令和４年度

気候変動対策に係る国際会議の開催等による

エネルギー・環境技術イノベーション創出のための

国際連携推進事業

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５年３月

公益財団法人 地球環境産業技術研究機構

委員会、ワーキンググループ名簿

（順不同）

＜地球温暖化対策国際戦略技術委員会＞

委員長	内山　洋司	筑波大学 名誉教授 （一社）日本エレクトロヒートセンター 代表理事 会長
委員	有馬　純	東京大学 公共政策大学院 特任教授
	岩船　由美子	東京大学 生産技術研究所 特任教授
	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 研究推進マネージャー
	江守　正多	国立研究開発法人 国立環境研究所 地球システム領域 上級主席研究員 東京大学未来ビジョン研究センター 教授
	沖　大幹	東京大学大学院 工学系研究科 教授
	杉山　大志	キヤノングローバル戦略研究所 研究主幹
	髙村　ゆかり	東京大学未来ビジョン研究センター 教授
	手塚　宏之	JFE スチール（株） 専門主監（地球環境）
	中上　英俊	（株）住環境計画研究所 代表取締役会長
	野村　浩二	慶應義塾大学産業研究所 教授
	藤井　康正	東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授
	増井　利彦	国立研究開発法人 国立環境研究所 社会システム領域 領域長
	森　俊介	国立研究開発法人 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター 研究統括／上席研究員

委員会事務局　地球環境産業技術研究機構（RITE） システム研究グループ

＜モデル構築・分析 WG＞

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

	山　形　与志樹	慶應義塾大学大学院 システムデザイン・マネジメント研究科 教授
	山　本　博　巳	（一財）電力中央研究所 グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 上席研究員
	横　木　裕　宗	茨城大学大学院 理工学研究科（工学野） 都市システム工学領域 教授
	秋　元　圭　吾	RITE システム研究グループ グループリーダー
	和　田　謙　一	RITE システム研究グループ 主任研究員
	本　間　隆　嗣	RITE システム研究グループ 主任研究員
	佐　野　史　典	RITE システム研究グループ 主任研究員
	林　　礼　美	RITE システム研究グループ 主任研究員
	桑　鶴　　整	RITE システム研究グループ 主任研究員
	安　藤　輝　尚	RITE システム研究グループ 研究員

＜経済分析 WG＞

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

＜セクター横断対策検討 WG＞

主　査	秋　元　圭　吾	RITE システム研究グループ グループリーダー
委　員	伊香賀　俊　治	慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科 教授
	小　田　潤一郎	秋田大学大学院 国際資源学研究科 准教授
	梶　野　　勉	（株）豊田中央研究所 研究企画室
	金　成　修　一	（一財）日本自動車研究所 環境研究部 LCA グループ グループ長 主任研究員
	上　條　元　久	日産自動車（株） 総合研究所 EV システム研究所 エキスパートリーダー
	紀　伊　雅　敦	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 原子力国際専攻 教授
	齋　藤　　潔	（一社）日本電機工業会 環境ビジネス部 次長

	清　水　敦　志	パナソニックホールディングス（株） プラットフォーム本部 エネルギー事業開発室 エネルギーPF プロジェクト プロジェクトマネージャ
	堤　崎　高　司	（株）本田技術研究所 先進パワーユニット・エネルギー研究所 戦略企画室 1BL チーフエンジニア
	鶴　崎　敬　大	（株）住環境計画研究所 取締役研究所長
	西　尾　健一郎	（一財）電力中央研究所 社会経済研究所 上席研究員
	松　尾　雄　司	立命館アジア太平洋大学 アジア太平洋学部 准教授
	松　橋　啓　介	国立研究開発法人 国立環境研究所 社会システム領域 地域計画研究室 室長
	村　上　正　吾	大成建設（株）クリーンエネルギー・環境事業推進本部 ZEB・スマートコミュニティ部 エネルギーサポートセンター センター長
	佐　野　史　典	RITE システム研究グループ 主任研究員
	望　月　則　孝	RITE システム研究グループ 主任研究員
	ジョニ･ジュペスタ	RITE システム研究グループ 主任研究員
	山　川　浩　延	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　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
	清　水　　洋	早稲田大学商学学術院 教授
	中　山　寿美枝	電源開発（株） 執行役員
	野　村　浩　二	慶應義塾大学産業研究所 教授
	古　橋　　真	ソニーグループ（株） サステナビリティ推進部 環境グループ
	山　口　栄　一	立命館大学 教授
	秋　元　圭　吾	RITE システム研究グループ グループリーダー
	山　田　航　也	RITE システム研究グループ 副主席研究員
	長　島　美由紀	RITE システム研究グループ 主任研究員
	望　月　則　孝	RITE システム研究グループ 主任研究員
	中　野　優　子	RITE システム研究グループ 研究員

＜気候変動リスクマネージメント検討 WG＞

主　　査	山　地　憲　治	RITE 理事長
副 主 査	秋　元　圭　吾	RITE システム研究グループ グループリーダー
委　　員	江　守　正　多	国立研究開発法人 国立環境研究所 地球システム領域 上級主席研究員 東京大学未来ビジョン研究センター 教授
	岸　本　充　生	大阪大学データビリティフロンティア機構 教授
	杉　山　大　志	キヤノングローバル戦略研究所 研究主幹
	杉　山　昌　広	東京大学未来ビジョン研究センター 准教授
	高　橋　　潔	国立研究開発法人 国立環境研究所 社会システム領域 副領域長
	平　林　由希子	芝浦工業大学大学院 理工学研究科 工学部 土木工学科 教授
	松　尾　雄　司	立命館アジア太平洋大学 アジア太平洋学部 准教授
	松　田　裕　之	横浜国立大学大学院 環境情報研究院 教授
	森　　信　人	京都大学 防災研究所 沿岸災害研究分野 教授
	森　川　哲　男	（一財）日本エネルギー経済研究所 化石エネルギー・国際協力ユニット 石油グループ 研究主幹 マネージャー
	山　田　航　也	RITE システム研究グループ 副主席研究員
	林　　礼　美	RITE システム研究グループ 主任研究員
	ジョニ･ジュペスタ	RITE システム研究グループ 主任研究員
	大　西　尚　子	RITE システム研究グループ 研究員

目　　次

要　約 3

第 1 章 はじめに 17

1.1 背景 18

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

1.2 本研究の目的と実施内容 37

第 2 章 気候変動リスクマネジメント 43

2.1 気候変動リスクマネジメントの考え方 43

2.2 持続可能な発展とのシナジー・トレードオフ 55

2.2.1 IPCC WG3 AR6 における緩和策と持続可能な発展との関係性評価 55
2.2.2 GHG 正味ゼロ排出追求による日本のフードセキュリティへの影響の分析 63

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 76

2.3.1 はじめに 76
2.3.2 最新の核融合技術開発動向と、そこから得られる今後の取り組み示唆 78
2.3.3 イノベーション関連のまとめ 79

第 3 章 グリーン成長の限界と機会 80

3.1 グリーン成長の限界と機会 80

3.1.1 世界の経済成長と CO_2 排出の関係 81
3.1.2 世界の CO_2 排出等についての近年の状況 83
3.1.3 過去の IPCC 報告書のシナリオと世界 CO_2 排出量の実績値との関係 85

3.2 日本経済の長期エネルギー生産性変化における構造要因の分析 87

3.2.1 はじめに 87
3.2.2 長期の経済成長とエネルギー生産性 89
3.2.3 U 字型エネルギー生産性の形成 92

3.3 日本産業のエネルギー生産性変化の測定 96

3.3.1 はじめに 96
3.3.2 電力需要の見通しと実績 97
3.3.3 分析フレームワーク 100
3.3.4 エネルギー品質変化 111
3.3.5 EPI の産業起因 113
3.3.6 結び 131
3.3.7 付表 133

3.4 日本の産業界の排出削減の取り組み状況の分析 145

3.4.1 経団連を中心とした温室効果ガス排出削減の取り組み状況と評価 145
3.4.2 中小企業の省エネ等への取り組み事例と CN への取り組みの課題 158

3.5 国内外の再生可能エネルギーの動向 167

3.5.1 世界における再生可能エネルギーの導入状況 167
3.5.2 日本における再生可能エネルギーの導入状況 174

3.6 エネルギーシステム改革と温暖化対策 181

3.6.1 電力自由化の市場と温暖化対策 181

3.7 ESG 投資、グリーンボンド等の動向 189

3.7.1 背景 189
3.7.2 ESG 投資の現況 190
3.7.3 債券市場 192
3.7.4 GX 経済移行債と今後の課題 194

3.8 気候変動政策に伴う費用負担の格差拡大の課題 196

3.8.1 気候変動政策による費用負担格差への影響 197
3.8.2 エネルギー価格上昇による費用負担格差への追加的な影響 202
3.8.3 まとめ 205

第 4 章 中期緩和対策（パリ協定国別貢献 NDCs）分析 206

4.1 2030 年の排出削減目標（NDCs）に関する分析・評価 206

4.1.1 世界各国の NDCs の排出削減目標の状況 206

4.1.2 NDCs の排出削減努力の評価 209
4.2 国際競争力への影響・国境調整税の評価 218
4.2.1 はじめに 218
4.2.2 国境炭素調整に関するモデル分析 218
4.2.3 国境炭素調整や国際競争力、気候クラブに関する研究事例の調査 231
4.2.4 まとめ 234
4.3 排出削減努力等の研究事例の調査 236
4.3.1 UNFCCC 事務局による Synthesis レポート 236
4.3.2 UNEP による Emission Gap Report 2022 （EGR2022） 238
第 5 章 長期緩和シナリオ分析 244
5.1 長期緩和温暖化政策（カーボンニュートラルに向けた技術等）の調査 245
5.1.1 各国の CN 燃料関連政策の動向 245
5.1.2 グリーンイノベーション基金関連の技術開発動向全般 249
5.1.3 水素系エネルギーの動向 279
5.1.4 二酸化炭素除去（CDR）の技術動向 303
5.2 トランジションを含む長期緩和策分析 314
5.2.1 CN に向けた長期シナリオ策定の背景とシナリオ想定 314
5.2.2 世界 320
5.2.3 日本 329
5.3 CN 実現の主要技術に関する感度解析 352
5.3.1 部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計 352
5.3.2 水素、アンモニア、e-methane（合成メタン）、 e-fuels（合成燃料）、CDR 関連の感度解析 358
5.4 需要側技術の動向と社会変化 385
5.4.1 日本における家庭の財、サービス需要：生活行動の長期的な変化の検討 385
5.4.2 3D プリンティング技術のエネルギー需要への影響 409
5.4.3 貨物輸送技術の変化 427
5.5 最終需要部門の変化に伴う統合的な分析 442
5.5.1 建築部門のエネルギー需要削減における課題の解決に向けた分析 442

5.5.2 産業部門における技術社会変化の調査・シナリオのレビュー 465
5.5.3 食品廃棄低減による農業土地利用・非 CO_2 GHG 排出への影響分析 474

5.6 需要サイドの定量的なモデル分析 496

5.6.1 シナリオ分析の背景と意図 496
5.6.2 需要側変化に関する定量的な分析のための各種想定シナリオ 499
5.6.3 需要側変化に関するシナリオ分析結果 504

5.7 非 CO_2 GHG 排出量評価モデルの更新と試算 508

5.7.1 はじめに 508
5.7.2 非 CO_2 GHG 排出量評価モデルの更新 509
5.7.3 非 CO_2 GHG 排出量評価モデルの試算 512
5.7.4 まとめ 517

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 519

6.1 IPCC WG3 長期排出シナリオ 519

6.1.1 IPCC WG3 長期排出シナリオの概要 519
6.1.2 IPCC WG3 排出削減コストとポテンシャルと DNE21+分析等との比較 531

6.2 IEA WEO の分析 537

6.2.1 IEA の World Energy Outlook のシナリオ 537
6.2.2 IEA WEO2022 と DNE21+シナリオとの比較 563

6.3 国際モデル比較プロジェクト分析等の動向（ENGAGE） 567

6.3.1 プロジェクト全体概要 567
6.3.2 WP5 の概要 570
6.3.3 エネルギーセキュリティ分析 573
6.3.4 今後の課題 577

第 7 章 まとめ 578

付録 ALPS 国際シンポジウム 585

要　　約

令和４年度気候変動対策に係る国際会議の開催等によるエネルギー・環境技術イノベーション創出のための国際連携推進事業

「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４年度気候変動対策に係る国際会議の開催等によるエネルギー・環境技術イノベーション創出のための国際連携推進事業「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。2021 年 11 月に英国グラスゴーで開催された第 26 回締約国会議（COP26）では、パリ協定の詳細ルールの策定の内、先送りされていた協定６条に関する市場メカニズムに関連したルールも合意された。2023 年には第 1 回グローバルストックテイクが予定され、パリ協定の目標達成に向けた世界全体での実施状況をレビューし、目標達成に向けた進捗の評価がなされてきている。

世界では 150 以上の国と地域が、21 世紀中ごろまでのカーボンニュートラルを表明し、温暖化への対応は、国際的にも成長の機会と捉える時代に突入している。日本政府は、2019 年 6 月に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を策定し、そこでは「21 世紀後半のできるだけ早い時期に実質ゼロ排出を目指す」とした。そして、2020 年 10 月には、菅首相が所信表明演説で「2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」と宣言した。そして、2020 年 12 月に経済産業省が中心になって、「グリーン成長戦略」を策定した。2021 年 4 月に、2030 年の温室効果ガス排出削減目標を 2013 年度比 26%減から 46%減、更に 50%減の高みを目指すと深堀を行った。その他、先進国を中心に 2030 年目標の深堀が行われた。このように、意欲的な排出削減を目指す動きが国内外で加速してきている。そして、2021 年 10 月には、第６次エネルギー基本計画が閣議決定され、また、地球温暖化対策計画、および、パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略についても改定し閣議決定された。2022 年はエネルギー安全保障・安定供給の問題が顕在化した。ロシア・ウクライナ情勢からの化石燃料価格高騰や、2022 年 3 月の電力需給逼迫等により、改めてエネルギー安全保障・安定供給の課題を再認識し、2023 年 2 月には「GX（グリーントランスフォーメーション）実現に向けた基本方針」が閣議決定された。

ところで再び世界に目を転じてみると、2021 年の COP26 では、国連や英国政府等が意図した合意が得られたわけではなかったし、2022 年 11 月にエジプトのシャルム・エ

ル・シェイクで開催された COP27 までにも、NDCs の排出削減目標の深堀はほとんどなされなかった。国際社会は、気候変動対策の強化の必要性については概ね認識を一にしているものの、それでも具体的な対応については温度差がある。グローバルでカーボンニュートラルの達成を目指すうえでは、各国の掲げる野心や政策強度の違いによる、競争上の不公平性を是正し、カーボンリーケージを防止したうえで国際的なルール策定を実施していく必要がある。このような中、各国・各地域・各産業の状況を総合的に考慮するとともに、気候変動政策の立案に貢献し得る様々な評価・分析を行う重要性は一層高まってきている。最新の気候変動の科学的な知見の集積として、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は第 6 次評価報告書を公表した。これを基にしつつ、複雑な課題に対する科学的な分析等を更に進めていく必要がある。今後、第 7 次評価報告書作成のプロセスも開始される予定であり、気候変動に関する最新の科学的知見の提供も引き続き求められている。

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

本報告書では、まず、第 1 章において背景と目的を記述した後、第 2 章で気候変動に関連した各種不確実性を指摘した上で、本事業で実施した定量的な分析も踏まえながら、気候変動リスクマネージメント戦略のあり方について議論を行い、とりまとめた。また、IPCC の最新の評価報告書で整理された内容を含め、気候変動対策と他の SDG 目標等とのシナジー・トレードオフについて記述した。更に、気候変動対策におけるイノベーションの可能性についてまとめ、気候変動リスクマネージメントにおけるイノベーションの役割について論じた。第 3 章ではグリーン成長の限界を正しく認識しつつ、その機会を見出すために、各種調査、分析した結果をとりまとめた。また、日本経済の長期エネルギー生産性変化における構造要因の分析、日本産業のエネルギー生産性変化の測定、電力自由化の下での温暖化対策の動向等についての調査、サステイナブルファイナンスの動向と既往のモデル分析の調査・検討等を行った。第 4 章では、中期的な緩和策の分析として、パリ協定 NDCs（Nationally Determined Contributions）の排出削減目標（2030 年頃）に関する分析・評価を行った結果をまとめた。各種制約に伴う NDCs 達成の排出削減費用の上昇等について分析するとともに、国際競争力への影響についても評価を行った。また、国境調整税に関する国際的な議論の動向を整理するとともに、モデル分析による試算も行った。第 5 章は長期の緩和シナリオ分析についてまとめた。カーボンニュートラル実現のための各種技術の開発動向や国際的な最新の分析・評価について整理した。また、温暖化対策モデルにおいて、エネルギー供給側および需要側双方について、2050 年カーボンニュートラル実現の様々なシナリオを想定した分析を行った。第 6 章においては、最新の海外の気候変動に関する政策動向の調査結果を記すとともに、国際モデル比較プロジェクトの各種動向、国際エ

ネルギー機関 IEA 等のシナリオについてもその概要等を記載した。第 7 章においてまとめを記載した。また、付録には本事業の一環として実施した国際シンポジウム等の内容について掲載した。以下に第 2～6 章のそれぞれのポイントを記載する。

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

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

経済と CO_2 排出のデカップリングの状況などについて、最新の定量的なデータ収集と分析を行い、その要因も含めて検討を行った。そして、更なる深堀として、日本経済の長期エネルギー生産性変化における構造要因の分析を行うと共に、日本産業のエネルギー生産性変化の測定も実施した。更に、日本の産業界が取り組んでいるカーボンニュートラル行動計画の実績について、グリーン成長の視点を含め、排出削減努力についての一次的な試算も行った。

その他、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、そしてそれへの対応として進められている電力政策の動向等についてまとめた。更には、グリーンボンド、サステイナブルリンクローン等、サステイナブルファイナンスの動向とこれまでのモデル分析例についてその内容と課題について整理を行った。気候変動政策に伴う費用負担の格差拡大の課題についても調査・検討を行った。

第 4 章では、パリ協定 NDCs の排出削減目標（2030 年頃）に関する分析・評価を行った。パリ協定では、プレッジ・アンド・レビューの仕組みとなっており、NDCs の国際的なレビューが重要となる。本研究では最新の動向をふまえ、排出削減費用を含む、複数の指標を採用し、各国 NDCs の排出削減努力の国際比較を実施した。また、日本の新たな 2030 年の排出削減目標-46%について、その経済影響についても分析・評価を行った。日本の排出削減目標実現には、大きな排出削減費用と経済影響が推計された。なお、国際的な NDCs 評価の文献についても整理を行った。

更には、欧州では炭素国境調整税導入の具体的な検討が進められてきている。そこで、関連動向と既往モデル分析事例の調査を行うとともに、世界エネルギー経済評価モデルを拡張して、2030 年の NDCs の下での炭素国境調整税導入の影響に関する試算を行った。また、海外のモデルでも分析を行い、比較・評価を行った。炭素国境調整税は、炭素リーケージに一定の効果は有すると推計されるものの、効果は限定的とも見られ、原則的には CO_2 限界削減費用の差異が国間で大きくなりすぎないよう、排出削減目標の調整が重要と見られる。

第 5 章では、長期の温暖化対策・政策の総合的な分析を行った。先述のように、日本政府を含む、世界の多くの国が、2050 年にカーボンニュートラルを目標に掲げるようになった。このような状況を踏まえ、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+において、エネルギー供給側および需要側双方のエネルギーシステムの分析を行った。

2021 年度の本事業において、2050 年カーボンニュートラルの分析を行ったが、2022 年度は、カーボンニュートラル実現までのトランジションを含めて、部門別のロードマップとして、DNE21+モデルによるシナリオ分析を行った。

なお、エネルギー供給サイドについては、カーボンニュートラル実現において、より一層重要性が増すと考えられる、水素や水素系燃料である、アンモニア、e-methane（合成メタン）、e-fuels（合成燃料）の技術調査、各種の経済性評価に関する調査を行った。また、大気中からの直接 CO_2 回収・貯留（DACCS）などの二酸化炭素除去技術（CDR）についても技術調査、各種の経済性評価に関する調査を行った。これらの調査は、DNE21+モデルによる 2050 年カーボンニュートラル分析においても反映した他、その可能性についての感度解析も実施した。

エネルギー需要サイドについては、デジタルトランスフォーメーション（DX）を中心に誘発され得るサーキュラーエコノミー、シェアリングエコノミー等、低エネルギー需要実現の可能性について、調査、分析を実施した。3D プリンティングの技術動向や、DX による貨物部門の技術・社会変化、食料廃棄低減に伴う土地利用変化とそれによる非 CO_2 温室効果ガス排出量低減等について調査した。また、消費行動を包括的に評価するため、COVID-19 の影響を含む生活行動の変化について調査した。そして、DX を中心とした技術変化や社会変化が、エネルギー需要にどのような変化をもたらし得るのかについて、定量的な推計を行い、DNE21+モデルを用いてエネルギー需給双方を整合的に分析した。これらによって、リバウンド効果を含む、行動変化を総合的に捉えて、将来のエネルギー需要の見通しを得る分析手法の今後の発展に資するものと考えられる。

また、非 CO_2 温室効果ガス排出および削減費用の推計モデルの更新を行い、その試算も行った。

第 6 章では、カーボンニュートラルに関する国際的なシナリオ分析の動向を記述するとともに、国際モデル比較プロジェクトの動向を整理した。まず、IPCC WG3 第 6 次評価報告書にまとめられた、排出シナリオ、および、排出削減費用とポテンシャルについて整理を行った。また、国際エネルギー機関（IEA）が 2022 年 10 月に発表した世界エネルギー展望 WEO2022 についても解説を行った。本報告書では、これらシナリオについても概要をとりまとめるとともに、DNE21+によるシナリオ（第 4 章、5 章に記載）との比較評価についてもとりまとめた。国際モデルプロジェクトとしては、欧州委員会が研究資金を提供し IIASA が主宰するパリ協定目標を技術的、社会的、政治的に達成可能な排出削減経路を分析・評価する ENGAGE (Exploring National and Global Actions to reduce Greenhouse gas Emissions) プロジェクトの動向について概要をまとめた。

パリ協定は、世界すべての国が排出削減に取り組む仕組みとして出来上がったものの、現状では、世界各国がその目標を実現するための CO_2 限界削減費用には大きな差異が見られる。これは、CO_2 排出原単位の高い産業を中心に産業の国間の移転を誘発し、世界全体での排出削減効果を大きく減じるリスクがある。欧州は、このリスクを減じるため、炭素国境調整税の導入を目指しているが、本事業での分析からもその効果は一定程度あるものの、効果は限定的とも見られる。確かに、急速な気候変動対応強化への国際的な高まりは見られ、特にファイナンス部門を介した経済界への対応強化の要請も強まり、大きな進展が見られる。一方で、COVID-19、化石燃料価格の急騰、国際的な紛争のリスクなどが、気候変動対応にどのような影響を及ぼすかについても注視が必要である。化石燃料価格の高騰は、化石燃料生産企業の収益を大きくしてきている。これは、ここ数年の脱化石燃料のファイナンスの流れも変える可能性もある。いずれにしても、技術、社会のイノベーションがなければ、世界排出量の大幅な削減、そしてカーボンニュートラル化はあり得ない。広範なイノベーションを誘発する良い経済社会環境を整えることが重要と考えられる。意欲的な目標だけでは長い気候変動との闘いを継続できず、真に実効ある気候変動対策のためには、地球温暖化対策と経済成長の両立は不可欠である。単なる希望を語るのではなく、着実かつ、「グリーン成長」もしくは「経済と環境の好循環」を具体的に実現し得る適切な対策・方策を明確にすることが求められている。また、多くの不確実性が存在する中で、リスクを総合的により良くマネージメントする戦略が求められる。広範で、深い分析、洞察が必要なため、今後、更なる調査、分析・評価を行っていく必要があるが、本年度の調査研究によって、真に「グリーン成長」を実現していく道筋のフレームワークとその具体的対策・方策の提示を行い、そしてその定量的な分析・評価も実施できたものと考えられる。

Fiscal Year 2022: Project for creating energy and environmental technology innovations by holding international conferences on climate change actions
"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 creating energy and environmental technology innovations by holding international conferences on climate change actions" for fiscal year 2022 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 COP26 held in Glasgow in November 2021, the rules related to the market mechanism regarding Article 6 of the Agreement, which had not been resolved, was agreed upon and the Paris rulebook was finally completed. The first Global Stocktake is scheduled for 2023, and has been reviewing global collective actions toward the Paris Agreement goal and assessing progress toward meeting the goal. More than 150 countries and regions around the world have pledged to be carbon neutral by the middle of the 21st century, and we are entering an era in which addressing global warming is seen as an opportunity for growth globally. In June 2019, the Japanese government developed a "long-term strategy as a growth strategy based on the Paris Agreement," in which it "aims to achieve net zero emissions as early as possible in the second half of the 21st century. In October 2020, Prime Minister Suga declared in his policy speech that he would" aim to achieve a carbon-neutral, decarbonized society by 2050. In December 2020, the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) took initiative in formulating the "Green Growth Strategy". Responding to this, the Japanese government strengthened its greenhouse gas emission reduction target for 2030 from a 26% reduction compared to the FY2013 level to a 46% reduction, and then possibly to a 50% reduction in April 2021. The 2030 target has been strengthened, especially in developed countries. In this way, the movement toward ambitious emission reductions is accelerated in Japan and abroad. In October 2021, the Cabinet approved the Sixth Basic Energy Plan, as well as the Global Warming Prevention Plan and the Long-Term Strategy as a growth strategy based on the Paris Agreement. In 2022, the issue of energy security and stable supply emerged. The soaring fossil fuel prices due to the Russia-Ukraine war and the tight power supply-demand situation

in March 2022 have once again made us aware of the issues of energy security and stable energy supply, and the Cabinet approved the “Basic Policy toward the Realization of GX (Green Transformation)” in February 2023.

Turning our eyes to the world again, we see COP26, did not result in the agreement that the UN and the UK government had expected and there was little progress to the NDCs' emission reduction targets by COP27, held in Sharm El Sheikh, Egypt in November 2022. Although the international community is generally aware of the need to strengthen climate actions, there is still a large gap in terms of specific measures among countries. In order to achieve carbon neutrality on a global scale, it is necessary to correct competitive unfairness caused by differences in ambitions and policy intensity among countries and to prevent carbon leakage in formulating international rules. In this context, the importance of comprehensively considering the situation of each country, region, and sector, as well as conducting various assessments and analyses that can contribute to the formulation of climate change policies, is increasing even more. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has released its Sixth Assessment Report as the latest scientific assessment of climate change. While building on this report, further scientific assessment of complex issues needs to be conducted. The process of preparing the Seventh Assessment Report is expected to start in the near future, and there is a continuing need to provide the latest scientific knowledge on climate change.

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

In this report, Chapter 1 describes the background and objective of the study. Chapter 2 discusses and compiles quantitative analysis on climate risk management carried out within this project, while pointing out various types of uncertainties related to climate change. In particular, we conducted a study on the economic impact and effectiveness of climate change impact as well as adaptation measures. This chapter also describes synergies and trade-offs between climate change actions and other SDG targets, including those assesseed in the IPCC's latest assessment report. Furthermore, we discuss the role of innovation for climate risk management by compiling the possibilities of innovation for climate change mitigation. Chapter 3 summarizes the results of various surveys and analyses in order to search for green growth opportunities while properly recognizing its limits. Furthermore, we assessed the structural factors in long-term energy productivity in the Japanese economy and measurement of energy productivity changes in Japanese industry, analyzed policy issues for electricity market liberalization and climate policy, and reviewed the trend and modelling-based

analyses on sustainable finance. In Chapter 4, we analyze and assess mid-term climate change mitigation through a compilation of the post-2030 targets of the Nationally Determined Contributions (NDCs) contained in the Paris Agreement. In particular we assessed the effect on global competition by analyzing how various constraints increase the cost of achieving the NDCs. In addition, we reviewed the climate policy on border tax adjustment and performed modeling analysis of the effects. Chapter 5 presents our analysis of long-term mitigation scenarios. Trends and the latest international analyses in the development of various technologies for carbon neutrality are summarized. We analyze various scenarios in the integrated assessment model for the carbon neutrality in 2050 for both the energy supply side and the demand side. Chapter 6 describes the results of a survey on the latest trends in overseas climate policies, as well as an overview of international model comparison projects and scenarios developed by the International Energy Agency (IEA) and other organizations. Chapter 7 summarizes insights gained from the studies above. The Appendix includes the summary of the International Symposium which was held as part of the Project. Key points of chapter 2 to 6 are described in the following paragraphs.

Chapter 2 addresses the issue of climate risk management. The Sixth Assessment Report of the IPCC WG1 assessed that there is “no doubt” that climate change is caused by human intervention. In order to ensure climate stabilization, it is necessary to reduce CO_2 emission to nearly zero. However, there is great uncertainty regarding climate sensitivity and climate-induced damage. There is also great uncertainty regarding the cost of climate change mitigation. We can also point out significant disparities across countries in terms of the marginal abatement costs to achieve the NDCs of the Paris Agreement. Moreover, if we take into account national constraints such as the nuclear stance, the necessity to conciliate mitigation goals with energy security and other national policies, and other constraints from each country’s political system, the total mitigation cost is probably much higher than the mitigation cost assessed with cost minimization methods. In such a context, and taking into account various risk factors, there is great need for good decision making in climate change response. Adaptation is also regarded as an important option to reduce the risk of climate change comprehensively. This chapter describes the synergies and trade-offs between climate change measures and the SDGs, as summarized in the IPCC 6th Assessment Report. While there are many synergies between various measures and the SDGs, there are trade-offs as well, so measures need to be taken while reducing the impact of the trade-offs. It also summarized the ways of climate change risk management, referring to the economic impact and effects of climate change impacts and adaptation, as well as innovation and policies that could induce it.

Chapter 3 examines limits and potential of green growth using data and quantitative analysis as far as possible. The Japanese government is committed to a “virtuous cycle

between the environment and the economy". However, there is no clear path to this goal at present, and it can be considered a narrow path.

We have collected and analyzed the latest quantitative data on the decoupling between the economy and CO_2 emissions, and examined the factors behind this. And for a deeper analysis, we analyzed structural factors in long-term energy productivity changes in the Japanese economy, as well as measuring energy productivity changes in Japanese industry. The performance of the Carbon Neutrality Action Plan, which is being implemented by Japanese industry, including the perspective of green growth, was preliminary evaluated in terms of emission reduction efforts.

Besides, we conducted literature review on the current situation of renewable integration in Europe and Japan and related issues. We discussed the issues involved in addressing global warming under the deregulation of power sector, and the trends in electric power policy that are being implemented to respond to these issues. Furthermore, we summarized the trend of sustainable finance, such as Green Bond and Sustainability Link Loan, and their challenges based on the modeling analysis. The challenges of increasing gap in cost burden associated with climate policies were also investigated and discussed.

In Chapter 4, we analyze and assess the post-2030 targets of the Nationally Determined Contributions (NDCs) contained in the Paris Agreement. The Paris Agreement is based on a pledge-and-review mechanism, and international review of NDCs will be important. In this study, based on the latest trends, we conducted an international comparison of the emission reduction efforts of NDCs in each country by adopting several indicators, including emission reduction costs. We also analyzed and evaluated the economic impact of Japan's new 2030 emission reduction target of 46%. The cost and economic impact of Japan's new emission reduction target of 46% in 2030 are estimated to be significant. In addition, literature on international NDCs assessment was also reviewed. We conducted a literature review and sorted peer-reviewed publications regarding NDCs assessment.

In Europe, the introduction of a carbon border tax adjustment is now being considered, so we conducted broad research on border tax adjustment policy and upgraded our energy-economic model to analyze the impacts of the policy to estimate the impact of introducing a border tax adjustment under the NDCs in 2030. Analyses were also made with foreign models for comparison. Although the border tax adjustment is expected to have a certain effect on carbon leakage, the effect can be limited, and generally it is important to adjust emission reduction targets so that the difference in marginal CO_2 reduction costs does not become too large among countries.

Chapter 5 presents a comprehensive analysis of long-term global warming measures and policies. As mentioned above, many countries, including the Japanese government, have set a goal of carbon neutrality by 2050. In light of this situation, we analyzed both energy supply and demand side energy systems in the DNE21+ model, a global energy and climate

change assessment model. In FY2021, analysis of carbon neutrality in 2050 was conducted. In FY2022, scenario analysis using the DNE21+ model was conducted as a roadmap for each sector, including transitions toward carbon neutrality.

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

As for the energy demand side, we investigated and summarized the possibility of realizing low energy demand through circular economy and sharing economy that can be induced around digital transformation (DX). We examined technological trends in 3D printing, technological and social changes in the freight sector due to DX, and land use changes associated with food waste reduction and the resulting reduction in non-CO_2 greenhouse gas emissions For a comprehensive analysis of consumer behavior, we investigated the changes in lifestyle or behavior caused by COVID-19 pandemic. We examined quantitatively how technological and social changes, such as DX, might affect our daily life and bring about changes in energy demand, using the DNE21+ model to analyze both energy supply and demand in a consistent manner. These studies are expected to contribute to develop analytical tools and deep understanding of the change in behavior, including the rebound effect, and gaining insights into future energy demand.

An updated model for estimating non-CO_2 greenhouse gas emissions and abatement costs was also assessed and provided.

Chapter 6 describes the trends in international scenario analysis on carbon neutrality and summarizes the initiative of the international model comparison projects. First, we summarized the emission scenarios and the abatement costs and potentials summarized in the IPCC WG3 6th Assessment Report. The International Energy Agency's (IEA) World Energy Outlook WEO2022, released in October 2022, was also overviewed. This report outlines these scenarios and compares them with the DNE21+ scenario (see Chapter4 and Chapter5). As for international model projects, we summarized the ENGAGE (Exploring National and Global Actions to reduce Greenhouse gas Emissions) project, funded by the European Commission and led by IIASA, which analyzes and evaluates technically, socially, and politically achievable emission reduction pathways for the Paris Agreement targets.

Although the Paris Agreement was formulated as a mechanism for all countries around the world to work on emission reductions, there are currently large differences in the marginal CO_2 abatement costs for countries across the world to achieve their goals. This could induce transfers of industries, especially those with high CO_2 emission intensity,

between countries and significantly reducing the effectiveness of global emission reductions. Europe is aiming to introduce a carbon border adjustment tax to reduce this risk, but the analysis in this project suggests that the effect of this tax will be limited, although it will have a certain effect. It is true that there has been a rapid increase in international efforts to strengthen climate actions, and there has been significant progress, especially in strengthening economic response through the financial sector. At the same time, we need to keep a close eye on how COVID-19 pandemic, the sharp rise in fossil fuel prices, and the risk of international conflicts will affect the climate actions. Soaring fossil fuel prices have been making fossil fuel producing companies more profitable. This could also change the trend of de-fossil fuel financing over the past few years. In any case, without technological and social innovation, there will be no significant reduction in global emissions and no carbon neutralization. It is thus vital to create a socioeconomic environment ripe for extensive innovation.

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

本　　編

第1章　はじめに

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

2015 年末の気候変動枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）で合意された「パリ協定」が 2016 年 11 月に発効した。2021 年 11 月に英国グラスゴーで開催された第 26 回締約国会議（COP26）では、パリ協定の詳細ルールの策定の内、先送りされていた協定 6 条に関する市場メカニズムに関連したルールも合意された。2023 年には第 1 回グローバルストックテイクが予定され、パリ協定の目標に向けた各国の気候変動対策の進捗や NDC 達成に向けた実現可能性などについて、議論がなされてきている。

世界では 150 以上の国と地域が、21 世紀中ごろまでのカーボンニュートラルを表明し、温暖化への対応は、国際的にも成長の機会と捉える時代に突入している。日本政府は、2019 年 6 月に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」[1)]を策定し、そこでは「21 世紀後半のできるだけ早い時期に実質ゼロ排出を目指す」とした。そして、2020 年 10 月には、菅首相が所信表明演説で「2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」と宣言した。そして、2020 年 12 月に経済産業省が中心になって、「グリーン成長戦略」を策定した。2021 年 4 月に、2030 年の温室効果ガス排出削減目標を 2013 年度比 26%減から 46%減、更に 50%減の高みを目指すと深堀を行った。その他、先進国を中心に 2030 年目標の深堀が行われた。このように、意欲的な排出削減を目指す動きが国内外で加速してきている。そして、2021 年 10 月には、第 6 次エネルギー基本計画 [2)]が閣議決定され、また、地球温暖化対策計画 [3)]、および、パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略 [4)]についても改定し閣議決定された。2022 年はエネルギー安全保障・安定供給の問題が顕在化した。ロシア・ウクライナ情勢からの化石燃料価格高騰や、2022 年 3 月の電力需給逼迫等により、改めてエネルギー安全保障・安定供給の課題を再認識し、2023 年 2 月には「GX（グリーントランスフォーメーション）実現に向けた基本方針」[5)]が閣議決定された。

ところで再び世界に目を転じてみると、2021 年の COP26 では、国連や英国政府等が意図した合意が得られたわけではなかったし、2022 年 11 月にエジプトのシャルム・エル・シェイクで開催された COP27 までにも、NDCs の排出削減目標の深堀はほとんどなされなかった。国際社会は、気候変動対策の強化の必要性については概ね認識を一にしているものの、それでも具体的な対応については温度差がある。例えば、EU は、2019 年 12 月に発足したフォン・デア・ライエン体制において、気候変動対策への意欲を示し、炭素国境調整措置の導入検討を行うとし、2021 年 7 月に具体的な炭素国境調整措置の制度案の提示がなされた。また、2022 年 12 月には欧州連合（EU）理事会と欧州議会においても暫定合意がなされた。現状では、2023 年 10 月から 2025 年末まで

が経過措置期間、2026 年より段階的導入期間、2032 年に完全適用というスケジュールが示されている。炭素国境調整措置の検討は、まさに世界の足並みが揃っていないことへの EU の懸念に他ならない。また、気候変動を含む持続可能な発展投資の適正性のガイドラインの位置づけの EU タクソノミーは、条件付きながら、天然ガス、原子力ともに適正とする最終的な案が提示された。現実を見据えた実効性を考慮した方針決定と考えられる。このような中、COP27 では、排出削減の深堀からは離れ、気候変動影響による「損失と損害（ロス＆ダメージ）」の基金に焦点が当てられた形となった。

また、化石燃料価格高騰は、気候変動対策によって急速な化石燃料の上流投資からの引き上げが起こる中で、ロシアによるウクライナ侵略が重なって起こったものと考えられる。長期でカーボンニュートラルを目指すことは必要であるが、雇用等の影響も踏まえながらトランジションを適切に進めていくことが、結果として、より早くカーボンニュートラルを実現することにもつながるはずである。

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

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

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

1.1 背景

1.1.1 世界の温室効果ガス排出の動向

世界の CO_2 排出量は上昇してきており、京都議定書採択後もむしろその上昇速度を高めてきた（図 1.1.1-1）[6]。これは、とりわけ中国を中心とした高中位所得国の排出の伸びが大きかったことによる（図 1.1.1-2）。一方、世界経済危機による CO_2 排出への影響は大きく、2009 年は、高所得国の CO_2 排出量の低下が著しく、世界全体の CO_2 排出量も前年比で低下した。そして、2020 年は COVID-19 のパンデミックに襲われた。2020 年の世界排出量は 2009 年を大きく上回る低減となった。しかし、これは経済のマイナス成長と引き換えに実現したのであり、これによって雇用も大きく失われた。グリーン成長が実現したわけではない。2009 年の排出低減後の 2010～2013 年にかけての排出量の増大は急速だった。COVID-19 によって特に運輸部門の排出量が一時的に大き

く低下したが、その後の回復によって、2021～22 年において排出量は再び上昇してきており 2022 年は過去最高の排出量を記録したと見られる。各国のインフラ形成状況を踏まえると、長期的な基調は依然として排出増大要因が大きいと考えられる。先進国では排出の減少が起こってきているが、世界全体で見ると、CO_2 排出量は低下せず、上昇が続いている。CO_2 原単位の高い産業が先進国から途上国へ移転してきている。排出および排出削減の要因については慎重に分析することが、効果的な方策を見出すために重要と考えられる。深い分析については第 3 章で議論する。

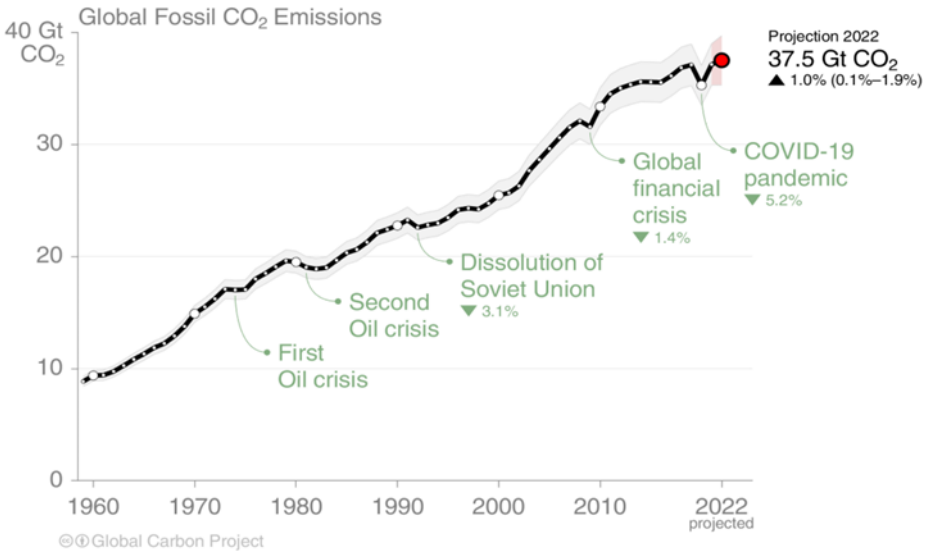


図 1.1.1-1　世界の CO_2 排出量推移（化石燃料燃焼および産業プロセス）
（出典：Global Carbon Project[6)]）

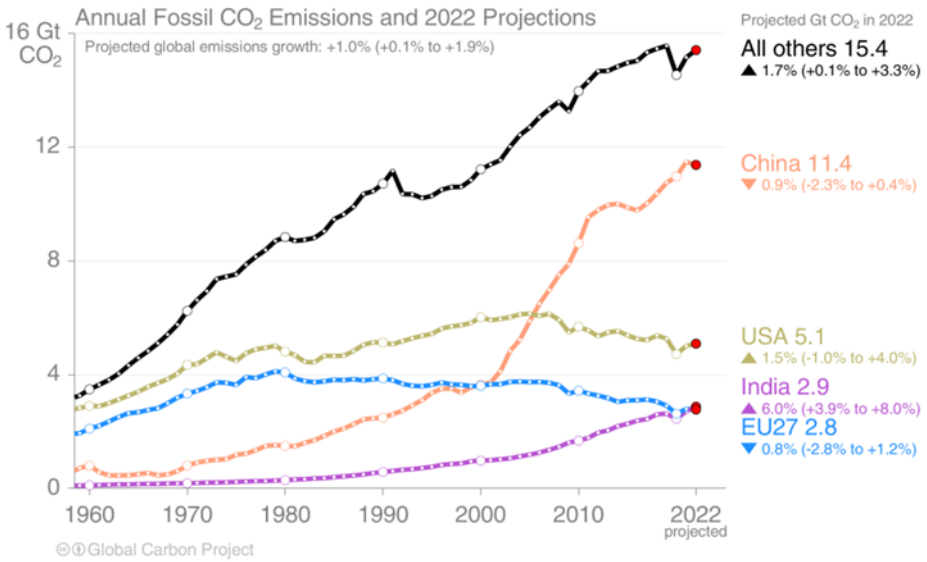


図 1.1.1-2　主要国別の CO_2 排出量推移（化石燃料燃焼および産業プロセス）
（出典：Global Carbon Project[6)]）

1.1.2 気候変動枠組条約パリ協定

パリ協定は、先進国と途上国という隔てなく、ほぼすべての国が温室効果ガス排出削減に取り組む法的拘束力を有する国際枠組ができたという点で画期的なものと言える。しかし、そのプレッジ・アンド・レビューの枠組みであるがゆえに、プレッジされた目標がしっかりした排出削減努力を伴うような目標であるのかの検証や、実際に実効性をもって排出削減に取り組んでいるのかの検証が重要になってくる。2018 年 12 月に開催された COP24 で、パリ協定の詳細ルールについて大部分が合意された。そこでは NDCs のレビューの方法等が定められ、基本的には先進国と途上国とで差異を設けないこととなった。しかし、NDCs の排出削減努力を適切にレビューできる仕組みではなく、UNFCCC の外での NDCs の排出削減努力の評価も大変重要であると考えられる。協定 6 条に関わる市場メカニズム関連のルールは、COP24、COP25 と合意できなかったが、2021 年の COP26 でようやく合意された。これにより、パリ協定実施の枠組みが一応の完成をみることとなった。

2021 年度の本事業[8)]において、NDCs (Nationally Determined Contributions)の各国の排出削減努力について複数の指標を用いて評価を実施した。本年度は、一部分析、また最新の国際的な研究動向についても、インプリケーションを含め記載を行った。

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

日本政府は、2019 年 6 月に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を UNFCCC 事務局に提出[1)]していたが、「2050 年カーボンニュートラル」宣言を受け、2021 年 10 月に改訂した「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を、UNFCCC 事務局に再提出[4)]している。2023 年には第 1 回グローバルストックテイクが予定され、パリ協定の目標に向けた各国の気候変動対策の進捗や NDC 達成に向けた実現可能性などについて、議論が進められると見られる。

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[9)]。気候変動対応は極めて重要であるが、国際社会として取り組むべき課題はここで掲げられただけでも多く存在しており、気候変動対応との同時達成が望まれる。このような持続可能な発展目標間にはシナジー効果が存在する一方、トレードオフ効果も存在すると考えられる。持続可能な発展は、気候変動問題解決よりも高位の目標であり、持続可能な発展のための一つの要素として、気候変動問題の解決を考えていかなけれ

ば、より良い将来社会の実現とはならないと思われる。また、気候変動対応が、持続可能な発展目標全体との調和の中で実施しなければ、気候変動対応も持続できず、結果、気候変動問題の解決が遠のくことにもなりかねないと考えられる。そして、企業の中にも、SDGs を重視して企業理念や事業との整合性を判断する動きも広がりつつある。本研究においても、気候変動対応と持続可能な発展目標との関係については重要と位置づけており、IPCC 第 6 次評価報告書（AR6）[10]の記述内容を含め、2.2 節等に記載した。また、デジタル化の進展やその新結合によるイノベーションによって低需要社会が実現すれば、SDGs の同時達成に大きな貢献を果たす可能性が高く、この視点での研究も進めた（2.3 節、5.4～5.6 節など）。

図 1.1.3-1 国連持続可能な発展目標（SDGs）

（出典：UN[9]）

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）[11]。2020 年排出量（確報値）は、COVID-19 の影響もあり、前年比で 5.1%減少し、2013 年度比では 18.4%の減少（2005 年比では 16.8%減）となった。振り返ると、2008 年頃に検討が行われた、2020 年排出削減目標は、当時の麻生政権の下で、2005 年比 15%減であったため、これに近い数字となっている（因みに、鳩山政権では 1990 年比 25%減、2005 年比では 30%減程度であったが、これとは極めて大きなギャップがある。）。この間、大きな情勢変化があり、原子力発電の見込みは大きく低下する一方、FIT により、大きな費用負担と引き換えに再エネは大きく導入拡大した。GDP 成長率は当初の見込みは達成できず、低位で推移

し、潜在的な排出量は低位となった。排出上昇要因、低下要因ともに存在しているが、結果として、麻生政権での目標に近い数字が実現している。

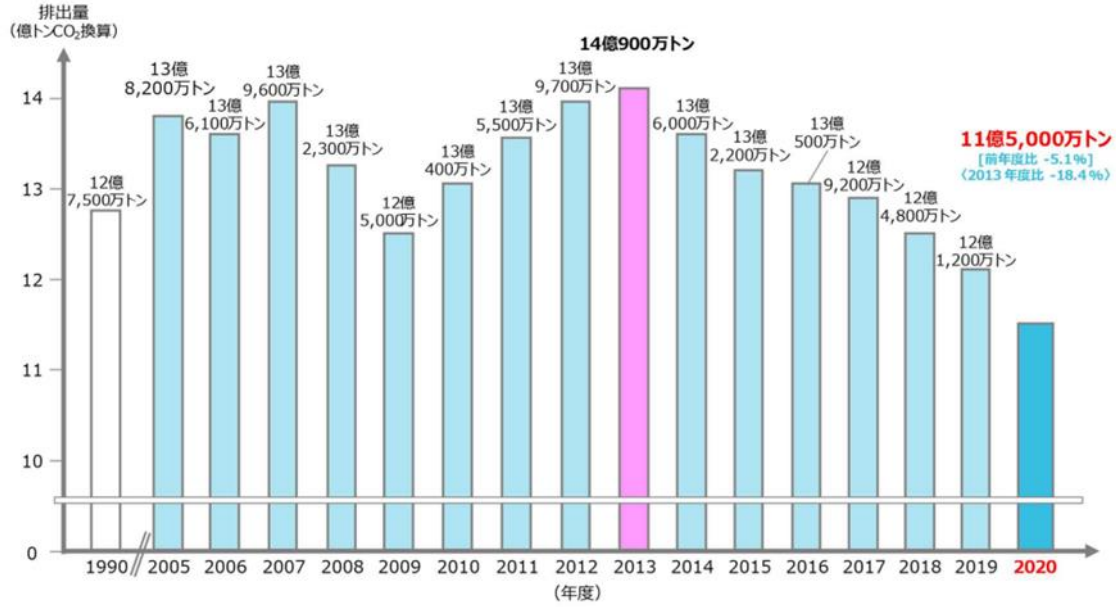


図 1.1.4-1 日本の GHG 排出量推移

（出典：環境省 [11]）

日本政府は、2014 年 4 月に閣議決定された第 4 次エネルギー基本計画で強調されたとおり、安全性を大前提としつつ、3E+S（経済効率性、エネルギー安定供給・安全性、環境保全性、安全性）の政策目標を達成するという方針に基づいて、2015 年にエネルギーミックス（長期エネルギー需給見通し）策定を行った [12]。

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

その後、2021 年 10 月に第 6 次エネルギー基本計画 [2]が閣議決定された。また地球温暖化対策計画も改定 [4]され、閣議決定された。2030 年の温室効果ガス排出削減目標は、26%減から 46%減（さらに 50%減の高みを目指す）へと公式に修正がなされた。第 6 次エネルギー基本計画、地球温暖化対策計画については後述する。

(2) 日本における自主行動計画と低炭素社会実行計画

日本国内の産業界の排出削減への取り組みは、「低炭素社会実行計画」[13]として実施されており、いわゆるプレッジ・アンド・レビューの仕組みとなっている。これは、基本的な仕組みとしてはパリ協定と同じとなっている。そして、各種業界団体内のレビュー、経団連でのレビュー、政府審議会でのレビューにより、排出削減への取り組

みのプレッシャーがかかる。排出削減への取り組み・目標は、①国内の企業活動における 2020 年・2030 年の排出削減目標（原単位目標等を含む）、②低炭素製品・サービス等による他部門での貢献、③海外での削減貢献、④革新的技術の開発・導入の 4 本柱で成り立っており（図 1.1.4-2）、様々な形で排出削減を促す形となっている。

また、経団連は、②、④に関して、グローバル・バリューチェーン（GVC）を通した、様々な業種・企業による、多種多様な製品・サービス等の削減貢献の「見える化」事例をとりまとめている [14]。なお、GVC での削減貢献は、WBCSD が Avoided Emissions のガイドライン作成を行っており [15]、これに展開していると言える。

そして、経団連は、2021 年 11 月に低炭素社会実行計画を、2050 年カーボンニュートラルに向けたゴールを明確化する形にして、カーボンニュートラル行動計画（CN 行動計画）を策定し公表した [16]。

図 1.1.4-2　低炭素社会実行計画における 4 つの柱

（出典：経産省 [13]）

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

表 1.1.4-1 は、低炭素社会実行計画の 2020 年度実績のレビュー結果である [17]。多くの業種は、2020 年度目標を達成したが、一部の業種では目標を下回った業種もある。特に、COVID-19 の影響により生産活動量が大きく落ち込んだ業種があり、原単位目標を掲げている業種においては、指標が急激に悪化した業種も見られた。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

経済産業省41業種+環境省3業種	2020年度目標	2030年度目標
2020年度実績が目標水準を上回る	34業種	16業種
基準年度比/BAU比で削減しているが、2020年度実績において目標水準には至っていない	7業種	23業種
2020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	1業種	2業種
データ未集計等	2業種	3業種

（出典：産業構造審議会 [17]）

(3) 再生可能エネルギー導入拡大と費用負担の増大

CO_2 排出削減、カーボンニュートラルを目指す上で、再生可能エネルギーの果たすべき役割は大変大きく、拡大が必須である。再生可能エネルギーに対する固定価格買取制度（FIT）の導入が進むなどし、世界的に再生可能エネルギー導入の拡大が続いている。日本も大幅な拡大が図られてきた（表 1.1.4-2）。また、平地面積あたりの各国再エネおよび太陽光・陸上風力の発電電力量では、世界最高水準となっている（図 1.1.4-3）。

表 1.1.4-2　再生可能エネルギーの発電電力量の変化

発電電力量の国際比較（水力発電除く）

単位：億kWh

	2012年	2020年	
日本	309	→ 1,199	3.9倍
EU	3,967	→ 8,363	2.1倍
ドイツ	1,213	→ 2,323	1.9倍
イギリス	359	→ 1,278	3.6倍
世界	10,586	→ 31,409	3.0倍

出典：IEA データベースより資源エネルギー庁作成

（出典：調達価格委員会資料 [18]）

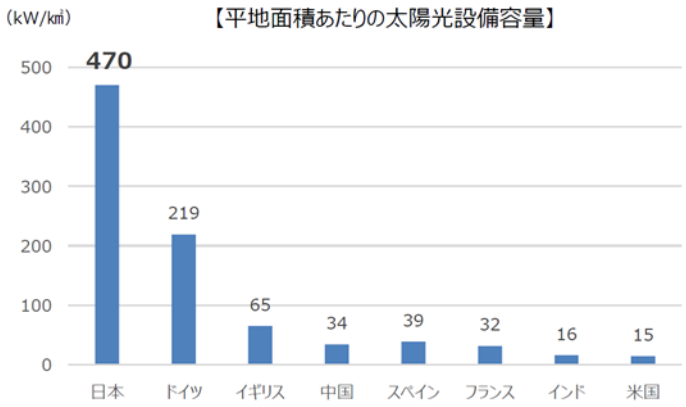


図 1.1.4-3 平地面積あたりの各国の太陽光発電の設備容量（2019～2020 年時点）比較

（出典：調達価格委員会資料 [18]）

しかしながら、特に太陽光発電については FIT の買取価格が機動的に価格引き下げすることに失敗し、実際のコストとの間に大きな差が生じ、バブルが発生する状況が見られた。これによって、太陽光発電の導入量は増えるものの、そのコスト負担が大きくなり、電力料金が上昇し、負担感が大きくなっている（表 1.1.4-3）。2022 年度見込みの買取総額は年間 4.2 兆円、賦課金（負担額）は 2.8 兆円となっている（図 1.1.4-4）。再生可能エネルギーの拡大は温暖化対策のために重要ではあるものの、経済効率性の悪い対策となり、経済的な負担が大きくなれば、我々の経済的なリソースは奪われてしまう。それによって、長期的には却って温暖化抑制に逆行しかねない。（再エネの動向については第 3.5 節に記載）

政府は、FIT の見直しを行い、事業用太陽光発電について、設備認定を行っているものの、未稼働が続いている案件について、設備認定の取り消しを行うなど対策を行った（2017 年 4 月改正 FIT 法施行）。また、2020 年 2 月には、更に FIT 法の改正が予定され、2022 年 4 月から大規模事業用太陽光発電を皮切りにして市場価格連動型の Feed-In Premium (FIP)への移行となった。これによって、FIT のような極めて投資予見性の高い制度から、ある程度の事業リスクを負いながらそれに見合った利潤を得るような制度へと移行することとなる。また、需給が逼迫し市場価格が高いときに、再エネ電気を例えば蓄電池を介して供給するなど、事業者の工夫を引き出す制度とされている。

表 1.1.4-3　日本の再生可能エネルギー導入容量と認定容量（2022 年 3 月末時点）

<2022年3月末時点のFIT・FIP認定量・導入量>

再生可能エネルギー発電設備の種類	制度導入前	固定価格買取制度導入後										認定容量
												固定価格買取制度導入後
	2012年6月までの累積導入量	2012年度（7月～）・2013年度の導入量	2014年度の導入量	2015年度の導入量	2016年度の導入量	2017年度の導入量	2018年度の導入量	2019年度の導入量	2020年度の導入量	2021年度の導入量	制度開始後合計	2012年7月～2022年3月末
太陽光（住宅）	約４７０万kW	207.4万kW (476,577件)	103.5万kW (228,697件)	85.7万kW (179,408件)	79.1万kW (161,356件)	65.9万kW (133,279件)	73.2万kW (146,685件)	76.8万kW (152,239件)	75.8万kW (141,551件)	85.9万kW (153,101件)	**853.4万kW** (1,772,893件)	**889.6万kW** (1,829,172件)
太陽光（非住宅）	約９０万kW	677.2万kW (123,730件)	837.2万kW (152,807件)	815.2万kW (115,962件)	544.5万kW (72,578件)	474.8万kW (53,363件)	490.7万kW (54,828件)	488万kW (49,174件)	500万kW (33,322件)	372.5万kW (20,543件)	**5,200.2万kW** (676,307件)	**6,816.0万kW** (786,789件)
風力	約２６０万kW	11万kW (21件)	22.5万kW (24件)	14.8万kW (58件)	31万kW (152件)	17.8万kW (322件)	17万kW (517件)	46.8万kW (340件)	36.2万kW (268件)	29.8万kW (234件)	**226.8万kW** (1,936件)	**1,320.4万kW** (7,996件)
地熱	約５０万kW	0万kW (2件)	0.4万kW (9件)	0.5万kW (10件)	0.5万kW (8件)	0.7万kW (23件)	0.9万kW (10件)	4.8万kW (6件)	1.3万kW (8件)	0.2万kW (4件)	**9.3万kW** (80件)	**241.5万kW** (1,123件)
中小水力	約９６０万kW	0.6万kW (39件)	8.5万kW (56件)	9.3万kW (87件)	7.9万kW (101件)	7.5万kW (86件)	6.1万kW (86件)	13.3万kW (89件)	16.6万kW (79件)	12.8万kW (96件)	**82.5万kW** (719件)	**21.6万kW** (121件)
バイオマス	約２３０万kW	8.7万kW (46件)	18万kW (48件)	31.4万kW (57件)	35.1万kW (67件)	49.1万kW (75件)	30.7万kW (61件)	48.0万kW (62件)	44.2万kW (56件)	67.6万kW (67件)	**332.7万kW** (539件)	**829.8万kW** (895件)
合計	約2,０６０万kW	904.8万kW (600,415件)	990.2万kW (381,641件)	957万kW (295,582件)	698.1万kW (234,262件)	615.8万kW (187,148件)	618.5万kW (202,187件)	677.6万kW (201,910件)	674.2万kW (175,284件)	568.7万kW (174,045件)	**6,704.8万kW** (2,452,474件)	**10,118.8万kW** (2,626,096件)

※ 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。
※ 失効分(2022年3月時点で確認できているもの)を反映済。

66.3%

（出典：調達価格委員会資料 [18]）

<買取総額の内訳>

住宅用太陽光		0.2兆円	5%
事業用太陽光	2012年度認定	0.8兆円	21%
	2013年度認定	1.1兆円	59% 28%
	2014年度認定	0.4兆円	10%
	2015~2021年度認定	0.4兆円	10%
	（合計）	（2.8兆円）	（69%）
風力発電		0.2兆円	5%
地熱発電		0.02兆円	0.4%
中小水力発電		0.1兆円	3%
バイオマス発電		0.7兆円	17%
合計		4.2兆円	—

※合計額は調整力確保費用等（約0.1兆円）を含む。

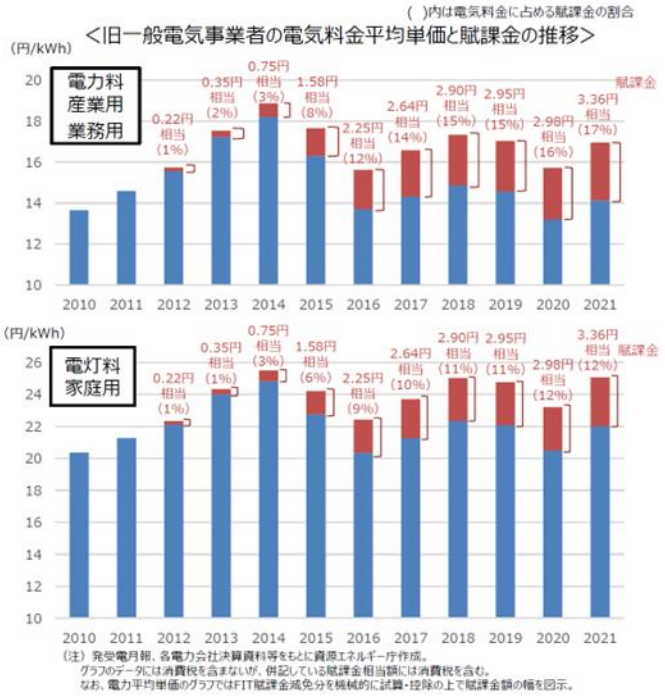


図 1.1.4-4　再生可能エネルギーの費用負担の推移

（出典：調達価格委員会資料 [18]）

(4) エネルギーシステム改革

日本政府は、東日本大震災以降、電力・ガスシステム改革として自由化の一層の促進を進めてきた。電力については、2020 年 4 月には送配電部門の法的分離がなされ、第 1 弾から 3 弾までの一連の改革が一通り終了した（ただし経過措置料金（規制料金）

は解除がなされていない)。ガスについては 2017 年 4 月より都市ガスの小売料金の全面自由化となり、2022 年 4 月にガス導管部門の法的分離もなされた。

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

そして、ロシア・ウクライナ情勢による化石燃料高騰と LNG 供給リスクの上昇、また、2022 年 3 月 22 日には東京、東北電力管内での電力需給逼迫が起こるなど、エネルギー安全保障、安定供給のリスクが顕在化してきている。まさに、電力自由化と温暖化対策との調和の難しさが顕在化してきた事象と考えられる。日本政府は、他の課題も踏まえ、「GX 実現に向けた基本方針」[5]で原子力の活用の方針や、電力供給安定化等、電力システムに関して改善方針を示したところである。その効果を含め、注視、検証していくことが、持続的な気候変動対策のためにも重要と考えられる（電力自由化の下での地球温暖化対策の課題については第 3.6 節で議論する)。

(5) エネルギー基本計画

エネルギー基本計画は 3 年に 1 回見直しの検討が行われることとなっており、第 6 次エネルギー基本計画 [2]が、2021 年 10 月に閣議決定された。

2020 年 10 月の総合資源エネルギー調査会基本政策分科会資料 [19]では、第 5 次エネルギー基本計画 [20]以降のエネルギーをめぐる状況変化を踏まえた、今後の検討の主な視座として、以下の点が提示されていた。これらの視座や、「2050 年カーボンニュートラル」宣言、そして 2030 年目標としての 2013 年度比 46%削減（さらに 50%減の高みを目指す）の宣言を踏まえながら、新たなエネルギー基本計画が策定された。

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

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

図 1.1.4-5 は、2030 年のエネルギーミックスの姿における電源構成の見込みである[21]。第 6 次エネルギー基本計画では、46%減の目標がとても厳しい目標であるため、エネルギーミックスの数値も「野心的な見通し」とした。一方で、エネルギー政策の要諦は、安全性を前提とした上で、エネルギーの安定供給を第一とし、経済効率性の向上による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に、環境への適合を図る S+3E の実現のため、最大限の取組を行うこととしている。環境対応は重要であるが、S+3E の実現が重要で、とりわけエネルギーの安定供給の重要性、優先度の高さを指摘したものとなっている。

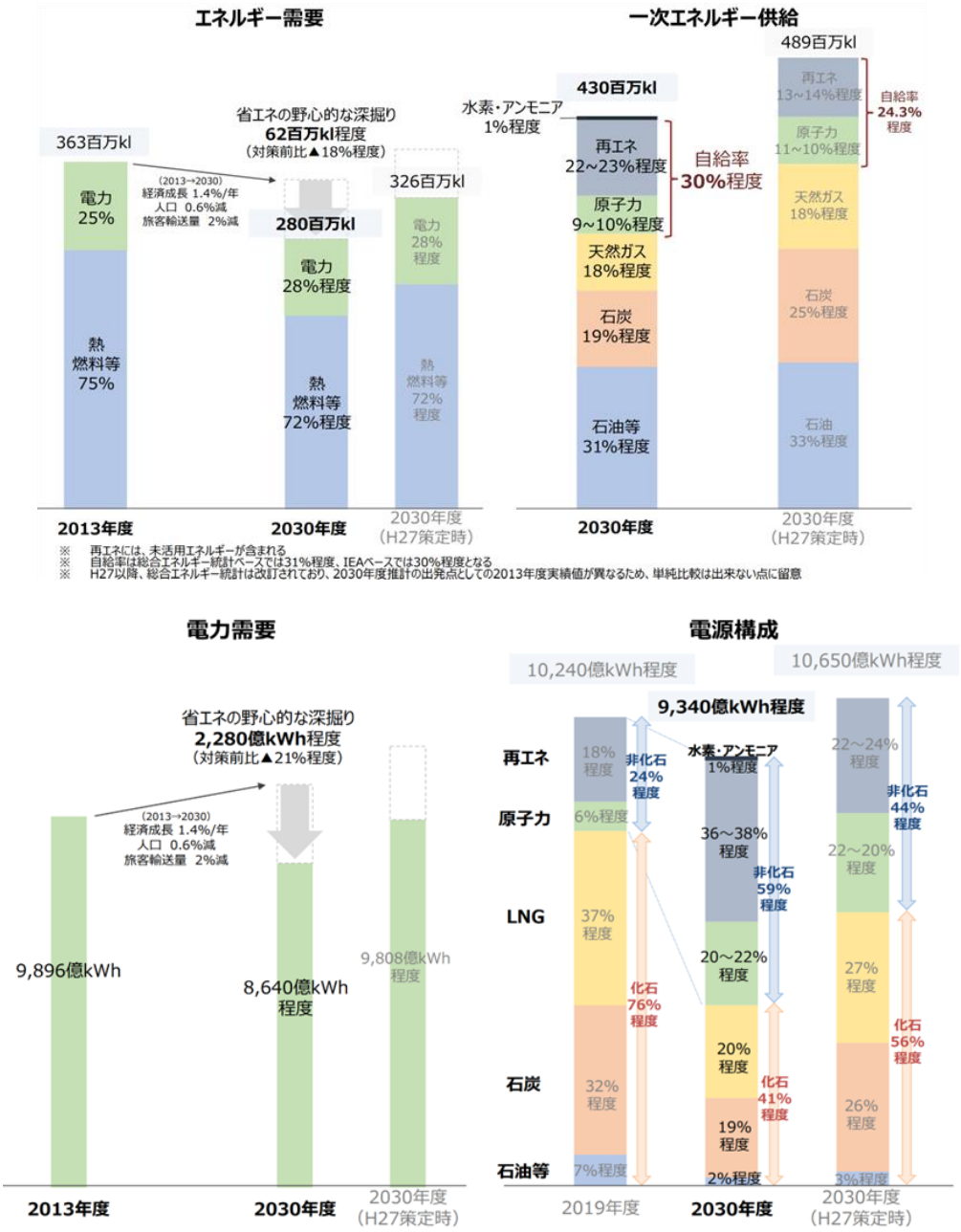


図 1.1.4-5　第 6 次エネルギー基本計画：2030 年エネミックス

（出典：経済産業省[21]）

(6) 地球温暖化対策計画

2021 年 10 月に地球温暖化対策計画が改正され、2030 年の 46%減目標を受ける形で大きく見直された。2030 年の部門別排出削減見通しは、表 1.1.4-4 のような形とされた [3]。

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

表 1.1.4-4 地球温暖化対策計画における 2030 年の部門別排出削減見通し

温室効果ガス排出量・吸収量（単位：億t-CO2）		2013排出実績	2030排出量	削減率	従来目標
		14.08	7.60	▲46%	▲26%
エネルギー起源CO_2		12.35	6.77	▲45%	▲25%
部門別	産業	4.63	2.89	▲38%	▲7%
	業務その他	2.38	1.16	▲51%	▲40%
	家庭	2.08	0.70	▲66%	▲39%
	運輸	2.24	1.46	▲35%	▲27%
	エネルギー転換	1.06	0.56	▲47%	▲27%
非エネルギー起源CO_2、メタン、N_2O		1.34	1.15	▲14%	▲8%
HFC等４ガス（フロン類）		0.39	0.22	▲44%	▲25%
吸収源		-	▲0.48	-	（▲0.37億t-CO_2）
二国間クレジット制度（JCM）		官民連携で2030年度までの累積で１億t-CO_2程度の国際的な排出削減・吸収量を目指す。我が国として獲得したクレジットを我が国のNDC達成のために適切にカウントする。			-

（出典：日本政府資料 [3]）

(7) パリ協定長期成長戦略

2018 年 8 月に内閣総理大臣の下に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略策定に向けた懇談会」が立ち上げられ、議論が行われた。そして、2019 年 6 月に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を閣議決定し、UNFCCC 事務局に日本の長期戦略として提出を行った。そこでは、「最終到達点としての「脱炭素社会」を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現することを目指す」とされた。

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

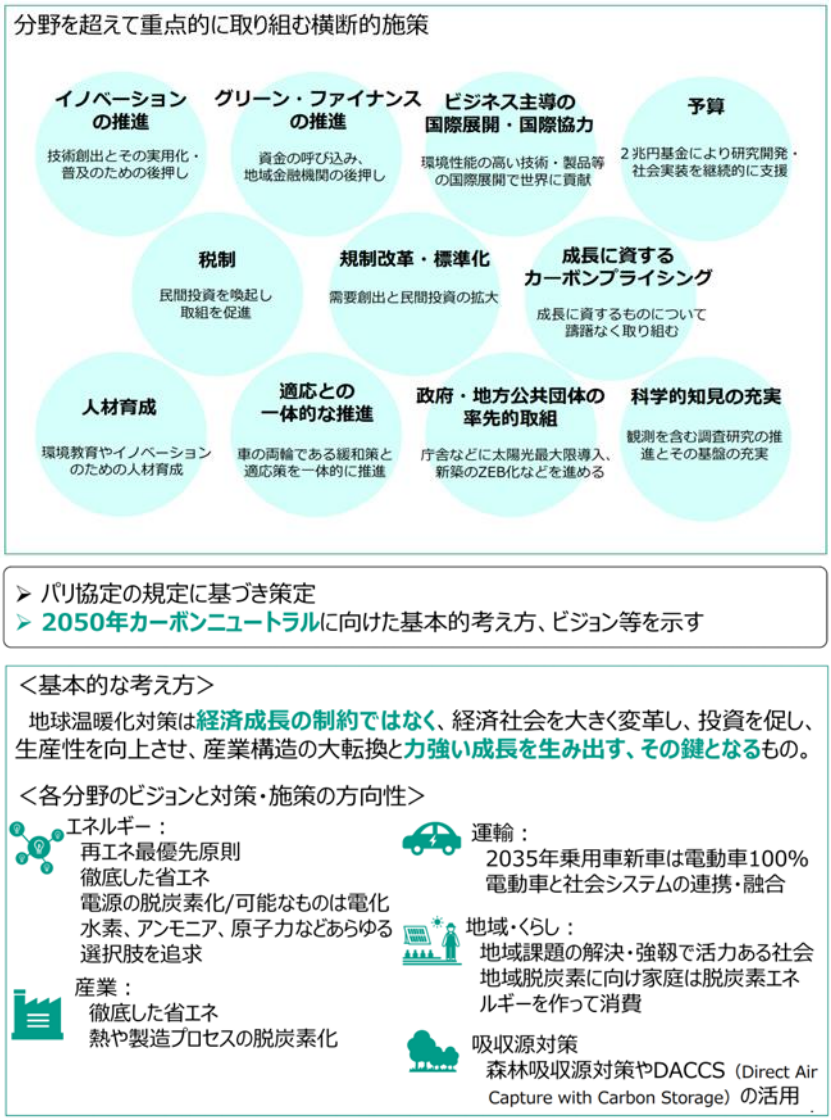


図 1.1.4-6 パリ協定長期成長戦略（概要）

（出典：文献 4)）

(8) 革新的技術開発－革新的環境イノベーション戦略・グリーン成長戦略

パリ協定長期成長戦略では、イノベーションの重要性が指摘された。そして、政府は、2020 年 1 月に「革新的環境イノベーション戦略」[22]を策定した（図 1.1.4-7）。そこでは、イノベーション・アクションプランの重点領域として、①非化石エネルギー、②蓄電池を含むエネルギーネットワーク、③様々な分野で活用可能な水素、④カーボンリサイクル・CCUS、⑤農林水産分野での炭素固定等、として、アクションプランを策定した。また、2020 年 12 月に「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」[23]も策定され、また、2021 年 6 月に一部を改訂した最終的な「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定、公表された[24]（図 1.1.4-8）。取り上げられている技術は、カーボンニュートラル達成のために重要と考えられる技術がほぼカバーされていると考えられるが、広範なるイノベーション政策として適切な政策となっているかの検証をし、必要に応じて是正していくことも重要である。

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

本研究でも、イノベーションの可能性について検討を行った（第 2.3 節）。

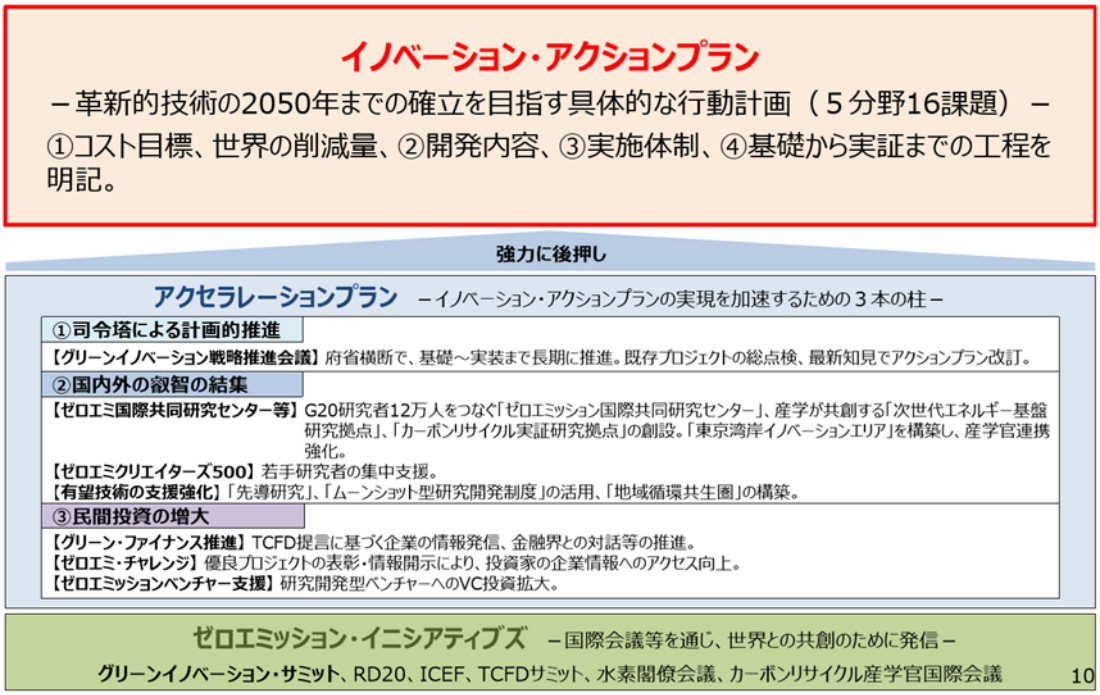


図 1.1.4-7 革新的環境イノベーション戦略（全体像）

（出典：文献 22)）

図 1.1.4-8 グリーン成長戦略

（出典：文献 24)）

(9) サステナブルファイナンス

長期的な投資を行う機関投資家を中心に、投資判断において、投資に ESG（Environment, Social, Governance）を組み入れる考えが進展してきている。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指摘」している。更には、気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）では、財務に影響のある気候関連情報の開示を推奨するとされ、それに賛同する企業も国内外で増加してきている。批判に一部対応

するような形で、欧州委員会は 2022 年 2 月に、条件付きながら天然ガスと原子力も適格扱いとする最終方針を示した。

経済産業省は、2020 年に環境イノベーション・ファイナンス研究会を立ち上げ、「クライメート・イノベーション・ファイナンス戦略 2020」をとりまとめた[25]。そこでは、SDGs やパリ協定の実現のためには、グリーンか、それ以外の二項対立的な考え方ではなく、トランジション（T)、グリーン（G)、革新イノベーション（I）を同時に推進し、これらの事業に対してファイナンス（F）していくことが重要であり、このために、政府の気候変動対策へのコミットメント、企業の積極的な情報開示、資金の出し手によるエンゲージメントの３つの基盤を整備していく、とされた。

そして、クライメート・トランジション・ファイナンスの拡大を目指し、政府は「クライメート・トランジション・ファイナンスに関する基本指針」を策定した[26]。これは、グリーンボンド原則等を公表している ICMA が 2020 年 12 月に公表した「クライメート・トランジション・ファイナンス・ハンドブック」[27]に記載されている 4 要素（①トランジション戦略とガバナンス、②ビジネスにおける環境面のマテリアリティ（重要度)、③科学的根拠のある戦略、④実施の透明性）に基づき、開示に関する論点、開示事項・補足、独立したレビューに関する事項が記載された。

さらに、トランジション・ファイナンスに資するよう、分野別ロードマップの策定が進められた。鉄鋼、化学、電力、ガス、石油、セメント、紙・パルプの策定がなされた[28]。また、2022 年度には自動車のロードマップの策定もなされた。本報告書では、第 5.2 節において、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いた、2℃、1.5℃目標と整合的な部門別ロードマップの策定を試みた。

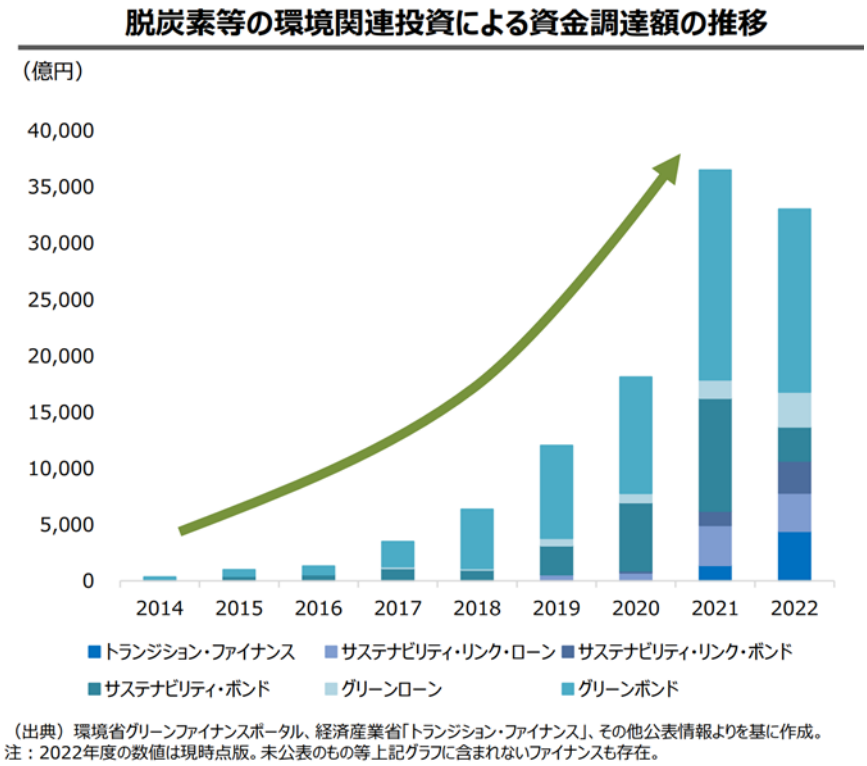


図 1.1.4-9 サステナブルファイナンスの動向

（出典：文献 29)）

(10)温暖化適応計画

政府は、「気候変動による様々な影響に対し、政府全体として、全体で整合のとれた取組を計画的かつ総合的に推進するため、目指すべき社会の姿等の基本的な方針、基本的な進め方、分野別施策の基本的方向、基盤的・国際的施策を定めた、政府として初の気候変動の影響への適応計画」を 2015 年 4 月に策定し閣議決定を行った[30]。気候変動緩和を進めることは重要であるが、同時に、気候変動を完全には防止することは困難であり、過去の排出による効果を含め不可避的に進行する可能性のある地球温暖化影響に対する適切な対応を計画性をもって実施し、リスクに備えることは重要である。

適応計画では、基本戦略として、(1)政府施策への適応の組み込み、(2)科学的知見の充実、(3)気候リスク情報等の共有と提供を通じた理解と協力の促進、(4)地域での適応の推進、(5)国際協力・貢献の推進を挙げている。また、基本的な考え方として、観測・監視や予測を行い、気候変動影響評価を実施し、その結果を踏まえ適応策の検討・実施を行い、進捗状況を把握し、必要に応じ見直す。このサイクルを繰り返し行い、おおむね 5 年程度を目途に気候変動影響評価を実施し、必要に応じて計画の見直しを行うとした。

また、気候変動への適応を推進することを目的として、2018 年 6 月には「気候変動適応法」が公布された。政府による気候変動適応計画の策定、環境大臣による気候変動影響評価の実施等が定められ、5 年程度を目途とした気候変動影響評価の実施も法律

の中で位置づけられることとなった。これに基づき、2020 年 12 月に「気候変動影響評価報告書」[31]がとりまとめられた。

(11)GX 実現に向けた基本方針

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

図 1.1.4-10　GX 実現に向けた政策のロードマップ

（出典：文献 5)）

1.1.5 欧州排出量取引制度の動向

欧州排出量取引市場の炭素価格は、2021 年に入ってから急速に上昇し、100 ユーロ/tCO_2 に迫る価格となり、その後も高い水準で留まっている（図 1.1.5-1）[32]。また、2023 年 2 月 16 日に先物は初めて 100 ユーロ/tCO_2 を超えた。炭素国境調整措置の必要性がより大きくなる一方、炭素国境調整措置で対応可能なのかという疑問も生じる。炭素国境調整措置でこの炭素価格に相当する輸入関税をかければ、鉄鋼等の素材価格が大きく上昇し得る。消費構造の変化を長期的には促すかもしれないが、代替製品が少ない製品の価格上昇は、物価の上昇のみをもたらし、排出削減には効果が乏しい可能性もある。日本政府も 2023 年 2 月に「GX 実現に向けた基本方針」[5]が閣議決定され、カーボンプライシングとして、炭素に関する賦課金と、排出量取引制度の導入の方針が決定された。第 4.2 節において、炭素国境調整措置に関する動向と分析・評価について記述した。

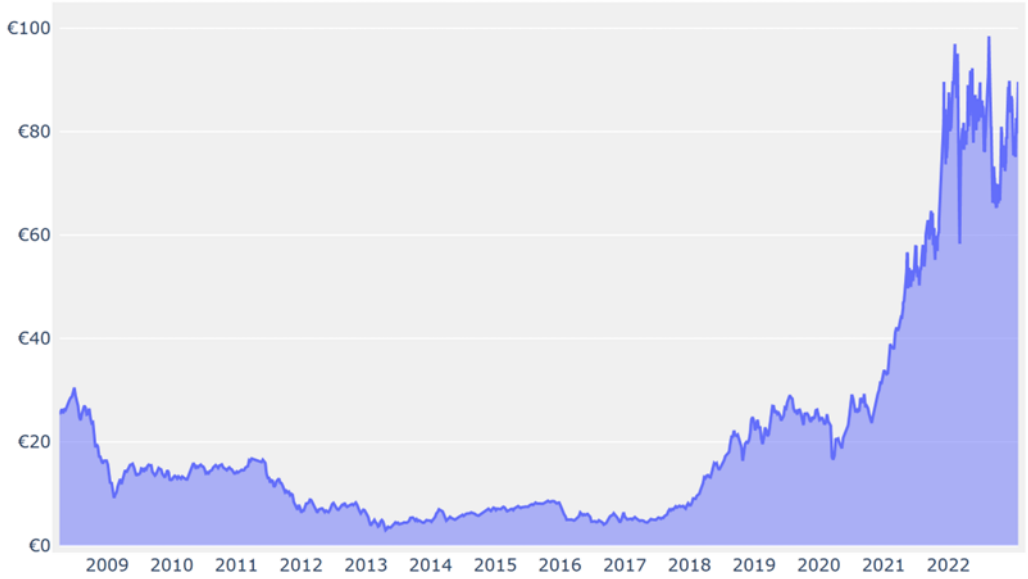


図 1.1.5-1 欧州排出量取引制度 EUA 炭素価格推移

（出典：Sandbag[32]）

1.1.6 IPCC 関連の動向

IPCC は、第 6 次評価報告書（AR6）に向けたサイクルが終盤となり、第 3 作業部会（WG3）緩和に関する評価報告書が、2022 年 4 月に公表された[10]。

AR6 のプロセスにおいては、新しい統合シナリオとして SSPs (Shared Socioeconomic Pathways、共有社会経済パス)と呼ばれる、WG 横断的な分析の共通基盤とするシナリオの検討、策定も進められてきた。これは当初、AR5 の分析に間に合わせようとしてきたが、ほとんど間に合わず、AR6 に向けて、ベースとなる社会経済シナリオになると考えられるため、本事業でもこの検討を行った。2017 年 9 月の IPCC 総会において章構成が承認された後、気候変動緩和を扱う WG3 については、報告書執筆者会合は 2018 年 4 月に第 1 回が、2019 年 9 月に第 2 回会合、2020 年 4 月に第 3 回会合、2021

年 4 月に第 4 回会合（第 3 回、第 4 回会合は COVID-19 の影響によりオンライン）が開催された。そして、最終ドラフトが 2022 年 3 月末からの IPCC 総会にかけられ、2022 年 4 月に報告書の政策決定者向け要約（SPM）が承認、本体が承諾された。2023 年 3 月中旬に統合報告書が承認、承諾される予定となっている。

一方、気候変動の自然科学的側面を扱う第 1 作業部会（WG1）の報告書[33]は、2021 年 8 月に、また気候変動影響・適応策を扱う第 2 作業部会（WG2）の報告書[34]は、2022 年 2 月に公表されている。IPCC WG3 報告書は本事業目的と関連の深い内容を広範にカバーしているが、その主要なポイントについて第 2.2 節および第 6.1 節に記載した。

1.2 本研究の目的と実施内容

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

(1) コンピュータモデルを用いた総合的な分析・評価

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

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

(1－2)

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

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

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

その限界について分析、評価を行った。また、国際機関、研究機関、市民団体による排出削減目標の評価について、その方法論等を調査し、評価を行った。

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

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

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

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

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

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

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

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

(3) 効果が期待できる温暖化対策の具体的なシステム提案とその分析

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

(4) グリーン成長、温暖化対策技術の国際展開に関する分析

以下①～⑤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) 米国スタンフォード大・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欧州の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）へのモデル分析結果の提供や、会合への参加、会議出席を行った。

(8－6) 気候変動緩和シナリオ分析の国際連携のためのコンソーシアム Integrated Assessment Modeling Consortium（IAMC）会合への参加、会議出席を行った。

(8－7) 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) 日本政府「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」 (2019)、https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai40/pdf/senryaku.pdf
2) 第 6 次エネルギー基本計画 (2021) https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html
3) 日本政府「地球温暖化対策計画」https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html (2021)
4) 日本政府「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」(2021) http://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/chokisenryaku.html
5) 日本政府、GX 実現に向けた基本方針、2023 年 2 月、https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html (2023 年 2 月 16 日アクセス)
6) Global Carbon Project, Global Carbon Budget 2022, https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/22/files/GCP_CarbonBudget_2022.pdf
7) 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
8) RITE/METI、令和 3 年度地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業報告書、2022 年 3 月
9) United Nations, Sustainable Development Goals, http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/
10) IPCC WG3、第 6 次評価報告書 (2022) https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/
11) 環境省、2020 年度（令和 2 年度）温室効果ガス排出量（確報値）、https://www.env.go.jp/content/900445425.pdf
12) 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

13) 経団連 低炭素社会実行計画概要
https://www.meti.go.jp/committee/summary/0004647/2011_s01_00.pdf
14) 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
15) WBCSD, Avioded Emissions (2022)
https://www.wbcsd.org/Overview/Policy-Advocacy-and-Member-Mobilization-PAMM/News/COP27-The-Business-of-Climate-Recovery-Accelerating-Accountability-Ambition-and-Action
16) 経団連 カーボンニュートラル行動計画
https://www.keidanren.or.jp/policy/vape/LowCarbonSociety2017.pdf
17) 産業構造審議会産業技術環境分科会 地球環境小委員会 (2022)
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/pdf/2022_001_05_01.pdf
18) 経済産業省 調達価格等算定委員会 資料 (2022)、
https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/078_01_00.pdf
19) 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
20) 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
21) 2030 年度におけるエネルギー需給の見通し（参考資料）(2021)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/opinion/data/03.pdf
22) 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
23) 経済産業省、2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2020)
https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html
24) 日本政府、2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2021)
https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html
25) 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
26) 日本政府、クライメート・トランジション・ファイナンスに関する基本指針 (2021)
https://www.meti.go.jp/press/2021/05/20210507001/20210507001.html
27) ICMA, Climate Transition Finance Handbook (2020)
https://www.icmagroup.org/assets/documents/Regulatory/Green-Bonds/Climate-Transition-Finance-Handbook-December-2020-091220.pdf
28) 経済産業省、経済産業分野におけるトランジション・ファイナンス推進のためのロードマップ策定検討会 https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/transition_finance_suishin/index.html
29) 総合資源エネルギー調査会 2050 年カーボンニュートラルを見据えた次世代エネルギー需給構造検討小委員会資料（2022 年 12 月）
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/carbon_neutral/011/011_04.pdf
30) 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
31) 気候変動影響評価報告書 (2020) http://www.env.go.jp/press/files/jp/115261.pdf
32) Sandbag, EUA futures. https://sandbag.be/index.php/carbon-price-viewer/ (2023 年 2 月 16 日アクセス)

33) IPCC WG1, AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis (2021)
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/
34) IPCC WG2, AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability (2023)
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

第2章　気候変動リスクマネジメント

IPCC 第 1 作業部会（WG1）の第 6 次評価報告書（AR6）では、「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない。」とされた [1)]。また、第 5 次評価報告書（AR5）[2)]では、累積 CO_2 排出量と気温上昇にほぼ線形に近い関係が指摘された。このため、気温を安定化するためには、世界の CO_2 排出量を正味でほぼゼロにする必要があり、それは長期的に目指さなければならない目標と考えることができる。第 1 章で記載したように、政治的には 2050 年までにカーボンニュートラル実現を目指す動きが加速した。気候感度については、第 4 次評価報告書（AR4）[3)]で likely range が 2～4.5℃、最良推定値 3℃、AR5 では AR4 以前と同じく再び 1.5～4.5℃に広がり、更には最良推定値は無しとされた。AR6 では、最良推定値 3℃、likely range 2.5～4℃と評価された。この likely range は AR5 の幅の半分程度であり大きく改善した。幅が狭められると、緩和策の意思決定が容易になってくるため、望ましいことである。一方で、引き続き、気候変動影響被害の程度とともに、大きな不確実性が残っていることに留意が必要である。

また気候変動緩和コストの不確実性も大きいと見られる。更には、気候変動対応の国際的な政治状況についての政権の交代も含めて不確実性が大きい。ロシアによるウクライナ侵略により、冷戦終結以降の国際的な協調ムードは一変してきている。また、それ以前からも、近年、米中関係等、経済紛争等が増してきている。第 1 章で見たように、世界の GHG 排出量は引き続き増大基調にあり、2022 年は過去最高の排出量を記録したと見られる。協調下でも困難だった気候変動対策は、分断された世界で一層難しくなる可能性がある。

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

第 2.1 節に気候変動リスクマネジメント戦略のあり方を記載した。第 2.2 節には、気候変動対策とその他 SDGs とのシナジー・トレードオフについて、IPCC AR6 での整理を含めて記載した。そして、第 2.3 節には気候変動リスクマネジメントから見たイノベーションの役割と期待について、核融合発電の事例も含めて記載した。

2.1　気候変動リスクマネジメントの考え方

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

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

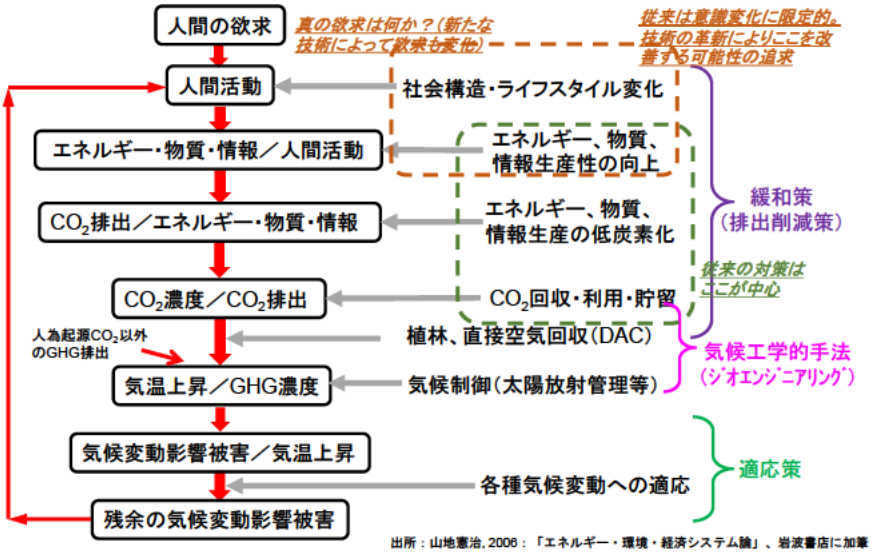


図 2.1-1 地球温暖化対策の基本構造

- 原則的には、緩和策、適応策、残余の影響被害の総和の最小化（費用便益分析）が望まれる。ただし、この手法は不確実性がないか、小さいときには採用できるが、気候変動を取り巻く状況には、様々な、かつ、大きな不確実性が存在する（気候変動影響被害推計例は図 2.1-2）ため、データの見方、考え方によって大きな幅があり、費用と便益が一致する点にはあまりに大きな幅が生じてしまう。例えば、気候変動リスクに関わる金融当局ネットワーク（NGFS）の気候変動影響被害リスクの推計は、2021 年の ver.2[5]では、相対的に気候変動影響被害推計が大きい、Kalkuhl, Wenz (2020)の論文をベースに推計している（図 2.1-3）。更に 2022 年の ver.3[6]では、同じモデルを用いているものの、平均値ではなく、不確実性推計の上位 95%タイルの推計を採用している（図 2.1-4）。リスク回避志向は人によって様々であるが、どのような推計値を採用するかで、費用便益分析の結果は大きく異なってくる。ただし、もし気候変動影響被害について上位の 95%タイルの推計値を採用するのであれば、同様に気候変動緩和費用推計についても上位 95%タイルの推計値を採用するのが整合的と考えられるが、NGFS ではそのような扱いはされていないので、注意をもって報告を解釈すべきと考えられる。IPCC WG2 報告書では、エキスパートジャッジメントにより、最新報告書では図 2.1-5 のような影響被害リスクを提示している。しかし、報告

書改定の度に、被害リスクの大きさは大きく表示される傾向がある。科学的な知見の集約によって真に影響被害リスクが大きいと推計されるようになっているならば、科学の進展として好ましいことであるが、国際政治が 2℃から 1.5℃目標へと厳しい排出削減目標を提示する中で、学術論文も政治目標を念頭に研究の焦点を当てるケースもあるかもしれない。複数の論文をベースにしたエキスパートジャッジメントであることを理解した上で、リスクを判断し、全体のリスクマネジメント戦略も考える必要性がある。

- いずれにしても、費用便益分析から、例えば、4℃のような世界を許容すれば影響被害が大きすぎる可能性があるとか、1.5℃では排出削減費用は大きくなりすぎる可能性があるといった程度の評価は一定程度意味をもって議論ができるものの、何℃に抑制するのが望ましいのかということを、科学的な費用便益分析を基にして、明確に言うことは困難な状況にある。このことは研究が相当進展しても、当面は変わることがないと考えられる。

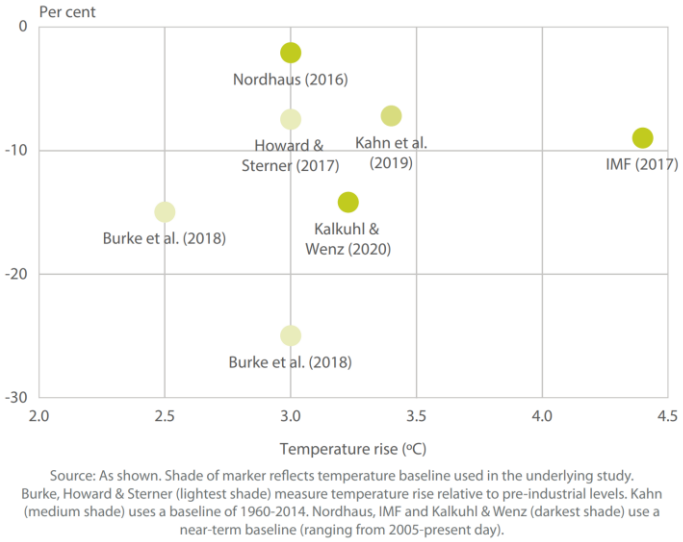


図 2.1-2 気候変動影響による世界 GDP への影響推計

（出典：NGFS[5]）

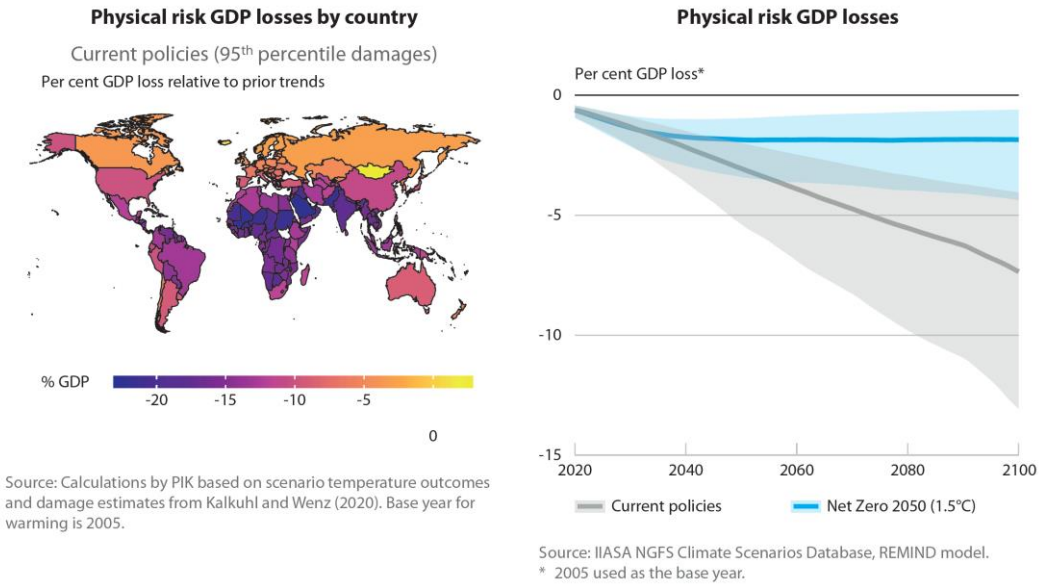


図 2.1-3 気候変動影響による世界 GDP への影響推計

（出典：NGFS[5]）

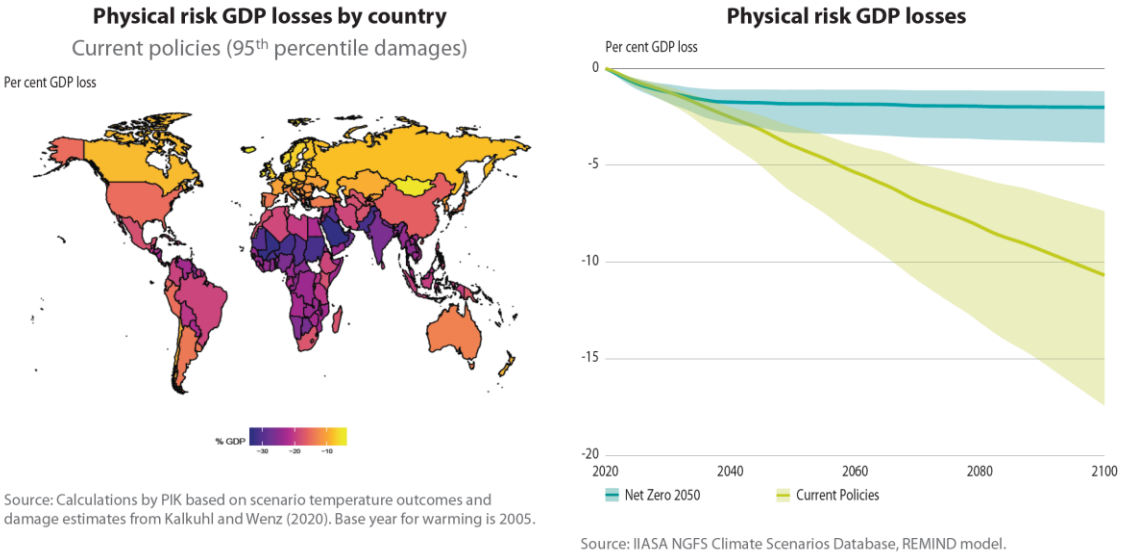
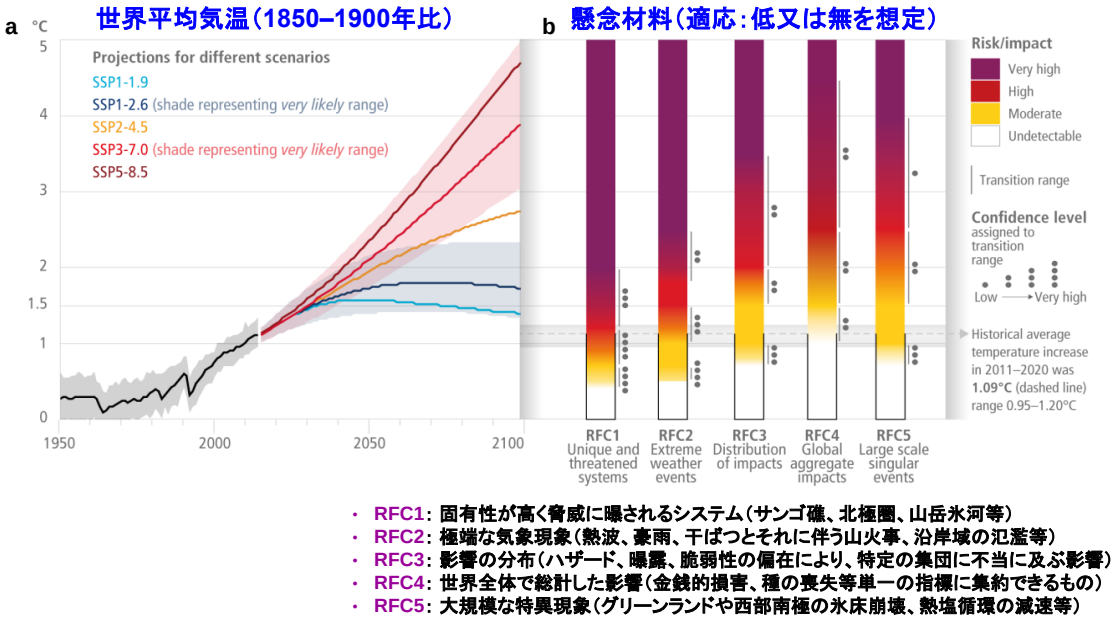


図 2.1-4 気候変動影響による世界 GDP への影響推計

（出典：NGFS[6]）



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

図 2.1-5 IPCC WG2 AR6 における気候変動影響被害評価

（出典：IPCC[7]）

- また、同様に、仮に実質ゼロ排出を目指すとしたとしても、いつの時点までに正味ゼロ排出を目指すのが良いのかについては、費用便益分析からは算定することは事実上不可能である。すなわち、合理的な世界の排出削減経路を見出すことは不可能である。1.5℃目標や 2050 年カーボンニュートラル目標は、政治的に決定された、そうありたいという願望の目標であって、対策費用が極めて大きい状況でも実現が必須と考えるような目標ではないことは認識しておくべきである。
- 特に 2050 年やそれ以降においては、気候変動の科学、対応技術、社会情勢、政治情勢など、様々な不確実性が存在している。よって、長期の野心的なビジョンを持ちながらも、不確実性をよく理解しながら、柔軟な対応をしていくことが重要と考えられる。経済産業省長期温暖化対策プラットフォーム報告書[8]や第 5 次エネルギー基本計画[9]でも、不確実性を認識した柔軟な対応（複線シナリオ的対応）の必要性が指摘されている。より高位の目的である「持続可能な発展」のためにも、野心的な目標・ビジョンを持ちながらも、柔軟な対応が必要である。
- 経済産業省長期温暖化対策プラットフォーム報告書[6]では、最上位の目標（野心的なビジョン）として「持続可能な発展」を位置づけているが、これは妥当な目標と考えられる。一方、「持続可能な発展」は、貧困や飢餓撲滅などの目標との調和した対策が必要であり、高すぎる緩和費用（炭素価格）では、GHG の大幅排出削減につながったとしても、他目標の実現が困難になる可能性が高い。安価な対策技術を開発し、低い緩和費用であっても排出削減が進むような社会を実現することがリスク対応戦略上も必要。また現実にも高い炭素価格を世界全体で協調してつけることは不可能に近いとも考えられる。また、近年の国内

での電力需給逼迫やロシア・ウクライナ情勢等による化石燃料価格の高騰は、改めて、エネルギー安全保障・安定供給、経済性の重要性を再認識させられる状況であり、S+3E のバランスの達成が重要であり、これは、SDGs の同時達成の必要性と同様の意味合いがあるものである。

- 累積 CO_2 排出量と全球平均気温上昇には線形の関係が見られる。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。IPCC 1.5℃特別報告書（SR15）[10]でも示されているように、1.5℃排出経路でも様々な経路、対策の可能性がある（P1～P4 で類型化された）。どれか一つの排出経路とそれに対応した技術ポートフォリオを前提とするのではなく、様々な不確実性に備え、複数のシナリオを念頭におきながら、リスク対応を行うことが必要と考えられる。第 6 次エネルギー基本計画 [11]でも、2050 年カーボンニュートラルに向けて「あらゆる選択肢追求する」とされた。
- 気候変動影響が甚大なら、BECCS や DACCS、場合によって、SRM のような手段を使っても気温上昇抑制を図らなければならないかもしれず、オプションは有しておく必要がある。一方、気候変動影響に適応などで対応できるレベルであれば、BECCS や DACCS、場合によって、SRM などを大規模に使うことなく、適応で対応していくという複合的なリスク対応戦略が必要であろう。

【気候変動予測の不確実性】

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

【気候変動影響被害の相対化と適応の可能性】

- 気候変動影響被害は、社会経済的環境によって大きく異なることは多く、気候変動緩和のみならず、社会経済的環境の強化などが気候変動影響被害のリスク低減に重要なことも多い。
- 気候変動影響被害は、世界一様ではなく、地域的な偏在性が存在する。これは国際協調による緩和策を難しくする要因でもある。
- 過去、地球の気候は大きく変化してきた時期も多い。また、自然環境に対する脆弱性を、社会経済的環境を変化させ対応することで、小さくしてきた。一方

で、逆に社会経済的環境の変化によって、自然環境を大きく改変してきた。気候変動影響被害を、過去の自然環境の改変と比較し、相対的にとらえることもリスク管理としては重要。

- 過去人類は、自然環境に適応してきたし、今後の気候変動に対しても適応できる余地は大きいとも考えられる。
- 厳しい緩和策をとったとしても、一定程度の気候変動は不可避であり、温暖化適応策は不可欠でまた効果的な場合も。適応策は、とりわけ途上国では経済開発と密接に関係しており、経済開発の文脈の中で実施することで小さな追加費用で適応策をとることができる場合や適応策によって気候変動がなくとも生じる被害を併せて低減でき、コベネフィットが生じる場合も多い。

【緩和費用の不確実性】

- 不確実性は、気候変動予測や影響被害だけに存在しているわけではなく、気候変動緩和費用にも付随している。
- CO_2 限界削減費用（炭素価格）は、IPCC AR5[12]では、430-530 ppm CO_2eq シナリオの場合（2℃目標相当）、2050 年では約 100～300 \$/tCO_2（25-75 パーセンタイル）、2100 年では約 1000～3000 \$/tCO_2、全シナリオでは 150～8000 \$/tCO_2 程度が推計。また、世界 GDP は 2050 年では 2～5%程度（25-75 パーセンタイル）、2100 年では 4～10%程度の損失と推計されている（図 2.1-6）。
- IPCC AR6[13]では、オーバーシュートがほぼ無い 1.5℃シナリオ（C1 カテゴリー）の場合には、2030 年では約 180～300 \$/tCO_2 程度（25-75%タイル）、2050 年では約 420～1000 \$/tCO_2 程度（25-75%タイル）と推計。世界 GDP は 2050 年では 2.7～4.1%程度（25-75 パーセンタイル）の損失と推計されている。なお、厳しい目標ほど、どういった技術までを想定しているか、社会経済の想定による差異などにより、推計される費用の幅は大きくなる傾向もある（図 2.1-7、図 2.1-8）。

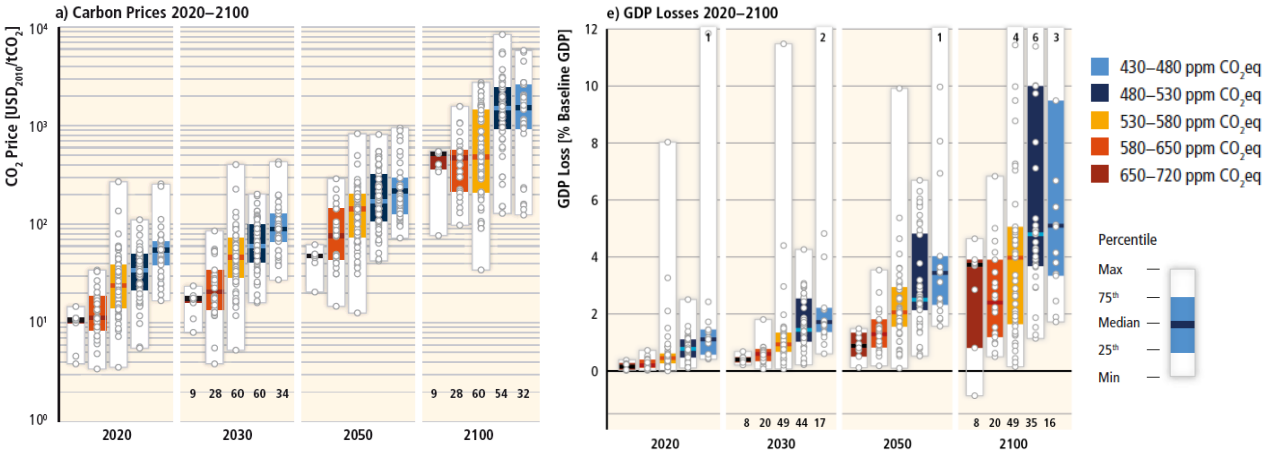


図 2.1-6 IPCC AR5 報告における濃度レベル別の世界の CO_2 限界削減費用と GDP ロス[12]

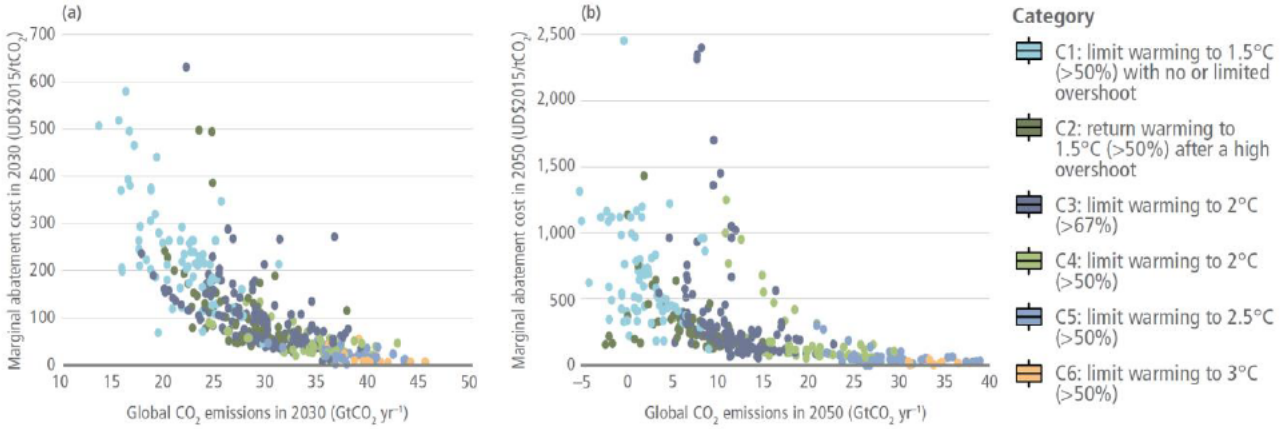


図 2.1-7 IPCC AR6 の報告における 2100 年の気温水準別の CO_2 限界削減費用 [13)]

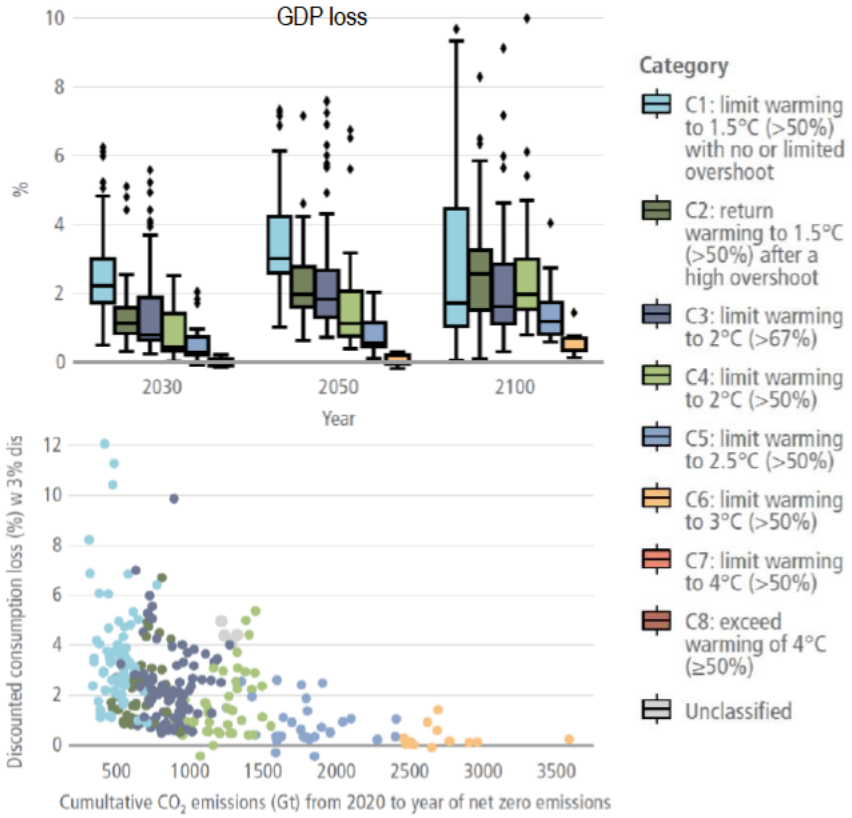


図 2.1-8 IPCC AR6 の報告における 2100 年の気温水準別の GDP ロスおよび消費ロス [13)]

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

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

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

【気候工学的手法の位置づけ】

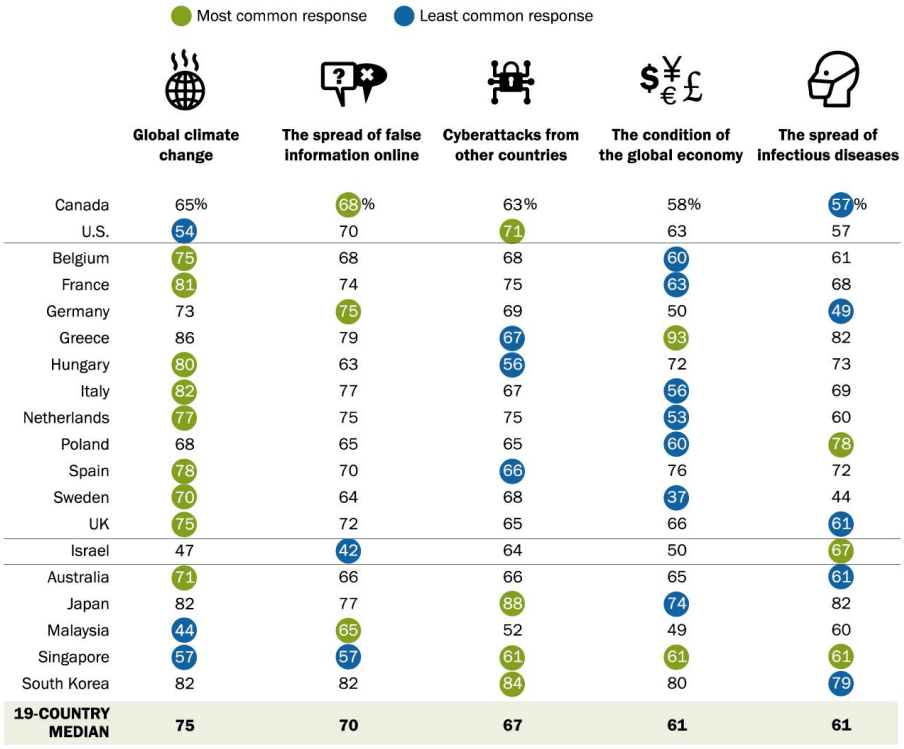
- 気候工学的手法による対策は、気候変動影響被害の fat tail に対する対応として、有効に働き得るとの見方あり。
- CCS 付きバイオエネルギー（BECCS）は、ネガティブ排出が可能となるという利点がある。現実的には、すべての部門で CO_2 排出ゼロを実現することは難しいと考えられるため、BECCS のようにネガティブ排出を実現できる技術は有効と考えられる。しかしながら、BECCS は、コストの問題に加えて、生態系への影響や規模の問題などがあり、現実的には大きな役割を担うことも困難と考えられる。正味ゼロ排出を実現するために、BECCS は一定の役割を担う可能性はあるものの、省エネルギ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

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

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

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

【気候変動リスクへの認識】
- 気候変動影響のリスク認知は、日本を含めて、高まってきてはいるものの、国間で大きな差異があり（図 2.1-9、図 2.1-10）[14]、米国内に限っても、特に共和党支持者と民主党支持者では見方が大きく異なっている（図 2.1-11）[15]。その差は益々広がっている。2022 年 1 月の調査では、米国では 18 課題中 14 位であり、しかも民主党支持者と共和党支持しでは、最も見方の差異が大きい課題となっており、共和党支持者に限れば、18 課題中最下位である。

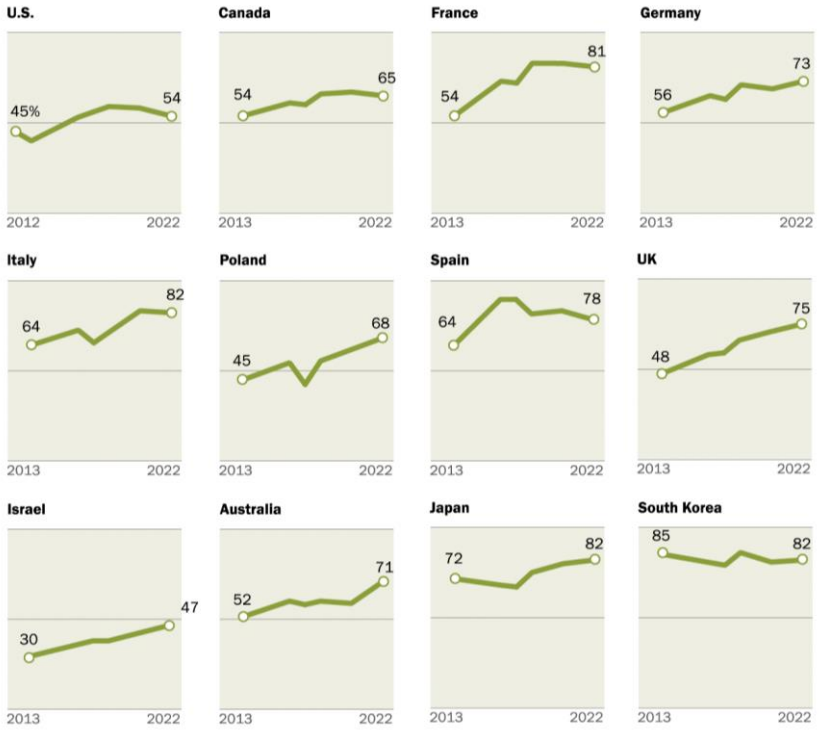


	Global climate change	The spread of false information online	Cyberattacks from other countries	The condition of the global economy	The spread of infectious diseases
Canada	65%	68%	63%	58%	57%
U.S.	54	70	71	63	57
Belgium	75	68	68	60	61
France	81	74	75	63	68
Germany	73	75	69	50	49
Greece	86	79	67	93	82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

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

PEW RESEARCH CENTER

図 2.1-9 主要国別の気候変動問題に対する他問題との相対的な認識の違い [14)]



Note: Not all countries in survey shown. Prior to 2020, U.S. and Australia surveys were conducted by phone. See topline for full results.
Source: Spring 2022 Global Attitudes Survey. Q10a.
"Climate Change Remains Top Global Threat Across 19-Country Survey"

PEW RESEARCH CENTER

図 2.1-10 気候変動問題に対する認識の主要国別の推移 [14)]

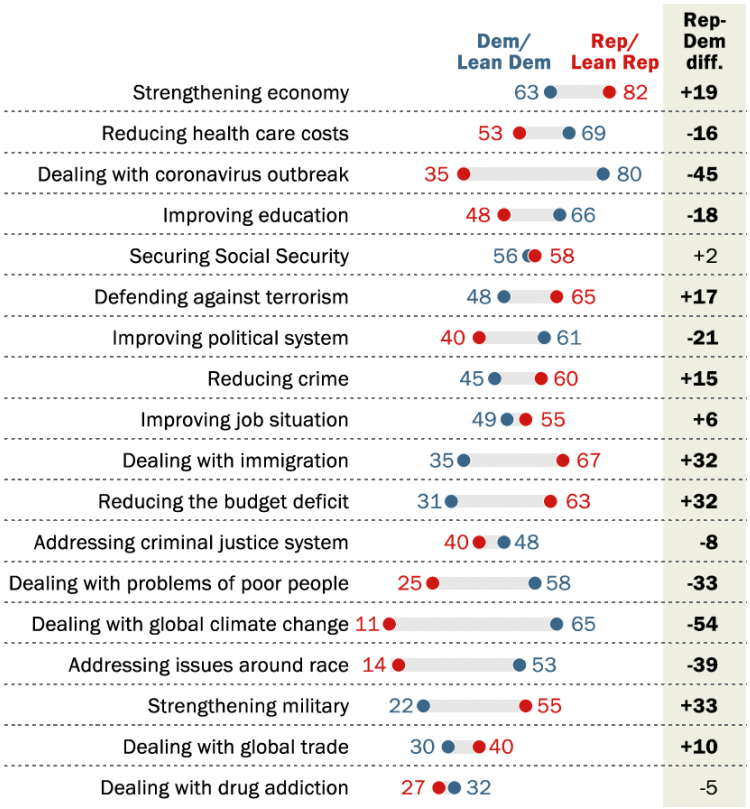


図 2.1-11 米国の気候変動問題に対する認識（民主党と共和党支持層での差異を含む）

15)

【科学的な評価を超えた安心感への対応】

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

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

参考文献（第 2.1 節に関するもの）

1) IPCC WG1, Sixth Assessment Rpoert, 2021
2) IPCC WG1, Fifth Assessment Report, 2013
3) IPCC WG1, Fourth Assessment Report, 2007
4) RITE、FY2021 ALPS 報告書 (2022)
5) NGFS, 2021. https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/820184_ngfs_scenarios_final_version_v6.pdf
6) NGFS, 2022. https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/ngfs_climate_scenarios_for_central_banks_and_supervisors_.pdf.pdf
7) IPCC WG2, Sixth Assessment Rpoert, 2022
8) 経済産業省、長期地球温暖化対策プラットフォーム報告書、2017
9) 経済産業省、第 5 次エネルギー基本計画、2018
10) IPCC, Special Report on Global warming of 1.5 ℃ (SR15), 2018
11) 経済産業省、第 6 次エネルギー基本計画、2021
12) IPCC WG3, Fifth Assessment Report, 2014
13) IPCC WG3, Sixth Assessment Report, 2022
14) Pew Research Center (2022) https://www.pewresearch.org/global/2022/08/31/climate-change-remains-top-global-threat-across-19-country-survey/
15) Pew Research Center (2022) https://www.pewresearch.org/politics/2022/02/16/publics-top-priority-for-2022-strengthening-the-nations-economy/

2.2 持続可能な発展とのシナジー・トレードオフ

2.2.1 IPCC WG3 AR6 における緩和策と持続可能な発展との関係性評価

IPCC WG3 AR6[1)]では、「気候変動の影響を緩和し適応するための加速した衡平な気候行動は、持続可能な開発のために非常に重要である。」としている。また、「持続可能な開発目標（SDGs: Sustainable Development Goals）[2)]は、持続可能な開発の文脈において、気候行動の評価基準として利用することができる。」とも述べている。図 2.2.1-1 は、AR6 の 17 章（持続可能な開発の文脈での遷移加速）及び政策決定者向け要約（SPM: Sumary for Policymakers）に掲載されたもので、気候変動緩和策と、SDG 13（気候変動に具体的な対策）を除く 16 個の SDGs との関係を示している。これによると、緩和策は多数の SDGs とシナジー関係にあるものの、トレードオフ関係のものもある。SPM にも掲載されたことから、しばしば目にする図であるが、解釈にあたり留意点がある。まず、これらは AR6 の部門別章（6～11 章）における緩和策と SDGs の定性的評価の結果概要を、一つの図に表現したものである。厳密には、後述するように、緩和策と SDGs の関係は状況や規模によって異なる。「シナジーとトレードオフは、状況と規模によっ

て異なる」との但し書きが、図のキャプションに添えられている。また、埋められた欄を見る限りでは、シナジー「＋」がトレードオフ「－」より多いが、空欄も少なくない。空欄は、文献が限られ定性的評価が行われなかった項目であり、SDGsとの相互作用が無いというわけではない。

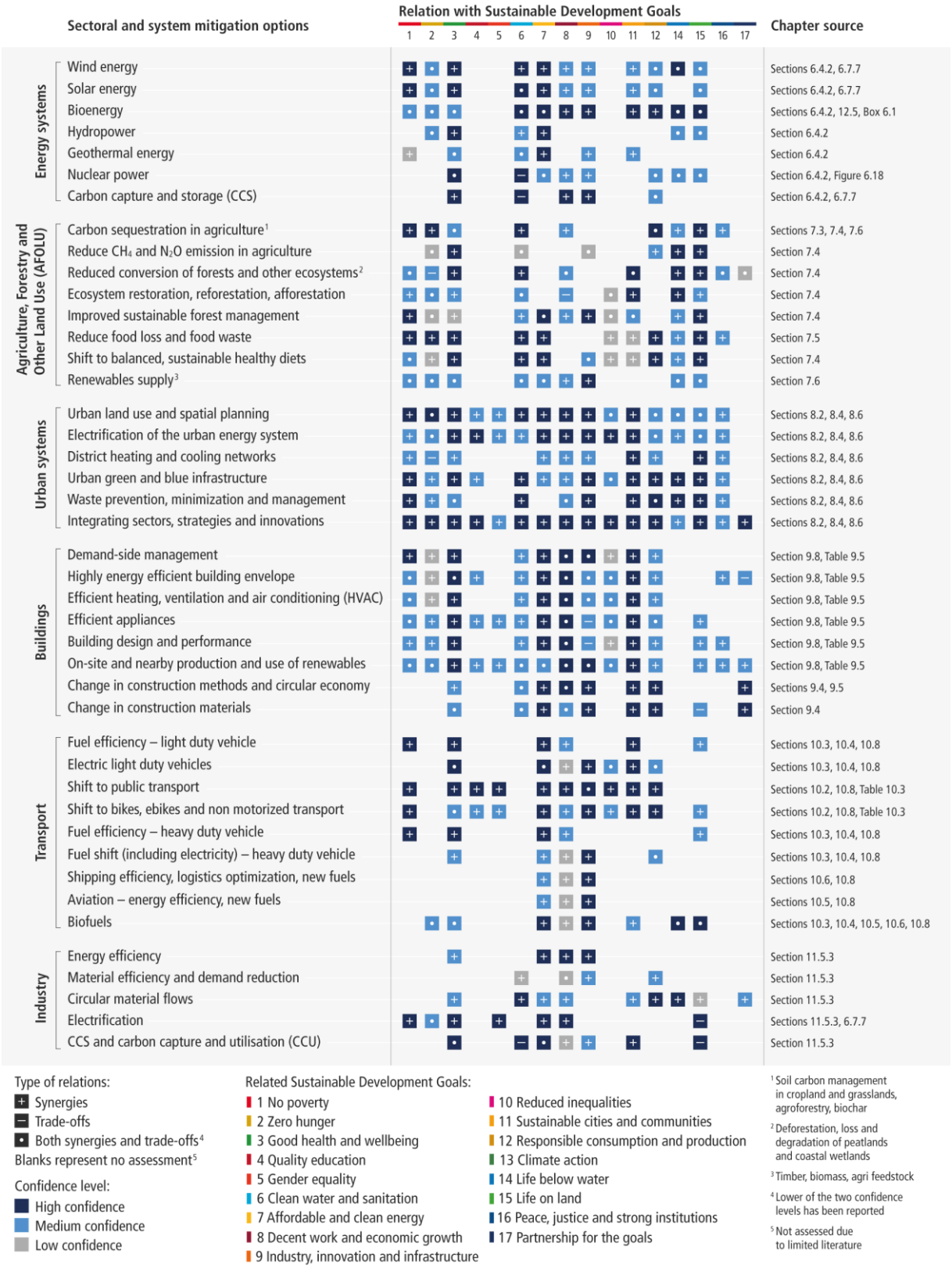


図 2.2.1-1 緩和策と SDGs とのシナジーとトレードオフの例（AR6 Figure 17.1、Figure SPM.8）[1)]

前述の留意点を踏まえた上で、主な緩和策と SDGs の、これまで認識されているシナジー、トレードオフについて、AR6 の 17 章（17.3.3.7 節）等を基に記載する。

① エネルギー部門緩和策

エネルギー部門緩和策の多くは複数の SDGs とシナジー関係にあるが、風力、太陽光、水力は、土地競合や漁業への悪影響により SDG 2（飢餓ゼロ）とシナジー/トレードオフのどちらにもなりうる。また、風力、太陽光は大量の材料消費と廃棄により SDG 12（責任ある消費と生産）とトレードオフの関係があると評価されている。地熱は、エネルギーアクセスを改善し SDG 1（貧困撲滅）とシナジー、大気汚染物質を低減し SDG 3（健康と福祉）とシナジー/トレードオフと見込まれるが、管理が不十分な場合は SDG 6（安全な水と衛生）とトレードオフの可能性もある。原子力発電は、大気汚染物質を低減し SDG 3（健康と福祉）と、材料消費を低減し SDG 12（責任ある消費と生産）とそれぞれシナジー関係にあるものの、水を大量に消費するため SDG 6（安全な水と衛生）とトレードオフの可能性がある。なお、水消費の課題は、エネルギー部門の他の多くの緩和策にも共通する（Box1：原子力発電、CCS 有発電の水利用と対応策）。

バイオエネルギーはエネルギー部門緩和策の中で、SDGs との関係が最も多いオプションの一つである。SDG 1（貧困撲滅）、SDG 8（働きがいと経済成長）、SDG 9（産業と技術革新、インフラ）とシナジーとなり得る一方、CCS と組み合わせるとコスト高のため SDG 1（貧困撲滅）とトレードオフになり得る。CCUS は、SDG 3（健康と福祉）とシナジー、また産業プロセスの脱炭素化を促進し SDG 9（産業と技術革新、インフラ）とシナジーとなる一方、SDG 1（貧困撲滅）、SDG 6（安全な水と衛生）とトレードオフになると評価されている。

以上は個々の緩和策と SDGs との関係であるが、AR6 の 6 章（6.7.7 節）には、エネルギーシステムの統合化、最適化により、各対策の SDGs とのトレードオフを低減できるとの記載もある。例えば、VRE（variable renewable energy）電力供給は間欠性、水素は電力コストのため高価という問題があるが、日間の余剰太陽光を水素製造に利用すれば、水素コストの低下とともに送電網の安定性向上に寄与する。なお、再生可能エネルギーは、インフラ構築のための大量資源採掘が生物多様性に悪影響を及ぼすといったトレードオフがあるものの、全体として低炭素エネルギーシステムと SDGs はシナジーの方が多いと見込まれている。

② 農業、林業、その他の土地利用（AFOLU）部門緩和策

農業、林業、その他の土地利用（AFOLU）の緩和策は、SDGs と密接に関連しておりシナジー、トレードオフ両方の可能性があり、それは、実施規模に大きく依存する。図 2.2.1-1 の全ての緩和策は、SDG 1（貧困撲滅）とシナジーが期待されるものの、広大な土地をエネルギー作物生産に使用し、他の活動抑止により貧困を引き起こす場合はトレードオフとなる可能性がある。

AFOLU 部門緩和策の多くは、環境負荷を低減し、SDG 3（健康と福祉）、SDG 14（海の豊かさ）、SDG 15（陸の豊かさ）とシナジーが期待される、但し、SDG 14、SDG 15 とは土地利用次第でシナジー/トレードオフの両方になりうる。SDG 8（働きがいと経済成長）とは森林再生・修復等土地競合により、又、SDG 7（手頃でクリーンなエネル

ギー）とは経済影響によってシナジー/トレードオフの両方の可能性がある。同様に、農業 CH_4、N_2O の排出削減策は、革新的な食料生産に依存し、SDG 8（働きがいと経済成長）や SDG 11（産業と技術革新、インフラ）とシナジー/トレードオフが混在する。森林再生、森林管理といった緩和策は、地域コミュニティのプロジェクトへの関わり方次第で、SDG 10（不平等の是正）に複合的な影響を与える。このように、AFOLU 部門の緩和策と SDGs の関係は、文脈、規模によるところが大きい。

③ 都市緩和策

都市の緩和策について、評価された対策は全て SDGs とシナジーがあり、一部にシナジー/トレードオフの両方が見込まれる。例えば、都市の土地利用・空間計画は、SDG 1（貧困撲滅）に寄与する。さらに、統合的な都市計画の下では気候変動の脆弱性軽減や、食料（SDG 2：飢餓ゼロ）、水（SDG 6：安全な水と衛生）へのアクセス達成が期待される。都市部における電化、グリーン・ブルー インフラは、今回検討されたすべての SDGs とシナジー関係があると評価されている。廃棄物の防止、最小化、管理も、多くの SDGs とシナジー関係があると評価されているが、大気汚染防止技術の適用やインフォーマルな廃棄物リサイクル活動の状況によっては、トレードオフになる可能性がある。

④ 建築部門緩和策

建築部門についても、緩和策と SDGs の間に多くの関係が指摘されている。例えば、高性能の建物外皮は、SDG 10（不平等の是正）と潜在的なトレードオフを除き、多くの SDGs とシナジーが期待される。建物の設計・性能、暖房、換気、空調、家電製品に関する緩和策も、多くの SDGs とシナジーが認識されている。但し、SDG 8（働きがいと経済成長）とは、エネルギー消費減少、エネルギー価格低下、座礁投資のマクロ経済影響により、トレードオフが生じる可能性も考えられる。エネルギー需要減少による経済影響は、建築部門以外の緩和策でも指摘されている。建設資材や循環経済について、バイオ系材料の使用は SDG 6（安全な水と衛生）と SDG 15（陸の豊かさ）とのトレードオフの可能性がある（Box2： 主要な建築材に体化された CO_2）。

建築部門の緩和策と SDGs に関する議論では、シナジー/トレードオフが、エネルギー需要減少に伴うエネルギー価格の低下、エネルギー効率化投資、イノベーション促進、労働生産性向上等による経済影響等、状況に依存することが課題として強調されている。高コストのため緩和策実施が妨げられるような場合は、貧困世帯が負担を回避できるよう、適切な政策設計が必要である。

⑤ 運輸部門緩和策

運輸部門の緩和策は、バイオ燃料による汚染と交通事故リスクという例外を除くと、環境汚染を減少させ SDG 1（貧困撲滅）、SDG 3（健康と福祉）とシナジー関係にある。バイオ燃料については、食料生産から土地を奪う場合に SDG 2（飢餓ゼロ）とトレードオフの関係が考えられる。運輸部門の緩和策は、SDG 7（手頃でクリーンなエネルギー）、SDG 8（持続可能な開発）、SDG 9（持続可能な開発）ともシナジー関係がある。電気自動車の普及率の向上など、一部の緩和策には充電やバッテリー交換のインフラを含め、革新的なビジネスモデルも必要である。

⑥ 産業部門緩和策

産業部門における緩和策は、基本的に SDGs とシナジー関係にあると評価されている。エネルギー効率化、マテリアルリサイクル、電化等の対策は、雇用やビジネス機会の増加をもたらし、SDG 8（働きがいと経済成長）に寄与する、但し、物質効率の向上は税収を減少させる可能性も考えられる。電化は、SDG 1（貧困撲滅）、SDG 2（飢餓ゼロ）、SDG 3（健康と福祉）等、多くの SDGs とシナジーがあると評価されている。

産業部門での CCS は、二酸化硫黄等を抑制する一方、粒子状物質、窒素酸化物、アンモニア等が増加する。また、CCS を適用したプラントは従来プラントに比べ、15～25%の追加エネルギーが必要となり、生産コストが増加する。産業部門の全体的な傾向として、緩和策と SDGs のシナジーとトレードオフのバランスは、技術と、便益の地域間共有規模、バリューチェーンでの便益分配に依存する。

⑦ 部門横断、まとめ

全ての部門において、緩和策と SDGs の間には多くのシナジーがあるが、幾つかのケースでは、SDG 1（貧困撲滅）、SDG 2（飢餓ゼロ）、SDG 14（海の豊かさ）、SDG 15（陸の豊かさ）などの主要 SDGs を譲歩させる恐れがあり、重要なトレードオフがある。特に、植林や再植林、エネルギー作物等土地利用に関連する緩和策は、ケースによっては食料へのアクセスや地元の便益分配とトレードオフの関係が暗示されている。但し、適切な土地管理や部門横断的な政策により、持続可能な土地利用が考慮されればシナジー関係も存在しうる。この部門緩和策の影響とトレードオフは、規模や状況に依存するため、政策の最終的な効果は詳細に検討する必要がある。

都市、運輸部門も、緩和政策と SDGs の間に多くのシナジーの可能性がある。これらの部門のトレードオフを回避するためには統合的な計画とインフラ管理が重要である。同様に、建築部門、産業部門は、緩和策と SDGs の間に多くの潜在的なシナジーが認められるが、新技術の導入費用や、家計負担等、公平性の問題がある。緩和策実施の便益/費用分担について各状況に即した評価を含め、異なる部門間の統合、調整に係る政策が必要である。

Box 1：原子力発電、CCS 有発電の水利用と対応策

◆ 原子力発電

火力や原子力発電では、蒸気タービンの蒸気を水の状態に戻す際、大量の冷却水を必要とする。AR6 の 6.4.2.4 節によると、原子力発電は水利用強度が高く、特に内陸部のプラントは、大量の取水が地域の水ストレス度を高め水利用競合を引き起こす可能性がある。対応策として、冷却システムを貫流型の代わりに循環型とし、取水量を抑制すること等があげられている。

なお、文献 3)によると、海に囲まれた日本や韓国では、火力や原子力発電の冷却に海水を利用しており、他部門との淡水利用競合の可能性は低い。また、排水熱の周辺環境への影響も、内陸部の河川水や湖水を利用する場合に比べると小さいと考えられる。

◆ CCS 有発電

AR6 の 6.4.2.5 節によると、CCS 有の発電プラントは、CCS 無プラントに比べ取水量が 25～200%増大する。CO_2 分離回収技術に、吸収液以外の技術を適用すると取水量を若干抑制できるが、その場合でも、米国南西部や東南アジア等水不足になりがちな地域では、発電プラントの導入制限や夏季に利用停止の可能性が考えられる。対応策として、熱統合戦略の改善や排水再利用があげられている。

参考まで、RITE のモデルを用い、特段の気候変動緩和が無い Baseline と 450ppm シナリオについて、世界各地の水ストレス度（CWA）[*1]への影響を分析した例では [4]、水ストレス度が比較的高い地域、例えば南アフリカについて、次のような結果が得られた。450ppm シナリオでは、バイオマス CCS、石炭 CCS、原子力が発電用の水消費を増大させ 2030～2050 年に当該地域の水ストレス度増大に寄与する。但し、Baseline シナリオ下では気候変動によって淡水資源量が減少し水ストレス度が大幅上昇すると見込まれるところ、450ppm シナリオ下では淡水資源量減少が抑制されるため、水ストレス度は Baseline シナリオ程悪化しない。

緩和策と SDGs の関係はさることながら、気候変動リスクの管理という観点からは、緩和策実施による気候変動影響の低減効果も考慮した評価、議論が必要と考えられる。

*1: CAR (annual water consumption-to-available ratio)
CAR=（発電、その他工業、農業、生活部門の水消費量）/ 淡水資源量

Box 2：主要な建築材に体化された CO_2

下図は、主要な建築材 1kg に体化された CO_2 の LCA 評価（Cradle to product stage）の結果をまとめたもの。例えば、一般鋼は 1kg 生産当たり 2.21～3.19 kg の CO_2 が排出されるのに対し、木材は最大でも 0.41 kg CO_2 と小さく、中には負値という評価もある。

このような評価から、バイオ系建築材は炭素を固定すると期待される。一方で、無計画な利用が森林伐採や、土地利用圧力強化を招かないよう、適切な管理も必要である。

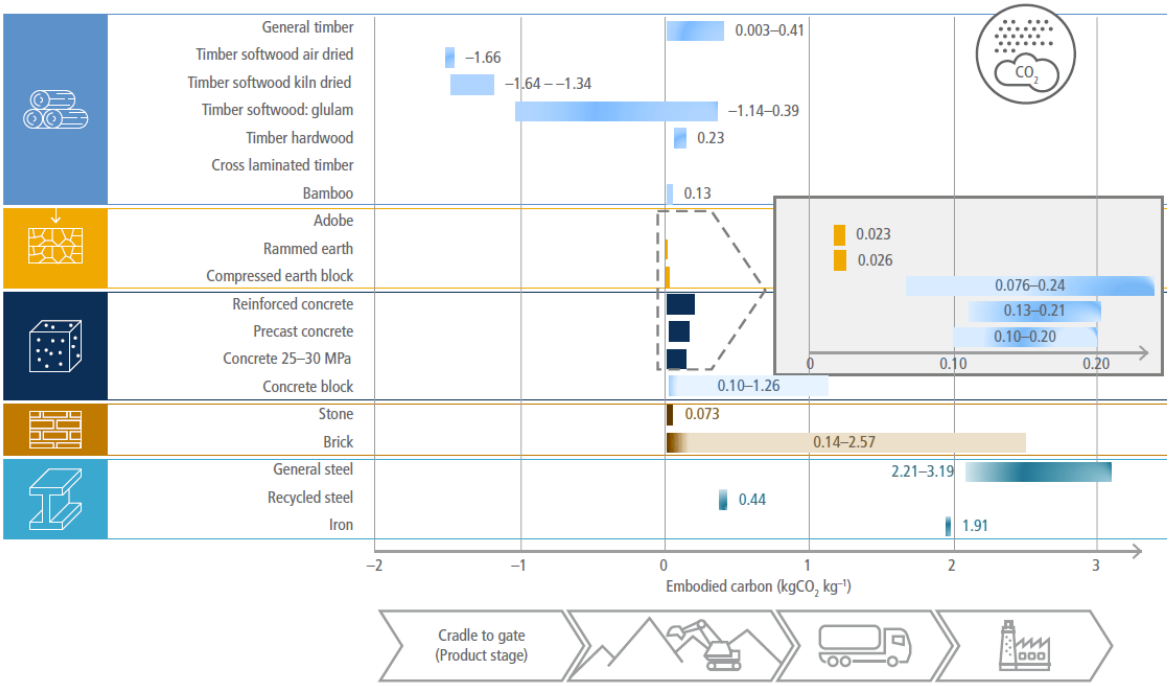


図　主要な建築材に体化された CO_2（IPCC WG3 AR6　Figure9.9）

参考文献（第 2.2.1 節に関するもの）

1) IPCC WG3 AR6: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (2022) https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/ (accessed 2023-01-23)
2) UN: Sustainable Development Goals, https://www.un.org/sustainabledevelopment/ (accessed 2023-01-23)
3) Davies, E.G.R., Kyle, P., Edmonds J.A.,: An integrated assessment of global and regional water demands forelectricity generation to 2095. Advances in Water Resources, 52, 296-313(2013)
4) Hayashi, A., Sano, F., Nakagami, Y., Akimoto, K.: Changes in terrestrial water stress and contributions of major factors under temperature rise constraint scenarios, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 23, 1179‑1205 (2018)

2.2.2 GHG 正味ゼロ排出追求による日本のフードセキュリティへの影響の分析

(1) 背景と目的

食料の安定的な供給は、エネルギーや水資源と同様、人間生活に必要不可欠であるが、気候変動の影響を受けると注視される課題の一つである。特にサプライチェーンの上流に位置する農作物生産においては、気候変動の悪影響がアフリカや地中海域、島嶼国等で既に観測されている[1)]。日本でも水稲、麦類、大豆の品質・重量低下、露地野菜の発育障害発生頻度増加が一部の地域でみられ、更なる気候変動は食料の安定供給へのリスクになると懸念されている[2)]。

2016 年に発効したパリ協定では、気温目標（全球平均気温上昇を産業革命前比 2℃未満に抑制、また 1.5℃に抑える努力を追求）が掲げられ、そのため人為起源温室効果ガス（GHG）排出を今世紀後半には正味ゼロにする必要があるとされた。気温目標が達成されれば、特別な排出削減努力が無く温暖化が成り行きで進行する場合に比べ食料供給への気候変動影響は軽減される。一方、現在約 60Gt CO_2-eq/yr で、なお増加傾向にある世界の GHG 排出量を正味ゼロにするための対策費用も相当である。また、モデルを用いたシナリオ分析によると、省エネルギー、エネルギー炭素強度低減、森林伐採の低減、非 CO_2 ガス排出の削減等の各種対策に加え、CO_2 除去（CDR）技術が必要となる[3)]。具体的な CDR 技術と程度は、モデルやシナリオによるが、多くのモデルではバイオエネルギーと CO_2 回収・貯留の組み合わせ（BECCS）や植林を、一部のモデルで大気中 CO_2 直接回収・貯留（DACCS）を考慮している。BECCS はポテンシャルが比較的多く、植林は他の削減オプションより低コストと見込まれるものの、これらの大量導入は広大な土地利用・変化をもたらし、生態系への悪影響、土地競合による農作物価格上昇等の可能性が指摘されている[4),5)]。今日、世界の多くの国々、企業、その他組織団体が GHG 正味ゼロ排出目標を宣言し、その達成に向けて各種ロードマップの検討がなされているが、前節までに述べた通り、気候変動対応は持続可能な発展の文脈で行うべきであり、仮にそれとトレードオフの関係が予想される場合は、その要因を理解し更なる対策をとる必要がある。

そこで、本研究では、気候変動影響（以下、温暖化影響）を考慮の上、GHG 正味ゼロ排出追求によるフードセキュリティ、特に日本に注目し、そのフードセキュリティへの影響と要因を分析した。なお、温暖化影響を考慮した今世紀中頃までのフードセキュリティに関する研究として日本を含む世界の食料需給分析はあるが、緩和策の影響は必ずしも考慮されていない[6)]。温暖化と緩和策の両影響を考慮した世界各地域の飢餓人口分析[5),7)]は、飢餓人口への影響理解に有益であるものの、指標が日本の評価に適しているとは限らず、日本への影響は明らかでない。本分析では、日本のフードセキュリティ評価により適切と考えられる FSI（Food Security Index）[8)]を用いた。

(2) フードセキュリティ指標（FSI）

FAO によると、フードセキュリティ（食料安全保障）は量的供給可能性（availability）、物理的・経済的入手可能性（access）、利用可能性（utilization）と安定性（stability）の４つの要素から成る[9)]。但し、食料事情は地域毎に異なり、内容について国際的コンセ

ンサスがあるわけではない。大賀によると、日本、スイス、ドイツ、北欧諸国等食料の海外依存度が高い国々のフードセキュリティは国内食料供給の維持・向上と輸入食料の安定供給に尽きる[10]。確かに日本は、食料の自給率が過去約 60 年間低下しており（例えば重量ベースで、小麦：1965 年 28%→2020 年 15%、豆類：25%→8%、トウモロコシ：ほぼ 0%[11]）海外依存度が高い。ただ、これは第二次大戦後の世界的食料貿易が拡大する中、日本においては食料の輸入拡大が合理的であったことを反映している[12]。このような状況を鑑みると、戦争等の有事を除けば「今後も日本の経済力に対し、十分な食料を手頃な価格で入手できるか」、という視点が日本のフードセキュリティ評価に重要と考えられる。そこで、「GDP に対する食料輸入額の割合」で定義される FSI を用いる。GDP は長期シナリオにおける日本の購買力の代理指標である。本分析では、輸入品目としてこれまでの小麦、米、トウモロコシに加え大豆を取り上げた。いずれも、主食、加工品、飼料の原料であり、GDP に対する輸入額の割合が小さいとしてもその変化が日本の食料供給全体に及ぼす影響は大きいと考えられる。また輸入に必要な国際輸送も考慮することとし、式(2.2.2-1)の FSI を用いた。

$$FSI = \left\{ \sum_i C_i \cdot (P_i + F) \right\} / GDP \qquad (2.2.2\text{-}1)$$

i：食品目
C：輸入量 [t]
P：食品の国際価格 [$/t]
F：国際輸送費（海上輸送費） [$/t]

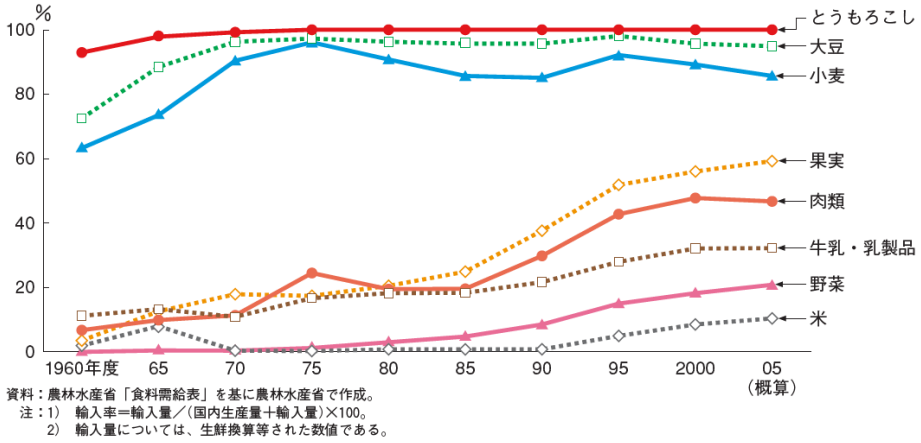


図 2.2.2-1 日本の品目別輸入率の推移[13]

(3) 分析方法

① シナリオ設定

社会経済は SSP2[14]相当に発展するとし、表 2.2.2-1 に示すように、排出削減レベルが異なる Reference、NDC、DO15 シナリオを設定した（GHG、CO_2 排出パスを図 2.2.2-2 に示す）。さらに、各シナリオの気候変動影響・緩和策影響を評価するため、社会経済は Reference シナリオと同様に発展するものの気候は 2000 年のままという仮想的な NoCC シナリオを設定した。

表 2.2.2-1 シナリオの排出削減と気温

シナリオ	排出削減	全球平均気温（℃，産業革命前比）	
		2050 年	2100 年
Reference	特に無	2.3	4.0
NDC	2030 年までに NDCs [*1] 達成。それ以降は 100$/t CO_2 の対策を実施 [*2]。	2.0	3.0
DO15	2030 年までに NDCs 達成。主要先進国（日米英欧）は 2050 年に正味ゼロ排出達成。その他の国・地域は限界削減費用均等化の下で 1.5℃目標を達成。	1.8	1.4
NoCC	特に無	0.8	0.8

*1: 2021 年 11 月までに提出されたもの。

*2: 但し、2030 年で CO_2 限界削減費用が 0 $/t$CO_2$ の国は特に制約無。

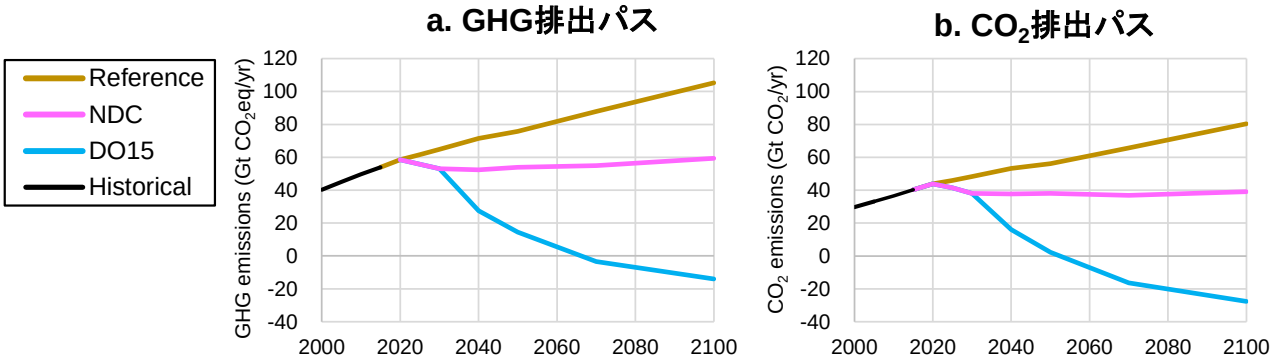


図 2.2.2-2 GHG 及び CO_2 排出パス

② 分析の枠組みと主な想定

a. 分析の枠組み

将来のエネルギーシステム、GHG 排出量、気候変動、農業土地利用等と整合的に分析するため、エネルギーシステム・CO_2 削減策評価モデル（DNE21＋）、世界土地利用モデル（GLaW）、FSI モデルを用いる（図 2.2.2-3）。FSI の算定に必要な作物輸入量（*C*）は GLaW モデルの分析値を適用する。作物の国際価格（*P*）と国際輸送費（*F*）、及び GDP は、NoCC シナリオの値を図 2.2.2-4 のように外生的に想定し、Reference、NDC、DO15 シナリオの各値は後述する通り NoCC シナリオからの変化量を推計する。

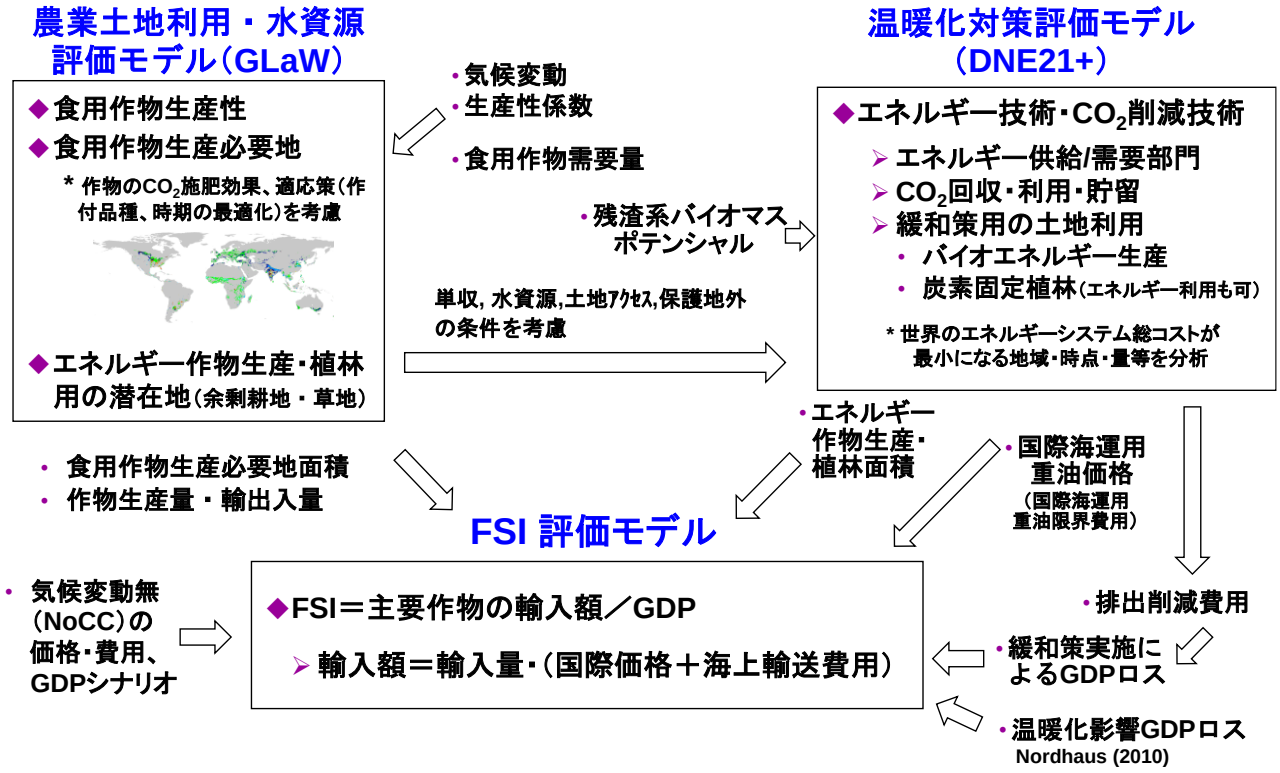


図 2.2.2-3 モデル分析の枠組み

b. NoCC シナリオの GDP・作物価格・想定

図 2.2.2-4 に示す国際価格と GDP の想定値に、2021 年時点で計測/予測可能な COVID-19 影響は含まれている。ロシアのウクライナ侵攻の影響は、作物の国際価格想定において、World Bank[15]の予測を参考に一部考慮した。World Bank の 2022 年 4 月の予測によると、侵攻に伴う供給網の混乱等のため、小麦、トウモロコシ、大豆の価格は一時 2000 年の 2.5～3.2 倍まで上昇したが、2022 年内にピークアウトすると見込まれている。但し、侵攻期間等不確実性もあり長期予測値は報告されていない。そこで、侵攻前の 2021 年 10 月の長期予測に準拠しつつ、侵攻に伴う 2022 年の価格上昇分が、2050 年にかけて次第に低減すると想定した。国際輸送費は、2020 年以降、国際取引量増大に伴い、緩やかに上昇すると想定した。

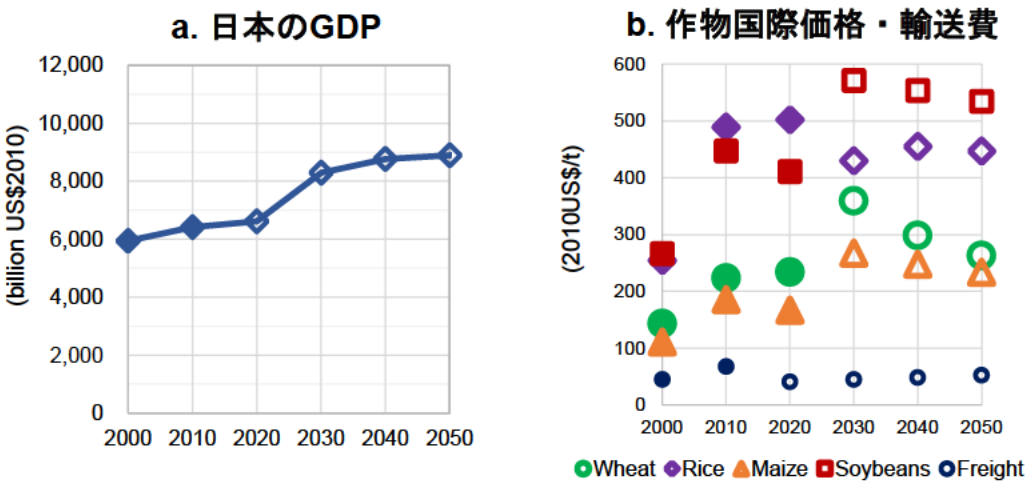


図 2.2.2-4　NoCC シナリオにおける a.日本の GDP と b.作物国際価格・輸送費

*1: 図中のマーク、塗りつぶしは統計値、中抜きはシナリオ。

*2: 統計値の出典

作物国際価格は文献 16)。Wheat: US Gulf ports, Rice: Thailand, Maize: US Gulf ports, Soybeans: US Gulf ports。

国際輸送費の 2000 年、2010 年値は小麦の海上輸送費 [17]。2020 年値はバルチック海運指数 [18]を参考に 2000 年値を下回ったとした。

各地域の作物価格は、FAOSTAT の生産者価格 [19]を世界 32 地域別に整理し、将来は図 2.2.2-4 の国際価格シナリオの変化率に準じて変化するとした（必要に応じて微調整）。なお、地域別の生産者価格（D）と国際価格（P）は、式(2.2.2-2)の単純な関係を想定し、国際市場のシェア（S）には、GLaW モデルの分析値を適用した。

$$P_i = \sum_r D_{i,r} \cdot S_{i,r} \qquad (2.2.2\text{-}2)$$

i: 作物，r: 地域

c. NoCC 以外のシナリオの価格・GDP 推計

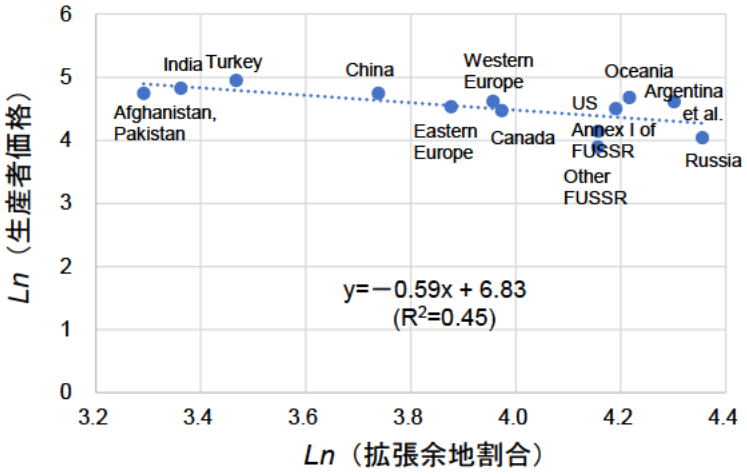


図 2.2.2-5 拡張余地割合と生産者価格の関係（2000 年頃）

*1: 拡張余地割合＝1－総作付面積/潜在的耕地面積

*2: データ出典。生産者価格と総作付面積は FAOSTAT[19] より生産量上位国（世界生産量のカバー率 80%以上）の値。潜在的耕地面積は、GLaW モデルを用いて算出。

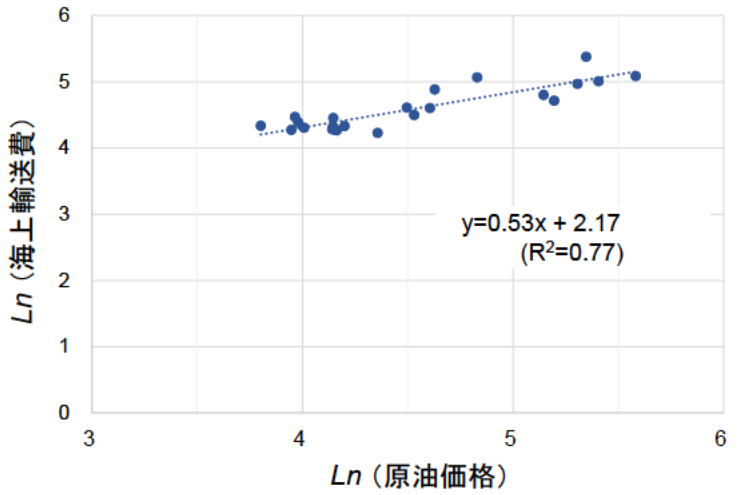


図 2.2.2-6 エネルギー価格と海上輸送費の関係（1987-2010 年）

*1: データ出典。海上輸送費は文献 17)。
平成 14 年度(2002 年度)までは国際穀物理事会（IGC）資料の値。
平成 15 年度(2003 年度)以降はトランプデータサービス（不定期船市況情報提供企業）の北米大陸太平洋岸～日本間の値。
原油価格は文献 16)。Crude oil, average spot price of Brent, Dubai and West Texas Intermediate, equally weighed.

温暖化による GDP ロスの推計には全球平均気温上昇に対するダメージ関数[21]を用いた。緩和策実施による GDP ロスは、DNE21＋モデルで算出されたエネルギーシステム

の CO_2 削減費用に基づき推計した。これは、IPCC レポート [3),22)]にもあるように、排出削減費用が大きいシナリオ程 GDP ロスも大きいという関係を参考にしたものである [20)]。

d. 留意点

本分析で、日本の食料自給率向上目標は特に設定していない。また、国際海事機関（IMO）の国際海運 GHG 排出削減目標、中国・インド等の野心的な再エネ導入目標、氷床の大規模崩壊等破局的事象も特に想定していない。

(4) 分析結果

① 作物の輸入量と価格

2050 年に向け、世界全体では人口増加と社会経済発展に伴って食料需要が増大するため輸出入量が増えるが、日本は一人当たり食料需要が既にほぼ安定から減少傾向にあることに加え、人口が減少し、輸入量は減少する（図 2.2.2-7）。日本の輸入量に占める作物の割合は、トウモロコシが最も多く、小麦、大豆が続く。

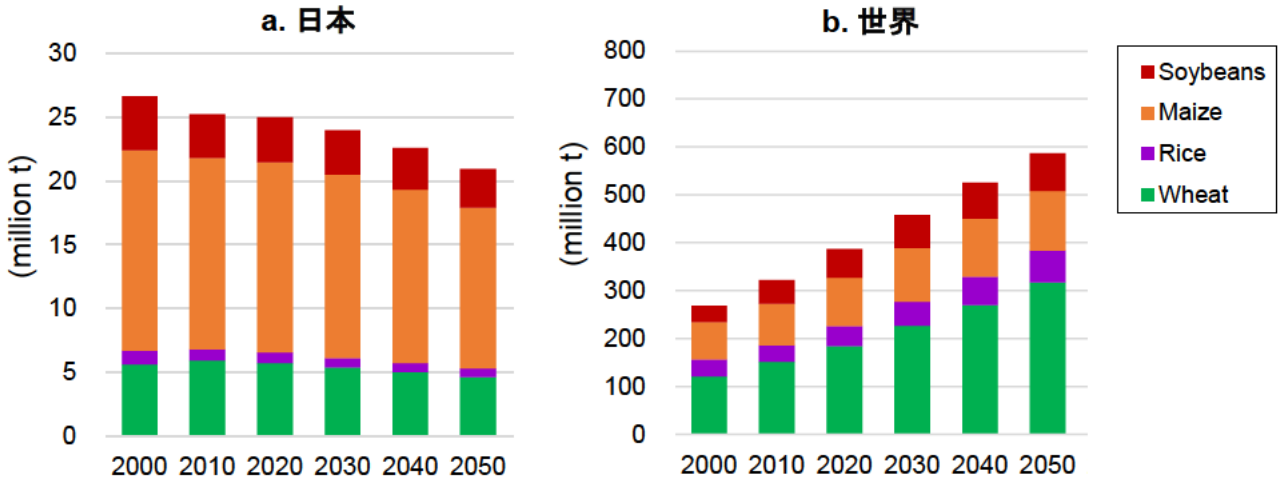


図 2.2.2-7 日本と世界の作物輸入量（NoCC シナリオ）

国際市場シェア（図 2.2.2-8）について、小麦は、米国、西欧の他、カナダ、ロシア等、比較的分散しているが、トウモロコシや大豆は米国、ブラジル、アルゼンチン等が大半を占める。なお、推計に用いた GLaW モデルでは、各地域で作物需要を満たすための土地が不足する場合を除き、国際市場シェアは基本的に現状（少なくとも近年の市場経済の下、合理的とされる状態）を維持すると想定したため、どのシナリオも概ね現状を反映したものとなっている。

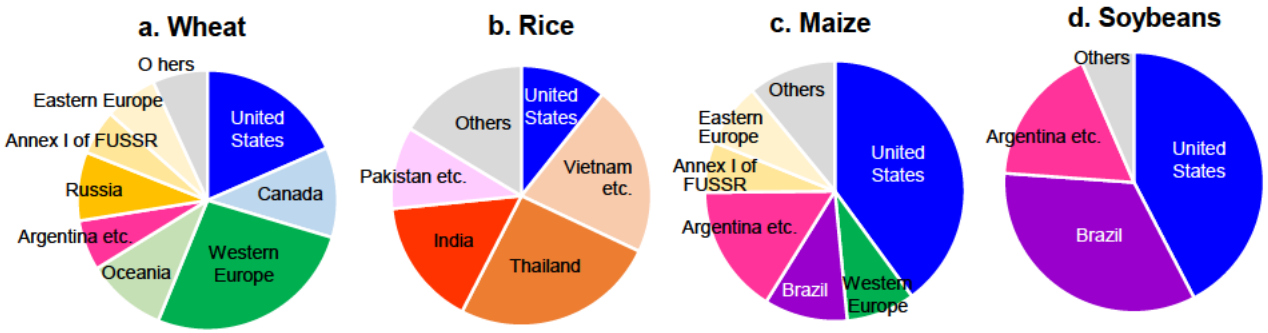


図 2.2.2-8 作物の国際市場シェア（NoCC シナリオ、2030 年）

以上より、食料輸入額の観点では、トウモロコシ、大豆、小麦の国際価格に比較的大きな影響を及ぼす、米国、ブラジル等の土地利用変化と作物生産価格を注視する必要があるといえる。

図 2.2.2-9 に、米国におけるトウモロコシの生産者価格変化率（NoCC シナリオ比）と、それに関連する情報を示す。これより、NDC、DO15 シナリオでは、一次エネルギーとして石炭の使用が抑制される他、ガスは CCS 有が導入される、と分析されていることが読み取れる（図 a)。さらに、2040 年以降、特に DO15 シナリオで DACCS が利用される（図 b)。一次エネルギー供給量に占めるバイオエネルギーの割合は比較的少なく、そのための土地利用面積は限られるものの 2040 年以降、緩和策としての植林が拡大する（図 c)。これらの結果、作物の生産者価格は NoCC シナリオに比べ、トウモロコシの場合 2050 年に NDC シナリオで 8%、DO15 シナリオで 13%上昇すると分析された（図 d)。なお、食用作物の土地面積は、シナリオ間の差が比較的小さい。この理由として、i)食料需要はシナリオに依らず同じと想定、ii)土地利用分析で CO_2 施肥効果や適応策（作付け品種・時期の最適化） を考慮しており、温暖化の悪影響がそれほど大きくない、作物や地域によっては温暖化は単収増に寄与すると分析されることがあげられる。後者は、各種モデル分析の傾向 [1]、すなわち、現在の年平均気温が 10 °C を下回る地域では、 2001-2010 年比 1.5℃以下の全球平均気温上昇（産業革命前から 2001-2010 年までの上昇を 0.8 °C とすると、産業革命前比 2.3℃以下の上昇）に対し、小麦、米、トウモロコシ、大豆等収量は増加すると予測されていることと合致する。ただ、本モデル分析では、日単位の極端な高温・大雨、害虫等の変化は考慮できておらず、この点については緩い評価となっている可能性も考えられ、今後の課題である。

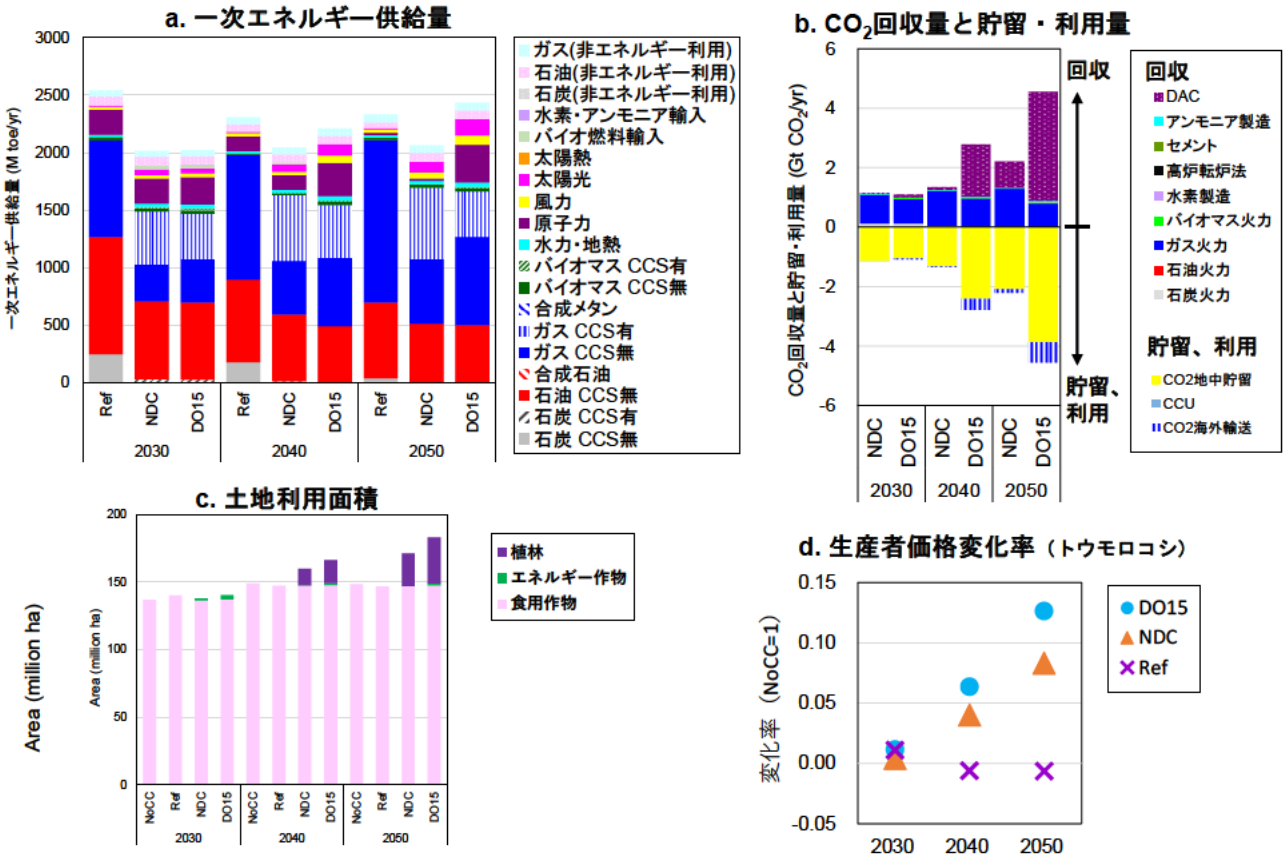


図 2.2.2-9 作物の主要輸出地域のエネルギー供給量、CO_2 回収量と貯留・利用量、土地利用、作物生産者価格の変化率（米国の例）

作物の国際価格（図 2.2.2-10）は、各地域で緩和策用の土地利用が拡大する 2040 年以降の NDC、DO15 シナリオで顕在化し、トウモロコシの場合、2050 年に、NoCC シナリオより NDC シナリオで+5%、DO15 シナリオで+15%と推計された。

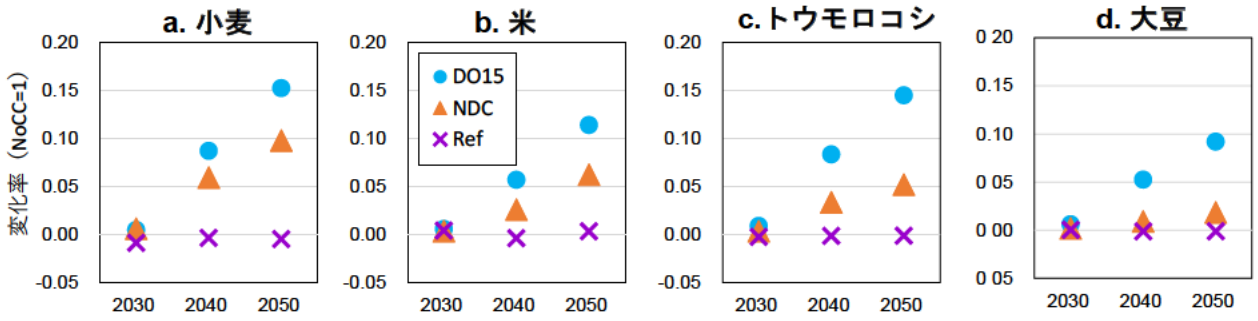


図 2.2.2-10 作物国際価格の変化率

② 国際輸送費（海上輸送費）

図 2.2.2-11 に、国際海上輸送費の（NoCC シナリオ比）変化率を示す。2040 年以降の DO15 シナリオで、国際海運用エネルギー（重油）の価格上昇に伴い、海上輸送費が NoCC シナリオより 80%以上上昇すると分析された。

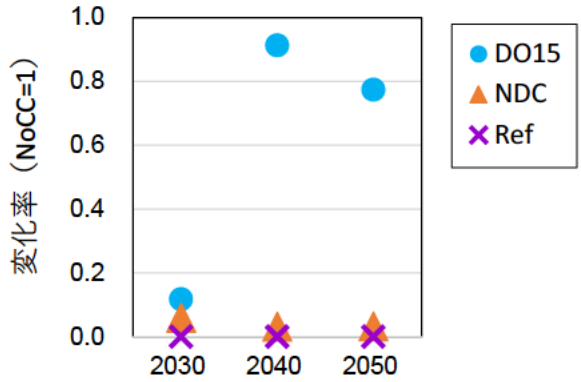


図 2.2.2-11 国際輸送費（海上輸送費）の変化率

③ GDP ロス

表 2.2.2-2 に 2050 年の GDP ロスとして、日本と参考までに世界平均の値を示す。例えば、2050 年に+2.3℃の Reference シナリオに対し、温暖化影響 GDP ロスの世界平均値 1.0%は、IPCCAR6[1)]の推計例の範囲内にある。また、DO15 シナリオに対する緩和策 GDP ロスの世界平均値 2.6%も同様である[3)]。日本は温暖化影響 GDP ロス、緩和策 GDP ロスともに世界平均のそれらより小さい結果となった[1]。なお、GDP ロスの推計には、温暖化影響の貨幣換算、緩和策による経済活動への波及想定、地域区分等による不確実性が存在する。この点に留意し、今後、他モデルとの比較・検討も必要である。

表 2.2.2-2 2050 年の GDP ロス（NoCC シナリオ比，%）

シナリオ	日本		世界平均	
	温暖化影響	緩和策	温暖化影響	緩和策
Reference	0.8	—	1.0	—
NDC	0.6	0.8	0.8	1.2
DO15	0.5	1.8	0.6	2.6

④ FSI

以上の数値を基に算出した FSI を図 2.2.2-12 に示す。時系列トレンド（図 a）によると、2000 年に日本の小麦・米・トウモロコシ・大豆の輸入額は GDP の 0.08%に相当した。2010 年には新興・途上国の食料需要増大、市場への投機資金流入、ロシア等での干ばつ等複数要因のため作物価格が上昇し、FSI も 0.12%まで上昇。2020 年は COVID19 の影響を受けたものの 0.1%まで改善した。今後について、2030 年に向け、FSI は気候変動緩和のレベルに依らず 0.11%まで上昇する。すなわち日本の食料セキュリティは 2010 年程ではないものの悪化すると分析された。FSI 上昇の主要因は、ロシアのウク

[1] 緩和策評価の結果は 6.3 節に詳述する通り、NDC、DO15 シナリオでは 2030 年に Reference シナリオに比べ日本の一次エネルギー供給量は約 30%減少する。また、化石燃料依存が低減する一方、太陽光は増大する。2050 年に DO15 シナリオで、合成メタン、バイオ燃料、水素及びアンモニアの輸入が、日本の正味ゼロ達成に経済合理的な対策と分析された。

ライナ侵攻による供給網混乱に伴い作物価格が上昇すると想定した（図 2.2.2-4 参照）ことにある。2030 年以降、FSI は次第に低減し、NoCC シナリオでは、2050 年に 2000 年程度まで改善する。作物国際価格の漸減と輸入量減少に伴う作物輸入額減少、及び GDP 成長による。

Reference、NDC、DO15 シナリオの、2030 年以降の NoCC シナリオとの差異（図 2.2.2-12 b）については以下のように推計された。Reference シナリオでは、温暖化影響 GDP ロスのため FSI が NoCC シナリオより若干悪化するものの大差はみられない。NDC シナリオでは緩和策 GDP ロスと緩和策による作物国際価格の上昇（作物輸出国である、米国、ブラジル等でのエネルギー作物生産や植林の拡大に伴う生産者価格上昇を反映したもの）のため、FSI は NoCC シナリオ比 2030 年に+2%、2050 年に+6%となる。DO15 シナリオでは、さらに、エネルギー価格上昇に伴う海上輸送費上昇も加わり、FSI は NoCC シナリオ比 2030 年に+3%、2050 年に+23%となる。

これらの結果より、NDC、特に DO15 シナリオの緩和策は、温暖化影響の低減効果を考慮しても、2030 年以降の日本のフードセキュリティ改善を鈍らせる可能性があると考えられる。

参考まで、温暖化影響が大きいケースも想定し感度分析を行った。ここで、温暖化影響 GDP ロスは、IPCC WG2 AR6 で引用された研究例のうち、非常に高い GDP ロスを示す Burke et al. (2018) [23]の値に着目し、上記標準ケースの世界平均 GDP ロスが Burke et al. (2018)[23]の中間値に合致するように、各シナリオ各時点の全球平均気温上昇値に応じて 16～18 倍に拡大した。また、作物国際価格の上昇率（NoCC シナリオ比）は、モデル比較研究 [5]で温暖化による価格増大率が最も大きいモデルの値を参考に、例えば 2050 年に Reference シナリオで小麦 +18%、トウモロコシ +23%、大豆 +15%とした。温暖化影響大ケースの FSI を図 2.2.2-13 に示す。温暖化影響を大きく見込んだため、2030 年以降の FSI は標準ケース（図 2.2.2-12）に比べ増大する。但し、Reference シナリオより NDC、DO15 シナリオで、FSI が大きい点は、標準ケースと同じである。つまり、温暖化影響が大きいと想定しても、NDC、DO15 シナリオの緩和策が 2030 年以降の日本のフードセキュリティ改善を鈍化させる可能性があると、標準ケースと同様の結論が得られた。

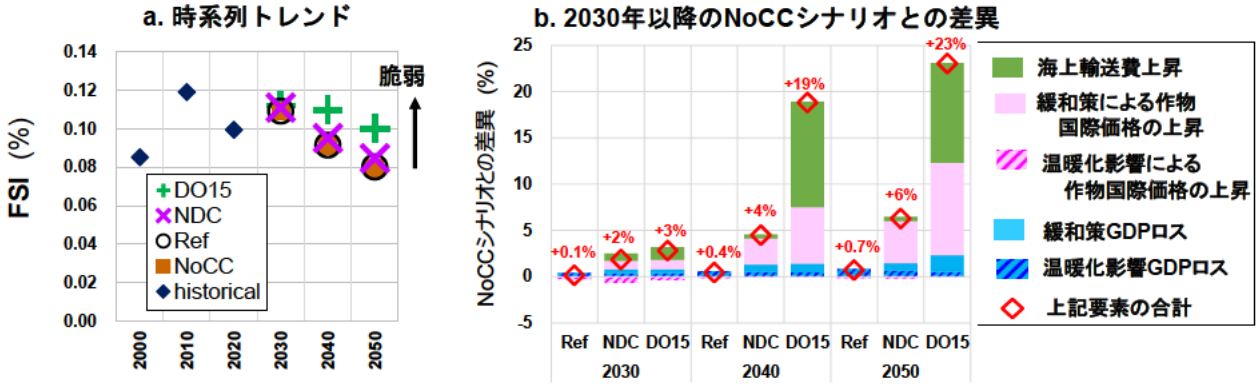


図 2.2.2-12 日本の FSI：a. 時系列トレンド、b. 2030 年以降の NoCC シナリオとの差

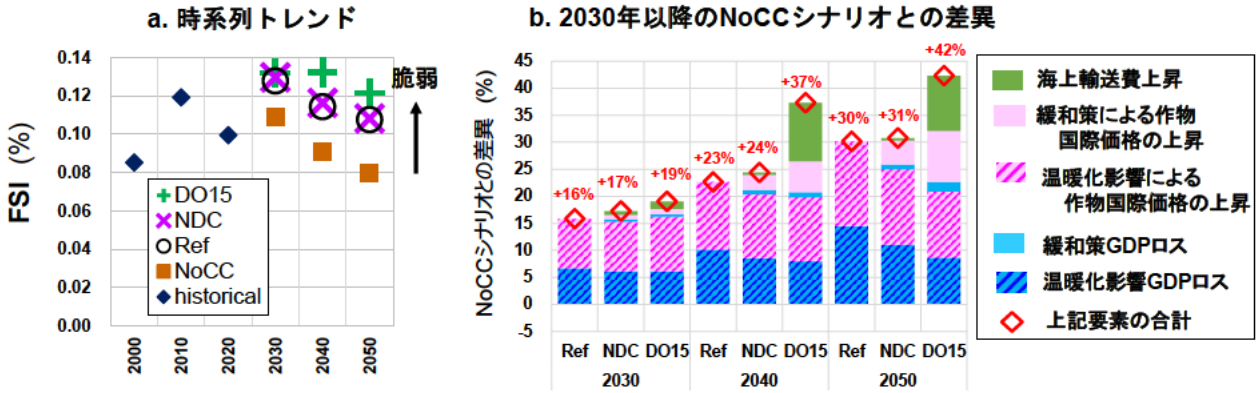


図 2.2.2-13 日本の FSI：a. 時系列トレンド、b. 2030 年以降の NoCC シナリオとの差異（温暖化影響が大きいケース）

⑤ 国産品と輸入品の価格

最後に、本分析の国産品と輸入品の価格を比較する。図 2.2.2-14 に示すように、輸入品は国際輸送費を考慮しても、国産品より格段に安いと分析されている。フードセキュリティを高めるために自給率を高めるという見方もあるが、経済合理性を踏まえたものでなければ、むしろ国民の負担が増える可能性も考えられ留意が必要といえる。

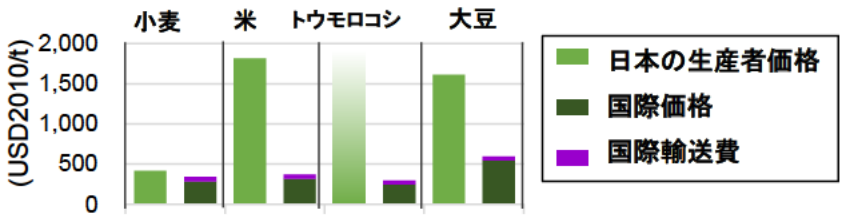


図 2.2.2-14 国産品と輸入品の価格（NDC シナリオ、2050 年）

(5) まとめ

「GDP に対する主要作物の輸入額」で定義される FSI に基づき、気候変動と緩和策の両影響を考慮し、世界の正味ゼロ排出追求が日本のフードセキュリティに及ぼす影響を分析した。主な結果は、以下のようにまとめられる。

ロシアのウクライナ侵攻に伴う供給網乱れや資源高騰の影響が次第に縮小しつつも、2030 年の作物国際価格は 2020 年より高いとすると、将来の、食料需要減少に伴う作物輸入量減少、及び GDP 成長を見込んでも、日本のフードセキュリティは 2030 年に 2020 年より悪化する。

2030 年以降、仮に温暖化や緩和策の影響が無ければ（NoCC シナリオの場合）、日本の食料需要減少、GDP 成長に加え、作物国際価格の漸減により、フードセキュリティは次第に改善される。特段の緩和策がなく温暖化が進んだ場合（Reference シナリオ）、温暖化影響 GDP ロス等のため、日本のフードセキュリティは NoCC シナリオより若干悪化する。NDCs や 1.5℃目標に相当するシナリオでは、Reference シナリオより温暖化影響は低減されるものの、米国・中南米等作物輸出国におけるバイオエネルギーや植林の拡大が土地利用競合、作物生産者価格上昇をまねき、作物国際価格の上昇につながる。さらに、1.5℃目標下では、エネルギー価格の上昇に伴い海上輸送費も上昇する。このため FSI は特に緩和策を行わない Reference シナリオより悪化する。つまり、NDCs、特に 1.5℃目標達成に向けた緩和策実施は、2030 年以降の日本のフードセキュリティ改善を鈍化させる可能性がある、つまりトレードオフの関係があると示唆された。

なお、各種シナリオ、パラメータに対する感度分析や、他の指標との比較・検討が、引き続き必要である。仮に、本分析を基に日本のフードセキュリティ悪化への備えをあげるとするなら、食料利用効率の向上（フードロス削減等）により、輸入量を合理的な範囲で縮減する。これは、特に国際価格が上昇する 2030 年まで、緩和レベルに依らず取るべき対応と考えられる。2030 年以降の緩和策実施による作物や輸送エネルギーの価格上昇、GDP ロスの影響を出来るだけ小さくするためには、バイオエネルギーや植林より土地利用強度が低く、手頃な排出削減策を開発し、それらを日本に限らず作物輸出国等で利用可能にすることがあげられる。

参考文献（第 2.2.2 節に関するもの）

1) IPCC WG2: Sixth Assessment Report: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Cambridge University Press (2022)
2) 農林水産省: 食料の安定供給に関するリスク検証 (2022)
3) IPCC WG3: Sixth Assessment Report: Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press (2022)
4) IPCC: Special Report on Climate Change and Land (2019). https://www.ipcc.ch/srccl/cite-report/ (accessed 2023-01-23)
5) Hasegawa T et al.: Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. Nature Climate Change 8-8, 699-703 (2018)
6) 農林水産省: 2050 年における世界の食料需給見通し(2019)

7) Fujimori S et al.: A multi-model assessment of food security implications of climate change mitigation. Nature Sustainability, 2-5, 386-396 (2019)
8) RITE: 平成 23 年度 ALPS 成果報告書, 317‐331 (2012)
9) Schmidhuber J, Tubiello FN: Global food security under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(50), 19703-19708 (2007)
10) 大賀圭治: 食料安全保障とは何か―日本と世界の食料安全保障問題―, システム農学, 30-1, 19-25 (2014)
11) 農林水産省: 食料自給率 (accessed 2022-5-8)
12) 食料安全保障に関する研究会: 我が国の「食料安全保障」への新たな視座 (2010).https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/food_security/pdfs/report1009.pdf (accessed 2022-11-20)
13) 農林水産省: 平成 18 年度 食料・農業・農村白書 (2006) (accessed 2022-4-25)
14) O'Neill B Cet al.: The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century, Global Environmental Change, 42, 169–180 (2017)
15) World bank: Commodity market outlook (2022). https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets#3 (accessed 2022-7-15)
16) World bank: Commodity Price Data (The Pink Sheet) Updated on June 02, 2022.
17) 農林水産省: 麦の需給に関する見通し, 参考統計表 2 (2013), https://www.maff.go.jp/j/seisan/boueki/mugi_zyukyuu/pdf/0328_toukei2.pdf (accessed 2022-10-7)
18) Trading Economics: Baltic dry index, https://tradingeconomics.com/commodity/baltic (accessed 2022-10-7)
19) FAO: FAOSTAT database (accessed 2020-4-17)
20) RITE: 令和 3 年度 ALPS 成果報告書, 587‐610 (2022)
21) Nordhaus, W D: Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment, PNAS, 107-26, 11721-11726 (2010)
22) Clarke L et al.: Assessing Transformation Pathways, Climate Change 2014: Mitigation of climate change, 413–510 (2014)
23) Burke M et al.: Large potential reduction in economic damages under UN mitigation targets. Nature, 557(7706), 549–553 (2018)

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

2.3.1 はじめに

2050 年頃までの CN 実現を宣言する国が増大し、例えば、IEA WEO2022[1)]の APS (Announced Pledges Scenario)では、2100 年までに「2℃を十分に下回る」水準を達成できる見込みとなっている。一方で、多くのプレッジされた長期目標はあくまで意欲的な目標であって、実現が約束された世界ではない。それらの目標には暗黙的に将来に向けた広範なイノベーションへの期待が含まれた目標と考えられる。気候変動対策関連のイノベーションが十分に進まない状況で、短中期的に厳しい排出削減対策を行って、エネルギーコストを大きく上昇させてしまえば、各国、各企業のイノベーション誘発への対応能力を損ねてしまうリスクもある。そうなれば、長期的には却って排出削減を遅らせてしまいリスクを増大させてしまう恐れもある。

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

2021 年 10 月にはエネルギー基本計画、地球温暖化対策計画、パリ協定長期戦略が改定された。他方で、これまでの計画だけでは、需要サイドのエネルギー転換の道筋や経済社会・産業構造全体をクリーンエネルギー中心としたものへと転換していくために必要となる具体的な政策対応が必ずしも明らかでなかったことを踏まえ、成長が期待される産業ごとの具体的な道筋や需要サイドのエネルギー転換、クリーンエネルギー中心の経済社会・産業構造の転換に向けた政策対応などについてクリーンエネルギー戦略において整理し、2022 年 5 月に中間整理として策定された[3)]。岸田総理は、水素・アンモニア等の普及促進を含め、今後 10 年間に 150 兆円の投資の呼び込みのため、20 兆円規模の GX（グリーントランスフォーメーション）経済移行債発行を示唆した。

2022 年 7 月には、GX 実行会議が発足し、新型原子炉の新設・リプレースを含む原子力の活用が表明され、その後の実行会議や審議会等での議論を踏まえ、年末には GX 基本方針が取りまとめられ、2023 年 2 月には閣議決定がなされた[4)]。ここでは、今後 10 年を見据えたロードマップの全体像が示され、水素・アンモニア、蓄電池産業、脱炭素目的のデジタル投資、次世代革新炉など 20 の分野・産業における目標・戦略、GX 移行債を活用した投資の内容などが、今後の道行きとして具体的に例示されることとなった。

GX 経済移行債は、時間遅れをもって導入される見通しの GX-ETS におけるオークションスキームと炭素に対する賦課金で償還されていくものと見られる。GX 経済移行債を介した先行的な投資によって、いち早く気候変動対策のイノベーションを誘発し、国際的な市場も獲得できるかが、「経済と環境の好循環」を実現する鍵となると考えられる。具体的な技術のロードマップ、そしてそれを実現するための GX 経済移行債活用を含めた関連政策の具体化は、精緻なものとなっている。一方で、イノベーションは、想定しなかった分野や少し逸れたところで誘発されることも多い。精緻過ぎるがゆえに、対象から逸れたところで、世界的にイノベーションが起きて、日本が取り残されるようなことがないような配慮も必要と考えられる。

気候変動に対応する長期イノベーションの誘発、投資促進政策が政府主導で進められる中、より実効性の高い政策の具体化に向け、これまでの政策による実績、成果をレビューするとともに、研究開発から事業化に至るプロセスにおけるイノベーション創出事例を調査し、政策との協調の枠組みを検討していくことも重要である。イノベーション創出の担い手である企業、スタートアップ、さらには大学や研究機関にとって望ましい政策枠組みはどのようなものなのか示唆を得るべく、関係者に対して事例調査を行った。カーボンニュートラル実現において重要と見られる、水素系エネルギーや CDR 関連の技術動向やグリーンイノベーション基金関連の動向等については、第

5.1 節で記載した。本節では、以降において、より長期の技術開発が必要と見られる、核融合発電技術について、イノベーションへの示唆を中心にまとめた。

2.3.2 最新の核融合技術開発動向と、そこから得られる今後の取り組み示唆

技術開発におけるイノベーションの事例の一つとして、核融合技術開発の最新動向とその課題について理解を深めることを目的として、同分野の専門家へのヒアリング、意見交換を通じ、今後の日本のイノベーションのあり方を考える上でのポイントを調査した。

- 現在の技術開発動向として、50 万 kW 級核融合実験炉 ITER（イーター）の着火が間近であり、ITER の次は原型炉が計画中である。ここでは核融合発電の実証と経済性の見通しを確認する予定だが、2025 年での実現規模技術開発への移行判断、さらに 2035 年には建設段階への移行判断を行う開発スケジュールとなっている。
- 原型炉を実現するための要素技術はほぼ手にしている状況であるが、このような技術開発をベンチャーが行う次元ではない。ただし、ベンチャー企業の新たな技術により、開発が効率的に進むことは重要である。一方でベンチャー企業が資金調達を行うにあたり、正確な情報が公開されていないことが問題点として挙げられ、資金が本当に有効な分野・会社に投資されていない面も見られることから、国のプロジェクトとして進めることの重要性が指摘された。
- また、中小企業が良い技術を持っていたとしても、その技術が核融合炉のどこに有効に活用されるのかを知ってもらうための宣伝が不十分であるのが実情である。日本のベンチャー企業の競争力を増すためには、まずは政府予算をつけて原型炉設計センターから共同開発のような形で募集をかけて、一緒に開発に加わってもらうことが重要であるとの指摘もなされた。技術全体がよくわかっている専門家と一緒の舞台で検討を進めることができる機会の重要性が挙げられた。
- アメリカでのベンチャー企業の成功事例として、スペースX社が良く取り上げられるが、これも NASA のアポロ計画やスペースシャトルでの技術が存在していたから、新規技術開発につながったのであり、核融合技術に関してはベンチャー企業が開発をできる段階にまで到達していないというのが実情である。
- 核融合は福島の原発事故のようになることはなく、廃棄物は 100 年間で 100 万分の 1 まで減衰し、再利用も可能である。また実用炉では発電原価として 10～12 セント/kWh と予測され、低コストの核融合炉へのイノベーションはいろいろとある。
- 技術面でも、日本は原型炉を単独でも建設できる技術はすべて持ち合わせているが、日欧が投資に躊躇する中で、中国が原型炉計画を進めようとしている。現時点では技術面で日本の方が上位であるが、ITER の成功まで待っていると、

中国が先に核融合炉を開発し、この分野での優位性を追い越されてしまう可能性は高い。

- ITER 建設も国際協力で実行できたが、この方式にはメリットとデメリットがある。国際協力のおかげで日本単独の資金負担は 3,900 億円程度でできたが、総額で見ると、仮に一国で建設した場合よりも 2 倍ほどのコストがかかっており、重複分や無駄があることも事実である。一方で、核融合技術関連予算は、ITER の国際協定がなければ続けることができなかったかもしれないので、建設地がどこであろうと、まずは ITER 建設を行うしかなかった状況である。ただ日本国内の立地に建設することが望ましかった。
- 技術関係者の、必要な予算額への感覚が小さくなってしまっており、ネガティブ思考に陥ってしまっていることも課題となっている。
- 日本も政府主導で早く原型炉段階に入るべき状況の中、政府としても原発再稼働を表明しており、SMR の新増設まで言及していることから良いタイミングとなっている。

2.3.3 イノベーション関連のまとめ

2050 年カーボンニュートラル目標の達成に向け、地政学リスクを考慮しつつ温暖化対策技術に関連する様々なイノベーションを早期実現する必要性が高まっている。本節では、イノベーション創出に向けた官民の役割やベンチャー企業などによる活発な活動を促進しうる環境のあり方について、専門家へのヒアリング調査に基づく検討を行った。特に核融合技術といった次世代革新炉の分野での開発・建設に関しては国主導のもとで集中的な研究開発投資と、事業を促進するための環境整備が大事であり、国際状況を注視しながら競争・連携を通じた開発促進の重要性が改めて認識された。

参考文献（第 2.3 節に関するもの）

1) IEA；World Energy Outlook2022
2) 経済産業省；2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略
https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html
3) 経済産業省；クリーンエネルギー戦略　中間整理
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/008_01_00.pdf
4) 経済産業省；GX 基本方針閣議決定
https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html

第3章　グリーン成長の限界と機会

気候変動影響被害低減のため、CO_2排出削減を進める必要があるが、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」もしくは「経済と環境の好循環」）することが重要である。

政府は「経済と環境の好循環」を実現するとし、2023 年 2 月には「GX 実現に向けた基本方針」を閣議決定した。その中では、20 兆円規模とされる GX 経済移行債を活用し、企業の気候変動対策の技術開発、技術普及の支援に回し、それを時間を遅らせて、炭素に対する賦課金と排出量取引制度（オークションは 2033 年頃からの導入）で回収するというスキームが提示されている。ただし、先行する支援で日本が競争力をつけられなければ、結局、後の負担だけが残るリスクも存在している。いかに、先行される支援の期間で、競争力を有した技術、製品、サービスを提供できるかにかかっている。他方、第 2 章でも指摘したように、世界は長期の意欲的な目標は掲げつつも、2030 年の NDCs では CO_2 限界削減費用（炭素価格）が国間で大きく異なるような状況であり、その時点で、国際的に低炭素、脱炭素技術、製品の大きなマーケットが存在しているのかという懸念もある。「経済と環境の好循環」に対する、このような課題認識はあるものの、本章では、これまでの実績はどうだったのか、どのような状況にあるのか等について、実証的な分析を中心に、「グリーン成長」もしくは「経済と環境の好循環」にアプローチする。

3.1 節でグリーン成長関係の概括を行った後に、3.2 節において、日本経済の長期エネルギー生産性変化における構造要因の分析を行った。3.3 節では、日本産業のエネルギー生産性変化の測定を行った。3.4 節では、足元における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、ESG 投資、グリーンボンド等、サステイナブル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

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

これまで、経済成長と CO_2 排出との関係性やデカップリングに関する分析や評価を実施し、報告を行ってきた。昨年度の報告 [1)]でそれらの分析・評価の主要点をまとめた

ように、一部の国では経済成長とCO_2排出とのデカップリング傾向が見られるものの、それは主に先進国におけるエネルギー多消費的な製品生産の海外への移管等を通して、それらの国外での排出としてカウントされているためで、世界全体での CO_2 はあまり削減されず、グローバルでは依然として経済と CO_2 排出がカップリングしている状況にあると言える。本節では、世界における GDP と CO_2 排出量等との長期的なデカップリング・カップリングに関する状況について概観し、さらに世界の CO_2 排出に関する現状について記載する。

3.1.1 世界の経済成長と CO_2 排出の関係

図 3.1.1-1 に、1971～2020 年における世界 GDP とエネルギー起源 CO_2 排出量との関係を示す。分析には、従来の報告と同様に、IEA による統計データ（文献 2),3)）を用いた。両者の間には強い正の相関関係が見られる。2013～2016 年にかけては、世界の CO_2 排出量は横ばい傾向にあったが、2017 年には再び上昇に転じた。長期の傾向で見ると、2009～2013 年の間の急上昇が 2013～2016 年の間で調整されたと見ることができ、その背景としては、中国を中心とする鉄鋼、セメントの生産調整等の影響が大きいが、これに、米国シェールガス生産の増大により、経済自立的に石炭からシェールガス（天然ガス）への燃料転換が 2005 年頃から進んできている影響が加わっての傾向と推計される（文献 4)）。2017 年、2018 年においては再び上昇し、2019 年は前年とほぼ同水準だった。そして、2020 年は COVID-19 のパンデミックにより、世界の CO_2 排出量は大幅に低減した。しかし、経済活動の停滞により GDP の落ち込みも大きかった。第 1 章でも述べたように、CO_2 排出の大幅な低減は経済のマイナス成長と引き換えに実現したのであり、グリーン成長が実現したわけではない。

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 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る。

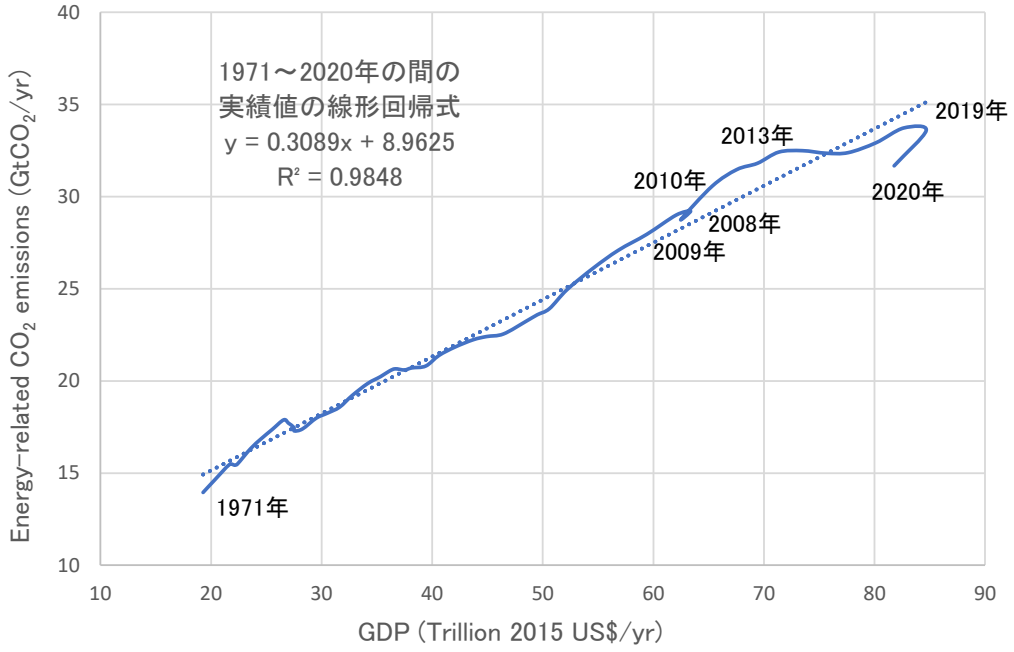


図 3.1.1-1 世界の GDP とエネルギー起源 CO_2 排出量の関係（1971～2020 年）

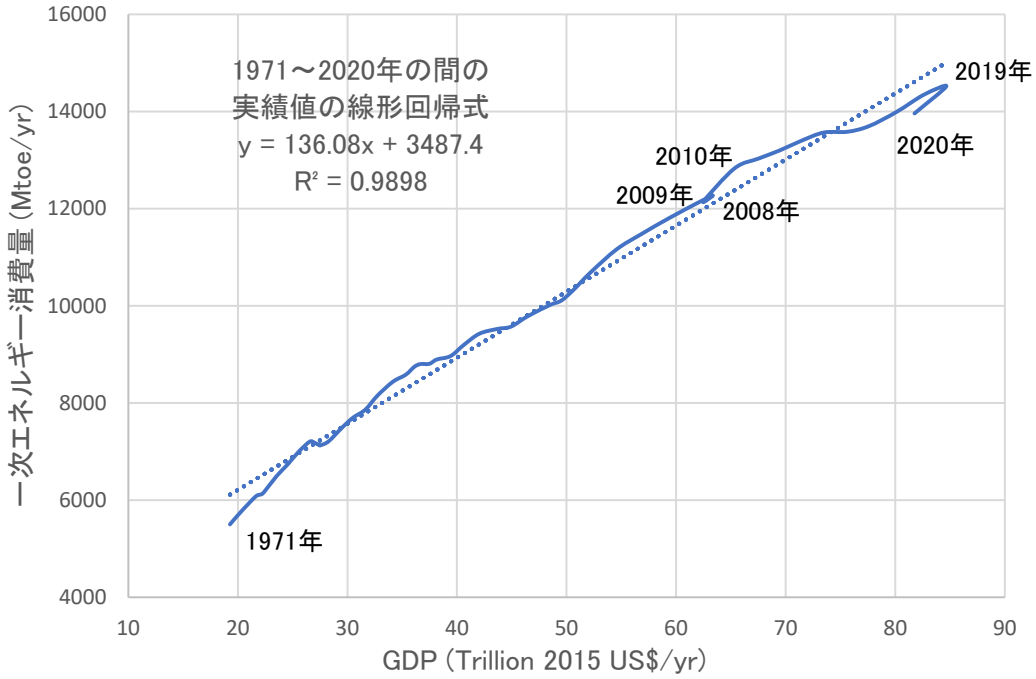


図 3.1.1-2 世界の経済成長と総一次エネルギー供給量の関係（1971～2020 年）

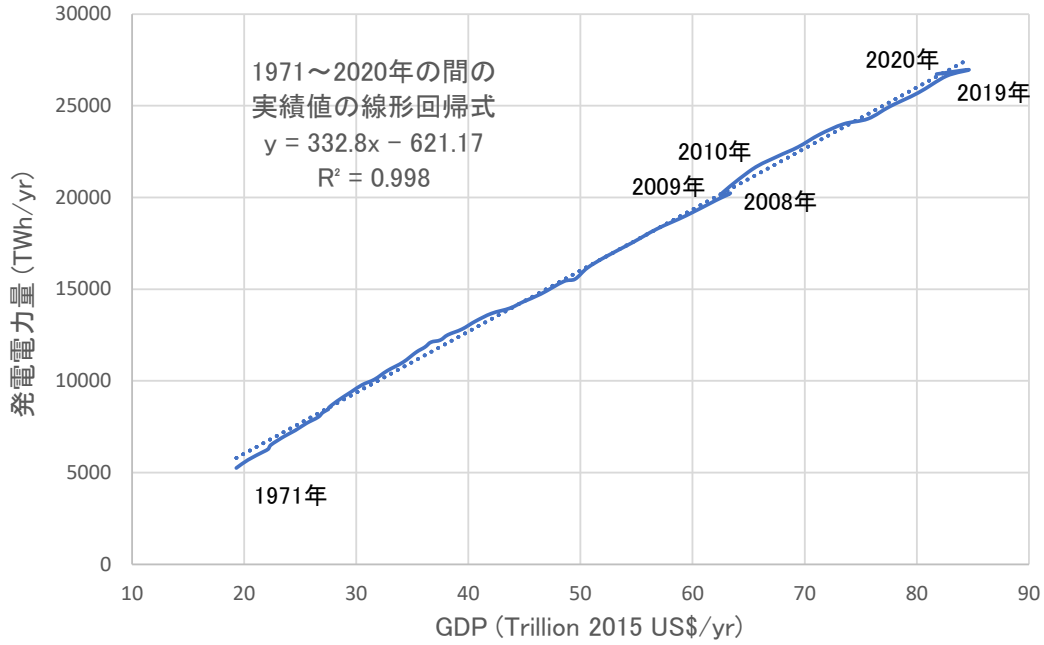


図 3.1.1-3　世界の経済成長と発電電力量の関係（1971～2020 年）

3.1.2　世界の CO_2 排出等についての近年の状況

2021 年以降の世界 CO_2 排出について、IEA の CO_2 排出に関するレポートによると、2021 年には、世界経済は金融刺激策やワクチンの展開等により急速に回復し、世界 CO_2 排出量は 2020 年より 6%増加した（文献 5)）。2022 年については、世界エネルギー起源 CO_2 は前年よりは緩やかな伸びとなったものの、0.9%増加した（文献 6)）。IEA[6)]の CO_2 排出量の増加率、および IMF[7)]の GDP 成長率を用いて、2021 年と 2022 年についてデータを補完し、世界 GDP と CO_2 排出量の関係をグラフにしたものを、図 3.1.2-1 に示す。世界 GDP とエネルギー起源 CO_2 排出量との間には、強い正の相関関係が見られる。一方で、長期の線形トレンドの下方で推移をしている。中国は、2022 年まで厳格な COVID-19 対策を採ってきたことも影響している可能性がある。引き続き、今後の動向を確認していくことが重要である。

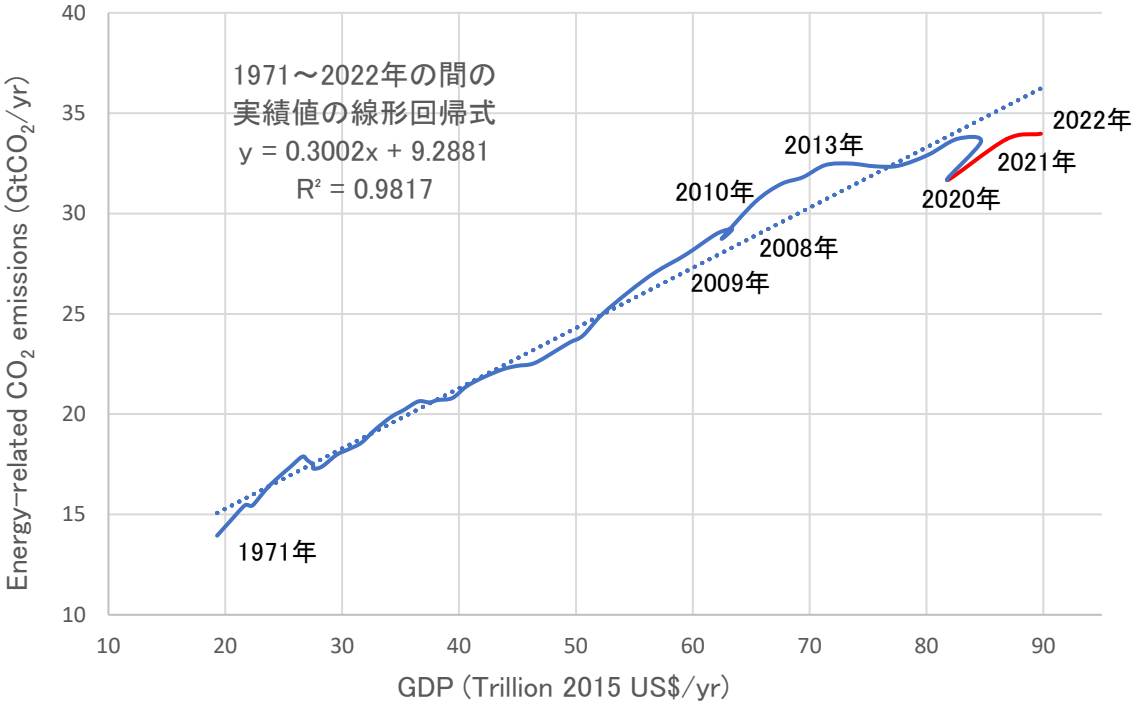


図 3.1.2-1　世界の GDP とエネルギー起源 CO_2 排出量の関係（1971～2022 年）

（注）2021 年、2022 年（赤線部分）については、文献 6),7)の増加率を用いて補完（ただし 2022 年の GDP 成長率は Estimate）

文献 6)では、2022 年の世界エネルギー起源 CO_2 排出量に関連する状況について考察している。2022 年はエネルギー価格ショック、上昇するインフレ、燃料サプライチェーンの混乱等に特徴付けられる年であった。ロシアのウクライナ侵攻による影響で供給が制限されたため、多くの国でガスから石炭への切替があったにもかかわらず、世界の CO_2 排出増加は懸念されていたよりも少なかった。排出が抑制された要因としては、再エネ、EV、ヒートポンプ等のクリーンエネルギー技術により排出低下、また主に中国、EU における産業の減産がある。

また、同レポートでは、経済成長と CO_2 排出との関係については、2022 年の CO_2 排出増加は GDP 成長率 3.2%より十分に低く、2021 年の急激なリバウンドが起こる前の 10 年間における CO_2 排出と経済成長のデカップリング傾向を取り戻した、としている。昨年の報告でも指摘したが、表 3.1.2-1 にあるように、過去約 20 年間と比べ最近の 10 年において GDP 弾性値が下がっており、GDP の上昇ほどには CO_2 排出量が増加しない傾向が強まっていると言える。大きな傾向としては、第 1 次産業から第 2 次産業に移行する過程でインフラ形成が伴って大きく CO_2 原単位は大きく上昇し、その後、第 3 次産業への移行の中で、CO_2 原単位は低減する傾向にある。その中で、2000～2013 年頃の排出急増とその後の排出増の抑制は、中国における生産活動量の変化によるところが大きかった。この後、インド等の人口が大きい国がそれに追従することも考えられる。まだ、インフラ形成が不十分な人口が大きな国は多く存在しており、それらの国で第 2 次産業の急速な進展がどのタイミングで起こるかによって波があると考えら

れ、短期の動向からだけをもって、長期にわたる将来的な傾向を判断するには難しいところもある。

表 3.1.2-1　CO_2 排出量の GDP 弾性値

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

（出典）文献 1)

3.1.3　過去の IPCC 報告書のシナリオと世界 CO_2 排出量の実績値との関係

本節では、IPCC の 2007 年の第 4 次評価報告書（AR4）と 2014 年の第 5 次評価報告書（AR5）時の世界排出量の見通しと排出量の実績値とを比較した。図 3.1.3-1 は、2007 年公表の AR4 における特段の CO_2 排出削減対策をとらないとしたベースラインにおける世界の CO_2 排出量の推移である。気候変動対策をとってきたにも関わらず、当時のベースライン排出量推計の上限値に近い実績となっている。また、図 3.1.3-2 はより近い時点の 2014 年公表の AR5 における CO_2 排出量と GHG 排出量のシナリオと、2019 年の排出量実績との比較である。ここでも、排出レンジのほぼ上限が実績値となっている。既に各国が政策の強化を進めており、これらは少し時間遅れをもって効果が表れると考えられるため、将来的には、ベースラインの上限からは乖離し、低減していくことが期待されるものの、少なくとも、現状では排出削減は進んでいないばかりか、むしろ、過去の推計よりも大きくなっている。第 1 章の図 1.1.1-2 で見られるように、主要先進国は排出低減傾向があるものの、産業の移転等が伴って、その低減分を吸収しながら、一層増加していることによると推察できる。因みに、AR5 におけるシナリオの 2005～2020 年の間の世界の実質 GDP 見通しは 2.3～3.7%/yr（平均 3.0%/yr）であったが、2005～2019 年の GDP 実績値は 2.8%/yr であり、GDP は低位になったにも関わらず、実績の排出量は増大していることも認識しておく必要がある。世界全体では、経済成長と CO_2 もしくは GHG 排出量のデカップリングには遠い状況にあり、将来のモデル推計においても、国間の産業の移転、排出のリーケージについて、十分留意する必要が示唆される。

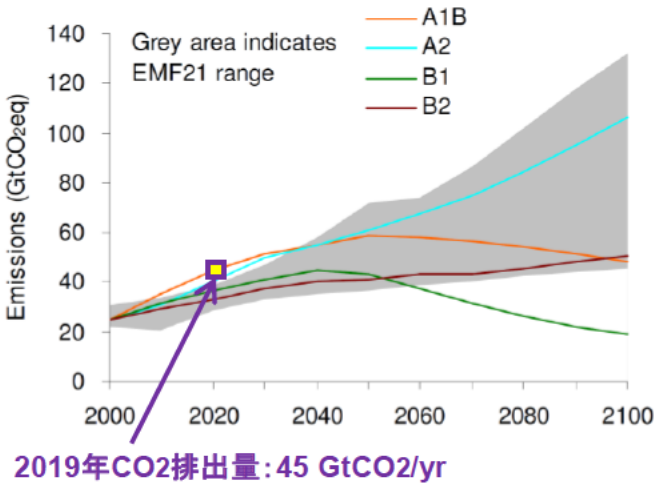


図 3.1.3-1 IPCC AR4 (2007)におけるベースラインの世界 CO_2 排出量の見通しと 2019 年 CO_2 排出量実績

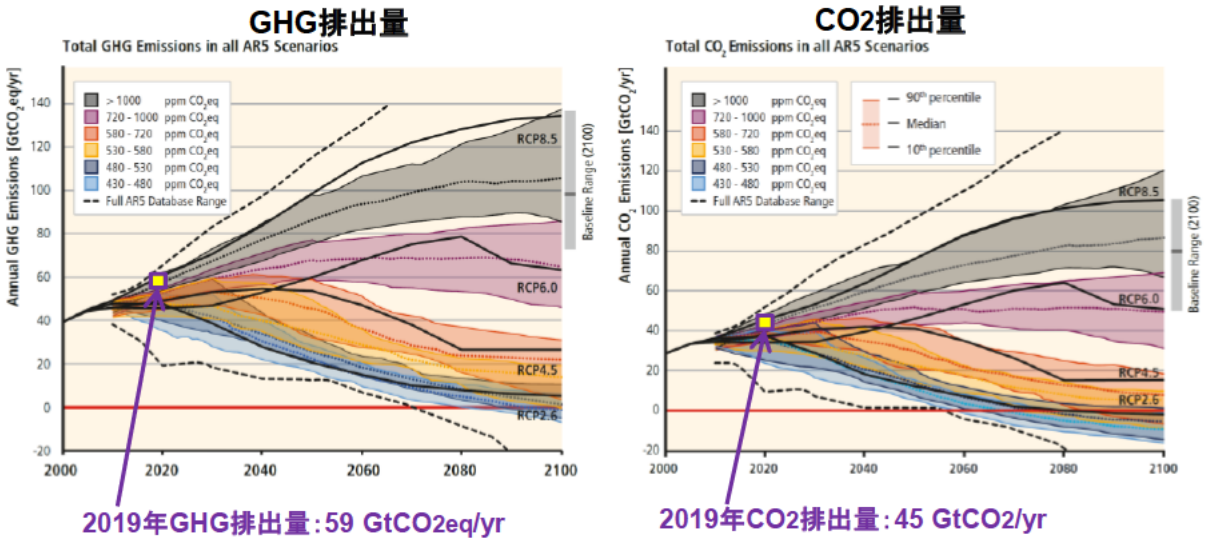


図 3.1.3-2 IPCC AR5 (2014)におけるベースラインの世界 GHG 排出量の見通しと 2019 年 CO_2 排出量実績

参考文献（第 3.1 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）令和 3 年度成果報告書 (2022)
2) IEA: Greenhouse gas emissions from energy 2022 (2022)
3) IEA: World Energy Balances 2022 (2022)
4) 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 年度成果報告書 (2020)
5) IEA: Global Enery Review: CO_2 Emissions in 2021 (2022)
6) IEA: CO_2 Emissions in 2022 (2023)

7) IMF: World Economic Outlook Update: Inflation Peaking amid Low Growth (2023)
8) IPCC (2007) Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
9) IPCC (2014) Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.

3.2 日本経済の長期エネルギー生産性変化における構造要因の分析

3.2.1 はじめに

グリーン成長の可能性を探るため、本節と続く 3.3 節では、日本の経済成長および産業構造とエネルギー消費の経験における実証的な分析を行う[1]。エネルギー投入のコストは、国内総生産（gross domestic product: GDP）の数パーセントに過ぎないが、経済成長におけるエネルギーの重要性はその見かけ上の数値をはるかに上回る。エネルギーはすべての生産および消費活動に利用されており、その価格高騰は経済体系へと直接・間接的に広範な影響を与える。そしてより重要なことは、安価で安定的なエネルギー供給が損なわれることに対する懸念は、国内の資本蓄積を停滞させ、労働生産性の改善スピードを大きく低迷させることである（Nomura 2023）。資本（機械設備、建設物、ソフトウェアなど）の稼働にはエネルギーが不可欠である。労働者は、自らの人的能力を高めることよりも、より多くの、そしてより質の高い資本を利用することで、その生産性を高めてきた。それが経済成長の主要なエンジンであった（Jorgenson 2009, Gordon 2016）。

とくに質の高いエネルギーとして、電力の役割は強調される。エネルギー資源分野において著名な米国の経済学者 Sam Schurr は、20 世紀の米国経済におけるその貢献を分析し、電力を「技術進歩の仲介者（agent of technological progress）」と称した（Schurr et al. 1990）。技術は資本に体化され、資本の稼働には二次エネルギーとしての電力が必要となる。経済成長において電力の役割がとくに強調され始めたのは、米英の 1920 年代後半から 1950 年代初めである[2]。1952 年、英国電気開発協会（Electrical Development Association）の Percy Dunsheath 会長は、安価で十分な電力供給による産業における生産性改善の重要性を強調した（Dunsheath 1952）。直接的にはその影響は見えづらいが、電力の低廉な価格による安定供給は、中長期の経済成長のスピードを定める要因ともなっている。

1 3.2 節および 3.3 節での測定値は、野村（2021）における 2016 年（日米比較では 2015 年）までの測定値から、2015 年基準 JSNA（日本の国民経済計算体系）に基づく基準改定（資本推計対象の拡大により、過去の系列も改訂）および 2019 年までの更新値に基づき、過去に遡及して修正されていることに留意されたい。またそうした改訂値に対する解釈は、2022 年度の ALPS IV 経済分析ワーキンググループでの議論を踏まえて行われている。

2 米国経済の長期にわたる成長過程を分析した Gordon（2016）は 1920 年代末から 1950 年代初めの急速な TFP 上昇を可能としたもっとも重要な要因は機械の品質向上であるとし、それを裏付けるものとして電力消費の拡大を指摘する。米国で最初に発電所が開設されたのは 1882 年であるが、製造業をはじめ米国経済全体に電力が完全に普及したのは 1929–50 年であり、それが生産性革命を可能とした要因として評価される。

1990 年代からの気候変動への問題意識の高まりは、大気というグローバル・コモンズの地球規模での管理の方法についての探索を求めてきた。さまざまな政策手段が考えられ、また実行されてきたが、これまでその有効な管理へと至らなかった最大の障害はフリーライディング（free-riding）への強固な誘因であった（Nordhaus 2015）。パリ協定のような世界の排出削減に向けた現在の枠組みも、フリーライダーテストを満たすとは言えない（Yale Center of the Study of Globalization 2015）。各国の削減目標における限界的な削減費用は依然としてきわめて大きな跛行性が存在している。他方、この四半世紀に深化したグローバルな生産ネットワークの存在は、国境をまたいだ生産移転のためのコストを大きく減じさせ、フリーライダーとなる障壁を低下させてきた。対策を強化した国から、環境対策が取られないか、あるいは軽微で抜け穴が多い経済圏への生産シフトを防ぐことは机上の理論では可能であっても、現実的に難しいことは強く認識されてきている。この四半世紀に実現してきたことは、日本や他の先進国から中国などへの生産シフトと、そしてカーボンリーケージ（炭素の漏れ）である。野村（2021, 第 4・5 章）に分析されるように、気候変動対策としての 国内でのエネルギー消費削減への注力は、設備投資を抑制させ、エネルギー多消費的な国産財の輸入への切り替えを強いるものとなってきた。

かつて「石油の一滴は血の一滴」（Georges Clemenceau 仏首相）とされたエネルギーの重要性に関する認識は、日本では薄れてきたのかもしれない。それを導いた経済的な背景には、後述する 3.3 節で論じられるように、戦後日本経済において持続的に実現してきたエネルギー生産性の改善（energy productivity improvement: EPI）、そしてエネルギー多消費的な産業が相対的に縮小するような構造変化により、一国経済の成長に必要なエネルギーコストの実質的な負担が逓減してきたことがある。しかしそのことは、省エネ政策がこれまで有効であり、また将来も有効であることを意味するものではない。無駄遣いを無くすというような消費者による倹約精神や、経済合理的に導入されるエネルギー節約的な技術への代替といったイメージとはまったく異なった要因により、マクロの EPI は大きく影響される。

日本政府によるグリーン成長への期待（日本政府 2019, 2020; GX 実現会議 2022）は、官需および政策的に誘発された民需の拡大など、需要サイドに置かれている。需要拡大は経済成長を牽引するが、その裏面には、非効率投資や重複投資により、中長期的に生産性の改善スピードを停滞させかねない弊害があることは忘れられている。拙速なエネルギー転換が導く供給サイドにおける生産性リスクの懸念は、すでに顕在化している。現在の脱炭素ブームの中では、「待ったなし」とも、それを国内で実現しなければ「競争力を失う」とも表現されるが、国際交渉や企業連合の場における表面的な賛意とは異なり、炭素排出削減の持つ価値には世界的な調和も形成されておらず（Akimoto 2022）、不安定なままである。日本国内でも優れた経済理論家たちが 1990 年代初めから洞観していたように[3]、フリーライダーテストが満たされないままでは世

3 1995 年には日本でも、東京大学の宇沢弘文教授の呼びかけにより日本開発銀行設備投資研究所主催での国際コンファレンスが箱根で開催され、海外からは Kenneth J. Arrow、Partha Dasgupta、Dale W. Jorgenson、William D. Nordhaus、Martin L. Weitzman などの錚々たる教授たちが来日した（JDB Research Center on Global Warming 1996）。

界の削減コストは莫大となり、それによる経済停滞はむしろ健全なエネルギー転換から遠ざけるものとなろう。集団浅慮に陥り、見切り発車をすることの弊害は、日本でこそ大きいかもしれない。

3.2 節では、長期の日本経済におけるエネルギー投入と経済成長の分析に基づき、その構造変化を総括的に考察する。3.2.2 節では、一国経済における長期の経済成長に伴う資本・労働・エネルギー投入によるそれぞれの生産性の推移を論じる。日本でマクロ的に観察されるエネルギー生産性は第二次世界大戦まで低下を続け、戦後には持続的な EPI が観察される。長期に U 字型となるエネルギー生産性は、経済成長に伴い必要とされる資本蓄積やエネルギー消費の拡大、そして生産における全体効率の視点から考察される。長期にわたる日本のエネルギー消費に関する分析では、その背景にある日本経済の構造変化を考慮しなければならない。続く 3.3 節では構造変化を統御した分析を行う[4]。

3.2.2 長期の経済成長とエネルギー生産性

19 世紀の終わりから、日本経済における長期の経済成長とエネルギー投入の関係を概観しよう。図 3.2.2-1 は、1885（明治 18）年から 2019（令和元）年までを測定期間とし、日本経済における産出量（実質 GDP: X)、資本（K)、労働（L）およびエネルギー（E）それぞれの投入量の推移を比較している[5]。集計産出量および各投入量は、1885 年値を 1.0 とした指数によっている（労働投入量のみ桁が異なるので、その単位は右軸に示されている)。

4 3.2 節では構造変化を含んだ一国経済におけるグロスのエネルギー生産性を議論するが、続く 3.3 節では、より細分化した測定により、戦後日本経済において持続的に実現した一国経済のグロス EPI の内にある構造要因の変化へと接近する。考慮される構造要因の第一はエネルギー品質の変化である。電力化などエネルギー構成の変化は、エネルギー生産性の測定値にも大きな影響をもたらしてきた。第二の視点は産業構造の変化である。一国経済のグロス EPI はエネルギー多消費型製造業の生産縮小による影響を多分に含んでいる。

5 ここでは資本投入量は土地・在庫を除く実質純資本ストック、労働投入量は投入労働時間によっている。資料は 2015 年基準国民経済計算（内閣府経済社会総合研究所 2022）およびそれに準拠して 1955 年まで遡及推計された KEO データベース（黒田他（1997）および野村（2004）の更新推計値）である。また 1954 年以前の遡及推計値は、大川・高松・山本（1974)、大川・石渡・山田・石（1966）に基づく簡易推計値である。

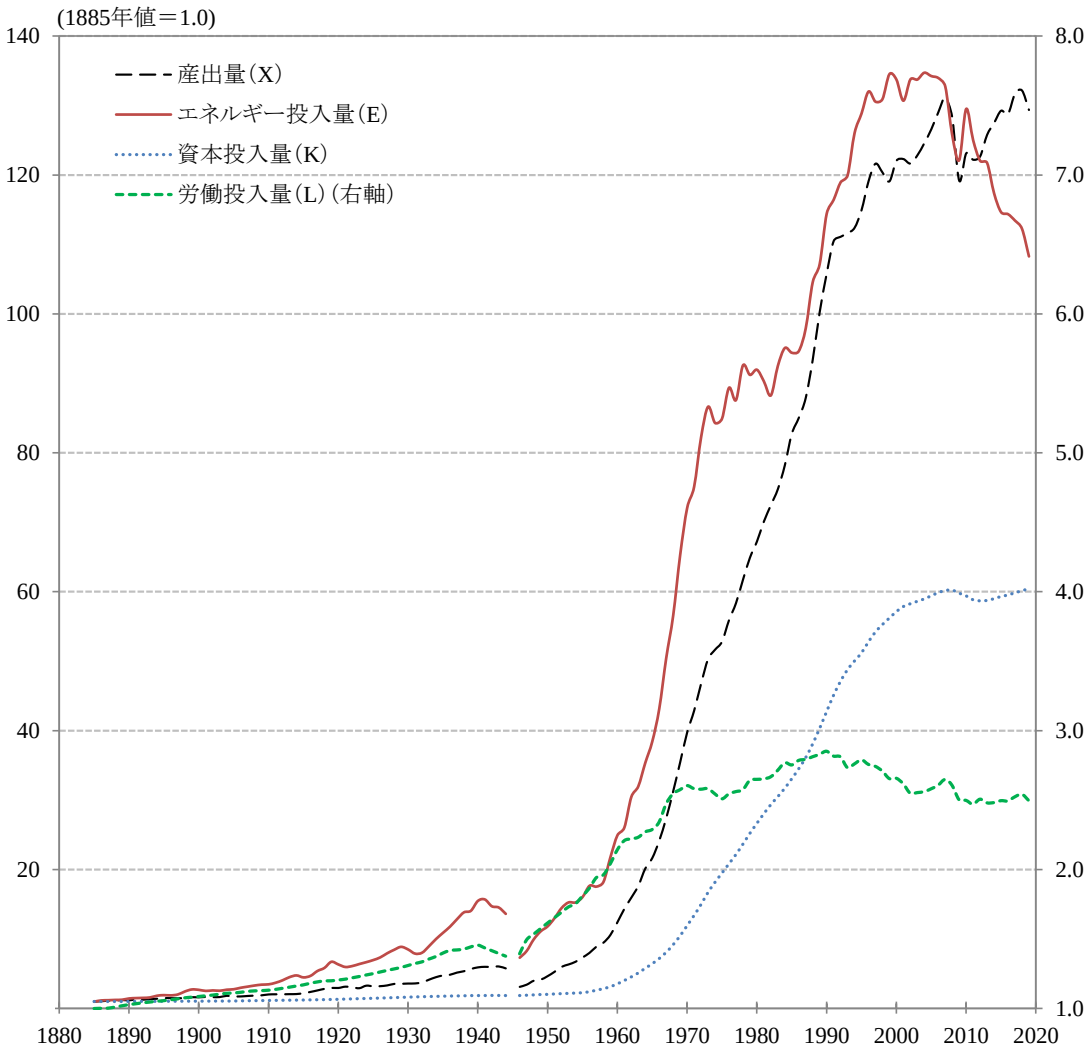


図 3.2.2-1　長期の経済成長、資本・労働とエネルギー投入（1885–2019 年）

単位：1885 年値=1.0（1885–2019 年）。

注：労働投入量のみ単位は右軸。資料は脚注 5 参照。

この 135 年間の経済成長の歴史において、集計レベルでの産出量は 129 倍へと拡大した。この期間に総人口も 3.3 倍へと増加していることから、一人あたり産出量は 39 倍である。こうした集計産出量の拡大を実現するため、資本投入量（生産的資本ストック）は 60 倍、労働投入量（労働投入時間）は 2.5 倍へと拡大してきた。それは、この期間に資本生産性は 2.1 倍、労働生産性では 52 倍にまで改善したことを意味している。同期間、最終エネルギー消費量（一次エネルギー換算値）は労働と資本の拡大を上回り、108 倍にまで増加している。図 3.2.2-1 にみるように、とくに 19 世紀後半から 20 世紀後半までの一世紀以上にわたり、日本の経済成長の実現には、生産拡大とほぼ比例的なエネルギー消費の拡大が必要であった。

経済成長とエネルギー消費は同様な拡大を示すが、この間、エネルギー生産性（X/E）は大きく変化している。図 3.2.2-1 と同じデータに基づき、資本、労働そしてエネルギー、それぞれの生産性（単要素生産性）としての推移を示したものが図 3.2.2-2 である。

ここでは 2019 年値を 1.0 とした指数によるが、資本生産性（X/K）のみ単位を右軸としている。全観察期間となる 1885–2019 年の 135 年間における大きな特徴は、第二次世界大戦時における断層や、いくつかの短期的な景気変動の影響はあるが、日本経済では持続的な労働生産性（X/L）の改善が見いだされることである。単調な改善を実現してきた労働生産性に対し、エネルギー生産性は第二次世界大戦をボトムとして大きく U 字型（生産性が悪化するフェーズから改善するフェーズへ）を示し、対照的に資本生産性（右軸）は逆 U 字型（改善から悪化へ）の形状となっている。

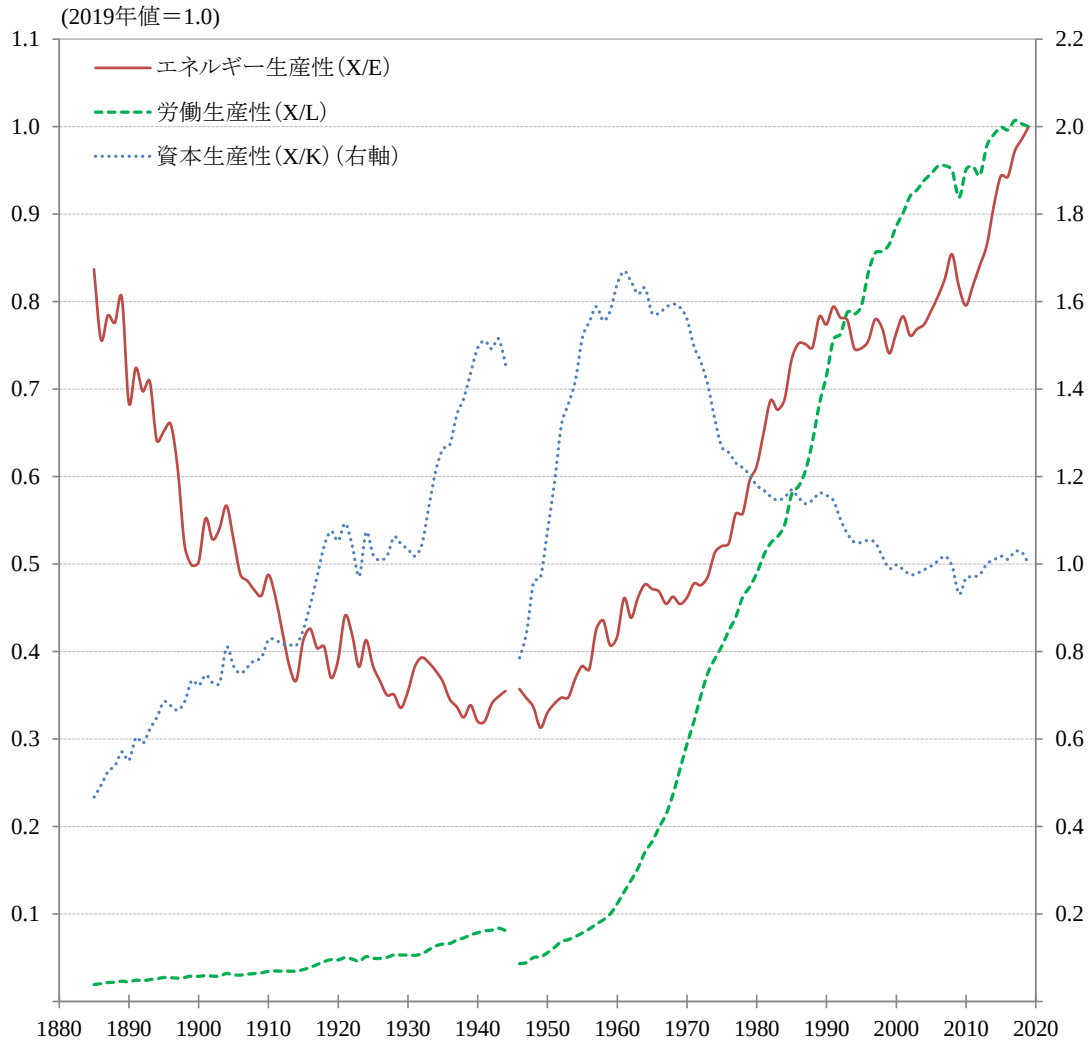


図 3.2.2-2　長期のエネルギー生産性と資本・労働生産性（1885–2019 年）

単位：2019 年値=1.0（1885–2019 年）。

注：資本生産性のみ単位は右軸。資料は脚注 5 参照。

U 字型となるエネルギー生産性において、右半分となる戦後日本経済では持続的な EPI が実現している。EPI により（生産量一定のもとでは）直接的にエネルギー需要は減少する。そのことはエネルギーの市場価格を低下（あるいは価格上昇を抑制）させながら、生産拡張によるさらなるエネルギー需要を通じてエネルギー消費量を押し上

げていく。そうしたマクロ経済としてのフィードバック効果は 20 世紀にわたり主要先進国でも強固であり、カッシューム・ブルックス仮説（Khazzoom-Brookes postulate）と呼ばれてきた[6]。戦後の日本経済でも、EPI は持続的でありながらも（図 3.2.2-2）、20 世紀後半まではエネルギー消費量もまた拡大しており（図 3.2.2-1）、カッシューム・ブルックス仮説が適合していたことを示している。

近年の大きな変化は、2000 年代後半以降、世界金融危機によるエネルギー需要の落ち込み（図 3.2.2-1）や稼働率の低下によるエネルギー生産性の悪化（図 3.2.2-2）が一時的には見られるが、その後には力強く EPI が加速し、またエネルギー消費量も急速に減少していることである。第一次オイルショック後の経験値にも類似する近年の EPI の加速は、「エネルギー効率向上・省エネへの取組が実を結んでいる」（内閣府 2021）と、日本政府による省エネ政策やカーボンプライシング政策への自信を与えていると言えよう。

3.2.3 U 字型エネルギー生産性の形成

しかし近年の EPI 加速では、同時期に労働生産性の改善も低迷しているように（図 3.2.2-2）、その要因が問われなければならない。一般にエネルギー環境分野では、エネルギー生産性やエネルギー効率といった指標は、エネルギーと産出（粗産出量あるいは実質付加価値）の関係として、資本や労働投入とは独立に捉えられている。しかし資本と労働はエネルギーと不可分に繋がっており、生産の全体効率を定める要因として一体とした理解が必要である。省エネは生産効率を高め成長力を強化するとも主張されるが、それは資本や労働から独立にみた部分的な評価に過ぎないのである。

経済成長に伴うエネルギー生産性の変化を説明する要因を、野村（2021, 第 4 章）は大きく 3 つの効果へと分解している[7]。第 1 は「省エネ」の効果である。ここでは資本の稼働に使用するエネルギー量をどれだけ減じることができるかを示す指標として、資本エネルギー比率（K/E）の上昇によって総合的な省エネ性能を評価する。第 2 は経済成長（生産拡大）に伴う「増エネ」の効果であり、1 人の労働者が使用するエネルギー量の拡大を労働エネルギー比率（L/E）の低下によって評価する。Smil（2017）は産業革命以来の持続的な労働生産性の改善は、エネルギー投入量の拡大によるものと指摘する。それは長期にわたる労働エネルギー比率の低下であり、直接的にはエネルギー生産性を悪化させる要因となる。しかし労働がより多くの資本とエネルギーを利用することにより、生産における全体的な効率が改善することで EPI も実現する。そうした「全体効率」の指標が第 3 の全要素生産性（total factor productivity: TFP）の改善による寄与である。第 2 の「増エネ」効果は直接的にはエネルギー生産性を悪化させ

6 より大きな文脈ではジェボンズ・パラドックス（Jevons paradox）とも呼ばれる。同仮説の有効性に関する英国貴族院での議論は House of Lords of the United Kingdom（2005）を参照。

7 ここでの EPI は、マクロ的に観察されるグロス EPI から、エネルギー種別構成や産業構造などの変化を考慮した上での調整済み EPI に基づいた分析である。構造変化の統御によっても、エネルギー生産性は U 字型の推移をとる。構造変化の統御によるグロス EPI への影響は 3.3.5 節を参照。

るが、もたらされる TFP の改善が間接的に実現しうる EPI への貢献が第 2 の効果である。

一例として、図 3.2.3-1 は戦後の鉄鋼業での測定値を示している。高度成長期（1955–73 年）は、構造変化を調整した真のエネルギー生産性（3.3.5 節）ではマクロ経済として史上もっとも高い EPI を実現したが、その最大の貢献は鉄鋼業であった。この期間、鉄鋼業では旺盛な内需拡大に対して資本能力増強が求められ、生産性の向上やコスト削減を主目的として LD 転炉や連続鋳造などが導入されている。それは大幅な増エネをもたらしたが、労働生産性が大きく改善しながら TFP 成長も年率 1.2%と高く（図 3.2.3-1 右図）[8]、そのことが年率 4.0%もの高い EPI を実現させている（図 3.2.3-1 左図）。

また第 1 次オイルショック後（1973–90 年）には、エネルギー価格の急激な上昇により、鉄鋼業では省エネとしての経済合理性を持ちながらコークス乾式消化設備（CDQ）や高炉炉頂圧発電（TRT）などが導入されている。重要なことは、その期間には資本生産性を犠牲とすることなく（むしろ改善させながら）TFP を改善させ（図 3.2.3-1 右図）、省エネ要因（資本エネルギー比率の拡大）とともに TFP 改善が EPI を実現させたことである（図 3.2.3-1 左図）。

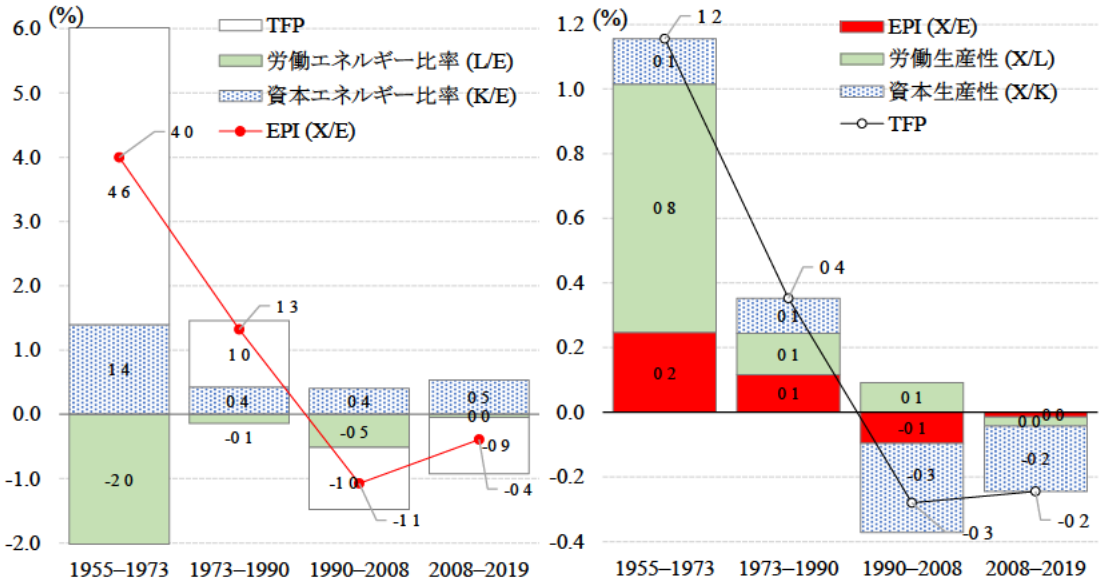


図 3.2.3-1　鉄鋼業における EPI と生産効率（1955–2019 年）

単位：%（年成長率）。

注：経済と環境の循環構造を評価するものとして、左図は TFP 成長が EPI に与える影響であり、右図は EPI が TFP 成長に与える影響の評価である。そのフレームワークは野村（2021, 4.2 節）を参照。

8　一般に TFP は、資本や労働といった投入の拡大によって説明されない生産拡大として残差として理解されるが、TFP 成長率は労働生産性、資本生産性、そしてエネルギー生産性などの単要素生産性の変化の加重平均値としても理解される（野村 2021, 4.2 節）。図 3.2.3-1 の右図はそうした分解を示しており、3.3 節の文脈では EPI による TFP への貢献を評価している。ただし、こうした効果はエネルギー多消費産業以外ではかなり限定的である。

安価な技術導入機会が存在するならば、そこには経済（生産効率）と環境（エネルギー消費抑制や CO_2 排出削減）の両立しうる姿を見出すことができる。しかし日本の鉄鋼業でも 1990 年代に入ると、地球温暖化対策としての排出削減が求められる中で省エネ投資が拡大（資本エネルギー比率は上昇）するが、それは資本生産性を大きく毀損させ、TFP を悪化させている（図 3.2.3-1 右図）。省エネ投資の拡大にも関わらず、生産の全体効率の毀損により、総合的な効果としてのエネルギー生産性もむしろ悪化するものとなった（図 3.2.3-1 左図）。省エネが生産効率を高めるということは、一般法則ではなく、コスト合理的に利用可能な省エネ技術が存在するという状況のもと、限られた産業での限られた期間に見いだされる例外的な現象である。

マクロの経済成長に伴う長期エネルギー生産性の変化は、実測データに基づく大きな傾向として図 3.2.3-2 のように描写される（Nomura 2023, Chapter 4）。一般に EPI は省エネ投資によって実現されるとのイメージを抱くが、図 3.2.3-2 は、省エネ投資の拡大（資本エネルギー比率の上昇）による効果は、オイルショック後の限られた期間に見いだされる限定的な要因に過ぎないことを示している。EPI に寄与するはるかに大きな要因は、TFP による全体効率の改善である。経済成長に伴い労働者の利用するエネルギー量は大きく増加（労働エネルギー比率は低下）してきたが、それによる TFP の改善は第二次世界大戦後には直接的な増エネの効果を上回るもの（線グラフがマイナスからプラスの領域へ移動）となっている。そのことがマクロ的に、U 字型の長期エネルギー生産性（図 3.2.2-2）を形成させた要因である。

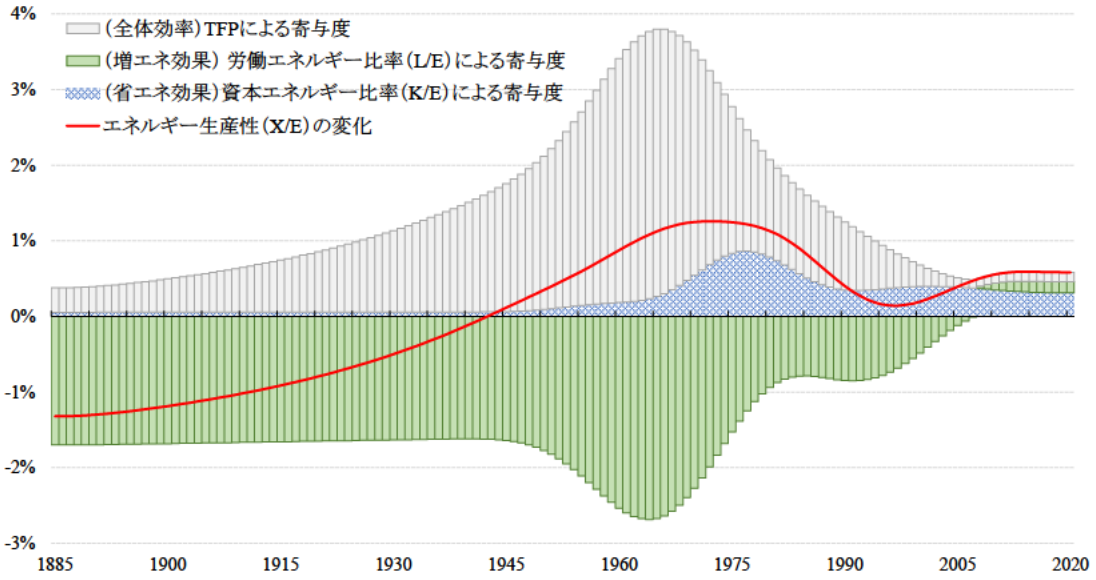


図 3.2.3-2 経済成長に伴う長期エネルギー生産性変化要因（1885–2019 年）

単位：%（年成長率）。

注：フレームワークの詳細は Nomura（2023, Chapter 4）を参照。ここでは長期傾向の把握のためスムージングされている。

1990 年代からは日本経済は低成長期へと入り、図 3.2.3-2 にみるように、増エネ要因が抑制され始める。そして 2000 年代後半から観察されることは、サービス業などを中心として労働エネルギー比率がむしろ上昇（一人あたりの労働者がより少ないエネルギーを利用）するという「逆行」であり、そして労働生産性改善の停滞（図 3.2.2-2）である[9]。一国経済にも見いだされる増エネ効果の逆行は、経済成長における長期経験とは反して、エネルギー生産性という一面の生産性をむしろ改善させる要因となっている。しかしそのことは国内における資本蓄積の低迷を通じて、EPI の最大の牽引役であった TFP 改善による効果を大きく減じているのである。

参考文献（第 3.2 節に関するもの）

1) Akimoto, Keigo (2022) “Evaluation and implication for NDCs by 2030,” The 2021 ALPS International Symposium–Strategy for NDCs in 2030 & Impact on International Competitiveness, Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE). March 8.
2) Dunsheath, Percy (1952) “Electricity’s Role in Industry– Contribution to Raising Productivity,” *Financial Times*, October 30.
3) Gordon, Robert J. (2016) *The Rise and Fall of American Growth*, Princeton University Press. （高遠裕子・山岡由美訳『アメリカ経済－成長の終焉』日経 BP 社、2018 年）.
4) House of Lords of the United Kingdom (2005) *Energy Efficiency, Science and Technology Committee*, UK Parliament.
5) JDB Research Center on Global Warming (eds.) (1996) *Symposium on the Environment and Sustainable Development: Roles for Japan with Regard to Global Environmental Issues*, The Japan Development Bank.
6) Jorgenson, Dale W. (2009) *The Economics of Productivity*, International Library of Critical Writings in Economics, 236.
7) Nomura, Koji (2023) Energy Productivity and Economic Growth—Experiences of the Japanese Industries, 1955–2019, Springer.
8) Nordhaus, William D. (2015) “Climate Clubs: Overcoming Free-riding in International Climate Policy,” *American Economic Review*, Vol.105, No.4.
9) Schurr, Sam H., Calvin C. Burwell, Warren S. Devine and Sidney Sonenblum (eds.) (1990) *Electricity in the American Economy– Agent of Technological Progress*, Contributions in Economics and Economic History, No. 117, New York: Greenwood Press.

9 こうした逆行（L/E の上昇）に相応する直接的な現象は、過度の省エネ行動による労働生産性の低下である。エネルギー消費量の削減のための反作用として、同じ仕事量により多くの労働時間を必要とする懸念は大きい。一例として、2019 年の夏に兵庫県姫路市役所が室内温度を 25 度に設定したところ（環境省は冷房使用時の室温を 28 度に推奨）、光熱費は約 7 万円の増加となったが、前年比で総残業時間は 14.3%減少し、人件費を約 1400 万円削減できたと評価される（神戸新聞 2019 年 10 月 8 日）。また、企業における省エネ担当者の設置・増員、省エネ診断士の増加、あるいは顧客の光熱水費などの経費削減実績から対価を得るような ESCO 事業などの拡大もこの四半世紀に進行しており、必ずしも企業・産業レベルやマクロでの全体効率の改善に寄与していない懸念は大きい。活動の導入初期には省エネとともに全体効率を高めるものであっても、そうした効果は急減速し、硬直化した活動はむしろ労働生産性を低下させている。こうした直接要因に加え、労働が資本使用（エネルギー使用を伴う）を抑制せざるを得ないという資本深化の停滞により、生産効率の改善を低迷させる間接要因はより大きいかもしれない。

10) Smil, Vaclav (2017) *Energy and Civilization: A History*, Cambridge: The MIT Press. （塩原通緒訳（2019）『エネルギーの人類史』青土社, 2019 年）.
11) Yale Center of the Study of Globalization (2015) *Global Harmonization Carbon Pricing: Looking Beyond Paris*, International Conference held on May 27–28.
12) 大川一司・石渡茂・山田三郎・石弘光（1966）『長期経済統計(3) 資本ストック』東洋経済新報社.
13) 大川一司・高松信清・山本有造（1974）『長期経済統計(1) 国民所得』東洋経済新報社.
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－産出および資本・労働投入の測定－』慶應義塾大学産業研究所.
15) GX 実行会議（2022）「GX 実現に向けた基本方針（案）」内閣官房, 12 月.
16) 内閣府（2021）『令和３年度　年次経済財政報告（経済財政政策担当大臣報告）―レジリエントな日本経済へ：強さと柔軟性を持つ経済社会に向けた変革の加速―』9 月.
17) 日本政府（2019）「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」6 月.
18) 日本政府（2020）「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」12 月.
19) 野村浩二（2004）『資本の測定－日本経済の資本深化と生産性』慶應義塾大学出版会.
20) 野村浩二（2021）『日本の経済成長とエネルギー：経済と環境の両立はいかに可能か』慶應義塾大学出版会.

3.3　日本産業のエネルギー生産性変化の測定

3.3.1　はじめに

2023 年 2 月のエネルギーコスト・モニタリング（ECM202303）によれば[10]、2022 年（暦年）における最終エネルギー消費総額（速報値）は 52.2 兆円となり、前年差で 13.5 兆円、前年比では 35.1%の増加となる見込みとなった。エネルギーコストの急激な増加に対し、日本政府は総合経済対策として 2023 年 1 月より電力消費 1kWh あたり 7 円ほどの補助を決めている。ガソリンなどを含めたエネルギー価格への政策支援による総額は 6 兆円ほどとなり、日本経済におけるエネルギーコスト増大の半分近くの規模となる。

価格上昇に対してエネルギー消費を削減できる割合（弾性値）は、少なくとも短期的にはかなり小さく、その意味では一時的な激変緩和措置は正当化されよう。他方、そうした措置は中長期的には省エネへの誘因を減じてしまうとした批判の声も多い。しかしこうした批判も、単純な価格弾性のイメージと、おそらく過大評価された弾性値に基づくものであるかもしれない。観察される価格弾性は、エネルギー価格上昇に対する消費者による長期的な適応として解されようとも、それは真に技術的な改善に基づくものであり、また社会的な経済合理性を有するのか問われなければならない。

10 エネルギーコスト・モニタリング（ECM）は、2021 年初からの COVID-19 からの世界的なエネルギー需要回復や 2022 年 2 月からのロシアのウクライナ侵攻によるエネルギー価格の高騰、またカーボンニュートラルに向けたエネルギー環境政策による中長期的なコスト増加が見込まれる中で、日本経済や主要工業国における影響をリアルタイムに近く測定していくことを目的として、2022 年 1 月より構築が開始され同年 4 月から公開されている（慶應義塾大学産業研究所野村浩二研究室：https://www.ruec.world/Japan.html）。

3.3 節は、日本経済の長期にわたるエネルギー生産性変化の構造的な要因を分析することを目的としている。はじめに 3.3.2 節では、電力消費量の予測値とその実績値の推移を比較しながら、世界金融危機後に見られる電力消費量の減少について論じる。その減少がエネルギー生産性の改善（energy productivity improvement: EPI）によるとすれば、そのペースを将来にも持続できるだろうか？こうした問いに答えるためには、マクロ的に観察される EPI（これを「グロス EPI」と呼ぶ）の内部構造について検討する必要がある。

3.3.3 節では、生産性勘定と整合して構築されるエネルギー勘定の概要を示しながら、野村（2021, 第 2 章）に基づきグロス EPI の変化要因を分解するための測定のフレームワークを論じる。持続的な EPI が観測されることとなった戦後日本経済において、3.3 節では 1955 年（昭和 30 年）以降を測定の対象期間として、3.3.4 節ではエネルギーの品質変化の視点から考察し、続く 3.3.5 節では産業構造変化の視点から EPI の産業起因について分析する。3.3.6 節は、3.3 節の観察事実をまとめて結びとする。

3.3.2 電力需要の見通しと実績

日本経済は欧米諸国に比して、20 世紀を通じて常に高いエネルギー価格に直面してきた。1973 年の第一次オイルショックによる原油価格の高騰、そして 1990 年代に入ってからは気候変動問題への対応のため、さまざまな省エネ政策を先進諸国にならい、またときに先んじて取り組んできている。本節では電力消費を一例として、近年の需要の見通しとその実績を観察しよう。

経済産業省は、数年に一度「長期エネルギー需給見通し」（以下、需給見通し）として 10 年から 20 年ほど先のエネルギーと電力の需給予測を行っている。この数十年の経験としてみれば、それは合理的な予測であることを超え、政策ターゲットとしての性格を帯びるものへ変化してきた。1970 年代や 1980 年代、日本経済において事後的に実現されるエネルギー・電力需要は、需給見通しによる予測値を下回る傾向にあった。言い換えれば、十分な供給力の確保を目的とするように、需給見通しは将来需要を過大に推計する傾向にあった。

1990 年代後半は大きな転機となった。1997 年 12 月には京都で気候変動枠組条約第 3 回締約国会議（COP3）が開催され、気候変動への対応が政府によって重要な政策課題となり、将来の電力供給は温室効果ガス排出抑制という政策ターゲットと不可分な性格を有するものとなっている。そのことは野心的な省エネ目標を需給見通し内に織り込んで、電力需要量のターゲットを過小に設定する誘因を与えている。図 3.3.2-1 は、1990 年代後半以降から 2021 年までの経産省や日本政府による電力需要見通しに基づき、それぞれの策定年次からの見通し（点線）と、その後の実績値（実線）を比較している。

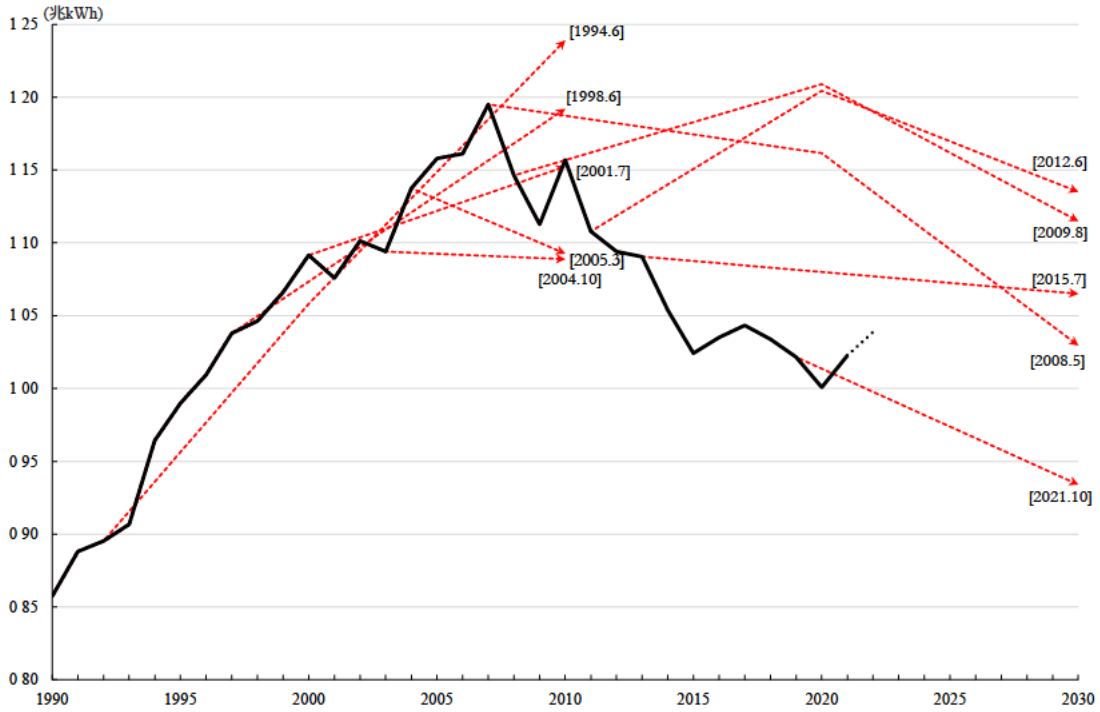


図 3.3.2-1 電力需要の実績と政府による需要見通し

単位：1 兆 kWh（発電端、自家発電を含む）。

注：点線は日本政府による電力需要見通しの予測値（括弧内は公表時点）、実線は日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット（2022）による実績値（1990–2020 年度）および慶應義塾大学産業研究所野村研究室で構築されるエネルギーコスト・モニタリングの 2021 年度推計値および 2022 年度予測値（2023 年 2 月 28 日公表 ECM_JPN_202302）による。需給見通しにおいて複数シナリオが設定されている場合は、もっとも野心的なシナリオによる評である（自家発電の包含など公開資料から不明な部分に関しては一部推計値を含む）。なお需給見通し策定時に利用可能なデータは前年度値となるなどの制約があるため、公表時点の 1–2 年前から現実値とは乖離がある。

図 3.3.2-1 にみるように、予測値と実績値との関係性は 2000 年代半ばから後半を境として大きく傾向が異なっている。その前半期では、1998 年から 2005 年までの需給見通しが目指すようには、現実の電力需要は減少しなかった。当時においても政府は省エネ・節電の進展を必ずしも楽観していたわけではないが、京都議定書の求める温室効果ガス排出抑制ターゲットのもと、原子力や再エネなど低炭素電源の拡大によって補うことのできない排出分は、最終的に電力需要の縮小という目標へと押し付けられてきた性格がある。

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

され、釣り竿の先端からの距離を調整するために、その科学的な予測値を超えて不釣り合いに長い釣り糸が設定されてきたのである[11]。

さらなる転機は世界金融危機であった。戦後最大のマイナス成長を記録した日本経済の電力需要は急激に縮小した。2008 年および 2009 年の需給見通し自体は野心的な政策ターゲットであるとみなされていたものの、図 3.3.2-1 にみるように実際の電力需要はそれを上回って減少している。2011 年の福島第一原子力発電所事故後には、原発への依存度の縮小という新たな制約が加わり、大幅な再エネの推進とともに、電力需要の縮小に向けてより強い圧力が加えられるものとなった。そうした野心的な節電・省エネ目標は、世界金融危機からの回復と震災後の復興需要の拡大により実現困難なものとして捉えられることも多かったが、そうした悲観論をよそに、現実の電力需要は政策目標を上回るスピードで減少したのである（図 3.3.2-1）[12]。

2015 年の需給見通し（経済産業省 2015）では、2012 年から導入された再生可能エネルギーの固定価格買取制度（feed-in-tariff: FIT）の買取総額が早くも年 2 兆円に接近するなど、電力価格上昇の抑制が重要な政策課題として認識されるものとなった。2030 年に GHG 排出量を 2013 年比で 26%削減するという温室効果ガスの排出制約、東日本大震災後の原発シェア縮小、そこに再エネ費用負担の抑制という制約が加わり、残された手段としてもう一段の EPI に向けた期待が高まる。しかし 2030 年における電力消費見通しはほぼ横ばいとされた（図 3.3.2-1）。これは安倍晋三首相による経済政策（アベノミクス）によって、実質 GDP として 2030 年まで年率 1.7%ほどの成長軌道への回復を想定したことによる。そのベースラインからみれば、17%ほどの電力消費縮小が目標として組み込まれている。最終エネルギー消費量（一次エネルギー換算）では、徹底した省エネにより 2013–30 年の政策ターゲットとして年率 2.0%ほどの EPI を目指すとされた。それは世界金融危機前までの第 III 期（1990–2008 年）における EPI のスピード（年率 0.5%）の 4 倍であり、第一次オイルショック後の第 II 期（1973–90 年）の黄金時代における日本経済の経験（年率 2.7%）に近い。

そうした野心的と思われた目標に対して、第 IV 期（2008–19 年）の日本経済は年率 1.4%という高い EPI を実現した。少なくとも見かけ上、COVID-19 前までに良いスタートを切ったようにみえる。しかし COVID-19 からの回復傾向が明確となってきた 2021 年 10 月、岸田文雄内閣が閣議決定した第 6 次エネルギー基本計画（経済産業省 2021c）では、菅義偉首相がその前年 10 月に宣言した 2050 年までのカーボンニュートラル目標を受け、2015 年に定められたこの意欲的な目標はさらに深堀りされるものとなった。2030 年に向けて、日本経済におけるさらなる電化の進展が見込まれているにもかかわらず、2030 年の電力消費量は 1990 年代前半の水準まで引き下げるように設定された（図 3.3.2-1）。EPI 目標では、2015 年の需給見通しにおける 2.0%から年率 2.5%に目標は先

11 そして奇妙にも長い釣り糸（野心的な EPI の要請）は、政府が省エネ対策を強化するための根拠を与えるものとして利用されてきた。他の要素は一定であれば、省エネ（エネルギー生産性の改善）は競争力強化へと寄与する。しかし安価に利用可能な省エネ技術が制約される中では資本生産性や労働生産性を犠牲とするものとなり、全体的な生産効率（全要素生産性）をむしろ悪化させるものとなる（野村 2021, 第 4 章）。

12 政府による野心的な需要見通しを下回った近年の日本における国内電力需要の低迷は、電力多消費的な中間財・最終財の輸入を通じた間接的な電力輸入拡大の効果によってその 3 割ほどが説明される（野村 2021, 第 5 章）。

鋭化されている[13]。そうした目標の持つ意味、またそれがもたらす影響を考えるには、観察されるグロス EPI の構造を分解しなければならない。

3.3.3 分析フレームワーク

(1) エネルギー勘定

3.3 節では、細分化した測定により、戦後日本経済において持続的に実現した一国経済のグロス EPI の内にある構造要因の変化へと接近する。考慮される構造要因の第一はエネルギー品質の変化である。電力化などエネルギー構成の変化は、エネルギー生産性の測定値にも大きな影響をもたらしてきた。第二の視点は産業構造の変化である。一国経済のグロス EPI はエネルギー多消費型製造業の生産縮小による影響を多分に含んでいる。節での産業別エネルギー消費量は、1955 年を開始年次とする長期産業別生産性統計（KEO Database: KDB）における長期時系列産業連関表（供給使用表: KDB-SUT）と整合して構築された、エネルギー勘定（KDB-E）に基づいている[14]。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分析の障害となってきた。また数%のコストシェアしか持たないエネルギーでは、名目値を制約として変動の大きな価格指数から実質値を評価するようなアプローチでは、エネルギー生産性の測定指標が大きく荒れてしまう。測定値の改善のためには、エネルギーの分類を細分化したうえで、物量と価格指数から名目金額を先決するようなエネルギー勘定の構築が求められる。

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

両統計における産業分類概念の相違も大きい。KDB-E では、産業分類を経済統計における活動分類に基づきながら、同時にエネルギー統計における物量・熱量としての詳細な消費構造との整合性を可能なかぎり維持しつつ、名目値としての KDB-SUT とのバランスを保持している。利用するエネルギー統計は、「総合エネルギー統計」（経済産業省）および『EDMC エネルギー・経済統計要覧』（日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット 2022）、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

13 温室効果ガス排出量の中期削減目標は、2030 年度（目標年度）に 2015 年に決定した 2013 年度（基準年度）比 26%削減から 46%削減へと深堀されている。両者では、2013 年から 2030 年までの GDP 成長率の前提が年率 1.7%から 1.4%へと下方修正され、一次エネルギー消費量削減率は年率–0.3%から–1.1%へと大きく改訂された。

14 KDB は、内閣府経済社会総合研究所によって構築される JSNA との整合性を保持しながら拡張・構築されており、現行の KDB は 2015 年基準 JSNA に基づき 1955 年まで長期遡及されている。そのフレームワークと測定に関する詳細は黒田・新保・野村・小林（1997）、野村（2004）、Jorgenson and Nomura（2005）を参照されたい。

消費（27 のエネルギー種別）の名目金額表（以下の A 表）、物量表（B 表）および熱量表（C 表および D 表）から構成されている。エネルギー統計と経済統計の接合のため、いくつかの調和が行なわれている。たとえば、経済統計では日本の経済主体が消費した国際航空輸送や外洋輸送なども国内生産として含まれ、そのために海外で消費（特殊貿易（輸入））したエネルギー消費も計上されている。「総合エネルギー統計」ではそれを含まないため、KDB-E の最終エネルギー消費量のほうが大きな値となる。

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

日本のベンチマーク産業連関表や JSNA では、バイオマス燃料（パルプ黒液など）や廃棄物由来燃料（木くずや廃タイヤ、プラスチック、RPF など）の消費額は計上されていない。このような燃料が計上されないのは、それらの価格の観測が困難であることも一因である[15]。3.3 節のエネルギー勘定でも、このような燃料は一次エネルギーとして定義されておらず、最終エネルギー消費としてはそれを燃料として生産された自家電力や自家蒸気がカウントされている[16]。言い換えれば、廃棄物由来燃料の購入者価格はゼロであると仮定している。このことは各産業のエネルギー消費量を過小に評価するものではないが、自家発電や自家蒸気生産におけるこれらの燃料の使用が拡大すると、こうした活動（そうした活動を所有する各産業）の TFP 成長としての過大評価を導く[17]。

15 例えば、日本の鉄鋼業界では、2000 年代初頭から高炉やコークス炉で廃プラスチックやタイヤなどの廃棄物由来燃料の利用を推進し、CO_2 排出量を削減している。2000 年代半ばから 2020 年までの間に、年間 0.32–0.47 万トンの廃棄物由来燃料を使用し、約 100 万 t-CO_2 の排出削減を実現した（日本鉄鋼連盟 2022）。現状では、この利用量はむしろ廃プラスチックの供給（回収）に制約されている。同資料によると、廃プラスチックの利用はさらに拡大する余地があり、2030 年には 100 万トンまで拡大し、約 210 万 t-CO_2（産業界の総排出量の約 1.1%）を削減することを目標としている。しかし、日本のこのリサイクルシステムは補助金が多く、筆者が一部の企業に取材したところ、廃棄物由来の燃料の投入価格は現状ではマイナスのようである。

16 なお、エネルギー転換ではなく、最終エネルギー消費量として生産工程に直接投入される廃棄物由来燃料は、そのシェアは小さいと考えられるが、ここでは最終エネルギー消費としての対象から外れている。

17 戦後の日本経済では、こうした前提はマクロ的には大きな影響を与えないが、近年廃棄物由来燃料の利用を拡大している紙・パルプ製造業など、一部の産業ではその影響が観察される（Nomura 2023, Chapter 4）。

表 3.3.3-1　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	$\varepsilon_i c_i E^{T}_{ij}$	0			$\varepsilon_i c_i E^{T}_{iM}$	0	$\varepsilon_i c_i E^{T}_{i}$
	最終消費(C) 1原油 ・ ・ ・ 27自家蒸気(投入)	$\varepsilon_i c_i E^{C}_{ij}$	$\varepsilon_i c_i E^{C}_{if}$	$\varepsilon_i c_i E^{C}_{if}$				$\varepsilon_i c_i E^{C}_{i}$

(2) 電力化とエネルギー品質

エネルギー投入のうち、経済成長における電力の役割はとくに強調される。一人あたり実質 GDP の拡大はほとんど労働生産性の改善によって実現されるが、多くの国々での成長会計分析によれば労働生産性を改善させる最大の原動力は（全要素生産の改善ではなく）資本の蓄積であった。そしてコンピュータ制御の工作機械から情報通信機器まで、さまざまな機械設備の精確なオペレーションに不可欠なエネルギーが電力である。

エネルギー資源分野において著名な米国の経済学者サム・シューアは、20 世紀の米国経済成長におけるその歴史的な役割を評価し、電力を「技術進歩の仲介者（agent of technological progress）」であると呼称した（Schurr et al. 1990）。技術は資本に体化され、資本の稼働には二次エネルギーとしての電力が必要となる。とくに電力の役割が強調され始めたのは米英における 1920 年代後半から 1950 年代初めである[18]。1952 年には英国電気開発協会（Electrical Development Association）のパーシー・ダンシース会長は、安価で十分な電力供給による産業における生産性改善の重要性を強調している[19]。

最終エネルギー消費量に占める電力のシェアは電力化率（electrification rate）と呼ばれる。日本の経済成長においても電力化率の拡大は、旺盛な資本蓄積とその高度化を支える重要な役割を担ってきた。1955 年から 2019 年において、図 3.3.3-1 の縦軸には日本経済における資本深化をとり、横軸には右図では労働生産性、左図には電力化をプロットしている。ここで資本深化（capital deepening）とは、労働時間あたりの資本サービス投入量によって定義される資本労働比率（capital-labor ratio）である。図 3.3.3-1 の右図にみるように、戦後の経済成長パターンにおいては、労働生産性の改善はその 1.3–1.6 倍ほどのスピードの資本深化を必要としている。左図ではそれに対応して、資本深化のための電力化が進行する姿が描かれている。

18 米国経済の長期にわたる成長過程を分析した Gordon（2016）は 1920 年代末から 1950 年代初めの急速な TFP 上昇を可能としたもっとも重要な要因を機械の品質向上とし、それを裏付けるものとして電力消費の拡大を指摘している。米国で最初に発電所が開設されたのは 1882 年であるが、製造業をはじめ米国経済全体に電力が完全に普及したのは 1929–50 年であり、それが生産性革命を可能とした要因として評価される。

19 “Electricity’s Role in Industry–Contribution to Raising Productivity,” Financial Times, October 30, 1952.における Sir Percy Dunsheath 氏の発言。

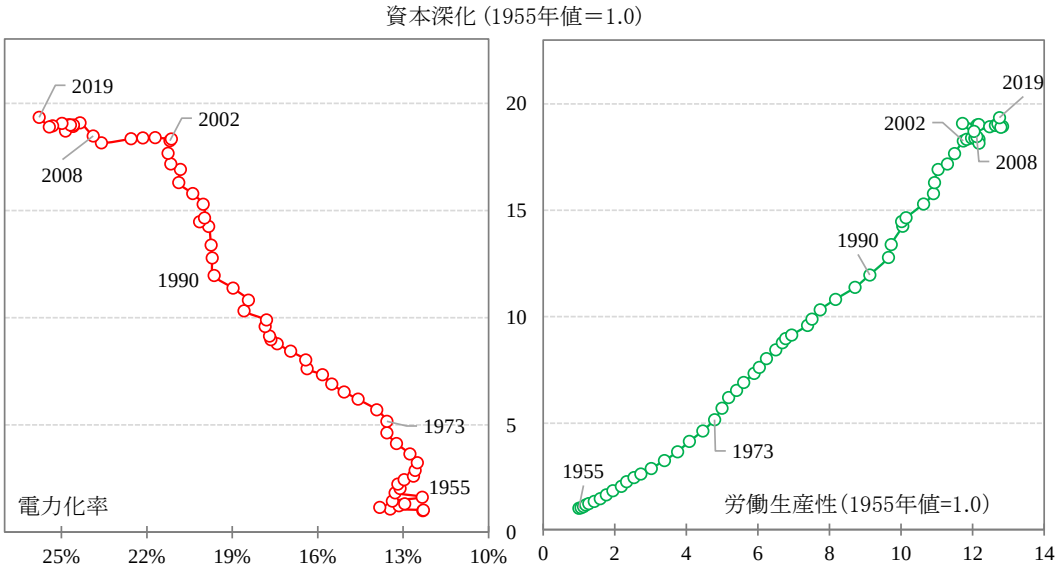


図 3.3.3-1　労働生産性、資本深化と電力化

単位：縦軸・右図横軸は 1955 年値=1.0（1955–2016 年）、左図横軸は電力化率（%）。
注：資料は(1)節を参照。

電力化の進行は単調ではない。第 I 期（1955–73 年）ではわずかな上昇に留まり、オイルショック後の第 II 期（1973–90 年）に急速な電力化の進行が見いだされる。こうした電力化の変化は、エネルギー投入という集計量における品質が変化したことを意味する。言い換えれば、EPI の黄金期とされた第 II 期におけるエネルギー生産性は、その一次エネルギー換算された熱量によって集計された最終エネルギー消費あたりの指標であり、その改善には電力化によるエネルギーとしての品質的な改善の影響も含まれているのである。また第 III 期（1990–2008 年）の後半期からは、資本深化が著しく停滞する中で、むしろ電力化のみが進行している。この期間の EPI においても、エネルギーの品質変化による影響が考慮されるべきであろう。

3.3 節ではエネルギー生産性をより厳密に定義しよう。簡易な指標として一国集計レベルでのエネルギー生産性は、分子を集計産出量（X）、分母を最終エネルギー消費量（一次エネルギー換算値）（primary energy equivalent of final consumption: E_p）によって定義している[20]。それを「グロスのエネルギー生産性（gross energy productivity）」と呼び、その成長率（τ）を次のように表記しよう。

$$\tau = \Delta \ln X - \Delta \ln E_p, \tag{3.3.3-1}$$

ここでΔは連続する二期間の差分を意味している。$\Delta \ln X$は一国集計産出量の成長率であり、それは産業別産出量（X_j）からのトランスログ指数によって定義している。

20「最終消費」とは、経済統計（国民経済計算体系）では生産過程に投入されるすべての中間消費を除くため、産業によるエネルギー消費を含まないが、エネルギー統計では、エネルギー転換部門による消費と在庫品純増を除く国内消費全体を示している。3.3 節での最終エネルギー消費とは後者の意味であり、それは産業部門（エネルギー転換用の消費分を除く）と家計部門における消費量の合計である。

$$\Delta \ln X = \sum_j \bar{w}_j^X \Delta \ln X_j, \tag{3.3.3-2}$$

ここで$\bar{w}_j^X$は、一国経済の名目産出額における産業別シェアの二期間平均値である（$\sum_j \bar{w}_j^X$=1）。

(3.3.3-1)式において定義される EPI は、電力化などエネルギーの構成変化による影響を含んでいる。発電における熱効率（thermal efficiency）を 30–50%とすれば、最終消費される電力における熱量の 2–3 倍の一次エネルギーが必要となる。よって電力化の進行は、直接的には(3.3.3-1)式におけるグロスの EPI を悪化させる影響を持つ。他方、電力は単純な熱量換算による評価よりも、より高品質なエネルギーのサービスを提供すると考えられる。エネルギー投入としての高度化は、測定されるグロスの EPI を上昇させる効果を持つと考えられる。

あらためて一国集計レベルでのエネルギー生産性を定義しよう。(3.3.3-1)式におけるグロスの EPI を次の 3 つの項へと分解する。

$$\tau = \Delta \ln q_c + \Delta \ln q_s + \tau_q, \tag{3.3.3-3}$$

ここで、右辺第一項のq_cは次のように定義されている。

$$q_c = E_f / E_p. \tag{3.3.3-4}$$

E_fは国内における最終エネルギー消費量（final energy consumption）であり、E_fを生産するために投入された一次エネルギー消費量（E_p）との指数として、q_cはエネルギー転換における効率性を示している。q_cを「エネルギー転換指数（energy conversion index）」と呼ぼう。石炭など一次エネルギー自体が最終消費される場合にはq_cの分母・分子ともに同量が含まれるが、電力化の進行は分母をより大きく拡大させることからq_cを低下させる[21]。他方、発電における技術的な熱効率の改善はq_cを上昇させる。

また(3.3.3-3)式の右辺第二項（q_s）は、

$$q_s = E / E_f, \tag{3.3.3-5}$$

としてエネルギー投入量（E）と最終エネルギー消費量（E_f）との指数によって定義されている。石炭、A 重油、灯油、天然ガス、電力など、さまざまなエネルギー種をiとしよう。ここでは同一のエネルギー種においては$E_i/E_{f,i}$が時系列的に一定であることを仮定するが、集計量としてのE/E_fはその構成変化を反映して変化する。

ここでE_fは異なるエネルギー種ごとの熱量（$E_{f,i}$）の和集計値によって定義されている（$E_f = \sum_i E_{f,i}$）。単純な和集計の適用とは、熱、動力、光などのエネルギー・サービス

21 再エネによる電力の一次エネルギー換算は、日本のエネルギー統計では当該時点の平均的な火力発電効率によって評価されること（partial substitution method）から、電力に占める再エネのシェア拡大によってq_cが上昇することはない。これに対して IEA 統計では、再エネ電力のエネルギー量によって評価され（physical energy content method）、再エネ電力の拡大はq_cを上昇させる。3.3 節では前者の概念によっている。

を提供するために最終消費されるエネルギー種間において、熱量あたりの品質が等しいと陰伏的に仮定していることを意味する。しかし電力という二次エネルギーへの転換にはロスが生じ、熱量あたりの単価が相対的に高いように、それはより高品質である。

産業別集計エネルギー投入量（E_j）として、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、次のように定義する。

$$\Delta \ln E_j = \sum_i \bar{v}_{ij} \Delta \ln E_{f,ij}, \tag{3.3.3-6}$$

$\Delta \ln E_{f,ij}$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(3.3.3-6)式は、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。

$$\Delta \ln E = \sum_j \bar{w}_j^E \Delta \ln E_j, \tag{3.3.3-7}$$

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）。

(3.3.3-5)式におけるq_sは、E_fからEへの変換指数であり、それを「エネルギー高度化指数（energy sophistication index）」と呼ぶ。電力は都市ガスに比して熱量あたりの価格が高く、最終エネルギー消費において都市ガスから電力へとエネルギー転換が進行するのであれば、もしE_fが一定であっても品質が調整されたエネルギー投入量（E）としてq_sは上昇する。電力化の進行は、その直接的な効果としてはエネルギー転換指数（q_c）を低下させるが、エネルギー高度化指数（q_s）を上昇させるものとなる。q_cとq_sの積として、

$$q = q_c q_s = E/E_p, \tag{3.3.3-8}$$

両者をまとめた指数であるqを「エネルギー品質指数（energy quality index）」と呼ぼう。

そして(3.3.3-3)式における右辺第三項（τ_q）は、エネルギー投入一単位あたりの産出量であり、エネルギーとしての品質の相違を統御したもとで定義されるエネルギー生産性の成長率である。

$$\tau_q = \Delta \ln X - \Delta \ln E. \tag{3.3.3-9}$$

(3.3.3-3)式にみるように、左辺のグロスの EPI（τ）は、エネルギー品質の変化による影響（q）を含んでいるという意味においてグロス指標であり、その影響を取り除いた品質調整済みの EPI がτ_qである[22]。

あらためて(3.3.3-3)式を書き換えて、

$$\Delta \ln E_p = -\Delta \ln q - \tau_q + \Delta \ln X, \qquad (3.3.3\text{-}10)$$

とすれば、一次エネルギー消費量（E_p）の変化は、エネルギー転換の効率化（q_c）とエネルギーの高度化（q_s）からなる右辺第一項のエネルギー品質変化（$\Delta \ln q$）、第二項の品質調整済み EPI（τ_q）、そして第三項の産出量変動（$\Delta \ln X$）という 3 つの要因へと分解される。

省エネ（energy conservation）やエネルギー効率性（energy efficiency）という用語はエネルギー生産性と互換的に用いられることもあるが[23]、これまでの定式化に基づけば、それぞれの意味をより明確に定義できる。エネルギー効率性を狭義に捉えれば、それは一次エネルギーからエネルギー投入量を生産するまでの技術的な効率性指標として、(3.3.3-10)式の右辺第一項（エネルギー品質変化: $\Delta \ln q$）として定義される。また省エネとは、エネルギー・サービス自体における低品質化や、あるいは産出量自体の減少を伴うものとなろうとも、一次エネルギー消費量（E_p）自体が削減される現象である[24]。こうした定義によれば、(3.3.3-10)式の左辺の減少が省エネそのものであり、省エネの源泉は右辺における、エネルギー効率性（q）の改善、エネルギー生産性（τ_q）の改善、そして生産量（X）の縮小という大きく 3 つに分解して理解される。

(3) 産業構造要因

(1)節の(3.3.3-1)式や(3.3.3-9)式で定義されたエネルギー生産性は、一国集計レベルで定義されており、産業構造変化による影響をその内に含んでいる。もしすべての産業でエネルギー生産性が不変であっても、エネルギー多消費型産業の生産が相対的に縮

22 これまでの変数定義によれば、グロスのエネルギー生産性を$(X/E_p) = (E_f/E_p)(E/E_f)(X/E)$と分解している。その右辺第三項の成長率として定義される(3.3.3-9)式のτ_qは一国経済レベルでの定義として、産業構造変化による影響を含んだものであり、産業構造要因を統御した定式化は(3)節において後述される。

23 米国科学アカデミー（National Academy of Sciences 1979）は、伝統的な意味における“conservation”とは賢く用心深い（“wise and thoughtful use”）という意味を持つものの、1973–74 年に生まれた“energy conservation”という用語は耐乏や、英雄的あるいは犠牲的な否定という（“belt-tightening”や“heroic or sacrificial denial”な）性格を帯びるものとなったと指摘している。

24 (3.3.3-10)式を書き換えれば$E_p = (E/E_p)^{-1}(X/E)^{-1}X$である。自動車の利用や住宅・オフィスにおける冷暖房などのエネルギー・サービス量E_Sを定義すれば、(3.3.3-10)式をさらに分解して$E_p = (E/E_p)^{-1}(E_S/E)^{-1}(E_S/X)X$とも理解される。Herring（2006）は省エネとは「より低品質のエネルギー・サービス化によるエネルギー消費の削減」（“reduced energy consumption through lower quality of energy services”）であるとした。それは右辺第三項であるE_S/X（生産量一単位あたりのエネルギー・サービス需要量）の縮小を通じた犠牲的なE_pの減少として理解される。またこうしたエネルギー・サービス量の識別によれば、右辺第二項のE_S/Eのみを狭義に捉えた真のエネルギー生産性として理解することもできる。Murtishaw and Schipper（2001a, 2001b）はグロス EPI から構造変化要因の分解において、真の EPI を狭義のE_S/E（あるいは 3.3 節のエネルギー品質の変化を考慮せずにE_S/E_p）として捉えている。それに対して 3.3 節での真のエネルギー生産性であるX/Eは$(E_S/E)(E_S/X)^{-1}$として、E_S/Xのようなエネルギー・サービスの縮小や低品質化を含むものである。

小するような産業構造変化を伴うものであれば、一国集計レベルで定義されるエネルギー生産性指標はプラス成長になりうる[25]。細分化した産業レベルでの測定から積み上げることによって、より適切に産業構造要因を統御したエネルギー生産性指標へと接近できる。

後に 3.3.5 節では、産業構造変化が一国全体のエネルギー生産性の成長率に与える影響を測定する。データ（エネルギー勘定）の概要は(1)節に示されているが、ここではその測定における概念を明確にするため、とくに重要となる以下の三点を論じておきたい。第一に、経済統計とエネルギー統計の主体の相違である。エネルギー統計では、実際の経済における経済主体（制度単位）におけるエネルギー消費のうち、用途によって分割して産業、民生業務、運輸へと格付けしている。それはエネルギー統計として国際的に広く利用される概念であるが、エネルギー投入と産出との投入産出関係、あるいはエネルギー投入と資本や労働などの他の生産要素との相対的な投入関係を描写することには適さない。3.3 節におけるエネルギー生産性の分析では、産業別生産性統計における投入産出関係の整合性を保持するように、経済統計の概念に合わせて経済主体ごとのエネルギー投入が定義されている。

第二に、3.3 節での産出量は粗生産（gross output）ではなく、実質付加価値によって定義されている。一般には、粗産出量のほうが直接的に理解されやすく、実質付加価値はその変動が大きくなりがちとなる問題もある。しかし実質付加価値という純生産（net output）概念では、中間投入の変化がエネルギー生産性に与えるバイアスを緩和することが期待される[26]。もうひとつの利点は、一国集計値の変化における産業起因を明確にすることである。なお 3.3 節は EPI の分析を主目的とするため、生産関数はエネルギー、資本、労働を投入要素とした関数を想定しており、純産出量は実質付加価値と最終消費されるエネルギー投入量の集計量によって定義されている。

第三に、一国全体の EPI を消費主体別寄与度へと整合的に分解する際のひとつの課題は、家計（あるいは家庭）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。3.3 節では家計も含めて一国経済の整合的な描写を行うため、家計部門（家庭部門と自家用車による輸送部門）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（土地を含む）と耐久消費財の資本サービス生産量、

25 例として、2 つの産業があり、それぞれの産出量（実質付加価値）をX_1およびX_2（ただし$X_1 = X_2$）、エネルギー消費量をE_1およびE_2（ただし$E_2 = 4E_1$）としよう。ここでは第 2 産業がよりエネルギー消費的である。基準時点から比較時点に対して、いま両産業におけるエネルギー生産性（X_1/E_1およびX_2/E_2）は不変のままであったとして、第 1 産業のみの産出量が 2 倍に拡大したとしよう。そのとき集計産業におけるエネルギー生産性は、$(2X_1/5E_1 = 0.4\,(X_1/E_1))$から$(3X_1/6E_1 = 0.5\,(X_1/E_1))$へ、25%改善したとして測定される。それはエネルギー多消費型産業（第 2 産業）の相対的な低成長によって、集計レベルで測定される見かけ上のエネルギー生産性が過大に評価されることを示している。

26 たとえばある産業において、粗産出量は一定のもとで、自部門内で生産していたエネルギー消費的な中間財を、輸入財へと切り替えたとしよう。そのとき粗生産をアウトプットとしたエネルギー生産性の指標では、エネルギー消費の縮小により生産性は改善したものと評価されてしまう。しかし、これが見かけ上の改善に過ぎないことは明らかである。他方、3.3 節のような実質付加価値をアウトプットとするエネルギー生産性の指標では、エネルギー消費は縮小しながらも、輸入財の中間投入量の増加によって実質付加価値も減少し、エネルギー生産性への影響は緩和される。

およびエネルギー消費量の集計値によって定義する。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（imputed rent）として古くからGDPに加算されている概念である。それは一般に不動産業に格付けられるが、3.3節でのエネルギー分析用に拡張された産業別生産性勘定では、帰属家賃を第47産業としての家計部門（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[27]。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、その多くが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資本サービスの拡大ともなり、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。

一国経済としての最終エネルギー消費量（一次エネルギー換算）（E_p）はj産業部門における消費量（$E_{p,j}$）の和集計による。両者の成長率を、以下のようなトランスログ・タイプの指数によって近似する。

$$\Delta \ln E_p = \sum_j \bar{s}_j \Delta \ln E_{p,j}, \tag{3.3.3-11}$$

ここで$\bar{s}_j$は最終エネルギー消費量（一次エネルギー換算値）の産業別シェア（$E_{p,j}/E_p$）の二期間平均値である（$\sum_j \bar{s}_j = 1.0$）。(3.3.3-7)式におけるw_j^Eが最終エネルギー消費額（名目値）の産業別シェアであったのに対して、ここでのs_jは物量としての産業別シェアである。1955–2016年におけるs_jは付表の表 3.3.7-1に与えられている。

産業部門ごとのグロスのEPI（τ_j）を次のように定義しよう。

$$\tau_j = \Delta \ln X_j - \Delta \ln E_{p,j}. \tag{3.3.3-12}$$

(3.3.3-12)式を(3.3.3-11)式へと代入して、

$$\Delta \ln E_p = \sum_j \bar{s}_j \Delta \ln X_j - \sum_j \bar{s}_j \tau_j, \tag{3.3.3-13}$$

一国全体の一次エネルギー消費量E_pの成長率は、右辺第一項における産業ごとの生産拡大による寄与度（$\bar{s}_j \Delta \ln X_j$）と、第二項における産業ごとのグロスEPIの寄与度（$\bar{s}_j \tau_j$）へと分解される。第一項は$\bar{s}_j$をウェイトとした集計量として、エネルギー消費の視点に

27 現行のSNA国連勧告（SNA2008）を超えたこうした勘定体系はバーバラ・フラウメニ氏によりジョルゲンソン勘定（Jorgensonian accounting）とも呼ばれる。耐久消費財の帰属計算値などの拡張によって、一国経済のGDPは拡張している。ただし経済成長率への計数的な影響は軽微であり、内部整合的な測定となることを目的としている。

基づいて産業部門別の集計産出量による寄与を評価したものである。そして第二項が産業構造変化を統御した EPI を示している。

(1)節の一国集計レベルにおける(3.3.3-3)式と同様に、(3.3.3-12)式におけるグロスの産業別エネルギー生産性の成長率（τ_j）を次のように分解する。

$$\tau_j = \Delta \ln q_{c,j} + \Delta \ln q_{s,j} + \tau_{*,j}. \tag{3.3.3-14}$$

ただし、$q_{c,j}$および$q_{s,j}$は、一国集計レベルにおける(1)節の(3.3.3-4)式および(3.3.3-5)式と同様に、それぞれ産業部門別に定義されたエネルギー転換指数（$E_{f,j}/E_{p,j}$）とエネルギー高度化指数（$E_j/E_{f,j}$）である。また右辺第三項（$\tau_{*,j}$）はエネルギー品質の変化を統御したうえで、産業別に測定されるエネルギー投入量あたりのエネルギー生産性改善として、

$$\tau_{*,j} = \Delta \ln X_j - \Delta \ln E_j, \tag{3.3.3-15}$$

によって定義される。ここでのE_jは(3.3.3-6)式のとおりである。

(3.3.3-13)式および(3.3.3-14)式より、(3.3.3-1)式における一国集計レベルでのグロスの EPI（τ）は次のように分解される。

$$\tau = \Delta \ln \sigma + \Delta \ln q_* + \tau_* \tag{3.3.3-16}$$

ここで、右辺の各変数は以下のように定義されている。

$$\Delta \ln \sigma = \sum_j \left(\bar{w}_j^X - \bar{s}_j \right) \Delta \ln X_j, \tag{3.3.3-17}$$

$$\Delta \ln q_* = \sum_j \bar{s}_j \Delta \ln q_{c,j} + \sum_j \bar{s}_j \Delta \ln q_{s,j}, \tag{3.3.3-18}$$

$$\tau_* = \sum_j \bar{s}_j \tau_{*,j}. \tag{3.3.3-19}$$

(3.3.3-16)式のようにマクロレベルにおいて計測されるグロスの EPI（τ）は、右辺第一項の産業構造要因（σ）、第二項のエネルギー品質要因（q_*）[28]、そしてその両者を統御したうえで定義された第三項の一国集計レベルでの調整済み EPI（τ_*）へと分解される。

エネルギー多消費型産業が拡大するような産業構造変化の場合には、$\Delta \ln \sigma$がマイナス値となり、グロスの EPI（τ）は過小に評価される。逆にエネルギー多消費型産業の相対的な縮小はτの過大評価を導く。エネルギー品質要因は、(3.3.3-18)式のようにエネルギー転換要因（$q_{c,j}$）とエネルギー高度化要因（$q_{s,j}$）の集計値からなる。電力化の進行

28 (3.3.3-18)式でのエネルギー品質要因q_*は、一国集計レベルで定義される(1)節での(3.3.3-8)式とはウェイトの相違により乖離している。3.3.4 節では(3.3.3-8)式、3.3.5 節では(3.3.3-18)式に基づいて、エネルギー品質要因が定義されている。

は、エネルギー転換要因を通じてはグロスの EPI（τ）を過小に評価させ、エネルギー高度化要因を通じてはグロスの EPI（τ）を過大に評価させる。これらの要因を調整したτ_*が、より望ましい真の EPI 指標を与える。

3.3.4　エネルギー品質変化

(1)節で定義されたフレームワークに基づき、日本経済における 3 つのエネルギー投入量（E_p, E_f, E）の推移を示したものが図 3.3.4-1 である。すべての指数は 1955 年を 1.0 と基準化するが、日本経済における長期傾向としては、一次エネルギー換算された最終エネルギー消費量（E_p）を最終エネルギー消費量（E_f）が上回り、品質調整済みエネルギー投入量（E）はそれをさらに上回る。

各エネルギー投入量から求められるエネルギー転換指数（$q_c = E_f/E_p$）と高度化指数（$q_s = E/E_f$）、および両者の積としてのエネルギー品質指数（$q = E/E_p$）の推移を示したものが図 3.3.4-2 である。エネルギー転換指数は 1955–65 年において急速な上昇がみられるが、それ以降は長期にわたり横ばいから減少傾向にある。これはその期間にも火力発電所など熱効率の改善（転換指数の増加要因）が見いだされるものの、電力化の進行（転換指数の低下要因）がそれを相殺してきたことを示している。他方、電力化の進行はエネルギー高度化指数の改善として現れ、1970 年以降ほぼ単調に増加している。両者を総合したエネルギー品質指数は、1955 年を 1.0 としたとき 2019 年では 1.81 となり、期間平均値としてみれば年率 0.9%の改善である。そうしたエネルギー品質の改善は、(3.3.3-3)式にみるように、グロス EPI の内に含まれている。

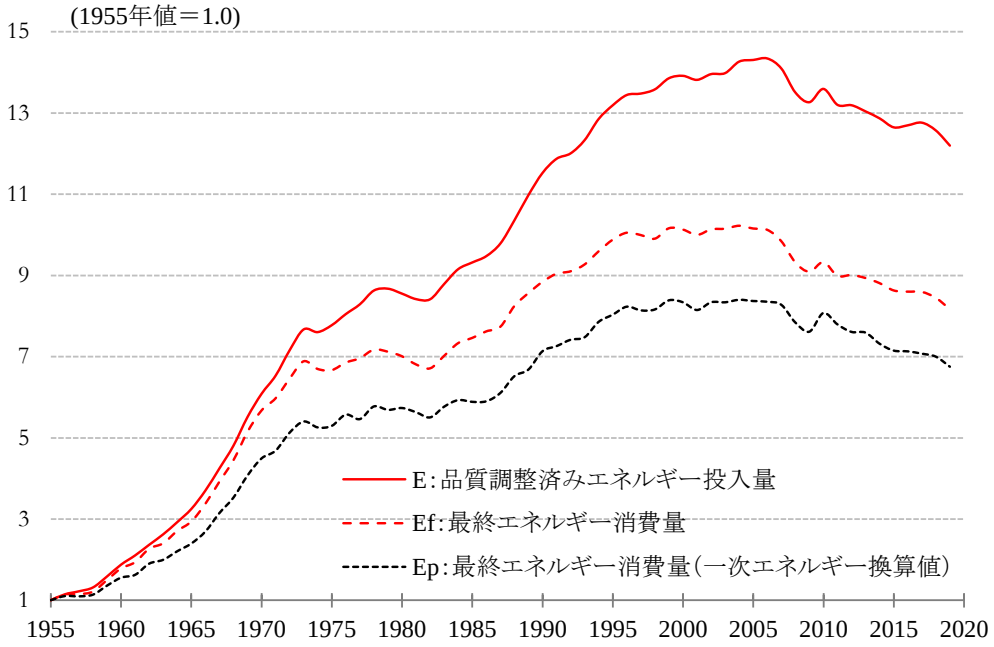


図 3.3.4-1　エネルギー投入指数

単位：1955 年値=1.0（1955–2019 年）。

注：品質調整済みエネルギー投入量（E）は(3.3.3-7)式に基づく。

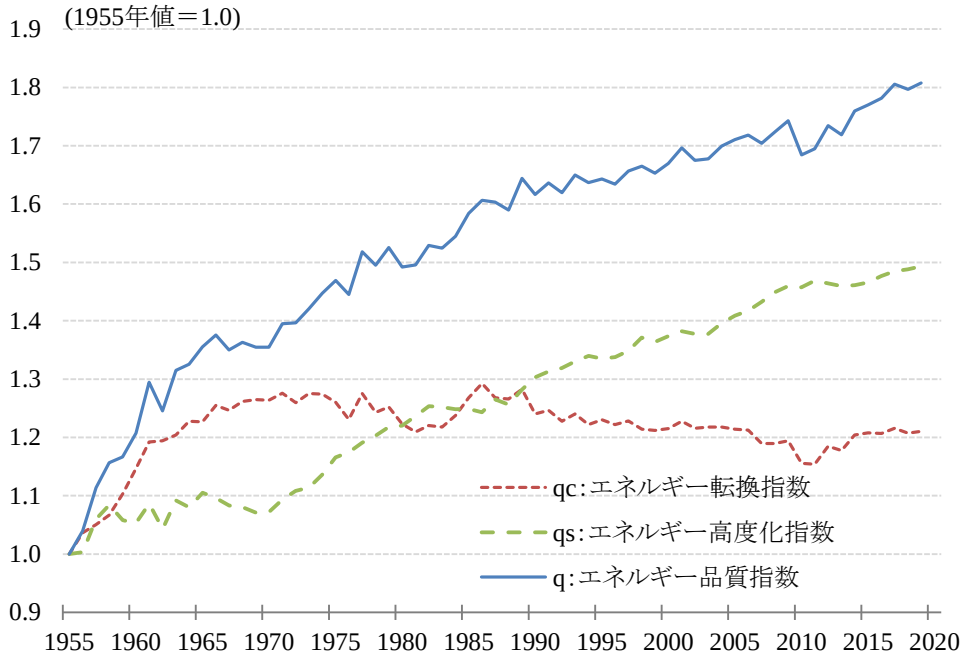


図 3.3.4-2 エネルギー品質指数

単位：1955 年値=1.0（1955–2019 年）。

注：エネルギー転換指数q_cは(1)節での(3.3.3-4)式、エネルギー高度化指数q_sは(3.3.3-5)式による。

(1)節の(3.3.3-3)式による一国集計レベルでの分解によれば、1955–2019 年の全観測期間におけるグロス EPI（年平均 1.5%改善）の 3 分の 2 が、エネルギー品質の改善（$\Delta \ln q$）によって説明される。言い換えれば、エネルギー品質変化を調整した EPI（τ_q）は、全観察期間の期間平均値で年率 0.6%ほどの改善を示すに過ぎない。τとτ_qの両系列の時系列的な推移を示した図 3.3.4-3 にみるように、エネルギー品質変化を調整した EPI（τ_q）はグロスの EPI を大きく下回っている。マクロで観察される見かけ上のエネルギー生産性改善の多くは、エネルギー転換や高度化といった、エネルギー投入における品質の変化によって説明されるのである。また高度経済成長を実現した第 I 期（1955–73 年）では、τ_qはむしろ低下している。これは一国集計レベルによる測定の限界であり、より適切な評価のためには、3.3.5 節において産業構造変化による影響を統御した測定が求められる。

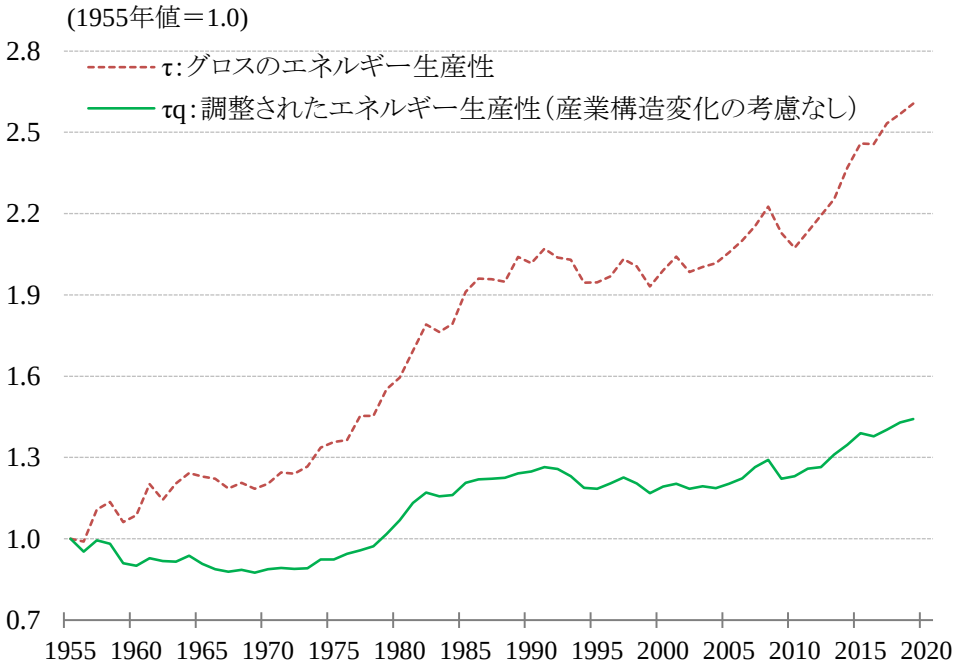


図 3.3.4-3　エネルギー品質を統御したエネルギー生産性

単位：1955 年値=1.0（1955–2019 年）。

注：グロスのエネルギー生産性（τ）は(1)節での(3.3.3-1)式、調整済みエネルギー生産性指数（産業構造変化の考慮なし）（τ_q）は(3.3.3-9)式による。産業構造要因を統御した後の調整済みエネルギー生産性指数との比較は、3.3.5 節の図 3.3.5-1 を参照されたい。

3.3.5　EPI の産業起因

(1) 逓減する EPI

エネルギー品質変化に加え、(3)節の(3.3.3-19)式に基づいて産業構造変化による要因を統御したもとで調整された真の EPI（τ_*）の測定値は図 3.3.5-1 に示されている。そこでは比較のため、3.3.4 節で推計されたエネルギー品質変化のみを統御した EPI（τ_q）も描かれるが、産業構造要因の考慮によってマクロ的な EPI 測定値は大きく修正される。第 I 期（1955–73 年）における EPI では、エネルギー品質変化の考慮によってτ_qは大きく低下するが、高度成長期における産業構造変化を適切に評価したτ_*によれば、グロスの EPI に近いレベルの高い EPI 実現が見いだされる。その一方、2000 年代初めからの 10 年間では、τおよびτ_qの両系列は緩やかに改善するが、産業構造要因を考慮したτ_*では停滞がみられる。それはこの期間における見かけ上の EPI が、エネルギー多消費型産業の相対的な縮小という産業構造変化によって過大評価されていることを示している。しかし、とくに東日本大震災後には、τ_*においても再び急速な上昇が見いだされる。

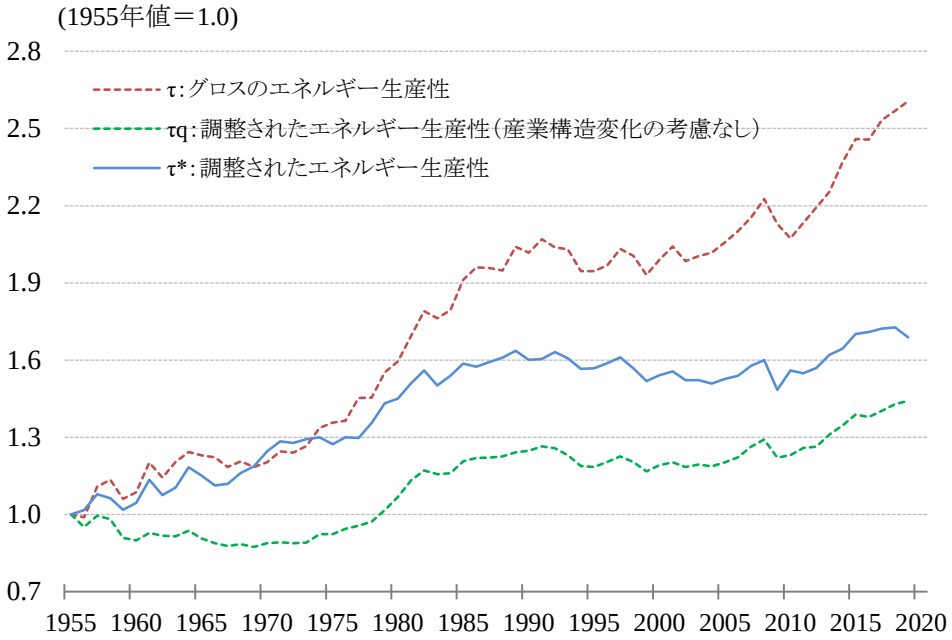


図 3.3.5-1　エネルギー品質と産業構造要因を統御したエネルギー生産性

単位：1955 年値=1.0（1955–2019 年）。

注：グロスの EPI（τ）は(1)節での(3.3.3-1)式、調整済み EPI（産業構造変化の考慮なし）（τ_q）は(3.3.3-9)式、さらに産業構造要因を統御した後の調整済み EPI（τ_*）は(3)節の(3.3.3-19)式による。

全観察期間（1955–2019 年）のうちの（戦前期を除く）四つの期間ごとに、一国経済におけるグロスの EPI を分解したものが図 3.3.5-2 である。グロス EPI(年平均成長率)は点線によって描かれており、それはエネルギー品質変化（転換要因と高度化要因）と産業構造変化の両者を統御したもとでの調整済みの EPI へと分解される（(3)節）。各期間における産業ごとの詳細を検討する前に、こうした構造変化によって一国集計レベルのグロス EPI がどのように改定されるか、言い換えれば、マクロ的な統計から直接観察されるグロス EPI はその内にいかなる測定バイアスを持つのかを図 3.3.5-2 に基づいて考察しよう。

第 I 期（1955–73 年）は、3.3.4 節にみたようにエネルギー品質の改善が顕著であり（図 3.3.4-2）、グロスの EPI（年率 1.2%）はエネルギー転換要因とエネルギー高度化要因によって、それぞれ 1.3 ポイントと 0.5 ポイント過大に評価されている。それはエネルギー品質の改善によって、真のエネルギー生産性の改善よりもグロス EPI が大きく嵩上げされていたことを示している。他方、高度経済成長を実現したこの期間の産業構造変化として、エネルギー多消費型産業が大きく拡大したことにより、グロス EPI は年率 2.0 ポイントほど過小に評価されている。重工業化は真のエネルギー生産性の改善を見えづらいものとしている。この期間、エネルギー品質要因と産業構造要因は互いに相殺する効果を持つが、両者を調整した真の EPI（τ_*）は年率 1.4%の改善となり、グロス EPI（年率 1.3%）をわずかに上回る。

第 II 期では、産業構造変化による影響は（第 I 期の）マイナスからプラスへと転じている。産業構造変化とエネルギー高度化によって、グロス EPI（年率 2.7%）はそれぞれ年率 1.1 ポイントと 0.5 ポイント過大に評価されており、調整された EPI（τ_*）は年率 1.3%にまで大きく下方に改定される。それは第 I 期の水準（年率 1.4%）を下回る。グロス EPI という指標では、その黄金期は二度のオイルショックによる影響を含む第 II 期（1973– 90 年）にみられるが、2 つの構造変化を統御して調整された真の EPI のピークはむしろ第 I 期（高度経済成長期）にあることが見いだされる。黄金期の EPI は、オイルショック後の重工業化の後退という産業構造変化により大きく嵩上げされているのである。

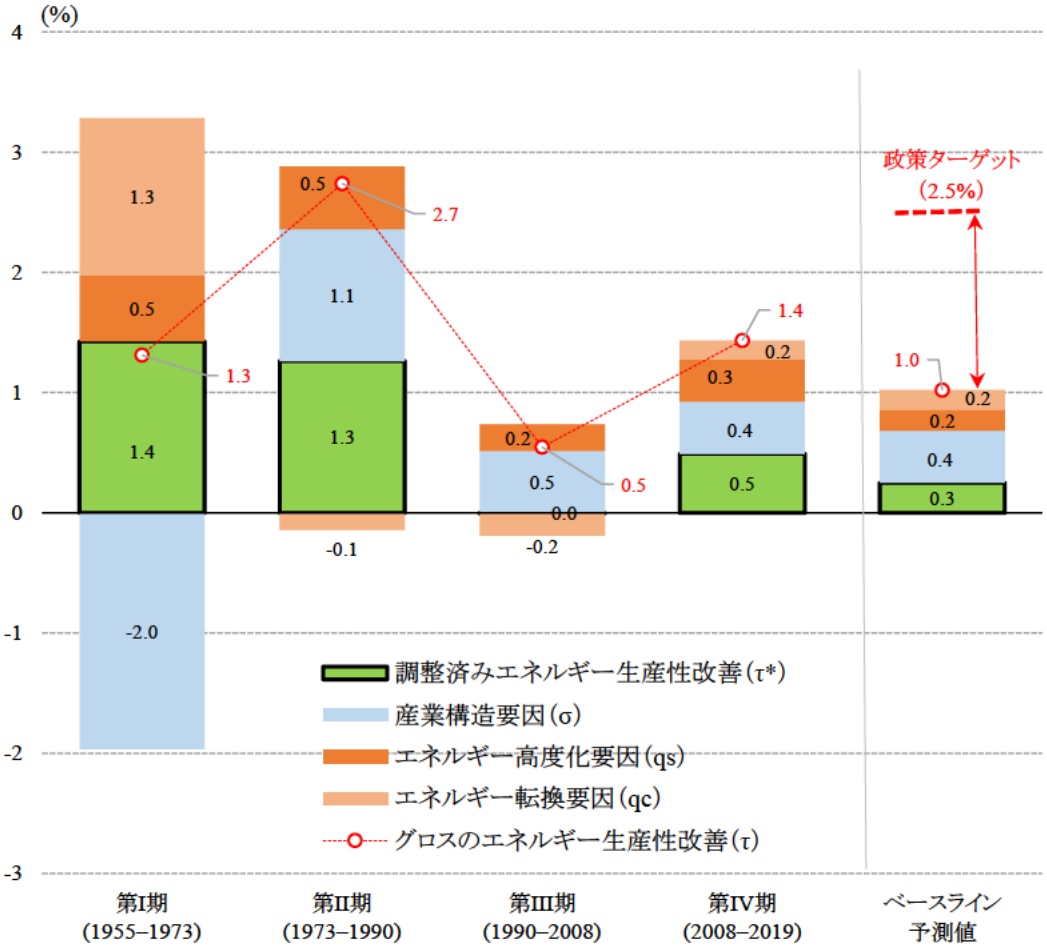


図 3.3.5-2 エネルギー生産性改善の要因分解（実績値と予測値）

単位：%（年平均期間成長率）。

注：グロス EPI の要因分解は(3)節の(3.3.3-16)式に基づく。なお、最右系列のベースライン予測値は(6)節を参照（政策ターゲットとした年率 2.5%は、2030 年度に 2013 年比▲46%とした目標に相応）。なお 3.3 節では測定期間を 4 つの期間に区切っているが、短期的な変動も大きいため年次の取り方にも依存している。時系列推移は図 3.3.4-2 および図 3.3.5-1 を参照されたい。

第 III 期（1990–2008 年）には、構造変化の調整によっては真の EPI（τ_*）はほぼゼロにまで大きく減速し、日本経済におけるエネルギー生産性の低迷は顕著である。後述するように省エネ法の制定は 1979 年であり、その後には大規模な改正が何度か行なわれ、とくにこの期の後半（2000–08 年）には気候変動問題への対応からもっとも積極的な省エネの推進が行なわれている。こうした省エネへの支援制度によって、ミクロ的には補助金行政が有効であるような評価もされるが、一国集計レベルでは真の EPI は第 II 期から大きく減速する姿が見いだされる。グロス EPI（年率 0.5%）は産業構造要因によって年率 0.5 ポイント嵩上げされており、真の EPI に改善は見られない[29]。第 I 期から第 III 期まで続くτ_*の逓減傾向は、省エネ法の施行・改正、また産業界の自主的な取り組みはあろうとも[30]、経済合理的に利用できる安価な省エネ技術の枯渇を示唆している。

そして第 IV 期（2008–19 年）のグロス EPI（年率 1.4%）は第 I 期（年率 1.3%）を上回ったが、第 II 期と第 III 期から続く産業構造の変化により 0.4%、エネルギー高度化により 0.3%、エネルギー変換により 0.2%の過大評価となっている。真の EPI は年率 0.5%と評価され、グロス EPI の 3 分の 1 に近い。しかし第 III 期との比較では回復基調にあるとも考えられる。2011 年 3 月の東日本大震災以降、図 3.3.5-1 に示されるように真の EPI は強い上昇傾向にある。その要因を捉えるためには、ここでの産業構造の統御のみでは不十分であり、(5)節において産業内における構造変化に接近する。(2)節以降では、各期間における産業ごとの寄与度や変化について詳細に考察していこう。

(2) 第 I 期: 1955–1973 年

マクロ的なエネルギー消費と EPI の産業起因を観察しよう。図 3.3.5-3 では、第 I 期における品質調整済みエネルギー消費量（E）の変化に対する産業別寄与度（(3.3.3-7)式に基づく分解）を左図に、調整済み EPI（τ_*）に対する産業別寄与度（(3.3.3-19)式に基づく分解）を右図に描いている。一国経済におけるエネルギー消費の変化とエネルギー生産性の変化は、それぞれの産業による貢献（寄与度）へと分解されており、（家計部門の自己勘定サービス生産を含む）産業ごとの寄与度の合計値がマクロの期間平均成長率と完全に合致している。またそれぞれの計数は付表の表 3.3.7-4、その成長率は表 3.3.7-8 を参照されたい。

高度経済成長期における一国全体のエネルギー消費量の急速な拡大（年率 11.5%）に対して、非家計部門では 18.鉄鋼業（寄与度にして 1.58 ポイント）が最大の消費主体と

29 Murtishaw and Schipper（2001a, 2001b）は米国経済におけるエネルギー生産性変化（3.3 節でのグロス EPI に相応）の要因を分析し、1994–98 年における改善は、それまでの 1970 年代や 1980 年代とは異なり、そのほとんどが構造変化によって説明されると評価している。それはエネルギー多消費的ではない（とくに情報技術関連の）製造業の GDP シェア拡大に加え、自動車利用や家電所有あるいは家庭暖房面積などが経済成長ほどには拡大しなかったことの 2 つによる。3.3 節での構造変化要因とはその前者のみであり、後者の効果は含まれていない（真の EPI の中に含まれている）。

30 経団連では、1997 年 12 月の京都議定書合意に先立つ 1997 年 6 月に「環境自主行動計画」を策定し、各業界・企業による温室効果ガス排出削減への積極的な取り組みを推進してきた。2013 年 1 月には「低炭素社会実行計画」を策定したが、2020 年 10 月に菅義偉内閣が掲げた 2050 年のカーボンニュートラル宣言を受け、2021 年 11 月には「カーボンニュートラル行動計画」へと改訂されている（経団連 2022）。

なっている。加えて、12.化学業の 1.20 ポイント、17.窯業土石製品製造業の 0.53 ポイント、10.紙パルプ製品製造業の 0.33 ポイント、19.非鉄金属製品製造業の 0.31 ポイントの 5 つのエネルギー多消費型産業の拡大(寄与度の合計は 3.96 ポイント)によって、この期間における非家計エネルギー消費量拡大の 44.5%が説明される。

エネルギー多消費型産業における EPI もまた顕著である。産業構造要因を統御した一国集計レベルでの EPI では、年率 1.4%の改善と 3.3 節の観察期間内でのピークとなるが(**(1)節の図 3.3.5-2**)、そのもっとも大きな貢献は 0.79 ポイントの寄与度を持つ 18.鉄鋼業であり、12.化学業（0.52 ポイント)、17.窯業土石製品製造業（0.40 ポイント）と続く。5 つのエネルギー多消費型産業による寄与度合計でも 1.8 ポイントとなり、一国レベルの EPI 改善（1.4%）を上回る。

この期間、日本の鉄鋼業の EPI は年平均 4.0%ものスピードで改善した(**表 3.3.7-8**)。鉄鋼業の省エネ実現においてとくに効果的であった対策として、加治木（2010）は 1）平炉から転炉への転換（LD 転炉の導入)、2）連続鋳造（continuous casting: CC)、3）転炉ガス回収法（oxygen converter gas recovery system: OG)、4）コークス乾式消化設備（coke dry quenching: CDQ)、5）高炉炉頂圧発電（top pressure recovery turbine: TRT）の導入を挙げている。そして LD 転炉や CC などの技術導入は、1952 年に制定された企業合理化促進法による合理化特別償却制度の対象期間（1952–68 年）とほぼ一致していたことを指摘している。こうした政策的な支援が有効となった背景には、高度経済成長期の旺盛な内需拡大に対して資本能力増強のための投資が求められたこと、またコスト合理性を持つ省エネ技術が利用可能であったことによる。加治木（2010）は、LD 転炉や CC の導入は全般的な生産性の向上やコスト削減を主目的としたものであり、OG 法は競合する技術に対して資本コスト面で優位性を確立したことで普及したと指摘する。

鉄鋼業における省エネとしてもっとも効果的であったこの 3 つの対策は、省エネそのものを主目的としたものではなく、生産能力拡大のための投資に組み込まれた技術の恩恵である。戦後ハーバード大学で経済発展論の基盤を構築したアレクサンダー・ガーシェンクロンは、途上国は海外からの輸入機械の投資などにより、意図せずとも技術進歩を享受できると指摘した。こうした「借りた技術（borrowed technology)」は、エネルギー生産性の改善としても大きな効果を持っている。省エネ技術はそれが安価になるにしたがって資本財へと体化（embodied）され、意図せずとも自ずと経済体系に組み込まれていく性格を持つ。対して、おもにオイルショック後（第 II 期）に導入された CDQ や TRT は、エネルギー価格の上昇によってはじめて省エネとしてのコスト合理性を持つに至った技術である。第 II 期においては、CDQ や TRT によるエネルギー生産性の改善もあるが鉄鋼業の EPI は年率 1.3%へと低下しており（**表 3.3.7-9**)、日本の鉄鋼業のもっとも高い EPI（年率 4.0%）は第 I 期に実現している。

他方、第 I 期にエネルギー生産性を低下させた産業は、1.農林水産業（一国経済の EPI への寄与度では▲0.27 ポイント)、4.建設業（▲0.19 ポイント)、45.その他サービス（▲0.14 ポイント）である。農業では、1953 年に施行された「農業機械化促進法」や、1961 年施行の「農業基本法」により機械化が急速に推進されている。労働集約的な生

産プロセスから、労働者一人あたりの農業機械装備率を高める資本深化が進行する中で、エネルギー生産性という単要素生産性は悪化している[31]。

高度経済成長期における年率 11.5%ものエネルギー消費量（E）の拡大に対し、もっとも寄与度の大きな部門は家計部門（2.61 ポイント）である[32]。三種の神器と称された白黒テレビ・洗濯機・冷蔵庫は日本経済では 1950 年代後半において急速に普及し、そして 1960 年代半ばからは新・三種の神器と呼ばれたカラーテレビ・エアコン・自動車の普及も始まるなど[33]、ライフスタイルの変化によるエネルギー多消費化が急速に進行している。しかし家計部門（自己勘定サービス生産）では、この期間において EPI は見いだされない。

31 機械化は労働生産性を高め、資本生産性とエネルギー生産性を低下させる。現行の KDB に基づく測定（慶應義塾大学産業研究所野村研究室）では、農業部門における全体効率としての全要素生産性の成長率はこの期間に 0.1%とわずかながらもプラスである。

32 E_pやE_fによる寄与度ではそれぞれ 1.28 ポイントと 1.35 ポイントと相対的に小さいように（表 3.3.7-4）、品質調整済みのエネルギー投入（E）としての家計部門の寄与度の拡大は、家計における高いエネルギー単価を反映したものである。1965 年に家計部門は、エネルギー消費量のシェアでは一国全体の 13.6%であるが（表 3.3.7-1）、エネルギーコストでは 22.8%を占めている（表 3.3.7-2）。

33 内閣府「消費動向調査」によれば、白黒テレビ、洗濯機、冷蔵庫の普及率が 60%に達したのはそれぞれ 1961 年、1963 年、1966 年であり、カラーテレビ、エアコン、乗用車では 1972 年、1989 年、1982 年である。また 1973 年では、白黒テレビ、洗濯機、冷蔵庫の普及率はそれぞれ 65.4%（1968 年には 96.4%に達し、すでに縮小）、97.5%、94.7%であり、カラーテレビ、エアコン、乗用車は 75.8%、12.9%、36.7%である。

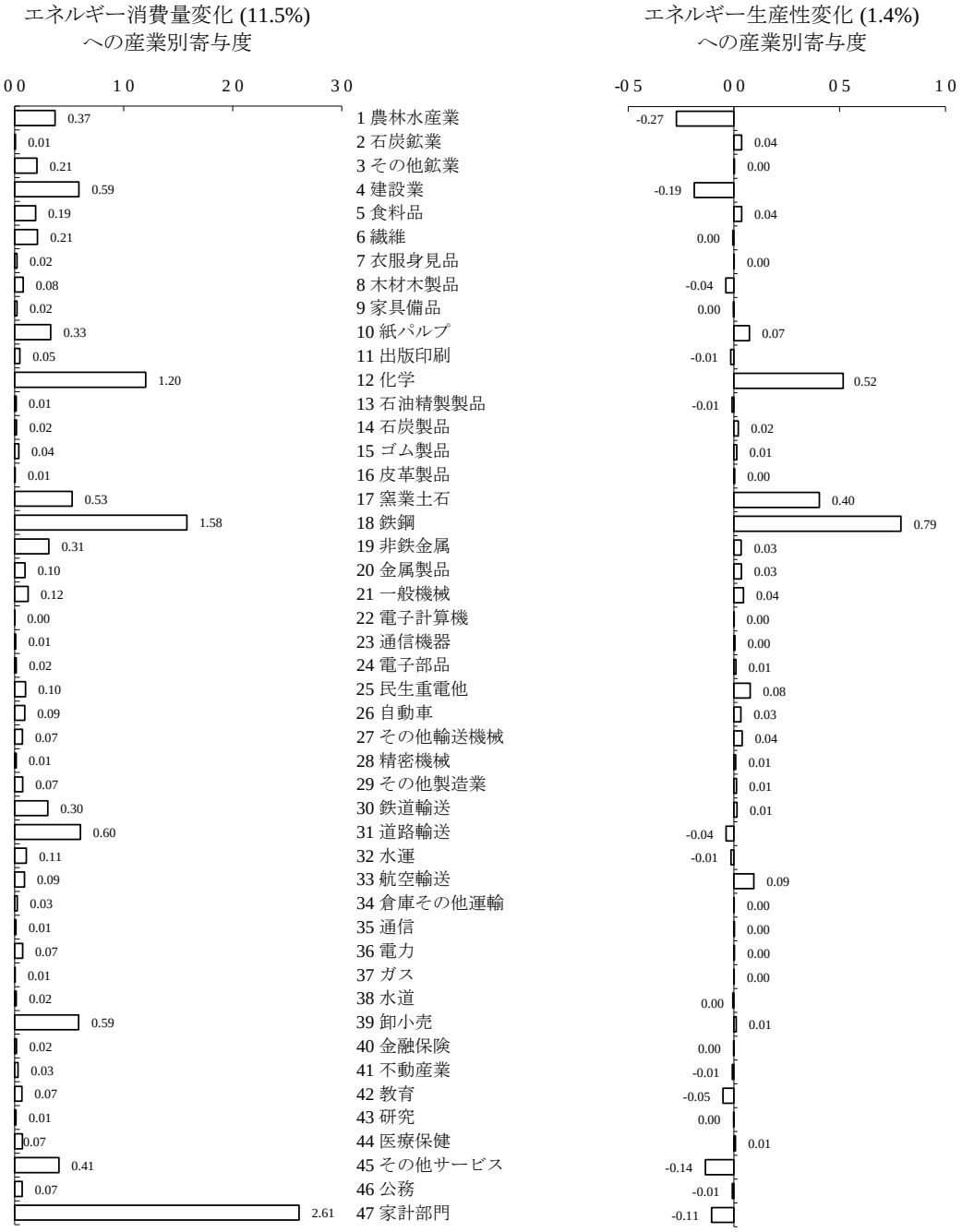


図 3.3.5-3 エネルギー消費および EPI の産業起因（第 I 期：1955–73 年）

単位：パーセンテージ・ポイント（一国全体の集計量への部門別寄与度）。

注：エネルギー消費（E）は(3.3.3-7)式、調整済み EPI（τ_*）は(3.3.3-19)式に基づく。

(3) 第 II 期: 1973–1990 年

第 II 期（1973–90 年）は、二度のオイルショックの影響を受けて、グロスの EPI が年率 2.7%にも達する黄金期である。この期間は、火力発電における平均的な熱効率の改善は第 I 期に比して減速するが、急速に電力化が進行し（(1)節の図 3.3.3-1）、エネルギー高度化はグロス EPI を 0.5 ポイント過大に評価させる要因となる（図 3.3.5-2）。産業構造要因はさらに大きな影響を持っている。この期間、第 I 期とは対照的に、エネ

ルギー多消費な産業における生産が相対的に縮小したことにより、グロスの EPI（年率 2.7%）のうちの 1.1 ポイントが産業構造要因によって説明される。

両者を統御した真の EPI は年率 1.3%に留まり、グロス評価の半分以下に縮小する。この期間は二度のオイルショックにより、エネルギー価格は資本投入価格に比して大きく上昇したが、そうした急速な相対価格変化に直面しながらも、産業構造要因を考慮すると、真の EPI は第 I 期（年率 1.4%）から減速したと評価されるのである。オイルショック後のエネルギー価格の上昇に呼応した、いわば「意図した EPI」は、高度成長期において原油価格が安定していたもとでの「借りた技術（borrowed technology）」の導入による「意図せざる EPI」を下回るのである。

この期間、品質調整済みのエネルギー消費量（E）の成長率でも、第 I 期の年率 11.5%から年率 2.5%へと大きく減速した。図 3.3.5-5 左図にみるように、一国経済のエネルギー消費拡大におけるエネルギー多消費型産業の寄与は小さいかマイナスとなり、最大の増加要因（寄与度では 1.23 ポイント）は 47.家計部門による。新・三種の神器のうちエアコンや乗用車の本格的な普及は、この第 II 期に行なわれている。家計部門でも年率 0.8%の EPI（第 I 期のマイナス 0.9%からプラスへ転換）が見いだされるが、ライフスタイルの変化によるエネルギー消費拡大（年率 5.4%）のすべてを相殺するには力不足であり、家計のエネルギー消費は年率 4.6%で増加している（表 3.3.7-9）。

第 II 期では、47 部門のうち半分以上の産業でエネルギー生産性が改善するが、最大の寄与は 12.化学製品製造業である。同産業における調整済み EPI（τ_*）は年率 3.1%（寄与度では 0.39 ポイント）であり、一国集計値（年率 1.3%改善）に対してその 31%を説明する。第 I 期から第 II 期にかけて、18.鉄鋼業の EPI は年平均 4.0%から 1.3%へ、17.窯業土石製品製造業では 4.7%から 0.5%へ、10.紙パルプ製品製造業では 2.3%から 1.6%へと、大規模な省エネ技術の導入を高度経済成長期にすでに終え、エネルギー生産性の改善スピードは第 II 期に大きく減速している。しかし 12.化学製品製造業では、第 I 期の年率 3.6%改善からの減速幅はわずかなものに留まっている。

化学業の生産する製品は多種多様であり、また結合生産物も多いことから、個別製品のエネルギー原単位評価は困難であるが、代表的な基礎製品においては技術情報に基づいた測定が行なわれている。澤田（1998）によるエチレン、低密度ポリエチレン(LDPE)、ポリプロピレン(PP)、か性ソーダの 4 つの代表的な化学製品のエネルギー原単位の推移を示したものが図 3.3.5-4 である（資料の制約から開始年次と終了年次が異なるものの、すべて 1976 年値を 1.0 として基準化している）。

エチレン生産のエネルギー原単位では、1976 年の 10.4 百万 kcal/t から 1986 年の 6.0 百万 kcal/t までほぼ直線的に改善し、10 年間の年平均改善率では 5.5%にも上る[34]。しかしその後急速に改善の余地を失い、1980 年代半ば以降からは横ばいを続けている。1976–86 年では、LDPE と PP でもそれぞれ年率 4.0%および 6.4%、か性ソーダではそれを下回るものの年率 2.1%のエネルギー原単位の改善である。工学的なアプローチによ

34 澤田（1998）では、原単位改善へと寄与した対策技術として、高効率圧縮機の採用、反応器出口の熱回収強化、分解炉の改造（高オレフィン収率型の採用）、ガスタービンによるコジェネレーション、コンピュータ制御による最適化、蒸留プロセスの効率化（多段蒸留、インテグレート化）を指摘している。

るこうした測定は代表的な基礎化学製品に限られるが、そのエネルギー原単位の推移は第 II 期の EPI（図 3.3.5-5）ともほぼ整合する。

第 II 期において、健全な EPI が持続した化学製品製造業と、大きく EPI が減速した鉄鋼業や窯業土石製造業との比較によれば、エネルギー価格の上昇に直面しようとも、省エネの進行は安価に利用可能な技術の存在に大きく制約されることを示唆している。鉄鋼業や窯業土石製造業などでは、エネルギー生産性を高めるための限界的な費用はこの期間にはすでに逓増してきたと考えられる。

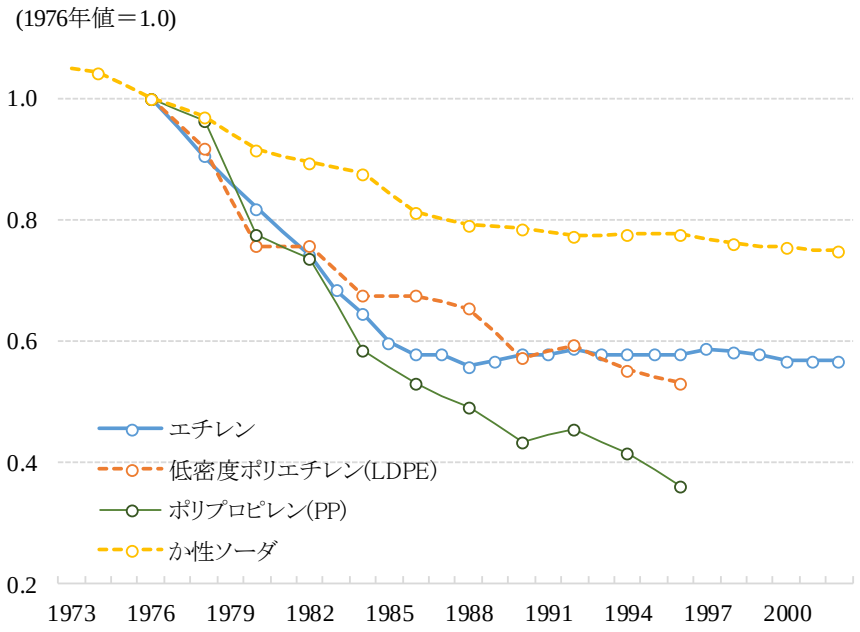


図 3.3.5-4 化学製品製造におけるエネルギー原単位

単位：1976 年=1.0 とした指数（1973–2002 年）。

出典：1976–96 年は澤田（1998）、それ以外の年次は、日本化学工業協会「化学業界の「低炭素社会実行計画」への取り組み」（2012 年 8 月 22 日）より作成。

19.非鉄金属製品製造業は、第 I 期から第 II 期にかけて EPI が年率 0.8%（寄与度にして 0.03 ポイント）から 5.8%（0.14 ポイント）へと大きく改善した例外的な産業である。しかしこうした改善は、ここでの EPI 指標が 47 の産業部門を最小単位として生産構成変化を捉えていることの限界でもある。日本のアルミニウム製錬業は 1977 年のピーク時に 119 万トンの地金を生産したが、二度のオイルショックを経た電力価格の高騰によって、1980 年代に入ってからは縮小を始め、1983 年には 1980 年水準の 3 分の 1 へ、そして 1980 年代後半には完全撤退へと追い込まれている。産業生産は輸入地金による圧延工程などのみに切り替わるなかで、産業内における製品構成変化による影響は、ここでの EPI（τ_*）の測定値に含まれており、真の EPI を過大に評価する。

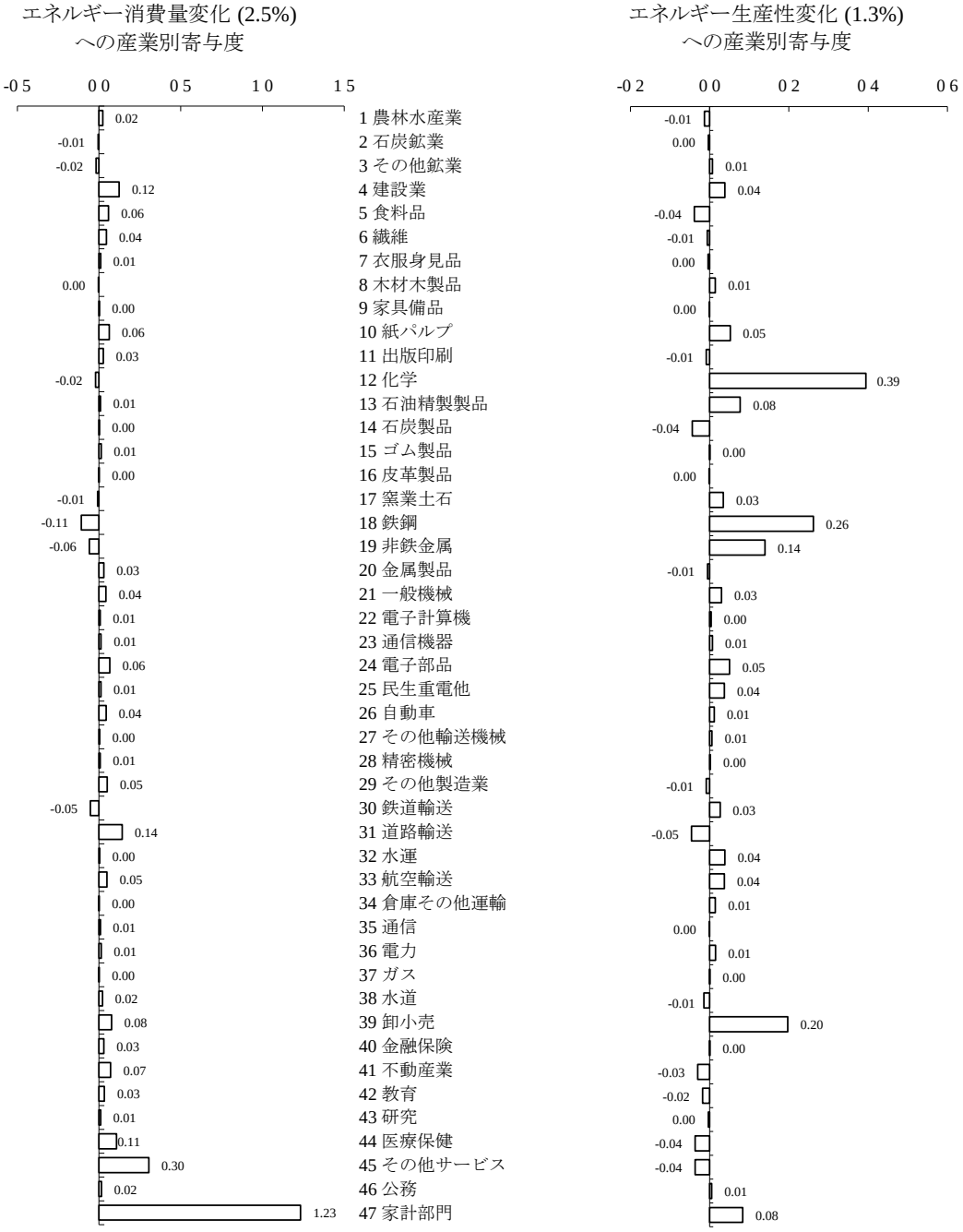


図 3.3.5-5 エネルギー消費および EPI の産業起因（第 II 期：1973–90 年）

単位：パーセンテージ・ポイント（一国全体の集計量への部門別寄与度）。

注：エネルギー消費（E）は(3.3.3-7)式、調整済み EPI（τ_*）は(3.3.3-19)式に基づく。

また第 II 期においては、1951 年に施行された熱管理法が全面的に改正され、1979 年 10 月に省エネ法（エネルギーの使用の合理化等に関する法律）が施行されている。対象は工場のみから建設物と機械器具にまで拡張され、ファイナンスや租税優遇措置を含む総合的な法律とされた。努力事項として細かな「判断基準」を設定し、それが業種横断的に省エネを推進するためのガイドラインとして位置づけられている。しかしこの時期の省エネ法では、判断基準はあくまで努力目標としての指標であり、報告徴

収もほとんど行なわれていない（杉山・野田・木村 2010）。第 II 期の後半期（1980 年代）でも省エネ法による EPI への影響は軽微であった。

(4) 第 III 期: 1990–2008 年

第 III 期（1990–2008 年）には日本経済の成長率は大きく減速する。第 II 期の経済成長率（年平均 4.4%）に対して、この期間では年率 1.1%に留まった（表 3.3.7-10）。経済成長率の低迷に伴い、グロスの EPI もまた年率 2.7%から 0.5%へと大きく減速している（図 3.3.5-2）。エネルギー品質や産業構造の変化による影響も縮小するが、産業構造変化はグロス EPI のほぼすべてを説明する要因となっている。第 II 期に続き、第 III 期にも相対的にエネルギー多消費型産業が縮小しており、そうした産業構造を統御したうえでの EPI（τ_*）は霧消している[35]。

第 III 期の後半期（2000–08 年）は、エネルギー価格が相対的に上昇した局面にある。2000 年代に入り原油価格は上昇を開始し、そのピークとなる 2008 年には 1990 年代後半に比して 6 倍ほどに上昇した。賃金率や一般物価におけるデフレ傾向のなかで、実質エネルギー価格の上昇としては、むしろ（二度の石油危機を含む）第 II 期を上回る[36]。そうした実質的なエネルギー価格の上昇に直面しようともこの期間の EPI がわずかに留まったことは、広範な産業において安価に利用可能な省エネ技術が減少してきており、エネルギー生産性を高めるための限界費用が逓増していることを示唆する。また民間企業が過剰資産を抱え投資を控えるような低成長の環境下では、資本に体化された省エネ技術の自律的な導入も進みづらい。12.化学製品製造業における EPI は、第 II 期の年平均 3.1%から第 III 期には 0.3%へと大きく減速した。代表的な化学製品におけるエネルギー原単位の改善も 1990 年代に停滞したこと（図 3.3.5-4）と整合している。

第 III 期では省エネ法が改正された。1993 年改正では遵守すべき「基準部分」と努力目標としての「目標部分」に整理され、1998 年改正では「基準部分」の遵守状況調査を通じた遵守担保措置が取られている。杉山・野田・木村（2010）はインタビュー調査などにより、優れたエネルギー管理を行っている企業では、この時期には省エネ法の規制内容を上回る対策がすでに実施済みであり、省エネ法改正の影響はほとんどなかったと指摘する。その一方、改正省エネ法による指定を契機として、熱分野など新たな対策を開始した企業、あるいは実際に対策を推進できなかった企業もあったとしている。産業レベルでの測定（図 3.3.5-6）からみれば、省エネ法改正による製造業への影響をこの時期に見出すことは困難である。

図 3.3.5-6 の左図にみるように、エネルギー多消費型産業の多くは（マイナスの産出量変化により）この期間ではむしろエネルギー消費の減少要因となった。増加する部門は、47.家計部門、45.その他サービス業、39.卸小売業、44.医療保健、42.教育などに限定される。サービス部門におけるエネルギー消費の拡大傾向は顕著である。一国全体のエネルギー消費量の拡大（年率 0.9%）のうち 0.7 ポイントは、運輸や公務を除くサービス業による寄与である（表 3.3.7-6）。

35 英独などでは 2000 年頃よりグロス EPI の加速が見いだされるが、産業構造を統御して細分化することによる調整済み EPI への影響は野村（2017）を参照されたい。
36 エネルギー投入を軸とした相対価格変化については野村（2021, 第 3 章）に詳しい。

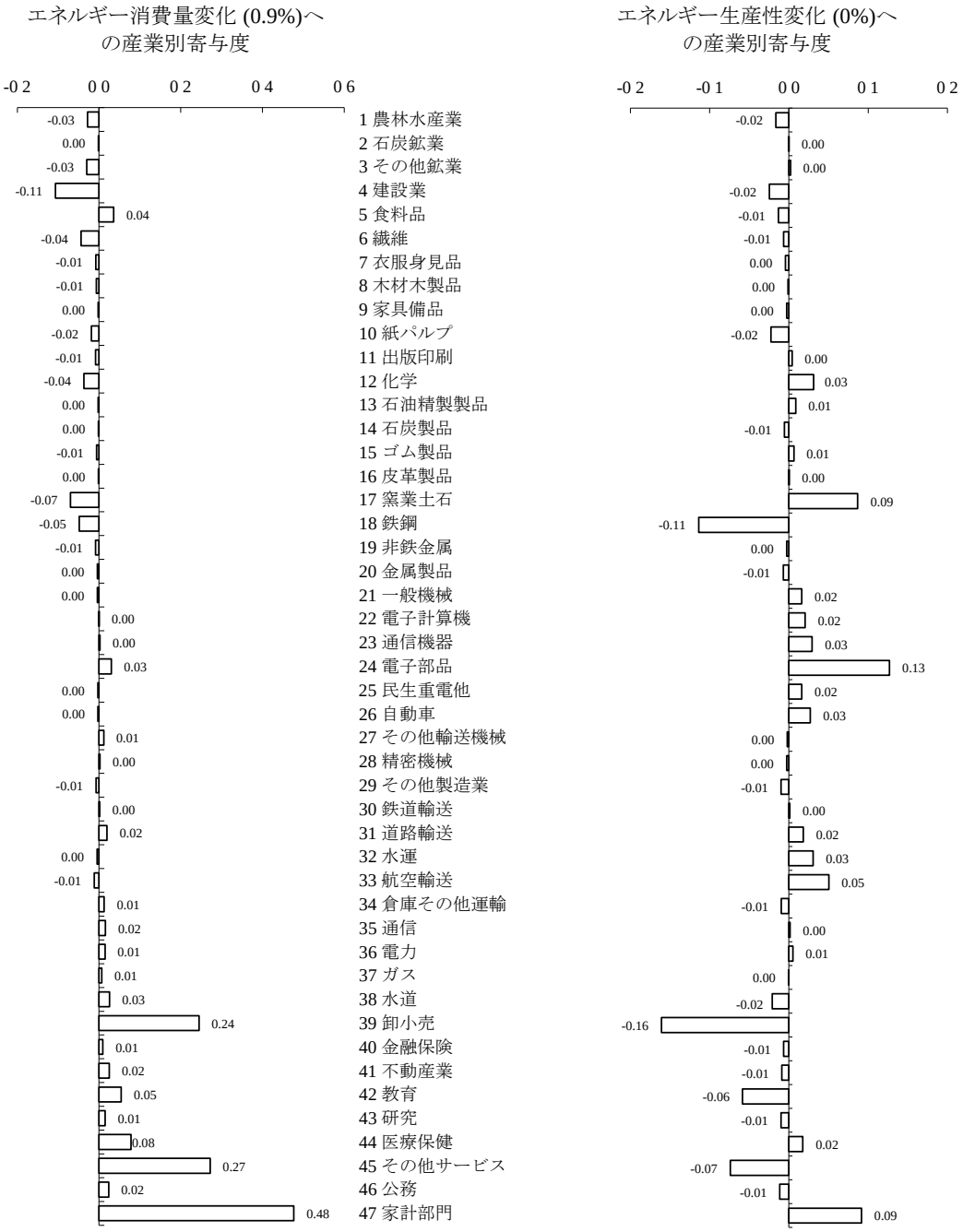


図 3.3.5-6 エネルギー消費および EPI の産業起因（第 III 期：1990–2008 年）

単位：パーセンテージ・ポイント（一国全体の集計量への部門別寄与度）。

注：エネルギー消費（E）は(3.3.3-7)式、調整済み EPI（τ_*）は(3.3.3-19)式に基づく。

図 3.3.5-6 の右図におけるエネルギー生産性の変化では、最大の寄与度は 0.13 ポイント（年平均成長率で 10.2%）となる 24.電子部品製造業である。この期間における情

報通信分野の技術革新は（品質変化を統御した）産出量を急速に拡大させ[37]、エネルギー消費の拡大を十分に吸収しながら、エネルギー生産性を改善させている。第 III 期における家計部門による寄与度も 0.09 ポイントと大きい。制度面では、1998 年の省エネ法の改正によって、トップランナー制度が導入されている。しかし家計部門の EPI は年率 0.4%であり、第 II 期の 0.8%からは大きな減速となった。マクロ的な測定では、トップランナー制度による顕著な影響は観察されない。

(5) 第 IV 期: 2008–2019 年

第 IV 期（2008–19 年）では、品質調整したエネルギー消費量（E）は 44.医療保健や 42.教育業などを除くほとんどの部門で減少し（図 3.3.5-7）、一国全体では年平均マイナス 0.8%とはじめて減少する。同期間、グロスの EPI は年率 1.4%にまで回復した（図 3.3.5-2）。第 II 期、第 III 期に続き、第 IV 期でもエネルギー多消費産業における生産は相対的に縮小し、グロス EPI は年平均 0.4 ポイントの過大評価となった。また、同時期のエネルギー品質変化もグロス EPI を年率 0.5%ポイント過大評価する要因となっている。両者の影響を調整すると、品質調整済み EPI（τ_*）は年率 0.5%の改善である。

このように構造的な変化を考慮すれば真の EPI は年率 0.5%へと大きく低下するが、第 III 期のゼロ水準からの回復とも評価できる。第 I 期から第 III 期まで続いた EPI の低下傾向に対し、第 IV 期における EPI の回復はどう解釈されるだろうか。その回復に大きく寄与したのは 12.化学業である。同産業の EPI は一国全体の調整済み EPI の 53%、非家計部門における EPI の 70%を説明する要因である（図 3.3.5-7 の右図）。この強固な EPI は、多くの製造業が安価な省エネ技術の利用として飽和状態にある中で、例外的なものである[38]。

化学業の EPI は、第 I 期には年率 3.6%、第 II 期 3.1%、そして第 III 期には 0.3%と逓減したものの、第 IV 期には再び 2.1%と大きく改善している。澤田（1998）は、エチレンでは 1990 年代後半でもすでに「極限に近い段階まで省エネルギー化が進んでいる」と評価しており、1980 年代半ば以降では技術的なエネルギー原単位の改善も見いだせない（図 3.3.5-4）。省エネの進行したひとつの要因は、米国のシェールガス由来の安価な汎用化学品が日本へと流入することを意識して、2014 年頃からエチレン事業の再編が進んでいることである。一般に、化学工業では設備稼働率の変化がエネルギー生

37 半導体や情報通信機器などにおける品質の改善は、経済統計においては（品質を統御した）「数量」（quality-adjusted quantity）の拡大として、また（品質を統御した）「価格」（quality-adjusted price）の下落として測定されている。

38 18.鉄鋼業では継続的な省エネ努力に加え、2012 年 10 月の新日本製鐵と住友金属工業の合併による新日鐵住金株式会社（2019 年 4 月より新日本製鐵に社名変更）の稼働率向上による EPI も実現している（野村 2021）。2019 年までとして第 IV 期の期中平均値では EPI が観察されない。日本鉄鋼連盟（2022）によれば、鉄鋼業のエネルギー原単位（ここでの計測とは対象が若干異なる）は 2019 年度に 92.5 となり、1990 年度の 100.0 からは改善したが、2008 年度（91.2）からは若干悪化しており、ここでの測定値と整合的である。

産性に大きく影響するため、合理化による稼働率の向上は EPI に寄与する[39]。日本化学工業協会（2022）によれば、化学工業のエネルギー原単位は第 IV 期（年度ベース）では年率 0.6%の改善である。これは、3.3 節でこの期間に観察される高い EPI（年率 2.1%）の 3 割ほどの水準に過ぎない[40]。

39 合理化に加え、2017–19 年度の堅調な需要増も高稼働へと寄与している。他方、COVID-19 の影響により 2019 年から 2020 年にかけての国内生産は年度ベースで 10.3%減少し、その結果、エネルギー原単位は 5.7%悪化している（日本化学工業協会 2022）。パンデミックの影響を考慮して測定期間を 1 年拡大するだけで、2008–20 年のエネルギー原単位の改善率は 0.05%にまで低下する。このように、エネルギー生産性が稼働率に大きく依存する産業では、測定期間また会計年度と暦年の相違が大きな差になることがある。

40 日本化学工業協会（2022）のエネルギー原単位と 3.3 節のエネルギー生産性は、化学工業の活動範囲や生産量・エネルギー投入量の定義が異なるため、おおよその比較でしかない。

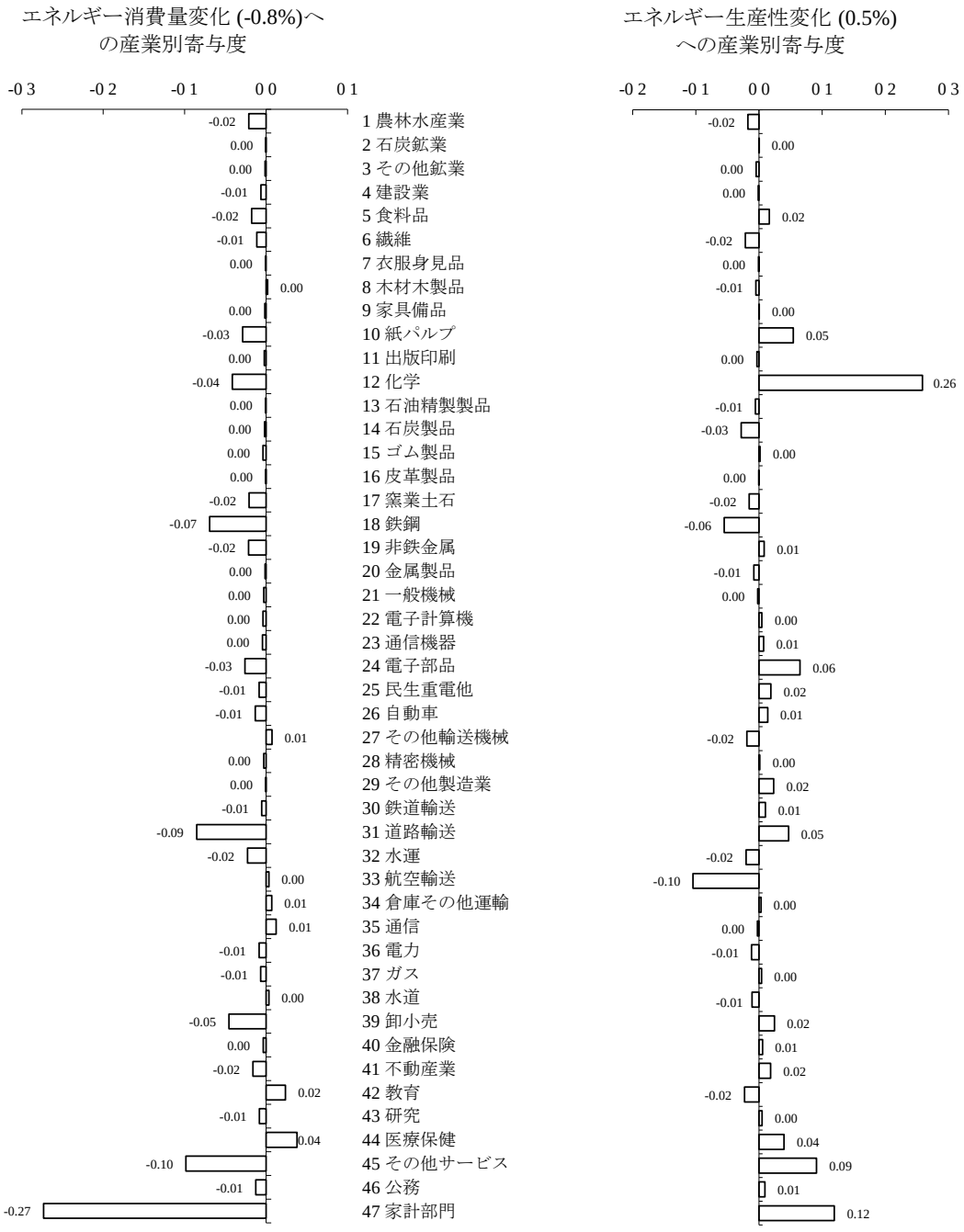


図 3.3.5-7　エネルギー消費および EPI の産業起因（第 IV 期：2008–19 年）

単位：パーセンテージ・ポイント（一国全体の集計量への部門別寄与度）。

注：エネルギー消費（E）は(3.3.3-7)式、調整済み EPI（τ_*）は(3.3.3-19)式に基づく。

第 IV 期の EPI が年率 2.1%へと回復したもうひとつの理由は、化学製品製造業の内部における製品構成の変化である。図 3.3.5-8 は、産業連関表で定義されている 25 の化学製品ごとに細分化した分析として、横軸にベンチマーク年（2011 年）におけるエネルギー生産性水準（エネルギー消費量あたりの付加価値額）の自然対数値、縦軸には第 IV 期における各製品の実質粗生産額の年平均成長率をとっている。また各バブルの大きさは 2011 年における付加価値の大きさを示す（各製品の名称における括弧内に

は、2011 年における各製品の付加価値シェアとエネルギー消費シェアを示している)。2011 年の 12.化学製品製造業における最大の付加価値シェアとなる部門は医薬品であり、化学全体の粗付加価値総額の 40.4%を占めている。他方、エネルギー消費の視点からみれば、石油化学基礎製品が化学業全体の 65.0%を占める。対照的に、医薬品のエネルギー消費シェアはわずか 0.7%であり、石油化学基礎製品の付加価値シェアは 1.9%に過ぎない。こうした際立った対照は、化学業全体としてのエネルギー生産性の変化率に対して大きな影響を与える源泉となっている。

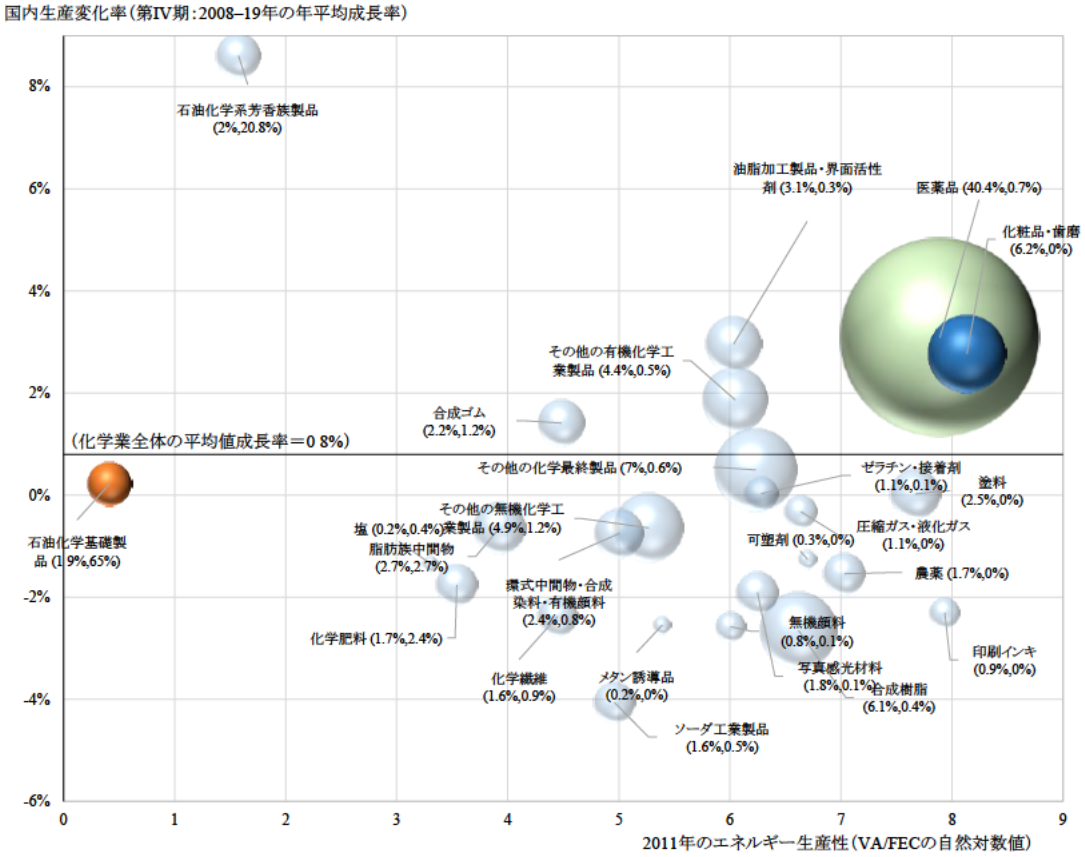


図 3.3.5-8 化学製品のエネルギー生産性と生産量変化（第 IV 期：2008–19 年）

出典：「2011 年産業連関表」（総務省）および「物量表（付帯表）」、「国民経済計算」（内閣府経済社会総合研究所）、「工業統計」（経済産業省）、「国内企業物価指数」（日本銀行）などより作成。

注：図中におけるバブルの大きさは各製品製造における 2011 年における付加価値であり、製品名称の括弧内は同年の（付加価値シェア、エネルギー消費シェア）を示している。

第 IV 期における粗生産の年平均実質成長率では、医薬品は年率 3.1%増加したが、石油化学基礎製品は 0.2%増として化学業の平均値を 0.6 ポイント下回った。エネルギー消費シェアの 3 分の 2 を占める石油化学基礎製品の生産拡大が当該産業の平均を下

回り[41]、付加価値シェア最大の医薬品が平均を大きく上回る成長となることで、化学業全体としてのエネルギー生産性指標では見かけ上の改善を生じさせている。図 3.3.5-8 の計数に基づき簡易的な試算を行えば、化学業におけるエネルギー生産性の成長率 2.1%のうちの 1.7 ポイントは、こうした化学製品の構成変化によって説明される。そのもとでは、化学業としての調整された EPI は年率 0.4%にまで低下し、同産業による一国経済の EPI への寄与度（0.26 ポイント）も 0.05 ポイントへと縮小する。

化学業に次いで寄与度が大きいのは家計部門であり、一国経済全体における EPI への寄与度も 0.12 ポイントである。東日本大震災による節電・省エネへの努力要請による EPI への効果は一時的なものであったと考えられるが、第 III 期の年率 0.4%から第 IV 期には 0.5%へと、わずかながらも加速したと評価される[42]。しかしこうした控えめな EPI の加速は、戦後初めて減少した家計部門のエネルギー消費量（年率–0.9%）の主要因ではない。その多くは、耐久消費財のサービス量が第 III 期の年率 1.8%増から第 IV 期には 0.4%の減少へと大きく抑制されたことによるものである。

サービス業では、45.その他サービス業、33.航空輸送業、39.卸小売業では一国レベルの EPI を 0.04–0.09 ポイント改善させる要因となっている（図 3.3.5-7 の右図）。日本政府観光局によれば、訪日外国人旅行者数では 2008 年の 835 万人から 2011 年には 622 万人へと減少したが、2013 年には 1036 万人、2019 年には 3188 万人にまで大きく拡大した[43]。それは旅行業や飲食宿泊業（ここでは 45.その他サービス業に含まれる）や航空輸送業における稼働率の改善となり、エネルギー生産性を改善させている。

39.卸小売業では年率 0.4%の EPI となり、一国全体の EPI の 2%を説明する。2010 年 4 月には省エネ法が改正された。改正省エネ法では、「業務その他部門（サービス業・店舗・病院など）」における適用対象範囲が拡大され、企業全体での取り組みを促すものとなっている。従来は年 1500kl（原油換算）以上消費する工場・事業場単位を対象としていたが、それは事業者単位へと変更され、個々の工場や支店などが対象とならずとも事業者の合計値として、またフランチャイズチェーンを運営する企業では加盟店も含めた合計値として、省エネ法の適用を受けることとなった。

この期間、流通部門においては照明用電力消費などを中心として順調に省エネが進行してきたと考えられるが[44]、市場の構造変化も見いだされる。経済産業省（2021a）によれば、日本国内の消費者向け電子商取引（BtoC-EC）の市場規模は 2010 年の 7.8 兆円から 2019 年には 19.4 兆円へと拡大している。こうした電子商取引の拡大は、一般にエネルギー生産性を改善させると考えられるが、その過渡期にある現在では影響は軽微である。とくに小売業では電子商取引にシェアを奪われようとも、リアルな店舗におけるエネルギー消費量は営業時間などに応じて減少させることが難しく、むしろ

41 石油化学工業協会によると、日本の国内需要に占めるエチレン輸入の割合は、2008 年の 9.7%（541 千トン）から 2019 年には 17.0%（800 千トン）に増加している。

42 家計部門における EPI の 3.3 節での測定値には、家計による自家用車利用の抑制や冷暖房する住環境エリアの縮小など、エネルギー・サービス自体を抑制する行動変化も含まれている（(1)節の脚注 24）。

43 パンデミックの影響により 2020 年には 412 万人、2021 年には 246 万人まで減少しており、測定期間の拡張はエネルギー生産性の大幅な悪化を導く。

44 低炭素社会実行計画では流通部門の多くがエネルギー原単位を目標指標とするが、その進捗報告によれば、2020 年・2030 年目標は 2015 年にはすでに達成されている。

過渡的には、小売業としての重複投資によりエネルギー生産性を悪化させる可能性も大きい。

(6) 将来展望

簡易な試算ではあるが、第 IV 期（2008–19 年）に観察された産業別エネルギー生産性の寄与度を基準として、2030 年に向けた EPI のベースラインとしての予測を行う。第 IV 期の EPI にもっとも寄与した 12.化学業では、上述のように化学製品構成変化を統御することによって、一国全体の EPI は 0.21 ポイント縮小（図 3.3.5-2 では、その縮小分だけ産業構造要因が拡大）すると評価される。

第 IV 期において寄与度が大きいもうひとつの部門は 47.家計部門である。一国集計レベルの EPI への 0.12 ポイントの寄与度は、東日本大震災後の節電・省エネ努力を反映したものと捉えられるが、その持続可能性には疑問が残る。むしろ、家計部門において省エネ機器の購入が前倒しで実施されたのであれば、この時期の EPI 観測値はベースラインとして過大評価であるかもしれない。簡易に第 III 期の寄与度（0.09 ポイント）をベースラインとすれば、縮小幅はわずかながら 0.03 ポイントとなる。この 2 部門を合わせて 0.24 ポイントの縮小となり、第 IV 期における年率 0.49%の EPI から導かれる、将来のベースライン推計値は年率 0.25%へと半減する。

グロス EPI の見通しについては、上記の真の EPI（0.25%）のベースライン試算値に対して、構造変化の影響を考慮する必要がある。第 IV 期におけるエネルギー高度化効果の改善（年率 0.35 ポイント）は、再生可能エネルギー発電の推進や電力網への統合コストの拡大による電力料金の上昇を考慮すると、約半分ほどまでの減速を余儀なくされるかもしれない。エネルギー転換効果（0.17%ポイント）、産業構造変化効果（0.44%ポイント）が継続的であると仮定すれば、一国集計レベルのグロス EPI のベースライン推定値は年率 1.02%と評価される[45]。

(1)節に示した図 3.3.5-2（最右系列）は、このベースライン推計を日本経済の実体験と比較したものである。グロス EPI は将来にわたっても持続すると予測されるが、政策目標ははるかに野心的な水準に設定されている。本節でのベースライン試算（1.0%）は、2015 年のパリ協定締結時に政府が設定した 2030 年目標（2013 年から 2030 年まで年率約 2.0%）の半分ほどである。両者の乖離は大きいが、政府はより野心的な目標に移行した。2020 年 10 月に菅義偉内閣が宣言した 2050 年までのカーボンニュートラル目標により、2021 年 7 月に岸田文雄首相が閣議決定したエネルギー基本計画（経済産業省 2021b）では、EPI 総量目標を 2013 年から 2030 年の間で年率 2.5%にまで深掘りされている。

技術的な裏付けがないままに省エネ規制を強化すれば、ここで見いだされるようなベースライン試算値と政策目標値とのギャップは、生産拠点のさらなる海外移転によって補われ、国内経済の成長を毀損させるという懸念は大きい。もちろん、このようにして実現される国内経済のエネルギー生産性改善とは見せかけに過ぎず、そして世

45 エネルギーを使用する事業者の努力目標として、省エネ法は原単位を年平均 1%以上低減することを掲げる。3.3 節でのグロス EPI（ベースライン推計値）は計数的には類似するが、それはさまざまな構造変化を含んだマクロ指標であり、真の EPI はその 4 分の 1 ほどに過ぎない。

界全体の温室効果ガスの排出量削減を約束するものでもない。第 IV 期（2008–19 年）において、日本や欧州が生産をシフトさせてきた経験は、自らの経済域内における経済成長とエネルギー消費のデカップリングを演出しながらも、世界の排出総量を増大させてきたのである。

3.3.6 結び

戦後の日本経済が持続的に実現してきた省エネの経験から何を学ぶことができるだろうか。また将来、その加速は可能なのだろうか。こうした問いへと接近するため、マクロ的に観察されるエネルギー生産性改善（EPI）のグロス指標から、3.3 節ではエネルギー品質と産業構造における変化を統御した調整済みの EPI 指標を構築してきた。その測定によれば次のことが導かれる。

第一に、日本経済における持続的な EPI の実現においても、調整済みの真の EPI 指標によれば、その改善スピードは長期的に大きく逓減してきたことが見いだされる。マクロレベルでの見かけ上のグロス EPI の黄金期は二度のオイルショックを含む第 II 期（1973–90 年）にみられるが、エネルギー品質や産業構造における変化を統御すれば、真の EPI としては年率 1.4%を記録する第 I 期（1955–73 年）がもっとも高く、第 II 期には年率 1.3%、そして第 III 期（1990–2008 年）にはほぼゼロへと大きく減速している。

オイルショック後には、資本／労働サービス投入の価格よりもエネルギー投入価格の上昇が上回っている[46]。こうした実質エネルギー価格の上昇によって内生的に導かれた第 II 期の「意図した EPI」は、原油価格が安定していた高度成長期の生産拡張を目的とした投資による「借りた技術」の導入がもたらした第 I 期の「意図せざる EPI」の効果を下回るのである。安価となった省エネ技術は、生産拡張や更新投資などの機会に、意図せずとも資本に体化され経済体系内に織り込まれていった。

また第 III 期には、気候変動問題への意識の高まりにより、省エネ法の改正によるトップランナー制度の導入といった政策強化や、経団連による環境自主行動計画などの企業努力が行なわれた。しかし、一国経済としての EPI はわずかなものに留まっている。省エネの実現は、コスト合理的に利用可能な技術の存在が前提となる。1950 年代からの半世紀における EPI の減速は、利用できる技術が限定的となり、省エネのための限界的な費用の逓増を示唆している。安価である技術導入が一巡すれば、その限界費用は不連続に高まり、EPI のスピードは急減速しうる。

第二に、戦後の日本経済において、マクロレベルでは長期にわたり持続的な EPI が観察されるものの、その産業起因は期間ごとに大きく変化している。生産プロセスの異なる産業では、利用可能な技術に依存して省エネ技術導入のタイミングもまた異なる。個別産業を 10 年ほどの期間でみれば、ある一時期に EPI が盛り上がろうとも、次の 10 年には大きくブレーキがかかるなど、省エネ技術の存在量をポテンシャルとして、それを織り込んでいくプロセスとして理解される。

---

46 野村（2021, 第 3 章）ではエネルギーを軸とした相対価格の変化を分析し、オイルショック後の実質エネルギー価格の上昇は、1973–95 年では資本投入価格に対するエネルギー価格の上昇により、1995 年以降では労働投入価格に対するエネルギー価格の上昇によって加速していることが見いだしている。

このことは、省エネ政策の貢献としてみなされている成果は、いずれ時間をかけて経済に織り込まれるはずであった技術が「前倒し」して導入されるに過ぎない可能性を示唆している[47]。省エネ技術における将来のさらなる革新やコスト低下の可能性を考慮すれば、前倒しの効果はときにマイナスとなる懸念も大きい[48]。

第三に、第 IV 期（2008–19 年）では、真の EPI のスピードも年率 0.5%に回復している。産業レベルでの測定ではこの要因は見えないが、製品レベルにまで細分化すれば、化学製品製造業では生産される製品構成として、エネルギー多消費的な化学基礎製品の国内生産が相対的に縮小したことの影響が見いだされる[49]。カーボンニュートラル宣言やグリーン成長の名のもと、技術的な裏付けを持たずに国内における排出削減を強いるものとなれば、日本経済にさらなる停滞をもたらす懸念は大きい。問題は、そうした静かな変化はマクロや産業レベルの測定によっては観察すらもされずに、むしろエネルギー生産性が改善したかのように演出されることである。

第四に、多くの製造業で安価な省エネ技術の導入が飽和することで、近年における一国全体のエネルギー生産性の変化は、エネルギー需要の生産弾性が小さい（生産量の変化に依存せずにエネルギー消費量が硬直的となる傾向のある）サービス業により強く依存するものとなってきている。その結果、好景気下ではエネルギー生産性が改善し、景気低迷によっては一気に悪化するというように、マクロレベルでもエネルギー生産性の変動幅が大きくなると予想される。マクロ的なエネルギー生産性は単年度などの変化に捉われず、中長期的な変化によって評価することが求められる。

簡易ながらも 3.3 節での中長期エネルギー生産性の将来展望によれば、日本経済におけるマクロレベルでのグロス EPI としてのベースライン推計値は年率 1.0%ほどである。それは 2030 年に向けた政府目標（年率 2.5%ほど）の半分にも達しない。政府は省エネ政策としての規制的な性格を強め、中小事業者を含めて補助金政策の対象を拡大させようとしている。それは社会的な投資効率を低下させるとともに、将来の事業環境の変化に対応して企業が戦略的に経営資源を配分するための柔軟性を失わせる。マクロ

47 トップランナー制度の評価として資源エネルギー庁（2015）では、制度導入から 10 年ほどが経過し多くの機器が目標年度を迎えるなかで、乗用自動車での改善の実績は 48.8%（当初見込み 22.8%）、冷蔵庫では 43.0%（同 21.0%）、電子計算機では 85.0%（同 77.9%）など、当初見込み以上の成果が出ていると評価している。ただし、これは制度なくしても導入されたであろう「前倒し」や「成りゆき」の影響を含んでいる。また市場全体がトップランナー近くまで到達すると、制度の効果は出にくいことも指摘される（Kimura 2013）。政策の効率性は急速に失われていく。

48 ひとつの事例としては 2009 年 5 月、世界金融危機による経済危機対策と合わせて省エネ機器の普及促進を実施しようとした家電エコポイント制度の失敗がある（拙稿「技術革新を促す政府の役割－グリーン・イノベーションに向け多様性ある技術政策の導入を」『日経 BP エコマネジメント』2010 年 8 月 23 日）。制度の導入時、市場に出回っていたソニーの 40 型液晶テレビ（KDL-40F5／4 月 24 日発売）の年間消費電力は 175kWh/年とされている。その後にエコポイント制度による普及促進が始まるが、翌年 2 月 25 日にソニーが発売を開始した新製品（KDL-40EX700）では高発光効率の LED バックライトを使用することによりその消費電力は 108kWh/年へ、実に 40%ものエネルギー効率の改善が達成されている。同様に日立が 3 月 15 日に発売した液晶テレビでも、年間消費電力量は従来機に比して 48%も削減された。家電エコポイントによる推進（前倒し）はかえって効率の悪い機器を固定化させてしまったのである。

49 基礎製品を国内生産から輸入へと切り替えで、見かけ上のエネルギー生産性は改善するが、（輸入財の拡大により）中間投入による生産性は低下する。生産における全体効率への影響は野村（2021, 第 4 章）で評価されている。

的には一時の需要創出効果はあろうとも、安易な低収益投資の拡大誘導はサプライサイドの効率性を犠牲とするものであり、成長のダイナミズムを削ぐものとなろう。

3.3.7 付表

表 3.3.7-1 産業別エネルギー消費量シェア

	1955	1965	1973	1980	1990	2000	2008	2019
1.農林水産業	2.8	3.7	2.6	2.7	2.6	2.1	1.7	1.6
2.石炭鉱業	3.0	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
3.その他鉱業	1.5	1.5	1.1	1.1	0.8	0.4	0.2	0.2
4.建設業	0.9	2.3	2.5	2.4	3.0	2.4	1.2	1.5
5.食料品	1.3	1.5	1.4	1.6	1.9	1.9	2.3	2.4
6.繊維	3.7	2.4	1.7	1.5	1.7	1.1	0.8	0.7
7.衣服身見品	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
8.木材木製品	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2
9.家具備品	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
10.紙パルプ	3.1	3.2	3.4	3.2	3.7	3.2	3.1	2.9
11.出版印刷	0.4	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4	0.3	0.3
12.化学	12.0	15.2	15.7	12.4	11.8	11.3	11.3	11.7
13.石油精製製品	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2
14.石炭製品	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1
15.ゴム製品	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3
16.皮革製品	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
17.窯業土石	10.5	7.4	5.9	6.3	5.0	3.2	2.6	2.6
18.鉄鋼	15.5	19.0	22.6	19.8	14.2	10.7	11.2	11.8
19.非鉄金属	3.5	3.2	3.4	2.7	1.5	1.2	1.2	1.0
20.金属製品	0.7	0.9	0.9	0.6	1.1	0.9	0.8	0.8
21.一般機械	0.7	1.2	1.0	0.9	1.4	1.0	1.0	1.0
22.電子計算機	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
23.通信機器	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2
24.電子部品	0.0	0.1	0.1	0.3	1.0	1.4	1.3	1.1
25.民生重電他	0.5	1.1	0.9	0.6	0.8	0.5	0.6	0.5
26.自動車	0.2	0.7	0.6	0.7	1.1	0.9	1.0	0.9
27.その他輸送機械	1.2	0.8	0.7	0.5	0.6	0.6	0.7	0.9
28.精密機械	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
29.その他製造業	0.3	0.5	0.6	0.8	1.3	1.1	0.9	1.0
30.鉄道輸送	12.3	5.5	2.5	2.0	1.0	0.9	0.9	0.9
31.道路輸送	1.4	2.7	3.4	3.9	5.1	5.2	5.0	4.9
32.水運	0.7	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.1	0.9
33.航空輸送	0.5	1.0	1.7	1.9	2.2	3.1	2.6	2.8
34.倉庫その他運輸	0.4	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5
35.通信	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.5
36.電力	0.4	0.3	0.2	0.1	0.4	0.3	0.3	0.3
37.ガス	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
38.水道	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8
39.卸小売	2.1	3.0	3.5	4.1	3.3	3.7	5.7	5.9
40.金融保険	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4
41.不動産業	0.1	0.1	0.2	0.3	0.7	0.9	0.7	0.7
42.教育	0.4	0.6	0.8	1.0	0.9	1.4	1.4	1.7
43.研究	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3
44.医療保健	0.9	0.6	0.6	1.0	1.6	2.6	2.2	2.6
45.その他サービス	2.8	2.6	3.2	4.5	5.9	8.3	8.4	7.9
46.公務	1.1	0.9	0.6	0.7	0.5	0.8	0.8	0.7
47.家計部門	12.5	13.6	13.9	17.6	19.9	23.6	24.9	23.7
一国経済	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
うち製造業 (5–27部門)	55.5	59.1	60.8	54.2	49.5	41.3	40.5	41.0
うち運輸業 (30–34部門)	15.3	10.6	9.3	9.4	9.9	10.8	10.0	10.0
うち他サービス業 (39–45部門)	6.7	7.2	8.6	11.3	12.9	17.6	19.2	19.5

単位：%（最終エネルギー消費量（一次エネルギー換算値）$E_{p,j}$の産業部門別シェア：s_j）。
注：自家輸送は各産業および家計部門に含まれている。

表 3.3.7-2　産業別エネルギーコストシェア

	1955	1965	1973	1980	1990	2000	2008	2019
1.農林水産業	4.0	4.5	3.0	2.9	1.9	1.5	1.8	1.6
2.石炭鉱業	2.2	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
3.その他鉱業	1.4	2.1	1.7	1.4	0.8	0.4	0.2	0.2
4.建設業	1.7	3.9	5.2	4.3	4.9	4.2	2.5	2.8
5.食料品	1.6	1.7	1.5	1.8	1.8	1.8	2.0	2.1
6.繊維	3.5	2.4	1.7	1.6	1.8	1.1	0.7	0.6
7.衣服身見品	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1
8.木材木製品	0.7	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2
9.家具備品	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
10.紙パルプ	2.2	2.6	2.7	2.6	2.6	2.2	2.0	1.8
11.出版印刷	0.3	0.4	0.4	0.4	0.6	0.5	0.3	0.3
12.化学	8.9	9.9	10.2	11.3	7.4	6.1	8.9	7.4
13.石油精製製品	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
14.石炭製品	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
15.ゴム製品	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2
16.皮革製品	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17.窯業土石	7.8	5.3	4.1	4.7	3.4	2.0	1.7	1.6
18.鉄鋼	13.8	12.4	14.4	12.9	8.2	5.0	5.6	5.4
19.非鉄金属	2.6	2.4	2.8	2.4	1.2	0.9	0.8	0.7
20.金属製品	0.7	0.9	0.7	0.6	1.0	0.9	0.6	0.7
21.一般機械	0.7	1.0	0.8	0.8	1.3	1.0	0.8	0.9
22.電子計算機	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
23.通信機器	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2
24.電子部品	0.0	0.1	0.1	0.3	1.0	1.4	1.1	1.0
25.民生重電他	0.5	0.8	0.6	0.5	0.7	0.5	0.4	0.4
26.自動車	0.3	0.7	0.7	0.7	1.0	0.8	0.8	0.7
27.その他輸送機械	1.1	0.7	0.6	0.5	0.5	0.6	0.5	0.7
28.精密機械	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
29.その他製造業	0.4	0.6	0.7	0.8	1.2	1.0	0.7	0.9
30.鉄道輸送	9.5	5.0	2.9	2.4	1.3	1.1	0.9	1.0
31.道路輸送	2.7	4.6	5.1	4.6	4.5	6.0	6.9	5.3
32.水運	0.6	0.8	0.9	1.1	0.7	0.6	1.0	0.8
33.航空輸送	0.3	0.6	0.7	1.0	0.9	0.9	2.3	1.8
34.倉庫その他運輸	0.3	0.1	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5
35.通信	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4	0.6
36.電力	0.7	0.6	0.7	0.8	0.7	0.9	0.8	0.9
37.ガス	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1
38.水道	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.6	0.8
39.卸小売	2.7	4.2	5.4	5.6	4.2	5.1	7.0	7.7
40.金融保険	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.6	0.5	0.6
41.不動産業	0.2	0.2	0.3	0.5	1.3	1.6	1.0	1.1
42.教育	0.5	0.6	0.7	1.1	0.9	1.6	1.4	2.0
43.研究	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4
44.医療保健	0.8	0.7	0.7	1.3	1.9	3.2	2.5	3.4
45.その他サービス	3.1	3.3	3.9	5.5	6.5	9.6	8.9	9.2
46.公務	1.3	1.1	0.6	0.8	0.6	0.9	1.0	0.9
47.家計部門	21.3	22.8	23.1	21.7	31.6	32.8	31.2	31.7
一国経済	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
うち製造業　(5–27部門)	46.0	43.8	44.0	43.8	35.7	27.2	28.1	26.7
うち運輸業　(30–34部門)	13.5	11.1	9.9	9.3	7.7	8.8	11.4	9.3
うち他サービス業 (39–45部門)	7.6	9.2	11.3	14.5	15.6	22.1	21.8	24.4

単位：%（エネルギーコストシェア：w_j）。

注：自家輸送は各産業および家計部門に含まれている。

表 3.3.7-3 調整済みエネルギー生産性

	エネルギー生産性			エネルギー品質・産業構造要因				エネルギー投入量			産出量
	τ_*	τ_q	τ	σ	q_*	q_{c*}	q_{s*}	E	E_f	E_p	X
1955	1 00	1 00	1 00	1 00	1 00	1 00	1 00	1 00	1 00	1 00	1 00
1956	1 02	0 95	0 99	0 94	1 04	1 04	1 00	1 14	1 14	1 10	1 09
1957	1 08	1 00	1 11	0 93	1 10	1 06	1 04	1 21	1 15	1 09	1 21
1958	1 06	0 99	1 14	0 94	1 13	1 07	1 05	1 31	1 21	1 14	1 29
1959	1 02	0 91	1 06	0 90	1 15	1 10	1 05	1 58	1 50	1 36	1 44
1960	1 04	0 90	1 09	0 87	1 20	1 15	1 05	1 88	1 78	1 55	1 69
1961	1 13	0 93	1 20	0 83	1 28	1 19	1 07	2 10	1 94	1 62	1 95
1962	1 08	0 91	1 14	0 86	1 23	1 20	1 03	2 38	2 27	1 90	2 17
1963	1 10	0 91	1 20	0 84	1 29	1 21	1 07	2 64	2 40	1 99	2 40
1964	1 18	0 93	1 24	0 80	1 31	1 24	1 06	2 95	2 71	2 21	2 74
1965	1 15	0 90	1 23	0 81	1 33	1 23	1 08	3 27	2 94	2 40	2 95
1966	1 11	0 88	1 22	0 81	1 35	1 26	1 08	3 73	3 38	2 69	3 29
1967	1 12	0 86	1 19	0 79	1 34	1 25	1 07	4 31	3 92	3 15	3 73
1968	1 16	0 87	1 21	0 77	1 36	1 26	1 08	4 90	4 45	3 53	4 25
1969	1 19	0 85	1 18	0 73	1 36	1 26	1 08	5 65	5 15	4 07	4 82
1970	1 25	0 87	1 20	0 71	1 35	1 26	1 08	6 24	5 67	4 49	5 40
1971	1 28	0 87	1 25	0 71	1 37	1 27	1 08	6 70	5 97	4 68	5 83
1972	1 28	0 86	1 24	0 71	1 38	1 25	1 10	7 38	6 46	5 13	6 36
1973	1 29	0 86	1 27	0 70	1 40	1 27	1 10	7 92	6 89	5 40	6 84
1974	1 30	0 90	1 34	0 72	1 42	1 26	1 12	7 82	6 70	5 25	7 02
1975	1 27	0 90	1 36	0 74	1 43	1 25	1 15	8 00	6 67	5 29	7 18
1976	1 30	0 92	1 36	0 75	1 41	1 22	1 15	8 28	6 85	5 57	7 60
1977	1 30	0 93	1 45	0 76	1 47	1 26	1 16	8 54	6 96	5 46	7 93
1978	1 36	0 94	1 45	0 75	1 44	1 23	1 17	8 91	7 17	5 77	8 39
1979	1 43	0 99	1 55	0 74	1 47	1 24	1 18	8 96	7 12	5 69	8 82
1980	1 45	1 04	1 59	0 77	1 43	1 22	1 17	8 81	7 01	5 73	9 14
1981	1 51	1 10	1 69	0 80	1 41	1 20	1 17	8 67	6 81	5 63	9 53
1982	1 56	1 14	1 79	0 80	1 43	1 21	1 18	8 66	6 71	5 50	9 85
1983	1 50	1 12	1 76	0 83	1 42	1 21	1 17	9 06	7 02	5 77	10 16
1984	1 54	1 12	1 79	0 81	1 44	1 23	1 17	9 46	7 33	5 93	10 63
1985	1 59	1 17	1 91	0 82	1 47	1 26	1 16	9 63	7 46	5 88	11 25
1986	1 57	1 18	1 96	0 84	1 48	1 29	1 15	9 82	7 62	5 90	11 56
1987	1 59	1 18	1 96	0 83	1 48	1 26	1 17	10 16	7 74	6 10	11 95
1988	1 61	1 18	1 95	0 83	1 46	1 26	1 16	10 78	8 25	6 52	12 70
1989	1 64	1 19	2 04	0 83	1 51	1 28	1 18	11 48	8 57	6 68	13 63
1990	1 60	1 19	2 02	0 85	1 49	1 24	1 21	12 09	8 84	7 13	14 38
1991	1 60	1 21	2 07	0 86	1 50	1 24	1 21	12 46	9 04	7 26	15 02
1992	1 63	1 20	2 04	0 85	1 47	1 22	1 20	12 61	9 10	7 41	15 11
1993	1 61	1 17	2 03	0 85	1 48	1 24	1 20	12 95	9 27	7 48	15 18
1994	1 57	1 13	1 95	0 85	1 46	1 22	1 20	13 50	9 60	7 85	15 28
1995	1 57	1 13	1 95	0 85	1 47	1 22	1 20	13 84	9 88	8 03	15 63
1996	1 59	1 15	1 97	0 85	1 46	1 21	1 20	14 11	10 05	8 23	16 19
1997	1 61	1 16	2 03	0 85	1 48	1 22	1 21	14 22	10 00	8 14	16 54
1998	1 57	1 14	2 01	0 87	1 47	1 21	1 21	14 41	9 91	8 16	16 37
1999	1 52	1 10	1 93	0 87	1 46	1 21	1 21	14 71	10 16	8 38	16 19
2000	1 54	1 12	1 99	0 88	1 47	1 22	1 21	14 77	10 13	8 34	16 59
2001	1 56	1 14	2 04	0 88	1 49	1 23	1 21	14 65	10 00	8 15	16 63
2002	1 52	1 12	1 98	0 89	1 47	1 22	1 21	14 80	10 14	8 34	16 54
2003	1 52	1 13	2 00	0 89	1 48	1 22	1 22	14 83	10 15	8 34	16 70
2004	1 51	1 12	2 02	0 90	1 49	1 22	1 22	15 12	10 22	8 40	16 94
2005	1 53	1 14	2 06	0 90	1 49	1 22	1 23	15 15	10 16	8 37	17 21
2006	1 54	1 16	2 10	0 91	1 50	1 21	1 24	15 16	10 12	8 35	17 54
2007	1 58	1 20	2 15	0 92	1 49	1 19	1 25	14 90	9 84	8 27	17 82
2008	1 60	1 22	2 23	0 93	1 50	1 19	1 26	14 24	9 32	7 84	17 44
2009	1 48	1 16	2 13	0 95	1 51	1 20	1 26	13 97	9 09	7 61	16 20
2010	1 56	1 17	2 07	0 91	1 46	1 16	1 26	14 31	9 33	8 07	16 74
2011	1 55	1 19	2 13	0 94	1 46	1 16	1 26	13 91	8 99	7 79	16 61
2012	1 57	1 20	2 19	0 93	1 50	1 19	1 26	13 87	9 01	7 61	16 68
2013	1 62	1 25	2 25	0 93	1 49	1 18	1 26	13 71	8 94	7 59	17 10
2014	1 65	1 28	2 37	0 94	1 53	1 21	1 27	13 59	8 81	7 31	17 33
2015	1 70	1 31	2 46	0 94	1 54	1 21	1 28	13 41	8 63	7 15	17 57
2016	1 71	1 30	2 46	0 93	1 55	1 21	1 28	13 49	8 60	7 13	17 51
2017	1 72	1 32	2 53	0 94	1 57	1 22	1 29	13 57	8 60	7 07	17 91
2018	1 73	1 34	2 57	0 95	1 57	1 21	1 29	13 38	8 45	7 00	17 97
2019	1 69	1 35	2 61	0 97	1 59	1 22	1 30	13 04	8 17	6 75	17 59

単位：1955 年値=1.0。

注：τ_*は調整済みの真の EPI（(3.3.3-16)式）、τ_qは産業構造変化の考慮なき調整済み EPI（(3.3.3-9)式）、τはグロスの EPI。構造要因は(3.3.3-16)式および(3.3.3-14)式を参照。Eは品質調整済みエネルギー投入量、E_fは最終エネルギー消費量、E_pは最終エネルギー消費量（一次エネルギー換算値）。

表 3.3.7-4　EPI 関連指標における産業別寄与度（第 I 期: 1955–73 年）

	EPI		構造要因			エネルギー消費			産出
	$\tau_{*,j}$	τ_j	σ_j	$q_{c*,j}$	$q_{s*,j}$	E_j	$E_{f,j}$	$E_{p,j}$	X_j
1.農林水産業	-0.27	-0.19	0.08	-0.01	0.01	0.37	0.41	0.31	0.12
2.石炭鉱業	0.04	0.07	-0.03	0.05	0.02	0.01	0.00	-0.05	0.02
3.その他鉱業	0.00	-0.02	-0.07	0.04	0.01	0.21	0.15	0.11	0.09
4.建設業	-0.19	0.14	0.27	-0.02	0.08	0.59	0.30	0.28	0.42
5.食料品	0.04	0.24	0.18	0.03	-0.01	0.19	0.17	0.14	0.38
6.繊維	0.00	0.04	-0.04	0.07	0.01	0.21	0.16	0.13	0.17
7.衣服身見品	0.00	0.07	0.06	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.09
8.木材木製品	-0.04	0.00	0.02	0.01	0.01	0.08	0.04	0.04	0.04
9.家具備品	0.00	0.04	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.05
10.紙パルプ	0.07	-0.17	-0 35	0.12	-0.01	0.33	0.31	0.32	0.15
11.出版印刷	-0.01	0.07	0.06	0.01	0.01	0.05	0.02	0.03	0.09
12.化学	0.52	-0.99	-1.73	0.56	-0 34	1.20	1.90	1.53	0.54
13.石油精製製品	-0.01	0.05	0.06	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.07
14.石炭製品	0.02	0.01	-0.02	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02
15.ゴム製品	0.01	0.03	0.01	0.01	0.00	0.04	0.03	0.03	0.05
16.皮革製品	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02
17.窯業土石	0.40	-0.32	-0 94	-0.01	0 23	0.53	0.63	0.53	0.21
18.鉄鋼	0.79	-1.68	-2.49	-0.08	0 10	1.58	2.37	2.20	0.52
19.非鉄金属	0.03	-0.17	-0 31	0.03	0.08	0.31	0.27	0.30	0.13
20.金属製品	0.03	0.13	0.09	0.00	0.01	0.10	0.11	0.09	0.23
21.一般機械	0.04	0.22	0.16	0.01	0.00	0.12	0.13	0.12	0.34
22.電子計算機	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
23.通信機器	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.04
24.電子部品	0.01	0.10	0.09	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.12
25.民生重電他	0.08	0.28	0.21	0.00	0.00	0.10	0.16	0.12	0.40
26.自動車	0.03	0.39	0.34	0.00	0.01	0.09	0.09	0.08	0.46
27.その他輸送機械	0.04	0.05	-0.02	0.01	0.01	0.07	0.06	0.06	0.10
28.精密機械	0.01	0.07	0.06	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.09
29.その他製造業	0.01	0.10	0.09	0.00	0.00	0.07	0.05	0.06	0.16
30.鉄道輸送	0.01	0.09	-0 26	0.00	0 33	0.30	0.04	0.03	0.11
31.道路輸送	-0.04	-0.03	0.03	-0.01	-0.01	0.60	0.48	0.36	0.34
32.水運	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.11	0.21	0.16	0.16
33.航空輸送	0.09	-0.12	-0 20	0.00	-0.02	0.09	0.20	0.15	0.03
34.倉庫その他運輸	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03
35.通信	0.00	0.21	0.21	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.22
36.電力	0.00	0.16	0.14	0.00	0.02	0.07	0.02	0.02	0.18
37.ガス	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02
38.水道	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.03
39.卸小売	0.01	1.20	1.12	0.08	0.00	0.59	0.39	0.34	1.54
40.金融保険	0.00	0.38	0.38	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.39
41.不動産業	-0.01	0.27	0.27	0.01	0.00	0.03	0.02	0.02	0.29
42.教育	-0.05	0.03	0.08	0.00	0.00	0.07	0.07	0.06	0.09
43.研究	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
44.医療保健	0.01	0.18	0.14	0.00	0.02	0.07	0.05	0.04	0.22
45.その他サービス	-0.14	0.35	0.41	0.11	-0.04	0.41	0.32	0.27	0.61
46.公務	-0.01	0.28	0.28	0.00	0.00	0.07	0.07	0.05	0.33
47.家計部門	-0.11	-0.35	-0 51	0.27	-0.01	2.61	1.35	1.28	0.92
一国経済	1.4	1.3	-2.0	1.3	0.5	11.5	10.7	9.4	10.7
うち製造業　(5–27部門)	2.1	-1.4	-4.4	0.8	0.1	5.2	6.6	5.9	4.5
うち運輸業　(30–34部門)	0.1	-0.1	-0.4	0.0	0.3	1.1	0.9	0.7	0.7
うち他サービス業 (39–45部門)	-0.2	2.4	2.4	0.2	0.0	1.2	0.9	0.7	3.2

単位：パーセンテージ・ポイント（年平均寄与度）。

注：$\tau_{*,j}$は一国集計レベルでの真の EPI に対する産業別寄与度（(3.3.3-19)式）、τ_jはグロス EPI の産業別寄与度。構造要因の定義は(3.3.3-16)式および(3.3.3-14)式を参照。

表 3.3.7-5　EPI 関連指標における産業別寄与度（第 II 期: 1973–90 年）

	EPI		構造要因			エネルギー消費			産出
	$\tau_{*,j}$	τ_j	σ_j	$q_{c*,j}$	$q_{s*,j}$	E_j	$E_{f,j}$	$E_{p,j}$	X_j
1.農林水産業	-0.01	-0.03	0.00	0.00	-0.01	0.02	0.05	0.04	0.01
2.石炭鉱業	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.01
3.その他鉱業	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01
4.建設業	0.04	0.26	0.22	0.01	-0.01	0.12	0.09	0.07	0.33
5.食料品	-0.04	-0.04	0.01	0.00	0.00	0.06	0.05	0.06	0.02
6.繊維	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.04	0.02	0.03	0.03
7.衣服身見品	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
8.木材木製品	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
9.家具備品	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.紙パルプ	0.05	-0.05	-0 10	0.00	0.00	0.06	0.07	0.08	0.03
11.出版印刷	-0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.03
12.化学	0.39	0.10	-0 31	-0.01	0.03	-0.02	-0.02	-0.02	0.09
13.石油精製製品	0.08	0.07	-0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.07
14.石炭製品	-0.04	-0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02
15.ゴム製品	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
16.皮革製品	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.窯業土石	0.03	-0.03	-0.02	-0.01	-0.04	-0.01	0.03	0.03	0.00
18.鉄鋼	0.26	0.24	-0.09	-0.05	0 12	-0.11	-0.27	-0.23	0.02
19.非鉄金属	0.14	0.10	-0.05	0.01	0.01	-0.06	-0.06	-0.08	0.02
20.金属製品	-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.02	0.03	0.01	0.03	0.03
21.一般機械	0.03	0.11	0.08	-0.01	0.02	0.04	0.02	0.04	0.15
22.電子計算機	0.00	0.12	0.12	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.13
23.通信機器	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02
24.電子部品	0.05	0.09	0.04	0.00	0.00	0.06	0.04	0.06	0.15
25.民生重電他	0.04	0.14	0.10	-0.01	0.02	0.01	-0.01	0.00	0.14
26.自動車	0.01	0.11	0.10	-0.01	0.01	0.04	0.03	0.04	0.16
27.その他輸送機械	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
28.精密機械	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03
29.その他製造業	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04	0.06	0.05
30.鉄道輸送	0.03	0.05	0.00	0.02	0.01	-0.05	-0.03	-0.07	-0.01
31.道路輸送	-0.05	-0.10	-0.03	0.00	-0.02	0.14	0.22	0.17	0.06
32.水運	0.04	0.01	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02
33.航空輸送	0.04	-0.04	-0 15	0.01	0.06	0.05	0.09	0.07	0.02
34.倉庫その他運輸	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
35.通信	0.00	0.07	0.07	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.07
36.電力	0.01	0.05	0.05	0.00	-0.02	0.01	0.02	0.02	0.07
37.ガス	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
38.水道	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.00
39.卸小売	0.20	0.74	0.53	-0.01	0.02	0.08	0.03	0.05	0.79
40.金融保険	0.00	0.27	0.27	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.29
41.不動産業	-0.03	0.07	0.10	0.00	0.01	0.07	0.03	0.04	0.11
42.教育	-0.02	0.03	0.04	-0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.06
43.研究	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
44.医療保健	-0.04	0.06	0.09	-0.01	0.01	0.11	0.07	0.08	0.14
45.その他サービス	-0.04	0.24	0.27	-0.03	0.04	0.30	0.21	0.24	0.49
46.公務	0.01	0.18	0.16	-0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.18
47.家計部門	0.08	-0.16	-0.45	0.01	0 20	1.23	0.65	0.67	0.52
一国経済	1.3	2.7	1.1	-0.1	0.5	2.5	1.5	1.6	4.4
うち製造業　(5–27部門)	1.0	1.0	-0.1	-0.1	0.2	0.3	0.0	0.2	1.2
うち運輸業　(30–34部門)	0.1	-0.1	-0.2	0.0	0.0	0.1	0.3	0.2	0.1
うち他サービス業 (39–45部門)	0.1	1.4	1.3	-0.1	0.1	0.6	0.4	0.5	1.9

単位：パーセンテージ・ポイント（年平均寄与度）。

注：$\tau_{*,j}$は一国集計レベルでの真の EPI に対する産業別寄与度（(3.3.3-19)式）、τ_jはグロス EPI の産業別寄与度。構造要因の定義は(3.3.3-16)式および(3.3.3-14)式を参照。

表 3.3.7-6　EPI 関連指標における産業別寄与度（第 III 期: 1990–2008 年）

	EPI		構造要因			エネルギー消費			産出
	$\tau_{*,j}$	τ_j	σ_j	$q_{c*,j}$	$q_{s*,j}$	E_j	$E_{f,j}$	$E_{p,j}$	X_j
1.農林水産業	-0.02	0.00	0.01	-0.01	0.01	-0.03	-0.05	-0.04	-0.04
2.石炭鉱業	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.その他鉱業	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	-0.03	-0.03	-0.03	-0.01
4.建設業	-0.02	-0.15	-0 15	-0.01	0.03	-0.11	-0.09	-0.08	-0.23
5.食料品	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.01	0.04	0.03	0.04	0.03
6.繊維	-0.01	0.03	0.04	0.00	0.00	-0.04	-0.04	-0.04	-0.01
7.衣服身見品	0.00	-0.02	-0.02	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.03
8.木材木製品	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
9.家具備品	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01
10.紙パルプ	-0.02	0.01	0.04	0.00	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01
11.出版印刷	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.01
12.化学	0.03	-0.03	0.01	0.01	-0.08	-0.04	0.04	0.03	0.00
13.石油精製製品	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
14.石炭製品	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15.ゴム製品	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00
16.皮革製品	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.窯業土石	0.09	0.10	0.02	0.00	0.00	-0.07	-0.12	-0.11	-0.01
18.鉄鋼	-0.11	0.08	0.17	0.03	-0.01	-0.05	-0.08	-0.10	-0.02
19.非鉄金属	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00
20.金属製品	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.02
21.一般機械	0.02	0.04	0.01	-0.01	0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.03
22.電子計算機	0.02	0.08	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
23.通信機器	0.03	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
24.電子部品	0.13	0.12	-0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.14
25.民生重電他	0.02	0.05	0.03	-0.01	0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.04
26.自動車	0.03	0.06	0.03	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.06
27.その他輸送機械	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
28.精密機械	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29.その他製造業	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02
30.鉄道輸送	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
31.道路輸送	0.02	0.00	-0.02	-0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
32.水運	0.03	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01
33.航空輸送	0.05	-0.03	-0.05	0.00	-0.03	-0.01	0.04	0.03	0.00
34.倉庫その他運輸	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
35.通信	0.00	0.11	0.10	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.12
36.電力	0.01	0.05	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.05
37.ガス	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
38.水道	-0.02	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.00
39.卸小売	-0.16	-0.07	0.05	-0.05	0.09	0.24	0.08	0.14	0.07
40.金融保険	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
41.不動産業	-0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01
42.教育	-0.06	-0.06	-0.01	-0.01	0.03	0.05	0.02	0.03	-0.02
43.研究	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
44.医療保健	0.02	0.13	0.09	-0.01	0.03	0.08	0.04	0.05	0.17
45.その他サービス	-0.07	0.15	0.16	-0.05	0 12	0.27	0.12	0.18	0.33
46.公務	-0.01	0.09	0.09	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.10
47.家計部門	0.09	-0.19	-0 21	-0.03	-0.05	0.48	0.33	0.38	0.18
一国経済	0.0	0.5	0.5	-0.2	0.2	0.9	0.3	0.5	1.1
うち製造業　(5–27部門)	0.2	0.5	0.4	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.3
うち運輸業　(30–34部門)	0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
うち他サービス業 (39–45部門)	-0.3	0.1	0.3	-0.1	0.3	0.7	0.3	0.4	0.6

単位：パーセンテージ・ポイント（年平均寄与度）。

注：$\tau_{*,j}$は一国集計レベルでの真の EPI に対する産業別寄与度（(3.3.3-19)式）、τ_jはグロス EPI の産業別寄与度。構造要因の定義は(3.3.3-16)式および(3.3.3-14)式を参照。

表 3.3.7-7　EPI 関連指標における産業別寄与度（第 IV 期: 2008–19 年）

	EPI		構造要因			エネルギー消費			産出
	$\tau_{*,j}$	τ_j	σ_j	$q_{c*,j}$	$q_{s*,j}$	E_j	$E_{f,j}$	$E_{p,j}$	X_j
1.農林水産業	-0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03
2.石炭鉱業	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.その他鉱業	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.建設業	0.00	-0.02	-0.01	0.02	-0.03	-0.01	0.02	0.01	-0.02
5.食料品	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	-0.02	-0.03	-0.03	0.00
6.繊維	-0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01
7.衣服身見品	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.木材木製品	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
9.家具備品	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.紙パルプ	0.05	0.06	-0.01	0.00	0.01	-0.03	-0.05	-0.06	0.00
11.出版印刷	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01
12.化学	0.26	0.16	-0 16	0.01	0.05	-0.04	-0.13	-0.12	0.04
13.石油精製製品	-0.01	-0.04	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.04
14.石炭製品	-0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01
15.ゴム製品	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16.皮革製品	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.窯業土石	-0.02	0.02	0.04	0.00	0.00	-0.02	-0.03	-0.03	-0.01
18.鉄鋼	-0.06	0.08	0.18	-0.13	0.08	-0.07	-0.24	-0.10	-0.02
19.非鉄金属	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	-0.02	-0.03	-0.03	-0.01
20.金属製品	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01
21.一般機械	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.02
22.電子計算機	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.通信機器	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00
24.電子部品	0.06	0.06	-0.01	0.00	0.00	-0.03	-0.02	-0.04	0.03
25.民生重電他	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.02
26.自動車	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01
27.その他輸送機械	-0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
28.精密機械	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00
29.その他製造業	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
30.鉄道輸送	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.01
31.道路輸送	0.05	0.06	0.01	0.03	-0.02	-0.09	-0.07	-0.08	-0.01
32.水運	-0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	-0.02	-0.04	-0.03	-0.02
33.航空輸送	-0.10	0.01	0.09	0.01	0.02	0.00	-0.01	-0.02	-0.01
34.倉庫その他運輸	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
35.通信	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.05
36.電力	-0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.03
37.ガス	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00
38.水道	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
39.卸小売	0.02	0.03	-0.02	0.03	0.00	-0.05	-0.03	-0.06	-0.03
40.金融保険	0.01	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
41.不動産業	0.02	0.05	0.03	0.01	-0.01	-0.02	0.00	-0.01	0.04
42.教育	-0.02	-0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00
43.研究	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00
44.医療保健	0.04	0.20	0.13	0.01	0.03	0.04	0.00	0.00	0.20
45.その他サービス	0.09	0.16	0.00	0.03	0.04	-0.10	-0.11	-0.16	0.00
46.公務	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00
47.家計部門	0.12	0.40	0.05	0.09	0 14	-0.27	-0.35	-0.44	-0.04
一国経済	0.5	1.4	0.4	0.2	0.3	-0.8	-1.2	-1.4	0.1
うち製造業　(5–27部門)	0.3	0.4	0.1	-0.1	0.2	-0.3	-0.6	-0.5	-0.1
うち運輸業　(30–34部門)	-0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.0
うち他サービス業 (39–45部門)	0.2	0.5	0.2	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.2	0.2

単位：パーセンテージ・ポイント（年平均寄与度）。

注：$\tau_{*,j}$は一国集計レベルでの真の EPI に対する産業別寄与度（(3.3.3-19)式）、τ_jはグロス EPI の産業別寄与度。構造要因の定義は(3.3.3-16)式および(3.3.3-14)式を参照。

表 3.3.7-8　産業別 EPI とエネルギー消費成長率（第 I 期: 1955–73 年）

	EPI		エネルギー消費			産出
	$\tau_{*,j}$	τ_j	E_j	$E_{f,j}$	$E_{p,j}$	X_j
1.農林水産業	-7.9	-7.9	9.0	8.6	9.0	1.1
2.石炭鉱業	1.1	6.0	-2.1	-6.7	-7.0	-0.9
3.その他鉱業	0.1	4.0	11.8	11.1	7.9	11.9
4.建設業	-9.4	-6.8	17.4	14.0	14.8	8.0
5.食料品	2.3	3.7	11.0	11.4	9.6	13.3
6.繊維	-0.4	2.3	7.8	7.4	5.2	7.5
7.衣服身見品	0.7	5.2	14.0	11.3	9.5	14.8
8.木材木製品	-6.8	-3.6	10.8	9.2	7.6	4.0
9.家具備品	-2.5	1.4	13.6	13.8	9.7	11.1
10.紙パルプ	2.3	5.8	13.3	13.6	9.8	15.6
11.出版印刷	-4.8	0.3	13.2	9.5	8.1	8.4
12.化学	3.6	5.4	12.7	15.1	10.9	16.3
13.石油精製製品	-10.4	-9.0	22.2	21.5	20.8	11.8
14.石炭製品	12.1	13.3	10.8	12.0	9.6	22.9
15.ゴム製品	3.6	4.6	9.7	10.4	8.7	13.3
16.皮革製品	4.1	6.9	8.3	7.7	5.5	12.4
17.窯業土石	4.7	6.9	8.3	5.9	6.1	13.1
18.鉄鋼	4.0	4.2	11.6	11.1	11.4	15.6
19.非鉄金属	0.8	4.0	12.3	9.8	9.1	13.1
20.金属製品	3.9	5.4	12.1	10.8	10.6	16.0
21.一般機械	4.2	5.7	12.5	11.9	11.0	16.7
22.電子計算機	4.4	7.1	21.9	21.3	19.2	26.3
23.通信機器	5.3	9.3	14.7	14.4	10.7	20.1
24.電子部品	8.7	12.5	21.5	21.7	17.7	30.2
25.民生重電他	8.2	7.9	12.9	13.0	13.2	21.1
26.自動車	6.2	8.1	16.6	14.5	14.7	22.8
27.その他輸送機械	2.0	4.3	8.4	6.9	6.2	10.5
28.精密機械	5.9	6.5	11.6	11.1	11.1	17.5
29.その他製造業	2.2	3.2	14.6	14.5	13.5	16.7
30.鉄道輸送	-0.1	5.0	5.6	-0.5	0.5	5.5
31.道路輸送	-0.7	-1.5	13.6	13.7	14.4	12.9
32.水運	-1.1	-1.2	13.3	13.1	13.5	12.3
33.航空輸送	9.7	8.5	15.0	15.8	16.2	24.7
34.倉庫その他運輸	-1.2	3.6	12.0	9.3	7.2	10.8
35.通信	1.4	4.1	11.5	9.8	8.8	12.9
36.電力	-0.4	6.1	12.2	6.6	5.6	11.7
37.ガス	2.8	4.8	6.1	9.7	4.2	9.0
38.水道	-6.3	-2.5	18.7	18.7	14.8	12.4
39.卸小売	0.0	2.9	15.1	15.3	12.3	15.1
40.金融保険	0.0	4.1	13.2	12.3	9.1	13.2
41.不動産業	-5.4	-2.3	14.7	16.8	11.6	9.3
42.教育	-10.4	-9.4	13.4	12.4	12.5	3.0
43.研究	-1.5	2.5	9.2	10.5	5.2	7.7
44.医療保健	1.4	5.4	11.2	7.7	7.2	12.6
45.その他サービス	-5.1	-2.3	12.8	14.3	10.1	7.8
46.公務	-0.1	0.1	6.2	6.0	6.0	6.1
47.家計部門	-0.9	1.1	12.0	12.1	9.9	11.0
一国経済	1.4	1.3	11.5	10.7	9.4	10.7

単位：%（年平均成長率）。

注：$\tau_{*,j}$は真の産業別 EPI（(3.3.3-15)式）、τ_jはグロスの産業別 EPI。

表 3.3.7-9　産業別 EPI とエネルギー消費成長率（第 II 期: 1973–90 年）

	EPI		エネルギー消費			産出
	$\tau_{*,j}$	τ_j	E_j	$E_{f,j}$	$E_{p,j}$	X_j
1.農林水産業	-0.6	-1.1	1.0	1.5	1.6	0.5
2.石炭鉱業	-1.8	-1.1	-7.0	-6.5	-7.8	-8.8
3.その他鉱業	0.8	-0.2	-1.4	-0.8	-0.3	-0.6
4.建設業	1.5	1.5	2.7	3.1	2.7	4.2
5.食料品	-2.3	-2.4	3.4	3.2	3.5	1.1
6.繊維	-0.3	0.5	2.5	1.7	1.8	2.2
7.衣服身見品	-2.0	-1.2	3.9	2.1	3.1	1.9
8.木材木製品	3.4	2.9	-0.9	-0.7	-0.4	2.5
9.家具備品	-0.9	-1.3	1.4	1.3	1.8	0.5
10.紙パルプ	1.6	1.7	2.3	2.3	2.2	3.9
11.出版印刷	-2.8	-3.0	5.1	5.4	5.3	2.3
12.化学	3.1	3.3	0.1	-0.1	0.0	3.3
13.石油精製製品	33.4	35.7	3.2	0.9	0.9	36.6
14.石炭製品	-19.0	-18.6	1.2	0.3	0.9	-17.8
15.ゴム製品	0.1	0.1	3.7	3.3	3.7	3.8
16.皮革製品	-3.0	-3.6	2.1	2.8	2.6	-1.0
17.窯業土石	0.5	-0.2	-0.1	0.5	0.7	0.5
18.鉄鋼	1.3	1.7	-0.7	-1.3	-1.1	0.6
19.非鉄金属	5.8	6.0	-2.8	-2.7	-3.1	3.0
20.金属製品	-0.6	0.1	3.6	1.4	2.9	3.0
21.一般機械	3.2	3.8	4.0	1.8	3.4	7.2
22.電子計算機	13.9	14.6	24.2	22.4	23.5	38.1
23.通信機器	4.4	5.2	8.9	8.1	8.1	13.3
24.電子部品	10.2	11.0	13.8	12.6	12.9	24.0
25.民生重電他	5.3	6.3	1.7	-1.0	0.7	7.0
26.自動車	1.4	1.3	5.2	3.9	5.2	6.5
27.その他輸送機械	1.0	1.3	0.9	-0.2	0.5	1.8
28.精密機械	1.9	2.6	5.2	3.0	4.6	7.1
29.その他製造業	-1.5	-1.8	5.5	5.7	5.7	3.9
30.鉄道輸送	1.9	2.8	-2.8	-3.0	-3.6	-0.9
31.道路輸送	-1.1	-1.6	3.4	3.9	3.9	2.3
32.水運	2.9	2.5	1.0	1.4	1.3	3.8
33.航空輸送	1.9	5.2	6.7	3.5	3.3	8.5
34.倉庫その他運輸	5.3	5.1	0.5	2.3	0.7	5.8
35.通信	-1.4	-0.3	6.0	3.7	4.8	4.5
36.電力	4.9	0.6	1.1	4.8	5.4	6.0
37.ガス	3.8	4.2	2.6	2.2	2.2	6.4
38.水道	-6.4	-5.9	7.9	6.0	7.4	1.5
39.卸小売	5.4	5.4	1.3	0.9	1.3	6.7
40.金融保険	-0.9	0.2	8.4	7.4	7.3	7.5
41.不動産業	-6.9	-5.6	9.8	7.9	8.5	2.9
42.教育	-1.9	-0.9	3.4	1.6	2.4	1.5
43.研究	-2.9	-2.5	6.1	5.5	5.7	3.2
44.医療保健	-3.6	-2.8	8.3	6.8	7.4	4.6
45.その他サービス	-1.2	-0.8	5.6	4.6	5.2	4.3
46.公務	0.6	2.2	2.3	-0.2	0.8	2.9
47.家計部門	0.8	1.7	4.6	3.8	3.8	5.4
一国経済	1.3	2.7	2.5	1.5	1.6	4.4

単位：%（年平均成長率）。

注：$\tau_{*,j}$は真の産業別 EPI（(3.3.3-15)式）、τ_jはグロスの産業別 EPI。

表 3.3.7-10　産業別 EPI とエネルギー消費成長率（第 III 期: 1990–2008 年）

	EPI		エネルギー消費			産出
	$\tau_{*,j}$	τ_j	E_j	$E_{f,j}$	$E_{p,j}$	X_j
1.農林水産業	-0.4	-0.3	-1.8	-2.2	-1.9	-2.2
2.石炭鉱業	-7.0	-6.6	-15.7	-16.2	-16.0	-22.6
3.その他鉱業	1.0	0.8	-7.1	-7.0	-6.9	-6.0
4.建設業	-0.3	0.7	-3.4	-4.6	-4.4	-3.7
5.食料品	-0.5	-0.3	2.0	1.5	1.8	1.4
6.繊維	-0.5	-0.7	-4.1	-3.9	-4.0	-4.7
7.衣服身見品	-3.5	-3.3	-4.6	-5.1	-4.8	-8.1
8.木材木製品	-0.7	-0.5	-2.8	-3.4	-3.1	-3.5
9.家具備品	-2.9	-2.6	-2.1	-2.5	-2.4	-5.0
10.紙パルプ	-0.7	-1.0	-0.9	-0.6	-0.6	-1.6
11.出版印刷	1.1	1.1	-2.1	-1.4	-2.1	-1.0
12.化学	0.3	-0.3	-0.3	0.3	0.3	-0.1
13.石油精製製品	4.6	2.8	-2.8	-2.4	-0.9	1.9
14.石炭製品	-3.2	-3.2	-1.1	-0.8	-1.1	-4.3
15.ゴム製品	2.0	1.6	-2.0	-1.2	-1.6	0.0
16.皮革製品	1.8	2.1	-7.1	-7.2	-7.4	-5.2
17.窯業土石	2.5	2.4	-3.2	-3.2	-3.2	-0.8
18.鉄鋼	-1.1	-0.9	-0.6	-0.5	-0.8	-1.7
19.非鉄金属	-0.7	-0.6	-0.8	-0.7	-0.9	-1.5
20.金属製品	-0.7	-0.2	-0.7	-1.4	-1.1	-1.4
21.一般機械	1.7	2.4	-0.4	-1.7	-1.1	1.4
22.電子計算機	19.9	20.2	-0.3	-0.7	-0.7	19.6
23.通信機器	11.2	11.2	0.8	0.9	0.8	12.1
24.電子部品	10.2	10.3	2.4	2.5	2.3	12.6
25.民生重電他	2.9	3.7	-0.5	-2.4	-1.3	2.5
26.自動車	2.9	2.8	-0.3	0.2	-0.2	2.6
27.その他輸送機械	-0.9	-0.6	2.2	1.7	1.9	1.3
28.精密機械	-1.1	-0.5	1.4	0.6	0.7	0.3
29.その他製造業	-0.8	-0.5	-0.9	-1.0	-1.2	-1.8
30.鉄道輸送	0.1	0.4	0.1	-0.4	-0.2	0.2
31.道路輸送	0.4	0.5	0.6	0.2	0.5	1.0
32.水運	2.6	2.3	-0.7	-0.6	-0.4	1.9
33.航空輸送	1.6	0.5	0.3	1.2	1.3	1.9
34.倉庫その他運輸	-3.0	-1.9	4.1	2.0	3.0	1.1
35.通信	0.1	0.7	5.8	3.8	5.2	5.9
36.電力	1.9	4.0	1.5	-1.4	-0.7	3.4
37.ガス	-2.2	-8.2	6.9	13.0	12.9	4.7
38.水道	-4.1	-3.7	4.6	3.8	4.2	0.4
39.卸小売	-4.0	-2.9	4.5	2.3	3.5	0.6
40.金融保険	-1.6	-1.1	1.6	1.5	1.0	0.0
41.不動産業	-1.1	-0.4	1.4	0.4	0.7	0.3
42.教育	-4.9	-3.7	4.3	2.0	3.1	-0.6
43.研究	-3.8	-3.2	4.9	4.7	4.3	1.2
44.医療保健	0.6	1.4	3.3	2.2	2.5	3.9
45.その他サービス	-1.1	-0.3	3.4	1.9	2.5	2.3
46.公務	-1.8	-1.0	3.4	2.3	2.7	1.6
47.家計部門	0.4	0.0	1.4	1.6	1.8	1.8
一国経済	0.0	0.5	0.9	0.3	0.5	1.1

単位：%（年平均成長率）。

注：$\tau_{*,j}$は真の産業別 EPI（(3.3.3-15)式）、τ_jはグロスの産業別 EPI。

表 3.3.7-11　産業別 EPI とエネルギー消費成長率（第 IV 期: 2008–19 年）

	EPI		エネルギー消費			産出
	$\tau_{*,j}$	τ_j	E_j	$E_{f,j}$	$E_{p,j}$	X_j
1.農林水産業	-1.0	-0.5	-1.3	-1.2	-1.7	-2.3
2.石炭鉱業	1.5	-1.7	-2.9	0.6	0.2	-1.4
3.その他鉱業	-2.1	-1.6	-0.6	-0.2	-1.1	-2.7
4.建設業	-0.1	-0.9	-0.2	1.6	0.5	-0.4
5.食料品	0.8	1.0	-0.9	-1.2	-1.1	-0.1
6.繊維	-3.0	-2.5	-1.8	-2.3	-2.3	-4.8
7.衣服身見品	-1.2	-0.7	-0.4	-0.5	-0.9	-1.6
8.木材木製品	-2.6	-3.3	0.9	3.3	1.7	-1.6
9.家具備品	1.0	1.8	-2.4	-2.9	-3.2	-1.4
10.紙パルプ	1.9	2.3	-1.6	-1.9	-2.0	0.4
11.出版印刷	-1.1	-0.5	-0.7	-1.3	-1.3	-1.8
12.化学	2.1	2.6	-0.5	-0.9	-1.0	1.6
13.石油精製製品	-3.8	-4.7	-0.5	0.8	0.3	-4.4
14.石炭製品	-21.3	-20.7	-1.8	-2.1	-2.4	-23.1
15.ゴム製品	0.8	0.8	-1.8	-1.6	-1.9	-1.0
16.皮革製品	-1.9	-1.2	-5.0	-5.7	-5.7	-6.9
17.窯業土石	-0.6	-0.6	-1.3	-1.2	-1.3	-1.9
18.鉄鋼	-0.4	-0.8	-1.3	-2.1	-0.9	-1.7
19.非鉄金属	0.7	1.1	-2.8	-3.3	-3.1	-2.1
20.金属製品	-1.1	-0.5	-0.2	-0.6	-0.8	-1.3
21.一般機械	-0.2	0.5	-0.4	-0.8	-1.1	-0.6
22.電子計算機	8.5	9.3	-8.0	-7.3	-8.9	0.5
23.通信機器	3.2	3.8	-2.5	-3.0	-3.0	0.7
24.電子部品	5.7	6.3	-2.5	-2.9	-3.1	3.2
25.民生重電他	3.9	4.6	-2.1	-2.2	-2.9	1.7
26.自動車	1.5	2.1	-1.8	-2.4	-2.4	-0.3
27.その他輸送機械	-2.5	-2.0	1.2	1.1	0.8	-1.2
28.精密機械	1.1	2.3	-1.8	-3.4	-3.0	-0.7
29.その他製造業	2.2	2.6	0.0	-0.1	-0.4	2.2
30.鉄道輸送	1.2	1.9	-0.6	-0.9	-1.3	0.6
31.道路輸送	1.0	1.1	-1.5	-1.0	-1.6	-0.5
32.水運	-2.1	-1.5	-2.7	-2.7	-3.2	-4.7
33.航空輸送	-3.8	-2.9	0.2	-0.4	-0.6	-3.5
34.倉庫その他運輸	0.6	1.7	1.7	1.0	0.6	2.3
35.通信	-0.7	-0.2	2.7	2.4	2.3	2.1
36.電力	-2.8	-2.1	-0.9	-0.9	-1.6	-3.7
37.ガス	3.4	1.4	-4.6	-2.1	-2.6	-1.2
38.水道	-1.6	-0.9	0.5	0.2	-0.2	-1.1
39.卸小売	0.4	0.8	-0.6	-0.5	-1.0	-0.2
40.金融保険	1.4	1.9	-0.6	0.0	-1.1	0.8
41.不動産業	2.5	2.8	-1.5	-0.4	-1.8	1.0
42.教育	-1.4	-0.5	1.4	1.0	0.5	0.0
43.研究	1.5	2.1	-2.2	-2.5	-2.8	-0.7
44.医療保健	1.6	2.8	1.3	0.2	0.1	2.9
45.その他サービス	1.1	2.0	-1.1	-1.5	-2.0	0.0
46.公務	1.3	2.0	-1.3	-1.7	-2.0	0.0
47.家計部門	0.5	1.4	-0.9	-1.4	-1.8	-0.4
一国経済	0.5	1.4	-0.8	-1.2	-1.4	0.1

単位：%（年平均成長率）。

注：$\tau_{*,j}$は真の産業別 EPI（(3.3.3-15)式）、τ_jはグロスの産業別 EPI。

参考文献（第 3.3 節に関するもの）

1) Gordon, Robert J. (2016) *The Rise and Fall of American Growth*, Princeton University Press. （高遠裕子・山岡由美訳『アメリカ経済－成長の終焉』日経 BP 社、2018 年）.
2) Herring, Horace (2006) “Energy Efficiency – A Critical View,” *Energy*, Vol.31, Issue 1.
3) 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.
4) Kimura, Osamu (2013) “The Role of Standards: The Japanese Top Runner Programme for End-Use Efficiency,” in Armulf Grübler and Charlie Wilson (eds.) *Energy Technology Innovation: Learning from Historical Successes and Failures*, Cambridge University Press, Chapter 17.
5) Murtishaw, Scott and Lee Schipper (2001a) “Energy Saving and Structural Changes in the US Economy: Evidence from Disaggregated data Using Decomposition Techniques,” Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, LBNL-48786, September.
6) Murtishaw, Scott and Lee Schipper (2001b) “Disaggregated Analysis of US Energy Consumption in the 1990s: Evidence of the Effects of the Internet and Rapid Economic Growth,” *Energy Policy*, Vol.29, Issue 15.
7) National Academy of Sciences (1979) *Alternative Energy Demand Futures to 2010*, The Report of the Demand and Conservation Panel to the Committee on Nuclear and Alternative Energy Systems, Washington, D.C.: National Academy of Sciences.
8) Nomura, Koji (2023) Energy Productivity and Economic Growth—Experiences of the Japanese Industries, 1955–2019, Springer.
9) Schurr, Sam H., Calvin C. Burwell, Warren S. Devine and Sidney Sonenblum (eds.) (1990) *Electricity in the American Economy – Agent of Technological Progress*, Contributions in Economics and Economic History, No. 117, New York: Greenwood Press.
10) 加治木紳哉（2010）『戦後日本の省エネルギー史―電力、鉄鋼、セメント産業の歩み』エネルギーフォーラム.
11) 黒田昌裕・新保一成・野村浩二・小林信行（1997）『KEO データベース－産出および資本・労働投入の測定－』慶應義塾大学産業研究所.
12) 経済産業省（2015）「長期エネルギー需給見通し」7 月.
13) 経済産業省（2021a）「令和 2 年度 我が国経済社会の情報化・サービス化に係る基盤整備（電子商取引に関する市場調査）」7 月.
14) 経済産業省（2021b）「2018 年延長産業連関表」8 月.
15) 経済産業省（2021c）「エネルギー基本計画」10 月.
16) 経団連（2022）「経団連カーボンニュートラル行動計画：2050 年カーボンニュートラルに向けたビジョンと 2022 年度フォローアップ結果総括編（2021 年度実績）［速報版］」11 月.
17) 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.
18) 資源エネルギー庁（2015）「トップランナー制度－世界最高の省エネルギー機器等の創出に向けて」3 月.
19) 杉山大志・野田冬彦・木村宰（2010）『省エネルギー政策論―工場・事業所での省エネ法の実効性』エネルギーフォーラム.

20) 内閣府経済社会総合研究所（2022）『2021 年度国民経済計算年報』内閣府.
21) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット (2022) 『EDMC エネルギー・経済統計要覧』省エネルギーセンター.
22) 日本化学工業協会（2022）「化学産業における地球温暖化対策の取組み」1 月.
23) 日本鉄鋼連盟（2022）「地球温暖化対策への取組状況について」産業構造審議会 産業技術環境分科会 研究開発・評価小委員会 鉄鋼ワーキンググループ、3 月.
24) 日本政府（2019）「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」6 月.
25) 日本政府（2020）「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」12 月.
26) 野村浩二（2004）『資本の測定－日本経済の資本深化と生産性』慶應義塾大学出版会.
27) 野村浩二（2017）「英独におけるエネルギー生産性の改善は持続可能か」RCGW Discussion Paper, 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, No.60.
28) 野村浩二（2021）『日本の経済成長とエネルギー：経済と環境の両立はいかに可能か』慶應義塾大学出版会.

3.4 日本の産業界の排出削減の取り組み状況の分析

3.4.1 経団連を中心とした温室効果ガス排出削減の取り組み状況と評価

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、1997 年 6 月に「経団連環境自主行動計画」を策定して以来、温室効果ガス削減に向けて、毎年度 PDCA サイクルを回し、各業種・企業における主体的かつ積極的な取組みを推進してきた。2013 年には、「経団連環境自主行動計画」を進化させた形で「経団連低炭素社会実行計画」を策定し、国内事業活動における CO_2 削減、革新的技術開発等の四本柱のもと、2020 年目標（フェーズⅠ）、2030 年目標（フェーズⅡ）に向け、排出削減を目指した取組みを着実に続けてきた。そして、2020 年 10 月の菅首相（当時）による 2050 年カーボンニュートラル宣言を受け、カーボンニュートラルの実現に向けた経済界の主体的取組みの強力な推進のために、2021 年 11 月に「経団連 低炭素社会実行計画」を「経団連 カーボンニュートラル行動計画」と改めた。

これらの経団連を中心とした産業界の自主的な取り組みの分析および評価については、自主行動計画に関する総括的な評価等[1),2)]で公表されており、さらに低炭素社会実行計画の下での排出削減の取り組みの評価として、2020 年度から継続して分析を行ってきた（文献 3),4)）。本節では、昨年度の報告以降に公表された 2021 年度実績（速報）に基づき、これまでの分析との比較も踏まえ評価を行った内容を報告する。

(1) 経団連における地球温暖化対策の取り組みの概要

① 「経団連低炭素社会実行計画」における取り組みの経緯

経団連は、自主行動計画をさらに進化させた形で、低炭素社会実行計画[5)]を策定した。同計画において、1)国内の事業活動から排出される CO_2 の削減、2)消費者・顧客を含め

た主体間の連携の強化、3)途上国への技術移転など国際貢献の推進、4)革新的技術の開発の 4 本柱のもと、2020 年に向けたフェーズⅠ、2030 年に向けたフェーズⅡの目標が策定され、PDCA サイクルに沿って取り組みが続けられている。

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いる。2019 年度実績について、2013～2019 年度にかけて産業・エネルギー転換・業務・運輸の全部門合計の CO_2 排出量は毎年着実に削減し、2019 年度には約 10.7%削減（産業部門では約 10.9%削減）を達成と報告された（文献 6)）。また、低炭素社会実行計画の評価・検証は、経済産業省ならびに環境省の関係審議会での業種別ワーキンググループや専門委員会で定期的に実施されており、2021 年 3 月に行われた経産省・環境省の合同フォローアップ会議において、2019 年度実績について、両省所管 44 業種のうち、2020 年度目標は 35 業種、2030 年目標は 17 業種が達成しており、前倒しで着実な取り組みが進められていることが報告された（文献 7)）。

② 2020 年度実績およびフェーズⅠの取り組みに対する評価

2022 年 3 月に実施されたフォローアップでは、2020 年度の実績に対する評価とフェーズⅠの総括が行われた（文献 8)）。2020 年度の全部門（産業、エネルギー転換、業務、運輸）の CO_2 排出量は 2013 年度比、前年度比ともに減少した。産業部門における 2020 年度の CO_2 排出増減の要因分析によると、「経済活動量の変化」による CO_2 排出量は各年度基準で減少した（2005 年度比-22.9%、2013 年度比−18.1%、2019 年度比-12.4%）。これは 2005 年度から続く傾向であるものの、2019 年度フォローアップ結果と比較して、減少幅は 2～4 倍程度と大きく拡大しており、新型コロナウイルスの影響による生産量の減少が主な要因と考えられる。前年度比では「経済活動量の変化」に加え、「CO_2 排出係数の変化」による CO_2 排出量が微減（-0.6%）した結果、「経済活動量あたりエネルギー使用量の変化」による CO_2 排出量が増加（+2.0%）したにもかかわらず、CO_2 排出量は減少（-11.1%）した。

また、フェーズⅠ（2013～2020 年度）における取組み実績についての考察として、産業・エネルギー転換・業務・運輸の全部門合計の CO_2 排出量は、毎年着実に削減を重ね、7 年間で 21.6%削減を達成した。但し、最終年度である 2020 年度実績については、新型コロナウイルスの感染拡大による経済活動量低下の影響が大きいことには留意が必要である（2013～2019 年度の 6 年間では、10.8%削減）。フェーズⅠ目標達成率を調査した結果、47 業種が目標達成、1 業種が一部の目標を達成、10 業種が目標未達であった。目標を達成した業種のうち 14 業種は、これまでより高い目標への見直しを行った上で、新しい目標を達成した。目標が未達であった業種からは、その要因として、新型コロナウイルスの影響が多く報告され、具体的には、生産量が目標策定時の想定範囲を大きく外れて急激に減少したが、完全に工場が停止した訳ではないため固定エネルギー分の影響が顕著に出て原単位が悪化したこと、等が挙げられた。さらに、第三者評価委員会では、2020 年度における CO_2 排出量の削減は、新型コロナウイルスの影響による部分が大きいが、その部分を除いても、産業・エネルギー転換・業務・運輸のすべての部門において、2005 年度比でも 2013 年度比でも、10%以上あるい

は 10%近くの削減がなされていると考えられ、参加業種は、CO_2 排出削減を着実に進めており、これまでの取組みは高く評価される、とした。目標達成については、参加業種は一貫して CO_2 排出削減を進め、一部の業種が未達ではあったものの、全体から見ると当初の目標は十分に達成されている。経済界の自主的取組は、わが国の排出削減に貢献しており、フェーズⅠの計画実効性は高く評価される、としている（文献 9)）。

③ 2050 年カーボンニュートラルに向けた経団連の取り組み動向

2020 年 10 月の菅首相（当時）による 2050 年までにカーボンニュートラル（CN）を目指すとの宣言を受けて、経団連は 2020 年 12 月に「2050 年カーボンニュートラル（Society 5.0 with Carbon Neutral）実現に向けて -経済界の決意とアクション-」、2021 年 6 月に「グリーン成長の実現に向けた緊急提言」を発表した。実行計画は、パリ協定の下でのわが国の中期削減目標への貢献等の観点から、2030 年に向けた CO_2 削減に力点を置いてきたが、2050 年 CN の実現に対する内外の関心と期待がより一層高まる中、経団連は、その実現を今後目指すべき最も重要なゴールと新たに位置づけ、2021 年 11 月に実行計画を「経団連カーボンニュートラル行動計画」へ改め、2050 年 CN に向けたビジョン（基本方針等）の策定と四本柱の取組みにより地球規模・長期の温暖化対策に貢献していくとした（文献 8)）。

さらに、2022 年 5 月、経団連は「グリーントランスフォーメーション(GX）に向けて」[10]を発表した。日本が 2050 年 CN と温室効果ガスの 2030 年度 46%削減に国際的にコミットしたことを受け、これらの目標を実現するため、国を挙げて「経済と環境の好循環」を創出しながら、経済社会全体の変革である「グリーン・トランスフォーメーション（GX)」を推進する必要があるとし、政府に対して「GX 政策パッケージ」の早期策定・実行を求めた。「経団連カーボンニュートラル行動計画」の着実な実施を図り、BAT (Best Available Technologies; 経済的に利用可能な最善の技術）の最大限の導入による排出削減と、革新的技術の開発を進めることを改めて表明した。昨年度（2021 年度）のフォローアップ調査で終了したフェーズⅠでの着実な成果を踏まえ、CN 行動計画は、政府の「地球温暖化対策計画」において、引き続き産業界の対策の柱に位置づけられている。今年度（2022 年度）から、フェーズⅡ（2021～2030 年度）のフォローアップ調査が始まり、5 月に発表された提言「GX に向けて」で表明したように、経団連は、CN 行動計画を強力に推進することにより、2050 年 CN の実現に向けて、最大限の取組みを行っていく、としている（文献 11)）。

④ フェーズⅡに向けた目標設定および 2021 年度実績

経団連を中心とした温室効果ガス排出削減の取り組みは、2050 年 CN を視野に入れた対策の方向になってきている。そのような中、CN 行動計画において、国内事業活動からの排出抑制は依然として重要な柱の一つに位置付けられており、2030 年に向けたフェーズ II の取組みが実施されている。

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および CN 行動計画に参加している経団連傘下の業種について、フェーズⅠ・Ⅱに向けた目標指数の種類と部門別件数を示す。CN 行

動計画での 2030 年目標においては、特に産業部門で CO_2 排出量を指標とする業種が増えた。

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）（上：2020 年目標（2019 年 4 月時点）；下：2030 年目標（2022 年 3 月時点））

	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

	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
カーボンニュートラル行動計画（2030年目標）				
エネルギー転換部門（3業種）	1	1	2	1
産業部門（31業種）	5	1	6	19
業務部門（15業種）	11	1	3	1
運輸部門（8業種）	1	2	3	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

2021 年度実績に対するフォローアップにおいて、2021 年度の全部門（産業、エネルギー転換、業務、運輸）合計の CO_2 排出量は、2013 年度比 17.7%減少、前年度比では 5.7%増加したが、新型コロナウイルスの影響から、経済活動が回復に向かった時期であることに留意が必要であると指摘している。産業部門における 2021 年度の CO_2 排出量（電力配分後）は、2013 年度比-15.0%、前年度比+6.8%となった。産業部門の CO_2 排出量の増減の要因分析より、前年度比においては、「経済活動量の変化」が増加（+9.5%）した一方、「CO_2 排出係数の変化」及び「経済活動量あたりエネルギー使用量の変化」は減少した。「経済活動量あたりのエネルギー使用量の変化」は、2020 年度は前年度比増加していたが、2021 年度は減少（-2.6%）に転じた（文献 11)）。

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

第(1)④項で述べたように、目標設定にはエネルギー原単位やエネルギー消費量、CO_2 排出量といった様々な指標が採用されており、業種により異なる。排出削減努力のより良い評価のためには、目標に対する進捗や達成度だけでなく、複数の視点からの分析・考察が必要である。そこで、生産活動、エネルギー原単位（生産活動あたりのエ

ネルギー使用量)、CO_2排出原単位の関係性に着目し、それらの全体的な傾向や業種間の比較等の分析・考察を、定量的な評価に適していると考えられる経団連傘下の製造業を中心とした産業部門およびエネルギー転換部門を対象として行ってきた。今回は、2021年度の実績データに基づき、同様の分析・評価を行った。分析には、「経団連CN行動計画 2050年CNに向けたビジョンと2022年度フォローアップ結果<2021年度実績>[速報版]」の公表データを用いた。なお、比較のために参照した、昨年度実施の2020年までの実績についての分析には、2021年11月に公表された速報値を用いた。2022年3月に確定値が公表されたが、速報値と大きな違いはなかったため、速報値を用いたグラフから更新していない。

① 業種毎の生産活動指数とエネルギー原単位変化の関係

まず、生産活動指数の変化と、生産活動あたりのエネルギー使用量と定義したエネルギー原単位変化を業種横断的にグラフ化した。図 3.4.1-1 に2012～2019年の実績について、図 3.4.1-2 に2012～2020年の実績について（いずれも昨年度実施の分析)、図3.4.1-3 に2013～2021年の実績についての結果を示す。薄い赤の部分はエネルギー原単位が悪化した業種を表す。なお、横軸の生産活動指数は各業種から提出されたデータであり、例えば日本鉄鋼連盟は粗鋼生産量に基づいており、また日本製薬団体連合会は医薬品製造業界の生産活動を示す上で最も一般的な指標である売上高を採用するなど、業界により異なる。

2012～2019年の期間においては、殆どの業種でエネルギー原単位の改善が見られたが、2012～2020年では多数の業種でCOVID-19パンデミックの影響により生産活動指数が悪化し、またエネルギー消費量が減少した。また、エネルギー原単位が悪化した業種の多くに生産活動の後退が見られた。今回分析した2013～2021年においては、2020年までの分析と比べ、生産活動指数が改善した業種が増え、COVID-19による経済停滞からの回復が見られる。一方、エネルギー原単位が悪化した業種も一定数あり、悪化の原因は生産活動の後退による影響があると考えられる。

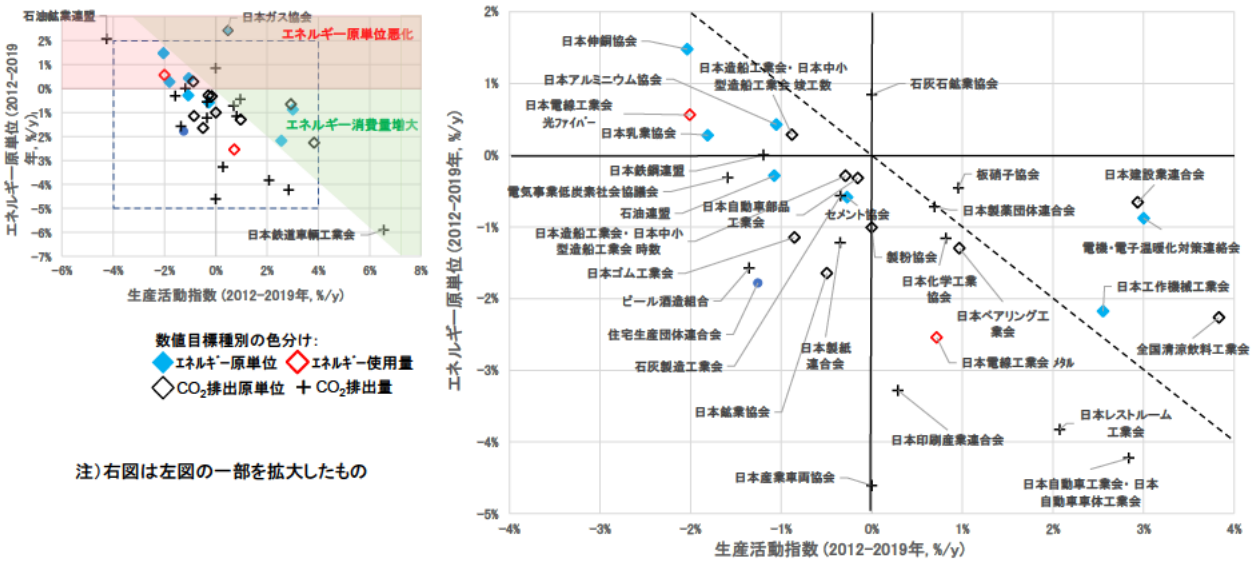


図 3.4.1-1 生産活動指数とエネルギー原単位の関係（2012～2019 年）

（出典） 文献 4)

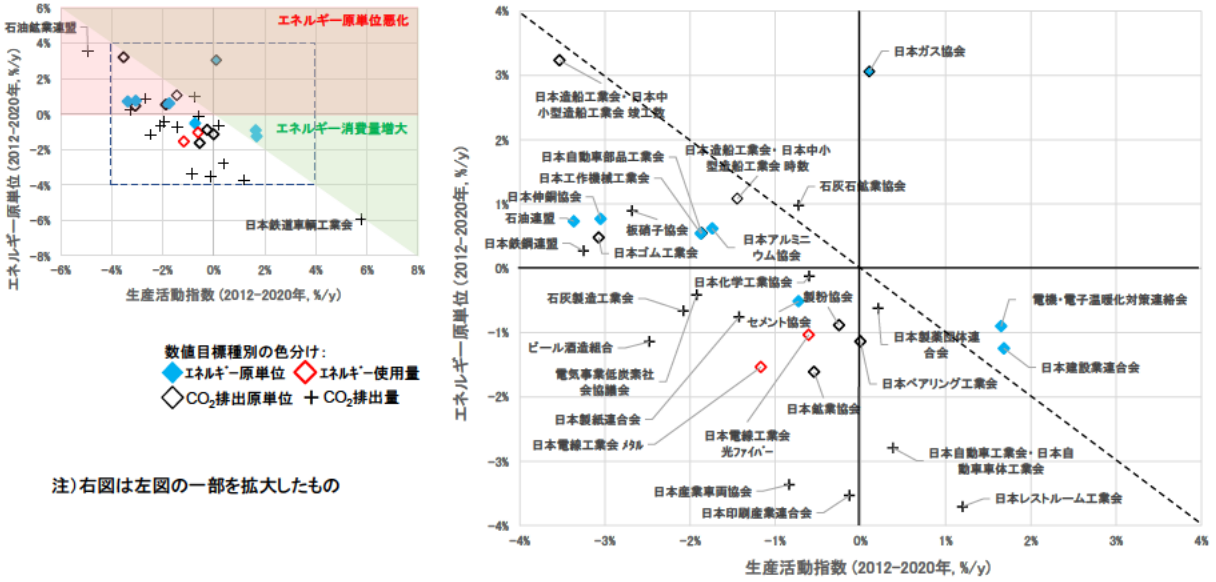


図 3.4.1-2 生産活動指数とエネルギー原単位の関係（2012～2020 年）

（出典） 文献 4)

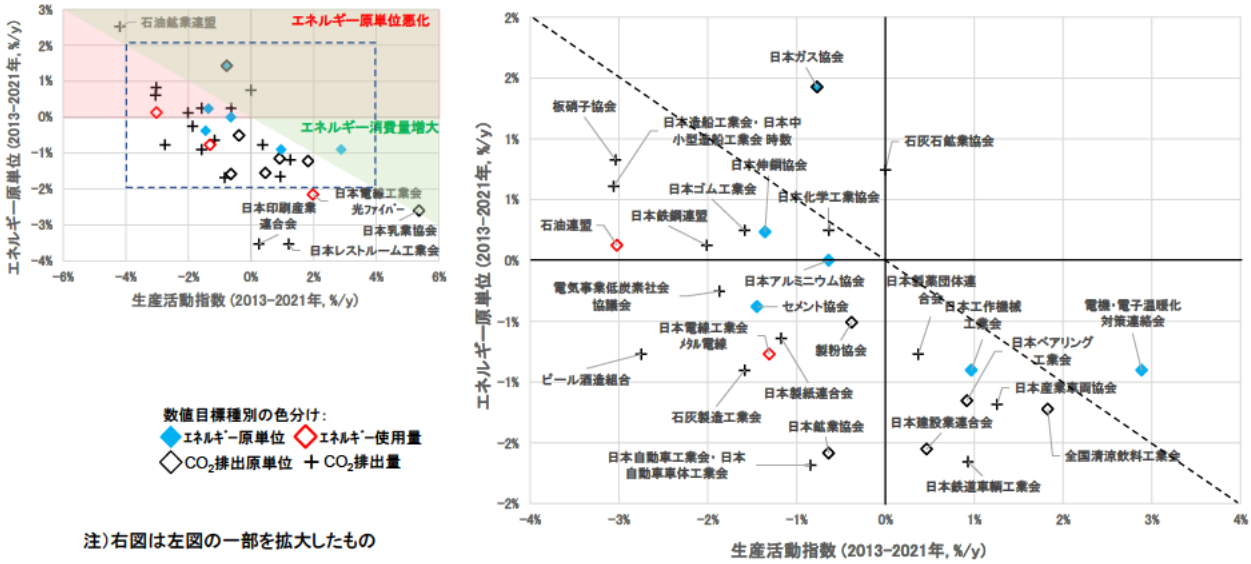


図 3.4.1-3 生産活動指数とエネルギー原単位の関係（2013～2021 年）

② 業種毎のエネルギーと CO_2 原単位変化の関係

次に、エネルギー原単位と CO_2 排出原単位（CO_2 排出量/エネルギー使用量）変化の関係を示す。図 3.4.1-4 が 2012～2019 年、図 3.4.1-5 が 2012～2020 年（いずれも昨年度実施の分析）、図 3.4.1-6 が 2013～2021 年についてである。なお、電力排出係数は、業種により固定値の採用と可変値の採用が混在しているが、統一せず、各業種からの報告の数字をそのまま使用している。

CO_2 排出量/エネルギー使用量で見た CO_2 排出原単位は、経済界の長期にわたる取り組みにより、全体的に大きく改善してきていたが、2012～2019 年においてもほぼ全ての業種で改善した。CO_2 排出原単位は、2012～2020 年においてもその傾向が続いた。COVID-19 の影響により殆どの業種でエネルギー使用量が減少したが、CO_2 排出原単位は継続して改善された。ただし、日本では 2011 年の東日本大震災による原発停止で火力発電が増え、その影響で 2012 年には CO_2 原単位が大幅に悪化していたため、そこを起点とした CO_2 排出量/エネルギー使用量の向上には、そのような外的要因による影響も含まれていることを考慮すべきである。CO_2 排出原単位は、2013～2021 年においてもほぼ全ての業種で改善した。

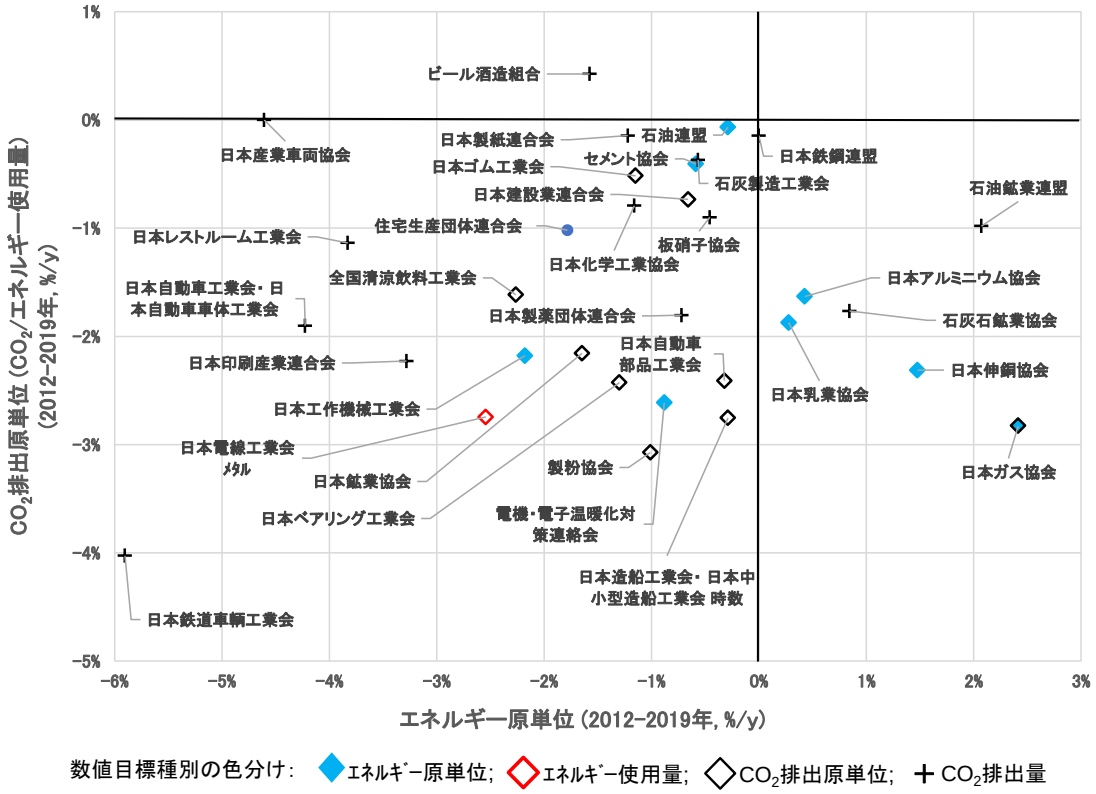


図 3.4.1-4 エネルギー原単位と CO_2 排出原単位の関係（2012～2019 年）

（出典）文献 4)

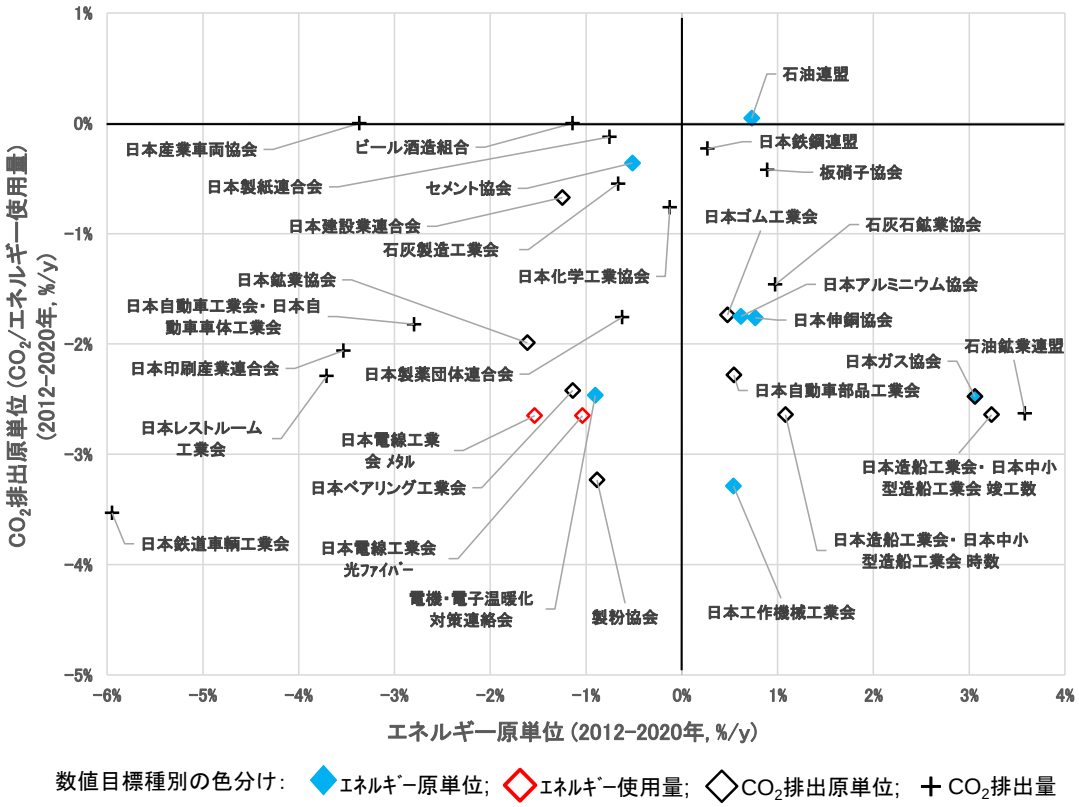


図 3.4.1-5 エネルギー原単位と CO_2 排出原単位の関係（2012～2020 年）

（出典）文献 4)

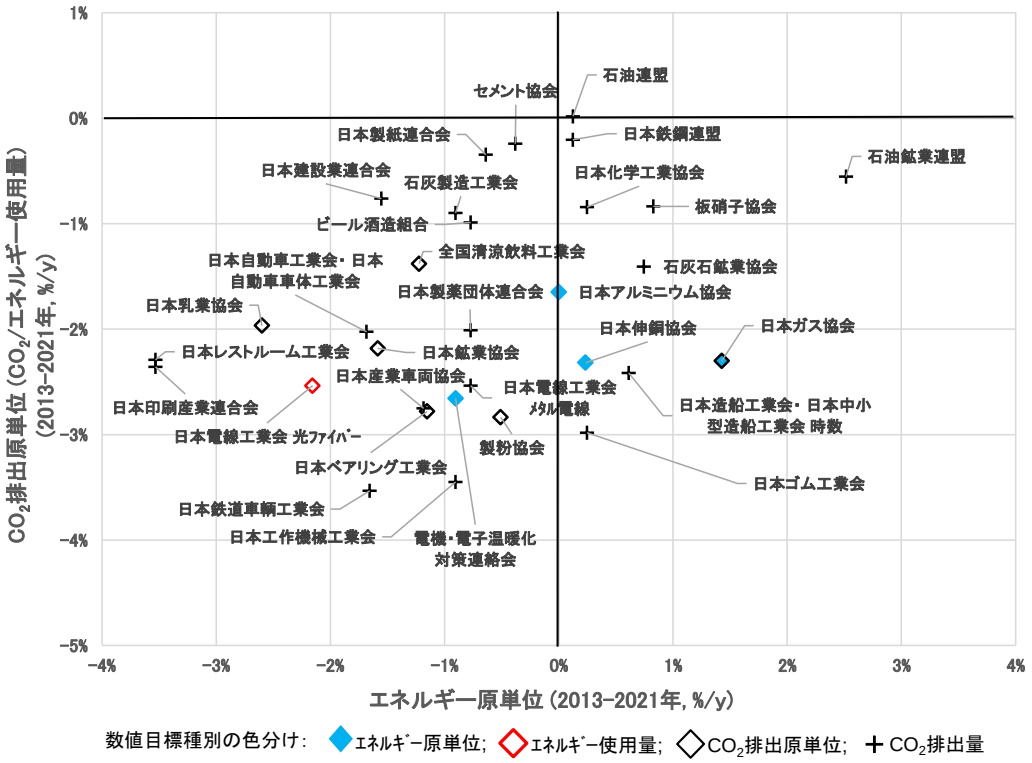


図 3.4.1-6 エネルギー原単位と CO_2 排出原単位の関係（2013～2021 年）

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 3.4.1-7 では、横軸が 2012～2019 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 2012 年比の 2019 年のエネルギー原単位指数を示し、1 以下であれば原単位が向上したことを表す。なお、回帰分析から得られた説明変数が有意でないもの（R^2 乗値が 0.3 より小さいものはほぼ全て）も参考として含めている。図 3.4.1-8 および図 3.4.1-9 には、それぞれ、2012～2020 年、2013～2021 年における同様の分析の結果を示す。

2012～2019 年においては、多くの業種でエネルギー原単位の改善が見られたが、領域 B にある業種については、それは経済活動の伸びによるところが大きいと考えられる。2012～2020 年においては、多くの業種において、生産活動の変化（改善あるいは悪化）とエネルギー原単位の変化（改善あるいは悪化）の連動性が高かった。経済活動の変化にかかわらずエネルギー原単位の改善を達成している領域 A にある業種は少数だった。今回分析の 2013～2021 年については、2012～2020 年と同様に、生産活動の変化とエネルギー原単位の変化の連動性が高く、特にエネルギー原単位が悪化した殆どの業種は、その理由は経済活動の悪化による可能性が高い。また、経済活動の変化にかかわらず、エネルギー原単位の改善を達成している領域 A にある業種は、2020 年までの分析に比べやや増加した。

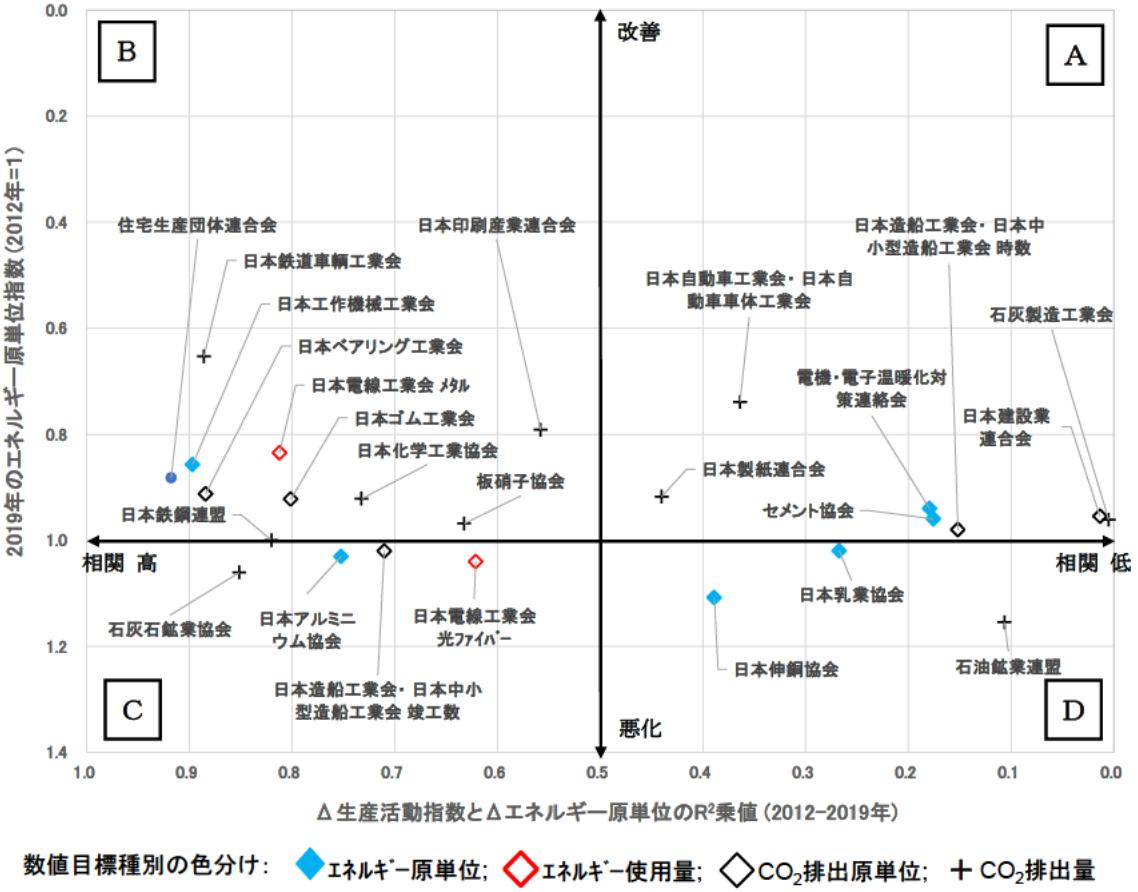


図 3.4.1-7 産業部門参加業種におけるエネルギー原単位変化と原単位変化に対する生産活動変化の説明性（R^2）の関係（2012-2019 年）

（出典）文献 4)

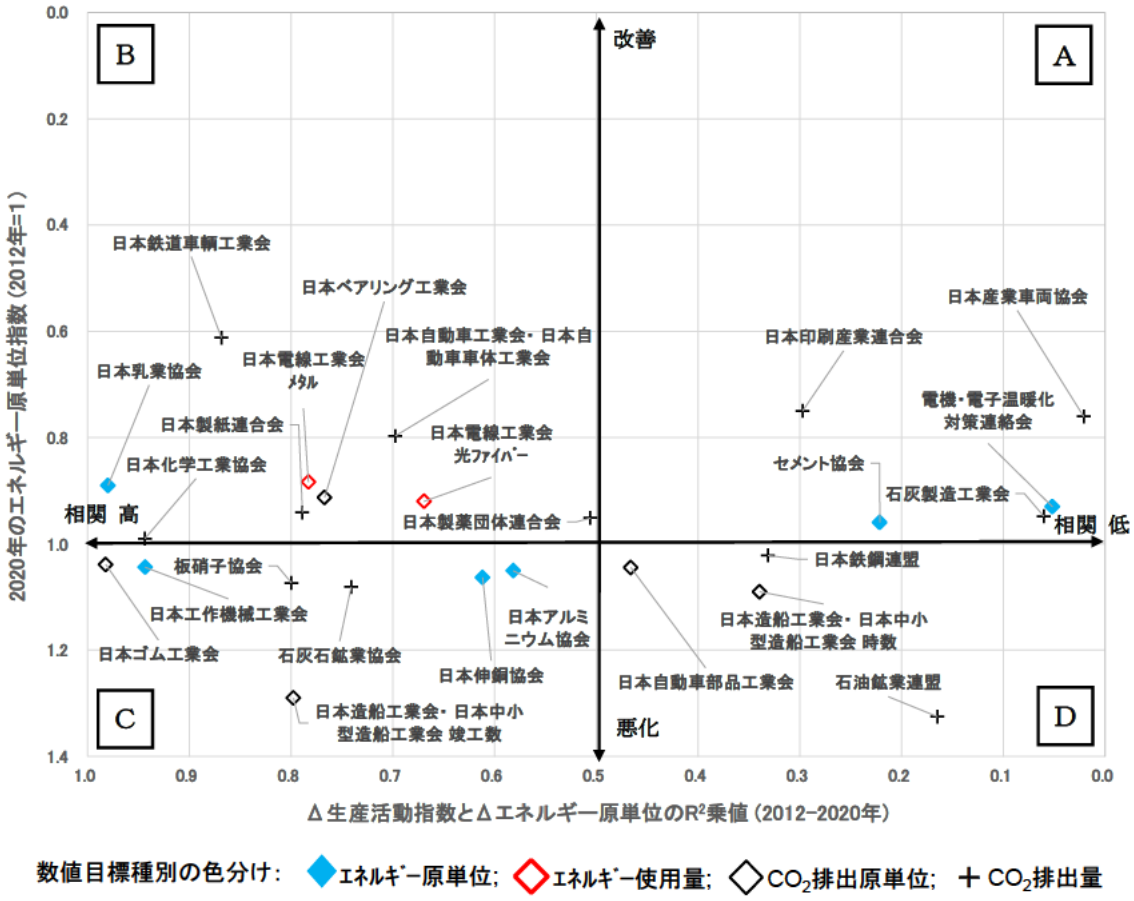


図 3.4.1-8 産業部門参加業種におけるエネルギー原単位変化と原単位変化に対する生産活動変化の説明性（R^2）の関係（2012-2020 年）

（出典）文献 4)

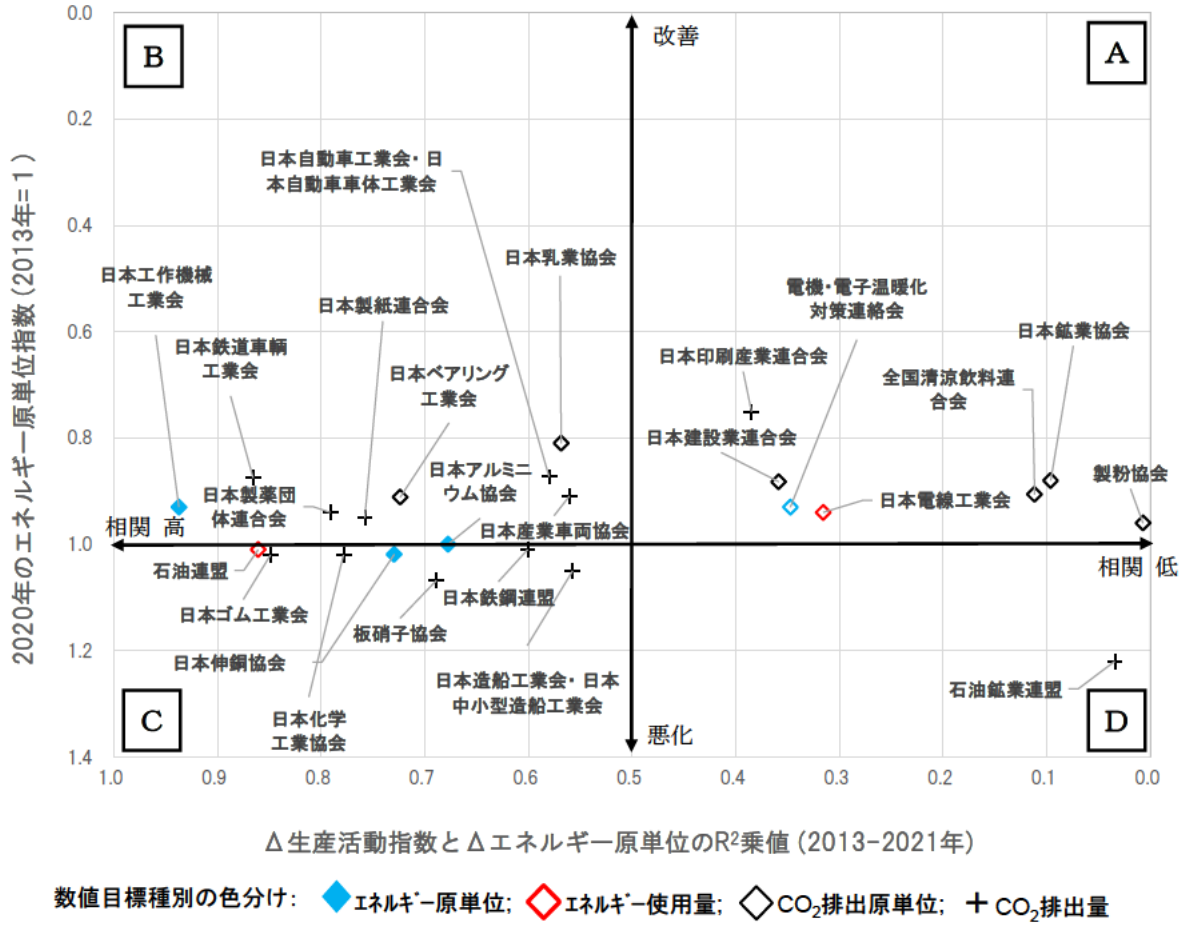


図 3.4.1-9 産業部門参加業種におけるエネルギー原単位変化と原単位変化に対する生産活動変化の説明性（R^2）の関係（2013-2021 年）

(3) まとめ

本分析においては、低炭素社会実行計画・カーボンニュートラル実行計画の産業・エネルギー転換部門参加業種における排出削減努力の評価のために、業種毎の生産活動指数とエネルギー原単位変化の関係、業種毎のエネルギーと CO_2 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、2021 年実績に基づき行った。2013～2021 年において、2020 年までの分析と比べ、生産活動指数が改善した業種が増え、COVID-19 による経済停滞からの回復が見られる。一方、エネルギー原単位が悪化した業種も一定数あった。CO_2 排出原単位については、殆どの業種でエネルギー使用量が減少したにもかかわらず、継続して改善された。さらに、エネルギー原単位変化の生産活動指数変化による説明性の分析から、エネルギー原単位の悪化の原因には生産活動の後退による影響があったと考えられる。

経団連カーボンニュートラル行動計画において、国内事業活動からの排出抑制は第一の重要な柱と位置付けられ、2030 年に向けたフェーズⅡの取り組みが続けられている。産業界の排出削減努力をより良く評価するためには、本節で報告した、複数の指標を用いての業種横断的な分析が必要である。異なる視点からの分析手法も検討しつつ、引き続き分析・評価を行っていく。

参考文献（第 3.4.1 節に関するもの）

1) 経済産業省自主行動計画の総括評価に係る検討会　自主行動計画の総括的な評価に係る検討会とりまとめ（2014）
2) 徳重功子、秋元圭吾、小田潤一郎、本間隆嗣: 京都議定書第 1 約束期間における日本の温室効果ガス排出削減の取り組みに関する分析・評価、エネルギー・資源、36-2 (2015)
3) RITE: 令和 2 年度地球温暖化対策における国際機関等連携事業 地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業 成果報告書（2021）
4) RITE: 令和 3 年度地球温暖化対策における国際機関等連携事業 地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業 成果報告書（2022）
5) 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）
6) 日本経済団体連合会: 経団連低炭素社会実行計画 2020 年度フォローアップ結果 総括編（2019 年度実績）（2021）
7) 産業構造審議会 産業技術環境分科会 地球環境小委員会・中央環境審議会 地球環境部会 低炭素社会実行計画フォローアップ専門委員会　2020 年度低炭素社会実行計画 評価・検証結果及び今後の課題等（概要資料）（2020）
8) 日本経済団体連合会: 経団連カーボンニュートラル行動計画 2050 年カーボンニュートラルに向けたビジョンと 2021 年度フォローアップ結果 総括編（2020 年度実績）（2022）
9) 2021 年度 カーボンニュートラル行動計画 第三者評価員会 評価報告書（2022）
10) 日本経済団体連合会: グリーントランスフォーメーション（GX）に向けて（2022）
11) 日本経済団体連合会: 経団連カーボンニュートラル行動計画 2050 年カーボンニュートラルに向けたビジョンと 2022 年度フォローアップ結果 総括編（2021 年度実績）[速報版]（2022）

3.4.2　中小企業の省エネ等への取り組み事例と CN への取り組みの課題

大企業における温室効果ガス排出削減の取り組みが進むなか、日本の GHG 排出量のうち約 1 割～2 割弱は中小企業が占めると推計されており、本節では中小企業における取り組みに視線を向ける。

(1) 中小企業の省エネ等への取り組み事例

事業者や事業場等において実施した他者の模範となる優れた省エネ取り組みや、省エネルギー性に優れた製品並びにビジネスモデルを表彰する制度として、省エネルギーセンター主催の「省エネ大賞」はよく知られるところである。その知名度からも「省エネ大賞」には多数の応募があり、ここでは中小企業庁長官賞に輝いた事例を 2022 年度と 2021 年度についてとりあげる。

① 2022 年度　省エネ事例部門　中小企業庁長官賞
受賞者：サンエー電機株式会社
テーマ：省エネ活動の深掘と手作り IoT による省エネの最適化

同社は、プリント基板や電子回路ユニット等電気機器を製造する従業員 160 名の電機メーカーである。同社では、省エネ活動の深掘として、2019 年より各部署の担当者 7 名による省エネ推進チームを立ち上げ、省エネ診断を受けて改めて自社の問題点 9 点を把握し、投資負担の大きい 2 点を除いて着実に一つ一つの改善を実施した。加えて、チャレンジテーマとして、電子機器製造会社ならではの知見を活用し、シングルボードコンピュータ「ラズパイ」[50]に、温度センサ・無線 LAN を組み込んだ温度監視システムを自社制作しての省エネ活動にも取り組んだ。ラズパイは、小型・安価・低消費電力であり多点での監視に適している。また一般的な言語を用いて柔軟にプログラムできることから、自社工場専用のエリアマップと最適な警報通知を組み合わせたシステムを構築し、室温の詳細な見える化に成功。サーキュレータの稼働による室内温度の均一化が効果的であることも検証し、空調設備の設定温度を 1.0～2.0℃緩和可能であることを見いだした。更にラズパイにクランプセンサまで組み込むことで、電力使用量の見える化にも成功。作業現場では、別作業優先により通電のまま放置されているような無駄な電力使用があることを発見し、排除することができた。

省エネ診断にて提案された項目による成果は、年間で原油換算 9.5kl、約 95 万円の削減、チャレンジテーマによる成果は、年間で原油換算 11.9kl、削減電力量 46.5 千 kWh、約 87 万円の削減。これらの合計は、活動前のエネルギー使用量の 8%減にあたるという。省エネに対して着実なアプローチを経て取り組んでおり、中小の製造業における模範的で他社の参考になる活動として高い評価を得ている。

図 3.4.2-1 手作り IoT（ラズパイ）の外観と設置したエリアマップ [3)]

[50] Raspberry Pi（ラズベリー パイ）は、英国の Raspberry Pi 財団により開発されたシングルボードコンピュータ。当初は教育利用を想定されていたが、安価で様々な用途に使える柔軟性から、研究や業務目的に利用される場面も多い。略して「ラズパイ」と呼ばれることが一般的。

表 3.4.2-1 省エネ活動の実施項目 [3)]

	提 案 名	実施有無	取組み状況
省エネ診断	1.空調設定温度の緩和	○	・各作業室の状況に合わせ、きめ細かく設定。自社発掘テーマB、Cで取り込む
	2.空調機の中間期停止	○	・実施。サーキュレータの活用で室温緩和
	3.空調室外機のフィン清掃	○	・高圧洗浄機を購入し、実施。定期的に行う。
	4.エアコンプレッサの吐出圧力低減	○	・4台中、2台を実施。
	5.デマンド監視装置の有効活用	○	・各提案の実施後、最大電力7kW削減。
	6.動力用変圧器の統合	×	・配線距離が長くなり、投資大。ペンディング。
	7.蛍光灯から一体型LED灯への更新	○	・蛍光灯98台をLED化に実施。
	8.空調機の更新	△	・投資回収が長く、補助金を含め検討。
	9.人感センサの設置	○	・見積もりを取り、実施の方向で検討。
チャレンジ	A.コンプレッサの夜間停止	○	・4台中3台は停止。大きな省エネの実現。
	B.サーキュレータの導入と手作りIoTで空調温度最適化	○	・空調温度を1.0～2.0℃緩和できた。
	C.手作りIoTによる電力使用量の監視	○	・電力量使用状況の解析で無駄を排除。

② 2022 年度　製品・ビジネスモデル部門　中小企業庁長官賞

受賞者：株式会社ＳＡＮＫＯ

テーマ：健康と快適性を追求し素材とつくり手にこだわった超高気密外断熱住宅「HARE シリーズ」

同社は、エネルギーや環境負荷の少ない、お客様が満足する快適な家づくりを目指し、高気密外断熱住宅の開発及びその普及に注力してきた。しかし、一般的な全館冷暖房システム採用の高気密高断熱住宅は、コスト及びスペース上の問題などがあり普及に障壁がある。そこで、同社は ZEH 断熱基準を上回る HEAT20 G2 グレード以上（外皮平均熱貫流率 UA 値平均 0.34W/m²・K）、気密レベルは全国トップレベル（相当隙間面積 C 値 0.1cm²/m² 以下）の高性能を維持しつつ、間取りを H,A,R,E の 4 種類から選択するよう規格化したことにより、自然素材も多用した高品質住宅ながらも価格を抑えることに成功した。長年高性能住宅に取り組んできた専属大工がつくり手であることもそれを可能にしている。また 1 年を通して家庭用エアコン（2.8kw）1 台の運転で家全体を快適な温度にすべく、夏用のエアコンは小屋裏に、冬用のエアコンは床下に設置している。窓は全方位同じものを採用するのではなく方角によって断熱性能を変更している。これら設備や建材における様々な工夫と合わせ、一般的な全館空調システムと同等の性能を低コストに実現した点が評価されている。

図 3.4.2-2 4タイプに規格化されたHARE シリーズ [6)]

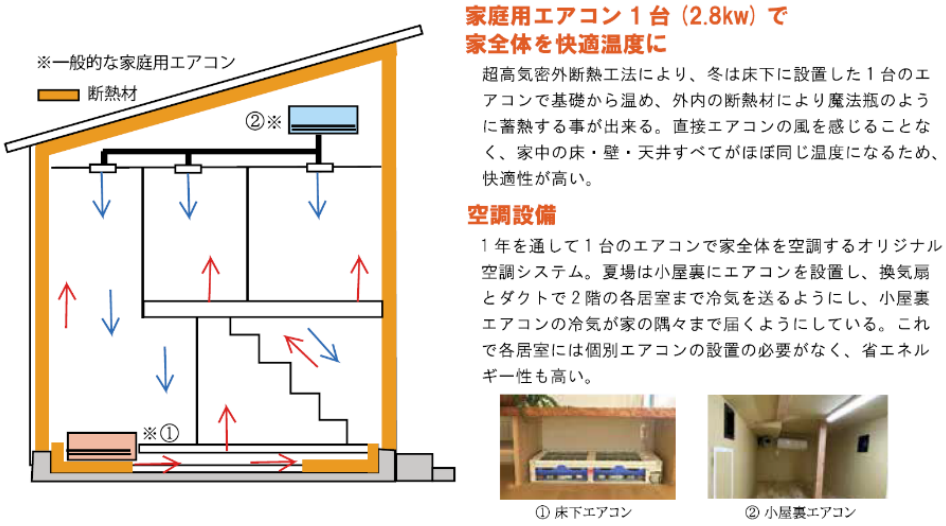


図 3.4.2-3 家庭用エアコンの設置イメージ [6)]

③ 2021年度　省エネ事例部門　中小企業庁長官賞
受賞者：株式会社島野工務店
テーマ：高断熱住宅における省エネルギー性と健康と快適性の実現

同社は、地元栃木県が冬期ヒートショックにおける死亡率が全国ワースト1であることから、断熱化にこだわり、HEAT20 G3グレード、UA値0.19W/m^2・Kを達成。建物の躯体性能を上げ断熱性を高め、省エネ性の高い設備機器を併用して少ない電気代で住宅全体を一定の温度環境にし、健康と快適性を兼ね備えた家づくりを目指している。具体的には、一般の3倍以上の厚みと言われる外断熱105mm＋充填断熱100mmの両断熱仕様、熱伝導率0.022W/m･k以下の断熱材、トリプルガラスの断熱材充填枠樹脂サッシ、施主の生活スタイルに合った換気システム等により住宅を高気密高断熱化。合わせてエアコンやエコキュートの高効率モデルを採用して省エネ化。また外付けブラインドシャッターを用いて夏季の日射遮蔽などとのバランスを考慮して昼光を利用しながら、LED照明は人感センサやタイマー等により人工照明のエネルギーも削減している。

加えて、HEMS を設置してのエネルギー使用量の見える化や、「光熱費保証」として引き渡し後 1 年目の適正に使用されたと認められる電気料金全額を施主に代わって支払う制度を実施して、それらを通じたコミュニケーションによって施主への省エネ啓発活動にも取り組んでおり、地方の工務店として年間の販売棟数は 18 棟程度ではあるものの ZEH 化率は 100%であり、今後の ZEH 普及拡大に向けて中小工務店等の参考になる活動として評価されている。

表 3.4.2-2 同社の建築実績 [7)]

ZEH住宅普及率

2018年度	年間15棟	ZEH普及率100%
2019年度	年間18棟	ZEH普及率100%
2020年度	年間18棟	ZEH普及率100%

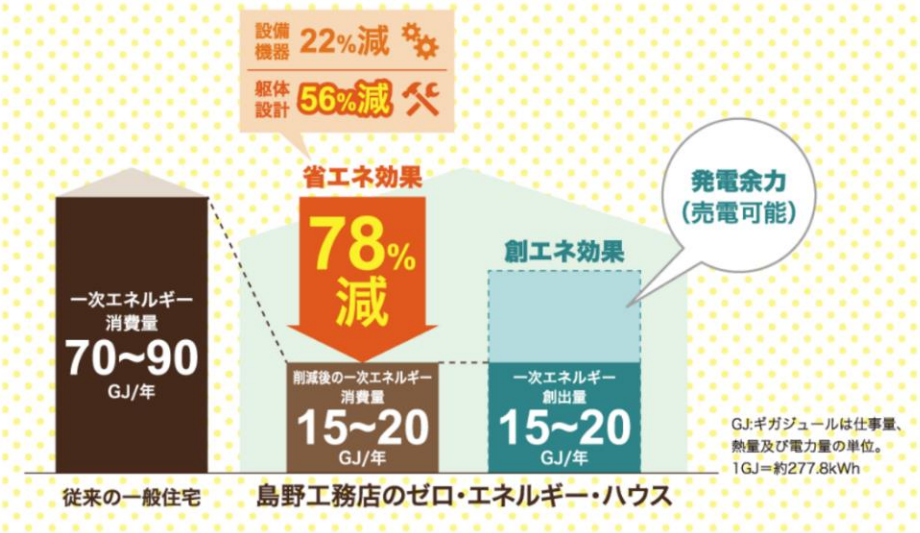


図 3.4.2-4 同社ホームページにおける省エネ効果の記載 [8)]

④ 2021 年度　製品・ビジネスモデル部門　中小企業庁長官賞
受賞者：株式会社フミン
テーマ：暑い熱をガラスで止める省エネスプレーガラスコーティング特許技術

同社が開発した特許技術は、紫外線や赤外線を吸収・カットする伝導性金属酸化物を、ガラス面にむらなく透明に塗装する技術である。スプレーガンによる塗布の直後に、均一な膜化・乾燥を行うために、塗液吐出ノズルの周辺から被塗面に向けて塗液を囲むようにエアーカーテンを発生させるブロアを備えた塗装機を用いる等により、本来のガラスが持つ透明性が維持される工法になっている。赤外線を約 70%、紫外線を約 90%カットする一方で、可視光線透過性に優れ室外の景観や室内の明るさには、ほとんど影響を与えないコーティングが実現できる。

フィルムが貼れない金網入りガラスや、曲面ガラス、巨大ガラス等にも施工可能であることから、住宅の他にも大型施設などさまざまな施設に活用可能であり、３次元曲面ガラスカーテンウォールを使った特徴的なデザインの国立新美術館でも採用された。4,700m^{2}近いガラス面に施工されたその例では、エネルギー使用の 18%にあたる年間約 220 万 kWh もの省電力が達成されている。

図 3.4.2-5 特許技術による施工風景 [9)]

表 3.4.2-3 特許技術による電力使用量の削減例 [7)]

K美術館 2010年度、2011年度（ガラス施工後） 電力使用の比較

2010年 電力使用量 kWh/単位

1月	2月	3月	4月	5月	6月	
771,338	915,950	864,261	1,022,222	1,006,128	1,154,226	
7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
1,292,385	1,386,125	1,305,365	1,038,537	927,000	859,514	12,543,051

2011年 電力使用量 kWh/単位 フミンコーティング省エネガラスコーティング4,653㎡施工（工事期間2010年12月21日～2011年1月4日）

1月	2月	3月	4月	5月	6月	
674,781	815,983	681,753	759,176	851,134	933,006	
7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
1,006,129	1,037,573	1,087,483	895,779	858,625	743,306	10,344,728

2010年度の電力使用量-2011年の電力使用量＝削減電気量

1月	2月	3月	4月	5月	6月	
96,557	99,967	182,508	263,046	154,994	221,220	
-13%	-11%	-21%	-26%	-15%	-19%	
7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
286,256	348,552	217,882	142,758	68,375	116,208	2,198,323
-22%	-25%	-17%	-14%	-7%	-14%	-18%

暖房がほしい寒い季節 1月、2月、11月、12月で 381,107kWh削減 <-11%削減>

日差しが暑くなる季節 3月、4月、5月、6月、7月、8月、9月、10月 で 1,817,216kWh削減 <-20%削減>

＜2011年 2,198,323kWh削減 -18%の電力使用量を削減＞

＊K美術館の報告をもとに算出 ※この削減電力は太陽光発電パネル8600枚（サッカー場10面）に匹敵する

＊K美術館の公表許可済み ※CO2排出削減量：削減電力量2,198,323kwh x マージナル係数0.69=

削減されたCO2排出量 1,516,843kg 約1,500トン

⑤ 受賞事例から

最初に挙げた受賞事例は、省エネ診断を堅実に活用し、更に自社製のスマートメータを利用した詳細な見える化を実施して、省エネ設備の導入や既存設備の適切な管理とメンテナンスを実施して大きな省エネを達成したものであり、流石の受賞内容であった。事業者がこういった自社の短中期的な省エネ対策の洗い出しを実施し、既存設備の最適稼働やエネルギーロスの低減を可能な限り図ることは、脱炭素経営に取り組む場面においても必要なステップであることから、カーボンニュートラル（CN）への取り組みの確かな一歩になっているとも言える。しかしながら、この受賞の側面から

は、多くの中小企業にとって、そのステップが当たり前に実施されているわけではないことが垣間見える。同事例においても、省エネ診断で挙がっていながら、投資回収期間の長さから実施されなかった項目もあり、中小企業の省エネ設備投資に対する補助金や省エネ診断の拡充などの形で更なる実効性ある施策が期待される。

続く 3 つの受賞事例は、断熱性に優れた家屋や、既存の大型施設にも施工可能な省エネコーティングなど、第 6 次エネルギー基本計画において ZEH・ZEB 水準の省エネルギー性能確保が目指されるなかで注目に値する優秀な事例であった。

中小企業が生み出す省エネルギー型の製品や、省エネルギーに貢献する技術が、わが国の CN に向けてその一端を支え、確実に貢献している状況が見てとれる。

(2) 中小企業におけるカーボンニュートラル（CN）への取り組みの課題

中小企業による CN への貢献は確実にあるものの、それらはわが国の中小企業における CN への取り組みが十分であるということに直結するわけではない。

中小企業を対象に実施した脱炭素に関するアンケート調査によれば、「既に取り組んでいる」の 16.7%に対して、「取り組む予定はない」「取り組みたいが、何をすべきか分からない」を合わせると 62.6%にも上り、中小企業の取り組みが不十分であることが読み取れる。

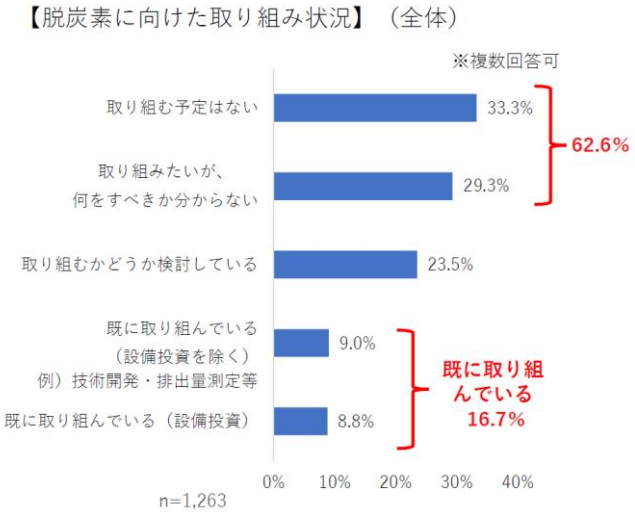


図 3.4.2-6 経営課題に関するアンケート結果（中小企業全体）

（出典）東京商工商工会議所 [10)]

また、同じアンケートを事業規模別に集計すると、小規模企業のみでは、「取り組む予定はない」「取り組みたいが、何をすべきか分からない」を合わせて 7 割を超えており、事業規模が小さい企業ほど取り組みがなされていない傾向が分かる。

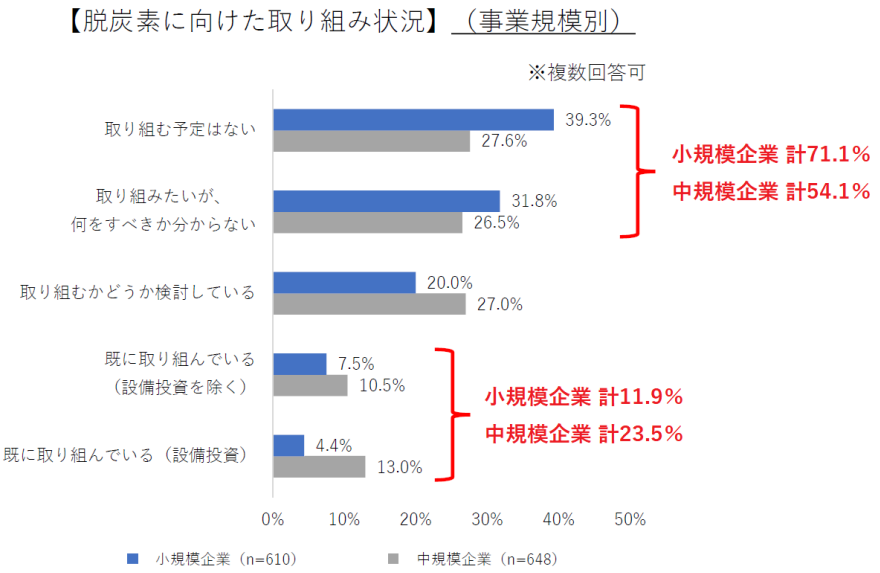


図 3.4.2-7 経営課題に関するアンケート結果（中小事業規模別）

（出典）東京商工商工会議所 [10)]

脱炭素に向けた取り組みを今後実施する予定はない中小企業者に、取り組まない理由を聞いたアンケート結果を次に示す。「自社の排出量は少ないと思うため」を脱炭素化に取り組まない理由とした企業が大勢を占めていることが確認できる。

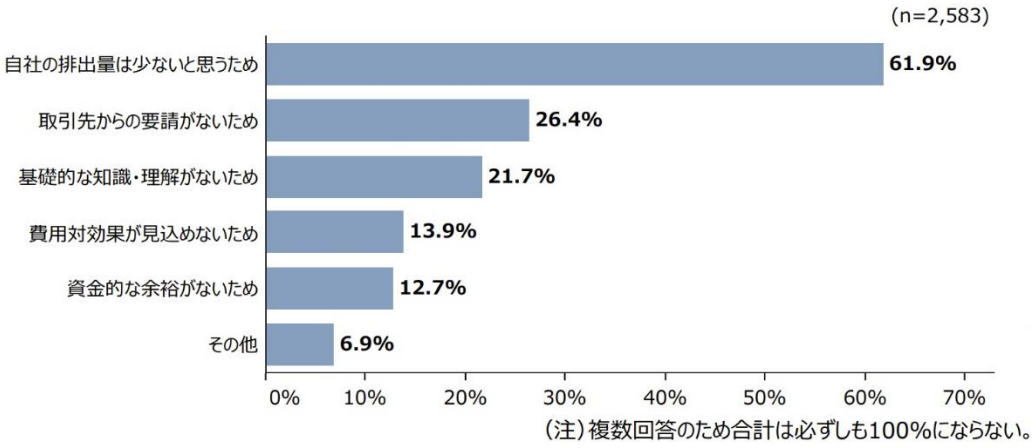


図 3.4.2-8 脱炭素化に取り組まない理由

（出典）中小企業白書 [11)]

世界的に脱炭素化に向けた動きが加速し、脱炭素化が共通価値へと高まってきた状況にあっても、自社の排出量の把握にのみ着目していたのでは、企業規模が小さい企業では一般に自社の排出量が小さいため、取り組みが不十分になる傾向が発生するのはある意味当然と言える。中小の事業者の事業活動も、購入や販売を通じてサプライチェーンでつながっており、そこには大きな削減ポテンシャルが存在する可能性があることから、脱炭素社会の実現を目指す上で、サプライチェーンにおける温室効果ガ

ス排出量について把握し、サプライチェーン排出量の削減取り組みを評価することの重要性が、中小企業に視線を向けた時にあらためて認識される。

サプライチェーン排出量として、企業は自社の排出の上流と下流の間接排出である Scope3（GHG プロトコルの Scope3 基準では 15 のカテゴリ）を含めて算出するが、ここでも見える化は極めて重要である。詳細な見える化により、企業は幅広い Scope3 の中にどのような排出源が存在しどこにホットスポットがあるかを知って効果的な削減に取り組むことができる。また自社がコントロールや測定できない排出を明確にし、自社の報告が適正に評価されるなど、見える化は欠かせない。それは自社の削減努力自体を可視化することでもある。

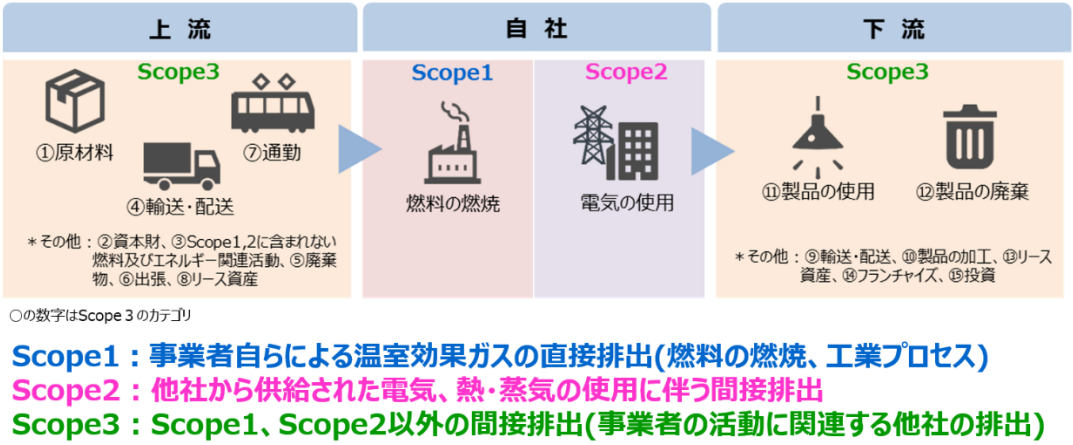


図 3.4.2-9 GHG プロトコル サプライチェーン排出量のイメージ

（出典）環境省 [15)]

CN への機運が高まってきた社会において、その取り組みに見える化が極めて重要であっても、資金的・人的・技術的リソースや、サプライチェーンに対する影響力に制限が生じやすい中小企業が、それを実施するまでの障壁は高いと考えられる。

本年度 2022 年 5 月には、改正省エネ法が成立した。1979 年の制定以来、幾度もの改正を繰り返しながら現在にいたる長い年月を思えば、カーボンニュートラルを目指す 2050 年までに残された時間は間違いなく短い。このことが企業規模に関わらず全ての事業者に認識され、行動に移す障壁は社会全体で取り払われることが肝要であり、その社会の実現は根本的な課題である。また優秀事例を含めた取り組みの様々なノウハウは誰にも共有・理解されており、アンケートで「取り組みたいが、何をすべきか分からない」と回答するような企業が存在しない社会にすることは足元の課題である。

参考文献（第 3.4.2 節に関するもの）

1) 経済産業省：クリーンエネルギー戦略　中間整理(2022)
2) 一般財団法人 省エネルギーセンター HP：https://www.eccj.or.jp/bigaward/item.html
3) 一般財団法人 省エネルギーセンター：2022 年度 省エネ大賞 全応募事例集 省エネ事例部門
4) 一般財団法人 省エネルギーセンター：2022 年度 省エネ大賞 発表資料集 3

5) サンエー電機株式会社 HP：http://www.sanei-electric.co.jp/
6) 株式会社 SANKO HP：https://www.sankohousing.co.jp/
7) 一般財団法人 省エネルギーセンター：2021 年度 省エネ大賞 発表資料集
8) 株式会社 島野工務店 HP：https://shimanokoumuten.co.jp/
9) 株式会社 フミン HP：https://fumin.jp/
10) 東京商工会議所：中小企業の経営課題に関する アンケート調査結果(2022)
11) 環境省：中小企業白書(2022)
12) 環境省：中小企業事業者のための脱炭素経営ハンドブック Ver.1.1
13) 経済産業省：中小企業のカーボンニュートラル施策について(2022)
14) 経済産業省：総合資源エネルギー調査会 省エネルギー小委員会 事務局資料(2022)
15) 環境省：サプライチェーン排出量の算定と削減に向けて(2022)
https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/files/SC_syousai_all_20220317.pptx
16) 環境省・経済産業省：サプライチェーンを通じた温室効果ガス排出量算定に関する基本ガイドライン（ver.2.4）

3.5 国内外の再生可能エネルギーの動向

3.5.1 世界における再生可能エネルギーの導入状況

パリ協定において、産業革命前からの世界全体の気温上昇を 2℃さらには 1.5℃に抑えるという長期目標が掲げられたのを受け、多数の国・地域が 2050 年や今世紀後半に温室効果ガス排出量のネットゼロを目指すことを表明している。その目標実現に向けた有効な手段としての再生可能エネルギーへの期待が高まっている。本報告では、主に 2021 年までの実績データを基に、国内外における長期的な再エネ導入の状況を記す。

(1) 世界全体の再生可能エネルギー導入の概観

図 3.5.1-1 に、2014～2021 年における世界全体の発電設備容量（ストック）の推移を示す。世界の再生可能エネルギー発電容量は、2015 年に約 2,000GW 程度まで増加し、石炭火力の発電容量を超えて以来、順調に増加し、2021 年には 3,000GW を越えるまでに成長した。図 3.5.1-2 は、2010 年および 2021 年における世界の発電電力量に占める主な燃料源の割合を示す。再エネの世界全体の発電電力量に占める割合は、2010 年には 20%だったが、2020 年には 29%となった。

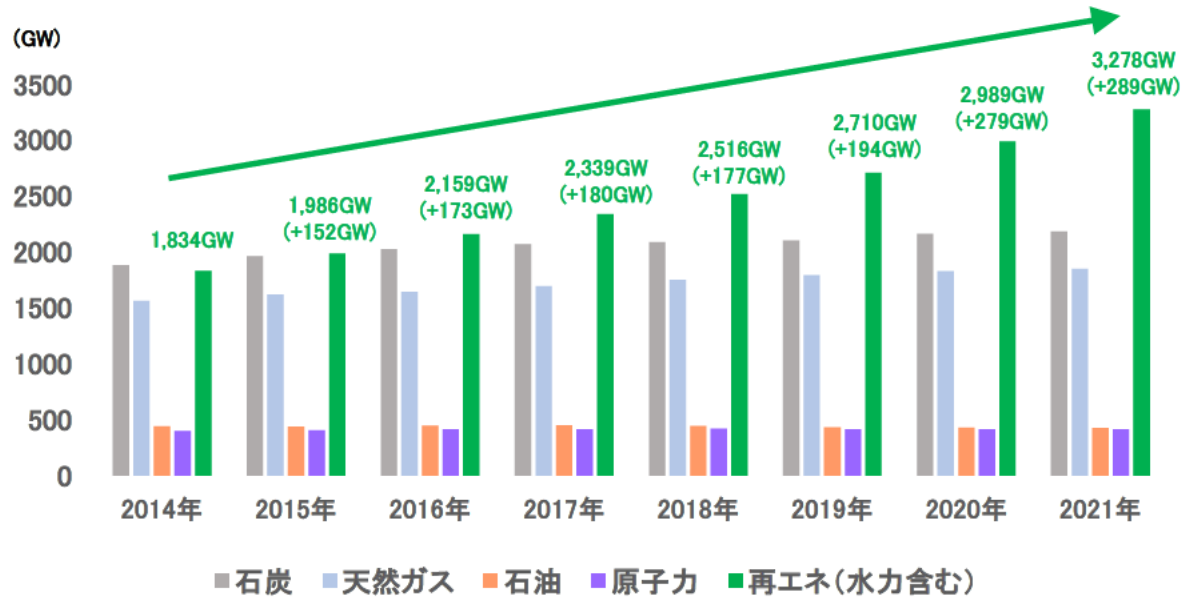


図 3.5.1-1 2014～2020 年における世界全体の発電設備容量（ストック）
（IEA, World Energy Outlook 2016～2022[1)~7)]より作成）

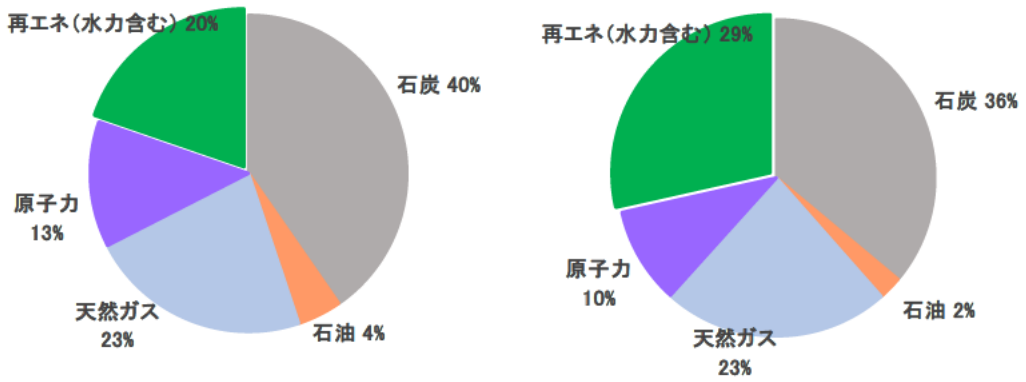


図 3.5.1-2 世界の発電電力量に占める燃料源の割合（左: 2010 年、右: 2021 年）
（IEA, World Energy Outlook 2022[7)]より作成）

また、図 3.5.1-3 と図 3.5.1-4 はそれぞれ、IRENA[8)]による 2021 年の世界の再生可能エネルギー発電容量における燃料源の割合と、2016-2021 年の世界の再生可能エネルギー発電容量の推移および 2021 年導入容量を示す。この統計によると、2021 年の世界の再生可能エネルギー容量は 3,064GW に達した。水力が依然として最大のシェアを占め、残りの部分を風力と太陽光とで同等の割合を占めた。2021 年に追加された設備容量は、年間の増加としてはそれまでで最大であった 2020 年には及ばなかったものの、再生可能エネルギー全体で 257GW（前年比+9.1%）、太陽光が 133GW（+19%）、風力が 93GW（+13%）で、再生可能エネルギーの導入容量は順調に増加している。

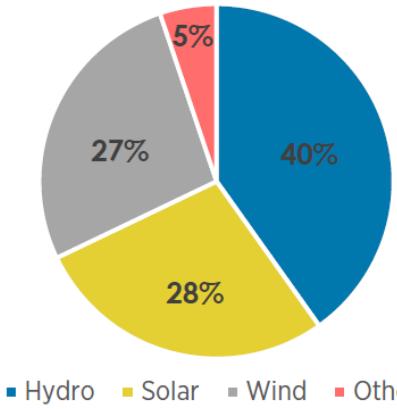


図 3.5.1-3　2021 年の世界の再生可能エネルギー発電容量における燃料源の割合

（出典）IRENA[8)]

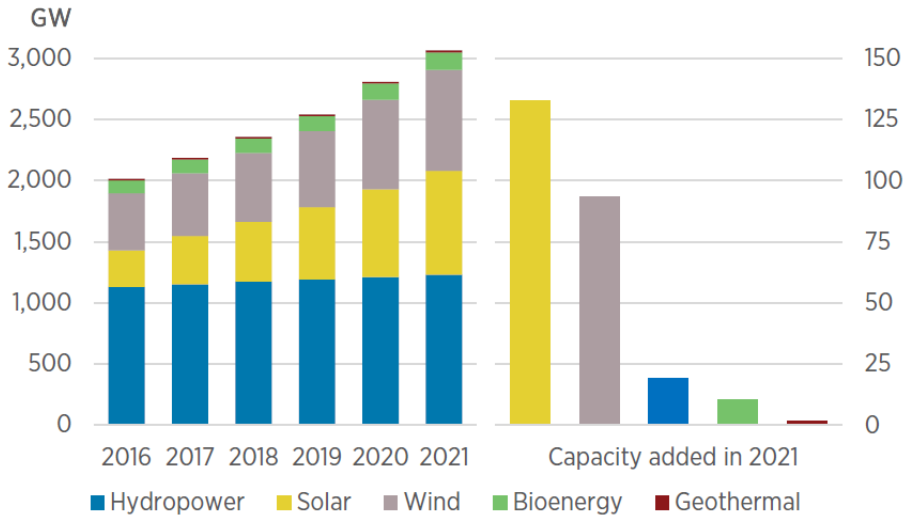


図 3.5.1-4　2016～2021 年の世界の再生可能エネルギー発電容量の推移および 2021 年導入容量

（出典）IRENA[8)]

(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、世界の動向を整理する。

① 太陽光発電

図 3.5.1-5、図 3.5.1-6 はそれぞれ、IEA による、2011～2021 年における世界の太陽光発電（PV）の年間導入容量の推移と、2021 年の世界の PV 年間導入容量について導入量の多い国別の割合を示している。また、図 3.5.1-7 は、世界の太陽光発電（PV）の 2021 年までの累積導入容量の国別割合を示す。2021 年に世界全体での太陽光発電（PV）の年間導入容量は 173.5GW に達した。中国が 2021 年まで 9 年連続で年間導入容量の首位で、中国国家エネルギー局（NEA）によると、2021 年には、世界導入容量

の半分以上を占めた 2017 年の導入量（52.8GW）を超える 55GW を導入した。同国の累積 PV 導入量は 308.5GW となり、2021 年に世界全体の 31%を占めるようになった。地域として見た場合、EU は 2 番目に年間導入容量が大きく、3 年連続で成長し、2021 年には 2011 年の記録的な 23.2GW を超える 28.7GW が導入された。ドイツ（5.8GW）、スペイン（4.9GW）、ポーランド（3.7GW）、オランダ（3.6GW）等が主要なマーケットである。続いて米国は同国で過去最高の 26.9GW を導入し、累積導入量は 123GW となった。その次はインドで、13.7GW を導入し、2017～2019 年のレベルに近づいた。その次の位置にある日本はやや減速し、2021 年導入量 6.6GW は 2012 年以来の低いレベルだった。2021 年までの世界の累積 PV 導入容量は 945.5GW となり、過去 5 年間でその約 70%が導入された。PV の新たな市場も増加しており、2021 年は新たに大幅な PV を導入した国の数が最も多い年となった。一方、導入量トップ 10 に入るために必要な導入量は、2014 年 0.78GW から 2018 年には 1.6GW、2020 年以降は 3.5GW 以上となった。これは世界の PV 市場が年々成長していることを反映している。

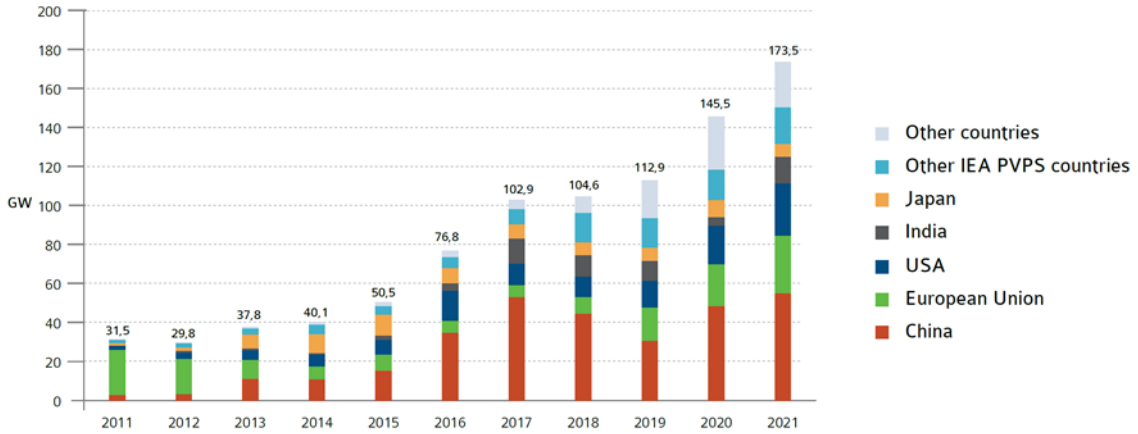


図 3.5.1-5　2011～2021 年の世界の太陽光発電（PV）の年間導入容量の推移
（出典）IEA[9)]

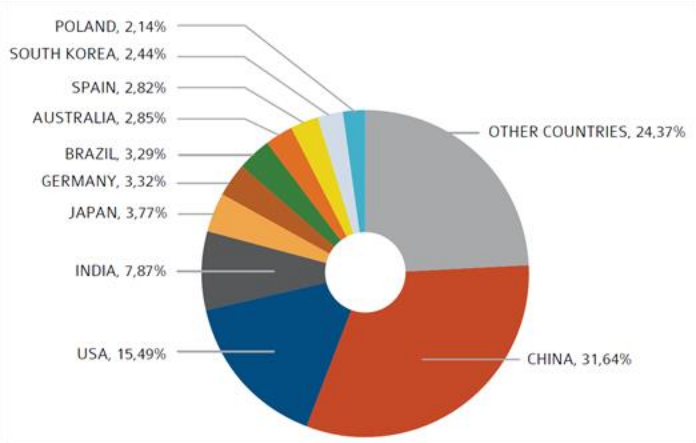


図 3.5.1-6　世界の太陽光発電（PV）の 2021 年における年間導入容量の国別割合
（出典）IEA[9)]

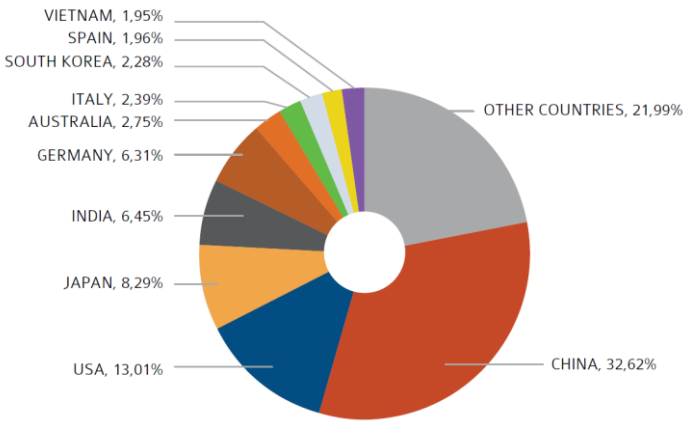


図 3.5.1-7 世界の太陽光発電（PV）の 2021 年までの累積導入容量の国別割合
（出典）IEA[9)]

② 風力発電

図 3.5.1-8 に、世界の風力発電（陸上、洋上）の 2017～2021 年における年間導入容量を示す。2021 年には、年間導入容量の史上最高となった 2020 年比でわずか 1.8%減となる 93.6GW が追加された。陸上風力発電の 2021 年の導入容量は、記録的な 2020 年よりは減少し 72.5GW となったものの、史上 2 番目に多い年となった。洋上風力発電は、前年の 3 倍以上の 21GW が導入され、年間導入容量の記録を更新した。図 3.5.1-9 に、世界の風力発電の 2021 年の年間導入容量における上位 5 か国の割合を示す。2021 年の風力発電導入容量の上位 5 か国は中国、米国、ブラジル、ベトナム、英国で、これらの 5 か国で全体の 75.1%を占めた。上位 5 か国が占める割合は、昨年（80.6%）より 5.5%減ったが、それは中国と米国を合わせたシェアが 2020 年と比べて 10%少なくなったことによる。

図 3.5.1-10 は、世界の風力発電（陸上、洋上）の 2021 年までの累積導入容量の推移を示す。2021 年に風力発電の累積導入容量は世界全体で 837GW となった（前年比+12.4%）。上位 5 か国は、中国、米国、ドイツ、インド、スペインで、これら 5 か国で 2021 年時点の世界の風力発電累積導入容量の 72%を占めた。

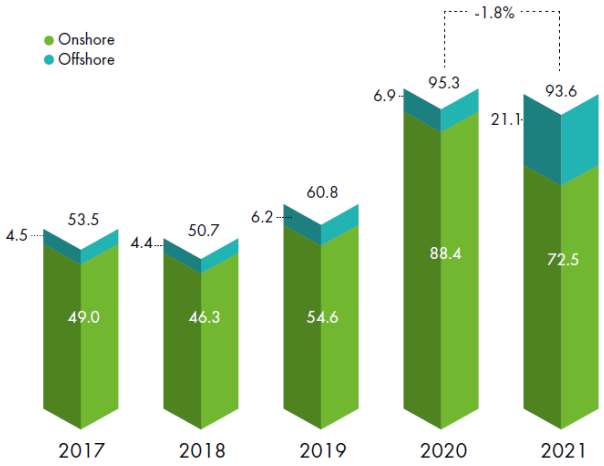


図 3.5.1-8 世界の風力発電（陸上・洋上）の 2017～2021 年の年間導入容量（GW）

（出典）GWEC[10)]

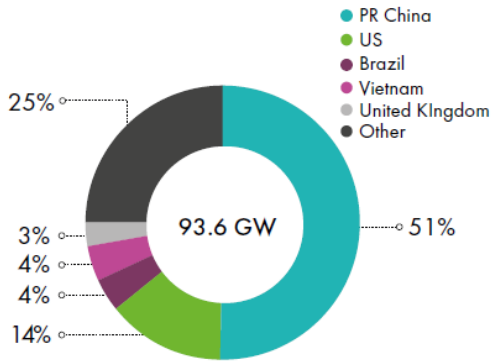


図 3.5.1-9 世界の風力発電の 2021 年の年間導入容量と上位 5 か国の割合

（出典）GWEC[10)]

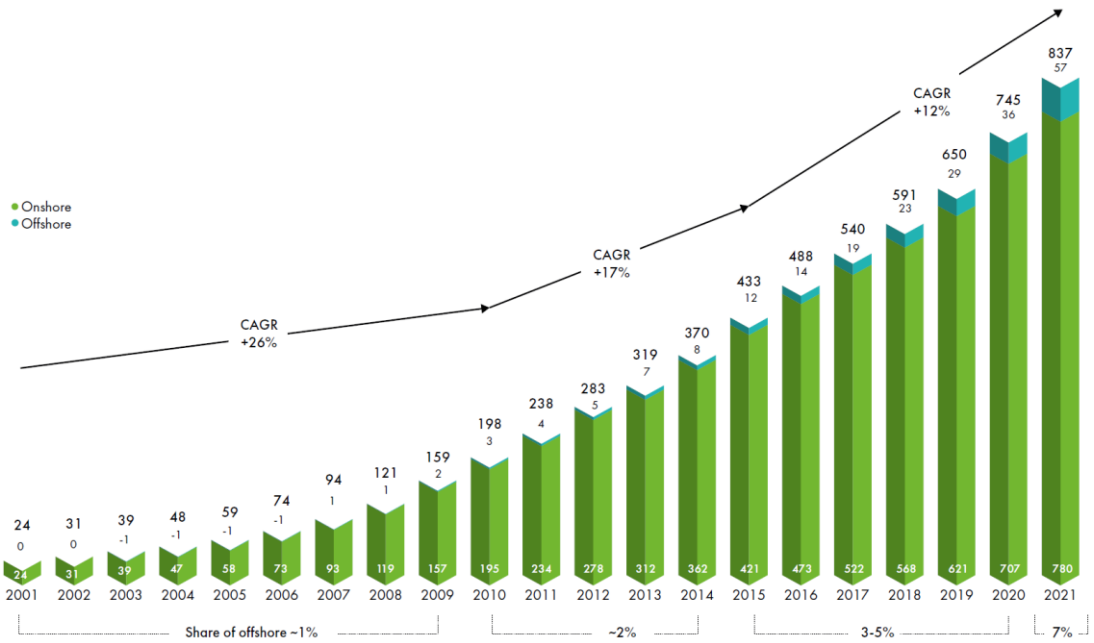


図 3.5.1-10 世界の風力発電の 2021 年までの累積導入容量の推移（GW）

（出典）GWEC[10)]

③　再生可能エネルギーのコスト動向

IRENA[11]は約 21,000 件のプロジェクトから収集した Renewable Cost Database と、約 13,500 件のプロジェクトに関する Auctions and Power Purchase Agreement (PPA) database に基づき、再エネ発電技術のコストやパフォーマンスに関する分析を行っている。図 3.5.1-11 は、世界の各種再生可能エネルギーの 2010 年と 2021 年における LCOE（Levelized Cost of Electricity）を示す。再エネの LCOE は過去約 10 年間に低下しており、事業用 PV の LCOE は 2010 年から 2021 年で 88%低下した。これは、この期間に世界の PV 累積容量が大幅に増加したことと、モジュール価格が低下したことが主な理由である。また、2010～2021 年の LCOE は陸上風力発電では 68%低下、洋上風力発電では 60%の低下であった。2020 年（昨年の報告（文献 12)）にあるグラフを参照）と 2021 年とでコストを比較すると、PV と風力発電において LCOE が低下した。PV は 2020 年は 0.057 USD(2020USD)/kWh だったが 2021 年は 0.048 USD(2021USD)/kWh、洋上風力発電は 2020 年には 0.084 USD(2020USD)/kWh だったが 2021 年は 0.075 USD(2020USD)/kWh、陸上風力発電は 2020 年には 0.039 USD(2020USD)/kWh だったが 2021 年は 0.033 USD(2021USD)/kWh であった。

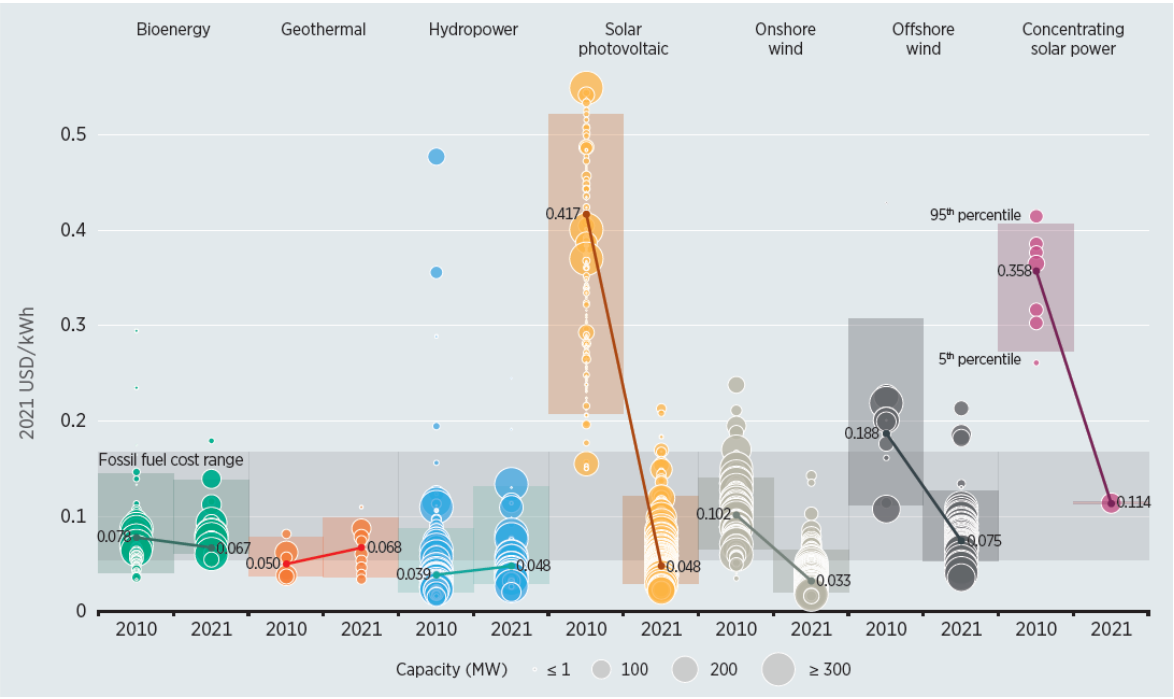


図　3.5.1-11　世界の各種再生可能エネルギーの LCOE コスト

（出典）IRENA[11]

④　再生可能エネルギーの課題

太陽光、風力発電のコスト低減が進展しているものの、世界的にも課題が見え始めている。近い時点では、材料費の上昇に伴って、コスト低減が鈍化もしくは緩やかな上昇を見せ始めている点が挙げられる。また、太陽光パネル製造は、中国への依存度が極めて高くなってきている。更に、ロシアによるウクライナ侵略を受けたエネルギ

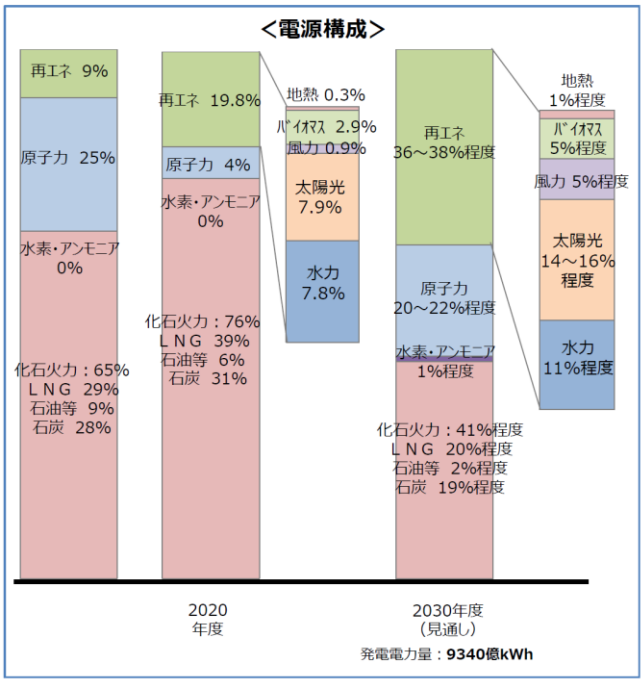
一不足、エネルギー価格の高騰により、欧州等で太陽光発電導入が一層進んだことで、中国の太陽光パネル輸出の一層の増加も見られる。一方、米国は、2022 年にウイグル強制労働防止法を制定し、これに基づいて、米国国内への中国製太陽光パネルの輸入が制限されてきている。一方、国内での太陽光パネル製造の増強がなされてきている。これによって、今後、太陽光パネル製造コストの上昇となる可能性もある。

例えば、英国では洋上風力発電の導入量が大きくなっているが、2021 年は風があまり吹かず、風力発電の発電電力量が落ち、天然ガス需要が増大して、これにロシア・ウクライナ情勢が加わって、2021 年秋からの世界的な天然ガス高騰につながった。導入量が増えてくると、自然変動に伴って様々なリスクを誘発する可能性もある。

3.5.2 日本における再生可能エネルギーの導入状況

2012 年 7 月の FIT 制度（固定価格買取制度）開始により、日本における再エネの導入は大幅に増加し、発電電力量に占める再エネ発電の割合は、2011 年度 10.4%から 2020 年度 19.8%に拡大した（文献 13)）。2020 年 6 月に、FIT 制度の抜本見直し等を内容とした再エネ特措法の改正を含む「エネルギー供給強靭化法」が成立し、以降、再生可能エネルギーの大量導入や主力電源化を検討する資源エネルギー庁小委員会等において、再エネ型経済社会の創造や、再エネ大量導入に向けた諸制度の検討、エネルギー供給強靭化法の詳細設計についての検討が重ねられ、さらに第 6 次エネルギー基本計画の改定やエネルギーミックスの見直しに向けた再エネに係る議論が行われてきた。

2021 年 10 月に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画では、2030 年度の温室効果ガス 46%削減に向けて、施策強化等の効果が実現した場合の野心的目標として、電源構成 36～38%（合計 3,360～3,530 億 kWh 程度）の導入を目指すことが掲げられている（文献 14)）。図 3.5.2-1 は第 6 次エネルギー基本計画で策定された新たなエネルギーミックスおよびエネルギーミックスに対する再生可能エネルギーの導入状況（2022 年 3 月時点）を示す。



出典）総合エネルギー統計(2020年度確報値)等を基に資源エネルギー庁作成

(kW)	導入水準 (22年3月)	FIT前導入量＋FIT・FIP認定量 (22年3月)	ミックス (2030年度)	ミックスに対する導入進捗率
太陽光	6,610万	8,270万	10,350～11,760万	約60%
風力	480万	1,500万	2,360万	約20%
地熱	60万	70万	150万	約41%
中小水力	980万	1,020万	1,040万	約95%
バイオマス	560万	1,060万	800万	約70%

※バイオマスはバイオマス比率考慮後出力。
※失効分（2022年3月時点で確認できているもの）を反映済。
※太陽光の「ミックスに対する進捗率」はミックスで示された値の中間値に対する導入量の進捗。

図 3.5.2-1 新たなエネルギーミックスに対する再生可能エネルギーの導入状況
（出典）調達価格等算定委員会 [13)]

(1) 太陽光発電

図 3.5.2-2、図 3.5.2-3 にそれぞれ、太陽光発電の FIT・FIP 認定量・導入量および太陽光発電（2,000kW）の各国の買取価格を示す。第 6 次エネルギー基本計画で策定された新しいエネルギーミックス（10,350～11,760 万 kW）の水準に対して、2022 年 3 月における FIT 制度開始前導入量+FIT・FIP 認定量は 8,270 万 kW、導入量は 6,610 万 kW となった。2022 年度の買取価格は、住宅用（10kW 未満）が 17 円/kWh、事業用（50kW 以上 250kW 未満）が 10 円/kWh 等だが、海外の買取価格と比べて高い。事業用（250kW 以上）は入札対象になっており、2022 年度第 1 四半期・第 2 四半期における入札（FIT・FIP）の加重平均落札価格は 9.79～9.93 円/kWh である。

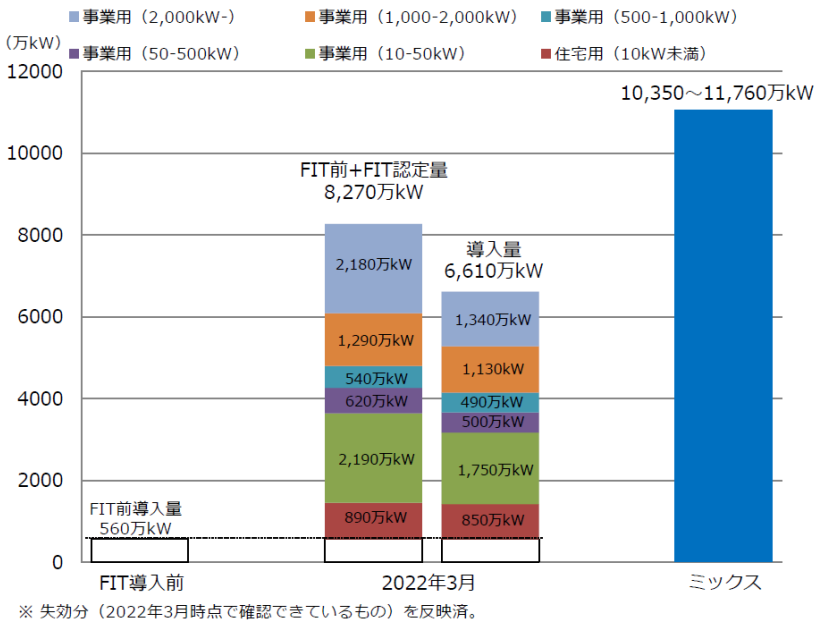


図 3.5.2-2 太陽光発電の FIT・FIP 認定量と導入量

（出典）調達価格等算定委員会 [13)]

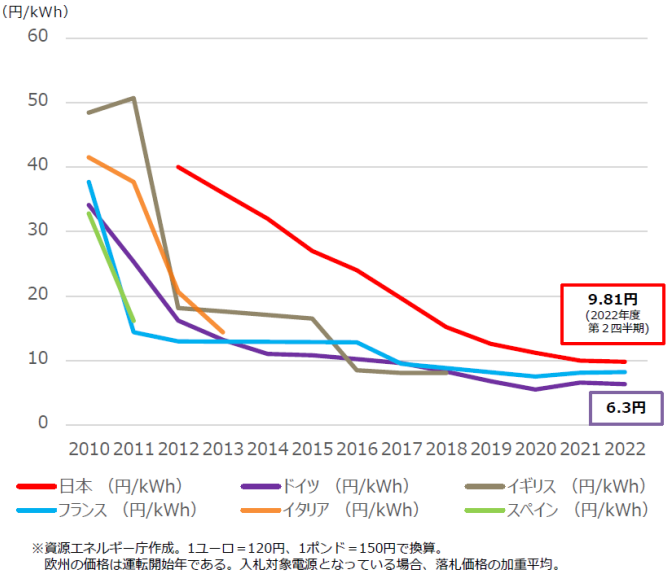


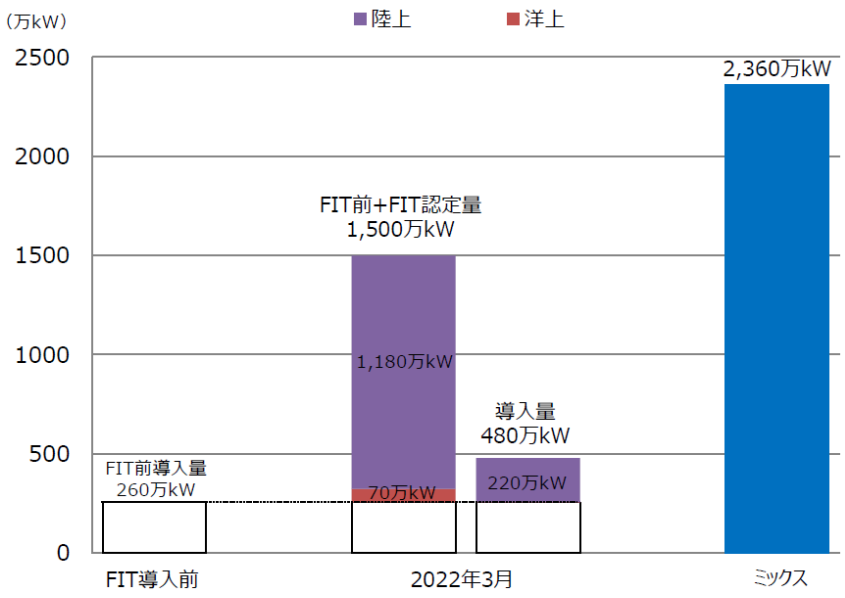
図 3.5.2-3 太陽光発電（2,000kW）の各国の買取価格

（出典）調達価格等算定委員会 [13)]

(2) 風力発電

図 3.5.2-4、図 3.5.2-5 にそれぞれ、風力発電の FIT・FIP 認定量・導入量および風力発電（20,000kW）の各国の買取価格を示す。新しいエネルギーミックス（2,360 万 kW）の水準に対して、2022 年 3 月における FIT 制度開始前導入量+FIT・FIP 認定量は 1,500 万 kW、導入量は 480 万 kW となった。洋上風力（着床式・浮体式）発電については、現時点では導入案件は少ないものの、今後の導入拡大が見込まれる。買取価格につい

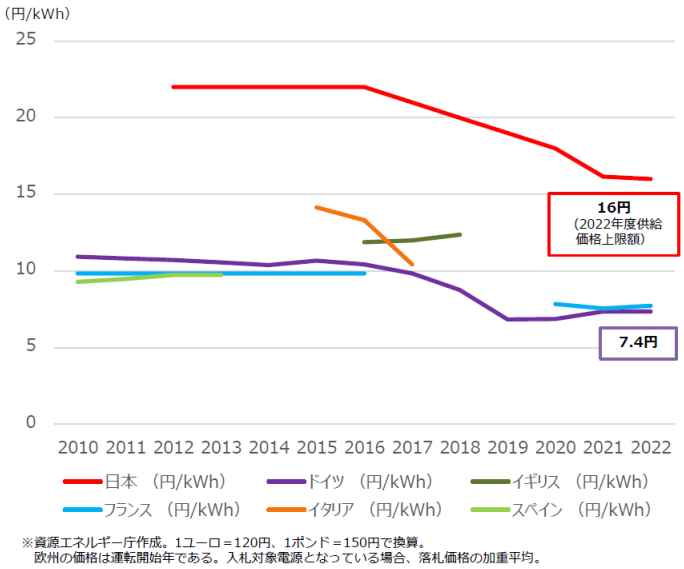
ては、陸上風力発電が 16 円/kWh（2022 年度入札における上限価格）等であるが、海外の買取価格と比べて高い。



※ 失効分（2022年3月時点で確認できているもの）を反映済。
※ リプレースは除く。

図 3.5.2-4 風力発電の FIT・FIP 認定量と導入量

（出典）調達価格等算定委員会 [13)]



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

図 3.5.2-5 風力発電（20,000kW）の各国の買取価格

（出典）調達価格等算定委員会 [13)]

(3) 再生可能エネルギー導入における課題

FIT 制度により再エネ導入量は大きく拡大したが、第 1 章の 1.1.4 節でも記載したように、高い再生可能エネルギーの賦課金による国民負担の増大が問題である。図

3.5.2-6 に示すように、2022 年度（予測）の買取総額は 4.2 兆円、賦課金（国民負担）総額は 2.8 兆円になっており、買取総額の内訳によると 2012 年度～2014 年度に認定された事業用太陽光発電に係る買取費用が大半を占めている。また電気料金に占める賦課金割合は、2021 年度実績では、産業用・業務用が 17%、家庭用が 12%となっている。

＜買取総額の内訳＞			
住宅用太陽光		0.2兆円	5%
事業用太陽光	2012年度認定	0.8兆円	21%
	2013年度認定	1.1兆円	59% 28%
	2014年度認定	0.4兆円	10%
	2015～2021年度認定	0.4兆円	10%
	（合計）	（2.8兆円）	（69%）
風力発電		0.2兆円	5%
地熱発電		0.02兆円	0.4%
中小水力発電		0.1兆円	3%
バイオマス発電		0.7兆円	17%
合計		4.2兆円	―

※合計額は調整力確保費用等（約0.1兆円）を含む。

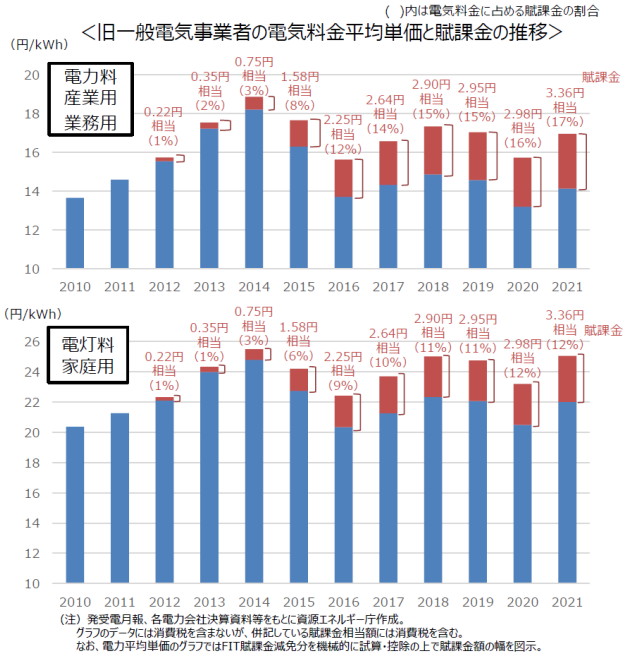


図 3.5.2-6 FIT・FIP 制度に伴う国民負担の状況

（出典）調達価格等算定委員会 [13)]

太陽光発電、風力発電は、同じ kWh の電力量を供給するにも、火力発電所や原子力発電所よりも大きな面積が必要である。火力・原子力発電所 100 万 kW と同量の発電量を得るには、太陽光では 100 倍程度、風力では 300～400 倍程度の面積が必要とされる。このような中、国土が狭くとりわけ平地面積が小さい、日本は平地面積あたりの太陽光設備容量は世界最大級となっている。そのため、設置にあたって、地元住民や自治体とトラブルになるケースが増えてきている。設置に適切な土地の確保が大きな課題である。営農型太陽光発電などの期待も大きいが、実際には、なかなか進んでいないのが実態である。太陽光パネルの価格等は下がってきても、設置にあたって、場所の確保が難しくなり、土地代、設置費用等が上がったり、太陽光や風力発電の設備利用率が下がっていったりする可能性があり、将来的なコスト低減の見通しは不透明でもある。

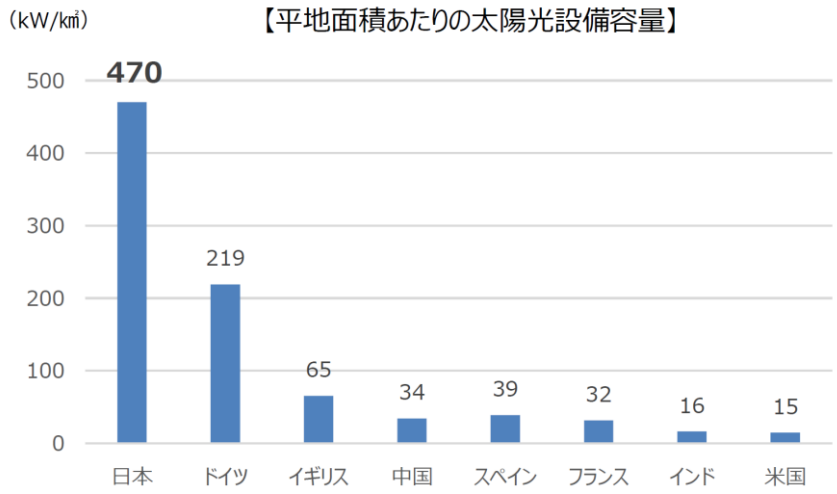


図 3.5.2-7 平地面積あたりの太陽光発電設備容量の国際比較

（出典）調達価格等算定委員会 [13)]

(4) 電力ネットワーク形成の課題

再生可能エネルギー大量導入・次世代型電力ネットワーク小委員会では、我が国は2050年カーボンニュートラルや2030年度の野心的な水準としての電源構成 36-38%程度の再エネ導入といった目標の実現に向けて、エネルギー政策の原則である S+3E を大前提に、電力部門の脱炭素化に向け、再生可能エネルギーの主力電源化を徹底し、再生可能エネルギー最優先の原則で取り組み、国民負担の抑制と地域共生を図りながら最大限の導入を促すことが不可欠である、としている。また、グリーントランスフォーメーション（GX）を実行すべく、再生可能エネルギー政策については、再生可能エネルギーの大量導入に必要な次世代ネットワークの構築や調整力の確保を進めていくとともに、国産再エネを最大限導入する具体的な取組を更に加速させていくことが重要である。同小委員会は、2022年10月にこれまでの論点をまとめ、さらに関係審議会等と連携し、地域と共生可能な事業規律の強化を大前提に、再エネの最大限導入に向けて、さまざまな施策を検討していくとしている（文献 15)）。

電力広域的推進運営機関では、従来は、各電源の追加計画等を基に、電力系統整備計画を策定してきたが、今後の再エネ大量導入を見込み、2050年頃までの長期の再エネ導入見込みの下での、あるべき電力系統を費用便益分析を通して策定し、電力系統のマスタープランとして提示した（図 3.5.2-8)。今後、この大きな方向性を参考にしながら、より具体的に系統整備が行われていく見込みである。一方、このとき、再エネ50%程度の導入にあたって、系統整備に6～7兆円規模の投資が必要と推計されており、費用便益上の検討がなされた結果ではあるものの、再エネ比率を引き上げていくために、追加的に系統整備にも大きな費用が発生する。エネルギーシステム全体としてのコストの試算、管理が引き続き、重要と考えられる。

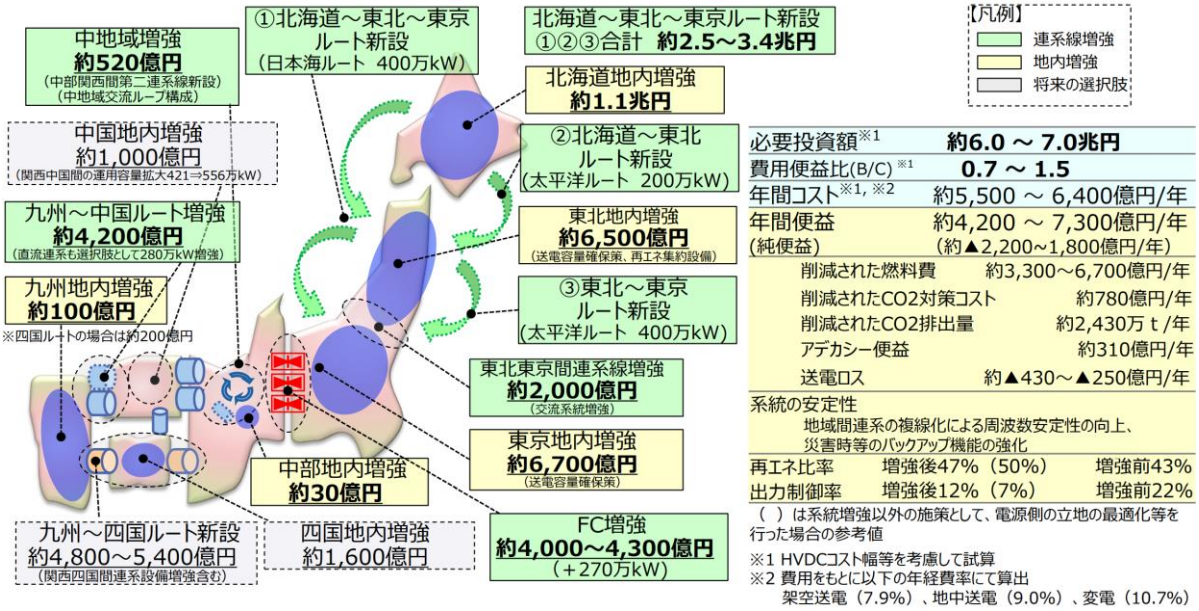


図 3.5.2-8 電力系統に関するマスタープランの策定

（出典）電力広域的運営推進機関 [16)]

参考文献（第 3.5 節に関するもの）

1) IEA, World Energy Outlook 2016
2) IEA, World Energy Outlook 2017
3) IEA, World Energy Outlook 2018
4) IEA, World Energy Outlook 2019
5) IEA, World Energy Outlook 2020
6) IEA, World Energy Outlook 2021
7) IEA, World Energy Outlook 2022
8) IRENA, Renewable Capacity Highlights (2022)
9) IEA, Trends in Photovoltaic Applications 2022
10) GWEC, Global Wind Report 2021 (2022)
11) IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2021 (2022)
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) 令和 3 年度報告書 (2022)
13) 調達価格等算定委員会 (2022) https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/078_01_00.pdf
14) 第 6 次エネルギー基本計画
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf
15) 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会／電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 制度的な検討を要する論点の整理 (2022)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/20221007_1.pdf
16) 電力広域的運営推進機関、広域連系系統のマスタープラン及び系統利用ルールの在り方等に関する検討委員会 https://www.occto.or.jp/iinkai/masutapuran/2022/masutapuran_23_shiryou.html

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た。また、ガス事業についても同様にガスシステム改革が行われてきた。全面自由化後は、発電事業、送配電事業、小売電気事業の3事業に分割され、送配電事業については、中立性を担保するために2020年4月に法的分離が行われた。送配電部門は、引き続き、総括原価方式による地域独占・料金規制が維持されるが、発電事業、小売事業は全面自由化され、一部、小売りの規制料金（経過措置料金）は継続されているものの、一連の電力システム改革は一旦終了した。小売における新電力の比率は大きく上昇した（図 3.6.1-1）。ただし、2022年度は、化石燃料高騰の中、特別高圧、高圧では、新電力の比率の低減が見られてきている。電力は経過措置料金の解除が見送られている状況であるが、都市ガスについては、2021年10月に規制料金（経過措置料金）の規制解除がなされた。また、2022年4月にガス導管の法的分離がなされ、ガスに関する一連のエネルギーシステム改革は一旦終了した。

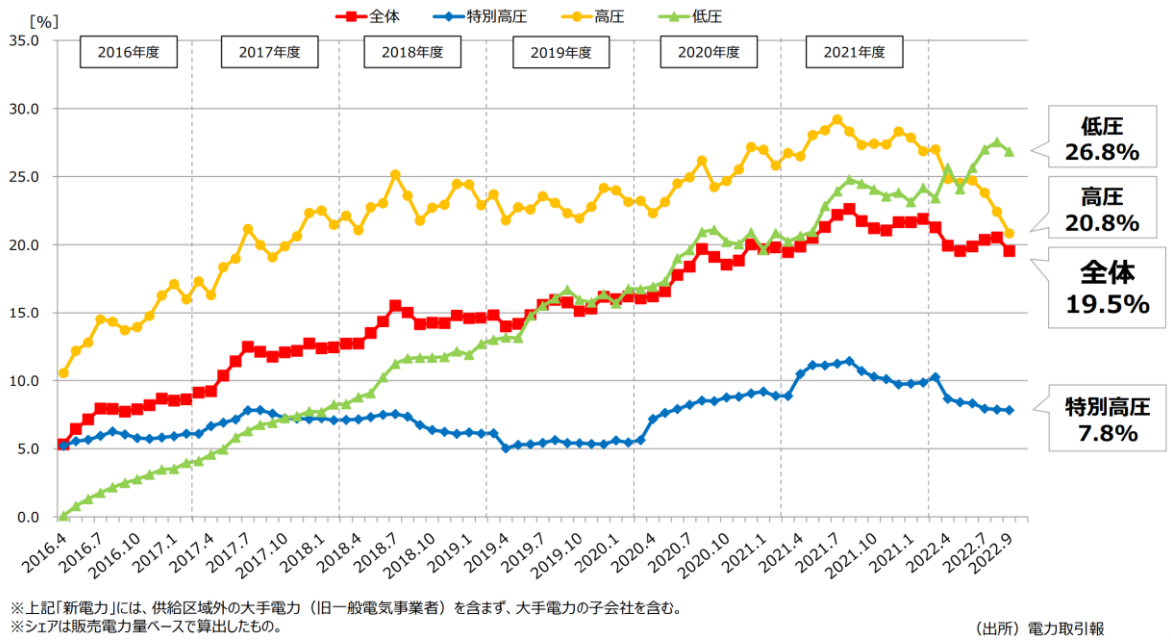


図 3.6.1-1 新電力のシェアの推移

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料[1)]）

電力卸取引市場（スポット市場）の取引量は、グロスビディングと呼ばれる、旧一般電気事業者に半強制的に一定の発電電力量を市場に拠出するよう求める制度もあり、取引量は2018年頃から劇的に増大し、全電力需要の40%程度となっている（図 3.6.1-2）。このように、これまでの相対契約中心から、卸取引市場の活用へと移行しており、卸取引市場の価格が電力需給価格全体により大きな影響を及ぼすようになってきている。図 3.6.1-3は、取引価格の推移である。需給がひっ迫すれば、市場により価格調整が働

き、価格が上昇している。その面では短期的な需給調整という点で、価格がシグナルになって、調整が機能していると見ることができる。しかしながら、2021 年 1 月には kWh あたり 250 円といった極めて高い価格となった。2021 年 1 月には比較的長期間にわたって kWh の不足に陥ったため、電力市場は大きく混乱した。また、2021～2022 年の冬季においても高い価格推移となり、2022 年 3 月 22 日は東京、東北電力管内での季節外れの寒さの影響もあり、電力需要は増大し、一方、変動性再エネ（VRE）の供給力は低位となって需給逼迫となった。また、ロシア・ウクライナ情勢による化石燃料価格の高騰の影響が重なり、2022 年は年間通じて高い価格となった。需給がひっ迫すれば、ディマンドレスポンス（DR）のような対応を促すために、ある程度高い価格付けは必要である。一方、VRE の供給が順調な時間帯で下限値である 0.01 円/kWh の価格となるコマも増えてきている。

しかし、安定的な電力需給と電力事業運営という点から、このようにボラティリティの極めて高い市場は必ずしも望ましくない。そして、規制料金においては、事前に認められている燃料費調整額の上限幅を超え、小売電力事業者の経営を圧迫している。規制料金（経過措置料金）は、みなし小売事業者（旧一般電気事業者）に適用されるが、規制料金が適正にコスト転嫁できなければ、新電力も、顧客が流出する恐れがあるため、料金転嫁が事実上難しく、新電力の経営を大きく圧迫する事態となってきている。再エネ比率が高い小売事業者でも、需給不一致時の調整コストとなっているインバランス料金が高騰する。また、一般的に脱炭素に資するような電源は、資本費が高いため、価格ボラティリティの高さは、投資リスクの高さをもたらす可能性がある。

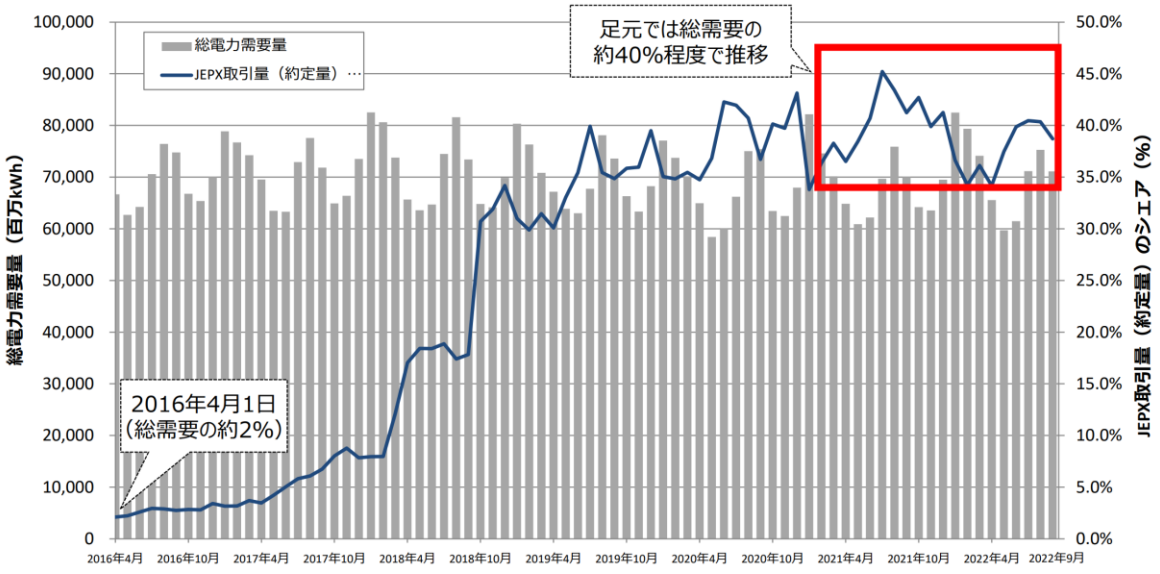
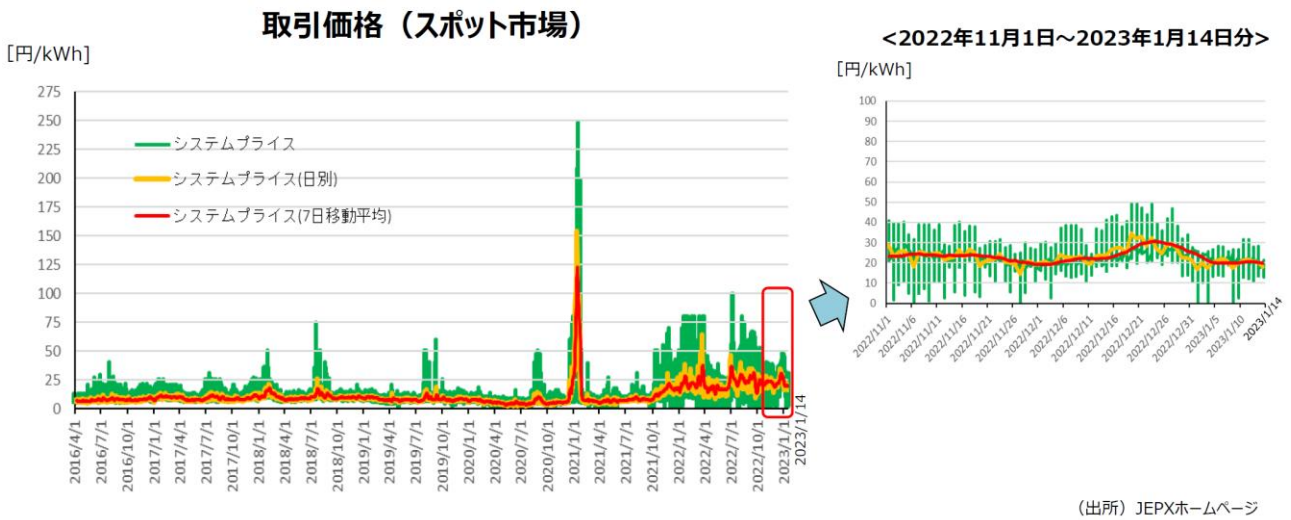


図 3.6.1-2 JEPX の取引量（約定量）の推移

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 [1)]）



（出所）JEPXホームページ

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
平均価格（円/kWh）	16.5	14.7	9.8	8.5	9.7	9.8	7.9	11.2	13.5	22.12
最高価格（円/kWh）	55	44.6	44.9	40.0	50.0	75.0	60.0	251.0	80.0	100.0
200円/kWh超えの時間帯	0	0	0	0	0	0	0	56	0	0
100～200円/kWhの時間帯	0	0	0	0	0	0	0	287	0	8
(参考)0.01円/kWhの時間帯※	0	0	0	0	0	0	22	266	284	410

図 3.6.1-3 日本における電力卸取引市場（スポット市場）の取引価格の推移

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 [1]）

政府は、卸取引市場（kWh 価値の取引）だけでなく、容量市場（kW の取引）、需給調整市場（ΔkW の取引）、非化石価値取引市場（非化石電源比率実現のための価値や、ゼロエミッション価値などの環境価値の取引）の制度設計を行い、容量市場と非化石価値取引市場は 2020 年度に開始された。また、需給調整市場は 2021 年 4 月に開設され、調整力についても、これまでのエリア毎の公募から広域調達となった。これらの市場は、温暖化対策の視点からも極めて重要であり、引き続き、制度の詳細を詰め、また、必要に応じて見直しながら、導入を進めていくことが求められる。なお、非化石価値取引市場は、2021 年度からは、再エネの非化石証書の取引を目的とした再エネ価値取引市場と、2030 年に向けた非化石電源比率（現状では前エネルギーミックスの 44%が目標値）達成に向けた高度化法義務達成市場の 2 つに分離された。再エネ価値取引市場における FIT 非化石証書の最低価格が 0.3 円/kWh で、高度化法義務達成市場の非 FIT 非化石の最低価格は 0.6 円/kWh となっている。本来であれば、高度化法義務達成市場は正に非化石電源の拡大のために需要家の負担を求めなければならないコストであるものの、需要家に十分に価値を理解してもらえるような状況になっておらず、料金転嫁が難しい状況が続いている。このような中、再エネ価値取引市場における FIT 非化石証書の最低価格を引き上げ、高度化法義務達成市場との価格差を縮め、需要家への料金転嫁を少しでもしやすいような制度変更の方向性が示されているところである。

ただ、いずれにしても、引き続き多くの課題が残っている。「2050 年カーボンニュートラル」や「2030 年 46%排出削減」といった厳しい排出削減は、初期投資額の大きな設備導入が求められる場面が多い一方で、エネルギーシステム改革は市場の活用に主眼があるが、どうしても市場は短期の価格を主たるターゲットとしてしまう傾向があ

り、その市場価格は変動性が大きい傾向がある。これが、長期の大規模投資が必要となりがちな CO_2 排出削減対策と矛盾する部分がある。政府は、2023 年 2 月に「GX 実現に向けた基本方針」[2]を閣議決定したが、改めて、エネルギー安定供給・安全保障、経済効率性、環境をどう両立するか、どうバランスさせるか、エネルギーシステム改革の下でより高度な制度設計が求められる状況となっている。図 3.6.1-4 でも見られるように、エネルギー安定供給・安全保障、そして、電気料金の安定性のため、官の関与を強めるような政策の方向性が提示されてきている。また、「GX 実現に向けた基本方針」においては、排出量取引制度の GX-ETS の導入方針も決めたが、排出量取引制度も同様に、短期的な市場価格で排出量の調整を図るため、長期の大規模投資を促しにくい傾向があるとされてきた。なお、GX-ETS や炭素に対する賦課金は、高度化法義務達成市場との重複性が相当に強い。特に、高度化法義務達成市場は、電力に対する初期割り当てグランドファザリング式の排出量取引制度の亜種とも言える（排出量取引制度とは異なり、化石燃料の燃料種間の差異はない）。GX-ETS 等への統合、そして高度化法義務達成市場の廃止の道筋をつけていくことが、効率的な排出削減のためには必要である。

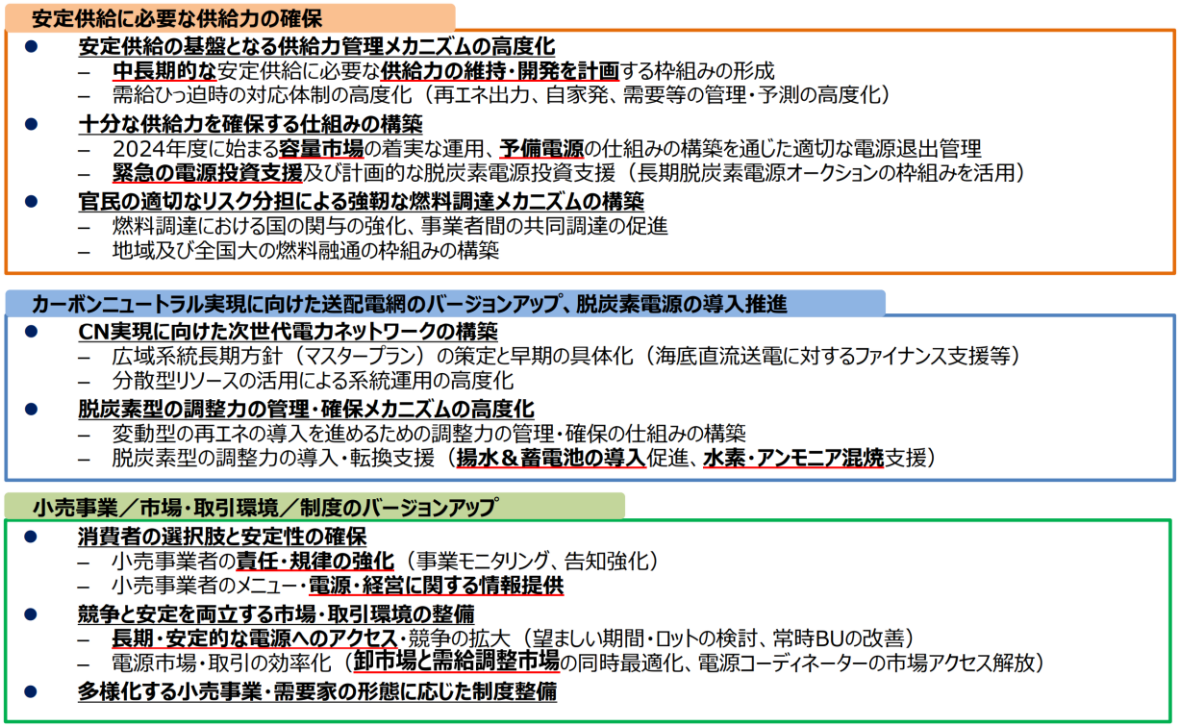


図 3.6.1-4 今後の電力政策の方向性

（出典：電力・ガス基本政策小委員会資料 [3]）

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 3.6.1-5）。固定費は回収しにくいが、図 3.6.1-3 で見られるように、価格がスパイクする時間帯もあるため、そのスパイクした際に得

られる収入で固定費分と利潤を確保してくこととなる。しかし、先にも記載したように、安定的な電力需給と事業環境の整備という点からは、あまりに価格スパイクすることも問題である。また、再生可能エネルギーが固定価格買取制度（FIT）のような政策措置で、優先給電ルールで市場に出てくると、卸取引市場価格が下がってしまう（図 3.6.1-6）。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。過去 3 回、2020～22 年度に実施された容量市場オークション結果は図 3.6.1-7 のようになっている。初年度の 2020 年度は設定した上限価格にほぼ張り付くという結果であった。しかしながら、2020 年度オークションの上限価格に張り付く結果を受けて、容量市場の制度について各種変更を施した。これも反映され、2021 年度オークション価格は 2020 年度よりも大きく低下し、また、NetCONE と呼ばれる参照価格よりも大幅に低い価格での約定となった。そして、2022 年度のオークション価格は 2021 年度よりは高い価格となった。ただし、現在の需給逼迫状態からすると、安価な約定価格とも見られる。稀頻度リスクを十分に織り込んだ電源容量の募集になっていないのではないか、との見方もあり、検討が進められている状況であり、必要な供給力は従来よりも H3 需要の 3～4%増加させた方が適切ではないかとの検討結果が提示されたところである。

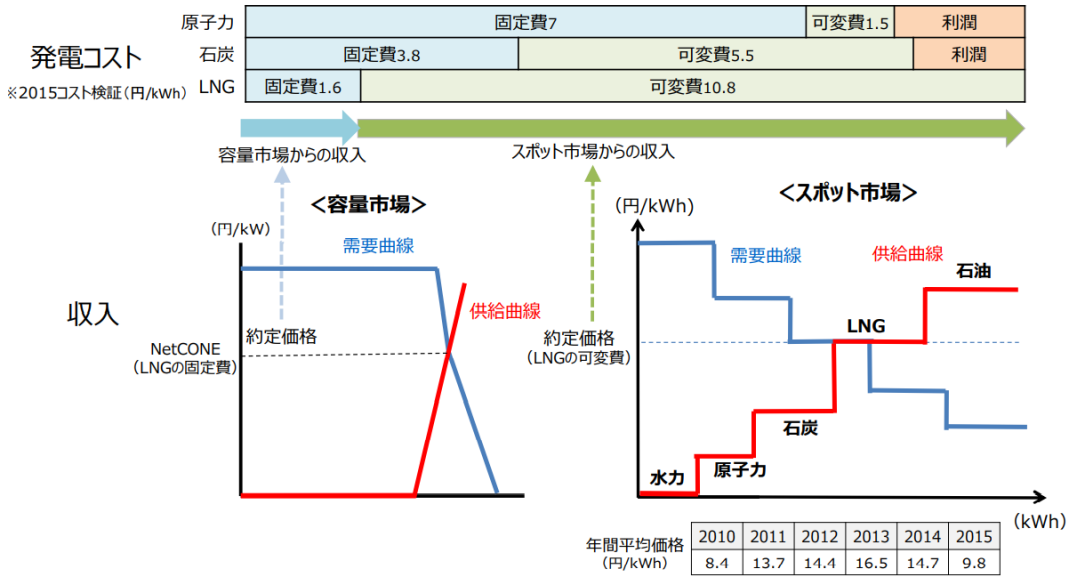


図 3.6.1-5 発電投資回収のイメージ

（出典：文献 4)）

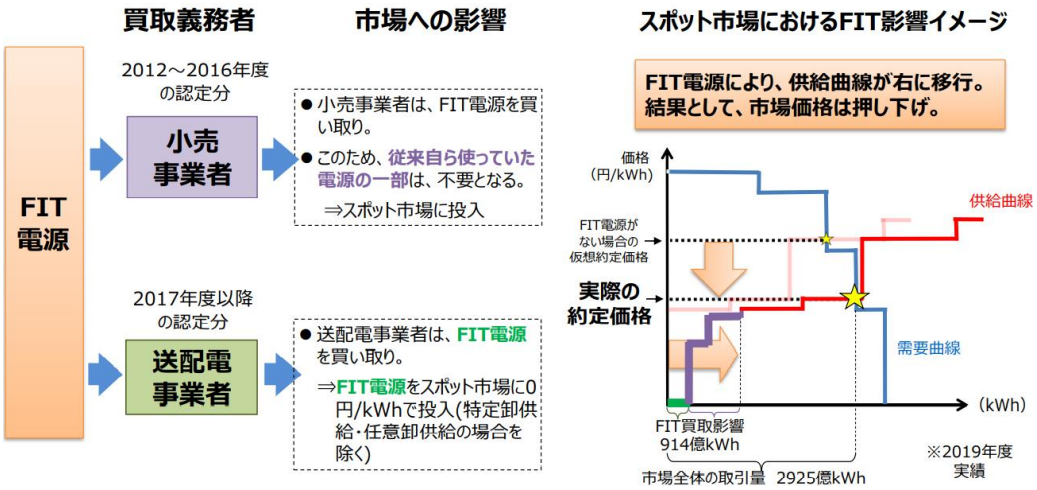
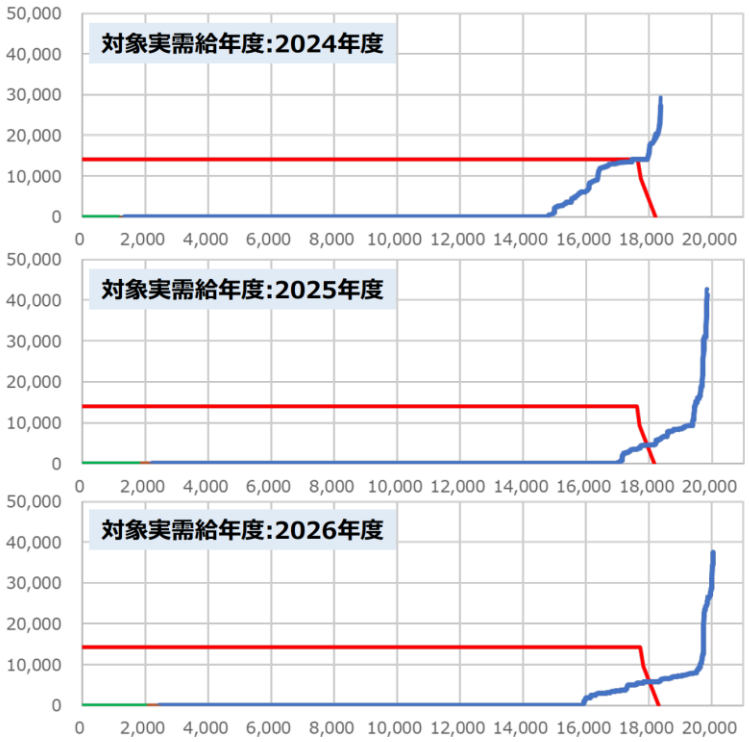


図 3.6.1-6 スポット市場における FIT の影響

（出典：文献 4)）



<容量市場メインオークションの供給曲線（スムージング処理後）と各諸元>

縦軸：価格[円/kW] 横軸：調達量[万kW]

- 需要曲線
- 供給曲線※1
- FIT電源等の期待容量※2
- 追加オークションで調達を予定している供給力

※1【2025年度】発動指令電源の応札容量については、メインオークションにおける調達上限容量を超過した非落札電源の容量は除外している。
【2026年度】発動指令電源の応札容量については、調整係数反映後の容量とし、1,000kW未満となる電源等は除外している。
※2 応札後に織込む石炭とバイオマスの混焼を行うFIT電源の供給力を含む

対象実需給年度	2024年度	2025年度	2026年度
NetCONE	9,425 円/kW	9,372 円/kW	9,557 円/kW
目標調達量	177,468,513 kW	176,991,335 kW	178,295,201 kW
FIT電源等の期待容量	11,789,258 kW	18,889,612 kW	21,087,676 kW
追加オークションで調達を予定している供給力	–	3,167,258 kW	3,180,694 kW

図 3.6.1-7 2020～22 年度（対象年：2024～26 年度）容量市場オークション結果

（出典：文献 5)）

市場開設からまだ 2 年しか経過していないため、長期的な運用によって、価格の安定性を得ていくことは重要と考えられるが、それでも毎年のオークションであり、4 年後の 1 年間の供給力の提供に対して対価が支払われる仕組みである。そして、価格の変動性がどうしても大きくなる可能性があることは、長期的な電源投資を難しくする可能性がある。特に、脱炭素化に向けた、新設電源の投資のインセンティブとしては小さいと考えられる。

一般的には既存電源の方が、新設電源よりも安価であり、既存電源ベースの価格で、容量市場の価格形成が行われると考えられる。そうすると、新設電源にとっては、投資リスクをとって建設するだけの十分な対価を得られない可能性があり、新設電源への投資を安定的に促すことができるのか、慎重に検討する必要がある。また、4 年後の 1 年間であるが、通常の電源は、建設計画から運開まで 3～10 年程度要するため、4 年前にならないと対価がわからないと投資とその回収の計画を立てにくく、金融機関からの融資も受けにくい可能性がある。先行して容量市場を導入した欧州では、容量市場の価格が上昇すると、ディーゼル発電のように短期で導入可能な規模が小さく、発電効率が悪い電源の導入が促進されたという報告もなされている。更に火力の場合、通常、30～40 年運転されるが、1 年毎に対価が変わるため、投資回収の予見性が低く、それも投資を躊躇させる方向に働く。

特にカーボンニュートラルということになると、CCS 付き火力発電なども重要になると考えられるが、設備単価は上昇し、また CCS 無しよりも投資リスクは高いと考えられる。先に指摘したように、市場は価格スパイクが起こることもあるが、いつか起こると考えられる価格スパイクを期待して金融機関が融資する可能性は必ずしも高くない。図 3.6.1-8 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。具体的な制度設計が進められ、容量市場の付帯的な市場として、長期脱炭素電源オークションとして 2023 年度から開始される予定となった。容量市場は 4 年後の 1 年間の容量のみの募集を毎年繰り返すが、この長期脱炭素電源オークションは、容量募集期間は原則 20 年とすることとされた。また、供給力提供開始期限は電源によって長期間の開発による投資リスクの高さとそれに応じたリターンの違いがあるという特徴の違いに応じて、表 3.6.1-1 のように、差異を設けることとなった。これによって、脱炭素電源の新設を促すインセンティブとして一定の役割が果たされると考えられる。ただし、これも市場であるため、長期間において様々な投資リスクに晒される、特に脱炭素電源に対して十分な投資インセンティブとなるかは、引き続き、注視していく必要がある。

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

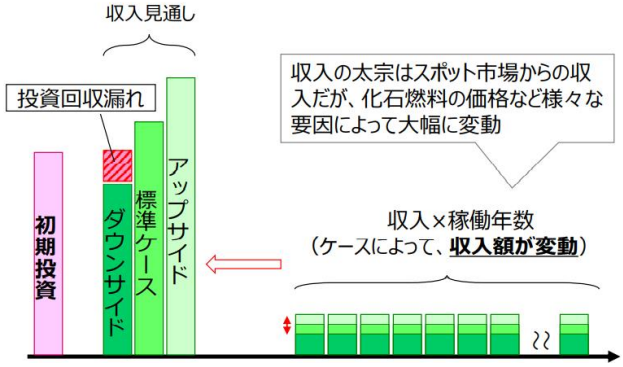


図 3.6.1-8 投資リスクの課題

（出典：文献 4)）

表 3.6.1-1 脱炭素長期電源容量市場の設計：供給力提供開始期限

電源種	供給力提供開始期限（案）
太陽光	5年（法・条例アセス済の場合：3年）
風力、地熱	8年（法・条例アセス済の場合：4年）
水力	12年（法・条例アセス済の場合：8年） （多目的ダム併設型についてはダム建設の遅れを考慮）
水素・アンモニア（専焼）、バイオマス 水素・アンモニア混焼のLNG、CCS火力 既設火力の改修（水素・アンモニア混焼、バイオマス専焼）	11年（法・条例アセス済・不要の場合：7年）
原子力	17年（法・条例アセス済の場合：12年）
蓄電池	4年
LNG（時限的に対象）	6年 ※21頁のとおり、早期に供給力を提供開始できる新設・リプレース案件のみを対象とするため、供給力提供開始期限を短く設定

（出典：制度検討作業部会資料 7)）

参考文献（第 3.5 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 (2023)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/058_03_00.pdf

2) 日本政府、GX 実現に向けた基本方針、2023 年 2 月、
https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html

3) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 (2022)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/057_04_01.pdf

4) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 資料 (2021)

5) 電力広域的運営推進機関 容量市場の在り方等に関する検討会 (2023)
https://www.occto.or.jp/iinkai/youryou/kentoukai/2022/files/youryou_kentoukai_43_03.pdf

6) 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 (2023)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/076_04_03.pdf
7) 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 (2022)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/070_05_00.pdf

3.7 ESG 投資、グリーンボンド等の動向[51]

3.7.1 背景

近年では気候変動問題において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加速している。2006 年に国連は機関投資家による投資判断プロセスに ESG 基準：環境（Environment)、社会（Social)、企業統治（Governance）を組み込む「責任投資原則 (Principles of Responsible Investment：PRI)」を提唱した。PRI[2)]によると、2022 年 9 月 30 日時点で、PRI への署名機関は、5,179 機関となり、特に 2018 年以降、急激に拡大している。ESG 投資は、サステナブル投資あるいは社会的責任投資とも呼ばれる。

また、世界主要 25 ヶ国、金融規制当局、中央銀行総裁が参加メンバーとなっている国際機関、金融安定理事会（FSB）の「気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD)」は 2017 年 6 月に「気候変動関連の財務情報開示」に関する最終報告書を発表した。TCFD 提言においては、企業が開示する重要課題（マテリアリティ）に関し、気候関連のリスク及び機会がもたらす財務的影響を重視した考え方がとられている 。

2015 年に国連で持続可能な開発目標（SDGs）が採択され、また同年にフランスのパリで開催された第 21 回国連気候変動枠組み条約（UNFCCC）締約国会議（COP21）において、2020 年以降の温室効果ガス（GHGs）排出量削減に関するパリ協定が採択された（2016 年に発効)。主な内容として、長期目標として世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力を追求すること、そして、できる限り早く世界の GHGs 排出量をピークアウトし、21 世紀後半には GHGs 排出量と吸収量とのバランスを達成するための早急な削減が求められた。そして、全ての国に対し、削減目標（国別貢献：NDCs）の 5 年ごとの提出及び更新、並びに NDCs に加えて長期戦略の提出が求められた。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ことが締約国によって認められている。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[3)]によると、2050 年のネット・ゼロ排出達成に向けて、2021 年（単年）現在の 1.3 兆ドルのクリーンエネルギー投資額から、2030 年までに 4 兆ドルを超える投資が必要であり、エネルギー分野において新たに投資家を誘致することの重要性が強調されている。

[51] 本節は長島 [1)]を修正・加筆したものである。

一方、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（GB）市場が拡大している。

本節は、現在の ESG 投資及びグリーンボンドの動向を考察し、今後の課題についてまとめることを目的とする。

3.7.2 ESG 投資の現況

現在のサステナブルファイナンスの投資動向を概観する。国際団体である Global Sustainable Investment Alliance(GSIA)は、世界のサステナブル投資額を集計した報告書を隔年で発行している。2020 年版報告書 [4] における、サステナブル投資の 7 つのアプローチと定義は以下の通りである（2020 年に定義を改訂）。

① ESG インテグレーション：財務分析に、投資マネージャーが ESG の要素を体系的及び明示的に取り入れること。
② コーポレートエンゲージメントと株主行動：企業の行動に影響を与えるべく株主の権力を利用すること（企業への直接的なエンゲージメント、株主提案の提出等）。
③ 規範に基づくスクリーニング：国連等の国際機関が発行する国際的規範に基づいて企業の事業や活動をスクリーニングすること。
④ ネガティブ／除外スクリーニング：投資対象外とみなされる活動、特定のセクター、企業、国あるいはその他の発行体をファンドやポートフォリオから除外すること（例：武器及びタバコ製品、動物実験及び人権侵害活動等）。
⑤ ベストインクラス／ポジティブ・スクリーニング：同業他社と比して良い ESG パフォーマンスを示し、ある定義された閾値以上の評価を得た部門、企業及びプロジェクトに投資をすること。
⑥ サステナビリティをテーマとする投資：環境と社会の持続可能な解決に貢献するテーマや資産に投資をすること。
⑦ インパクト／コミュニティ投資：インパクト投資は社会や環境にポジティブな影響を達成する投資を指し、コミュニティ投資は伝統的に十分なサービスを受けていない個人及びコミュニティに対して投資をすること。

2020 年版報告書 [4]によると、2020 年の年初において世界のサステナブル投資資産は 35.3 兆米ドル に達し、2018 年から 2020 年の間で約 15%増加した。地域別にみると、2020 年において総運用資産に対するサステナブル投資資産の割合はカナダ（62%）、欧州（42%）、オーストラリア／ニュージーランド（38%）、米国（33%）、日本（24%）となっている 。また、サステナブル投資戦略別では、多い順に「ESG インテグレーション」、「ネガティブ／除外スクリーニング」、「コーポレートエンゲージメントと株主

行動」、「規範に基づくスクリーニング」、「サステナビリティをテーマとする投資」となっており、ESGインテグレーションへの移行が進んでいることがわかる（図 3.7.2-1）。

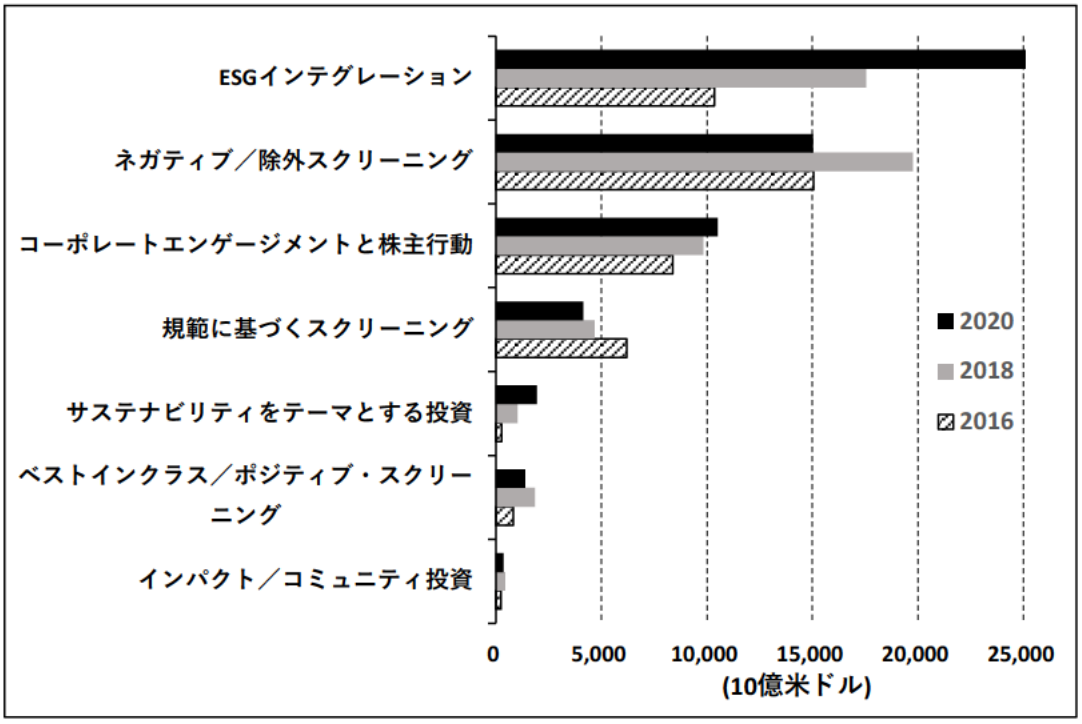


図 3.7.2-1　世界のサステナブル投資戦略の推移

（出典）GSIA[4]の図 7 の数値を基に、著者作成

なお、資産クラス別のサステナブル投資については、2020 年版報告書には記載がないが、前回 2018 年版報告書[5]によると、資産クラスは株式（上場株及び未上場株）、債券、不動産、ローンに分類されている。2018 年時点の世界のサステナブル投資で最も多く占めるのは、上場株（全体の 51%）、次いで債券（36%）である。また、不動産が全体の 3%、非上場株／ベンチャー・キャピタルも 3%を占めている。

前述の 7 つのタイプのサステナブル投資において、気候変動分野で注目されているのは、特にネガティブスクリーニング（ダイベストメント）である。つまり、機関投資家及び金融機関による化石燃料企業といった環境負荷が高い財・企業に対する投資の撤退、さらには環境に優しい財・企業への再投資である。特に、化石燃料の中でも温室効果ガスや大気汚染物質を相対的に多く排出するエネルギー源である石炭に対するダイベストメント運動が活発になってきている。2010 年に米国の学生や環境保護運動家がダイベストメント運動を立ち上げ、その後、世界では政府年金基金、保険会社、教育機関、銀行、財団等においてダイベストメント方針が発表された。

一方、脱炭素社会の実現にはグリーン事業の推進に加えて、GHGs 多排出企業における脱炭素化に向けた移行（トランジション）も重要である。そのため、2017 年以降、様々な機関において、例えば石炭火力発電からガス火力発電への転換を促進する等、GHGs 多排出企業の移行を支援する「トランジション・ボンド」が発行され、ガイドラインが公表されている 。

このような状況の中、2022 年以降、ロシアによるウクライナ侵略等を契機に多排出企業における脱炭素化への移行を重要視する動きが加速され、ネガティブスクリーニングからエンゲージメントへの移行も数多くみられる。例えば、以前はダイベストメントを実施していたスウェーデン公的年金 AP7 は、多排出企業の行動を変えるべく株式運用を実施し、また、排出実質ゼロを目指す金融機関で構成されているグラスゴー金融同盟（GFANZ）も同様に、企業の脱炭素化への移行に資金を投じることが決定された [6)]。

3.7.3 債券市場

グリーンボンド市場は、環境投資の資金調達メカニズムとして台頭してきており、近年、環境関連に対するファイナンスの選定基準に関する議論が進展している。国際資本市場協会（ICMA）は、各種債券の原則及びガイドラインを定めている。

最新版であるグリーンボンド原則（GBP）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 [7)]。

- 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）
- 環境性能の高い建物

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、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。一方、EU は独自のグリーンボンド基準案を公表している 。

非営利団体である気候債券イニシアチブ（CBI）は世界のグリーンボンドの概況を公表している [8)]。図 3.7.3-1 は発行体別の世界のグリーンボンド発行実績を表している。発行額は経年的に増加し、特に昨年 2021 年は 5,784 億米ドルに達し、前年比で約 90%増と飛躍的に増加していることがわかる。発行体別でみると、金融機関 と非金融機関の合計が約 52%を占め、グリーンボンド市場を牽引している。一方、2021 年時点で国が発行するソブリン債（以下「グリーン国債」とよぶ）は全体の約 15%を占め、この 5 年の間に発行額が約 8 倍増加し、急成長している。

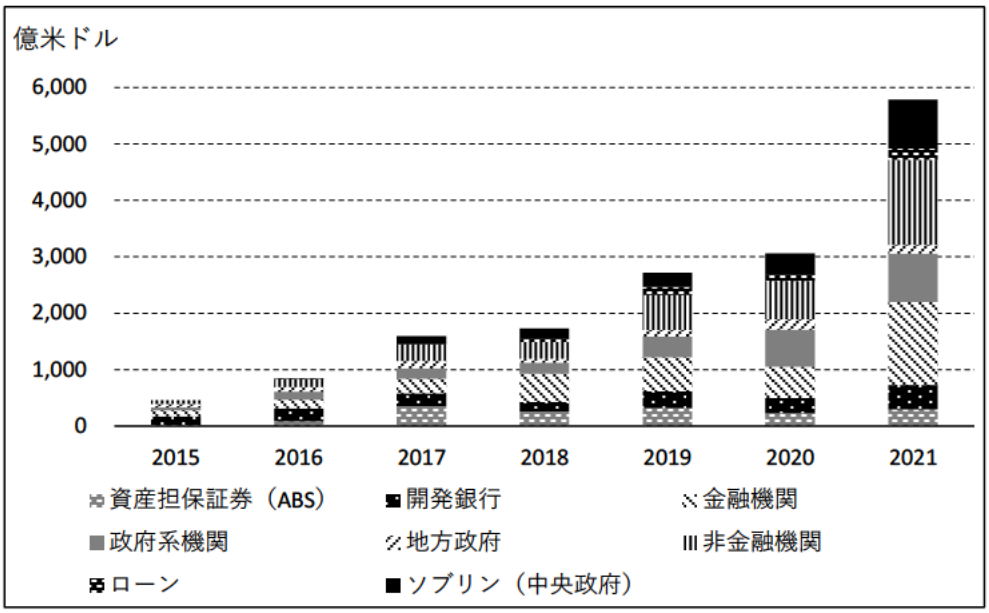


図 3.7.3-1 世界のグリーンボンド発行実績：発行体別

（出典）CBI Market data[8]より著者作成

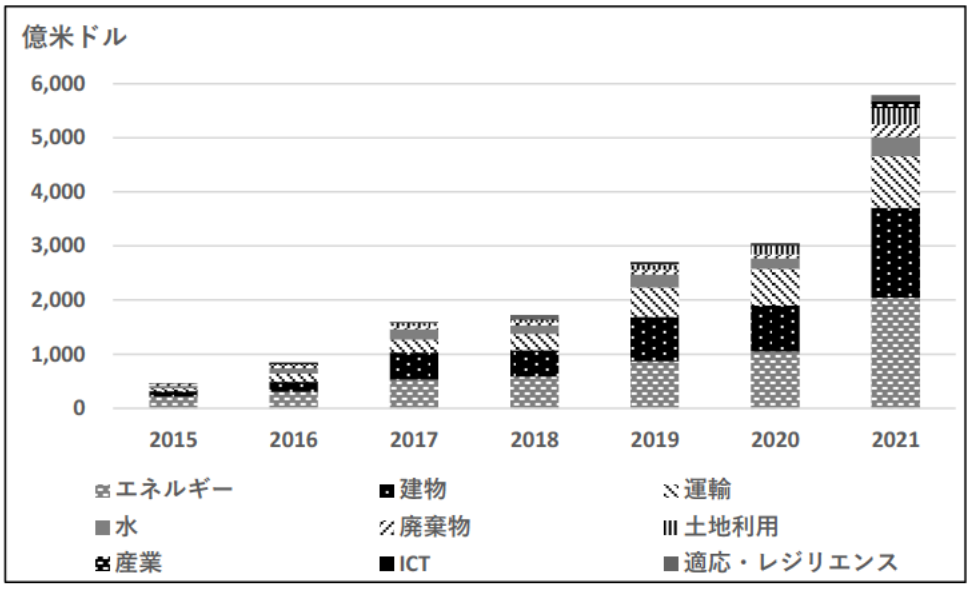


図 3.7.3-2 世界のグリーンボンド発行実績：使途別

（出典）CBI Market data[8]より著者作成

図 3.7.3-2 は、世界のグリーンボンドの使途別の発行額である。2021 年はエネルギー、建物、運輸が大きな割合を占め、全体の 80%に及ぶ。

グリーン国債は 2016 年にポーランドが世界で初めて起債し、その後、フランス、ドイツ、英国、イタリア、カナダを含む、世界 22 ヶ国が発行を開始している（2022 年 3 月時点、財務省[9]）。ドイツ、英国、イタリアをはじめ、募集額を大幅に超える買い注文が生じていることから、世界的にグリーン国債への投資が加速していることがわかる[10)11)12)]。

発行体あるいは投資家にとってのグリーンボンドのメリットは定性的に示されている。例えば、Hadaś-Dyduch et al.[13] によると、発行体にとっての主なメリットは、①ESG 課題に対する実践の証明、②投資家からの需要が高い場合、発行規模拡大の可能性があること、③投資家層に関する多様性の向上、④グリーンボンドに対する投資家の「バイ・アンド・ホールド」が増えていることから流通市場での債券のボラティリティが低下する可能性、⑤レピュテーション効果（発行体のグリーン資格・実績やグリーン投資に対する支持の強化）、が挙げられている。一方、発行体にとっての主なデメリットは、①グリーン資格・実績に疑問が生じた場合の評判リスク、②管理、認証、報告、検証、モニタリングにかかる取引コスト、が指摘されている。

同様に、投資家にとってのグリーンボンド購入メリットは、①リスク調整後の財務リターンを環境便益で相殺することが可能、②ESG 要件への適合、③多排出資産を含むポートフォリオにおいて、気候政策リスクを積極的にヘッジするための資産担保証券（ABS）等の活用、④グリーンボンドのボラティリティが低い場合におけるリスクヘッジとしての活用、⑤発行体との ESG に関するエンゲージメントと対話、が考えられている。一方、投資家にとっての主なデメリットは、①市場規模が小さいため流動性が低い可能性があること、②統一されたグリーン基準がないため、グリーン統合が問題視された場合、評判リスクが生じる可能性があること、が挙げられている。

気候変動対策を含む環境分野における資金需要が増加する中で、グリーンボンドの発行額が拡大している。そのような世界の債券市場で、グリーニアムという現象が生じている。CBI の定義によると、グリーニアムやグリーンボンドのプレミアムとは、「債券発行市場で販売されるグリーン債券が流通市場で取引される同じ発行体の既存の債券と比して、低い利回り（高い価格）となる現象」である [14]。この場合、国や企業等の発行体にとっては、資金調達コストが抑制されるため、グリーニアムが継続すれば将来の安定的な資金獲得手段となるが、一方で投資家にとっては環境改善といった社会的な意義はあるものの、利回りが低いため資産運用上、どこまで許容できるかが課題となる。

3.7.4 GX 経済移行債と今後の課題

2022 年 12 月現在、日本政府は、2050 年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロにするために必要な投資を実現するため、新たに「グリーントランスフォーメーション（GX）経済移行債（仮称）」を創設し、国として 20 兆円規模の先行投資支援を実行することを検討している [15]。また、「移行債」として国際標準に準拠した発行を目指している。GX 分野はグリーン分野とトランジション分野に分類されるが、それぞれ国際的なグリーンファイナンスあるいはトランジション・ファイナンスに関する基準に沿った形での発行となるであろう。しかし、GX に向けた脱炭素技術には、原子力の活用が含まれているため、一般的なグリーン基準においては除外、もしくは条件付となる可能性がある。一方、トランジション・ファイナンスの国際基準は ICMA による気候トランジション・ファイナンスハンドブックが該当するが、トランジションに該当する具体的な技術の記載がないため、国際基準との整合性が課題となる。現在、諸外国における

グリーンボンドに対する投資家の需要が高まり、また近年、GFANZ による、多排出企業の脱炭素化への移行に資金を投じる傾向から、GX 経済移行債に対する需要が期待される。しかし、一方で、グリーニアムが生じた場合、どの程度投資家が低い利回りを受け入れるのか、その持続性については課題である。

また、近年、ESG 投資促進に反対する動きが米国でみられる。例えば、企業年金の運用者が ESG 要素を考慮して投資対象を選択することを認めた米労働省による規則[16]を無効にする決議案を、2023 年 2 月 28 日に、米議会下院において、賛成 216、反対 204 で可決、さらに、上院においても 2023 年 3 月 1 日に同決議案が 50 対 46 と賛成多数で可決した[17]。今後は、バイデン大統領が拒否権を発動するとの見方が強まっている。

ESG 投資を巡る制度的な課題についても議論が必要である。ロンドン・ビジネス・スクールの Edmans 教授は、2022 年 12 月に、「The End of ESG」[18]と題する論文を発表し、ESG がニッチな分野から主流のプラクティスへと進化することの必要性を説いている。その中で、ESG は非常に重要であるが、長期的な財務的、社会的リターンを生み出す経営品質、企業文化及び革新的能力といった他の無形資産と何ら変わりはないため、ESG の視点ではなく、長期的な価値の視点が重要であると主張している。さらに、長谷部（2022）[19]が指摘するように、ESG 評価に関し統一的な基準がないため評価機関毎に異なるスコアを防ぐためには、ESG 課題に関する各企業のマテリアリティを適切に判断し、その効果を検証することによって中長期的な企業価値の創造及びグリーンウォッシュの防止が実現できると期待される。グリーンボンド市場においても同様に、グリーン認証取得プロセスにおける課題を認識し、発行体及び投資家が直面する投資障壁を克服することによって、中長期的な企業価値の向上及び社会・環境の改善につながることを期待する。

参考文献（第 3.7 節に関するもの）

1) 長島美由紀:気候変動問題における金融部門の役割－ESG 投資及びグリーンボンドに関する定量分析の考察、『経済分析』、内閣府経済社会総合研究所、第 206 号 2023 年 (Forthcoming)
2) PRI: Signatory update: July to September (2022).
3) IEA: World Energy Outlook 2022, (2022)
4) GSIA: Global sustainable investment review 2020 (2021)
5) GSIA: Global sustainable investment review 2018 (2019)
6) GFANZ: Final report: Financial institution net-zero transition plans, November (2022)
7) ICMA: Green bond principles, June 2021 (with June 2022 Appendix 1) (2021)
8) CBI: Market data, https://www.climatebonds.net/market/data/ (2022 年 12 月 16 日アクセス)
9) 財務省：債務管理リポート 2022、(2022)
10) Reuters: Germany raises 6.5 billion euros from first-ever green bond, https://jp.reuters.com/article/bonds-green-germany/germany-raises-6-5-billion-euros-from-first-ever-green-bond-idUSKBN25T2UP (accessed on January 16, 2023) (2020)
11) Reuters: UK’s first green gilt draws record $137 billion demand, https://www.reuters.com/ world/uk/uks-first-green-gilt-draws-record-137-billion-demand-2021-09-21/ (accessed on January 16, 2023) (2021).

12) Bloomberg:“イタリア初のグリーンボンドに強い需要－ドイツの 2 倍以上”、https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2021-03-03/QPDX22T0AFB601（2023 年 1 月 16 日アクセス）（2021）
13) Hadaś-Dyduch, Monika, Blandyna Puszer, Maria Czech and Janusz Cichy: Green bonds as an instrument for financing ecological investments in the V4 countries, Sustainability, 14, 12188 (2022)
14) Harrison, Caroline: Green bond pricing in the primary market H1 2022, Climate Bonds Initiative, September (2022)
15) GX 実行会議：GX 実現に向けた基本方針（案）：今後 10 年を見据えたロードマップ、内閣官房、12 月（2022）
16) 米労働省：Prudence and Loyalty in Selecting Plan Investments and Exercising Shareholder Rights, https://www.federalregister.gov/documents/2022/12/01/2022-25783/prudence-and-loyalty-in-selecting-plan-investments-and-exercising-shareholder-rights, (accessed on March 9, 2023)
17) Bloomberg: Anti-ESG Bill Passes Senate as Biden Threatens First Veto, https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-03-01/republicans-anti-esg-bill-on-track-to-pass-senate-prompt-biden-veto?leadSource=uverify%20wall (accessed on March 9, 2023)
18) Edmans, Alex: The end of ESG, Financial Management, https://doi.org/10.1111/fima.12413 (2022)
19) 長谷部賢：マテリアリティの開示が株式資本コストに及ぼす影響について、Discussion paper series No. 67、DBJ Research Center on Global Warming（2022）

3.8 気候変動政策に伴う費用負担の格差拡大の課題

本事業ではこれまで、気候変動政策による国民の費用負担に関し、所得階層間で格差が存在し、かつその格差が様々な社会的あるいは制度的な要因により拡大してきていることを指摘してきた。平成 29 年度には、日本における家庭向け太陽光発電の余剰買取制度（FIT）が世帯にもたらす費用負担を、電力支出、PV 導入及び維持費用、電力賦課金を考慮したうえで所得階層別に分析し、低所得者層においてより負担感が増大していることを指摘した [1)]。また、令和 3 年度には、2050 年カーボンニュートラルの下での温暖化政策による日本の家庭部門の費用負担と世帯間の格差への影響の分析を通して、エネルギー消費量はベースライン比で低減するがエネルギーコスト負担額は増大し、負担感は低収入世帯ほど高く逆進性が認められることを明らかにした [2)]。さらには、様々な既往分析調査を通し、世界各国においてもエネルギー税や気候変動政策は世帯間に逆進的な影響をもたらし、これを緩和しうる適切な制度設計の必要性が議論されていることを確認してきた。

近年、多くの国、地域が 1.5℃目標に基づく 2050 年 CN 目標を宣言しており、多くの国は 2021 年の COP26 開催の前に NDCs 更新を発表した。しかし、これらの新しい NDC 実施に基づく 2030 年の世界 GHG 排出量では 1.5℃目標は達成できず、2030 年以降の急速な排出削減が求められるとされる [3)]。1.5℃目標達成に向け脱炭素化政策の導入を加速させていく過程で各国における国民負担はより増大していくとみられ、とりわけ低所得層への負担が不均衡に増大することが予見される。おりしも 2022 年 2 月に発生したロシアによるウクライナ侵攻を端緒として世界的なエネルギー危機と価格高騰がも

たらされており、欧州諸国によるロシア産天然ガスからの撤退がみられるとともに、アジア等の一部の国では石炭への一時的な回帰もみられている。このような状況下において 2050 年 CN 達成に向けた気候変動政策を深掘りしていくことは、費用負担の格差拡大に関する課題をより悪化させる可能性がある。

本項では、近年加速する 2050 年 CN 目標設定に基づく気候変動政策、あるいは近年のエネルギー価格の上昇が国民の費用負担に与える分布的な影響に関して、最近発表された文献や報告書を基に考察する。

3.8.1 気候変動政策による費用負担格差への影響

EU は 2050 年 CN 目標を積極的に推進する地域の一つである。2018 年の A Clean Planet for all[4]において 2050 年 CN 経済の実現を目指すことを公表し、翌 2019 年にはその行程表として欧州グリーンディール [5]を発表した。ここでは 2030 年 GHG 排出削減目標を従来の 1990 年比 40%から 50%に、さらに 55%へ引き上げることを提案するなど、具体的な目標や行動が示されている。これに関連し、欧州グリーンディールによる所得不均衡とエネルギー貧困への影響に関する報告書 [6]を 2022 年に発表している。具体的には、クリーンエネルギートランジションが所得分布、不衡平性、エネルギー貧困に与える影響の定性的・定量的評価を、グリーンディールの下での 2 シナリオに基づいて行い、2050 年 CN におけるエネルギー移行の社会的側面を検討した結果を示している。分析は E3Modelling チームと Cambride Econometrics が GEM-E3-FIT モデルを用いて行っている。

EU 各国内における所得の不衡平性は、産業構造や教育水準、労働賃金の不衡平性など各国の状況に起因し存在する。各国内における職業毎の賃金所得分布をみると、低スキル労働は各十分位に均等に分布している（図 3.8.1-1）一方、マネージャーや専門職などは高い十分位に偏って分布している（図 3.8.1-2）ことがわかる。

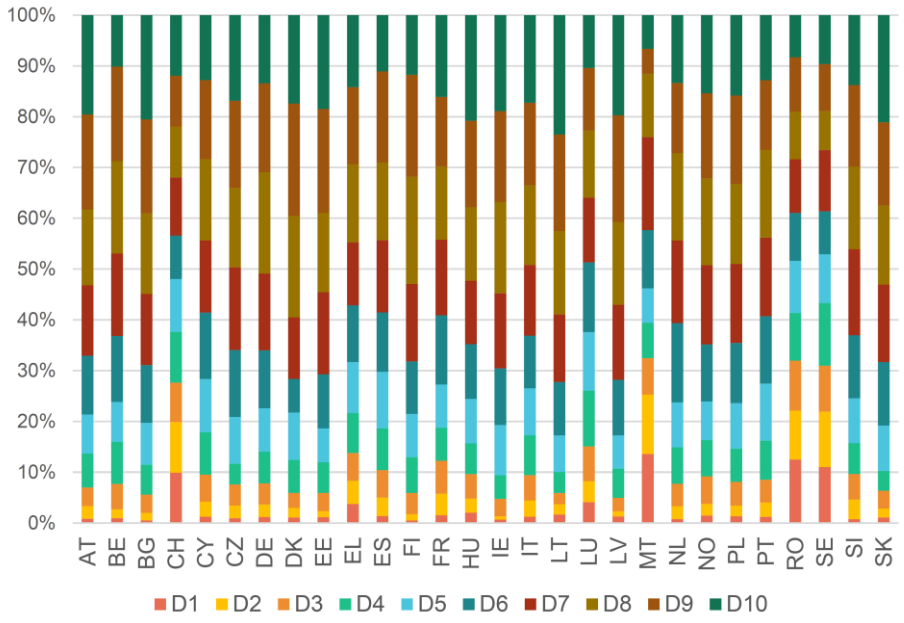


図 3.8.1-1 低スキル職業の賃金収入分布（2010 年）

（出典）文献 6)

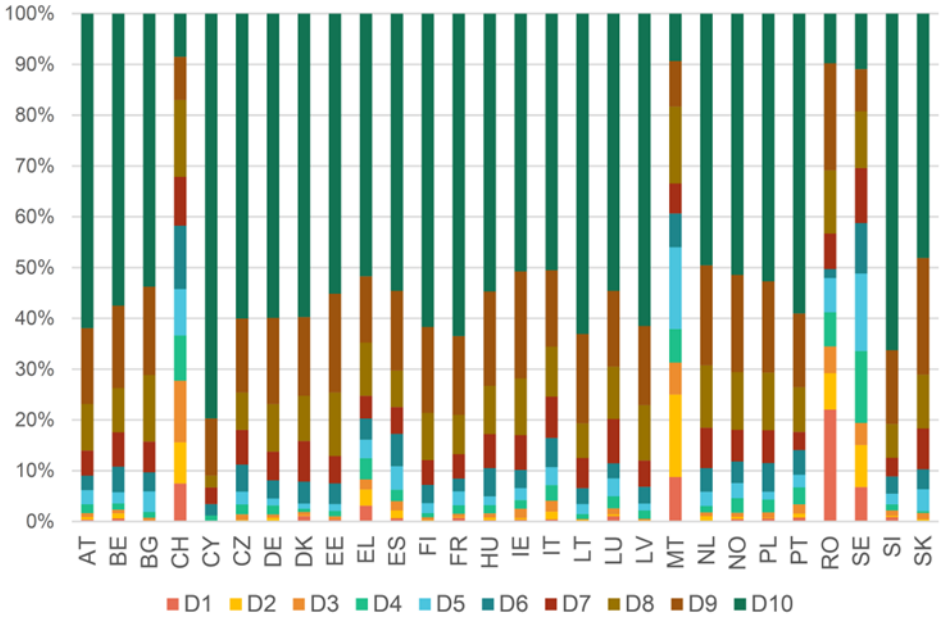


図 3.8.1-2 管理職の賃金収入分布（2010 年）

（出典）文献 6)

これらの現状に対し、欧州グリーンディール政策がどのように影響を及ぼすかを、ベースラインシナリオと COMB55 シナリオの 2 シナリオに基づいて行っている。ベースラインはややサービス志向で技術に優れた国内生産への移行を想定している。COMB55 シナリオはベースラインよりも野心的な気候行動を 2025 年より開始するシナリオであり、PRIMES の COMB55 と整合的なエネルギーシステム変化及び排出削減速度を取るシナリオとされる。家庭からの排出は ETS と同等の炭素価格を課され、その

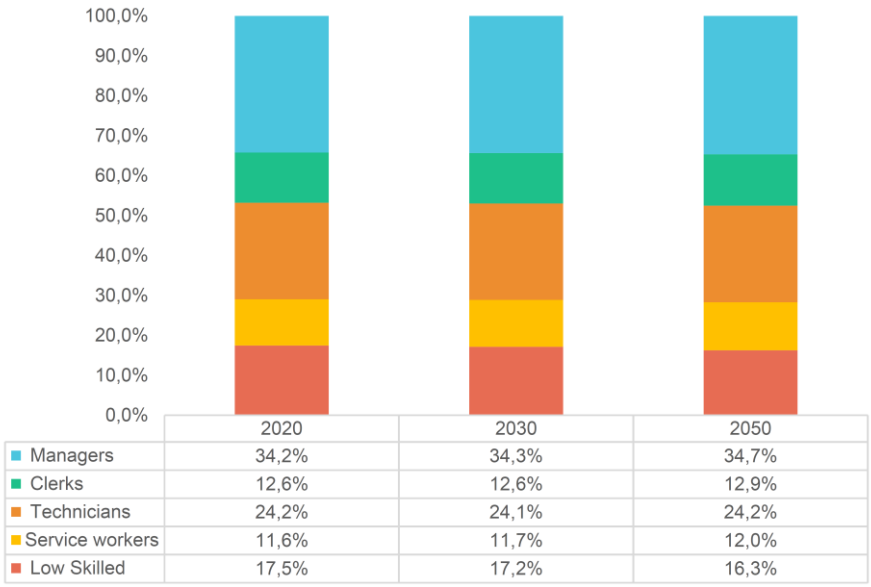
他部門は同等の課税もしくは EU-ETS オークションに参加するものとされている。また排出課税のレベニューは表 3.8.1-1 に示す総額を一括支払いもしくは社会保障負担で世帯に還元する政策を考慮している。EU 以外の地域については、グリーンディールベースラインシナリオにおける中庸な緩和行動をとると想定されている。

表 3.8.1-1　COMB55 シナリオにおける GHG 排出税及び EU-ETS オークションによるレベニューの再配分

Bl. € '2015	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Lump-sum to households	56.7	61.5	158.4	180.9	191.5	147.2
Social security contributions	30.5	33.1	85.3	97.4	103.1	79.3

（出典）文献 6)

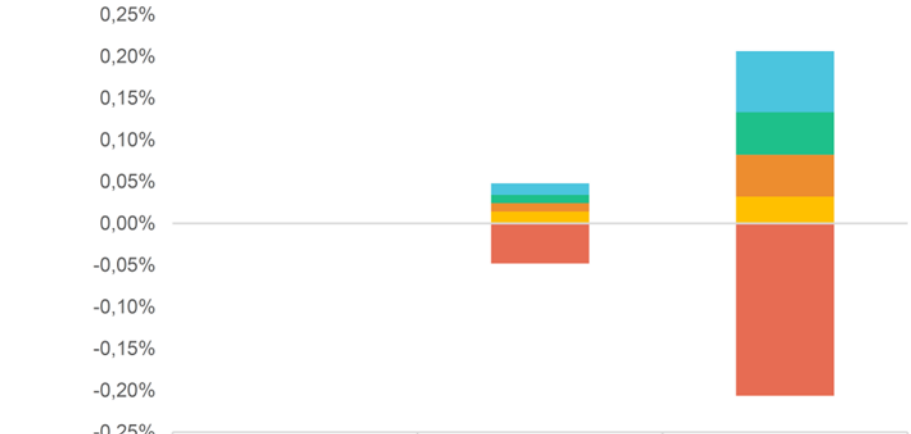
この 2 シナリオにおける所得不衡平性への影響、及びエネルギー支出指標の変化の分析が行われている。所得不衡平性への影響に関しては、ベースラインシナリオにおいては、労働需要が低スキルから高スキルへ移動するため、主として低スキル労働から収入を得る低所得世帯の収入は負の影響を受ける（図 3.8.1-3）。一方、COMB55 シナリオにおいては付加価値の高い労働需要が増大する（図 3.8.1-4）にもかかわらず収入の不衡平性は改善する。これは COMB55 シナリオで炭素税のレベニューを世帯に還元する政策を考慮しているため低十分位世帯の収入水準が高くなることによる（図 3.8.1-5）。2045 年まで、低所得層を中心に所得がベースライン比で増大し、第 1 十分位では 1.5～3%の増大がみられる。2050 年には多くの層で所得が減少するが第 1 十分位では唯一所得が増大する。



	2020	2030	2050
Managers	34,2%	34,3%	34,7%
Clerks	12,6%	12,6%	12,9%
Technicians	24,2%	24,1%	24,2%
Service workers	11,6%	11,7%	12,0%
Low Skilled	17,5%	17,2%	16,3%

図 3.8.1-3　ベースラインシナリオにおけるスキル別付加価値比率

（出典）文献 6)



	2020	2030	2050
Managers	0,00%	0,01%	0,07%
Clerks	0,00%	0,01%	0,05%
Technicians	0,00%	0,01%	0,05%
Service workers	0,00%	0,01%	0,03%
Low Skilled	0,00%	-0,05%	-0,21%

図 3.8.1-4　COMB55 シナリオにおけるスキル別付加価値比率のベースラインからの変化

（出典）文献 6)

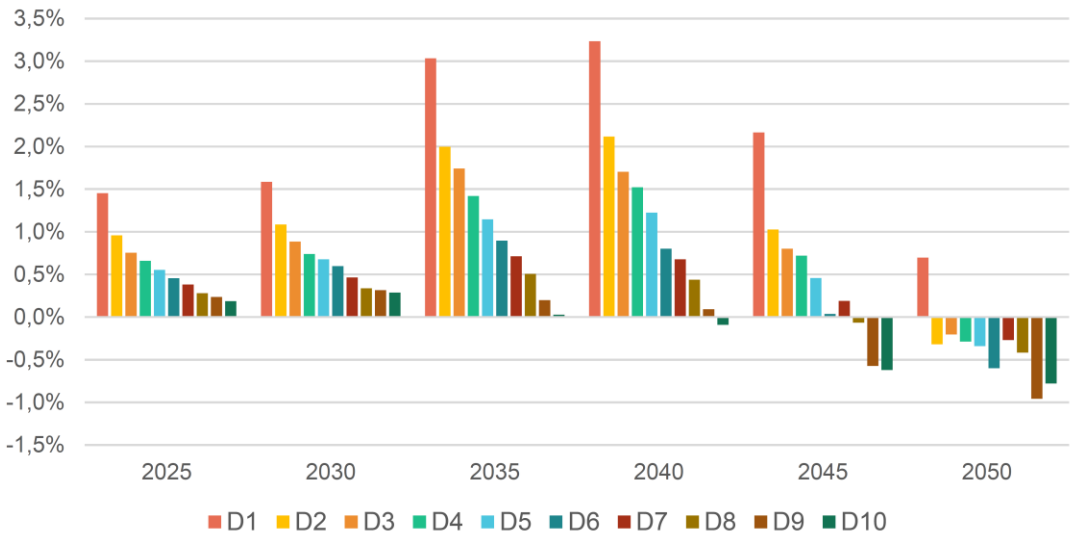


図 3.8.1-5　COMB55 シナリオにおける総所得のベースラインからの変化

（出典）文献 6)

ジニ係数の比較結果を図 3.8.1-6、図 3.8.1-7 に示す。ベースラインでは高スキルかつ資本集約型経済への移行により国内での所得不衡平性は時間とともに拡大するが、COMB55 シナリオでは所得不衡平性はベースラインよりもやや低下する。

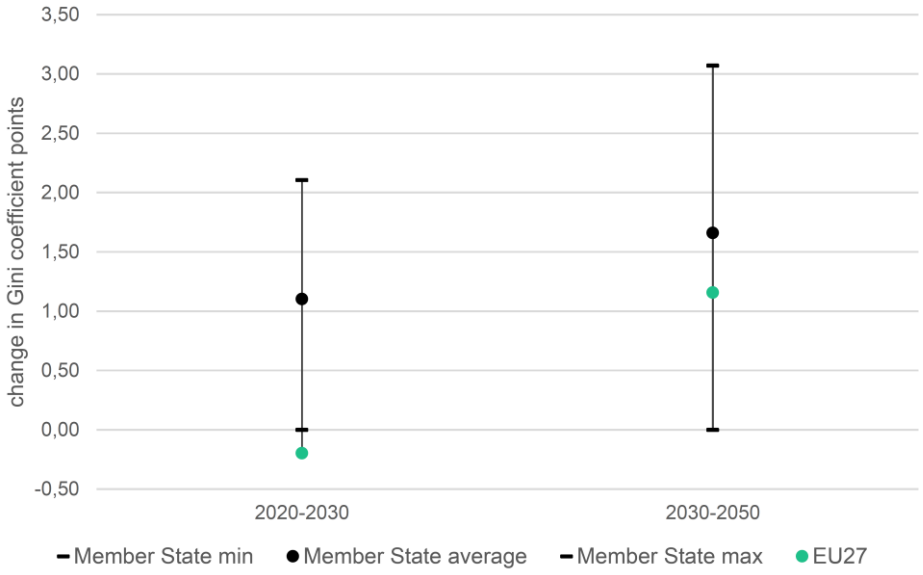


図 3.8.1-6　ベースラインシナリオにおけるジニ係数

（出典）文献 6)

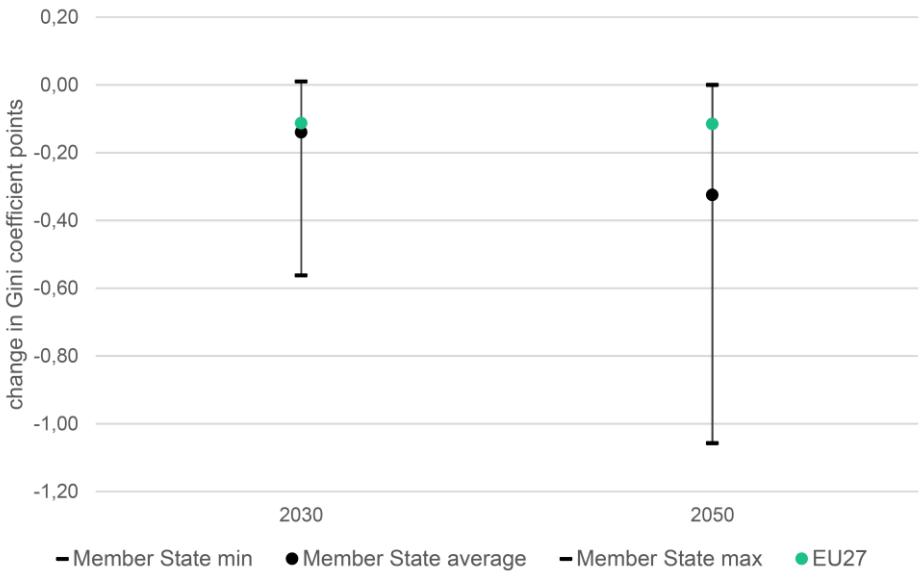


図 3.8.1-7　COMB55 シナリオにおけるジニ係数のベースラインからの変化
（出典）文献 6)

欧州グリーンディールによるエネルギー支出への分布的影響の分析結果については、ベースラインでは低所得層のエネルギー支出負担率が大きいが COMB55 シナリオではエネルギー支出そのものの比率が全体で減少し、エネルギー機器も考慮した指標では低所得層におけるエネルギー支出シェアは低下し不衡平性は軽減されるとしている。

本レポートでは、所得の不衡平性、エネルギー支出とも、グリーンディール政策のベースラインでは不衡平性に負の影響を与える可能性があり、家庭部門を含めた各部門への炭素課税とレベニューの再配分により世帯間の格差拡大は抑制できると結論付けている。これは各国による炭素レベニューリサイクルの適切な制度設計に依拠するものであり、公平なトランジション実現に向け、各国は部門別付加価値構造の状況を踏まえた社会保障制度設計を具体化することが必要となる。

3.8.2　エネルギー価格上昇による費用負担格差への追加的な影響

様々な既往文献によりエネルギーコスト上昇が家庭に対し分布的な影響をもたらすことが示されており、従って現在のエネルギーコスト上昇も同様な影響をもたらすことが考えられる。Guan et al.[7]は、ロシアによるウクライナ侵攻によって引き起こされたエネルギー危機が家計のエネルギーコスト（冷暖房、モビリティ）にもたらした直接影響と、その他の財・サービスのコストへの間接的影響の分析を行い、エネルギー貧困と世帯の支出階層間の不衡平性への影響を考察している。エネルギー危機前のエネルギーコスト、及びウクライナ侵攻開始後のエネルギー価格推移に基づく 9 通りの価格シナリオを設定し、世帯の支出階層別に与える影響を分析した結果、エネルギー危機によるエネルギー価格の上昇により世帯のエネルギーコストは 62.6-112.9%上昇し、世帯支出は 2.7-4.8%増大するとしている。7800 万～1 億 4100 万人が追加的に極度の貧困に、また 1 億 6600 万～5 億 3800 万人がエネルギー貧困に追いやられる可能性がある

と指摘している。支出階層間の不衡平性に関しては、多くの国で最貧世帯のエネルギー負担率が高く、高所得国のほとんどで逆進的であるが低所得国においては累進的な傾向がみられるとしている。また、エネルギー価格上昇による影響を受ける支出階層はその国の経済に依拠し、富裕国では低支出層への影響が高く、中～低所得国では、間接的な影響（電気、食料、その他）で低支出層への影響が大きいとしている（図 3.8.2-1）。

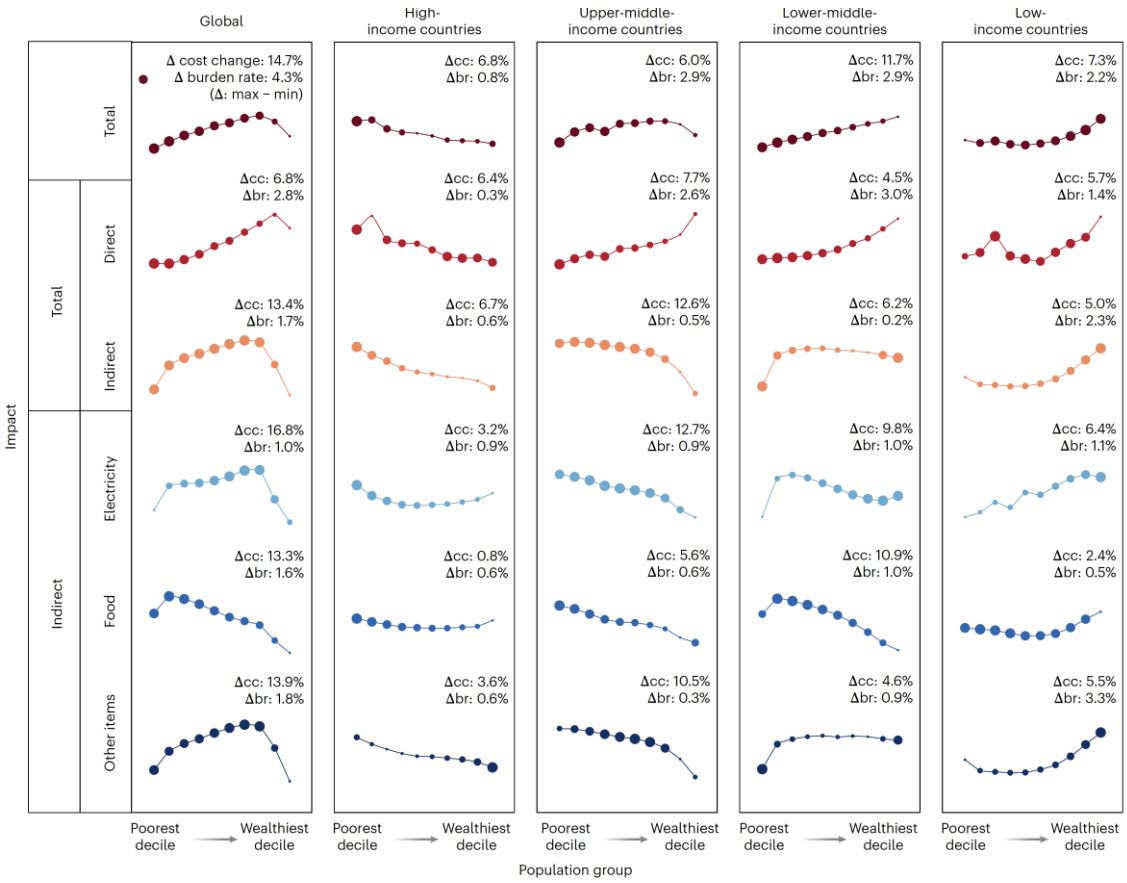


図 3.8.2-1　エネルギー価格上昇による支出十分位別の影響（SC1 シナリオ）

（出典）文献 7)

注：SC1-SC9 の価格シナリオは、2022 年 2 月 24 日以降の石炭及び石炭製品、原油及び石油製品、天然ガス価格の変化を反映したエネルギー価格シナリオ。SC1 は 2 月 24 日～9 月 13 日の平均価格に基づくシナリオ

IEA は、所得階層別のエネルギー消費（図 3.8.2-2）を示し、エネルギートランジションにおいて現在のエネルギー価格高騰は低所得世帯に過度の負担を強いていると指摘している [8]。先進国では収入が最も低い世帯層におけるエネルギー消費量は最も高い世帯層の 1/3 であるのに対し、新興国・途上国では 1/9 にとどまり、さらに数百万の世帯がモダンエネルギーにアクセスできていない状況である。それにもかかわらず貧困層では世帯収入に対するエネルギー支出シェアはずっと大きく、貧困層は効率の低い建物に住み低効率機器の利用や低品質の燃料を利用しているため、エネルギー価格高騰に対し不均衡に影響を受けると指摘している。

クリーンエネルギーへの移行と現在のエネルギー価格上昇において、貧困世帯への価格面での支援は重要だが、化石燃料への補助金はもっとも効率が悪く、富裕世帯や企業に利するのみならず、各国政府にとっても財政的負担となると述べている。STEPS では、化石燃料補助金を改革できなければ、家庭のエネルギー使用と個人の移動に対する補助金が 2030 年までに 15% 増加し、3,700 億米ドルに達する可能性があるが、NZE シナリオでは、化石燃料補助金を廃止しエネルギー効率と燃料転換をより重視することで、STEPS と比較して 2030 年の消費者のエネルギー支出が削減される（図 3.8.2-3）。しかし、エネルギーに収入の 10% 未満を費やす貧しい家庭に対しては、財政的支援を行う必要があり、エネルギーリベート、社会的関税などの的を絞った支援が、政府補助金の削減と貧困世帯への支援に有効であるとしている。

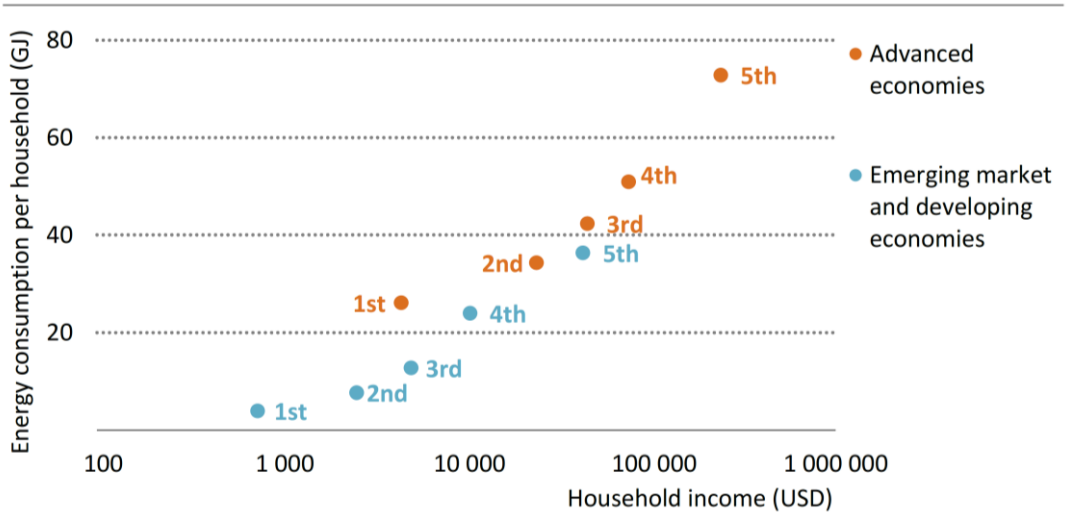


図 3.8.2-2 収入 5 分位別の世帯当たりエネルギー消費（2021 年）

（出典）文献 8)

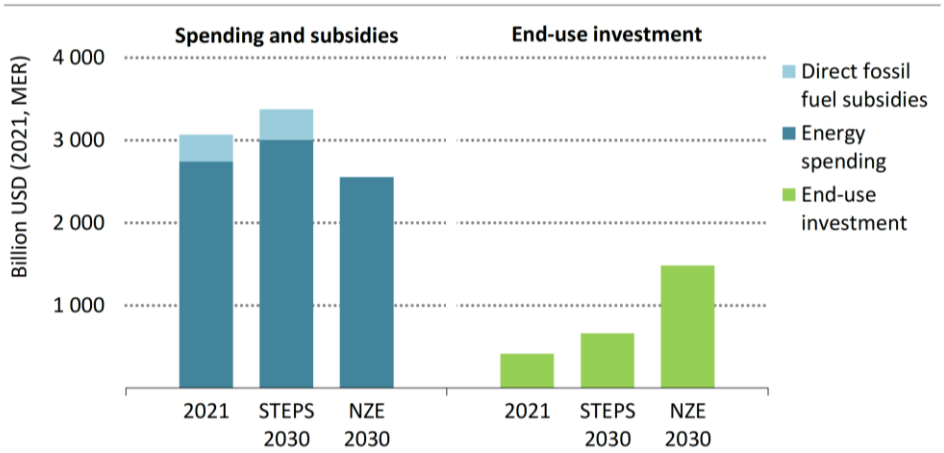


図 3.8.2-3 STEPS 及び NZE シナリオにおける消費者のエネルギー支出、補助金、最終部門における投資（2030 年）

（出典）文献 8)

3.8.3 まとめ

気候変動政策による世帯間の費用格差拡大に関する最近の分析において、分布的影響の緩和を考慮しない気候変動政策によって世帯間の不衡平性は拡大しうることが指摘され、クリーンエネルギーへの移行において貧困世帯への財政的支援は重要であることが議論されている。ただし、化石燃料への補助金は効率的でなく、エネルギー効率と燃料転換に焦点を当てた補助金とすることがより長期的な視点からは効率的との指摘もみられている。一方、最近のエネルギー価格上昇と気候変動政策の複合的な影響に関しては、定量的な分析を通した議論は未だなされておらず、どのような影響がもたらされうるかは今後分析、議論がなされていくものと考えられる。

各国における所得あるいは支出の分布は、産業構造や教育水準、労働賃金に依拠しうると指摘されており、クリーンエネルギー移行期におけるエネルギー価格上昇の家庭向け対策においては、家庭の直接エネルギー消費に対する支援のみならず、それぞれの国のエネルギーコスト構造を踏まえた支援制度を考慮することが重要であるといえる。

参考文献（第 3.8 節に関するもの）

1) H29 年度 ALPS 報告書(2018)
2) R3 年度 ALPS 報告書(2022)
3) IPCC WGIII AR6(2022)
4) European Commission: A Clean Planet for all (2018)
5) European Commission: The European Green Deal (2019)
6) European Commission: The impact of energy & climate policies on income inequality and energy poverty (2022)
7) Guan et al., Burden of the global energy price crisis on households, nature energy (2023)
8) IEA, World Energy Outlook 2022 (2022)

第4章　中期緩和対策（パリ協定国別貢献 NDCs）分析

パリ協定は、多くの国の参加を促すため、いわゆるプレッジ・アンド・レビューの仕組みを採用した。実際にそれは有効に働くと期待でき、ほぼすべての国が排出削減に取り組む枠組みができた。パリ協定では、すべての国が自主的に目標と達成方法を決め、それを国別貢献（NDCs）として 5 年ごとに提出する（第 4 条 2 項、第 4 条 9 項）。目標見直しにあたっては、従前の目標に比べて前進させるよう求めている（第 4 条 3 項）。また、効果的な実施を促すために、透明性を高めた形で、すべての国が共通かつ柔軟な方法でその実施状況を報告しレビューを受けるものとされた（第 13 条）。パリ協定が実効ある形で排出削減を行っていくためには、レビューをいかに適切に実施できるかが重要になると考えられる。ただし、COP24 で決定されたレビューの実施方法においては、各国 NDCs の適切さ、不適切さについてはレビュー対象とはならないため、UNFCCC の外での評価が重要と考えられる。

2021 年 4 月の気候変動サミットに前後して、先進国を中心に、NDCs の排出削減目標を引き上げがなされた。一方で、2021 年 COP26 では、グラスゴー気候合意において、「気温の上昇を摂氏 1.5 度に制限するための努力を継続することを決意する」とされ、そして「異なる国情を考慮しつつ、2022 年末までに、パリ協定の温度目標に整合するよう、必要に応じて各国の国が決定する貢献における 2030 年目標を再検討し、強化することを締約国に要請する」とされた。しかしながら、2022 年末までに NDCs の 2030 年排出削減目標を引き上げた国はわずかに留まった。

昨年度の本事業[1)]では、様々な指標を用いて、NDCs 排出削減目標の排出削減努力の評価を包括的に行ったが、2021 年 11 月 11 日までに提出された目標をベースに評価した。本年度は、2021 年 12 月 31 日までに提出された目標[2)]で更新を行った。本章では、最新の NDCs の排出削減目標の分析・評価を行った。まず、第 4.1 節で最新の NDCs の排出削減目標の状況について整理しつつ、最新の経済動向を踏まえ、複数の指標を用いて排出削減目標の排出削減努力に関する分析・評価を行った。第 4.2 節においては、NDCs の経済影響の分析を行うとともに、国際競争力への影響、また炭素国境調整税の効果についても分析した。第 4.3 節においては、関連する既往研究の調査・整理を行った。

4.1　2030 年の排出削減目標（NDCs）に関する分析・評価

4.1.1　世界各国の NDCs の排出削減目標の状況

2015 年の第 21 回国連気候変動枠組み条約締約国会議（COP21） で合意されたパリ協定で、2020 年以降の排出削減目標について、すべての国が国別貢献（NDCs: Nationally Determined Contributions）を策定し国連に提出して、それをレビューする、プレッジ・アンド・レビュー形式をとることとなった。2021 年 4 月の気候変動サミットに前後して、先進国を中心に、NDCs の排出削減目標を引き上げた。日本については 2030 年に 2013 年比▲26%としていた排出削減目標を 2013 年比▲46%に引き上げ、更に 50%減の

高みを目指して挑戦するとした。この目標に対応した日本のエネルギーミックスを含む、「第 6 次エネルギー基本計画」が策定され、地球温暖化対策計画も改定された（2021 年 10 月に閣議決定）。さらに、2021 年 10 月末より英国グラスゴーで開催された COP26 に合わせ、多数の国が従来の目標を更新した NDCs を提出、あるいは目標の更新を表明した。一方、中国、インド、ロシアなどは原則従来通りの排出削減目標である。

表 4.1.1-1 に、今回の分析・評価の対象とした国・地域について、2021 年 12 月 31 日までに国連に提出された NDCs の 2030 年目標、および公表されている NDCs やカーボンニュートラル（CN）宣言の状況を示す。

表 4.1.1-1　主要国の NDCs の排出削減目標

国・地域名	提出済み NDCs の 2030 年目標	公表されている NDCs、CN 宣言*
日本	2013 年比▲46%	2050 年 CN
米国	2005 年比▲50%～▲52%	2050 年 CN
EU **	1990 年比▲55%	2050 年 CN
英国	1990 年比▲68%	2035 年に 1990 年比▲78% 2050 年 CN
スイス	1990 年比▲50%	2050 年 CN
豪州	2005 年比▲26%～▲28%	2050 年 CN
カナダ	2005 年比▲40%～▲45%	2050 年 CN
韓国	2018 年比▲40%	2050 年 CN
メキシコ	BAU 比▲22% （BAU2030: 991MtCO_2eq/yr）	
トルコ	2021.10.11 NDC(conditional)提出	2053 年 CN
南アフリカ	2026～2030 年に 350～420MtCO_2eq/yr	2050 年 CN
ロシア	1990 年比▲30%	2060 年 CN
ウクライナ	1990 年比▲65%	2060 年 CN
カザフスタン	1990 年比▲15%	2060 年 CN
中国	GDP あたり CO_2 排出量を 2005 年比▲65%	2030 年に GDP あたり CO_2 排出量を 2005 年比▲65% 以上。2030 年より前に CO_2 排出量のピークを達成する。2060 年 CN
インド	GDP あたり GHG 排出量を 2005 年比▲33%～▲35%	2070 年 CN
サウジアラビア	2019 年比▲278MtCO_2eq/yr	2060 年 CN
パキスタン	BAU 比▲15% （BAU2030: 1603MtCO_2eq/yr）	
タイ	BAU 比▲20% （BAU2030: 約 555MtCO_2eq/yr）	2050 年 CN
マレーシア	GDP あたり GHG 排出量を 2005 年比▲45%	2050 年 CN
シンガポール	2030 年頃に GHG 排出量のピーク（65Mt CO_2eq/yr）達成。GDP あたり GHG 排出量を 2005 年比▲36%	
ブラジル	▲43%（2005 年比）	2060 年 CN
インドネシア	BAU 比▲29% （BAU2030：2.869GtCO_2eq/yr）	2060 年 CN

注) * 2020 年の気候野心サミット、2021 年の気候変動サミットで公表された、またはそれ以降に公表されたもの

** 2020 年 12 月 31 日以降は英国に適用されない

また、参考として、一部の EU 加盟国について個別の削減目標を表 4.1.1-2 に示す。

表 4.1.1-2 一部の EU 加盟国の独自の削減目標

国名	2030 年排出削減目標、CN 目標
ドイツ	1990 年比▲65%、2045 年 CN
ポーランド	2005 年比▲7%（ETS 対象外セクター）
ハンガリー	1990 年比▲40%、2050 年 CN
チェコ	2005 年比▲30%
フランス	1990 年比▲40%、2050 年 CN
イタリア	2005 年比▲33%（ETS 対象外セクター）
スペイン	1990 年比▲23%、2050 年 CN
ポルトガル	2005 年比▲45%～▲55%、2050 年 CN

4.1.2 NDCs の排出削減努力の評価

(1) 評価の指標・手法

各国がプレッジした NDCs の排出削減目標は、適切にレビューを行うことが重要である。各国の事情に差異がある中で、各国の事情を踏まえつつ、排出削減努力が平滑化されることが重要である。そのために、適切な指標を選択し、排出削減努力を計測することが必要である。ここでは、過去の検討[1)]に基づき、以下で述べるような指標について、評価を行った。

排出削減努力を計測することは、PDCA（Plan-Do-Check-Act）サイクルを確立する上で重要と考えられる。各国の排出削減努力の指標について、文献 4)は Comparability metrics として以下の原則を上げている。

- Comprehensive: 努力を包括的に捉えること
- Measureable: 計測できることが必要
- Replicable: 再現性があり、透明性があること
- Universal: できる限り多くの国に適用可能なこと

その上で、公平性・衡平性を一意に決める指標は存在しないので、複数の指標を多面的に評価することが必要としている。

各国 NDCs は、基準年（各国によって異なった基準年）からの排出削減率の目標、CO_2 原単位目標、成り行きケース（明確に定義されている場合もあれば、されていない場合もある）からの排出削減量・削減率目標など様々である。衡平な排出削減努力を測り、世界において効果的な排出削減を実現していくためには、これら約束草案を比較可能な形で指標化することが必要である。各種指標は、以下のように分類が可能である。

- 簡単な指標（簡単に計測、再現が可能）

- ➢ 同一の基準年に換算して算出した排出削減率　　等
- より高度な指標（より良く比較できるが、予測が必要）
  - ➢ ベースライン排出量からの排出削減率
  - ➢ GDP あたりの排出削減量・削減率　　等
- 更に高度な指標（最も包括的に比較できるが、モデル推計が必要）
  - ➢ エネルギー価格への影響
  - ➢ CO_2 限界削減費用
  - ➢ GDP あたりの排出削減費用　　等

これらを総合的に見ることによって、各指標の短所を補って、排出削減努力をより適切に評価できると考えられる。

本研究調査で、排出削減努力の比較評価対象とした国は表 4.1.1-1 であるが、昨年度の本調査事業で包括的に評価しており、それ以降の NDCs の排出削減目標の更新は少ないため、一部の指標のみを示す。

表 4.1.2-1 本研究で採用した排出削減努力の評価指標

排出削減努力評価の手法		概要	留意点等
排出量基準年比削減率（OECD諸国もしくは附属書I国にのみ適用）	1990年比／2005年比／2013年比など	ベースラインで排出が横ばいに近い場合には、単純に削減率の大きさを比較することで、BAU比削減率の代用とできる（BAU推計が不要となるメリット有）。OECD諸国等にのみ採用（潜在的に大きな排出増が予想される国に適用するには不適当なため）	各国それぞれの基準年に合わせて比較
	2019年比など最新年基準		最新実績からの削減率となるため、今後の削減努力の計測として相対的に良い。
一人あたり排出量（非OECD諸国かつ非附属書I国にのみ適用）	絶対値水準	OECD諸国等については、この指標を採用せず、基準年比削減率で評価	経済活動の大きさや国土の状況等に依拠しやすく、排出削減努力の指標とは言い難い面がある。
GDP比排出量（CO_2原単位）	絶対値水準	経済活動の大きさに見合ったCO2排出量水準を表すもの	GDPが低い国は悪い数値になりやすい。産業構造に依拠する。
	改善率（2019年比など）	排出量基準年比削減率に比べ経済成長率の違いが除きやすく、削減努力を測りやすい	GDPが低い国は、高いGDP成長率に伴って原単位改善率が良くなりやすい。
BAU比削減率		経済成長の違いなどを考慮できる。	過去の省エネ努力（更なる省エネの困難さ）、再エネ等の削減ポテンシャルは無視される。
CO_2限界削減費用（炭素価格）		経済成長、過去の省エネ努力、再エネなどの削減ポテンシャル等、各国の諸々の差異を含む指標で、削減努力の計測として妥当性が高い。	エネルギー税などによる既往の対策は外枠となる（ただしそれによって省エネが既に実現していれば限界削減費用も高く推計されるため、これも考慮されたものとも考えられる）。
2次エネルギー価格（電力、ガス、ガソリン・軽油）	2019年比など最新年の実績で加重平均）	限界削減費用は追加的な削減努力を表しやすい指標だが、本指標はベースラインに含まれる削減努力も含むような指標と考えられる。	事後評価であれば、市場価格で観測ができるが、事前評価においてはモデル推計となり、推計の不確実性が高い。
GDP比削減費用		限界削減費用は、経済力に応じた負担能力が考慮されないが、本指標は負担能力を含めた評価が可能	モデル推計となり、推計の不確実性が高い。

以下に NDC の排出削減努力の評価における留意点を列挙しておく。

- 各国の LULUCF 排出見通しや、排出削減については不確実性が大きく、その評価が困難であるため、本研究では基本的に取り扱っていない。

- 基準年比排出削減目標を提出している国については、基準年の排出実績（LULUCF 起源除く）に基づいて 2030 年の排出総量を算定し、評価した。なお、基準年の排出実績は、日本は温室効果ガスインベントリオフィス、日本以外の附属書 I 国は UNFCCC、その他の国は IEA のものを用いている。
- GDP 原単位改善目標を提出している国については、GDP の将来想定に基づいて 2030 年の排出総量を算定し、評価した。
- BAU 比削減目標を提出している国については、BAU の排出量についても NDC に明記されている場合、その値に基づいて 2030 年の排出総量を算定し、評価した。BAU の排出量が不明の場合は、明示的な評価を行わなかった（DNE21+モデルを用いる分析では、2030 年まで炭素価格を$0/tCO$_2$とした）。
- その他、対象年の排出総量の算定が困難な国（例：NDC において、個別の行動目標のみを記載）についても、上記の BAU 排出量が不明な場合と同じく、明示的な評価は行わなかった。
- 今回の NDC の排出削減努力の評価においては、2030 年 NDCs の CO_2 限界削減費用推計への影響を小さくするため、2030 年以降については、相対的に緩やかな 2℃（>66%）のカーボンバジェットを世界全体に想定して計算を行った。

以上の方針の下、世界全体に占めるエネルギー起源 CO_2 排出量および GDP（MER）の比率の高い国、23 カ国・地域について評価を行った。

(2) 各国排出削減努力の分析・評価結果

以下に表 4.1.2-1 で示した指標について、各国 NDCs の評価を行った結果を示す。

図 4.1.2-1 に 2013 年比の排出量を示す。また、表 4.1.2-2 に 1990 年比、2015 年比、2019 年比の排出量についても加えて示す。

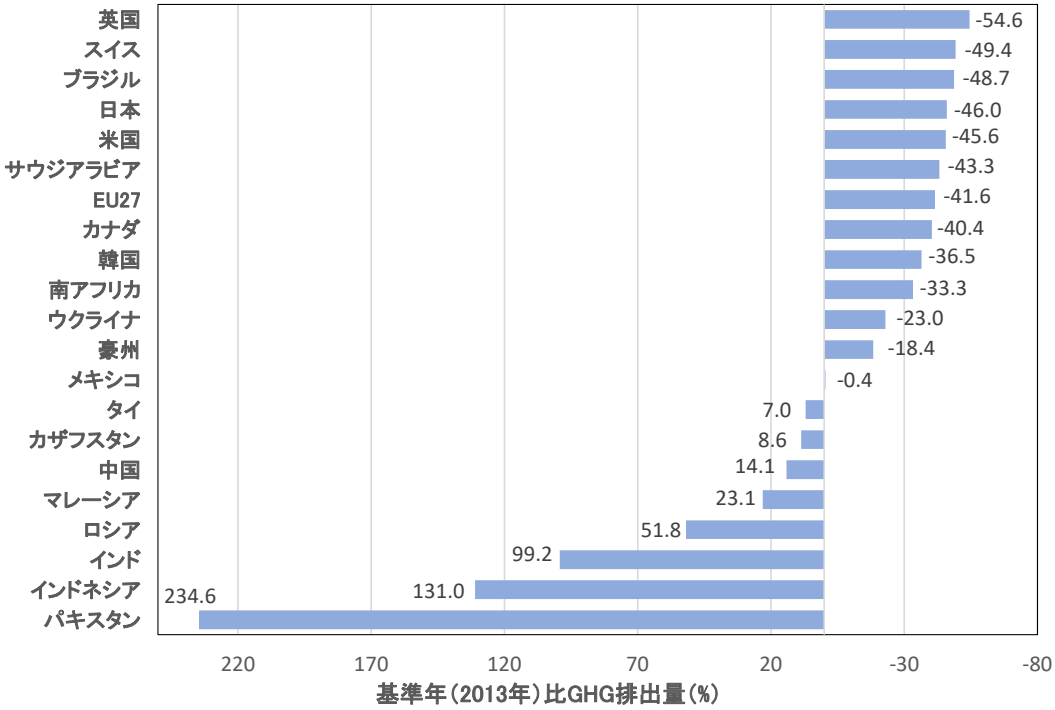


図 4.1.2-1 各国の 2030 年 GHG 排出量（2013 年比）

表 4.1.2-2 各国の 2030 年の GHG 排出量（各基準年比）

	基準年比排出削減率				
	1990年比	2005年比	2013年比	2015年比	2019年比
日本：2013年比▲46%	▲39.8%	▲43.8%	▲46.0%	▲42.5%	▲37.5%
米国：2005年比▲50%～▲52%	▲40～▲43%	▲50～▲52%	▲45～▲47%	▲44～▲46%	▲43～▲45%
EU：1990年比▲55%	▲55%	▲51%	▲42%	▲41%	▲38%
英国：1990年比▲68% ［公表値：1990年比▲78%（2035年)］	▲68% [▲78%]	▲63% [▲74%]	▲55% [▲69%]	▲50% [▲65%]	▲43% [▲61%]
スイス：1990年比▲50%	▲50%	▲51%	▲49%	▲44%	▲42%
豪州：2005年比▲26%～▲28%	▲26～▲28%	▲26～▲28%	▲17～▲20%	▲15～▲17%	▲13～▲15%
カナダ：2005年比▲40%～▲45%	▲18～▲25%	▲40～▲45%	▲38～▲43%	▲38～▲44%	▲39～▲45%
韓国：2018年比▲40%	+29%	▲28%	▲39%	▲40%	—
メキシコ：BAU比▲22% (BAU2030: 991$MtCO_2eq/yr$)	+67%	+13%	0%	+4%	—
トルコ：Conditional目標のみ	—				
南アフリカ：2026～2030年に350～420$MtCO_2eq/yr$	▲2.4～+17%	▲33～▲19%	▲39～▲27%	▲38～▲26%	—
ロシア：1990年比▲30%	▲30%	+51%	+52%	+49%	+36%
ウクライナ：1990年比▲65%	▲65%	▲24%	▲23%	▲1%	▲7%
カザフスタン：1990年比▲15%	▲15%	+12%	+9%	▲6%	▲13%
中国： CO_2排出原単位2005年比▲65% ［公表値：2005年比▲65%以上］	+274%	+76%	+14%	+12%	—
インド：GHG排出原単位2005年比▲33%～35%	+353～+340%	+191～+183%	+102～+96%	+91～+85%	—
サウジアラビア：2019年比▲278$MtCO_2eq/yr$	+56%	▲9%	▲43%	▲45%	▲42%
パキスタン：BAU比▲15% (BAU2030: 1603$MtCO_2eq/yr$)	+631%	+329%	+235%	+230%	—
タイ：BAU比▲20% (BAU2030：約555$MtCO_2eq/yr$)	+112%	+27%	+7%	+10%	—
マレーシア：GHG排出原単位2005年比▲45%	+287%	+55%	+23%	+18%	—
シンガポール：2030年頃にピークを65$MtCO_2eq/yr$ GHG排出原単位2005年比▲36%	+90%	+33%	+6%	+9%	—
ブラジル：2005年比▲43%	▲19%	▲43%	▲49%	▲47%	—
インドネシア：BAU比▲29% (BAU2030：2.869$GtCO_2eq/yr$)	+338%	+200%	+131%	+113%	—

注）

・各基準年比欄の[]内の数字は公表値の場合

・2013 年比は、IEA データにない一部の国については EDGAR データを使用（中国、南ア等）

・韓国の 2030 年排出量は NDC に記載の 2018 年値に基づく

・シンガポールは排出量目標に対する評価のみ

図 4.1.2-2 には、2030 年 NDCs 達成時の 1 人当たり GHG 排出量を示している。2030 年時点では、ブラジル、スイス、英国は小さい。また、インドは英国に次いで 1 人当たり GHG 排出量は小さいが、2015 年実績よりは排出が増加する見通しである。また、日本と中国は 2015 年実績では 1 人当たり GHG 排出量は近い水準（約 10tCO_2eq/人）であるが、中国は、2030 年には 1 人当たり排出量で見ても、日本よりも大きな数字になると推計される。

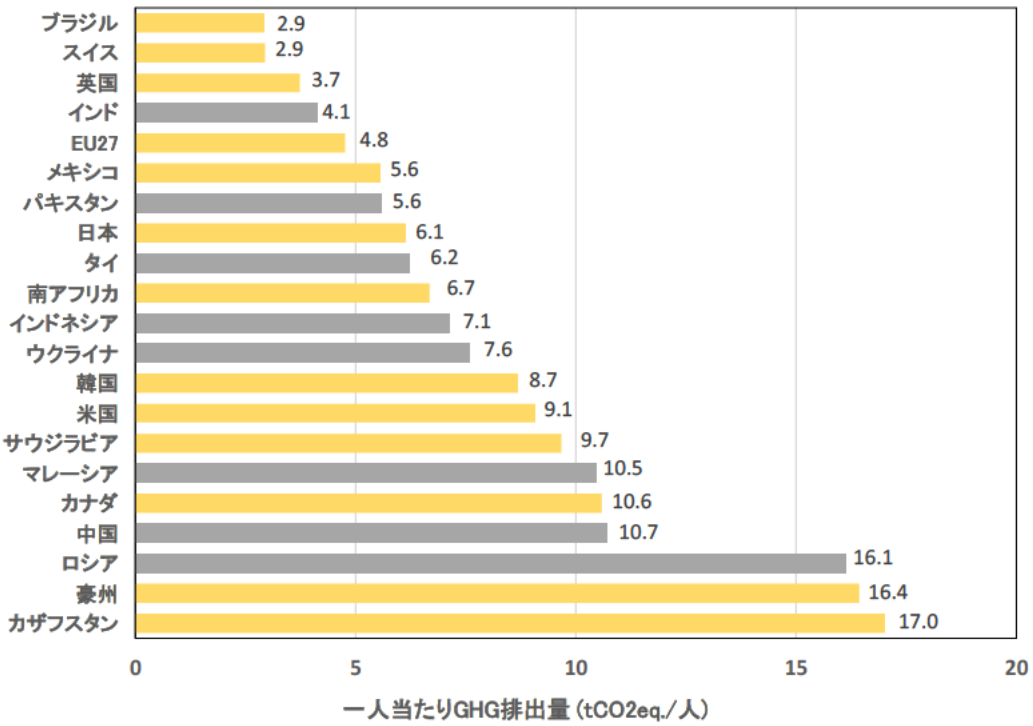


図 4.1.2-2 各国の 1 人当たり GHG 排出量（2030 年）
（2015 年比で 1 人当たり GHG 排出量が減少している国は黄色、増加している国は灰色で表示）

図 4.1.2-3 には 2030 年時点の GDP 当たり排出量を示す。スイス、英国、EU27、米国、日本の順で、GDP 当たり排出量が小さいと推計される。なお、GDP 当たり排出量は、産業構造にも影響される他、水力発電などの利用可能性にも大きく影響を受け、これらは排出削減努力とは無関係に決まっている面もあることは理解しておく必要がある。

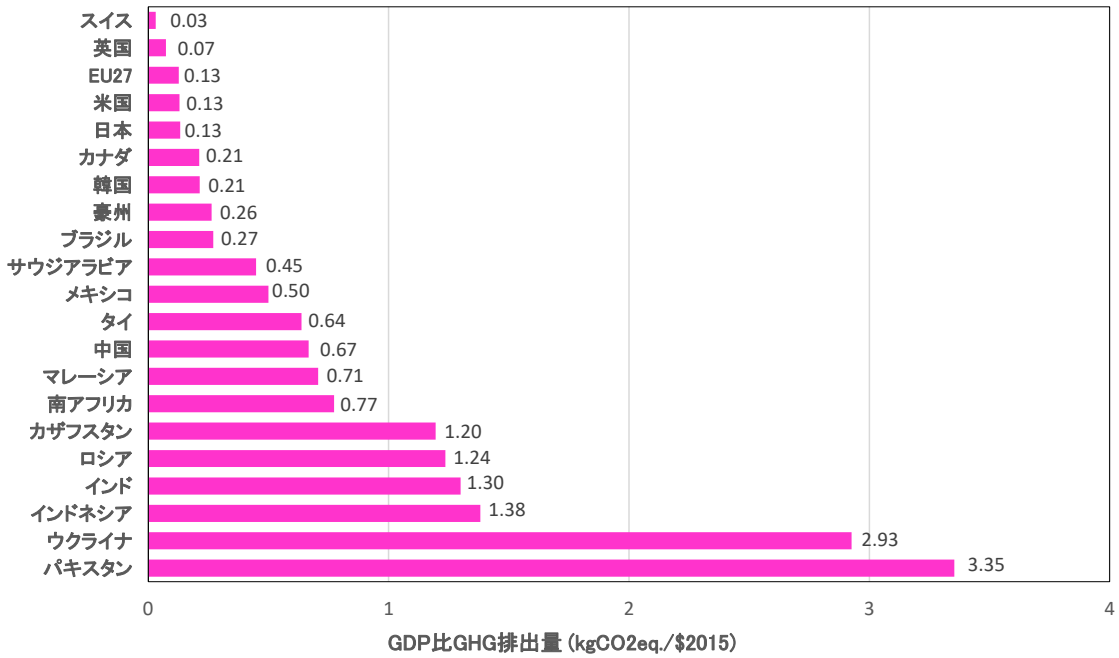


図 4.1.2-3 各国の GDP(MER)当たり GHG 排出量（2030 年）

図 4.1.2-4 には、DNE21+モデルで評価した、各国の限界削減費用を示す。日本、英国、EU27 では 400 $/tCO$_2$ を超える限界削減費用が推計される一方（EU27 が、共同達成ではなく、表 4.1.1-2 に示した独自の削減目標を仮にそれぞれ真水で達成するとすれば、イタリアやドイツの限界削減費用が高い）、発展途上国の限界削減費用は安く、インド等は限界削減費用が 0 $/tCO$_2$ でも達成可能（ベースラインで排出削減目標が達成可能）と推計された。なお、各国の NDCs の積み上げで期待される排出量を世界全体で最も費用効率的に達成する（限界削減費用均等化）とすれば、47 $/tCO$_2$ の限界削減費用になると推計された。

各国の CO_2 限界削減費用の評価は、国によって排出削減目標達成のための限界削減費用に大きな差異があるという結果であり、炭素リーケージも懸念される。排出削減努力が小さいと見られる国への目標引き上げの要請を強めていくことは重要であると言える。一方で、先進国と発展途上国のギャップが埋まる可能性は低いとの認識も必要である。パリ協定は、プレッジ&レビューの仕組みにより、多くの国の参加を得たものの、限界削減費用の各国間の差異は大きいままであり、パリ協定以外によるパリ協定を補完する枠組を志向する動きも強まってくると考えられる（例えば、EU の炭素国境調整措置（CBAM）提案やドイツの気候クラブ（Climate Club）提案等 [6])。

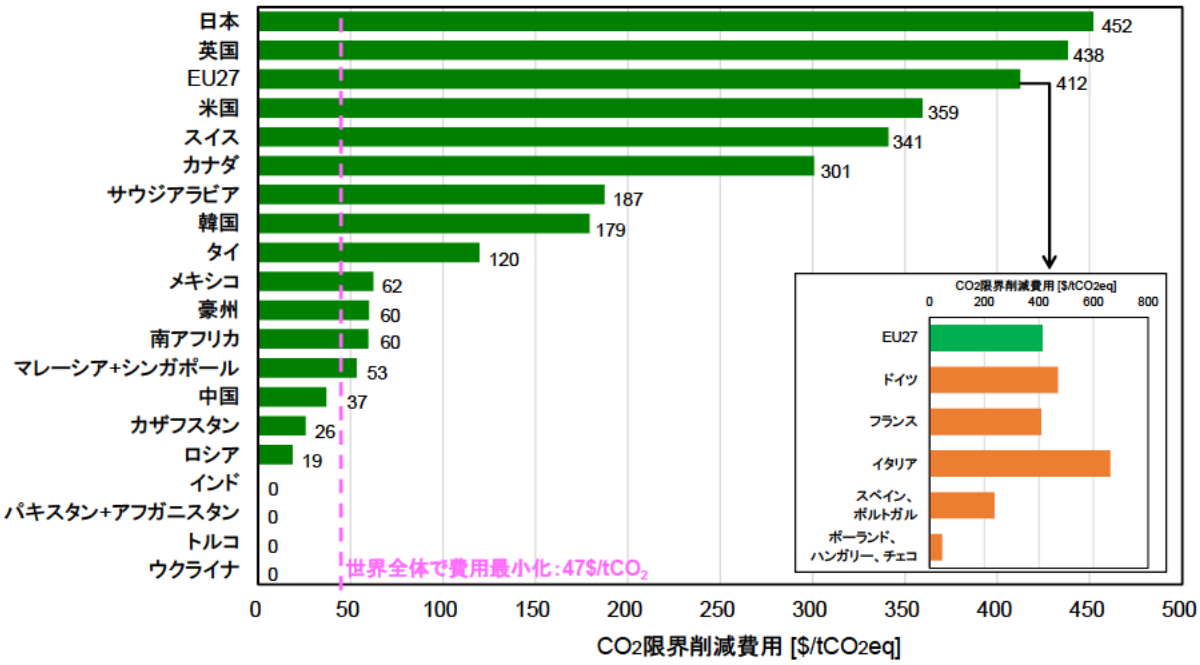


図 4.1.2-4 各国の CO_2 限界削減費用（2030 年）

注）ブラジル、インドネシアについては、土地利用変化による排出削減の寄与度が大きいと見られる一方、その不確実性が極めて大きいため、限界削減費用の推計をしていない。イランは、BAU の定義の不明確性が大きいため、費用推計していない。

(3) NDCs による世界全体での排出削減量の分析・評価結果

図 4.1.2-5 は、世界全体での NDCs の期待排出削減量の推計結果を示している。2030 年における世界全体の GHG 排出量は 50 $GtCO_2eq/yr$ 程度と推計され、UNFCCC 事務局による Synthesis レポートによる評価 [8]の 52.4 $GtCO_2eq.$（49.1～55.7 $GtCO_2eq.$、LULUCF 除く）や、UNEP による評価 [9]の約 52 $GtCO_2eq.$（49～54 $GtCO_2eq.$、Conditional NDCs）等と整合的である（第 4.3.1 節も参照）。なお、UNEP のレポートでは、NDCs の期待排出削減量と 2℃、1.5℃排出経路とのギャップが強調されている。今回の DNE21+モデルによる推計では、DACCS 等の CDR を想定したカーボンバジェットでの最適化計算によると、気温の一定程度のオーバーシュートを許容するなら、必ずしも 2030 年 NDCs は 2℃、1.5℃が不可能な水準という訳ではなく、寧ろ費用効率的な排出経路になり得る可能性も示唆される。

1.5℃目標の世界 CO_2 排出経路も、様々な可能性があると整理されている [10),11)]。BECCS の場合、食料供給や生物多様性とのトレードオフの懸念は大きいが、DACCS の場合、これらの懸念は小さい。費用対効果の高い対策をとることが重要であるので、様々な技術の活用を前提に、負排出の可能性を必ずしもネガティブに捉える必要はないと考えられる。

先述のように、また図 4.1.2-5 でも記載しているように、NDCs で期待される世界排出削減量を世界費用最小で達成しようとすれば、47 $\$/tCO_2$ の限界削減費用相当と計算された。一方、日本の NDC の 2013 年比 46%減を達成するための限界削減費用は、DNE21+の計算では 452 $\$/tCO_2$ 相当であったが、この限界削減費用が世界全体で均等化

した場合には、世界 GHG 排出量は 32 $GtCO_2$/yr 程度と推計された。このとき、UNEP が参照している 1.5℃シナリオの 2030 年推計値とほぼ整合的と言える。ただ、この場合、途上国の大幅な NDCs 排出削減目標の深堀が必要であり、現実性はかなり乏しいと言わざるを得ない。この点からも、CDR を含む技術革新によって、2030 年以降の大幅排出削減に注力することが、1.5℃シナリオ実現の可能性としてはまだ高いように思われる。

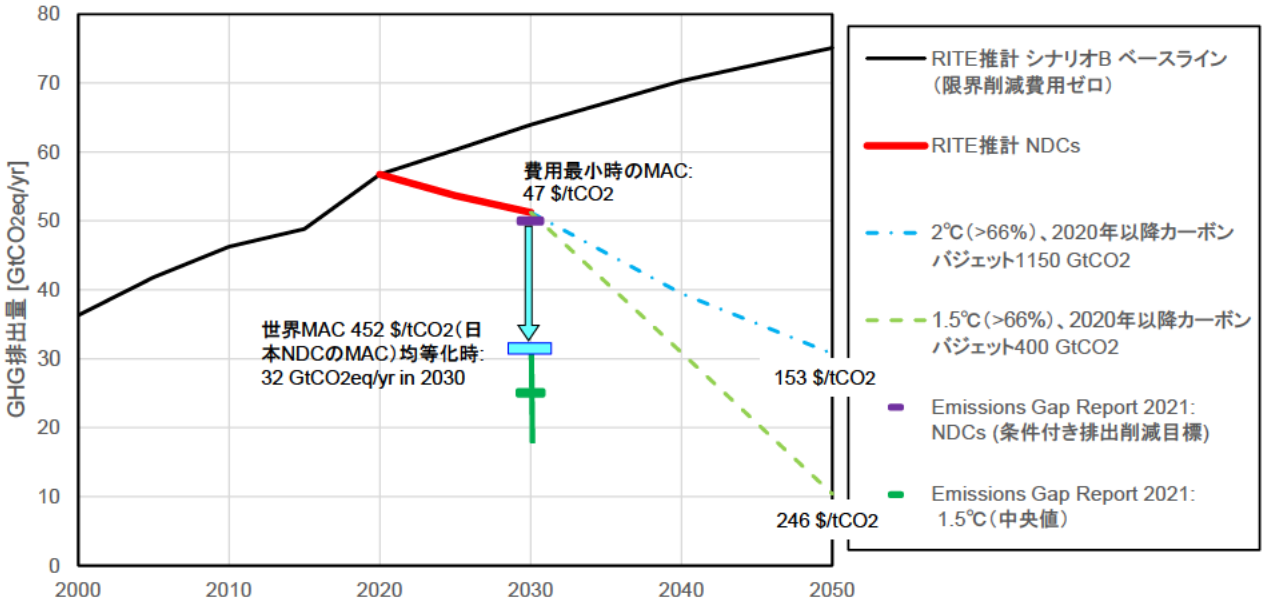


図 4.1.2-5 世界全体での NDCs の期待排出削減量推計

参考文献（第 4.1 節に関するもの）

1) RITE、令和 3 年度地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業成果報告書、2022
2) UNFCCC; All NDCs, https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/All.aspx (最終アクセス日：2021 年 12 月 31 日)
3) RITE、平成 27 年度地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業成果報告書、2016
4) J. Aldy, B. Pizer, Comparability of effort in international climate policy. Harvard Project on Climate Agreements Discussion Paper 14-62, 2014
5) J. Aldy, B. Pizer, K. Akimoto, Comparing emission mitigation efforts across the countries, Climate Policy, Vol.17, Issue 4, pp. 501-515, 2017
6) 産業技術環境局・資源エネルギー庁、カーボンニュートラル実現に向けた国際戦略、第 4 回産業構造審議会産業技術環境分科グリーントランスフォーメーション推進小委員会/総合資源エネルギー調査会基本政策文化会 2050 年カーボンニュートラルを見据えた次世代エネルギー需給構造検討小委員会合同会合、2022
7) IEA, OECD Energy Prices and Taxes quarterly, 2021
8) United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): Nationally determined contributions under the Paris Agreement – Synthesis report by the secretariat, October 26 (2022).

9) UNEP, Emission Gap Report 2022. https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2022
10) IPCC, Special Report on Global Warming of 1.5℃, 2018
11) IPCC WG3、第 6 次評価報告書 (2022) https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

4.2 国際競争力への影響・国境調整税の評価

4.2.1 はじめに

近年、パリ協定のプレッジ&レビュー方式のもとで、先進国を中心により野心的な目標として NDC 削減目標が大きく引き下げられている一方、削減努力に差異があり、経済や環境、政治的な観点から、課題を提起している。特に、炭素価格（明示的な価格だけではなく暗黙的な価格も含む）が地域によって大きく異なる場合、国際競争力や排出量リーケージに悪影響を及ぼす可能性がある。欧州連合（EU）は、産業国際競争力の維持と炭素リーケージの防止を目的に、炭素国境調整措置（CBAM: Carbon Border Adjustment Mechanism）の制度設計を行い、その導入を予定している（CBAM の動向などは第 4.2.3 節参照）。そこで、本節では、2030 年 NDC 排出削減目標下における国境調整措置に関する分析を行った。EU-CBAM と同様にエネルギー多消費貿易依存産業 (EITE: Energy-Intensive and Trade-Exposured)に対する CBAM に焦点を当て、CBAM が導入された際の影響分析を実施した。世界エネルギー・経済モデルを用いて、世界各国 NDCs の下での CBAM の効果の評価を行った。また、米国 RFF やイタリア CMCC の 2 つのモデルを用いて、ベースライン GDP 等の前提条件を調整したうえで、NDC 排出削減目標下における CBAM のシナリオ分析も行った。なお、EU の制度では CBAM と呼ばれるが、既往文献の中には BCA (Border Carbon Adjustment)が使われることもある。また、国境炭素調整や気候クラブ、国際競争力に関する研究事例の調査も行った。

4.2.2 国境炭素調整に関するモデル分析

(1) 分析方法

本分析で用いた世界エネルギー経済モデル DEARS[2)]は、世界を 18 地域に分割した、トップダウン型経済モジュールとボトムアップ型エネルギーシステムモジュールの統合モデルである。世界全体の消費効用最大化を目的関数とした、動的非線形最適化モデルである。経済モジュール（一般均衡モデル構造型）では、非エネルギー18 産業を想定し、国際産業連関表 GTAP (Global Trade Analysis Project) Ver.9 データベース [5)]に基づく産業連関構造を明示し、産業構造や貿易構造を明示化したモデル化をしている。モデルでは、2 地域間の産業別の輸出入構造を明示的に扱っているため、国境炭素調整などのような特定の地域に対する関税の影響などを分析することが可能である。エネルギーモジュールでは、一次エネルギー8 種類を想定した、ボトムアップによる簡略化したエネルギーシステムを明示化し、エネルギーバランスや発電構成などを扱うことが可能である。IEA[3)]のエネルギーバランス表を 2010 年基準年値として利用し、それに合致するように国際産業連関表を調整した。各化石燃料の供給曲線は RITE[4)]や Krey ら[6)]をベースに想定した（昨年度 [1)]より更新）。

表 4.2.2-1 には、シナリオ分析のシミュレーションケースの想定を示した。ここでは、2030 年の各国の NDC 排出削減目標（表 4.2.2-2）をもとに、国境調整措置による影響を評価した。国境調整措置としての炭素関税は、クラブと非クラブの炭素価格差に基づいて決定されると想定した。炭素価格・炭素関税による税収は、その他の税と同様に、政府収入として政府消費に用いられると想定した。この点に関しては、税制中立を維持することなどが考えられるため、今後検討が必要である。クラブの構成は、欧州・米国・日本を想定した。欧州は 、EU と非 EU 欧州諸国（英国、ノルウェイ、スイス、アイスランド）を表す。気候クラブに関して、Nordhaus[20]の気候クラブ（狭義の定義）と同様に、クラブ内では同一炭素価格を想定し、国境調整措置を実施する際にはクラブ外の輸入品に対して実施し、クラブ内では追加の関税が生じないと想定した。ベースラインの GDP と CO_2 排出は、IEA[7]の current policy scenario（COVID-19 影響は含まれていない）に合うように各種パラメータを調整した。

エネルギー多消費産業 EITE(Emissions-Intensive Trade-Exposed)は、鉄鋼、化学、非鉄金属、窯業土石、紙パルプ産業を対象とした。輸出リベートは、EITE の輸出品に対する 100%減免を想定した。本分析の CBAM に関する CO_2 排出量の対象範囲は、スコープ 1（直接排出）とスコープ 2（電力に関する間接排出）である。炭素関税を避けるために生じうる、非クラブにおける削減対策強化などは想定していない

表 4.2.2-1 シミュレーションケースの想定

<table>
<tr><th rowspan="2">ケース名</th><th colspan="4">クラブ</th><th colspan="2">非クラブ</th></tr>
<tr><th>メンバー</th><th>削減目標</th><th>CBAM
(輸入限定)</th><th>輸出
リベート</th><th>メンバー</th><th>削減目標</th></tr>
<tr><td>NDC</td><td rowspan="4">欧州、
米国、
日本</td><td rowspan="4">NDC削減目標を
共同で達成。
（クラブ内は同
一炭素価格）</td><td rowspan="2">無</td><td rowspan="3">無</td><td rowspan="4">中国、
その他</td><td>各地域NDC削減目
標を達成</td></tr>
<tr><td>Club+CTAX0</td><td rowspan="3">無
（炭素価格ゼロ）</td></tr>
<tr><td>Club+CTAX0
+BCA</td><td rowspan="2">有
(非クラブから
のEITE輸入
品に対して)</td></tr>
<tr><td>Club+CTAX0
+BCA
+ExRebate</td><td>有</td></tr>
</table>

表 4.2.2-2 各国の 2030 年 NDC 排出削減目標

	2030年 NDCs削減目標
EU	▲55% （1990年比）
英国	▲68% （1990年比）
米国	▲50% ～▲52%（2005年比）
日本	▲46% （2013年比）
カナダ	▲40%～▲45%（2005年比）
豪州	▲26%～▲28%（2005年比）
中国	▲65% of CO2 intensity（2005年比）
インド	▲33～▲35% of CO2 intensity（2005年比）

(2) DEARS モデルによる分析結果

NDC 達成するための推計炭素価格は、国によって大きく異なり、30 年のクラブ内の限界削減費用（炭素価格）は 161[$/tCO₂]と推計され、一方、中国とインドでは、それぞれ 49、3[$/tCO₂]と相対的に低い炭素価格が推計された。

図 4.2.2-1 には、代表的なエネルギー多消費産業である鉄鋼産業の生産と純輸入へのケース別影響を示した。炭素価格が高いクラブの鉄鋼産業などのエネルギー多消費産業では大きな悪影響を受け、生産減少や純輸入増加が推計された（NDC ケース）。クラブの野心的な NDC 削減目標のもとでは、 クラブ全体の鉄鋼産業の生産量の減少、純輸入の増加となり、国際競争力は大きく悪化する（NDC、Club-CTAX0 ケース）。CBAM の導入（Club-CTAX0+CBAM ケース）により、リーケージの一部を軽減し得るものの、CBAM 効果は NDC 達成のために生じる悪影響に比べかなり小さいと推計される。さらに、輸出リベートを実施することで、生産と輸出の損失を大きく軽減できる可能性が大きい。鉄鋼業における輸出リベートの影響は、輸入限定の CBAM よりも非常に高い可能性がある（Club-CTAX0+CBAM+ExRebate ケース）。ただし、輸出リベートは WTO ルールを満たさない可能性が高い点に留意が必要である。

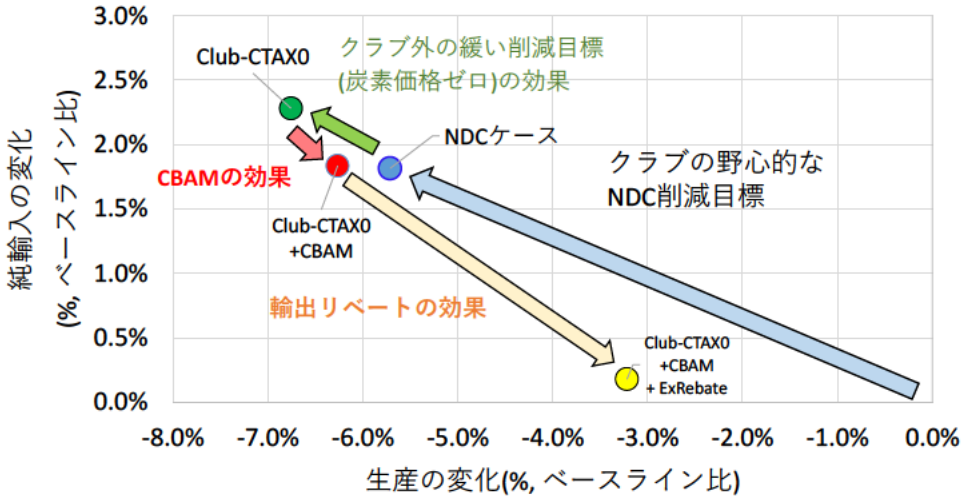


図 4.2.2-1 欧州・米国・日本の鉄鋼産業の生産・純輸入への影響（2030 年）
注記：両軸の変化%は、ベースライン生産量を用いて規格化

クラブ内の地域別影響を比較するために、図 4.2.2-2 と図 4.2.2-3 には、クラブを構成する欧州と日本の鉄鋼産業への影響をそれぞれ示した。欧州と日本の鉄鋼はともに輸出超過の産業であり、2030 年のベースラインの純輸出はそれぞれ+13%、+4%（生産比）である。しかし、両地域の CBAM（輸入限定）や輸出リベートによる影響は異なる。日本の CBAM 効果は、欧州に比べ非常に小さい一方、日本の輸出リベート効果は大きいと推計された。欧州と日本では産業構造や輸出構造が異なるため、輸入に限定された CBAM の効果の大きさはクラブ内でも大きく異なる可能性があり、慎重に検討する必要がある。

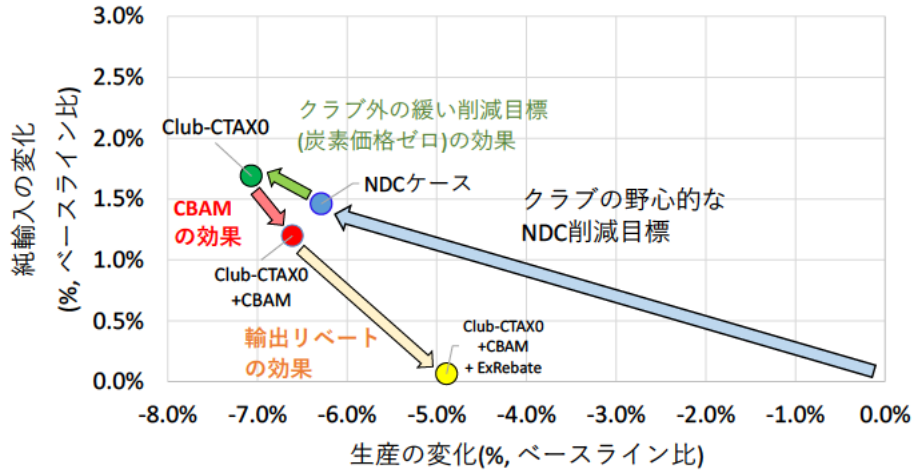


図 4.2.2-2 欧州の鉄鋼産業の生産・純輸入への影響（2030 年）
注記：両軸の変化%は、ベースライン生産量を用いて規格化

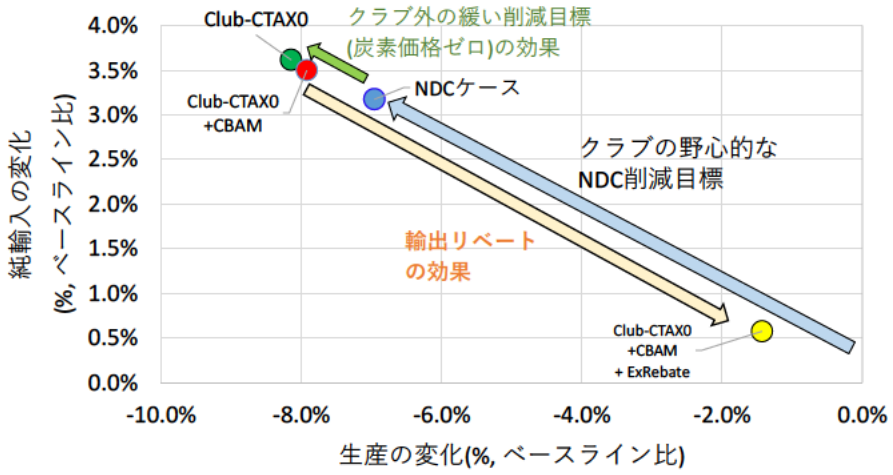


図 4.2.2-3 日本の鉄鋼産業の生産・純輸入への影響（2030 年）

注記：両軸の変化%は、ベースライン生産量を用いて規格化

図 4.2.2-4 と図 4.2.2-5 には、エネルギー多消費産業の CBAM（輸入限定）をクラブ加盟国が実施した際の、クラブ加盟国全体（欧州、米国、日本）と非加盟国全体の産業への影響をそれぞれ示した。すなわち、図 4.2.2-4 は、CBAM 導入によって軽減された、クラブ加盟国の生産ロスを表している。クラブが CBAM を実施した際には、CBAM の対象範囲ではない産業の一部に悪影響を及ぼす可能性があることが示された。CBAM の正の効果として、クラブでは、CBAM 課税の対象である鉄鋼や化学などのエネルギー多消費産業の輸入価格が上昇し、国際競争力が改善するために、クラブ全体のエネルギー多消費産業の輸入が減少し、代わりに国内生産や輸出が増加すると推計された。一方、クラブでは NDC 排出目標を達成するために、CBAM 実施によるエネルギー多消費産業の生産量増加に伴う CO_2 排出増加の影響を相殺する必要があり、CBAM 対象範囲外の産業の生産量などを、NDC ケースよりも減少させる必要が生じる負の効果が推計された。そのため、CBAM の対象範囲ではない、サービス産業などの一部の産業に悪影響を及ぼす可能性が大きく、マクロ経済全体では悪影響が及ぶ（負の効果の方が大きい）可能性が推計された。一方、非加盟国では、CBAM によりエネルギー多消費産業の生産はかなり減少するものの、機械産業などの生産が増え、マクロ経済全体を表す GDP はわずかに増加する可能性が推計された。CBAM の制度を設計する際には、対象とする産業だけではなく、対象外の産業やマクロ経済全体への影響も考慮する必要があり、包括的な産業政策を考慮しつつ、より望ましい制度設計を構築する必要がある。

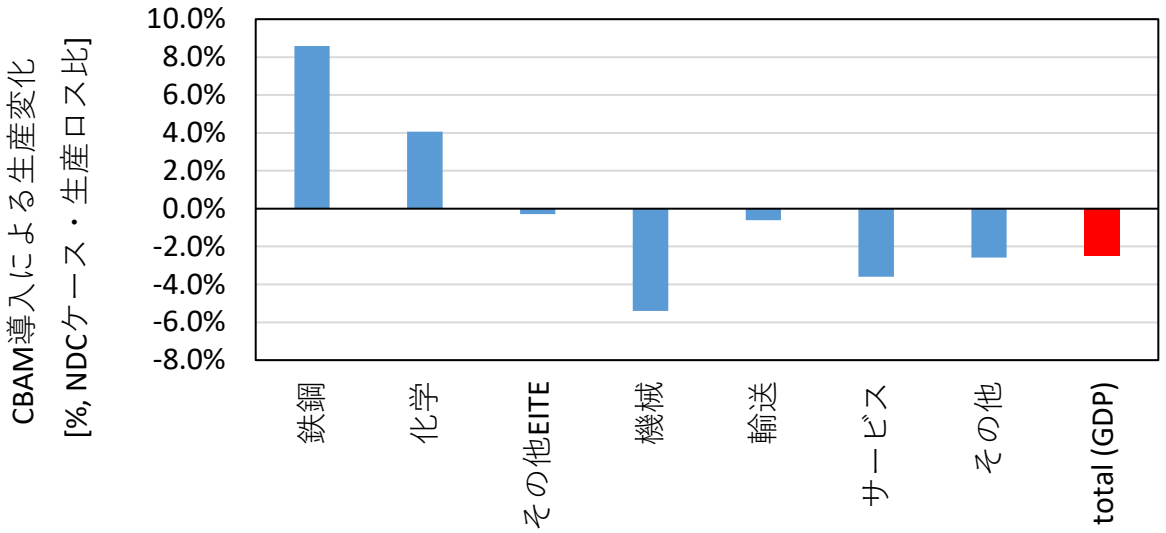


図 4.2.2-4 エネルギー多消費産業 EITE への CBAM をクラブ加盟国が導入した際の、各産業への影響（クラブ加盟国全体（欧州・米国・日本の合計）、2030 年）

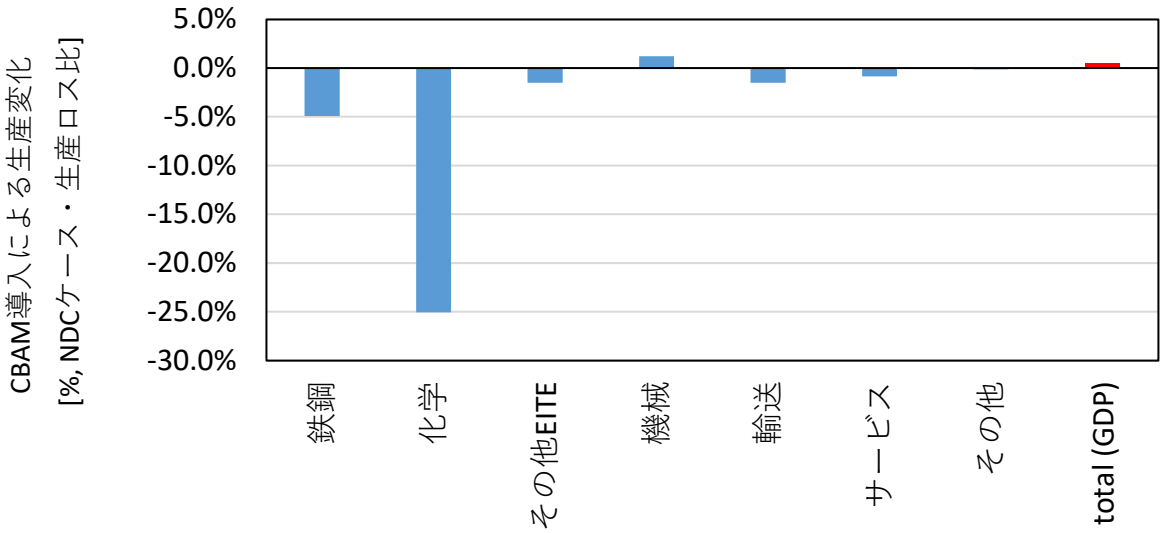


図 4.2.2-5 エネルギー多消費産業 EITE への CBAM をクラブ加盟国が導入した際の、各産業への影響（クラブ非加盟国全体、2030 年）

次に、クラブを拡張した場合の影響を分析した。ここでは、クラブ 2 として、欧州・米国・日本に、中国を加えた拡張クラブを検討した（表 4.2.2-3）。

表 4.2.2-3 拡張クラブケースの想定

ケース名	クラブ				非クラブ	
	メンバー	削減目標	CBAM（輸入限定）	輸出リベート	メンバー	削減目標
Club2+CTAX0	欧州、米国、日本、＋**中国**	NDC削減目標を共同で達成。（クラブ内は同一炭素価格）	無	無	その他	無(炭素価格ゼロ)
Club2+CTAX0+CBAM			有（非クラブからのEITE輸入品に対して）			

図 4.2.2-6 には、拡張クラブケースの欧州・米国・日本の鉄鋼産業の生産・純輸出への影響を示した。クラブ構成国に中国を加えることによって、拡張クラブ内の共通炭素価格は 84[$/tCO$_2$]と推計された。欧州・米国・日本にとっては、中国が加わることによって、共通炭素価格が低下することから、生産ロスを大幅に縮小することが可能となる（Club2-CTAX0）。しかし、中国を加えた拡張クラブにおいては、欧州・米国・日本への主要な輸出国である中国が CBAM の対象から除かれるために、CBAM 導入の効果はより限定的となることが示された（Club2-CTAX0+CBAM）。また、中国は、クラブへの参加によって炭素価格が大幅に上昇するため、鉄鋼の国内生産が約 10%減少する（Club-CTAX0 比）。そのため、想定した枠組みの範囲内では、中国にとってはクラブ内貿易で追加的な炭素関税が課されないメリットやクラブ内排出量取引の売却利益（約 0.5%（ベースライン GDP%））が考慮されているが、文献 8),9)と同様に、中国がクラブに参加するインセンティブがほとんど生じないと考えられる。そのため、クラブ内における資金移転や技術移転に関するスキームがインセンティブとして重要と考えられる [8),9)]。

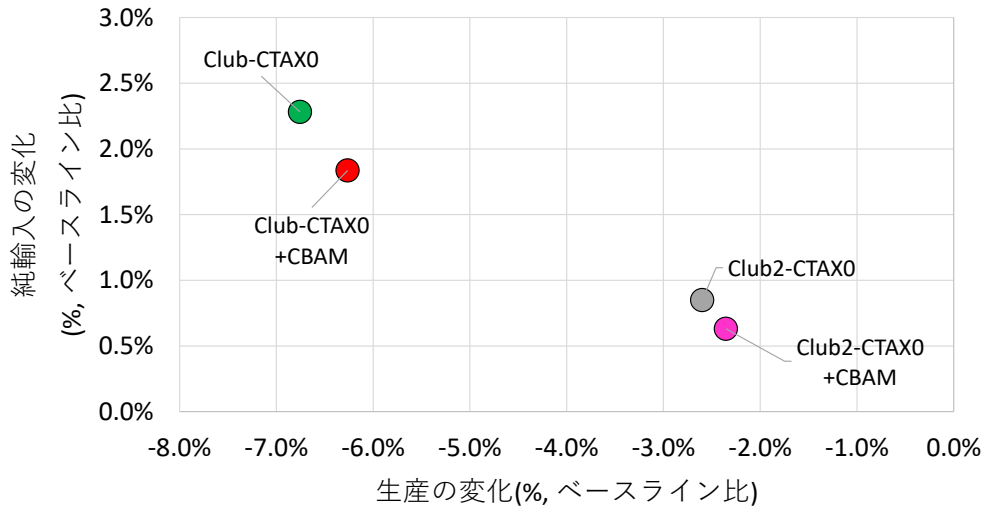


図 4.2.2-6 クラブを拡張した際の欧州・米国・日本の鉄鋼産業の生産・純輸入への影響（2030 年）

(3) 国境炭素調整措置に関するモデル比較分析

ここでは前節までに用いた DEARS と、イタリア CMCC が開発している ICES 世界エネルギー経済モデルの 2 モデルを用いて、NDCs 削減費用が国間で大きく異なる制約のもとで、この不均質な削減目標による悪影響（リーケージ、国際競争力の低下）を軽減するために考案された炭素国境調整（輸入品に限定）の効果を評価した。（本項では国境炭素調整措置を BCA と記載する。）炭素関税を避けるために生じうる、クラブ外における削減対策強化などは想定していない。表 4.2.2-4 には、モデル分析シナリオを示した。ベースラインに関しては、前項の想定（4.2.2(1)）と同じである。

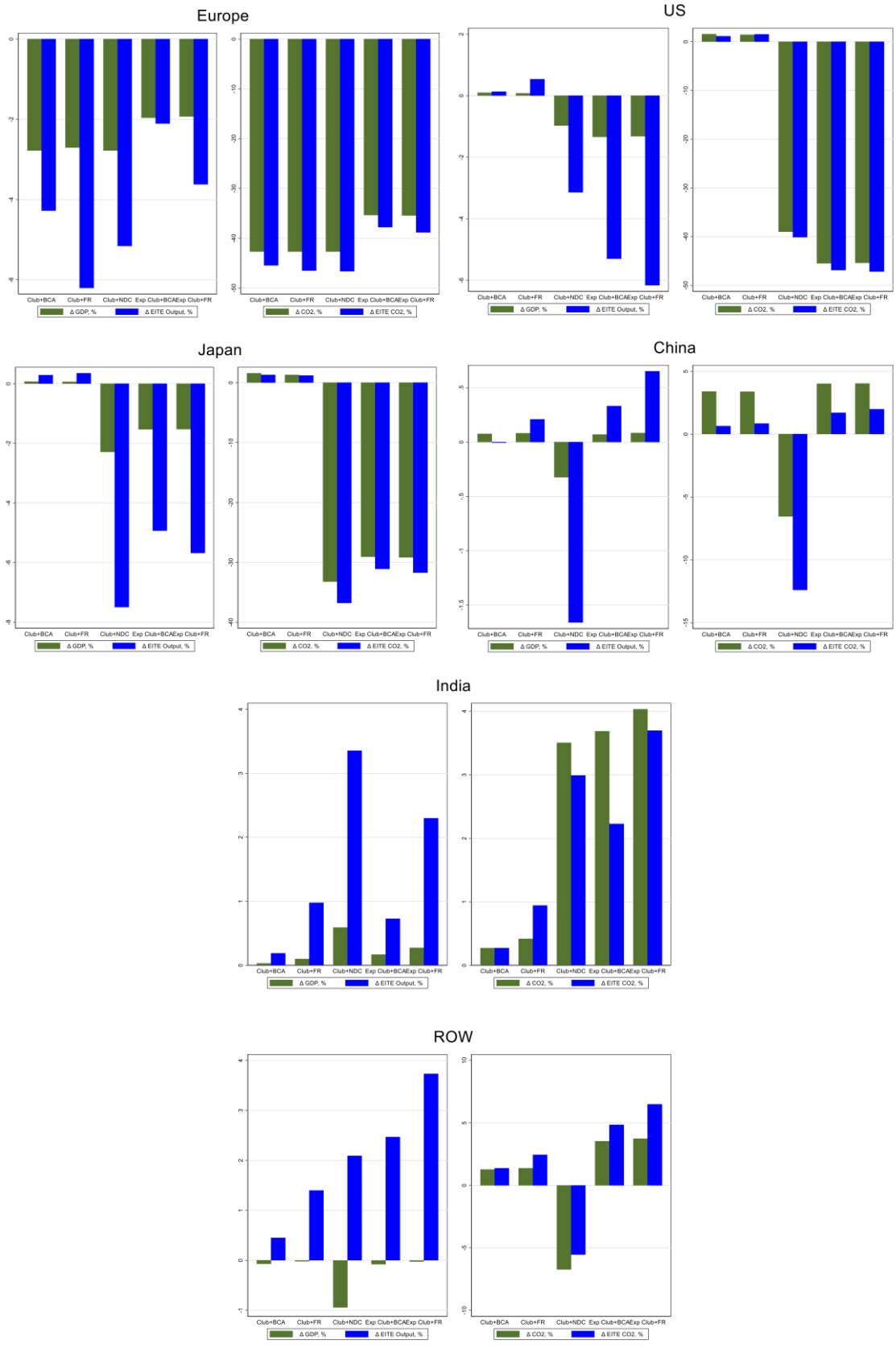
表 4.2.2-4 モデル分析シナリオ [10)]

Table 1. Modeling Scenarios

Scenario	Club Members	Club Target	Non-Club Targets	BCA
Baseline	–	–	–	–
Club + NDCs	Europe	NDC	NDCs	None
Club + Free-riding	Europe	NDC	None	None
Club + BCA-EITE	Europe	NDC	None	EITE
Club + BCA-Steel	Europe	NDC	None	Steel
Expanded Club + NDCs	Europe + USA + Japan	Jointly implemented NDCs	NDCs	None
Expanded Club + Free-riding	Europe + USA + Japan	Jointly implemented NDCs	None	None
Expanded Club + BCA-EITE	Europe + USA + Japan	Jointly implemented NDCs	None	EITE
Expanded Club + BCA-Steel	Europe + USA + Japan	Jointly implemented NDCs	None	Steel

Notes: Refer to Appendix Table 1 for country-specific NDCs as implemented in the models.

図 4.2.2-7 は、2 モデル平均の、GDP（経済全体）と EITE 産業の生産量・CO_2 排出量の変化（ベースライン比）を示している。これは、気候変動政策の議論において EITE 産業が重要であることを表している。EITE 産業は経済全体よりも生産量が大きく減少し、ベースライン排出量に対する排出削減量の割合も経済全体よりも EITE 産業で大きくなっていることがわかる。



* Results are the average across the ICES and DEARS models and across EITE outputs.

図 4.2.2-7 GDP と EITE 産業の生産量・CO_2 排出量の変化（2030 年）[10)]

クラブ内の限界削減費用を均等化するという限定的な条件のもとでは、日本はクラブに参加することにより削減費用を縮小できる可能性が大きい。各国が NDC を実行する場合（Club-NDC）よりも、クラブ非参加国がフリーライドしたとしても、拡大クラブに参加した方が日本の GDP や EITE 産業生産のロスは小さい(Expanded Club＋FR)。この拡大クラブ（欧州、米国、日本が参加）が BCA（輸入限定）を採用した場合に、EITE 産業生産のロスの縮小が強化される（Expanded Club＋FR+BCA)。しかし、輸入品に対する措置に限定された CBAM の改善効果は、NDC 削減目標による競争力の低下を決定的に改善するわけではない可能性が大きい。日本は NDC 削減目標を単独で達成するための限界削減費用が大きいため、国際競争力を維持する観点からは、CBAM よりも、より多くの国・地域が参加するクラブのもとで協調された炭素価格（暗示的価格を含む）を目指すインセンティブが大きく、削減努力の世界的な協調化を図っていくことは重要である。

一方、アメリカは日本と異なり、クラブに参加することにより削減費用が、NDC 単独実施の場合よりも増加する可能性がある。本分析の想定のもとでは、BCA は米国の EITE 産業の生産ロスを抑制するものの、アメリカは単独で NDC を達成した方が生産ロスが小さい。インドとその他の地域は、すべてのシナリオにおいて、EITE の生産量がマクロ経済全体の生産量よりもはるかに大きく増加する。中国とインドは、BCA が実施されたとしても、BCA のない場合よりも低いものの、EITE 産業の生産量の増加を実現する可能性が大きい。

図 4.2.2-8 は、貿易の影響を純輸入、輸入、輸出の観点からの要因分解を示している。自由競争下では、欧州の純輸入の増加は、すべて総輸出の大幅な減少によるものである。このシナリオでは、欧州の総輸入額は小幅に減少しているが、これは、このシナリオにおける経済活動全体の約 2.5%の減少を反映していると考えられる。同様に、Club+NDC および Expanded Club+BCA シナリオにおける日本の純輸入の増加は、ほぼ完全に総輸出の減少によるものである。中国とインドでは、クラブと拡大クラブのケースにおける BCA により、総輸出が減少する。その他の地域は、総輸出の増加が総輸入の減少を上回っている。

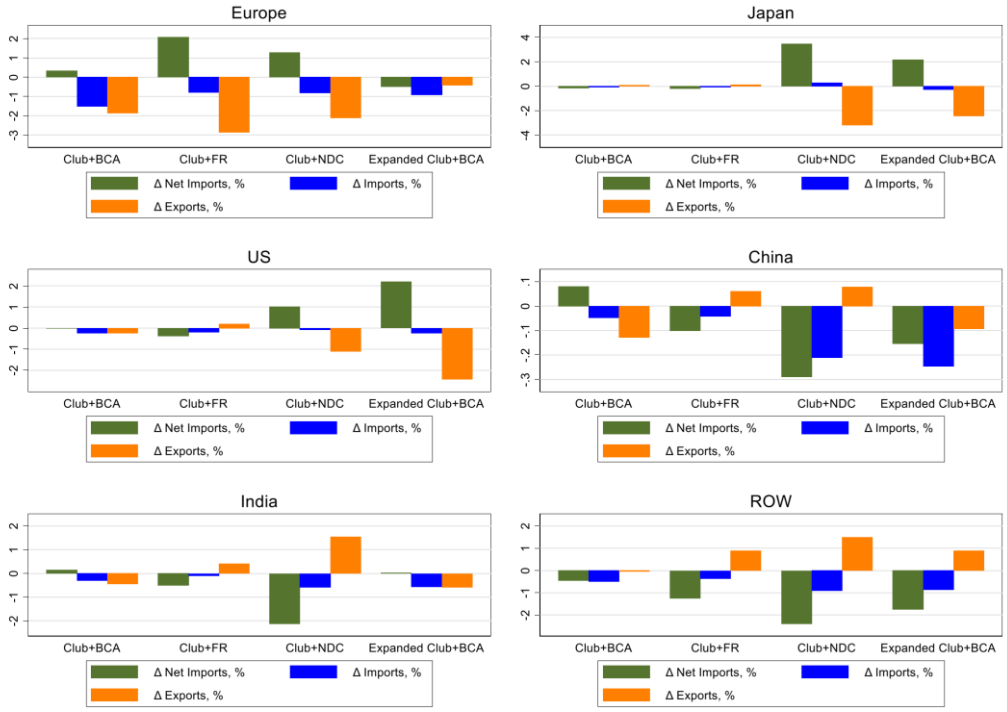


図 4.2.2-8 貿易への影響に関する要因分解（2030 年）[10)]

図 4.2.2-9 と図 4.2.2-10 は、EITE 産業と経済全体に関する、クラブ加盟国から非加盟国への排出量リーケージ率（クラブ参加国の排出削減量に対するクラブ非参加国の排出増加量の比率）を示している。ICES モデルは、DEARS モデルよりも EITE 産業からのリーケージを緩和するための炭素国境調整の効果がかなり大きい推計となっている。フリーライドの場合、ICES モデルは、加重平均で EITE 産業におけるリーケージ率を約 30～50%と推定している。国境調整では、ICES は 10-20%のオーダーでリークを推定している。一方、DEARS モデルは、4 つのシナリオすべてにおいて、約 40%のリーケージ率を推定している。ICES モデルのリーケージ率は化学と鉄鋼でかなり高いが、これは前者の産業で約 50$MtCO_2$ から 75 $MtCO_2$、後者の産業で約 30 $MtCO_2$ から 40 $MtCO_2$ のリーク量に相当する（全世界）。

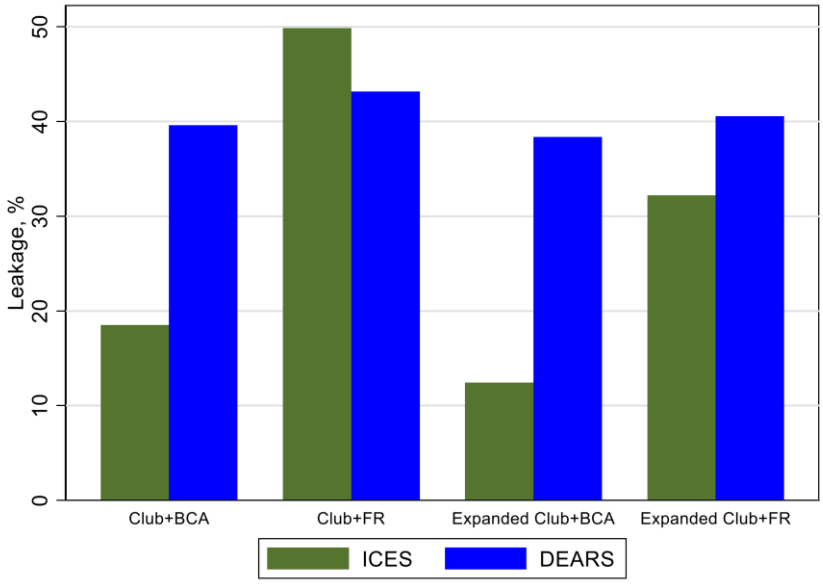


図 4.2.2-9 クラブ加盟国から非加盟国への、EITE 産業 CO_2 リーケージ率（2030 年）[10)]

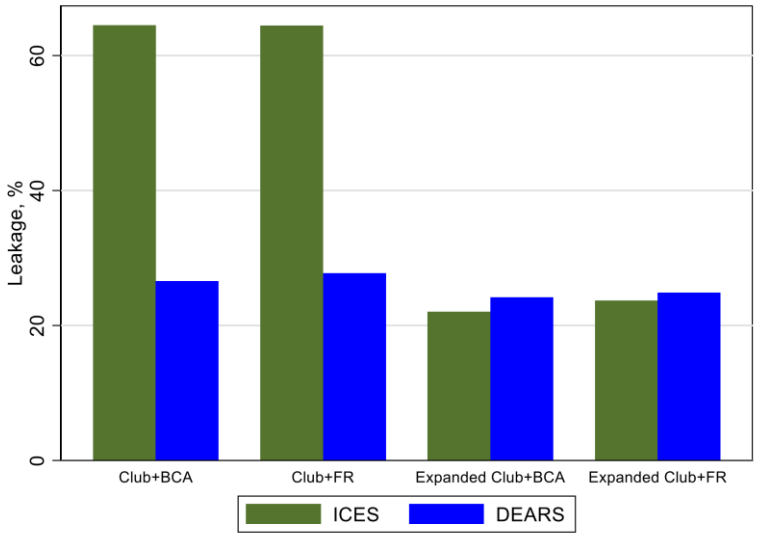


図 4.2.2-10 クラブ加盟国から非加盟国への、全部門 CO_2 リーケージ率（2030 年）[10)]

BCA が経済全体のリーケージに及ぼす効果が小さいことは、別の現象を強調している。すなわち、BCA がクラブ加盟国以外の EITE 産業（エネルギー多消費貿易財）からの排出を削減するのに有効であることを考えると、リーケージは現在、非 EITE 産業から発生していることを意味する。BCA はクラブ内の EITE 産業を保護するが、部分的にはその他の部門の犠牲の上に成り立っている。BCA による価格上昇は、これらの非 EITE 産業にとって競争力の低下とリーケージの増加をもたらすことになる。

パリ協定の緩和策に関連する暗黙の炭素価格は、主要国間で非常に大きな差があることが両モデルから推計された。その結果、欧州では 2030 年の GDP がベースライン比で 2%以上減少し、EITE 産業の（粗）生産量は 5%以上も減少する可能性がある。欧

州諸国のクラブに日本や米国が加わった場合、欧州の EITE 産業の生産量は約 4%（ベースライン比）減少する。また、欧州・日本・米国が輸入品の炭素強度に国境炭素調整を課した場合、欧州の EITE 産業の生産量は 2%未満の減少にとどまる。EITE 産業、クラブ加盟国、モデルにおいて、競争力の中央値（EITE 産業の生産量減少が純輸入の増加によって相殺される割合）は 34%と推計された。また、国境炭素調整により、EITE 産業の排出量リーケージ率は低下するが、完全には解消されるわけではないことが明らかになった。すなわち、国境炭素調整は純輸入の増加を減少させるが、排除することはできない。

4.2.3 国境炭素調整や国際競争力、気候クラブに関する研究事例の調査

国境炭素調整の動向について、文献 12)をもとに整理する。温暖化緩和策の実施によるリーケージと経済活動の損失は、鉄鋼やアルミニウムなど、競争の激しい国際市場で販売される製品を生産する産業において最も深刻であり、これらの産業は、生産投入としてのエネルギーへの依存度が高く、温室効果ガスを排出する産業プロセスにより、限界排出削減コストが高いという特徴がある。これらのセクターにおけるリーケージや経済活動の損失を減らすには、国際的に取引される鉄鋼やアルミニウムの生産が、合意された一定の排出基準を満たすことに合意するか、これらの産業セクターに同じ炭素価格を課す国が「クラブ」を形成し、クラブメンバーが関税を課さないことに合意すればよいと考えられる。

欧州連合（EU）は、産業競争力の維持と炭素リーケージの防止を目的に、炭素国境調整措置 CBAM の制度設計を行い、その導入を予定している。EU-CBAM（図 4.2.3-1、図 4.2.3-4)は、2021 年 7 月に欧州委員会が提案した気候変動政策パッケージ「Fit for 55」に含まれる施策の一つである。対象は、炭素集約的で輸出依存度が高い鉄鋼、アルミニウム、セメント、肥料、電力、水素に関する EU 域内への輸入品である。2022 年 12 月の合意では、前駆体材料の一部や、鉄鋼製のねじやボトルなどの対象製品を原料とした製品の一部も含まれている。有機化学品やポリマーなどは 2025 年までに含めるかどうか決定される予定である。製品単位当たりの炭素排出量に基づく CBAM 証書の購入を輸入者に課し、それに基づき輸入時の課金を行う仕組みとなっている。排出量の報告義務のみで炭素価格は課されない移行期間が、2023 年から開始される予定である。実際の支払い義務の開始年は、2026 年の予定である。また、CBAM 導入に伴い、EU-ETS 無償枠は、2026 年から 2034 年にかけて段階的に廃止する予定である。輸出リベート措置は含まれない。また、米国においても、上院を中心に、製造業の国境炭素調整の素案が検討されている（図 4.2.3-2、図 4.2.3-3、図 4.2.3-4）。Whitehouse 議員提案は、米国の産業部門を対象とした国内排出削減政策と国境調整関税を組み合わせた文献 15)の枠組みと整合的である。

気候クラブは、ある国からの輸入品に関税を課す一方で、そのクラブのメンバーであるとみなされる特定の国からは同じ製品の自由貿易を認めるという政策が最もよく知られている。最近 G7 で提案された、ドイツ提案の気候クラブの第二の形態は、関税

に頼るのではなく、むしろクラブメンバー間の重要な協力と協調に頼るものであった。このクラブは G7 諸国でも注目されているが、クラブの設計の全容はまだ曖昧である。

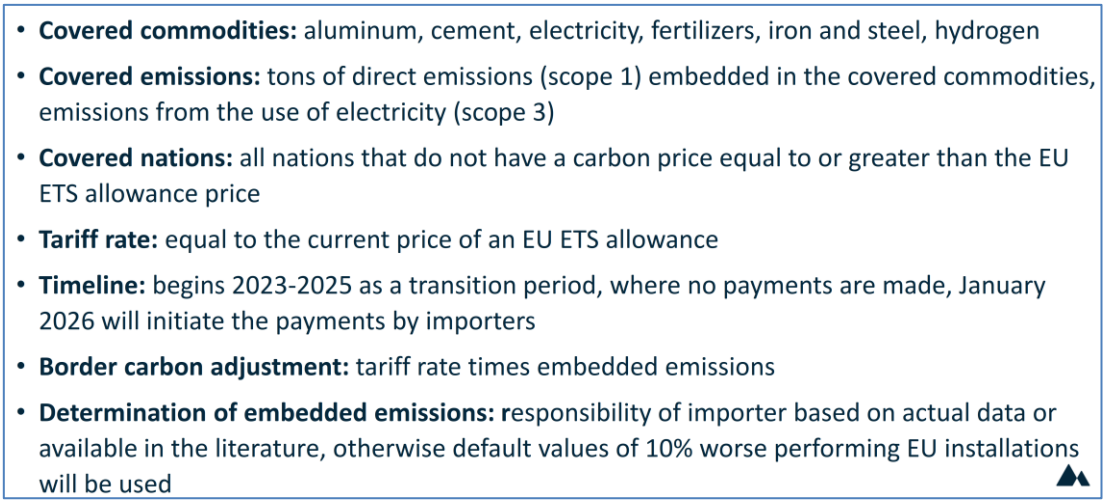


図 4.2.3-1 EU-CBAM の概要 [12)]

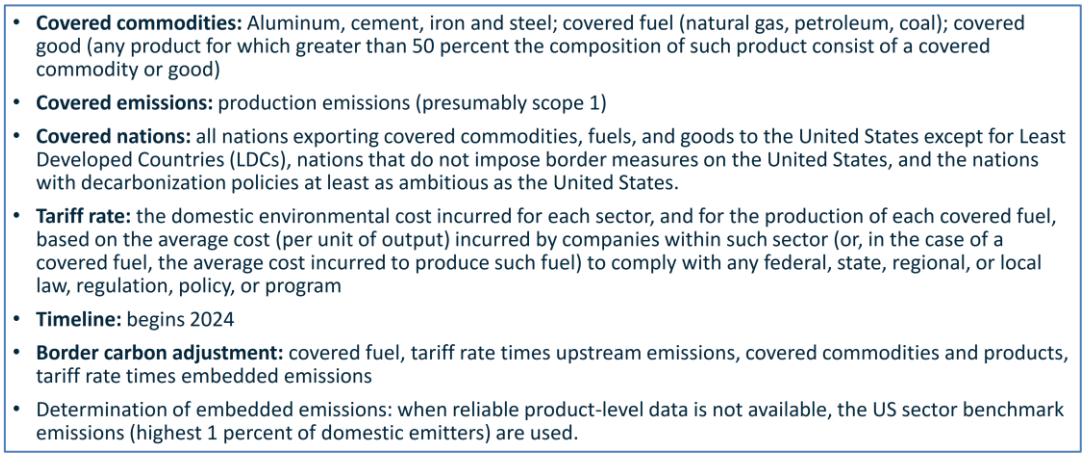


図 4.2.3-2 S.2378: Fair, Affordable, Innovative and Resilient Transition and Competition Act ('Coons-Peters') 米国提案の概要 [12)]

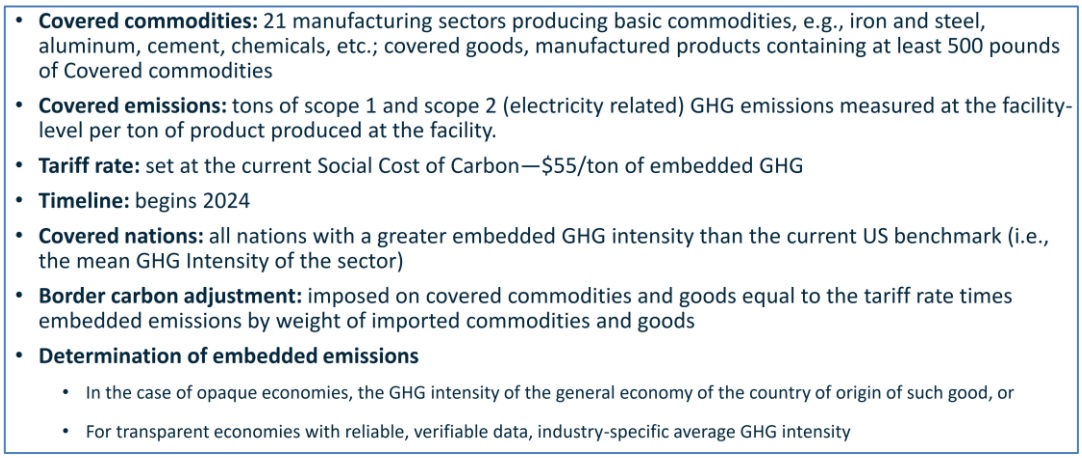


図 4.2.3-3 S.4335: Clean Competition Act (Sen. Whitehouse)米国提案の概要 [12)]

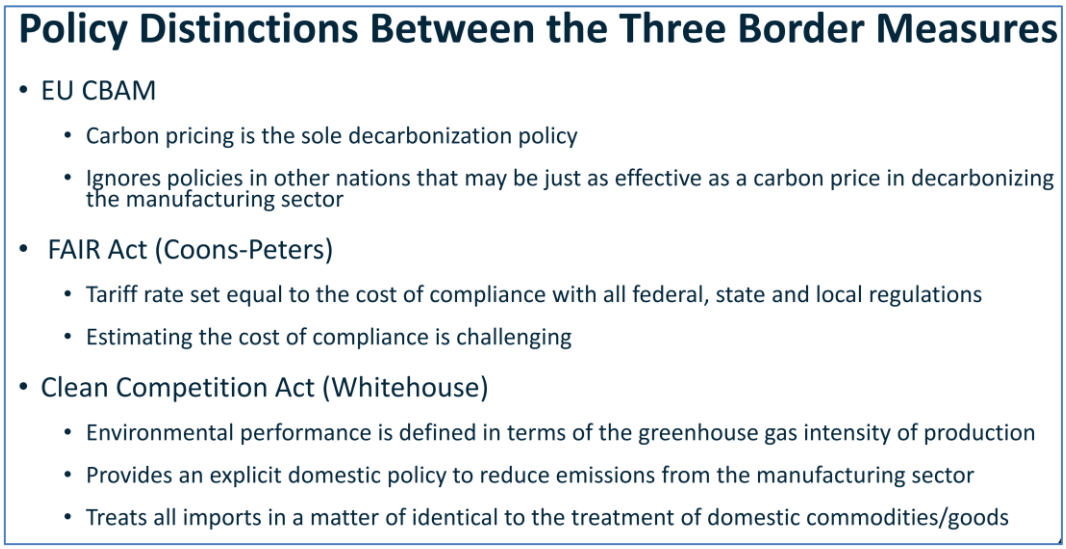


図 4.2.3-4 国境調整措置に関する 3 提案の特徴 [12)]

文献 14)によると、EU-CBAM や Clean Competition Act は暗示的な気候クラブと位置付けられている。EU の場合、EU に一次産品を輸出している国は、その国の国内生産に炭素価格を課せば、クラブに加盟することができる。この場合、輸出国は EU が課す炭素関税に直面することはない。Clean Competition Act の場合、米国に一次産品を輸出する国は、国内の一次産品生産の GHG 強度が米国のベンチマーク強度以下であれば、クラブに加盟することができる。この場合、輸出国は米国が課す国境課税に直面しない。それぞれのクラブの加盟国は、自国の国境措置を EU や米国に合わせるためにさらに調整する可能性を見込んでいる。EU-CBAM は明示的炭素価格に基づく政策クラブであり、一方、米国提案はパフォーマンスクラブであるとみなすことができる。

一方、文献 14)の提案するパフォーマンス・アライアンス(performance alliance)は、加盟国が産業部門の脱炭素化を推進するために努力する「クラブ」ではなく「同盟」(アライアンス）に焦点を当て、非加盟国への輸入関税を行うことなく、保護主義的な雰囲気を緩和することを意図としている。パフォーマンス・アライアンスという概念は、各国が加盟して無関税貿易を享受するために必要なパフォーマンスのベンチマークを

強調するものである。国内政策の主流として明示的炭素価格が世界的に広く採用されていると考えるのは不合理であると考え、排他性よりも包括性を重視している。すなわち、EU-CBAM が採用する明示的炭素価格とは異なり、パフォーマンス・アライアンスの枠組みでは、政策パフォーマンスを測る指標として、その国の産業の平均的な GHG 強度（政策の達成度や実績を示す指標）を重視する。この利点は、この環境政策によって貿易相手国が競争上不利になることは考えにくい点である。また、特定の産業分野や商品を中心に個別の同盟が形成され、それぞれの同盟が異なる国のメンバーで構成される可能性もあり、参加がより容易になり、国際貿易を拡大する可能性が考えられる。国が加盟するために採用すべき政策を規定しないものの、この協定には、アライアンス全体の脱炭素化目標を達成するための原単位の減少を規定する条項が含まれることになる。

G7 で提案された製造業グリーン技術に焦点を当てた気候クラブの成功のためには、技術イノベーションの波及効果を理解することが重要である。しかし、技術イノベーションの R&D 波及効果について、定量的な分析事例は数少ない。文献 16)のような各 IAM における技術・イノベーションの扱いに関するサーベイや、文献 17),18)のような技術の波及効果の定量分析は今後重要になると考えられる。知識・技術の普及に関するメカニズムを IAM のどのように組み込み、長期的なカーボンニュートラルを達成するのが望ましいかを検討するのは重要な課題である。また、文献 16)で指摘されるように、脱炭素の鍵となるデジタル化について、デジタル技術が産業部門のエネルギー需要や関連する排出量に与える影響について、定量的エビデンスが不足していることは今後の研究課題である。さらに、将来のマテリアル効率性が脱炭素経路に与える影響について、IAM 分析ではあまり評価対象となっていない点が指摘されており、今後の検討課題となりうる。

4.2.4 まとめ

NDC 達成のための炭素価格は国によって大きく異なっている、すなわち、排出削減に必要な努力は異なることが示された。このような各国の NDC 削減目標の下で、Club2（欧州、米国、日本）では、エネルギー多消費産業を中心に、炭素リーケージが見込まれる。CBAM（輸入限定）を用いると、エネルギー多消費産業からのリークを 3 分の 1 程度軽減することが可能と推計された。CBAM によってリーケージや国際競争力は改善するものの、完全に悪影響が解消されるわけではない。さらに、輸出リベート（輸出品の炭素価格分の減免）も追加可能ならば、大きくリーケージは削減され、国際競争力の低下も軽減されうる。ただし、輸出リベートは、国内政策との対応によっては（特に ETS 制度などのもとでは）WTO ルールを満たさない可能性が高い。

また、CBAM の効果は国によって異なる。 エネルギー多消費産業の製品を輸入する国（輸入超過）では、大規模な輸入国ではない国（輸出超過）よりも CBAM の効果が大きくなりうる。しかし、Overland and Huda[19]が示すように、クラブ参加国の CBAM 導入によって、非参加国による報復や貿易戦争、反連合の形成などが引き起こされる

リスクがある。そのため、気候政策に関する国際協力を混乱させ、かえって効果的な地球規模の気候変動の緩和を弱める可能性がある。

CBAM（輸入限定）が炭素リーケージや競争力を改善する効果は限定的である可能性が高い。リーケージを防ぐ観点からは、CBAM よりも、世界的に協調された炭素価格（暗示的価格を含む）の方が重要であり、引き続き、NDCs の排出削減努力の協調化を図っていくことは重要と考えられる。限界削減費用に大きな差異があっても CBAM を導入すれば、日本や主要先進国の経済影響を大きく低減できるわけではないことが示された。

欧州は CBAM の導入に積極的に向けて動き始めているが、EU と日本とでは産業構造や輸出入の構造が異なり、CBAM のメリットは日本とは異なる。日本においては、引き続き慎重に CBAM のメリットやデメリットを見極めることが必要と考えられる。

参考文献（第 4.2 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）令和 3 年度成果報告書 (2022)
2) 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.
3) IEA ; World Energy Statistics, (2020)
4) RITE: 地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業 成果報告書, (2020)
5) Global Trade Analysis Project (GTAP), https://www.gtap.agecon.purdue.edu/（アクセス日 2023.03.02）
6) V. Krey et al.; MESSAGEix-GLOBIOM Documentation. Technical Report, (2020), International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg.
7) IEA; World energy outlook 2018, https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018 (2018) （アクセス日 2023.03.02）
8) M. Nagashima et al.; Stability of international climate coalitions ? A comparison of transfer schemes. Ecological Economics, 68-5, 1476-1487. (2009)
9) K. Lessmann et al.; The stability and effectiveness of climate coalitions: A comparative analysis of multiple integrated assessment models. Environmental and Resource Economics, DOI 10.1007/s10640-015-9886-0.(2015)
10) J.E. Aldy, et al. Clubs, Border Carbon Adjustments, and Heterogeneously Ambitious Emission Mitigation Goals, Feb (2023)
11) J.E. Aldy, Pizer, W.A., & Akimoto, K. Comparing emissions mitigation efforts across countries. Climate Policy 17, pp.501–515 (2017).
12) R. Kopp: Issue Summary: Monitoring International Climate Policy for Developments with Respect the Evolution of Carbon Clubs, Feb (2023)
13) J. Aldy et al.: Clubs, Border Carbon Adjustments, and Heterogeneously Ambitious Emission Mitigation Goals, Feb (2023)
14) R. Kopp et al.: Industrial Decarbonization and Competitiveness: Building a Performance Alliance, Jul(2022)

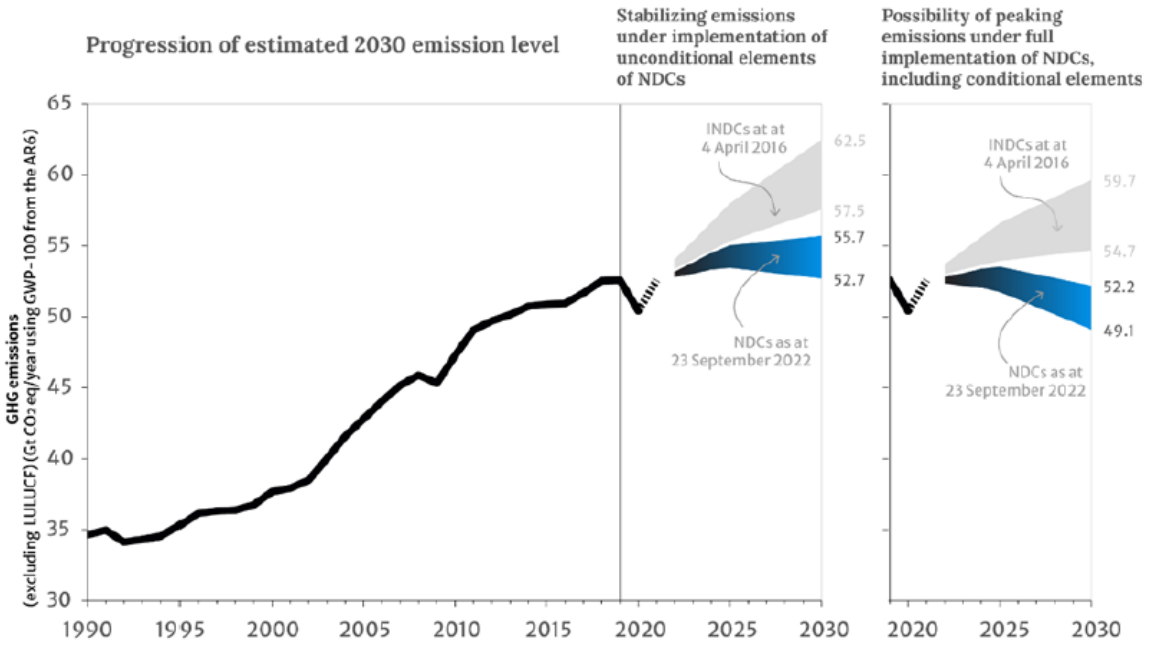
15) R. Kopp et al.: Industrial Decarbonization and Competitiveness: A Domestic Benchmark Intensity Approach May(2022)
16) E. Verdolini et al.: Industrial deep decarbonization: modeling approaches and data challenges, Feb (2023)
17) Y. J. Kim and E. Verdolini: International and intertemporal knowledge spillovers in carbon-free and carbon-efficient technologies (2023)
18) R. Parrado and E. De Cian: Technology spillovers embodied in international trade: Intertemporal, regional and sectoral effects in a global CGE framework, Energy Economics 41, pp.76-89 (2014)
19) I. Overland and MS. Huda: Climate clubs and carbon border adjustments: a review, Environmental Research Letter 17, 093005(2022)
20) W. Nordhaus; Climate Clubs: Overcoming Free-riding in International Climate Policy, American Economic Review, 105-4, pp.1339–1370 (2015)

4.3 排出削減努力等の研究事例の調査

本節は、他機関による NDCs の下での排出削減努力の研究事例として、UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)及び UNEP(United Nations Environment Programme)の分析を以下に紹介する。

4.3.1 UNFCCC 事務局による Synthesis レポート

UNFCCC 事務局は、2022 年にエジプトのシャルムエルシェイクで開催された COP27 前に、パリ協定の下での 166 ヶ国の NDCs（2022 年 9 月 23 日時点）をまとめた報告書を 2022 年 10 月に公表した。これらの国の GHG 排出量は、2019 年における世界 GHG 排出量の 94.9%を占め、排出量絶対値は 52.6GtCO_2eq（LULUCF 除く）となる。



Note: For comparison, global emissions with LULUCF in 2030, when taking into account implementation of the new or updated NDCs (blue areas), are estimated to be 56.4 (54.9–57.9) Gt CO_2 eq considering unconditional elements and 52.8 (51.3–54.4) Gt CO_2 eq assuming full implementation.

図 4.3.1-1　NDCs 下の GHG 排出量パス（LULUCF を除く）

（出典）UNFCCC[1)]

図 4.3.1-1 は、NDCs 下の GHG 排出量パスを表している。推計幅で高い排出量は条件が無い場合、低い排出量は条件付きの場合を示している。また、国際航空からの排出量は 2030 年まで 2019 年レベルで一定とし（619MtCO_2）、国際海運からの排出量は 2018 年時点の 755MtCO_2eq から 2030 年まで線形に伸びると仮定し、2050 年まで 2008 年レベル比で半減する目標に向かうと想定する。条件無しの NDCs を実施した場合の世界の GHG 排出量（LULUCF 除く）は 2030 年で 54.2 （52.7-55.7）GtCO_2eq と推計されている。一方、条件付きの NDCs を実施した場合の世界の GHG 排出量は 2030 年で 50.7（49.1-52.2）GtCO_2eq である。

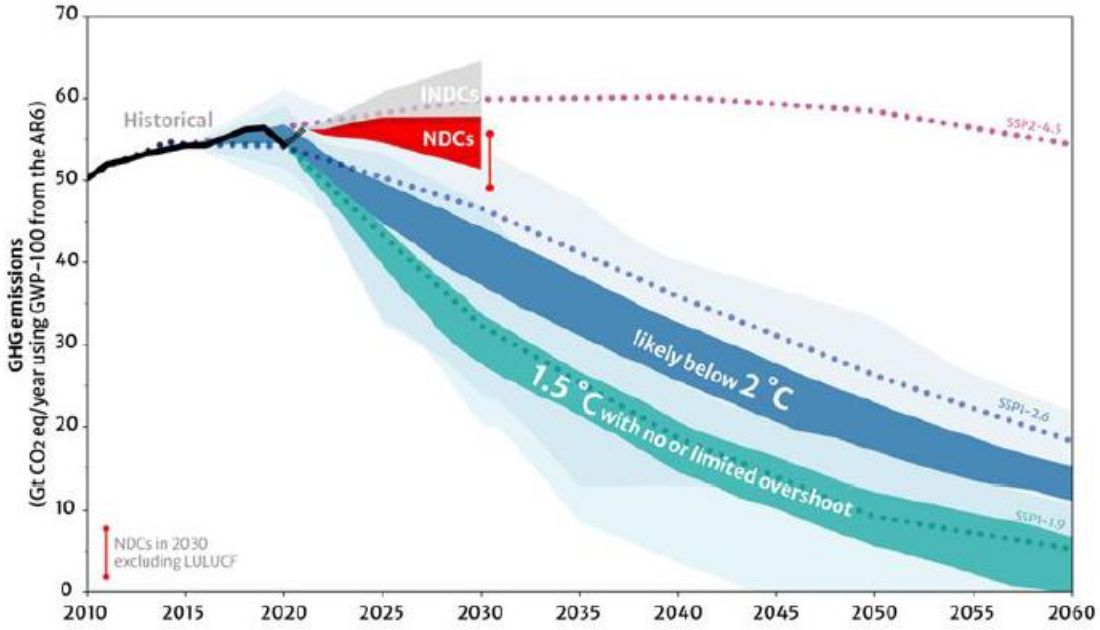


図 4.3.1-2 IPCC 第 6 次評価報告書で評価されたシナリオにおける世界排出量と NDCs 下における世界排出量との比較

（出典）UNFCCC[1)]

図 4.3.1-2 は IPCC 第 6 次評価報告書（AR6）で評価された 3 つのシナリオ（1.5℃ with no overshoot、1.5℃ with limited overshoot、likely below 2℃）における世界 GHG 排出量と NDCs 下における世界排出量を比較したものである。1.5℃目標（50%以上の可能性）の場合は、2019 年レベル比で GHG 排出量が 2030 年までに 43（34-60）%減少する。一方、2℃目標（67%以上の可能性）の場合は、2019 年レベル比で GHG 排出量が 2030 年までに 27（13-45）%減少する。

以上、IPCC が検討した多くのシナリオで示唆された、費用効果的な排出レベルを達成するためには、現在から 2030 年にかけて NDC の野心レベルを大幅に引き上げるか、最新の NDC を大幅に超過達成するか、あるいはその両方を組み合わせる必要があることが示唆される。2030 年までに排出量を削減できない場合、ネット・ゼロ・エミッションへの道のりの遅いスタートを補うために、排出量を大幅に削減する必要性が強調されている。

4.3.2 UNEP による Emission Gap Report 2022 （EGR2022）

2022 年 10 月に、UNEP は Emission Gap Report 2022 を公表した。Emission Gap Report（EGR）は UNEP が毎年公表しているものであり、本報告書は第 13 版となる。第 13 版では、COP26 以降に NDCs として約束された排出削減量とパリ協定下の気温目標達成に必要とされる排出削減量とのギャップを縮小するためのこれまでの進捗が、非常に限定的であることが強調されている。

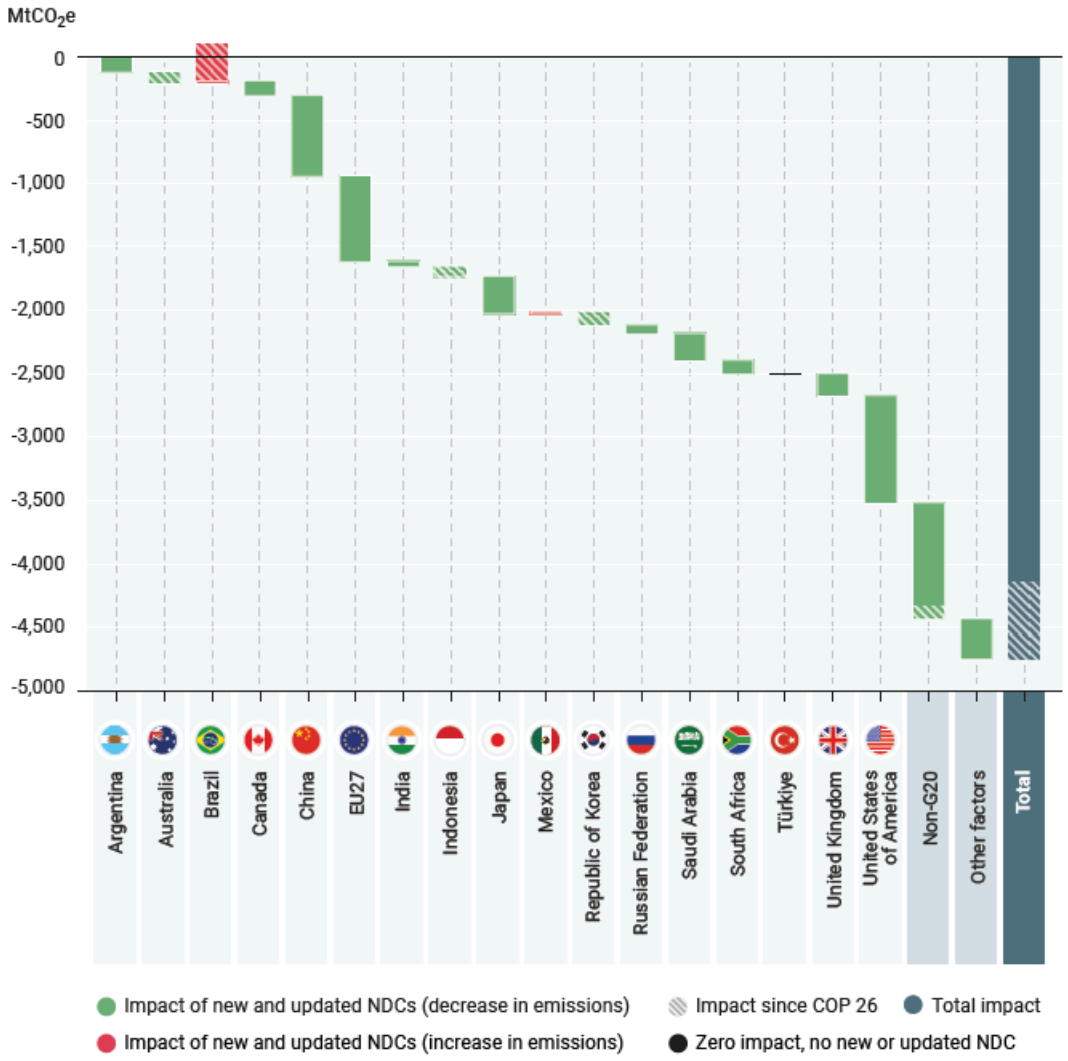


図 4.3.2-1 新規及び更新された条件無しの NDCs による 2030 年における世界 GHG 排出量への影響（最初の NDCs との比較）

（出典）UNEP[2)]

2020 年 1 月 1 日から 2022 年 9 月 23 日（EGR2022 で対象とした期間）において新規及び更新された条件無しの NDCs が実施された場合、最初に提出された NDCs と比較して 4.8GtCO₂eq の追加削減が達成される（図 4.3.2-1 の Total の数値参照）。そのうち、COP26 以降の NDC 削減量は 0.5GtCO₂eq（Total の斜線部分）である。具体的には、オーストラリア、ブラジル、インドネシア、韓国における NDCs 更新によるものである。

図 4.3.2-2 は、各シナリオにおける世界の GHG 排出量と各削減目標とのギャップを示している。また、表 4.3.2-1 の数値は、図 4.3.2-2 の数値を詳細にしたものである。具体的には、2030 年の排出量のギャップの定義は、「現行政策及び NDCs を完全に実施した場合の世界 GHG 排出量」と「各気温上昇シナリオ（詳細は表 4.3.2-2 を参照）を費用最小化の下で達成する場合に得られる世界の GHG 排出量」との差である。

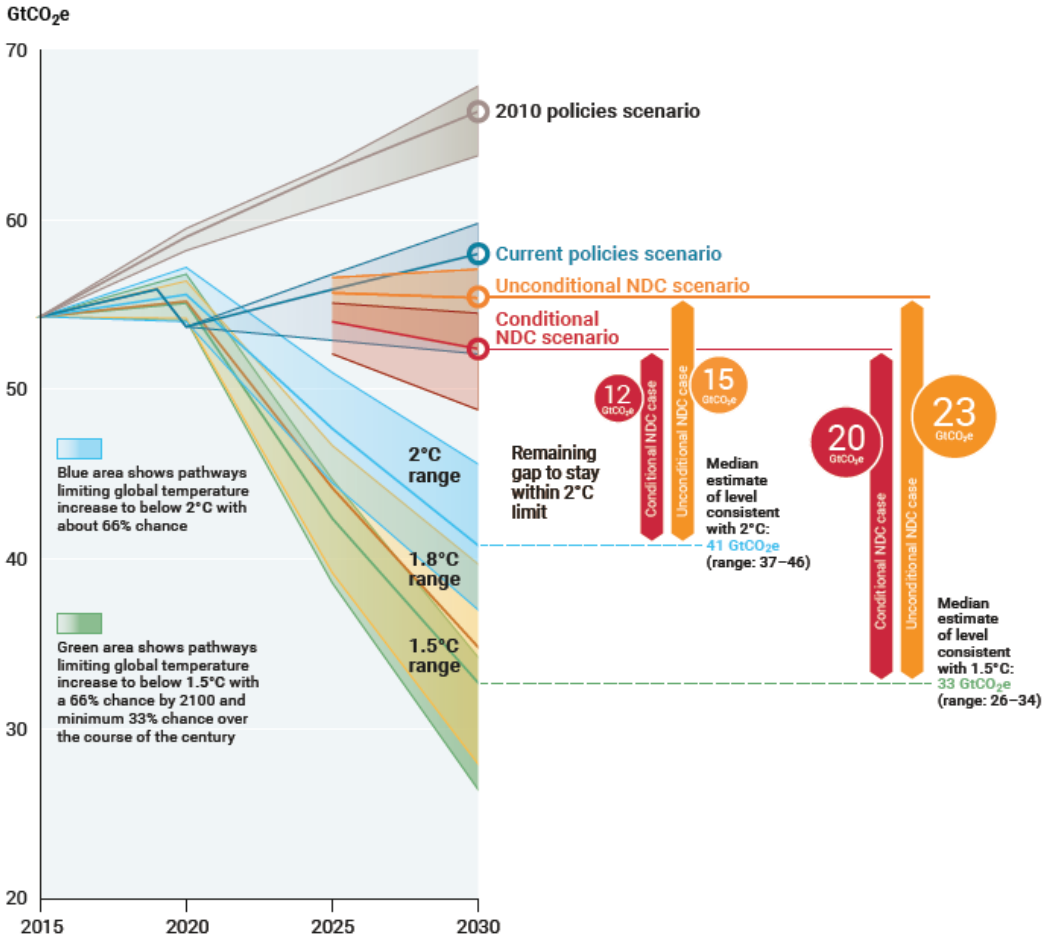


図 4.3.2-2 異なるシナリオ下の世界の GHG 排出量と 2030 年時点の排出量ギャップ（中央値及び 10～90 パーセンタイルの範囲）

（出典） UNEP[2)]

表 4.3.2-1 各シナリオにおける 2030 年の世界の GHG 排出量と推計排出量のギャップ

	GHG emissions in 2030 ($GtCO_2e$) Median and range	Estimated emissions gap in 2030 ($GtCO_2e$)		
		Below 2.0°C	Below 1.8°C	Below 1.5°C
Year 2010 policies	66 (64–68)	-	-	-
Current policies	58 (52–60)	17 (11–19)	23 (17–25)	25 (19–27)
Unconditional NDCs	55 (52–57)	15 (12–16)	21 (17–22)	23 (20–24)
Conditional NDCs	52 (49–54)	12 (8–14)	18 (14–20)	20 (16–22)

Note: The gap numbers and ranges are calculated based on the original numbers (without rounding), and these may differ from the rounded numbers in the table. Numbers are rounded to full $GtCO_2e$. GHG emissions have been aggregated with global warming potential over 100 years (GWP100) values of the Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (IPCC AR6).

（出典） UNEP[2)]

現行政策による 2030 年の世界の GHG 排出量（中央値）は 58GtCO₂eq と推計される。この数値と条件無しの NDCs とのギャップは約 3GtCO₂eq、条件付きの NDCs とのギャップは約 6GtCO₂eq である。そのため、NDCs を達成するためには、更なる政策が必要であることが示唆される。また、条件無しの NDCs に関し、2030 年の排出ギャップ（中央値）は、2℃目標の経路で 15GtCO₂eq、1.5℃目標の経路で 23GtCO₂eq である。一方、条件付きの場合、排出ギャップは、2℃目標の経路で、12 GtCO₂eq、1.5℃目標の経路で 20GtCO₂eq である。

表 4.3.2-2　各気温上昇シナリオにおける地球温暖化の特徴

Scenario	Number of scenarios	Global total GHG emissions ($GtCO_2e$)		Estimated temperature outcome			Closest approximate
		In 2030	In 2050	50% chance	66% chance	90% chance	IPCC AR6 Working Group (WG) III scenario class
Below 2.0°C (66% chance)*	195	41 (37–46)	20 (16–24)	Peak: 1.7–1.8°C In 2100: 1.4–1.7°C	Peak: 1.8–1.9°C In 2100: 1.6–1.9°C	Peak: 2.2–2.4°C In 2100: 2.0-2.4°C	C3a
Below 1.8°C (66% chance)*	139	35 (28–40)	12 (8–16)	Peak: 1.5–1.7°C In 2100: 1.3–1.6°C	Peak: 1.6–1.8°C In 2100: 1.4–1.7°C	Peak: 1.9–2.2°C In 2100: 1.8–2.2°C	N/A
Below 1.5°C (66% in 2100 with no or limited overshoot)*	50	33 (26–34)	8 (5–13)	Peak: 1.5–1.6°C In 2100: 1.1–1.3°C	Peak: 1.6–1.7°C In 2100: 1.2–1.5°C	Peak: 1.9–2.1°C In 2100: 1.6–1.9°C	C1a

* Values represent the median and tenth to ninetieth percentile range across scenarios. Percentage chance refers to peak warming at any time during the twenty-first century for the below 1.8°C and below 2.0°C scenarios. When achieving net-negative CO_2 emissions in the second half of the century, global warming can be further reduced from these peak warming characteristics, as illustrated by the "Estimated temperature outcome" columns. For the below 1.5°C scenario, the chance applies to the global warming in the year 2100, while the "no or limited overshoot" characteristic is captured by ensuring projections do not exceed 1.5°C with more than 67 per cent chance over the course of the twenty-first century or, in other words, that the lowest chance of warming being limited to 1.5°C throughout the entire twenty-first century is never less than 33 per cent. This definition is identical to the C1 category definition used by the IPCC AR6 WG III report. Compared to IPCC (2022), the Emissions Gap Report analysis also selects scenarios based on whether or not they assume immediate action.

Note: GHG emissions in this table have been aggregated with GWP100 values of IPCC AR6.

（出典）UNEP[2)]

表 4.3.2-3 は、各シナリオの下での気温上昇を推計したものである。66%の確率の場合、現行政策では、今世紀中に 2.8℃の温暖化が予想される。また、条件無し及び条件付きの NDCs 実施によって、それぞれ 2.6℃及び 2.4℃に気温上昇が低減する。

表 4.3.2-3 各シナリオの下での気温上昇推計

Scenario	Estimated global warming over the twenty-first century with various chances (median and range)		
	66%	50%	90%
Current policies	2.8°C (range: 1.9–3.3°C)	2.6°C (range: 1.7–3.0°C)	3.3°C (range: 2.3–3.9°C)
Unconditional NDCs	2.6°C (range: 1.9–3.1°C)	2.4°C (range: 1.7–2.9°C)	3.1°C (range: 2.3–3.7°C)
Conditional NDCs	2.4°C (range: 1.8–3.0°C)	2.2°C (range: 1.7–2.7°C)	2.8 (range: 2.2–3.5°C)
Unconditional NDCs and long-term net-zero targets	1.8°C (range: 1.8–2.1°C)	1.7°C (range: 1.7–1.9°C)	2.1 (range: 2.0–2.5°C)
Conditional NDCs and long-term net-zero targets	1.8°C (range: 1.7–1.9°C)	1.7°C (range: 1.6–1.8°C)	2.0°C (range: 2.0–2.3°C)

（出典） UNEP[2)]

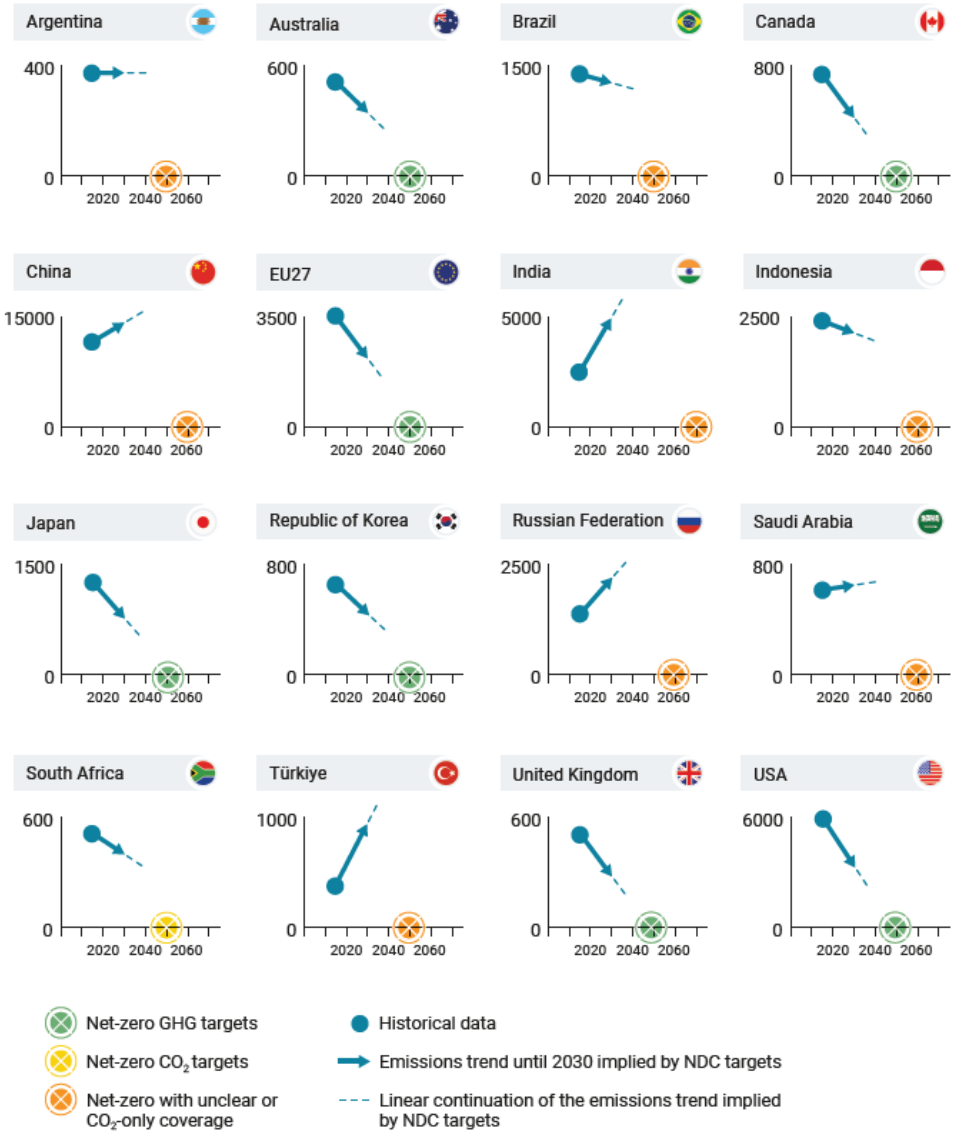


図 4.3.2-3 G20 加盟国の NDC 及びネットゼロ目標に向けた排出経路（$MtCO_2eq./year$）

（出典） UNEP[2)]

図 4.3.2-3 は、ネットゼロ目標を表明している G20 加盟国毎に、現在の排出レベルから 2030 年の NDCs 目標に移行するために必要な方向性を示している。既に排出ピークに達した国は、今後ネットゼロを達成する目標年に向かって削減をさらに加速する必要がある。一方、2030 年まで排出量が増加傾向にある国は、ネットゼロ目標を達成するためには、さらなる政策転換と投資が必要であることが強調されている。

参考文献（第 4.3 節に関するもの）

1) UNFCCC: Nationally determined contributions under the Paris Agreement – Synthesis report by the secretariat, October 26 (2022).
2) UNEP: Emission Gap Report (2022).

第5章　長期緩和シナリオ分析

本章では、長期の温暖化緩和シナリオ分析について記述する。パリ協定では、全球平均気温上昇を産業革命前に比べ２℃未満に十分に低く（“well below”）抑える。また1.5℃に抑えるような努力を追求する。今世紀後半には、温室効果ガスについて人為的起源排出とシンクによる吸収をバランスさせる、とされている。2019 年 9 月に開催された国連気候行動サミットに合わせて、世界では、2050 年の実質ゼロ排出を目指す動きが加速した。2070 年頃までの実質ゼロ排出の宣言を含めると、2021 年の COP26 終了時点で、世界の GDP の 90%を占める国が宣言しているとされる。日本政府は、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、2021 年 10 月には、これに沿った形で、エネルギー基本計画、地球温暖化対策計画、パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略が閣議決定されている。

2050 年カーボンニュートラルに向けた各種技術の展望の不確実性は大きい。このような状況において、長期的に実質ゼロ排出を実現する、世界全体が整合的な姿を分析することが重要と考えられる。一方、第 2 章でも記述したように、不確実性が大きい中で、不確実性を考慮したリスクマネージメントが重要であり、そのため、複数のシナリオによる分析が求められる。本章では、このような戦略への道筋について、コストの視点を含め、全体整合性をもって評価するため、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル等も用いながら、分析・評価を行った。

まず、5.1 節においては、大幅排出削減に寄与し得ると考えられる技術について調査を行い、具体的には、5.1.1 節においては水素、アンモニア、e-methane（合成メタン）、e-fuels（合成液体燃料）などの実質カーボンニュートラルとなる燃料が注目されてきており、その国際的な政策動向について記載した。日本ではグリーンイノベーション基金が設置され、水素等のカーボンニュートラル燃料を含む技術開発が進行しており、その動向について 5.1.2 節、5.1.3 節で記述した。更に、5.1.4 節では特に二酸化炭素除去技術 CDR の動向、国際的な評価事例について記述した。

その上で、5.2 節において、パリ協定長期目標の 2℃、1.5℃未満と整合的な複数のシナリオを想定し、2030 年や 2040 年といったトランジション期も含め、世界および日本のカーボンニュートラル実現に向けたシナリオ分析を世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+によって行い、その結果をまとめた。また、そこでは、日本について主要な部門別のロードマップについても、時点、地域、部門間で量、価格が整合する形でのシナリオ分析結果として提示した。また、5.3 節においては、特にカーボンニュートラル実現の限界的な費用の対策となりやすい、水素、アンモニア、e-methane、e-fuels、CDR といった技術に焦点を当て、各種の感度解析を実施し、その技術特性を明らかにした。

続く 5.4 節では、需要サイドに焦点を当てた調査を行った。5.4.1 節では、日本における家庭の財、サービス需要について、生活行動の長期的な変化の検討を、住環境計

画研究所に協力を頂いて実施した。また、5.5.1 節では国際応用システム分析研究所（IIASA）に協力を頂いて建築部門における技術社会変化の調査・シナリオ分析結果を整理した。更に 5.5.2 節ではスタンダード大学エネルギー･モデリング･フォーラム（EMF）に協力を頂いて産業部門における技術社会変化の調査・シナリオ分析のレビューを整理した。5.5.3 節では、食品廃棄低減による農業土地利用・非 CO_2 GHG 排出への影響分析を実施した結果をまとめた。その上で、5.6 節では、DNE21+モデルを用いて、DX 等による需要サイドの変化に関して、エネルギー需要側およびエネルギー供給側両者が、全体整合的な形でのシナリオ分析を実施した。

最後に、5.7 節には、非 CO_2 GHG の排出削減ポテンシャル・コスト推計モデルの更新について記載した。

5.1 長期緩和温暖化政策（カーボンニュートラルに向けた技術等）の調査

5.1.1 各国の CN 燃料関連政策の動向

本節では、主な海外諸国の CN 燃料関連の政策動向について概要を述べる。

(1) EU

欧州委員会は 2018 年 11 月に発表した A Clean Planet for all[1)]において、2050 年までにカーボンニュートラル経済の実現を目指すことを公表した。CN 燃料に関する方針として、カーボンフリー電力による水電解や CCS 付き天然ガス改質で製造された水素は電力、空調、運輸、産業などの脱炭素化に貢献するとしている。また power-to-X は脱炭素化が困難な部門において様々な方法で貯蔵及び利用ができる利点があるとしている。運輸における脱炭素化は電化が中心とするもののより多くのモードを電化しうる技術ができる前は代替燃料が重要になるとし、航空や長距離海運、貨物などにおいては advanced biofuel と carbon-free e-fuel を利用する必要があるとしている。

2019 年 12 月には欧州グリーンディールが発表された[2)]。A Clean Planet for all で表明された EU の 2050 年カーボンニュートラル目標達成に向けた行程表であり、2030 年 GHG 排出削減目標の引き上げ、必要な法制、対象とする産業、投資額や手段をはじめ具体的な行動が明示されている。2030 年 GHG 排出削減目標については従来の 1990 年比 40%から 50%に、さらに 55%へ引き上げることが提案されている。そのほか、産業における優先分野としてクリーン水素、燃料電池及びその他の代替燃料、エネルギー貯蔵、CCUS があげられている。また、様々な輸送モード向けの持続可能な代替燃料の生産と実装を促進するための立法オプションの検討、代替燃料インフラ指令の見直し、ゼロまたは低排出車両及び船舶の展開の加速、Horizon Europe プログラムによるクリーン水素等の研究とイノベーション支援などが記載されている。

欧州グリーンディールの一環として 2020 年 7 月にはエネルギーシステム統合に関する戦略“Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration”が発表された[3)]。運輸部門も含め、再エネによる電化が脱炭素化の主たる手段であるとする一方、電化が困難な用途においてはよりクリーンな燃料（次世代バイオ燃料、グリーン水素、合成燃料）が利用されるとしている。また、合成燃料製造のための capture

of carbon の実証と規模拡大については Innovation Fund（2021 年～）による支援を表明している。

2030 年の GHG 削減目標については、2021 年 6 月に採択された欧州気候法で 1990 年比 55%が確実となった。これを達成するための政策パッケージとして同年 7 月に Fit for 55 package が発表された [4]。Fit for 55 では再生可能エネルギー指令（RED II）の改正、エネルギー効率化指令の改正、代替燃料インフラ指令の改正、航空部門及び海運における持続可能な燃料の利用に関する政策イニシアチブなどが提案された。RED II の改正については、EU 全体における 2030 年再生可能エネルギー導入目標を従来の 32%から 40%に引き上げることが提案されたほか、再エネ目標に利用可能な燃料として合成燃料（RFNBO：非生物起源の再生可能燃料、RCF：回収炭素燃料）や再生可能燃料を定義している。代替燃料インフラ指令は、クリーン車の充電や代替燃料補充のためのインフラ普及に関する義務的目標であり、これにより確実な普及が見込まれるとされている。

RED II 改正案は 2021 年 7 月に発表され、この時の 2030 年再エネ導入目標は 40%であったが、2022 年 2 月のロシアによるウクライナ侵攻を受け、EU は REPowerEU Plan を発表した [5]。ここではロシア産化石燃料への依存低減とクリーンエネルギーへの移行の加速、Fit for 55 提案を基本としつつ再エネと省エネの目標をより高めることが表明されており、それぞれについて 2030 年までの目標値が提示された。具体的には再エネ導入目標の引き上げ（2030 年 40%→45%）、再エネ由来水素の国内生産量、輸入量の目標（それぞれ 10 Mt）、産業と運輸部門の RFNBO 導入目標の提案（産業：75%、運輸：5%）、Horizen Europe による Hydrogen Joint Undertaking への投資(EUR 200 million)などが提案された。このため、RED II 改正案における 2030 年再エネ導入目標は REPowerEU Plan に沿った形で 45%に変更され、2022 年 9 月に欧州議会で採択された。今後、EU 理事会と欧州議会による検討を経て 2023 年第 1 四半期に採択される見通しである。

以上のように、EU は 2050 年 CN 達成に向けた経路を検証、見直してきており、それに沿った形でクリーンエネルギーの導入目標や支援を示している。脱炭素化に向けては電化を中心とする一方、世界のエネルギー情勢やトランジションを踏まえ、水素や合成燃料などの低炭素燃料の導入についてもより積極的に推進する姿勢がみられている。

(2) ドイツ

ドイツでは 2019 年 12 月に気候保護法が制定され、2050 年の気候中立達成に向け、2030 年までに GHG 排出量を 1990 年比で少なくとも 55%削減することを規定していた。また、エネルギー、製造業、建造物、交通、農林業、廃棄物その他の 6 分野における GHG 年間排出許容量を規定した。これに対し、2031 年以降の GHG 排出削減措置が不十分であるとの法的判断がなされたことから、ドイツ連邦政府は 2021 年 5 月に気候保護法の改正法案を閣議決定し、気候中立の達成時期を 2045 年とするとともに、2030 年の GHG 排出削減目標を 65%に引き上げた。また新たに、中間目標として 2040 年までに 88%の削減目標を定めた。さらに 6 分野の GHG 年間排出許容量も引き下げた [7]。

気候中立達成に向け、ドイツ連邦政府は水素を重要な柱と位置付けている。連邦政府は 2020 年 6 月に国家水素戦略を発表するとともに、経済対策パッケージにおいて 2 年間で総額 90 億ユーロの予算を確保し水素の製造・利用・研究開発等を支援することを表明している。このほか、EU 基金や州レベルでも国内製造の支援を行っていくこととしている。水素の輸入分に関しては H2Global スキームで支援することとされている。H2Global では取引仲介会社が固定価格で 10 年間購入することで水素供給事業者の価格リスク及び量的リスクを低減することとしている。また、供給側からの買取価格と需要家への販売価格との差額を埋めるために、政府が取引仲介会社に資金を投入して支援する仕組みである。H2Global に対しては 9 億ユーロの経済対策パッケージが公表されている [8]。

ドイツの産業界からは、水素に加え合成燃料の促進に向けた施策が必要との指摘もなされている。2021 年 3 月に交通デジタル・インフラ省の Scheuer 大臣は、2035 年までに自動車における化石燃料の使用を段階的に廃止する考えを示すとともに、将来に向けてドイツの高い内燃機関技術の競争力を維持し続けるために、合成燃料の実用化と大量生産が求められると述べた [9]。2021 年 5 月に PtL ロードマップ [10]がドイツ連邦政府、航空業界、石油業界等により制定された（図 5.1.1-1）。これはドイツ航空業に 2030 年までに少なくとも 20 万 t/yr の PtL kerosene を提供可能とすることに向けたロードマップであり、このロードマップを基に政策とビジネスが協力して技術開発、基準の整備、市場拡大支援に取り組むこととされている。ドイツの航空機に対する PtL の混合義務は、2026 年以降に 0.5%、2030 年には 2%とすべきと記載されるとともに、当初はコストが非常に高いことが見込まれるため、PtL kerosene 製造の副産物に対する様々なクレジット等による支援が望まれるとされている。

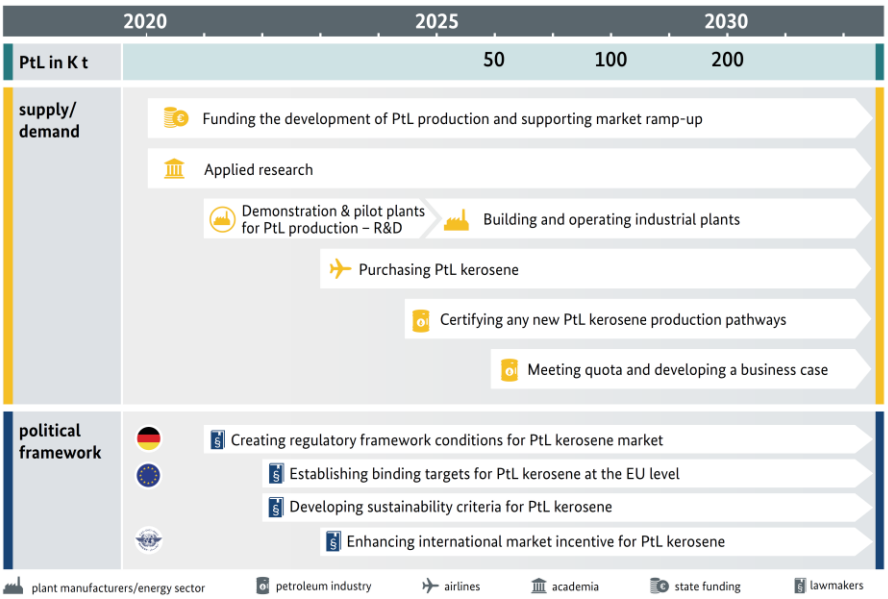


図 5.1.1-1 ドイツにおける PtL ロードマップ

ドイツ連邦政府は合成燃料の研究開発や生産拡大に対する具体的支援策を表明している。交通デジタル・インフラ省は、電力由来燃料及び次世代バイオ燃料の技術創出

ファンドを整備した。実施期間は 2021 年～24 年で、全体の助成額は 15.4 億 ユーロである。具体的なテーマは PtL 開発プラットフォームの構築と運用、電気由来燃料や次世代バイオ燃料の生産プラントの建設、e-kerosene の市場拡大支援等である。e-kerosene の副産物（ディーゼル、ガソリン、原料物質）は他の運輸部門や化学産業での利用を考えている。このファンドの一つとして 2021 年 5 月に、再生可能エネルギー由来の合成燃料及び次世代バイオ燃料の研究開発に対し 6.4 億ユーロの助成を行うと発表している。生産関連では、合成燃料製造設備に約 600 万ユーロを出資している [11]。

ドイツは、気候中立目標においては EU 全体の目標に先んじる 2045 年 CN を表明するとともに、自国の重要産業である自動車産業の競争力維持に向け水素や低炭素液体燃料の開発及び生産拡大、市場創出に向けた支援を具体的に進めており、これら低炭素エネルギーの今後の市場導入推移が注目される。

(3) 英国

英国の気候変動委員会は 2019 年 5 月に発表したネットゼロ戦略レポート [12]において、英国は 2050 年ネットゼロを追求すべきと勧告した。同年 6 月には気候変動法を改正し、2050 年ネットゼロエミッションを規定した。2020 年 12 月の NDC 報告書に 2030 年目標として 1990 年比 68%削減を記載し、2021 年の第 6 次カーボンバジェットでは 2035 年目標として 1990 年比 78%を明記している [13]。

カーボンニュートラル燃料については、水素が戦略の中心とされている。ネットゼロ戦略では、ネットゼロに向けたミックスを理解し、可能性のある課題やコストを評価するため、排出削減に向けた技術・行動変容オプションを、Core シナリオ、Further Ambition シナリオ、Speculative シナリオに区分し分析している。各シナリオにおける 2050 年排出削減目標は Core では 1990 年比 80%削減、Further Ambition では同 96%削減、Speculative では同 100%削減である。Core 及び Further Ambition ではクリーン燃料として水素と持続可能バイオ燃料が考慮されている。Speculative では技術開発レベルが低く、コストが非常に高く、公的受容性が相当に低い技術が考慮されており、水素の大規模普及拡大と合成燃料は Speculative シナリオでのみ考慮されている。水素の生産コストは 2025 年に 44 ポンド/MWh、2050 年に 39 ポンド/MWh と想定している。

2020 年 11 月に発表された The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution[14]では、重点項目の一つとして水素が取り上げられた。2030 年までに 5GW 規模の低炭素水素発電の開発を目指すこと、2021 年春に英国水素戦略を発表することが明記され、水素に対する英国政府の戦略が明確に示された。

水素に対する投資も積極的に行われている。2018 年 4 月に、ネットゼロイノベーション導入促進に向けた 10 億ポンドの投資プログラム Net Zero Innovation Portfolio（2021～2025 年）を実施している。投資対象 10 分野のうちの一つが水素であり、水素のバリューチェーン、サプライチェーン全体にわたる技術の実現と導入を目的とすることが明記されている。具体例としては Industrial Hydrogen Accelerator Programme に 2600 万ポンド、Low Carbon Hydrogen Supply 2 Competition に 6000 万ポンドの投資が計画されている。The Ten Point Plan では、5GW 規模の低炭素水素発電に向けた 2 億 4,000 万ポンドの Net Zero Hydrogen Fund を創設することが表明されている。

合成燃料に関する政策は現時点では具体的には示されていない。運輸関連の戦略においても、道路交通の zero emission vehicle については BEV が念頭に置かれており、大型車で水素が考慮されているのみである。2021 年 10 月に発表された UK Net Zero Research and Innovation Framework[15]は英国のネットゼロ戦略の実現支援に必要な R&I ニーズが示されており、CCUS 分野におけるイノベーションニーズでは回収 CO_2 の合成燃料への経済的利用を中長期（2025 年～）のニーズとする一方、運輸分野におけるイノベーションニーズとしては短期ニーズ（2020～25 年）として合成燃料製造における水素の可能性検討を上げるにとどまっており、合成燃料としての検討は考慮されていない。運輸の脱炭素化においては電化と水素利用が中心とされている。

参考文献（第 5.1.1 節に関するもの）

1) European Commission: A Clean Planet for all (2018)
2) European Commission: The European Green Deal (2019)
3) European Commission: Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration (2020)
4) European Commission: 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality (2021)
5) European Commission: REPowerEU Plan (2022)
6) 第 10 回メタネーション推進官民協議会、欧州の政策等動向と欧州バイオメタン GO 制度について (2023)
7) ジェトロ: 改正気候保護法が成立、気候保護のための新プログラム予算化も閣議決定 (2021). https://www.jetro.go.jp/biznews/2021/07/a147a21fe8138847.html（アクセス日：2023 年 2 月 27 日）
8) 資源エネルギー庁: 水素・アンモニアの商用サプライチェーン支援制度について (2022). https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/004_02_00.pdf（アクセス日：2023 年 2 月 27 日）
9) WeLT: „Unser Ziel muss das Auslaufen des fossilen Verbrenners bis 2035 sein“ (2021). https://www.welt.de/wirtschaft/article228206995/Verkehrsminister-Andreas-Scheuer-Unser-Ziel-muss-das-Auslaufen-des-fossilen-Verbrenners-bis-2035-sein.html（アクセス日：2023 年 2 月 7 日）
10) The Federal Government, PtL roadmap (2021)
11) ジェトロ: 政府、合成燃料の設備に 600 万ユーロを出資、生産拡大を目指す (2023). https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/01/14d1376da268c0c1.html（アクセス日：2023 年 2 月 27 日）
12) Committee on Climate Change: Net Zero - The UK's contribution to stopping global warming (2019)
13) ジェトロ、英国の気候変動対策と産業・企業の対応（2021）
14) 英国政府、The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution（2020）
15) 英国政府、UK Net Zero Research and Innovation Framework（2021）

5.1.2 グリーンイノベーション基金関連の技術開発動向全般

2020 年 10 月の 2050 年カーボンニュートラル宣言を踏まえ、政府は、2020 年 12 月にグリーン成長戦略を策定し、2021 年 6 月にグリーン成長戦略の具体化を行った。

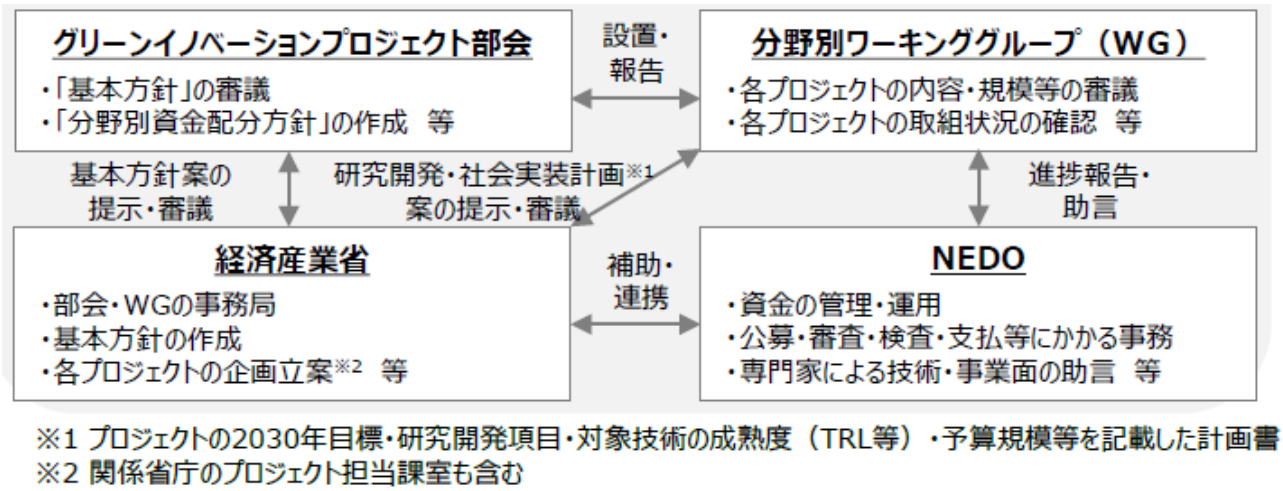
図 5.1.2-1 2050 年カーボンニュートラル実現に向けたこれまでの取組 [1)]

グリーン成長戦略の基、政府は 2 兆円の「グリーンイノベーション基金」を国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）に造成した。同基金では、「経済と環境の好循環」を作っていく産業政策であるグリーン成長戦略において実行計画を策定している重点分野のうち、特に政策効果が大きく、社会実装までを見据えて長期間の取組が必要な領域にて、具体的な目標とその達成に向けた取り組みへのコミットメントを示す企業等を対象として、10 年間、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援していく [2)]としている。

本節では、同基金事業の実施体制、及び基金プロジェクトの概要を示す。

(1) グリーンイノベーション基金事業の実施体制

基金の適正かつ効率的な執行に向けて、産業構造審議会グリーンイノベーションプロジェクト部会において決定された「分野別資金配分方針」を踏まえ、同部会の下に設置された分野別ワーキンググループが、基金で実施するプロジェクトごとの優先度・金額の適正性等を審議。その上で、担当省庁のプロジェクト担当課室が、各プロジェクトの内容を「研究開発・社会実装計画」として策定し、順次公募を開始していくことになっており、2023 年 2 月 16 日時点の進捗状況は、表 5.1.2-1 のとおり。



※1 プロジェクトの2030年目標・研究開発項目・対象技術の成熟度（TRL等）・予算規模等を記載した計画書
※2 関係省庁のプロジェクト担当課室も含む

図　5.1.2-2　グリーンイノベーション基金の実施体制 2)

表　5.1.2-1　グリーンイノベーション基金プロジェクトの進捗状況 2)

分野	プロジェクト名	① WG準備	② WG１回目	③ WG２回目	④ 公募	⑤ 採択	予算規模 （億円）
WG1	①洋上風力発電の低コスト化	済	済（21/6/23）	済（21/8/31）	21/10/1～11/15	済（22/1/21）	1,195
	②次世代型太陽電池の開発	済	済（21/6/23）	済（21/8/31）	21/10/1～11/15	済（21/12/28）	498
	⑪廃棄物・資源循環分野におけるカーボンニュートラル実現	実施中	未定	未定	未定	未定	－
WG2	③大規模水素サプライチェーンの構築	済	済（21/4/15）	済（21/4/28）	21/5/18～7/1	済（21/8/26）	3,000
	【追加】大型ガスタービンによる水素発電（高混焼）の実証	済	済（23/2/13）	調整中	未定	未定	－
	④再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造	済	済（21/4/15）	済（21/4/28）	21/5/18～7/1	済（21/8/26）	700
	⑤製鉄プロセスにおける水素活用	済	済（21/6/22）	済（21/8/24）	21/9/15～11/11	済（22/1/7）	1,935
	⑥燃料アンモニアサプライチェーンの構築	済	済（21/6/22）	済（21/8/24）	21/9/15～11/11	済（22/1/7）	688
	⑦CO_2等を用いたプラスチック原料製造技術開発	済	済（21/7/15）	済（21/9/13）	21/10/15～12/9	済（22/2/18）	1,262
	⑧CO_2等を用いた燃料製造技術開発	済	済（21/10/21）	済（21/12/23）	22/1/20～3/7	済（22/4/19）	1,152.8
	⑨CO_2を用いたコンクリート等製造技術開発	済	済（21/7/15）	済（21/9/13）	21/10/15～11/29	済（22/1/28）	567.8
	⑩CO_2の分離回収等技術開発	済	済（21/9/13）	済（21/12/23）	22/1/20～3/7	済（22/5/13）	382.3
WG3	⑫次世代蓄電池・次世代モーターの開発	済	済（21/7/30）	済（21/10/26）	21/11/11～22/1/6	済（22/4/19）	1,510
	⑬電動車等省エネ化のための車載コンピューティング・シミュレーション技術の開発	済	済（21/10/26）	済（22/2/17）	22/3/14～5/10	済（22/7/19）	420
	⑭スマートモビリティ社会の構築	済	済（21/10/26）	済（22/2/17）	22/3/14～4/27	済（22/7/19）	1,130
	⑮次世代デジタルインフラの構築	済	済（21/7/30）	済（21/10/1）	21/10/19～12/3	済（22/2/25）	1,410
	【追加】IoTセンシングプラットフォーム構築	済	済（22/9/27）	調整中	未定	未定	－
	⑯次世代航空機の開発	済	済（21/5/24）	済（21/7/8）	21/7/19～9/16	済（21/11/5）	210.8
	【追加】電動航空機の開発	実施中	未定	未定	未定	未定	－
	⑰次世代船舶の開発	済	済（21/5/24）	済（21/7/8）	21/7/19～9/6	済（21/10/26）	350
	⑱食料・農林水産業のCO_2等削減・吸収技術の開発	済	済（22/2/17）	済（22/6/3）	22/8/24～10/24	済（22/12/19）	159.2
	⑲バイオものづくり技術によるCO_2を直接原料としたカーボンリサイクルの推進	済	済（22/6/3）	済（22/9/27）	22/10/27～12/12	審査中	1,767
	⑳製造分野における熱プロセスの脱炭素化	済	済（23/2/15）	調整中	未定	未定	－

(2) グリーンイノベーション基金プロジェクトの概要

① 洋上風力発電の低コスト化

2050 年カーボンニュートラル実現に向け、再生可能エネルギーを最大限導入することが政府の方針。特に、洋上風力発電は、大量導入やコスト低減が可能であるとともに、経済波及効果が期待されることから、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札である。これまで欧州を中心に洋上風力が拡大してきたが、2050 年にかけては

アジア市場の急成長が見込まれる。特に、急深な地形が広がる日本・アジアにおいて、低風速・台風・落雷等の気象条件や海象等を踏まえて最適化するニーズが高まっている。足下では水深の浅い海域で、欧州で技術が確立した着床式の導入が進むが、浮体式は、欧州においてもまだ開発途上。造船業を含む新たなプレイヤーの参入余地も期待される。欧州と異なり、遠浅の海域の少ない日本で「2040 年までに 3000 万～4500 万 kW の案件を形成する」という高い目標を達成するため、特に、深い海域でも導入余地が大きい浮体式のコストが、技術開発や量産化を通じて、今後大幅に低減することが必要である。本プロジェクトでは、これまで取り組んできた実証事業等による知見も踏まえ、浮体式を中心とした洋上風力発電の早期のコスト低減を行い、導入拡大を図るとしている。

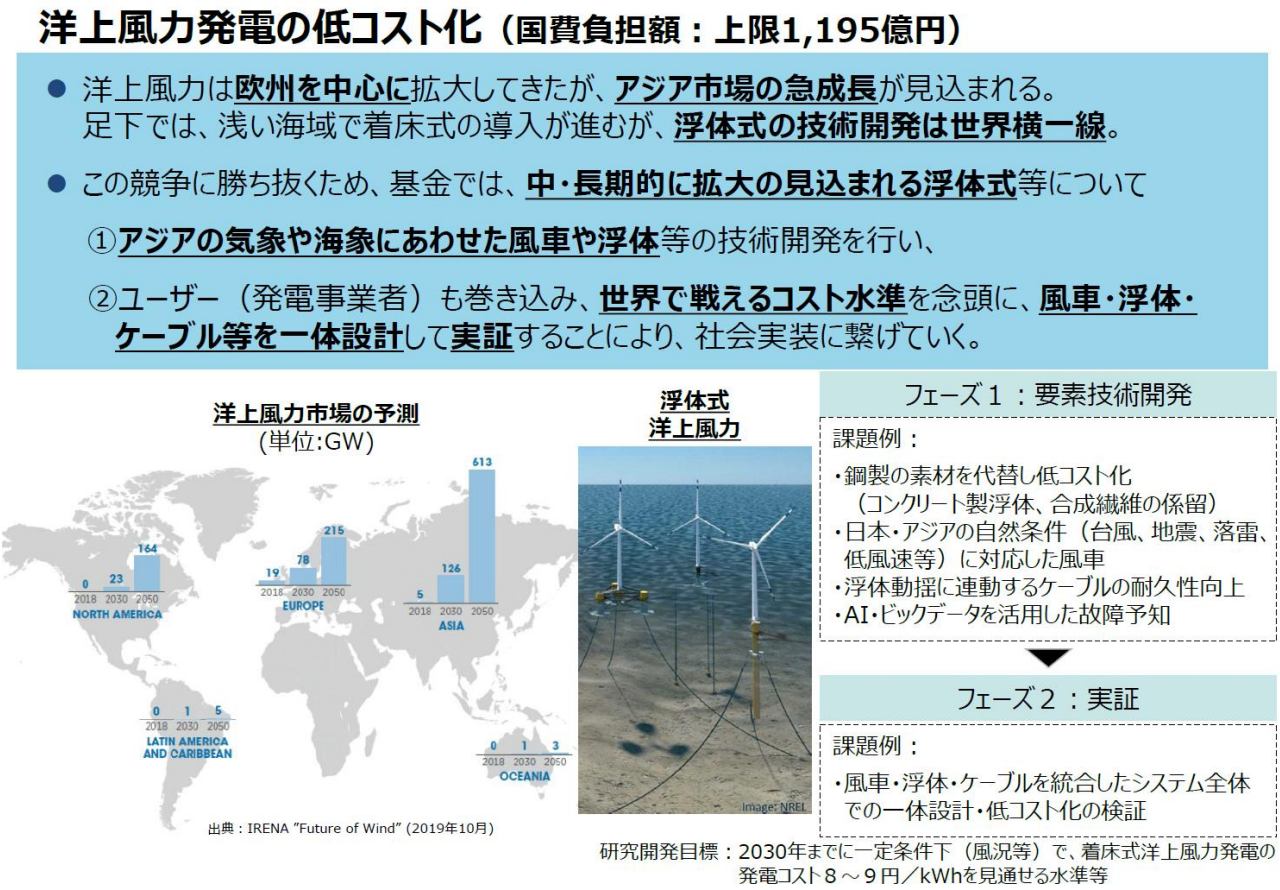


図 5.1.2-3 プロジェクト概要 [2)]

② 次世代型太陽電池の開発

2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、太陽光発電を含む再生可能エネルギーの主力電源化を目指し、最大限導入を進めていく必要がある。こうした中、平地の少ない我が国において、日本は既に国土面積あたりの太陽光発電の導入量は主要国で 1 位の状況であるが、地域と共生しながら、安価に事業が実施できる太陽光発電の適地が不足しているという点について、発電事業者等から懸念の声があがっており、適地の確保が導入拡大に向けた大きな課題の一つとなっている。この課題を克服する手段

の一つとして、既存の技術では太陽光発電を設置できなかった場所（耐荷重の小さい工場の屋根、ビル壁面等）にも導入を進めていくことが期待されているが、その実現には電池の軽量性や壁面等の曲面にも設置可能な柔軟性等を兼ね備え、性能面（変換効率や耐久性等）でも既存電池に匹敵する次世代型太陽電池の開発が不可欠。海外においても太陽光発電の導入を拡大する動きは急速に進んでおり、国際機関の報告によれば世界的に屋根置きの設置が進むと想定されているところ、先行的に課題に直面する日本発のイノベーションにより、今後拡大が見込まれる次世代型太陽光市場の獲得を目指すとしている。

本プロジェクトでは、こうした認識の下、産学官の連携した開発体制を構築することに加え、開発事業者と住宅メーカー・ゼネコン等のユーザー企業に近い事業者との連携体制を構築する。ユーザー企業等のニーズ（意匠性等）をあらかじめ取り込んだ技術開発を同時・平行で行うことなどにより、国内外の市場開拓、製品の信頼性獲得（ブランド力の向上）、効率的な生産体制を早期に確立し、競争力ある産業への進化を加速することを目指す。また、こうした研究開発のみならず、海外市場の獲得も見据え、次世代型太陽電池に係る性能評価等の標準化も並行して進めるとしている。

図 5.1.2-4 プロジェクト概要 [2)]

③　大規模水素サプライチェーンの構築

水素は、化石燃料や再エネなど様々なエネルギー源から製造することができ、利用先も発電・輸送・産業など多岐に渡ることが期待されるため、カーボンニュートラル達成には必要不可欠な二次エネルギーである。また、世界的に水素及び関連市場が今後拡大していくことが見込まれており、こうした国内外の市場を獲得することは、我が国の経済成長、雇用維持や、世界の脱炭素化にも貢献することに繋がる。ただし、水素の社会実装を促すためには、供給設備の大型化等を通じた供給コストの削減と両輪で、大規模な水素需要の創出を同時に行うことが求められる。しかしながら、水素の黎明期においては、長期の水素需要量が不確実であるため、民間事業者が大規模なインフラ投資に踏み出しにくいという問題があり、この不確実性を下げるためにも、追加でのインフラ投資を最小化しつつ、供給量の増大と水素需要の創出を行うことを可能とする社会実装モデルを構築する必要がある。本プロジェクトについては、こうしたモデルを構築し、各要素の技術的な課題の解決を図るとともに、水素の需要側と供給側の取組を特定エリアで統合的に実証することで、技術的な知見を蓄積し、将来的なインフラ整備とともに効率良く水素の普及を達成することを目指すとしている。

図　5.1.2-5　プロジェクト概要 [2)]

④　再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造

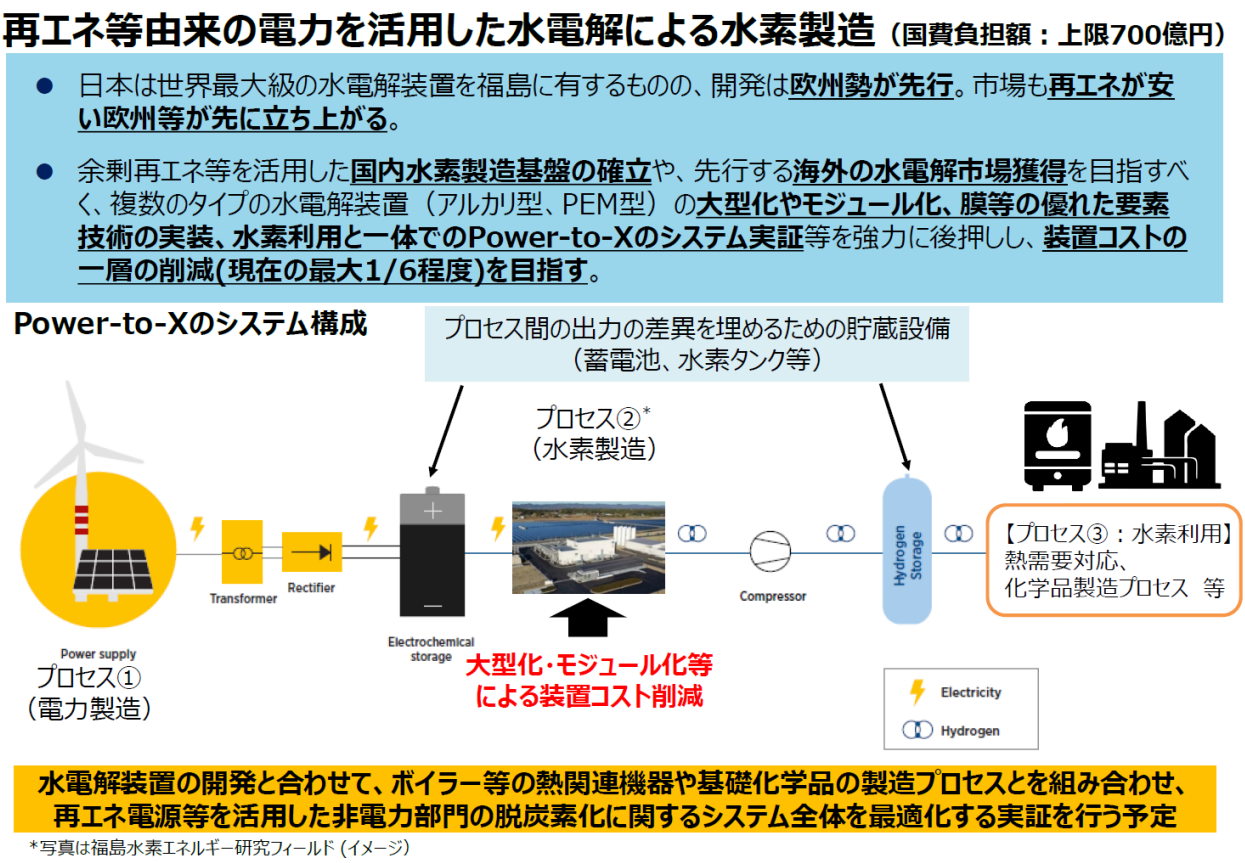


図　5.1.2-6　プロジェクト概要 [2)]

⑤　製鉄プロセスにおける水素活用

鉄鋼は、宇宙船から自動車、新幹線、PC、スマートフォン、住宅、日用品等の人々の生活を支えるあらゆる製品に組み込まれている。こうした社会の基盤となる製品の材料を供給する鉄鋼業は、サプライチェーンの川上に位置し、資源・エネルギー・土木・建築等のインフラ分野や、自動車、電機電子・造船等の製造業等のあらゆる産業の基盤の役割を果たしている。2050 年のカーボンニュートラル社会においても、鉄鋼は、自動車向けの電磁鋼板や洋上風力のモノパイル等にも利用されるなど、脱炭素化製品に必要不可欠な素材の一つである。IEA の見通しにおいても、2050 年断面において、自動車や各インフラ、電子電気機器等で大きな需要が見込まれている。しかしながら、鉄鋼業では、製造過程で CO_2 を多く排出することが課題となっており、実際、鉄鋼業は産業部門全体の 40%もの CO_2 を排出している。製鉄プロセスにおいて、炭素（石炭や木炭）を鉄鉱石の還元に用いる技術は古来より不変の製鉄のあり方であり、現行の高炉法は、エネルギー効率、生産効率、生産品質（高級鋼製造）、原料条件（豪州産等の低品位鉄鉱石が利用可能）の面で優れている一方で、コークス（石炭）を用いて還元する過程で不可避的に CO_2 が発生する。そのため、鉄鋼業におけるカーボンニュートラル実現のためには、原料や還元剤において化石燃料から脱却するという、製鉄プロセスそのものの抜本的な転換が求められている。現在、製鉄プロセスにおける脱炭素化のため、鉄鉱石の還元に炭素ではなく水素を用いる水素還元製鉄の研究が

各国で進められているが、世界的に見ても未だ実用化の例は無く、史上初のチャレンジである。我が国鉄鋼業が、世界に先駆けて水素還元製鉄等の超革新技術を確立し、グリーンな高級鋼に特化して生産・供給する体制を構築することが、日本の鉄鋼業の「勝ち筋」と考えられる。本プロジェクトでは、将来的に安価かつ大量の水素供給基盤が確立されることを見据え、水素還元製鉄技術を始めとした脱炭素技術の確立と社会実装に向けた研究開発を行うとしている。

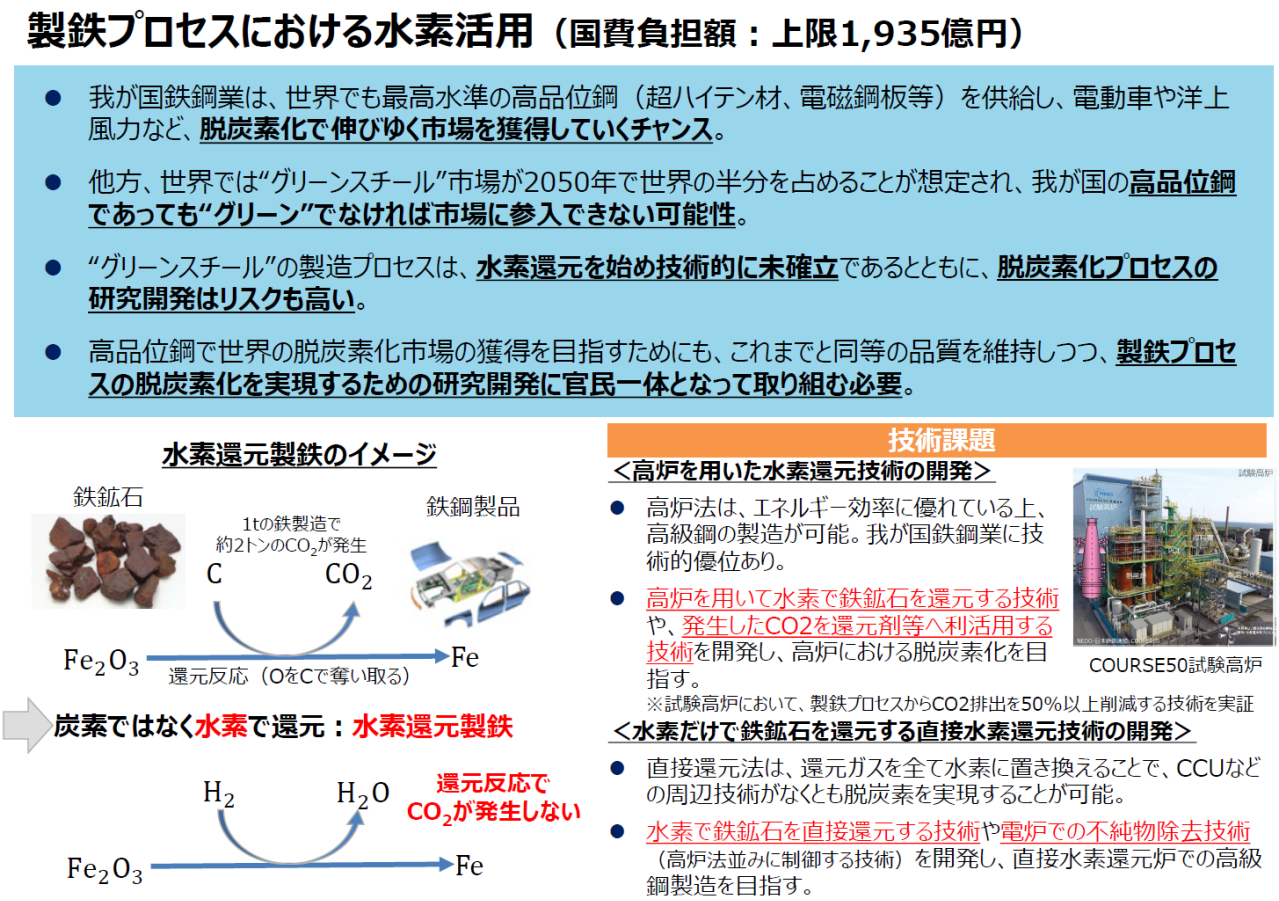


図　5.1.2-7　プロジェクト概要 [2)]

⑥　燃料アンモニアサプライチェーンの構築

2050 年カーボンニュートラル実現に向けては、脱炭素燃料の普及拡大や電力の脱炭素化を推進する必要があり、脱炭素燃料の候補の 1 つとしてアンモニアが挙げられる。現在、アンモニアは肥料や工業原料として用いられている（原料アンモニア）が、アンモニアは燃焼時に二酸化炭素（CO_2）を排出しないため、発電用や船舶用などでゼロエミッション燃料としての役割が期待されている。特に発電用途では、火力発電が調整力、慣性力機能を具備しており、系統運用安定化に資する。そのため、アンモニアの利用を通じて、化石燃料を代替する形で火力発電の脱炭素化を進めることが重要。また、アンモニアは、水素キャリアとしても利用可能であり、水素に変換しなくても燃料として利用でき、既存のインフラを活用することで、安価に利用・製造できることが特長である。こうした特性に鑑み、世界的に燃料アンモニアへの注目が高まって

おり、今後、アジアを中心に燃料としての需要が急拡大していくことが見込まれるため、その市場を積極的に獲得することは、我が国の経済成長・雇用維持や、世界全体の脱炭素化にも貢献する。しかしながら、現状燃料用途での利用がされていない中で、燃料アンモニアの大規模な需要の創出と安定的で安価な供給の実現に向けて、利用拡大、安定供給確保、コスト低減といった視点を盛り込んだ形で社会実装モデルを構築することで、燃料アンモニアサプライチェーンの川上から川下まで様々な市場の形成が期待できる。そこで、本プロジェクトでは、アンモニアの利用拡大及びに製造の高効率化・低コスト化等の各要素での技術的課題を解決することで、需要と供給が一体となった燃料アンモニアサプライチェーンの構築を目指すとしている。

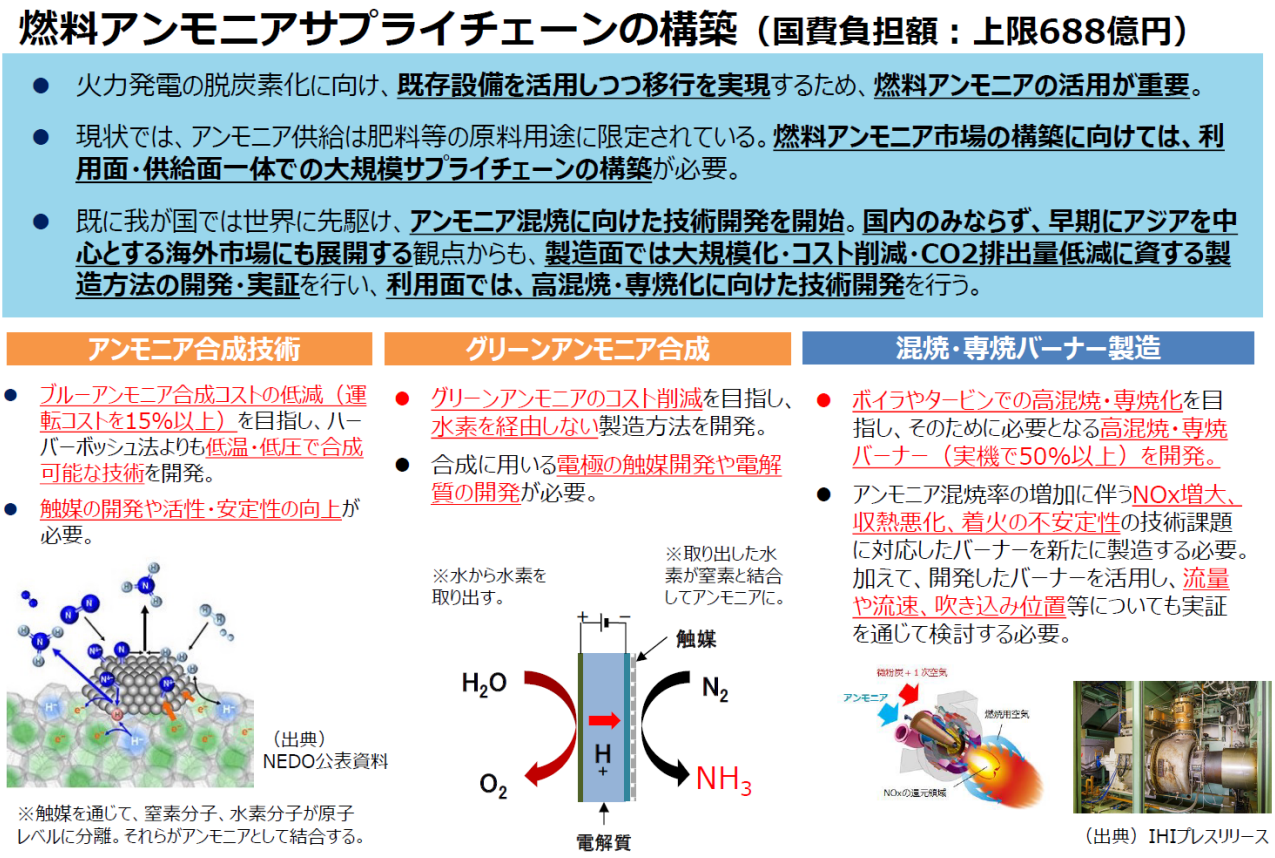


図　5.1.2-8　プロジェクト概要 [2)]

⑦　CO_2 等を用いたプラスチック原料製造技術開発

カーボンリサイクルは CO_2 を資源として有効活用する技術で、カーボンニュートラル社会を実現するためのキーテクノロジーであり、CO_2 分離回収分野や、一部の化学品分野（例：ポリカーボネート）をはじめとして日本に競争力がある。日本の部門別 CO_2 排出量の内、産業部門・工業プロセスが占める割合は全体の 29.3%（2019 年）。この内、化学産業からは 18.6%（年間 6018 万トン）が排出されており、2050 年のカーボンニュートラル化に向けて抜本的な対策が必要である。プラスチックの多くは石油精製で得られるナフサ（粗製ガソリン）を原料として作られている（石油製品の 12.4%が石油化学用ナフサ）。石油製品の需要が減少する中で、プラスチックの原料となるナフサの消

費量は横ばいとなっている。プラスチックには炭素成分が不可欠であることから、ナフサについても当面一定量を使い続けることが見込まれる。ナフサを約 850℃の高温で熱分解することによって、プラスチックやゴムの原料となるエチレン、プロピレン、ブタジエン等の基礎化学品（オレフィン）が製造されているが、これらの製造過程で年間 3100 万トンの CO_2 が排出されており、特にナフサ分解炉の熱源については抜本的な対策が必要である。例えば、基礎化学品やポリカーボネート、ポリウレタン等の機能性化学品（含酸素化合物）の製造時に CO_2 等を資源として有効活用することができれば、CO_2 排出量を大幅に削減することができるため、その実現への期待は大きい。また、年間 891 万トン排出される廃プラスチックは約 84%がリサイクルされているが、この内 57%がごみ焼却発電やセメント製造の熱源として利用（サーマルリサイクル）されている。しかし、最終的には単純焼却を含めて年間約 1600 万トンの CO_2 が排出されているため、廃プラスチックを元のプラスチック原料に戻すケミカルリサイクル等の技術確立が求められる。海外では、ナフサの代わりに安価な石炭やシェールガスからプラスチック原料を製造する取り組みが行われているが、前者は CO_2 排出量が多いこと、後者はゴムの原料となるブタジエンの生産が難しい点が、それぞれ課題として挙げられる。廃プラ・廃ゴムのケミカルリサイクルには、酸素存在下でガス化して合成ガスから基礎化学品を製造する方法と、無酸素条件下で熱分解してオレフィン合成または油化する方法等がある。しかし、ケミカルリサイクルが占める割合は 4%程度に留まっており、用途も限定的であることから、CO_2 削減のためには、この割合を増やしていくことが重要である。日本が強みを発揮できる有望なケミカルリサイクル技術（現行 TRL4 相当）を確立して社会実装を目指すとともに、リサイクルプラスチックの国際標準化等により、海外に対する日本の優位性を確保するとしている。

図　5.1.2-9　プロジェクト概要 [2)]

⑧　CO_2 等を用いた燃料製造技術開発

2050 年に向けたカーボンニュートラルへの移行を実現するためには、日本が排出する温室効果ガスの 85%、CO_2の 93%を排出するエネルギー部門の取組が重要となり、とりわけ、燃焼しても大気中に CO_2が増加せず、化石燃料の代替となる「脱炭素燃料」の実装が鍵となる。「脱炭素燃料」は、水素や燃料アンモニアの他、液体燃料としてのバイオ燃料や合成燃料、気体燃料としての合成メタン、グリーン LP ガス等が挙げられる。「脱炭素燃料」の社会実装は、海外の化石燃料に依存する我が国のエネルギー需給構造の変革をもたらす可能性があり、エネルギー安全保障の観点からも重要なものとなっている。また、その特性として、既存のインフラを活用することで導入コストを押さえられるとともに、製造技術に関する課題を解決し、製造コストを下げることができれば、社会実装が可能となる。さらに、電化・水素エネルギーへの代替が困難又は限定的となってしまう分野においても、既存の化石燃料からの代替が可能であると考えられる。こうした優位性から、脱炭素社会の実現に向けた多様な選択肢の一つとして、技術開発を促進することが重要となる。商用化レベルでの製造技術を世界に先駆けて我が国企業が確立し、海外各国へ技術や設備、それらの利用に係るノウハウ・知見等を展開することは、世界における「脱炭素燃料」市場の獲得及び CO_2削減に貢献することにも繋がる。また、新たな燃料に対して市場の開発及び獲得にはスピード

が課題となってくることから、早期の社会実装を実現するために、政府側からの支援に加えて、事業者のコミットメントも必要と考えられるとしている。

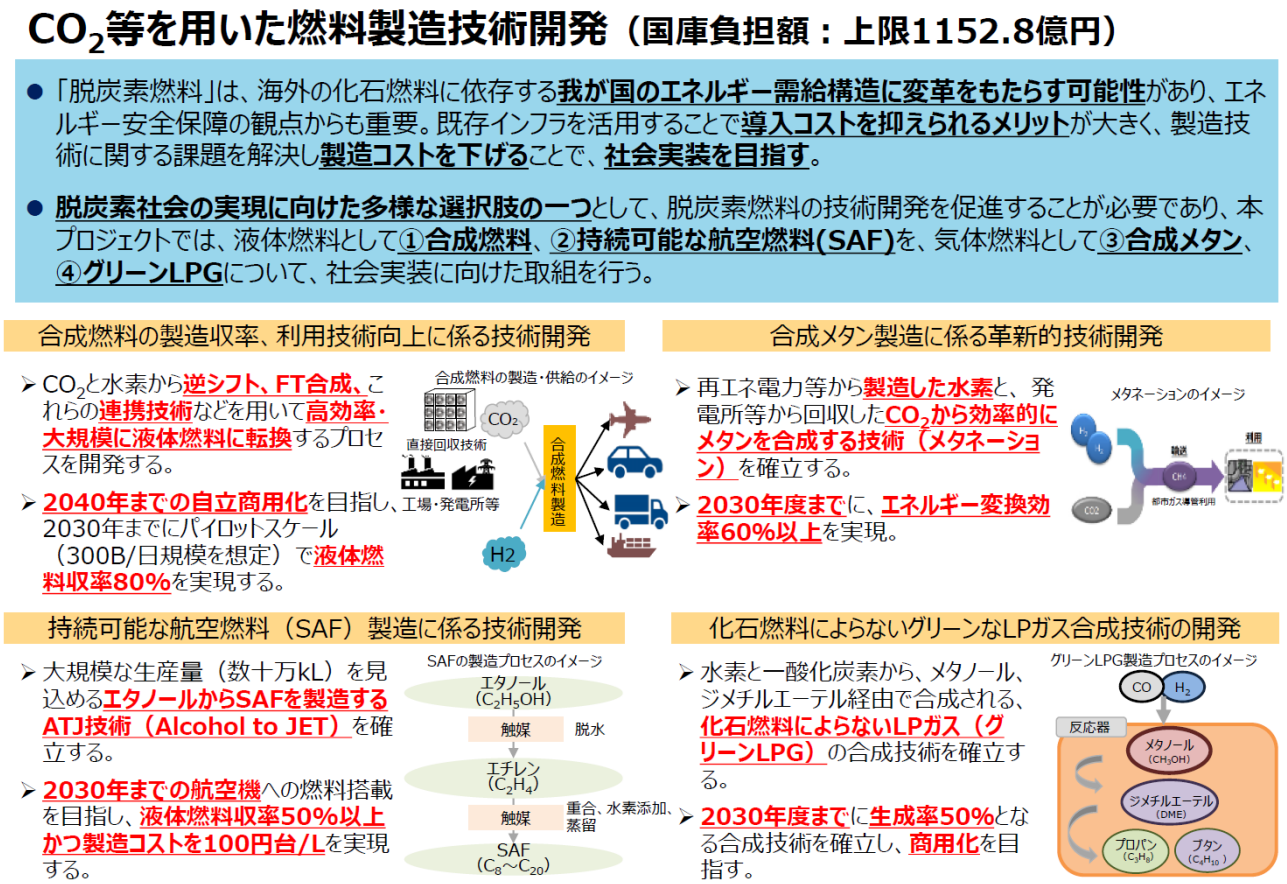


図　5.1.2-10　プロジェクト概要 [2)]

⑨　CO_2を用いたコンクリート等製造技術開発

カーボンリサイクルは、CO_2を資源として有効活用する技術でカーボンニュートラル社会を実現するためのキーテクノロジーであり、CO_2分離回収分野や、一部の化学品分野（例：ポリカーボネート）をはじめとして日本に競争力がある。特に、コンクリート、セメント、炭酸塩等（以下、「コンクリート・セメント分野」）への CO_2の利用については、CO_2固定化ポテンシャルが高いこと、生成物が安定していることなどから、早期の社会実装による大規模な CO_2削減が期待され、日本をはじめ米国や欧州において研究開発・実証が本格化している。コンクリート・セメント分野におけるカーボンリサイクル技術は、廃棄物・副産物等に含まれるカルシウム（Ca）、マグネシウム（Mg）等のアルカリ源を抽出・再利用し、CO_2を生成物に取り込む技術（例：$CaO+CO_2 \rightarrow CaCO_3$）である。また、生成物は、主にコンクリート、セメント、その他素材・化学品等で利用される。同分野において脱炭素化を実現するためには、世界各地で利用されているコンクリートの CO_2排出削減・固定量を増大させるとともに、コスト削減等によりその利用を促していく必要がある。また、コンクリートの材料であるセメントについても、その原料である石灰石の脱炭酸反応で CO_2が排出されるという課題がある。

同分野におけるカーボンリサイクル技術の社会実装に向け、上述した技術的課題の解決を図るとともに、国内外への普及を戦略的に進めることで、同分野における脱炭素化の実現、もってカーボンニュートラル社会実現に貢献することを目指すとしている。

図 5.1.2-11 プロジェクト概要 [2)]

⑩ CO_2 の分離回収等技術開発

電力部門の脱炭素化に向けては、再生可能エネルギーを最大限導入する方向性であるが、国内の電力需要をカバーするためには、電力の安定供給とレジリエンス対策（供給力、調整力、慣性力）の観点から火力発電を一定容量確保し、排出される CO_2 を回収する必要がある。さらに、欧州委員会が準備中の「EU タクソノミー」規制において、一定の条件（ライフサイクル全体での排出量が kWh 当たりで 100 グラム(CO_2 換算)未満）を満たすガス火力発電所を、「持続可能な投資」に分類することを検討中。これを満たすためには、ガス火力発電所に CO_2 分離回収システムを装備する必要があるが、こうした欧州での規制は、CO_2 排出の国境調整などの議論を通じて、世界に類似の規制をもたらす可能性があり、CO_2 分離回収技術の必要性は今後も高まっていくと考えられる。産業部門の脱炭素化に向けては、電化や水素等への燃料転換が進展するが、コストの影響等により、化石燃料需要は一定程度残存すると予想される。また、セメント、製鉄、化学等の産業部門では原料由来の CO_2 排出が避けられない。さらに、海外、特に欧州各国において、脱炭素化にむけた取組が加速しており、炭素国境調整（CBA）

等の議論もある中で、我が国の産業競争力を維持するためには、産業分野から排出される CO_2 を着実に回収して脱炭素化を目指す必要がある。また、CO_2 を水素と合成することにより燃料、化学品を製造する等のカーボンリサイクル／CCUS においても、CO_2 分離回収技術は、共通基盤のコア技術として位置づけられている。

以上のように、電力部門・産業部門の双方において CO_2 分離回収技術の必要性が高まっている一方で、①分離回収のために多くのエネルギー投入が必要、②設備コスト・回収素材コスト等が高い、といった課題が存在。海外では、税控除や補助金等の政策サポートによりその導入が支援される例があるが、本格的な社会普及・市場形成には、CO_2 分離回収の低コスト化・低エネルギー化に繋がる技術開発や社会制度整備により、費用対効果の高い分野・需要家から段階的に分離回収技術を導入していくことが必要としている。

CO_2 分離回収の低コスト化・低エネルギー化には、CO_2 回収効率を飛躍的に向上させる素材等の開発、カーボンリサイクル／CCUS までを包含した全体システムの開発が必要となるが、利用形態に応じて排ガス特性（圧力、濃度、含まれる夾雑物の種類と量、等）は様々であることから、一定の分類の下に、最適な素材・プロセス等を開発することが求められる。既に、EOR（原油促進回収法）に用いられる CO_2 分離回収技術は既に実用化され、米国等において商用プラントが稼働している他、国内でも、石炭火力発電や製鉄プロセス等における CO_2 分離回収技術の開発・実証が進められている。今後は、より低圧・低濃度の排ガスへの対応が進展していくことが見込まれ、具体的には、ガス火力発電、工業炉等の産業プロセス等、CO_2 濃度が 10%以下の領域が対象になりうる。なお、回収された CO_2 を燃料・化学品・コンクリート等に活用する技術も並行して開発が進められていき、分離回収技術と組み合わされてサプライチェーンが構築され、ビジネスモデルが確立されることを期待。

本プロジェクトでは、世界に先駆けて、CO_2 濃度 10%以下の低圧・低濃度の CO_2 分離回収技術を確立し、CO_2 分離回収設備・素材ビジネスの拡大に加えて、CO_2 の活用も含めたカーボンリサイクルのビジネスモデル創出を可能にすることで、カーボンリサイクル市場における我が国の国際競争力を強化するとともに、BECCS や DAC 等のネガティブエミッション技術の開発にもその成果を繋げていくことを目指すとしている。

CO_2の分離回収等技術開発（国庫負担額：上限382.3億円）

- **電力部門**や**熱需要**のカーボンニュートラル化に向けては、**「CO_2回収」で対応**する必要がある。
- また、「CO_2回収」のコア技術であるCO_2分離回収技術は、CO_2を原料とする合成燃料、化学品、コンクリートなどの**カーボンリサイクル**／CCUSにおいて**必須の共通要素技術**。
  なお、日本は、商用化されている、**石炭火力等の高濃度CO_2の分離回収プラントでトップシェア**。
- 今後は、CO_2回収が未着手である**天然ガス火力や工場等のより低い濃度（10%以下）のCO_2回収への適用**に向け、分離回収に必要な**エネルギーやコストの低減が課題**。
- 低エネルギーでCO_2を分離可能な**革新的素材の開発※やシステム技術等の革新・実証**を推進し、現在、6000円台/t-CO_2であるコストにつき、**2030年には2000円台/t-CO_2を達成**する。※アミン吸収剤、物理吸着剤、分離膜など
  また、実際に排出されたガスを用いた分離素材の標準評価技術基盤を確立し、国際競争力の強化を図る。

図　5.1.2-12　プロジェクト概要 [2)]

⑪　廃棄物・資源循環分野におけるカーボンニュートラル実現（準備中）

準備中のため、公表資料なし

⑫　次世代蓄電池・次世代モーターの開発

温暖化対策に向け、世界的に自動車の電動化の動きが加速している。欧州や中国は、電気自動車・プラグインハイブリッド自動車の普及を戦略的に進めており、急速に普及が拡大する一方、日本では、欧州や中国に比べ、普及が遅れている。また、各国で燃料電池トラック・バスの開発支援の取組が強化されている。我が国経済の大黒柱である自動車産業の競争力の維持・強化のためには、電動化の取組を加速する必要がある。電動車の普及に向けては、車両価格の低減等による社会的受容の拡大、充電インフラ・水素ステーション等のインフラ整備、蓄電池・燃料電池・モーター等の電動車関連技術・サプライチェーン・バリューチェーンの強化が課題となる。特に、軽自動車・商用車等ユーザーのコスト意識や車体設計上の制約が厳しい自動車の電動化については、小型・軽量な蓄電池・モーターの開発が必要となる。また、自動車のライフサイクルでの CO_2削減の観点から、高効率なモーターの開発に加え、蓄電池やモーターの製造時・廃棄時の CO_2削減も重要な課題となる。加えて、蓄電池やモーターには、リチウム、ニッケル、コバルト、黒鉛、ネオジム、ジスプロシウム等の資源が大量に使用されることから、資源制約の克服の観点から、よりサプライチェーンリスクの低い材料の開発や、リサイクルの実現も課題である。

本プロジェクトでは、こうした課題に対し、①蓄電池やモーターシステムの性能向上・コスト低減、②材料レベルからの高性能化、省資源化、③高度なリサイクル技術の実用化に向け、技術的な課題の解決を図ることで、将来的な自動車の電動化を支える基盤技術や蓄電池・モーターの産業競争力の強化、サプライチェーン・バリューチェーンの強靭化を目指すとしている。

図　5.1.2-13　プロジェクト概要 [2)]

⑬　電動車等省エネ化のための車載コンピューティング・シミュレーション技術の開発

自動車産業は日本の基幹産業として現在 62 兆円の市場規模を有している。引き続き、2030 年時点で 140 兆円と言われる世界の電動車市場や、2030 年時点で約 45 兆円、2040 年時点で約 150 兆円と言われる世界の自動運転・コネクテッドカー市場において、我が国自動車産業の競争力を維持することが重要である。

グリーン化の観点からも、パワートレインの電動化への対応に加え、自動車がコネクテッド・自動運転機能を有することで、平常走行時における高度なエコドライブ、サグ部（下り坂から上り坂への変化点）・トンネルに起因する渋滞の解消、事故に起因する渋滞の解消など、交通流の最適化を通じ、CO_2削減（ポテンシャルとして 2030 年に国内で 168.7 万 t-CO_2、2050 年に国内で 1,320 万 t-CO_2）に貢献することが見込まれている。その際、自動運転に必要な情報処理をネットワーク・クラウド側に依存すると、今後自動車分野以外でもデータ量の増大が見込まれるネットワーク・クラウドに

追加の電力負荷を与えることとなり、トータルでの CO_2削減効果を減殺する可能性がある。そのため、データセンターのグリーン化（次世代デジタルインフラ）の取組とともに、そもそも自動車からクラウドに至るネットワークへの負荷を減少させるべく、自動運転を含む高度な情報処理について、可能な限りエッジ側にて実施できるアーキテクチャとそれを支える要素技術が重要となる。

他方で、電動車内では、電池容量に対して、パワートレインだけでなく、車室内空調・車載コンピューティング等でも電力を消費しながら走行しているところ、自動車側にて自動運転に必要となる膨大な情報処理を実施した場合、航続時間・距離がカタログ値（パワートレインのみで走行し、車室内空調や車載コンピューティングを使用しない場合）に対して 35%以上減少する可能性がある。そのため、自動運転機能等の本格的な社会実装が見込まれる 2030 年代以降に向けては、電動車の利活用に問題ない航続時間を確保するための徹底した車載コンピューティングの省エネ化技術が、グリーンの観点からも、製品競争力の観点からも重要となる。なお、グリーン成長戦略においても「2050 年カーボンニュートラルの実現に当たっては、2050 年のモビリティ社会の在り方の変革も見据え、単に電動化のみを射程とするのではなく、「電動・自動走行車」をターゲットとして取り組んでいく」とされているところ、本プロジェクトを通じて、自動車内での電動化と自動化の両立を達成することを目指すとしている。

同時に、電動化への対応は、自動車メーカーだけではなく、広く我が国の自動車サプライチェーン全体にとっての課題であり、今後自動化の進展とともにその開発が高度化することも踏まえ、これまでの我が国自動車産業の強みであったすり合わせ型開発手法から一定程度、デジタル・アジャイル開発へと転換を図り、もって電動車等開発サイクル全体の加速化・高度化を実現することが重要である。

本プロジェクトでは、上記のような問題意識を踏まえ、分散型アーキテクチャ（エッジ処理志向）を前提にしつつ、車載コンピューティング（自動運転ソフトウェア・センサーシステム）について、レベル 4 自動運転を実現するため性能を担保しながら、徹底した省エネ化を進めるための研究開発を実施するとともに、サプライチェーン全体で電動車等開発の加速化・高度化を実現するためのシミュレーション基盤の構築のための研究開発を実施するとしている。

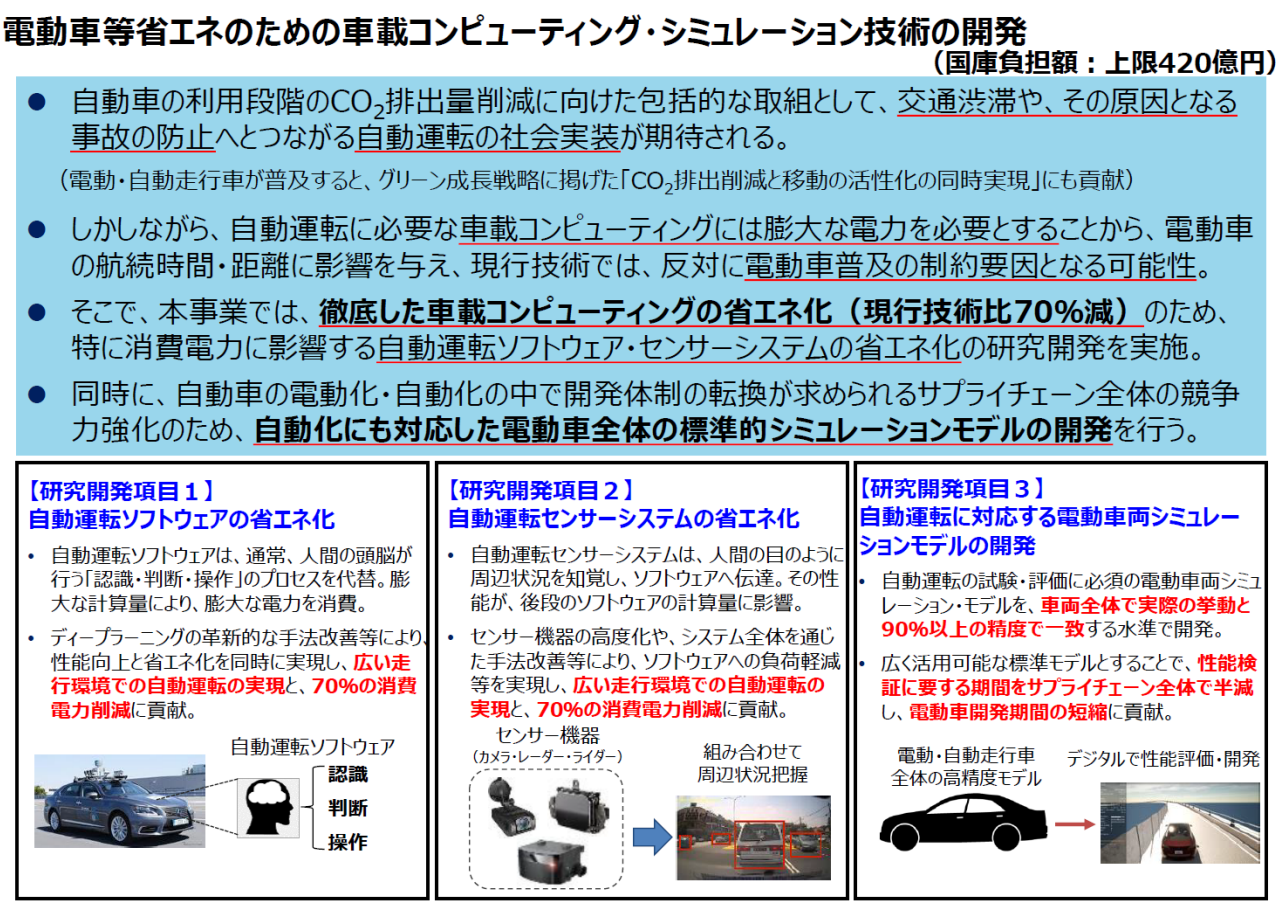


図　5.1.2-14　プロジェクト概要 [2)]

⑭　スマートモビリティ社会の構築

我が国における CO_2 排出量に占める運輸部門の割合は 18.6%（自動車からの排出は 16%）を占めており、その内約 40%を貨物等の商用利用目的の車が占めている。温暖化対策に向け、世界的に自動車の電動化の動きが加速している。欧州や中国は、電気自動車・プラグインハイブリッド自動車の普及を戦略的に進めており、急速に普及が拡大する一方、日本では、欧州や中国に比べ、普及が遅れている。また、各国で燃料電池トラック・バスの開発支援の取組が強化されている。また、世界的に乗用車と比較して、商用利用の車の電動化は遅れており、取組の加速が必要となる。2021 年 6 月に策定されたグリーン成長戦略では、「8 トン以下の小型の車について、2030 年までに、新車販売で電動車 20～30%、2040 年までに、新車販売で、電動車と合成燃料等の脱炭素燃料の利用に適した車両で合わせて 100%を目指し、車両の導入やインフラ整備の促進等の包括的な措置を講じる。8 トン超の大型の車については、貨物・旅客事業等の商用用途に適する電動車の開発・利用促進に向けた技術実証を進めつつ、2020 年代に 5,000 台の先行導入を目指すとともに、水素や合成燃料等の価格低減に向けた技術開発・普及の取組の進捗も踏まえ、2030 年までに、2040 年の電動車の普及目標を設定する」こととした。

電動車の普及に向けては、車両価格の低減等による社会的受容の拡大、充電インフラ・水素ステーション等のインフラの最適整備といった課題がある。加えて、電動化

に伴い、エネルギーの利用構造が変化することについても、対応が必要となる。例えば、電気自動車を商用利用しようとする場合、電動化によるエネルギー利用のピークが重複することで、電力系統等の社会コストの増大や運輸事業者の電力基本料金の上昇等による負担増大が懸念される。また、燃料電池自動車についても、整備コストの高い水素ステーションを最適配置・運用しなければ、大量の水素を需要する商用の燃料電池自動車の運行に支障を来す可能性がある。電動車を活用したバーチャルパワープラント構築の取組など、エネルギー需給調整に積極的に貢献することで、電動車の経済性を向上させる試みも進んでいるが、乗用車については、稼働率が約 4%と低いことが指摘されており、蓄電池としての活用も可能と考えられる一方、商用車については、稼働率が高く、再生可能エネルギーの豊富な昼間にも稼働していることから、需給調整への貢献は容易ではない。このため、商用車では、運行管理と一体的に、特に、商用車によるエネルギーの「需要」（時間、場所等）に着目して、エネルギーマネジメントを行う必要があると考えられる。その際、エリアを走行する多くの商用車が連携し、エネルギー利用・運行を最適化する（例えば、エネルギーインフラ利用時間帯の調整、走行ルートの全体最適化等）ことが有効であると考えられるが、運行管理やエネルギー利用に関する情報が企業秘密であり、事業者間での情報流通は困難である。

各国においても、MaaS（モビリティのサービス化：Mobility as a Service）や自動走行技術を活用した持続的な都市交通の実証・実装が進展中であり、例えば欧州では、環境負荷の低減と都市交通の最適化を図る「持続可能でスマートなモビリティ戦略」を策定するほか、各国連携による大規模実証プロジェクトが進んでいるが、個別事業者とエネルギーインフラとの間での実証など、個別最適に関する実証が中心であり、社会全体でのエネルギー利用の最適化に関する検証は進んでいない。

本プロジェクトでは運輸部門の脱炭素化に向け、シミュレーション技術を活用し、社会全体及び個別事業者におけるエネルギー利用・運行管理等の最適化を実現するスマートモビリティ社会の構築を目指し、電気自動車・燃料電池自動車等の商用利用時のデータの収集及びそれを活用した運行管理と一体的なエネルギーマネジメント、充電・充てんインフラの最適配置等に関するシミュレーションに関する研究開発・実証を実施するとしている。

スマートモビリティ社会の構築（商用車の電動化の推進）（国庫負担額：上限1,130億円）

- 運輸部門のCO_2排出の**約4割**を占める商用車のカーボンニュートラル化に向けては**電動車の普及**に加え、**エネルギーマネジメントや運行管理の最適化によるエネルギー使用量の抑制**が重要。
- このため、①バス・タクシー・トラック等の**業態別やEV/FCV等の動力別に異なるケース**で、エネルギーコスト・CO_2排出最小化と運輸効率最大化に向けた**運行管理のためのシミュレーションシステム**を構築・検証。
- さらには、②**複数の業態別事業から様々なデータを収集**し、気象等のデータも活用しつつ、**社会全体の最適化シミュレーションシステム**を構築・検証。**充電・充てんインフラの最適配置やエネルギーシステムへの負荷抑制**を目指す。

個別事業者毎に、一定のエリアにおいて、電気自動車又は燃料電池自動車を大規模に（100～1,000台程度）運用し、**電気自動車又は燃料電池自動車について、運行管理と一体的にエネルギーマネジメントを行うシステムを構築・検証する**。

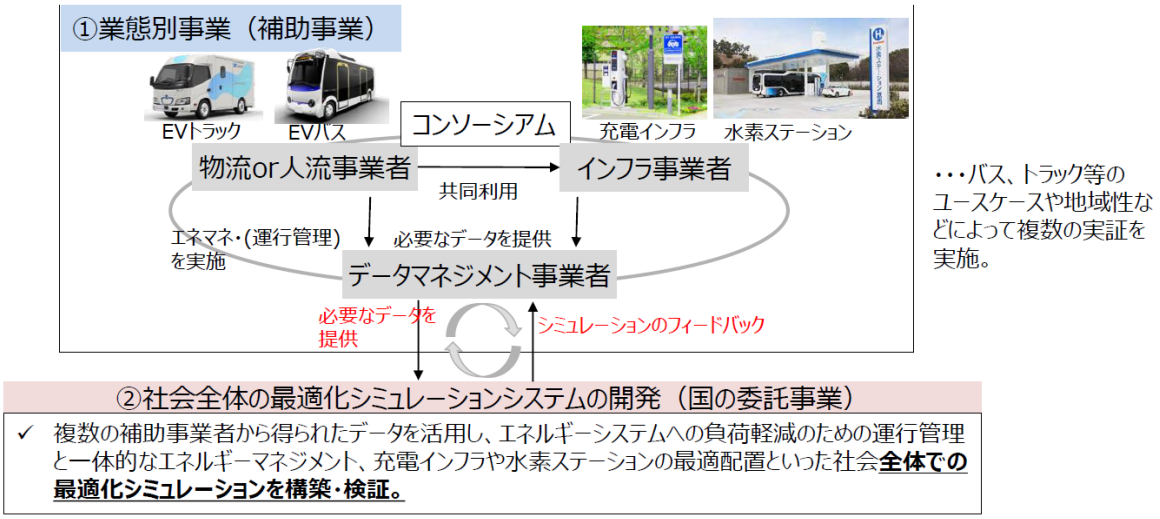


図　5.1.2-15　プロジェクト概要 [2)]

⑮　次世代デジタルインフラの構築

情報の利活用、デジタル化が急速に進展する中、カーボンニュートラルは、製造・サービス・輸送・インフラなど、あらゆる分野で電化・デジタル化が進んだ社会によって実現される。したがって、電化・デジタル化の基盤である、半導体・情報通信産業は、グリーンとデジタルを同時に進める上での鍵である。特に、日本が世界に先駆けてグリーンとデジタルが両立した持続可能な社会を構築するためには、「産業のコメ」であり、あらゆる社会・経済活動に深く関係し、データ通信、処理等の根幹を担う半導体やデジタル産業について、時代の変化を正確に捉え、競争力を高めることが必要である。パワー半導体は自動車・産業機器、電力・鉄道、家電など、生活に関わる様々な電気機器の制御に使用されている。カーボンニュートラルに向けた電化社会にとって、こうした電気機器の省電力化は極めて重要である。

世界の用途別電力需要のうち、約半分がモーターによる電力となっており、モーターの駆動に使用するインバータ（パワー半導体を使った機器）の効率を１％改善するだけで、大幅な省電力効果が期待される。例えば、HV の電力損失のうち、約 20%がパワー半導体による損失であり、サーバ消費電力のうち、約 25%にパワー半導体が使用されている電源の損失と言われていることから、損失低減は非常に重要である。パワー半導体産業は、現在約 3 兆円の市場規模であるが、2030 年には 5 兆円、2050 年には 10 兆円市場になる見通しである。本分野は、日本企業がシェア 29%を保有するなど、半導体産業の中では日本企業が強みを持っている分野である。パワー半導体の省エネ

化技術として、次世代パワー半導体（SiC（シリコンカーバイド）、GaN（窒化ガリウム）、Ga_2O_3（酸化ガリウム））が挙げられる。これらの次世代パワー半導体は今後の自動車の電動化、再生可能エネルギー（再エネ）などの電力、データセンターの増加など社会的要因によって需要が拡大する見通しである。例えば SiC は、2020 年代半ばから後半にかけて電動車・充電インフラ、GaN は 2025 年サーバ内電圧変換器、2030 年データセンター向け電源への需要拡大が予想されており、これらの次世代パワー半導体の高性能化・高信頼化に加えて、普及促進に向けたコスト低減が重要である。また、住宅や工場、自動車などの電化やデジタル化が進むことにより、デジタル関連の消費電力は増加し、CO_2排出が増えることが予見される。現状、世界のデータ量は年間約 30%のペースで急増している。それに伴い、データセンターサーバの市場規模は拡大の一途であり、2019 年は 6 兆円、2030 年には 25 兆円の市場となる見通しとなっている。データセンター市場は、世界的なサーバメーカーがシェア上位を占めており、日本勢は海外市場で苦戦している状況である。一方で、これまではサーバメーカーがサーバ単位でセット販売していたが、GAFAM（Google, Amazon, Facebook, Apple, Microsoft）等が主導し、自ら要素デバイスを選定して、ODM（Original Design Manufacture）企業に製造を委託し、購入するという、市場のオープン化が進んでいる。こうしたゲームチェンジの進展により、我が国を含めたデバイス企業が、いち早く技術的優位性を確保して各デバイスのレイヤーマスターとなることで、データセンターサーバ市場に参入することが可能である。また、これまでは従来型データセンターから効率の良い大規模なクラウド型・ハイパースケール型データセンターに置き換わることにより、世界のデータセンターの電力消費量の増加は比較的抑制できていた。

一方で、今後は大規模データセンターの急増により、データセンター全体の電力消費量も増加に転じることが予想され、これまでの技術進化では、電力消費量の増加に追いつかないと予想される。こうした背景の下、本プロジェクトでは光電融合技術等をデータセンターに適用することで、省エネ化を実現する。新しいデータセンターの普及には研究開発に加えて、自然災害等に対する BCP（事業継続計画：Business Continuity Plan）や再エネの有効利用などの観点も踏まえた立地計画に関する政策も重要であるとしている。

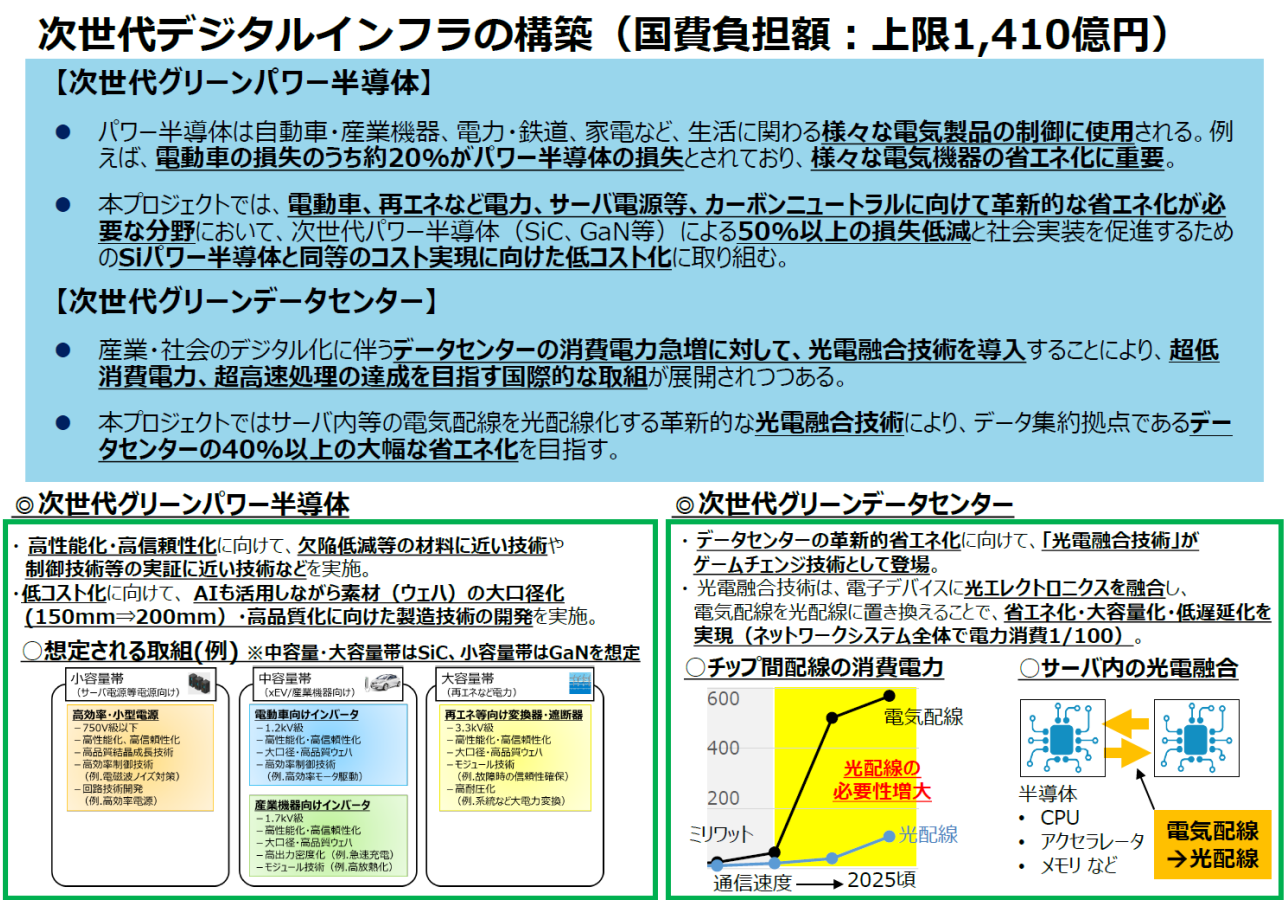


図　5.1.2-16　プロジェクト概要 [2)]

⑯　次世代航空機の開発

我が国の航空機産業は、戦後7年間の空白期間を経て、自衛隊が運用する輸入機の修理や米国等からのライセンスに基づく国内生産、国産機の開発・量産等の防衛航空機分野の事業等を通じて技術を獲得、向上してきた。この間、民間航空機分野については、戦後初の国産旅客機YS-11の開発の後、主として、欧米メーカーとの機体構造、航空機エンジンの国際共同開発への参加を通じ、その事業規模を拡大してきた。完成機事業については、2008年にYS-11以来の約50年ぶりにＭＲＪ（現：三菱スペースジェット）の開発が開始されたが、2023年2月に開発中止を決定した。一方、防衛用の機体について、戦後、戦闘機の米国からのライセンスに基づく製造や、米国との国際共同開発、輸送機・哨戒機・救難機の国内開発・製造等が行われてきた。現在、将来戦闘機について、国際協力を視野に、我が国主導の開発が着手されている。航空機産業は、広い裾野産業を持ち、防衛用途の機体に係る産業基盤が共用され、航空機開発で開発、適用された最先端の技術が他の分野に波及する効果も期待される等、我が国産業全体において重要な役割を果たしている。

新型コロナウイルス感染症の拡大により、世界的に航空需要は大打撃を受けているものの、2024年には2019年と同水準まで回復し、その後、新興国等の経済成長を背景に、約3%/年程度の持続的な成長を遂げることが見込まれている。また、今後は更にハブアンドスポーク（拠点空港から放射状に目的地を結ぶ方式）よりもポイントトゥポ

イント（直接目的地間を結ぶ方式）へ需要が推移するとの見方もあり、航空需要の在り方が変化する可能性もある。こうした航空分野の成長と並行して、急速に脱炭素化の要求が高まりつつある。航空関連の国際機関では「燃料効率の毎年 2%改善」、「2020 年以降総排出量を増加させない」というグローバル目標を掲げており、2027 年以降、当該目標を達成できなかった場合、最大離陸重量 5,700kg 以上の全ての国際線運行者は、カーボンオフセット制度（CORSIA）を利用することが義務づけられている。目標達成に向けては、エアラインによる運航方式の改善、機体やエンジンの効率改良（新技術導入）、持続可能な航空燃料の導入の活用等を総動員することが必要であるとされている。航空分野における脱炭素化の要請に基づくグリーン技術へのシフトを我が国産業の競争力を飛躍的に強化する機会として捉え、機体・エンジンメーカーやエアライン、燃料メーカー等が連携を図りつつ、既存の技術や取組の延長を超えて、野心的なイノベーションの実現に取り組むことが期待される。他方で、新型コロナウイルスにより目下、経済的に甚大な影響を受けている航空機産業において、資金や人材面等のリソースを最大限効率化するべく、既存設備や技術の活用を含め、技術の変わり目においてサプライチェーン全体を慎重に検討することも必要である。具体的には、①機体・エンジン側では軽量化や効率化、電動化率の向上、水素航空機関連技術の開発、②燃料側としてはバイオジェット燃料や合成燃料等の代替燃料を適切に供給することが可能な体制確立等が挙げられる。現時点では、一つの技術開発で課題が全て解決する万能の方策は存在していない。それぞれの方策には後述のとおり一長一短が存在し、技術の成熟度も異なっている。今後の技術開発については、世界の技術動向なども踏まえ、ステージゲートを設けつつ、我が国に優位性のある技術分野を中心に機体・エンジン側と燃料側の両面から、腰を据えて取り組んでいくことが必要である。本計画は、機体・エンジンの開発を対象とすることとし、代替燃料については、航空用途以外も含めて、「CO_2 等を用いた燃料製造技術開発」プロジェクトにおいて取り扱うとしている。

次世代航空機の開発（国費負担額：上限210.8億円）

- 航空機分野では、温室効果ガス低減に関する国際的な合意目標が存在。
  - **2020年以降、国際航空における温室効果ガスの総量を増加させない**（国際民間航空機関（ICAO））
  - **2050年時点で2005年比半減させる**（国際運送協会（IATA））
- カーボンニュートラル社会の実現に向けて、航空機分野においては、SAF(持続可能な航空燃料）と合わせ、**機体側としては更なる機体軽量化・エンジン効率化・電動化・水素航空機の開発等**を組み合わせた野心的なイノベーションが必要。
- 機体全体の開発は欧米OEMメーカー（ボーイング、エアバス）が主導。我が国としては、既に支援を開始している軽量化や電動化技術に加え、当該基金において**水素航空機のコアとなる技術の技術開発を強力に後押しし、競争力強化を目指す**。

欧米OEMメーカーが発表している将来機コンセプト

（出典）：https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html
http://www.boeing.com/features/2019/01/spreading-our-wings-01-19.page

技術課題

＜エンジン燃焼器＞

- 水素特有の逆火やNOxの問題の解決が必要。特に航空機は燃焼器入口温度が高くなるため、NOx低減が重要。

⇒水素燃焼方式・燃焼器材料・冷却技術等の研究開発に取り組む。

＜水素燃料貯蔵タンク＞

- 液化水素を必要量搭載する、ジェット燃料の約４倍の体積が必要になる。航空機として機能させるため、飛躍的な軽量化が必要。また、極低温燃料への対応・気密性・安全性も両立させなくてはならない。

⇒上記を両立するタンク材料の研究開発に取り組む。

＜機体設計構想、機材構造複雑形状への対応＞

- 上記のとおりタンクの体積の問題等、水素航空機の成立のためには、機体全体の設計の見直しが必要。
- 左図のように、従来の航空機構造から大きな形状変化が必要となる可能性。そのため、飛躍的な複合材料の強度向上や軽量化が必要。

⇒主に複合材料・製造技術の研究開発に取り組む。

図　5.1.2-17　プロジェクト概要 [2)]

⑰　次世代船舶の開発

国際海運から排出される温室効果ガス（GHG）について、IEA における 2020 年の調査によれば、2018 年時点における国際海運全体からの CO_2 排出量は約 7 億トンであり、世界全体の CO_2 排出量の約 2.1%を占める。世界経済の成長を背景に、海上輸送需要は今後も増大すると予測され、何も対策を講じなければ海上輸送需要の拡大に応じて CO_2 排出量も増大することになる。これに対して、国際海事機関（IMO）において、2018 年 4 月に GHG 削減戦略が採択されており、2050 年には 2008 年比で総排出量 50%以上削減が掲げられている。我が国では、世界有数の海事大国として、このような国際的取組を牽引すべく、産学官公の海事関係者による検討を行い、今世紀中のゼロエミッションに向けた GHG 削減シナリオ及びその実現に向けた今後の作業計画を「国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ」として 2020 年 3 月に取りまとめた。同ロードマップにおいて、外航船の寿命を考慮すると 2030 年頃から 80%以上の効率改善を実現する船舶の投入を開始する必要性が示され、これにより 2050 年には 2008 年比で総排出量 50%以上削減され、次世代燃料等により、約 5.6 億トン/年（2050 年）の CO_2 削減効果が見込まれるところ、我が国が世界をリードしてゼロエミッション船の導入を進める観点から 2028 年までにゼロエミッション船の商業運航を目指すこととした。

一方、四方を海に囲まれた我が国は貿易量の 99.6%を海上輸送に依存しており、資源や食料の自給率が低い我が国にとって、安定的な海上輸送の確保は社会経済の存続基盤である。この海上輸送を担う我が国外航海運事業者が調達する船舶の 77%は我が

国造船業が供給しており、我が国造船業は高性能・高品質な船舶の安定供給を通して、安定的な海上輸送の確保に貢献している。また、我が国は造船業、舶用工業、海運業を中心に、研究機関、金融、商社等の関連分野が密接に関連した「海事クラスター」といわれる産業集積を形成しており、海事クラスター全体で売上高 11.3 兆円、従業員数 34 万人（海運業・造船業・舶用工業のみでは売上高 8.7 兆円、従業員数 30.9 万人）、付加価値額で我が国 GDP の約 1%を占める産業群となっている。このような海事に関係するほぼ全ての業種が国内に揃い、かつ、多数の企業、関係機関が集積するフルセット型の海事クラスターは世界的にも稀で、これまでの強い海事産業を支える大きな柱となってきた。

造船業は、国内、特にそのほとんどが地方圏（東京、神奈川、千葉、愛知、大阪、兵庫を除く地域）に生産拠点を維持している。国内生産に占める地方圏での生産比率は 9 割（総トン数ベース）を超えており、1,000 あまりの事業所が約 8 万人の従業員を雇用している。各地域における製造業全体の生産高に占める造船・舶用工業の生産高シェアは、特に瀬戸内、北部九州を中心に高く、それらの地域において、我が国造船業は地域の経済・雇用を支えている産業と言える。また、周囲の舶用工業など周辺産業を有する裾野の広い産業となっている。舶用工業は、船舶の設備・機器等を製造し、付帯するサービスを提供しており、高い技術と信頼性、充実したアフターサービス等により、我が国造船業の発展を支えている重要な産業であり、我が国造船業が建造する船舶に用いられる舶用機器の約 9 割程度が国内舶用工業事業者から調達されている。我が国舶用工業事業者の中には、原油タンカー用カーゴオイルポンプ及びその駆動用タービン（カーゴオイルポンプタービン）で世界シェア 8 割以上、舶用 LNG ポンプでは 9 割以上の世界シェアを占める企業も存在する。また、世界で初めて魚群探知機の実用化に成功した企業が舶用電子機器市場では世界シェアトップ（17%）、中でも舶用レーダーでは約 4 割の世界シェアを誇っている。さらに、世界で初めて一般商船向け CFRP プロペラを開発し、第 6 回ものづくり日本大賞の内閣総理大臣賞を受賞した企業は、直径 10m 超の大型船用プロペラについて約 3 割の世界シェアを占めている。このように、舶用ポンプや航海機器、プロペラ等の製品カテゴリーについては、世界においても大きなシェアを占めており、強い国際競争力を有している。我が国舶用工業全体の生産高は約 1 兆円規模で推移しており、そのうちの約 4 割（船外機を除くと約 2.5 割）が海外に輸出されている。また、日本国内に約 1,000 事業所が存在し、約 4.7 万人の従業員を雇用しており、造船業と同様に地域の経済・雇用を支えている。

こうした中、カーボンニュートラルの実現に向けて、小型船・大型船それぞれにおいて、産業・サプライチェーンの構造が転換することが見込まれる。近距離・小型船では、水素燃料電池船やバッテリー推進船が商用化に向けて実証段階に入っている一方で、遠距離・大型船では、燃料電池や蓄電池の出力・重量・サイズ等の制約により、水素・アンモニアを直接燃焼できるエンジンの開発が必要である。そこで、本プロジェクトでは、国際海運におけるゼロエミッションの実現に向けて、2050 年にゼロエミッション船を本格的に普及させるべく、次世代船舶の開発に係る技術力及び国際競争力の獲得を目指すとしている。

なお、ゼロエミッション船が本格的に投入される 2030 年代において、水素及びアンモニアの国際的な燃料供給インフラが構築されるかどうかは不確実であり、2050 年時点でも船舶用燃料として「水素・アンモニアの供給が拡大するシナリオ」と「水素・アンモニアの供給が拡大せずに、LNG に加えバイオメタン、カーボンリサイクルメタンの供給が拡大するシナリオ」の２通りがあるなど、水素、アンモニア及びメタン（バイオメタン及びカーボンリサイクルメタン）のいずれの燃料が主流となるのか判明していない。このため、民間事業者が開発に踏み出しにくいという問題があり、この不確実性を下げるためにも、ゼロエミッション船の候補となる複数の選択肢それぞれの開発を進める必要がある。しかしながら、ゼロエミッション船の開発にあたっては、既存船舶の燃料である重油から、水素・アンモニアやカーボンリサイクルメタンといったガス燃料への転換が必須となる。水素・アンモニアについては、現時点において船舶の燃料として利用されていないため、エンジン、燃料タンク、燃料供給システムといった主要舶用製品の開発が必要となる。なお、LNG については、将来的にカーボンリサイクルメタンの供給が拡大することになった際には、LNG 燃料船や陸側の燃料供給インフラ設備がそのまま転用可能となり、ゼロエミッションの達成に資することとなる。また、前述のロードマップにおける代替燃料の普及シナリオのうち水素・アンモニアが拡大する場合においても、2050 年における国際海運による消費エネルギー全体のうち LNG（カーボンリサイクルメタン等を含む）が 42%、水素及びアンモニアが 45%とされ、LNG はいずれのシナリオにおいても主力燃料の一つとなることが想定されている。以上のことから、次世代船舶に係る民間の技術開発・社会実装を加速し、前述のロードマップの目標である 2028 年よりも前倒しでゼロエミッション船の商業運航を実現し、我が国の国際競争力を強化することで世界市場をリードし、2050 年の我が国造船・海運業の国際競争力の強化及び海上輸送のカーボンニュートラルの実現を目指すとしている。

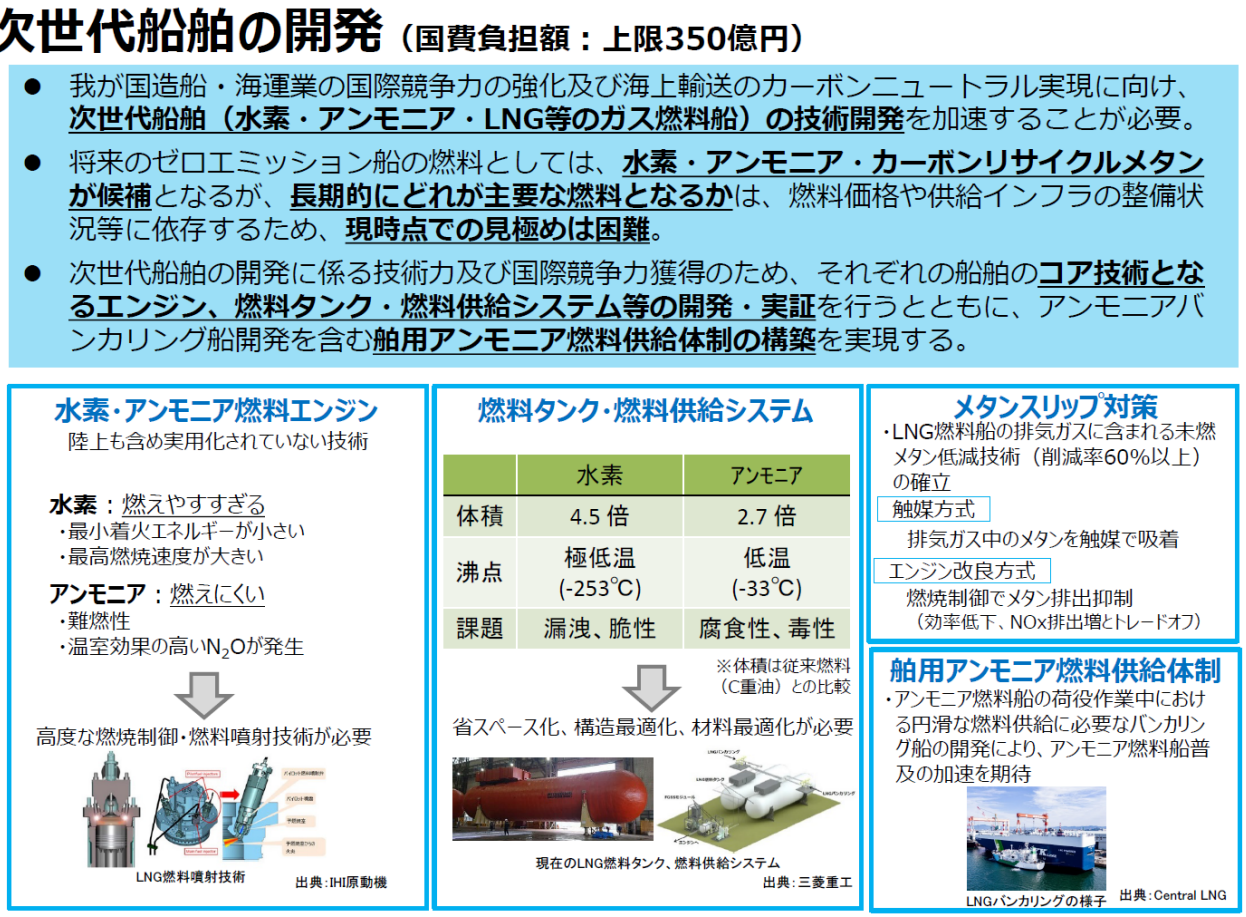


図　5.1.2-18　プロジェクト概要 [2)]

⑱　食料・農林水産業の CO_2 等削減・吸収技術の開発

農林水産業・食品産業は、国民に良質な食料を安定供給すると同時に、農地や森林、海洋の適切な管理・保全により、大気や水源の涵養を促し、生物多様性を保全するなどの多面的な役割が期待されている。しかしながら、昨今、化学肥料・農薬の多投等により、世界的に農地土壌の劣化や地下水の汚染・枯渇化が進行し、農地・家畜に由来する一酸化二窒素（N_2O）やメタン（CH_4）の大量放出、森林・海洋資源の乱開発等も深刻化するなど、正にプラネタリー・バウンダリー（地球の限界）が迫りつつあることへの危機感が世界的に高まりをみせている。また、2050 年には世界人口が 1.3 倍（2019 年比）に増加し、今後、大幅な食料の増産が不可避となる中で、食料生産による環境負荷を引き下げ、農地や森林、海洋が果たす CO_2 等の吸収・固定能力を最大限に高めることが、食料の増産及び地球環境保全の両面において喫緊の課題となっている。こうした状況を踏まえ、農林水産省では、2021 年 5 月に食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現するため「みどりの食料システム戦略」を策定した。農地及び森林等が吸収・固定する温室効果ガス（GHG）は、年間 4,450 万トン（2020 年度）にも達することから、本戦略では、食料・農林水産分野における 2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、これらの吸収源対策を一層強化するため、バイオ炭による農地炭素貯留、高層木造建築物の拡大、海藻類による CO_2 固定化（ブルーカーボン）等の技術に係る研究開発及びその社会実装を加速化すること等の方針

を明らかにしたところである。さらに、2022 年 4 月には、「みどりの食料システム法（環境と調和のとれた食料システムの確立のための環境負荷低減事業活動の促進等に関する法律（令和 4 年法律第 37 号））が可決、成立し、同年 7 月に施行された。本法律に規定する基本理念や国が講ずべき施策に基づき、国は必要な技術開発等を推進するとともに、「見える化」を始め、消費者の行動変容を促す施策を総合的に講ずることとしている。

本プロジェクトでは、特に、農林水産業に期待される CO_2等の吸収・固定技術を中心に、将来の成長産業の創出につながるインパクトの大きな課題を対象として、これまでの発想や技術的な限界を打ち破るような野心的な研究開発を重点的に推進するとしている。

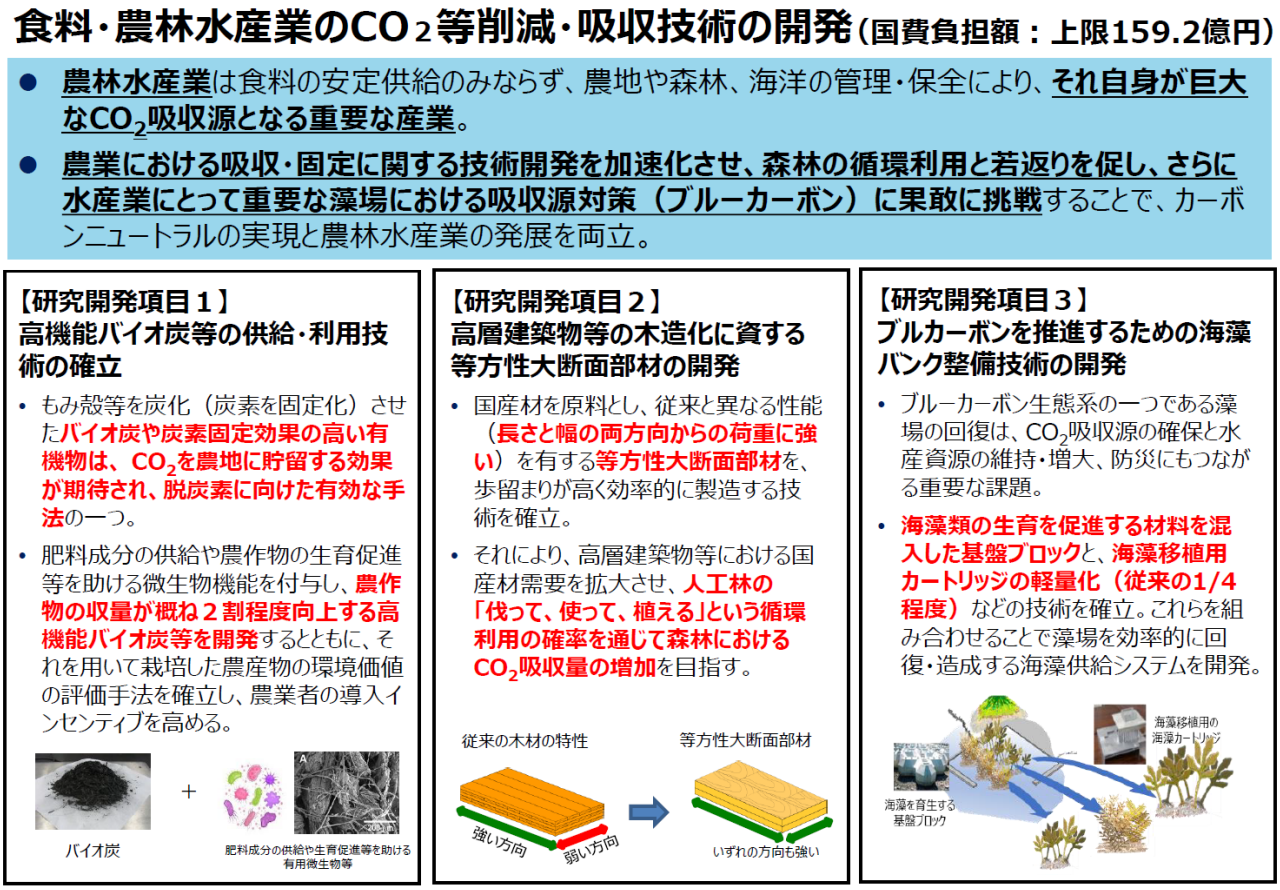


図　5.1.2-19　プロジェクト概要 [2)]

⑲　バイオものづくり技術による CO_2 を直接原料としたカーボンリサイクルの推進

バイオものづくり技術を利用したカーボンリサイクルは、バイオマス資源や大気中等の CO_2 を原料として、バイオプラスチックや機能性素材などの化学品、燃料、タンパク質や飼料等の食品を生産する取組である。炭素の固定経路としては、大きく①バイオマス資源利用による CO_2 の資源化、②植物による CO_2 の直接資源化、③微生物による CO_2 の直接資源化といった３類型が存在する。ゲノム編集、ゲノム構築等最先端のバイオ技術を適用することで、今後大幅な生産性の向上が期待できることから、バ

イオものづくりはカーボンニュートラル社会の実現に向けた有力な選択肢のひとつといえる。

日本の部門別 CO_2 排出量(電気・熱配分後)のうち、製造業・工学プロセスが占める割合は 36.7%。このうち、特にバイオものづくりに関連する化学、繊維、食品飲料からは 21.9%の年間 8,901.7 万トンの CO_2 が排出されており、これらの業種についてはバイオものづくり技術による CO_2 排出削減への貢献が期待できる。バイオものづくりに関心が集まる背景として、直近 10 年でゲノム合成、ゲノム編集等の技術革新により、合成生物学が急速に台頭していることがある。さらに、ゲノム解析、IT・AI 技術の進展とあいまって、バイオ×デジタルの潮流が加速し、ゲノムと代謝物の関係を明らかにできるようになった。その結果、高度にゲノムがデザインされ、物質生産性を高度に高めた細胞（＝スマートセル）を利用することにより、インプットとアウトプットのバリエーションを大幅に拡大した新たな物質生産プロセスを利用することが可能となりつつある（バイオものづくり革命)。

OECD や米国のシンクタンクが実施した試算によると、細胞内分子や細胞、臓器を活用して物質生産するバイオエコノミーの世界市場は、2030 年には 200 兆円に成長すると予測しており、2040 年には、高位予測のケースでは 400 兆円に達するとの予測も出ている。また、バイオ技術の利用は農林水産、健康医療分野で先行したが、今後は、素材やエネルギー、食品などの分野でも高い成長が予測されている。

合成生物学でトップを走る米国産業界では、近年、IT 業界実業家や VC が合成生物学ベンチャー企業に積極的に投資を行い、ポスト第四次産業革命を担うバイオベンチャーが続々と誕生している。2021 年にはバイオベンチャーに対する投資額が前年度比で倍増し、年間 178 億ドル（＝約 2 兆円）の投資を集めている。バイオベンチャーのうち、特に急速に資金調達額を伸ばしているのは、微生物等改変プラットフォーム事業者である。バイオものづくりでは、上流の微生物等開発では、AI・ロボットを用いた効率的な微生物等改変プラットフォーム技術、下流の発酵生産では、培養・精製技術の高度化といった、バリューチェーンの段階に応じて全く異なる高度な技術・設備が必要となる。このため、今後のバイオものづくり産業は、水平分業化が進展し、それぞれの基盤技術を確保したプレイヤーが付加価値の源泉を握ることが予測される。

米国の微生物等改変プラットフォーム事業者等とも競争・連携できるような事業者を国として育成していくことは重要であるが、担い手となる国内事業者は萌芽段階であり、現状では海外事業者との間に大きな差がある。こうした微生物等改変プラットフォーム事業者に対して、異分野事業者等からの投資や微生物等改変のノウハウなどが集約するように国として先行的かつ重点的に投資を行っていく。他方で日本の得意分野/不得意分野を上手く使い分けることも重要であり、特に日本が苦手な分野については、海外事業者との協力により進めることも妨げない。また、我が国は、南北に長い領土から生まれる多様な環境や、火山や深海といった極限環境を有し、そのような幅広い条件下に生息する微生物がいることから、バイオものづくりの上流工程で重要となるゲノム情報のバリエーションが豊かであると考えられる。さらに、悠久の歴史を持つ発酵・醸造産業を有しており、下流工程で重要となる大量発酵生産技術につい

ても数多くの実績を持った事業者が存在していることから、独自の強みを生かせることが見込まれる。

本プロジェクトでは、こうした認識の下、革新的な素材や燃料などの異分野事業者との共同開発の促進等を通じて、バイオものづくりの中核を担う微生物等改変プラットフォーム事業者と大規模発酵生産とバイオものづくり製品の生産を担う製造事業者・事業会社の育成・強化を図るとともに、プラットフォーム事業者による高効率な微生物開発技術を活用することで微生物等が持つ CO_2 固定能力を最大限に引き出し、バイオマス原料を用いない CO_2 を原料としたバイオものづくりによりカーボンリサイクルを推進するために必要となる各要素の技術的な課題の解決を図る。さらに、原料の CO_2 供給から製品製造までのバリューチェーンを構築し、商用生産までのスケールアップや製造技術の高度化を推進することで、CO_2 を原料とした新しいバイオものづくり製品の社会実装と CO_2 の資源化による産業構造の変革を目指すとしている。

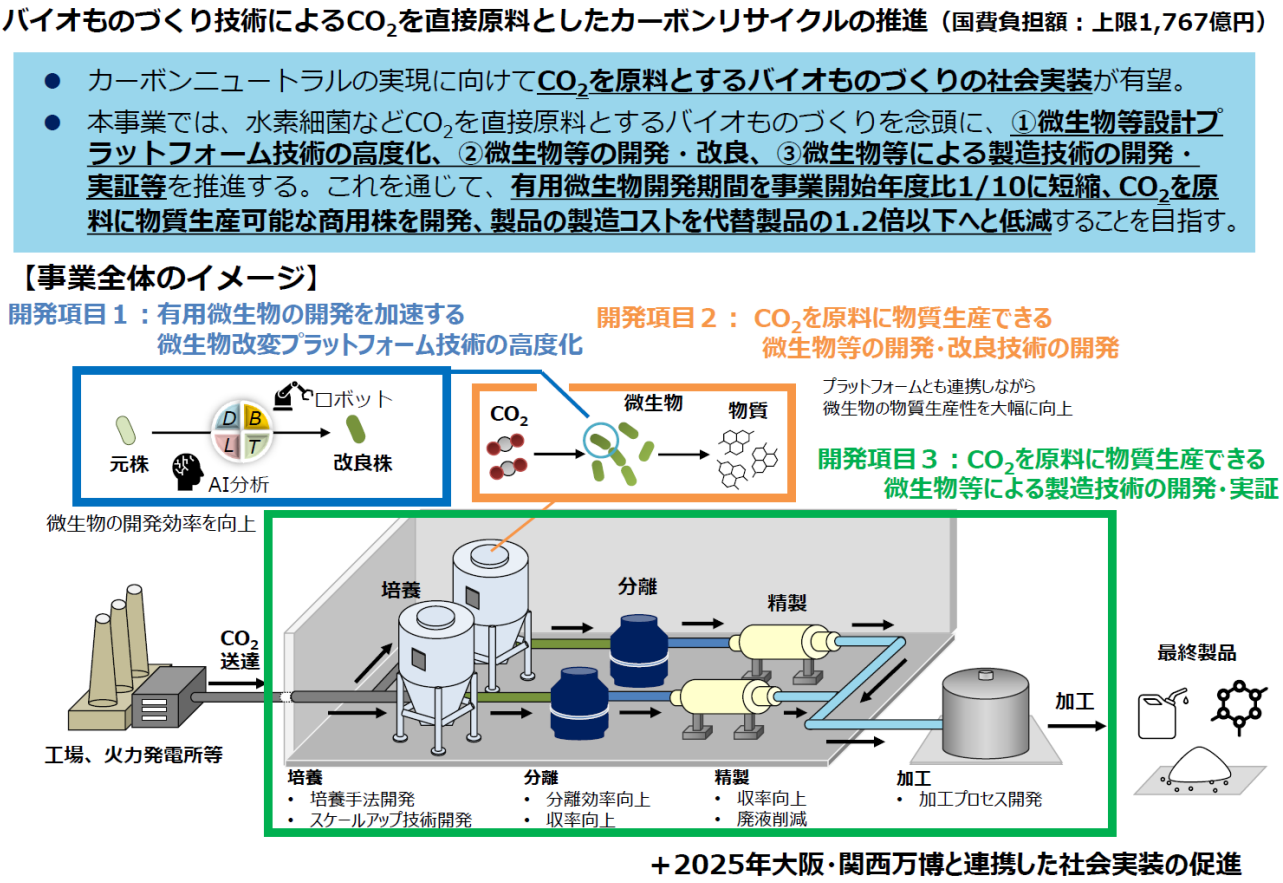


図 5.1.2-20 プロジェクト概要 [2)]

参考文献（第 5.1.2 節に関するもの）

1) 経済産業省：クリーンエネルギー戦略中間整理（2022.5）

2) 経済産業省：グリーンイノベーション基金、
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/index.html

5.1.3　水素系エネルギーの動向

水素は燃焼しても CO_2 を発生させないため、電力分野の脱炭素化に貢献するだけでなく、再エネ等の余剰電力を水素に変換することで、貯蔵することも可能となる。電化による脱炭素化が困難な熱利用や原料利用の脱炭素化にも貢献し、水素から製造されるアンモニアや合成燃料等は、既存のインフラを活用することも可能であり、用途に応じた活用が見込まれる。

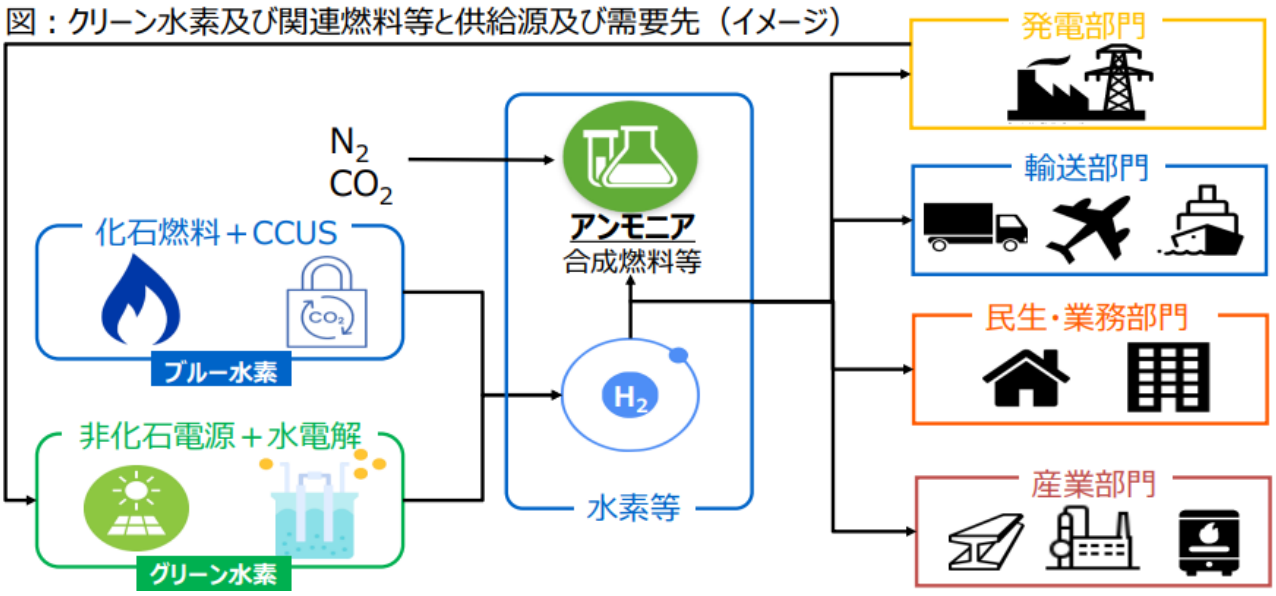


図　5.1.3-1　クリーン水素及び関連燃料等と供給源及び需要先（イメージ）[1)]

総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会の下に「水素政策小委員会」、資源・燃料分科会の下に「アンモニア等脱炭素燃料政策小委員会」が 2022 年 3 月に設けられ、両審議会の合同審議を経て 2023 年 1 月に社会実装への政策検討に向けた中間整理[1)]がなされた。

水素・アンモニアも含め他のカーボンリサイクル燃料についても各種研究会が立ち上げられており、2023 年 2 月に閣議決定された「GX 実現に向けた基本方針」[2)]において、「SAF や合成燃料（e-fuel）については、官民協議会において技術的・経済的・制度的課題や解決策について集中的に議論を行いつつ、多様な製造アプローチ確保のための技術開発促進や実証・実装フェーズに向けた製造設備への投資等への支援を行う」と位置付けられている。

本節では、上記、中間整理の内容、及び SAF や合成燃料についての官民推進会議の概要、審議状況を示す。

(1) 水素政策小委員会/アンモニア等脱炭素燃料政策小委員会　合同会議　中間整理

① 水素・アンモニアを取り巻く現状

a. 水素・アンモニア需要の拡大

想定される水素・アンモニアの需要先は多岐に渡る。電力分野においては、水素は非常に燃えやすくガス火力での混焼、アンモニアは燃焼速度が比較的遅く石炭火力での混焼を想定。非電力分野ではアンモニアはそのエネルギー密度の高さから、国際輸送など、長距離を移動する船舶分野などが利用先として想定されている。一方、水素は水素還元製鉄や、メタノールなど基礎化学品の合成といった産業プロセスの原料など様々な用途で利用出来るポテンシャルを有する。

表 5.1.3-1　水素とアンモニア（直接利用）の想定利用先 [1)]

用途（大分類）	用途（中分類）	水素	アンモニア
電力	石炭火力への混焼・専焼		○
	ガス火力への混焼・専焼	○	
非電力（燃料）	熱利用（工業炉等）	○	○
	船舶等用のエンジン	○	○
	モビリティ・定置用等用の燃料電池	○	
非電力（原料）	水素還元製鉄	○	
	基礎化学品合成	○	

既存の産業分野や FCV 等などによる需要に加えて、新たな水素・アンモニアの用途先を以下に示し、現在の開発状況等を記載したところ、概要は以下のとおり。

表 5.1.3-2　国内の水素・アンモニア需要の現状分析と長期的な需要ポテンシャル [1)]

用途例	発展段階（商用化想定年・年代）
商用車	• FCバス：商用化済 • FCトラック：実機実証中（2020年代）
産業用熱需要	• 水素バーナー：技術確立済 • 水素ボイラー：商用化済 • アンモニアバーナー：開発・実証中（～2027年度）
火力発電	• 純水素燃料電池：商用化済 • 小型水素タービン（専焼）：商用化済 • 大型水素タービン(混焼):実機実証予定(2025年頃) (専焼):燃焼器開発中(~2030年) • アンモニア　20%混焼：実機（100万kW）実証中（～2024年度） • アンモニア　高混焼（50%以上）・専焼バーナー：開発・実証中（~2028年度）
船舶	• 燃料電池船：システム開発・実証中（~2028年） • 水素・アンモニア燃料船：エンジン開発中（~2030年）
化学	• ナフサ分解炉でのアンモニア利用：技術開発(2030年代) • MTO（Methanol to Olefine）：大規模実証予定（~2030年）
鉄鋼	• 水素還元製鉄：要素技術開発（2040年代）

i)　輸送部門における水素利用

乗用車に加えて、燃料電池トラックも GI 基金も活用しながら 2022 年度から走行開始。FC 商用車の普及を見据え、水素ステーションも人流・物流を考慮した最適配置、大型化を進めている。水素 ST から、パイプライン等を通じて車両以外の近隣の水素需要に供給する取組を一部企業が開始。今後、水素ステーションは近傍の水素需要への供給拠点としてマルチ化していく可能性があり、将来、船舶や飛行機などで、水素やアンモニア（燃料電池、エンジン）の活用も期待されている。

図 5.1.3-2　輸送部門における水素利用のイメージ [1)]

FCV の普及やインフラの整備状況、顧客層・導入されうるモビリティ等は地域で差異があるだけでなく、時間経過によって変化する。そのため、足下の状況に対応した最適な水素 ST を選択し、かつその状況変化に合わせて ST を拡充等出来るようにすることは、コスト・リスクを抑えつつも、利便性の向上や顧客層の拡大を行うことを可能とし、早期の水素モビリティの普及拡大・効率的な ST 事業の自立化に寄与する。このような観点から、事業者には、長期的な自立化等に向けた事業ビジョンの提示を求めつつ、想定されうる状況変化に柔軟に対応出来るような支援を行う方向性が示された。

図 5.1.3-3 FCV 等の普及に応じた水素ステーションの変遷（イメージ）[1)]

ii) 発電部門における水素利用

- 定置用燃料電池

家庭用燃料電池（エネファーム）は、2009 年に世界に先駆けて我が国で販売が開始。これまで 45 万台以上が普及しており（令和 4 年 9 月末時点）、販売価格も、PEFC の場合、販売開始時の 300 万円超から、100 万円を切る水準まで低下。今後、部品点数の削減などに向けた更なる技術開発を進め、一層のコスト削減を目指すだけでなく、電力系統において供給力・調整力として活用する実証等、燃料電池の持つポテンシャルを最大限活用出来る環境整備を支援する方針が示された。

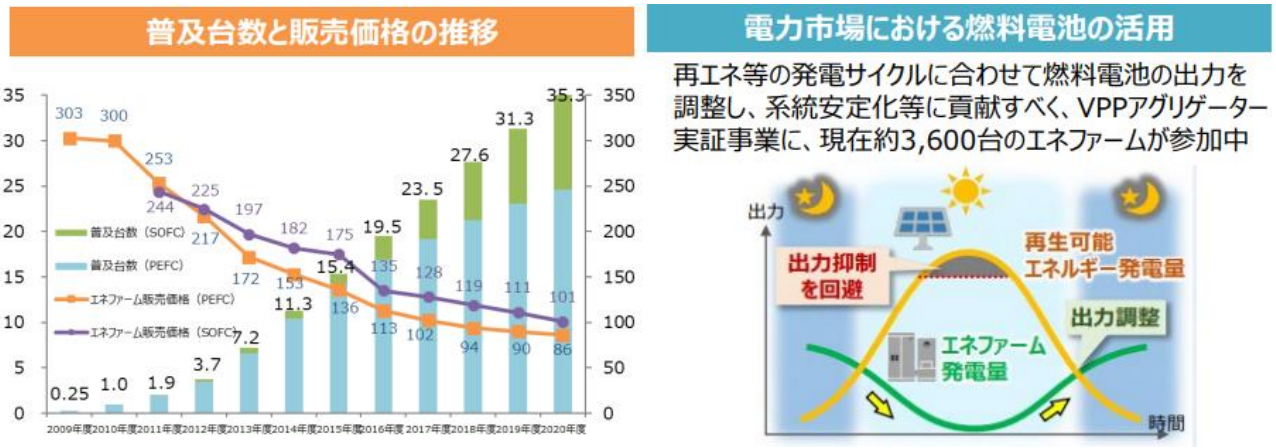


図 5.1.3-4 エネファームの推移と電力市場における活用 [1)]

- 大規模水素発電

水素発電の社会実装には、混焼・専焼とも、天然ガスより燃えやすい水素の特性に対応した燃焼器の開発と、実際のタービンでの長期安定運転の検証を行う必要がある。小型の水素発電においては、既に専焼においても実機での検証まで終了。他方、大型については、混焼は燃焼器の開発を終了し、専焼は開発中。今後は、GI 基金を活用し、残された技術開発を完了することで、国内外での普及を加速するとされた。

【水素タービンの技術開発動向】　　国際水素サプライチェーンと一体的にGI基金で実施予定

	混焼(10%)	専焼
大規模タービン メーカー:三菱重工	①燃焼器開発:完 ②実機運転実証:未完	①燃焼器開発:未完 ②実機運転実証:未完
小規模タービン メーカー:川崎重工	①燃焼器開発:完 ②実機運転実証:完	

【世界の水素発電の主な動き（日本企業の受注）】

蘭マグナム
出力：44万kW
運転開始：2027年
備考：当初から専焼発電を志向

米ユタ州
出力：84万kW
運転開始:2025年
備考：当初は混焼で開始、2045年頃に専焼化することを目指す

図　5.1.3-5　大規模水素発電の動向 [1)]

iii) 発電分野におけるアンモニア利用

火力発電設備でアンモニアを燃料として直接利用するための技術開発を実施中。将来的な専焼技術を目指して、混焼技術の開発を推進。現在、石炭火力のバーナーにアンモニアを20%混焼して、安定燃焼とNOx排出量の抑制に成功。資源エネルギー庁による支援で、2021年度から実機での20%混焼実証（4年間）を開始。

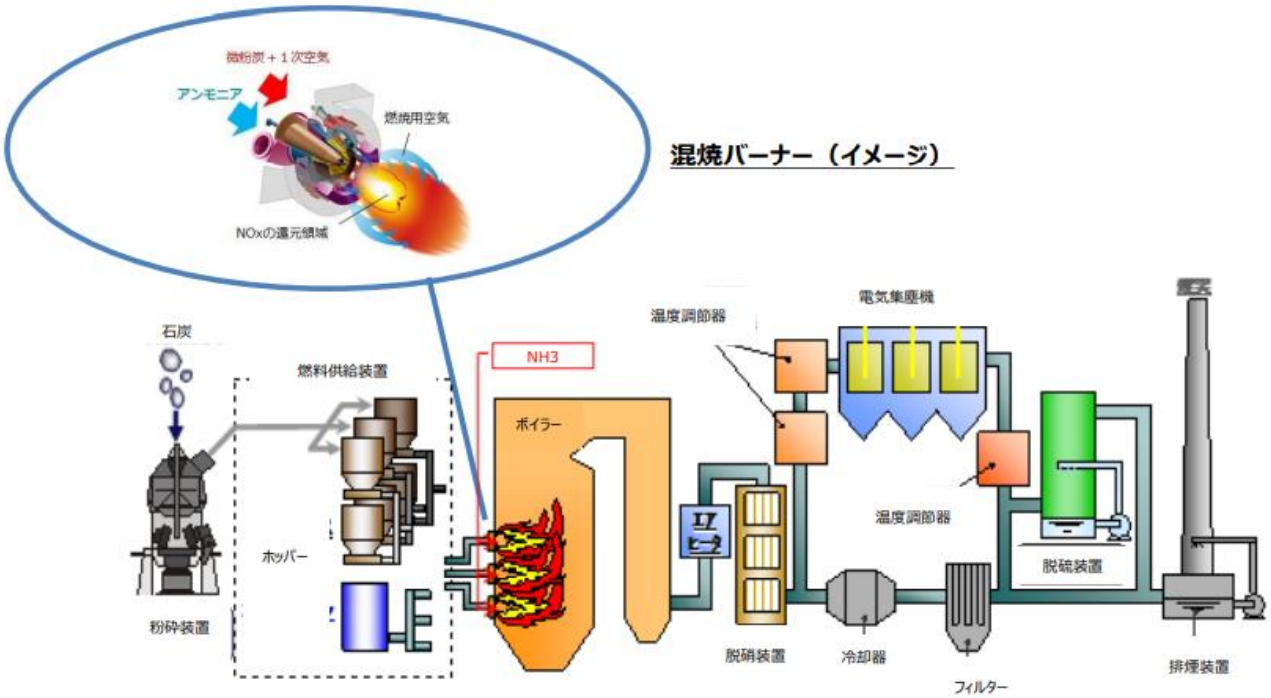


図　5.1.3-6　混焼バーナー（イメージ） [1)]

iv) 産業部門での原料・燃料利用

鉄鋼分野の脱炭素化のために、炭素ではなく水素を還元剤として利用する水素還元製鉄をGI基金等も活用しながら技術開発中。また、産業プロセスで必要となる高温の

熱源としても水素は期待されている。製造プロセスの転換や、水素の燃焼特性に合わせた技術開発等を行う必要があるとしている。

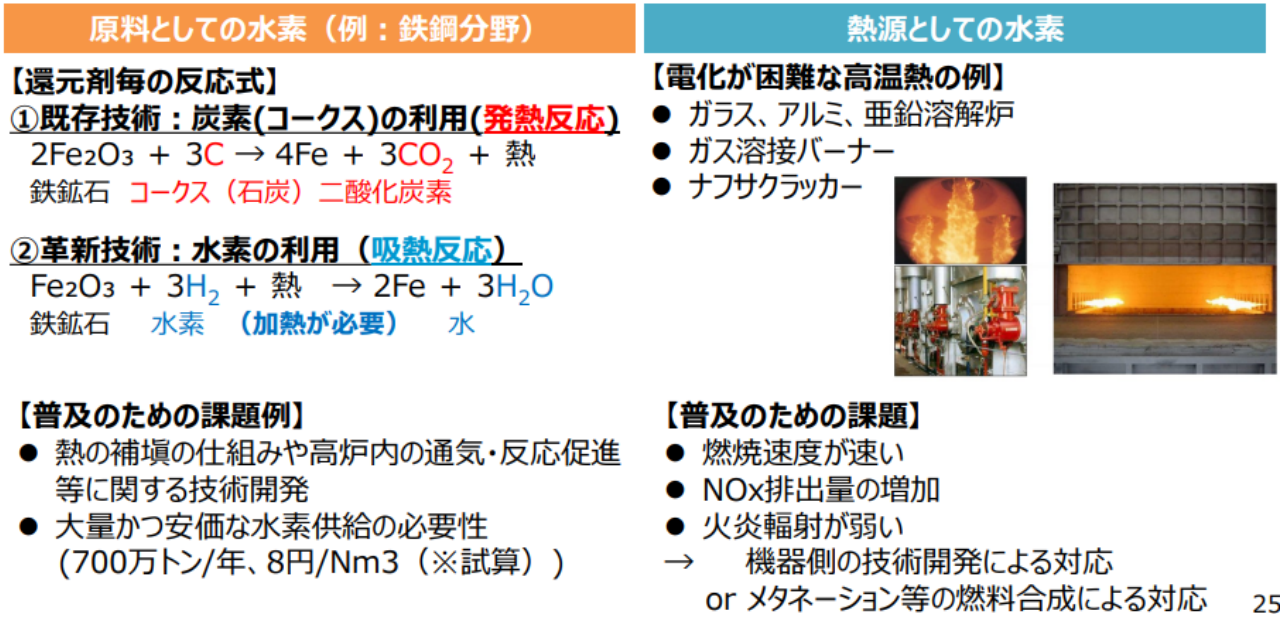


図 5.1.3-7 産業部門での原料・燃料利用の例 [1)]

v) 水素・アンモニアの需要創出に向けた取組

水素・アンモニアの導入拡大を進める上では、水素・アンモニア価格そのものに加え、インフラ整備のコストについても考慮が必要。特に、インフラ整備がされていない地域で新たに水素やアンモニアの利用を進める場合、整備に期間を要し、導入時期の遅れにもつながる。需要の集積と輸送・貯蔵インフラの共用化の両者を進めることで、低価格での調達及び設備利用が可能となり、需要のさらなる喚起につながることから、そのためのハード面・ソフト面の整備を進めていく必要があるとしている。

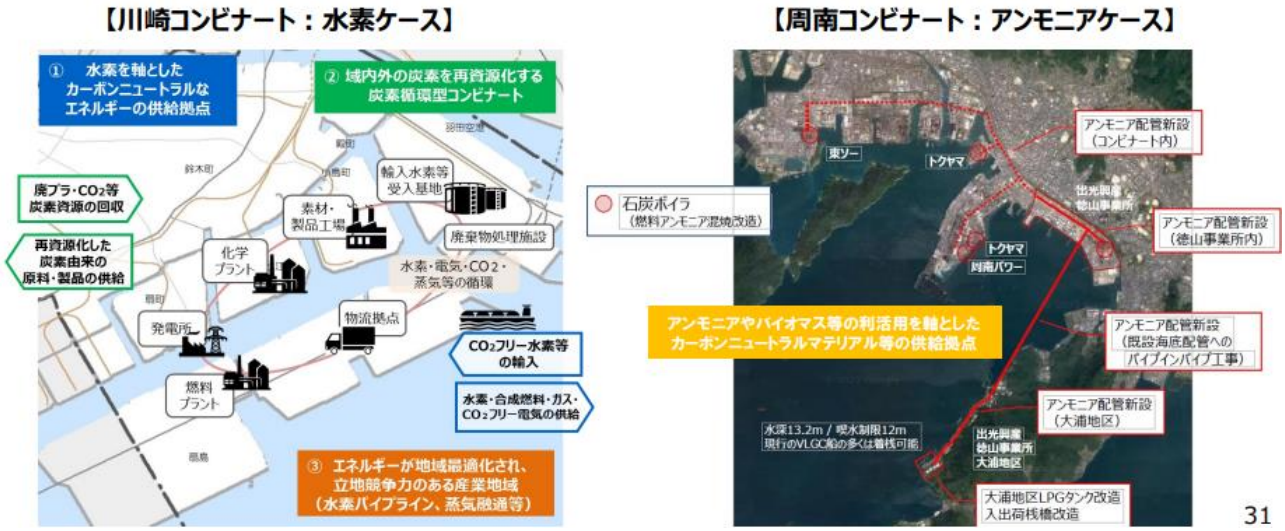


図 5.1.3-8 コンビナートにおける需要の集積と輸送・貯蔵インフラの共用化 [1)]

b. 水素・アンモニア供給事業の現状

i) 水電解装置

水電解装置は、2050 年のカーボンニュートラルの実現に向けて、再エネの大量導入時に安価な余剰再エネ等を活用（国産再エネ由来水素の確保）し、非電力部門の脱炭素化を進める上での基幹製品である。EU では、2030 年 40GW という野心的な目標を掲げるなど、各国で再エネと両輪で積極的な導入姿勢（国内最大の福島水素エネルギー研究フィールド（FH2R）4,000 基分）。こうした新しい成長市場を日本の水電解装置が獲得することを目指し、更なるコスト低減を図るべく、グリーンイノベーション基金等で技術開発・実証を支援。

ii) 水電解装置を用いた水素製造コストの感度分析（電力コスト・稼働率）

電力コスト及び水電解装置の稼働率が水素製造コストに与える影響は図 5.1.3-9 のとおり。電力調達は系統電力、再エネ直付けの 2 パターン及びその組み合わせが考えられ、事業者が水素製造コストを最小化するべく、水電解装置の最適な運転を行うとしている。

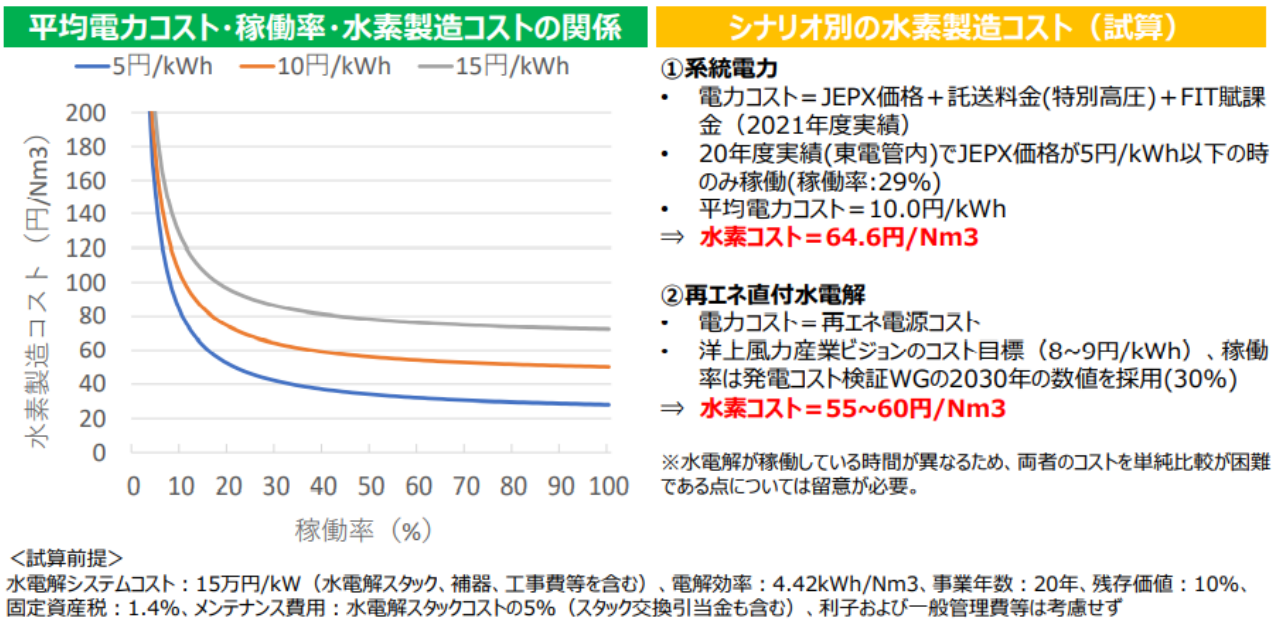


図 5.1.3-9 水素製造コストの感度分析 [1)]

iii) 水素キャリアの選定と今後の支援方針

水素キャリアの選定は、水素社会の在り方を決める重要な論点であるが、それぞれ異なる課題を抱えており、長期的にどれが総じて優位となるか現時点で見極めることは不可能。化学的な特性や既存インフラ等の活用可否により、用途等の棲み分けも長期的に行われると考えられるため、現時点でキャリアを絞り込まず、競争を促しつつも各々の技術的課題克服等を支援。また、キャリアの評価に当たっては、水素化、脱水素化のコストに加えて、輸送（国際輸送）、配送（国内配送）のコストなども加味し、総合的に評価することが重要としている。

表 5.1.3-3 各水素キャリアの特性 [1)]

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

c. 海外の状況

i) 世界的な水素・アンモニアの需要・供給量の拡大

IEA の Net Zero Emissions by 2050 シナリオ [3]では 2030 年は発電部門が需要拡大を牽引。輸送部門は乗用車に加え、商用車（FC トラック等）でも水素の導入が拡大する見込み。水素系エネルギーとして 2050 年では現在の約 6 倍弱の 5 億トン/年程度の需要が見込まれている。発電部門の導入量も堅調に増加するが、水素還元製鉄をはじめとする産業分野での水素利用、船舶や航空機での利用などが大きく拡大し、利用先の更なる多様化が見込まれる。供給側は当初は CO_2 未処理の化石燃料由来水素が太宗を占めるが、化石燃料＋CCUS（ブルー水素）、電解水素（グリーン水素）の供給量が拡大。長期的には再エネ由来水素がコスト競争力を有し、2050 年で約 6 割のシェアを有する見込みとしている。

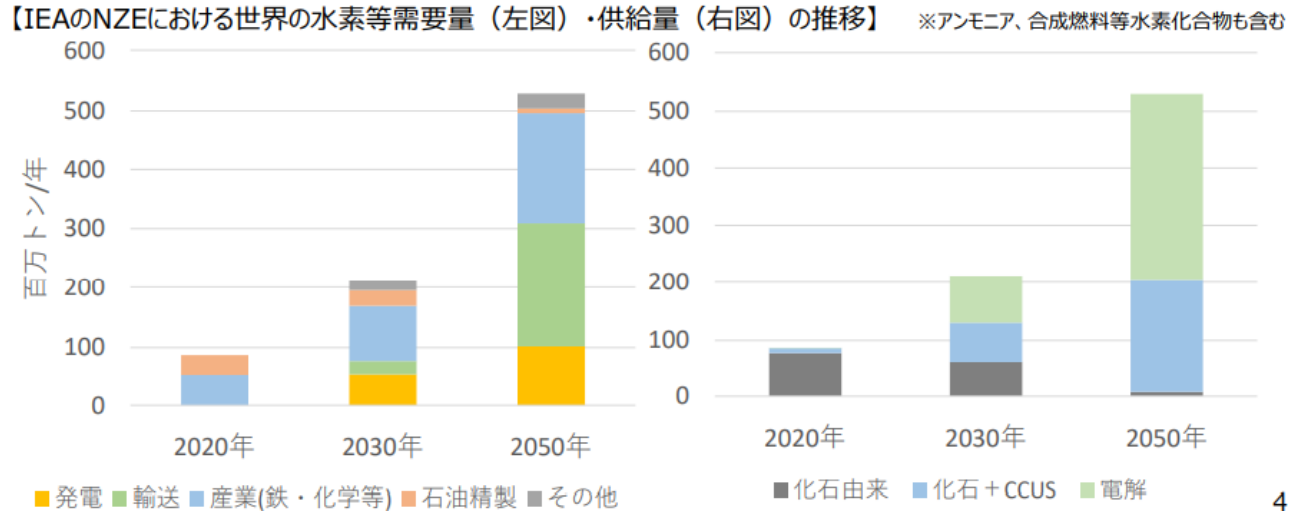
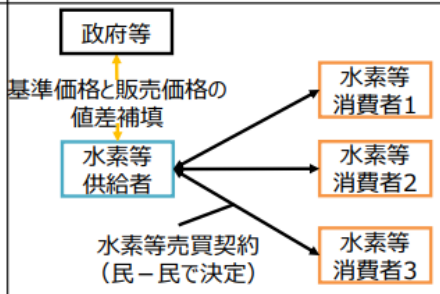
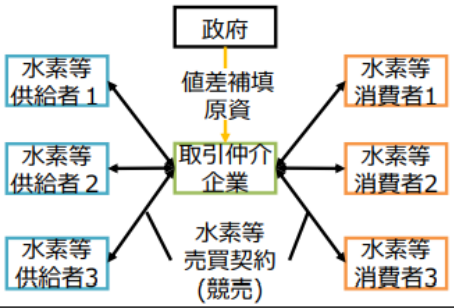


図 5.1.3-10 IEA における世界の水素等需要量と供給量の想定 [1)]

ii) サプライチェーン支援の海外先行検討事例

表 5.1.3-4 サプライチェーン支援の海外先行検討事例 [1)]

	イギリス Low Carbon Hydrogen Business Model	ドイツ H2Global
①政策的位置づけ・役割	• 2030年に低炭素水素製造能力を10GW確保 • 国内水電解事業とブルー（CCS）案件を支援、前者で5GW以上目指す	• 経済対策予算(9億€、約1,200億円)の範囲内で水素製品の供給と利用を早期に実現 • 輸出国との外交関係深化、産業輸出
②支援対象の水素等	• 低炭素水素(2.4kg/kgH2)基準を満たす事業	• 海外から再エネ由来水素で製造したアンモニア、メタノール、ケロシンを輸入
③支援方法	• 供給コストと販売価格の差額を可変的に補填	• 固定価格買取・販売式
④考慮すべきリスク	• 事業者の価格、量的リスクの低減を志向（具体的な手法は異なり、下図参照）	
⑤供給コストの低減	• 基準価格（供給コスト＋利潤）の決定に際して、案件募集後個別査定で検討。	• 売り手・買い手の数量と値段をそれぞれ入札により決定
⑥他政策との関係	• CCS、輸送・貯蔵に関しては別予算・制度での支援検討。	• 国内水素生産など、H2Globalの枠外は予算で別途支援。
⑦開始時期	• 初回募集実行中。25年末までに運転開始の案件を採択。	• 初回入札実行中。24年供給開始を目標。10年間の時限措置。
支援スキーム図（イメージ）		

	アメリカ Energy Earthshot Initiativeほか	EU REPower EU
①政策的位置づけ・役割	• 気候変動対策（3,690億ドル。水素導入数量目標はなし） • 水素供給コストを80%削減し、10年以内に水素1kgあたり1ドルとする目標（"1-1-1"）	• 脱ロシア産ガスのための燃料転換 • 2030年までに水素域内製造・輸入それぞれ1,000万トン目標
②支援対象の水素等	• 4.0kg/kgH2以下のクリーン水素(Clean Hydrogen Production Standard) • CO2閾値が低いほど優遇（下記⑥）	• 3.4kg/kgH2 / 基準燃料のCO2の70%削減（Renewable Energy Directive基準）
③支援方法	• インフレ削減法（IRA）の下、2033年1月1日より前に建設開始される低炭素水素製造について、水素1kgあたり最大3ドルの生産税額控除または投資税額控除を10年間に渡り付与（タックスクレジット）。 • 製造開始後5年間は、生産税額控除分の税還付を受けることを事業者が選択することも可能（Direct Pay Option）。	• 30億ユーロ規模のHydrogen Bankの創設を2022年9月に発表。 • 詳細未定。
④他政策との関係	• 超党派インフラ整備法(IIJA)の下、5年間でグリーン水素ハブの開発（80億ドル）、水電解研究開発（10億ドル）、水素製造とリサイクル（5億ドル）に対し支援。	• 30億ユーロのInnovation Fundでも水素製造や実証実験を支援。
⑤開始時期	• 23年1月以降の建設開始案件が対象	• パイロット案件を2023年第3四半期実施目標
⑥その他	クリーン水素基準とタックスクレジット額 2.5-4.0kg 0.6ドル/kg 1.5-2.5kg 0.75ドル/kg 0.45-1.5kg 1ドル/kg <0.45kg 3ドル/kg	－

注：Clean Hydrogen Production Standard の算定範囲は Well-to-Gate[4)]

iii) 効率的なインフラ整備と海外での先行事例

水素・アンモニアの社会実装局面において、各社が個別にインフラ整備をする場合、大規模需要の創出を一体で行われなければ、大規模なサプライチェーンの構築に基づくコスト低減効果が見込めない恐れがある。海外においては、地理的特性等を活かして、カーボンニュートラル社会構築に向けてコンビナート等を活用する取組が進められている。例えば、現在も世界有数の石油等の搬入港である蘭ロッテルダム港は、脱炭素時代でも水素の輸入を通じて、ドイツ等の欧州各国にエネルギーを供給することを狙い、ロッテルダム港湾局を中心に研究機関や企業等とコンソーシアムを組み、EUの助成金を用いた調査を実施。そのためにも、2050 年に水素搬入量 2000 万トンという高い目標を掲げ、早ければ 2023 年から様々な水素製造源からの水素製造、パイプラインによる水素輸送や海外からの大規模輸入、輸送・民生・産業等の分野での水素利活用を順次実施予定。

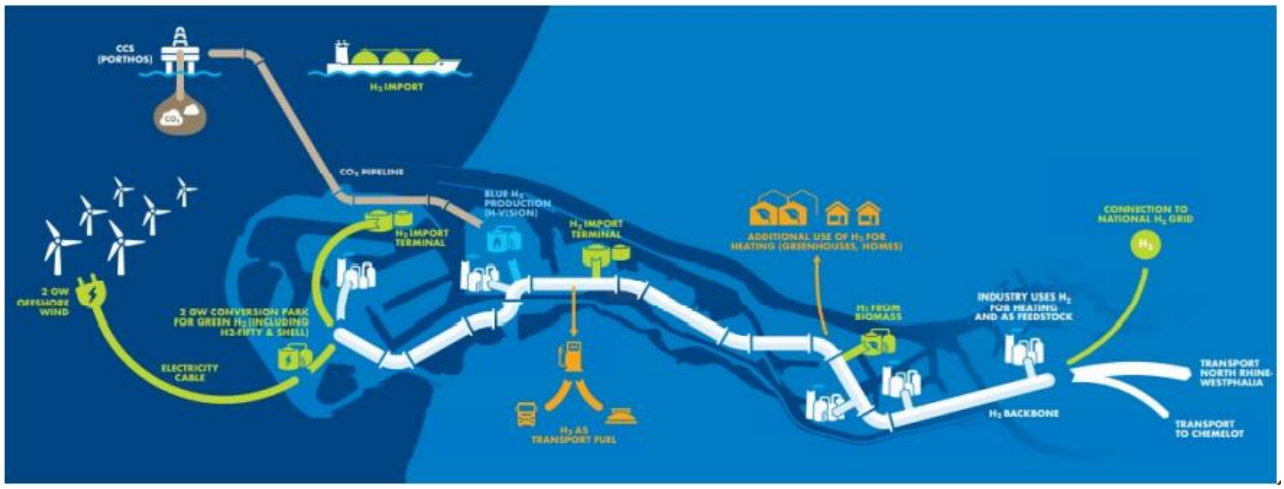


図 5.1.3-11 水素インフラのイメージ [1)]

iv) 米国の Regional Clean Hydrogen Hubs

米国エネルギー省（DOE）は、特定のエリアで集中して水素等の製造から輸送貯蔵までを一貫して大規模に実証するべく、2022 年から 2026 年までに 80 億ドル(約 1 兆円)を投入し、最低 4 地点で Regional Clean Hydrogen Hub を作ることを目指している。こうした Hub を通じ、多様な水素源を活用したクリーン水素の供給拡大と、エリアにおける多様な需要創出を同時に実現することを可能とし、エリアの脱炭素化だけでなく、地域の雇用拡大・経済成長を実現するとしている。

DOE によるクリーン水素の定義は、水素製造地点における（Gate-to-Gate）CO_2 排出量が 2kg-CO_2/kg-H2 を超えないこと [5)]としており、2026 年時点の水素製造コスト目標を 2 ドル/kg と設定することで、2030 年 1 ドル/kg の目標を達成することを目指す。

今後、複数回に分けてハブの公募を行い、ステージゲートを設け候補地の絞り込みを行いつつ、実装までを補助(補助率：最大 50%)。

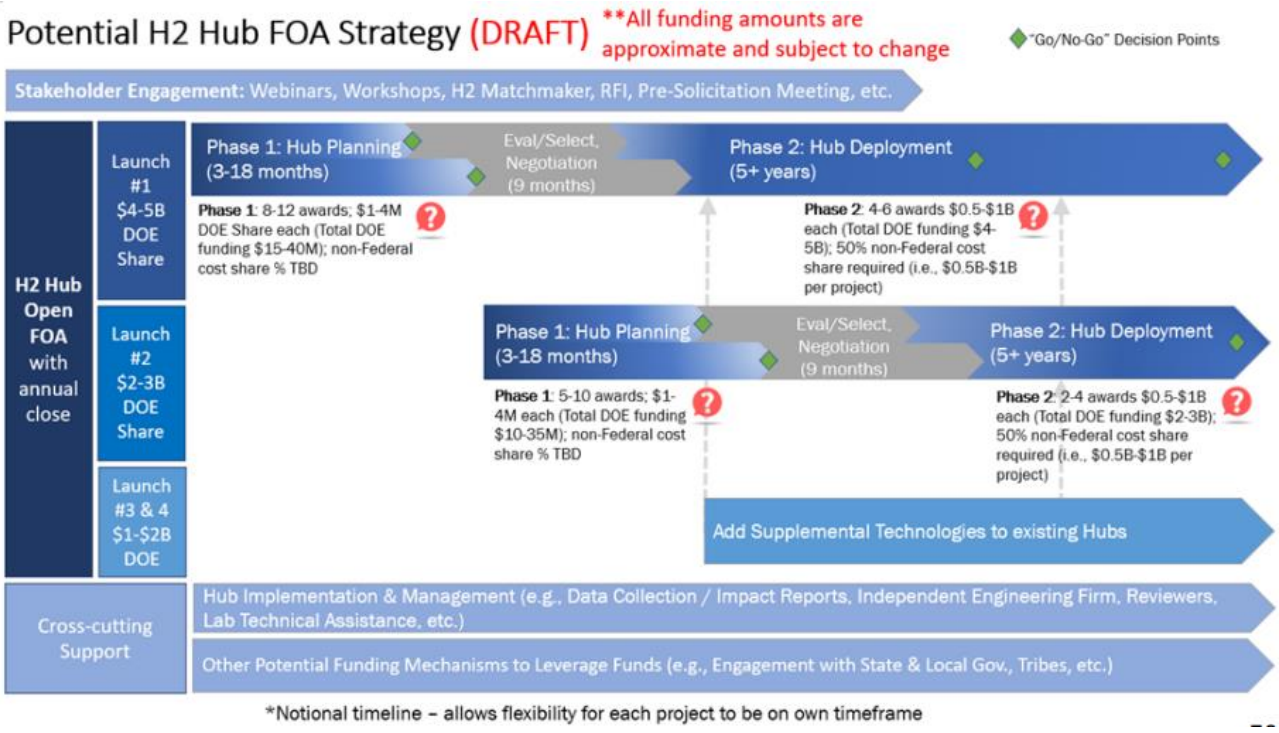


図 5.1.3-12 スケジュール案 [1)]

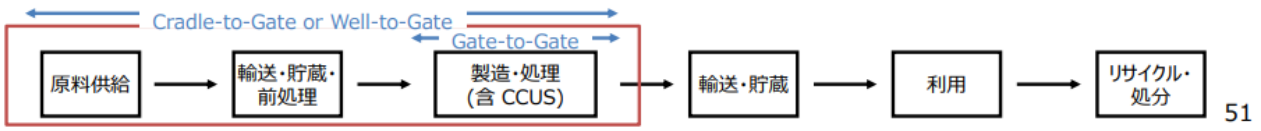
v) 諸外国検討事例における支援対象・CO_2閾値の設定

各国の支援制度では製造源や排出される CO_2 排出量で閾値を設定し、支援対象を限定する方向。

表 5.1.3-5 各国の CO_2 閾値の設定 [1)]

対象地域	ラベル	公表時期	要求事項	目的
EU	EUタクソノミー対応水素	2022	• LCA全体排出量が化石燃料由来のものより73.4%削減されたもの（3.0kg-CO2/kg-H2） • 水素化合物については70%削減されたもの	• 気候変動緩和のための投資の誘導
EU	RFNBO	2022	• 3.4kg-CO2e/kg-H2 ※"Lifecycle GHG"	• 供給者の再生可能燃料供給の義務を定めたもの（Renewable Energy Directive）
英国	低炭素水素	2022	• 2.4kg-CO2e/kg-H2 ※"Well-to-Gate"	• 政策や補助金の対象に用いられる
ドイツ H2Global	クリーン水素	2022	• EUタクソノミーを基準に考えるが、70%以上の削減を求める可能性	• 供給契約条件の一つとして用いられる
豪州	原産地証明制度	2021	• IPHEの計測方法等に基づいたCO2排出量の報告 ※Well-to-Gate	• 豪州原産地証明制度（Guarantee of Origin("GO")）における認証を付与
米国	クリーン水素	2022	• 4kg-CO2/kg-H2 ※"Well to Gate"	• DOEの水素ハブ補助金の対象に用いられる
米国	クリーン水素	2022	• 4kg-CO2/kg-H2 ※"through the point of production"	• インフレ防止法において炭素強度に応じて税控除が可能
–	低炭素水素	2017	• 天然ガス由来水素と比して60%が削減されたもの（将来的な閾値厳格化の可能性） ※"Well to Gate"	• 自主的なCertifHy制度による認定

（出典）EUタクソノミー規則等より資源エネルギー庁作成。関係国へのヒアリング等により今後変わり得る。



51

d. 他制度の検討状況

水素は製造源も用途も非常に広範に渡るため、複数の政策を組み合わせることは、サプライチェーンの構築と需要の創出を一体的に行うために重要。他方で、各取組の間で適切な棲み分けが図られない場合、事業者への過剰な支援・負担となる等の結果、政策全体が複雑化・非効率化する恐れがある。そのため、各政策の関係性（重複・補完）を理解した上で、重複支援とならないよう整理しつつ、適切な政策を事業者が組み合わせて活用できるような政策体系とすべきとしている。

表 5.1.3-6 他制度の検討状況 [1)]

他の政策例(含 検討中)	政策概要等
グリーンイノベーション（GI）基金	□ 水素等サプライチェーン等のコスト低減に向けた技術の検証・確立し、**技術リスクの低減を支援** □ 基金で導入された設備が**商用化時も使われる見込み**
長期脱炭素電源オークション	□ 脱炭素電源等の**巨額の初期投資の回収に対し、長期的な収入の予見可能性を付与する方策** □ 需要側設備である発電所は棲み分けが図られるものの、受入設備等、一部設備については**支援が重複する可能性有**。
改正JOGMEC法(出資・債務保証等)	□ 水素・アンモニアのサプライチェーン構築の際に、**事業者が負う投資リスクを低減**（事業採算性の向上には寄与しない）
GXリーグ	□ **脱炭素にいち早く移行するための挑戦を行い、国際ビジネスで勝てる企業群**を生み出すための産官学の仕組み。 □ 参加企業の自主的な取組により**水素等の調達インセンティブが増大**することが期待。

② 水素・アンモニアの商用サプライチェーン支援制度の検討状況 [7)]

中間整理では、水素・アンモニアの商用サプライチェーンに対する今後の支援について以下のような方向性が示された。

a. 強靭な大規模サプライチェーン構築に向けた基本的な考え方

- 本制度では、現在供給コストが高価である水素・アンモニアに対し、市場型の支援策を講じることで、強靭な大規模サプライチェーンの構築を通じ、水素・アンモニアの自立した市場の形成を目指す。
- 第6次エネルギー基本計画において、S+3Eを原則としたエネルギー政策の重要性が確認されたところ、我が国の次世代エネルギーである水素・アンモニアサプライチェーンの構築に向けた基本的な考え方もこれに則り、安全性、安定供給、環境性、経済性を前提とした制度とする。
- 水素・アンモニアをとりまく将来の見通しが不透明な状況においても、他の事業者に先立って自らリスクを取り投資を行い、2030年頃までに水素・アンモニア供給を開始する予定である事業者（ファーストムーバー）をS+3Eの観点から選定し、優先して後押ししていく。彼らの事業の予見性を高め、大規模な投資を促す。

b. 支援制度イメージ

事業者が供給する水素に対し、基準価格と参照価格の差額（の一部または全部）を支援。また、一定年数経過時点ごと基準価格を実績と見通しに合わせて見直す機会（例：5年）を設けるとしている。

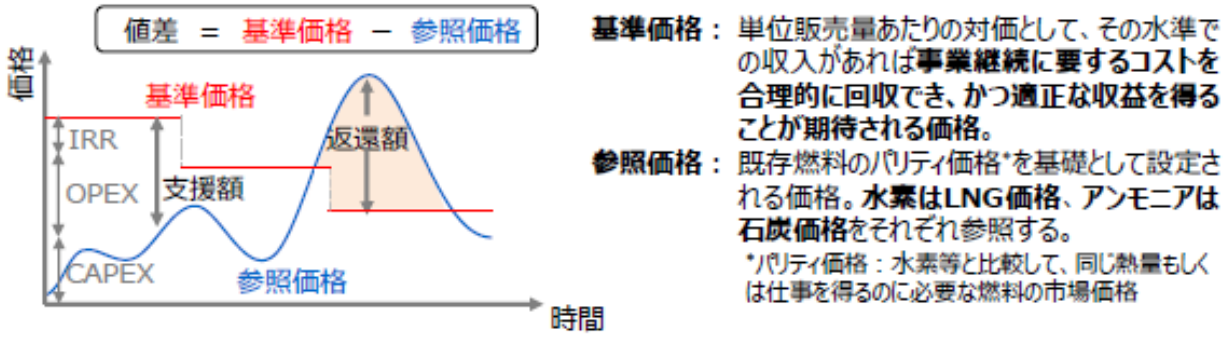


図 5.1.3-13 支援スキームと制度の骨格（イメージ）[7)]

選定されたファーストムーバーについて、支援期間は15年（状況に応じて20年）としている。

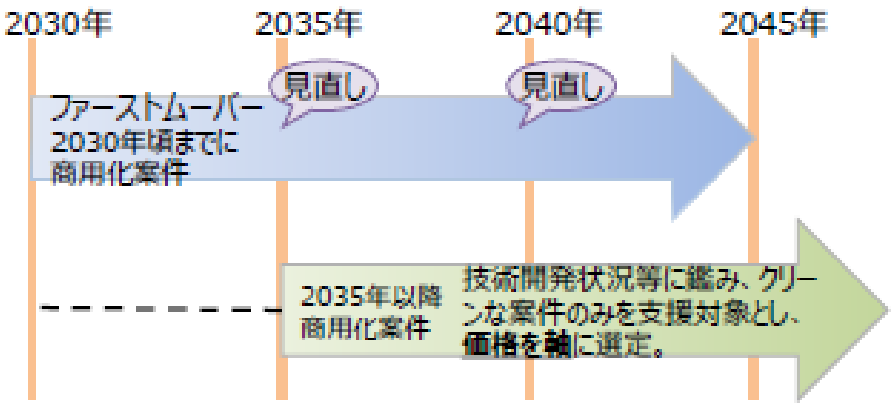


図 5.1.3-14 支援期間のイメージ [7)]

原則としてクリーンな水素・アンモニアが支援の対象としている。

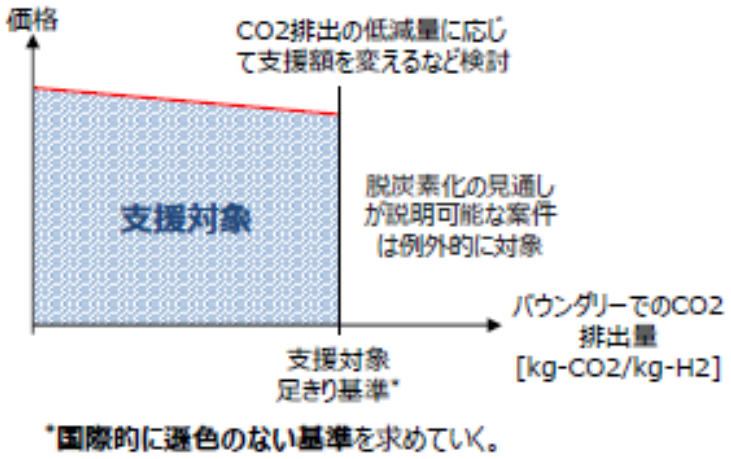


図 5.1.3-15 CO_2 排出量と価格設定案（イメージ）[7)]

c. 支援範囲

国内製造、海外製造・海上輸送に加え、国内貯蔵後の脱水素設備等での変換コストまでを支援するとしている。

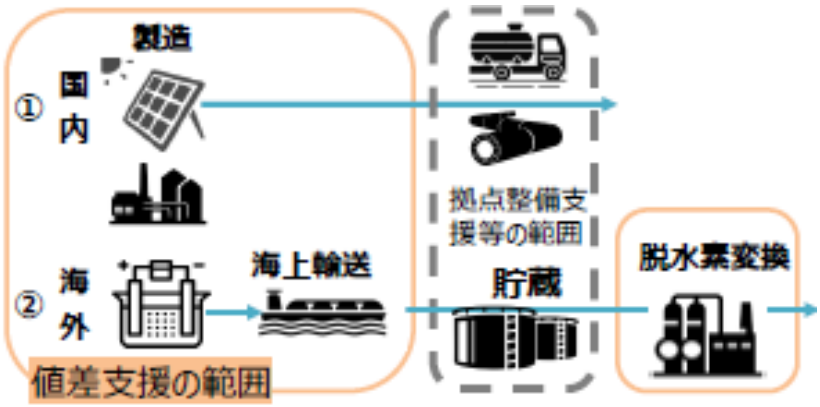


図 5.1.3-16 支援対象のイメージ [7)]

d. 案件の選定

ファーストムーバーの選定に際しては、中立性、透明性が担保される環境で、S+3Eを前提とした総合的な評価軸のもと、戦略的に案件の選定を行う。エネルギー安全保障の観点から、国内においても大規模にサプライチェーンを構築し、価格低減が見込まれる案件については、自治体等のコミットを要件とした上で、優先して支援するとしている。

③ 効率的な水素・アンモニア供給インフラの整備支援制度の検討状況 [7)]

中間整理では、水素・アンモニア供給インフラの整備に対する今後の支援について以下のような方向性が示された。

a. 基本的な考え方

カーボンニュートラル実現に向けて、燃料や原料として利用される水素・アンモニアの安定・安価な供給を可能にする大規模な需要創出と効率的なサプライチェーン構築を実現するため、国際競争力ある産業集積を促す拠点を整備。

＜今後 10 年間程度で整備する拠点数＞

- 大規模拠点：大都市圏を中心に 3 か所程度
- 中規模拠点：地域に分散して 5 か所程度

図 5.1.3-17 水素・アンモニアの潜在的需要地のイメージ例 [1)]

b. 支援制度イメージ

①拠点整備の事業性調査（FS）②詳細設計 FEED③インフラ整備の 3 段階に分けて支援。GI 基金の例を参考に、ステージゲートを設け、有望な地点を重点的に支援。利用される技術の技術成熟度レベル（TRL）が実装段階を超えてから一定の期間内に③インフラ整備の支援を行うものとし、それ以前に①FS 支援、②詳細設計支援の期間を用意するとしている。

図 5.1.3-18 ステージゲートの例 [1)]

c.　制度運用

モニタリングや審査の際に専門性、中立性が必要となるため、政府が主体を担いつつ専門家の意見を反映させる仕組みを検討するとしている。

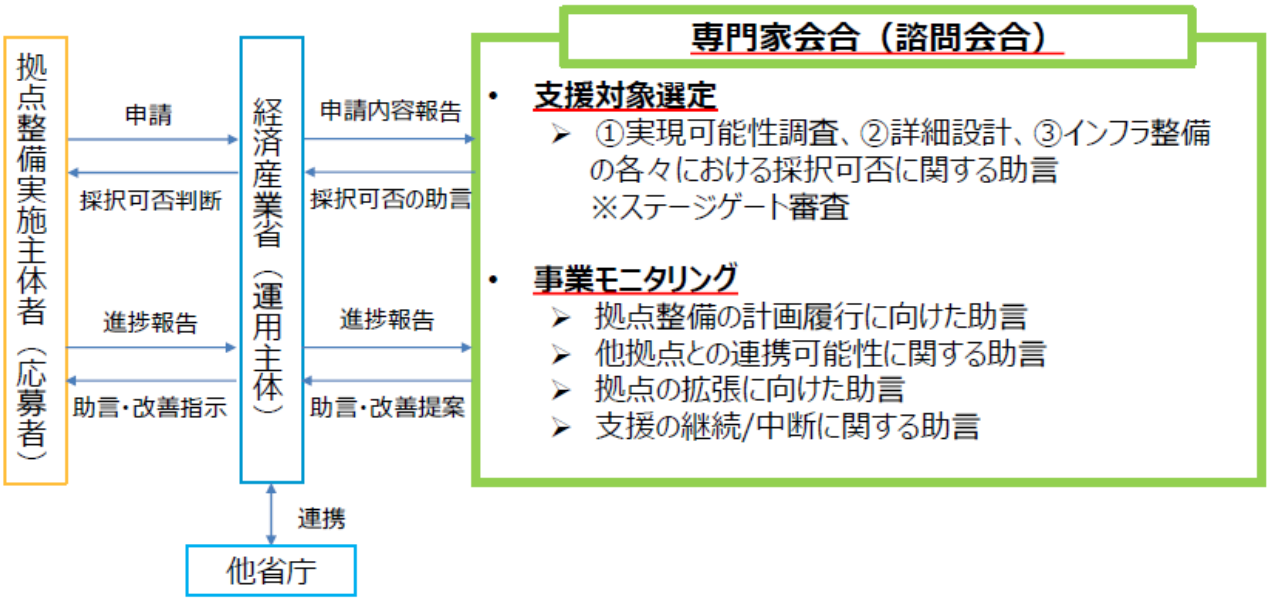


図　5.1.3-19　審査体制の案 [1)]

d.　支援範囲

多数の事業者の水素・アンモニア利用に資するタンク、パイプライン等の共用インフラを中心に支援するとしている。

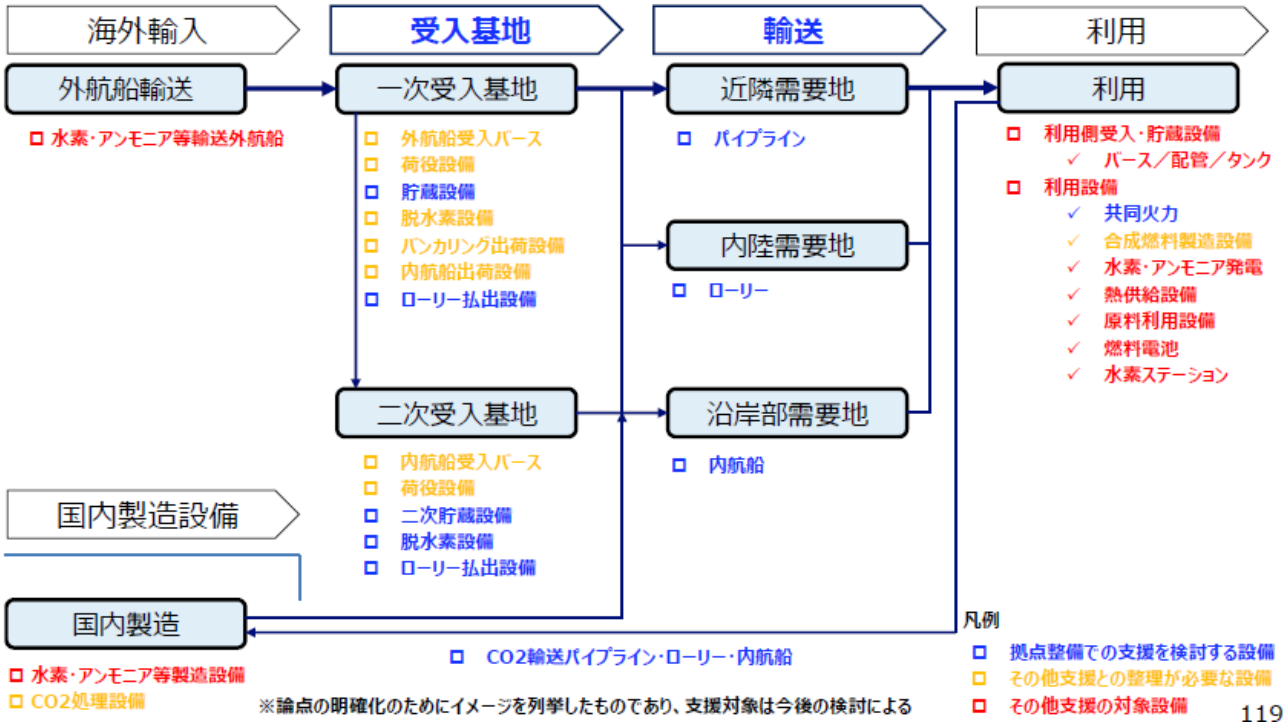


図　5.1.3-20　支援対象のイメージ [1)]

e.　他制度との連携

水素・アンモニアの大規模な商用サプライチェーン構築のためには、サプライチェーン構築支援から拠点整備支援まで連携して支援を行うことが効果的。そのため拠点整備を活用する際には、サプライチェーン構築支援においても優遇するなど、制度間の連携を図る。国交省で推進するカーボンニュートラルポートや、GX 実行会議において検討されている製造業の燃料転換等の支援策とも連携し、水素・アンモニアのサプライチェーン構築に向け、切れ目のない支援を実現するとしている。

(2) SAF 官民協議会

国土交通省が設定した、2030 年時点で「本邦エアラインによる燃料使用量の 10%を SAF に置き換える」という目標の達成に向けては、技術開発や製造設備への大規模投資等による国際競争力のある国産 SAF の製造・供給の推進と、将来的なサプライチェーンの構築に向けた供給側の元売り事業者等と利用側の航空会社との連携促進が重要である。国産 SAF の需要創出に向けて、改正航空法に基づく基本方針により、本邦航空運送事業者による計画の策定及び推進に取組む。また、ICAO 登録・認証取得に向けた取組環境持続可能性・GHG 排出量の評価等及び支援体制の構築等の国産 SAF の利用拡大に向けた取組や、海外の原料サプライヤー等との連携体制の構築による国産 SAF を製造するための原料の安定確保や、主にアジア地域における SAF の市場の獲得を目指す。これら政策課題の解決等に向けて、引き続き、官民一体となって取り組む（SAF 官民協議会）[6)]としている。

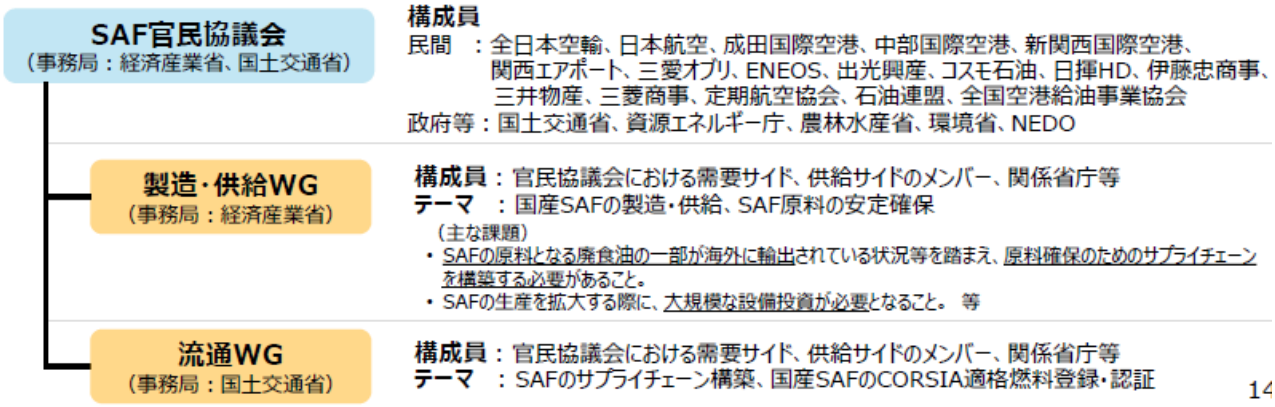


図　5.1.3-21　SAF 官民協議会の構成 [6)]

2022 年 4 月 22 日に第 1 回、2022 年 11 月 7 日に第 2 回の協議会が開催され、構成員の取組説明及び自由討議を行っている状況。

(3) 合成燃料官民協議会

合成燃料の商用化に向けては、技術面・価格面の課題に加え、認知度向上のための国内外への発信や、サプライチェーンの構築、CO_2 削減効果を評価する仕組みの整備等の課題に対応するため、官民が一体となって取り組んでいくことが重要であり、これらの議論を加速させるため、「合成燃料（e-fuel）の導入促進に向けた官民協議会」が設立された。また、それぞれの課題について専門的な議論を行う場として同協議会の下に、「商用化推進 WG」、「環境整備 WG」を設置。検討結果については、総合資源エネルギー調査会等にも共有し、必要な政策の検討へとつなげていく [6)]としている。

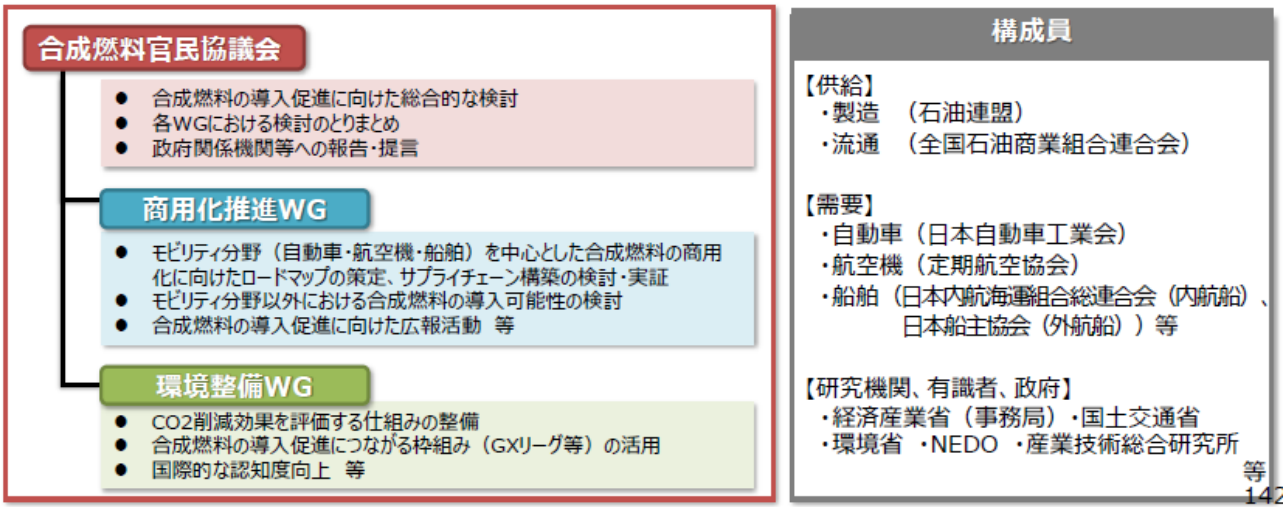


図　5.1.3-22　合成燃料官民協議会の構成 [6)]

2022 年 9 月 16 日に第 1 回の協議会が開催され、構成員の取組説明と自由討議がなされた。

(4) メタネーション推進官民協議会

合成メタンの社会実装に向けては、技術開発に加えて、水素コストが相対的に安価な海外で生成した合成メタンを国内に輸送するといったサプライチェーンの構築や、カーボンニュートラルに資する方向での CO_2 のカウントの検討などが必要であり、これらの課題への取組を推進するため、2021 年 6 月に供給側・需要側の民間企業や政府など関係する様々なステークホルダーが連携して取り組むメタネーション推進官民協議会を設置された。検討結果については、総合資源エネルギー調査会等にも共有し、必要な政策の検討へとつなげていく[6]としている。

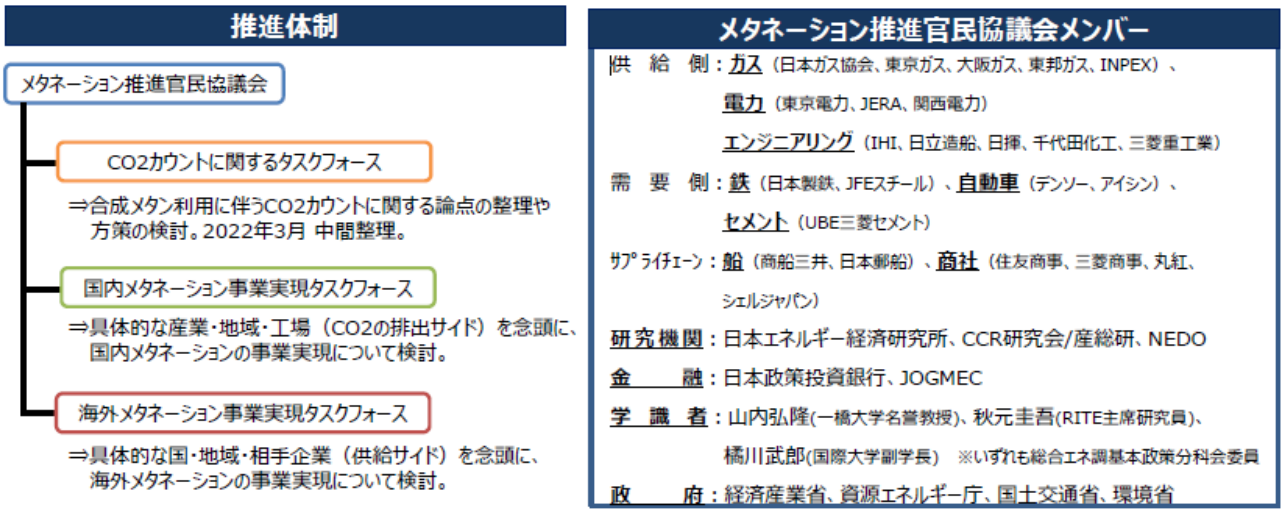


図 5.1.3-23 メタネーション推進官民協議会の構成[6]

2021 年 6 月 28 日に第 1 回の協議会が開催され、2023 年 3 月現在で、10 回の協議会が開催されている。第 9 回の協議会で、これまでの協議会及び各タスクフォースの議論内容が取り纏められた資料[8]が示されたので、その内容を以下に示す。

① 日本企業によるメタネーションの取組の広がり

日本企業によるメタネーションの取組は、総じて拡大傾向。様々な分野における多様な主体による取組が行われている。CO_2 排出の観点からは、鉄鋼や石油化学等の産業を含むコンビナートなどの CO_2 の大規模排出地におけるカーボンニュートラル化が効果的である。メタネーションという一つ技術の導入だけではなく、我が国の産業競争力強化と地域経済活性化という観点からの検討が必要であり、国際競争力のある産業集積等の中でのメタネーションの導入や社会実装を検討していくべきとしており、また、国内工場におけるオンサイトの合成メタン利用は、製造業における具体的な実証の取組が始まっており、今後の国内水素供給の充実による拡大が期待される。ガス会社等による海外での合成メタン製造については、各社の FS 調査が進み、具体的な事業計画推進の動きが出てきている。

IEA の Gas Market Report Q3-2022 によれば、日本以外では、欧州において、仏の Jupiter1000 や独のファルケンハーゲン等の合成メタンプロジェクトが進展。なお、欧

米での低炭素ガスとしてのメタン利用は、合成メタンよりも、バイオメタンが主。特に日本のガス事業者が取り組んでいる合成メタンを海外で大規模に生産し国内に輸入して利用するビジネスモデルは、世界的にも例のない挑戦である点に留意が必要としている。

a. 合成メタンの特徴と意義

水素と回収した CO_2 から合成(メタネーション)される合成メタンは、再エネ・水素利用の一形態である。合成メタン燃焼時に排出される CO_2 は回収した CO_2 であるため、追加的に新たな CO_2 が排出されるわけではなく、低炭素・カーボンニュートラルに資する。合成メタンの導入により、既存インフラの活用により社会コストを抑制しつつ、熱需要の脱炭素化が実現可能で、足元では、アジアを中心とした諸外国における天然ガス転換支援や、現地ガス事業者への出資等による LNG 需要拡大に貢献し、将来的には LNG から合成メタンへの移行を図ることで、海外 LNG サプライチェーンの脱炭素化への貢献も可能であるとしている。

b. 国内メタネーションの類型

国内メタネーションは水素需要の一つで、国内メタネーションに必要となる水素供給量を把握するとともに、国内メタネーションのための水素供給のあり方について検討し、水素拠点形成の検討やカーボンニュートラルコンビナート、カーボンニュートラルポートの検討との連携を図る必要がある。特に、臨海部の水素拠点等で行われる国内メタネーションについては、鉄鋼、化学、セメント、ガス火力発電との連携が想定され、今後、水素の供給・利用やインフラ整備が、国、都道府県、複数の事業者の連携の下で推進されることが見込まれる。一方、臨海部の水素拠点等から離れた内陸部の工業団地や工場で行われる国内メタネーションについては、水素（又は再エネ電気）の供給確保が課題であるとしている。

表 5.1.3-7 メタネーションの類型 [8)]

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

c. 国内メタネーションの事業者間連携

内陸部や臨海部において、ガス事業者が製造業者や自治体との連携を通じて、新たに FS や実証を行う取り組みが進められている。アイシン、デンソー、東邦ガスは、内

陸部の工場群(都市ガス需要)から回収した CO_2 を、湾岸部の LNG 基地へ運搬して合成メタンを製造し、都市ガス導管を用いて当該需要に供給する CO_2 循環モデルの FS 調査を実施中。西部ガスが北九州市とカーボンニュートラル実現に向けた連携協定を締結し、ひびき LNG 基地でのメタネーション実証を検討。

(出所)東邦ガス、デンソー、アイシン「中部圏におけるメタネーション地域連携検討」より　　(出所)西部ガスウェブサイトより

図 5.1.3-24 事業者間連携のイメージ [8)]

d. 海外プロジェクトの動向

海外メタネーションは、相対的に安価な水素を活用できるため、国内への大規模かつ安価な合成メタンの導入が期待できる。三菱商事、東京ガス、大阪ガス、東邦ガスは共同で、北米（米国テキサス州、ルイジアナ州）で製造した合成メタンを日本に導入する FS を実施。

東京ガス、大阪ガス、シェルは、海外メタネーションの日本導入事業の商用化を目指し、エンジニアリング・経済性を議論中。

東邦ガス、豊田通商、トタルエナジーズは、トタルエナジーズが製造する水素・合成メタンなどの海上輸送、国内受入・配送・利用までのバリューチェーン全体の課題を洗い出し、導入に向けたＦＳを共同実施。

② 合成メタンの導入に向けた制度・仕組み

a. 環境価値の移転等

合成メタンの生産から消費に至るまでのサプライチェーンを念頭に置くと、海外で生産した合成メタンは、既存の LNG インフラによって LNG と混合した形で海外から輸入・貯蔵され、ガス化されて、天然ガスと合成メタンが混合されて国内の需要家に供給される。国内で生産された合成メタンも、ガス導管に注入される場合には同様である。このように、特に導管を通じた合成メタンの供給は、需要家に届く段階では、天然ガスと合成メタンが混合した状態にあり、物理的に合成メタンのみを需要家に供給することはできない。このため、混合した合成メタンと天然ガスを「区別」するための認証制度や合成メタンの環境価値だけを切り出して移転・取引する仕組みの整備が必要である。この課題は、バイオガス（バイオメタン）にも共通しており、国内バイオガス資源の地域的偏在を踏まえると、バイオガスの都市ガス利用の観点からも重要である。引き続き官民協議会及びＴＦにおいて基本的検討を継続するとともに、類

似の国内制度・海外事例等の整理や、具体的なプロジェクトに基づく具体的課題の洗い出しや解決等について、委託調査による深掘りを検討するとしている。

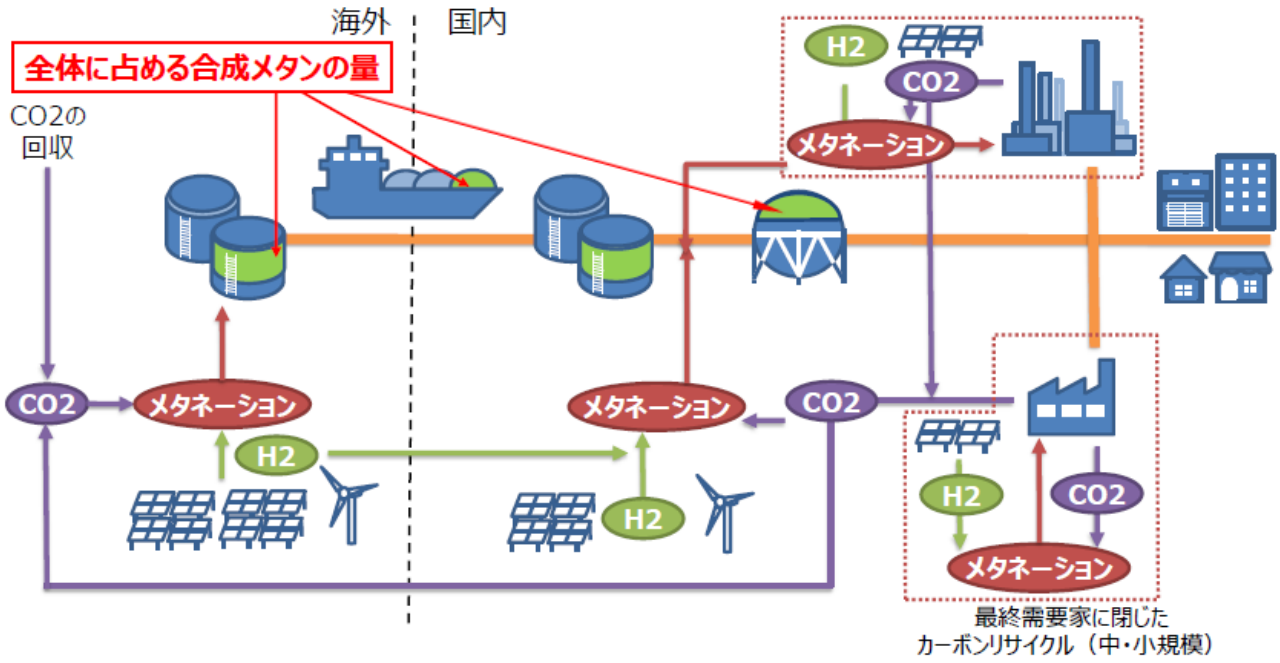


図 5.1.3-25 合成メタンが国内で流通するまでのサプライチェーン(イメージ図)[8)]

b. 供給高度化法の目標

第６次エネルギー基本計画では、2030 年に既存の都市ガスインフラへ合成メタンを１％注入し、水素直接利用やバイオガスやクレジットでオフセットされた LNG 等その他の手段と合わせて５％のガスのカーボンニュートラル化を図ること目標としている。2030 年の都市ガス分野の目標達成に向けては、合成メタンのみならずバイオガス（バイオメタン）の導入やその他の手段の活用拡大も重要。バイオガスについては、既に供給高度化法に基づき、一定規模以上のガス小売事業者について、バイオガスの導入によるガス供給を拡大するよう取り組む責務があるが、2030 年目標の達成に向けて、合成メタンも対象とした新たな供給高度化法の目標を定める必要がある。供給高度化法の目標の検討にあたり、導入支援策および認証制度や環境価値を移転・取引する仕組み等、合成メタンの社会実装を促進するための制度措置と合わせて検討することが重要であり、供給高度化法の新たな目標設定については、関係審議会（ガス事業制度検討ＷＧ）における「カーボンニュートラルに向けたガス制度整備」の議論の中で検討するとしている。

③ 合成メタン燃焼時の CO_2 カウントに関するルール整備促進

合成メタンは、燃焼時に CO_2 を排出するため CO_2 排出の取り扱いについて、合成メタンの利用促進に繋がる国際・国内ルールの整備が必要。CO_2 排出を実質的にゼロと見なす「環境価値」を明確にし、その帰属先を決めることで、合成メタンの需要家の予見可能性が高まり、利用促進に繋がることが期待される。国内で回収した CO_2 を用い

て国内で製造・利用される合成メタン（国内メタネーション）については、国レベルの CO_2 排出の取扱いが問題となる訳ではない。国内の各種制度において、（排出や削減の二重カウントを認める、認めない等を含め）各制度の趣旨に則り、適切な制度設計が期待される。特に事業者の関心が高い国内制度は、温対法のＳＨＫ制度やＧＸリーグの制度設計等であるが、国際的な製造業のサプライチェーンのカーボン・フット・プリントの扱いの中で、日本国内の合成メタン利用がどう評価されるかという国際的視点も重要としている。

海外で回収した CO_2 を用いて海外で製造した合成メタンを日本国内で利用するビジネスモデル（海外メタネーション）については、国レベルの CO_2 排出の取扱いが重要である。マルチの国際ルール作りは交渉等に相当程度の時間を要すると見込まれるため、まずは日本企業が計画している具体的な合成メタン製造プロジェクトを前提に、その投資先国との二国間のルール作りに官民連携で取り組むことを優先する。カーボンリサイクル燃料の燃焼時の CO_2 排出の取扱いは、合成メタンに固有の課題ではなく、カーボンリサイクル燃料一般に共通することから、今後、合成燃料やグリーン LPG の官民協議会とも連携して、内外のルール作りの促進を図ることが重要としている。

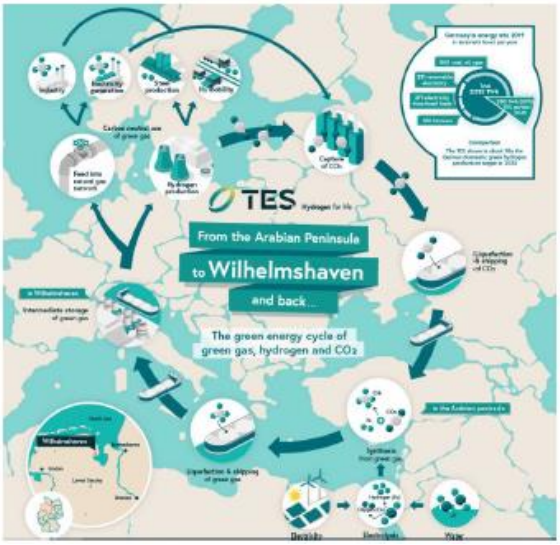
④　合成メタンの導入促進の検討の方向性

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

⑤　その他（再エネ水素の供給手段としての合成メタン活用）

海外では、合成メタンを燃焼利用するのではなく、純粋な水素キャリアとして利用する計画も存在。日本では、これまでのところ、このような形の合成メタン利用の事業計画は存在しないが、既存の LNG サプライチェーン活用という合成メタンのメリットを活かすことが可能な事業モデルの一つであり、動向を注視するとしている。

- ドイツ北海沿岸にあるヴィルヘルムスハーフェンにおいて、FSRUを利用したLNG及びグリーンガスの陸揚げ・国内供給を行うプロジェクトが予定。Tree Energy Solutions (TES) 社は合成メタンをキャリアとする水素輸入を計画。
- 本構想では、海外で生産した水素を合成メタンとしてドイツに輸入。水素とCO2に分離し、CO2は回収して再び水素生産国に再輸出し、合成メタン製造に利用。



出所：TES社ウェブサイト

図 5.1.3-26 独における合成メタンによる水素輸入の構想 [8)]

参考文献（第 5.1.3 節に関するもの）

1) 経済産業省：水素政策小委員会/アンモニア等脱炭素燃料政策小委員会　合同会議　中間整理、https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230104_1.pdf（アクセス日 2023.3.3）
2) 内閣官房：GX 実現に向けた基本方針、https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/pdf/kihon.pdf（アクセス日 2023.3.3）
3) IEA, Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector (2021)
4) U.S. Department of Energy: Clean Hydrogen Production Standard, https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/clean-hydrogen-production-standard（アクセス日 2023.3.13）
5) 経済産業省：水素・アンモニアサプライチェーン投資促進・需要拡大策について、https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/002_01_00.pdf（アクセス日 2023.3.13）
6) 経済産業省：エネルギーの安定供給の確保、https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2022/052/052_004.pdf（アクセス日 2023.3.3）
7) 経済産業省：水素政策小委員会/アンモニア等脱炭素燃料政策小委員会　合同会議　中間整理の概要、https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230104_2.pdf（アクセス日 2023.3.3）
8) 経済産業省：今後のメタネーションの推進について、https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_04_01.pdf（アクセス日 2023.3.3）

5.1.4 二酸化炭素除去（CDR）の技術動向

概要

二酸化炭素除去（CDR）などの負排出技術は残余の排出をオフセットしオーバーシュートを抑制することから1.5℃経路における重要な技術である。本研究では、CDR技術経路及び開発状況について技術の拡散、イノベーション、ライフサイクル評価に焦点を当てて紹介する。第(2)項ではRITEにおけるCDR開発について述べる。第(3)項では分析手法について、第(4)項では技術イノベーションシステム（TIS）を分析フレームワークとして用いたCDR技術拡散の評価について述べる。第(5)項では固体、液体、膜など様々なCDR技術によるDACCSのライフサイクル評価（LCA）の重要性について述べる。第(6)項では結論について述べる。

Abstract

Negative emissions technologies such as Carbon Dioxide Removals (CDRs) are key components of pathways towards 1.5°C, offsetting residual emissions and compensating for overshoot. This study aims to present CDR technological pathways as well the development status with foci on technology diffusion, innovation, and life cycle assessment. This report also outlines RITE' work on CDR in section (2). The section (3) outlines the methodologies and section (4) employ the technology innovation system (TIS) as an analytical framework to assess the diffusion of CDR technologies. Later, section (5) points out the importance of the life cycle assessment (LCA) of DACCS with various CDR technologies such as solid, liquid and membrane. Conclusion on the report will be in Section (6).

(1) Background

Total anthropogenic GHG emissions in this report refer to release during period 2010-2019 as cumulative net CO_2 emissions since 1850 (IPCC[1)]). In 2019, approximately 34% (20 $GtCO_2eq.$) of total anthropogenic GHG emissions came from the energy supply sector, 24% (14$GtCO_2eq$) from industry, 22% (15 $GtCO_2eq.$) from agriculture, forestry, and land use (AFOLU), 15% (8$GtCO_2eq.$) from transport, and 6% (3.3 $GtCO_2eq.$) from buildings. Alongside emission reduction (ER), carbon dioxide removal (CDR) is a key component of pathways to achieve net-zero emissions and the goals of the Paris Agreement, and essential if future generations aim for net-negative emissions. Net zero is now targeted by many countries, cities, and businesses. The role of CDR in strategies is perceived to carry risks to successful mitigation, however, and separating out targets for ER and CDR has been proposed to reduce these risks. CDR methods refer to a set of techniques for removing CO_2 from the atmosphere (IPCC[1)]). This report provides an update from the previous report on FY 2021/2022 on the latest CDR technology which has been shown in Figure 5.1.4-1.

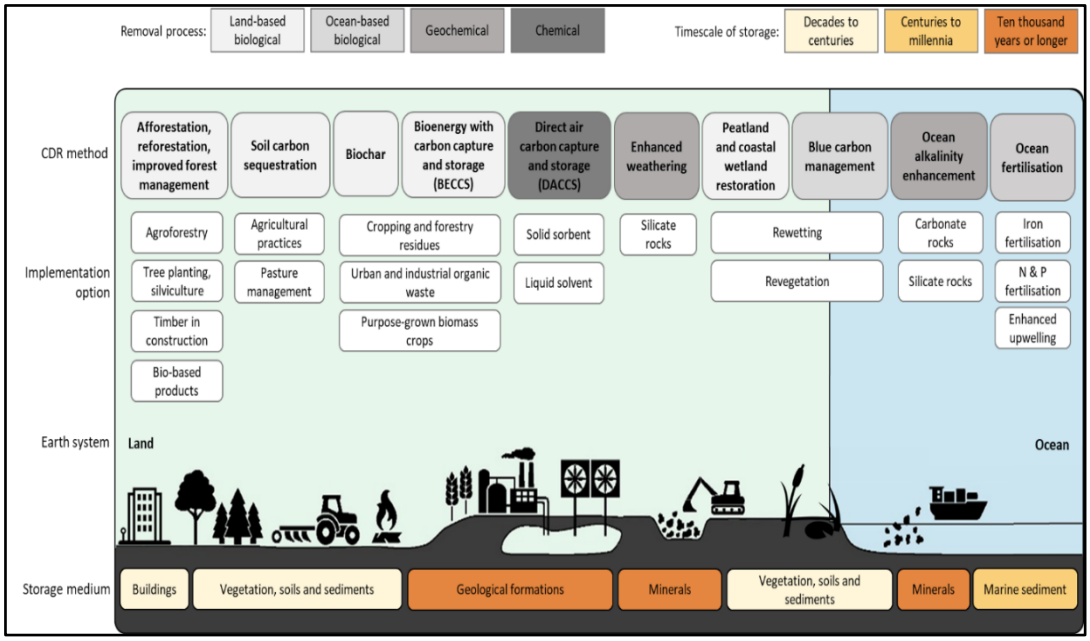


Figure 5.1.4-1 Taxonomy of CDR (IPCC[1)]).

(2) RITE's works on CDR technology update.

The CDR technology pathways has been shown in Figure 5.1.4-1. RITE published several journal articles and conference proceedings on various CDR technologies as well:

① Afforestation, reforestation, and improved forest management

Achieving carbon neutral consumer goods is dependent on reducing the greenhouse gas (GHG) emissions from one of their major ingredients–palm oil. This crop has become one of the most controversial topics today because, despite its high productivity, high applicability, and ability to alleviate poverty, palm oil development also comes at the cost of deforestation, which causes GHG emissions and biodiversity loss. This study aims to assess the possibility for the palm oil sector to move toward carbon neutrality to support the United Nations' Sustainable Development Goal (SDG) 13 (climate action). In this paper we assess the pathways to reduce the GHG emissions from palm oil by using the tool Palm GHG Calculator from Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO). The current Business as Usual (BAU) GHG emissions from palm oil are 0.6 tonCO_2eq./ton Crude Palm Oil (CPO). The study shows that in four scenarios: Land Use Change (LUC), Palm Oil Mill Effluent (POME) utilization technology, new planting materials, and nutrient (fertilizer) management could contribute to GHG emissions reduction. The estimated reductions are: 0.36 tonCO_2eq./ton CPO, 0.15 tonCO_2eq./ton CPO, 0.3 tonCO_2eq./ton CPO, and 0.06 tonCO_2eq./ton CPO, respectively. Altogether, those four scenarios suggest negative GHG emissions at value −0.37 tonCO_2eq./ton CPO. This study is useful as the guidelines to decarbonize palm oil industry derivates such as biofuels and oleochemicals industries. The study on palm oil in Indonesia

would be one of the case on how to become net zero emissions combining with forest conservation (Jupesta, et al.[2]).

② Biochar

Biochar, produced from biomass as a result of a process called pyrolysis, is one such nature-based solution that can help reduce greenhouse gas emissions via soil carbon sequestration. Oil palm biomass residues, namely: empty fruit bunches, mesocarp fiber, oil palm frond, oil palm trunk, and palm kernel shell, are abundant in Southeast Asian countries, especially in Indonesia, Malaysia, and Thailand. These residues can be used to produce biochar through thermochemical conversion, so called pyrolysis. This study provides a literature review on the physicochemical properties of biochar production from the palm oil residues mentioned above in the Southeast Asia region. There are ten parameters reviewed including: yield, physical properties (i.e., moisture content, volatile content, fixed carbon content, and energetic value), as well as chemical properties (i.e., C, H, O, N, and ash content) under different temperatures for all palm oil residues. Future research details field applications of biochar for soil carbon sequestration, and life cycle assessment of biochar production and field application. This study informs relevant stakeholders on the potential of biochar from oil palm residues in Southeast Asia as one possible nature-based solution to reduce GHG emissions (Jupesta et al.[3]). Hayashi et al., also assess the global carbon sequestration by using biochar from crops residues. It found that there are 1 and 1.1 Gt CO_2/year in 2030 and 2050 respectively. This study also suggests that it is desirable to simultaneously consider the contribution to the CH_4 and N_2O emission reductions and to the crops yields increment (Hayashi et al.[4]).

③ Bioenergy with Carbon capture and Storage (BECCS)

The 6th Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Assessment Report has mentioned that carbon dioxide removal (CDR) technologies have potential to remove CO_2 from the atmosphere. There is high potential of bioenergy from biomass residues, mill effluent and palm oil products to support net zero emissions in form of bioenergy with carbon capture and storage (BECCS). BECCS is the most mature of all the carbon removal technologies, as both bioenergy production and carbon capture and storage (CCS) have been separately proven at commercial scale. Oil palm biomass residues, namely, empty fruit bunches, mesocarp fiber, frond, trunk, and palm kernel shell, are abundant in Southeast Asia countries, especially in Indonesia, Malaysia, and Thailand. These residues could be processed into various forms: pellet biomass, biochar, and syngas, while the mill effluents can be processed into biomethane, and the palm oil could be processed into biofuel. It is expected that the study could give information to relevant stakeholders on the potential of BECCS in Southeast region as one of the CDR technologies (Jupesta et al.[3),5)]).

④ Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS)

Negative emissions technologies such as Carbon Dioxide Removals (CDRs) are key components of pathways towards 1.5°C, offsetting residual emissions and compensating for overshoot. This study aims to present CDR technological pathways as well the development status with foci on technology diffusion, innovation, and life cycle assessment. The first objective is to evaluate the GHG emissions removal potential by comparing life cycle assessment (LCA) of various CDR technologies in several pathways (natural, combined, and technological). Second, since the CDR deployment still in infant phase, we employ the concept of functions of technology innovation system (TIS) as an analytical framework to assess the diffusion of CDR technologies. The study shows that the potential for CDR development and commercialization is highly contextual determined by geographical (topography, latitude, etc.) as well as social factors (public acceptance, policy supports, etc.). Currently, the highest potential for CDR is on land based (afforestation/reforestation, BECCS, biochar, soil carbon sequestration, etc.) due to its technology and cost maturity followed by ocean based (ocean alkalinity and blue carbon), Carbon Capture and Utilization (CCU) and air based (DACCS). However, in the future the CCU and DACCS will be catching up to commercial scale thanks to rapid research and development (R&D) activities that supported by policies and industries (Jupesta et al. [6]).

⑤ Peatland and coastal wetland restoration

Protecting and restoring soil organic matter delivers many benefits for people and provides a comprehensive solution for climate change such as tropical peatland. Peatland is the moisture soil which contained high organic carbon element. Indonesia offers a dramatic opportunity to contribute to tackling climate change by deploying natural climate solutions (NCS), increasing carbon sequestration and storage through the protection, improved management, and restoration of drylands, peatlands, and mangrove ecosystems. Here, we estimate Indonesia's NCS mitigation opportunity for the first time using national datasets. The maximum NCS mitigation potential in 2030 is 1.3 ± 0.04 $GtCO_2e\ yr^{-1}$, based on the historical baseline period from 2009–2019. This maximum NCS potential is double Indonesia's nationally determined contribution (NDC) target from the forestry and other land use sector. Of this potential opportunity, 77% comes from wetland ecosystems. Peatlands have the largest NCS mitigation potential (960 ± 15.4 $MtCO_2e\ yr^{-1}$ or 71.5 $MgCO_2e\ ha^{-1}\ yr^{-1}$) among all other ecosystems. Mangroves provide a smaller total potential (41.1 ± 1.4 $MtCO_2e\ yr^{-1}$) but have a much higher mitigation density (12.2 $MgCO_2e\ ha^{-1}\ yr^{-1}$) compared to dryland ecosystems (2.9 $MgCO_2e\ ha^{-1}\ yr^{-1}$). Therefore, protecting, managing, and restoring Indonesia's wetlands is key to achieving the country's emissions reduction target by 2030. The results of this study can be used to inform conservation programs and national climate policy to prioritize wetlands and other land sector initiatives to fulfill Indonesia's NDC by 2030, while simultaneously providing additional co-benefits and contributing to COVID-19 recovery and economic sustainability (Novita et al. [7),8)]).

(3) Methodology

There are two methodologies covered in this report: Innovation and diffusion, and Life Cycle Assessment (LCA) focusing on DACCS. Examining innovation will be conducted from Research, Development and Demonstration (RD&D) related to CDR. Data on public R and D investment is obtained from 2010-2022. The next stage is to conduct patent activity by using patent application data from 1980-2020. Life Cycle Assessment (LCA) is a holistic and comprehensive method that can be used in assessing the environmental burdens and impacts resulting from biochar production. In this study, the system boundary starts from three DACCS technologies: solid, liquid and membrane. The inventory database for the LCA study was obtained from the study of solid and liquid (Balint,S. [9]) and the study of RITE (Yogo, K.[10]).

(4) CDR innovation and diffusion

The objective in this section is to examine the diffusion and innovation process of CDR technologies using a technology innovation system perspective focusing on the stages of innovation. In summary, diffusion of CDR innovation is proceeding, albeit modestly. Public R&D funding is small; patenting is growing but concentrated in a few technologies and countries; and deployment investment is small. The implicit growth rates to targets imply massive imminent scale up is needed for CDR to reach its potential. The current levels of R&D, patenting, investment, and growth are not at present well aligned for the development of gigatons of CDR by mid-century. The scale up challenge implies an urgent need for comprehensive and durable innovation policy support. This part was consisting of two parts: the innovation stages and innovation gap and expanding CDR innovation.

① Innovation stages and the “innovation gap”

Innovation is important because it provides an understanding how CDR technologies are evolving, how fast they might become adopted and whether they are improving, for example in cost. We use previous literature that describes innovation as a process of a series of stages with important interactions and feedbacks among them.

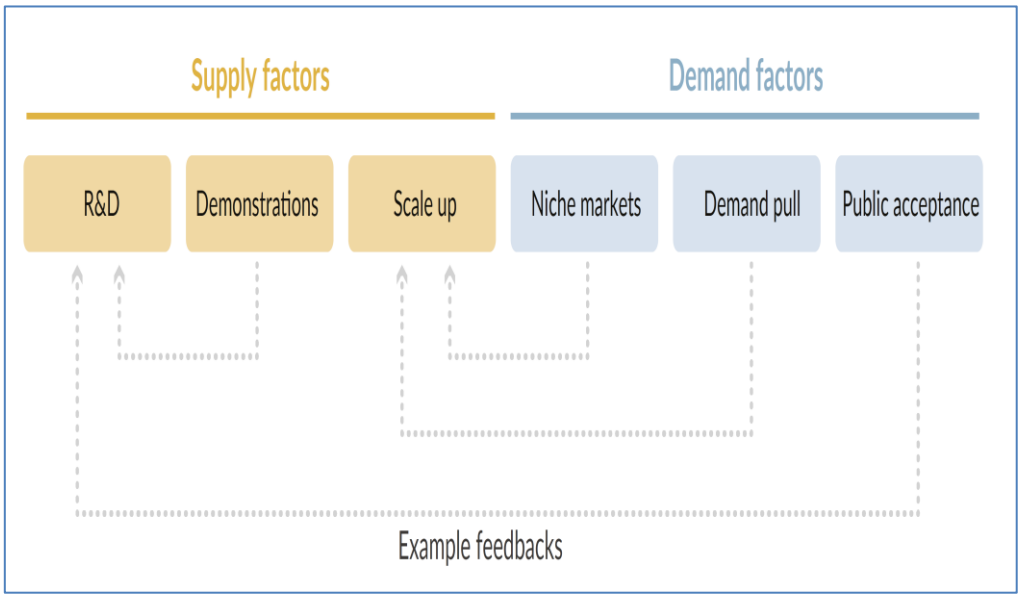


Figure 5.1.4-2 Stages of CDR innovation (Smith S.M et al. [11]).

We know from previous work that substantial scale up of CDR will be necessary to reach net zero to meet Paris climate targets (IPCC[1]). DACCS is likely to be an important component of the negative emissions contribution. While the time of net zero is likely to be mid-century for 1.5C and in the 2060s for 2.0C, it still requires rapid scale up to reach either target, and because of the typical decades-long adoption sequence, that scale up will need to start soon and then rapidly expand. It is therefore important to assess the state of DACCS innovation and diffusion in the near term. An assessment of the literature found a much stronger focus on supply side innovation stages, especially R&D, than on demand side stages, such as demand pull and public acceptance. In that analysis, 83% of the literature could be considered focused on innovation supply factors such as R&D and only 17% on demand side stages. This led to the observation of an "innovation gap"—wherein there was insufficient focus on demand for carbon removal.

② Expanding CDR innovation

Since the innovation gap study was published in 2018, investments in CDR innovation have expanded dramatically. Here we assess the state of CDR innovation with three sets of metrics, which the innovation literature emphasizes. Because innovation consists of a sequence of interlinked processes, it requires multiple metrics to assess. First, we compile data on public investment in CDR research and development (R&D), to measure inputs to the innovation process. Second, we track trends, as well as the geographic and technological focus of patenting in CDR technology to provide an indicator of the invention stage of the innovation process. Third, we measure investment in new capacity to assess the adoption stage.

Public R&D.

Because public R&D is an early-stage input to the innovation process, it can provide a leading indicator of where effort is being directed and where gaps exists. While public R&D is typically smaller than private R&D at the economy level, for nascent technologies public R&D plays a much bigger role and can be crucial to entraining private R&D later. In contrast to other climate mitigation technologies like clean energy. data on CDR R&D is patchy. We have used public sources to gather what data and programs are available. Summing this spending we observe total world investment of $3.9 billion on CDR RD&D. The overwhelming majority of this amount is $3.6 billion for US DAC hubs, spread over multiple years. DACCS R&D is a subset of this, although at present the public data are insufficiently precise to estimate on a global level. To put this in perspective, annual global energy RD&D spending is $16.7b just for OECD countries (excludes China).

Patenting. Patents measure inventive activity. We find a large increase in CDR patenting activity at the global level. A large and growing share of patenting is occurring in China and the most prominent technology area has been direct air capture. Using the Derwent Innovations Index and the search methodology from Kang et al.[11)], we measured patent activity across CDR technologies over time, by technology type, and by country. We use patent family counts to assess patent activity over time and by technology type and patent application counts for country activity. Patent families group patents for the same technology or process that are filed in multiple countries or patent offices. Patent applications account for the different countries where patents are filed. We use the patent index date for the time range of 1980--2020. The index date searches the last update to the database.

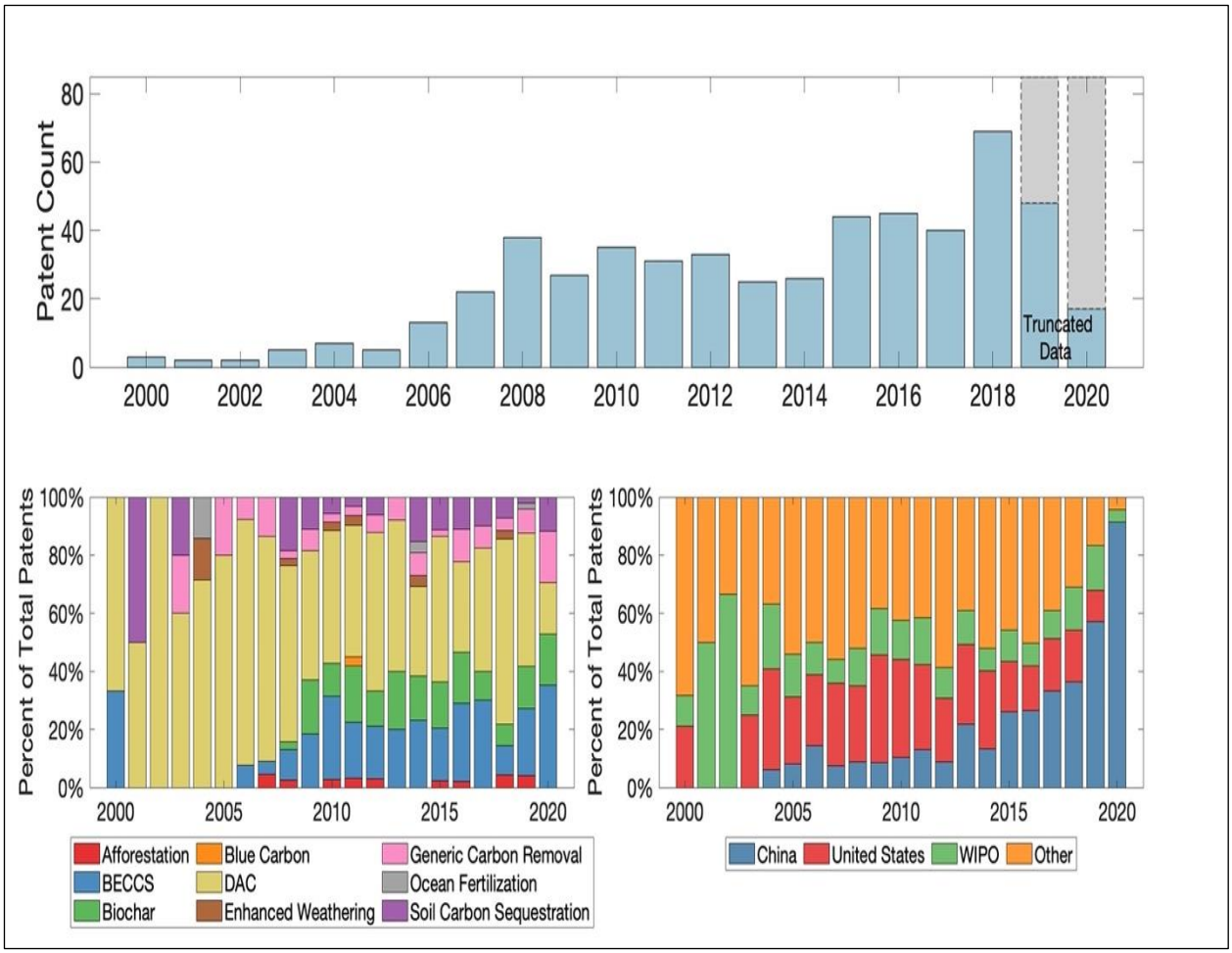


Figure 5.1.4-3 Patenting activity in CDR technologies (Smith S.M. et al. [11])

Top panel: Number of patents (grouped by patent families to avoid double-counting applications filed for the same technology in multiple countries) by year. In 2019 and 2020, the data is truncated because of the time it takes to process the application after it is filed before publishing, bottom-left panel: percent of total patent families by year by technology, bottom-right panel: number of individual patent families by year by country where the patent was filed.

Adoption Investment.

The ultimate manifestation of innovation is widespread adoption of technology. While CDR technology is only beginning to be adopted, we find evidence of $0.5 billion in purchases of carbon removal, although only a small fraction has been delivered to customers.

The Marginal Carbon database has been used to collects known announced purchases of CDR, including the year of purchase and CDR method. For announced purchases without a purchase price, we apply a cost per ton by technology type. We assess that cost per ton from the other announced purchases for each technology and year. In total, announced purchases total an approximated $526 million and 510,651 tonnes. This results in $1,029 per ton of removed carbon dioxide. The vast majority ($400 million or 80%) of announced purchases

are focused on DAC. This is largely driven by one announcement from 1PointFive and Carbon Engineering of 100,000 tons per year for four years with a 2021 average cost per ton of DAC applied to that announcement. Beyond the 80% of total announcements going to DAC, biochar is the second biggest technology type with announced purchases. Unknown CDR methods also include $6.3 million in announced purchases, more than any other defined technology type beyond DAC. Finally, to put these data in perspective we use data from Bloomberg on investments in various mitigation technologies. For 2021 we see investments in CDR of $0.3b, which is consistent with the marginal carbon estimate of $0.5b from late 2020 to mid-2022.

Table 5.1.4-1 Investment in the energy transition in 2023 (Bloomberg[12])

	$ billions	Share
Renewables	366	48%
Electric vehicles	273	36%
Heat pumps	53	7.00%
Nuclear	31	4.10%
Materials	19	2.50%
Storage	7.8	1.00%
Hydrogen	2.7	0.40%
CCS	2.3	0.30%
CDR	0.3	0.00%
Total	755.1	99.3%

(5) Life Cycle Assessment of DACCS

Among all CDR, DACCS is the most promising due to the scale up is still new and not yet facing learning rate as much as other established compared with other CDRs with higher learning rate (Afforestation/Reforestation, biochar, soil carbon sequestration, etc.). The challenges in DACCS are required a lot energy to captured CO_2 hence the focus on DACCS is to find the materials which could absorb CO_2 with low energy consumption and longer life time of usage. Study from Balint[9] is one of the most comprehensive on the DACCS by comparing solid adsorption and two liquid-based absorptions carbon capture technologies. The life cycle of the embodied energy of each technology normalized to 1 ton CO_2 captured atmospheric has been shown in Figure 5.1.4-4. RITE also has been extensively working on the DACCS with solid sorbent material to capture CO_2. Other technologies such as membrane also has been utilized however this technique still consume relatively higher energy to separate the CO_2 hence membrane as carbon capture technology mostly still use in point source CO_2 such as coal and natural has power plant which emits high CO_2 concentration (Nakao et al.[13]).

		Adsorption MJ/t CO_2		Absorption - GS MJ/t CO_2		*Absorption NaOH* MJ/t CO_2	
construction phase		*best case*	*worst case*	best case	worst case	*best case*	*worst case*
		plant					
	concrete	*4.5*	*6.6*	3.3	4.9	*3.4*	*5.01*
	steel rebar	*2.1*	*4.4*	0.60	1.24	*1.6*	*3.4*
	gravel	*0.17*	*0.89*	0.023	0.12	*0.029*	*0.15*
	sand	*0.15*	*0.78*	0.022	0.11	*0.025*	*0.13*
	soil work	*0.11*	*0.73*	0.039	0.25	*0.025*	*0.16*
	steel (alloyed)	*3.7*	*42*	2.2	25	*0.103*	*1.2*
	steel (unalloyed)	*3.05*	*35*	0.01	0.16	*0.70*	*8.00*
	aluminum	*13*	*280*	n.a.	n.a.	*0.012*	*0.25*
	copper	*0.38*	*2.8*	n.a.	n.a.	*0.013*	*0.096*
	mineral wool	*3.1*	*6.1*	1.1	2.3	*0.016*	*0.033*
	plastics	*4.9*	*6.1*	0.12	0.15	*32*	*40*
	PUR					*2.3*	*2.9*
	civ. eng. sum	*35*	*385*	*7*	*34*	*40*	*62*
operation phase		sorbent					
	sorbent (lifetime)	*67*	*12,240*	36	50	*3.8*	*8.6*
		energy					
	electricity	*1,999*	*6,312*	700	2,209	*2,425*	*7,656*
	air fan	95.2%		78.8%		8.7%	
	evacuation (vacuum)	2.8%		0.1%			
	pump (HX)	2.0%		10.2%			
	fluid pump (sorbent)			1.5%		51.2%	
	heat pump					26.7%	
	sorbent recovery			9.5%			
	crystallizer					0.2%	
	PSA - oxygen					13.2%	
	thermal energy	*4,277*	*6,426*	8,180	12,288	*8,743*	*20,813*
	sum	*6,379*	*25,362*	8,924	14,582	*11,211*	*28,539*

Figure 5.1.4-4 Energy consumption of different DACCS technology to capture 1 ton CO_2 from atmosphere (Balint,S[9]).

(6) Conclusion

This report outlines several studies on various CDR has been done by RITE; Afforestation/Reforestation, biochar, BECCS, DACCS and peatland as shown in references. Among all CDR options the DACCS still the best option considers the technology maturity and potential. In future DACCS will be able to dramatically reduce emission reduction costs and alleviate dependence on high energy consumption carbon capture technologies. While solid adsorption and liquid absorption has been extensively developed, little attention has been paid for the membrane technologies.

参考文献（第 5.1.4 節に関するもの）

1) IPCC WGIII Mitigation, Summary for Policymakers (SPM) 2022.

2) Jupesta, J., Akimoto, K., Boer, R. (2022). Is it possible to achieve carbon neutrality in palm oil production? In: Climate Change and Environment Sustainability, edited by: Jie, B., Prasad, D. Pignatta, G., Jupesta, J., Springer Nature Publisher.

3) Jupesta, J., Akimoto, K, Wiloso, E.I, Gheewala, S.H. (2022) The Physicochemical properties of the biochar in Southeast Asia, Indonesian Journal of Life Cycle Assessment and Sustainability (IJoLCAS) Vol 6, No.1. https://ijolcas.ilcan.or.id/index.php/IJoLCAS/article/view/72
4) Hayashi, A., Jupesta, J. Akimoto, K. (2022) The global biochar carbon sequestration from crops residue: Towards Net Zero 2050, December 16th, 2022, Grand Renewable Energy Integration (GREI) International Conference (virtual). https://www.grand-re2022.org/
5) Jupesta, J., Akimoto, K, Wiloso, E.I, Gheewala, S.H. (2022) Modeling the potential and cost of Bioenergy, Carbon Capture and Storage (BECCS) in Southeast Asia, July 23rd, 2022 (virtual). 1st International Conference Carbon Capture Science and Technology, https://ccst2022.com/
6) Jupesta, J., Nemet, G.F., Akimoto, K. Nakano, Y., Mochizuki, N. (2022) Carbon Dioxide Removals (CDR) from technology diffusion, innovation, and life-cycle assessments perspectives, June 21st, 2022, IIASA Scenario Forum, Vienna, Austria. https://iiasa.ac.at/events/jun-2022/scenarios-forum-2022
7) Novita, N., Subarno, Yeo,S., Lestari, N.S., Lugina, M., Malik, A., Putra, C.A.S., Gangga, A., Asyhari, A., Jupesta, J. et al. (2022) Natural Climate Solutions in Indonesia, Environmental Research Letters, IOP publisher. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac9e0a
8) Novita, N, Lestari, N.S., Lugina, M., Tiryana, T., Basuki, I., Jupesta, J. (2021). Geographic setting and groundwater table control carbon emission from Indonesia peatland: A Meta-Analysis, Forests. https://www.mdpi.com/1999-4907/12/7/832
9) Balint, S. 2023. Material flows and embodies energy od direct air capture: A cradle to gate inventory of selected technologies, Journal of Industrial Ecology.
10) Yogo, K. Recent and Development Trend of Caron Dioxide Solid Absorbents and RITE's Efforts (in Japanese), Innovative CO_2 separation and recovery technology symposium, RITE.
11) Smith, S.M. et al., 2023. The state of Carbon dioxide removal, 1st edition. https://www.stateofcdr.org/doi:10.17605/OSF.IO/W3B4Z
12) Bloomberg, 2022. Investment on energy transition. https://www.bloomberg.com/professional/blog/webinar/energy-transition-investment-trends-2022/
13) Nakao, S., Yogo, K., Goto, K., Kai, T., Yamada, H., 2019. Advanced CO_2 capture technologies: Absorption, Adsorption, Membrane Separation Methods, Springer Nature.

5.2 トランジションを含む長期緩和策分析

本節では、パリ協定長期目標の 2℃、1.5℃未満と整合的な複数のシナリオを想定し、2030 年や 2040 年といったトランジション期も含め、世界および日本のカーボンニュートラル実現に向けたシナリオ分析を世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+ によって行った結果について述べる。

5.2.1 CN に向けた長期シナリオ策定の背景とシナリオ想定

(1) トランジションを含む CN に向けた長期シナリオ策定の背景

パリ協定長期目標の 2℃や 1.5℃目標や 21 世紀後半早期のカーボンニュートラル実現に向けて各部門の対策を強化していく必要があるが、IPCC AR6[1)]においても、CDR に

よって負の排出への依拠が大きいシナリオや、低エネルギー需要社会の実現によって負の排出への依拠が小さいシナリオなど、様々な可能性が提示されている。更には、CN 実現に至るトランジションは、より一層の幅がある。例えば、産業部門毎の排出削減経路は、部門によって、既存インフラの寿命や、排出削減対策の難易度等は異なっている。一律の削減は、対策費用の増大を招き、却って排出削減を困難にしかねない。

しかし、各国、各産業・各企業の対策が、「グリーン・ウォッシュ」とみなされ、批判されるリスクも存在している。他方、金融機関そして評価機関であっても、必ずしも技術を含めた、全体整合的な排出削減への経路を十分理解できるわけでもないため、投資の適切性に関する判断できる定量的な材料が必要な状況にある。そのため、気候変動リスク等に係る金融当局ネットワーク（NGFS）などでも、定量的な分析が可能な統合評価モデルを用いた排出削減シナリオの策定が行われている [2)]。一方、これらは、部門毎の排出削減経路に対しては十分な情報を与えていない（図 5.2.1-1）。また、国際エネルギー機関（IEA）も提示しているものの、とりわけ 1.5℃シナリオについて、国別の十分な情報提示がなされているわけではない。国際資本市場協会（ICMA）のレポートにおいても、地域性や産業特性の考慮に関して課題があるとされている。日本政府は、トランジション・ファイナンスでの活用も念頭に、カーボンニュートラル実現に向けた具体的な移行の方向性を示すため、2021 年度にトランジションロードマップを策定した。これについても有用な情報を提供するものであるが、一方、これらは、部門毎に策定されたものであり、全体としての 2℃、1.5℃排出削減経路との整合性、部門間での整合性について、説明性を更に向上させる必要性もある。

そこで、部門別の積み上げ評価をし、2100 年までの期間について動的にコスト最小化の記述で最適化を行っている世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いて、世界全体で 2℃や 1.5℃目標と整合性を有し、また、国間、部門間で差異を踏まえつつ、経済合理性の点で整合性を有する、排出削減対策シナリオを、部門別のトランジションロードマップを含めて策定した。

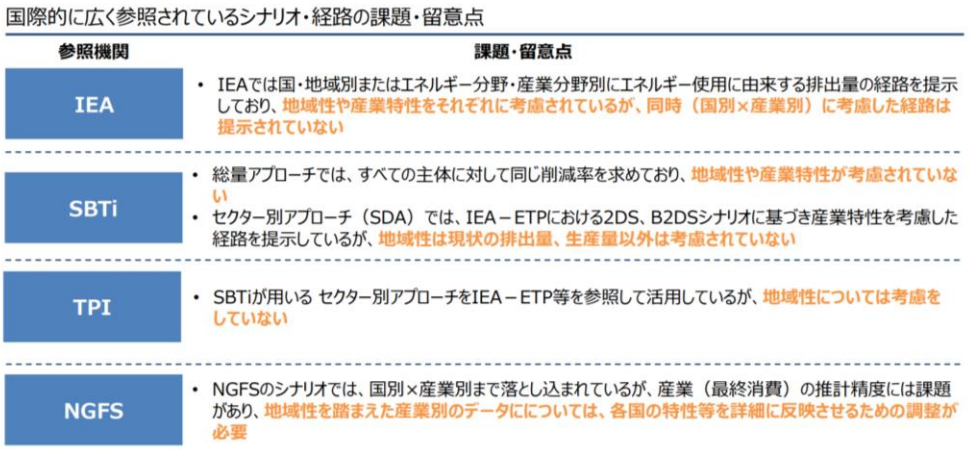


図 5.2.1-1 既存の国際的に広く参照されるシナリオ・経路の課題

（出典：経済産業省資料 [3)]）

(2) シナリオの想定

DNE21+モデルでの定量的な分析のシナリオ想定にあたっては、基本的に NGFS シナリオを参考にした。図 5.2.1-2 が NGFS のシナリオであり、6 つのシナリオが用意されている。この内、Current Policies、NDCs シナリオは、気候変動影響被害リスクと 2℃や 1.5℃目標に向けた排出削減対策コストとの比較のための参照ケースの位置づけでもある。本分析では、気候変動影響被害リスク推計は分析対象としない。NGFS は、2℃、1.5℃シナリオ相当としては、Orderly シナリオ（規律がとれたシナリオ）と Disorderly シナリオ（不規律なシナリオ）が用意されている。今年度の事業では、これに準拠する形で、Orderly シナリオと Disorderly シナリオを用意した。

DNE21+モデル分析用に想定したシナリオの概略を表 5.2.1-1 に示す。気温上昇については、2℃目標と整合するシナリオを 2 種類、1.5℃目標と整合するシナリオを 3 種類想定した（比較参照として、特段の気候変動政策を考慮しないベースラインも提示）。

		Physical risk	Transition risk			
Category	Scenario	Policy ambition	Policy reaction	Technology change	Carbon dioxide removal	Regional policy variation
Orderly	Net Zero 2050	1.4°C	Immediate and smooth	Fast change	Medium-high use	Medium variation
	Below 2°C	1.6°C	Immediate and smooth	Moderate change	Medium-high use	Low variation
Disorderly	Divergent Net Zero	1.4°C	Immediate but divergent across sectors	Fast change	Low-medium use	Medium variation
	Delayed Transition	1.6 °C	Delayed	Slow / Fast change	Low-medium use	High variation
Hot house world	Nationally Determined Contributions (NDCs)	2.6°C	NDCs	Slow change	Low-medium use	Medium variation
	Current Policies	3°C +	Non-currente policies	Slow change	Low use	Low variation

Colour coding indicates whether the characteristic makes the scenario more or less severe from a macro-financial risk perspective
- Lower risk
- Moderate risk
- Higher risk

図 5.2.1-2 NGFS で想定されているシナリオとその特徴

（出典：NGFS[2)]）

表 5.2.1-1 シナリオ想定（概略）

シナリオ名	気温上昇	政策のスピード	CDR	再エネ, EV	政策の地域差	他シナリオとの類似性		
						IPCC AR6	NGFS	IEA
Disorderly Below 2 ℃	1.7～1.8℃（ピーク:1.8℃、2100年 1.7℃）	遅（2030年NDC）	中	中位進展	大（主要先進国2050年CN）	Likely below 2 C, NDC [C3b]	Disorderly: Delayed Transition	APS (WEO 2022)
Orderly Below 2 ℃	1.7℃程度	早（2030年NDC:全世界MAC均等化）	小	高位進展	小（MAC均等化）	Likely below 2 C with immediate action [C3a]	Orderly: Below 2C	SDS (WEO 2021)
Disorderly 1.5 ℃	1.4℃（ピーク:1.7℃、2100年 1.4℃）	遅（2030年NDC）	大	中位進展	大（主要先進国2050年CN）	1.5 C with high overshoot (IMP-Neg) [C2]	(Disorderly: Divergent Net Zero)*	
Orderly 1.5 ℃	1.4℃（ピーク:1.6℃、2100年 1.4℃）	早（2030年NDC:全世界MAC均等化）	中	高位進展	中（主要先進国2050年CN）	1.5 C with no or limited overshoot [C1]	Orderly: Net Zero2050	
1.5C-CO2_CN	1.5℃程度（CO2パスからの概略値）	早（2030年NDC:全世界MAC均等化）	小（部門別Near-zero of CO2）	高位進展	中（主要先進国2050年CN）	1.5 C with no or limited overshoot [C1]		NZE

具体的には以下のようなシナリオ想定を行った。

政策のスピードについては、Disorderly シナリオでは、政策スピードが遅いとして 2030 年の排出削減については各国が個別に NDCs の排出削減を達成すると想定した。一方、Orderly シナリオでは、政策スピードが早いとして世界全体が CO_2 限界削減費用均等化の下、2℃目標、1.5℃目標を達成すべく NDCs 以上に排出削減を進めると想定した。

また、技術の進展については、CDR（Carbon Dioxide Removal）の利用可能性と、再エネ（太陽光発電および風力発電）と EV 技術のコスト低減について、複数のシナリオを想定した。前者については、Disorderly シナリオでは、掘削リグの台数に制約がある等、CO_2 貯留の急拡大には困難が伴うことを鑑みて想定している CO_2 貯留の拡大率を、CCS は 2026 年以降利用可能とした上で、国内/地域内の総貯留ポテンシャルに対し、2030 年までは年間 0.01%、それ以降は 0.02%ずつ貯留量を拡大可能と想定した。つまり、2050 年時点および 2100 年時点では、モデル分割の地域別に想定の CO_2 貯留ポテンシャルの内のそれぞれ約 0.5%、約 1.5%に相当する分を年間貯留可能と想定した。Orderly シナリオは、CCS・CDR への依存が少ないシナリオとして、Disorderly シナリオと同様に CCS は 2026 年以降利用可能とするが、その拡大率は年間 0.004%ずつと低く想定すると共に、世界全体の商用バイオマス供給量の上限を 50EJ/yr と想定している。

NGFS の 4 種類の 2℃、1.5℃シナリオと準拠したシナリオ以外に、IEA の Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector （NZE）に近いシナリオも用意した。1.5C-CO_2_CN シナリオは、CO_2 貯留の拡大率は Disorderly シナリオと同じとしつつも、部門別の CO_2 排出量が実質ゼロに近くなるように CDR の利用を制約している（DACCS および BECCS の利用をゼロとすると同時に、発電部門における e-メタン+CCS の利用

も不可としている)。非 CO_2 GHG の残余排出は比較的大きいと見られる。そのため、GHG 全体としてモデルで費用最小化となるシナリオを導こうとすれば、ある程度の量の CDR が必要であり（IPCC AR6（SPM C.11）でも、「CO_2 又は GHG の正味ゼロを達成しようとするならば、削減が困難な残余排出量を相殺する CDR の導入は避けられない。」としている)、そのとき、費用効率的な対策として非 CO_2 GHG のオフセットだけではなく、例えばセメント部門からの CO_2 排出をオフセットする結果となりやすい。しかし IEA の NZE シナリオは、CDR への依存が大変小さく、逆に言えば、全部門の残余排出量が大変小さく、NZE に近いシナリオを経済合理的なシナリオを導出するモデルで導くのはナローな解となる。そこで、1.5C-CO_2_CN シナリオでは、他のシナリオと異なり、GHG ではなく、CO_2 のみを対象にモデル最適化計算を行い、NZE に近い、各部門で CO_2 が実質ゼロに近くなる、定量的なシナリオを導出した。ただし、CDR のオプションも存在する中で、各部門で実質ゼロを目指すのは、本来、対策費用増になりやすいことに留意をもってシナリオを理解する必要がある。

再エネ（太陽光発電および風力発電）については、中位進展として文献 1)の低位シナリオを想定し、高位進展では更にコスト低減が進み、2050 年時点では同時点の中位進展でのコスト比で半減となると想定した。EV の技術進展については、表 5.2.1-2 に示すように、高位進展では中位進展に比べ、BEV や FCEV 等のコスト低減が更に進むと想定している。

政策の地域差としては、主要先進国である日米英と EU は、それぞれ個別に GHG 排出実質ゼロを 2050 年に達成すると想定するケースと、CO_2 限界削減費用均等化の下で 2℃目標を世界全体で費用効率的に達成するケースの 2 種類を想定した。

分析シナリオの世界全体排出経路を図 5.2.1-3、図 5.2.1-4 に示す。2℃シナリオでは、2065～2080 年頃に CO_2 排出を実質ゼロ、2090～2100 年頃に GHG 排出を実質ゼロとしている。1.5℃シナリオでは、更に早期から排出削減を進めることが必要であり、2050～2060 年頃に CO_2 排出を実質ゼロ、2075～2080 年頃に GHG 排出を実質ゼロとしている。なお、対応する全球平均気温上昇は、図 5.2.1-5 に示すとおりである（簡易気候変動モデル MAGICC を用いて推計)。

表 5.2.1-2 自動車車両コストの想定：小型乗用車（万円/台）

(a) 中位進展

	2015	2020	2030	2050
在来型内燃自動車	170	170	180	185
ハイブリッド車（ガソリン）	210	209	202	201
プラグインハイブリッド車（ガソリン）	270	248	219	210
純電気自動車（BEV）	311	305	265	225
燃料電池自動車（FCEV）	598	514	388	244

(b) 高位進展

	2015	2020	2030	2050
在来型内燃自動車	170	170	180	185
ハイブリッド車（ガソリン）	210	208	201	201
プラグインハイブリッド車（ガソリン）	270	244	210	205
純電気自動車（BEV）	311	285	210	205
燃料電池自動車（FCEV）	598	412	244	205

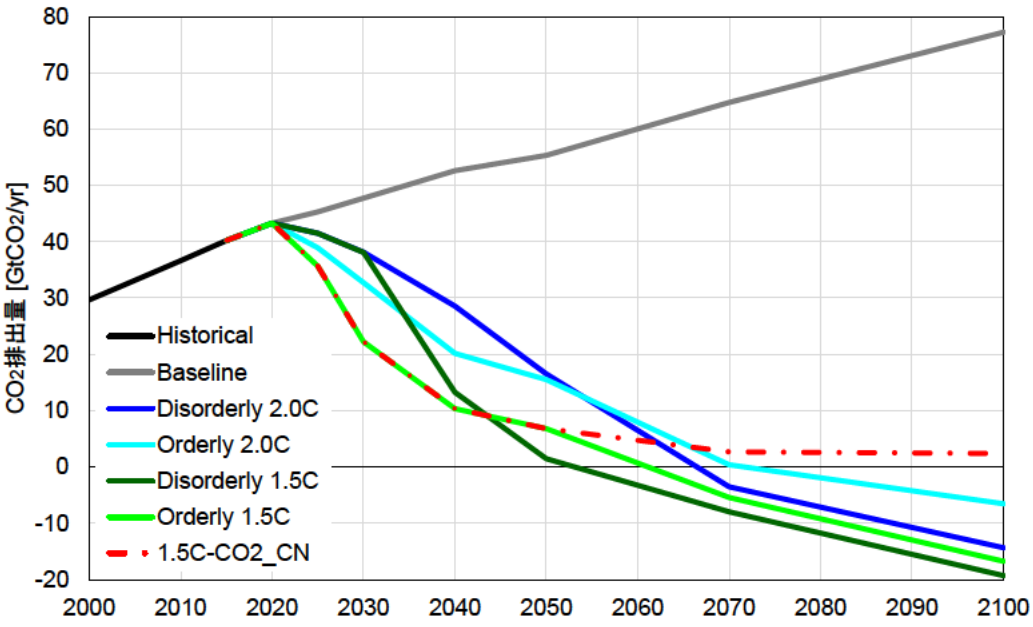


図 5.2.1-3 分析シナリオの世界全体 CO_2 排出経路

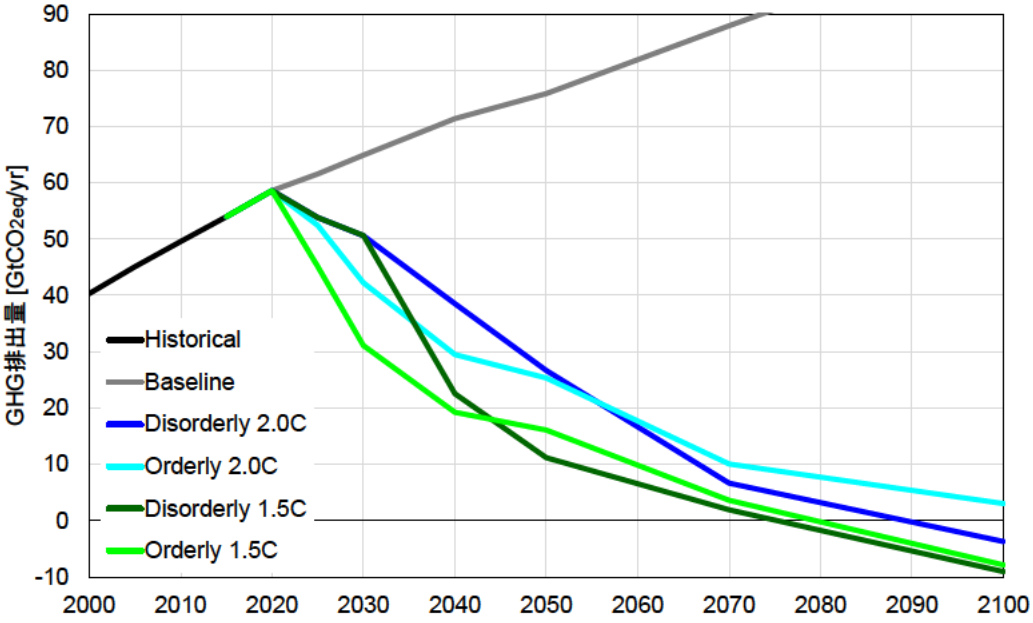


図 5.2.1-4 分析シナリオの世界全体 GHG 排出経路

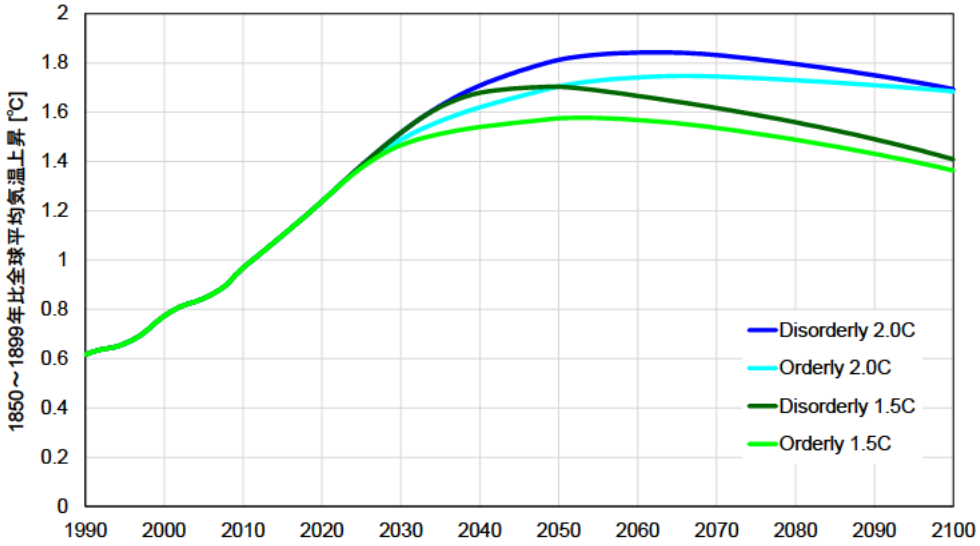


図 5.2.1-5 分析シナリオの全球平均気温上昇

5.2.2 世界

まず、本 5.2.2 節では世界のシナリオを示す。表 5.2.2-1～表 5.2.2-5 に、各シナリオの下での CO_2 限界削減費用を示す。各国が個別に NDCs を達成するとした Disorderly 2.0C や Disorderly1.5C では、先進国の CO_2 限界削減費用は tCO_2 当たり数百ドルと非常に高い水準となっている。一方、2030 年は CO_2 限界削減費用均等化の下で NDCs の深堀を達成するとした Orderly 2.0C や Orderly 1.5C では、前者では 81\$/tCO_2、後者では 234\$/tCO_2 であり、より費用効率的に排出削減が進められている。また、主要先進国は 2050 年に GHG 排出を実質ゼロにすると想定しているシナリオでの 2050 年 CO_2 限界削減費用は、例えば Disorderly 1.5C の日本では 685\$/tCO_2 等と推計されており、非常に高

い排出削減対策まで導入しなければ達成できないとされている。一方、世界全体の CO_2 限界削減費用均等化の下では、158$/tCO_2$ と推計されており、後に示すように日本の国内での排出削減は少ない。

表 5.2.2-1 Disorderly 2.0C における CO_2 限界削減費用（$/tCO_2$）

	2030 年	2040 年	2050 年
日本	463	305	500
米国	200	240	230
EU27	282	207	284
韓国	150	80	119
中国	34		
その他	国によって差異		

表 5.2.2-2 Orderly 2.0C における CO_2 限界削減費用（$/tCO_2$）

	2030 年	2040 年	2050 年
日本	81	250	158
米国			
EU27			
韓国			
中国			
その他			

表 5.2.2-3 Disorderly1.5C における CO_2 限界削減費用（$/tCO_2$）

	2030 年	2040 年	2050 年
日本	402	456	685
米国	209	291	276
EU27	284		324
韓国	142		268
中国	39		
その他	国によって差異		

表 5.2.2-4 Orderly1.5C における CO_2 限界削減費用（$/t$CO_2$）

	2030 年	2040 年	2050 年
日本	234	517	465
米国		492	301
EU27			324
韓国			268
中国			
その他			

表 5.2.2-5 1.5C-CO_2_CN における CO_2 限界削減費用（$/t$CO_2$）

	2030 年	2040 年	2050 年
日本	282	706	341
米国			308
EU27			351
韓国			293
中国			
その他			

図 5.2.2-1 に NGFS の各シナリオ（REMIND モデルによる推計）の炭素価格（CO_2 限界削減費用）との比較を示す。1.5℃シナリオでは、DNE21+では DACCS を考慮していることから、限界値が抑制される傾向があり、若干低めの CO_2 限界削減費用となる傾向があるものの、概ね NGFS シナリオと整合的な炭素価格水準を示している。なお、IPCC、IEA との炭素価格比較については、それぞれ 6.1.2 節、6.2.2 節を参照されたい。

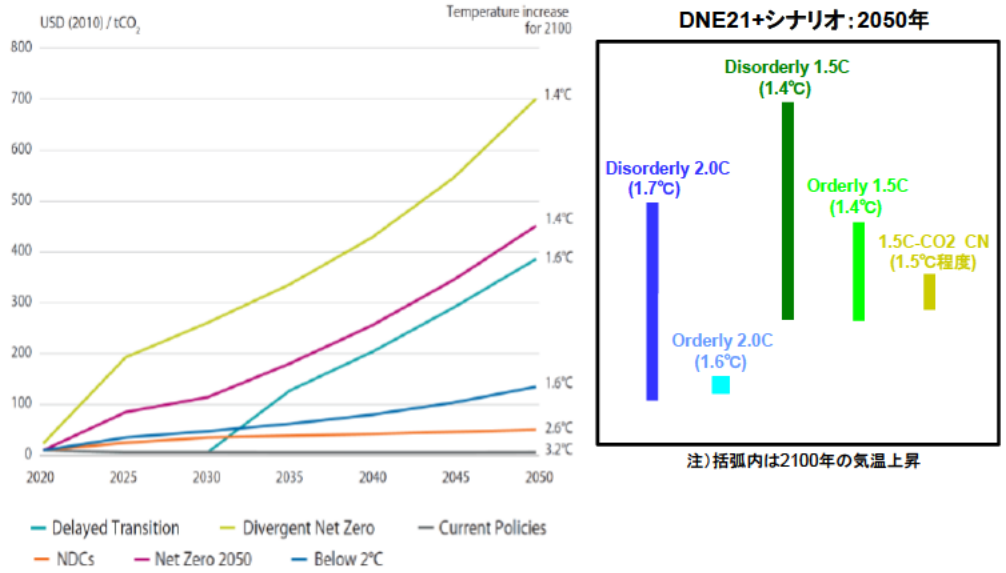


図 5.2.2-1 NGFS の各シナリオと本シナリオの炭素価格の比較

図 5.2.2-2 に、世界全体の部門別 GHG 排出量を示す。現状の排出量が多い発電部門からの CO_2 排出は、後に示すように各種の対策を導入することにより、他部門に比べて早い時期から大幅な削減が進められていることが確認できる。CDR による CO_2 固定は 2030 年以降大きく拡大されており、最も多い Disorderly 1.5C では 2050 年に 20 $GtCO_2eq/yr$ 程度利用されている。Disorderly 2.0C および Orderly 1.5C のシナリオにおいては、当該量は 10 $GtCO_2eq/yr$ 程度の利用である。一方、Orderly 2.0C、1.5C-CO_2_CN シナリオでは、5 $GtCO_2eq/yr$ を下回る量に留まり、その多くは植林等による土地利用変化である。なお、NGFS で利用されている 3 つの IAMs の Orderly-Net Zero 2050 シナリオでは、最も大きな見込み量の IAM で、BECCS 8 $GtCO_2eq/yr$ 程度、土地利用変化で最大 6 $GtCO_2eq/yr$ 程度が見込まれている。DACCS についてはまだモデル評価の考慮対象外であり、具体的な推計はなされていない。

図 5.2.2-3 は、世界全体の一次エネルギー供給量を示している。2030 年時点でも石炭の供給は大きく抑制され CCS も導入されている一方、ガスや石油の供給は相対的に多い。CCS が導入されていない石炭の供給は 2050 年に向けて大きく抑制される一方、CDR による負排出のオフセットがあること、また世界全体では 2050 年までに GHG 排出を正味ゼロとするわけではないことから、1.5℃目標であっても 2050 年の化石燃料利用（ガスおよび石油）は相当量残っている。

図 5.2.2-4 には、世界全体の発電電力量を示す。一次エネルギー供給と同様に、石炭火力発電は 2030 年でも大きく抑制されている一方、ガス火力発電は CCS も導入しつつ、ベースラインより増加しているシナリオもあり、ガスへの転換が進んでいる。後に示す日本の結果では、水素・アンモニア発電が導入され、ガス火力+CCS は相対的に少なくなっているが、世界では CO_2 貯留ポテンシャルが大きい国もあることから、このような結果となっている。CO_2 貯留の拡大率を相対的に低く想定している Orderly シナリオにおいては、Disorderly シナリオに比べてガス火力+CCS の利用は少なく、代わりに更なるコスト低減を見込んでいる太陽光発電や風力発電の導入が増加している。

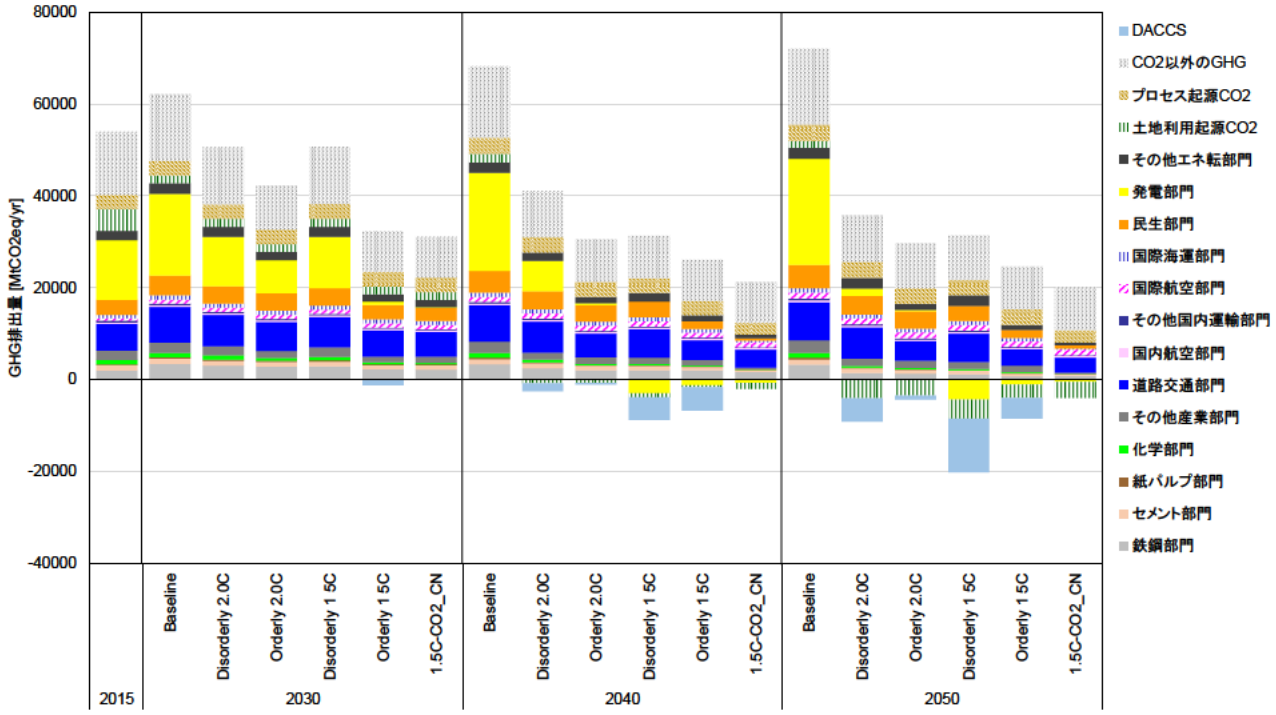


図 5.2.2-2 部門別 GHG 排出量（世界全体）

注：1.5C-CO_2_CN は CO_2 のみの分析をしており、グラフ中の CO_2 以外の GHG 排出量は便宜上、Orderly 1.5C の数値を掲載している。

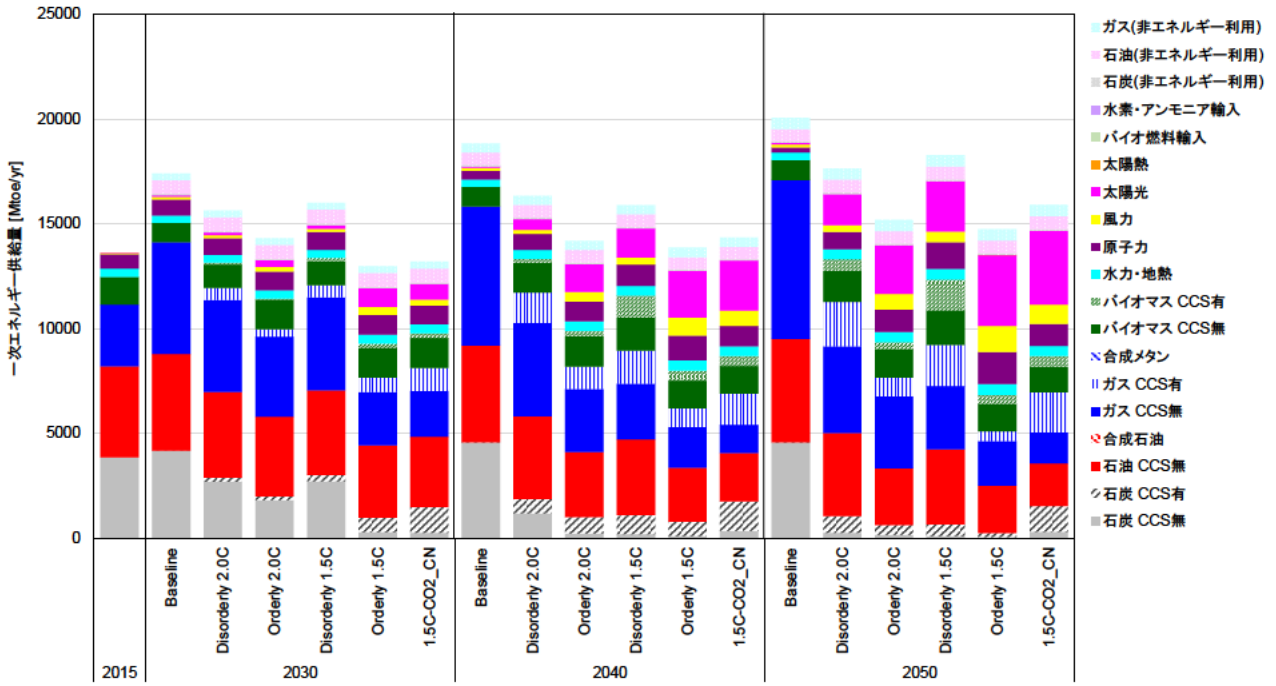


図 5.2.2-3 一次エネルギー供給量（世界全体）

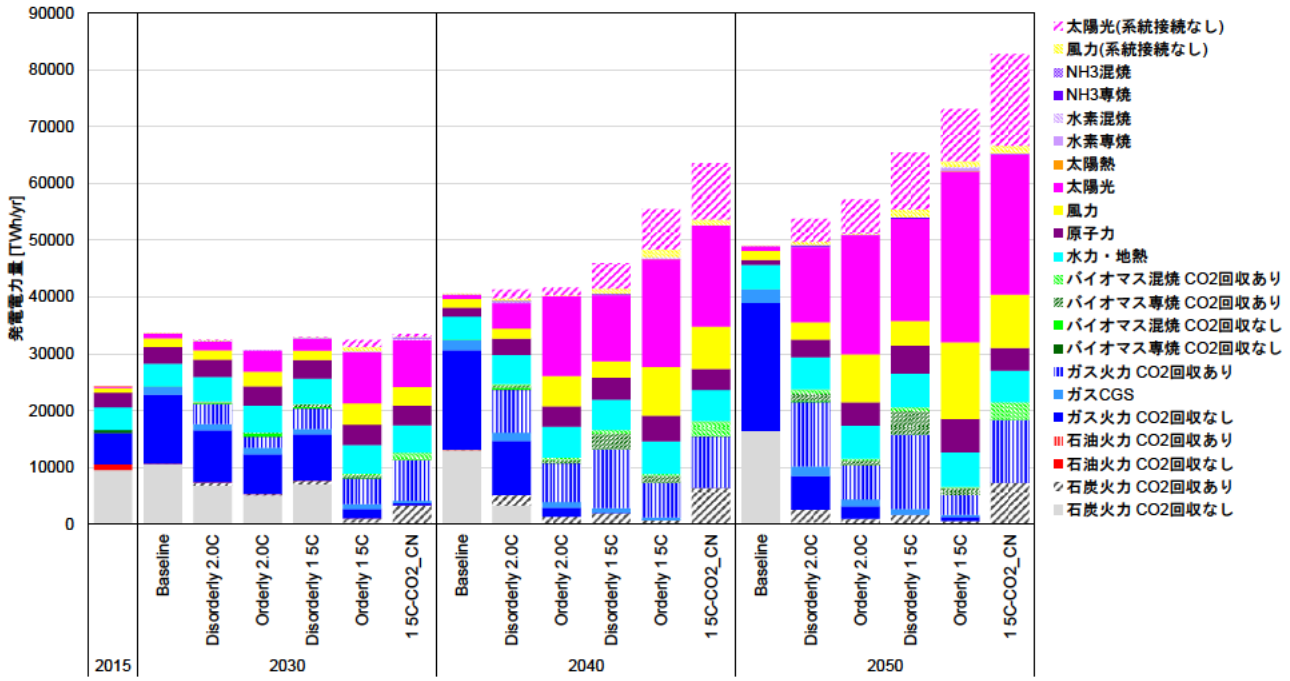


図 5.2.2-4 発電電力量（世界全体）

図 5.2.2-5 に世界全体の産業部門最終エネルギー消費量を示す。発電部門と同様に、石炭利用は減少し、その一方でガスと電力の利用が増大する。しかしながら、図 5.2.2-6 に示すように鉄鋼部門での高炉による粗鋼生産のための石炭利用は必要となるため、発電部門に比べると石炭利用の減少は少ないと言える。後に示す日本の結果と比べると、日本と比べ国内再エネ・国際連系線利用再エネや国内 CO_2 貯留量が大きい国が多いことから、水素・アンモニアや e-メタンの利用は相対的に少なくなっている。但し、CDR の利用を制約している 1.5C-CO_2_CN においては、それらの利用は相当量となっている。

鉄鋼部門の最終エネルギー消費量（図 5.2.2-6）は、2℃目標、1.5℃目標の下では、2040 年頃までは省エネの進展と電炉比率増大により漸減している。但し、先に述べたように、高炉での石炭利用は継続することから、石炭の利用が主となっている。2040 年では 1.5C-CO_2_CN の下で Super COURCE50 のような外部水素も活用した高炉・転炉法製鉄、2050 年では全ての排出削減シナリオで水素直接還元製鉄が導入される結果であり、相当量の水素利用が必要となっている。

図 5.2.2-7 はセメント部門の最終エネルギー消費量を示している。セメント部門も鉄鋼部門同様に現状は石炭の利用が多いが、排出削減が厳しいシナリオ程、早期からガスへの転換が費用効率的であるとして進められている。生産技術の高効率化は進められる一方で、CO_2 回収を行うために寧ろ増エネルギーとなる側面もあり、同一時点のベースラインにおけるエネルギー消費と比べ増加しているケースもある。特に、CDR の利用を限定的に想定した 1.5C-CO_2_CN ではその影響が顕著である。

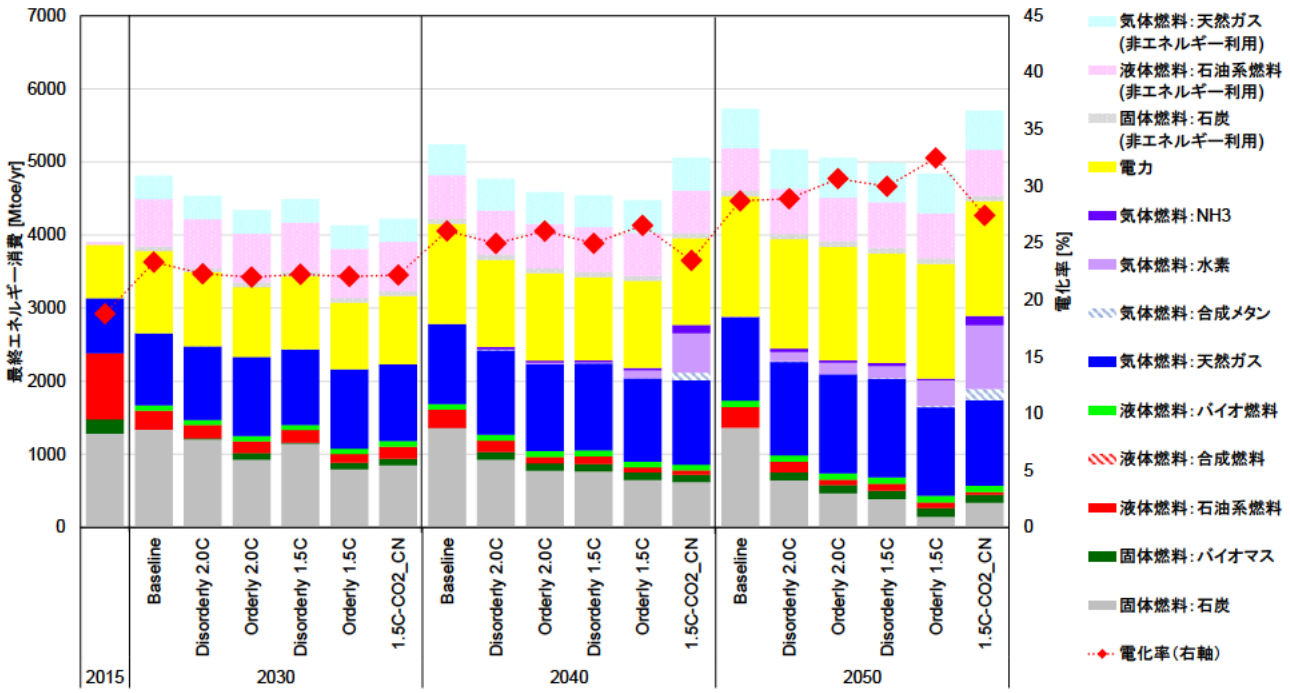


図 5.2.2-5 産業部門最終エネルギー消費量（世界全体）

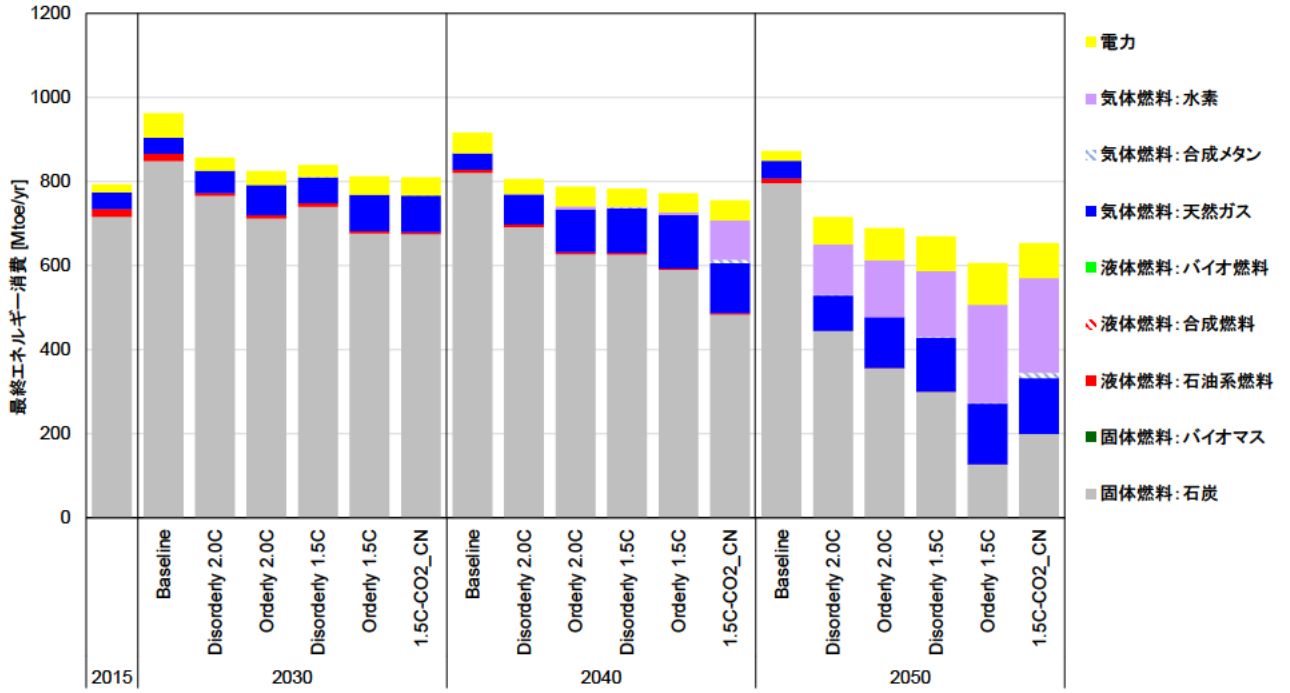


図 5.2.2-6 鉄鋼部門最終エネルギー消費量（世界全体）

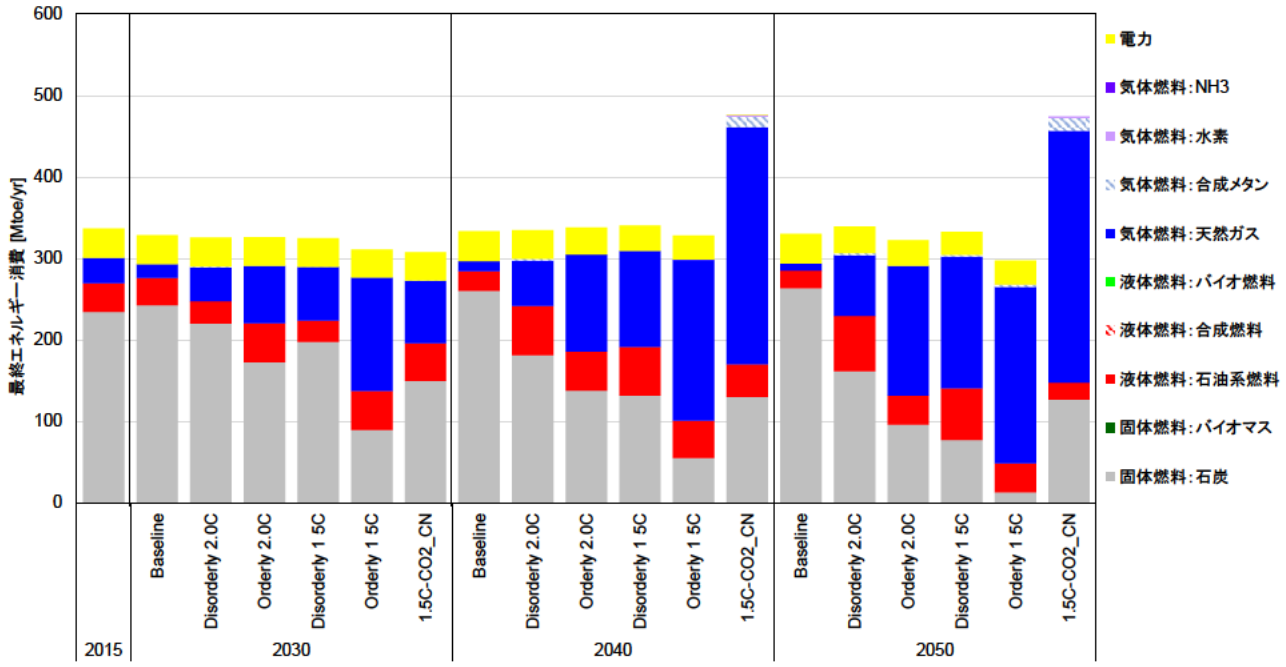


図 5.2.2-7 セメント部門最終エネルギー消費量（世界全体）

図 5.2.2-8 は、紙パルプ部門の最終エネルギー消費量を示している。セメント部門と同様に、石炭からガスへの転換を進めることが費用効率的な対策となっている。なお、世界全体で見ると若干ではあるが、アンモニアや e-メタンの利用も見られる（CDR の利用を制約している 1.5C-CO_2_CN における利用は相当量となっている）。

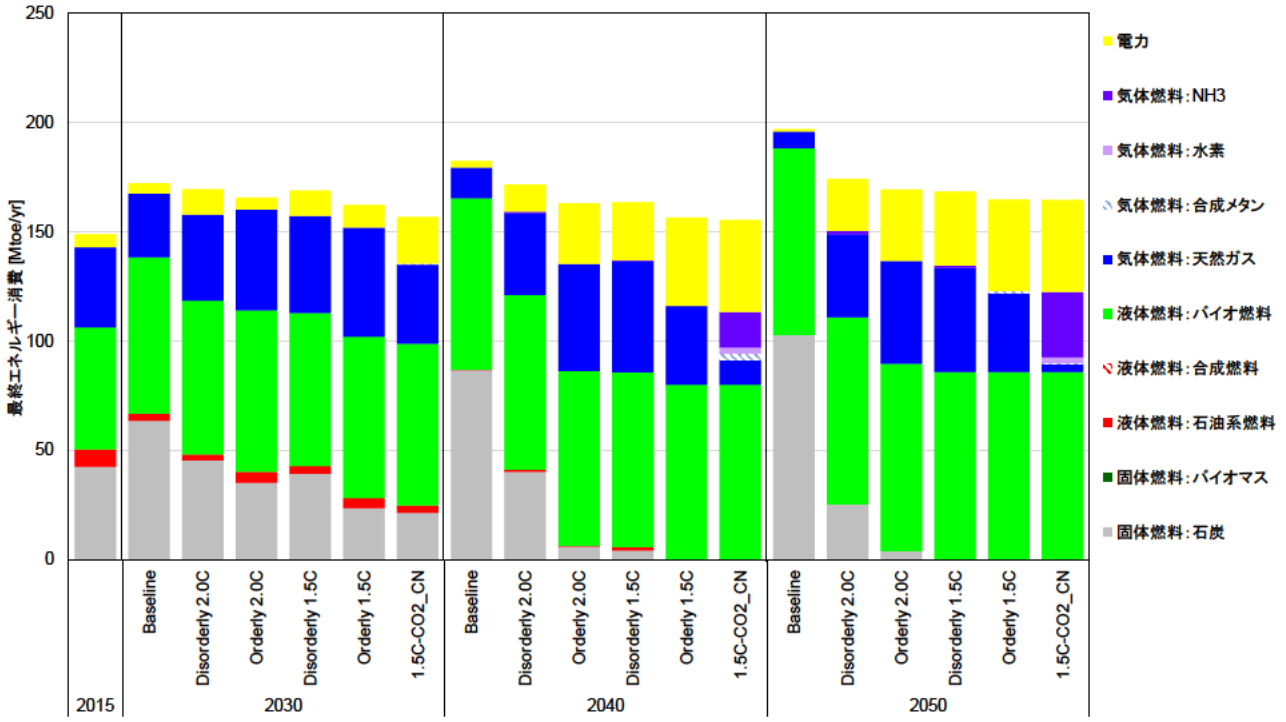


図 5.2.2-8 紙パルプ部門最終エネルギー消費量（世界全体）

注：黒液の利用はバイオ燃料消費に含まれる。

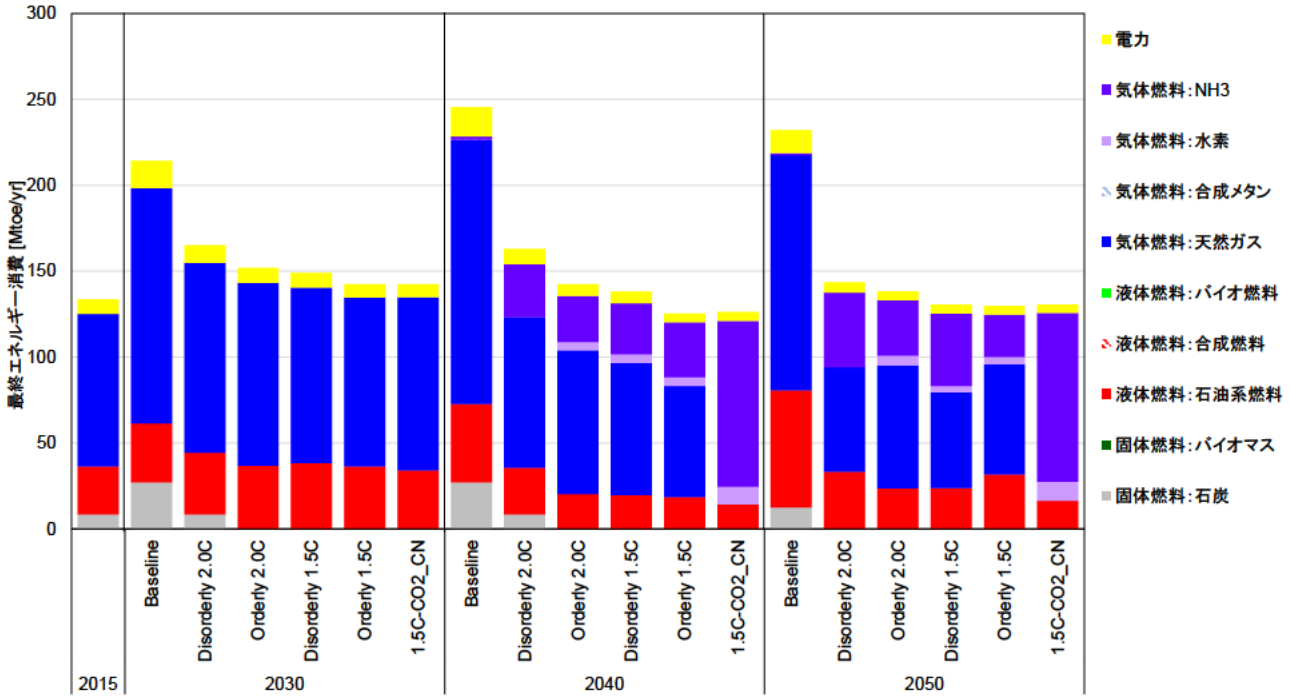


図 5.2.2-9 石油化学部門（エチレン、プロピレン、BTX 製造）最終エネルギー消費量（世界全体）

注：グラフのエネルギー消費量はエネルギー利用分のみで、原料分は含んでいない。

図 5.2.2-10 は世界全体の民生部門最終エネルギー消費量を示している。民生部門では、時点が進むに従って、ベースラインでも電化が促進されている。更に、排出削減が厳しい程、電化を進めることが経済合理的な対策となっている。一方で、排出削減が非常に厳しい Orderly 1.5C や 1.5C-CO_2_CN を除けば、ガス利用の現状からの拡大は少なくとも 2050 年頃までは経済合理的であると評価されている。

図 5.2.2-11 に世界全体の運輸部門最終エネルギー消費量を示す。2℃、1.5℃目標下では、石油消費量は燃費の改善等を通して漸減している。但し、Orderly 1.5C や 1.5C-CO_2_CN の 2050 年でも現状の半分程度までの削減に留まり、石油消費量は相当量残っている。なお、バイオ燃料の他、電力、水素、e-fuels といった石油系燃料の代替エネルギーは、時点が進むに従ってその利用を拡大する結果である。

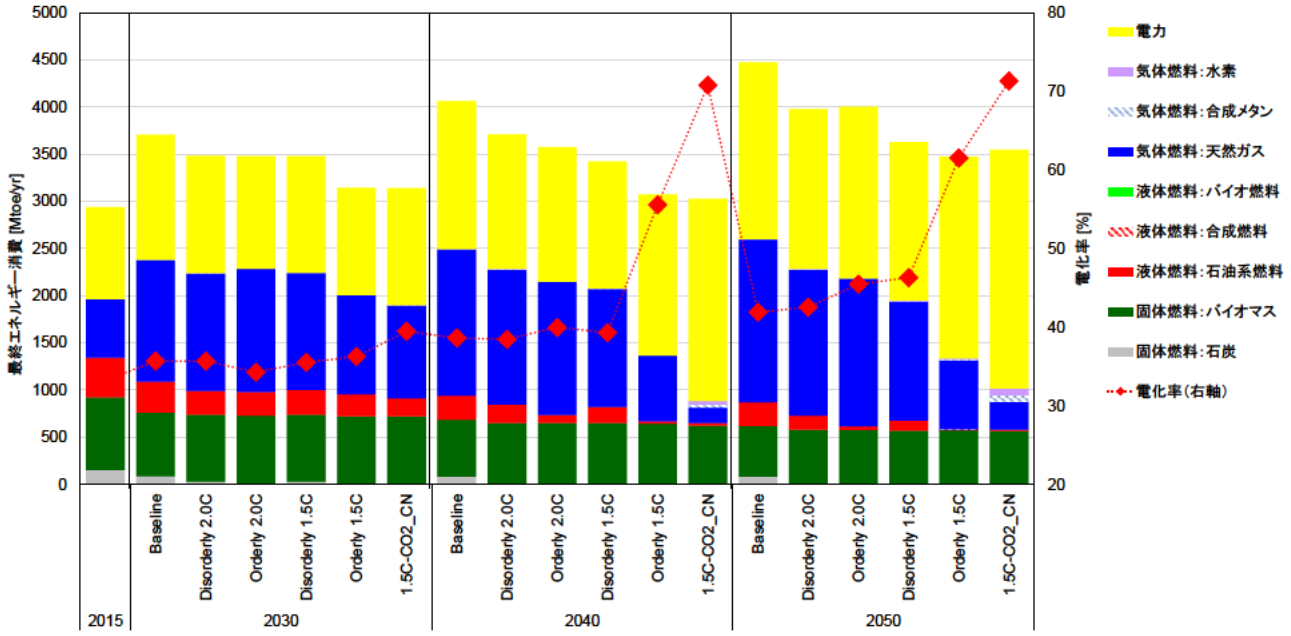


図 5.2.2-10 民生部門最終エネルギー消費量（世界全体）

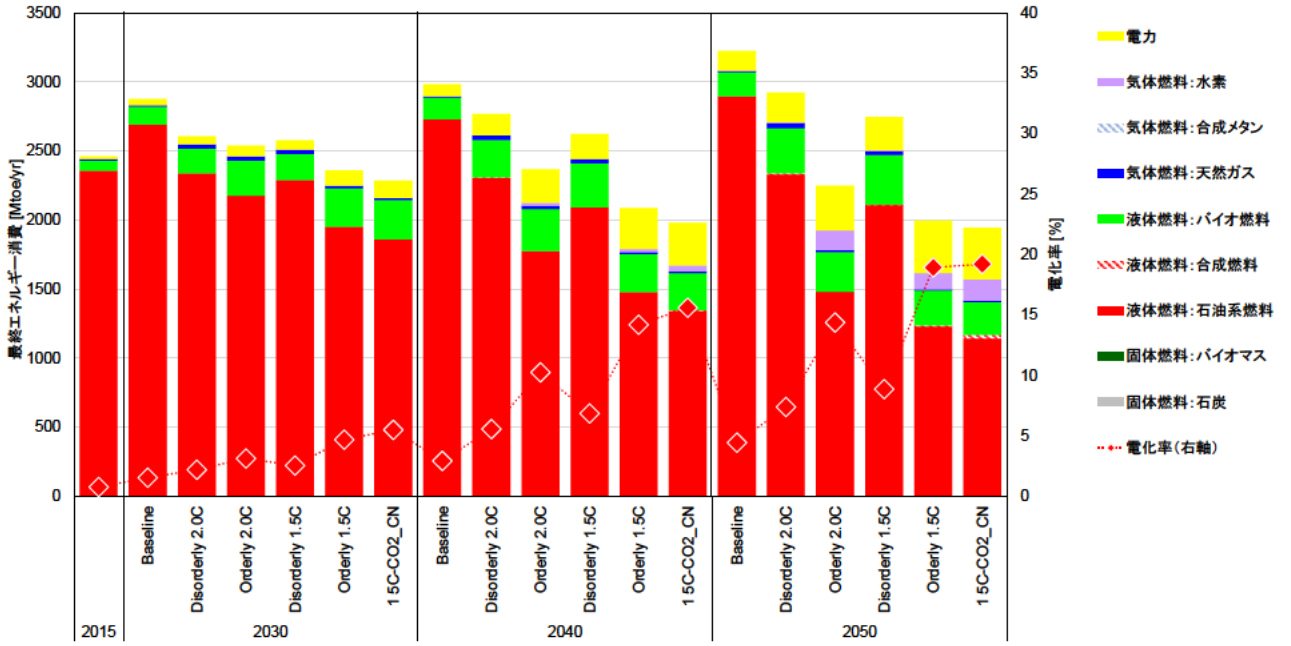


図 5.2.2-11 運輸部門最終エネルギー消費量（世界全体）

5.2.3 日本

本節では、日本の分析結果について詳細に示す。日本以外の世界主要国・地域別のシナリオは引き続き、モデル分析結果を精査しつつ、更新、公表を検討していく。

表 5.2.2-1～表 5.2.2-5 に示したように、分析したシナリオにおける日本の CO_2 限界削減費用は、ほとんどのシナリオで 2030～2050 年において tCO_2 当たり数百ドルと評価されており、非常に高い対策まで導入することが必要と評価されている。表 5.2.3-1 には、日本の CO_2 削減費用を整理している。各時点における最大の CO_2 削減費用は 2030

年：45 billion US$/yr、2040 年：161 billion US$/yr、2050 年：211 billion US$/yr と評価されており、莫大な CO_2 削減費用が必要になると示唆されている。なお、潜在的な GDP に対する CO_2 削減費用（GDP 比削減費用）は、それぞれ 0.7%、2.3%、3.0%に達している。

表 5.2.3-1 日本の CO_2 削減費用（billion US$/yr）

	2030 年	2040 年	2050 年
Disorderly 2.0C	45	92	165
Orderly 2.0C	0	7	20
Disorderly 1.5C	41	117	211
Orderly 1.5C	9	80	145
1.5C-CO_2_CN	20	161	95

注：ベースライン比の年間エネルギーシステムコストの増分

図 5.2.3-1 に、日本の部門別 GHG 排出量を示す。2050 年に GHG 排出を実質ゼロとする 3 シナリオ（Disorderly 2.0C と Disorderly/Orderly 1.5C）においては、DACCS や土地利用起源 CO_2（植林による CO_2 固定）の活用の他、発電部門からの CO_2 排出を実質負とする（BECCS、e-メタン+CCS によって達成）といった対策が取られている。2050 年に GHG 排出を実質ゼロと想定しておらず、世界全体で費用最小化（世界のすべての国の CO_2 限界削減費用が均等化）を想定した Orderly 2.0C においては、2013 年比▲70%程度とするのが費用効率的であるとの評価である。この際には、発電部門や鉄鋼部門からの CO_2 排出も残っている。

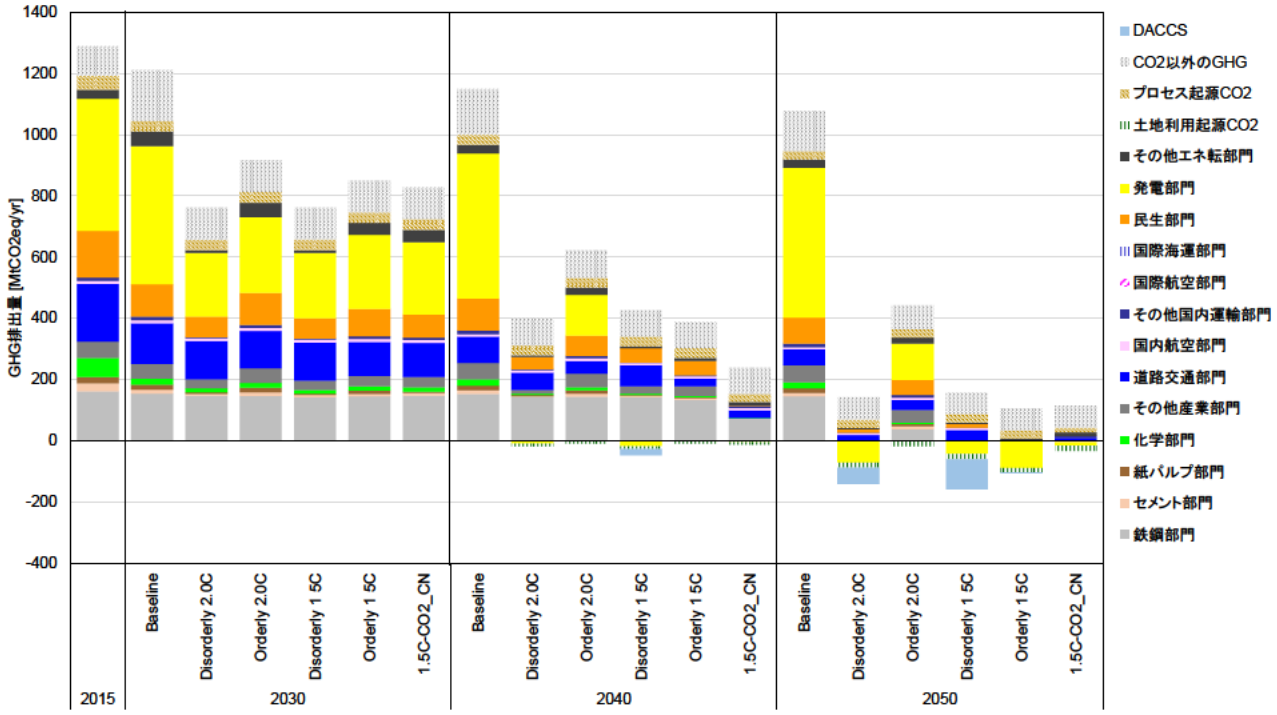


図 5.2.3-1 部門別 GHG 排出量（日本）

注：1.5C-CO_2_CN は CO_2 のみの分析をしており、グラフ中の CO_2 以外の GHG 排出量は便宜上、Orderly 1.5C の数値を掲載している。

図 5.2.3-2 は、日本の CO_2 の回収と貯留、利用のバランスを示している。2030 年や 2040 年においては、石炭火力やガス火力、高炉から CO_2 回収が行われている。バイオマス発電や DAC については、シナリオによっては 2040 年時点でも導入が見られるが、2050 年における回収が多くなっている。1.5-CO_2_CN では、発電部門での BECCS、e-メタン+CCS は不可としている他、DACCS も不可としている（DAC で回収した CO_2 を利用する CCU は可としている）ため、2050 年においても石炭火力（バイオマス混焼分からの回収も含む）、ガス火力、セメント部門での CO_2 回収が見られる。

図 5.2.3-3 に、日本の一次エネルギー供給量を示す。日本は再生可能エネルギーや CO_2 貯留のポテンシャルがエネルギー需要に比して大きくないため、水素・アンモニアの他、e-メタンや e-fuels、バイオ燃料といったカーボンニュートラル燃料を輸入して利用することが費用効率的であると評価されている。2050 年に 2013 年比▲70%程度の排出削減を行う Orderly 2.0C においては、それらの量は相対的に少なく、世界全体での 2℃目標達成のためには他国で排出削減を深堀することが全体として費用効率的であるとの評価であり、CCS なしの石炭やガスの供給が残っている。

図 5.2.3-4 には、日本の発電電力量を示している。2030 年については、第 6 次エネルギー基本計画 [5]における電源構成の比率を制約として想定している。電化を促進するため、とりわけ厳しい排出削減シナリオの下では総発電電力量が増加する傾向が見られる。太陽光発電等の再エネの普及拡大や CCS の利用の他、輸入した水素・アンモニアによる発電を行うことにより、CO_2 排出削減を進めている。なお、2050 年におけるガス火力発電+CCS は、Orderly 2.0C と 1.5C-CO_2_CN 以外のシナリオでは e-メタンが利

用されている。Disorderly シナリオでは VRE が相対的に高いと想定していることから、海外から輸入した水素やアンモニア（CO_2 貯留の拡大率を高く想定しているため、海外でブルー水素やブルーアンモニアを生産しやすい）を用いた発電が多い傾向にある。一方、Orderly シナリオでは、日本でも更に安価になると見込んだ VRE の利用が相対的に拡大し、CO_2 貯留の拡大率を低く見込んでいることから海外での生産が困難になる水素やアンモニアを用いた発電はほとんど見られない。なお、1.5C-CO_2_CN では、BECCS および e-メタン+CCS は利用できないと制約していることから、CCS 付き石炭火力が導入される結果である。

図 5.2.3-5 には各シナリオの CO_2 排出係数を整理しているが、2050 年に GHG 排出を実質ゼロとする Disorderly 2.0C/1.5C、Orderly 1.5C では、上述したように電源構成は異なるものの、CO_2 排出係数の推移に大きな差異は無く、2040 年頃に実質ゼロとすることが全体として費用効率的であると評価されている。

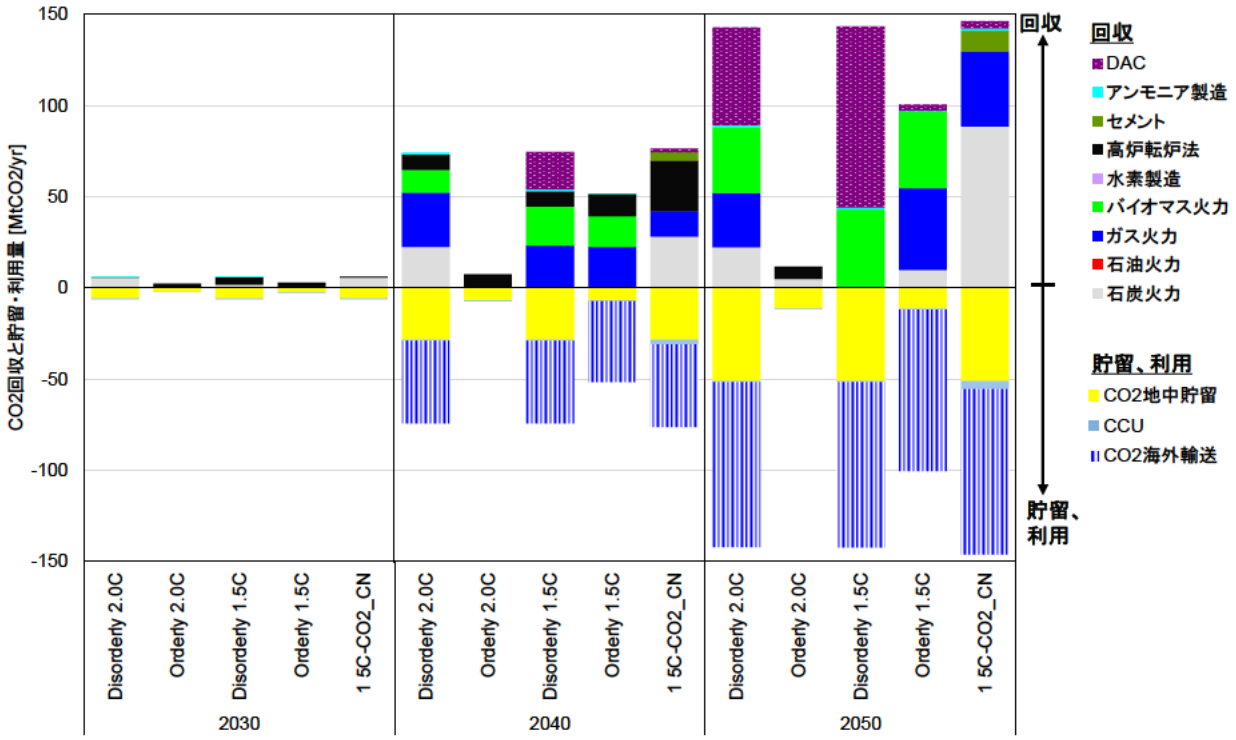


図 5.2.3-2 CO_2 バランス（日本）

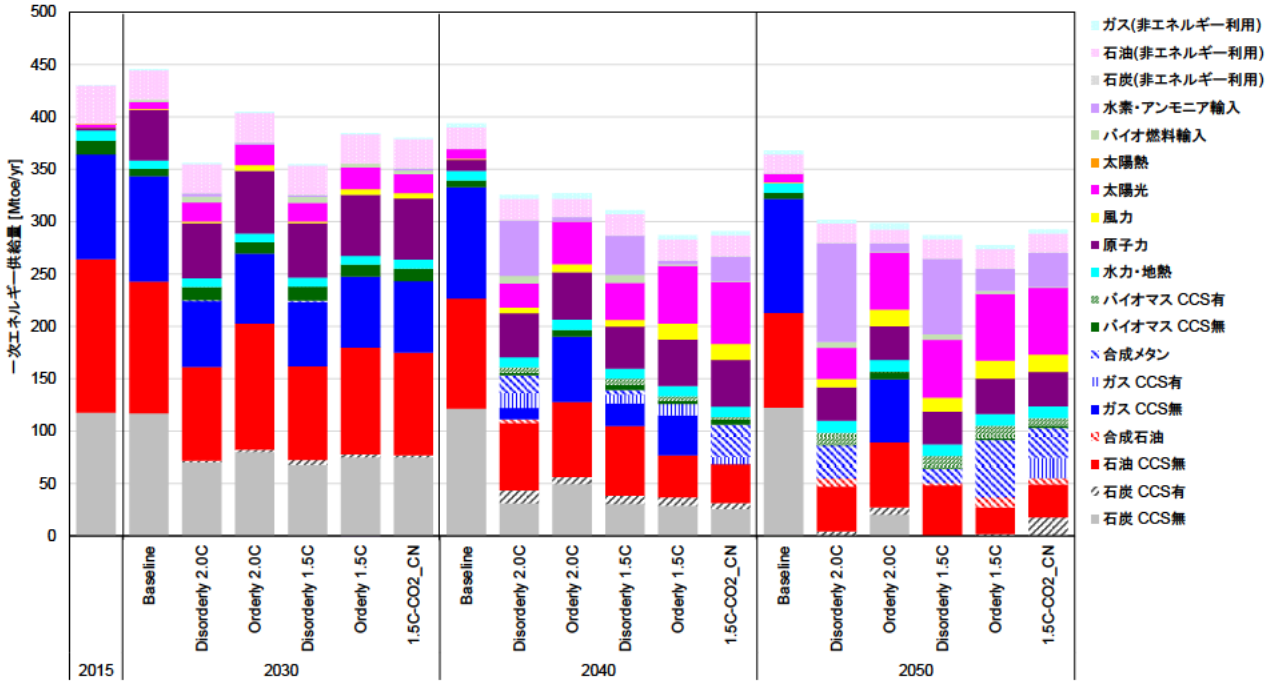


図 5.2.3-3 一次エネルギー供給量（日本）

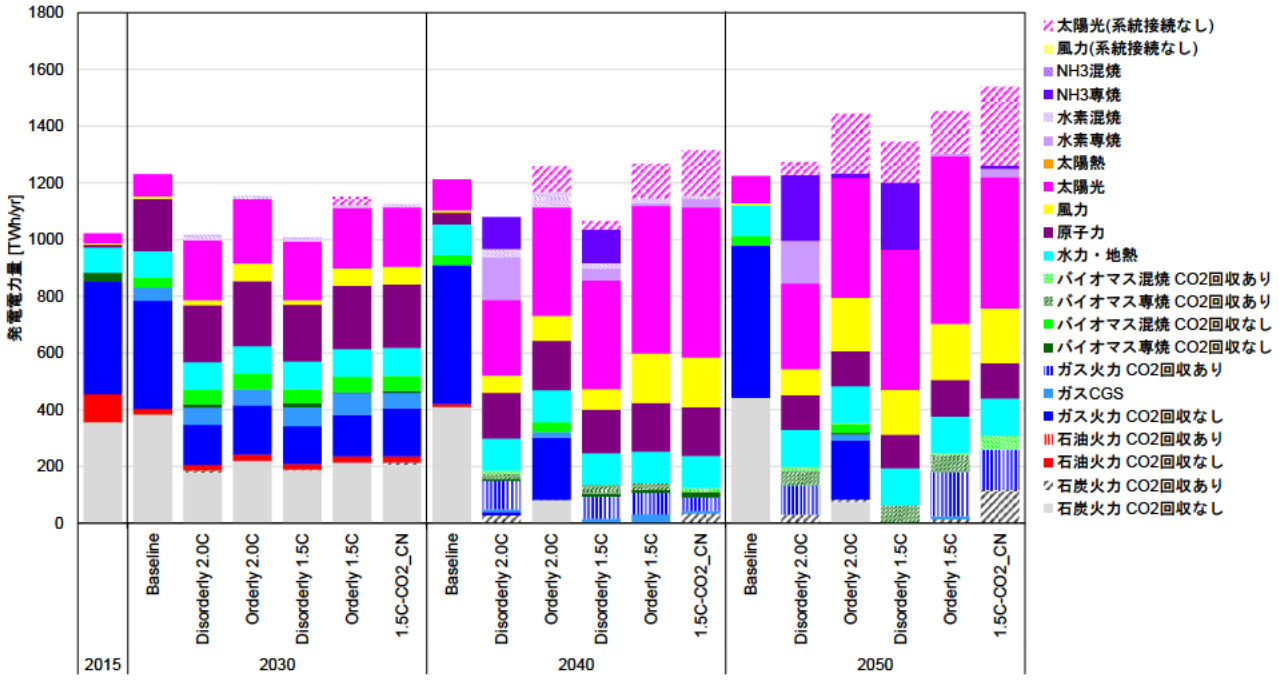


図 5.2.3-4 発電電力量（日本）

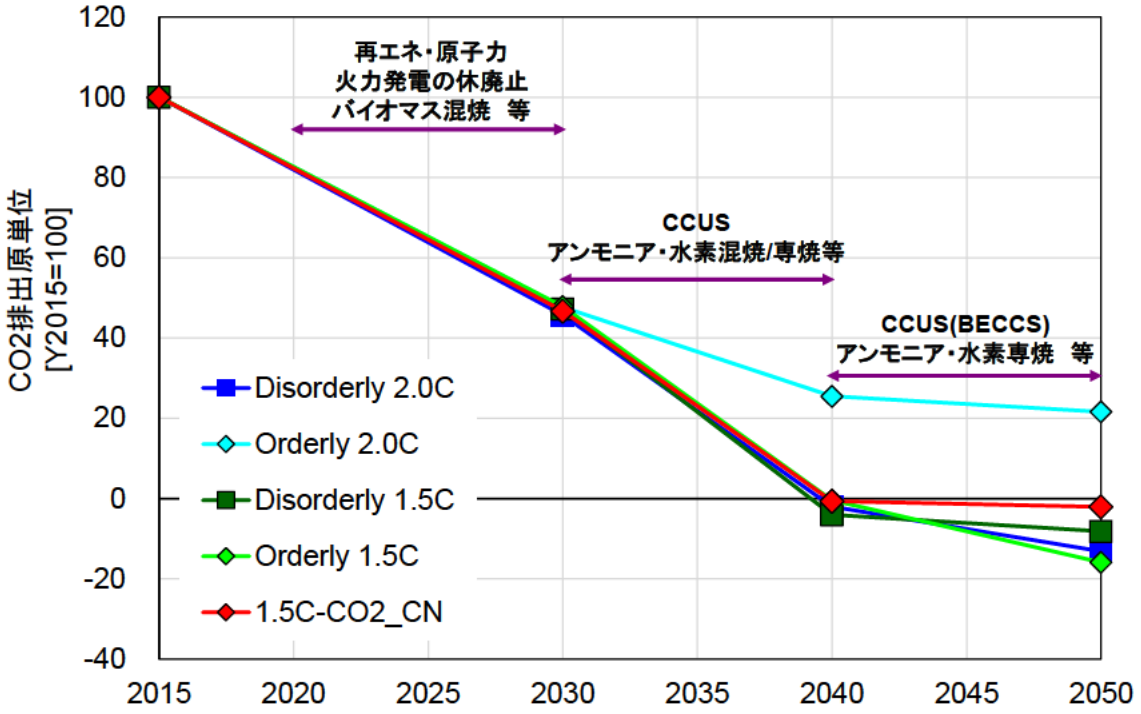


図 5.2.3-5 発電部門 CO_2 排出係数（日本）

図 5.2.3-6～図 5.2.3-8 は、日本における水素、アンモニア、e-メタンの供給と利用のバランスを示している。

水素については、VRE の更なるコスト低減を見込んでいる Orderly 2.0C/1.5C や 1.5C-CO_2_CN では国内での水電気分解による製造も見られるが、その他のシナリオでは専ら海外からの輸入となっている。利用用途については、2030 年や 2040 年においては発電での利用が多いが、2050 年になると鉄鋼部門での利用が最も多くなっている（水素直接還元製鉄での利用）。

アンモニアについては、Disorderly 2.0C/1.5C では、VRE のコスト低減が相対的に緩やかであることもあり、海外で製造したブルーアンモニアが発電部門で利用されている。その他、石油化学部門等、産業部門でのカーボンニュートラル燃料として利用されている。

合成メタンは、民生部門やその他産業部門で利用される他、発電部門でも利用されている（CCS を導入することで、BECCS と同様に実質負の排出としている）。なお、e-メタンの製造は再エネコストが安価な海外が主で輸入して利用しているが、1.5C-CO_2_CN の下では革新的メタネーション技術による国内生産も見られる。

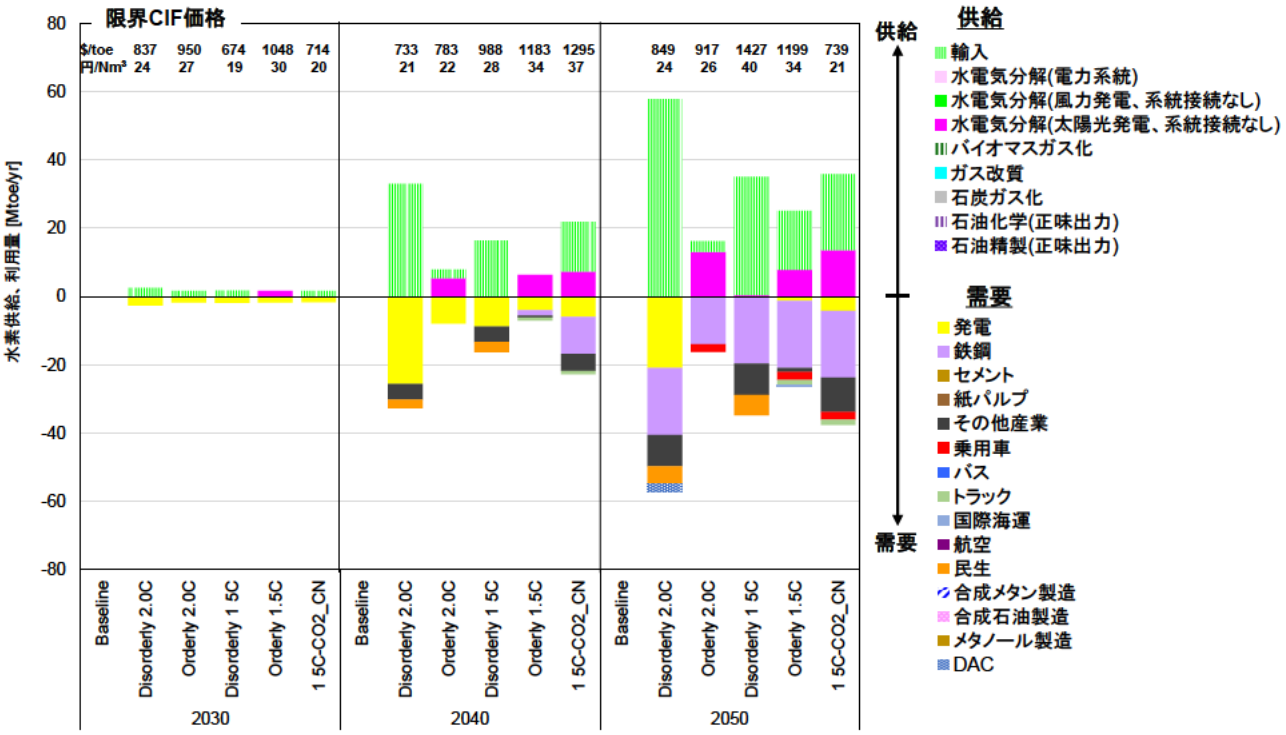


図　5.2.3-6　水素バランス（日本）

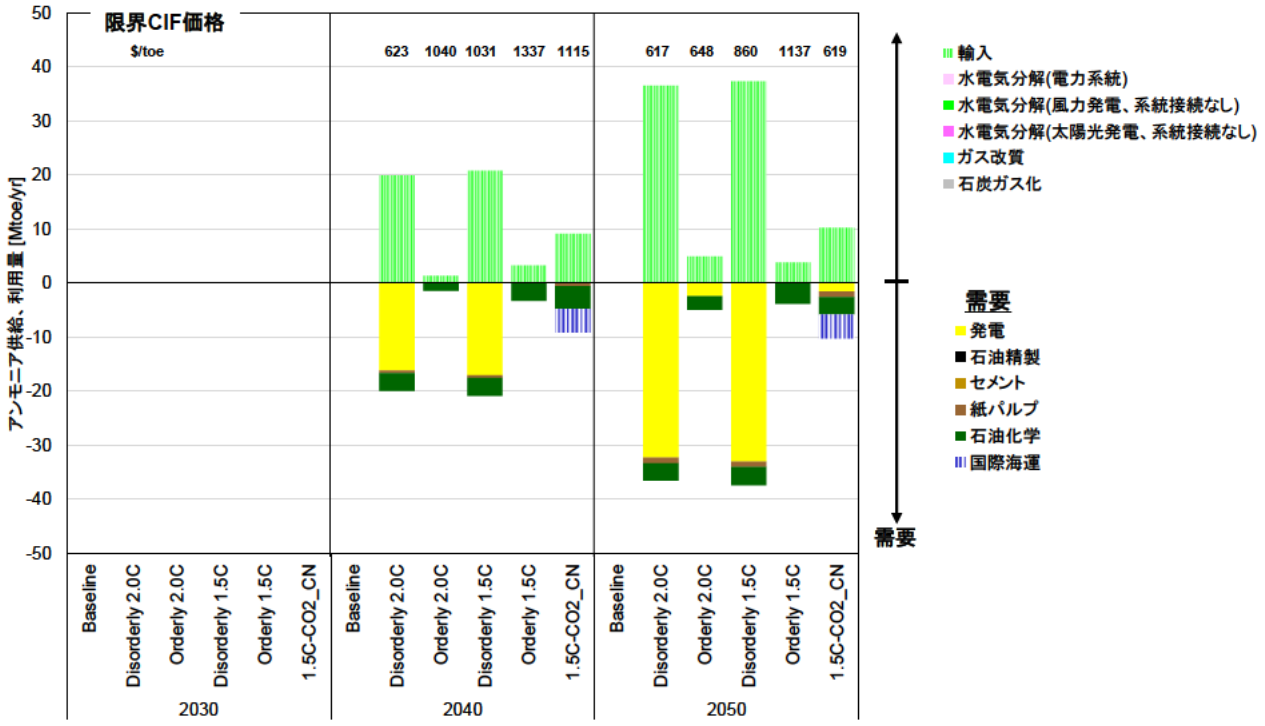


図　5.2.3-7　アンモニアバランス（日本）

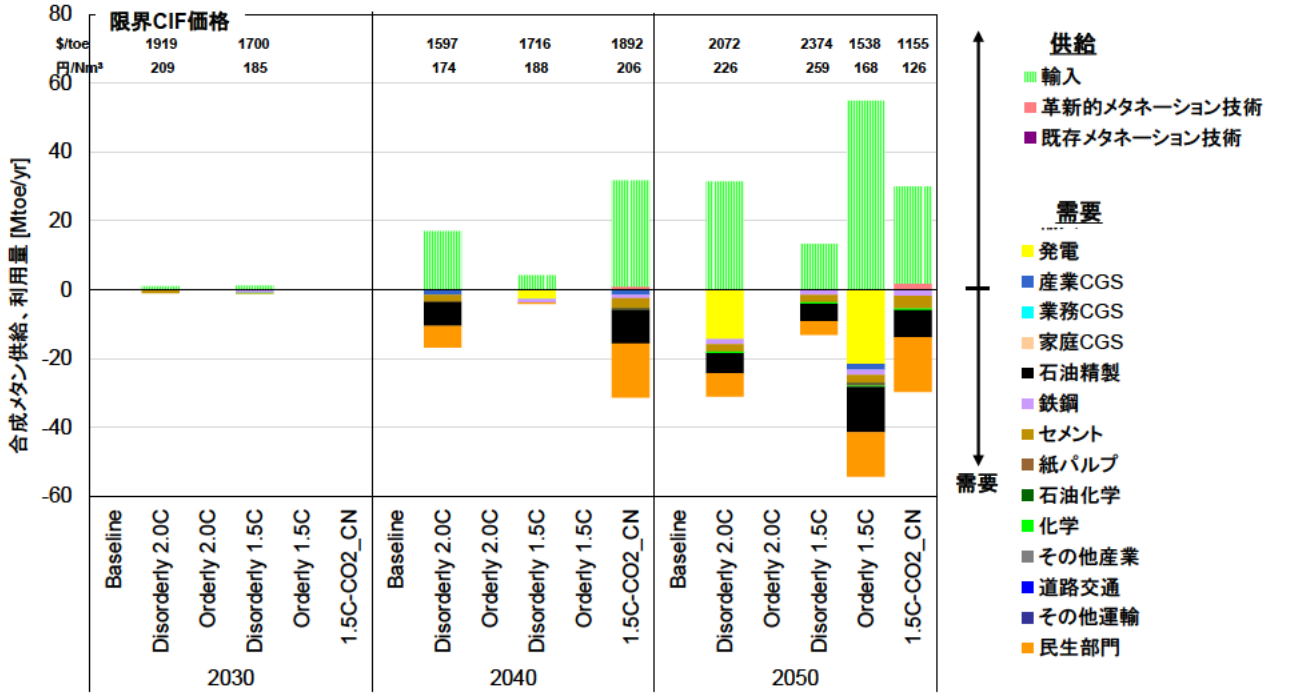


図 5.2.3-8 e-メタンバランス（日本）

図 5.2.3-9 には、ガス供給量を示している。Orderly 2.0C では、2050 年までは天然ガスはほぼ現状～微減程度の供給量である。その他のシナリオでは、2040 年、2050 年にかけて水素、もしくは e-メタンによる供給が多い。なお、水素か e-メタンかは、コスト低減のタイミングの想定等、前提条件によってセンシティブである。

図 5.2.3-10 はガス部門の CO_2 排出量であるが、発電部門の CO_2 排出係数（図 5.2.3-5）に比べ、2030 年や 2040 年での排出削減は進んでいないと言える。なお、Orderly 1.5C での CO_2 排出量が 2040 年において多くなっているが、Orderly 1.5C では CO_2 限界削減費用が他国と近くなっており（表 5.2.2-4）、合成メタンや水素の輸入において他国との競合が生じ（限界 CIF 価格も高くなっている）、輸入が困難となった影響と解釈される。

図 5.2.3-11 に石油（液体燃料）の供給量を示す。供給量は、輸送サービス需要の減少や、自動車の燃費向上や EV 化等により、いずれのシナリオでも大きく低減している。特に、再エネと EV の技術進展を高位と見込んでいる Orderly 1.5C や 1.5C-CO_2_CN ではその傾向が強い。2050 年には e-fuels の利用も見られ、特に CO_2 貯留の拡大率を低く想定している Orderly 1.5C では、排出のオフセットが小さくなること、再エネコストの更なる低減で e-fuels 価格も低下すること、により石油系燃料から e-fuels への代替がより進んでいる。

図 5.2.3-12、図 5.2.3-13 には、日本の石油部門 CO_2 排出量と石油精製部門 CO_2 排出量（Scope 1） をそれぞれ示している。石油部門の CO_2 排出については、CO_2 貯留の成長率を低く想定している Orderly 1.5C や、CDR の利用を小と想定している 1.5C-CO_2_CN においては、DACCS 等による排出のオフセットの余地が限定されることから、2050 年の CO_2 排出量はほぼゼロにまで削減される。なお、石油精製量の減少に伴い、石油精製部門の CO_2 排出量（Scope 1）も減少する。特に、個別に NDCs を達成するために他

国との CO_2 限界削減費用の差が大きい Disorderly シナリオでは、その傾向が強く見られる。

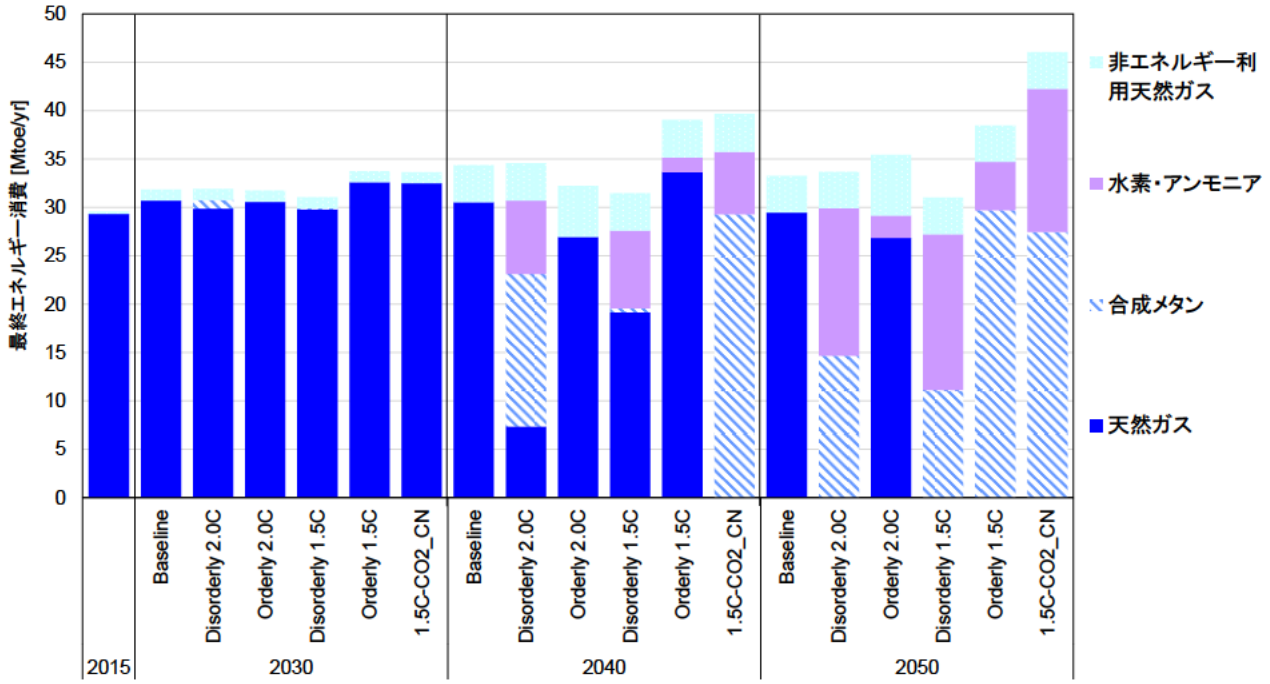


図 5.2.3-9 ガス供給量（日本）

注：グラフの水素・アンモニア供給量には発電部門、鉄鋼部門、石油化学部門での利用は含めていない。

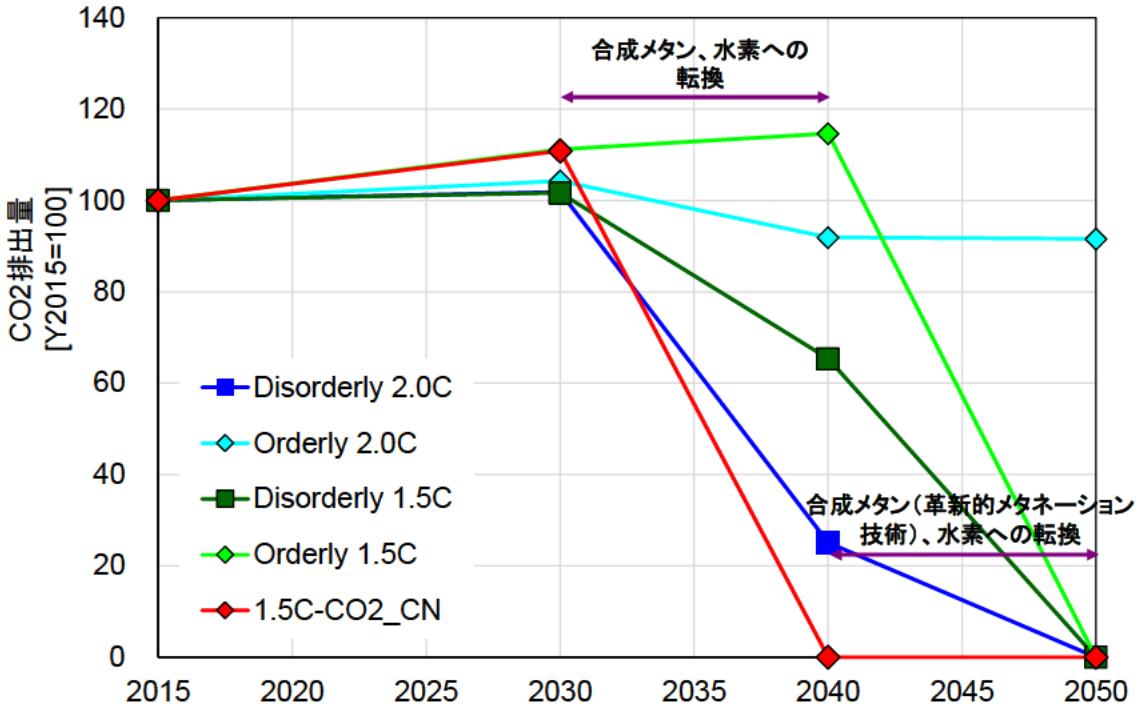


図 5.2.3-10 ガス部門 CO_2 排出（日本）

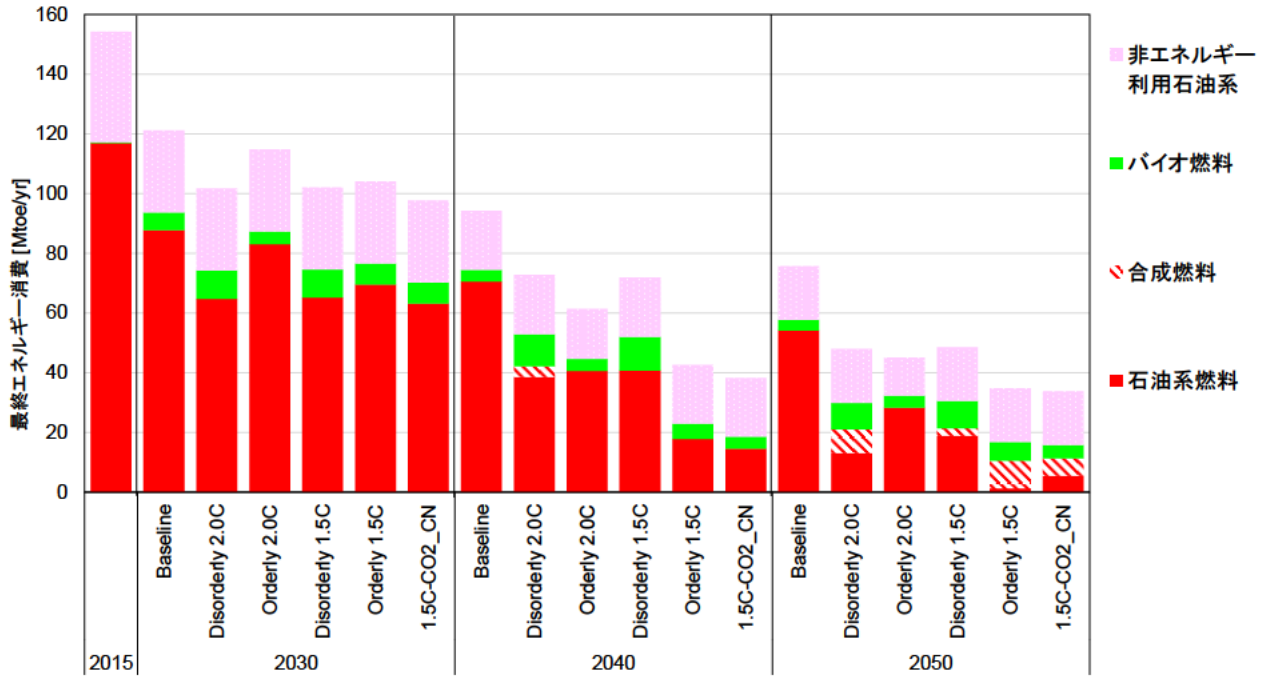


図 5.2.3-11 石油（液体燃料）供給量（日本）

注：グラフには発電部門での利用は含めていない。

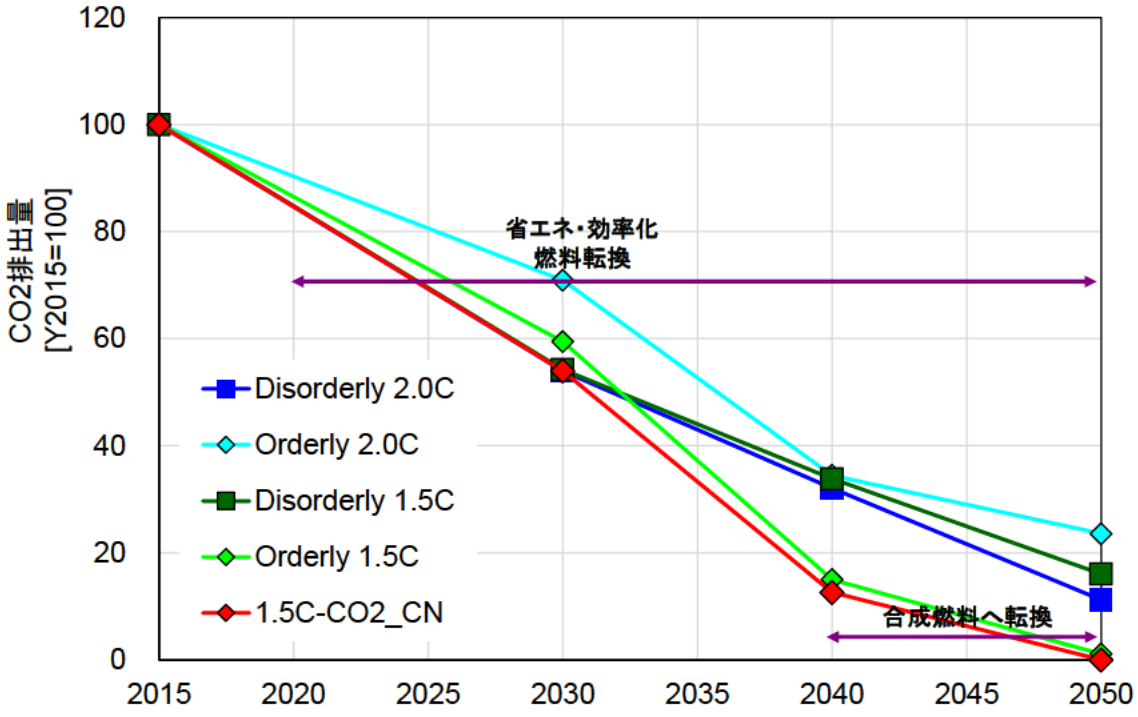


図 5.2.3-12 石油部門 CO_2 排出量（日本）

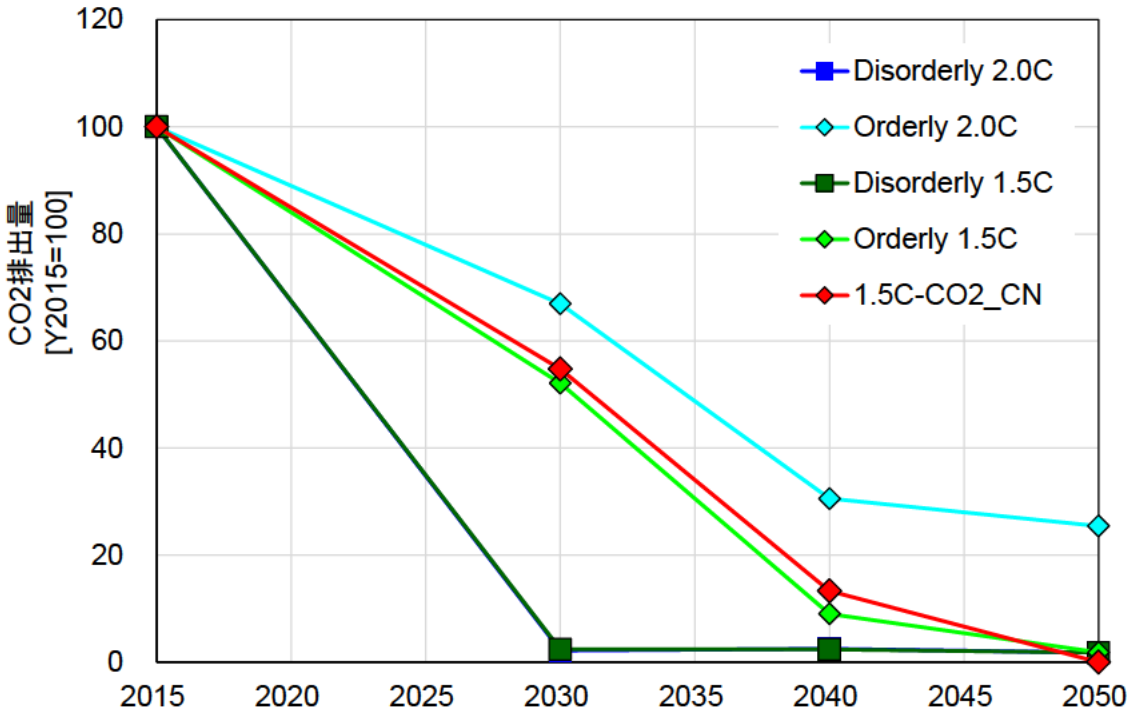


図 5.2.3-13 石油精製部門 Scope 1 CO_2 排出量（日本）

図 5.2.3-14 は産業部門の最終エネルギー消費量を示している。2040 年においても 2030 年に近い水準の石炭利用が残っているが、これは鉄鋼部門の高炉・転炉法での利用である（図 5.2.3-15）。2050 年においては、Orderly 2.0C 以外では石炭の利用は無く、水素やアンモニア、e-メタンの利用が多く見られる。

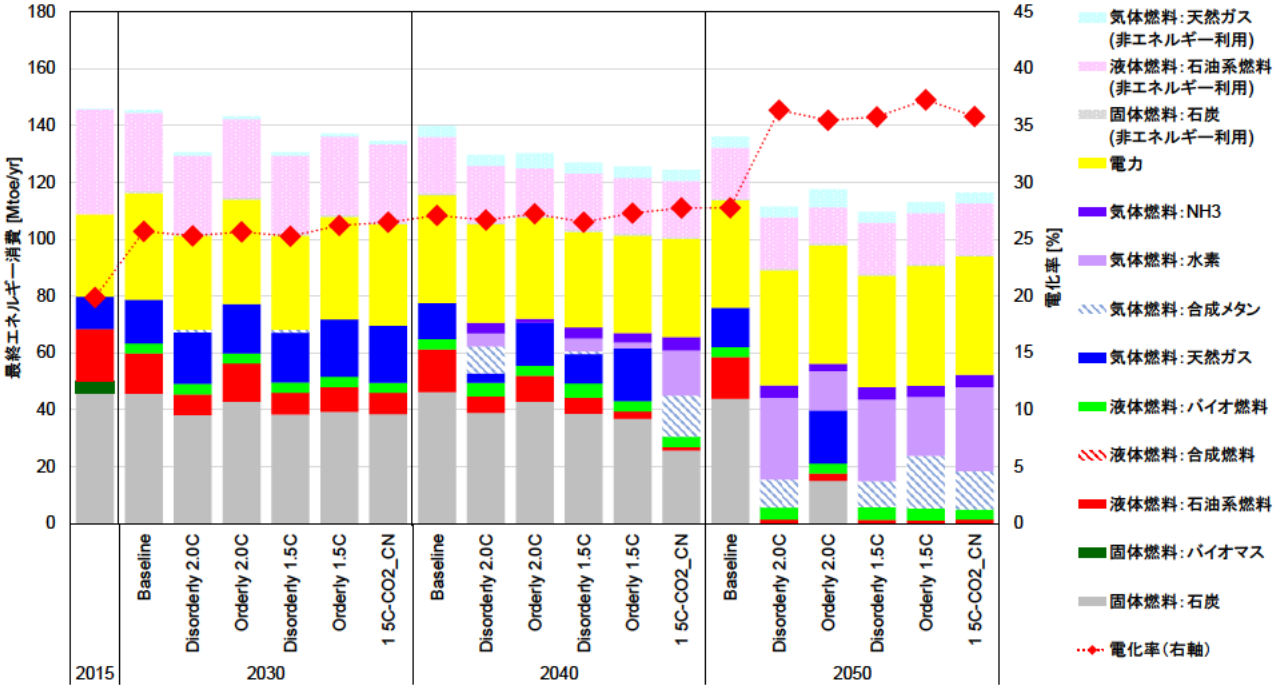


図 5.2.3-14 産業部門最終エネルギー消費量（日本）

図 5.2.3-15、図 5.2.3-16 は、鉄鋼部門の最終エネルギー消費量、技術別粗鋼生産量をそれぞれ示している。先に述べたように、2040 年は石炭の利用が相当残っている。図 5.2.3-16 に示しているように、Super COURCE50 のような外部水素も活用した高炉・転炉法製鉄が導入されているシナリオでは、水素の利用も見られる。2050 年においては、総排出量が 2013 年比▲70%と評価された Orderly 2.0C 以外では石炭の利用は無く、高炉転炉法は水素利用 DRI 電炉によって完全に代替されている。なお、e-メタンは、スクラップ電炉法で利用されている。

図 5.2.3-17 に鉄鋼部門の CO_2 排出原単位を示す。いずれのシナリオも、2030 年以降高炉に CCS を導入し、シナリオによっては外部水素利用を進め、2040 年以降は水素利用 DRI 電炉へと転換することで 2050 年にほぼ排出をゼロとしている。但し、日本国内での CO_2 排出削減をそれほど進めない Orderly 2.0C では、2050 年でも CCS を行わない高炉転炉法を継続する等、一部排出が残るシナリオとなっている。

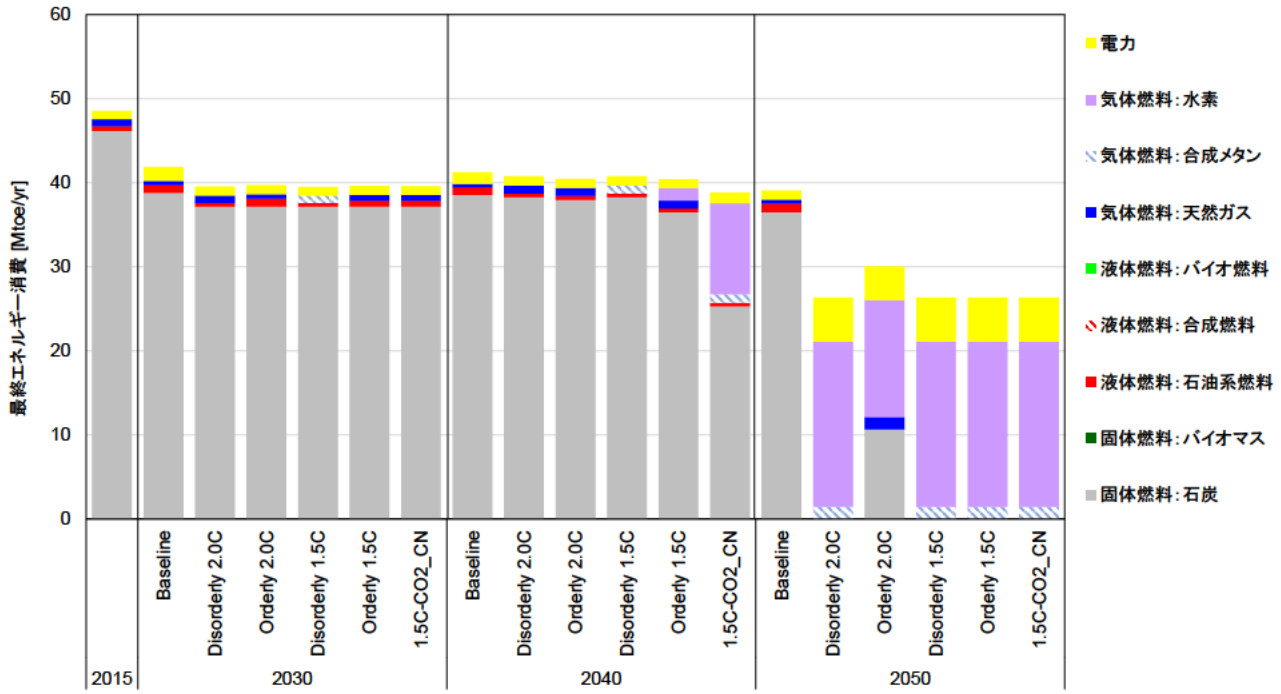


図 5.2.3-15 鉄鋼部門最終エネルギー消費量（日本）

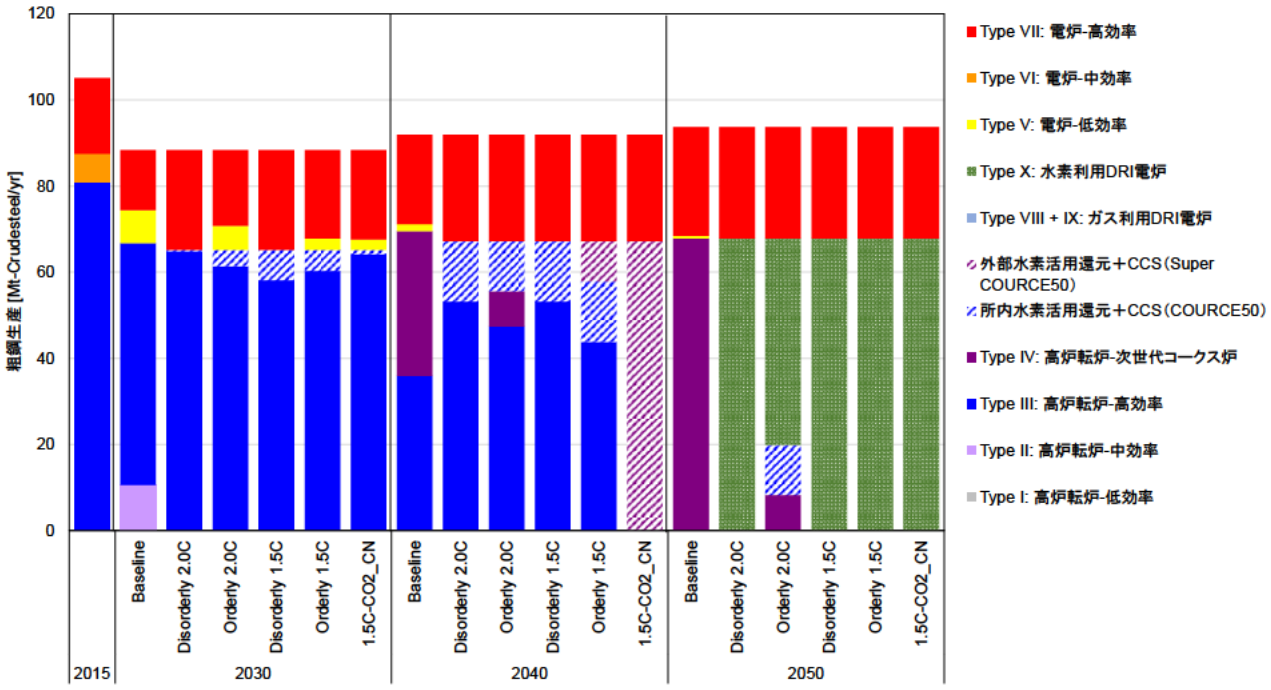


図 5.2.3-16 鉄鋼部門技術別粗鋼生産量（日本）

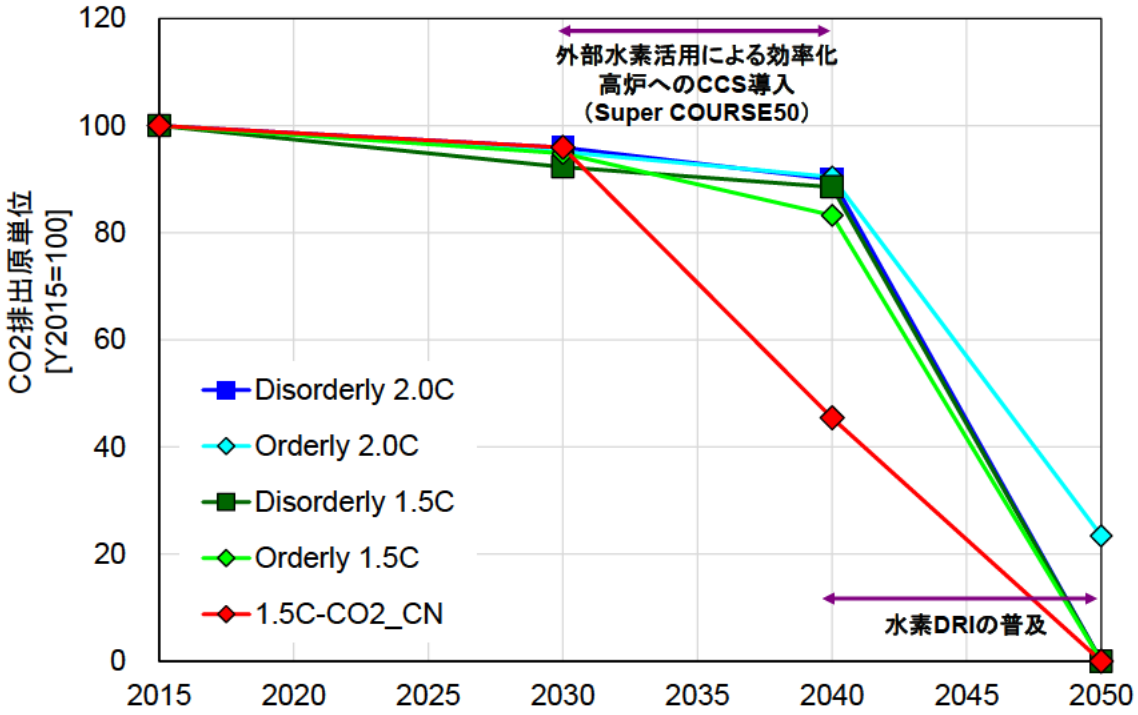


図 5.2.3-17 鉄鋼部門 CO_2 排出原単位（日本）

図 5.2.3-18、図 5.2.3-19 は、セメント部門の最終エネルギー消費量、技術別クリンカ生産量をそれぞれ示している。Orderly 2.0C を除けば、2030 年においては石炭からガスへの転換が経済合理的な対策と評価されている。2040 年に向けては更にガスへの転換を進め、2050 年においては e-メタンの利用が主となっている（シナリオによってはより早期から e-メタンの利用が見られる）。なお、CDR の利用を制約している

1.5C-CO_2_CN においては CCS の導入が進むため、他シナリオに比べエネルギー消費が多くなっている。

図 5.2.3-20 にはセメント部門の CO_2 排出原単位を示す。1.5C-CO_2_CN 以外のシナリオでは、CCS の導入が無いため、プロセス起源 CO_2 を含む排出は 2050 年になっても残る結果である。1.5C-CO_2_CN においては、e-メタン+CCS（正味負の排出）を導入することで、排出を実質ゼロとする結果である。

図 5.2.3-21、図 5.2.3-22 には、日本の紙パルプ部門の最終エネルギー消費量、CO_2 排出原単位をそれぞれ示す。2030 年においては、石炭からガス、バイオ燃料、電力（購入電力の増加）への転換が見られる。2040 年、2050 年においては、CO_2 貯留の拡大率を相対的に高く想定している Disorderly シナリオでは、海外で生産したブルーアンモニアを輸入して利用する結果となっている。一方、CO_2 貯留の拡大率を相対的に低く想定している Orderly1.5C では、ブルーアンモニアの製造が相対的に困難であることから、e-メタンの利用も見られる。CO_2 原単位については、アンモニアや e-メタンの導入により、2050 年には排出を実質ゼロとする経路となっている。

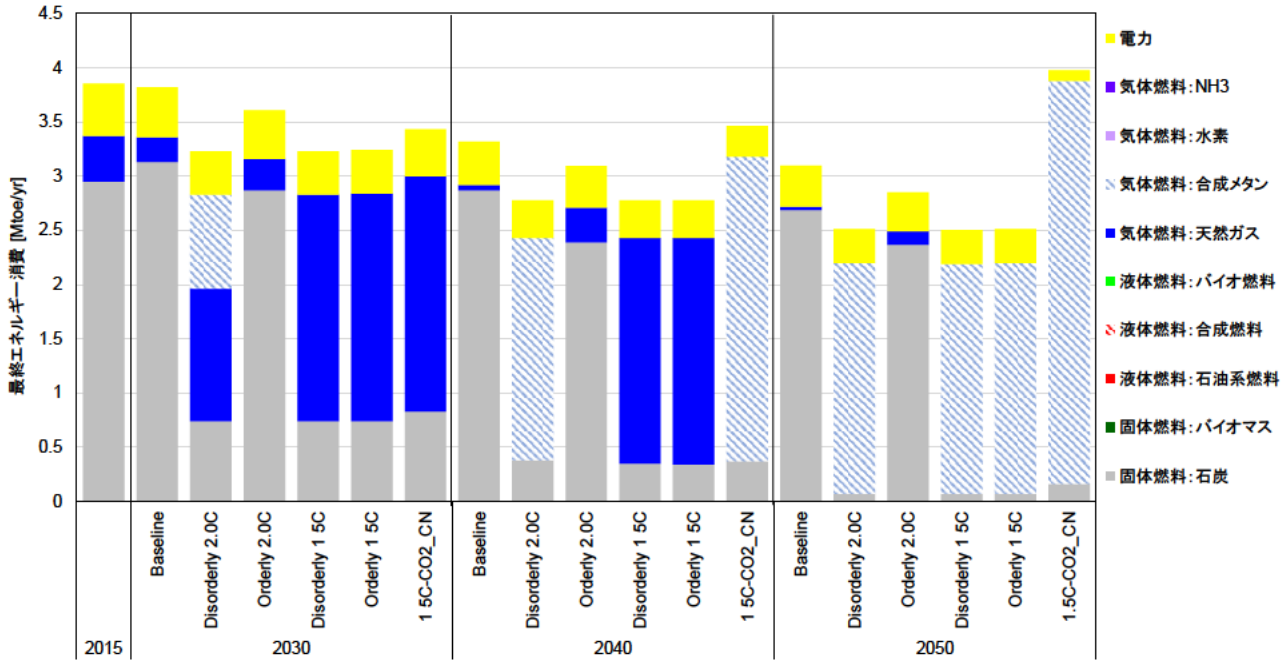


図 5.2.3-18 セメント部門最終エネルギー消費量（日本）

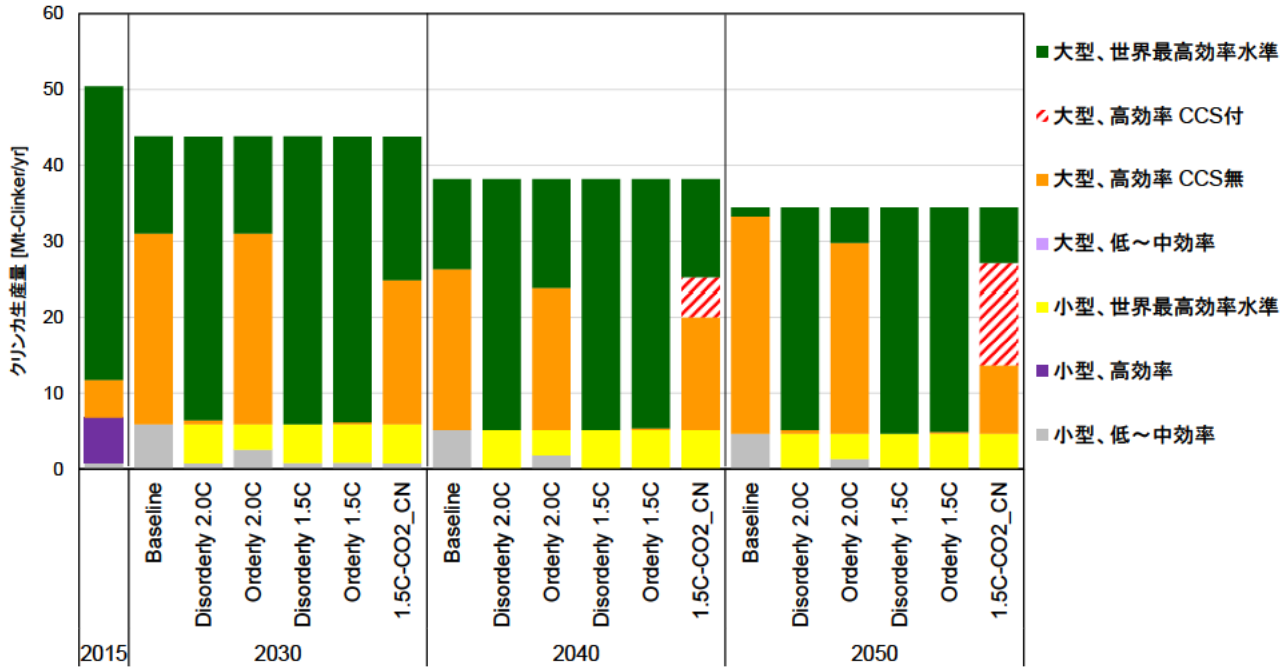
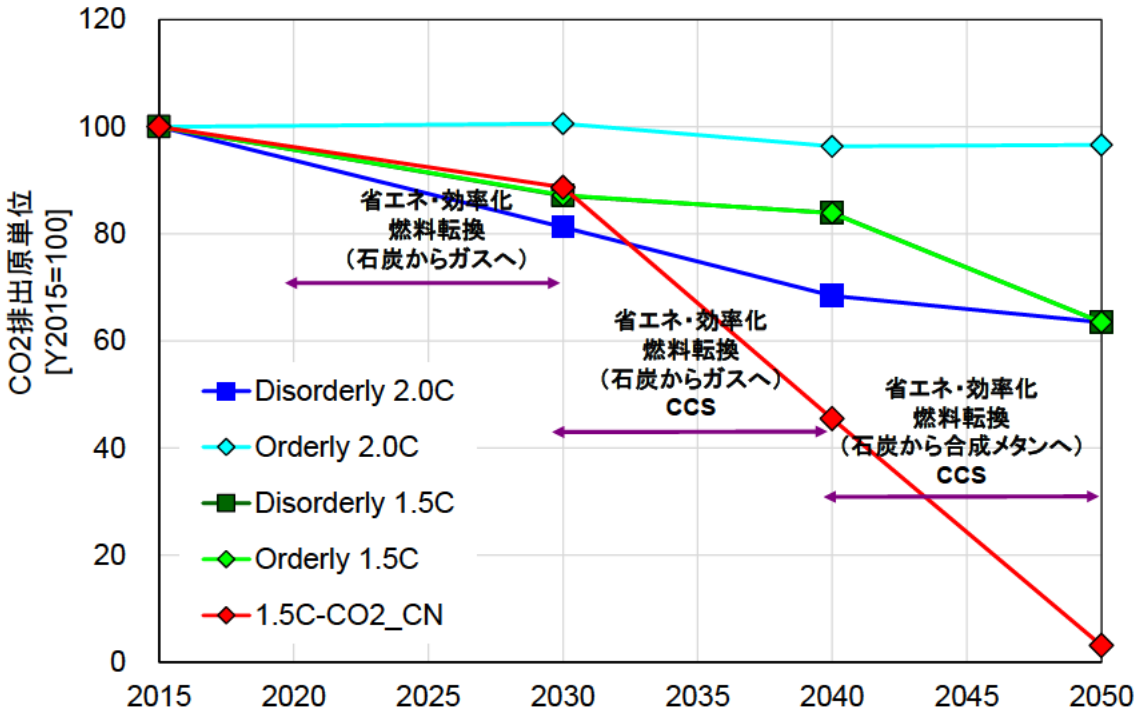
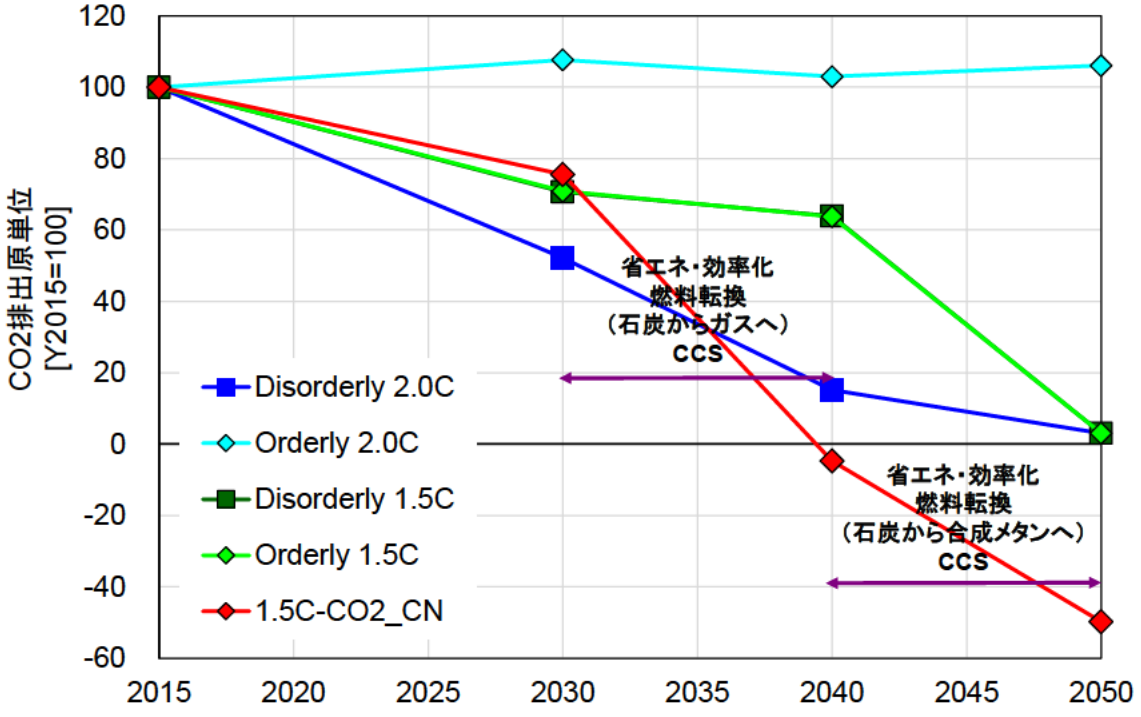


図 5.2.3-19 セメント部門技術別クリンカ生産量（日本）



（a）エネルギー起源+プロセス CO_2



（b）エネルギー起源 CO_2

図 5.2.3-20 セメント部門 CO_2 排出原単位（日本）

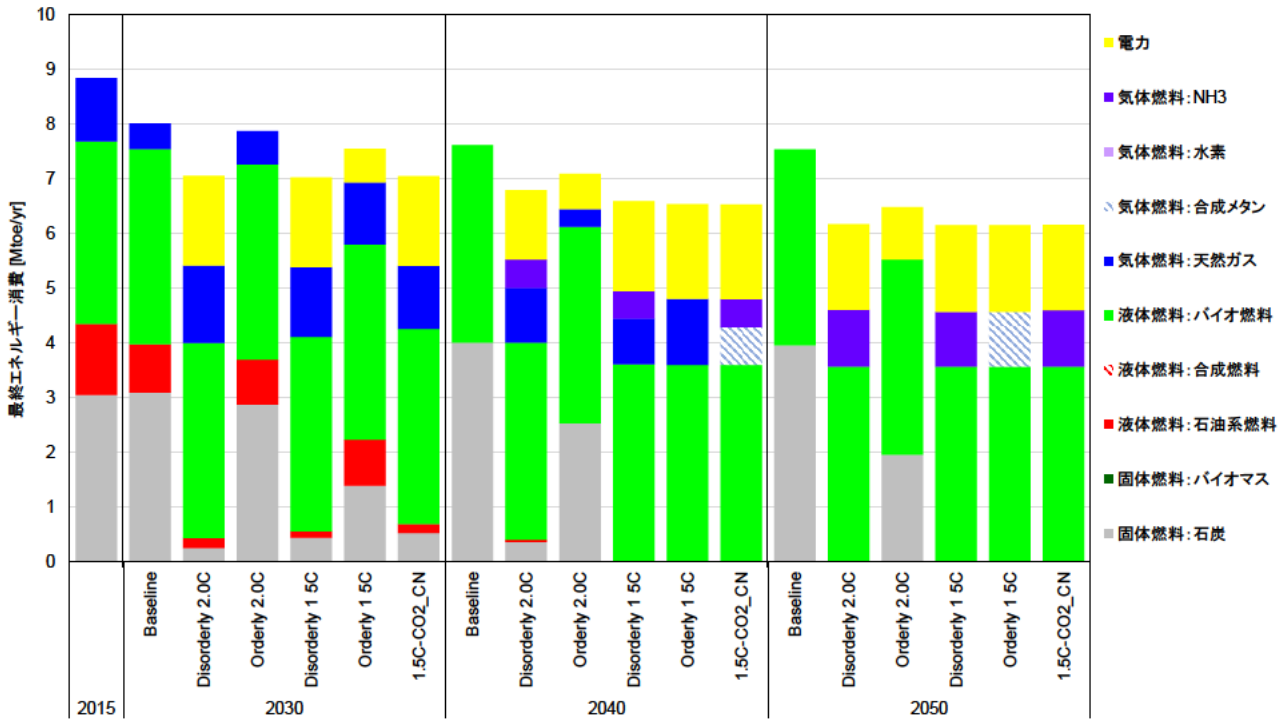


図 5.2.3-21 紙パルプ部門最終エネルギー消費量（日本）

注：黒液の利用はバイオ燃料消費に含まれる。

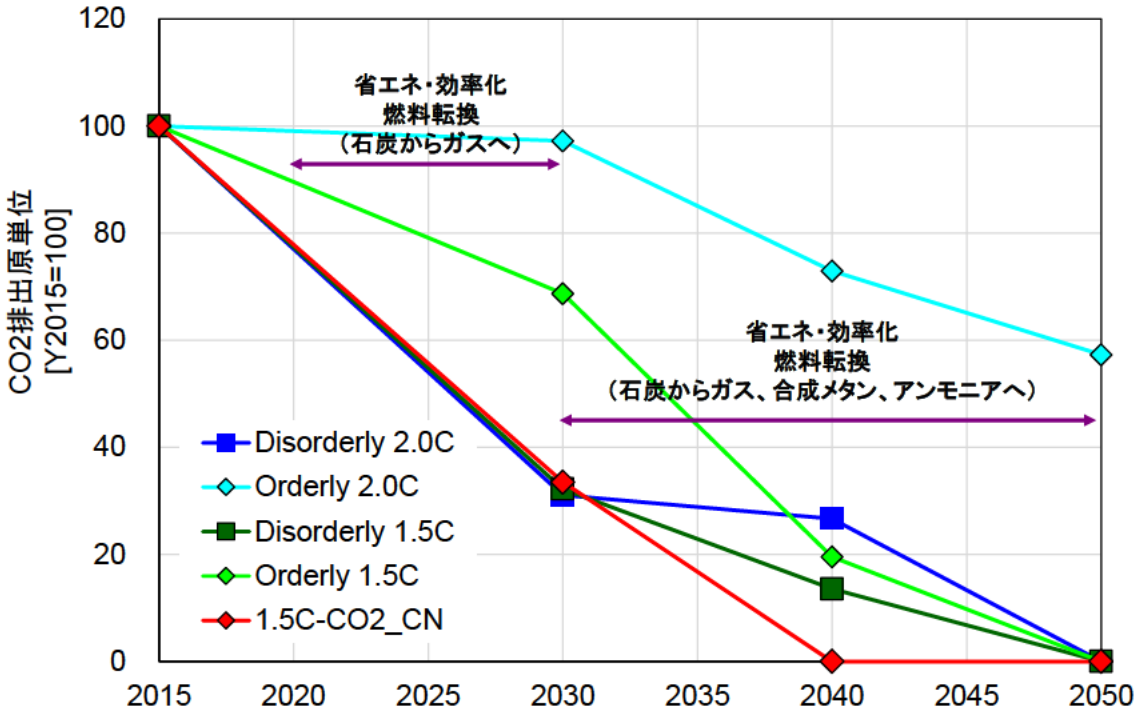


図 5.2.3-22 紙パルプ部門 CO_2 排出原単位（日本）

図 5.2.3-23、図 5.2.3-24 には、化学部門の最終エネルギー消費量を示す。アンモニア製造においては、合成メタンの利用の他、一部では電解アンモニアも導入される結果である。なお、日本では化成品向けのアンモニア製造が行われる結果であり、他部

門でエネルギー利用されているアンモニアは全て海外からの輸入アンモニアである。エチレン、プロピレン、BTX 製造（いわゆる石油化学）については、海外から輸入したブルーアンモニアを利用した生産となっている。

図 5.2.3-25 は化学部門の CO_2 排出量の推移を示しているが、上述の合成メタンやアンモニアの利用および電化によって排出量を大幅に削減する経路となっている。

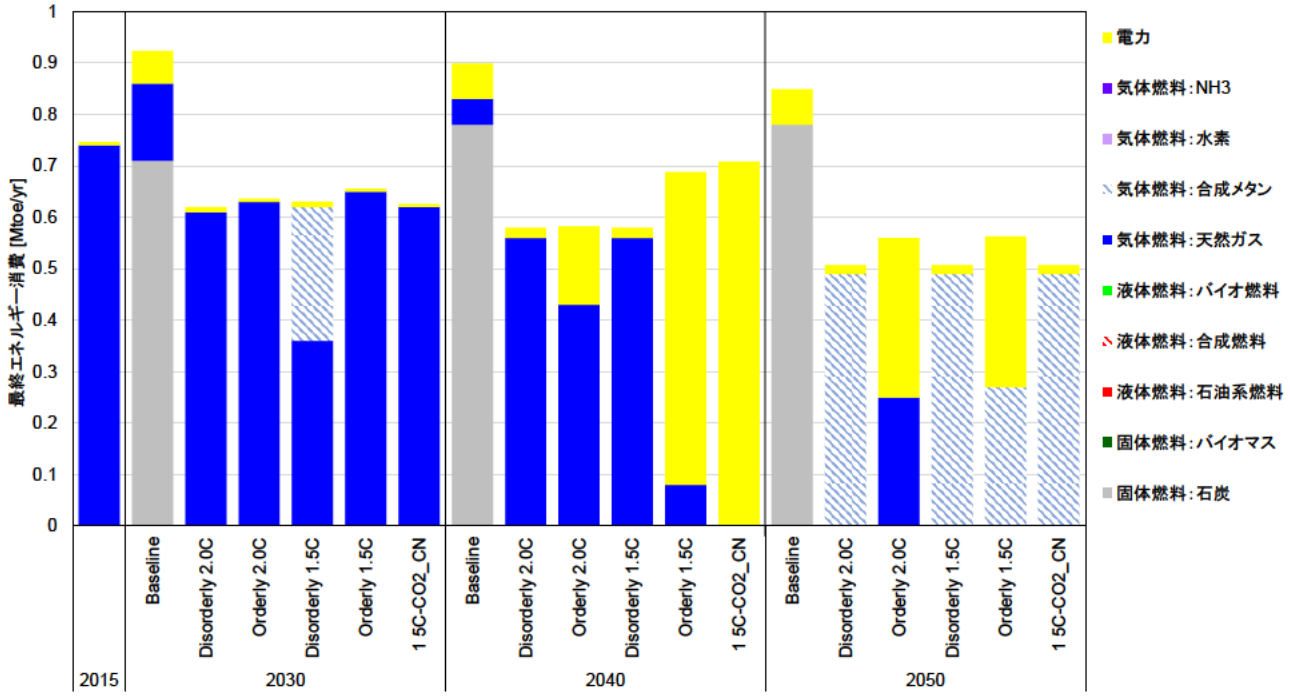


図 5.2.3-23 化学部門（アンモニア製造）最終エネルギー消費量（日本）

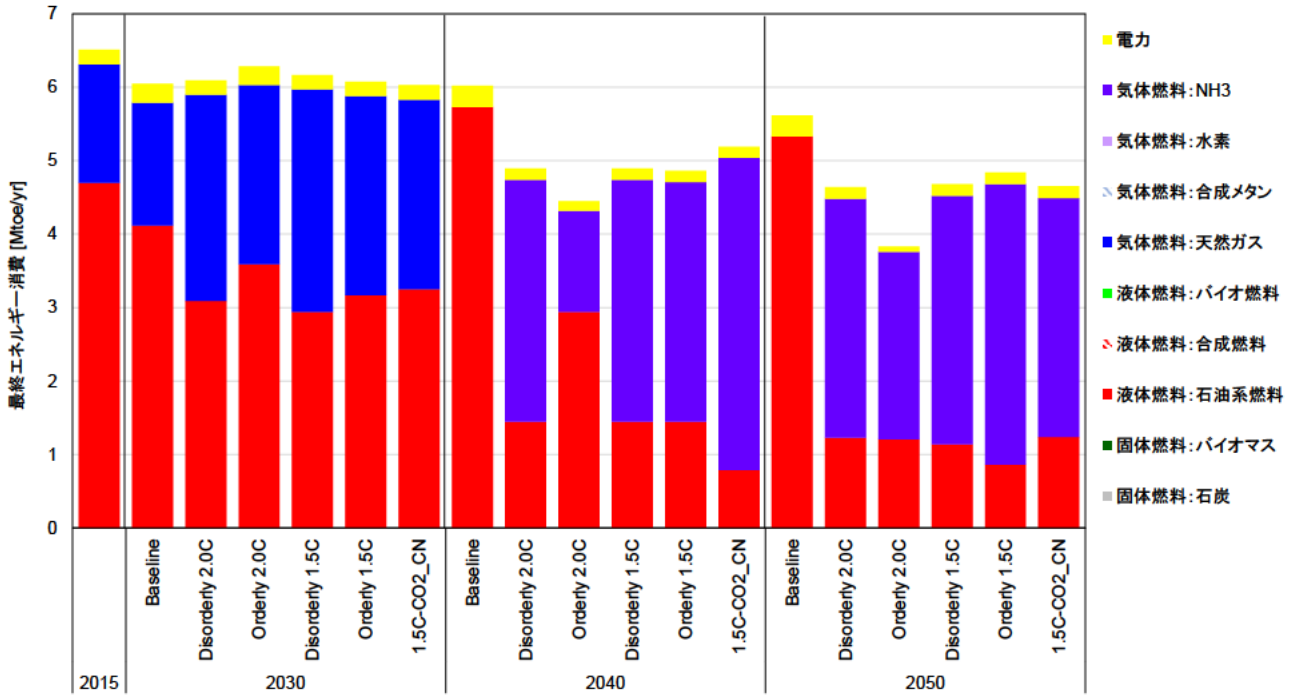


図 5.2.3-24 化学部門（エチレン、プロピレン、BTX 製造）最終エネルギー消費量（日本）

注：グラフのエネルギー消費量はエネルギー利用分のみで、原料分は含んでいない。

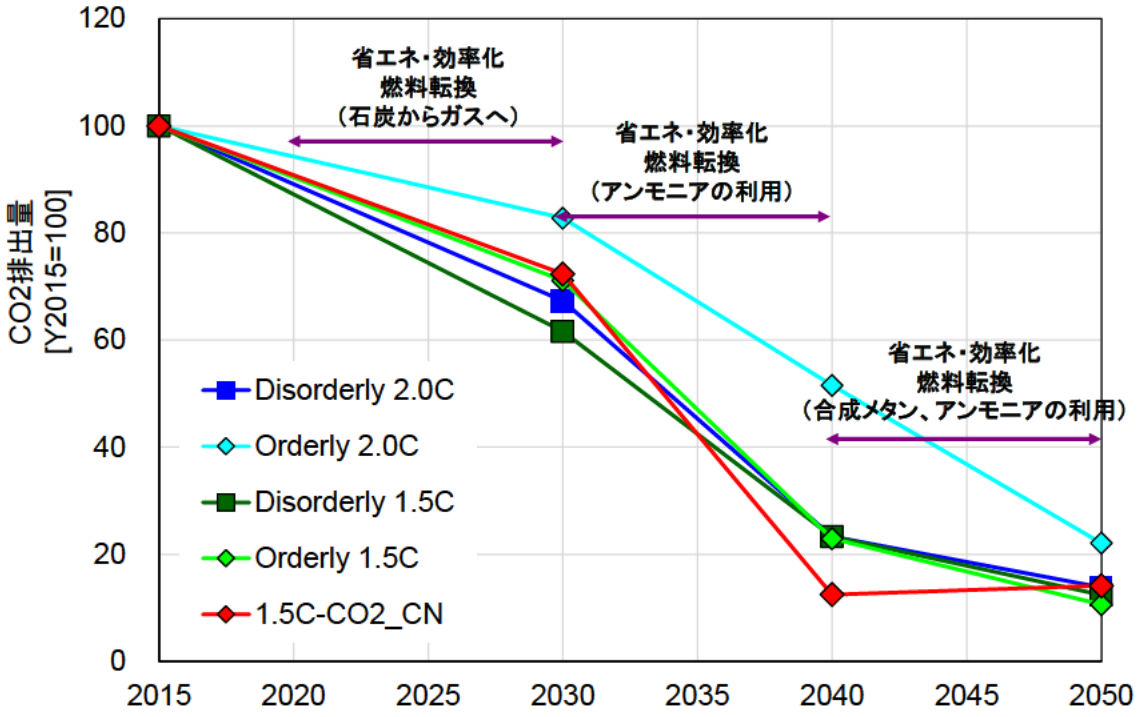


図 5.2.3-25 化学部門 CO_2 排出量（日本）

図 5.2.3-26 に民生部門の最終エネルギー消費量を示す。排出削減が厳しい程、電化率を向上させることが経済合理的と評価されるのは世界全体の結果と同じである。な

お、日本全体で 2050 年に 2013 年比▲70%とする Orderly 2.0C においては、従来と同様に都市ガスが利用されている。なお、その他のシナリオでは、気体燃料は合成メタン、もしくは水素となっている。

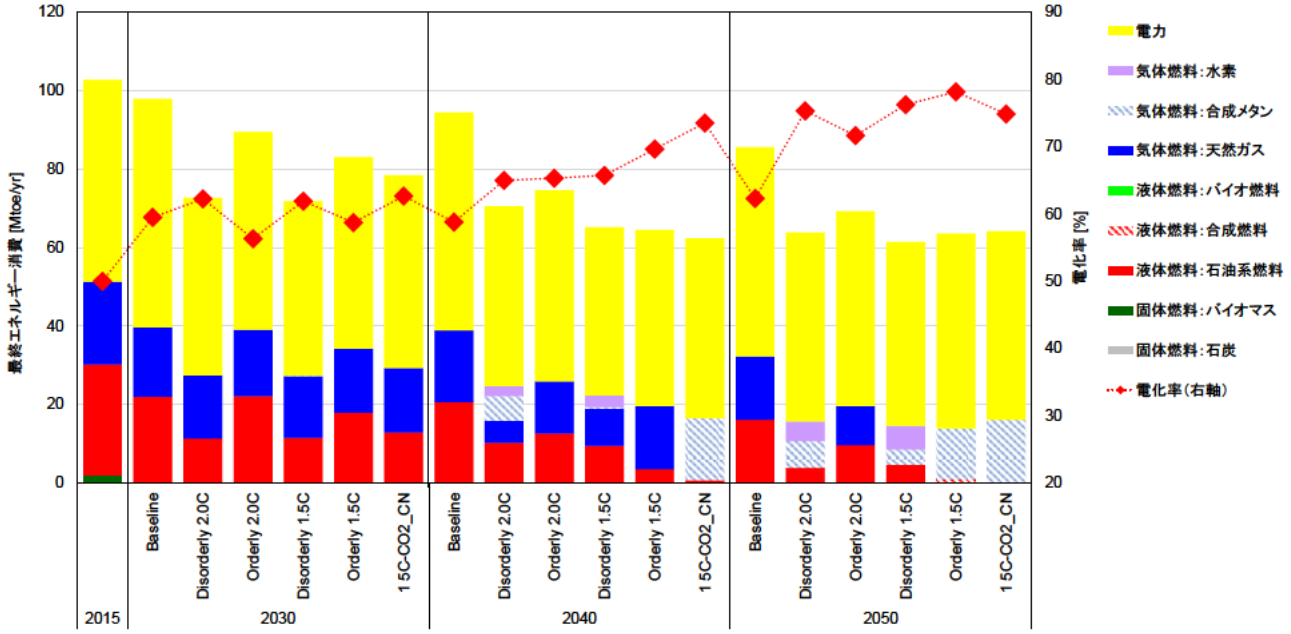


図 5.2.3-26 民生部門最終エネルギー消費量（日本）

図 5.2.3-27、図 5.2.3-28 は日本の運輸部門、道路交通部門の最終エネルギー消費量をそれぞれ示している。再エネ及び EV の大幅なコスト低減を見込んでいる Orderly シナリオ、1.5C-CO_2_CN シナリオにおいては、2040 年頃から特に電力が増大している。また、e-fuels の利用を見られる。Orderly 1.5C や 1.5C-CO_2_CN においては、乗用車は BEV もしくは FCEV となっており（図 5.2.3-29）、道路交通部門における e-fuels 利用はトラックが主となっている。

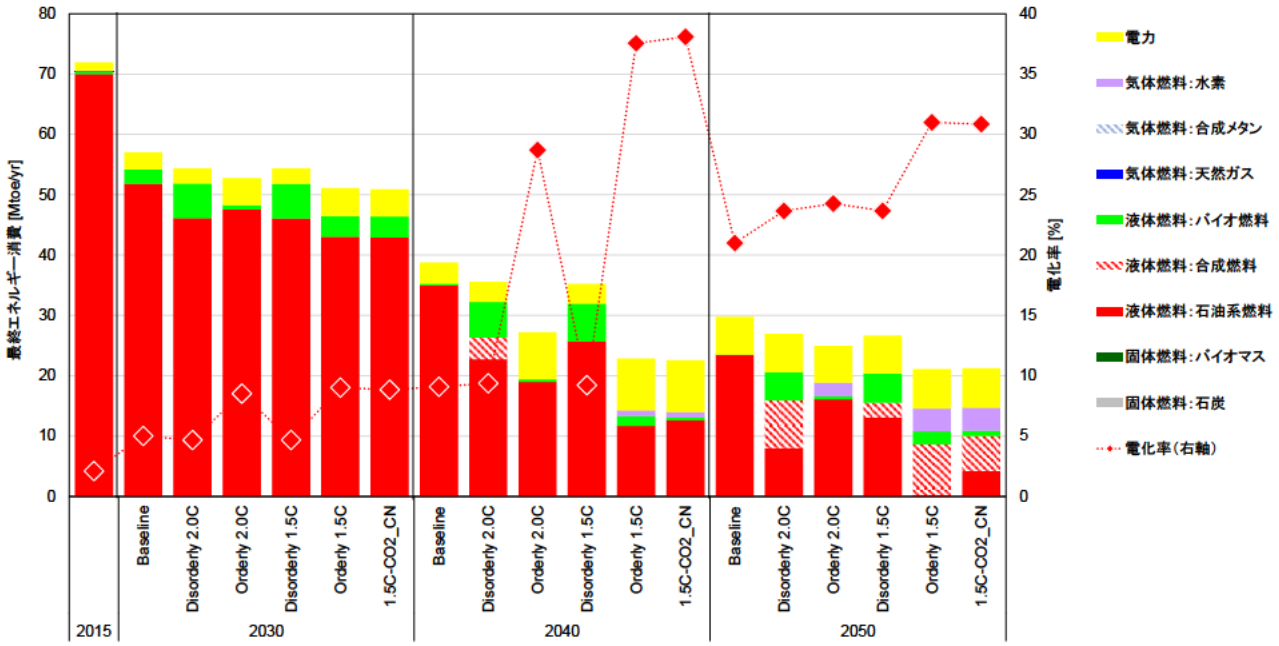


図 5.2.3-27 運輸部門最終エネルギー消費量（日本）

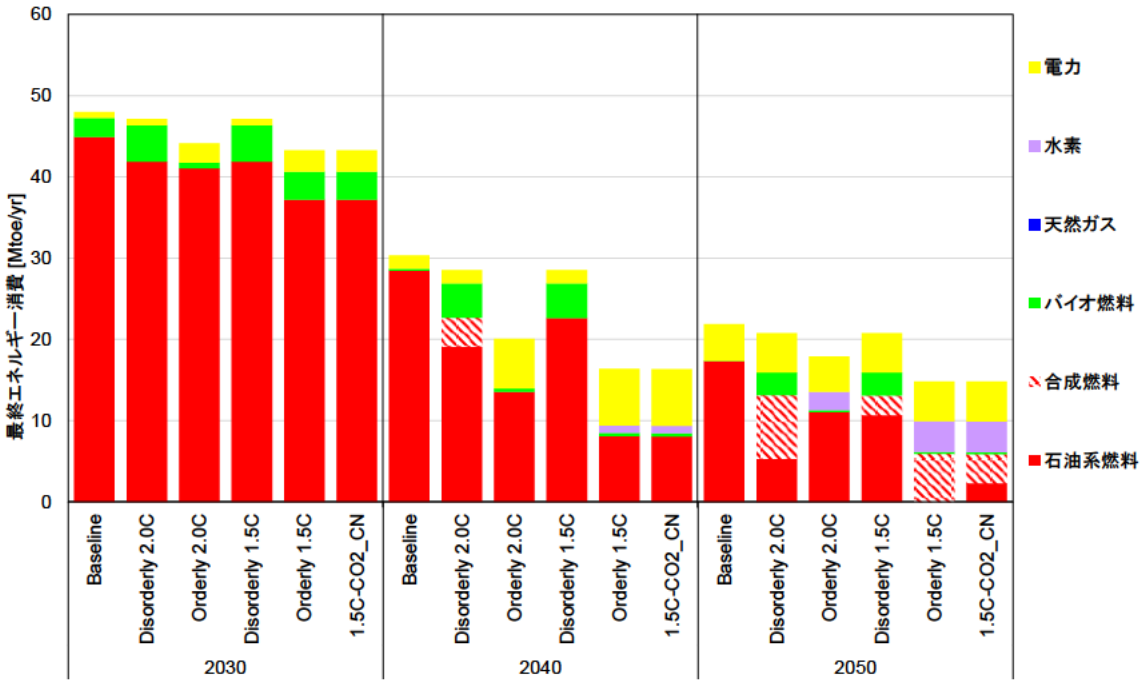


図 5.2.3-28 道路交通部門最終エネルギー消費量（日本）

図 5.2.3-29、図 5.2.3-30 に、日本における技術別の乗用車、トラック保有台数を示す。EV の技術進展を中位としている Disorderly シナリオでは、乗用車については、2030 年頃の排出削減対策は HEV が中心で、以降は PHEV についても拡大し、2050 年には PHEV が主となる結果である。一方、EV の技術進展を高位としているその他のシナリオにおいては、BEV の普及がより早期から進み、2040 年時点で BEV が主となり、2050 年には FCEV の普及も見込まれている。トラックに関しては、乗用車に比べ BEV や FCEV の導入は限定的であり、大半は内燃機関を有する HEV や PHEV となっている。

図 5.2.3-31 は、日本の道路交通部門の CO_2 排出量を示している。輸送サービス需要の低減に加え、HEV、PHEV、BEV、更には FCEV の導入により、継続的に CO_2 排出削減を進めるシナリオとなっている。なお、電力や水素のみではなく、図 5.2.3-28 に示したように、e-fuels も排出削減に寄与している。

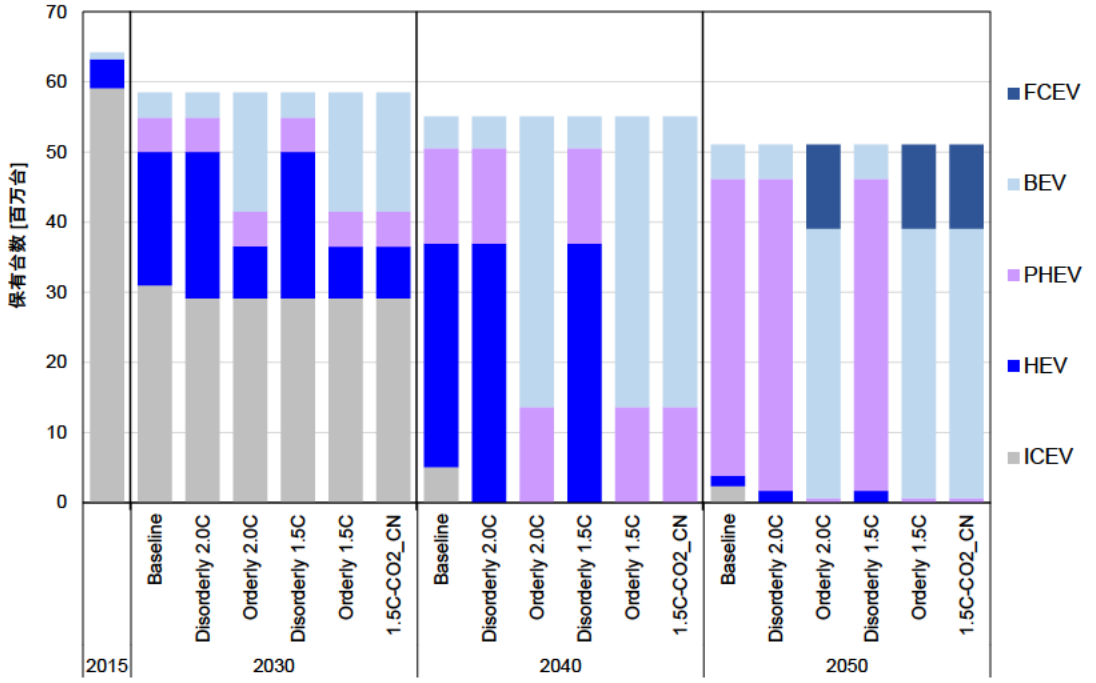


図 5.2.3-29 技術別乗用車保有台数（日本）

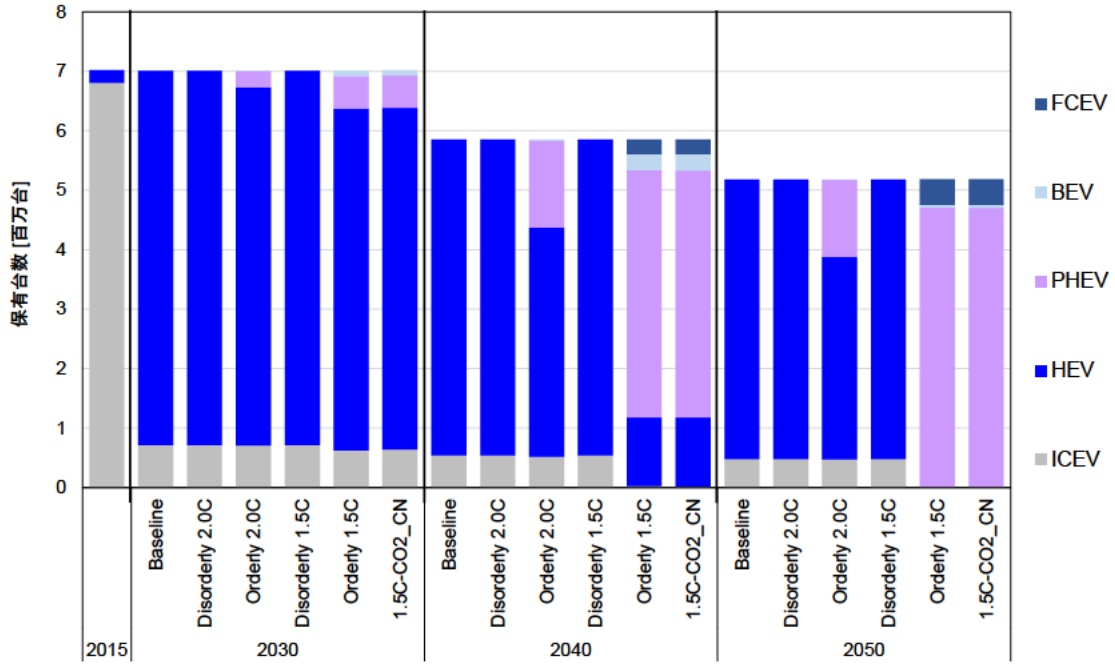


図 5.2.3-30 技術別トラック保有台数（日本）

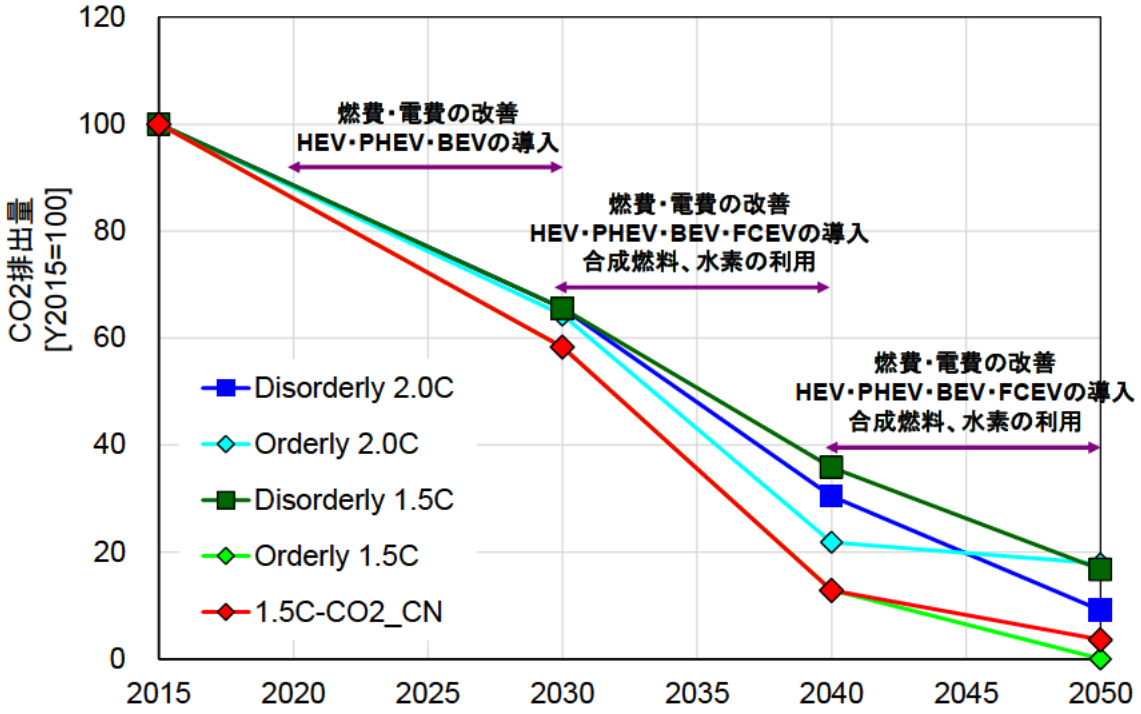


図 5.2.3-31 道路交通部門 CO_2 排出量（日本）

2℃目標、1.5℃目標に整合的で、NGFS や IEA シナリオと整合性を有する 5 種類のシナリオを想定し、定量的かつ整合的な分析が可能な DNE21+モデルを活用して、カーボンニュートラルへのトランジションを含めた分析を行った。排出経路は、部門によって差異が大きくなっており、技術等の想定シナリオによっても幅が大きいものとなっている。特に CDR の見通しによって大きな差異が生じ得ることが示された。なお、部門毎の排出経路を比較すると、排出削減オプションが豊富な発電部門における CO_2 排出原単位の改善は、比較的早期からの進展が求められる結果となっている。一方、CO_2 排出原単位の小さな天然ガスは、2℃や 1.5℃シナリオにおいても、日本では 2030 年に向けては増大する方が経済効率的な対策と評価され、また、鉄鋼部門は、CO_2 削減対策が困難で 2040 年頃までは最大 1 割程度の排出減に留まるシナリオが示された。

今回の分析では、多くのシナリオを提示し過ぎればどのシナリオを参照すれば良いか混乱してしまいかねないことも考慮して、5 種類のシナリオに絞って提示した。それでも大きな幅があるが、実際には 5 種類のシナリオで考慮しきれない不確実性が存在しているため、シナリオの解釈には留意が必要である。また、DNE21+モデルは相対的には詳細なモデルではあるが、それでもモデルは、現実の事象を高度に簡素化して表現している。現実は多様な主体があるし、退出、新設ともに地元との調整に時間を要するなど、より複雑な移行過程が必要であるが、モデルはこれらについてはほとんど考慮できていない。モデル分析の透明性を確保するために、不透明な制約は意図的に考慮しないようにもしている。よって、これらの点もよく理解しつつ、出来る限り幅広い対策オプションの中から費用効率的な対策を採っていくことが、より早期のカーボンニュートラル実現の近道になると考えられ、本シナリオ分析、ロードマップはその戦略策定に有用と考えられる。

参考文献（第 5.2 節に関するもの）

1) IPCC, 2022: Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, IPCC
2) NGFS: NGFS Scenarios for central banks and supervisors (2022)
3) 経済産業省：分野別ロードマップの策定にあたって、経済産業分野におけるトランジション・ファイナンス推進のためのロードマップ策定検討会（2021）
4) 秋元、佐野、2050 年カーボンニュートラルのシナリオ分析（中間報告）、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/043/043_005.pdf（最終アクセス日 2022 年 3 月 10 日）
5) 第 6 次エネルギー基本計画 https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/（最終アクセス日 2022 年 3 月 10 日）

5.3 CN 実現の主要技術に関する感度解析

本節では、カーボンニュートラル（CN）達成のための主要な技術について、まず、5.3.1 節において、技術別の排出削減ポテンシャルとコスト推計結果を提示し、各技術の位置づけについて概観する。その上で、5.3.2 節においては、特に CN 達成における限界的なコストの対策となりやすい、水素系エネルギーおよび BECCS、DACCS 等の CDR 技術を取り上げ、各種不確実性を考慮した感度解析を実施した結果を整理した。

5.3.1 部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計

本節では、2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計を示し、特に CN 達成に必要と見られる、水素系エネルギーおよび BECCS、DACCS 等の CDR 技術のコストとポテンシャルについて概観する。コストとポテンシャル推計は、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+[1),2)]用いた。

(1) 排出削減ポテンシャル・コスト推計の留意点

① 隠れた費用

技術積み上げ型のモデルのコスト・ポテンシャル推計では、「隠れたコスト」の考慮がとても重要になる。各技術の年間コストは、年換算された固定費＋O&M 費＋燃料費として表されることが多いが、様々な「隠れたコスト」が存在している。このコストの考慮をより良く行わなければ、実際の社会におけるコストを過小に、経済的なポテンシャルを過大に評価し、実態と合わない評価となってしまう。また、部門、技術によっても、これら「隠れたコスト」の大きさは異なるため、技術間でのコストの順位も異なった評価となり、誤ったメッセージとなる恐れもある。

詳細については、文献 3)を参照されたいが、以下に簡単に記載する。

Jorgenson の新古典派投資理論において企業の最適化行動を考慮して定式化された資本のユーザーコストは、資本財からのサービスを得るために投資家が支払わなければならない費用として定義され、以下のように表される。

$$\boldsymbol{P_{kj}^{K} = (r_{kj} + \delta_{kj} - \pi_k) \cdot P_k^{A}} \qquad (5.3.1\text{-}1)$$

資本取得価格（$P_k{}^A$）、 t 時点における実質利子率（r）、減価償却率（δ）、資本財価格の変化に伴うコスト（π）、資産の種類（k）、国あるいは経済主体（j）

資本取得価格（$P_k{}^A$）に対する係数（$r_{kj}+\delta_{kj}-\pi_k$）は通常、年次化要素（annualization factor）と呼ばれている。一般的にエネルギー需要側の技術（例えばテレビ、自動車など）は、新たなサービスを提供するような製品が提供されていくなどもあって、減価償却率が高い傾向が観測される。また、コスト低減が早ければ、当該時点で導入するよりも、安価になることが見通されていれば導入を待つ方が合理的な判断となりやすくなるが、πで表現される（逆に価格上昇が予想されていれば、年次化要素は小さくなる）。このように、設備、機器導入にあたっての経済合理性計における、固定費の年換算係数は利子率 r だけではないことに留意が必要である。この他、投資・購買検討など、様々な機会費用も存在しているし、限定合理的な行動もあり得る。これらは、特にエネルギー需要側技術で相対的に大きなコスト比率を有しやすい。下式は、これらについても固定費の年次化の係数として表現した場合として示している。

主観的割引率（γ）＝年次化要素（$r+\delta-\pi$）
＋投資・購買検討他、機会費用要素（λ）
＋限定合理性要素（ρ） (5.3.1-2)

6.1.2 節で触れるように、IPCC AR6 における部門別、技術別のコスト・ポテンシャル推計は、このように現実に存在している「隠れたコスト」を考慮していないことが大きな理由となって、負のコストの排出削減ポテンシャルを大きく推計し、統合評価モデル IAMs 推計との大きなギャップを生じさせていると推察される。DNE21+モデルでは、部門別、技術別に主観的割引率を想定している（文献 3),4)参照）。

② コストと排出削減効果推計の方法

DNE21+モデルを用いて、炭素価格水準を変えて複数回分析し、それぞれの炭素価格水準で部門別・技術別の排出削減量を算定し、異なる炭素価格での排出削減量の差分をとって、図示した。なお、DNE21+モデルは世界を 54 地域分割し、2100 年までの動的な最適化を行っているため、例えば同じ炭素価格であっても 2050 年の対象国等の各技術の排出削減ポテンシャルやコストは、国間の炭素価格（CO_2限界削減費用）の違いや、時点間の炭素価格の遷移によって変化する。本節では、部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コストを概観することを目的とするため、国間や時点間の炭素価格の差異についての議論は省略する。

なお、部門別・技術別の排出削減量の算定式は文献 4)を参照されたい。

③ シナリオの想定

CCS・CDR について相対的に楽観的な展望の「シナリオ A」は、CO_2 貯留についてその拡大の制約はあるものの相対的に制約は緩やかな想定をしたシナリオである。また、大気中 CO_2 直接回収（DAC）技術のコスト低減も順調に進むと想定している。更に、バイオエネルギーの利用についても土地利用の可能性からのポテンシャル想定は行っているものの、経済合理的な範囲でその想定したバイオマスポテンシャルは利用可能と想定している。このため、化石燃料＋CCS・CDR が相対的に、モデルの経済計算の解として大きく算定されやすいシナリオである。

一方で、IEA が 2021 年 5 月に公表した「Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector」における NZE シナリオは、再生可能エネルギーへの依存が大きく、CDR の利用が相当に少ないという特徴がある（IEA WEO2022 も同様であり、6.2 節参照）。そこで、再エネについて相対的に楽観的な展望、一方、CCS/CDR については保守的な展望を想定し、IEA-NZE シナリオに近いエネルギー展望となるシナリオを、「シナリオ B」として想定した。シナリオ B では、利用可能な技術としてはシナリオ A と共通ではあるが、そのコストなどの設定を様々に変更している。まず、再生可能エネルギーと電化の普及が促進されやすいように設定した。具体的には、シナリオ A よりも自動車用のバッテリーと風力発電のコストが低下すると共に、風力発電のポテンシャルも大きく設定した。また、CDR については、DAC のコストが現状から低減しないとし、商用バイオマスエネルギーの供給量上限は世界全体で 50 EJ/yr と想定した（これはシナリオ A の 2050 年 CN シナリオ下における経済的なポテンシャルとしての分析結果の半分程度に相当する）。更に、CO_2 貯留の年拡大制約をシナリオ A よりも厳しく想定した（実質的には CO_2 貯留の実施に社会的な受容性等の視点で制約が生じると想定したことにあたる）。具体的には、貯留可能量がシナリオ A のおおよそ十分の一程度まで少なくなるように設定した。これら条件設定は、文献 4)の「ケース（III）」に相当するものである。

(2) 世界全体の分析結果

まず、世界全体での排出削減ポテンシャルとコストの推計を示す。「シナリオ A」での世界全体の排出削減ポテンシャル及びコストの推計を図 5.3.1-1 に示す。なお、ここでの分析は、炭素価格については G7 国とその他国の間で差異を想定し、G7 がその他国の炭素価格の 1.5 倍と想定した計算によって算出したコスト・ポテンシャル推計である。技術毎の効果としては CO_2 限界削減費用が約 90$/t$CO_2$ の時点では発電部門や化学部門において、石炭利用からガス（以降、特に断りがない限りガスは天然ガスを指す）利用への転換が見られる。また、民生部門等でも石炭利用が削減され、バイオマスなどの環境負荷の低いものに代替されていく。さらに、引き続き利用される石炭・ガス火力発電には、二酸化炭素回収・貯留（CCS）が導入され、セットで運用されるようになる。発電部門以外の鉄鋼、化学、セメント部門においても CCS が導入され始める。約 180 $/t$CO_2$ 以降は DACCS が排出削減の多くの担うようになり、360 $/t$CO_2$ 付近で世界全体としての CO_2 での CN が達成される推定となる。

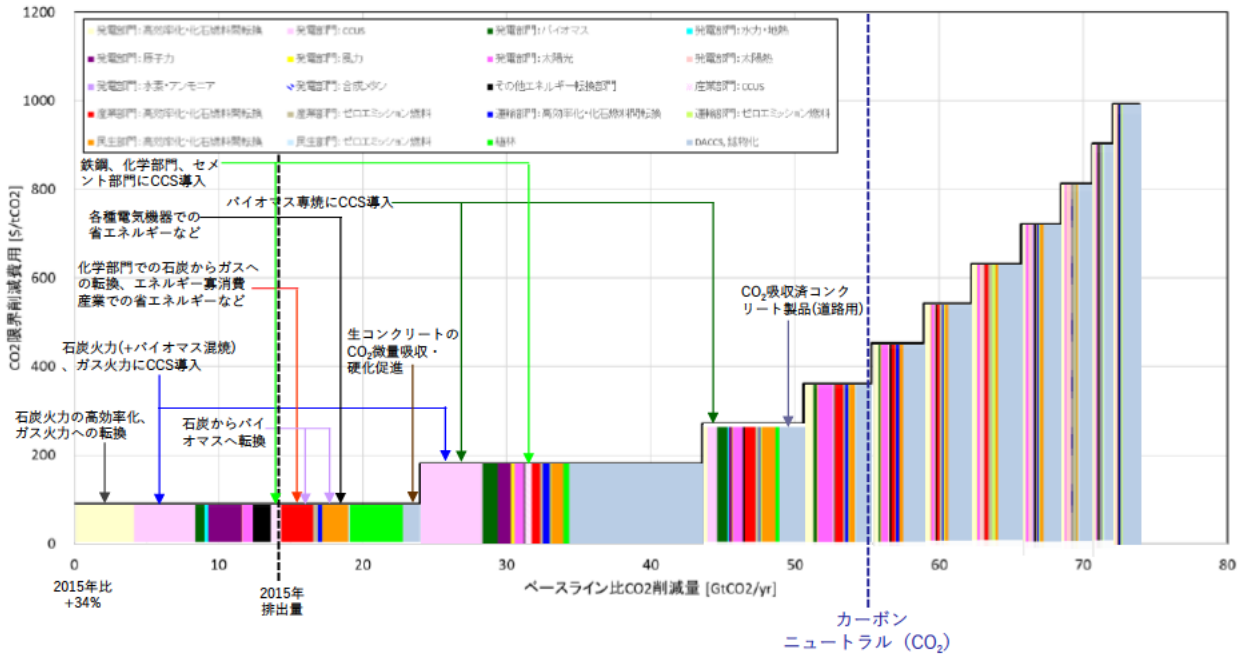


図 5.3.1-1　シナリオ A での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：世界全体

次に、再エネ、蓄電池等の技術進展を楽観的に、CCS・CDR 等の社会制約を保守的に想定した「シナリオ B」での世界全体の排出削減ポテンシャル及びコストの推計について図 5.3.1-2 に示す。約 90 $/tCO$_2$ の時点では、発電部門の高効率化・化石燃料間転換による排出削減が多い。石炭・ガス火力発電の双方で発電量の減少が進んでおり、シナリオ A のように単純に石炭火力発電が減少し、ガス火力発電に転換している訳では無い。石炭火力発電の方が優先的に廃止されるため、ガス火力発電の割合が高まり、ガス転換が起きているように見えることには注意が必要である。また、シナリオ A と比較し、再生可能エネルギーコストが低減している影響で、全コスト帯において太陽光発電が多く導入されている。さらに、CO_2 限界削減費用の上昇に伴い、シナリオ A と同様に各分野での CCS や DACCS が導入されていくが、シナリオ A と比べると特に DACCS において、その導入量は少ない。その結果、CO_2 での CN は 900 $/tCO$_2$ 付近での達成と推定される。この比較から、DACCS の技術進展・コスト低下が CN 達成のための限界削減費用を押し下げることに重要な役割を果たすことが分かる。

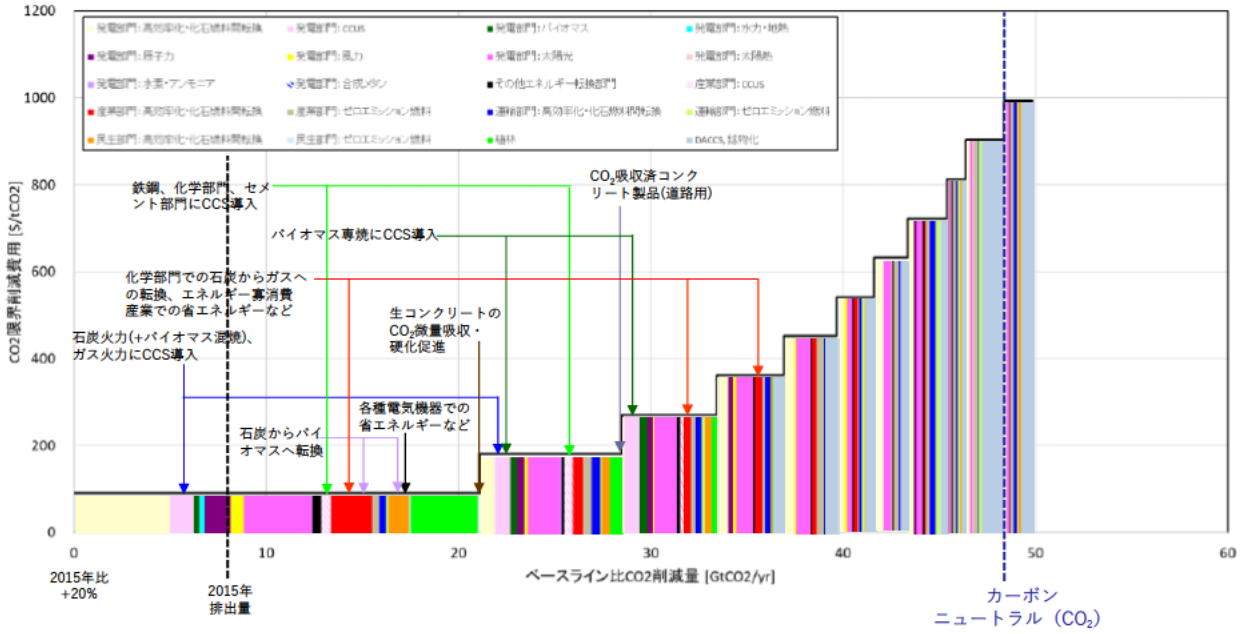


図 5.3.1-2 シナリオ B での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：世界全体

(3) 日本の分析結果

次に、日本の 2050 年の各部門別・技術別の排出削減ポテンシャルとコストの推計例を示す。シナリオ A、B についてそれぞれ図 5.3.1-3、図 5.3.1-4 に示す。世界全体では、2050 年時点の水素系エネルギーの供給量は、最終エネルギー消費量の 5%前後となるシナリオが多い（WEO2022 で抽出された IPCC の 2050 年までに CO_2 で CN となるシナリオの水素系エネルギー供給量の平均値は 18 EJ/yr であり、最終エネルギー消費量の 4%程度、WEO2022 NZE ではこれよりも大きく 9%程度とされている）。世界全体としては大きな比率とまではならず、図での確認が容易ではないので、より寄与度が大きい日本の結果で確認する。

シナリオ A では、水素・アンモニア発電は、ブルー水素系の利用が多く、175～350 \$/tCO_2 近辺の炭素価格帯で費用効率的な対策として見受けられる。e-fuels は 100～250 \$/tCO_2 程度、e-methane は 400～500 \$/tCO_2 程度の炭素価格帯で見られる。e-methane の方が、e-fuels よりも製造の選択性がよくカロリー当たりの製造コストは安価であるが、e-methane は天然ガスの代替が大部分で、一方、e-fuels は石油系燃料の代替が大部分となり、LNG はそもそも CO_2 原単位が小さいし、LNG 複合発電やコジェネは効率の高さもあって CO_2 原単位が小さいので、その代替としての e-methane は、e-fuels よりも排出削減効果が小さくなるため、ton-CO_2 あたりの削減コストは高くなっている。DACCS は 350～500 \$/tCO_2 程度で、e-methane とともに CN 達成のための限界費用的な対策となっている。シナリオ A では、海外への CO_2 輸送、貯留も可能としており、DACCS のポテンシャル的も大きくなっている。

一方、シナリオ B は、再エネのコスト低減を楽観的に想定しているため、ベースラインの排出見通しが、シナリオ A よりも 5%ポイント程度低くなり、2015 年比▲21%となっている。他方、CCS、CDR を保守的に想定したシナリオであるため、CO_2 での CN

達成の限界費用は、100 $/tCO$_2$程度引き上がって500 $/tCO$_2$程度となる。CDRの貢献が小さいため、GHGでのCN達成の限界費用は更に上昇する。CCSのコストレンジはシナリオAよりも上方に移行し50～450 $/tCO$_2$程度、DACCSのコストは450～500 $/tCO$_2$程度となっている。e-methaneは再エネコストの低下によって、製造コストが低下し、DACCSよりも低い、350～450 $/tCO$_2$程度のレンジになっている。シナリオBでは、日本での水素発電は、引き続き、海外で製造された水素の利用が主となるが、シナリオAではブルー水素・ブルーアンモニア発電が主だったが、シナリオBではグリーン水素がかなりの利用となり、コストレンジも175～500 $/tCO$_2$程度へと広がっている。

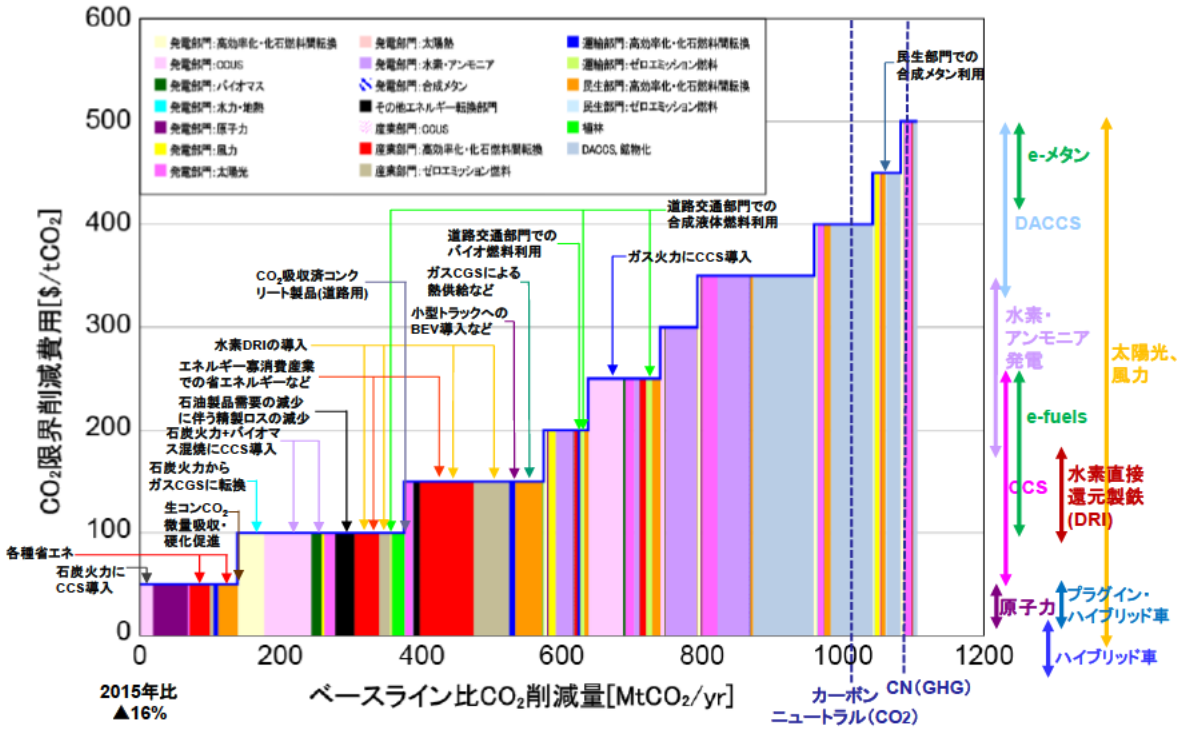


図 5.3.1-3 シナリオAでの2050年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：日本

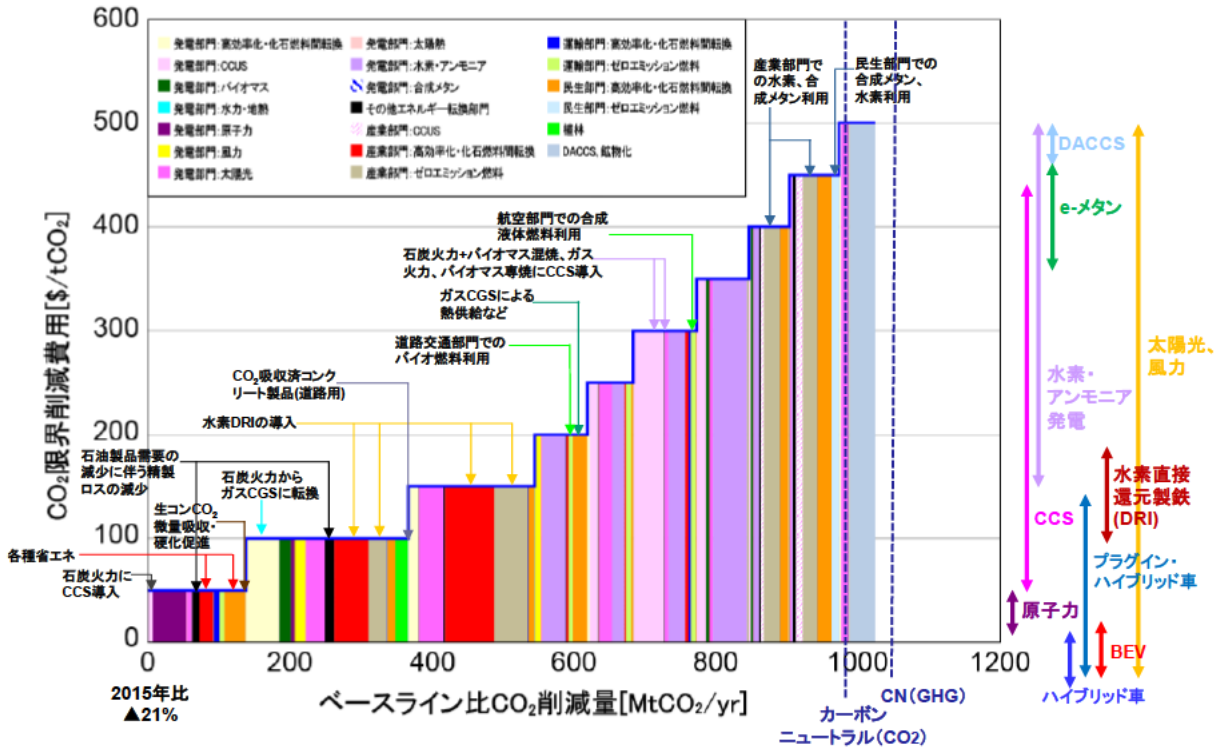


図 5.3.1-4　シナリオ B での 2050 年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャル・コスト推計：日本

参考文献（第 5.3.1 節に関するもの）

1) K. Akimoto, et al.; Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost, Energy Policy, 38（7）, 3384-3393　（2010）

2) K. Akimoto, et al.; Assessment of the emission reduction target of halving CO_2 emissions by 2050: macro-factors analysis and model analysis under newly developed socio-economic scenarios, Energy Strategy Reviews, 2（3-4）, 246-256　（2014）

3) 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）
https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/mitigationcost-discountrate.pdf

4) RITE: FY2021 ALPS 報告書（2022）

5.3.2　水素、アンモニア、e-methane（合成メタン）、e-fuels（合成燃料）、CDR 関連の感度解析

第 5.1.2 節、第 5.1.3 節では、水素、アンモニア、e-methane（合成メタン）、e-fuels（合成燃料）、BECCS や DACCS 等、CDR 技術の技術開発動向、特徴等についてとりまとめた。一方、第 5.3.1 節の排出削減コスト・ポテンシャルで概観したように、水素、アンモニア、e-methane、e-fuels、BECCS や DACCS は、CN 達成のためには必要となる対策と見られるものの、いずれも、相対的にはコストが高い対策である。また、これら技術は、相互に依存性がある場合も多く、また代替性がある場合もある（図 5.3.2-1）。

本節では、これら技術について、定量的かつ整合的なシステム評価が可能な、技術積み上げ型の世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いながら、CN 実現におけるこれら技術の役割について分析・評価を行った。

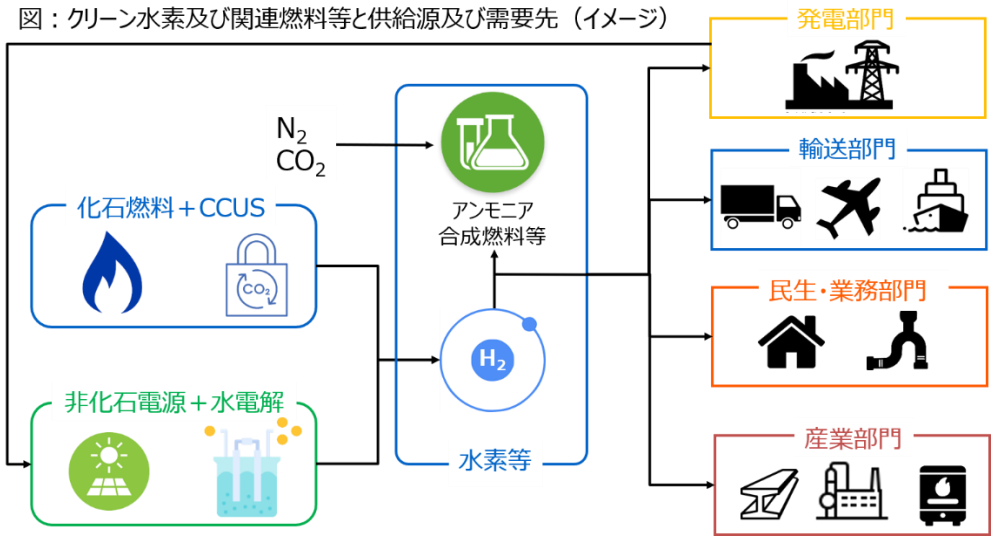


図 5.3.2-1 水素系エネルギー（水素、アンモニア、e-methane、e-fuels）の供給、転換、需要に至るシステム

（出典：資源エネルギー庁 [1)]）

e-methane（合成メタン）は H_2 と CO_2 から合成され、都市ガスを代替することなどを想定されている。この合成に使用する CO_2 について、発電所などから大気に放出されるはずだった CO_2 を回収したり、放出されてしまい大気中に存在している CO_2 を回収することで、e-methane の燃焼時には大気中への追加的な CO_2 排出が行われないことになり、CN に貢献することとなる（図 5.3.2-2）。e-fuels（合成燃料）も e-methane と同じく H_2 と CO_2 から合成されるが、液体状であり、エネルギー密度が高いため、自動車やジェット機などの交通分野での燃料を代替が主に想定されている。

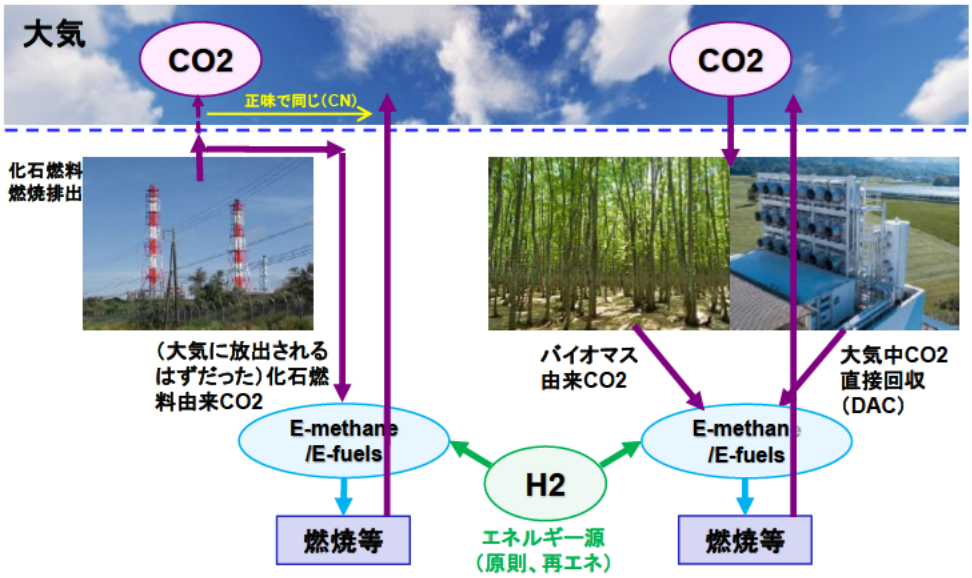


図 5.3.2-2 e-methane および e-fuels における CO_2 の利用

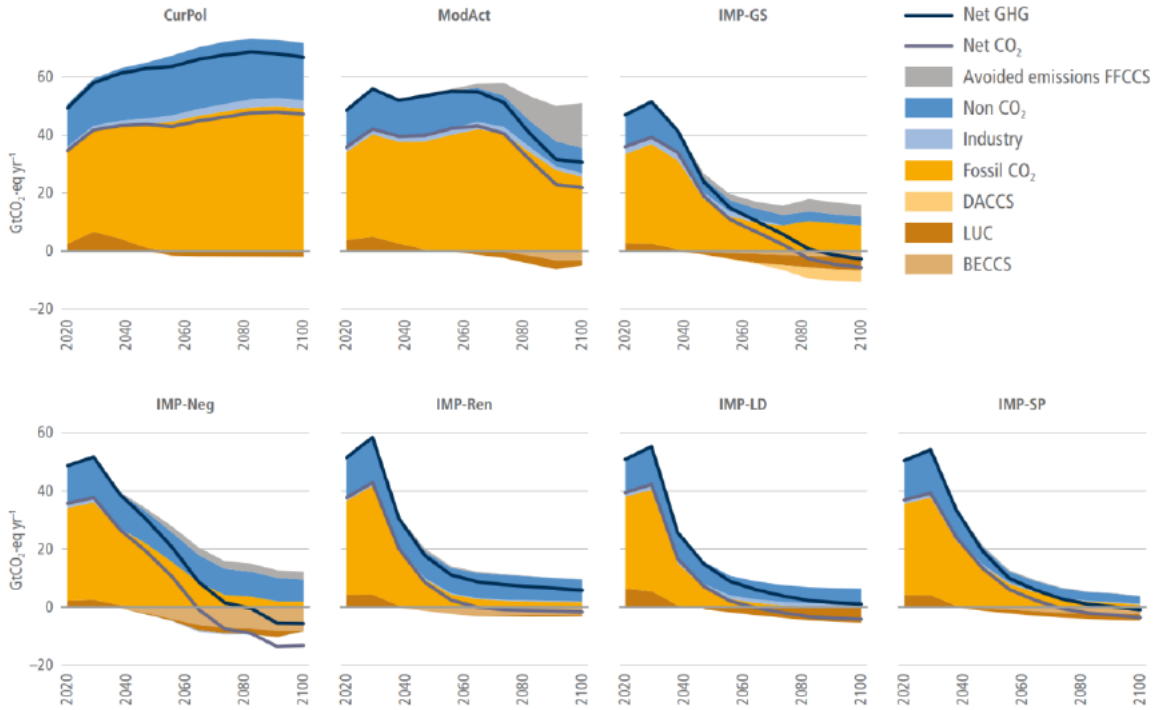


図 5.3.2-3 IPCC 報告書における化石燃料起源 CO_2 排出量の見通し

（出典：IPCC 第 6 次評価報告書 [2)]）

本節では、まず、(1)水素・アンモニア、e-methane/e-fuels、CCS/CDR の比較に関する分析を実施した結果を記載した。次に(2)①項において、e-methane と e-fuels は両者ともに水素と CO_2 を必要とする一方、両者で利用用途が異なる部分が多いと想定されるため、その競合を含めた比較分析を実施した。更に、水素系エネルギーは、ブルー水素は CCS へのアクセス、コストによって利用可能性が異なってくるし、グリーン水素も同様に、再エネへのアクセス、コストによって利用可能性が異なってくる。つま

り、国間でのこれら利用可能性の差異によって、その経済合理的な利用量が変化する。それを定量的に分析するため、(2)②項において、主要先進国と途上国の間での炭素価格（CO_2限界削減費用）の差異によって、水素系エネルギーの利用量が、世界全体また主要先進国と途上国の間でどのように変化するかについて分析を実施した。

(1) 水素・アンモニア、e-methane/e-fuels、CCS/CDR の比較に関する分析

図 5.3.2-4 に、ガス体関連で見た LNG+CDR、水素、e-methane の比較としての CN システムの概観を示す。それぞれ、長所、短所があり、社会的な制約が生じることもあり得る。

図 5.3.2-5 には、水素、アンモニア、e-methane（合成メタン）等の日本におけるコスト比較例を示す。いずれにしても、まず、水素製造のコストが大きな比率を占めていることがわかる。e-methane の CO_2 回収および合成のコストは相対的には小さい。液化水素、輸送のコストの比率は高い傾向が見られる。国内の e-methane 製造コストは、国内再エネコストが高いため、高価になる可能性が高いことも示されている。また、図 5.3.2-6 には、各種水素の製造コストおよびその見通し例を示す。現状ではブルー水素のコストが安価である。将来的には不確実性は大きいものの、グリーン水素のコスト低減も期待され、競争的になる可能性はある。

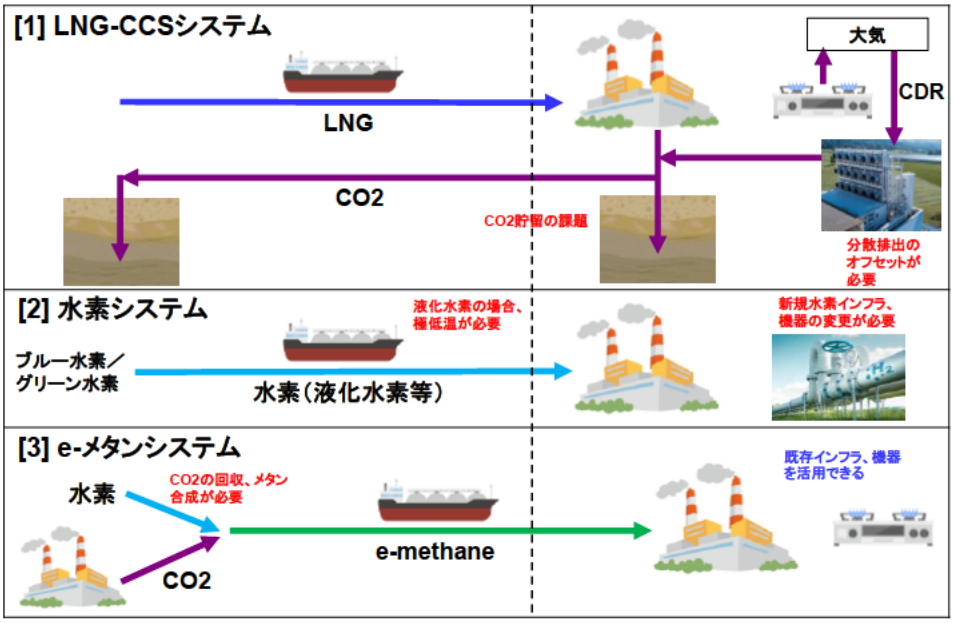


図 5.3.2-4 ガス体関連で見た CN システム（LNG+CDR、水素、e-methane の比較）

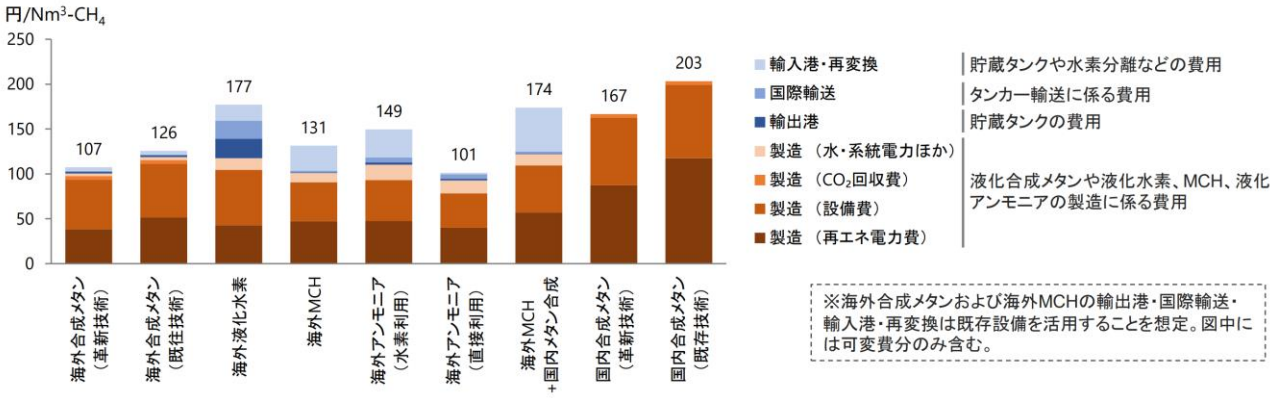


図 5.3.2-5 日本における合成メタン他技術のコスト構造

（出典：大槻、柴田 [3]）

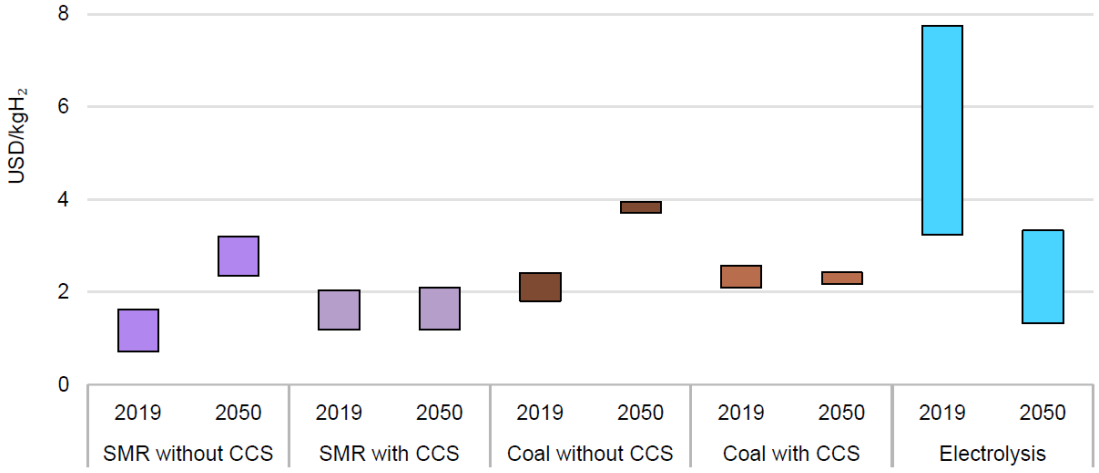


図 5.3.2-6 IEA による世界の水素製造コストの見通し

（出典：IEA ETP2020, 2020[4]）

① 感度解析のシナリオ想定

図 5.3.2-4 はガス体エネルギーについての CN システムの比較であるが、液体燃料を含め、CN エネルギーシステムとしての比較を行うため、表 5.3.2-1、表 5.3.2-2 のようなシナリオ想定を行って、DNE21+モデルで経済合理的なシステムの評価を行った。CN のためには電化の促進が重要ではあり、経済合理的な対策として電化促進が示されているが、民生および運輸で電化 100%を想定した場合についてもシナリオ分析を行った。排出シナリオとしては、1.5℃シナリオ（2060 年頃 CO_2 で世界全体で CN）を想定するとともに、日本他の主要先進国については 2050 年に各国で GHG での CN を達成するシナリオを想定した。また、すべてのケースにおいて、再エネコスト低減加速を想定した。ただし、別途、比較のため、標準的な再エネコスト低減ケースを「参照ケース」として、シナリオ分析結果を提示する。

表 5.3.2-1 e-methane/e-fuels の評価のためのシナリオ想定（1/2）

ケース	技術想定	海外への CO_2 輸送	CDR
[1] 海外CCS	CO2貯留可能量大（海外へのCO2輸送・貯留も可）、CO2貯留に関する想定：「参考値のケース」と同じ	Yes	Yes
[2] 国内e-メタン	e-methane, e-fuelsの輸入無、結果、国内E-メタン製造・利用ケース	No	Yes
[3] 海外e-メタン	海外製造e-methane, e-fuelsの利用拡大ケース	No	Yes
[4] CDR利用制約	CDR（BECCS、DACCS）利用制約ケース。負排出によるオフセット可能量が小さくなるケース	No	DAC:ｺｽﾄ低減無＋ﾊﾞｲｵｴﾈﾙｷﾞｰ：50 EJ/yr以下
[6] 水素社会	新設水素配給インフラコストを想定した上で、都市ガス需要の85%を水素と想定したケース	No	Yes
[7] 電化社会	民生、乗用車部門の完全な電化を想定したケース	No	Yes

表 5.3.2-2 e-methane/e-fuels の評価のためのシナリオ想定（2/2）

<table>
<tr><th colspan="2">ケース</th><th>VRE
コスト</th><th>水素製造
コスト</th><th>メタネーション
コスト</th><th>CCSの想定
（最大CO2貯留量（国内、海外））</th></tr>
<tr><td colspan="2">参照ケース</td><td>標準</td><td>標準</td><td>標準</td><td>日本国内貯留上限：91 $MtCO_2$/yr（2050年），
国外CO2輸送上限： 235 $MtCO_2$/yr</td></tr>
<tr><td rowspan="6">再エネイノベ</td><td>[1] 海外CCS</td><td rowspan="6">低位コスト</td><td rowspan="5">低位水素製造（水電解）コスト＋低位水素液化設備コスト</td><td rowspan="5">革新的メタネーション：
エネルギー効率向上加速＋設備費低減加速</td><td rowspan="2">日本国内貯留上限：91 $MtCO_2$/yr（2050年），
国外CO2輸送上限：0 $MtCO_2$/yr</td></tr>
<tr><td>[2] 国内e-メタン</td></tr>
<tr><td>[3] 海外e-メタン</td><td>日本国内貯留上限：91 $MtCO_2$/yr（2050年），
国外CO2輸送上限：0 $MtCO_2$/yr</td></tr>
<tr><td>[4] CDR利用制約</td><td rowspan="2">日本国内貯留上限：91 $MtCO_2$/yr（2050年），
国外CO2輸送上限：0 $MtCO_2$/yr</td></tr>
<tr><td>[5] 水素社会</td></tr>
<tr><td>[6] 電化社会</td><td>標準</td><td>標準</td></tr>
</table>

② シナリオ分析結果

図 5.3.2-7、図 5.3.2-8 にそれぞれ、世界の一次エネルギー供給量および CO_2 回収と貯留、利用のバランスを示す。1.5℃シナリオでは、石炭はすべて CCS 付、天然ガスの一部も CCS が必要となっている。ただし、シナリオにより差異があるものの、CDR の貢献により、いずれの想定シナリオにおいても、CCS 無しの石油、天然ガスの利用は残っている。CCS/CDR の利用可能性が高い想定の「参照ケース」ではその比率が高い。一方、再エネイノベケースでは、太陽光、風力の比率は上昇し、替わりに, CCS 無しの石油、天然ガスの利用は「参照ケース」よりも低下している。また、[4]CDR 利用制約ケースでは DACCS、BECCS の利用が低下し、排出のオフセット量が低下するため、CCS 無しの石油、天然ガスの利用は一層低下している。

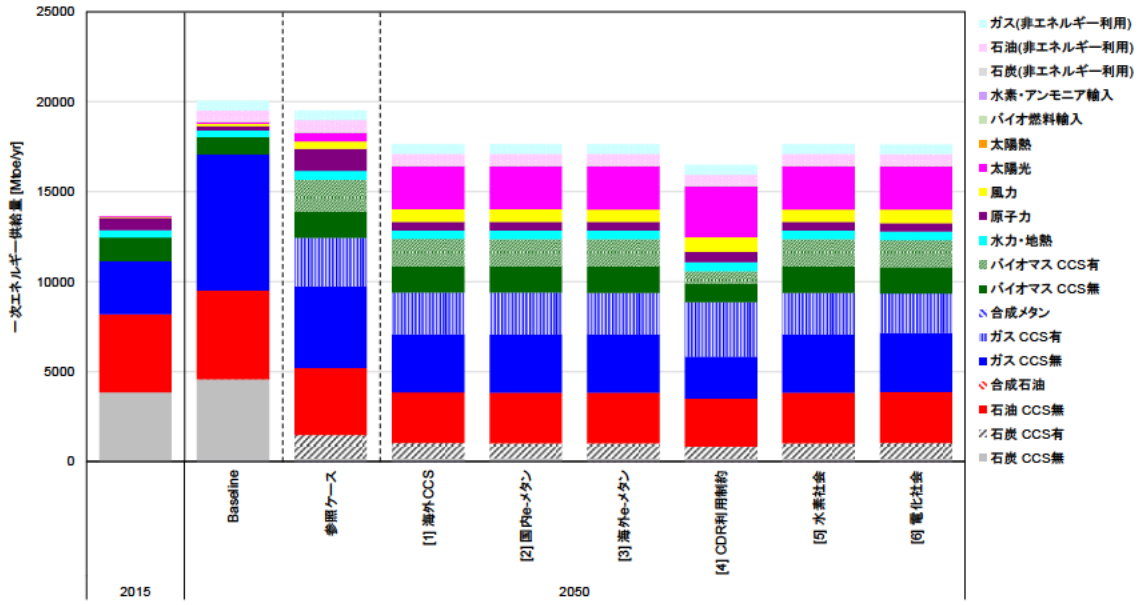


図 5.3.2-7 一次エネルギー供給量（世界）

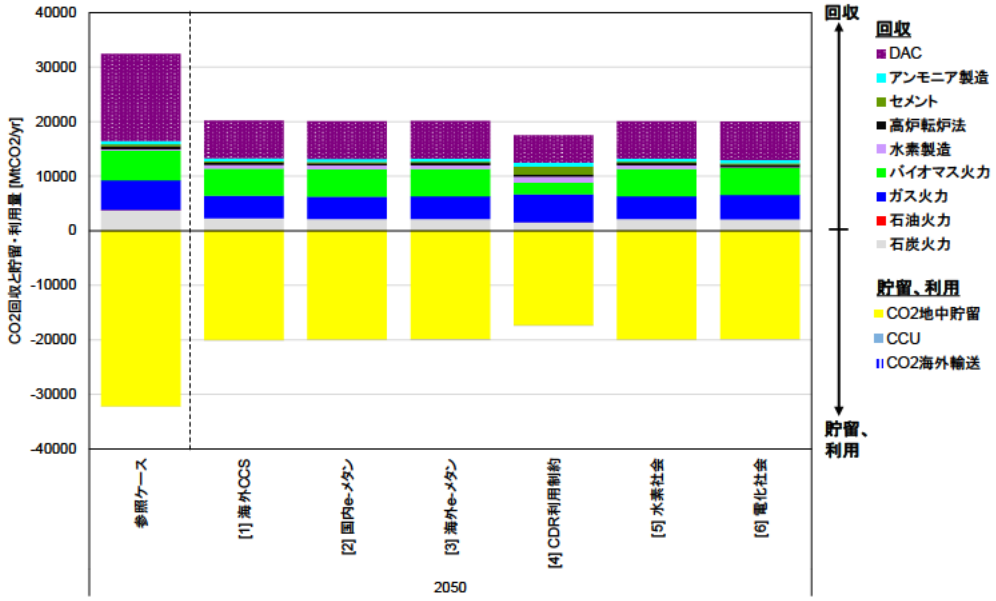


図 5.3.2-8 CO_2 バランス（世界）

図 5.3.2-9、図 5.3.2-10 に、それぞれ、日本の部門別 GHG 排出量と CO_2 バランスを示す。「参照ケース」では 2050 年に年間 3 億トン-CO_2 強の残余排出をオフセットするのが経済合理的な一方、再エネイノベケースでは、年間 1 億トン-CO_2 程度をオフセットしている。[2]国内 e-メタンケースでは、国内回収の CO_2 の海外移送は想定せず、また、海外 e-methane, e-fuels の輸入も想定しないので、e-methane 用の DAC による CO_2 回収の増加が見られる。国内で閉じた中で、CN を達成するためには、e-methane、e-fuels 用の CO_2 は DAC もしくはバイオマス由来となる。

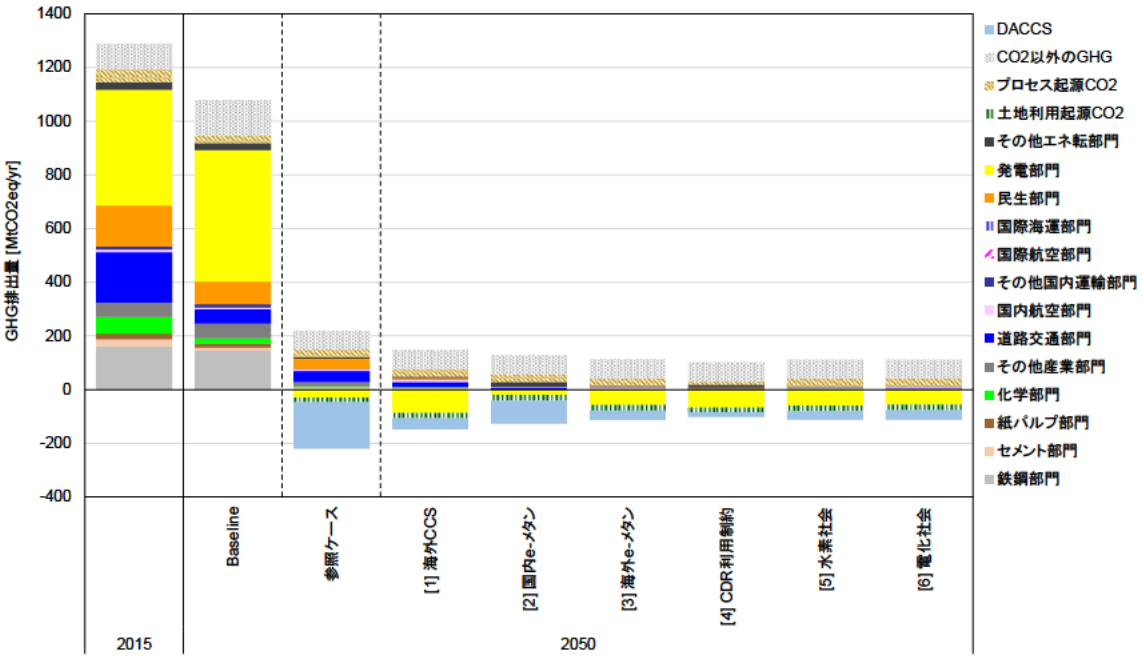


図 5.3.2-9 部門別 GHG 排出量（日本）

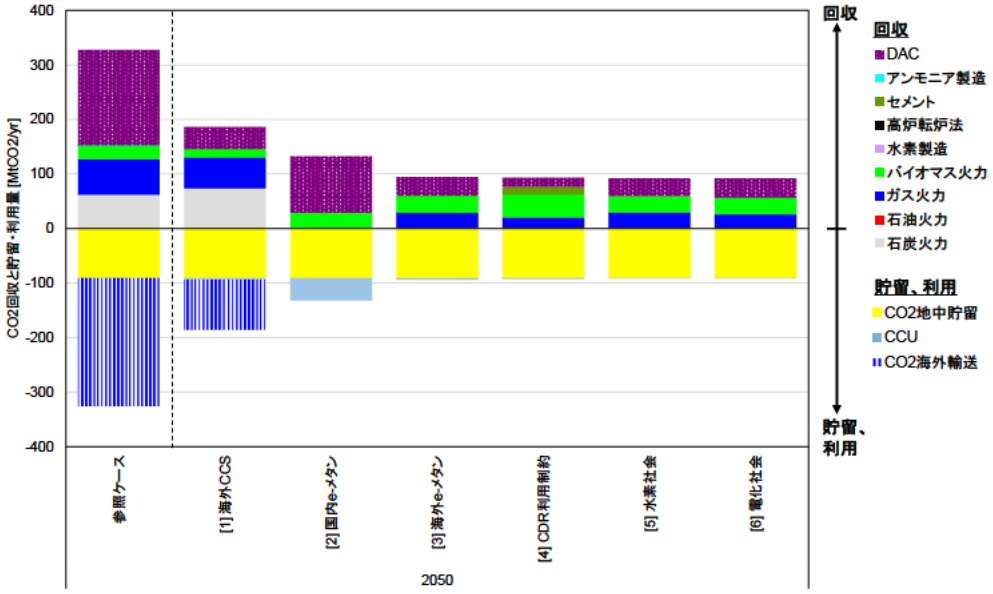


図 5.3.2-10 CO_2 バランス（日本）

図 5.3.2-11、図 5.3.2-12 に、それぞれ、日本の一次エネルギー供給量と発電電力量を示す。[2]国内 e-メタンケースでは、海外から水素の輸入が増大し、また、再エネの利用量も増大する。e-methane や e-fuels の輸入がないため、残余の石油からの CO_2 排出量が他の[3]～[6]ケースよりも若干多く、DACCS、BECCS の負排出量を増やし、その分、化石燃料からの CO_2 回収貯留をほぼ無くして、CO_2 貯留容量の上限想定をより有効に活用していることがわかる。ただし、当然ながらその分、コストが増大する。日本における発電用としては、CCS がしやすい「参照ケース」では、化石燃料発電＋CCS が比較的大きなシェアを占めるとともに、ブルーアンモニアの利用が経済合理的との結果である。一方、再エネコストの更なる大幅低減を見込んだ再エネイノベケー

スでは、再エネ比率が増している。その中でも、[1]海外 CCS ケースでは CCS 比率は高いが、海外 CO_2 貯留を想定しない、[2]～[6]のケースでは、CCS 発電は減っており、残っている CCS 発電も e-methane＋CCS で負排出の対策となっている。そして、[2]～[5]のケースでは、水素発電の比率が高い。一方、水素製造や e-methane 製造コストを高位に想定した、[6]電化社会ケースでは、水素発電の替わりにアンモニア発電が経済合理的な対策として採用されている。

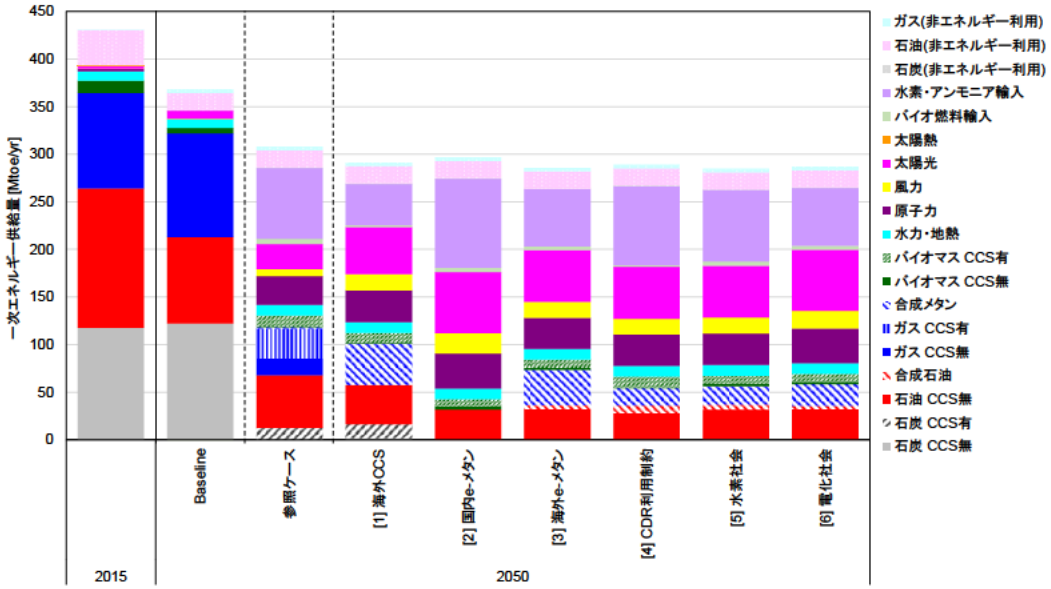


図 5.3.2-11 一次エネルギー供給（日本）

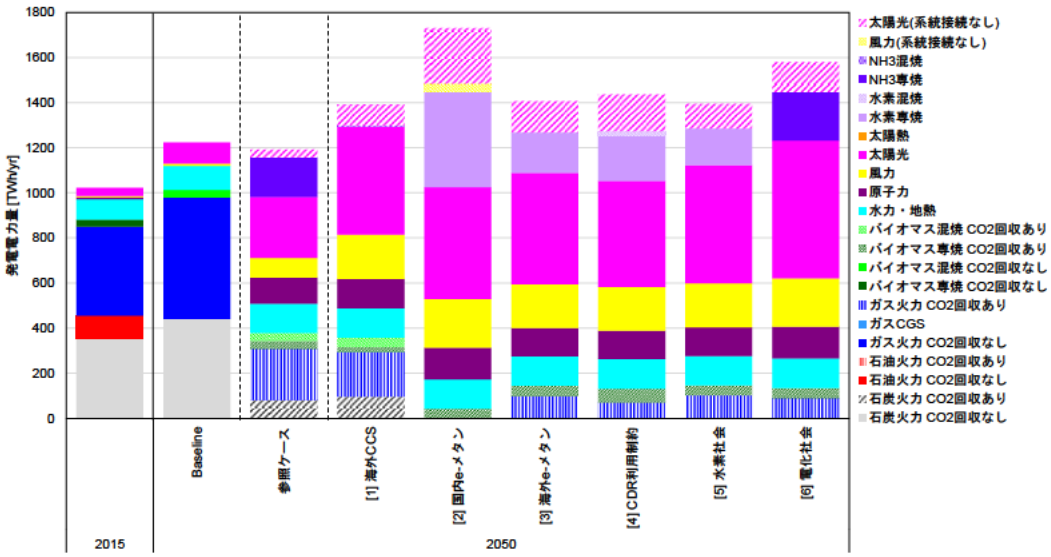


図 5.3.2-12 発電電力量（日本）

図 5.3.2-13、図 5.3.2-14 にそれぞれ世界と日本の水素バランスを、図 5.3.2-15、図 5.3.2-16 にそれぞれ世界と日本のアンモニアバランスを、図 5.3.2-17、図 5.3.2-18 にそれぞれ世界と日本の e-methane バランスを示す。

[4]CDR 利用制約ケースでは、CCS 無の化石燃料排出をオフセットする量が減少するため、CCS 無の化石燃料の利用を減らさなければならず、替わりに水素の生産、利用を増大させる結果となっている。また、国際海運の石油系燃料利用をオフセットの制約にもなるため、国際海運でアンモニア利用が見られる。

日本においては、水素はここで想定したいずれのケースにおいても、鉄鋼部門の水素直接還元製鉄に利用されている。

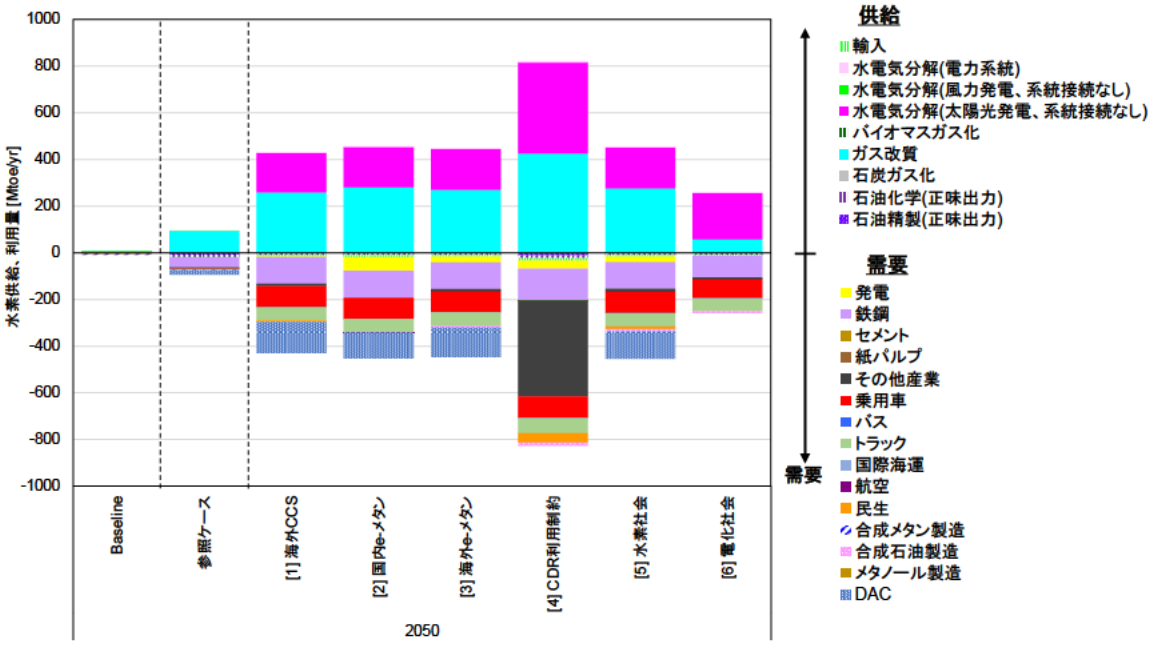


図 5.3.2-13 水素バランス（世界）

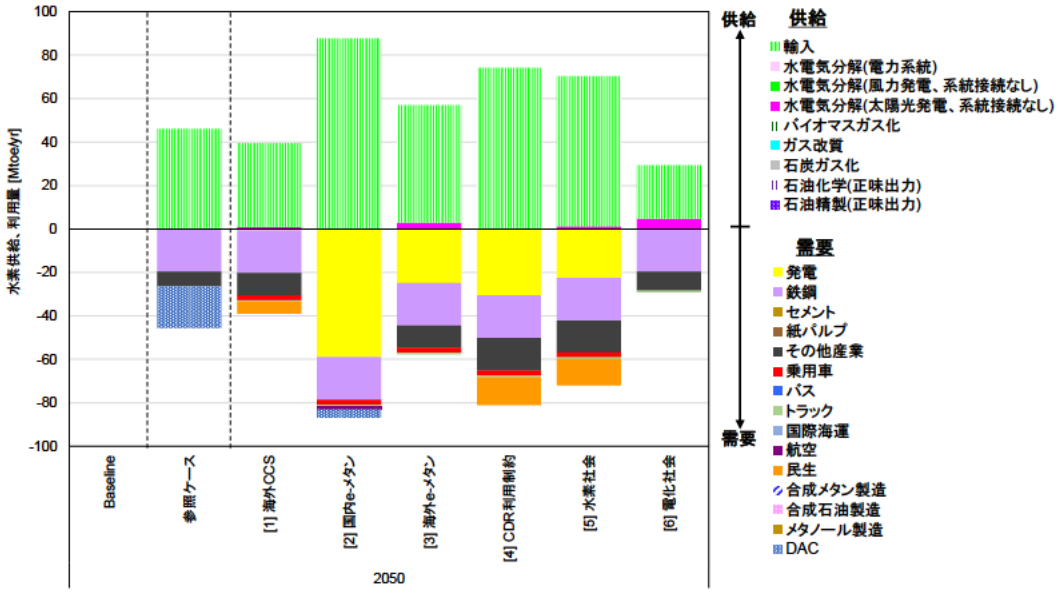


図 5.3.2-14 水素バランス（日本）

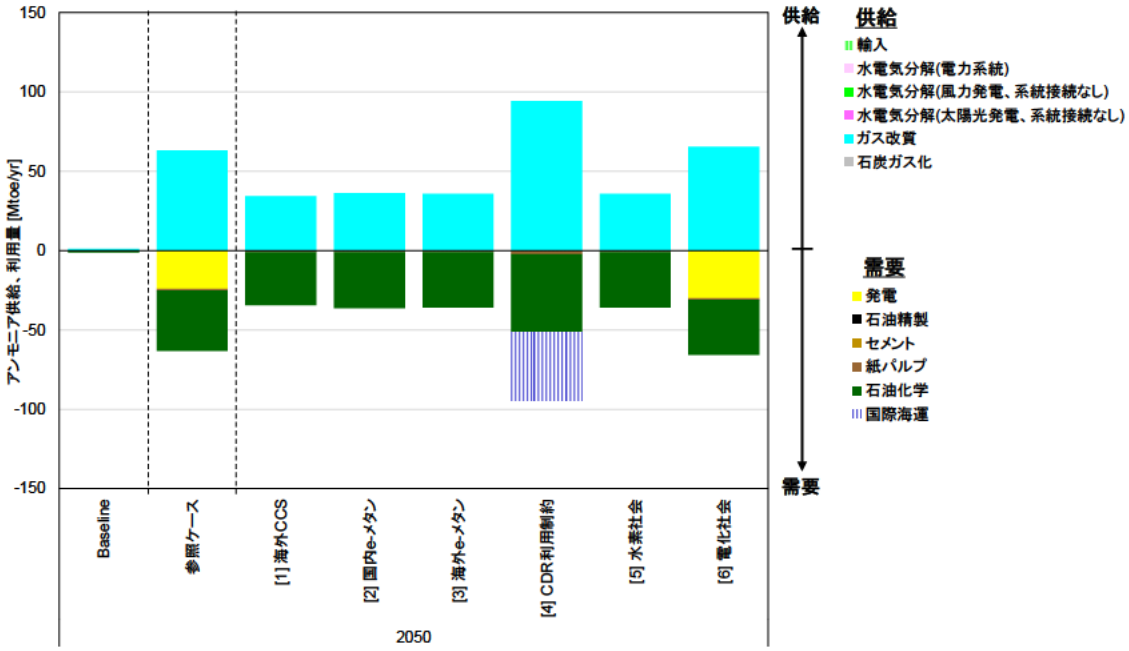


図　5.3.2-15　アンモニアバランス（世界）

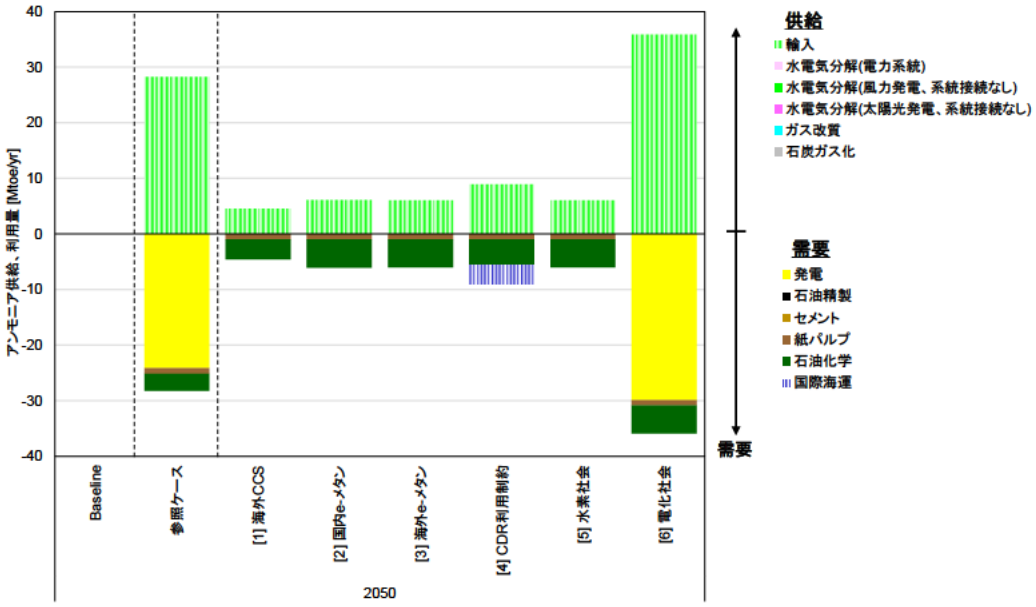


図　5.3.2-16　アンモニアバランス（日本）

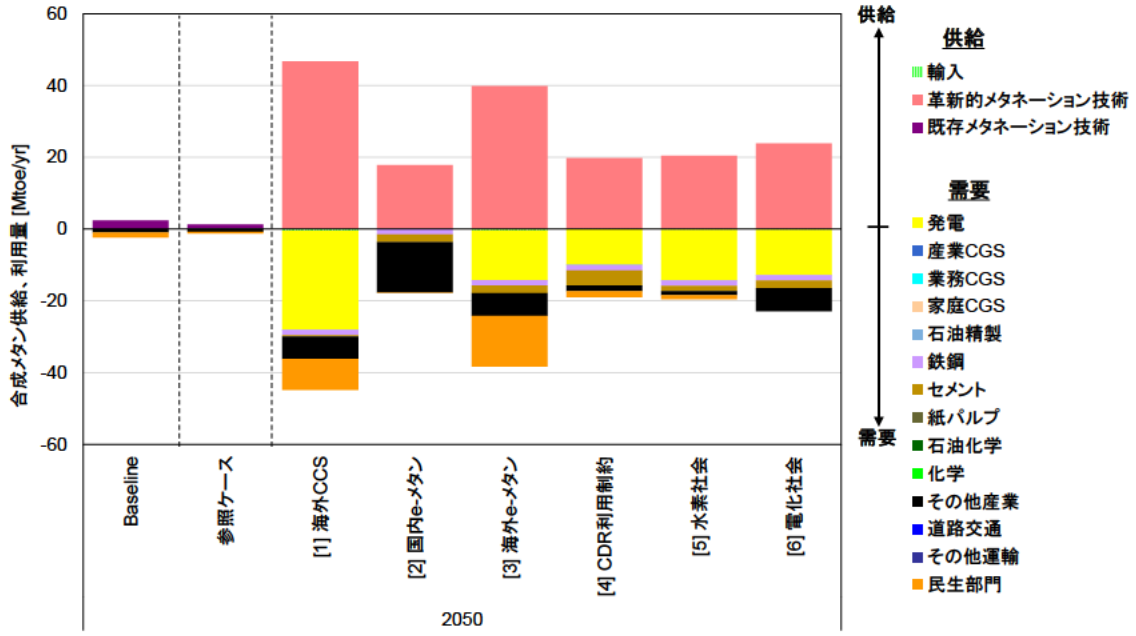


図 5.3.2-17 e-メタンバランス（世界）

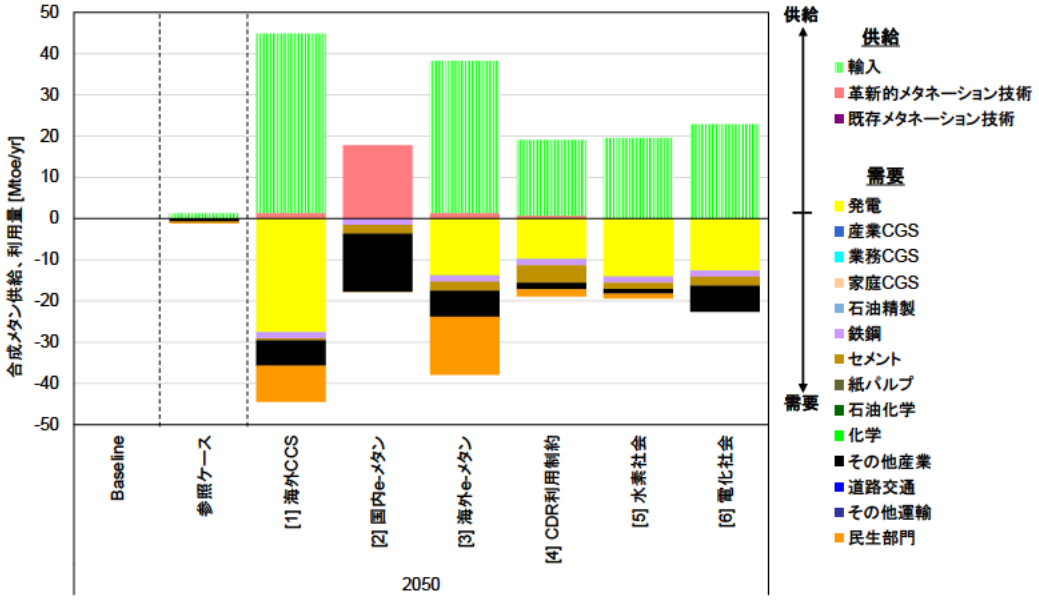


図 5.3.2-18 e-メタンバランス（日本）

図 5.3.2-19、図 5.3.2-20、図 5.3.2-21 にそれぞれ、日本の 2050 年の産業部門、民生部門、運輸部門の最終エネルギー消費量を示す。いずれの部門でも、2050 年 CN のためには電化率を上昇させることが経済合理的な対策と評価される。その上で、[2]国内 e-メタンケースでは、産業部門の e-methane 利用量は増加する一方、国内製造 e-methane のコストは海外 e-methane に比べて高くなるため、民生部門では電力に置き換わる結果となっている。また、運輸部門でも、e-fuels のコストが高いため、経済合理的に利用がされず、電化率が増し、また水素の直接利用が増える結果となっている。

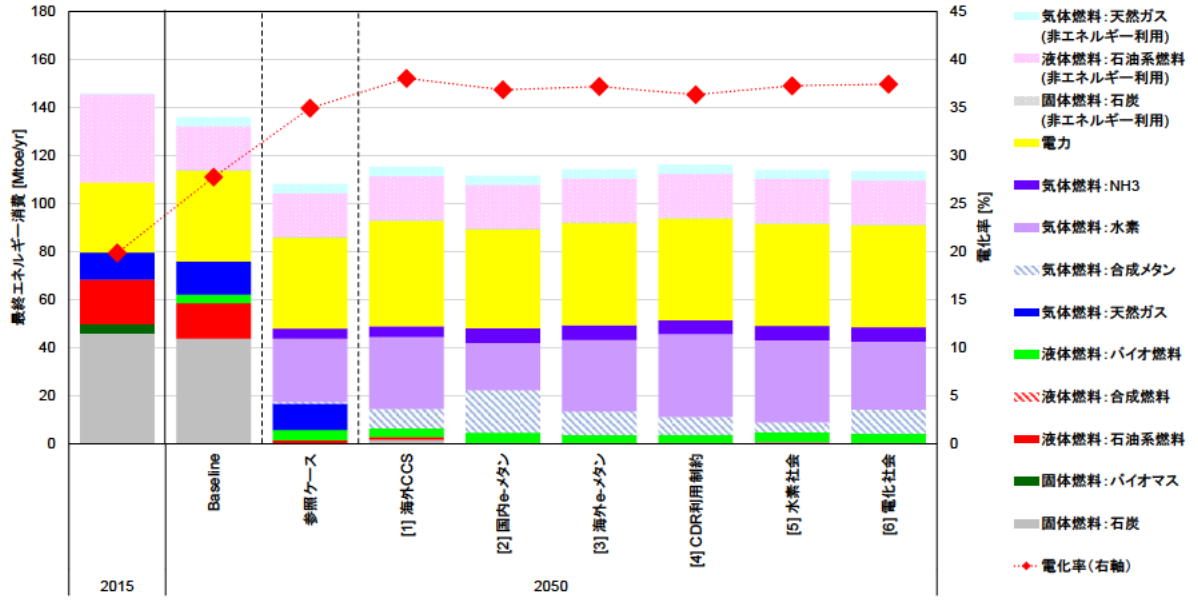


図 5.3.2-19 産業部門最終エネルギー消費量（日本）

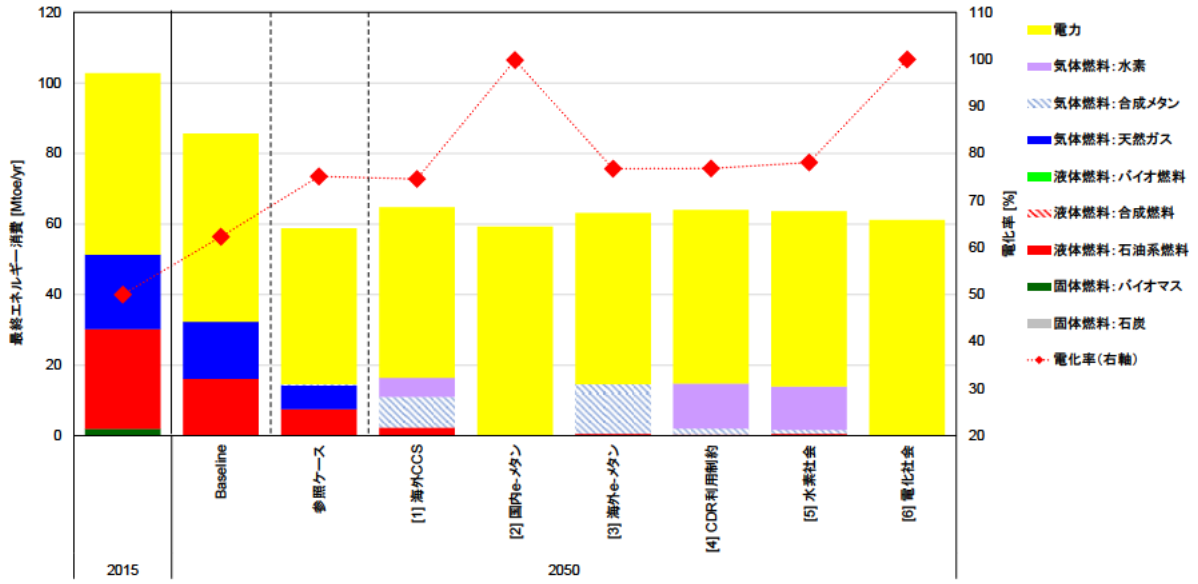


図 5.3.2-20 民生部門最終エネルギー消費量（日本）

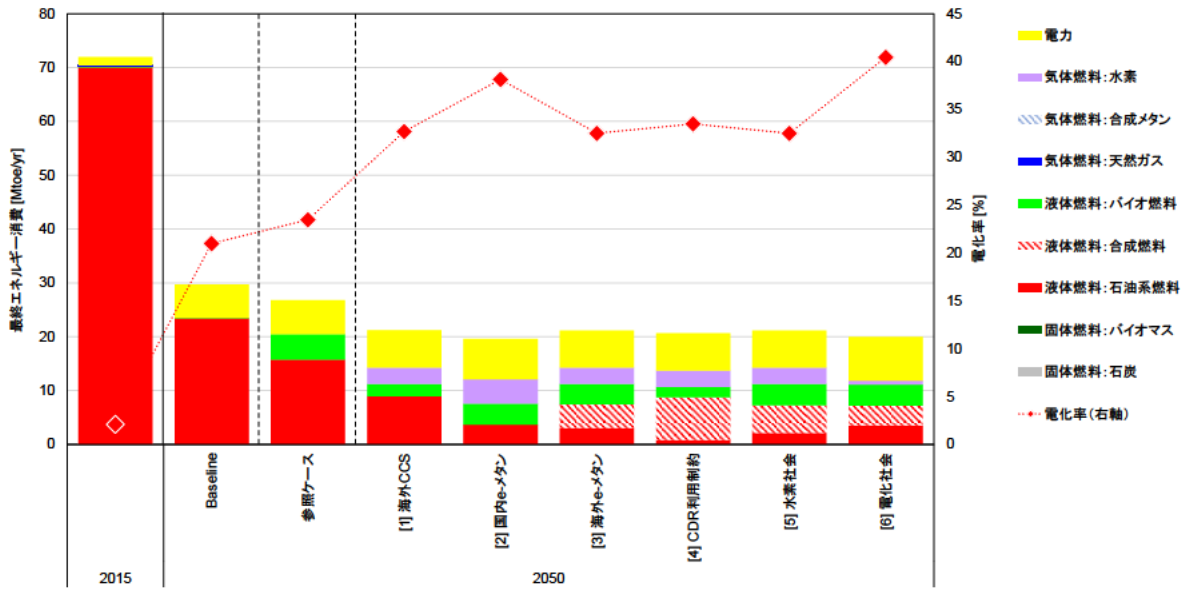


図 5.3.2-21 運輸部門最終エネルギー消費量（日本）

次に、表 5.3.2-3 に、各ケースの日本における 2050 年の CO_2 限界削減費用およびエネルギーシステムコストを示す。まず、「参照ケース」と再エネイノベケースの[1]海外 CCS ケースを比べると、限界削減費用が 570 から 386 \$/tCO_2 へと下がっているが、これは、将来の再エネのコスト想定を下げたことによる影響が大きい。[2]国内 e-メタンケースでは、1201 \$/tCO_2 と限界費用の上昇が大きい。[1]海外 CCS ケースに比べると、他のケースは、海外 CCS の利用ができないとの想定により、コストの上昇が見られる。

以上のように、様々な水素系エネルギーや、化石燃料＋CCS/CDR といった、CN 燃料があり、それぞれ長所、短所がある。将来の様々な想定により、その役割の度合いが異なってくるが、それでも CN の達成を目指すならば、これら様々な対策について「あらゆる選択肢」を有しておく必要がありそうである。当然ではあるが、選択肢を狭めれば、コストが増大する場合は多い。

表 5.3.2-3　CO_2限界削減費用、エネルギーシステムコスト（日本、2050 年）

		CO2限界削減費用 [$/tCO2]	エネルギーシステムコスト [billion US$/yr]
参照ケース		570	1016.3
再エネ イノベ	[1] 海外CCSケース	386	946.4
	[2] 国内eメタン	1201	980.8 (+34.5)
	[3] 海外e-メタン	514	963.2 (+16.8)
	[4] CDR利用制約	630	970.9 (+24.5)
	[5] 水素社会	518	963.1 (+16.7)
	[6] 電化社会	572	986.3 (+39.9)

※ 括弧内の赤字は、[1]CCS ケースからのエネルギーシステムコストの増分

(2) e-methane と e-fuels の経済性に関する感度解析

前項(1)では水素系エネルギー全体として、様々なシナリオを想定して、水素、アンモニア、e-methane/e-fuels、化石燃料＋CCS/CDR の比較を行ったが、本項では、e-methane/e-fuels により焦点を当てる。両者とも、水素だけではなく CO_2 も必要である。また、合成の技術は確立しているものの、既存技術ではコストが高いことが課題となっている。一方で、前項で議論したように、これらエネルギーコストの多くの部分は、グリーン水素のコストである。コスト高の課題は、グリーン水素系エネルギーすべてに共通の課題となる。その上で、CO_2 合成には追加のコストを要するものの、e-methane、e-fuels ともに、水素よりも輸送費用が安価となり、e-methane は既存ガスインフラや機器を活用できるメリットが、e-fuels は既存の石油インフラ、内燃機関自動車、ジェット燃料航空機等を活用できるメリットがある。とりわけ、e-fuels の場合は、現在の石油備蓄のようなエネルギー備蓄にも向いている。表 5.3.2-4 には、e-methane と e-fuels の特徴の比較を整理した。

表 5.3.2-4　e-methane と e-fuels の特徴の比較

	e-methane	e-fuels
技術特性	・既存技術として、サバティエ反応による合成は確立 ○選択性が良く、ほぼ CH_4 成分が生成できる。 ・革新的技術開発も進行中	・既存技術として、FT 合成は確立 ×現状では選択性が悪く、ガソリン、軽油、ジェット燃料成分を選択的に生成することは難しい状況。ただし、アップグレードすれば（追加コストをかければ）、ある程度、目的の成分を生成できる。 ○液体燃料として e-methane よりも貯蔵性に優れる。 ・革新的技術開発も進行中
エネルギー代替先	・現在の天然ガス用途をほぼ代替可能（既存の天然ガス供給・配給インフラ、機器を利用可能）	・現在の石油系用途をほぼ代替可能（既存の石油供給・配給インフラ、機器を利用可能）
コスト	○発熱量当たりのコストは、e-fuels よりも安価に製造可能 △代替相手が CO_2 原単位が小さい天然ガスであるため、代替による排出削減効果は、石油代替の e-fuels よりも小さく、結果、CO_2 排出削減費用は高くなる可能性有	×発熱量当たりのコストは、e-methane よりも高価になりやすい。 ○代替相手が石油であるため、代替による CO_2 削減効果は e-methane よりも大きく、結果、CO_2 排出削減費用は、e-methane よりも小さくなる可能性有
その他	△いずれも、電気、水素、アンモニアとの競合はあり得る。 ○いずれも、既存の石炭需要の新たな代替先となり得る（ただし CCS と競合も）	

まず、(2)①項では、CDR について相対的に楽観的な展望を持った場合（シナリオ A）と、再エネについて相対的に楽観的な展望を持った場合（シナリオ B）について、e-methane/e-fuels のコストと経済的なポテンシャルについて感度解析を実施した。そして、(2)②項では、国間の CO_2 限界削減費用の差異による感度解析を実施した。更に(2)③項では、e-fuels 生産のエネルギー効率に関する感度解析（エネルギー製品としての得率の想定を変化）を実施した。

e-methane、e-fuels については、表 5.3.2-5 のように、それぞれの合成時のエネルギー変換効率を設定した。メタンの合成方法として、DNE21＋内ではサバティエ反応と革新的メタネーション技術（SOEC 共電解メタネーション技術等）の 2 つをモデル化している。分析モデルにおいては、サバティエ反応は、別途製造された水素を供給し、合成に利用するが、表では水の電気分解の工程も含め、エネルギー変換効率を示している。一方、革新的メタネーション技術では電力と CO_2 を投入し、直接メタンを合成するようにモデル化しているため、当該プロセスのみのエネルギー変換効率を示している。e-fuels についても、サバティエ反応と同様に、水の電気分解の工程も含めエネルギー変換効率を示している。なお、e-fuels についても、SOEC 共電解のような革新的技術が利用される可能性はあるが、今回は考慮していない。③項で e-fuels のエネルギー得率の想定の違いによる感度解析でカバーしている。また、それぞれの合成で利用する CO_2 は様々なプロセスから供給されるため、CO_2 回収に必要とされるエネルギーは、表に記載のエネルギー変換効率には含んでいない。FT 合成による e-fuels では、様々

な成分が製造され、製造された燃料の全てがガソリンやジェット燃料など目的の燃料として利用出来る訳ではないため、得率を別途表 5.3.2-6 のように設定した。これら条件設定は、RITE が 2021 年 5 月に総合資源エネルギー調査会基本政策分科会に提示したシナリオ分析の「参考値のケース」に相当するものであり、具体的な想定は文献 5)に記載している。

表 5.3.2-5　e-methane・e-fuels に関するエネルギー変換効率の想定

	2020 年	2025 年	2030 年	2040 年	2050 年	2070 年	2100 年
e-methane							
サバティエ反応	52.7%	54.7%	56.8%	58.8%	60.9%	65.8%	69.9%
革新的メタネーション技術	64.0%	66.5%	69.0%	71.5%	74.0%	80.0%	85.0%
e-fuels	50.5%	52.5%	54.5%	56.4%	58.4%	63.0%	66.9%

表 5.3.2-6　e-fuels 製造後のエネルギーとして利用可能な得率の想定

2020 年	2025 年	2030 年	2040 年	2050 年	2070 年	2100 年
50.0%	53.5%	57.0%	64.0%	71.0%	85.0%	85.0%

① CDR と再エネのコスト･ポテンシャル展望による e-methane/e-fuels の経済性の違い

まず、CDR と再エネの展望の違いによる、e-methane/e-fuels の経済性への影響を分析した。CDR について相対的に楽観的な展望のシナリオ A では、CO_2 貯留についてその拡大の制約はあるものの相対的に制約は緩やかである。また、大気中 CO_2 直接回収（DAC）技術のコスト低減も順調に進むと想定している。更に、バイオエネルギーの利用についても土地利用の可能性からのポテンシャル想定は行っているものの、経済合理的な範囲でその想定したバイオマスポテンシャルは利用可能と想定している。このため、化石燃料＋CCS・CDR が相対的に、モデルの経済計算の解として大きく算定されやすいシナリオである。文献 6)の「ケース（III）」に相当するものであり、より詳しくは、当該文献、もしくはもう少し簡略な説明としては 5.3.1 節を参照されたい。

まず、CCS/CDR の想定が楽観的なシナリオ A と再エネ等の想定が楽観的なシナリオ B の 2 つのシナリオについて、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いて、e-methane、e-fuels の経済性について分析した。本①項では、炭素価格（図内では以下 CP と記載）は世界共通と仮定した上で、炭素価格の違いによる経済性の変化も併せて分析した。DNE21+は動学的な最適化を行うモデルであるため、炭素価格は年率 3%で上昇を想定した。

図 5.3.2-22 に e-methane および e-fuels の 2050 年の世界全体でのエネルギー供給量を示す。どちらのシナリオにおいても、炭素価格が上がるに従って、e-methane・e-fuels 共にエネルギー供給量が増えていく。しかし、シナリオ A においては、約 270$/t$CO_2$ 付近で CO_2 での CN が達成されており、その時点では e-methane・e-fuels 共にほとんど利用が見られない。これはシナリオ A では CDR である DACCS が、このコストレンジ以

下のコストで十分に利用可能なためである。CO_2での CN を超え、GHG での CN に近づくと、e-methane・e-fuels も多く利用される結果となるが、シナリオ A においては両技術は CO_2もしくは GHG での CN 達成の限界的な対策と評価され、大規模な利用は見られない。一方、シナリオ B においては、約 720$/t$CO_2$付近で CO_2での CN が達成され、CN 達成において e-methane・e-fuels が経済効率的な対策と評価される。シナリオ B では DACCS が十分に利用できず、その他手段で排出削減を進める必要がある。また、再生可能エネルギーのコスト低減をより大きく見込んだシナリオであり、そこから製造される水素を主として利用する e-methane・e-fuels のコストも低下が見込まれる。そのため、シナリオ A とは異なり、CN 達成よりも低い炭素価格の下で e-methane・e-fuels の経済性が成立することが示されている。なお、e-methane と e-fuels の比較では、両者同じような傾向ではあるが、e-fuels の方が若干、低い炭素価格で経済性が成立する傾向が見られる。これは、e-methane は CO_2原単位の小さい天然ガスの代替が主である一方、e-fuels は石油系燃料の代替となるため、代替による排出削減効果が大きいことによると考えられる。

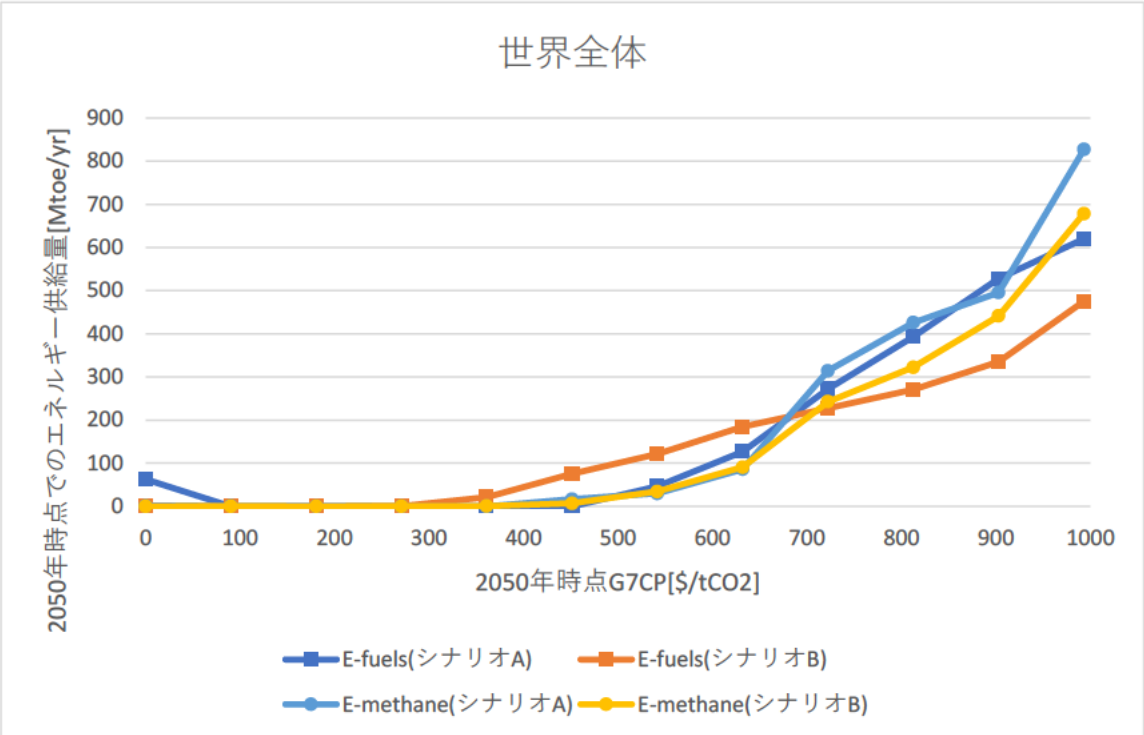


図 5.3.2-22 各シナリオにおける e-methane・e-fuels のエネルギー供給量の推移（2050 年,世界全体）

② 国間の排出削減強度・限界削減費用の差異による e-methane/e-fuels の経済性への影響に関する分析

次に、各シナリオにおいて G7 各国の炭素価格パラメータを振った際に、世界全体で最も CO_2 排出量が CN に近かったときの CO_2 の回収及び貯留・利用のバランスを図 5.3.2-23 に示す。このとき、その他国の炭素価格は G7 各国の炭素価格を基準として、半額(Ⅰ:その他国 CP 半額)、2/3(Ⅱ:その他国 CP2/3)、均等(Ⅲ:CP 均等)の 3 つの比率と

なるように設定した。また、最も CO_2 排出量が CN に近かったとき結果を示しているため、厳密に CO_2 排出量が 0 になった結果ではなく、さらに、各結果の炭素価格自体も G7 各国-その他国間の炭素価格比率毎に異なることには注意が必要である。

シナリオ A では DACCS が十分に利用可能なため、多くの CO_2 は DAC により回収され、地中貯留されていることが分かる。その次に、CO_2 回収元としてバイオマス火力（BECCS)、ガス火力或いは石炭火力と続く。炭素価格比率が均等に近づくにつれて、バイオマス火力から回収される CO_2 は増加し、DAC から回収される CO_2 は減少する。この挙動は各地域での炭素価格の変化を見ると、理解しやすい。まず、その他国視点では炭素価格が上昇するため、バイオマス火力発電を行う動機が高まり、DACCS だけでなく BECCS の導入量も増加し、CO_2 の地中貯留可能量は取り合いとなる。一方、G7 各国視点では炭素価格は下落するため、DACCS の導入動機も下がり、それまで CO_2 の輸出先となっていたその他国内での貯留可能量も圧迫されているため、DAC による CO_2 回収量は減少することとなる。実際に、DAC による CO_2 回収量の世界全体での内訳を見てみると、Ⅰ:その他国 CP 半額ケースでは半分以上が G7 各国で回収されていたのに対し、Ⅲ:CP 均等ケースでは半分以上がその他国で回収される結果となった。

一方、シナリオ B では DACCS が十分に利用できないため、シナリオ A に比べ、CO_2 回収量そのものが大幅に減少している。また、火力発電からの CO_2 回収はほぼバイオマス火力発電（BECCS）からとなっている。シナリオ B では、CO_2 貯留制約が厳しいため、少ない CO_2 貯留容量を BECCS と DACCS の CDR に優先的に割り当てるのが経済合理性が高い結果となっている。そして、その傾向は、G7 各国とその他国の CP の差異が大きい場合に、より顕著にみられる。G7 各国の大規模排出源からの CO_2 排出を回収・貯留するための貯留可能量が制約され、少し余裕のあるその他国で BECCS、DACCS をより多く行う必要性が示唆される。また、G7 各国での排出についてはシナリオ A では回収 CO_2 の大部分が地中貯留される結果であるが、シナリオ B では CCU もされるようになっている。この CCU 利用分の多くは e-methane と e-fuels の合成用である。

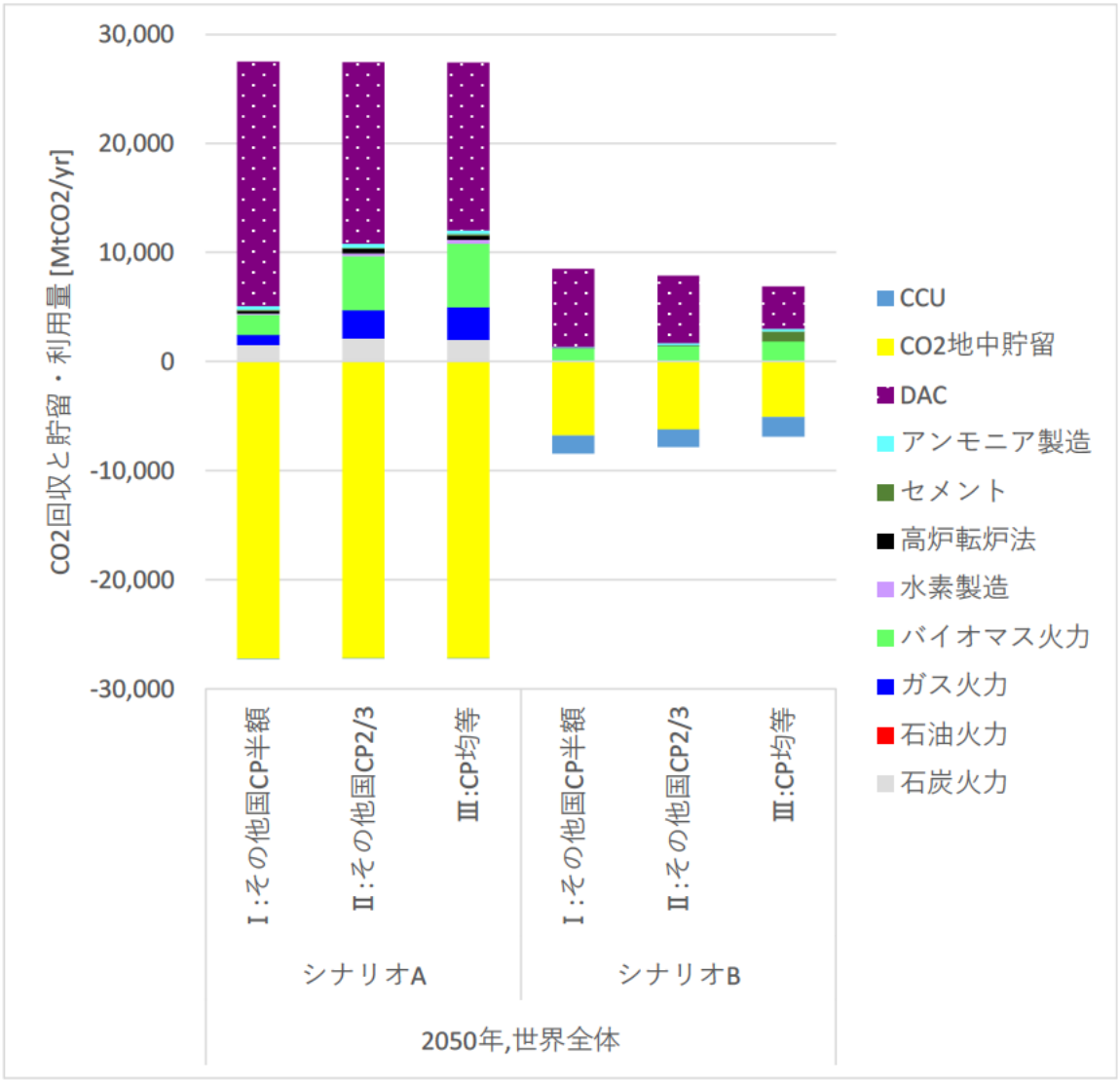


図 5.3.2-23 各シナリオにおける CO_2 の回収と貯留・利用量（2050 年,世界全体）

注）各ケースにおける選択データの炭素価格。シナリオ A ケース I G7：約 450$/$tCO_2$、その他国：約 230$/tCO_2、ケース II G7：約 360$/$tCO_2$、その他国：約 240$/tCO_2、ケース III G7：約 270$/$tCO_2$、その他国：約 270$/tCO_2。シナリオ B ケース I G7：約 990$/$tCO_2$、その他国：約 500$/tCO_2、ケース II G7：約 900$/$tCO_2$、その他国：約 600$/tCO_2、ケース III G7：約 720$/$tCO_2$、その他国：約 720$/tCO_2。

次に、e-methane、e-fuels の経済性が成立しやすいシナリオ B を基にして、G7 国とその他国に区別して、e-methane、e-fuels のエネルギー供給量を図 5.3.2-24 に示す。ここで示す結果も G7 国の炭素価格パラメータを振った際に、ケース I～III 別に、最も CO_2 排出量が CN に近かったときのものを採用している。具体的な各炭素価格は図注に記載している。炭素価格が G7 とその他国間で均等化するにつれて、G7 国での利用が少し減少し、その他国での利用が大幅に増えていくことが分かる。炭素価格が高い方が e-methane・e-fuels を利用する動機が強くなるため、炭素価格が上がったその他国で利用が増える。一方、G7 国の視点で見ると、その他国の炭素価格が上がり、CO_2 排出削減を進めたことで、G7 国の負担が減り、e-methane・e-fuels のエネルギー供給量を減ら

しても、CN が達成できるようになったと考えられる。実際に、炭素価格比率が半額から均等な負担に近づくにつれて、CN 達成に最も近い時の G7 国の炭素価格は約 990、900、720 $/tCO$_2$ と少しずつ下がっていることも確認出来る。また、各ケースの G7 各国とその他国の合計量と世界全体の量が一致しないが、これは国際航空用途に用いられた e-fuels（ジェット燃料代替）は G7 各国とその他国のいずれにも割り振られていないためである。

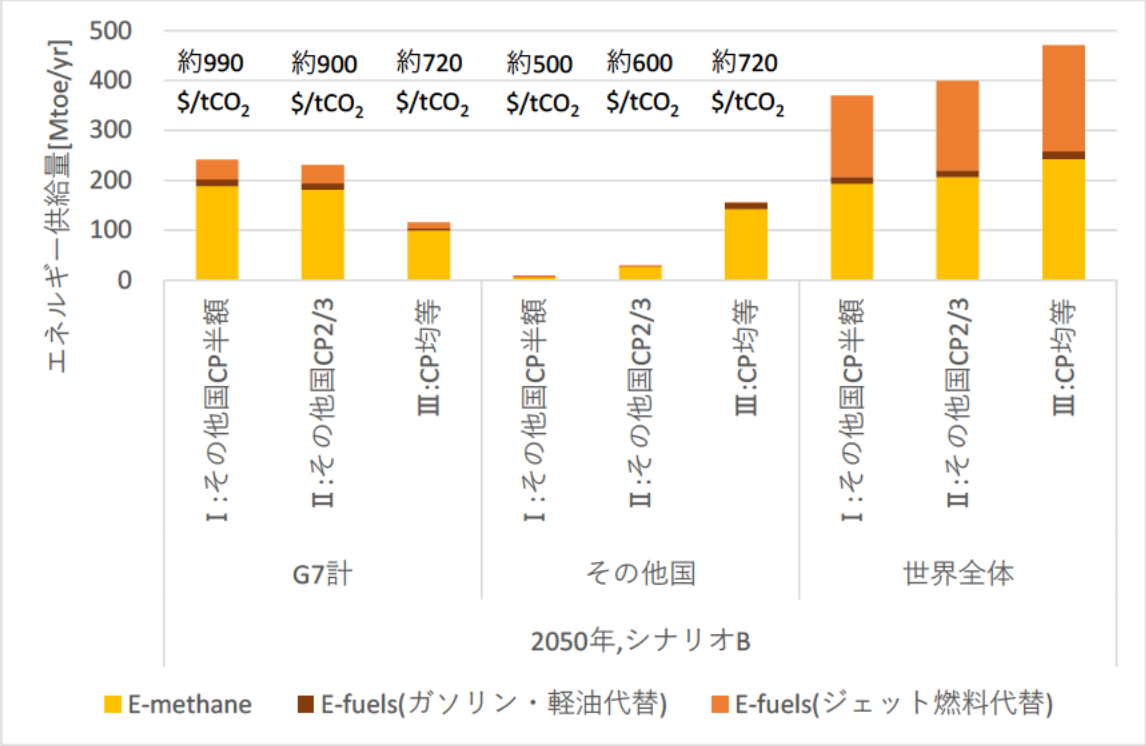


図 5.3.2-24 e-methane、e-fuels の G7 計とその他国でのエネルギー供給量内訳（2050 年）

注）各ケースにおける選択データの炭素価格。シナリオ B ケース Ⅰ G7：約 990$/tCO$_2$、その他国：約 500$/tCO$_2$、ケース Ⅱ G7：約 900$/tCO$_2$、その他国：約 600$/tCO$_2$、ケース Ⅲ G7：約 720$/tCO$_2$、その他国：約 720$/tCO$_2$。

次に、世界の均等な炭素価格を想定したケース III において、CO_2 の CN 時の G7 国の炭素価格約 720 $/tCO$_2$ を固定した上で、その他国の炭素価格をケース I、II のように変化させた場合を分析した結果を図 5.3.2-25 に示す。G7 国において同じ炭素価格であっても、その他国の炭素価格が安価な方が、e-methane および e-fuels 用の再エネの競合が起こりにくく、G7 の e-methane および e-fuels の供給量が増大する。e-methane よりも、e-fuels の方が増大幅が大きい傾向が見られる。なお、グラフでは記載していないが、水素についても同様の変化が見られるが、e-methane 同様に、e-fuels よりも変化は緩やかである。地域・国による水素、CO_2 の入手可能性の違いや、エネルギー利用用途需要などの違いが影響していると考えられる。

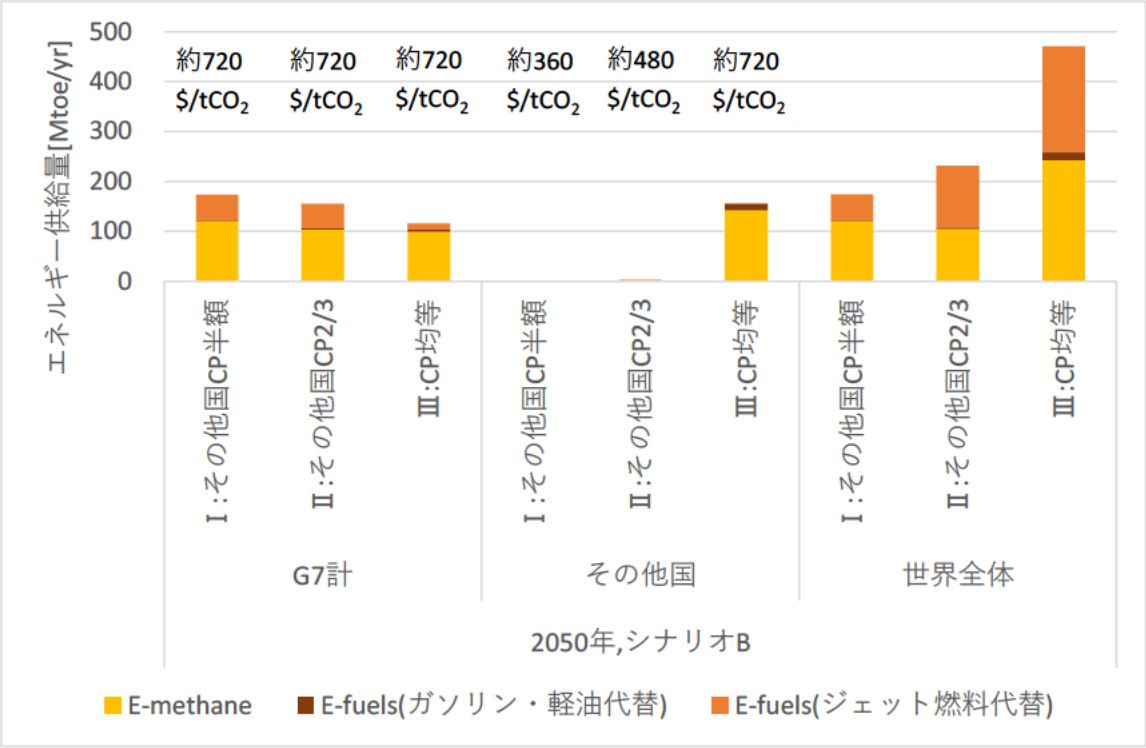


図 5.3.2-25 e-methane、e-fuels の G7 計とその他国でのエネルギー供給量内訳（2050 年）

注）各ケースにおける選択データの炭素価格。シナリオ B ケース Ⅰ G7：約 720$/$tCO_2$、その他国：約 360$/tCO_2、ケース Ⅱ G7：約 720$/$tCO_2$、その他国：約 480$/tCO_2、ケース Ⅲ G7：約 720$/$tCO_2$、その他国：約 720$/tCO_2。

③ e-fuels のエネルギー得率に関する感度解析

次に、e-fuels 生産のエネルギー得率に関する感度解析を行い、e-methane/e-fuels のエネルギー供給量がどのように変化するかを分析した。なお、ここでは、エネルギー転換効率（表 5.3.2-5）の感度は振らず、簡単のため得率（表 5.3.2-6）のみで代表して、複数のシナリオを想定して感度解析を行ったが、エネルギー変換効率とエネルギー得率を掛けたものが e-fuels 生産の全体のエネルギー効率と言えるので、エネルギー転換効率の不確実性も含んだ感度解析と理解されたい。他節や前項での得率想定を中位とし、得率 100%、得率高位、得率低位の 3 ケースを表 5.3.2-7 のように想定し、感度解析を行った。

まず、標準シナリオとしての得率中位ケースであるが、このとき、2070 年における e-fuels 生産のエネルギー効率（水の電気分解から e-fuels の利用まで）は 50%強と見込んでいる。これは IEA の Energy Technology Perspectives 2020 Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage CCUS in clean energy transition[7)]と整合的な水準である。また、同じく得率中位ケースでは、2020 年における e-fuels のエネルギー効率は 25%程度と想定しているが、これは NEDO 報告書[8)]の報告値と整合的な水準である。

その上で、得率高位のケースについては、標準シナリオである得率中位ケースのエネルギー効率 50%程度を 20 年前倒しし、2050 年に実現すると想定した。一方、得率低位ケースについては、2020 年の得率から進展しないと想定した。

また、得率 100%の想定では、別途、一旦 FT 合成法などによって生産された e-fuels をアップグレードする必要もあり得るが、ここでは追加費用は想定していない。一方、エネルギー以外の製品として有価な製品を生産できる場合もあると考えられ、それらを区分せず得率 100%と想定した。

本項での分析は、世界全体で炭素価格が均等化するとしたケース（2050 年の炭素価格 720 $/tCO$_2$）で分析を行った。

表 5.3.2-7　E-fuels のエネルギー得率に関する感度解析ケースの想定

	2020 年	2025 年	2030 年	2040 年	2050 年	2070 年	2100 年
得率 100%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
得率高位	50.0%	56.7%	63.3%	76.7%	90.0%	90.0%	90.0%
得率中位	**50.0%**	**53.5%**	**57.0%**	**64.0%**	**71.0%**	**85.0%**	**85.0%**
得率低位	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%

e-fuels のエネルギー得率想定の違いによる世界全体での e-fuels のエネルギー供給量の時系列の推移を図 5.3.2-26 に示す。再エネ価格の低下と、e-fuels の製造のエネルギー効率向上とそれに伴う製造コスト低減に合わせて、2040 年頃からの導入拡大が見られる。得率 100%と想定した場合には、2030 年頃からの導入が見られる。

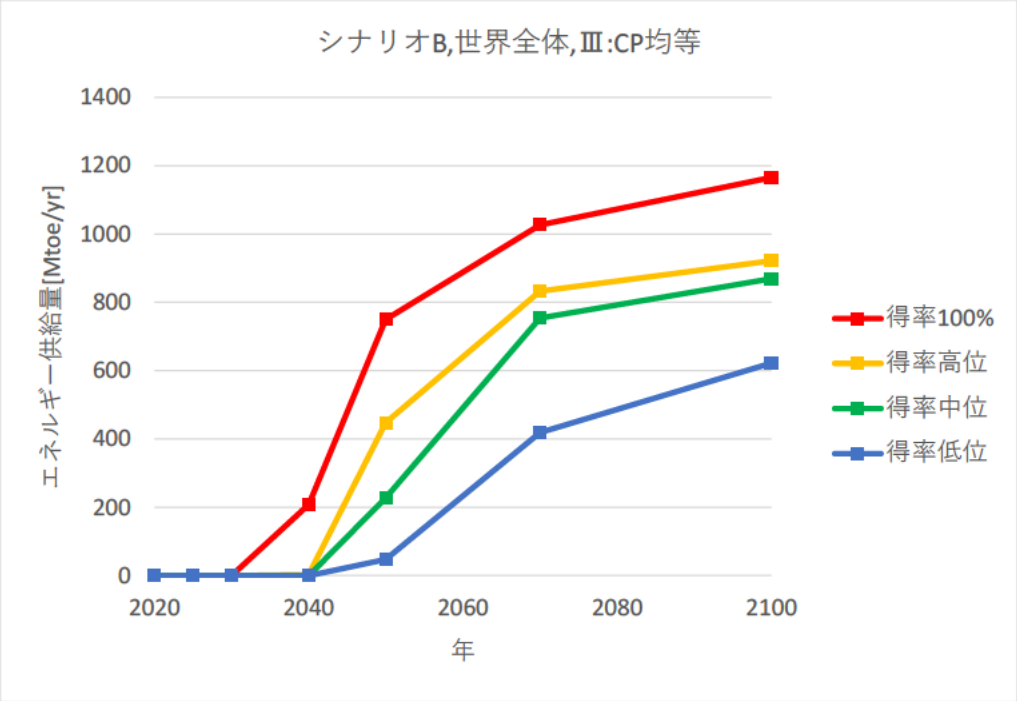


図 5.3.2-26 e-fuels の得率想定の違いによる世界全体での e-fuels のエネルギー供給量の推移

次に、e-fuels に加え、水素、アンモニア、e-methane、メタノールを加えた水素系の CN エネルギーの供給量を図 5.3.2-27 に示す。ここで、水素供給量からは e-fuels、e-methane、メタノールの製造に使用された分は差し引いて示している。e-fuels の得率が低位から高位になるにつれて、e-fuels の供給量が増大する一方、e-fuels 製造のために水素供給がなされるため、直接の水素供給量は減少している。そして、e-methane はほとんど変化が見られない。また、アンモニアについては、発電利用はされず、従来通りの窒素肥料用として利用されている。さらに、メタノールは化学製品用途としてのみモデル化しているため、燃料用途などには利用されない。

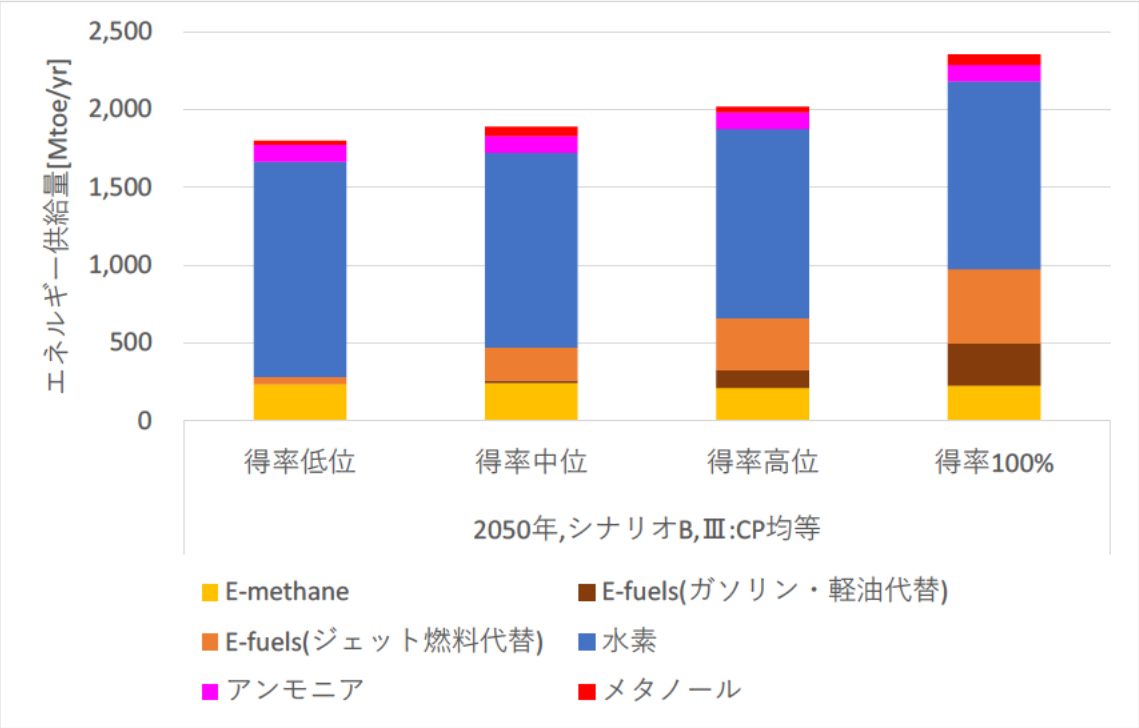


図 5.3.2-27　e-fuels の得率の変化に伴う CN 燃料のエネルギー供給量（2050 年、世界全体）

次に、e-fuels の得率を変化させたときの最終エネルギー消費量を図 5.3.2-28 に示す。ここで、固体燃料と電力については、e-fuels の得率の変化による変化がほとんど無いため、除いて記載している。また、第 5.2 節のモデルとは異なり、産業部門でのアンモニア利用は想定していないため、最終エネルギー消費にアンモニアが含まれないことには注意が必要である。e-fuels の得率が低位から高位になるにつれて、当然ながら e-fuels 自身の経済性は高まって消費量が大きくなっている。それに応じて、石油系燃料（+CDR でのオフセット）が減少している。一方、水素が e-fuels 生産に利用されることもあり、e-fuels 以外の水素系エネルギーである水素が代わりに減少している。ガス体エネルギーである水素が減少することで、天然ガス（+CDR でオフセット）が増加する傾向が見られる

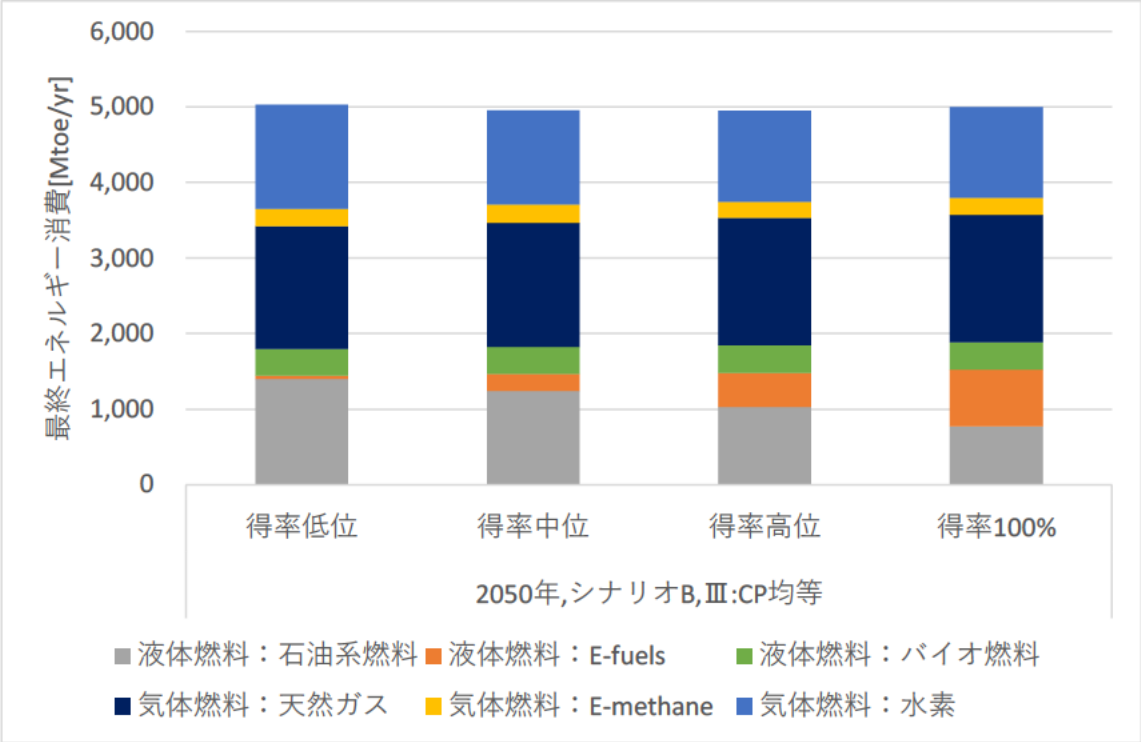


図 5.3.2-28 エネルギー効率の変化に伴う燃料の最終エネルギー消費の変化量（2050年,世界全体）

(3) おわりに

本節では、水素系エネルギー（水素、アンモニア、e-methane、e-fuels）について、様々なシナリオを想定して感度解析を行うことによって、他の対策との関係性、また、水素系エネルギー間の関係性について評価を行った。第 5.3.1 節で見たように、CCS/CDR の利用可能性が大きい場合、CN 実現においてはこれら対策への大きな依存は費用対効果の高い対策として評価される。特に、CO_2貯留ポテンシャルが大きい国では、化石燃料＋CCS、CDR は主要な対策となる。一方、再エネや蓄電池のコスト低減が一層加速する一方で、CCS/CDR の利用可能性が小さい場合には、再エネ＋電化促進は、費用対効果の高い対策として評価される。特に、再エネが安価で豊富に存在している国では、その傾向は強い。

一方で、熱需要は大きく存在しており、電化のみでは高コストだったり、また対応が難しい用途もある。そして、特に日本のように、再エネコストが海外よりも相対的に高く、また、CO_2貯留ポテンシャルが小さい国では、海外再エネ・CCS 利用のため、水素系エネルギーの輸入が重要になる。ただし、水素系エネルギーのコストは安価ではない。水素系エネルギーとして、水素、アンモニア、e-methane、e-fuels 等があり、それらには長所、短所が存在する。近い時点では CCS 由来のブルー水素系、将来的にはグリーン水素系も競合可能になる可能性はある。しかし、いずれの水素系エネルギーにおいても、水素製造のコストが主たるコストであると見られ、いずれかが突出して優位とは現時点では判断しにくい状況である。

それでも、水素と e-methane／e-fuels の比較では、水素のパイプライン輸送が可能な地域は別として、日本のように液化水素等での輸送が必要なところでは、 e-methane

／e-fuels でも水素の費用が大部分を占めるという状況では、既存インフラ・機器が活用可能な e-methane／e-fuels の優位性は認められる。

e-methane／e-fuels は、最終的な CN 段階では、バイオマス由来か DAC の CO_2 の利用が求められるが、2050 年段階では２℃、1.5℃目標下であっても、相応の CO_2 排出は残っていると見られ、少なくとも、モデル分析結果からは、化石燃料燃焼 CO_2 の供給が制約になることはあまりない。しかし、これは海外からの e-methane／e-fuels の輸入が前提であり、それがなく、国内だけでの e-methane／e-fuels 製造で、かつ、CN の達成となると、国内の再エネコストの高さに加えて、合成する CO_2 はバイオマス由来か DAC かが必要になるので、全体のコスト増につながる。

日本など G7 国での水素系エネルギーの利用は、G7 以外国の炭素価格が小さいとき、再エネ等の競合が起こりにくく、G7 国では、経済的なポテンシャルがより大きくなる。

特に、海外からの e-methane／e-fuels の輸入においては、e-methane／e-fuels の CO_2 帰属の問題は重要であり、バイオマスの現状の扱いからしても、利用時の排出をゼロ扱いすることが妥当と考えられるが、国際的な議論を急ぐ必要がある。

参考文献（第 5.3.2 節に関するもの）

1) 資源エネルギー庁；
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/edu/future_ene/2022/muroran.html（アクセス日 2023.2.17）
2) IPCC, Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change,
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf（アクセス日 2023.3.8）
3) 大槻、柴田、第 9 回メタネーション推進官民協議会 （2022）
4) IEA; Energy Technology Perspectives 2020
5) 資源エネルギー庁；
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/043/043_005.pdf（アクセス日 2022.12.5）
6) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構；
https://www.rite.or.jp/news/events/pdf/akimoto-ppt-kansaisympo2021.pdf（アクセス日 2022.12.8）
7) IEA; Energy Technology Perspectives 2020 Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage CCUS in clean energy transition
8) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構；CO_2 からの液体燃料製造技術に関する開発シーズ発掘のための調査、(2020)、p.411

5.4 需要側技術の動向と社会変化

5.4.1 日本における家庭の財、サービス需要：生活行動の長期的な変化の検討

(1) はじめに

従来のエネルギーシステム評価では、エネルギー需要は 1 人当たり GDP 等の経済指標や気象条件等と関連付けて想定されてきたが、デジタル化の進展、シェアリングエコノミーの普及、環境意識の高まり等により、消費行動を含む生活行動が変化し、需要構造が大きく変化する可能性が高まっており、エネルギー需要を規定する生活行動に遡って需要の発生メカニズムを検討することが重要になっている。

生活行動の変化の影響についてはリバウンド効果を含めて包括的にとらえる必要があることから、令和 2 年度に生活に関する財・サービス需要の分析フレームワークの検討を行ったうえで、令和 3 年度に生活行動・消費行動に関する実態調査（アンケート）を行い、そのデータを用いて、在宅勤務とネットショッピングの影響を測定する生活行動モデルの定量化を試みた。分析の結果、一定の示唆が得られたが、調査項目が多岐にわたったため、十分なサンプルサイズを確保することができず、この手法をさらに拡張していくには課題が残った。

COVID-19 を契機に加速した在宅勤務等のテレアクティビティ[1]の普及は世界的に進行中であり、それらの実態や生活行動の変容を通じた需要への影響に関する研究報告が相次いでいる。近年の研究では、従来行われてきたアンケートによる過去の行動や態度・意識の把握に加えて、人の移動を追跡、記録し、集計されたデータ（人流データ）の活用が拡がっている[2]。

他方、気候変動緩和の研究分野では、ライフスタイルの変革等の行動変容による CO_2 削減ポテンシャルや、低エネルギー需要（LED）シナリオが注目されており、最近では国家レベルの LED シナリオも報告されている[3]。このような成果が各国の政策に反映されるには一層の研究の蓄積が必要であり、生活行動に関する詳細かつ広範なデータに対するニーズは、今後ますます高まると考えられる。

そこで本研究では、在宅勤務等のテレアクティビティの普及に伴う生活行動の変容や、その需要への影響に関する既往研究の調査を行い、特に研究の方法論と使用されるデータの特性に着目して知見の整理を行う。また、生活行動に基づく需要発生メカニズムのモデル化への示唆を得ることを目的に、これらの方法論やデータの活用可能性について検討する。

---

[1] ICT を活用して遠隔で行われる仕事、買い物、教育、社交などの活動の総称（Mouratidis et al.(2021)[1)]）。

[2] アンケート調査には回答の文脈依存性があること、また、大きな変化に対して過剰反応する傾向があることなどにより、データに偏りが生じやすいため、客観的事実として人の移動データの重要性が指摘されている（André de Palma et al.(2022)[2)]）。

[3] Grubler et al.(2018)[3)]によるグローバルな LED シナリオを踏まえ、英国版の LED シナリオが報告されている（Barret et al.(2021)[4)]）。

(2) テレアクティビティの普及に伴う生活行動の変容に関する既往研究の調査

本項では、テレアクティビティの普及に伴うエネルギーや CO_2 排出量、及び移動・消費需要等に与える影響に関する情報を収集・整理する。情報の整理にあたっては、執筆者によるオリジナル研究（11 件）と先行研究をレビューした文献（4 件）の 2 区分で、共通フォーマット（研究内容、研究手法、利用するデータ、研究結果の 4 部構成）を用いて各文献の情報を体系的に整理した。その結果は以下のようにまとめられる。

① 研究結果に関するまとめ

a. 在宅勤務

在宅勤務について、オリジナル研究 10 件とレビュー論文 3 件（André de Palma et al.(2022)[2]、Kostas Mouratidis et al.(2021)[1]、L. Stermieri et al.(2023)[5]）を調査した。オリジナル研究の調査対象地域は北米（米国・カナダ）、日本、欧州に限定される。

i) 在宅勤務実施率の影響要因と今後の持続性

オリジナル研究によると、在宅勤務実施率に影響を与える要因として、社会・人口統計学的要因では、年齢、性別、所得、学歴、通勤時間、業種・職種、居住地の都市レベルなどが挙げられている。在宅勤務実施率を押し上げる直接的な要因としては、通勤時間が長いこと、在宅勤務に適した業種・職種であること、在宅勤務に適応しやすいこと（若年齢等）が考えられる。Xiaoqiang Kong et al.(2022)[6]では、若年齢を負の要因と評価しているが、この研究ではエッセンシャルワーカーを含むのに対して、Agnieszka Stefaniec et al.(2022)[7]によるアイルランドの研究ではホワイトカラー労働者に限定されていることなども影響していると考えられる。社会・人口統計学的要因以外では、パンデミック前に在宅勤務を経験することなどによって、在宅勤務の生産性評価が高い人や、パンデミックの深刻度が高い地域に居住する人の在宅勤務実施率が高い（表 5.4.1-1）。

パンデミック後の在宅勤務の継続意向をみると、いずれの研究も概ね 5 割以上がハイブリッド型またはフルタイムの在宅勤務を望んでいることを示しており、パンデミック後の働き方として、定着していく可能性がある（表 5.4.1-2）。

表 5.4.1-1 在宅勤務実施率の影響要因

文献	地域・調査時期	社会・人口統計学的要因	態度・意識等の心理的要因、COVID-19 対策	在宅勤務経験
(1)Motahare Mohammadi et al. (2022)[8]	米国・2020 年～2021 年	・ミレニアル世代（Y 世代）(+) ・通勤時間が長い(+) ・高所得(+) ・高学歴(+)	・在宅勤務の生産性評価が高い(+) ✧ 自宅環境 ✧ 憂鬱感・悲哀感 ✧ 育児・介護 ・COVID-19 リスク認知が高い(+)	・パンデミック前に在宅勤務を経験(+)
(2)Xiaoqiang Kong et al. (2022)[6]	米国ワシントン州・2020 年	・通勤距離が短い(−) ・修士号以上(−) ・若年齢(−) ・エッセンシャルワーク(−)	・対面でなくても仕事が捗る(+) ・在宅勤務中の自己統制に難(−) ・オンライン会議に難(−) ・同僚との交流を重視(−) ・家族が在宅勤務を支持(+) ・COVID-19 のステイホーム・マスク政策に反対(−)	・パンデミック前の在宅勤務頻度が高い(+)
(3)Agnieszka Stefaniec et al. (2022)[7]（注）	アイルランド・2021 年	・通勤時間が長い(+) ・若年齢(+) ・通勤に鉄道を利用(+)	・在宅勤務の生産性評価が高い(+) ・在宅勤務中の生活の質の向上を実感(+)	
(4)岡田・出口(2021)[9]	日本・2020 年	・在宅勤務に適した業種、職種(+) ・通勤時間が長い(+) ・高所得(+)		

(5)国土交通省(2022)[10]	日本・2021年	・男性(+) ・女性の場合、若年齢(+) ・都市規模(+) ・在宅勤務に適した業種、職種(+) ・企業規模が大きい(+) ・通勤時間が長い(+) ・通勤に鉄道・バスを利用 (+)		
(6)Rezwana Rafiq et al. (2022)[11]	米国・2020年	・以下の特徴を持つ郡で実施率が高い(+) ✧ 高所得 ✧ 通勤時間が長い ✧ 人口密度が高い ✧ インターネット接続率が高い	・以下の特徴を持つ郡で実施率が高い(+) ✧ COVID-19の深刻度が高い ✧ COVID-19の封じ込め・閉鎖政策の対応レベルが高い	・パンデミック前の在宅勤務者が多い(+)

（注）Agnieszka Stefaniec et al. (2022)[7]はパンデミック後の実施意向に対する影響要因である。

表 5.4.1-2　パンデミック後の在宅勤務の実施意向

文献	地域・調査時期	パンデミック後の在宅勤務の実施意向
(1)Motahare Mohammadi et al. (2022)[8]	米国・2020 年～2021 年	・パンデミック時の新規在宅勤務実施者は、在宅勤務を頻繁に行う意向が弱い。
(2)Xiaoqiang Kong et al. (2022)[6]	米国ワシントン州・2020 年	・ピュージェット湾地域(シアトル等)の労働者の意向(n=874) ✧ 毎日 11% ✧ 週 3-4 日 14% ✧ 週 1-2 日 32% ✧ なし 43%
(3)Agnieszka Stefaniec et al. (2022)[7]	アイルランド・2021 年	・ダブリン都市圏(n=586), 非ダブリン都市圏(n=310)のホワイトカラー労働者の意向 ✧ 常に在宅 12.8%, 15.8% ✧ たいていは在宅 34.3%, 24.5% ✧ 同じ程度 17.6%, 16.8% ✧ たいていはオフィス 16.0%, 15.5% ✧ 常にオフィス 10.6%, 12.9% ✧ 在宅勤務を実施できない 8.7%, 14.5%
(4) 岡田・出口 (2021)[9]	日本・2020 年	・2020 年 7 月時点でテレワークを行った就業者の過半数は継続を希望
(5) 国土交通省 (2022)[10]	日本・2021 年	・雇用型テレワーカーの 84%が継続意向あり(n=9,728) ✧ 理由 1「通勤時間の有効活用」（43%） ✧ 理由 2「通勤の負担軽減（感染症対策以外）」（30%） ・希望する実施頻度(n=7,022) ✧ 週 6-7 日 6.0% ✧ 週 5 日 24.2% ✧ 週 4 日 11.0% ✧ 週 3 日 19.6% ✧ 週 2 日 17.3% ✧ 週 1 日 12.5% ✧ 週 1 日未満 9.5%
(6) Rezwana Rafiq et al. (2022)[11]	米国・2020 年	・先行研究を参照し、在宅勤務の慣行が続くことを示唆する知見を紹介している。
(8) Mohammadjavad Javadinasr et al. (2022)[12]	米国・2020 年～2021 年	・パンデミック前（実績）とパンデミック後(n=2,973) ・週 1 回超 16%, 34% ・週 1 回以下 21%, 14% ・無し 63%, 52%

ii) 在宅勤務が移動需要・エネルギー需要に及ぼす影響

在宅勤務が移動需要に及ぼす影響について、北米でのオリジナル研究によると、パンデミック中の特殊条件下ではあるものの移動距離やトリップ数が減少したことが確認されている。ただし、Rezwana Rafiq et al. (2022)[11)]の分析は、大都市圏と非大都市圏で逆の傾向を示しており、傾向は一様ではない。また、パンデミック後も通勤手段としての自家用車や交通機関の利用は減少することが見込まれている。ただし、通勤に限定しなければ、自家用車の利用はやや増加すると考えられる。他方、航空利用は商用・私用のいずれも減少する見込みである。アクティブモード（徒歩・自転車）のトリップはパンデミック中にやや増加したが、店舗等の近隣施設へのアクセス性に依存する（表 5.4.1-3）。

表 5.4.1-3　在宅勤務が移動需要に及ぼす影響

文献	地域・調査時期	指標	影響
(6)Rezwana Rafiq et al. (2022)[11]	米国・2020 年	移動距離 Person-miles traveled	・パンデミック前に比べ約 14%減少 ・以下の特徴を持つ郡で減少(−) ✧ COVID-19 の深刻度が高い ✧ 在宅勤務実施率が高い ✧ 高所得 ✧ 大都市圏 ✧ パンデミック前の在宅勤務率・インターネット接続率が高い ・在宅勤務実施率の影響は都市規模によって異なる。大都市圏では在宅勤務実施率が高いほど、移動距離の中央値が小さいが、非大都市圏では逆の傾向がみられる。
(7)Kanglin Chen and Ruth Steiner (2022)[13]	米国・2020 年～2021 年	在宅者数、距離帯別トリップ数	・2020, 2021 年のパンデミック前比変化率 ✧ 在宅者数 +34%, +15% ✧ トリップ数（全体） −32%, −7% ✧ 同、片道 1 マイル未満 −28%, +9% ✧ 同、片道 1～25 マイル −30%超, −10%超 ✧ 同、片道 100～250 マイル +28%, +36% ✧ 同、片道 500 マイル以上 −56%, −51%
(8)Mohammadjavad Javadinasr et al. (2022)[12]	米国・2020 年～2021 年	通勤手段	・パンデミック前・中（2 回の調査）・後 ✧ 自家用車 72%→40%→46%→66% ✧ 交通機関 11%→4%→5%→8%
		交通モードの利用（通勤以外を含む）	・パンデミック後（対パンデミック前） ✧ 自家用車; 減少 12%,同程度 71%,増加 17% ✧ 交通機関; 減少 13%,同程度 76%,増加 10% ✧ 商用航空; 減少 41%,同程度 51%,増加 8% ✧ 私用航空; 減少 24%,同程度 59%,増加 17%
(9)Rodrigo Victoriano-Habit et al. (2023)[14]	カナダ・2021 年	仕事以外の実用目的のアクティブモードトリップ数	・パンデミック前（2019 年）・中（2021 年） ✧ 5 トリップ以上 8%→7% ✧ 3～4 トリップ 14%→16% ✧ 1～2 トリップ 23%→27% ✧ なし 54%→51% ・地域アクセス性（ウォークスコア）の高い居住地では在宅勤務が増加するとトリップ数が増加するのに対し、地域アクセス性が低い居住地では逆の傾向がみられる。

在宅勤務がエネルギー需要に及ぼす影響については、オリジナル研究ではほとんど知見を得ることができなかった。Jan C.T. Bieser et al. (2022)[15]は、在宅勤務により通勤時間が減少した場合に、他の生活行動の時間が増加することに着目し、家庭でのエネルギー需要と移動のエネルギー需要を通勤手段別に比較している。自家用車で通勤する場合はエネルギー需要は減少するが、公共交通機関利用の場合は代替行動に依存する。なお、この研究ではオランダが評価されているが、データは約 30 ヶ国の生活時間調査結果で構成されるデータベースであり、他国についても同様の評価が可能と考えられる（表 5.4.1-4）。

表 5.4.1-4　在宅勤務がエネルギー需要に及ぼす影響

文献	地域・調査時期	指標	影響
(10)Jan C. T. Bieser et al. (2022)[15]	オランダ・2005 年	エネルギー消費原単位（時間あたりエネルギー需要）	・通勤手段によってエネルギー需要への影響は異なる。 ✧ 自家用車：すべての代替活動のエネルギー消費原単位が下回る（減少要因） ✧ 公共交通機関：一部の代替活動のエネルギー消費原単位が下回る（減少要因・増加要因の混合） ✧ アクティブモード（徒歩、自転車）：すべての代替活動のエネルギー消費原単位が上回る（増加要因）

中長期的な影響として、居住パターンの変化もエネルギー需要への影響に関連している。アイルランドの研究（Agnieszka Stefaniec et al. (2022)[7]）では、在宅勤務を前提とした自宅の転居を検討する可能性について、ダブリン都市圏に居住者や若年齢層、通勤時間が極めて長い（120 分以上）労働者にその傾向が強いことを示唆している。レビュー論文の André de Palma et al.(2022)[2]によると、米国での研究として、パンデミックにより在宅勤務が職住近接のニーズを低下させたことなどから、人口密度の高い地域の住宅需要が減少する影響に言及されている。自動車依存度の高い地域に移住した場合、移動需要やエネルギー需要を増大させる可能性がある。

在宅勤務が移動需要に及ぼす影響について、Kostas Mouratidis et al.(2021)[1]は先行研究をもとに、通勤の移動距離は減少するが、仕事以外の追加的な移動を誘発する可能性（補完効果）があると指摘している。しかし、代替効果（在宅勤務で総移動需要が減少）を主張する研究もあり、コンセンサスには達していない。研究では在宅勤務実施前後の比較よりも、在宅勤務者・非在宅勤務者の比較が多く、他の要因の影響を切り分けきれていないなどの方法論上の課題も指摘されている。

L. Stermieri et al.(2023)[5]は、デジタル化が誘発する行動変化がエネルギーに及ぼす影響を定量化するアプローチを系統的にレビューしている。この中で、在宅勤務につい

ては、ICT 利用による直接的影響、通勤の減少や在宅時間の増加がもたらす間接的影響、リバウンド（時間リバウンド、誘導リバウンド）、技術・社会への系統的影響（移住、産業・組織構造の変化等）に分類し、在宅勤務が及ぼす移動等の需要及びエネルギー需要への影響を包括的にとらえる枠組みを示している。

以上をまとめると、以下の通りである。

- COVID-19 パンデミックは在宅勤務を急速に普及させ、在宅勤務に適した業種・職種に属する通勤時間の長い労働者を中心に、少なくとも職場勤務とのハイブリッド型で定着すると考えられる。
- 在宅勤務の移動需要に及ぼす影響に関する北米を対象とした研究によれば、在宅勤務は平均的には移動距離やトリップ数を削減するが、非大都市圏では逆の傾向が見られることもある。
- 在宅勤務の移動需要に及ぼす影響については、レビュー論文では補完効果（増加）と代替効果（減少）の両方が示されており、コンセンサスには達していない。
- パンデミックにより、アクティブモード（徒歩・自転車）によるトリップが増加する傾向も見られたが、近隣施設のアクセス性に依存する。
- 在宅勤務がエネルギー需要に及ぼす影響は、通勤手段に大きく依存する。
- 在宅勤務の普及は居住パターンを変える可能性もあり、空間利用や移動需要及びエネルギー需要に及ぼす影響をマクロ的に捉える必要がある。

b. オンラインショッピング

オンラインショッピングについては、オリジナル研究 2 件（Mohammadjavad Javadinasr et al.(2022)[12]、Alireza Adibfar et al.(2022)[16]）、レビュー論文 3 件（André de Palma et al.(2022)[2]、Kostas Mouratidis et al.(2021)[1]、Huyen T. K. Le et al.(2022)[17]）を調査した。

Mohammadjavad Javadinasr et al.(2022) [12]によると、米国ではパンデミック前に食料品のオンラインショッピングを月 1 回以上利用していた人の割合は 10%であり、パンデミック中に 19%に上昇した。パンデミック後の利用予想は 17%となっており、ある程度定着することが見込まれる（表 5.4.1-5）。食料品のオンラインショッピングを行う傾向が強いのは若年層、自家用車を持たない人、高所得者層である。

パンデミックがオンラインショッピングに与えた影響については、Alireza Adibfar et al.(2022) [16]で詳述されているが、研究対象は米国・フロリダ州に限定される。食料品のオンラインショッピングについては、パンデミックで若干増加し、パンデミック後にもある程度増加した状態が維持されるが、ほとんどの人は店舗での購入を好むと予想されており、前述の研究と整合的である。一方、食料品以外の生活必需品についてはパンデミックで増加したオンラインショッピングは食料品よりは継続されると考えられている。また、パンデミック以前からオンラインショッピングのシェアが高かった他の品目（書籍・音楽・ゲーム、電子機器・PC、衣類品）については、パンデミックで増加したシェアがより維持されやすいと考えられている。なお、本論文での調査

で利用されているのは NHTS データ[18]だが、参考までに、各国で実施されている全国を対象とした交通行動実態に関する公的調査には文献 19)～22)がある。

André de Palma et al.(2022)[2]によれば、米国以外にカナダや韓国においても、パンデミックによるオンラインショッピングの急増が確認されている。オンラインショッピングのインフラがある国では、同様の傾向があったと推察される。また、Kostas Mouratidis et al.(2021)[1]では、オンラインショッピングが移動行動・建築環境に及ぼす影響について先行研究をもとに考察されている。移動行動については、オンラインショッピングは店舗での買い物を完全に代替するものではないこと、追加的な買い物とそのための移動とリンクしていること（補完効果）、また、他方で家庭外でのレジャーを代替する可能性があること（買い物行動を超えた代替・補完関係）を指摘している。

Huyen T. K. Le et al.(2022)[17]では、オンラインショッピングが移動需要に及ぼす影響について系統的な文献レビューが行われた。調査対象の 42 件の文献のうち最多の 36 件で検討された移動回数（トリップ頻度）への影響については、代替効果（移動需要の減少）を示す研究と補完効果（移動需要の増加）を示す研究の数が拮抗している。混合効果を示す研究も多く、細分化した評価の必要性を指摘している。

これらの知見をふまえると、買い物行動に限定すれば、オンラインショッピングの増加はエネルギー需要を増加させる可能性があるが、レジャー行動との代替関係を考慮すれば、その影響は相殺される可能性もある。いずれにせよ先行研究はコンセンサスに達していない。今後、買い物行動は必需的性質（家事）と余暇的性質（レジャー）を併せ持つことから、これらを区分して検討することが求められる。

表 5.4.1-5　オンラインショッピングが移動需要に及ぼす影響

文献	地域・調査時期	指標	影響
(8) Mohammadjavad Javadinasr et al. (2022)[12]	米国・2020 年～2021 年	食料品のオンラインショッピング	・パンデミック前・中（2 回の調査）・後 ✧ 週 1 回超 3%→7%→6%→4% ✧ 月 1 回～週 1 回 7%→12%→13%→13% ✧ 月 1 回未満 90%→81%→82%→83%

以上をまとめると、以下の通りである。

- COVID-19 パンデミックはオンラインショッピングの利用を加速し、その影響は食料品にも及んでおり、品目によって程度の差はあるが、パンデミック後も継続すると見込まれる。
- オンラインショッピングが店舗での買い物を代替すること（代替効果）を示す研究と、店舗での買い物に追加的に行われること（補完効果）を示す研究の双方が見られ、コンセンサスに達していない。
- オンラインショッピングを含む買い物行動がレジャーを代替すると指摘する研究もあり、買い物行動を超えた生活行動全体で評価する必要がある。
- 買い物行動の必需的性質と余暇的性質を区分した研究の蓄積が求められる。

② データに関するまとめ

既往研究調査のオリジナル研究は、データの観点では大きく 3 パターンに分類される。1 つ目はオリジナル調査によるもの、2 つ目は公開されている調査データを分析するもの、3 つ目は統計やオルタナティブデータ（携帯端末位置情報等）に基づく推計データを分析するものである（表 5.4.1-6）。

表 5.4.1-6 オリジナル研究の利用データ

No.	文献	タイプ	利用している外部データ
1	Motahare Mohammadi et al. (2022) [8]	1	
2	Xiaoqiang Kong et al. (2022) [6]	2	・COVID-19 Disruption on Travel Patterns data（米国ワシントン大学の研究チーム）
3	Agnieszka Stefaniec et al. (2022)[7]	1	
4	岡田潤、出口敦 (2021) [9]	1	
5	国土交通省（2022 年）[10]	1	
6	Rezwana Rafiq et al. (2022)[11]	3	・メリーランド交通研究所データベース ・Google Community Mobility Reports ・オックスフォード COVID-19 政府対応トラッカー ・米国連邦政府の統計調査等
7	Kanglin Chen and Ruth Steiner (2022)[13]	3	・メリーランド交通研究所データベース
8	Mohammadjavad Javadinasr et al. (2022)[12]	2	・COVID Future Panel Survey（アリゾナ州立大学、イリノイ大学シカゴ校の共同研究チーム）
9	Rodrigo Victoriano-Habit et al. (2023)[14]	1,3	・ウォークスコア（Walkscore.com）
10	Jan C.T. Bieser et al. (2022) [15]	3	・Multinational Time Use Study（ロンドン大学生活時間研究センター（Centre for Time Use Research)）
11	Alireza Adibfar et al. (2022) [16]	1,3	・National Household Travel Survey（米国連邦道路局）

（注）利用している外部データについては文献 23)～29)を参照。

André de Palma et al.(2022)[2)]は、COVID-19 パンデミックが移動とライフスタイルに及ぼす影響に関する文献レビューを総括して、3 種類のデータがあることを見出し、以下のように特徴を整理している。

- 1 つ目は、調査対象者に対して、COVID-19 以前と COVID-19 中のある期間に起こったことを思い出しながら回答してもらうもの。限界は、これらの知見が非常に文脈依存的であり、したがって、異なる文脈での政策立案への示唆が限定的であることである。
- 2 つ目は、調査対象者に自分の態度や選択肢を述べるよう求めるもの。一般的な限界に加え、このようなデータには偏りがある。なぜなら、回答者は大きな変化を伴う新しい状況の始まりに過剰反応する性質があるからである。
- 3 つ目は、IoT を介してモビリティを具体的に追跡・登録し、集計しているもの。これらは、COVID-19 の動的な効果を調査するための基礎的な真実として、不可欠なものとなり得る。

オリジナル研究の中では、3 つ目のデータとして、メリーランド交通研究所データベース、Google Community Mobility Reports が該当する。ウォークスコアもアルゴリズムに基づいて生成される徒歩圏のアクセス性に関する指標であり、このようなデータに属すると考えられる。これらとは性質が異なるが、ロンドン大学が提供する多国の生活時間調査データもグローバルな課題を検討する際には価値が高い。

在宅勤務やオンラインショッピングなどのテレアクティビティによる需要及びエネルギー需要への影響は包括的に捉える必要があることから、オルタナティブデータの充実と伝統的な統計データを結び付けたデータベースの価値が益々高まると考えられる。他方で、意識や行動の変遷を追跡するパネル調査は、バイアスに留意する必要はあるが、構造変化の背景や要因を把握するうえで引き続き重要である。

(3) 生活行動に基づく需要発生メカニズムのモデル化への既往研究の活用可能性の検討

① 概要

本項では、生活行動に基づく需要発生メカニズムのモデル化への示唆を得ることを目的に、前章で調査した既往研究の方法論やデータの活用可能性について検討する。

在宅勤務などのテレアクティビティが普及されると通勤時間を短縮することができる一方で、可処分時間が増え、ワーク・ライフ・バランスが取りやすくなることもあり、特に私事などの通勤以外のための移動需要が増加する可能性がある。特に、平日に比べ休日は仕事などの拘束がなく、家族や友人との時間を過ごすことが多いため、外出する機会も増え、私事のための移動需要が増加する傾向がある等、平日と休日によっても私事による移動需要は異なると考えられる。

国土交通省が公表している「令和 3 年度全国都市交通特性調査結果（速報値）[30)]」をみると、在宅勤務者と通勤者（在宅なし若しくは在宅併用）を比較すると、平日においては、三大都市圏・地方都市圏とも、在宅勤務者は通勤目的トリップがない分、私事目的トリップ原単位が僅かに大きい。これに対して、休日になると、在宅勤務者

の私事目的トリップ原単位は通勤者の 2 倍以上であり、また通勤者は平・休日による私事目的トリップ原単位に大きな違いが見られないのに対し、在宅勤務者においては、休日の私事目的トリップ原単位が平日の約 1.7 倍となり、平・休日別の私事のための移動需要に差があることが示されている（図 5.4.1-1)。これには以下のような理由が考えられる。

- 在宅勤務を実施することにより、平日から仕事とプライベートのバランスが取れるようになり、休日には多くの私事を楽しむことができる。
- 在宅勤務が増えることで、平日から外出する機会が少ないこともあり、休日は外出する機会を増やし、より余暇を楽しみたくなる。

このような要因から、在宅勤務が増えることで、特に休日に私事のための移動需要が増加する可能性があると考えられる。

国土交通省が実施している「全国都市交通特性調査」は、移動需要の変化を把握するための基礎資料として重要な情報であり、またこのような調査データを元に地域に適切な交通システムの整備や改善策を考案することも重要である。

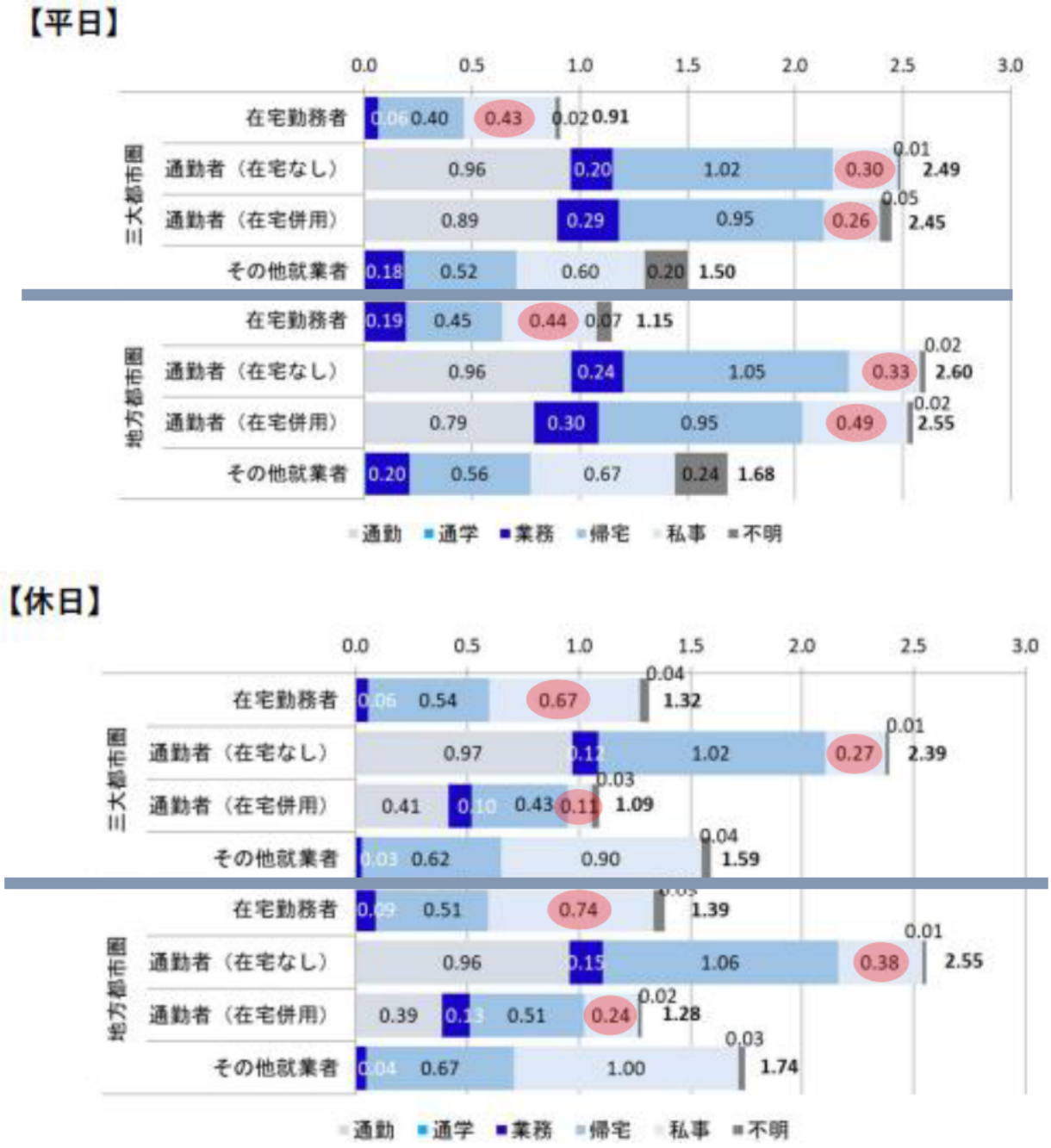


図 5.4.1-1 都市圏別の就業者（在宅勤務有無別）の移動目的別トリップ原単位

（注）「令和 3 年度全国都市交通特性調査（国土交通省）[30]」の集計結果より抜粋

一方で、在宅勤務の実施率には、個人の基本属性だけでなく、個人が感じるテレワークのメリット・デメリット、および柔軟な働き方への許容程度や組織文化、技術的な支援整備状況等の要因も重要な影響を与えると思われる。

そこで、本章では、前述の「新型コロナ感染症の影響下における生活行動調査（国土交通省）」における個票データを用いて、個人の基本属性以外の要因が在宅勤務実施状況に与える影響、および在宅勤務が移動需要を減少させるといった因果関係が存在するかどうかを探るための分析を行う。

② 共分散構造分析を用いた定量的分析

a. モデルに用いるデータ

本項では、国土交通省が実施した「新型コロナ感染症の影響下における生活行動調査（調査概要は下記と文献 9)を参考されたい)」の個票データ[4]を用いて、在宅勤務と移動需要の関係をモデル化し、因果関係や要因間の影響度を推定する。

- 調査対象都市
  - 東京都市圏、および全国都市交通特性調査の対象地域から都市類型や特定警戒都道府県の有無の観点から、対象都市を抽出
  - 特定警戒都道府県（約 9,600 件）：札幌市、東京都市圏（茨城南部、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県の市区町村）、金沢市、岐阜市、名古屋市、大阪市、豊中市、福岡市
  - 上記以外（特定警戒都道府県以外、約 3,300 件）：盛岡市、仙台市、静岡市、四日市市、奈良市、広島市、松山市

- 調査時期、件数、調査項目

表 5.4.1-7 調査時期、件数、調査項目

調査時期		回答件数	調査項目
第一回	令和 2 年 8 月	毎回、約 13,000 件	・以下 5 時点の 1 日の行動時間（15 分単位） ①新型コロナウイルス感染症流行前の平日 ②緊急事態宣言中(2020 年 4/16～5/13)の平日 ③2020 年 7 月 30 日（木） ④2021 年 12 月の平日 1 日の行動時間 ⑤2022 年 3 月 1 日 ・活動頻度（オンラインサービスの利用状況、場所別の勤務日、利用しているサテライトオフィス等の場所・交通手段・所要時間、外出頻度・最も頻繁に訪れた場所） ・意識調査（外出自粛、居住環境、移動、交通手段選択、インターネット利用環境等々）
第二回	令和 4 年 3 月		

- 分析に用いるデータ
  - 基本属性：性別、年齢、お住いと職場の住所、住宅の建て方・部屋数・所有形態、世帯収入、就業形態、世帯構成、業種・職種、通勤時間、通勤手段、自動車の保有状況、ほか
  - テレワークのメリット・デメリット、今後の継続実施意向

[4] 国土交通省は個人情報の匿名化処理をした個票データ（令和 2 年 8 月調査と令和 4 年 3 月調査の計 2 回分）を提供している。

- リモートワークに対する会社の制度、会社規模
- 目的別（買い物、余暇等）の外出頻度
- 場所別（職場、自宅、シェアオフィス等）の勤務日数
- 移動手段別の移動時間、行動分類別の生活時間（15 分単位）
- 目的別（買い物、音楽・動画、デリバリー、会議、学習、診療、ほか）のオンラインサービスの利用状況

また 2 回とも調査に参加した回答件数は約 3200 件あるが、その中から、「週あたりの在宅勤務日数がコロナ前では 0 日だったが、直近の調査時期（2021 年 12 月と 2022 年 3 月）においては平均で 1 日以上ある就業者」を「新規在宅勤務実施者」と定義付けて、「新規在宅勤務実施者」の個票データを用いて分析を行う。なお、分析にあたっては、以下の回答者を集計対象から除外している。

- 場所別（職場、自宅、シェアオフィス等）勤務日数の回答がない場合
- 移動手段別（電車、バス、自動車、自転車、徒歩）の移動時間の回答がない場合
- 学生・主婦（夫）・無職者、および自営業の回答者
- 通勤手段が重複する場合（「鉄道利用」および「自家用車利用（自分で利用）」の回答）
- 調査対象日（5 時点）における移動手段別の日平均移動時間が 6 時間を超える場合

b. 分析手法

ここでは、共分散構造分析を用いて、在宅勤務が増加することで移動需要がどの程度影響するかと推定する。まず、就業者がリモートワークを実施することで感じたメリット、デメリット、リモートでの活動に関する今後の継続実施意向に関する観測変数（5 段階の順序尺度）を用いて因子分析を行い、共通因子（潜在因子）を導入する。

次に、就業者の業種や勤務先のリモートワークに対する制度有無といった名義尺度、および会社規模、目的別外出頻度、オンラインサービスの利用状況のような量的変数（比例尺度、間隔尺度）を投入し、各々の観測変数と在宅勤務実施状況、並びに在宅勤務実施状況と交通手段別の利用頻度との因果関係を同定する。

- モデルの設定： SPSS Amos 29 を用いてパス図（モデル）を構築し、仮説を反映した初期モデルに基づき、適合性を確認しながらモデルを改良する。
- パス係数の推定：観測変数が別の観測変数の原因になる、潜在変数が別の潜在変数の原因になる、観測変数が潜在変数の原因になる、といった関係（パス係数）を推定する。
- 因子分析の設定
  - 観測変数の選基準定：因子負荷量が 0.4 以上という基準値を因子のみモデルの観測変数として投入
  - 因子数の決定基準：固有値やスクリープロットを確認しながら、累積寄与率が約 40%あたりまでの因子を採用

- 因子抽出方法：最尤法
- 回転方法：プロマックス（斜交回転）

- モデルの適合度の判断
  - モデルの評価を行う際には、「モデル全体の評価」と「モデルの部分評価」の 2 つの段階を踏まえる。
  - モデル全体の評価では、適合度指標（GFI、AGFI、RMSEA、AIC）を見て判断し、部分評価ではパス係数の数値が±1 にどれぐらい近いか、またその係数が有意であるかどうかを確認するために、t 検定を用いる。

c. 分析結果

i) 在宅勤務状況別の移動需要

コロナ以降に在宅勤務を新たに実施した人（新規在宅勤務実施者）の平日の移動手段別の移動時間、移動距離、二酸化炭素排出量がどの程度違うかを確認する。

移動手段別の移動時間の個票データと表 5.4.1-8 に示す時速や二酸化炭素排出原単位の想定値を用いて、移動手段別の移動距離や二酸化炭素排出量を求める。算定結果を図 5.4.1-2～図 5.4.1-4 に示す。

- 移動時間：新規在宅勤務実施者は、コロナ前に比べ、鉄道による移動時間が半減している。自動車による移動時間はコロナ前後であまり変わっていない。
- 移動距離：新規在宅勤務実施者は、コロナ前に比べ、移動距離が約 3 割減少している。
- 二酸化炭素排出量：コロナ以降に在宅勤務を新たに実施した人の移動に伴う二酸化炭素排出量は、コロナ前よりやや増加しているが、これは、コロナ禍での乗車率の低下により、鉄道・バスの二酸化炭素排出原単位が大幅に悪化（コロナ前に比べコロナ後の鉄道の原単位は 1.6 倍、バスは 1.9 倍）したためである。

表 5.4.1-8 移動手段別の時速および二酸化炭素排出原単位の想定値

項目	時期	鉄道	バス	自動車	タクシー	バイク	自転車	徒歩
時速 (km/h)	共通	30	20	20	20	20	15	15
二酸化炭素排出原単位 ($g\text{-}CO_2$/人・km)	コロナ前 (2019 年度)	17	57	130	130	56	0	0
	コロナ禍 (2020 年度)	28	109	131	131	56	0	0

（出典）文献 31)

（注）CO_2 排出原単位：コロナ前は 2019 年度値、2020 年以降は 2020 年度値を採用

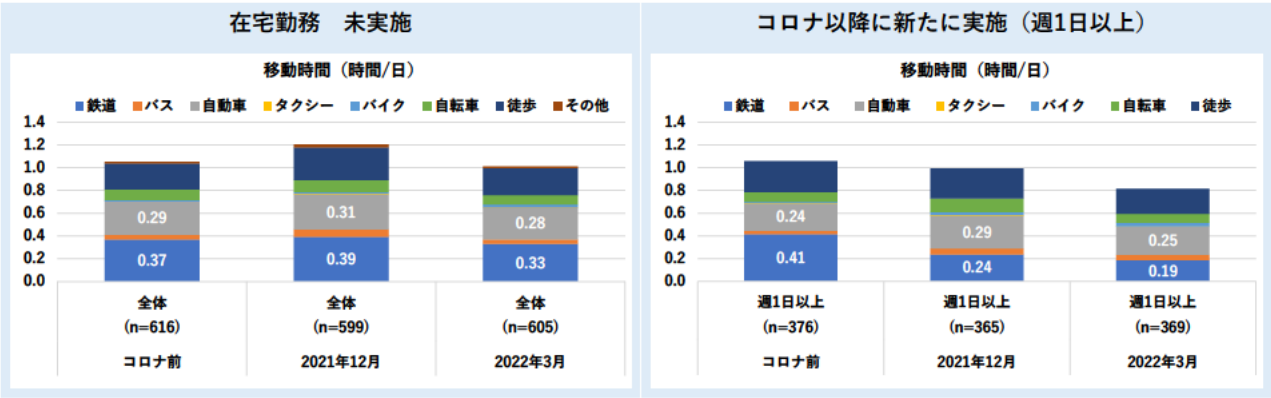


図　5.4.1-2　在宅勤務実施状況別の移動時間の変化（平日）

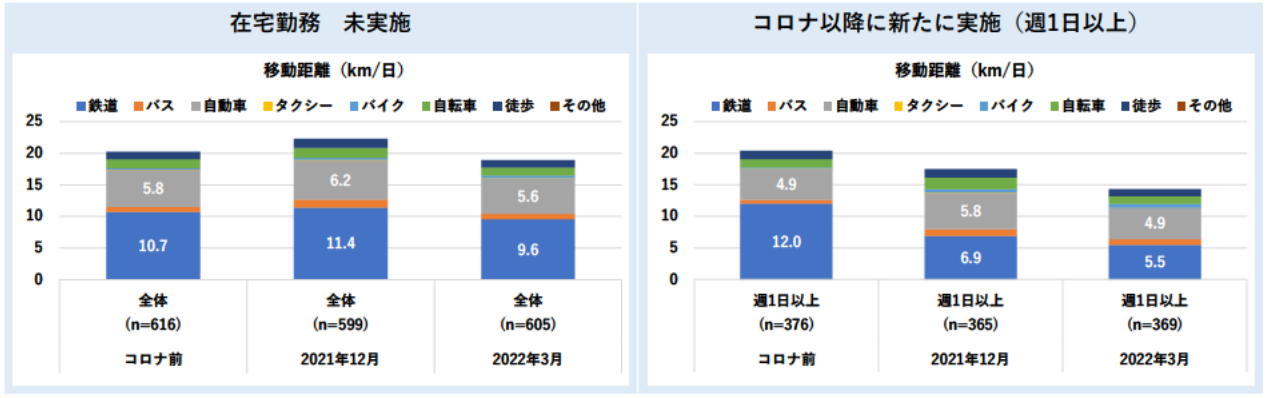


図　5.4.1-3　在宅勤務実施状況別の移動距離の変化（平日）

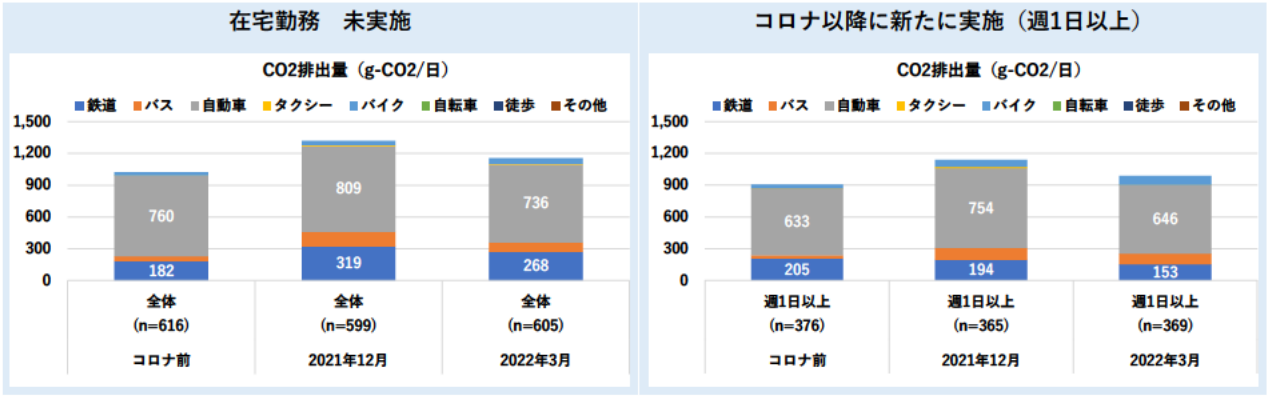


図　5.4.1-4　在宅勤務実施状況別の二酸化炭素排出量の変化（平日）

（注）図 5.4.1-2～図 5.4.1-4 について、コロナ前および直近の調査時期（2021 年 12 月、2022 年 3 月）において、在宅勤務を実施していない回答者を「在宅勤務未実施者」

ii)　共分散構造分析による推定結果

ｱ)　潜在変数間の関係

- リモートワークのデメリットは、「自宅では作業スペースがないため、作業効率が低下（.88）」や「自宅では作業が集中しづらい環境にあるため、作業効率が低下（.90）」との関係が特に強い。

- リモートワークのメリットは、「家事や育児など、家の用事ができる」、「遠距離のコミュニケーションがとりやすくなる」、「自分の時間ができる」、「集中できる環境がつくりやすくなる」の影響が他より若干強い。
- 今後も継続実施意向があるリモートでの活動について、項目間の差異がほとんどなく、特にこの活動を重視したいといった傾向は見られない。
- 「リモートワークのメリットを感じる」と「リモートでの活動に関する今後の継続実施意向」は強い関係がある。

ｲ) 各変数と在宅勤務実施状況の関係

- 全体：総じてみると、潜在変数であれ観測変数であれ、在宅勤務実施状況はいずれの変数からも弱い影響を受けている。
- 潜在変数と在宅勤務実施状況：在宅勤務実施状況は、リモートワークを実施することで感じたメリット、デメリット、リモートでの活動に関する今後の継続実施意向の 3 つの潜在変数からは弱い影響を受けている。
- 観測変数と在宅勤務実施状況
  - 在宅勤務実施状況に対する影響度は、「情報通信業」や「RW 制度関連」の変数が相対的に強い。
  - 居住地別にみると、東京都市圏の方が他の地域に比べ関係がやや強い。
  - 通勤時間は在宅勤務実施日に負の弱い影響を与えているが、これは既往研究（文献 10)）の「通勤時間が長くなるほど雇用型就業者のテレワーカーの割合が高い」と異なる傾向である。なお、文献 10)で示すテレワーカーの割合とは、雇用型就業者のうち、テレワークを実施している人が占める割合であり、本モデルで示す在宅勤務実施日とは異なるものである。これより、通勤時間が長くなるほど在宅勤務を実施する傾向はあるものの、在宅勤務実施頻度が必ずしも高いとは言えない。

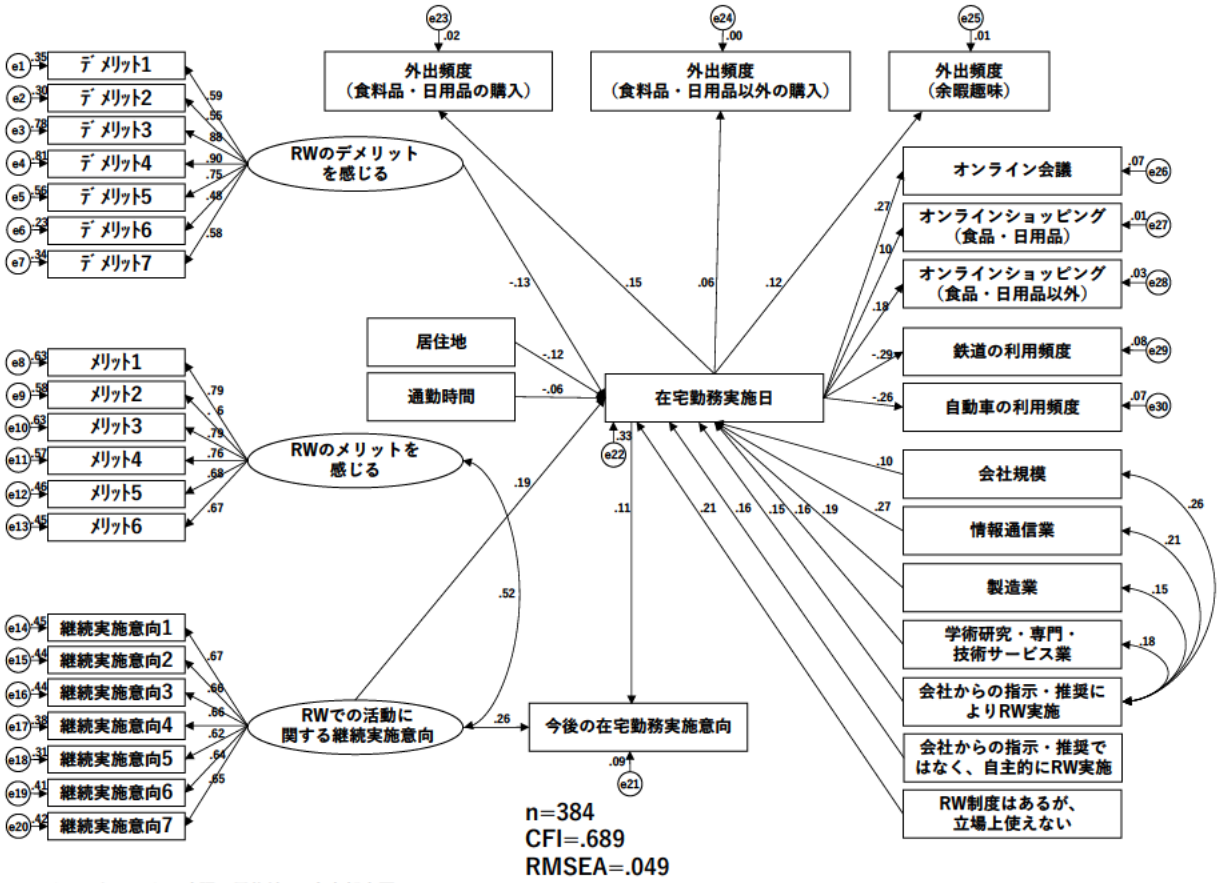
ｳ) 在宅勤務実施状況と移動需要や他の変数との関係

- 在宅勤務実施状況と移動需要
  - 在宅勤務実施者にとっては、平日における鉄道や自動車の利用頻度が減少する傾向が示された。他方で、(3)①項に述べたように、在宅勤務者においては、平日に比べ休日の私事のための移動需要が多くなる傾向があるため、休日の移動活動に関する情報収集も重要である。
  - 在宅勤務実施日は、平日の外出頻度およびオンラインサービスの利用状況と正の相関が示されている。ただし、オンライン会議を除き、在宅勤務実施状況が強い影響を与えるような傾向は見られない。

ｴ) モデルの適合度

- モデル全体の評価：RMSEA は 0.05 以下であるが、CFI は 0.7 未満であり、モデル適合度はあまり良好でない。

- モデルの部分評価：「RW 制度はあるが、立場上使えない」は 5%以下の水準で有意で、それ以外のうち「製造業」「外出頻度（食料品・日用品購入）」は有意差が見られないが、この 2 指標を除いた全ての指標において、1%以下の水準で有意である。



RW：リモートワークの略語、居住地1は東京都市圏
居住地2は中京・関西都市圏、居住地3はその他地域

デメリット1：人とのコミュニケーションに距離を感じる
デメリット2：新たな友人・知り合いをつくる機会が減少
デメリット3：自宅では作業スペースがないため、作業効率が低下
デメリット4：自宅では作業が集中しづらい環境にあるため、作業効率が低下
デメリット5：仕事とプライベートの境界が曖昧になり、メリハリがつけにくい
デメリット6：移動する機会が減り運動不足になりやすい
デメリット7：通勤・通学時間中の趣味の活動がなくなる

メリット1：家事や育児など、家の用事ができる
メリット2：遠距離のコミュニケーションがとりやすくなる
メリット3：自分の時間ができる
メリット4：集中できる環境がつくりやすくなる
メリット5：オンラインを活用することで、友人・同僚とのコミュニケーションの頻度を増やすことができる
メリット6：同居している家族と過ごし、直接話す時間を増やすことができる

以下に示す「リモートでの活動」について、今後行いたい、もくしは続けたいと思うか
継続実施意向1：食料品・日用品のネット購入（ネットスーパーなど）
継続実施意向2：食料品・日用品以外のネット購入（インターネット通販・フリーマーケットサービスなど）
継続実施意向3：家族や知人とのビデオ通話
継続実施意向4：オンライン飲み会
継続実施意向5：オンライン会議
継続実施意向6：食事のデリバリーサービス・出前
継続実施意向7：オンライン診療

図 5.4.1-5 在宅勤務実施状況と移動需要に関する構造モデル（標準化推定値）

（注）係数は標準化推定値

③ まとめ

本項では、生活行動に基づく需要発生メカニズムのモデル化への示唆を得ることを目的に、既往研究の方法論やデータの活用可能性について検討した。

具体的には、(2)項で調査した「新型コロナ感染症の影響下における生活行動調査（国土交通省）」の個票データを用いて、コロナ以降に在宅勤務を新たに実施した就業者の

移動需要の変化を確認するとともに、また在宅勤務実施状況への影響要因や在宅勤務と移動需要の関係をモデル化し、因果関係や要因間の影響度を探るための分析を行った。以下に、分析から得られた結果と課題について整理する。

a. コロナ以降に在宅勤務を新たに実施した就業者（新規在宅勤務実施者）の移動需要の変化

- コロナ以降に在宅勤務を新たに実施した人は、コロナ前に比べ、鉄道による移動時間が半減し、それに伴い移動距離も約 3 割減少。他方で、自動車による移動時間はコロナ前後でほとんど変わらない。
- コロナ禍での乗車率の低下により、鉄道やバスの二酸化炭素排出原単位が悪化したこともあり、移動に伴う二酸化炭素排出量はコロナ前よりやや増加。

b. 共分散構造分析による推定結果

- 共分散構造分析により、在宅勤務日数への影響要因や在宅勤務日数と移動手段別の移動頻度の関係を構造的に把握した。
- 在宅勤務実施状況に対する影響度は、情報通信業等の業種や企業のリモートワークに対する制度の有無や柔軟な勤務形態への許容程度が相対的に強いが、リモートワークに対する個人のメリットやデメリット、リモートでの活動に関する今後の継続実施意向といった潜在的な要因からは強い影響を受けてないことが示唆された。東京都市圏の方は他の地域より在宅勤務実施日数が多い傾向があり、また通勤時間が長くなると在宅勤務を実施する傾向はあるが、必ずしも在宅勤務を実施する頻度（日数）が高いとは限らない。
- 在宅勤務実施日数が多いほど、平日における鉄道や自動車の利用頻度が減少する傾向が示された。
- 在宅勤務実施日は、平日の外出頻度およびオンラインサービスの利用状況と正の相関が示されたが、オンライン会議を除き、在宅勤務実施状況が強い影響を与えるような傾向は見られない。

c. 課題

- 上記の分析結果は、平日の状況のみを反映したものであり、また分析対象地域も、ある程度の人口規模を持つ都市部である等分析に用いるデータが制限されている。よって、分析結果がある特定の条件下で得られたものあり、分析結果が必ずしも全体像を反映していない可能性がある点に留意されたい。
- 在宅勤務実施者においては、平日に比べ休日の私事のための移動需要が多くなる傾向があると考えられる。よって、平日のみならず、休日の移動活動に関する情報収集も重要である。

(4) まとめ

① テレアクティビティの普及に伴う生活行動の変容に関する既往研究の調査

(2)項ではテレアクティビティの普及に伴うエネルギーや CO_2 排出量、及び移動・消費需要等に与える影響に関する情報を収集・整理した。対象は、執筆者によるオリジナル研究（11 件）と先行研究をレビューした文献（4 件）の計 15 本である。

在宅勤務に関する主な知見は以下の通りである。

- COVID-19 パンデミックは在宅勤務を急速に普及させ、在宅勤務に適した業種・職種に属する通勤時間の長い労働者を中心に、少なくとも職場勤務とのハイブリッド型で定着すると考えられる。
- 在宅勤務の移動需要に及ぼす影響に関する北米を対象とした研究によれば、在宅勤務は平均的には移動距離やトリップ数を削減するが、非大都市圏では逆の傾向が見られることもある。
- 在宅勤務の移動需要に及ぼす影響については、レビュー論文では補完効果（増加）と代替効果（減少）の両方が示されており、コンセンサスには達していない。
- パンデミックにより、アクティブモード（徒歩・自転車）によるトリップが増加する傾向も見られたが、近隣施設のアクセス性に依存する。
- 在宅勤務がエネルギー需要に及ぼす影響は、通勤手段に大きく依存する。
- 在宅勤務の普及は居住パターンを変える可能性もあり、空間利用や移動需要及びエネルギー需要に及ぼす影響をマクロ的に捉える必要がある。

オンラインショッピングに関する主な知見は以下の通りである。

- COVID-19 パンデミックはオンラインショッピングの利用を加速し、その影響は食料品にも及んでおり、品目によって程度の差はあるが、パンデミック後も継続すると見込まれる。
- オンラインショッピングが店舗での買い物を代替すること（代替効果）を示す研究と、店舗での買い物に追加的に行われること（補完効果）を示す研究の双方が見られ、コンセンサスに達していない。
- オンラインショッピングを含む買い物行動がレジャーを代替すると指摘する研究もあり、買い物行動を超えた生活行動全体で評価する必要がある。
- 買い物行動の必需的性質と余暇的性質を区分した研究の蓄積が求められる。

また、オリジナル研究が利用している外部データの概要について、とりまとめた。伝統的な統計データにオルタナティブデータ（携帯端末位置情報等）に基づく推計データを組み合わせたデータベースは、今後の包括的な影響評価研究に資すると考えらえる。

② 生活行動に基づく需要発生メカニズムのモデル化への既往研究の活用可能性の検討

(3)項では、生活行動に基づく需要発生メカニズムのモデル化への示唆を得ることを目的に、既往研究の方法論やデータの活用可能性について検討した。ここでは、「新型コロナ感染症の影響下における生活行動調査（国土交通省)」の個票データを用いて、在宅勤務実施状況への影響要因や在宅勤務と移動需要の関係を探るための分析を行った。ただし、分析結果がある特定の条件下で得られたものあり、網羅性と代表性が欠ける可能性がある点に留意されたい。

在宅勤務等のテレワークの実施状況には、就業者の業種や職種、企業の規模や働き方の文化・風土、在宅勤務を行うための適切な技術や環境の整備状況、就業者個人のライフステージや性格による受容度（インドア派かアウトドア派、自己管理能力の不足、コミュニケーション欠如や孤独感を感じることで仕事の生産性低下等）といった、多様な変数に依存すると考えられる。よって、在宅勤務の実施状況をより徹底的に把握するためには、個人の考え方や性格を加味した関連情報の収集も重要である。

また、テレアクティビティによって平日の移動需要が減少した分、仕事の拘束がない休日になると、旅行やレジャー等の移動需要が増加する可能性や、テレアクティビティによって遠距離の仕事やビジネスが可能になることで、遠隔地への出張需要も増加する可能性もある。そのため、テレアクティビティの普及がリバウンド効果に繋がるかどうかについても研究の蓄積が必要と考えられる。

参考文献（第 5.4.1 節に関するもの）

1) Kostas Mouratidis, Sebastian Peters, Bert van Wee, Transportation technologies, sharing economy, and teleactivities: Implications for built environment and travel, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 92, March 2021, 102716
2) André de Palma, Shaghayegh Vosough, Feixiong Liao, An overview of effects of COVID-19 on mobility and lifestyle: 18 months since the outbreak, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 159, May 2022, Pages 372-397
3) Arnulf Grubler, Charlie Wilson, Nuno Bento, Benigna Boza-Kiss, Volker Krey, David L. McCollum, Narasimha D. Rao, Keywan Riahi, Joeri Rogelj, Simon De Stercke, Jonathan Cullen, Stefan Frank, Oliver Fricko, Fei Guo, Matt Gidden, Petr Havlík, Daniel Huppmann, Gregor Kiesewetter, Peter Rafaj, Wolfgang Schoepp, Hugo Valin, A low energy demand scenario for meeting the 1.5 ℃ target and sustainable development goals without negative emission technologies, Nature Energy, Volume 3, June 2018
4) John Barrett, Steve Pye, Sam Betts-Davies, Kate Scott, The role of energy demand reduction in achieving net-zero in the UK, Centre for Research into Energy Demand Solutions (CREDS), Oxford UK, October 2021
5) L. Stermieri, T. Kober, T.J. Schmidt, R. McKenna, E. Panos. Quantifying the implications of behavioral changes induced by digitalization on energy transition: A systematic review of methodological approaches. Energy Research & Social Science, Volume 97, March 2023, 102961

6) Xiaoqiang Kong, Amy Zhang, Xiao Xiao, Subasish Das, Yunlong Zhang. Work from home in the post-COVID world. Case Studies on Transport Policy, Volume 10, Issue 2, June 2022, Pages 1118-1131
7) Agnieszka Stefaniec, William Brazil, Warren Whitney, Brian Caulfield. Desire to work from home: Results of an Irish study. Journal of Transport Geography, Volume 104, October 2022, 103416
8) Motahare Mohammadi, Ehsan Rahimi, Amir Davatgari, Mohammadjavad Javadinasr, Abolfazl Mohammadian, Matthew Wigginton Bhagat-Conway, Deborah Salon, Sybil Derrible, Ram M. Pendyala &Sara Khoeini, Examining the persistence of telecommuting after the COVID-19 pandemic, The International Journal of Transportation Research (2022), published online: 26 May 2022
9) 岡田潤、出口敦、コロナ第一波の緊急事態宣言中および解除後における生活行動調査に基づくテレワークの導入実態、公益社団法人日本都市計画学会・都市計画論文集、Vol. 56、No. 3、2021 年 10 月
10) 国土交通省、令和 3 年度テレワーク人口実態調査 - 調査結果 - http://www.mlit.go.jp/toshi/daisei/content/001471979.pdf
11) Rezwana Rafiq, Michael G. McNally, Yusuf Sarwar Uddin, Tanjeeb Ahmed, Impact of working from home on activity-travel behavior during the COVID-19 Pandemic: An aggregate structural analysis, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 159, May 2022, Pages 35-54
12) Mohammadjavad Javadinasr, Tassio Maggasy, Motahare Mohammadi, Kouros Mohammadain, Ehsan Rahimi, Deborah Salon, Matthew W. Conway, Ram Pendyala, Sybil Derrible, The Long-Term effects of COVID-19 on travel behavior in the United States: A panel study on work from home, mode choice, online shopping, and air travel, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Volume 90, October 2022, Pages 466-484
13) Kanglin Chen, Ruth Steiner, Longitudinal and spatial analysis of Americans' travel distances following COVID-19, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 110, September 2022, 103414
14) Rodrigo Victoriano-Habit, Ahmed El-Geneidy, Studying the Interrelationship between Telecommuting during COVID-19, residential local accessibility, and active travel: a panel study in Montréal, Canada, Transportation (2023), published online: 06 January 2023
15) Jan C.T. Bieser, Mattias Höjer, Anna Kramers, Lorenz M. Hilty, Toward a method for assessing the energy impacts of telecommuting based on time-use data, Travel Behaviour and Society, Volume 27, April 2022, Pages 107-116
16) Alireza Adibfar, Siddhartha Gulhare, Siva Srinivasan, Aaron Costin, Analysis and modeling of changes in online shopping behavior due to COVID-19 pandemic: A Florida case study, Transport Policy, Volume 126, September 2022, Pages 162-176
17) Huyen T. K. Le, Andre L. Carrel, Harsh Shah, Impacts of online shopping on travel demand: a systematic review, Transport Reviews, Volume 42, 2022, Issue 3, Pages 273-295, Published online: 06 Aug 2021
18) 米国の交通行動特性調査（NHTS）の関連情報サイト：
https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/nhts.cfm (accessed 2023-02-22)
https://nhts.ornl.gov/ (accessed 2023-02-22)
https://nhts.ornl.gov/publications (accessed 2023-02-22)
https://nhts.ornl.gov/od/ (accessed 2023-02-22)

19) 各国の全国規模の交通行動実態調査に関する情報サイト（イギリス）
https://www.gov.uk/government/collections/national-travel-survey-statistics
https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/NTS-International-english.pdf
https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalcpij/42.3/0/42.3_559/_pdf/-char/ja
http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00039/201111_no44/pdf/22.pdf
20) 各国の全国規模の交通行動実態調査に関する情報サイト（ドイツ）
https://bmdv.bund.de/EN/Services/Statistics/Mobility-in-Germany/mobility-in-germany.html
https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/NTS-International-english.pdf
https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalcpij/42.3/0/42.3_559/_pdf/-char/ja
http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00039/201111_no44/pdf/22.pdf
21) 各国の全国規模の交通行動実態調査に関する情報サイト（日本）
https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/toshi_tosiko_tk_000033.html
https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalcpij/42.3/0/42.3_559/_pdf/-char/ja
http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00039/201111_no44/pdf/22.pdf
22) Aoife Ahern, Gill Weyman, Martin Redelbach, Angelika Schulz, Lars Akkermans, Lorenzo Vannacci, Eleni Anoyrkati, Anouk Van Grinsven, Analysis of National Travel Surveys in Europe - OPTIMISM WP2: Harmonisation of National Travel Statistics in Europe, JRC Technical Reports, January 2013
23) メリーランド交通研究所のデータベース（MTI）https://data.covid.umd.edu/about/index.html (accessed 2022-07-07)
24) Lei Zhang, Aref Darzi, et.al, Interactive COVID-19 mobility impact and social distancing analysis platform, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Boar, September 2021
25) メリーランド交通研究所のデータベース（MTI）https://data.covid.umd.edu/findings/index.html (accessed 2022-07-07)
26) Google Mobility Reports, https://www.google.com/covid19/mobility/ (accessed 2022-07-07)
27) オックスフォードCOVID-19政府対応トラッカー、https://www.nature.com/articles/s41562-021-01079-8
28) MTUS データベースの関連情報 1、https://www.mtusdata.org/mtus/sda/ (accessed 2023-02-21)
29) MTUS データベースの関連情報 2、https://www.mtusdata.org/mtus/sda/ (accessed 2023-02-21)
30) 国土交通省 令和 3 年度全国都市交通特性調査結果（速報版）
https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001573783.pdf
31) 移動手段による二酸化炭素排出原単位に関する情報
http://www.okaimonokakumei-pj.com/pdf/results_02-02-3.pdf
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html
https://www.env.go.jp/council/former2013/07air/y071-48/mat01-3.pdf

5.4.2 3D プリンティング技術のエネルギー需要への影響

3D プリンティング（以下、3DP）あるいはアディティブ・マニュファクチャリング（Additive Manufacturing、以下 AM と表記）技術の進展が注目されている。AM は第 4 次産業革命（Industry 4.0）の中核の一つをなすと見られており（図 5.4.2-1）、製品のデザイン構築に CAD 等の 3 次元モデリングソフトウェアを用いて物質を積層していく

方法で、従来の金型を作っての成形や切削による造形等とは全く異なり、最も期待される製造技術の一つと考えられている（R. Godina et al.[1]）。3DP/AM 技術は様々な分野での適用が進んでいるが、原料や廃棄物の削減が見込まれること、従来製法に比べ工程や時間の短縮の可能性があること等の利点から、サステナビリティの観点からも注目されている。IPCC 第 6 次評価報告書 第 3 作業部会（WG3）緩和に関する評価報告書では、需要サイドにおけるデジタル化によるエネルギー消費量の低減や CO_2 排出削減に影響するポテンシャルのある技術の一つとされている（文献 2)）。また、今後、AM 技術が IoT やビッグデータといった他のデジタル化技術と結びつくことにより、産業のトランスフォーメーションが起こる可能性がある。例えば、スマートファクトリーの概念においては、コミュニケーションネットワークを通じて、モニタリングやプロセスの最適化がリアルタイムに行われ、リモートでのメンテンナンスも可能となるが、これらのデジタル化技術と組み合わせることにより、3DP/AM の持つ製品デザインの柔軟性や生産拠点の分散化といった利点を活かしつつ、製造スピードや品質面での課題にも対応できることから、製造ビジネスモデルを変革するかもしれないとの指摘もある（R. Godina et al.[1]、B. A. Praveena et al.[3]）。

本報告では、まず 3DP/AM の技術全般や主に産業分野における適用の現況といった概要をまとめ、3DP/AM 技術の適用による効果に関する既往文献の調査について記述する。そして、それらの研究動向を踏まえ、今後の 3DP/AM 進展が世界全体のエネルギー需要等へ与える影響に関し、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いて行った分析と考察について述べる。

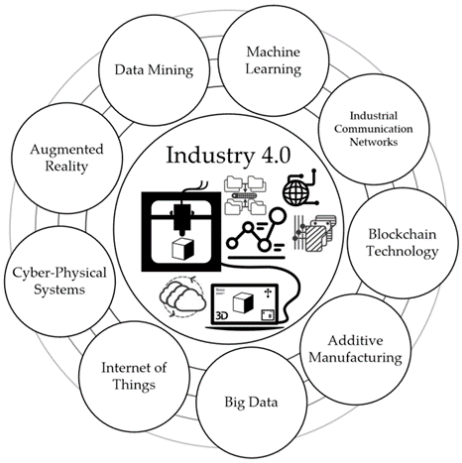


図 5.4.2-1　Industry 4.0 の一部としての AM

（出典）R. Godina et al.[1]

(1) 3DP/AM の概要

① 3DP/AM の技術と市場

従来、ラピッドプロトタイピング等と呼ばれていた 3D プリンタによる造形技術について、2009 年に ASTM（米国試験材料協会）F42 委員会が設置され、AM 技術と呼ぶことが決定された。本委員会で AM 技術は “a process of joining materials to make objects

from 3D data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies" と定義され、AM 技術は 7 つのカテゴリーに分類された（文献 4)）。日本においては、ASTM ならびに ISO の規定による 7 つのカテゴリーの名称が、2020 年 3 月に JIS B 9441 により規定された（京極 [5]）。7 つのカテゴリーの用語と定義は下記の通りである。また、代表的な材料としては、セラミックス、ポリマー、金属や複合材料、セメント・コンクリート、傾斜機能材料（FGM）等がある（B. A. Praveena et al.[3], H. A. Colorado et al.[6]）。

一方、DfAM (Design for Additive Manufacturing) と呼ばれる AM 向け設計技術も重要であり、CAD ソフトウェアにトポロジー最適化やラティス構造作成用の機能が付加されてきている。また AM 特有のサポート設計も考慮された組織予測シミュレーションの開発も行われており、これらが統合された設計・製造・管理統合ソフトウェアとして体系化されてきている（京極 [5]）。

表 5.4.2-1　AM の加工技術のタイプ

加工技術のタイプ	定義
Binder Jetting (BJT) 結合剤噴射	液状の結合剤を選択的に供給して、粉体材料を結合するプロセス
Direct Energy Deposition (DED) 指向性エネルギー堆積	集束させた熱エネルギーを利用して材料を溶融し、堆積させるプロセス
Material Extrusion (MEX) 材料押出	ノズルまたはオリフィスから材料を押出し、選択的に供給するプロセス
Material Jetting (MJT) 材料噴射	造形材料の液滴を選択的に堆積するプロセス
Power Bed Fusion (PBF) 粉末床溶融結合	熱エネルギーを利用して粉末床を選択的に溶融凝固するプロセス
Sheet Lamination (SHL) シート積層	シート状の材料を積層し、層間を結合して造形物を形成するプロセス
Vat Photopolymerizatio (VPP) 液槽光重合	容器内の液体光硬化性樹脂を光重合によって選択的に固化するプロセス

（注）文献 5)にある表を編集

Hubs[7]は 3DP の市場の動向等を定期的にまとめて発表しているが、その最新のトレンドレポートによると、図 5.4.2-2 に示すように、2021 年のグローバルの AM 市場規模は 151 億ドルと推計され、CAGR（年平均成長率）24%で成長し、2026 年には 445 億ドルに達すると見込まれる。（3DP システム、ソフトウェア、マテリアル、サービスを含む。企業内 3DP 技術への投資は含まない。）文献 7)には、他の幾つかの主要な調査機関等による見通しも含まれているが、いずれも今後の AM 市場について大幅な成長を予測している。

3DP/AM 技術は、図 5.4.2-3 に示すように、様々な分野で適用されている。Wohlers Associates のレポート（文献 9)）によると、主に消費財・電子機器、航空宇宙、自動車、医療・歯科、産業機械において AM の適用が広く進んでいるが、その他、建築、発電やエネルギー、学術分野、政府や軍事関連等にも適用例がある。また、3DP はファッションや宝飾業界でも利用されている。

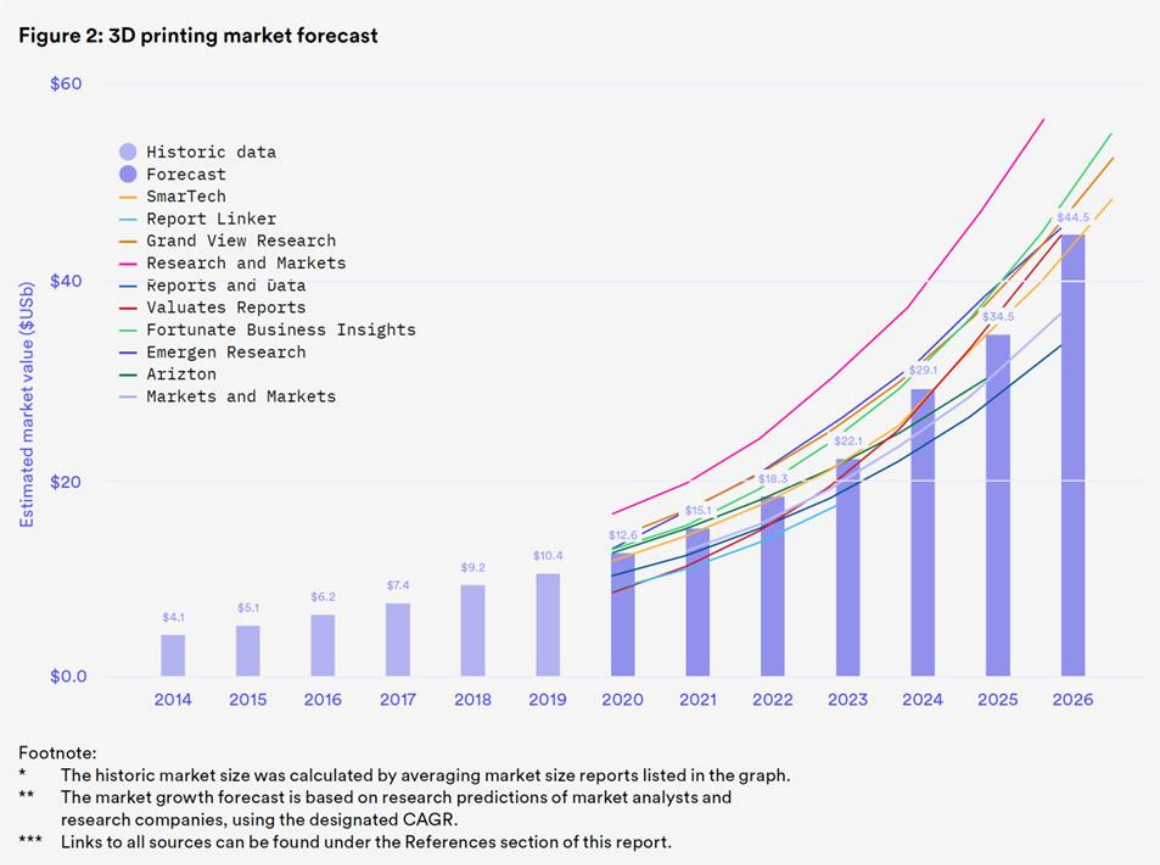


図 5.4.2-2　3DP/AM の市場規模

（出典）Hubs[7)]

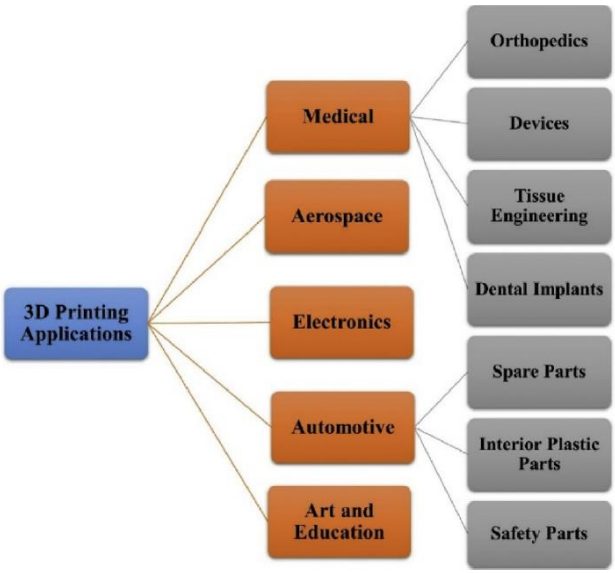


図 5.4.2-3　3DP/AM の適用分野

（出典）S. Rouf et al.[8)]

② 3DP/AM の利点と課題

3DP/AM の利点については、サステナビリティに関連した論文や報告が多く発表されている。M. Mehrpouya et al.[10)]は、時間、コスト、フレキシビリティの 3 つの観点から、3DP/AM の利点について評価し（図 5.4.2-4）、さらにサステナビリティについては経済、環境、社会の 3 つの側面における影響について考察している。3DP/AM の経済、環境、社会の側面に着目した研究は、T. Peng et al.[11)]、S. Rouf et al.[8)]、R. Godina et al.[1)]等にも見られる。

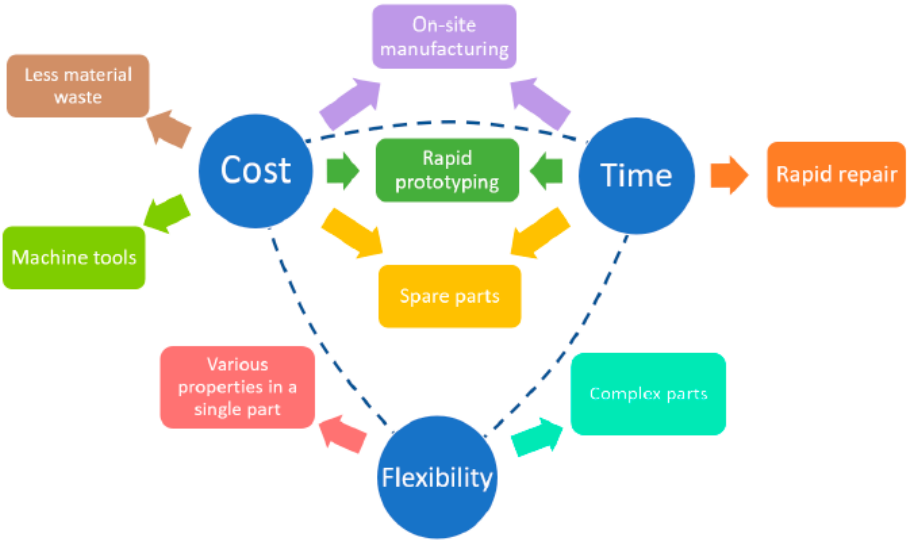


図 5.4.2-4　3 つの主要な特徴と AM の利点との相互関係

（出典）M. Mehrpouya et al.[10)]

Sustainability Additive Manufacturing		
Economy	**Environment**	**Society**
Market Evolution	**Resource Consumption**	Social Benefits
Novel Applications	Materials Demands	Labor Development
Supply Chain Management	Process/Life Cycle Energy	Product Quality
Production Costs	**Waste Management**	Public Acceptance
Machinery Costs	Recyclable/Non-recyclable Waste	Healthcare Improvements
Process Productivity	**Pollution Control**	Ethics
.....	Process/Life Cycle Emissions	.....

図 5.4.2-5　AM のサステナビリティに関する特徴

（出典）M. Mehrpouya et al.[10)]

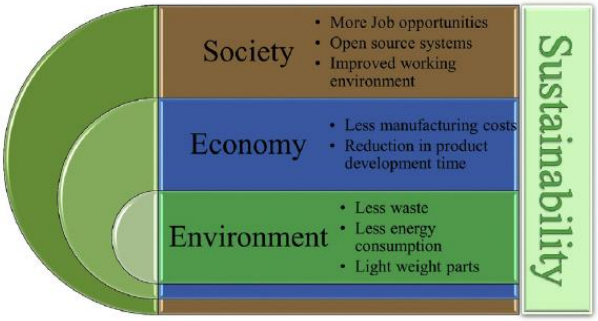


図 5.4.2-6　3DP プロセスのサステナビリティ

（出典）Rouf et al.[8)]

また、S. Ponis et al.[12)]や H. A. Colorado et al.[6)]は、3DP 技術のサステナビリティを評価するためには、LCA による調査が重要であるとし、材料効率と廃棄物削減に着目している。そして、サーキュラーエコノミーの促進を目指したリサイクル材料の活用について、広く研究されてきていることを指摘している。例えば、幾つかの研究では、建設産業における AM の利用は、従来の方法に比べて環境への影響が 50%以上少ないことが示されている。また、プラスチック射出成形のような従来の加工法に比べ、AM による加工では製品の充填密度を制御でき、機械的性能を必要最小限に抑えられる。実質的な廃棄物を発生させず、エネルギー消費と GHG 排出量が削減され、環境の持続可能性の達成に貢献する。また、プラスチック、金属、砂、コンクリート等の 3DP 材料は、リサイクルして再利用できる。将来、AM は廃棄物と世界の炭素排出量を削減する効果的な方法になる可能性がある。

これらの文献を参考に 3DP/AM の利点をまとめると、以下の項目が主に挙げられる。

- サプライチェーンにおける原材料の削減
- 製造過程における廃棄物の削減
- 効率的でフレキシブルな製品デザインが可能
- 部品数の削減、強度の向上
- 軽量化

- プロトタイプ製造にかかる時間、コストの削減
- スペアや代替部品の製造時間の短縮
- 分散化した消費者に近い生産拠点
- 輸送プロセスの削減およびカーボンフットプリントの削減
- マシンツールの簡略化
- 材料のリサイクルが可能

一方、3DP/AM の課題については、利用する加工技術や適用する分野により異なるが、S. Rouf et al.[8]、M. Mehrpouya et al.[10]によると、一般的には下記が指摘されている。

- 3D プリンターシステムの購入コストが高価
- 材料のオプションが限定的、材料が高価
- 製造サイズの限界
- 製造スピードの速さ
- 製造品が不完全（空隙、加工表面の粗さ等）で後処理が必要
- 規格や認証の欠如

③ 産業部門における 3DP/AM 利用の動向

早期に 3DP/AM を適用しているのは航空宇宙、自動車産業、医療分野であり、特に AM 市場（サービス、ソフトウェア、材料、装置含む）において航空宇宙産業が最も早く成長しており、今後も成長が期待される（S. C. Altiparmak et al.[13]）。また、産業部門における 3DP/AM の適用には、主にプロトタイプの製造（prototyping）、工作機械器具の作製（tooling）、エンドユースの部品や製品の製造（end-use/final parts production）がある。

Wohlers Associates（文献 9)）のレポートによると、航空宇宙産業においては、Boeing、Airbus、GE Aviation 等の主だったメーカーが AM を採用しており、殆どの商用機がエアダクト、ブラケット、エンジン部分等に 3D プリントされた部品を使用している。Boeing の AM 部門の担当部長によると、70,000 以上の AM 部品が実際に商用機や軍用機、人工衛星に使われている。また、自動車産業はプロトタイピングでの利用として早期に AM を採り入れた産業の一つであり、自動車メーカーは、デザインのバリエーションや機能のテスト、いくつかのタイプのツーリングに AM を適用している。最終部品の製造での利用はまだ少量生産に限られているが、この技術が量産部品の市場へと浸透していくという指摘もある。例えば、BMW グループはドイツ連邦教育研究省との共同プロジェクトにおいて、2022 年 1 月時点で、AM を用いて 350,000 以上の量産部品を製造した。年間に少なくとも 50,000 の部品と 10,000 以上のスペア部品を製造することを目標としている。

プロトタイピング技術としての 3DP/AM の適用が中心であることには変わりがないものの、近年、エンドユースの部品や製品の製造における活用が進んでいることが指摘されている。プロトタイピングからエンドユースの製造までの多くのポテンシャルが見込めることから、AM は数多くの研究の対象となっている。近い将来、3DP のプロセスはより早く安価で可能となり、伝統的な製造プロセスから置き換わって行くことも予測されている。現在は小規模での生産で用いられているが、大量生産への適用に

ついても議論がされている（G. Prashar et al.[14]、M. Mehrpouya et al.[10]）。一方、3DP がどの程度の速さで普及するかを正確に予測するのは難しく（OECD[15]）、その技術を適用する産業においても、革新的な製品やサプライチェーンの変化を求める企業もあれば変化に消極的な場合もある（C. A. Giffi et al.[16]）。従来の製造方法から 3DP/AM へ完全に切り替わる可能性は低く、むしろ、それらが統合されたプロセスが発展し、複雑な部品を効率的に生産する方法が実現するかもしれない（M. Mehrpouya et al.[10]）。

(2) 3DP/AM がもたらす効果に関する定量化な分析の調査

上述のように、3DP/AM の進展により、製品のライフサイクルでのエネルギー消費量の低減や CO_2 排出削減に大きな効果がもたらされる可能性がある。特に、AM の早期の適用は航空宇宙分野や自動車産業において多くの例が見られ、これらのセクターにおけるメタル使用での適用が環境への影響の削減という点で大きなポテンシャルがあると考えられる（V. Pusateri et al.[17]）。そこで、航空宇宙産業および自動車産業での AM 適用による効果について、従来の製造（Conventional Manufacturing、以下 CM と表記）との比較において定量的な分析・評価を行っている既往文献の調査を行った。

L. A. Verhoef et al.[18]は、AM が世界のエネルギー需要に与え得る影響について、2050 年の 4 つのエネルギーシナリオで評価を行っている。文献 19)で報告しているが、ここではその概要を記す。まず、2050 年の世界の社会政治状況を示す Shell Energy Scenario for 2050 の Blueprints シナリオ（グローバル化進展、イノベーション促進）と Scramble シナリオ（グローバル化とイノベーション促進が乏しい）、および AM の普及と効果が高い（high）場合と低い（low）場合を組み合わせた、4 つのシナリオを想定する。そして、航空宇宙セクターと建設セクターについて、2050 年のエネルギー消費量（AM 無し、ベースケース）を予測し、バリューチェーンの各フェーズ（原料、輸送、加工、使用、メンテナンス等）における 2050 年の想定に基づき、AM がエネルギー消費に与える影響（エネルギー削減量）を算出する。さらに、2 つのセクターの分析結果から、特定のフェーズのエネルギー削減率を使用して他セクターにおけるエネルギー削減率を計算し、世界全体の削減量（率）の集計を行う。分析の結果、航空宇宙セクターの 2050 年エネルギー消費予測（ベースケース）は、Scramble シナリオでは 35.4EJ/yr、Blueprints シナリオでは 20.1EJ/yr となり、AM による効果を考慮すると 5-25%のエネルギー低減の可能性がある。建設セクターの 2050 年エネルギー消費予測は、Scramble シナリオでは 173EJ/yr、Blueprints シナリオでは 159EJ/yr となり、AM による効果を考慮すると 4-21%のエネルギー低減の可能性がある。これらの結果に基づき、各シナリオにおける 2050 年世界一次エネルギー消費とエネルギー削減率を用いて経済セクター毎に計算して集計を行い、図 5.4.2-7 に示すように、2050 年の世界エネルギー需要の 26-138EJ/yr（5-27%）の低減が可能である。

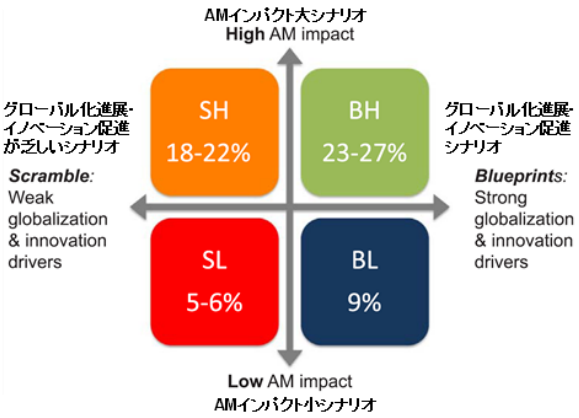


図 5.4.2-7　AM による 2050 年の世界のエネルギー需要削減ポテンシャル
（出典）文献 18)に基づき作成

また、D. Böckin et al.[20]は、小型配送トラックのエンジン（D5k210）の金属部分に PBF（Power Bed Fusion）を適用した場合について、LCA を用いて、従来の製造と 3D プリンティングに関するシナリオを想定し、環境影響を比較している。3 つのシナリオ（D5K210 の従来のライフサイクルであるリファレンスシナリオ; 現在の PBF 技術を想定したシナリオ; 将来の PBF 技術を想定しエンジンの大部分が 3DP 可能となるシナリオ）を想定し、全ライフサイクル（原料、加工、使用、End-of-life 等）におけるインベントリ分析（LCI）を実施し、Eco-Indicator 99、EPS 等の LCA 指標を用いて評価を行っている。そして、分析の結果から、3DP の将来の技術を想定した場合、軽量化のために部品構成を再設計することにより LCA が向上する可能性があるが、クリーンな電源、大型部品の印刷や低影響な原料の使用といった技術革新が必要であり、一方、現在の AM 技術を想定した場合は環境面の向上は殆ど見られない、としている。

その他、P. C. Priarone et al.[21]、M. Möller et al.[22]、V. Lunetto et al.[23]等は、航空機や自動車部品のライフサイクルにおけるエネルギーや CO_2 排出について、CM と AM との比較を行っている。また、やや古い文献ではあるが、R. Huang et al.[24]は米国における航空機メタル部品に AM を適用することによる、ライフサイクルでの一次エネルギーと GHG 排出の変化を定量化し、2050 年の米国の航空セクターにおける CM から AM へのシフトによる環境便益を評価している。

(3) DNE21+を用いた 3DP/AM 技術のエネルギー需要への影響に関する分析

3DP/AM がエネルギーや GHG 排出の削減といった効果をもたらすことが指摘されている。今後、主に産業分野で 3DP/AM が展開し、従来の金型を作っての成形や切削加工を中心とした製造法からの移行が進んだ場合の影響の評価が必要である。しかし、最近の数年間に発表された学術文献を概覧した限りでは、AM の各技術レベルで、あるいは製品の部品レベルでのエネルギー消費量や環境負荷等について、CM との比較において 3DP/AM の効果を評価した研究は多く見られるものの、セクターあるいはグローバルレベルで、さらには将来のエネルギー消費等への影響について定量的な推計を行っている研究は、上述の Verhoef et al.による研究を除いて、殆ど見られない。そこで、

今後の AM の進展（CM から AM へのシフト）によりもたらされる効果が、世界のエネルギー需要や GHG 排出等に与える影響について、航空機産業および自動車産業を評価の対象とし、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル Dynamic New Earth 21+ (DNE21+) を用いて、分析・評価を行うこととした。

① DNE21+の概要

DNE21＋は統合評価モデル（IAM）の一つで、世界のエネルギー総コストが最小化される、線形計画モデルである。地域的な特徴を表現し、2100 年までを対象期間として、炭素排出を削減するためのエネルギー関連技術の詳細な評価が可能である。DNE21+は、想定された CO_2 排出制約の下で、産業や輸送等の需要に関するあらゆる想定要件を満たしつつ、コスト最小化となるようなエネルギーシステムを特定する（文献 25)）。

② シナリオの想定

航空機産業、自動車産業に AM を適用することによる効果として、部品構成の製造における素材質量の低減、製品の使用段階における軽量化による消費エネルギーの削減等が考えられる。航空機、自動車の製造を CM から AM へ移行することにより予想されるこれらの効果についての想定には、それぞれ、第(2)項で紹介した Verhoef et al.[18] および Böckin et al.[20]による論文を参照した。また、AM 技術の進展については、今回対象とする航空機、自動車の製造における生産において、2050 年に AM による生産比率が 100%になる「AM 加速進展ケース」、2070 年に AM による生産比率が 100%になる「AM 低速進展ケース」の 2 つを想定した。表 5.4.2-2 に AM 適用による効果の想定について、表 5.4.2-3 に分析シナリオを整理する。

表 5.4.2-2 AM 適用による効果の想定

対象	予想される効果	モデル分析における想定 （世界全体、2050年時点）
航空機	Verhoef et al.(2018)に基づく ・2050年に全ての応用がAMで可能になり、下記の効果が見込まれる。 【原料】メタル原料が90%削減 【輸送】輸送距離22,700km→6500km 【加工】電力消費量が35%削減 【使用】燃料消費が16.7%削減	・アルミニウム製品: ▲1% ・鉄鋼製品: ▲0.02% ・国際海運: ▲0.01% ・直接的電力消費量: ▲1% ・航空機の運航時のエネルギー消費量: ▲10%
自動車	Böckin et al.(2019)に基づく ・小型トラックのエンジンの大部分が3DP可能となった場合、下記の効果が見込まれる。 【原料】アルミニウムが7.5%削減、鉄鋼が33.4%削減 【使用】燃料消費量が1.5%削減	・アルミニウム製品: ▲4.3% ・鉄鋼製品: ▲4.2% ・自動車の燃費: ▲1%

表 5.4.2-3　分析シナリオ

シナリオ	排出削減経路	AM技術進展
BL_標準	Baseline （特段の気候変動緩和政策を想定せず）	AMの進展想定せず
BL_AM加速進展		2050年にAMによる生産比率が100%
BL_AM低速進展		2070年にAMによる生産比率が100%
B2DS_標準	B2DS （2℃を十分に下回る排出に抑制、かつ2030年の各国NDCsを想定、主要先進国：2050年GHGでのCN）	AMの進展想定せず
B2DS_AM加速進展		2050年にAMによる生産比率が100%
B2DS_AM低速進展		2070年にAMによる生産比率が100%

③　モデルの分析結果

表 5.4.2-3 のシナリオで行ったモデル分析結果を以下に示す。AM の技術進展については、2050 年に AM による生産が 100%になるとする AM 加速進展ケースと、2070 年に 100%となる AM 低速進展ケースの 2 つを想定し、2020 年に AM 生産比率 0%からそれぞれ漸進的に生産比率が上がっていくとしたが、AM 技術進展の想定の有無による違いがより表れている 2050 年以降の結果を中心に考察する。また、AM 低速進展ケースと AM 加速進展ケースとの間に大きな差異が見られない場合は、加速進展ケースのみを図中に表示する。

まず、世界の部門別 GHG 排出量について、図 5.4.2-8 に示す。各バーは AM 加速進展ケースの標準ケースとの差分を表している。ベースラインでは、2100 年に AM 加速進展ケースでその他エネ転換部門からの排出量が大きく減少しており、トータルで AM 進展により世界 GHG 排出量が約 2GtCO$_2$/yr 減少すると予想される。一方、気温上昇の制約を設けた B2DS では、AM 加速進展ケースであっても、AM 進展を想定しないケースとの差異は殆ど見られない。また、図 5.4.2-9 は、世界の一次エネルギー供給量を示す。ベースラインでは、2100 年に AM 進展により世界一次エネルギー供給量が減少する。これは CCUS 無しの石炭の減少による。また、B2DS においては、AM 加速進展ケースであっても、AM 進展を想定しないケースとの差異は殆ど見られない。

世界の部門別 GHG 排出量において、その他エネルギー転換部門からの排出が減少している理由について、2100 年といった将来時点では、安価な石炭を利用して水素（グレー水素）を製造し、高いガスを使用しているその他産業部門や民生部門での需要としての利用があり、その際の CO_2 排出がその他エネ転換部門に含まれるが、標準ケースに比べ、ベースライン AM 加速進展ケースでは、そのような水素の利用が減少するためと考えられる。後述の産業部門における最終エネルギー消費量で、ベースライン 2100 年の AM 加速進展ケースで水素の利用が減少しているのも、この理由によるものと考えられる。

また、B2DS で 2070 年や 2100 年に DACCS による GHG 排出量が増加、すなわち DACCS の展開が減少していることについて、将来時点で二酸化炭素除去（CDR）技術が利用

されるようになるが、後述のように、AM 導入により輸送部門での石油系燃料の消費が減少し GHG 排出が減り、DACCS への依存が低減すると見られる。

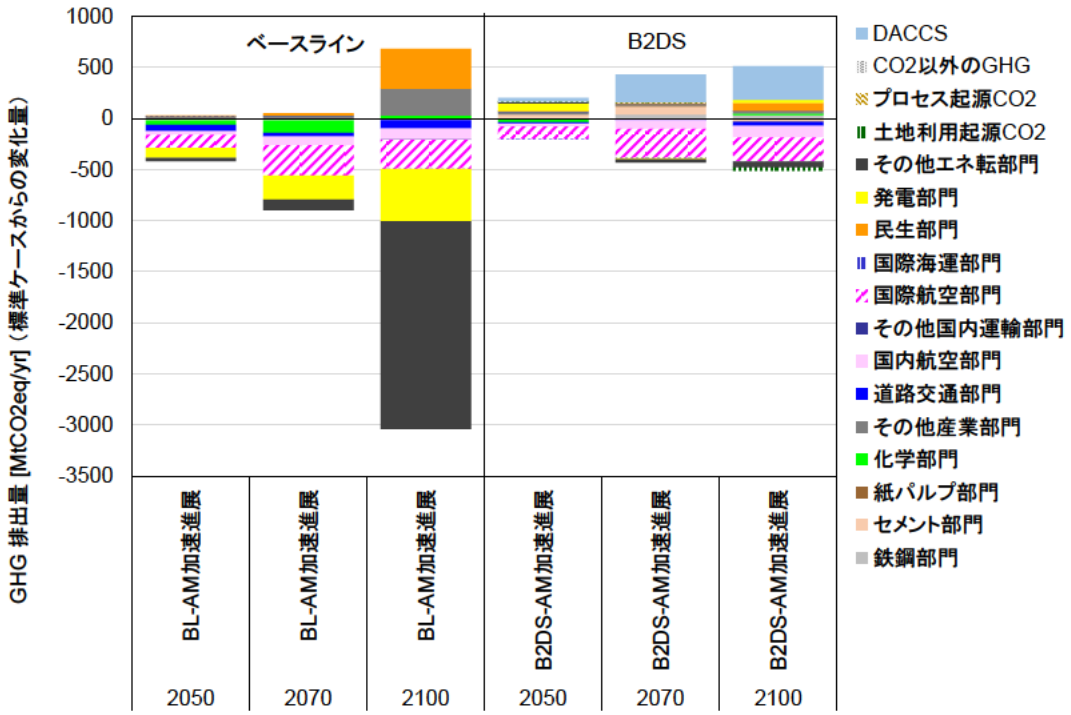


図 5.4.2-8 世界の部門別 GHG 排出量

（注）AM 低速進展ケースと AM 加速進展ケースとの間には殆ど差異がなかったため、加速進展ケースのみ表示

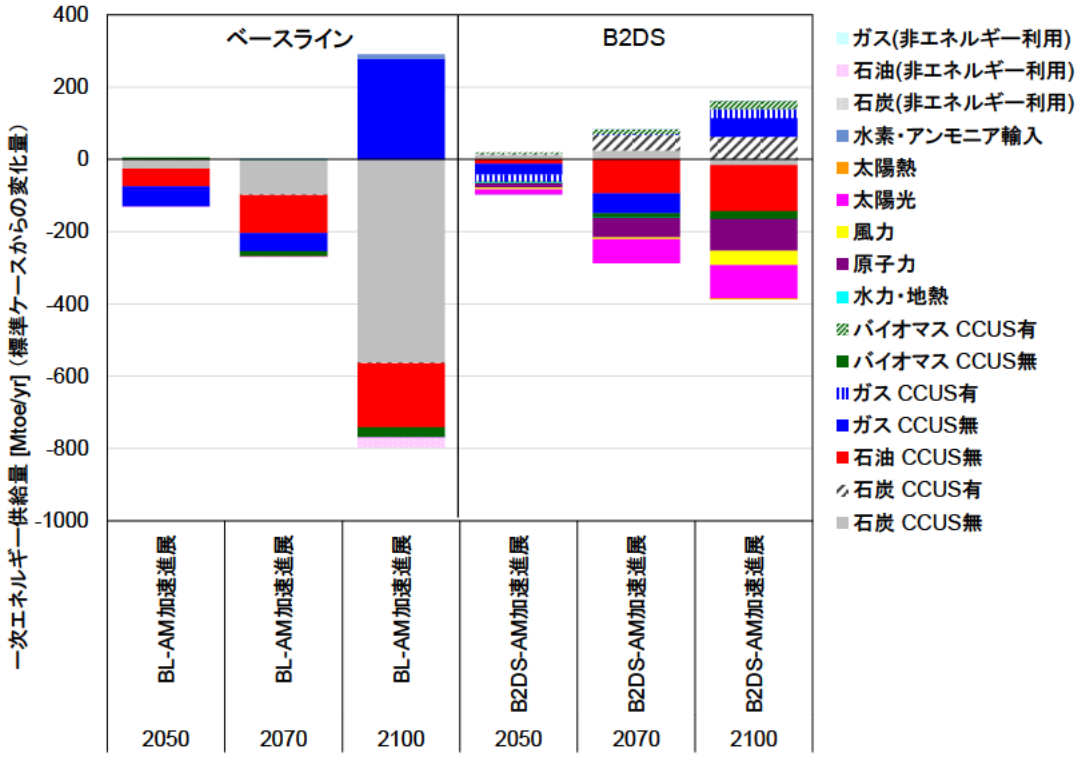


図 5.4.2-9 世界の一次エネルギー供給量

（注）AM 低速進展ケースと AM 加速進展ケースとの間には殆ど差異がなかったため、加速進展ケースのみ表示

次に、図 5.4.2-10 に世界の発電電力量を示す。同じく標準ケースからの差分を示すが、ベースライン、B2DS のいずれにおいても、2100 年に AM 進展により 1,000TWh/yr 程度の減少が見られる。B2DS においては、AM により電力消費が減少すること、また対策の内容が変わってくることを踏まえると、コストの高い電源が必要でなくなるため、図のような結果が示されたと見られる。系統接続なしの太陽光や風力が減少するのは、CO_2 限界削減費用が下がり水素の需要が減少するためであり、またガス火力、ガス CGS、ガス/石炭+CCS が増えているのも同様に、CO_2 限界削減費用が下がっているためと考えられる。

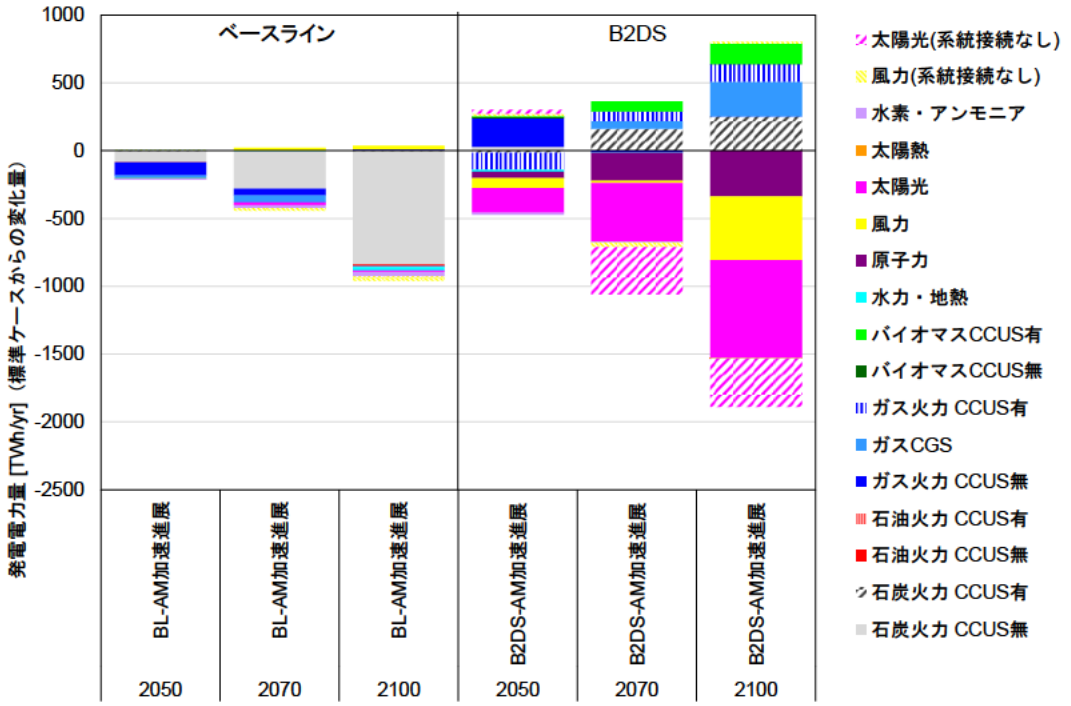


図 5.4.2-10 世界の発電電力量

（注）AM 低速進展ケースと AM 加速進展ケースとの間には殆ど差異がなかったため、加速進展ケースのみ表示

世界最終エネルギー消費量については、まず産業部門を図 5.4.2-11 に示す。ベースライン、B2DS のいずれにおいても、AM 進展を想定したケースと想定しないケースとで違いはあまりない。なお、B2DS で 2070 年や 2100 年で石炭、ガスが増えているのは、3DP の展開によりカーボンプライスが減少するので、より CN が達成しやすくなり、石炭やガスがリバウンドしているためと考えられる。

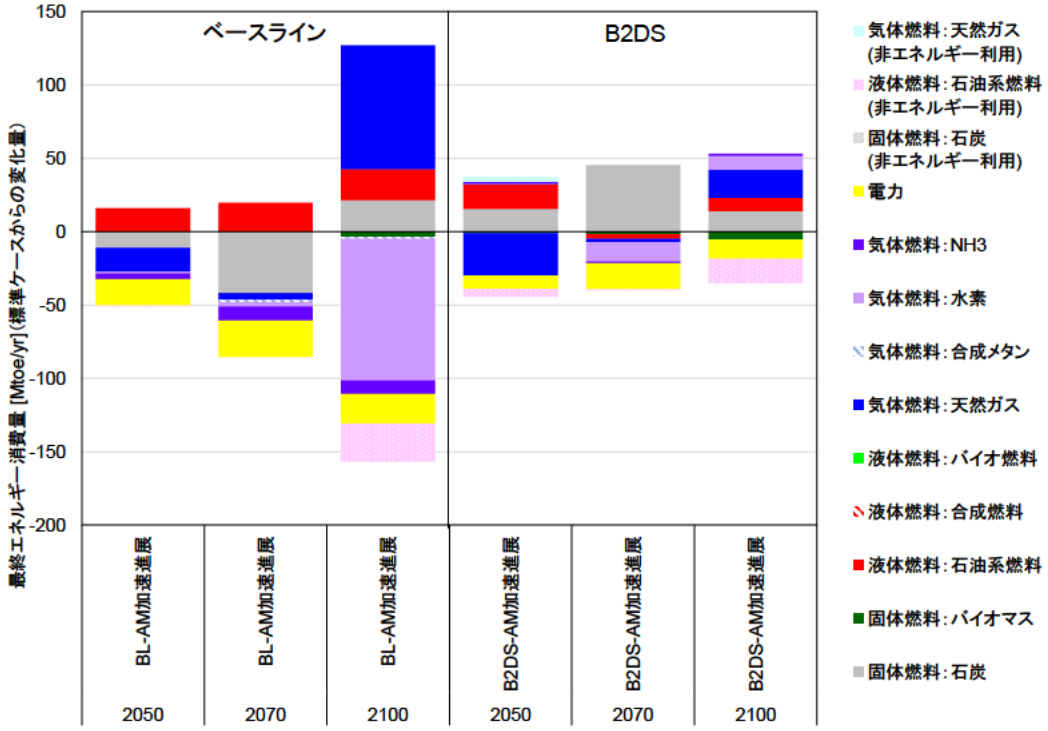


図 5.4.2-11 世界最終エネルギー消費量：産業部門

（注）AM 低速進展ケースと AM 加速進展ケースとの間には殆ど差異がなかったため、加速進展ケースのみ表示

次に、運輸部門について図 5.4.2-12 に示す。ベースライン、B2DS いずれにおいても、2050 年に AM 進展により石油系燃料からの最終エネルギー消費量が減少する。さらに、2100 年においては、このような AM 進展による影響がより大きくなる。

運輸部門の内訳で見ると、図 5.4.2-13 に示すように、国際航空において、ベースライン、B2DS どちらも、2050 年の時点で AM 進展により最終エネルギー消費量が低減し、AM 進展の程度によっても違いが見られる。しかし、2100 年においては、AM 進展によるエネルギー消費量の更なる低減があるものの、航空機のライフタイムを 30 年と想定したことから AM 低速進展ケースにおいても AM 機の普及が 100%になるため、AM 技術進展の違いによる差異は見られない。

なお、B2DS において、2100 年といった時点でも石油系燃料の利用が見られるが、CDR の貢献度が大きくなることから、特に輸送や航空部門での石油の使用がオフセットされるためと考えられる。

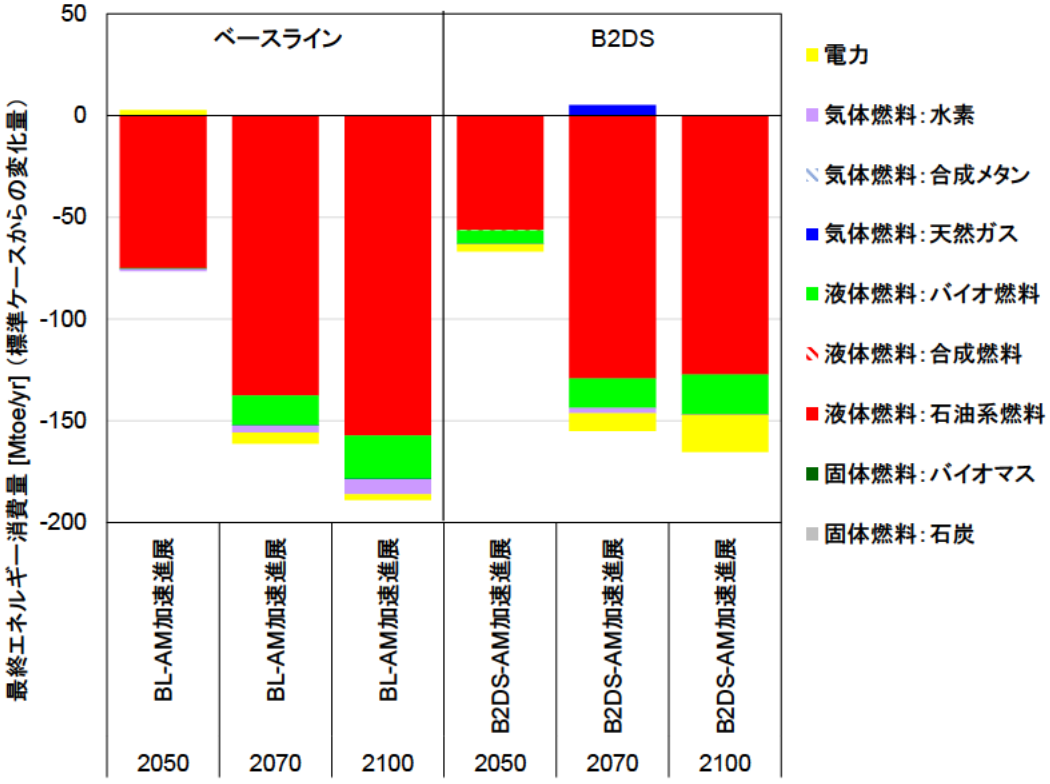


図 5.4.2-12 世界最終エネルギー消費量：運輸部門

（注）AM 低速進展ケースと AM 加速進展ケースとの間には殆ど差異がなかったため、加速進展ケースのみ表示

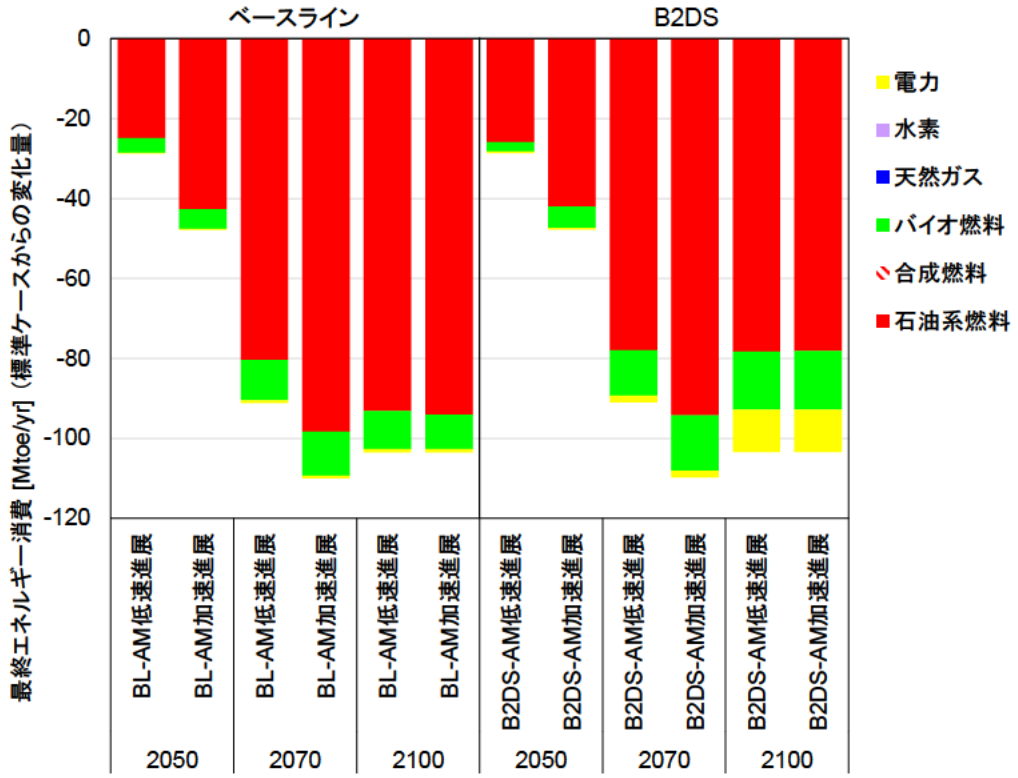


図 5.4.2-13 世界最終エネルギー消費量：運輸部門（国際航空）

また、表 5.4.2-4、表 5.4.2-5 には、それぞれ、世界のエネルギーシステムの総コスト（標準ケースとの差分）、CO_2 限界削減費用を示す。今回の分析では、B2DS シナリオは、世界全体で 2℃（>66%）を満たしつつ、主要先進国は各国が 2050 年にカーボンニュートラルを達成する制約も同時に想定しているため、限界削減費用は国間で差異があり、表 5.4.2-5 には費用の幅として表している。これらの表から、AM 進展による費用のある程度の低減効果が認められる。

表 5.4.2-4　世界のエネルギーシステム総コスト（標準ケースとの差分）
（単位：Billion USD/yr）

		AM低速進展	AM加速進展
2030-2040年の間の年平均値	ベースライン	▲1	▲4
	B2DS	▲4	▲6
2040-2050年の間の年平均値	ベースライン	▲5	▲10
	B2DS	▲12	▲17

表 5.4.2-5　B2DS シナリオにおける CO_2 限界削減費用（単位：USD/tCO_2eq）

	B2DS-標準	B2DS-AM低速進展	B2DS-AM加速進展
2040年	68-310	68-304	67-304
2050年	146-739	145-732	144-723

(4) まとめ

3DP/AM は最も期待される製造技術の一つと考えられており、原料や廃棄物の削減、軽量化といった特長のため、低エネルギー需要社会の実現への貢献が期待される技術として注目されている。今後の展開も含めた産業部門での 3DP/AM 技術の利用、またエネルギー消費や GHG 排出に与える影響について、個別的な事例に関する文献等は多数あるものの、グローバルレベルの包括的な推計や分析は殆ど見られない。本報告では、それらの研究動向を踏まえ、3DP/AM の技術進展が全体的なエネルギーや GHG 排出削減等に与える影響を見ることを目的として、航空機産業と自動車産業における 3DP/AM の進展（CM から AM へのシフト）がもたらす、素材の低減を中心とした効果を想定し、DNE21+を用いた分析を試みた。モデル分析の結果として、世界 GHG 排出量や運輸部門の世界最終エネルギー消費量において、AM 進展によるある程度の低減効果が期待できる。

3DP/AM は航空機・自動車産業をはじめとして幅広い分野で適用が進んでいる技術である。製造での試作や少量生産に利用することにより、新技術の迅速な開発やコストの削減に貢献するだけでなく、ロボティクスやデジタルツインといった他のテクノロジーとの融合によるシナジーも期待できる等、多くのポテンシャルを含んでいる。また、耐久性や素材のリサイクルという点で優位性があるとする研究もあり、それらが

エネルギー需要等に与える影響に関する調査・分析も重要である。今後は、分析の対象を拡げると共に、3DP/AM 進展による他の効果も考慮した、更に詳細な分析を検討していきたい。

参考文献（第 5.4.2 節に関するもの）

1) R. Godina et al.: Impact assessment of additive manufacturing on sustainable business models in Industry 4.0 context, Sustainability, 12-7066 (2020)
2) IPCC WG3, AR6 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (2022) https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/
3) B. A. Praveena et al.: A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential, Materials today: Proceedings, 52-3 (2022), pp.1309-1313
4) ISO/ASTM 52900:2021(en) Additive manufacturing – General principles - Funcamentals and vocalubary
5) 京極秀樹: 金属積層造形技術の最新動向と今後の展開、日本画像学会誌、60(4) (2021)
6) H. A. Colorado et al.: Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives, Journal of Materials Research and Technology, 9-4 (2020), pp.8221-8234
7) HUBS: 3D Printing Trend Report 2022 – Market changes and technological shifts in the 3D printing market, (2022)
8) S. Rouf et al.: 3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and application, Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 5 (2022), pp.143-158
9) Wohlers Associates: Wohlers Report 2022 3D Printing and Additive Manufacturing - Global State of the Industry (2022)
10) M. Mehrpouya et.al.: The Potential of Additive Manufacturing in the Smart Factory Industrial 4.0: A Review, Applied Sciences, 9 (2019)
11) T. Peng et al.: Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact, Additive Manufacturing, 21 (2018), pp.694-704
12) S. Ponis et al.: A systematic literature review on additive manufacturing in the context of circular economy, Sustainability, 13-6007 (2021)
13) S. C. Altiparmak et al.: A market assessment of additive manufacturing potential for the aerospace industry, Journal of Manufacturing Processes, 68(A) (2021), pp.728-738
14) G. Prashar et al.: Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry 4.0, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), (2022)
15) OECD: The Digitalization of Science, Technology and Innovation, (2020)
16) C. A. Giffi et al.: 3D opportunity in the automotive industry, Dloitte University Press, (2014)
17) V. Pusateri et al.: Life Cycle Assessment of metal additive manufacturing: a systematic literature review, Sustainability in Energy and Buildings: Research Advances, 8-1 (2021)
18) L. A. Verhoef et al.: The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach, Energy Policy, 112 (2018), pp.349-360

19) RITE: 技術革新によるエネルギー需要変化に関するモデル比較国際連携事業（EDITS） 令和 3 年度成果報告書 (2022)
20) D. Böckin et al.: Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry, Journal of Cleaner Production, 226 (2019), pp.977-987
21) P. C. Priarone et al.: The Role of re-design for Additive Manufacturing on the Process Environmental Performance, Procedia CIRP, 69 (2018)
22) M. Möller et al.: Sustainable Production of Aircraft Systems: Carbon Footprint and Cost Potential of Additive Manufacturing in Aircraft Systems, AST 2019
23) V. Lunetto et al.: Additive manufacturing for an urban vehicle prototype: re-design and sustainability implications, Procedia CIRP 99 (2021)
24) R. Huang et al.: Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components, Journal of Cleaner Production
25) K. Akimoto et al.: Assessment of comprehensive energy systems for achieving carbon neutrality in road transport, Transport Research Part D: Transport and Environment, 112 (2022)

5.4.3 貨物輸送技術の変化

(1) はじめに

貨物運輸からの CO_2 排出量は運輸部門全体の 40%以上を占める一方、排出削減対策の実現は容易ではない。ITF によれば貨物運輸需要は、サプライチェーンのグローバル化や e コマースの普及により今後 30 年で 2 倍以上に増大すると見込まれる [1)]が、大型トラックや海運、航空など貨物運輸における大幅排出削減技術の普及は短期的には困難な状況である。IPCC AR6[2)]における部門別ネットゼロ達成時期に関する記述においても、運輸部門単独での CN を達成することは難しいとの結果が多くを占める。運輸部門などからの残余の排出をオフセットする負排出技術への依存を軽減するためには、低排出モード・低炭素燃料への転換などの従来からの取り組みに加え、輸送技術の低炭素化や、ウェルビーイングの実現に必要な水準のサービス需要を満たしつつ輸送需要増大の抑制をアフォーダブルに実現するような革新的技術が期待される。

そこで本稿では、世界貨物運輸需要や排出を低減しうる革新的技術や対策、行動変容、またそれらの影響について、既往文献調査に基づき整理した結果を紹介する。また、これらの対策が世界 CO_2 大幅排出削減目標において果たす役割の分析フレームワークについて紹介する。

(2) 貨物運輸部門の現況

前項で述べたとおり、貨物運輸需要は今後 30 年で 2 倍に増大する見通しである（図 5.4.3-1）。新興国の経済発展、e-commerce の普及、サプライチェーンのグローバル化などが増加の要因とされている。また、ITF 推計による 2020 年の世界貨物運輸直接 CO_2 排出(tank to wheel/wake)は 3.21GtCO_2 である [1)]。IEA[3)]による世界 CO_2 燃焼排出は約 31.7GtCO_2 であり、貨物運輸からの排出シェアは約 10%程度と推計できる。モード別にみてみると、2020 年の貨物輸送需要(t-km)シェアは、海運が 70%、道路貨物（都市

間貨物+都市貨物）は 20%弱と海運の占める割合が高いが、CO_2 排出シェアは海運が17%に過ぎないのに対し、道路貨物は 69%を占めている（図 5.4.3-2）。道路貨物における排出削減対策が重要であることがわかる。また、貨物輸送需要と CO_2 排出量から算定した排出原単位を見ると、道路貨物の中でも都市貨物の排出原単位は都市間貨物の 2 倍以上である。今後の E-commerce 市場拡大に伴い都市貨物需要は増加する見通しであり、都市貨物輸送技術の動向は貨物輸送全体の排出量の増大にも大きく影響すると考えられる。なお、排出原単位が最も高いモードは航空貨物運輸であるが、需要は2050 年においても非常に小さい見通しであることから、航空輸送技術変化による排出量への影響はそれほど大きくないと考えられる。

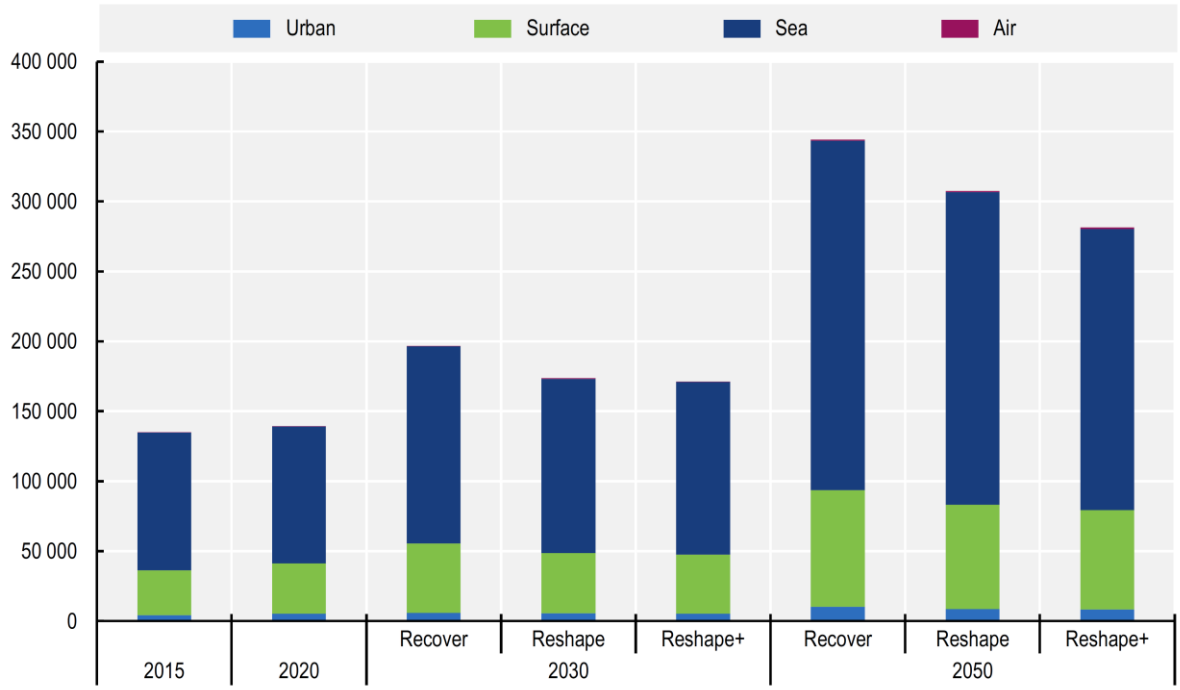


図 5.4.3-1 世界貨物輸送需要（2015 年、2050 年）

（出典：文献 1)）

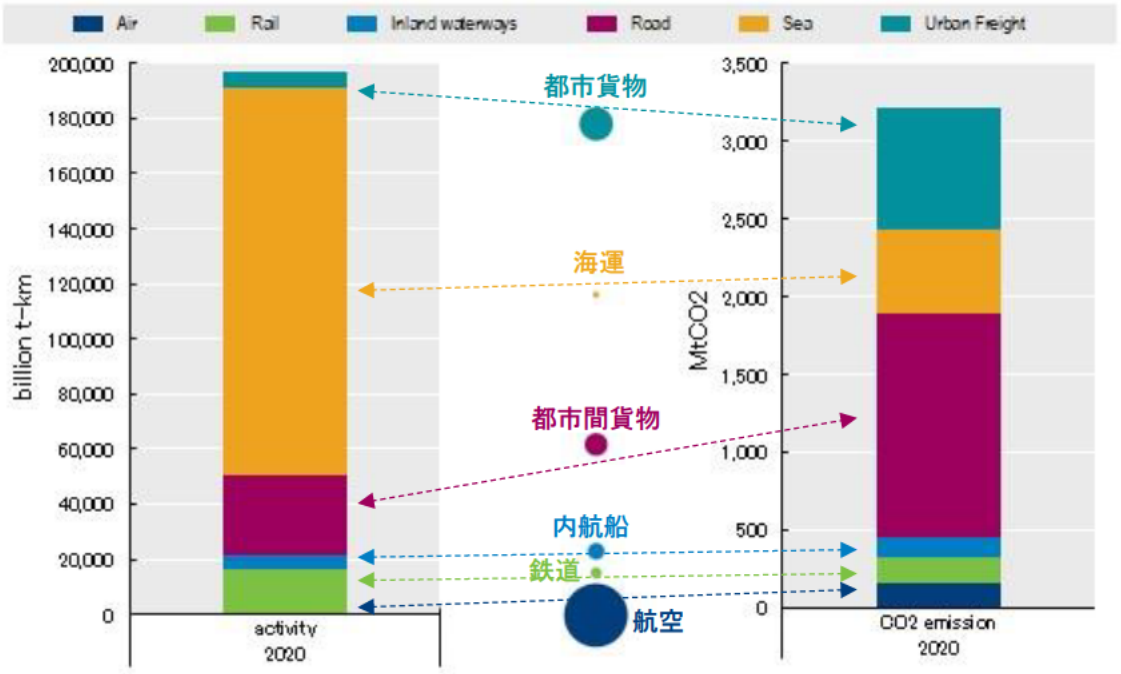


図 5.4.3-2 モード別貨物運輸需要（左）、排出原単位（中）、CO_2 排出量（右）
（出典：文献 1)、3)より筆者作成）
注：排出原単位の面積は需要と CO_2 排出量に基づく tCO_2/t-km 算定値。

近年の e-commerce の台頭は貨物運輸に大きな影響を及ぼしている。2021 年の世界 e-commerce 市場（物販系＋サービス系＋デジタル系の BtoC）は 4.92 兆ドルと推計されており、2025 年には 7.39 兆ドルと年平均 15%の成長が予想されている（図 5.4.3-3）[4]。E-commerce 市場拡大により都市貨物需要は追加的に 5%増加し、都市交通における渋滞の悪化と排出量の増加、貨物輸送車両の低積載率での運用を引き起こす要因とであることが指摘されている [1]。BtoC 市場の EC 化率は現在で 21%程度であり、今後さらに普及すれば都市貨物需要にも大きな影響を及ぼす可能性がある。

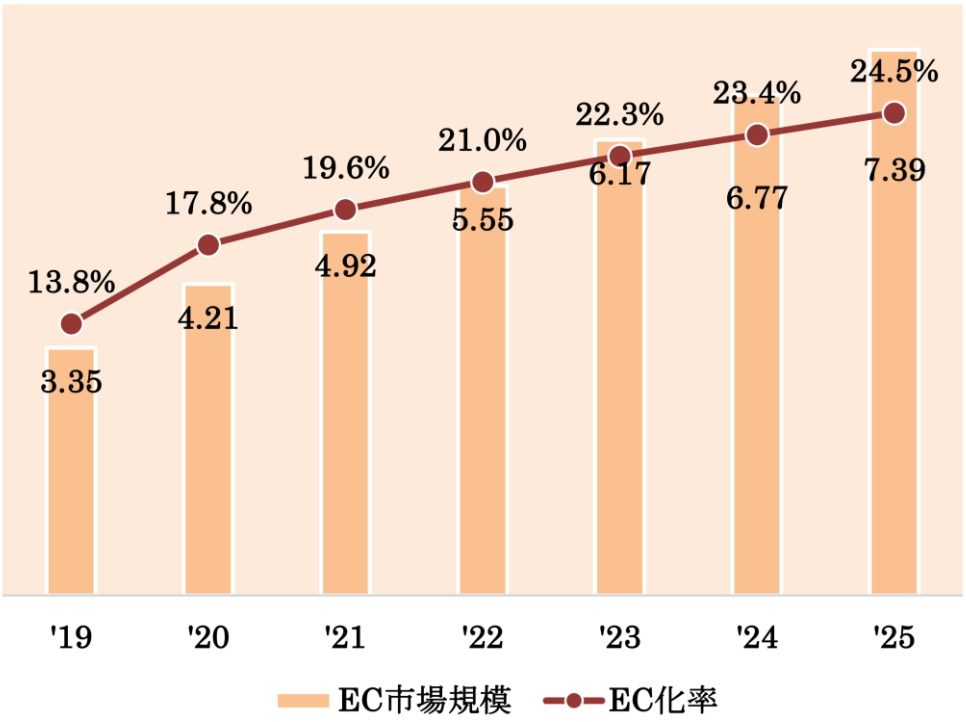


図 5.4.3-3 世界の BtoC-EC 市場規模（単位：兆 US ドル）

（出典：経済産業省 [4]）

貨物運輸における排出削減対策として、低炭素モードや低炭素燃料への転換、車両の燃費効率向上など従来から行われてきた対策に加え、デジタル化や ICT 技術などにより実現する革新的な排出削減技術や対策が期待される。これらに着目し、その導入による輸送需要及びエネルギー消費への影響分析例を、既往研究を対象に調査した。調査を通して明らかになった、排出削減に貢献しうる技術は、貨物運輸事業側の対策、貨物運輸利用側の対策、貨物運輸に直接関連しない財・サービス技術の 3 通りに大別される。貨物運輸事業側の対策としては、ICT 技術による物流システムの効率化や事業者間での資産共有、再配達率の低減、crowd logistics などによる効率向上やモーダルシフトがあげられる。貨物運輸利用側の対策としては、返品、お急ぎ便など非効率あるいは高排出な輸送の要因となる選択を回避する行動、行動変容を誘発する技術があげられる。また、貨物運輸に直接関連しない財・サービス技術として、書籍や音楽など従来の physical コンテンツの ICT 技術による代替があげられる。これら技術は排出削減目的ではないが、更なる普及はサービス需要を満たしつつ貨物輸送需要の抑制に貢献する可能性があり、また physical コンテンツに体化されたエネルギーの削減にも貢献しうる。

既往研究調査を通して得られた、貨物運輸排出削減対策分析例を表 5.4.3-1 に示す。それぞれの技術及び対策が世界排出削減に影響を与える経路を明確にするため、最終エネルギー消費の構成要素である Activity-Structure-Intensity のいずれに対して影響するかを区分して示している。Activity は輸送需要(t-km)あるいは車両走行距離(v-km)を低減しうる、Structure はモーダルシフトを誘発しうる、Intensity はエネルギー原単位を改善しうる技術や対策である。

表 5.4.3-1 既往研究における貨物運輸排出削減対策分析例

	技術、対策	影響の対象		
		需要、活動量 (activity)	構造変化 (structure)	エネルギー原単位 (intensity)
貨物運輸事業側	ICT 技術による物流効率化、Physical internet による資産共有	✓		
	再配達率の低減（AI+スマートメーター）	✓		
	配送・集荷統合場所（宅配ロッカー等）の利用	✓		
	Crowd logistics		✓	
	自動運転トラック、隊列走行			✓
	ITS (Intelligent Transport System)			✓
	ドローン配送	✓	✓	✓
貨物運輸利用側	No-rush delivery	✓	✓	
	返品の回避	✓		
財・サービス技術	デジタルコンテンツ（出版物、音楽）のダウンロード購入、オンラインビデオストリーミング視聴	✓		

次項では、これら技術及び対策による影響について調査した内容を記述する。

(3) 貨物運輸における排出削減技術、対策

① 貨物運輸事業側の技術、対策

a. ICT 技術による物流効率化、資産共有

ICT 技術を導入することにより貨物輸送が最適化され輸送距離の低減が実現する。さらには、フィジカルインターネットの実現、普及により、情報コストの削減や車両稼働率の向上や積み荷の統合によるトリップ数の低減の実現など、物流全体の効率化につながる（図 5.4.3-4）。

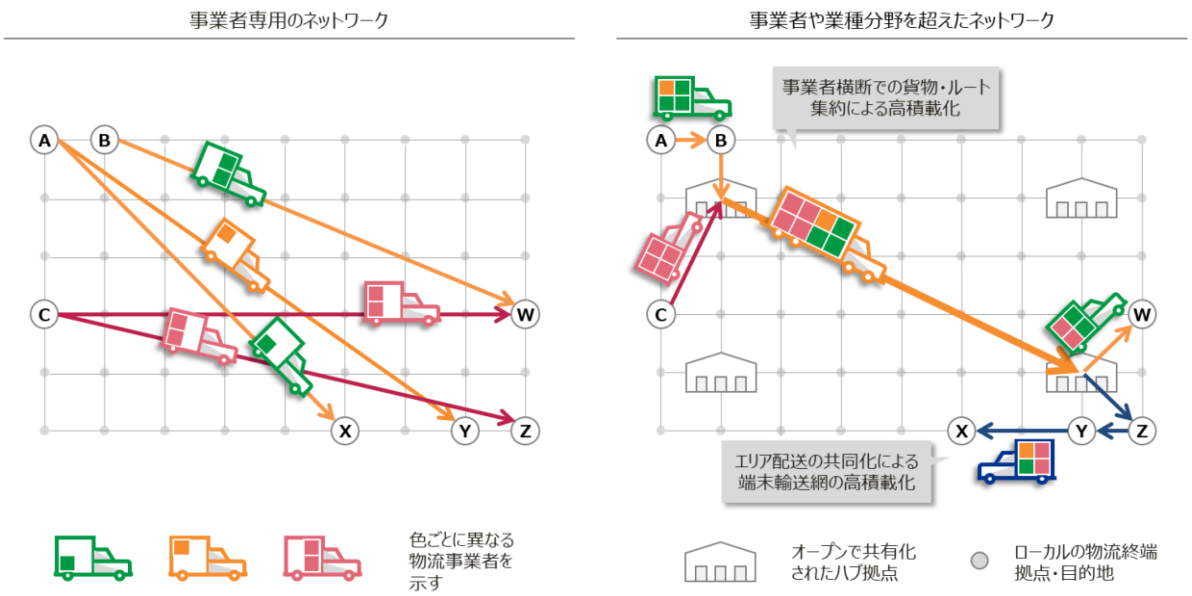


図 5.4.3-4 フィジカルインターネットによる積載効率向上のイメージ

（出典：経済産業省 [5]）

フィジカルインターネットとは、物流事業者間で資産共有と協業を最大限まで行った、オープンかつ共有された世界物流システムである [1]。モントルイユによる定義 [6] によると、「相互に結び付いた物流ネットワークを基盤とするグローバルなロジスティクスシステムである。その目指すところは効率性と持続可能性の向上であり、標準化されたモジュラー式コンテナ、物流ノード、プロトコルを通じてリソースの共有と統合を可能にする」とされる。この考え方はインターネット通信に着想を得たものであり、インターネット通信における規定プロトコル上でのパケット通信を物流の世界にも適用するというものがフィジカルインターネットの基本的なコンセプトである（図 5.4.3-5）。

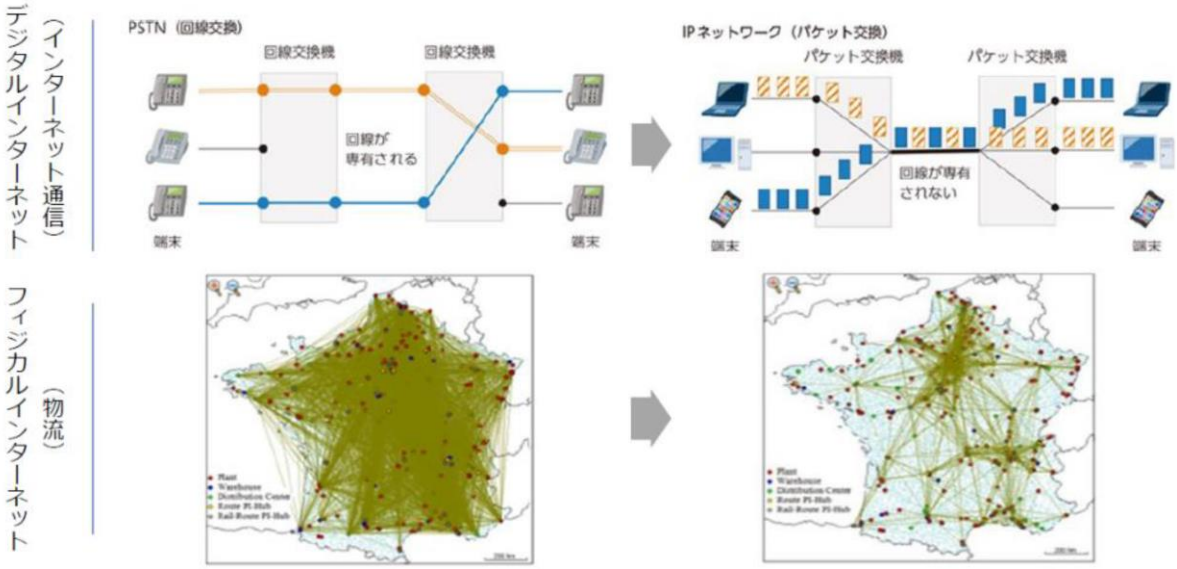


図 5.4.3-5 フィジカルインターネットの考え方 [5)]

これら ICT 技術の貨物輸送への導入により、移動距離や CO_2 排出量の低減に貢献するとの分析結果が既往研究により示されている。例えば Baudel et al [7)]は、都市貨物輸送の最適化アルゴリズムにより、移動距離は平均で 18%低減すると予測され、実証例では 63km から 47km と 25%低減効果が見られたことを示している。Wang et al.[8)] は、ICT 導入により道路貨物輸送からの CO_2 排出が 40%削減できた例があることを指摘している。

物流事業者間の資産共有による効率化の影響分析については、例えば ITF [1)]は、資産共有とフィジカルインターネットにより道路貨物の平均積載量が 2020 年に 1～4%、2050 年に 2～20%増大すると指摘している。また Montoya-Torres et al.[9)]は、コロンビアにおける都市貨物輸送の分析で、事業者の協調シナリオの下では非協調シナリオと比較し移動距離が 25%低減しうることを示している。物流改革に取り組む欧州の非営利団体 ALICE は、Physical Internet により CO_2 排出量は 49%削減可能であるとしている [10)]。

b. 再配達率の低減

貨物輸送において受領側の不在などで再配達が必要となる場合、車両輸送距離(v-km)を押し上げ非効率化の要因となる。再配達が必要となる delivery failure rates については様々な指摘分析があり、11%～60%との指摘もみられる [11)]。日本においては宅配分取扱個数のうち約 2 割が再配達されている。不在率の差異による荷物一個当たりの排出量への影響を比較分析した例では、初回配達における排出は 181g CO_2/個であるのに対し、不在率 10%の場合の初回配達排出量は 199g、30%の場合は 235g、50%の場合は 271g と推計されている [12)]。

再配達を抑制しうる技術により v-km が低減できる可能性がある。例として、スマートメーターから取得される電力データを AI が学習し、配送ルートを生成するシステムの開発と実証が日本で進められている。大学構内における実験（2018 年）では配送成

功率 98%を達成し、不在配送が 92%減少、配送距離 5%削減との結果が示された。配送業者も参画したフィールド実証（2020 年）では、約 20%の不在配送の減少が確認された一方、総走行距離と稼働時間は増加傾向であったことが確認された [13]。この実証実験結果に基づき最適ルートの公式化とシミュレーションを行った結果、総移動距離は 16%低減したことが示された [14]。この技術により、配送事業者に受領者側の不在情報が伝達されないため、安全性は向上するとされる。

この技術のほか、宅配便ロッカー等での受け取り（次項参照）など、消費者の行動変容を促すツールによっても再配達を抑制しうる。

c. 配送・集荷統合場所の利用

配送のラストマイルは物流において高コストかつ非効率な部分の一つであるとされる。配送・集荷の機能を統合した設備（いわゆる宅配ロッカー）を利用者が日常的に立ち寄る場所に設置し、この設備を貨物発送及び受け取りに利用することにより、ラストマイルの輸送需要と貨物事業者コストを削減し、また再配達も抑制しうる [15]。イタリアの分析例では、pick-up point を設置し移動距離を最適化した場合、走行距離は宅配と比較し 24%減少し、排出量が 21%減少した [16]。56 都市による比較分析では、渋滞は 36%減少、排出は 4%減少、配送コストは 48%減少することが示されている [17]。ポーランドにおける parcel lockers 導入実証においては、1 日の配送距離は従来の 150km から 70km に低減し、年 CO_2 排出量は従来比 4.7%に低減し、配送コストは 18%減少したことが示されている [18]。

d. Crowd logistics

Crowd logistics (crowdshipping ともいう）は、crowd sourcing の概念を貨物の個人輸送に適用した造語であり、群衆(crowd)の物流リソースを活用して物流サービスを行うことを指す [19),20)]。ラストマイル配送は B2C 輸送において最もコストの高い部分であり、Crowd logistics はラストマイル配送のコスト削減策の一つとして期待されている。一方、McKinnon[19)]は、crowdshipping によりラストマイル輸送が一般市民の手に委ねられることになり、もともと予定していた個人トリップに貨物輸送がシフトすることになるため v-km は低減するであろうが、マッチングが低位の場合は輸送を増大させることになるため、宅配市場で crowdshipping が一定のシェアを獲得するまでは都市輸送への影響は大きくないだろうと指摘している。また、Crowdshipping の環境影響は、利用されるモードと需要合致率により異なる。Crowdshipper が公共交通機関を利用する場合、GHG 排出は 3～35%低減するが、自動車を利用する場合は GHG 排出は 4～5%増大し、負の環境影響をもたらすと指摘している [21)]。

e. 自動運転技術、ITS (Intelligent Transport System)

道路貨物輸送において、自動運転トラックの実現により隊列走行と完全自動走行が可能となり、輸送コストの低減と CO_2 原単位の改善が期待できる。また、ITS により高品質、リアルタイム、自動でのデータ収集が可能になり、フリート管理や走行ルート選択、運転支援が改善されうる。

文献 1)では、自動運転トラックと隊列走行の導入により排出原単位は 14%低下、コストは 45%低減しうるとしている。また ITS 導入により CO_2 原単位は 2020 年に 4～15%、2050 年に 0～2%改善するとの想定をおいている。

一方、自動運転トラックや ITS の普及による効率向上と貨物輸送コストの低減は、需要を増大させ道路交通への逆モーダルシフトを誘発する可能性も指摘されている。文献 1)は自動運転トラックにより道路貨物の輸送需要が 2050 年には最大 17.8%増大し、鉄道貨物需要は 2050 年に最大 15.4%減少するとしている。Erdmann[22]は、ITS 普及により貨物輸送コストが低減し需要を 12 ～28%増大させると指摘している。

f. ドローン配送

近年のドローン技術の開発進展や商品化に伴い、ドローンの貨物運輸への利用検討も行われ始めている。貨物運輸においては、小包配送、遠隔地への医療品輸送、航空貨物輸送などが主な利用用途として検討されている

小包配送用途は、配送において最も高価で非効率な部分であるファーストマイル、ラストマイルを自動化する手段として期待されている。Google, Amazon, UPS などがドローンによる商用配送の米国 FAA 認証を取得済、もしくは取得に動いている。Amazon は米国におけるドローン配送“Prime Air”を 2022 年内に開始すると 2022 年 11 月に発表した。中国でもドローンによる小包配送の認証取得が始まっている。

遠隔地への医療品輸送については、DHL や米国スタートアップ企業がアフリカ地域でサービスを行っている。

貨物ドローンによる大容量・長距離配送の実現への期待は高まっている。米国スタートアップ企業 Elroy Air は最大 225kg の貨物を 500km 自動輸送可能な貨物ドローンを開発し、FedEx と共同で 2023 年にテスト飛行を行う計画としている。

ドローン配送のエネルギー消費に関しては、単位距離当たりのエネルギー消費で見ると消費電力は小さいとされているが、ペイロードが 1kg 前後と小さいため、輸送需要あたりの消費エネルギーはトラックよりも大きいと考えられる（表 5.4.3-2）。このため、製品仕様上は、エネルギー消費においてドローンはトラックより優位にはならないが、トラックが低積載率で稼働するケースと比較すると competitive となる可能性はある。ドローンは、積載量及び航続距離の点から当面は導入可能な市場が限られると考えられるものの、移動距離短縮による輸送需要への影響や、非効率輸送の改善に関しては更なる研究や実証試験が待たれる。

表 5.4.3-2 ドローン配送におけるエネルギー消費

ドローンの種類	エネルギー消費	Payload(kg)	出典
Quadcopter	21.6 wh/km ≒0.08MJ/km	5.0	Figliozzi[23]
Quadcopter	0.08 MJ/km	0.5	Rodrigues[24]
Quadcopter	0.04 MJ/km	0.5	Stolaroff[25]
Octocopter	0.34 MJ/km	7	
(ref.) class 4 truck	7.32 MJ/km	6351 to 7257	

② 貨物運輸利用側の技術、対策

a. 配達速度の緩和(no-rush delivery)

e-commerce 等における即時配達サービスは、高速かつ排出原単位の高いモードによる輸送や、低積載率での車両稼働を引き起こす可能性があり、排出増大につながりうる。Kang et al.[26]は、中国オンラインショッピングにおける express delivery の環境負荷分析において、express delivery トレンドでは航空輸送が道路貨物を代替し比率がベースライン比 10%増大するとの想定を置いている。配達日時を遅らせる、または配送日程に柔軟性を持たせることで、貨物輸送の積載率の向上に寄与し、輸送車両の効率的な稼働が可能になる。また低排出モードへのシフトにもつながる可能性がある。

近年 EC 事業者の中には、顧客に対し遅めの配達日を選択するような行動変容を促す動きがみられる(例:Amazon によるインセンティブ付与プログラム“no-rush shipping”)。消費者側も、環境負荷情報を提供されることにより、環境負荷の低い配達速度を選択する行動をとるケースがしばしばみられ、事業者は環境負荷情報を提供するだけで配送コストと排出を低減しうるとされている[27]。消費者が no-rush delivery 行動を選択することにより物流コストは 3～32%削減しうることが、ファストファッション EC におけるインセンティブ付き no-rush delivery に関する消費者意向調査を通して示されている[28]。No-rush delivery 導入により高積載率でのトラック配送が促進されれば、輸送距離は平均 11%、配送コストは最大で 14%程度低減しうる[29]。

b. 返品の回避

オンラインショッピング等で購入した商品の返品率は、商品の種類により差はあるが、電子機器では販売額の 5－10%、衣料品では 20～40%との分析例がある[11]。返品された商品の輸送は reverse supply chain であり、輸送効率向上の対策が取られておらず非効率な貨物輸送とされている。この非効率性と返品量は初回配達の排出量の 30%以上に相当する可能性があり、返品が回避されるよう EC 事業者側の対策と環境情報の提供、消費者による理解が重要である[30]。

返品の回避につながるような技術の導入により、環境負荷の低い選択が誘発されうる事例として、衣料品の e-commerce 事業者がサイズ確認アプリ(3D Look)を導入することにより返品率の 30～40%低減を実現した例がある。これは返品の理由がサイズ不適

合の場合であり、消費者は様々な理由で購入物品の返品を行っていると考えられるため、更なる調査が求められる。

③ 財・サービス関連技術

a. デジタルコンテンツのダウンロード購入

出版物や音楽のデジタルフォーマットでの売買及び配信、映像の動画配信など、デジタルコンテンツやサービスのデジタル化はすでに広範に普及がみられている。世界コンテンツ市場におけるデジタル市場の割合は 2014 年の 12%から 2018 年には 21%に拡大し、今後も拡大するとみられている（図 5.4.3-6）。これらは排出削減対策技術そのものではないが、ICT 技術により従来の物質ベースのコンテンツを代替することにより、コンテンツ提供というサービス需要を満たしつつ物質需要と貨物運輸需要を削減する可能性のある技術である。これら技術は貨物輸送以外のエネルギー消費についても影響があるため、ライフサイクルベースでの影響の把握が求められる。

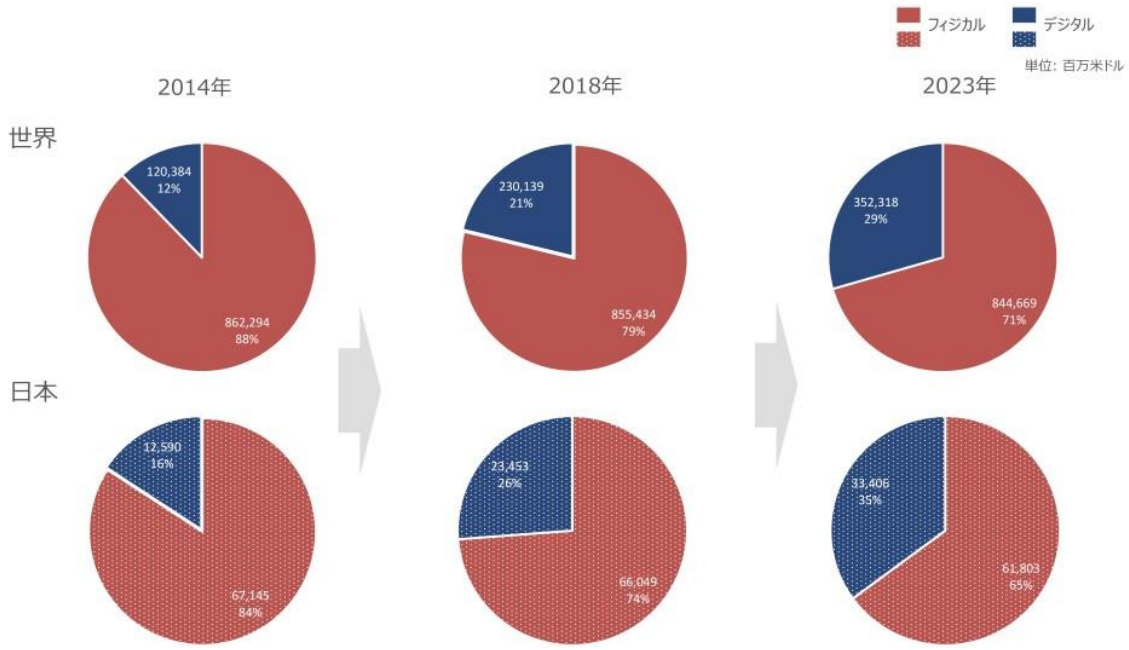


図 5.4.3-6 コンテンツ市場におけるデジタル／フィジカル別の割合（金額ベース） [31)]

印刷書籍の購読を、タブレット等によるデジタル書籍の購入及び購読で代替した場合における、単位当たり貨物輸送需要及びエネルギー消費への影響は、LCA 評価のシステムバウンダリとタブレットの総利用時間により幅広い結果が示される。Achachlouei et al.[32)]は、スウェーデンにおける同一雑誌の電子版（タブレット利用）と印刷版雑誌の環境影響の LCA 評価を行い、電子版の環境影響は、タブレットの利用頻度が低い場合は印刷版よりも大きいが、タブレットの利用頻度が高い場合は印刷版の半分程度であるとされている。貨物輸送需要は－30～＋200%、エネルギー消費は－74%～+200%（輸送エネルギー込み）と評価している。この分析は LCA 分析であるが、印刷版雑誌のシステムバウンダリにパルプ木材製造、輸送、紙パルプ製造は含まれていない。Naicker and Cohen[33)]は、アフリカにおいて大学の書籍 4 年分 21 冊を印刷書籍

あるいは e-book で読書した場合の環境影響と累積エネルギー需要の LCA 評価を、パルプ木材製造及び輸送、紙パルプ製造時のエネルギー需要も考慮し行っている。印刷書籍はデジタル版と比較し環境影響が大きく、特に紙の製造と印刷においてエネルギー需要と環境影響が大きいことが示されている。デジタル化により貨物輸送需要は 93%、エネルギー消費は 69%低減するとの評価である。パルプ木材及び紙パルプ輸送までを考慮すると、デジタル出版による貨物輸送需要の低減効果は大きいことが示唆される。

デジタル音楽のダウンロード購入による CD 販売の代替に関する LCA 評価としては、Türk et al.[34]や、Weber et al.[35]の例がある。いずれも、再生機器に体化されたエネルギーは考慮しておらず、従ってダウンロード販売やオンライン視聴での代替により貨物輸送需要は 100%削減されると評価されている。エネルギー消費は Weber et al.[35]において 85～76%低減されると推計されており、ダウンロード購入は、データ通信に関連するエネルギー消費や排出を若干増加させるものの、全体としてはエネルギー消費や CO_2 排出を低減するとの結果である。

映像のデジタル購入については、Shehabi et al.[36]により、オンラインビデオストリーミング視聴における一次エネルギー消費及び GHG 排出について従来の DVD 視聴との比較が行われている。音楽と同様、貨物輸送需要は 100%削減される。単位当たりエネルギー消費を比較すると、ストリーミング視聴とレンタル視聴は同等であり、消費者の店頭への移動が発生する場合の輸送に係るエネルギー消費の影響が大きいとの結果である。

文献 34)、35)、36)を参考に CD あるいは DVD1 枚当たりの貨物輸送需要を試算した結果、0.07～0.22 t-km と算定され、デジタルコンテンツのオンライン購入により貨物輸送需要が 100%削減されたとしても貨物需要(t-km)に対する影響は大きくないと考えられる。一方、再配達や express delivery による非効率な輸送の発生を抑制する可能性を考慮するとエネルギーシステムへの影響は異なってくると考えられる。ICT 技術に付随するエネルギー消費も考慮した上でサービスのデジタル化によるエネルギーシステム全体への影響を分析していくことが求められる。

④ 貨物運輸への影響

以上の調査に基づき、各種技術及び対策が貨物運輸のエネルギー消費構成要素に与えうる影響を整理した結果を表 5.4.3-3 に示す。物流の効率化に寄与しうる技術や、ラストマイル輸送需要削減に寄与する対策は車両走行距離(v-km)削減に貢献しうる。一方、コンテンツのデジタル化とオンライン提供による物質コンテンツの代替は、貨物輸送需要(t-km)削減の可能性があるものの利用状況や代替される財の種類によって幅があり、場合によっては貨物輸送需要を増大させる可能性もあることが示唆される。産業部門など他部門への影響や、ネットワーク通信にかかるエネルギー消費、あるいは①項や②項で指摘した再配達や express delivery などの消費者行動による v-km 押し上げ効果も考慮したうえで、エネルギーシステムへの影響を包括的に分析することが望ましい。

表 5.4.3-3 デジタル技術による貨物運輸への影響

技術、対策	サブセクター	対象	影響	その他影響
ICTによる物流効率化	urban, road freight	走行距離 (v-km)	－25～－18%	
資産共有+ physical internet	road freight	走行距離 (v-km)	－20～－１%	
資産共有	urban, road freight	走行距離 (v-km)	－25%	
再配達率の低減	urban, road freight	走行距離 (v-km)	－16%	
配送・集荷統合場所の利用	urban, road freight	走行距離 (v-km)	－53%～－24%	
自動運転トラック+隊列走行	road freight, trucks	エネルギー原単位	14%改善	
ITS	freight	エネルギー原単位	4～15%改善	
No-rush delivery	road freight, trucks	走行距離 (v-km)	－11%	
書籍のデジタル購読	freight	輸送需要 (t-km)	－93～+200%	エネルギー消費－74～+200%（輸送エネ込）
音楽、映像のダウンロード購入、オンライン視聴	freight	輸送需要 (t-km)	0.07～0.24t-km/枚 -> 0	エネルギー消費－85～+1%（輸送エネ込）

(4) まとめ、今後の課題

本節では、世界貨物運輸のエネルギー需要を低減しうる技術や対策について、既往文献等の調査を行い、エネルギー消費の構成要素別に影響の整理を行った。貨物運輸における技術や対策は、車両走行距離(v-km)削減やエネルギー原単位改善を介して排出削減に貢献しうる。また、コンテンツのデジタル化とオンライン提供による physical コンテンツの代替は、ライフサイクルベースでは貨物輸送需要(t-km)と最終エネルギー消費双方において削減の可能性があるものの、デジタルコンテンツ再生機器の利用状況や代替されるコンテンツの種類によって影響に幅があり、貨物輸送需要を増大させる可能性もあることが明らかになった。

今回の調査ではコストに関する情報が十分ではないため、今後はコスト情報も含めた調査を通して影響を整理する必要がある。また、紙パルプ製造やデータ通信など他部門への影響を明らかにした上で、世界排出削減目標下での世界エネルギーシステムにおけるこれら対策の役割を評価することは需要である。

なお、都市貨物交通における技術や対策は排出削減に大きな影響をもたらすと考えられるため、今後の分析においては都市貨物輸送の明示的な取り扱いについて検討する必要がある。さらに、各種効率向上による運輸需要の増加、EC 普及による購買行動の促進などのリバウンド効果を考慮することも重要である。世界全体の流れとしての都市化や電化、デジタル化を踏まえたうえで、貨物運輸における経済的かつウェルビーイング向上に資する排出削減のあり方について分析していくことが求められる。

参考文献（第 5.4.3 節に関するもの）

1) ITF, Transport Outlook 2021, (2021)
2) IPCC, IPCC WGIII AR6, (2022)
3) IEA, GHG Emissions from Energy, (2021)
4) 経済産業省、令和３年度　電子商取引に関する市場調査報告書、(2022)
5) 経済産業省、フィジカルインターネット・ロードマップ、(2022)
6) Benoit Montreuil, Toward a Physical Internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge, Logistics Research 3, pp. 71–87 (2011)
7) Thomas Baudel, Laetitia Dablanc, Penelope Alguiar-Melgarejo, Jean Ashton, Optimizing Urban Freight Deliveries: From Designing and Testing a Prototype System to Addressing Real Life Challenges, Transportation Research Procedia, Volume 12(2016), Pages 170-180.
8) Yingli Wang, Vasco Sanchez Rodrigues and Leighton Evans, The use of ICT in road freight transport for CO_2 reduction – an exploratory study of UK's grocery retail industry, The International Journal of Logistics Management, Vol. 26 No. 1(2015), pp. 2-29
9) Jairo R. Montoya-Torres, Andrés Muñoz-Villamizar & Carlos A. Vega-Mejía, On the impact of collaborative strategies for goods delivery in city logistics, Production Planning & Control, 27:6(2016), 443-455
10) ALICE, Roadmap towards Zero Emissions Logistics 2050
11) Julia Edwards, Alan McKinnon, and Sharon Cullinane, Comparative carbon auditing of conventional and online retail supply chains: a review of methodological issues, Supply Chain Management, Vol. 16 No. 1, (2011)
12) Julia Edwards, Alan McKinnon, Tom Cherrett, Fraser McLeod, and Liying Song, Carbon Dioxide Benefits of Using Collection–Delivery Points for Failed Home Deliveries in the United Kingdom, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2191, (2010)
13) Shimpei Ohsugi and Noboru Koshizuka, Delivery Route Optimization Through Occupancy Prediction from Electricity Usage, 2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), (2018)
14) Shimpei Ohsugi, So Negishi, Kensaku Okada, Hayato Yoshii, Kenji Tanaka, and Noboru Koshizuka, Traveling Salesman Problem on Smart Meter Infrastructure, 2021 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), (2021)
15) ITF, Transport Climate Action Directory – Drop-off collection points / Pick-up consolidation, (2021)

16) Pasquale Carotenuto, Massimiliano Gastaldi, Stefano Giordani, Riccardo Rossi, Alberto Rabachin, Alessio Salvatore, Comparison of various urban distribution systems supporting e-commerce. Point-to-point vs collection-point-based deliveries, Transportation Research Procedia, Volume 30(2018), Pages 188-196.
17) José Holguín-Veras, Johanna Amaya Leal, Ivan Sanchez-Diaz, Michael Browne, Jeffrey Wojtowicz, State of the art and practice of urban freight management Part II: Financial approaches, logistics, and demand management, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 137(2020), Pages 383-410
18) Stanisław Iwan, Kinga Kijewska, Justyna Lemke, Analysis of Parcel Lockers' Efficiency as the Last Mile Delivery Solution – The Results of the Research in Poland, Transportation Research Procedia, Volume 12(2016), Pages 644-655
19) Alan C. McKinnon, Crowdshipping: A communal approach to reducing urban traffic levels? Logistics White Paper, September 1/2016 (2016).
20) Valentina Carbone, Aurélien Rouquet and Christine Roussat, The Rise of Crowd Logistics: A New Way to Co-Create Logistics Value, Journal of Business Logistics, 2017, 38 (4), pp.238-252.
21) Michele D. Simoni, Edoardo Marcucci, Valerio Gatta, and Christian G. Claudel, Potential last-mile impacts of crowdshipping services: a simulation-based evaluation, Transportation (2020) 47:1933–1954
22) Lorenz Erdmann, Lorenz, Hilty, James Goodman, and Peter Arnfalk, The future impact of ICTs on environmental sustainability, EC Technical Report EUR, (2004).
23) Miguel A. Figliozzi, Carbon emissions reductions in last mile and grocery deliveries utilizing air and ground autonomous vehicles, Transportation Research Part D 85 (2020) 102443
24) Thiago A. Rodrigues, Jay Patrikar, Natalia L. Oliveira, H. Scott Matthews, Sebastian Scherer, and Constantine Samaras, Drone flight data reveal energy and greenhouse gas emissions savings for very small package delivery, Patterns 3, 100569 (2022)
25) Joshuah K. Stolaroff, Constantine Samaras, Emma R. O'Neill, Alia Lubers, Alexandra S. Mitchell & Daniel Ceperley, Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery, Nature communications (2018) 9: 409
26) Peng Kang, Guanghan Song, Ming Xu, Travis R. Miller, Haikun Wang, Hui Zhang, Gang Liu, Ya Zhou, Junshu Ren, Ruoyu Zhong & Huabo Duan, Low-carbon pathways for the booming express delivery sector in China, Nature Communications 12, 450 (2021).
27) Rodney W. Thomas, Monique L. Ueltschy Murfield, and Lisa M. Ellram, Leveraging sustainable supply chain information to alter last-mile delivery consumption: A social exchange perspective, Sustainable Production and Consumption, Volume 34 (2022), Pages 285-299
28) Alison M. Heuser and Tabjeel Ashraf, Incentivizing No-Rush Delivery in Omnichannel Retail, Master thesis, (2019).
29) Kahina Hamoudi, Ahmed Bellaouar, Romain Petiot, A model of systems dynamics for physical flow analysis in a distribution supply chain, Transport and Telecommunication, volume 22, no. 1(2021), 98‑108
30) Xu Tian and Joseph Sarkis, Emission burden concerns for online shopping returns, Nature Climate Change, 12, 2‑3 (2022).
31) 経済産業省、コンテンツ市場の世界市場・日本市場の概観(2020)、https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/contents/downloadfiles/report/202002_contentsmarket.pdf（アクセス日：2022.10.3）

32) Mohammad Ahmadi Achachlouei, Åsa Moberg,Elisabeth Hochschorner, Life Cycle Assessment of a Magazine, Journal of Industrial Ecology, 19(2015)
33) Vinesh Naicker and Brett Cohen, A life cycle assessment of e-books and printed books in South Africa, Journal of Energy in Southern Africa, 27(2), (2016)68‐77.
34) Volker Türk, Vidhya Alakeson, Michael Kuhndt and Michael Ritthoff, The environmental and social impacts of digital music, (2013), https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/1760/file/1760_Digital_Music.pdf （アクセス日：2022.10.14）
35) Christopher L. Weber, Jonathan G. Koomey, and H. Scott Matthews, The Energy and Climate Change Implications of Different Music Delivery Methods, Journal of Industrial Ecology, 14(2010), 754-769.
36) Arman Shehabi, Ben Waker and Eric Masanet, The energy and greenhouse-gas implications of internet video streaming in the United States, Environmental Research Letters, 9 (2014) 054007

5.5 最終需要部門の変化に伴う統合的な分析

5.5.1 建築部門のエネルギー需要削減における課題の解決に向けた分析

建築部門のエネルギー需要を大幅に削減する技術的方策は、一般に知られており定量化もされてきたが、このポテンシャルを実際に活用するのはチャレンジングである。緩和策の採用には、関係者（家主、テナント、電力会社、規制当局など）の行動に依存する多くの障壁がある。豊かになるにつれ、また気候変動による環境変化に伴い、冷房のエネルギー需要増加も見込まれる。このような要因が重なり、ここ数年、建築部門における脱炭素化はこれまで予想されていたよりも難しいという見方がされている。本節では、このような課題を解決すべく国際応用システム研究所（IIASA）で実施された (1)エージェントベースアプローチによる個人の行動変容と、(2)気候変動による冷房需要への影響を、建物ストック回転率モデルへ統合した分析と、そこから得られた知見について記載する。

(1) 個人のエネルギー消費行動変容と社会規範が建物のエネルギー改善に果たす役割：ボトムアップ型結合モデリング

① 背景と目的

建物は、人々に住まいやサービスを提供する上で不可欠である一方、世界の GHG 排出量の 21%を占めている（Cabeza et al., 2022[3)]）。これまでの研究によると、建物における需要側の緩和戦略は、技術的には 2050 年までに温室効果ガス（GHG）排出量を 78%（6.8GtCO_2e）削減し（Creutzig, Niamir al.,2022a[6)]）、再生可能エネルギーへの移行を迅速かつ費用対効果の高いものにできる（Patt al.,2019[33)]）。家庭のエネルギー消費が排出量に与える影響と社会規範の新たな変化を考慮すると、個人の行動変革が気候変動緩和に関する議論の主要なテーマとしてあげられる（Creutzig et al., 2021[5)]; Creutzig, Niamir, et al., 2022a[6)]; Dietz et al., 2009[10)]; Faber et al., 2012[13)]; Niamir, Kiesewetter, et al., 2020[30)]; Nielsen et al., 2021[31)]）。

建築部門のエネルギー需要とその経年変化の評価には、モデルが必要である。これまで、統合評価モデル（IAM）やマクロ経済応用一般均衡（CGE）モデルは、気候変動緩和における定量的な政策評価の標準ツールとして利用されてきた（Babatunde et al.,2017[1]; Fujimori et al.,2014[16]; O'Neill et al.,2017[32]）。これら IAMs は、GHGs 削減政策に関連するエネルギー供給、技術、投資、消費パターンに焦点を当て、方程式を用いて需給行動を表現し、生産や為替要因に関する市場をシミュレートする。炭素税、排出削減目標、排出権取引、再生可能エネルギー、エネルギー効率は、高度なエネルギー政策評価 IAMs モデルの主要研究課題である。但し、これら IAMs は、予算制約、完全情報、競争市場の下で最適な意思決定を行う合理的な代表エージェントを前提としている（Farmer et al., 2015[15]; Niamir, Ivanova, & Filatova, 2020[28]; Stern, 2016[37]）。パラメータの一部は調整され、残りは時系列データを用いて計量経済学的に推定される。従って、IAMs は、短絡的思考や短期的行動に対する GHG 削減政策の経済効果を検証するに適するが、行動変容を統合するのは難しい。そのため、モデルが先入観なく気候緩和政策の助言を提供する妥当性や能力について、議論がある。（Farmer et al., 2015[15]; Farmer & Foley, 2009[14]; Isley et al., 2015[22]; Niamir, Kiesewetter, et al., 2020[30]; Stern, 2016[37]）。最近の開発では、IAMs は、インフラとストックのダイナミクスを考慮し、需要側の脱炭素戦略の表現を改善するために、部門別建物使用モデルと結合された（Daioglou et al., 2022[9]; Edelenbosch et al., 2021[11]; Knobloch et al., 2019[23]; Mastrucci et al., 2021[25]）。社会経済や技術の詳細が向上しているにもかかわらず、これら結合モデルは、簡略化された方法で行動面を考慮し、建物の床面積や活動レベルなどに外生的な仮定を用いることが多い。一方、エージェントベースのマイクロシミュレーションモデルでは、エネルギー需要、均衡外ダイナミクス、社会的ダイナミクス、相互作用、学習など、行動学的に豊かな表現に注力している（Castro et al., 2020[4]; Hesselink & Chappin, 2019[18]; Niamir et al.,2018[27];Rai et al.,2016[34]）。

本研究では、建物インフラのダイナミクスを踏まえた改築の意思決定を考慮しながら、住宅のエネルギー行動の変化と社会的相互作用によるエネルギー・気候の利益を捉えるための新たなモデリングフレームワークを提示する。このフレームワークは、ボトムアップ型のエネルギー行動エージェントベースモデル（BENCH）と、ボトムアップ型の建物ストックエネルギーモデル（MESSAGEix-Buildings）の 2 つの主要な相互リンクモデルで構成される。BENCH モデルは、エンドユーザーの行動シナリオと社会シナリオを策定する。MESSAGEix-Buildings では、異なる世帯や住宅タイプにおける住宅エネルギーの変化を更新し、ストック回転のダイナミクスとエネルギー需要を決定する。このフレームワークは、ボトムアップの行動シナリオや社会的なエンドユーザーシナリオを建物ストックダイナミックシナリオに導入することにより、気候緩和オプションに関する政策立案者の意思決定を支援できる。

② 分析方法

a. ボトムアップ・モデリング

i) BENCH エージェントベースモデル

BENCH ABM（Niamir et al., 2018[27]; Niamir, Kiesewetter, et al., 2020[30]）は、低炭素経済への移行における個人のエネルギー使用に関する行動変化の役割を研究するために開発されたモデルである。BENCH ABM の世帯は、社会人口学的特性（所得、年齢、教育など)、住居の特性（タイプ、サイズ、年齢など)、エネルギー消費パターン（電気・ガス消費、エネルギー供給者など)、行動要因（意識、個人規範、社会規範など）の点で不均質である。エージェントの行動ルールは EU の 2 つの NUTS2 地域、すなわちスペインの Navarre とオランダの Overijssel の調査データに基づき調整されている(Niamir, Ivanova, Filatova, et al., 2020[29])。BENCH モデルは、合理的な選択の要素（経済、金融など）と文脈上の行動要因の両方を統合している。変動性を適切に反映することで、様々な改築の戦略やそれらの相互作用を考慮できる。不均質な世帯は、相互作用により、互いに学び合う。特に、社会的ネットワーク（家族、近隣、機関など）の中での情報交換により、適応に関する自身の意識やモチベーションが変化する可能性がある。本研究では、この ABM をさらに進化させ、ABM と IAM で用いられる関数形の理論的整合性、データセットやシナリオ想定の両方の観点から、MESSAGEix-Buildings との統合を可能にした。特に、BENCH_v04 では、建物の断熱に関する家庭の意思決定に焦点をあてた。

ii) MESSAGEix-Buildings モデル

MESSAGEix-Buildings (Mastrucci et al., 2021[25]) は、異なる社会経済、技術、気候、政策シナリオの下で、建築物ストックと関連エネルギー需要の推移を評価するボトムアップモデルである。本研究では、MESSAGEix-Buildings の 2 つの主要なサブモジュールを使用する。一つは可変度日数（variable degree days）計算に基づく冷暖房のエネルギー需要モデル CHILLED (Cooling and Heating gLobaL Energy Demand model)で、もう一つは動的マテリアルフロー分析（MFA）に基づき新築、解体、改装を評価するストック回転モデル STURM (Stock TURnover Model of global buildings) である。MESSAGEix-Buildings は、(GHG 排出）価格フィードバックのため統合評価モデリングフレームワークの MESSAGEix-GLOBIOM（Huppmann et al, 2019[19]）とソフトリンクすることができる。モデルの範囲と解像度は、空間的、時間的に柔軟で、国～世界、中期～長期の評価に対応できる。本研究では、5 年間のタイムステップで、国レベルとした。MESSAGEix-Buildings は、不均質な世帯や住宅特性を高い粒度で表現する。ここでは、立地（都市と農村)、気候帯、住宅タイプ（一戸建と多世帯)、建築時期とエネルギー効率レベル(1945 年以前に建てられた既存、1946～1990 年建築の既存、1991～2015 年建築の既存、改築、2015 年以降の新築)、エネルギーキャリア（バイオマス、石炭、天然ガス、石油、地域暖房、電気）という次元で区別する。

b. 統合の枠組み

モデル統合の枠組み概要を図 5.5.1-1 に示す。ワークフローは 3 つの主要なステップから成る。1) MESSAGEix-Buildings で建物ストックの回転と将来の構成を評価する。2) 建物ストックの構成を BENCH_v04 に引き継ぎ、世帯社会経済と住居特性の不均質性を考慮して改築の意思決定を推定する。3) 改築行動を MESSAGEix-Building に引き継ぎ、建物ストックの構成とエネルギー需要の更新を計算する。

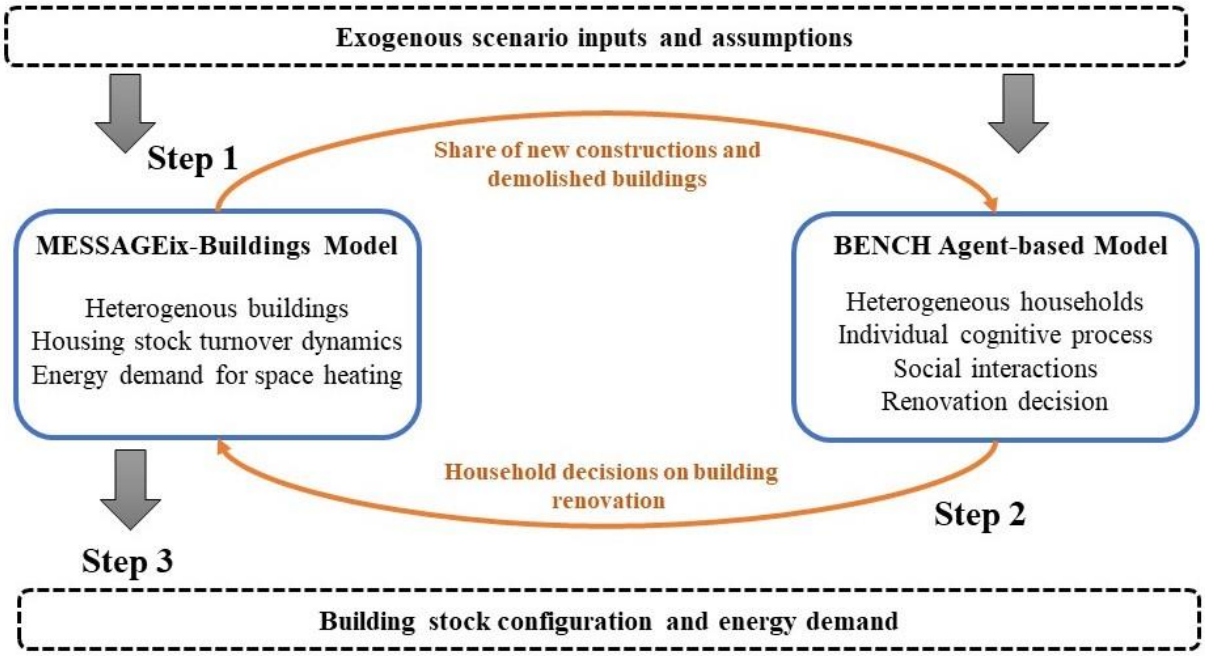


図 5.5.1-1 モデル統合の枠組み

c. シナリオとモデルラン

i) 建物在庫回転率シナリオ

MESSAGEix-Buildings のベースライン(B)シナリオは、Shared Socio-economic Pathway SSP2 (Riahi et al., 2017[35])と整合的で、建物ストックとエネルギー需要は過去のパターンを継続する。住宅部門について、住宅規模拡大は現在の傾向を継続、中程度のエネルギー効率向上、中程度のエネルギー需要レベルを想定している（Mastrucci et al., 2021[25])。

ii) 行動・社会シナリオ

BENCH_v04 ABM のエージェントは、社会人口統計学的特性(年齢、収入、教育など)、居住する住宅（入居状況、規模、エネルギーラベル“energy label”など)、心理的要因（態度や信念、個人規範など）の点で不均質であることに加え、知識や認識、社会的相互作用への関与や学習などの行動特性も不均質である。BENCH_v04 ABM では、社会的相互作用の強さと学習速度を区別して、2 つのエンドユーザー行動シナリオ（SD、ID）を設定している（表 5.5.1-1)。SD シナリオは、世帯の社会的相互作用が制限されている BENCH_v04 ABM のベースラインに相当し、ID シナリオは、国民全体の知識とモチ

ベーションを高めることで建物の改築を活性化し促進するといった情報政策の強化を想定している。

iii) 建物ストックの回転率とエネルギー改築シナリオの組み合わせ

MESSAGEix-Buildings のストック回転率ベースライン（B）と BENCH_v04 ABM の 2 つのエンドユーザー行動シナリオ（SD、ID）を組み合わせ、異なる社会動態下での建物ストックと改築行動、及び暖房エネルギー需要への影響を分析する。この他、2 つのシナリオを、比較用に追加する。第一の追加シナリオ（B-LR）では、現在の改築率（スペイン：1.05%/yr、オランダ：0.95%yr）を 2050 年まで一定とし、現行の慣習を継続する。第二の追加シナリオ（B-HR）は、欧州の「リノベーションの波」（European Commission, 2020[12)]）の野心に沿った改築率の倍増を想定している。B-HR シナリオでは、改築率は 2025 年までに年率 2.5%に加速し、2050 年まで一定に保たれる。他の研究による同様のシナリオ（BPIE, 2020[2)]）と一致するように、改築の 20%は大規模な改築（60%のエネルギー削減に達する）、残りは中程度の改築（平均 30%のエネルギー削減）を想定している。

表 5.5.1-1　シナリオ設定、建物ストックと行動・社会シナリオ

Scenarios	Type	Setups/explanation
MESSAGEix-Buildings (Step1)		
B (Baseline)	Buildings stock	Continuation of current building trends (SSP2)
BENCH_v04 (Step2)		
SD (Slow Dynamics)	behavioural and social	Slow: in an active neighborhood: individuals interacts with 4 available neighbors
ID (Informative Dynamics)	behavioural and social	Informative: in an active neighborhood: individuals interacts with all available neighbors + Intense information policy
Combined BENCH_v04 and MESSAGEix-Buildings (Step3)		
B-SD	Buildings stock + behavioural and social	Building stock turnover + Slow behavioural and social dynamics
B-ID	behavioural and social + Buildings stock	Building stock turnover + Informative behavioural and social dynamics
MESSAGEix-Buildings (Additional scenarios)		
B-LR (low renovation rate)	Building stock	Building stock turnover + Low fixed renovation rate
B-HR (high renovation rate)	Building stock	Building stock turnover + High fixed renovation rate

③　分析結果と考察

a.　建物ストック

図 5.5.1-2 に、MESSAGEix-Buildings で推計したベースライン（B）シナリオにおけるスペインとオランダの住宅床面積、建設率、解体率を示す。2050 年まで人口増加が緩やかで住宅サイズの変化も小さいため、総床面積は、スペインでわずかに増加、オランダではほぼ一定に保たれる。建設率は現在の値から大きく変化せず（最大 1%/yr）、解体率はわずかに増加するのみである。この結果、建築年代別コホートの構成は、部分的にしか変化しない。両国とも、住宅ストックの大部分（45～55%）が築 35 年以上の建物で占められ、エネルギー効率が悪い。新しい建物（築 10 年未満）は、全住宅ストックの 20～30%程度に過ぎず、建設速度の鈍化に伴い、そのシェアは時間の経過とともに減少する。この住宅ストック構成の時系列を BENCH_v04 ABM モデルに引き渡し、家庭の改築意思決定において、インフラの老朽化を考慮する。

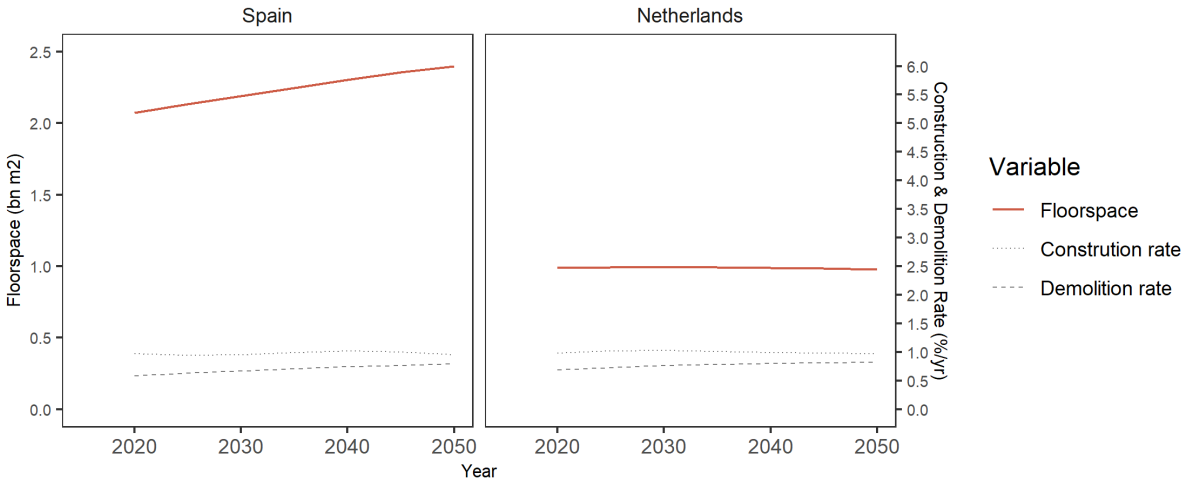


図 5.5.1-2 ベースライン（B）シナリオにおけるスペインとオランダの住宅総床面積（左軸）と平均建設・解体率（右軸）の予測値

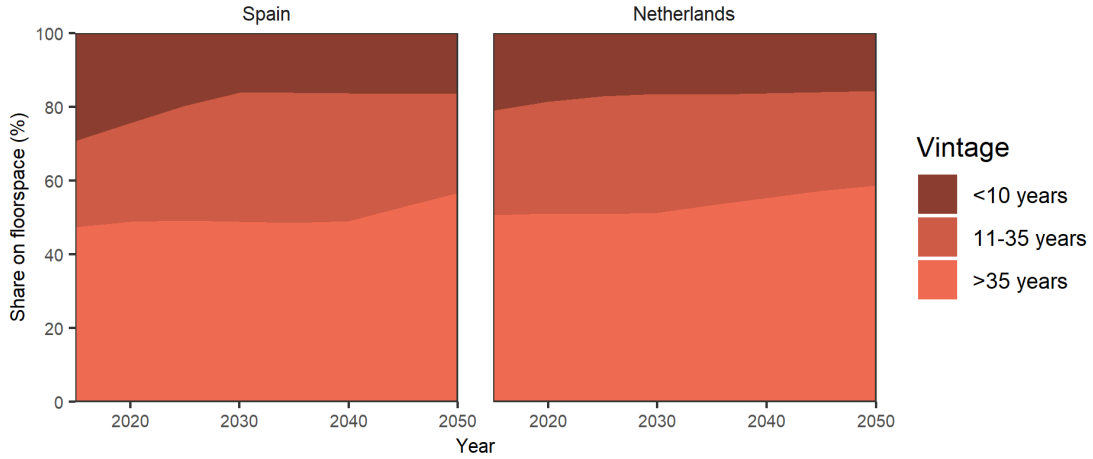


図 5.5.1-3 ベースライン（B）シナリオにおけるスペインとオランダの年代別住宅ストックの構成

b. 家庭の改築意思決定

このステップでは、2 つの行動・社会シナリオ（SD と ID）の下でスペインとオランダを対象に、時間的・空間的改築率の非線形性を捉えつつ不均質な世帯の改築意思決定を BENCH_v04 ABM モデルで分析する。ABMs の確率的な性質を考慮し、各シナリオの下、同じパラメータ設定で BENCH_v04 を複数回実行した。以下に示す ABMs の結果は、100 回のランダムランの平均値をプロットしたものである。

シナリオ SD（BENCH_v04 ベースライン）では、所得、年齢、教育、エネルギー消費、個人的・社会的特性、好み、建物条件などが多様な不均質な世帯が、改築して省エネを行うかどうかを決める。図 5.5.1-4 は、家庭の経済的、行動的、社会的そして建物の属性に不均質性を導入することで、スペインやオランダの改築投資の経年変化が非線型になることを示している。オランダの世帯（古い建物では最大 9.4%）は、スペインの世帯よりも改築や省エネに投資する意向がある結果となっている。

シナリオ ID では、近隣の社会的なダイナミックスがより激しくなった場合、つまり社会内部での情報の拡散がより速くなった場合にどうなるかを示している。このシナリオでは、家庭がエネルギー消費に関する十分な知識と、改築戦略や費用に関する情報を得るというソフトな政策圧力を想定している。分析の結果、高速の社会相互作用により家庭が活性化し、改築のシェアがスペインとオランダで、それぞれ 4%、18.2%増えるとなった。

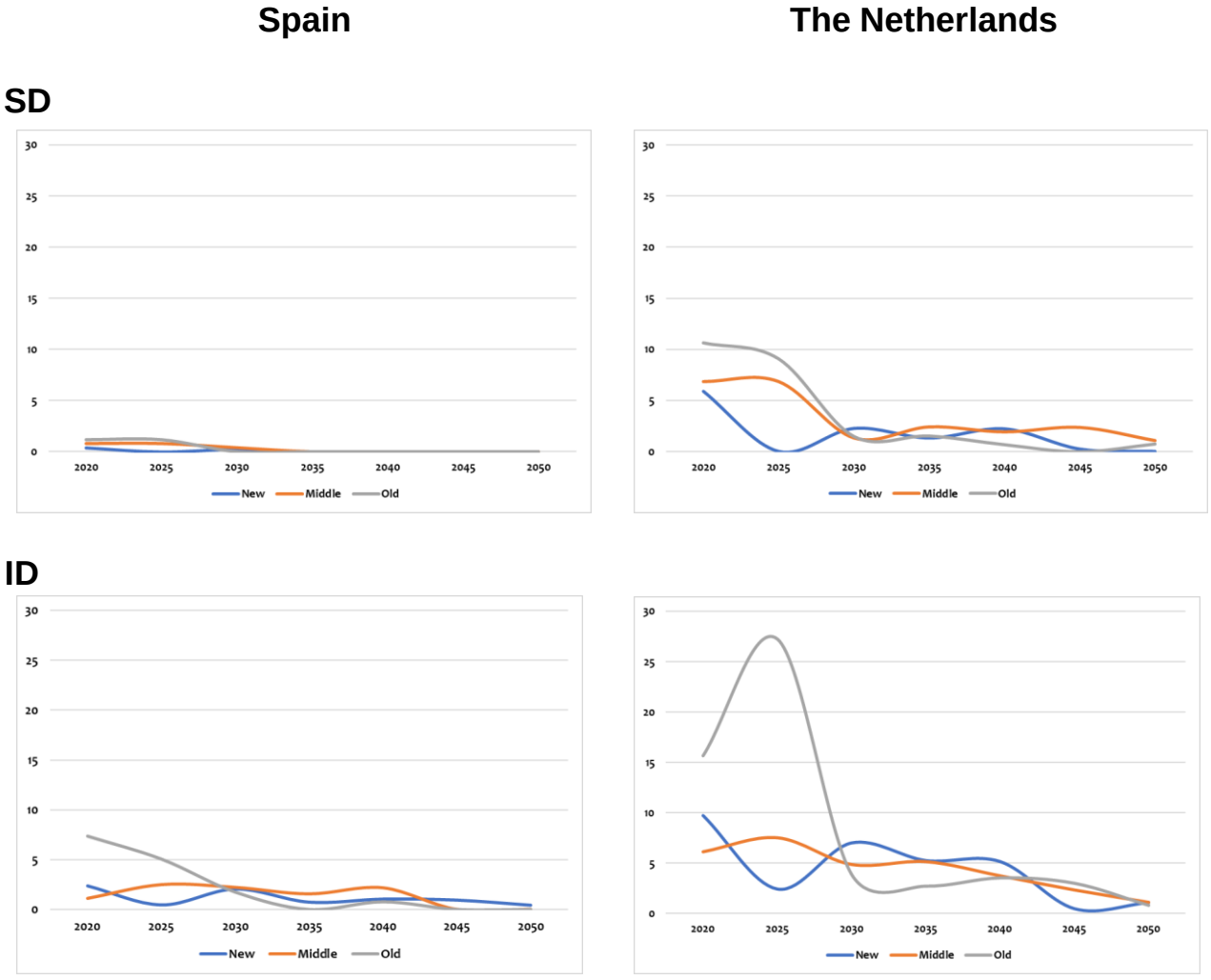


図 5.5.1-4 スペインとオランダにおける住宅改築の意思決定

図 5.5.1-4 に示すように、シナリオ ID では、初期（2020-2030 年）に多くの世帯が改築投資を行うだけでなく、その後の数年間は情報拡散により他の世帯が活性化する。両ケースとも、特に 2030～2050 年の改築の意思決定における主な障壁は、1）所有権の状態、すなわち建物を借りている世帯は建物の構造を変えることができない、2）改築費用の負担、特にスペインの場合、所有者で建物の改築に投資意欲がある世帯の大多数が費用を負担できない、に根差していることが示された。

c. 建物ストックとエネルギー

最後のステップでは、BENCH_v04 の改築に関する分析結果を MESSAGEix-Buildings モデルに入力し、社会行動と建物ストックのダイナミクスを同時に考慮して分析する。図 5.5.1-5 は、スペインとオランダの住宅ストックの平均改築率を、シナリオ別に示したものである。改築率は、より激しい社会ダイナミックスを想定した B-ID シナリオで高く、B-SD シナリオで低くなっている。特にオランダで、改築率は初期に急速に増大し、その後、既存住宅ストックの更新が進むにつれて鈍化する。スペインでは、政策介入の障壁が高いため、改築率は相対的に低く算定されている。改築率を外生的に予測し固定した追加シナリオ B-LR、B-HR と比較すると、B-SD、B-ID シナリオの改築率は、より複雑な経年変化を示している。

改築率の違いは、時間の経過とともに、住宅ストックの構成に影響を与える（図 5.5.1-6）。B-ID シナリオでは、既存建物の更新が早いため、スペインとオランダ共に 2050 年までに改築される建物の割合は高い。建築サイクルが遅いため、両国とも 2050 年に総住宅ストックの 60～70%は未だ既存住宅であり、従って、将来の建物のエネルギー需要を削減するためには、改築が重要な役割を果たす。

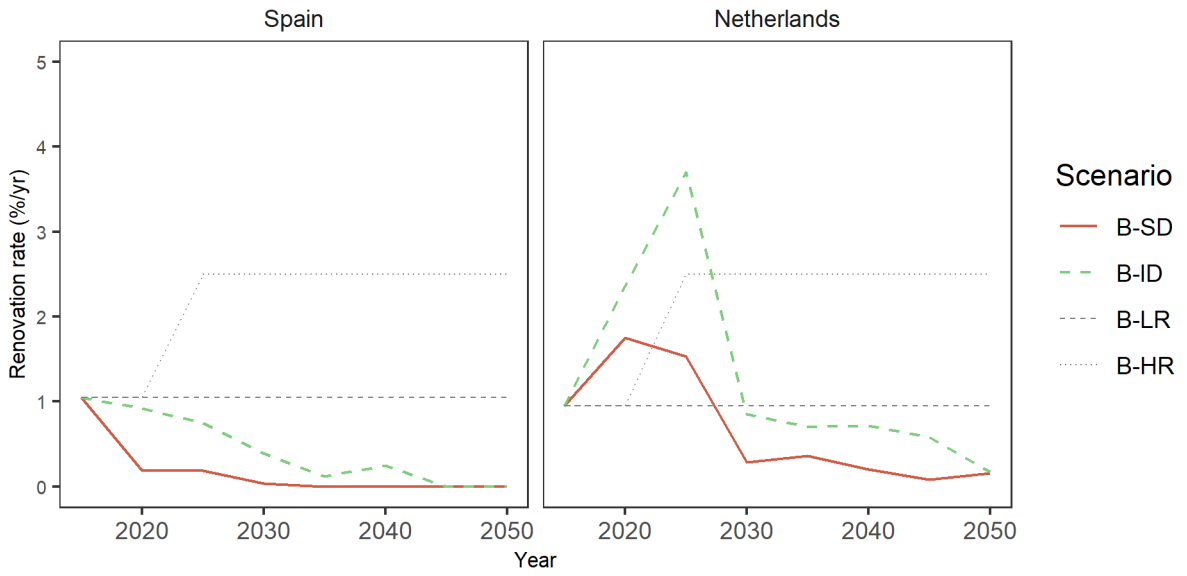


図 5.5.1-5 シナリオ別のスペインとオランダにおける住宅ストックの平均改築率

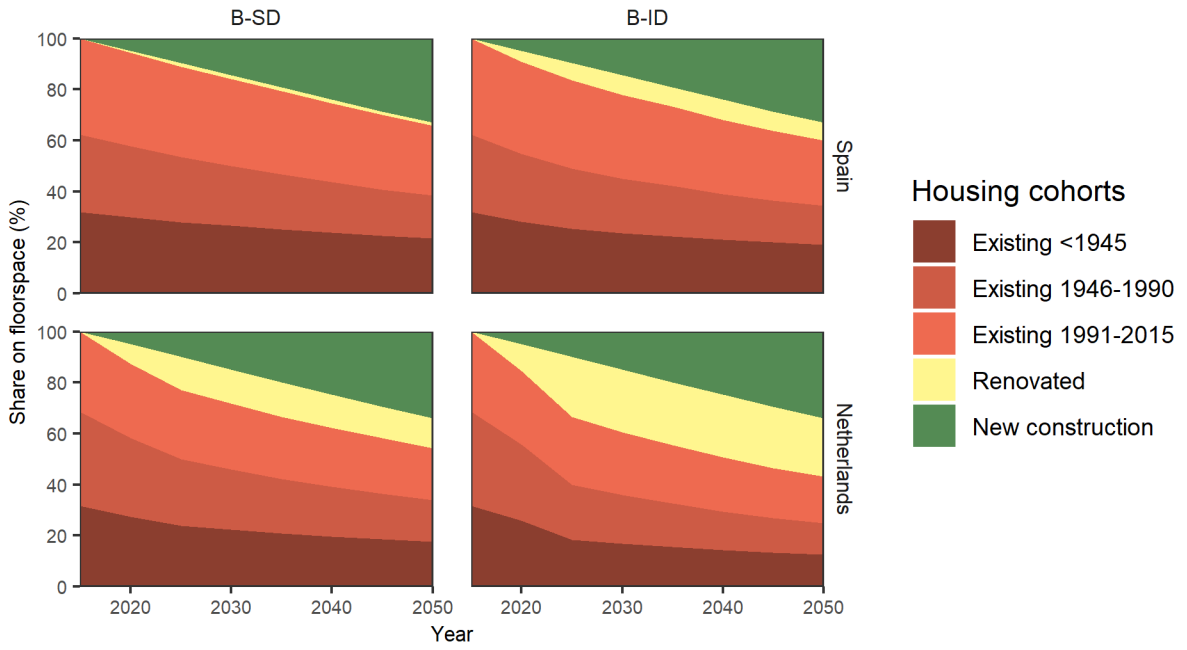


図 5.5.1-6 B-SD、B-ID シナリオにおける建築年代別コホートの構成

シナリオ別、暖房用最終エネルギー需要の予測を図 5.5.1-7 に示す。スペインとオランダ共に、B-ID シナリオで最終エネルギーが低い。改築率が高いことによる。オランダは、寒冷な気候と高い改築率の下、省エネのポテンシャルは高く、暖房用エネルギー需要の削減がより大きく分析されている。改築率を固定した B-LR と B-HR シナリオに比べ、B-SD と B-ID シナリオで、オランダについては、エネルギー需要削減のタイミングが予測されることが特徴的である。スペインでは、B-SD と B-ID のエネルギー削減量は、B-LR と B-HR のシナリオに比べて低く、外生的な改築予測で考慮されていない障壁の潜在的効果を示している。

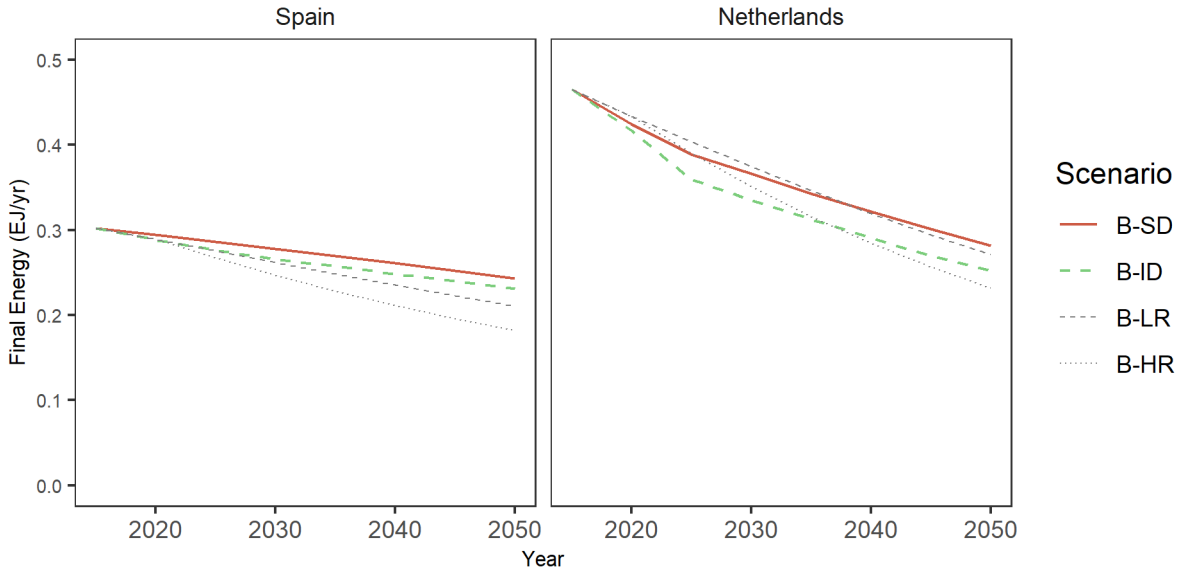


図 5.5.1-7 シナリオ別、住宅暖房用エネルギー需要の予測

④ まとめ

ここ 10 年、需要側管理、特に最終エネルギーと炭素排出量の削減における個人のエネルギー決定と社会規範の役割は、気候変動緩和戦略の一つとして大きな注目を集めている（Cabeza et al., 2022[3]; Creutzig, Niamir, et al., 2022b[7]; Creutzig, Roy, et al., 2022[8]; Grubler et al., 2018[17]; Niamir, 2019[26]）。これまで、IAMs は強力なバックボーンとして、緩和政策評価を支えてきた。これらモデル、例えば MESSAGEix-Buildings は、マクロ経済的な影響をトレースする上で糸口となる。しかし、過去の行動を反映した一連の仮定と方程式に依存しているため、人間の意思決定、行動変化、社会的相互作用の不均質性を統合することは困難である。ABMs は、不均質性、適応的行動と相互作用、境界合理性、不完全情報に対応することで、マクロ経済モデル（CGE、IAMs など）を補完する（Niamir, Ivanova, Filatova, 2020[28]）。BENCH_v04 のような実験的に豊かなエージェントベースモデルは、不均質な適応行動を捉え、エネルギー決定やエネルギー需要削減における非線形性を探ることに長けているが、建物のストック回転ダイナミクスを無視している。そこで、本研究では BENCH_v04 ABM と MESSAGEix-Buildings IAM をソフトリンクさせることにより、両モデルの長所を活かし、短所を克服した。

本研究からの政策的インプリケーションとして、次の 3 つがあげられる。まず、緩和政策の評価において、不均質性、行動、建物ストックのダイナミクスの考慮が重要である。次に、政策立案者は時間的・空間的に固定された改築率に依るのではなく、家庭の改築意思決定の不均質性を考慮する必要がある。改築を遅らせる・妨げる多くの障壁が存在する。例えば、スペインでは、建物の保有状況、知識、動機、そして改築費用（値ごろ感）が、改築の意思決定における大きな障壁となっている。最後に、気候変動緩和の行動障壁が注目される中、政策立案者は、家計が完全な情報に基づき最適な判断をする、という定型的表現でなく、それを越えた意思決定支援ツールからこそ有益な知見を得ることができるであろう。実質的な変化のためには、知識や動機

向上のためのソフトな情報政策から、金銭的なインセンティブまで、さまざまな外部介入が必要である。

(2) 統合評価モデルにおける気候と冷房需要のフィードバックループ

① 背景と目的

最近まで、統合評価モデル(IAM)と大部分のシナリオは、気候変動の影響を考慮していなかった。これらは、さまざまな方法で考慮することができる。例えば、作物の生産性やエネルギー需要の変化などのプロセスに対する生物物理学的影響、または生産性と経済成長に影響を与える経済的損害を、考慮することによって。豊かな暮らしと気候の温暖化により、エアコンの需要は急速に高まっており、近年、最も成長が著しいエネルギー需要分野の一つとなっている(IEA, 2018[20])。十分な冷房は、熱波や熱ストレスに対する脆弱性を低減させる(Sustainable Energy For All, 2022[38])が、グローバルサウスの大部分は、十分な熱的快適性を提供できない貧弱な構造の住宅で生活している。

MESSAGEix-Buildings のボトムアップフレームワーク(Mastrucci et al., 2021[25])は、さまざまな研究で使用されており、冷房エネルギー需要と「冷房ギャップ」、つまり、家庭で快適な温度を利用できない人口、およびこのギャップを満たすために必要なエネルギー需要を評価している。MESSAGEix-Buildings には、エネルギー需要モデルである CHILLED(Cooling and Heating gLobaL Energy Demand model)とストック・ターンオーバーモデルである STURM(Stock TURnover Model of global buildings)が含まれる。CHILLED は、空間的に明確なグリッドベースのビルディングシステム冷暖房需要モデルであり、高解像度の気候データと、地域ごとに細分化された建物タイプのパラメトリゼーション、冷房アクセスの予測値を組み合わせる。そのため、CHILLED エネルギーモデルのシミュレーションは計算量やデータ量が多く、MESSAGEix や他の IAMs との完全結合は難しい。

これまで、MESSAGEix-Buildings シナリオ分析では、RCP などの標準的な排出シナリオからの地球規模の気候モデル出力を使用し、アプリオリに推計してきた。MESSAGEix-Buildings と IAMs が統合されていないため、両モデルで排出経路は異なり、すなわち温暖化の推移や、暖房・冷房需要も異なる。

本研究では、エミュレーション技術を応用し MESSAGEix-Buildings のエネルギー需要を MESSAGEix フレームワーク内のフィードバックループで表現する。CHILLED エネルギー需要は、表面気温上昇によって変わる。一方、地球の平均気温上昇は、CO_2 の累積排出量と強い線形相関があることがよく知られており、これは TCRE（Transient Climate Response to Emissions）と呼ばれている。従って、排出経路の様々な累積 CO_2 排出量に対し、おおよその世界平均気温が推計できる。また、世界平均気温をもとに、CHILLED モデルを用い、空間的に詳細な地域エネルギー需要を決定できる。

このエミュレーションの目的は、あらゆる時点で、あらゆるレベルの世界平均気温に対し、MESSAGEix-Buildings の需要推計を迅速に再現することである。そのために、様々なパラメタリゼーションと排出シナリオを用いて CHILLED を実行し、累積 CO_2 排出量と冷房用最終エネルギー需要の関係を表す応答関数を統計的に導き出した。こ

れらの応答関数は、MESSAGEix の入力として使用され最終エネルギー予測に反映される。そして、今世紀末までの累積排出量、気候変動と整合的な冷房用最終エネルギー需要と排出シナリオを作成する。

② 分析方法

モデリングワークフロー（図 5.5.1-8）には、2 つの主要なステップが含まれる。ステップ 1 は、冷房需要エミュレータの開発（図 A）で、ステップ 2 は、エミュレータと MESSAGEix-GLOBIOM の結合（図 B）である。最初のステップでは、MESSAGEix-Buildings を使用して一連の気候シナリオを実行し、冷房需要を世界の平均気温および累積炭素排出量と関連付ける関数を構築する（冷房需要エミュレータ）。 2 番目のステップでは、冷却需要エミュレータを MESSAGEix-GLOBIOM に結合し、さまざまな気候シナリオの下で追加の冷房エネルギー需要を投入し、発電、GHG 排出、炭素価格などエネルギーシステムへの影響を評価する。

モデリングフレームワークの中核となるのは MESSAGEix-Buildings(Mastrucci et al., 2021[25])で、住宅および商業部門における冷房エネルギー需要のグローバルシナリオを策定する。MESSAGEix-Buildings には、異なる建物タイプの冷房エネルギー需要を計算するエンジニアリングモデル、CHILLED（Cooling and Heating gLobaL Energy Demand model）、文献（Isaac & van Vuuren, 2009[21]）に基づく AC アクセスモデル、動的物質フロー分析（Sandberg et al, 2016[36]）に基づくストック回転モデル STURM(Stock TURnover Model of Global Buildings)があり、住宅および商業ビルのストック推移化を評価して総エネルギー需要を予測する。

CHILLED モデルは、空間的に明示的な可変度日(VDD)に基づいて冷却エネルギーの必要性を推定する(Mastrucci et al., 2021[25])。度日(DD)は、建物の冷暖房エネルギー需要を推定するために広く使用されている方法である。CHILLED モデルは、地表気温と日射量、人口の社会経済的予測、収入、空調へのアクセス、に関するグリッドデータ(0.5° 空間解像度)、及び建物ストック、電化製品、エネルギー効率に関する地域パラメータを入力値とする。

TURM モデルは、マテリアルフロー分析(MFA)(Sandberg et al., 2016[36])により、新しい建設、解体、改築を含む在庫回転率を推定する。建物床面積の需要は、人口と取り壊された建物の代替に依存し、生存曲線と外生的な住宅タイプのシェアに基づいて計算する。建物シェルと冷房システムのエネルギー効率改善は、過去の研究（Mastrucci et al., 2021[25]）に基づき計算する。総エネルギー需要は、さまざまな建物コホートの床面積に、CHILLED モデルで計算されたエネルギー強度を乗じて算出する。

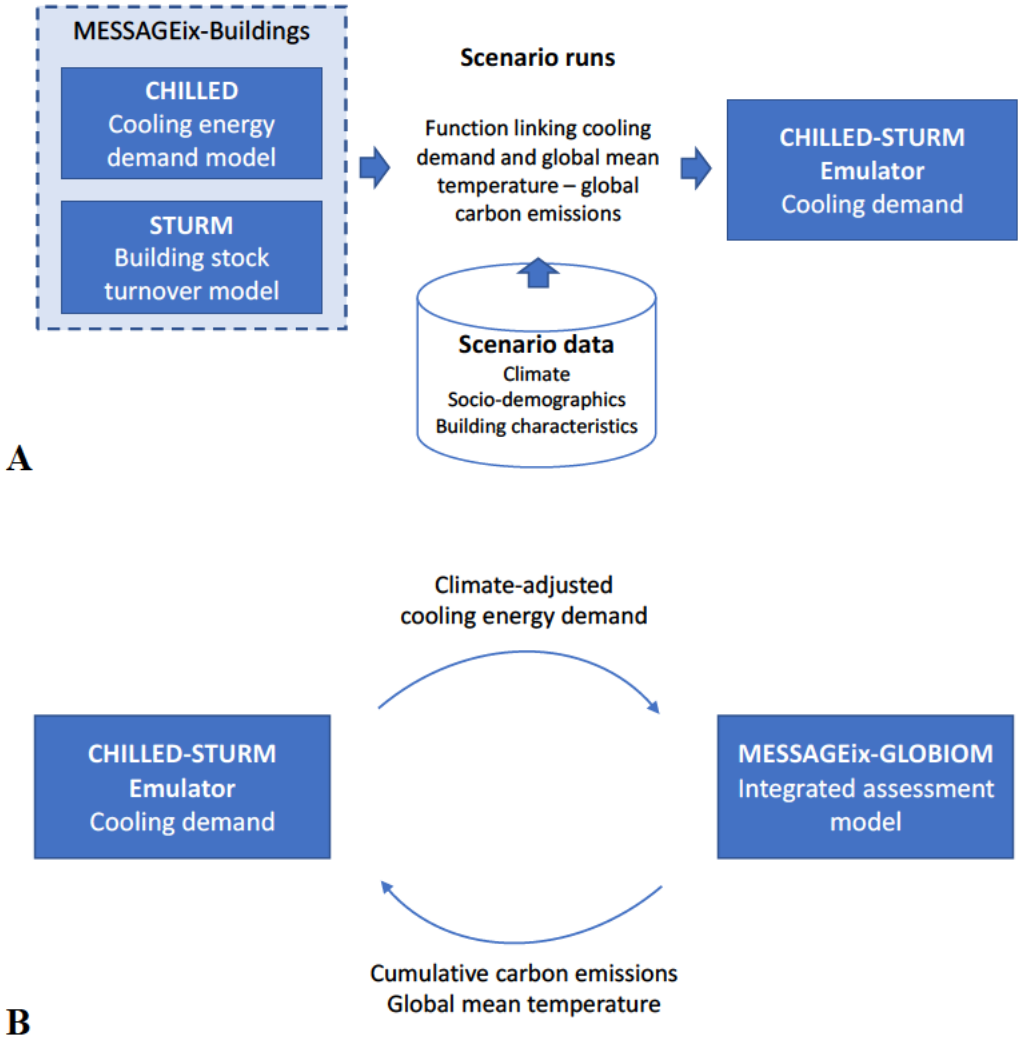


図 5.5.1-8 モデリングワークフローの概要
パネル A：冷房需要エミュレータの開発、
パネル B：エミュレータと MESSAGEix-GLOBIOM の結合

③ 分析結果と考察

a. シナリオ設定

現行政策、2°C、1.5°C の 3 つのシナリオを設定した。現行政策シナリオは、2020 年までの気候政策とエネルギー政策が盛り込まれ、2030 年以降の GHG 排出価格が控えめに推移し、今世紀末には約 110USD2010/tCO_2eq になるものである。2°C、1.5°C シナリオは、2020 年まで現行政策シナリオを踏襲し、その後、パリ協定の 2℃と 1.5℃目標を遵守する、2018～2100 年の CO_2 排出バジェットはそれぞれ 1400、300$GtCO_2$ というものである（Riahi et al., 2021[39]）。

- **Current policies**: EN_NPi2100,2100 年の世界のピーク気温の中央値は 3.31°C。
- **2°C**: EN_NPi2020_1400f, 世界のピーク気温の中央値は 1.95°C に達し、2100 年には 1.83°C に戻る。
- **1.5°C**: EN_NPi2020_300f, 世界のピーク気温の中央値は 1.64°C に達し、2100 年には 1.25°C に戻る。

b. 冷房用エネルギー需要のエミュレーション

図 5.5.1-9 に、CHILLED で予測した、地域別エネルギー強度を示す。これより、次のことが読み取れる。

- エネルギー強度は気候と建物ストックの質の関数で表現される。各項はエネルギー強度に地域差をもたらす重要な要因になっている。
- 今世紀後半のエネルギー強度は、3 つのシナリオで 25%程度の大きな幅がある。
- サハラ以南のアフリカ、南アジア、太平洋アジア、中東・北アフリカなどの発展途上地域では、エネルギー強度、エネルギー強度の増加率共に大きくなっている。これらの地域は既に気温が高いことに加え、気候変動下で気温上昇に伴う冷房需要の増加が顕著と見込まれる。西ヨーロッパ、東ヨーロッパ、旧ソビエト連邦、北アメリカなど、温帯気候の地域では、エネルギー強度が最も小さく、増加率も小さい。気候変動に対する冷房エネルギー強度の感度が低いことを示している。これは、建物ストックの効率が良いこともあるが、エネルギー強度が総度日によって決まるため、気候が一般的に涼しいことが一因であると考えられる。

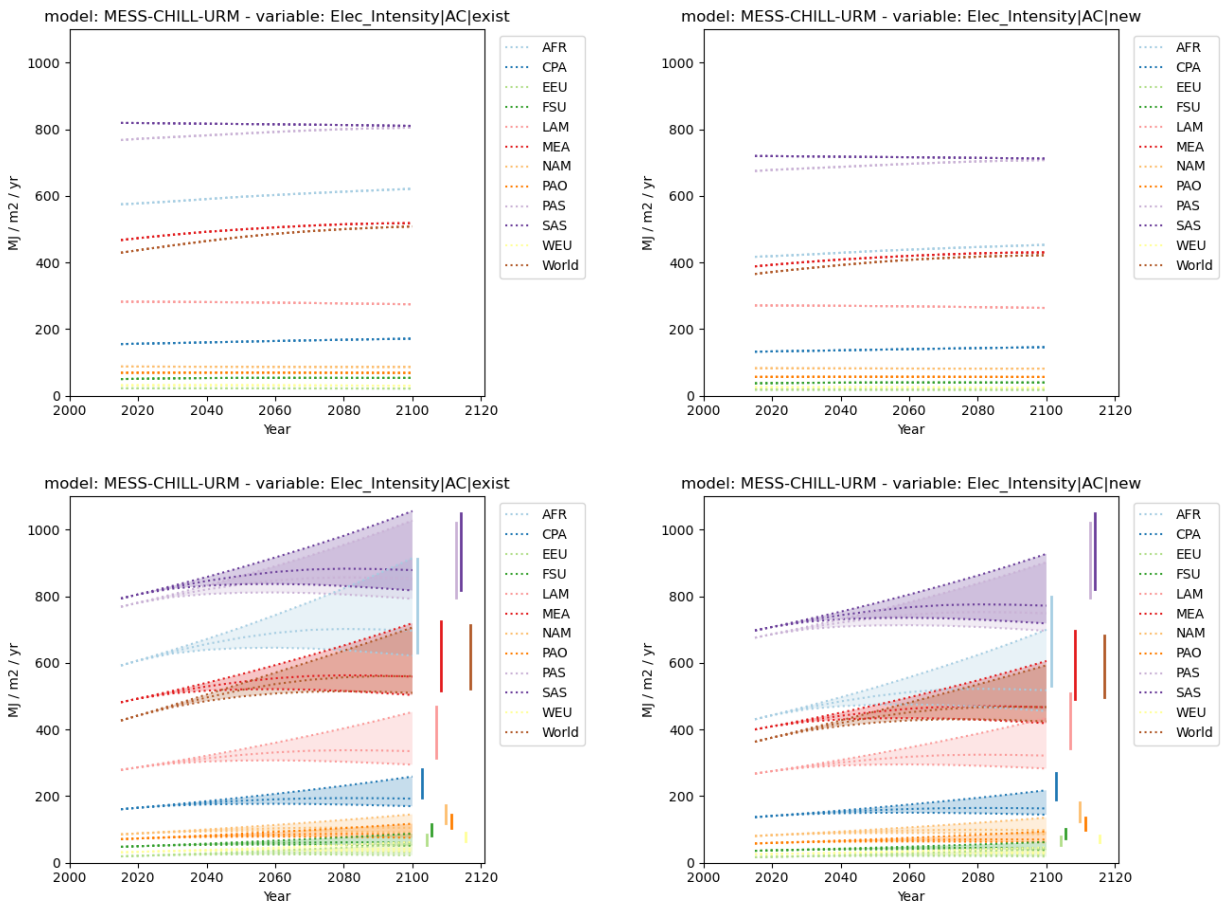


図 5.5.1-9 CHILLED モデルによる地域別エネルギー強度の予測
上段：気候変動無ケース。
下段：3 つのシナリオ。影付きは 1.5°C シナリオと現行政策シナリオの幅。
（注）上下段共、左図：既存ストックの場合、右図：新規ストックの場合

図 5.5.1-10 は、3 つのシナリオについて、世界 11 地域の住宅・商業用冷房の最終エネルギー総需要の予測を示したものである。南半球のほとんどの地域、特にサハラ以南のアフリカと南アジアでは、人口増加と豊かさの増加、それに伴う一人当たりの床面積の増加、エアコン所有率の増加により、冷房のエネルギー需要は大きく増加すると予測される。北半球のほとんどの地域では、冷房エネルギー需要は一定か、わずかに増加する程度である。現行政策シナリオで、冷房エネルギー需要が最も高く、次いで 2°C シナリオ、1.5°C シナリオの順になっている。

図 5.5.1-11 には、3 つのシナリオについて、気候変動を考慮しないケースと比較した、冷房エネルギー需要の差を示す。気候が温暖でエネルギー需要が高い南半球の地域、特にサハラ以南のアフリカと南アジアでは、現行政策シナリオ下で、将来的にその差が増幅する傾向が見られる。

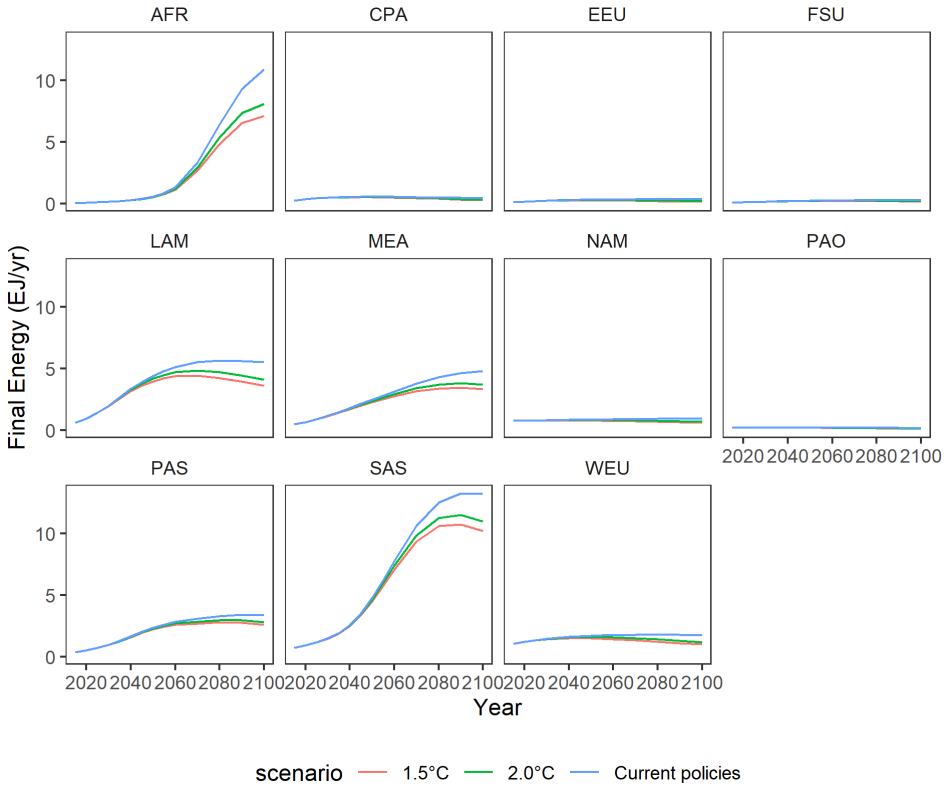


図 5.5.1-10 3 つのシナリオにおける地域別の建物冷房用エネルギー総需要の予測

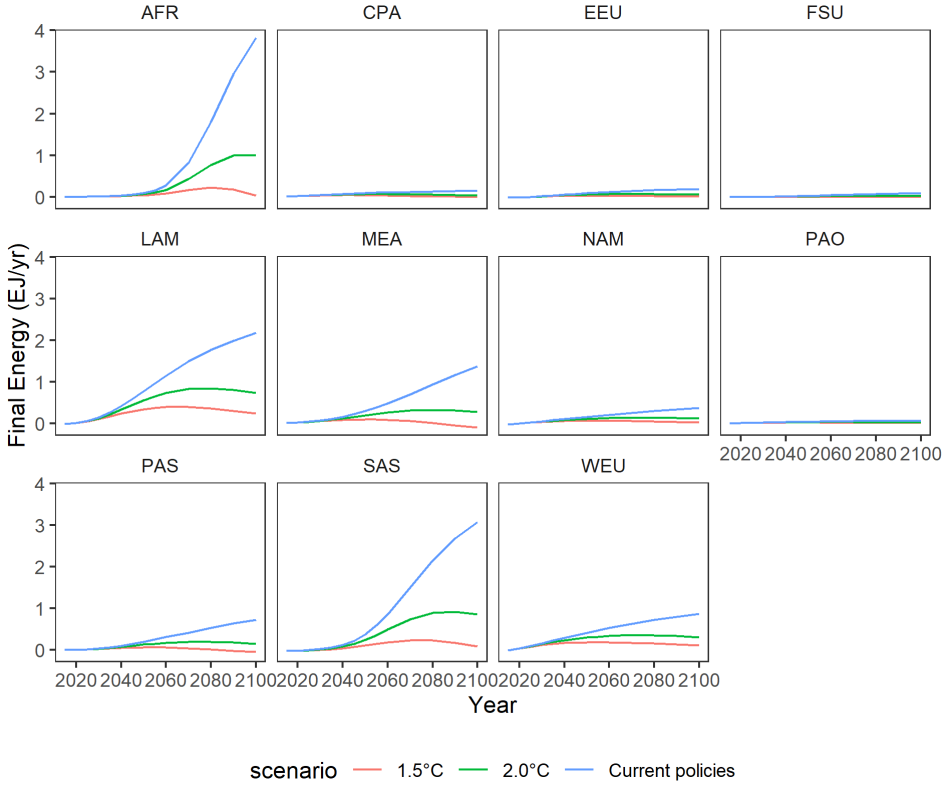


図 5.5.1-11 3 つの地域別の建物冷房用エネルギー総需要
気候変動無ケースに対する差分

c.　エネルギー、GHG 排出量への影響

本項では、総発電量、GHG 排出量、及び GHG 排出価格への影響について述べる。気候変動影響を考慮したことによる総発電量推計への影響は、当然ながら、現行政策シナリオで最大となり、2050 年、2100 年にそれぞれ+3EJ/yr、+16EJ/yr と推計された（図 5.5.1-12）。2°C シナリオでは、2050 年に+2.3EJ/yr、2100 年に+4.5EJ/yr と、増加は小さくなる。1.5°C シナリオでは、2050 年に+1.2EJ/yr、2100 年に+0.5EJ/yr と影響はさらに小さい。

緩和シナリオでは、発電量の相当な割合が太陽光発電に占められ、2°C シナリオでは 2050 年以降に約 25%、1.5°C シナリオの場合は 2050 年以降に約 30%に達する。負荷プロファイルと太陽光発電による冷房需要との相関関係を詳細に考慮していないが、これら 2 つは非常に強い相関傾向がある(Li et al., 2022[24])。このような理由により、追加の冷房需要の大部分が、太陽光発電のピーク電力で満たされる可能性は少なくない。そうでなければ、需要を抑制するか、他の需要側の管理オプションを介して利用する必要がある。

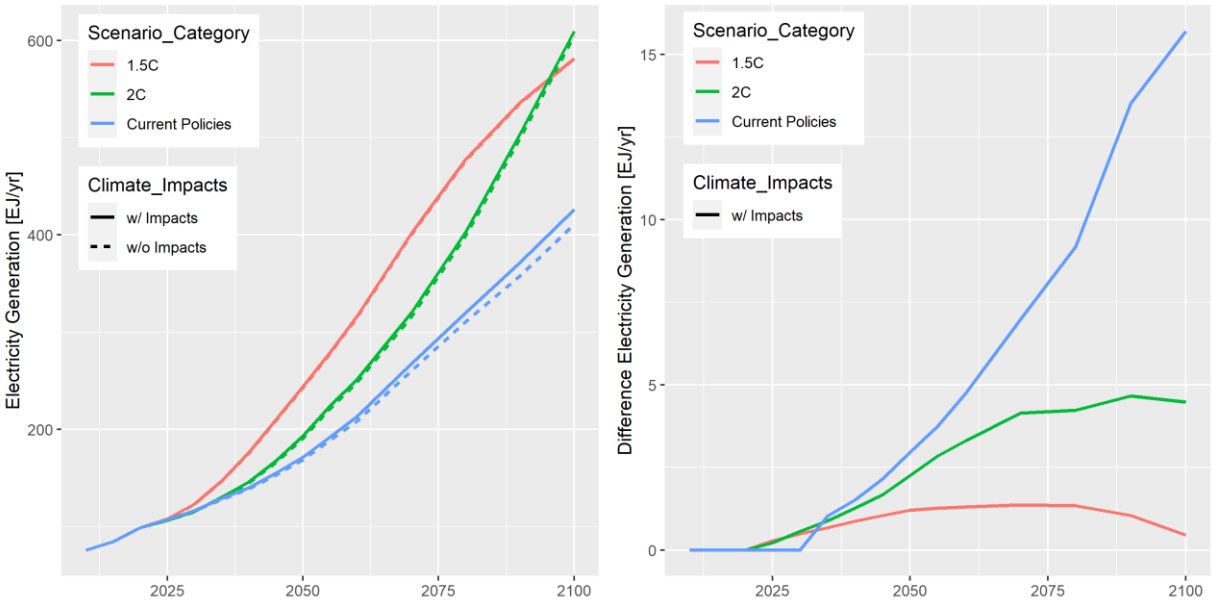


図 5.5.1-12 3 つのシナリオについて、（左図）気候変動影響有ケース及び無ケースの総発電量、（右図）気候変動影響有無による総発電量の差

GHG 排出量を図 5.5.1-13 に示す。2℃と 1.5℃シナリオでは、CO_2 バジェットが制約されているため、気候変動影響の考慮有無によって大差が無い。現行政策シナリオのみ気候変動影響を考慮した場合 2050 年に+300MtCO_2/yr、2100 年に+120GtCO_2/yr と推計された。生産側では、それぞれ 370gCO_2eq/kWh、280gCO_2eq/kWh の GHG 排出強度に相当する。

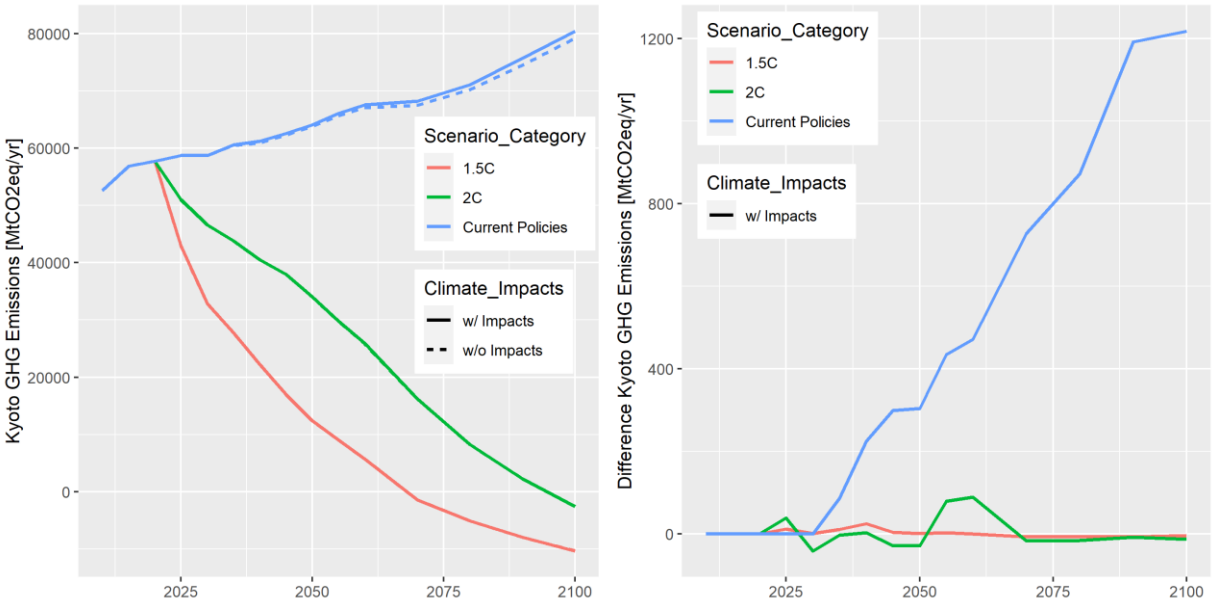


図 5.5.1-13 3 つのシナリオについて、（左図）気候変動影響有ケース及び無ケースの GHG 排出量、（右図）気候変動影響有無による総 GHG 排出量の差

気候変動影響の考慮有無による GHG 排出価格へ影響は、数パーミルを上回ることはなく（図 5.5.1-14）、有意な結果を示す精度のレベルを下回る。従って、冷房度日の変化で表される平均的な気候の変化だけをみると、冷房需要の増加による適応のための追加的な経済的課題は限定的であると考えられる。なお、生物物理学的及び経済的観点から適応をより困難にする可能性のある効果も存在するが、本研究ではこれらを考慮していない点に、留意が必要である。

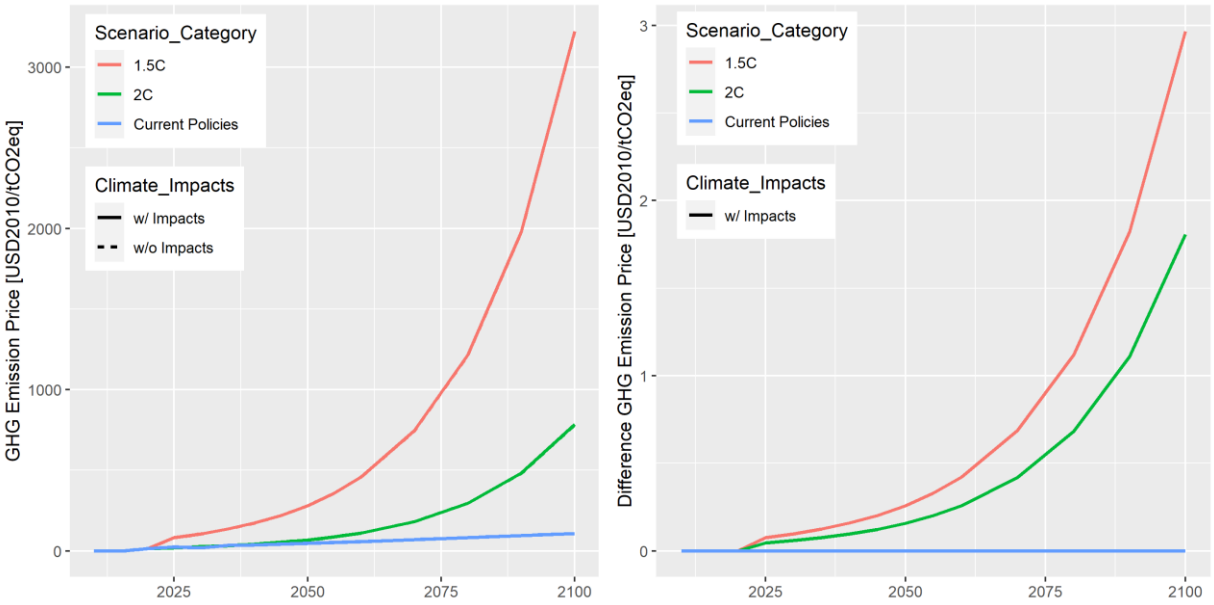


図 5.5.1-14 3 つのシナリオについて、（左図）気候変動による冷房用エネルギー需要への影響有ケース及び無ケースの GHG 排出価格、（右図）気候変動影響有無による GHG 排出価格の差

d. 本研究の限界

本研究では、以下の点を考慮していない。

- 都市のヒートアイランド効果と、特に熱波時の排熱の増加による空調システムの性能係数（COP）の低下
- 運用段階での冷房装置の利用率の向上と採用率の増加による F ガスなどの冷媒の排出量の潜在的増加
- 冷房装置の採用率の増加に伴って、体化されたエネルギー使用と排出
- SSP2 以外の社会経済想定

これらを CHILLED-STURM のフレームワークに組み込むことで、これらの影響を考慮することが可能になる。

④ まとめ

気候の影響に関するエミュレータのテスト（今回は冷房エネルギー需要への影響）により、多くの知見が得られ、研究の道筋が開かれた。比較的計算量の多い CHILLED モデルのエネルギー強度応答関数のエミュレーションを、地域別、建物ストックタイプ別に試み、達成した。このエミュレータは、8000GtCO$_2$まで線形関係を維持し、非常に高い排出量のシナリオまで幅広く適用できると見込まれる。CHILLED の初期シナリオを実行すれば、エミュレータのセットアップは高速で、大規模なシナリオセットにも容易に適用できる。また、気候の影響に関連する他の変数と累積排出量に同様の方法を適用すれば、更なる研究のための貴重な手段を提示できる。

今後の研究で取り組むべき重要な課題として、平均的な気候の影響に限らず、冷房システムの採用や使用パターンを誘発する可能性のある極端な事象を考慮することがあげられる。

参考文献（第 5.5.1 節に関するもの）

1) Babatunde, K. A., Begum, R. A., & Said, F. F. (2017). Application of computable general equilibrium (CGE) to climate change mitigation policy: A systematic review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78, 61–71. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.064
2) BPIE. (2020). On the way to a climate-neutral Europe. Buildings Performance Institute Europe (BPIE).
3) Cabeza, L. F., Bai, Q., Bertoldi, P., Kihila, J., Lucena, A., Mata, É., Mirasgedis, S., Novikova, A., & Saheb, Y. (2022). Chapter 9: Buildings. IPCC. 10.1017/9781009157926.011
4) Castro, J., Drews, S., Exadaktylos, F., Foramitti, J., Klein, F., Konc, T., Savin, I., & van den Bergh, J. (2020). A review of agent-based modeling of climate-energy policy. WIREs Climate Change, 11(4), e647. https://doi.org/10.1002/wcc.647
5) Creutzig, F., Callaghan, M., Ramakrishnan, A., Javaid, A., Niamir, L., Minx, J., Müller-Hansen, F., Sovacool, B., Afroz, Z., Andor, M., Antal, M., Court, V., Díaz-José, J., Döbbe, F., Figueroa, M. J., Gouldson, A., Haberl, H., Hook, A., Ivanova, D., … Wilson, C. (2021). A typology of 100,000 publications on demand, services and social aspects of climate change mitigation. Environmental Research Letters, submitted.
6) Creutzig, F., Niamir, L., Bai, X., Callaghan, M., Cullen, J., Díaz-José, J., Figueroa, M., Grubler, A., Lamb, W. F., Leip, A., Masanet, E., Mata, É., Mattauch, L., Minx, J. C., Mirasgedis, S., Mulugetta, Y., Nugroho, S. B., Pathak, M., Perkins, P., … Ürge-Vorsatz, D. (2022a). Demand-side solutions to climate change mitigation consistent with high levels of well-being. Nature Climate Change, 12(1), 36–46. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01219-y
7) Creutzig, F., Niamir, L., Bai, X., Callaghan, M., Cullen, J., Díaz-José, J., Figueroa, M., Grubler, A., Lamb, W. F., Leip, A., Masanet, E., Mata, É., Mattauch, L., Minx, J. C., Mirasgedis, S., Mulugetta, Y., Nugroho, S. B., Pathak, M., Perkins, P., … Ürge-Vorsatz, D. (2022b). Demand-side solutions to climate change mitigation consistent with high levels of well-being. Nature Climate Change, 12(1), 36–46. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01219-y
8) Creutzig, F., Roy, J., Devine-Wright, P., Diaz-Jose, J., Geels, F., Grubler, A., Maizi, N., Masanet, E., Mulugetta, Y., Onyige-Ebeniro, C. D., Perkins, P., Sanches Pereira, A., & Weber, E. U. (2022). Chapter 5: Demand, services and social aspects of mitigation. In Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. IPCC.
9) Daioglou, V., Mikropoulos, E., Gernaat, D., & van Vuuren, D. P. (2022). Efficiency improvement and technology choice for energy and emission reductions of the residential sector. Energy, 243, 122994. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122994
10) Dietz, T., Gardner, G. T., Gilligan, J., Stern, P. C., & Vandenbergh, M. P. (2009). Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(44), 18452–18456. https://doi.org/10.1073/pnas.0908738106

11) Edelenbosch, O., Rovelli, D., Levesque, A., Marangoni, G., & Tavoni, M. (2021). Long term, cross-country effects of buildings insulation policies. Technological Forecasting and Social Change, 170, 120887. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120887
12) European Commission. (2020). A Renovation Wave for Europe—Greening our buildings, creating jobs, improving lives. COM/2020/662 final.
13) Faber, J., Schroten, A., Bles, M., Sevenster, M., Markowska, A., Smit, M., Rohde, C., Dütschke, E., Köhler, J., Gigli, M., Zimmermann, K., Soboh, R., & Riet, J. van 't. (2012). Behavioural Climate Change Mitigation Options and Their Appropriate Inclusion in Quantitative Longer Term Policy Scenarios (p. 87). CE Delft. http://publications.europa.eu/resource/cellar/d9f5683a-b330-47c4-beac-d4d4f5dec681.0001.07/DOC_1
14) Farmer, J. D., & Foley, D. (2009). The economy needs agent-based modelling. Nature, 460(7256), Article 7256. https://doi.org/10.1038/460685a
15) Farmer, J. D., Hepburn, C., Mealy, P., & Teytelboym, A. (2015). A Third Wave in the Economics of Climate Change. Environmental and Resource Economics, 62(2), 329–357. https://doi.org/10.1007/s10640-015-9965-2
16) Fujimori, S., Kainuma, M., Masui, T., Hasegawa, T., & Dai, H. (2014). The effectiveness of energy service demand reduction: A scenario analysis of global climate change mitigation. Energy Policy, 75. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.015
17) Grubler, A., Wilson, C., Bento, N., Boza-Kiss, B., Krey, V., McCollum, D. L., Rao, N. D., Riahi, K., Rogelj, J., & Stercke, S. (2018). A low energy demand scenario for meeting the 1.5° C target and sustainable development goals without negative emission technologies. Nature Energy, 3(6), 515–527. https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6
18) Hesselink, L. X. W., & Chappin, E. J. L. (2019). Adoption of energy efficient technologies by households – Barriers, policies and agent-based modelling studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 99, 29–41. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.031
19) Huppmann, D., Gidden, M., Fricko, O., Kolp, P., Orthofer, C., Pimmer, M., Kushin, N., Vinca, A., Mastrucci, A., Riahi, K., & Krey, V. (2019). The MESSAGE Integrated Assessment Model and the ix modeling platform (ixmp): An open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development. Environmental Modelling & Software, 112, 143–156. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.11.012
20) IEA. (2018). The Future of Cooling. https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling
21) Isaac, M., & van Vuuren, D. P. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. Energy Policy, 37(2), 507–521. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.051
22) Isley, S. C., Lempert, R. J., Popper, S. W., & Vardavas, R. (2015). The effect of near-term policy choices on long-term greenhouse gas transformation pathways. Global Environmental Change, 34, 147–158. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.06.008
23) Knobloch, F., Pollitt, H., Chewpreecha, U., Daioglou, V., & Mercure, J.-F. (2019). Simulating the deep decarbonisation of residential heating for limiting global warming to 1.5 °C. Energy Efficiency, 12(2), 521–550. https://doi.org/10.1007/s12053-018-9710-0

24) Li, Y., Rosengarten, G., Stanley, C., & Mojiri, A. (2022). Electrification of residential heating, cooling and hot water: Load smoothing using onsite photovoltaics, heat pump and thermal batteries. Journal of Energy Storage, 56, 105873. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105873

25) Mastrucci, A., van Ruijven, B., Byers, E., Poblete-Cazenave, M., & Pachauri, S. (2021). Global scenarios of residential heating and cooling energy demand and CO2 emissions. Climatic Change, 168(3–4), 14. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03229-3

26) Niamir, L. (2019). Behavioural Climate Change Mitigation: From individual energy choices to demand-side potential [University of Twente]. https://doi.org/10.3990/1.9789036547123

27) Niamir, L., Filatova, T., Voinov, A., & Bressers, H. (2018). Transition to low-carbon economy: Assessing cumulative impacts of individual behavioral changes. Energy Policy, 118, 325–345. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.045

28) Niamir, L., Ivanova, O., & Filatova, T. (2020). Economy-wide impacts of behavioral climate change mitigation: Linking agent-based and computable general equilibrium models. Environmental Modelling and Software, 134, 104839. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104839

29) Niamir, L., Ivanova, O., Filatova, T., Voinov, A., & Bressers, H. (2020). Demand-side solutions for climate mitigation: Bottom-up drivers of household energy behavior change in the Netherlands and Spain. Energy Research & Social Science, 62(101356), 101356. https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101356

30) Niamir, L., Kiesewetter, G., Wagner, F., Schöpp, W., Filatova, T., Voinov, A., & Bressers, H. (2020). Assessing the macroeconomic impacts of individual behavioral changes on carbon emissions. Climatic Change, 158(2), 141–160. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02566-8

31) Nielsen, K. S., Nicholas, K. A., Creutzig, F., Dietz, T., & Stern, P. C. (2021). The role of high-socioeconomic-status people in locking in or rapidly reducing energy-driven greenhouse gas emissions. Nature Energy, 6(11), Article 11. https://doi.org/10.1038/s41560-021-00900-y

32) O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Global Environmental Change, 42, 169–180. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004

33) Patt, A., van Vliet, O., Lilliestam, J., & Pfenninger, S. (2019). Will policies to promote energy efficiency help or hinder achieving a 1.5 °C climate target? Energy Efficiency, 12(2), 551–565. https://doi.org/10.1007/s12053-018-9715-8

34) Rai, V., & Henry, A. D. (2016). Agent-based modelling of consumer energy choices. Nature Climate Change, 6(6), 556–562. https://doi.org/10.1038/nclimate2967

35) Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., … Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Global Environmental Change, 42, 153–168. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

36) Sandberg, N. H., Sartori, I., Heidrich, O., Dawson, R., Dascalaki, E., Dimitriou, S., Vimm-r, T., Filippidou, F., Stegnar, G., Šijanec Zavrl, M., & Brattebø, H. (2016). Dynamic building stock modelling: Application to 11 European countries to support the energy efficiency and retrofit ambitions of the EU. Energy and Buildings, 132, 26–38. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.100
37) Stern, N. (2016). Economics: Current climate models are grossly misleading. Nature, 530(7591), 407–409. https://doi.org/10.1038/530407a
38) Sustainable Energy For All. (2022). Chilling Prospects 2022—Tracking sustainable cooling for all. https://www.seforall.org/chilling-prospects-2022
39) Riahi, K., Bertram, C., Huppmann, D., Rogelj, J., Bosetti, V., et al. (2021). Cost and attainability of meeting stringent climate targets without overshoot. Nature Climate Change, 11(12), 1063-1069.

5.5.2 産業部門における技術社会変化の調査・シナリオのレビュー

産業部門からの排出については、(1) エネルギーの利用形態やプロセスが多様である、(2) 多くの素材生産プロセス（鉄鋼、アルミニウム、セメント、ガラス、石油化学、鉱業、食品加工等）が旧来の技術に依存している、(3) 電力や水素、アンモニア、持続可能なバイオエネルギーへの転換など代替技術に関する研究が発展途上にある、といった特徴がある。

パリ協定の目標達成に向けて温室効果ガス（GHG）の排出量を大幅に削減するためには、発電部門の CO_2 排出を可能な限り減らし、建物、運輸、産業部門では化石燃料消費を減らしつつ、エネルギー需要を満たす電化率を高めていくことが基本戦略となるが [1]、産業部門はサブセクターによって利用できる技術は異なっている。そこで本節では、スタンフォード大学のレポート [2] や IPCC レポート [1]、先行研究をもとに、産業部門全般の排出削減策、産業部門における排出削減シナリオ、サブセクターレベルでの排出削減技術やプラクティスについてまとめる。

(1) 産業部門の排出削減策

2000 年以降、産業部門から GHG 排出量は、他部門よりも速いペースで増加している。IPCC[1] によると産業部門に起因する GHG 排出は、燃料燃焼、プロセス排出、製品使用、廃棄物に由来しており、2019 年における世界の人為起源 GHG 排出の 24%にあたる 14.1$GtCO_2$-eq を占めている。発電や熱源からの間接排出を含めると世界全体の排出量の 34%、20$GtCO_2$-eq となる。

産業部門の主な排出削減策としては、図 5.5.2-1 で示すように (i) 原材料代替などによる需要の削減（Feedstock switching）。(ii) 原材料の効率化（Material efficiency）、(iii) 循環経済の確立と産業廃棄物対策（circulr material flows）、(iv) エネルギー効率の向上（Energy efficiency）、(v) 電化と燃料転換（Fuel switching and electrification）、 (vi) CCS 及び CCU の活用（CCU and CCS）の 6 つに分類できる。

① 原材料需要の削減

産業部門におけるエネルギー消費と CO_2 排出の主要なドライバーは原材料（マテリアル）に対する需要にある。過去四半世紀、人口増加や経済発展にともない原材料需要は急激に伸び、主要なエネルギー集約型材料の需要は 2.5～3.5 倍に増加した。原材料需要は、床面積、モビリティ、輸送インフラと関連する都市計画、建築基準、社会文化的規範などに影響される。リサイクルが可能な部品を多用し、修理が簡単な耐久財の設計を促進することで、エネルギー消費や GHG 排出の多いバージン原材料の需要を減らすことが考えられる。また、人口増加や経済発展から原材料需要を切り離すには、人々の充足感を満たしつつ持続可能な消費を実現し、社会的規範などを通じた需要削減行動も必要となる。

② 原材料の効率化

産業部門における GHG 排出量削減するため、より少ない原材料で商品やサービスを提供することが重要な戦略となる。原材料と製品のライフサイクルにおいて、より軽量な製品設計、原材料の使用を最小限に抑えながら最終用途のサービスを維持するための最適化、より長い寿命や再利用性を高めた設計、廃棄物を回収するための製造・加工プロセス、リサイクルプロセスの改善による原材料回収の改善、等により原材料の効率化が図れる。

これらの対策はサプライチェーン全体に分散し、多くの異なる利害関係者にまたがるため、排出削減のポテンシャルやコストの評価が難しく、これまで統合評価モデル（IAM）などでは十分に表現されてこなかった。近年は、気候変動対策のシナリオやモデル評価において原材料の効率化戦略を含めた研究が行われるようになってきている。Grubler et al.（2018）[3]による低エネルギー需要（LED）シナリオでは、2050 年までに世界の原材料生産量が現在より 20%減少し、（その 3 分の 1 は脱原材料化、3 分の 2 は原材料効率の向上）、大きな排出量削減をもたらすシナリオが描かれている。

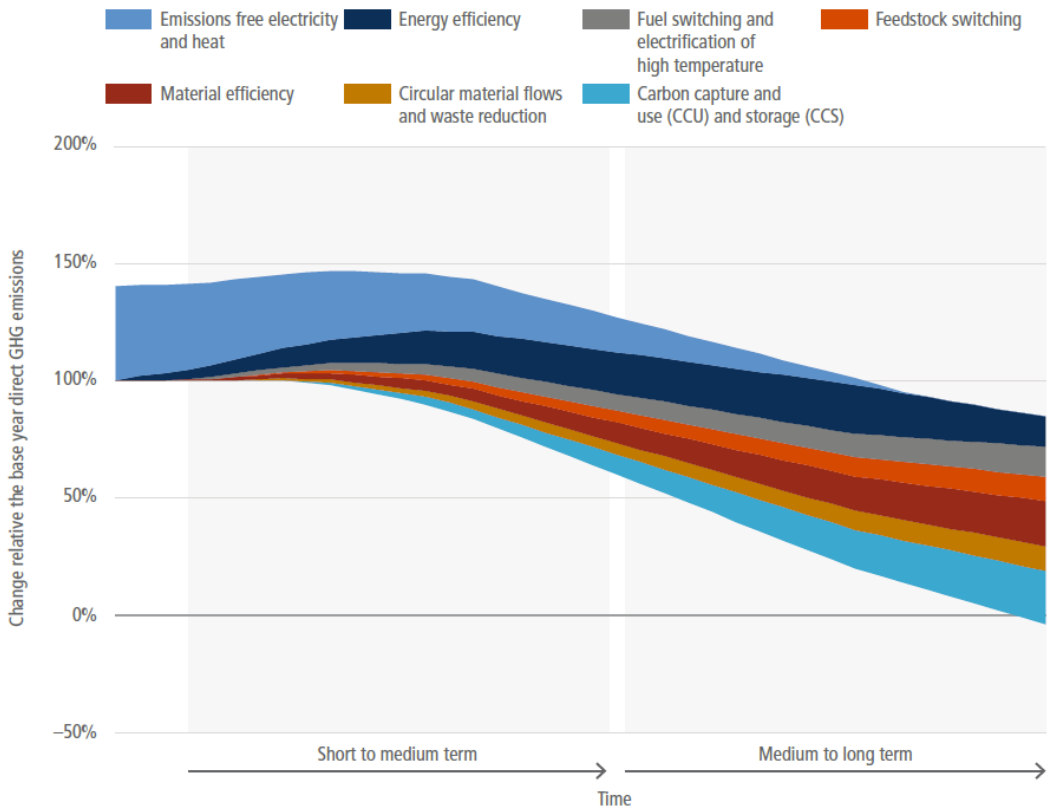


図 5.5.2-1 産業部門のネットゼロ排出に向けた対策別寄与度の概念図

（出典）IPCC[1)]

③ 循環型経済

循環型経済は、採掘-生産-使用-廃棄の工程をたどる直線的な生産様式から脱却し、廃棄物を最小限に抑えつつ、より効率的にエネルギーや原材料を消費し、リユースやリサイクルを推進することにより、原材料とエネルギーの流れを循環させる経済を指す。ミクロレベル（プロセス統合やクリーナープロダクションなど企業内）、メソレベル（エコインダストリアルパークなど複数企業によるもの）、マクロレベル（都市や地域などセクターを越えた連携）といった異なるレベルでの取り組みも必要となる。

④ エネルギー効率

エネルギー効率の向上は、全ての部門において主要緩和策の一つとして位置づけられている[4)]。しかし、鉄鋼などの非エネルギー集約型産業においてはエネルギー効率化の技術オプションが限られていることが多い。エネルギー効率を改善させるためには、利用可能な最高技術（BAT: best available technology）やプラクティスを普及させることが必要になるが、世界的に省エネ技術が普及してきたことにより、最近はエネルギー効率の向上に鈍化傾向が見られている。

⑤ 電化と燃料転換

産業部門における電化と燃料転換は、石炭、石油精製品、天然ガスから低炭素電力、バイオ燃料、水素、アンモニア、合成燃料へ移行することを意味している。

電力は、再生可能エネルギーや原子力など多様な低炭素電源から作り出せるエネルギーキャリアであり、エネルギー利用を低炭素電力に切り替えることで排出削減に寄与する。一般的に蒸気ボイラー、乾燥、小規模プロセス加熱は必要となる最大熱温度が低い（200～250℃未満）ため、熱や原料を多く必要とする鉄鋼、セメント、化学などの重工業部門より、軽工業部門の電化は進めやすいと考えられている。風力や太陽光など変動性の再生可能エネルギーの割合が高まった場合、デマンドレスポンス、系統の増強、複数の時間スケールでの貯蔵、原子力、バイオ燃料、CCS 付き火力発電などの柔軟性電源による出力変動への対応が必要となる。

バイオ燃料には、木片、リグニン、加工ペレットなどのバイオマス、バイオメタノール、バイオエタノール、バイオディーゼルなどがあり、ほとんどが化石燃料と互換性がある。これらのライフサイクル GHG 強度は、土地利用の変化、土壌の炭素枯渇、肥料の使用等により変わってくる。現在、商業化されているバイオ燃料のほとんどは、トウモロコシなどの農作物や食品廃棄物由来であり、食糧生産との競合が懸念される。バイオ燃料の利用を高めるには大量に入手できる藁、スイッチグラス、木屑などから製造されるセルロース系バイオマスの商業化が必要となる。バイオ燃料の利用は、炭素回収・貯留と組み合わせ（BECCS）、ネガティブ排出を可能にする技術としても期待されている。

水素は現在の燃料や投入物の代替としてクリーンなエネルギー・システムに貢献すると期待されている。運輸、暖房、産業（水素還元製鉄など）、電力において、水素をそのまま、もしくはアンモニアなどの水素ベースの燃料や、メタンやメタノールのような炭化水素に転換して利用することが想定されている。

⑥ CCS、CCU

CCS（Carbon Capture and Storage）は、化石燃料の燃焼で発生する CO_2 を発電所や製鉄所、化学プラントなどの発生源から分離・回収し、回収した CO_2 を地中や海底に貯留・隔離する技術であり、大気中から直接回収する場合は DACCS（Direct Air Carbon Capture and Storage）、バイオエネルギー利用にともなって発生した CO_2 を回収・貯留する場合は BECCS（Bio Energy with Carbon Capture and Storage）と呼ばれる。CO_2 分離・回収技術としては化学吸収法、固体吸収法、膜分離法などがある。既存の CCS プロジェクトは CO_2 を原油貯留層に圧入することで、油層内の原油の流動性を高め、原油の回収量を向上させる EOR（Enhanced Oil Recovery）と言われる石油増進回収が中心であり、CO_2 を地下に長期貯留する目的で枯渇油ガス田や帯水層に圧入することで規模拡大が期待されるが、事業の経済性（コスト削減）や信頼性（社会的受容性）向上が課題となる。

CCU（Carbon capture and utilization）は、あるプロセスから炭素（CO または CO_2 として）を回収し、価値ある製品（建築材料、化学物質、合成燃料など）に変換し、再利用することを指す。CCU による正味の GHG 削減効果は、捕捉率、必要エネルギー、利用製品の寿命といった要因に左右され、ライフサイクルでの GHG 削減効果は研究によって評価が異なっていることが多い。

⑦ 戦略の相互作用

低炭素電力、バイオ燃料、水素、アンモニア、CCU を使った合成炭化水素の間には複雑な物理的・市場的関係があり、上記①～⑥の対策が相互補完、あるいは逆に競合するケースも出てくる。また、どのような対策が採用されるかは地域性やインフラの整備状況によっても左右される。例えば、電気自動車の急速な普及により、自動車産業や発電部門に供給する原材料の構成が劇的に変化し、石油製品の需要も減少することが考えられる。また、CCS の普及拡大によりインフラを構築するための基礎材料と、それを運用するための追加的なエネルギーが必要となり、全体的な原材料効率とエネルギー効率を低下させる可能性もある。

(2) 排出削減シナリオ

IPCC の第 6 次評価報告書 WGIII レポートではモデルによって評価した 1,000 以上のシナリオをもとに、産業部門におけるエネルギー利用や CO_2 排出、電化率などの全体的な傾向を評価している（図 5.5.2-2）。すべてのシナリオで、エネルギーと炭素強度が時間とともに減少していく一方、多くのシナリオで最終エネルギー需要は増加する。1.5℃シナリオ（カテゴリーC1）の場合、2030 年にかけて最終エネルギー需要が大幅に減少し、2050 年までほぼ一定の需要に落ち着くが、世紀後半においては増加する原材料利用に牽引され需要が増加する傾向が見られる。CO_2 排出量は、特に 2℃や 1.5℃シナリオといった野心的なシナリオで 2030 年以降大きく減少する。ただし、今世紀後半で産業部門からの CO_2 排出量がネットでマイナスとなるシナリオの数は少なく、依然として CO_2 排出が残ると考えられる。

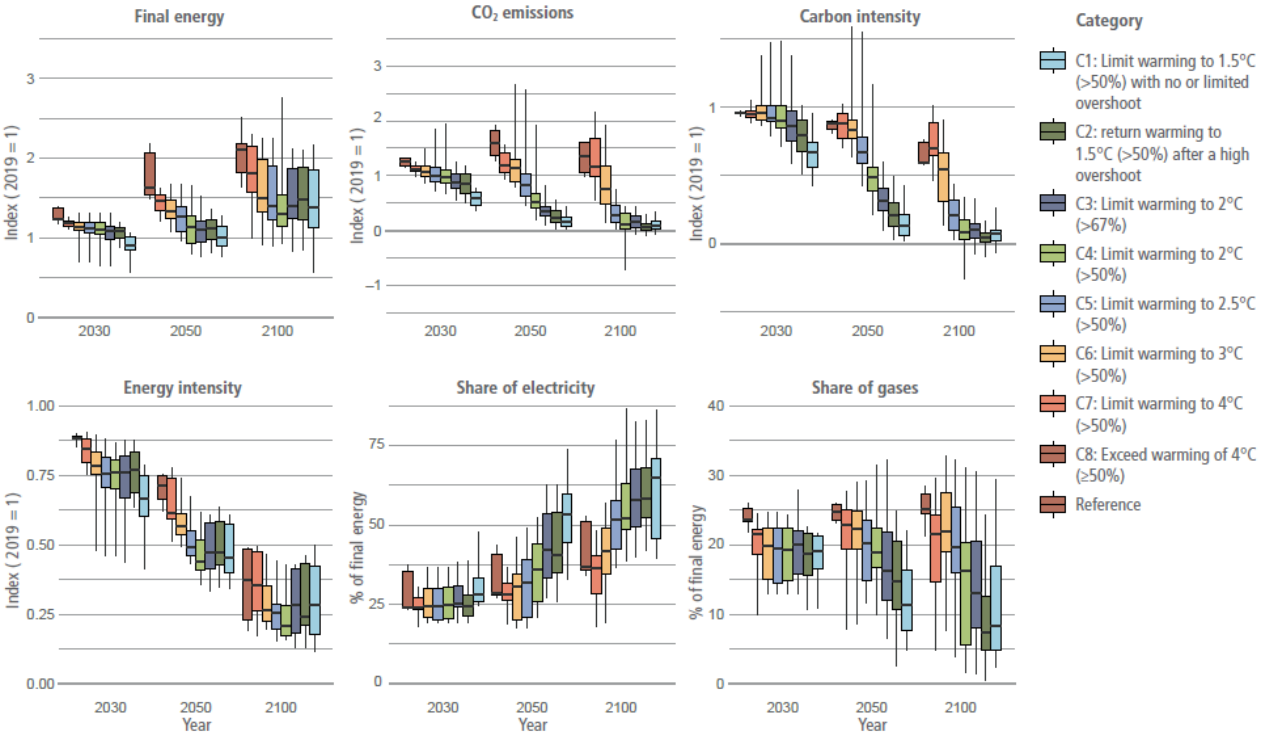


図 5.5.2-2 産業部門の最終エネルギー需要（左上）、CO_2 排出（中上）、炭素強度（右上）、エネルギー強度（左下）、電化率（中下）、ガスのシェア（右下）

（出典）IPCC[1)]

どのような技術で産業部門からの CO_2 排出を削減するかという緩和戦略はシナリオごとに大きく異なっている。例えば、多くのシナリオで CCS の利用は非常に重要であると評価されているが、産業部門において CCS なしでも野心的な緩和レベルを達成できるとしているシナリオもある。IEA のシナリオ[5),6)]ではネットゼロ排出に向けて CCS が大きな役割を果たしているが、LED シナリオ[3)]では CCS は使われず、原材料需要を大幅に減らすことにより大規模な CO_2 排出削減をすることが想定されている。また、水素や水素由来の燃料がどの程度拡大していくかもシナリオによって違いが大きい。他方、バイオマス燃料及び電力利用の拡大は概ねどのシナリオも共通している。各技術のコスト見通しや利用可能性、政策、社会の受容可能性といった要因に関する想定の違いがシナリオ間で異なる評価を生む要因になっていると考えられる。

(3) サブセクター別の技術と対策

産業セクターは最も脱炭素化が困難な部門の一つであり、特に鉄鋼、セメント、アルミニウム、紙・パルプ、化学などのエネルギー集約産業の課題は大きいと考えられている。以下、産業サブセクター別の動向や排出削減に向けた技術や対策をまとめる。

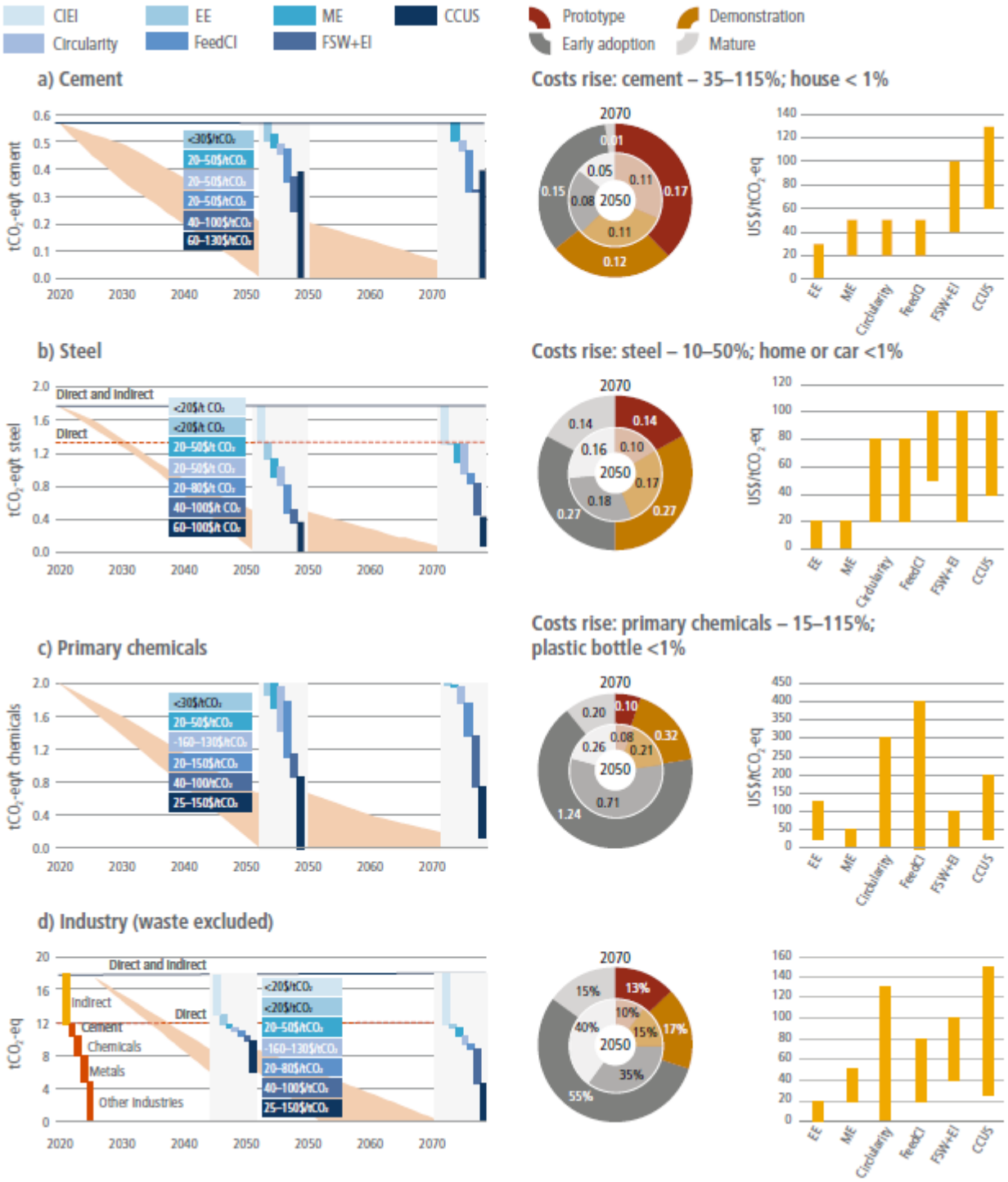


図 5.5.2-3　産業サブセクターにおける緩和ポテンシャルとコスト

CIEL:間接排出における電力の炭素強度、EE: エネルギー効率、ME :原材料効率、マテリアルフロー循環（石炭フライアッシュ、高炉スラグ、その他の副産物や廃棄物、鉄くず、プラスチックリサイクルなどによるクリンカ代替）、FeedCI: 原料炭素強度（水素、バイオマス、新セメント、天然のクリンカ代替）、FSW+EI: 燃料転換と低炭素電力による工程の電化

（出典）IPCC[1)]

① 鉄鋼

2019 年の CO_2 排出量は 2.6Gt にのぼり、産業部門からの排出の 28%を占めている。鉄鋼の約 40%が構造物、20%が産業機器、18%が消費財、13%がインフラ、10%が自動車に使用されており、世界の粗鋼生産量は 2008 年から 2020 年の間に 41%増加した。鉄鋼生産は、鉄鉱石を原料とする一次生産と鉄スクラップを原料とする二次生産に分けられる。高炉-転炉ルート（BF-BOF）は主要な一次生産ルートであり、世界の粗鋼生産の 73%を占める。鉄鋼生産の 26%を占める電炉（EAF）はリサイクル鉄の溶融による二次生産のためエネルギーと CO_2 排出量は少ない。BF-BOF プロセスでは 15%のエネルギー効率改善が可能であと推計されている。二次ルートの割合を増やすことで排出量を削減できるが、スクラップの利用可能性に制約がある。その他、CCUS を備えた BF-BOF ルート、CCS を伴うメタンベースの合成ガス（水素と一酸化炭素）による直接還元鉄（DRI)、水素直接還元鉄（H-DRI)、BF-BOF ルートにおける水素混焼などの技術選択肢がある。鋼材の使用量削減、長寿命化、再利用、施工性、低汚染リサイクルのための設計により、鋼材需要を最大 40%削減できる可能性がある。そのほか、カーシェアなど効率的な最終製品利用などにより鋼材需要を減らす対策もある。

② セメント

セメントは安価で耐久性があり、地域偏在性が小さくどこでも利用可能なため、現代社会において大量に利用されている。セメントは、砂、砂利、石の骨材をつなぎ合わせコンクリートなどの建築材料として利用される。2019 年のセメント生産にともなう直接 CO_2 排出量（エネルギー消費とプロセス排出量の合計）は 2.1～2.5Gt、産業部門からの排出の 14～17%を占めると推定されている。CO_2 の一部（直接排出量の 15～30%）はコンクリート製品に再吸収されると考えられている。

セメント部門は排出削減の選択肢が限られている。セメントからの排出の多くは、クリンカを作るための石灰石の脱炭酸に由来するため、クリンカの使用を減らすことができれば GHG 強度を低下させることができる。現在、高炉スラグ、石炭フライアッシュなどがセメントに代わる補助的なセメント質材料として使用されている。通常のセメント製造プロセスは、非化石エネルギー源の利用による CO_2 排出削減という選択肢がとれないため、エネルギー消費及び炭酸カルシウム分解プロセスにともなう CO_2 排出を CCS によって回収することが重要な緩和策となる。

③ 化学

化学産業は水素、アンモニア、メタノール、一酸化炭素、エチレン、プロピレン、ベンゼン、トルエン、キシレン、芳香族などの基本化学物質からプラスチックやゴム、肥料、溶剤、食品添加物や医薬品などの特殊化学品まで多種多様な製品がある。2019 年における化学部門からの直接 CO_2 排出量は約 1.1～1.7Gt で、産業部門による排出の約 10%を占めている。排出量の大部分は化学製品の生産において必要となる熱と蒸気に由来するもので、現在、このエネルギーは化石燃料によって賄われている。電気ボイラーや高温ヒートポンプを利用したり、バイオエネルギーや水素によって代替した

りすることにより排出削減の余地がある。また CCS による CO_2 回収や、化学製品の効率的利用など需要側の対策も重要となる。

④ そのほか

紙パ部門は、黒液による生物起源の CO_2 排出量は多いが、化石燃料起源の CO_2 排出量は比較的少ない。パルプ工場ではバイオマスの残渣や副産物を利用することができ、製紙工場では低温から中温のプロセス熱を利用することで電化が可能である。また、CCS も有力な技術オプションの一つとして考えられている。

軽工業部門は、エネルギーサービスニーズ（動力、換気、乾燥、暖房、圧縮空気など）の点で多様なセクターであるが、暖房や乾燥のための化石燃料利用は、低炭素電力を利用した高温ヒートポンプ、機械的蒸気再圧縮、エアインダクションなどによって代替することができる。

(4) まとめ

産業部門はサブセクターごとに使われている技術や生産プロセスが異なるため、CO_2 排出削減のための部門横断的、汎用的な対策は少ない。特に鉄鋼、セメント、化学などのエネルギー集約産業は対策が容易ではないが、原材料需要の削減、原材料の効率化、循環型経済システムの確立により一次生産の必要性を減らすことができる。あわせて、生産側ではエネルギー効率を高め、エネルギーキャリアを電力、水素、バイオ燃料など低～ゼロ GHG 排出のものに転換し、それでも残る CO_2 排出は CCUS によって回収、貯蔵、再利用することが必要になる。電化が容易な軽工業部門は CO_2 フリーの電力を利用することが基本戦略となる。以上の状況を踏まえ、IPCC では産業部門の脱炭素化は技術的には可能であるものの、簡単ではないと評価している。

産業部門の脱炭素化に向けては、1）材料効率向上と循環型経済システムを促進する規制や政策、2）新技術が「死の谷」を越えて普及させるための供給側に対するテクノロジー・プッシュ（technology-push）、需要側に対するディマンド・プル（demand-pull）の政策、3）イノベーションを誘発ための政策、4）長期かつ低コストの資金調達を可能にする仕組み、5）計画的なインフラ（CO_2 輸送・処分、電力・水素輸送・貯蔵など）建設、といった制度的支援も必要になる。

参考文献（第 5.5.2 節に関するもの）

1) IPCC, 2022: Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, IPCC
2) John P. Weyant: A Review and Assessment of Strategies and Scenarios for Rapidly Reducing Net GHG Emissions from the Industrial Sector. Stanford University (2023)
3) Grubler, A. et al., 2018: A low energy demand scenario for meeting the 1.5 ℃ target and sustainable development goals without negative emission technologies. Nature Energy, 3(6), 515–527

4) IPCC, 2018: 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. Cambridge University Press, Cambridge, IPCC
5) IEA, 2021: Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector.
6) IEA, 2022: World Energy Outlook 2022.

5.5.3 食品廃棄低減による農業土地利用・非 CO_2 GHG 排出への影響分析

(1) 背景と目的

需要側技術の活用による物質消費、エネルギー消費、及び GHG 排出量の削減の可能性の一つとして、本 PJ では情報技術（IT）等の活用による食品廃棄低減の影響に着目している。食料の安定的な供給は人間生活に必要不可欠であるが、一方で、過剰な生産や購買に伴う廃棄、不適切な保存による損失が指摘され [1]、国連の持続可能な開発目標（SDGs）のターゲット 12.3 では、「2030 年までに小売・消費レベルにおける世界全体の一人当たりの食料の廃棄を半減させ、収穫後損失などの生産・サプライチェーンにおける食料の損失を減少させる」という目標が掲げられている [2]。食料は世界各地の風土や慣習、生活スタイルに依って異なり、食品廃棄低減策も多様と考えられるが、例えば日本では近年の IT 進展に伴い、需要予測を活用した小売やメーカでの食品廃棄低減や、フードロスダイアリーの活用による家庭での廃棄低減が一部実証されつつある [3),4),5]。IT 進展は世界的な傾向であり、このような技術が世界各地域で活用された場合には、食品廃棄の低減と同時に、食品に体化されるエネルギーや GHG の削減にも寄与すると期待される。

その効果について、昨年度まで産業連関表（I-O 表）を用いた分析を行い、家庭や食品産業での廃棄低減は食品加工、農水産をはじめ、飼肥料、プラスチック・紙等工業材料、輸送、廃棄物処理等多数の産業に波及し、各部門のエネルギー消費や GHG 排出量の削減に寄与することを定量的に示した [6),7),8]。このように、I-O 分析は関連部門への波及効果の算定に有用である。なお、これまでの分析は、2011 年又は 2014 年と過去の産業構造に基づくものであった。今年度、5.6 節に後述する長期緩和策評価のため、食品廃棄低減による主要エネルギー需要部門の活動量（生産量）への影響を、2014 年 I-O 表に基づき推計した。但し、厳密には IT の台頭に伴う産業構造変化を考慮した I-O 表に基づき分析する必要があり、継続的な課題である。

ところで、IPCC WG3 AR6[9)]によると、2019 年の世界人為起源 GHG 排出量の 64%はエネルギー利用のための化石燃料燃焼・工業プロセス由来であり、その他に、土地利用・土地利用変化（土地関連）CO_2 が総排出量の 10%を、CH_4、N_2O、F ガスがそれぞれ 18%、4%、2%を占める。このうち土地関連 CO_2 排出には耕地拡大のための森林伐採や泥炭地排水・火災 [10)]が含まれる。CH_4 排出は稲作や反芻動物のゲップ、N_2O 排出は化学肥料や家畜糞尿等というように、農業部門からの排出が多い [11),12)]。このことから、食品廃棄低減によって、これまで最終的に廃棄されていた作物や畜産の生産が省かれるならば、土地関連 CO_2 や農業部門 CH_4、N_2O の排出削減にもつながると考えられる。

また、食料生産に必要な土地が減少し、その分、エネルギー作物や植林等の緩和策に利用可能な土地が増大する可能性も考えられる。従って、食品廃棄低減による農業土地利用や農業部門非 CO_2 GHG 排出への影響は、長期緩和シナリオ分析における重要な要素の一つといえる。

RITE ではこれまで長期緩和シナリオ分析のために、農業土地利用モデル GLaW（**G**rid-based model for agricultural **La**nd-use and **W**ater resource assessment）[13),14)]や非 CO_2 GHG 排出評価モデル[15)]を開発してきた。本節では、両モデルを用いた分析について記す。具体的には図 5.5.3-1 に色付けした箇所で、まず IT 等の活用による食品廃棄低減を考慮した長期作物需要シナリオを策定した。続いてその作物需要を満たすために必要な土地を確保した上で、エネルギー作物や植林の緩和策に利用可能な潜在地、土地関連 CO_2 排出量等を GLaW モデルにより分析した。さらに、算定された水田面積と畜産生産量を非 CO_2 GHG 排出評価モデルに引き渡し、水田 CH_4、畜産 CH_4、N_2O の排出に及ぶ影響を分析した。

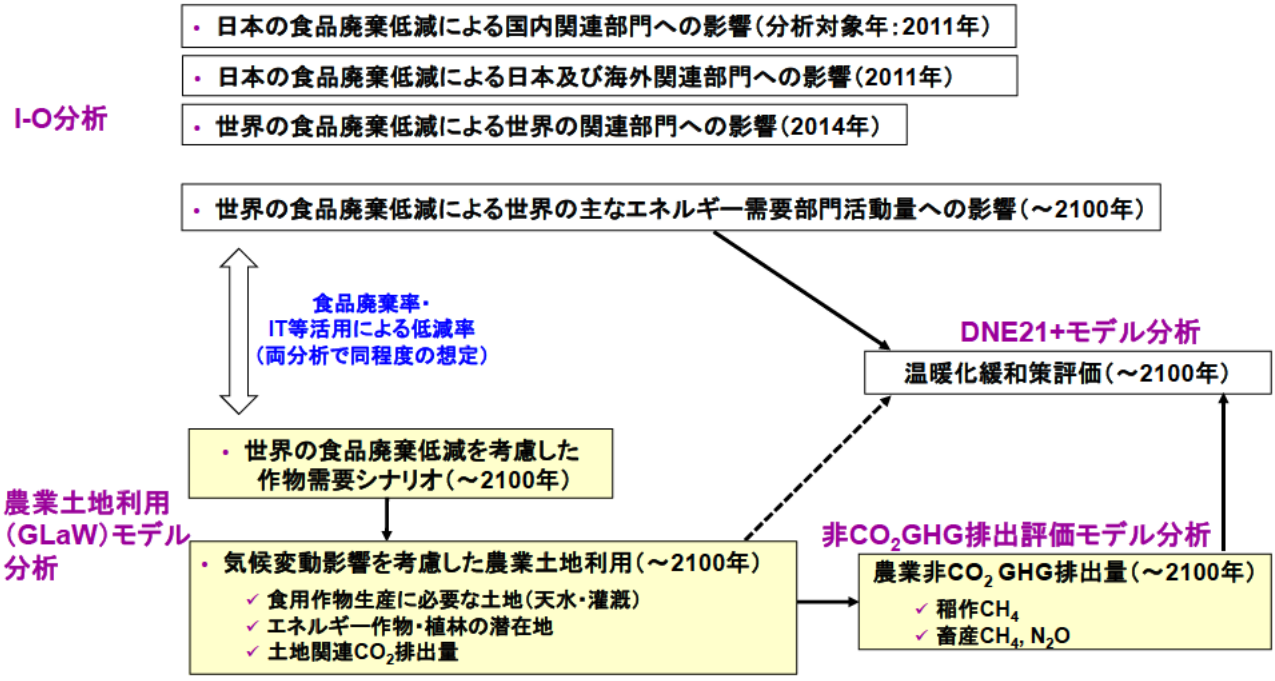


図 5.5.3-1 本節の分析対象項目

(2) 世界の食品廃棄低減を考慮した長期作物需要シナリオの策定

① 食用作物需要シナリオの策定手順

世界 32 地域毎（図 5.5.3-2）に、図 5.5.3-3 に示すように経済発展（一人当たり GDP の増大）に伴う一人当たり供給総熱量の増大（図 5.5.3-3a）や、供給総熱量に占める植物油や動物性食品の比率増大を考慮し、食品目別の供給熱量を算定する（図 5.5.3-3b）。さらに、加工品はその原料に、畜産品は飼料に換算し、作物需要量を算出する（図 5.5.3-3c）（詳細は文献 9)を参照）。

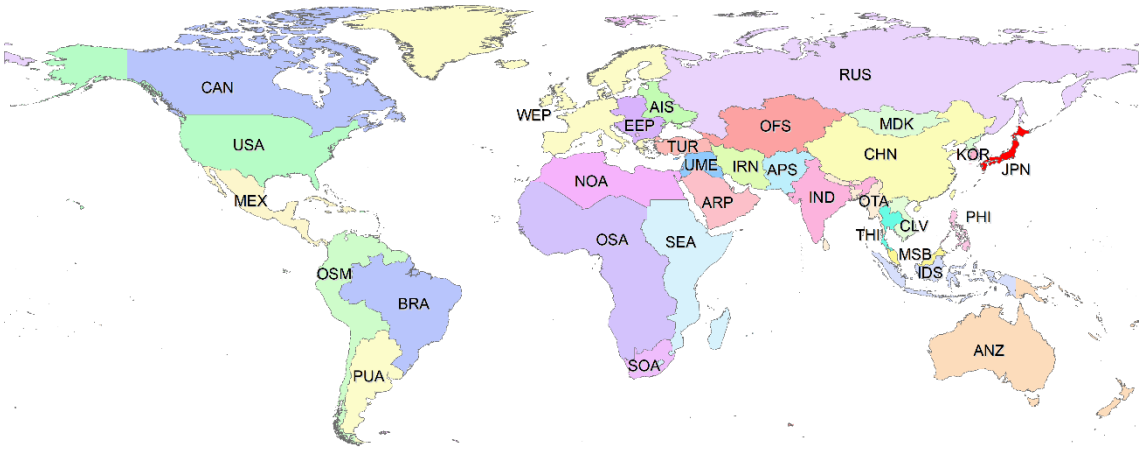


図 5.5.3-2 GLaW モデルの世界 32 地域区分

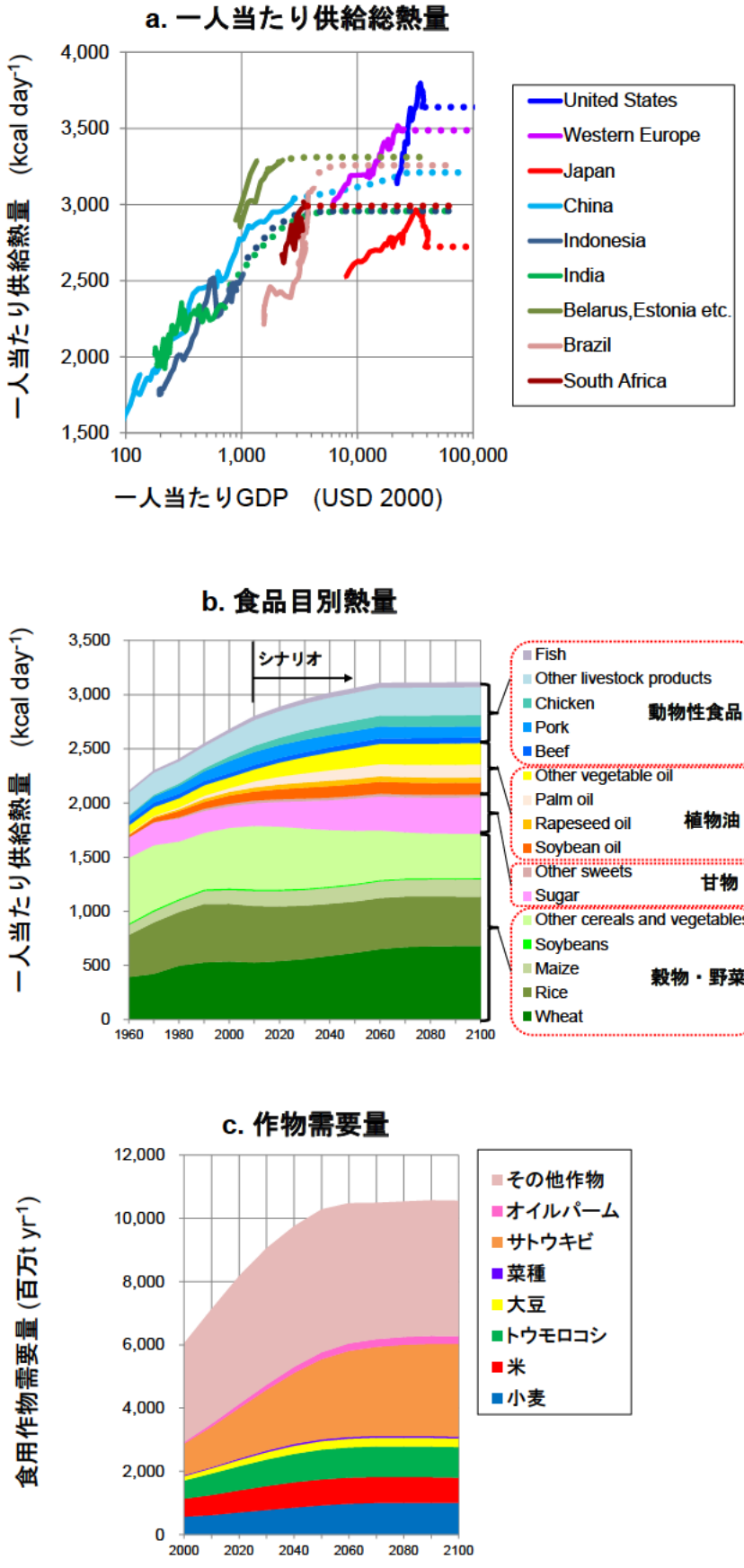


図 5.5.3-3 一人当たり熱量供給量（a,b）、食用作物需要量（c）

留意点として、図 5.5.3-3a の一人当たり供給熱量は FAOSTAT Food Balances の“Food supply kcal/capita/day” [16] に準拠しており、小売等流通段階や消費段階で廃棄される分も含む。今回、食品廃棄低減を考慮した作物需要シナリオを策定するにあたり、流通段階と消費段階の食品廃棄率（それぞれ L_D、L_C）のシナリオを食品目毎に作成し、IT 等活用によって廃棄率が低減するケースでは、廃棄低減分に相当する熱量を各品目の供給熱量から減じた。さらに、食品加工段階での廃棄率（L_P）、農作物の収穫後取り扱い・保存段階の廃棄率（L_H）シナリオも作成し、各段階の廃棄率低減に応じて、原料作物や飼料作物の需要が低減するとした。図 5.5.3-4 に、収穫から消費までの作物フロー概念図を示す。

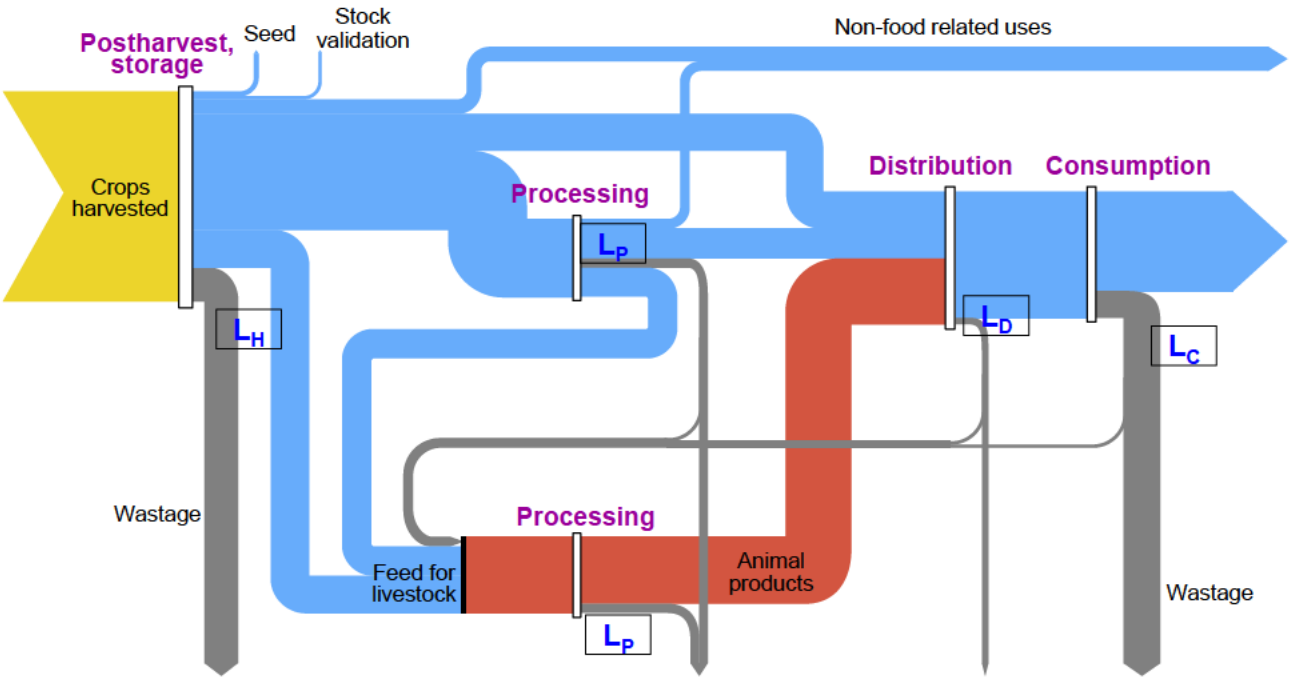


図 5.5.3-4 作物フローの概念図

*1: FAO(2011), Alexander et al.(2017)[17] を参考に作図

② IT 等を活用した食品廃棄低減策

世界的に導入され食品廃棄低減に寄与する可能性が考えられるものとして、昨年度の I-O 分析と同様の対策 [8]を想定した。表 5.5.3-1 に示すように、消費段階では、フードロスダイアリーや買物・献立管理のアプリ活用により、食材が無駄なく消費され、賞味期限切れや食べ残しの低減に寄与するとした。食品加工と流通の段階では POS（Point of sales）システムを用いた需要予測により、過剰な発注・生産が抑制されるとした。収穫後の取り扱い・保存段階では、倉庫整備により食品廃棄が低減するとした。

表 5.5.3-1 食料システムの段階別、主な食品廃棄発生理由と低減策

段階	食品廃棄の発生理由	対策
消費	賞味期限切れ、食べ残し	フードロスダイアリー、買物・献立管理
食品加工、流通（卸・小売等）	過剰な発注・生産	POS システムを用いた需要予測
収穫後の取り扱い・保存	不適切な貯蔵	倉庫整備・管理

③ 食品廃棄率シナリオ

食品廃棄率シナリオとして、「なりゆき(BAU)」と「食品廃棄低減強化(EWR)」の 2 つのケース（表 5.5.3-2）を設定した。

表 5.5.3-2 食品廃棄率シナリオのケース設定

ケース	説明
なりゆき(BAU)	IT 等の活用が経済発展に伴って拡大し、食品廃棄率低減に寄与する。
食品廃棄低減強化(EWR)	IT 等の活用が大幅に拡大し、食品廃棄率低減も一層進む。

両ケースの食品廃棄率想定を食料システムの段階別に示す。

a. 消費段階

2000 年の食品目別廃棄率は文献 18),19)を参考に設定した。2010 年以降は、所得向上に伴い廃棄率が増大する傾向を地域別に考慮した[5]。その上で 2020 年以降、なりゆきケースでは、フードロスダイアリー、買物・献立管理等のアプリの活用が次第に拡大し、食品廃棄の低減に寄与すると想定した（図 5.5.3-5）。食品廃棄低減強化ケースでは、アプリ活用の大幅増大により[6]食品廃棄低減が一段と進み、例えば、米国・カナダ、西欧、東欧、オーストラリア等の廃棄率は 2010 年に比べ半減するとした。

[5] Barrera and Hertel (2021)[20]は、1992-2013 年の消費段階の食品廃棄率を（供給熱量－摂取熱量）/供給熱量から推計、さらに所得との関係を調べ、廃棄率に地域差はあるものの、同一地域では所得が高くなる程食品廃棄率も増大する傾向が見られたと報告している。また、彼らはこの傾向を、所得向上に伴う購入食料の増加や家庭労働の機会費用増大によると考察している。本分析では、Barrera and Hertel (2021)の世界 18 地域別関係式を基に、2010 年以降の所得向上に伴う各地域の廃棄率上昇を想定した。

[6] アプリの導入率は文献 5)等を参考に、OECD 諸国では、なりゆきケースに 2030 年、2050 年、2100 年に 25%、35%、60%、食品廃棄低減対策強化ケースに 60%、80%、95%の世帯で導入されると想定した。非 OECD 諸国でのアプリ導入率はその 1/2 程度とした。

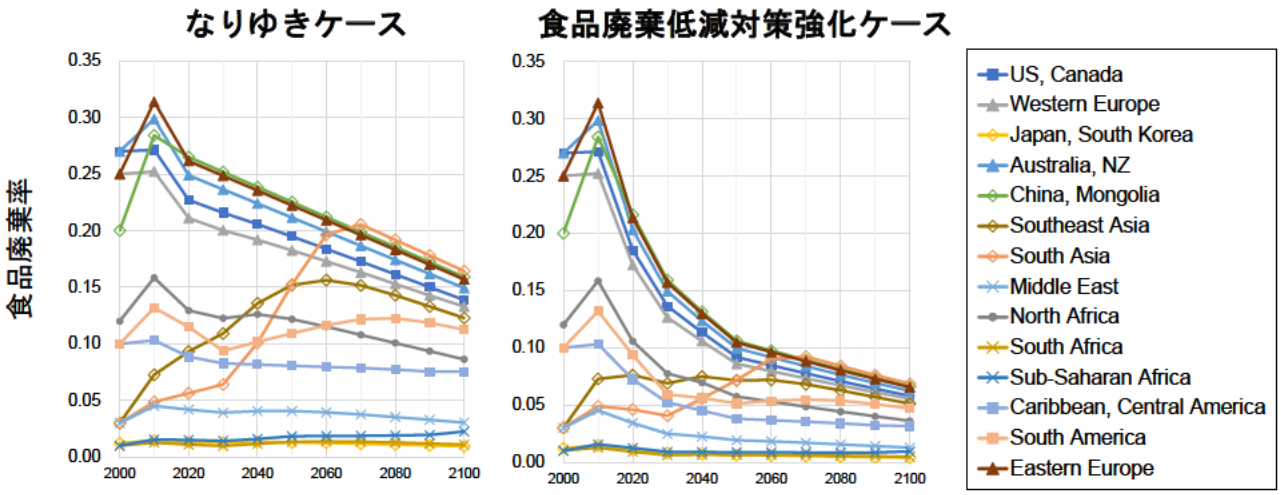


図 5.5.3-5 消費段階の食品廃棄率シナリオ（小麦の例）

b. 流通段階、食品加工段階

流通段階、及び食品加工段階について、2000 年、2010 年の食品廃棄率として文献 18)の値を引用し、2020 年以降は POS システムを用いた需要予測技術の活用拡大に伴い食品廃棄率が低減するとした。ここで、需要予測技術の活用は POS システムの導入率に伴い増大するとし、なりゆきケースの POS システム導入率は図 5.5.3-6 に示す一人当たり GDP の係数、及び地域別補正項に基づき推計した。食品廃棄低減強化ケースには、食品廃棄率がなりゆきケースの 50%に低減されるよう、POS システム及び需給予測技術の活用が拡大すると想定した（図 5.5.3-7、図 5.5.3-8）。

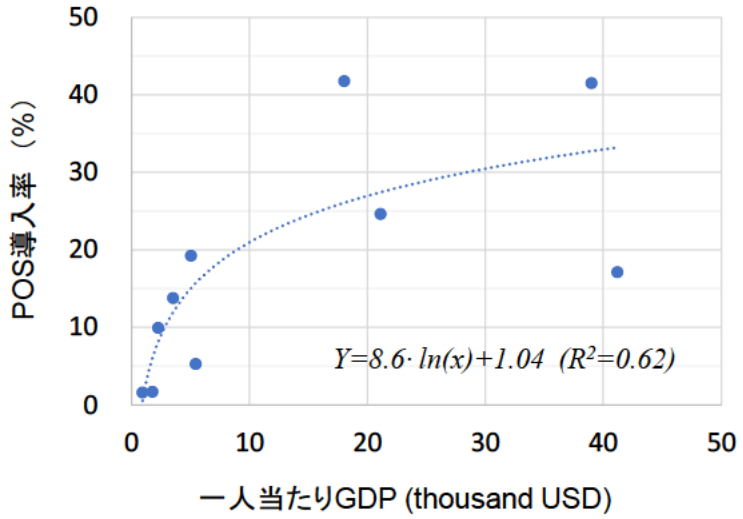


図 5.5.3-6 一人当たり GDP と POS システム導入率（2014 年，世界 10 地域別）

*1: POS システム導入率は、成人 10 万人あたり POS ターミナル数 [21]と日本の食品スーパーマーケットや飲食店における POS システム導入率 [6]を参考に推計。

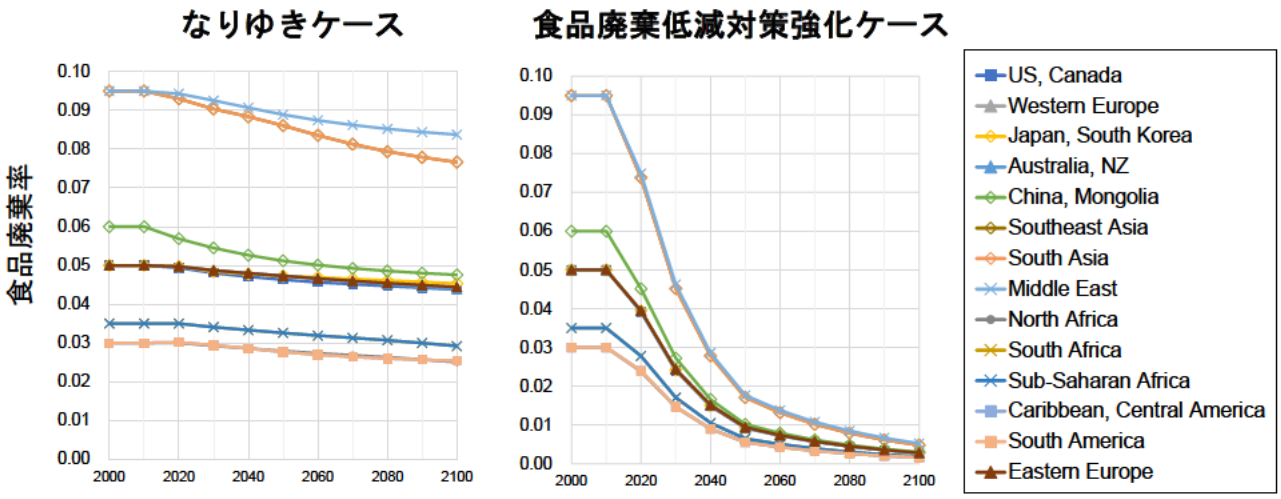


図 5.5.3-7 流通段階の食品廃棄率シナリオ（その他作物の例）

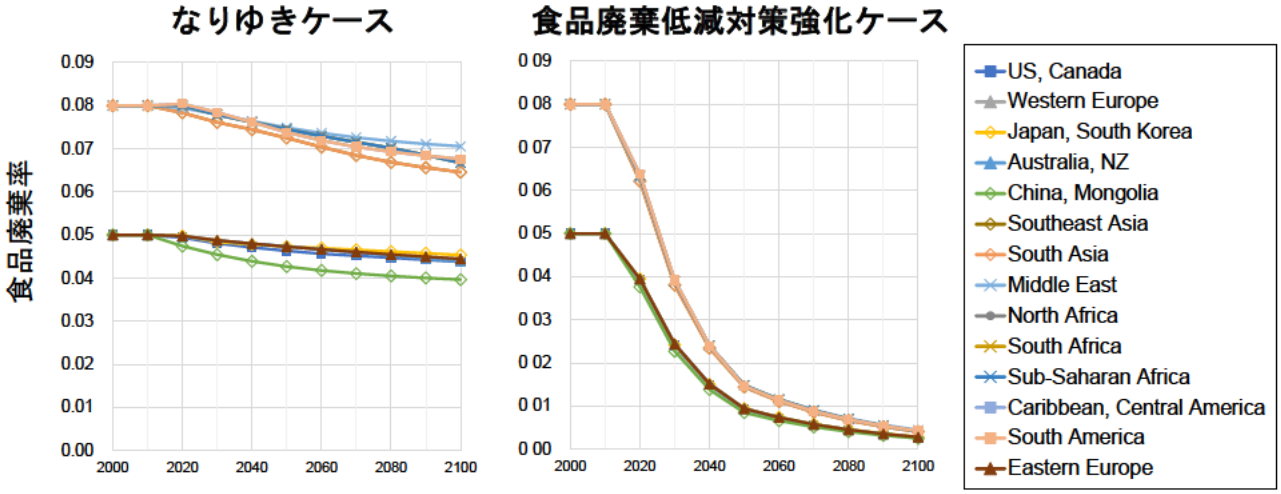


図 5.5.3-8 加工段階の食品廃棄率シナリオ（菜種油の例）

c. 収穫後の取り扱い・保存段階

収穫後の取り扱い・保存段階について、2000 年、2010 年の食品廃棄率は FAOSTAT food balances[16]の値を用いて推計した[7]。2020 年以降、なりゆきケースでは、非 OECD（但し、東欧・ロシア等寒冷地域を除く）地域で、GDP 成長に伴い倉庫が整備され、食品廃棄率低減に寄与するとした。食品廃棄低減強化ケースには全地域で、倉庫管理が強化され、食品廃棄率がなりゆきケースの 50%に低減されるとした。

[7] L_H=Losses/(Production+Import－Stock Variation)より推計。

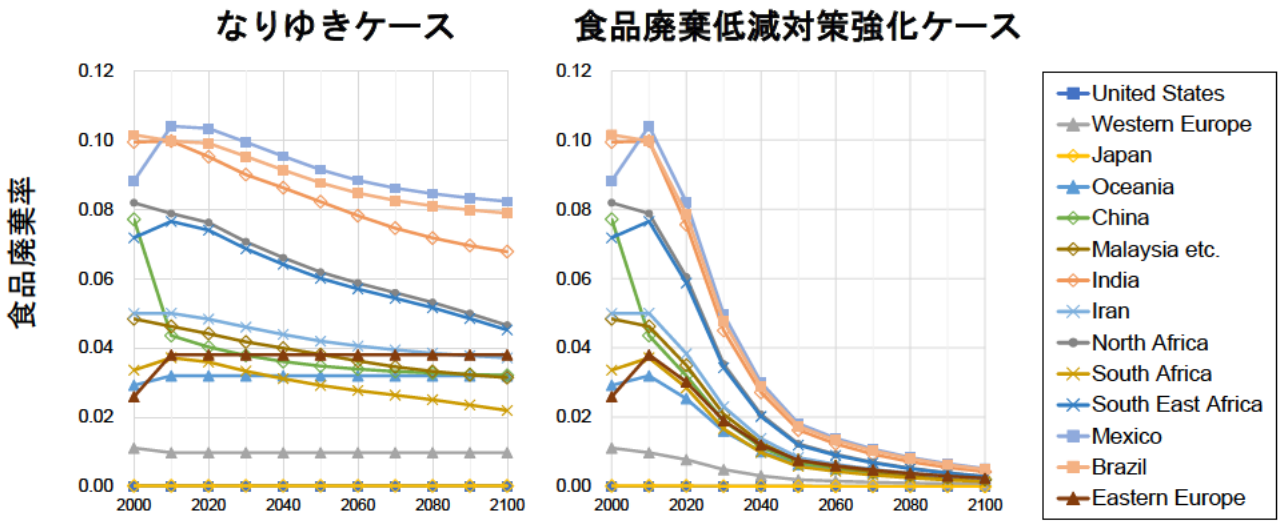


図 5.5.3-9 収穫後の取り扱い・保存段階の食品廃棄率シナリオ（トウモロコシの例）

④ 再生利用の想定

廃棄された食品の一部は飼料や肥料等に再生利用される。文献 22), 23)によると、家庭で発生した廃棄食品物の再生利用率は、日本は 6～7%[22]、米国は 38%、西欧は 20～55%、韓国は 95% [23]と推計される。西欧の再生利用率が高い理由の一つに、家庭でのコンポスト化（堆肥化）を含めている点があげられる。韓国では、2005 年の「生ごみ直接埋立禁止法」制定後、堆肥化、飼料化がすすめられ、再生利用率が非常に高い。但し、堆肥と飼料の過剰生産が大きな問題となっており、結局廃棄されているとの指摘もある [24] 。このように、再生利用の実態は不明な上、推計されている再生利用率の地域差は大きい。なお、多くの地域に共通する特徴として、消費段階に比べ、加工段階、流通段階で発生した食品廃棄物は再生利用率が高いことがあげられる。発生場所や形態が限られ、収集・利用をしやすいためと考えられる。

本分析では暫定的であるが、なりゆきケース、食品廃棄低減強化ケースともに、各段階の再生利用率は次第に上昇し、例えば 2030 年に加工・流通段階ではどの地域も 90%以上になるとした。再生利用内容は、飼料、肥料、その他のいずれかとし、文献 22), 23)を参考に、表 5.5.3-3 のような内訳を想定した。

さらに、食品廃棄物 1 トンから 0.16 トンの飼料が生成される [24]とし、食品廃棄低減によって廃棄物由来飼料が不足する場合は、飼料用作物で代替するとした。

表 5.5.3-3 食品廃棄の再生利用内訳

段階	利用内訳
消費段階	飼料: 10%、肥料: 70%、その他: 20%
加工段階、流通段階	飼料: 45%、肥料: 40%、その他: 15%

⑤　工業原料用作物需要の想定

世界の耕地で栽培される作物の多くは食用作物（人間が食する、又は家畜の飼料となる作物）であるが、パーム洗剤等工業製品の原料としての需要も一定量存在する。それらに必要な土地を確保した上で、緩和策用のエネルギー作物生産や植林に利用可能な土地を推計するため、工業原料用の作物需要シナリオも暫定的ながら策定する。本分析では、2010 年の一人当たり工業原料用作物供給量[8]に将来人口を乗じて想定した。

⑥　作物需要シナリオ

前項までの想定に基づき算定した作物需要量を図 5.5.3-10 を示す。図中、「食シフトケース」は、IPCC WG3AR6 等で、畜産品を植物性食品で代替する食スタイルが需要サイドでの GHG 排出削減策の一つとしてあげられていることから、参考までに設定したものである。具体的には、なりゆきケースに各地域で推計された畜産物（牛肉、豚肉、鶏肉、その他畜産品）需要量の 50%（2030 年）、87%（2050 年）、94%（2070 年）、100%（2100 年）が、食シフトケースでは同熱量の大豆で代替されるとした。なお、食シフトには多様な様式が考えられる。ここでは、大豆の単位熱量当たりたんぱく質量 0.09 g/kcal が、牛肉・羊肉の 0.09、豚肉の 0.04、鶏肉の 0.08、ミルク等の 0.06 g/kcal と比較的近いこと [16]、さらに、大豆ミート等が市場に出現してきていることから、一例として設定した。

図 5.5.3-11 には 2050 年と 2100 年について、なりゆきケース比の値を示す。食品廃棄低減強化ケースでは、2050 年、2100 年の作物需要がなりゆきケースに比べ、約 10 億トン縮小する。また、食シフトケースにはなりゆきケースに比べ、畜産用の飼料需要が減少し、特にトウモロコシの需要が減少する一方、大豆の需要が増大する。

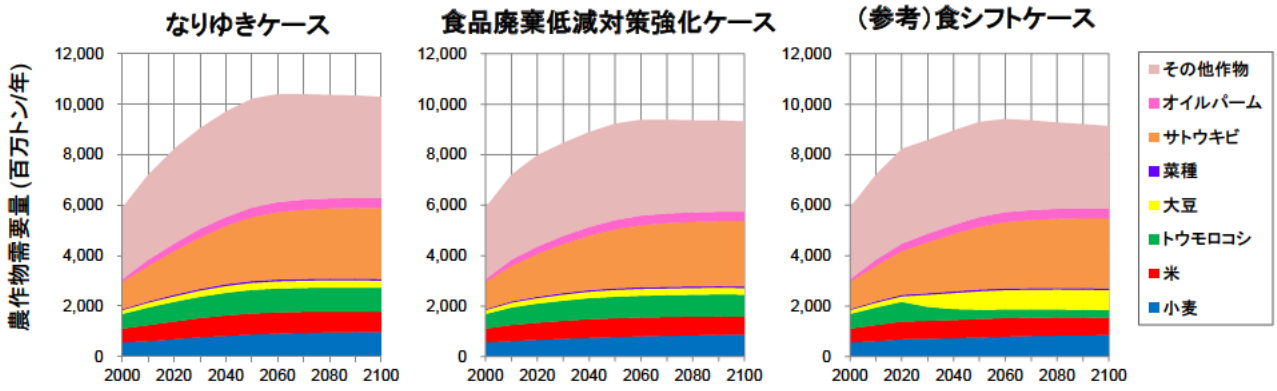


図 5.5.3-10 ケース別の作物需要量シナリオ（食用、一部工業原料用を含む）

[8] 2010 年の工業原料用作物供給量は、Other uses (non-food)[16]－バイオエネルギー利用相当量 [25] から推計。

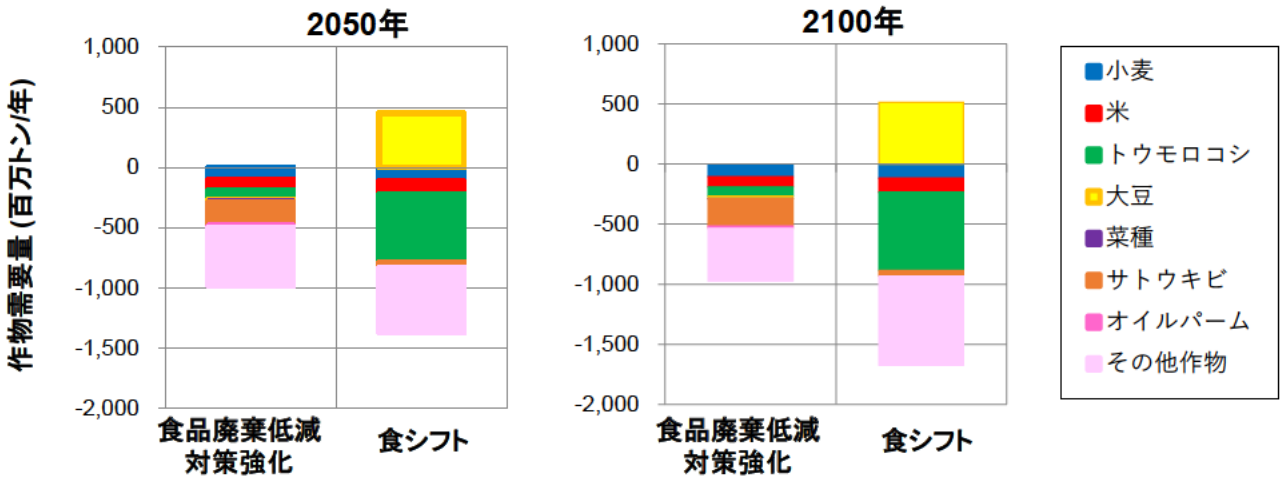


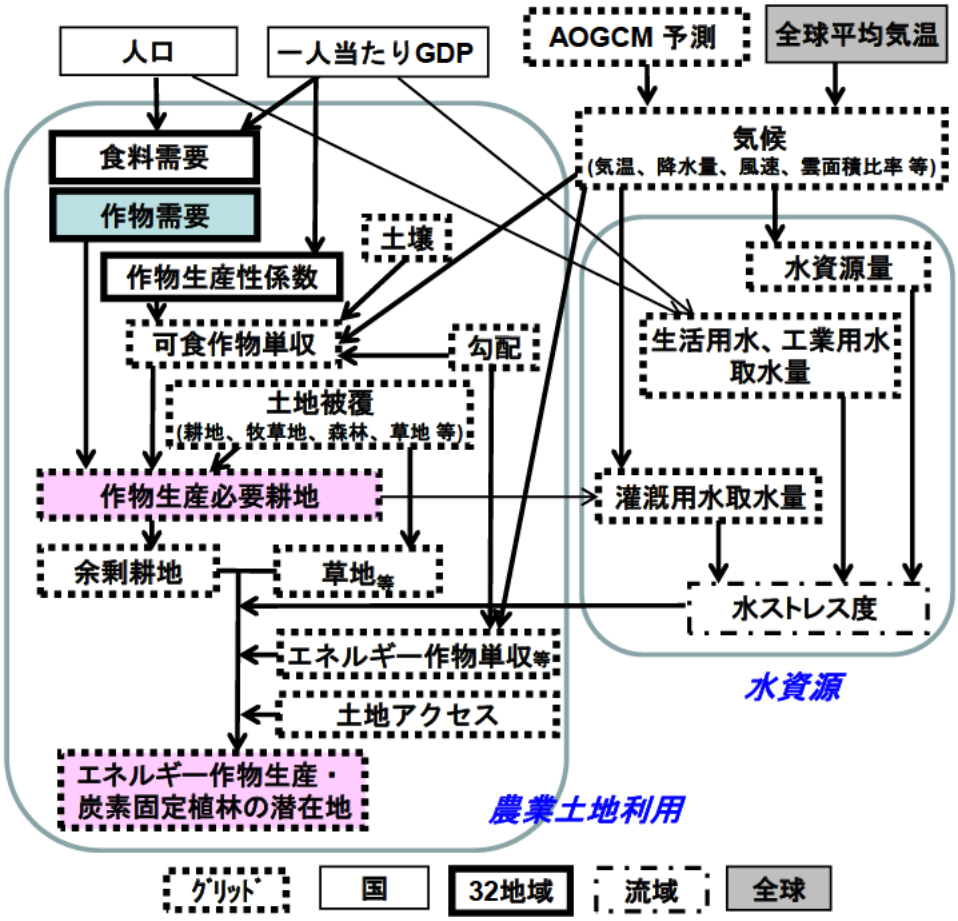
図 5.5.3-11 なりゆきケース比の作物需要量（食用、一部工業原料用を含む）

(3) 農業土地利用分析

① GLaW モデルの概要

GLaW モデルでは、図 5.5.3-12 に示すように、作物需要を満たすために必要な耕地面積を、経済発展に伴う作物生産性の向上、土壌、勾配、気候影響（含 CO_2 施肥効果）、及び適応（気候条件に適した品種・作付け時期の選択）を考慮して算定する。さらに「耕地」から「作物生産に必要な土地」を除いた土地を「余剰耕地」と定義し、食料生産との競合や生態系への影響が極力少ないと考えられる「余剰耕地」と「草地」のうち、水ストレス度が低く、作物単収/森林吸収能、土地アクセス、保護地区外等の条件を満たす土地を「エネルギー作物生産/炭素固定植林の潜在地」として算定する。さらに、耕地拡大に伴う CO_2 排出量等を算定する。これらは後に DNE21+モデルに引き渡され、GHG 排出パス設定や、エネルギーシステムの CO_2 排出削減策評価に利用される。また、水田面積や畜産品生産量を非 CO_2 GHG 排出評価モデル [15]の入力値としてソフトリンクし、作物需要の違いによる CH_4、N_2O 排出への影響評価に利用できる。

気候分布データとして、MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research On Climate ver.5) [26]による予測分布を全球平均気温に応じてパターンスケーリングしたものを用いる。土地被覆は 2000 と 2010 年は LUMIP データ [27]に準拠し、2020 年以降は耕地を一定割合まで拡大可能としている [13]。



計算時点：2000-2050の10年毎、2070年、2100年

AOGCM: Atmosphere-Ocean General Circulation Model

図 5.5.3-12 GLaW モデルの概要

② 農業土地利用の分析シナリオ

(2)項で述べた 3 つの作物需要に対し、温暖化レベルの違いを考慮したシナリオ（表 5.5.3-4）を農業土地利用の分析対象とした。ここで、温暖化レベルの BL とは、特段の GHG 排出削減が無いケースで 2100 年の産業革命前比全球平均気温上昇が約 4℃に達する、2DS は GHG 排出量を IEA の 2DS シナリオ [28]相当に削減し 2100 年までの全球平均気温上昇を 2℃未満に抑制するケースを指す。NoCC は、特段の GHG 排出削減は無いものの気候は 2000 年のままというもので、仮想的であるが温暖化影響をみるために設定した。図 5.5.3-13 に、BL、2DS ケースの全球平均気温上昇を示す。

表 5.5.3-4 農業土地利用の分析シナリオ

分析シナリオ	作物需要	温暖化レベル
BAU-BL	BAU: なりゆき	BL
BAU-2DS		2DS
BAU-NoCC		NoCC
EWR-BL	EWR: 食品廃棄低減強化	BL
EWR -2DS		2DS
DS-BL	DS: 食シフト	BL
DS -2DS		2DS

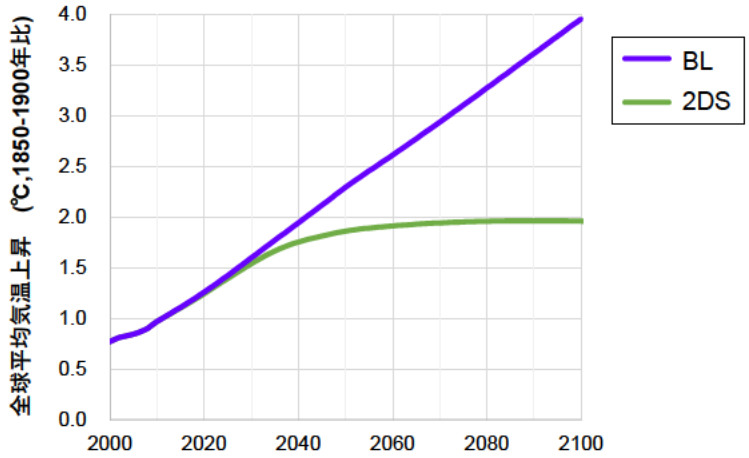


図 5.5.3-13 全球平均気温

* GHG 排出量を基に MAGICC 6[28]で計算したもの。

③ 農業土地利用分析の結果

図 5.5.3-14 に作物作付分布の例を示す。なお、図では作付け有りグリッドを全面色付けしているが、モデルではグリッド（15min×15min）内の天水栽培/灌漑栽培可能な土地面積比率をそれぞれ考慮している。

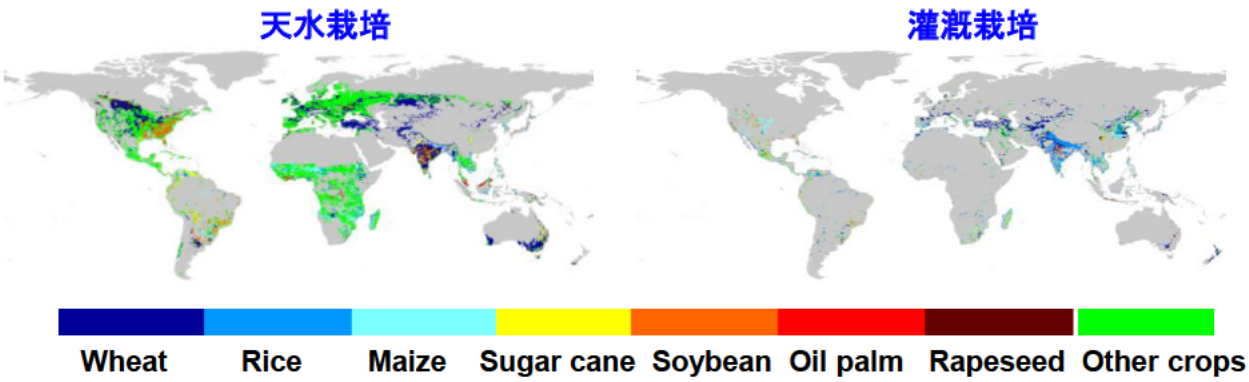


図 5.5.3-14 作物作付分布の例（BAU-BL シナリオ、2050 年）

注）モデルでは、グリッド（15min×15min）内の耕作可能な土地の面積比率を考慮。上図では作付け有りグリッドを全面色付け。

図 5.5.3-15 に 2000 年及び各シナリオ 2050 年、2100 年の地域別作物単収の例を示す。例えば、中国の米（図 a）の単収は、BAU-NoCC シナリオの 2050 年、2100 年に、2000 年より+20%、+25%と算定された。これは主に、経済発展に伴い生産性が向上すると想定した（図 5.5.3-12 参照）ことによる。BAU-2DS、BAU-BL シナリオでは BAU-NoCC シナリオより単収は増大する。米は熱帯性の作物であり、中国では温暖化により単収が増加する結果となっている。

一方、アフリカ[9]の小麦は、温暖化によって単収が低減する（図 b）。特に、GHG 排出削減が無く 2100 年の全球平均気温上昇が 4℃の BL シナリオで、顕著な低減が分析された。

米国の大豆（図 c）は、2DS レベルの温暖化であれば単収増となるものの、BL レベルでは単収減となる。なお、温暖化レベルに依らず食シフトケース（DS）の単収が、なりゆきケース（BAU）や、食品廃棄低減強化ケース（EWR）より小さい。これは、世界的な食シフトに伴い米国で大豆の生産を増大するにあたり、土壌条件があまり良くない土地にも栽培を拡大すると分析されたことによる。

このように、作物需要や温暖化の単収への影響は、地域や作物によって多様といえる。

[9] 図 5.5.3-2 の NOA、OSA、SEA、SOA を含む。

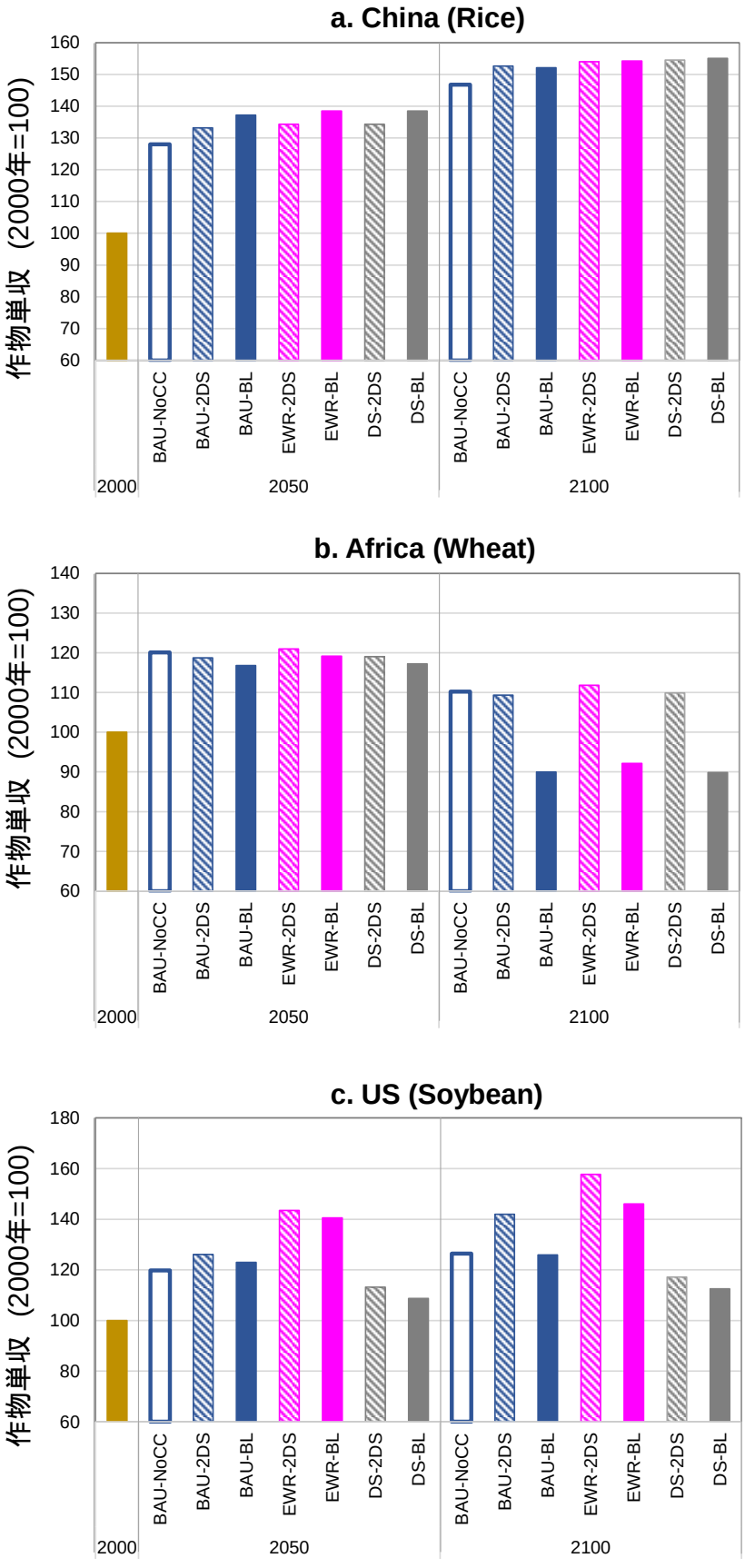


図 5.5.3-15 シナリオ別の作物単収の例

図 5.5.3-16 に総作付面積を示す。なりゆき（BAU）や食シフト（DS）ケースに比べ、食品廃棄低減策強化（EWR）ケースに総作付面積は小さく、2050 年、2100 年に世界全体で約 10%縮減する。なお、世界全体で見ると、なりゆき（BAU）ケースと食シフト（DS）ケースで作付面積に大差は無いが、アルゼンチン・パラグアイ・ウルグアイ地域等、大豆の主要産地では、食シフト（DS）ケースに耕地が拡大され、2050 年に BAU 比+30%と分析されている。

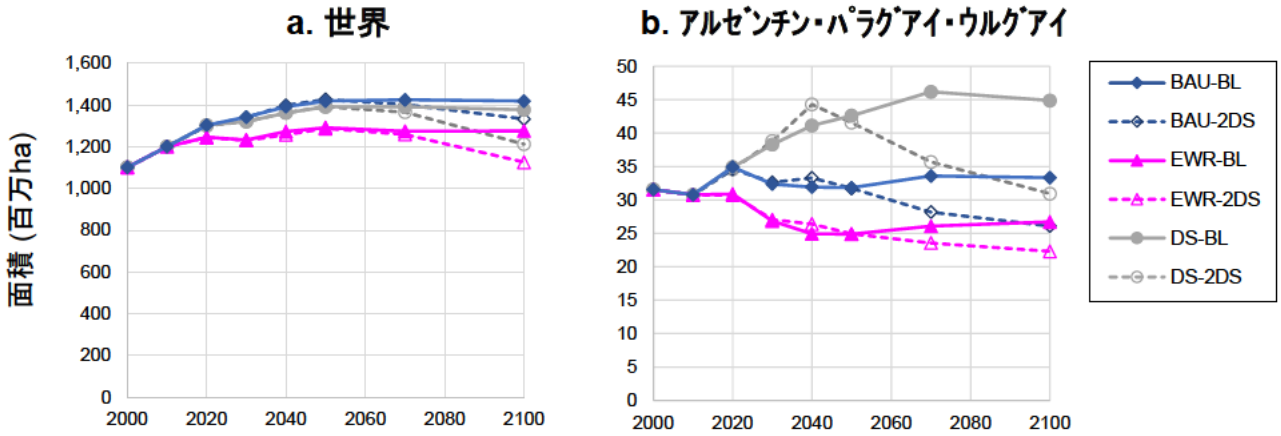


図 5.5.3-16 作物作付面積

図 5.5.3-17 に世界の水田面積を示す。食品廃棄低減策強化（EWR）ケースでは、なりゆき（BAU）ケースに比べ、水田面積が 2050 年に約 10%、2100 年には約 15%縮減すると分析された。これらは、後述するように CH_4 排出の削減に寄与する。

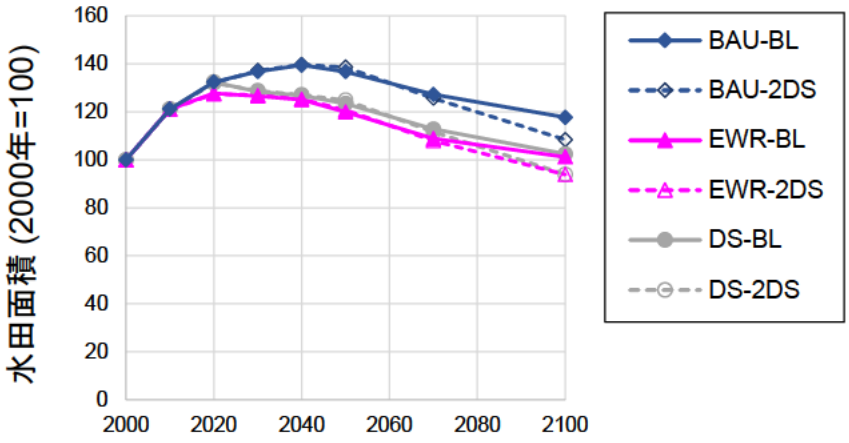


図 5.5.3-17 世界の水田面積

図 5.5.3-18 に世界のエネルギー作物/植林の潜在地面積を示す。食品廃棄低減策強化（EWR）ケースでは、なりゆき（BAU）ケースに比べ、食用作物の作付面積が縮減される分、エネルギー作物や植林に利用可能な潜在地は増大する。中でも「土地アクセス良・単収高」や「土地アクセス良・単収中」といった良質な潜在地の増大は、緩和費用の低減に寄与すると考えられる。

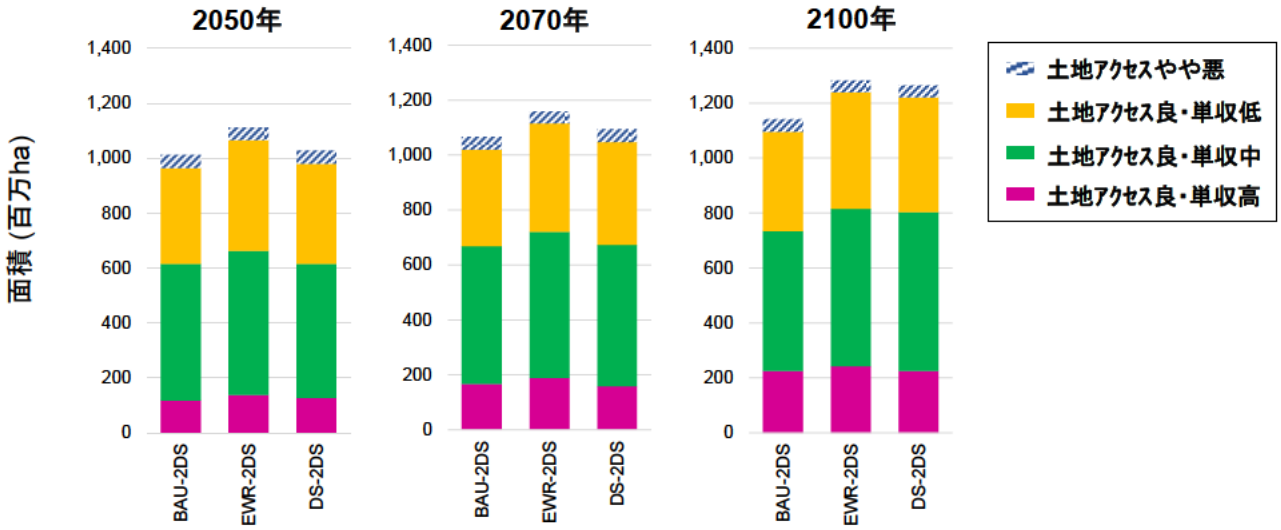


図 5.5.3-18 世界のエネルギー作物/植林の潜在地面積

*1: 土地アクセスは人口密度を代理指標として評価。人口密度が 1 人/km^2 以上のグリッドは「土地アクセスが良」、1～0.1 人/km^2 のグリッドは「土地アクセスはやや悪」。
*2: 単収の高、中、低の値は文献 14)を参照されたい。

図 5.5.3-19 に BAU-BL シナリオの土地関連 CO_2 排出量を示す。ここには、耕地拡大時の土地利用変化に伴う炭素放出[10]、泥炭耕地からの CO_2 排出[11]、2020 年までの植林・自然再生による炭素吸収[12]、その他要因（不適切な森林管理等）による炭素放出[13]が含まれる。図に示すように土地関連 CO_2 排出量は 2020 年以降、次第に低減する。主な要因として、食料需要は 2020 年以降も増大するものの（図 5.5.3-10 参照）、生産性の向上により耕地拡大が鈍化する（図 5.5.3-16a 参照）こと、また、経済発展に伴い森林管理が向上しその他要因の排出も次第に減少すると想定したことがあげられる。

10 耕地への転用面積×炭素排出係数 [30),32)]より推計。
11 作付面積×泥炭地割合 [32)]×炭素排出係数 [32)]より推計。
12 過去約 70 年間の植林・自然再生面積 [33)] ×NPP より推計。
13 その他要因による排出の 2020 年値は、本文記載の全項目の和が Global carbon project[34)]の公表値と等しくなるように推計。2020 年以降は、経済発展に伴い森林管理等が改善し、次第に減少すると想定。

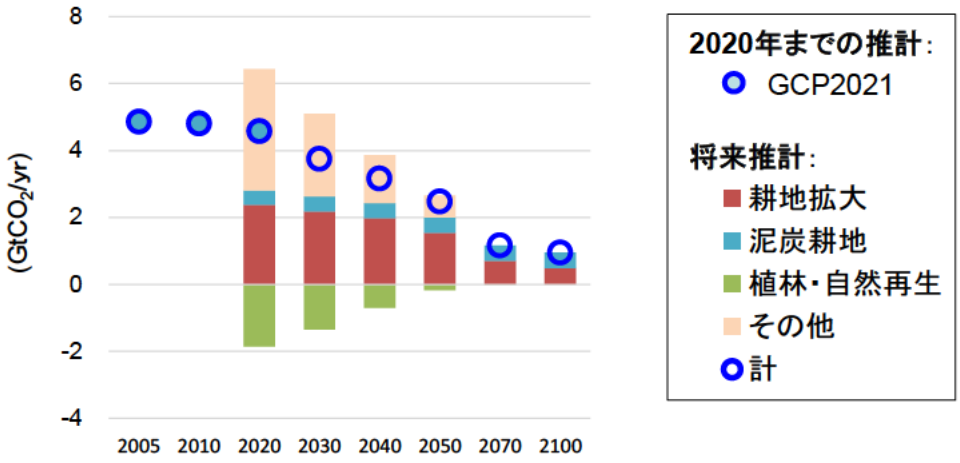


図 5.5.3-19　世界の土地関連 CO_2 排出量（BAU-BL シナリオ）

図 5.5.3-20 に、作物需要が異なるシナリオの土地関連 CO_2 排出量を示す。また、表 5.5.3-5 に、なりゆきシナリオ（BAU-BL）比の値を示す。これより、BAU-BL シナリオに比べ、食品廃棄低減強化シナリオ（EWR-BL）では、作物生産に必要な土地が減り耕地拡大も抑制されるため、2030～2050 年の土地関連 CO_2 排出量は 110～130 百万 t CO_2/yr だけ低減すると算定された。

一方、参考までに想定した食シフトシナリオ（DS-BL）では、なりゆきシナリオ（BAU-BL）より増大する結果となった。図 5.5.3-16b に示したように、大豆の主要な生産地であるアルゼンチン・パラグアイ・ウルグアイ、ブラジル等で耕地が拡大し、単位面積当たり炭素密度が高い森林の伐採が増大することによる。なお、食シフトにより、余剰となった牧草地に植生が自然再生し、炭素固定に寄与する可能性も考えられる。その点も考慮したならば、世界全体の土地関連 CO_2 排出量が本推計より小さくなる可能性はある。

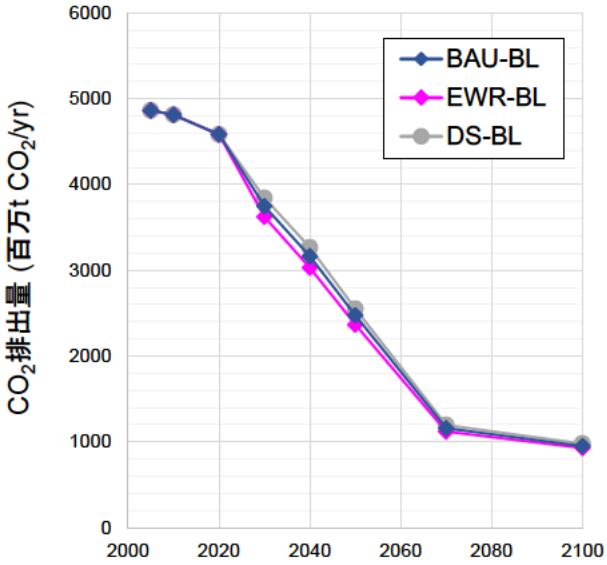


図 5.5.3-20 作物需要が異なるシナリオの世界土地関連 CO_2 排出量

表 5.5.3-5 世界土地関連 CO_2 排出量、BAU-BL シナリオとの差異（百万 t CO_2/yr）

シナリオ	2030 年	2040 年	2050 年
EWR-BL	－120	－130	－110
DS-BL	＋100	＋100	＋80

(4) 非 CO_2 GHG 排出量の分析

食料需要量の違いは、前節まで述べたように、水田面積（図 5.5.3-17）や畜産数にも違いをもたらし、稲作（CH_4）と畜産（CH_4、N_2O）の排出量にそれぞれ影響を与える。さらに、温暖化をベースラインから 2DS のレベルに抑制することが求められた場合、これらの部門でも非 GHG 排出抑制策をとる可能性が考えられる。本節では、食料需要の違いや、温暖化緩和レベルの違いを考慮した場合に、稲作、畜産関連の CH_4、N_2O 排出に及ぼす影響を、非 CO_2 GHG 排出量評価モデル [15]を用いて分析した。

非 CO_2 GHG 排出量評価モデルで、稲作関連の排出量は、UNFCCC-GHG インベントリ [35]の Category3.C（CH_4）に対応し、畜産関連の排出量は、Category3.A、3.B（CH_4、N_2O）に対応する。両排出量は水田面積と畜産数を変数として定式化されている [15]。ここでは、食料廃棄低減強化による水田面積と畜産数の変化（BAU ケース比）を反映し、排出量変化を推計した。さらに、温暖化緩和シナリオでは CO_2 限界削減費用（MAC）までの排出削減策が実施されるとして、MAC と削減率の関係式 [15]より、非 CO_2 GHG 排出削減量を推計した。各地域の MAC の値には、第 5.2 節の DNE21+モデルによる推計値を用いた。

図 5.5.3-21 に、食料需要、温暖化緩和レベル別に、2050 年の世界全体の、畜産、稲作関連 CH_4、N_2O 排出量推計結果を示す。IT 等をより積極的に活用し食品廃棄低減を強化した場合（EWR-BL）、食品廃棄低減がなりゆきの場合（BAU-BL）に比べ、493 百万 t $CO_{2\text{-eq}}$/yr（BAU-BL 比 10%）の非 CO_2 GHG 排出削減効果が推計された。さらに、2℃

目標における限界削減費用まで対策を実施すると 713 百万 t $CO_{2\text{-eq}}$/yr(BAU-BL 比 15%)の非 CO_2 GHG 排出削減となり、EWR-2DS では合計 1206 百万 t $CO_{2\text{-eq}}$/yr（BAU-BL 比 25%）の非 CO_2 GHG 排出削減になると推計された。

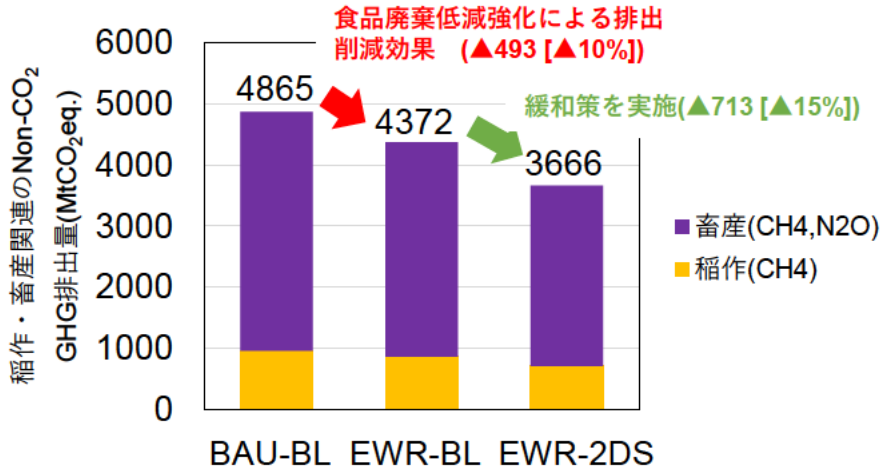


図 5.5.3-21 食料需要、温暖化緩和レベル別の、畜産・稲作関連非 CO_2 GHG 排出量（世界、2050 年）

同様に、食シフトケース（DS-BL）における非 CO_2 GHG 排出量への影響を推計した（図 5.5.3-22）。食シフトによって、3499 百万 t $CO_{2\text{-eq}}$/yr(BAU-BL 比 72%)の非 CO_2 GHG 排出削減効果が推計された。さらに、2℃目標における限界削減費用まで対策を実施すると 231 百万 t $CO_{2\text{-eq}}$/yr（BAU-BL 比 5%）の非 CO_2 GHG 排出削減となり、DS-2DS では合計 3720 百万 t $CO_{2\text{-eq}}$/yr（BAU-BL 比 77%）の非 CO_2 GHG 排出削減になると推計された。

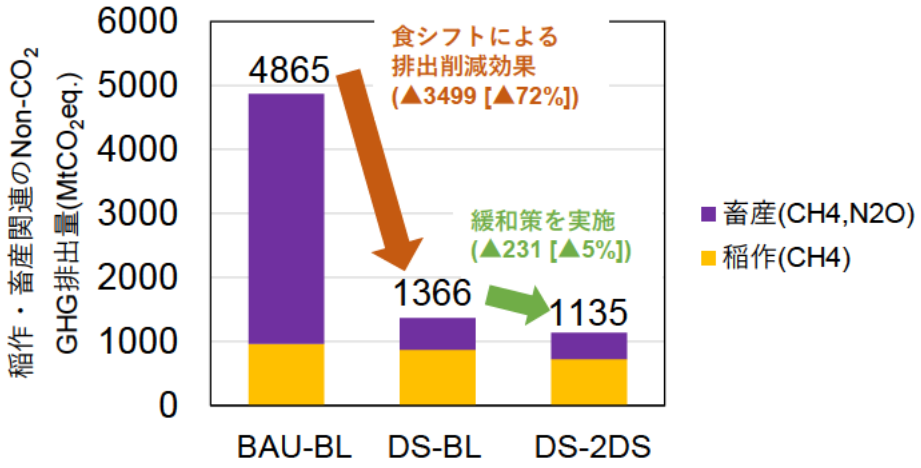


図 5.5.3-22 食料需要、温暖化緩和レベル別の、畜産・稲作関連非 CO_2 GHG 排出量（世界、2050 年）

(5) まとめ

需要側技術の活用を想定した長期緩和シナリオ分析の一環として、IT 等の利用により世界の食品廃棄率が低減する場合の作物需要シナリオを 2100 年まで策定した。また、IPCC WG3 AR6 等で、畜産品を植物性食品で代替する食スタイルが需要サイドの GHG 排出削減策の一つとしてあげられていることから、参考までに、畜産品（牛肉、豚肉、鶏肉、その他畜産品）を大豆で代替する場合の作物需要シナリオも策定した。

さらに、これらシナリオを農業土地利用モデル（GLaW）、非 CO_2 GHG 排出評価モデルに引き渡し、食品廃棄低減や食シフトが世界の土地利用、及び農業部門非 CO_2 GHG 排出、特に稲作 CH_4、畜産 CH_4、N_2O の排出に及ぼす影響を分析した。

主な結果は以下のようにまとめられる。

将来の世界作物需要量は、主として発展途上国の経済成長に伴う、一人当たり食料需要の増大、植物油や動物性食品の割合増大により、2050 年には 2000 年の 175%（全作物計、重量ベース）まで増大すると見込まれる（以下、なりゆきケース）。但し、IT 等を積極的に活用し消費、流通、加工、収穫後取り扱い・保存段階の食品廃棄を一段と低減した場合、2050 年の世界作物需要量は 2000 年の 155%程度に留まる。食シフトの場合、大豆の需要が伸びる一方、飼料用の作物、特にトウモロコシの需要が縮小し、2050 年の全作物需要量は 2000 年の 155%程度と推計された。

これら作物需要を満たすために必要な土地面積は、なりゆきケースには経済発展に伴う作物生産性向上を考慮しても 2050 年に 2000 年の 130%まで増大するところ、食品廃棄低減ケースには 120%弱に留まる。すなわち、食品廃棄低減は、作物需要量の低減、耕地拡大の抑制に寄与し土地関連 CO_2 排出を低減させると同時に、水田面積を縮減させ CH_4 排出低減に、また、畜産業の CH_4、N_2O 排出低減にも寄与する。これらにより、なりゆきケースに比べ 2050 年に、土地関連 CO_2 排出量は▲110 百万 t CO_2/yr、稲作・畜産の CH_4、N_2O 排出量は▲490 百万 t CO_2-eq/yr と分析された。さらに、食用作物生産に必要な土地が減少する分、エネルギー作物や植林等緩和策に利用可能な土地は増大すると分析された。中でも「土地アクセス良・単収高」や「土地アクセス良・単収中」といった良質な潜在地の増大は、緩和費用の低減につながると期待される。

参考までに分析した食シフトケースについて、2050 年の作物生産面積は大豆が増える一方でトウモロコシが減少し、世界全体で見るとなりゆきケースと大差が無い。但し、アルゼンチンやブラジル等、大豆の主要生産地では生産拡大のため耕地が拡大する。これは単位面積当たり炭素密度が高い森林の伐採につながり、世界の土地関連 CO_2 排出量はなりゆきケースに比べ 2050 年に＋80 百万 t CO_2/yr と算定された。なお、稲作・畜産の CH_4、N_2O 排出量が▲3500 百万 t CO_2-eq /yr と大幅に減少するため、世界全体では土地関連 CO_2 排出量の増大は打ち消される。このように、食シフトは世界全体で見た場合、これまでの報告と同様、GHG 排出削減に寄与するといえる。但し、地域によっては、上述の南米のように稲作・畜産の CH_4、N_2O 排出量減少以上に土地関連 CO_2 排出が増大する可能性が示唆される。食の嗜好は個人に依存することに加え、GHG 排出が増加する地域もあるとすると、食シフトの緩和策としての有効性には検討の余地があると考えられる。

今後の課題として、IT 活用による食品廃棄低減の効果について、実証実験の進捗を踏まえ、想定の更新があげられる。また、土地利用モデルや非 CO_2 GHG 排出評価モデルのパラメータやシナリオについて感度分析と、地域毎の精査が必要である。そして、得られた GHG 排出削減量やエネルギー作物生産/植林の潜在地情報を、DNE21+モデルに引き渡し、需要側技術の活用と整合的な長期緩和策評価を行う予定である。

参考文献（第 5.5.3 節に関するもの）

1) FAO; Global food losses and food wastage: extent, causes and prevention. FAO, Rome (2011)
2) UN; Sustainable Development Goals, https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300 (accessed 2019.10.10)
3) METI: 食品ロス削減に向けた経済産業省の取組 (2017) https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_policy/information/food_loss/conference/pdf/adjustments_index_10_170915_0006.pdf
4) METI: IoT 技術を活用したサプライチェーン効率化及び食品ロス削減に関する実証実験を行います (2023) https://www.meti.go.jp/press/2022/01/20230124001/20230124001.html
5) 京都経済短期大学他：食品ロス削減による経済便益に関する調査・分析 研究報告書 (2020) https://www.env.go.jp/policy/keizai_portal/F_research/report31_4.pdf
6) 林礼美, 本間隆嗣, 秋元圭吾; 情報技術等の活用による日本の食品廃棄低減が各部門のエネルギー消費と GHG 排出に及ぼす影響：産業連関表を用いた分析, エネルギー・資源, 41-3, 87-97 (2020)
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世界のエネルギー消費と GHG 排出に及ぼす影響の分析, 第 37 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集 (2021)
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」、(公財)地球環境産業技術研究機構 令和 3 年度報告書 (2022)
9) IPCC WG3 AR6: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (2022) https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/ (accessed 2023-01-23)
10) Tubiello, F.N., Conchedda, G.; Emissions due to agriculture Global, regional and country trends, FAO food and nutrition paper (2021)
11) Global carbon project; Methane Budget budget 2020 (2020) (accessed 2023-01-28)
12) IEA; CO_2 emissions from fuel combustion 2019 edition (2019)
13) 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 strategies for global change, 18, 591-618 (2013)
14) Hayashi, A. Sano, F., Akimoto, K. (2020) On the feasibility of cropland and forest area expansions required to achieve long-term temperature targets. Sustainability Science, 15(3), 817-834
15) Akimoto K, Sano F, Homma T, Oda J, Nagashima M, Kii M (2010) Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost. Energy Policy 38:3384-3393. doi:10.1016/j.enpol.2010.02.012
16) FAO; FAOSTAT data, https://www.fao.org/faostat/en/#data

17) Alexander, P., Brown, C., Arneth, A., Finnigan, J., Moran, D., & Rounsevell, M. D.: Losses, inefficiencies and waste in the global food system. Agricultural systems, 153, 190-200 (2017)
18) SIK; The methodology of the FAO study: “Global Food Losses and Food Waste - extent, causes and prevention”- FAO, 2011, SIK report No. 857 (2013)
19) 農林水産省；平成 26 年度食品ロス統計調査報告（世帯調査）
20) Barrera, E. L., Hertel, T.: Global food waste across the income spectrum: Implications for food prices, production and resource use. Food Policy, 98, 101874 (2021)
21) World Bank; Data Bank, POS terminals per 100,000 adults (accessed 2021-10-5)
22) 農林水産省；食品廃棄物等の年間発生量及び食品循環資源の再生利用等実施率について
23) 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)
24) 環境省；参考資料２ 韓国の生ごみリサイクルに関する情報 (2012) https://www.env.go.jp/recycle/report/h24-02/02.pdf
25) IEA; World energy balances 2019 edition (2019)
26) Watanabe, M., et al.; Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. J. Climate, 23, 6312–6335 (2010)
27) The historical land-use forcing dataset (LUH2 v2h) covers the period 850-2015 (2016), https://luh.umd.edu/data.shtml, (Accessed 13, Apr. 2020)
28) IEA; Energy Technology Perspectives 2017 (2017)
29) Meinshausen, M., Raper, S. C., Wigley, T. M.; Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6–Part 1: Model description and calibration. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(4), 1417-1456 (2011)
30) Houghton, R. A.; The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850–1990. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 51(2), 298-313 (1999)
31) Houghton, R. A., Hackler, J. L.; Carbon flux to the atmosphere from land-use changes: 1850 to 1990, ORNL/CDIAC-131, NDP-050/R1, Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (USA) (2001)
32) Carlson, K. M., Gerber, J. S., Mueller, N. D., Herrero, M., MacDonald, G. K., Brauman, K. A., ... & West, P. C. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. Nature Climate Change, 7(1), 63-68 (2017)
33) FAO; Global Forest Resource Assessment 2020 (2020)
34) Friedlingstein, P., et al.; Global Carbon Budget 2021, Earth Syst. Sci. Data, 14, 1917–2005, (2022) https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022
35) UNFCCC, Greenhouse Gas Inventory Data, https://di.unfccc.int/detailed_data_by_party (accessed 2023-01-28)

5.6 需要サイドの定量的なモデル分析

5.6.1 シナリオ分析の背景と意図

第 5.4 節で、需要サイドの様々な対策について調査した結果を整理した。そこでも見られたように、デジタルトランスフォーメーション（DX）およびその他のイノベーションによって、暗黙的なコストを低減し、比較的安価なコストによって、サーキュラ

ー・シェアリングエコノミーを誘発できる余地が生まれてきている。IPCC 第 6 次評価報告書（AR6）でも、各種文献からの各対策におけるエネルギー需要や CO_2 排出量の低減効果に関する報告結果として、図 5.6.1-1、図 5.6.1-2 のような整理もなされた。推計の幅が大きいものの、エネルギー需要や CO_2 排出量のかなり大きな低減も期待されることが示されている。一方、これらの分析は、各対策の低減率に関する評価であり、部門横断的に整合的かつ定量的なエネルギー低減量や、CO_2 排出低減量が示されているわけではない。同じく、IPCC AR6 は、需要部門の対策によって世界全体の GHG 排出量の低減効果も提示し（図 5.6.1-3）、「需要側の対策とエンドユースサービスの新しい提供方法によって、エンドユース部門における世界全体の GHG 排出量をベースラインシナリオに比べて 2050 年までに 40～70% 削減しうる。」とした。ただし、各対策をそれぞれ積み上げて評価したものであり、対策コストを含めて、必ずしも整合的かつ定量的なモデルを使って部門横断的に推計したものではない。

他方、全体整合的なシナリオとしては、IPCC 1.5℃特別報告書（SR15）[2]で引用され、注目を集めた、IIASA の MESSAGE モデルを用いた Low Energy Demand（LED）シナリオ [3]が著名であり、これを期に、世界でも定量的なシナリオ作成が進行中である。ただし、需要部門の全体整合的なモデル推計は容易ではなく、分析は緒に就いたばかりと言える。本事業では、次期 IPCC 報告書等に向けて、需要部門に焦点を当てた、世界エネルギー・温暖化対策シナリオの策定も実施した。

複雑なシステムを包括的かつ定量的に分析し、その有用性と課題を明確にしていくことが、DX によって誘発される、サーキュラー・シェアリングエコノミー等の低エネルギー需要社会を社会全体として推進していく上での強力な推進力となると考えられる。

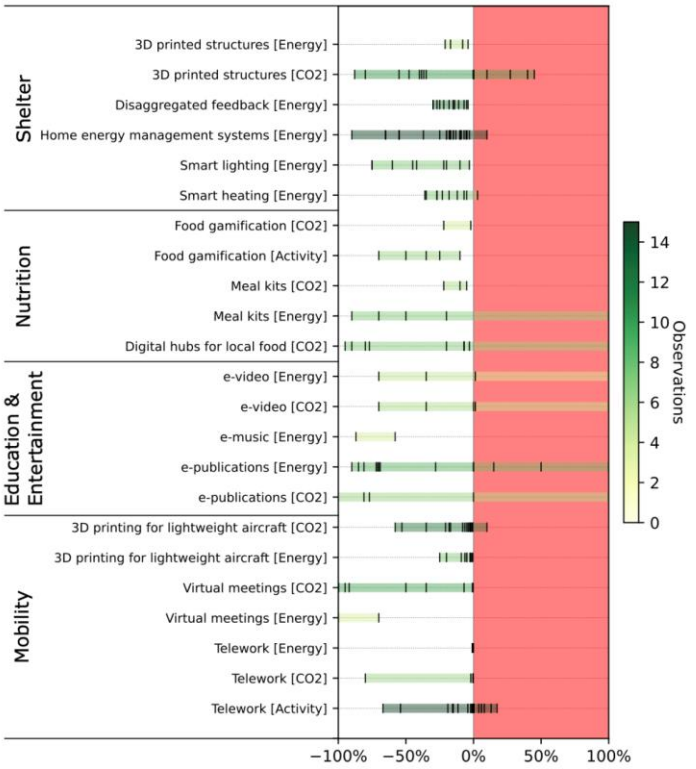


図 5.6.1-1　デジタル化によるエネルギー消費・CO_2 排出への影響

（出典：IPCC WG3 AR6[1)]）

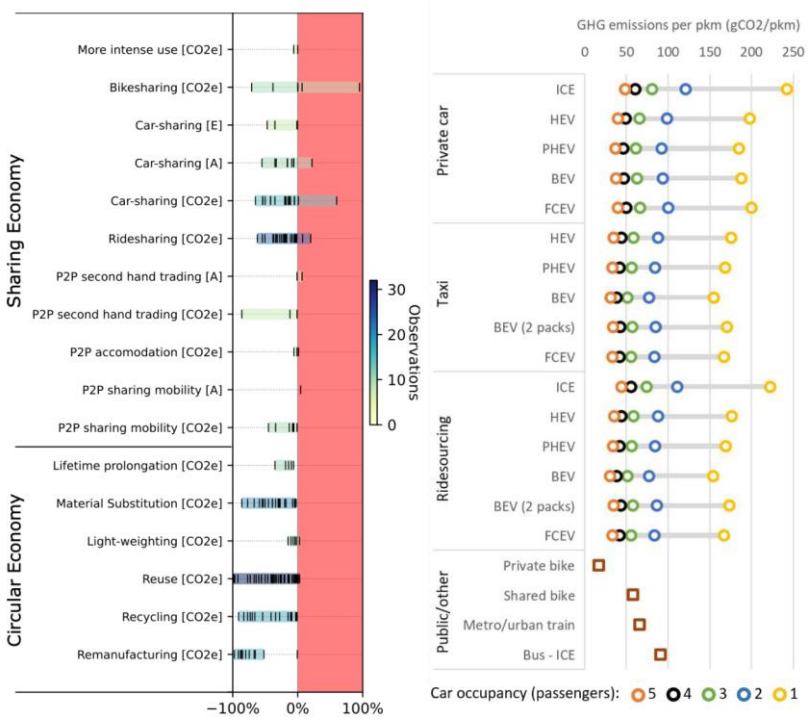


図 5.6.1-2　シェアリング・サーキュラーエコノミーによるエネルギー消費・CO_2 排出への影響

（出典：IPCC WG3 AR6[1)]）

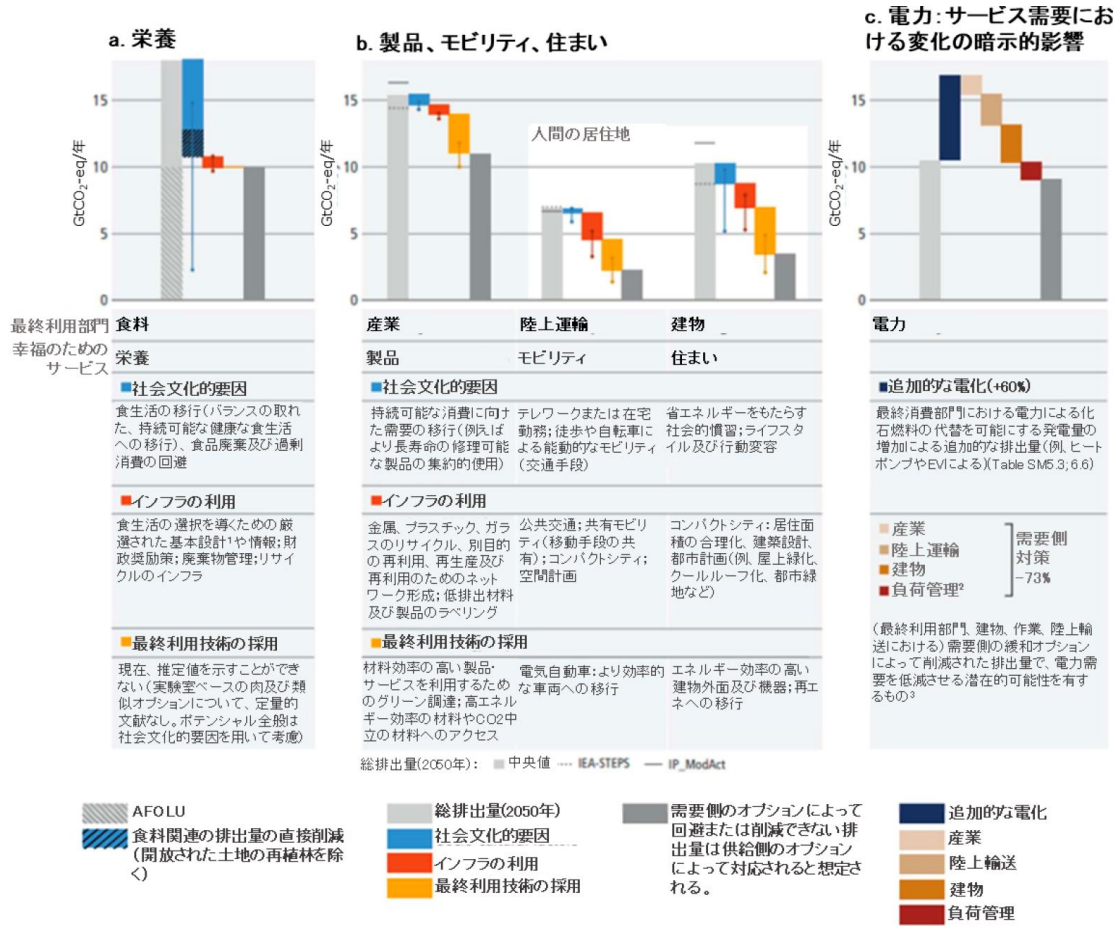


図 5.6.1-3 部門別の需要対策の GHG 排出削減効果

（出典：IPCC WG3 AR6 SPM[1]仮訳）

5.6.2 需要側変化に関する定量的な分析のための各種想定シナリオ

(1) 定性的なシナリオ

図 5.6.2-1 のようなドライバーを考慮した定性的なシナリオ[4]を基に、定量的なシナリオ策定を行った。本シナリオは、EDITS（Energy Demand changes Induced by Technological and Social innovations）事業における WG で検討されているものであり、本 ALPS 事業のモデル分析作業において参考にした。デジタル化の進展と新結合によるイノベーション、そして適切な生活水準（DLS）が融合した世界観であり、well-being を高めながら、低需要（エネルギーおよび各種物質や製品等）を実現し得るとするシナリオである。要素間の関係性については、図 5.6.2-2 に示す。

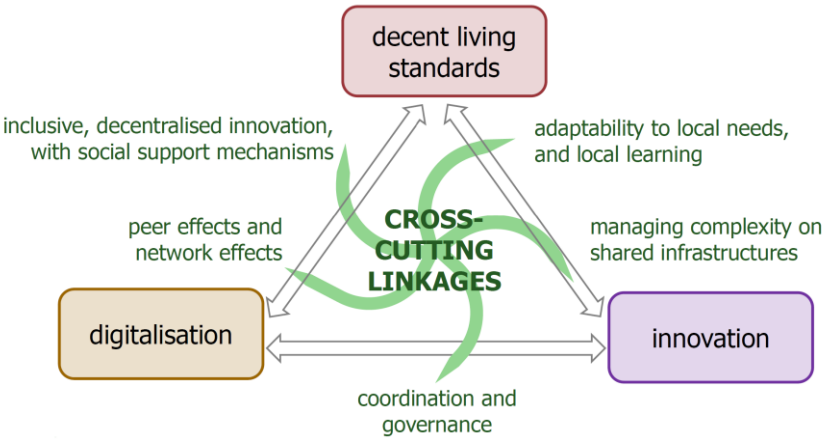


図 5.6.2-1 定性的シナリオ‘High-with-Low’の想定ドライバー

（出典：EDITS WG3 Narratives group シナリオ [4]）

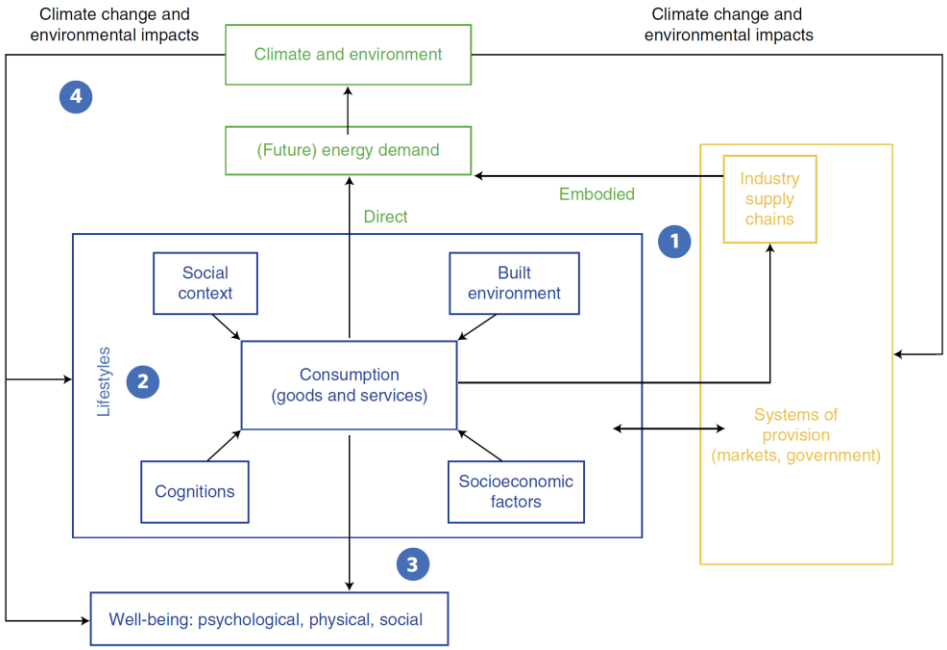


図 5.6.2-2 定性的シナリオ‘High-with-Low’の要素間の関係

（出典：EDITS WG3 Narratives group シナリオ [4]）

(2) 定量的な分析のためのシナリオ想定

世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いて、DX を中心にして誘発されるサーキュラーエコノミー、シェアリングエコノミーによる、低エネルギー需要社会の実現、そして、GHG 排出量の低減効果を定量的に推計した。推計には現時点では定量的なデータ入手の困難性もあり、波及効果について一部しか考慮できていないことに注意が必要である。また、モデル前提条件の想定についても、不確実性が大きく、より良いデータの入手、反映の課題が残っている。DNE21+モデルは、鉄鋼、セメント、化学製品など、CO_2 排出原単位の高い製品を積み上げ評価しているため、サーキュラー

エコノミー、シェアリングエコノミー等による基礎素材製品の低下、それに伴うエネルギー消費の低下等を整合的に分析可能である。

前節の図 5.6.2-1 のような定性的なシナリオドライバーを基に、定量的なシナリオ想定を行った。表 5.6.2-1 に今年度、分析を行った、DX によるサーキュラーエコノミー（CE）誘発のシナリオ想定を示す（以降、本報告書では、シェアリングエコノミーもサーキュラーエコノミーに内包されるものとして、CE と記載する）。また、表 5.6.2-2 には、分析を行ったシナリオ名と、各シナリオの想定内容を示す。需要側のデジタル化の進展、イノベーションとして、CE 関連だけではなく、変動性再生可能エネルギーの利用増大に資する、電力需要側の柔軟性の提供の可能性についても考慮した。具体的には、DN21+の電力需要曲線において、BEV や PHEV、ヒートポンプ給湯器、コジェネレーションシステムが、特に太陽光の日中の供給力の需要調整を、標準のシナリオよりも、柔軟に提供できると想定した（“FL”シナリオ）。また、需要側技術は、granular technologies と呼ばれるような規模の小さい技術が多い。これら技術は、サイクルが早いことがあって、一般に技術習熟率が高い傾向が観測される。DNE21+では、太陽光発電や風力発電、EV 用バッテリーなど、標準シナリオでも大きなコスト低減を見込んでいる。しかし、これら比較的規模の小さい技術の技術習熟率が一層高くなるシナリオ（“GR”シナリオ）も想定した。ただし、このシナリオはあくまで外生的な想定であり、参考として他シナリオの結果と比較するべきものという位置づけであることに注意されたい。

表 5.6.2-1　DX によるサーキュラーエコノミー（CE）誘発のシナリオ想定

DX による CE 誘発等	エネルギー消費への直接的な影響	エネルギー消費への間接的な影響	DNE21+モデル分析における想定（暫定試算）
1) 完全自動運転車実現により誘発されるライドシェア、カーシェアリング（2030 年時点までは想定せず）	- ライドシェアによる乗用車用エネルギー消費量の低減	- カーシェアリングに伴う乗用車台数の低下に伴う、鉄鋼、プラスティック、ゴム、ガラス、コンクリート等の低減 - 製品、素材の国際貨物輸送の低減⇒項目 8)	- 鉄鋼製品生産量：▲4%（車両＋立体駐車場。道路建設含まず） - プラスティック製品：　▲1% - タイヤ製品：▲28%（乗用車向け比）（エネルギー消費量低減換算値をモデルで想定） - ガラス製品：▲28%（乗用車向け比）（エネルギー消費量低減換算値をモデルで想定） - セメント製品：▲1%（立体駐車場のみ。道路建設含まず）
2) バーチャルミーティング、テレワーク	- 移動の低減に伴う運輸部門のエネルギー消費量の低減	- *長期的に建築物の稼働率上昇、必要な空間面積の低減により、鉄鋼、コンクリート等の低減の可能性有*　【今回のモデル分析では未考慮】	- 旅客需要：▲10%
3) E-publication 等による紙の代替	- 紙の生産のためのエネルギー消費量の低減	- *紙媒体の配送等の貨物需要低減の可能性有*　【今回のモデル分析では未考慮】	- 紙パ生産量：▲20%
4) E-コマースや他の DX によるアパレルのリサイクル・シェア化の促進	- アパレル製造のエネルギー消費の低減	- *ショッピングセンター等、小売店舗の低減と、それに伴うエネルギー消費、また建築物建設の低減により、鉄鋼、コンクリート等の低減の可能性有*　【今回のモデル分析では未考慮】	- アパレル生産量：▲20%（エネルギー消費量低減換算値をモデルで想定）
5) 都市開発、設計等の進展による建築物の高寿命化	- 建築物の高寿命化による、セメント、鉄鋼製品の低減に伴うエネルギー消費量の低減		- 建築物の高寿命化：+40%、それに伴うセメント：▲3%、鉄鋼製品需要の低減：▲3%
6) 需要予測の向上等による食品廃棄の低減	- 必要食品生産量の低減等に伴う、窒素肥料、プラスティック製品等の生産に伴うエネルギー消費量の低減 - 小売店舗等のエネルギー消費量の低減	- 農畜産物、食品等の低減に伴う国際貨物輸送の低減 ⇒ 項目 8) - *食品販売量の低減に伴う、小売店舗の低減に伴う鉄鋼、コンクリート製品等の低減の可能性*　【今回のモデル分析では未考慮】 - *他用途への利用可能な土地面積の*	- 石油化学製品（窒素肥料含む）の低減：▲1% - プラスティック製品：▲1% - 紙パ製品：▲0.5% - 輸送サービス需要：▲1% 他 (以上、産業連関表より算定)

	- 必要食品生産量の低減等に伴う、メタン、一酸化窒素排出量の低減	*増大に伴う植林等による CO_2 固定可能性* 【今回のモデル分析では未考慮】	- メタン、一酸化窒素排出低減：▲493 $MtCO_2eq/yr$ in 2050
7) 3D プリンティングの適用による素材の低減	- アルミニウム、鉄鋼製品等の低減 - 製造段階による電力消費量の低減	- 航空機の軽量化に伴う運航時のエネルギー消費量の低減 *- 自動車等の軽量化に伴うエネルギー消費量の低減* 【今回のモデル分析では未考慮】	- アルミニウム製品：▲1% - 鉄鋼製品：▲0.02% - 直接的電力消費量：▲1% - 航空機の運航時のエネルギー消費量：▲10%
8) 基礎素材やその他製品需要の低減に伴う国際海運需要の低減	- 国際海運需要の低減によるエネルギー消費量の低減		- 国際海運需要：▲1%

赤字： 家庭部門関連、 緑字： 業務部門関連、 青字: 輸送部門関連、 紫字： 産業部門関連、茶字：非 CO_2 GHG 等

表 5.6.2-2 モデル分析のためのシナリオ想定

	排出削減経路	主にデジタル化によるエネルギー需要低減						電力需要のフレキシビリティ(EV, HP, CGS)	小規模技術(PV、風力、EV等)のより急速なコスト低減
		運輸 1)	家庭 2, 3, 4)	建築物 5)	農業・食品 6)	産業 7)	派生効果 8)		
BL-Std	Baseline（特段の気候変動緩和政策を想定せず。炭素価格0）	—	—	—	—	—	—	—	—
BL-Mobil		○							
BL-Resid			○						
BL-Build				○					
BL-Food					○				
BL-Ind						○			
BL-All_CE		○	○	○	○	○	○		
BL-All_CE+FL		○	○	○	○	○	○	○	
BL-All_CE+FL+GR		○	○	○	○	○	○	○	○
B2DS-Std	B2DS 2 Cを十分に下回る排出に抑制（かつ2030年の各国NDCsを想定、主要先進国:2050年GHGでのCN）	—	—	—	—	—	—	—	—
B2DS-Mobil		○							
B2DS-Resid			○						
B2DS-Build				○					
B2DS-Food					○				
B2DS-Ind						○			
B2DS-All_CE		○	○	○	○	○	○		
B2DS-All_CE+FL		○	○	○	○	○	○	○	
B2DS-All_CE+FL+GR		○	○	○	○	○	○	○	○

注1）今回の分析では、IPCC等で用いられている共有社会経済パス(SSP)は、中位的なSSP2ベースで分析
注2）本来、DXによる電力消費量の増大等のリバウンド効果も考えられるが、CO2限界削減費用低下に伴うリバウンド効果以外のリバウンド効果は今回考慮していない

5.6.3　需要側変化に関するシナリオ分析結果

まず、CO_2 排出削減を考慮しない、Baseline シナリオの結果を示す。図 5.6.3-1、図 5.6.3-2 に、CE 進展を想定しない標準シナリオ（Std）からの世界の最終エネルギー消費量の低減と、GHG 排出量の低減をそれぞれ示す。かなり限定された波及効果のみを考慮した分析段階ではあるものの、想定したサーキュラーエコノミー・シェアリングエコノミー実現によって部門横断的に大きな省エネ効果が期待できることが示されている。また、GHG の排出低減効果も大きいことが推計される。

同じく、B2DS シナリオについて、図 5.6.3-3、図 5.6.3-4 に、CE 進展を想定しない標準シナリオ（Std）からの世界の最終エネルギー消費量の低減と、GHG 排出量の低減をそれぞれ示す。かなり限定された CE の事例および波及効果のみを考慮しただけでも、2050 年では、現在の世界の最終エネルギー消費量全体の 6%程度、また、2℃目標下で経済合理的と推計される省エネ量の半分程度もの省エネが、サーキュラーエコノミー・シェアリングエコノミーによって更に追加できる可能性が示唆される。排出削減目標が決まっている条件では、想定したサーキュラーエコノミー・シェアリングエコノミー対策は相対的に費用が安価なため、限界的な費用の対策と評価される、CCS 付きバイオエネルギー（BECCS）や大気中 CO_2 直接回収貯留（DACCS）といった二酸化炭素除去（CDR）技術への寄与を低減し得る。なお、最終エネルギー消費量の低減効果は大きいが、CO_2 削減効果は、エネルギー供給側の CO_2 原単位低減も伴っているため、エネルギー消費量ほど、大きくは算定されない。ただし、後述のように、費用低減効果は大きい。

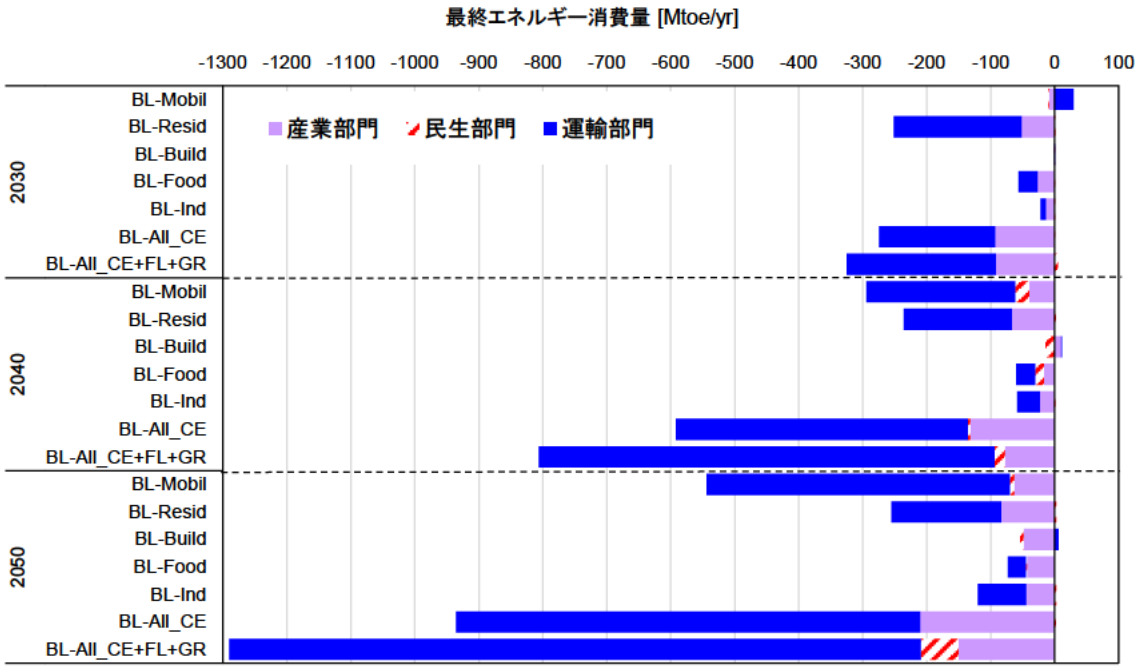


図 5.6.3-1　世界エネルギー消費量（ベースラインシナリオ、CE 想定時の変化）

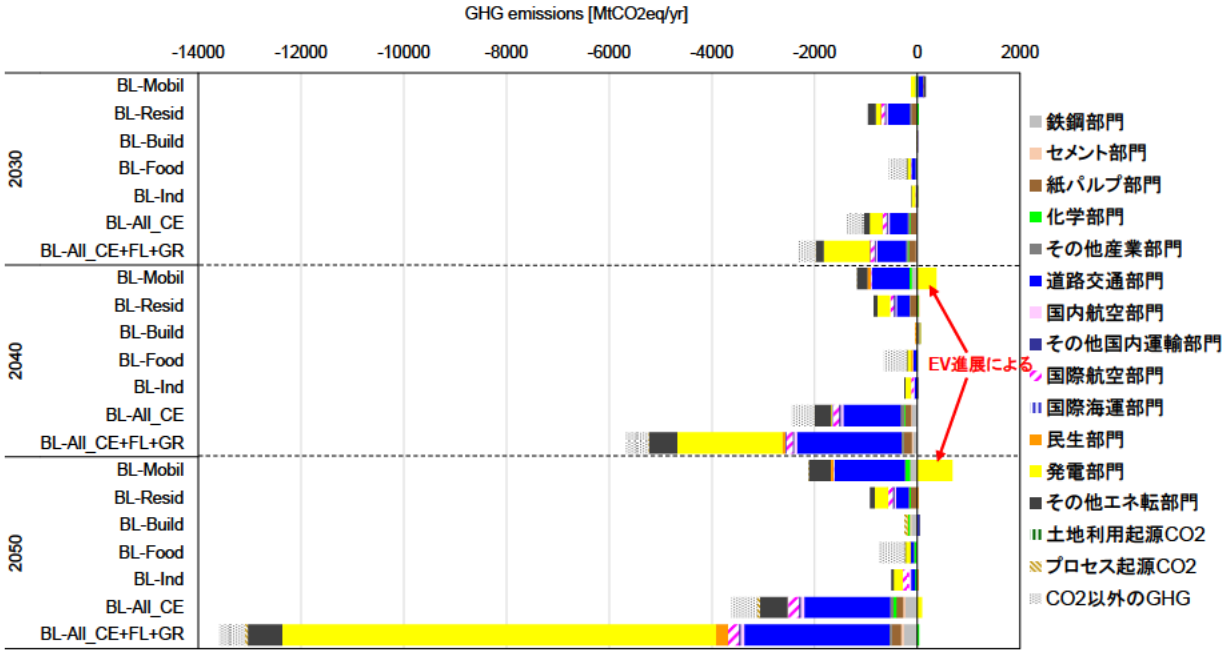
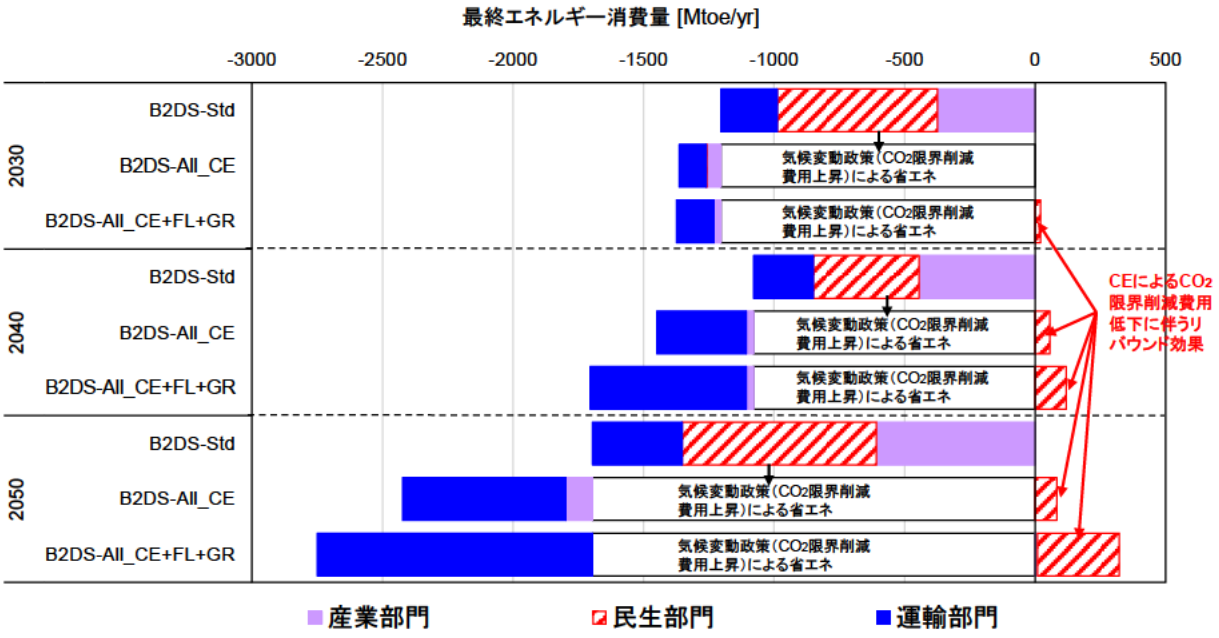


図 5.6.3-2 世界の GHG 削減効果（ベースラインシナリオ、CE 想定時の変化）



参考）2019年の世界の最終エネルギー消費量実績値：10 Gtoe/yr、2050年のベースラインの最終エネルギー消費量推計値：14 Gtoe/yr

図 5.6.3-3 世界エネルギー消費量（B2DS（2℃制約シナリオ）下、CE 想定時の変化）

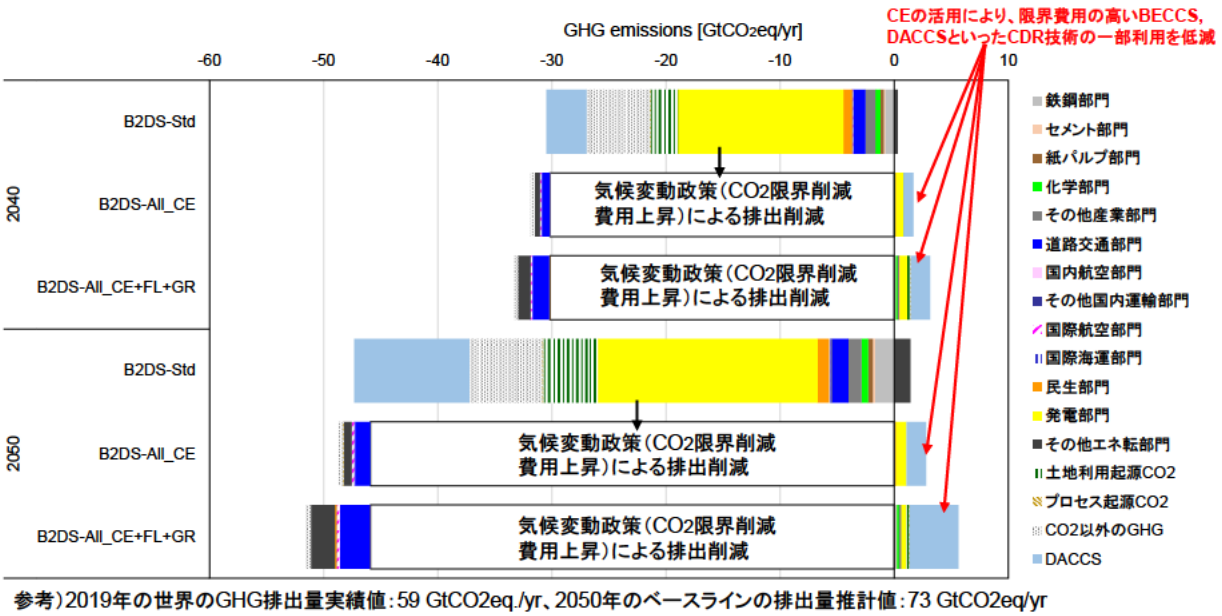


図 5.6.3-4 世界の GHG 削減効果（B2DS（2℃制約シナリオ）下、CE 想定時の変化）

図 5.6.3-5 に は、世界地域別の一人当たり最終エネルギー消費量を示す。先進国では、特に需要側で必要以上に多くのエネルギーが消費されており、‘High-with-Low’シナリオは、主に先進国の低エネルギー需要の実現を誘発し、エネルギー消費の国際的な格差を縮小させる。

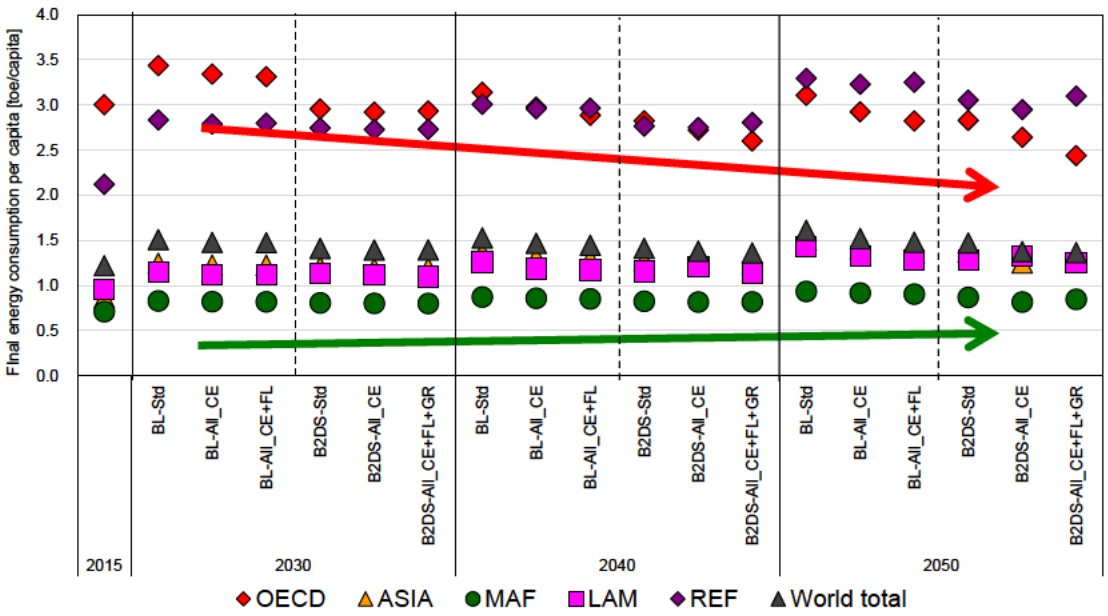


図 5.6.3-5 世界地域別の一人当たり最終エネルギー消費量

表 5.6.3-1 には、CE シナリオ下におけるエネルギーシステム総コストの Std シナリオ比での低減を、また、 表 5.6.3-2 には、B2DS 時の CO_2 限界削減費用を示す。DX に誘因された CE の推進により、エネルギーシステムコストの大きな低下が推計される。

特にカーシェアの効果が社会全体としての大きなコスト低減効果が期待できるが、テレワークなどの家庭部門の変化、食品ロス低減なども、エネルギーシステムコストの低減に比較的大きな効果が期待できる。

また、表 5.6.3-2 で確認できるように、2℃目標等の長期目標の実現においては、CO_2 限界削減費用の低下（2～3 割程度）が期待できる。

表 5.6.3-1　エネルギーシステム総コストの低減：CE 想定時（単位：Billion USD/yr）

	Scenarios	Mobil	Resid	Build	Food	Ind	All_CE	All_CE +FL	All_CE +FL+GR
2030-2040 年の間の年平均値	Baseline	▲547	▲339	▲1	▲57	▲4	▲894	▲894	▲963
	B2DS	▲556	▲352	▲0	▲64	▲5	▲926	▲928	▲1038
2040-2050 年の間の年平均値	Baseline	▲1601	▲459	▲1	▲74	▲7	▲1971	▲1971	▲2085
	B2DS	▲1635	▲477	▲6	▲90	▲14	▲2037	▲2038	▲2266

表 5.6.3-2　B2DS 時の CO_2 限界削減費用（単位：USD/tCO_2eq）

	B2DS-Std	B2DS_All-CE	B2DS_All-CE+FL	B2DS_All-CE+FL+GR
2040 年	68–310	57–238	57–240	50–195
2050 年	146–739	123–524	122–522	60–364

最後に今回分析の BL-Std シナリオおよび B2DS_All-CE+FL+GR シナリオを、IEA WEO シナリオ [5]と比較したグラフを図 5.6.3-6 に示す。グラフには、LED シナリオ [3]、そして更に、Millward-Hopkinsa らによる、必要十分なエネルギー消費量推計のシナリオ [6]を併せて記載している。デジタル化によって誘発され得る、サーキュラーエコノミー・シェアリングエコノミー等によって、大きなエネルギー低減効果は算定されたものの、LED シナリオ等とは相当大きなギャップがある。また、同じく 2℃、>66%確率の B2DS_All-CE+FL+GR と IEA SDS を比較しても、相当大きなギャップがある。IPCC AR6 の 2℃シナリオ相当（C3 カテゴリー）とを比較すると、DNE21+のシナリオは、中位的なシナリオとなっている。一方、IEA SDS や LED は、かなり低い最終エネルギー消費量の推計をしている。

今回の分析では、一部の DX の期待効果のみをモデル化していること、また、定量的なデータが限られることから、波及効果についても一部のみ評価したため、より低最終エネルギー消費量が見込まれ得るものの、IEA SDS や LED とのギャップは引き続き、大きいことに留意が必要である。引き続き、より低エネルギー需要を実現する可能性を検討、分析を強化するとともに、IEA SDS、LED シナリオ等とのギャップの理解促進が重要と考えられる。

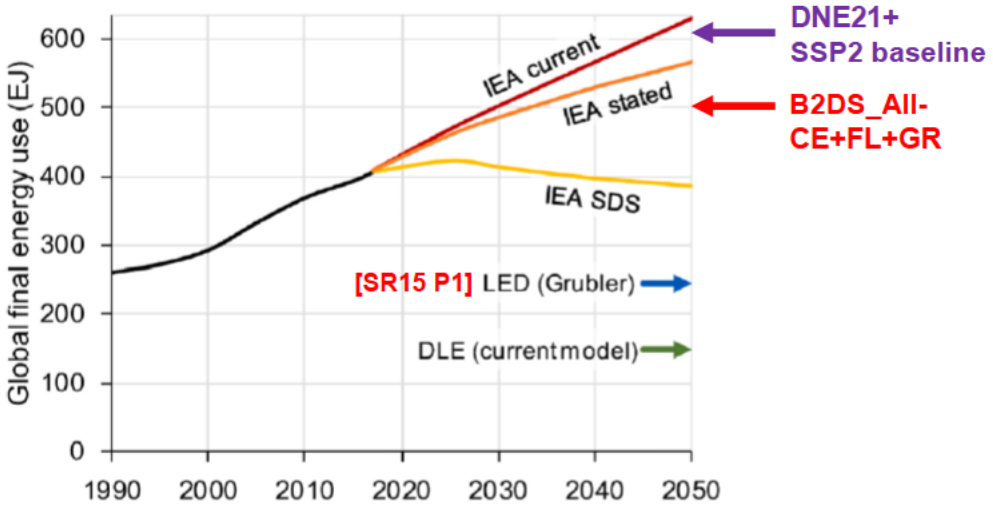


図 5.6.3-6　世界エネルギー消費量の見通し：他シナリオとの比較

（出典：文献 6)グラフに追記）

参考文献（第 5.6 節に関するもの）

1) IPCC WG3、第 6 次評価報告書 (2022) https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

2) IPCC SR15 (2018)

3) A. Grubler et al. LED (2018)

4) EDITS WG3 Narratives group (Arnulf Grubler, Greg Nemet, Shonali Pachauri, Charlie Wilson), The 'High-with-Low' Scenario Narrative (2022)

5) IEA World Energy Outlook 2019 (2019)

6) J. Millward-Hopkinsa et al., Global Environmental Change (2020)

5.7　非 CO_2 GHG 排出量評価モデルの更新と試算

5.7.1　はじめに

本節では、これまで開発してきた非 CO_2 GHG 排出量評価モデル [1)]の改良について述べる。本年度は、最新の EPA[2)]の非 CO_2 GHG 削減ポテンシャル・データベースを反映した。昨年度までのバージョン [1)]では、EPA [3)] の非 CO_2 GHG 排出削減対策のデータベースをもとに、当該モデルを構築してきた。本年度は、新しい技術対策データベース EPA[2)]に対応したモデル更新を実施した。ベースラインの社会経済シナリオ SSP2 に関する、文献 1)の社会経済シナリオ（人口・GDP）や（DNE21+（第 5 章参照）による）化石燃料需給シナリオ（CH_4 漏洩に関連）は、昨年度までに反映されている。また、IT 技術による食料廃棄低減に関する非 CO_2 GHG 排削減量を推計については第 5 章を参照されたい。

5.7.2 非 CO_2 GHG 排出量評価モデルの更新

図 5.7.2-1 には、非 CO_2 GHG 排出量評価モデルの構造を示した。本年度は、非 CO_2 GHG 排出量評価モデルの削減パラメータについて、更新を行った。

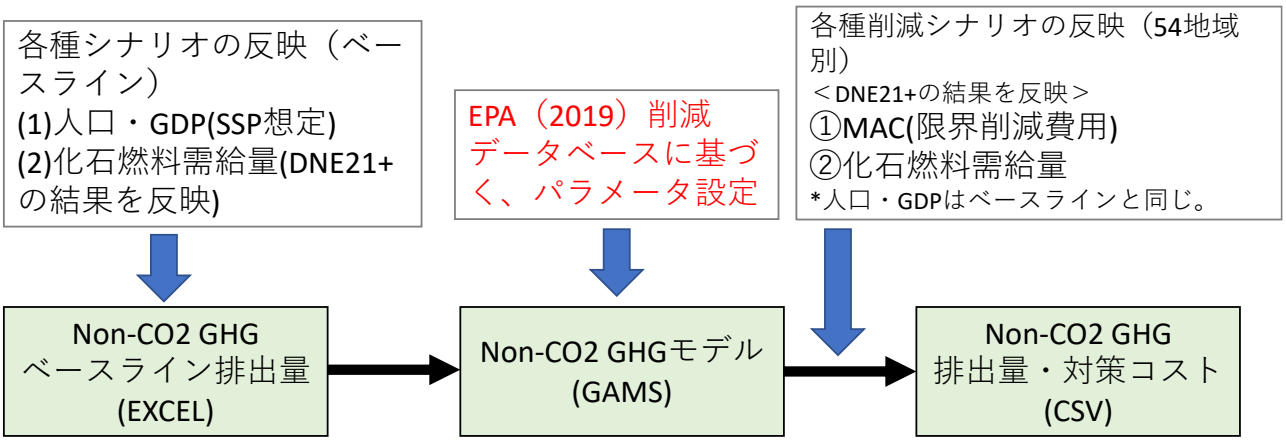


図 5.7.2-1 非 CO_2 GHG 排出量評価モデルの構造

EPA [3]データベースを利用して、ベースラインからの非 CO_2 GHG 削減ポテンシャルを、以下の近似式 $Abatement(\%) = 1 - \left(\frac{1}{MAC_{GHG}}\right)^{\sigma}$ で推計した[14]。社会経済シナリオは SSP2、割引率 5%/yr、AR4-GWP100、価格は 2000 年価格表示へ換算した。EPA[2]の削減ポテンシャルを反映するために、時点別×地域別×サブセクター別に、パラメータ σ を、回帰分析により推計した。限界削減費用に関して、EPA[2]Summary 表の MAC は 5,10,...,500, 1000$/t$CO_2$ の 10 レベルで整理されているので、それらを利用した。時点に関して、 8 時点（2015～2050; 5 年間隔）を対象とした。2015 年値は UNFCCC 実績値排出量と概ね整合的であるが、2015 年・米国値は UNFCCC 値が EPA2019 値よりも約 1 割大きいなど、不整合な地域もある点には留意が必要である。地域に関して、 EPA[2]の Summary 表の各国別データを、DNE21＋モデルの 54 地域別に集計した。対象セクターに関して、非 CO_2GHG モデルのセクター・ガス種区分に合わせ、8 サブセクターに集約。農業（CH_4・N_2O 合計）、石炭（CH_4）、石油ガス（CH_4）、産業プロセス 1（HFCs）、 産業プロセス 2（PFCs）、産業プロセス 3（SF_6）、産業プロセス 4（N_2O）、廃棄物その他（CH_4・N_2O 合計）に集約した。

表 5.7.2-1 には、2050 年の米国と中国に関する、推計した削減パラメータ σ を示した。図 5.7.2-2 と図 5.7.2-3 には、2050 年の米国と中国に関する、セクター別の削減カーブをそれぞれ示した。表 5.7.2-2 には 2050 年の 54 地域別の削減パラメータ σ を示した。削減パラメータ σ は、同一の限界削減費用レベルの場合、数字が大きいほど、削減率（ベースライン比）が大きい。更新前と比較すると、更新後のパラメータは HFCs では大きくなるものの、概ね小さくなる傾向となった。特に、排出量の大きい農業部

[14] Abatement(%): ベースラインからの削減率、MAC:限界削減費用、σ：削減パラメータ。

門では EPA [3]では削減ポテンシャルが小さいことが反映され、小さいパラメータが推計された。

表 5.7.2-1　削減パラメータσの推計（2050 年）

Region	サブセクター・ガス種		更新前 (EPA2006ベース; 2020年値を適用)	更新後 (EPA2019ベース)
US	Agriculture	CH4	0.05	0.02
		N2O	0.06	0.02
	Industrial Process	N2O	0.37	0.17
		HFCs	0.03	0.20
		PFCs	0.15	0.04
		SF6	0.29	0.12
	Coal	CH4	0.29	0.18
	Oil & Gas	CH4,N2O	0.04	0.17
	Others	CH4	0.19	0.01
		N2O	0.00	0.01
China	Agriculture	CH4	0.03	0.01
		N2O	0.02	0.01
	Industrial Process	N2O	0.49	0.36
		HFCs	0.03	0.42
		PFCs	0.15	0.05
		SF6	0.29	0.08
	Coal	CH4	0.27	0.18
	Oil & Gas	CH4,N2O	0.09	0.06
	Others	CH4	0.22	0.02
		N2O	0.00	0.02

注：赤字（青字）は、更新前数値より大きい（小さい）ことを示す。

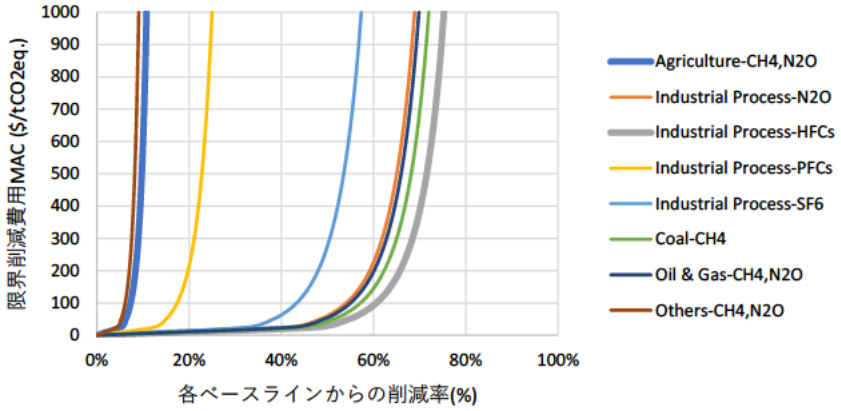


図 5.7.2-2　EPA[2]に基づく、米国の部門別削減カーブ（2050 年）

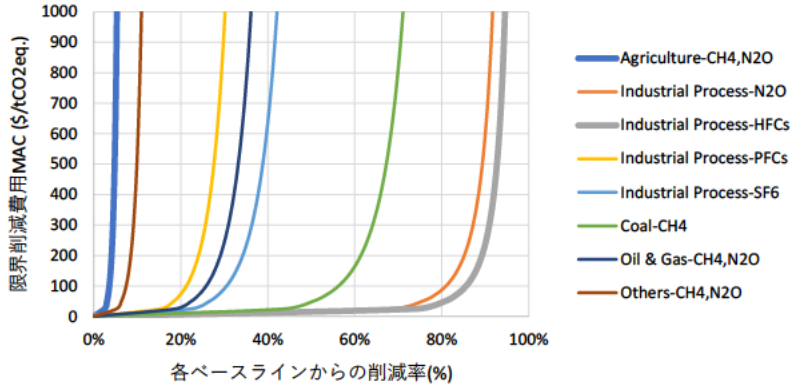


図 5.7.2-3　EPA[2)]に基づく、中国の部門別削減カーブ（2050 年）

表 5.7.2-2　54 地域別・セクター別の削減パラメータσ推計（2050）

	Region	Agriculture	Industrial Process				Coal	Oil & Gas	Others
		CH4,N2O	N2O	HFCs	PFCs	SF6	CH4	CH4,N2O	CH4,N2O
1	United States	0.01	0.16	0.13	0.04	0.12	0.16	0.09	0.01
2	Canada	0.01	0.44	0.13	0.03	0.25	0.16	0.01	0.06
3	United Kingdom	0.01	0.43	0.02	0.02	0.12	0.15	0.03	0.09
4	France	0.00	0.14	0.04	0.03	0.11	0.13	0.07	0.06
5	Germany	0.01	0.18	0.08	0.03	0.09	0.05	0.06	0.12
6	Italy	0.01	0.15	0.02	0.02	0.06	0.15	0.05	0.05
7	Spain, Portugal	0.01	0.44	0.03	0.02	0.11	0.15	0.08	0.09
8	Belgium, Netherlands, Denmark	0.01	0.42	0.07	0.02	0.06	0.13	0.06	0.08
9	North Europe	0.00	0.42	0.02	0.03	0.09	0.00	0.08	0.03
10	Other EU	0.01	0.44	0.02	0.03	0.05	0.00	0.06	0.11
11	Norway, Iceland	0.00	0.42	0.02	0.03	0.30	0.15	0.01	0.09
12	Greenland (Denmark)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	Other Western Europe	0.01	0.44	0.02	0.02	0.09	0.00	0.08	0.04
14	Japan	0.01	0.15	0.06	0.03	0.13	0.15	0.08	0.02
15	Australia	0.01	0.44	0.09	0.03	0.06	0.17	0.08	0.10
16	New Zealand	0.01	0.00	0.08	0.05	0.11	0.16	0.05	0.15
17	Other Oceania	0.01	0.00	0.25	0.00	0.12	0.00	0.06	0.08
18	China	0.00	0.34	0.36	0.05	0.07	0.16	0.03	0.01
19	North Korea, Mongolia	0.01	0.63	0.29	0.00	0.20	0.16	0.01	0.03
20	Viet Nam, Cambodia, Laos	0.02	0.00	0.23	0.00	0.11	0.15	0.03	0.04
21	Korea	0.00	0.32	0.18	0.05	0.06	0.15	0.08	0.06
22	Malaysia, Singapore	0.02	0.17	0.23	0.03	0.07	0.16	0.05	0.05
23	Indonesia	0.02	0.57	0.16	0.05	0.13	0.16	0.05	0.03
24	Thailand	0.01	0.00	0.23	0.03	0.13	0.00	0.06	0.06
25	Philippines	0.02	0.00	0.23	0.00	0.21	0.17	0.06	0.06
26	Brunei	0.00	0.00	0.24	0.00	0.11	0.00	0.05	0.06
27	Chinese Taipei	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28	India	0.01	0.51	0.17	0.02	0.12	0.16	0.03	0.03
29	Pakistan, Afghanistan	0.00	0.00	0.23	0.00	0.19	0.16	0.07	0.05
30	Myanmar	0.03	0.00	0.18	0.00	0.00	0.16	0.08	0.08
31	Other Asia	0.03	0.00	0.24	0.00	0.19	0.16	0.08	0.06
32	Iran	0.00	0.61	0.23	0.06	0.13	0.16	0.03	0.04
33	Saudi Arabia	0.00	0.00	0.23	0.05	0.11	0.00	0.01	0.08
34	Bahrain, Oman, Qatar, UAE, Yemen	0.00	0.40	0.24	0.04	0.12	0.00	0.02	0.07
35	Other Middle East	0.00	0.45	0.19	0.03	0.13	0.00	0.03	0.07
36	Turkey	0.01	0.51	0.15	0.05	0.12	0.04	0.02	0.09
37	North Africa	0.00	0.45	0.18	0.03	0.17	0.16	0.02	0.08
38	South Africa	0.00	0.57	0.22	0.05	0.13	0.16	0.07	0.10
39	South East Africa	0.00	0.57	0.24	0.01	0.20	0.16	0.06	0.05
40	Other S.S.Africa	0.01	0.00	0.23	0.04	0.18	0.16	0.01	0.08
41	Mexico	0.00	0.57	0.16	0.00	0.13	0.16	0.02	0.06
42	Other Central America	0.01	0.41	0.24	0.00	0.13	0.00	0.02	0.05
43	Brazil	0.00	0.38	0.23	0.05	0.18	0.15	0.01	0.05
44	Venezuela, Guyana, Suriname	0.01	0.50	0.27	0.05	0.12	0.16	0.01	0.06
45	Paraguay, Uruguay, Argentina	0.00	0.56	0.29	0.05	0.12	0.16	0.03	0.04
46	Other South America	0.01	0.57	0.20	0.05	0.12	0.16	0.02	0.05
47	Russia	0.00	0.58	0.22	0.04	0.36	0.18	0.03	0.05
48	Other Annex I of FUSSR	0.00	0.50	0.21	0.00	0.35	0.17	0.05	0.03
49	Belarus	0.00	0.57	0.11	0.03	0.04	0.00	0.06	0.05
50	Kazakhstan	0.00	0.57	0.15	0.05	0.13	0.17	0.02	0.06
51	Other FUSSR	0.00	0.46	0.17	0.04	0.07	0.10	0.04	0.08
52	OECD E.Europe	0.00	0.50	0.03	0.03	0.12	0.14	0.05	0.08
53	Other Annex I of East Europe	0.00	0.50	0.03	0.03	0.10	0.00	0.04	0.07
54	Other E.Europe	0.00	0.50	0.24	0.05	0.11	0.06	0.05	0.06

5.7.3　非 CO_2 GHG 排出量評価モデルの試算

図 5.7.3-1 には、更新前・更新後の 2050 年の世界全体の非 CO_2GHG 排出量を示した。前述の通り、農業部門などで削減ポテンシャルが小さくなったため、更新後の排出量はやや増加した。図 5.7.3-2 には、2050 年排出量に関して、IPCC-AR6 データベース（AR6 Scenario Explorer and Database(ver1.0)）との比較を行った。IPCC-AR6 データベースの C7 が SSP2 のベースラインに相当する。非 CO_2 GHG 排出量評価モデルのベースラインは、C7 の平均値とおおむね整合的である。1.5℃目標の C1、C2 の最上位値は、米 GCAM による評価である。2℃目標の C3、C4 の上位値は、米 GCAM や米 MIT-EPPA である。一方、C1,C2,C3 の最下位値は、EC-POLES（非 CO_2GHG 排出量推計に関しては、農業部門は IIASA モデル（比較的楽観的な結果を示す傾向）、産業・エネルギー部門は EPA 分析に基づく）に基づいている。本年度の更新後の非 CO_2 GHG 排出量評価モデルの結果は、米 GCAM などの結果に近い傾向を示している。

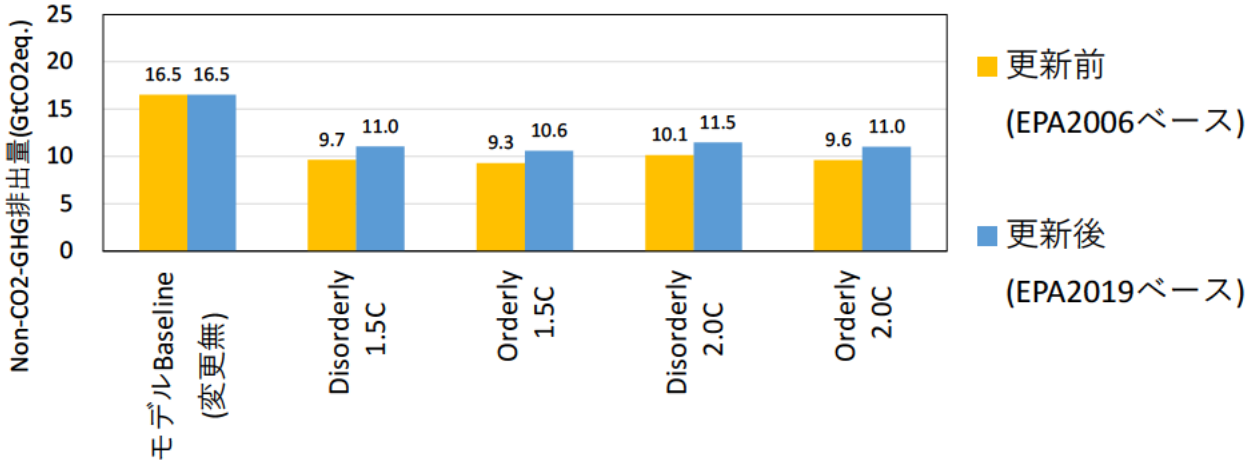


図 5.7.3-1　世界の非 CO_2 GHG 排出量(2050)の試算：更新前・更新後の比較

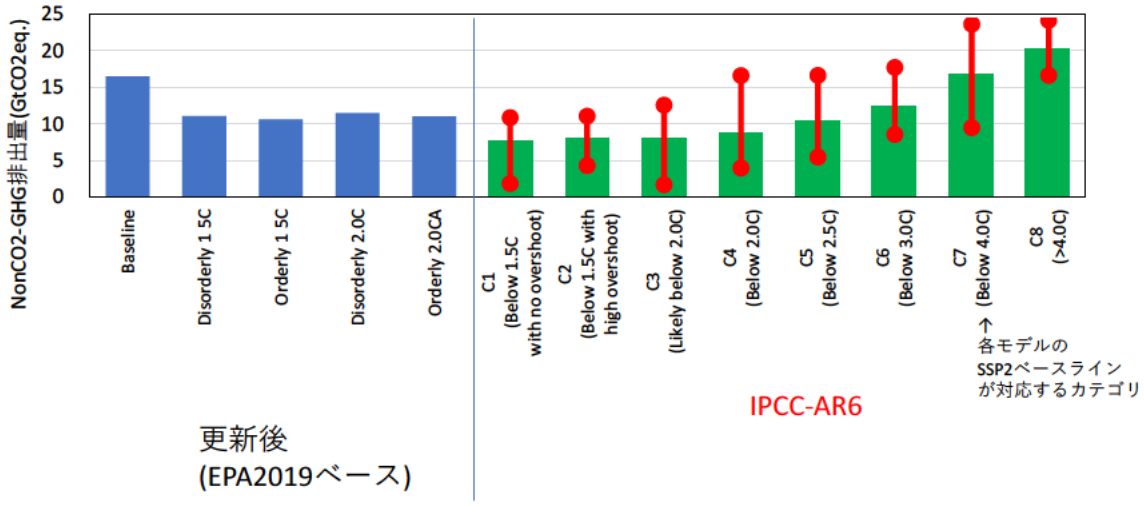


図 5.7.3-2 世界の非 CO_2 GHG 排出量(2050)の試算：IPCC データベースとの比較

注記：AR6 Scenario Explorer and Database(ver1.0)より作成。棒グラフ（緑）は、データベースの平均値を表す。エラーバーの上限・下限は、最大値・最小値を表す。

図 5.7.3-3～図 5.7.3-5 には、地域別、ガス別、セクター別に関する、2050 年の世界の非 CO_2 GHG 排出量を示した。更新により、CH_4 や農業部門の排出量がやや増加した。

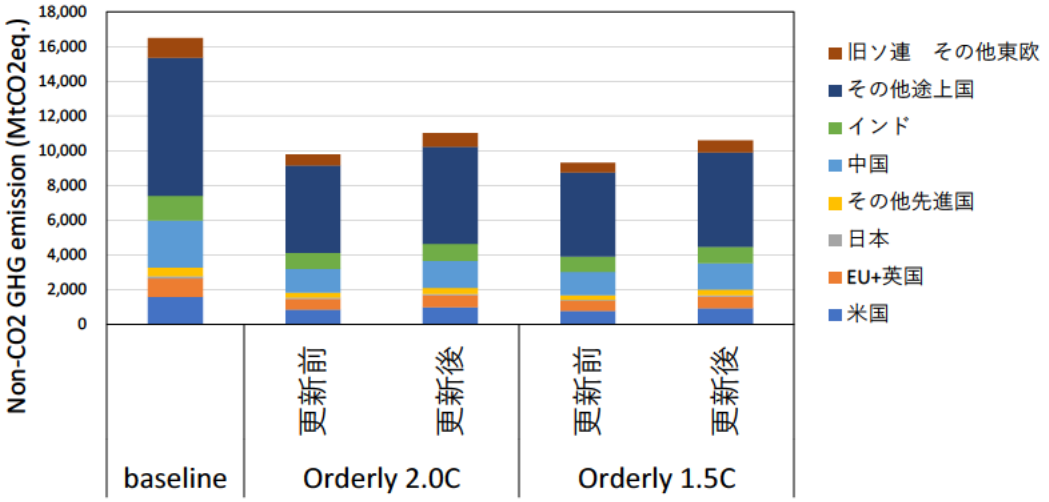


図 5.7.3-3 世界の非 CO_2 GHG 排出量(2050)の試算（地域別）

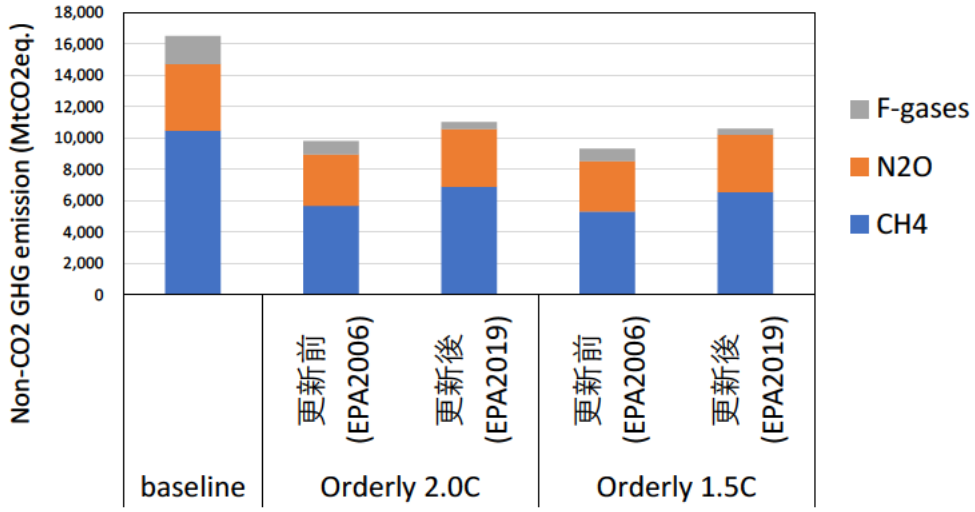


図 5.7.3-4 世界の非 CO_2 GHG 排出量(2050)の試算（ガス別）

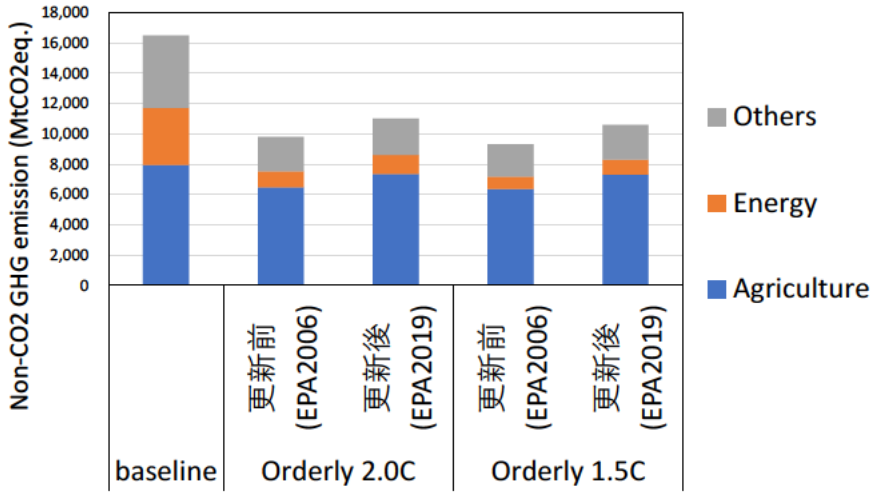


図 5.7.3-5 世界の非 CO_2 GHG 排出量(2050)の試算（セクター別）

図 5.7.3-6～図 5.7.3-8 には、地域別、ガス別、セクター別に関する、2050 年の世界の非 CO_2 GHG 排出量のベースライン（SSP2）をそれぞれ示した。世界全体の総排出量は概ね一致しているが、非 CO_2 GHG 排出量評価モデルの HFCs（特に冷媒用途）がやや小さく、また農業 CH_4 の排出量がやや大きい傾向がみられる。これらの点に関しては、EPA[2)]や他文献を参考に、検討する必要がある。

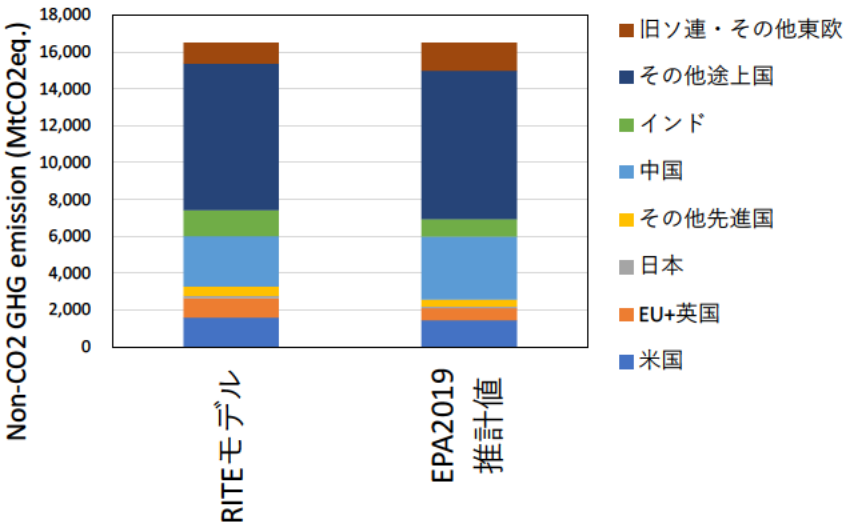


図 5.7.3-6 世界の非 CO_2 GHG 排出量(2050)のベースライン（SSP2）の比較（地域別）

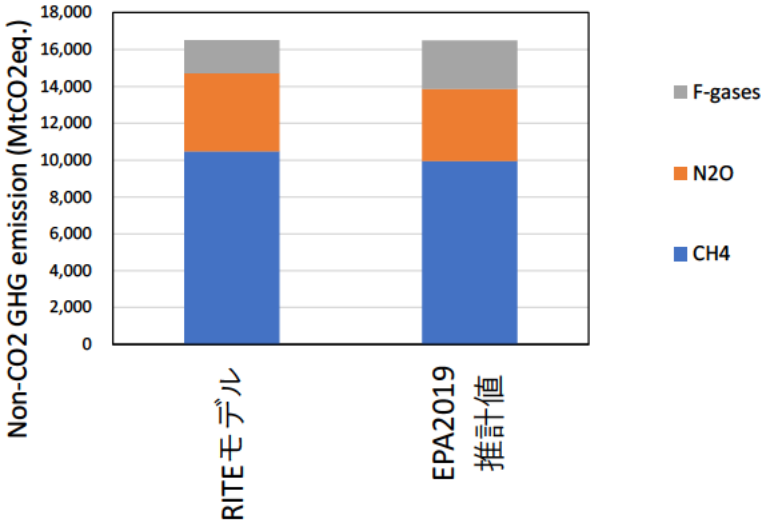


図 5.7.3-7 世界の非 CO_2 GHG 排出量(2050)のベースライン（SSP2）の比較（ガス別）

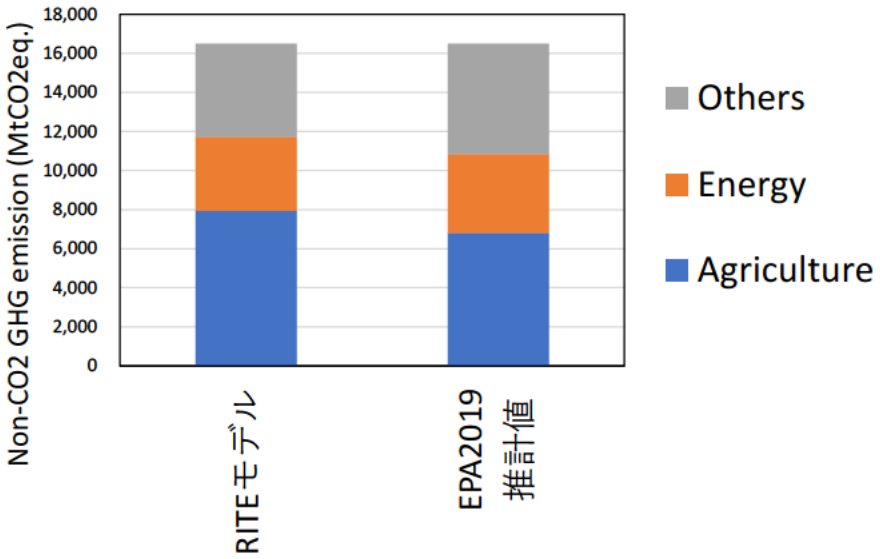


図 5.7.3-8　世界の非 CO_2 GHG 排出量(2050)のベースライン（SSP2）の比較（セクター別）

表 5.7.3-1～表 5.7.3-3 には、EPA[2)] 削減ポテンシャルに関して、実績排出量と比較することによる MAC 推計を示した。ここでは、COVID19 前の 2019 年実績値排出量と、の 2020 年 EPA[2)]排出量推計値を比較した。EPA[2)]排出量推計値よりも、実績値排出量の方が大きいセクターが多いため、正の MAC が推計されたセクターは限定的である。特に、冷媒用途の HFCs（産業プロセスに含まれる）の EPA[2)]排出量推計値が小さく、近年の実績値の急増を反映できていない点には留意が必要である。

表 5.7.3-1　EPA[2)] 削減ポテンシャルに基づく、2020 年の MAC 推計（EU＋英国）

Sector	**実績値排出量,2019年** (UNFCCC) [MtCO2eq.]	**EPA2019推計の ベースライン排出量 2020年** [MtCO2eq.]	EPA2019から 推計されるMAC [$/tCO2eq.]
Agriculture(CH4,N2O)	412.6	416.1	< -20
Energy(CH4,N2O)	102.8	113.9	2.7
Waste(CH4,N2O)	129.2	121.1	-
Industrial Process(F-gas,N2O)	120.3	87.6	-
Non-CO2 GHG total	**765.1**	**738.7**	-

表 5.7.3-2　EPA[2)] 削減ポテンシャルに基づく、2020 年の MAC 推計（米国）

Sector	**実績値排出量,2019年** (UNFCCC) [MtCO2eq.]	**EPA2019推計の ベースライン排出量 2020年** [MtCO2eq.]	EPA2019から 推計されるMAC [$/tCO2eq.]
Agriculture(CH4,N2O)	615.3	575.0	-
Energy(CH4,N2O)	329.7	338.6	-6.4
Waste(CH4,N2O)	159.6	131.9	-
Industrial Process(F-gas,N2O)	208.0	198.3	-
Non-CO2 GHG total	**1312.6**	**1243.9**	-

注：米国・2015 年・非 CO_2GHG 合計において、 UNFCCC 実績値と EPA[2)]値で、合計約 100MtCO_2eq.（UNFCCC が約 1 割大きい）の相違がある点に留意。

表 5.7.3-3　EPA[2)]削減ポテンシャルに基づく、2020 年の MAC 推計（日本）

Sector	**実績値排出量,2019年** (UNFCCC) [MtCO2eq.]	**EPA2019推計の ベースライン排出量 2020年** [MtCO2eq.]	EPA2019から 推計されるMAC [$/tCO2eq.]
Agriculture(CH4,N2O)	31.6	32.6	< -20
Energy(CH4,N2O)	7.8	9.4	> 1,000
Waste(CH4,N2O)	8.3	6.2	-
Industrial Process(F-gas,N2O)	56.4	36.8	-
Non-CO2 GHG total	**104.1**	**85.1**	-

5.7.4　まとめ

本年度は、最新の EPA[2)]の非 CO_2 GHG 削減ポテンシャル・データベースを反映し、非 CO_2 GHG 排出量評価モデルの改良を行った。試算結果と IPCC-AR6 データベースとの比較によると、1.5℃目標に相当する C1 や C2 の中の上位排出量グループに位置し、米国のモデル分析グループの分析結果とおおむね整合的である。

今後の課題として、EPA[2)]に対応したベースラインシナリオの見直しが必要である。特に、農業部門の CH_4 や冷蔵冷凍空調部門の HFCs（冷媒用途）に関して、EPA[2)]や他文献を参考に、検討する必要がある。各種シナリオの各種想定値や、GLaW モデルの農業・土地利用関連の数値と整合的なシナリオを反映できるように改良する必要がある。また、EPA[2)]に対応した排出量の部門分割想定の見直しが必要と考えられる。

参考文献（第 5.7 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）令和 3 年度成果報告書 (2022)
2) EPA(2019), Global Non-CO2 Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation Potential: 2015-2050
3) EPA(2006), Global Non-CO2 Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation Potential: 2000-2020

4) Hyman et al.(2003), Modeling non-CO2 greenhouse gas abatement, Environmental Modeling & Assessment volume 8, pp.175–186

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　IPCC WG3 長期排出シナリオ

6.1.1　IPCC WG3 長期排出シナリオの概要

IPCC の評価報告書において、複雑な気候変動問題を理解、分析するために長期排出シナリオは中心的なツールとなっている。温室効果ガスの排出には人口増加や経済成長、エネルギーシステム、土地利用、技術の進展、気候変動政策など多くの要因に左右される。これらが将来どう変化するかは不確実であるが、想起しうる将来をシナリオを用いて定量的、叙述的に描くことで、我々が直面する課題や取りうる選択肢を探るための示唆を得ることができる。

本節では IPCC 第 6 次評価報告書（AR6）[1), 2), 3)]で利用されている様々なシナリオの特徴や、シナリオから得られる情報やインプリケーションについて概説する。最初に気候変動の自然科学的根拠（WG I)、影響、適応、脆弱性（WGII)、緩和（WGIII）という 3 つの研究コミュニティ間で横断的に、かつ整合性のある分析をするためのシナリオ枠組みについて整理する。さらに WGIII レポートの特徴であるパリ協定の目標に向けた長期排出経路を検討するためのシナリオやネットゼロ排出、NDCs（Nationally Determined Contributions）など政策関連シナリオ、さらに野心的な気温目標シナリオの実現可能性の評価について取り上げる。最後に今後のシナリオ研究のあり方ついて考察する。

(1) シナリオ枠組み

これまで IPCC の評価報告書では将来の気候や気候変動の影響、気候変動を緩和するための排出削減について評価するため、様々なシナリオが使われてきた。第 4 次評価報告書までは IPCC がシナリオ開発プロセスを一元的に担ってきたが、それ以降、シナリオ開発は研究コミュニティに委ねられ、IPCC はシナリオ研究を促進する役割を果たしている。

IPCC の評価報告書は WGI、WGII、WGIII の 3 作業部会に分かれているが、気候変動に影響を与える（i）社会経済発展（ii）エネルギーや土地利用、（iii）温室効果ガス排出、（iv）温室効果ガスと短寿命気候因子の大気組成と放射強制力、（v）気温と降水パターンの変化、（vi）気候変動の物理、社会的影響は、相互に密接に関連しており、これらを網羅的、整合的に把握する必要がある。そのため気候変動研究のコミュニティは 2011 年に代表的濃度経路（Representative Concentration Pathway: RCP）を作成し、3 つの異なる研究コミュニティ間の分析を整合させている。2013 年から 2014 年にかけて発表された第 5 次評価報告書（AR5）では、2100 年の放射強制力が 2.6、4.5、6.0、8.5W/m^2 となるような 4 種類のシナリオ（それぞれ RCP2.6、RCP4.5、RCP6、RCP8.5）が WGI

と WGII 評価レポートの基礎となっている（図 6.1.1-1）。WGIII でも、RCP2.6 から 8.5 までをカバーしたシナリオが評価されている（図 6.1.1-2）。

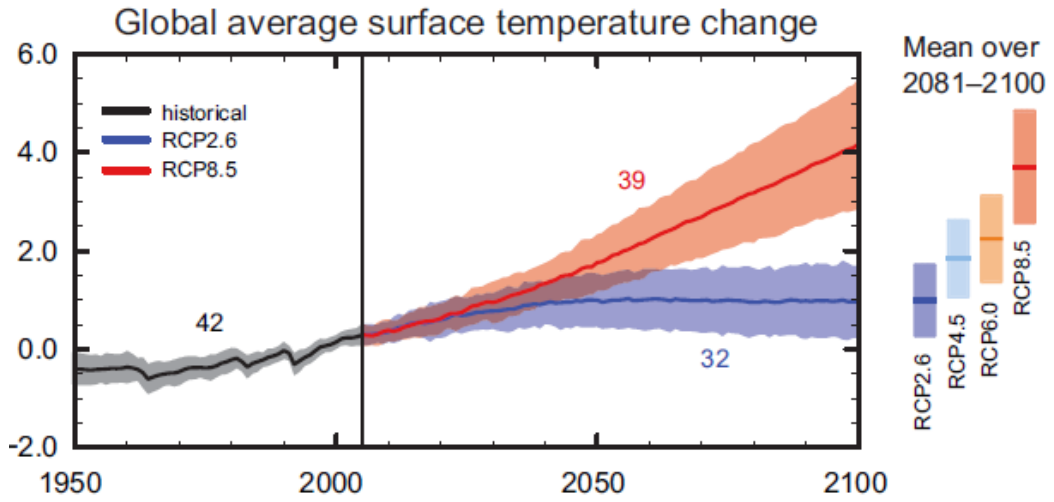


図 6.1.1-1 AR5 WGI におけるシナリオ別世界平均地上気温変化

（出典）IPCC[4)]

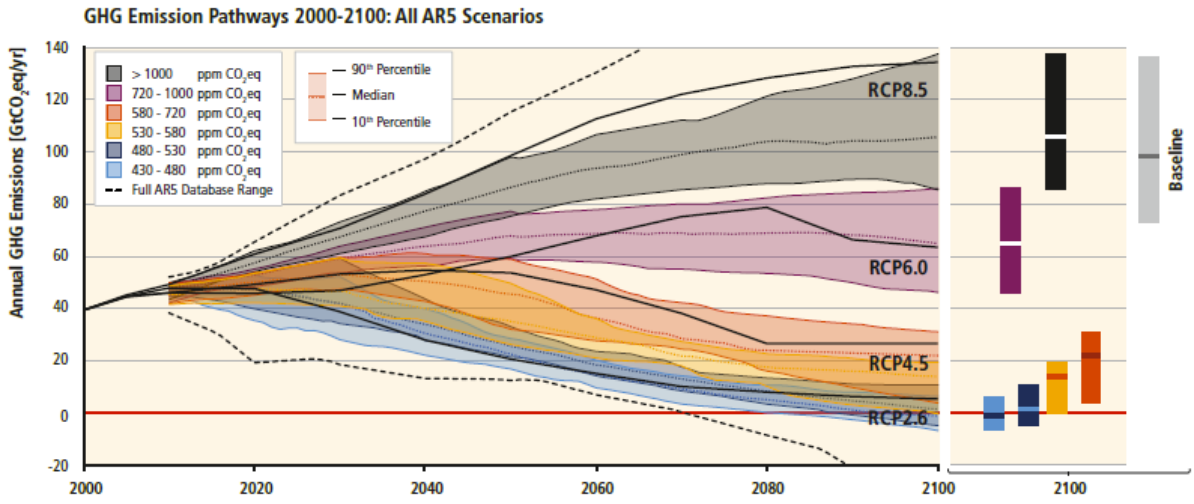


図 6.1.1-2 AR5 WGIII における排出シナリオ

（出典）IPCC[5)]

2021 年から 2023 年にかけて発表されている AR6 では放射強制力に加え、社会経済的側面も考慮した評価が行われている。2017 年に発表された共有社会経済経路（Shared Socioeconomic Pathway: SSP）では、適応と緩和の両方に対する社会経済的な課題を検討するため、持続可能性重視（SSP1）、中道的発展（SSP2）、地域間競争（SSP3）、不均衡（SSP4）、化石燃料による発展（SSP5）の 5 つのストーリーラインによって幅広い社会的未来像がカバーされている。AR6 のシナリオ分類では SSP x-y と表現されているが（図 6.1.1-3）、SSP のストーリーラインに対応するラベルとして x = {1, 2, 3, 4, 5}、放射強制力に相当するラベルとして y = {1.9, 2.6, 4.5, 7.0, 8.5} を付したものである。このシナリオ枠組みにより AR6 では強制力が同レベルであっても、SSP の違いにより

気候変化要因の内訳や土地利用の形態が異なることが表現できるようになり、緩和や気候変動影響における社会的課題をより具体的に検討できるようになった[6]。

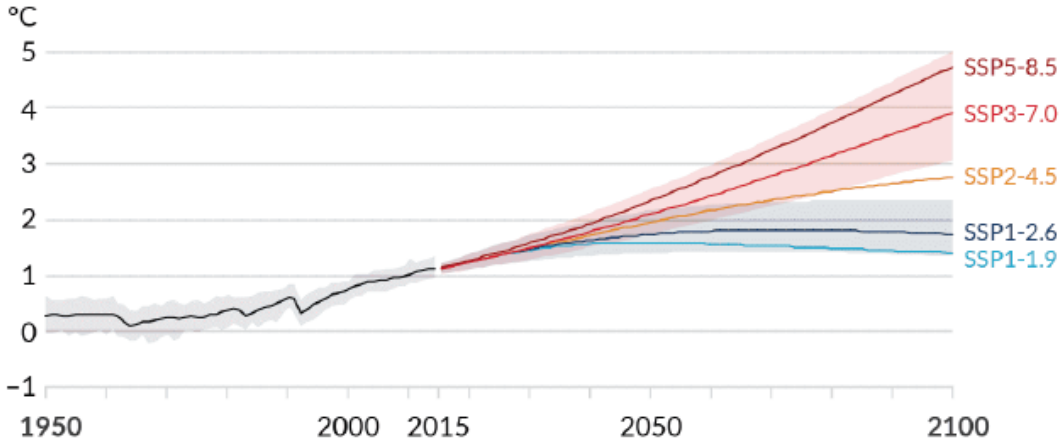


図 6.1.1-3 AR6 WGI におけるシナリオ別世界平均地上気温変化

（出典）IPCC[1)]

また AR6 では、パリ協定以降、1.5℃目標に対する関心が高まったことを受け、この目標水準に相当する 1.9 W/m^2 の低排出シナリオも加えられた。従来の 1.5℃シナリオは将来的に大きなネガティブ排出をともなうオーバーシュートシナリオが多かったが、これは不可逆的な影響をもたらすとして批判も多かったことから、オーバーシュートを抑制したシナリオの分析にも焦点が当てられており、同じ 1.5℃を達成するシナリオでも、オーバーシュートをしない、もしくは限られたオーバーシュートによって 1.5℃を達成するシナリオカテゴリー（C1）と、大きなオーバーシュートをともないつつ 1.5℃を達成するシナリオカテゴリー（C2）に区分され、両者の違いを評価できるようになっている。他方、現在は世界の多くの国で気候政策が実施されているため、RCP-8.5 程度の排出量が将来発生する可能性は小さいという議論もあったが、高リスクのハイエンドシナリオを評価するために引き続き評価対象となっている。WGIII ではこのシナリオ枠組みをベースに、表 6.1.1-1 で示すように C1 から C8 まで気温目標別に細かく分類し、それぞれのシナリオの特徴を整理している。

表 6.1.1-1 AR6 のシナリオカテゴリー

	気温目標	Illustrative	CMIP-6	シナリオ数
C1	1.5℃限定的オーバーシュート	IMP-LD IMP-Ren IMP-SP	SSP1-1.9	97
C2	1.5℃高オーバーシュート	IMP-Neg		133
C3	2℃（>67%）	IMP-GS	SSP2-2.6	311
C4	2℃（>50%）			159
C5	2.5℃			212
C6	3℃	ModAct	SSP2-4.5	97
C7	4℃	CurPol	SSP3-7.0	164
C8	4℃以上		SSP5-8.5	29

（出典）IPCC[3)]

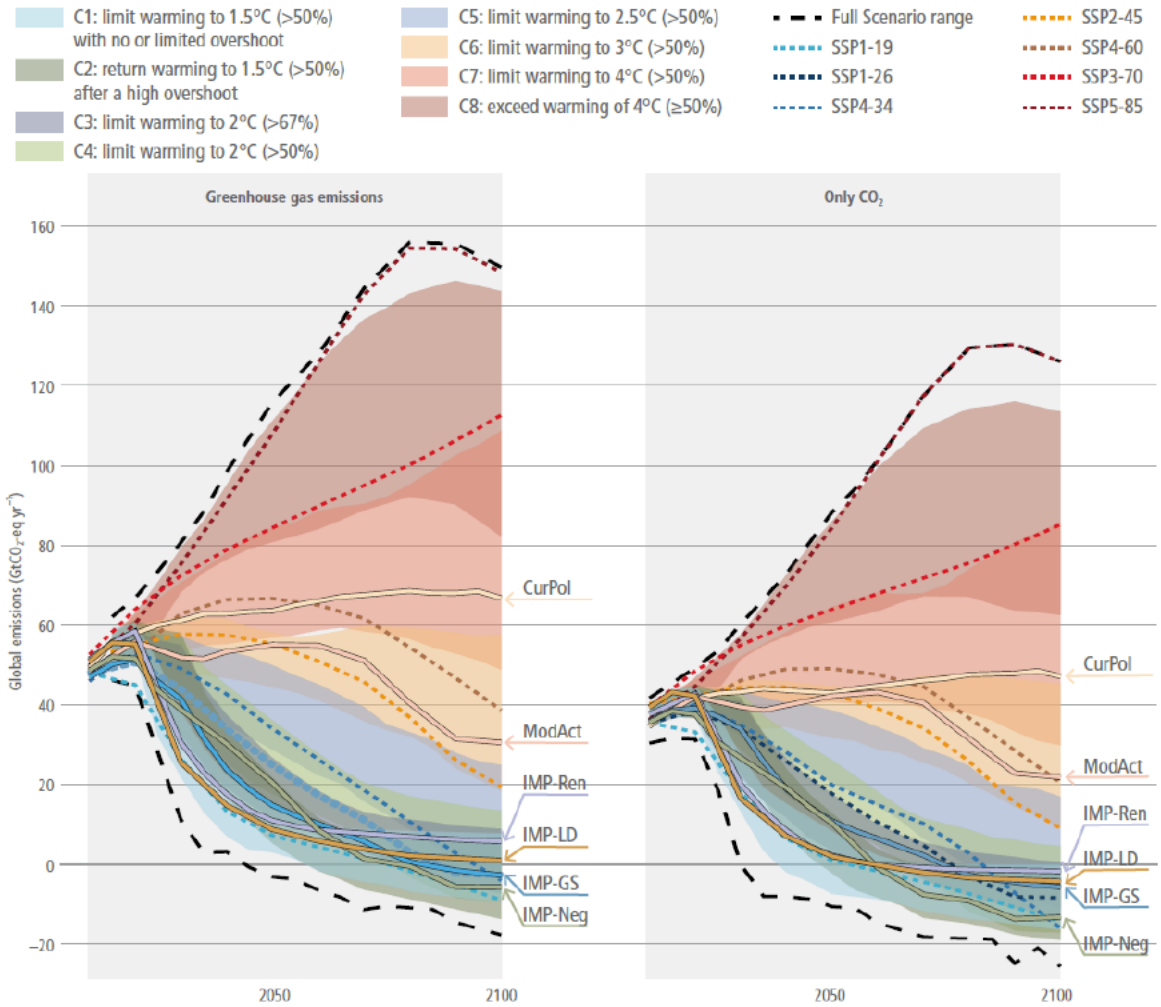


図 6.1.1-4 AR5 WGIII における GHG（左）と CO_2（右）排出シナリオ

（出典）IPCC[3)]

(2) シナリオの政策関連性

① IPCC シナリオ評価の特徴

IPCC は国連気候変動枠組条約（UNFCCC）をはじめ、地球温暖化に対する取り組みに科学的根拠を与える重要な役割を担っているが、評価レポートは「政策に関連するが、政策を規定しない（policy-relevant but not policy-prescriptive）」原則に則り、政策的中立性を旨としている。

2015 年にパリ協定が採択され、「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）」ことや「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）」ことが掲げられた。これを受け、AR6 でも 2℃や 1.5 ℃といった気温目標や、ネットゼロ排出といった長期的な気候変動目標に向けた道筋を探るためのシナリオが作成されている。

IPCC による評価の特徴の一つとして、シナリオを複数モデルによって評価（アンサンブル評価）し、将来の不確実性を評価結果の幅で示していることが挙げられる。同じシナリオにもとづいてモデル試算を行っても、研究チームやモデルの特性によって評価結果に違いが生じる。そのため、単一のモデルによる結果にもとづいて意思決定を行うとバイアスが生じる懸念がある。

IPCC ではシナリオデータベースを整備し、大量のシナリオの評価結果を収集している。AR6 シナリオデータベースには 3131 本のシナリオが含まれており、そのうち全世界を対象とした 2266 本の中で一定の基準を満たした 1686 本のシナリオをもとに評価を行うことで信頼性を確保している。シナリオ・アンサンブル全体の評価結果の広がりを示すために記述統計学が用いられ、中央値や四分位範囲、その他のパーセンタイル（5、10、90、95 など）値をプロットすることで結果の分布が表されている。

例えば、C1 シナリオ（オーバーシュートしない又は限られたオーバーシュートを伴って温暖化を 1.5℃(>50%)に抑える経路）では、「GHG 排出量は 2030 年までに 43 [34～60]%、2050 年までに 84 [73～98]%削減となる」とされているが、[ ] 前に示されている数値が評価結果の中央値、[ ] 内は 5%値~95%値に相当する。政策的メッセージを打ち出す際に中央値だけが取り上げられるケースも多いが、実際の IPCC の評価では結果に幅があることが示されている。

② 例示的経路

IPCC の気候変動シナリオは科学的評価だけでなく、社会に情報を提供することも目的としている。AR6 WGIII では、SSP-RCP フレームワークによるシナリオ分析に加え、気温目標やネットゼロ排出といった主要なテーマについての理解を深めるため、特徴的なシナリオをピックアップした例示的緩和経路（IMPs: Illustrative Mitigation Pathways）を提示している（図 6.1.1-5、図 6.1.1-6）。同じ長期目標でもシナリオによって排出経路や緩和戦略、課題が異なる上、モデル評価の結果には広がりがあるため直感的な理解に繋がりづらい。そのためシナリオデータベースの中から緩和戦略に関して特徴的なストーリーラインを持つシナリオを IMP として選び、異なるストーリーを定量的に対比ができるように示されている。

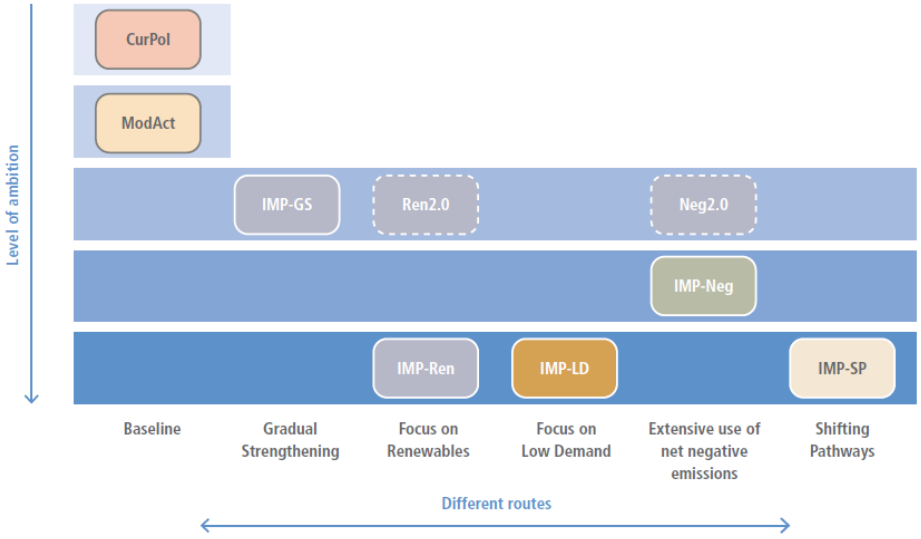


図 6.1.1-5 IMPs のマッピング

（出典）IPCC[3)]

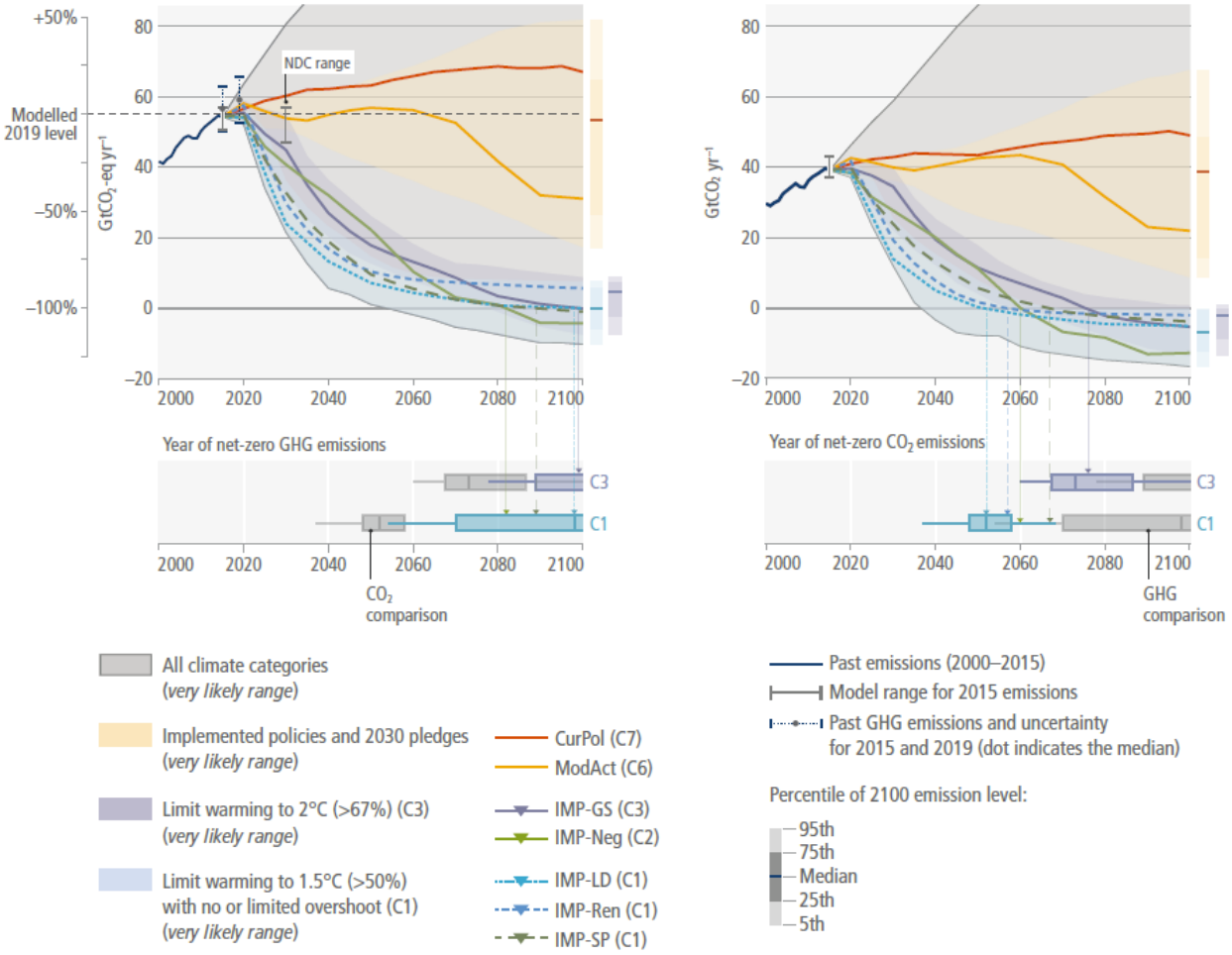


図 6.1.1-6 GHG(左)及び CO_2（右）排出経路と正味 GHG/CO_2 排出ゼロとなる時期

（出典）IPCC[3)]

図 6.1.1-6 では AR6 の評価において重要な緩和戦略を表す例示的経路（IP: Illustrative Pathway）として、2℃以上の温暖化を伴う排出シナリオである 2 つの参照経路とパリ協定の目標に対応した 5 つの IMPs が示されている。参照経路の 1 つである CurPol（Current Policies）は現在の政策、緩和努力水準が 2020 年以後も継続していくもので、今世紀末に 3℃～4℃程度上昇する C7 シナリオに相当する。もう 1 つの参照経路である ModAct（Moderate Action）は 2030 年まで NDC に沿い、その後は長期的に中程度の気候変動対策を継続することを想定した C6 相当のシナリオになっている。これら参照経路は IMP と比較するためのベンチマークとして示されている。これに対し 5 つの IMP は気温上昇を 1.5℃～2℃の範囲に抑える緩和経路を例示したものである（図 6.1.1-7）。IMP-GS は 2030 年まで NDC の野心レベルを超える緩和努力を行い、その後、温暖化を 2℃に抑える可能性の高い行動をとることを想定したもので、C3 シナリオに相当する。残りの 4 つは 1.5℃目標に対応したものだが、IMP-Neg は二酸化炭素除去技術の大規模展開に焦点を当て、今世紀後半に GHG 排出量をネットで大きくマイナスにするシナリオであり、オーバーシュートが大きい C2 シナリオに相当している。他の 3 つはいずれも C1 シナリオに相当するが、異なる緩和戦略にもとづいている。IMP-LD では効率的な資源利用と消費パターンのシフトにより高いレベルのサービスを確保しながらエネルギー需要を低く抑えることが想定されているのに対し、IMP-Ren は再生可能エネルギーの利用に重点を置き、IMP-SP は広範な持続可能な開発アジェンダを明示的に追求する SSP1 の社会経済的シナリオに沿ったものになっている。

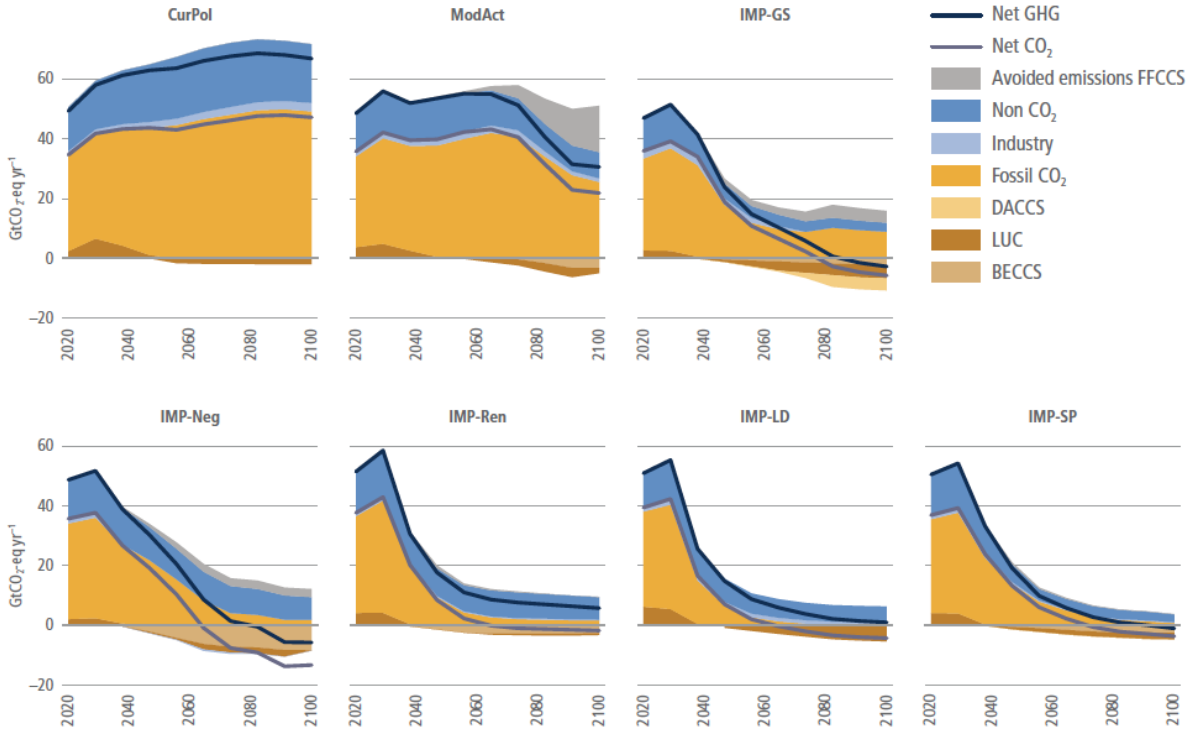


図 6.1.1-7 IMPs の CO_2, non-CO_2, CDR 経路

（出典）IPCC[3)]

③ ネットゼロ排出

AR5 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、気温を安定化するには、どこかのタイミングで世界全体の CO_2 排出をネットでゼロにする必要があることが示唆されている。また、パリ協定で今世紀後半に GHG 排出をネットでゼロにすることが盛り込まれたこともあり、AR6 ではネットゼロ排出目標について掘り下げた評価が行われている。なお、CO_2 排出量をネットゼロとすることは、一般的に気温上昇のピークと一致する。これに対し GHG 排出量をネットでゼロとすることは、通常、CO_2 以外の GHG 排出が残るため CO_2 排出量はマイナスにすることが必要であり、累積 CO_2 排出量が減ることになるため世界平均気温が低下することを意味している（GWP-100 に基づく）。

ネットゼロ CO_2 排出を達成するタイミングは、C1 シナリオの場合、2050-2055 [2035-2070] の間に、C3 シナリオの場合は 2070-2075 [2055-] の間とされている（5 年間隔の中央値、[ ] 内は 5-95%幅の範囲、図 6.1.1-6）。2018 年に作成された IPCC の 1.5℃特別報告書（SR15）[7]では「1.5℃に抑えるモデルの（排出）経路においては 2050 年前後（2045-2055 年）にネットゼロに達する」という評価となっている。AR6 では SR15 よりもわずかながら後ろ倒しされた数値になっているが、これは SR15 以降に 1.5℃目標を検討したシナリオが数多く開発され[8]、その結果を含めて評価が更新されたためとされている。また、温室効果ガスの安定化濃度を低く抑えるにあたり、AR5[5]では比較的多くのシナリオがオーバーシュートする経路を辿っていたが、近年、持続可能性の観点から大規模に CO_2 回収貯留付きバイオエネルギー（BECCS）を利用することなどに対する懸念が高まっており、AR6 ではオーバーシュートしない、もしくは限定的なオーバーシュートにとどまるシナリオを重視した評価がされている。

GHG 排出がネットゼロに到達するタイミングは、CH_4、N_2O、F ガスなど CO_2 以外の温室効果ガスの削減可能量が限定的なため、ネットゼロ CO_2 排出よりも 10～40 年程度遅れるとされている。C1 シナリオ群では約半分程度、C3 シナリオ群については約 1/3 程度のシナリオが今世紀中にネットゼロ GHG 排出に達するという評価になっている。

同一の緩和シナリオカテゴリー内であれば、どのモデルの評価においても比較的似たような排出経路を辿るが、どのようにしてそのような排出経路を実現するかという点ではモデル間の評価や想定する緩和戦略によって大きな違いがある。図 6.1.1-8 は IMPs におけるネットゼロ CO_2 排出を達成時点での CO_2 及び非 CO_2 の排出源と吸収源の部門別寄与を示したものである。ネガティブ排出の大きさや部門別の排出寄与度は、緩和戦略の違いによって大きく変わってくることがわかる。

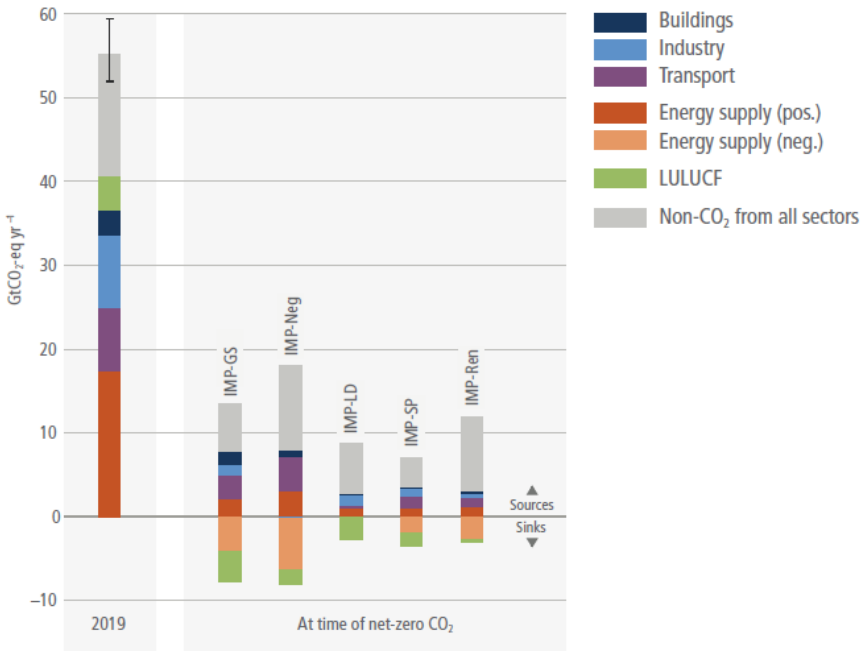


図 6.1.1-8　ネット CO_2 ゼロ時のセクター別排出

（出典）IPCC[3)]

ネットゼロ排出を達成するタイミングや GHG 排出削減のポテンシャルは、セクターや地域によっても異なる。例えば、電力部門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、早いタイミングで CO_2 排出をネットゼロとなることが想定されている。続いてエネルギーシステム全体、さらには経済全体からの CO_2 排出をネットゼロにしていくプロセスをたどることが多い。ただし、国や地域によって再生可能エネルギー資源の賦存や経済水準、産業構造、利用可能な技術や対策は異なっており、排出経路や排出内訳に大きな違いがあることにも留意が必要である。

他方、エネルギーシステムからの排出をネットゼロにするためにはいくつかの共通した特徴もある。AR6 では、(i) 化石燃料の限定的利用、(ii) 電力部門からのゼロ/ネガティブ排出、(iii) 最終消費部門における電化の普及、(iv) 電化に適さない部門での代替燃料の利用、(v) 省エネ、(vi) エネルギーシステム全体の物理的/制度的/運用面の統合性向上、(vii) 二酸化炭素除去（CDR）が共通要素として挙げられている。

④　グローバルストックテイクへのインプット

パリ協定では長期目標達成に向け、世界全体の実施状況を評価し（GST: グローバルストックテイク）、それをもとに各国は NDC を更新することになっている。IPCC はそのための科学的知見を提供することが期待されており、第 1 回 GST では AR6 の評価が参照されることになる。

図 6.1.1-9 は 2050 年までの世界全体の GHG 排出量について、4 パターンの経路を示したものである。1 つは 2020 年末までに実施されたものと同程度の政策が継続することを想定した経路（赤）。もう 1 つが COP26 前に発表された NDC が 2030 年まで実施され、以降、2℃や 1.5℃目標に向かう経路（紫）となっている。さらに 2℃目標に向けて

最適経路を辿る C3 シナリオの経路(緑)と 1.5℃目標に向けた C1 シナリオの経路(青)が示されている。

2020 年末までに実施された政策が継続していけば、GHG 排出量は 2025 年以降も増加し、2100 年までに 3.2 [2.2～3.5] ℃の地球温暖化をもたらすとされている。また、COP26 前に発表された NDC が実施されると 2030 年時点での世界全体の GHG 排出は 50~53GtCO$_2$eq になると見積もられている。それ以降、パリ協定の長期目標を達成しようとすると全ての部門において急激な排出削減が必要であり、それでも 21 世紀中に 1.5℃を超える可能性が高く、0.15～0.3℃の気温のオーバーシュートが起こることを示唆している。現在実施されている政策や NDC 実施による排出水準と長期気温目標を実現するために必要な排出水準にはギャップがあることから、2023 年の COP28 で行われる GST では、各国の NDC の野心をさらに高めていくようなプレッシャーがかかることが考えられる。

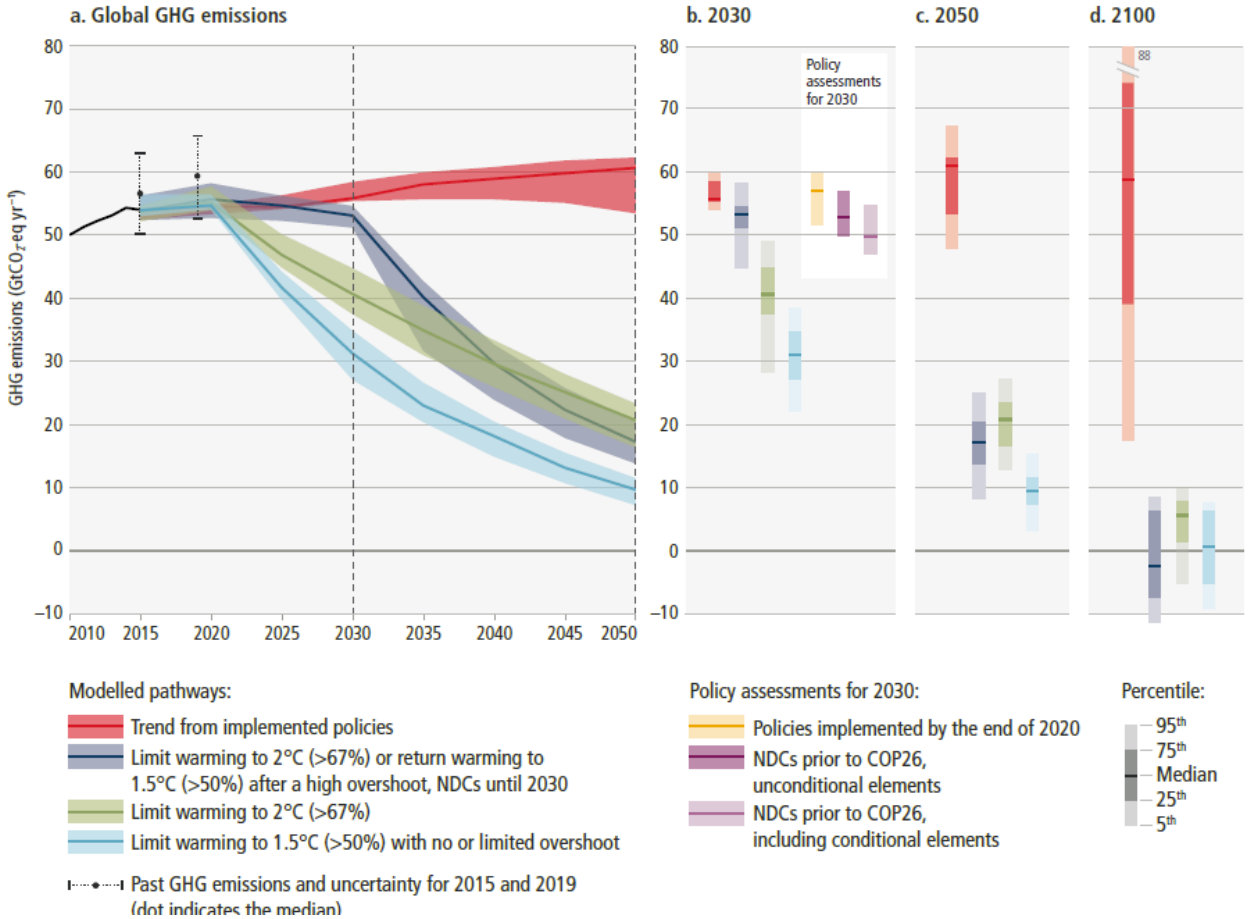


図 6.1.1-9 気候変動目標と政策を踏まえた GHG 排出経路

（出典）IPCC[3)]

⑤ 実現可能性評価

IPCC のレポートでは 1.5℃のような非常に野心的な目標に向けた経路が描かれているが、実際にそれを実現することは簡単ではない。AR6 では、モデル解の有無、及び多角的な評価軸に沿ってシナリオの実現可能性について検証されている。

長期気温目標に向けた排出経路は、技術の進展やコスト、資源のポテンシャルなどの制約条件を組み込んだモデルを用い、シナリオに適った解を求めることで導出される。1.5℃目標のように炭素制約が厳しい場合、モデルで解が得られないケースもある。例えば 1.5℃シナリオについては、持続可能性を重視した SSP1 シナリオの仮定では全てのモデルで解が得られたが、地域間の対立が激しく協調的な行動がとれない SSP3 シナリオでは 1.5℃目標の解が得られなかったことが報告されている。また SSP4 シナリオでは、不平等が拡大し土地管理能力が限られてくるため、SSP5 シナリオでは化石燃料資源への依存度が高いため、一部のモデルしか解けなかったとされている。気候の安定化を達成するためには、緩和努力だけでなく、社会経済的要因にも左右されることがわかる。

モデルの解が得られたとしても、技術普及のペースやコスト負担が非現実的な水準になっていることも考えられる[10]。そこで AR6 ではシナリオの実現可能性を「特定の期間において社会が変化できる能力の範囲内にシナリオがあるかどうか」と定義し、多角的に検証している。評価軸として①地球物理学的実現可能性（バイオマス、太陽光、風力の発電量）、②経済的実現性（炭素価格、GDP ロス、エネルギー投資、座礁資産化した石炭火力発電）、③技術的実現可能性（BECCS の拡大速度を含む、発電部門や運輸部門の変革速度）、④社会・文化的実現可能性（主要セクターにおけるエネルギー需要の削減、食料需要の削減、森林や牧草地の被覆の変化）、⑤制度的実現性（政府のガバナンス水準、一人当たり CO_2 排出量）の 5 つを設定し、それぞれ「前例がない（赤）」、「最良シナリオではありうる（黄）」、「妥当（青）」レベルであるかどうかで評価されている。

図 6.1.1-10 は SSP2 シナリオの仮定の下、1.5℃目標（C1 シナリオ）の実現性可能性を評価したものであるが、世紀半ばごろまでは制度的側面の懸念が大きいことが示されている。短中期的に政府のガバナンス水準が低い途上国においても大きな排出削減が必要であり、その実現可能性が危ぶまれているが、長期的には途上国でも経済成長が期待され、制度的実現可能性の懸念は和らいでいく。これに対し、世紀後半に向けては地球物理学的実現可能性の懸念が大きくなっており、これは将来的に BECCS などネガティブ排出技術の広範な活用が見込まれ、そのマイナスの影響が大きくなっていくことを示唆している。このように同じシナリオでも時間が経つにつれて課題やリスクの性質が変化していることがわかる。

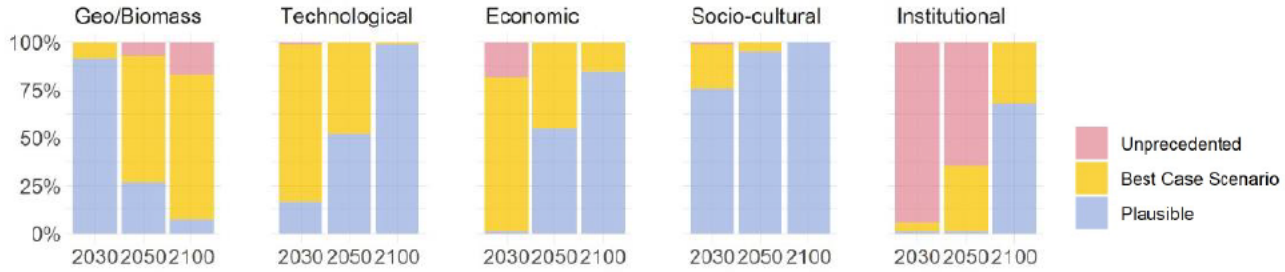


図 6.1.1-10　SSP2-C1 シナリオの実現性評価

（出典）IPCC[3]

(3) 今後のシナリオ研究

近年、シナリオの利用者は政策担当者だけでなく、投資家や企業、金融機関などにも広がっている。金融安定理事会（FSB）により設置された気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）は、2017 年に財務に影響のある気候関連情報の開示を推奨する報告書をまとめた。その中では、全ての企業に対し、気候変動や関連政策が経営環境をどのように変化させるか、自社の経営戦略にどのような影響を与えるかシナリオ分析し、その財務上の影響を把握、開示することを求めている。今後、IPCC による気候変動シナリオも、より多様なニーズに応えていくことも重要になると考えられる。

既に気候変動研究コミュニティも今後のシナリオ研究のあり方について議論を始めており、2019 年にはアメリカのデンバーで第 1 回「気候・社会未来のためのシナリオに関するフォーラム」が開催され、2022 年 6 月に第 2 回シナリオフォーラムがオーストリアのラクセンブルクで開催された。その成果をまとめた論文[9]では、SSP のデータセットが整備されてから現在までの間にシナリオと過去のトレンドに乖離が生じているため SSP の更新が必要なこと、地域レベルでの意思決定に活用できるようグローバルな SSP を地域、地方レベルのより詳細な情報に落とし込む（ダウンスケーリング）こと、気候変動研究コミュニティ以外への関連性を向上させる必要があること、などが指摘されている。COVID-19 パンデミックやロシアのウクライナ侵攻といったグローバルショックや技術の進歩、政策の進展によりシナリオは陳腐化する。次の IPCC 評価報告書サイクル（AR7）に向け、シナリオを更新・拡充し、時宜に適った分析をできるようにしていく必要があるだろう。

参考文献（第 6.1.1 節に関するもの）

1) IPCC, 2021: Climate Change 2021 The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, IPCC
2) IPCC, 2022: Climate Change 2022 Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge, IPCC
3) IPCC, 2022: Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, IPCC
4) IPCC, 2013: Climate Change 2013 The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, IPCC
5) IPCC, 2014: Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, IPCC
6) O'Neill, Brian C., et al. “The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6.” Geoscientific Model Development 9.9 (2016): 3461-3482.
7) IPCC, 2018: 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. Cambridge University Press, Cambridge, IPCC

8) Riahi, Keywan, et al. “Cost and attainability of meeting stringent climate targets without overshoot.” Nature Climate Change 11.12 (2021): 1063-1069.
9) O’Neill, Brian C., et al. “Achievements and needs for the climate change scenario framework.” Nature climate change 10.12 (2020): 1074-1084.
10) Brutschin, Elina, et al. “A multidimensional feasibility evaluation of low-carbon scenarios.” Environmental Research Letters 16.6 (2021): 064069.

6.1.2 IPCC WG3 排出削減コストとポテンシャルと DNE21+分析等との比較

本節では、RITE DNE21+による排出削減コストとポテンシャル推計と、IPCC WG3 第6次評価報告書（AR6）[1)]の推計の比較を行った。

DNE21+推計と IPCC 推計の前に、IPCC AR6 では、技術積み上げ評価と統合評価モデル IAMs の評価と2種類の提示があり、それらの推計には比較的大きな差異があるため、まず、IPCC AR6 における技術積み上げ評価と統合評価モデル IAMs の評価の比較について記載しておく。なお、IAMs と一括りに言っても、DNE21+のように技術積み上げで評価しているモデルも多い。一方、一般均衡型モデル CGE や計量経済モデルも含まれ、モデル構造は多様である。後者は価格弾性値等を用いることが多いが、過去の実証に基づき、弾性値は想定されることが多く、過去の再現性が高いとも言える。しかし、大きな技術変化等に対しては、過去の実績に基づきパラメータ設定がなされることから、保守的に過ぎる結果を示すこともあり得る。一方、技術積み上げ型モデルの結果は、「隠れた費用」の扱いの違いによって、分析結果に差異が生じることが多い（例えば、Energy Modeling Forum (EMF) 25 の評価 [2),3)]）。「隠れた費用」には、例えば、新規の技術や社会的受容性の低い技術など、投資リスクが高い技術は、投資のリターンを高くとらなければならず、投資の割引率が高くなるケースや、例えば照明を LED に換える場合、一つ一つの省エネ効果が小さい場合は、付け替える時間が隠れたコストとして相対的に大きくなるケースなど、多くのケースが存在している。また、例えば、技術進展が早い技術・製品においては、陳腐化が早いため、投資の割引率と関係する、年次化要素はその分、高くなる。詳しくは文献 4)を参照されたい。更に、具体的に IPCC 報告書で明記されている、考慮されていないコストもある。例えば、「変動性再生可能エネルギーの系統統合費用は 2030 年までは大きくはないと想定し、統合費用は加えていない。」と記載されている。一方、モデルによる分析の場合は、過去の実績との整合性を図ることは多く、考慮の大小はあるものの、一定の「隠れた費用」が考慮されることが多いと考えられる。さもなければ、実際の排出量等との整合性がとれないことが多いからである。他方、全体整合的なモデルとして構築されていない、技術積み上げ評価の場合は、実際の排出量等との整合性は、モデル分析のような形では確認されないので、「隠れた費用」が十分には考慮されないことが多い。

まず、図 6.1.2-1 に IPCC AR6 で提示された、個別技術の 2030 年の排出削減コスト・ポテンシャル推計を示す。これは、各技術のコストとポテンシャルについて、特定の代替元の技術（参照技術）を想定し、それと想定する対策技術との比較で、固定費、可変費（燃料費、O&M 費）を想定して、コスト差を算定し、一方で、排出削減効果も

算定して、tCO_2 あたりの排出削減費用が算定される。このとき、いくつか注意が必要な点がある。例えば、参照技術として何を想定するかである。IPCC 報告書では説明が十分なされておらず、不明瞭であるが、例えば、太陽光や風力発電などの発電技術では、石炭火力発電を参照技術として採用している可能性が高い。しかし、実際には、LNG 火力や石油火力を代替する場合もあるが、石炭火力発電の代替に比べ、CO_2 削減量は小さくなり、単位 CO_2 排出削減あたりのコストは高くなる場合もあり得るが、参照技術を決めてしまうため、コストを過小評価、ポテンシャルを過大評価してしまう恐れがある。一方、モデルの分析では、全体システムとして費用最小となる代替を算出することが多いので、図 6.1.2-1 の手法のような問題は原則生じない。固定費を年間費用に換算するために必要な割引率の想定も重要である。IPCC 報告書では図 6.1.2-1 を算定した際の割引率について明記がされていないようであるが、通常 5～10%/yr 程度の割引率をすべての部門、すべての国について適用されることが多い。実際には、途上国では他の投資機会が多かったり、投資リスクが高かったりする中、より大きな投資のリターンがなければ投資がなされないケースは多い。また、先に記述したように、特に需要側技術は、より新しいサービス等を生み出していく中で、製品のサイクルが早く、技術・製品の陳腐化が早いものも多い。例えば製品の物理的な寿命は 10 年であっても、製品の価値は 3 年でほぼ無くなるようなものも多い。この場合、割引率は 30%/yr 程度ということになるが、技術積み上げ評価では、部門や技術の特徴、差異を踏まえた、実態にあった割引率の設定がなされないことが多い。そうすると、コストを過小評価、ポテンシャルを過大評価してしまう。IPCC 第 5 次評価報告書（AR5）[5]では、このような課題認識から、技術積み上げ評価によるコスト・ポテンシャル推計がなされなかったが、新しい AR6 では図 6.1.2-1 のような推計が示されている。第 4 次評価報告書（AR4）[6]では類似の推計の掲載があるが、「部門間で比較はできない」といった注意事項が記載されてあるが、AR6 ではこれら推計を集約した結果も記載されており、「100 $/tCO_2eq 以下のコストの緩和オプションで、世界全体 GHG 排出量を 2030 年までに少なくとも 2019 年レベルの半分に削減しうるだろう。その削減ポテンシャルの半分以上は、20 $/tCO_2eq 以下である。」としている。

図 6.1.2-2 には、IAMs における 2030 年の排出削減コストとポテンシャル推計を示す。部門、技術積み上げのコスト評価の Fig. SPM7（図 6.1.2-1）では、2030 年の 100 $/tCO$_2$eq 以下のポテンシャルは、2019 年排出量の少なくとも半分と評価している。2019 年排出量を 59 GtCO$_2$eq/yr とすると、29.5 GtCO$_2$eq/yr となる。また、20 $/tCO$_2$eq で少なくともその半分のポテンシャルとしているので、2030 年において 44.3 GtCO$_2$eq/yr を達成できることとなる。ただし、Fig. SPM7 に関する評価は GHG である一方、IAMs の評価である図 6.1.2-2 は、CO_2 なので、GHG との 2019 年時点での差分 14 GtCO$_2$eq/yr 程度を単純ながら調整する。図 6.1.2-2 のグラフ読みから、100 $/tCO$_2$ で 22～33 GtCO$_2$/yr 程度、20 $/tCO$_2$ 程度で 35～45 GtCO$_2$/yr 程度の推計幅なので、それぞれに 14 GtCO$_2$eq/yr を足すと、100 $/tCO$_2$ の場合は 36～47 GtCO$_2$eq/yr 程度、20 $/tCO$_2$ 程度の場合は 49～59 GtCO$_2$eq/yr 程度となる。統合評価モデル IAM の分析と、部門、技術積み上げのコスト評価の Fig. SPM7 では、かなり大きな評価のギャップが見られる（以上を整理した表を表 6.1.2-1 に示す）。

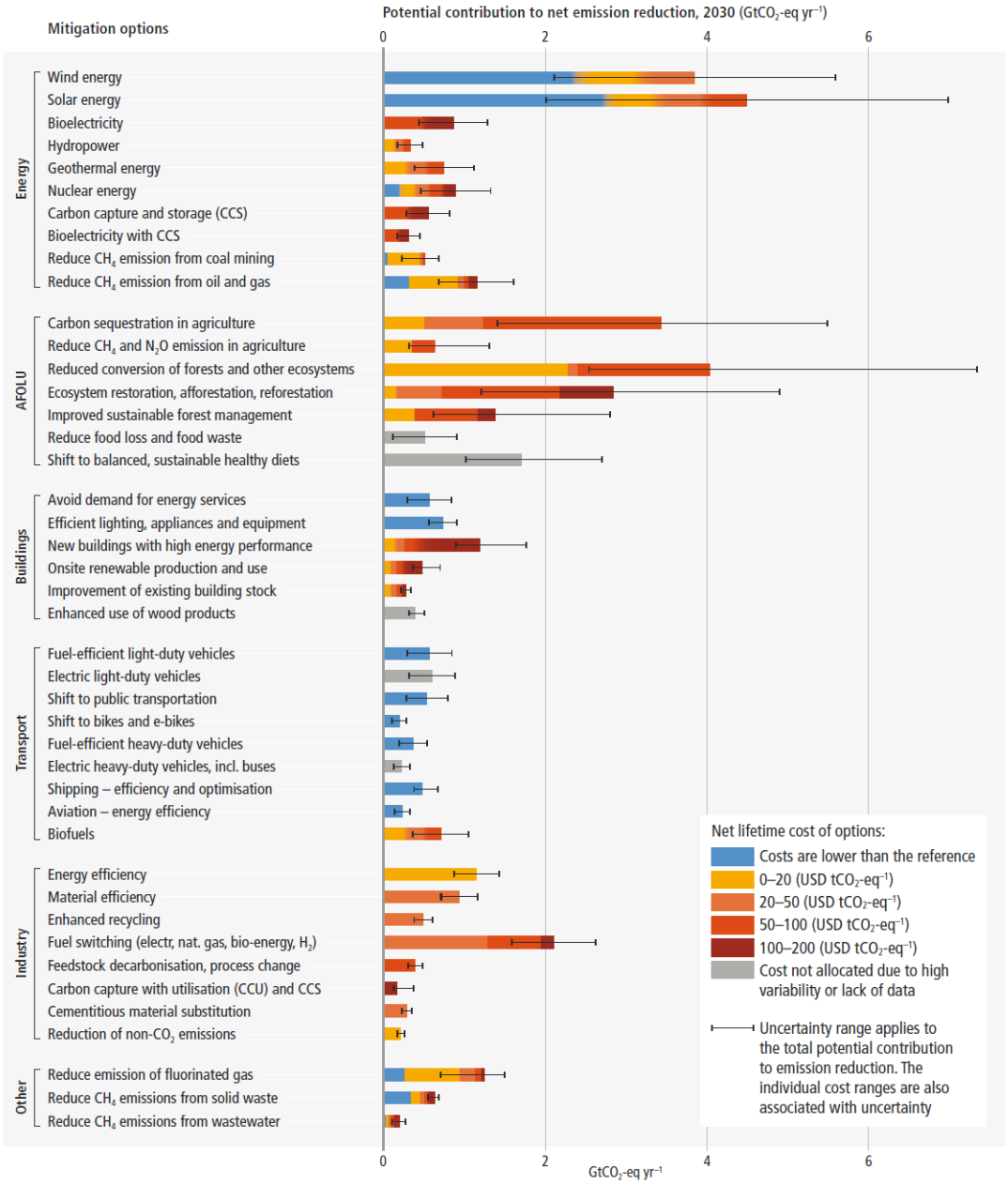


図 6.1.2-1　個別技術の 2030 年の排出削減コスト・ポテンシャル推計（出典：文献 1)）

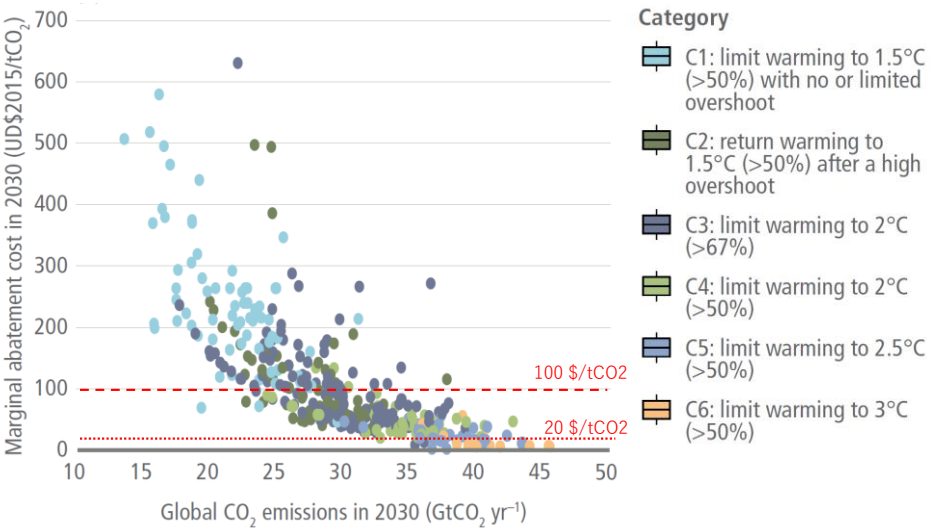


図 6.1.2-2　IAMs による 2030 年の排出削減コスト・ポテンシャル推計

（出典：文献 1)を基に加工）

表 6.1.2-1　各炭素価格水準で期待される 2030 年の世界の排出量

		技術積み上げ評価 （IPCC Fig. SPM7）	IAMs の評価 （IPCC Fig.3.33）
20 $/tCO₂eq 以下	CO_2	(30.3 $GtCO_2$/yr)	35～45 $GtCO_2$/yr
	GHGs	44.3 $GtCO_2$eq/yr	(49～59 $GtCO_2$eq/yr)
100 $/tCO₂eq 以下	CO_2	(15.5 $GtCO_2$/yr)	22～33 $GtCO_2$/yr
	GHGs	29.5 $GtCO_2$eq/yr	(36～47 $GtCO_2$eq/yr)

IPCC 報告書においても、部門横断章の第 12 章において、両者の違いについての認識の下、図 6.1.2-3 や図 6.1.2-4 のような比較評価がなされている。エネルギー供給部門では、低コストレンジにおいて特に排出削減ポテンシャル推計が、積み上げ評価の方が楽観的な傾向があり、200 $/tCO₂eq 程度までのコストのポテンシャルとなると、差異はあまりなくなっていることがわかる。他方、運輸部門については、積み上げ評価では 20 $/tCO₂eq 以下に大きな削減ポテンシャルがあると推計しており、一方、IAMs ではコストレンジが上昇するに従って、削減ポテンシャルが徐々に増大するものの、200 $/tCO₂eq においてもまだ積み上げ評価との大きなギャップが残っていることがわかる。図 6.1.2-4 は脱炭素エネルギーの導入量での比較評価（2℃目標相当の炭素価格で 2030 年にどの程度導入ポテンシャルがあるか）であるが、特に積み上げ評価では太陽光、風力の変動性再生可能エネルギーについて、IAMs 推計よりも、導入量を大きく推計していることがわかる。IPCC の 12 章においては、この違いが、積み上げ評価の方が直近の再エネ価格等のコスト低減を反映している一方、IAMs ではモデル前提条件のデータ更新が遅いためではないかと記載されている。しかし、IAMs も将来コストの低減は織り込んでおり、また、本報告書でも分析しているように、再エネコスト等がコスト低減がより加速するシナリオ等も分析されている。運輸部門のギャップが 200

$/tCO₂ の炭素価格でも大きな差が見られることも、価格の参照時点の少しの違いでは説明がつかないはずである。よって、価格の参照時点の違いによるところが主要な要因とは言えないように思われる。むしろ、先述のように、「隠れたコスト」の想定の有無の違いによるところが主要な要因と考えることが妥当である。例えば運輸部門の「隠れたコスト」としては、BEV の充電に要する時間、充電池設置のコスト、航続距離が短いこと（また充電容量が小さくなってきたときの充電の不便性からの不安感も含まれる）などが挙げられるだろう。引き続き、世界では、FIT/FIP 制度で再エネに補助をしているし、BEV にも多額の補助金を支出している。もし、炭素価格が負や 20 $/tCO₂eq 以下で良いなら、そのような多額な補助金がなくても、市場で選択されるはずだが、そうなっていないことも、大きな「隠れたコスト」が存在している論拠でもある。

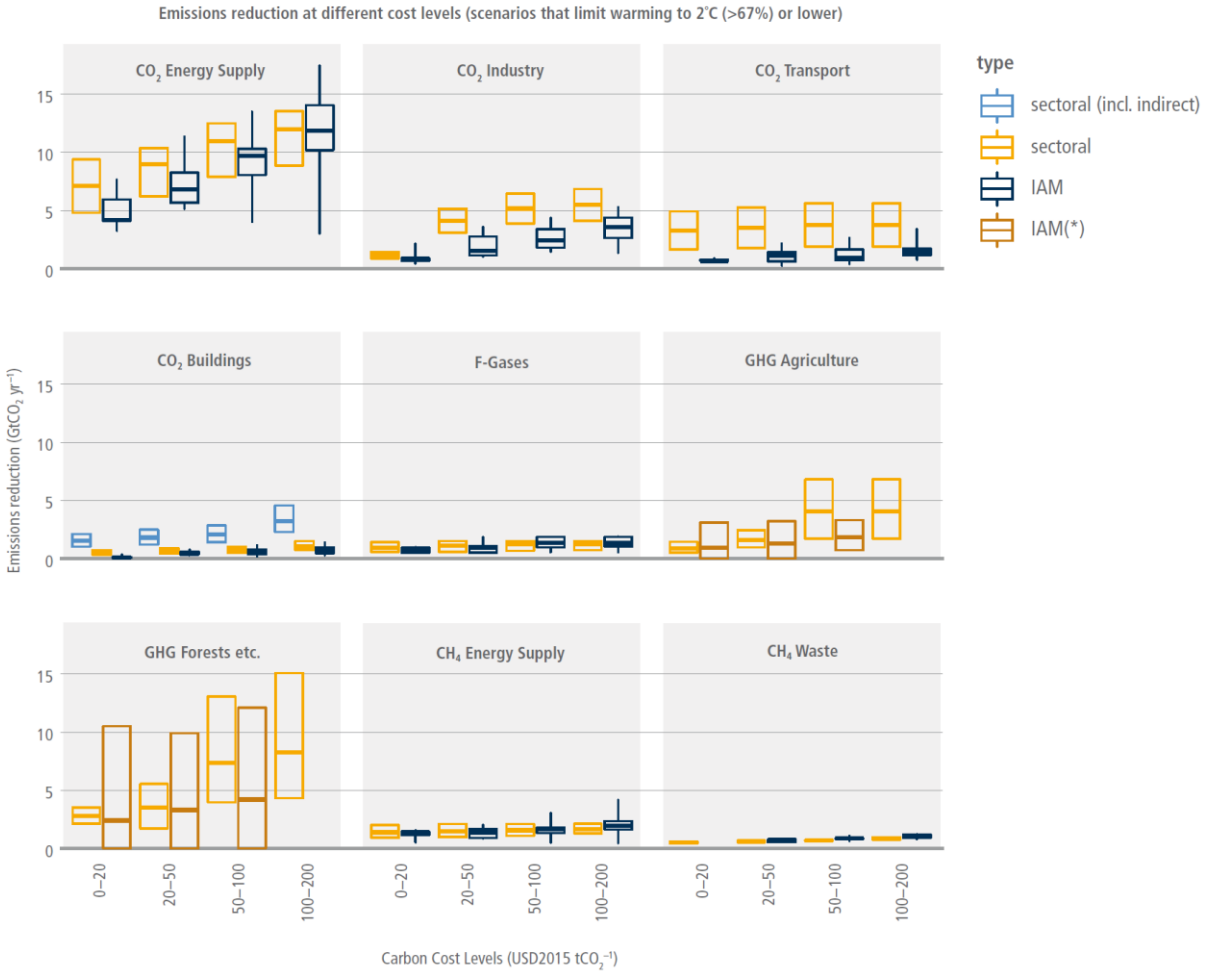


図 6.1.2-3　技術積み上げ評価と IAMs 評価の差異

（出典：文献 1)）

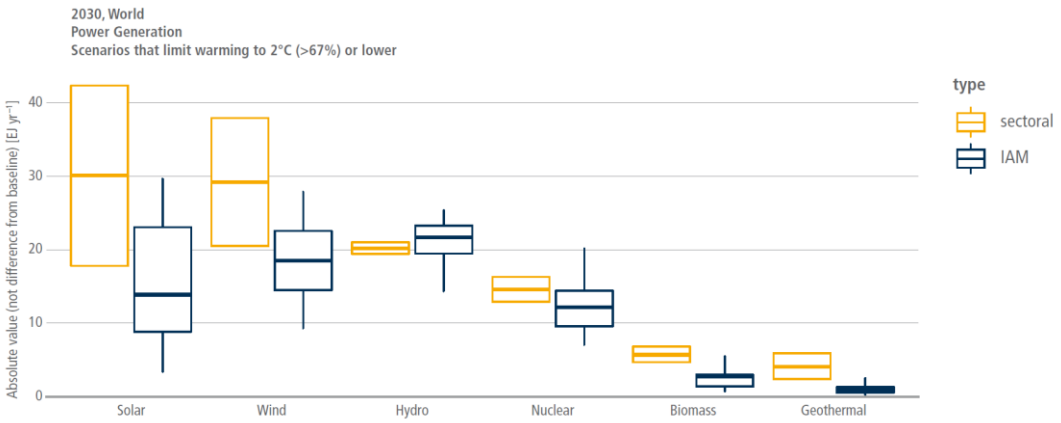


図 6.1.2-4　技術積み上げ評価と IAMs 評価の差異：脱炭素エネルギーの導入見込み量（出典：文献 1)）

第 4.1 節で記載のように、DNE21+の NDCs 排出削減目標を世界全体での費用最小化（世界で CO_2 限界削減費用均等化）で達成する際の CO_2 限界削減費用は 47 $/tCO_2eq と推計されている。これを、図 6.1.2-2 と同じ IPCC AR6 のグラフに記載したものが、図 6.1.2-5 である。これは、報告された IAMs のシナリオでは、おおよそ 29～41 $GtCO_2/yr$ 程度に位置し、中央値は 35 $GtCO_2/yr$ 程度である。先と同じく、このグラフは CO_2 なので、GHG との 2019 年時点での差分 14 $GtCO_2eq/yr$ 程度を単純に追加すると、49 $GtCO_2eq/yr$ 程度となる。これは、RITE の NDCs 推計の 50 $GtCO_2eq/yr$（第 4.1 節）とほぼ整合的な水準な水準となる。RITE DNE21+モデルの 2030 年推計は、IPCC AR6 の多数報告されたシナリオと整合的かつほぼ中位的な推計となっている。また、DNE21+の推計では日本の NDCs の限界削減費用は 452 $/tCO_2eq と推計されており、これを世界すべての国の均一な炭素価格として想定すると、世界 GHG 排出量は 32 $GtCO_2/yr$ 程度と推計されている（同じく第 4.1 節参照）。図 6.1.2-5 には、452 $/tCO_2eq の線も追記している。この炭素価格レンジの報告事例は少なく判別が難しいが、このとき世界 CO_2 排出量はおおよそ 15～25 $GtCO_2/yr$ 程度である。この価格レンジでは Non-CO_2 GHG も大きく低減する可能性があると考えられるため、仮に 2019 年時点の差分 14 $GtCO_2eq/yr$ の 2/3 の 9 $GtCO_2eq/yr$ 程度とすれば、世界 GHG 排出量は 24～34 $GtCO_2eq/yr$ 程度となる。この高い炭素価格レンジにおいても、IPCC で収集された IAMs の報告と、DNE21+の推計とは整合性が高いと言える。

これは、更に言えば、IPCC AR6 の技術積み上げ評価の推計（Fig. SPM7 等）とは大きなギャップがあることでもある。

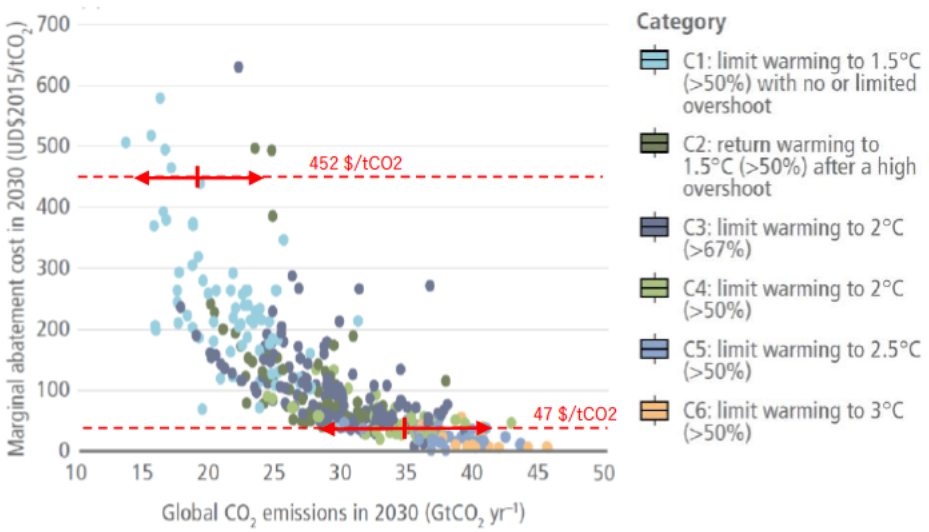


図 6.1.2-5　IPCC IAMs 評価と本事業利用の DNE21+推計との比較

（出典：文献 1)を基に加工）

参考文献（第 6.1.2 節に関するもの）

1) IPCC WG3、第 6 次評価報告書 (2022) https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/
2) Energy Modeling Forum: Energy Efficiency and Climate Change Mitigation, EMF Report 25 Volume I, Stanford University, http://emf.stanford.edu/files/pubs/22530/summary25.pdf (2011)
3) Huntington, H.G.: The Policy Implications of Energy-Efficient Cost Curves, Energy Journal, 32, Special Issue 1, 7-21 (2011)
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 (2022) https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/mitigationcost-discountrate.pdf
5) IPCC WG3、第 5 次評価報告書 (2014)
6) IPCC WG3、第 4 次評価報告書 (2007)

6.2　IEA WEO の分析

6.2.1　IEA の World Energy Outlook のシナリオ

国際エネルギー機関（IEA）が毎年発刊している World Energy Outlook（WEO）は、エネルギーの需供の最新動向と将来展望を示したもので、長らく世界のエネルギー関係者にとってバイブル的な存在であった。この WEO の将来展望は複数のシナリオによって示されており、これまでも何度かシナリオの名称や位置づけが変わったこともあったが、近年特に大きく変化してきている。昨年 10 月に発刊された最新の WEO2022 のシナリオの変化を概括した上で、その概要をシナリオ別のエネルギー指標の比較分析により示す。最後に、シナリオの変化についての一論考を示す。

(1) WEO2022 のシナリオの変化

WEO2006 から WEO2022 までのシナリオを以下の図 6.2.1-1 に示す。WEO2010 から中心シナリオ、BAU シナリオ、2℃シナリオという 3 つのシナリオの組み合わせが 10 年間続いたが、WEO2020 で 1.5℃シナリオが BAU シナリオに取って代わり、WEO2021 で APS（カーボンニュートラル宣言している国は全て達成すると想定したシナリオ）が加わる、WEO2022 で 2℃シナリオが消え、WEO2022 のシナリオは STEPS、APS、NZE の 3 つになっている。

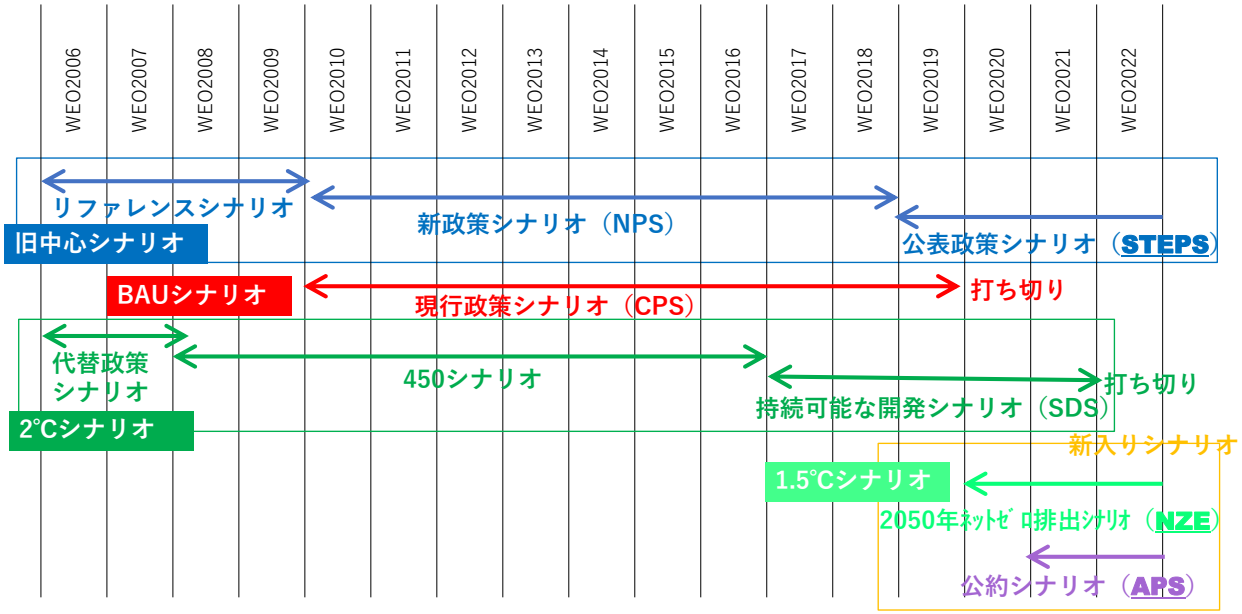


図 6.2.1-1 WEO のシナリオの変遷

シナリオのアプローチとして、現在の STEPS を含む中心シナリオは forecast 型の将来予測シミュレーションであるが、2℃シナリオ、1.5℃シナリオは将来の CO_2 排出量を固定して目標達成の手段を見出す backcast 型である。APS はカーボンニュートラル宣言している国は backcast 型、その他の国は forecast 型でアプローチしたハイブリッド型のシナリオであると言える。図 6.2.1-1 に示す通り、WEO2019 までは forecast 型シナリオが 2 つ、backcast 型シナリオが一つという組み合わせであり、予測重視であったと言える。しかし、WEO2020 以降は forecast 型シナリオ 1 つ、backcast 型シナリオ 1 つ、ハイブリッド 1 つという組も合わせに変わり、目標重視にシフトしていることがわかる。

また、シナリオとは別に、WEO が対象とする CO_2 排出量についても、WEO2020 まではエネルギー起源 CO_2 であったのが、WEO2021 からエネルギー起源 CO_2 に加えて産業プロセス CO_2 が対象になっている。WEO2022 の STEPS、APS、NZE のシナリオ別の CO_2 排出量は以下の通りである。

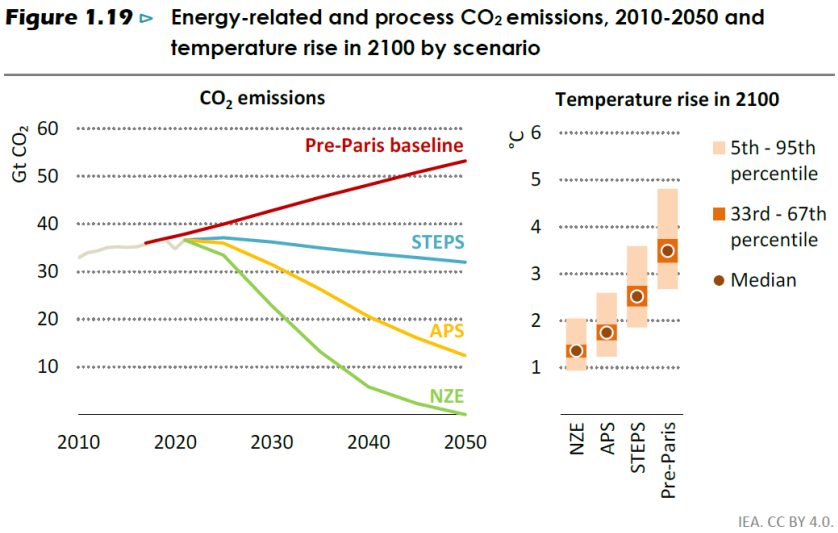


図 6.2.1-2　WEO2022 の３つのシナリオの CO_2 排出

３つのシナリオは以下のように定義されている。

- NZE：2100 年における世界の平均気温が産業革命前の水準からの温度上昇が 1.5℃で安定するように、2050 年に世界のエネルギー起源 CO_2 および産業プロセス CO_2 がネットゼロを達成する規範的なシナリオ
- APS：各国政府が長期のネットゼロ目標や NDC での誓約を含め、発表した気候関連の約束を全て達成するシナリオ
- STEPS：米国 IRA など、政府が設定した目標と目的を達成するために実際に行っていることと整合したシナリオ

人口と GDP 成長率の想定は３つのシナリオに共通している。人口は WEO2021 と同様に 2050 年に 97 億人に増加すると想定している。GDP 成長率は WEO2021 では 2020 年から 2050 年の年平均成長率を 3.0%としていたが、WEO2022 では 2021 年から 2050 年の年平均成長率 2.8%に下方修正している。

燃料価格については表 6.2.1-1 の通りであり、2050 年の石油、石炭は WEO2021 から STEPS と NZE の双方で僅かに低下しているが、大きな変化は見られない。

表 6.2.1-1　WEO2022 の燃料価格（WEO2021 との比較）

	STEPS		NZE		WEO2021 STEPS		WEO2021 NZE	
Real terms ($2021)	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
IEA crude oil ($/barrel)	82	82	35	24	77	88	36	24
Natural gas ($/MBtu)								
United States	4.0	4.7	1.9	1.8	3.6	3.3	1.9	2.0
European Union	8.5	9.2	4.6	3.8	7.7	8.0	3.9	3.6
China	10.9	10.6	6.1	5.1	8.5	9.0	4.4	4.2
Japan	9.8	10.2	6.0	5.1	8.6	9.7	5.3	4.7
Steam coal ($/tonne)								
United States	46	44	22	17	39	52	24	22
European Union	60	64	52	42	67	76	58	44
Japan	91	72	59	46	77	86	67	50
Coastal China	89	75	58	48	83	89	72	51

WEO2022 の STEPS と NZE の炭素価格について、カッコ書きで WEO2021 の値を併記して表 6.2.1-2 に示す。WEO2021 と比較して 2 割以上増加しているものは下線で強調し、2 倍以上に増加しているものは赤字で示している。WEO2022 の STEPS の炭素価格は、想定されているほとんどの対象国で、近年の炭素市場の価格上昇を反映させる形で WEO2021 と比較して 2 割以上増加しており、EU、韓国では 2 倍を超える。ただし、南アに関しては WEO2022 では STEPS の炭素価格の対象から外している。NZE では、2030 年の炭素価格は全ての地域で増加しており、2050 年のその他途上国の炭素価格は WEO2021 の値の 3 倍を超えて増加している。WEO2021 と WEO2022 で NZE は同じ排出経路にも関わらず、炭素価格が大幅に増加する結果を提示していることは留意が必要である。

表 6.2.1-2　炭素価格の想定（カッコ内は WEO2021 の値）

地域		2030	2050
STEPS	カナダ	54(36)	77(39)
	チリ	13(12)	29(20)
	中国	28(23)	53(36)
	EU	90(33)	113(43)
	韓国	42(33)	89(44)
	南アフリカ	0(15)	0(24)
NZE	先進国	140(100)	250(250)
	一部の振興国・途上国	90(75)	205(205)
	その他の途上国	25(0)	180(55)

WEO2022 のシナリオにおいて留意すべきは、WEO2021 までは STEPS が NDC と整合したシナリオと定義されていたのに対して、WEO2022 では APS が NDC と整合したシ

ナリオとあり、シナリオの定義が変わっている点である。このようなシナリオの定義変更の影響を見るべく、CO_2排出、一次エネルギー需要（TPES)、最終エネルギー消費（TFC）について、2050 年までのシナリオ別の経路について、WEO2021 と WEO2022 で比較を行った。TPES、TFC については、WEO2021 の STEPS のカーブと WEO2022 の STEPS のカーブはほぼ重なっており、2050 年における WEO2021 値に対して WEO2022 値は TPES で 0.5%、TFC で 1.2%低下しているのに対して、CO_2排出量には目に見えるギャップがあり、同様の低下率は 6%である。

WEO2022 の STEPS の CO_2排出量が WEO2021 の STEPS より 6%低いということは、2021 年時点の NDC の後に導入された政策にそれだけの排出量低減の効果（＝政策による低炭素エネルギーシフトの成果）があるということを意味している。

ここまでの WEO2022 の変化を考察すると、表 6.2.1-2 で示した STEPS の炭素価格の増加が化石燃料から非化石燃料へのシフトをより促進し、その結果として排出量が低下したことが、前述の WEO2022 の STEPS の CO_2排出量が WEO2021 比で 6%低下している要因の一つとして考えられる。

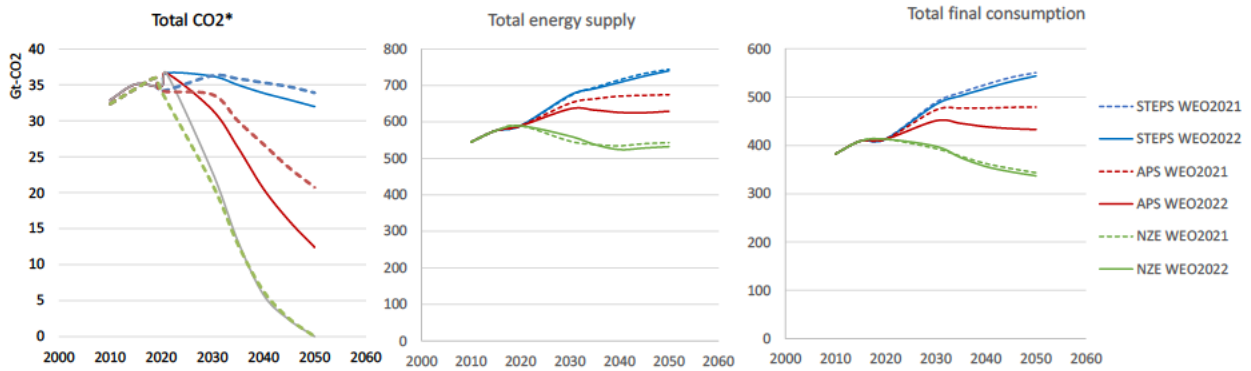


図 6.2.1-3　WEO2021 と WEO2022 のシナリオ別世界 CO_2排出量、TPES、TFC

図 6.2.1-3 の APS の CO_2排出量に注目すると、WEO2021 と比べて WEO2022 では大きく低下しており、2050 年には 40%の差となっている。この大きな変化は、WEO2022 の APS が想定している「ネット宣言国」の数が WEO2021 の想定より増加していることが主な原因と考えらえる。WEO2022 本文中には、APS の CN 宣言国にインドを始めとして、東南アジア、中東、アフリカの国を追加したとあるが、対象とする全ての CN 宣言国は明記されていない。有料のエクセルデータには、STEPS、APS のエネルギー関連データが主要な国・地域別に記載されているので、APS の主要国別の世界 CO_2排出量について、WEO2021 と WEO2022 を比較した図を図 6.2.1-4 に示す。（なお、今回も NZE に関しては世界合計のデータのみで、主要な国・地域別のデータは掲載されていなかった。）

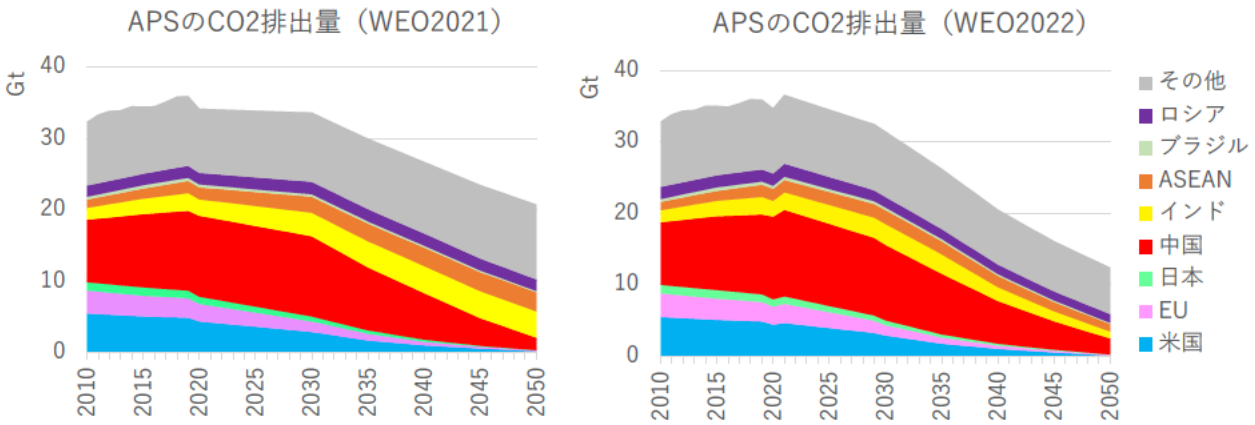


図 6.2.1-4　WEO2021 と WEO2022 の APS の主要国別世界 CO_2 排出量

インド、ASEAN、その他の排出量は、左図の WEO2021 ではむしろ 2050 年に向かって増加しているが、右図の WEO2022 では減少していることが見て取れる。2050 年の合計排出量は WEO2021 では 21Gt であったのが、WEO2022 では 12.4Gt にまで低下している。

NZE の CO_2 回収量、除去量についても WEO2021 から変化している。図 6.2.1-5 にその比較を示す通り、NZE の CO_2 回収量は WEO2021 に比較して 2030～2050 年にかけてほぼ 3 割、除去量は同ほぼ 2 割低下している。2050 年の CO_2 回収量は 8 Gt 弱と NZE 報告書で示していたが、今や 6Gt 強にまで低下している。ネットの排出量は図 6.2.1-3 の通り WEO2021 とほぼ変わらないので、回収量の低下はグロスの排出量の低下を意味している。（グロスの排出量は AnnexA に記載されていない。）

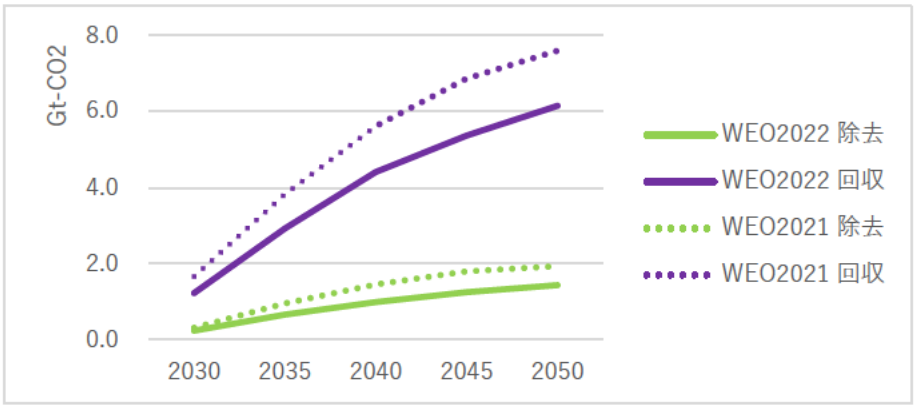


図 6.2.1-5　WEO2021 と WEO2022 の CO_2 回収量・除去量

(2) WEO2022 の一次エネルギー需要

WEO2022 の AnnexA に記載された各種エネルギー関連指標の世界合計値について、3 つのシナリオを比較分析した結果を示す。

一次エネルギー需要の比較を図 6.2.1-6 に示す。TPES では再エネが目に見えて増加するが、化石燃料（石炭、石油、ガス）の合計は 2050 年までほぼ維持される。NZE では再エネが激増する一方で、化石燃料が激減する。

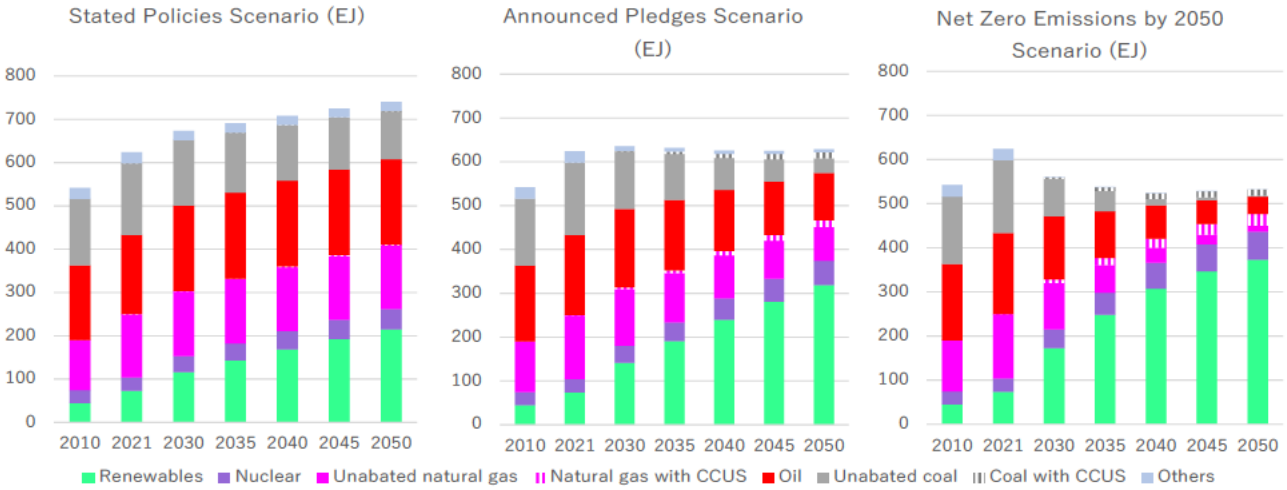


図 6.2.1-6　シナリオ別一次エネルギー需要

2050 年断面の燃料別一次エネルギー需要とその燃料構成をシナリオ比較すると以下のようである。2050 年の NZE の総需要は STEPS の 72%であり、大きな差がある。右図から、2050 年の再エネの比率は STEPS では 30%、NZE では 70%と倍以上になっている。化石燃料の比率は STEPS では 62%、NZE では 18%（うち CCUS つき 8 %）と再エネと逆の傾向になっている。

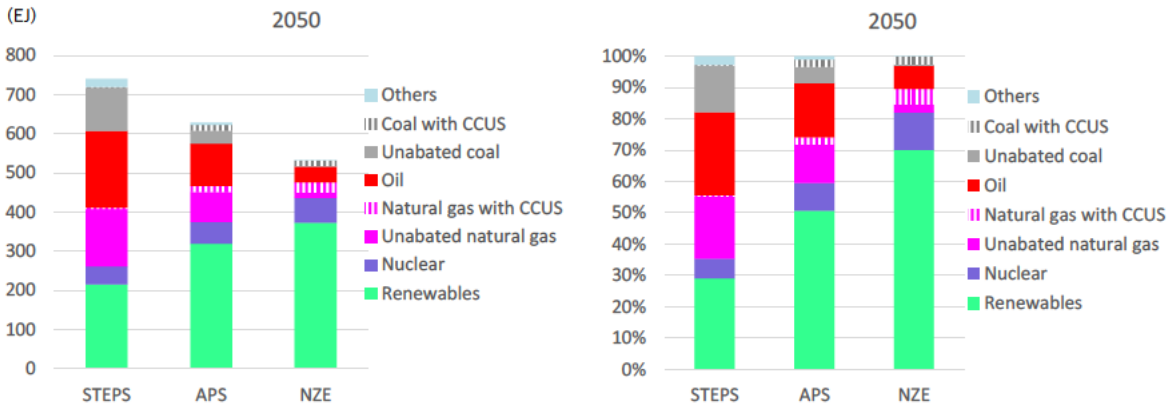


図 6.2.1-7　2050 年におけるシナリオ別一次エネルギー供給（左）と燃料構成（右）

前述の通り、WEO2021 と比較して WEO2022 では、2050 年の NZE の TPES は 2%低下しており、その差は 11EJ である。燃料別に比較すると、化石燃料が合計 25EJ 低下している一方で、再エネが 11EJ、原子力が 13EJ それぞれ増加して、ネットで 11EJ の

低下となっていることが確認された。この化石燃料の需要低下により、WEO2021 の NZE に比べて WEO2022 で CO_2 回収量、貯留量（のニーズ）が減っているのである。

主な非化石燃料と削減対策なし化石燃料についてのシナリオ別の供給量を図 6.2.1-8 に示す。

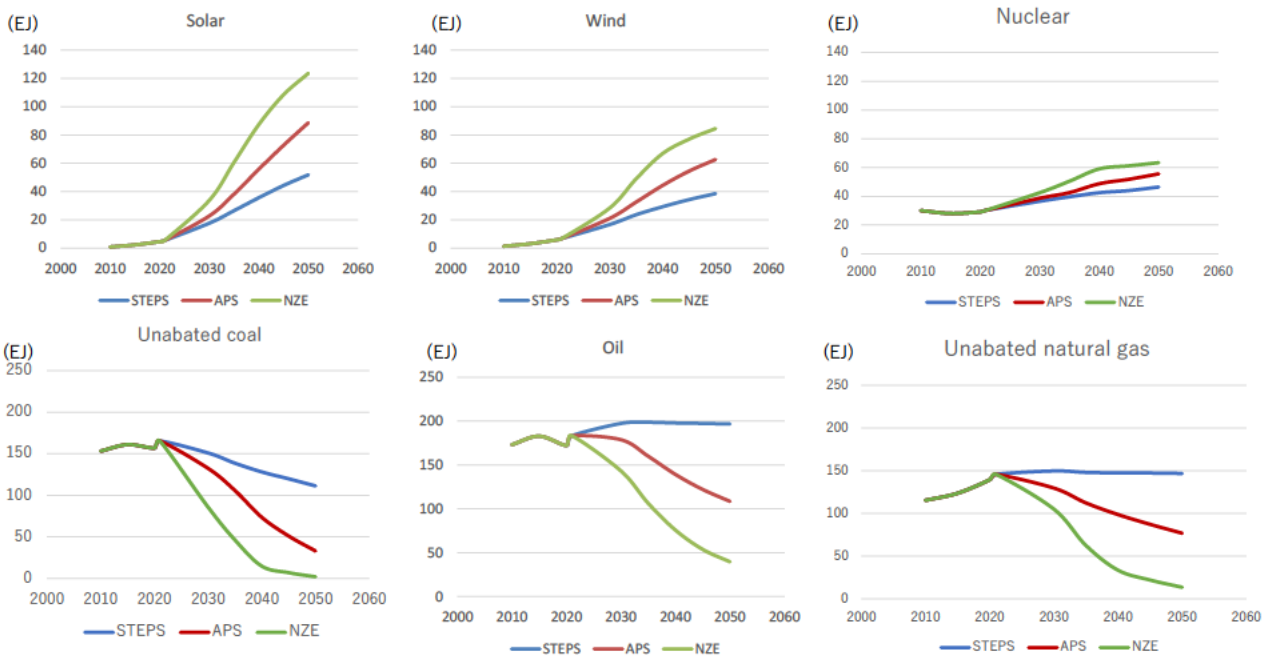


図 6.2.1-8　燃料別のシナリオ別供給量変化：上段非化石、下段化石燃料

上段の太陽光、風力、原子力については、全てのシナリオで増加しているがその増加率は原子力＜＜風力＜太陽光となっている。下段の削減対策なしの石炭、石油、ガスの比較では、石炭はいずれのシナリオでも減少していく一方で、石油とガスは STEPS では増加、その他のシナリオでは減少していく。また、NZE では削減対策なし石炭は 2040 年代にゼロに、ガスは 2050 年にほぼゼロになる一方で、石油は 2050 年にも残ることが示されている。

CCUS 付きの石炭、ガスについて見ると、図 6.2.1-9 の通りであり、CCUS つき石炭は 2040 年で頭打ちとなり 2050 年は APS と等量となる。一方ガスでは全てのシナリオで増加し続ける。

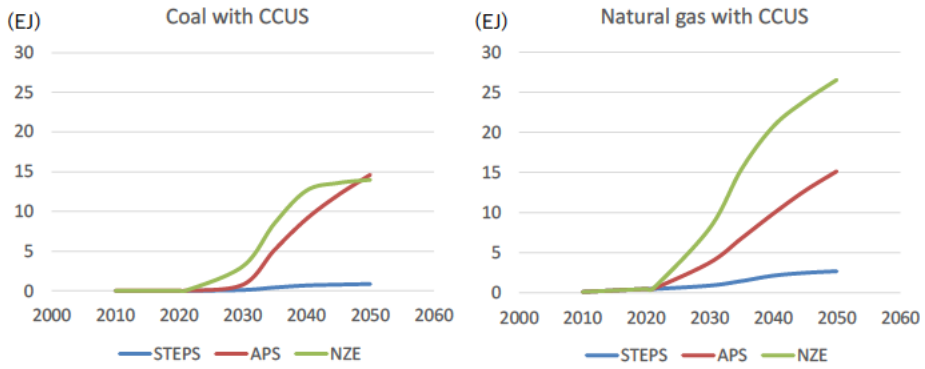


図 6.2.1-9　CCUS 付き石炭（左）とガス（右）のシナリオ別供給量変化

(3) WEO2022 の最終エネルギー消費と発電電力量

次に、WEO2022 の最終エネルギー消費を利用エネルギー別、部門別の順に、最後に主要な利用エネルギーである電気の発電電力量について見ていく。

① 利用エネルギー別最終エネルギー消費

シナリオ別の利用エネルギー別 TFC の 2010 年から 2050 年までの変化を以下に示す。STEPS では需要が増加して行くのと同じペースで電気が増加し、それ以外の燃料構成はほぼ変わらないように見えるのに比較して、NZE では 2021 年以降エネルギー需要は低下し、電気と水素は増加、化石燃料は減少していく。

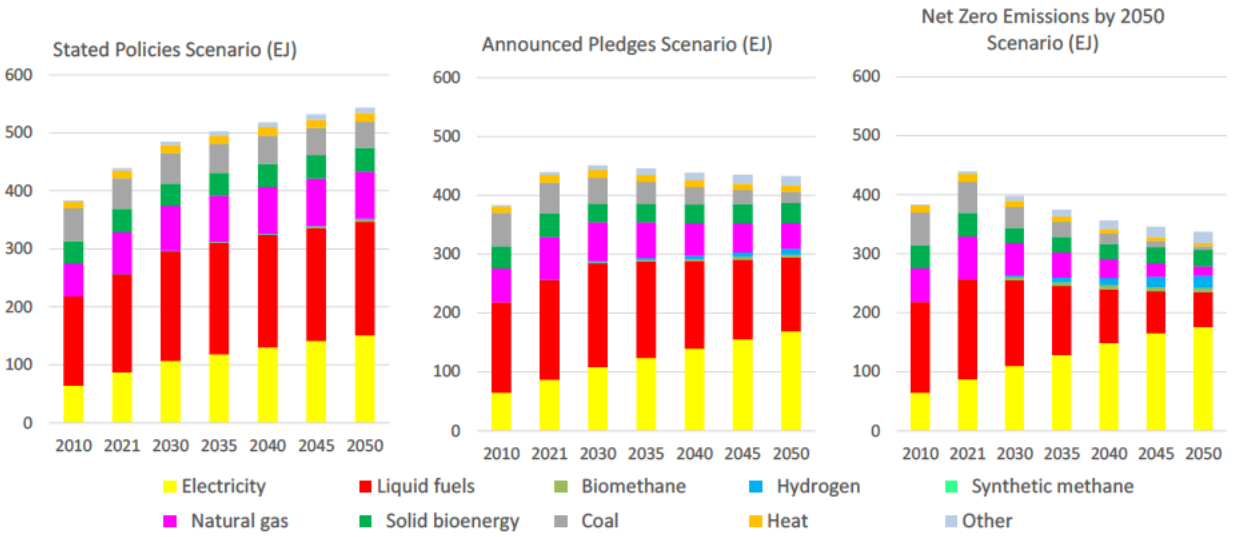


図 6.2.1-10　シナリオ別の利用エネルギー別 TFC

2050 年断面のシナリオ別 TFC の比較（左）と TFC 構成比較（右）を図 6.2.1-11 に示す。2050 年において NZE の最終エネルギー消費量は STEPS の 62%であり、一次エネルギーの同比が 70%であったのに比べると更に小さい。これは、二次エネルギー、三次エネルギーの利用量と共にエネルギー損失が増加していることに起因すると考えられる。右図の構成割合から、電気の比率は STEPS では 28%、NZE では 52%であり、

NZE では電化が進んでいる。WEO2021 の電化率 49%と比較して、更に電化が進んでいることが確認された。一方で、化石燃料の比率は STEPS では 57%、NZE では 18%と大きな差がある。

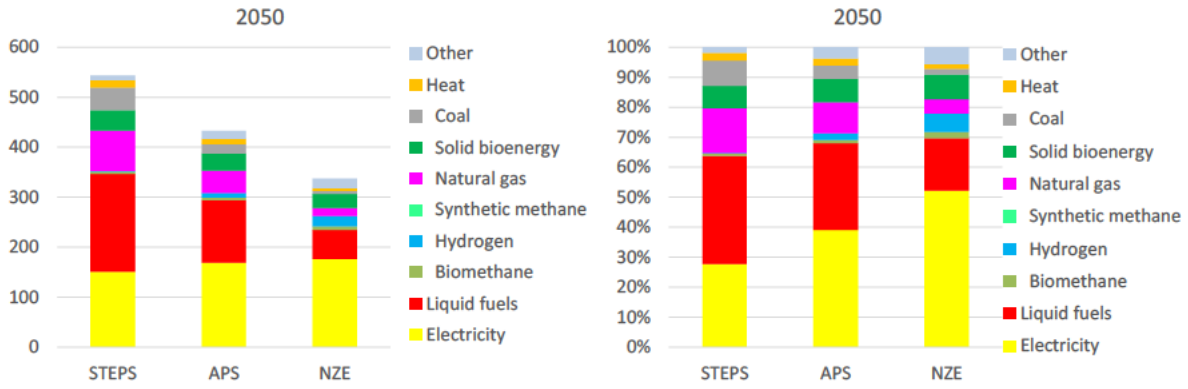


図 6.2.1-11　2050 年のシナリオ別 TFC（利用エネルギー別）とその構成

② 部門別最終エネルギー消費

シナリオ別の部門別 TFC の 2010 年から 2050 年までの変化を示す。STEPS では全ての部門でエネルギー消費が増加するが、NZE では産業は漸減、運輸と民生は目に見えて減少している。

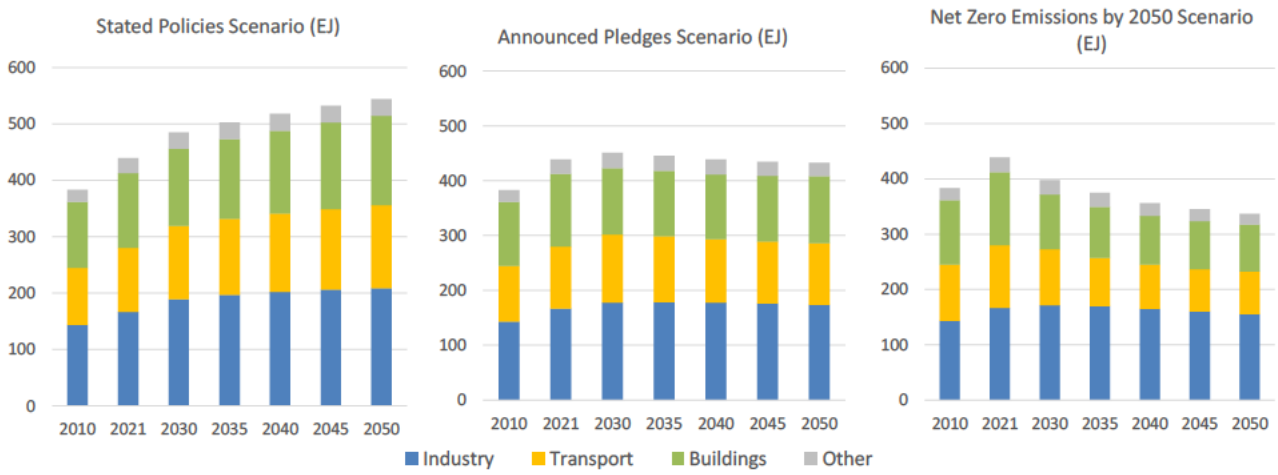


図 6.2.1-12　シナリオ別の部門別最終エネルギー消費

部門別のシナリオ別 TFC の変化を図 6.2.1-13 に示す。産業のシナリオ間ギャップが最も狭く、NZE においても連続的な変化をしている

運輸はシナリオ間ギャップが大きく、NZE は 2021～2030 年で 2010～2020 年の低下（コロナ禍の影響を含む）と同様の低下となっている。民生はシナリオ間ギャップが大きく、コロナ禍でも減少しなかったエネルギー消費が 2021～2030 年で大きく低下しており、部門中では最も厳しい急激な変化が想定されている。

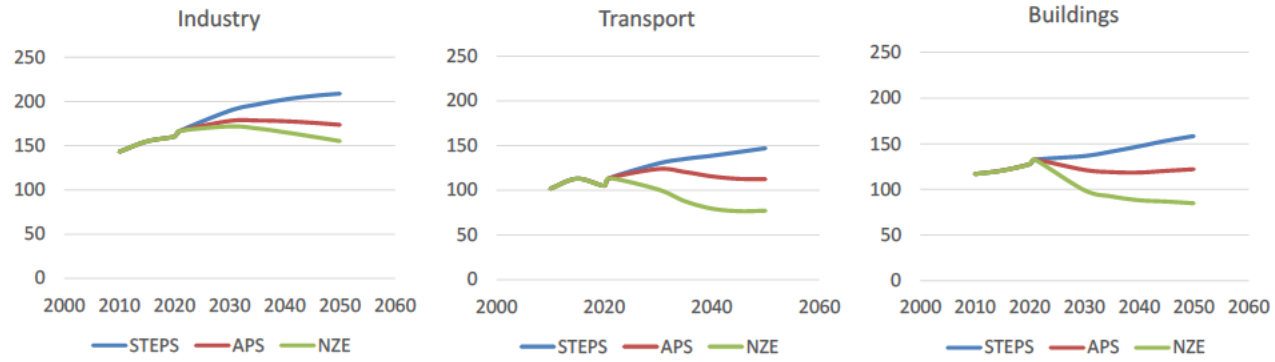


図 6.2.1-13　部門別のシナリオ別 TFC の変化

民生の NZE の TFC について、利用エネルギー別の変化を見ると、2021 年（合計 132EJ）から 2030 年にかけて、traditional biomass が 24EJ からゼロに、天然ガスが 31EJ から 17EJ に、石炭が 4EJ から 1EJ にそれぞれ低下して、電気が 41EJ から 43EJ に増加して合計 99EJ となっている。即ち、NZE の民生部門の想定は、traditional biomass を利用している貧困層が他の有価なエネルギーを利用できるようになること（貧困の緩和）、非常に急激な省エネ技術の進化、行動変容によるエネルギー節減、を前提としている、ということである。

③　発電電力量

シナリオ別の電源別発電電力量を図 6.2.1-14 に示す。AnnexA の電源区分は凡例の通りで、火力発電については燃料別ではなく「削減対策なしの化石燃料」、「CCUS 付きの化石燃料」の２つに区分されている。発電電力量は全てのシナリオで増加するが、その増加率は STEPS＜APS＜NZE である。STEPS では太陽光、風力が増加し、削減対策なしの化石燃料は漸減するが、NZE では太陽光と風力の増加は目覚ましく、削減対策なしの化石燃料は 2040 年にはゼロになっている。

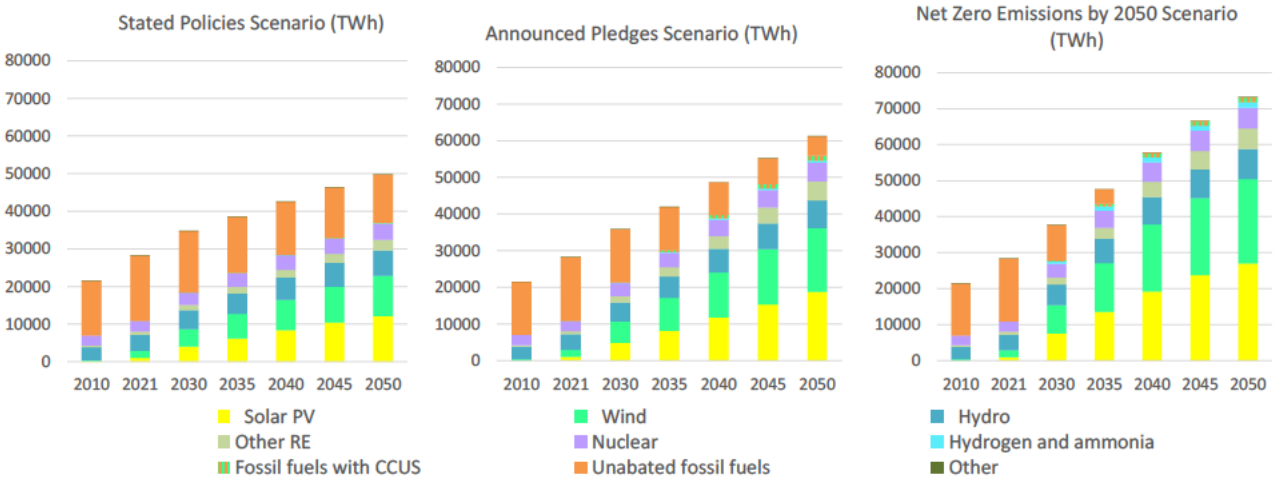


図 6.2.1-14　シナリオ別の電源別発電電力量

図 6.2.1-15 に 2050 年のシナリオ別電源別発電電力量（左）とその構成（右）を示す。発電電力量は STEPS で 2050 年に 50000TWh、NZE では 73000TWh と STEPS 比で 150%である。2050 年の太陽光＋風力比率は STEPS で 45%、NZE では 70%、再エネ比率は STEPS で 65%、NZE で 88%である。一方で、2050 年の対策なし化石燃料（火力発電）の比率は STEPS で 26%、NZE で 0.1%となっている。

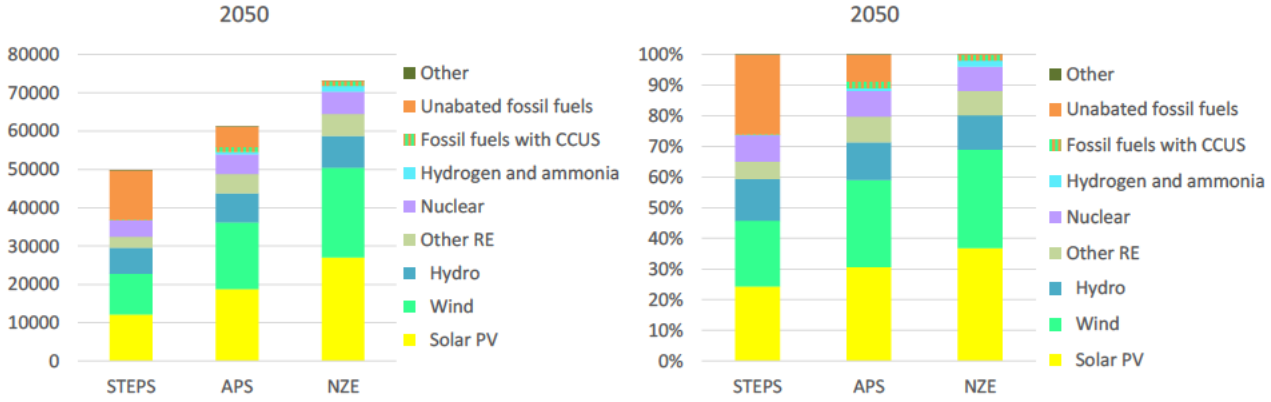


図 6.2.1-15　2050 年のシナリオ別の電源別発電電力量とその構成

AnnexA には国、地域別のシートには電力の CO_2 排出係数が示されているが、世界合計値については記載されていない。そこで、「電力・熱」部門の CO_2 排出量をほぼ電力部門からの排出量と仮定して。発電電力量から試算した排出係数を図 6.2.1-16 に示す。STEPS でも排出係数は 2050 年には 0.200kg- CO_2/kWh と大きく低下しているが、NZE では 2040 年以降の排出係数はマイナスになっている。

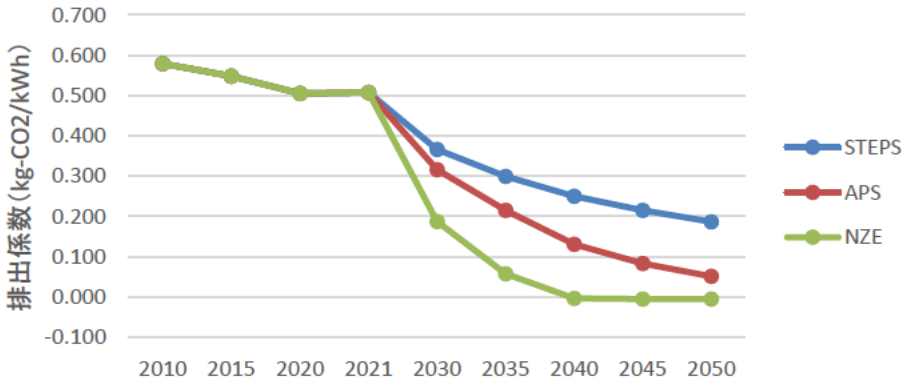


図 6.2.1-16　シナリオ別の電力排出係数の試算値

(4) WEO2022 の CO_2 排出と CO_2 回収・除去

シナリオ別の部門別 CO_2 排出量、回収量、除去量を図 6.2.1-17 に示す。STEPS ではエネルギー供給部門からの排出量は低下するが、最終消費部門からの排出量は変わらない。NZE ではエネルギー供給部門からの排出量が急減して 2040 年にはゼロになり、産業、運輸からの排出量は 2040 年以降に大きく低下する。

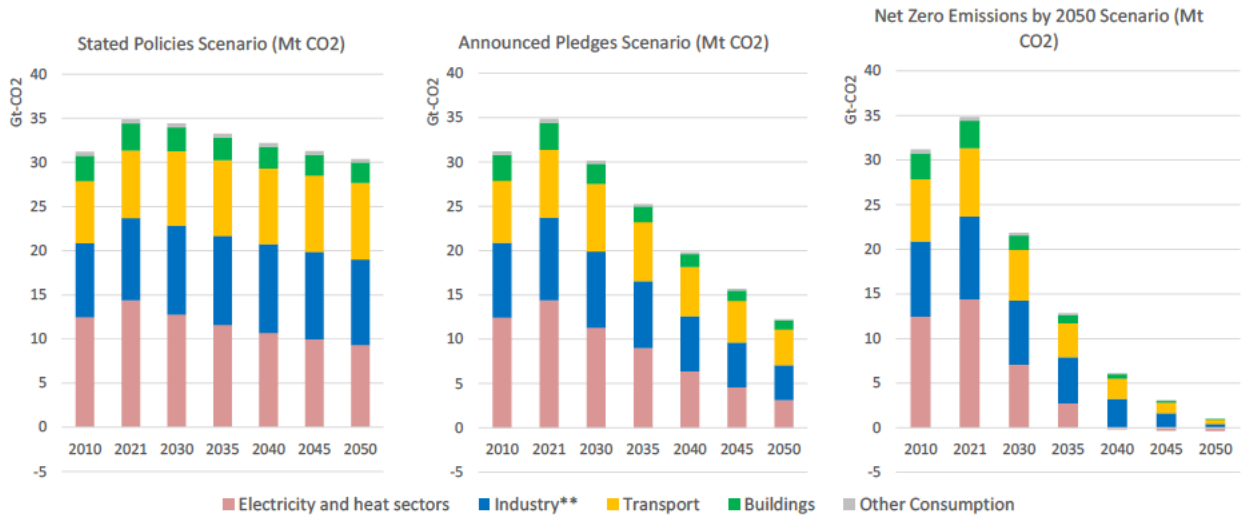


図 6.2.1-17　シナリオ別部門別 CO_2 排出量

2050 年のシナリオ別燃料別 CO_2 排出量を図 6.2.1-18 に示す。2050 年のネット CO_2 排出量は STEPS で 32Gt、APS で 12.7Gt、NZE でゼロである。2050 年の除去量は STEPS で 0.07Gt、APS で 0.9Gt、NZE で 1.4Gt となっている。2050 年の回収量は STEPS で 0.4Gt、APS で 4Gt、NZE で 6.2Gt である。

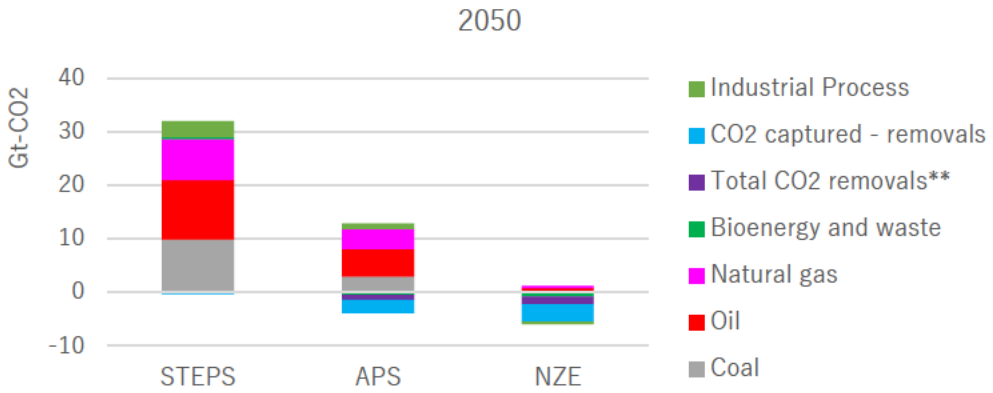


図 6.2.1-18　2050 年のシナリオ別燃料別 CO_2 排出量

以下に AnnexA に示されている CO_2 排出、回収、吸収を示すが、①Total CO_2,②Combustion activities,③Industry removals,④Total CO_2 removals,⑤Total CO_2 captured の関係が正確にはわからない。図 6.2.1-18 は、①－②=Industrial process 排出量、③は④の内数、④は⑤の内数、②及びその燃料内訳は③を反映したネット排出量、と仮定してグラフ化している。

表 6.2.1-3　AnnexA の NZE の CO_2 emissions（Table A.4c より抜粋）

	Net Zero Emissions by 2050 Scenario (Mt CO_2)						CAAGR (%) 2021 to:	
	2010	2020	2021	2030	2040	2050	2030	2050
Total CO_2*	32 893	34 779	36 639	22 846	5 799	-	-5.1	n.a.
Combustion activities (+)	30 643	31 904	33 680	20 590	5 103	510	-5.3	-13
Coal	13 855	14 335	15 106	7 578	1 140	114	-7.4	-16
Oil	10 576	10 194	10 850	7 710	3 030	722	-3.7	-8.9
Natural gas	6 067	7 162	7 520	5 282	1 391	405	-3.8	-9.6
Bioenergy and waste	146	213	204	19	- 458	- 731	-23	n.a.
Industry removals (-)	-	1	2	156	530	787	65	23
Biofuels production	-	1	1	102	308	394	71	24
Direct air capture	-	-	1	54	222	393	57	23
Total CO_2 removals**	-	1	2	240	994	1 438	71	26
Total CO_2 captured**	4	42	43	1 230	4 413	6 153	45	19

Includes emissions from industrial processes and flaring.

***Includes emissions from industrial processes.*

(5) 日本の APS と STEPS 分析

有料の AnnexA 掲載されている主要な国・地域別のデータで、日本の WEO2021 から WEO2022 にかけての変化を TPES および TFC で確認したところ、WEO2022 では双方とも低下していることが確認された。

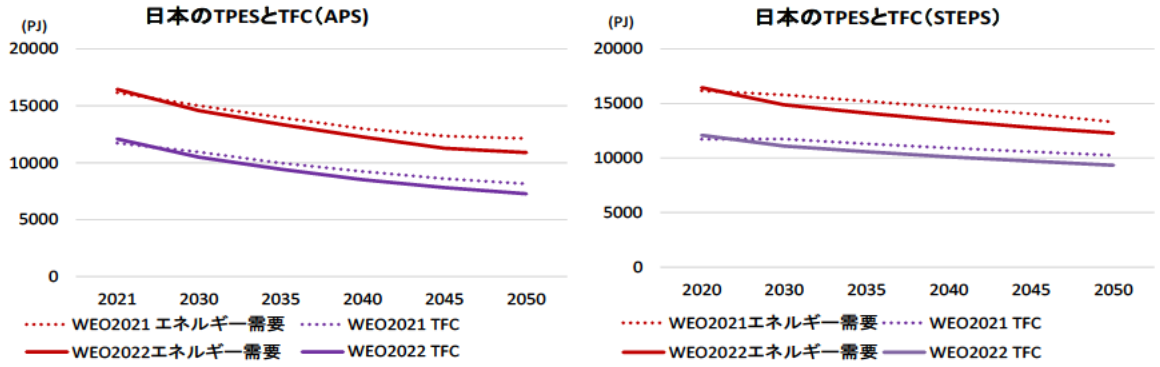


図 6.2.1-19　日本の TPES、TFC の WEO2021 と WEO2022 の比較

そこで、他のエネルギー関連指標についても変化を測定したところ、最も大きな変化が確認されたのは CO_2 回収量、除去量であった。2050 年における CO_2 回収量は WEO2021 の 2.4 億トンから WEO2022 では 1.65 億トンへと（率にして 30%）低下している。除去量は WEO2021 の 8500 万トンから 3900 万トンへと（率にして 55%）低下している。これは、NZE の世界の CO_2 回収量（率にして 19%低下）、除去量（率にして 26%低下）という WEO2021 からの低下傾向と比較しても大きな低下率である。

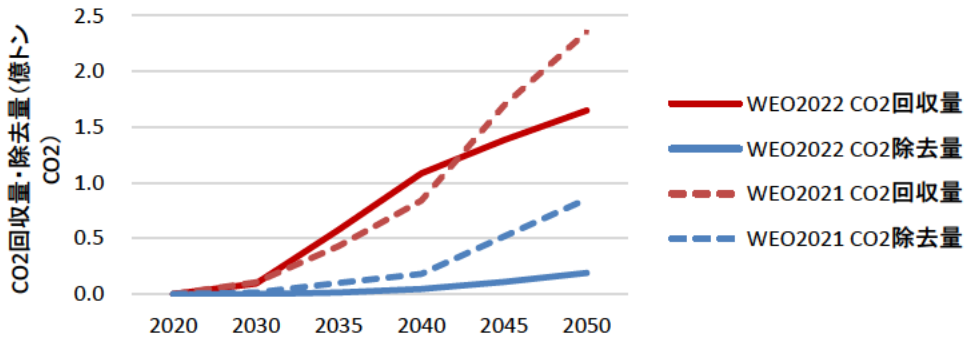


図 6.2.1-20　WEO2021 と WEO2022 の日本の APS の CO_2 回収量・除去量

この変化の背景には日本が 2022 年 5 月に CCS 長期ロードマップ（中間とりまとめ）を示したことが関係している可能性がある。同ロードマップでは 2050 年の CCS 貯留量を 1.2～2.4 億トンとしており、IEA は WEO2022 ではこのロードマップを尊重して上限値にあたる 2.4 億トンからほぼ中間値（やや低めではあるが）の 1.65 億トンに変更した、という見方もできる。

なお、WEO2022 の本文中（第 3 書の SPOTLIGHT）では、IPCC の第 6 次評価報告書が扱った同様（2050 年にエネルギー部門の CO_2 排出をネットゼロとする）のシナリオ 16 本と比較しており、CCUS 利用量については IPCC シナリオの中央値が 17Gt であるのに対して NZE では 6.2Gt であることを示している。IEA としては CCUS 利用を制限したいという意向が伺え、それが WEO2022APS の CO_2 回収量、除去量が WEO2021 から低下した、という可能性も考えられる。

日本の STEPS、APS における燃料別一次エネルギー需要の変化を図 6.2.1-21 に示す。双方のシナリオにおいて 2030 年は第 6 次エネルギー基本計画と整合していることを確認した。2050 年にかけても双方のシナリオにおいて需要量は低下していくが、APS の低下量がより大きい。石炭、石油、ガスについては、STEPS では 2030 年以降は漸減であるのに対して、APS では早いペースで減少し続ける。

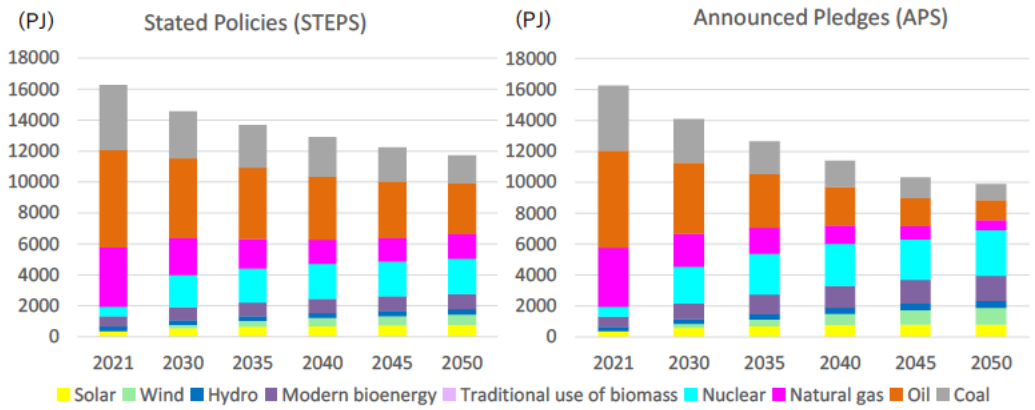


図 6.2.1-21　日本のシナリオ別燃料別 TPES

次に、STEPS および APS の部門別の最終エネルギー消費を図 6.2.1-22 に示す。

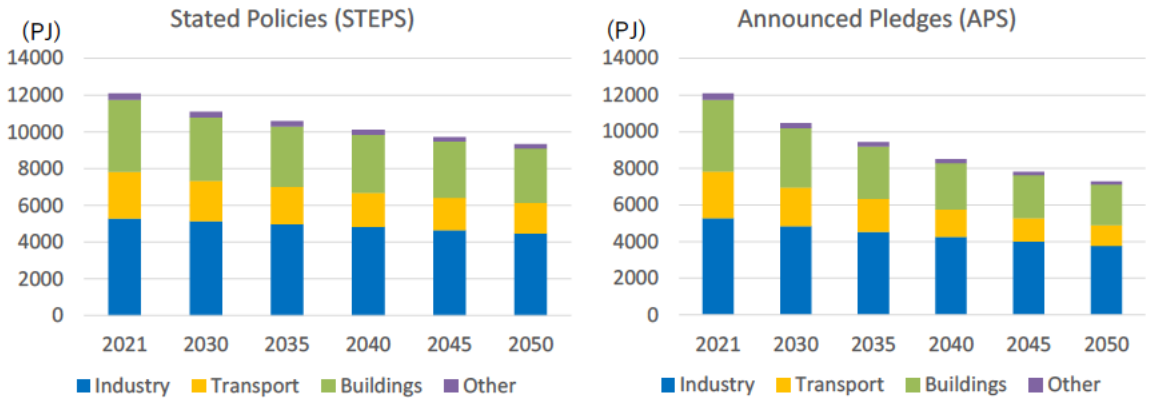


図 6.2.1-22 日本の STEPS と APS の部門別 TFC

双方のシナリオでエネルギー消費量は低下しているが、APS ではより低下量が大きい。全ての部門で STEPS より APS のエネルギー消費量がより大きく低下しているが、産業部門では 2050 年の APS／STEPS は 85%であるのに対して、運輸では同 75%、民生では 68%と、APS におけるエネルギー消費の圧縮割合が大きい。産業部門の省エネルギーの難しさを示しているとも考えられる。

日本の STEPS と APS における電源構成の変化を図 6.2.1-23 に示す。STEPS では化石燃料が減少していくが 2050 年にも 15%以上残るのに対して、APS では 2050 年にはゼロになっている。APS では火力発電を置き換える形で「CCUS 付き化石燃料」と水素・アンモニアが増加している。STEPS と APS で太陽光＋風力は共に 41%であるが、その構成が STEPS では太陽光が多いのに対して APS では風力が多い。

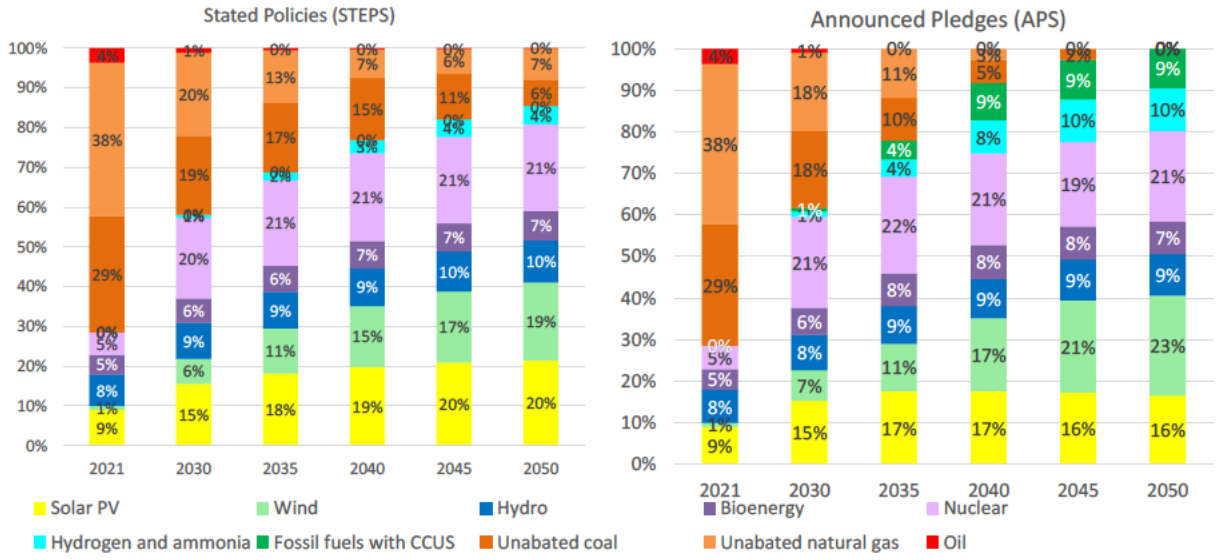


図 6.2.1-23 日本の STEPS と APS の電源構成変化

図 6.2.1-24 に APS の 2050 年における日本、EU、米国の電源構成を示す。APS では、図 6.2.1-4 に示したように日本、EU、米国は 2050 年にカーボンニュートラルを達成しており、この 3 つの国・地域の 2050 年の電力 CO_2 排出係数（右軸）はいずれもマイナスである。

カーボンマイナスを達成している 3 つの国・地域の発電電力量の電源構成比較からは、日本には以下のような特徴があることが読み取れる。

- 太陽光＋風力の割合が 40%で、EU、米国の同割合 70%と比べて少ない
- 原子力の割合が 21%で、EU、米国の 12%に比べて大きい
- 水素・アンモニアの割合が 10%、CCUS つき火力が 9%で、EU（合計で 2%）、米国（同 4%）と比べて大きい

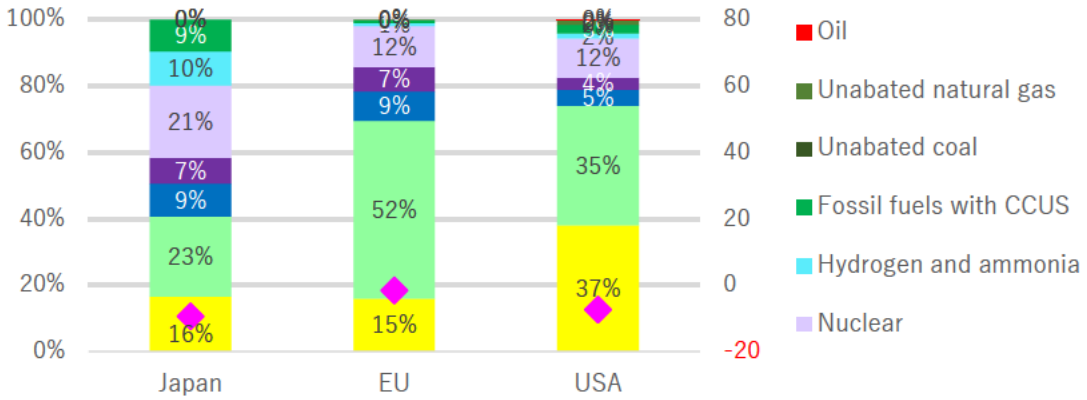


図 6.2.1-24　2050 年 APS の日本、EU、米国の電源構成

(6) インドの APS 分析

図 6.2.1-4 で示した通り、WEO2022 では APS にインドがカーボンニュートラル国の対象となったことが APS 全体に大きな影響を与えていることが示唆されている。同国の APS がどのように想定されているのか、有料の AnnexA で確認した。以下は、インドの部門別 TFC について STEPS と APS を比較したものである。いずれも APS では STEPS より低いが、民生部門では 2030 年に向けて大きくエネルギー消費が減っている。世界最大の人口が今後も増加し、GDP も増加、そして冷房需要増加は必然のインドにおいて、これは何故なのか詳細を確認した。

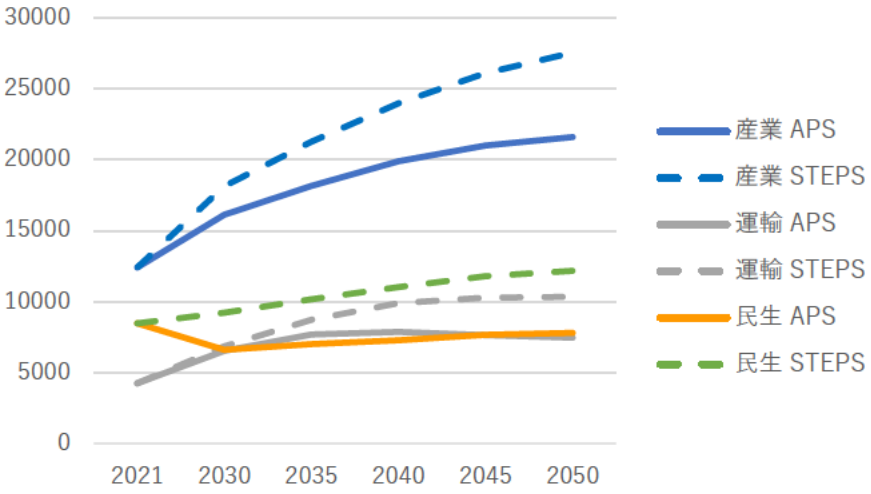


図 6.2.1-25 インドの STEPS と APS の TPES と TFC

民生の APS の TFC の内訳(利用エネルギー別)を図 6.2.1-26 に示す。これによれば、現状半分を占める「その他固形燃料」が 2021 年から 2030 年にかけて大幅に減ることで TFC 合計が低下している。2030 年までに traditional biomass 利用がゼロとなる NZE 同様に、APS でも大幅な traditional biomass の削減が想定されていることを示している。同時期に電気、液体燃料が増加しているが、STEPS と同等であることから「最大限の省エネ」と「最高効率の電気・灯油による非効率な traditional biomass 代替」を想定していると考えられる。ただし、traditional biomass は地方の貧困地域で利用されていることから、インドがあと 7 年で地方の貧困をほぼ全て解決することが条件となる。

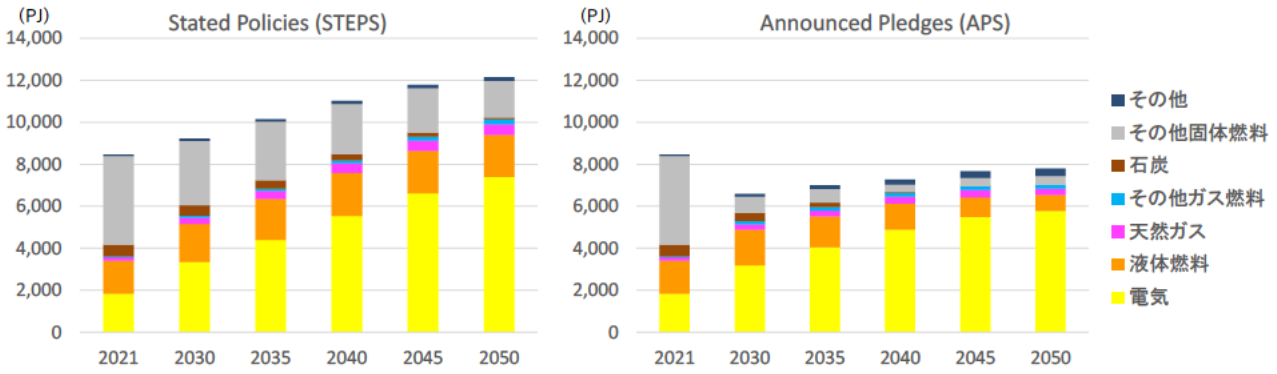


図 6.2.1-26 インドの民生部門の STEPS と APS の TFC（利用エネルギー別）

現状 73%の電力を供給している石炭火力は STEPS では 2040 年以降漸減して 2050 年には現状比で 25%減、APS では 2040 年以降急減して 2050 年には現状比で 85%減少する。太陽光は STEPS では 2050 年に 2000TWh に増加(現状の 30 倍)、APS では 3000TWh に増加（現状の 40 倍）となっており、発電部門でもインドの APS は大幅な変化を想定されていることが確認された。

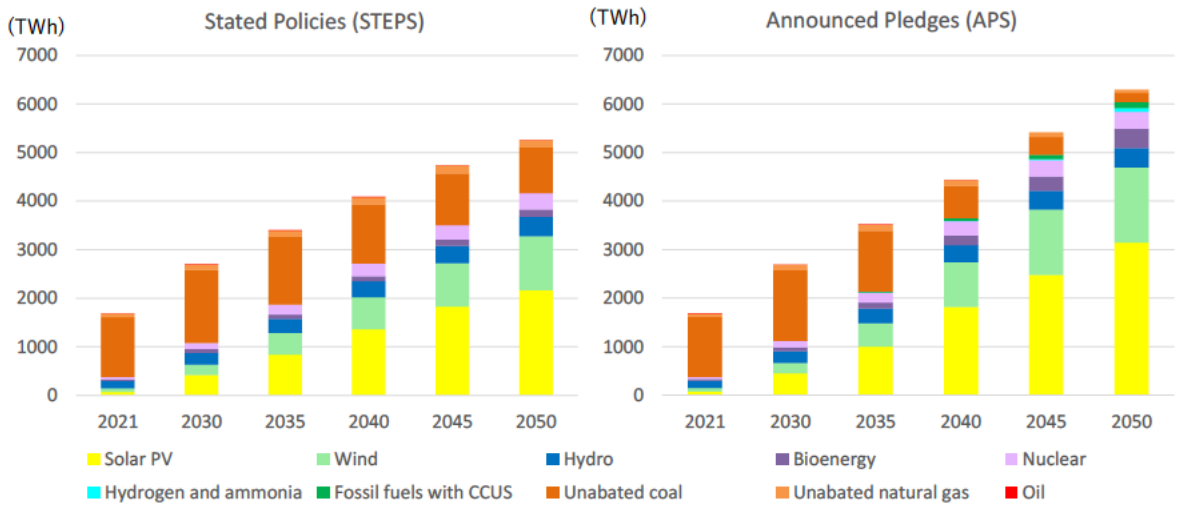


図 6.2.1-27 インドの STEPS と APS の発電電力量

図 6.2.1-28 の APS では電力部門も最終消費部門も大きく CO_2 排出が低下、STEPS 比で 2.3 億トン（70%減）APS では 2050 年には 5 億トンの CO_2 回収・貯留を行っている。STEPS でも 2045 年から CO_2 排出量は低下、電力の排出低下による。

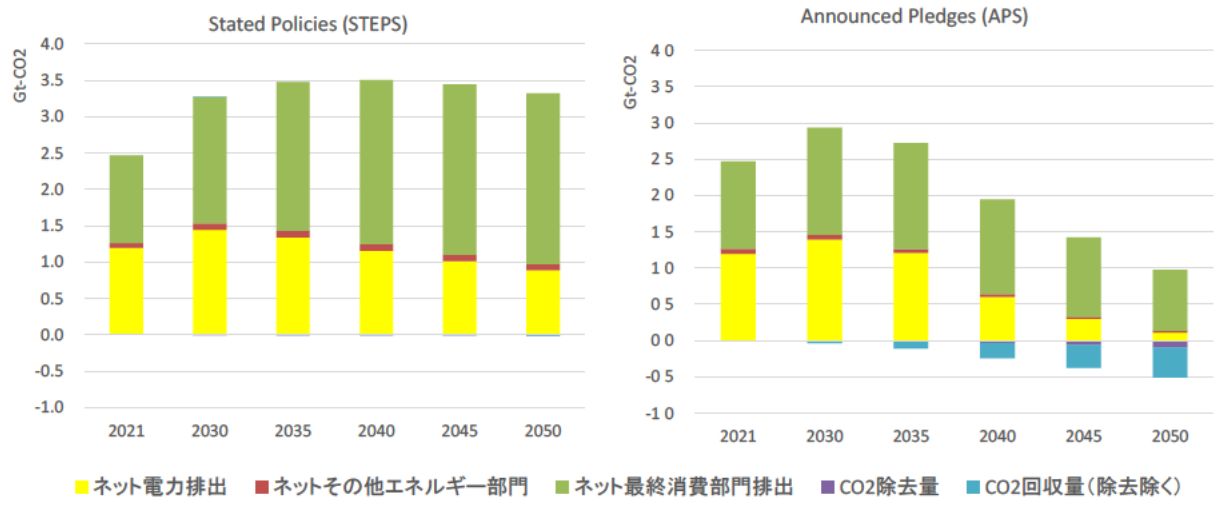
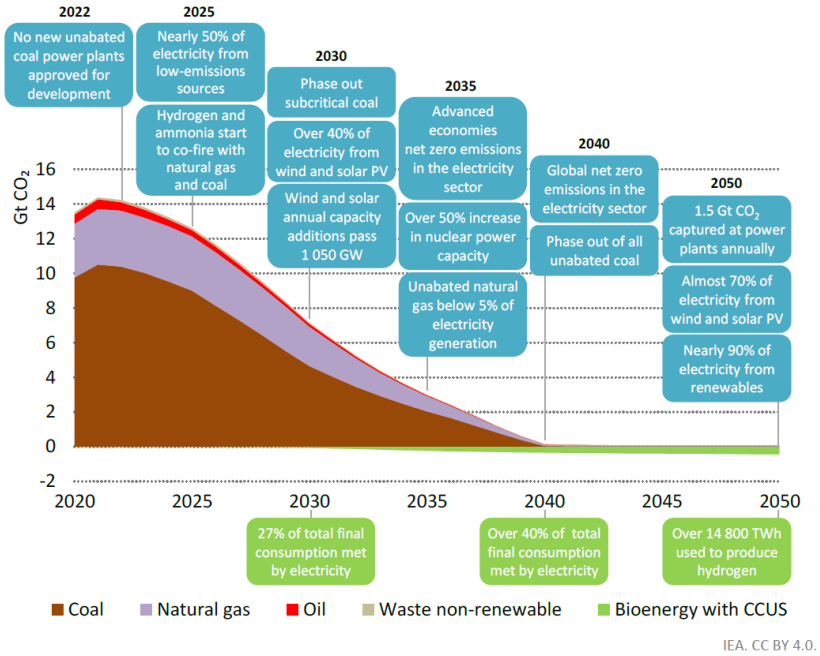


図 6.2.1-28 インドの STEPS と APS の CO_2 排出、回収、貯留

(7) WEO2022 のメッセージ

ここまで、AnnexA のデータ分析から WEO2022 のシナリオの概要を示してきたのは、WEO2022 本体にはこのような定量的な分析の記載が少なく、ナラティブなメッセージの記載がメインだからである。そのような WEO2022 のメッセージ性のあるものをいくつか抜粋する。図 6.2.1-29 は、「NZE の電力部門における燃料別の排出と主要なマイルストーン」として示されている図である。

Figure 3.9 ▷ CO_2 emissions by source and key milestones in the electricity sector in the NZE Scenario, 2020 to 2050



IEA. CC BY 4.0.

Electricity is the first sector to reach net zero emissions in 2040, tapping a wide set of low-emissions sources and enabling other sectors to cut emissions through electrification

図 6.2.1-29　NZE の電力部門における燃料別の排出と主要なマイルストーン

この図 6.2.1-29 に示されている 2022 年のマイルストーンに「削減対策なしの石炭火力の新設認可を世界中で禁止」と書かれている。これは G7 の声明には記載されたが、G20 では合意できなかった文言であり、既に NZE 達成のマイルストーン達成に失敗していることになる。恐らく IEA は WEO2022 発刊時の 2022 年 10 月時点では、G20 または COP28 で合意できると想定して記載したのではないか。

図 6.2.1-30 は、NZE における 2030 年のクリーンエネルギー投資とその資金源を示した図である。

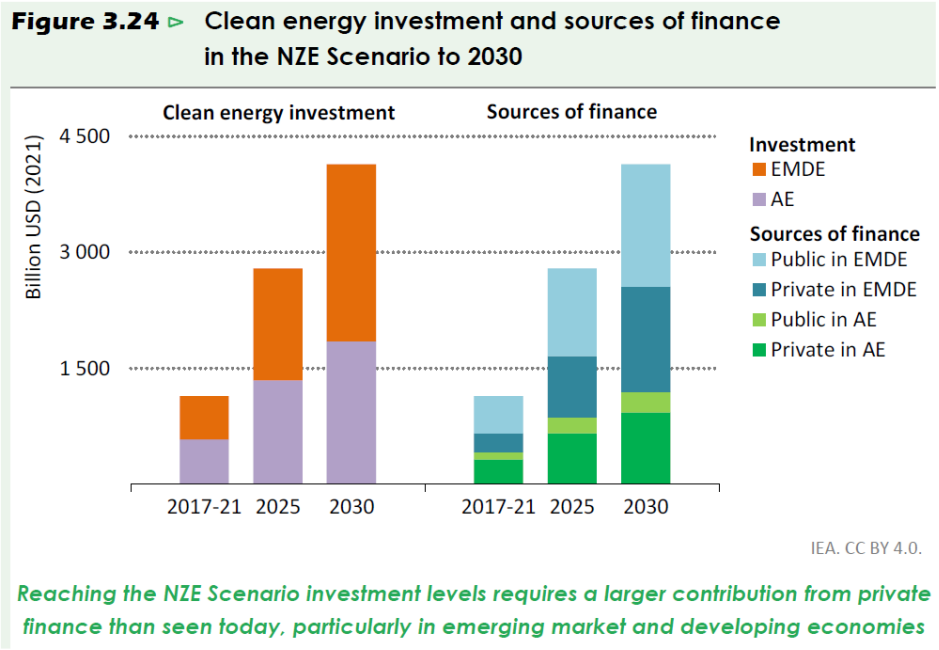


図 6.2.1-30　NZE の 2030 年のクリーンエネルギー投資とその資金源

左図は NZE に必要な投資の半分以上は新興国・途上国に対する投資であるとしている。右図は、その資金の 2/3 以上を供給するのは途上国と想定、最も多いのは新興国・途上国の公的資金、次いで新興国・途上国の民間資金としており、先進国の公的資金は非常に少ない。この図の示す資金の出し手の配分に関して、どのように決めているのかという説明は記載されていない。COP では常に CBDR 原則を根拠として常に先進国からの支援を要求している新興国・途上国には「途上国がメインの資金供給」という NZE の想定（計算結果だとしても）は受け入れ難いとも考えられ、根拠や計算方法の明示が望まれる。

以下の図 6.2.1-31 は「エネルギー集約産業の工場の立地は、従来は、消費者への近さ、原材料や労働力へのアクセス、税金やその他の金銭的インセンティブなどが重視されていた」として、その現状を「現状のエネルギー集約産業の系統電力の排出係数、太陽光ポテンシャル、CO_2 貯留地への近さ別の分布」というタイトルで示している。

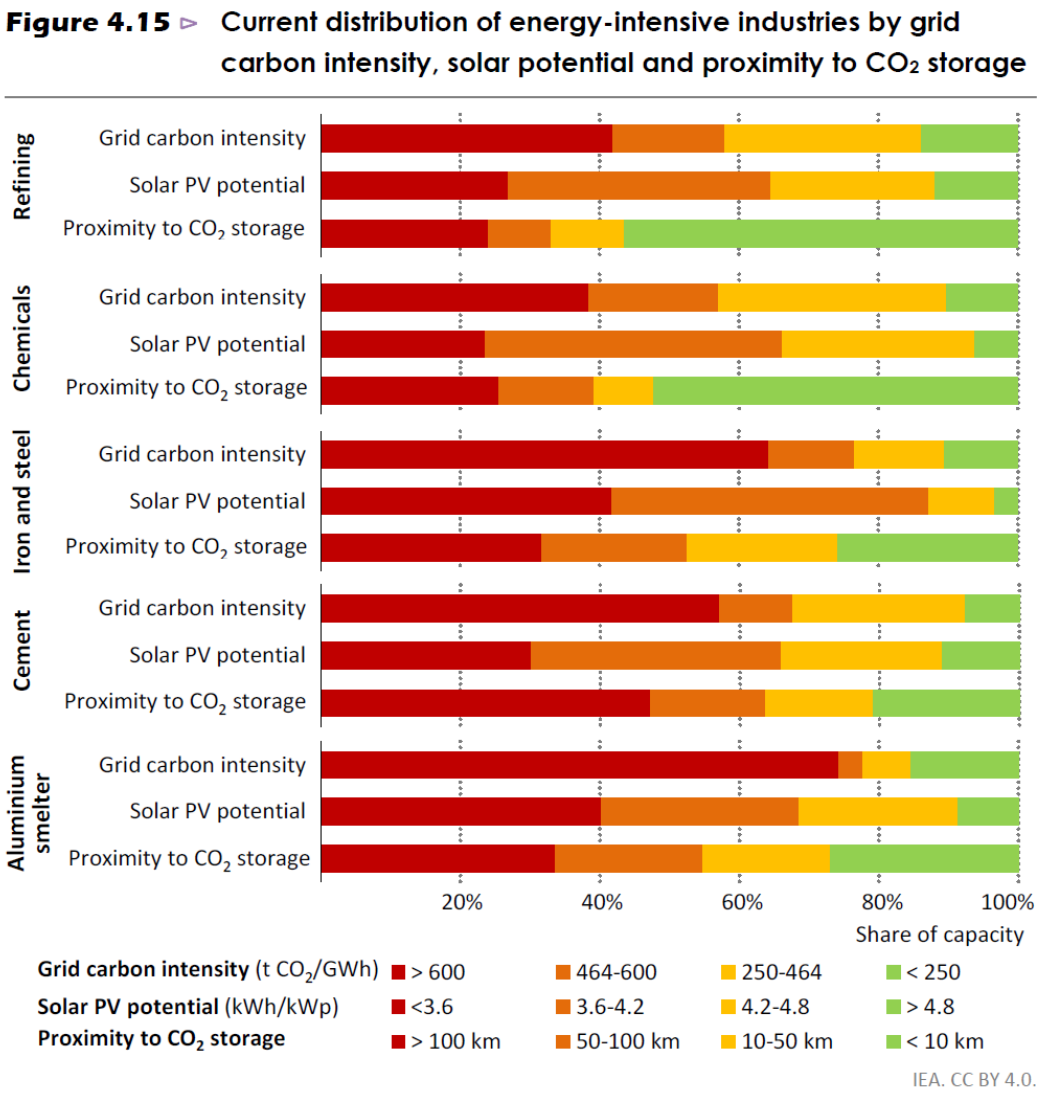


図 6.2.1-31 現状のエネルギー集約産業の系統電力の排出係数、太陽光ポテンシャル、CO_2 貯留地への近さ別の分布

IEA は「クリーンエネルギーに移行する世界では、新たな立地の基準として、低排出電力へのアクセス、再生可能資源を利用する範囲、CO_2 貯留サイトへの近さなどが重要」、「エネルギー集約型産業への将来の投資は、特に優れたクリーンな（排出係数が低い＆太陽光がメインの）電力と CCUS の可能性を備えた地域に有利に働く可能性が高い」、と記載している。図 6.2.1-31 に示された現状の立地地点から排出係数や CCUS を考慮して設備を移転するためにはそれを正当化する事業環境、即ち、世界共通の CBAM のような制度が必要である。WEO2022 には書かれていないが、NZE ではそのような制度を前提としている、ということを示唆している。

図 6.2.1-32 は、「IPCC AR6 シナリオの下で温度上昇に晒される発電設備出力の割合」という図である。

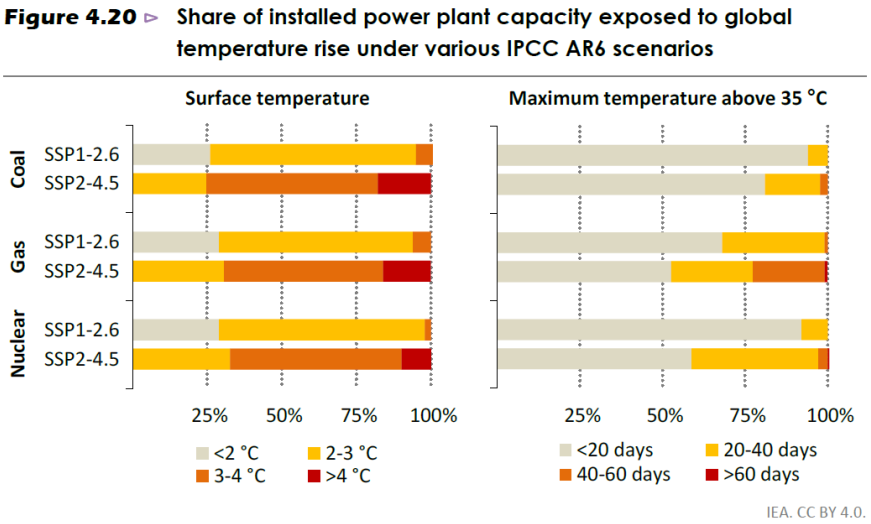
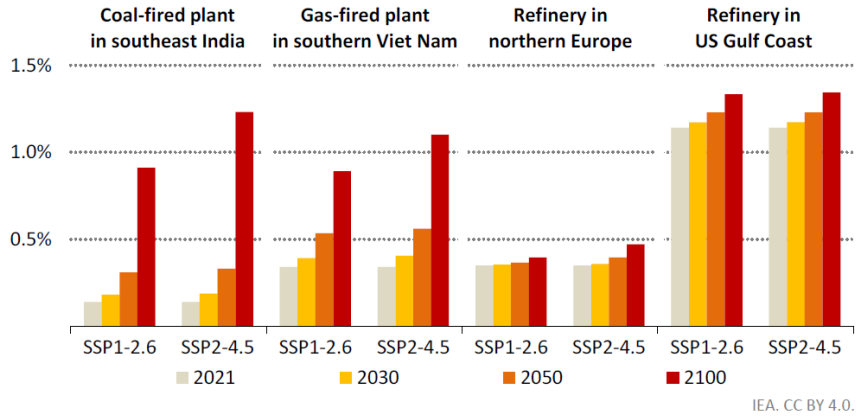


図 6.2.1-32　IPCC AR6 シナリオの下で温度上昇に晒される発電設備出力の割合

WEO2022 本文ではこの図に関して、「米国、フランス、ドイツなどの国では、水温が一定値を超えた場合、火力発電を削減する必要がある」、「米国では、2000 年から 2015 年までの石炭火力発電所での電力削減に関連する 18 件の事故のうち 13 件が、冷却目的で必要な水温に関連」、「より大きな長期的気温上昇につながる IPCC シナリオでは、これらのしきい値を超える温度レベルにさらされる火力発電所の数は、より低い気温上昇のシナリオよりも大幅に多くなる(IPCC,2021)」と記載している。

冷却水を河川取水している火力発電所、原子力発電所では、水温上昇は効率低下、即ち出力低下に繋がるが、海水取水の場合は影響をほとんど受けないが、そのような影響とリスクの違いは説明していない。立地地域による違いを説明しないまま、大規模の火力発電所、原子力発電所は気温が上がると電力安定供給の役に立たなくなる、そのリスクを避けるためにも火力発電は早期に廃止すべきということをこの図は示そうとしているように見えるがそれは適切なのか、そもそも IPCC のシナリオを引用することが適切なのか、疑問が残る。

Figure 4.21 ▹ Annual average loss of asset value from flooding at four indicative energy supply infrastructure sites based on two IPCC scenarios



The average annual financial impact of floods could amount to 0.3-1.2% of total asset value by 2050

図 6.2.1-33 IPCC シナリオに基づく 4 つの地域に立地するエネルギー供給インフラの洪水による年間損失

図注：年平均損害額は、規模の異なるハザード事象の発生確率を含め、その程度や頻度の変化を考慮した年当たりの期待損害額の平均値。毎年、100 年ごとに発生する洪水などの大規模なハザードイベントは、年間平均よりもはるかに大きな損失を引き起こす可能性がある。この例示的な分析の目的で、過去のデータに基づいて、少なくともある程度の洪水リスクがある異なる場所にある 4 種類の設備が選択された。予測される洪水データは、IPCC シナリオに基づいている SSP1-2.6 および SSP2-4.5 は、異なる気温の結果を表わす(SSP1:2.6-2℃、SSP2:4.5-3℃)。

図 6.2.1-33 は「IPCC シナリオに基づく 4 つの地域に立地するエネルギー供給インフラの洪水による年間損失」を表す。インド南東部の石炭火力、ベトナム南部のガス火力、北欧の製油所、米国湾岸の製油所、について SSP1-2.6（2100 年の温度上昇 2.6℃）、SSP2-4.5（2100 年の温度上昇 4.5℃）における資産価値の平均損失を示している。図からは、SSP1-2.6 と SSP2-4.5 の差は 2100 年のインドとベトナムで僅かに認められる程度であるが、本文中では「気候リスクは、発電所や製油所などの資産に損害を与え、通常の事業運営を中断させることにより、資産の価値を損ない、ひいては企業のバランスシートに悪影響を及ぼす可能性がある」と記載している。このグラフからそのような結論ができるのか、疑問が残る。

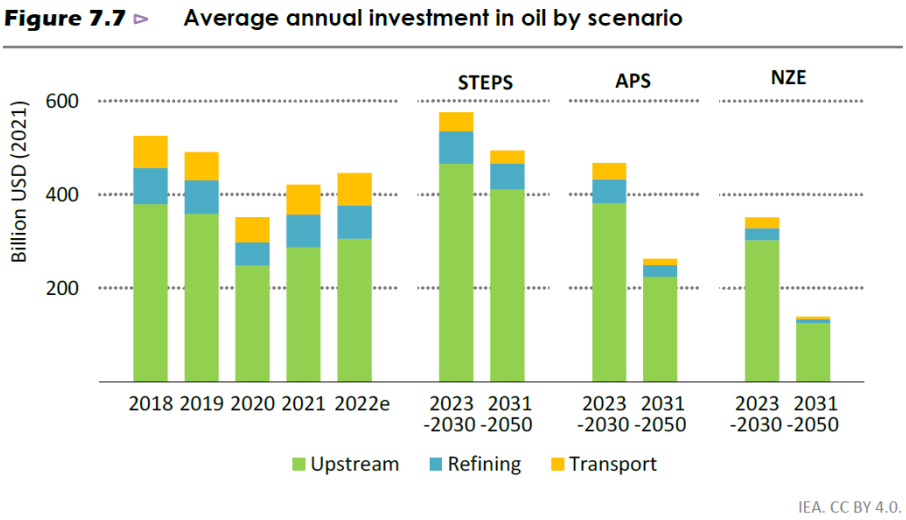


図 6.2.1-34　シナリオ別の石油への年間平均投資額

IEA は 2021 年、NZE 報告書に「NZE シナリオは新規の石油・ガスの上流投資は不要」と記載して、「不要に投資を萎縮させるものだ」と各国の経済紙から批判を浴びた。しかし、WEO2022 でもまた同様のグラフを掲載して同じことを記載している。

(8) エネルギーセキュリティーと WEO2022

ロシアのウクライナ侵攻の影響によりエネルギーセキュリティーが脅かされているという記述が各所に見られ、第 4 章「エネルギートランジションにおけるエネルギーセキュリティー」で特集するなど、エネルギー安全保障に焦点を当てているような印象を受ける。

第 4 章冒頭の「安全なエネルギー移行のための 10 の要素」の翻訳を以下に示す。

4.1　さまざまなクリーンエネルギー技術の拡大と化石燃料の縮小を同期させよ

リードタイムの長い化石燃料の新たな供給に代えて、クリーンエネルギーへの投資を増やすことで、排出量を削減しながら、今日のエネルギー危機に対するより永続的な解決策を提供できる。化石燃料への投資の削減は、燃料価格の急激な上昇を避けるために慎重に行う必要がある。

4.2　需要サイドに取り組み、エネルギー効率を優先せよ

省エネルギーは、雇用と成長を支えながら、燃料輸入への依存を減らし、気候目標に向けた前進を促進し、消費者への圧力と、高く不安定な燃料価格に対する脆弱性を緩和し、複数の政策目標にとって不可欠なツールである。

4.3　エネルギー貧困への転落を逆転させ、貧しいコミュニティを新しいエネルギー経済へと導け

エネルギー価格の高騰の結果、何百万人もの人々が、基本的なエネルギーサービスを購入できなくなり、最も基本的な形のエネルギー安全保障を失う危険にさらされている。対象を絞った政策支援は、恵まれない脆弱なコミュニティが手頃な価格で安全で持続可能な最新エネルギーへのアクセスを改善するために不可欠である。

4.4　新興市場国および発展途上国の資本コストを引き下げるために協力せよ

高い資本コストは、多くの新興国および発展途上国でクリーンエネルギーインフラを導入する際の大きな障害となっている。経済全体およびセクター固有のリスクを軽減することは、タイムリーで費用対効果の高い投資を実現するために不可欠である。

4.5　既存のインフラの一部はネットゼロ排出への確実な道のりに不可欠、その廃止と再利用を慎重に管理せよ

既存の化石燃料インフラの予定外の、無秩序な、または時期尚早の廃止は、エネルギー安全保障だけでなく人々にも悪影響を与える可能性がある。移行中は新旧のシステムが共存し、それらの相互作用を効果的に管理することが不可欠である。

4.6　生産国経済が直面する特定のリスクに取り組め

化石燃料の収入に大きく依存している国は、新しいエネルギー経済への移行に失敗した場合、エネルギー安全保障と排出量に大きな影響を与える可能性があり、エネルギー移行における特定の課題と潜在的な緊張に直面している。

4.7　柔軟性に投資せよ―電力セキュリティの新しい合言葉

現代の経済は電力に依存しており、需要と供給の両方でより高い変動性を特徴とするシステムの信頼性と柔軟性を確保するための対策と、新しいサイバーセキュリティの脅威に対する回復力を確保するための措置の重要性が増している。

4.8　多様で回復力のあるクリーンエネルギーサプライチェーンを確保せよ

高く不安定な重要な材料の価格、クリーンエネルギーのサプライチェーンの極度の集中により、エネルギーの移行が遅れ、コストが高くなる可能性がある。供給の多様化と需要側のイノベーションを促進する政策が不可欠である。

4.9　エネルギーインフラの気候レジリエンスを促進せよ

極端な気象現象の頻度と激しさの増大は、エネルギーインフラと供給に重大なリスクをもたらすため、政府はシステムが悪影響を予測、吸収、適応、回復する能力を確保するために行動する必要がある。

4.10　戦略的な方向性を示し、市場の失敗に対処するが、市場を解体しない

政府は安全なエネルギー移行を確実にするための主導が必要であるが、汚染のコストを反映する機能的な市場と市場メカニズムにより、民間資本の導入と効率的な配分が行われ、多いに役立つ。

これを読むと、エネルギーセキュリティーは重要であるが、2050 年ネットゼロの目標は変わらない、ということを強調しており、IEA の優先順位は NZE 達成であることが伺える。

(9) WEO2022 の特徴

WEO2022 の特徴を箇条書きにまとめると、以下のようになる。

- シナリオから SDS が完全消滅している
- 従来は STEPS が「NDC と整合したシナリオ」であったのが、WEO2022 では「米国 IRA など現行政策を反映したシナリオ」に、APS が「NDC と整合したシナリオ」に変化した
- 炭素価格が WEO2021 比で STEPS は全般で値上がり、NZE は「その他新興国・途上国」の 2050 年の価格が 3 倍以上に値上がりした
- IPCC AR6 との比較は積極的に行っている一方で、IEA シナリオは AR6 のシナリオとの差異が大きいことも示している。
- ウクライナ戦争の影響を第 4 章で特集するなどエネルギー安全保障に焦点を当てているが、さりとて 2050 年ネットゼロの目標は変わらないことを強調している
- 1～4 章までは NZE がメインで扱われているが、5 章以降は NZE の登場回数が激減する
- WEO2021 と同様に、本文中にも Annex A にも NZE のみ国・地域別のデータが掲載されていない（p106 のシナリオ説明に“The results for the NZE Scenario are presented at the global level, with some separate indicators for advanced and for emerging market and developing economies.”とある）
- WEO2021 と同様に、STEPS と APS には LCOE に加えて VALCOE（調整力や供給力を評価）が示されているが、NZE には LCOE のみで VALCOE は示されていない。VRE 割合が最も高く、調整力および供給力を最も多く必要とするはずであるが、モデルでは計算不能という可能性もある。

6.2.2 IEA WEO2022 と DNE21+シナリオとの比較

本節では、RITE DNE21+シナリオと IEA WEO シナリオ他の比較を行った。比較の視点は、1) 二酸化炭素除去（CDR）技術の展望、2) 最終エネルギー需要、3) 排出削減コストとする。

まず、図 6.2.2-1 に IEA WEO2022 に示されている、IEA NZE と IPCC AR6 のシナリオとの比較を示す。比較されているのは、AR6 のシナリオデータベースの内、2050 年までに CO_2 で正味ゼロ排出となっているシナリオ 16 との比較である。因みに IPCC の 1.5℃シナリオ（C1, C2）は 230 シナリオが登録されているが、ここでの比較はその内のごく一部である。IPCC AR6 シナリオと比べると、1)最終エネルギー消費量はかなり

小さく、2) 風力、太陽光発電は大きく、3) バイオマスはかなり小さく、4)水素は大きく、5)CCS/CDR はかなり小さく、見込んだシナリオとなっており、標準的なシナリオというわけではなく、むしろ極端なシナリオになっている。5.2 節では、RITE DNE21+モデルによって、シナリオ分析を行い、その中で、CDR の利用可能性を相当絞り、IEA NZE に相対的に近くなる排出パスのシナリオを作成した。

IPCC シナリオでは BECCS と土地利用変化だけで 2100 年までの累積の CDR は 450 $GtCO_2$ 程度となっている(図 6.2.2-2)。WEO2022 の NZE シナリオの 2050 年 1.5 $GtCO_2$/yr はかなり小さいことがわかる。DNE21+推計の Disorderly 1.5 °C は、IPCC シナリオレンジと比べても、CDR 利用量はレンジの上限付近となっているが、Orderly 1.5 °C は中位的な推計である。

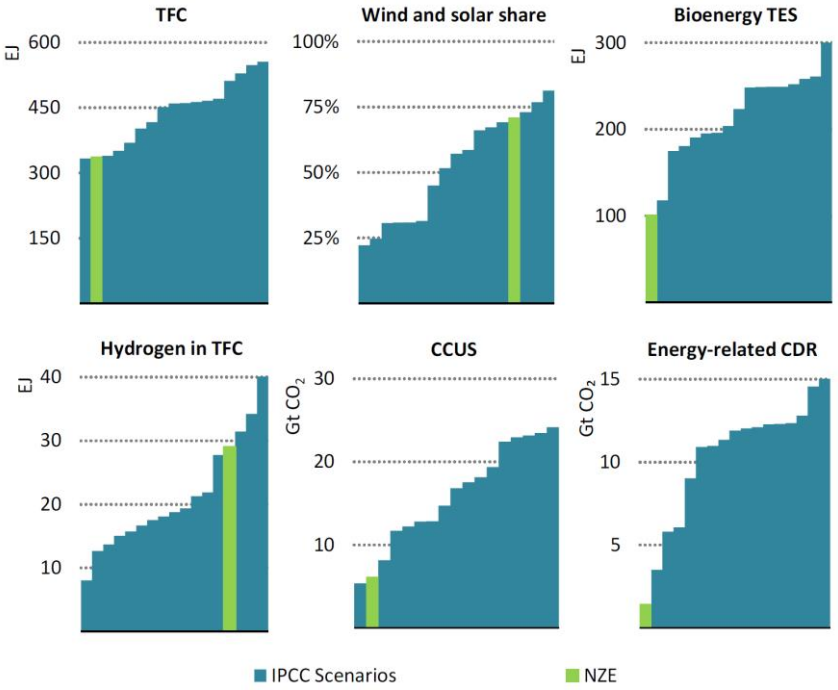


図 6.2.2-1 IEA NZE と IPCC AR6 の 2050 年 CO_2 CN シナリオとの比較
(出典：文献 1))

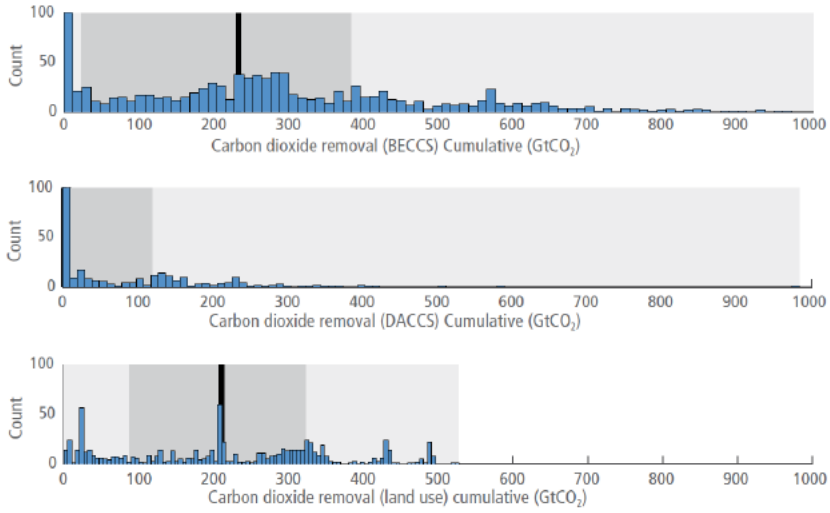


図 6.2.2-2 IPCC シナリオにおける CDR の累積利用量

（出典：文献 2)）

次に最終エネルギー消費量について比較する。図 6.2.2-3 に本研究（需要部門に焦点を当てた分析を行った 5.6 節参照）と IEA シナリオの最終エネルギー消費量の比較を示す。Current policies シナリオは、DNE21+の分析結果と近いものの、2℃目標相当の SDS、そして 1.5℃相当の NZE では、大きなギャップがある。図 6.2.2-4 に IPCC AR6 で収集された全シナリオ（2℃、1.5℃シナリオ以外も含む）における 2100 年における世界全体の最終エネルギー消費量と一次エネルギー供給量を示す。2100 年ではあるし、全排出シナリオであるが、最終エネルギー消費量の中央値は 750 EJ/yr 程度であり、300 EJ/yr 付近のシナリオの報告はわずかであることが確認できる。

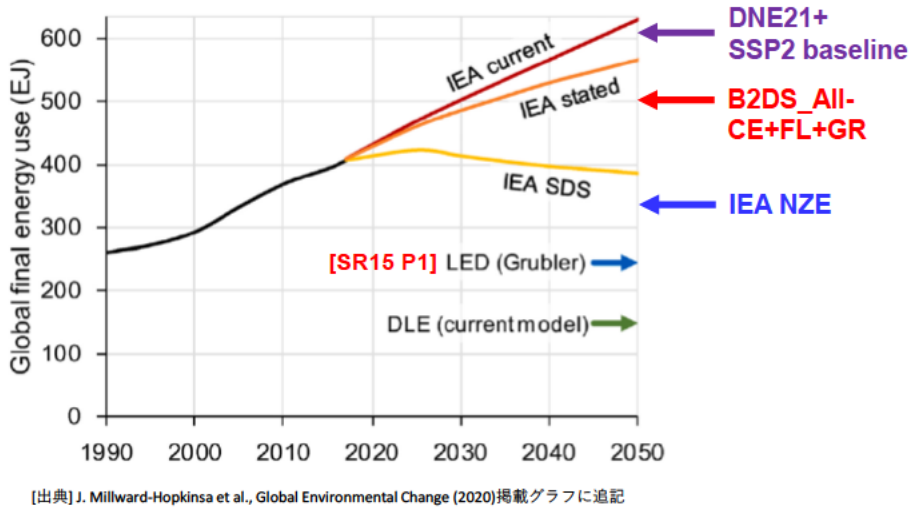


図 6.2.2-3 本研究と IEA シナリオの最終エネルギー消費量の比較

（出典：文献 2)より加工。IEA current, stated, SDS の各シナリオは WEO2019 の数値）

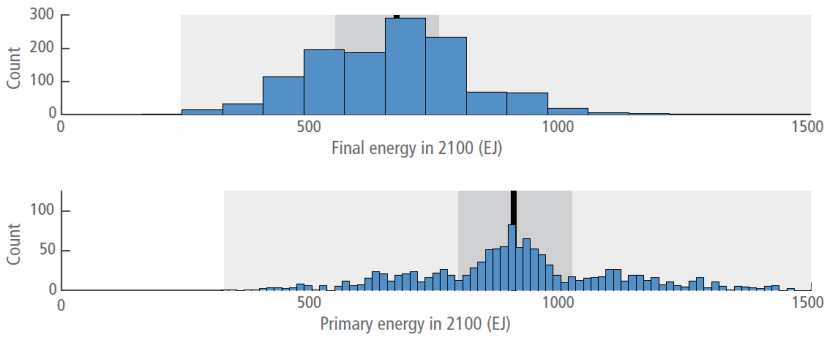


図 6.2.2-4　IPCC シナリオにおけるエネルギー消費量（2100 年）
（出典：文献 2)）

最後に CO_2 限界削減費用（炭素価格）について、表 6.2.2-1 に、本研究調査における DNE21+モデルによる分析シナリオの結果を IPCC シナリオの報告とともに、IEA WEO シナリオの比較で示す。基本的に、DNE21+の分析結果は、IPCC の IAMs のシナリオの限界削減費用と整合的で中位的な結果である。ただし、IPCC シナリオでは、DACCS の想定が少ない一方、DNE21+では DACCS も想定しており、シナリオには依るが、DACCS の費用が CO_2 限界削減費用を決めているところが大きく、特に 1.5℃シナリオにおいては、IPCC シナリオレンジよりも、DNE21+の分析結果の方が、安価に推計される傾向が見られる。WEO2021 時の NZE の炭素価格は 55～250 $/tCO_2$、WEO2022 では、同じ排出経路にも関わらず、炭素価格はかなり上がったがそれでも 180～250 $/tCO_2$ とされており、DNE21+や IPCC の IAMs 推計と比べるとかなり安価な推計となっている。なお、WEO の炭素価格は、electricity, industry, energy production の炭素価格と記載されているため、これ以外の部門ではもっと炭素価格が高く、その炭素価格で排出経路が調整されている可能性もある。いずれにしても、IEA NZE は、相当省エネルギーの費用を安価に推計していて、また、再エネ、蓄電池の費用も相当安価に推計していて、故に電化が相当促進して、併せて最終エネルギー消費量が大きく低下する推計になっていて、結果、炭素価格も相当安価な推計になっていると見受けられる。しかし、第 1、3 章などでも指摘したように、足下では大きな対策をとってきたものの、世界全体の排出削減にあまり成功しているとは言えない状況であって、実績と IEA による将来の見通し・推計には大きな乖離があると言わざるを得ないものとなっている。

表 6.2.2-1 CO_2限界削減費用（炭素価格）の比較

RITE DNE21+（本報告書 5.2 節）		IPCC		IEA WEO	
		カテゴリー	CO_2限界削減費用（25-75%タイル）	WEO2021 CO_2限界削減費用	WEO2022 CO_2限界削減費用
Disorderly 2.0C	119～500	C3	150～350 程度	―	[APS] 47～200
Orderly 2.0C	158	C3		[SDS] 95～160	―
Disorderly 1.5C	268～685	C2	200～350 程度	―	―
Orderly 1.5C	268～465	C1	450～1000 程度	―	―
1.5C-CO_2_CN	293～351	C1		[NZE] 55～250	[NZE] 180～250

単位：USD/tCO_2

参考文献（第 6.2.2 節に関するもの）

1) IEA World Energy Outlook 2022
2) IPCC WG3、第 6 次評価報告書 (2022) https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/
3) J. Millward-Hopkinsa et al., Global Environmental Change (2020)

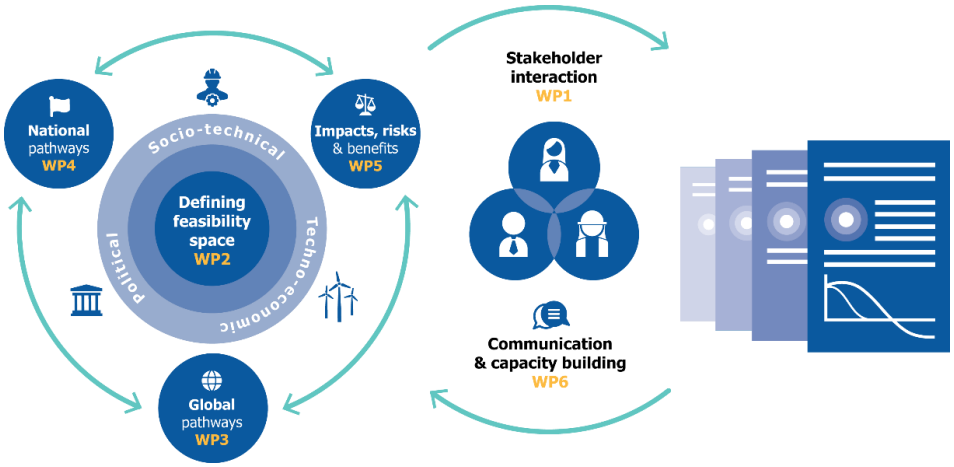
6.3 国際モデル比較プロジェクト分析等の動向（ENGAGE）

6.3.1 プロジェクト全体概要

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、2022 年 6 月 23 日から 6 月 24 日に第 6 回会合開催（オーストリア開催、ハイブリッド型会合）、そして、2023 年 3 月 27 日から 3 月 31 日にかけて第 7 回会合（ブラジル開催、ハイブリッド型会合）が開催される予定である。ENGAGE では、パリ協定達成に向けたコスト効率的かつ技術に基づいた社会的・政治的に実現可能な経路の設計に向けたモデル分析が実施されている。その目的は以下の通りである。

- 知識の協創
- 多次元の実行可能性の概念化と運用
- 気候変動の回避された影響の定量化とコベネフィットの最大化およびトレードオフの最小化
- 多次元の実行可能性とパリ協定を反映した次世代の脱炭素経路の開発
- IPCC AR6 への貢献

図 6.3.1-1 は、ENGAGE の Working Package（WP）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 6.3.1-1 ENGAGE の Working Package

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 6.3.1-1 は、ENGAGE の Task である。RITE は WP4 (Task 4.1 及び Task 4.4)及び WG5 に参加している。2023 年 3 月現在、ENGAGE プロジェクトの研究成果が多くの学術雑誌に掲載され、また、IPCC AR6 においても研究成果が引用されている [1)]。

表 6.3.1-1　ENGAGE プロジェクトの Task

WP	Task	内容	他の WP との関係性
WP1	T1.1	Implement a stakeholder process to co-design global decarbonization pathways: Three global workshops	Establish stakeholder process to co-develop feasibility (WP2), pathways (WP3 and 4), assessment of impacts/co-benefits/trade-offs (WP5) and development of communication tools (WP6)
	T1.2	Stakeholder dialogue on national decarbonization pathways: Four national level workshops (Brussels, China, India, Brazil)	
	T1.3	Documenting the stakeholder engagement process	
	T1.4	Outreach activities	
WP2	T2.1	Update of the policy database and analysis of the policy gaps	
	T2.2	Analysis of national constraints and enablers to decarbonization: Renewable electricity expansion; Energy efficiency and energy demand in key sectors; Phasing out unabated coal; Renewable energy technology innovation	
	T2.3	Analysis of international constraints and enablers to decarbonization: Institutional complexity; Design options for global collaboration	
	T2.4	Feasibility space for decarbonization pathways: Constraints define a feasibility space; Techno-economic, socio-technical, political constraints; Soft and dynamic constraints	
WP3	T3.1	System transformations for balancing sinks and sources of GHG emissions	Selection of game changers (WP1), Communication & capacity building (WP6), Feasibility framework and application / more feasible pathways (WP2), Interactions with national pathways (WP4)
	T3.2	Game-changing societal trends and innovations: Demand, lifestyles & behavioural change; Digitalization; Power-to-X and deep electrification; Sustainable innovations in agriculture and land use	
	T3.3	Comparative feasibility analysis of decarbonization pathways: Ex-post	

		feasibility analysis; feasibility constraints	
	T3.4	Transition from the currently fragmented global climate policy regime overcoming feasibility barriers	

WP4	T4.1	Development of national pathways and mid-century strategies	Input from WP1, Work together with WP2 and WP3, Design model protocol national pathways
	T4.2	Produce a summary roadmap for the EU energy system transition	
	T4.3	Multidimensional feasibility of national pathways	
	T4.4	Frame national strategies in different equity principles and their ethical implications	
	T4.5	Consistency of national mid-century strategies and policies with the overall objectives of the Paris Agreement and identification of potential for strengthening current policies	
WP5	T5.1	Minimizing potential trade-offs of mitigation policies (global teams, national teams, develop policy portfolios)	
	T5.2	Co-benefits of climate change mitigation at the country level (global teams, national teams, new set of pathways, develop policy portfolios)	
	T5.3	National benefits of avoided impacts of climate change	
	T5.4	Integrated analysis of avoided impacts of climate change, and trade-offs and co-benefits of mitigation policies	
WP6	T6.1	Capacity building	
	T6.2	Research exchange programme	

2022 年度は、RITE は主に WP5 のトレードオフ及びコベネフィット分析の議論に参加し、フードセキュリティ及びエネルギーセキュリティに関する分析を行った。以下に詳細を記す。

6.3.2 WP5 の概要

WP5 の研究テーマは、緩和策のトレードオフとコベネフィットである。参加機関は研究テーマを自由に選択することができ、例えば、大気汚染、水、土地利用、エネルギーセキュリティ、フードセキュリティなどがテーマとしてあげられている。

最初に、各研究機関は、既存の IIASA が作成した Global Hotspots Explorer[2)]（図 6.3.2-1 参照）上に、選択したテーマ毎に“Stories”を作成する。Stories の目的は、政策立案者及び一般の人々にわかりやすく研究内容を説明し、政策インプリケーションを示すことである。Global Hotspots Explorer は、IIASA、Grobal Environment Facility (GEF)、国際連合工業開発機関（UNIDO）のパートナーシップである Integrated Solutions for Water Energy and Land プロジェクト (ISWEL) で得られた結果をまとめている。尚、2023 年 3 月 8 日現在、ENGAGE プロジェクトの WP5 で作成した Stories は調整中であり、まだ公開されていない。

図 6.3.2-1 及び図 6.3.2-2 は ISWEL で作成された Stories の一例である。

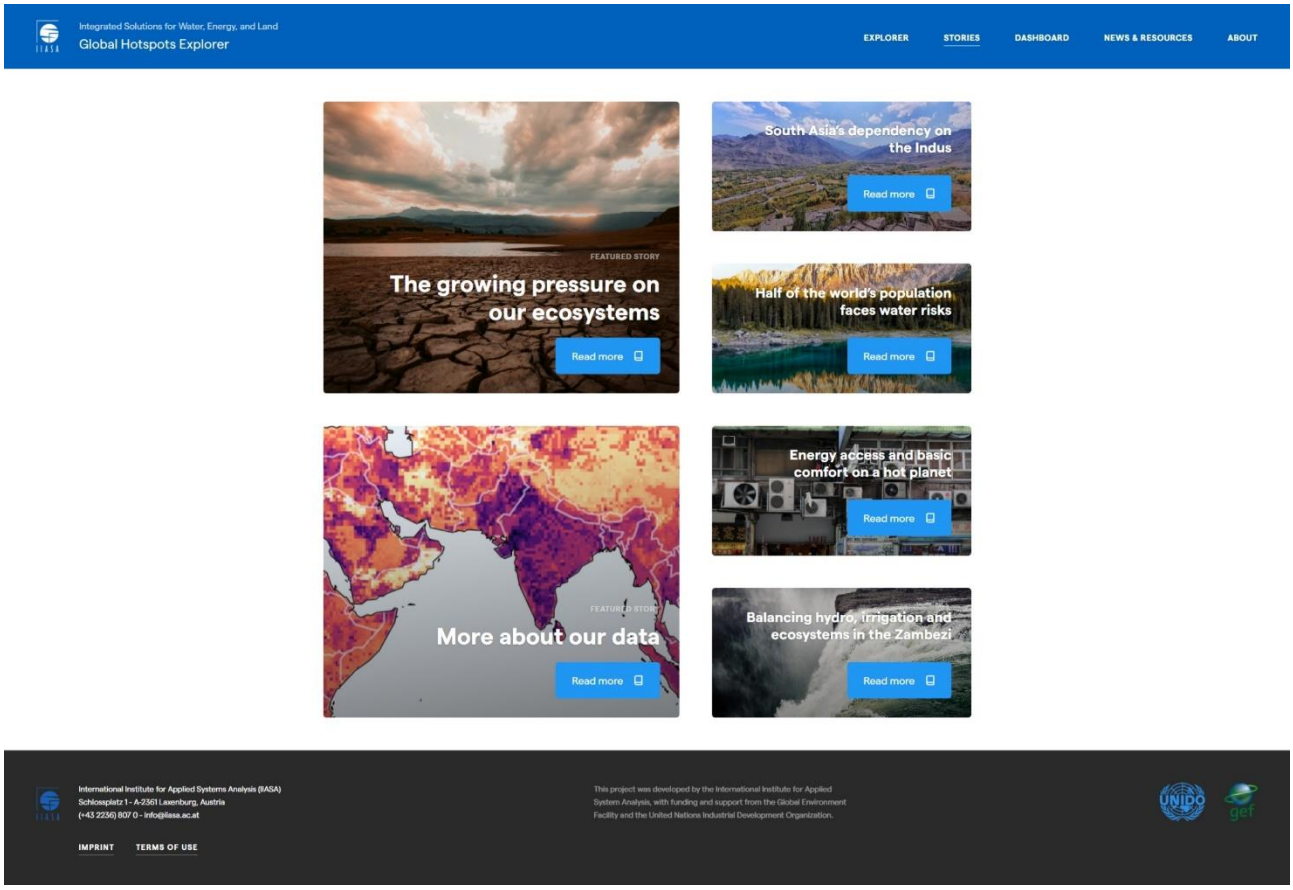


図 6.3.2-1 Global Hotspots Explorer

（出典）ISWEL[2)]

図 6.3.2-2 のように、研究テーマ毎に、分析内容をグラフと共に表示する。また、Stories に記載のグラフは、Database と連携しており、各図にカーソルを近づけるとデータが表示される形となっている。

ENGAGE プロジェクトでは、このプラットフォームを活用して、各機関は、選択したシナリオ毎のデータをエクセルで作成し、Data Explorer 上に upload する。尚、Stories は html で作成し、Global Hotspots Explorer 上に掲載される予定である。

WP5 の下で、RITE はフードセキュリティとエネルギーセキュリティを分析した。フードセキュリティの分析は、本報告書の第 2.2.2 節に示し、エネルギーセキュリティ分析の概要は次節で紹介する。

図 6.3.2-2　ISWEL プロジェクトで作成された Stories の例及びイメージ（抜粋）
（出典）ISWEL[3)]

6.3.3 エネルギーセキュリティ分析[1]

(1) 背景

2015 年 12 月、フランスのパリで開催された第 21 回国連気候変動枠組条約（UNFCCC）締約国会議（COP21）において、2020 年以降の温室効果ガス（GHGs） 排出削減に関するパリ協定が採択された。主な内容は、長期目標として世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力を追求すること、そして、できる限り早く世界の GHGs 排出量をピークアウトし、21 世紀後半には GHGs 排出量と吸収量とのバランスを達成するための早急な削減が求められた。また、全ての国に対し、削減目標（国別貢献：NDCs）の 5 年ごとの提出及び更新、及び NDCs に加えて長期戦略の提出が求められた。日本は、2050 年カーボンニュートラルと整合的な目標として、2013 年度比で 2030 年に GHGs 排出量を 46%削減することを目指している。

一方、2022 年 2 月から始まったロシアのウクライナ侵攻後、世界のエネルギー価格高騰及びエネルギー供給不安が生じたことから、エネルギーセキュリティの重要性に対する認識が世界で高まった。また、各国はエネルギー安定供給の観点から、石炭等の化石燃料使用回帰及び原子力発電の重要性が議論されるようになった。IEA[5)]はエネルギーセュリティについて次のように述べている。

“Energy security is not just about having uninterrupted access to energy、 but also about securing energy supplies at an affordable price”(IEA[5)]、 p.184)。

つまり、エネルギーアクセスの途絶を避けることのみならず、エネルギー供給を安価に確保することの重要性が強調されている。

日本は一次エネルギー輸入依存が高い。2020 年度の日本のエネルギー自給率は 11.2%である [6)]。燃料別にみると、2021 年度において、原油の輸入比率は 99.6%、LNG の輸入比率は 97.9%である [6)]。

再生可能エネルギーの推進及び化石燃料に対する依存度を低減させる脱炭素化移行期において、エネルギー安定供給は各国における重要課題となっている。エネルギーセキュリティ定量評価は様々なものがあり、範囲（対象燃料、評価変数）、地理的範囲（国内か世界か）、時間軸（過去か未来か）、重みづけ方法等によって、エネルギーセキュリティ指標は異なる [7)]。

本稿では、日本が NDC 及び、カーボンニュートラルを達成する場合のエネルギー構造、及び一次エネルギー輸入依存度という観点から、エネルギーセキュリティに与える影響を分析する。

(2) 分析シナリオと分析手法

本稿では、RITE のエネルギーシステムモデル（DNE21+）を用いて、気候変動緩和策とエネルギーセキュリティとの関係を考察する。

[1] 長島ら [4)]を基に、一部修正したものである。

シナリオは、特段の気候変動緩和策が無いベースライン及び二つの気候変動緩和策シナリオ:i)NDC 及び ii) NDC 及び 2050 年ネットゼロ排出達成を想定する(表 6.3.3-1)。

表 6.3.3-1 シナリオ想定

シナリオ	気温上昇	備考
NDC	2100 年 3.0℃	2030 年は NDC 達成。2040 年以降は、100$/tCO$_2$（2030 年で CO$_2$ 限界削減費用が 0$/tCO$_2$ の国は 0$/tCO$_2$ とする)。
DO1.5℃	1.5℃ (ピーク: 1.8℃、2100 年 1.4℃)	2030 年は NDC 達成。主要先進国（日米英欧)は 2050 年にカーボンニュートラル達成。その他の国・地域は限界削減費用均等化の下で 1.5℃目標を達成。

(3) 結果

① GHG 排出量

図 6.3.3-1 は各シナリオにおける 2030 年及び 2050 年の GHG 排出量を示している。2030 年の気候変動緩和シナリオ（NDC 及び DO1.5℃）における GHG 排出量は、ベースラインシナリオと比較すると約 40%減少する。これは特に発電部門における排出量削減が加速しているためである。

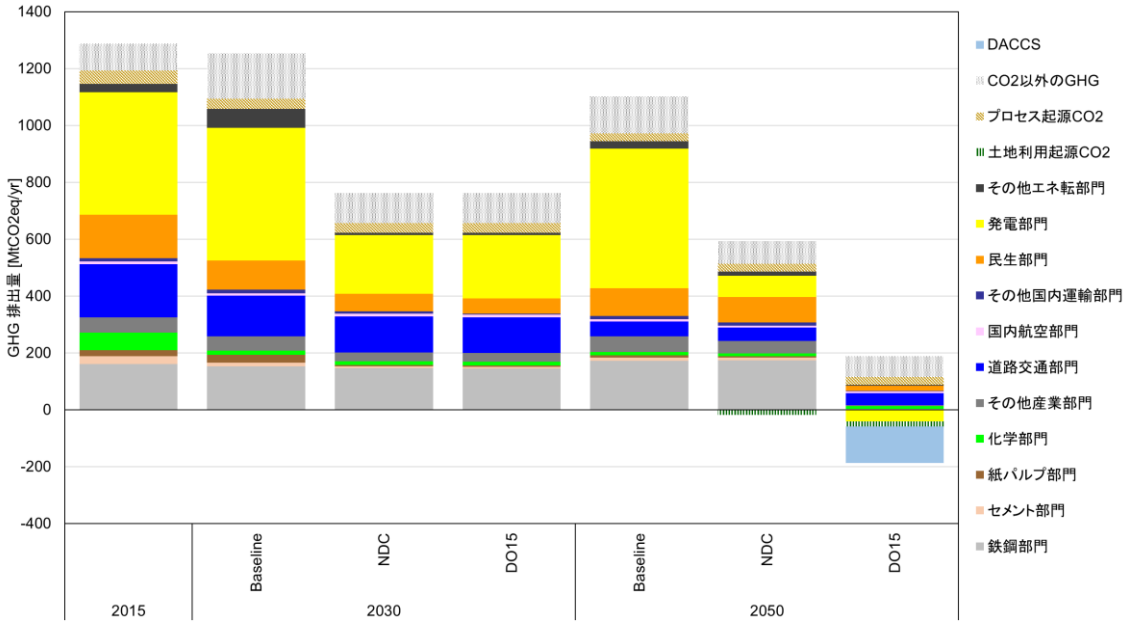


図 6.3.3-1 日本の GHG 排出量

一方、2050 年にネットゼロ排出量を達成する場合、土地利用による CO$_2$ 吸収（植林による CO$_2$ 固定）及び CO$_2$ を回収及び貯留する技術である DACCS（Direct Air Carbon dioxide Capture and Storage）及び BECCS（Bio Energy with Carbon Capture and Storage）等の緩和策がとられる。

② 一次エネルギー供給

図 6.3.3-2 は各シナリオの日本の一次エネルギー供給を示している。ベースラインシナリオにおいて、日本の一次エネルギー供給は輸入化石燃料に大きく依存していることがわかる。気候緩和シナリオにおいて、一次エネルギー供給は 2030 年にベースライン比で約 30%減少する。また、各化石燃料依存が減少し、太陽光によるエネルギー供給が約 3 倍増加する。特に、2050 年にネットゼロ排出を達成する場合、合成メタン、バイオ燃料、水素及びアンモニアを輸入することが経済合理的となる。

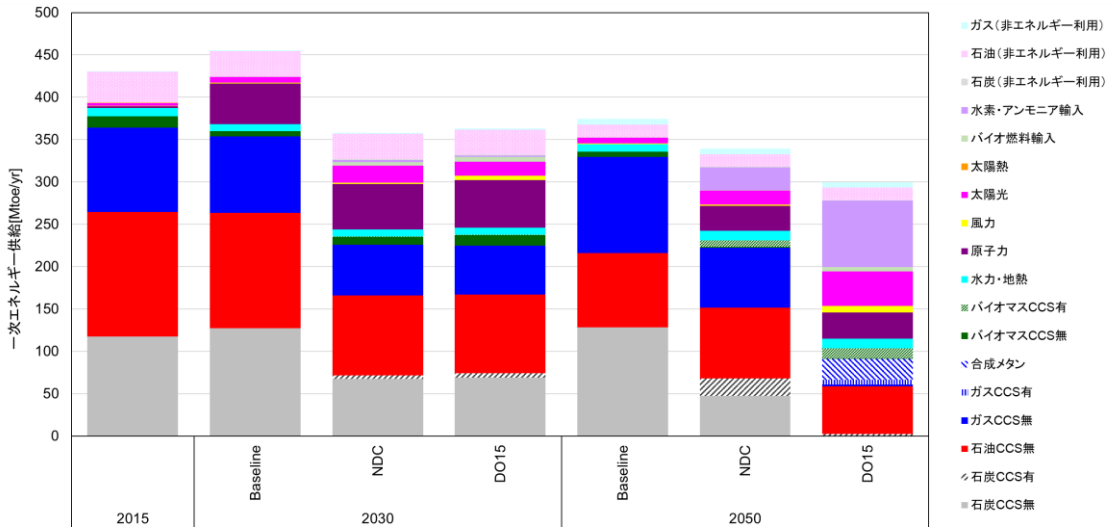


図 6.3.3-2 日本の一次エネルギー供給量

③ 日本の発電電力量

図 6.3.3-3 は各シナリオの日本の発電電力量を表している。2030 年時点では、全てのシナリオにおいて CCS 無しの化石燃料による発電利用が残っている。しかし、2050 年になると、気候変動緩和シナリオにおいて、化石燃料による発電の割合がベースライン比で減少し、CCS 利用及び再生可能エネルギー、そして水素及びアンモニアによる発電電力量が増加する。

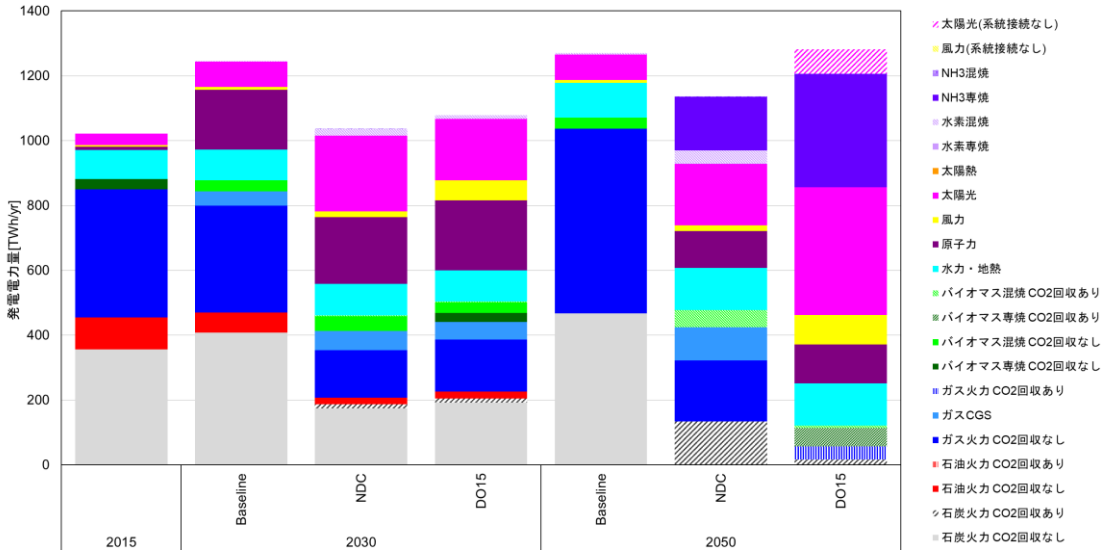


図 6.3.3-3 日本の発電電力量

④ 日本の一次エネルギー輸入依存度

輸入エネルギー供給に対する依存度という観点からみたエネルギーセキュリティと気候変動緩和策との関係について考察する。図 6.3.3-4 は各シナリオにおける一次エネルギー輸入依存度を示している。ベースラインシナリオにおいて、化石燃料の輸入に対する依存度が高いことから、全体的なエネルギー輸入依存度は経年的に増加する。

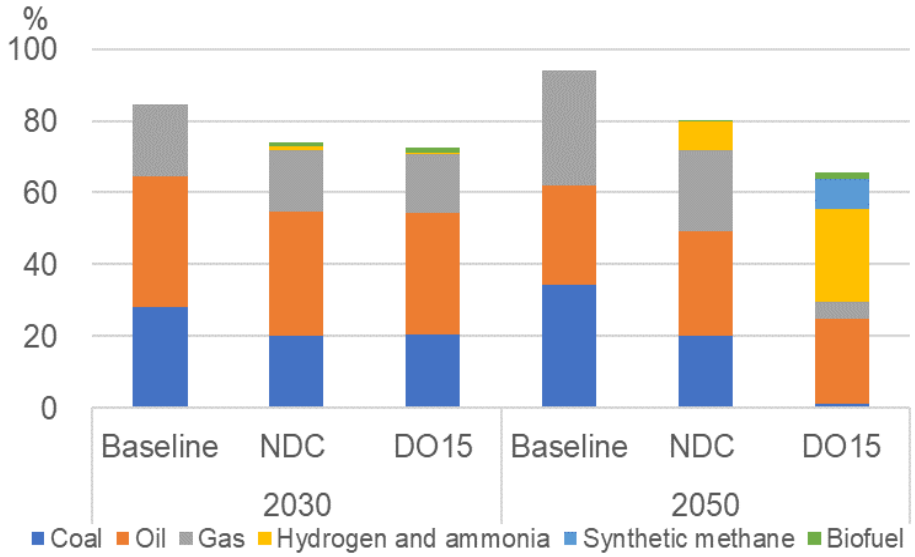


図 6.3.3-4 日本の一次エネルギー輸入依存度

（注）一次エネルギー輸入依存度（%）=（輸入された一次エネルギー供給）／（一次エネルギー供給）×100

気候変動緩和シナリオの下では、化石燃料の輸入、特に石炭輸入が減少することから、2030 年は、ベースライン比でエネルギー輸入依存度が減少する。一方、2050 年にネットゼロ排出量を達成する場合、水素・アンモニア及び合成メタンの輸入は増加す

るが、再生可能エネルギー等の国産のエネルギー供給が増加するため、全体的には輸入依存度が低下する。

緩和シナリオの下では、エネルギー輸入依存度は将来的に改善する一方、コストの観点からみると、2050 年にネットゼロ排出量を達成する場合 CO_2 限界削減費用は 2050 年時点で 432 \$/tCO_2 となる。

6.3.4 今後の課題

本節では、日本の気候変動緩和策と一次エネルギー輸入依存度という観点からみたエネルギーセキュリティに関して分析を行った。エネルギーセキュリティを判断するためには、今回分析した将来の一次エネルギー自給率のみならず、今後はエネルギー輸入先の多様性及びカントリーリスクを含む総合的な評価を行う予定である。

参考文献（第 6.3 節に関するもの）

1) ENGAGE: Publications, https://www.engage-climate.org/publications/ (accessed March 7, 2023)
2) ISWEL: Global Hotspots Explorer, https://hotspots-explorer.org/（2023 年 3 月 8 日アクセス）
3) ISWEL: South Asia’s dependency on the Indus, https://hotspots-explorer.org/story/indus（2023 年 3 月 8 日アクセス）
4) 長島美由紀、佐野史典、小田潤一郎、秋元圭吾：脱炭素化移行期における日本のエネルギーセキュリティ指標の評価、第 39 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、1 月 (2023)
5) IEA: World Energy Outlook 2022.
6) エネルギー白書 2022，経済産業省資源エネルギー庁.
7) Gasser, P.: A review on energy security indices to compare country performances, Energy Policy, 139, 111339 (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、我が国の気候変動政策の立案や、IPCC、COP といった国際的な議論に貢献することを目的とした。これらにより、積極的に温暖化対策を行うことが、産業構造や経済社会の変革をもたらし、大きな成長につなげる、「経済と環境の好循環」を目指す将来枠組み・我が国の国際戦略立案を進めていくべく、事業を実施した。

本報告書では、まず、第 1 章において背景と目的を記述した。

第 2 章では、気候変動に関連した各種不確実性を指摘した上で、本事業で実施した定量的な分析も踏まえながら、気候変動リスクマネージメント戦略のあり方について議論を行い、とりまとめた。また、IPCC 第 6 次評価報告書で整理された、気候変動対策と SDGs とのシナジー・トレードオフ等についても記述した。各種対策は、SDGs に対してシナジーも多く存在する一方、トレードオフも存在しており、トレードオフの影響を小さくしながら、対策を進める必要がある。そして、気候変動対策におけるイノベーションの可能性についてまとめ、気候変動リスクマネージメントにおけるイノベーションの役割について論じた。

第 3 章ではグリーン成長の限界を正しく認識しつつ、その機会を見出すために、CO_2 排出量変化の要因分析を行った。そして、更なる深堀として、日本経済の長期エネルギー生産性変化における構造要因の分析を行うと共に、日本産業のエネルギー生産性変化の測定も実施した。更には、グリーンボンド、サステイナブルリンクローン等、サステイナブルファイナンスの動向とこれまでのモデル分析例についてその内容と課題について整理を行った。

第 4 章では、中期的な緩和策の分析として、パリ協定 NDCs（Nationally Determined Contributions）の排出削減目標（2030 年頃）に関する分析・評価を行った結果をまとめた。本研究では最新の動向をふまえ、排出削減費用を含む、複数の指標を採用し、各国 NDCs の排出削減努力の国際比較を実施した。また、日本の新たな 2030 年の排出削減目標-46%について、その経済影響についても分析・評価を行った。日本の排出削減目標実現には、大きな排出削減費用と経済影響が推計された。更に、炭素国境調整税に関する国際的な議論の動向を整理するとともに、2030 年 NDCs を踏まえ、炭素国境調整税に関するモデル分析による試算も行った。

第 5 章は長期の緩和シナリオ分析についてまとめた。カーボンニュートラル実現のための各種技術の開発動向や国際的な最新の分析・評価について整理した。また、温暖化対策モデルにおいて、エネルギー供給側および需要側双方について、2050 年カーボンニュートラル実現の様々なシナリオを想定した分析を行った。2021 年度の本事業において、2050 年カーボンニュートラルの分析を行ったが、2022 年度は、カーボンニュートラル実現までのトランジションを含めて、部門別のロードマップとして、DNE21+モデルによるシナリオ分析を行った。また、カーボンニュートラル実現の限界的な費用の対策と評価されやすい、水素系エネルギー（水素、アンモニア、e-methane、e-fuels）の感度解析も実施した。一方、需要側対策についても各種調査をするとともに、DX を中心とした技術変化や社会変化が、エネルギー需要にどのような変化をもたらし得るのかについて、DNE21+モデルを用いて定量的な推計、分析を行った。

第 6 章においては、最新の海外の気候変動に関する政策動向の調査結果を記すとともに、IPCC 第 6 次評価報告書のシナリオや、国際エネルギー機関 IEA のシナリオについてもその概要を記載するとともに、本事業の分析の比較等を記載した。

本第 7 章においてまとめを記載した。また、付録には本事業の一環として実施した国際シンポジウムの内容について掲載した。

以下に本報告書の内容の全体像についての簡単なまとめを記載する。

2015 年にパリ協定が合意され、すべての国が排出削減に取り組む枠組みが合意され、各国が自主的に排出削減目標を掲げ、レビューする仕組みとなった。また、長期目標が定められ、2℃目標や 1.5℃目標が掲げられた。2021 年に開催された COP26 では世界の平均気温の上昇を 1.5℃に抑える努力を追求することを決意すると合意され、COP26 までに、多くの国が 2050 年頃までのカーボンニュートラルを目指すと宣言した他、先進国を中心に世界の多くの国が自国の 2030 年の排出削減目標を引き上げた。世界は、気候変動対策の強化を進めている。一方で世界は多様であり、見かけ上、言葉上の強化と、真の排出削減努力とは一定のギャップが存在する可能性がある。COP27 までに 2030 年目標の野心度の更なる引き上げが目指されたものの、大きな変化はなかったと言える。足下の世界排出量も過去最高を記録しており、排出削減が成功しているような状況にはない。主要先進国で排出は低減しても、途上国に CO_2 原単位の高い産業、製造工程が移転しているに過ぎない状況と言える。

グローバルに排出削減努力の協調が必要である。しかしながら、最新の NDCs や社会経済状況を反映した、2030 年 NDC の排出削減努力の分析からは、国間の排出削減目標を実現するために必要な努力、実現の難易度が一層開いていると推計された。根本的には、国間で限界削減費用の均等化が望まれる。一方、この実現は極めて難しいという点にも多くの理解がある。そのため、欧州は、国境炭素調整措置の導入に向けた手続きを終了した。また、米国議会でも国境炭素調整措置導入の法案が提出されている。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。冷戦終結以降の国際的に協調の時代から、米中の対立、世界とロシアの対立など、世界は分断の方向にも進みつつある。協調の時代でさえ難しかった気候変動対策の協調が、より一層難しくなってきている。このように、国際的な気候変動対策は一層複雑化してきている。気候変動対策を着実に進めながら、一方で、これらを踏まえた柔軟でしたたかな対応戦略が必要と考えられる。

近年、再生可能エネルギーのコスト低減が著しく、再エネによるグリーン成長の可能性の光明も見え始めている。しかし、世界を見渡しても、完全にグリッドパリティを達成しているものはわずかと見られる。また、導入規模を拡大すれば、条件の悪い再エネを活用することとなり、再エネ単価は上昇するし、系統対策費用が増大していくと考えられる。全体システムの中で、再エネも正しく評価していくことが重要である。つまり適正な水準の再エネ導入は、グリーン成長に資すると考えられるが、それを超える導入はグリーンには資するが、成長には逆行する。

広範で非連続なイノベーションが不可欠である。本研究におけるモデルを用いたシステム的な分析では、カーボンニュートラルのような厳しい排出削減のためには、様々な対策の組み合わせが重要であることを示した。そして、それぞれの技術についてもコスト低減の見通しは確実なわけではない。直接的な気候変動対策だけではなく、それを構成する要素技術、基礎技術、そして、それらを誘発する組織、制度のイノベーションなど併せて求められる。第 6 次エネルギー基本計画では、「あらゆる選択肢を追求する」とされた。

一方、日本国内では、エネルギーシステム改革が進められる中で、電力需給のひっ迫の課題が顕在化してきている。脱炭素電源は、長期の視点で大きな投資リスクを負って投資しなければならない場合も多く、それと短期の効率性を追求する市場とがミスマッチする部分もある。市場の失敗を是正する政策が必要である。更に、ロシアによるウクライナ侵略によって、天然ガスをはじめとした化石燃料価格の急騰も加わってきている。「2050 年カーボンニュートラル」の環境面が強くなっていたところで、改めて、3E（エネルギー安全保障・安定供給、経済性、環境性）のバランスの重要性を社会は再認識した状況である。全体のシステムとして理解をし、分析を深めておくことの重要性も再認識されたところである。

このような中、政府は、2023 年 2 月に「GX 実現に向けた基本方針」を閣議決定した。そこでは、カーボンニュートラル実現に向け、一層の対策をとることとしつつも、エネルギー安定供給の対策方針も含まれている。また、GX-ETS や炭素に対する賦課金といったカーボンプライシング政策についても方向性が明示された。効率の良い政策とするには、既往の政策の廃止を含めた政策の整理が必要と考えられ、今後の更に具体的な政策議論が求められる。

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。IPCC 第 6 次評価報告書でも、「CO_2 又は GHG の正味ゼロを達成しようとするならば、削減が困難な残余排出量を相殺する CDR の導入は避けられない。」とされる一方、需要サイドについては、新たに需要サイドの章が設けられ、「需要側の対策とエンドユースサービスの新しい提供方法によって、エンドユース部門における世界全体の GHG 排出量をベースラインシナリオに比べて 2050 年までに 40～70% 削減しうる。」、「需要側の緩和対応策は、全ての人々の基本的幸福の向上と整合的である。」と記載された。

本事業においては、主に DX によって誘発され得る需要の低減と、低エネルギー需要社会の実現について、その可能性についての調査を行うとともに、定量的なシナリオ分析を実施した。需要側の対策は広範であり、引き続き、分析の課題は多いが、定量的かつ包括的なモデル分析の一つの方向性を示した。このような定量的な分析によって、DX による需要低減が、カーボンニュートラル実現の一つの手段として、そして SDGs の同時達成の方向性を示すことを幅広く世界の人々が認識できて、その方向での対応をとるよう促すきっかけになることを期待したい。

また、カーボンニュートラル実現に向けてのトランジションも重要である。ファイナンス部門は、投資先、貸付先とのダイベストメントやエンゲージメントにおいて、カーボンニュートラルとの整合性を求めるようになってきている。しかし、カーボンニュートラルの実現の姿も CDR の活用の手段もある中、複数あり、ましてや、2℃や 1.5℃目標と整合的な排出経路といっても、そのトランジションにはかなりの幅がある。その幅を、国別、部門別に定量的かつ全体整合的にシナリオとして提示することは、ファイナンス部門の行動において、重要なサポートになると考えられる。本事業で提示した部門別ロードマップはその一助となることを期待したい。

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、「経済と環境の好循環」を着実に実現し得る適切な対策・方策を明確にすることが求められている。

本調査研究では、このような真の「経済と環境の好循環」を実現していく道筋のフレームワークとその具体的対策・方策の検討を包括的に行った。この問題は、広範で、深い分析と洞察が必要なため、今後、更なる調査・分析・評価を行っていく必要があるが、本研究調査でまとめた知見は、今後の気候変動対策・政策において重要な情報・示唆となると考えられる。

付　　録

付録　　ALPS 国際シンポジウム

(1) はじめに

本研究事業では、地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業を進めるにあたり、地球温暖化問題研究で世界的に著名なオーストリアの国際応用システム分析研究所（IIASA: International Institute for Applied Systems Analysis）、米国の未来資源研究所（RFF: Resources for the Future）、国際エネルギー機関（IEA）をはじめ、世界の研究機関とも協力しながら研究を進めている。

2023 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 ―グリーントランスフォーメーション GX の実現に向けて―」を開催した。当日は、国際応用システム分析研究所、中央ヨーロッパ大学、国際エネルギー機関、ウィスコンシン大学マディソン校における、この分野に造詣の深い著名な専門家より講演いただくとともに、先進的に温暖化対策に取り組んでいる㈱日立製作所、パナソニックオペレーショナルエクセレンス㈱、㈱日本政策投資銀行、JFE スチール㈱といった企業の方から、カーボンニュートラルへの取り組みやトランジション、削減貢献量をめぐる状況や課題にご紹介いただいた。企業、官公庁、大学、研究機関、その他団体等から約 220 名超が参加（会場ならびに Web 配信にて）した。

エネルギー需要サイドの取り組みについては、2022 年 4 月に発表された IPCC 報告書でも、新たな章が設けられ焦点が当てられ、幅広い企業にとっても取り組める機会も多いことから、重要な分野と考えられる。本シンポジウムでは、これらエネルギー需要サイドの対策を含めながら、GX 実現に向けた取り組みの現状、実現への課題について、幅広い方々にとって最新の研究成果をもとに深く考える有意義な機会になった。

以下に、本シンポジウムの概要を掲載する。当日の講演者の詳細な略歴や講演スライドは RITE ホームページのシンポジウム紹介欄に掲載されているので参照されたい。(https://www.rite.or.jp/system/events/2023/03/fy2022alpsresult.html)

開催年月日	2023 年 3 月 6 日（月）10:00-17:00
開催場所	WEB 配信およびイイノホール&カンファレンスセンター （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

講演	**Scenarios for Transformation toward Climate-Neutral Society** Dr. Nebojsa Nakicenovic Emeritus Research Scholar, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)
	The role of energy demand and services in climate stabilization: Based on the findings of the IPCC's Sixth Assessment Report Dr. Diana Urge-Vorsatz Professor at the Central European University(CEU), Vice-Chair, IPCC Working Group Ⅲ
	Energy security in clean energy transitions: Insights from the World Energy Outlook 2022 Ms. Yasmine Arsalane World Energy Outlook analyst, International Energy Agency (IEA)
	DX による低エネルギー需要社会と GX の実現の分析 秋元 圭吾 地球環境産業技術研究機構 システム研究グループ グループリーダー
	Dynamic Policy Design for High Wellbeing with Low Resource Use Dr. Gregory Nemet Professor of Public Affairs, University of Wisconsin-Madison
パネル討論	**企業のトランジションを含むカーボンニュートラルへの取り組みと排出削減貢献** (モデレーター) 山地 憲治 地球環境産業技術研究機構 理事長 (パネリスト) 岸本 道弘　株式会社日立製作所 グローバル環境事業本部 理事 環境戦略ダイレクター 楠本 正治　パナソニックオペレーショナルエクセレンス株式会社 品質・環境本部 環境経営推進部 部長 竹ケ原 啓介 株式会社日本政策投資銀行 設備投資研究所 エグゼクティブフェロー 手塚 宏之　JFE スチール株式会社 専門主監（地球環境）
講演	**エネルギー需要側対策を中心とした GX の展望** 下田 吉之 地球環境産業技術研究機構 理事 研究所長

Scenarios for Transformation toward Climate-Neutral Society

Dr. Nebojsa Nakicenovic
Emeritus Research Scholar
International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

Humanity is facing formidable poly-crises from war and food insecurity to the pandemic and ever-increasing pressure on the Earth system including the climate change. Humanity has the possibility and capability to overcome these challenges toward just future for all on a safe planet. We argue that this can be achieved through disruptive and inclusive technological change about people, societies and about values and behaviors. This will require “doing more with less” – efficiency and sufficiency of providing more services with less resources toward a carbon-neutral society – and will require new integrated, systemic, and holistic pathways to achieve the needed grand transformation.

人類は、戦争や食料不安からパンデミック、そして気候変動を含む地球システムへの圧力増大等、手ごわい複合的な危機に直面している。人類は、安全な地球で、すべての人にとって公正な未来を実現するために、これらの課題を克服する可能性と能力を持っている。私達は、人間、社会、そして価値観や行動様式に関する破壊的かつ包括的な技術革新を通じて、これを達成できると主張する。そのためには、「より少ない資源でより多くのサービスを提供し、カーボンニュートラルな社会を目指す」という「より少ないものでより多くを行う」という効率性と充足性が必要であり、必要な大転換を実現するために統合的、体系的、全体的な新しい道筋が必要である。

(RITE　抄訳)

The role of energy demand and services in climate stabilization: Based on the findings of the IPCC's Sixth Assessment Report

Dr. Diana Urge-Vorsatz

Professor at the Central European University(CEU), Vice-Chair, IPCC Working Group Ⅲ

The IPCC’s Sixth Assessment Report for the first time devoted a dedicated chapter to energy demand and services. The talk discusses how demand-side changes alone could reduce emissions by up to 70% if we focus on delivering services rather than kWhs, how much individuals and corporations can contribute, and how their transformation needs to be facilitated by technology access, infrastructures, right service provisioning systems, information and incentives. The presentation will present the various ways how digitalization affects energy demand, and whether the circular economy is a key solution to climate changemitigation. Finally, we show that pathways emphasizing energy demand side solutions will have more and stronger co-benefits with SDGs than those targeting the supply side.

IPCC の第 6 次評価報告書では、エネルギー需要とサービスに特化した章が初めて設けられた。

本講演では、kWh ではなくサービスの提供に焦点を当てた場合、どのように需要側の変化のみで排出量を最大 70%削減できるのか、個人や企業がどの程度貢献できるのか、そしてその変革には技術へのアクセス、インフラ、正しいサービス提供システム、情報、インセンティブが必要であることを説明する。

デジタル化がエネルギー需要にどのように影響するか、循環型経済が気候変動緩和の重要な解決策となるか等、様々な方法を提示する。

最後に、エネルギー需要側の解決策を重視する経路は、供給側を対象とする経路よりも、SDGs とのコベネフィットがより多く、より強くなることを示す。

(RITE　抄訳)

Energy security in clean energy transitions: Insights from the World Energy Outlook

Ms. Yasmine Arsalane

World Energy Outlook analyst, International Energy Agency (IEA)

The World Energy Outlook 2022 provides a comprehensive view of how the global energy system could develop in the coming decades. With the world in the midst of the first global energy crisis – triggered by Russia's invasion of Ukraine – the new Outlook provides indispensable analysis and insights on the implications of this profound and ongoing shock to energy systems across the globe. Will the crisis be a setback for clean energy transitions or a catalyst for greater action? How might government responses shape energy markets? Which energy security risks lie ahead on the path to net zero emissions?

世界エネルギー展望 2022 年版（World Energy Outlook 2022）は、今後数十年間に世界のエネルギーシステムがどのように発展しうるかに関して、包括的な展望を示している。ロシアのウクライナ侵攻に端を発した初めての世界的エネルギー危機の中、この新しい展望は、世界のエネルギーシステムに対する深刻かつ継続的な衝撃の影響について、不可欠な分析と洞察を提供するものである。この危機は、クリーンエネルギーへの移行を妨げるのか、あるいはより大きな行動を起こすための触媒となるのか。政府の対応はエネルギー市場をどのように形成するのか。ネットゼロエミッションへの道のりには、どのようなエネルギー安全保障のリスクがあるのか、などについて述べる。

(RITE　抄訳)

DXによる低エネルギー需要社会とGXの実現の分析

秋元 圭吾
公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)
システム研究グループ　グループリーダー

主要先進国のCO_2排出量は低減傾向にあるものの、世界のCO_2排出量は引き続き上昇傾向が見られる。その中で早期のカーボンニュートラル実現を目指しており、その難しさを直視した上で、これまでと異なったアプローチも必要である。カーボンニュートラル実現そしてそのトランジションについて、各種不確実性を考慮した複数のシナリオを作成し、世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+を用いて、経済効率的な世界および日本の部門別排出削減対策を提示する。また、デジタルトランスフォーメーション（DX）による低エネルギー需要社会実現の可能性についても、エネルギーシステム全体として整合的かつ定量的な分析を行った試算結果について提示する。そして、グリーントランスフォーメーション（GX）の方向性について展望する。

Dynamic Policy Design for High Wellbeing with Low Resource Use

Dr. Gregory Nemet
Professor of Public Affairs
University of Wisconsin-Madison

Unexpectedly large improvements in low-carbon technology over the past 20 years have made decarbonizing the world economy far more feasible; we can peak emissions soon, rapidly decline to zero, and do so in a way that enhances human well-being. This presentation presents empirical results on technology innovation to motivate policy guidelines to support high levels of well-being with low resource use. It concludes that climate policy requires a comprehensive, inclusive, and dynamic approach to stimulating innovation and accelerating adoption of low energy demand technologies and social innovations.

過去 20 年において、予期せぬほどの低炭素技術の大きな進展により、世界経済の脱炭素化はより実現可能なものになってきた。CO_2 排出はまもなくピークを迎え、急速にゼロまで下がり、人類の幸福度を高めるようになるだろう。今回の発表では、資源低利用によるハイレベルなウェルビーイングを手助けするような政策的ガイドラインが引き起こす技術イノベーションによるこれまでの経験的な結果を明らかにする。結論とするところは、気候変動政策とは包括的でダイナミックなアプローチが必要であり、それはイノベーション意欲を刺激し、低エネルギー需要技術や社会変革を加速するということである。

(RITE　抄訳)

企業のトランジションを含むカーボンニュートラルへの取り組みと排出削減貢献

(モデレーター)

山地 憲治	公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)	理事長

(パネリスト)

岸本 道弘	株式会社日立製作所	グローバル環境事業本部 理事 環境戦略ダイレクター
楠本 正治	パナソニックオペレーショナルエクセレンス株式会社	品質・環境本部 環境経営推進部 部長
竹ケ原 啓介	株式会社日本政策投資銀行	設備投資研究所 エグゼクティブフェロー
手塚 宏之	JFE スチール株式会社	専門主監（地球環境）

各社ごとのビジョンやカーボンニュートラルへ向けた取り組みを紹介いただき、「GX基本方針」も閣議決定された中、GX に関連して新たな技術開発や強化・注力している分野は何か、またトランジションファイナンスに対する金融業界の受け止めと事業会社側の金融機関との対話状況、さらには削減貢献量への取り組み・課題・今後の展望など幅広いトピックスに渡り、意見交換を実施した。

エネルギー需要側対策を中心としたGXの展望

下田 吉之
公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)
理事 研究所長

エネルギーシステムの需要側は、今後 1）エネルギー需要の大幅な削減によってエネルギーシステムのカーボンニュートラル化に貢献すること 2）変動性再生可能エネルギーの普及に伴う電力需給の不安定性に対して調整力を提供することの 2 点において今後の GX で重要な役割を果たす。これらを達成する上で重要な鍵の一つがエネルギー消費によってもたらされるサービスの明確化であり、もう一つがデジタル化である。デジタル化は機器の稼働を最適にマネジメントするだけでなく、人間の行動に働きかけることや、暮らしや仕事の形を変えることでエネルギー需要の中身を大きく変質させる可能性を持つ。また、民生部門やモビリティのエネルギー需要の変革を考える上で、従来のエネルギー供給側と大きく異なるのは需要技術一つ一つの小ささと、意思決定主体の小ささである。従って都市など適切な単位でパッケージ化し、まとまりを持った需要として管理する工夫が必要である。

本報告書の内容を利用する際は、
公益財団法人 地球環境産業技術研究機構（RITE）
システム研究グループにご一報願います。

電　話　０７７４（７５）２３０４
ＦＡＸ　０７７４（７５）２３１７