

ネット・ゼロ排出とその達成に向けた課題

(一財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 地球環境グループ
加藤悦史

本発表は、環境再生保全機構の環境研究総合推進費（2-1704）「日本における長期地球温暖化対策経路の複数モデルを用いた評価と不確実性の分析」、および、カーボンリサイクルファンドの2020年度研究助成活動「正味ゼロ排出に向けたカーボンリサイクル技術イノベーションシナリオ分析」の成果の一部を含む

私について

- エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 副部長 主管研究員
- 学位
 - 博士 (地球環境科学) 北海道大学
- 専門分野
 - 地球レベルの炭素循環、地球システムモデリング
 - IPCC WG1 AR5 Carbon and Other Biogeochemical Cycles
 - Global Carbon Budget
 - IPCC WG3 AR5 Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)
 - エネルギーシステムモデリング
 - EMF-33 バイオエネルギー分析, EMF-35 JMIP 日本のエネルギーシステム分析
 - GRAPE, TIMES-Japan モデルによるエネルギー需給分析
 - ネガティブエミッション技術
 - Associate Editor for Frontiers in Climate, Negative Emission Technologies
- <https://scholar.google.co.jp/citations?user=WC0cTaMAAAAJ>

本日の内容

- ネット・ゼロ排出*の必要性和関心の高まり
- ネット・ゼロ排出への移行における課題
 - 世界全体でみたエネルギーシステムの課題
 - 日本のエネルギーシステム分析からみた課題とCRFでの研究
 - カーボンオフセットの課題
- まとめ

*net-zero emissions、排出量正味ゼロ、排出量実質ゼロ、などとも呼ばれるが、本発表ではネット・ゼロ排出を主に利用

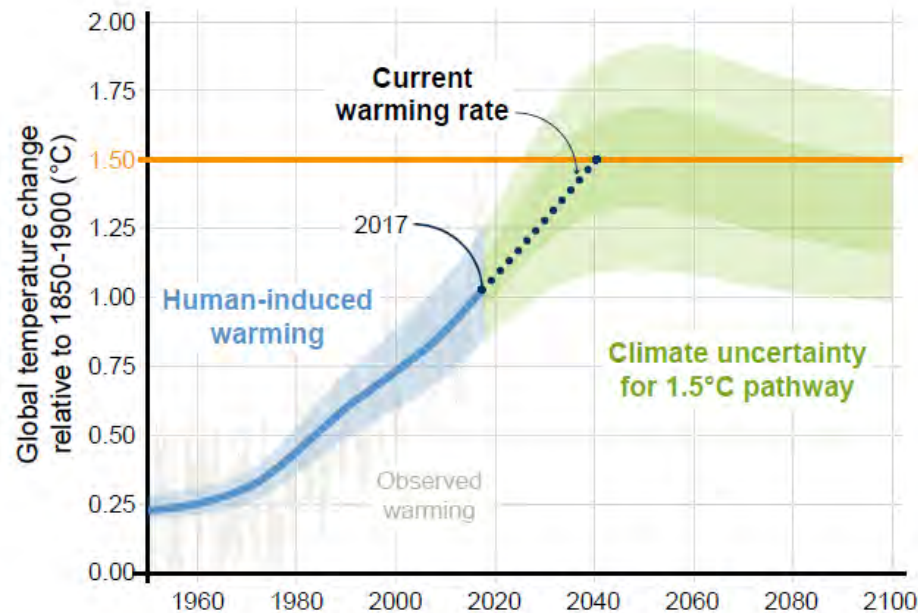
ネット・ゼロ排出の必要性和関心の高まり

パリ協定の気温上昇抑制目標に整合するシステムへの移行が求められている

FAQ 1.2 (continued)

FAQ1.2:How close are we to 1.5°C?

Human-induced warming reached approximately 1°C above pre-industrial levels in 2017

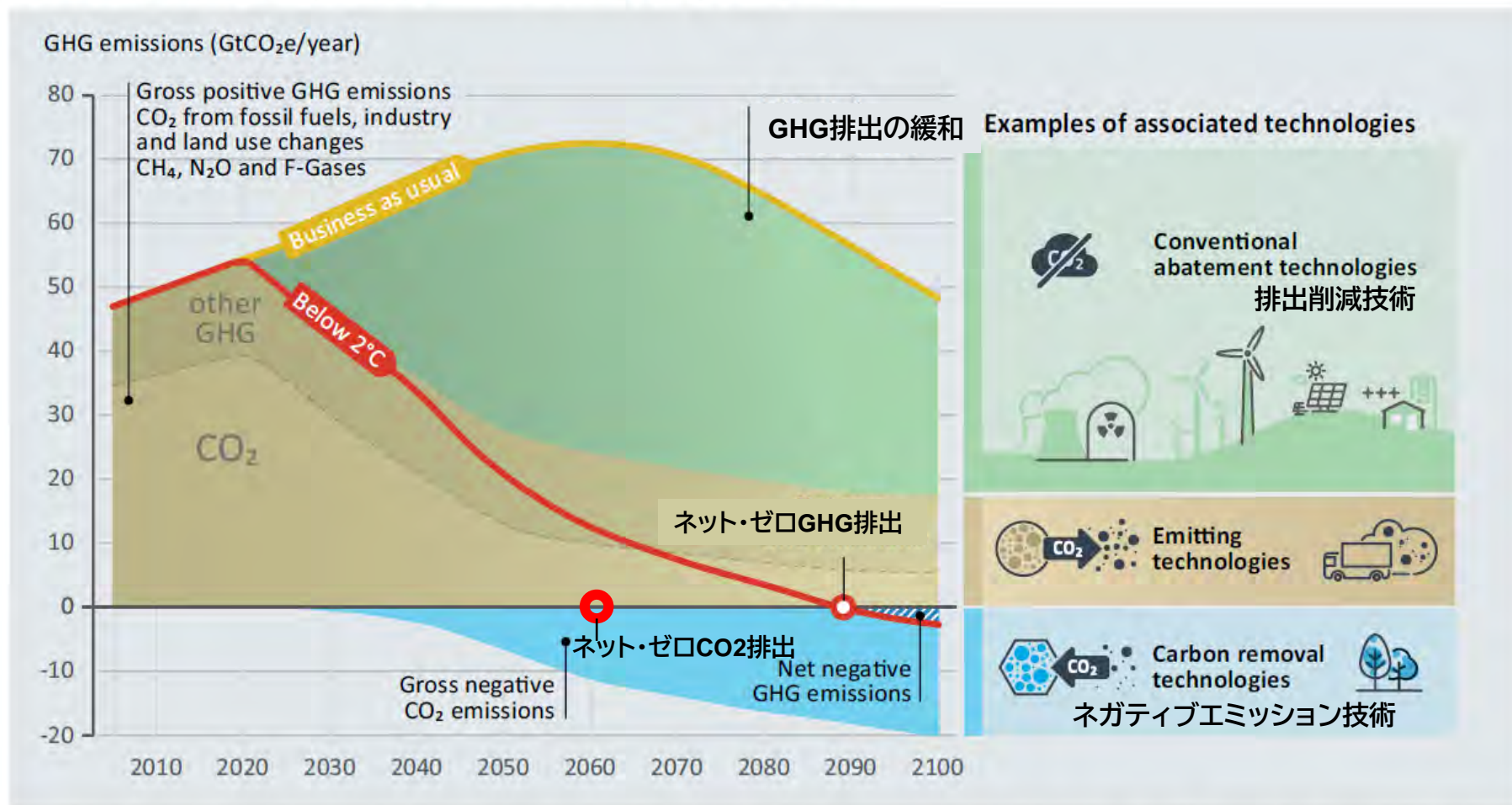


FAQ 1.2, Figure 1 | Human-induced warming reached approximately 1°C above pre-industrial levels in 2017. At the present rate, global temperatures would reach 1.5°C around 2040. Stylized 1.5°C pathway shown here involves emission reductions beginning immediately, and CO₂ emissions reaching zero by 2055.

IPCC (2018)

GHG排出全体でみた2°C目標の経路とギャップ (UNEP 2017)

Figure 7.2: The role of carbon dioxide removal in climate change mitigation.



Note: This figure shows emission reductions from conventional mitigation technologies combined with carbon dioxide removal. This exemplary scenario is consistent with an at least 66 percent chance of keeping warming below 2°C relative to pre-industrial levels. Emission reductions are shown against a business-as-usual scenario without any additional climate policies. Global net emissions levels turn to net negative towards the very end of the century, but carbon dioxide removal is already being deployed much earlier. Some residual greenhouse gas emissions remain at the end of the century, as they are too difficult to mitigate in the scenario. Note that the scenario used is different from the scenarios used in Chapter 3, which leads to small variations in emission levels and timing of negative emissions.

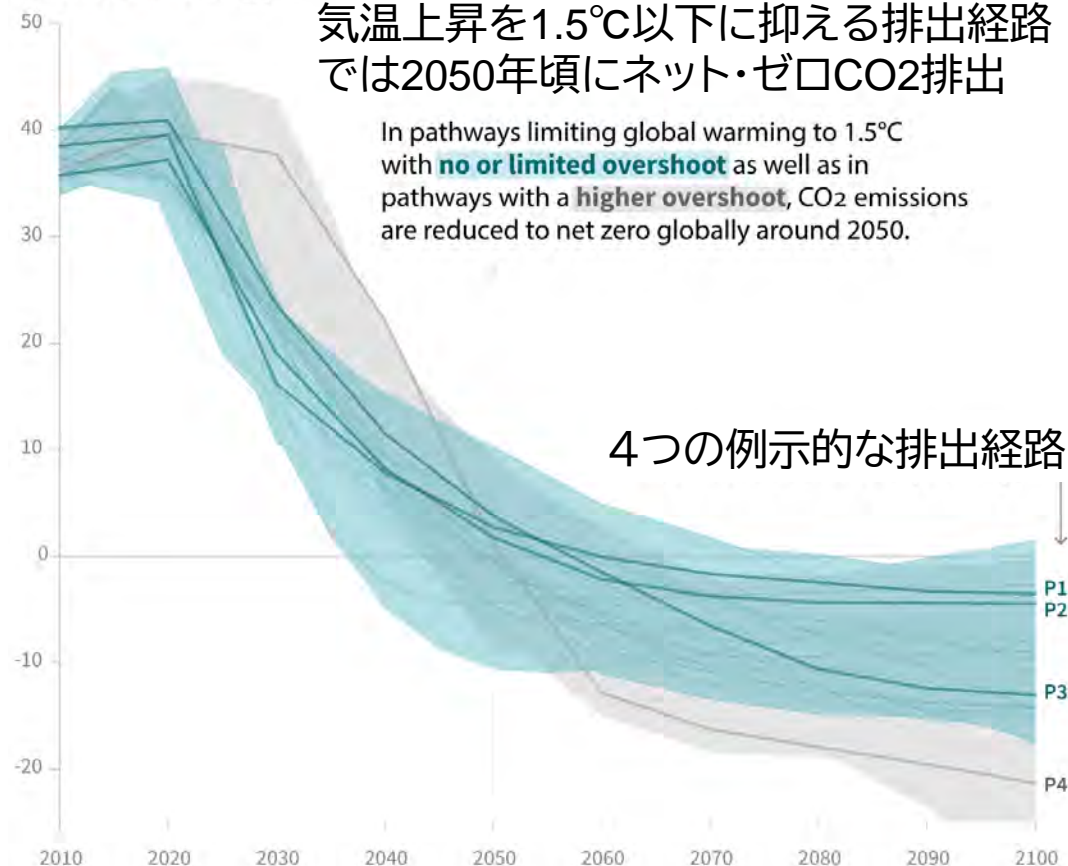
Source: Jérôme Hilaire (Mercator Research Institute on Global Commons and Climate)

UNEP (2017)に追記

気温上昇を1.5°C以下に抑える排出経路

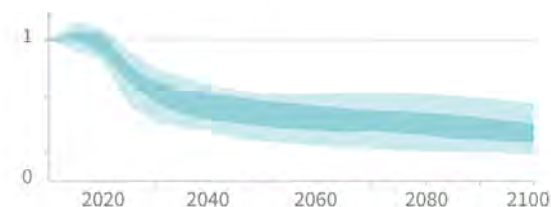
Global total net CO₂ emissions

Billion tonnes of CO₂/yr

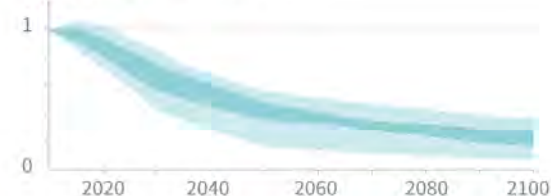


CO₂以外の排出も1.5°C排出経路では減少するが、世界全体での正味排出はゼロには達しない

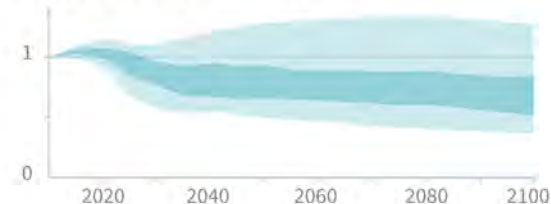
メタン排出量



ブラックカーボン排出量



N₂O 排出量



ネット・ゼロCO₂排出は通過点

Timing of net zero CO₂

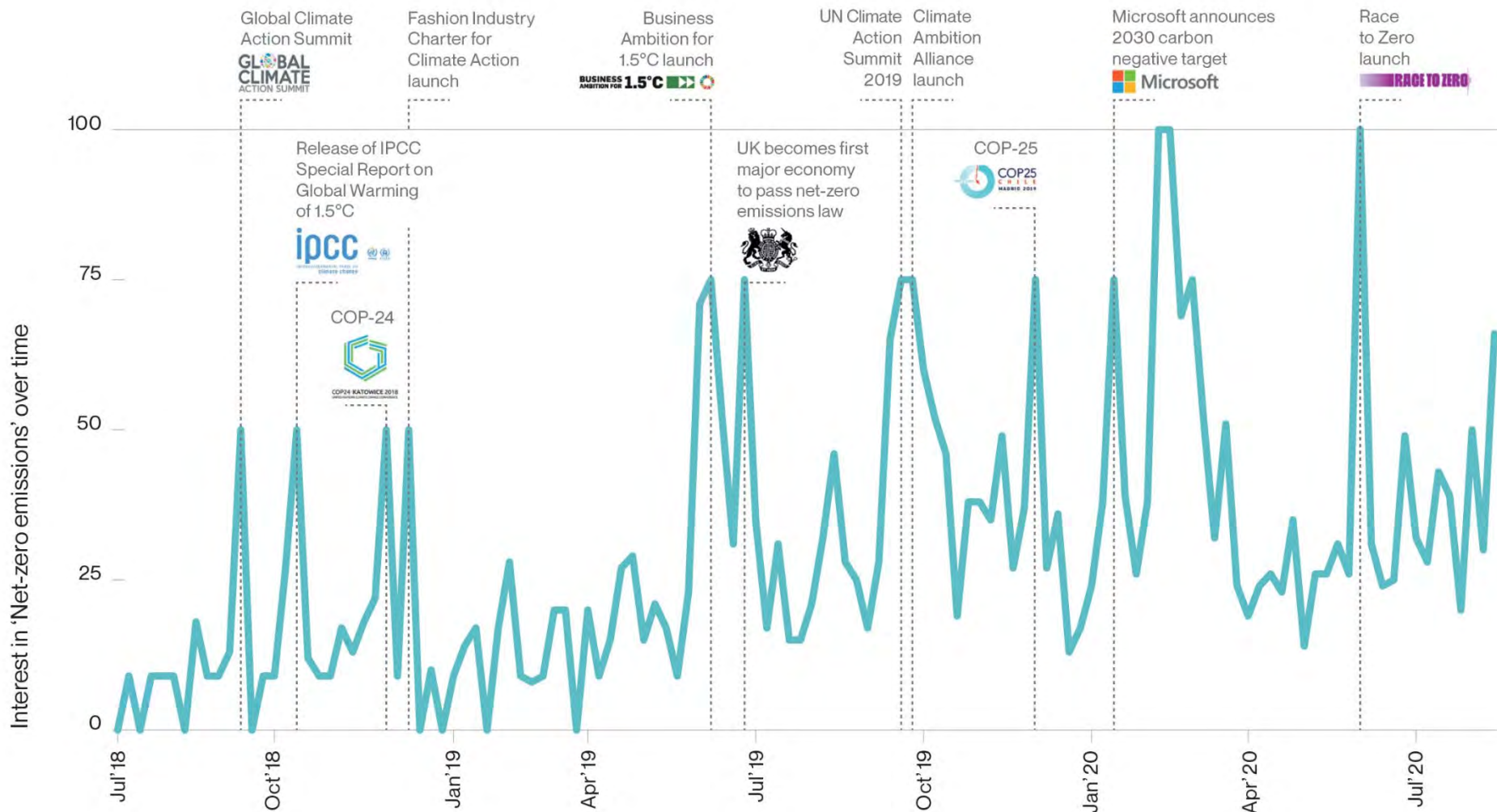
Line widths depict the 5-95th percentile and the 25-75th percentile of scenarios



IPCC (2018) SPM 3aIに追記

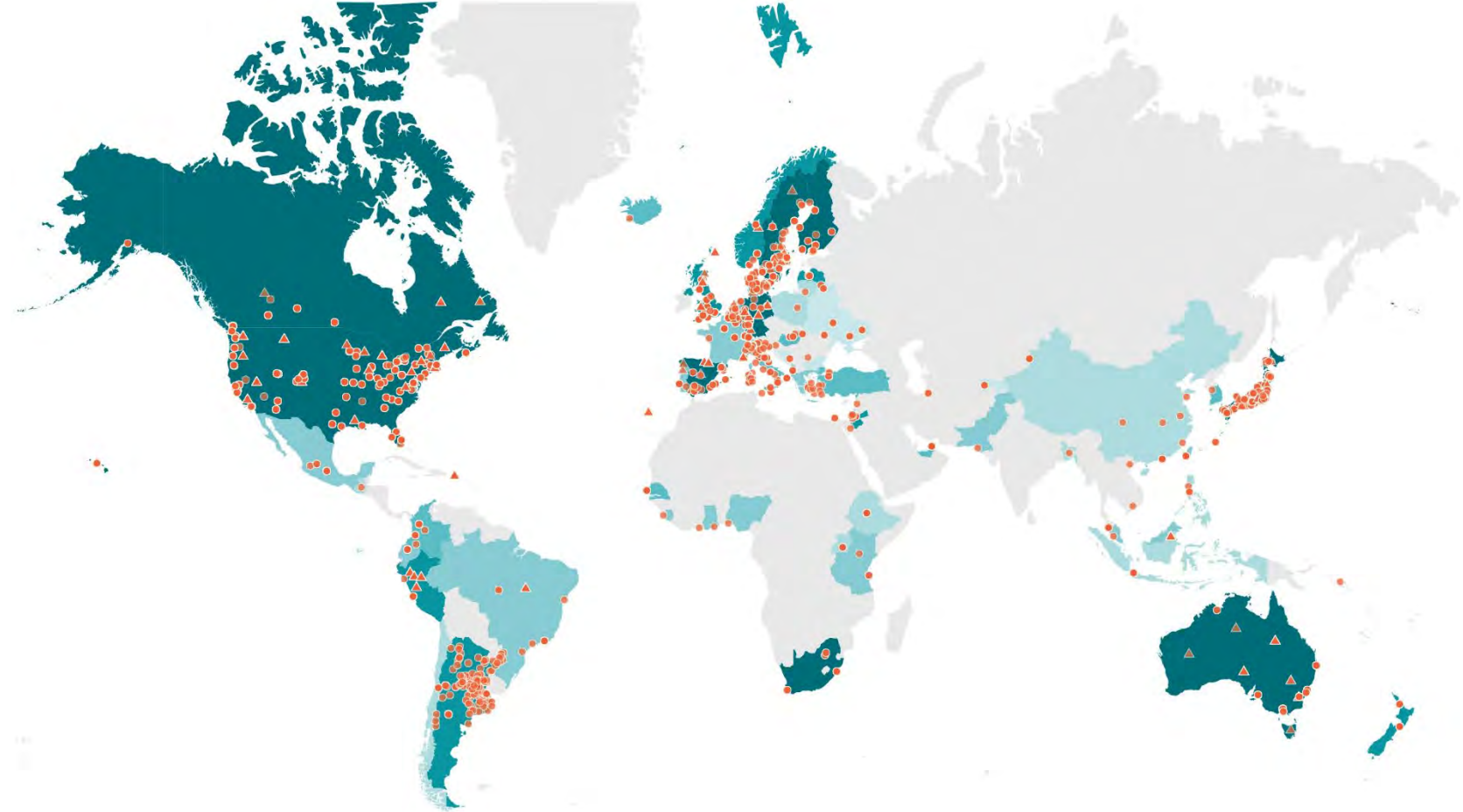
世界でのネット・ゼロ排出への関心の高まり

2018年から2020年8月までのGoogle Trendsによる“net-zero emissions”への検索



NewClimate Institute (2020a)

都市・地域・企業レベルでのネット・ゼロ排出への宣言



Note: NA refers to countries where we did not record actors pledging net-zero emissions targets

Percentage of national population
<1% 15-35%
1-5% 35-50%
5-15% >50% NA
● City ▲ Region

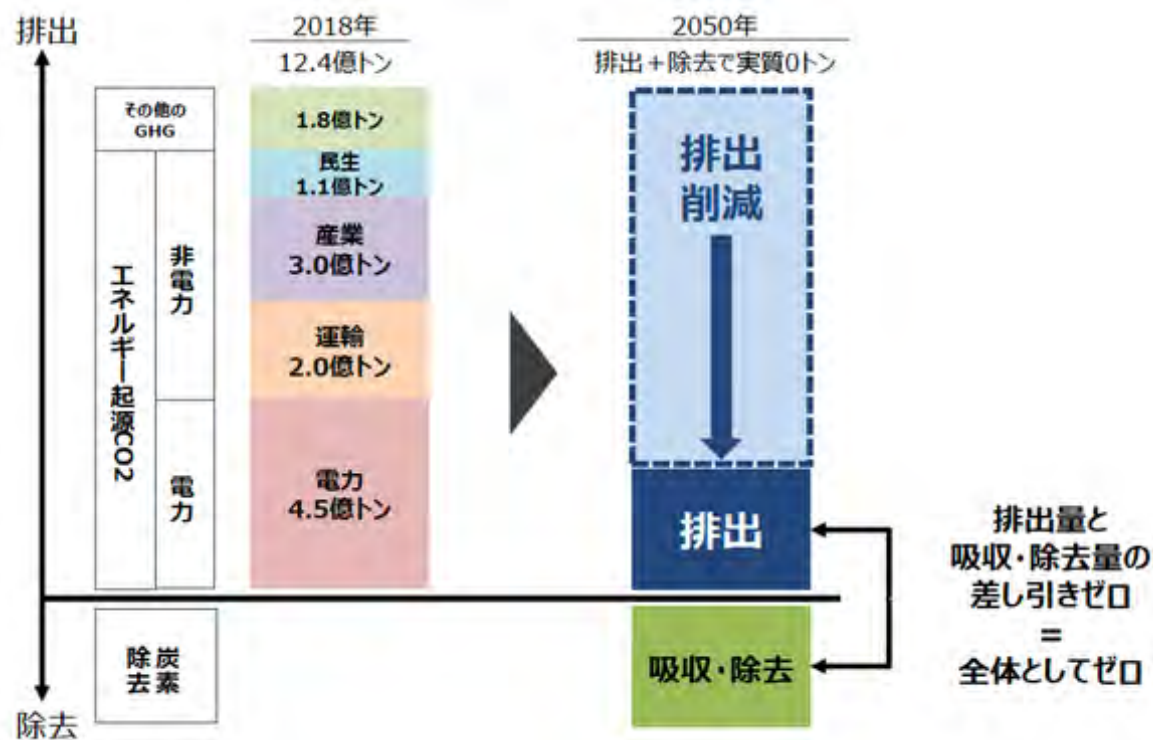
- 823の都市と101の地域が目標を掲げた (8億2800万人以上が含まれる。6.5GtCO₂e 相当)
- 1,541の企業 (11.4 兆ドルの収益レベル。3.5 GtCO₂e相当) NewClimate Institute (2020a)

2020年国連総会からの東アジアでのネット・ゼロ排出宣言

- 日本: 2050年までにカーボンニュートラル
 - 「我が国は、2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことを、ここに宣言いたします」2020年10月26日、菅総理による所信表明演説
- 中国: 2060年までにカーボンニュートラル
 - 2020年9月22日、国連総会
- 韓国: 2050年までにカーボンニュートラル
 - 2020年10月28日

カーボンニュートラルとは

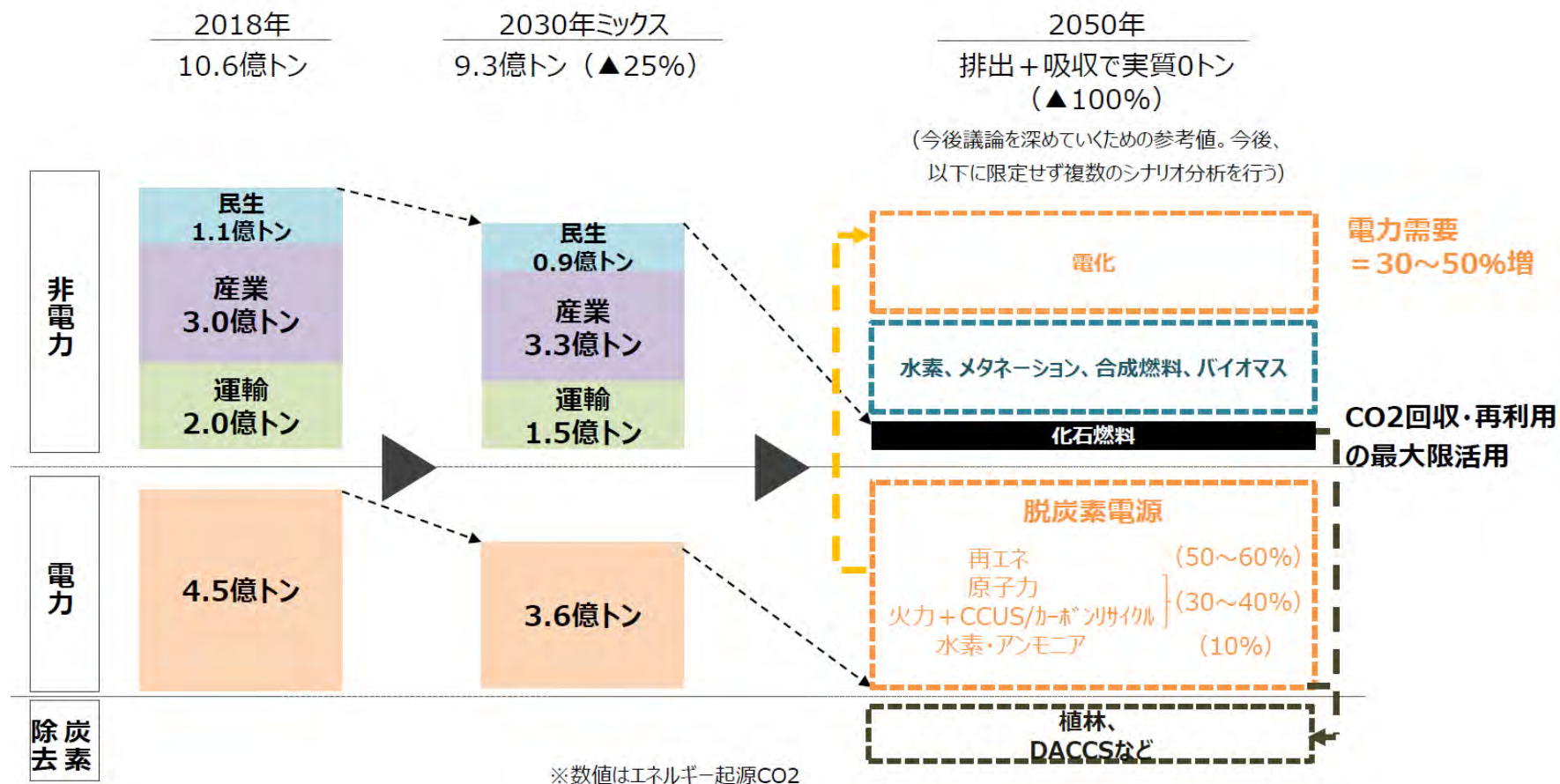
- 日本が目指す「カーボンニュートラル」は、CO₂だけに限らず、メタン、N₂O(一酸化二窒素)、フロンガスを含む「温室効果ガス」を対象



https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_neutral_01.html より

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

2（２）． 2050年カーボンニュートラルの実現

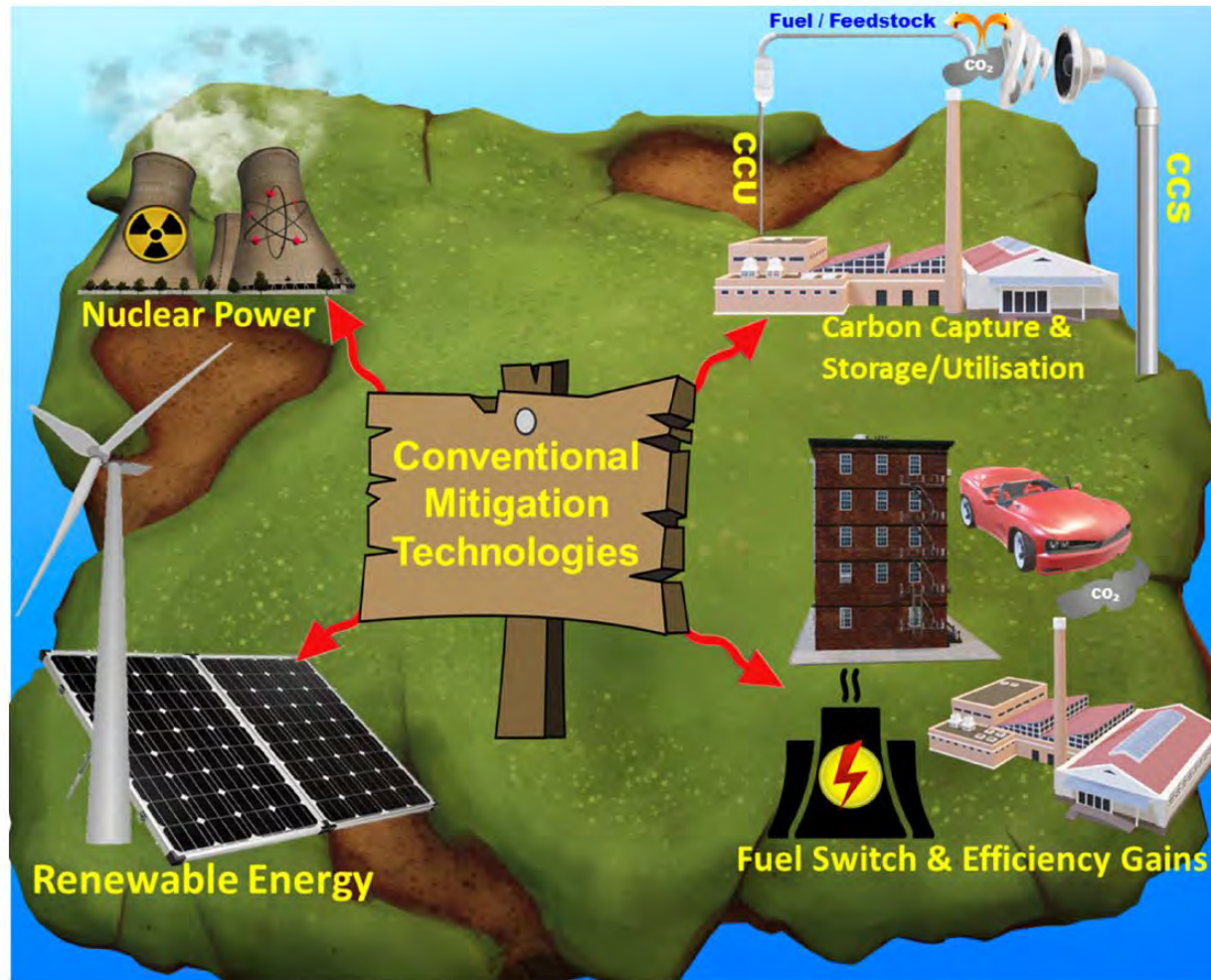


2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 令和2年12月25日 資料2

グリーンイノベーション基金として2兆円の基金を造成し、野心的な研究開発を、今後10年間、継続して支援 6

ネット・ゼロ排出への移行における課題

1. 緩和: エネルギー需給における従来型の排出削減技術



- 再生可能エネルギー
- 原子力
- CCS, CCU
- 燃料転換
- 高効率化

×

- 電力
- 産業
- 運輸
- 民生

Fig.1 Major decarbonization technologies which focus on the reduction of CO₂ emissions related to the supply and demand sides of energy. Conventional mitigation technologies include renewable energy, nuclear power, carbon capture and storage (CCS) as well as

utilization (CCU), fuel switching and efficiency gains. These technologies and techniques are mainly deployed in the power, industrial, transportation and building sectors

Fawzy et al. 2020

2. 大気からのCO2の除去: 主要なネガティブエミッション技術

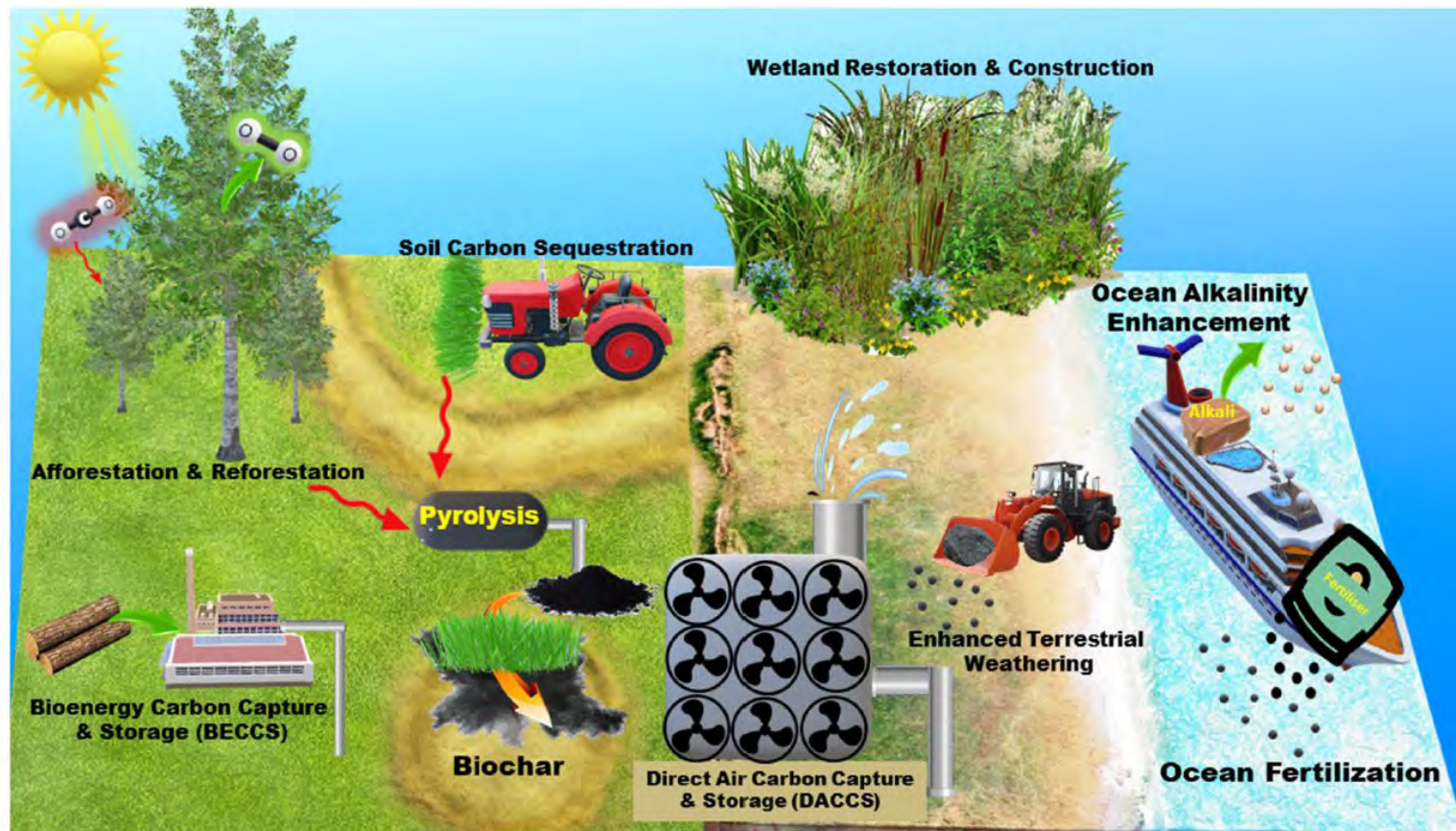


Fig. 2 Major negative emissions technologies and techniques which are deployed to capture and sequester carbon from the atmosphere. This approach includes bioenergy carbon capture and storage, afforestation and reforestation, biochar, soil carbon sequestration, enhanced

terrestrial weathering, wetland restoration and construction, direct air carbon capture and storage, ocean alkalinity enhancement and ocean fertilization

Fawzy et al. 2020

BECCS (バイオマスCCS)、植林、バイオ炭、土壌炭素蓄積、風化促進、湿地の再生・保全、DACCS (直接空気回収+貯留)、海洋アルカリ化、海洋肥沃化など

3. カーボンオフセット利用: ネット・ゼロ排出におけるオフセットの原則



The Oxford Principles for Net Zero Aligned
Carbon Offsetting
September 2020

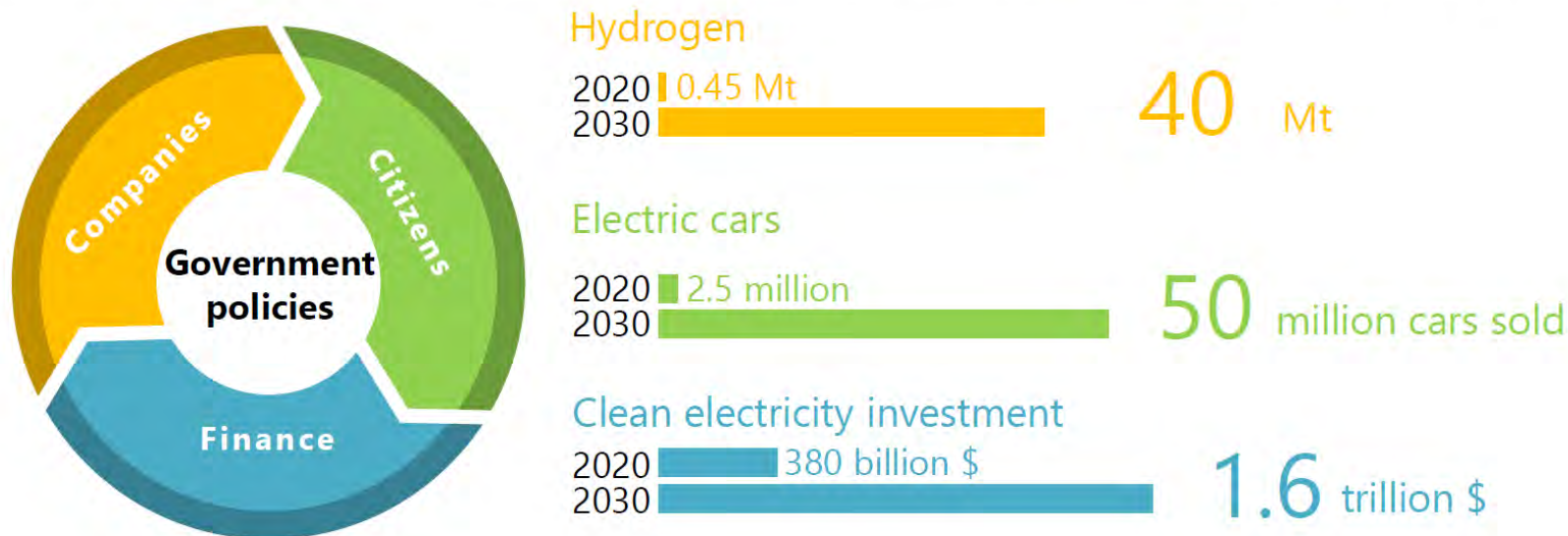
Allen et al. (2020)

ネット・ゼロ排出への移行における課題

1. 世界全体でみたエネルギーシステムの課題

WEO 2020ではNZE2050シナリオを追加：2020-2030年を中心に分析

Net-zero by 2050 demands unprecedented efforts over the next decade



Net zero energy emissions in 2050 would require a set of dramatic additional actions over the next 10 years. Energy companies, citizens and investors all need to be on board – with unprecedented contributions to make

IEA 2020. All rights reserved.



IEA WEO 2020 Launch Presentation

ネット・ゼロ排出に向け、まずは低排出な発電システムへの移行と、エンドユースの電化促進および高効率化、水素利用などそれぞれのスケールアップが鍵となる

ネット・ゼロ排出のエネルギーシステム: Davis et al. (2018)

ネット・ゼロ排出達成を考える上で、長期的には以下の項目が更に重要

- 最後までゼロ排出化が困難であるセクターの特定と、そのセクターにおけるイノベーション
- どうしても避けられない排出をオフセットするため、あるいは、ネットCO₂排出を負とする場合に必要とされるネガティブエミッション技術の実施

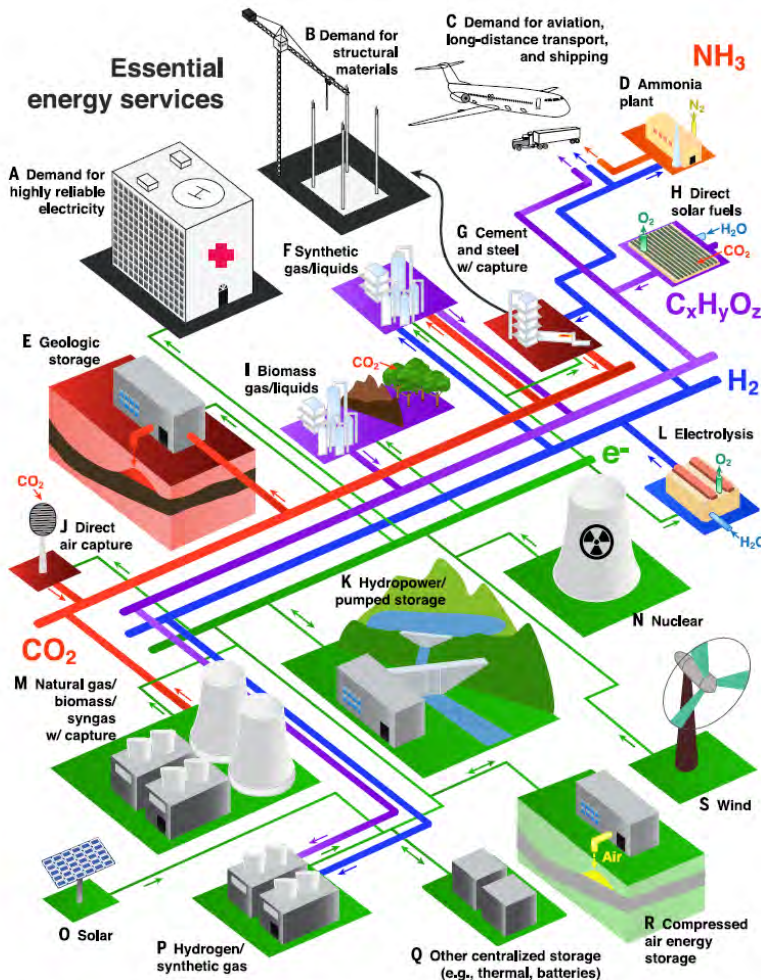
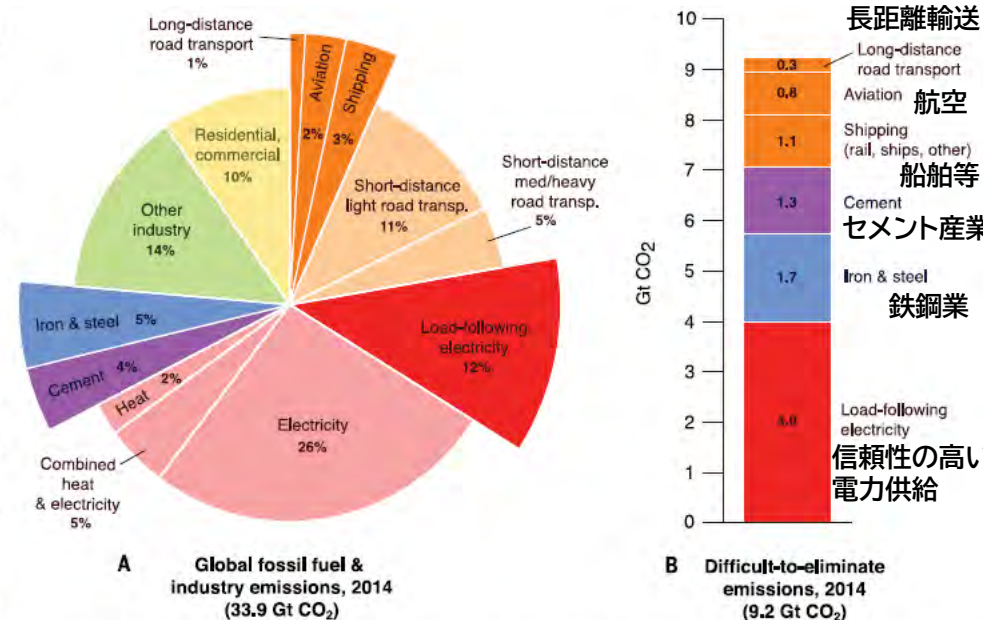


Fig. 1. Schematic of an integrated system that can provide essential energy services without adding any CO₂ to the atmosphere. (A to S) Colors indicate the dominant role of specific technologies and processes. Green, electricity generation and trans-

mission; blue, hydrogen production and transport; purple, hydrocarbon production and transport; orange, ammonia production and transport; red, carbon management; and black, end uses of energy and materials.

Davis et al. (2018)

downs shown are based primarily on data from the International Energy Agency and EDGAR 4.3 databases (8, 38). The highlighted iron and steel and cement emissions are those related to the dominant industrial processes only; fossil-energy inputs to those sectors that are more easily decarbonized are included with direct emissions from other industries in the "Other industry" category. Residential and



commercial emissions are those produced directly by businesses and households, and "Electricity," "Combined heat & electricity," and "Heat" represent emissions from the energy sector. Further details are provided in the supplementary materials.

ネット・ゼロには、大気からのCO2除去について新しいアライアンスが必要



Commentary

Moving toward Net-Zero Emissions Requires New Alliances for Carbon Dioxide Removal

Sabine Fuss,^{1,2,*} Josep G. Canadell,³ Philippe Ciais,⁴ Robert B. Jackson,⁵ Chris D. Jones,⁶ Anders Lyngfelt,⁷ Glen P. Peters,⁸ and Detlef P. Van Vuuren⁹

¹Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change, Berlin, Germany

²Institute of Geography, Humboldt University of Berlin, Germany

³CSIRO Oceans and Atmosphere Flagship, Canberra, Australia

⁴Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Institut Pierre-Simon Laplace, CEA-CNRS-UVSQ, Gif sur Yvette Cedex, France

⁵Department of Earth System Science, Woods Institute for the Environment, and Precourt Institute for Energy, Stanford University, Stanford, CA, USA

⁶Met Office Hadley Centre, Exeter, UK

⁷Energy Technology, Department of Space, Earth, and Environment, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

⁸CICERO Center for International Climate Research, Oslo, Norway

⁹PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, the Hague, the Netherlands

*Correspondence: fuss@mcc-berlin.net

<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.08.002>

The 1.5°C target will require removing at least some of the carbon dioxide (CO₂) previously emitted. Knowledge on how this can be done has been increasing, though barriers remain concerning governance, policy, and acceptability. For the 26th session of the Conference of the Parties (COP26) to move beyond an academic debate on CO₂ removal (CDR), a broader alliance of research and policy communities, industry, and the public is needed.

Fuss et al. (2020)

ネガティブエミッション技術に関する知識は増加してきたが、ガバナンス、政策、社会受容性がまだまだ

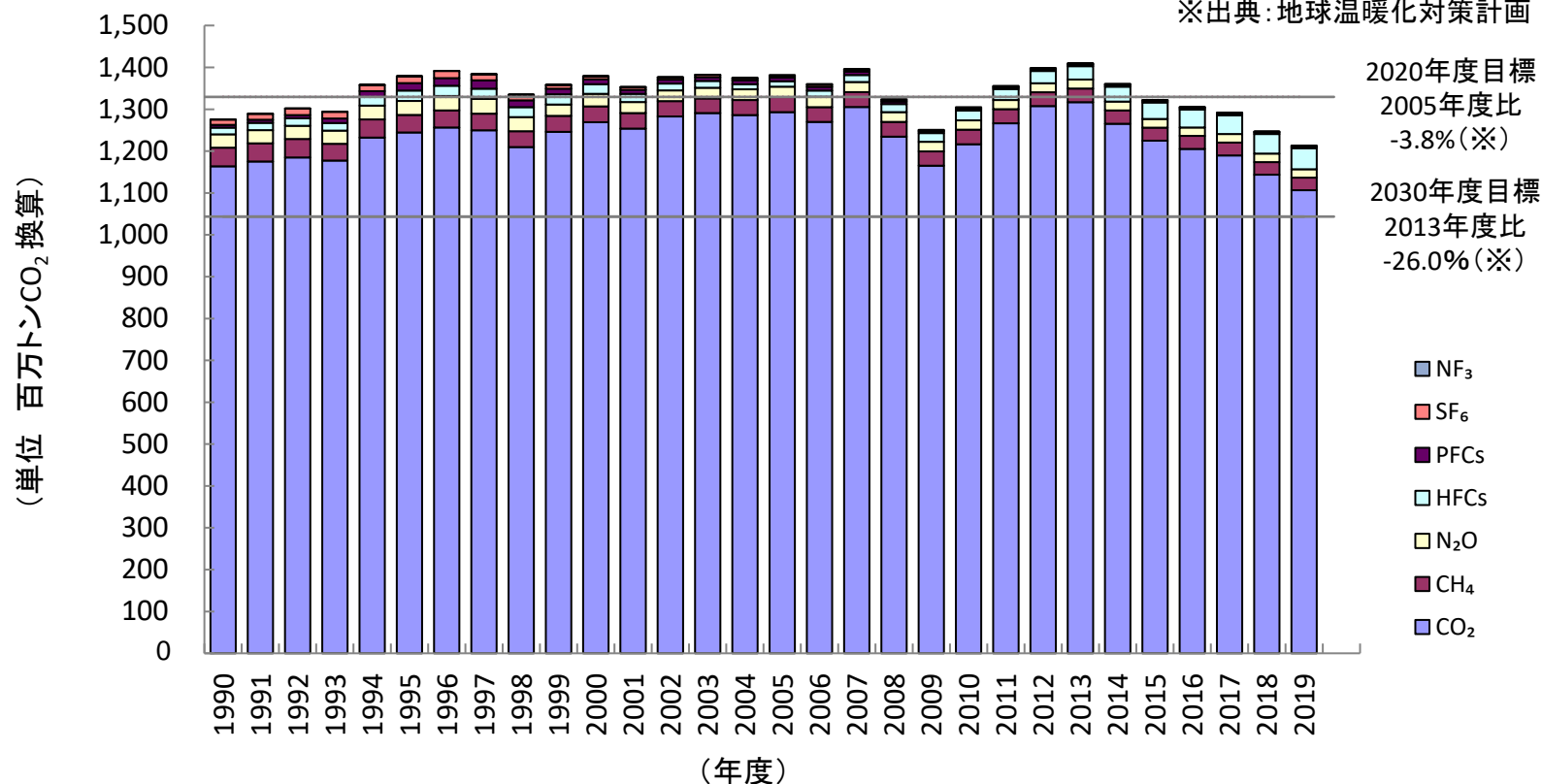
ネット・ゼロ排出への移行における課題

2. 日本のエネルギーシステム分析からみた課題

日本のGHG排出量の推移

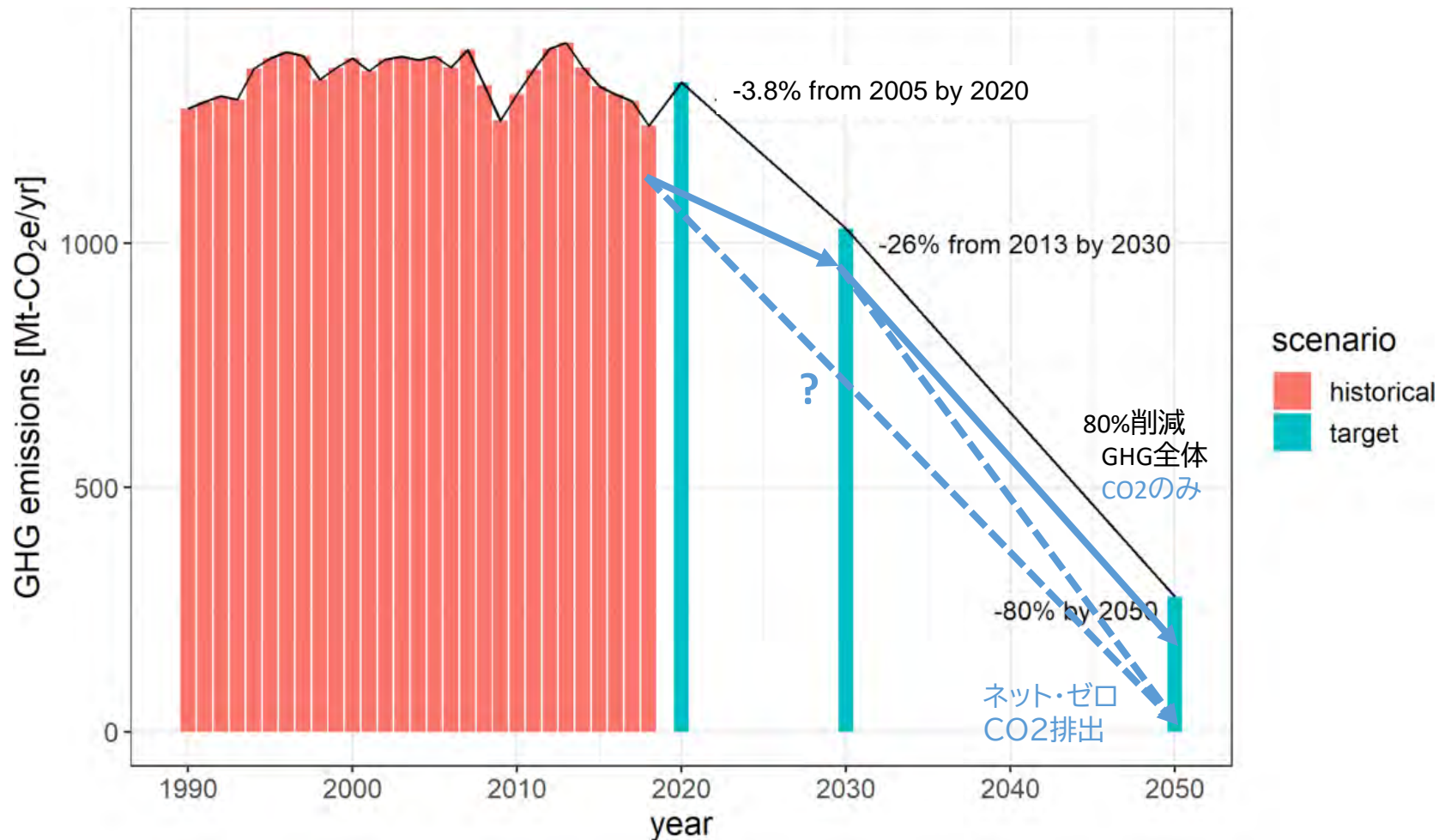
各温室効果ガスの排出量の推移(2019年度速報値)

※出典: 地球温暖化対策計画



温室効果ガスインベントリオフィス 2019年度(令和元年度)の温室効果ガス排出量(速報値)を利用

日本の排出削減目標の経路



2050年80%CO2排出削減のマルチモデル分析結果

- IPCC AR6に向け、国レベルの長期エネルギー分析として、日本のエネルギーシステムモデル5つの詳細比較“EMF 35 JMIP”を実施 (Sugiyama et al., 2021)
 - エネ総研からもTIMES-Japanモデルを利用して参加
 - Sustainability Science特集号として発表予定

80%排出削減分析結果: すべてのセクターで大幅な排出削減

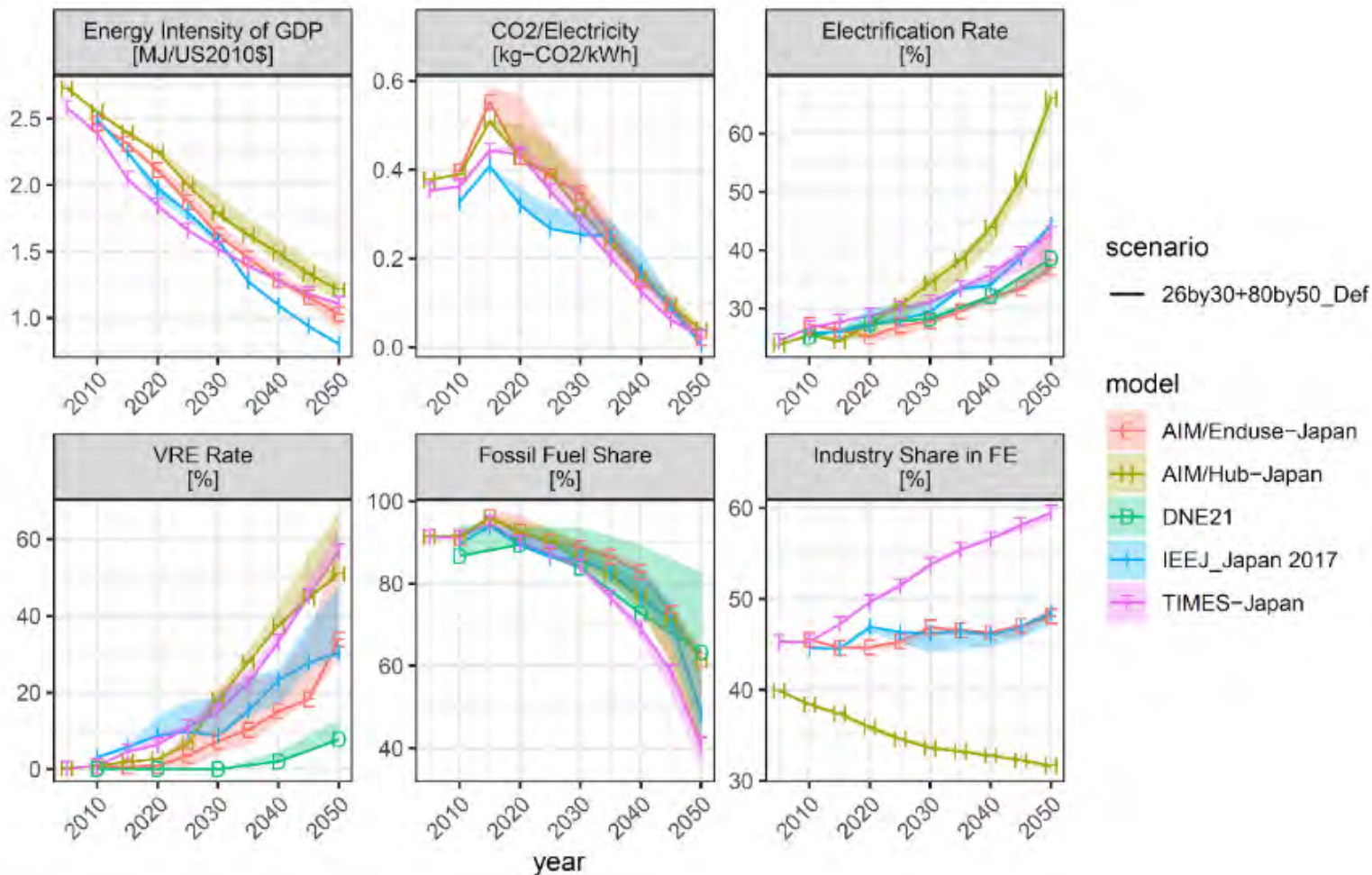
- GDPあたりのエネルギー利用量の低下
- 電力のCO2排出原単位は2050年ほぼゼロ
- 最終エネルギー消費に占める電力の増加
- VRE発電シェアはモデルに依存するが増加
- 一次エネルギーにおける化石燃料シェアは低下するものの、2050年で40-80%
- 部分均衡モデルの分析では、最終エネルギー消費全体に対する産業部門の割合が増加。2050年でのCO2排出の多くを占める

80-100%排出削減感度分析

- 80%排出削減は、参加5モデルすべて実行可能解あり
 - 90%排出削減では、5モデル中3モデルのみ実行解あり
 - 100%排出削減 (ネット・ゼロ) は2モデルのみ実行解あり
- Sugiyama et al. (2021)

2050年80%CO2排出削減のマルチモデル分析結果

2030年NDC、2050年80%排出削減での主要な脱炭素指標



Sugiyama et al. (2021)

80%排出削減からネット・ゼロ排出への課題

- EMF 35 JMIP での TIMES-Japanモデルでは、2050年90%および100%排出削減の解なし
- つまり、グロスの排出を2050年に120 MtCO₂/yr 程度以下に抑えることは、モデルの標準的なエネルギーサービス需要および技術想定では難しい
- そのため、ネガティブエミッション技術利用も考慮した長期のネット・ゼロ排出分析を別途実施 (Kato and Kurosawa, 2021)
 - 2050年80%排出削減から2070年ネット・ゼロCO₂排出へつながるエネルギー需給構造を分析
 - ネット・ゼロ排出達成に向け必要な、ネガティブエミッション技術 (持続可能な国産バイオマスを利用したBECCS、およびDACCS)のそれぞれのスケールを分析
 - 不確実性として、技術オプションの利用可能性やエネルギーサービス需要の幅を考慮
 - DACが利用可能な場合は、DACによるCCU (液体合成燃料製造) のスケールも検討
 - CCSによる貯留量上限は2050年に50 MtCO₂/yr、2070年に 200 MtCO₂/yr と仮定

TIMES-Japanを用いた2070年ネット・ゼロCO₂排出分析の概要

定性的な結論

- ネット・ゼロCO₂排出達成には、ネガティブエミッション技術は必須
- エネルギーサービス需要が比較的高い想定では、想定したネガティブエミッション技術が存在しても解なし
- 解が得られた範囲内では、2040-2050年ごろからBECCS発電を開始することが、ネット・ゼロ達成にコスト的になりつつ
- ただし、持続可能な国産バイオマスの量的な制約により、最終的にDACCSは多くのシナリオにおいて必須

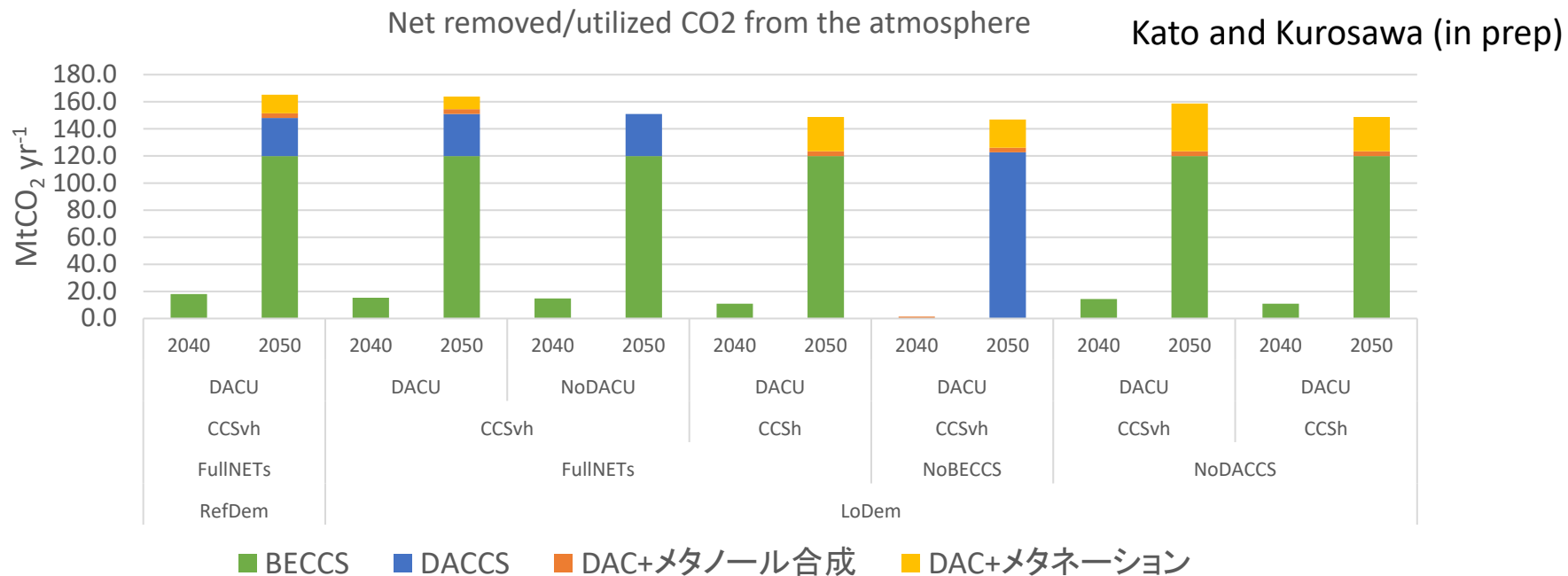
定量的な結果

- 2070年ネット・ゼロCO₂排出において、40 MtCO₂/yr 程度土地ベースの技術が利用可能できるとすると、BECCSで120 MtCO₂/yr、DACCSで 45 MtCO₂/yrレベルのCO₂除去量が最適解と試算。BECCS発電規模は最大で約 24 GW
- DACによるCCUのスケールは 4–20 MtCO₂/yr とDACCSに比較して小さいが、その利用開始時期はDACCSより10–15年先行
- BECCSが何らかの理由で利用できない場合では、DACCSは170 MtCO₂/yrまでスケールアップが必要

Kato and Kurosawa (2021)

今後の展開

- これまでの分析
 - 2050年80%CO₂排出削減のシステム転換
 - その後2070年にネット・ゼロCO₂排出想定での、BECCSおよびDACCSといったネガティブエミッション技術の役割分析
 - カーボンニュートラルメタンは考慮外
- 2050年ネット・ゼロ排出達成に向けた検討のため、カーボンリサイクリング技術の役割、特にCO₂回収による合成メタン燃料技術を検討中
 - 産業、長距離輸送、民生等からの脱炭素燃料需要としての位置づけを分析



ネット・ゼロ排出への移行における課題

3. カーボンオフセットの課題

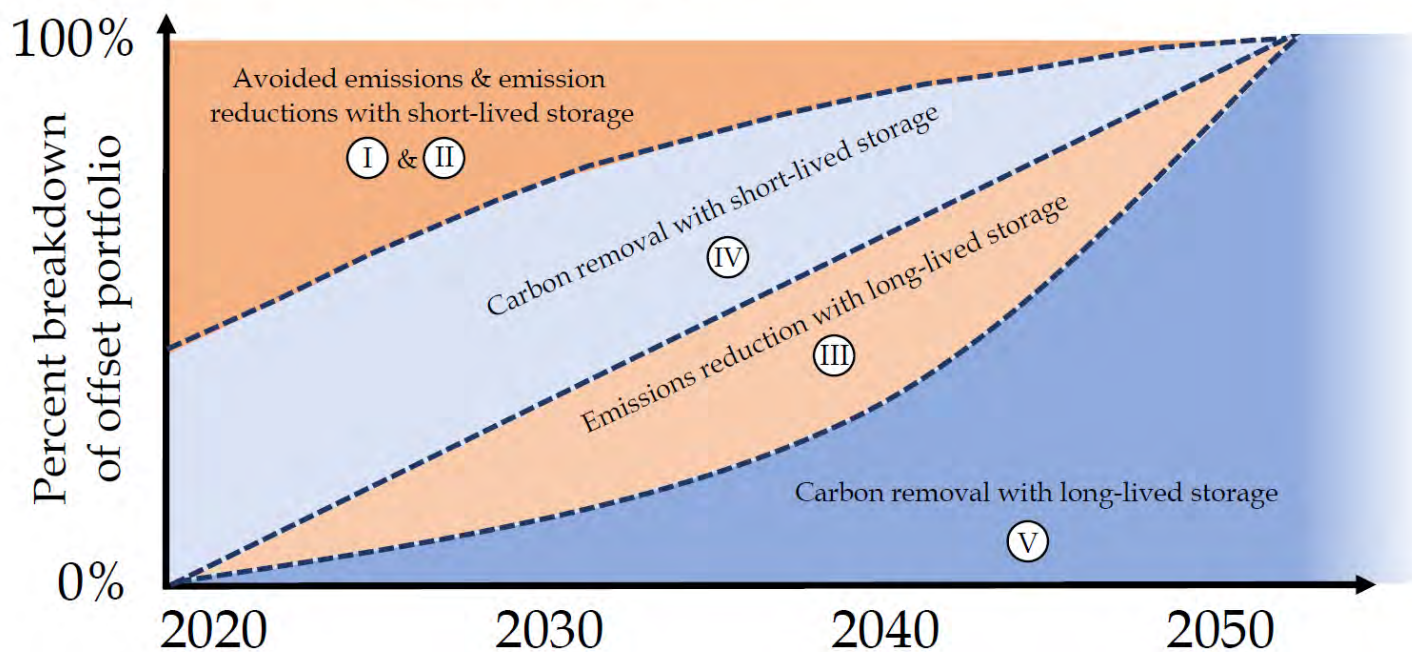
カーボン・オフセットにおけるネガティブエミッション技術の役割

- Microsoft: 2020年7月の気候変動対策宣言
 - Carbon negative by 2030
 - Remove our historical carbon emissions by 2050
 - \$1 billion climate innovation fund
- Amazon: 2019年9月に、2040年カーボンニュートラルの目標を宣言
- エネルギー企業 (Shell by 2050, Occidental by 2040) もネット・ゼロ排出目標を宣言
- こういった企業の目標には、避けられない排出に関しては、大気中のCO₂の除去によるオフセット利用も考慮
 - AmazonはNature Conservancyによるアメリカにおける再植林に投資
 - Shellはオーストラリアにおける “carbon farming” 企業を買収
- ネガティブエミッション技術を利用したオフセットビジネスに注目が集まっている (2050年に年間1.4兆ドル規模との試算; Vivid Economics, 2020)
- 一方、オフセットの過大評価や持続性に対する懸念などがある
 - E.g. These Trees Are Not What They Seem, Bloomberg Green, Dec 09 2020

The Oxford Principles for Net Zero Aligned Carbon Offsetting

1. 自身の排出削減が先、高品質なオフセット利用、定期的なオフセット戦略の見直し
2. 排出削減によるオフセットから、大気中からの炭素除去によるオフセットに移行
3. 長期間の炭素貯留への移行
4. ネット・ゼロに連携したオフセット市場開発へのサポート

Figure 2: Example net zero aligned offsetting trajectory



Allen et al. 2020

まとめ

まとめ

- ネット・ゼロ排出の必要性と関心の高まり
 - ネット・ゼロ排出は通過点
- ネット・ゼロ排出への移行における課題
 - エネルギーシステムの課題
 - ネガティブエミッション技術の課題
 - スケールアップ
 - カーボンオフセット
 - ガバナンス、政策、社会受容性
- ネット・ゼロ排出へ向けた具体的な動き
 - RD&Dの重要性とガバナンスに向け、企業、国レベルの動き
 - 2050年ネット・ゼロに達するためには、地域ごとのポートフォリオを考慮した、今後10年レベルの政策的な投資プラン作成が必要

参考文献

- IPCC (2018) Global warming of 1.5°C
- UNEP (2017) The emissions gap report 2017
- 環境省 (2018) 1.5°C特別報告書 政策決定者向け要約(SPM)の概要
- Data-Driven EnvironLab & NewClimate Institute (2020) Accelerating net zero: exploring cities, regions, and companies' pledges to decarbonise
- Fawzy et al. (2020) Strategies for mitigation of climate change: a review, Environmental Chemistry Letters, 18, 2069–2094
- Allen et al. (2020) The Oxford Principles for Net Zero Aligned Carbon Offsetting
- IEA (2020) World Energy Outlook 2020
- Davis et al. (2018) Net-zero emissions energy systems, Science 360, 1419
- Fuss et al. (2020) Moving toward net-zero emissions requires new alliances for carbon dioxide removal, One Earth, 3, 145–149
- Sugiyama et al. (2021), EMF 35 JMIP study for Japan's long-term climate and energy policy: scenario designs and key findings, Sustainability Science, doi:10.1007/s11625-021-00913-2
- Kato and Kurosawa (2021), Role of negative emissions technologies (NETs) and innovative technologies in transition of Japan's energy systems toward net-zero CO2 emissions, Sustainability Science, doi:10.1007/s11625-021-00908-z
- Bloomberg Green, These Trees Are Not What They Seem: How the Nature Conservancy, the world's biggest environmental group, became a dealer of meaningless carbon offsets, <https://www.bloomberg.com/features/2020-nature-conservancy-carbon-offsets-trees/>