

環境研究総合推進費 S-20-3 [JPMEERF21S12030]
令和3年度（2021年度）～令和7年度（2025年度）

短寿命気候強制因子による環境影響の 緩和シナリオの定量化

Evaluation of emission scenarios for mitigating environmental impacts
caused by Short-Lived Climate Forcers

サブ1リーダー兼統括：**花岡 達也**（国立研究開発法人国立環境研究所）

サブ2リーダー：**平山 智樹**（みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社）

サブ3リーダー：**黒川 純一**（一般財団法人日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター）

サブ4リーダー：**赤星 香**（公益財団法人地球環境戦略研究機関）

研究分担者：**スィルバ エラン ディエゴ**、**金森 有子**（国立研究開発法人国立環境研究所）

張 潤森（東京大学）

元木 悠子、**大田 宇春**、**後藤 友里絵**、**滝見 真穂**（みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社）

川島 一真、**植田 洋行**、**片桐 究**（三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社）

桐山 悠祐（一般財団法人日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター）

エリック ザスマン（公益財団法人地球環境戦略研究機関）

はじめに 緩和シナリオ研究の背景

- 気候変動枠組条約(UNFCCC)のパリ協定(2015)で「世界の平均気温上昇を2°C未満に抑える(2°C目標)とともに1.5°Cに抑える(1.5°C目標)努力を追求する」ことが合意
 - 2°C目標の実現には、今世紀後半に正味CO₂排出量をゼロにし、かつ非CO₂温室効果ガス排出量の大幅削減も必要
 - 1.5°C目標の実現には、2030年頃までにCO₂排出45%減(2010年比)、2050年頃までに正味CO₂排出量をゼロにするために早期の大幅削減が急務
- 国連環境計画(UNEP)や気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の報告書などより、各国の温室効果ガス排出削減目標は、2°C/1.5°C目標に向けて取り組みが不十分で、2030年の各国削減目標の大幅な引き上げが必要
- 非CO₂温室効果ガス排出量をゼロにすることは難しく、非CO₂温室効果ガスの削減は2°C/1.5°C目標の実現に向けた障壁の一つ
 - HFCは地球温暖化係数が大きく、僅かな排出量でも影響を与え、先進国だけでなく途上国においてもHFC排出量が急増中。そこで、モントリオール議定書キガリ改正(2016)によって、HFCの生産・消費の段階的な削減規制が定められた。
 - CH₄の主な排出源は非エネルギー部門であり、化石燃料燃焼起源に対する脱炭素対策とは別に、非エネルギー部門に対する独自の対策も必要
- ブラックカーボン(BC)、メタン(CH₄)、対流圏オゾン(対流圏O₃)、ハイドロフルオロカーボン(HFC)は短寿命気候強制因子(SLCFs)である。
 - 早期に大幅削減することで2°C/1.5°C目標の実現への貢献が期待される

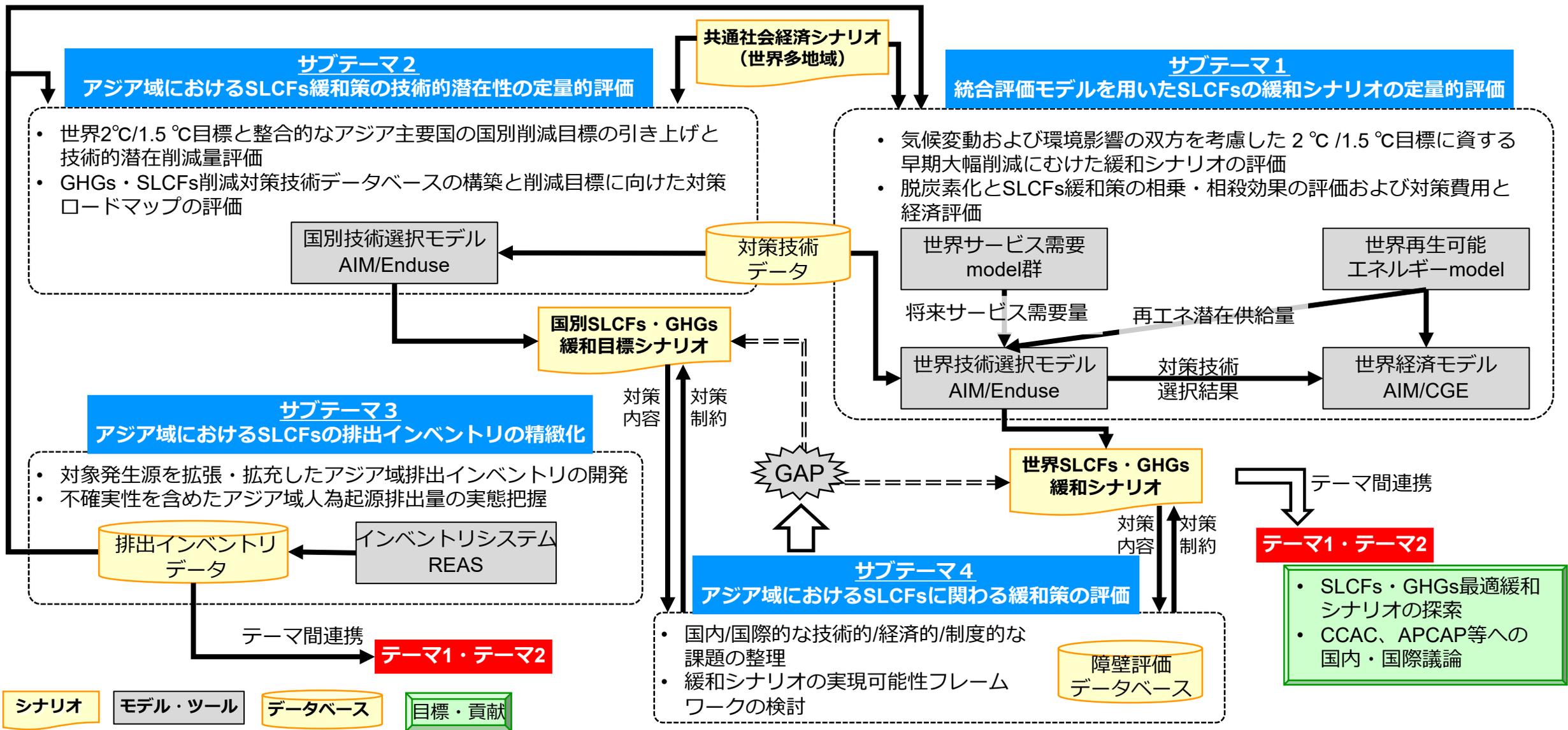
S20 テーマ3 研究開発目標・目的

2°C目標・1.5°C目標および環境影響の低減を考慮した

短寿命気候強制因子(SLCFs)と長寿命温室効果ガス(GHGs)の最適緩和シナリオを探索し、**地域別・ガス種別の技術的な潜在削減量や経済影響**などの定量的の評価を行い、**緩和策の技術的・経済的・制度的な課題**を明らかにする

- 脱炭素社会の実現と環境影響の軽減に向けた持続可能な世界・アジア域のGHGs・SLCFs最適緩和シナリオを探索し、**GHGs・SLCFs排出削減経路における対策費用や経済影響**等を定量的に評価する。
- 1.5°C目標に資するGHGs・SLCFsの**早期大幅削減シナリオ**を探索し、**脱炭素対策とSLCFs緩和策の組み合わせによる相乗効果・相殺効果**を定量的に評価する。
- パリ協定下の**アジア諸国の排出削減目標の大幅な引き上げ**にむけた**対策強化策**、対策技術導入による**潜在的削減量**や技術的・経済的・制度的な課題の下における**実現可能性**、および**主要な排出源の地域偏在性**を踏まえた2°C/1.5°C目標の実現に向けた対策ロードマップを検討する。
- テーマ1による気候影響評価およびテーマ2による環境影響評価を踏まえ、テーマ3による緩和策による社会経済評価と合わせて、**S20独自のGHGs・SLCFs最適緩和シナリオ**を策定する。

S20 テーマ3 研究構成と研究開発内容



S20 テーマ3 計画計画

テーマ1・テーマ2

データ共有フレームの確認

テーマ1・テーマ2

計算結果

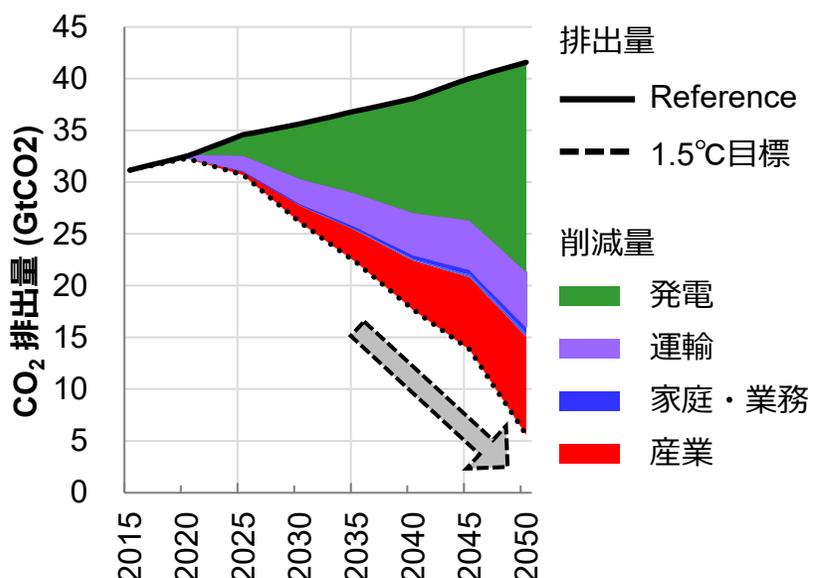
テーマ1・テーマ2

計算結果

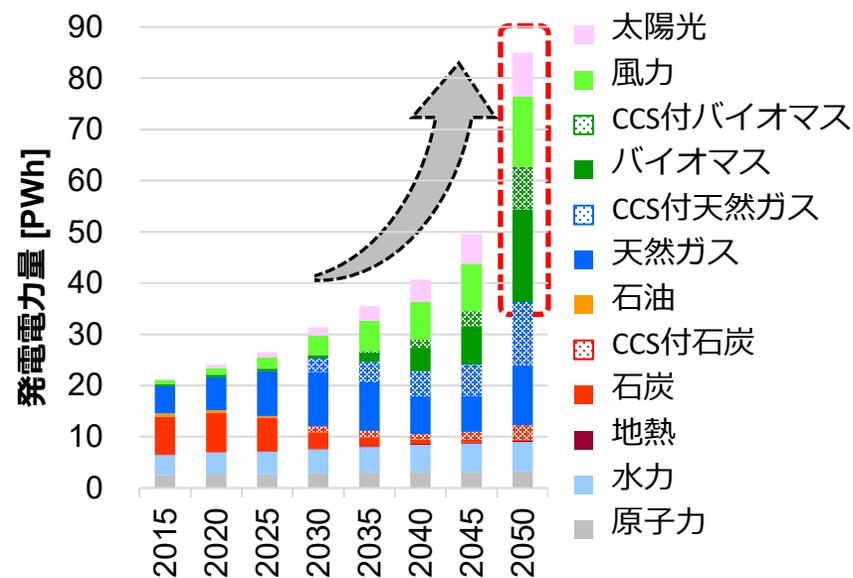
	FY2021	FY2022	FY2023	FY2024	FY2025
テーマ3	モデル・データベース・インベントリの開発・拡張・拡充	緩和シナリオ評価第一弾	モデル・データベース・インベントリの改良	緩和シナリオ評価第二弾	早期大幅削減の実現可能性や政策等の検討
サブテーマ1	AIM/Enduseモデル、再エネモデル、運輸モデル等の開発・拡張 ・サービス需要量の遷移・電化普及可能性等 ・早期大幅削減シナリオの探索・検討 対策データベースの拡充		AIM/Enduseモデル、再エネモデル、運輸モデル等の改良・拡充 ・脱炭素対策・SLCF対策の相乗・相殺効果 ・最適な早期大幅削減シナリオの策定 対策データベースの拡充（特にアジア域）		対策費用・経済影響などを考慮した実現可能性の検討 アジアの削減目標の引き上げ・対策の地域偏在性等の評価
サブ2	データベースの拡充 モデル改良・緩和シナリオの作成		対策データベースの拡充（特にアジア域） モデル拡充・緩和シナリオの策定		・ロードマップ策定 ・シナリオ感度分析等
サブ3	データ収集・REASシステムの拡張・拡張 時系列排出インベントリの作成		排出インベントリの更新・不確実性評価 排出インベントリの変動要因解析		排出削減対象優先国や発生源のまとめ
サブ4	BC, CH ₄ , HFCの国際・国内の制度・政策の収集・検討 調査・ヒアリング / 実現可能性フレームワークの作成		ガバナンス・行動様式等の検討 実現可能性フレームワークの改良		・ソリューション報告書 ・有効な制度・施策等

成果1: 1.5°C目標に資する世界のGHGs・SLCFs早期大幅削減シナリオの探索

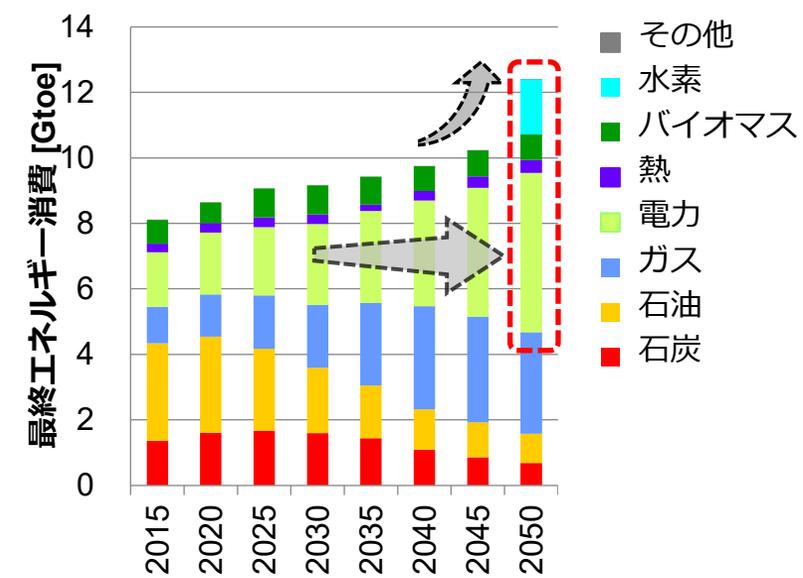
- 技術選択モデルAIM/Enduse[Global]を用いて、先進国は2050年頃、途上国は2060年頃にCO₂ネットゼロ排出を達成する1.5°C目標に資するシナリオを分析。
- 1.5°C目標に資するCO₂ネットゼロ排出を実現するには、
 - 1) グラスゴー気候合意で採択された**石炭の段階的削減を加速**し、残存する**石炭火力発電はすべてCCS付き**
 - 2) 脱炭素化が困難な部門からの排出量を相殺するために、**CCS付きバイオマス発電（BECCS）の大幅普及**
 - 3) 需要部門において、**電化の促進**だけでなく、2040年以降は**水素や合成燃料などの利用を促進**
 - 4) **再生可能エネルギーの大幅普及**と**グリーン電力による水素製造（グリーン水素）**
 など、世界全体で大規模な脱炭素対策の導入が必須。



1.5°C目標シナリオの世界のCO₂排出経路と削減量



1.5°C目標シナリオの世界の発電電力量と電源構成

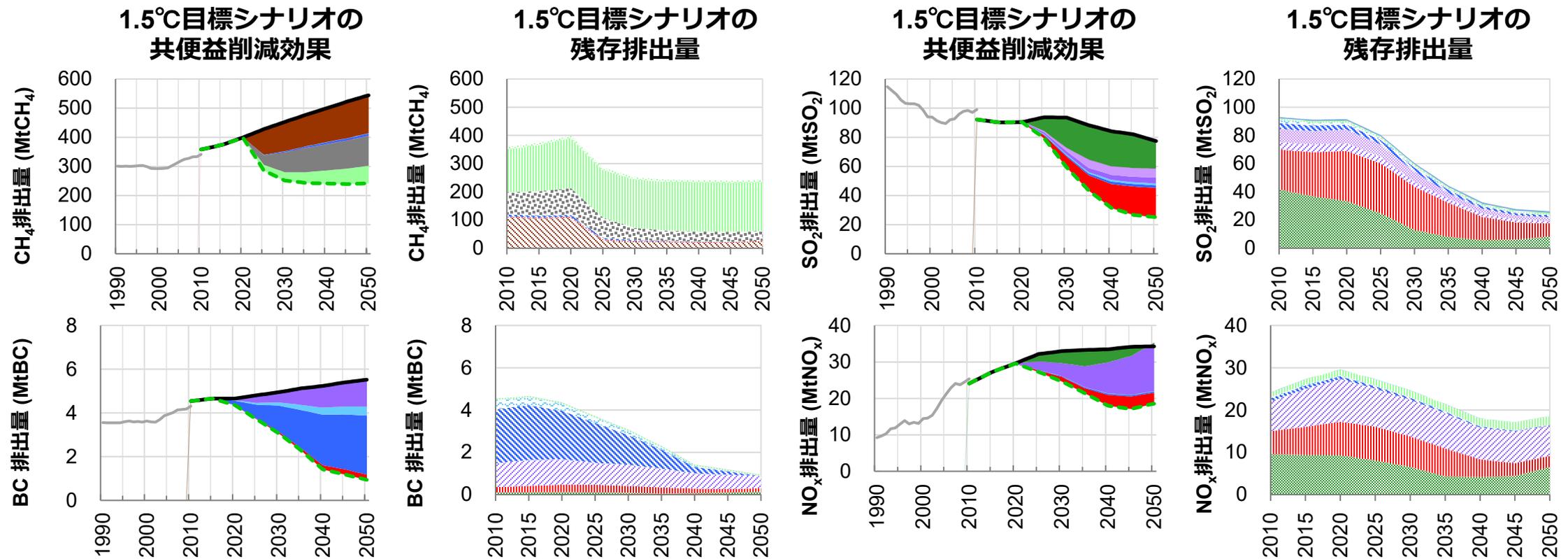


1.5°C目標シナリオの世界の最終エネルギー消費とエネルギー構成

Source) Hanaoka, et al (2023) 10th International Conference on Acid Deposition

成果2: 1.5°C目標に資する世界のGHGs・SLCFs早期大幅削減シナリオの探索

- 1.5°C目標に資する大規模な脱炭素対策により、エネルギー起源のSLCFs・大気汚染物質の共便益削減効果も期待できる。
- 一方、脱炭素化が困難な部門や非エネルギー部門でGHGs, SLCFs, 大気汚染物質の排出が残存し、その傾向はガス種別・部門別に異なる。（例：CH₄排出は農業部門由来が大きく残る。NO_x排出は発電部門由来が2040年以降に増加傾向。など）



排出量 ——— インベントリ (EDGAR) ——— Reference - - - 1.5°C目標シナリオ

共便益削減量 ■ 発電 ■ 運輸(陸上) ■ 運輸(航空船舶) ■ 家庭 ■ 業務 ■ 産業 ■ 資源採掘 ■ 廃棄物 ■ 農業

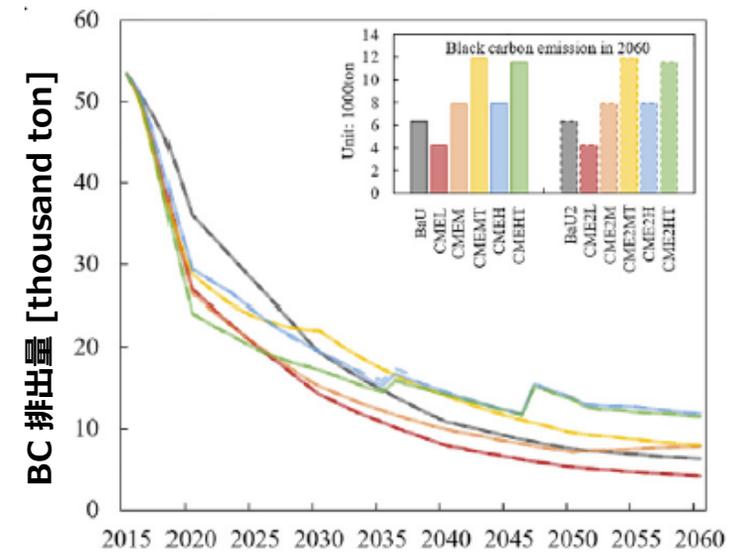
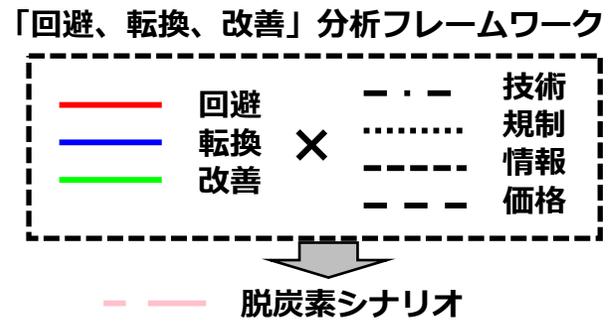
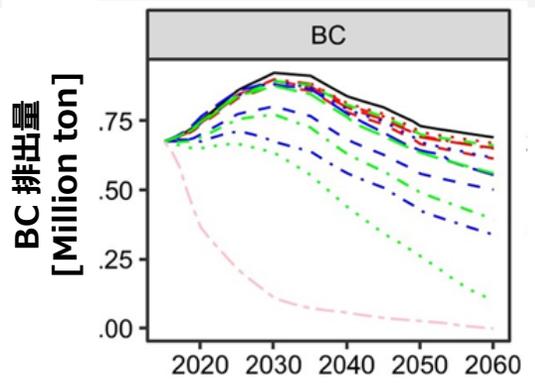
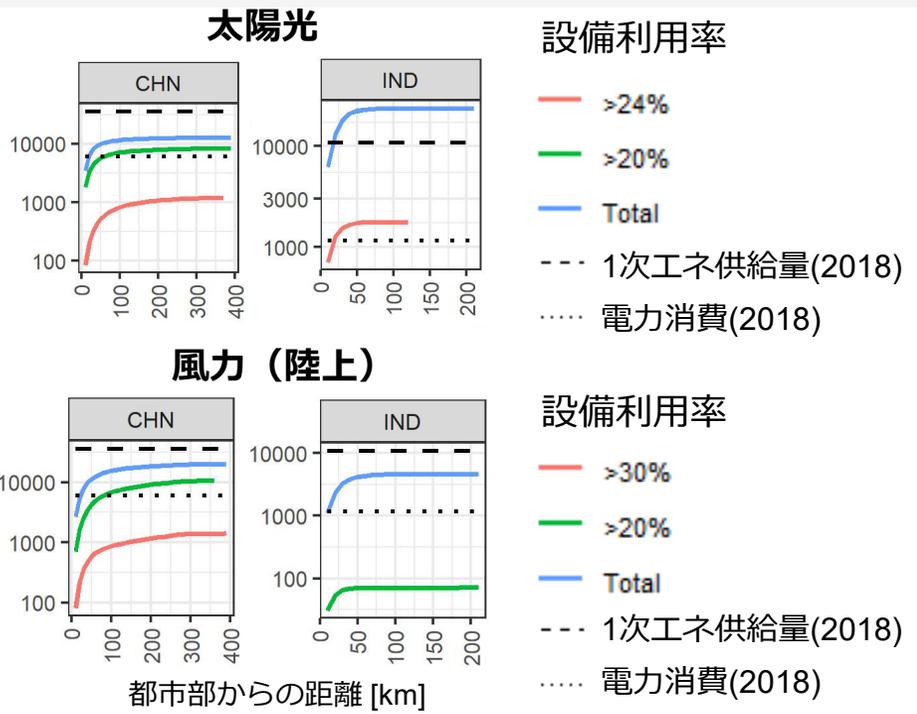
残存排出量 ■ 発電 ■ 運輸(陸上) ■ 運輸(航空船舶) ■ 家庭 ■ 業務 ■ 産業 ■ 資源採掘 ■ 廃棄物 ■ 農業

Source) Hanaoka, et al (2023) 10th International Conference on Acid Deposition

成果3: 1.5°C目標の実現に向けた部門別の評価（供給ポテンシャル、削減ポテンシャル等）

- (左図) 世界再生可能エネルギーモデルを拡張し、風力・太陽光の供給潜在量のある地域との距離を考慮した、再生可能エネルギー供給ポテンシャルを推計。**国別・地域別に風力・太陽光の供給潜在量の特徴が異なる。**
- (中図) 世界で電気自動車の普及が最も速い中国に注目し、運輸旅客・貨物需要モデルと技術選択モデルを統合する新手法を開発し、CO₂ネットゼロ排出に向けた脱炭素対策を分析。**BCや大気汚染物質の排出への共便益削減効果がある。**
- (右図) エネルギー集約型産業で脱炭素化が困難な分野である鉄鋼部門に対し、世界の鉄鋼生産の半分を占める中国に注目し、技術選択モデルを用いて中国の政策等を考慮した脱炭素対策を分析。**BCや大気汚染物質の排出への共便益削減効果がある。**

供給ポテンシャル[TWh/yr]



Source) SILVA HERRAN and ASHINA (2023) Environmental Research Communications (IF:3.237)

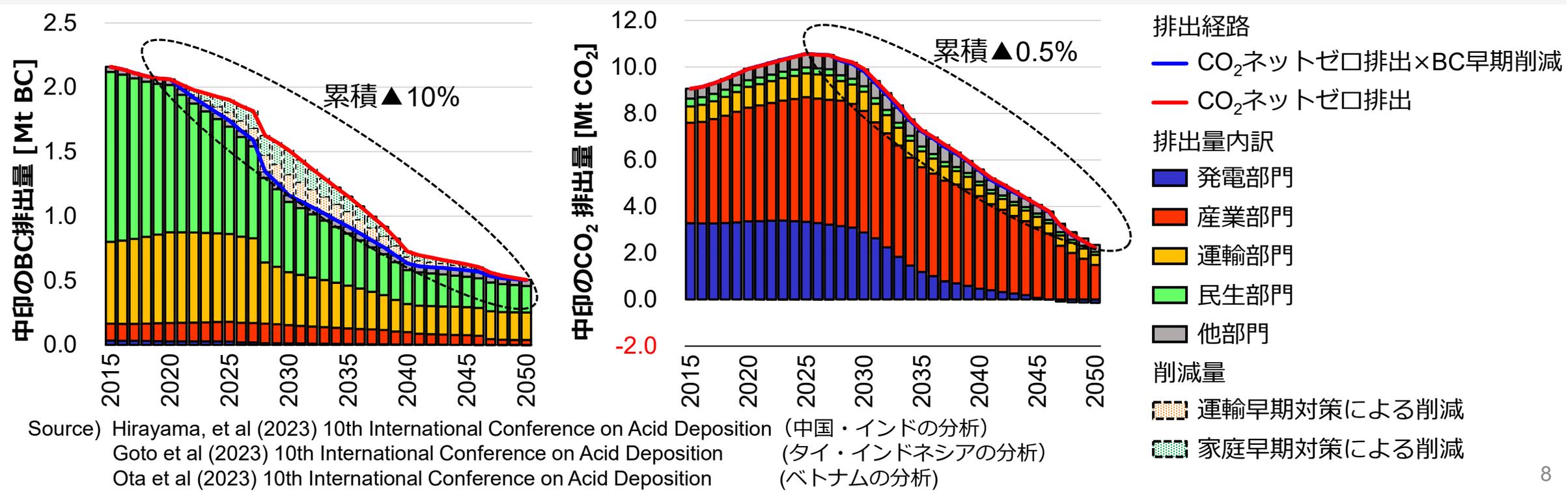
Source) ZHANG and HANAOKA (2022) Nature Communications (IF:10.754) ZHANG and HANAOKA (under review) Renewable and Sustainable Energy Reviews (IF:15.9)

Source) LI and HANAOKA (2022) One Earth (IF: 14.944)

成果4: 1.5°C目標に資するアジア諸国のGHGs・SLCFs早期大幅削減シナリオの探索

- (下図) 中国及びインドについて、**2060年「CO₂ネットゼロ排出」シナリオ**、及びBC削減にも効果的な家庭・運輸部門の脱炭素対策をネットゼロ排出シナリオよりも5年早く前倒しする「**CO₂ネットゼロ排出×BC早期削減**」シナリオを分析。

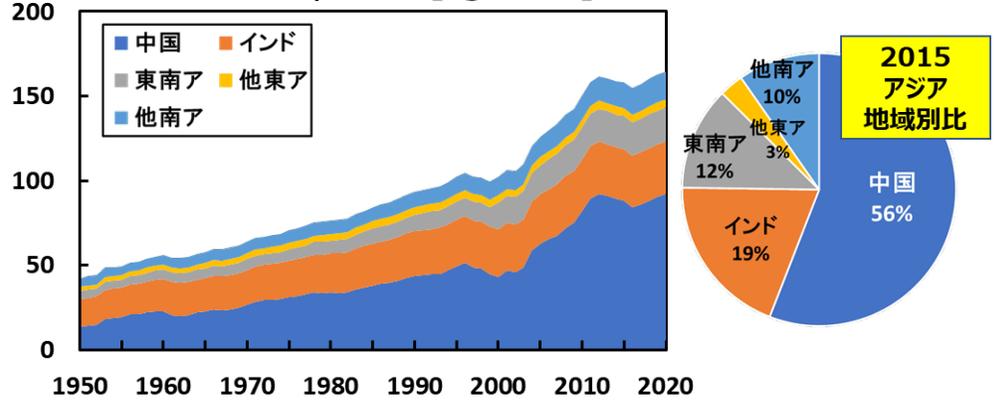
 - BC削減策を前倒しすることで**累積BC排出量は約10%削減**されるが、**累積追加対策費用は3.2%増加**に留まる。つまり、主要なBC排出源で対策強化すると、大規模な追加投資費用を費やすことなく、BCの累積排出量を大幅に削減できる。
 - BC削減策の前倒しがCO₂削減へ与える影響は小さく、**累積CO₂削減効果は0.5%削減**に留まる。
- ASEANにおけるCO₂ネットゼロ排出の各国の特徴を把握するために、タイとインドネシアについて、各国の中長期温室効果ガス低排出開発戦略に沿った「LTS」シナリオと、脱炭素対策を強化する2050年「CO₂ネットゼロ排出」シナリオを分析。ベトナムについて、「CCS依存」と「再生可能エネルギー最大活用」の2通りの2050年「CO₂ネットゼロ排出」シナリオを分析。



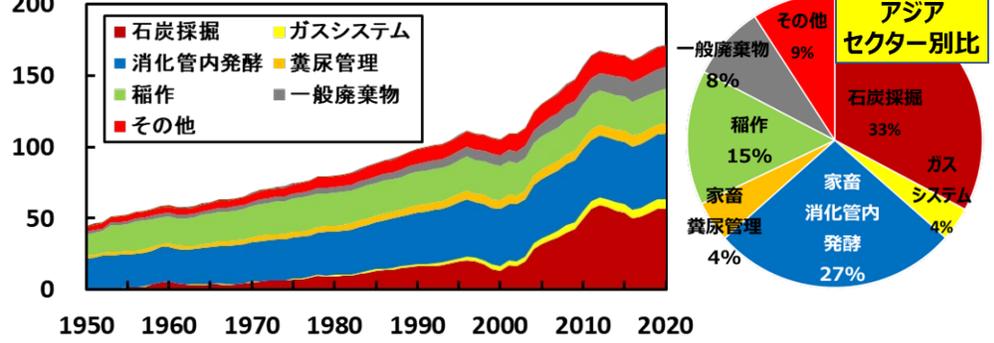
成果5: REASシステムの拡張・拡充及び近年のSLCF排出量の推移

- **CH₄排出量はこの70年で約3.5倍増加**。最大の排出国は中国、次いでインド（近年両国で約75%を占める）。農業は約2倍、一般廃棄物は約7.5倍なのに対し、燃料漏洩（特に石炭採掘）は約50倍となっている。
- 最大の発生源は**中国の石炭採掘**。**インドの家畜消化管内発酵**が次ぎ、**東南アジアの稲作**の寄与分も大きい。
- **近年中国とインドのSO₂排出量は逆転**し、BC・OCもほぼ同等に近いが、NO_xは依然中国がインドの約2倍。

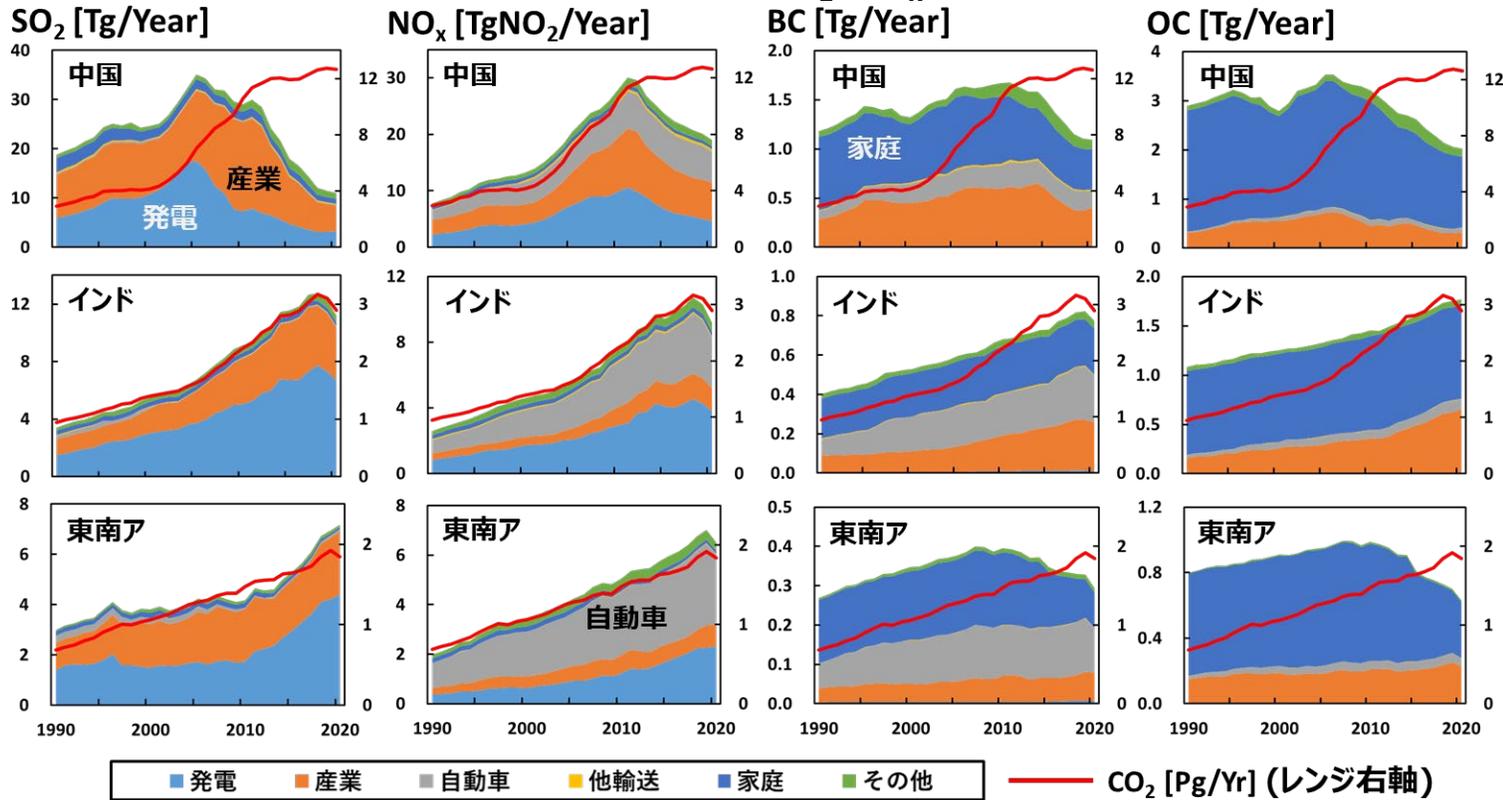
アジア地域別CH₄排出量 [Tg/Year]



アジアセクター別CH₄排出量 [Tg/Year]



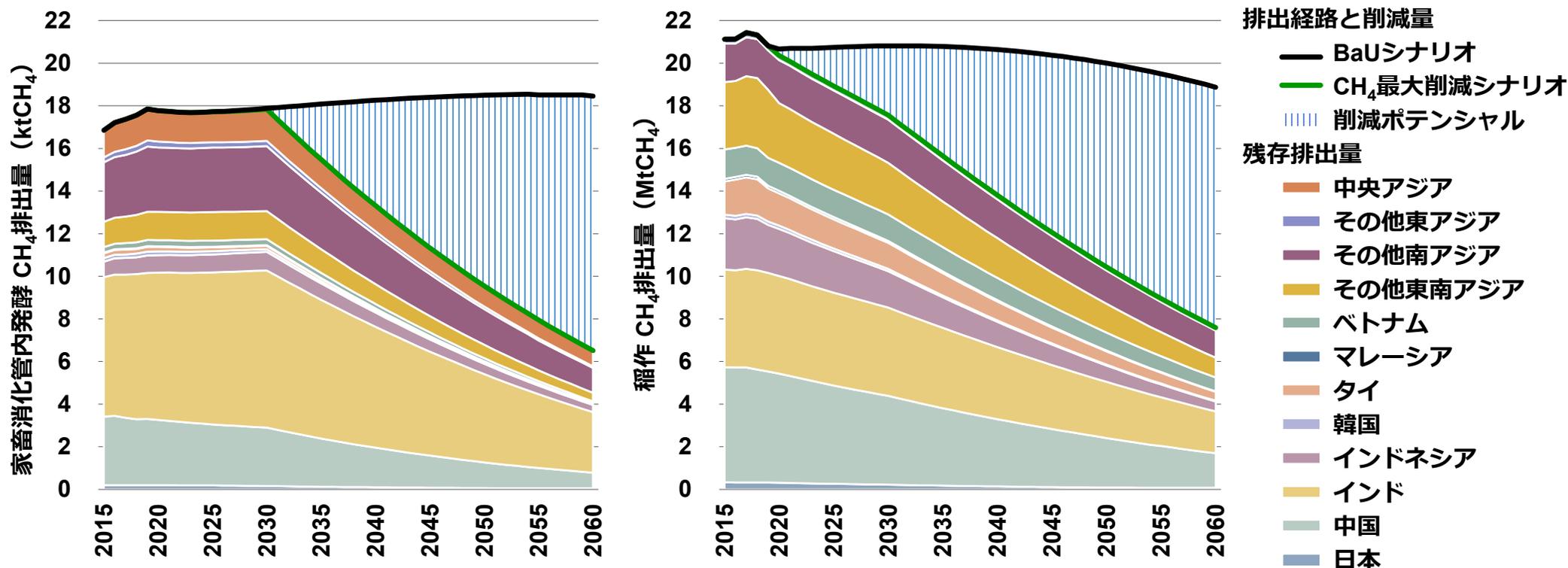
主要発生源別中国・インド・東南アジアSO₂, NO_x, BC, OC排出量 (レンジ左軸)



Source) CRIPPA, ~~, KUROKAWA, ~~ et al (2023) Earth System Science Data (IF: 11.4) へ用いられたREASのデータの詳細
 KUROKAWA, KIRIYAMA, and HANAOKA (2023) 20th GEIA Conference (GEIA: Global Emission Initiative)

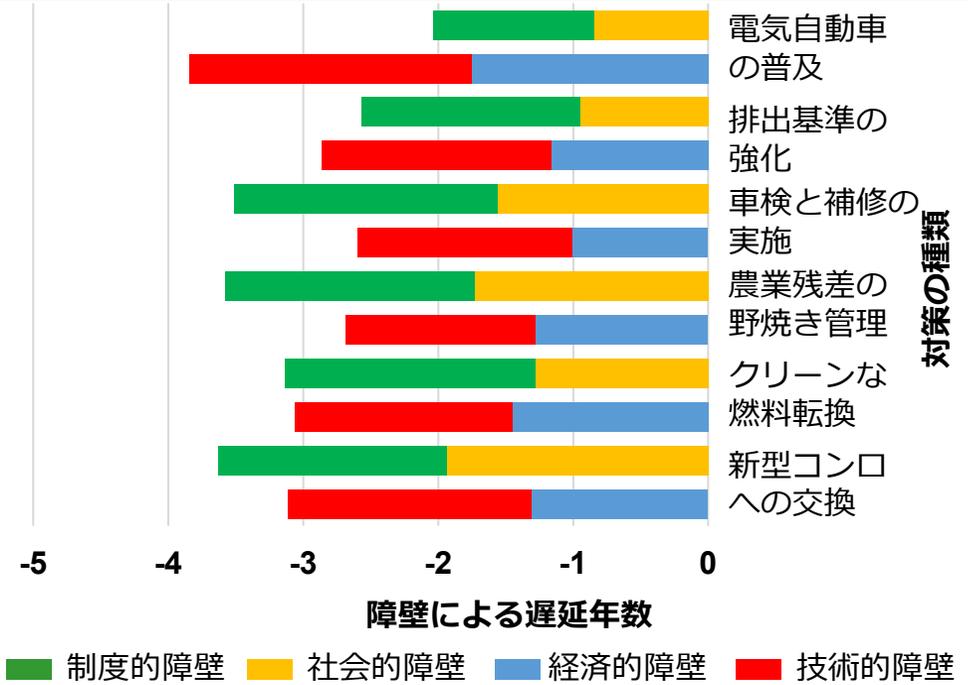
成果6: 1.5°C目標に資する非エネルギー部門のSLCFs大幅削減シナリオの探索

- (下図) アジア域でCH₄排出内訳の大きい農業部門に対して、BaUシナリオを精査。また、脱炭素対策だけでは農業部門のCH₄排出が大きく残るため、利用可能なCH₄削減対策が2060年までに最大限導入される「**CH₄最大削減**」シナリオを分析。
 - 例えば、家畜消化管内発酵では「メタン発生抑制物質の餌への添加」「飼養管理の改善」「牛の育種改良」など、稲作では「水管理の改善」「施用有機物の変更」などがアジア全域で最大限導入されるケースを想定。
 - 2060年までに**消化管内発酵は61%減、稲作は64%減(2015年比)**と試算されたが、**CH₄排出の約4割が残る**。
- 廃棄物部門について、一般固形廃棄物及び排水処理のGHGs・SLCFs排出量算定にむけた廃棄物モデルの開発を推進。
- HFCs部門について、冷媒用途に注目し最新インベントリの報告値及び内容を精査し、HFCs排出量推計モデルの開発を推進。



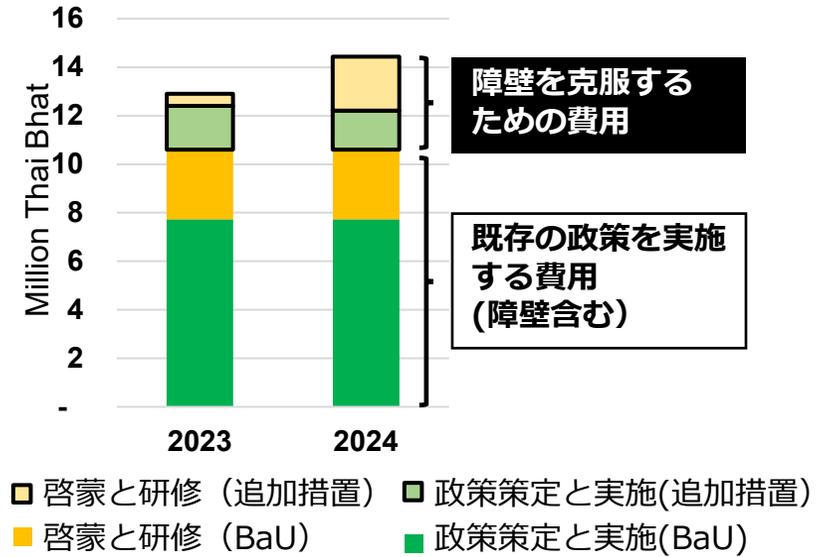
成果7: 障壁評価手法および実現可能性フレームワークの開発

- 4つの障壁カテゴリー（経済・技術・社会・制度）に対して、SLCFs削減対策に与える障壁影響度を4段階で定量的に評価した実現可能性フレームワークを新たに開発。
- タイを対象に、文献調査及び専門家へのヒアリング調査を実施し、主なBC削減策に対する障壁及び障壁による対策遅延の影響（遅延年数）を評価。また、障壁を克服するためにかかる費用を評価する方法を検討。
- 自動車の車検と補修をはじめ、クリーンな調理用コンロ導入など、比較的規模の小さな対策においては社会的、制度的障壁が、これまで注視されてきた技術的、経済的な障壁と同程度もしくはより大きいことが明らかになった。



タイにおける主なBC削減策の障壁による対策遅延への影響評価（2020-2035年）

Source) Zusman, et al (in preparation)

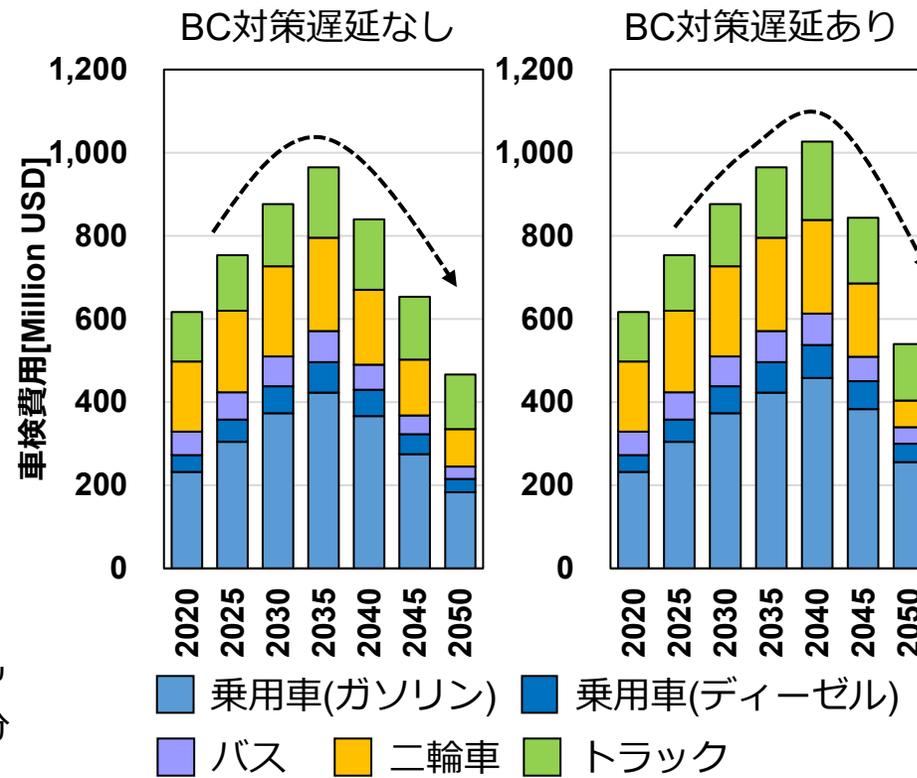
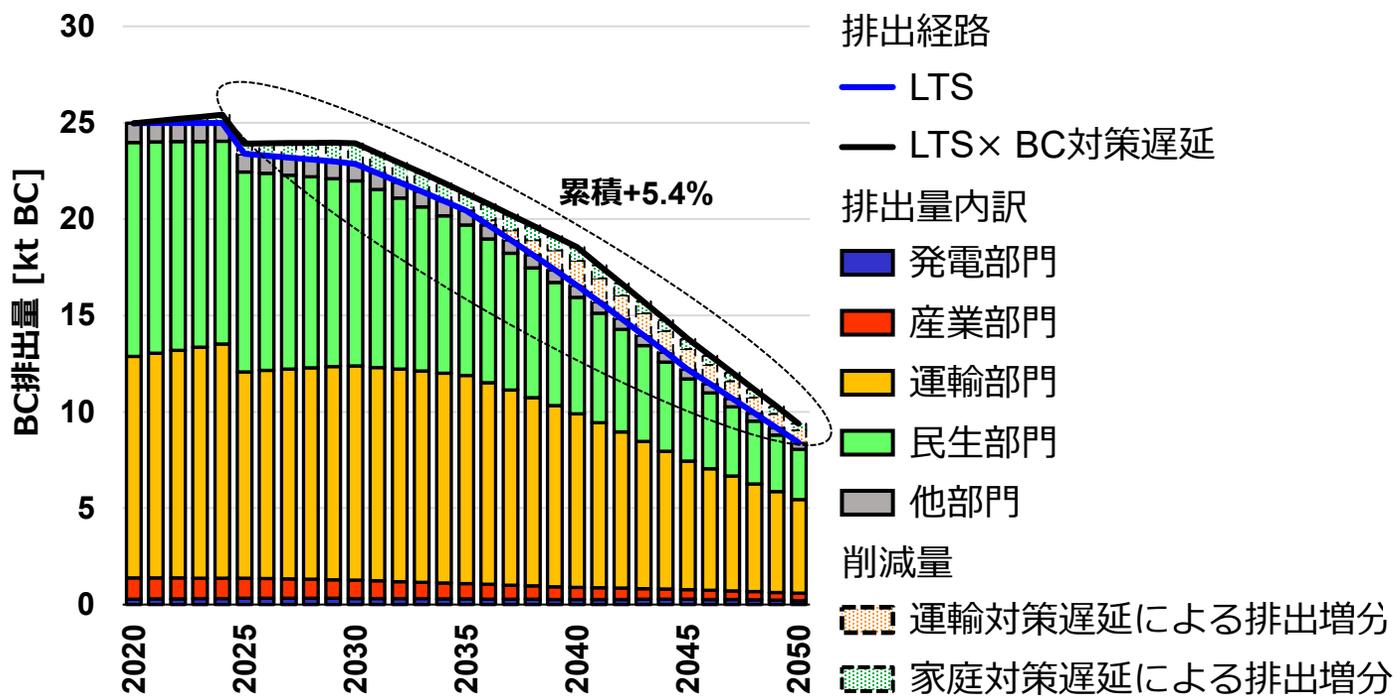


調理用コンロに関する制度的・社会的障壁を克服するためにかかる費用

Source) Akahoshi, et al (in preparation)

成果8: 障壁評価手法のタイ・シナリオへの適用および障壁費用の算出

- 技術選択モデルを用いて、タイが掲げる中長期温室効果ガス低排出開発戦略に沿った「LTS」シナリオ、及びBC削減策への障壁によって対策導入が約5年後ろ倒しとなる「LTS× BC対策遅延」シナリオを分析。
- BC削減策の導入が遅れることで**累積BC排出量は5.4%増加**する一方で、BC削減策の遅れがCO₂排出へ与える影響は小さく、**累積CO₂排出量は1.3%増加**に留まることが分かった。また、対策導入が遅れるため、**総対策費用は6.6%減少**となる。



タイの中長期温室効果ガス低排出開発戦略に対してBC削減策の対策遅延の影響の評価

内燃機関自動車への適切な車検に係る費用の評価例

1.5°C目標に資するGHGs・SLCFs早期大幅削減シナリオの案

- 狙い1) 対策の組み合わせ次第で相乗効果と相殺効果があり、国/部門/ガス毎に特徴が異なるため、主な組み合わせを網羅する。
- 狙い2) 脱炭素対策（1.5°C目標に資するCO₂ネットゼロ排出）に加え、SLCFs早期大幅削減の可能性とその影響を見る。
- 狙い3) “オーバーシュート無し”の1.5°C目標の実現や大気質の改善に対する、SLCFs早期大幅削減の貢献度を見る。



「1.5°C目標に資するGHGs対策強化×除去対策強化×非エネルギー部門のSLCFs対策強化」の組み合わせ

シナリオ群	概要	シナリオコード	対策の組み合わせ 及び 対策強度(★)								
			大気汚染除去強化	エネルギー起源GHGs対策				非エネルギー起源SLCFs対策			
				発電部門再エネ強化	全部門省エネ強化	需要部門電化強化	需要部門水素強化	農業部門対策強化	廃棄物部門対策強化	Fガス部門対策強化	
レファレンス：主	なりゆき (BaU)	SSP2									
レファレンス：副	技術固定	Frozen									
除去対策のみ	EoP段階的削減	EPS	★								
	EoP最大削減	EPM	★★★								
GHG対策強化	低炭素(2°C目標)	LC		★★	★★	★★		★	★	★	
	脱炭素(1.5°C目標)	DD		★★★	★★★	★★★	★★	★	★	★	
GHG+SLCF強化	低炭素+SLCF早期大幅削減	LCS		★★	★★	★★		★★★	★★★	★★★	
	脱炭素+SLCF早期大幅削減	DDS		★★★	★★★	★★★	★★	★★★	★★★	★★★	
GHG+EoP	低炭素+EoP最大削減	LC-EPM	★★★	★★	★★	★★		★	★	★	
	脱炭素+EoP最大削減	DD-EPM	★★★	★★★	★★★	★★★	★★	★	★	★	
最大削減組み合わせ	低炭素+SLCF+EoP最大	LCS-EPM	★★★	★★	★★	★★		★★★	★★★	★★★	
	脱炭素+SLCF+EoP最大	DDS-EPM	★★★	★★★	★★★	★★★	★★	★★★	★★★	★★★	

S20 テーマ3 研究の進捗状況

【サブテーマ1】 計画通り進展している

- AIM/Enduse[Global]の拡充・拡張を進め、1.5°C目標に資するGHGs・SLCFs削減シナリオを分析
- 世界再生可能エネルギーモデルの拡充・拡張を進め、太陽光・風力の普及ポテンシャルを分析
- テーマ間連携で用いるGHGs・SLCFs早期大幅削減シナリオの原案の探索
など

【サブテーマ2】 計画通り進展している

- 中国、インド、ASEAN諸国におけるCO₂ネットゼロ排出の分析やBC早期削減シナリオの分析
- CH₄排出量内訳の大きい農業起源CH₄排出に対して、アジア諸国におけるBaUの精査及び技術的 maximum 削減量を分析
- タイを対象にサブテーマ4と連携し、BC緩和策の障壁を考慮したBC対策遅延シナリオの分析
など

【サブテーマ3】 計画通り進展している

- アジア域排出インベントリREASシステムの拡張・拡充の推進（大規模発生源、固定発生源のデータ更新など）
- 主要SLCFs関連物質(SO₂, NO_x, CO, NMVOC, NH₃, CH₄, PM₁₀, PM_{2.5}, BC, OC) 及びCO₂の1950-2020年の排出量を推計
- CH₄の排出量推計システムの新規開発し、CH₄排出量が上位となる発生源及び国の組み合わせを調査
など

【サブテーマ4】 計画通り進展している

- 4つの障壁カテゴリー(経済・技術・社会・制度)に対し、障壁影響度を4段階で評価した実現可能性フレームワークを開発
- 主なBC削減策に関し、タイを対象に障壁による対策遅延への影響を分析
- 新たな研究として、障壁を克服する費用(取引費用)や世界銀行のガバナンス指標を用いたタイ国以外への展開の検討
など

S20 テーマ3 環境政策等への貢献および国際共同研究等

環境政策等への貢献

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

- アジア域排出インベントリREAS（及び、REASが組み込まれるTF-HTAPやMICS-Asiaのモザイク型排出インベントリ）は、環境省が実施する光化学オキシダント、微小粒子状物質（PM_{2.5}）、窒素インベントリなどに関する業務において、モデルシミュレーション、発生源解析、対策検討などの基礎データとして活用されることが見込まれる。
- サブテーマ4の赤星及びザスマンは、国連環境計画「気候と大気浄化の国際パートナーシップ (Climate and Clean Air Coalition: CCAC)」によるASEAN地域を対象とした大気環境のソリューションレポート作成に参画した。本レポートは2023年秋に発表される見込みで、本レポートに記載の推奨事項は、今後のASEAN各国への支援の際に活用されることが見込まれている。

＜行政等が既に活用した成果＞

- IPCCインベントリタスクフォースにおけるSLCFインベントリ専門家会合用の資料として、アジア域排出インベントリREASの対象発生源、方法論に対する情報を提供した（2021）。
- 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）から2021年に出版された「第4次東アジアにおける酸性雨の状況に関する評価報告書」第I巻6.3節（P205-216）において、アジア域排出インベントリREASの結果が引用された。この結果は、令和4年度環境省第1回大気モニタリングデータ解析ワーキンググループ会合においても報告された。また、環境省PM_{2.5}排出インベントリ及び発生源プロファイル策定検討会や、環境省によるアンモニア燃焼時のNO_x削減技術評価事業などにおいて、排出インベントリに関する知見・情報を提供した。

国際共同研究等

- 国連環境計画 気候と大気浄化の国際パートナーシップ (UNEP Climate and Clean Air Coalition: CCAC) 科学諮問委員会
- 大気汚染物質の半球規模輸送に関するタスクフォース (Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution: TF-HTAP) 第三期全球排出インベントリ開発プロジェクト
- モデル間相互比較研究(Model Inter-Comparison Study for Asia: MICS-Asia) 第四期アジア域排出インベントリ開発プロジェクト
- 国連環境計画 気候と大気浄化の国際パートナーシップ (UNEP Climate and Clean Air Coalition: CCAC) Supporting National Planning and Action to Reduce SLCPs (SNAP) Initiative in Thailand
- Leveraging co-benefits for a healthy net-zero transitions in Japanese and other G7 cities: A scalable approach for transformative change

S20 テーマ3 研究成果の発表状況

研究成果の発表状況

- 査読付き論文：6件（Nat.Commun. [IF:10.754], One Earth [IF: 14.944], Earth Syst.Sci.Data [IF:11.4] 等）
- 誌上発表（査読なし）：7件
- 口頭発表（学会等）：21件
- 「国民との科学・技術対話」の実施：5件
- 本研究費の研究成果による受賞：1件