

2024年3月29日（金） 13:40 – 14:10
日本建築学会土木学会連携タスクフォース
脱炭素WGオンラインワークショップ

カーボンニュートラル社会を先導する 循環経済への転換と建設材料

南齋規介

国立環境研究所 資源循環領域 国際資源持続性研究室 室長

名古屋大学大学院 環境学研究科 客員教授

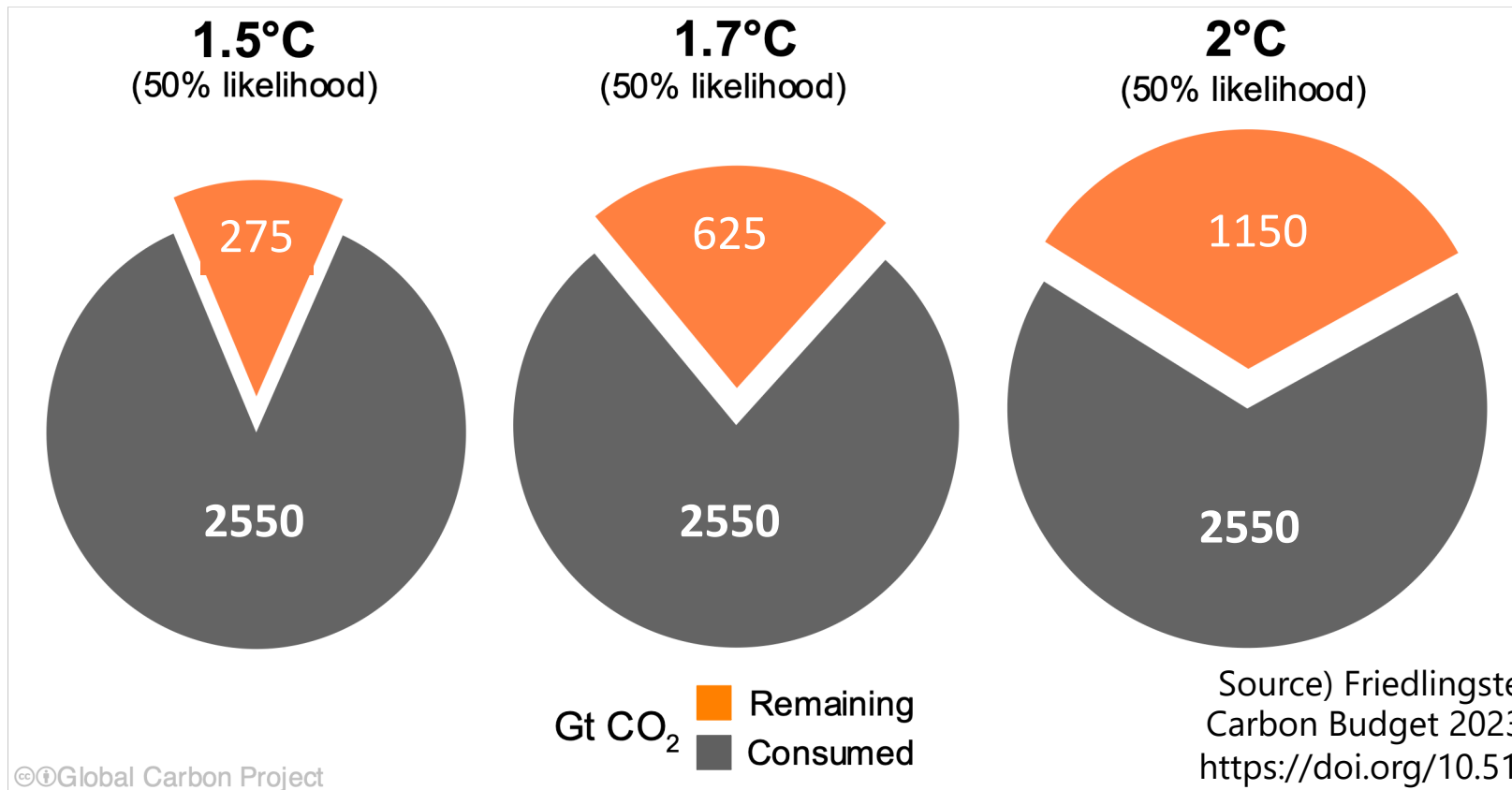
国連環境計画 国際資源パネル パネルメンバー

本日の内容

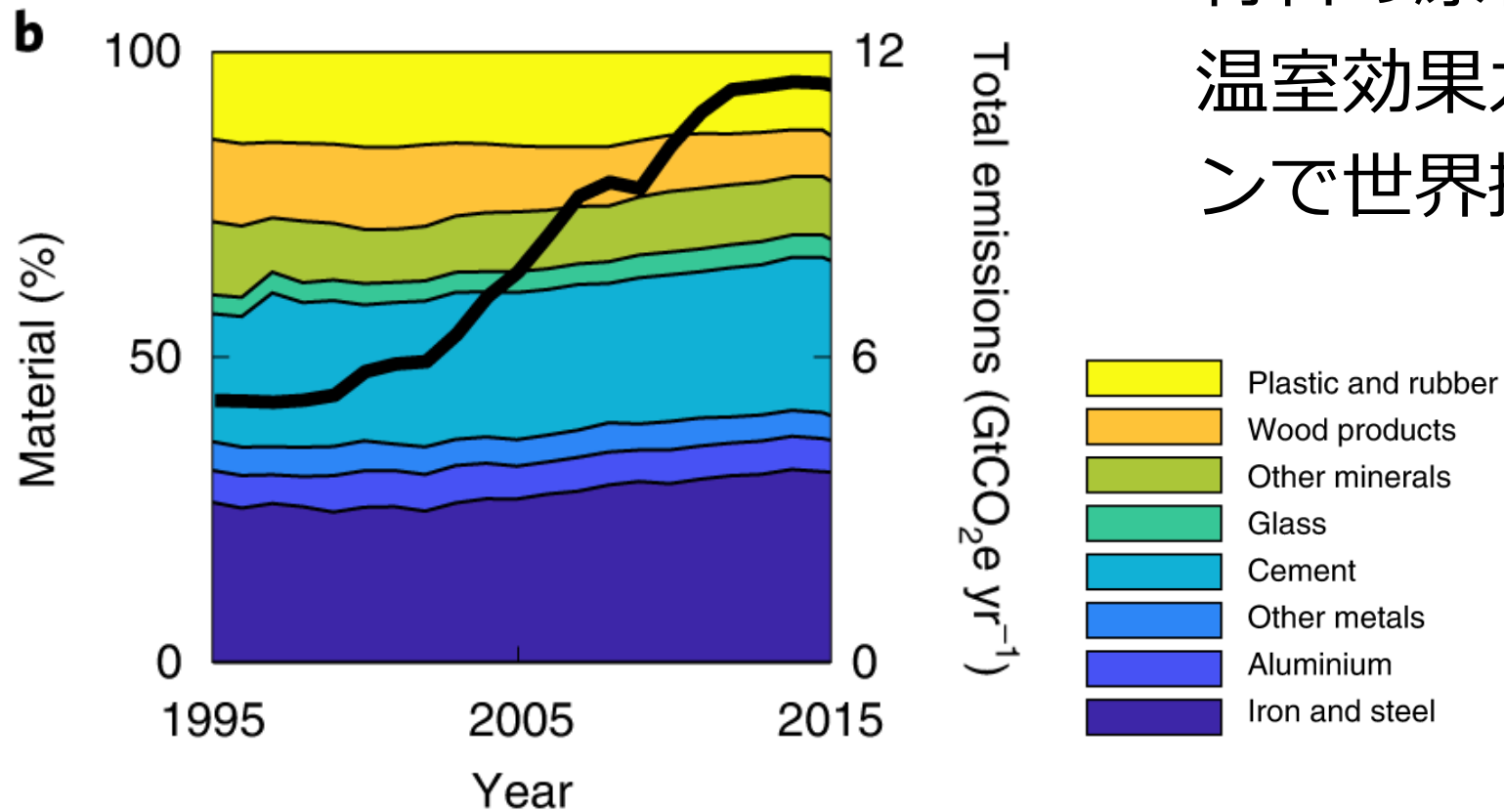
- 世界の物質利用に伴う気候変動と生物多様性影響
- 日本の物質フローの構造と脱炭素化との関係
- CCSに依存しない素材の全球的な脱炭素化経路（鉄鋼，金属）
- CCSに依存しない素材の日本の脱炭素化経路（鉄鋼，セメント）
- 建築物の日本の脱炭素化経路
- まとめ

カーボンバジェット2024

地球温暖化を1.5、1.7、2度に抑える可能性が50%ある残りのカーボンバジェットは、2024年初めで、それぞれ275GtCO₂、625GtCO₂、1150GtCO₂である。これらは、約7年、15年、28年分の排出量に相当する。1850年から既に2550GtCO₂が排出されたと推計。



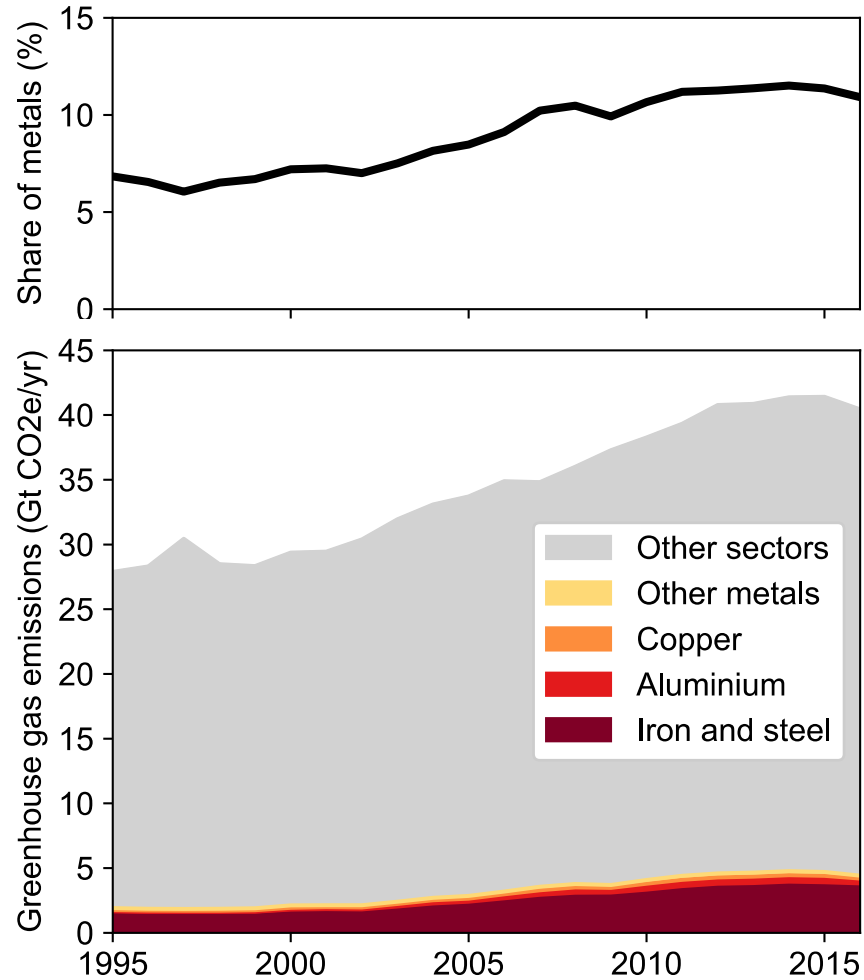
資源供給に伴う世界の温室効果ガス排出量



材料の原料採掘から加工に要する温室効果ガスは2015年で110億トンで世界排出量の23%を占める。

生産プロセスの電化が困難で再生可能エネルギー電力による脱炭素が困難

金属生産に伴う世界の温室効果ガス排出量



金属生産からのGHG排出量は1995年から2015年の間に2.5倍に増加した。

GHG排出量全体に占める割合は、1995年の約7%から2015年には約11%に増加した。

金属のGHG排出量に占める割合は、鉄鋼が約76%で最も大きく、アルミニウムが約13%、銅が約4%である。

資源利用に伴う多様な環境影響

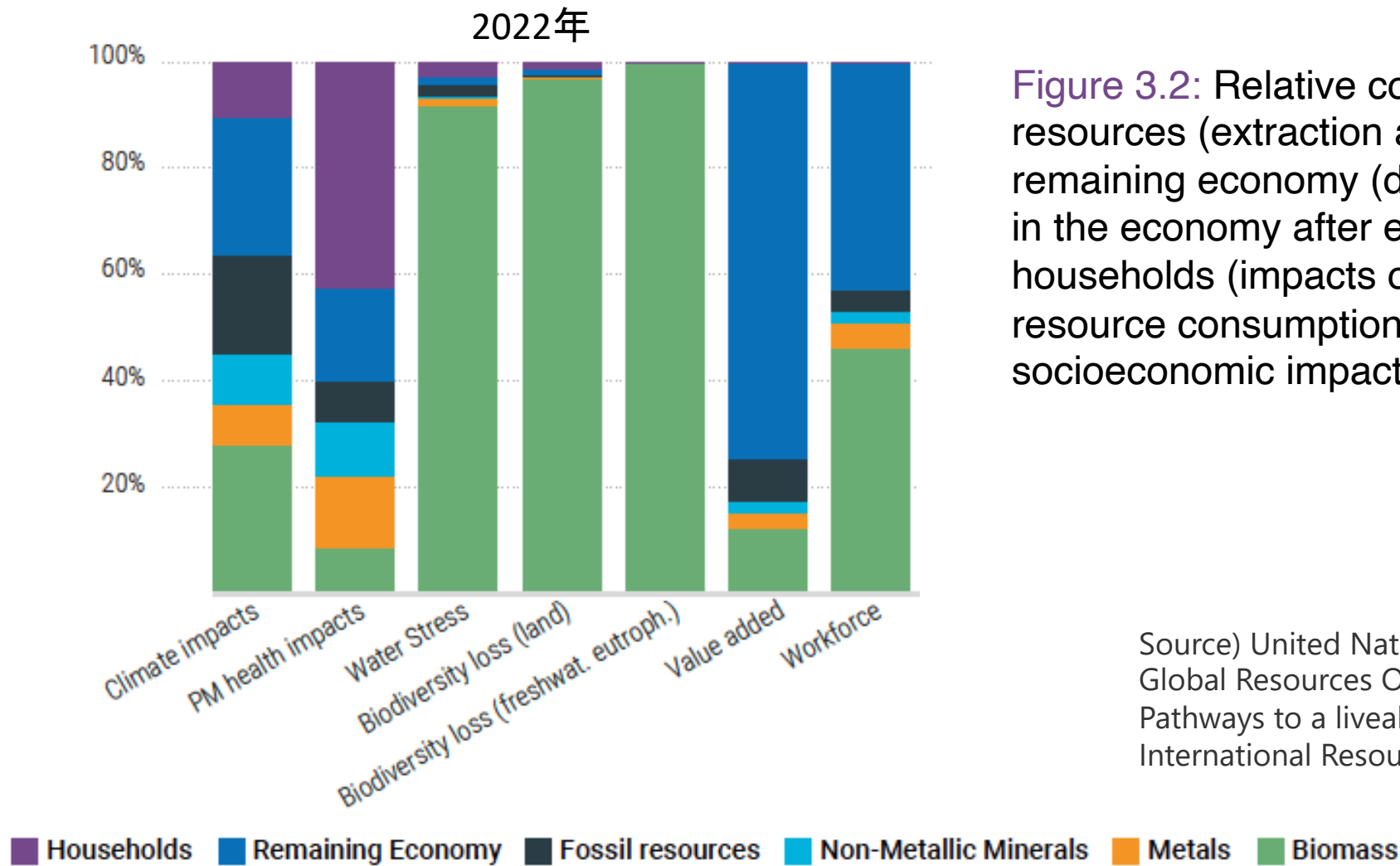
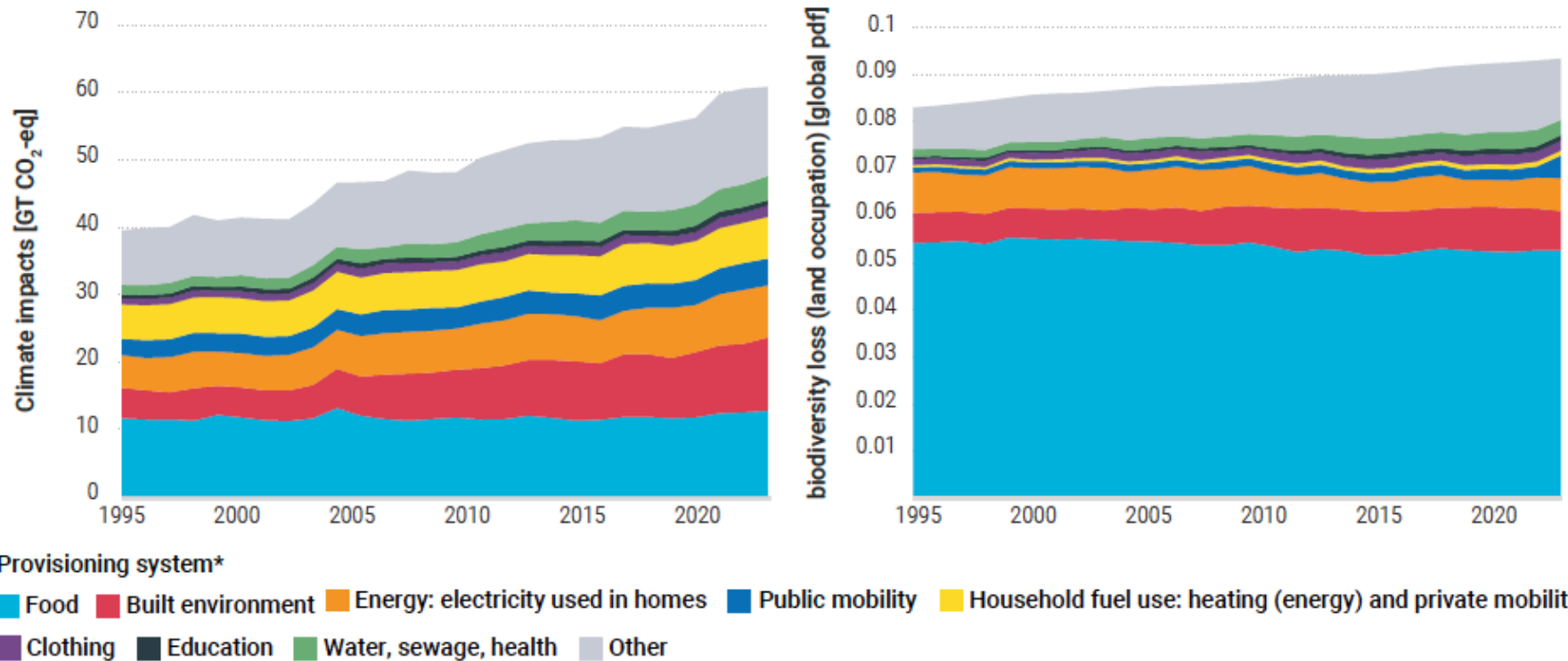


Figure 3.2: Relative contribution of different types of resources (extraction and processing), the remaining economy (downstream use of resources in the economy after extraction and processing) and households (impacts of direct emissions and resource consumption) to global environmental and socioeconomic impacts for 2022.

Source) United Nations Environment Programme (2024): Global Resources Outlook 2024: Bend the Trend – Pathways to a liveable planet as resource use spikes. International Resource Panel. Nairobi

供給システムによる気候変動と生物多様性影響

Figure 3.7: Time series of climate change (left) and land-related biodiversity loss (right) impacts split by provisioning system. The provisioning systems energy and mobility are represented in the graph by public mobility (dark blue), energy (orange, including electricity, hot water supply and the production of fuels) and household fuel use (yellow, including direct emissions from private mobility and heating).

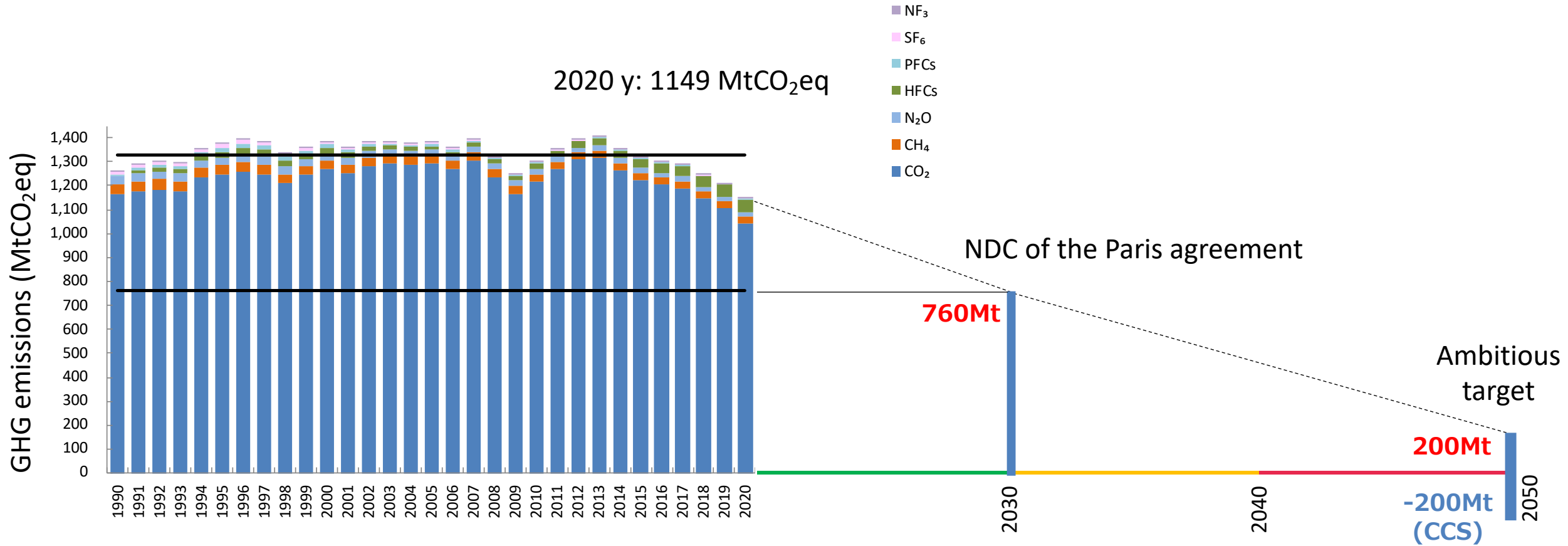


Source) United Nations Environment Programme (2024): Global Resources Outlook 2024: Bend the Trend – Pathways to a liveable planet as resource use spikes. International Resource Panel. Nairobi

循環経済への転換と建設材料に関する提言

1. 建築・建設材料の要である鉄鋼，セメント，金属，木材等の供給は世界のGHG総排出量の2割強を占め，建築環境に関わる排出量は増加傾向にあり，早急なネットゼロ対策の必要性を再認識すべきである。
2. ネットゼロ対策とする木材利用はネイチャーポジティブとの調和が不可欠である。

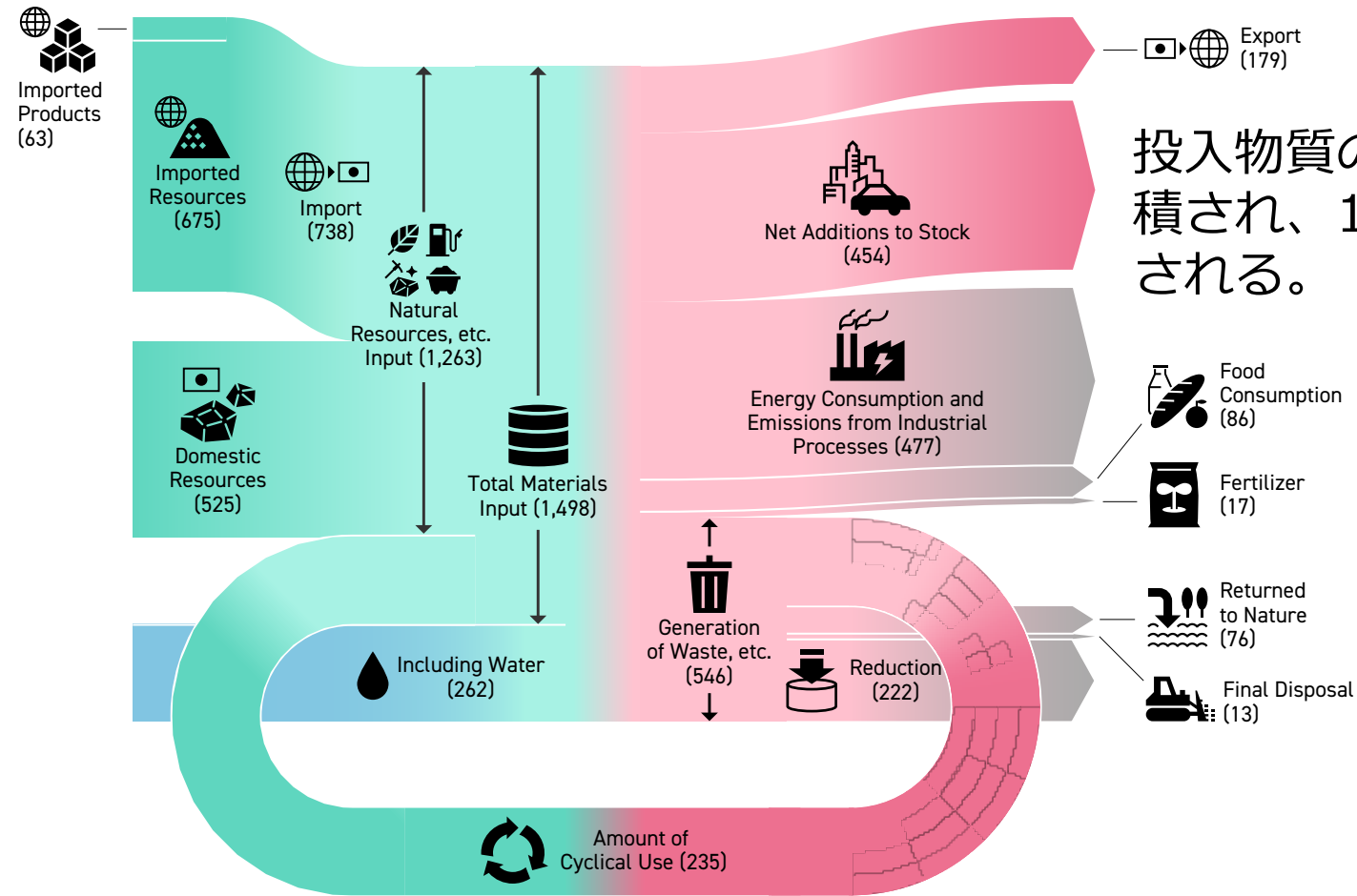
日本の温室効果ガス削減目標



Source) NIES-GIO

日本のマテリアルフロー (炭素排出源)

14億9800万トンの物質が最終需要を満たすために経済に投入される。



投入物質の1/3は社会に蓄積され、1/3は環境に放出される。

Figure: Japanese economy-wide material flow in 2019

家計消費の生産と固定資本に伴うマテリアルフロー

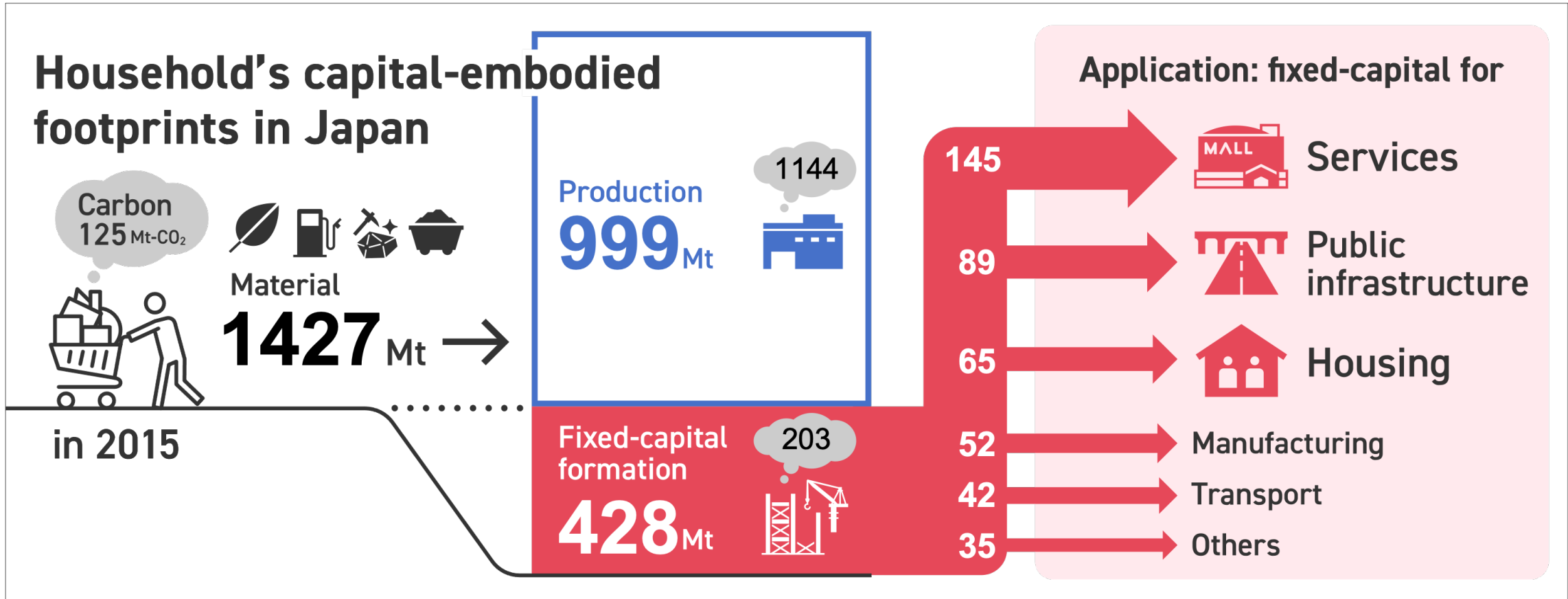
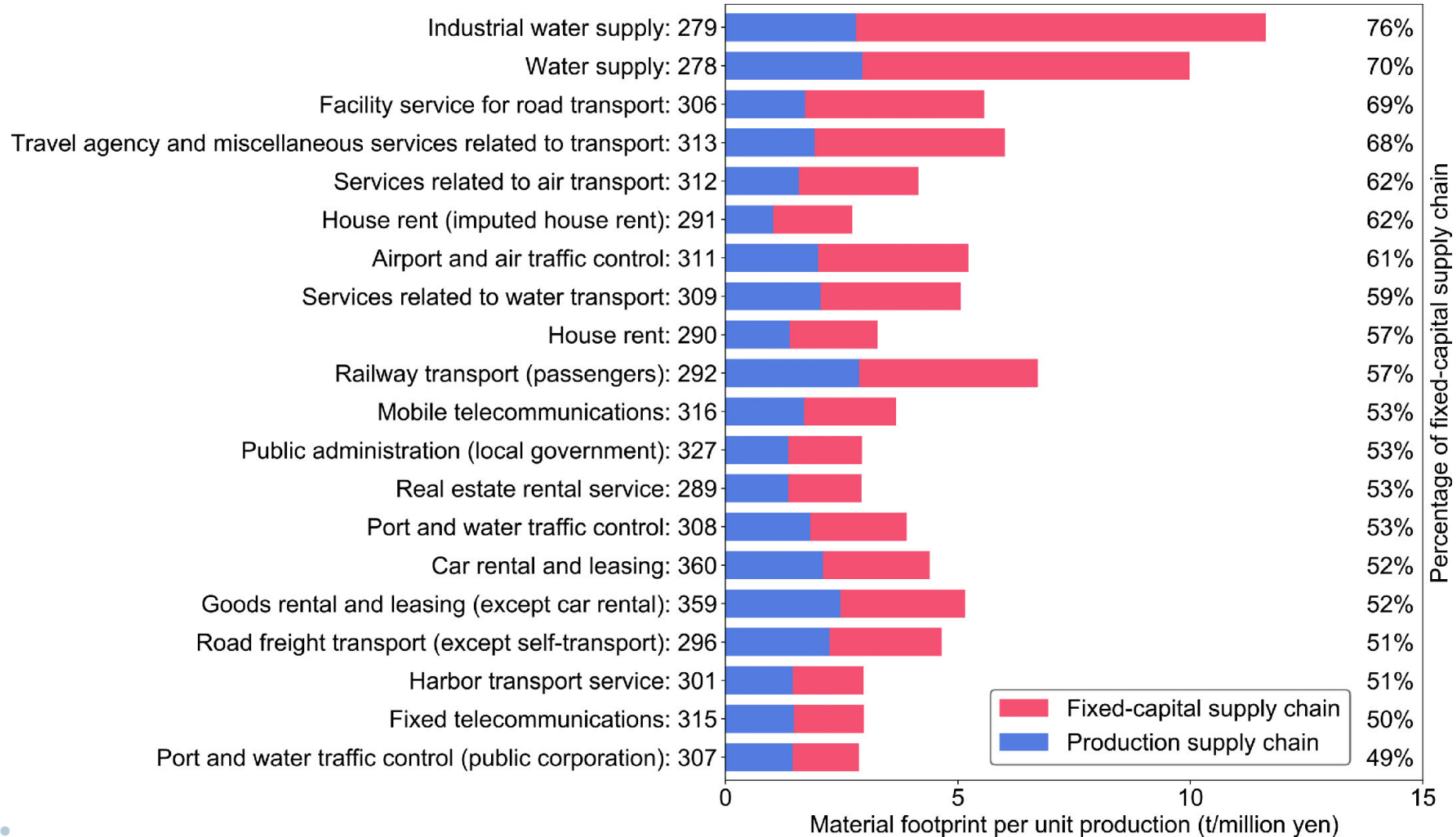


Fig. Material footprint of household consumption in Japan in 2015

Source) Corrigendum to 'Fixed-capital formation for services in Japan incurs substantial carbon-intensive material consumption', Resources, Conservation and Recycling 182, (2022), 106334

単位生産あたりの製品別マテリアルフロー



Source) Hata et al. (2022), Fixed-capital formation for services in Japan incurs substantial carbon-intensive material consumption, *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106334.

家計消費の生産と固定資本に伴うマテリアルフロー

b. Household consumption categories

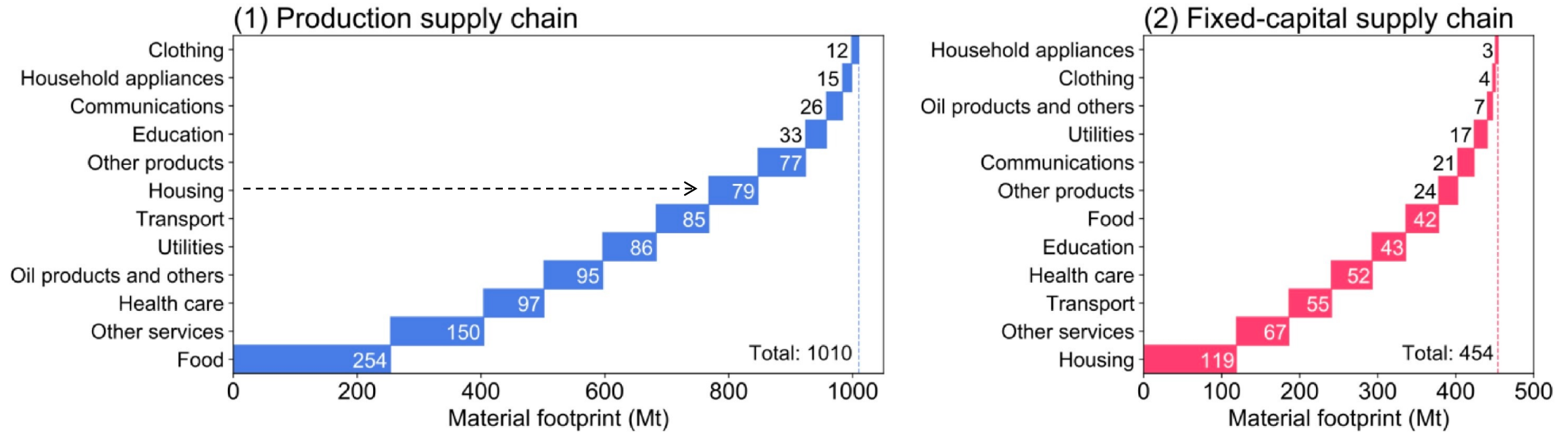


Fig. 2. Capital-embodied material footprint (MF) for household consumption by supply chain type and carbon footprint (CF) per unit MF by supply chain type, organized by material composition.

Source) Hata et al. (2022), Fixed-capital formation for services in Japan incurs substantial carbon-intensive material consumption, *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106334.

家計消費の生産と固定資本に伴うマテリアルフロー

a. Material composition

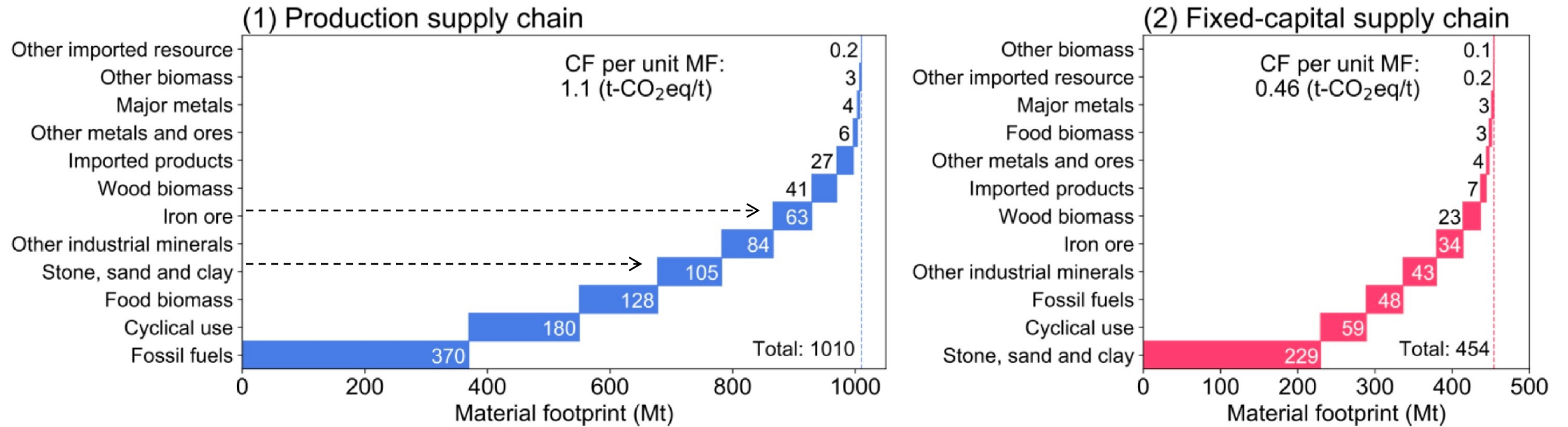


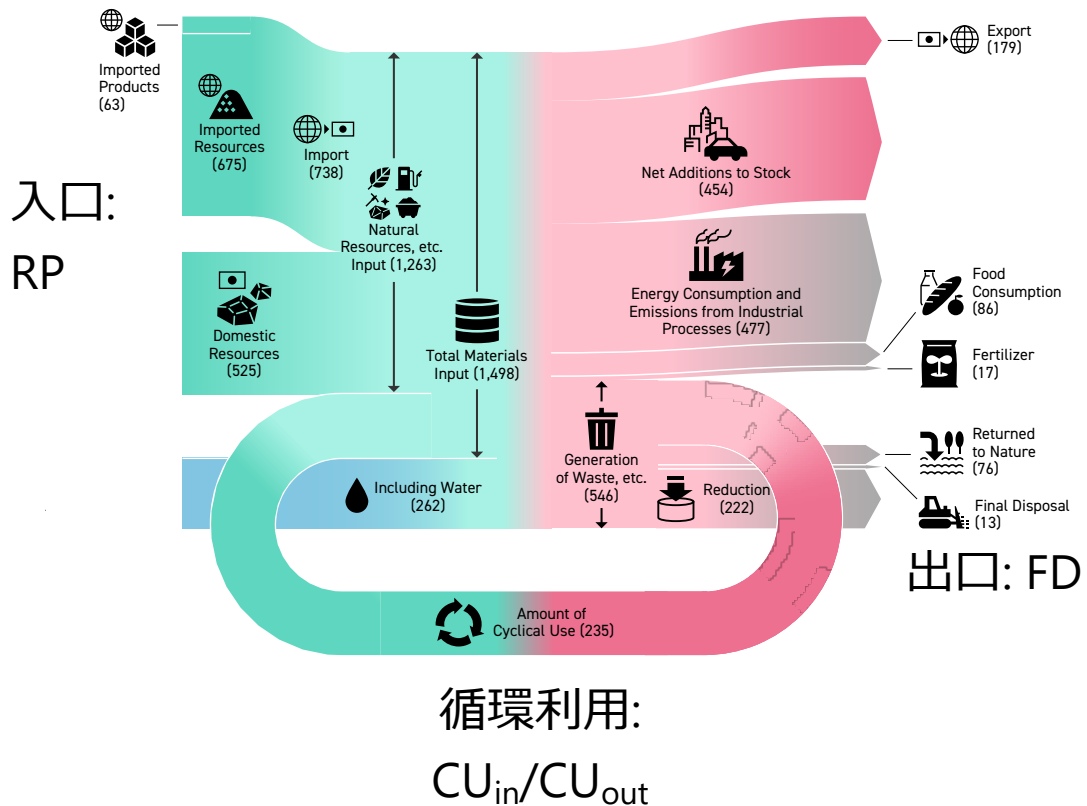
Fig. 2. Capital-embodied material footprint (MF) for household consumption by supply chain type and carbon footprint (CF) per unit MF by supply chain type, organized by material composition.

Source) Hata et al. (2022), Fixed-capital formation for services in Japan incurs substantial carbon-intensive material consumption, *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106334.

マテリアルフローの指標と目標

日本の物質フロー

Fiscal Year 2019



Material flow indicators (MFIs)

[1] 資源生産性: RP
 $= GDP / DMI$

*1: DMI; Domestic material input

[2] 最終処分量: FD
 $= \text{amount of landfilled waste}$

[3] 循環利用率 (入口):
 $CU_{in} = CU / (CU + DMI)$

*2: CU; Amount of cyclical use

[4] 循環利用率 (出口):
 $CU_{out} = CU / GW$

*3: GW; Amount of generated waste

2020年値

RP = 460,000 JPY/t

FD = 12.8Mt

$CU_{in} = 15.9\%$

$CU_{out} = 41.6\%$

2025年目標値

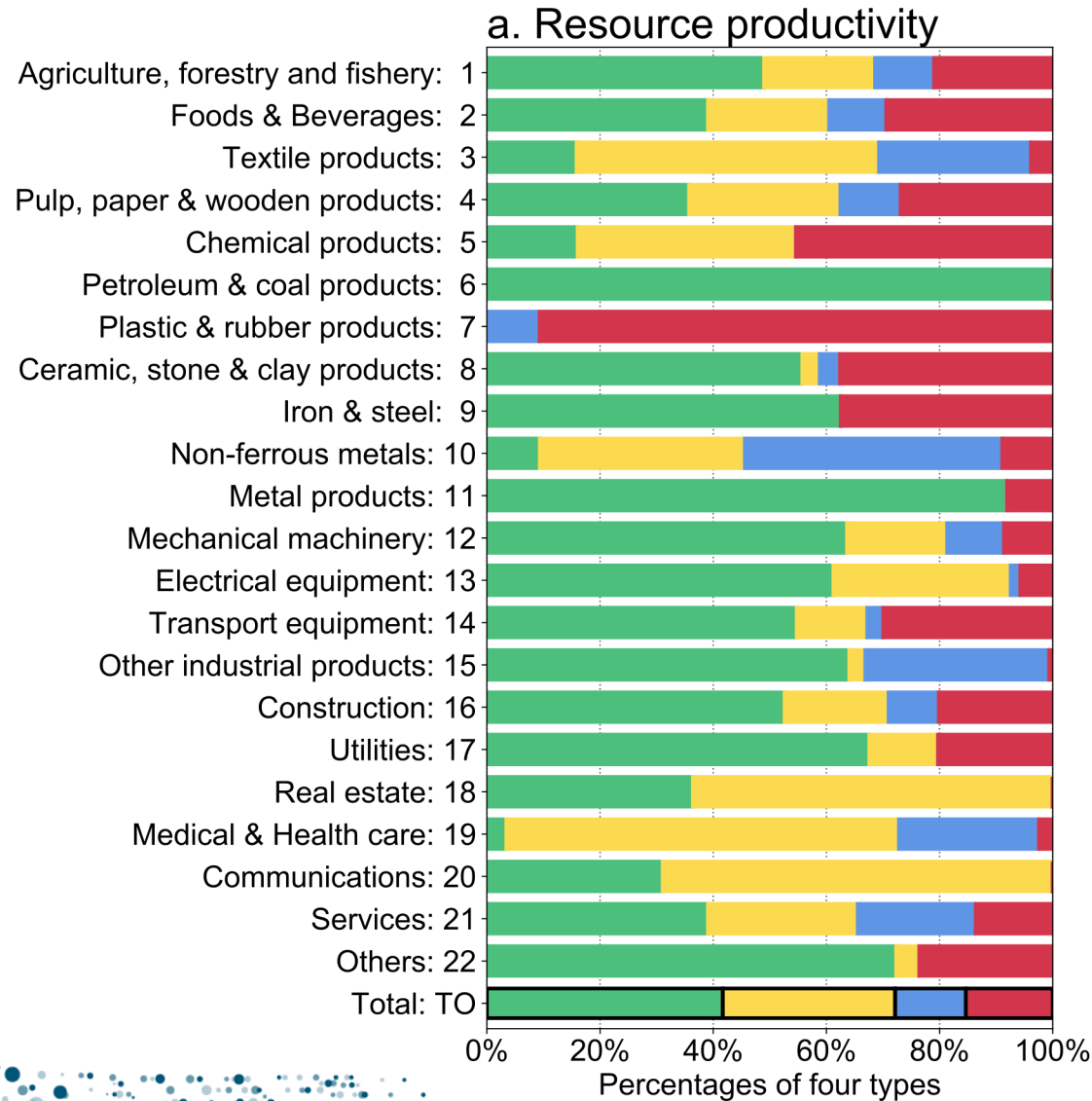
RP = 490,000 JPY/t

FD = 13Mt

$CU_{in} = 18\%$

$CU_{out} = 47\%$

資源生産性指標の改善とカーボンフットプリント削減との関係



2011年値

2015年値

38万9千円/t

42万7千円/t

MFIとCFの変化に関する4分類

■ MICI
 ■ MICD
 ■ MDCI
 ■ MDCD

資源生産性指標(M)とGHG排出量(C)の変化に対する産業分類別の改善・改悪効果

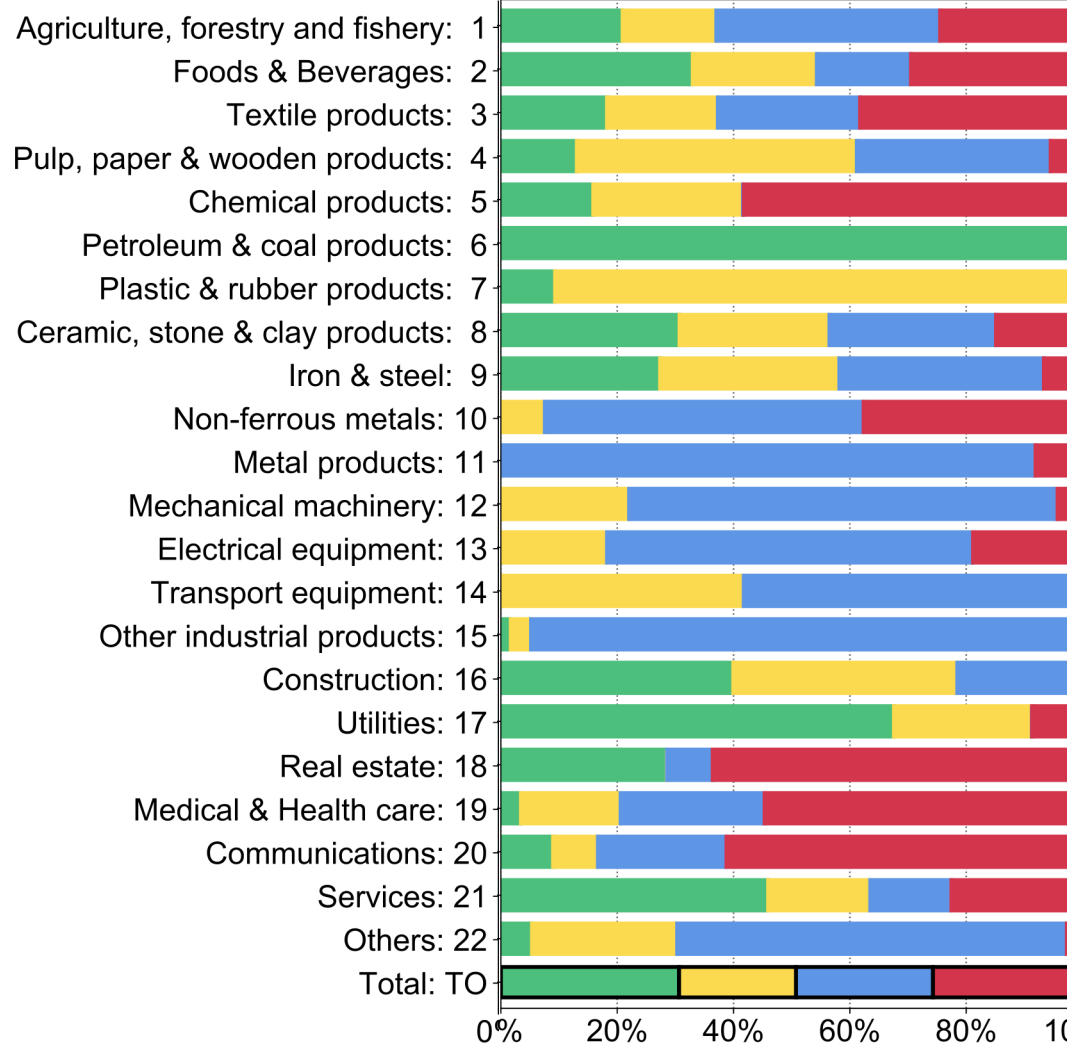
(緑:MC両改善, 赤:MC両改悪, 黄:M改善C改悪, 青:M改悪C改善)

percentages of the four types in 22 industries, weighted by the total output of the sectors included in each industry

Source) Hata et al. (2023) Supply Chain Factors Contributing to Improved Material Flow Indicators but Increased Carbon Footprint, *Environmental Science & Technology* **2023** 57 (34), 12713-12721.

循環利用率指標の改善とカーボンフットプリント削減との関係

c. Cyclical use rate of inflow



2011年値

15.2%

2015年値

16.3%

MFIとCFの変化に関する4分類

■ MICI
 ■ MICD
 ■ MDCI
 ■ MDCD

資源生産性指標(M)とGHG排出量(C)の変化に対する産業分類別の改善・改悪効果

(緑:MC両改善, 赤:MC両改悪, 黄:M改善C改悪, 青:M改悪C改善)

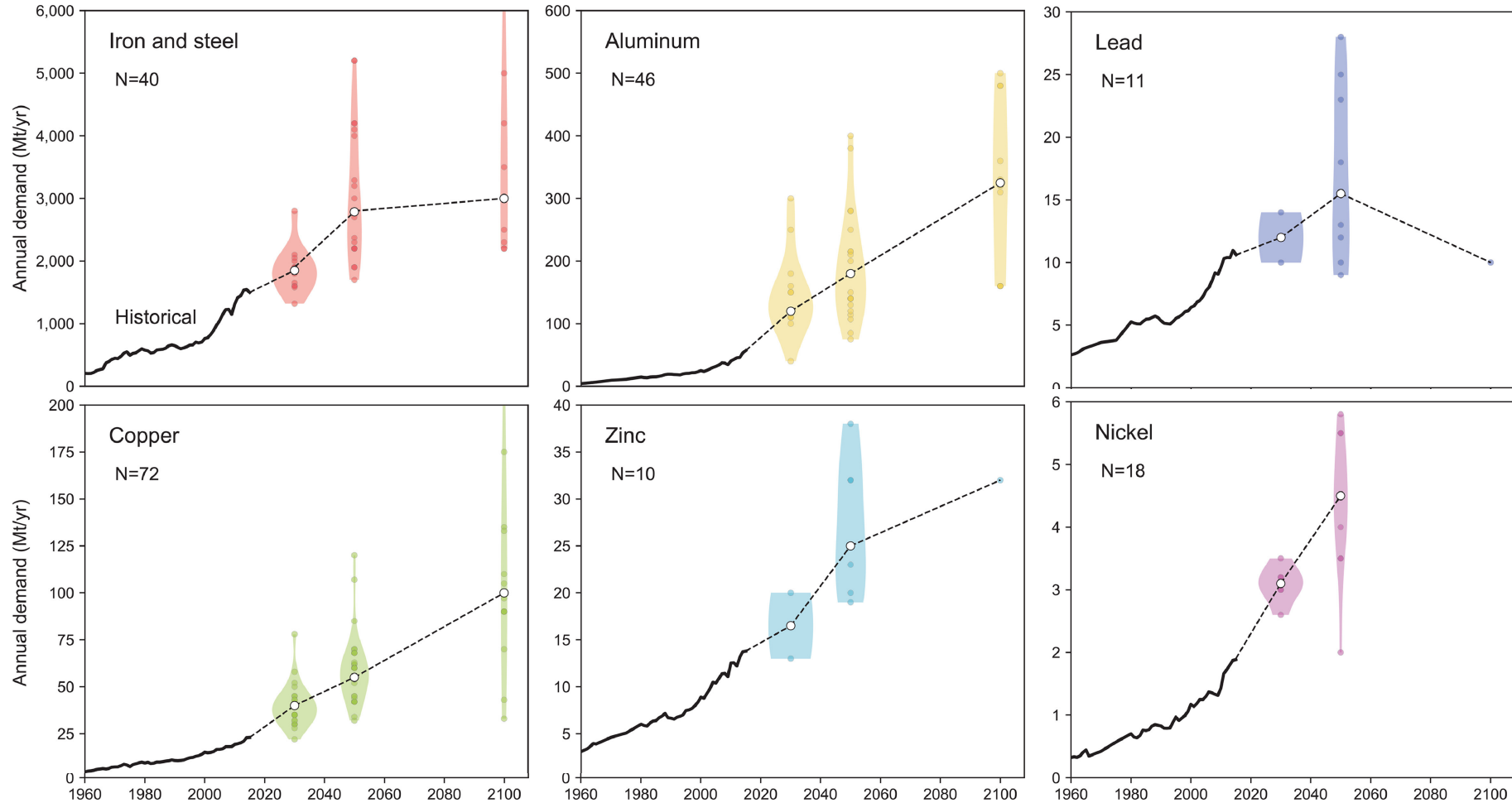
percentages of the four types in 22 industries, weighted by the total output of the sectors included in each industry

Source) Hata et al. (2023) Supply Chain Factors Contributing to Improved Material Flow Indicators but Increased Carbon Footprint, *Environmental Science & Technology* **2023** 57 (34), 12713-12721.

循環経済への転換と建設材料に関する提言

1. 建築・建設材料の要である鉄鋼，セメント，金属，木材等の供給は世界のGHG総排出量の2割強を占め，建築環境に関わる排出量は増加傾向にあり，早急なネットゼロ対策の必要性を再認識すべきである。
2. ネットゼロ対策とする木材利用はネイチャーポジティブとの調和が不可欠である。
3. 消費者の物質利用は製品材料だけでなく製品生産に必要な固定資本形成を通じて大きく生じるため，ネットゼロ化には消費者への協力を明確に求めるべきである。
4. 循環型社会の状態を観察する物質フロー指標の改善とGHG排出削減が両立していない産業部門があり，物質循環によるGHG増加を防ぐ取り組みが産業レベルで重要である。

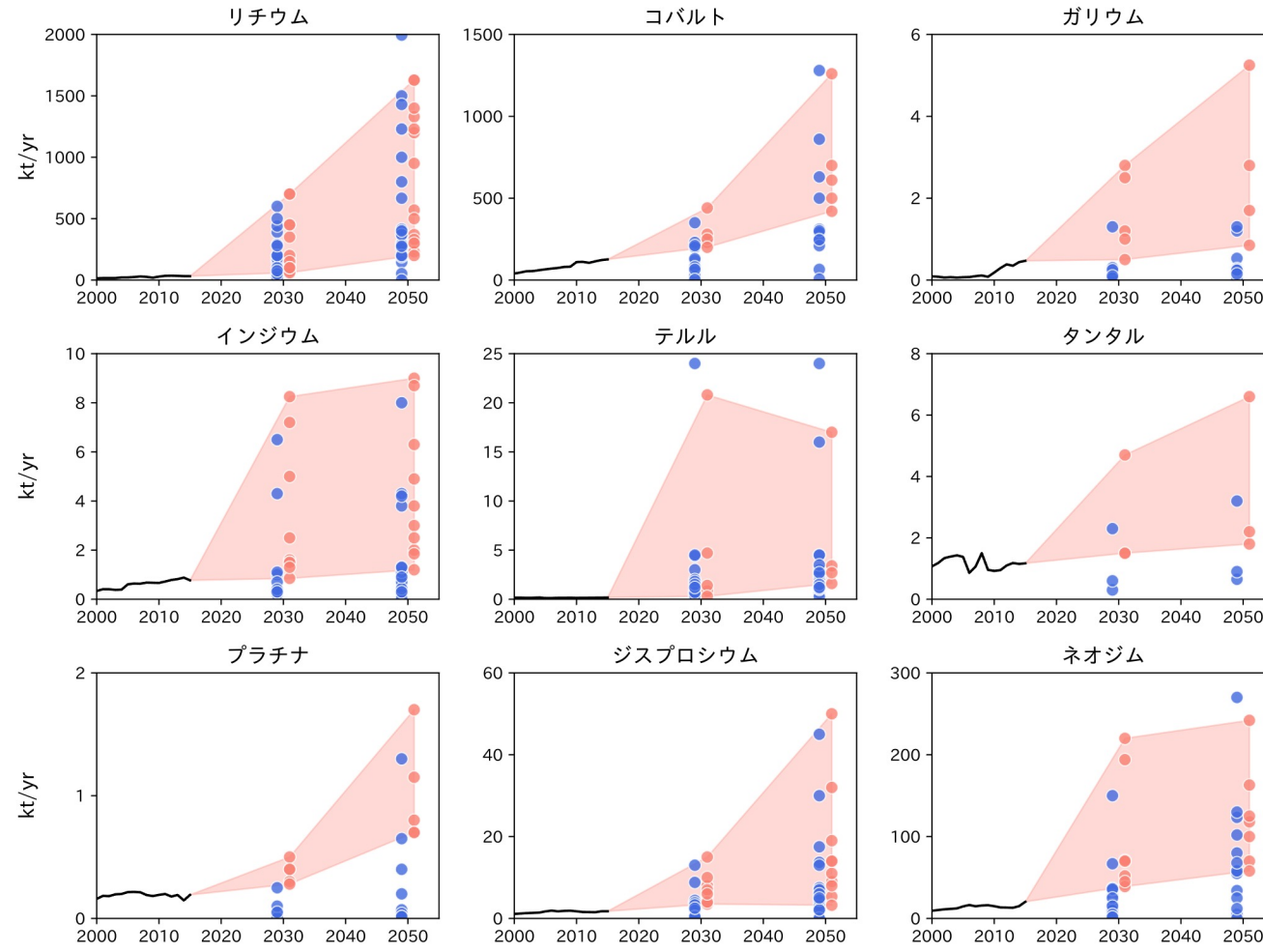
将来のベースメタル需要予測



Demand for base metals other than lead is expected to grow linearly with past trends.

Fig. 2. Summary of demand outlook for major metals through 2030, 2050, and 2100 at the global scale. N indicates the number of data points; a total of 197 data points are included. Open circles represent the median of the data.

脱炭素技術に要するクリティカルメタル需要



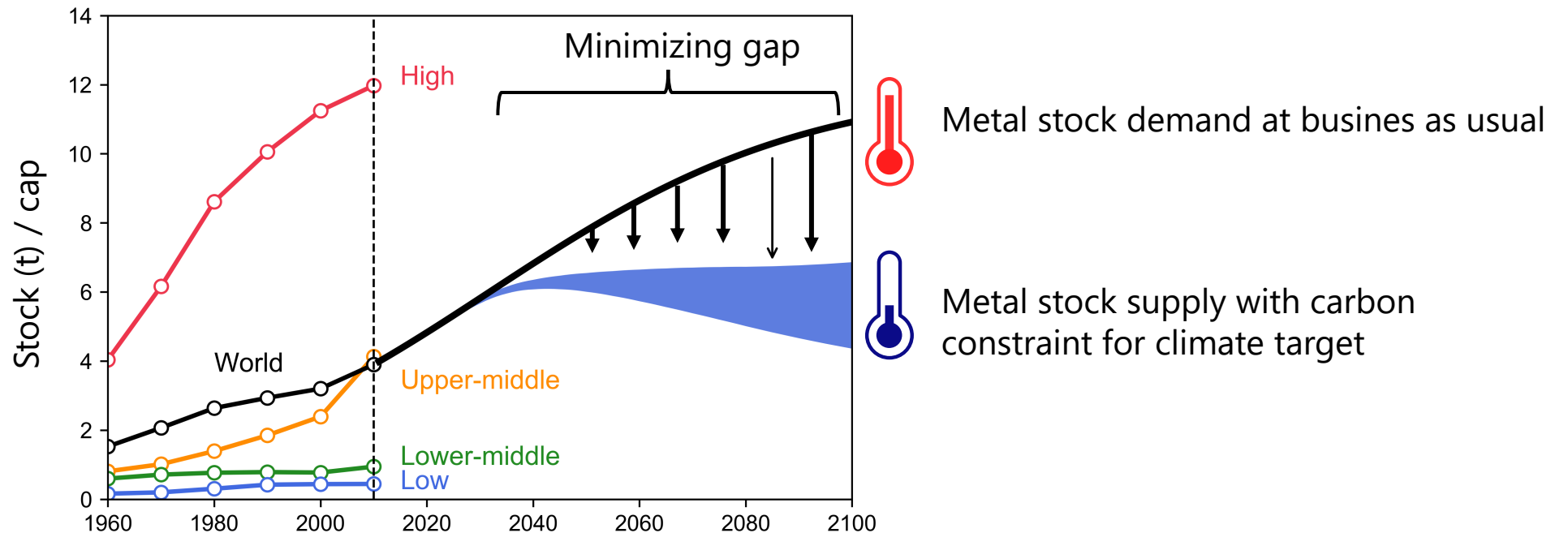
● 脱炭素技術需要 — 生産量統計値
 ● 全用途需要 ■ 全用途需要推計値の幅

低炭素技術の必要性から、クリティカル・メタルの需要増加を見込む研究報告が多数

Fig. 3. Summary of demand outlook for critical metals through 2030 and 2050 at the global scale; 546 data points are included. Twenty-two metals for which data could be obtained are presented, for all end-uses and for low-carbon technologies.

マテリアルバジェット

- カーボンバジェットの下で脱炭素化が困難な材料の供給可能量（マテリアルバジェット）とは？
- 素材生産部門が気候変動目標の達成に向かう平等なGHG排出削減率に貢献する場合の素材の供給可能量を算出する。



金属資源に関する物質バジェット戦略

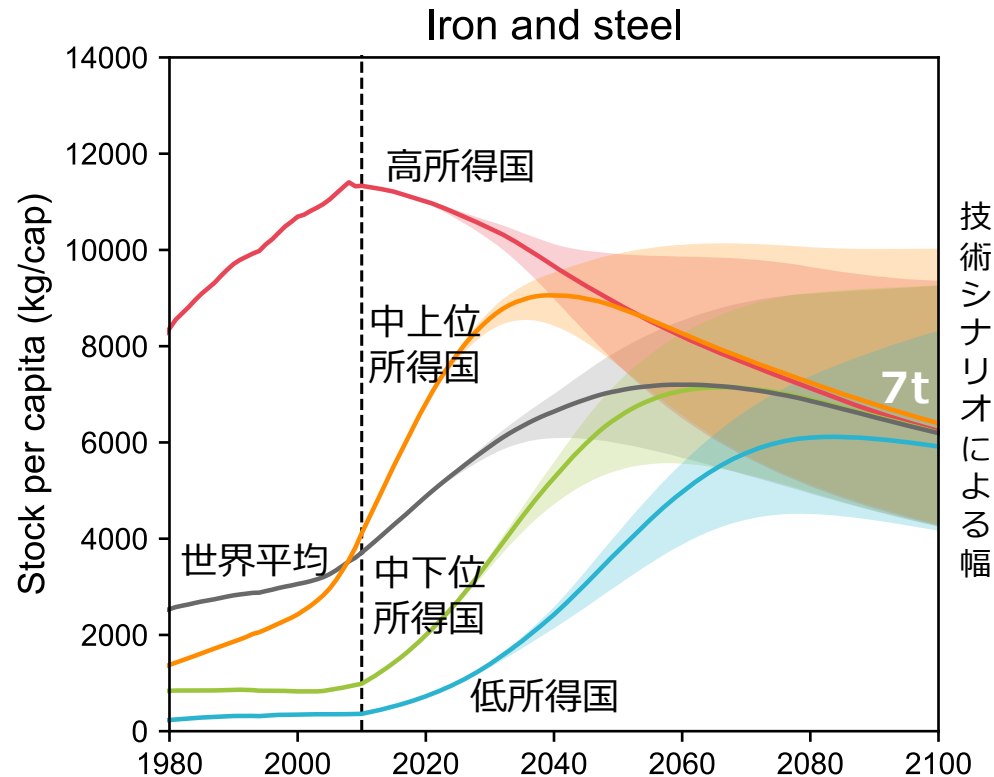


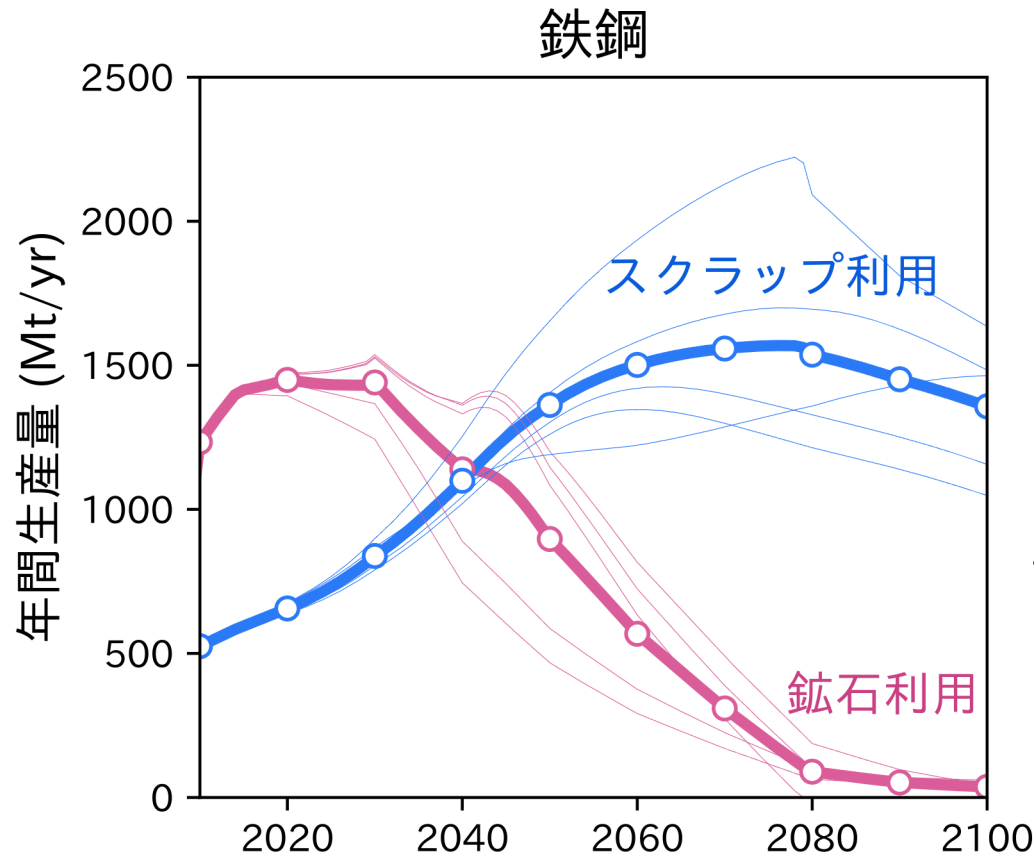
図: 気候2℃目標に対応した金属（鉄）の一人あたり社会蓄積量に関する長期目標値（2100年まで）

出典: Watari et al. (2021) Contraction and convergence of in-use metal stocks to meet climate goals, *Global Environmental Change*, 69, 102284.

気候 2℃ 目標へのGHG削減割合を生産者が等しく目標に持つ場合、社会蓄積としての**一人当たり金属利用可能量は約7トン**に収斂する必要性を示唆。

約7トンは日本を含む高所得国の現状（約12トン/人）を大きく下回る。

金属資源に関する物質バジェット戦略



一次資源の生産を削減し、二次資源を現状以上に押し上げることが肝要。

脱炭素生産技術の開発と共に**物質利用効率の向上**による脱物質化が**気候安定化には不可欠**。

2度の炭素制約のもとでは、一次生産は2030年までにピークアウトし、二次生産は2050年までに一次生産を上回る必要性がある。

Fig. 2. Primary and secondary production of the six major metals under conditions of an emissions budget, 2010–2100. The thin lines show the various scenarios with different advances in technology and circular economy, and the thick lines represent the means of the scenarios.

1.5°Cの炭素予算の下での銅サイクルからの温室効果ガス排出量

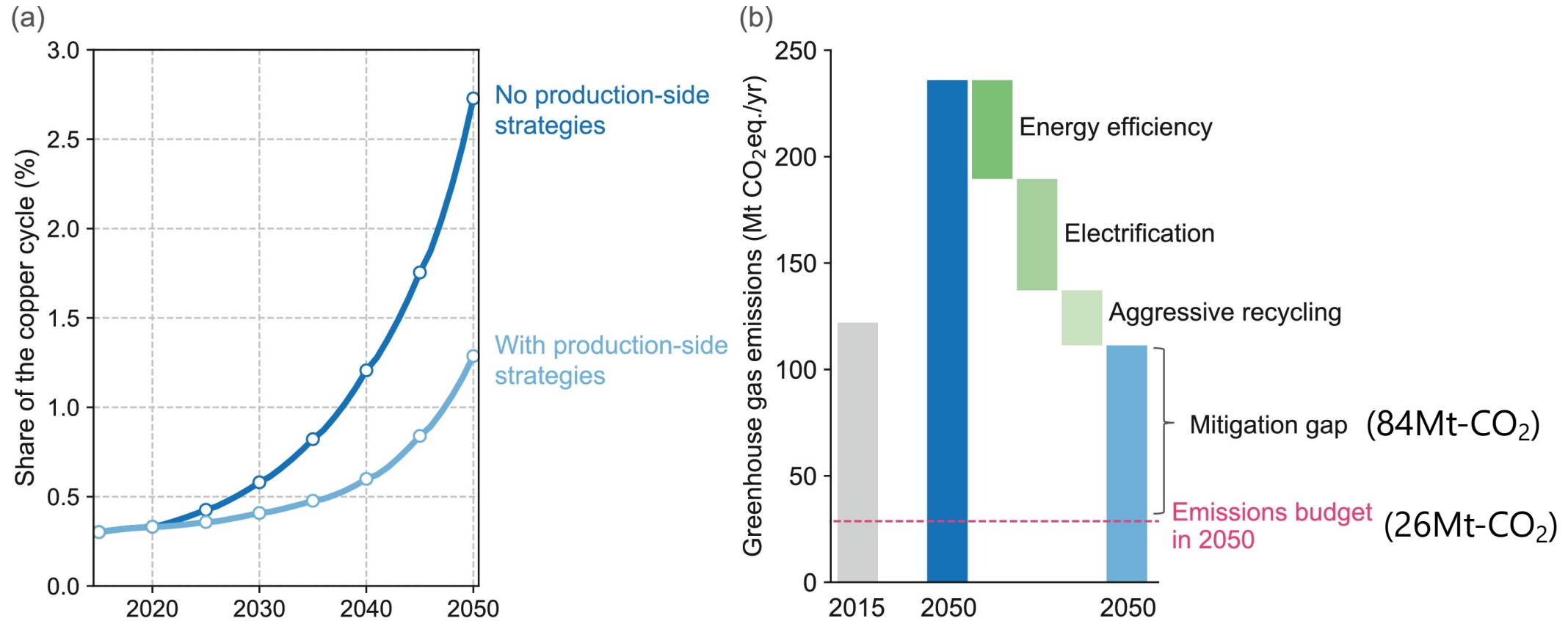


Fig. 5: GHG emissions associated with the global copper cycle, 2015–2050: (a) Share of the copper cycle in the total emissions budget for fossil fuels and industry; (b) Waterfall chart showing the extent to which different production-side strategies reduce GHG emissions from the global copper cycle in 2050.

1.5°Cの炭素予算の下での銅サイクルからの温室効果ガス排出量

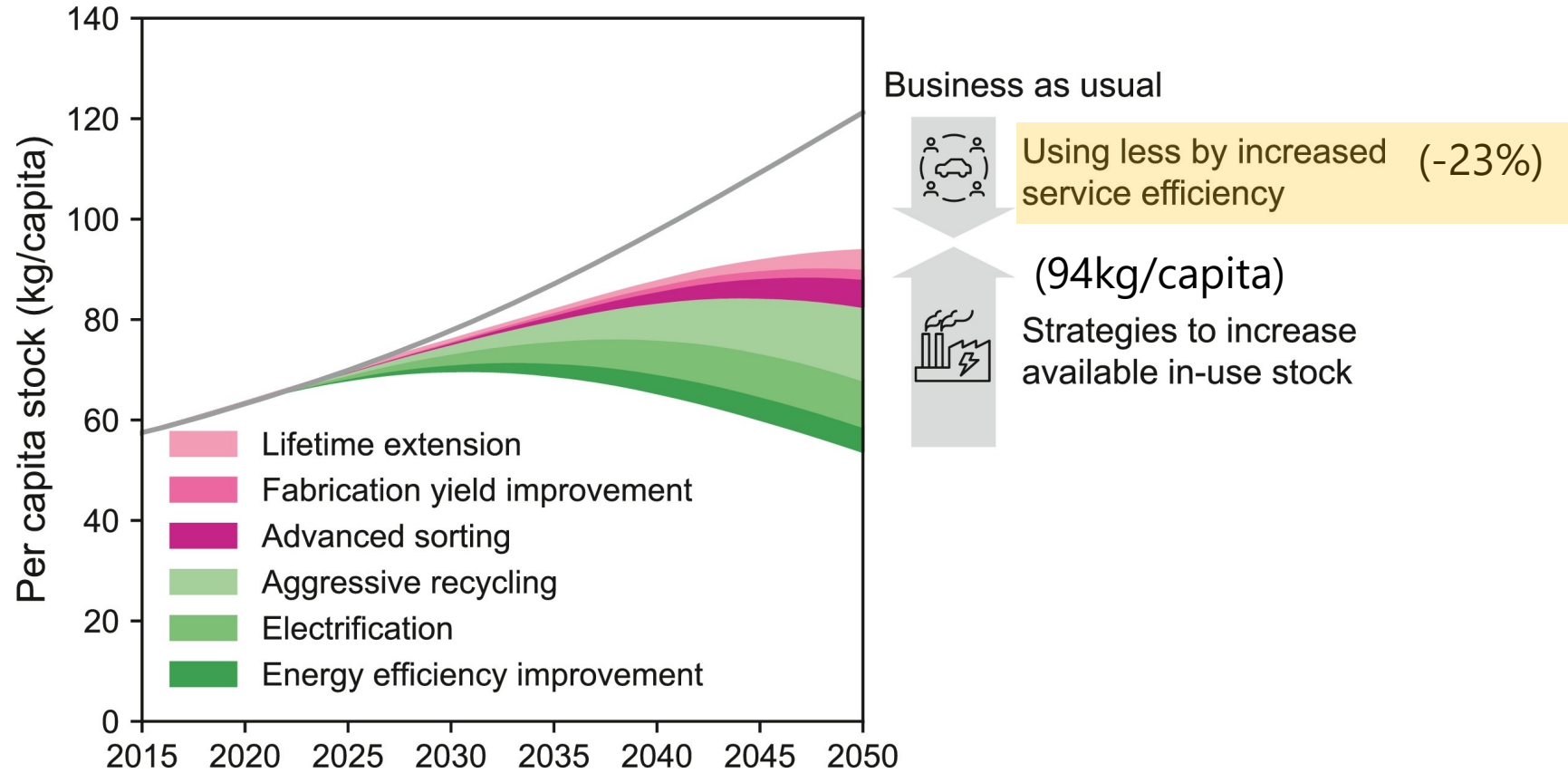


Fig. 7. Global copper in-use stock available under the emissions budget, 2015–2050. The business-as-usual scenario is presented as a comparison, showing the gaps that cannot be filled by strategies to increase the available in-use stock.

CCSに依存しないセメント・コンクリート供給のネットゼロ排出経路

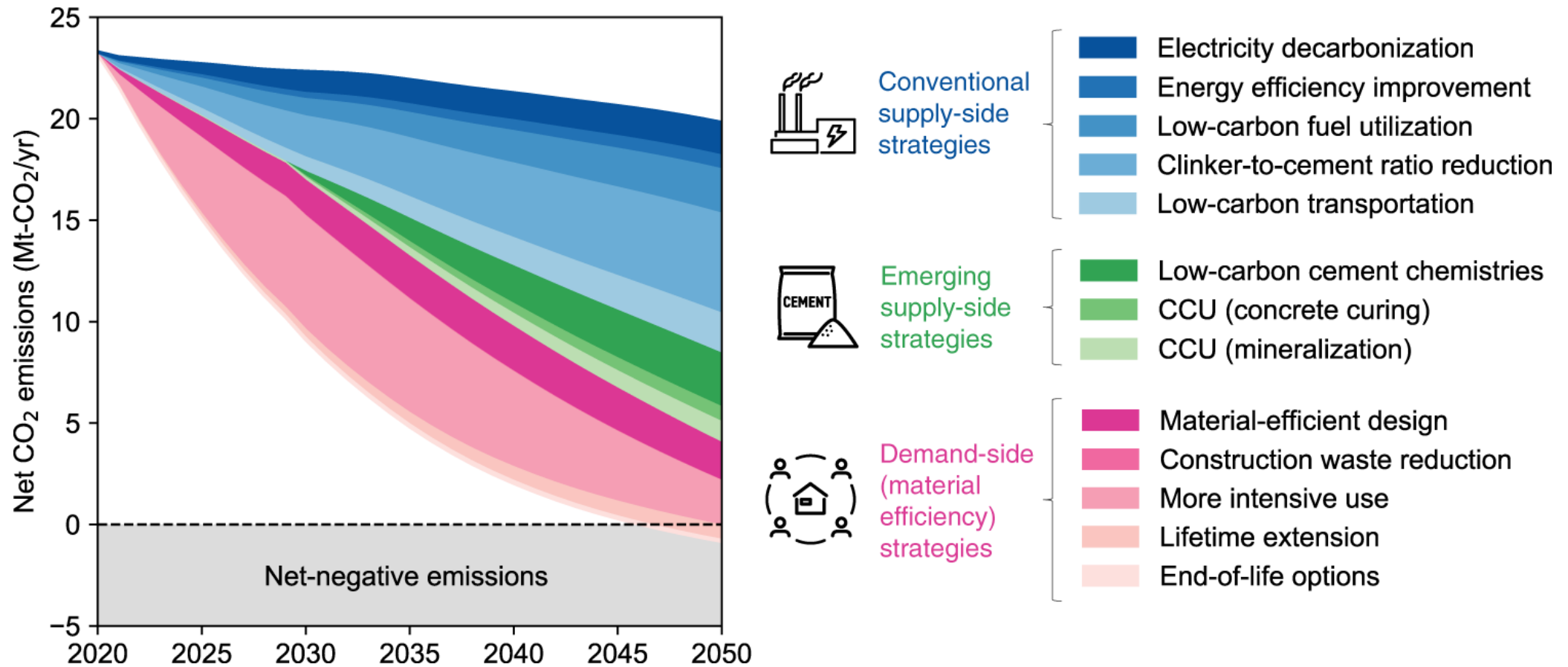


Fig. 3: Role of supply- and demand-side strategies in net CO₂ emissions associated with the cement and concrete cycle in Japan, 2020–2050..

CCSに依存しないセメント・コンクリート供給のネットゼロ排出経路

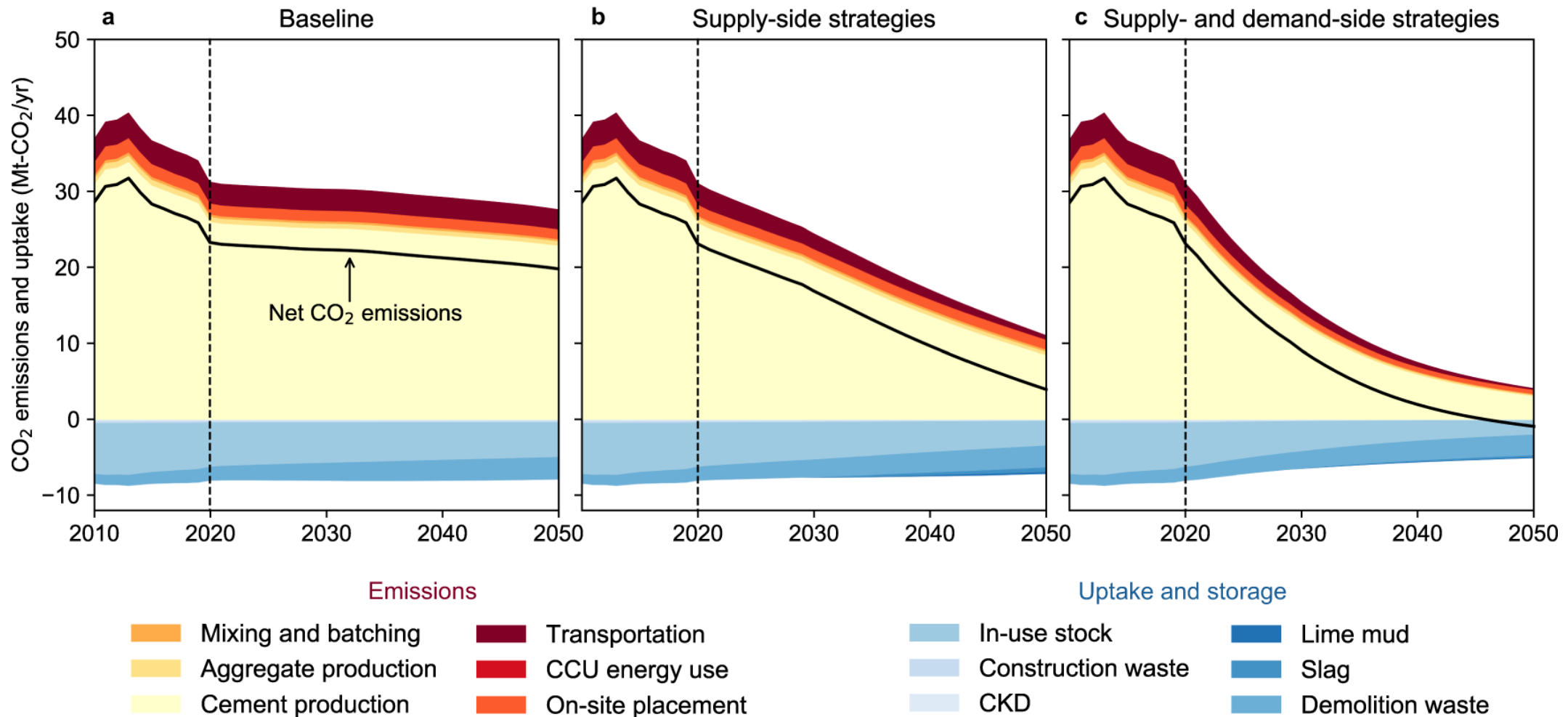


Fig. 4: CO₂ emission and uptake associated with cement and concrete cycle in Japan under the three representative scenarios, 2010–2050.

CCSに依存しないセメント・コンクリート供給のネットゼロ排出経路

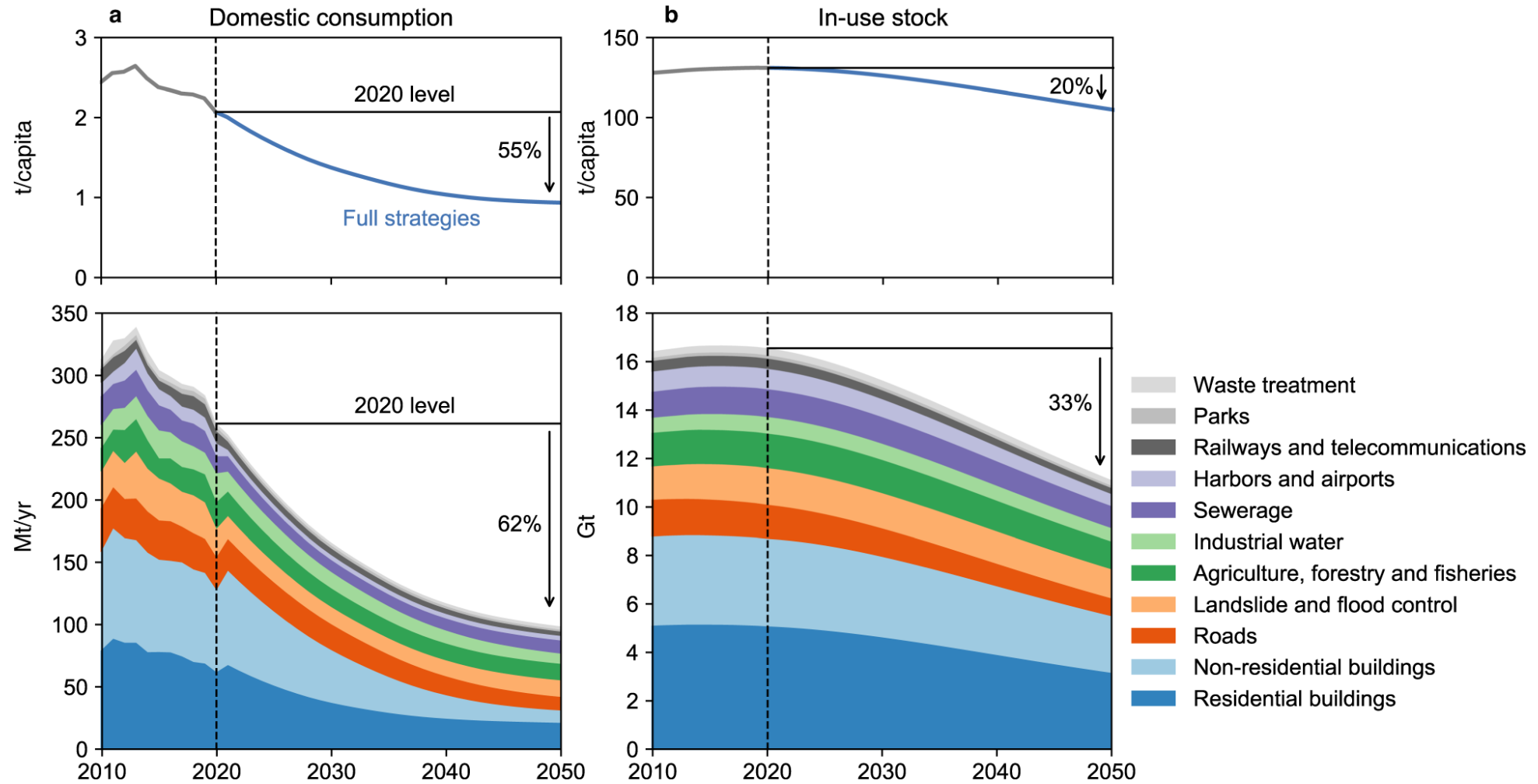


Fig. 5: Domestic consumption and in-use stocks of concrete with and without a set of supply- and demand-side strategies in Japan, 2010–2050.

需要側対策導入率とCCS付帯キルン導入率との相互関係

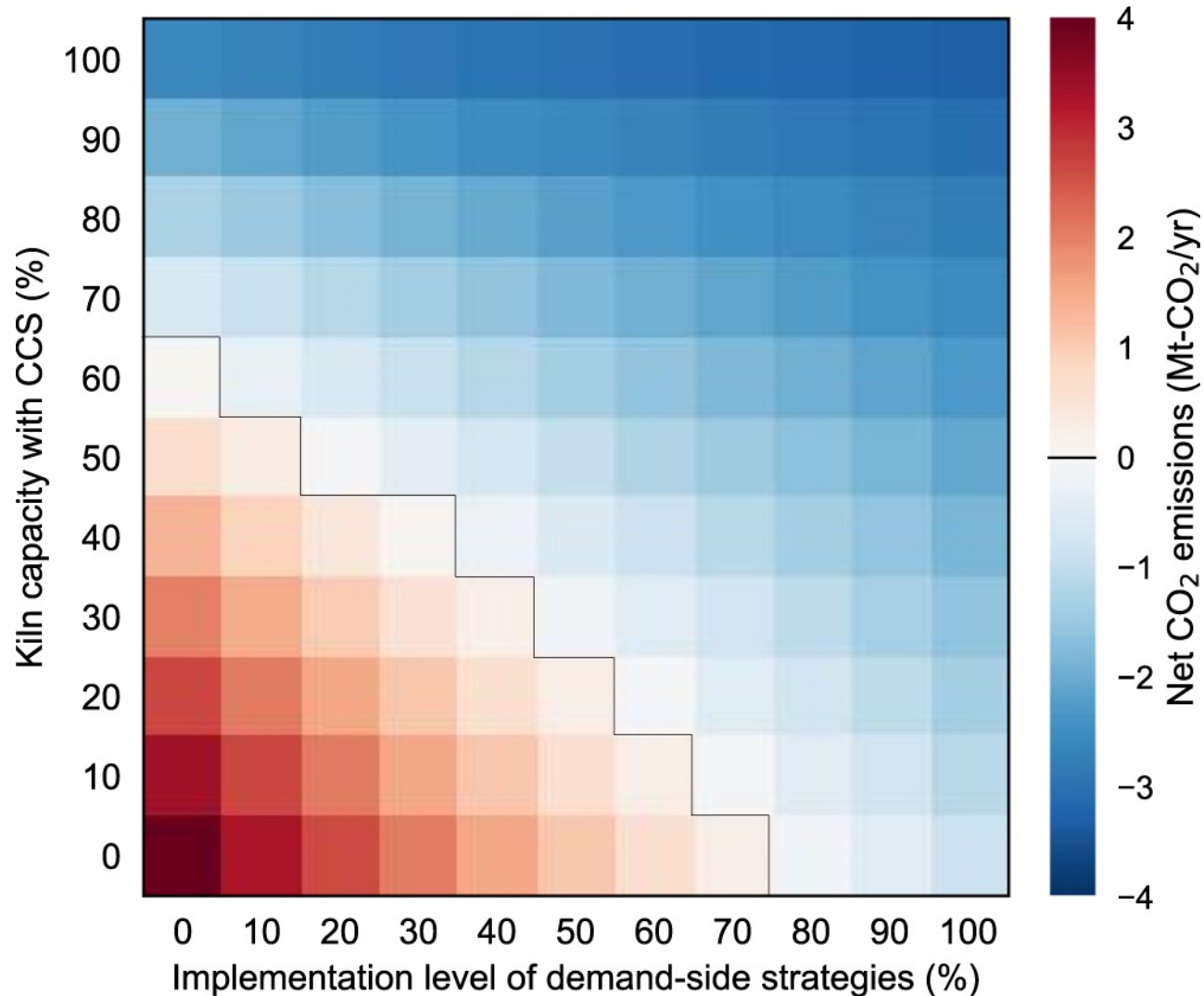


Fig. 6: Sensitivity of 2050 net CO₂ emissions attributable to the cement and concrete cycle in Japan to the implementation level of demand-side strategies and the proportion of kilns equipped with carbon capture and storage (CCS).

日本の鉄鋼フローにおける質の違い

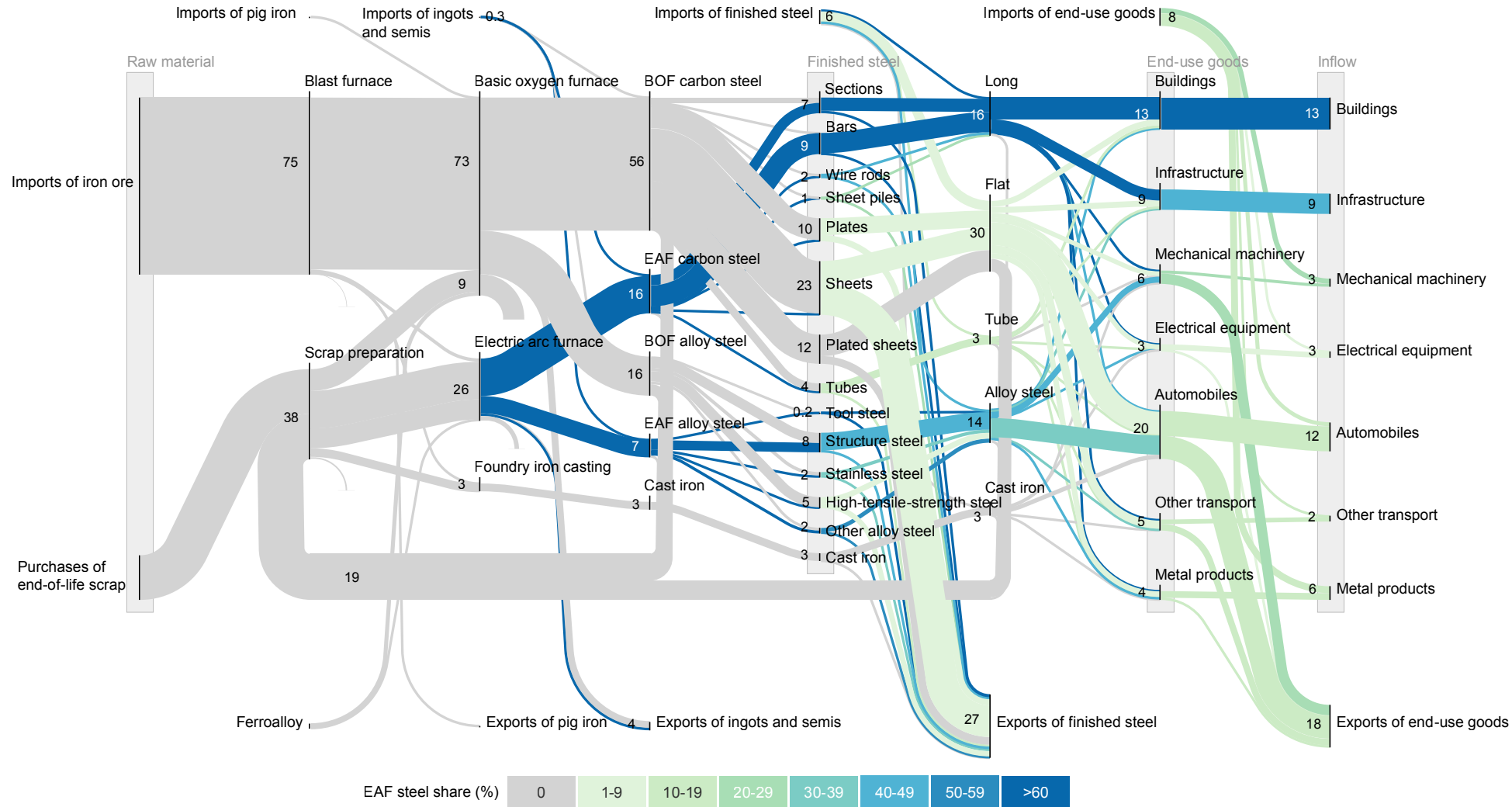
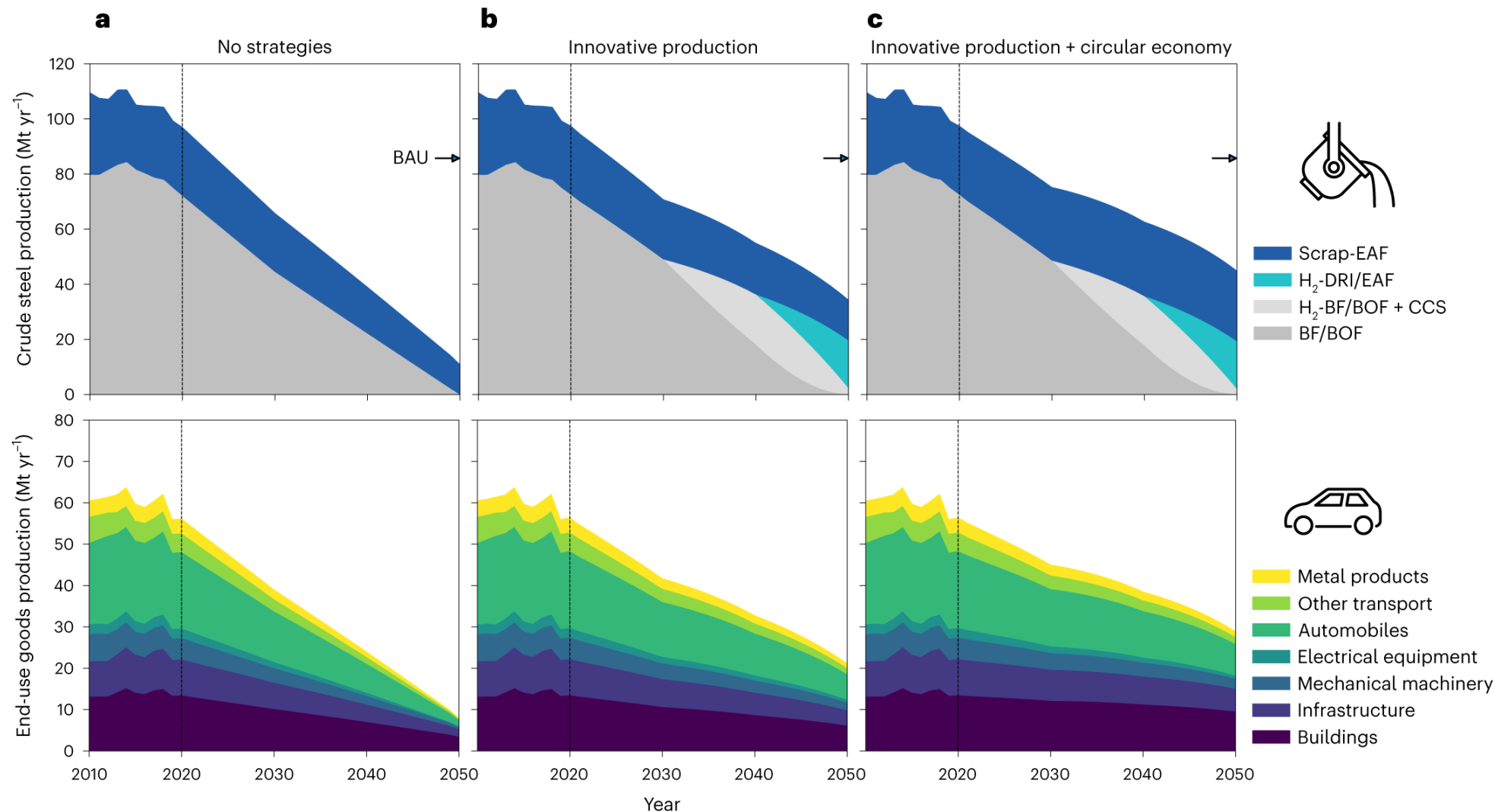


Fig. : Map of steel flows from raw materials to end-use goods in Japan in 2019.

Source) Watari, T. et al. (2023) Limited quantity and quality of steel supply in a zero-emission future. *Nature Sustainability*, 6, 336–343

日本の鉄鋼生産のネットゼロシナリオ



Source) Watari, T. et al. (2023) Limited quantity and quality of steel supply in a zero-emission future. *Nature Sustainability*, 6, 336–343

Fig. 2: Production of crude steel, finished steel and end-use goods, available under the carbon budget in Japan, 2010–2050.

日本の建築物の生産に伴う炭素排出量

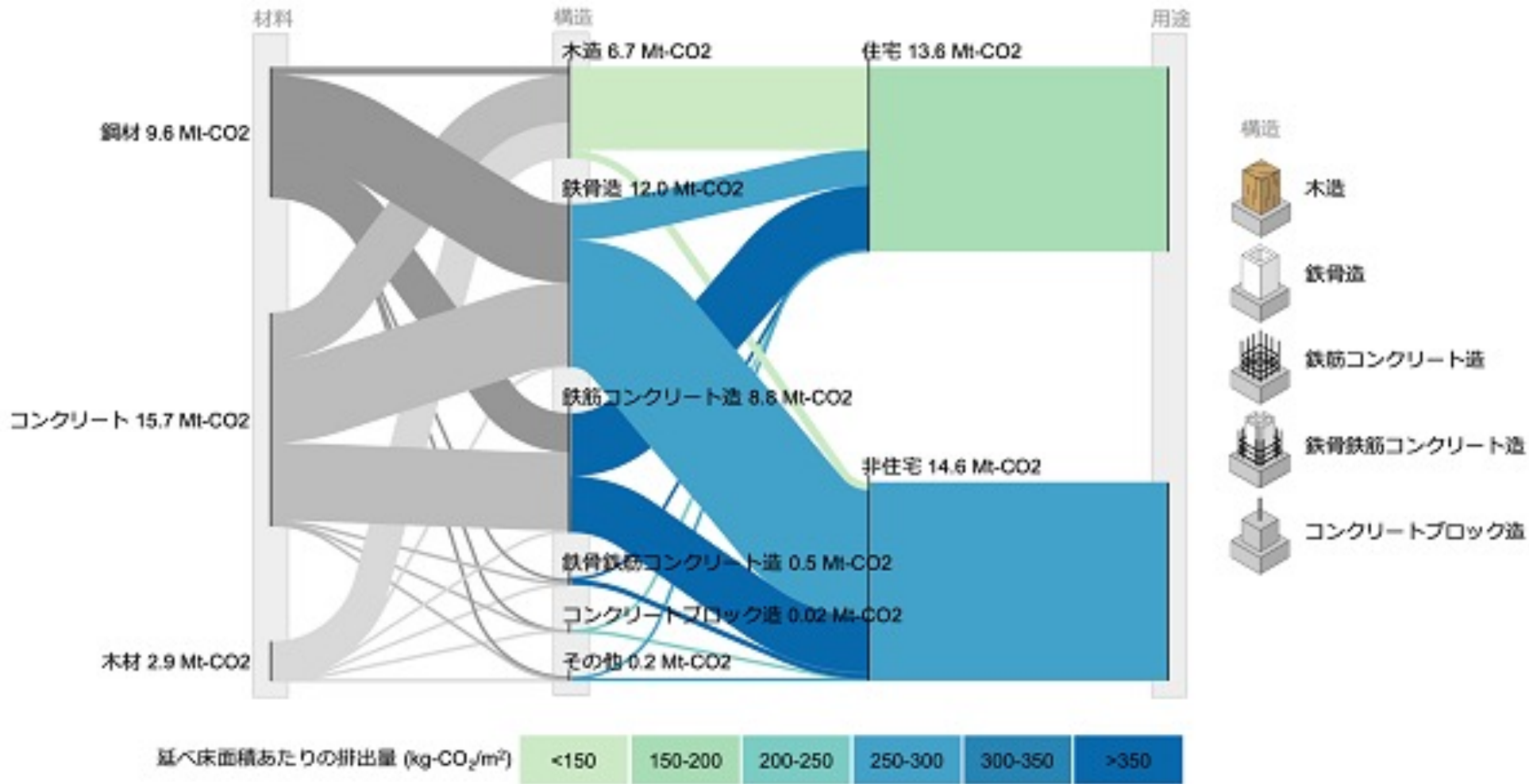


Fig. 2. Embodied carbon in building construction by material, structure, and end-use across Japan in 2019. Carbon accounting here includes carbon storage in concrete and HWP, in addition to emissions from materials production.

Source) Watari, T. et al. (2024) Net-Zero Embodied Carbon in Buildings with Today's Available Technologies. *Environ. Sci. Technol*, 2024, 58, 4, 1793–1801

循環経済への転換と建設材料に関する提言

5. ネットゼロに向かう素材供給量（物質バジェット）は2050年までの大規模なCCSの導入を前提としなければ、供給側の脱炭素技術だけでは不十分であり、需要側の対策を同時に展開する必要がある。
6. 鉄鋼はアップサイクルによる資源循環を指向しなければ、建築
 - ・ 建設材料への供給に偏るため、鉄鋼需要者全体として循環経済の戦略を持つべきである。

日本の建築物のネットゼロ炭素排出への達成経路

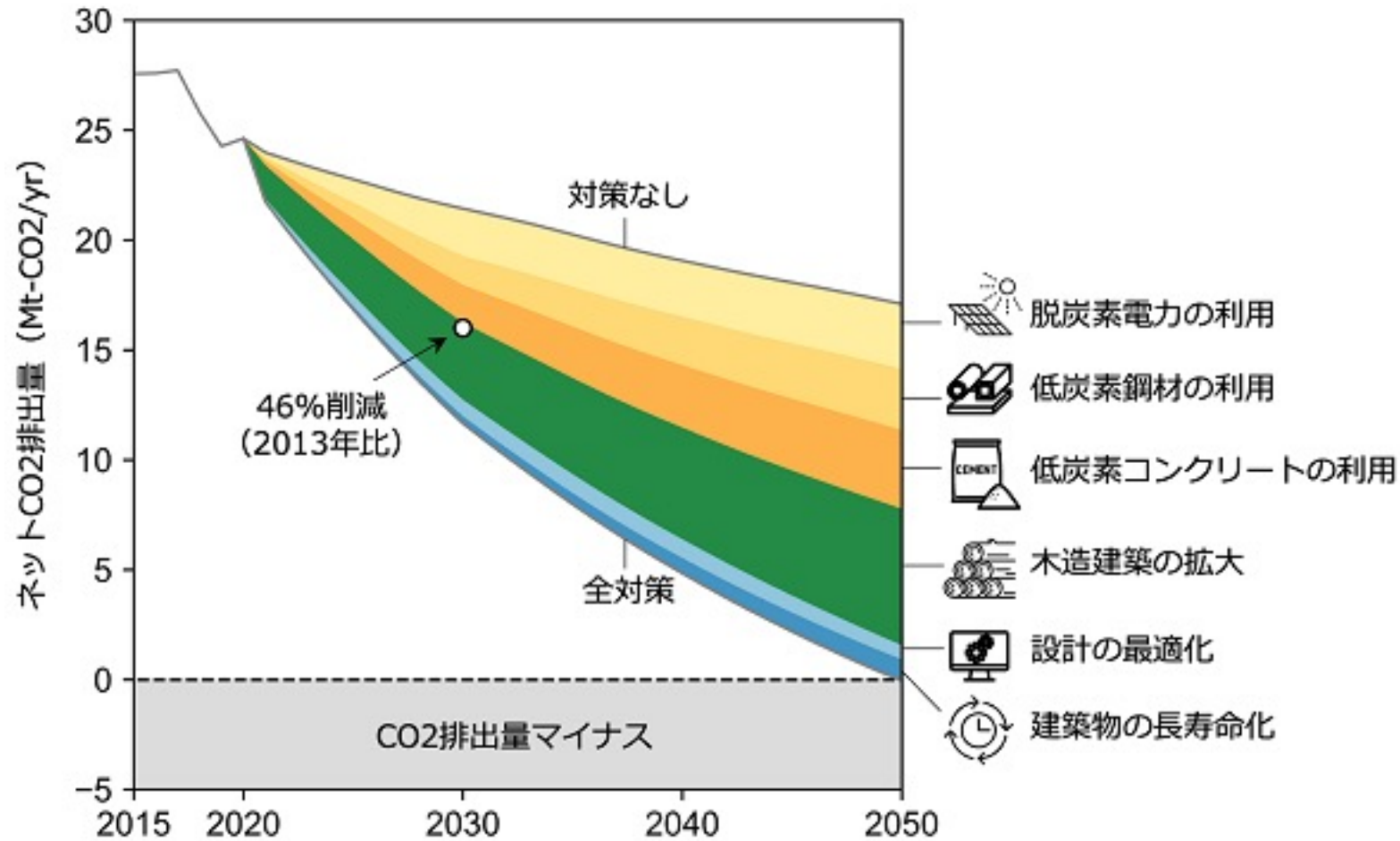


Figure 3. Pathways to achieving net-zero embodied carbon in buildings across Japan. Net CO₂ emissions include carbon storage in concrete and HWPs, in addition to carbon emissions from material production. A detailed balance of positive and negative CO₂ fluxes is shown in Figure S12 in the SI.

Source) Watari, T. et al. (2024) Net-Zero Embodied Carbon in Buildings with Today's Available Technologies. *Environ. Sci. Technol*, 2024, 58, 4, 1793–1801

日本の建築物のネットゼロ炭素排出への達成経路

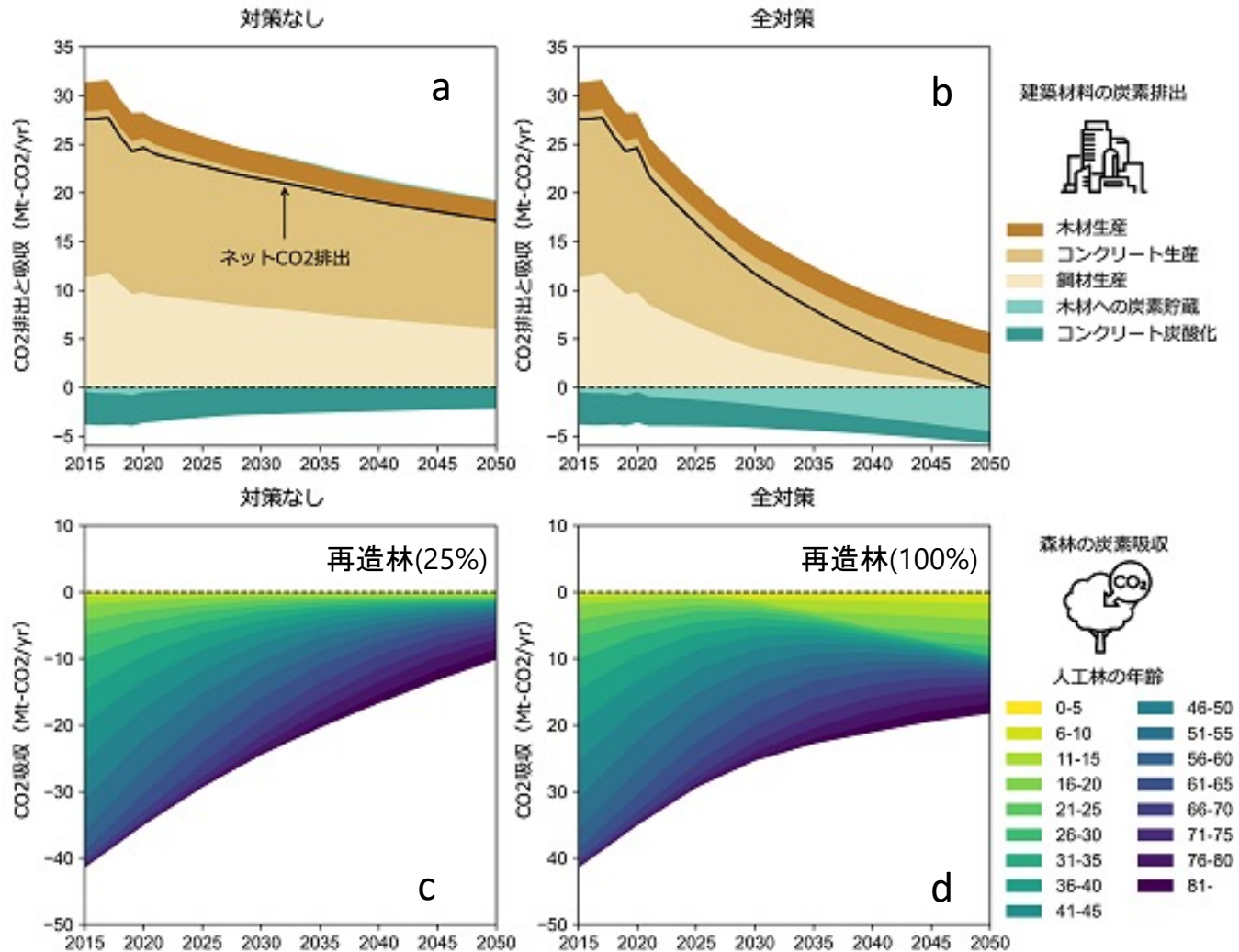
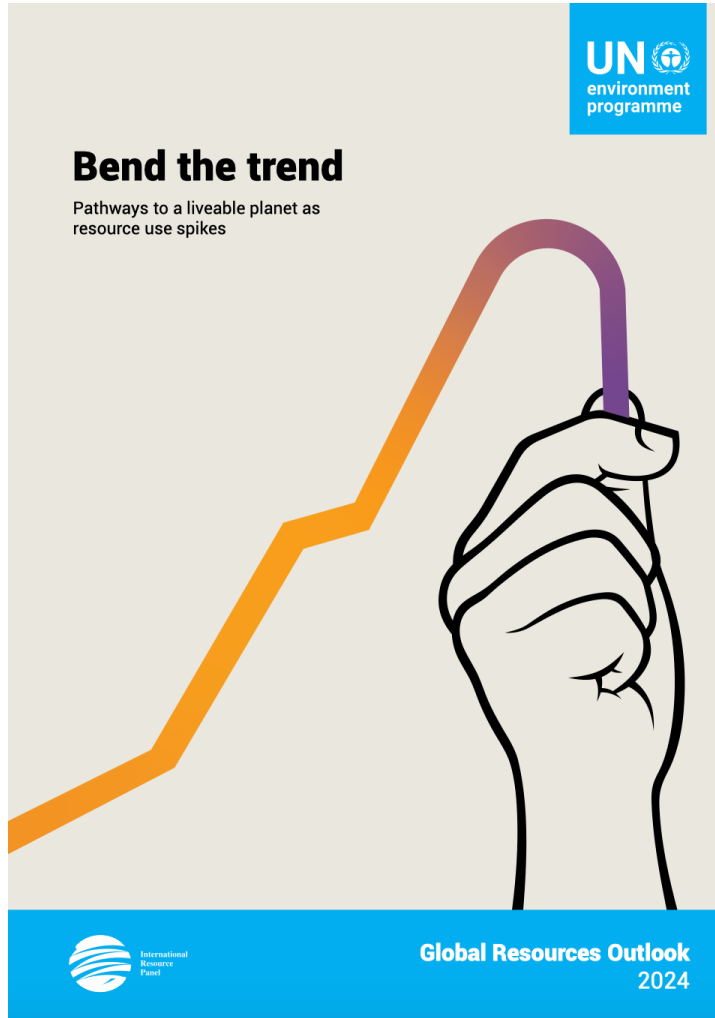


Figure 4. CO₂ emissions and storage associated with building materials and forests. Panels (a) and (b) show emissions and storage associated with building materials. Panels (c) and (d) show storage associated with forests..

Source) Watari, T. et al. (2024) Net-Zero Embodied Carbon in Buildings with Today's Available Technologies. *Environ. Sci. Technol*, 2024, 58, 4, 1793–1801

The Global Resources Outlook 2024



The 2024 edition of the Global Resources Outlook sheds light on how resources are essential to the effective implementation of the Agenda 2030 and multilateral environmental agreements to tackle the triple planetary crisis.

GRO2024 provides 9 key messages; **speed-up, demand-side measures**

| | |
|-----------|---|
| <p>07</p> | <p>Bold policy action is critical to phase out unsustainable activities, speed up responsible and innovative ways of meeting human needs and promote social acceptance of the necessary transitions.</p> |
| <p>08</p> | <p>The prevailing approach of focusing on supply-side (production) measures must be supplemented with a much stronger focus on demand-side (consumption) measures.</p> |

Source) United Nations Environment Programme (2024): Global Resources Outlook 2024: Bend the Trend – Pathways to a liveable planet as resource use spikes. International Resource Panel. Nairobi

循環経済への転換と建設材料に関する提言

5. ネットゼロに向かう素材供給量（物質バジェット）は2050年までの大規模なCCSの導入を前提としなければ、供給側の脱炭素技術だけでは不十分であり、需要側の対策を同時に展開する必要がある。
6. 鉄鋼はアップサイクルによる資源循環を指向しなければ、建築
 - ・ 建設材料への供給に偏るため、鉄鋼需要者全体として循環経済の戦略を持つべきである。
7. 建築物の供給側でのネットゼロ対策は国内木材利用が鍵であり、需要側の対策の導入量を抑制できる。
8. 循環経済への転換の必要性は既に認識されており、加速する対策と制度設計に注力すべき。

循環経済への転換と建設材料に関する提言

1. 建築・建設材料の要である鉄鋼，セメント，金属，木材等の供給は世界のGHG総排出量の2割強を占め，建築環境に関わる排出量は増加傾向にあり，早急なネットゼロ対策の必要性を再認識すべきである。
2. ネットゼロ対策とする木材利用はネイチャーポジティブとの調和が不可欠である。
3. 消費者の物質利用は製品材料だけでなく製品生産に必要な固定資本形成を通じて大きく生じるため，ネットゼロ化には消費者への協力を明確に求めるべきである。
4. 循環型社会の状態を観察する物質フロー指標の改善とGHG排出削減が両立していない産業部門があり，物質循環によるGHG増加を防ぐ取り組みが産業レベルで重要である。
5. ネットゼロに向かう素材供給量（物質バジェット）は2050年までの大規模なCCSの導入を前提としなければ，供給側の脱炭素技術だけでは不十分であり，需要側の対策を同時に展開する必要がある。
6. 鉄鋼はアップサイクルによる資源循環を指向しなければ，建築・建設材料への供給に偏るため，鉄鋼需要者全体として循環経済の戦略を持つべきである。
7. 建築物の供給側でのネットゼロ対策は国内木材利用が鍵であり，需要側の対策の導入量を抑制できる。
8. 循環経済への転換の必要性は既に認識されており，加速する対策と制度設計に注力すべき

ご清聴ありがとうございました。

南齋規介

nansai.keisuke@nies.go.jp