

中環審 2050年ネットゼロ実現に向けた気候変動対策検討小委員会・
産構審 地球環境小委員会 中長期地球温暖化対策検討WG 合同会合

2024年11月25日

RITE DNE21+モデルを用いた日本の 2040年排出削減目標の感度解析

(公財) 地球環境産業技術研究機構(RITE)

システム研究グループ

秋元 圭吾、佐野 史典、本間 隆嗣



分析モデル、手法、シナリオ の概要

分析・評価スキーム：全体概要

日本の実績排出量

	1990年度	2013年度	2021年度	2022年度		
	排出量	排出量	排出量	排出量	変化量 《変化率》	
	〔シェア〕	〔シェア〕	〔シェア〕	〔シェア〕	2013年度比	2021年度比
合計	1,275 〔100%〕	1,407 〔100%〕	1,164 〔100%〕	1,135 〔100%〕	-271.9 《-19.3%》	-28.6 《-2.5%》
二酸化炭素 (CO ₂)	1,163 〔91.2%〕	1,318 〔93.6%〕	1,064 〔91.4%〕	1,037 〔91.3%〕	-280.9 《-21.3%》	-27.0 《-2.5%》
エネルギー起源	1,068 〔83.7%〕	1,235 〔87.8%〕	987 〔84.8%〕	964 〔84.9%〕	-271.3 《-22.0%》	-23.0 《-2.3%》
非エネルギー起源	95.3 〔7.5%〕	82.2 〔5.8%〕	76.6 〔6.6%〕	72.6 〔6.4%〕	-9.6 《-11.7%》	-4.0 《-5.2%》
メタン (CH ₄)	49.8 〔3.9%〕	32.7 〔2.3%〕	30.4 〔2.6%〕	29.9 〔2.6%〕	-2.8 《-8.6%》	-0.51 《-1.7%》
一酸化二窒素 (N ₂ O)	28.9 〔2.3%〕	19.9 〔1.4%〕	17.6 〔1.5%〕	17.3 〔1.5%〕	-2.6 《-13.3%》	-0.34 《-1.9%》
代替フロン等4ガス	33.4 〔2.6%〕	37.2 〔2.6%〕	52.4 〔4.5%〕	51.7 〔4.5%〕	14.5 《+39.0%》	-0.71 《-1.4%》
ハイドロフルオロカーボン類 (HFCs)	13.4 〔1.1%〕	30.3 〔2.2%〕	46.9 〔4.0%〕	46.1 〔4.1%〕	15.8 《+52.1%》	-0.76 《-1.6%》
パーフルオロカーボン類 (PFCs)	6.2 〔0.5%〕	3.0 〔0.2%〕	2.9 〔0.2%〕	3.0 〔0.3%〕	0.06 《+2.1%》	0.14 《+4.9%》
六ふっ化硫黄 (SF ₆)	13.8 〔1.1%〕	2.3 〔0.2%〕	2.2 〔0.2%〕	2.1 〔0.2%〕	-0.21 《-8.9%》	-0.10 《-4.6%》
三ふっ化窒素 (NF ₃)	0.0 〔0.0%〕	1.5 〔0.1%〕	0.3 〔0.0%〕	0.3 〔0.0%〕	-1.2 《-77.6%》	0.00 《+1.4%》

(注) 排出量"0.0"は5万トン未満、シェア"0.0"は0.05未満

(単位：百万トンCO₂換算)

※ DNE21+モデルについては、
○2021年5月基本政策分科会提示資料
○2024年8月GX専門家WG提示資料
なども参照されたい。関連査読論文は
付録1参照

【分析手法】

DNE21+による内生的計算

外生シナリオ+CCUについて
DNE21+による内生的計算

EPAデータベースを基にした
コスト・ポテンシャル関数を利用。
DNE21+とソフトリンクによる
内生的計算
(付録2参照)

外生シナリオ(ギガリ改正)
(付録2参照)

吸収源活動	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2013年度 排出量比	2022年度 排出量比
合計	-63.1	-60.1	-58.8	-59.5	-59.0	-54.1	-52.1	-53.6	-50.2	-3.6%	-4.4%

土地利用モデルGLaWにより、
ポテンシャル・コスト推計。残渣系
バイオマスは別途、ポテンシャル
を推計し、コストを想定。
DNE21+による内生的計算

温暖化対策評価モデルDNE21+の概要

(Dynamic New Earth 21+)

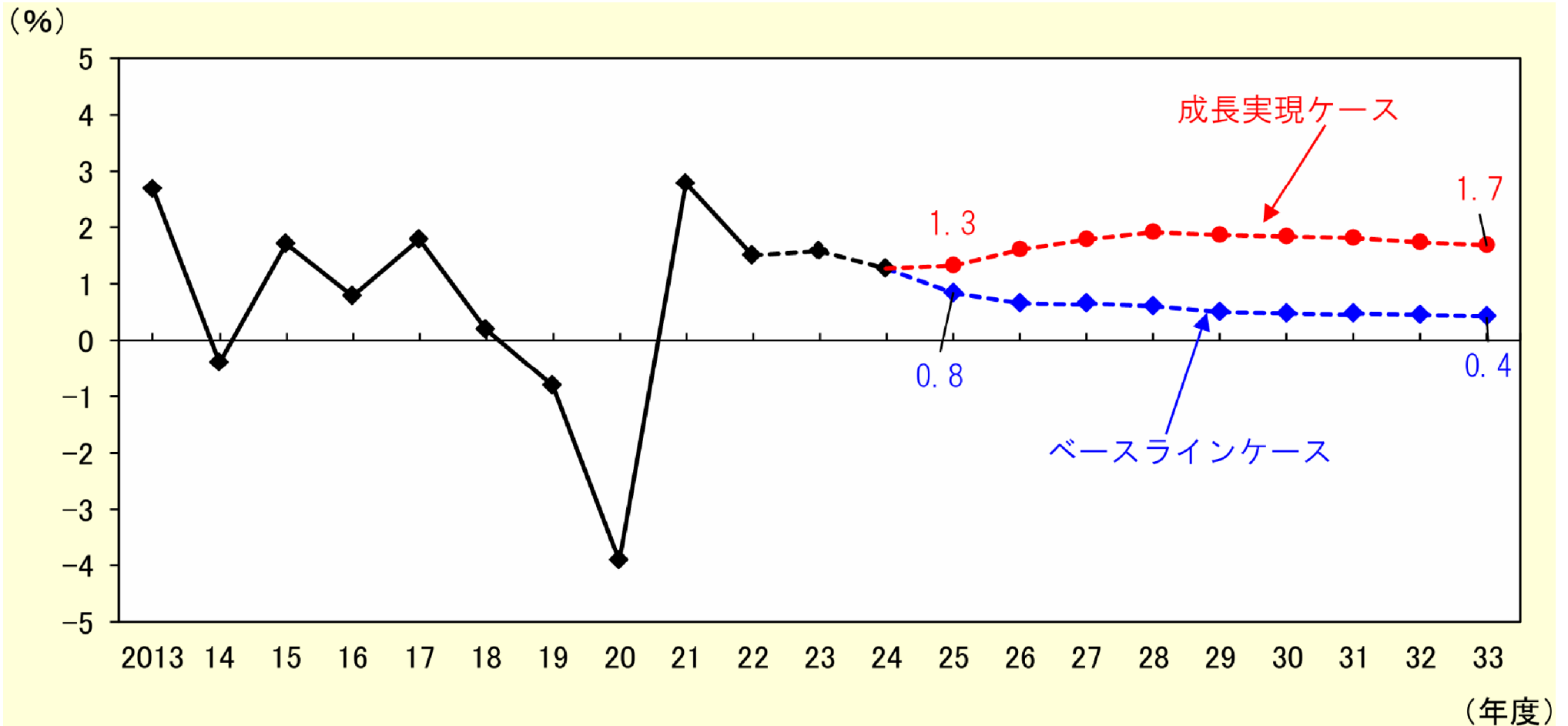
- ◆ 各種エネルギー・CO₂削減技術のシステム的なコスト評価が可能なモデル
- ◆ 線形計画モデル(エネルギーシステム総コスト最小化。決定変数:約1千万個、制約条件:約1千万本)
- ◆ モデル評価対象期間: 2000~2100年(代表時点:2005, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 70, 2100年)
- ◆ 世界地域分割: 54 地域分割(米国、中国等は1国内を更に分割。計77地域分割)
- ◆ 地域間輸送: 石炭、原油・各種石油製品(e-fuels含む)、天然ガス・合成メタン、電力、エタノール、水素、アンモニア、CO₂
- ◆ エネルギー供給(発電部門等)、CO₂回収・利用・貯留技術(CCUS)を、ボトムアップ的に(個別技術を積み上げて)モデル化
- ◆ エネルギー需要部門のうち、鉄鋼、セメント、紙パ、化学、アルミ、運輸、民生の一部について、ボトムアップ的にモデル化。その他産業や民生においてCGSの明示的考慮
- ◆ 国際海運、国際航空についても、ボトムアップ的にモデル化
- ◆ 500程度の技術を具体的にモデル化、設備寿命も考慮
- ◆ それ以外はトップダウン的モデル化(長期価格弾性値を用いて省エネ効果を推定)
- ◆ モデル内でのコストは、実質価格で想定しており、1 USD=110円(2000-10年の平均値)を採用

・ 地域別、部門別に技術の詳細な評価が可能。また、それらが整合的に評価可能

- ・ 中期目標検討委員会およびタスクフォースにおける分析・評価
- ・ 国内排出量取引制度の検討における分析・評価、環境エネルギー技術革新計画における分析・評価
- ・ 第6次エネルギー基本計画策定時において基本政策分科会への2050年CN分析の提示はじめ、気候変動政策の主要な政府検討において活用されてきた。またIPCCシナリオ分析にも貢献。関連の査読論文多数(付録参照)

- ◆ DNE21+モデルは、エネルギーの輸出入の量・価格の整合性を有しながら、世界全体を評価できる特徴を有する。モデルは、世界全体の整合性を重視し、前提条件の想定を行っている。例えば、太陽光、風力発電やCO₂貯留ポテンシャル推計は、世界全体のGISデータをベースに、同じ推計ロジックによって、世界各国のポテンシャルを推計している。
- ◆ そのため、技術・経済ポテンシャルは国間で比較評価しやすいものの、それを超えた各国の事情（例えば、日本における原子力や再エネに対する社会・物理的制約など）はあまり考慮していない。
- ◆ 動学的な最適化を行うモデルであるため、2100年までの将来の姿を踏まえた上で、2040年、2050年などの途中時点の評価がなされるという長所がある。また、コスト最小化という基準での評価であり、恣意的なシナリオ設定は極力排除される一方、経済合理性が成立した途端に、急に技術が完全代替するなど、極端な変化を示すこともあることに注意が必要。（現実世界は、多様な選択者がいるため、急激に変化せず、普及曲線に従うようなことは多い。そのような表現に優れた計量経済モデルと比べると、本最適化型モデルは、極端な変化を示す場合がある。）
- ◆ モデルは、需給バランスが常にとれるように計算がなされる。モデル分析結果からは、発電設備容量が不足するといった結果は導出されない。
- ◆ モデルで内生的に評価されていない事項（上記の留意点やエネルギー安全保障など）は、モデル分析結果を見た上で、別途、検討・評価が必要

GDP想定：内閣府展望



出典)内閣府「中長期の経済財政に関する試算」(2024年1月)

✓ 「成長実現ケース」をベースに試算。2034年以降については、「成長実現ケース」における2033年の一人当たりGDP成長率(1.5%/yr)が継続するものと想定

2050年カーボンニュートラル実現シナリオ

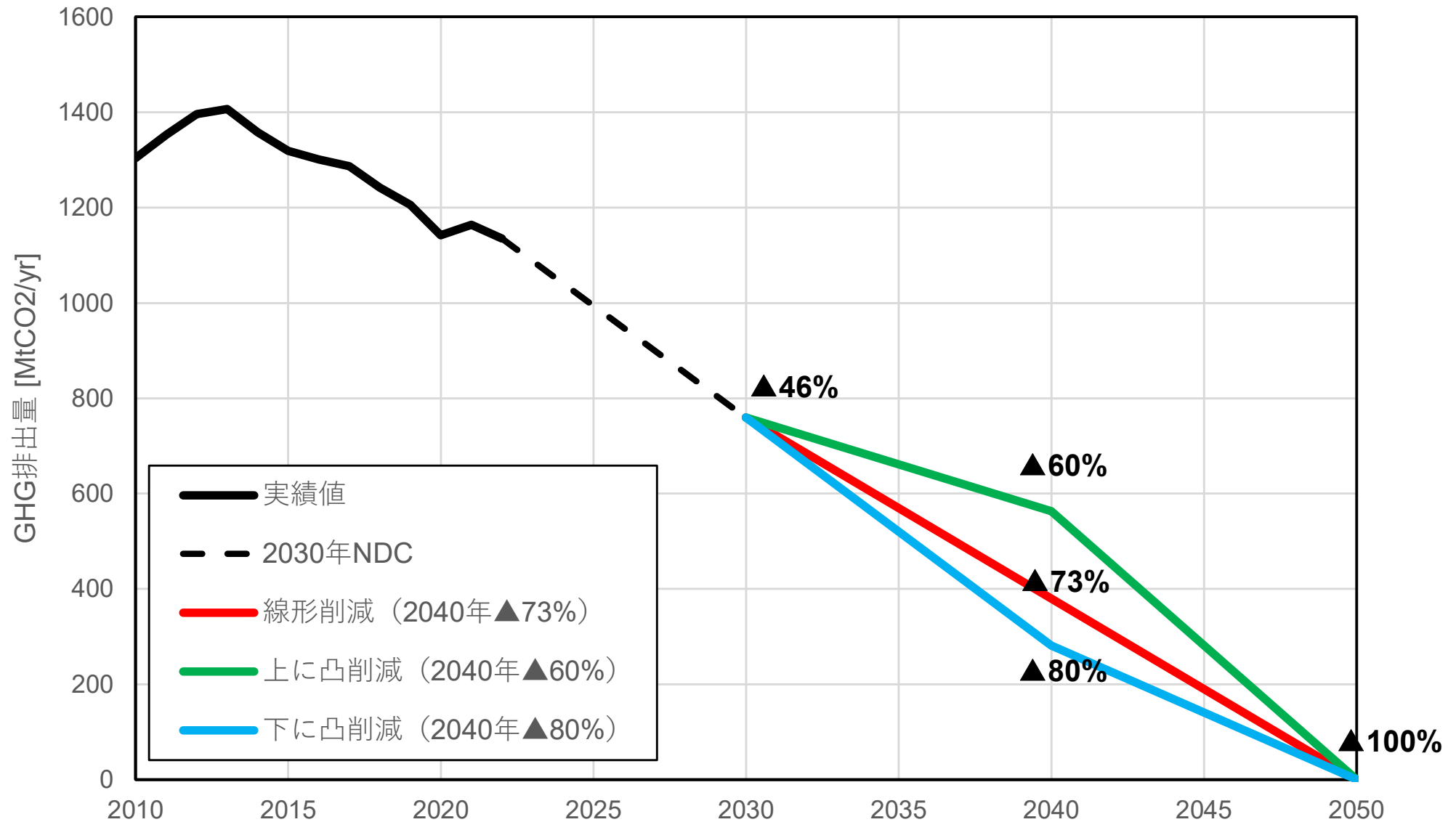
シナリオ	潜在的 経済成長	原子力	再エネ		CCS／CDR	水素・アンモニア	合成燃料	データセンター等 IT 需要	自動車	鉄鋼
	所得効果、人口・なりゆき産業構造変化等	【上限】 低位/ 高位	【ポテンシャル】 太陽光、陸上風力の社会共生制約 低位：強/ 高位：弱	【コスト】 中位/ コスト低減加速	【ポテンシャル上限】 低位/ 高位	【コスト】 中位/ コスト低減加速	【コスト】 中位/ コスト低減加速	将来シナリオ（外生。ただし価格弾性効果考慮）	【EV】 中位 コスト低減加速	水素 DRI 普及速度
成長実現シナリオ	GDP 高位 （内閣府「成長実現ケース」）	高位	高位	コスト低減加速・洋上収斂	高位	コスト低減加速	コスト低減加速	高位	コスト低減加速	高位
低成長シナリオ		低位	低位	中位	低位	中位	中位	中位	中位	中位

※ 2024年8月9日GX専門家ワーキンググループに提示した「成長実現シナリオ」と「低成長シナリオ」から、各種技術の前提条件の精査を実施しており、両シナリオについても、分析結果に若干の差異が生じている。

また、本分析では、排出削減対策に伴うエネルギー価格上昇による、エネルギー多消費産業などの生産量低下を考慮していない。

2040年排出削減目標感度解析

GHG排出量削減経路の想定



世界全体では、1.5°Cシナリオ＋2030年各国NDCs＋主要先進国は2050年CN（線形排出削減）を想定

1.5°Cシナリオとの整合性(世界全体)

	2040年GHG 排出削減率 (2019年比)	CO ₂ 排出量の 正味ゼロ 排出実現時期	正味CO ₂ ゼロ排 出までの累積 CO ₂ 排出量 (2020年以降)	気温上昇	
				ピーク	2100 年
IPCC C1: 1.5°C オーバーシュート無もしくは小	69 [58–90] %	2050–55年	510 [330-710] GtCO ₂	1.6°C	1.3°C
IPCC C2: 1.5°C オーバーシュート有	55 [40–71] %	2055–60年	720 [530-930] GtCO ₂	1.7°C	1.4°C
本分析シナリオ	62 % (エネ起CO ₂ : 71–72%)	2050–55年	767 GtCO ₂	1.7°C	1.4°C

出典) IPCCの数字は、IPCC WG3第6次評価報告書 Table SPM.2より

- ✓ 世界全体では1.5°Cシナリオ(IPCC C1もしくはC2カテゴリー)と整合的
- ✓ 2030年NDCsを前提としたため、累積CO₂排出量想定は、IPCC C1カテゴリーより大きくC2カテゴリー相当だが、2040年の世界CO₂排出量はC1相当
- ✓ 世界CO₂排出量の正味ゼロ実現時期(2050–55年)も、C1相当

世界各国間でのCO₂限界削減費用(2040年)の比較

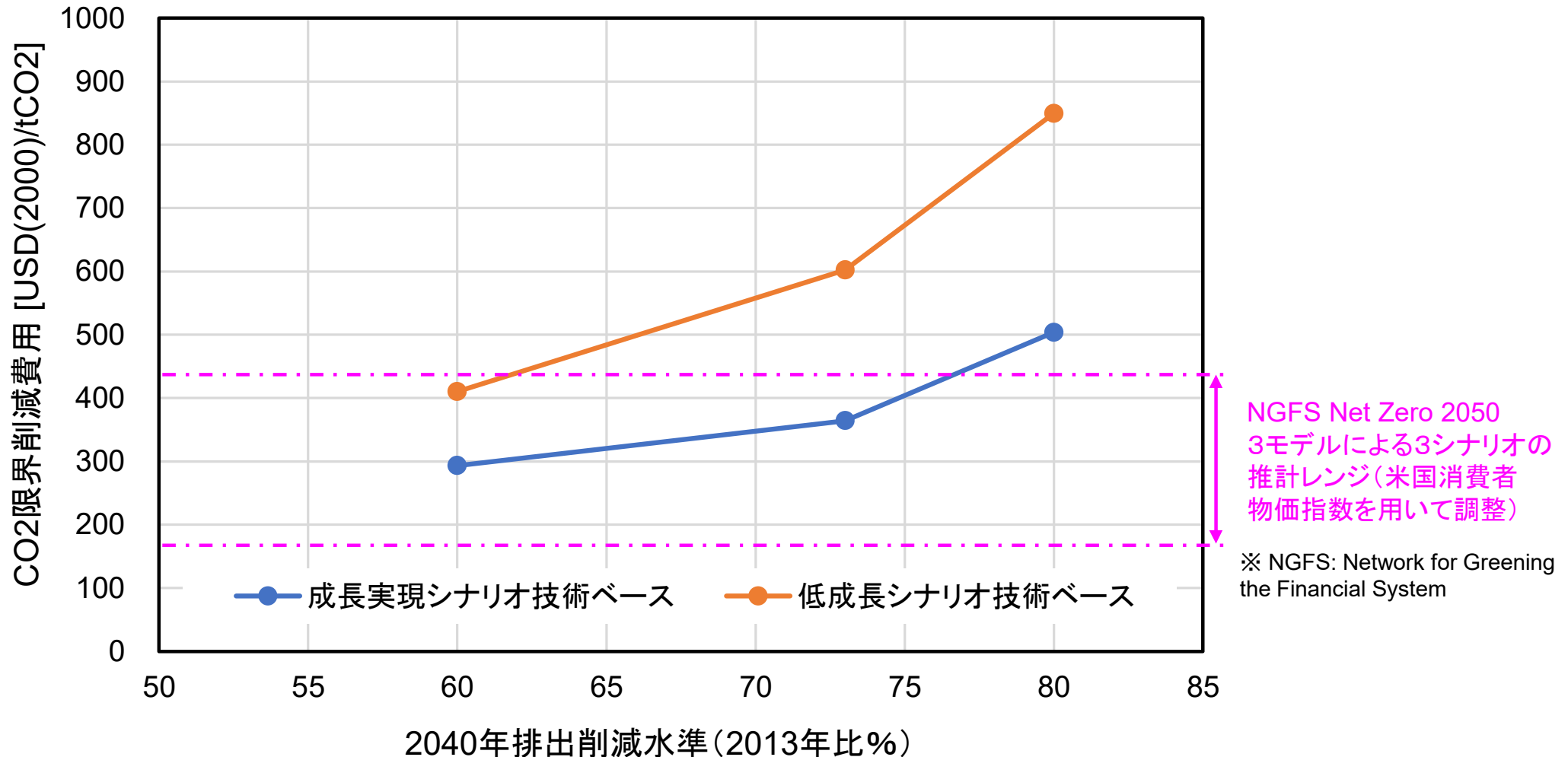
	成長実現シナリオ			低成長シナリオ		
日本の2040年削減率	▲60%	▲73%	▲80%	▲60%	▲73%	▲80%
日本	294	364	504	410	602	850
米国	294	293	292	410	410	409
英国	294	293	292	428	428	428
EU	298	298	296	410	410	409
その他	294	293	292	410	410	409

単位: USD/tCO₂ (2000年価格)

※ 米、英、EUの主要先進国は、2050年GHGでのCN(正味ゼロ排出)を想定

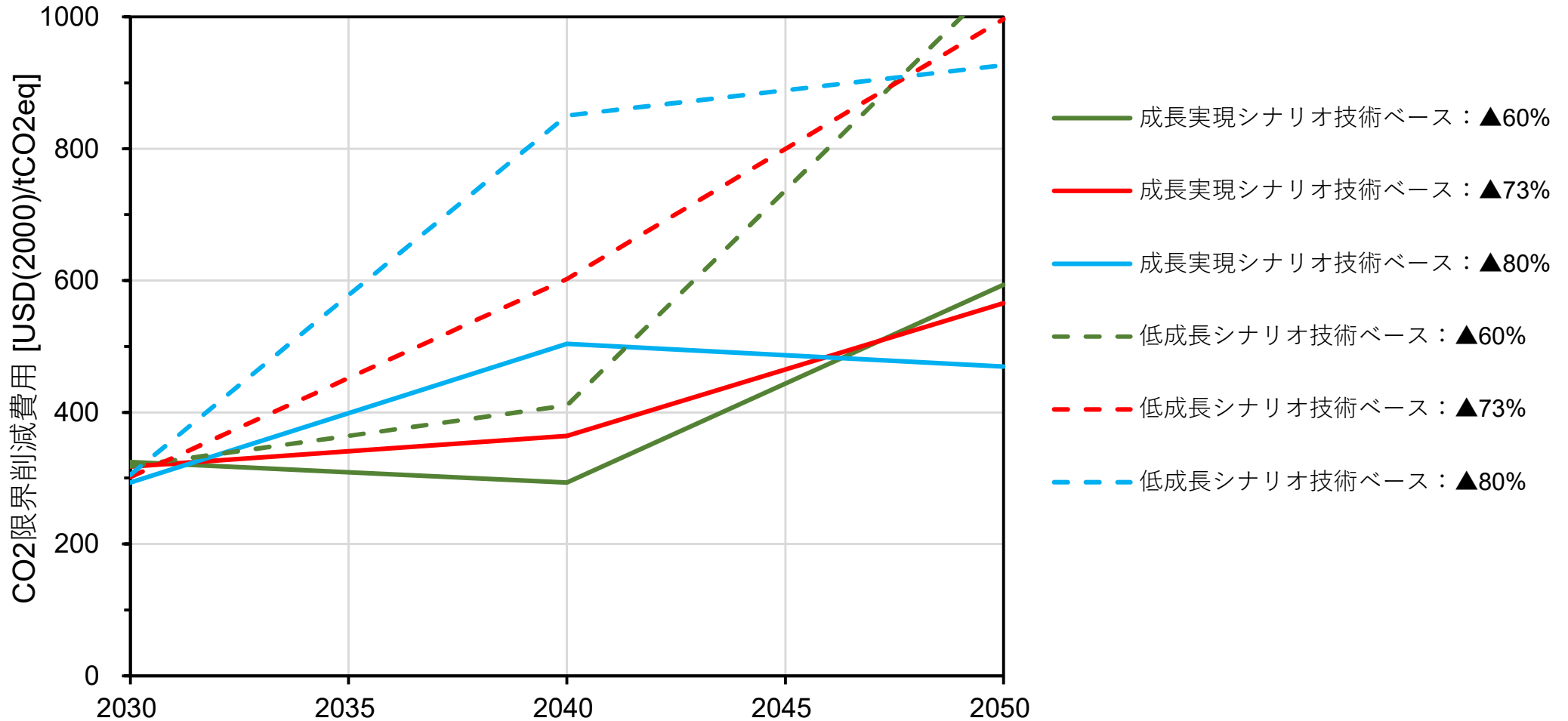
- ✓ ▲60%では、CO₂限界削減費用が、世界各国間でほぼ均等化しており、世界全体での効率的な排出削減水準となっている。
- ✓ ▲73%以上になると、日本の限界削減費用は、他国よりも高くなり、他国よりも野心的な水準と主張可能な排出削減水準

削減水準別CO₂限界削減費用(2040年)の傾向と 他モデル推計の限界削減費用との比較



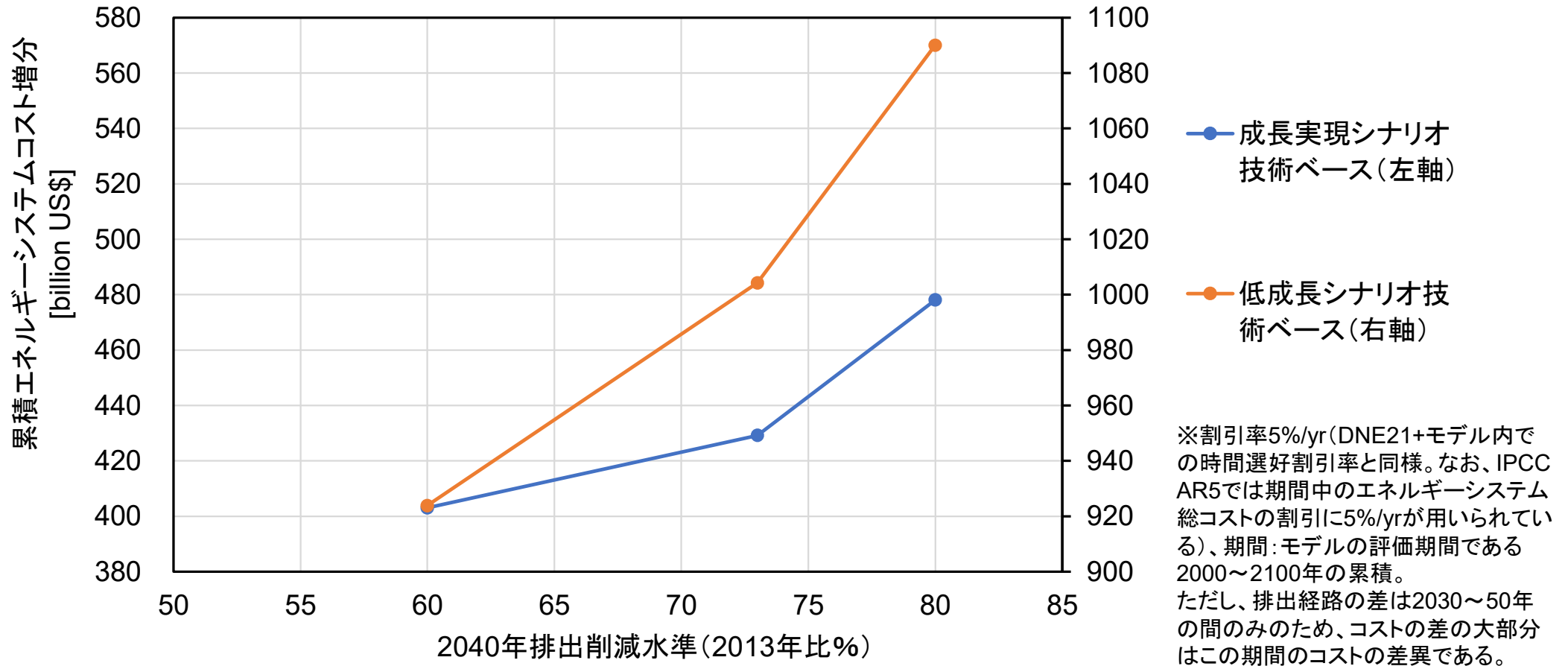
- ✓ ▲80%で限界削減費用の上昇が大。「成長実現シナリオ」、「低成長シナリオ」のいずれの技術想定シナリオベースでも、NGFS Net Zero 2050の2040年限界削減費用(炭素価格)の上限も超える。
- ✓ 「成長実現シナリオ」の技術想定下では、▲73%時の限界削減費用は、「低成長シナリオ」の技術想定下での▲60%を若干下回る水準

CO₂限界削減費用：時系列



- ✓ 「成長実現シナリオ」の技術想定下では、2030年▲46%の限界削減費用よりも、2040年▲60%では若干低下する可能性はある。
- ✓ 他方、「低成長シナリオ」の技術想定下では、いずれの排出削減水準であっても、2040年では限界削減費用が2030年よりも上昇傾向がみられる。

日本のエネルギーシステムコスト増分



	2040年▲60%		2040年▲73%		2040年▲80%	
	2040	2050	2040	2050	2040	2050
成長実現シナリオ	+49	+163	+70	+162	+115	+150
低成長シナリオ	+82	+382	+149	+370	+204	+369

単位: billion US\$/yr

※ 特段の排出削減を考慮しない経済合理的なベースラインにおけるエネルギーシステム総コストからのコスト増分

まとめ

まとめ

- ◆ 1.5°Cシナリオ(オーバーシュート無もしくは小)と整合的な2040年の世界排出削減水準を想定した上で、日本の2040年の排出削減水準について、1) ▲60%(上に凸)、2) ▲73%(線形削減)、3) ▲80%(下に凸)の3経路について分析・評価 **【1.5°C整合性の担保】**
- ◆ 広範かつ早い技術進展を見込んだ「成長実現シナリオ」と、技術進展が漸進的な「低成長シナリオ」の2種類の技術シナリオ想定で分析を実施 **【技術進展の不確実性の考慮】**
- ◆ ▲60%では世界の限界削減費用はほぼ均等化(効率的な削減)、▲73%、▲80%では他国よりも限界削減費用は高くなると推計(他国よりも意欲的な削減水準) **【国間での排出削減努力の検証】**
- ◆ CO₂限界削減費用は、▲60%⇒▲73%⇒▲80%の間、逡増的 **【排出削減率に対する限界削減費用の検証】**
- ◆ 国際的に金融機関等での参照が多い、NGFSの1.5°C(2050年実質ゼロ)シナリオで3モデルによって推計されているCO₂限界削減費用と比較すると、▲60%でも、「成長実現シナリオ」、「低成長シナリオ」ともに、十分整合的な水準。▲80%の場合は、広範なる技術進展を見込んだ「成長実現シナリオ」であっても、NGFSの限界削減費用の3モデルの中の高い推計さえも超える可能性あり。**【他モデル推計の限界削減費用水準との比較検証】**
- ◆ 2030年▲46%のためのCO₂限界削減費用と比較すると、▲46%が極めて厳しい目標であることが原因ではあるが、「成長実現シナリオ」ベースの場合、▲60%では、2030年よりも2040年の限界削減費用が低下する可能性あり。**【時系列の排出削減費用の検証】**
- ◆ 累積の総エネルギーシステムコストで確認しても、CO₂限界削減費用と同様に、下に凸のコスト関数が見られ、▲60%⇒▲73%⇒▲80%の間、逡増的。**【排出削減率に対する累積の総費用の検証】**

付録1 DNE21+モデル分析に関する 査読論文例

- K. Akimoto, M. Nagashima, F. Sano, T. Ando, Gaps between costs and potentials estimated by bottom-up assessments versus integrated assessment models, *Energy Strategy Reviews*, 55, 101521, 2024.
- K. Akimoto, Assessment of road transportation measures for global net-zero emissions considering comprehensive energy systems, *IATSS Research*, 47(2), 196-203, 2023.
- K. Akimoto, F. Sano, T. Homma, M. Nagashima, N. Onishi, Analysis of the 2030 emissions reduction targets of the previous and current nationally determined contributions of Japan, and a comparison between countries using energy-technology and energy-economic models, *Asia-Pacific Sustainable Development Journal*, 30(1), 2023.
- K. Akimoto, F. Sano, Y. Nakano, Assessment of comprehensive energy systems for achieving carbon neutrality in road transport, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 112, 103487, 2022.
- Y. Nakano, F. Sano, K. Akimoto, Impacts of decarbonization technologies in air transport on the global energy system, *Transportation Research Part D*, 110, 103417, 2022.
- F. Leblanc, R. Bibas, S. Mima, M. Muratori, S. Sakamoto, F. Sano, N. Bauer, V. Daioglou, S. Fujimori, M. J. Gidden, E. Kato, S. K Rose, J. Tsutsui, D. P. Van Vuuren, J. Weyant, M. Wise, The contribution of bioenergy to the decarbonization of transport: a multi-model assessment, *Climatic Change*, 170, 2022.
- K. Akimoto, F. Sano, J. Oda, Impacts of ride and car-sharing associated with fully autonomous cars on global energy consumptions and carbon dioxide emissions, *Technological Forecasting and Social Change*, 174, 121311, 2022.
- K. Akimoto, F. Sano, J. Oda, H. Kanaboshi, Y. Nakano, Climate change mitigation measures for global net-zero emissions and the roles of CO2 capture and utilization and direct air capture, *Energy and Climate Change*, 2, 100057, .2021.
- M. Harmse, E. Kriegler, D. Vuuren, K. Wijst, G. Luderer, R. Cui, O. Dessens, L. Drouet, J. Emmerling, J. Morris, F. Fosse, D. Fragkiadakis, K. Fragkiadakis, P. Fragkos, O. Fricko, S. Fujimori, D. Gernaat, C. Guivarch, G. Iyer, P. Karkatsoulis, I. K. Kimon, Keramidas, A. Koberle, P. Kolp, V. Krey, Christoph Kruger, F. Leblanc, S. Mittal, S. Paltsev, P. Rochedo, B. Ruijven, R. Sands, F. Sano, J. Streffer, E. Arroyo, K. Wada, B. Zakeri, Integrated assessment model diagnostics: key indicators and model evolution, *ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS*, 16(5), .2021.
- H. Kanaboshi, F. Sano, J. Oda, K. Akimoto, N. Onishi, Cost-efficient measures in the oil refinery and petrochemical sectors for the reduction of CO2 emissions under the Paris Agreement and air pollution under the MARPOL Convention, *Energy and Climate Change*, 2, 100027, 2021.
- 佐野史典、永田敬博、秋元圭吾、長期的な脱炭素社会を目指したシナリオ下での水素とメタネーションの役割の分析、*エネルギー・資源*、42(1), 2021.
- V. Daioglou, S. K. Rose, N. Bauer, A. Kitous, M. Muratori, F. Sano, S. Fujimori, M. J. Gidden, E. Kato, K. Keramidas, D. Klein, F. Leblanc, J. Tsutsui, M. Wise, D. P. van Vuuren, Bioenergy technologies in long-run climate change mitigation: results from the EMF-33 study, *Climatic Change*, 163, 1603-1620, 2020.
- M. Harmsen, O. Fricko, J. Hilaire, D. van Vuuren, L. Drouet, O. D.-Lasserve, S. Fujimori, K. Keramidas, Z. Klimont, G. Luderer, L. A. Reis, K. Riahi, F. Sano, S. Smith, Taking some heat off the NDCs? The limited potential of additional short-lived climate forcers' mitigation, *Climatic Change*, 163, 1443-1461, .2020.
- N. Bauer, S. K. Rose, S. Fujimori, D. P. van Vuuren, J. Weyant, M. Wise, Y. Cui, V. Daioglou, M. J. Gidden, E. Kato, A. Kitous, F. Leblanc, R. Sands, F. Sano, J. Streffer, J. Tsutsui, R. Bibas, O. Fricko, T. Hasegawa, D. Klein, A. Kurosawa, S. Mima, M. Muratori, Global energy sector emission reductions and bioenergy use: overview of the bioenergy demand phase of the EMF-33 model comparison, *Climatic Change*, 163, 1553-1568, .2020.
- R. Schaeffer, A. Köberle, H. L. van Soest, C. Bertram, G. Luderer, K. Riahi, V. Krey, D. P. van Vuuren, E. Kriegler, S. Fujimori, W. Chen, C. He, Z. Vrontisi, S. Vishwanathan, A. Garg, R. Mathur, S. Shekhar, K. Oshiro, F. Ueckerdt, G. Safonov, G. Iyer, K. Gi, V. Potashnikov, Comparing transformation pathways across major economies, *Climatic Change*, 162, 1787-1803, .2020.
- 永田敬博、佐野史典、秋元圭吾、世界および日本における中長期温暖化対策としての天然ガスの貢献に関する分析、*エネルギー・資源*、41(5), 2020.

- M. Roelfsema, H. van Soest, M. Harmsen, D. van Vuuren, C. Bertram, M. den Elzen, N. Höhne, G. Iacobuta, V. Krey, E. Kriegler, G. Luderer, K. Riahi, F. Ueckerdt, J. Despres, L. Drouet, J. Emmerling, S. Frank, O. Fricko, M. Gidden, F. Humpenöder, D. Huppmann, S. Fujimori, K. Fragkiadakis, K. Gi, et al., Taking stock of national climate policies to evaluate implementation of the Paris Agreement, *Nature Communications*, 2096, 2020.
- K. Gi, F. Sano, K. Akimoto, R. Hiwatari, K. Tobita, Potential contribution of fusion power generation to low-carbon development under the Paris Agreement and associated uncertainties, *Energy Strategy Reviews*, 27, 2020.
- 魏啓為、佐野史典、秋元圭吾、日渡良爾、飛田健次、核融合開発ロードマップを反映した世界エネルギーシステムモデルによる日本の長期エネルギーシステム分析、*エネルギー・資源*、40(5)、170-179, 2019.
- M. Sugiyama, S. Fujimori, K. Wada, S. Endo, Y. Fujii, R. Komiyama, E. Kato, A. Kurosawa, Y. Matsuo, K. Oshiro, F. Sano, H. Shiraki, Japan's long-term climate mitigation policy: Multi-model assessment and sectoral challenges, *Energy*, 167, 1120-1131, 2019.
- K. Akimoto, F. Sano, T. Tomoda, GHG emission pathways until 2300 for the 1.5 °C temperature rise target and the mitigation costs achieving the pathways, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23(6), 2018.
- D. L. McCollum, C. Wilson, M. Bevione, S. Carrara, O. Y. Edelenbosch, J. Emmerling, C. Guivarch, P. Karkatsoulis, I. Keppo, V. Krey, Z. Lin, E. O Broin, L. Paroussos, H. Pettifor, K. Ramea, K. Riahi, F. Sano, B. S. Rodrigues, D. P. van Vuuren, Interaction of consumer preferences and climate policies in the global transition to low-carbon vehicles, *Nature Energy*, 3, 664-673, 2018.
- 魏啓為、佐野史典、本間隆嗣、小田潤一郎、林礼美、秋元圭吾、現行の気候・エネルギー政策および国別貢献による世界全体のエネルギー起源CO2排出削減とエネルギーシステムの評価、*日本エネルギー学会誌* 6月号、2018
- K. Gi, F. Sano, A. Hayashi, T. Tomoda, K. Akimoto, A global analysis of residential heating and cooling service demand and cost-effective energy consumption under different climate change scenarios up to 2050, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23(1), 51-79, 2018.
- D. Victor, K. Akimoto, D. Cullenward, C. Hepburn, Y. Kaya, M. Yamaguchi, Prove Paris was more than paper promises, *Nature*, 548, 25-27, 2017.
- H. L. van Soest, L. A. Reis, L. Drouet, D. P. van Vuuren, M. G.J. den Elzen, M. Tavoni, K. Akimoto, K. V. Calvin, P. Fragkos, A. Kitous, G. Luderer, K. Riahi, Low-emission pathways in 11 major economies: comparison of cost-optimal pathways and Paris climate proposals, *Climatic Change*, 142(3), 491-504, 2017.
- K. Akimoto, F. Sano, B. Shoai Tehrani, The analyses on the economic costs for achieving the nationally determined contributions and the expected global emission pathways, *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 14(1), 193-206, 2017.
- O.Y. Edelenbosch, K. Kermeli, W. Crijns-Graus, E. Worrell, R. Bibas, B. Fais, S. Fujimori, P. Kyle, F. Sano, D.P. van Vuuren, Comparing projections of industrial energy demand and greenhouse gas emissions in long-term energy models, *Energy*, 122, 701-710, 2017.
- 秋元圭吾、佐野史典、パリ協定2°C目標から見た我が国の2050年排出削減目標に関する分析、*エネルギー・資源*、38(1)、2017.
- J. Aldy, B. Pizer, M. Tavoni, L.A. Reis, K. Akimoto, G. Blanford, C. Carraro, L.E. Clarke, J. Edmonds, G.C. Iyer, H.C. McJeon, R. Richels, S. Rose, F. Sano, Economic tools to promote transparency and comparability in the Paris Agreement, *Nature Climate Change*, 6, 1000-1004, 2016.
- Y. Kaya, M. Yamaguchi, K. Akimoto, (The uncertainty of climate sensitivity and its implication for the Paris negotiation, *Sustainability Science*, 11(3), 515-518, 2016.
- 佐野史典、秋元圭吾、本間隆嗣、徳重功子、日本の2030年温室効果ガス排出削減目標の評価、*エネルギー・資源*、37(1)、2016.
- E. Kriegler, K. Riahi, N. Bauer, V. J. Schwanitz, N. Peterman, V. Bosetti, A. Marcucci, S. Otto, L. Paroussos, S. Rao-Skirbekk, T. A. Curras, S. Ashina, J. Bollen, J. Eom, M. Hamdi-Cherif, T. Longden, A. Kitous, A. Mejean, F. Sano, M. Schaeffer, K. Wada, et al., A short note on integrated assessment modeling approaches: Rejoinder to the review of "Making or breaking climate targets - The AMPERE study on staged accession scenarios for climate policy", *Technological Forecasting & Social Change*, 99, 273-276, 2015.

- F. Sano, K. Wada, K. Akimoto, J. Oda, Assessments of GHG emission reduction scenarios of different levels and different short-term pledges through macro- and sectoral decomposition analyses, *Technological Forecasting & Social Change*, 90, Part A, 153-165, 2015.
- E. Kriegler, K. Riahi, N. Bauer, V. J. Schwanitz, N. Petermann, V. Bosetti, A. Marcucci, S. Otto, L. Paroussos, S. Rao, T. Arroyo-Currás, S. Ashina, J. Bollen, J. Eom, M. Hamdi-Cherif, T. Longden, A. Kitous, A. Méjean, F. Sano, M. Schaeffer, Making or breaking climate targets: The AMPERE study on staged accession scenarios for climate policy, *Technological Forecasting & Social Change*, 90, Part A, 24-44, 2015.
- E. Kriegler, N. Petermann, V. Krey, V. J. Schwanitz, G. Luderer, S. Ashina, V. Bosetti, J. Eom, A. Kitous, A. Méjean, L. Paroussos, F. Sano, et al., Diagnostic indicators for integrated assessment models of climate policy, *Technological Forecasting & Social Change*, 90, Part A, 45-61, 2015.
- N. Bauer, V. Bosetti, M. Hamdi-Cherif, A. Kitous, D. McCollum, A. Méjean, S. Rao, H. Turton, L. Paroussos, S. Ashina, K. Calvin, K. Wada, D. van Vuuren, CO2 emission mitigation and fossil fuel markets: Dynamic and international aspects of climate policies, *Technological Forecasting & Social Change*, 90, Part A, 243-256, 2015.
- K. Riahi, E. Kriegler, N. Johnson, C. Bertram, M. den Elzen, J. Eom, M. Schaeffer, J. Edmonds, M. Isaac, V. Krey, T. Longdon, G. Luderer, A. Méjean, D. L. McCollum, S. Mima, H. Turton, D. P. van Vuuren, K. Wada, V. Bosetti, P. Capros, Locked into Copenhagen pledges - Implications of short-term emissions targets for the cost and feasibility of long-term climate goals, *Technological Forecasting & Social Change*, 90, Part A, 8-23, 2015.
- F. Sano, K. Akimoto, K. Wada, Impacts of different diffusion scenarios for mitigation technology options and of model representations regarding renewables intermittency on evaluations of CO2 emissions reductions, *Climatic Change*, 123(3-4), 665-676, 2014.
- G. Luderer, V. Krey, K. Calvin, J. Merrick, S. Mima, R. Pietzcker, J. Van Vliet, K. Wada, The role of renewable energy in climate stabilization: results from the EMF27 scenarios, *Climatic Change*, 123(3-4), 427-441, 2014.
- K. Akimoto, T. Homma, F. Sano, M. Nagashima, K. Tokushige, T. Tomoda, Assessment of the emission reduction target of halving CO2 emissions by 2050: macro-factors analysis and model analysis under newly developed socio-economic scenarios, *Energy Strategy Reviews*, 2(3-4), 246-256, 2014.
- K. Akimoto, K. Wada, F. Sano, A. Hayashi, T. Homma, J. Oda, M. Nagashima, K. Tokushige, T. Tomoda, Consistent assessments of pathways toward sustainable development and climate stabilization, *Natural Resources Forum*, 36(4), 231-244, 2012.
- K. Akimoto, F. Sano, T. Homma, K. Wada, M. Nagashima, J. Oda, Comparison of marginal abatement cost curves for 2020 and 2030: longer perspectives for effective global GHG emission reductions, *Sustainability Science*, 7(2), 157-168, 2012.
- K. Wada, K. Akimoto, F. Sano, J. Oda, T. Homma, Energy-efficiency opportunities in the residential sector and their feasibility, *Energy*, 48(1), -8, 2012.
- K. Wada, F. Sano, K. Akimoto, T. Homma, K. Tokushige, M. Nagashima, T. Tomoda, Assessment of Copenhagen Pledges with Long-term Implications, *Energy Economics*, 34(3), S481-S486, 2012.
- K. Akimoto, F. Sano, T. Homma, J. Oda, M. Nagashima, M. Kii, Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost, *Energy Policy*, Vol. 38,(7), 3384-3393, 2010.
- K. Akimoto, F. Sano, J. Oda, T. Homma, U.K. Rout, T. Tomoda, Global Emission Reductions through a Sectoral Intensity Target Scheme, *Climate Policy*, 8, S46-S59, 2008.
- K. Akimoto, M. Takagi, T. Tomoda, Economic Evaluation of the Geological Storage of CO2 Considering the Scale of Economy, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1(2), 271-279, 2007.
- F. Sano, K. Akimoto, T. Homma, T. Tomoda, Analysis of Technological Portfolios for CO2 Stabilizations and Effects Technological Changes. *The Energy Journal*, 27, Special Issue, 141-161, 2006.
- K. Akimoto, T. Tomoda, A High Productivity and Flexibility Modeling Methodology for Energy and Environment Systems, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 48(1), 9-23, 2005.

付録2 Non-CO₂ GHG評価モデル

Non-CO2 GHGの排出削減ポテンシャルの推計

Non-CO2 GHG排出削減推計は、対策オプション別コストに関する、EPA(2019)のデータベースを利用。ベースライン排出からのNon-CO2 GHG削減ポテンシャルを、以下の近似式で推計。(割引率5%/yr、AR4-GWP100)。ただし、HFCシナリオについては、EPA2019では考慮されていないため、キガリ改正の排出目標を別途外生的に想定(次々頁)

Hyman et al. (2003)によるNon-CO2 GHG削減量の近似曲線
(時点別・地域別・セクター・ガス別)：

$$\text{Abatement}(\%) = 1 - \left(\frac{1}{\text{MAC}_{\text{GHG}}} \right)^{\sigma}$$

Abatement(%): ベースラインからの削減率、
MAC:限界削減費用(エネ起CO2と同レベル)、
σ: 削減パラメータ(EPA(2019)から推計)。

削減ポテンシャル推計式に必要なパラメータσを、EPA2019データベース(*1)から回帰分析により推計
(時点別(*2) × 地域別(*3) × セクター別(*4))

*1: MACは、5,10,...,500, 1000\$/tCO2の10レベル

*2: 8時点(2015～2050; 5年間隔)。2015年値はUNFCCC実績値排出量と概ね整合的(ただし、2015年・米国値など、不整合な地域もある)。

*3: EPA2019のSummary表の各国別データを、DNE21+の54地域別に集計。

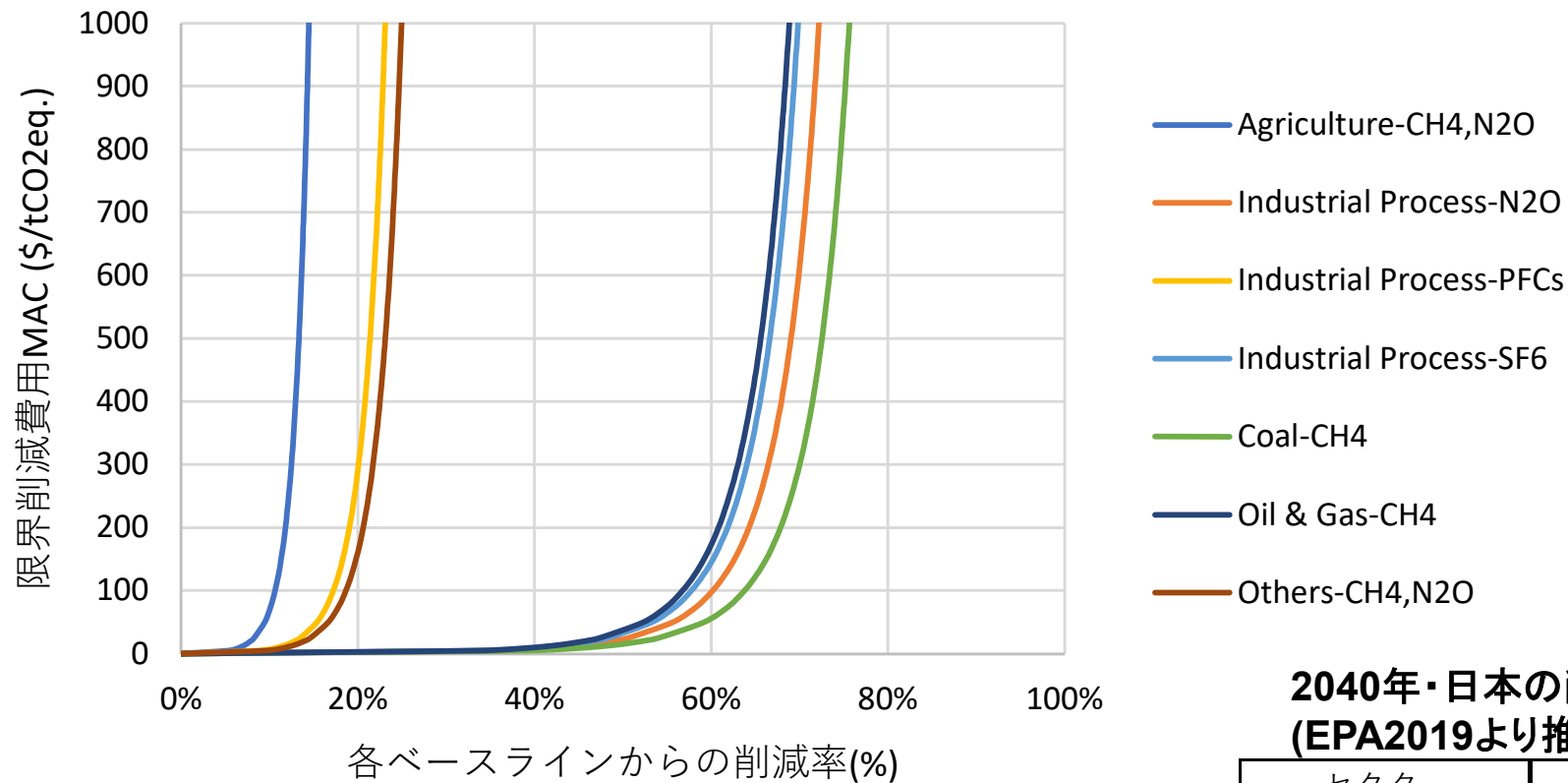
*4: 以下のセクター・ガス種に集約。農業[CH4・N2O]、産業プロセス1[HFCs]、産業プロセス2[PFCs]、産業プロセス3[Sf6]、産業プロセス4[N2O]、石炭[CH4]、石油ガス[CH4]、その他[CH4・N2O合計]

文献:

[1] Hyman et al.(2003), Modeling non-CO2 greenhouse gas abatement, Environmental Modeling & Assessment volume 8, pp.175–186

[2] US-EPA(2019), Global Non-CO2 Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation Potential: 2015-2050

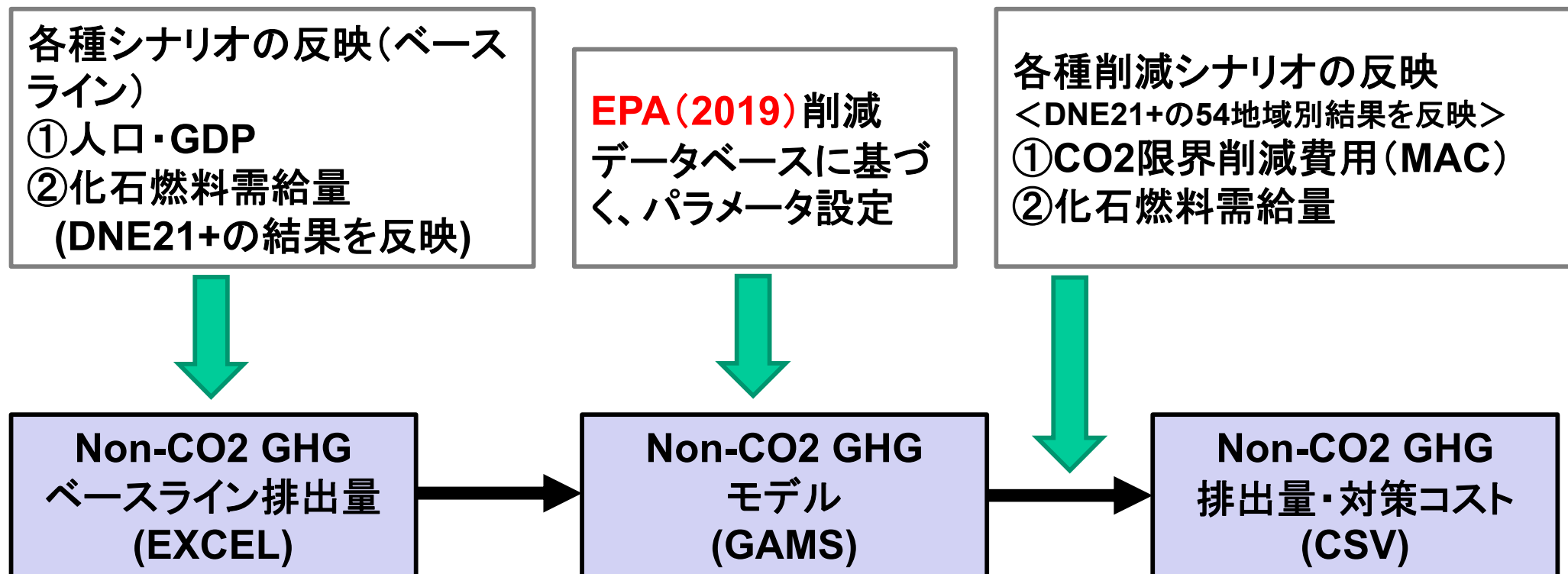
セクター別・ガス種別のNon-CO2-GHG排出削減費用曲線： 日本、2040年



**2040年・日本の削減パラメータσの想定
(EPA2019より推計)**

セクター	ガス種	2040年	2050年
Agriculture	CH4	0.02	0.02
	N2O	0.02	0.02
Industrial Process	N2O	0.16	0.16
	PFCs	0.03	0.03
	SF6	0.15	0.14
Coal	CH4	0.17	0.17
Oil & Gas	CH4	0.14	0.18
Others	CH4	0.04	0.04
	N2O	0.04	0.03

Non-CO₂GHG排出量・削減量推計モデルの構造



※ HFCは、キガリ改正の排出目標に従い、
外生的に想定(次頁参照)

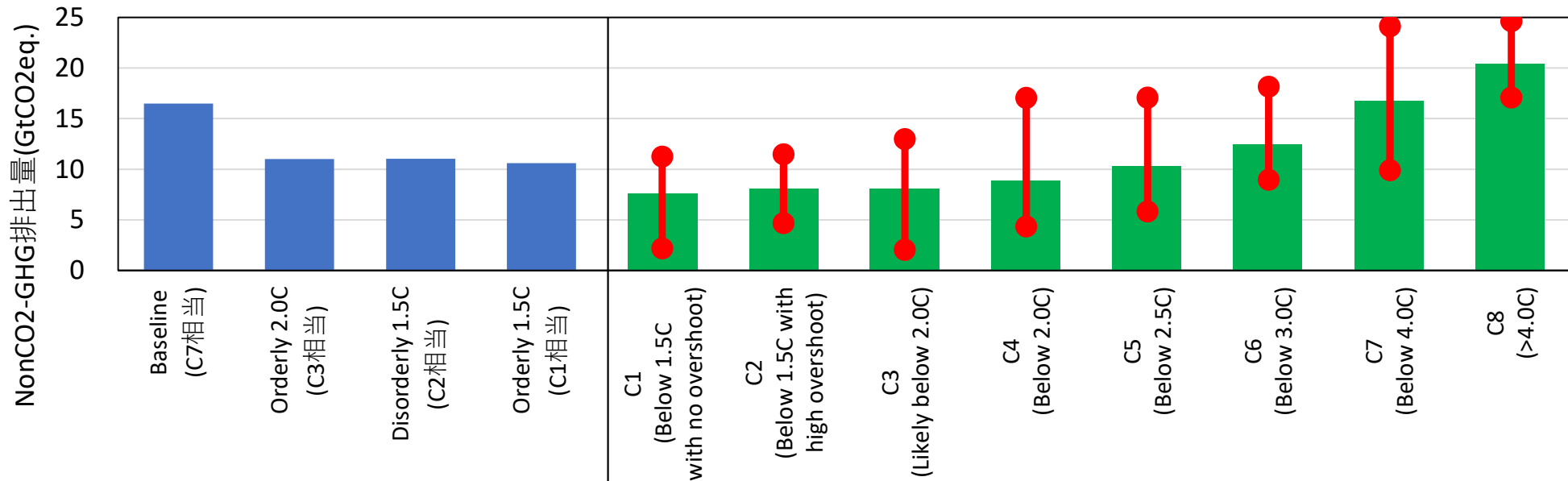
HFC: キガリ改正による排出削減目標の想定(外生)

HFCについては、モントリオール議定書キガリ改正で合意されている排出削減を外生的に想定

	削減目標の基準年	2030	2040	2050
日本・先進国	2011-2013年	▲80%	▲85%	▲85%
中東・インド・パキスタン	2025年	-	▲20%	▲85%
その他途上国	2020年	▲10%	▲50%	▲80%

世界Non-CO2 GHG排出量の試算: IPCCシナリオとの比較

2050年



**RITE Non-CO2 GHGモデル
(EPA2019ベース)**
[キガリ改正目標は未考慮]

IPCC-AR6

AR6 Scenario Explorer and Database(ver1.0)より作成。

グラフは、データベースの平均値を表す。

エラーバーの上限・下限は、最大値・最小値を表す。

*C1,C2,C3の最上位値は、米GCAM。

(C4の上位値は、米GCAMや米MIT-EPPA。)

**C1,C2,C3の最下位値は、EC-POLES(Non-CO2推計に関しては、農業部門はIIASAモデル(比較的楽観的な結果を示す)、産業・エネルギー部門はEPA分析に基づく)。

⇒ RITE Non-CO2 GHGモデル(EPA2019ベース)の結果は、米GCAMの結果に近い。