2040 年展望（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

2℃シナリオの世界一次エネルギー需要 2040 年展望は WEO2014 から WEO2020 にかけて漸減している。石油が最大のシェア（26～29%）を占めるという点、化石燃料合計のシェアは 73～77%を占めるという点では大きく変化はしていない。一方、石炭とガスのシェアを比較すると WEO2015 までは石炭＞ガスであったのが WEO2016 以降は石炭とガスの割合が逆転している。これは、ガスシフトのペースの想定を（2030 年想定を変更する 2 年前に）早めたことを意味している。

2℃シナリオの世界一次エネルギー需要 2040 年展望は WEO2014 から毎年減少して WEO2020 では 17%低下している。化石燃料の 2040 年展望は、合計値もシェアも共に減少傾向にあり、合計値で 22%、シェアで 6%減少している。

中心シナリオと 2℃シナリオを比較すると、後者は前者に比べて低く、そのギャップは拡大しており、2040 年展望のシナリオ間ギャップは WEO2017 では 15%、WEO2020 では 24%となっている。

② 最終エネルギー消費と部門別の展望

a. 世界合計の展望の変化

WEO2010～WEO2020 の中心シナリオと 2℃シナリオにおける世界の部門源別エネルギー最終消費の 2030 年展望を図 6.3.1-3 に示す。



図 6.3.1-3 WEO2010～WEO2020 の部門別世界最終エネルギー消費 2030 年展望（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

中心シナリオの世界最終エネルギー消費 2030 年展望は、平均値に対して－3～＋2%の範囲にあり、大きく変化はしていない。部門別の割合も大きく変わらない。

2℃シナリオの世界最終エネルギー消費 2030 年展望は、WEO2016 までは大きな変化はなかったが、WEO2017 で前年比 5%低下している。この減少は Buildings 部門の減少によるものである。（その要因については後述）

中心シナリオと 2℃シナリオを比較すると、後者は前者に比べて低く、シナリオ間ギャップは WEO2016 までは約 8%であったが、WEO2017 から拡大して WEO2020 では 14%となっている。

WEO2014～WEO2020 の中心シナリオと 2℃シナリオにおける世界の部門源別エネルギー最終消費の 2040 年展望を図 6.3.1-4 に示す。

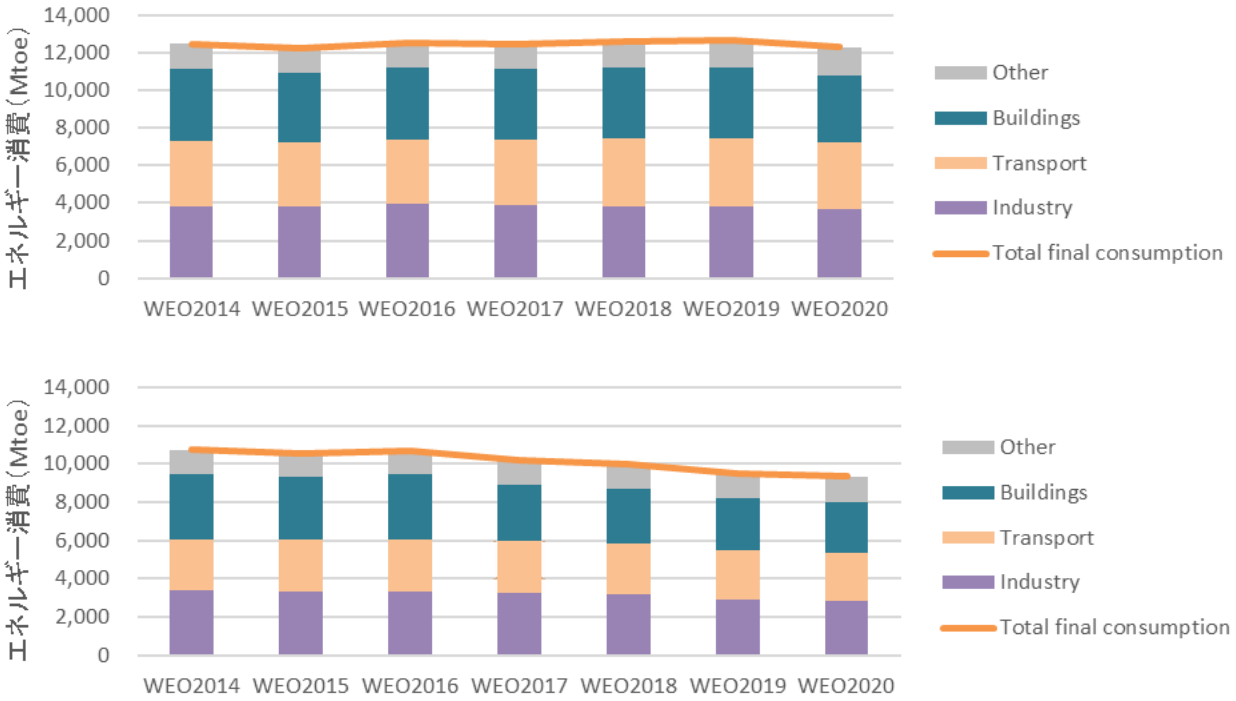


図 6.3.1-4 WEO2014～WEO2020 の世界最終エネルギー消費 2040 年展望（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

中心シナリオの世界最終エネルギー消費 2040 年展望も同±2%の範囲にあり、大きく変化はしていない。部門別の割合も大きく変わらない。

2℃シナリオの世界最終エネルギー消費 2040 年展望は WEO2016 まではほぼ一定であったが、WEO2017 から低下し始め、WEO2020 では-13%となっている。WEO2016 から WEO2017 にかけての低下は Buildings 部門の減少によるものである（その要因については後述）が、それ以降の低下は全ての部門の減少によるものである。

中心シナリオと 2℃シナリオを比較すると、後者は前者に比べて低く、2040 年展望のシナリオ間ギャップは WEO2014 から WEO2016 までは約 14%とほぼ一定であったのが、WEO2017 から拡大して WEO2020 では 24%となっている。

b. 産業部門の展望の変化

WEO2010～WEO2020 の中心シナリオと 2℃シナリオにおける産業部門のエネルギー種別エネルギー最終消費の 2030 年展望を図 6.3.1-5 に示す。

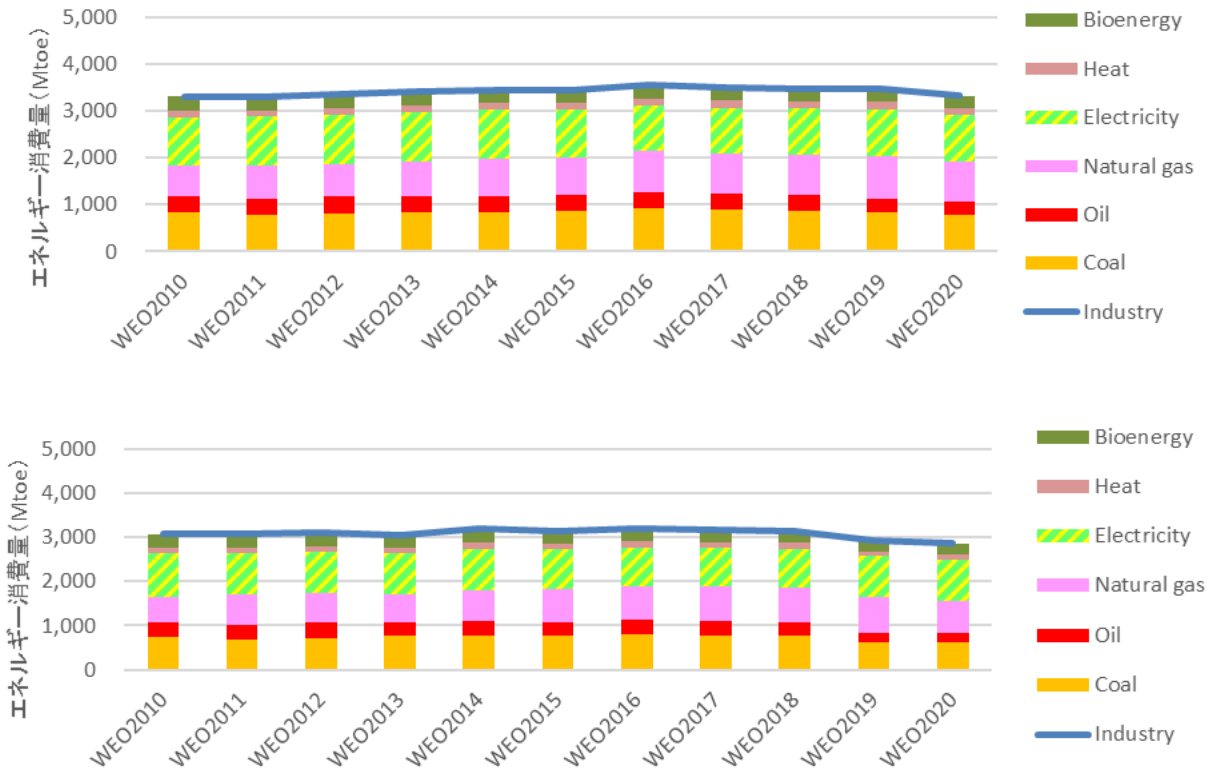


図 6.3.1-5 WEO2010～WEO2020 の世界産業部門最終エネルギー消費 2030 年展望
（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

産業部門の中心シナリオの世界最終エネルギー消費 2030 年展望は、WEO2010 比で WEO2017 では 7%増加したがその後低下して WEO2020 では同レベルに戻っている。そのエネルギー構成に着目すると、石炭・石油が減少、ガスがその分増加して化石割合は 56～60%と大きく変わらず、また電気の割合も 28～31%と大きく変わらない。

産業部門の 2℃シナリオの世界最終エネルギー消費 2030 年展望は、WEO2010 から WEO2013 までほぼ一定、WEO2014 で 4%増加して WEO2018 までほぼ一定だったが、WEO2018 から WEO2019 にかけて 7%低下している。化石燃料割合は同様に WEO2018 から WEO2019 にかけて 12%低下し、燃料別には石炭が 15%、石油が 25%の低下、ガスが 1%の増加となっている。

中心シナリオと 2℃シナリオを比較すると、後者は前者に比べて低く、シナリオ間ギャップは WEO2018 までは 7～10%の範囲にあったが、WEO2019 で 15%、WEO2020 では 13%となっている。

WEO2014～WEO2020 の中心シナリオと 2℃シナリオにおける産業部門のエネルギー種別エネルギー最終消費の 2040 年展望を図 6.3.1-6 に示す。

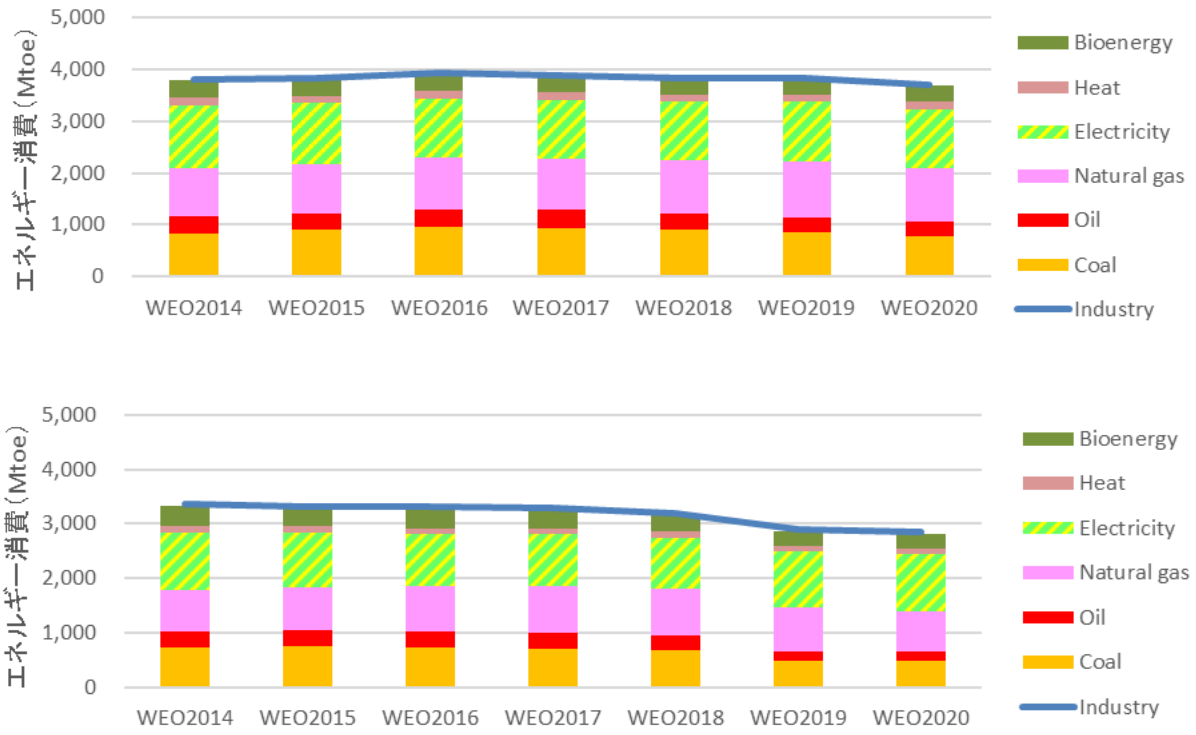


図 6.3.1-6 WEO2010～WEO2020 の世界産業部門最終エネルギー消費 2040 年展望
（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

産業部門の中心シナリオの世界最終エネルギー消費 2040 年展望は、平均値の±3%の範囲にあり、大きな変化はない。そのエネルギー構成に着目すると、石炭・石油が減少、ガスがその分増加して化石割合は 56～60%と大きく変わらず、また電気の割合も 29～32%と大きく変わらない。

産業部門の 2℃シナリオの世界最終エネルギー消費 2040 年展望は、WEO2014 から WEO2018 まで毎年 1%程度の低下であったが、WEO2018 で 9%低下し、WEO2020 では WEO2014 比で 15%の低下となっている。化石燃料割合は WEO2018 までほぼ一定であったが、WEO2019 で 18%、WEO2020 で 23%低下した。WEO2014 から WEO2020 への変化を燃料別に見ると、石炭が 34%、が石油 43%、ガスが 4%の低下となっている。また、電気の割合は WEO2018 までは 30%前後であったのが、WEO2019 で 36%、WEO202020 で 38%と増加している。

中心シナリオと 2℃シナリオを比較すると、後者は前者に比べて低く、シナリオ間ギャップは拡大し続けており、WEO2014 では 11%であったのが WEO2020 では 23%となっている。

c. 輸送部門の展望の変化

WEO2010～WEO2020 の中心シナリオと 2℃シナリオにおける輸送部門のエネルギー種別エネルギー最終消費の 2030 年展望を図 6.3.1-7 に示す。



図 6.3.1-7 WEO2010～WEO2020 の世界輸送部門最終エネルギー消費 2030 年展望
（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

輸送部門の中心シナリオの世界最終エネルギー消費 2030 年展望は、WEO2016 と WEO2017 を例外として、概ね増加傾向にある。そのエネルギー構成は圧倒的に石油の割合が高く WEO2010 の 89%から WEO2020 の 87%と僅かに低下している。電気の割合は WEO2010 の 2%から WEO2020 の 3%へと僅かに増加している。

輸送部門の 2℃シナリオの世界最終エネルギー消費 2030 年展望は、WEO2017 までほぼ一定だったが、WEO2018 で 5%増加している。そのエネルギー構成は圧倒的に石油の割合が高く WEO2010 の 88%から WEO2018 の 77%まで低下したが、その後上昇して WEO2020 では 80%となっている。電気の割合は WEO2010 の 3%から WEO2020 の 4%へと僅かに増加している。

中心シナリオと 2℃シナリオを比較すると、後者は前者に比べて低く、シナリオ間ギャップは 9%から 16%の間で変化しており、一定の傾向は見られない。

WEO2014～WEO2020 の中心シナリオと 2℃シナリオにおける輸送部門のエネルギー種別エネルギー最終消費の 2040 年展望を図 6.3.1-8 に示す

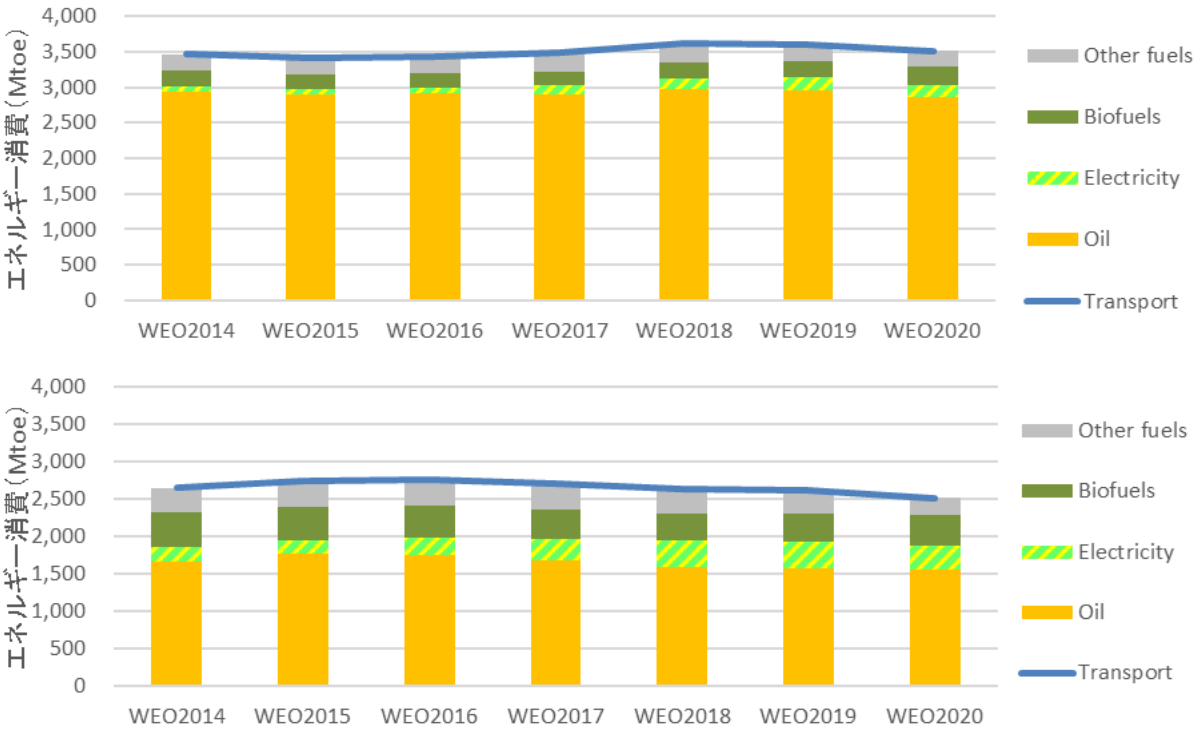


図 6.3.1-8 WEO2014～WEO2020 の世界輸送部門最終エネルギー消費 2040 年展望
（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

輸送部門の中心シナリオの世界最終エネルギー消費 2040 年展望は、-1%～+4%の範囲にあり、一定の変化は見られない。そのエネルギー構成は圧倒的に石油の割合が高く WEO2010 の 85%から WEO2020 の 81%と低下している。電気の割合は WEO2010 の 2%から WEO2020 の 5%へと増加している。

輸送部門の 2℃シナリオの世界最終エネルギー消費 2040 年展望は、WEO2017 までほぼ一定だったが、WEO2018 から毎年低下している。そのエネルギー構成は石油の割合が 62～65%と高く、次いでバイオマスの割合が 14～18%となっており、これらの変化には一定の傾向はない。一方、電気の割合は年々高くなっており WEO2014 の 7%から WEO2020 では 13%となっている。

中心シナリオと 2℃シナリオを比較すると、後者は前者に比べて低く、シナリオ間ギャップは WEO2015 以降拡大傾向にあり、WEO2015 の 19%から WEO2020 の 29%まで拡大している。

d. 民生・業務部門の展望の変化

WEO2010～WEO2020 の中心シナリオと 2℃シナリオにおける民生・業務部門のエネルギー種別エネルギー最終消費の 2030 年展望を図 6.3.1-9 に示す。



図 6.3.1-9 WEO2010～WEO2020 の世界民生・業務部門最終エネルギー消費 2030 年展望（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

民生・業務部門の中心シナリオの世界最終エネルギー消費 2030 年展望は、WEO2010 から WEO2020 にかけての平均値の±5%の範囲にあり、大きな変化はない。そのエネルギー構成に着目すると、化石燃料は 33%±1%の範囲で増減しているが、バイオマスは WEO2010 の 25%から WEO2020 の 21%へと減少傾向、電気は同 35%から 38%へと増加傾向にある。

民生・業務部門の 2℃シナリオの世界最終エネルギー消費 2030 年展望は、WEO2010 から WEO2016 まではほぼ一定であったが、WEO2017 で 15%低下している。エネルギー構成に着目すると、バイオマスが WEO2017 において、WEO2010 から WEO2016 の平均値の約 3 割に減少しており、電気は WEO2010 から WEO2016 まで 35%±1%であったのが WEO2017 で 43%に増加している。

中心シナリオと 2℃シナリオを比較すると、後者は前者に比べて低く、シナリオ間ギャップは WEO2016 までは 7～9%の範囲にあったが、WEO2017 で 19%に拡大し、WEO2020 では 20%となっている。

WEO2014～WEO2020 の中心シナリオと 2℃シナリオにおける輸送部門のエネルギー種別エネルギー最終消費の 2040 年展望を図 6.3.1-10 に示す。

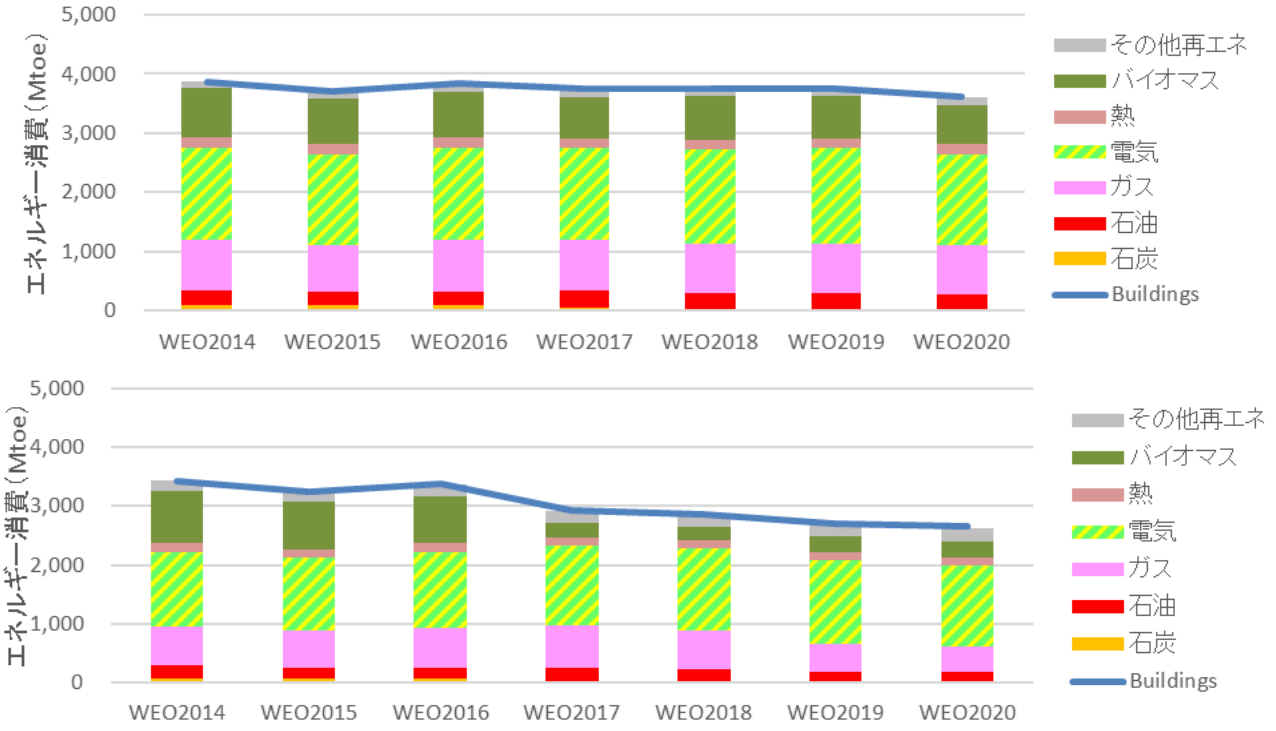


図 6.3.1-10 WEO2014～WEO2020 の世界民生・業務部門最終エネルギー消費 2040 年展望（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

民生・業務部門の中心シナリオの世界最終エネルギー消費 2040 年展望は、平均値の±4%の範囲にあり、大きな変化はない。そのエネルギー構成に着目すると、化石燃料は 31%±1%の範囲で増減しているが、電気の割合は WEO2010 の 40%から WEO2020 の 43%へと増加傾向、バイオマスの割合は WEO2010 の 22%から WEO2020 の 18%へと減少傾向にある。

民生・業務部門の 2℃シナリオの世界最終エネルギー消費 2040 年展望は、WEO2017 で 15%低下している。エネルギー構成に着目すると、バイオマスが WEO2017 において、WEO2014 から WEO2016 の平均値の 3 割に減少しており、電気は WEO2016 まで 38%であったのが、WEO2017 で 47%に増加し、WEO2019 では 53%にまで増加している。

中心シナリオと 2℃シナリオを比較すると、後者は前者に比べて低く、シナリオ間ギャップは WEO2016 まで 12%であったが、WEO2017 で 22%に拡大し、WEO2020 では 27%となっている。

ここで、業務・民生部門におけるバイオマス利用が WEO2017 で激減した理由について考えてみる。WEO2017 は 2℃シナリオが SDS となったタイミングである。WEO2017 では、持続可能な開発シナリオ　Sustainable Development Scenario（SDS）は、国連が 2030 年までに達成することを定めた 17 の SDG のうちの以下の 3 つを同時達成するシナリオであるとして、気候変動のみを考慮した従来の 450 シナリオとは異なることを強調している。

SDG３：健康と福祉

SDG７：安価でクリーンなエネルギーを全ての人に
SDG13：気候変動への対応・・パリ協定の 2℃目標と整合

「健康」および「クリーンエネルギーへのアクセス」の考慮の手法として、450 シナリオに汚染物質（SO_x、NO_x、PM2.5）の低減対策を追加し、その効果を別のモデル（IIASA の GAIN）で確認した上で、目標達成まで対策を積み上げた、と記載している。SO_x・NO_x 対策として火力 PS への環境設備設置、PM2.5 対策としてバイオマス燃焼調理器具の電化/ガス化などを挙げ、その効果を以下の図 6.3.1-11 で示している。

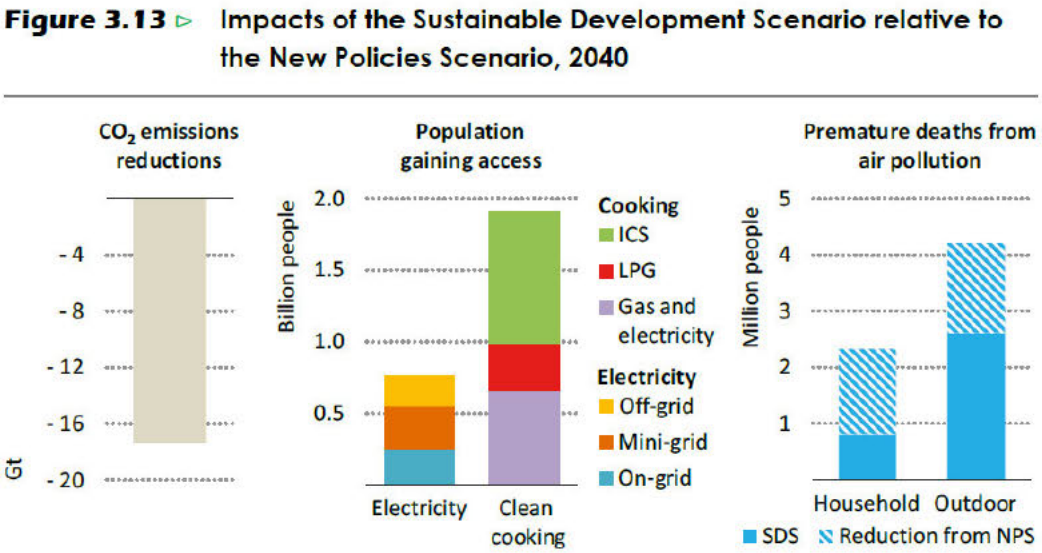


図 6.3.1-11 WEO2017 に示された SDS の説明

民生・業務部門におけるエネルギー消費の構成の推移を先進国／途上国別に見ると以下の図 6.3.1-12 の通りである。

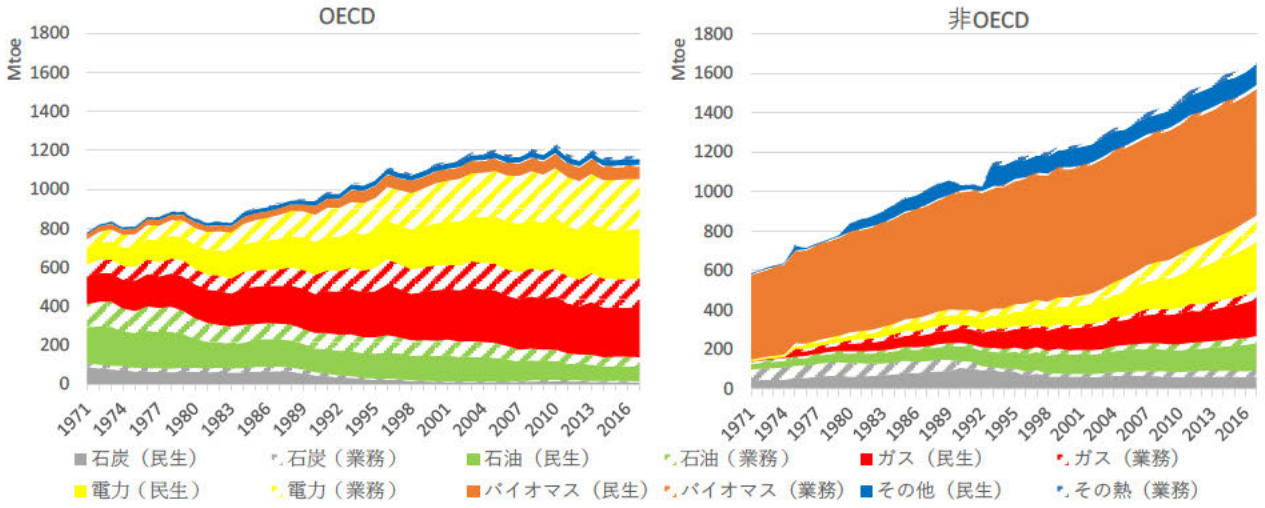


図 6.3.1-12 先進国（左）途上国（右）の民生・業務部門のエネルギー消費とその構成

途上国においては圧倒的にバイオマスの割合が高いが、これは貧困層が調理や暖を取るために用いる木の枝や動物の糞尿（traditional biomass と呼ばれる）がほとんどであり、それらの室内燃焼は PM2.5 やブラックカーボンの発生を伴い、途上国の早世率を高める一因となっている。

歴代 WEO の民生･業務部門の 2℃シナリオ 2030 年展望を先進国／途上国別に見ると以下の図 6.3.1-13 のようである。

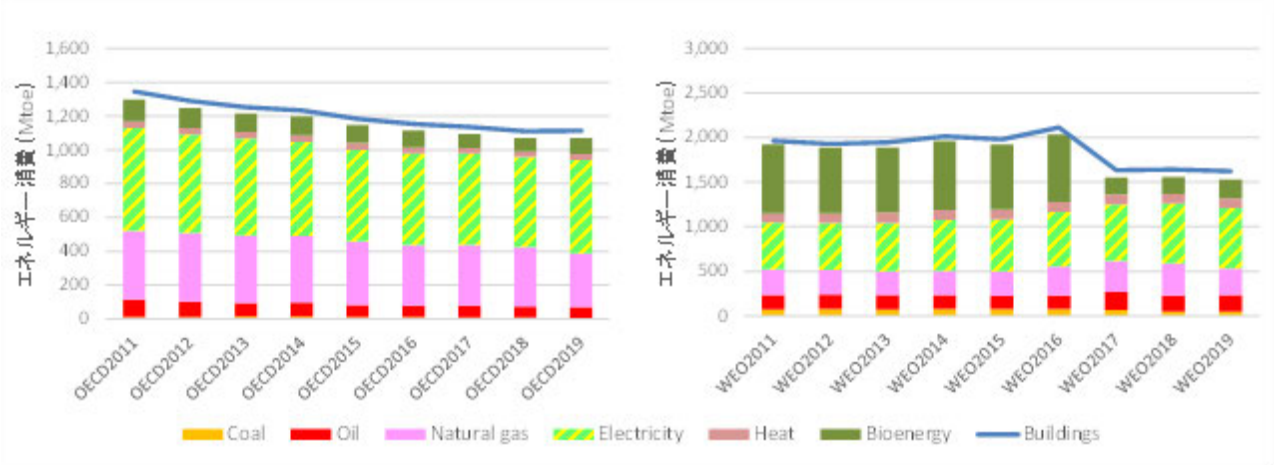


図 6.3.1-13 WEO2010～WEO2020 の先進国(左)と途上国（右）における 2℃シナリオの民生・業務部門のエネルギー消費 2030 年展望の変化

このように、先進国では WEO2017 において大きな変化は見られないが、途上国では WEO2017 においてバイオマス利用の激減と電気利用の急増が起きており、これが世界全体に影響を与えていることがわかる。即ち、WEO2017 における SDS の「健康への考慮」により、途上国の traditional biomass 利用をクリーンな調理器具や電気で置換したことが、世界全体の民生・業務部門のバイオマス利用を激減させたのである。

バイオマス激減の理由は判明したが、激減したバイオマスのエネルギー量に比較して電気の増加は小さく、全体の需要は大きく減少している。

電気は useful energy としての有用性が高いため、全体の需要を減らす効果はあると考えらえるが、WEO2017 以降のバイオマスと電気の置換が十分に民生・業務部門の需要を満たしているかどうかは疑問が残り、利用実態が不明であるのでその検証は困難である。

③ 発電電力量の展望

a. 世界合計と電源構成の変化

WEO2010～WEO2020 の中心シナリオと 2℃シナリオにおける世界のエネルギー源別発電電力量の 2030 年展望を図 6.3.1-14 に示す。

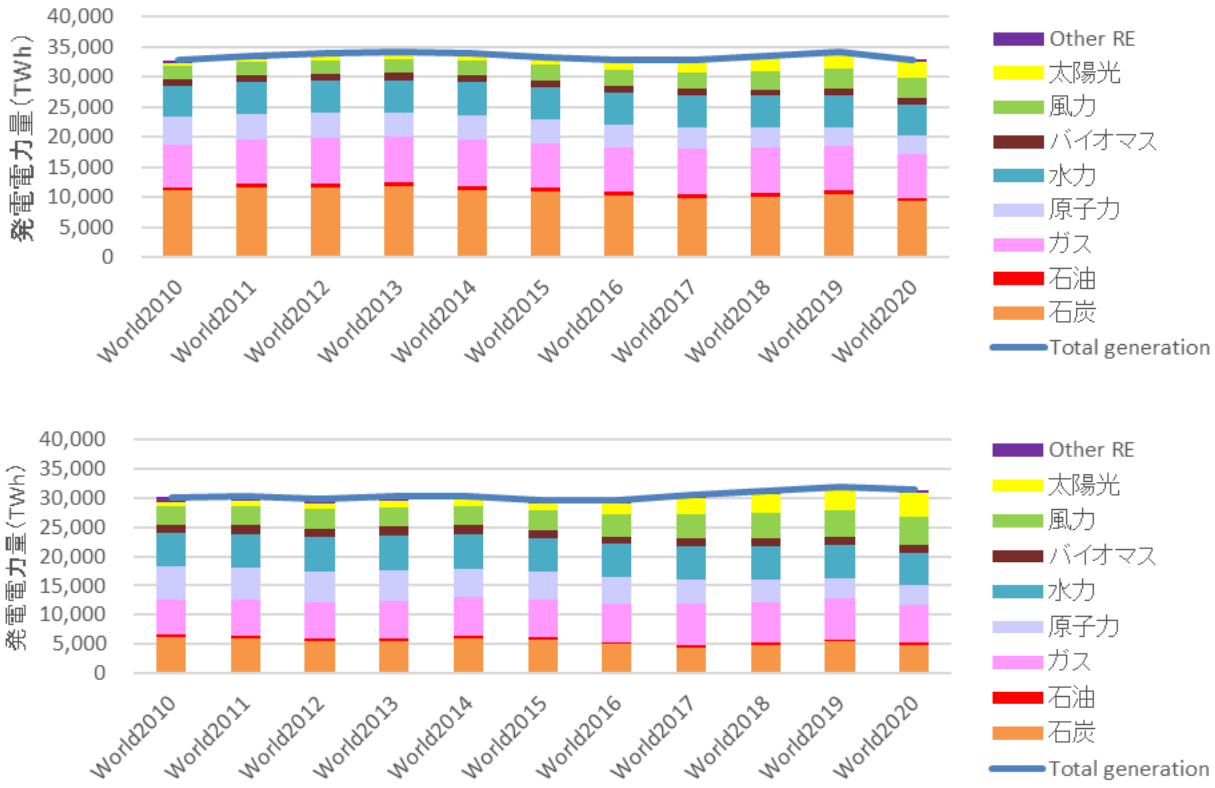


図　6.3.1-14 WEO2010～WEO2020 の世界発電電力量 2030 年展望（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

中心シナリオの世界発電電力量 2030 年展望は、平均値に対して±2%の範囲にあり、ほぼ一定である。その構成に着目すると、石炭の割合は WEO2014 まで 35%±1%であったが、WEO2015 以降低下して WEO2020 では 28%となっており、化石燃料合計のシェアは WEO2015 まで 57%±1%であったが WEO2016 以降低下して WEO2020 で 52%となっている。割合は低下したが石炭が最大の電源であるということは変わっていない。再エネ割合は WEO2014 まで 29%と一定であったが WEO2015 以降増加傾向にあり、WEO2020 では 38%となっている。太陽光は WEO2010 の 1.3%から WEO2020 では 8.4%に増加、風力は WEO2010 の 7%から 10%に増加している。原子力の割合は漸減しており、WEO2010 の 14%から WEO2020 では 9%となっている。

2℃シナリオの世界発電電力量 2030 年展望は、WEO2017 までは平均値の±2%の範囲にあり大きな変化はなかったが、WEO2018 以降は 3～5%高いレベルにある。石炭の割合は WEO2015 まで 20%±1%の範囲にあったが WEO2016 で 16%に低下している。化石燃料合計の割合は、ガスが石炭の減少を補う形で増加して WEO2019 まで 41%±2%の範囲にありほぼ一定だったが、WEO2020 で 36%に低下した。再エネは一貫して増加しており WEO2010 の 39%から WEO2020 では 52%となっている。中でも太陽光は WEO2010 の 2.4%から WEO2020 では 14%に、風力は同 11%から 15%に増加している。原子力の割合は一貫して低下しており、WEO2010 の 19%から WEO2020 では 11%となっている。

中心シナリオと 2℃シナリオを比較すると、後者は前者に比べて低く、そのギャップは WEO2010 では 8%であったのが WEO2012 では 12%に拡大したが WEO2016 以降は縮小傾向にあり、WEO2020 では 4%となっている。

WEO2014～WEO2020 の中心シナリオと 2℃シナリオにおける世界のエネルギー源別発電電力量の 2040 年展望を図 6.3.1-15 に示す。

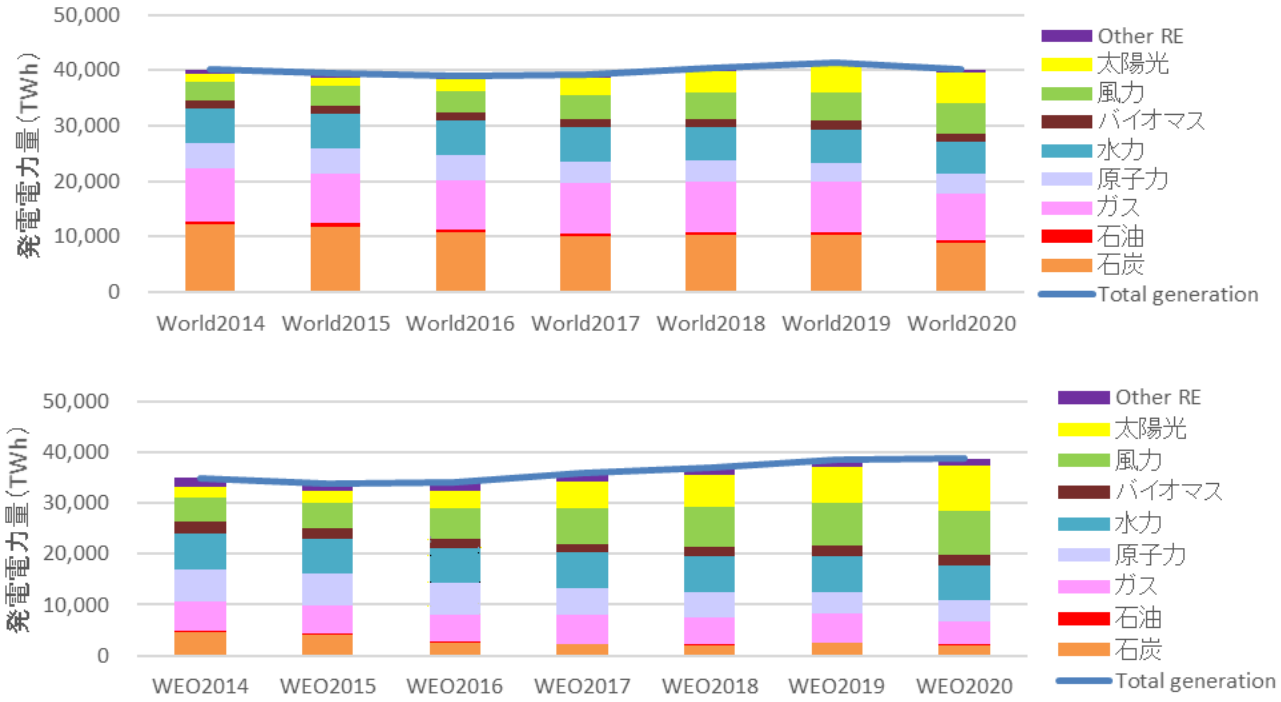


図 6.3.1-15 WEO2014～WEO2020 の世界発電電力量 2040 年展望（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

中心シナリオの世界発電電力量 2040 年展望は、平均値に対して±3%の範囲にあり、ほぼ一定である。その構成に着目すると、石炭の割合は一貫して低下しており WEO2010 の 31%から WEO2020 では 22%となっており、化石燃料合計のシェアも同様に WEO2010 の 31%から WEO2020 の 22%へと低下している。再エネ割合は一貫して増加傾向にあり、WEO2010 では 33%であったのが WEO2020 では 47%となっている。太陽光は WEO2010 の 3%から WEO2020 では 14%に増加、風力は WEO2010 の 8%から 14%に増加している。原子力の割合は漸減しており、WEO2010 の 12%から WEO2020 では 9%となっている。

2℃シナリオの世界発電電力量 2040 年展望は、WEO2017 以降は増加傾向にあり、WEO2020 は WEO2014 比で 11%高くなっている。石炭の割合は WEO2014 の 13%から WEO2020 で 5%に低下している。化石燃料合計の割合も同様で、WEO2010 の 30%から WEO2020 には 17%に低下した。再エネは一貫して増加しており WEO2010 の 51%から WEO2020 では 79%となっている。中でも太陽光は WEO2010 の 6%から WEO2020 では

23%に、風力は同 14%から 22%に増加している。原子力の割合は一貫して低下しており、WEO2010 の 18%から WEO2020 では 11%となっている。

中心シナリオと 2℃シナリオを比較すると、後者は前者に比べて低く、WEO2014～WEO2016 では 13%あったギャップは、WEO2017 以降縮小しており、WEO2020 では 3%となっている。

b. 電源別の変化：原子力と太陽光・風力

図 6.3.1-14 に示した発電電力量の棒グラフを各電源の変化がよりわかりやすい折れ線グラフで表示したものが以下の図 6.3.1-16 である。

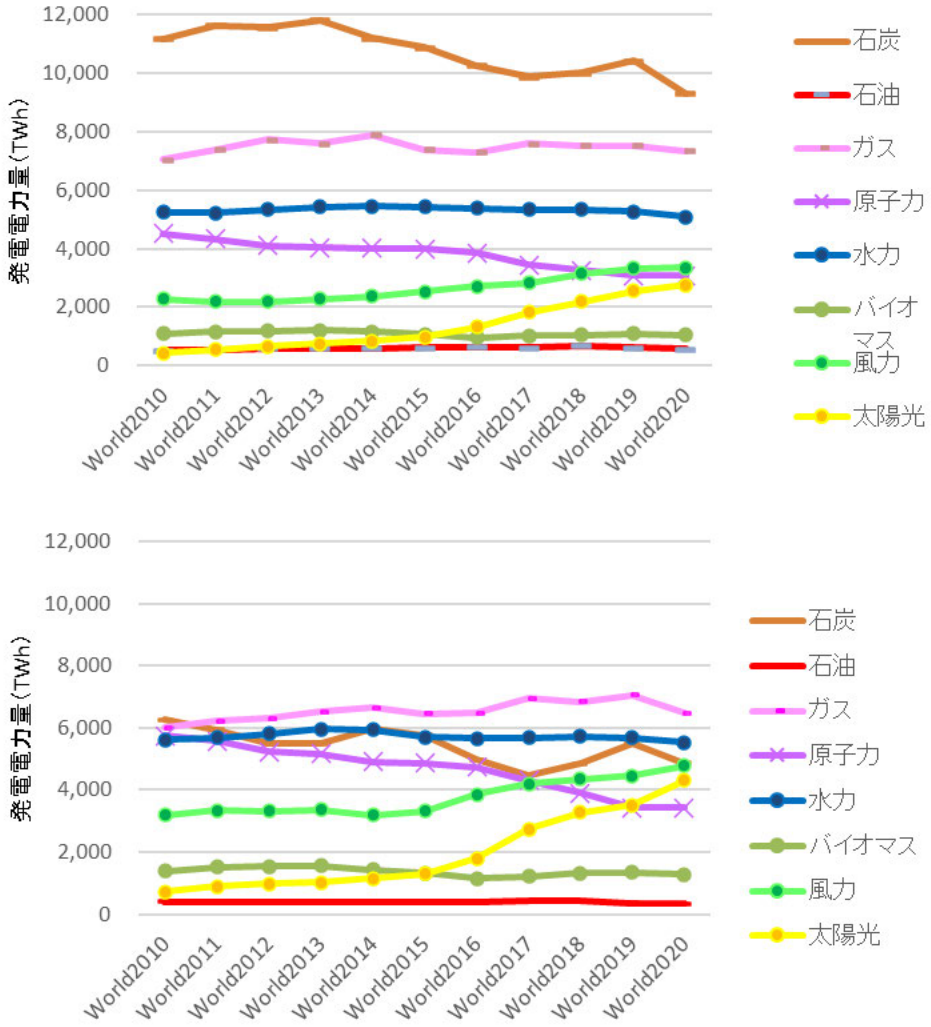


図 6.3.1-16 WEO2010～WEO2020 の世界燃料別発電電力量 2030 年展望 （上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

中心シナリオでは、太陽光の 2030 年展望は WEO2010 から WEO2020 で 6 倍に増加、風力は 50%増加した一方で、原子力は約 30%低下している。即ち、太陽光はかつてこれほどの増加は期待されていなかったものが、毎年上方修正をしている状況であることがわかる。中心シナリオでは発電電力量構成は総コストを最小化するように計算さ

れていることから、原子力は IEA の当初の予測を上回ってコストが上昇して導入予想量は低下し続け、太陽光は（導入促進政策の普及と共に）当初予測を上回ってコスト低下が進み導入予想量が増加し続けた、ということを意味する。

2℃シナリオでは、太陽光の 2030 年展望は WEO2010 から WEO2020 で 6 倍に増加、風力は 50%増加と増加割合は中心シナリオと同じである（初期値が異なるため絶対値は太陽光が中心シナリオの約 2 倍、風力は約 1.4 倍）。原子力については、低下割合は中心シナリオと同様で、絶対量は中心シナリオの約 1.1 倍である。

2040 年展望についても、図 6.3.1-15 に示した発電電力量の棒グラフを各電源の変化がよりわかりやすい折れ線グラフで表示して図 6.3.1-17 に示す。

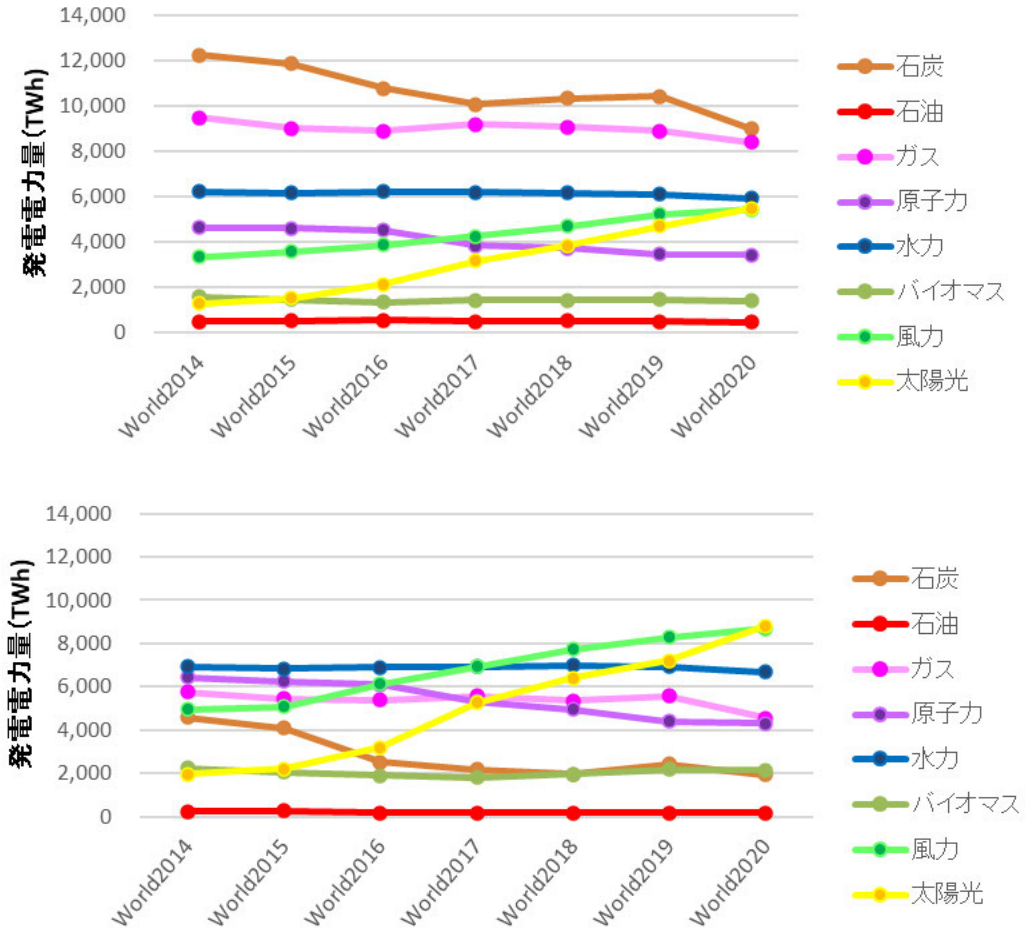


図 6.3.1-17 WEO2014～WEO2020 の世界燃料別発電電力量 2040 年展望　（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

中心シナリオの 2040 年展望では、太陽光は WEO2014 から WEO2020 で 4 倍に増加、風力は 6 割増加、原子力は 25%低下している。

2℃シナリオの 2040 年展望では、太陽光は WEO2014 から WEO2020 で 4 倍に増加、風力は 7 割増加、原子力は 33%低下している。

2℃シナリオの電源別 2030 年展望に太陽光と風力の合計を追加し、原子力と「太陽光＋風力」のカーブを強調したものを図 6.3.1-18 に示す。

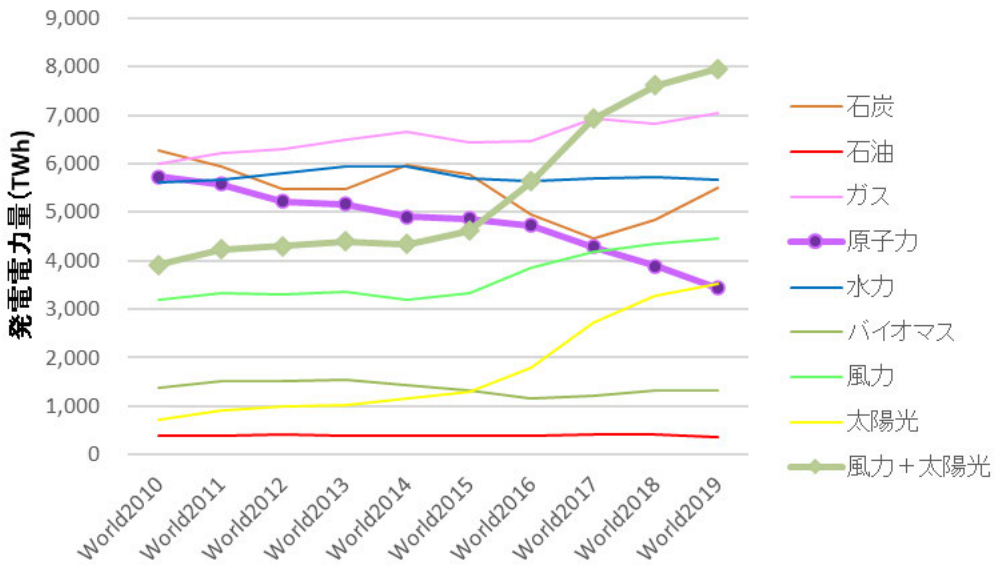


図 6.3.1-18 WEO2010～WEO2020 の 2℃シナリオ電源別発電電力量 2030 年展望

太陽光と風力の合計（図中の破線）と原子力の関係を見ると、WEO2015 で交差している。つまり、2℃シナリオにおけるゼロエミッション電源としての主役は、WEO2015 で原子力から風力・太陽光に入れ替わったということを意味する。ただし、原子力が低下する傾きに比べて、WEO2015 以降の太陽光＋風力の増加は急勾配であり、原子力をオフセットして余りあることから、別の要因があることが示唆される。

c. 石炭火力への注目

電源別発電電力量の 2030 年展望のシナリオ間ギャップ（2℃シナリオの発電電力量－中心シナリオの発電電力量）の変化を図 6.3.1-19 に示す。CO_2 排出を伴う全ての化石電源はマイナスに、ゼロ排出の非化石電源はプラスになるのは当然であるが、太陽光と風力のギャップが増加傾向にあるのはこれまでの分析結果から理解できるが、石炭のギャップが大きく不規則な変化をしていることが注目される。

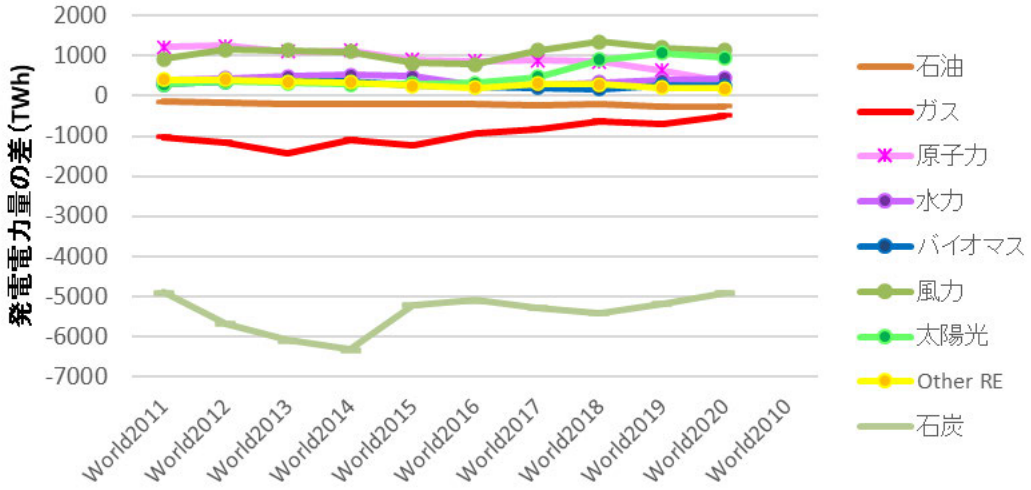


図 6.3.1-19 WEO2010～WEO2020 の燃料別発電電力量の中心シナリオと 2℃シナリオの差（2℃シナリオ発電量－中心シナリオ発電量）

そこで、石炭火力発電所の排出原単位を計算して比較してみた。図 6.3.1-20 に示すように、中心シナリオでは 2030 年、2040 年の両法で毎年同じレベルの値であるのに対して、2℃シナリオの 2030 年の排出原単位は WEO2015 までは中心シナリオ同年値より 2 割程度低いレベルであるのが、WEO2016 以降は中心シナリオと同じレベルとなっている。2℃シナリオの 2040 年展望の排出原単位は、中心シナリオの半分以下のレベルにあった WEO2014 から WEO2017 まで上方修正され、WEO2018 で再び減少、WEO2019 で上昇、と不規則に変化している。

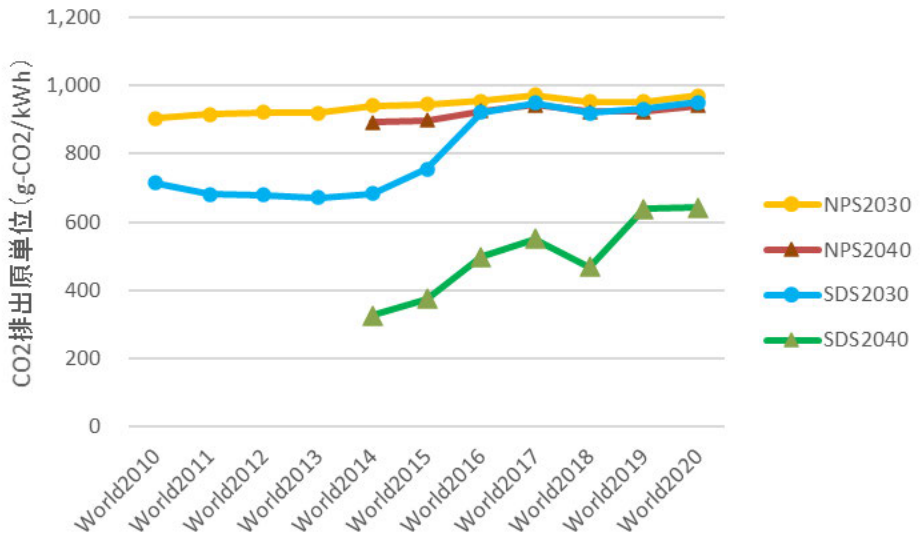


図 6.3.1-20 WEO2010～WEO2020 の石炭火力の CO_2 排出係数（2030 年/2040 年）

2℃シナリオの石炭火力の CO_2 排出原単位が中心シナリオから減少する原因としては、（中心シナリオに比べた）発電効率の向上と CCS による CO_2 貯留の 2 つの可能性

がある。しかし、歴代 WEO のデータ（電力部門の石炭需要と石炭による発電電力量）を確認した結果、2℃シナリオにおいては発電効率の向上はなく、むしろ僅かに低下していた。これは、2℃シナリオでは石炭火力は新設されないことを考えれば、当然と言える。従って、CO_2 排出原単位の減少は、全量 CCS によるものと仮定して、この貯留量を計算すると、図 6.3.1-21 のようになる。

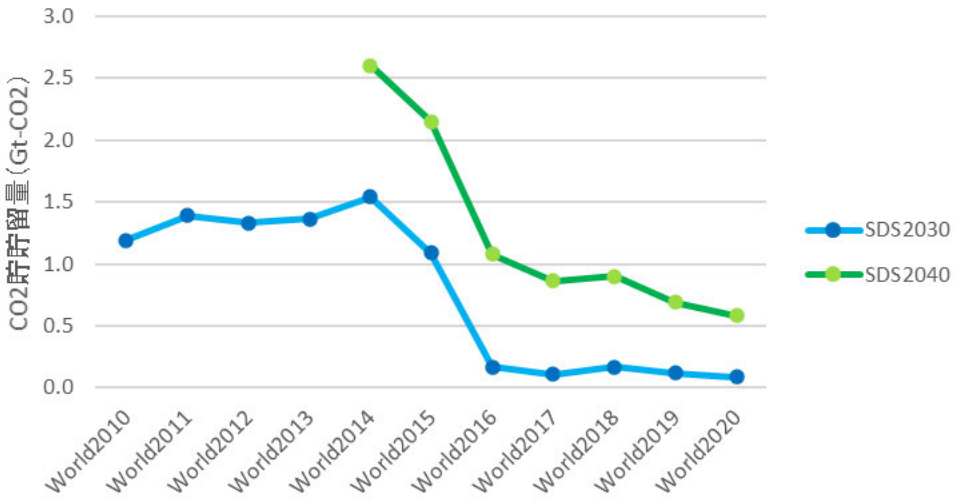


図 6.3.1-21 WEO2010～WEO2020 の石炭火力排出 CO_2 の貯留量

このように、当初の 2℃シナリオでは 2030 年に 1.5Gt の CO_2 回収が想定されており、これは 2 割以上の石炭火力発電所の 2 割以上に CCS が付いていることになる。それを、2015 年に下方修正して、2016 年からはゼロ（CCS 付きの石炭火力は存在しない）としている。2040 年には WEO2014 では 2.5Gt の CO_2 貯留（石炭火力の 6 割に CCS 付帯）を想定していたが、WEO2016 以降は約 1 Gt（石炭火力の約 3 割に CCS 付帯）と想定を変更している。この CCS の想定の下方修正変化は、前述の 2℃シナリオの太陽光・風力が 2015 年から上方修正されていることと一致する。

ここで、2℃シナリオにおける電力部門からの CO_2 排出量展望の変化を見てみると、図 6.3.1-22 に示す通りであり、2030 年展望と 2040 年展望のいずれにおいても、石炭火力の CCS 想定の変更のように 1Gt を超えるような急激な変化は見られない。

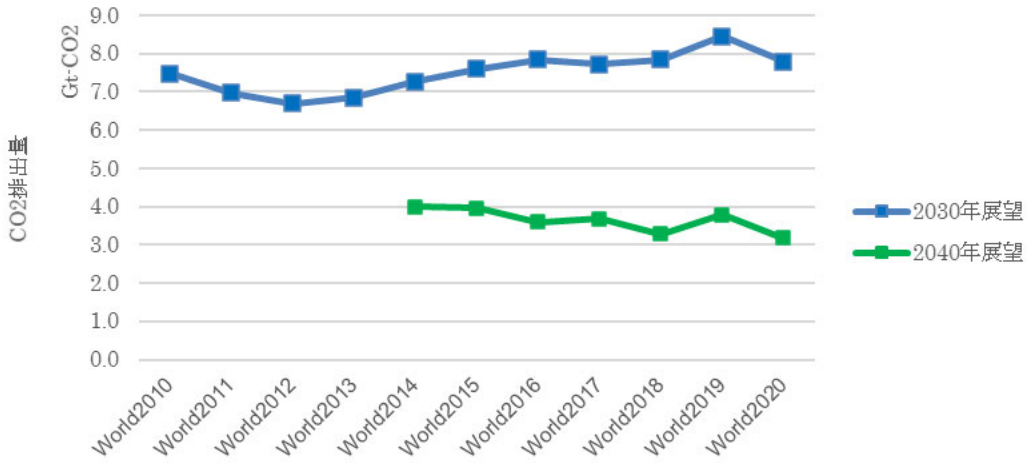


図 6.3.1-22 WEO2010～WEO2020 の 2℃シナリオの電力部門 CO_2 排出展望

即ち、2℃シナリオでは、前述の原子力の低下に加えて、石炭火力 CCS による CO_2 排出削減の低下分もオフセットするように太陽光・風力を増加させたということが示唆さえる。前述（図 6.3.1-19）の風力＋太陽光の増加割合が原子力の低下割合を上回っていたのは、発電電力量からは見えない石炭火力 CCS 想定の変更が原因であったことが確認できた。

④ 電化率の展望

低炭素化において電化は大きな役割を果たす。ここで、電化率をエネルギー最終消費に占める電気の割合と定義して、2030 年展望の変化を比較すると以下の図 6.3.1-23 のようになる。

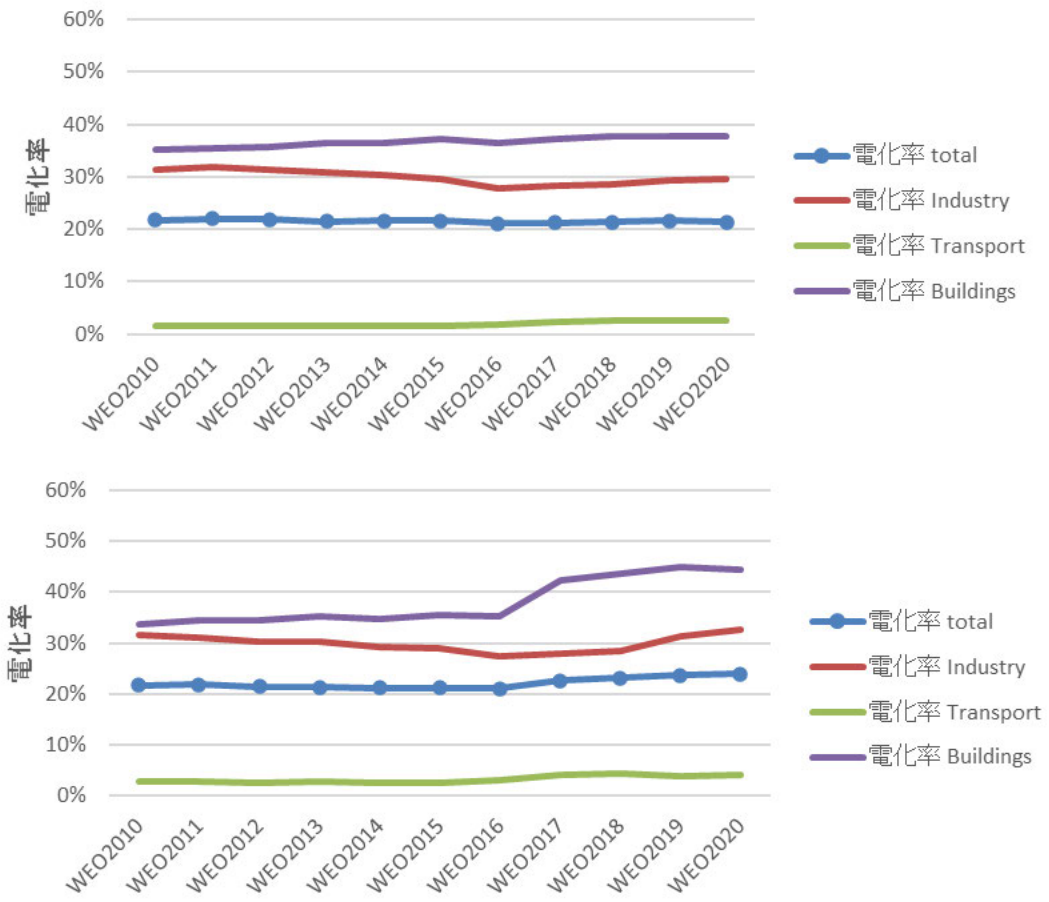


図 6.3.1-23 WEO2010～WEO2020 の電化率の 2030 年展望（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

中過去 11 年間の WEO における中心シナリオの 2030 年電化率展望は、総合および全ての部門でほとんど変化していない。民生・業務部門では電化率が 40%弱の高いレベルにある一方で、輸送部門では WEO2010 から WEO2020 で 2%から 4%へと増加してはいるが低いレベルにある。産業部門の電化率は 30%±2%の範囲にあり、総合の電化率は 21～22%とほぼ一定である。

2℃シナリオの電化率の 2030 年展望は、民生・業務で WEO2016 から WEO2017 で 35%から 42%に増加しており、それがエネルギー最終消費の電化率の増加（21%→23%）に反映されている。輸送部門においても、WEO2010 の 4%から WEO2020 の 8%に増加しており、産業部門では WEO2010 の 32%から WEO2016 では 27%に減少したが WEO2017 以降増加して WEO2020 では 33%となっている。総合の電化率は WEO2010 の 22%から WEO2020 では 24%に増加している。

中心シナリオと 2℃シナリオのギャップ（平均値）は部門別に、産業部門で 1 ポイント、輸送部門で 2 ポイント、民生・業務部門で 5 ポイント、となっていて、2℃シナリオで最も電化が進むと想定しているのは民生・業務部門である。

同様に、電化率について 2040 年展望の変化を比較すると図 6.3.1-24 の通りである。

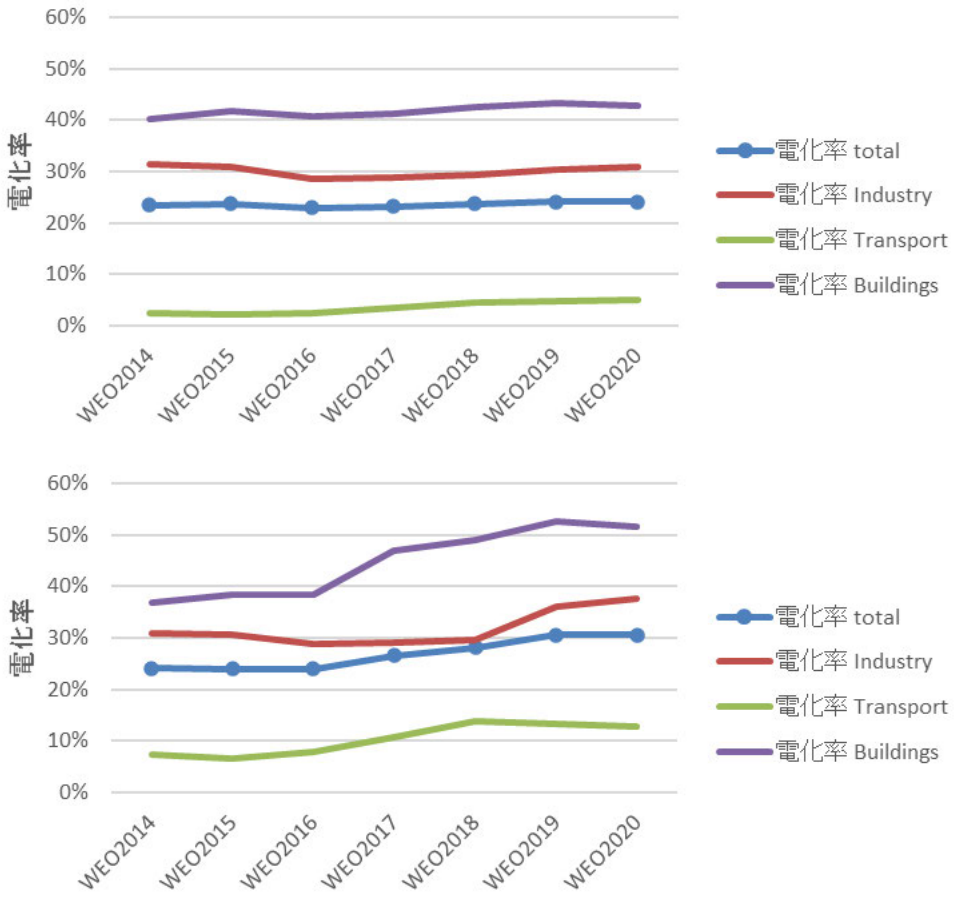


図 6.3.1-24 WEO2010～WEO2020 の電化率の 2040 年展望（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

過去 11 年間の WEO の中心シナリオの 2040 年電化率展望は、総合および全ての部門でほとんど変化していない。電化率は民生・業務で高く、輸送で低く、産業部門で変化が見られないという点は産業部門では 2030 年展望と同様である。民生・業務部門では WEO2014 の 40%から 43%に増加、産業部門では 30%±1%の範囲にありほぼ一定、輸送部門では WEO2014 の 2%から WEO2020 では 5%に増加、その結果、総合の電化率は WEO2014 の 23%から WEO2020 の 24%へと漸増している。

2℃シナリオの 2040 年展望では、全ての部門で電化率は増加している。民生・業務部門では WEO2014 の 37%から WEO2020 の 52%に増加、産業部門では同 31%から 38%に増加、輸送部門では同 7%から 13%へと増加しており、総合の電化率は同 24%から 31%へと増加している。

中心シナリオと 2℃シナリオのギャップは部門別に、産業部門で WEO2014 から WEO2020 で-1%から 7%へ、輸送部門で同 5%から 8%へ、民生・業務部門で同-3%から 9%に拡大している。

歴代 WEO における中心シナリオと 2℃シナリオの展望の違いをよりわかりやすく示したのが以下の図 6.3.1-25 である。

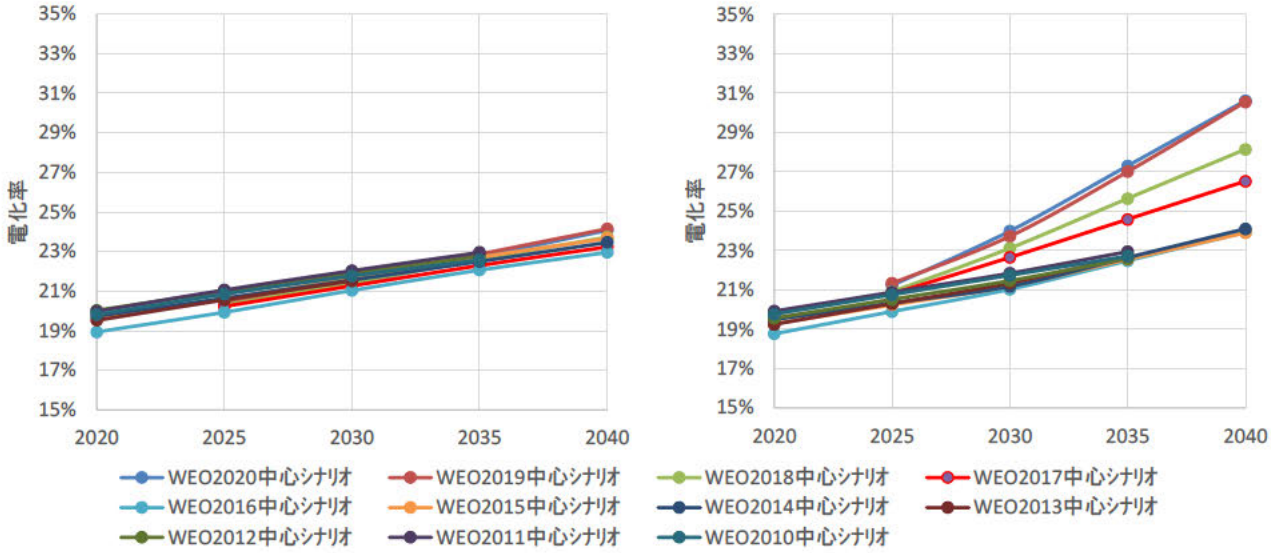


図 6.3.1-25 WEO2010～WEO2020 の世界の電化率展望の変化（左：中心シナリオ、右：2℃シナリオ）

中心シナリオの展望はほとんど変化していないこと、一方で 2℃シナリオでは WEO2017 で大きな変化が見られ、その後電化率展望が上昇し続けていることが確認できる。民生・業務部門における電化率の上昇は、前述の 2℃シナリオの 450S から SDS への変更により、民生・業務部門のバイオマス利用を減らす必要があり、それを電気で代替したことが理由だと考えられる。一方で、産業および輸送部門においても電化率が上昇していることは、これらの部門からの CO_2 排出を抑制するためであると推測される。

⑤ CO_2 排出量の展望

a. 世界合計エネルギー起源 CO_2 排出量の展望の変化

WEO2009～WEO2020 の Annex A に記載されているエネルギー起源 CO_2 排出量の実績とシナリオ別の展望を、時間を横軸にとって示すと図 6.3.1-26 のようになる。

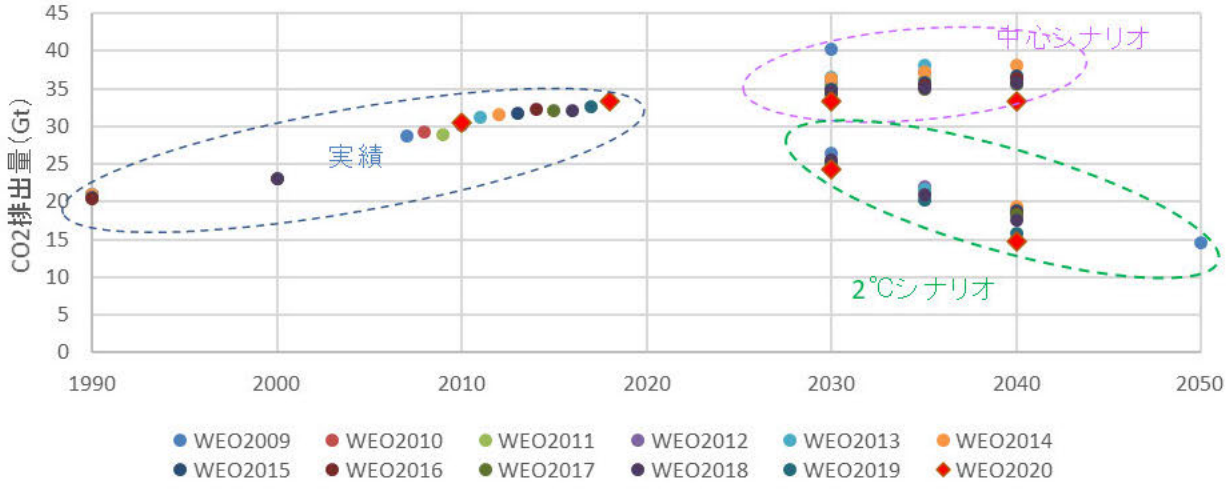


図 6.3.1-26 WEO2010～WEO2020 の CO_2 排出量展望

当然のことながら、中心シナリオと2℃シナリオでは差があり、この差が年を追うごとに拡大していくことが示されている。この図では、同じシナリオでもその展望にはバラつきがあることがわかる。

その変化に一定の傾向があるかどうか、展望の WEO 経年変化を図 6.3.1-27 に示す。

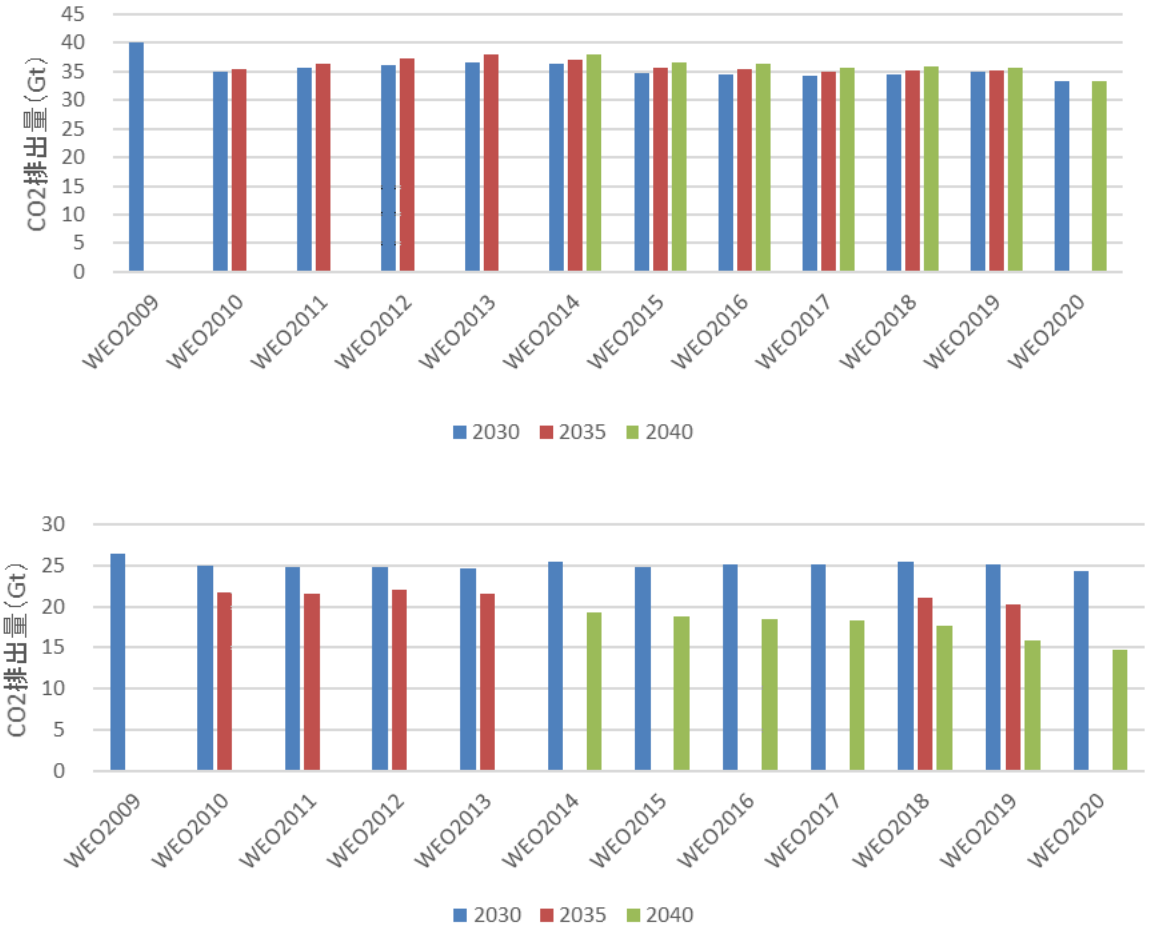


図 6.3.1-27 WEO2010～WEO2020 の CO_2 排出量展望の変化（上：中心シナリオ、下：2℃シナリオ）

中心シナリオ（図 6.3.1-27 上）では、展望の値は 2010 年と 2015 年に低下しているが、その後ほとんど変化はない。一方で、2℃シナリオ（図 6.3.1-27 下）では、2030 年展望はほとんど変わらないが、2035 年、2040 年と先の展望ほど年々低下していることがわかる。2040 年の CO_2 排出展望は WEO2014 から WEO2020 にかけて 24%低下している。これは、「2℃目標を達成するためには累積の CO_2 排出量を一定量に抑制しなければいけない」というカーボンバジェットの制約を守るためには、現状の排出量の増加分を、将来の排出削減でオフセットさせる必要があることに起因する。2℃シナリオの 2040 年 CO_2 排出量の展望とは、そのようなカーボンバジェットの制約から決定するので「展望」と呼ぶのがふさわしいかは疑問である。

その CO_2 制約に合わせるために、一次エネルギー需要も毎年低下しており、つもりつもって WEO2019 では、WEO2014 の値（2040 年展望）と比較して 15%も低下してい

ることが図８に示されている。一体どのような手段でそれだけの省エネを実現すると想定しているのか、十分な説明はない。このような大きなエネルギー需要の削減が、いつの間にか織り込まれているのが 2℃シナリオである。

b.　電力・非電力の CO_2 排出削減の展望の変化

2℃シナリオの CO_2 排出量と、中心シナリオから 2℃シナリオまでの削減を電力、非電力で区分して図 6.3.1-28 に示す。

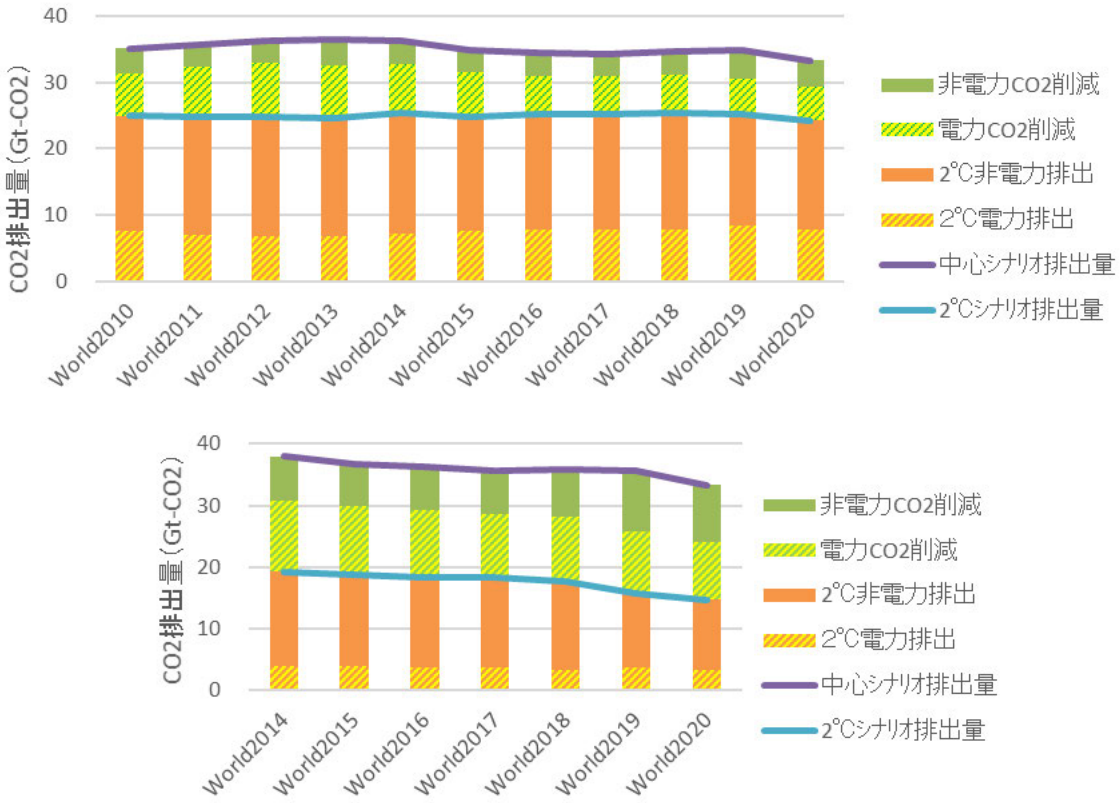


図 6.3.1-28 WEO2010～WEO2020 の電力／非電力別の CO_2 排出とシナリオ間ギャップ（上：2030 年展望、下：2040 年展望）

これは、2℃シナリオの電力部門と非電力部門の排出割合と、中心シナリオから 2℃シナリオまでの削減を電力部門と非電力部門がどのような割合で負担するか、ということを表している。2030 年の展望の 2℃シナリオ排出では、電力は非電力の半分以下(43～50%)であることがわかる。中心シナリオから 2℃シナリオまでの削減では、WEO2010~2014 の電力の削減量は 2℃シナリオ排出量と同じ大きさ（90～120%）であるが、WEO2015 以降は小さい（63～86%）。これは前述の CCS の想定の変化が影響していると考えられる。非電力部門の削減量と 2℃シナリオ排出量の比は 19～26%と低く、非電力部門からの削減の難しさを示している。

2040 年展望では、2℃シナリオの排出で電力の割合は更に低下（23～31%）している。中心シナリオから 2℃シナリオまでの削減では、電力の削減量は 2℃シナリオの排出量の 2.7 倍～3.2 倍であり、電力部門の削減幅が非常に大きい。非電力部門の 2℃シナリ

オ排出量に対する非電力部門の削減量の比は、WEO2018 まで 50%前後であったのが、WEO2019 で 81%に増加しており、非電力部門の削減想定に変更があったことが示唆される。

2030 年、2040 年の展望全てで「電力セクターの削減負担＞非電力セクターの削減負担」であり、2℃シナリオにおける CO_2 削減の電力負担（貢献）が重要であることを示している。一方で、削減負担の電力割合は、2030 年（58～71%）に比べて、2040 年（51～68%）は低下しており、非電部門での排出削減は（技術開発とコスト低下に）時間がかかり、短期的には電力部門での排出削減に頼るしかないと想定していることが示唆される。

2040 年の 2℃シナリオの排出展望に注目して、部門別直接排出量を非電力排出量から試算。部門別の間接排出量を電力排出量から試算して。部門別に直接排出と間接排出に分けて図示すると以下の図 6.3.1-29 ようになる。

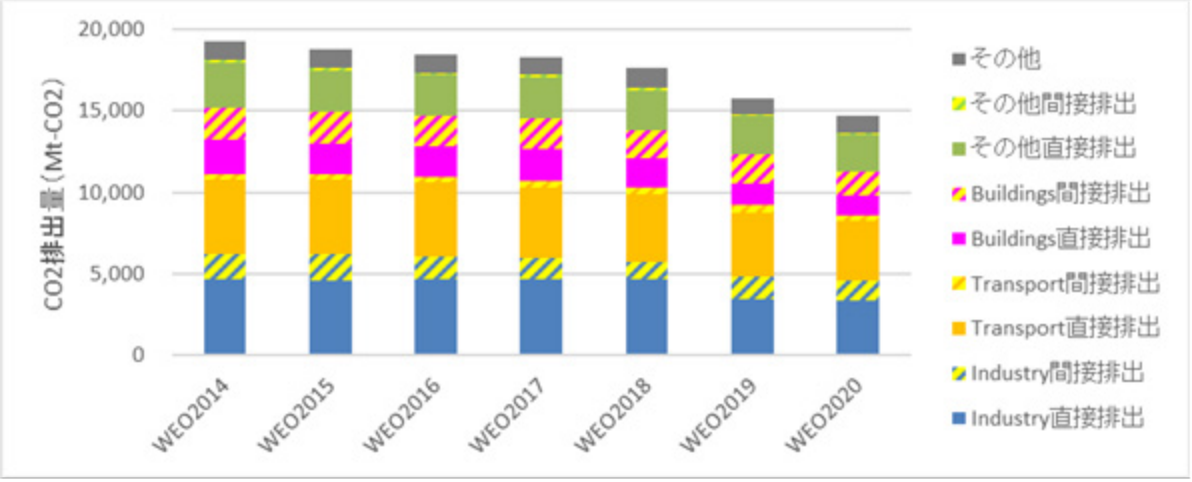


図 6.3.1-29 2℃シナリオの 2040 年部門別・直接／間接別エネ起 CO_2 排出展望

この図は、2℃シナリオの 2040 年 CO_2 排出展望では WEO2019 で産業部門の直接排出が大きく減少していること、民生・業務部門の直接排出も WEO2019 で大きく減少していることを示しており、この 2 つの部門の排出の急激な減少が上述の「WEO2019 における非電力部門の想定の変化」であることが確認された。産業部門における直接排出の低下の原因は図 6.3.1-6 に示された石炭消費の急減によるものと考えられる。産業部門においては、鉄鋼、セメント、化学など化石燃料を原料とする製品の製造過程における CO_2 排出削減が技術的・コスト的に難しく、これらは経済成長の源泉でもあるため長年「手つかず」の聖域となっていた。しかし、2℃シナリオにおいては、前述したような年々厳しくなる排出量制約を満たすために、WEO2019 でついに産業部門の直接排出に「手をつけた」のではないかと推測される。

(3) WEO2020 に見られる新たな変化

2020 年 10 月に発刊された WEO2020 は、従来の WEO とは異なる点がいくつかある。それらについて述べる。

a. 構成の変化

WEO2019 を例にとって WEO2020 と比較して、構成およびボリュームの違いを示すと以下の図 6.3.1-30 のようになる。

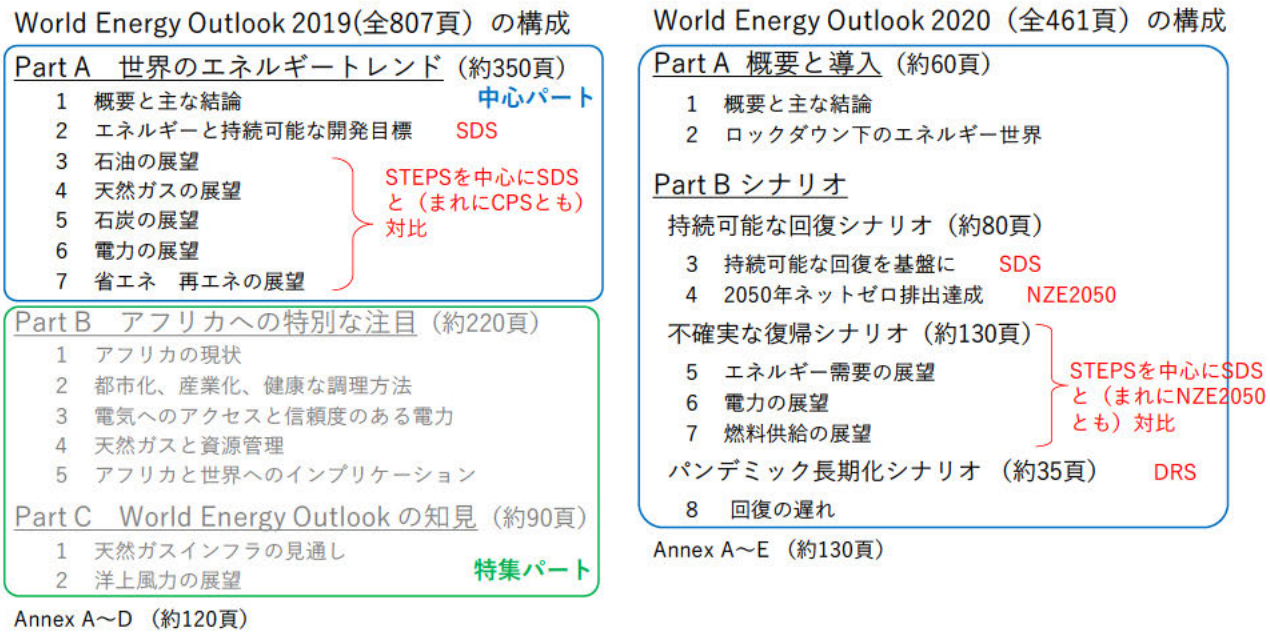


図 6.3.1-30 WEO2019 と WEO2020 の構成の比較

WEO2020 は、従来 WEO の中心パートのみとなっていること、中心パートの構成も従来の WEO のように燃料別の項目建てではなく、シナリオ別の項目建てとなっているのが特徴である。

b. シナリオの位置づけの変化

WEO2020 では、STEPS はこれまで WEO におけるような「中心シナリオ」というステータスを失っていることが示唆される。WEO2018 まで、NPS（新政策シナリオ）は中心シナリオと位置付けられていた。WEO2019 では名称が NPS から STEPS（公表政策シナリオ）に変わり、本文中でも「中心に位置するシナリオ」と記載され、位置づけの変化を示唆していたが、WEO2020 ではそういった表現はどこにも見られない。

また、これまで BAU シナリオとして存在していた CPS は完全に消滅（本文だけでなく Annex A からも消えている）し、それに伴いこれまで AnnexA には、NPS/STEPS の将来展望は SDS と CPS に比べて細かい刻みで記載されていたが、WEO2020 では STEPS と SDS の展望が同じ間隔で記載されており、AnnexA においても STEP が中心シナリオというステータスは示されていない。

新しいシナリオとして、2050 年ネットゼロ排出達成の NZE2050 と、コロナ影響からの経済回復が遅れる DRS が追加されている。従来の「STEPS が中心シナリオ、SDS が理想シナリオ、CPS が最悪シナリオ」という位置づけから、「SDS が目指すべきシナリ

オ、究極の理想は NZE2050、STEPS が Bad シナリオ、最悪は DRS」に変更されたような印象を受ける。

近年、IEA に対して「SDS を中心シナリオに据えるべき」という声が高まっていること [3]を背景に、WEO のメインフォーカスは SDS に移っていることが示唆される。

しかし、(2)で示した通り WEO2020 の各種展望が従来の WEO の展望と比べて著しく変化した、ということは確認できない。定量的には大きな変化はないが、2℃シナリオとネットゼロシナリオを強調したり、記述をナラティブに変えたりすることで大きく変化したような印象を与えているとも言える。また、シナリオの位置づけを変えることによって、WEO のフォーカスそのものが 2℃シナリオにシフトしているのではないか、ということも示唆される。

参考文献（第 6.3.1 節に関するもの）

1) IEA, World Energy Outlook 2008 (2008)
2) IEA, World Energy Outlook 2009 (2009)
3) IEA, World Energy Outlook 2010 (2010)
4) IEA, World Energy Outlook 2011 (2011)
5) IEA, World Energy Outlook 2012 (2012)
6) IEA, World Energy Outlook 2013 (2013)
7) IEA, World Energy Outlook 2014 (2014)
8) IEA, World Energy Outlook 2015 (2015)
9) IEA, World Energy Outlook 2016 (2016)
10) IEA, World Energy Outlook 2017 (2017)
11) IEA, World Energy Outlook 2018 (2018)
12) IEA, World Energy Outlook 2019 (2019)
13) IEA, World Energy Outlook 2020 (2020)
14) IEA, Energy Balances 2019 (2019)

6.3.2 IEA WEO2020 シナリオと本研究での分析シナリオとの比較

本節では、第 5 章で記載した DNE21+モデルによる長期シナリオ分析と比較を行った。

(1) CO_2 排出量

図 6.3.2-1 は、5 章で分析を行ったパリ協定 2℃目標に対応する世界 CO_2 排出削減シナリオと、WEO2020[1)]で提示された Sustainable Development Scenario (SDS)および

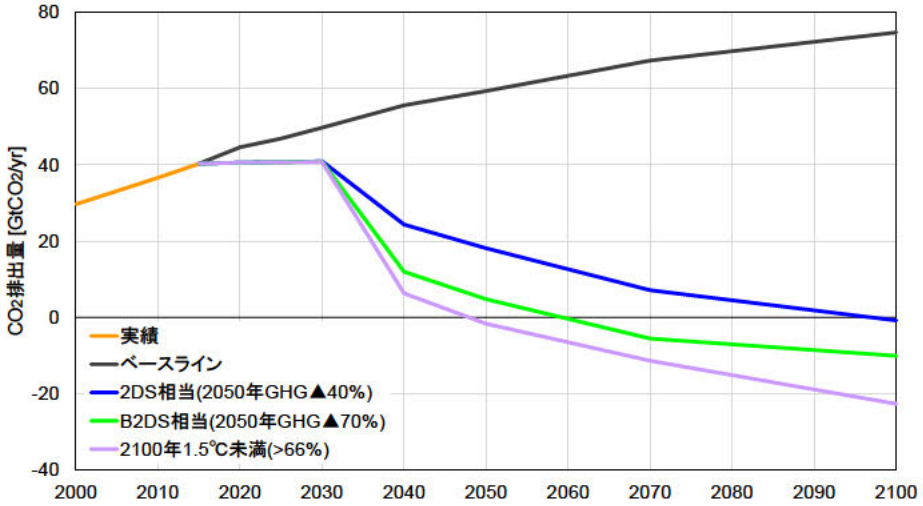
[3] WEO2019 発刊直後に、欧州の投資家、科学者など 65 名が署名したレターが IEA ファティ・ビロル事務局長に送られたというロイターの報道によれば、同レターは WEO をパリ協定ベースとすることを要請している。
https://www.reuters.com/article/climate-change-energy-investors/exclusive-investors-step-up-pressure-on-global-energy-watchdog-over-climate-change-idUKL8N27V3OB
2020 年 5 月に世界の投資家、企業、科学者が連名で IEA に送られたオープンレターは 1.5℃シナリオを WEO の中心にすることを要請している。
https://mission2020.global/letter-to-IEA/

NEZ2050 との比較である（WEO2020 はエネルギー起源 CO_2 排出に対して、本研究の CO_2 排出量想定は、エネルギー起源以外の CO_2 排出を含むことに注意）。本研究で用いた 2℃目標に対応する排出シナリオは、基本的に IEA ETP2017[2)]の 2DS シナリオと、B2DS シナリオに相当するものである。

WEO の SDS は、今回の DNE21+分析の 2DS 相当シナリオと B2DS 相当シナリオの間くらいの排出量のシナリオとなっている。なお、SDS についても、2100 年に 15 $GtCO_2$ 程度の正味負の排出が実現したとすれば、1.5℃目標も視野に入るシナリオであるとしている。それに対して、今回の DNE21+分析では、B2DS 相当のシナリオで、2100 年の正味 CO_2 排出量は 10 $GtCO_2$ 程度の正味負排出を想定したシナリオとなっている。

RITE による簡易気候変動モデル MAGICC を用いた計算では、平衡気候感度 3.0℃を想定した場合には、B2DS 相当のシナリオは、ピーク気温上昇が 1.75℃程度、2100 年気温上昇は 1.53℃程度である。気候感度 3.5℃（66%以上の達成確率に相当）の場合で計算すると、ピーク気温上昇は 1.93℃程度、2100 年気温上昇は 1.73℃程度である。2100 年の気温上昇を 1.5℃未満（66%確率）とするシナリオは、2050 年頃に CO_2 排出量をほぼゼロとし、GHG 排出量では 2065 年頃にほぼゼロとするシナリオである。2100 年の気温上昇は、確率 50%換算すると（期待値としては）、1.3℃上昇程度と見込まれる。

(a) 本報告書の分析シナリオ



(b) IEA WEO 2020

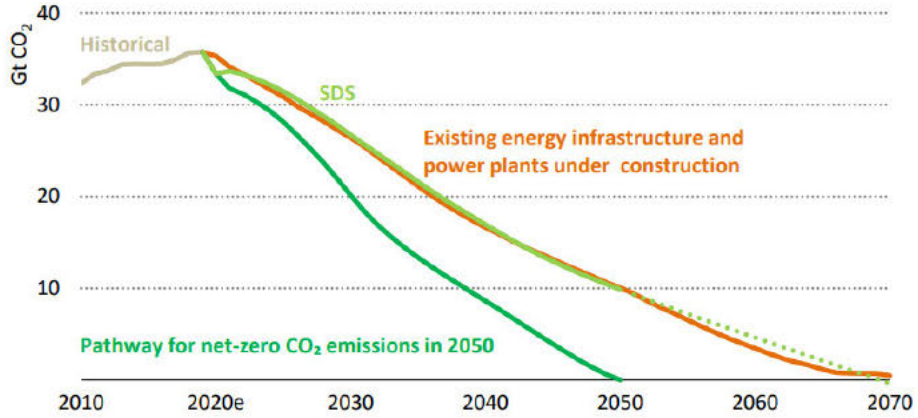
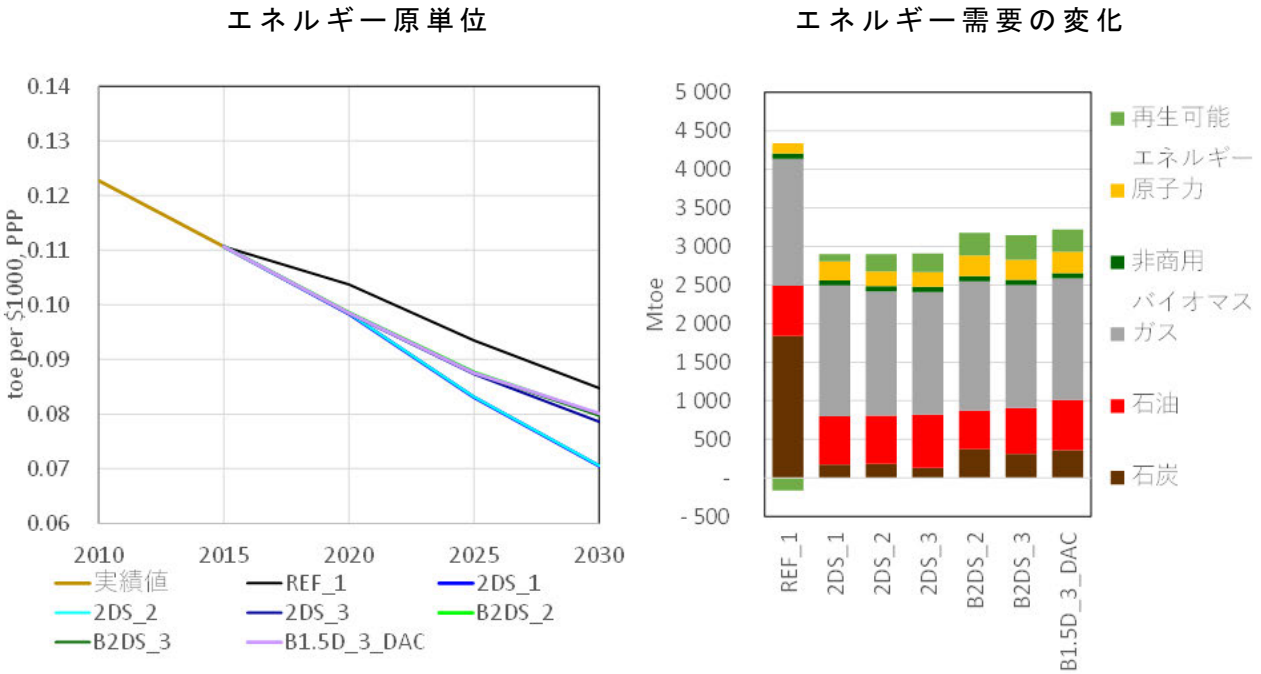


図 6.3.2-1 IEA WEO2020[1)]において想定されているエネルギー起源 CO_2 排出シナリオ（本報告書の分析シナリオとの比較）

(2) 一次エネルギー供給量

図 6.3.2-2 に WEO2020 の世界一次エネルギー供給シナリオを本研究の分析シナリオとの比較で示す。DNE21+の B2DS 相当と WEO2020 の SDS、DNE21+の B1.5D と WEO2020 の NEZ2050 を比較すると、DNE21+の分析の方が、若干、エネルギー原単位が高い傾向が見られる。2030 年までの変化として見ると、特に、WEO の NEZ2050 では一次エネルギー量の大幅な低下を見込んでいるが、DNE21+ではそこまで低下するような結果となっていない。また、WEO はいずれのシナリオでも再エネの増加を、DNE21+の分析結果よりも大きく見込まれている。

(a) 本報告書の分析シナリオ



(b) IEA WEO 2020

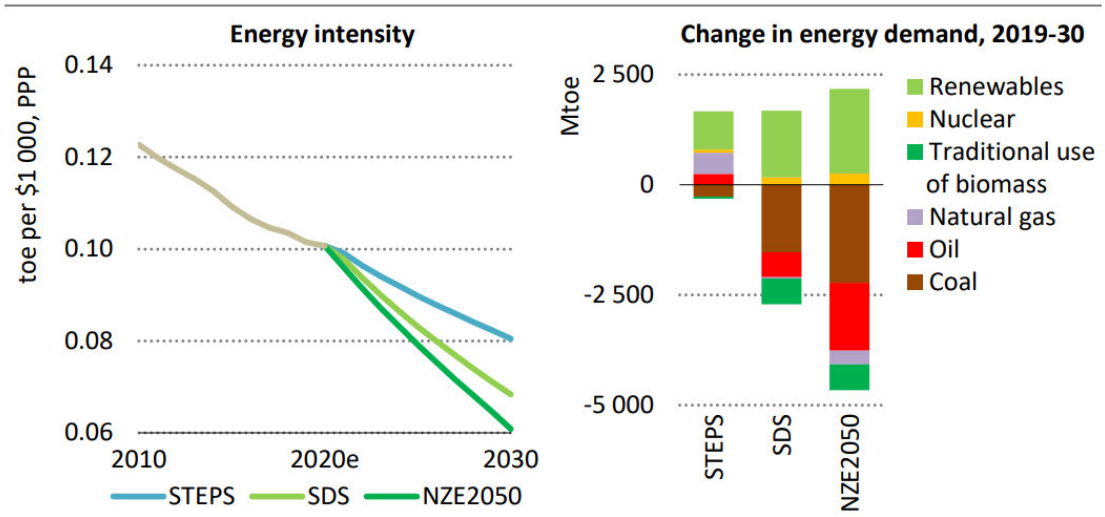


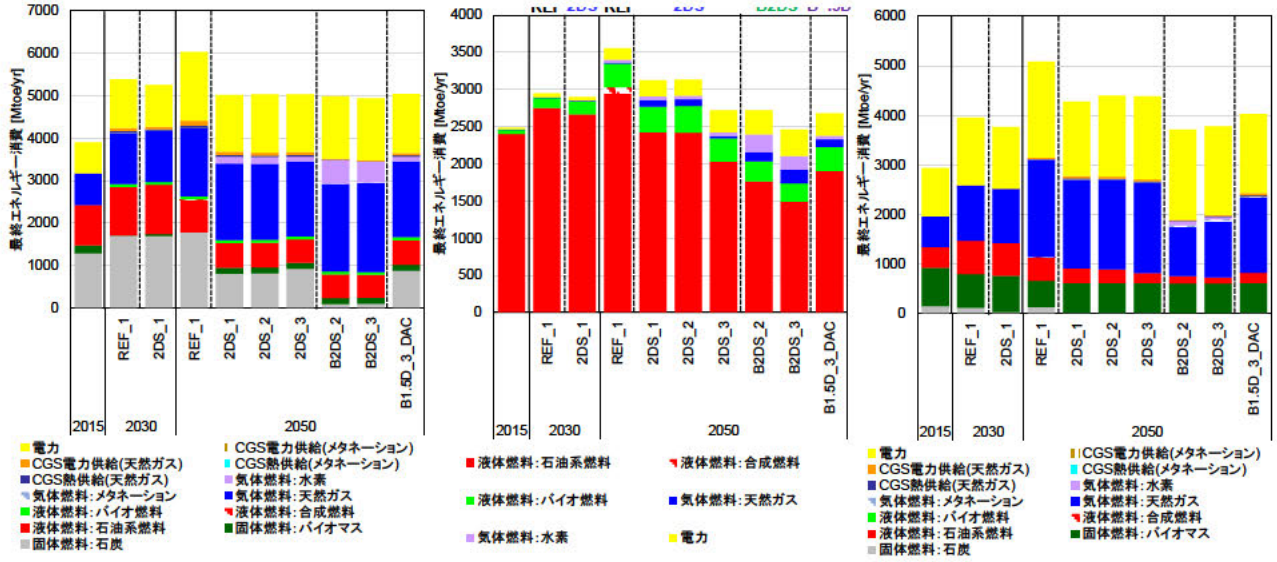
図 6.3.2-2 IEA WEO2020[1)]の世界一次エネルギー供給量シナリオ（本報告書の分析シナリオとの比較）

(3) 最終エネルギー消費量

図 6.3.2-3 に WEO2020 の世界の部門別の最終エネルギー消費量シナリオを本研究の分析シナリオとの比較で示す。なお、エネルギー消費量の総量が、運輸部門と民生部門については比較的両者で合致している一方、産業部門では両者に差異が見られる。これは WEO2020 のグラフには、フィードストック分が含まれていないことが大きい。フィードストック分を加えると、産業部門についても総量は比較的整合している。運輸の最終エネルギー消費量についてはかなり似通っている。民生の最終エネルギー消費量は、DNE21+の分析シナリオは若干ガス比率が高い傾向があり、消費量の総量が少

し大きい傾向が見られる。WEO では、DNE21+の分析よりも、住宅断熱対策が全世界的に大きく進展すると想定している可能性がある。ただし、それを除けば、概ね似通った結果とは言える。

(a) 本報告書の分析シナリオ



(b) IEA WEO 2020

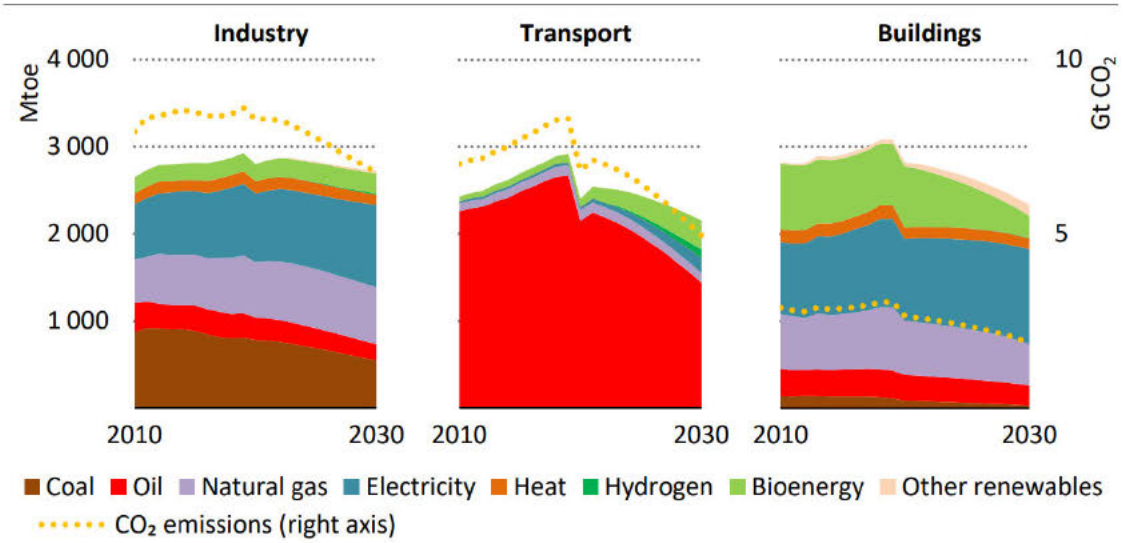


図 6.3.2-3 IEA WEO2020[1)]の NZE2050 における世界の部門別の最終エネルギー消費シナリオ（本報告書の分析シナリオとの比較）

参考文献（第 6.3.2 節に関するもの）

1) IEA, Energy Technology Perspectives 2017

2) IEA, Energy World Outlook 2020

6.4　水素エネルギーシナリオのレビュー

ネットゼロ CO_2 排出目標を掲げる国や地域が増え、カーボンニュートラルなエネルギーシステムのあり方が検討されるようになってきている。欧州委員会が発表した2050 年のネットゼロ排出シナリオでは、8 つのシナリオすべてに水素の導入が想定されている [43]。図 6.4-1 は CO_2 を排出しないエネルギーシステムの概念図であるが、水素は主に余剰の自然エネルギーを蓄えること、長距離輸送やエネルギー集約産業などの電化が困難な分野におけう脱炭素化、化学製品や燃料生産において化石燃料を代替する原料として用いるといった役割がある。そこで本節ではスタンフォード大学によるレポート [45]や先行研究をもとに、水素の導入シナリオや課題についてレビューを行う。

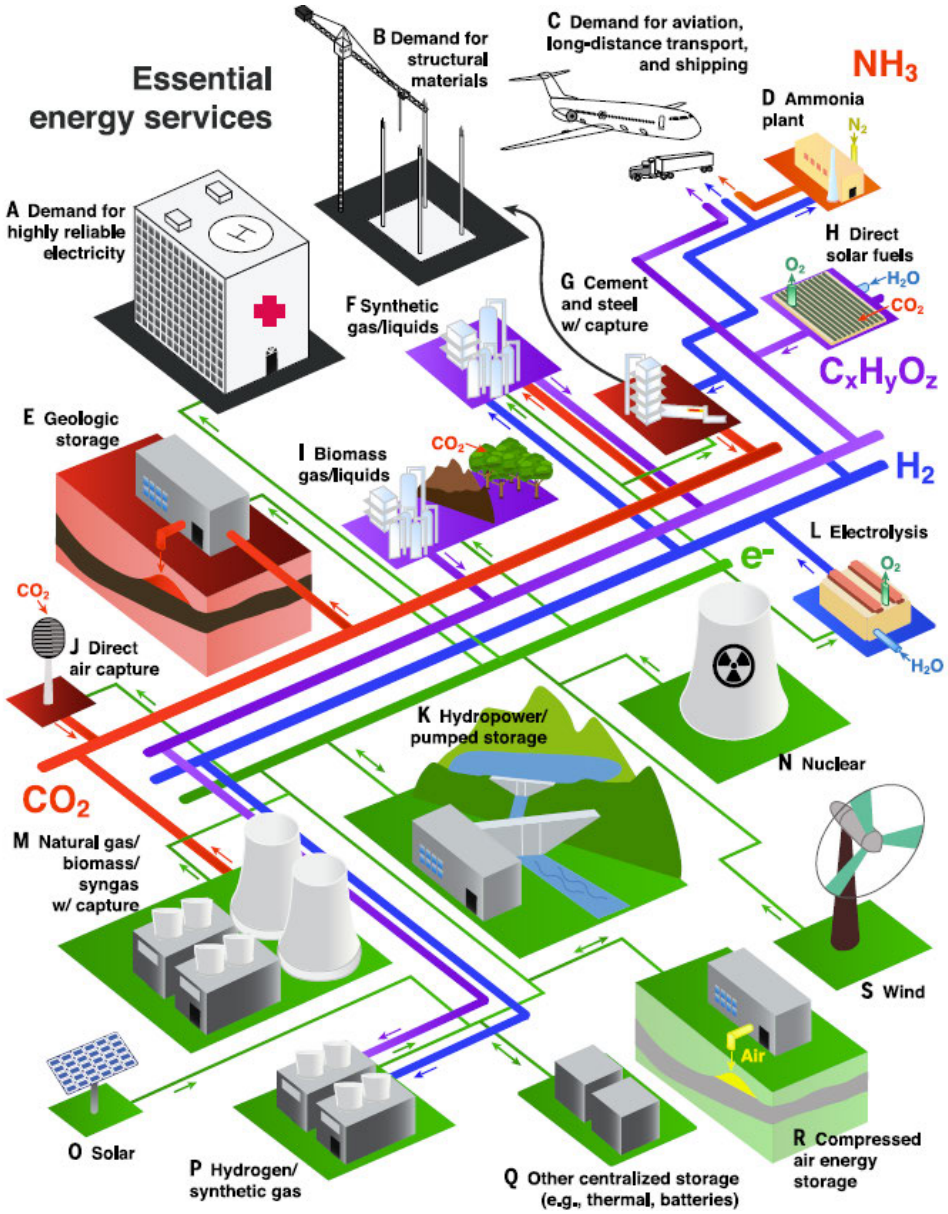


図 6.4-1 CO_2 フリーのエネルギーシステム概念図

（出典） S.Davis et al. (2018)[44]

(1) 水素の製造とコスト

水素の開発、利用の歴史は古く、水素を製造するための熱化学プロセスの解明は 1868 年にさかのぼる。1920 年代から 1930 年代にかけてメタンの水蒸気改質が実証され、商業的に利用されるようになった。1960 年代になると、水素はロケットの燃料として使用されるようになり、1970 年代には「水素経済」が提唱された。水素は輸送用燃料、工業プロセス用熱源、原料としての用途があるにもかかわらず、これまで普及のペースは非常に緩やかなものであった。

水素の利用拡大ペースが遅い要因として主に 2 つのことが障壁になっている [45]。1 つは、水素の製造、貯蔵、輸送、販売までのサプライチェーンを完成させるためには、全ての段階においてコストと性能を向上させる必要があり、さらにそれぞれの段階で十分な安全性を確保しなければならないことである。各段階において経済的かつ安全な対策がなければ、それがボトルネックとなりサプライチェーン全体での実行が難しくなる。もう 1 つの課題として、水素サプライチェーンの各段階で従来の化石燃料と競合することが挙げられる。ここ数年は電気自動車の開発が加速しており、代替技術の存在が水素の普及を難しくしている。

しかし近年、水素への期待が再び高まってきている。水素サプライチェーンの各プロセスにおいてコストは下がってきており、安全性も高まっている。欧州では€50～60/t の炭素価格があれば、水素は競争力を持つようになると見積もられている [43]。大規模な水素経済の構築に向けた課題についても、解決の可能性について楽観的な見通しが出るようになってきている [47), 48]。水素の需要サイドだけでなく、供給源となり得る資源国サイドでも関心が高まりつつあり、再生可能エネルギー、電力・ガス、石油・石炭等のエネルギー産業、自動車、エンジニアリング産業等、広範な産業で水素に係る取り組みが起きつつあるとして、IEA[49]も過去の水素ブームと昨今の状況は異なることを指摘している。

なお、水素自体は技術ではなく、クリーンな形でもダーティな形でも製造されうるエネルギーキャリアである。そのため気候変動緩和にどの程度寄与するかは、水素がどのように製造されるかに依存している。最近では気候への影響を区別するため、水素の製造過程によって水素を色付けして呼ぶことがある、「グレー水素」は天然ガスから製造され、現在、主に産業界で使用されているもの、「ブルー水素」は、天然ガスから製造され、炭素回収・貯蔵（CCS）を用いて脱炭素化しているものを指す。ブルー水素に対しては、CCS と天然ガスに依存しており、商業的に運営可能な CCS には不確実性があり、さらに上流でのメタンの漏洩について懸念を示す見方もある。これに対し「グリーン水素」は自然エネルギーを利用して水を電気分解して製造されるものを指している。他にメタン熱分解で生成される「ターコイズ水素」と呼ばれるものもあり、これは CCS を必要としないこと、さらに利用価値の高い固体炭素（カーボンブラックなど）も製造するというメリットがあり、ロシアのガスプロムやドイツの BASF などが研究しているが、まだ黎明期の技術である。

グリーン水素を生産するコストの 80%は電気料金であり、資本コストではなく運営コストが課題となる。グリーン水素の最大の課題は、膨大な量の再生可能エネルギー

を必要とすることであり、現在、グレー水素の価格は約 €1.50/kg、ブルー水素は €2-3/kg、グリーン水素は€3.50-6/kg である。現状では、天然ガスから製造したグレー水素が最も安価だが、IEA[49]は再生エネルギーから製造するグリーン水素のコスト低下が期待できるとしている。その結果、中国のように天然ガスを輸入する一方、再生可能エネルギー資源に恵まれているような国では、今後、グリーン水素のコストがグレー水素のコストを下回る可能性もある。

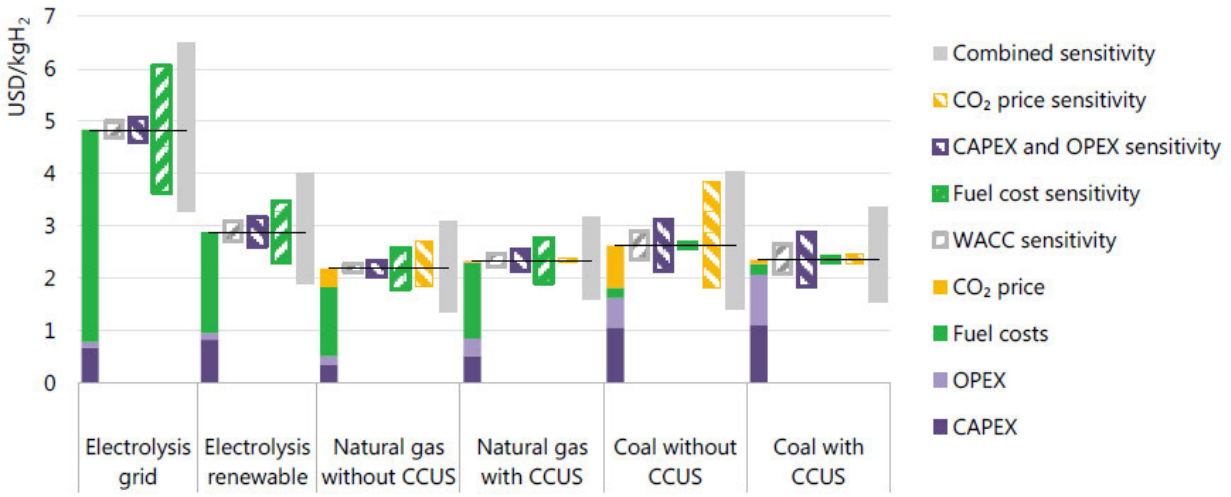


図 6.4-2 2030 年における水素製造コストの見通し

（出典）IEA[49]

(2) 水素導入シナリオ

カーボンニュートラルなエネルギーシステムを構築するには、エネルギー供給部門、特に電力部門を低炭素化するとともに、エネルギー需要側で電化を進めつつ、電化が難しい部門は燃料転換などによって低炭素化を進める必要がある。水素はエネルギー供給部門の低炭素化に寄与することに加え、産業部門や運輸部門など電化が難しいセクターにおいて重要な緩和オプションとなる。

最近の太陽光や風力のコスト低下は、水素の可能性を高める要因の一つになっている。電源構成に占める変動性再生可能エネルギー（VRE）の割合が高まると、変動する需給をマッチングさせることが難しくなる。水素は電気からの転換が可能であり、また大規模に貯蔵できることから、電力需給の短期的な変動だけでなく季節性の変動にも対応が可能である。水素を介在させることにより柔軟性のある電力システムを構築することができるようなる。

電力部門の低炭素化と並行してエネルギー最終需要部門の電化を加速させていく必要があるが、電化のポテンシャルはセクターごとにそれぞれ異なっている。建物部門は比較的電化のポテンシャルが大きいのに対し、運輸部門では乗用車の電化は比較的容易なものの、長距離貨物、空運、海運の電化は難しい。産業部門には多様な業種があるが、鉄鋼やセメント、紙パルプ、化学などのエネルギー集約産業の電化は難しい。これら電化の難しい部門からの CO_2 排出を削減するためには、化石燃料をバイオ燃料や水素で代替するといった対策が考えられる。バイオエネルギーは既に商業利用され

ている技術であるが、土地利用から受ける制約が大きく、これを拡大していくことは持続可能性の面で懸念がある。他方、水素は電力を含む様々なエネルギーキャリアから製造することができるというメリットがあるが、取り扱いが難しく、新たなインフラや需要側の技術も必要というデメリットもある。そのため、それぞれ異なる特性を活かして活用していくことが重要となる。

排出削減が難しい部門における対策について検討した研究事例としては、Luderer et al. (2018)[51]がある。図 6.4-3 は 2℃ [50%以上]（B1400）シナリオ、2℃[67%以上]（B800）シナリオ、1.5℃（B200）シナリオにおける最終エネルギーに占める水素のシェアを示したものである。CO_2 排出制約が大きくなるほど水素の割合が大きくなる傾向があり、また、比較的電化を進めやすい建物部門より、電化オプションが少ない産業部門や運輸部門において水素のシェアが大きくなることが示されている。

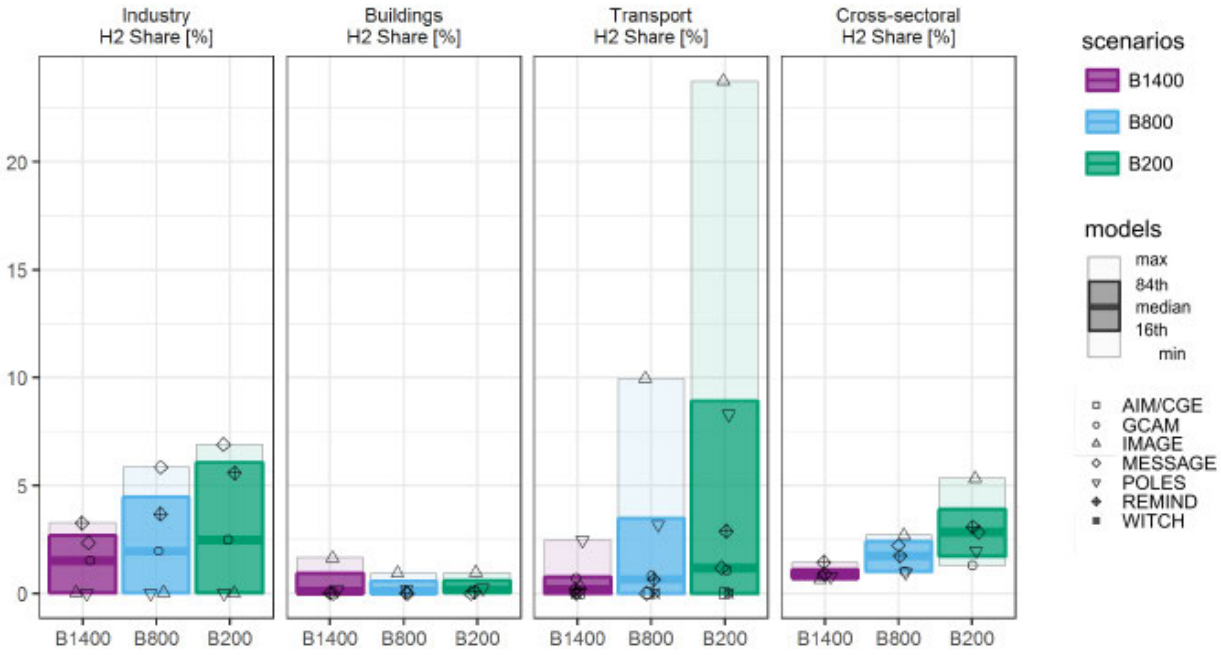


図 6.4-3 各セクターにおける最終エネルギーに占める水素のシェア

（出典）Luderer et al. (2018)[51]

IPCC の 1.5℃特別報告書[50]においても、2℃シナリオよりも 1.5℃シナリオにおいて水素の役割は有意に大きいことが示されている。セクターとしても低炭素技術が利用できない、あるいはコストが高い運輸や産業部門において水素が活用される傾向がある。また、水素の原料としてバイオ燃料と炭素回収・貯留（BECCS）を組み合わせ、バイオメタン/バイオガスの水蒸気改質についても言及されている。

図 6.4-4 は IEA の World Energy Outlook 2020[52]における世界の水素需要の見通しを示したものである。現行政策シナリオにあたる STEPS シナリオでは 2040 年になっても水素需要は非常に限られたものになっている。他方、クリーン・エネルギー政策や投資が大規模に展開され、パリ協定や持続可能な開発目標達成に向かう持続可能な開発（SDS）シナリオでは、CCUS による電気分解と化石燃料からの水素生産が急速に拡大し、2030 年には 18 Mt、2040 年には 7,500 万トンに達することになる。セクターと

しては運輸部門の需要が最も大きく、特に長距離輸送においてアンモニアや CO_2 を回収して製造された合成ガスからの炭化水素燃料を活用することが想定されている。

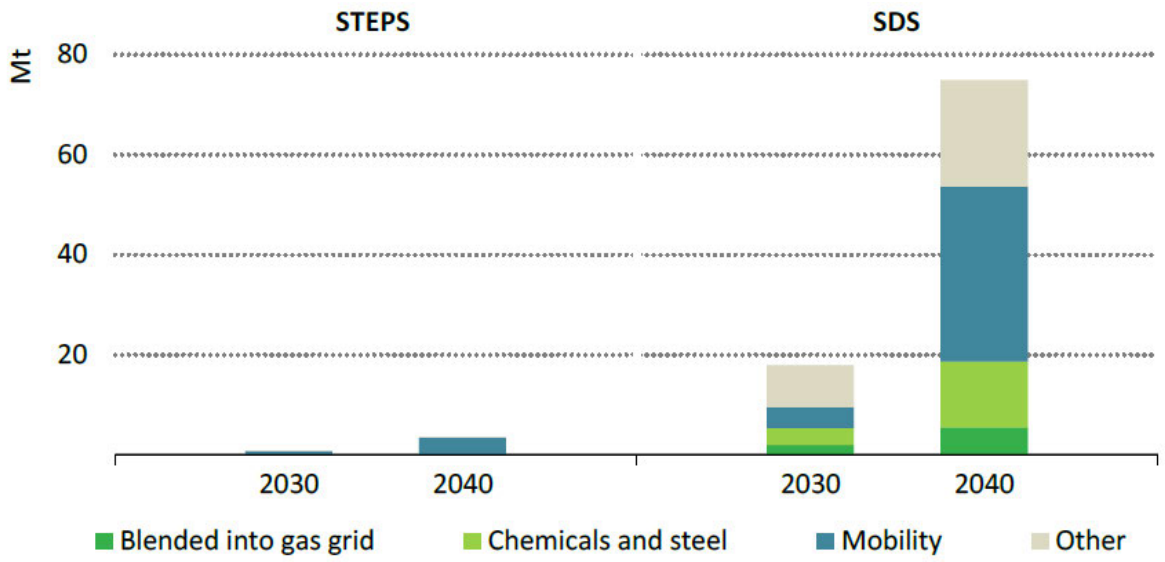


図 6.4-4 水素の世界需要

（出典）IEA[52)]

水を電気分解した H_2 と CO_2 を触媒反応で合成した液体の炭化水素燃料（e-fuel）の製造は、バイオ燃料のように耕地に依存しないという点で環境面において優れているが、大量の再生可能エネルギーによる電力を必要とし、製造コストもかかるというデメリットがある。また、体積エネルギー密度の小さい水素は低温高圧で輸送、貯蔵する必要があり、重くてかさばるコンテナ貯蔵コンテナも必要となる。現在、運輸部門の燃料として使われているディーゼル燃料を保管する場合に比べ、総エネルギー量が同じ液体水素を保管するには重量にして約 6 倍、容積にして約 8 倍の大きさが必要になる。ただし燃料電池車はディーゼル燃料を用いた内燃機関よりもエネルギー効率が高く、搭載するエネルギー量は小さくてすむというメリットもある。

水素はカーボンニュートラルなエネルギーシステムを築く上で魅力的な緩和オプションの一つとして捉えられているが、今後、大規模に導入されていくかどうかは多くの不確実性を伴っている。水素の生産と流通インフラは資本集約的であり、長期的な水素需要の可能性が見えてこなければ投資は進まない。水素を拡大していくためには、適切な民間投資を促進するための政治的コミットメントや規制の枠組みが重要となる。また、水素燃焼時には CO_2 だけでなく大気汚染物質を排出せず、バイオ燃料のように土地利用変化を伴わず農業生産への懸念が小さいといったメリットもある。これらをあわせて考慮することで、持続可能な発展に資するエネルギーキャリアとして位置付け、導入の機運を高めていくことも考えられる。

参考文献（第 6.4 節に関するもの）

1) van Renssen, Sonja. "The hydrogen solution?" Nature Climate Change 10.9 (2020): 799-801.
2) Davis, Steven J., et al. "Net-zero emissions energy systems." Science 360.6396 (2018).
3) John P. Weyant: A Review and Assessment of Hydrogen Energy Futures Scenarios. Stanford University (2021)
4) Weyant, John P. (2006). “Energy Technology Assessments: Engineering, Economics, and Institutional Perspectives,” presentation at GCEP Research Symposium 2006 Frances C. Arrillaga Alumni Center Stanford University September 18.
5) Page, Brad. Hydrogen isn't the fuel of the future. It's already here, World Economic Forum Newsletter, June 11 (2019)
6) Deign, Jason. Countries Moving Toward a Green Hydrogen Economy, Grid Edge, October 14 (2019)
7) IEA: The Future of Hydrogen- Seizing today’s oppourunity, Report prepared byt the IEA for the G20, Japan. (2019)
8) IPCC: Global Warming of 1.5° C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5° C Above Pre-industrial 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. (2018)
9) Luderer, Gunnar, et al. "Residual fossil CO_2 emissions in 1.5–2 C pathways." Supplementary Information. Nature Climate Change 8.7 (2018): 626-633.
10) IEA: World Energy Outlook, IEA, Paris (2020)

第7章　まとめ

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

本事業では、最新の科学的知見や国際交渉の動向も踏まえながら、海外研究機関とも連携・協力しつつ、温暖化対策（緩和策及び適応策等)、ファイナンス、政策の総合的かつ整合的な分析・評価を行い、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。

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。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。2020 年は、COVID-19 のパンデミックが世界を混乱に陥れ、その対応に追われた。第 2 章では、COVID-19 のリスクとリスクマネージメントを踏まえ、気候変動リスクとリスクマネージメントとの比較をし、COVID-19 からの教訓についても検討を行った。

第 3 章ではグリーン成長の機会と限界をより正しく認識しつつ、その機会を見出すことを目的に調査、整理を行った。その中で、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を実施した。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。

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。そこでは、最近の各国 GDP 動向の変化を反映した NDCs の限界削減費用等の推計も実施した。各種制約に伴う NDCs 達成の国際競争力への影響について分析を行った。また、NDCs 評価の他の研究事例についても整理を行った。更に、欧州や米国では、国

境炭素調整の導入が検討されつつあるため、国境炭素調整によって、どのような経済影響が推計されるのかについて試算を行った。

第 5 章は長期の緩和シナリオ分析についてまとめた。共有社会経済パス（Shared Socioeconomic Pathways: SSPs）の国際的な策定・分析状況を踏まえながら、独自に SSPs を想定し、モデル分析を行った。2050 年カーボンニュートラルの動きが強まってきたため、従来以上に様々な部門における様々な対策技術の可能性の評価が必要になってきた。そこで、海運や航空部門について、エネルギー・温暖化対策評価モデルにおいて、具体的な技術積み上げを行い、システム的な分析を行った。更に、CO_2 回収利用（CCU）の一つである合成燃料、大気中からの直接 CO_2 回収（DAC）についてもモデル化を行い、カーボンニュートラルに向けた多様な技術オプションを評価できるようにした。また、エネルギー需要サイドの IT、AI 等の技術革新が、食料廃棄の削減や、更にはシェアリングエコノミーを誘発し、社会変化をもたらす可能性、そして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った。そして、これら社会変化は、我々の生活行動を変化させる可能性がある一方、リバウンド効果も含め生活行動を整合的に分析する必要性があることから、その調査も行った。SDGs との関係性の評価として、土地利用・食料アクセス、大気汚染排出・PM2.5 削減のコベネフィット・トレードオフに関する調査や分析、評価も行った。

第 6 章においては、海外の気候変動に関する最新の政策動向や IPCC の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等について記載した。

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。世界は、気候変動対策の強化を進めていることは間違いないが、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。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。

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　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）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。

2021 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 —2050 年カーボンニュートラルに向けた今後の戦略—（ALPS International Symposium “Future strategy towards carbon neutral society”）」を開催した。当日は、メリーランド大学、中国エネルギー研究所、IIASA、E3-Modelling、英国気候変動委員会の、この分野に造詣の深い著名な専門家よりオンラインにて講演頂くとともに、先進的に温暖化対策に取り組んでいる（株）JERA、（一社）日本ガス協会、パナソニック（株）といった産業界の方にもご参加頂き、脱炭素化に向けた取り組み・2050 年に向けたビジョンをパネルディスカッション形式で紹介して頂いた。企業、官公庁、大学、研究機関、その他団体等から約 500 名超が参加（会場ならびに Web 配信にて）した。講演者との間で活発な質疑が行われ、2050 年のカーボンニュートラル・脱炭素社会を目指し、持続可能な社会・経済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、本シンポジウムの要旨集（日・英語）を掲載する。当日の講演者による発表スライドはホームページに掲載されているので参照されたい。

開催年月日　2021 年 3 月 9 日（火）　10:00-17:30
開催場所　イイノホール　（東京都千代田区内幸町 2-1-1）
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

目次

講演	**野心的な米国の NDC に向けて** Leon Clarke, Research Professor, University of Maryland
	脱炭素社会に向けた取り組みと実現へのシナリオ 山地 憲治 公益財団法人 地球環境産業技術研究機構　副理事長　研究所長
	1.5℃目標下における中国のエネルギー・経済移行 Kejun Jiang, Senior Researcher, Energy Research Institute in China
パネル討論	**脱炭素化に向けた産業界の取り組み** (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　副理事長　研究所長 (パネリスト) 多和 淳也　株式会社 JERA　経営企画本部　企画部長 深野 行義　一般社団法人 日本ガス協会　企画ユニット　環境部長 楠本 正治　パナソニック株式会社 品質・環境本部　環境経営推進部　部長
講演	**日本における脱炭素化へ向けた動向とシナリオ分析** 秋元 圭吾 公益財団法人 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
	CO_2 正味ゼロ排出に向けた急速な世界的転換 Keywan Riahi, Program Director, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)
	EU のカーボンニュートラルに向けた経路のモデリング Alessia De Vita, Project Manager, energy analysis and policy, E3-Modelling
	英国の第 6 次カーボンバジェット－ネットゼロへの経路 Vivian Scott, Senior Analyst, The Committee on Climate Change Richard Millar, Senior Analyst, The Committee on Climate Change

野心的な米国の NDC に向けて

Leon Clarke

Research Professor, Unversity of Maryland

2021 年は、米国の気候変動への野心と行動にとって重要な年となる。4 年間の連邦政府関与の空白を経て、バイデン-ハリス政権は気候政策をアジェンダの中心に据えている。バイデン大統領は、2050 年までに経済全体の脱炭素化を達成し、2035 年までに 100%クリーンな電力を実現するという公約でキャンペーンを展開していた。最近、パリ協定に公式に再参加したバイデン政権は、4 月 22 日までに国の新たな気候目標を国際社会に提示する意向を表明した。この新たな米国の国別貢献（NDC）は極めて重要である。米国は依然として世界第 2 位の温室効果ガス排出国であり、それゆえ気候変動を抑制するには不可欠の存在である。NDC は、国内の行動の基準を設定し、連邦政府や州レベルの政策決定に影響を与えることになる。また、NDC は、米国が気候変動対策へコミットメントするという明確なシグナルを送ることになり、世界的な追加行動に拍車をかける可能性を秘めている。NDC を成功させるには、政治的現実と進化する市場力学を考慮に入れ、2030 年までの今後 9 年間で可能なことと野心のバランスを取る必要がある。野心的すぎるアジェンダは、米国の失敗と信頼性の喪失を招くリスクがあり、野心が低すぎると、気候政策に熱心でないことを伝えることになり、世界的な取り組みに大きな影響を及ぼすリスクがある。気候変動をめぐって米国は依然として二極化している状況であるが、全米の都市、州、企業による野心的な行動が気候変動をめぐる機運を高めており、10 年前にはほとんど予測できなかったような技術トレンドが米国のエネルギー部門に変化をもたらしている。今回の発表では、米国 NDC を取り巻く問題点や、野心的な NDC に向けた最近の研究について議論する。

（RITE 仮訳）

脱炭素社会に向けた取り組みと実現へのシナリオ

山地憲治

公財財団法人 地球環境産業技術研究機構(RITE)副理事長・研究所長

2020 年 10 月の菅首相の「2050 年カーボンニュートラル実現」宣言を受けて、脱炭素社会に向けた取り組みが加速している。昨年 1 月に公表した「革新的環境イノベーション戦略」の実行に向けて 7 月にはグリーンイノベーション戦略推進会議が動き出し、12 月には成長戦略会議が経済と環境の好循環を目指して「グリーン成長戦略」の一次案を公表した。電化と電力のグリーン化、水素社会実現、CO_2 固定・再利用などのイノベーションからその成果の社会実装まで、既存技術も含めて総動員する脱炭素社会実現への本格的な取り組みが始まった。補正予算によって 2 兆円のグリーンイノベーション基金が創設され、分野ごとに具体的な取り組みが始まっている。

脱炭素社会とは、実質的に(正味で) CO_2 排出量がゼロとなる社会である。大気中 CO_2 濃度が上昇し始める産業革命期まで、自然のプロセスとして、光合成による CO_2 吸収

や海洋等による CO_2 吸収が CO_2 発生量を相殺して実質ゼロ排出が実現されていた。産業革命以降急速に進展した森林破壊や化石燃料の大量使用によって、この自然界のバランスが攪乱され大気中温室効果ガス濃度の増加を招き、地球温暖化が引き起こされた。イノベーションによって人工的に実質的 CO_2 ゼロ排出を実現する脱炭素社会は、いつまでに実現すべきかについては議論の余地があるが、地球温暖化対策の長期目標として適切である。ただし、気候変動対応を持続可能なものとするためには、3E+S(わが国のエネルギー政策の基本である安全確保を前提とした、エネルギー安全保障、経済効率、環境保全の確保)や SDGs の同時達成が必要である。

このような基本認識を踏まえて、本講演では脱炭素社会の姿とその実現に至るシナリオを考察する。脱炭素社会に向けた対策では、省エネや非化石エネルギー、CO_2 回収・貯留(CCS)など従来の対策に加えて、大気中の CO_2 を減らすことも必要になる。今世紀末までのシナリオを描いた研究でも、電力供給に伴う CO_2 排出を早期にマイナスにするという結果が多く得られている。

地球温暖化問題には様々な大きな不確実性がある。このような不確実性の下でも有効な脱炭素社会へのシナリオが重要である。この脈絡では、従来の温暖化対策の議論ではあまり取り上げられていなかったが、ベースラインシナリオにおける CO_2 排出の低減は注目に値する。環境・社会・ガバナンスを重視する ESG 投資などによる民間主導の脱炭素化が、新型コロナ対策で加速しているデジタル社会（ソサエティ 5.0）の進展とともに進めば、高コストの CO_2 削減対策に頼らずとも気候安定化へのシナリオが描ける。長期的な温暖化対策には、技術と社会のイノベーションが必要である。SDGs（持続可能な発展への国連目標）の達成に向けた社会イノベーションによって CO_2 排出のベースラインを下げ、そこに技術イノベーションによって電気や水素のようなクリーンな二次エネルギーを CO_2 排出なく生産し、効率的に利用するシステムを構築すれば、脱炭素社会実現への展望が開ける。

1.5℃目標下における中国のエネルギー・経済移行

Kejun Jiang

Senior Researcher, Energy Research Institute in China

エネルギー供給は、GHG 排出大幅削減を行う将来において最も重要な役割を果たす。最近の IPCC 報告書は、エネルギーシステムの急速な移行を明確に示している。2050 年までに、再生可能エネルギーと原子力がエネルギー供給の主軸となる。これは中国にとっても同様である。図 1 に統合政策評価モデル（IPAC）に基づき分析した中国の一次エネルギー供給量の結果を示す。エネルギー産業は、再生可能エネルギーと原子力へ大きくシフトする。図 2 に 1.5° C シナリオにおける中国の発電量の結果を示す。これら全ての結果は、エネルギー部門の移行が重要であることを示しており、経済移行の一部を示している。

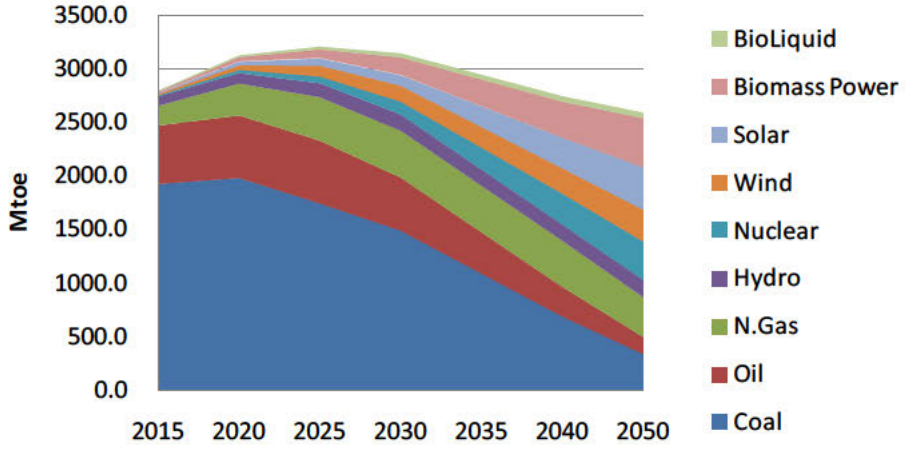


図 1 中国の一次エネルギー供給量（1.5℃シナリオ）

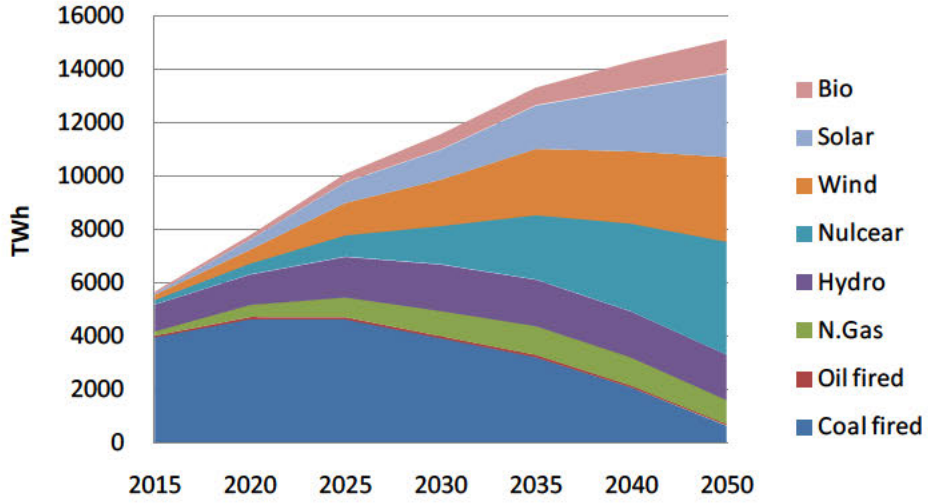


図 2 中国の発電電力量（1.5℃シナリオ）

明確な削減目標は産業部門と消費者に対応を求めることになる。削減政策は生産構造を変化させうる。鉄鋼、化学製品を製造するための原料および還元材料としての水素を含む新しい産業プロセス。自動車および電力貯蔵用の先進的なバッテリーや、高度な原子力発電などを含む新技術。再生可能な材料から製造したプラスチックのような、高排出製品に取って代わる可能性のある新しい材料。製造業を大きく変える可能性のある新たな消費行動（カーボンラベリング、カーボンフットプリントなど）。ゼロ排出のエネルギー供給、さらには負の排出のエネルギー供給となりうる新たなエネルギー消費の行動様式。GHG 排出量の削減により、経済システム全体が GHG 大幅削減の要件を満たすよう移行する必要がある。

（RITE 仮訳）

脱炭素化に向けた産業界の取り組み

(モデレーター)

山地　憲治　　RITE

(パネリスト)

多和 淳也　　株式会社 JERA 経営企画本部 企画部 部長

深野 行義　　一般社団法人　日本ガス協会 企画ユニット 環境部長

楠本 正治　　パナソニック株式会社 品質環境本部 環境経営推進部 部長

2020 年 10 月の所信表明演説の中で、菅総理は 2050 年までにカーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことを宣言した。アメリカではトランプ大統領からバイデン大統領へと政権が交代し、地球温暖化対策への取り組みが大きく変わることが予想される。EU でも新型コロナ禍による経済ダメージからの復興において、グリーンリカバリーを掲げるなど、世界全体で「脱炭素」に向けた動きが加速してきている。

我が国の産業界や企業においても、これらの環境の変化を受けて、2050 年のカーボンニュートラル社会・脱炭素社会への取り組みを今後の経営の柱とする動きが出ている。そこで、本パネル討論では、脱炭素社会に向けた企業や団体の取り組み・ビジョンなどについて紹介して頂く。

（発表概要）

■株式会社 JERA 経営企画本部 企画部長 多和 淳也

JERA ゼロエミッション 2050

2050 年に向けた CO_2 Zero Emission に向けた JERA の取り組みと、日本の電力システムに適したカーボンニュートラル実現に向けたロードマップについて説明する。

■一般社団法人 日本ガス協会 企画ユニット 環境部長 深野 行義

ガスのカーボンニュートラルチャレンジ 2050

～2050 年ガスのカーボンニュートラル化による脱炭素社会への貢献～

・　ガス業界は「2050 年のガスのカーボンニュートラル化」に挑戦し、将来の脱炭素/カーボンニュートラル社会の実現に貢献することを昨年 11 月に公表。

・　具体的には脱炭素社会の実現に至るトランジションの取り組みとして「徹底した天然ガスシフト・天然ガスの高度利用」により確実な CO_2削減を進めつつ、水素やメタネーション等のイノベーションにより「ガス自体の脱炭素化」を進めていく。

・　ガス業界はこのような脱炭素化に加えて、レジリエンス向上や地方創生など、様々な社会的課題の解決に貢献していく。

■パナソニック株式会社 品質・環境本部 環境経営推進部 部長 楠本 正治

パナソニック環境ビジョン 2050 の取り組み

パナソニックが環境ビジョン 2050 に込めた、2050 年に目指すカーボンニュートラルの姿や、その実現に向けた具体的な取り組みを、自社工場や商品・サービスなどの実例を交えて説明する。

日本における脱炭素化へ向けた動向とシナリオ分析

秋元 圭吾

公益財団法人 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

RITE は、経済産業省からの受託事業「地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業」（通称 ALPS）において、様々な科学的知見、定量的なデータを基に、そして現実の政策を踏まえながら、地球温暖化対策と経済成長の両立（グリーン成長）に向けてその限界と機会についてより良い理解を進め、グリーン成長を実現する道筋・方策を検討してきている。

2016 年 11 月に発効したパリ協定では 2℃目標や 1.5℃目標、そして 21 世紀後半に正味ゼロ排出といった長期目標も合意された。そして、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）1.5℃特別報告書（SR15）は、1.5℃上昇に抑えるには、2050 年頃に世界の CO_2 排出量を正味でほぼゼロにすることが必要とした。IPCC 第 5 次評価報告書（AR5）では、CO_2 の累積排出量と気温上昇との間には線形に近い関係が見られることが示されている。気温を安定化させようとすれば、気温上昇の水準に依らず、その時点では世界の正味 CO_2 排出量をほぼゼロにする必要があり、長期的には実質ゼロ排出（脱炭素化）が求められている。

日本政府は、2019 年に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を策定した。そこでは、「最終到達地点として『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」とした上で、非連続なイノベーション等を推進し、環境と経済の好循環を実現するとした。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、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」を発表したところである。

IPCC SR15 においては、典型的な 4 種類のシナリオについて提示がなされている。そのうちの極端な 2 種類について言及しておく。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。それに社会変化が重なって低エネルギー需要、低 CO_2 排出社会を実現し得る可能性が示されたシナリオである。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き、早期に達成するようにしていくことが望まれる。

本発表では、パリ協定で要請されているような大幅な排出削減における各技術の役割について、世界エネルギーシステムモデル DNE21+による分析結果を通して、システム的な視点から論じる。また、エネルギー需給両面における技術革新が複合的に起こったとき、大きな効果をもたらし、比較的低廉な費用で大幅な排出削減を実現できる可能性があることを定量的なモデル分析結果を通して提示する。

対策として、大きくは省エネと CO_2 原単位の低減があるが，まず、デジタル化による物質、エネルギーサービスの低減を含む、省エネルギーは基本的に重要である。CO_2 原単位の低減については、電力は非電力よりも低減しやすい傾向にあるので、IPCC でも、電化を促進し同時に電源の脱炭素化を進めることが重要としている。一方、省エネにしても、CO_2 原単位の低減にしても、大幅に低減しようとすればするほど、とりわけゼロに近付けようとすればするほど、費用が急激に増大する。残る排出量を負の排出技術（NETs）でキャンセルアウトするというのがカーボンニュートラル実現の大きな方向性となる。

図 3 は、ネットゼロの対策のイメージを日本における一次エネルギー供給の視点で記載したものである。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、化石燃料＋CCS のみで構成することが必要となる。ただし、日本は、再エネ自体の価格が海外主要国に比べ相対的に高く、将来的にも価格差が残る可能性もあり、また、国際的な系統連系もない中においては、再エネ、CCS については海外資源の活用を考えることも重要で、その際、水素への転換が重要になる。再エネ由来はグリーン水素、化石燃料＋CCS 由来はブルー水素とも呼ばれている。また、利便性向上のため、水素をアンモニアや合成燃料に転換して、輸送、利用することも重要となり得る。ただ、CCS 無しの化石燃料利用も残る可能性は高い。これを植林、BECCS、CO_2 鉱物化（コンクリートでの CO_2 固定など）等でキャンセルアウトすることも必要である。しかし、量の制約のため、DACCS の活用も重要と考えられる。なお、BECCS、DACCS を含む CCS は貯留可能量により制約を受けるため、CO_2 貯留サイトの確保が重要であるし、また、海外の CO_2 貯留サイトの活用も視野に入れることも重要性が高い。

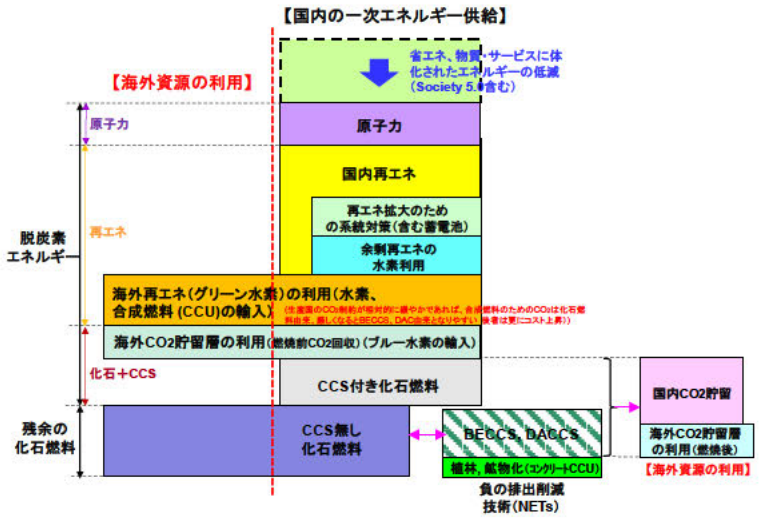


図 3　日本におけるカーボンニュートラルに向けた一次エネルギー供給の構成イメージ

CO_2 正味ゼロ排出に向けた急速な世界的転換

Keywan Riahi

Program Director, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

本講演では、国連のパリ協定における長期気温目標（世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低く保つとともに 1.5℃に抑える努力を追求する）と整合的な転換経路について述べる。その排出経路は、正味ゼロ排出に向けた急速な短期的転換が、経済の長期的な便益（気候変動影響回避の便益をたとえ考慮しなくとも）のために非常に重要であることを示している。気温目標のオーバーシュート制限は、世界の正味負排出への依存を減らし、長期にわたり経済的刺激を与え、気候リスクをより低くするため、複合的な便益をもたらす。さらに、正味 CO_2 ゼロ排出システムとして見込まれる代替構成と、排出と吸収をバランスさせるため異なる部門、地域の明確な役割を特定する。この文脈で、需要サイドの対策の重要性を強調しすぎることはない。全体的な緩和チャレンジの「サイズを設定する」のはサービス部門の需要である。低エネルギー需要シナリオは、エネルギー最終利用の全ての局面における技術的、組織的、行動的革新により、資源と環境への影響を悪化させ続けるエネルギー需要増大の歴史的軌跡を、どのように逆転させることができるかを示している。私達の移動、家の冷暖房、装置や機器の購入利用の仕方の劇的な転換は、実証されていない不確実な負排出技術（技術的手段による大気からの CO_2 除去）に依存することなく、2015 年のパリ協定で設定された 1.5℃目標内に保ちながら、国連の持続可能な開発目標さらにはそれ以上にグローバル・サウス（アフリカ、ラテンアメリカ、中東、アジアの発展途上国）の生活向上に役立ちうる。

（RITE 仮訳）

EU のカーボンニュートラルに向けた経路のモデリング

Alessia De Vita

Project Manager, energy analysis and policy, E3-Modelling

EU はパリ協定締約国で、気温上昇を 2℃よりも十分低く抑える目標に向け排出を削減することを公約している。欧州グリーンディールとそれに続く気候法で、EU は 2050 年までのカーボンニュートラル実現および 2030 年に 1990 年比 55%の排出削減をコミットした。本日の発表では、カーボンニュートラルへの経路をモデル化する上で、幾つかの選択された部門をより良く説明するために、PRIMES エネルギーシステムモデルで取り組まれた課題と改善を示す。課題とは、システムにおけるサーキュラーエコノミー等の新しい要素、システムの慣性を考慮した建物、産業、輸送におけるエネルギー効率性、また再生可能エネルギー源の割合の増加を含む供給サイドにおける変化、エネルギーシステムに要求される柔軟性、さらに新しいエネルギーキャリアの生産と貯蔵等を、いかにより良く説明するかである。そして、2030 年の排出削減を現行の法制化された目標から 1990 年比 55%削減へと進める上での影響、特に建物や発電といった選択された部門における影響について示す。

（RITE 仮訳）

英国の第 6 次カーボンバジェットーネットゼロへの経路

Vivian Scott, Senior Analyst, The Committee on Climate Change

Richard Millar, Senior Analyst, The Committee on Climate Change

英国気候変動委員会は、排出削減と気候変動リスク適応に関する助言と監視を英国政府に対して行う国家機関である。2019 年に、委員会の助言により英国は 2050 年までのネットゼロ排出目標を法制化した。2020 年 12 月、委員会は法的拘束力を持つ 2033～2037 年中間目標として第 6 次カーボンバジェットの設定に関する助言を発表した。ここでは、英国国内の温室効果ガス排出を 1990 年比で 78%低減することを提言している。本プレゼンテーションでは、気候変動委員会及び英国の気候ガバナンスフレームワークにおける委員会の役割を紹介する。さらに第 6 次カーボンバジェットにおける助言について、どのように策定されたか、またネットゼロへの移行のために英国の部門や国民に対して求める経路や変化を示しつつ詳しく述べる。

（RITE 仮訳）

講演者・パネリスト略歴

■Leon Clarke, Research Professor, University of Maryland

米国メリーランド大学のグローバル・サステナビリティ研究所（Center for Global Sustainability (CGS)）研究ディレクター、公共政策学部の研究教授。気候変動、気候変動緩和戦略、エネルギー技術オプション、統合評価モデリングを専門とするエネルギーと環境問題の専門家。CGS では政策やその他の決定をサポートする定量的手法とモデリングの活用に重点的に取り組む。現在の研究対象は主に中国、インド、ラテンアメリカの低排出開発戦略、ラテンアメリカのエネルギー・水・土地利用計画、米国の都市、州、企業による気候緩和。

経歴：統合人間地球システム科学グループを率い、Pacific Northwest 国立研究所とメリーランド大学の連携によるジョイントグローバルチェンジ研究所（JGCRI）で一連の統合評価モデリング活動を指揮。気候変動に関する政府間パネル（IPCC)、国家気候評価および米国学術研究会議の著者および統括執筆責任者を務める。現在は IPCC 第 6 次評価報告書の統括執筆責任者。気候緩和に関して数多くの多機関モデリング評価をリードしてきた。「エネルギーと気候変動」誌の共同編集者、チーフ。米国の 2 つの国立研究所、エネルギーコンサルティング、電気・ガス会社に勤務経験がある。スタンフォード大学で経営科学と工学の博士号、カリフォルニア大学バークレー校で機械工学の修士号を取得。

（RITE 仮訳）

■山地 憲治（公益財団法人 地球環境産業技術研究機構 理事・研究所長）

香川県出身。１９７２年４月東京大学工学部原子力工学科卒業。１９７７年３月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、工学博士。同年、(財）電力中央研究所入所。その後、米国電力研究所（EPRI）客員研究員、電力中央研究所・エネルギー研究室長等を経て、１９９４年東京大学教授（大学院工学系研究科電気工学専攻)、２０１０年より東京大学名誉教授、(公財）地球環境産業技術研究機構(RITE)理事・研究所長(2019 年より副理事長・研究所長)。専門分野はエネルギーシステム工学。エネルギー・資源学会会長（2011 年－13 年、現在は名誉会員)、日本エネルギー学会会長(2015 年－17 年、現在は参与)、日本学術会議会員（2005－14 年、現在は連携会員）等を歴任。政府の各種審議会委員を務め、現在は、総合資源エネルギー調査会　グリーンイノベーション戦略推進会議座長等。エネルギーシステム等に関する著書は 80 冊を超えており、論文多数、IPCC 第 3 次および第 4 次報告書（いずれも WG3）代表執筆者。

■Kejun Jiang, Senior Researcher, Energy Research Institute in China

姜克雋博士は五カ年計画と長期計画の支援のため、統合政策評価モデル（IPAC）を用いてエネルギー、気候変動緩和、大気汚染防止政策評価の研究を行っている。彼は 1990 年から中国国家発展改革委員会能源研究所にて研究を開始し、統合政策評価モデル（IPAC）の開発をリードしてきた。統合政策評価モデル（IPAC）を用いる彼の組織

は、中国の 2050 年エネルギー移行研究に資する研究結果を提供し、この分野の研究をリードしてきた。主要な研究として、エネルギー・CO_2 排出シナリオ、エネルギー政策、エネルギーシステム、エネルギー市場分析、気候変動、ローカルな環境政策、国際交渉が挙げられる。彼は 1997 年から IPCC SRES シナリオの著者、IPCC WGⅢ第三次報告書の著者、IPCC WGⅢ第四次報告書第 3 章の代表執筆者、Global Environment Outlook 4 の第二章の代表執筆者、IPCC 第五次報告書の統括執筆責任者、IPCC 第五次統合報告書の代表執筆者、IPCC1.5℃特別報告書の統括執筆責任者、Global Environment Outlook 6 の副共同議長でもある。2010 年からは、UNEP の排出ギャップレポートの著者、World Energy Outlook の著者でもある。現在、彼は IPCC 第六次報告書の代表執筆者である。彼は EMF、Seventh Framework Programme (FP7)、Horizon 2020 などの国際共同研究プロジェクトにも参加している。彼は、UNEP の Climate & Clean Air Coalition の科学委員会、統合評価モデリングコミュニティ（IAMC）の科学委員会のメンバーである。彼は、東京工業大学の社会理工学研究科社会工学専攻から博士号を授与されている。

（RITE 仮訳）

■多和 淳也(株式会社 JERA 経営企画本部 企画部長)

1995 年に早稲田大学政治経済学部卒業後、東京電力（株）入社。支店勤務を経て、IT ベンチャー企業へ出向し、事業戦略の企画立案に従事。その後、豪州のウィートストーンプロジェクトなどの LNG 上流事業の立上げや、各国の LNG プロジェクトからの LNG 調達業務などに携わる。東日本大震災以降、株式会社 JERA の設立に携わり 2016 年 7 月に同社 経営企画本部 企画部長就任。経営基盤の整備や全社戦略立案業務等に携わり現職に至る。

■深野 行義(一般社団法人 日本ガス協会 企画ユニット 環境部長)

- 1987 年 3 月京都大学大学院工学研究科精密工学修士課程修了
- 1987 年 4 月大阪ガス（株）入社
- 2011 年 4 月より大阪ガス(株) 技術戦略部長
- 2013 年 4 月より(株)ガスアンドパワー 常務取締役
- 2016 年 4 月より大阪ガス(株) エンジニアリング部長
- 2018 年 4 月より日本ガス協会に出向、環境部長、現在に至る。

■楠本 正治(パナソニック株式会社 品質・環境本部 環境経営推進部 部長)

1988 年に東京大学工学部精密機械工学科卒業、松下電器産業株式会社（現、パナソニック株式会社）入社。以来、同社 生産技術本部にて、半導体、光ディスク、ディスプレイ、基板実装、電池など様々な分野の内製生産設備の開発設計から量産導入に従事。2014 年から同社 エアコン工場勤務を経て、2016 年から同社 品質・環境本部にて、工場 CO_2 削減や環境長期ビジョンの策定などに携わる。2020 年 4 月に環境経営推進部長就任、現在に至る。

■秋元 圭吾(公益財団法人 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)

昭和 45 年生まれ。平成 11 年 横浜国立大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。平成 11 年 財団法人 地球環境産業技術研究機構 入所、研究員。主任研究員を経て、平成 19 年、同 システム研究グループリーダー・副主席研究員、平成 24 年 11 月、同 グループリーダー・主席研究員、現在に至る。平成 18 年 国際応用システム分析研究所（IIASA）客員研究員。平成 22 年～26 年度 東京大学大学院総合文化研究科客員教授、27 年度 同非常勤講師。日本学術会議連携会員。IPCC 第 5 次および 6 次評価報告書代表執筆者。総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会委員、産業構造審議会 産業技術環境分科会 地球環境小委員会委員、中央環境審議会 地球環境部会 気候変動影響評価等小委員会委員など、政府の各種委員会委員も務めている。エネルギー・環境を対象とするシステム工学が専門。著書として、「低炭素エコノミー―温暖化対策目標と国民負担」、「Climate Change Mitigation−A Balanced Approach to Climate Change」、「温暖化とエネルギー」、「Towards a Workable and Effective Climate Regime」（いずれも分担執筆）など。1997 年 IIASA より Peccei 賞、2004 年エネルギー・資源学会より茅奨励賞など受賞。

■ Keywan Riahi, Program Director, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

ケイワン・リアヒ博士は国際応用システム分析研究所（IIASA）のエネルギー、気候、環境プログラムのディレクターである。また、オーストリア、グラーツ工科大学の客員教授、米国のコロラド鉱山大学 Payne 研究所のフェロー並びにオランダのアムステルダム大学高等研究所（IAS）の外部教員を務める。

主な研究的関心は、技術変化並びに経済発展の長期パターン、特にエネルギーシステムの進化である。

現在の研究は世界的変化のエネルギー関連源及び持続可能な開発目標（SDGs）に関連する将来発展及び対応戦略に焦点をあてている。

現在取り組んでいるプロジェクトの中には、負の排出技術に関する EU-ERC シナジー助成金（GENIE）及び温室効果ガス排出削減に関する国内及び世界の行動探求に関するプロジェクト（ENGAGE）がある。

統合評価モデルコンソーシアム（IAMC）の科学運営会議の一員であり、気候変動の統合評価に関する RCP-SSP フレームワークの開発及び EU 出資の研究プロジェクトである CD-LINKS（国際的なネットワーク及び知識共有の活用を通じた気候政策と開発政策のリンク）を含む様々な国際的研究活動の共同主導及びコーディネートを行っている。また、スタンフォード大学のエネルギーモデルフォーラム（EMF）のような国際モデル比較プロジェクトにおいて、環境、経済及び社会の持続可能性に向けた急速な移行に関する気候とエネルギー政策に重点的に取り組んでいる。さらに、政府、エネルギー・環境省や産業分野において常任顧問を務めている。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC） WGⅢの第 6 次評価報告書（第 3 章：長期目標と整合的な緩和経路）の統括執筆責任者（CLA）を務める。また、これまで世界エネルギー評価（GEA）、2050 年の世界(TWI2050)、IPCC 第 3 次・第 4 次・第 5 次評価報告書、排出シナリオ特別報告書（SRES）、CCS 特別報告書（SRCCS）、再生可能エネルギー特別報告書（SRREN）を含む IPCC の報告書等の各種国際的評価報告書の代表執筆者、査読編集者を幅広く務めてきた。

クラリヴェイト・アナリティックス社（以前のトムソン・ロイター）は 2016 年から 2020 年の間に、二つのカテゴリーでリアヒ教授を世界的に非常に引用された研究者として繰り返し認めている。

（RITE 仮訳）

■Alessia De Vita, Project Manager energy analysis and policy, E3-Modelling

E3-Modelling のエネルギー・輸送モデリングチームのシニアエキスパートコラボレイターであり、政策分析とシナリオ設計に重点的に取り組んでいる。エネルギーと輸送の分野で数多くのプロジェクトを主導し、参加している。エネルギーや輸送、経済、環境政策のモデリングと影響評価の研究において 11 年の実績がある。プロジェクトやチーム管理、品質管理においても豊富な経験がある。また、国際的な気候変動交渉、ETS、技術開発、分散型エネルギーシステム、マイクロファイナンスの分野でも経験がある。E3-モデリングに参加する前には、オランダのエネルギー研究センター（ECN）では、MRV に関する UNFCCC での気候交渉のために、国や EU の代表団をフォローした。ドイツ・ハンブルグの Arrhenius Institute for Energy and Climate Policy では技術開発について、ベルリンの Microenergy International では分散型エネルギーシステムとマイクロファイナンスに従事した。ベルリン工科大学でエネルギー・プロセス工学の学位を取得している。

（RITE 仮訳）

■Vivian Scott, Senior Analyst, The Committee on Climate Change

排出削減及び気候変動リスクへの適応に関する英国政府の公式独立諮問委員会である気候変動委員会における国際的な行動のシニアアナリストである。

彼は、エディンバラ大学から委員会に出向している。大学では気候変動緩和と低炭素エネルギーの主任研究員を務めており、ネットゼロ目標及びシナリオや負の排出技術、CCS など、気候及びエネルギーシステムにおける CO_2 の直接管理に関して科学と政策の観点からの研究を行っている。

（RITE 仮訳）

■Richard Millar, Senior Analyst, The Committee on Climate Change

排出削減及び気候変動リスクへの適応に関する英国政府の公式独立諮問委員会である気候変動委員会における気候科学のシニアアナリストである。

気候変動委員会に参加する前は博士研究員として気候科学と政策の研究を行っており、IPCC1.5℃特別報告書では第 1 章のチャプターサイエンティストや第 2 章と第 3 章、政策決定者向け要約の執筆協力者などを務めた。オックスフォード大学で大気物理学の博士号を取得。

（RITE 仮訳）

Contents

Lecture

Charting an Ambitious U.S. NDC
Leon Clarke, Research Professor, University of Maryland

Actions and Scenarios for the Carbon Neutral Society
Kenji Yamaji, Director-General, RITE

Energy and Economy Transition in China under the Global 1.5C target
Kejun Jiang, Senior Researcher, Energy Research Institute in China

Panel discussion

Industries' activities and visions toward a Carbon Neutral society
<Moderator>
Kenji Yamaji, Senior Vice President/Director-General, RITE
<Panelist>
- Junya Tawa, Executive Officer, Head of Planning Group, Corporate Strategy Department, JERA Co., Inc.
- Yukiyoshi Fukano, Senior General Manager, Environment Division, The Japan Gas Association
- Shoji Kusumoto, Director, Environmental Management Department, Quality & Environment Division, Panasonic Corporation

Lecture

Recent trends for carbon neutrality and Scenario analysis in Japan
Keigo Akimoto, Group Leader, Systems Analysis Group, RITE

Rapid global transformations towards net zero CO_2 emissions
Keywan Riahi, Program Director,
International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

Modeling carbon neutral pathways for the EU
Alessia De Vita,
Project Manager, energy analysis and policy, E3-Modelling

The UK's Sixth Carbon Budget – the pathway to Net Zero
Vivian Scott, Senior Analyst, The Committee on Climate Change
Richard Millar, Senior Analyst, The Committee on Climate Change

Charting an Ambitious U.S. NDC

Leon Clarke

Research Professor, University of Maryland

2021 is a critical year for climate ambition and action in the United States. After four years without federal engagement, the Biden-Harris Administration has made climate a centerpiece of its policy agenda. President Biden campaigned on a commitment to achieve economy-wide decarbonization by 2050 and 100% clean electricity by 2035. Having recently formally re-joined the Paris Agreement, the administration has announced its intent to deliver a new national climate target to the international community by April 22nd. This new U.S. nationally determined contribution (NDC) will be critically important. The U.S. remains the world's second largest greenhouse gas emitter and is therefore essential to limiting climate change. The NDC will set the bar for domestic action, influencing federal and subnational policymaking. The NDC also has the potential to spur significant additional global action by sending a clear signal about the U.S. commitment to climate action. A successful NDC will need to balance ambition with what's possible in the next 9 years, taking into account political realities and evolving market dynamics. Too ambitious an agenda risks setting the U.S. up for failure and loss of credibility; too little ambition risks communicating only lukewarm support for climate with profound implications for global efforts. The U.S. remains deeply polarized on the topic of climate change, yet increasingly ambitious action by cities, states, and businesses across the U.S. are driving momentum around climate, and emerging technological trends that were largely unanticipated a decade ago are driving changes in the U.S. energy sector. This presentation will discuss the issues surrounding the U.S. NDC, and it will discuss recent research that has explored potential pathways to an ambitious U.S. NDC.

Actions and Scenarios for the Carbon Neutral Society

Kenji Yamaji

Senior Vice President/Director-General, Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE)

Japanese Prime Minister Suga declared the goal of realizing a carbon neutral, decarbonized society by 2050 in October 2020, and efforts toward a carbon neutral society are moving forward. The Green Innovation Strategy Council was initiated in July 2020 to implement the Progressive Environment Innovation Strategy announced in January last year, and the Committee on the Growth Strategy formulated a primary plan of the Green Growth Strategy toward a positive cycle of economic growth and environmental protection in December. Full-scale actions to realize a carbon neutral society that mobilize all possible solutions from innovations, such as electrification and greening electricity, realization of

hydrogen society, and CO_2 sequestration and reuse, to social implementation of those measures as well as existing technologies have begun. With two trillion yen of Green Innovation Fund created as a supplementary budget, concrete actions are now being undertaken in each field.

A decarbonized society, or a carbon neutral society, is a society where the CO_2 emission is net zero. This situation was maintained in the pre-industrial era when CO_2 absorption by photosynthesis and by ocean, etc. were enough to offset the amount of CO_2 emission as a natural process. Deforestation and large-scale use of fossil fuels, being accelerated rapidly since the Industrial Revolution, have disrupted this natural balance, leading to the increase of atmospheric GHG concentration and eventually global warming. A carbon neutral society where net zero CO_2 emission is achieved artificially through innovation, although it is debatable by what time it should be realized, is appropriate as a long-term goal for global warming mitigation. Furthermore, the fulfillment of 3E + S (energy security, economic efficiency, and environmental preservation on the premise of safety as the basis of Japan's energy policy) and SDGs are also required in order to make the response to climate change sustainable.

In the context of these basic understanding, this presentation examines the outlook of a carbon neutral society and the scenarios leading to its realization. As the measures toward a carbon neutral society, the reduction of atmospheric CO_2 will be necessary in addition to conventional measures such as energy saving, non-fossil energy, and CO_2 capture and storage (CCS). Many of the studies describing scenarios up to the end of this century have shown that CO_2 emissions from power supply will be negative at earlier timing.

There are various uncertainties around the global warming issue. A scenario for a carbon neutral society that is valid under such uncertainties is important. The reduction of CO_2 emissions in the baseline scenario is noteworthy although this has not been much considered in the discussions of climate change mitigation so far. A scenario for climate stabilization can be possible without relying on high-cost CO_2 reduction measures if the decarbonization led by private sectors through ESG investment emphasizing environment, society, and governance advances along with the development of a digital society (Society 5.0) being promoted by the countermeasures against COVID-19. Long-term climate change measures require technological and social innovation. Social innovation to achieve the SDGs (United Nations Sustainable Development Goals) lowers the baseline of CO_2 emissions, and technology innovation produces clean secondary energy such as electricity and hydrogen without CO_2 emissions and builds a more energy efficient system, which will open up the prospect for the realization of a carbon neutral society.

Energy and Economy Transition in China under the Global 1.5C target

Kejun Jiang

Senior Researcher, Energy Research Institute in China

Energy supply play most important role in the deep cut future. Recent IPCC reports clearly presents rapid transition in energy system. By 2050, renewable energy and nuclear will dominate energy supply. This is same story for China. Figure 1 show the primary energy demand in China based on IPAC results. The energy industry will shift largely to renewable energy and nuclear. Figure2 give power generation in the 1.5°C scenarios. All these show the energy sector transition is significant, and they present one part of economic transition.

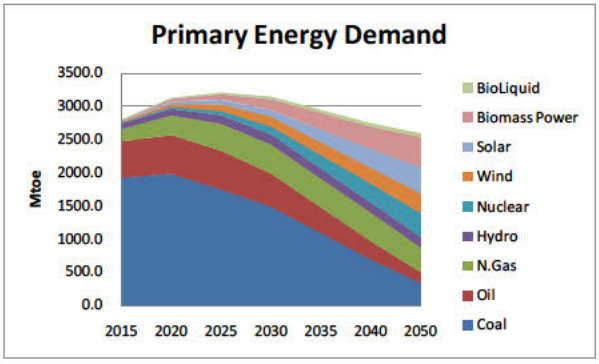


Figure 1 Primary energy demand in China, 1.5 scenario

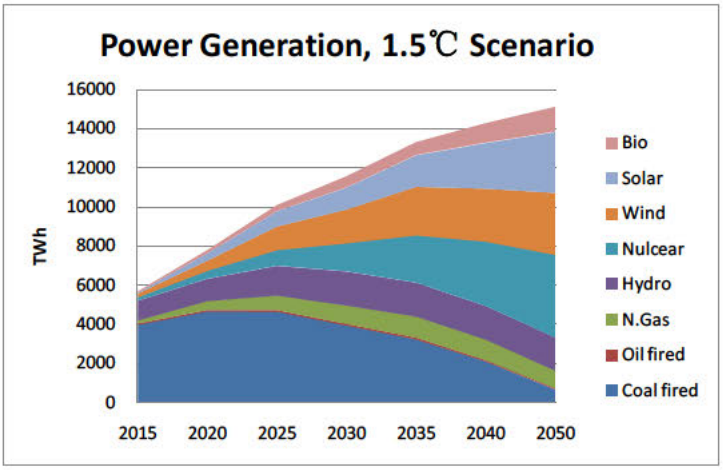


Figure2 Power generation scenarios for China, 1.5 scenario

Clear reduction targets will ask industries and consumer to response. Policies for reduction could change the production structure. New industry process including hydrogen as feedstock and reduction materials to make steel, chemical products; new technologies including advanced battery for vehicles and power storage, advanced nuclear power generation etc.; new materials which could replace high emission products, such as plastic from renewable materials; new consumption behaviors including carbon labeling, carbon footprint life, which can change manufacture industry significantly; new energy use pattern to be zero emission energy supply, or even negative emission energy supply. Due to GHG emission reduction, the whole economic system has to make the transition to match the requirement for deep cut of GHGs.

Industries' activities and visions toward a Carbon Neutral society

Moderator :

Kenji Yamaji, Senior Vice President/Director-General, Research (RITE)

Panelist :

Junya Tawa, Executive Officer, Planning Group of Corporate Strategy Department, JERA CO., Inc.

Fukano Yukiyoshi, Senior General Manager of Environment Division of The Japan Gas Association

Shoji Kusumoto, Director, Environmental Management Department, Quality & Environment Division, Panasonic Corporation.

Summary of presentation

■ JERA CO., Inc.

JERA Zero CO_2 Emissions 2050

JERA's efforts for Zero CO_2 Emissions toward 2050 and a road map toward achieving carbon neutrality suitable for Japan's electric power system are explained.

■ The Japan Gas Association

Carbon Neutral Challenge 2050 -Contributing to Decarbonized Society by Achievement of Gas Carbon Neutrality in 2050 -

・The gas industry has formulated "Carbon Neutral Challenge 2050" to demonstrate its commitment to achieve carbon neutrality by 2050, that contributes to the realization of a decarbonized society in 2050.

・During the transition phase on the path to a decarbonized society in 2050, we will contribute to a steady and significant CO_2 reduction by switching to natural gas and advanced use of natural gas. For a decarbonized society in 2050, we will decarbonize gas itself by innovations such as hydrogen and methanation technology. Carbon neutrality will be achieved by a combination of these diverse approaches.

・In addition to contributing to a decarbonized society, gas and its systems can solve various other social issues such as energy resilience and regional revitalization.

■ Panasonic Corporation.

Panasonic Environmental Vision 2050 Initiatives

Explain the carbon neutral world that Panasonic aims for in Panasonic Environmental Vision 2050, and the concrete efforts for achieving it by including actual examples of factories, products, and services.

Recent trends for carbon neutrality and Scenario analysis in Japan

Keigo Akimoto

Group Leader, Systems Analysis Group, RITE

RITE has been implementing a research project namely the Alternative Pathways toward Sustainable development and climate change stabilization (ALPS) which is supported by METI. In the project, RITE has been developing the scenarios for climate change response policies and measures harmonizing economic growth (green growth) with deeper understanding on the challenges and opportunities based on the wide range of scientific knowledge, quantitative data and deep understandings of political situations of real world.

The Paris Agreement, which entered into force in November 2016, includes long-term goals of the 2 °C/1.5 °C targets and net zero emission in the second-half of this century. For the 1.5 °C target, the Special Report on Global Warming of 1.5 °C (SR15) of the International Panel on Climate Change (IPCC) indicates that the global CO_2 emissions will be required to be net zero around 2050. The IPCC Fifth Assessment Report (AR5) showed a nearly linear relationship between cumulative CO_2 emissions and temperature change. Therefore, in order to stabilize temperature, global net CO_2 emissions are required to be nearly zero (de-carbonization) after the stabilization regardless of the temperature level.

In 2019, the Government of Japan decided and submitted “the Long-term Strategy under the Paris Agreement”, which stated her aim to accomplish “the decarbonized society” as the ultimate goal ambitiously as early as possible in the second half of this century, and to realize “a virtuous cycle of environment and growth” through creating business-led disruptive innovation. Afterwards, Prime Minister Suga declared the goal of realizing a carbon-neutral, decarbonized society by 2050 at his first policy speech in October 2020 and has just announced “Green Growth Strategy towards 2050 Carbon Neutrality” in December 2020.

IPCC SR15 released four categorized scenarios, and two extremes among the four scenarios will be explained here. One is the absolute energy saving scenario, known as Low Energy Demand (LED) Scenario, in which energy hugely exceeding the required amount on the energy demand side could be reduced dramatically by the progress of digital technologies, indicating the potential of low energy demand and low carbon society induced by social and technological innovations. The other is the scenario in which carbon neutral would be realized while fossil fuels remain cheap, and CDR technologies for gross emissions are utilized while continuing to use fossil fuels. The CDR technologies include CCUS as well as BECCS and DACCS to realize negative emissions. It is required to achieve carbon neutrality at earlier timing assuming several possible scenarios.

This presentation discusses the role of various kinds of emission reduction technologies for deep emission reductions demanded by the Paris Agreement based on the comprehensive aspects using the results of analyses of the world energy system model so

called DNE21+, and also shows through the quantitative model analysis results that many kinds of technological innovations will have synergistic impacts on deep emission reductions being achieved with low costs.

There are mainly energy saving and reduction of CO_2 intensity as the countermeasures, and energy saving including reduction in embodies energy of products and services induced by digital innovation is basically important. Regarding reduction of CO_2 intensity, as it is more easily achieved by electric power than non-electric energy, IPCC considers that it is important to promote electrification as well as decarbonization of power sources. On the other hand, reducing huge amount of CO_2, whether through energy saving or reduction of CO_2 intensity, particularly to the level of zero emissions, will increase the cost drastically. Therefore, it is a major direction to realize carbon neutrality by canceling out the remaining emissions with negative emission technologies (NETs).

Figure 3 shows the image of measures for net zero with the perspective of primary energy supply in Japan. In principle, the primary energy should consist of renewable energy, nuclear power, and fossil fuels with CCS. However, the cost of renewable energy in Japan is relatively high compared with the other major countries, and its cost difference will be possibly reminded in the future. It is also important to consider utilizing oversea-made resources for renewable energy and CCS as Japan has no international grid connection, thus conversion to hydrogen is important. Green hydrogen is produced using renewable energy, and blue hydrogen is created by fossil fuels with CCS. It can be also important to convert hydrogen to ammonia or synthetic fuel to be transported and used in order to enhance the convenience. On the other hand, the use of fossil fuels without CCS is likely remain, therefore, it is necessary to cancel out with forestation, BECCS, CO_2 mineralization (e.g., CO_2 fixation with concrete), and so forth. Furthermore, due to the quantitative constraints, application of DACCS is considered to be important, and as CCS including BECCS and DACCS has the limitation of storage amount, it is important to secure CO_2 storage site and to take into consideration utilizing overseas CO_2 storage site.

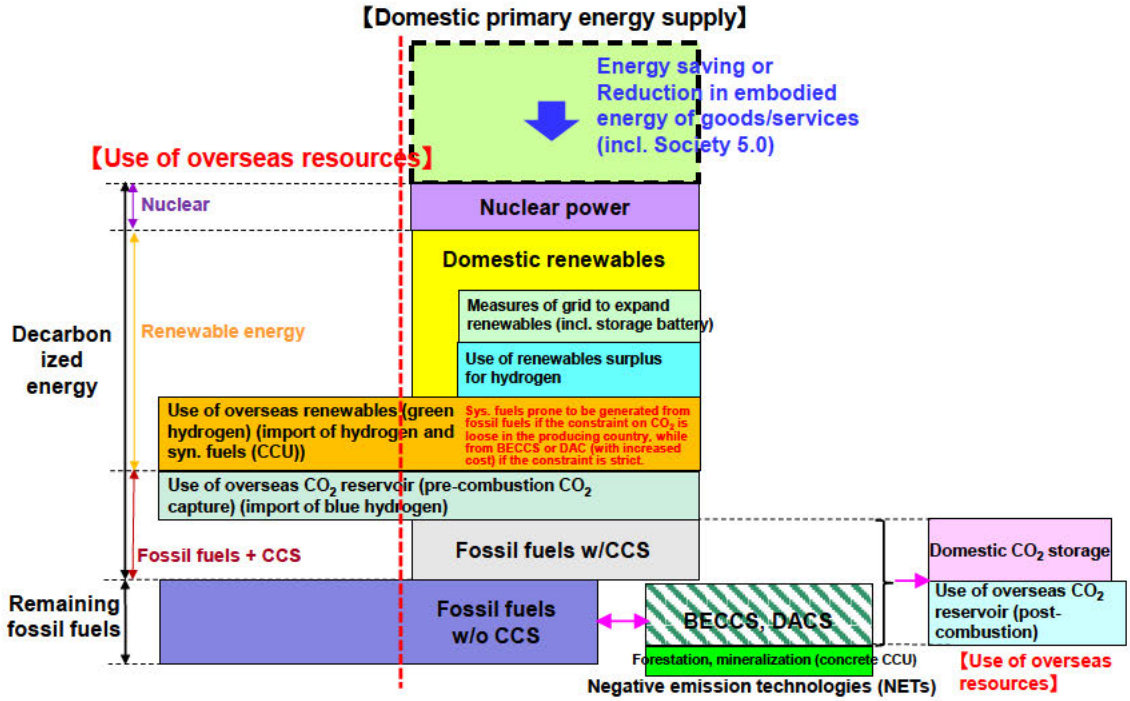


Figure 3 Image of primary energy in Japan for carbon neutrality

Rapid global transformations towards net zero CO_2 emissions

Keywan Riahi

Program Director, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

The presentation is focusing on transformation pathways consistent with the long-term goal of the UN Paris Agreement to hold warming well below 2°C and pursue limiting it to 1.5°C. The pathways illustrate the paramount importance of rapid near-term transformation towards net-zero emissions that will have significant long-term gains for the economy (even without considering the benefits of avoided climate impacts). Limiting the overshoot of the temperature goals has multiple benefits, as it reduces reliance on global net negative CO_2 emissions; it is economically more attractive over the long term; and involves lower climate risks. The talk will further identify possible alternative configurations of net-zero CO_2 emissions systems and the distinct roles of different sectors and regions in order to balance emissions sources and sinks. In this context, the importance of demand-side measures cannot be overemphasized. It is the demand in service sectors which 'sizes' the overall mitigation challenge. Low-Energy-Demand scenarios illustrate how the historical trajectory of ever-rising energy demand leading to ever aggravating resource and environmental impacts can be reversed driven by technological, organizational and behavioral innovations in all aspects of energy end-use. Dramatic transformations in the way we move around, heat and cool our homes, and buy and use devices and appliances can help raise living standards in the

Global South to meet, even exceed the UN Sustainable Development Goals, while also remaining within the 1.5°C target set by the 2015 Paris Agreement, and without relying on unproven and uncertain negative emissions technologies (CO_2 removal from the atmosphere by technological means).

Modeling carbon neutral pathways for the EU

Alessia De Vita, Project Manager, energy analysis and policy, E3-Modelling

The EU is signatory to the Paris agreement and has committed to reducing its emissions to well below 2oC: with the European Green Deal and the subsequent Climate Law the EU has committed to carbon neutrality by 2050 and to a reduce emission reductions by 55% in 2030 compared to 1990. In the presentation, we present the challenges and improvements undertaken in the PRIMES energy system model to improve the representation of selected sectors when modelling pathways to carbon neutrality. The challenges to improve representation of the new elements in the system such as circular economy, and energy efficiency in buildings, industry and transport taking into account the inertia of the system, as well as the changes required in the supply side including the high share of renewable energy sources and the required flexibility of the energy system, as well as the production and storage of new energy carriers. We then present the effects of moving from the current legislated targets to a 55% emission reduction in 2030 compared to 1990 and the effects on selected sectors of buildings and power generation.

The UK's Sixth Carbon Budget – the pathway to Net Zero

Vivian Scott, Senior Analyst, The Committee on Climate Change

Richard Millar, Senior Analyst, The Committee on Climate Change

The UK Climate Change Committee is the statutory body that advises and monitors the UK Government on emissions reductions and climate change risk adaptation. In 2019 on the Committee's advice the UK legislated a target for Net Zero emissions by 2050. In December 2020, the Committee published its advice on setting the Sixth Carbon Budget, the legally binding interim target for 2033-2037, recommending a 78% reduction in UK territorial greenhouse gas emissions relative to 1990. This presentation will introduce the Climate Change Committee and its role in the UK's climate governance framework, then detail the Sixth Carbon Budget advice showing how it was developed and the pathways and changes it recommends for UK sectors and citizens to transition to Net Zero emissions.

Biographies

■Leon Clarke, Research Professor, University of Maryland

Dr. Clarke is the Research Director for the Center for Global Sustainability (CGS) and a Research Professor in the School of Public Policy. Dr. Clarke is an expert in energy and environmental issues, with a focus on climate change, climate change mitigation strategies, energy technology options, and integrated assessment modeling. At CGS, Dr. Clarke focuses on the use of quantitative methods and modeling in support of policy and other decisions. Current activities include low-emissions development strategies in China, India, and Latin America, energy-water-land planning in Latin America, and climate mitigation by U.S. cities, states and businesses.

Dr. Clarke formerly led the Integrated Human Earth System Science Group and directed a range of integrated assessment modeling activities at the Joint Global Change Research Institute, a collaboration between the Pacific Northwest National Laboratory and the University of Maryland. Dr. Clarke has served as an author and coordinating lead author for the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the National Climate Assessment, and the National Research Council. He is currently a coordinating lead author in the IPCC's 6th Assessment Report. He has also led a number of multi-institution modeling studies on climate mitigation. He is the Co-Editor and Chief of the Energy and Climate Change. Dr. Clarke's has worked at two U.S. national laboratories, in energy consulting, and at an electric and gas utility. He holds a Ph.D. in Management Science and Engineering from Stanford University and a Masters degree in Mechanical Engineering from the University of California at Berkeley.

■Kenji Yamaji, Senior Vice President/Director-General, RITE

Dr. Kenji Yamaji, Emeritus Professor of the University of Tokyo, is Senior Vice President of the Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE) since July 2019 and Director-General of the research institute since April 2010. He served as President of the Japan Institute of Energy and as President of the Japan Society of Energy and Resources. Dr. Yamaji's immediate past position was a Professor of Electrical Engineering and Information Systems at the University of Tokyo. He obtained B.S., M.S., and Dr. of Engineering degrees in nuclear engineering from the University of Tokyo in 1972, 1974, 1977 respectively. During the earlier part of his career, Dr. Yamaji had been extensively involved in the analysis of energy technology assessment, mainly at the Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) in Japan. He has published more than 80 books as well as many research papers on energy systems, and he is also serving in many advisory bodies on energy and environmental policy for Japanese government. Dr. Yamaji contributed to Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) as a lead author for 3rd and 4th Assessment Reports of WG3.

■Kejun Jiang, Senior Researcher, Energy Research Institute in China

Dr. Kejun Jiang's research focus is energy, climate change mitigation and air pollution prevention policy assessment by using IPAC modeling, to support national five year plans, and long-term planning. He began his research in ERI from 1990, and led the development of Integrated Policy Assessment Model for China (IPAC). IPAC modeling team is now a leading research team on China's 2050 energy transition studies by providing benchmark research results. Major research focus includes energy and emission scenarios, energy policy, energy system, energy market analysis, and climate change, local environment policies and international negotiation. He also was authors of IPCC for Special Report on Emission Scenario from 1997, and Working Group III Third Assessment Report, leader author for IPCC WGIII AR4 Chapter 3, and leader author for GEO-4 Chapter 2, CLA in WGIII of IPCC AR5, LA for IPCC AR5 Synthesis Report, CLA of IPCC Special Report on 1.5℃ Warning, Vice Co-Chair of GEO6. From 2010, he is author for UNEP Emission Gaps and authors of WEOs, Emission Gap reports by now. Now he is lead author of IPCC AR6 WGIII. He also joined international research collaboration projects such as EMF, FP6, FP7 and H2020 research projects. He is member of Scientific Panel of UNEP CCAC, and Scientific Committee of IAMC. He got his Ph.D in Social Engineering Department of Tokyo Institute of Technology.

■Junya Tawa, Executive Officer, Planning Group of Corporate Strategy Department, JERA CO., Inc.

He started his career with TEPCO in 1995 after graduating from Waseda University's Department of Political Science and Economics.

After working at a branch office, he was seconded to an IT venture company and engaged in planning business strategies.

Since then, he has been involved in the launch of upstream LNG projects such as the Wheatstone Project in Australia and LNG procurement for LNG projects in various countries.

After the Great East Japan Earthquake, he was involved in the establishment of JERA Co., Ltd. and assumed the position of Executive Officer, Planning Group of Corporate Strategy Department, JERA Co., Ltd. in July 2016. He has been engaged in the development of management foundations and company-wide strategic planning, etc., to the present.

■Yukiyoshi Fukano, Senior General Manager of Environment Division of The Japan Gas Association

1987: Kyoto University, Master degree of Precision Mechanics

1987: enter Osaka Gas Co., Ltd.

2011-2013: Senior General Manager of Technology Strategy Department of Osaka Gas

2013-2016: Managing Director of Gas and Power Co. Ltd., subsidiary company of Osaka Gas

2016-2018: Senior General Manager of Engineering Department of Osaka Gas
2018: Senior General Manager of Environment Division of The Japan Gas Association

■Shoji Kusumoto, Director, Environmental Management Department, Quality & Environment Division, Panasonic Corporation.

He started the career at Panasonic in 1988 after graduating from Faculty of Engineering, University of Tokyo.

Since then, he engaged in the development and design of in-house production equipment in various fields such as semiconductors, optical disks, displays, circuit board mounting, batteries, etc. at the Production Engineering Division, and engaged in the installations to factories.

After working at the company's air conditioner factory since 2014, he has been involved in the Corporate Quality & Environment Division since 2016 for reducing CO_2 emissions at factory and formulating a long-term environmental vision. In April 2020, He was appointed to the Director of the Environmental Management Department.

■Keigo Akimoto, Group Leader, Systems Analysis Group, RITE

Keigo Akimoto was born in 1970. He received Ph.D. degree from Yokohama National University in 1999. He joined Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE) to work with the Systems Analysis Group in 1999, was a senior researcher in 2003 and the Leader of the Systems Analysis Group and an associate chief researcher at RITE in 2007. Currently he is the Leader of the Group and a chief researcher at RITE. He was a guest researcher at IIASA in 2006. He was a guest professor, Graduate School of Arts and Sciences, the University of Tokyo between FY2009 and FY2014, and is a part-time lecturer in FY2015. He was a Lead Author for the Fifth and Sixth Assessment Report of IPCC, and is a member for several advisory bodies on energy and environmental policy for Japanese government including Strategic policy committee, Advisory committee for natural resources and energy; and Global environment subcommittee, Industrial structure council; Climate change impact assessment subcommittee, Central environment council. His scientific interests are in modeling and analysis of energy and environment systems. He received the Peccei Scholarship from IIASA in 1997, an award from the Japan Society of Energy and Resources in 2004, etc.

■Keywan Riahi, Program Director, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

Dr. Keywan Riahi is the Director of the IIASA Program on Energy, Climate, and Environment. He is also visiting professor at the Graz University of Technology (TU Graz), a

fellow at the Payne Institute of the Colorado School of Mines, and an external faculty member at the Institute for Advanced Study (IAS) at the University of Amsterdam.

His main research interests are long-term patterns of technological change and economic development, particularly evolution of the energy system. His present research focuses on energy-related sources of global change, and on future development and response strategies related to the Sustainable Development Goals (SDGs).

Dr. Riahi's current projects, among others, include an EU-ERC Synergy Grant called GENIE on negative emissions technologies and 'Exploring National and Global Actions to reduce Greenhouse gas Emissions (ENGAGE)'.

He is a member of the Scientific Steering Committee of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) and has co-led and coordinated a variety of different international community research efforts, including for example the development of the RCP-SSP framework for the integrated assessment of climate change, or recently the EU-funded research project CD-LINKS (Linking Climate and Development Policies-Leveraging International Networks and Knowledge Sharing). His work within international modeling comparison projects, such as Stanford-based Energy Modeling Forum, focuses on climate and energy policies for rapid transformation toward environmental, economic and social sustainability. He is regular advisor to national government organizations, energy and environment ministries, and the Industry.

Dr. Riahi has been appointed as a coordinating lead author in Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report (chapter three on mitigation pathways compatible with long-term goals). He has served as lead author and review editor to various international assessments, such as the Global Energy Assessment (GEA), The World in 2050 (TWI2050), and other IPCC reports, including the Third, Fourth, and Fifth Assessment Reports, the Special Report on Emissions Scenarios (SRES), the Special Report on CO_2 Capture and Storage (SRCCS), and the Special Report on Renewable Energy (SRREN).

Clarivate Analytics (formerly Thomson Reuters) has repeatedly acknowledged Riahi as a Highly Cited Researcher Worldwide in two categories between 2016 and 2020.

■Alessia De Vita, Project Manager energy analysis and policy, E3-Modelling

Alessia De Vita is a senior expert collaborator in the energy and transport modelling teams of E3-Modelling, focusing on policy analysis and scenario design. She leads and participates in numerous projects in the field of energy and transport. She has 11 years of experience in energy, transport, economy and environmental policy modelling and impact assessment studies. She has extensive experience in project and team management, as well as quality control. Her experience also lies in the areas of international climate change negotiations, ETS, technology development as well as decentralized energy systems and microfinancing. Before E3-Modelling, she worked at the Energy Research Centre of the

Netherlands (ECN) following and preparing inputs for national and EU delegations for the climate negotiations at the UNFCCC on e.g. MRV, and among others on the ETS, at the Arrhenius Institute for Energy and Climate Policy in Hamburg-Germany on technology development and at Microenergy International in Berlin-Germany on decentralised energy systems and microfinance. She holds a degree in energy and process engineering (Diplom-Ingenieurin) from the Technical University of Berlin-Germany.

■Vivian Scott, Senior Analyst, The Committee on Climate Change

Vivian is the Senior Analyst for international action at the Climate Change Committee, the official independent advisory body to the UK government on reducing emissions and adapting to the risks of climate change.

He is on loan to the Committee from the University of Edinburgh where he is a senior researcher in climate change mitigation and low carbon energy, working on the science and policy context of the direct management of carbon dioxide in the climate and energy system including net-zero targets and scenarios, negative emissions technologies and carbon capture and storage.

■Richard Millar, Senior Analyst, The Committee on Climate Change

Richard is the Senior Analyst for Climate Science at the Climate Change Committee, the official independent advisory body to the UK government on reducing emissions and adapting to the risks of climate change.

Prior to joining the Committee on Climate Change, Richard worked at the interface of climate science and policy as a post-doc researcher, including on the recent IPCC Special Report on 1.5°C as a chapter scientist for Chapter 1 and a contributing author to Chapters 2, 3 and the Summary for Policymakers. Richard holds a DPhil from the University of Oxford in atmospheric physics.



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