

2021 年度委託成果報告書

気候変動関連リスクに係るシナリオ分析に 関する調査

2022 年 3 月

一般財団法人 **電力中央研究所**

この報告書は、一般財団法人電力中央研究所が金融庁から委託を受けて実施した「気候変動関連リスクに係るシナリオ分析に関する調査」に関する成果をとりまとめたものです。

気候変動関連リスクに係るシナリオ分析に 関する調査

富田 基史^{*1} 坂本 将吾^{*1} 筒井 純一^{*2} 上野 貴弘^{*3}

^{*1} サステナブルシステム研究本部 気象・流体科学研究部門 主任研究員
^{*2} サステナブルシステム研究本部 気象・流体科学研究部門 研究参事
^{*3} 社会経済研究所 上席研究員 研究推進マネージャー

目 次

1	背景・目的	1
2	中央銀行・金融監督当局による気候関連リスクの分析	3
2.1	気候関連リスクの特徴と金融リスクへの伝搬.....	3
2.2	シナリオ分析による気候関連リスクの定量化.....	4
3	NGFS シナリオ（第2版）の概要.....	10
3.1	NGFS シナリオ（第2版）の全体像.....	10
3.2	6本のシナリオとナラティブ	10
3.3	統合評価モデル（IAM）によるナラティブの定量化.....	12
3.4	NGFS シナリオへの批判.....	15
Box 1	統合評価モデル（IAM）の種類.....	17
Box 2	シナリオ作成に使われた3種類の統合評価モデル（IAM）の諸元と特徴.....	18
Box 3	データの地理的解像度とダウンスケーリング	20
Box 4	物理的リスクシナリオへのリンクとその考え方	23
4	主要変数の比較による NGFS シナリオ（第2版）の特徴.....	25
4.1	NGFS シナリオ（第2版）の概観：世界全体	26
4.2	NGFS シナリオ（第2版）の概観：日本.....	45
4.3	NGFS シナリオ（第2版）の概観：主要地域の特徴	62
4.4	既存のシナリオとの比較（世界全体・日本）	71
5	海外当局・中銀による NGFS シナリオの利用例	94
5.1	当局・中銀によるリスク分析事例の概要.....	94
5.2	参照している NGFS のシナリオ	97
5.3	採用されている統合評価モデル	101

5.4	移行リスク分析の変数.....	101
5.5	本章のまとめ	104
6	我が国の脱炭素に関連した計画との比較	105
6.1	第6次エネルギー基本計画に記載された2030年時点のエネルギー供給・需要やCO ₂ 排出量との比較	105
6.2	主要排出部門におけるNGFSシナリオの変数	111
7	まとめ.....	113
7.1	気候関連の金融リスク分析とNGFSシナリオの貢献	113
7.2	我が国における気候関連の金融リスク分析を想定した留意点と提案	114
	参考文献	118
	付録 用語集	121

1 背景・目的

気候変動の進行に伴う物理的リスクや、政策の推進や技術等の進展に関連した移行リスクが、金融機関の健全性や金融システムの安定性に対するリスクに波及するという認識が広がっている(Bolton et al., 2020)。気候変動に起因する金融リスクを金融機関のリスク管理に適切に織り込むために、G20財務大臣及び中央銀行総裁の意向を受け、金融安定理事会(FSB: Financial Stability Board)は、気候関連財務情報開示タスクフォース(TCFD: Taskforce on Climate-related Financial Disclosures)を立ち上げ、2017年6月に気候変動に関する企業のリスクや機会の開示に関する提言を公表した(TCFD, 2017)。

気候変動に関するリスクの影響は、数十年という長期にわたって顕在化していくことから、高い蓋然性を持ってその影響を計測することが難しい。そのため、気候変動に関するリスクの測定には、将来の気候変動の進展や経済社会の変化について様々な可能性を想定し、それらを具体化した定量的なシナリオに基づく「シナリオ分析」が用いられる。TCFDは、一定規模以上の企業に対して気候変動に関連するリスク・機会の分析に定量的なシナリオ分析を利用することを推奨しており、シナリオ分析を利用した気候変動に関するリスク分析を実施する企業や金融機関の数も徐々に増えている(TCFD, 2021)。

各国の中央銀行や金融監督当局が、気候変動関連のリスクを金融機関の健全性評価やマクロ・プルーデンスに織り込む動きもでてきている。2018年、オランダ銀行(DNB: De Nederlandsche Bank)が実施した、気候中立経済に伴うオランダ国内の銀行、保険会社及び年金基金のポートフォリオを対象とした移行リスク分析(DNB, 2018)を皮切りに、シナリオ分析は各国の金融監督当局や中央銀行のリスク分析に採用されつつある(NGFS, 2021c)。

このような背景を受け、各国の中央銀行・金融監督当局におけるシナリオ分析に関する能力の向上や、各機関で実施されるシナリオ分析の比較可能性を高めることを目指し、NGFS(Network for Greening the Financial System)は、2020年6月に、中央銀行・金融監督当局向けのシナリオ分析に関するガイダンスと、共通シナリオの第1版を公表した(NGFS, 2020)。NGFSは、パリ協定の達成、持続可能な開発に関連した環境面のリスクへの対応、及び持続可能な投資へ資本を動員するにあたっての金融システムの役割を強化することを目的とした、中央銀行・金融監督当局のネットワークである。2022年2月時点で、108の中央銀行・金融監督当局が会員となり、さらに17の国際機関や関連団体がオブザーバーとして参加している¹。

2021年6月、NGFSは、2020年に公表したシナリオを拡充したシナリオの第2版を公表した(NGFS, 2021b)。NGFSは今後も継続的に、シナリオやデータの開発を行っていく予定である。また、FSBは、2021年7月に「気候関連金融リスクに対処するためのFSBロードマップ」を公表し、FSB及びNGFSが2022年夏頃までにシナリオ分析に必要な指標に関する作業を調整して進めることとしている²。このように、気候変動に関連する金融リスクを分析するための情報やツールは、今後も充実していくと思われる。

その一方で、気候関連の金融リスクやシナリオ分析に関する、中央銀行・金融監督当局や市中金融機関

¹ NGFS. Membership. <https://www.ngfs.net/en/about-us/membership> (最終アクセス: 2022年3月22日)

² FSB Roadmap for Addressing Climate-related Financial Risks (<https://www.fsb.org/2021/07/fsb-roadmap-for-addressing-climate-related-financial-risks/>) (最終アクセス: 2022年3月22日)

の理解や、実際に分析を行う上で必要とされるリソースは、必ずしも十分ではない。気候関連リスクに関するシナリオ分析については、NGFS による解説を含め、すでにいくつかの解説文書が公表されているが、これらの文書は、気候変動分野の技術的・専門的な記述が多く、金融業界の実務者にとって必ずしも分かりやすいものではない。また、我が国の実務者が参照できる日本語での解説資料も十分とは言えない。

また、市中金融機関が気候関連の金融リスクに適切に対処するためには、リスク管理部門等の担当部署だけでなく、経営層をはじめとする組織全体が気候関連金融リスクを理解し、それらを適切に管理することの重要性を認識することが不可欠である。そのためには、気候関連の金融リスクを測定するための有力な手法である「シナリオ分析」への理解を深めることが重要である。

本報告書ではまず、気候変動のシナリオ分析による金融リスク分析について、我が国の金融機関の理解の早期向上を図るため、シナリオ分析や NGFS シナリオ（第 2 版）の基本的な考え方について日本語での詳細な解説を行う。次に、NGFS シナリオ（第 2 版）の主な変数に着目し、シナリオや定量的なシナリオを作成する手法である統合評価モデルの特徴を整理する。加えて、温室効果ガスの排出削減に関する我が国の政策と NGFS シナリオ（第 2 版）の比較分析を行うことで、我が国における気候関連の金融リスクへの活用を想定した場合の留意点等も明らかにする。

また、NGFS シナリオは各国の中央銀行・金融監督当局に対して、気候変動に関するシナリオ分析の共通のフレームワークを提供するものであるが、NGFS シナリオを用いて気候関連リスク分析を実施している中央銀行・金融監督当局の多くは、NGFS シナリオのデータを補完する形式で独自の改良を行っている。そこで本報告書では、中央銀行・金融監督当局による気候関連のストレステストの事例に着目し、金融リスク分析における NGFS シナリオの使い方を整理する。

これらの結果を踏まえ、本報告書では、我が国の金融機関が気候関連の金融リスク分析を実施するにあたり、NGFS シナリオの活用方法や現行の NGFS シナリオの問題点等を整理する。

なお、NGFS シナリオ（第 2 版）は、気候関連の移行リスク（低炭素社会への移行に伴う影響）と物理的リスク（気候変動に伴う災害等の影響）、及びマクロ経済影響の変数を含むが、本報告書ではこのうち、移行リスクに関連するものを対象とする。

2 中央銀行・金融監督当局による気候関連リスクの分析

2.1 気候関連リスクの特徴と金融リスクへの伝搬

気候関連リスクは大きく、経済・社会の脱炭素化の進展にともなう「移行リスク」と、温暖化の進行に伴う「物理的リスク」の2つに分類される(TCFD, 2017)：

移行リスク：新たな政策・規制の導入（温室効果ガス排出規制や炭素税等）、脱炭素化に関する技術的の進歩にともなう既存技術の陳腐化、消費者の嗜好の変化、等による経済への影響を指す。これらの変化は、経済・社会全体にわたって同調的に発生する性質があり、想定よりも広範かつ重大な影響をもたらすことがある。

物理的リスク：温暖化の進展にともなう気候の変化や災害等による経済への影響を指す。これらは、徐々に発現する「慢性リスク」（例えば、平均気温の上昇や降水量の変化にともなう農作物の収量低下や、海面上昇等）と、自然災害の頻度・強度の増加による「急性リスク」の2種類に分けることができる。また、物理的リスクの発生頻度や影響には大きなばらつきがあり、その予測は困難である。

気候関連リスクの影響の分析においては、これらのリスク要因が持つ高い不確実性を考慮することが重要である。現時点において、気候変動はこれまで人類が経験したことがない速度で進行しており、過去の実績にもとづいて将来の影響の高い蓋然性を持って予測することは困難である。また、気候変動関連のリスクは、臨界点（**tipping point**）を超えると甚大かつ不可逆的な影響を引き起こす非線形のリスクであり、地域によってもリスクの発生頻度や影響の大きさはまちまちである(BCBS, 2021)。

これらの気候関連リスクは、「波及経路（**transmission channels**）」を通じて、金融リスクへ伝搬すると考えられている（図 2.1.1）(Bolton et al., 2020; BCBS, 2021)。移行リスクを例にとると、将来、脱炭素政策の一環として炭素税が導入された場合、温室効果ガス排出量の大きい企業の収益性を悪化させることにより、長期にわたる信用リスクの増加につながる。物理的リスクについては、たとえば、温暖化の進行に伴う自然災害の増加は、将来、担保価値の毀損による信用リスクの増加や損害保険金の支払による保険引受リスクの増加等につながる。

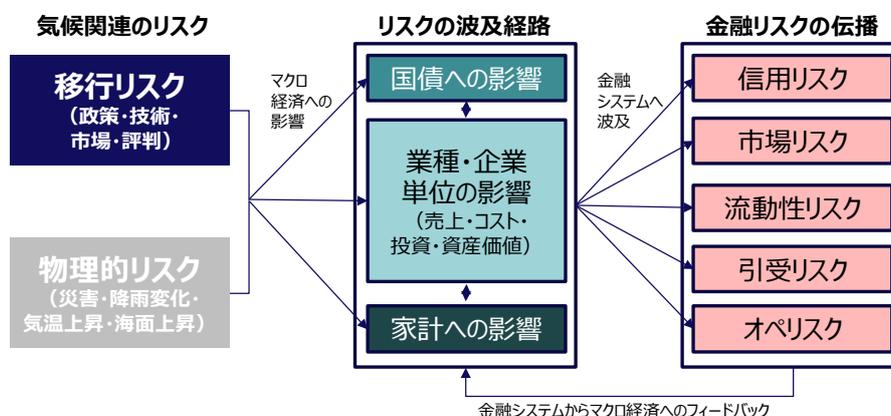


図 2.1.1 気候関連リスクから金融リスクへの波及経路の概観(BCBS, 2021)

2.2 シナリオ分析による気候関連リスクの定量化

中央銀行・金融監督当局による気候関連リスク分析の第一歩は、金融リスクを引き起こす気候関連リスクを特定し、将来にわたってこれらの度合いを定量化することである。これには、統合評価モデル（Integrated Assessment Model、以下、IAM：用語集を参照）や気候モデルのような、経済社会の発展やそれにとまなう気候の変化を定量的に記述する手法を用いた、シナリオ分析が用いられることが多い。

気候関連リスク分析の文脈においてシナリオとは、「重要な駆動力（key driving forces；技術変化のスピードや価格等）と相互の関係についての首尾一貫した整合的な仮定の下で、将来がどのように発展するか妥当性をもって記述したもの」であり、「予言でも予測でもないが、発展と行動について含意されることの見解を提供するのに使われる」ものと定義される(NGFS, 2021a)。

シナリオの駆動力（driving forces）となる要素には、人口・GDPや技術変化のような、経済・社会的な要素が挙げられることが多い。ただし、気候関連リスクの分析に用いるシナリオには、温室効果ガス排出量の制約等の要因（例えば、21世紀末の地球の平均温度上昇を1.5°C以内に抑えるために必要な排出量の制約等）も設定される。これによって、経済・社会の発展に加えて、将来の気温や降水量の変化といった物理的要素を含めた記述がされる。

気候関連リスクに起因する金融リスクの分析で用いるシナリオでは、経済・社会の発展、気候の変化、マクロ経済変数への影響等を記述する複数のモデルが多段階的に接続され、共通の前提条件のもとでの様々な気候関連リスクとそれらの影響が首尾一貫した形で記述される。これらを記述するモデルはいずれも複雑で、シナリオの作成には膨大な計算を要する。そのため、通常は研究機関等によって公開されている既製のシナリオが分析において参照される。

気候関連リスクと金融リスクの関連を扱うシナリオ分析はまだ歴史が浅く、本報告書の執筆時点でもいくつかのアプローチが試みられている発展途上の段階である。ただし、現時点で公表されている事例を総合すると、気候関連の金融リスク分析は、(1) 気候リスクに関するシナリオの作成・定量化、(2) 定量化した気候リスクの要因に関連した金融リスクの分析、の2段階に分けることができる(UNEP-FI, 2021)。

2.2.1 気候関連リスクに関するシナリオの作成・定量化

気候関連の金融リスクの分析にあたっては、まず気候関連リスクの定量化が行われる。気候関連リスクの定量化には様々なアプローチがあるが、本節ではNGFSシナリオ（第2版）でも採用されている、統合評価モデル（IAM）を用いた分析の手順を紹介する。これらは、以下の4段階に分けられる（図2.2.1）(NGFS, 2021c)。

1. ナラティブ（ストーリーライン）の作成：

シナリオ分析は、将来の世界の発展の方向性やビジョンを定性的に記述した、ナラティブ（ストーリーライン）を決めることからスタートする。気候関連リスク分析に用いるシナリオ分析では、経済・社会の発展の度合い（人口・GDP等）に加え、温室効果ガスの排出を制約するための政策導入の時期・強度や国・地域間での協調の度合い、技術導入の速度等の条件が定性的に記述される。

2. 統合評価モデル（IAM）による社会経済シナリオの定量化：

ナラティブで定義された世界観を元に、経済・社会・エネルギー・技術導入・土地利用変化等の様々な要素の関連を定量的に記述した統合評価モデルによって、様々な要因について将来の発展を定量化する。

ナラティブの定性的な記述は、統合評価モデルの前提条件（外生変数）に置き換えられる。気候リスク分析の場合、気候リスクの程度を左右する重要な前提条件となるのが、温室効果ガスの排出削減政策の強度、すなわち排出可能な温室効果ガスの量である。いわば、温室効果ガス排出量を制約条件として、統合評価モデルの内部に記述された経済・社会の様々な要素とそれらの相互関係が全体として整合するように、様々な変数（内生変数）の最適化計算が行われるのである。また、どの変数が内生変数となるかは統合評価モデルの仕様によって異なる³。

3. 気候モデルによる将来の気候シナリオの定量化：

IAM の出力のうち温室効果ガスや大気汚染物質の排出量等が気候モデルに渡され、温度上昇や降水量の変化のような気候シナリオが作成される。温室効果ガスの排出量から物理的な気候の変化を計算するモデルは極めて複雑で、計算には膨大な時間と計算機資源を要する。そのため、気候関連リスクのシナリオ分析においては、気候モデルを簡略化した「簡易気候モデル」が用いられることが多い。

4. 気候影響の定量化：

気候シナリオの出力結果が様々な地域・部門における気候影響を評価するモデルに渡されて、温暖化の進展にともなう自然災害の発生や農作物の収量低下のような、多岐にわたる気候影響が記述される。

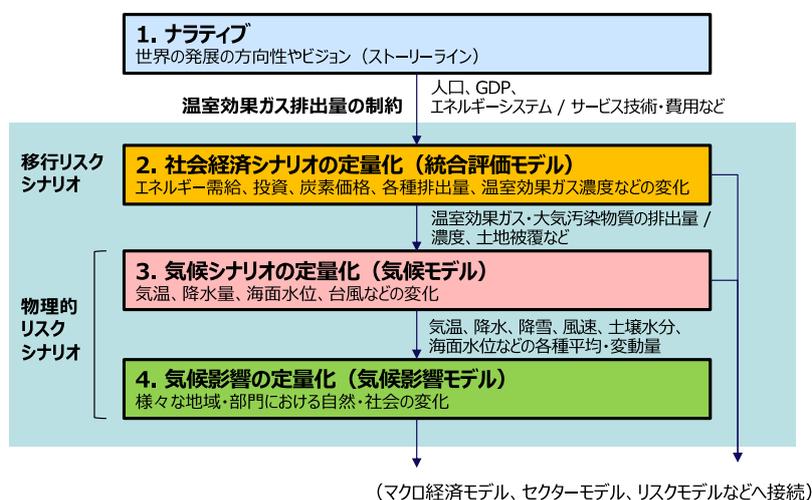


図 2.2.1 統合評価モデル（IAM）を用いた気候変動の影響に関するシナリオ分析の典型的な流れ

³ また、前提条件として変数を与えた場合であっても、統合評価モデルの中で内生変数として最適化計算の対象となるものもある。GDP を例にすると、NGFS シナリオ（第2版）では前提条件の1つとして GDP の発展経路が与えられるが、3種類の IAM のうち REMIND-MAGPIE 2.1-4.2 と MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 では内生変数として最適化が行われる。GCAM 5.3 の GDP は外生変数だが、炭素価格と GDP 変化の関係が MESSAGEix-GLOBIOM と整合するように、Current Policies 以外のシナリオでは GDP の値が補正されている。この修正は NiGEM の入力データとして GDP への影響が必要とされることによる(NGFS, 2021a, p.18)。

なお、シナリオ作成の手順は必ずしも上記の順番で行われるわけではなく、後段の出力が前段に波及することもある。例えば、気候関連リスクによる影響は、IAM の出力と気候モデルの出力をインプットとして定量化されるが、この計算結果を前段の IAM に反映させるアプローチも提案されている⁴。

シナリオデータを利用する上で、各種の不確実性をどのように扱うかは難しいところである。不確実性は様々な要素に関係するため、シナリオ作成の段階が後段に進むにつれて不確実性の影響も階層的に積み重なる。そのため、シナリオ分析においては、将来の経済・社会の発展について複数のナラティブを想定したうえで、それぞれを複数の IAM を用いて定量化することで、適度な範囲で不確実性を考慮することが一般的である。分析者は、複数のナラティブ、複数の IAM から出力される結果を踏まえ、金融リスクの分析に用いる気候リスク関連の変数を選択し、さらに必要に応じて変数の補正・追加を行うことが望ましい。

2.2.2 気候関連リスクの要因に関連した金融リスクの分析

金融リスクの分析にあたっては、IAM や気候モデルを用いたシナリオ分析によって定量化された将来の経済・社会的な変数や気候関連の変数の中から気候関連リスクに関連する要因を抽出し、それらと金融リスクの関連を定量化する必要がある。これらの変数はリスク分析の目的やスコープによって異なるが、現時点では表 2.2.1 のような変数が参照されている(UNEP-FI, 2021)。

これらの多くは IAM や気候モデル・気候影響モデル等によって計算されるが、GDP 等の一部を除くマクロ経済変数の多くは、シナリオ分析の結果には含まれない。そのため、前段の IAM や気候モデル・気候影響モデルで計算された気候関連リスクの変数を用いて、金融・経済分野のモデルからマクロ経済変数等を補完したうえで、金融リスクの分析が行われる(FSI, 2021; UNEP-FI, 2021)。なお、後段のマクロ経済変数の計算や気候関連の金融リスクの計測は比較的新しい分野であり、本報告書の執筆時点では標準的な手法は存在しない。

マクロ経済モデルとの接続

気候関連リスクがマクロ経済に与える影響を計測するため、マクロ経済モデルが用いられる。具体的には、IAM や気候影響モデルの出力のうち、炭素価格・化石燃料価格の上昇や災害による経済ショック等を入力条件として、様々なマクロ変数に対する気候関連リスクの影響が計算される。気候関連の金融リスクの分析では、英国 NIESR (National Institute of Economic and Social Research) が開発した NiGEM と呼ばれるモデルが使われる例が多い。これは、世界の主要な国・地域を内包する多国モデルであり、単一の国・地域のマクロ経済に対する影響だけでなく、ある国・地域における気候関連リスクに起因する経済ショックが他の国・地域へもたらす影響や、国・地域間の相互作用をモデル化できるという利点がある。

⁴ NGFS シナリオ (第 2 版) では、NiGEM と呼ばれる代表的な世界マクロ経済モデルへのリンクが導入された。NiGEM は移行リスクと物理的リスクの両方を入力として、金融リスク分析に有用な経済変数を出力する。この結果を IAM にフィードバックするアプローチが、NGFS シナリオ (第 2 版) の一部に試行的に採用されている(NGFS, 2021a, p.30)。

表 2.2.1 気候関連金融リスクに用いられる変数の例 (UNEP-FI, 2021)

カテゴリー	変数
価格	<ul style="list-style-type: none"> ● 炭素価格 ● コモディティ価格・エネルギー価格 <ul style="list-style-type: none"> ○ 一次エネルギー（石炭・石油・天然ガス） ○ 二次エネルギー（電力・ガス） ○ 再生可能エネルギー ● 政策・税（炭素価格以外のもの）
生産	<ul style="list-style-type: none"> ● 投入物の費用 ● 一次エネルギー ● エネルギー消費 ● 化石燃料の消費 ● 再生可能エネルギーの消費
投資	<ul style="list-style-type: none"> ● エネルギー効率 ● エネルギー供給 ● 新技術への投資
温室効果ガス 排出	<ul style="list-style-type: none"> ● 排出削減目標及び排出経路（部門別、地域別） ● エネルギーミックス ● 政府による政策 ● 部門別排出量
物理的リスク	<ul style="list-style-type: none"> ● 気温（世界全体、地域別） ● 降水量・洪水リスク ● 乾燥リスク ● その他の物理的リスク ● 農業の生産性・穀物収量・食糧安全保障
マクロ経済	<ul style="list-style-type: none"> ● 家計収入 ● 不動産価格（住宅／商業不動産） ● 失業率 ● GDP ● 企業利益 ● 社債利回り ● インフレ率 ● 政策金利・為替レート ● 銀行金利 ● 株価指数 ● 与信伸び率 ● 与信スプレッド

セクター・モデルによるマクロ経済影響の分解

マクロ経済単位で算出された気候関連リスクの影響をセクター（例えば、産業分類の大分類や中分類）の単位に分解するため、セクター・モデルが用いられる。これによって金融機関は、保有する資産やエクスポージャーに対して、セクター単位でリスクの程度を評価することができる。本報告書の執筆時点では、広く利用されている手法は存在しないが、仏中央銀行（Banque de France）によって将来の炭素価格上昇がセクター別付加価値（Value Added）に与える影響を試算した例がある(Devulder and Lisack, 2020)。

金融リスクモデルによるリスクの計測

金融機関のエクスポージャーに対する気候関連のリスクの計測にあたっては、デフォルト確率（PD）、デフォルト時損失率（LGD）、デフォルト時エクスポージャー（EAD）といった、通常の金融リスク分析でも用いられる変数が計算される。これらは、通常、中央銀行・金融監督当局や金融機関自身の内部モデルが用いられる。

例えば、移行リスクと信用リスクの関係を例にすると、気候関連の政策の進展に伴って炭素価格（炭素税や排出権のような温室効果ガスの排出に対して政策的に課せられる費用を総合したもので、気候関連政策の強度の代理指標の 1 つ）が上昇した場合、温室効果ガスを排出する企業や家計の費用増加につながる。この費用増加分を既存の信用リスクモデルに組み込むことによって、信用リスクへの影響が定量的に計測される。

2.2.3 気候ストレステスト

中央銀行・金融監督当局が行う金融リスク分析の一つに、ストレステストがある。伝統的なストレステストでは、リーマンショックのような極端な経済的ショックを想定した上で、各金融機関のバランスシートや基幹業務を担うシステムの耐性や、金融機関の戦略やリスク管理の妥当性を評価することが、目的とされている。

気候関連リスクを対象としたストレステストも同様に、気候変動に対する金融機関の耐性や戦略・リスク管理の妥当性を評価することを目的としているが、伝統的な金融リスクと気候関連リスクの特性の違いから、両者にはいくつかの違いがある（表 2.2.2、UNEP-FI (2021)）。

まず、伝統的なストレステストと気候ストレステストでは、対象となる時間軸に大きな違いがある。伝統的なストレステストの対象期間は 3～5 年程度とされるが、影響が長期にわたる気候ストレステストの場合は最大で 30～50 年先までが対象期間される。対象期間が数十年先の長期に及ぶため、気候ストレステストでは、分析対象のバランスシートに対して動的（ダイナミック）な変化が仮定される場合がある。

また、伝統的なストレステストでは、例えば信用リスク等では過去の実績データを元に信用モデルの変数を補正した上でリスクの分析を行うが、気候ストレステストではモデルを構築するための過去データが十分に存在しないため、関連研究を元に将来のシナリオを構築した上でリスク分析が行われる。

規制との関連で言えば、伝統的なストレステストは金融監督の一環として実施されることが多いが、本報告書の執筆時点では、中央銀行・金融監督当局によって実施される気候ストレステストの多くは、試行的・探索的なエクササイズという位置づけに留まっている。

表 2.2.2 伝統的なストレステストと気候ストレステストの特徴の比較

項目	伝統的な金融のストレステスト	気候ストレステスト
時間軸	短期間（通常は3年～5年） 流動性リスクに対するストレステストの場合は、数日～数ヶ月	長期間（30年～50年） 短～中期（数年程度）の急激な影響の評価を統合する例もある
バランスシート	分析開始の時点から一定	一定（スタティック）もしくは長期にわたる動的な変化（ダイナミック）を仮定
データ、モデル、変数	過去データからシナリオを補正 信用リスクについては、以下のような変数をモデル化： <ul style="list-style-type: none"> - デフォルト確率（PD） - デフォルト時損失率（LGD） - デフォルト時エクスポージャー（EAD） 	関連研究からシナリオを構築、将来のシナリオは排出量・技術・政策等の前提条件に依存 伝統的なストレステストの変数の一部は、気候ストレステストでも有効： <ul style="list-style-type: none"> - GDP - 資産価値 - デフォルト確率（PD）…等
金融機関への影響	分析結果を元に、金融機関の自己資本比率等の十分性が評価される	現時点では中央銀行・金融監督当局が結果を統合して公表するため、個別の結果は公表されない 気候変動リスクを適切に管理しないことによって、監督上の措置が講じられる可能性がある
規制等との関連	金融監督上の措置の一環として実施される	現時点では探索的なエクササイズに留まるが、結果は金融監督政策へフィードバックされる

3 NGFS シナリオ（第 2 版）の概要

3.1 NGFS シナリオ（第 2 版）の全体像

NGFS シナリオ（第 2 版）は大きく、気候変動による移行リスクを定量化する統合評価モデル、物理的リスクを評価する気候モデル及び、気候関連リスクの要因が主要なマクロ経済変数に与える影響を定量化するマクロ経済モデルの 3 つのコンポーネントで構成されている（図 3.1.1）。これらは、共通社会経路（SSP: Shared Socio-economic Pathway）と呼ばれる人口・GDP 等の変数と、温度上昇目標や政策・技術の発展の程度が異なる 6 種類のシナリオのナラティブを共通の前提条件とすることによって、経済社会の発展と気候変動の変化、将来のマクロ経済への影響を統合的に記述することを可能にしている。

このうち、マクロ経済モデルについては、2021 年 6 月に公表された NGFS シナリオ（第 2 版）において新たに追加されたものである。ここで採用されたのは、英国 NIESR（National Institute of Economic and Social Research）によって開発された NiGEM と呼ばれる多地域のマクロ経済モデルであり、炭素価格やコモディティ価格（主に化石燃料価格）の変化のような移行リスクの要因と、災害等の物理的リスクの影響の双方を加味した上で、GDP・失業率・インフレ率等の主要なマクロ経済変数を計算する。

本報告書ではこのうち、移行リスクを定量化する統合評価モデルに注目して解説を行う（物理的リスクの定量化にあたっては、Box 4 を参照）。

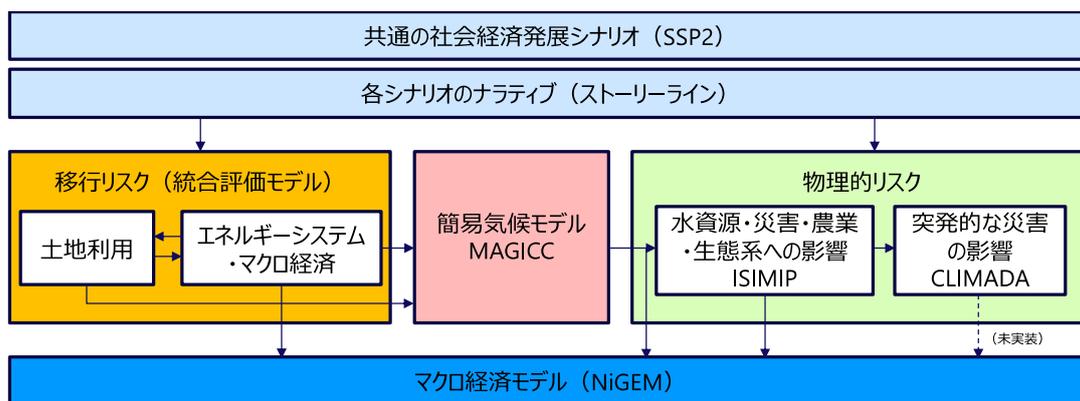


図 3.1.1 NGFS シナリオ（第 2 版）の全体構造（(NGFS, 2021a) を参考に作成）

3.2 6 本のシナリオとナラティブ

NGFS シナリオ（第 2 版）には、世界の多様な発展の可能性をカバーする 6 本のシナリオが採用された（表 3.2.1）。各シナリオには、ナラティブに記述される脱炭素社会への移行経路と気候変動影響の違いが表される⁵。なお、人口・GDP の見通しに関連する社会経済発展の方向性については、中道的な発展の経路（SSP2）⁶がすべてのシナリオに共通して設定されている（詳しくは、用語集の SSP を参照）。

⁵ NGFS シナリオ（第 1 版）には、3 本の代表シナリオに加え、5 本の代替シナリオが収録されている。第 2 版ではこれらに対して調整が加えられ、代表・代替の区分をなくした 6 本に整理された。

⁶ COVID-19 感染拡大とその経済影響を考慮するために、最終エネルギー需要や IMF の見通しに基づいて、SSP2 に設定された経路から GDP の調整が行われている(NGFS, 2021a)

表 3.2.1 NGFS シナリオ（第 2 版）に採用された 6 本のシナリオのナラティブ（NGFS, 2021a）

カテゴリー	シナリオ	ナラティブ
Orderly （秩序）	Net Zero 2050 （2050 ネットゼロ）	厳格な排出削減政策とイノベーションにより、地球温暖化を 1.5°C に抑制し、2050 年頃に世界の CO ₂ 排出量を正味ゼロにすることを目指す。米国、EU、日本等の一部の国では、すべての温室効果ガスについてネットゼロを達成
	Below 2°C （2°C 抑制）	排出削減政策の厳しさが徐々に増していき、地球温暖化を 2°C 以下に抑える可能性は 67%
Disorderly （無秩序）	Divergent Net Zero （分岐型ネットゼロ）	2050 年頃にネットゼロ到達。セクターごとに導入される政策が異なるため、コストが高くなり、石油使用のフェーズアウトが早まる
	Delayed Transition （遅延移行）	2030 年まで年間排出量が減少しない。温暖化を 2°C に抑えるには強力な政策が必要。CO ₂ 除去は限定的
Hot house world （温暖化進行）	Nationally Determined Contributions (NDCs) ⁷	各国が約束した全ての政策（現時点では実施されていないものも含む）が実施されると想定
	Current Policies （現行政策）	現在実施されている政策のみが保持される想定。物理的リスクが高くなる

6 本のシナリオは、3 つのカテゴリーに分かれる。カテゴリーは第 1 版と同じ枠組みで排出削減政策の違いを反映したもので、Orderly（秩序的）、Disorderly（非秩序的）及び Hot house world（温暖化進行）に分かれる（図 3.2.1）。

Orderly（秩序的）：排出削減政策が早期に導入され徐々に強化されることによって、移行リスク・物理的リスクともに影響は比較的少ない範囲に留まる。

Disorderly（非秩序的）：排出削減政策の実施が遅れる、もしくは国・地域間や部門間で政策の導入や対策の足並みが揃わないことで、移行リスクの影響が顕在化する。一方、最終的には排出削減政策が導入されるため、物理的リスクの影響は小さい。

Hot house world（温暖化進行）：気候変動を緩和する努力が世界的に不十分となり、物理的リスクの影響が顕在化する。排出削減政策は実施されないか、限定的にしか導入されないため、移行リスクの影響は小さい。

⁷ NDCs（Nationally Determined Contributions）とは、パリ協定の下で、各国が自ら定める排出削減目標等の貢献を指す。1.5°C や 2°C の温度目標もパリ協定に基づく。各国は NDCs を 5 年毎に提出する義務を負うが、NGFS 第 2 版は 2020 年 12 月時点で提出されているものを参照し、2025 年と 2030 年のエネルギーと排出量に関する各国の目標を反映しているが、2021 年以降に提出された目標（日本の 2030 年に 2013 年比で 46%削減、米国の 2030 年に 2005 年比で 50～52%削減等）は反映されていない。2030 年より後は同様の気候政策が保たれる想定であるが、その方法は IAM 間で異なる。

NDCs を冠するシナリオが Hot house world に分類されるのは、NDCs の本来の主旨からすると違和感がある。他方、2021 年 10 月時点で各国の NDC を積み上げた排出削減がパリ協定の温度目標と隔たりがあるのも事実であり（UNEP, 2021）、2020 年 12 月時点までに提出されたものに限定すれば、その乖離は一層大きくなる。シナリオ「NDCs」の位置付けはこの現状水準に依拠したものと理解される。

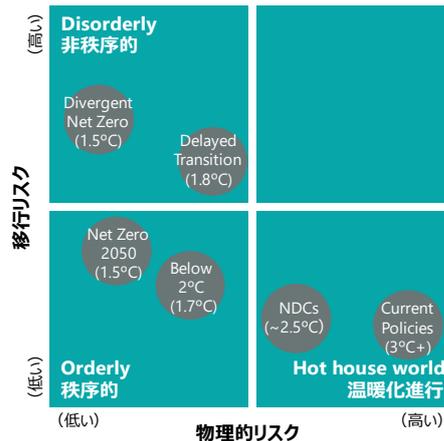


図 3.2.1 NGFS シナリオ（第 2 版）のフレームワーク（各シナリオの移行リスク及び物理的リスクの度合い、NGFS（2021b）に基づいて作成）

3.3 統合評価モデル（IAM）によるナラティブの定量化

3.3.1 前提条件の設定

NGFS シナリオのナラティブは IAM を用いて定量化される。NGFS が採用している IAM の場合、これらは主にエネルギーシステム、マクロ経済、及び土地利用の要素モデルで構成される。各要素モデルには多くの変数があり、変数間の定量的な関係が定式化されている。変数には前提条件として与える外生変数と、モデルの求解計算から決まる内生変数がある。これらの変数の時間的推移が移行リスクシナリオとなる。

ナラティブから前提条件への置き換えは IAM 間で共通に設定される。表 3.3.1 に各シナリオの主な前提条件を概略的に示す。例えば、Net Zero 2050 と Divergent Net Zero のシナリオではいずれも、温度上昇を 1.5°C に抑えるために温室効果ガス排出量に強い制約条件が課される。このうち Divergent Net Zero では、排出量を制約するための政策が、部門間で強度が異なる形で導入される。具体的には、運輸・民生部門の炭素価格が他部門（産業・エネルギー転換）の 3 倍になるよう設定される(NGFS, 2021a)。後述するように、IAM の炭素価格は排出削減政策の厳しさを定量化したものに相当する。Divergent Net Zero では、運輸・民生部門でより厳しい排出削減が課せられることになり、ナラティブに設定された石油使用の早期フェーズアウトにつながる。

なお、各シナリオの前提条件はそれぞれ、リスク水準とも対応している。移行リスクは経済的・財務的なインパクトの大きさで測られ、政策対応のスピードや円滑さ、技術革新のスピード、CO₂ 除去への依存性、及び国・地域の多様性によって、それぞれ異なるリスク水準の組み合わせとなる。政策的・技術的に急激な変化が想定される Disorderly カテゴリーは、変化のスピードに関係する要因で高リスクとされる。同様に Net Zero 2050 の技術革新も高リスク要因とされる。CO₂ 除去は、それ自体に副次的なリスク要因もあるが（用語集 Carbon Dioxide Removal の項目参照）、ここでは技術の利用可能性の制約が経済の他の部分での移行をより急激にすることをリスク要因と見ている。Divergent Net Zero は、想定される石油の早期フェーズアウトの結果、CO₂ 除去が少なくて済むと考えられるが、早期フェーズアウト自体がリスク要因となる。国・地域の多様性は、他と比べて強い政策をとる国・地域の存在をリスク要因と見るもので、Delayed Transition で高リスクとされる。

表 3.3.1 NGFS シナリオ（第2版）の主な前提条件（NGFS（2021a）に基づいて作成）

カテゴリー	シナリオ	政策の野心度 (温度目標)	政策の導入	技術 変化	CO ₂ 除去	政策の 地域間差
Orderly (秩序的)	Net Zero 2050	1.5°C	迅速かつ円滑*	早い**	中程度	中程度*
	Below 2°C	1.7°C*	迅速かつ円滑*	中程度*	中程度	小さい
Disorderly (非秩序的)	Divergent Net Zero	1.5°C	迅速だが セクター間で 分岐**	早い**	少ない*	中程度*
	Delayed Transition	1.8°C*	遅延**	早い/ 遅い**	少ない*	大きい**
Hot house world (温暖化 進行)	NDCs	~2.5°C**	NDCs 相当	遅い	少ない*	小さい
	Current Policies	3°C+**	なし (現行政策を 継続)	遅い	少ない*	小さい

**高いリスク要因、*中程度のリスク要因

3.3.2 定量化の結果

ここでは例として CO₂ 排出量、炭素価格及び世界平均気温を取り上げ、定量化された 6 本のシナリオの概略を述べる。詳細は 4 章以降で説明する。

図 3.3.1 に、各シナリオの 2050 年までの CO₂ 排出量と炭素価格を示す。CO₂ 排出量の推移には各シナリオが想定する排出削減政策の野心の違いが反映される。排出削減政策の野心度のナラティブは世界平均気温の上昇量（温度上昇）に関する前提条件に置き換えられ、IAM ではそれが累積 CO₂ 排出量を制約する形となる⁸。CO₂ 排出量の図では各線と横軸で囲まれる面積が累積排出量に当たる。つまり、この面積を所定の範囲に留める条件を課して IAM で最適化された結果が、排出量の経年変化となる。基本的に温度水準が低い野心的なシナリオほど CO₂ 排出量が急速に減少し、1.5°C 水準では 2050 年頃にほぼゼロに達する。排出削減が遅れる（政策導入を 2030 年まで先送りする）Delayed Transition は、同水準の Below 2°C に対して、2030 年代後半から急速に削減することで累積 CO₂ 排出量の上限に帳尻を合わせる形となる。

炭素価格は IAM において排出削減政策の厳しさを表す指標と捉えることができる。政策の厳しさには、温度水準に応じて課される将来の排出制限が反映され、政策の取り組みによる違いも加わる。温度が同水準でも Orderly より Disorderly の方が炭素価格が高くなっており⁹、部門間の違いや取り組みの遅れがより厳しい施策につながることを示唆される。

なお、排出削減政策を考慮する IAM の計算には、CO₂ 排出量を制約する方式と、炭素価格を与える方式がある¹⁰。排出制約の方式では、通常、一定期間にわたる累積排出量に上限を課し、計算結果から各年次の排出量とともに炭素価格を求める。この炭素価格は、通常、IAM の中で「シャドウプライス」として定

⁸ 世界平均気温の上昇量と累積 CO₂ 排出量の間近似的な比例関係があることによる。用語集「カーボンバジェット」参照。

⁹ 1.5°C 水準では、Orderly の Net Zero 2050 より Disorderly の Divergent Net Zero のほうが炭素価格が高くなる。2°C 未満（1.7–1.8°C）水準では、Orderly の Below 2°C より Disorderly の Delayed Transition のほうが、炭素価格が高くなる。

¹⁰ Divergent Net Zero は、Net Zero 2050 の結果に修正を加えた炭素価格で制約して計算する仕様と見られる。

義される。価格制約の方式では、炭素価格は炭素税の性格を持つ外生変数となり、IAM 中の所得恒等式に「税収」が反映される。両方式は計算の仕方が異なるが、排出削減政策の厳しさが同等であれば、方式の違いによらず、炭素価格と CO₂ 排出量の時間変化は 1 対 1 に対応する¹¹。

炭素価格が排出削減政策の野心度を表す指標という捉え方は、炭素価格と排出削減が IAM の定式化の中で完全に結びつくことを反映したものである。現実の排出削減政策で導入される炭素税や排出権取引も排出削減を誘導するものであるが、IAM はこれらの政策が排出量に作用するメカニズムを理想化しており、現実の世界における炭素価格と排出削減の関係は、IAM のそれとは大きく異なる可能性がある。理想化の度合いや方法も IAM によって様々であるため、同じ排出削減シナリオでも炭素価格は IAM の定式化に強く依存する。

世界平均気温は物理的リスクの重要な駆動力となる変数であり、IAM から出力される CO₂ 等の温室効果ガスや大気汚染物質の排出量を元に、気候モデルを用いて定量化される。さらにその結果を元に、部門毎の影響評価モデルを用いて各種の影響要素のシナリオが定量化される。このようなシナリオの受け渡しの中で、世界平均気温は移行リスクと物理的リスクの両シナリオを対応づける要素に当たる (Box 4)。

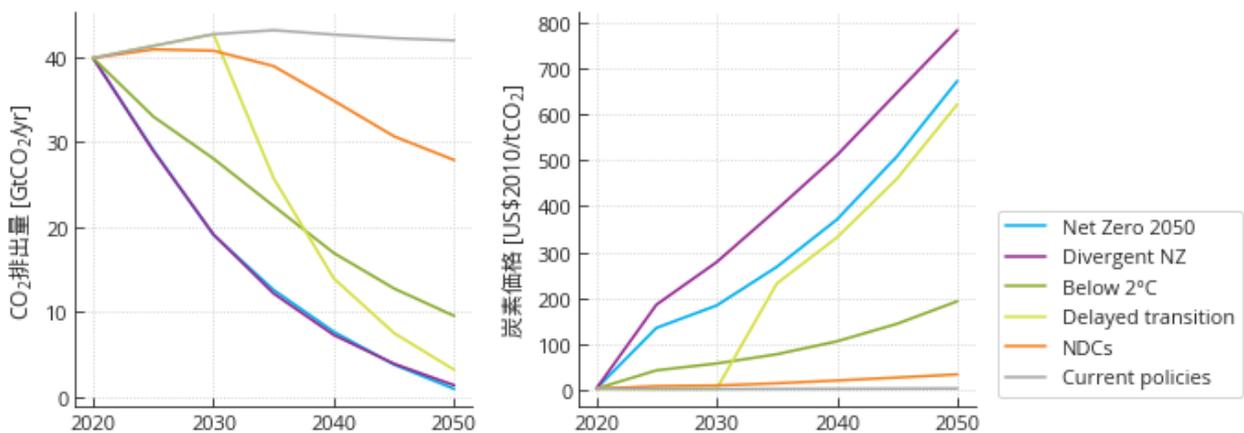


図 3.3.1 各シナリオの CO₂ 排出量と炭素価格の経年変化

図 3.3.2 に各シナリオにおける世界平均気温の見通しを示す。温度上昇の予測に不確実性があるため少なからず幅があるが、その分布から、Hot house world に分類された 2 つのシナリオ (NDCs・Current Policies) は、2°C ないし 3°C 超、他は 2°C 未満で推移する公算が高いと見られる。Hot house world 以外のシナリオは、パリ協定の「2°C より十分低く、1.5°C を目指す努力を追求」する目標の水準に近い。Orderly に分類された Net Zero 2050 と Below 2°C は、それぞれのナラティブに 1.5°C と 2°C 未満の温度水準が記載されており、定量化されたシナリオもその水準にある。Disorderly に分類された 2 本のシナリオも同様の水準にあり、Delayed Transition が 2°C 未満に、Divergent Net Zero が 1.5°C に対応する。

1.5°C 目標に整合する 2 つは、シナリオ名にネットゼロ (Net Zero) を冠する。これは前述のように、

¹¹ 価格制約方式の炭素価格は、その結果が所定の排出制約方式の結果と等価となるので、実質的に内生変数と見なせる。これに対し、IAM 中には炭素価格を完全に外生変数として扱うものもある。IEA (国際エネルギー機関) のシナリオ (Box 3 と 4.4 節で参照) の作成に使われるモデルがそれに当たる。このモデルでは、燃料毎に使用コストを相対的に変化させてエネルギー需要に影響を与えるように炭素価格が設定される (IEA, 2021a)。

2050年頃にネットゼロ排出に到達することによるものである。温暖化を所定の水準に留めるには、遅かれ早かれ正味のCO₂排出量をゼロ（ネットゼロ）にして、以降はその状態を保って累積排出量を一定に維持する必要がある。温度目標の高低は、基本的にネットゼロ排出の到達時点を前後することに相当する。1.5°Cの場合はネットゼロ排出の到達時点の目安が2050年頃とされており(IPCC, 2018)、これがシナリオ名に使われた格好である。温度目標の水準が2°C未満に設定されているシナリオ（Below 2°C・Delayed Transition）の場合もネットゼロ排出に向かうことに変わりはないが、ネットゼロ到達は2050年よりは少し先となる。

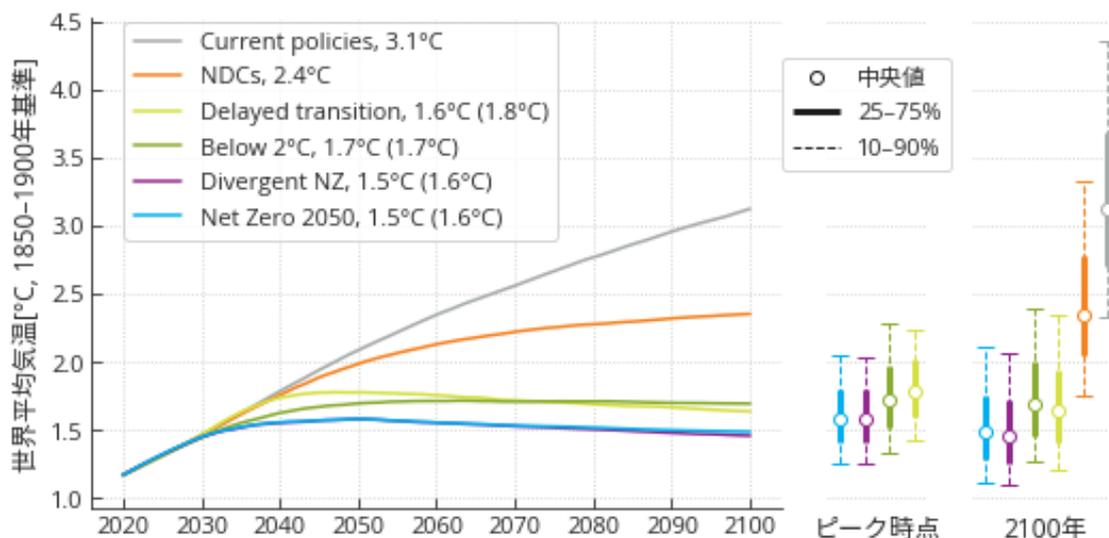


図 3.3.2 各シナリオの世界平均気温の見通し

3.4 NGFS シナリオへの批判

複数の学術研究機関のコンソーシアムによって作成された NGFS シナリオは、データセットだけでなく技術的な仕様の大部分が公開されている。そのため、中央銀行や金融規制当局だけでなく、市中金融機関や研究機関等、幅広い層が利用することができる。他方、NGFS シナリオはまだ新しい取り組みであることから、現時点では気候モデルや統合評価モデルの研究者による批判・検証は少ない。

本節では、気候関連リスク分析に関連した学術論文、規制当局や市中金融機関の報告書、NGO 等による記事のうち、NGFS シナリオに関する課題等に言及した箇所（NGFS シナリオ第1版に対するものも含む）の概要を整理した（表 3.4.1）。これらは大きく、(1) NGFS シナリオが採用しているシナリオの本数、(2) IAM が出力する変数の妥当性、(3) モデルの構造と実体経済の乖離、の3点に整理できる。

(1) シナリオの本数：NGFS シナリオは、8本（第1版）ないし6本（第2版）のシナリオを、3種類のIAMで定量化することで、将来予測に関する不確実性を考慮できるとしている。一方、IAMを用いたシナリオ分析の成果である IPCC の統合評価報告書では、IPCC に提出された数百本のシナリオ（査読付き論文として公表されたもの）の比較分析にもとづいた分析が行われている。これらと比較した場合において、NGFS シナリオでは考慮できないシナリオや、将来の発展の記述に偏り（バイアス）が生じる可能性もある(Gambhir et al., 2021)。

(2) 変数の妥当性

炭素価格：NGFS シナリオのうち、排出削減が進むシナリオでは、2050年時点の炭素価格がCO₂ 排出1トンあたり 600～1,500USD 程度まで上昇する。NGFS シナリオの炭素価格は、再生可能エネルギーや排出削減技術のコスト水準を踏まえたうえで、排出量の制約を達成するために必要な価格の水準として、IAM内の最適化によって算出されるものである。これに対し、実体経済への影響を踏まえると、この価格水準は現実的ではないという批判がある(Standard Chartered, 2021)。

CO₂ 除去・バイオマス：NGFS シナリオでは、排出量の制約の中で、IAMによってはCO₂ 除去技術（バイオマス+CCSや植林）が導入される。CO₂ 除去技術のうち、バイオマス+CCSについては、現時点では大規模商用化の段階にない技術であるため、将来のコストや導入規模に対して一定の仮定が置かれる。また、バイオマスの生産や植林については、土地利用の制約（食糧生産との競合や水資源の制約を含む）の仮定によって、将来の導入量が増減する。これらの仮定やそれにもとづく計算結果の妥当性について、批判がある(Standard Chartered, 2021; Reclaim Finance, 2021)。

化石燃料の価格：NGFS シナリオでは、地域内・地域間の需要・供給のバランスを踏まえて化石燃料の価格が決定される。この際、価格決定に関する IAM 内の定式化や関連する変数の挙動によって、化石燃料の価格は上昇・下落のいずれの場合もあり得る。これらの IAM の計算結果の妥当性に対して、批判がある(Standard Chartered, 2021)。

(3) モデルの構造と実態経済の乖離：NGFS シナリオを構成する一連のモデルは、気候変動が経済・社会に与える影響を定式化したものであるが、技術的な理由により、実態経済で想定されるすべての影響をモデル化できるわけではない(Gourdel et al., 2021)。

表 3.4.1 NGFS シナリオの課題に言及した文献と概要

文献	種類	概要
Standard Chartered (2021)	市中金融機関による報告書	<ul style="list-style-type: none"> IEA Net Zero 2050 シナリオは大半のセクターが 2050 年までにネットゼロに到達するのに対し、NGFS シナリオの 1.5°C シナリオは電力部門のネガティブエミッションに大きく依存している。 NGFS の 1.5°C シナリオの炭素価格は高すぎる。 化石燃料の生産量が減少するにつれて価格が低下すると期待されるが、NGFS シナリオの化石燃料の価格は概ね一定であり、適切な仮定とはいえない。
Reclaim Finance (2021)	NGO 等による批判記事	<ul style="list-style-type: none"> NGFS の 1.5°C シナリオは、CCS 及び BECCS（CCS 付きバイオマス発電）技術に大きく依存しており、化石燃料の使用量の減少速度が遅い。 持続可能なポテンシャルに対して、大量のバイオマスに依存している。
Gambhir et al., (2021)	学術論文	<ul style="list-style-type: none"> NGFS シナリオ（第1版）は、将来起こりうる社会経済的な要因（社会経済、技術オプション、気候変動の緩和に向けた行動の時期、気候変動の緩和に関する政策導入の地域差等）の変化や温度上昇による物理的影響の幅が狭い
Gourdel et al. (2021)	学術論文（プレプリント）	<ul style="list-style-type: none"> NGFS シナリオの気候変動の緩和シナリオは、投資家の変化（企業への期待、リスク認識、低炭素オプションへの投資等）による経済への影響を反映していない。

Box 1 統合評価モデル (IAM) の類型

NGFS シナリオの作成に使われた各 IAM (Box 2) の特徴をモデル類型の観点で整理する。ここでは文献(Clarke et al., 2015; 藤井, 2018; Forster et al., 2018)に基づいて、IAM を集約化の度合い、数学的な解法、将来の見通し、及び経済主体・部門の表現の点でそれぞれ 2 種類に分類し、その組み合わせで類型化する。

集約化の度合い：NGFS シナリオ (第 2 版) に採用された 3 種類の IAM は、いずれも トップダウン型 に分類される。トップダウン型はシステム全体を集約的に分析する方式で、特定の部門で技術的な要素を積み上げるボトムアップ型と対比される。移行リスクシナリオは世界全体の気候緩和戦略が関心の対象で、多くの場合、個別の技術的詳細より、システム全体における相互作用に焦点を当てた世界規模での集約的なアプローチがとられる。ただし、エネルギーシステムでエネルギー供給・需要部門が詳細に表現される等、ボトムアップ的な要素も含まれる。

数学的な解法：NGFS シナリオ (第 2 版) に採用された 3 種類の IAM は、最適化モデル に分類される。これは、目的関数を所定の制約条件の下で最大・最小化する解法を用いる。目的関数は、システムの挙動をある種の価値評価に基づいて決定するもので、システムの総コストや収益、あるいは社会全体の厚生 (welfare) が使われる。後述の Box 2 に示すように、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 は 厚生最大化、GCAM 5.3 は コスト最小化 を用いる。最適化モデルと対比されるのは シミュレーションモデル で、価値評価によらないシステムの動的挙動に基づいて将来を予測する。代表的なものとしては、IEA (国際エネルギー機関) のシナリオは、シミュレーションモデルに分類される World Energy Model(IEA, 2021a)で作成されている。

将来の見通し：モデルの求解法に関するもので、需要、生産、技術、価格等の将来の状態を完全に予見して解を求める 完全予見型 (perfect foresight) か、近視眼的な予見に留まる 近視眼型 (myopic) かで分類される。REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 は完全予見型、GCAM 5.3 は近視眼型に当たる。最適化モデルの場合、完全予見型では多時点 (通常 5-10 年間隔) の最適化を同時に実行し、近視眼型では逐次的に将来情報なしで最適化する。この場合、前者は時点間 (intertemporal) 最適化、後者は再帰動学 (recursive-dynamic) と呼ばれる。

経済主体・部門の表現：すべての主体とそれらの相互作用を完全に表現する 一般均衡 と、エネルギー部門や農業部門等の一部を詳細に記述する一方で、他は外生的な仮定をおく 部分均衡 に分類される。IAM が多数の要素モジュールから構成される場合、モジュール別に異なる方式を採用することもある。主要モジュールについては REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 は 一般均衡型 で、GCAM 5.3 は 部分均衡型 となる。経済表現の違いはモデル構造の複雑さと関係するため、全体のバランスから特定の求解法と組み合わせられることが多く、経済部門や地域分割の粒度とも関係する。詳細に表現する場合は多部門部分均衡・逐次最適化 (再帰動学)、ある程度簡略化する場合は一部門一般均衡・時点間最適化という組み合わせが典型で、GCAM と他 2 つもこのように括られ、地域粒度の違い (Box 2 表 B.2.1、Box 3 図 B.3.1) とも整合する。

Box 2 シナリオ作成に使われた 3 種類の統合評価モデル (IAM) の諸元と特徴

表 B.2.1 に、NGFS の移行リスクシナリオの作成に使われた 3 種類の IAM の特徴をまとめる。いずれも世界の代表的な研究機関で開発され、緩和シナリオの研究で広く活用されてきた実績がある。

表 B.2.1 NGFS シナリオが採用する 3 種類の IAM の諸元 (NGFS (2021a) を参考に電中研作成)

項目	REMIND-MAGPIE 2.1-4.2	MESSAGEix-GLOBIM 1.1	GCAM 5.3
開発機関	Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)	International Institute of Applied System Analysis (IIASA)	University of Maryland (UMD)
経済主体・部門の表現	REMIND: 一般均衡モデル MAGPIE: 部分均衡モデル	一般均衡モデル	部分均衡モデル
将来の見通し	REMIND: 時点間最適化 MAGPIE: 再帰動学	時点間最適化	再帰動学
数学的な解法	REMIND: 厚生最大化 MAGPIE: コスト最小化	厚生最大化	コスト最小化
基準年	2005 年	1990 年	2015 年
空間解像度	世界 12 地域 (日本含む)	世界 11 地域	世界 32 地域 (日本含む)
技術変化	太陽光・風力・蓄電は内生変数	外生変数	外生変数
需要家サイドの技術オプション	エネルギー効率改善、電化 (建物・産業・運輸)、CCS 等、17 種類	エネルギー効率改善、電化 (建物・産業・運輸)、CCS 等、16 種類	エネルギー効率改善、電化 (建物・産業・運輸)、CCS 等、14 種類
供給サイドの技術オプション	太陽光、風力、原子力、CCS、水素等、17 種類	太陽光、風力、原子力、CCS、水素等、20 種類	太陽光、風力、原子力、CCS、水素等、18 種類
土地利用・農業・森林分野のオプション	森林劣化防止・保全、水田メタン放出削減、窒素汚染削減等、7 種類	森林劣化防止・保全、森林管理、保全農業、水田メタン放出削減、窒素汚染削減等、8 種類	森林劣化防止・保全、森林管理、水田メタン放出削減、窒素汚染削減等、8 種類

シナリオデータは、それぞれの IAM で核となる経済において、厚生最大化もしくはコスト最小化の点で最適化された結果である。IAM はその定式化の範囲で合理的な解を導くが、それは現実の世界の動きを極度に簡略化したものに過ぎず、簡略化の方法は IAM に依存する。なお、モデル構造は GCAM と他の 2 つで特徴的な違いがある (Box 1)。ナラティブの定式化やエネルギー・土地部門の多岐にわたる技術的詳細 (本文: 表 3.3.1) も、IAM に依存する。この中には、行動様式の変化、政策の異質性、資本の市場配分といった、定量化における任意性の強い要素もある。ここでは一部のシナリオ変数に注目して、IAM 間の違いを例示する。

図 B.2.1 に、Net Zero 2050. Delayed Transition・Current Policies について、世界全体の CO₂ 排出量の推移を示す。排出量は総量 (図 B.2.1 左) とエネルギー部門 (セメント製造等の工業プロセスを含む) (図 B.2.1 右) を示し、両者の差は AFOLU 部門 (土地利用) の排出である。IAM 間の相対的な違いとして、REMIND-MAGPIE 2.1-4.2 は全体的に排出量が少なく、GCAM 5.3 は排出削減が 2030 年まで緩やかだがその後加速する、といった傾向が見られる。Net Zero 2050 で GCAM 5.3 はネットゼロ排出に到達する時期が早く、その後もさらに削減が進む (CO₂ 除去が拡大する) 傾向が強い。エネルギー部門の排出は、REMIND-MAGPIE 2.1-4.2 では総排出とほぼ同時にネットゼロに達するのに対し、

GCAM 5.3 と MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 では総排出がネットゼロとなる時点で残余排出がある。

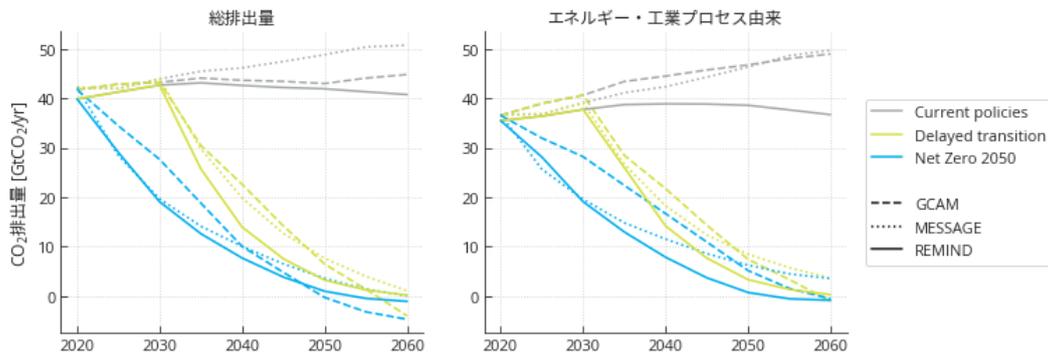


図 B. 2.1 IAM 間の CO₂ 排出量（世界合計）の違い

図 B.2.2 に、同期間の世界全体で平均された炭素価格と電力価格の推移を示し、Net Zero 2050 及び Delayed Transition について比較する。電力価格は REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と GCAM 5.3 のみの比較である。炭素価格の増加傾向は IAM 間で類似するものの、定量的な違いが目立つ。GCAM 5.3 では 2050 年近くになってから増加率が大きくなる。MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 では Delayed Transition で全体的に高水準となり、Net Zero 2050 との違いが大きい。電力価格は、GCAM 5.3 では安定しているが、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 では局所的な上昇がある（MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 は、世界全体の電力価格を報告していない）。REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 の価格変動は、排出削減の開始時点に対応するように、Delayed Transition の方が 10 年程度遅れる。

このような IAM 間の差異が何に起因するか見極めるのは難しいが、各 IAM の定式化と特徴的な振舞いからある程度推測できる。ネットゼロに向かう排出経路で REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 の排出削減が GCAM 5.3 より早く進む傾向は、最適化における将来の予見性の違い（BOX 1）に関係する可能性がある。エネルギー部門より先に総排出量がゼロに達するのは、土地部門の排出削減への比重の置き方に関係すると見られ、GCAM 5.3 と MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 は相対的に土地部門の削減ポテンシャルが大きい可能性がある。加えて、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 は、Current policies での排出量が多めであり、ゼロまで減らすのがより困難なエネルギー需給と技術オプションとなっている可能性がある。いずれにしろシナリオは本来不確実なものであり、NGFS シナリオは、6 通りのナラティブを 3 通りの IAM で定量化することによって不確実性を考慮していると理解される。

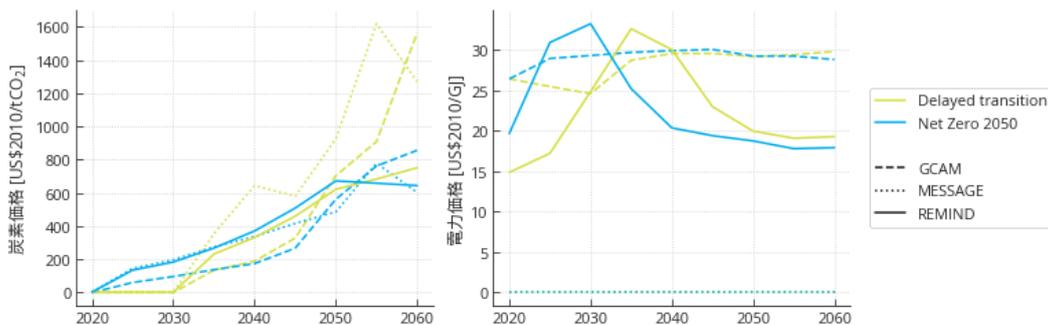


図 B. 2.2 IAM 間の炭素価格と電力価格（世界平均）の違い（電力価格は GCAM と REMIND のみ）

Box 3 データの地理的解像度とダウンスケーリング

シナリオデータを利用する際の制約として、データの地域的な粒度が挙げられる。図B.3.1に示すように、GCAM と REMIND では日本が単独地域として定義されるが、MESSAGE では日本はオーストラリア・ニュージーランドと合わせた3カ国の地域として扱われる。GCAM の地理的解像度は他より細かくなっており、地域数は他の3倍近くある。

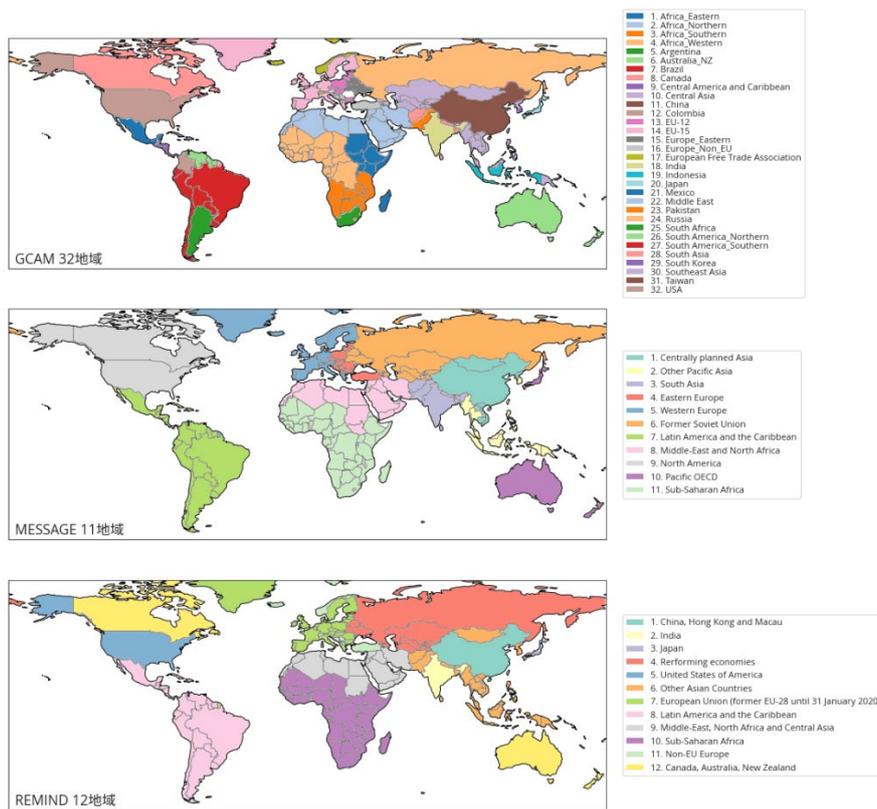


図 B. 3. 1 GCAM、MESSAGE 及び REMIND の地域区分 (NGFS (2021a) Table A1 に基づいて作成)

地理的解像度の制約で国単位データが不足するところは、NGFS シナリオ (第 2 版) で導入された国別ダウンスケーリングによってある程度補完される。ダウンスケーリングとは空間的に粗い情報から細かい情報を導出する手続きを指し、複数の国で合算されたシナリオを国別に按分することに当たる。NGFS シナリオ (第 2 版) では、ダウンスケーリングによって 132 カ国のデータが整備された。対象の変数は全体の 2/3 程度で、2050 年までのデータが提供される。

ダウンスケーリングの方法は、短期の国別トレンド (実績ベース) をその国を含む広域地域の長期見通し (IAM の結果) に所定の条件で収束させる考え方に基づく (NGFS, 2021a, p.24)。具体的には、最終エネルギーと一人当たり GDP の経験的関係を短期・長期でそれぞれ仮定し、両者を線形結合して重みを時間に関して線形に変化させる形で定式化される。重みが増加して短期トレンドの寄与がゼロになるところが収束時点となる。収束条件には各国特有の制度的な要因が考慮される仕様だが、現状では必ずしも個別の事情が反映されていないようである (NGFS, 2021b, p.22)。対象の変数はエネルギーとエネルギー

ギー関連 CO₂ 排出とされ、最終エネルギーはエネルギーキャリア別・部門別、二次エネルギーはキャリア別・燃料（電源）別に扱われる。エネルギーキャリアは、電気、ガス、熱、水素、液体燃料、固体燃料に区分される。

図 B.3.2 に、MESSAGE の日本を含む地域（Pacific OECD）のダウンスケーリングデータを示し、日本単独の地域が元々定義される（ネイティブ地域として扱われる）GCAM・REMIND と比較する。これは、上段から順に、GDP（購買力平価、単位を 2010 年 USD に統一）、最終エネルギー、発電電力量及びエネルギー由来 CO₂ 排出量（WEO-2021 のみ工業プロセス由来含む）の経年変化を示す。参考のため、IEA の World Energy Outlook（WEO）とも比較する。ここでは、2021 年版（WEO-2021;（IEA, 2021b））の APS（公約宣言シナリオ）と STEPS（公表政策シナリオ）を参照し、NGFS の Net Zero 2050 を APS と、NDCs、Current Policies を STEPS と、それぞれ対応づける。WEO の GDP は、シナリオに依存しない共通の値が設定されている。

以下、ダウンスケーリングデータの加法性と、ダウンスケーリング・ネイティブを含めた IAM 間の一貫性に注目する。WEO-2021 のシナリオは NGFS のナラティブと厳密に対応するものではないが、ここでは NGFS の IAM 間に見られる違いを解釈する際の参考とする。

加法性は、ダウンスケーリングされた 3 ヶ国の合計と元のネイティブ地域の値でずれがないかどうかを指す。図 B.3.2 に示した変数では、GDP を除き、判別可能なずれはない。GDP では 2030 年頃まで若干のずれが見られる。これが方法論的に避けられないかどうか判断できないが、ずれの経年変化はダウンスケーリングで実績ベースの重みが徐々に減少することと符号する。図には示していないが、加法性が満たされない変数はエネルギー関連以外で散見される。それらと比べると GDP のずれは僅かである。

IAM 間の一貫性は変数によって特徴的な違いがある。GDP はいずれの NGFS シナリオも SSP2（用語集参照）と呼ばれる参照値が基になる。このため IAM 間でもシナリオ間でも大きな違いはない。ただし、図 B.3.2 では、GCAM の値が他と比べてやや小さい。これは、各 IAM の最適化方式の違いではなく、SSP2 の参照値の違いが関係すると見られる。SSP2 は NGFS とは異なるナラティブを定量化したもので、2 種類のデータがある。図 B.3.2 には示していないが、各 IAM の GDP の経年変化は 2 種類の SSP2 のいずれかと良く対応しており、IAM 間の違いが SSP2 の元データの違いに依存することを示唆する。

最終エネルギーは、ネイティブ地域のデータは全て減少傾向で、低排出のシナリオ（Net Zero 2050）ほどその度合いが大きい。これに対しダウンスケーリングされた日本のデータは、高排出シナリオ（NDCs・Current Policies）で 2030 年頃に一時的に増加し、その後は小幅な減少（NDCs）もしくはほぼ一定（Current Policies）で推移する。日本でエネルギー消費が減少するのは人口の減少に対応するが、オーストラリア・ニュージーランドと合わさるとその傾向が弱まると理解される。Net Zero 2050 では、厳しい排出削減政策が反映されて、MESSAGE の 3 地域も 2020 年以降顕著に減少する。日本の減少幅は GCAM 及び WEO-2021 の APS と同程度である。REMIND は他と比べて減少幅が大きくなっており、排出削減政策がより強く反映される特徴が伺える。

発電電力量は、日本のダウンスケーリングデータが 2010 年より後の 20 年間で、WEO-2021 を含むネイティブ地域のデータと比べて過小となっている。MESSAGE の 3 ヶ国合計が減少する中で、オーストラリアが 2010 年直後に大きく増加しており、その齟齬が日本に及んでいるように見受けられる。電力は排出削減につながる技術オプションが豊富にあるため、最終エネルギーが減少する中でも発電電力量は

堅調に推移する。ただし定量的には IAM 間で比較的大きな差がある。全体的に、GCAM が最大で REMIND が最小、MESSAGE ダウンスケーリングは低排出シナリオで GCAM 寄り、高排出シナリオで REMIND 寄りとなる。

エネルギー由来の CO₂ 排出量も IAM 間の差が大きい。この中には、WEO-2021 の所定のシナリオと近いものや大きく異なるものが混在する。WEO-2021 の STEPS には第 6 次エネルギー基本計画が反映され、APS にはそれに加えて 2050 年カーボンニュートラル宣言が反映されている。これらの政策が NGFS のナラティブの定量化で考慮されるわけではないが、各 IAM の特徴を相対化する目安となる。GCAM は NDCs と Current Policies で大きな開きがあり、その間に STEPS が位置する。対照的に REMIND は両シナリオの差が小さく STEPS とも近い。MESSAGE ダウンスケーリングは両シナリオとも STEPS より上に位置するが、NDCs では差が縮まる。Net Zero 2050 では、REMIND が早期の急速な減少、GCAM が緩やかな減少、MESSAGE ダウンスケーリングがその中間と分かれ、GCAM が 2050 年を除き APS に近い。

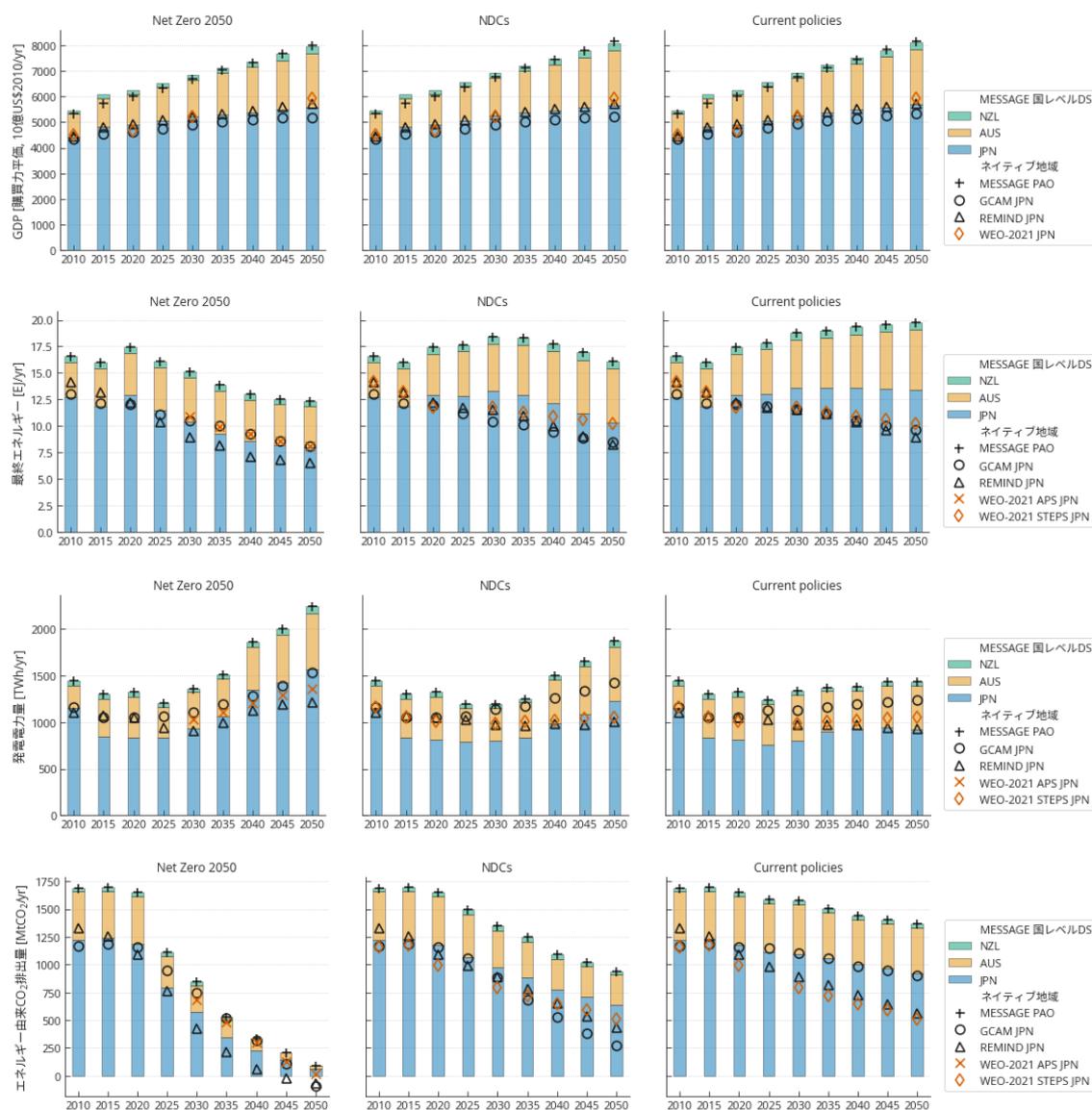


図 B.3.2 日本の MESSAGE ダウンスケーリングデータと GCAM・REMIND・IEA WEO-2021 との比較

Box 4 物理的リスクシナリオへのリンクとその考え方

移行リスクシナリオを扱う IAM と比べて、物理的リスクシナリオの定量化は、より複雑で大がかりな手順を踏む。ベースとなるのは気候モデルによるシミュレーション計算で、この結果から気温、降水量、風速等の時空間分布が得られる。気候モデルは IAM と比べて計算負荷が格段に高い上に、不確実性を考慮するために、複数の気候モデルによる多数の計算が必要となる。

気候モデルの出力データは、それ自体が物理的リスクの気候要素のシナリオとなり、さらにそれを元に専用の影響評価モデルで計算した結果から、様々な影響要素のシナリオが得られる。影響には、熱波、洪水、渇水、台風、山火事等の極端事象によるハザードや穀物収量等の農業に関連する要素がある。これらは、被害額、労働生産性の低下、影響を受ける人口・土地の割合のように指標化される。気候影響は多くの場合で地域固有のモデル化が必要となる。加えて、モデルの不確実性を考慮するために、影響要素・地域別に複数のモデルを比較することが一般に行われる。

このように複雑で大規模な計算を要するところを、NGFS では既存のプロダクトを活用する独自のアプローチを採用している。既存のプロダクトからは、ISIMIP が提供する気候・影響評価モデルの出力データと、CLIMADA が対象とする極端事象による経済損失の情報が使われた。ISIMIP は、REMIND の開発機関でもあるドイツ・ポツダム気候影響研究所（PIK）が主導する気候影響分野のモデル比較研究である（用語集参照）。CLIMADA はスイス連邦工科大学チューリッヒ校（ETHZ）の災害リスクモデリングの枠組みで、ISIMIP のデータが前提条件となる。

シナリオデータの提供は、Climate Analytics（気候変動を専門とするドイツ・ベルリン拠点の非営利組織）が開発したウェブ上の Climate Impact Explorer が受け持つ。このツールでは、本報告書執筆時点（2022年3月）で、気候、水文（河川流出等）、極端事象、農業及び経済損失の面で、計32要素の情報を地域別の時系列や空間マップの形で閲覧できる。この中で日本は都道府県規模までフォーカスできる。

既存のプロダクトは NGFS のナラティブに対応するシナリオとは無関係であるため、両者の対応づけには工夫を要する。ここは NGFS のアプローチで中核となるところで複雑な処理を経るが、大まかには次のような2段階の手順となる。

- 1) ISIMIP の地点別時系列を 0.1°C 間隔の温暖化水準（世界平均気温の上昇量）で区分し、複数モデルの結果から温暖化水準別に区分データを集める。
- 2) この区分集合を統計処理して、温暖化水準を基準に移行リスクシナリオの時系列に割り付ける。つまり、様々なシナリオ・モデルの組み合わせによる時系列データを温暖化水準で切り分けて、NGFS の経路に沿って並べ直すイメージである。

移行リスクシナリオには、簡易気候モデル MAGICC（用語集参照）で計算された温暖化水準の要素が含まれる（本文：図 3.3.2）。区分集合の並びはこの温暖化水準に対応する。この対応づけでは2つの不確実範囲が考慮される。1つは MAGICC の気候計算の不確実性で、もう1つは物理指標の区分集合に反映される気候・影響モデルの不確実性である。

気候・影響シミュレーションは頻繁に実行できるものではないが、研究の発展によって新しい知見がモデルに反映され、数年程度の間隔で更新された計算結果が公開されることが多い。NGFS 第2版が公開された後、IPCC 第1作業部会の第6次評価報告書が2021年8月に発表された。IPCCの報告書はモデル更新の契機となるため、MAGICCも含めた一連の気候・影響モデルは本報告書執筆時点で更新の過渡期にある。第6次評価報告書では従来と比べて気候予測の不確実幅が狭まっている。このような新しい知見は、NGFSシナリオの新版に徐々に反映されると見込まれる。

4 主要変数の比較による NGFS シナリオ（第2版）の特徴

気候関連の金融リスク分析の文脈で用いられるシナリオは、将来の経済社会・技術の発展を定性的に記述したナラティブを元に、統合評価モデル（IAM）や気候モデルといった複数の定量的なモデルを組み合わせて定量化される。この際、同一のナラティブの下でも、細かい前提条件やモデルの構造・解法・経済表現等によって、定量化される結果は異なる。NGFS シナリオ（第2版）では、3種類の IAM を用いてそれぞれ定量化を行うことで、将来の不確実性の幅を捉えようとしている。

本章では、NGFS シナリオ（第2版）の移行リスクに関連する主要な変数に着目し、シナリオの特徴を整理する。具体的には、CO₂ 排出量、CO₂ 除去量、炭素価格、一次エネルギー、二次エネルギー（発電電力量）、最終エネルギー、エネルギー価格（化石燃料・電力）、エネルギー関連の資本コストと投資額を採り上げる。

4.1 節では、世界全体を対象に定量化された変数の特徴を整理し、NGFS シナリオ（第2版）の特徴を概観する。4.2 節では、日本を対象に同様の整理を行い、世界全体との比較から日本の特徴を考察する。さらに4.3 節では、世界の主要地域（先進国及び新興国）の間でこれらの変数を比較することで、各地域の特徴を考察する。なお、これらの整理にあたっては、IAM による定量化の違いや不確実性の幅、定量結果の妥当性等についても、必要に応じて言及する。

4.4 節では、NGFS シナリオ（第2版）における定量化の傾向を把握するため、世界全体と日本のそれぞれについて、NGFS 以外の代表的な既往シナリオにおける計算結果との比較を行う。前述のとおり NGFS では、将来の不確実性の幅を捉えるために3種類の IAM による定量化を行っている。一方、気候変動分野では、これまで数多くのシナリオ分析の蓄積があり、NGFS（第2版）で採用された3種類の以外にも多数の IAM や IAM 以外の手法による定量化の結果の蓄積がある。これらを NGFS シナリオ（第2版）と比較することで、NGFS の3種類の IAM による定量結果の妥当性・十分性を検証する。

4.1 NGFS シナリオ（第2版）の概観：世界全体

4.1.1 CO₂ 排出量

IAM に共通するシナリオの特徴

Net Zero 2050・Divergent Net Zero：野心度の高い排出削減政策が早期に導入される想定が置かれている（「政策の野心度」は「1.5°C」、「政策の導入」は「迅速」）。他の4シナリオと比較してCO₂排出削減のペースが早く、2050年には正味の排出量がほぼゼロとなる（図4.1.1●●）。

Below 2°C・Delayed Transition：中程度の排出削減政策が導入されるが、導入のタイミングは異なる（「政策の野心度」は「1.7°C」～「1.8°C」、「政策の導入」については、Below 2°Cは「迅速」、Delayed Transitionは「遅延」(delayed)）。いずれも、2050年に向けて排出削減が進むものの、Delayed Transitionでは2030年までは排出が増加し、2030年以降に急速に削減が進む（図4.1.1●●）。

NDCs・Current Policies：現行の政策に相当する排出削減政策が想定されている（「政策の野心度」は2100年時点で「2.5°C」～「3°C+」、「政策の導入」はNDCsでは「NDCs相当」（各国の目標に準拠、ただし2020年12月までに提出されたNDCに限る）、Current Policiesでは「なし」）。CO₂排出量は2050年に向けて小幅な減少留まる、もしくは増加する。なお、NDCsの排出削減率は、1.5°C目標（Net Zero 2050）や2°C未満目標（Below 2°C）の達成に必要な水準に達していない¹²（図4.1.1●●）。

IAM間の相違

シナリオ間のCO₂排出量の大小関係は、それぞれのIAMにおいて概ね一貫しているが、CO₂排出量の絶対値には若干のばらつきがある。ただし、CO₂排出量をはじめとするGHG排出量と温度上昇の関係には不確実性があるため、排出量に多少のばらつきがあっても確率的にはほぼ同じ水準の温度上昇となる。

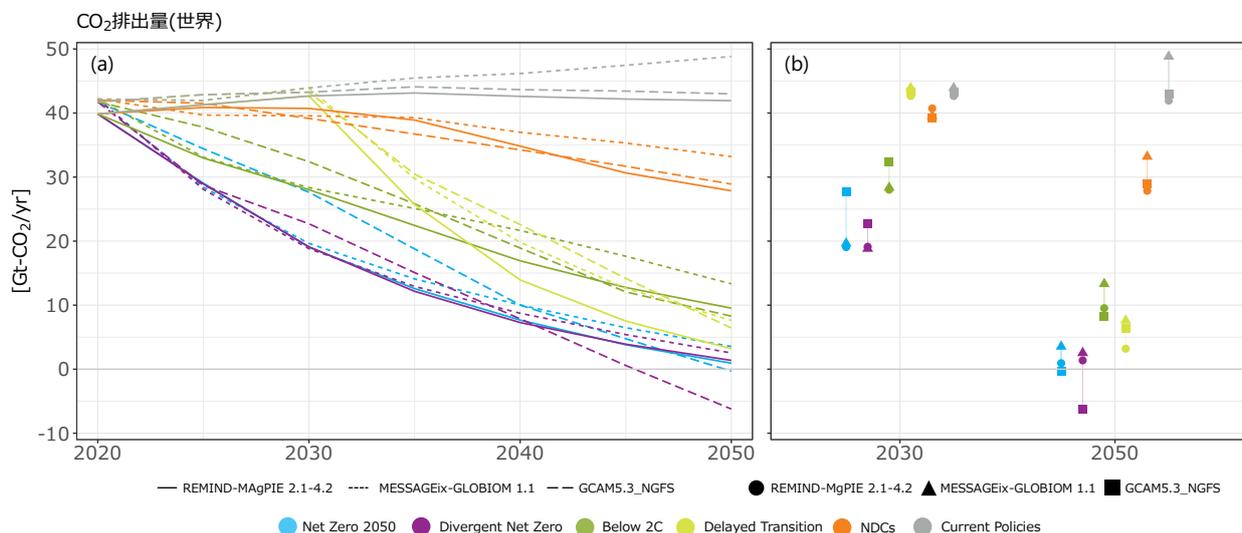


図 4.1.1 世界全体のCO₂排出量の排出経路 (a) 及び2030年・2050年時点の排出量 (b)

¹²ただし、各国の気候変動政策は、気候変動の緩和に向けた国際的な野心度の高まりによって毎年更新されるため、NGFSシナリオ（第2版）のNGFSシナリオが、シナリオ作成や分析の時点における最新の政策と同等であるとは限らない点に、留意すべきである。

4.1.2 炭素価格

NGFS シナリオ（第 2 版）の技術文書によれば、「炭素価格」は 6 シナリオすべてにおける主要な政策手段¹³として経済全体に波及するもので、各シナリオで想定される温度水準に到達する排出削減と整合的に、IAM によって地域ごとに算出される¹⁴。世界全体の炭素価格は、地域ごとに算出された炭素価格を、排出量で加重平均した値である。

炭素価格の算出方法は IAM 内部の定式化に依存し、現実の政策手段として導入されている炭素税や排出権取引とは性質が異なる。NGFS シナリオの IAM から算出される炭素価格は、その時点までの排出量と政策目標のギャップから経済全体に対して IAM 内で設定される排出削減政策の程度を表す指標である。

ただし、NGFS シナリオ（第 2 版）では、IAM から算出される炭素価格をもとに、NiGEM モデルによってマクロ経済への影響が計算される。すなわち、NGFS シナリオ（第 2 版）における炭素価格は、シナリオが想定する排出削減政策のもとでの移行リスクの程度を表している。

IAM に共通するシナリオの特徴

6 シナリオの傾向を俯瞰すると、排出削減政策の野心度が高いシナリオほど、2050 年に向けて炭素価格が上昇する傾向が確認できる。

Net Zero 2050 (1.5°C)：野心度の高い排出削減政策が早期に導入されることにより（「政策の導入」は「迅速」）、2050 年に向けて炭素価格は上昇する（図 4.1.2(b)●）。

Divergent Net Zero (1.5°C)：野心度の高い排出削減政策が早期だがセクター間で強度に差異を伴って導入されることにより（「政策の導入」は「迅速」だがセクター間で分岐）、Net Zero 2050 と比較すると、2030 年・2050 年時点の炭素価格は高い（図 4.1.2(b)●）。

「非秩序的（セクター間で強度に相違）」な排出削減政策を具体化するため、Net Zero 2050 の炭素価格を元に、運輸部門と民生部門の排出に対する炭素価格を他部門の 3 倍に設定することによって、部門間の足並みが揃わないことによる追加的な影響が表現されている（3.3.1 節参照）。

Below 2°C (1.7°C)：中程度の排出削減政策により、Net Zero 2050 と比較すると、2030 年・2050 年時点の炭素価格の上昇幅は小さい（図 4.1.2(b)●）。

Delayed Transition (1.8°C)：排出削減政策の野心度は中程度であるが、2030 年まで排出削減政策は導入されない（「政策の導入」は「遅延」）。そのため、2030 年時点の炭素価格はほぼゼロであるが、2050 年時点の炭素価格は、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 と GCAM 5.3 では Net Zero 2050 よりも高い水準まで上昇する（図 4.1.2(b)●）。

NDCs (2.5°C)・Current Policies (3°C+)：現行の政策に相当する排出削減政策（2.5°C~3°C+）により、2030 年・2050 年の炭素価格はゼロもしくはゼロ近傍に留まる（図 4.1.2(b)●●）。

IAM 間の相違

Net Zero 2050 (1.5°C)、Divergent Net Zero (1.5°C)、及び Delayed Transition (1.8°C) については、2050 年

¹³ NDCs と Current Policies には、炭素価格以外にも、現行の排出削減政策が含まれているとのことである。

¹⁴ Divergent Net Zero では、仕様上、炭素価格が外生変数となるが、その炭素価格が所定の排出削減と整合的であることに変わりはない（3.3.2 節参照）。

時点の炭素価格の大小関係が IAM 間で異なる (図 4.1.2(b))。これは、IAM の経済表現・解法や排出量の移行経路の違い等によって、シナリオのナラティブと炭素価格の対応関係が必ずしも一対一にはならないことを示している。炭素価格を、排出削減政策の強度や移行リスクの程度を示す指標であるとするならば、上記 3 シナリオにおけるそれらの定量的な関係は IAM によって異なる点に留意する必要がある。

REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 : Divergent Net Zero ● (1.5°C) > Net Zero 2050 ● (1.5°C) > Delayed Transition ● (1.8°C)

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : Delayed Transition ▲ (1.8°C) > Divergent Net Zero ▲ (1.5°C) > Net Zero 2050 ▲ (1.5°C)

GCAM 5.3 : Divergent Net Zero ■ (1.5°C) >> Delayed Transition ■ (1.8°C) > Net Zero 2050 ■ (1.5°C)

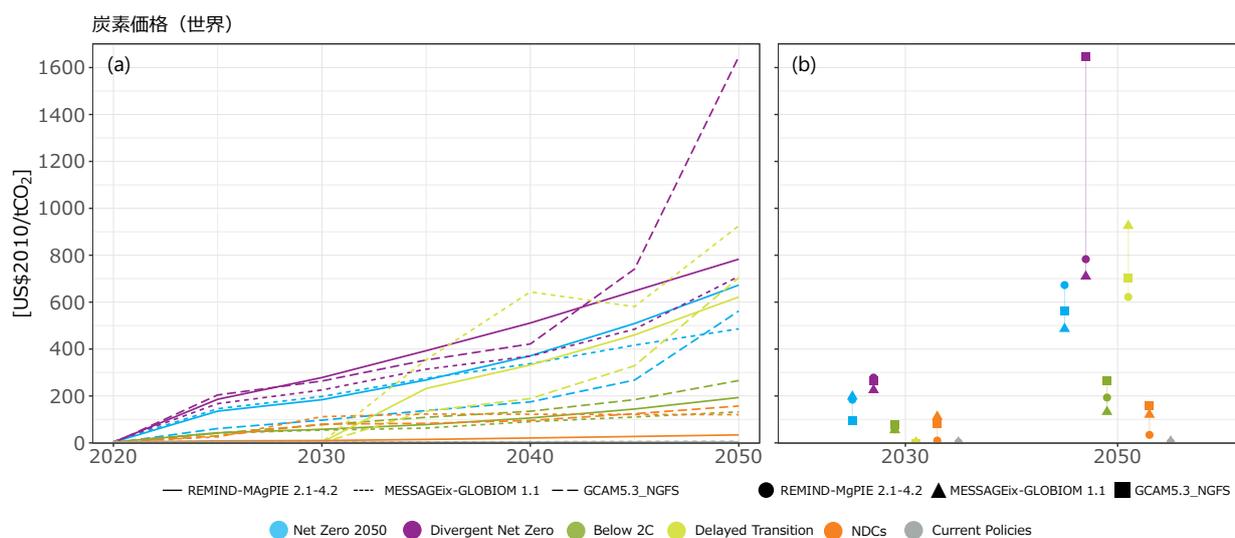


図 4.1.2 世界全体の炭素価格の移行経路 (a) 及び 2030 年・2050 年時点の炭素価格 (b)

4.1.3 部門別 CO₂ 排出量

IAM 内部では、排出削減政策と技術・コスト等の制約条件のもとで、エネルギー消費 (4.1.5 節、4.1.6 節、4.1.8 節参照) と土地利用のそれぞれについて、個々の部門の活動量とそれに伴う排出量が計算される。そのため、CO₂ 排出量の削減は必ずしも全ての部門で一様に進むわけではない。

IAM に共通するシナリオの特徴

排出削減政策が厳しいシナリオほど 2050 年時点の CO₂ 排出量はゼロに近づくが (図 4.1.3)、その中でも運輸部門 ■からの残余排出は他の部門と比較すると多い傾向がある (図 4.1.3(a)(b))。一方、エネルギー供給部門 (電力 ■、その他 ■) と AFOLU 部門 ■ (土地利用)¹⁵については、シナリオによって排出量がマイナス (排出量よりも CO₂ 除去の量が多い) となる場合がある (図 4.1.3(a)(c))。

Net Zero 2050・Divergent Net Zero (1.5°C) : 2050 年時点の運輸部門 ■の CO₂ 排出量は極力抑えられ、エネルギー供給部門 (電力 ■、その他 ■) と AFOLU 部門 ■ (土地利用) の CO₂ 排出量はゼロ近傍もしくはマイナスとなる。(図 4.1.3(a)(b))

¹⁵ AFOLU は Agriculture, Forestry and Other Land Use の略称 (用語集参照)

Below 2°C・Delayed Transition (1.7°C~1.8°C) : 2050年時点の運輸部門(オレンジ)のCO₂排出量は中程度、エネルギー供給部門(電力(青)、その他供給(水色))とAFOLU部門(緑)のCO₂排出量は多くの場合ゼロ近傍となる。(図4.1.3(c)(d))

NDCs・Current Policies (2.5°C~3°C+) : 2050年時点で、AFOLU部門(緑)を除くすべての部門でCO₂の残余排出がみられる。(図4.1.3(e)(f))

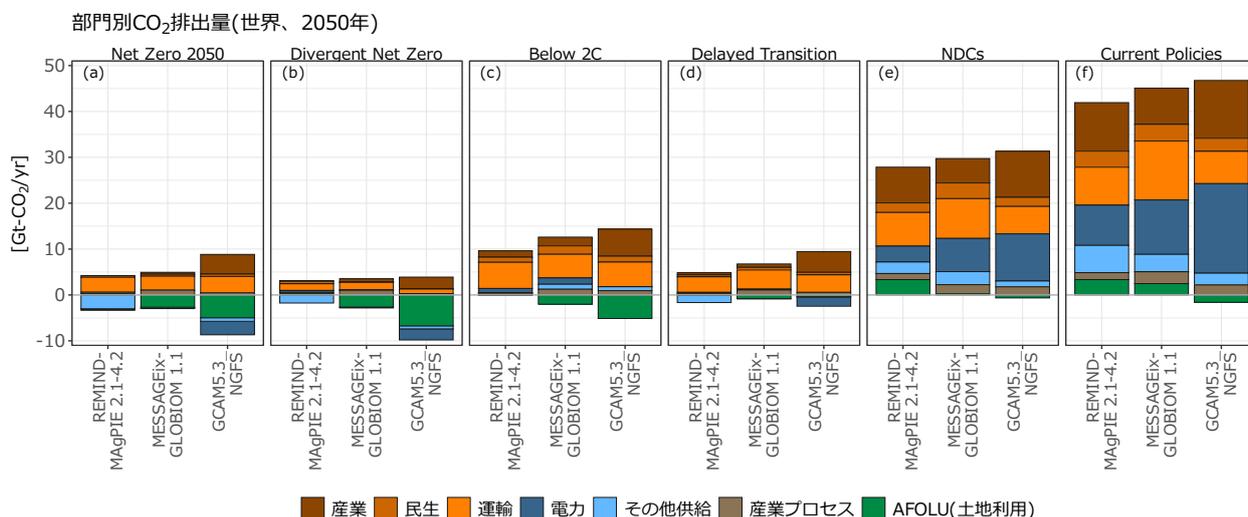


図 4.1.3 2050年時点の部門別CO₂排出量¹⁶(世界)

IAM間の相違

総排出量についてはIAM間で顕著な差はみられないが(図4.1.1)、2050年時点の部門別の排出量(図4.1.3)や2050年までの部門別の排出経路(図4.1.4)については、同一のシナリオ内でもIAM間で違いがあることを確認できる。これは、部門別の排出削減技術のコストやCO₂除去技術の導入コスト等の将来想定が、IAMによって異なるためと考えられる。

産業部門のCO₂排出量は、2020年時点の排出量にIAM間で大きな差異がある(図4.1.4(a))。そのため、2030年・2050年のいずれにおいてもIAM間の差異が大きく、特に2030年については、シナリオ間の相違よりも、IAM間の相違の方が大きい(図4.1.4(h))。エネルギー供給(電力、その他供給)については、2050年は2°C以下のシナリオにおいてはほぼゼロからマイナス排出となるが、図4.1.3(a)-(d)をみると、電力(青)とその他供給(水色)(電力以外のエネルギー供給部門)の比率は、IAMによって異なることが読み取れる。

排出削減政策の野心度が最も高いNet Zero 2050では、2050年時点で残余排出が生じる部門とそれを中和する部門の組み合わせや、残余排出の程度に、IAMの特徴が見られる。

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2 : エネルギー供給部門のうち、その他供給(電力以外のエネルギー供給部門)の排出がマイナスとなり(図4.1.3(a)(水色)、図4.1.4(l)(青丸))、運輸部門の残余排出(図4.1.3(a)(オレンジ))を中和している。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : エネルギー供給部門の排出はほぼゼロ(図4.1.4(k)(l)(青三角))。AFOLU部門(土地利用)(図4.1.3(a)(緑))がマイナス排出となり、運輸部門の残余排出(図4.1.3(a)(オレンジ))を中和している。

¹⁶ 産業プロセスは、セメント製造等、化石燃料の燃焼以外の工程におけるGHG排出を指す。他は、AFOLU部門(土地利用)を除き、化石燃料の燃焼による。

GCAM 5.3 : 2050 年時点の残余排出の量とそれを中和するマイナス排出の幅が、いずれももっとも大きい (図 4.1.3(a))。エネルギー供給部門では、電力の CO₂ 排出量がマイナスとなり (図 4.1.3(a)■、図 4.1.4(k)■)、AFOLU 部門 (土地利用) によるマイナス排出の幅も大きい (図 4.1.3(a)■、図 4.1.4(n)■)。全体として CO₂ 除去の量が多いため、産業部門の排出もプラスとなる (図 4.1.3(a)■、図 4.1.4(h)■)。

排出削減政策が導入されない Current Policies シナリオでも、IAM の特徴を反映して、部門別の排出量はそれぞれ異なっている。

REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 : エネルギー供給部門のうち電力部門の排出量が、他の IAM と比較して小さく、2030 年から 2050 年にかけて排出量の減少がみられる (図 4.1.3(f)■、図 4.1.4(k)●)。これは、2050 年時点の発電電力量 (二次エネルギー) に占める再生可能エネルギー (太陽発電・風力発電) の割合の増加によるものと考えられる (4.1.6 節) 一方、AFLOU 部門の排出量は最も大きい (図 4.1.3(f)■、図 4.1.4(n)●)。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : エネルギー需要部門の中では運輸部門の排出量が、他の IAM と比較して大きく、2030 年から 2050 年にかけて排出量の増加がみられる (図 4.1.3(f)■、図 4.1.4(j)▲)。一方、産業部門の排出量は 2050 年にかけて増加するものの、他の IAM よりは少ない (図 4.1.3(f)■、図 4.1.4(h)▲)。

GCAM 5.3 : エネルギー需要部門の中の産業とエネルギー供給部門の中の電力の排出量が、他の IAM と比較して大きい (図 4.1.3(f)■、図 4.1.4(k)■)。これは、発電電力量 (二次エネルギー) に占める CCS なしの石炭と天然ガス由来の割合が、2050 年時点でも高いことによるものと考えられる (4.1.6 節)。一方、AFOLU 部門 (土地利用) の排出はマイナスとなる (図 4.1.3(f)■、図 4.1.4(n)■)。

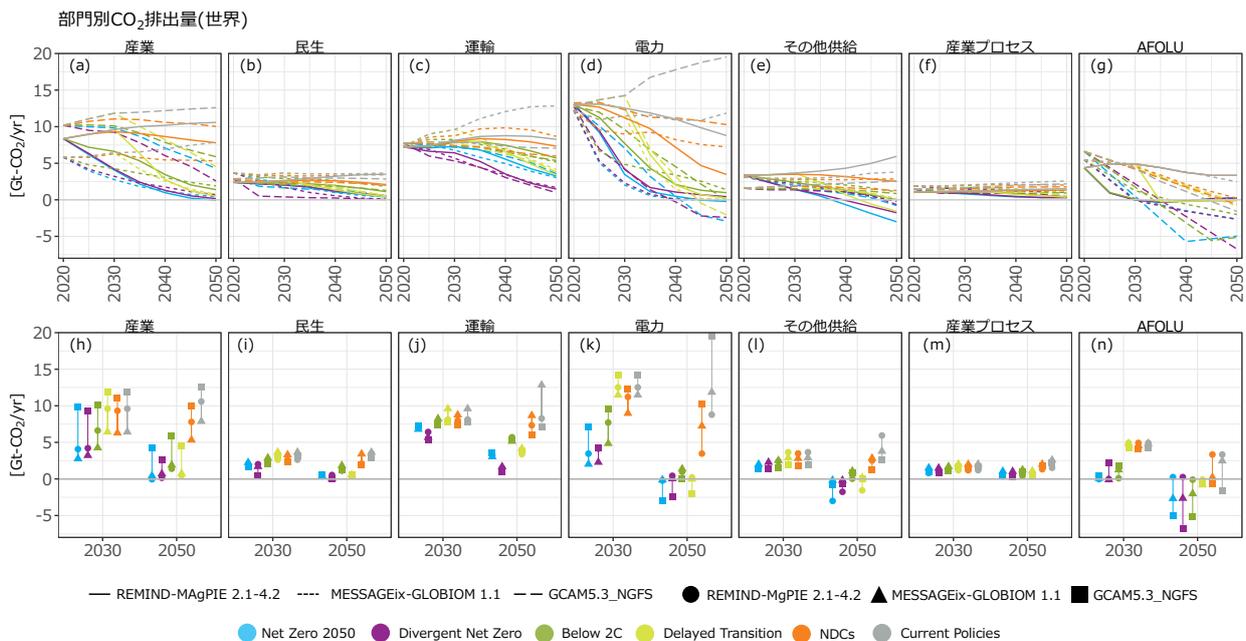


図 4.1.4 部門別 CO₂ 排出量の経年変化 (上段) と 2030 年・2050 年時点の値 (下段)

4.1.4 CO₂除去量

4.1.3節でCO₂がマイナス排出となった部門には、何らかのCO₂除去技術が導入される。前節までは物理的なCO₂排出量からCO₂除去量を差し引いたネット排出量を示したが、本節では、差し引きされる前のCO₂除去量（大気に排出される前に回収して地層中等に貯留したCO₂の量）を示す。

CO₂除去技術については、エネルギー供給部門のBECCS（CO₂回収・貯留付きのバイオエネルギー）が大きな役割を果たす。NGFSシナリオでは、電力部門（バイオエネルギー発電）と非電力のエネルギー供給部門（バイオ燃料の製造と水素製造）への導入が想定されている。また、AFOLU部門（土地利用）における植林も、CO₂除去技術に位置付けられる。

NGFSシナリオ（第2版）では、これらのエネルギー供給部門のBECCSとAFOLU部門（土地利用）における植林によるCO₂除去量が報告されている。その一方で、大気中CO₂の直接回収・貯留（DACCS）によるCO₂除去量は、含まれていない。

IAMに共通するシナリオの特徴

CO₂除去量は2020年時点ではほぼゼロであるが、各シナリオの排出削減政策の野心度に応じて、2050年にかけて増加する。特にBECCS導入量はシナリオ間で顕著に異なる。

Net Zero 2050 (1.5°C) : BECCSによるCO₂除去が進む。2050年時点のCO₂除去量は最も多く、他のシナリオと比較するとBECCSによるCO₂除去の量が多い（図4.1.5(a)■ ■ ■ ■ ■）。

Divergent Net Zero (1.5°C) : BECCSによるCO₂除去が進むが、2050年時点のCO₂除去量はNet Zero 2050よりもやや少ない（図4.1.5(b)■ ■ ■ ■ ■）。

Below 2°C (1.7°C) : BECCSによるCO₂除去が進むが、Net Zero 2050やDivergent Net Zeroと比較すると、2050年時点の導入量は少ない（図4.1.5(c)■ ■ ■ ■ ■）。

Delayed Transition (1.8°C) : 2030年以降にBECCSによるCO₂除去が2030年より後に急速に進むため、2050年時点のCO₂除去量はBelow 2°Cを上回り、Net Zero 2050やDivergent Net Zeroに近い水準となる（図4.1.5(d)■ ■ ■ ■ ■）。

NDCs・Current Policies (2.5°C~3°C+) : BECCSによる排出除去は他の4シナリオより少なく、特にCurrent PoliciesシナリオではBECCSの導入量はすべてのIAMでほぼゼロである（図4.1.5(e)(f)）。

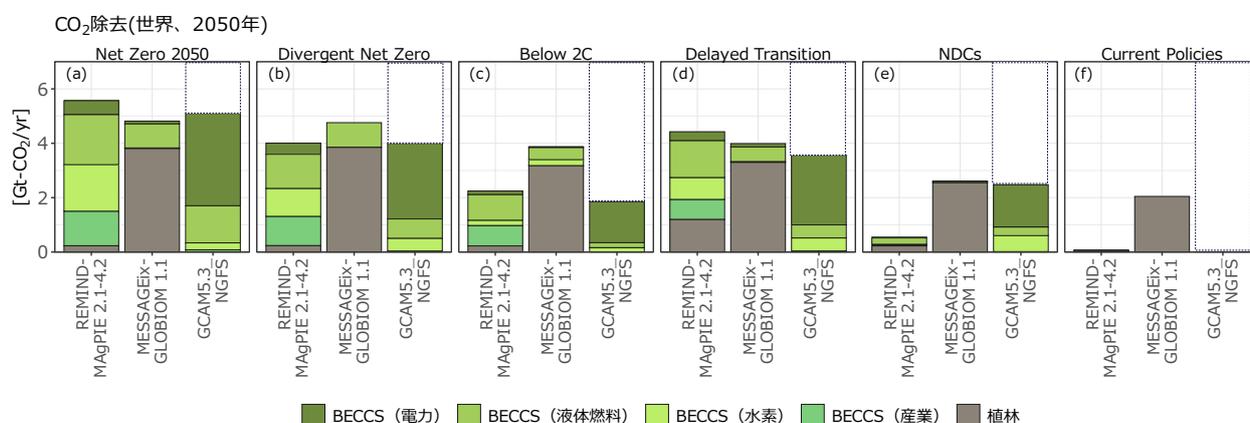


図 4.1.5 2050年時点のCO₂除去の導入量と内訳（各IAMから出力される数値を合計したものだが、GCAM 5.3については植林による除去量が報告されていないため、合計量はこれよりも多いと考えられる）

IAM 間の相違

IAM によって CO₂ 除去技術の導入コストや効率の想定に違いがあり、技術が導入される部門や導入量については、シナリオに共通した特徴がある（図 4.1.5、図 4.1.6）。

REMIND-MAgPIE 2.1-4.2：排出削減政策が導入されるシナリオ（図 4.1.5(a)-(d)、図 4.1.6●●●●●）をみると、他の IAM と比較して、BECCS（液体燃料）（図 4.1.5■、図 4.1.6(b)(g)）、BECCS（水素）（図 4.1.5■、図 4.1.6(c)(h)）、BECCS（産業）（図 4.1.5■、図 4.1.6(d)(i)）による CO₂ 除去量が多い。一方、2050 年時点の NDCs と Current Policies の CO₂ 除去量はほぼゼロであり（図 4.1.5(e)(f)）、シナリオ間の CO₂ 除去量の差が大きい。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1：2050 年に向けて植林による CO₂ 除去量が顕著に増加し、2050 年時点の導入量はシナリオ間で導入量が大きく変化しない（図 4.1.5■、図 4.1.6(e)(j)▲）。一方、BECCS による除去量は、ほとんどのシナリオ・部門において他の IAM より少ない（図 4.1.5■、図 4.1.6(f)-(i)）。

GCAM 5.3：多くのシナリオに共通して、BECCS（発電）による CO₂ 除去量が多いという特徴みられる（図 4.1.5■、図 4.1.6(a)(f)）。

なお、GCAM 5.3 では植林による CO₂ 除去量が報告されていないが、他の IAM よりも多いと考えられる（図 4.1.3(a)(b)では、AFLOU 部門■によるマイナス排出量（排出量から除去量を差し引いたネット排出量がマイナスである幅の大きさ）が MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 よりも多く、これは植林による排出除去によるものと考えられる）。したがって、CO₂ 除去量全体も、他の IAM よりも多いと考えられる。

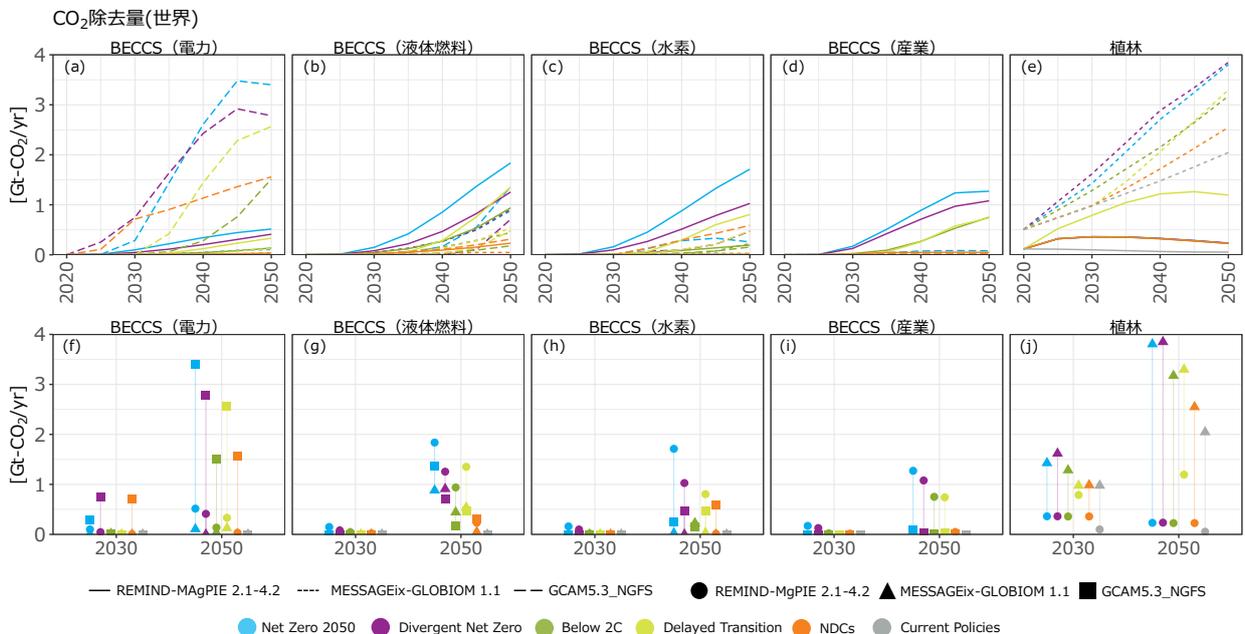


図 4.1.6 部門別の CO₂ 除去量の移行経路（上段）と 2030 年・2050 年時点の値（下段）

4.1.5 一次エネルギー

NGFS シナリオ（第2版）で報告される一次エネルギーには、化石燃料と再生可能エネルギー・原子力の両方が含まれる。

化石燃料については、燃料として直接消費される分と電力や熱等の二次エネルギーとして消費される分の合計をエネルギー量（EJ）で換算した値が報告される。これらは、石炭・天然ガス・石油に分けられ、さらに発電用に消費される分については CCS 付きと CCS なしの両方が報告されている。このうち、CO₂ 排出量を伴うのは、CCS なしの化石燃料消費である。これらが前節までに整理した CO₂ 排出量のうち、エネルギー起源の CO₂ 排出の由来となる。

一方、再生可能エネルギーは、バイオマス由来の再生可能エネルギーと非バイオマス由来の再生可能エネルギー（水力、風力、地熱、太陽光・太陽熱等が含まれる）に分けられ、電力と熱の消費量を合算した値が報告されている。原子力についても同様に、電力と熱の消費量を合算した値が報告されている。

IAMに共通するシナリオの特徴

2°C未滿に相当する排出削減政策が導入される4つのシナリオ（図4.1.7(a)-(d)）と、その政策が導入されないシナリオ（NDCs・Current Policies、図4.1.7(e)(f)）を比較すると、前者のほうが2050年時点での一次エネルギーが小さい傾向がある。部門別にみると、CCSなしの石炭■については、2050年までにほぼゼロまで減少する。一方、石油■については2050年時点において一定量が残余し、他の化石燃料と比較してシナリオ間の差が大きい（図4.1.8(p)でシナリオ同士の値の幅が、あまり重ならない）。一方、再生可能エネルギーの量は、2050年に向けて増加する（図4.1.8(b)(j)）。

Net Zero 2050・Divergent Net Zero（1.5°C）：2050年時点の再生可能エネルギー■□の導入量は最も多い。

CCSなしの化石燃料については、石炭■と天然ガス■はゼロに近い水準であるが、石油■は2050年時点でも一定程度の量が残る（図4.1.7(a)(b)）。

Below 2°C・Delayed Transition（1.7°C~1.8°C）：2050年時点で、再生可能エネルギー■□が大きな割合を占める点と、石炭■・天然ガス■の割合が少ないという点は、Net Zero 2050・Divergent Net Zeroと同様。一方、2050年時点の石油■の残存量は、上記2シナリオよりもやや多い（図4.1.7(c)(d)）。

NDCs・Current Policies（2.5°C~3°C+）：2050年に向けて再生可能エネルギー■□は増加するが、導入量は上記4シナリオよりも少ない。その一方で、CCSなし化石燃料（石炭■、天然ガス■、石油■）の量は多い（図4.1.7(e)(f)）。

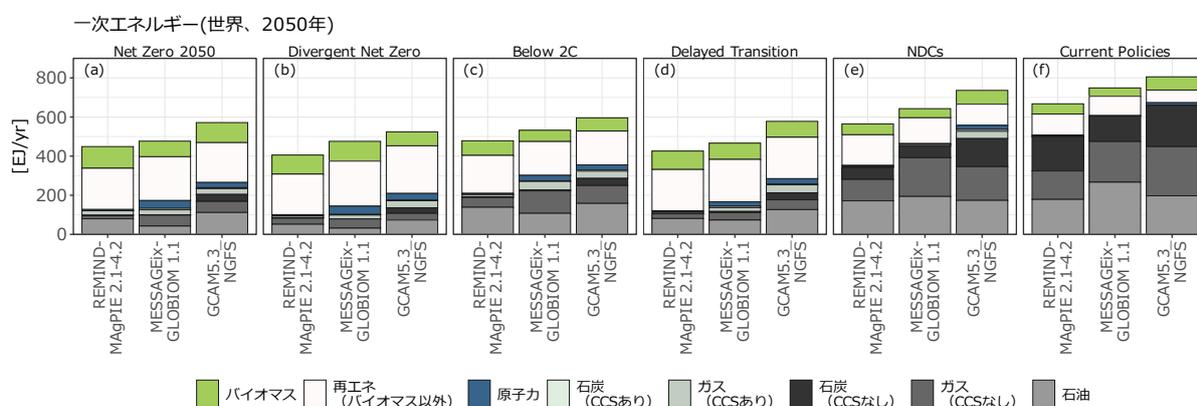


図 4.1.7 2050年時点の部門別一次エネルギー（世界全体）

IAM 間の相違

2050 年時点の一次エネルギーの量と CCS なしの化石燃料の量には、すべてのシナリオに共通する IAM の特徴がみられる。

最も野心度が高い排出削減政策が導入される Net Zero 2050 をみると、CCS なしの化石燃料（石炭、ガス、石油）については、いずれも 2050 年に向けて減少する傾向は共通している（図 4.1.7(a)、図 4.1.8(f)-(h)）が IAM によって量が異なる（図 4.1.8(n)-(p)）。

REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 : 2050 年時点の一次エネルギーは最も小さいが、再生可能エネルギーの量は多い（図 4.1.7(a)）。CCS なしの化石燃料のうち、石炭については、2030 年までに急速に減少し、2050 年にはほぼゼロとなる（図 4.1.7(a)■、図 4.1.8(n)●）。天然ガスについては、2030・2050 年いずれの時点においても最も量が少ない（図 4.1.7(a)■、図 4.1.8(o)●）。また、原子力の割合は最も少ない（図 4.1.7(a)■、図 4.1.8(k)●）。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : 2050 年時点の一次エネルギーの量は中程度である（図 4.1.7）。CCS なしの化石燃料のうち、石炭については、2030 年までに急速に減少し、2050 年にはほぼゼロとなる（図 4.1.7(a)■、図 4.1.8(n)▲）。天然ガスは、2030・2050 年いずれの時点においても高い水準にある（図 4.1.8(o)▲）。また、全体に占める割合は小さいものの、2050 年時点の一次エネルギーのうち原子力が占める割合が、最も高い（図 4.1.7(a)■、図 4.1.8(k)▲）。

GCAM 5.3 : 2050 年時点の一次エネルギーの量は最も多く、CCS なしの化石燃料（石炭、ガス、石油）の量は、他の 2 つの IAM よりも多い（図 4.1.7(a)、図 4.1.8(n)-(p) ■）。石炭については、他の IAM は 2050 年時点で 9 割近く減少するが、GCAM では 5 割程度の減少に留まる（図 4.1.7(a)■、図 4.1.8(n)■）。天然ガスは、2030・2050 年いずれの時点においても高い水準にある（図 4.1.8(o)）。また、原子力も MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 に次いで多い（図 4.1.7(a)■、図 4.1.8(k)■）。

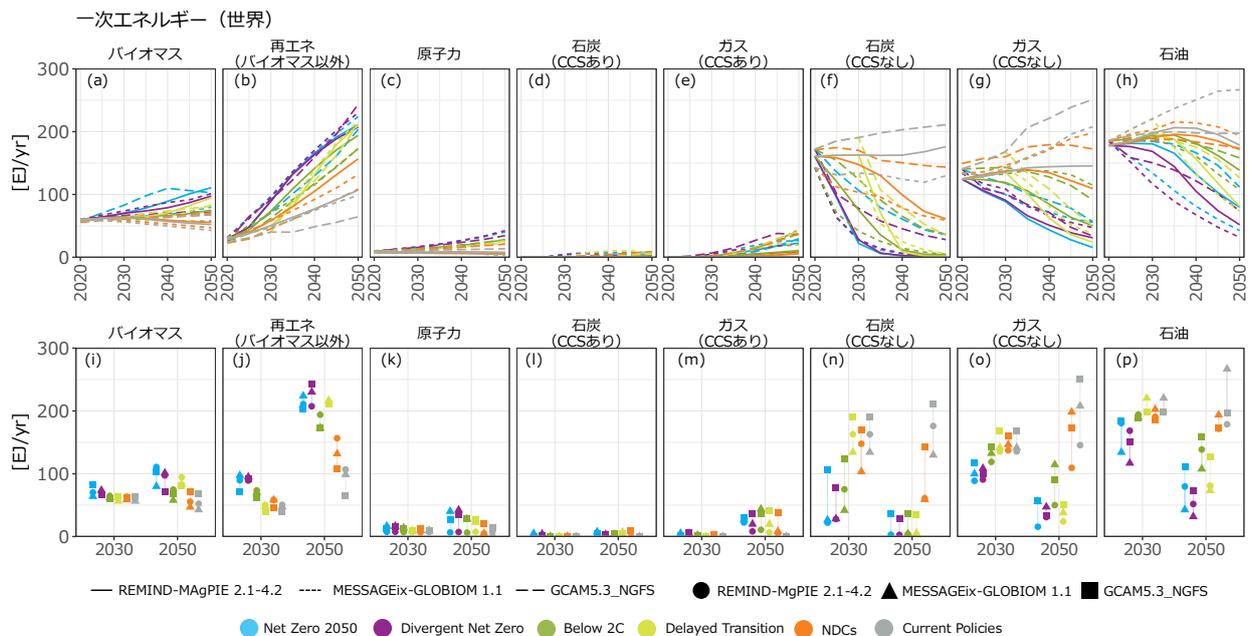


図 4.1.8 部門別の一次エネルギーの移行経路（上段）と 2030 年・2050 年時点の値（下）（世界全体）

4.1.6 二次エネルギー（発電電力量）

一次エネルギーは、様々な二次エネルギー媒体（電力・熱・ガス燃料・液体燃料等）を經由して消費されるが、このうち最も大きな割合を占めるものが電力である（図4.1.12）。NGFSシナリオ（第2版）では、発電電力量は、化石燃料、再生可能エネルギー及び原子力に分かれており、化石燃料はCCS付きとCCSなし、再生可能エネルギーについてはバイオマス・太陽・風力等主要な技術に分けて報告されている。

IAMに共通するシナリオの特徴

排出削減政策の野心得が高いシナリオほど、2050年時点の発電電力量全体が多く、再生可能エネルギーと原子力の割合が多くなる傾向がみられる（図4.1.9）。

Net Zero 2050・Divergent Net Zero（1.5°C）：2050年時点の発電電力量は最も多く、太陽発電¹⁷と風力発電の量・割合が最も多い。バイオマス発電や原子力発電も一定量みられるが、全体に占める割合は低い。CO₂排出量を伴うCCSなし化石燃料による電力量はほぼゼロとなる（図4.1.9(a)(b)）。

Below 2°C・Delayed Transition（1.7°C~1.8°C）：2050年時点の全体的な傾向は上記2シナリオと類似するが、発電電力量はやや少ない（図4.1.9(c)(d)）。

NDCs・Current Policies（2.5°C~3°C+）：2050年時点の全体の発電電力量は最も少ない。太陽発電と風力発電をはじめ、再生可能エネルギーの割合は少ない。その一方で、2050年時点においても、CCSなしの化石燃料が一定量、残存する（図4.1.9(e)(f)）。

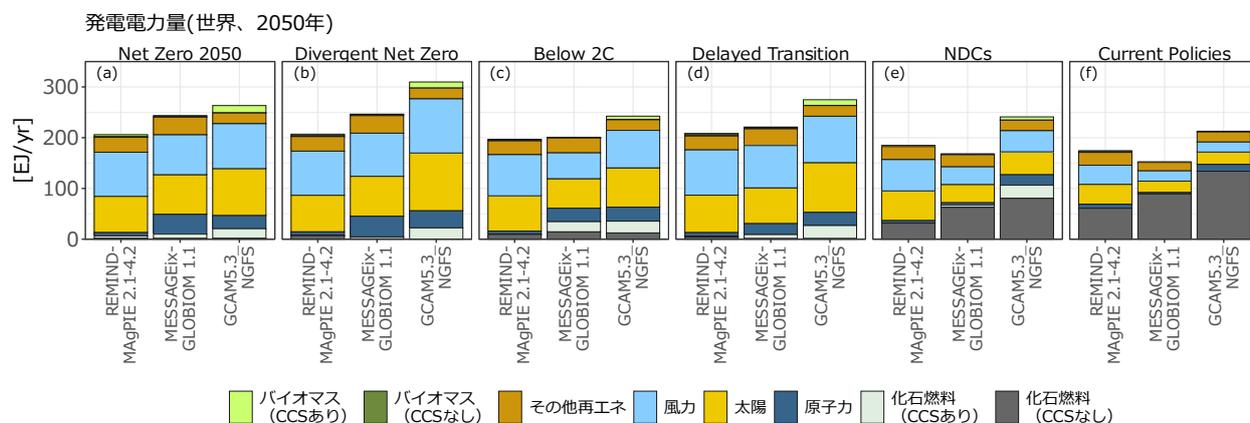


図 4.1.9 2050年時点の発電電力量の内訳（世界全体）

IAM間の相違

最も野心得が高い排出削減政策が導入される Net Zero 2050 に着目すると、発電電力量全体、バイオマス発電や原子力発電、CCSの導入量等に、IAMの特徴がみられる。

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2：発電電力量が他の2つと比較して最も少ない（図4.1.9(a)）。バイオマス発電（図4.1.9(a)■、図4.1.10(a)(b)(i)(j)●）、原子力発電（図4.1.9(a)■、図4.1.10(f)(n)●）、CCS付きの化石燃料発電（図4.1.9(a)■、図4.1.10(g)(o)●）の量は変化せず、2050年時点でもほぼゼロである。

¹⁷ 太陽発電には、太陽光発電（PV）と集光太陽熱発電（CSP）の両方を含む。NGFSシナリオ（第2版）のうち、REMIND-MAGPIE 2.1-4.2とGCAM 5.3は両者を区別して報告されているが、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1では両者が合算して報告されているため、本報告書では、両者を合算した値を用いる。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : 発電電力量は中程度である (図 4.1.9(a))。原子力発電 (図 4.1.9(a)■、図 4.1.10(f)(n)▲) による発電電力量は、2030年から2050年に向けて増加する。一方、バイオマス (図 4.1.9(a)■、図 4.1.10(a)(b)(i)(j)▲) と CCS 付きの化石燃料発電 (図 4.1.9(a)■、図 4.1.10(g)(o)▲) の量は変化せず、2050年時点でもほぼゼロである。

GCAM 5.3 : 発電電力量は最も多い (図 4.1.9(a))。原子力発電 (図 4.1.9(a)■、図 4.1.10(f)(n)▲) による発電電力量は、2030年から2050年に向けて増加する。また、CCS 付きのバイオマス発電 (BECCS、図 4.1.9(a)■、図 4.1.10(a)(i)■) と CCS 付きの化石燃料発電 (図 4.1.9(a)■、図 4.1.10(g)(o)■) が、2050年までに一定量、導入される。2050年のCO₂排出量のうち、エネルギー供給部門 (電力) がマイナス排出となる (図 4.1.3(a)) のは、BECCSによるものであることが分かる。

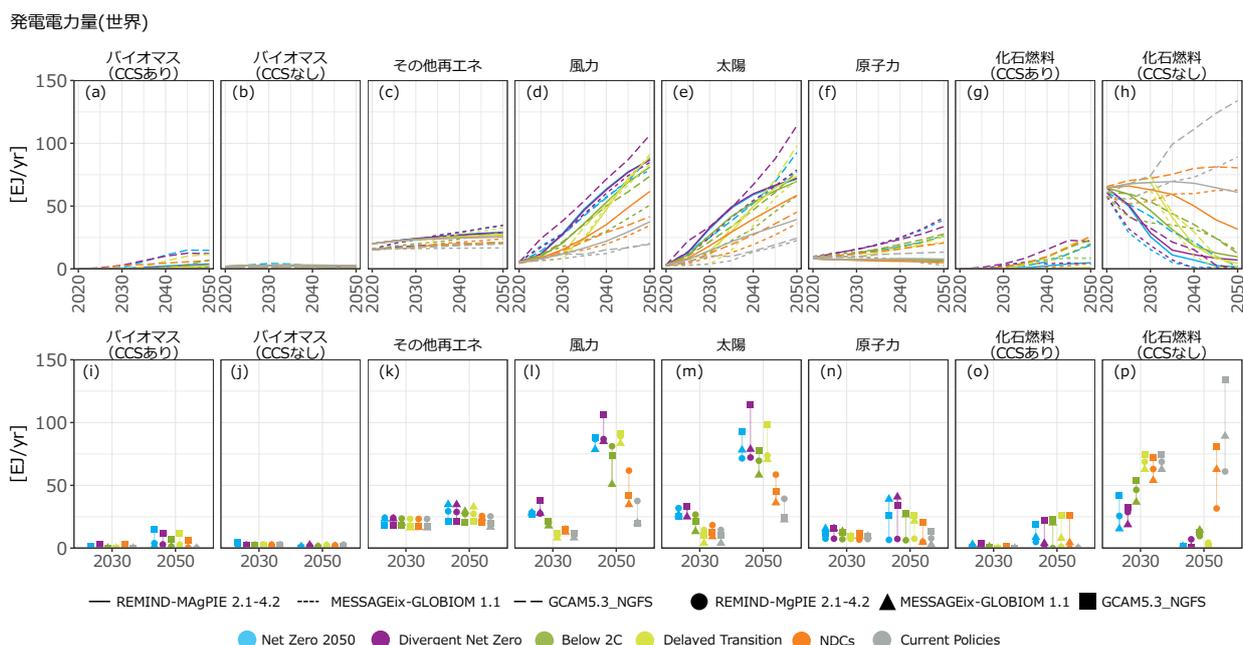


図 4.1.10 発電電力量の推移 (上段) と 2030 年・2050 年時点の値 (下段) (世界全体)

4.1.7 資本コスト

資本コストは、各技術の導入量を決定する要因の1つである。NGFS シナリオ (第2版) には、二次エネルギー (電力、ガス燃料、液体燃料、水素) 関連の資本コストが報告されている。なお、IAM の資本コスト (燃料費を含まない kW 当たりのコスト) についてはシナリオ間でほぼ差がないため、図 4.1.11 では Net Zero 2050 シナリオにおける電源別資本コストの想定を示す。

再生可能エネルギー (図 4.1.11(f)(g)) や CCS 付きの化石燃料発電 (図 4.1.11(b)(d)) の資本コストは、2050年に向けて低下する傾向にある。また、CCS 付きの石炭発電 (図 4.1.11(b)) と原子力発電 (図 4.1.11(e)) の資本コストは、他のエネルギー源と比較しても高い。

IAM 間の相違

NGFS シナリオ (第2版) の技術文書によれば、REMIND-MagPIE 2.1-4.2 と GCAM 5.3 については、技術進展によるコスト低下を織り込んで内生的に計算される。一方、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 の技術コストは、予め前提条件として与えられる外生変数である (ただし、前提条件として与えられた資本コストと、

IAM の計算結果の整合性を事後的に確認している)。

REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 : GCAM と比較すると、太陽光発電 (図 4.1.11(f)) と洋上風力 (図 4.1.11(g)) の資本コストが安い。また、石炭火力発電 (CCS なし) (図 4.1.11(a)) の資本コストも、GCAM よりはやや安い傾向が見られる。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : (資本コストのデータは報告されていない)

GCAM 5.3 : REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と比較すると、CCS 付きの火力発電 (図 4.1.11(b)(d)) と原子力発電 (図 4.1.11(e)) の資本コストはやや安い傾向があるが、他の発電技術よりは高い水準に留まっている。

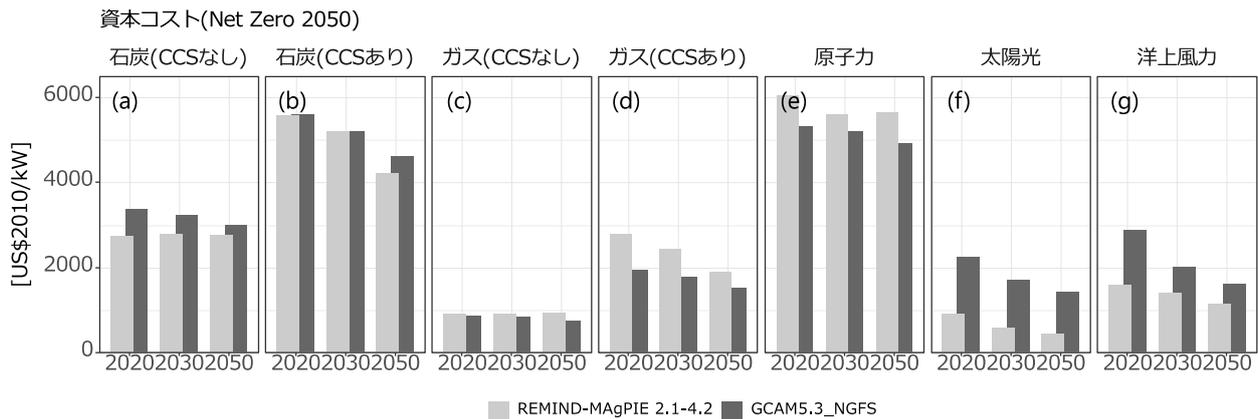


図 4.1.11 電源別の資本コストの想定 (2020年・2030年・2050年) (世界全体)

4.1.8 最終エネルギー

最終エネルギーは、IAM 内のエネルギーシステム全体のスケールや構造を決める要因である。NGFS シナリオ (第 2 版) には大きく、エネルギー媒体とエネルギー需要部門のそれぞれについて、最終エネルギーが報告されている。ここでは、エネルギー媒体毎の最終エネルギーを示す。

IAM に共通するシナリオの特徴

電力が増加するのはすべてのシナリオで共通している (図 4.1.13(a)) が、2050 年時点の電力需要の増加量についてはシナリオ・IAM 間のばらつきが大きい (図 4.1.13(h))。

Net Zero 2050・Divergent Net Zero・Below 2°C・Delayed Transition (1.5°C~1.8°C) : 温度上昇を 2°C 未満に抑えるための排出削減政策が導入されるこれらのシナリオについては、2050 年時点の最終エネルギー消費量全体とその内訳はほぼ同一である。最終エネルギー消費に占める電力の割合が多く、化石燃料の割合が低い傾向がみられる (図 4.1.12(a)-(d))。

NDCs・Current Policies (2.5°C~3°C+) : 2050 年時点の最終エネルギー消費は上記 4 シナリオと比較してやや多く、化石燃料の割合が高い傾向がみられる。また、2050 年時点でもすべての IAM で一定量の石炭が残る (図 4.1.12(e)(f))。

IAM 間の相違

最も野心度が高い排出削減政策が導入される Net Zero 2050 に着目すると、2050 年時点における最終エネルギーの量や化石燃料の量に IAM ごとの特徴がみられる。

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2 : 一次エネルギー消費と同様に、2050年時点の最終エネルギーの量は最も小さい。

化石燃料のうち、ガス（主に天然ガス）の消費量は最も少ないが（図 4.1.12(a)■、図 4.1.13(l)●）、液体燃料（主に石油）の量は多い（図 4.1.12(a)■、図 4.1.13(m)●）。石炭の量はほぼゼロである（図 4.1.12(a)■、図 4.1.13(n)●）。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : 化石燃料のうち、2050年時点のガスの量が最も多い（図 4.1.12(a)■(a)、図 4.1.13(l)▲）。一方、液体燃料の量は最も少ない（図 4.1.12(a)■、図 4.1.13(m)▲）。石炭の量はほぼゼロである（図 4.1.12(a)■、図 4.1.13(n)▲）。

GCAM 5.3 : 他の 2 つの IAM と比較すると、2050年時点の電力の割合がやや高い（図 4.1.12(a)■、図 4.1.13(h)■）。化石燃料については、ガス（図 4.1.12(a)■(a)、図 4.1.13(l)■）と液体燃料（図 4.1.12(a)■、図 4.1.13(m)■）の消費量は中程度である。一方、2050年時点においても、石炭の消費が一定量残る（図 4.1.12(a)■、図 4.1.13(n)■）。

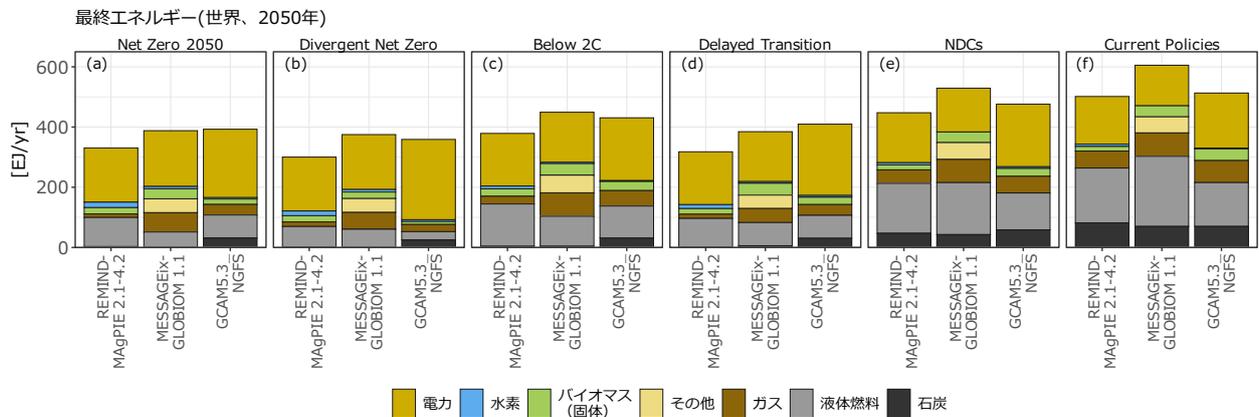


図 4.1.12 2050年の最終エネルギーの内訳（世界全体）

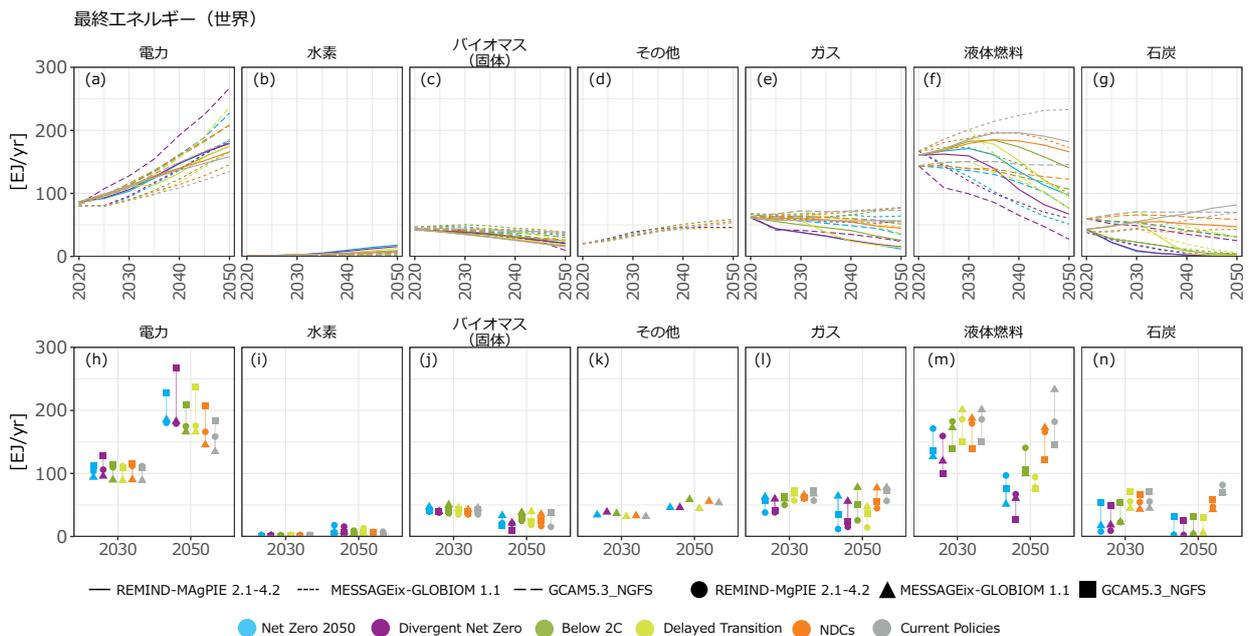


図 4.1.13 最終エネルギー需要の移行経路（上段）と 2030年・2050年時点の値（下段）

4.1.9 エネルギー価格（2020年比の増減率）

NGFSシナリオ（第2版）では、一次エネルギー、二次エネルギー、最終エネルギー（主要なエネルギー需要部門）のそれぞれについて、エネルギー価格が報告されている。

NGFSシナリオ（第2版）の技術文書によれば、一次エネルギーの価格については、需要、可採埋蔵量、採掘コストに基づいてIAM内で計算されるが、炭素価格の影響は含まれていない。

2020年時点のエネルギー価格（図4.1.14）については、他の変数よりもIAM間の相違が大きい（特に石油と電力）。これは、IAM内部の一次エネルギー価格・二次エネルギー価格の表現方法の違いや、可採埋蔵量とコストの関係等の前提条件の違いに由来するものと考えられる。これを踏まえ本節では、エネルギー価格の実数ではなく、2020年からの変化の傾向を指数で確認することとする。これにより、各シナリオにおけるエネルギー価格の増減の傾向の違いを整理することができる。

エネルギー価格(世界、2020年)

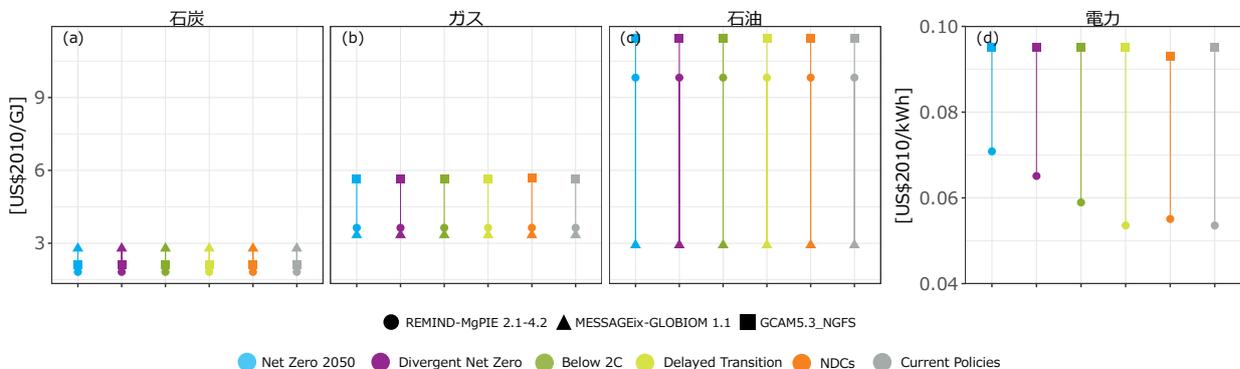


図 4.1.14 2020年時点のエネルギー価格（世界全体）

IAMに共通するシナリオの特徴

一次エネルギー（化石燃料）価格については、シナリオ間・IAM間のばらつきが大きい。石炭価格は、減少するシナリオがやや多い。ガス価格と石油価格については、多くのシナリオで、2030年・2050年にかけて増加する傾向がおおむね共通している。二次エネルギー（電力）価格については、2030年～2040年頃に上昇し、2050年には2020年と同じ水準に戻る傾向がみられる（図4.1.15）。

Net Zero 2050・Divergent Net Zero (1.5°C)・Below 2°C (1.7°C)：ガス価格は、政策の野心度が高いほど上昇する傾向が見られる（図4.1.15(f)●●●）。一方、石炭価格と石油価格については、IAMによって上昇・下落の傾向にばらつきが見られ、一貫性がない（図4.1.15(e)(g)●●●）。電力価格は、2030年に一時的に上昇する（図4.1.15(d)(h)●●●）。

Delayed Transition (1.8°C)：ガス価格・石炭価格・石油価格ともに、IAMによって上昇・下落のいずれの傾向もみられ、一貫性がない。また、極端な価格の変化が見られる（図4.1.15(e)(f)(g)●●●）。電力価格は、2035～40年に一時的に上昇する（図4.1.15(d)(h)●●●）。

NDCs (2.5°C)・Current Policies (~3°C+)：ガス価格・石炭価格・石油価格ともに、IAMによってやや上昇するか、一定となる（図4.1.15(e)(f)(g)●●●）。排出削減政策が導入される上記4シナリオと比較すると、価格変動の幅は小さい。電力価格もあまり変動しない（図4.1.15(d)(h)●●●）。

IAM 間の相違

化石燃料価格変化の幅には IAM の特徴が現れている。また、IAM によっては、一時的な価格の上昇・下落がみられる。

REMIND-MagPIE 2.1-4.2 : 化石燃料価格変化の幅は、中程度。ただし、Net Zero 2050 と Divergent Net Zero については、2040 年にガス価格の一時的な上昇が見られる (図 4.1.15(b)●●)。2050 年時点の石油価格は、すべてのシナリオに共通して値上がりする (図 4.1.15(c)●)。電力価格については、Net Zero 2050 と Divergent Net Zero では 2030 年、Delayed Transition では 2040 年をピークに、大幅な上昇がみられる (図 4.1.15(d)●●●)。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : 化石燃料価格の変化の幅は、最も大きい。Net Zero 2050 では、2050 年時点のガス価格は 2020 年比 300% に上昇する (図 4.1.15(f)▲) 一方で、石油価格は 25% まで下落する (図 4.1.15(g)▲)。また、Delayed Transition では、石油は 2030 年 (図 4.1.15(c)(g)▲)、石炭は 2040 年 (図 4.1.15(a)(e) ▲) に、それぞれ一時的な価格上昇が見られる。電力価格は報告されていない。

GCAM 5.3 : 化石燃料価格の変化の幅は、最も小さい。2050 年までに石炭価格は下落 (図 4.1.15(e)■)、ガス価格は上昇の傾向がみられる (図 4.1.15(f)■) が、変化の幅は小幅である。石油価格については、Net Zero 2050 では上昇 (図 4.1.15(g)■)、Delayed Transition では下落する (図 4.1.15(g)■)。電力価格の変動は小幅である (図 4.1.15(h)■)。

エネルギー価格(世界)

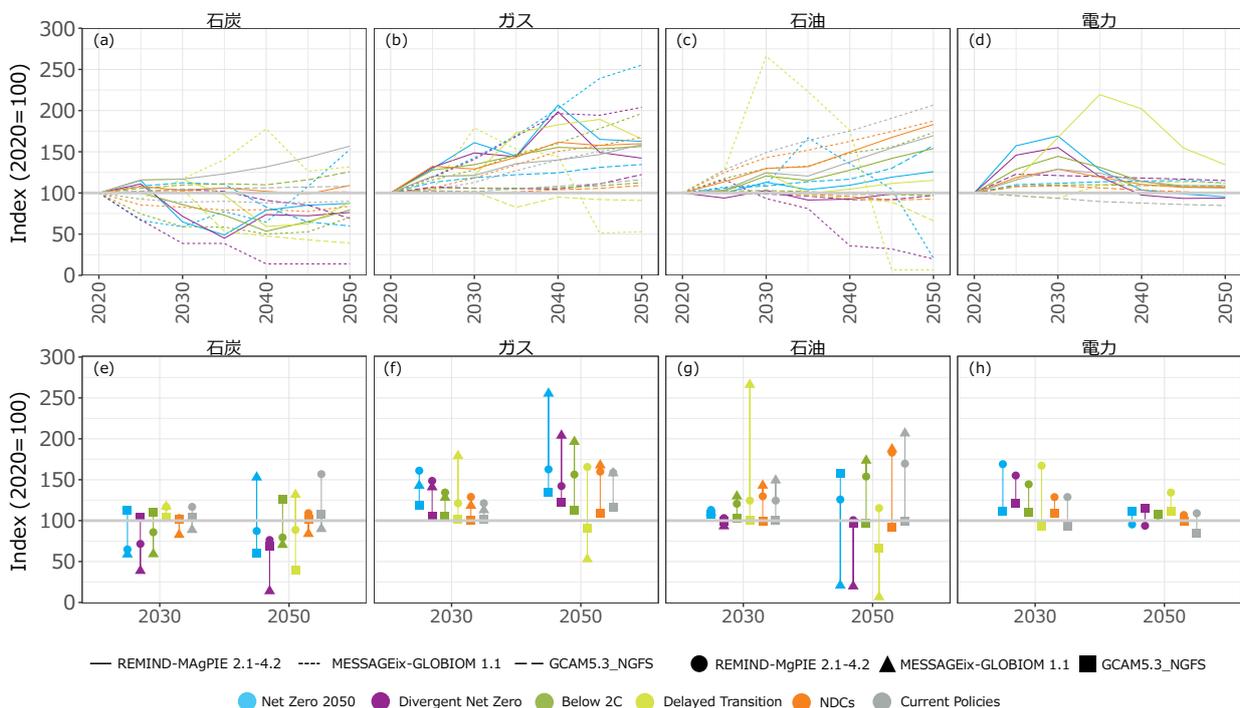


図 4.1.15 エネルギー価格の移行経路 (上段) と 2030 年・2050 年時点の値 (世界全体)

4.1.10 エネルギーへの投資（2050年までの累計）

エネルギーへの投資は、将来のエネルギーシステムの構造を決める要因である。NGFSシナリオ（第2版）では、化石燃料の採掘・精製と発電・送配電について、投資額が報告されている。ここでは、化石燃料（採掘・精製・発電・CCSを含む）と発電（太陽・風力・原子力）、送配電、電力貯蔵について、2050年までの累積投資額を扱う。

IAMに共通するシナリオの特徴

野心的な排出削減政策が導入される4シナリオ（Net Zero 2050・Divergent Net Zero・Below 2°C・Delayed Transition）は、そうでない2シナリオ（NDCs・Current Policies）よりもエネルギーへの投資額が大きい（図4.1.16）。また、すべてのシナリオに共通して、送配電への投資額が最も大きい割合を占める。

Net Zero 2050・Divergent Net Zero（1.5°C）・Below 2°C（1.7°C）・Delayed Transition（1.8°C）：2050年までの累積投資額とその内訳は、ほぼ同一である。送配電■が最も大きな割合を占めるが、太陽発電■と風力発電■の割合も大きい（図4.1.16(a)-(d)）。

NDCs（2.5°C）・Current Policies（~3°C+）：2050年までの累積投資額とその内訳は、上記4シナリオよりも少ない。太陽発電■と風力発電■の割合が小さく、代わりに化石燃料■への投資が一定量行われる（図4.1.16(e)(f)）。

IAM間の相違

2050年までの累積投資額や投資に占める化石燃料・再生可能エネルギー・原子力の割合に、IAMの特徴がみられる。

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2：2050年までの累積投資額が最も大きい（図4.1.16）。風力発電やエネルギー貯蔵への投資額が他のIAMよりも多い。一方で、原子力発電への投資は小さい（図4.1.17●）。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1：2050年までの累積投資額は中程度である（図4.1.16）。原子力発電への投資額が大きく、送配電への投資額は少ない（図4.1.17▲）。

GCAM 5.3：2050年までの累積投資額が最も少ない（図4.1.16）。すべてのシナリオに共通して、化石燃料への投資額が大きい。風力発電や送配電、エネルギー貯蔵への投資額は少ない（図4.1.17■）。

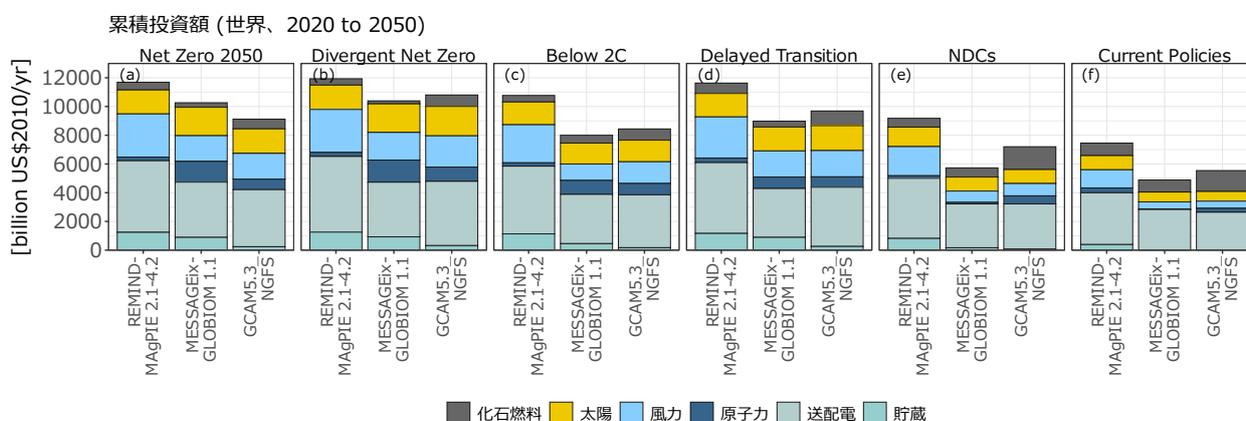


図 4.1.16 エネルギー関連の累積投資額（2020年～2050年、総額）

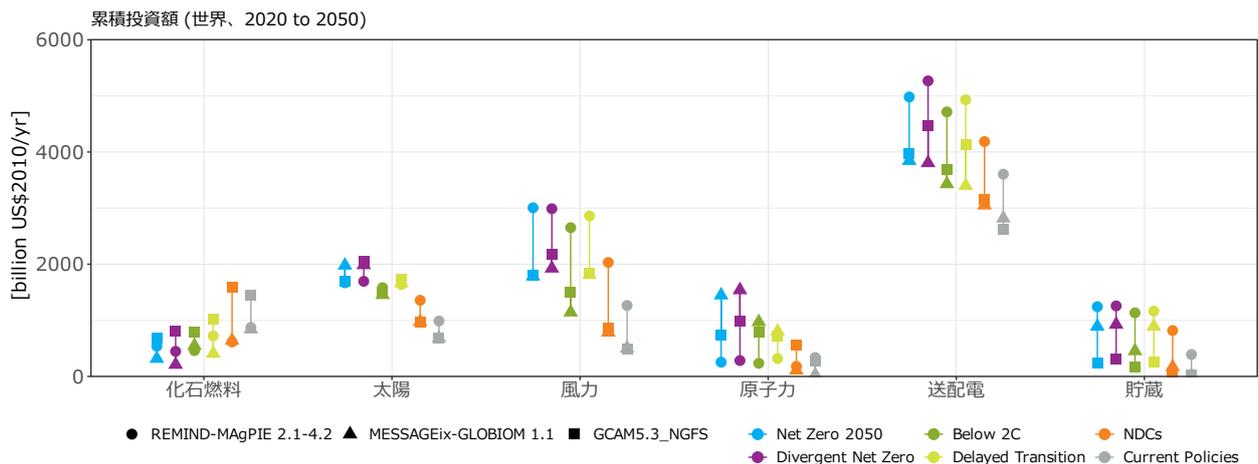


図 4.1.17 エネルギー関連の累積投資額 (2020 年～2050 年、部門別)

4.1.11 まとめ：世界全体でみた NGFS シナリオの特徴

前節まで、NGFS シナリオ（第2版）の中でも、CO₂排出量と CO₂除去量、CO₂排出量に与えるエネルギー需給の詳細、及びエネルギー供給構造に影響を与えるエネルギー価格とエネルギー関連の投資額について、変数ごとにシナリオや IAM の特徴を解説した。本節では、これらの特徴を俯瞰して、世界全体でみた NGFS シナリオの特徴を考察する。

エネルギーシステムの変化

エネルギー部門は CO₂排出の多くを占めており、エネルギーシステムの変化は NGFS シナリオ（第2版）の各シナリオにおいて設定された排出削減水準を達成する上で重要な要素となる。

野心的な排出削減政策が導入されるシナリオ（Net Zero 2050 等）は、2050 年時点の一次エネルギー消費に占める化石燃料の割合が低く、再生可能エネルギーの割合が高い（図 4.1.7）。一次エネルギーには、電力等の二次エネルギーへの変換で消費される分も含まれるが、野心的な排出削減政策が導入されるシナリオ（Net Zero 2050 等）では、発電に投入される再生可能エネルギーが大幅に増加する傾向がみられる（図 4.1.9、図 4.1.12）。

図 4.1.18 は、最終エネルギー消費に占める電力の割合（電化率）と発電電力量に占める非化石エネルギー（再生可能エネルギーと原子力の合計）の割合（電源構成の非化石比率）の関係を、2020 年から 2050 年までの推移として示したものである。2020 年時点では、電化率は 2 割程度に留まり、非化石比率は 4 割弱である。2050 年では、野心的な排出削減政策が導入されるシナリオ（Net Zero 2050 等）では、電化率は 5 割～7 割、非化石比率は 9 割強まで増加するが、排出削減政策が導入されないシナリオ（Current Policies 等）では小幅な変化に留まっている。

このように、シナリオ上では、エネルギー起源の CO₂排出量の削減は、最終エネルギー消費の電化と電力供給の脱炭素化の両面から進展することが読み取れる。

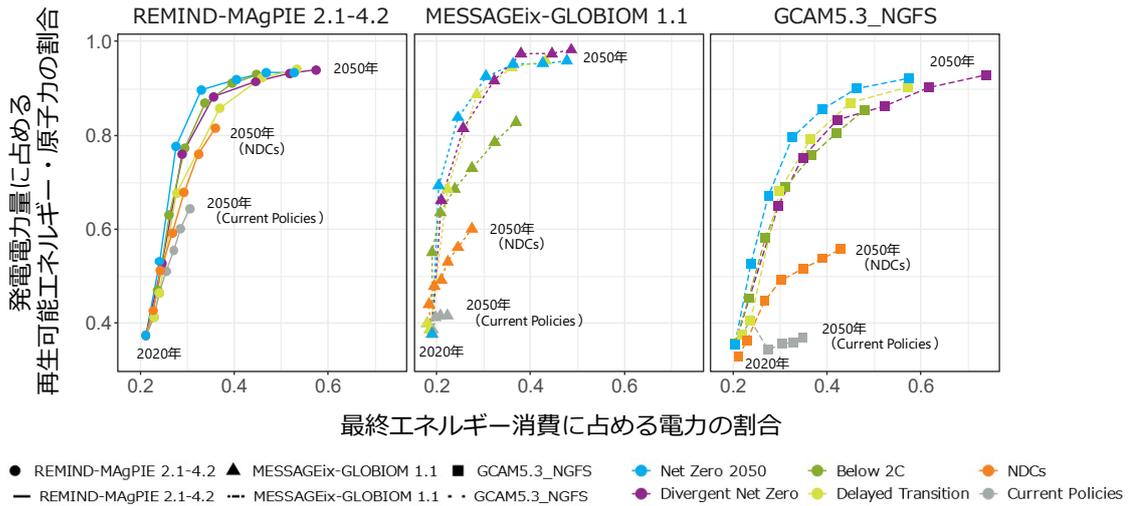


図 4.1.18 最終エネルギー消費に占める電力の割合（電化率）と発電電力量に占める非化石電源（再生可能エネルギー発電・原子力発電）の割合（電源構成の非化石比率）の関係。2020年から2050年まで（5年間隔）の推移（世界全体）

残余排出とネットゼロの達成

エネルギーシステムの変化だけで削減しきれずに残る CO₂ 排出（残余排出）については、種々の CO₂ 除去技術で対応することになる。Below 2°C と Net Zero 2050 について、2050 年時点の部門別の CO₂ 排出量を比較すると、CO₂ 除去によるマイナス排出量に違いがあることが分かる（図 4.1.3、図 4.1.5）。部門別では脱炭素がより困難となる運輸部門や産業部門で残余排出があり、これが Net Zero 2050 では CO₂ 除去技術によるマイナス排出で中和される形になる（図 4.1.5）。

CO₂ 除去技術は相対的に高価であるため、これが多く導入されるシナリオでは、2050 年に向けて炭素価格も高くなる（図 4.1.19）。IAM 内で炭素価格は CO₂ 排出に対して経済全体で追加的なコストをかけることになる。つまり、野心度の高いシナリオでは、高価な削減技術に頼らざるを得なくなり、その結果がモデルでは気候政策の厳しさとしての炭素価格の上昇という形で表れると理解される。

ただし、前述のとおり、NGFS シナリオが出力する炭素価格は、IAM ごとに定められた最適化計算の方式や各種の価格条件を含むエネルギーフロー全体の定式化に依存する。本報告書では詳しくは論じないが、除去技術の導入にはコスト以外にも様々な社会的な障壁が存在しており、現実世界において IAM で示された水準に現実の炭素価格を設定しても、CO₂ 除去技術が導入されるとは限らず、別の政策手段によって導入が後押しされる可能性もある。現実世界では炭素価格という形をとらない政策手段もあることを踏まえると、IAM の炭素価格は、シナリオ間での気候政策の厳しさの違いを相対的に表す指標と捉えたものと言える。

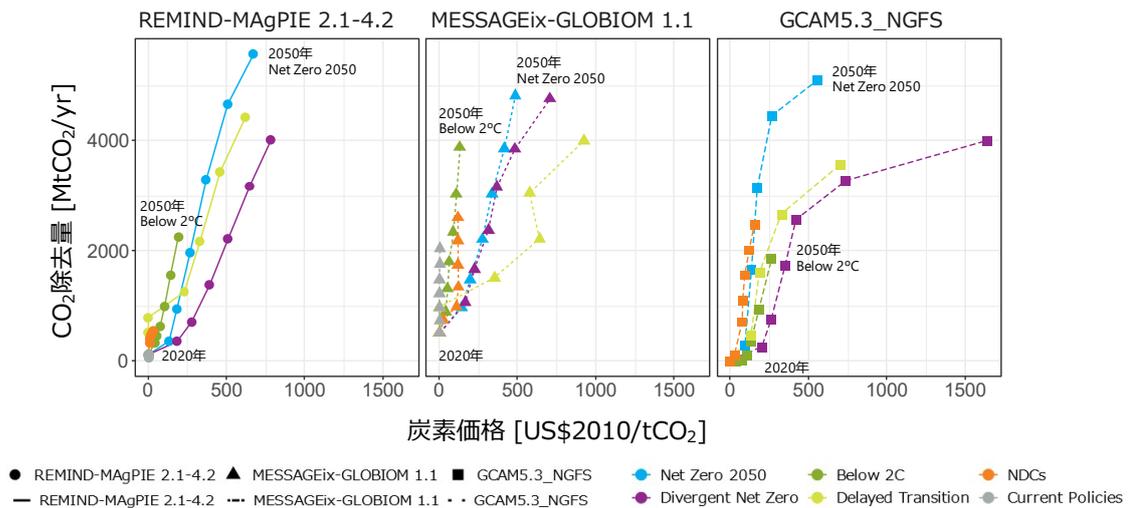


図 4.1.19 炭素価格と CO₂ 除去量の関係。2020 年から 2050 年まで（5 年間隔）の推移（世界全体）

電源構成（非化石電源の導入量の違い）

野心的なシナリオ（Net Zero 2050 等）で増加する再生可能エネルギーと原子力の中で、2050 年時点で大きな割合を占めるのは太陽と風力である（図 4.1.9）。2020 年から 2050 年までの累積投資額でも、発電部門の中では太陽と風力への投資額が多い（図 4.1.16）。一方、再生可能エネルギーと並ぶ非化石電源である原子力が発電力量に占める割合は、IAM 間で違いがあるものの、太陽・風力には及ばない（図 4.1.9）。

これらの導入量の違いには、IAM 内で設定される個別技術の資本コストが影響していると考えられる。2020 年から 2050 年にかけて、太陽と風力（NGFS シナリオ（第 2 版）には洋上風力のコストが報告されているが、陸上風力は洋上風力よりもさらに低コストであると思われる）の資本コストが低い水準におかれるのに対し、原子力は総じて高い水準にあり、両者の間には大きな差がある（図 4.1.11）。

資本コストの差が小さい技術間の導入量の違いは、資本コストだけでは説明がつかない。例えば REMIND-MAGPIE 2.1-4.2 と GCAM 5.3 の太陽と風力の場合、REMIND-MAGPIE 2.1-4.2 の方が資本コストは若干安い（図 4.1.11）、2050 年時点の発電力量はいずれも GCAM 5.3 の方が多い（図 4.1.9）。この結果には、個別に設定されるその他の前提条件（導入可能量、設備利用率、送電線や蓄電池等の電力システムに再生可能エネルギーを接続するための追加的な費用（統合コスト））が総合的に影響すると思われる。

このように、IAM はその定式化と前提条件の下で首尾一貫した結果を出力するが、必ずしも計算結果を容易に説明できるとは限らない。IAM によるシナリオ作成に関わる研究者コミュニティ（Integrated Assessment Modeling Consortium：統合評価モデリングコンソーシアム）においても同様の問題認識があり、IAM の振舞いをより良く理解するための活動が続けられている。

4.2 NGFS シナリオ（第2版）の概観：日本

前節では、NGFS シナリオの世界全体に関する結果について、主要な変数を概観した。ここでは日本に関する結果について、主要な変数を概観する。

4.2.1 CO₂ 排出量

IAMに共通するシナリオの特徴

6つのシナリオ間関係は世界全体と共通しているが、以下のような特徴もみられる。

Net Zero 2050・Divergent Net Zero：野心度の高い排出削減政策が早期に導入される想定が置かれているため（「政策の野心度」は「1.5°C」、「政策の導入」は迅速）、CO₂ 排出削減のペースが早く、2050年には正味の排出量がほぼゼロかマイナス排出となる（図4.2.1●●）。

Below 2°C：中程度の排出削減政策が早期に導入されることで（「政策の野心度」は「1.7°C」、「政策の導入」は「迅速」）、2050年に向けて排出削減が進行する（図4.2.1●●）。

Delayed Transition：中程度の排出削減政策が2030年以降に導入されるが（「政策の野心度」は「1.8°C」、「政策の導入」は「遅延」）、IAMによっては2030年より前から排出削減が進み、2050年時点の排出量はBelow 2°Cシナリオよりも少なく、ほぼゼロかマイナス排出となる（図4.2.1●●）。

NDCS・Current Policies：世界全体では2050年にかけて排出量が増加する結果もみられるが、日本では2050年にかけてCO₂排出量が減少する（図4.2.1●●）。

IAMの特徴：

シナリオ間の大小関係は概ね世界全体と一致している。ただし、CO₂ 排出量の絶対値のばらつきは、世界全体よりもやや大きい（図4.2.1(b)）。

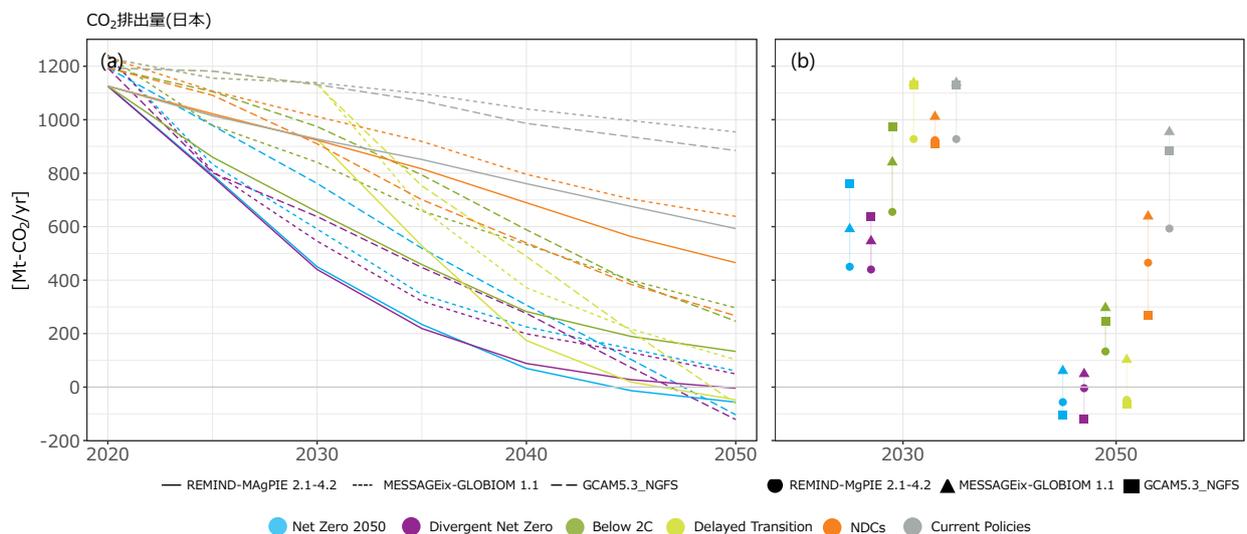


図 4.2.1 日本の CO₂ 排出量の排出経路（左）及び 2030 年・2050 年時点の排出量（右）

4.2.2 炭素価格

IAMに共通するシナリオの特徴

日本についても、世界全体と同様に、排出削減政策が厳しいシナリオほど、2050年に向けて炭素価格が上昇する傾向が確認できる。また、世界全体の炭素価格の推移と比較すると、日本の炭素価格の上昇幅は大きい(図4.2.2)。

Net Zero 2050 : 野心度の高い排出削減政策(1.5°C)が早期に導入されることにより(「政策の導入」が「迅速」)、2050年に向けて炭素価格は上昇する(図4.2.2(b)●)。

Divergent Net Zero : 野心度の高い排出削減政策(1.5°C)が早期かつ無秩序に導入されることにより(「政策の導入」は「迅速だがセクター間で分岐」)、2050年に向けて炭素価格は上昇する(図4.2.2(b)●)。

なお、Divergent Net Zeroでは運輸部門と民生部門の排出に対する炭素価格は、他部門の3倍に設定されているため、排出削減政策の野心度が同じNet Zero 2050よりも炭素価格が高くなると期待されるが、日本については、REMIND-MAGPIE 2.1-4.2のみNet Zero 2050よりもDivergent Net Zeroの炭素価格が低い¹⁸。

Below 2°C : 中程度の排出削減政策(1.7°C)であり、Net Zero 2050(●)と比較すると、2030年・2050年時点の炭素価格の上昇幅は小さい(図4.2.2(b)●)。

Delayed Transition : 排出削減政策の野心度は中程度(1.8°C)であるが導入のタイミングは遅れる(「政策の導入」は「遅延」)。2030年時点の炭素価格はほぼゼロであるが、Net Zero 2050(●)よりも2050年時点の炭素価格は高い水準となる(図4.2.2(b)●)。

NDCSとCurrent Policies : 現行の政策に相当する排出削減政策(2.5°C~3°C+)により、2030年・2050年の炭素価格はゼロもしくはゼロ近傍に留まる(図4.2.2(b)●●)。

IAM間の相違(全体的な傾向)

日本においても、Net Zero 2050とDivergent Net Zero(いずれも1.5°C)、及びDelayed Transition(1.8°C)については、2050年時点の炭素価格の大小関係が、以下に示すようにIAM間で異なる(図4.2.2(b))。

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2 : Delayed Transition ● (1.8°C) > Net Zero 2050 ● (1.5°C) > Divergent Net Zero ● (1.5°C)

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : Delayed Transition ▲ (1.8°C) > Divergent Net Zero ▲ (1.5°C) > Net Zero 2050 ▲ (1.5°C)

GCAM 5.3 : Divergent Net Zero ■ (1.5°C) >> Delayed Transition ■ (1.8°C) > Net Zero 2050 ■ (1.5°C)

¹⁸NGFSシナリオ(第2版、Version 2.2)では、REMIND-MAGPIE 2.1-4.2のDivergent Net Zeroの炭素価格(Price|Carbon)は、産業部門(Price|Carbon|Industry)及びエネルギー転換部門(Price|Carbon|Supply)と同じ値が報告されている。本来であれば、それらの3倍に設定されている運輸部門(Price|Carbon|Transport)と民生部門(Price|Carbon|Residential and Commercial)の炭素価格の影響が全体の炭素価格に反映されるべきであるが、何らかの理由によって反映がされていない。

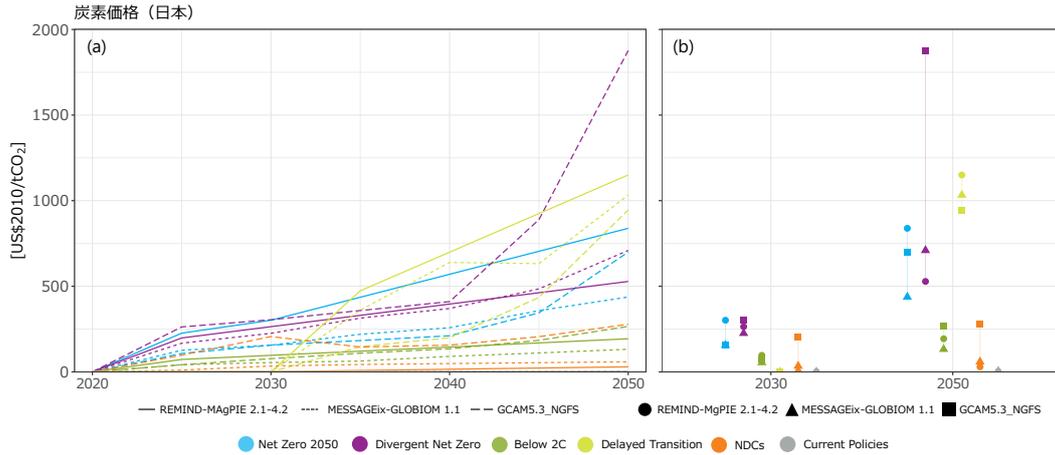


図 4.2.2 日本の炭素価格の移行経路（左）及び 2030 年・2050 年時点の炭素価格（右）

4.2.3 部門別の CO₂ 排出量

IAMに共通するシナリオの特徴

排出削減政策の野心度が厳しいシナリオほど 2050 年時点の CO₂ 排出量はゼロに近づく。世界全体と比較して、運輸部門 ■ や産業部門 ■ の残余排出が少なく、エネルギー供給部門（電力 ■、その他 ■）のマイナス排出の幅が大きい。AFLOU 部門 ■（土地利用）については、すべてのシナリオで排出量がゼロ近傍となり、土地利用変化の影響がほとんどないことが分かる（図 4.2.3）。

Net Zero 2050・Divergent Net Zero (1.5°C) : 2050 年時点の運輸部門 ■ の CO₂ 排出量はもっとも小さく、エネルギー供給部門（電力 ■、その他 ■）の排出はマイナスである（図 4.2.3(a)(b)）。

Below 2°C (1.7°C) : 2050 年時点の運輸部門 ■ の CO₂ 排出量は中程度であり、エネルギー供給部門（電力 ■、その他 ■）の排出はゼロ近傍となる（図 4.2.3(c)）。

Delayed Transition (1.8°C) : 世界全体とは異なり、Net Zero 2050 や Divergent Net Zero (1.5°C) に類似し、エネルギー供給部門（電力 ■、その他 ■）の排出がマイナスとなる（図 4.2.3(d)）。

NDCs・Current Policies (2.5°C~3°C+) : 2050 年時点で、産業部門 ■、運輸部門 ■、エネルギー供給（電力 ■、その他 ■）、産業プロセス ■ で CO₂ の残余排出がみられる。（図 4.2.3 (e)(f)）

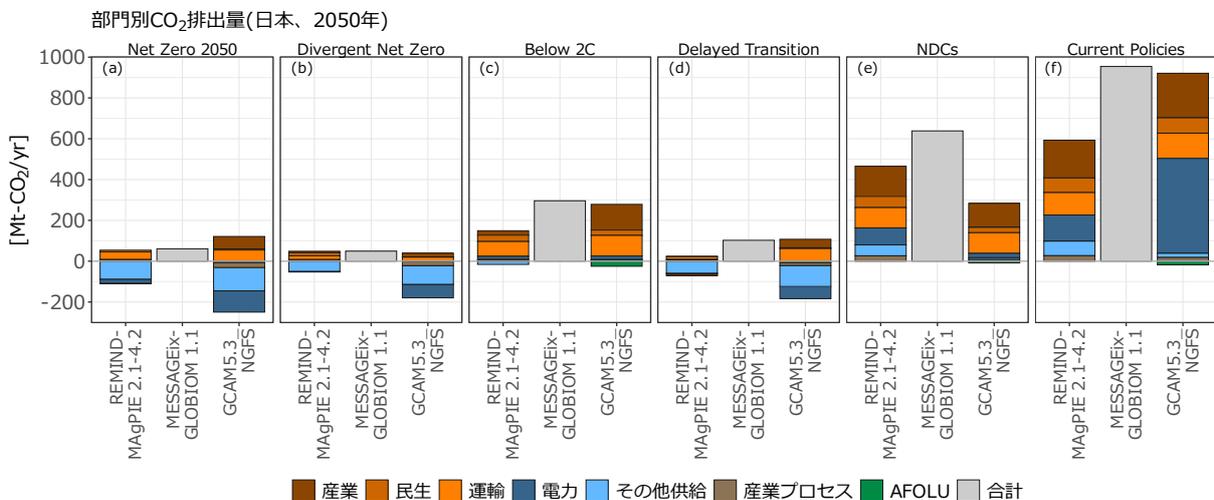


図 4.2.3 2050 年時点の部門別 CO₂ 排出量

IAM 間の相違

世界全体と比較すると、ネット排出量の IAM 間の差はやや大きく（図 4.2.3）、2050 年時点の部門別の排出量や排出パス（図 4.2.4）についても、IAM による違いがある。なお、3 つの IAM のうち MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 は、日本の部門別 CO₂ 排出量の内訳を報告していない。

REMIND-MagPIE 2.1-4.2：産業部門は、2030 年の時点で急速に排出削減が進み、2050 年時点ではほぼゼロ排出となる（図 4.2.3(a)■、図 4.2.4 (h)●）。また、エネルギー供給部門のうち、その他供給（電力以外）の CO₂ 排出のマイナス幅が大きい（図 4.2.3(a)■、図 4.2.4(l)●）。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1：（日本については、部門別の内訳は報告されていない）

GCAM 5.3：2030 年時点では、産業部門・電力部門いずれも排出量が多い。2050 年時点でも産業部門の排出は残り（図 4.2.3(a)■、図 4.2.4(h)■）、電力部門はマイナス排出（図 4.2.3(a)■、図 4.2.4(k)■）。

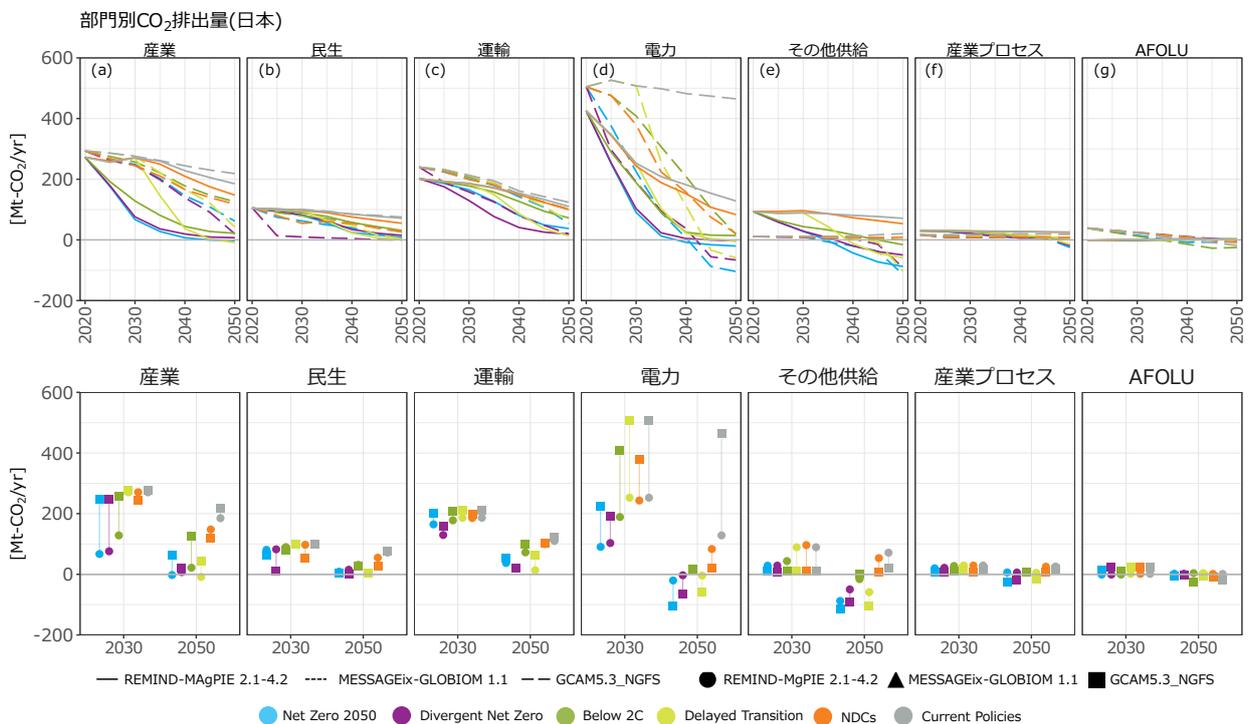


図 4.2.4 部門別の CO₂ 排出量の移行経路（上段）と 2030 年・2050 年時点の値（下段）

4.2.4 CO₂ 除去量

IAM に共通するシナリオの特徴

世界全体と同じく、BECCS による CO₂ 除去量はシナリオ間で異なる。一方、世界全体とは異なり、日本では植林による CO₂ 除去はゼロである。

Net Zero 2050・Divergent Net Zero (1.5°C)：世界全体と同じく、BECCS による CO₂ 除去が進む（図 4.2.5 (a)(b) ■■■■）。

Below 2°C (1.7°C)：BECCS による CO₂ 除去が進むが、上記 2 シナリオよりは量は少ない（図 4.2.5 (c) ■■■■）。

Delayed Transition (1.8°C)：2030 年以降に急速に排出削減が進むことにより、2050 年時点の BECCS による CO₂ 除去量は、Below 2°C よりも多い（図 4.2.5 (d) ■■■■）。

NDCs・Current Policies (2.5°C~3°C+) : BECCS による CO₂ 除去の量は、小さい (図 4.2.5 (e)(f)).

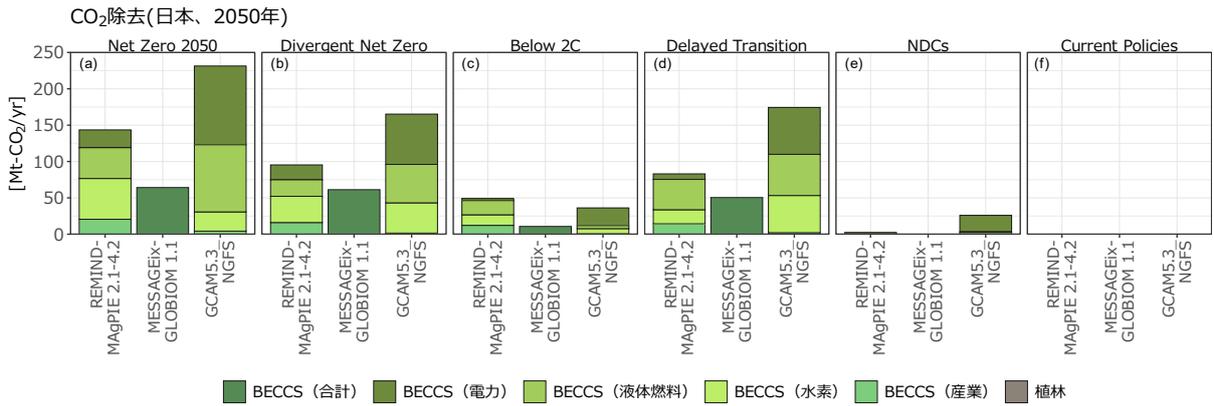


図 4.2.5 2050 年時点の CO₂ 除去の導入量と内訳 (GCAM5.3 は植林を報告してない) (日本)

IAM 間の相違

日本の CO₂ 除去量のほぼ全ては BECCS によるものであるが、BECCS が導入される部門や CO₂ 除去量は IAM によって異なる。

REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 : 2050 年時点の BECCS の導入量は比較的小幅にとどまり、液体燃料 (図 4.2.5 ■、図 4.2.6(b)(f)) と水素 (図 4.2.5 ■、図 4.2.6(c)(g)) に導入される。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : 日本については BECCS の総量のみが報告されており、3 種類の IAM の中では最も量が少ない (図 4.2.5 ■)

GCAM 5.3 : 2050 年時点の BECCS の導入量は比較的多く、電力 (図 4.2.5 ■、図 4.2.6(a)(e))、液体燃料 (図 4.2.5 ■、図 4.2.6(b)(f))、水素 (図 4.2.5 ■、図 4.2.6(c)(g)) の全てに導入される。また、植林による除去量は報告されていないが、日本では AFOLU 部門 (土地利用) の CO₂ 排出量がほぼゼロであることから、植林による CO₂ 除去量もゼロ近い水準であると考えられる (図 4.2.6(d)(h)).

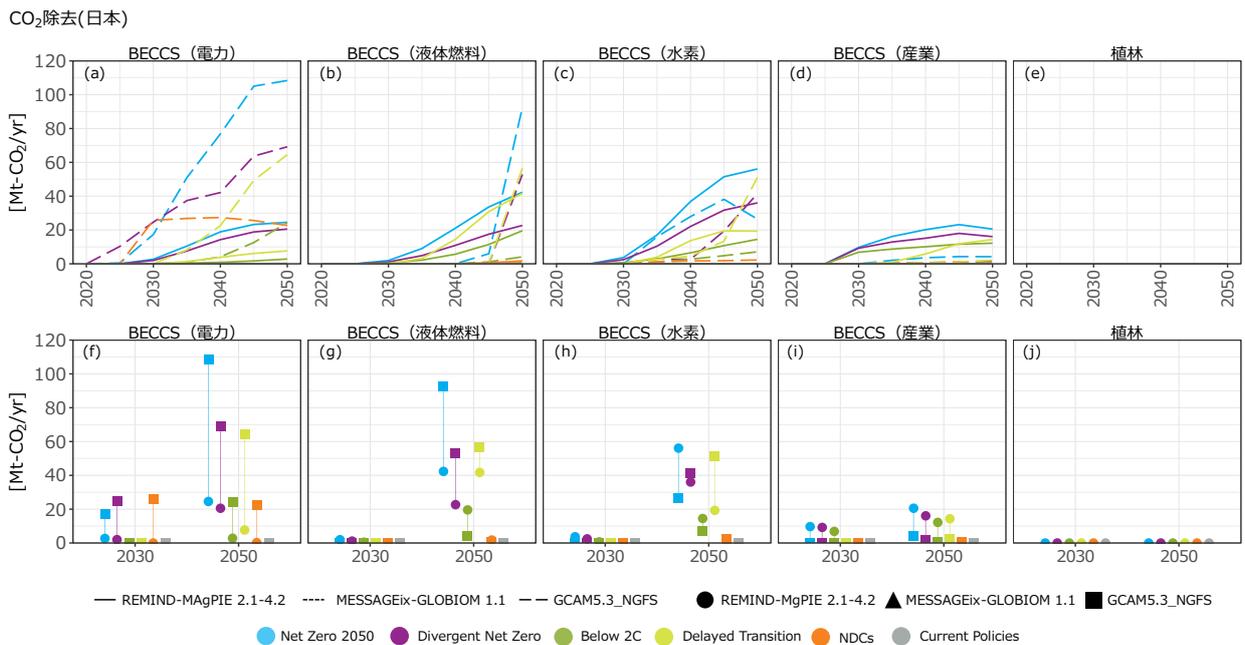


図 4.2.6 部門別の CO₂ 除去量の移行経路 (上段) と 2030 年・2050 年時点の値 (下段)

4.2.5 一次エネルギー

IAMに共通するシナリオの特徴

世界全体と同じく、2°C未満に相当する排出削減政策が導入される4つのシナリオ（図4.2.7(a)-(d)）と、政策が導入されないシナリオ（NDCs・Current Policies、図4.2.7(e)(f)）を比較すると、前者のほうが2050年時点での一次エネルギーの総量が小さい傾向がある。再生可能エネルギーの量は、2050年に向けて増加し（図4.2.8(b)(j)）、世界全体と比較するとバイオマスが占める割合が多い。

Net Zero 2050・Divergent Net Zero（1.5°C）：2050年時点の再生可能エネルギー（■□）の量は最も多く、世界全体と比較するとバイオマス■の割合が大きい。CCSなしの化石燃料については、石炭■と天然ガス■はゼロに近い水準であるが、石油■は2050年時点でも一定程度の量が残る（図4.2.7(a)(b)）。

Below 2°C（1.7°C）：再生可能エネルギー（特にバイオマス■）の量は、Net Zero 2050やDelayed Transitionと比較すると、やや少ない傾向が見られる。2050年時点の石油■の残存量は、Net Zero 2050よりもやや多い（図4.2.7(c)）。

Delayed Transition（1.8°C）：2050年に向けた再生可能エネルギー（■□）の増加と石炭（■）・天然ガス（■）の減少傾向は、Net Zero 2050と同程度。一方、2050年時点の石油（■）の量は、Net Zero 2050よりもやや多い（図4.2.7(d)）。

NDCs・Current Policies（2.5°C~3°C+）：世界全体と同じく、2050年に向けて再生可能エネルギー（■□）は増加するが、導入量は上記4シナリオよりも少ない。その一方で、CCSなし化石燃料（石炭■、天然ガス■、石油■）の量は多い（図4.2.7(e)(f)）。

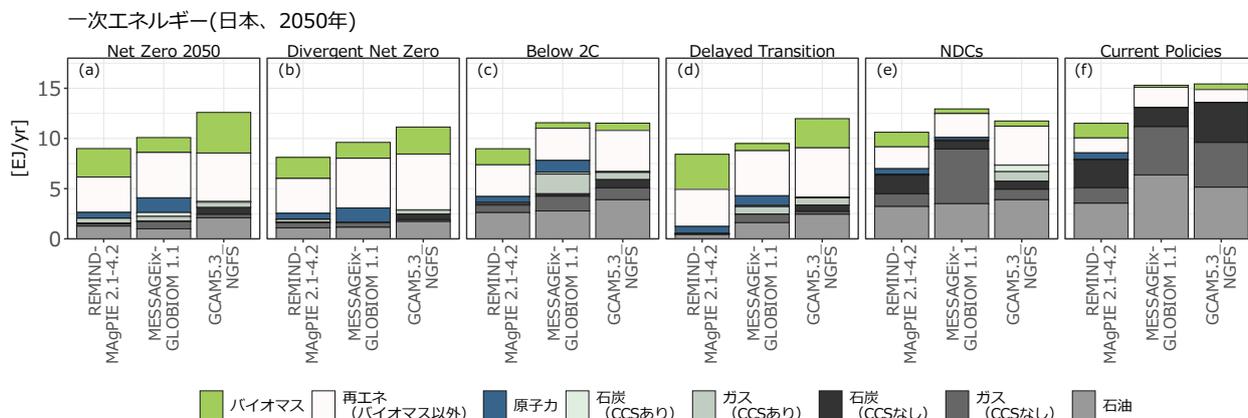


図 4.2.7 2050年時点の部門別一次エネルギー（日本）

IAM間の相違

最も野心的な排出削減政策は導入される Net Zero 2050 をみると、世界全体と同じく、CCSなしの化石燃料消費（石炭、ガス、石油）はいずれも2050年に向けて減少するが（図4.2.7(a)、図4.2.8(f)-(h)）、シナリオ間の大小関係は、IAMによって異なる（図4.2.8(n)-(p)）。

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2：2.1-4.2：2050年時点の一次エネルギーは最も小さい（図4.2.7(a)）。CCSなしの化石燃料のうち、石炭については、2030年までに急速に減少し、2050年にはほぼゼロとなる（図4.2.7(a)■、図4.2.8(n)●）。天然ガスについては、2030・2050年いずれの時点においても最も量が少ない（図4.2.7(a)■、図4.2.8(o)●）。世界全体とは異なり、原子力の割合は中程度である（図

4.2.7(a) ■、図 4.2.8(k) ●)。

なお、原子力の量は、すべての時点・シナリオでほぼ一定である (図 4.2.8(k)●)。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : 2050 年時点の一次エネルギーは中程度である (図 4.2.7(a))。CCS なしの化石燃料のうち、石炭については、2030 年までに急速に減少し、2050 年にはほぼゼロとなる (図 4.2.7(a)■、図 4.2.8(n)▲)。天然ガスについては、2030・2050 年いずれの時点においても最も量が多い (図 4.2.7(a)■、図 4.2.8(o)▲)。原子力の割合は最も多い (図 4.2.7(a) ■、図 4.2.8(k)▲)。

GCAM 5.3 : 2050 年時点の一次エネルギーは最も多い (図 4.2.7(a))。CCS なしの化石燃料 (石炭、ガス、石油) の合計量は他の 2 つの IAM よりも多い (図 4.2.7(a) ■■、図 4.2.8(n)-(p))。石炭については、他の IAM よりも量が多く 2050 年時点でもほぼゼロとはならないものの、2050 年に向けた減少幅は世界全体よりは多い (図 4.2.7(a)■、図 4.2.8(n) ■)。天然ガス (図 4.2.7(a)■、図 4.2.8(o)■) と原子力 (図 4.2.7(a)■、図 4.2.8(k)■) はいずれも、中程度である。

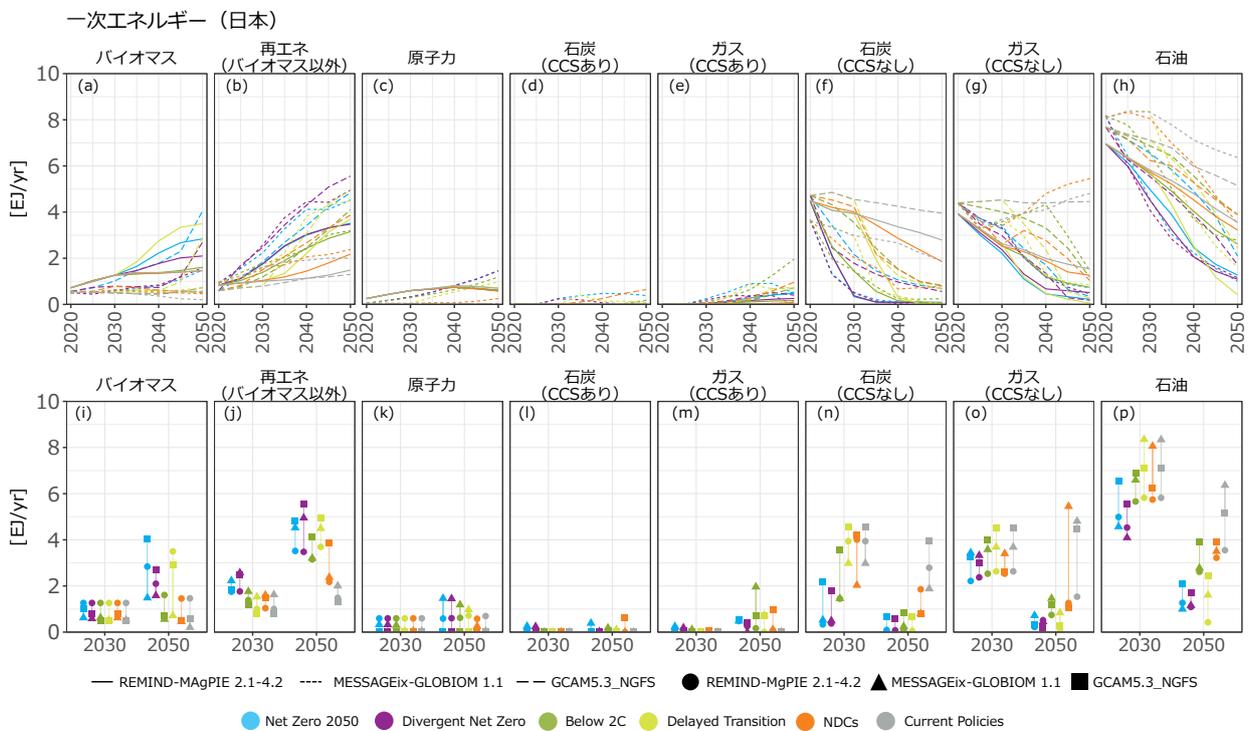


図 4.2.8 部門別の一次エネルギー消費量の移行経路 (上段) と 2030 年・2050 年時点の値 (下)

4.2.6 二次エネルギー (発電電力量)

IAM に共通するシナリオの特徴

世界全体と同じく、排出削減政策の野心度が高いシナリオほど、2050 年時点の発電電力量全体が多く、再生可能エネルギーと原子力の割合が多くなる傾向がみられる (図 4.2.9)。

Net Zero 2050・Divergent Net Zero (1.5°C) : 2050 年時点の発電電力量は最も多く、世界全体と比較すると太陽発電■と風力発電■が占める割合が多い。バイオマス発電■や原子力発電■も一定量みられるが、全体に占める割合は低い。CO₂ 排出量を伴う CCS なし化石燃料■による電力量は 2050 年時点でほぼゼロとなる (図 4.2.9(a)(b))。

Below 2°C・Delayed Transition (1.7°C~1.8°C) : 全体的な傾向は上記 2 シナリオと類似するが、全体の発電電力量はやや少ない (図 4.2.9(c)(d))。

NDCS・Current Policies (2.5°C~3°C+) : 2050年時点の全体の発電電力量は最も少ない。太陽発電■と風力発電■をはじめ、再生可能エネルギーの割合は少ない。その一方で、2050年時点においても、CCSなしの化石燃料■が一定量、残存する (図 4.2.9(e)(f))。

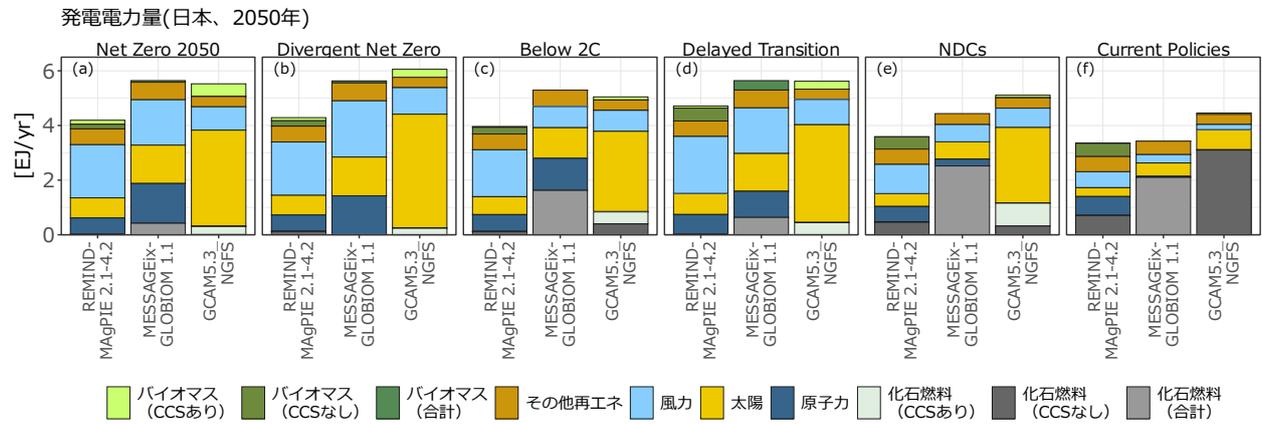


図 4.2.9 2050年時点の発電電力量の内訳 (日本)

IAM 間の相違

最も野心得が高い排出削減政策が導入される Net Zero 2050 に着目すると、発電電力量全体、太陽発電、風力発電、原子力発電、CCS の導入量等に、IAM の特徴がみられる。

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2 : 世界全体と同じく、発電電力量が他の 2 つと比較して最も少ない (図 4.2.9(a))。

世界全体と比較すると、2030年・2050年ともに太陽発電 (図 4.2.9 (a)■、図 4.2.10(e)(m)●) が少なく、その分だけ 2050年時点の風力発電 (図 4.2.9 (a)■、図 4.2.10 (d)(l)●) が多い。原子力 (図 4.2.9 (a)■、図 4.2.10 (f)(n)●) については、2030年・2050年を通じて発電電力量が変化しない。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : 世界全体と同じく、発電電力量は中程度である (図 4.2.9(a))。2050年時点では、太陽発電 (図 4.2.9 (a)■、図 4.2.10 (e)(m)▲) と風力発電 (図 4.2.9 (a)■、図 4.2.10 (d)(l)▲) の量は、同程度である。原子力 (図 4.2.9 (a)■、図 4.2.10 (f)(n)▲) については、発電電力量に占める割合が世界全体よりも高い。

GCAM 5.3 : 世界全体と同じく、発電電力量は最も多い (図 4.2.9(a))。2050年時点では、風力発電 (図 4.2.9 (a)■、図 4.2.10 (d)(l)■) が少なく太陽発電 (図 4.2.9 (a)■、図 4.2.10 (e)(m)■) が多い。ただし、太陽発電とされた内訳の大半は、集光型太陽熱発電 (CSP) である¹⁹。

一方、世界全体とは異なり、原子力発電 (図 4.2.9 (a)■、図 4.2.10 (f)(n)■) の量はほぼゼロである。CCS については、バイオマス発電 (BECCS、図 4.2.9 ■、図 4.2.10(i)■) と化石燃料発電 (図 4.2.9□、図 4.2.10 (f)(n)■) の両方に、一定量、導入される。

¹⁹ 集光型太陽熱発電 (CSP) とは、太陽の光をレンズや反射板を使って太陽炉に集め、熱源として利用する発電方式である。日照を確保できる地域 (赤道付近の乾燥地帯) では有力な再生可能エネルギー源の 1 つであるが、我が国では導入ポテンシャルはきわめて限られている。したがって、GCAM 5.3 が報告する日本の再生可能エネルギーの発電量は、過大評価であると考えられる。

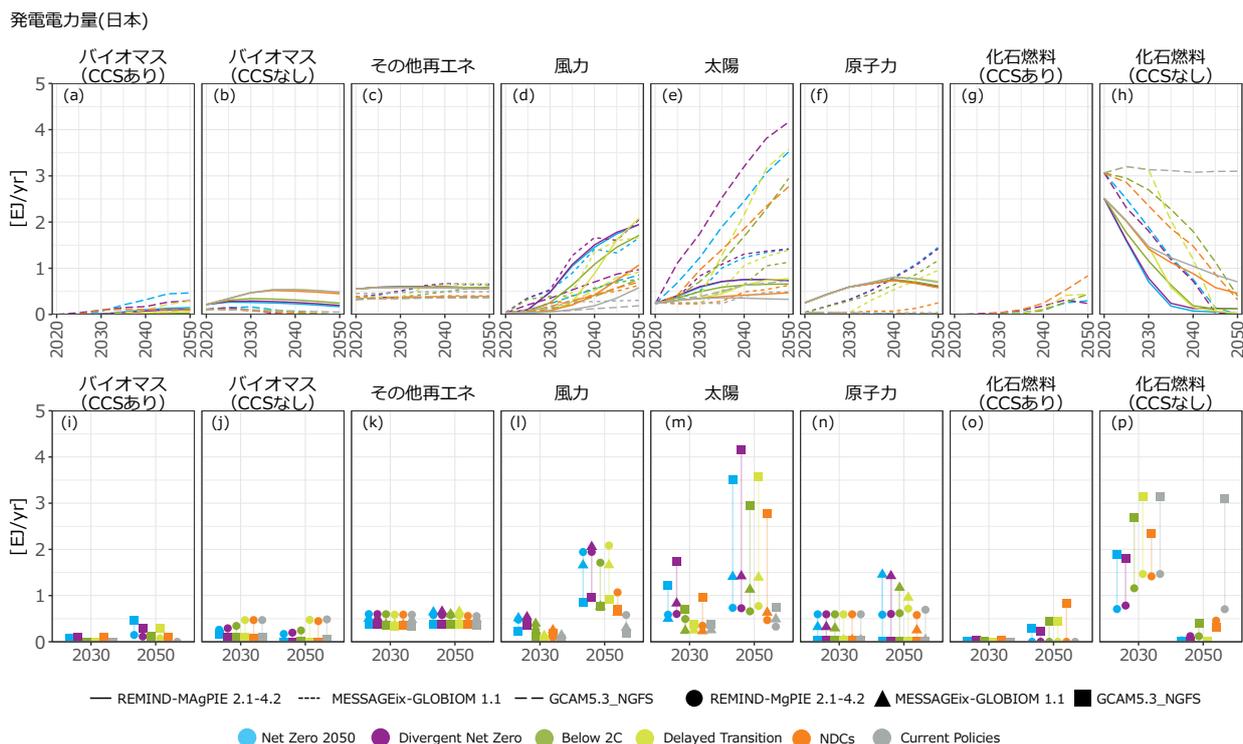


図 4.2.10 発電電力量の推移（上段）と 2030 年・2050 年時点の値（下段）（日本）

4.2.7 資本コスト

世界全体と同じく、資本コストについてはシナリオ間でほぼ差がないため、図では Net Zero 2050 シナリオにおける電源別資本コストの想定を示す。およその傾向は世界全体と同様であるが、REMIND-MagPIE 2.1-4.2 については、石炭（CCS 付き）と原子力の資本コストが、世界全体よりもやや高い（図 4.2.11）。

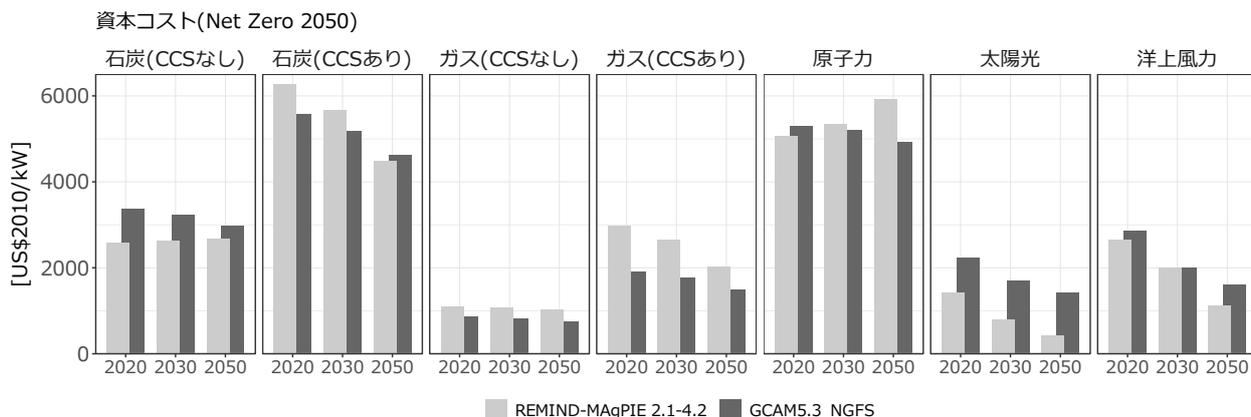


図 4.2.11 電源別の資本コストの想定（2020 年・2030 年・2050 年）（日本）

4.2.8 最終エネルギー

IAMに共通するシナリオの特徴

世界全体と同じく、2050年時点の最終エネルギーのうち、電力が最も大きな割合を占める。一方、化石燃料（ガス・液体燃料・固体燃料）の割合は、シナリオによって異なる（図4.2.12）。

Net Zero 2050・Divergent Net Zero・Below 2°C・Delayed Transition（1.5°C~1.8°C）：温度上昇を2°C未満に抑えるための排出削減政策が導入されるこれらのシナリオについては、2050年時点の最終エネルギー消費量全体とその内訳はほぼ同一である。最終エネルギー消費に占める電力の割合が多く、化石燃料の割合が低い傾向がみられる（図4.2.12(a)-(d)）。

NDCs・Current Policies（2.5°C~3°C+）：2050年時点の最終エネルギー消費は上記4シナリオと比較してやや多く、化石燃料の割合が高い傾向がみられる。また、2050年時点でもすべてのIAMで一定量の石炭が残る（図4.2.12(e)(f)、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1では、固体燃料■として報告されている）。

IAM間の相違

最も野心得が高い排出削減政策が導入されるNet Zero 2050に着目すると、2050年時点における最終エネルギーの量や化石燃料の量にIAMごとの特徴がみられる。

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2：世界全体と同じく、最終エネルギーの量は他のIAMよりも少ない（図4.2.12(a)）。化石燃料の中では、液体燃料（主に石油）の量が多い（図4.2.12(a)■、図4.2.13(n)●）。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1：最終エネルギーの量は中程度である（図4.2.12(a)）。化石燃料のうち、2050年時点のガス（主に天然ガス）の量が最も多い（図4.2.12(a)■(a)、図4.2.13(m)▲）。液体燃料（主に石油）の量は最も少ない（図4.2.12(a)■、図4.2.13(n)▲）が、固体燃料（石炭とバイオマスの合計）が一定量みられる（図4.2.12(a)■、図4.2.13(p)▲）。

GCAM 5.3：最終エネルギーの量は最も多い（図4.2.12(a)）。2050年時点のガス（図4.2.12(a)■(a)、図4.2.13(m)■）の量はほぼゼロで、液体燃料（主に石油）（図4.2.12(a)■、図4.2.13(n)■）は中程度である。なお、世界全体と同じく、すべてのシナリオで2050年時点においても石炭が残っている（図4.2.12(a)■、図4.2.13(o)■）。

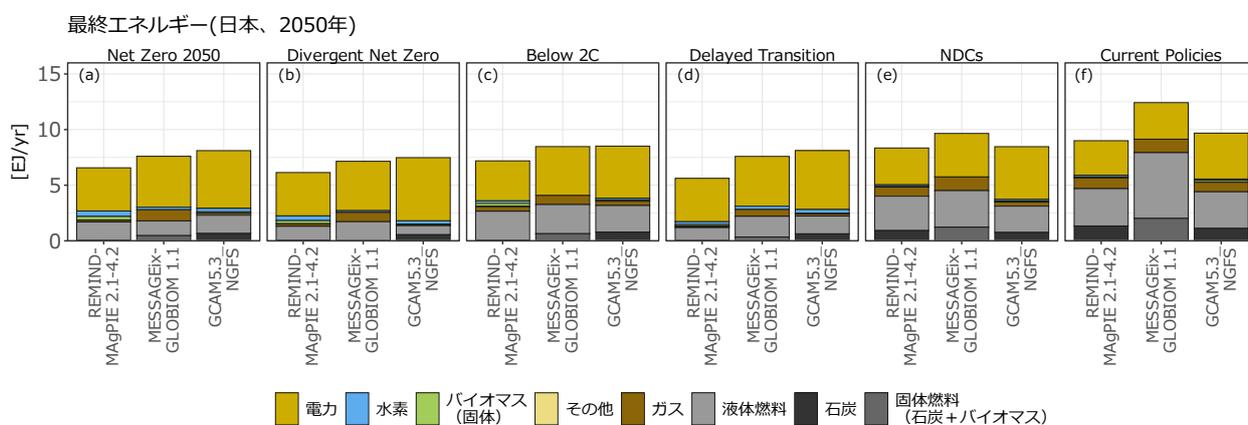


図 4.2.12 2050年の最終エネルギーの内訳（日本）

最終エネルギー（日本）

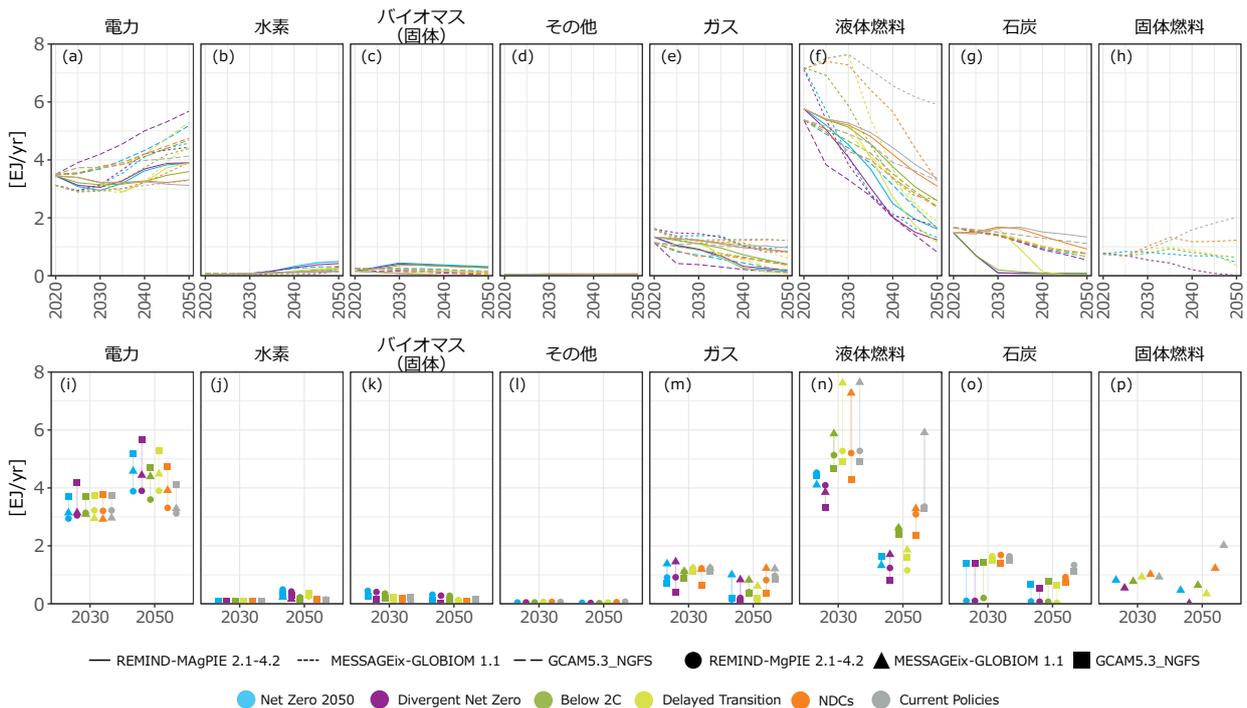


図 4.2.13 最終エネルギー需要の移行経路（上段）と 2030 年・2050 年時点の値（下段）（日本）

4.2.9 エネルギー価格（2020 年比の増減率）

2020 年のエネルギー価格（日本）

日本の 2020 年におけるエネルギー価格（図 4.2.14）を確認すると、世界の場合と同様に、足元の価格が IAM 間で相違していることから（特に石油と電力の相違が大きい）、エネルギー価格の実数ではなく、2020 年からの変化の傾向を指数で確認する。

なお、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 の値はダウンスケーリングされたものであり、日本をネイティブの区分としているほかの二つの IAM とは計算の前提が異なる。また、ダウンスケーリングされたものでも、エネルギー消費量等と異なり、価格の変数は按分するものではなく、IAM 内で定義された地域区分ごとに一律の値が報告される。実際、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 では、日本、オーストラリア、ニュージーランドが同じ地域区分であるが、これら 3 か国では同一のエネルギー価格が報告されている。

エネルギー価格(日本、2020年)

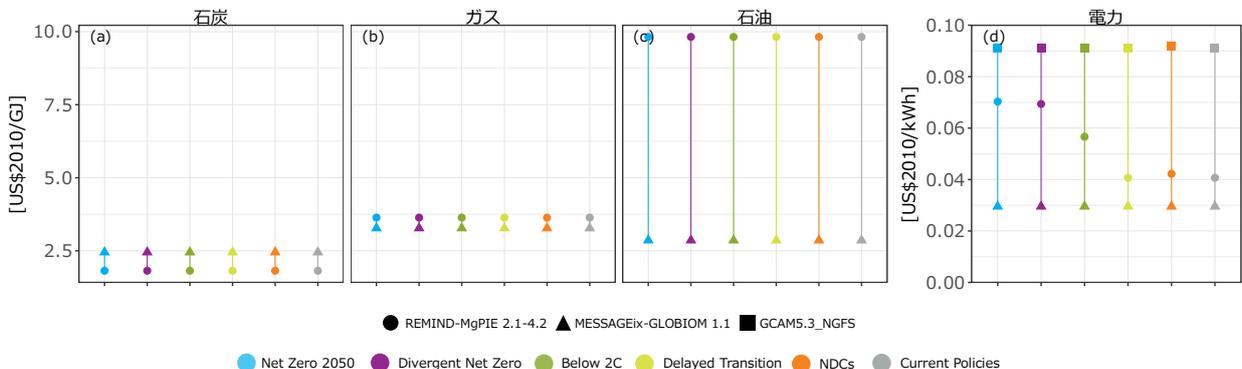


図 4.2.14 2020 年時点のエネルギー価格（日本）

IAMに共通するシナリオの特徴

一次エネルギー価格については、シナリオ間・IAM間によって極端な変動をとるものがあるが、IAM間の差は世界全体よりは小さい。石炭価格については、減少するシナリオがやや多い。ガス価格は、Delayed Transitionの一部を除いて、2030年・2050年にかけて増加する傾向がおおむね共通している。石油についても、価格が上昇するシナリオが多い。電力価格については、どのシナリオにおいても、世界全体よりも上昇率が大きくなる傾向が顕著である（図 4.2.15）。

Net Zero 2050 (1.5°C)・Divergent Net Zero (1.5°C)・Below 2°C (1.7°C)：世界全体と同じく、ガス価格は、政策の野心度が高いほど上昇する傾向が見られる（図 4.2.15(f)）。IAMによって幅にばらつきがあるが、石炭価格は下落、石油価格は上昇する傾向がみられる（図 4.2.15(e)(g)）。電力は、2030年に上昇する（図 4.2.15(d)(h)）。

Delayed Transition (1.8°C)：世界全体と同じく、ガス価格・石炭価格・石油価格ともに、IAMによって上昇・下落のいずれの傾向もみられ、一貫性がない。IAMによって極端な価格の変化が見られる。電力価格は、2035~40年に一時的に上昇する（図 4.2.15(d)(h)）。

NDCs (2.5°C)・Current Policies (~3°C+)：排出削減政策が導入される上記 4 シナリオと比較すると、価格変動の幅は小さい。ガス価格と石油価格は上昇する（図 4.2.15(e)(f)）。石炭価格は、IAMによって上昇と下落が分かれる（図 4.2.15(e)）。電力価格は上記 4 シナリオよりは変動しない（図 4.2.15(d)(h)）。

IAM間の相違

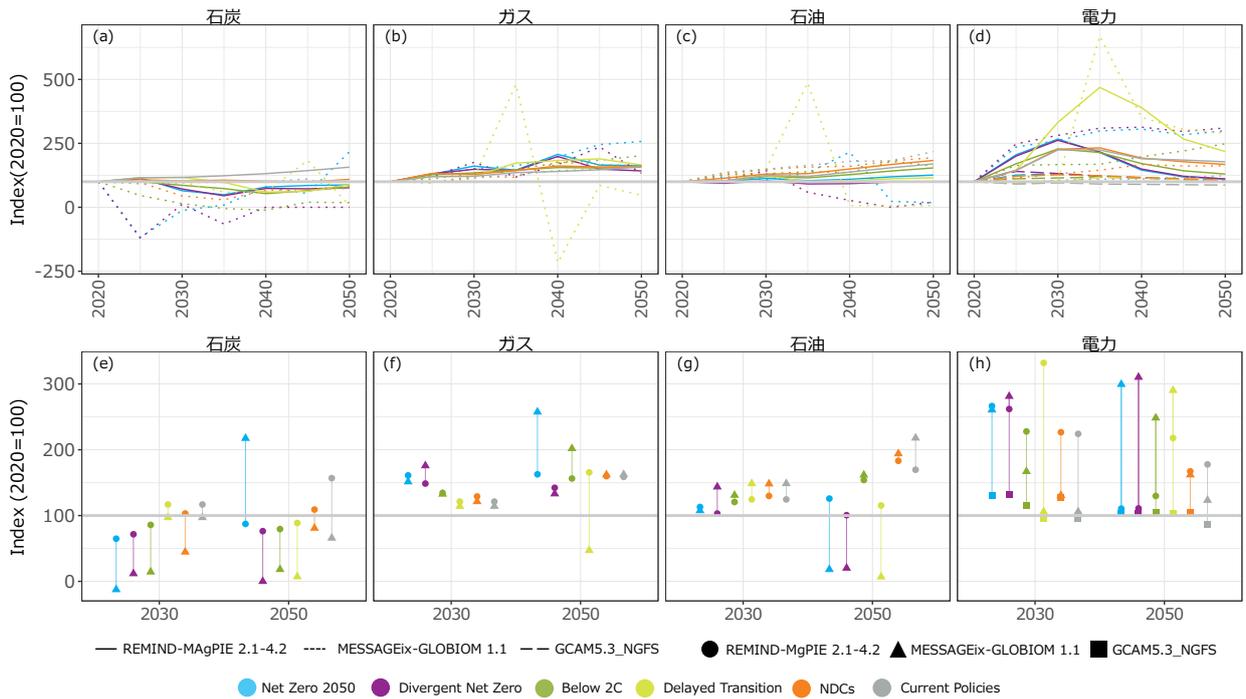
世界全体と同じく、化石燃料価格変化の幅には、IAMの特徴が現れている。また、IAMによっては、一時的な価格の上昇・下落がみられる。

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2：化石燃料価格変化の幅は小さい。電力価格については、Net Zero 2050 と Divergent Net Zero では 2030年、Delayed Transition では 2040年をピークに、大幅な上昇がみられるが、2050年に向けて下降する（図 4.2.15 (d) ●●●）。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1：他 2種の IAM と比較して、化石燃料価格の変化の幅は最も大きく、極端な変動がみられる。電力価格については、Net Zero 2050・Divergent Net Zero・Below 2°C・Delayed Transition において、2050年に他の 2種の IAM と比較して、大きくなる傾向（図 4.2.15 (h) ▲▲▲▲▲）。ただし、2020年の電力価格が他の IAM と比較して小さいため、増加率が大きくなっている側面がある。

GCAM 5.3：日本については、一次エネルギー価格（化石燃料）を報告していない。電力価格は小幅である（図 4.2.15 (h) ■）。

エネルギー価格(日本)



※ MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 では、石炭とガスで価格がマイナスになっている点が見られるが、これは価格の算出におけるエラーであると考えられる。

図 4.2.15 エネルギー価格の移行経路（上段）と2030年・2050年時点の値（下段）（日本）

4.2.10 エネルギーへの投資（2050年までの累計）

世界全体と同じく、排出削減政策の野心度が高いシナリオほど、化石燃料発電への投資額は少なく、再生可能エネルギー（太陽、風力）及び原子力への投資額が大きくなる傾向がある。また、送配電への投資額が大きい（図 4.2.16、図 4.2.17）。

IAM間の相違

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2：他のエネルギーと比較した場合の風力発電への投資額が、世界全体よりも多い。

原子力発電への投資も、世界全体とは異なり、高い水準にある（図 4.2.16、図 4.2.17●）。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1：（日本の値は報告されていない）

GCAM 5.3：化石燃料への投資額が大きく、風力発電への投資額が少ない点は、世界全体と共通している。

一方、送配電への投資額は、世界全体とは異なり、REMIND-MAGPIE 2.1-4.2 よりも大きい（図 4.2.16、図 4.2.17■）。

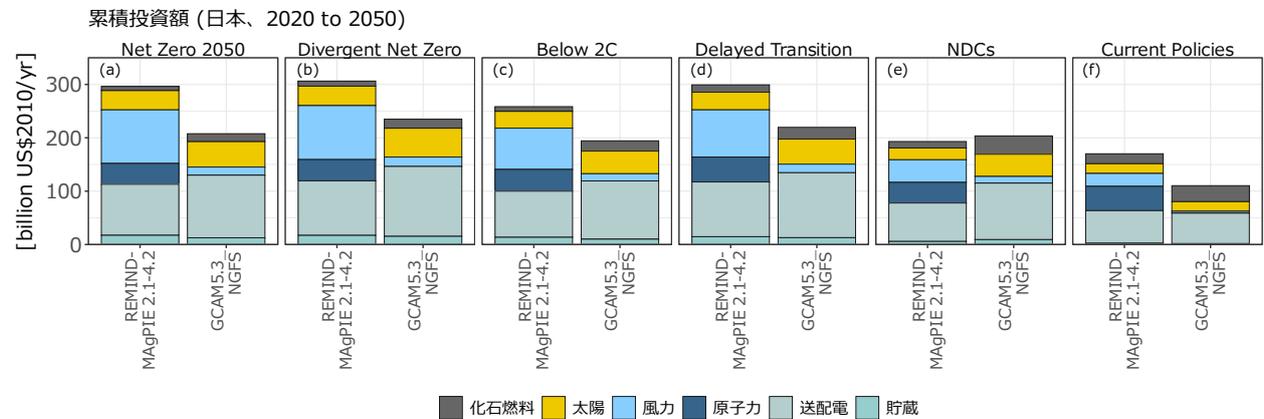


図 4.2.16 エネルギー関連の累積投資額（2020年～2050年）（日本）

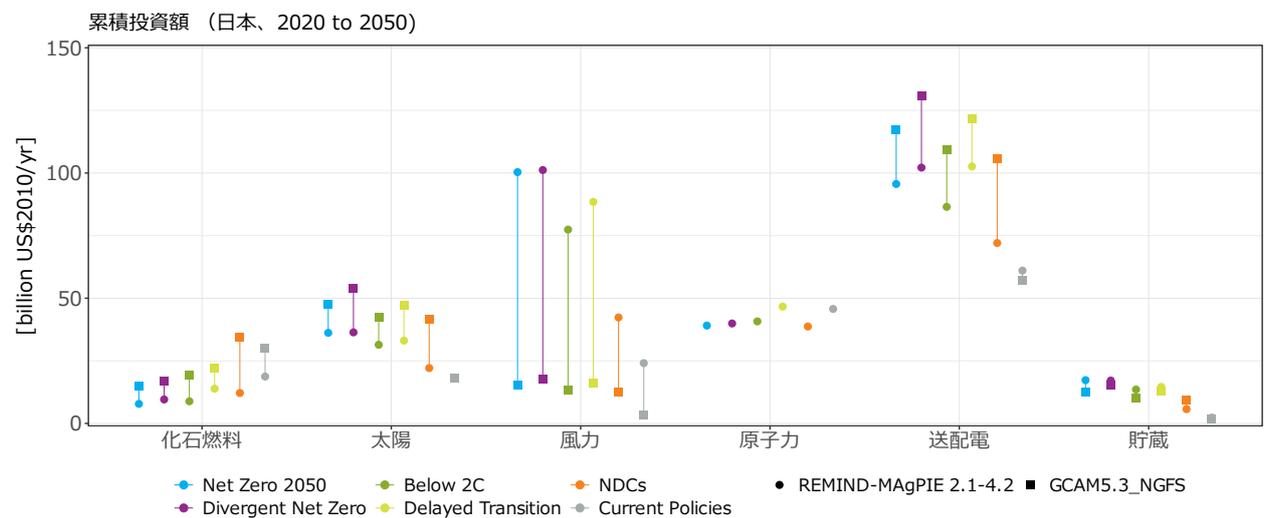


図 4.2.17 エネルギー関連の累積投資額（2020年～2050年、部門別）（日本）

4.2.11まとめ：日本の NGFS シナリオの特徴

マイナス排出の達成と CO₂ 除去技術

世界全体と同じく、日本においても野心的な排出削減政策が導入されるシナリオにおいては、2050年時点で発電電力量に占める非化石エネルギー（再生可能エネルギーと原子力の合計）の割合（電源構成の非化石比率）が高く（図 4.2.9）、最終エネルギーに占める電力の割合（電化率）も高い（図 4.2.12）。ここから、NGFSシナリオ（第2版）では、日本においても、最終エネルギー消費の電化と電力の脱炭素化の組み合わせによって、エネルギー起源の CO₂ 排出量が削減されることが分かる（図 4.2.18）。

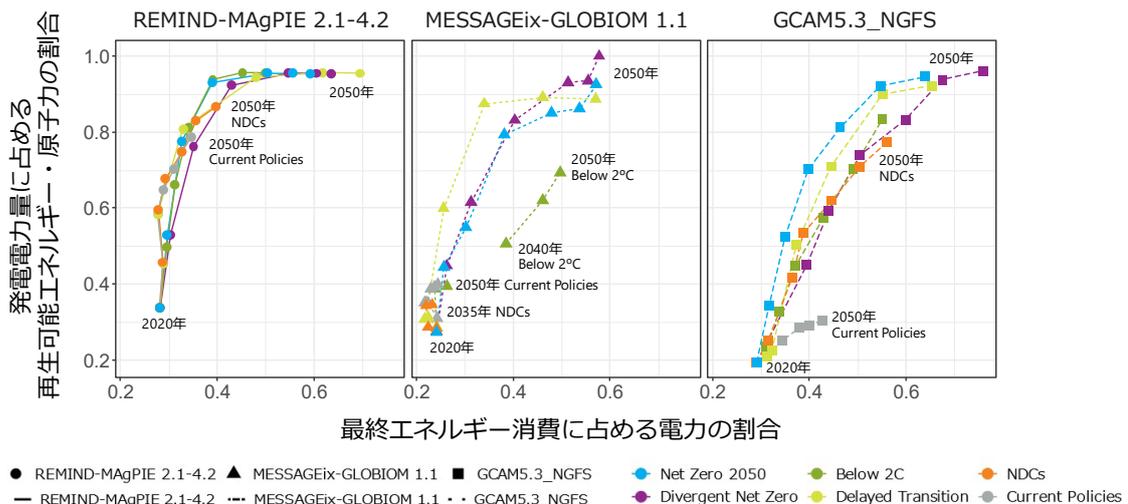


図 4.2.18 最終エネルギー消費に占める電力の割合（電化率）と発電電力量に占める非化石電源（再生可能エネルギー・原子力）の割合（電源構成の非化石比率）の関係。2020年から2050年まで（5年間隔）の推移（日本）

その一方で、Net Zero 2050 を例にとれば、世界全体で 2050 年時点の CO₂ 排出量がほぼゼロ（ネットゼロ）であるのに対し、日本の CO₂ 排出量は IAM によってはネットでマイナスとなる（図 4.2.1）。産業部門と運輸部門に残余排出が見られるが、それを上回るほどのマイナス排出量がある（図 4.2.3 (a)）。日本では、マイナス排出は BECCS による CO₂ 除去が中心で、植林による CO₂ 除去はゼロに近い（図 4.2.5）。

Net Zero 2050 等、野心的な排出削減政策にともなう BECCS の増加は、バイオマス燃料の需要に影響を与える。2050 年時点の一次エネルギーをみると、世界全体と比較して、バイオマスが占める割合がやや高い傾向が見られた（図 4.2.7）。また、BECCS の増加は、バイオマス輸入量の増加につながる。図 4.2.19 は、バイオマスの輸入量が報告されている REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 に注目して、2020 年から 2050 年にかけて、日本における BECCS による CO₂ 除去量と輸入バイオマスの割合の推移を示したものである。野心的な排出削減政策が導入されるシナリオでは、2050 年に向けて BECCS による CO₂ 除去量が増加するにつれ、輸入バイオマスの割合も増加する傾向があることが分かる。

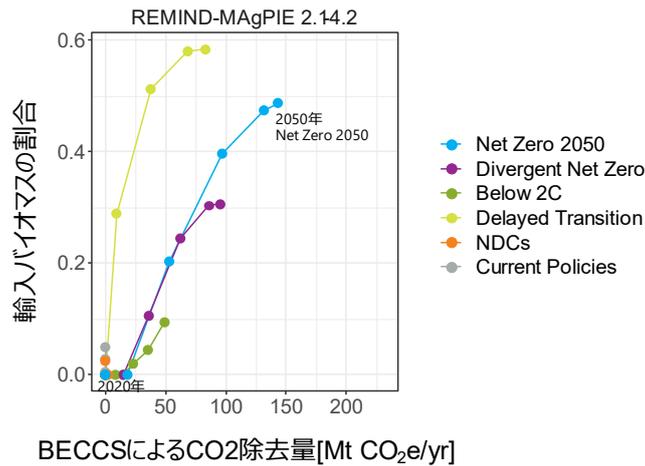


図 4.2.19 BECCS による CO₂ 除去量と輸入バイオマスの比率の関係。2020 年から 2050 年まで（5 年間隔）の推移（日本）

エネルギー価格の変動とその要因

エネルギー価格については、シナリオ間で明確な違いはないが、一部で極端な価格変動が起きている。日本においては、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 のガス価格と REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 の電力価格に見られる変動が該当する（図 4.2.15）。

一次エネルギーの石油・ガス価格は、IAM では長期的な均衡における石油・ガス市場の動学を反映したもので、現実とは異なる仕組みで算出される²⁰。この価格算出では、資源供給コスト、燃料需要、気候政策といった要因が、IAM における最適化対象の目的関数を通じて影響する。そのため、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 のガス価格が変動する要因について決定的な要因を考察することは難しい。

二次エネルギーの電力価格も、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 では一次エネルギーと同様の考え方で算出されている。この IAM で、電力価格は 2030 年前後に急上昇した後に、2050 年にかけて下落する（図 4.2.15(d)）。価格上昇は低炭素電源が拡大する時期に対応することから、関連する設備投資が影響している可能性が考えられる²¹。

実際、図 4.2.20 に示すように、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 では電力価格の大幅な変動が電力関連の投資額の変動に連動している。特に風力と送配電の投資額の変動が大きく、風力が先行して、そのピーク後に送配電がピークになる傾向が見られる。比較のため、図 4.2.20 には GCAM 5.3 の結果も示している。こちらもシナリオによっては特定の時期に投資が集中するが、それが電力価格には反映されていない。GCAM 5.3 は、時点間最適化を動作原理とする IAM と異なり、将来の予見性なしに地域・部門別の市場で供給と需要が均衡するように価格を算出する（Box 1）。この場合、大きな価格変動は起きにくいと考えられる。

²⁰ REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 がこれに該当する（NGFS FAQ <https://www.ngfs.net/ngfs-scenarios-portal/faq/#high-oil-prices>）。これらの IAM の公開されているソースコードでは、一次エネルギー価格が、時点間最適化の最適点におけるエネルギーバランスの変化をコストの変化と関係づける形で定義されている。

²¹ REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 のソースコードでは、価格の定義式で電力バランスの変化が所得恒等式の変化と関係づけられている。この場合、電力需要の変化に対して投資額の変化が大きいと大幅な価格変動が起きやすいと考えられる。

REMIND-MAqPIE 2.1 -4.2

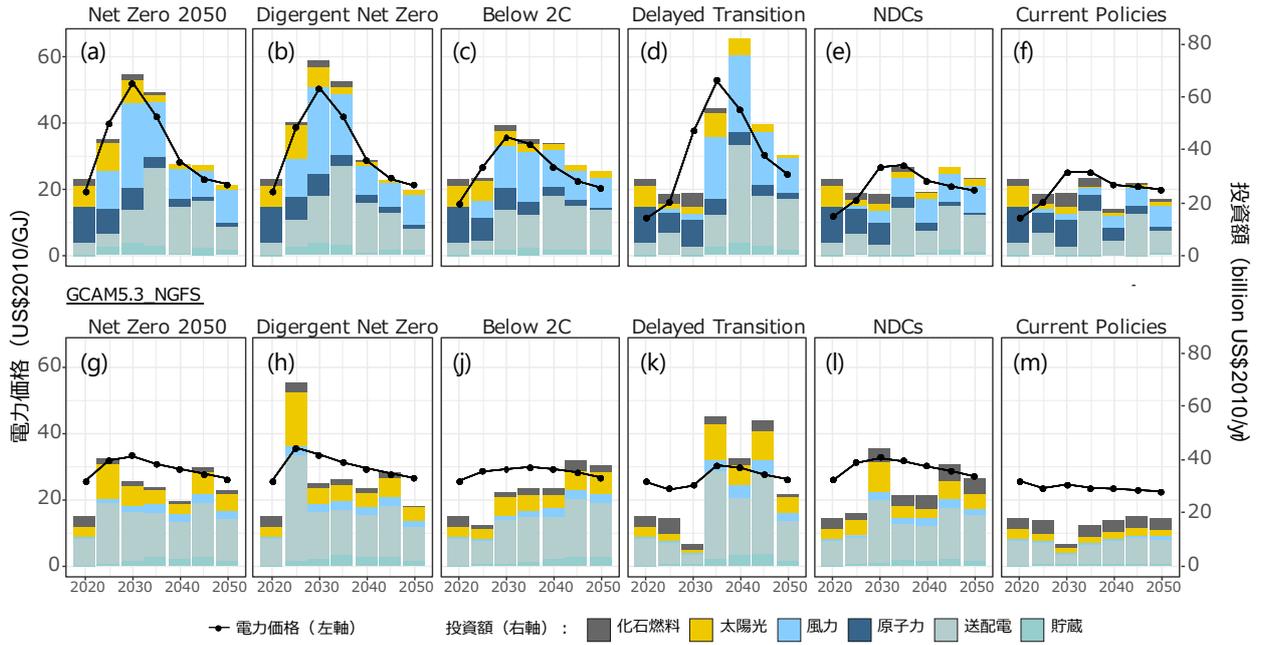


図 4.2.20 電力価格と電力関連の投資額の比較 (日本)

4.3 NGFS シナリオ（第2版）の概観：主要地域の特徴

本節では、NGFS シナリオ（第2版）の主要変数を地域間で比較することで、地域の特徴を整理する。比較対象とした地域は、日本・EU・米国・中国・インド・インドネシアである（表 4.3.1）。EU と米国は、先進国（advanced economies）の中で CO₂ 排出量・GDP が多い。また、中国とインドはアジアの新興国（emerging economies）のうち、世界の総 CO₂ 排出量に占める割合が高く、今後、経済成長による CO₂ 排出量の増加が予想される。インドネシアについては、人口規模が大きく、東南アジア地域を代表すると考えられる。なお本節では便宜的に、日本・EU・米国を「先進国」、中国・インド・インドネシアを「新興国」と呼ぶ。

表 4.3.1 本節で分析対象とする地域と NGFS シナリオ（第2版）上のデータ区分

地域	REMIND-MAGPIE 2.1-4.2	MESSAGEix-GLOBIOM 1.1	GCAM5.3
日本	ネイティブの地域区分	太平洋州 OECD (Pacific OECD) からのダウンスケール	ネイティブの地域区分
EU	ネイティブの地域区分	ネイティブの地域区分	ネイティブの地域区分
米国	ネイティブの地域区分	ネイティブの地域区分	ネイティブの地域区分
中国	ネイティブの地域区分	ネイティブの地域区分	ネイティブの地域区分
インド	ネイティブの地域区分	ネイティブの地域区分	ネイティブの地域区分
インドネシア	その他アジア諸国 (OAS: Other Asian Countries) からのダウンスケール	その他アジア太平洋地域 (PAS: Other Pacific Asia) からのダウンスケール	ネイティブの地域区分

分析対象とする地域の選定にあたっては、NGFS シナリオ（第2版）の IAM 上にネイティブの地域区分が存在しているかどうかを考慮した。しかしながら、日本とインドネシアについては、IAM によってネイティブの地域区分が存在しないものがある。その場合、上位の地域データから国単位にダウンスケールされたデータを分析対象とした（表 4.3.1）。

なお、本節では、NGFS シナリオ（第2版）に収録されている6種類のシナリオのうち、排出削減政策の野心度が最も高い Net Zero 2050 と、最も弱い Current Policies シナリオに主に着目する（炭素価格については Delayed Transition も参照する）。

4.3.1 CO₂ 排出量

どの地域においても、Net Zero 2050 と Current Policies との間には、大きな CO₂ 排出量の相違を確認できる。現行政策ではネットゼロ排出とのギャップが大きいことがわかる

地域の特徴

日本・EU・米国（先進国）： Net Zero 2050 と Current Policies のいずれにおいても、CO₂ 排出量は 2050 年にかけて減少する（EU のみ MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 では、Current Policies の排出量がわずかに増加する傾向がみられる）。また、Net Zero 2050 では、ネットゼロ排出か、IAM によってはネットネガティブ排出となっている（図 4.3.1(a)-(c)）。

中国・インド・インドネシア（新興国）： Net Zero 2050 では、2020 年以降に大幅な排出削減が想定されているが、2050 年時点ではネットゼロ排出には到達しない。Current Policies では、地域によって CO₂ 排出量はほぼ横ばいか、やや増加する傾向がみられる（図 4.3.1(d)-(f)）。

IAM間の相違

インドネシアについては、CO₂排出量が REMIND-MAgPIE 2.1-4.2・MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 と GCAM 5.3 で大きく異なっている（図 4.3.1(f)）。これは、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2・MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 がその他アジア地域からダウンスケールした際の影響によるものと考えられる。

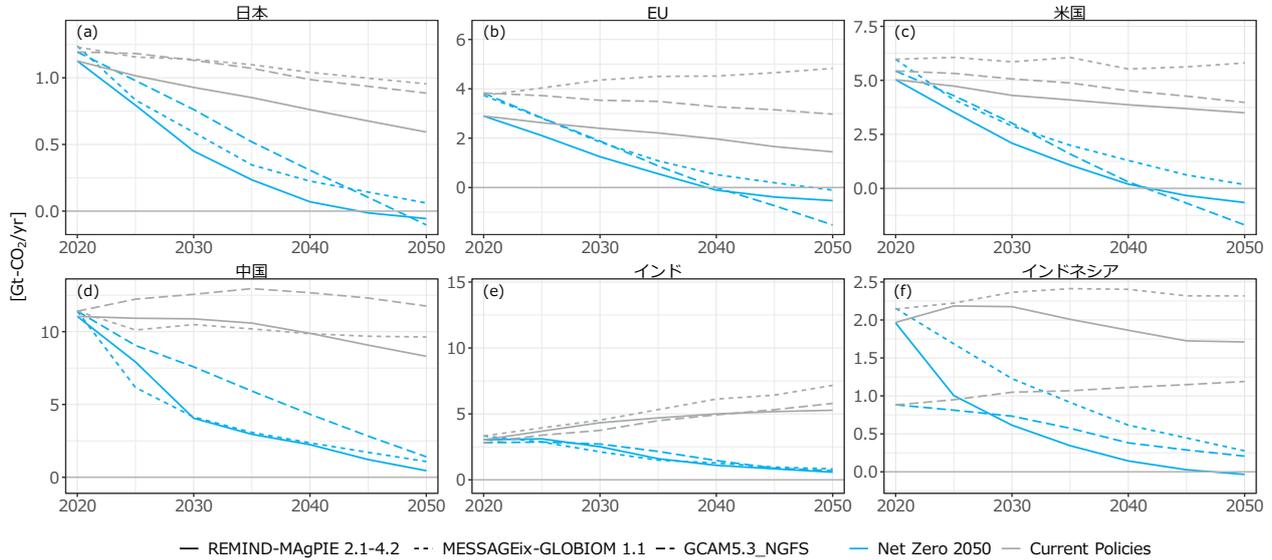


図 4.3.1 主要地域の CO₂ 排出量の推移

4.3.2 部門別 CO₂ 排出量

地域の特徴

日本・EU・米国（先進国）：世界全体の傾向と同じく、Net Zero 2050 では、2050 年時点で産業部門 ■ を中心に排出量が有意に減少する。また、エネルギー供給部門（電力 ■、その他 ■）では、CO₂ 排出量がマイナスとなる（図 4.3.2(c)(f)(i)）。

中国・インド（新興国）：Net Zero 2050 では、2050 年時点で産業部門の排出量が減少する傾向は共通しているが、先進国と比較すると排出量がマイナスとなる部門は少ない（図 4.3.2(l)(o)）。

インドネシア（新興国）：Net Zero 2050 では、2050 年時点で産業部門の排出量が減少し、マイナス排出となる部門が少ない傾向は共通している。また、いずれのシナリオにおいても、先進国と比較すると AFOLU 部門（土地利用） ■ の CO₂ 排出/マイナス排出が占める割合が多い（図 4.3.2(p)(q)(r)）。

IAM間の相違

インドネシアについては、GCAM5.3 と比較すると、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2・MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 で AFOLU 部門（土地利用）の排出量が多い傾向が認められる。これは、その他アジア地域からダウンスケールした際の影響によるものと考えられる。

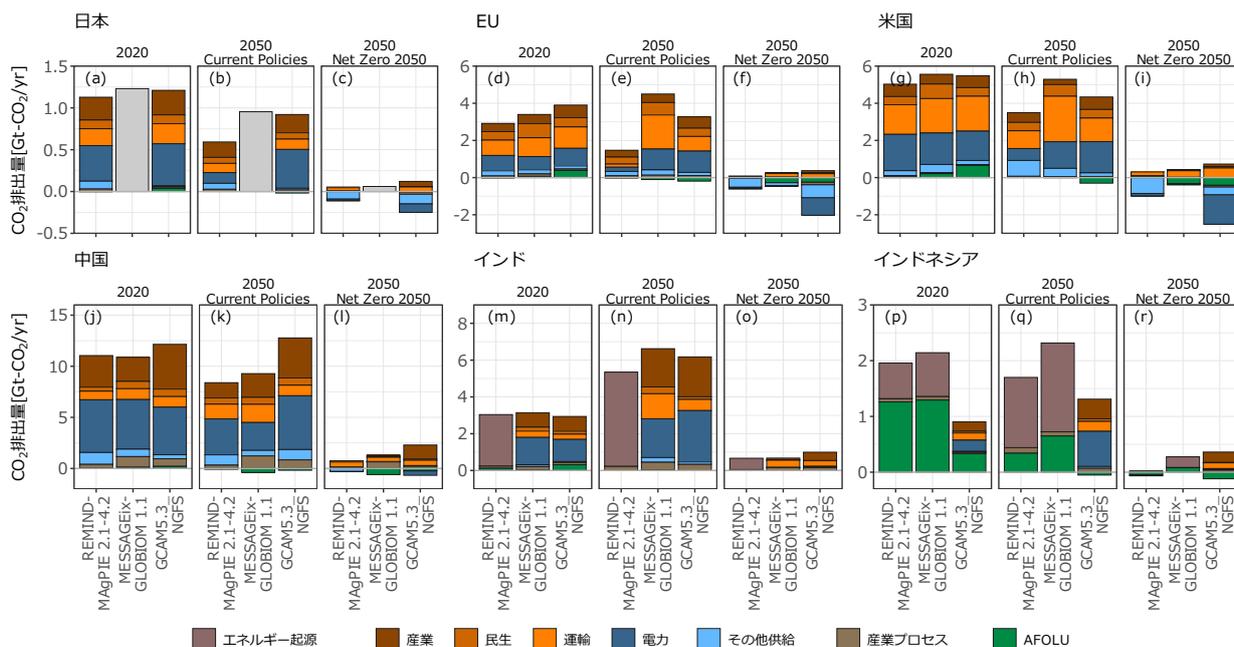


図 4.3.2 主要地域の部門別 CO₂ 排出量

4.3.3 炭素価格

排出削減政策の野心度が高いシナリオ（Net Zero 2050・Delayed Transition）では 2050 年に向けて炭素価格が上昇し、排出削減政策が導入されないシナリオ（Current Policies）では炭素価格が上昇しない傾向は、すべての地域に共通している。いずれのシナリオにおいても、先進国のほうが途上国よりも炭素価格の上昇幅が大きく、排出削減政策の強度に地域差があることが分かる。

なお、Net Zero 2050 と Delayed Transition のどちらがより炭素価格が上昇するかについては、地域や IAM によって差異がある。

地域の特徴

日本・EU・米国（先進国）：世界全体の傾向と同じく、排出削減政策が厳しいシナリオ（Net Zero 2050・Delayed Transition）ほど 2050 年に向けて炭素価格が上昇する。新興国と比較すると Delayed Transition の上昇幅が大きく、2050 年時点の炭素価格は、すべての IAM で Net Zero 2050 を上回っている（図 4.3.3(a)(b)(c)(g)(h)(i)）。

中国・インドネシア（新興国）：2050 年時点でも、Delayed Transition の炭素価格の上昇幅は先進国よりも小幅にとどまり、Net Zero 2050 と同水準に留まっている（図 4.3.3(d)(f)(j)(l)）。

インド（新興国）：Net Zero 2050 の炭素価格の上昇幅は小さいが、2030 年以降の Delayed Transition の炭素価格の上昇幅は大きく、結果的に、2050 年時点の両者の差が大きくなっている（図 4.3.3(e)(k)）。

IAM の特徴

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 は、地域間の炭素価格のばらつきが、他の IAM よりも大きい。特に、EU では Net Zero 2050・Delayed Transition とともに 2050 年時点の炭素価格が他地域よりも突出する（図 4.3.3 ▲▲）。

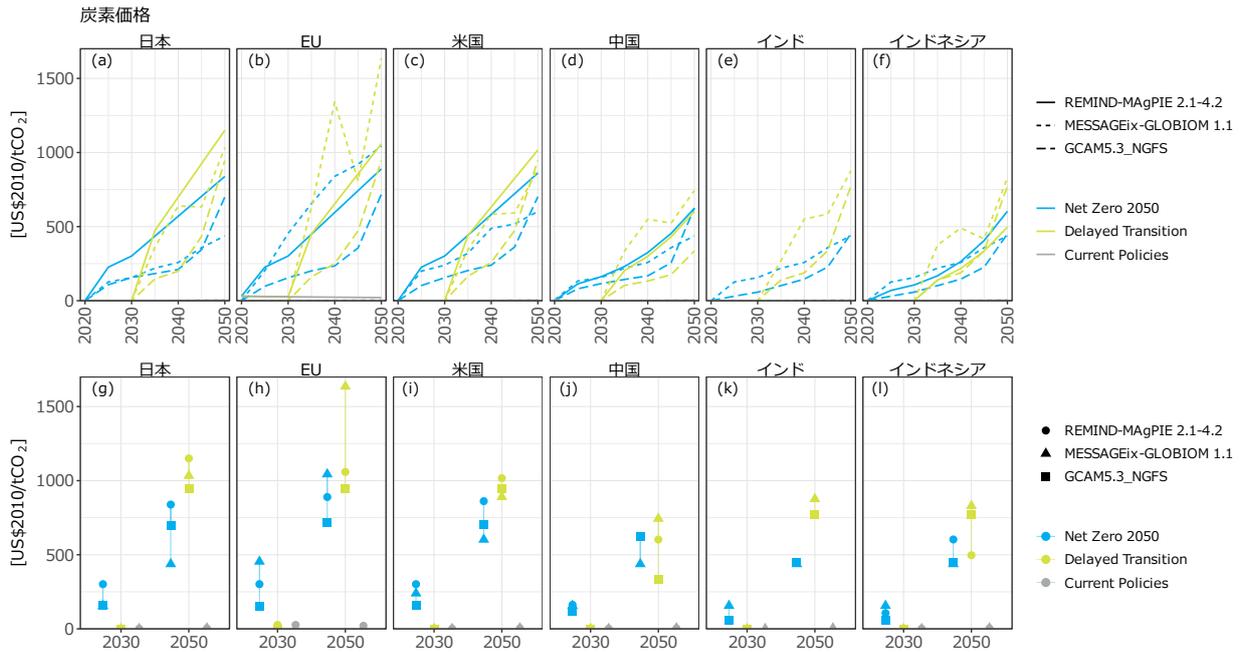


図 4.3.3 主要地域の炭素価格の推移

4.3.4 CO₂除去

Net Zero 2050 では 2050 年で一定量の CO₂除去技術（BECCS 及び植林）が導入される傾向は、すべての地域で共通している。なお、導入される CO₂除去技術の種類や量は、地域よりも IAM 間の差異のほうが大きい（図 4.3.4）。

IAM 間の相違

REMIND-MAgPIE 2.1-4.2：世界全体と同じく、BECCS のうち、BECCS（液体燃料）■、BECCS（水素）■、BECCS（産業）■の割合が大きい。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1：世界全体と同じく、植林■による排出除去の割合が多い。

GCAM 5.3：世界全体と同じく、3 種類の IAM のの中では CO₂排出除去量が最も多く、BECCS（発電）■の割合が多い。なお、GCAM 5.3 には植林による CO₂除去量が報告されていないため、実際の CO₂除去量はもっと多いと考えられる。

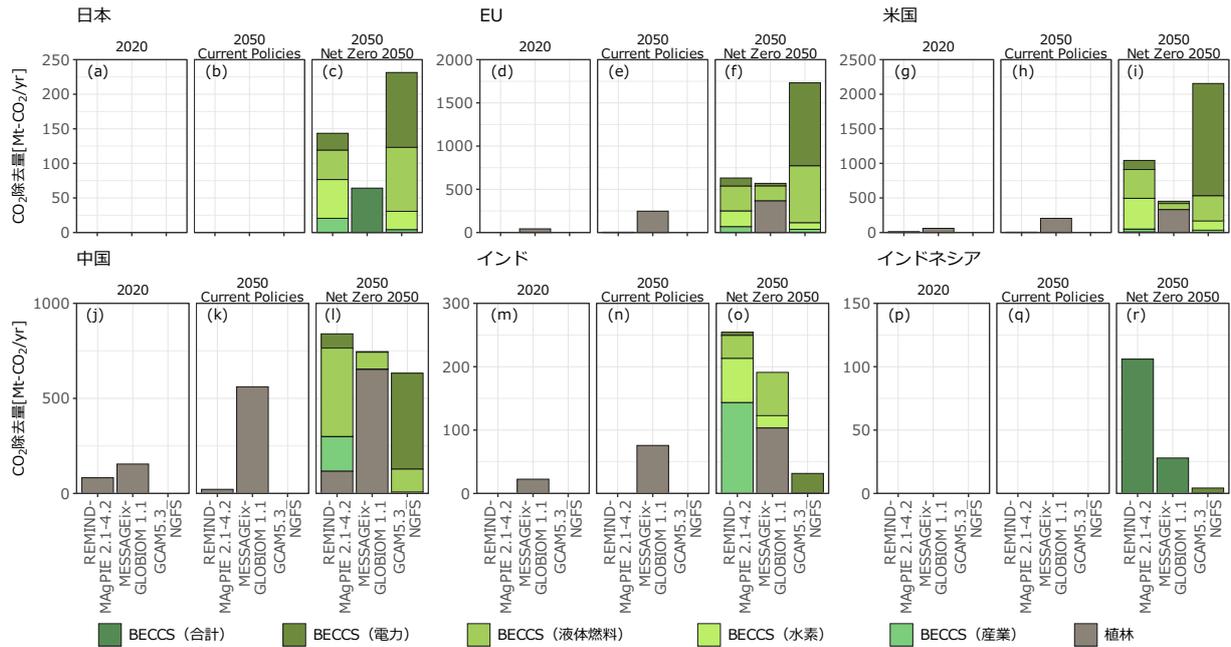


図 4.3.4 主要地域のCO₂除去の導入量

4.3.5 一次エネルギー

Net Zero 2050 では、2050 年時点の化石燃料の割合が減少し、再生可能エネルギー・原子力の割合が増加する。

地域の特徴

日本・EU・米国（先進国）：新興国と比較すると、2050 年時点における Net Zero 2050 の化石燃料の割合が低い。また、再生可能エネルギーの中でもバイオマス■の割合がやや高い（図 4.3.5 (c)(f)(i)）。

中国・インド・インドネシア（新興国）：2050 年時点で Net Zero 2050 では化石燃料の割合が減少するが、先進国よりは多い。また、全体の中の割合は小さいものの、先進国よりも CCS 付きの化石燃料（石炭□、ガス■）の割合がやや高い（図 4.3.5 (l)(o)(r)）。

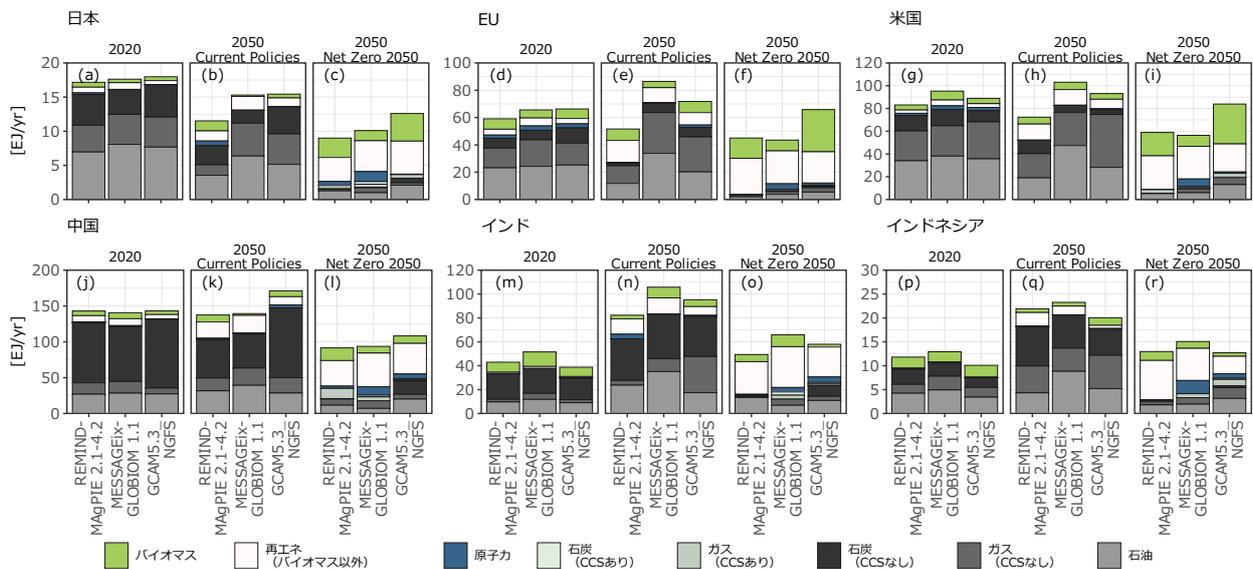


図 4.3.5 主要地域の一次エネルギー内訳

4.3.6 発電電力量（二次エネルギー）

世界全体と同じく、Net Zero 2050 では、2050 年にかけて発電電力量全体と再生可能エネルギーや原子力の割合が増加するが、個別の技術の内訳は地域・IAM によってまちまちである。

地域の特徴

Net Zero 2050 では、2050 年時点で太陽発電と風力発電が占める割合が最も多いという傾向は共通しているが、それ以外の技術による発電については地域の特徴がみられる。

日本・EU・米国（先進国）：Net Zero 2050 では、2050 年時点の CCS 付きのバイオマス発電■の割合がやや高い傾向にある（図 4.3.6(c)(f)(i)）。

中国・インド・インドネシア（新興国）：Net Zero 2050 では、CCS 付きの化石燃料発電□の割合がやや高い（図 4.3.6(l)(o)(r)）。

IAM 間の相違

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2：Net Zero 2050 と Current Policies のいずれにおいても、太陽発電と風力発電の伸びが大きい。また、Current Policies における化石燃料による発電の割合は最も小さい。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1：他の IAM と比較して原子力の量が多い傾向は世界全体と同じだが、インドネシア（その他アジア太平洋地域からのダウンスケール）では、2050 年時点の Net Zero 2050 の原子力の割合が 4 割前後まで増加する（図 4.3.6(r)）。

GCAM 5.3：Net Zero 2050 において、先進国（日本・EU・米国）や中国では、CCS 付きのバイオマス発電の割合が最も多く、CO₂ 除去技術が電力部門に導入されていることが分かる（図 4.3.6(c)(f)(i)(l)）。

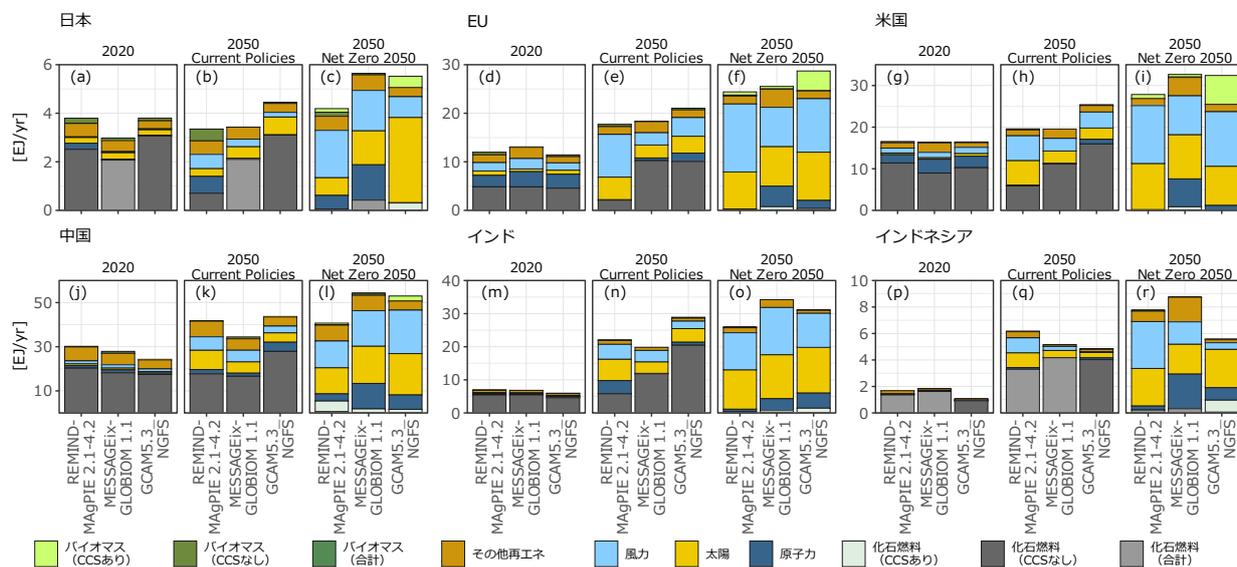


図 4.3.6 主要地域の発電電力量

4.3.7 最終エネルギー

Net Zero 2050 では、2050 年時点の最終エネルギー消費全体が減少し、電力の割合が増加する傾向がすべての地域に共通してみられる（図 4.3.7）。

IAM 間の相違

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2 : Net Zero 2050 と Current Policies のいずれにおいても、太陽光発電と風力発電の伸びが大きい。また、Current Policies における化石燃料による発電の割合は最も小さい。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : 他の IAM と比較して、石炭の割合が低く、液体燃料の割合が大きい傾向がある。

GCAM 5.3 : 2050 年時点で Net Zero 2050 でも石炭が残存している傾向がみられる。

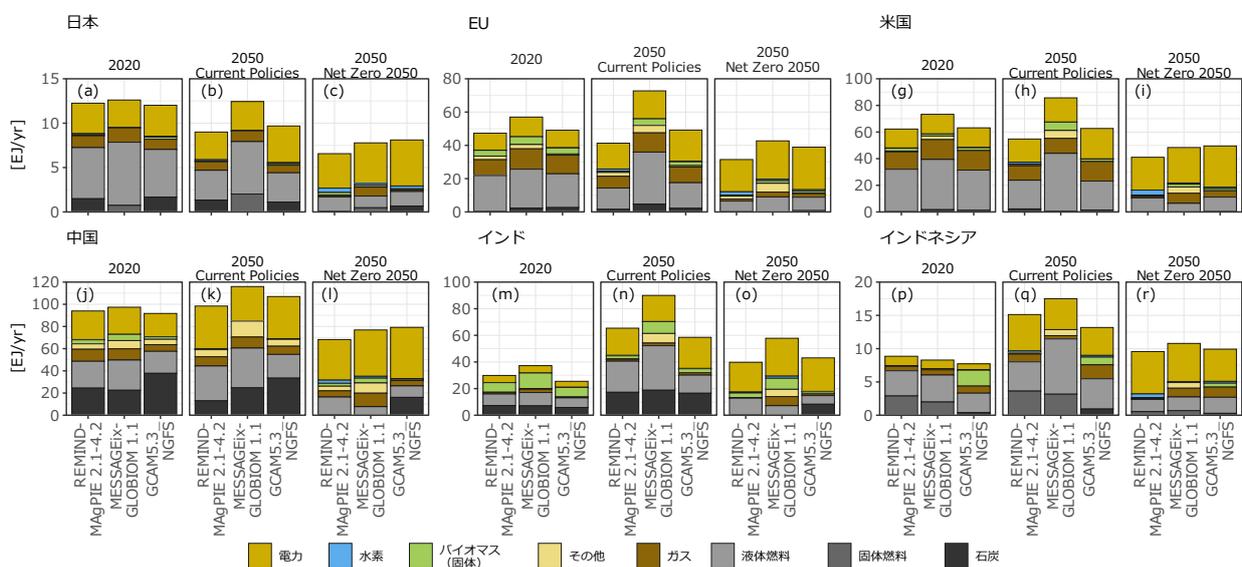


図 4.3.7 主要地域の最終エネルギー

4.3.8 エネルギー価格

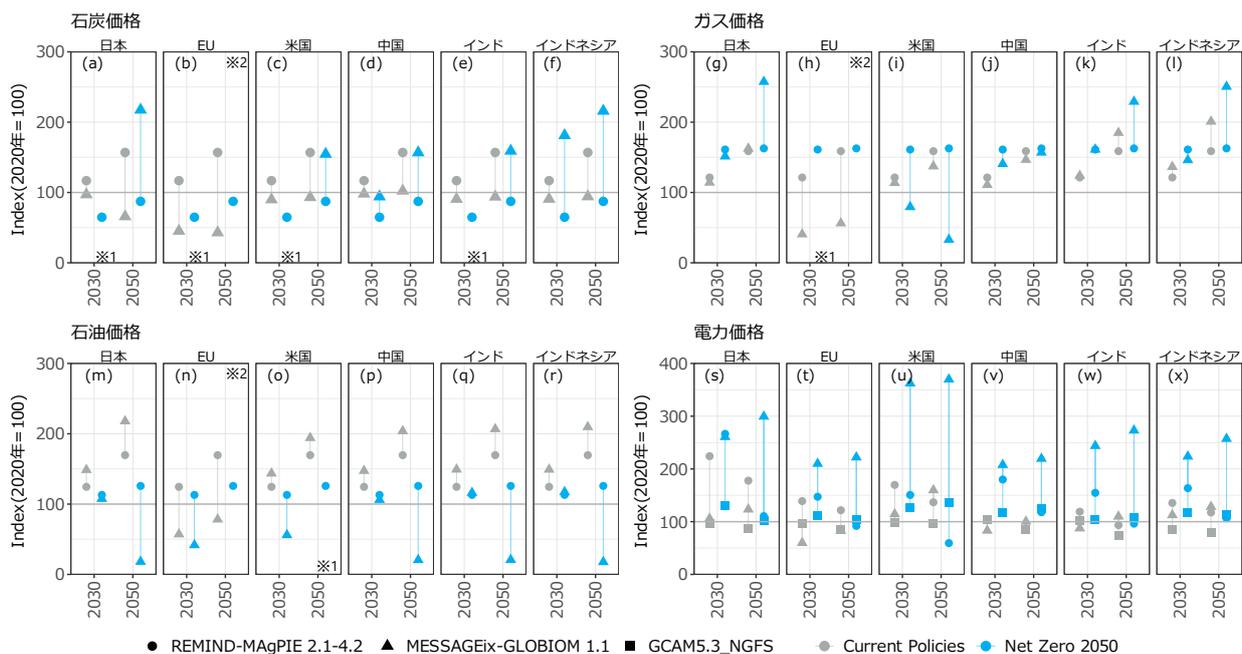
2030 年・2050 年時点のエネルギー価格については、IAM 間の相違が大きい。

IAM 間の相違

REMIND-MAGPIE 2.1-4.2 : 化石燃料（石炭・ガス・石油）の価格については、地域間の変化はほとんど見られない（図 4.3.8(a)-(r)●）。電力価格については、Net Zero 2050 で 2030 年に価格が上昇し、2050 年までに 2020 年の水準に戻る傾向が多く地域に見られるが（図 4.3.8(s)-(x)●）、上昇幅は日本が最も大きい（図 4.3.8(s)●●）。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 : 化石燃料（石炭・ガス・石油）の価格については、Net Zero 2050 で一部の地域の価格が極端に上昇する場合やマイナスとなる場合がみられる（図 4.3.8(a)-(r)▲）。電力価格については、地域によらず Net Zero 2050 で上昇する傾向が見られる（図 4.3.8(s)-(x)▲）。

GCAM 5.3 : 化石燃料（石炭・ガス・石油）の価格については、地域ごとの値を報告していない。電力価格については、年・地域間の変化が小さい（図 4.3.8(s)-(x)■）。



※1 MESSAGEix-GLOBIOM は、Net Zero 2050 においてエネルギー価格がマイナスとなる地域があり、エラーであると考えられる（2030年の石炭価格（日本、EU、米国、インド）、2030年のガス価格（EU）、2050年の石油価格（米国））。
 ※2 MESSAGEix-GLOBIOM は、Net Zero 2050 において 2050 年の EU の化石燃料価格が極端に上昇する（石炭：632[US\$2010/GJ]、ガス：346[US\$2010/GJ]、石油：488[US\$2010/GJ]）

図 4.3.8 主要地域のエネルギー価格

4.3.9 エネルギーへの投資（2050年までの累計）

世界全体の傾向と同じく、いずれの地域においても、温室効果ガス排出削減政策の野心度が高いシナリオ（Net Zero 2050）のほうが、エネルギーへの投資額が大きい。ただし、送配電については、シナリオにかかわらず、一定の投資が行われる。また、地域別のエネルギーへの投資額をみると、IAM による差が大きいことが分かる（図 4.3.9）。

地域の特徴

日本・EU・米国（先進国）：シナリオにかかわらず、化石燃料への投資額は小規模にとどまっている。
中国・インド・インドネシア（新興国）：野心的な排出削減政策がとられるほど太陽光や風力への投資額が増加する傾向は先進国と共通しているが、Current Policies に対する Net Zero 2050 の伸び率は、新興国のほうが大きい。

IAM 間の相違

REMIND-MagPIE 2.1-4.2：世界全体と同じく、風力発電やエネルギー貯蔵への投資額が大きい。
MESSAGEix-GLOBIOM 1.1：Net Zero 2050 シナリオで原子力への投資額が増加する傾向がある。
GCAM 5.3：風力発電やエネルギー貯蔵に対する投資額は、もっとも少ない。なお、世界全体では化石燃料への投資額がもっとも多い傾向が顕著であったが、化石燃料への投資額が他の IAM よりも顕著に多い傾向は、6 地域それぞれにおいて必ずしも見られるわけではない。

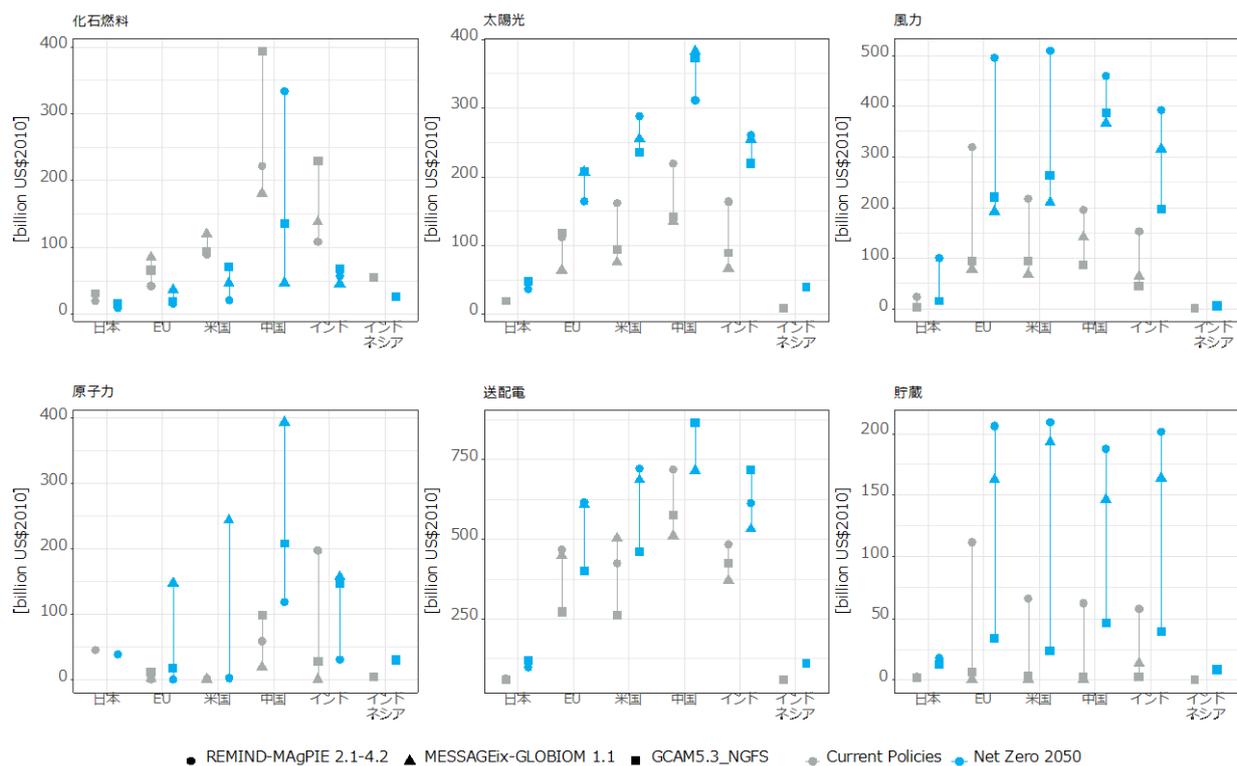


図 4.3.9 主要地域のエネルギー関連投資の累積投資額

4.3.10まとめ：地域間の比較

世界の主要地域間で NGFS シナリオ（第 2 版）の変数を比較した結果、まず先進国（日本・EU・米国）と新興国（中国・インド・インドネシア）では、同一のシナリオであっても排出削減政策の導入速度が異なることが分かった（図 4.3.3）。炭素価格を地域間で比較すると、いずれのシナリオにおいても、新興国（中国・インド・インドネシア）よりも先進国（日本・EU・米国）のほうが高い価格となっていた。また、IAM によって先進国の中でも炭素価格に大きな違いが見られる場合もあった。具体的には、MESSAGEi-GLOBIOM 1.1 では、2050 年時点の EU の炭素価格が突出して高く、逆に日本の炭素価格は低い水準であった。

地域間の炭素価格の違いは、CO₂ 排出量にも反映されていた。野心的な排出削減政策が導入されるシナリオ（Net Zero 2050 等）では、先進国（日本・EU・米国）はいずれも、2050 年時点でマイナス排出となっていたが、新興国（中国・インド・インドネシア）はわずかな残余排出がみられた（図 4.3.1、図 4.3.2）。この違いは、地域間の CO₂ 除去技術の導入量の差に起因するものと考えられる。先進国（日本・EU・米国）では、2050 年時点で BECCS を中心とする CO₂ 除去技術が一定量導入されているのに対し、新興国（中国・インド・インドネシア）では、このような技術の導入量は限定的であった（図 4.3.4）。

一方、CO₂ の主要な排出源である、エネルギーについては、地域間で顕著な違いは認められなかった。いずれの地域も、野心的な排出削減政策が導入されるシナリオでは、2050 年に向けて、一次エネルギーや二次エネルギー（電力）に占める化石燃料の割合が減少し、再生可能エネルギーを中心とする非化石エネルギーの割合が増加する傾向が認められた（図 4.3.5、図 4.3.6）。加えて、世界全体と同じく、最終エネルギーの全体量が減少して電力の割合が増加する傾向が、すべての地域で認められた（図 4.3.7）。

なお、エネルギーの種類や投資の割合は、地域・シナリオよりも IAM 間の差が大きかった（図 4.3.9）。

4.4 既存のシナリオとの比較（世界全体・日本）

NGFS シナリオ（第2版）は、6つのシナリオをそれぞれ3つの異なる IAM によって定量化することで、将来にわたる不確実性を考慮している。一方で、気候変動の緩和の文脈では、数多くのシナリオ分析の蓄積があり、これらのシナリオによって、より幅広い不確実性を把握することができる。これら既存のシナリオと比較した場合 NGFS シナリオ（第2版）は、シナリオ数・IAM 数ともに限定的であり、不確実性の幅が十分に考慮できていない可能性がある。そこで、本節では、NGFS シナリオと既存のシナリオを、世界と日本の結果について比較する。この比較を通じて、既存シナリオの変数の幅の中に NGFS シナリオを位置付け、各変数の偏りや不確実性の幅の相対的な大きさから、NGFS シナリオ（第2版）の十分性・妥当性を検証することができる。

世界全体については、IPCC 1.5°C 特別報告書（SR15; IPCC (2018)）と IEA の World Energy Outlook 2021（WEO-2021; IEA (2021b)）のシナリオとの比較を行う。日本については、Japan Model Intercomparison Project on Long-term Climate Policy（JMIP; Sugiyama et al. (2021)）と WEO-2021 との比較を行う。

4.4.1 留意点

既存のシナリオとの比較にあたっては、まず比較を行う上で厳密に条件を揃えているわけではないことに留意する必要がある。比較対象とした既存のシナリオは作成の目的がそれぞれ異なっているため、厳密な比較はできない。ここでは、CO₂ 排出量と温度上昇の度合いが類似しているシナリオ同士を比較することで、可能な限り条件をそろえているが、その他の条件はそろえることはできない。

また、比較対象と乖離があった場合でも、NGFS シナリオの妥当性が低いことを意味するわけでない。シナリオは予測ではないため、本来的にシナリオ間に妥当性の優劣をつけるものではない。ここでの比較の位置づけは、あくまでも、ある水準の CO₂ 排出量、温度上昇の度合いのシナリオ群に見られる不確実性の幅を確認するものである。

4.4.2 比較対象のシナリオ分の概要

IPCC 1.5°C 特別報告書シナリオデータベース（SR15）

2015年12月、国連気候変動枠組条約（UNFCCC）第21回締約国会議（COP21）の決定にて、IPCC に対して、「工業化以前の水準から 1.5°C の地球温暖化による影響及び関連する地球全体での温室効果ガス排出経路に関する特別報告書を 2018 年に提供する」よう招請された。これを受けて IPCC は、2018年10月に「IPCC 1.5°C 特別報告書」を公表した（IPCC, 2018）。IPCC 自体は、シナリオ分析を実施しておらず、世界中の研究機関から提出されるシナリオデータを基に報告書が作成される。SR15 では、10の研究機関から提出された 411 のシナリオデータが報告書の作成に使用され、公開されている²²。各シナリオについて、CO₂ 排出の推移から簡易な気候モデルにより、2100年の温度上昇の度合いが計算され、温度上昇の度合いに基づいて、6つのカテゴリーに分類されている。ここでは、Below-1.5°C、1.5°C-low-OS、1.5°C-high-OS を SR15（1.5°C）、Lower-2°C、Higher-2°C を SR15（2°C）、Above-2°C を SR15（Above 2°C）と呼ぶ（表 4.4.1）。

²² IPCC SR1.5 Scenario Database (<https://data.ene.iiasa.ac.at/iamc-1.5c-explorer>)

表 4.4.1 IPCC SR15 シナリオのカテゴリー一覧²³

本報告書での カテゴリー	IPCC SR15 の カテゴリー	説明	シナリオ 数
SR15 (1.5°C)	Below-1.5°C	21 世紀中のピーク昇温が確率 50-66%で 1.5°C 未満	5
	1.5°C-low-OS	2100 年の昇温中央値が 1.5°C 未満で、21 世紀中に確率 50-67%で一時的に 1.5°C を超す (Below-1.5°C のピーク昇温との差がおおむね 0.1°C 未満。OS はオーバーシュートの意)	37
未使用 ²⁴	1.5°C-high-OS	2100 年の昇温中央値が 1.5°C 未満で、21 世紀中に確率 >67%で一時的に 1.5°C を超す (Below-1.5°C のピーク昇温との差がおおむね 0.1-0.4°C 未満)	36
SR15 (2°C)	Lower-2°C	21 世紀中のピーク昇温が確率 >66%で 2°C 未満	54
	Higher-2°C	21 世紀中のピーク昇温が確率 50-66%で 2°C 未満	54
SR15 (Above 2°C)	Above-2°C	上記以外 (21 世紀中のピーク昇温が確率 >50%で 2°C 以上)	124

日本モデル相互比較プロジェクト (JMIP)

JMIP とは、国内の諸機関（東京大学、京都大学、国立環境研究所、地球環境戦略研究機関、日本エネルギー経済研究所、エネルギー総合工学研究所）が開発・運用する 5 つの IAM (AIM/Enduse-Japan V2.1 (Oshiro and Masui, 2015)、AIM/Hub-Japan 2.1 (Fujimori et al., 2017)、DNE21 Version 1.3 (Fujii and Komiyama, 2015)、IEEJ Japan ver.2017 (Matsuo et al., 2013)、TIMES-Japan 3.1 (Kato and Kurosawa, 2019)) により、日本の長期気候政策を評価したモデル間比較プロジェクトであり、2017 年～2020 年にかけて実施された²⁵。当時の日本の中長期目標であった 2030 年 26%削減・2050 年 80%削減のシナリオを中心に、感度解析として 2050 年 70%削減、90%削減、100%削減も分析されている（当時の 2030 年 26%削減と 2050 年 80%削減のシナリオ (26by30+80by50_Def) については、再エネのコスト・ポテンシャル、原子力や CCS の利用可能性、サービスデマンド水準、エネルギー輸入価格に関する感度解析も実施されている）。成果は Sustainability Science 誌の特集号 (Energy Scenarios for Long-Term Climate Change Mitigation in Japan) にまとめられており、査読付きの学術論文として公表されており、またシナリオデータ (JU, 2021) も公開されている (Sugiyama, Fujimori, Wada and Weyant, 2021; Sugiyama, Fujimori, Wada, Oshiro, et al., 2021)。

本稿では、表 4.4.2 に示す排出削減の制約に関するシナリオを比較対象として使用する。排出削減が厳しいシナリオほど、実行解が得られていないモデルが増えており、参照できるシナリオが少なくなっている。

²³ IPCC 1.5°C 特別報告書 (SR15) の本文 Table 2.4 では、提出された 411 シナリオデータのうち、2010 年の GHG 排出量の実績値と乖離しているシナリオと、重複したシナリオ 13 本が除外されており、本稿でも同様に除外した。対象とするシナリオは合計 310 本となる。

²⁴ 1.5°C-high-OS も 2100 年の温度上昇水準としては 1.5°C であるが、2050 年までの排出経路が、NGFS の Net Zero 2050 と Divergent Net Zero とは乖離が大きいいため、比較対象から除外した。

²⁵ 現在は、Japan Model Intercomparison Platform (JMIP) for Sustainable Futures ([https://ifi.u-](https://ifi.u-tokyo.ac.jp/en/units/jmip/)

[tokyo.ac.jp/en/units/jmip/](https://ifi.u-tokyo.ac.jp/en/units/jmip/)) と名称が変更され、モデルに基づくシナリオや関連分析の議論を促す、信頼性、透明性のある場として役割が拡大されている。シナリオ分析としては、ネットゼロ排出に関する比較分析が進行中である。

表 4.4.2 JMIP に収録されたシナリオ（抜粋）

本報告書での カテゴリー	JMIP の カテゴリー	説明	シナリ オ数	IAM
JMIP (Net Zero)	26by30+100by50_Def	NDC (2030 年 26%削減) と 2050 年 100%削減	2	AIM/Hub-Japan 2.1 DNE21 Version 1.3
JMIP(90%減)	26by30+90by50_Def	NDC (2030 年 26%削減) と 2050 年 90%削減	3	AIM/Enduse-Japan V2.1 AIM/Hub-Japan 2.1 DNE21 Version 1.3
JMIP(80%減)	26by30+80by50_Def	NDC (2030 年 26%削減) と 長期目標 (2050年 80%削減) を達成	5	AIM/Enduse-Japan V2.1 AIM/Hub-Japan 2.1 DNE21 Version 1.3
JMIP(70%減)	26by30+70by50_Def	NDC (2030 年 26%削減) と 2050 年 70%削減	5	IEEJ Japan ver.2017 TIMES-Japan 3.1
JMIP(Baseline)	Baseline_Def	気候政策なしを想定 (デフォ ルトの変数設定)	5	

IEA World Energy Outlook (WEO-2021)

WEO-2021 とは、IEA が毎年公開している世界のエネルギーの見通しを分析する報告書の 2021 年版である(IEA, 2021b)。WEO では足元のエネルギー情勢の分析に加えて、2050 年までのエネルギーの見通しについてのシナリオ分析が実施される。WEO-2021 で示されたシナリオは、Stated Policy Scenario (STEPS)、Announced Pledge Scenario (APS)、Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE) の 3 種類である。WEO-2021 の本文は世界全体のシナリオ分析結果を中心に記載されているが、国別の結果は別途データが公開（一部有料）されており、日本の結果も区分されている。各シナリオの GHG 排出量に基づいて温度上昇の度合いも計算されており、2100 年における温度上昇は、STEPS は 2.6°C、APS は 2.1°C、NZE は 1.4°C である。

なお、WEO-2021 の各シナリオは、World Energy Model と呼ばれるシミュレーションモデルによって定量化される(IEA, 2021a)。

表 4.4.3 WEO-2021 に収録されたシナリオ

本報告書での カテゴリー	WEO-2021 の カテゴリー	説明	シナリオ 数
WEO-2021 (NZE)	Net Zero Emissions by 2050 Scenario	世界全体のエネルギー部門における 2050 年までのネットゼロ CO ₂ 排出が達成可能な道筋を示す IEA の規範的シナリオ	1
WEO-2021 (APS)	Announced Pledge Scenario	NDC やネットゼロ目標を含む、世界中の政府による気候変動に関する公約が、期限内に達成されると想定するシナリオ	1
WEO-2021 (STEPS)	Stated Policy Scenario	現時点で政府が発表している目標が、すべては達成することを前提としていない、より保守的な将来のベンチマークとしてのシナリオ	1

4.4.3 NGFS シナリオとの比較

世界と日本について、以下の基準によって比較対象となるシナリオのペアを選定した。

世界については、2100 年における温度上昇水準をもとに比較対象を選定した(表 4.4.4)。NGFS シナリオのうち、Net Zero 2050 と Divergent Net Zero は 1.5°C の温度上昇であることから、SR15 の 1.5°C シナリオ

(SR15 (1.5°C)) と WEO-2021 の NZE シナリオ (WEO-2021 (NZE)) と比較する。NGFS シナリオのうち、Below 2°C と Delayed Transition は 1.7°C、1.8°C の温度上昇であることから、おおよそ温度上昇水準が対応する SR15 の 2°C シナリオ (SR15 (2°C)) と WEO-2021 の APS (WEO-2021 (APS)) と比較する。NDCs と Current Policies は、2°C 以上の温度上昇であり、SR15 の 2°C 以上シナリオ (SR15 (Above 2°C)) と WEO-2021 の STEPS (WEO-2021 (STEPS)) と比較する。

表 4.4.4 NGFS シナリオと比較対象シナリオ (世界)

NGFS シナリオ		比較対象		
シナリオ名	温度上昇	シナリオ名	温度上昇	シナリオ数
Net Zero 2050	1.5°C	IPCC SR15 (1.5°C)	1.5°C	90
Divergent Net Zero	1.5°C	WEO-2021(NZE)	1.4°C	1
Below 2°C	1.7°C	IPCC SR15(2°C)	2°C	132
Delayed Transition	1.8°C	IEA WEO-2021(APS)	2.1°C	1
NDCs	2.5°C	SR15(Above 2°C)	>2°C	189
Current Policies	3.0°C	WEO-2021(STEPS)	2.6°C	1

比較のペアごとに CO₂ 排出量を図 4.4.1 に示す。2050 年の排出量をみると、NGFS シナリオと比較対象がおおよそ同水準となっていることがわかる (SR15 はシナリオ数が多いためばらつきがあるが、どの比較ペアにおいても中央値は NGFS シナリオと同水準になっている)。したがって、比較のペアごとの対応づけとしておおむね妥当であると判断した。

CO₂排出量(世界)

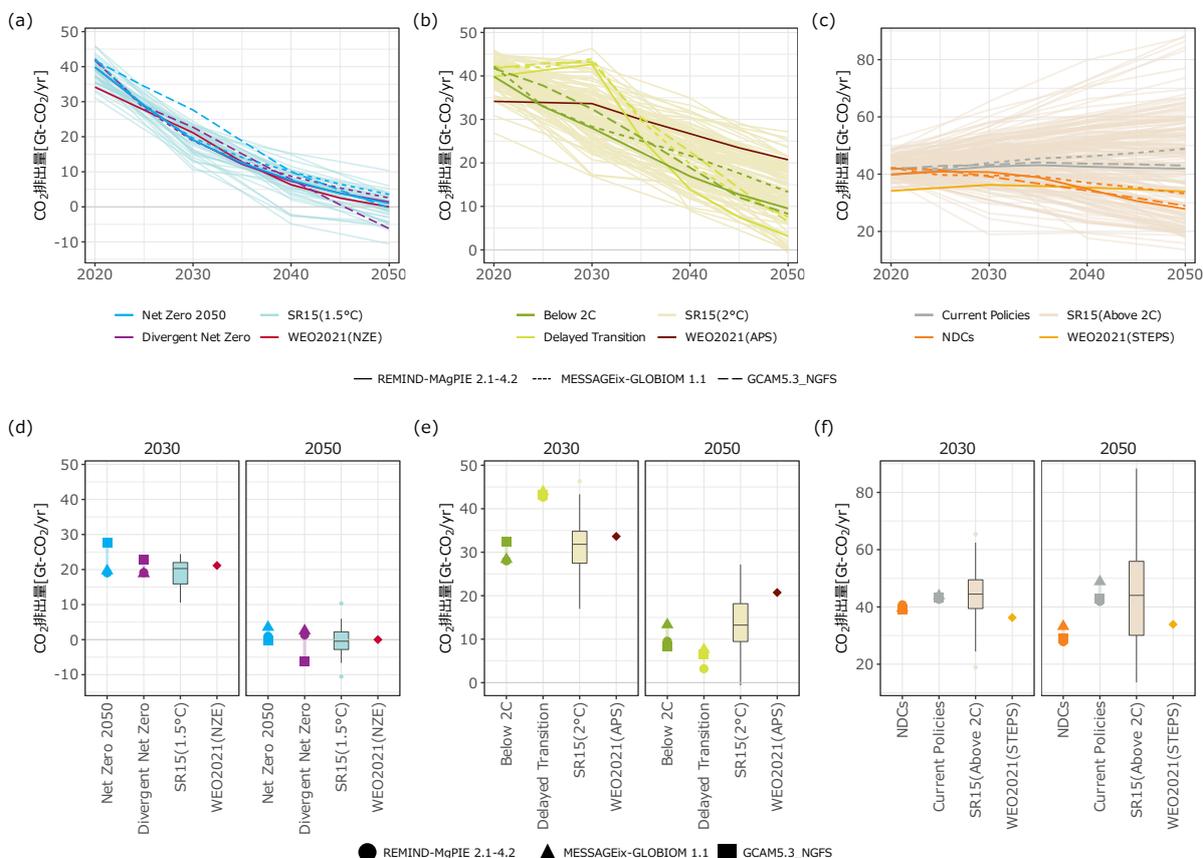


図 4.4.1 NGFS シナリオと比較対象シナリオの CO₂ 排出量 (世界)

日本については、JMIP と WEO-2021 から、2050 年の CO₂ 排出量が NGFS シナリオと類似しているシナリオを比較対象に選定した（表 4.4.5）。

なお、NGFS は世界全体の最適化のなかで、各国の CO₂ 排出量が決定されるのに対して、JMIP では、日本だけに排出制約を掛けており、シナリオごとに排出量が指定されているため、CO₂ 排出量の決まり方が異なっている点には留意が必要である。この違いにより、ネットゼロに達するシナリオにおいて、NGFS シナリオではマイナス排出になる IAM があるのに対して、JMIP の JMIP(Net Zero)では、すべての IAM が、ゼロ排出になっている。

表 4.4.5 NGFS シナリオと比較対象シナリオ（日本）

NGFS シナリオ		比較対象		
シナリオ名	CO ₂ 排出量 (2050 年) [Mt-CO ₂ /yr]	シナリオ名	CO ₂ 排出量 (2050 年) [Mt-CO ₂ /yr]	シナリオ数
Net Zero 2050	-104~61	JMIP(90%減)	128~182	3
Divergent Net Zero	-121~49	JMIP(Net Zero)	0~1.4	2
Delayed Transition	-62~102	WEO-2021(APS)	2.0	1
Below 2°C	133~296	JMIP(70%減)	364~515	5
		JMIP(80%減)	246~347	5
NDCs	267~638	JMIP(Baseline)	564~1648	5
Current Policies	593~954	WEO(STEPS)	513	1

比較のペアごとに CO₂ 排出量を図 4.4.2 に示す。図 4.4.2 をみると、それぞれ排出量がおおよそ同水準であることが確認できる。したがって、比較のペアごとの対応づけとしておおむね妥当と判断した。

CO₂排出量(日本)

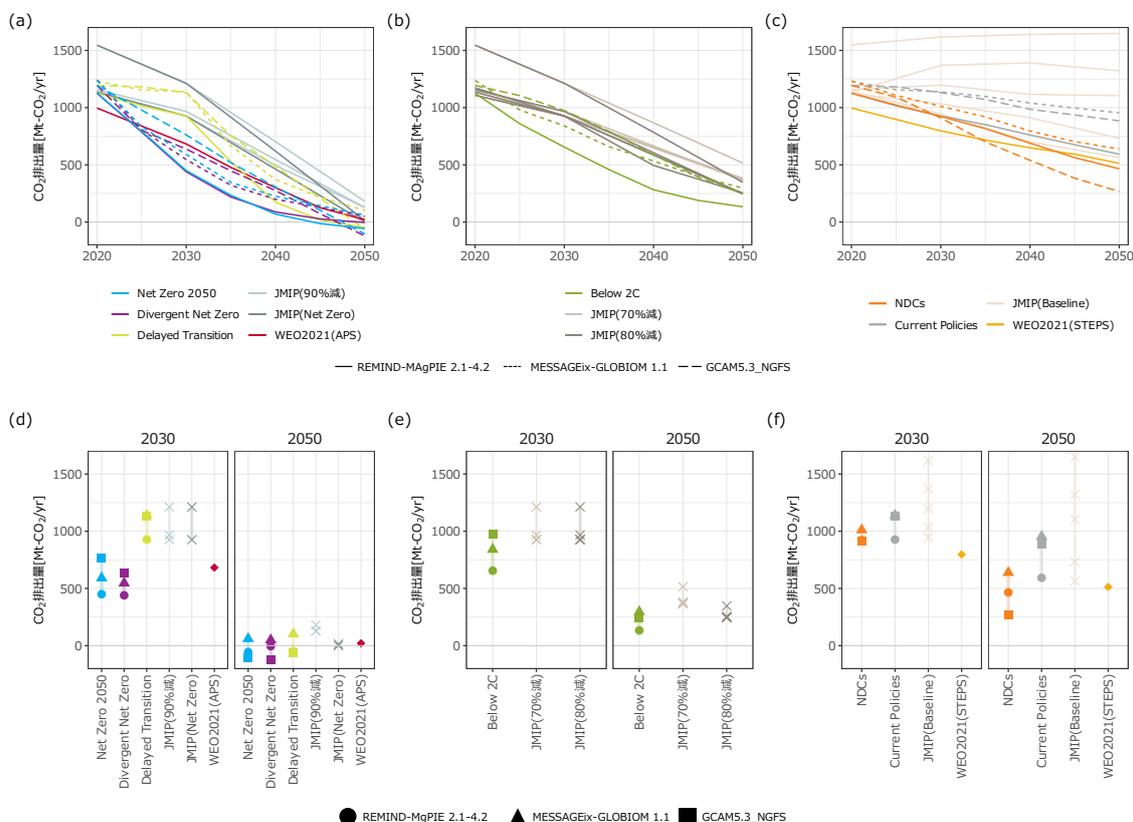


図 4.4.2 NGFS シナリオと比較対象シナリオの CO₂ 排出量（日本）

4.4.4 炭素価格

炭素価格の比較結果を図 4.4.3（世界）と図 4.4.4（日本）に示す。上段は、2020 年から 2050 年にかけての炭素価格の推移をシナリオごとに図示している。下段は、それぞれの比較ペアごとに、2030 年、2050 年の炭素価格を図示している。シナリオ数が多い SR15 については、値の分布を視覚的に表現する箱ひげ図²⁶で示している（箱の大きさ、ひげの長さが大きい場合にシナリオ間で値のばらつきが大きいことを意味する）。WEO-2021 について、それぞれのシナリオについて複数のプロットがなされているが、これは WEO-2021 では、地域・国単位の炭素価格のみが想定されているためである。そのため、世界の結果においては地域・国単位²⁷の結果を示している。日本の結果においては、WEO-2021（APS）は日本の炭素価格のみであるが、WEO-2021（STEPS）では日本のみの炭素価格が公表されていないため、世界の結果で示している炭素価格と同じ地域・国を示している。

世界（図 4.4.3）

NGFS シナリオには、同じシナリオの中でも IAM によって炭素価格の大きさにばらつきがある。一方で、シナリオ数が多い SR15 は、NGFS シナリオのばらつきの範囲に収まっているか、NGFS 以上に大きなばらつきがあることが分かる。すなわち、比較対象となる SR15 シナリオの炭素価格のレンジに含まれており、NGFS シナリオの炭素価格は極端な範囲に分布しているわけではないと判断できる。

その一方で、WEO-2021 と NGFS シナリオの炭素価格には、一部のシナリオで乖離がみられる。具体的には、NGFS シナリオのうち、もっとも野心的な排出削減政策が導入される Net Zero 2050 と Divergent Net Zero の炭素価格は、比較対象である WEO-2021（NZE）よりも高い。この違いは、NGFS シナリオと WEO-2021 のモデル中の炭素価格の取り扱いに起因する。前者は、IAM で算出される「シャドウプライス」であるが、後者は燃料種毎の相対コストを反転させてエネルギー需要に変化を起こす水準や各国の政策において設定されている水準として、外生変数（前提条件）として設定されたものである。

²⁶ 4 つの範囲（ひげの上端から箱の上端、箱の上端から箱中の線、箱中の線から箱の下端、箱の下端からひげの下端）に、全シナリオ数の四分の一ずつのシナリオが含まれる。外れ値は、箱の範囲の 1.5 倍以上、箱の上端・下端の値よりも絶対値が大きい値と定義。

²⁷ WEO-2021（NZE）では、Advanced economies、Major emerging economies、Other emerging market and developing economies と区分されている。WEO-2021（APS）では、Advanced economies with net zero pledges、中国、Emerging market and developing economies with net zero pledge と区分されている。WEO-2021（STEPS）では、カナダ、チリ、コロンビア、中国、EU、韓国と区分されている。

炭素価格(世界)

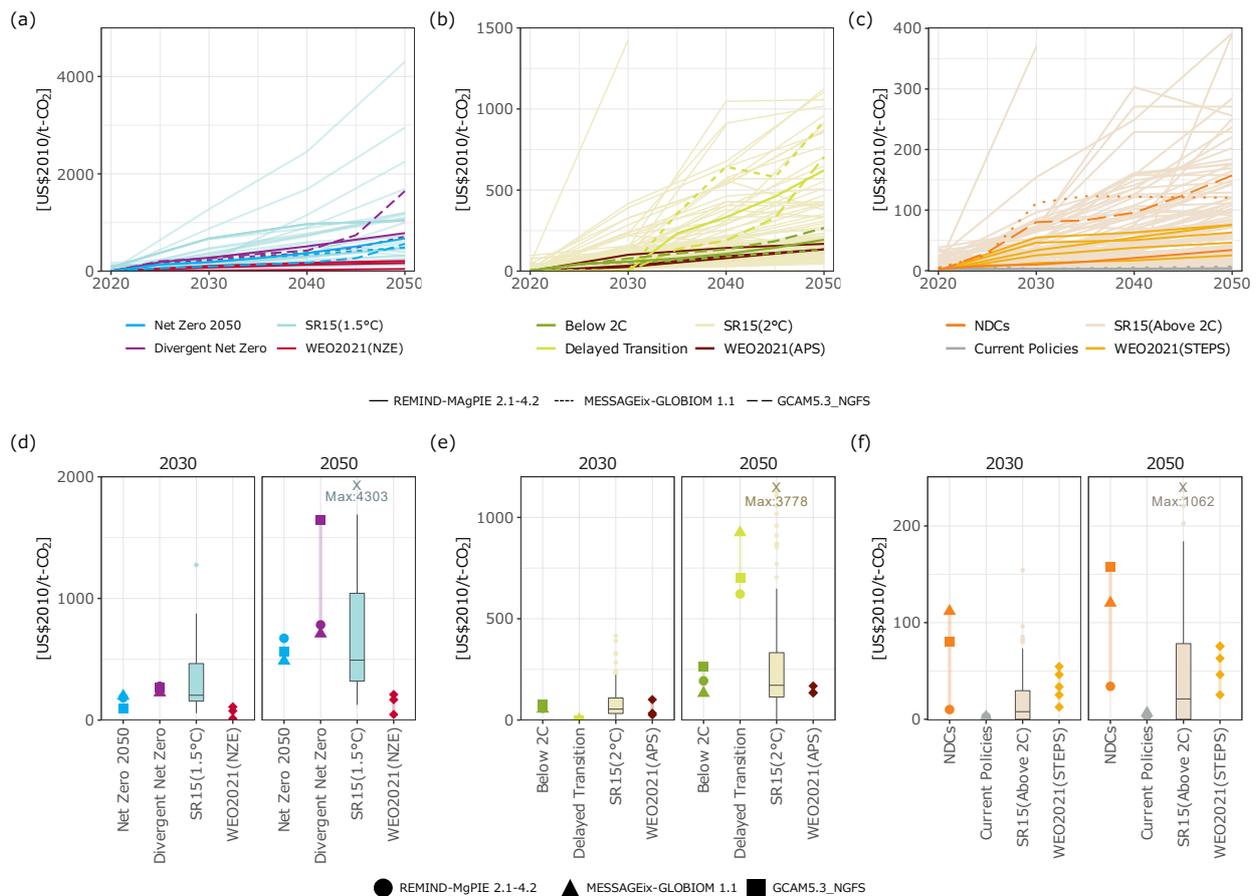


図 4.4.3 NGFS シナリオと比較対象シナリオの炭素価格（世界）

日本（図 4.4.4）

世界全体と同じく NGFS シナリオでは同一のシナリオの中でも IAM によって炭素価格のばらつきが認められ、比較対象とした JMIP シナリオの炭素価格のばらつきは、NGFS と同等かそれ以上であった。なお、NGFS の中でも NDCs の炭素価格は、比較対象とした JMIP シナリオよりも大きかった。これは JMIP が実施されていた時期（2017年~2019年）よりも、NGFS シナリオ（第2版）が作成された時期（2021年）のほうが、各国が掲げる政策がより野心的になったためと考えられる。

IEA の WEO-2021 との比較では、世界全体と同じく、NGFS シナリオのうち野心的な排出削減政策を掲げるシナリオ（Net Zero 2050 と Divergent Net Zero）のほうが、炭素価格が高かった。

炭素価格(日本)

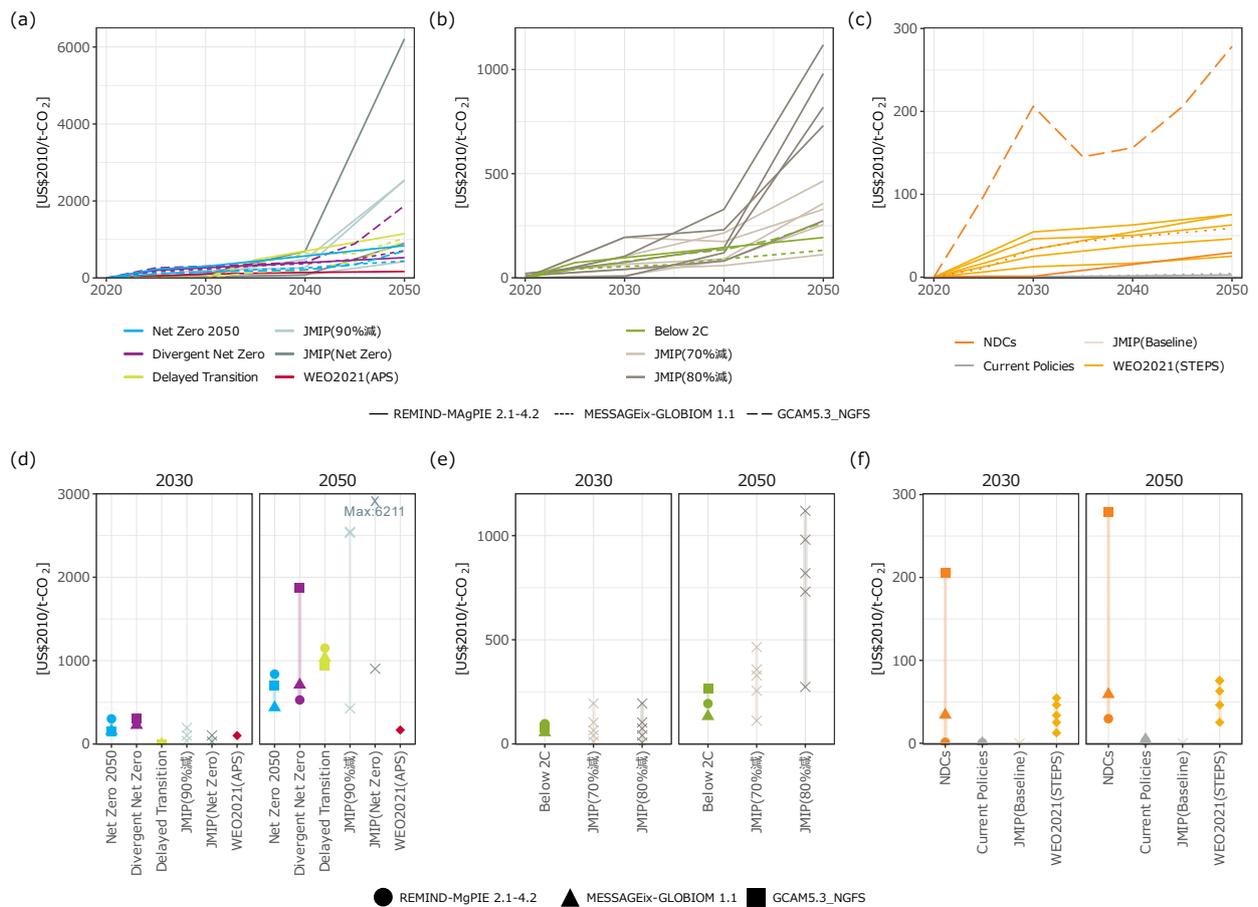


図 4.4.4 NGFS シナリオと比較対象シナリオの炭素価格 (日本)

4.4.5 部門別 CO₂ 排出量

世界全体 (図 4.4.5)

世界全体の 2050 年時点の部門別 CO₂ 排出量を、図に示す。点は NGFS シナリオと WEO-2021、箱ひげ図は SR15 シナリオの分布を示している。なお、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 は、日本の部門の CO₂ 排出量を報告していない。

NGFS シナリオの CO₂ 排出量は、全ての部門で SR15 シナリオと WEO-2021 の範囲内に概ね分布している。例えば、NGFS シナリオの産業部門では、CO₂ 排出量について IAM 間にばらつきがあるが (GCAM のみネットゼロ排出達成時にも産業部門の CO₂ 排出量がほかの 2 つの IAM と比較して多く残余する)、SR15 の産業部門の CO₂ 排出量の分布のばらつきの範囲内に収まっている。

部門別 CO₂ 排出量(世界、2050年)

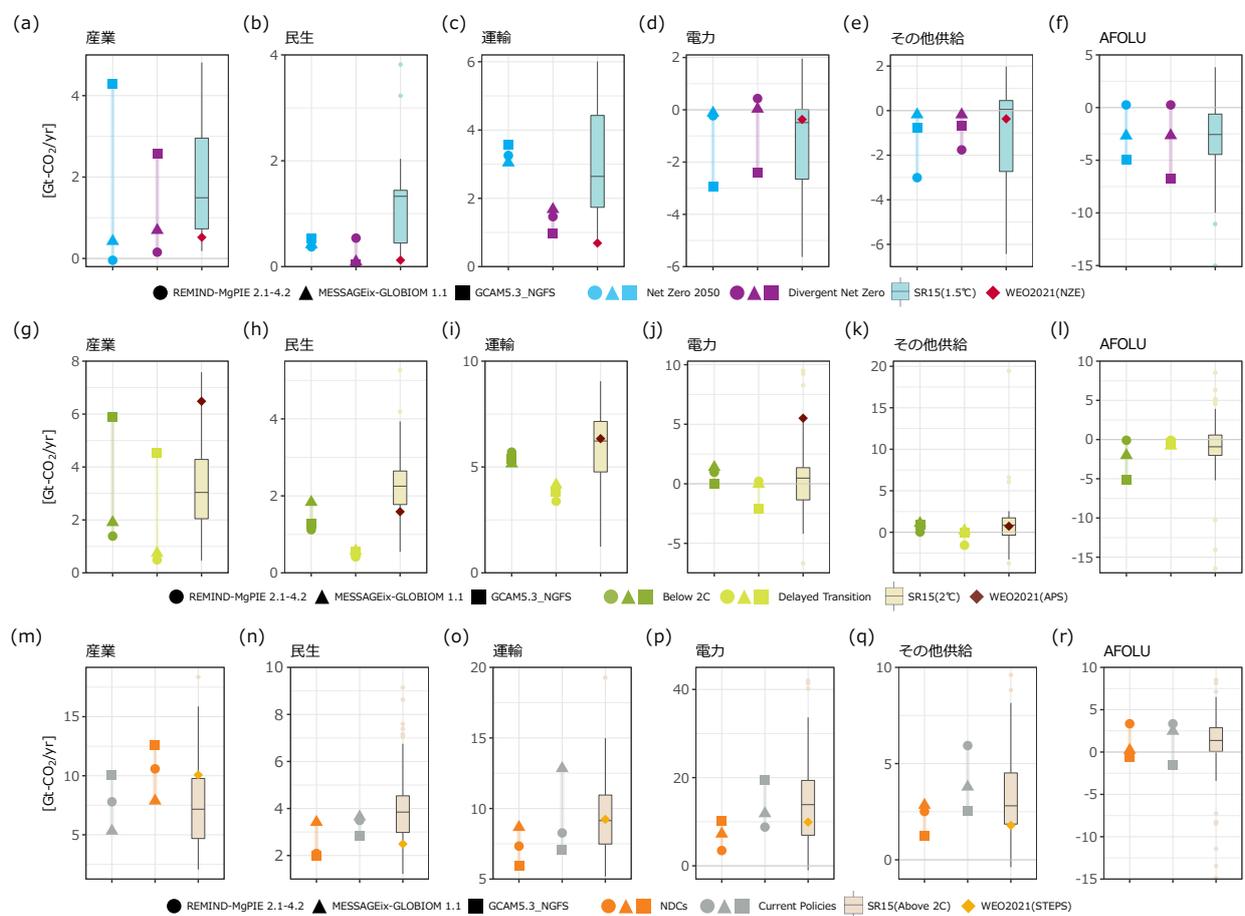


図 4.4.5 NGFS シナリオと比較対象シナリオの部門別 CO₂ 排出量 (2050 年・世界)

日本 (図 4.4.6)

Net Zero 2050 (1.5°C)・Divergent Net Zero (1.5°C) : 世界全体と同じく、NGFS シナリオの CO₂排出量は、全ての部門で JMIP シナリオと WEO-2021 の範囲内に概ね分布している。ただし、産業部門 (図 4.4.6(a)) では NGFS シナリオの排出量がマイナスとなるシナリオが見られるが、JMIP シナリオと WEO-2021 にはそのような例は見られない。また、民生部門 (図 4.4.6(b)) では、NGFS シナリオの排出量はほぼゼロであり、JMIP シナリオと WEO-2021 の分布範囲の下限に集中している。

NDCs (2.5°C) : NDCs の産業部門の排出量が JMIP シナリオと WEO-2021 の範囲よりも小さいが (図 4.4.6(m))、他は概ね、両シナリオの分布範囲に収まっている。

部門別CO₂排出量(日本、2050年)

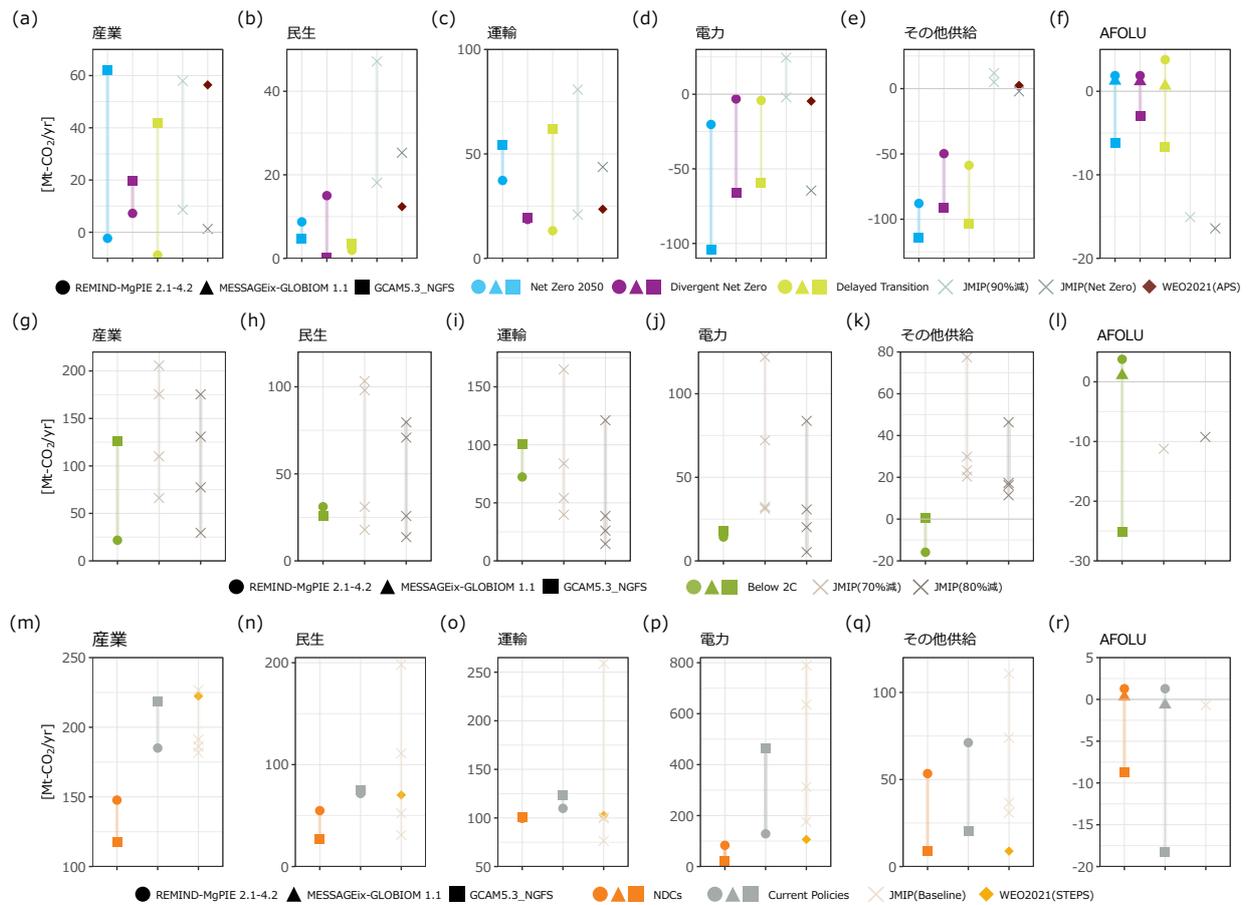


図 4.4.6 NGFS シナリオと比較対象シナリオの部門別 CO₂ 排出量 (2050 年・日本)

4.4.6 CO₂除去

世界全体 (図 4.4.7)

Net Zero 2050 (1.5°C)・Divergent Net Zero (1.5°C) : NGFS シナリオの CO₂ 除去量は、比較対象としたすべてのシナリオ・IAM で、SR15 シナリオの範囲に収まっており、極端な CO₂ 排出量への依存はみられない。

Below 2°C (1.7°C)・Delayed Transition (1.8°C) : NGFS シナリオの CO₂ 除去量は、概ね SR15 シナリオの範囲に収まっているが、いくつか特徴的な傾向もみられる。例えば、BECCS (液体燃料) では、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 と GCAM 5.3 は、SR15(2°C)シナリオのうち下限値付近に分布している。また、植林では、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 では、SR15(2°C)の範囲よりも導入量が少ない。

NDCs (2.5°C)・Current Policies (3°C+) : BECCS (電力) と BECCS (水素) については、GCAM では SR15(Above2°C)の範囲より導入量が多い。植林については、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 が、SR15(Above2°C)の範囲よりも導入量が少ない。

CO₂除去(世界、2050年)

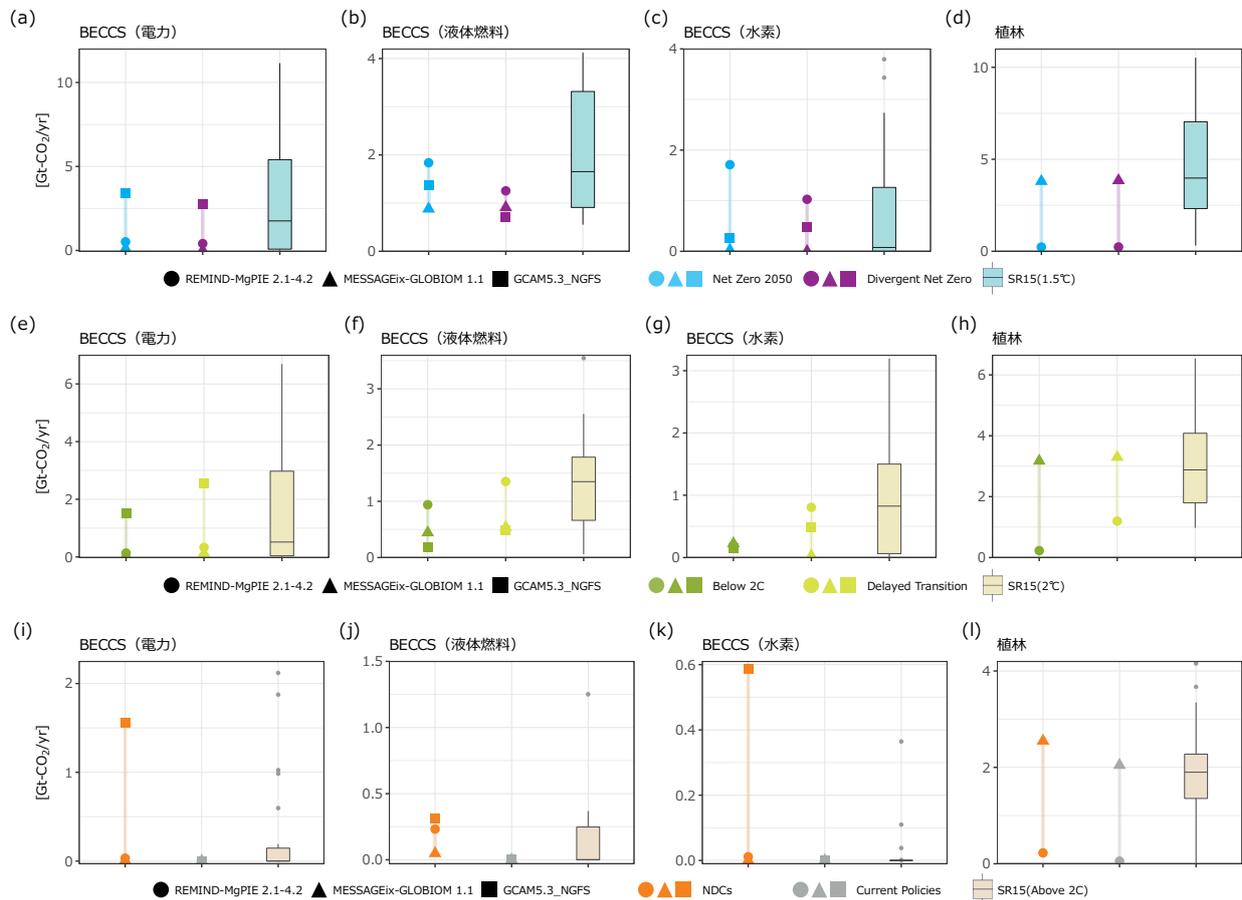


図 4.4.7 NGFS シナリオと比較対象シナリオの CO₂ 除去量 (2050 年・世界)

日本 (図 4.4.8)

Net Zero 2050 (1.5°C)・Divergent Net Zero (1.5°C)・Delayed Transition (1.8°C) : NGFS シナリオの CO₂

除去のうち、BECCS (電力) については JMIP シナリオの範囲に収まっている。一方、BECCS (水素) は JMIP シナリオには導入されておらず、BECCS (液体燃料) についても導入量はわずかである。電力以外の CO₂ 除去技術が導入されているのが、NGFS シナリオの日本の特徴の 1 つと言える。

なお、比較対象とした JMIP シナリオのうち、2050 年時点で日本の排出量が 90%減・100%減となるものについては、解が得られていない IAM がある。理由の 1 つとしては、電力以外の分野の CO₂ 除去技術が日本を対象とした既存のシナリオでは前提条件として考慮されていなかったことが伺える(Shiraki et al., 2021)。

Below 2°C (1.7°C) : NGFS シナリオの CO₂ 除去のうち、BECCS (電力) については JMIP シナリオの範囲

に収まっている。一方、BECCS (水素) は JMIP シナリオには導入されておらず、BECCS (液体燃料) についても導入量はわずかである。電力以外の CO₂ 除去技術が導入されているのが、NGFS シナリオの日本の特徴の 1 つと言える。

NDCs (2.5°C)・Current Policies (3°C+) : NGFS シナリオのうち、NDC では排出除去技術が導入量される

が、JMIP シナリオでは排出除去技術が導入されていない。

CO₂除去(日本、2050年)

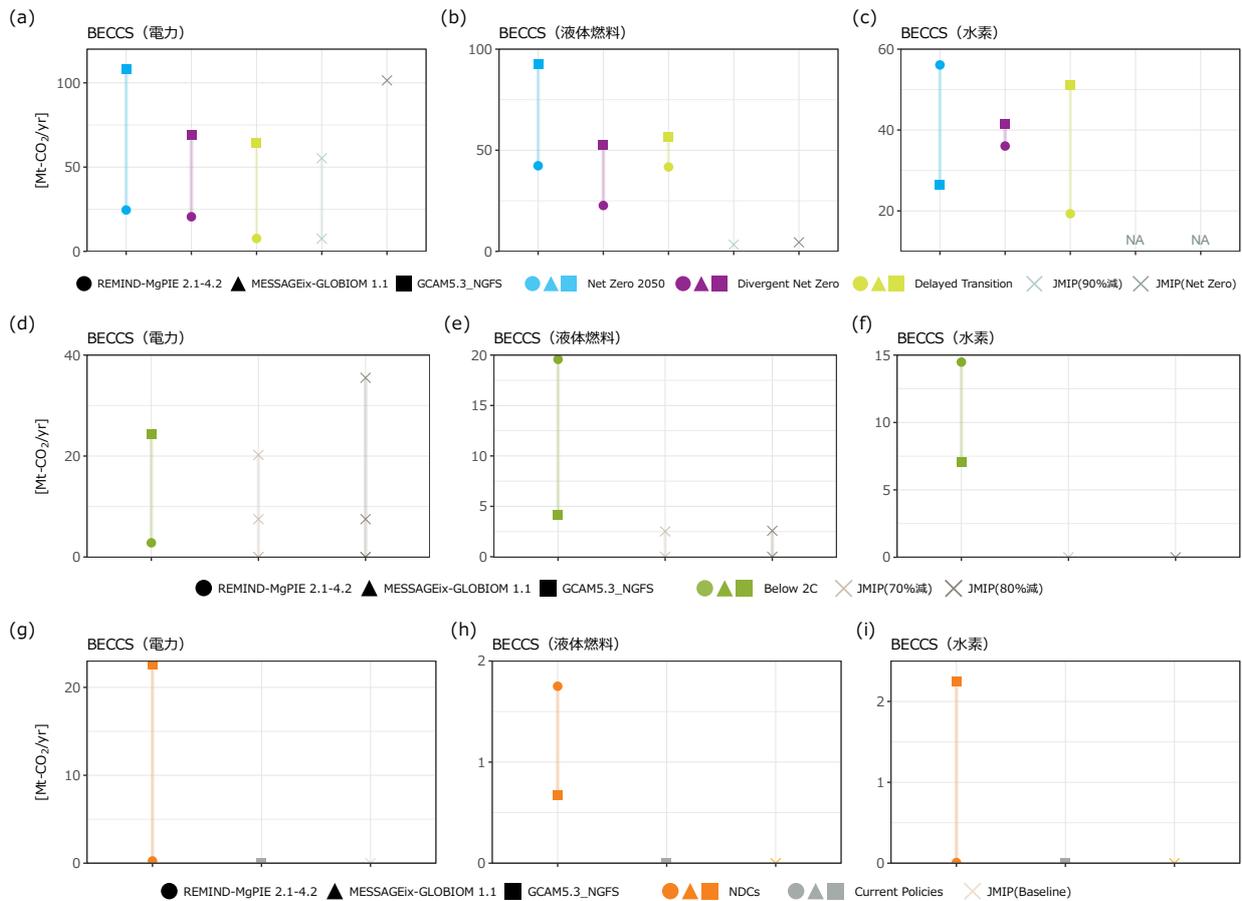


図 4.4.8 NGFS シナリオと比較対象シナリオの CO₂ 除去量 (2050 年・日本)

4.4.7 エネルギー価格（2020年比の増減率）

世界全体（図 4.4.9）

Net Zero 2050（1.5°C）・Divergent Net Zero（1.5°C）：NGFS シナリオのエネルギー価格の増減率は、概ね、SR15 シナリオの範囲に収まっている。ただし、石炭については、Divergent Net Zero では SR15 よりも低くなる。

Below 2°C（1.7°C）・Delayed Transition（1.8°C）：NGFS シナリオのエネルギー価格の増減率は、概ね、SR15 シナリオの範囲に収まっているが、ガス価格等、SR15 の範囲に収まらないものもある。

NDCs（2.5°C）・Current Policies（3°C+）：NGFS シナリオのエネルギー価格の増減率は、SR15 シナリオの範囲に収まっているが、NGFS シナリオのほうが、ばらつきが小さい。

エネルギー価格(世界、2050年)

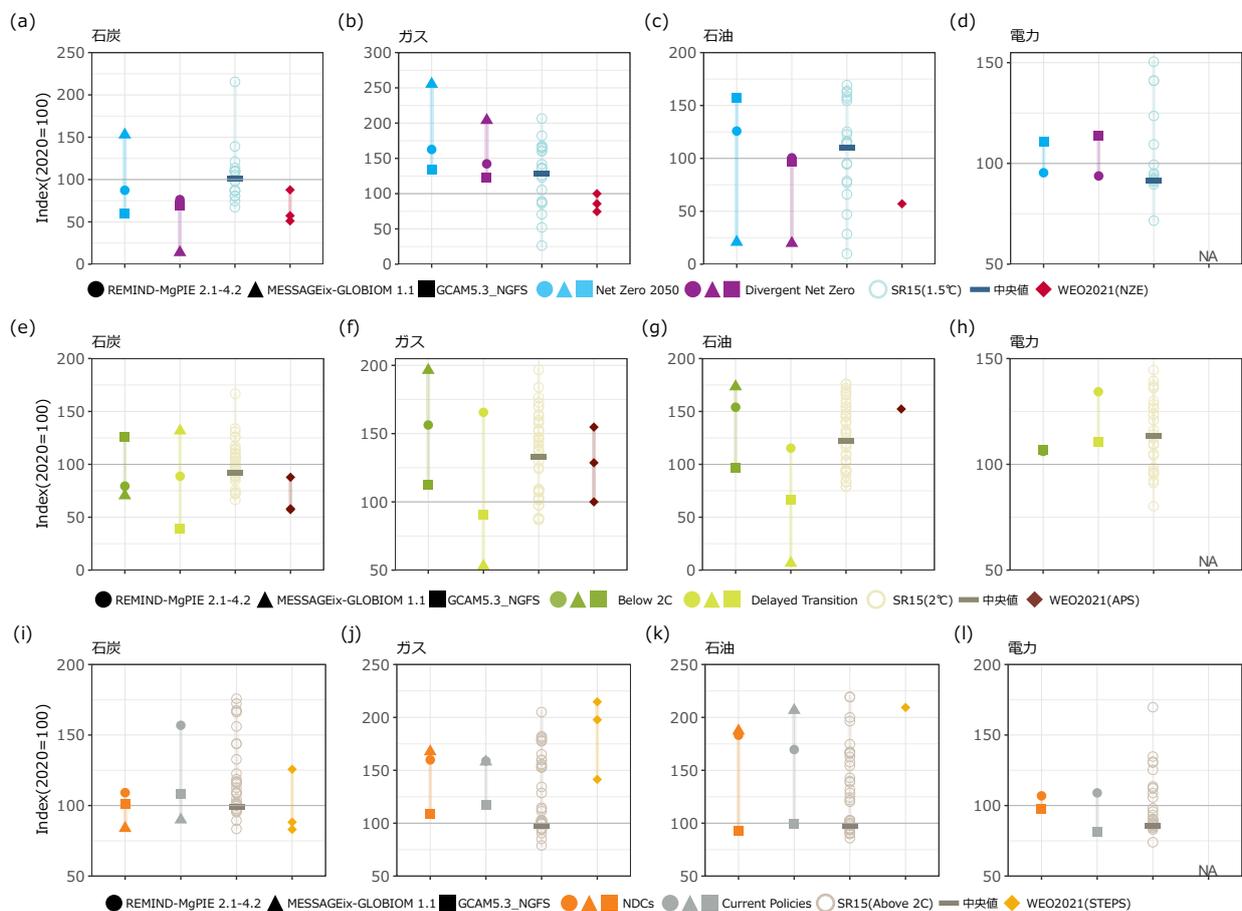


図 4.4.9 NGFS シナリオと比較対象シナリオのエネルギー価格（2050年・世界）²⁸

²⁸ WEO-2021 は石炭価格、ガス価格を国単位で報告しているため、米国、EU、中国の値を比較対象とした。

日本 (図 4.4.10)

Net Zero 2050 (1.5°C)・Divergent Net Zero (1.5°C)・Delayed Transition (1.8°C) : NGFS シナリオと JMIP

シナリオや WEO-2021 のあいだには、いくつかの差がみられる。石炭・ガス・石油のいずれについても、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 の増減率 (▲) は、JMIP シナリオと WEO-2021 よりも、上下のどちらかに顕著に振れている。この点はエネルギー価格がダウンスケーリングされていないことが影響している可能性がある (4.2.9 節を参照)。他方、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 の増減率は、JMIP シナリオと WEO-2021 に近い。電力価格の上昇率は、については、JMIP シナリオの上昇率が NGFS シナリオの幅の中間あたりにある。

Below 2°C (1.7°C) : 石炭・ガス・電力については、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 の増減率 (▲) が JMIP シナリオの増減率から大きく外れている一方、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と GCAM.3 (電力のみ) の増減率は、JMIP シナリオと WEO-2021 に相対的に近い。石油については、JMIP の増減率の幅が大きい一方、NGFS シナリオの幅は小さい。

NDCs (2.5°C)・Current Policies (3°C+) : ガスについては、NGFS シナリオの方が JMIP 及び WEO-2021 よりも価格の増加率が大きい。石炭・電力は NGFS の幅が大きい、石油は JMIP 及び WEO-2021 の幅が大きい。

エネルギー価格(日本、2050年)

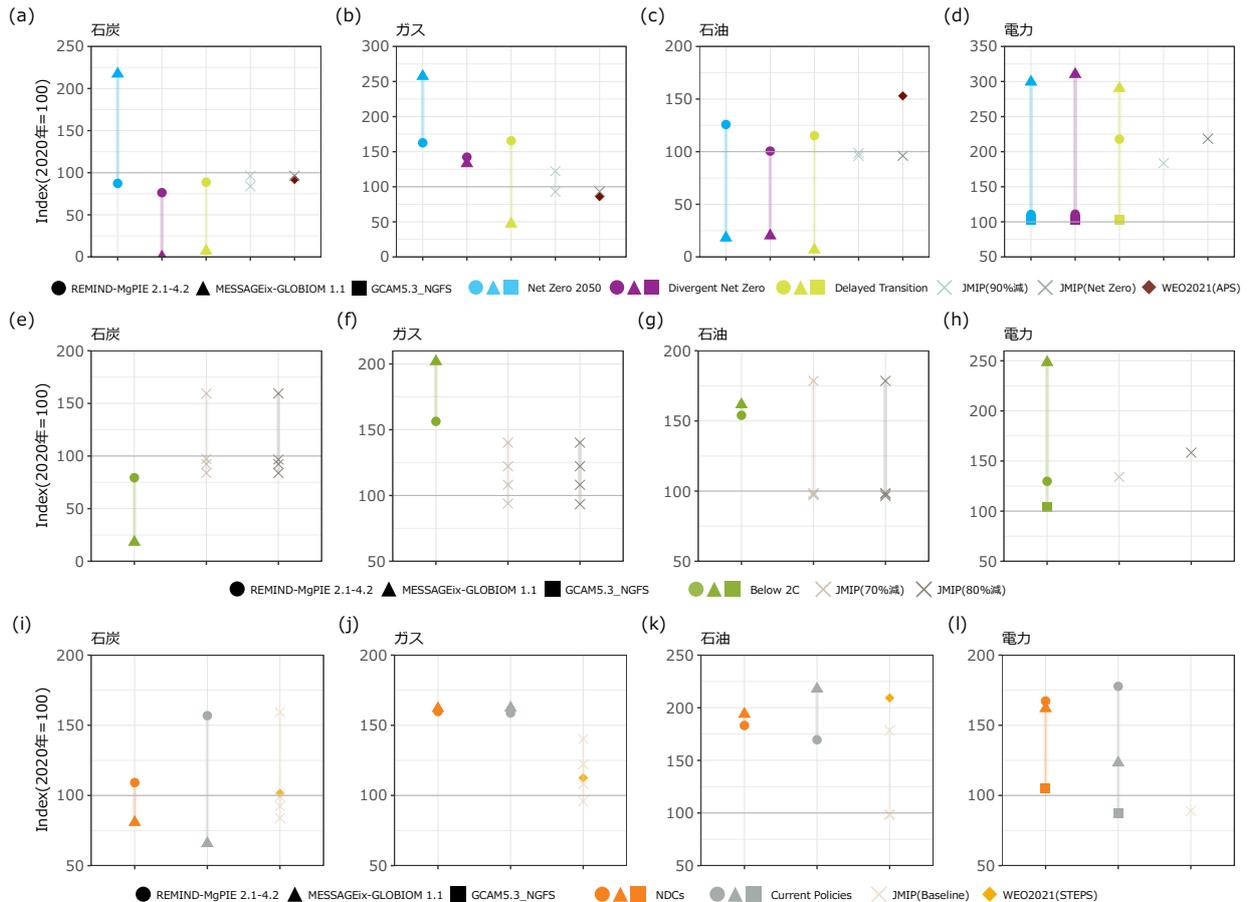


図 4.4.10 NGFS シナリオと比較対象シナリオのエネルギー価格 (2050 年・日本) ²⁹

²⁹ WEO-2021 の石油価格は世界の値のみが報告されているため、世界の値と比較している。

4.4.8 エネルギー消費量（一次エネルギー、発電電力量、最終エネルギー）

NGFS シナリオのエネルギー消費量は、世界全体（図 4.4.11）・日本（図 4.4.12）のそれぞれで、SR15 シナリオもしくは JMIP シナリオと WEO-2021 の範囲に分布している。

エネルギー消費量(世界、2050年)

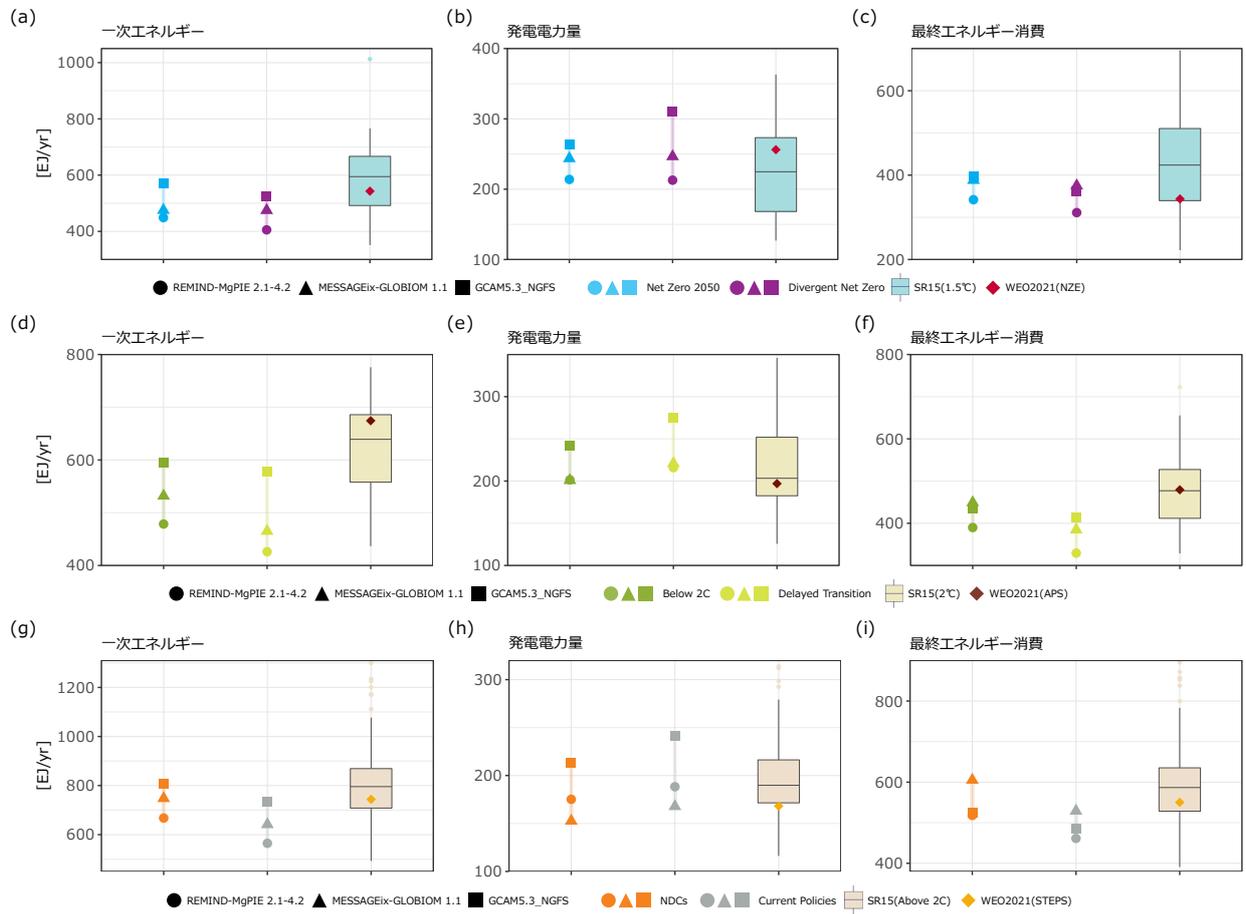


図 4.4.11 NGFS シナリオと比較対象シナリオのエネルギー消費（一次エネルギー、発電電力量、最終エネルギー）（2050年・世界）

エネルギー消費量(日本、2050年)

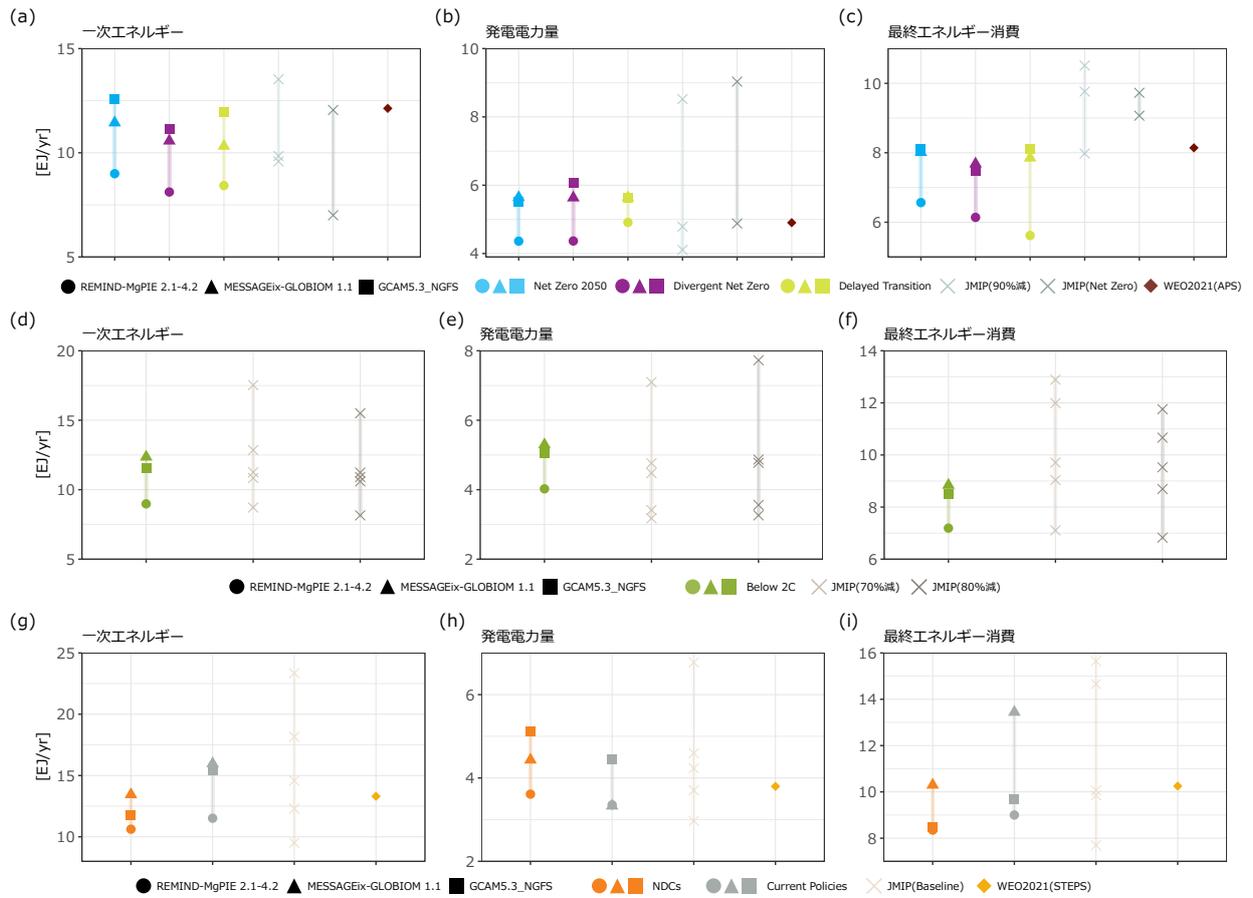


図 4.4.12 NGFS シナリオと比較対象シナリオのエネルギー消費（一次エネルギー、発電電力量、最終エネルギー）（2050年・日本）

4.4.9 一次エネルギー消費（化石燃料）

世界全体（図 4.4.13）

Net Zero 2050（1.5°C）・Divergent Net Zero（1.5°C）：NGFS シナリオの一次エネルギー消費（化石燃料）は、概ね、SR15 シナリオと WEO-2021 の範囲に収まっている。ただし、石炭については、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と MESSAGEix 1.1 では、SR15 シナリオのほぼ下限（一次エネルギー消費量はゼロ付近）にある。ガスについても、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 では、SR15 シナリオの範囲の下限に位置している。

Below 2°C（1.7°C）・Delayed Transition（1.8°C）：NGFS シナリオの一次エネルギー消費（化石燃料）は、概ね、SR15 シナリオの範囲に収まっている。ただし、石炭については、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と MESSAGEix 1.1 では、SR15 シナリオのほぼ下限（一次エネルギー消費量はゼロ付近）にある

NDCs（2.5°C）・Current Policies（3°C+）：NGFS シナリオの一次エネルギー消費（化石燃料）は、概ね、SR15 シナリオと WEO-2021 の範囲に収まっている。

化石燃料消費量(世界、2050年)

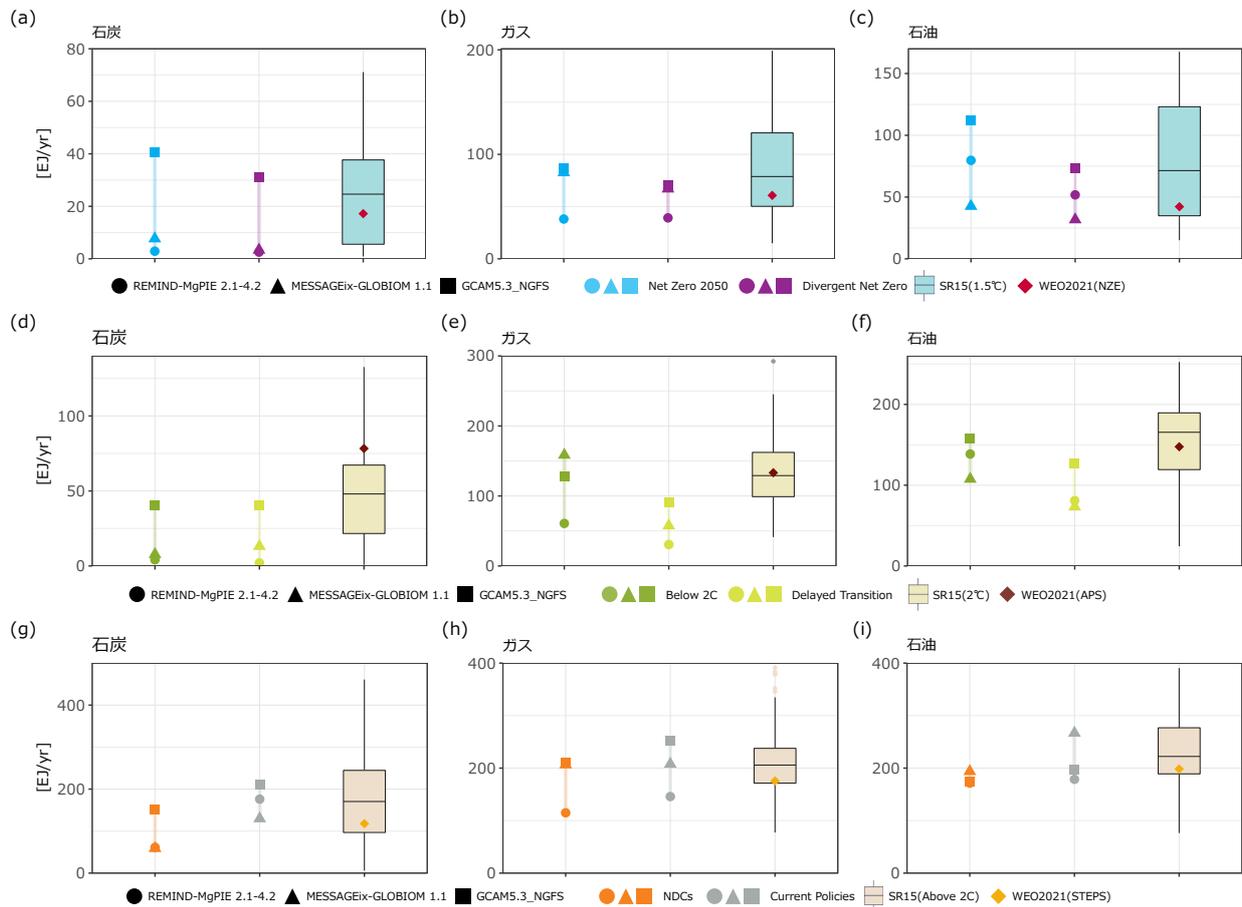


図 4.4.13 NGFS シナリオと比較対象シナリオの化石燃料消費（2050年・世界）

日本 (図 4.4.14)

Net Zero 2050 (1.5°C)・Divergent Net Zero (1.5°C)・Delayed Transition (1.8°C) : NGFS シナリオと JMIP

シナリオや WEO-2021 の範囲は概ね整合しているように見えるが、それぞれのシナリオ内でのばらつきが大きい。石炭の消費量は、NGFS シナリオの REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 ではゼロ付近である。また、ガスと石炭は概ね JMIP シナリオや WEO-2021 の範囲に収まっているように見えるが、NGFS シナリオの Delayed Transition の REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 では、JMIP シナリオや WEO-2021 よりも消費量が少ない。

Below 2°C (1.7°C) : NGFS シナリオと JMIP シナリオ・WEO-2021 の範囲は概ね整合しているように見えるが、同一シナリオ内でも IAM 間のばらつきは大きい。

NDCs (2.5°C)・Current Policies (3°C+) : 石炭については、NGFS シナリオの NDCs は、JMIP シナリオや WEO-2021 よりも消費量が少ない。ガス・電力については、NGFS シナリオと JMIP シナリオ・WEO-2021 の範囲は概ね整合している。

化石燃料消費量(日本、2050年)

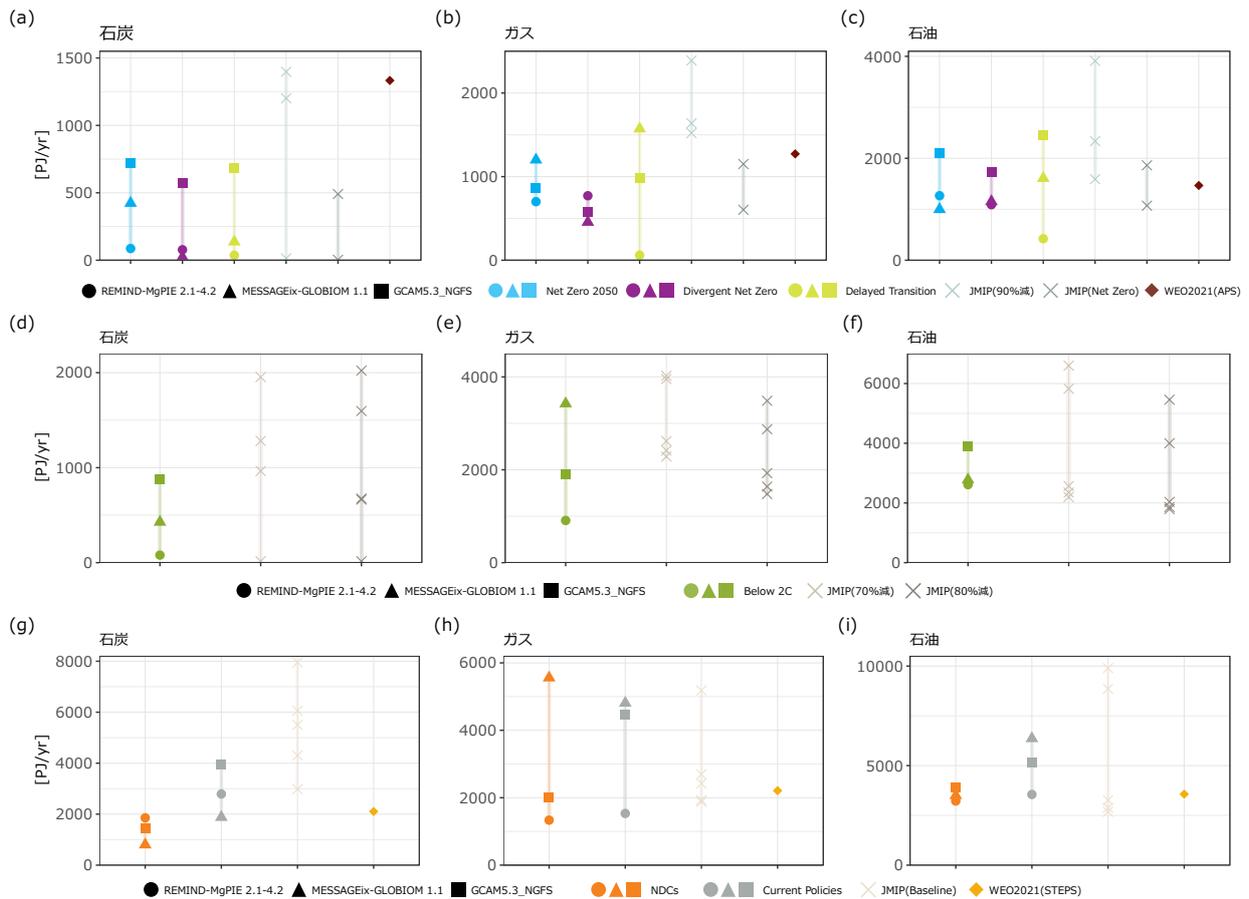


図 4.4.14 NGFS シナリオと比較対象シナリオの化石燃料消費 (2050年・日本)

4.4.10 発電電力量

世界全体 (図 4.4.15)

Net Zero 2050 (1.5°C)・Divergent Net Zero (1.5°C) : NGFS シナリオの発電電力量は、概ね、SR15 シナリオの範囲に収まっている。ただし、風力発電については、SR15 シナリオの上限付近に偏っており、既存のシナリオよりも風力発電の導入量が多いことが言える。一方、BECCS や CCS 付きの化石燃料発電については、IAM によって異なるものの、REMIND-MagPIE 2.1-4.2 と MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 では SR15 シナリオの分布の下限 (発電電力量はほぼゼロ) に位置している。

Below 2°C (1.7°C)・Delayed Transition (1.8°C) : NGFS シナリオの発電電力量は、概ね、SR15 シナリオの範囲に収まっている。ただし、風力発電と太陽発電については、SR15 シナリオの上限付近に偏っている。また、REMIND-MagPIE 2.1-4.2 は原子力発電の導入量が少ないが、SR15 シナリオの範囲と比較してもほぼ下限に位置している。

NDCs (2.5°C)・Current Policies (3°C+) : 風力発電と太陽発電については、SR15 シナリオの上限付近に偏っている一方で、原子力は SR15 シナリオの下限に付近に偏っている。

発電電力量(世界、2050年)

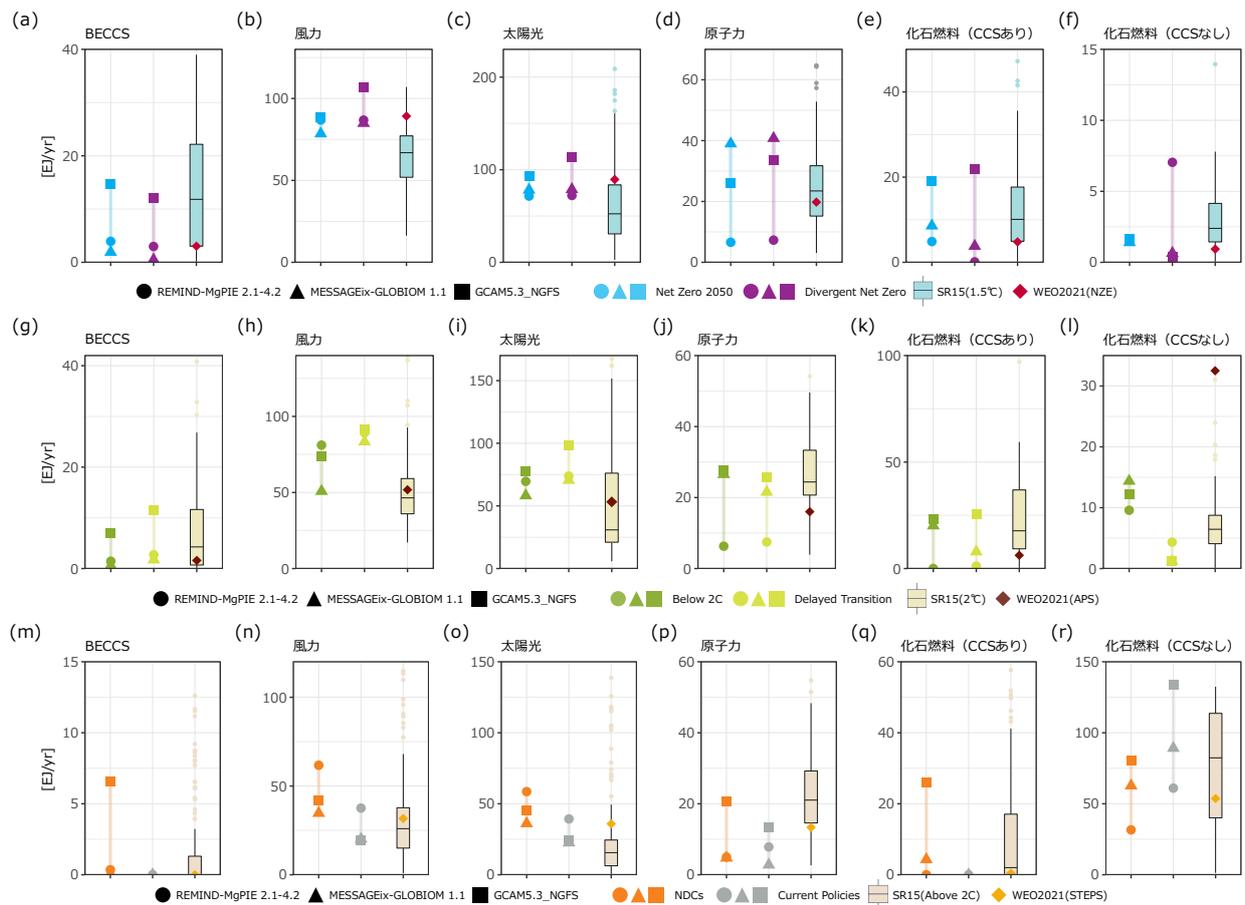


図 4.4.15 NGFS シナリオと比較対象シナリオの発電電力量 (2050年・世界)

日本 (図 4.4.16)

Net Zero 2050 (1.5°C)・Divergent Net Zero (1.5°C)・Delayed Transition (1.8°C) : NGFS シナリオの発電電力量は、概ね、JMIP シナリオと WEO-2021 の範囲に収まっている。ただし、IAM によっては、これらのシナリオの範囲を超えるものがある。太陽発電については、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 と GCAM5.3 の発電量は、JMIP シナリオや WEO-2021 よりも多い。一方、CCS 付きの化石燃料発電については、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と GCAM 5.3 の発電量は、JMIP シナリオや WEO-2021 よりも少ない。

Below 2°C (1.7°C) : NGFS シナリオの発電電力量は、概ね、JMIP シナリオと WEO-2021 の範囲に収まっている。ただし、太陽発電については、GCAM 5.3 の発電量は、JMIP シナリオや WEO-2021 よりも多い。

NDCs (2.5°C)・Current Policies (3°C+) : NGFS シナリオの発電電力量のうち、太陽発電や原子力等は JMIP シナリオと WEO-2021 の範囲に収まっている。NDCs シナリオでは、IAM によって BECCS (GCAM 5.3)、風力発電 (REMIND-MAgPIE 2.1-4.2)、CCS 付き化石燃料発電 (GCAM 5.3) 等が一定量導入される。

発電電力量(日本、2050年)

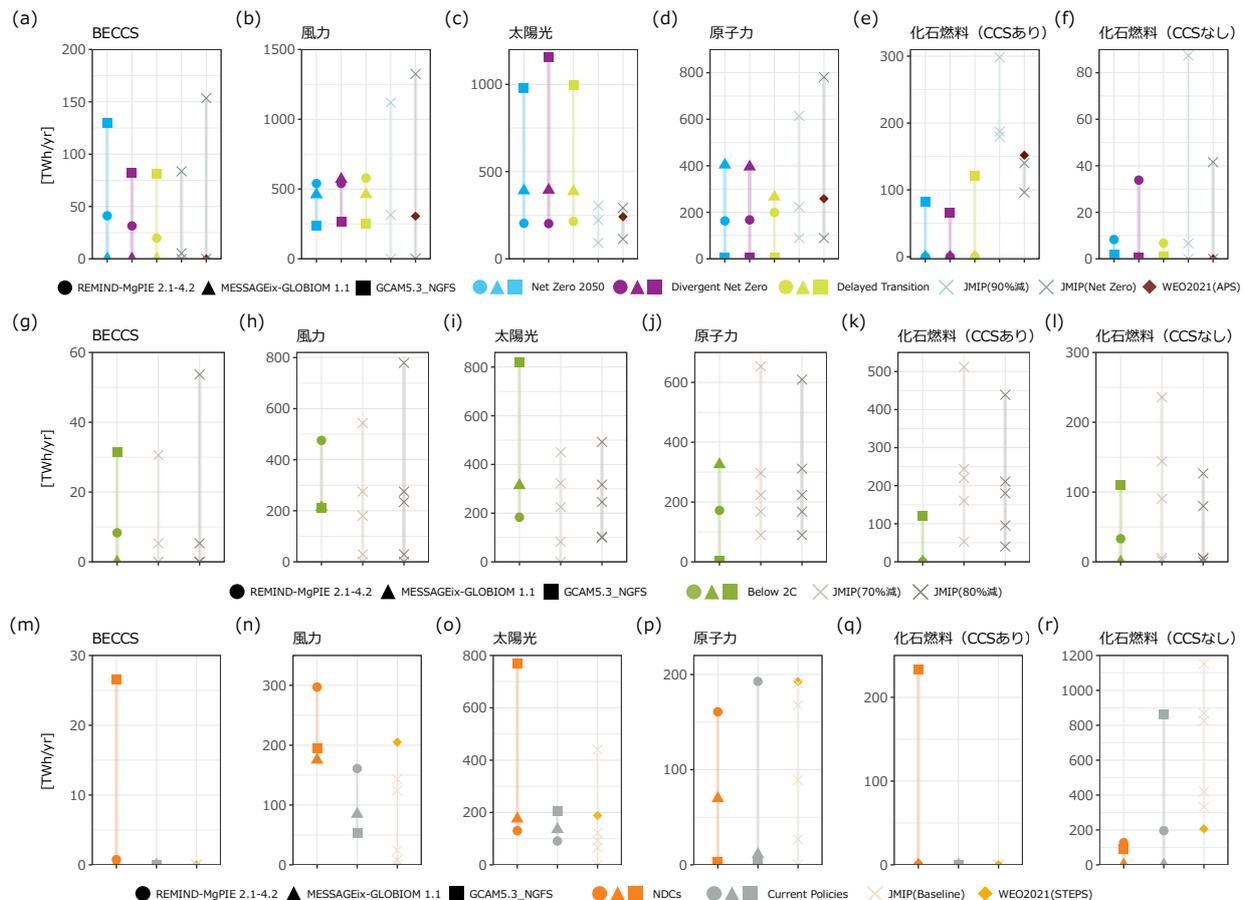


図 4.4.16 NGFS シナリオと比較対象シナリオの発電電力量 (2050年・日本)

4.4.11 最終エネルギー消費

世界全体 (図 4.4.17)

Net Zero 2050 (1.5°C)・Divergent Net Zero (1.5°C) : NGFS シナリオの最終エネルギー消費は、概ね、SR15 シナリオの範囲に収まっている。ただし、Divergent Net Zero では、液体燃料について、SR15 シナリオの下限付近に偏っている。

Below 2°C (1.7°C)・Delayed Transition (1.8°C) : NGFS シナリオの最終エネルギー消費は、概ね、SR15 シナリオの範囲に収まっている。ただし、Delayed Transition では、液体燃料について、SR15 シナリオの下限付近に偏っている。

NDCs (2.5°C)・Current Policies (3°C+) : NGFS シナリオの最終エネルギー消費は、概ね、SR15 シナリオの範囲に収まっているが、SR15 シナリオと比較すると、ガスの消費量は少なく、石炭の消費量はやや多い。

最終エネルギー消費(世界、2050年)

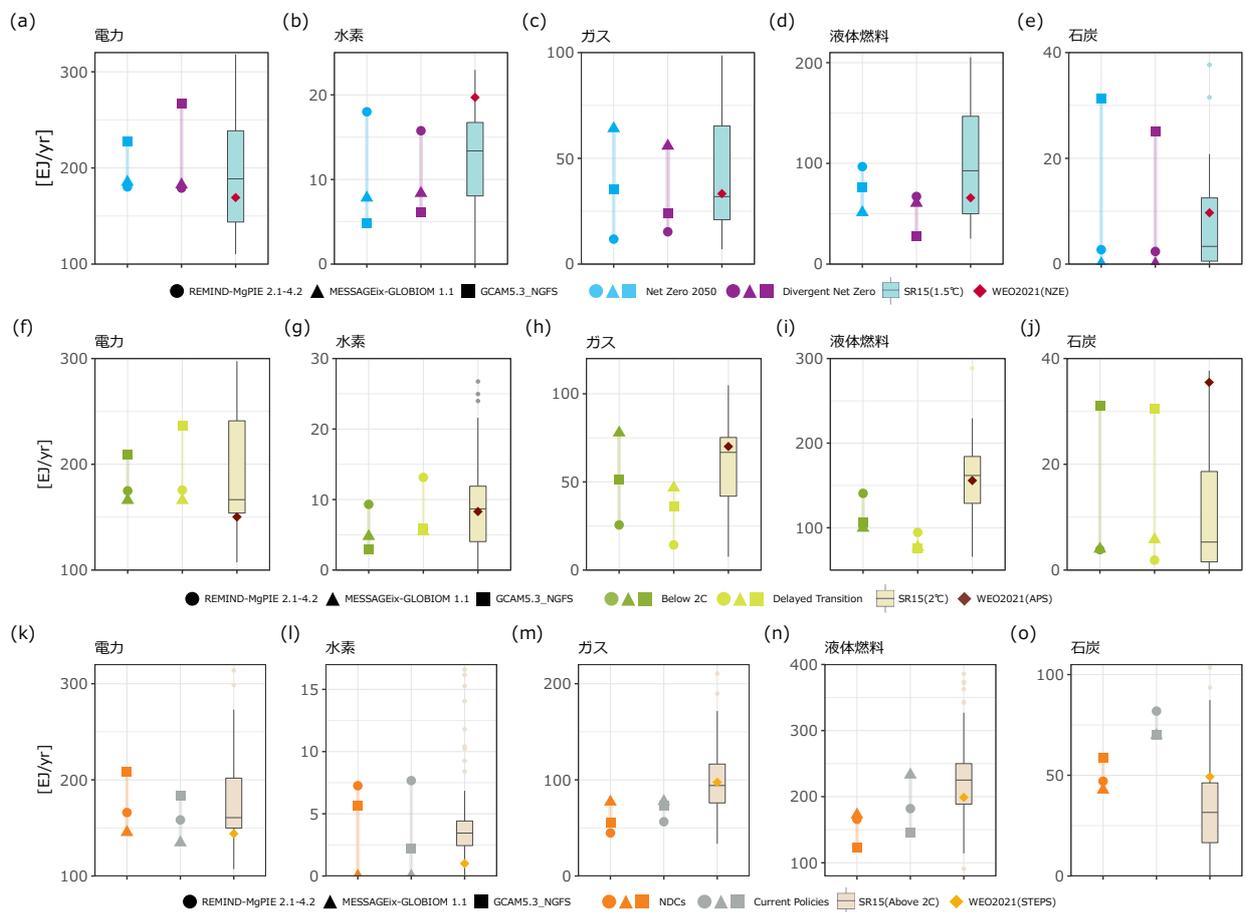


図 4.4.17 NGFS シナリオと比較対象シナリオの最終エネルギー消費 (2050年・世界)

日本 (図 4.4.18)

Net Zero 2050 (1.5°C)・Divergent Net Zero (1.5°C)・Delayed Transition (1.8°C) : NGFS シナリオの最終エネルギー消費量は、概ね、JMIP シナリオと WEO-2021 の範囲に収まっているが、NGFS シナリオのほうが分布の幅が狭く、JMIP シナリオや WEO-2021 よりも上限値が小さい。

Below 2°C (1.7°C) : NGFS シナリオの最終エネルギー消費量は、概ね、JMIP シナリオと WEO-2021 の範囲に収まっているが、NGFS シナリオのほうが分布の幅が狭い。

NDCs (2.5°C)・Current Policies (3°C+) : NGFS シナリオの最終エネルギー消費量は、概ね、JMIP シナリオと WEO-2021 の範囲に収まっている。ただし、NGFS シナリオの水素の導入量は、JMIP シナリオの導入量よりも多い。また、NGFS シナリオでは 2050 年時点でも石炭が残存するが、JMIP シナリオには 2050 年時点で石炭がほぼゼロとなるものがある。

最終エネルギー消費(日本、2050年)

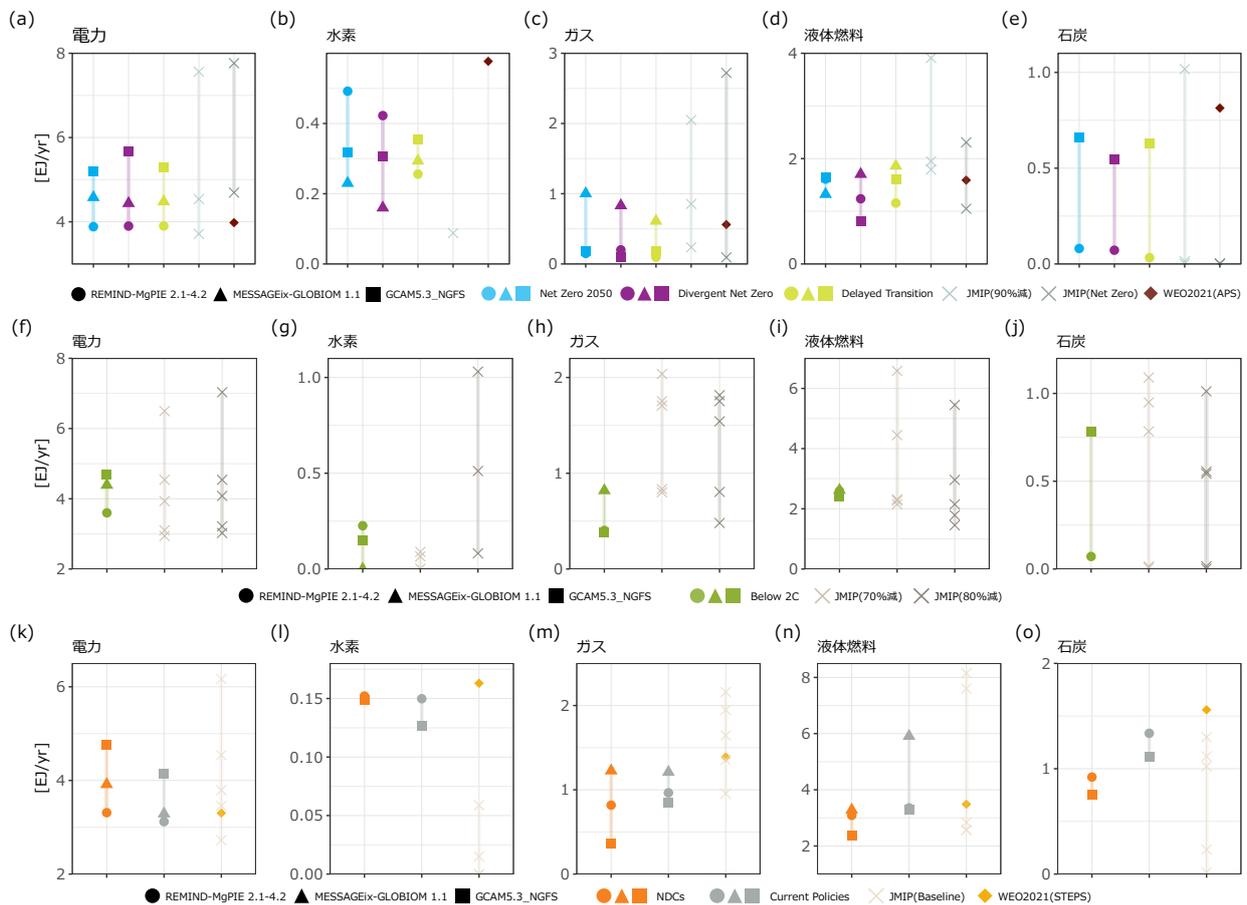


図 4.4.18 NGFS シナリオと比較対象シナリオの最終エネルギー消費 (2050 年・日本)

4.4.12 まとめ：既存シナリオとの比較

本節では、世界全体・日本のそれぞれについて、NGFS シナリオ（第2版）と既存のシナリオの間で主要な変数の比較を行った。その結果、部門別の CO₂ 排出量・CO₂ 除去量、一次エネルギー・二次エネルギー（発電電力量）・最終エネルギーのいずれにおいても両者に顕著な差はみられなかった。このことから、NGFS シナリオ（第2版）は、排出削減の水準が類似する既存のシナリオの範囲と整合していると言える。

その一方で、明らかな違いがあったのは、炭素価格である。具体的には、WEO-2021 において設定されている炭素価格の水準と、NGFS シナリオやその他のシナリオの水準を比較すると、野心的な排出削減が導入されるシナリオ（Net Zero 2050 等）において、前者のほうが顕著に低かった（図 4.4.3、図 4.4.4）。これは、炭素価格の決定方式が両者で異なるためである。WEO-2021 で利用されているシミュレーションモデルである World Energy Model では、排出削減に寄与する炭素価格以外の政策も想定した上で、燃料種間の相対的なコスト転換が起こることでエネルギー需要が変化する水準、もしくは現時点の既存の政策の水準を参照して、炭素価格が外生的に与えられる(IEA, 2021a)。一方、IAM では多くの場合、排出制約の条件を達成する水準としてモデルによって計算される（7.2 節も参照）。なお、日本については、JMIP によって算出された炭素価格のほうが、NGFS シナリオ（第2版）の水準よりも高かった（図 4.4.4）。この可能性の1つとして、JMIP と NGFS シナリオ（第2版）の間で、排出削減技術のコスト想定が異なる点が考えられる。

5 海外当局・中銀による NGFS シナリオの利用例

5.1 当局・中銀によるリスク分析事例の概要

2021年10月時点で30カ国の規制当局及び中央銀行が気候変動に関連する金融リスク分析を実施もしくは計画しており、そのうちの大半がNGFSシナリオを利用しているか、今後利用することを表明している(NGFS, 2021)。本報告ではこのうち、NGFSシナリオの統合評価モデルを利用した移行リスク分析の方法論及び結果が公表されている、5機関による6事例を取り上げる(表5.1.1)。

表 5.1.1 海外当局・中銀による NGFS シナリオの利用例³⁰

実施機関(国)	名称(略称)	完了時期	分析アプローチ	バランスシート	分析単位	分析期間
Autorité de contrôle prudentiel et de résolution (ACPR) / Banque de France (フランス)	ACPR Climate Pilot Exercise (ACPR 2021)	2021年5月	ボトムアップ	ハイブリッド	セクター(55種類)	30年
European Central Bank (ユーロ圏)	ECB Economy-wide climate stress test (ECB 2021)	2021年9月	トップダウン	一定	カウンターパーティー	30年
	ECB SSM stress test (ECB 2022)	2022年	ボトムアップ	短期:一定 長期:動的	カウンターパーティー	短期:3年 長期:30年
Bank of England (英国)	BoE Biennial Exploratory Stress test (BoE 2022)	2022年5月予定	ボトムアップ	一定	カウンターパーティー/マクロ経済/セクター	30年
Bank of Canada (カナダ)	BoC-OSFI Climate Scenario Analysis Pilot (BoC-OSFI 2022)	2022年1月	ボトムアップ/トップダウン	一定	カウンターパーティー/セクター	30年
Australian Prudential Regulation Authority (豪州)	APRA Climate Vulnerability Assessment (APRA 2022)	2022年前半予定	ボトムアップ/トップダウン	ハイブリッド	カウンターパーティー/マクロ経済/セクター	30年

5.1.1 ACPR / Banque de France (フランス)

ACPR Climate Pilot Exercise (ACPR 2021)

ACPR (Autorité de contrôle prudentiel et de résolution、フランス健全性監督局)はBanque de France (フランス中央銀行)と共同で、2020年7月から2021年4月にかけて2020年7月にNGFSシナリオにもとづく気候関連リスク分析の方法論を公表し(ACPR, 2020; Allen et al., 2020)、2021年5月に結果を公表した(ACPR, 2021)。

分析対象となったのはフランス国内の銀行と保険会社である。分析にあたっては、対象となった銀行及び保険会社が当局と協力してリスク分析を実施する「ボトムアップ方式」が採用された³¹。分析対象の期

³⁰ NGFS (2021c)に掲載された各国の金融規制当局・中央銀行の報告のうち、分析の方法論・結果が公表されているものを抜粋・要約

³¹ ACPR (2021)は各金融機関の参加の下でストレステストが実施されたことから本取り組みを「ボトムアップ

間は 2020～2050 年までの 30 年間で、55 種類のセクターを単位とした移行リスクを、脱炭素への移行経路が異なる 3 種類のシナリオによって分析した。

分析対象となるバランスシートの仮定には、一定（スタティック）／動的（ダイナミック）のハイブリッドアプローチが採用された。具体的には、2025 年までは伝統的な金融機関に対するストレステストのフレームワークに採用されている一定（スタティック）アプローチを採用し、2025 年以降は動的（ダイナミック）なバランスシートが仮定される。

5.1.2 European Central Bank（ユーロ圏）

ECB（European Central Bank、欧州中央銀行）は、2021 年にアプローチの異なる 2 種類のリスク分析の結果もしくは計画を公表している。

ECB Economy-wide climate stress test (ECB 2021)

最初に実施されたのはユーロ圏全体を対象とした分析で、2021 年 3 月に結果の概要が公表され、同 9 月に最終的な結果が公表された(ECB, 2021a)。

分析の対象となったのはユーロ圏内各国の銀行であり、ECB が外部データベース等を元に金融機関のリスクを計測・分析する「トップダウン方式」で実施されている。分析の対象期間は 2050 年までの 30 年間である。

分析のスコープは、物理的リスクと移行リスクの両方であり、ベースラインとなるシナリオ 1 本に加えて、いずれかの影響がより強く発現するシナリオ 2 本の、計 3 本のシナリオが用意されている。これらに基づき、カウンターパーティー（非金融企業）単位で信用リスク（PD 及び LGD）がモデル化される。なお、銀行のバランスシートには、動的（ダイナミック）アプローチが採用されている。

ECB SSM stress test (ECB 2022)

2021 年 10 月、ECB は単一銀行監督制度（Single Supervisory Mechanism: SSM）の元で実施される年次のストレステストにおいて、気候ストレステストの実施を発表し、方法論を公表した(ECB, 2021b)。これは、SSM の監督対象となる銀行と規制当局の双方が気候関連リスクの評価能力を向上させることを主な目的とするもので、ECB と監督対象である市中銀行との合同エクササイズ（joint learning exercise）と位置づけられている。

SSM のストレステストは、「ボトムアップ方式」で実施される。実施対象の銀行は、ECB から提供されるテンプレートに必要な情報を記入し、回答することが求められる。テンプレートは、銀行の気候関連リスクに関する定性的な情報（Module 1）、気候関連の定量的な指標（Module 2）、及び ECB から提供されるシナリオを用いたストレステストの結果（Module 3）の 3 部から構成される。2022 年の気候ストレステスト対象銀行のうち、significant institution に該当する全ての銀行は Module 2 まで回答する必要がある。気候シナリオによるストレステスト（Module 3）の回答対象は一部の銀行となるが、ECB は参加する全ての銀行に対して Module 3 のストレステストを実施するためのデータの提供を要請している。

プ方式」に分類しているが、定量的なリスク分析には当局によるモデル／アプローチが用いられていることから、「トップダウン方式」の要素も含んでいると言える。

ECBは2022年1月に正式にシナリオを公表した³²。ストレステストは2022年3月から7月にかけて実施される予定である。参加機関から提出されたデータは、ECBがデータの品質を精査した上で統合され、報告書として公表される予定である。

ストレステストは、短期（3年）・長期（30年）の2つの時間軸で実施される。このうち短期的（3年）な時間軸のストレステストは、伝統的なストレステストと同一のフレームワークを用いて実施され、一定（スタティック）のバランスシートを仮定した上で、炭素価格の急上昇による移行リスク（ショック）の分析が求められる。

一方、長期（30年）の時間軸で実施されるストレステストは、物理的リスクと移行リスクの両方を対象としている。バランスシートのアプローチは動的（ダイナミック）アプローチを採用し、対象の銀行は2030年・2040年・2050年時点の企業及び不動産（モーゲージ）へのエクスポージャーを記載することが求められる。

5.1.3 Bank of England（英国）

2021 Biennial Exploratory Scenario (BoE 2022)

2019年12月、Bank of England（イングランド中央銀行、BoE）は、毎年実施される通常のストレステスト（Annual Concurrent Stress Test）とは別に実施される隔年の探索的ストレステスト（Biennial Exploratory Scenario）の枠組下で、気候関連リスク分析を実施しシナリオ・方法論の概要を公表した（BoE, 2019）。これは、英国の主要な銀行及び保険会社を対象とするもので、移行リスクと物理的リスクの両方が対象となる。当初は2020年前半より実施予定であったが、新型コロナウイルスへの対応を優先するために1年の延期が決定した。2021年6月に方法論が公表され（BoE, 2021）、結果は2022年5月頃に公表される予定である。

ストレステストの対象は英国内の銀行及び保険会社であり、物理的リスクと移行リスクの両方が分析の対象となる。分析のアプローチは「ボトムアップ方式」である。銀行については銀行勘定における信用リスク（特に大企業のカウンターパーティーを中心）、保険会社については投資資産と保険負債（再保険金と引受再保険を含む）へのショックイベントによるリスクを分析することが求められる。

分析の時間軸は、物理的リスクと移行リスクで異なっている。物理的リスクは2050年以降に発現するリスクの影響を評価するため、最大で60年間（2080年まで）のシナリオが用意されている。一方、移行リスクの分析対象期間は30年（2050年まで）である。バランスシートは一定（スタティック）である。

5.1.4 Bank of Canada（カナダ）

Climate Scenario Analysis Pilot (BoC-OSFI 2022)

2020年11月にBank of Canada（カナダ中央銀行、BoE）及びOffice of Superintendent of Financial Institutions（金融機関監督官局、OSFI）は、連邦政府の監督下にある6金融機関（2銀行、2生命保険、2損害保険）

³² ECB. ECB Banking Supervision launches 2022 climate risk stress test.

<https://www.bankingsupervision.europa.eu/press/pr/date/2022/html/ssm.pr220127~bd20df4d3a.en.html>（最終アクセス：2022年3月22日）

を対象に、気候関連リスク分析のパイロットを実施することを表明した。そして 2022 年 1 月、詳細な分析手法・シナリオと結果が公表された(BoC-OFSI, 2022; Chen et al., 2022; Hosseini et al., 2022)。

分析の対象となったのはカナダ国内及び米国（一部の金融機関は北米以外の資産についてもリスク分析を実施）の資産の一部に係る移行リスクであり、中でも排出量が多い 10 セクター（穀物、林業、家畜生産、石炭、原油、ガス、石油精製、電力、エネルギー多利用産業、商業運輸）が対象となった。なお分析対象の資産がバランスシート上の総資産に占める割合は、銀行で 5%、保険会社で 15%である(BoC-OFSI, 2022)。

分析のアプローチは「トップダウン方式」と「ボトムアップ方式」のハイブリッドである。トップダウンによるリスク分析として、まず BoC によってセクター・地域ごとにマクロレベルの財務的影響が算出される。ボトムアップによる分析として分析対象の金融機関は、ポートフォリオのセグメントごとに少なくとも 5 社以上の代表的な貸付先を選択した上で、信用リスク（PD & LGD）を定量的に評価することが求められる。なお、ボトムアップの分析対象となった貸付先は、分析対象となった 10 セクターの資産全体の 28%である。

分析期間は 30 年（～2050 年）、バランスシートは一定（スタティック）である。

5.1.5 Australian Prudential Regulation Authority（豪州）

Climate Vulnerability Assessment (APRA 2022)

2021 年 4 月、Australian Prudential Regulation Authority（豪州健全性規制庁、APRA）は、気候変動に関する金融リスク監督に関するガイダンスに関する市中協議³³を開始し、同 11 月に最終的なガイダンスを公表した(APRA, 2021)。これと平行して APRA は、気候関連リスク分析のフレームワークの作成に着手し、2021 年 9 月に概要を公表した。

ストレステストの対象は豪州国内の銀行であり、物理的リスクと移行リスクの両方が対象である。分析の対象となるのは豪州国内の住宅ローン及び企業への融資エクスポージャーであるが、ニュージーランド及びその他世界を分析対象に含むことも可能とされている。分析の対象期間は 30 年間（2020 年～2050 年）である。バランスシートは、一定（スタティック）と動的（ダイナミック）のハイブリッドである。

5.2 参照している NGFS のシナリオ

まず、各中央銀行・金融監督当局によるリスク分析において、NGFS のどのシナリオが参照されているかを比較する。

表 5.2.1 は、5 機関・6 点のリスク分析で参照されている NGFS のシナリオを一覧にしたものである。このうち、ACPR (2021) と ECB (2021) の 2 事例は NGFS（第 1 版）を参照しており、残りの 4 事例は NGFS（第 2 版）を参照している。

多くの分析に共通して採用されているシナリオは、Net Zero 2050（第 1 では Orderly Transition に相当するが、これは第 2 版では Below 2°C に対応している）、Delayed Transition（第 1 版では Disorderly Transition）、及

³³ Media Release: APRA releases guidance on managing the financial risks of climate change (<https://www.apra.gov.au/news-and-publications/apra-releases-guidance-on-managing-financial-risks-of-climate-change>)（最終アクセス日：2022 年 3 月 22 日）

び Current Policies（第1版では Hot House World）の3本である。このうち、Net Zero 2050はベースケースとして参照され、移行リスクがより顕在化するケースを Delayed Transition、物理的リスクがより顕在化するケースを Current Policies でそれぞれ表現している。

また、各リスク分析はNGFSシナリオを元に独自のシナリオを作成しているが、NGFSシナリオの参照方法には違いがあった。ACPR (2021)・ECB (2021)・ECB (2022)・BoE (2022)・APRA (2021)は、NGFSシナリオの移行経路を表す特徴的な変数（例えば炭素価格や温室効果ガスの排出量等）を抽出し、それらを補完するような形式で独自のシナリオを作成していた。

一方、ACPR (2021)の一部のシナリオでは、NGFSシナリオの炭素価格に独自の補正を加えた上で、シナリオを作成していることが分かった。BoC-OFSI (2022)は、NGFSシナリオのナラティブや炭素価格等の経路を参考にしつつも、NGFSシナリオに採用されているものとは異なる統合評価モデルを用いて独自のシナリオを作成していた。以下では、これらの独自の参照方法を概説する。

表 5.2.1 各中央銀行・金融監督当局が参照している NGFS のシナリオの一覧

シナリオ		ACPR (2021)	ECB (2021)	ECB (2022)	BoE (2022)	BoC-OFSI (2022)	APRA (2022)
NGFS 第1版	Orderly Transition	○	○				
	Disorderly Transition	○	○				
	Disorderly Transition (代替)	△	-				
	Hot House World	-	○				
NGFS 第2版	Net Zero 2050			○	○	△*1	-
	Below 2°C			-	-	△	-
	Divergent Net Zero			-	-	△*1	-
	Delayed Transition			○	○	△	○
	NDC			-	-	-	-
	Current Policies			○	○	△	○

○：NGFSシナリオの炭素価格や排出量等の値を利用して、シナリオを作成

△：NGFSシナリオの数値を改変、もしくはナラティブのみを参考にシナリオを作成

*1 Net Zero 2050 と Divergent Net Zero は、同一のシナリオで参照

ACPR (2021)における NGFS シナリオの補正

ACPR (2021)では、3本のシナリオのうち1本で、NGFSシナリオからの補正が行われていることが、ドキュメントから読み取れる。具体的には、「Sudden transition」シナリオにおいて、NGFS（第1版）のIAM（REMIND-MAGPIE）が出力する炭素価格の上昇経路を5年遅らせる補正を行うことで（NGFS（第1版）の Disorderly Transition では2020年から炭素価格が上昇するが、ACPR (2021)の Sudden Transition では移行開始のポイントを2020年から2025年に先送り）、急速な移行による経済への影響が表現されている（図 5.2.1 右側：オレンジ色●）。

表 5.2.2 ACPR (2021)の移行シナリオのナラティブ

ACPR のシナリオ	ベースとなる NGFS のシナリオ	ナラティブ
Orderly transition	Orderly transition (代表シナリオ)	NGFS の Orderly transition に相当する。シナリオのナラティブはフランスの低炭素移行戦略 (Stratégie Nationale Bas Carbone) と対応し、パリ協定の目標にしたがって 2050 年にネットゼロ排出に到達する。
Delayed policy action	Disorderly transition (代表シナリオ)	2030 年時点で目標が未達かつ CCS 技術が未成熟のため、2050 年カーボンニュートラル目標を達成するために政府が炭素価格を反転上昇させる
Sudden transition	Disorderly transition (代替シナリオ)	技術発展が未成熟の段階で 2025 年より急速に移行が開始し、コストが高い技術への投資のために生産性が低下する

下線 : ACPR (2021)が独自に設定したナラティブ

Graph 4: Carbon emission and pricing trajectories of the three scenarios proposed by the ACPR²⁰

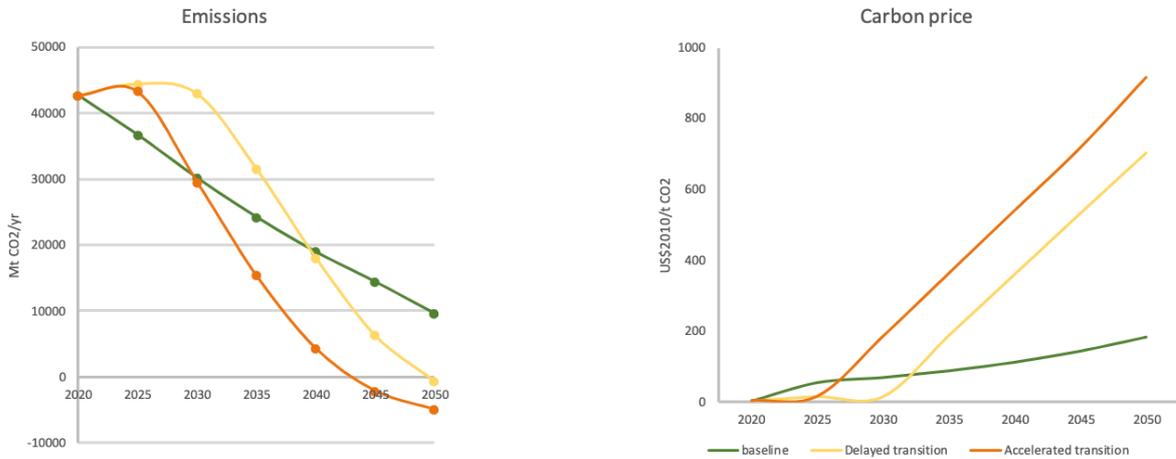


図 5.2.1 ACPR (2021)で参照された NGFS 第 1 版シナリオの排出量と炭素価格の経路。図中の凡例と表 5.2.2 のシナリオの対応関係は次のとおり : Baseline●→Orderly transition、Delayed Transition●→Delayed policy action、Accelerated transition●→Sudden Transition

BoC-OFSI (2022)による NGFS のシナリオの参照と独自のシナリオ

BoC-OFSI (2022)では、NGFS のシナリオのナラティブや主要な変数を参照しつつも、NGFS には採用されていない他の IAM を用いて独自のシナリオを構築している (表 5.2.3)。

BoC-OFSI のナラティブは、NGFS のシナリオに沿った政策導入や技術革新の前提が置かれている他、森林・林業分野については独自のナラティブが設定されていることが特徴と言える。ベースラインとなるシナリオ (NGFS では Current Policies に相当) では、2019 年末時点の政策が継続されることによって森林・林業分野への投資が十分に行われず、21 世紀半ばまで森林はネットで排出源となる (森林による炭素固定を上回る森林破壊や収穫が行われる)。一方、2°C 未満 / 1.5°C 目標を達成するシナリオでは、今世紀半ばまでに森林はネットで吸収源となることが、シナリオで明確に想定されている。

また、BoC-OFSI (2021)の Net-zero 2050 シナリオでは、現時点におけるカナダを含む各国のネットゼロ目標が明示的にモデル化されている。

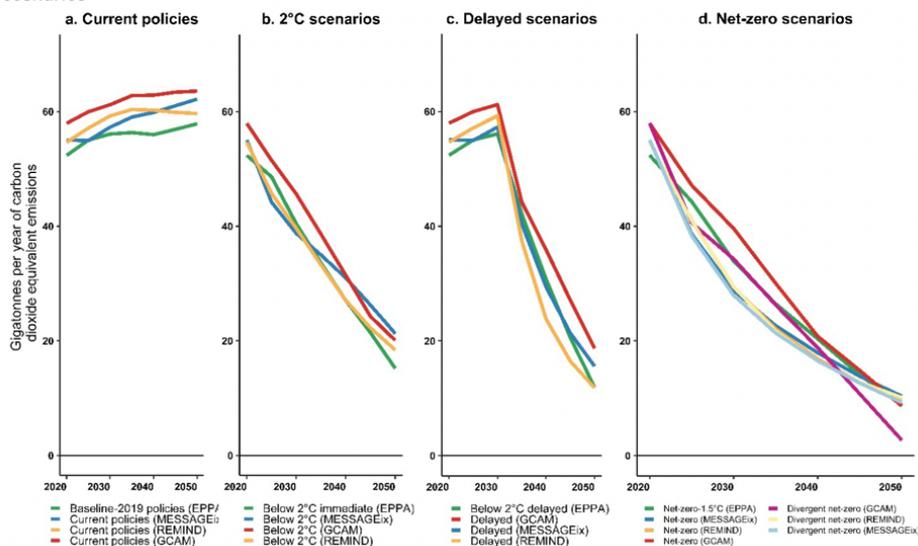
これらのナラティブを元に、BoC-OFSI (2021)はマサチューセッツ工科大学 (MIT) が開発した EPPA と

いう統合評価モデルを用いて、シナリオの変数を計算している。EPPA による世界全体の排出パス（図 5.2.2 の緑色■ライン）が、参照した NGFS のシナリオの排出パスの範囲に収まっていることを示すことで、NGFS シナリオとの整合性が担保されている(Chen et al., 2022)。

表 5.2.3 BoC-OFSI (2022) が参照している NGFS のシナリオとナラティブ

BoC-OFSI (2022) のシナリオ	参照している NGFS のシナリオ	ナラティブ
Baseline (2019 policies)	Current Policies	<ul style="list-style-type: none"> 世界は、2019 年末に実施される気候政策の経路をたどり、2100 年までに世界の平均気温が 2.9~3.1°C の範囲で上昇 林業は、世界的に今世紀半ばまでネットで排出源となる 技術革新のペースは遅い CO₂ 除去技術の利用可能性は限定的である。
Below immediate 2°C	Below 2°C	<ul style="list-style-type: none"> 今世紀末の温度上昇を 2°C 未満に抑えるための行動が、2020 年から行われる。 早期の投資や森林計画・管理により、今世紀半ばまでに森林は小規模であるがネットで吸収源となる 技術革新のスピードは緩やか CO₂ 除去技術の利用可能性は限定的
Below 2°C delayed	Delayed Transition	<ul style="list-style-type: none"> 2019 年末の政策を 10 年間継続した後、2030 年から今世紀末の温度上昇を 2°C 未満に抑えるための行動が開始される。排出量が増加する 10 年分の代償として、より急速な移行が必要 投資や森林計画・管理の導入の遅れにより、今世紀半ばまでに森林がネットの吸収源となることは不可能 技術革新のスピードは緩やか CO₂ 除去技術の利用可能性は限定的
Net-zero (1.5°C)	Net Zero 2050, Divergent Net Zero	<ul style="list-style-type: none"> 今世紀末の温度上昇を 1.5°C 未満に抑えるための行動が、行われる。カナダを含む現在のネットゼロ目標は、このシナリオに直接モデル化されている 初期の強力な投資により、今世紀半ばまでに森林はネットで吸収源となる 技術革新のペースは速い BECCS (CCS 付きのバイオマス) 等、CO₂ 除去技術の利用可能性は中程度

Chart 2: Alignment of global greenhouse gas emissions between the Bank of Canada and the NGFS scenarios



Note: NGFS refers to the Network for Greening the Financial System, EPPA is the Economic Projection and Policy Analysis model, GCAM is the Global Change Analysis Model, REMIND is the Regional Model of Investment and Development, and MESSAGE is the Model of Energy Supply Systems and their General Environment Impact.

図 5.2.2 BoC-OFSI (2022) と対応する NGFS シナリオの GHG 排出パスの比較

5.3 採用されている統合評価モデル

NGFSが採用している3種類の統合評価モデルのうち、移行リスクの分析において欧州の金融監督当局及び中央銀行が採用しているのがREMIND-MAgPIEである。一方、豪州のAPRAは全面的にGCAMを採用している。これは、豪州とニュージーランドが主な分析対象であることから、豪州+ニュージーランドをネイティブな地域区分としてモデル化しているGCAMが有利であったためと考えられる（REMIND-MAgPIEではカナダ・豪州・ニュージーランド、MESSAGEix-GLOBIOMでは日本・豪州・ニュージーランドがネイティブの地域区分となる）。

独自のIAMを採用しているカナダのBoC-OFSI(2022)では、設定したモデルとNGFSシナリオの整合性を検証するために、3種類のIAMの出力結果との比較が行われている（図5.2.2）。

表 5.3.1 各中央銀行・金融監督当局が採用しているIAM

統合評価モデル	ACPR (2021)	ECB (2021)	ECB (2022)	BoE (2022)	BoC-OFSI (2022)	APRA (2022)
REMIND-MAgPIE	○	○	○	○	△	-
MESSAGEix-GLOBIOM	-	-	-	-	△	-
GCAM	-	-	-	-	△	○
NGFS以外のモデル	-	-	-	-	○	-

○：IAMの出力結果を元にシナリオを作成

△：IAMの出力結果を参考にシナリオを作成

5.4 移行リスク分析の変数

各当局・中銀によるリスク分析のうち、移行リスクに関連する変数とデータの出典を公開している資料やデータから取りまとめたものを表5.4.1に示す。

リスク分析のアプローチや対象によって変数の種類は異なるものの、すべての分析に共通している変数は炭素価格である。また、炭素価格は独自のIAMを採用しているBoC-OFSI(2022)を除けば、NGFSシナリオを採用しているすべての分析においてNGFSシナリオのデータが採用されている。このことから、移行リスク分析に観点から最も重要なNGFSシナリオの変数は、炭素価格であるといえる。

その一方で、炭素価格以外の変数はほとんどが、中央銀行・金融監督当局によってNGFSシナリオのデータを元にした補正や独自の計算によるデータの追加が行われている。移行リスク関連の変数に着目すると、ECB(2021)・ECB(2022)・BoE(2022)では、エネルギー価格やエネルギー需要等はNGFSシナリオに基づいて変数の補正が行われているとの記述がある。また、BoE(2021)は、NGFSには含まれていない自動車セクターの変数を独自に付加している（後述）。

マクロ経済変数については、中央銀行・金融監督当局が、外部のデータプロバイダーから入手、もしくは独自に計算している。なお、分析対象とした6事例の中でシナリオにマクロ経済変数を含むのは、ACPR(2021)・ECB(2022)・BoE(2022)・BoC-OFSI(2022)の4事例である。

表 5.4.1 各当局・中銀のリスク分析における移行リスク関連の変数とデータの出典

カテゴリー	変数	ACPR (2021)	ECB (2021)	ECB (2022) (短期)	ECB (2022) (長期)	BoE (2022)	BoC-OFSI (2022)	APRA (2022)
移行リスク変数	GHG 排出量	NGFS	ECB / Urgentem	-	NGFS	-	EPPA	RCP2.6 / RCP4.5 / RCP8.5
	炭素価格	NGFS / ACPR	NGFS	NGFS	NGFS	NGFS	EPPA	NGFS
	エネルギー価格	-	ECB	-	NGFS / ECB	NGFS / NIESR / BoE	EPPA	-
	エネルギー需要 (一次・最終)	-	ECB	-	-	NGFS	EPPA	-
	エネルギーミックス (一次・電力)	-	-	-	NGFS / ECB	-	EPPA	AEMO / NGFS
	エネルギー生産費用	-	-	-	-	-	EPPA	-
	新車登録台数	-	-	-	-	BoE	-	-
	自動車登録台数	-	-	-	-	BoE	-	-
中古車価格	-	-	-	-	BoE	-	-	
マクロ経済変数	生産量 (GDP、付加価値総額、売上等)	NIESR / BdF	ECB	ECB	ECB	Refinitiv Eikon / NIESR / BoE / 他	EPPA / BoC	-
	インフレ率・物価指数	NIESR	-	ECB	ECB	Refinitiv Eikon / NIESR / BoE / 他	BoC	-
	失業率	NIESR	-	ECB	ECB	Refinitiv Eikon / NIESR / BoE / 他	-	-
	住宅価格	-	-	ECB	ECB	Refinitiv Eikon / NIESR / BoE / 他	-	-
	商業不動産価格	-	-	ECB	ECB	BoE / 他	-	-
	政府支出	-	-	ECB	ECB	-	-	-
	政府債務残高	OECD / NIESR	-	-	-	-	-	-
	財政赤字	OECD / NIESR	-	-	-	-	-	-
	世帯収入	-	-	ECB	ECB	Refinitiv Eikon / NIESR / BoE / 他	-	-
	為替レート	-	-	ECB	ECB	BoE	-	-
	短期金利	-	-	ECB	ECB	Refinitiv Eikon / NIESR / BoE / 他	-	-
	国債利回り	-	-	ECB	ECB	Bloomberg / BoE	-	-
	社債利回り・スプレッド	RMI / BoF	-	ECB	ECB	ICE/BofA ML Global Research / BoE	-	-
	株価指数	NiGEM / BoF	-	ECB	ECB	Bloomberg / BoE	-	-

【データの出典】

NGFS シナリオ (第1版・第2版) : NGFS

各中央銀行・金融監督当局 : ACPR / BdF (仏)、ECB (ユーロ圏)、BoE (英)、BoC (加)

公的機関・研究所 : OECD、AEMO (豪エネルギー市場機関)

研究機関・シンクタンク : NIESR (英経済社会研究所)、RMI (シンガポール大学リスクマネジメント研究所)、

EPPA (マサチューセッツ工科大学 EPPA モデル)

データプロバイダー : Urgentem、Refinitiv Eikon、ICE/BofA ML Global Research、Bloomberg

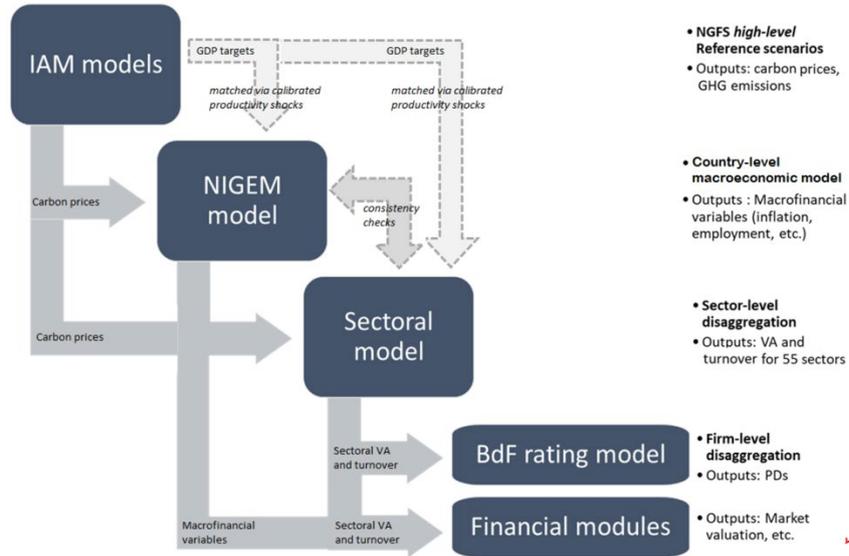
マクロ経済モデル (NiGEM) やセクターモデルとの接続 (ACPR (2021))

NGFS 第1版シナリオをベースに作成された ACPR (2021)では、NGFS シナリオの炭素価格を用いてマクロ経済モデル (NiGEM)³⁴と Banque de France (BdF)が開発したセクターモデル(Devulder and Lisack, 2020)によって、国単位のマクロ経済指標 (GDP、インフレ率、失業率) とセクター別の付加価値総額や売上額

³⁴ NGFS シナリオ (第1版) には NiGEM によるマクロ経済影響予測は含まれておらず、これは ACPR による独自の改良である。なお、IAM の出力をマクロ経済モデルに接続するというアイディアは 2021 年 6 月に公表された NGFS シナリオ (第2版) において採用され、ネイティブなデータとして NiGEM の出力結果が利用できる。

が計算される。これらの変数は最終的に、Banque de France の内部モデルに渡され、信用リスクや市場リスクの推定が行われている（図 5.4.1）。

Figure 5 - The modelling architecture



4.1. The macroeconomic model

図 5.4.1 ACPR による気候関連リスク分析モデルの全体構造

自動車のシェア（BoE (2022)）

NGFS シナリオには含まれていない変数として BoE (2022)は、英国国内の車種（内燃機関エンジン、ハイブリッド、EV）ごとの新車登録台数、登録台数、中古車販売価格をシナリオに追加した。これらのデータのうち 2020 年以前の値は英 Department of Transport による実績値であり、2020 年以降はすべてのシナリオで英国の政策目標と整合した経路が設定されている。具体的には、ガソリンエンジン車は 2030 年、ハイブリッド車は 2035 年に新車の販売が停止され（新車登録台数がゼロとなる）、2035 年以降は EV が 100%となる。シナリオ間に大きな違いは見られないが、Early Action では他の 2 種類に比べて、若干、ハイブリッド車の割合が多い傾向がある（図 5.4.2）。

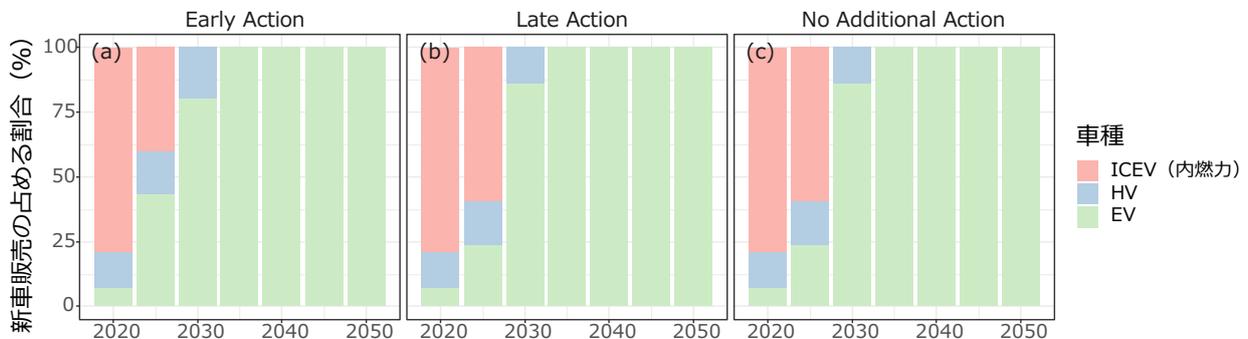


図 5.4.2 CBES シナリオにおける新車登録台数（英国）に占める車種別割合の推移

5.5 本章のまとめ

本章で分析対象とした6件の事例ではいずれも、NGFSが提供しているシナリオから複数のシナリオを参照し、2~4本のシナリオが作成されていた。これらをNGFSシナリオ（第2版）のナラティブに対応させると、中央銀行・金融監督当局が作成するシナリオは、概ね3種類に区分できる。1つめは、将来、移行リスクが強く発現するシナリオで、NGFSシナリオ（第2版）のDelayed Transitionが参照されている。Delayed Transitionは、2030年まで排出削減政策が導入されず、2030年に以降に急速に排出削減が進むことによって、低炭素社会への円滑な移行が進むケースよりも経済的な損失が大きくなるシナリオである。2つめは、排出削減政策が全く導入させずに、将来、物理的リスクが強く発現するシナリオで、NGFSシナリオ（第2版）のCurrent Policiesが参照される。本報告書では紹介しなかったが、中央銀行・金融監督当局によるリスク分析の多くでは、移行リスクと物理的リスクの双方の影響を捉えるシナリオが用意されている。3つめは、低炭素社会への円滑な移行が進むことにより、移行リスク・物理的リスクの双方が一定程度に抑えられるシナリオで、NGFSシナリオ（第2版）のNet Zero 2050が参照されている。

シナリオを定量化するIAMは、いずれの事例でも1種類であった。NGFSシナリオ（第2版）では、IAMの定量化方法に起因する将来の不確実性の幅を捉えるため、3種類のIAMが採用されている。ただし、少なくとも本稿の執筆時点では、将来の不確実性を考慮して複数のIAMによる分析を行った事例はなかった。欧州（ACPR (2021)・ECB (2021)・ECB (2022)・BoE (2022)）では、すべての事例でREMIND-MAgPIEが採用されていた。一方、カナダ（BoC (2022)）では独自のIAM、豪州（APRA (2021)）ではGCAMが採用されていた。これは、IAMの経済表現の細かさや地域区分の解像度等を踏まえ、地域によって適切なIAMが異なることが、理由の1つとして考えられる。

NGFSシナリオのIAMが出力する多数の変数うち、ほぼすべての事例に共通して採用されていたのは炭素価格であった。炭素価格は、温室効果ガスの排出に対する費用として、カウンターパーティー単位の信用リスク分析やマクロ経済モデルに組み込まれていた。ただし、IAMが出力する炭素価格は排出削減政策の程度を表す指標であり、現実の政策手段として導入される炭素税や排出権取引とは、価格決定や課税の仕組みが異なる。

一方、NGFSシナリオの変数のうち、炭素価格以外の変数で分析に採用されているものは、多くなかった。ECB (2022)やBoE (2022)では、NGFSシナリオ（第2版）のエネルギー価格（化石燃料価格・電力価格）が、変数として提供されていた。ただし、両事例はいずれも対象金融機関自身がシナリオ分析によるリスク計測を行うボトムアップ型であるため、これらの変数がどれだけ実際のリスク分析に活用されるかは不明である。

なお、多くの事例では、NGFSシナリオの炭素価格を元に、外部のデータとマクロ経済モデルや中央銀行の内部モデルを用いて、マクロ経済変数が計算されていた。NGFSシナリオ（第2版）では、IAMと気候影響モデルの出力をNiGEMと接続することで、一部のマクロ経済変数を提供しているが、このデータを利用したと思われる事例は、本稿の執筆時点ではなかった。

また、分析対象によって、NGFSシナリオに含まれていない変数を独自に追加する例もみられた。NGFSシナリオのIAMは、エネルギー転換部門を除けば、個別技術の発展に関する変数を報告していない。そのため、例えばBoE (2022)では、NGFSシナリオを元に構築されたシナリオとは別に、種類別の自動車のシェアに関する変数が独自に追加されていた。

6 我が国の脱炭素に関連した計画との比較

2020年10月、菅内閣（当時）の所信表明演説において「2050年カーボンニュートラル」が宣言され、2021年4月には「2050年カーボンニュートラル」と整合的な新たな2030年削減目標が設定された。本章では、本報告書の執筆時点における我が国の短期・長期目標を踏まえた計画等と NGFS シナリオを比較することで、NGFS シナリオ（第2版）の課題や、NGFS シナリオを分析上の留意点を考察する。

6.1 第6次エネルギー基本計画に記載された2030年時点のエネルギー供給・需要やCO₂排出量との比較

「2050年カーボンニュートラル」（2020年10月閣議決定）、並びに2050年目標に整合的な中間目標である「2030年度46%削減、更に50%の高みを目指して挑戦を続ける」（2021年4月表明）を踏まえ、2021年11月に2030年に向けたエネルギー供給・需要分野の計画である「第6次エネルギー基本計画」が閣議決定された³⁵。同計画は、「安全性（Safety）を前提とした上で、エネルギーの安定供給（Energy Security）を第一とし、経済効率性の向上（Economic Efficiency）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（Environment）を図る、S+3Eの視点」³⁶を大原則として策定されたものである。本節では、NGFS シナリオ（第2版）のうち、排出削減政策の野心度が異なる3つのシナリオ（Net Zero 2050（温度上昇水準：1.5°C）、Below 2°C（温度上昇水準：1.7°C）、Current Policies（温度上昇水準：3°C+））と、「CO₂排出量」「発電電力量」「最終エネルギー」等について、第6次エネルギー基本計画との比較を行う。

6.1.1 CO₂排出量（エネルギー起源・電力起源・2030年）

第6次エネルギー基本計画では、2021年4月に表明した我が国の2030年目標に合わせて、2030年時点のエネルギー起源のCO₂排出量を2005年比44%減・2013年比45%減となる677Mt-CO₂/年、うち電力由来のCO₂排出量を2005年比50%減・2013年比62%減となる219Mt-CO₂/年としている。

これらの値をNGFSシナリオ（第2版）と比較すると、2030年時点の第6次エネルギー基本計画の値は、Net Zero 2050～Below 2°Cの値の範囲に収まっていることが分かる（図6.1.1(a)(b)）。

³⁵ 第6次エネルギー基本計画が閣議決定されました

(<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html>)（最終アクセス：2022年3月22日）

³⁶ 第6次エネルギー基本計画 p.18 (<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>)（最終アクセス：2022年3月22日）

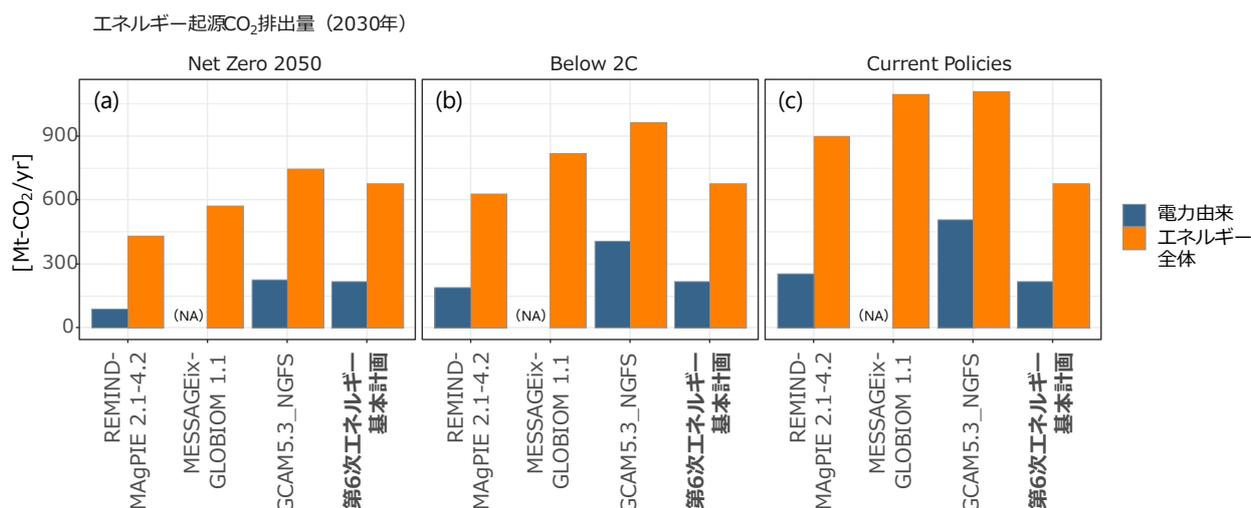


図 6.1.1 第 6 次エネルギー基本計画と NGFS シナリオのエネルギー起源 CO₂ 排出量の比較 (2030 年)

6.1.2 発電電力量・非化石電源比率 (2030 年)

発電電力量については、2013 年時点で 10,240 億 kWh/年 (3.69 EJ/年) であったところ、2030 年時点の発電電力量を 9,340 億 kWh (3.36 EJ/年) としたうえで、再生可能エネルギーと原子力をあわせた非化石電源の比率を 59%程度まで高めることにより、電力由来の CO₂ 排出量を 2013 年比で 62%削減 (2005 年比 50%削減) する絵姿が示された。

2030 年時点の発電電力量をみると、第 6 次エネルギー基本計画の値は NGFS シナリオ (第 2 版) の発電電力量と大きな差がない (図 6.1.2)。

非化石電源比率は、NGFS シナリオ (第 2 版) では IAM 間のばらつきが大きいですが、第 6 次エネルギー基本計画の値は Net Zero 2050~Below 2°C の範囲に収まっている (図 6.1.2 (a)(b))。

電源構成も NGFS シナリオ (第 2 版) では IAM 間のばらつきが大きいですが、第 6 次エネルギー基本計画の電源構成は Net Zero 2050 と Below 2°C におけるバラつきの範囲内に概ね収まっていると言える。より詳細に見ていくと、Net Zero 2050 では 2030 年時点で石炭はほぼゼロに近い水準であるが、第 6 次エネルギー基本計画では一定量の石炭が残っている一方、天然ガスは、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 と GCAM 5.3 よりもかなり小さい。他方、原子力は REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 の水準に近いものの、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 と GCAM 5.3 よりもかなり大きい (図 6.1.2 (a)(b))。

再エネ全体では、第 6 次エネルギー基本計画の発電量は、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 の Net Zero 2050 と Below 2°C、及び GCAM 5.3 の Below 2°C と同程度である。一方、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 及び GCAM 5.3 の Net Zero 2050 と比べるとかなり小さい。ただし、GCAM 5.3 では、4.2 節で述べた通り、日本の電源構成で集光型太陽熱発電 (CSP) が多くを占めている (Net Zero 2050 の 2030 年時点で太陽による発電量 1.23 EJ/年のうち 0.478 EJ/年が CSP、他が太陽光発電)。CSPについては、日射量と土地が限られる我が国において大規模な導入が進むと想定するには無理があり、事実、第 6 次エネルギー基本計画にも CSP は記載されていない。GCAM 5.3 が出力する「太陽」の発電電力量は、我が国については過大評価であると考えられる。

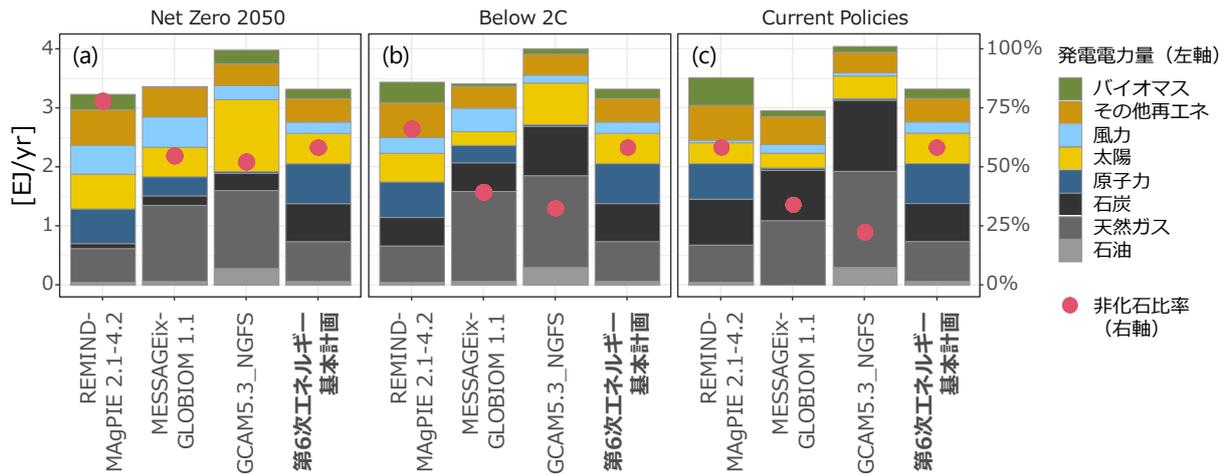


図 6.1.2 第 6 次エネルギー基本計画と NGFS シナリオの発電電力量・非化石電源比率の比較（2030 年）

6.1.3 最終エネルギー（2030 年）

最終エネルギーについては、2013 年に原油換算 363 百万 kL/年（13.9 EJ/年）であったところ、2030 年時点で 280 百万 kL/年（10.7 EJ/年）程度まで減少し、このうち 28%程度を電力、残りの 72%程度を熱・燃料等が占める絵姿が示されている。

これらを NGFS シナリオ（第 2 版）と比較すると、2030 年時点の最終エネルギーの総量及び最終エネルギーに占める電力の割合は、概ね Net Zero 2050～Below 2°C の範囲に収まっていた（図 6.1.3）。

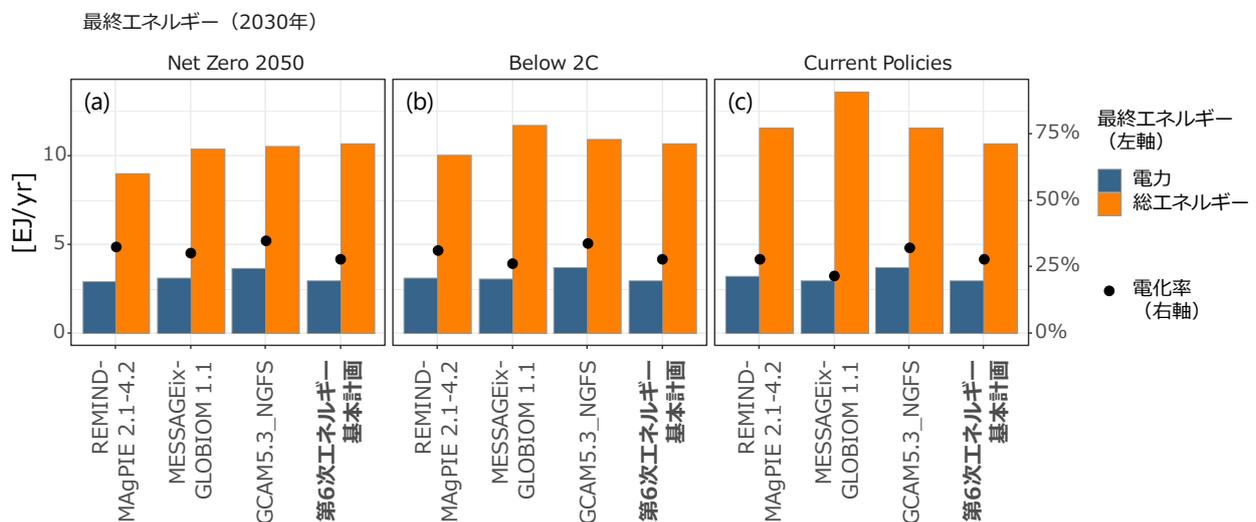


図 6.1.3 第 6 次エネルギー基本計画と NGFS シナリオの最終エネルギーの比較（2030 年）

部門別の最終エネルギーに注目すると、Net Zero 2050 と比較した場合、第 6 次エネルギー基本計画は産業部門の値が多く、運輸部門がやや少ないという特徴が見られた（図 6.1.4 (a)）。

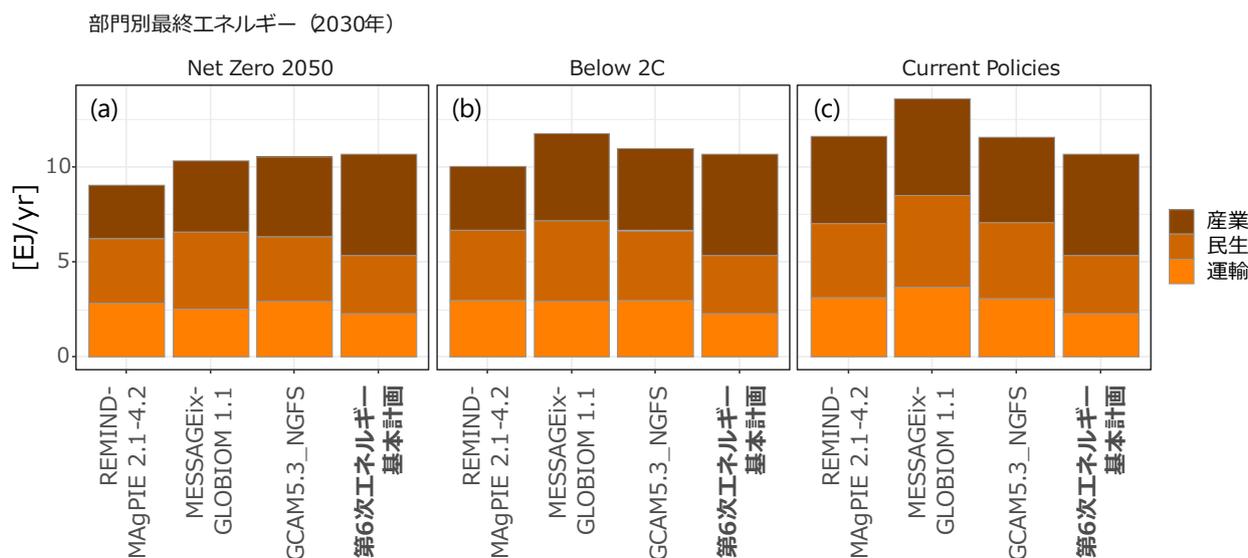


図 6.1.4 第 6 次エネルギー基本計画と NGFS シナリオの部門別最終エネルギーの比較 (2030 年)

この要因の 1 つとして、産業部門の活動量が NGFS シナリオ (第 2 版) と第 6 次エネルギー基本計画で異なることが考えられる。

第 6 次エネルギー基本計画では、2030 年時点の日本の粗鋼生産量は「年間 0.9 億トン±1 千万トン程度」と推計されているが、NGFS シナリオ (第 2 版) では、Net Zero 2050 及び Below 2°C における REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 の 2030 年の粗鋼生産量が第 6 次エネルギー基本計画の推計よりも大幅に低く、Net Zero 2050 では 6,470 万 t/年、Below 2°C で 7,088 万 t/年となっている。他方、GCAM 5.3 の場合、Net Zero 2050 では 8,530 万 t/年、Below 2°C で 8,672 万 t/年となっており、「年間 0.9 億トン±1 千万トン程度」の幅に収まっている (図 6.1.5 (a))³⁷。このように、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 については、粗鋼生産量が産業部門の最終エネルギー消費の違いに影響している。

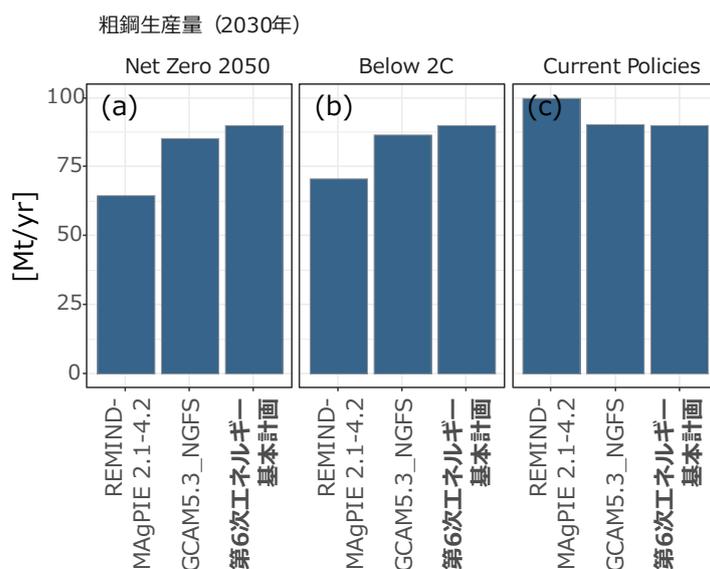


図 6.1.5 第 6 次エネルギー基本計画と NGFS シナリオの粗鋼生産量の比較 (2030 年)

³⁷ MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 は、日本の粗鋼生産量を報告していない。

国・地域間で炭素価格に大きな違いが生じる場合、炭素価格が安い国・地域で生産を増やし、高い国・地域が輸入するという「炭素リーケージ」が生じる可能性がある。ただし、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 の Net Zero 2050 では、世界全体で粗鋼生産量が 2020 年以降に大幅に減少しており（図 6.1.6）、日本の生産量の減少もその影響を受けていると思われる。そのうえで、Current Policies シナリオ比での減少幅を見ると、地域間で大きなバラつきがあり、特に日本はその幅が大きい。減少幅と炭素価格の間の相関は部分的にはあるものの、必ずしも明確ではない（図 6.1.7）。炭素価格の差異によるリーケージと言えるかは、NGFS に報告されていない輸出入量の結果等も踏まえた更なる精査が必要である。

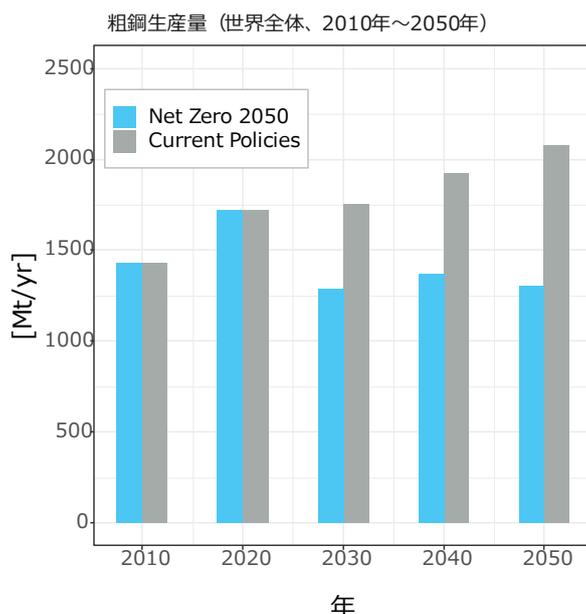


図 6.1.6 REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 の Net Zero 2050 シナリオ及び Current Policies シナリオにおける世界全体の粗鋼生産量の推移 (2010~2050 年)

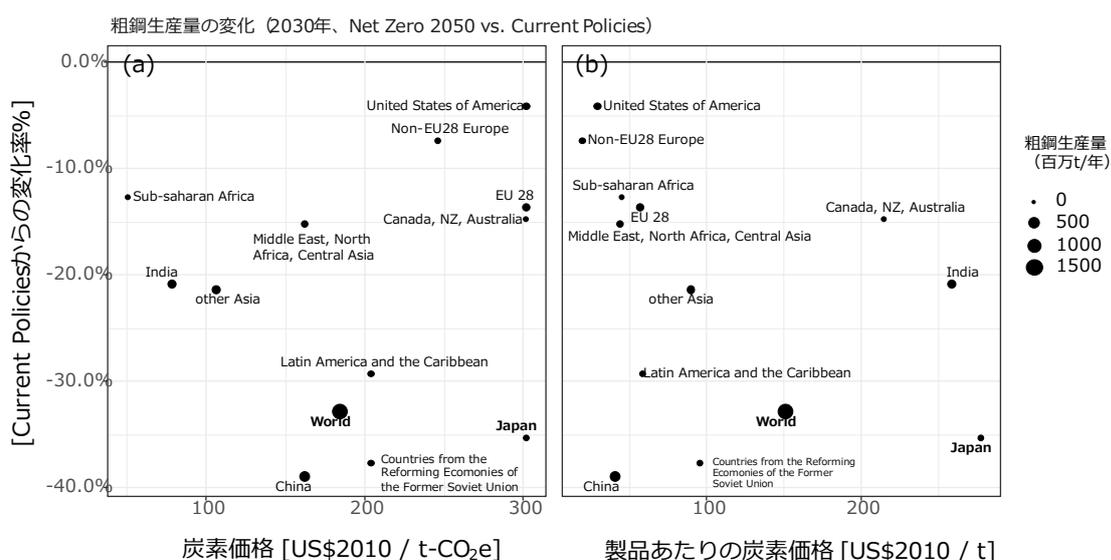


図 6.1.7 REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 の Current Policies に対する Net Zero 2050 の粗鋼生産量の変化に対する炭素価格 (a) 及び製品あたりの炭素価格 (b) の影響

他方、GCAM 5.3 においても、産業部部門のエネルギー消費量が第 6 次エネルギー基本計画よりも低くなっているが、セメント生産量の違いが影響していると見られる。第 6 次エネルギー基本計画では、2030 年時点の日本のセメント生産量は 5,558 万 t/年と想定されているが、NGFS シナリオ（第 2 版）の Net Zero 2050 と Below 2°C における 2030 年のセメント生産量は、それぞれ 3,820 万 t/年、4,428 万 t/年となっている。なお、REMIND-MagPIE 2.1-4.2 では、2030 年のセメント生産量が Net Zero 2050 で 6,531 万 t/年、Below 2°C で 7,043 万 t/年となっており、第 6 次エネルギー基本計画よりかなり大きい（図 6.1.8 (a)(b)）。

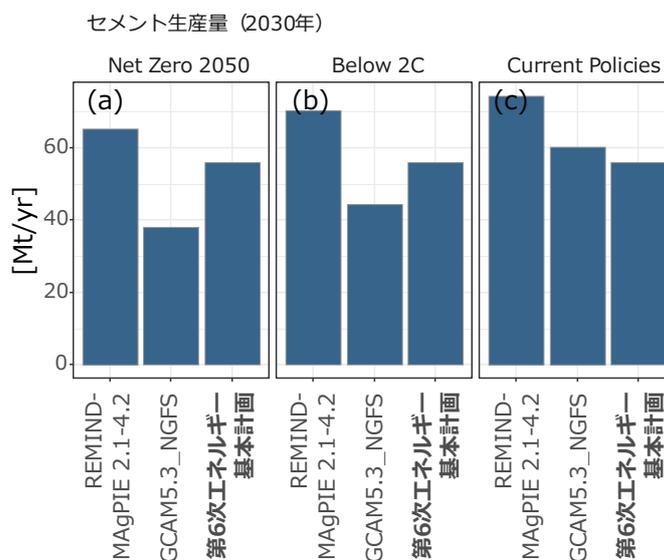


図 6.1.8 第 6 次エネルギー基本計画と NGFS シナリオ (Net Zero 2050・Below 2°C・Current Policies) のセメント生産量の比較 (2030 年)

このように、第 6 次エネルギー基本計画と NGFS シナリオ（第 2 版）を比較した場合、CO₂ 排出量が似たような場合であっても、エネルギーの供給・消費の内訳には部分的に違いがみられる。これは、世界全体の経済・社会全体をモデル化した上で、CO₂ 排出量等の制約条件の下で目的関数が最大または最小となるように多くの変数の計算を行う IAM と、S+3E のバランスを大原則としてエネルギーの需要と供給を個別に積み上げるエネルギー基本計画の間の、アプローチの違いによるものである。そのため、同様の排出量であっても、IAM の計算結果はエネルギー安全保障等の他の目的を阻害する可能性がある一方、エネルギー基本計画の下での排出削減は最小コストとは限らないということになるが、それでもなお、両者の大きな方向性は概ね整合的である。

6.2 主要排出部門における NGFS シナリオの変数

第 6 次エネルギー基本計画のエネルギー需給の見通しでは、エネルギー供給の以外に、エネルギー需要部門（産業・業務・家庭・運輸）におけるエネルギー需要と省エネルギーの想定が置かれている。これらの部門に対応する NGFS シナリオの変数を表 6.2.1 に整理する。

エネルギー供給部門（電力・ガス）には、個別の発電技術ごとに設備容量・発電量・資本コスト・投資額等の変数が利用でき、特定の技術（例えば再生可能エネルギー発電や化石燃料発電）への投資とシナリオの整合性を確認することができる。

一方、産業部門については、エネルギー消費や炭素強度（製品あたりの排出量）の情報が利用できるのは、鉄鋼、セメント、化学のみである。また、これらの部門内での個別技術の内訳に関する情報はない。民生部門・運輸部門についても、最終エネルギー消費量やエネルギー価格の情報が報告されているのみである。つまり、NGFS シナリオ（第 2 版）は、エネルギー供給部門に対して、エネルギー需要部門の解像度が低く、個別の技術に関する示唆は限られている。

表 6.2.1 第6次エネルギー基本計画に関連する NGFS シナリオの変数

区分	部門	NGFS シナリオの変数		
エネルギー供給	電力	設備容量 (GW) 設備容量の増加 (GW/年)	バイオマス (CCS 有/無)、石炭 (CCS 有/無)、ガス (CCS 有/無)、地熱、水力、原子力、石油 (CCS 有/無)、太陽光、太陽熱、風力 (陸上・洋上)、蓄電	
		発電量 (EJ/年)	バイオマス (CCS 有/無)、石炭 (CCS 有/無)、ガス (CCS 有/無)、地熱、水力、原子力、石油 (CCS 有/無)、太陽光、太陽熱、風力 (陸上・洋上)、蓄電ロス、送配電ロス	
		資本コスト (US\$2010/kW)	バイオマス (CCS 有/無)、石炭 (CCS 有/無)、ガス (CCS 有/無)、地熱、水力、原子力、太陽光、太陽熱、風力 (陸上・洋上)	
		炭素回収 (MtCO ₂ e/年)	バイオマス CCS、化石燃料 CCS	
		発電設備への投資額 (billion US\$2010/年)	バイオマス (CCS 有/無)、石炭 (CCS 有/無)、ガス (CCS 有/無)、地熱、水力、原子力、石油 (CCS 有/無)、太陽光、太陽熱、風力 (陸上・洋上)、蓄電、送配電	
		燃料採掘・生産への投資額 (billion US\$2010/年)	バイオ燃料、石炭、ガス、石油、ウラン	
	ガス	設備容量 (GW)	バイオマス (CCS 有/無)、石炭 (CCS 有/無)	
		水素製造設備の容量 (GW)	バイオマス (CCS 有/無)、石炭 (CCS 有/無)、電気分解、ガス (CCS 有/無)	
		供給量 (EJ/年)	バイオガス、石炭ガス、天然ガス	
		資本コスト (US\$2010/kW)	バイオマス (CCS 無)、石炭 (CCS 無)	
		水素製造設備の資本コスト (US\$2010/kW)	バイオマス (CCS 有/無)、石炭 (CCS 有/無)、電気分解、ガス (CCS 有/無)	
		燃料採掘への投資額 (billion US\$2010/年)	ガス	
	産業	鉄鋼	炭素回収 (MtCO ₂ e/年)	産業部門全体
			炭素強度 (MtCO ₂ e/Mt)	全排出量、燃料起因排出
最終エネルギー消費 (EJ/年)			電力、ガス、熱、液体燃料、固体燃料 (バイオ燃料、石炭)	
セメント		炭素回収 (MtCO ₂ e/年)	産業部門全体	
		炭素強度	製造プロセス	
		最終エネルギー消費 (EJ/年)	電力、ガス、熱、水素、液体燃料、固体燃料	
化学		炭素回収 (MtCO ₂ e/年)	産業部門全体	
		最終エネルギー消費 (EJ/年)	アンモニア、電力、ガス、熱、水素、液体燃料、固体燃料	
石油		設備容量 (GW)	バイオマス (CCS 有/無)、石炭 (CCS 有/無)、ガス (CCS 有/無)、石油	
		資本コスト (US\$2010/kW)	バイオマス (CCS 有/無)、石炭 (CCS 有/無)、ガス (CCS 有/無)、石油	
		燃料採掘への投資額 (billion US\$2010/年)	石油	
		燃料精製への投資額 (billion US\$2010/年)	バイオマス、石炭、ガス、石油	
民生		家庭・業務	最終エネルギー消費 (EJ/年)	電力、ガス、熱、液体燃料、固体燃料 (バイオ燃料、石炭)、水素、冷暖房
			エネルギー価格 (US\$2010/GJ)	電力、ガス、熱、液体燃料、固体燃料
運輸	旅客	最終エネルギー消費 (EJ/年)	電力、ガス、水素、液体燃料	
	貨物	最終エネルギー消費 (EJ/年)	電力、ガス、液体燃料	
	-	エネルギー価格 (US\$2010/GJ)	水素、液体燃料	

7 まとめ

7.1 気候関連の金融リスク分析と NGFS シナリオの貢献

NGFS シナリオが整備された背景には、信頼性・比較可能性が高い共通シナリオを提供することにより、各国の中央銀行・金融監督当局及び市中金融機関による気候関連リスク分析を支援することがある(NGFS, 2021b)。

本報告書では、NGFS シナリオ（第 2 版）の主要な変数に着目し、シナリオ・IAM の特徴を世界全体（4.1 節）・日本（4.2 節）・世界の主要地域（4.3 節）ごとに詳細に分析した。その結果、NGFS シナリオ（第 2 版）では、排出削減政策の野心度や将来の技術導入の想定が異なる 6 本のシナリオを設定した上で、それぞれについて将来の CO₂ 排出量、エネルギー供給や部門ごとのエネルギー需要、排出削減技術の導入量の変化等が定量的に示されていることが明らかになった。また、本報告書では分析対象としなかったが、NGFS シナリオ（第 2 版）では、移行リスクに関連する変数を定量化する IAM の出力が、気候モデル・気候影響モデル、さらにマクロ経済モデルに多段階的に接続されることで、これらのモデルの出力が同一のシナリオ内で整合している。

また、7.2 節で述べる点を除けば、NGFS シナリオ（第 2 版）の IAM が出力する主要変数の多くは、現時点の気候科学の成果を元に作成された既存のシナリオとも整合的であることが確認された（4.4 節）。NGFS シナリオ（第 2 版）では、同一のシナリオのナラティブを 3 種類の IAM によってそれぞれ定量化することで、シナリオに幅を持たせ、将来の不確実性に照らして計算結果が妥当な範囲に含まれていることを担保している。また、既存の気候関連のシナリオが整合していることは、将来予測の正確さを保証するわけではない点に留意する必要があるが、NGFS シナリオ（第 2 版）による定量結果には、一定の妥当性を与えるものであると言える。

これらから、NGFS シナリオ（第 2 版）が整備・公表されたことにより、世界の主要地域における移行リスク・物理的リスクの双方が金融機関や金融システムの健全性に与える影響を、同一の前提条件の元で計測することが可能となったと言える。従来、気候科学のリスク分析においては、同程度の排出削減政策の野心度を想定する場合であっても、分析の対象や地域によって異なるシナリオを組み合わせで使用することが一般的であった(TCFD, 2020)。NGFS によって共通シナリオが整備されることにより、気候関連のリスク分析の比較可能性が向上し、中央銀行・金融監督当局による金融リスク分析の質が向上することが期待できる。

また、中央銀行・金融監督当局による NGFS シナリオの利用例を整理・分析した結果、分析に用いるシナリオの種類や変数には、一定の共通性があることが明らかになった（第 5 章）。気候関連の金融リスク分析はまだ新しい分野であり、現時点において確立した分析の手法は存在しない。そのため、NGFS は各国の中央銀行・金融監督当局による事例共有を促進しつつ(NGFS, 2020; NGFS, 2021c)、様々な分析アプローチを想定したシナリオを公表している。今後、中央銀行・金融監督当局による分析のアプローチがどの程度まで収斂するかは分からないが、各国で得られた知見の共有を促進するための土台として NGFS シナリオが重要な役割を果たしてきたと言える。

7.2 我が国における気候関連の金融リスク分析を想定した留意点と提案

第4章では、NGFSシナリオ（第2版）の主な変数について、各シナリオ・IAMの特徴を整理した上で、分析において留意すべき点をいくつか取り上げた。第5章では、中央銀行・金融監督当局による気候関連のストレステストの事例に着目し、金融リスク分析におけるNGFSシナリオの使い方を整理した。さらに第6章では、我が国のエネルギー基本計画との比較を行い、NGFSシナリオ（第2版）の十分性や有用性を検討した。本節では、これらの結果にもとづいて、我が国における気候関連リスク分析を想定した場合に考えられる留意点や、NGFSに対する改善・修正の提案を行う。

7.2.1 炭素価格

NGFSシナリオ（第2版）では、IAMによって計算された炭素価格を用いて、マクロ経済変数への影響が計算される。また、海外の中銀・金融監督当局によるNGFSシナリオの利用例を参照しても、すべての事例でNGFSシナリオのIAMが計算した炭素価格を用いて、移行リスクの計測が行われている。このことから、IAMによって計算される炭素価格は、NGFSシナリオによる移行リスク分析においてもっとも重要な変数であると言える。

NGFSシナリオ（第2版）の野心的な排出削減政策が導入されるシナリオでは、炭素価格は2030年時点で\$96.8/t-CO₂～\$197.7/t-CO₂、2050年には\$486.2/t-CO₂～\$672.7/t-CO₂（いずれもNet Zero 2050の世界平均、US\$2010年換算）まで上昇し、先進国では世界平均よりも上昇幅が大きかった。一方、同一のシナリオであってもIAMによって炭素価格の値には幅があることも明らかになった。これらの炭素価格は、IAM内部で「シャドウプライス」として定義され、基本的に排出削減と炭素価格の時間変化が1対1で対応していると考えられる。

一方、WEO-2021では、カーボンプライシングに関する各国の政策導入・宣言や各シナリオの排出削減の度合いに応じて、外生的に炭素価格が設定されている。Net Zero 2050に相当するシナリオの2050年時点の炭素価格は、地域によって\$160/t-CO₂～\$200/t-CO₂（APS）、\$55/t-CO₂～\$250/t-CO₂（NZE）（いずれもUS\$2020換算³⁸）であり、NGFSシナリオ（第2版）の水準よりはかなり低くなっている。この違いは、両者の間の炭素価格決定の考え方や関連する化石燃料価格や技術コストの違いに起因する。NGFSシナリオ（第2版）のIAMが算出する炭素価格は、理想化（簡略化）されたエネルギー・経済の前提で、所定の排出削減を各IAMで定められた価値評価（最適化、Box 1参照）の下で達成する過程で決まる。一方、WEO-2021のシナリオでは、炭素価格に加えて、排出削減に寄与する炭素価格以外の施策も幅広く考慮されており、炭素価格は最適化計算で導かれる限界削減費用にはなっていない。このように、IAMの定式化の中で排出削減と対応づけられた炭素価格と、炭素価格以外の政策手段も存在する中で設定される炭素価格は異なる性質のものとなり、一般に前者の方が高く、IAMの定式化にも強く依存すると理解される。

移行リスク分析において、IAMの炭素価格を用いる際には、炭素価格以外の施策も排出削減に寄与する現実世界における炭素価格とは性質が異なることに留意する必要がある。

³⁸ デフレーター（例えば <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.DEFL.ZS?locations=US>）でUS\$2020からUS\$2010に換算すると約0.85倍となる。

7.2.2 エネルギー価格

化石燃料（一次エネルギー）

化石燃料（一次エネルギー）については、IAM 間での傾向が異なり、一部で極端な価格の変動が認められた。IAM（NGFS シナリオ（第2版）では、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 と MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 が該当する）によって計算される化石燃料の価格は、長期的な均衡における石油・ガス市場の動学を反映したもので、現実とは異なる仕組みで算出される。この価格算出では、資源供給コスト、燃料需要、気候政策といった要因が、IAM における最適化対象の目的関数を通じて影響する。化石燃料の価格変動の幅が大きいことは、将来の不確実性が大きいことを示しているとも言える。その一方で、化石燃料価格はインフレ率のような重要なマクロ経済変数に影響を与えるため、採掘コストや可採埋蔵量等の前提条件の透明性を高めたいと、変動の要因を検証できるようにすることが有用である。

また、将来のパスの推計に用いるためにモデルに取り込まれている実績データの期間が IAM によって異なるため、直近時点（2020年）の化石燃料価格（特にガス、石油）が IAM 間で大きく異なっており、他の変数の2020年値と比べても、エネルギー価格は IAM 間のばらつきが大きい。そのため、価格の絶対値をモデル間で比較することが難しくなっており（4.1.9 節及び 4.2.9 節を参照）、本報告書では、2020年の値に対する増減率でモデル間比較を行った。金融リスク分析で NGFS のデータを用いる際にも、価格の絶対値ではなく、2020年比の増減率を用いる等の工夫が必要となるかもしれない。また、本来的には、実績データの取り込み期間をそろえ、IAM の基準年（Box 2、表 B.2.1 を参照）を直近の年に設定した上で、その時点の現実の価格との整合性がある程度担保されることが望ましい。

MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 は日本についてはダウンスケーリングの値が報告されているが、エネルギー価格は地域内で同じ値となっている。日本に対するリスク分析を行う際には、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 の値が日本向けの調整がなされていないことに注意する必要がある。

なお、中央銀行・金融監督当局による気候変動ストレステストで採用されている化石燃料の価格は、NGFS シナリオだけでなく、外部データや独自の計算によって決定されていることが伺えた。外部データや独自の計算が別途用いられている原因を踏まえ、IAM 側でその原因に対応できるような改良が行われることが望ましい。

電力価格（二次エネルギー）

電力価格（二次エネルギー）についても、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 では野心的な排出削減政策が導入されるシナリオの一部で、極端な価格上昇とその後の急下降がみられた（4.1.9 節及び 4.2.9 節を参照）。これは、世界全体よりも日本で特に顕著であった。一次エネルギーと同様に、IAM における二次エネルギーの価格も現実とは異なる仕組みで算出されている。REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 の場合、電力の価格は、電力バランスと所得恒等式の変化の関係式を用いて定義されている。所得恒等式には、電源や送配電への投資額や化石燃料の費用等が含まれているが、低炭素電源への投資拡大と価格上昇の時期が一致していることから、関連する設備投資の一時的な増加が影響している可能性がある。他方、MESSAGEix-GLOBIOM 1.1 も野心的な排出削減政策が導入されるシナリオで、日本について電力価格の大幅な上昇が報告されているが（※世界全体の値は報告されていない）、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 のような鋭いピークはなく、シナリオ間での相違はあるものの、2030年から2050年にかけて高止まりしていた。これは価格決定に対する設備投資の影響が、REMIND-MAgPIE 2.1-4.2 ほどには直接的ではないためと考えられるが、MESSAGEix-GLOBIOM

1.1は、エネルギー価格が日本向けにダウンスケーリングされていない点にも注意が必要である。GCAM5.3は、将来の予見性なしに地域・部門別の市場で供給と需要が均衡するように価格を算出する方式を採っており（Box 1）、大きな価格変動は起きにくくなっている。

このように、IAM間で価格決定のメカニズムが異なっており、分析者はIAMが出力する電力価格を使用する際に、このメカニズムの違いに留意する必要がある。

また、化石燃料価格と同様に、2020年という過去時点の価格がIAM間で大きく異なっており、金融リスク分析でNGFSのデータを用いる際にも、価格の絶対値ではなく、2020年比の増減率を用いる等の工夫が必要となるかもしれない。

なお、中央銀行・金融監督当局による事例を参照すると、ECBのSSM Stress Test 2022では、NGFSシナリオ（第2版）を参照し、REMIND-MAGPIE 2.1-4.2が出力する電力価格がそのまま採用されていた（ECB, 2021）。

7.2.3 エネルギー需要部門

NGFSシナリオ（第2版）では、産業部門・民生部門・運輸部門のそれぞれについて、主要なセクターの排出量や生産量等が計算されている。これらの情報は、セクター単位の分析において現状の移行経路とシナリオの整合性を検証する上で、必要となる情報である。ところが、化石燃料の需要やエネルギー供給と比較するとエネルギー需要部門については変数の種類が少なく、個別技術の分解能も低い。

産業部門

NGFSシナリオ（第2版）には、CO₂の主要な排出源である「鉄鋼」「セメント」「化学」といった多排出セクターの情報が存在するが、製品の炭素強度や生産量等、利用できるのはごく一部の変数のみである。

「鉄鋼」を例にすれば、「高炉」「電炉」の内訳や、高炉へのCCS導入量、低排出技術への投資額、輸出入量といった情報は存在しない。産業部門の主要なセクターについては、技術や変数の分解能を向上することにより、分析者がシナリオを元に、移行経路を詳細に検証できるようにできることが望ましい。

また、NGFSシナリオ（第2版）と我が国の政策との比較では、Net Zero 2050では、IAMによる計算結果と第6次エネルギー基本計画の想定の間で、粗鋼生産量やセメント生産量に大きな開きがあった。要因の1つとして、NGFSシナリオにおける炭素価格の影響が考えられるが、NGFSに報告されている数字だけでは検証が困難である。産業部門の主要なセクターについては、生産量（活動量）の算出根拠や妥当性についても、輸出入量も踏まえた検証が必要である。

生産量は、炭素価格と併用されうる国境炭素調整（border carbon adjustment）次第で大きく変動する。現在、EUは域内排出量取引制度（EU ETS）と連動する国境炭素調整の導入を検討しており、今後、IAMの分析においても、現実の動きを踏まえ、国境炭素調整をモデル化することが望ましい。

産業以外の部門

NGFSシナリオ（第2版）では、民生部門・運輸部門でもCO₂排出量やエネルギー需要といった変数が報告されているが、産業部門と同じく、変数の種類は限られ、個別技術の分解能も低い。これらの変数については、IAMで分解能を向上させることも考えられるが、一方で、分析者が外部のデータやモデルを用いて、必要な情報を補足することも検討すべきである。中央銀行・金融監督当局の利用例では、英 BoE

(2021)が新車販売に占める自動車の車種別の割合を補足していた(BoE, 2021)。

IAM は温室効果ガスの排出制約のもとで、経済・社会・技術の変化を統合的に記述するものであるが、モデルの複雑性が増加するほど、計算は困難になる。NGFS は、IAM の改良だけでなく、IAM を補足するアプローチについても指針や事例を示すことが期待される。

7.2.4 新技術や新たな科学的知見の統合

NGFS は定期的にシナリオを更新する予定であり、技術進歩や気候科学の最新の知見が反映させることが期待される。

気候変動の緩和における重要な技術の1つであるが、NGFSシナリオ(第2版)に反映されていないものの1つが、大気中直接CO₂回収・貯留技術(DACCS)である。NGFSシナリオ(第2版)では、CO₂除去技術としてバイオマスを用いるBECCSと植林が含まれているが、これらはいずれも土地利用の制約を受けするため、導入量に限界がある。DACCSは、コストやエネルギー需要の制約があるものの、CO₂排出削減とCO₂除去のバランスを変化させる可能性がある。

また、2021年から2022年にかけて、IPCC第6評価報告書(IPCC AR6)が公表されている。ここでは、最新の気候科学の知見に基づいて、CO₂排出量と温度上昇の関係が更新されている。NGFSシナリオは、可能な限り、これらの最新の科学的知見を統合することが望ましい。

参考文献

- ACPR 2021. *A first assessment of financial risks stemming from climate change: The main results of the 2020 climate pilot exercise*. Banque de France. https://acpr.banque-france.fr/sites/default/files/medias/documents/20210602_as_exercice_pilote_english.pdf.
- BCBS 2021. *Climate-related risk drivers and their transmission channels*. <https://www.bis.org/bcbs/publ/d517.htm>.
- BoC-OFSI 2022. *Using Scenario Analysis to Assess Climate Transition Risk. Final Report of the BoC-OFSI Climate Scenario Analysis Pilot*. <https://www.bankofcanada.ca/wp-content/uploads/2021/11/BoC-OFSI-Using-Scenario-Analysis-to-Assess-Climate-Transition-Risk.pdf>.
- BoE 2021. *Guidance for participants of the 2021 Biennial Exploratory Scenario: Financial risks from climate change*. <https://www.bankofengland.co.uk/-/media/boe/files/stress-testing/2021/the-2021-biennial-exploratory-scenario-on-the-financial-risks-from-climate-change.pdf>.
- BoE 2019. *The 2021 biennial exploratory scenario on the financial risks from climate change*. Bank of England. <https://www.bankofengland.co.uk/paper/2019/biennial-exploratory-scenario-climate-change-discussion-paper>.
- Bolton, P., Déspres, M., Silva, L.A.P. da, Samama, F. and Svartzman, R. 2020. *The green swan: Central banking and financial stability in the age of climate change*. BIS. <https://www.bis.org/publ/othp31.pdf>.
- Chen, Y.-H.H., Ens, E., Gervais, O., Hosseini, H., Johnston, C., Kabaca, S., Molico, M., Paltsev, S., Proulx, A. and Toktamyssov, A. 2022. *Transition Scenarios for Analyzing Climate-Related Financial Risk*. <https://www.bankofcanada.ca/2022/01/staff-discussion-paper-2022-1/>.
- Clarke, L., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, G., Fisher-Vanden, K., Hourcade, J.-C., Krey, V., Kriegler, E., Löschel, A., McCollum, D., Paltsev, S., Rose, S., Shukla, P.R., Tavoni, M., Zwaan, B. van der and Vuuren, D.P. van 2015. *Assessing Transformation Pathways In: O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J. C. Minx, eds. 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, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, pp.413–510.
- Devulder, A. and Lisack, N. 2020. *Carbon Tax in a Production Network: Propagation and Sectoral Incidence*. Banque de France. <https://publications.banque-france.fr/en/carbon-tax-production-network-propagation-and-sectoral-incidence>.
- DNB 2018. *An energy transition risk stress test for the financial system of the Netherlands*. De Nederlandsche Bank. <https://www.dnb.nl/en/publications/publicatieoverzicht/research-publications/occasional-studies/nr-7-2018-an-energy-transition-risk-stress-test-for-the-financial-system-of-the-netherlands/>.
- ECB 2021. *Climate risk stress test - SSM stress test 2022*. https://www.bankingsupervision.europa.eu/ecb/pub/pdf/ssm.climate_risk_stress_test_2021~a4de107198.en.pdf.
- Forster, Huppmann, D., Kriegler, E., Mundaca, L., Smith, C., Rogelj, J. and Séférian, R. 2018. *Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development Supplementary Material*. In: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W.

- Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor and T. Waterfield, eds. *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.*
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_SM_High_Res.pdf.
- FSI 2021. *Stress-testing banks for climate change – a comparison of practices.*
<https://www.bis.org/fsi/publ/insights34.htm>.
- 藤井康政 2018. エネルギー環境経済システム. コロナ社.
- Fujii, Y. and Komiyama, R. 2015. Long-term energy and environmental strategies *In*: J. Ahn, C. Carson and M. Jensen, eds. *Reflections on the Fukushima Daiichi Nuclear Accident*. Springer International Publishing.
- Fujimori, S., Hasegawa, T. and Matsui, T. 2017. AIM/CGE V2.0: basic feature of the model *In*: S. Fujimori, M. Kainuma and T. Matsui, eds. *Post-2020 climate action.*, pp.305–328.
- Gambhir, A., George, M., McJeon, H., Arnell, N.W., Bernie, D., Mittal, S., Köberle, A.C., Lowe, J., Rogelj, J. and Monteith, S. 2021. Near-term transition and longer-term physical climate risks of greenhouse gas emissions pathways. *Nature Climate Change.*, pp.1–9.
- Gourdel, R., Monasterolo, I., Dunz, N., Mazzocchetti, A. and Parisi, L. 2021. Assessing the double materiality of climate risks in the euro area economy and banking sector. *SSRN*.
https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3939895.
- Hosseini, H., Johnston, C., Logan, C., Molico, M., Shen, X. and Tremblay, M.-C. 2022. *Assessing Climate-Related Financial Risk: Guide to Implementation of Methods.*
- IEA 2021a. *World Energy Model Documentation*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/932ea201-0972-4231-8d81-356300e9fc43/WEM_Documentation_WEO2021.pdf.
- IEA 2021b. World Energy Outlook 2021. *World Energy Outlook*.
- 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, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.*
- JU, Y. 2021. UTokyo-mip/JMIP_dataset: JMIP_dataset_2021. <https://zenodo.org/record/4817656#.YjrLaC8RpB0>.
- Kato, E. and Kurosawa, A. 2019. Evaluation of Japanese energy system toward 2050 with TIMES-Japan—deep decarbonization pathways. *Energy Procedia*. 158, pp.4141–4146.
- Matsuo, Y., Yanagisawa, A. and Yamashita, Y. 2013. A global energy outlook to 2035 with strategic considerations for Asia and Middle East energy supply and demand interdependencies. *Energy Strategy Reviews*. 2(1), pp.79–91.
- NGFS 2020. *Guide to climate scenario analysis for central banks and supervisors*. <https://www.ngfs.net/en/guide-climate-scenario-analysis-central-banks-and-supervisors>.
- NGFS 2021a. *NGFS Climate Scenario Database Technical Documentation V2.2*.
https://www.ngfs.net/sites/default/files/ngfs_climate_scenarios_technical_documentation__phase2_june2021.pdf.
- NGFS 2021b. *NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors*. <https://www.ngfs.net/en/ngfs-climate->

scenarios-central-banks-and-supervisors.

NGFS 2021c. *Scenario in Action: A progress report on global supervisory and central bank climate scenario exercises.*

<https://www.ngfs.net/en/scenarios-action-progress-report-global-supervisory-and-central-bank-climate-scenario-exercises>.

Oshiro, K. and Masui, T. 2015. Diffusion of low emission vehicles and their impact on CO2 emission reduction in Japan. *Energy Policy*. 81, pp.215–225.

Reclaim Finance 2021. *NGFS Climate Scenarios: pushing financial players into taking a risky gamble.*

https://reclaimfinance.org/site/wp-content/uploads/2021/08/NGFS_Climate_Scenarios_Analysis_EN.pdf.

Shiraki, H., Sugiyama, M., Matsuo, Y., Komiyama, R., Fujimori, S., Kato, E., Oshiro, K. and Silva, D.H. 2021. The role of renewables in the Japanese power sector: implications from the EMF35 JMIP. *Sustainability Science*. 16(2), pp.375–392.

Standard Chartered 2021. *Standard Chartered Net zero approach: Methodological white paper.* <https://av.sc.com/corp-en/content/docs/SC-net-zero-whitepaper.pdf>.

Sugiyama, M., Fujimori, S., Wada, K., Oshiro, K., Komiyama, R., Herran, D.S., Matsuo, Y., Shiraki, H. and Ju, Y. 2021. EMF 35 JMIP study for Japan’s long-term climate and energy policy: scenario designs and key findings. *Sustainability Science*.

Sugiyama, M., Fujimori, S., Wada, K. and Weyant, J. 2021. Introduction to the special feature on energy scenarios for long-term climate change mitigation in Japan. *Sustainability Science*. 16(2), pp.347–353.

TCFD 2017. *Final Report: Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures.*

<https://www.fsb-tcf.org/recommendations/>.

TCFD 2020. *Guidance on Scenario Analysis for Non-Financial Companies.*

https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2020/09/2020-TCFD_Guidance-Scenario-Analysis-Guidance.pdf.

TCFD 2021. *Task Force on Climate-related Financial Disclosures. 2021 Status Report.*

<https://www.fsb.org/2021/10/2021-status-report-task-force-on-climate-related-financial-disclosures/>

UNEP 2021. *Emissions Gap Report 2021.* <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021>.

UNEP-FI 2021. *UNEP FI’s Comprehensive Good Practice Guide to Climate Stress Testing.*

<https://www.unepfi.org/publications/good-practice-guide-to-climate-stress-testing/>.

付録 用語集

NGFS シナリオの技術文書(NGFS, 2021a)の用語集を和訳して、適宜訳注を記入した。

Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)

農業、林業及びその他土地利用

温室効果ガス (GHG) の除去の強化、並びに土地及び家畜の管理による排出削減の両方で緩和ポテンシャルが引き出される特徴を有する部門。

Bioenergy

バイオエネルギー

あらゆる形態のバイオマス又はその代謝副産物から得られるエネルギー。

Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)

炭素回収・貯留付きバイオエネルギー

バイオエネルギー施設に適用される二酸化炭素回収・貯留 (CCS) 技術。BECCS サプライチェーンの総排出量によっては、二酸化炭素 (CO₂) を大気から除去できる。NGFS 移行シナリオの作成に使われた統合評価モデルは、BECCS 技術が大気中から二酸化炭素を除去することを想定している。

Biofuel

バイオ燃料

バイオマスから製造される一般に液状の燃料。現在のところ、サトウキビやトウモロコシを原料とするバイオエタノール、キャノーラや大豆を原料とするバイオディーゼル、製紙工程で発生する黒液などがある。

Biomass

バイオマス

生きているまたは最近死んだ有機物。

訳注：地層に埋め込まれた有機物は除かれる。

Carbon Budget

カーボンバジェット

文献では次の三つの概念を指す場合がある。

(1) 地球レベルでの炭素循環におけるソース・シンクの評価。化石燃料とセメントによる排出、土地利用変化による排出、海洋と陸域の CO₂ シンク、及びその結果としての大気 CO₂ 増加率に関する証拠を統合して評価され、地球規模カーボンバジェットと呼ばれる。

(2) 地球表面温度の基準期間からの上昇を所定の水準に抑えると見込まれる世界全体の累積二酸化炭素排出量。他の温室効果ガス及び気候強制因子の地球表面温度への寄与を考慮して推定される。

(3) (2)で定義されたカーボンバジェットの、公平性、コスト又は効率性を考慮した、地域、国家又は準国家レベルへの配分。

訳注：carbon=炭素、budget=予算、と訳出されることもある。

(1)は気候科学の分野で従来から言及されてきた専門的な用法で、一般的には緩和策の文脈で(2)や(3)の意味に使われる。特に(2)の用法は、最近では、2°Cや1.5°Cなどの目標とする温度水準に整合的な累積CO₂排出量の上限として、政策関連の文書で言及されるようになった。この背景には、気候の科学的な理解が進んで、温度上昇と累積CO₂排出量が近似的に比例関係にあることが明らかになったことがある。この関係は、換算係数に依存するGHG排出量には成立しない。

Carbon Capture and Storage (CCS)

炭素回収・貯留

産業及びエネルギー関連の排出源からの比較的純粋な二酸化炭素(CO₂)を分離(回収)、調整、圧縮し、大気から長期的に隔離する貯蔵場所に輸送するプロセス。

Carbon dioxide (CO₂)

二酸化炭素

天然に存在するガスの一つで、化石燃料(石油、ガス、石炭など)の燃焼、バイオマスの燃焼、土地利用の変化(LUC)及び工業プロセス(セメント生産など)の副産物でもある。地球の放射収支に影響を与える主要な人為起源の温室効果ガス(GHG)である。他の温室効果ガスを計量する際の基準ガスであり、地球温暖化係数(GWP)は1となる。

Carbon Dioxide Removal (CDR)

二酸化炭素除去

大気中からCO₂を除去し、地質、陸上又は海洋のリザーバ(貯蔵庫)、あるいは製品に、長期的に貯留する人為的な活動。これには、既存の及び潜在的な生物学的又は地球化学的なシンクの人為的強化、及び直接空気回収・貯留が含まれるが、人間活動に直接起因しない自然のCO₂吸収は除外される。

Carbon price (also emissions price)

炭素価格(排出価格も同様)

二酸化炭素(CO₂)又はCO₂等価量の排出を回避又は放出するための価格。炭素税の税率や排出権の価格を指すこともある。緩和の経済的コストの評価に使われる多くのモデルで、炭素価格は緩和政策における努力の度合いを表す代理指標として使われる。

Global Change Assessment Model (GCAM)

地球環境変動評価モデル

人間・地球結合系のダイナミクスと地球規模変化に対する系の応答を探索するための統合的なツール。

<http://www.globalchange.umd.edu/gcam>

訳注：専ら略称で表記され、元の名称はほとんど参照されない。

Global climate model (also referred to as general circulation model) (GCM)

全球気候モデル（大循環モデルとも呼ばれる）

気候システムの数値的表現。システム構成要素の物理的、化学的及び生物学的特性、それらの相互作用並びにフィードバック過程に基づき、システムの既知の特性を考慮して表現される。気候システムは、複雑さの異なる様々なモデルによって表現できる。すなわち、ある構成要素又は構成要素の組み合わせに対して、空間次元の数、物理的・化学的・生物的過程が明示的に表現される程度、又は経験的パラメータ化を含む度合いなどの面で、幅広いモデルが順序づけられ又は階層化される。モデルは化学と生物の相互作用を含む複雑化に向けて発展している。気候モデルは、気候の研究及びシミュレーションのための研究ツールとして、並びに月、季節及び年々の気候予測などの現業目的に適用されている。

Global mean surface temperature (GMST、GMT)

世界平均気温

陸上と海氷域の地表付近の気温及び海氷のない海域の海面水温の推定された世界平均。通常、特定の基準期間の値からの差として表される。GMST の変化を推定する場合、陸と海の両方の地表付近の気温も使われる。

訳注：1.5 度のような 0.1 度単位の温度目標が関心となり、最近では、海洋域の扱い（気温か水温か）で温暖化の度合いに差があることが認識されるようになった。両者を使い分ける用語もあるが、ここでは特に区別せず「世界平均気温」とする。

Global warming

地球温暖化

30 年間、または特定の年や 10 年を中心とした 30 年間で平均した世界平均気温（GMST）の推定上昇値。特に指定しない限り、工業化以前の水準を基準に表す。過去と将来の年にもわたる 30 年間については、現在の数十年規模の温暖化傾向が継続すると仮定する。

訳注：一般には、CO₂排出などによる人為的な温暖化傾向及び関連する変化を指すが、ここでは（IPCC 評価報告書と同様に）、基準期間からの自然変動を除いた（30 年平均による）世界平均気温の上昇量に限定される。

Greenhouse gases (GHG)

温室効果ガス

大気の天然及び人為的ガス成分で、地球表面、大気及び雲から放射される地球放射のうち、特定の波長の放射を吸収・放出する性質があり、温室効果をもたらす。地球大気的主要な GHG は、水蒸気（H₂O）、二酸化炭素（CO₂）、一酸化二窒素（N₂O）、メタン（CH₄）及びオゾン（O₃）。さらに、ハロカーボン及び塩素・臭素を含む物質などの、完全に人為的に作られた GHG も多数存在し、これらはモントリオール議定

書が扱う。CO₂、N₂O、CH₄に加えて、六フッ化硫黄（SF₆）、ハイドロフルオロカーボン（HFCs）、パーフルオロカーボン（PFCs）のGHGは、京都議定書が扱う。

Earth System Grid Federation (ESGF)

地球システムグリッド連合

気候モデル出力と観測データの管理、普及及び分析のためのソフトウェアインフラを開発、展開及び維持するピアツーピアのエンタープライズシステム。地球システム科学の進歩の促進を主な目的とする、複数機関の間での国際的な取り組み。

<https://esgf.llnl.gov>

訳注：地球システムは気候システムと同様であるが、気候の要素に炭素循環などの要素を取り入れた、より包括的な地球環境のシステムを指す。数値表現としての地球システムモデルは、炭素循環などを含むモデルを指すが、その区分によらず広く気候モデルを指すこともある。ESGFの名称は後者の場合に当たる。

Energy

エネルギー

仕事又は熱の供給量。エネルギーは様々な種類に分類され、ある場所から別の場所に流れたり、ある種類から別の種類に変換されると、人間の役に立つようになる。天然資源（石炭、原油、天然ガス、ウランなど）に含まれ、人為的な変換を受けていないエネルギーは、一次エネルギー（エネルギー源）と呼ばれる。一次エネルギーは、不純物除去（天然ガス）、精製（石油製品中の石油）又は電気や熱への転換により、二次エネルギーに変換される。二次エネルギーが需要端の設備に届けられると最終エネルギー（コンセントの電気など）と呼ばれ、そこで利用可能なエネルギー（光など）になる。太陽は毎日、降雨、風、放射などとして大量のエネルギーを供給している。その一部はバイオマスや河川に蓄えられ、人間によって集積される。日照、換気、環境熱など、直接利用されるものもある。再生可能エネルギーとは、自然環境に存在する継続的又は反復的なエネルギーの流れから得られるもので、太陽エネルギー、水力、風力、潮汐・波浪及び地熱などの非炭素技術や、バイオマスなどのカーボンニュートラルな技術が含まれる。

Integrated Assessment Model (IAM)

統合評価モデル

複数領域の知見を一つの枠組みに統合したモデル。当該領域にわたる問題を統合的に評価するための主要なツールの一つ。

気候変動の緩和を評価する統合評価モデルには、エネルギー、土地利用及び土地利用変化などの経済の複数部門、部門間の相互作用、単一の経済全体、温室効果ガスの排出量と吸収量、簡略化された気候システム、などの表現が含まれる。この種のモデルは、経済・社会・技術の発展と気候システムの変化との関連性を評価するのに使われる。

これとは別に、気候変動の影響に関連する費用の表現をさらに含むが、経済システムの表現の複雑度を落した統合評価モデルがある。この種のモデルは、費用・便益の枠組みで影響と緩和の評価に使うことがで

き、炭素の社会的費用の推定に使われている。

訳注：モデルは問題の対象を数理的な表現で定式化したものを指す。

International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

国際応用システム分析研究所

一国や一学問分野では解決できないような大規模又は複雑な問題を、政策指向で研究する独立した国際研究機関。このような問題には、気候変動、エネルギー安全保障、高齢化、持続可能な開発といった、全人類の将来に影響を与える差し迫った懸念などがある。

<https://iiasa.ac.at>

Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP)

部門間影響モデル相互比較プロジェクト

影響を受ける部門や空間規模の全てにわたって、気候変動の影響を一貫して予測する枠組みを提供するモデル間相互比較プロジェクト。気候影響モデル開発者の国際的なネットワークが、異なる気候変動シナリオの下での世界の包括的で一貫した描像に貢献している。

<https://www.isimip.org>

訳注：モデル間相互比較プロジェクトは一般にその頭文字をとって *MIP* と呼ばれる。比較対象の異なる様々なプロジェクトがあり、*○○MIP* という名称がつけられることが多い。

Methane (CH₄)

メタン

京都議定書で削減対象とされた温室効果ガス (GHG) 6 種の一つ。天然ガスの主成分であり、全ての炭化水素燃料に関連する。畜産と農業の結果として大きな排出があり、それらの管理は主要な緩和策の一例。

Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change (MAGICC)

温室効果ガス起因の気候変動の評価のためのモデル

簡易気候モデルの名称。

<http://www.magicc.org>

訳注：専ら略称で表記され、元の名称はほとんど参照されない。

過去の IPCC 評価報告書で最も頻繁に使われ、排出シナリオと世界平均気温の関係を定量化する事実上標準の方法となっている。最新版は MAGICC7 だが、NGFS シナリオ第 2 版では MAGICC6 が使われている。

Model of Agricultural Production and its Impacts on the Environment (MAgPIE)

農業生産とその環境負荷のモデル

PIK（ポツダム気候影響研究研究所）の統合評価モデル枠組み REMIND-MAgPIE を構成する土地利用システム。

<https://www.pik-potsdam.de/research/projects/activities/land-use-modelling/magpie/magpie-2013-model-of-agricultural-production-and-its-impact-on-the-environment>

訳注：専ら略称で表記され、元の名称はほとんど参照されない。

Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact (MESSAGE)

エネルギー供給戦略代替とその一般的環境影響に関するモデル

IIASA の統合評価モデル枠組み MESSAGEix-GLOBIOM を構成するエネルギーシステム・モジュール。ここでは MESSAGE がモデル全体の略称として使われる。

<https://message.iiasa.ac.at/projects/global/en/latest>

訳注：専ら略称で表記され、元の名称はほとんど参照されない。

Nationally determined contribution (NDC)

国が決定する貢献

国連気候変動枠組条約（UNFCCC）の下で、パリ協定に参加した国が自国の排出量を削減する計画の概要を示す用語。各国の NDC の中には、低炭素の道筋を採用し、気候レジリエンスを高めるために、どのように気候変動の影響に適応し、どんな支援が他国から必要か、あるいは他国に提供するか、に言及されるものもある。

Net zero CO2 emissions

ネットゼロ CO2 排出

人間活動の結果、大気中に排出された CO₂ の他に、それと同量の CO₂ が大気中から除去された場合に達成される状態。大気に排出された量より多くが除去されると、CO₂ のネット排出量は負になる（すなわち、ネットネガティブ CO₂ 排出）。

複数の温室効果ガスが含まれる場合、負の排出量の定量化は、異なるガスの排出量を比較するための気候指標（global warming potential、global temperature change potential など）やその時間範囲に依存する。

訳注：複数の温室効果ガス排出量の定量化が気候指標に依存するのは、負排出量の場合に限らない。通常使われる気候指標は global warming potential（地球温暖化係数、略称 GWP）の時間範囲を 100 年としたもの（GWP-100）。

NGFS Scenario Explorer (NGFS SE)

NGFS シナリオ・エクスプローラ

シナリオの結果と過去の参照データを閲覧するためのウェブベースのユーザーインターフェイス。IIASA がホスト。

The NGFS Scenario Explorer is a web-based user interface for scenario results and historical reference data and is hosted by IIASA.

<http://data.ene.iiasa.ac.at/ngfs>.

訳注：IPCC 報告書向けシナリオデータベースなどの他のプロダクトについても、同様の仕組みが IIASA から提供されている。

Nitrous oxide (N₂O)

一酸化二窒素

京都議定書で削減対象とされた温室効果ガス (GHG) 6 種の一つ。N₂O の主な人為発生源は農業 (土壌及び家畜排泄物管理) であるが、下水処理、化石燃料の燃焼、化学工業プロセスからの寄与も大きい。N₂O は、土壌や水中の様々な生物学的発生源、特に湿潤熱帯林の微生物作用からも、自然に生成される。

Pathway

経路

以下のように二つの異なる意味で使われる。

NGFS シナリオの一つ (現行政策 (Current policies)) は(1)の厳密な意味では経路ではないが、ここでは、「移行経路 (Transition pathways)」という用語を、「NGFS シナリオ」という用語と明確に区別して、(NGFS の) 移行シナリオ (the transition scenarios) を指すのに用いる。

(1) 目標 (goal) 指向のシナリオ：将来の目標に向けた自然及び/又は人間システムの時間発展。経路の概念は、潜在的な将来についての定量的・定性的なシナリオやナラティブのセットから、望ましい社会的目標を達成するための解決策志向の意思決定プロセスまで多岐にわたる。シナリオには、ベースラインシナリオのように目標 (target) に焦点を当てないものもあるため、経路はシナリオの部分集合に適用される用語となる。

経路と言及する場合は、典型的には、生物物理学的、技術経済的及び/又は社会行動学的な軌道に焦点を当てており、様々な規模にわたる多様な動学 (dynamics)、目標 (goals) 及び行動主体 (actors) が関係する。

(2) あるシナリオの特定の側面 (又は変数) の軌跡。例えば、RCP の温室効果ガス濃度の推移など。これは、「RCP 8.5」がその基となるベースラインシナリオも指すのに使われる場合のように、混乱を招く可能性がある。ベースラインシナリオは(1)の意味での経路ではない。

Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) , Member of the Leibniz Association

ポツダム気候影響研究所、ライプニッツ協会会員

ドイツ・ポツダムにある公的研究機関。

<http://www.pik-potsdam.de>

Pre-industrial

工業化前 (産業革命前)

1750 年頃の大規模産業活動の開始に先立つ数世紀。工業化前の世界平均気温（GMST）を近似するために、1850-1900 年の基準期間を用いる。

訳注：1850 年以前は世界平均気温を算出するのに十分な観測データがないこと、19 世紀後半は気温変動を伴う火山噴火の影響が比較的小さいことから、最近の IPCC 評価報告書ではこの期間が工業化前の代わりに使われている。

Primary energy accounting

一次エネルギー計算法

エネルギー分析にはいくつかの計算法が用いられ、それによって一次エネルギー使用量の推定値が異なる。国連統計局や IPCC 報告書で使われる直接等価法、OECD、IEA、Eurostat で使われる物理的エネルギー含有量法、BP や米国 EIA で使われる代替法の三つが主に用いられている。

直接等価法では、非燃焼エネルギー源から供給される二次エネルギー1 単位を一次エネルギー1 単位として、つまり電気・熱 1 kWh が $1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ}$ の一次エネルギーとして計上される。

訳注：NGFS シナリオでは直接等価法（direct equivalent）が採用されている（変数定義の Primary Energy の項目 <https://data.ene.iiasa.ac.at/ngfs/#/docs>）。日本のエネルギー統計では、非燃焼エネルギー源による発電電力量が、火力発電の平均熱効率の実績値（約 40%）を用いて一次エネルギーに換算される。熱効率が 40% の場合は $1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ} / 0.4 = 9.0 \text{ MJ}$ となる。ただし、IEA（国際エネルギー機関）のエネルギーバランス表に示される日本の一次エネルギーは、原子力は 33%、地熱は 10%、水力、太陽光、風力は 100% の熱効率で換算されている。

参考：https://www.enecho.meti.go.jp/appli/public_offer/2020/data/20210215_003_04.pdf

Regional Model of Investments and Development (REMIND)

投資と開発の地域モデル

PIK の統合評価モデル枠組み REMIND-MAgPIE のエネルギーシステム要素。ここでは REMIND がモデル全体の略称として使われる。

<https://www.pik-potsdam.de/research/transformation-pathways/models/remind>

訳注：専ら略称で表記され、元の名称はほとんど参照されない。

Representative Concentration Pathway (RCP)

代表濃度経路

温室効果ガス（GHGs）並びにエアロゾルと化学活性ガスに土地利用・土地被覆を加えたフルセットの排出量と濃度の時系列を含むシナリオ（Moss et al., 2010）。代表という単語は、各 RCP が、特定の放射強制力の特徴をもたらす多くの可能なシナリオの一つのみを提供していることを意味する。経路という単語は、長期的な濃度水準だけでなく、その結果に至るまでに経過した道筋にも関心があることを強調している（Moss et al., 2010）。RCP は、通常、濃度経路の 2100 年までが参照され、その部分に対して、統合評価モデルによって対応する排出シナリオが作成された。

Scenario

シナリオ

重要な駆動力（技術変化のスピードや価格など）と相互の関係についての首尾一貫した整合的な仮定の下で、将来がどのように発展するか妥当性をもって記述したもの。シナリオは予言（predictions）でも予測（forecasts）でもないが、発展と行動について含意されることの見解を提供するのに使われる。

Shared Socioeconomic Pathway (SSP)

共有社会経済経路

RCPを補完するために開発された、適応と緩和の社会経済的な困難度が異なる経路（Kriegler et al., 2012; O'Neill et al., 2014）。5通りのナラティブに基づき、気候政策の介入がない場合の代替的な社会経済の将来を記述したもので、持続可能な開発（SSP1）、地域間競争（SSP3）、不平等（SSP4）、化石燃料による開発（SSP5）、及び中道的な開発（SSP2）から構成される（O'Neill et al., 2017; Riahi et al., 2017）。SSPに基づく社会経済シナリオと、代表濃度経路（RCP）に基づく気候予測の組み合わせで、気候影響と政策分析のための統合的な枠組みが提供される。

訳注：SSPは、シナリオ作りの枠組み、ナラティブ（定性的な記述）、及び定量化されたシナリオを指す場合があり、文脈によって意味合いが異なる。

NGFSシナリオは中道的なSSP2に基づく。シナリオ作成に使われたIAMの前提条件にSSP2のナラティブが反映され、IAMの計算で参照する人口・GDPに、SSP2ナラティブを基に定量化されたシナリオデータが使われた。

SSPは、IAMC（Integrated Assessment Modeling Consortium）と呼ばれるIAMに関する研究コミュニティの取り組みで作成され、気候変動問題を扱うモデリング研究の3分野（気候モデル、影響評価モデル、統合評価モデル）で共通に使われている。

Sustainable Development Goals (SDGs)

持続可能開発目標

国連が参加型プロセスを通じて策定し、持続可能な開発のための2030アジェンダに記載された、全ての国の開発のための世界的な17の目標。貧困と飢餓の撲滅、健康と福祉、教育、男女平等、清潔な水とエネルギー及び人間らしい仕事の確保、レジリエントで持続可能なインフラ、都市及び消費の構築と確保、不平等の削減、土地と水の生態系の保護、平和、正義及びパートナーシップの推進、気候変動に対する緊急行動などが含まれる。