



第436回 定例研究報告会

IEEJ Outlook 2021

ポストコロナのエネルギー変革

エネルギー・環境・経済

2020年10月16日, 東京

日本エネルギー経済研究所

A light gray world map is centered in the background of the slide.

2050年までのエネルギー需給見通しと ポストコロナの影響分析

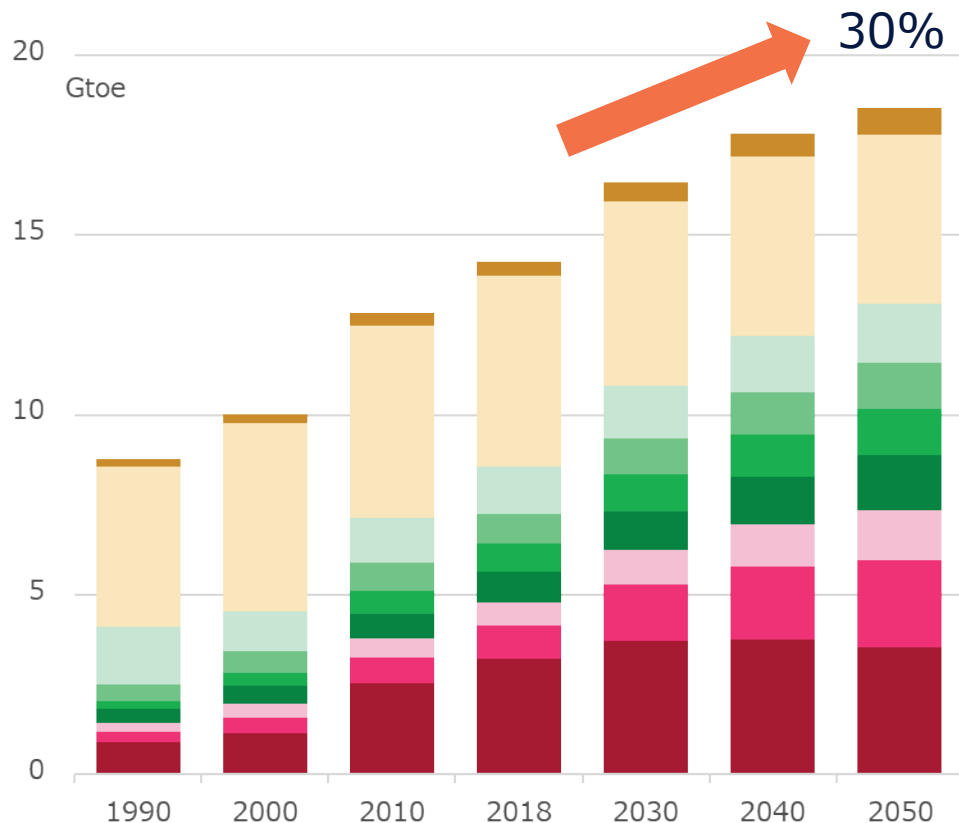
レファレンスシナリオのポイント

【レファレンス】とは

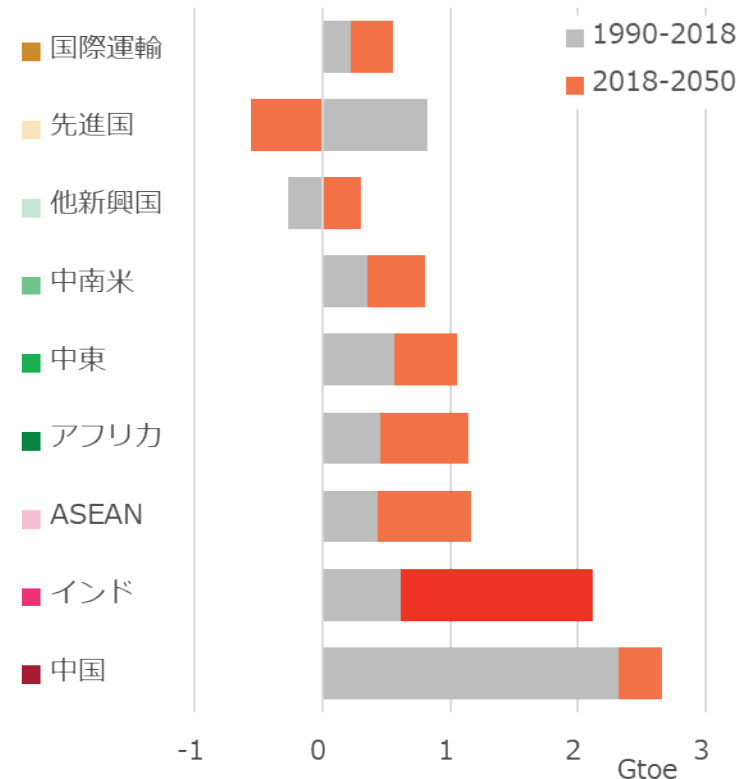
- 現在までのエネルギー・環境政策等を背景とし、これまでの趨勢的な変化が継続するシナリオ
- 世界のエネルギー需要は、アジアを中心に大幅増大。世界のエネルギー需要の重心はアジアにシフト
- アジアの中でも、インド・東南アジア等の需要増大が中心に
- 化石燃料のシェアは2050年でも8割。天然ガスは大幅増大。石油は緩やかな需要増持続。石炭はピーク
- アジアにおける化石燃料を中心としたエネルギー需要増加で、エネルギー安全保障や環境問題は今後一層深刻化
- 特にアジアでは、自給率の低下、環境負荷増大への対応が重要に

需要の成長源は中国からインドへ

❖ 一次エネルギー需要



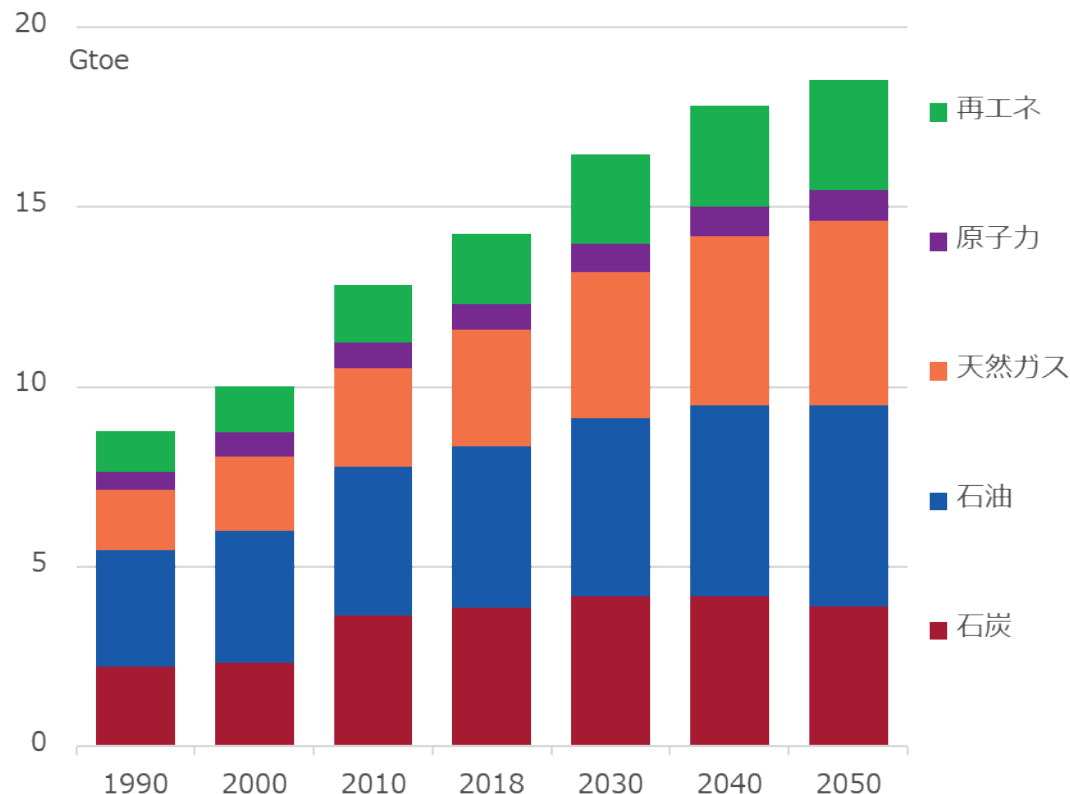
❖ 増加分(1990-2050年)



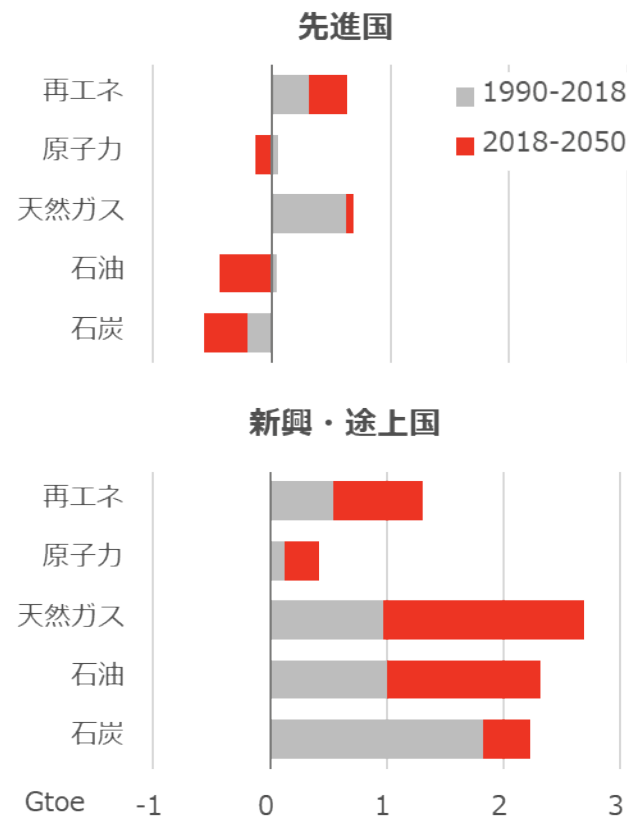
新興・途上国のエネルギー需要は50%以上増加する一方で、先進国は約10%減少する。世界のエネルギー需要の成長源は中国からインドに変わる。世界の需要増加の3分の1以上がインドから生じる一方、中国の需要は2030年代後半にはピークを迎える。

石炭ピーク、天然ガス大幅増、石油増加継続

❖ 一次エネルギー需要



❖ 増加分(1990-2050年)



発電部門を中心に天然ガスが最も増加、石油に次いで第2位のエネルギー源に。

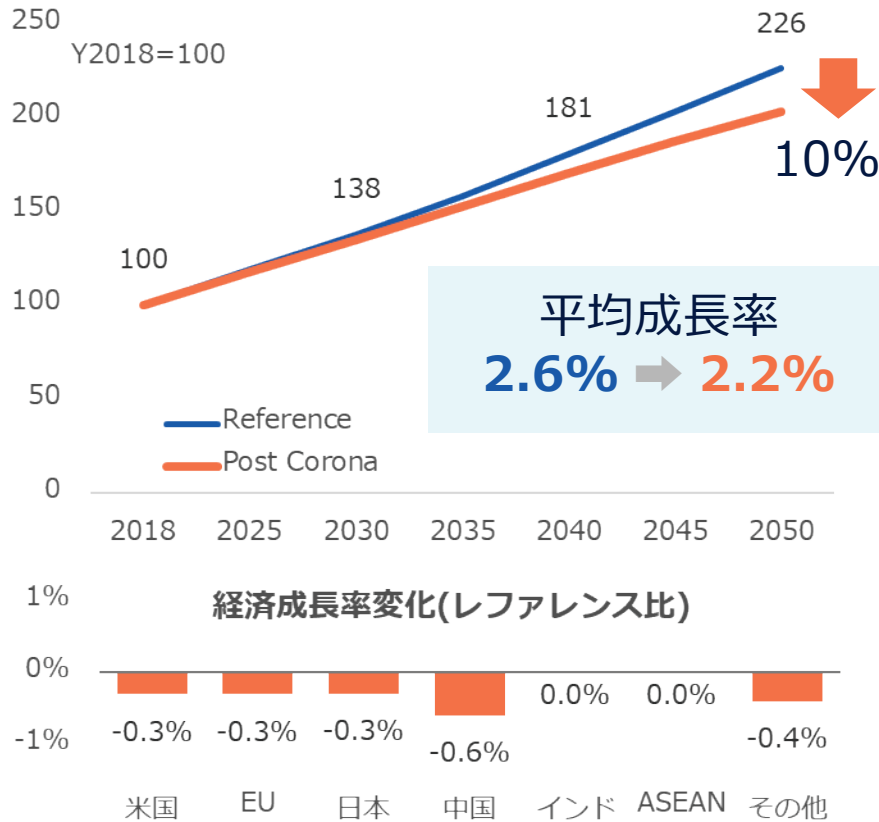
石油は、新興・途上国の伸びが、先進国の減少を大きく凌駕する。石炭需要は、先進国・中国の減少により、2030年代半ばにはピークを迎える。

“ポストコロナ・世界変容シナリオ”の策定

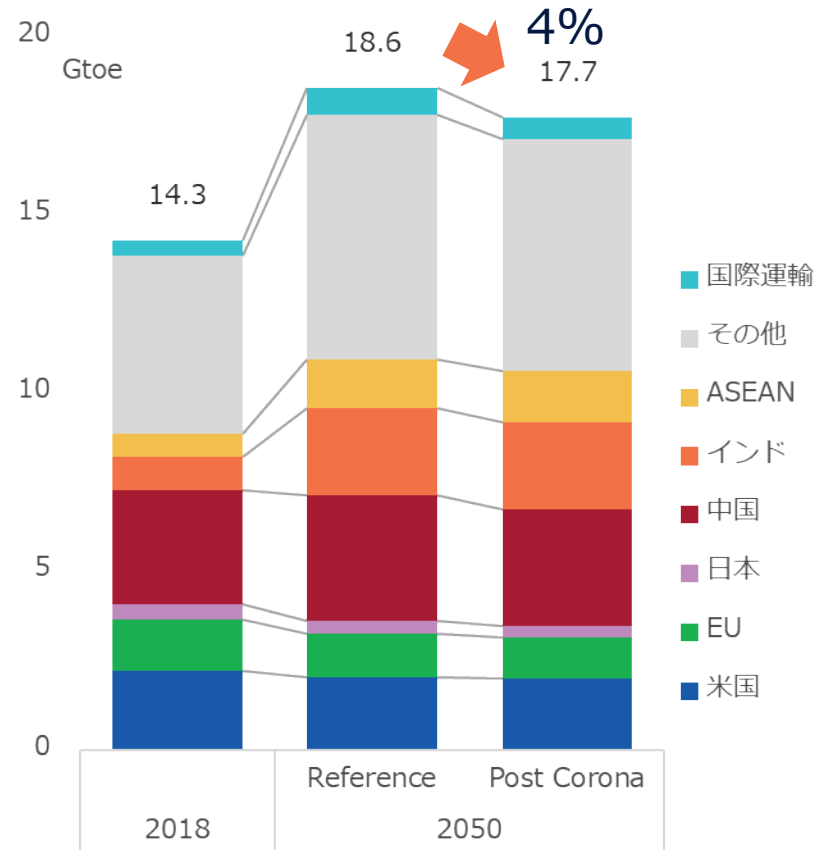
レファレンスシナリオ	現在までのエネルギー・環境政策等を背景とし、これまでの趨勢的な変化が継続するシナリオ	
ポストコロナ ・世界変容シナリオ	コロナウイルス感染拡大によって引き起こされた政治・経済・社会のあり方の変化が、そのまま維持・強化されていく世界。気候変動対策強化は継続。ただし、取り組み状況は国・地域で「まだら模様」に。	
	安全保障の重視	デジタル化の進展
感染拡大による意識の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 感染対策を契機に、自国民の安全確保の重要性を再認識 ・ 自給体制を含むサプライチェーンの見直し 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人の移動・接触が控えられ、リモートでの活動が増える ・ 密を避ける社会。大都市から地方移住への兆し
変化が加速	<ul style="list-style-type: none"> ・ 米中関係悪化。国家間の政治的な緊張は相対的に高くなる ・ 自国第一主義と同盟国重視。自由貿易体制からの離脱が進む 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 経済のリモート活動を支える情報通信技術の進展が加速 ・ リモートワークが定着。海外渡航も控えられ、輸送需要は伸び悩む
変化の帰結	<ul style="list-style-type: none"> ・ 世界経済は減速。中国の製造拠点がインド・ASEANに流出 ・ エネ供給多様化・自給率向上への取り組み強化。エネ技術覇権の競争も 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 社会のデジタル化が進み、電力需要が増加 ・ 輸送用燃料である石油需要が大きく低下

経済成長は減速し、エネルギー需要も抑制

❖ GDP



❖ 一次エネルギー需要



参考) 1929年の世界恐慌の際は、3年間で約10%のGDPが失われた。

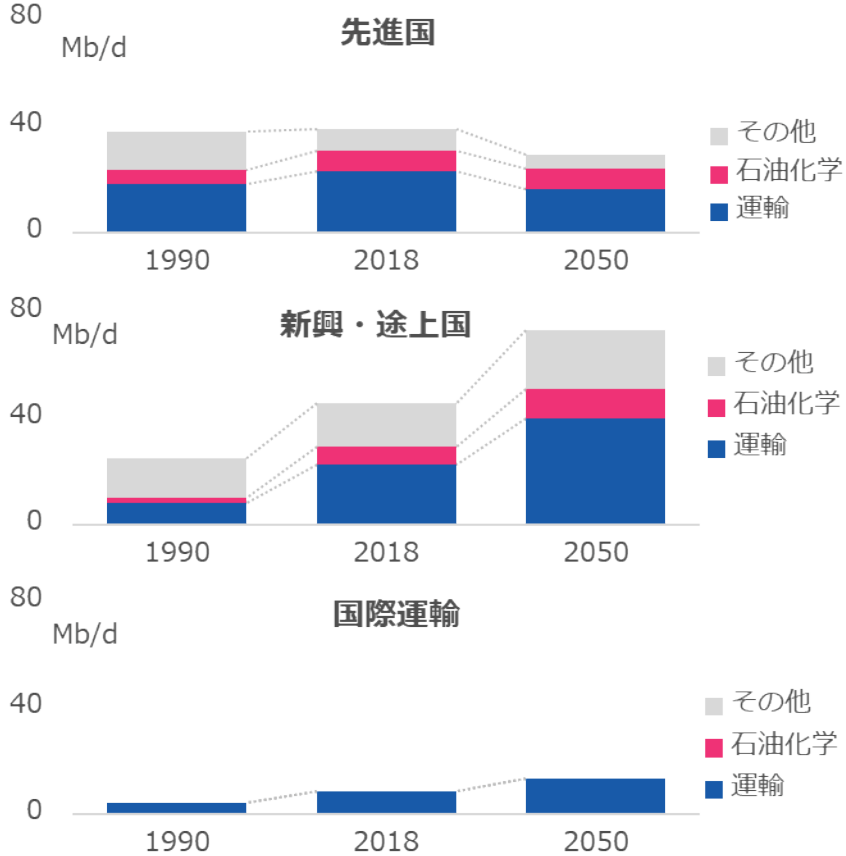
注) EU(欧州連合)に英国は含まれていない。以下同じ。

レファレンスシナリオにおけるエネルギー需要は30%増加、増加分の6割以上がアジア地域から生じる。

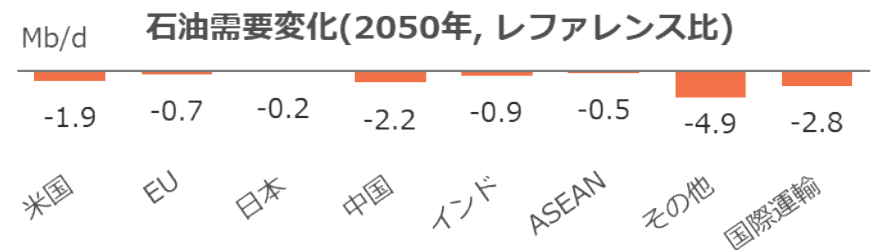
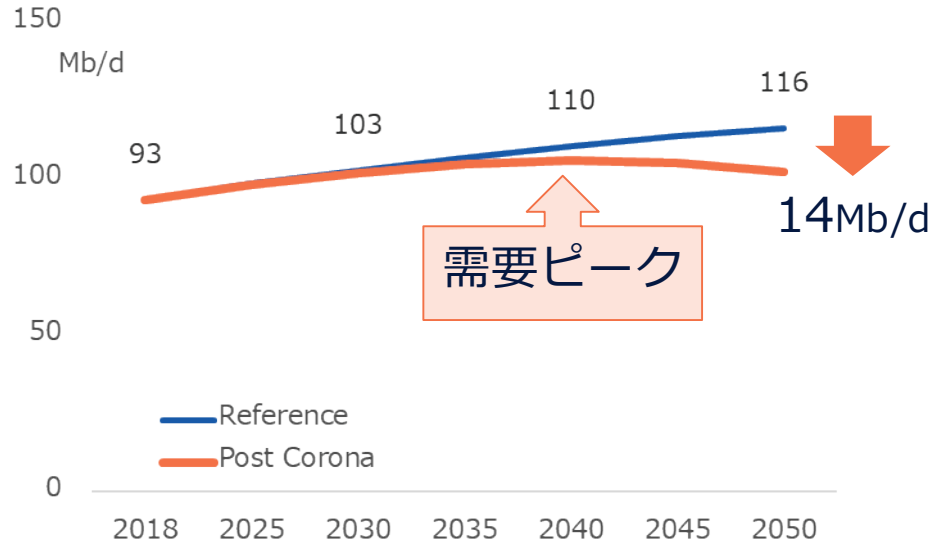
ポストコロナでは、自由貿易の停滞で世界経済はレファレンスより10%縮小、生産拠点が流出する中国の減速が大きい。エネルギー需要は4%縮小も、アジアへの集中は変わらない。

輸送停滞で石油需要はピークを迎える

❖ 用途別石油需要(レファレンス)



❖ ポストコロナの石油需要



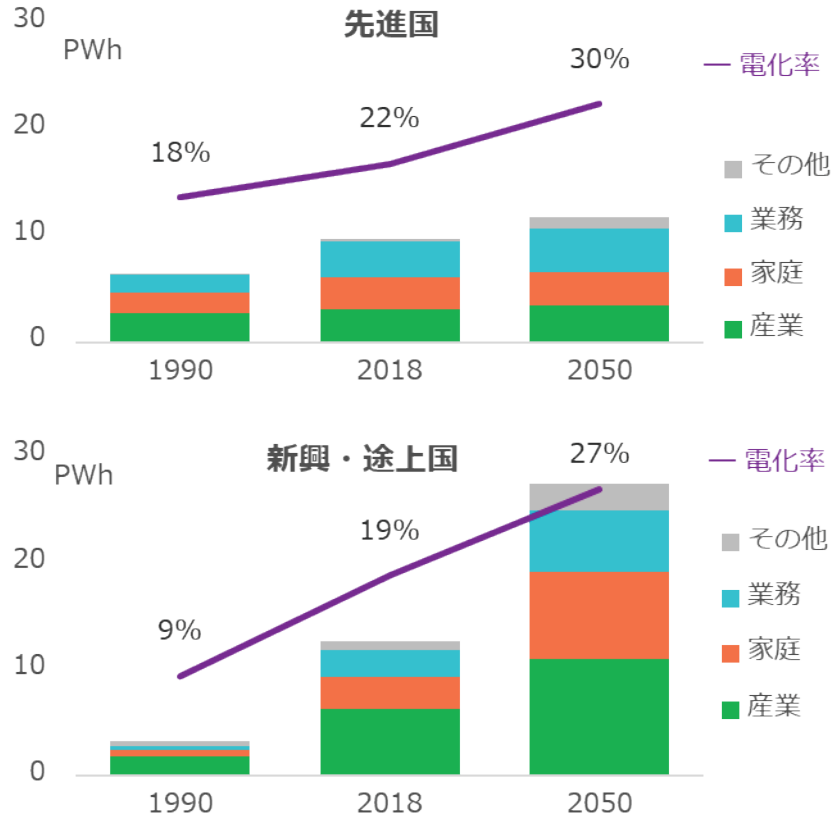
参考) 自動車の電動化が急速に進んだ場合は、2030年頃にピークを迎えると試算(IEEJアウトトラック2018)。

レファレンスシナリオにおける世界の石油需要は、運輸燃料・石油化学原料を中心に伸びていく。先進国では減少続く。

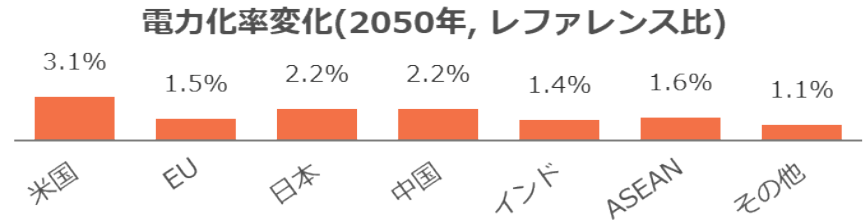
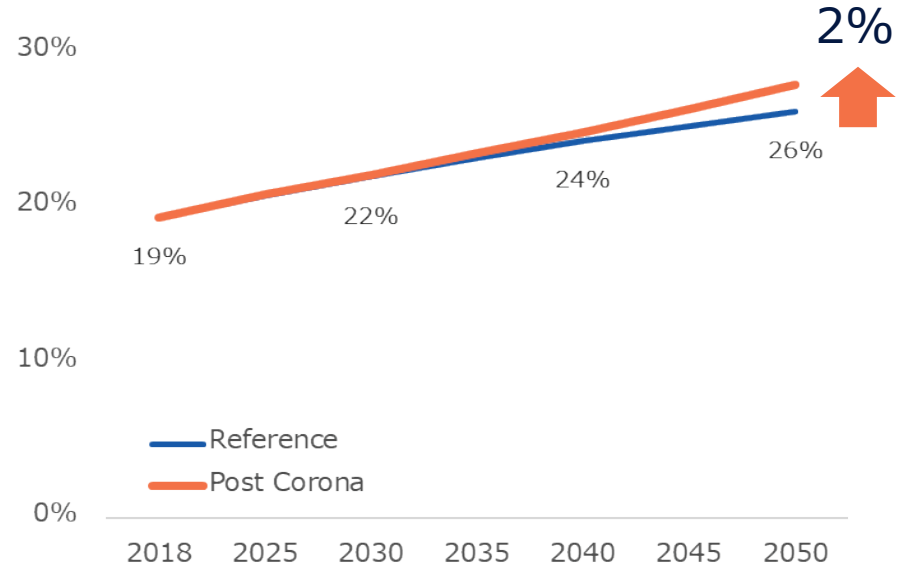
ポストコロナでは、2040年頃に石油需要はピークを打つ。輸送需要の抑制、経済減速で自動車、航空、船舶燃料が減少に転じる。

社会のデジタル化(DX)で電力化率が上昇

❖ 電力最終需要 (レファレンス)



❖ ポストコロナの電力化率

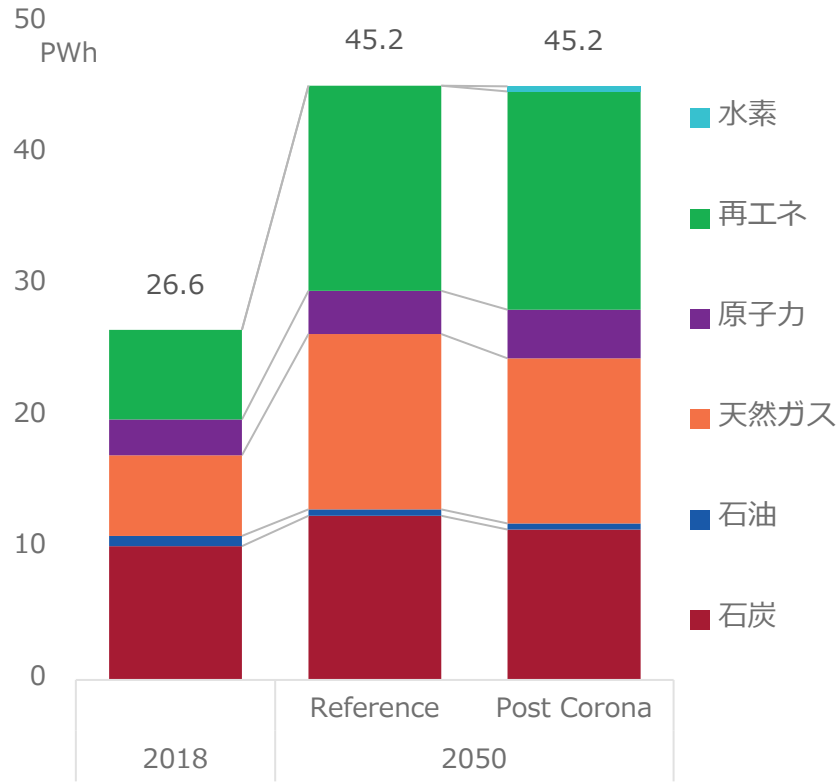


レファレンスシナリオでは、途上国の経済発展とともに産業・民生部門で電力需要が急増。エネルギー需要の電化が進む。

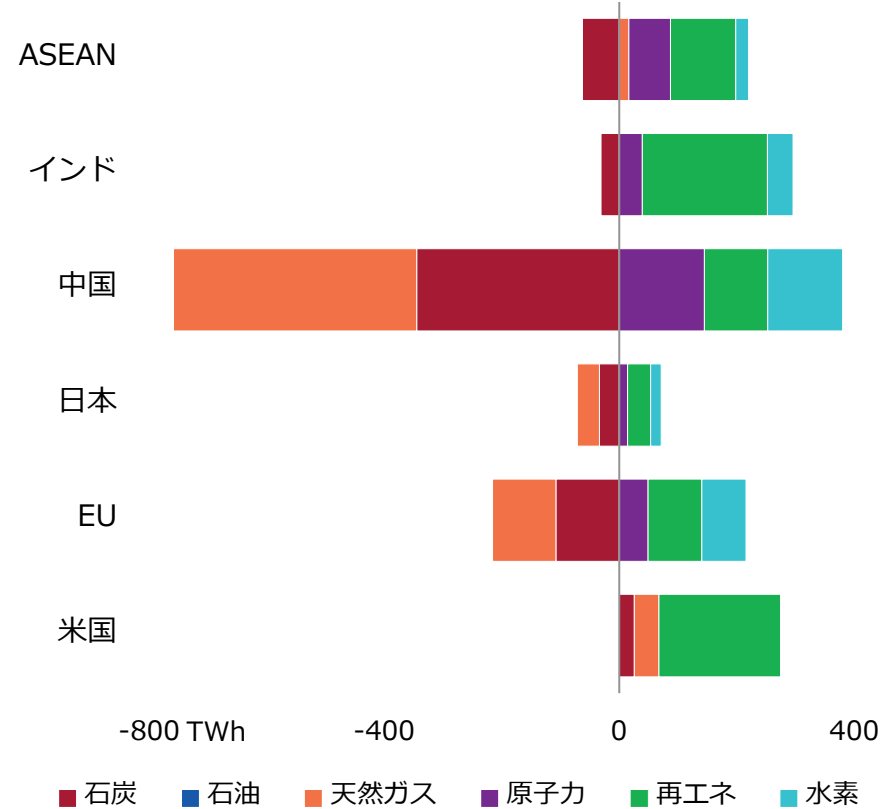
ポストコロナでは、経済活動のリモート化を支えるデジタルトランスフォーメーション(DX)により、電力化がさらに進む。政府による情報管理とプライバシー保護のバランスが課題。「中央集権型」と「分散型」の2パターンで、様々な差異も。

発電は非化石電源へシフト。水素の導入も

❖ 発電構成



❖ 発電量増減(2050年、レファレンス比)

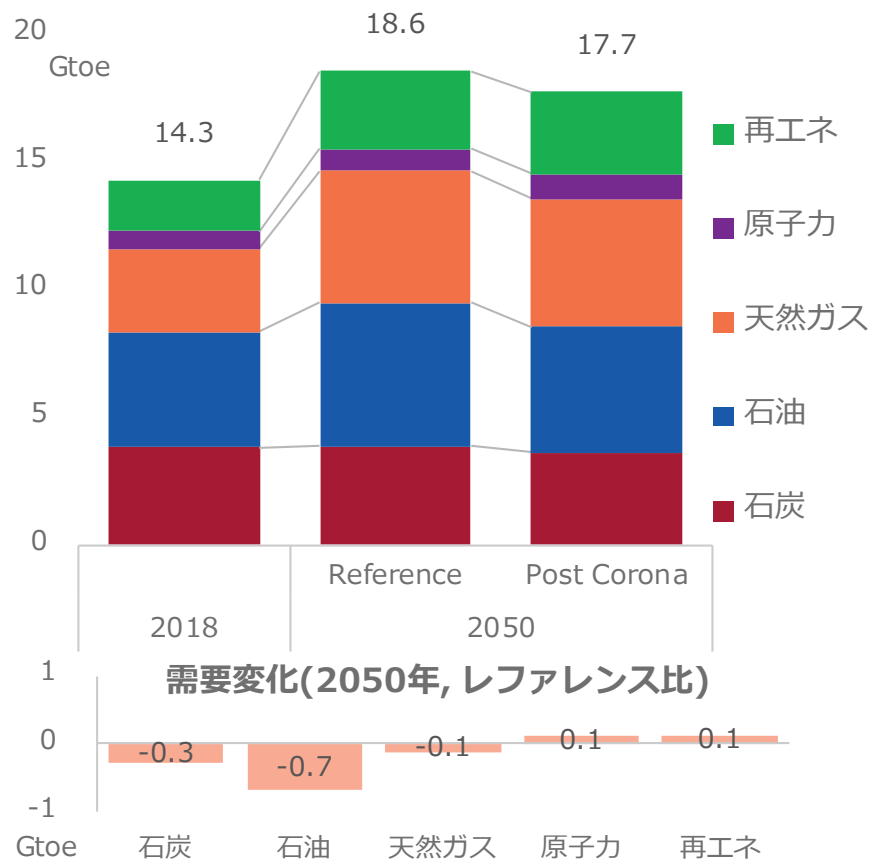


レファレンスシナリオでは、急増する電力需要を支えるのはガス火力と再エネ。途上国では石炭火力も必要。

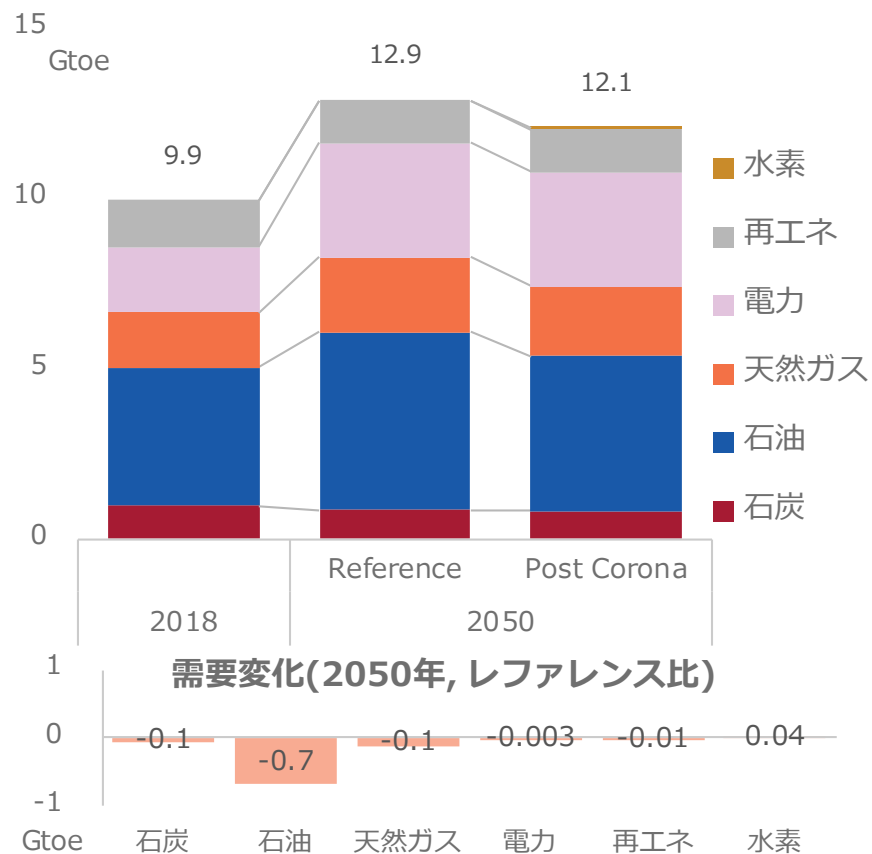
ポストコロナでは、原子力・再エネ電源へのシフトが進み、輸入依存の高い天然ガスの利用が抑制される。また、革新的技術の開発競争が進み、発電にも水素が利用され始める。なお、水素導入については、「炭素循環経済・4Rシナリオ」参照。

非化石へシフトも、化石燃料依存は変わらず

❖ 一次エネルギー需要



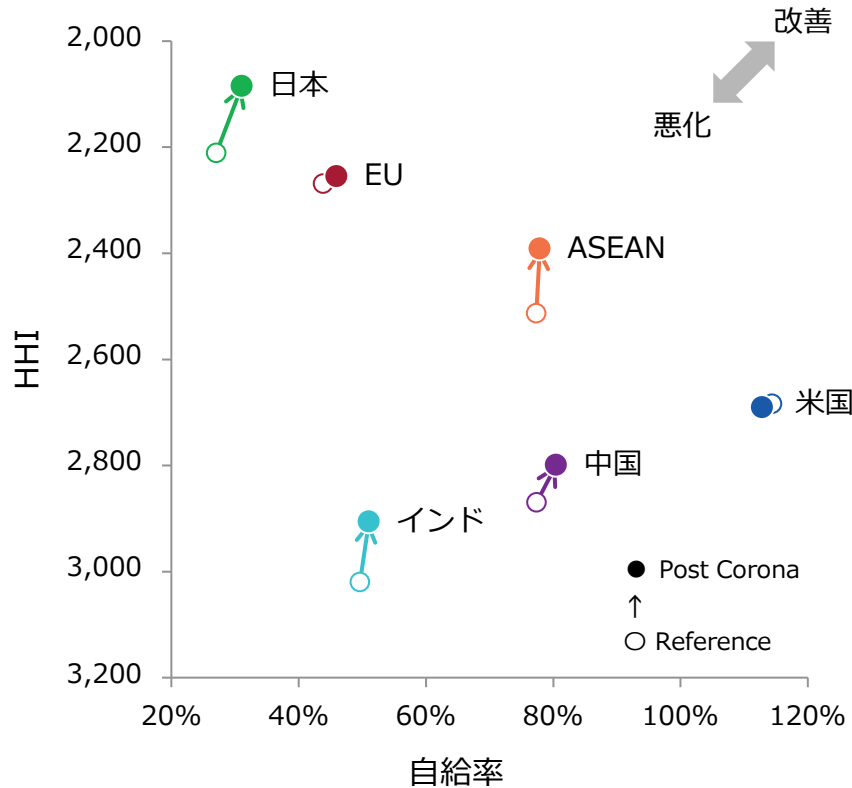
❖ 最終エネルギー需要



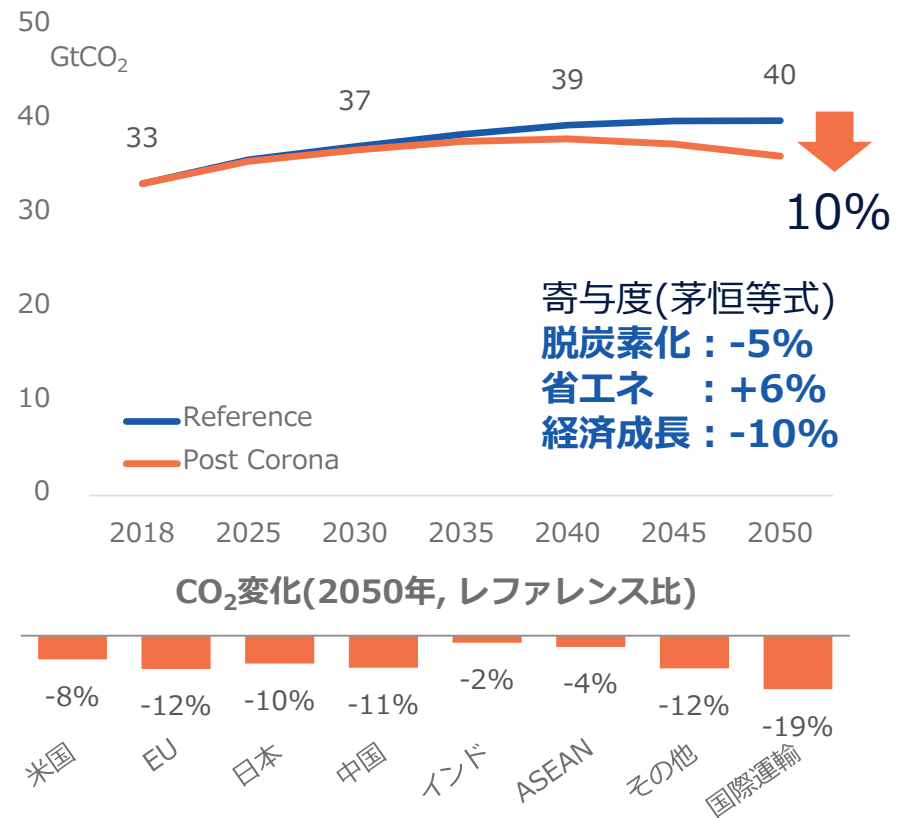
レファレンスシナリオの一次エネルギーの化石燃料依存度は81%から79%へと僅かに低下。ポストコロナでは、(準)国産エネルギーである原子力・再エネにシフトしていく。輸送需要の停滞により、レファレンスに比べて石油需要が大きく減少。化石燃料依存度は77%。

自給率/多様性は改善、CO₂ピークが早まる

❖ エネルギー自給率/多様性(2050年)



❖ エネルギー起源CO₂排出量



HHI(ハーフィンダール・ハーシュマン指数): 集中度を示す指標。数値が高いほど集中度が高く、数値が低いほど多様化していることを示す。

レファレンスシナリオにおいては、ASEAN・インドのエネルギー自給率は大きく低下。CO₂排出量は2040年代後半にピーク。

ポストコロナでは、輸入国の自給率/多様性は改善。CO₂排出量のピークは経済減速、脱炭素化などで10年早まる。

まとめ

【レファレンス】

- アジアを中心にエネルギー需要は増加、2050年でも化石燃料依存の構造は変わらない。途上国の生活水準の向上が石油・電力需要を誘発する。
- 省エネの進展や電源の低炭素化などにより、CO₂排出量は2040年代後半にピークを迎える。

【ポストコロナ】

- 経済効率性を追求するシステムからの乖離で、世界経済は減速、エネルギー需要増も鈍化。地域別エネ需要の増加パターンも変化。
- 石油需要ピーク前倒しは産油国経済を圧迫。経済多様化が一層重要に。他方、需要は一定水準で維持されるため、適切な上流投資も必須。
- エネルギー安全保障強化と脱炭素化への取組みが、革新的技術の開発競争を誘発し、非化石エネルギーやCO₂フリー水素の推進をもたらす。
- 世界変容の可能性を意識し、その変化に対応するための戦略思考に基づいたエネルギー政策の立案が重要に。

A light gray world map is centered in the background of the slide, showing the outlines of continents and major landmasses.

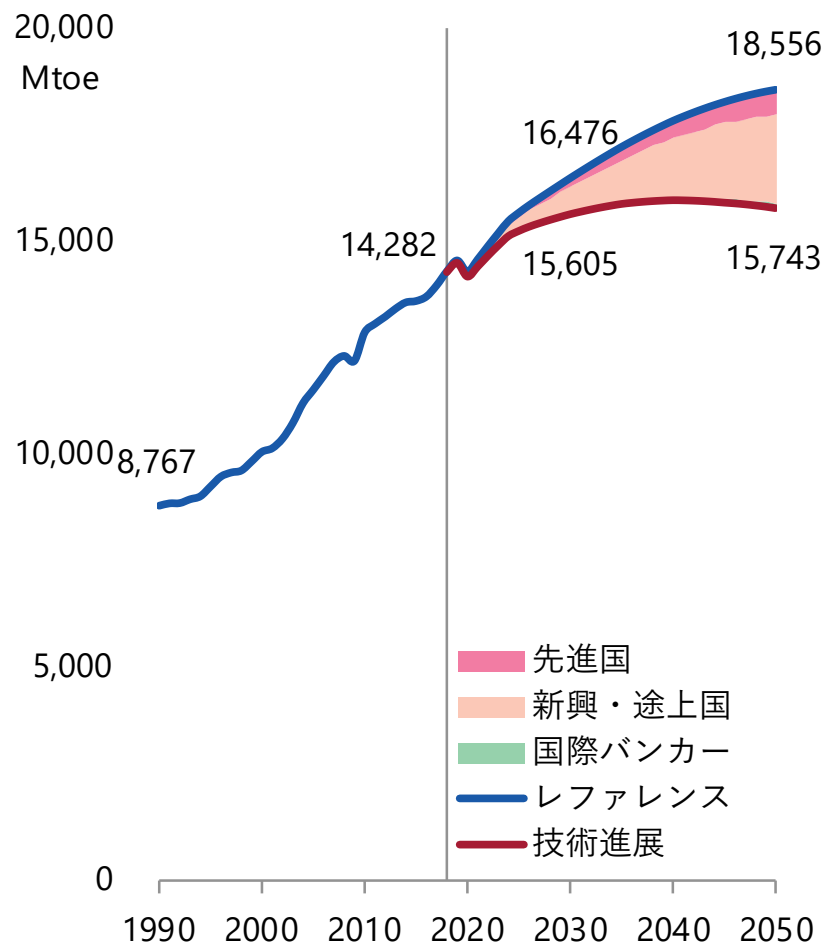
技術進展シナリオ

IEEJアウトlookの基本シナリオ

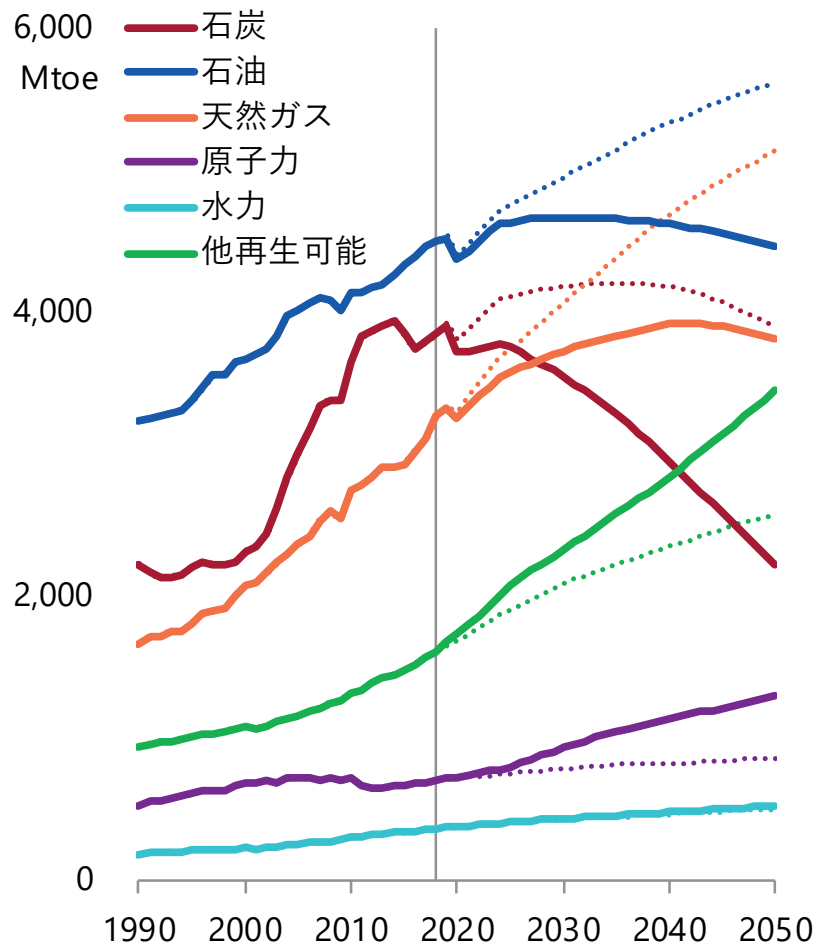
	レファレンスシナリオ	技術進展シナリオ
	<p>現在までのエネルギー・環境政策等を背景とし、これまでの趨勢的な変化が継続するシナリオ。急進的な省エネルギー・低炭素化政策は打ち出されない</p>	<p>各国がエネルギー安定供給の確保や気候変動対策の強化のため、強力なエネルギー・環境政策を打ち出し、それが最大限奏功し、エネルギー・環境技術が最大限導入されるシナリオ</p>
社会経済構造	<p>人口増加率は低下するものの、新興・途上国を中心に安定した経済成長 経済構造の変化は連続的、産業のサービス化が進展 所得水準の向上により、家電、自動車等のエネルギー消費機器が大きく普及</p>	
国際エネルギー価格	<p>原油：需要増に伴い、生産費用が上昇 ガス：欧米市場の価格差が縮小 石炭：現状と同程度の水準を維持</p>	<p>需要増抑制のため価格上昇は限定的 (石炭価格は低下)</p>
エネルギー・環境政策	<p>過去の動向と同様に低炭素化政策を漸進的に強化 ・規制措置(省エネ基準、排出規制等) ・経済的誘導措置(補助金、税金等)</p>	<p>国内政策強化とともに国際連携を推進 ・エネルギー安定供給の確保 ・気候変動問題への対処 ・低開発農村地域のエネルギー近代化</p>
エネルギー・環境技術	<p>現行技術について ・過去の趨勢と同程度の効率進展 ・過去の趨勢と同程度の価格低下 ・規制・誘導による低炭素技術の普及</p>	<p>現行技術及び商業化の見込みが高い技術について ・技術進展により価格低下が加速 ・規制・誘導強化により普及が加速</p>

一次エネルギー需要（世界）

❖ 地域別の一次エネルギー需要の推移



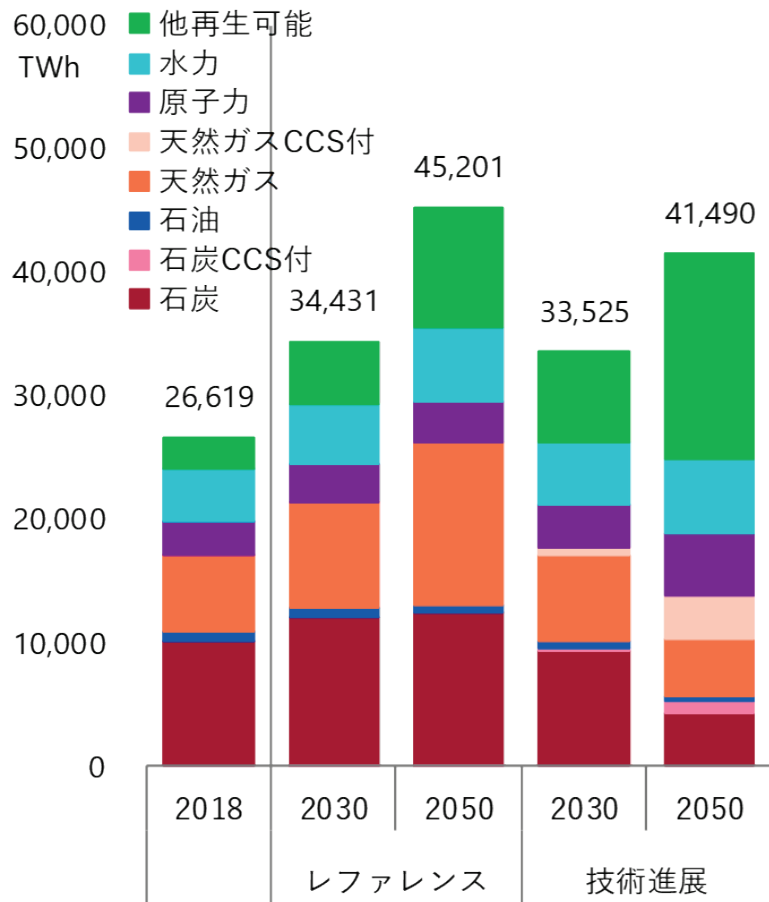
❖ エネルギー源別の一次エネルギー需要の推移



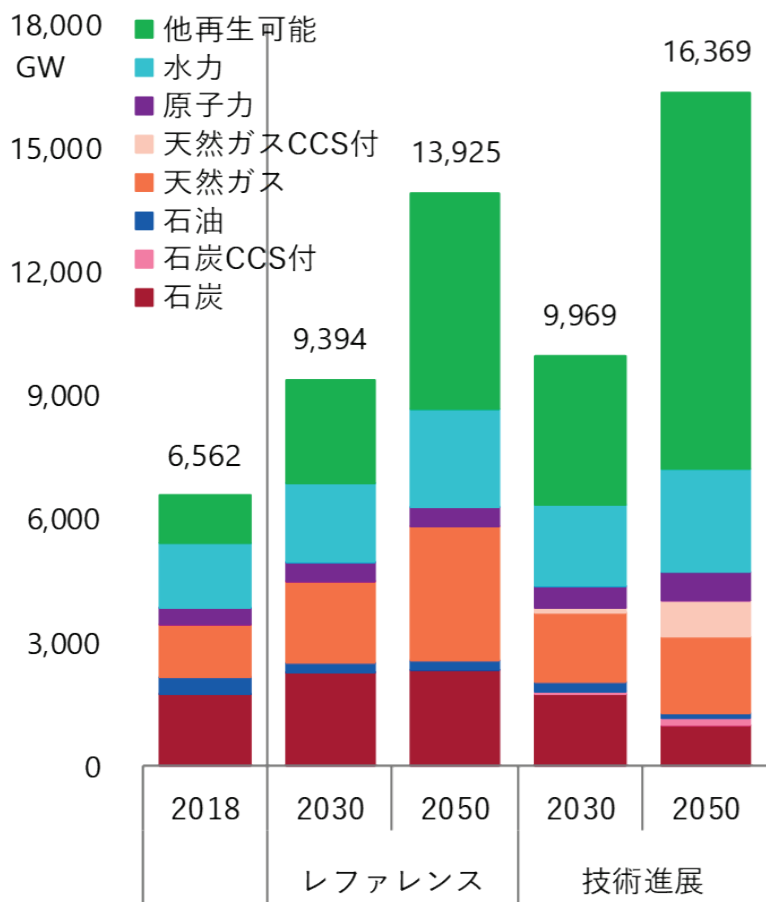
一次エネルギー需要は15%低下。新興・途上国における化石燃料の需要増の抑制が大きく寄与
 他方、2050年時点の化石燃料シェアは67%であり、依然として世界の化石燃料への依存は続く。

発電構成（世界）

❖ 発電量



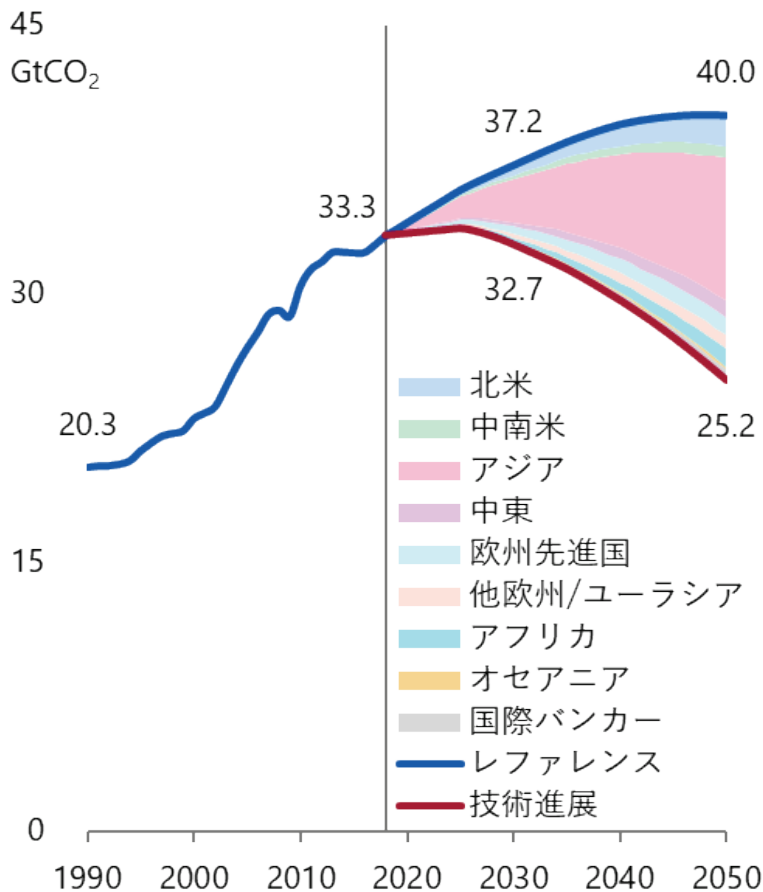
❖ 発電設備構成



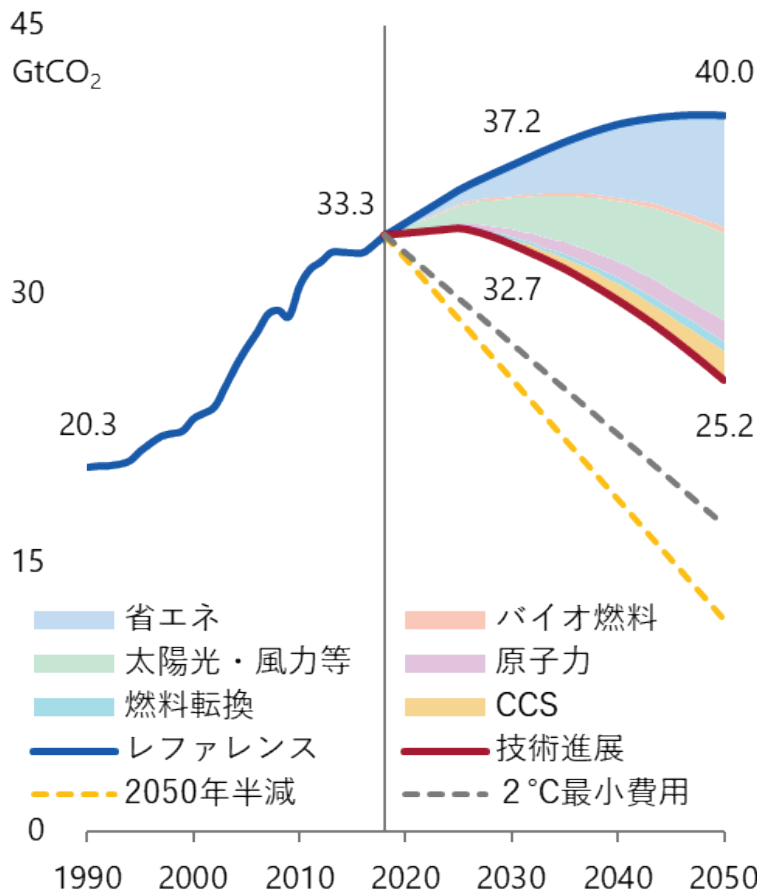
運輸用の電力需要が増加するものの、産業、民生他部門での省エネで相殺され、全体の発電量は低下
 電源別では、石炭火力が大きく減少する一方、太陽光・風力などの他再生可能エネルギーが最大の電源
 に成長する。

CO₂排出量（世界）

❖ 国・地域別



❖ 技術別



2°C最小費用: 「IEEJアウトルック2021」 気候変動シナリオ分析を参照
 2050年半減: 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)5次評価報告書(ARS)で整理されている「RCP2.6」における排出パスを設定

世界のCO₂排出量は2025年をピークに減少に転じ、2050年時点ではレファレンス対比で37%低下
 一次エネルギー需要あたりのCO₂排出の低下（低炭素化）が、全体の排出量削減に寄与

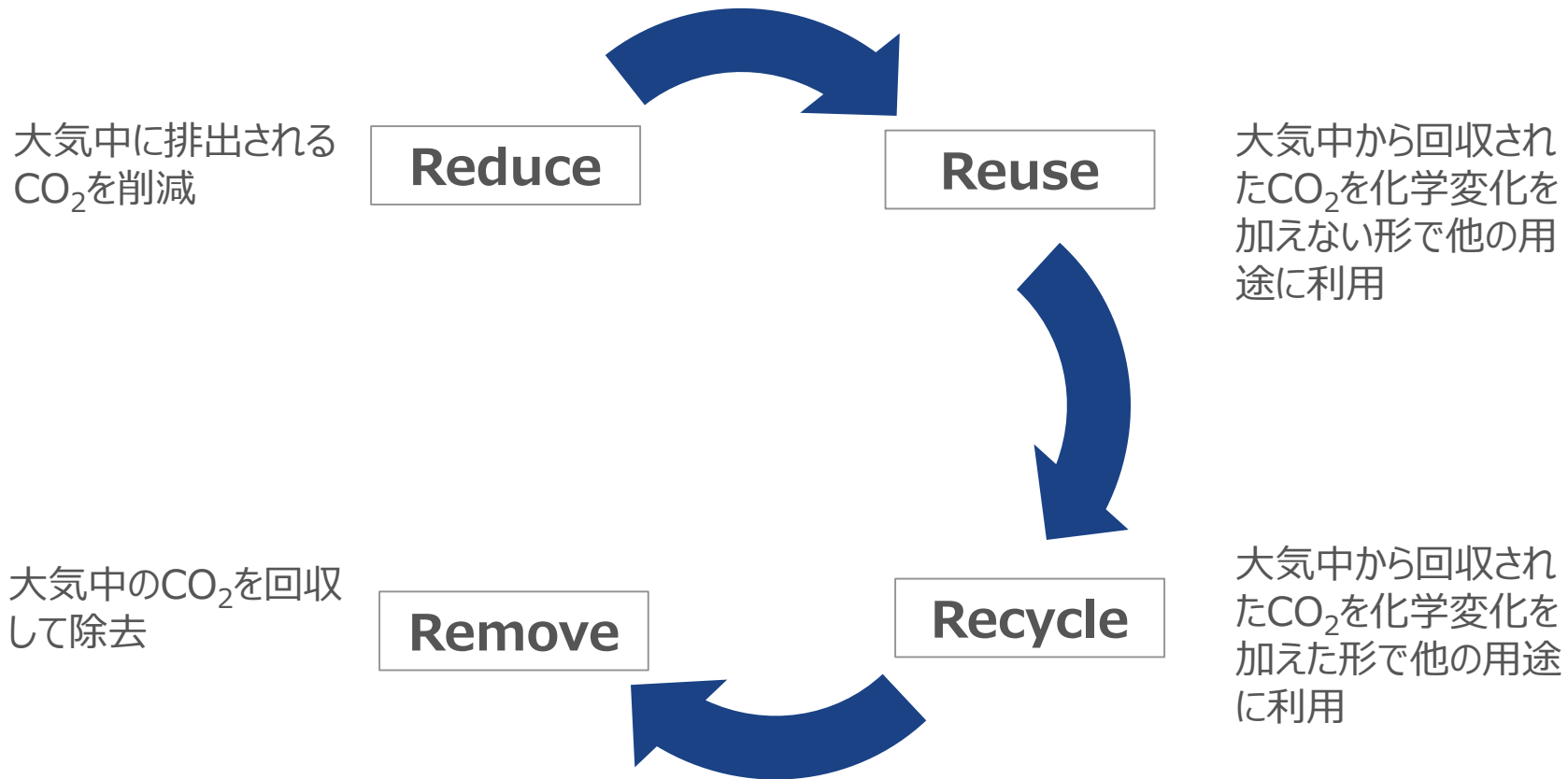


炭素循環経済/4Rシナリオ

本シナリオの意義

- 今後の野心的な排出削減目標を達成するためには、利用可能な排出削減技術のあらゆるオプションを最大限活用するという包括的なアプローチが必要
- その中では、再生可能エネルギーや省エネルギー、原子力などの導入を進めるとともに、「4R」として整理される化石燃料の利用を脱炭素化する技術についても最大限活用することが重要
- 2020年11月にサウジアラビアをホスト国として開催されるG20サミットにおいても、化石燃料利用の脱炭素化に主眼を置いた「炭素循環経済（Circular Carbon Economy: CCE）」が主要な議題の一つとして議論される予定であり、化石燃料利用の脱炭素化に対する国際的な関心も高まってきている。
- 炭素循環経済/4Rシナリオ（以下CCEシナリオ）では、化石燃料利用の脱炭素化技術を最大限導入した場合、世界全体の排出削減量はどのように変化するのか、またその際の一次エネルギー供給構成はどのようになるのかを試算する。

炭素循環経済(Circular Carbon Economy)とは



炭素循環経済 (Circular Carbon Economy : **CCE**) とは、大気中に存在するCO₂を循環構造に見立てて、全体を俯瞰する包括的な観点から削減を進めていく考え方

利用可能な技術は全て活用するという観点から、大気中の炭素削減策を、削減 (Reduce)、再利用 (Reuse)、再循環 (Recycle)、除去 (Remove) の4つの「R」の技術で進めるものとする。

4つの「R」技術で炭素の削減を目指す

❖ 炭素循環経済における主な「4R」技術

4Rの種類	削減 (Reduce)	再利用 (Reuse)	再循環 (Recycle)	除去 (Remove)
内容	大気中に排出されるCO ₂ の量を削減	大気中から回収したCO ₂ を化学変化を加えない形で別の用途に利用	大気中から回収したCO ₂ を化学変化を加えた形でほか別の用途に利用	大気中のCO ₂ を回収して除去
主な技術	<ul style="list-style-type: none"> ● 省エネルギーの推進 ● 再生可能エネルギーの導入促進 ● 原子力の導入促進 ● 先進超々臨界圧石炭火力の活用 ● 燃料電池車の導入促進 ● 水素発電 ● アンモニアを発電用燃料や船舶用燃料として利用 ● 石炭灰等の混和材を用いたセメント生産量削減 ● 水素を用いた還元製鉄プロセス 	<ul style="list-style-type: none"> ● 回収したCO₂を用いた油田の増進回収法 (Enhanced Oil Recovery: EOR) ● CO₂濃度を高めたグリーンハウスにおける農産物栽培 ● 回収されたCO₂を活用した藻類系バイオ燃料 ● 葦を原料とするジェット燃料の生産 	<ul style="list-style-type: none"> ● 回収したCO₂をコンクリートに吸着させる技術 ● 回収したCO₂を炭酸塩として固定 ● 回収したCO₂と水素を原料とした合成液体燃料の生産 ● 回収したCO₂と水素を原料とした合成メタンの生産 ● 回収したCO₂と水素を原料とした化学原料の生産 	<ul style="list-style-type: none"> ● 炭素回収・貯留 (CCS) ● 二酸化炭素直接吸収 (Direct Air Capture : DAC) によるCO₂の回収

出所 : Mansouri, N. Y. et al.(2020) "A Carbon Management System of Innovation: Towards a Circular Carbon Economy"を基に作成

個々の技術はこれまでも開発が進められてきたものであるが、上記「4R」の分類は、これらの一連の技術を大気中の炭素の循環構造に見立てて包括的に再整理したもの

ReduceやRemoveが主であった従来の排出削減の議論に対し、炭素を資源とみなすReuseやRecycleの重要性を強調

本シナリオにおける想定

❖ シナリオの想定条件（ベースはいずれも本アウトルックの技術進展シナリオ）

4R分類	シナリオで想定する技術	想定内容
Reduce	ブルー水素*の発電利用	技術進展シナリオにおいて2050年時点でCCSがついていない石炭火力発電の50%にブルー水素発電（ブルー水素を原料としたアンモニアの利用も含む）を導入
	輸送部門におけるブルー水素の利用	技術進展シナリオにおける2050年時点の道路部門の輸送用需要の20%をブルー水素に転換
	ブルー水素を利用した水素還元製鉄	2050年時点の先進国および中国・インドの粗鋼生産の25%にブルー水素を用いた水素還元製鉄技術を導入
	セメント生産量の削減	石炭灰や石灰石焼成粘土などの混和剤を活用することで2050年時点の世界のセメント生産量を25%削減
Reuse	CO ₂ 集中利用による藻類系バイオ燃料の増産	技術進展シナリオにおける2050年時点のバイオディーゼルの生産量が50%増加
Recycle	CO ₂ 吸着コンクリート	2050年時点の世界のコンクリート生産の50%にCO ₂ 吸着技術を導入
	合成メタン	技術進展シナリオにおいて2050年時点でCCSがついていないガス火力発電の燃料の50%を、合成メタン（ブルー水素及びグリーン水素**由来）で代替
Remove	炭素回収・貯留（CCS）	ブルー水素製造に要するCCSを追加で実施

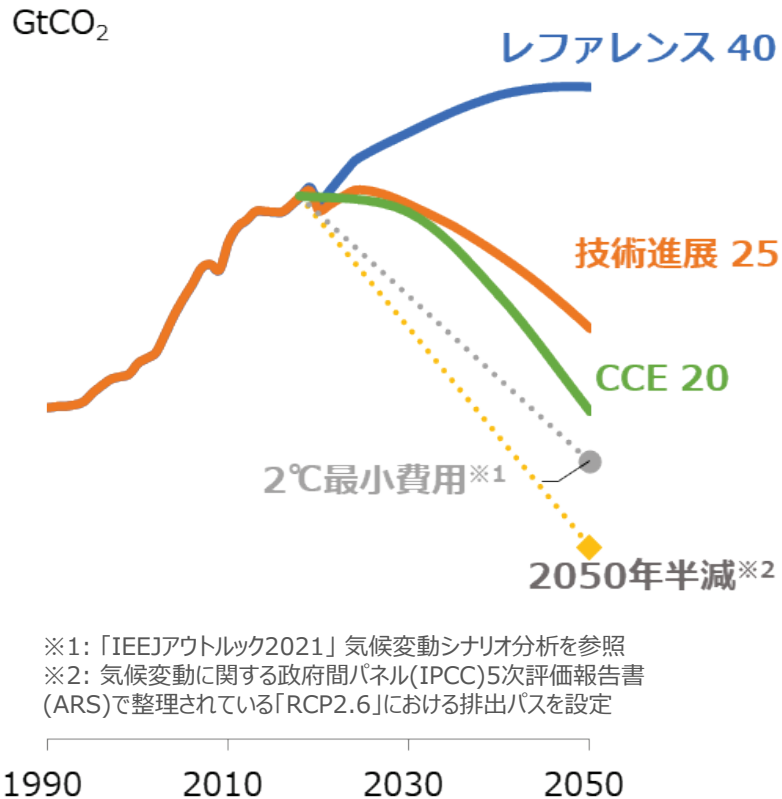
*ブルー水素：化石燃料と原料として、生産時に排出されるCO₂をCCSで回収貯留して生産する水素

**グリーン水素：再生可能エネルギーによる電力を用いて製造する水素

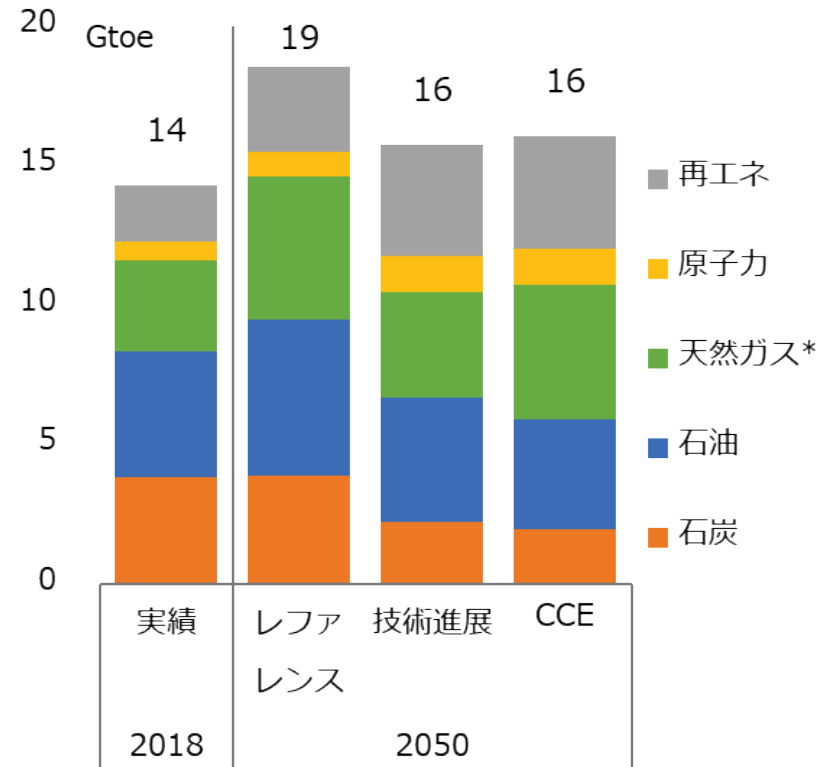
上記想定は、本アウトルックの技術進展シナリオの想定に加えて、化石燃料利用を脱炭素化するという観点から、4Rの技術が最大限導入されるケースを一定の前提を置いてシナリオとして想定したもの

化石燃料消費量は変わらず排出量は大きく減少

❖ 世界のCO₂排出量



❖ 世界の一次エネルギー需要



*CCEシナリオは合成メタンを含む

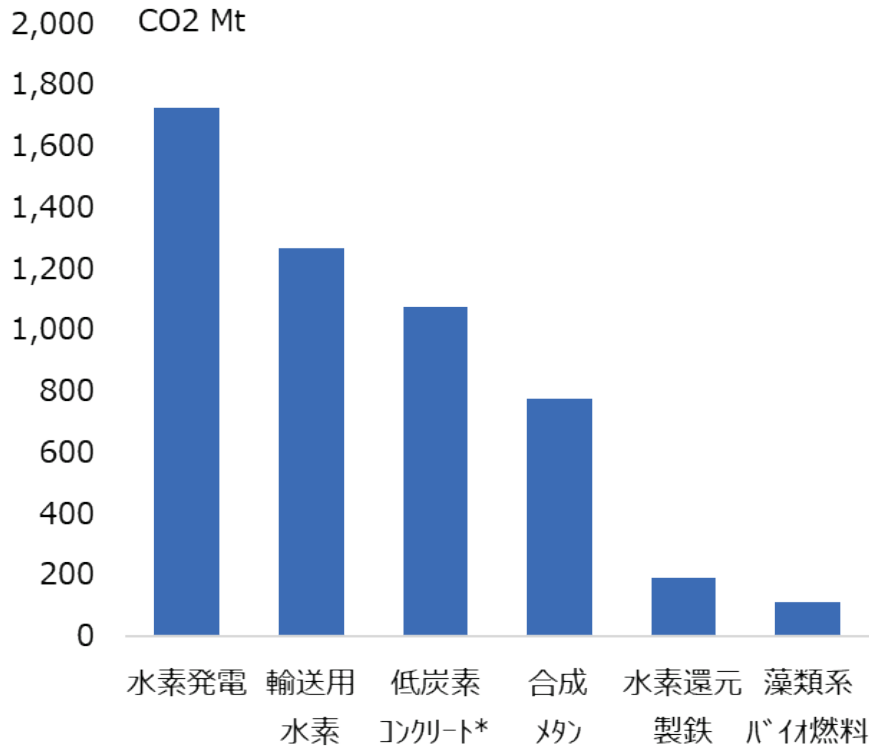
CO₂排出量は、技術進展シナリオからさらに5 Gt削減され、2°C費用最小化パスに近づく。

一次エネルギー需要における化石燃料全体に対する依存度は技術進展ケースとほぼ同じ（67%）だが、化石燃料間では、石油・石炭から主なブルー水素の原料となる天然ガスへの振替が発生する。

化石燃料消費は全体として大きく変わらない中で、CO₂の排出量は大幅に削減される。

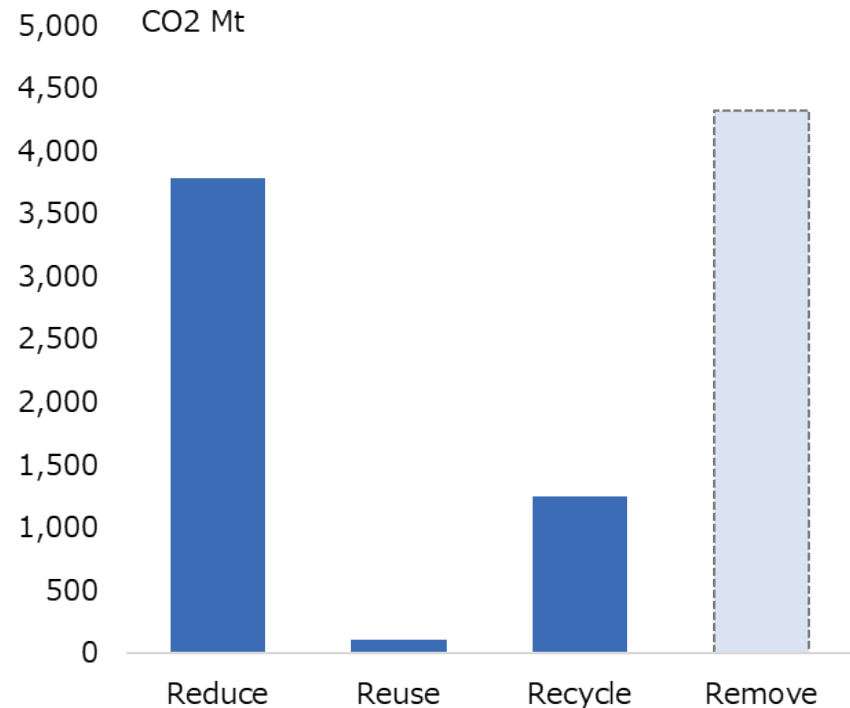
発電・輸送部門に大きな削減ポテンシャル

❖ 各導入技術によるCO₂排出削減量



*低炭素コンクリートは、セメント生産量の削減とCO₂吸着コンクリートの排出削減量の合計値

❖ 各技術分野によるCO₂排出削減量



Reduce: 水素発電、道路用水素、セメント生産量削減、水素還元製鉄

Reuse: 藻類系バイオ燃料

Recycle: CO₂吸着コンクリート、合成メタン

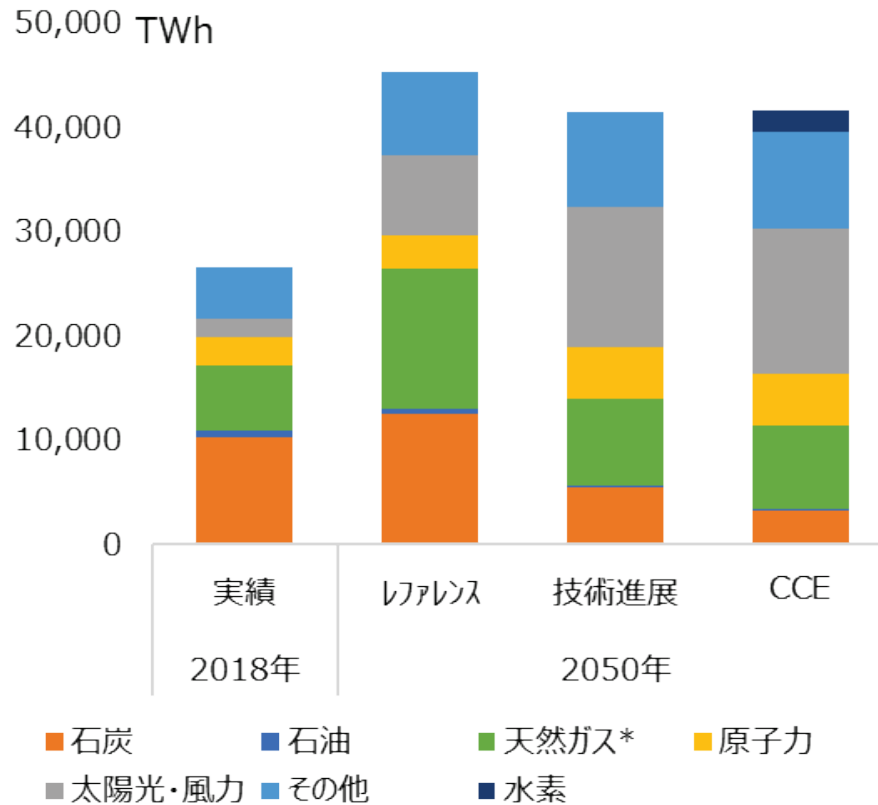
Remove: CCS (Reduce, Recycleの削減量とダブルカウントになるため点線薄色で表記)

排出削減量では発電・輸送部門における削減量が大きく、ブルー水素の寄与度が大きい。

4R別排出量削減では、本試算ではReduceによる排出量が大きく、Reuse、Recycleの削減量は限定的

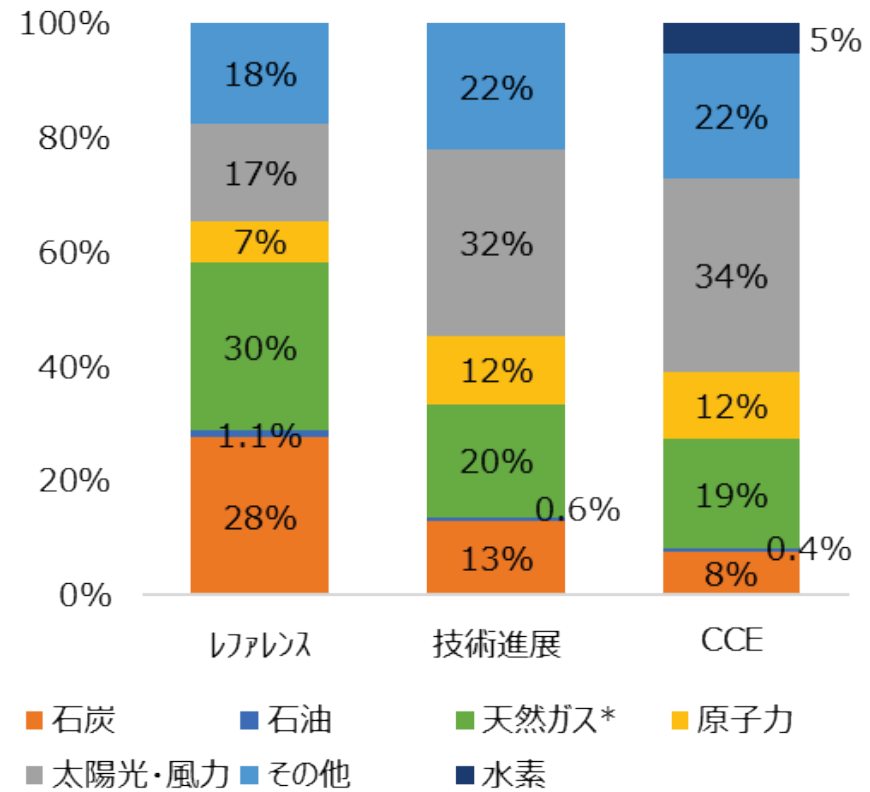
電源構成では水素が石炭を一部代替

❖ 世界の発電電力量構成



*CCEシナリオは合成メタンを含む

❖ 世界の2050年時点での電源シェア

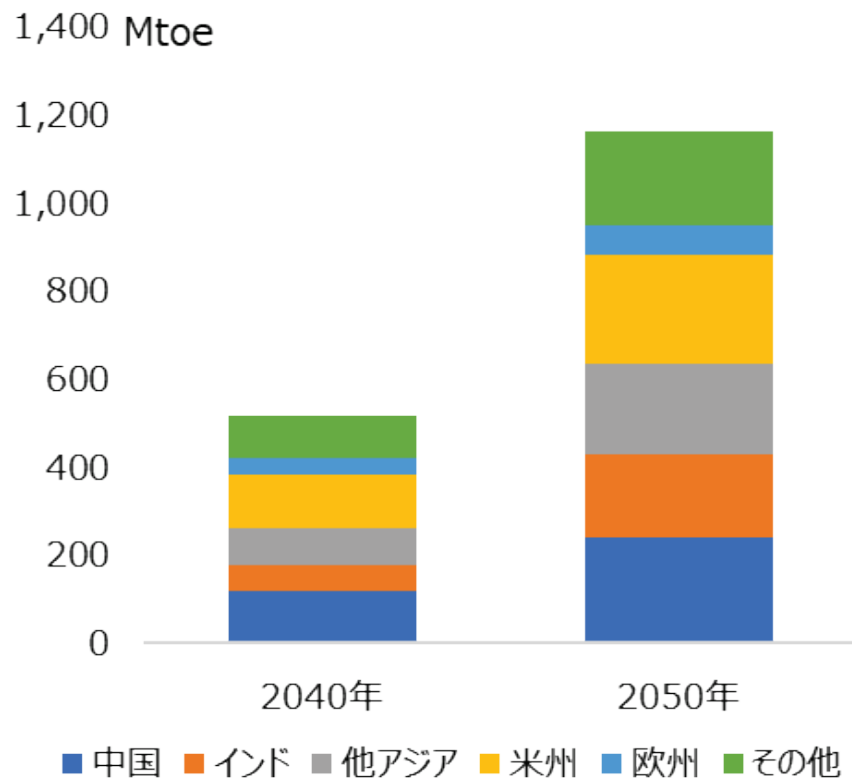


*CCEシナリオは合成メタンを含む

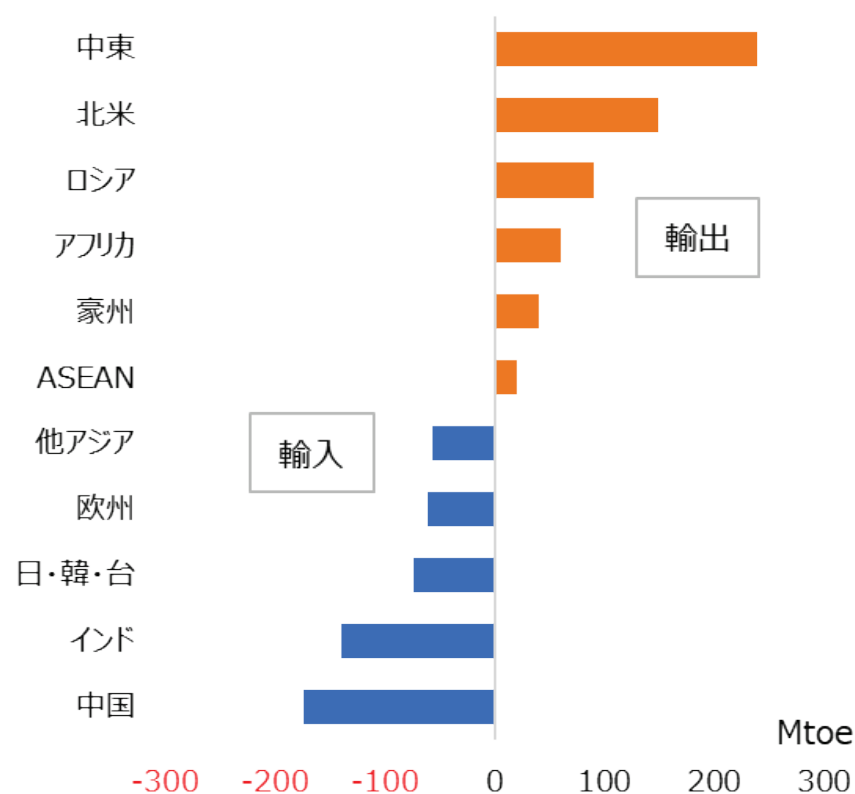
石炭火力のシェアが低下し、化石燃料火力の構成比は技術進展シナリオの34%から27%に低下
水素発電の構成比は2050年時点で5%を占める。

水素需要はアジアを中心に拡大

❖ 世界の水素需要見通し



❖ 世界の水素輸出入 (2050年時点)

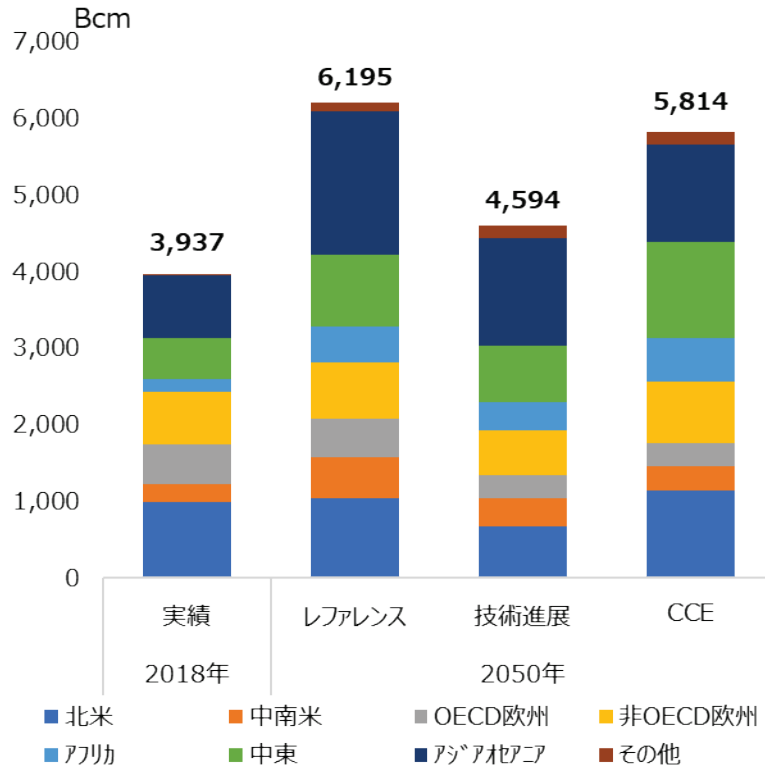


本シナリオでは世界の水素需要はアジアを中心に拡大

国内にブルー水素生産能力がない国は海外からブルー水素を輸入。主要なブルー水素の供給源は、豊富な化石燃料資源を有し、CCSを行うことができる中東や北米、ロシアなどになる

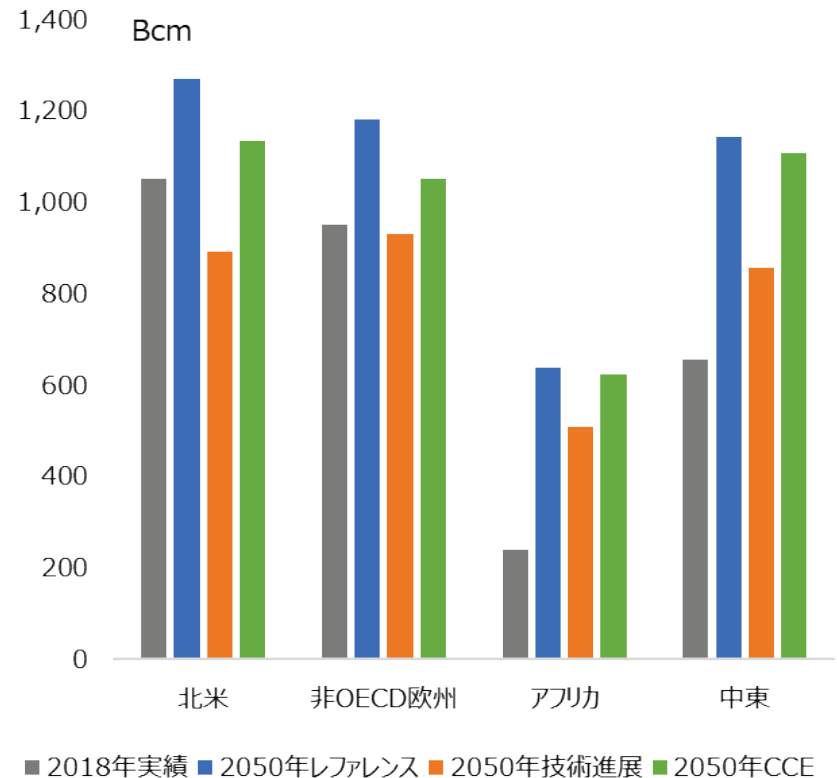
天然ガスの新たな需要が創出

❖ 世界の天然ガス需要* (2050年時点)



*合成メタンの需要を含む

❖ 天然ガス生産量 (2050年時点)



CCEシナリオにおいては、水素原料用の需要が増加することで、2050年時点での世界の天然ガス需要は技術進展シナリオに比べて27%増加する。

主要産ガス国では水素生産のための天然ガスが増産されるが、2050年時点での生産量はレファレンスケースの水準には達せず。

本試算では水素製造の主原料は天然ガス。実際には他の化石燃料が利用されるケースも。

インプリケーション

- 炭素循環経済における4R技術を最大限導入することによって、大幅なCO₂の排出削減と化石燃料利用を両立をさせることが可能となる
- 鍵を握るのが排出削減への寄与度の大きいブルー水素の供給。今後さらなる水素製造技術の低コスト化、水素供給関連のインフラ整備、技術標準の統一化などが必要
- 加えて、4R技術開発の中では、Reuse、Recycle分野の底上げが重要。政策・資金面でのサポート、国際協力を通しての情報共有を進めていくべき
- 炭素循環経済の概念の重要性とその含意に対する社会の認知度の向上・PRの重要性

A light gray world map is centered in the background of the slide, showing the outlines of continents and major landmasses.

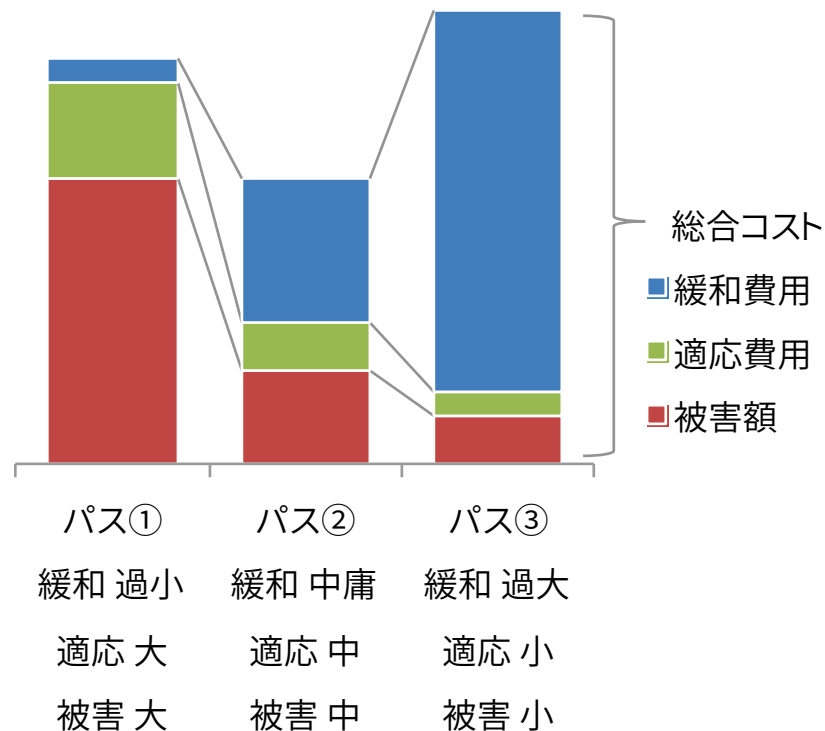
気候変動シナリオ分析

— 費用便益分析の改善に向けて —

❖ 緩和+適応+被害=総合コスト

緩和	省エネルギー、非化石エネルギーによるGHG排出削減が代表的。 CCSIによるGHGの大気中への放出削減なども含む。 これらで気候変動を緩和する
適応	気温上昇により、海面上昇、農作物の早魃、疾病の蔓延などが発生しうる。 これらに対する堤防・貯水池整備、農業研究、疾病の予防・処置などが 適応
被害	緩和、適応によっても気候変動の影響が十分に低減できない場合、海面上昇、農作物の早魃、疾病の蔓延などの 被害 が実際に発生する

❖ パスごとの総合コストのイメージ※

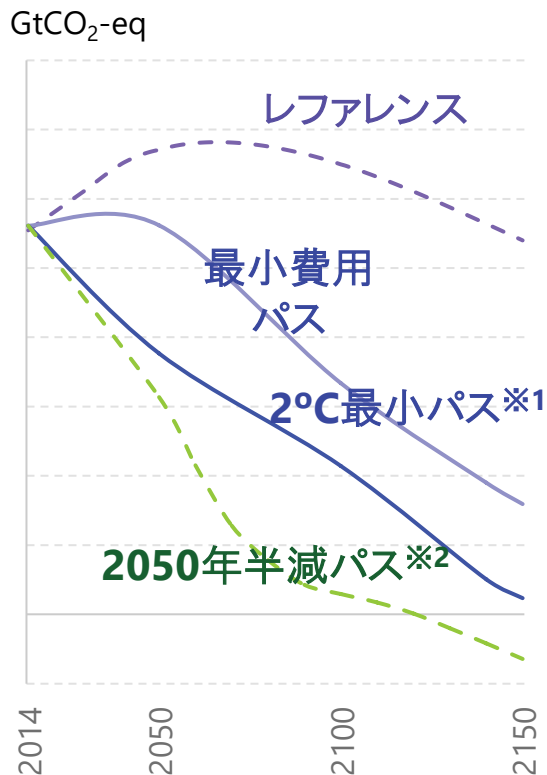


※ 実際のモデル計算では費用最小化ではなく、効用最大化で最適パスを計算

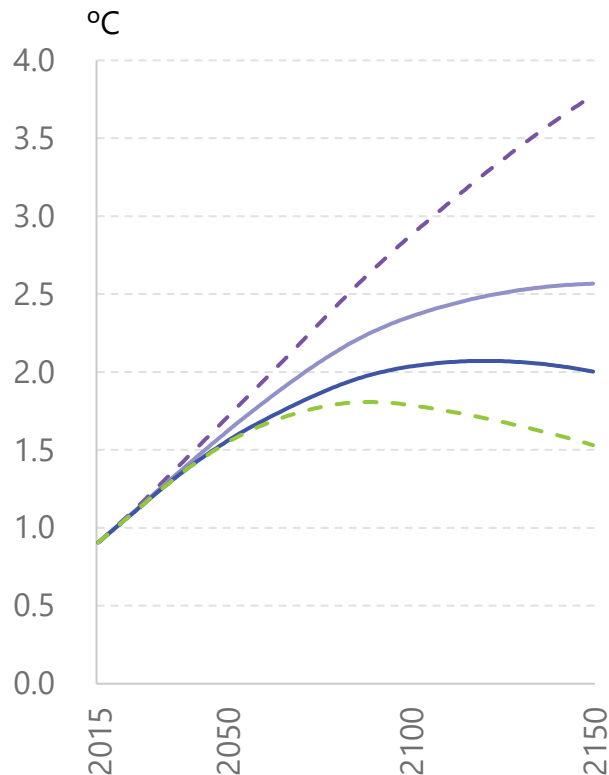
気候変動に対して無策であれば、緩和費用をかけずに済むが、適応費用・被害は膨大となる。強力な緩和策を講じれば、適応費用・被害は軽減されるが、そのための費用は顕著に大きい

気候変動問題は、広範な領域に影響し、かつ何世代にもわたる長期的課題。持続可能性に基づき、緩和費用、適応費用、被害額の和=総合コスト が小さくなる組み合わせ(最小費用パス)を評価する。

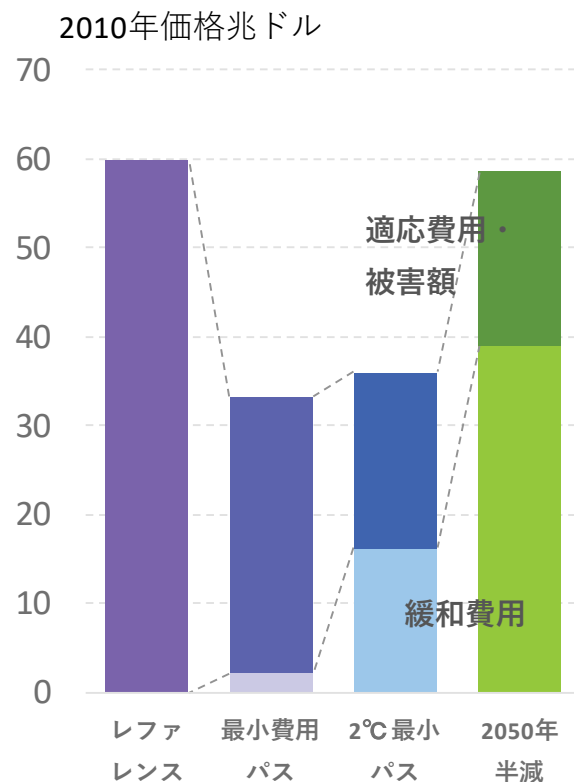
温室効果ガス(GHG) 排出量



産業化前からの 気温上昇



総合コスト (2500年までの累計)



※1 気温上昇が2°Cを超え、2150年に2°Cに回帰する排出パス

※2 IPCCのRCP2.6に概ね相当する排出パス

- 費用便益分析による「最小費用パス」での気温上昇は、2150年までに2.5°Cを超える。但し、結果は各種の前提条件に強く依存することに注意が必要。
- 更に低炭素技術の導入を進め、2150年に2.0°Cに回帰するパス(2°C最小費用化パス)も大きな総コスト上昇なく実現し得る可能性があり、リスク回避の観点からも、「最小費用パス」を超えた削減目標の追求が望まれる。

被害額(被害関数)の正確性: 気候変動に伴う被害額を正確に把握できなければ、費用便益分析も正しい結果は得られない。

- ・ 被害額の推計には非常に大きな不確実性を伴う。世界中で研究が進められているものの、十分な知見が蓄積されていない。
- ・ 最新の科学的知見を踏まえ、被害関数(気温上昇と被害額の関係)をより精緻化することは重要な課題。

Tipping elements (不可逆的、または臨界点をもつ要素)のモデル化: 一旦変化が始まると変化が加速化し、被害・費用が想定以上に大きくなることを考慮する必要がある。

- ・ ある事象の進行が臨界点を超えると、地球システムによるGHGの自動吸収作用が機能しなくなることにより正のフィードバックがかかり、変化が加速的に進む可能性がある。
- ・ 例えば、温暖化によってシベリア永久凍土の融解が進むと、地中のメタンやCO₂が大気に放出される。その放出自体が温暖化に寄与することで、凍土融解がさらに進むことになる。
- ・ 結果として、これまでとは異なる平衡状態、例えば気温が数度以上高い状態 “Hothouse Earth(熱室的な地球)” に移行するリスクが指摘されている。

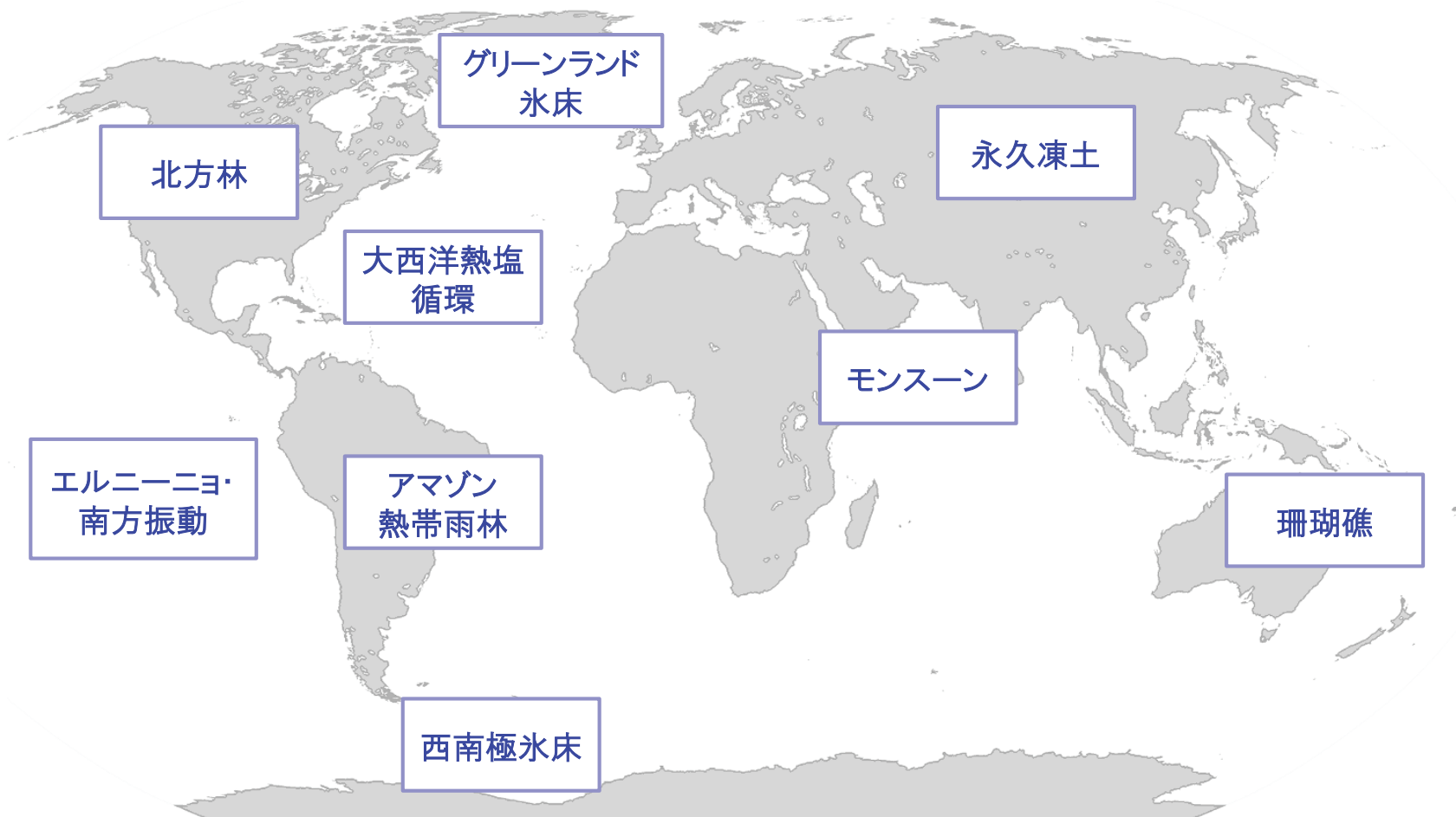
その他の問題(衡平性、パラメータの不確実性など)

長期割引率: 一般的に、将来の貨幣価値は現在の貨幣価値に比べて割引して評価される。しかし、この「割引率」の設定を高くすると、将来発生する被害額が過小評価される可能性がある。

地域間の衡平性: 世界を1地域と見做して総被害を算出するモデルは、世界の地域ごとに異なる被害を考慮し得ず、地域間の不公平性に関する懸念をもたらす。

Fat tail: 被害関数等のパラメータの確率分布の裾が十分に早くゼロに収束しない場合、費用便益分析自体が意味をなさなくなる、との指摘がある。

地球システムの臨界点(Tipping point)



- ・地球のシステムは従来、ある種の安定状態にあったとされる。例えば大気中のCO₂濃度が上昇した場合、海洋へのCO₂の吸収が増加するなど、「負のフィードバック」が働くことによって状態が維持されていた。
- ・これに対し、近年、地球システムの変化がある臨界点を超えると変化が不可逆的になる、もしくは「正のフィードバック」がかかり、従来とは異なる(より気温の高い)平衡状態へと至る可能性が指摘されている。この臨界点はTipping pointと呼ばれ、それを形成するサブシステムはTipping elementと呼ばれる。

グリーンランド氷床(GIS)の崩壊

グリーンランド島の氷床は既にかつてない速度で融解を始めており、全て融解すると世界の海水位を約7 m 上昇させる。気温上昇と氷の融解レベルとの間にはヒステリシス的な現象が生じるとされ、仮に一度グリーンランドの氷床が融解した場合、その後気温が低下したとしても、少なくとも直ちには氷床は元に戻らない。

西南極大陸(WAIS)の崩壊

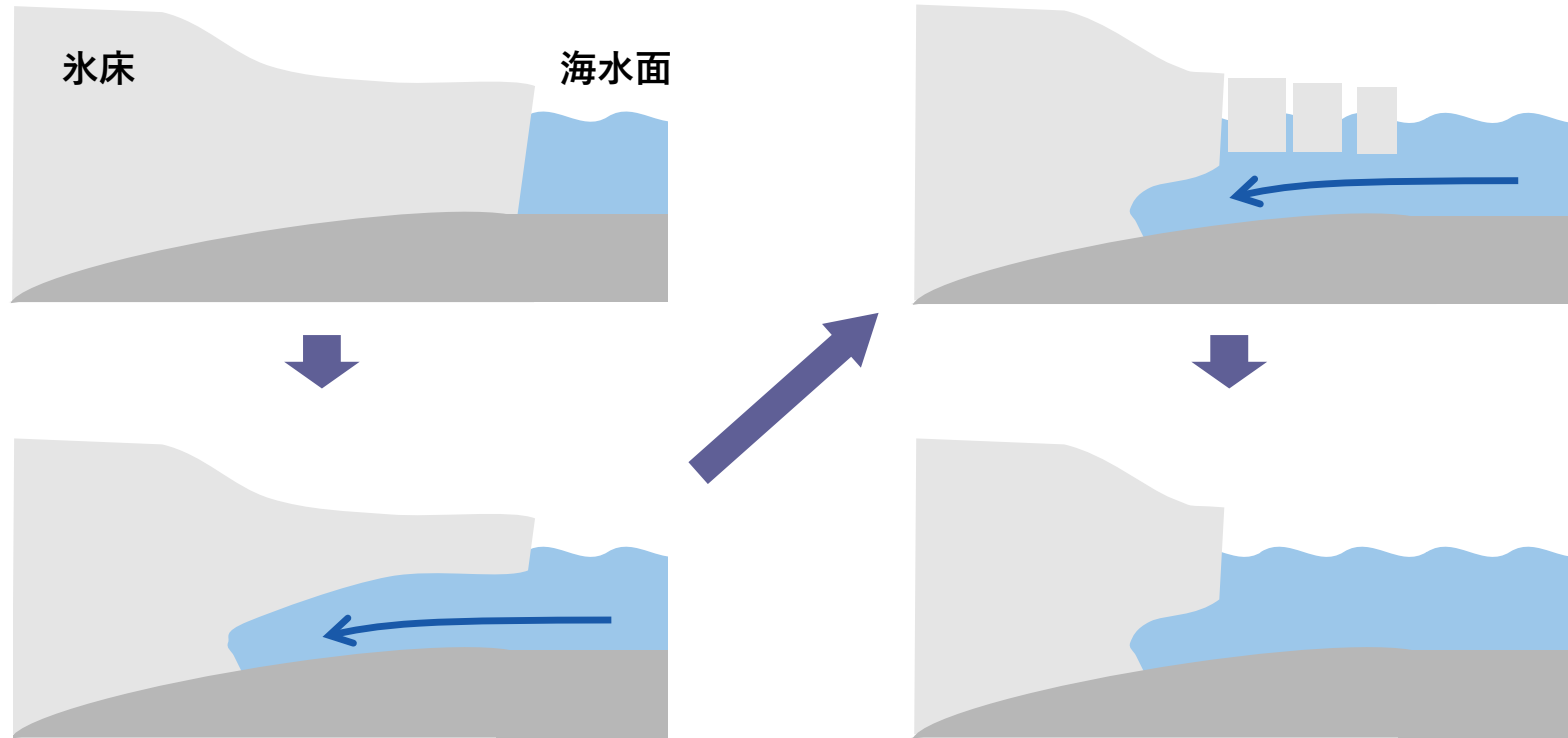
南極大陸の約2700万km³相当の氷床が仮に全て融解すると、世界の海面水準を約60m上昇させる。南極横断山脈の東側は東南極(EAIS)、西側は西南極(WAIS)と呼称される。氷床自体は西南極はよりも東南極の方が大きい、西南極氷床の方がより不安定であり、早期の崩壊が懸念されている(次頁)。

永久凍土によるフィードバック(PCF)

永久凍土中には1.7兆トン程度もの炭素が存在しており、気温上昇によって凍土が融解した場合、これがメタンないしCO₂として大気中に放出される可能性がある。放出されたこれらのガスは気候変動を更に加速させ、いわゆる「正のフィードバック」として作用することが懸念されている。

珊瑚礁(CR)の消滅

珊瑚礁には9万種の生物が生息し、人間に漁業資源や観光資源を提供している。仮に全て死滅した場合には世界のGDPの0.5%に相当する経済影響を与えるとの評価もある。熱帯の珊瑚礁は既に白化が進んでおり、IPCCによれば2°Cで99%以上、1.5°C上昇でも70~90%が壊滅的な打撃を受けるとされる。



- 西南極では氷床底のかなりの部分が海水面よりも低いところに位置しており、上図の通り、海氷崖不安定性 (Marine Ice Cliff Instability: MICI) と呼ばれるメカニズムにより、海水の侵入に伴い融解が早く進む可能性が指摘されている (DeConto and Pollard, 2016)。
- これに対し Edwardsら (2019) は、海氷崖の急速な崩壊を仮定しなくても過去の南極氷床動態を説明できるとした。IPCCの海洋・雪氷圏報告書 (2019) では、MICIの正確なメカニズムや、それが本当に発生し得るのかについては現状では不明確とされており、将来の海面上昇予測においてMICIは考慮されていない。

平衡状態の定義式

$$X^*(t) = X_0 \frac{\max(T(t) - T_C)}{T_0} = \alpha \max(T(t) - T_C)$$

運動方程式

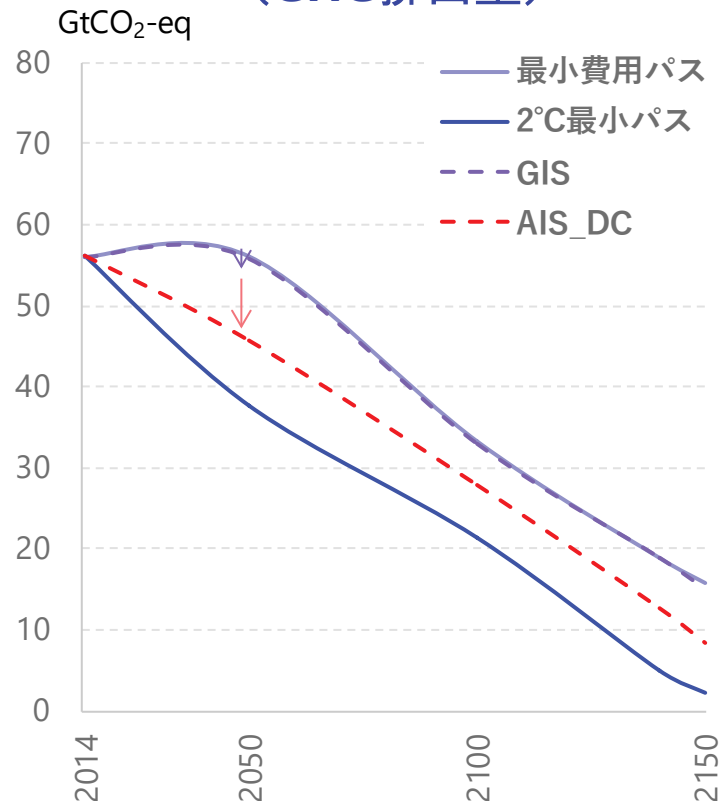
$$\frac{\Delta X(t)}{\Delta t} = \beta X_0 \text{sign}(X^*(t) - X(t)) \left| \frac{X^*(t) - X(t)}{X_0} \right|^\gamma$$

X : 事象を記述する変数(氷床の融解量等)
 X^* : X の平衡状態
 T : 世界平均気温
 T_C : 臨界気温

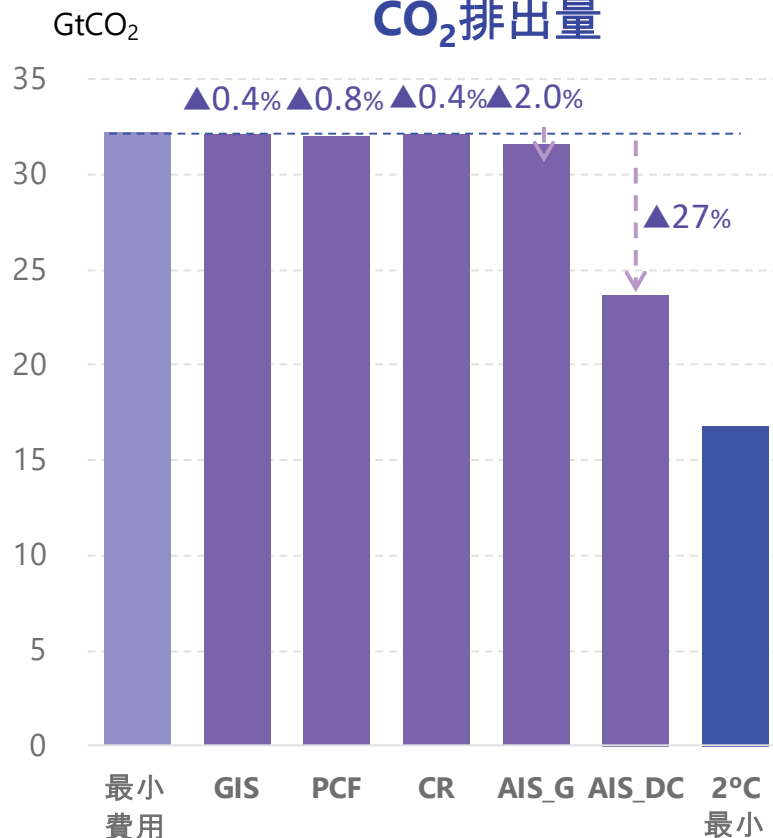
X_0 : 事象の特性スケール
 T_0 : 事象の特性気温
 $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$: パラメータ

- 上記の簡易な方程式を用いてTipping elementsの挙動をモデル化。例えば西南極氷床においては、気温上昇(T)に伴って潜在的な氷床の崩壊量、もしくは「平衡状態」(X^*)が定まると想定し、現実の状態 X はこの平衡状態に向けて、ある時間遅れをもって移行すると想定した。
- グリーンランド氷床についてはNordhaus (2019)、南極氷床についてはMICIが存在する場合にはDeConto and Pollard (2016)、存在しない場合にはGolledge et al. (2019)、永久凍土についてはYumashev et al. (2019)をもとにパラメータを設定。また、珊瑚礁については1.2°Cの気温上昇で50%、2°Cの気温上昇でほぼ全てが致命的なダメージを被るとし、20年の時間遅れを想定した。

最小費用パスの変化 (GHG排出量)



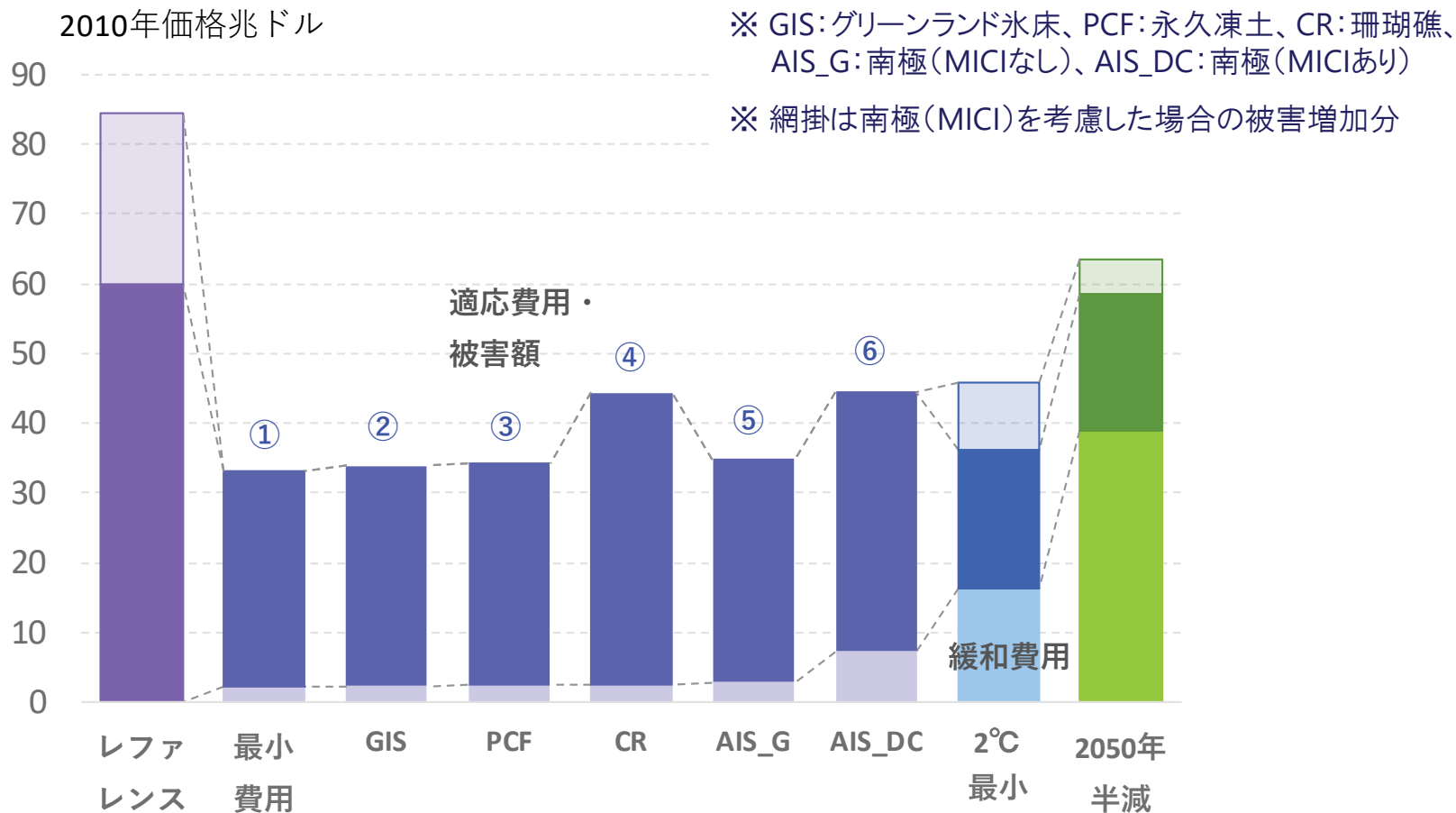
2050年のエネルギー起源 CO₂排出量



GIS: グリーンランド氷床、PCF: 永久凍土、CR: 珊瑚礁、
AIS_G: 南極(MICIなし)、AIS_DC: 南極(MICIあり)

- Tipping elements として、グリーンランド氷床(GIS)、永久凍土(PCF)、珊瑚礁(CR)、及び南極氷床(AIS_G、MICIを考慮しない場合)を費用便益分析に取り入れても、最小費用パスは大きくは変化しない。
- 一方で、もしMICIが作用し、南極氷床の崩壊が急速に進む場合(AIS_DC)を分析に取り入れると最小費用パスは大きく変化し(左図の赤点線にシフト)、2050年の排出量は27%低下する。それでも、2°C最小費用パスでの排出削減までは求められない。

Tipping elementsの考慮による総合コストの変化



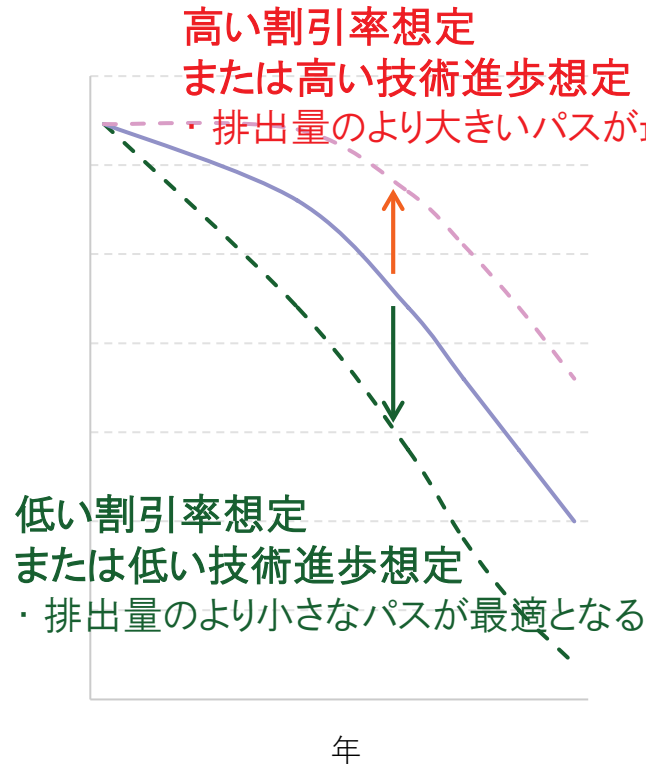
- Tipping elementとして、グリーンランド氷床(GIS)、永久凍土(PCF)、及び南極氷床(AIS_G、MICIを考慮しない場合)については、明示的に考慮することにより、総コストはわずかに上昇する(①と、②③⑤の対比)。
- 南極氷床(MICIを考慮する場合)と、珊瑚礁(CR)の被害を考慮する場合には、総コストは大きく上昇する(①と、④⑥の対比)。なお、珊瑚礁が消滅する被害は非常に大きい可能性があるが、1.5°C上昇の段階で既に大半が死滅するため、前頁に示す最小費用パスには大きく影響しない。

割引率及び技術進歩の想定

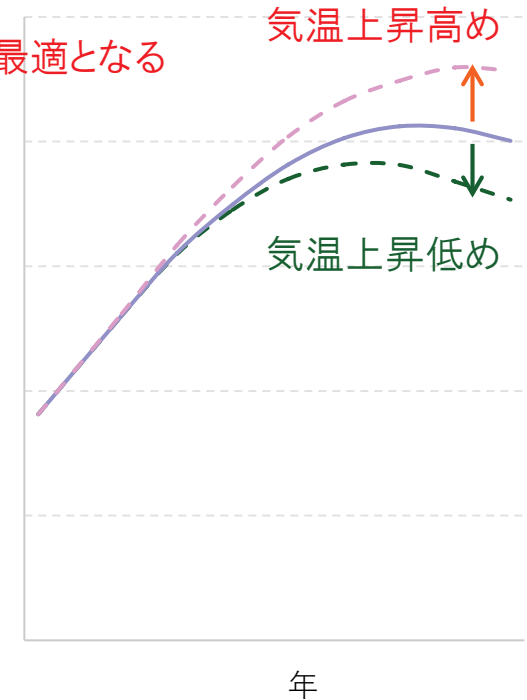
割引率の想定

- ・ 割引率とは、将来の貨幣価値を現在価値に換算する(例えば、今手元にある1万円と10年後の幾らの金額が価値として釣り合うかを評価する)ために用いられる比率。
- ・ 割引率の想定を低くすると、将来の被害額はより大きく加算され、今から早めに排出量をより大きく削減するパスが「最適」となる。
- ・ 低い割引率想定は、「将来世代の負担をより重視する」見方を表すと考えることができる。

最小費用パス



産業化前からの気温上昇



技術進歩の想定

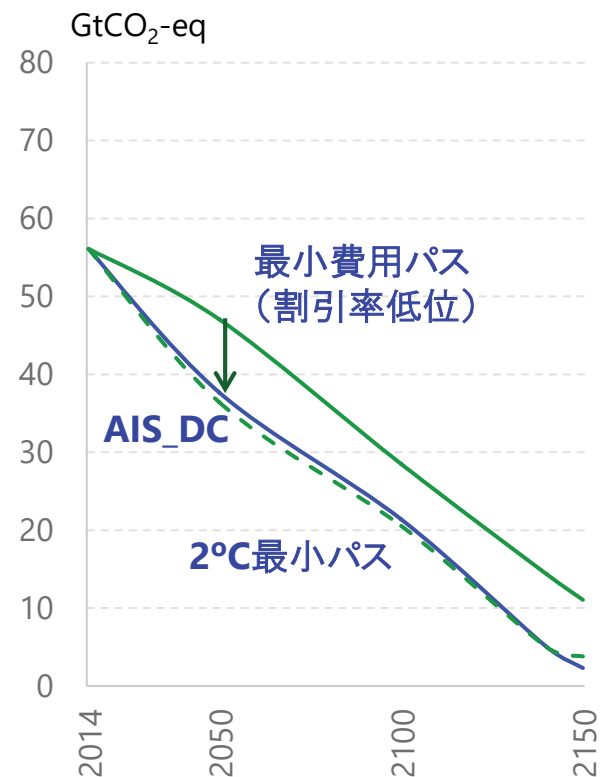
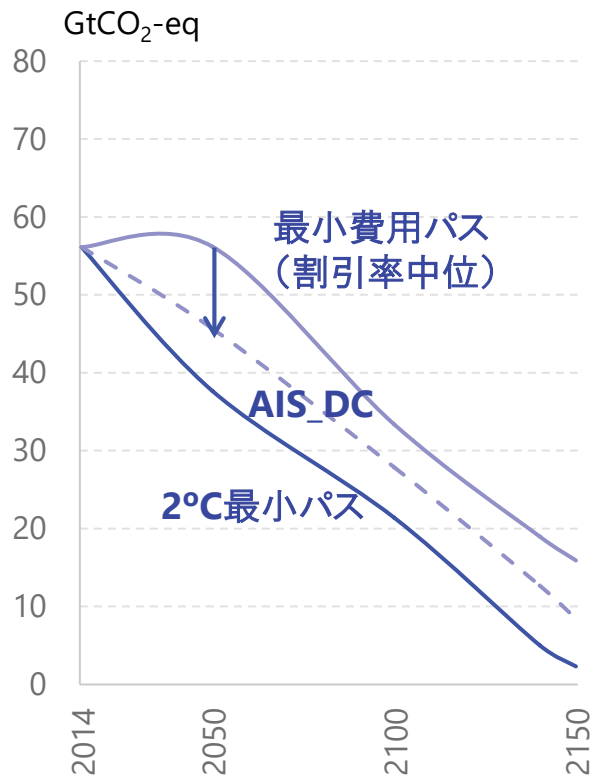
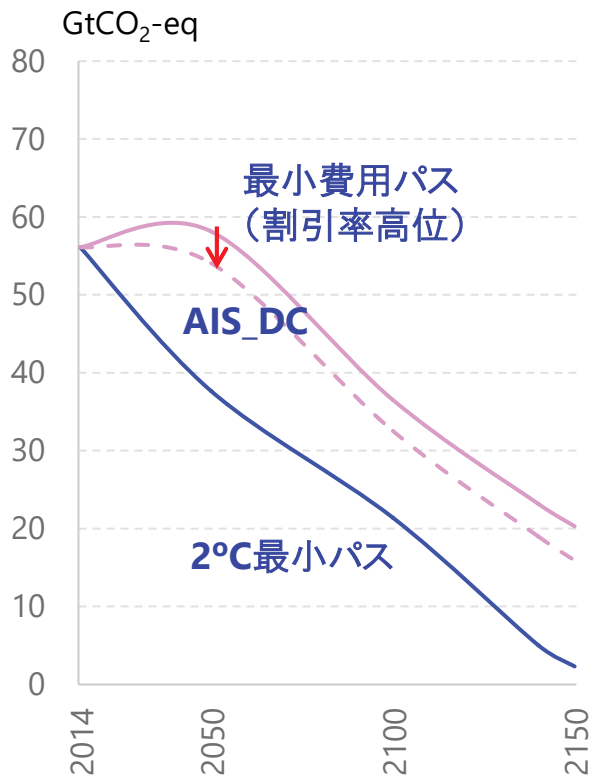
- ・ 将来に向けた緩和コストの低減速度や、負の排出技術の導入時期・導入可能量など
- ・ より遅い技術進歩を想定すると、足元の排出量をより大きく削減するパスが「最適」となる。

※ 後述の想定に従い、割引率について「高位」「中位」「低位」、技術進歩について「通常ケース」と「技術進歩ケース」を設定し、結果を比較した。

割引率高位

割引率中位

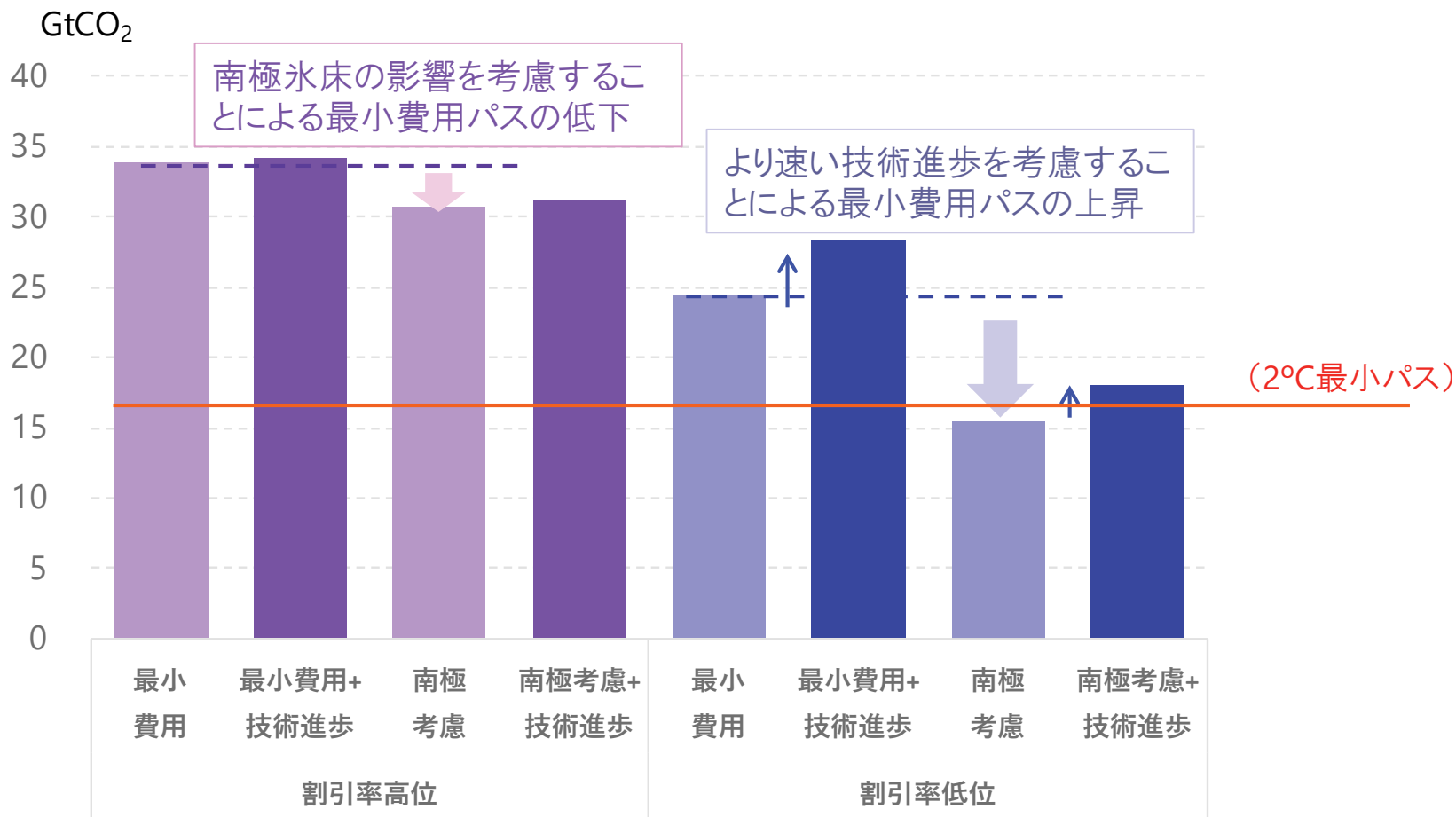
割引率低位



- 低い割引率想定を用いた場合、最小費用パスの排出量は減少し、より2°C最小パスに近づいてゆく。
- 更に、仮に南極の氷床崩壊が急速に進展する場合、最小費用パスは大きく変化する(上図AIS_DC)。特に低い割引率想定を用いるほど、南極氷床の影響によって、最小費用パスはより大きく変化する。
- 但し、その場合でも最小費用パスは2°C最小費用化パスと同等以上の排出となる。このような観点からも、2°C最小費用化パスを追求することの妥当性を確認することができる。

技術進歩による変化(2050年の最適CO₂排出量)

※ エネルギー起源CO₂排出量



- 将来の技術進歩をより強く見込んだとしても、高い割引率想定の場合には、2050年の最適排出量(=「最小費用パス」の2050年の排出量)は大きく変化しない。これは、この想定の下ではより近い将来における緩和費用や被害額を重視することによる。
- 一方で低い割引率想定の場合には、技術進歩を想定した場合、より低コストで大幅な削減が可能となるため、2050年の最適排出量は大きくなる。即ち、低い割引率想定は長期の視野での技術開発をより重視する見方であるといえる。

- ・ 気候変動への対策を行わなければ緩和費用をかけずに済むが、適応費用、もしくは気候変動による被害が甚大となる。逆に協力的な緩和策を講じる場合には、適応費用や被害は軽減されるが、そのために必要となる緩和費用が大きくなる。
- ・ この観点から、気候変動の緩和・適応・被害それぞれのコストを考慮し、「最適」な排出パスを求める試みが多くの研究者によって行われており、現状ではその評価には批判も含め、様々な意見がある。
- ・ 中でも、気候変動に伴って生じる不可逆的な事象(Tipping elements)が人類に大きな被害を与える可能性が懸念されている。しかし多くの場合、これらの事象を明示的に考慮しても、費用便益分析に与える影響は大きくない。これは一部には、例えばグリーンランドの氷床が融解するためには数千年の時間を要することなどによる。
- ・ 一方、南極氷床におけるMICIのような、事象の発現時間を極端に早めるような現象が発生する場合には、最小費用パスに大きな影響を与え得る。このような事象について、科学的知見を深めることは気候変動問題を考えるに当って非常に重要である。
- ・ 割引率の想定によってもTipping elementsの影響は異なるものとなり、一般的には低い割引率を用いるほど、Tipping elementsの影響は大きなものとなる。その影響は将来の技術進歩によってある程度は緩和され得るものの、潜在的な脅威であり続けることに変わりはない。
- ・ Tipping elementsの考慮や低い割引率の想定は、将来に向けた技術開発の影響をより大きく評価することにもなる。気候変動問題に対処するために、長期の将来を見据えた、着実な技術の開発・実用化を後押しする政策の遂行が今後ますます求められるようになる。

※ 最小費用パス(最適パス)及びTipping elementsの影響は、割引率や技術進歩の想定によって変化する。ここでは、以下のケースに従って感度解析を実施した。

割引率の想定

- ・ 割引率とは、将来の貨幣価値を現在価値に換算するために用いられる比率。例えば確実に3%の利息収入が得られる場合、10年後の1000ドルは現在の744ドルに相当し、この3%が割引率に相当する。
- ・ 一般的に、割引率 ρ は次のラムゼイ則によって記述される。

$$\rho = \delta + \eta g$$

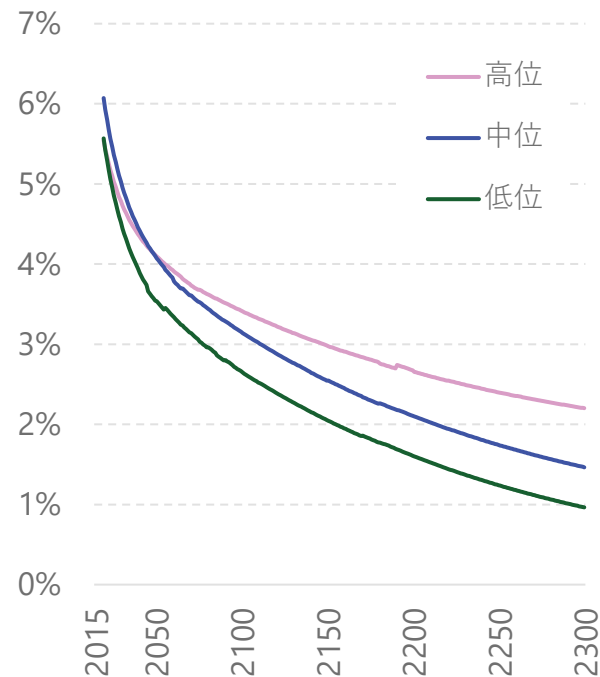
δ : 純時間選好率、 g : 一人当り消費の成長率、
 η : 効用の対消費弾性値

- ・ 以下の3通りの割引率想定を使用した。

高位: $\delta=1.5\%$ 、 $\eta=1.45$

中位: $\delta=0.5\%$ 、 $\eta=2.0$

低位: $\delta=0.05\%$ 、 $\eta=2.0$



技術進歩の想定

- ・ 将来への技術開発を加速することは、緩和コストの低減をもたらすとともに、より大きな排出削減に貢献し得ると考えられる。
- ・ 「技術進歩ケース」では技術進歩が加速し、緩和コストの低減率が1.5倍(0.5%/年→0.75%/年)になるとともに、2100年以降、ベースライン排出量の20%に相当する負の排出技術が可能になるとした。

A light gray silhouette of a world map is centered on the page, serving as a background for the title text.

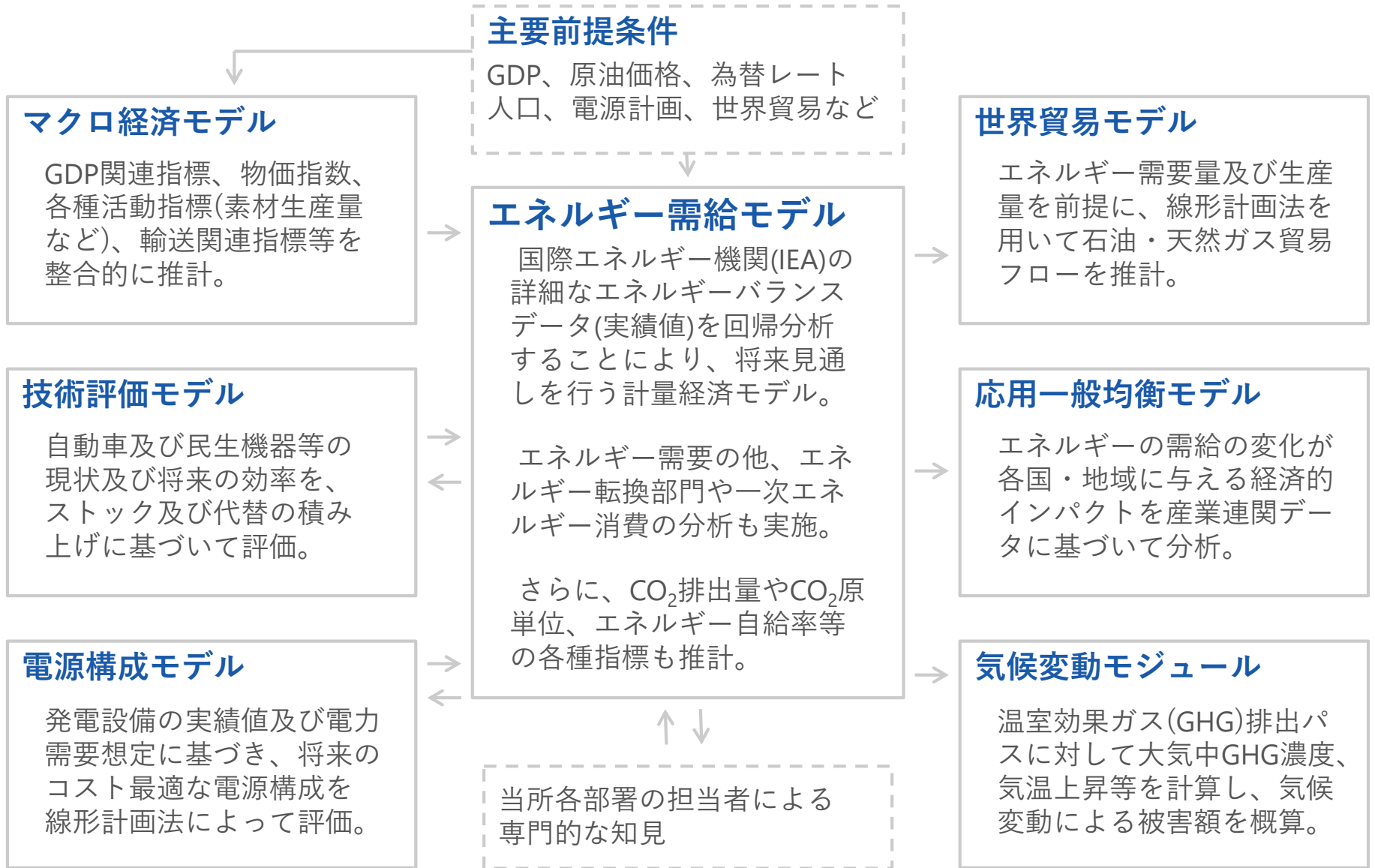
付属資料

地域区分

- 世界を42か国・地域および国際バンカーに区分
- 特にアジアは15か国・地域、中東は8か国・地域と詳細に区分

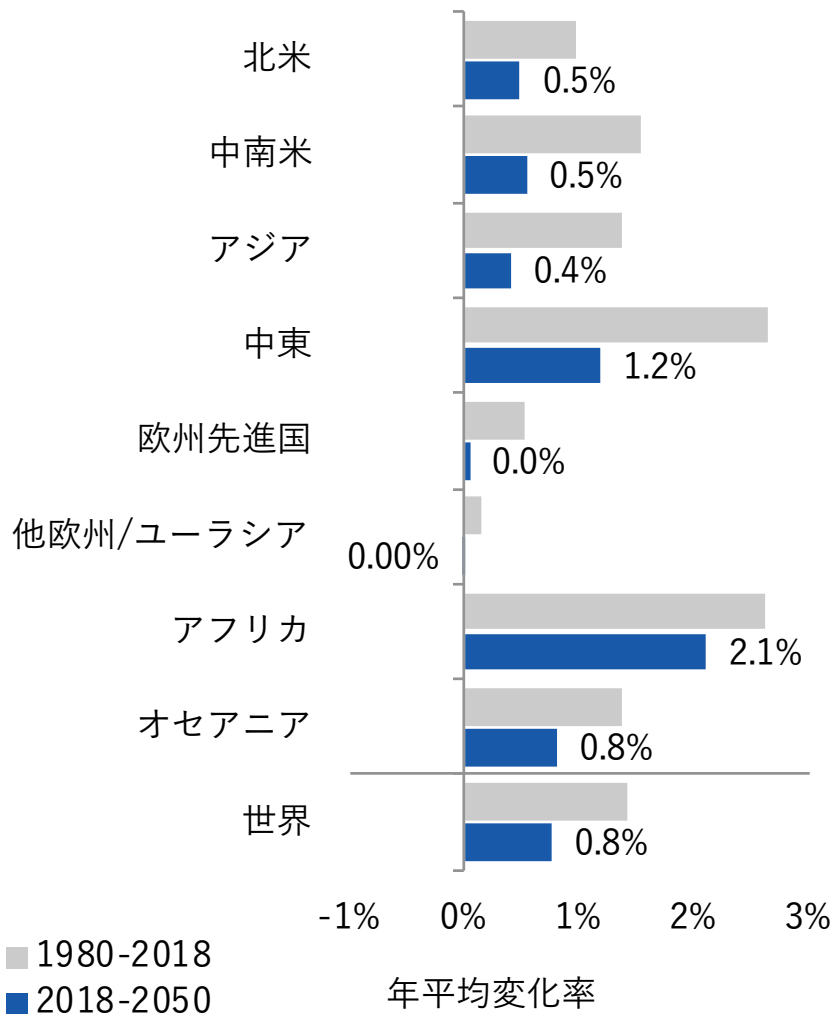


モデルの構造

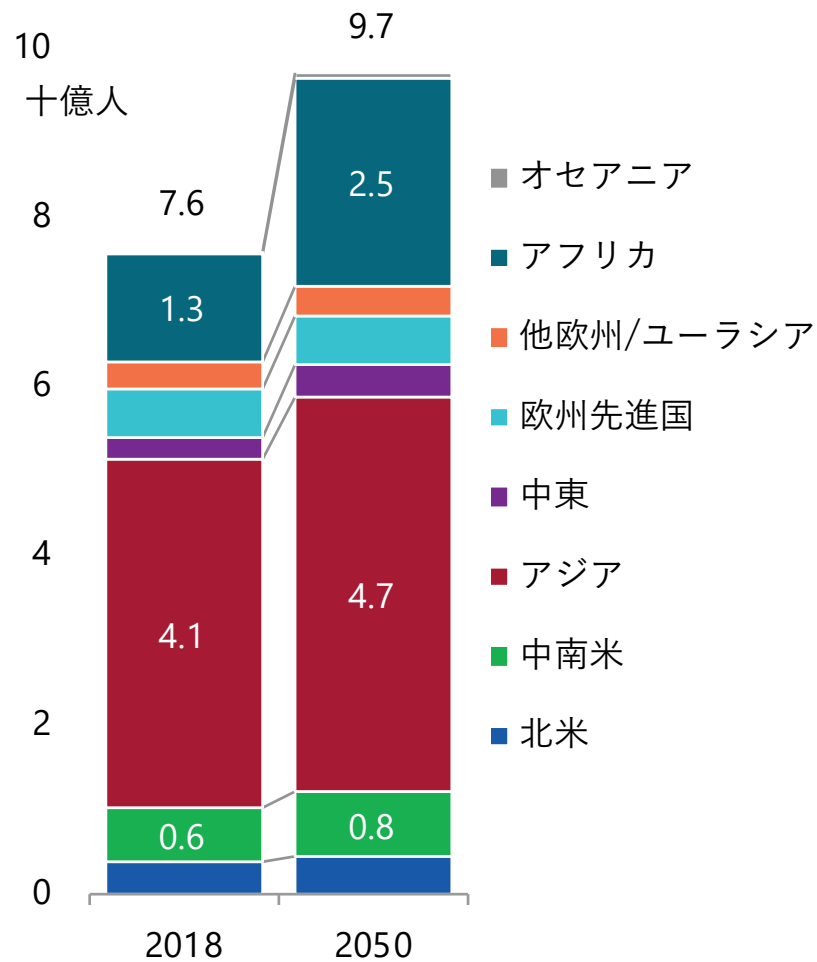


	レファレンスシナリオ	技術進展シナリオ
	<p>現在までのエネルギー・環境政策等を背景とし、これまでの趨勢的な変化が継続するシナリオ。急進的な省エネルギー・低炭素化政策は打ち出されない</p>	<p>各国がエネルギー安定供給の確保や気候変動対策の強化のため、強力なエネルギー・環境政策を打ち出し、それが最大限奏功するシナリオ</p>
社会経済構造	<p>人口増加率は低下するものの、新興・途上国を中心に安定した経済成長 経済構造の変化は連続的、産業のサービス化が進展 所得水準の向上により、家電、自動車等のエネルギー消費機器が大きく普及</p>	
国際エネルギー価格	<p>原油：需要増に伴い、生産費用が上昇 ガス：欧米市場の価格差が縮小 石炭：現状と同程度の水準を維持</p>	<p>需要増抑制のため価格上昇は限定的 (石炭価格は低下)</p>
エネルギー・環境政策	<p>過去の動向と同様に低炭素化政策を漸進的に強化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・規制措置(省エネ基準、排出規制等) ・経済的誘導措置(補助金、税金等) 	<p>国内政策強化とともに国際連携を推進</p> <ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー安定供給の確保 ・気候変動問題への対処 ・低開発農村地域のエネルギー近代化
エネルギー・環境技術	<p>現行技術について</p> <ul style="list-style-type: none"> ・過去の趨勢と同程度の効率進展 ・過去の趨勢と同程度の価格低下 ・規制・誘導による低炭素技術の普及 	<p>現行技術及び商業化の見込みが高い技術について</p> <ul style="list-style-type: none"> ・技術進展により価格低下が加速 ・規制・誘導強化により普及が加速

年平均増減率

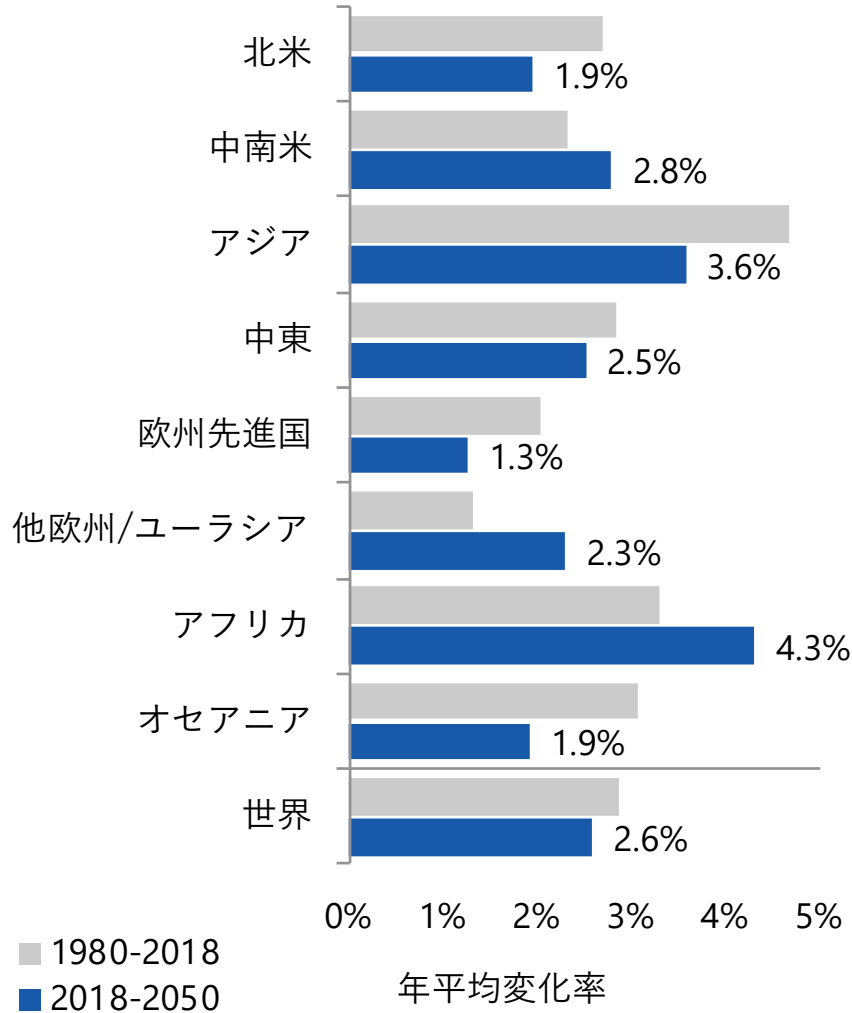


人口構成

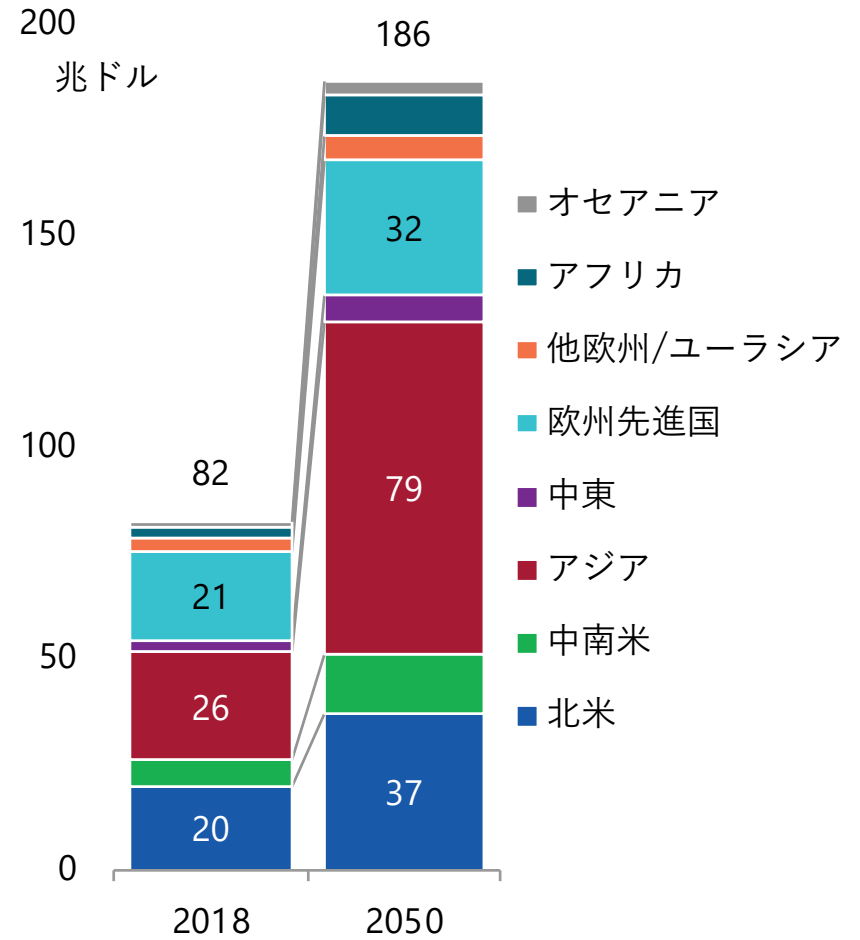


実質GDP

経済成長率



GDP構成

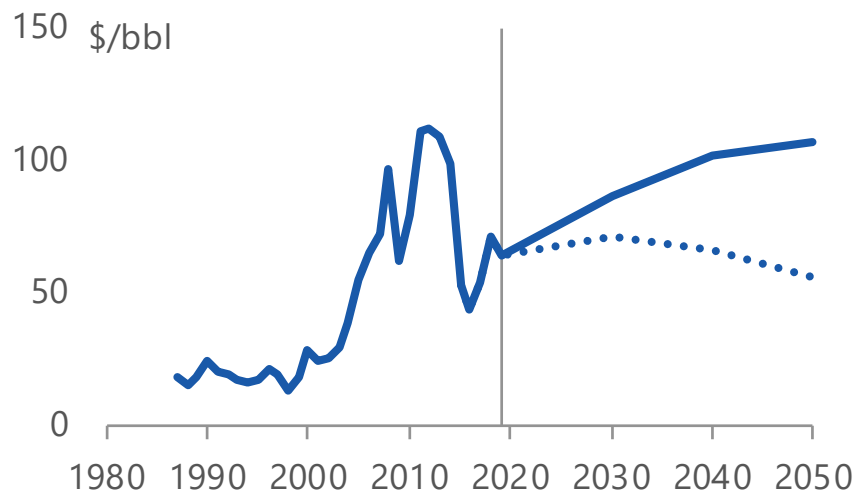


国際化石燃料価格

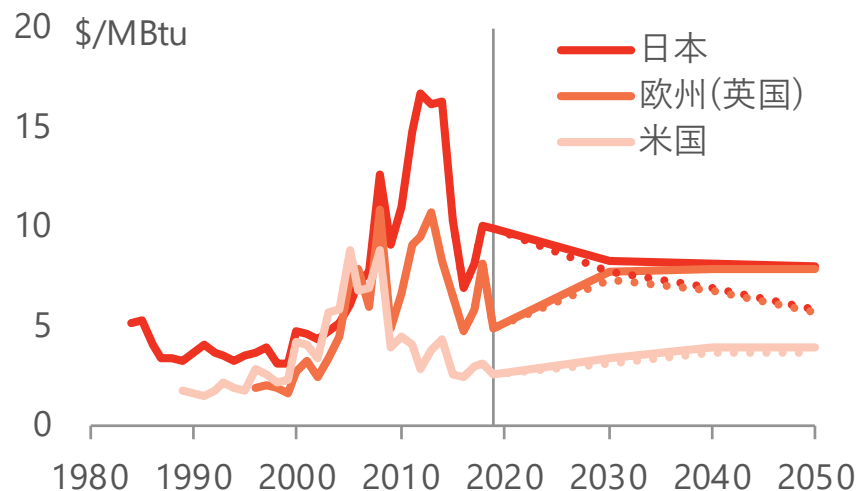
レファレンス：実線
技術進展：破線



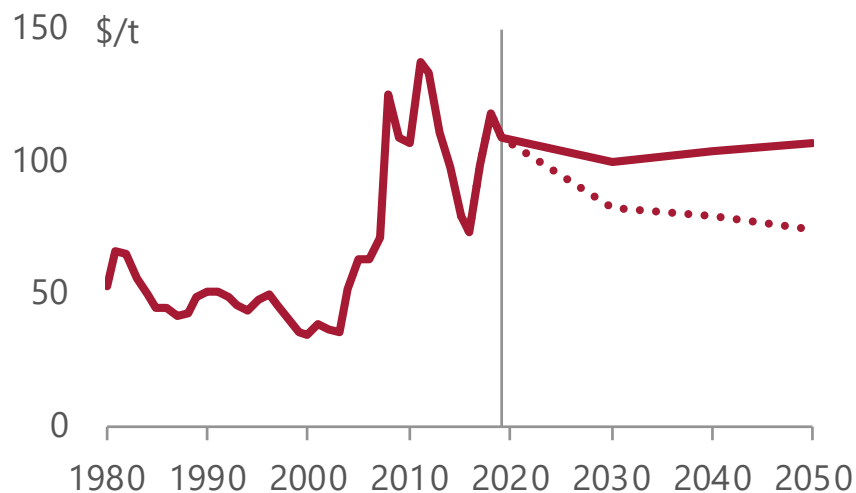
原油



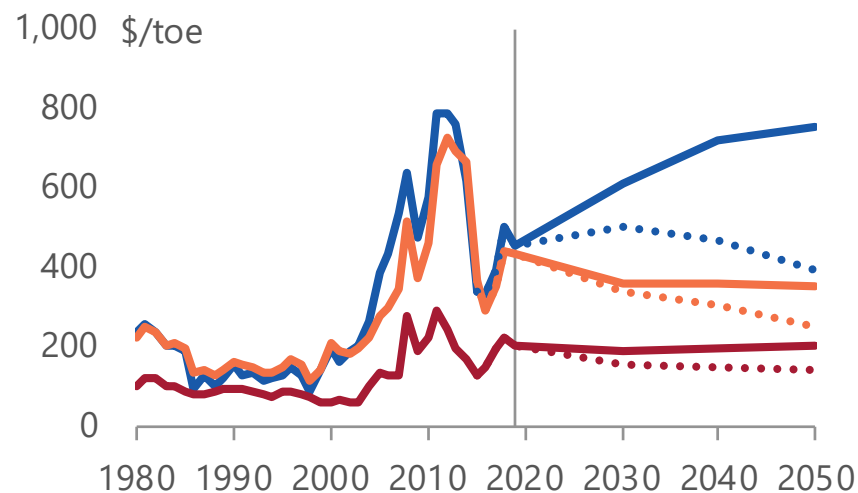
天然ガス



石炭



日本の輸入CIF価格



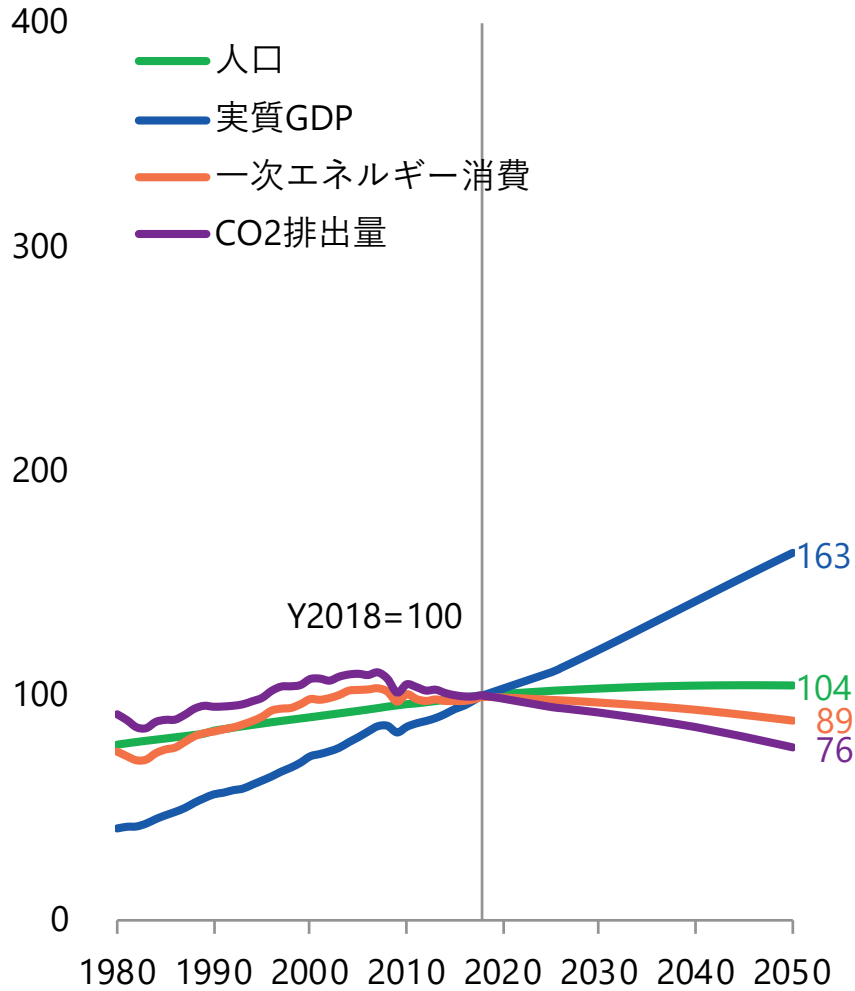
(注)実績値は名目価格、見通しは2019年価格

エネルギー・環境技術の前提

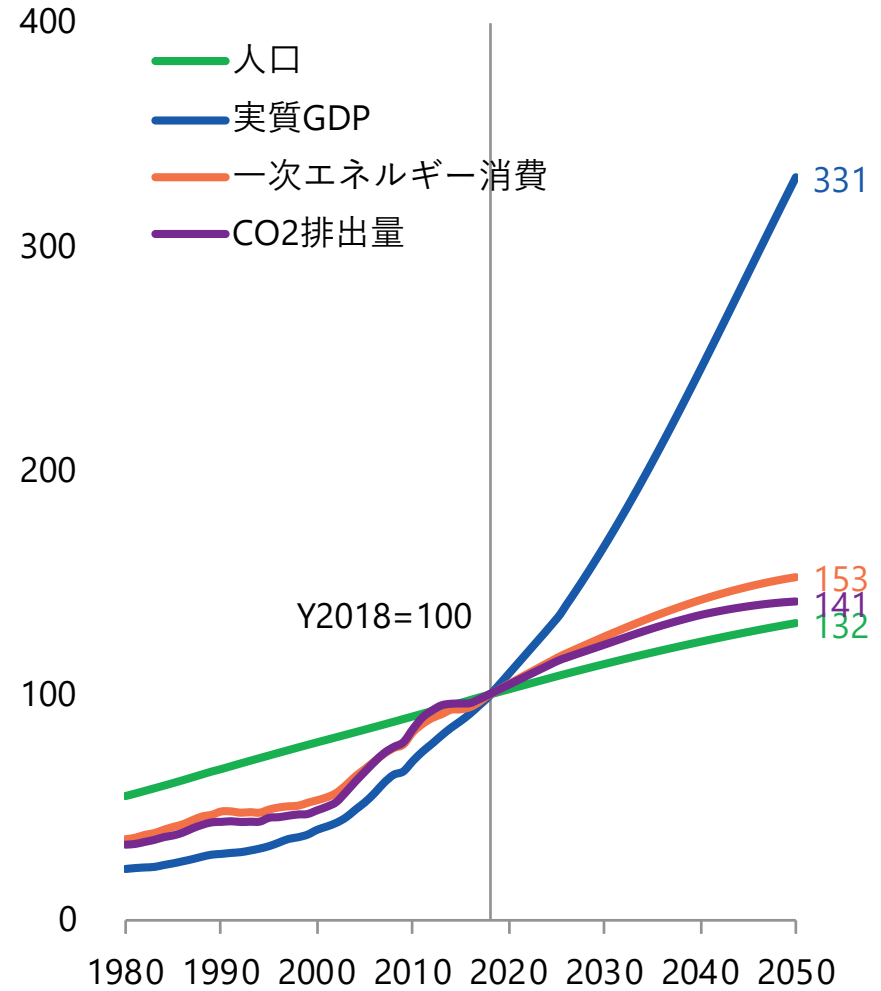
	2018	2050		技術進展シナリオにおける前提
		レファレンス	技術進展	
エネルギー効率の改善				
産業部門 鉄鋼業の原単位 (ktoe/kit)	0.274	0.245	0.217	2050年までにBest Available Technologyが100%普及
窯業土石業の原単位	0.093	0.072	0.064	
運輸部門 電動乗用車販売比率	6%	55%	87%	電動自動車のコスト低下。燃料インフラを含む普及促進策の強化 ※電動自動車:ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車
乗用車新車燃費 (km/L)	14.4	23.7	34.0	
民生部門 家庭の総合効率 (Y2018=100)	100	150	181	新規、新設の家電・機器効率及び断熱効率の改善スピードが約2倍に 暖房・給湯・厨房用途における電化。クリーンクッキング化(途上国)
業務の総合効率	100	180	211	
発電部門 火力発電効率(発電端)	38%	45%	46%	高効率火力発電導入のための初期投資ファイナンススキーム整備
低炭素エネルギーの導入				
運輸用バイオ燃料消費量 (Mtoe)	90	134	254	次世代バイオ燃料の開発・コスト低下。農業政策としての位置づけ(途上国)
原子力発電設備容量 (GW)	416	480	725	適切な卸電力市場価格の維持。初期投資の融資枠組み整備(途上国)
風力発電設備容量 (GW)	564	1,850	3,625	発電コストのさらなる低下
太陽光発電設備容量 (GW)	480	2,909	4,737	系統安定化技術のコスト低減、系統システムの効率的運用
CCS付設火力発電設備容量 (GW)	0	0	1,023	2030年以降の新設火力はCCS付設(帯水層を除く貯留ポテンシャルがある国)
ゼロエミッション発電比率 (CCS含む)	36%	42%	77%	国際連系を含む系統システムの効率的運用

人口、GDP、エネルギー消費、CO₂排出量

先進国



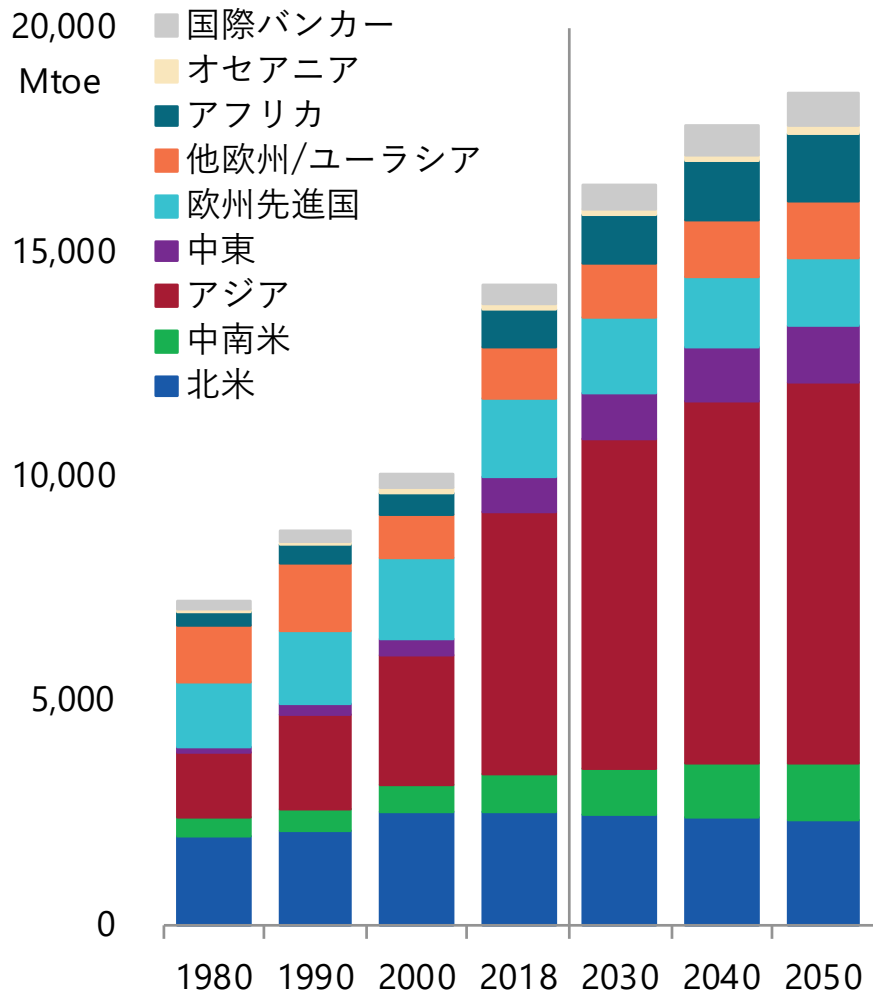
新興・途上国



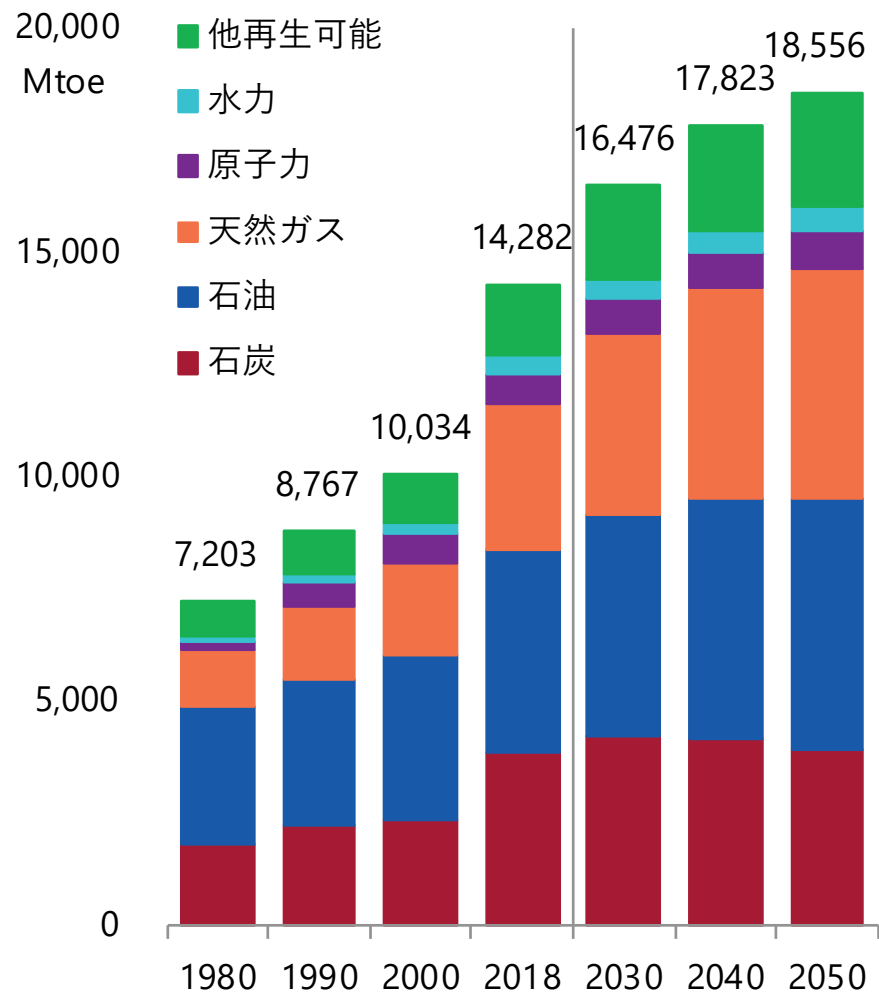
※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

一次エネルギー消費

地域別

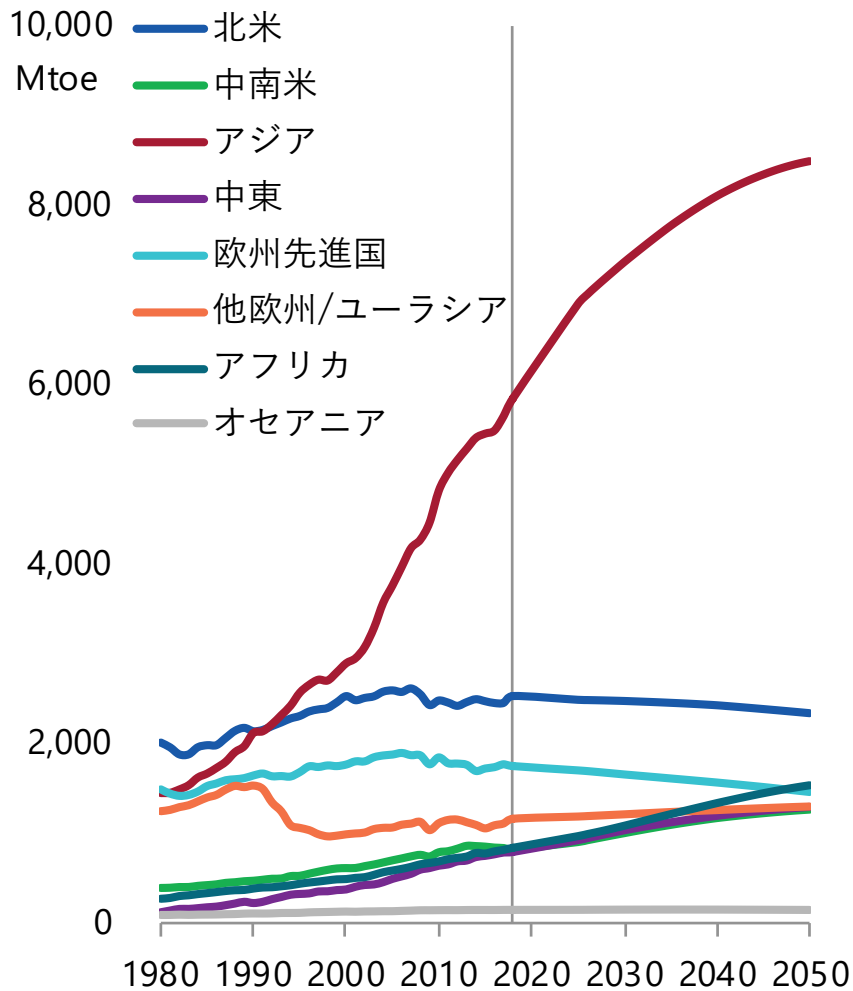


エネルギー源別

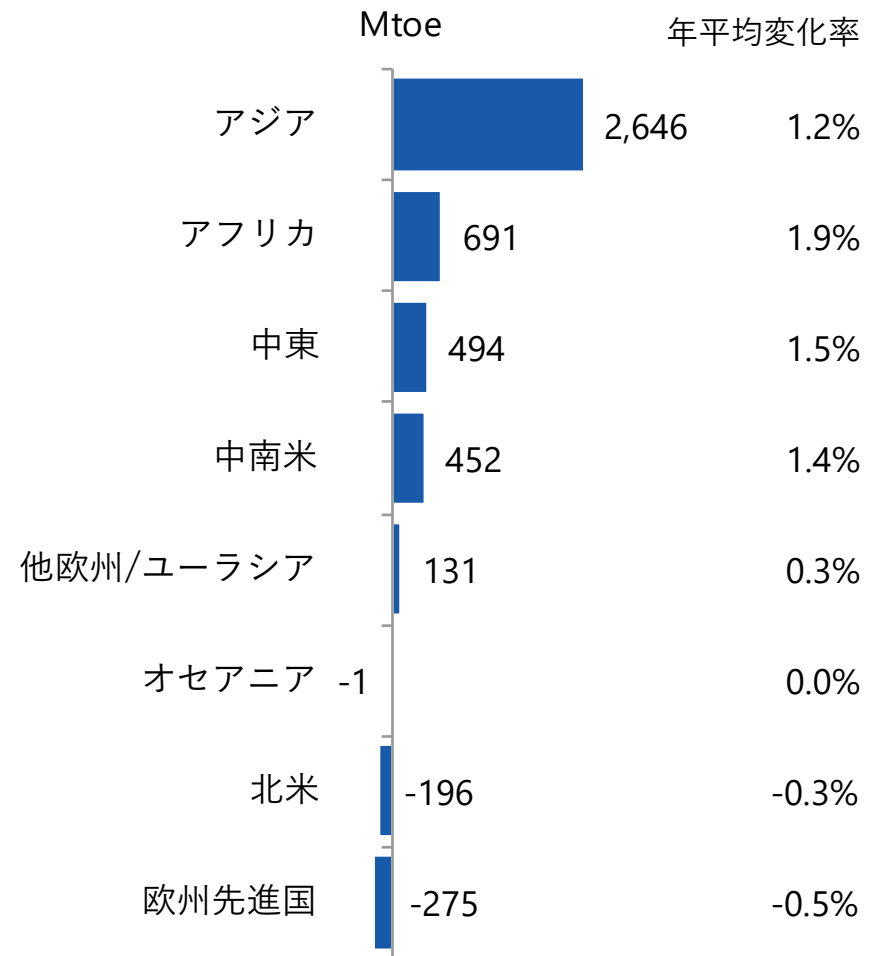


一次エネルギー消費(地域別)

エネルギー消費量



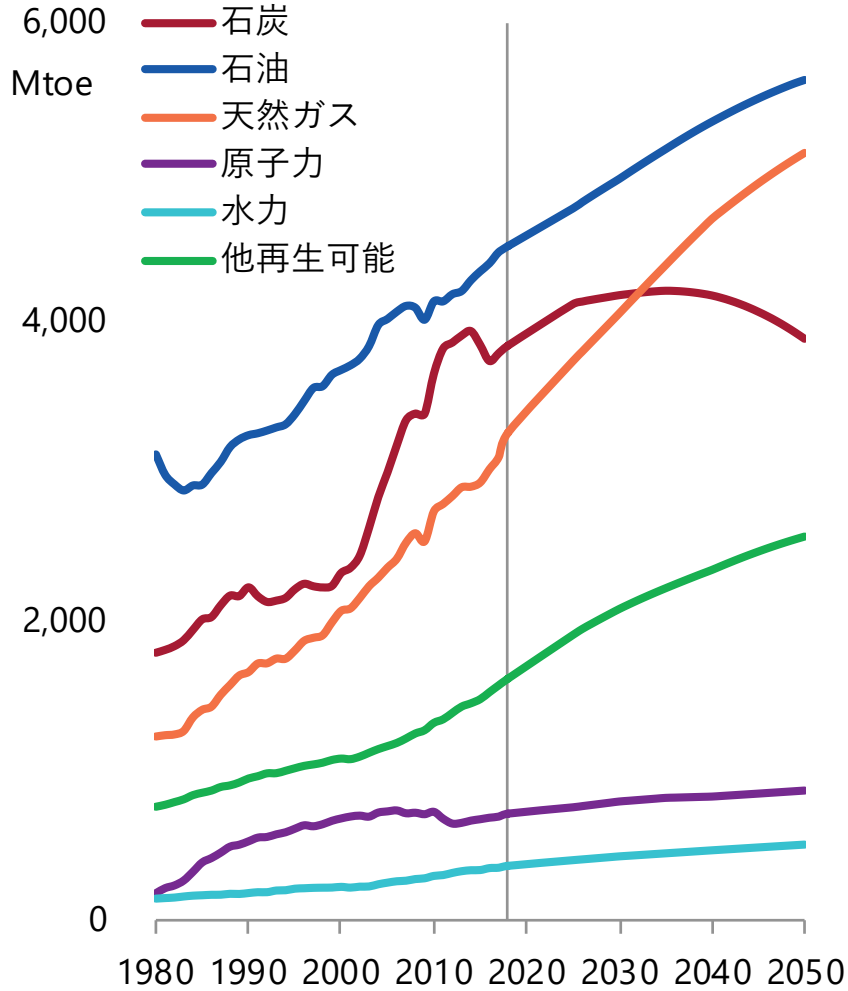
増減分(2018-2050年)



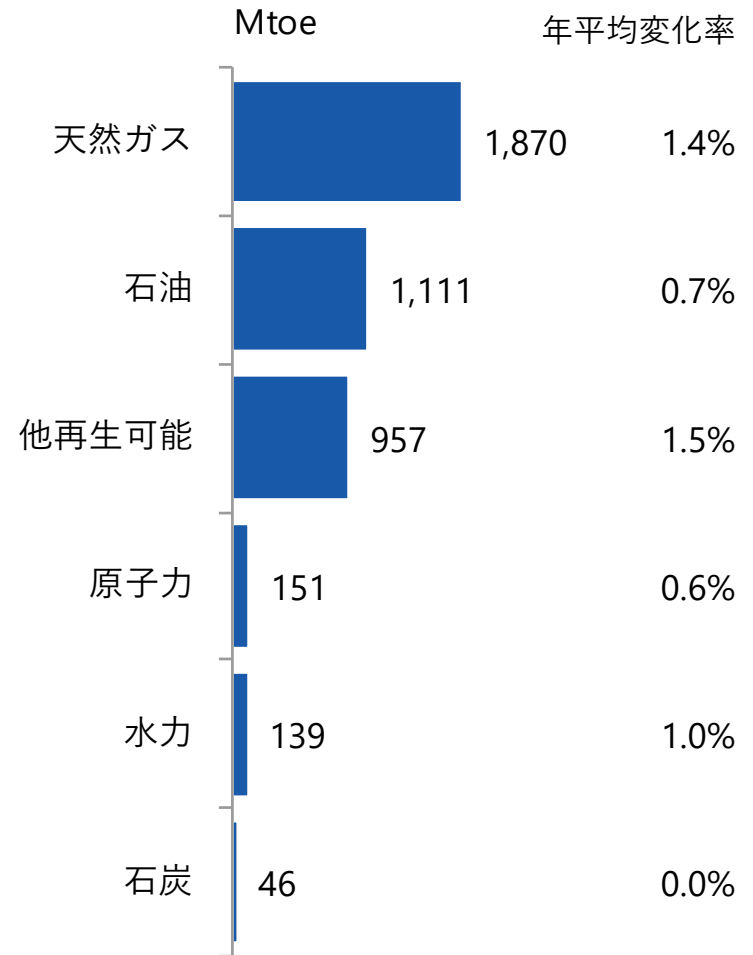
※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

一次エネルギー消費(エネルギー別)

エネルギー消費量



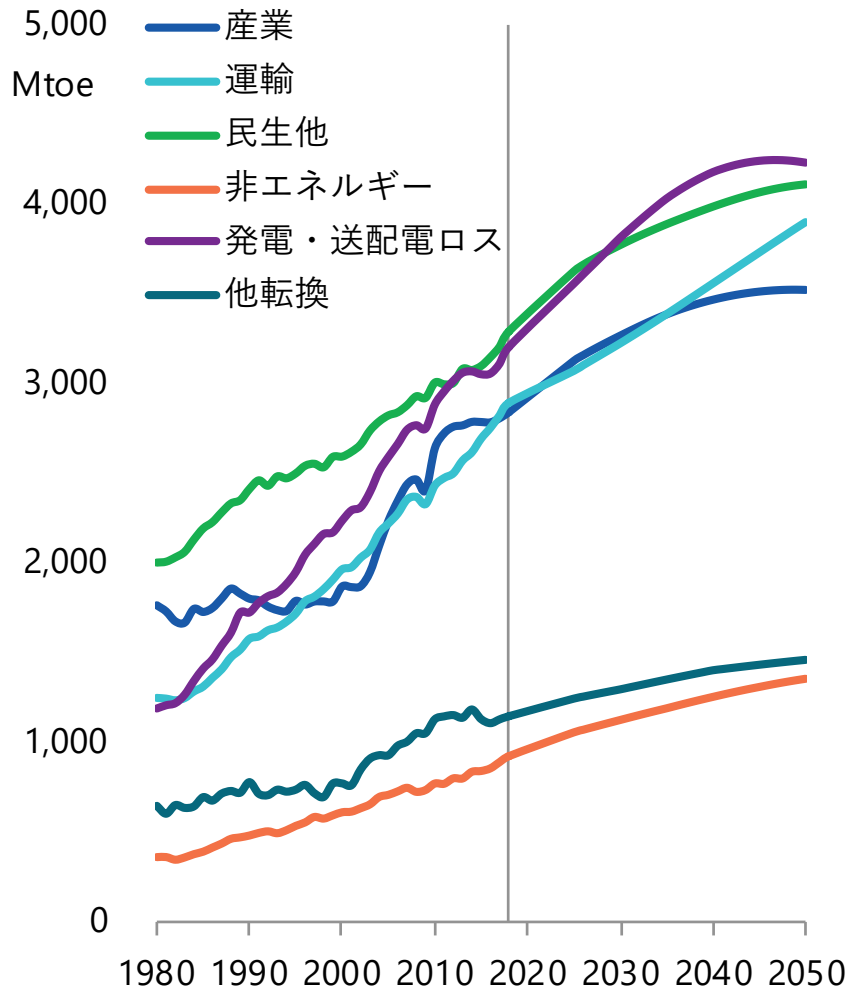
増減分(2018-2050年)



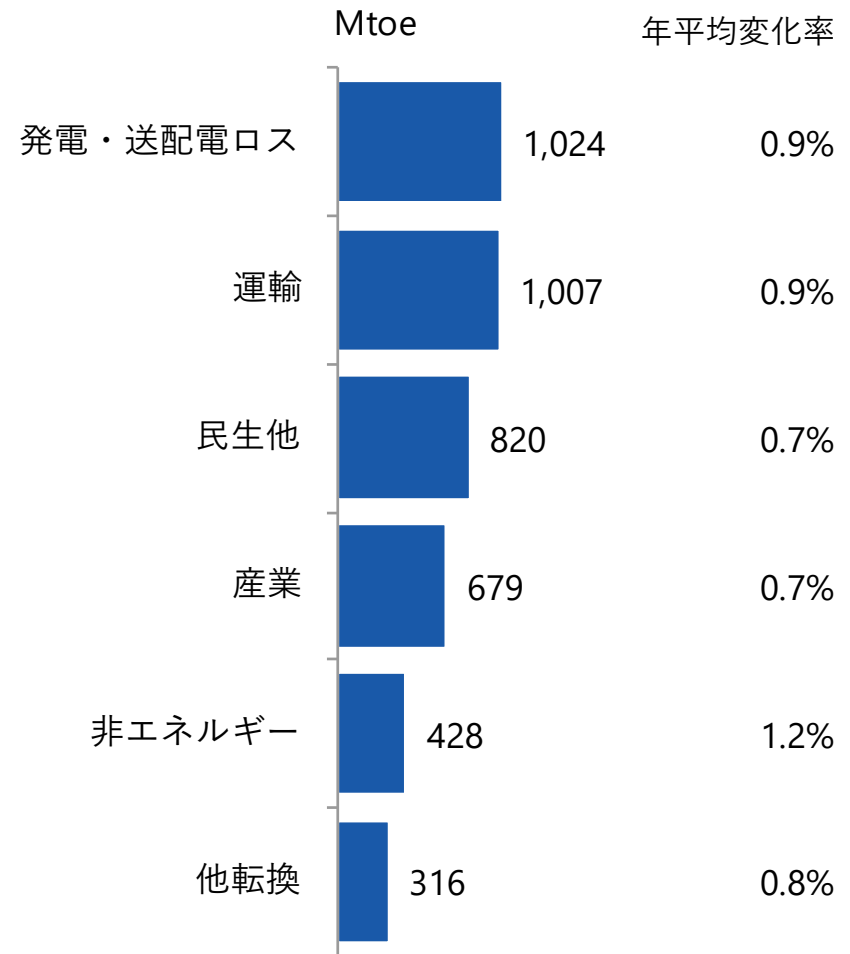
※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

一次エネルギー消費(部門別)

エネルギー消費量



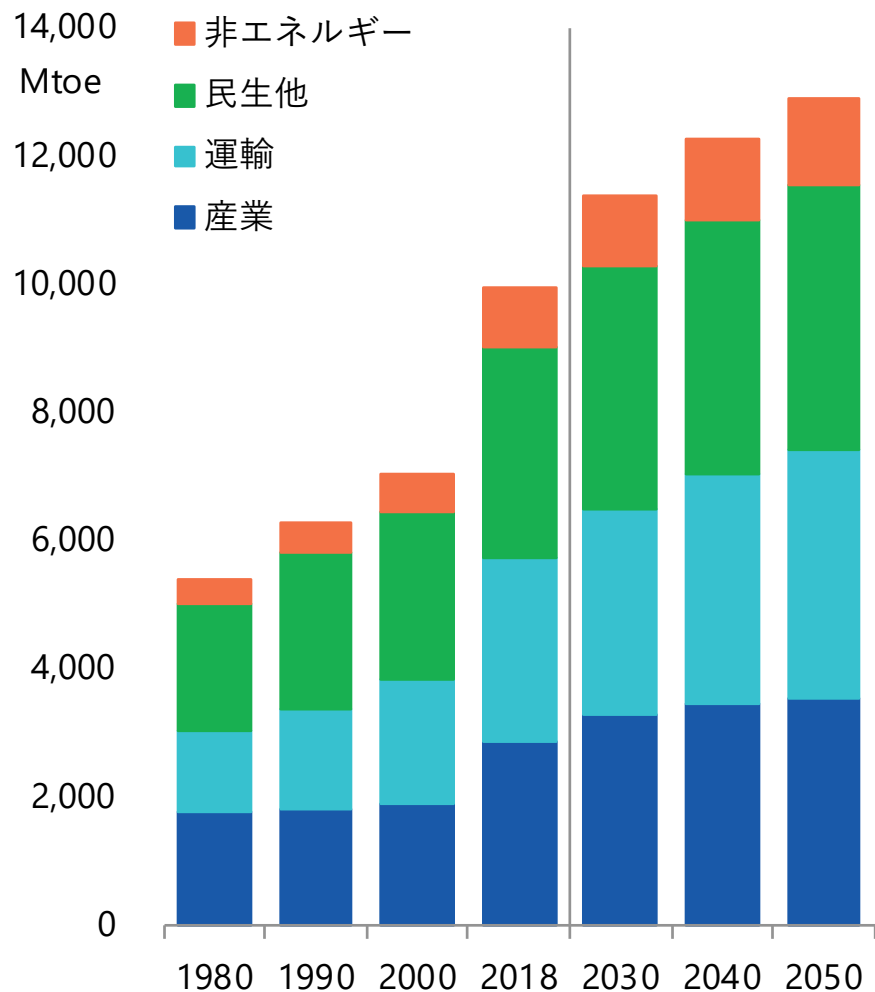
増減分(2018-2050年)



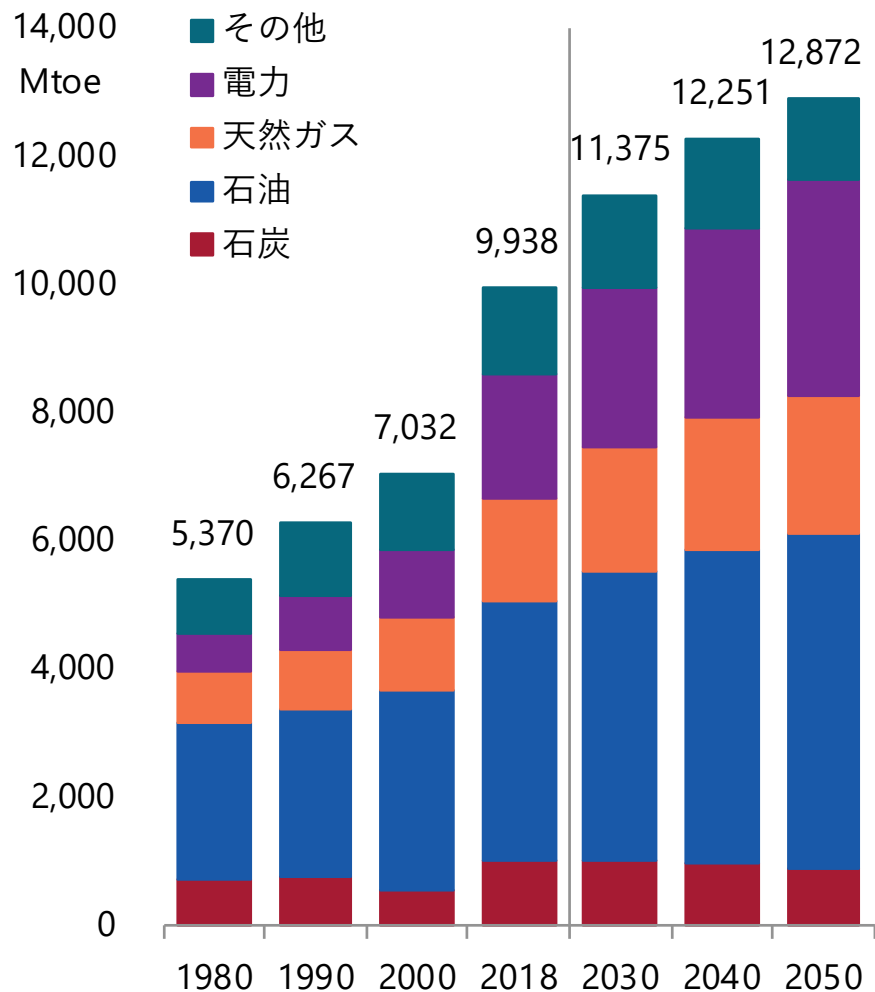
※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

最終エネルギー消費

部門別

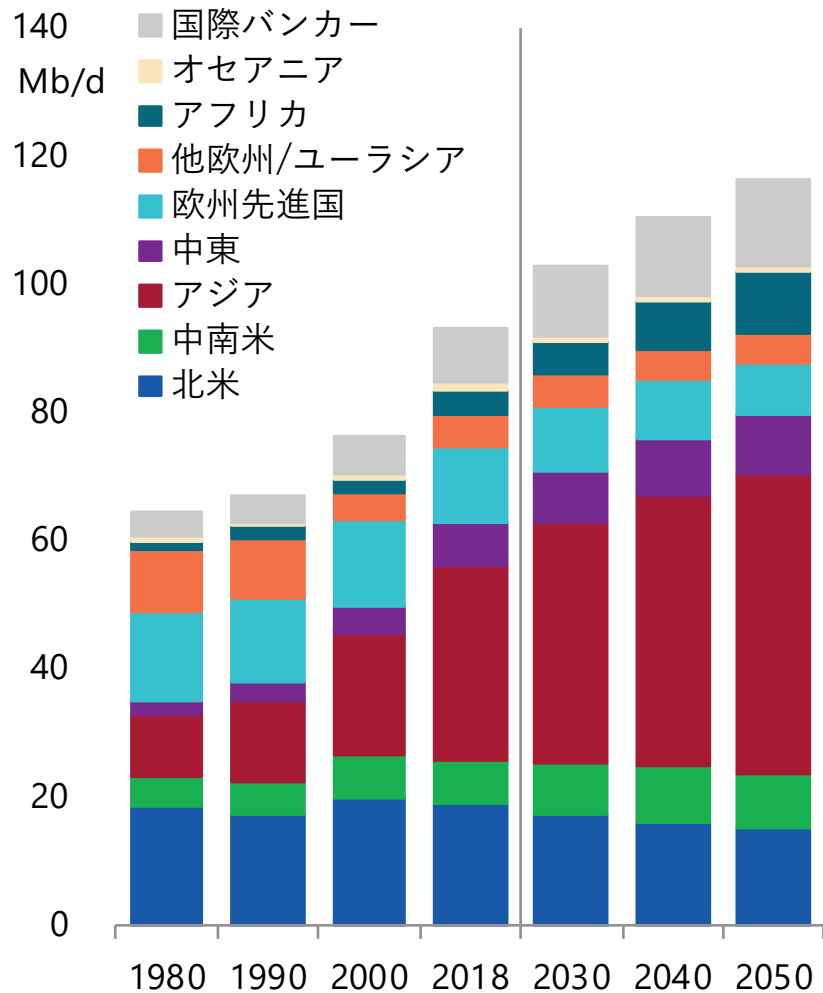


エネルギー源別

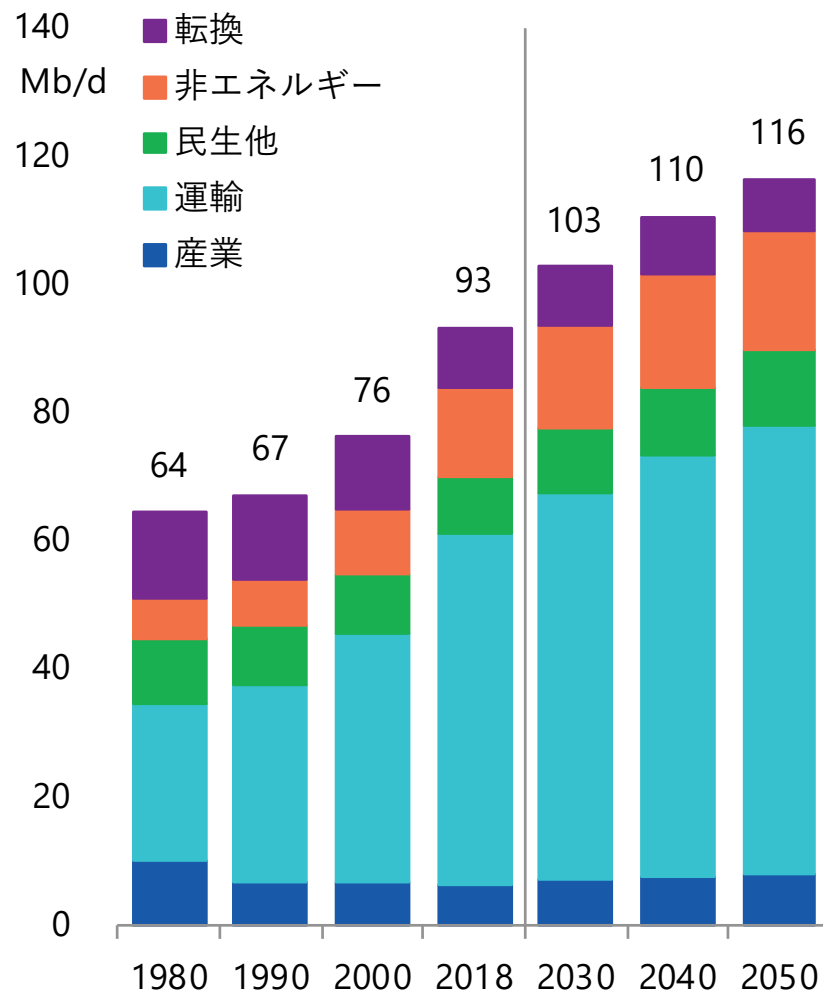


石油消費

地域別

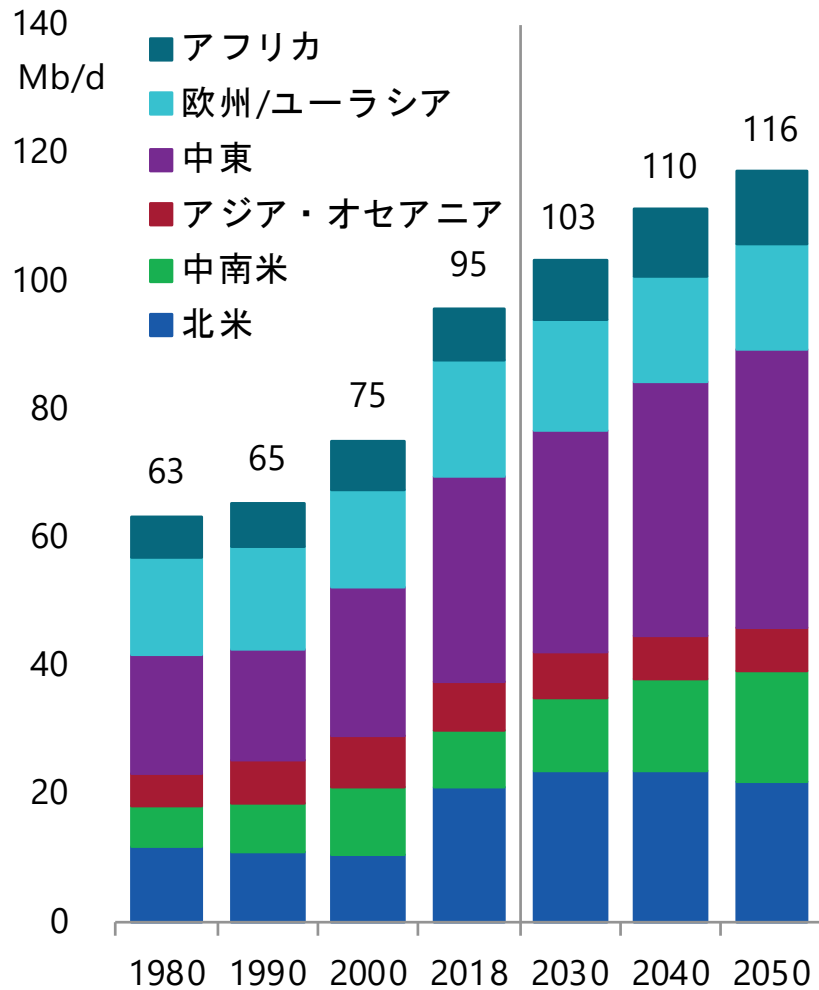


部門別

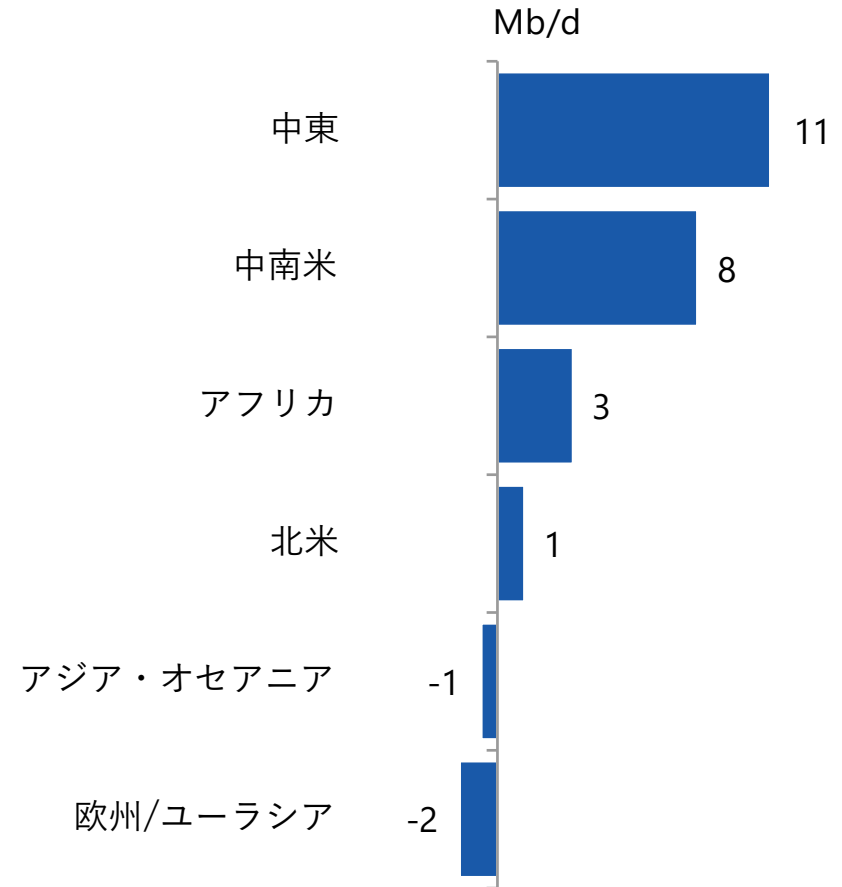


原油生産

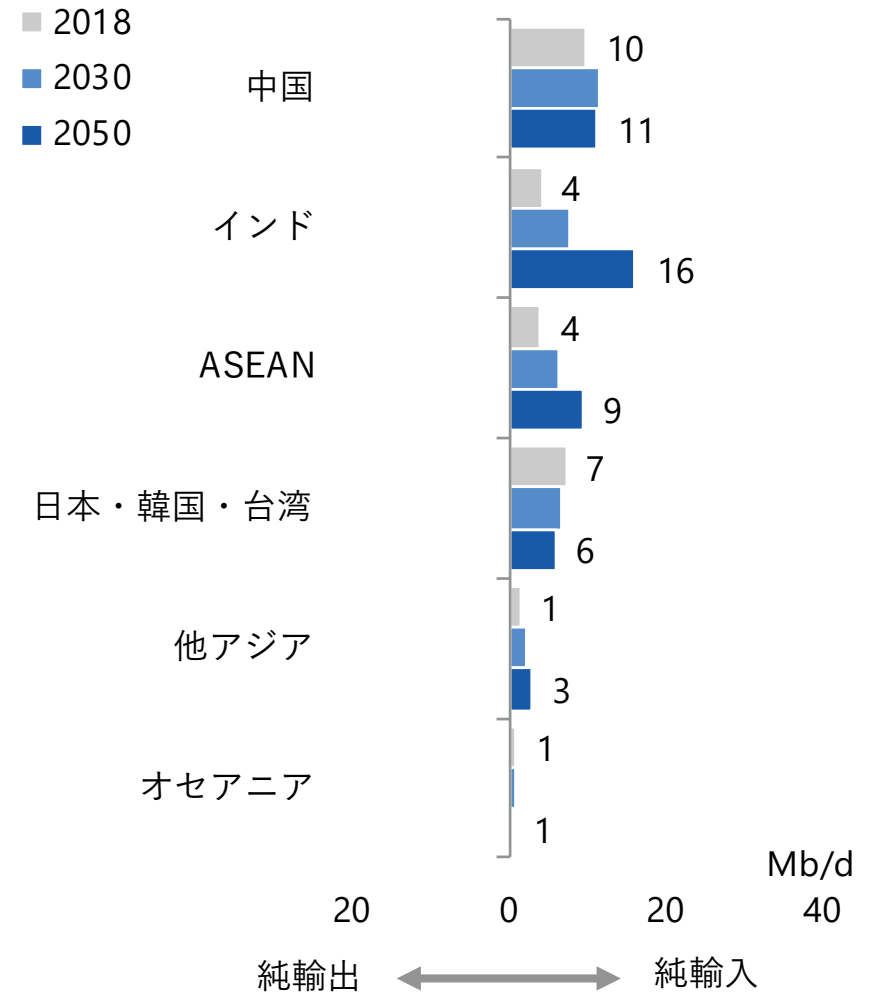
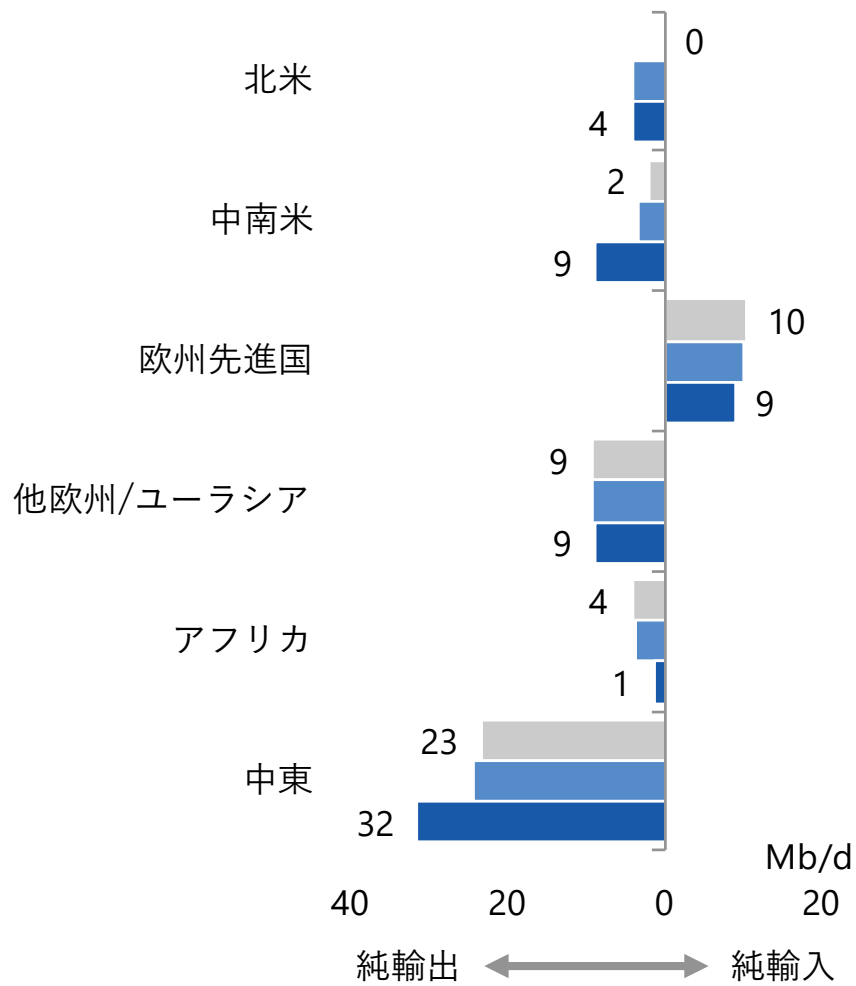
地域別



増減分(2018-2050年)

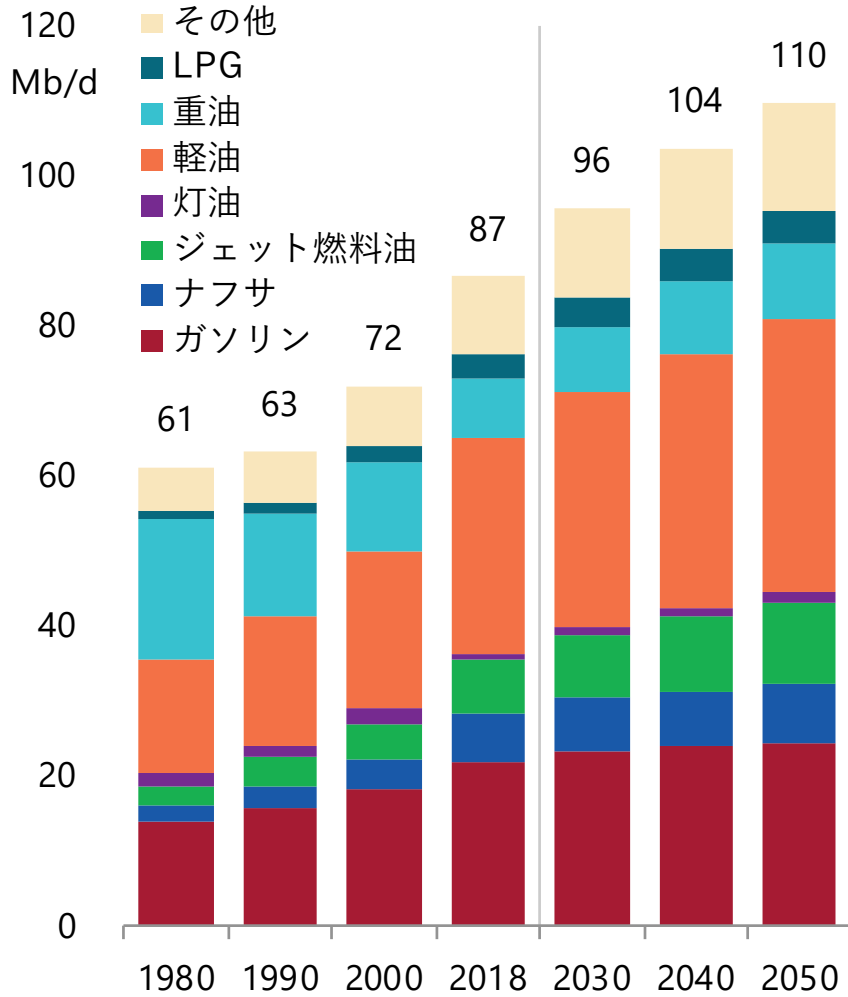


石油純輸出入量

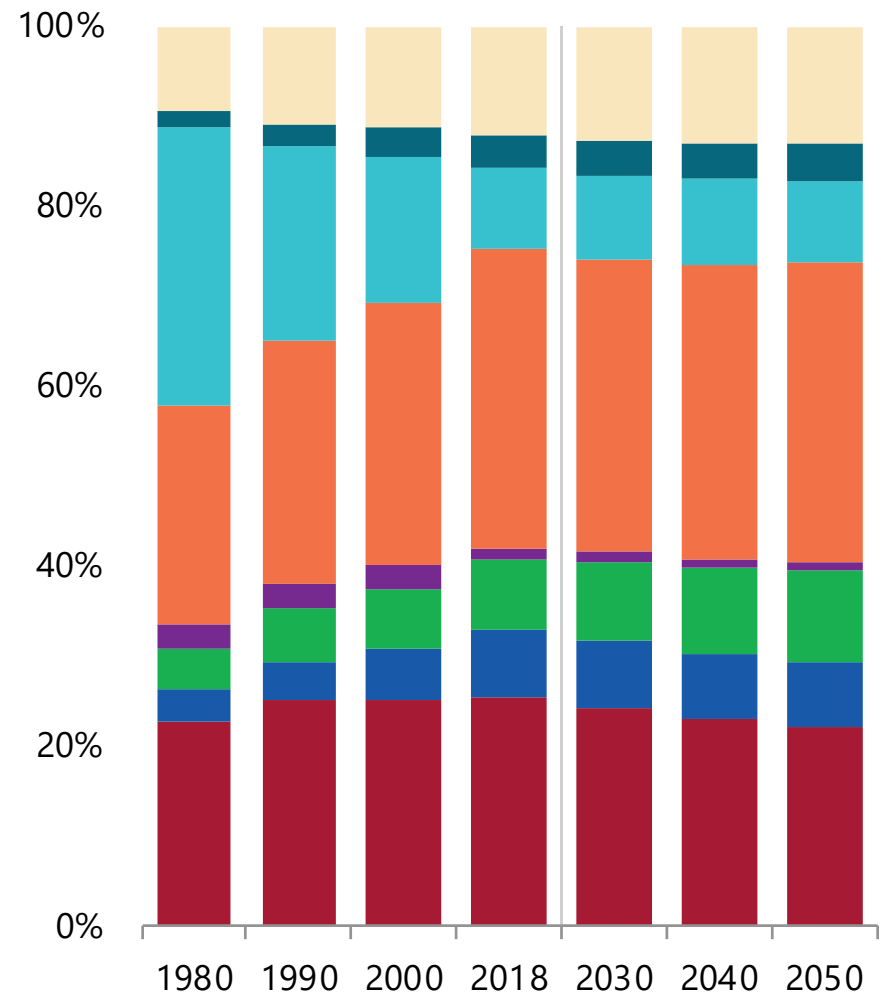


石油製品需要

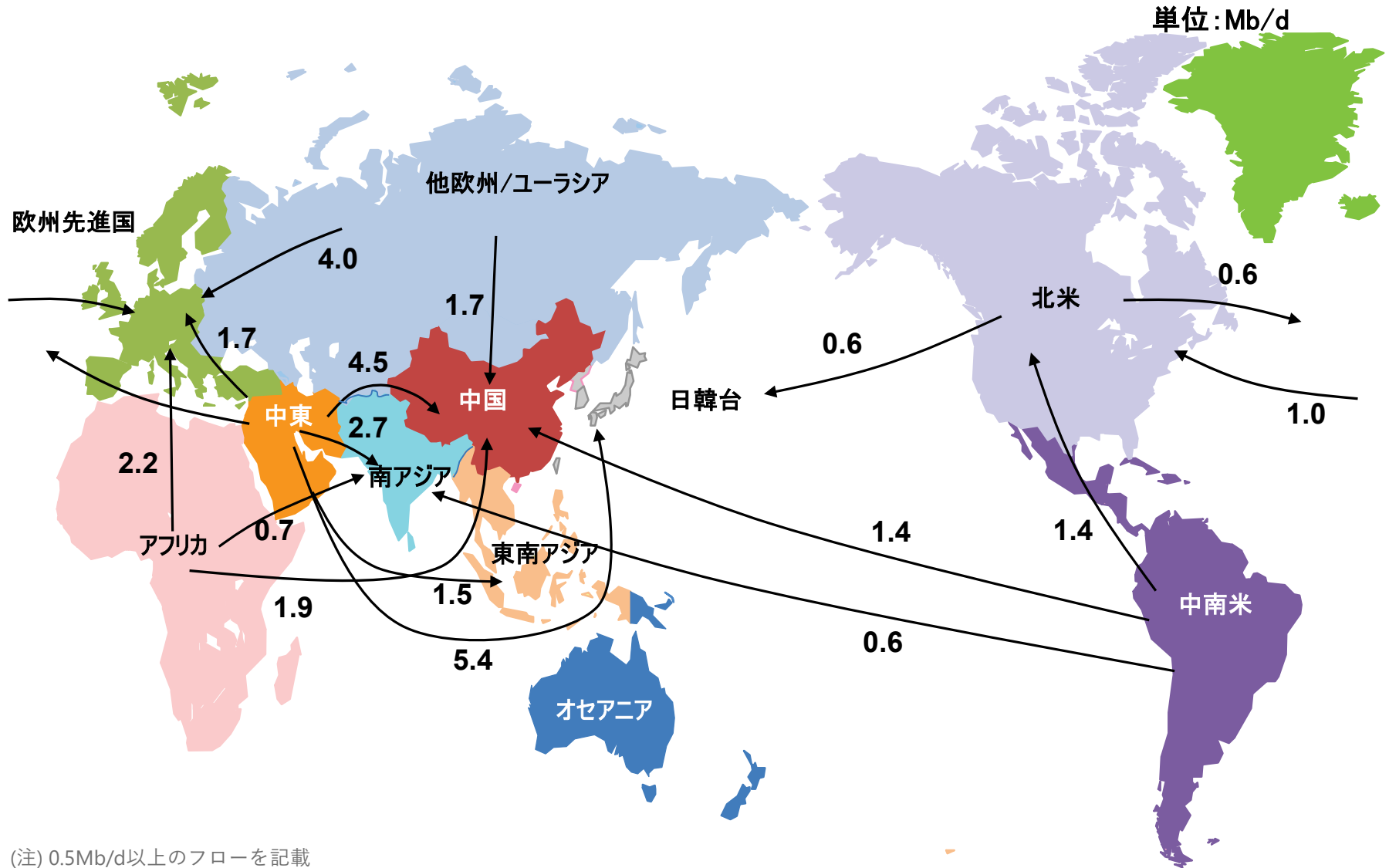
需要量



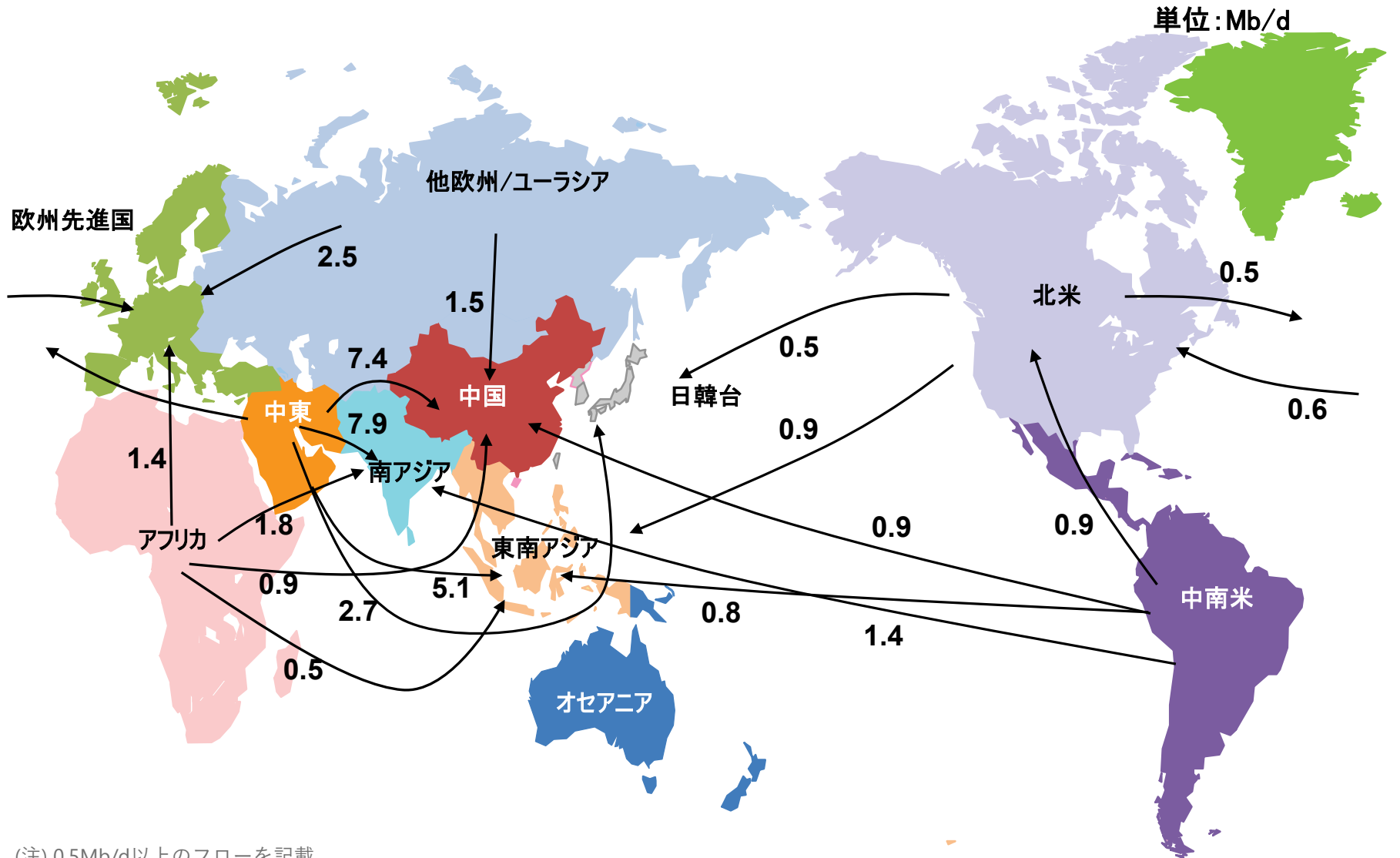
構成比



主要な原油貿易フロー(2019年)



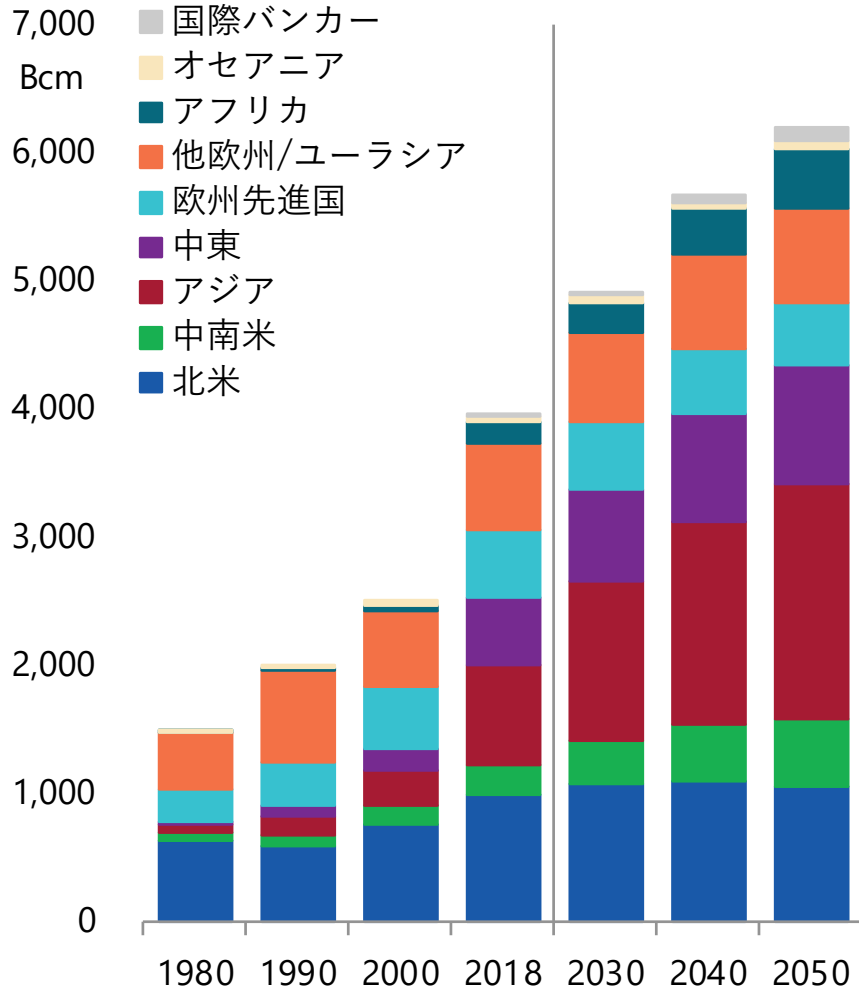
主要な原油貿易フロー(2050年)



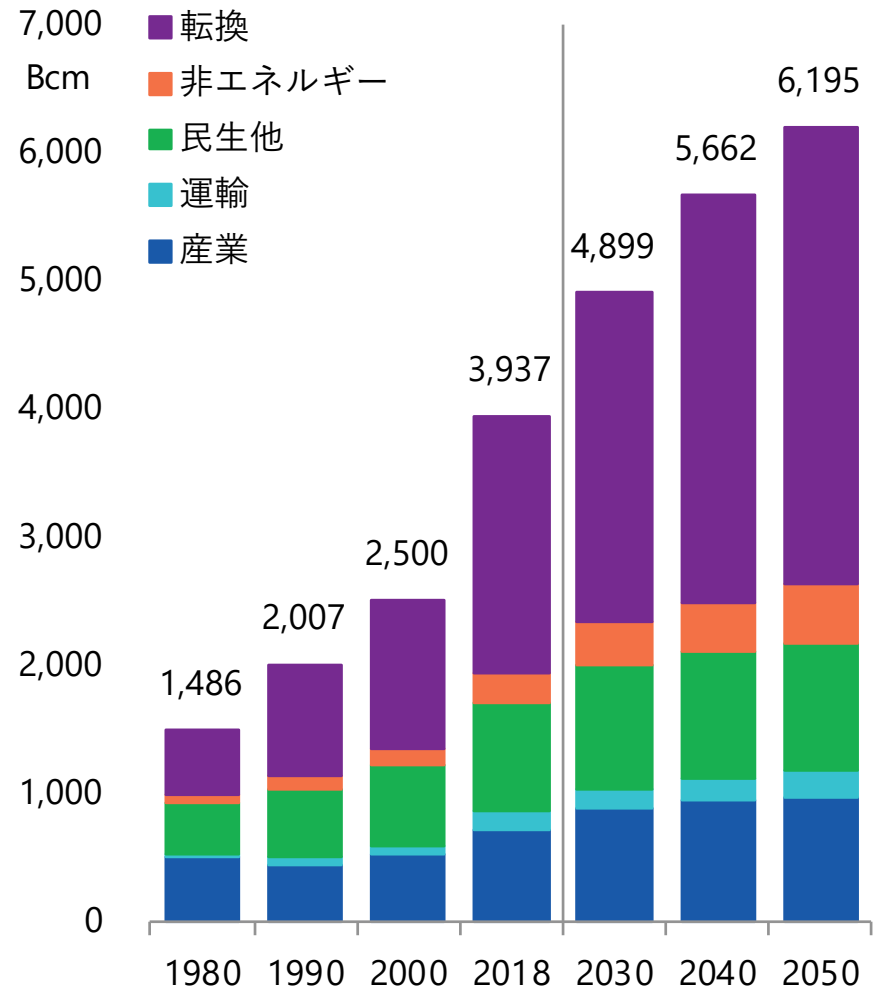
(注) 0.5Mb/d以上のフローを記載

天然ガス消費

地域別

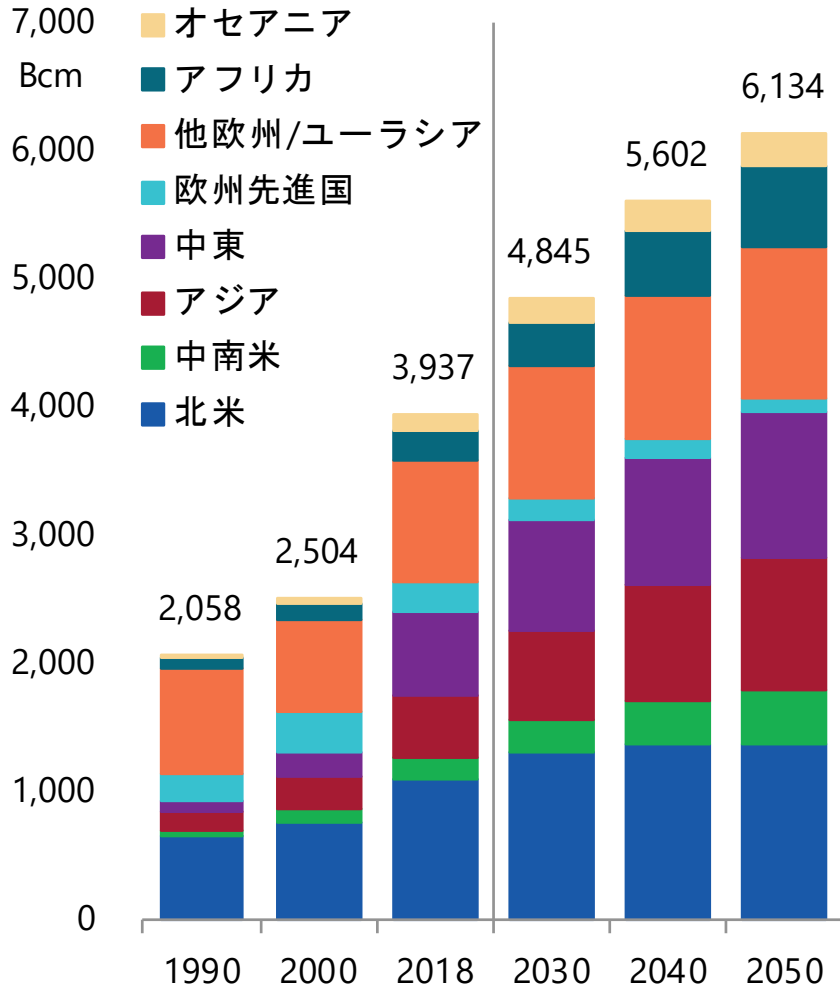


部門別

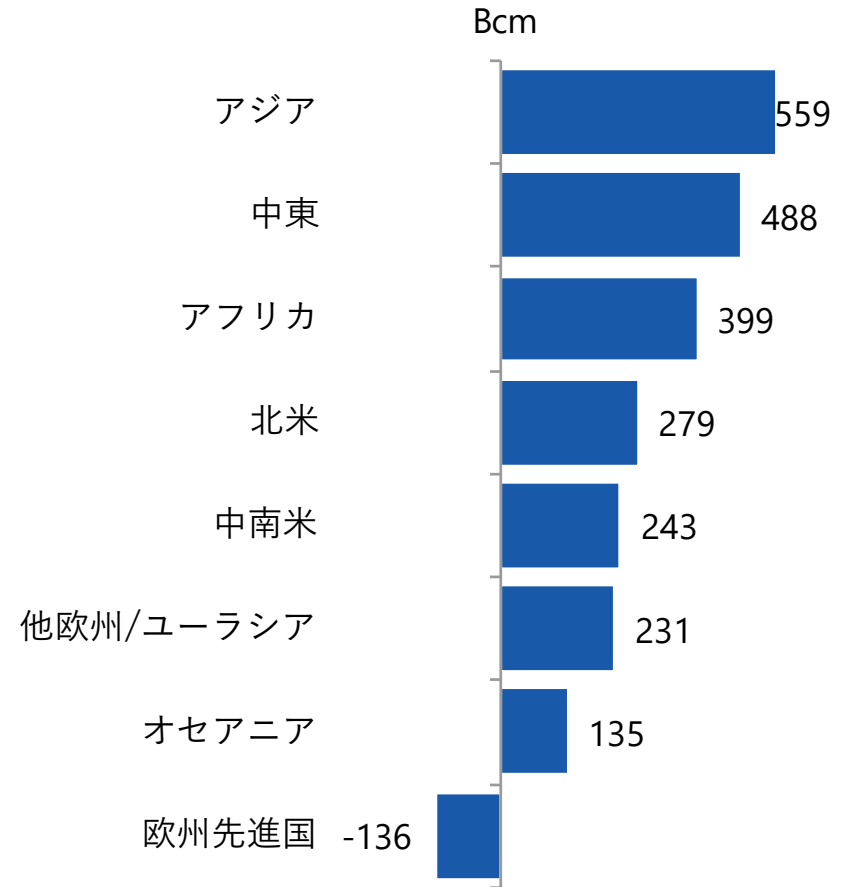


天然ガス生産

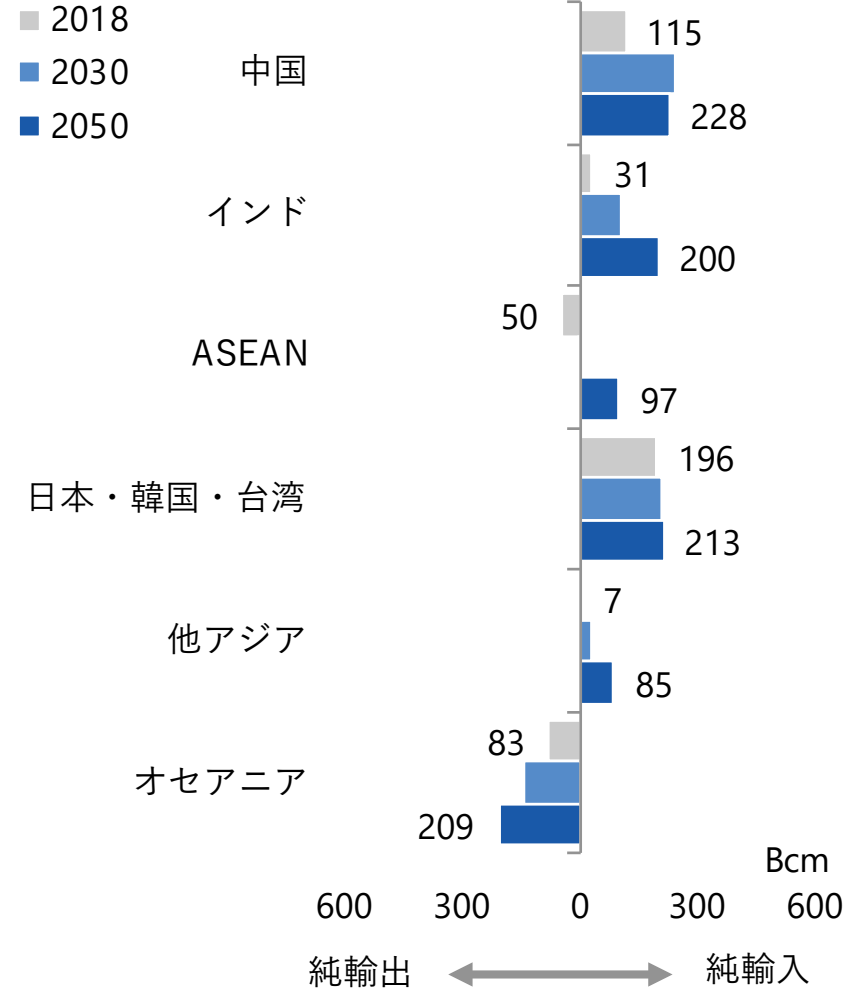
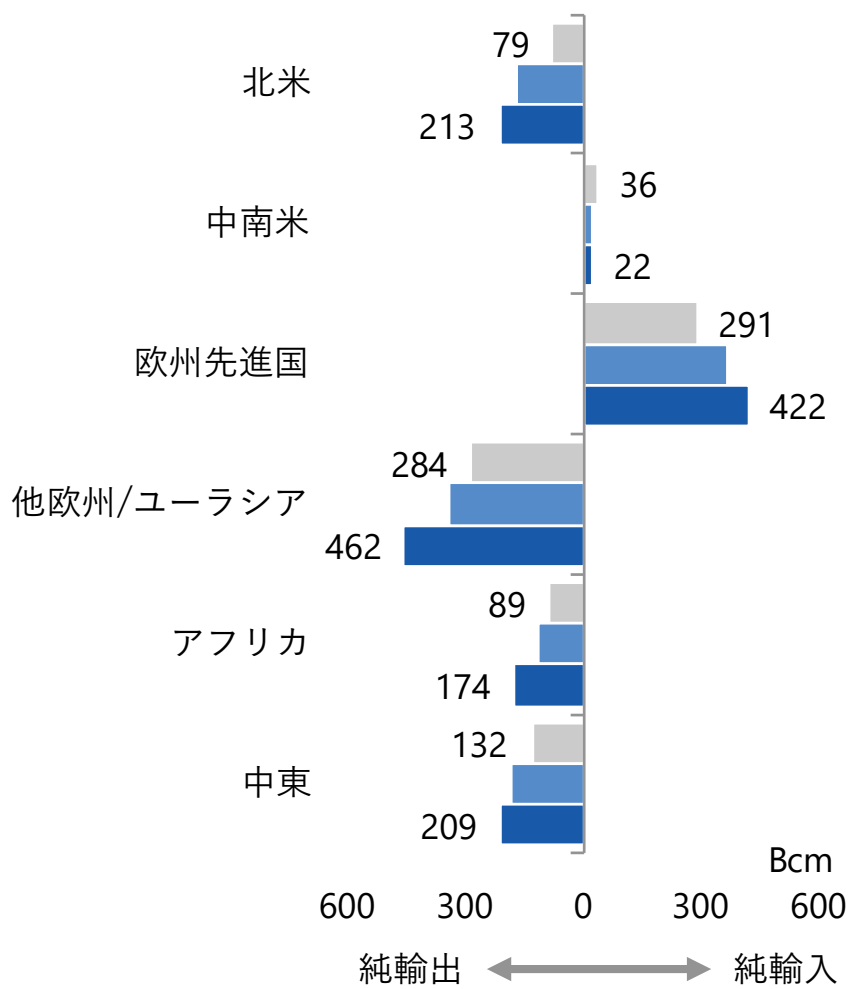
地域別



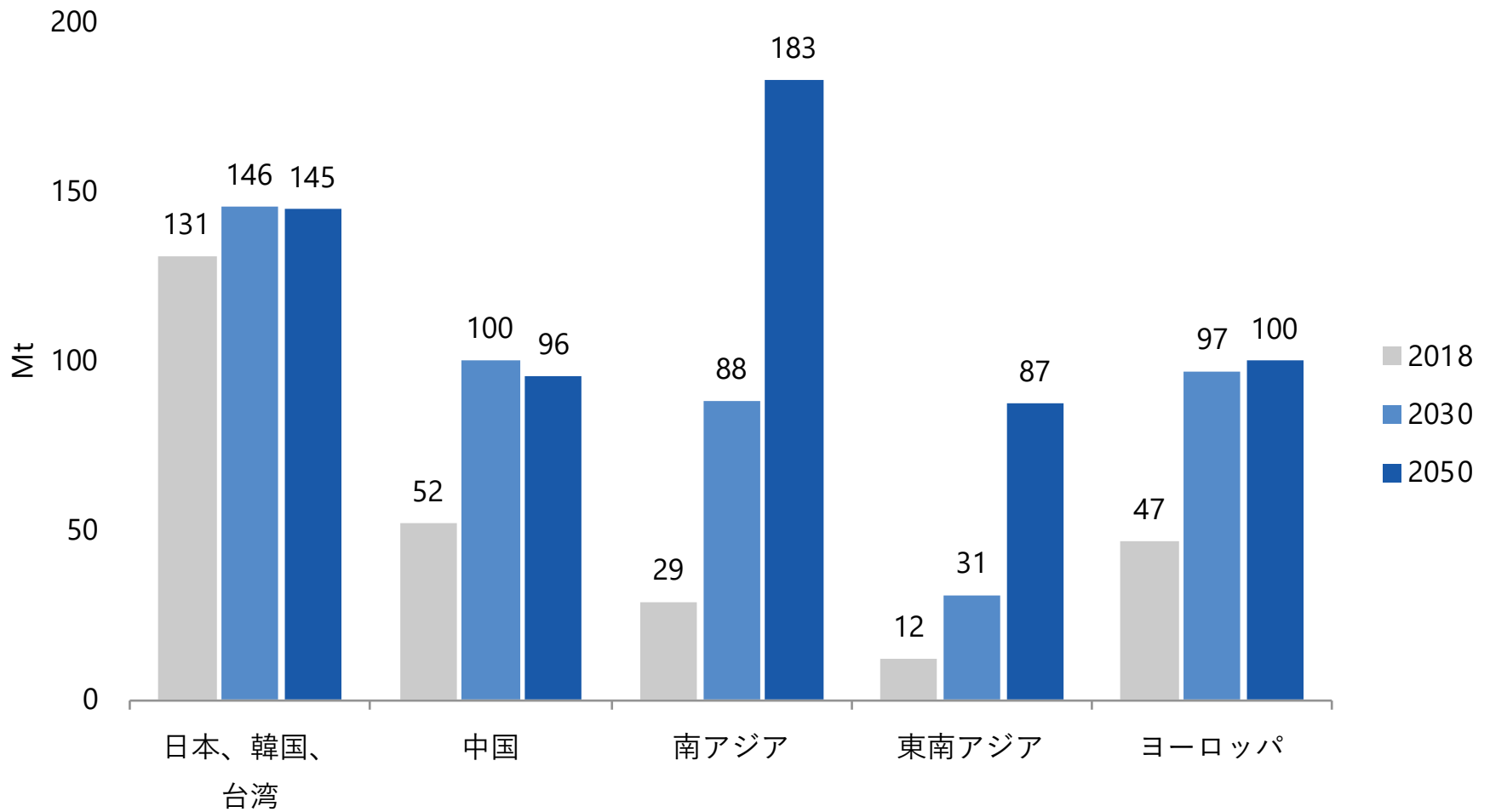
増減分(2018-2050)



天然ガス純輸出入量



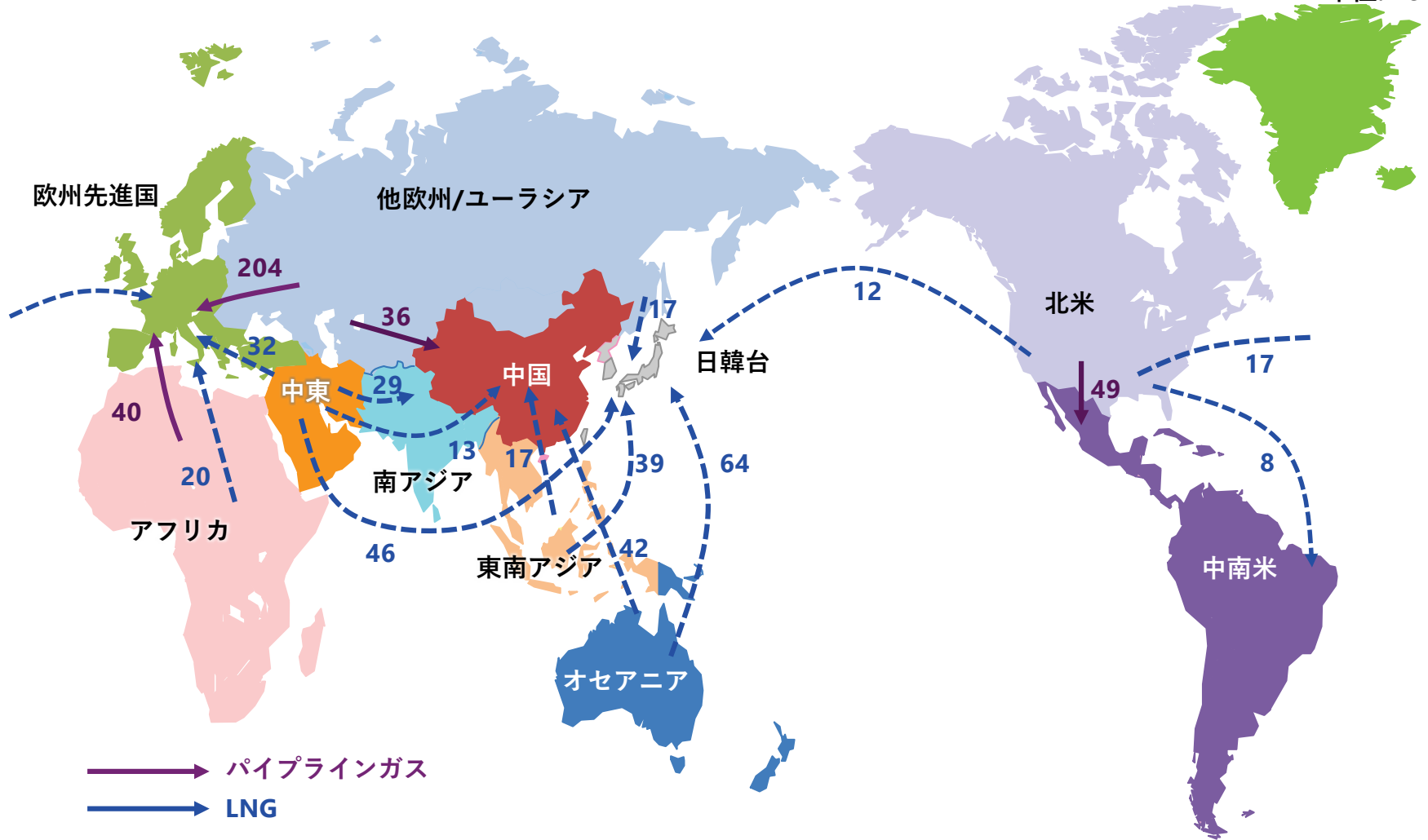
主要地域のLNG純輸入量



(注)域内貿易分を含まない

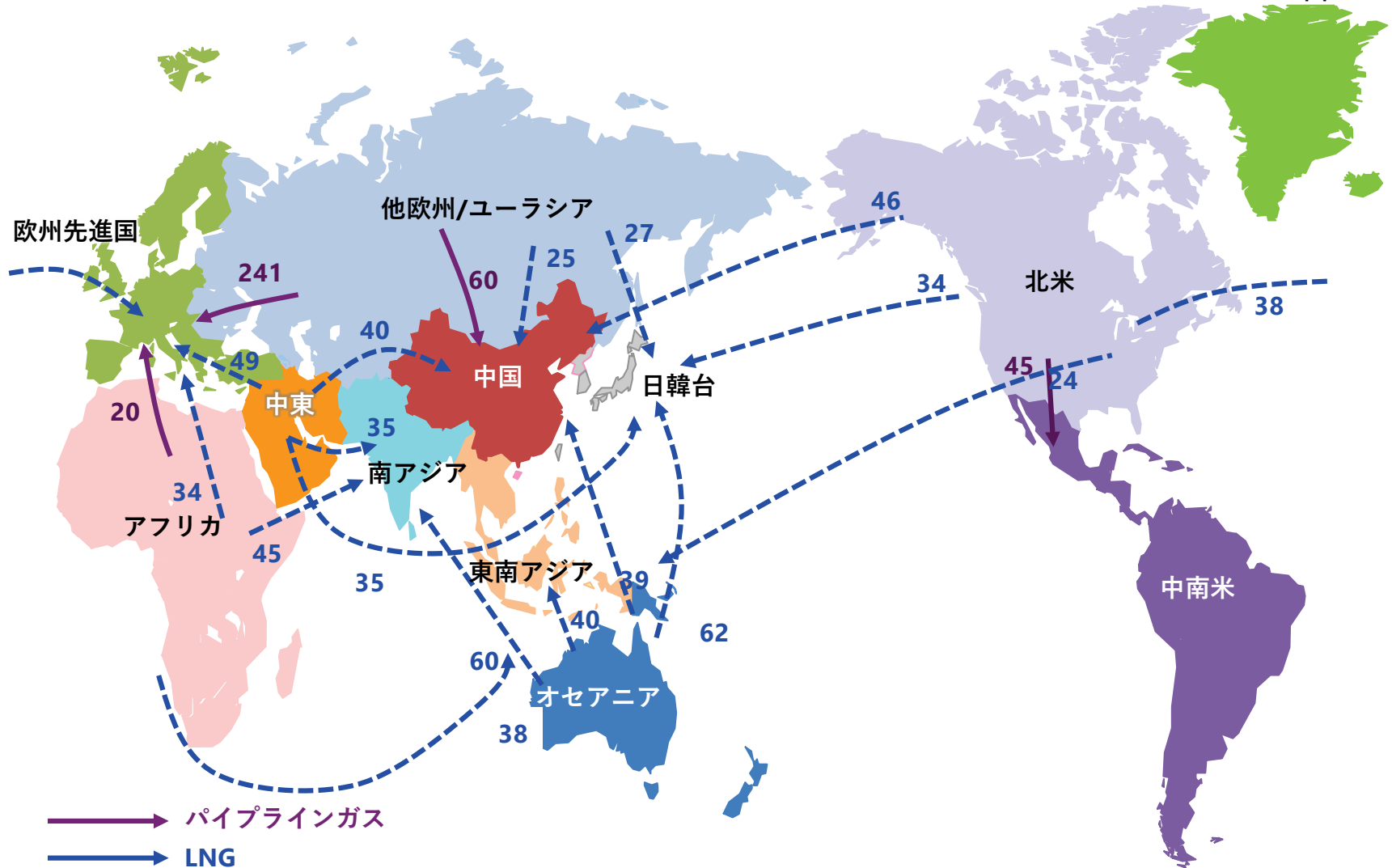
主要な天然ガス貿易フロー(2019年)

単位: Bcm



主要な天然ガス貿易フロー(2050年)

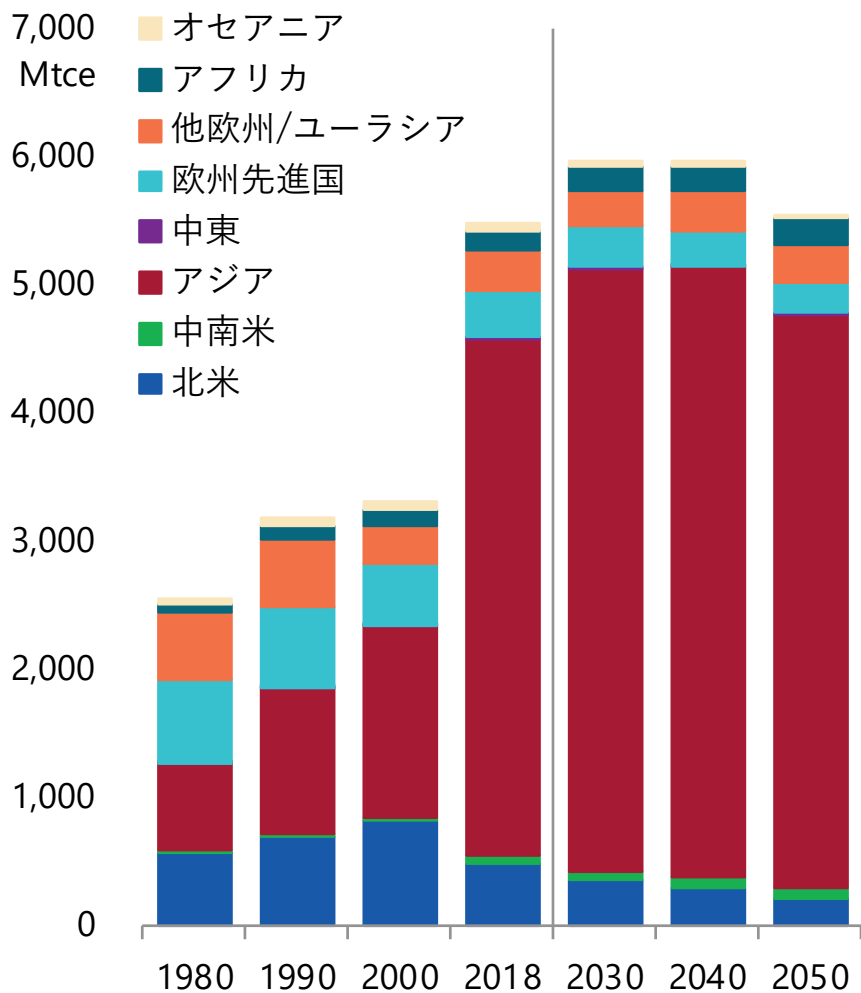
単位: Bcm



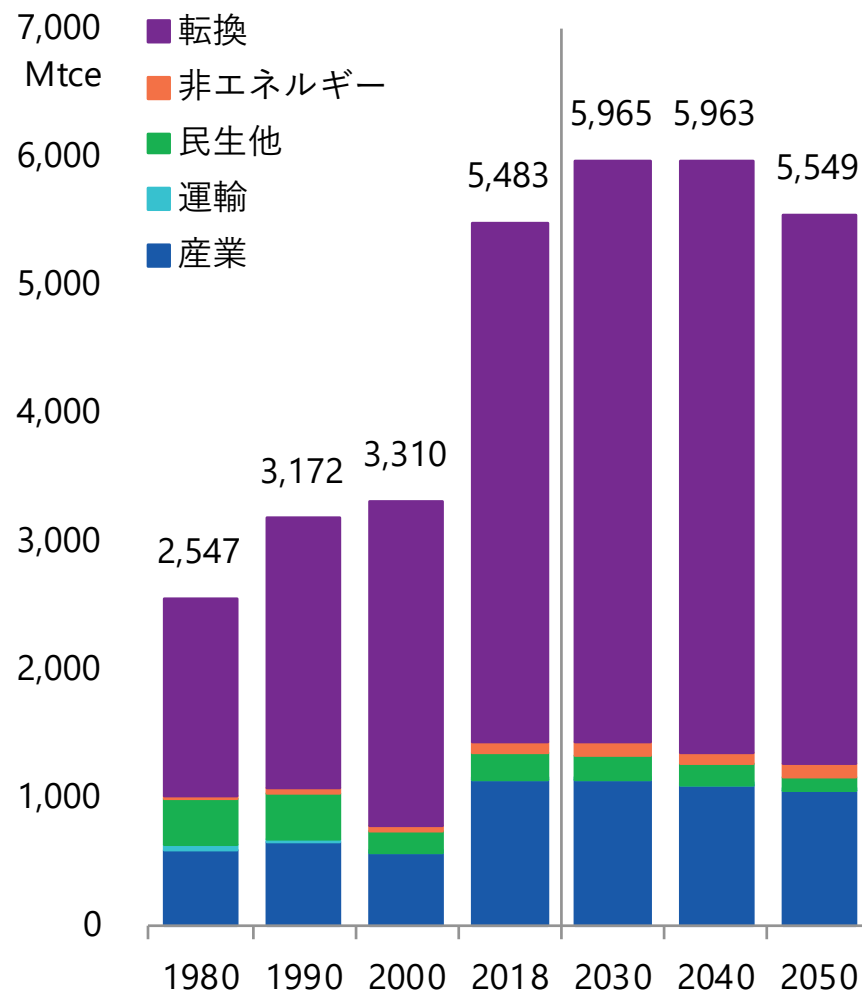
パイプラインガス
 LNG

石炭消費

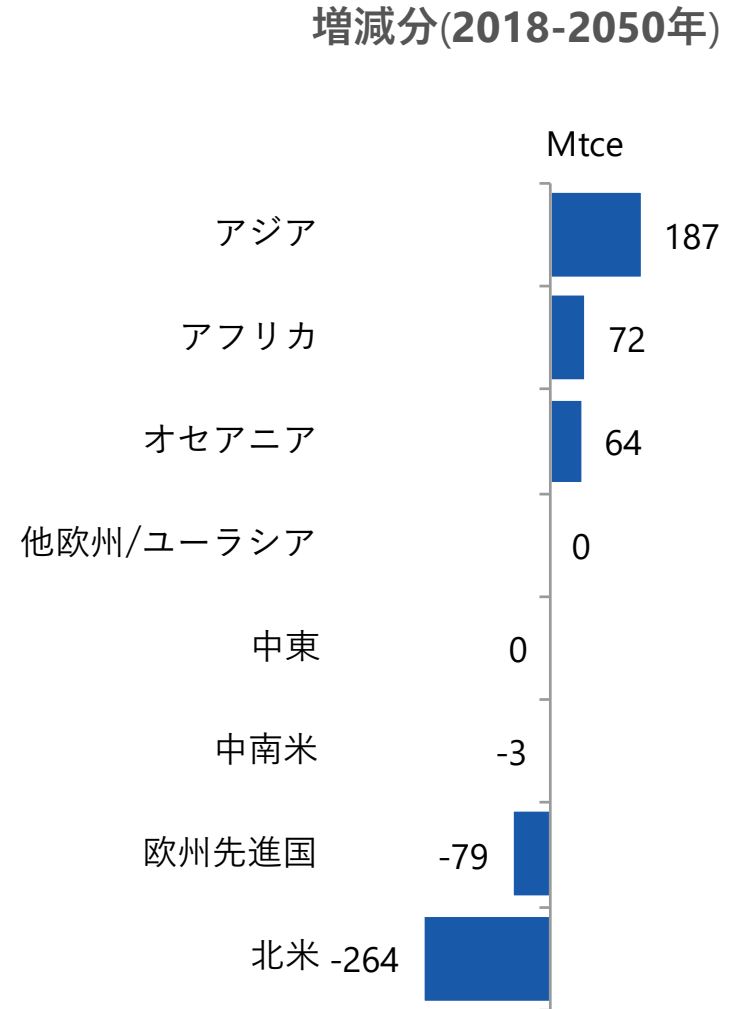
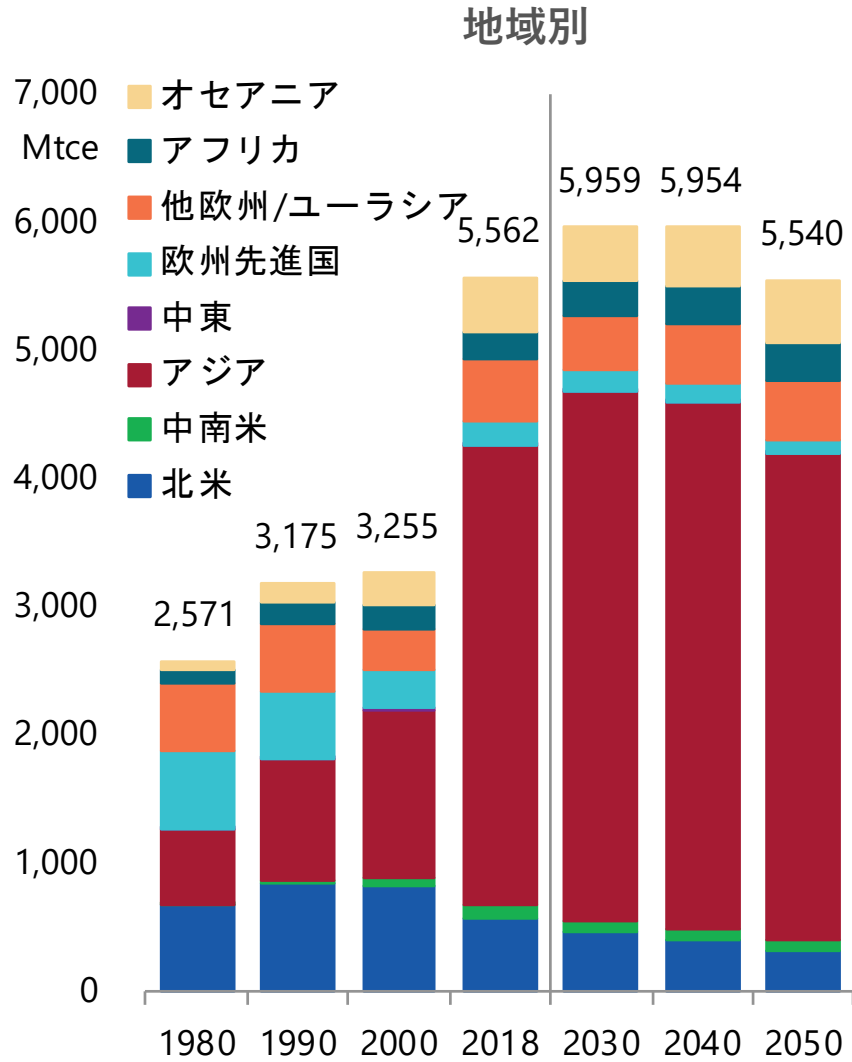
地域別



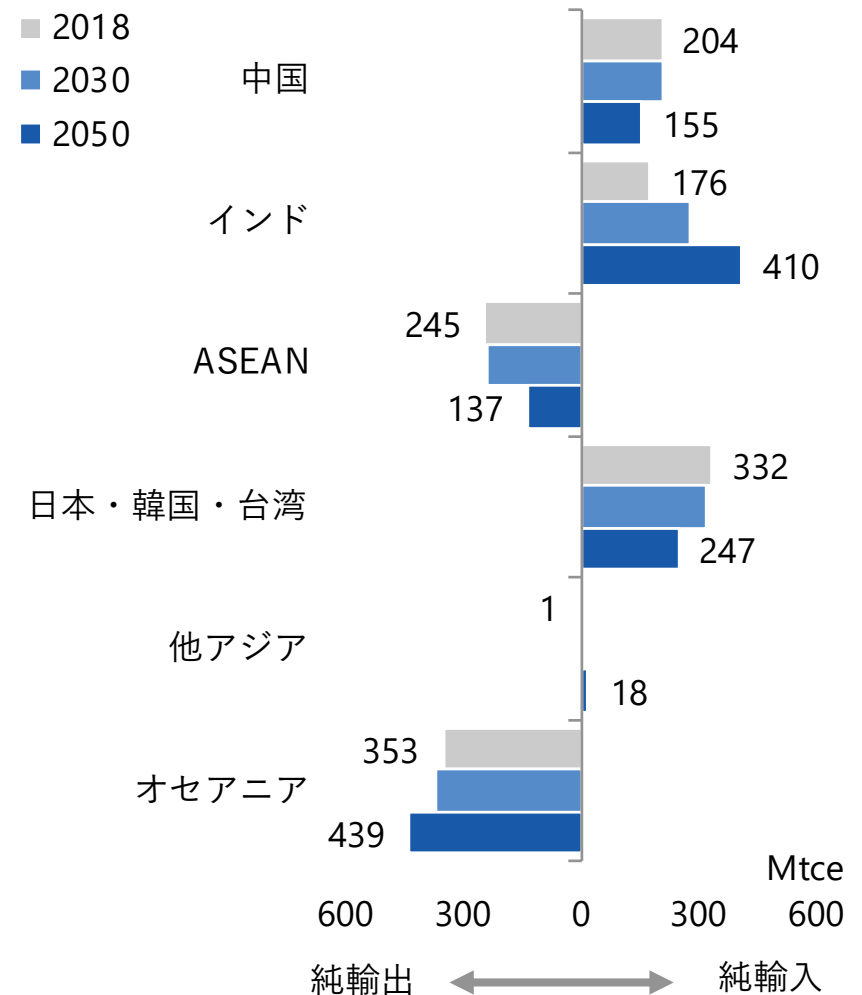
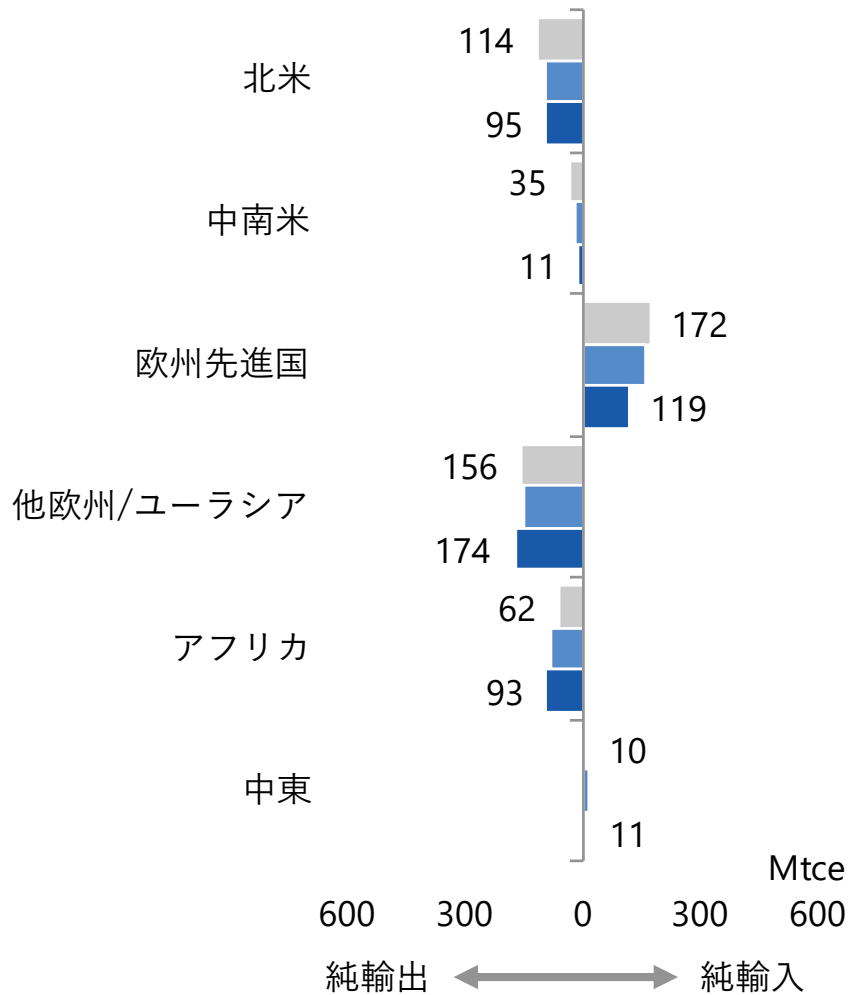
部門別



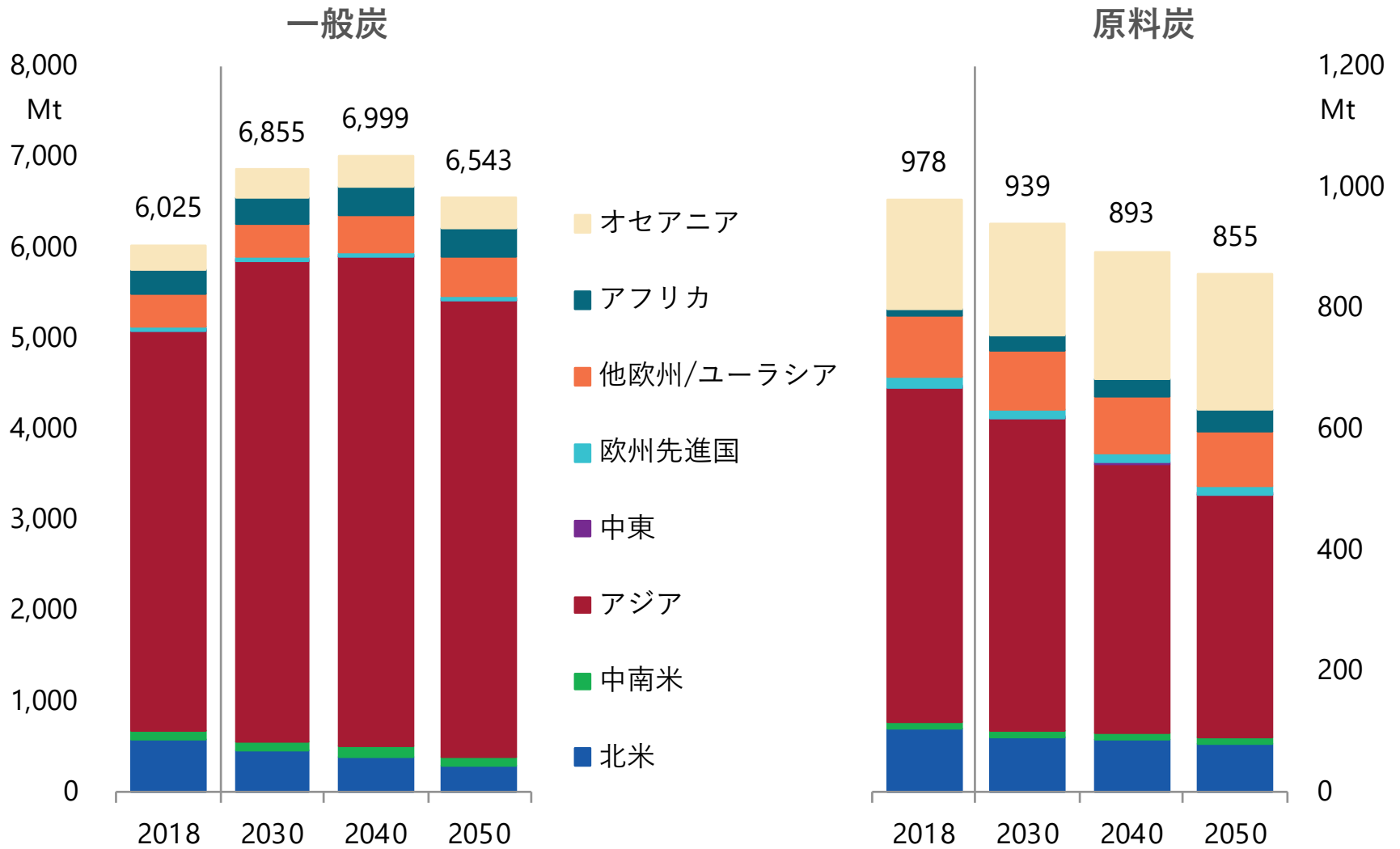
石炭生産



石炭純輸出入量

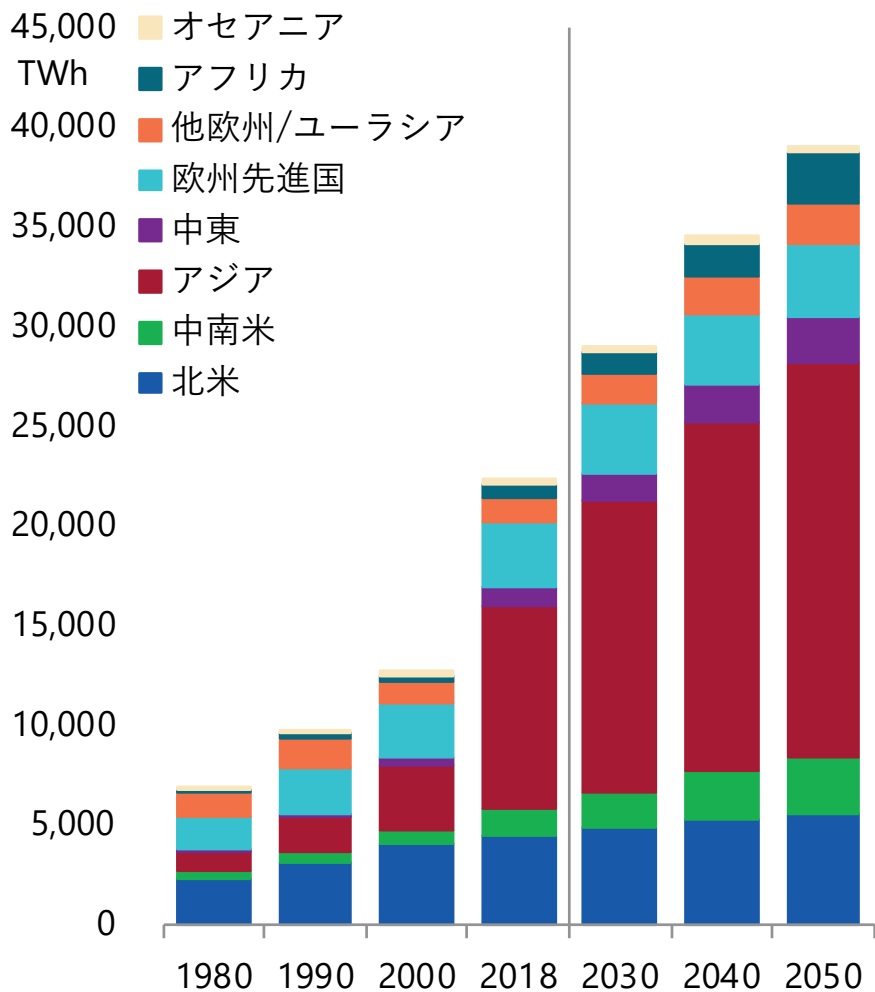


石炭生産(一般炭・原料炭)

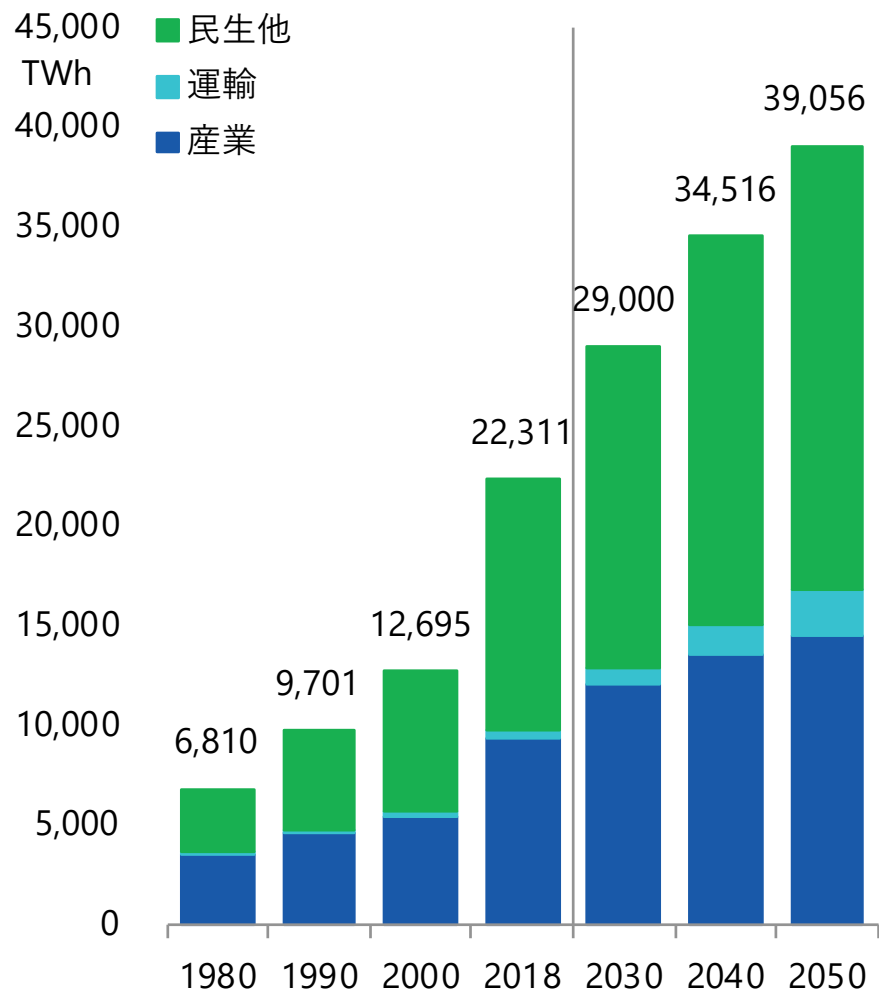


電力最終消費

地域別

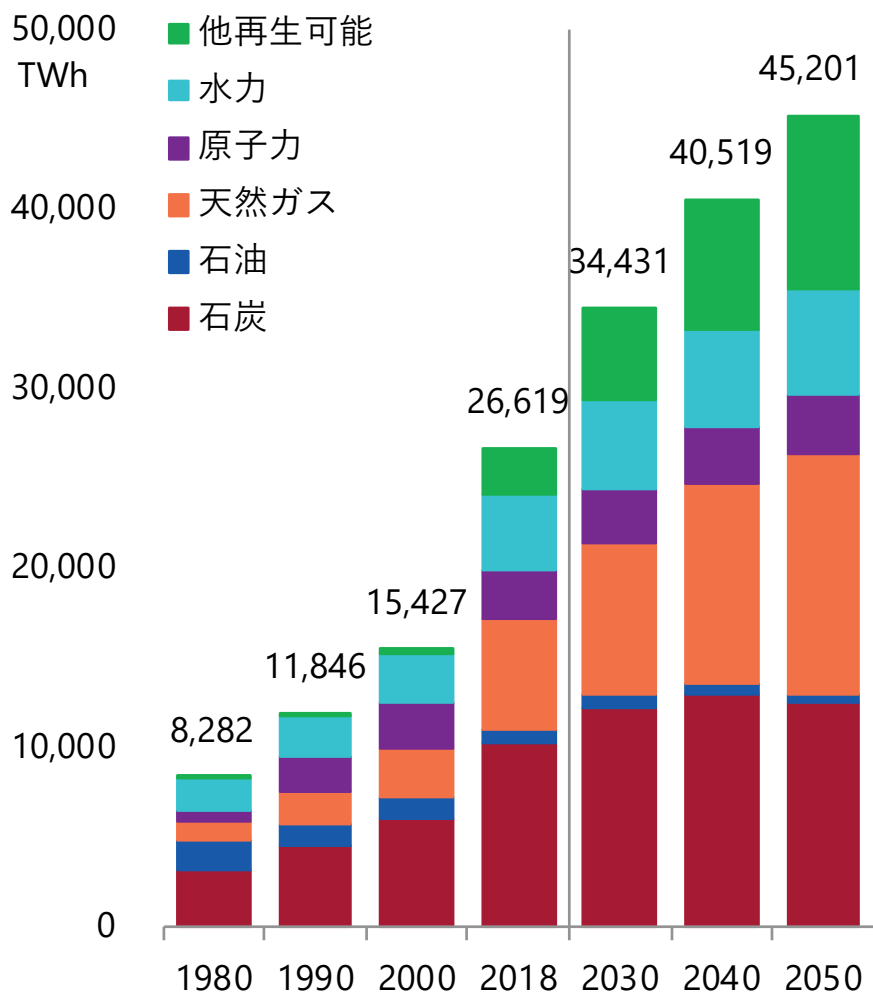


部門別

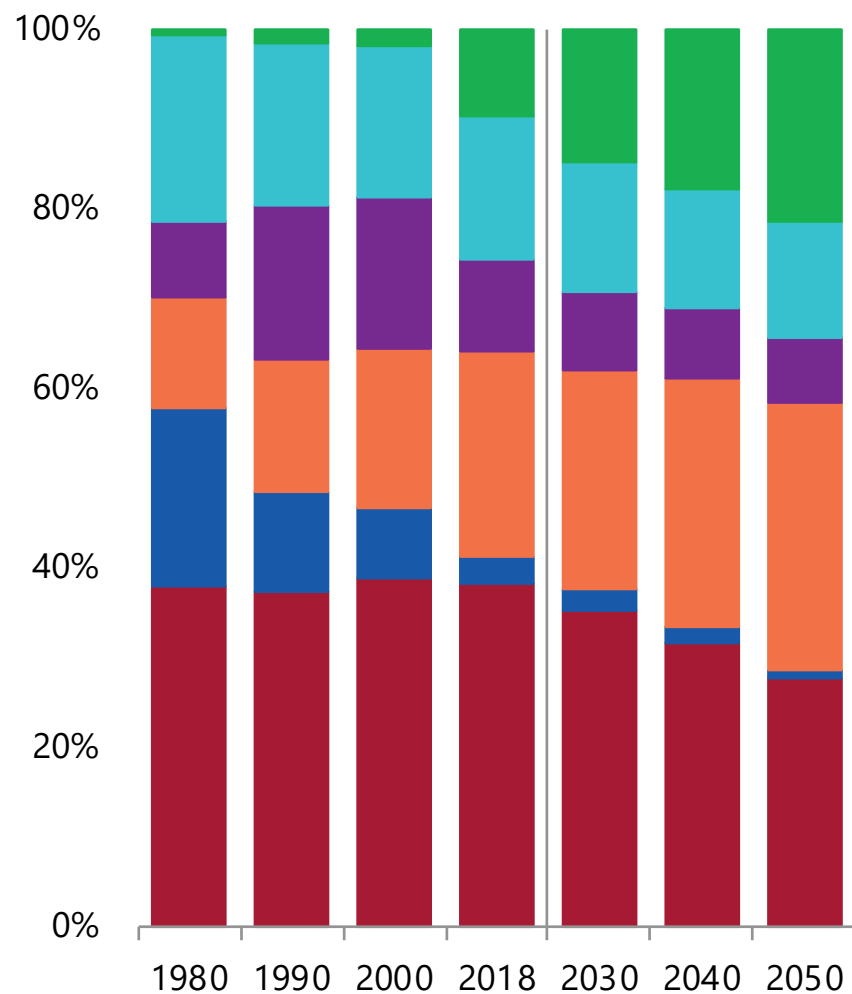


発電構成

発電量

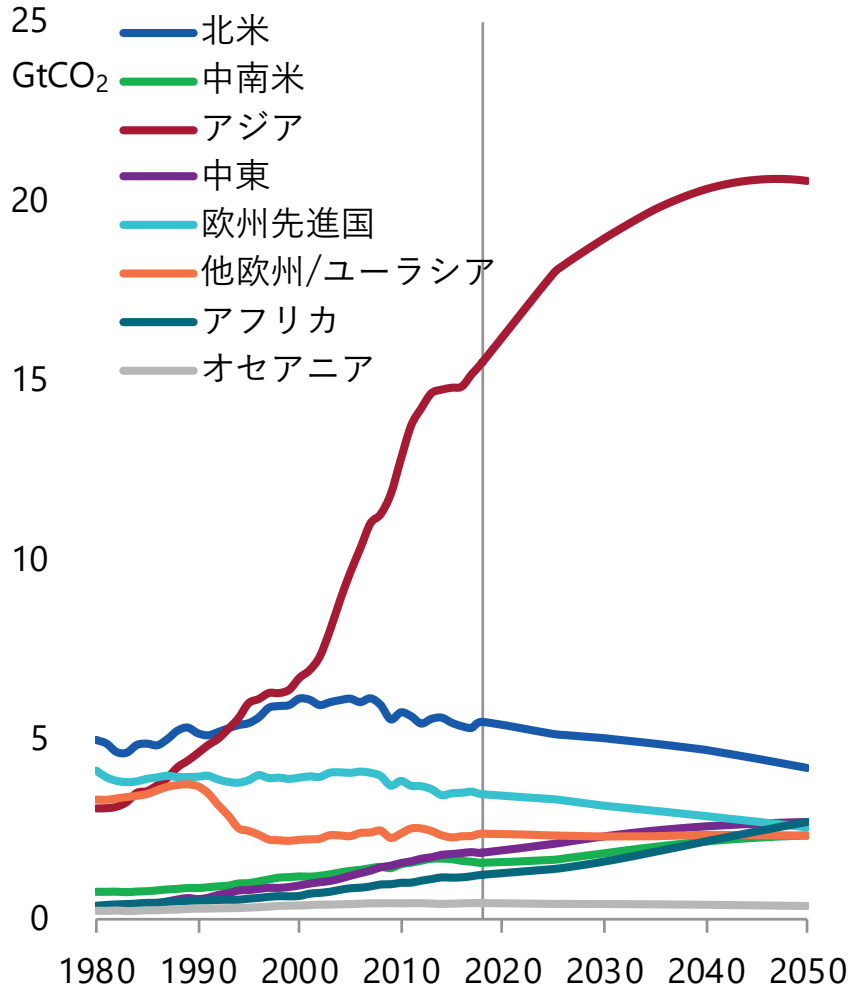


発電量シェア

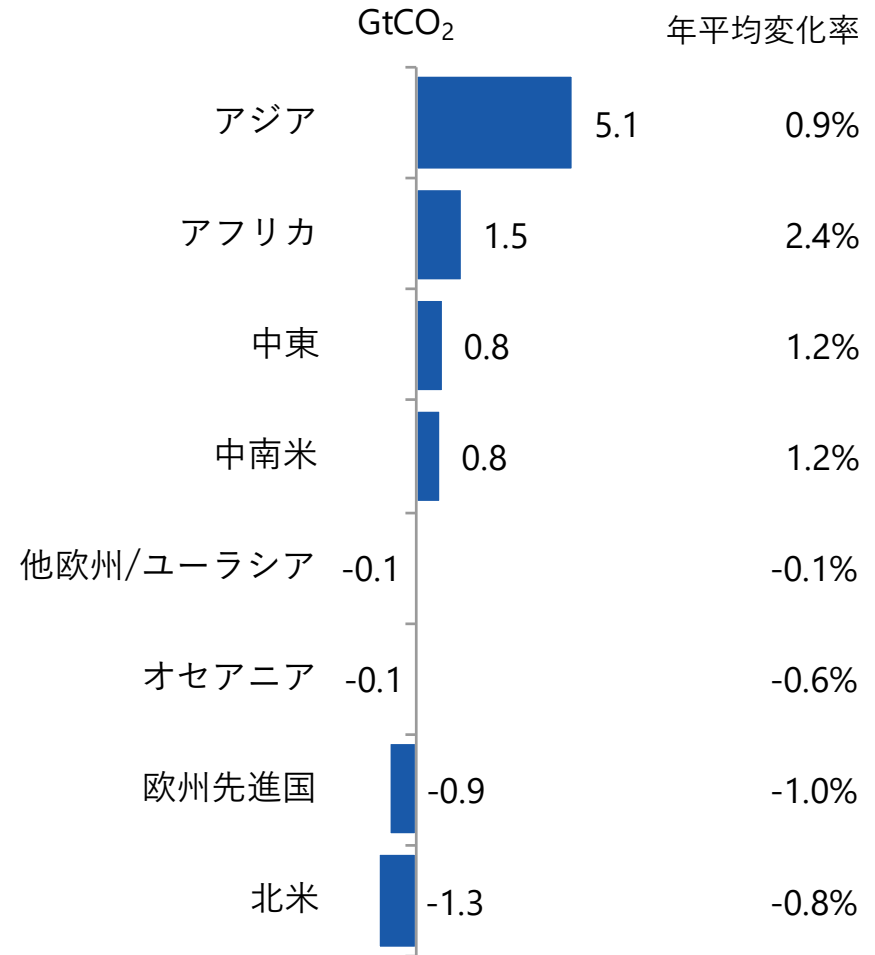


CO₂排出量

エネルギー起源CO₂排出量



増減分(2018-2050年)

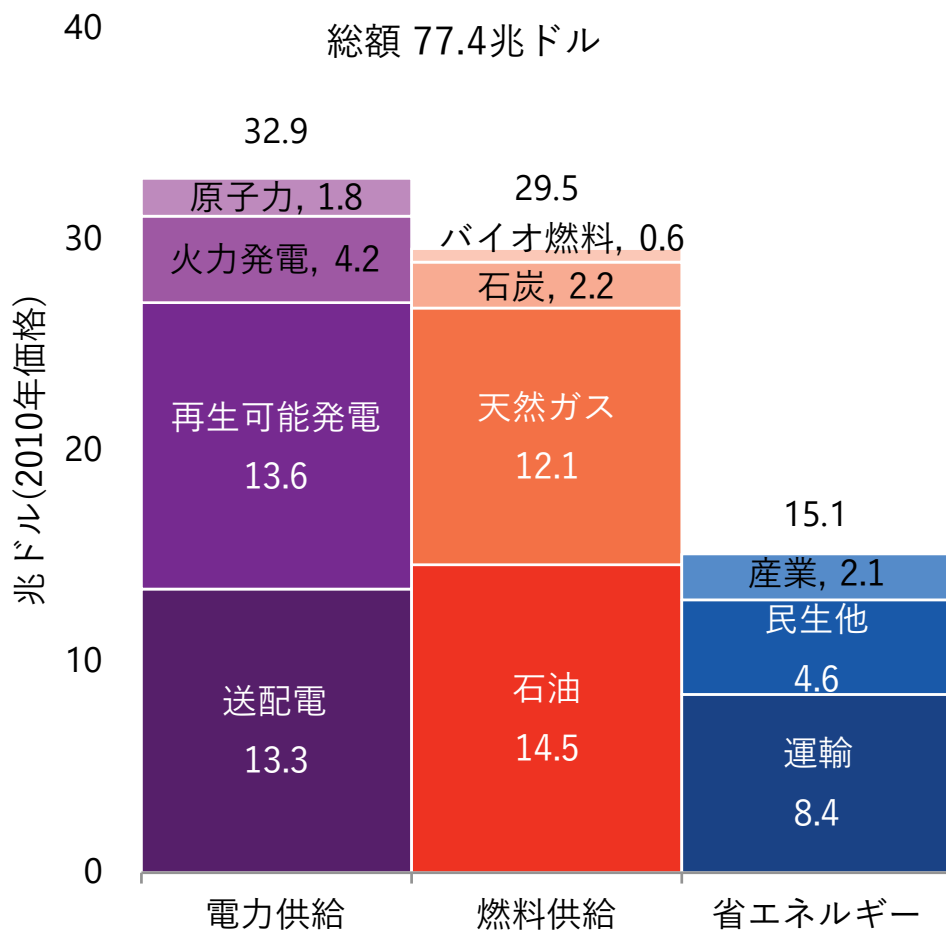


※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

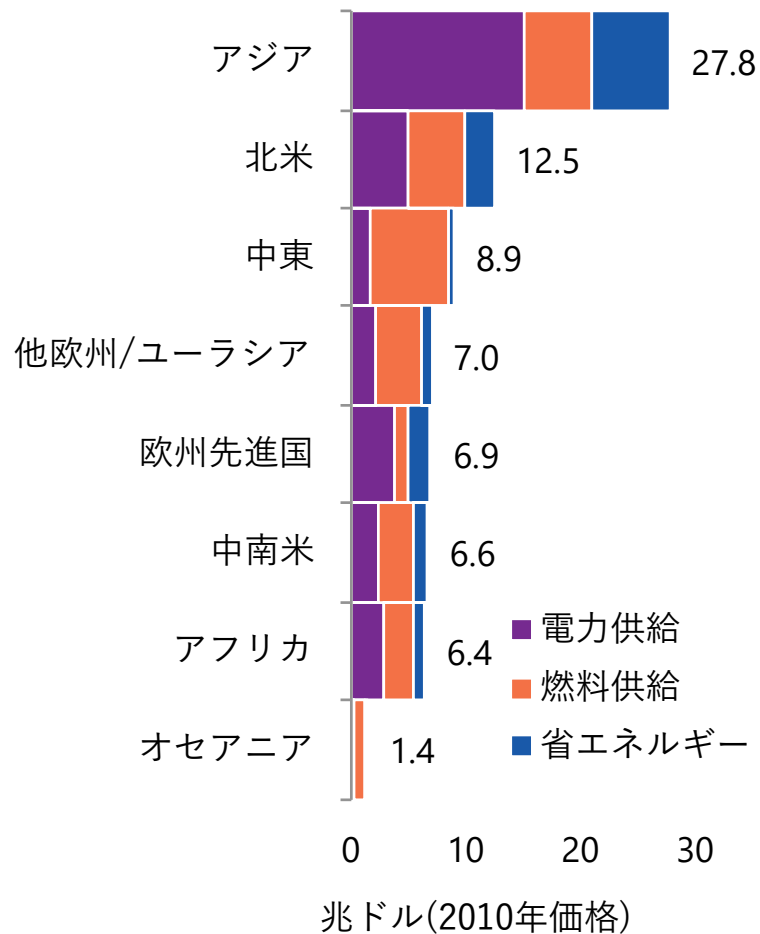
エネルギー関連投資額

(2019年～2050年 累積投資額)

部門別

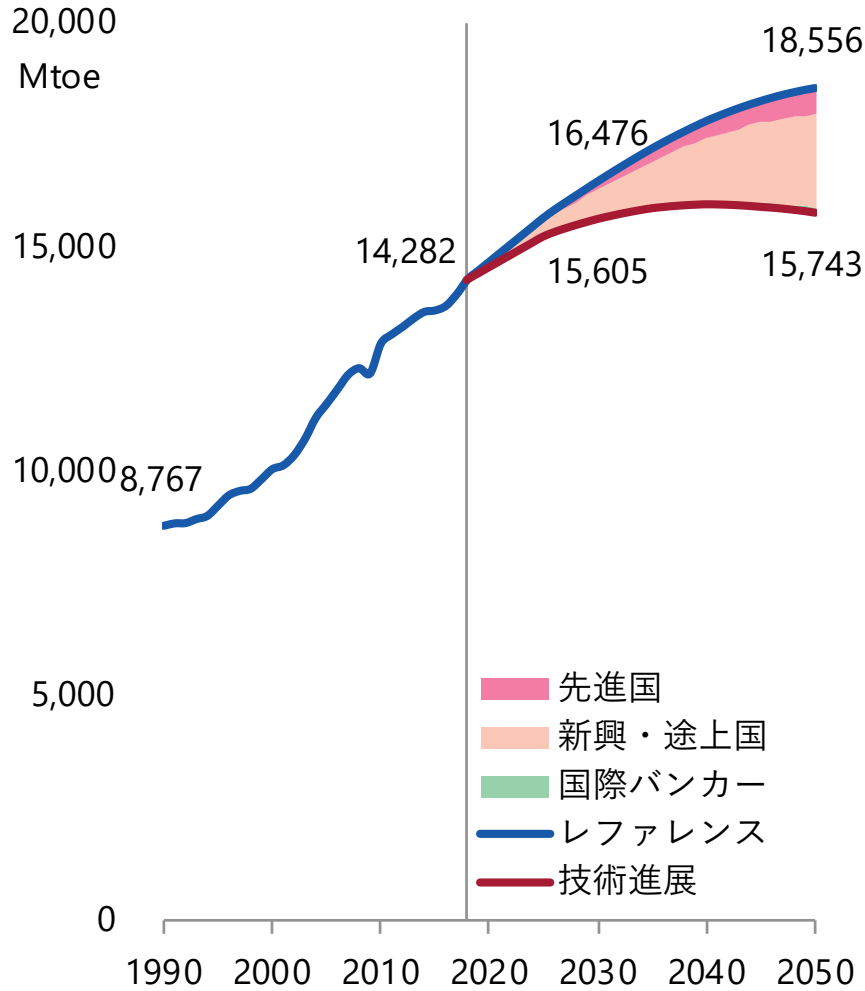


地域別

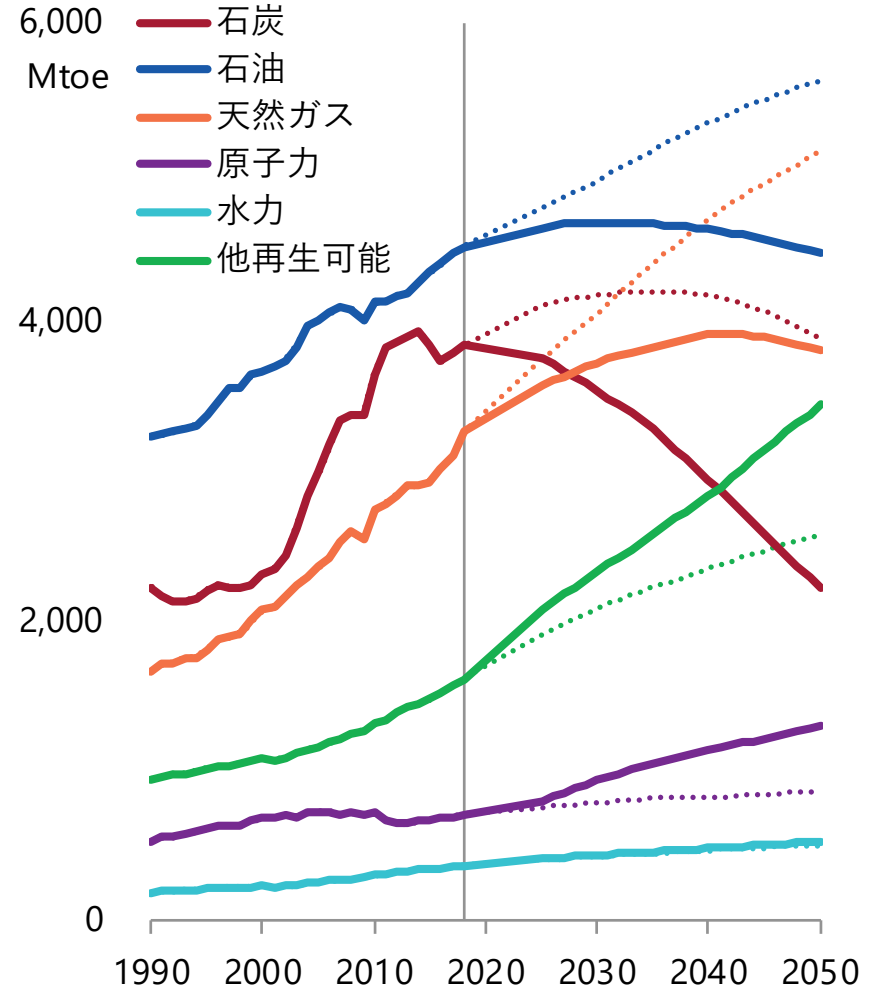


一次エネルギー消費

国・地域別



エネルギー源別

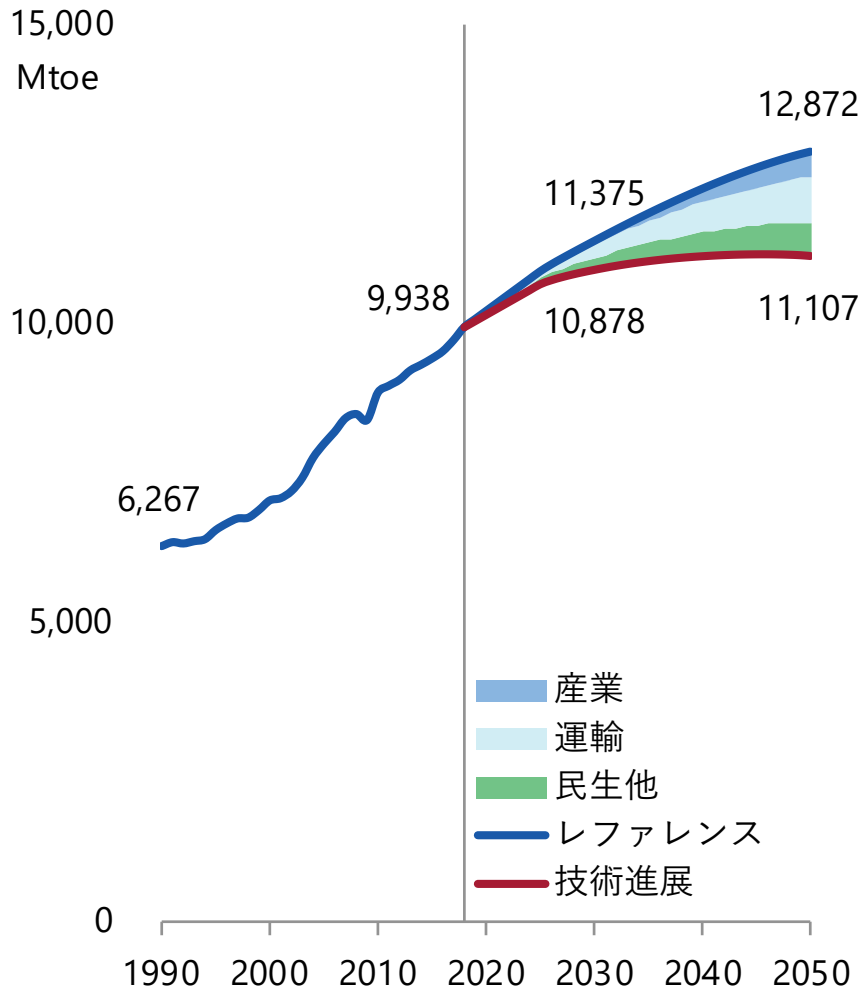


(注)実線：技術進展、破線：レファレンス

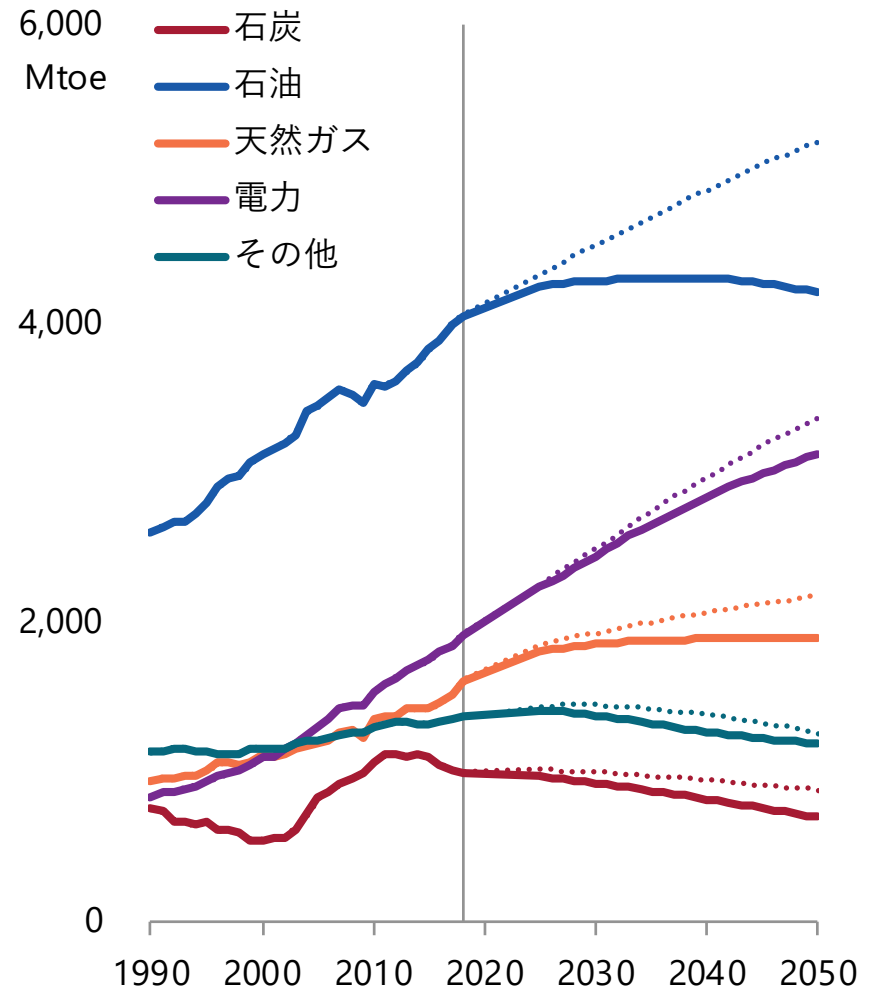
※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

最終エネルギー消費

部門別



エネルギー源別

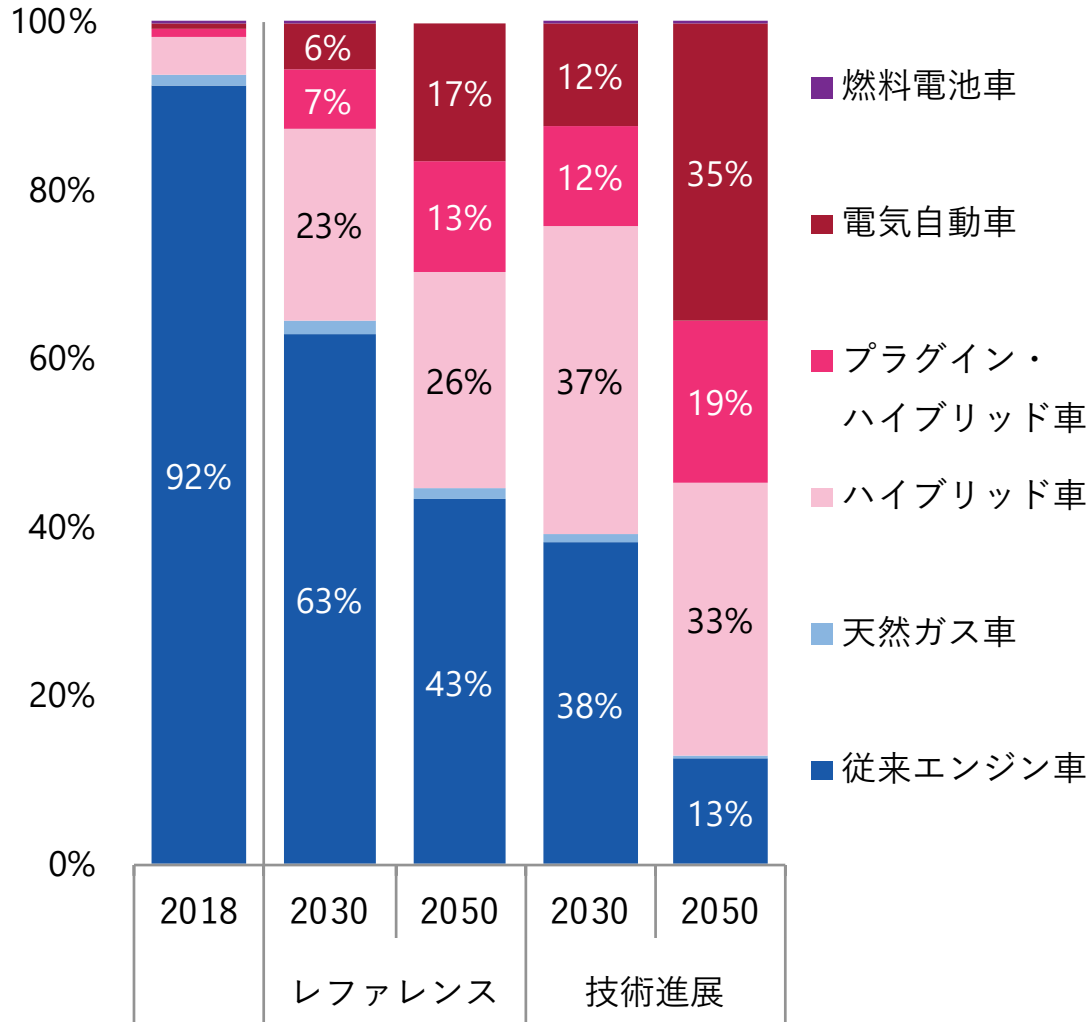


(注)実線：技術進展、破線：レファレンス

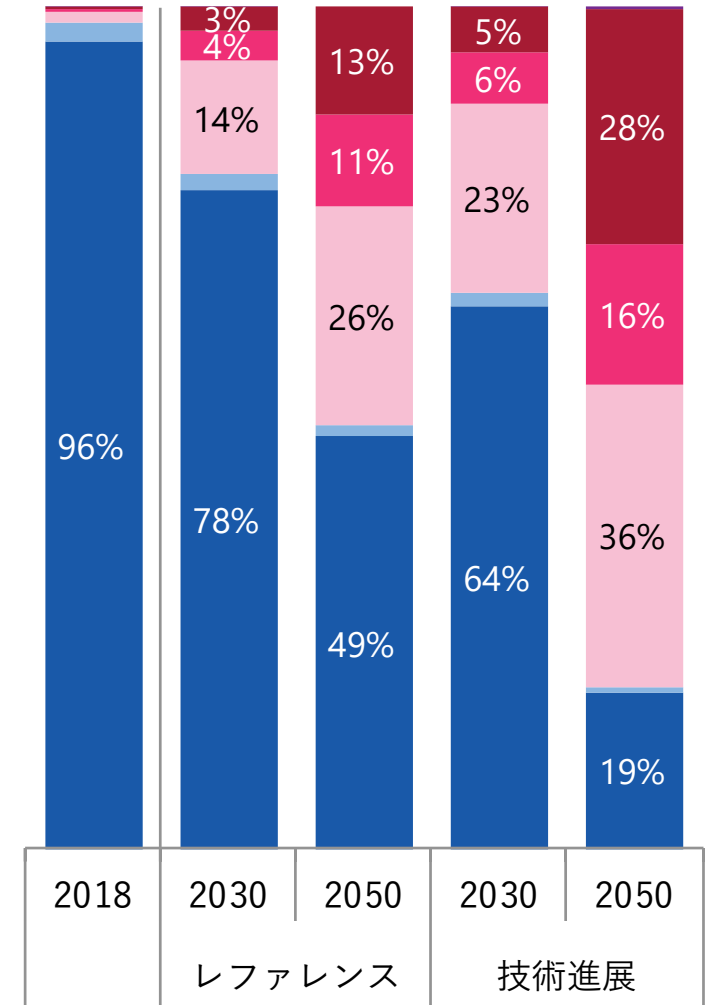
※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

自動車駆動タイプ構成(乗用車)

新車販売台数構成

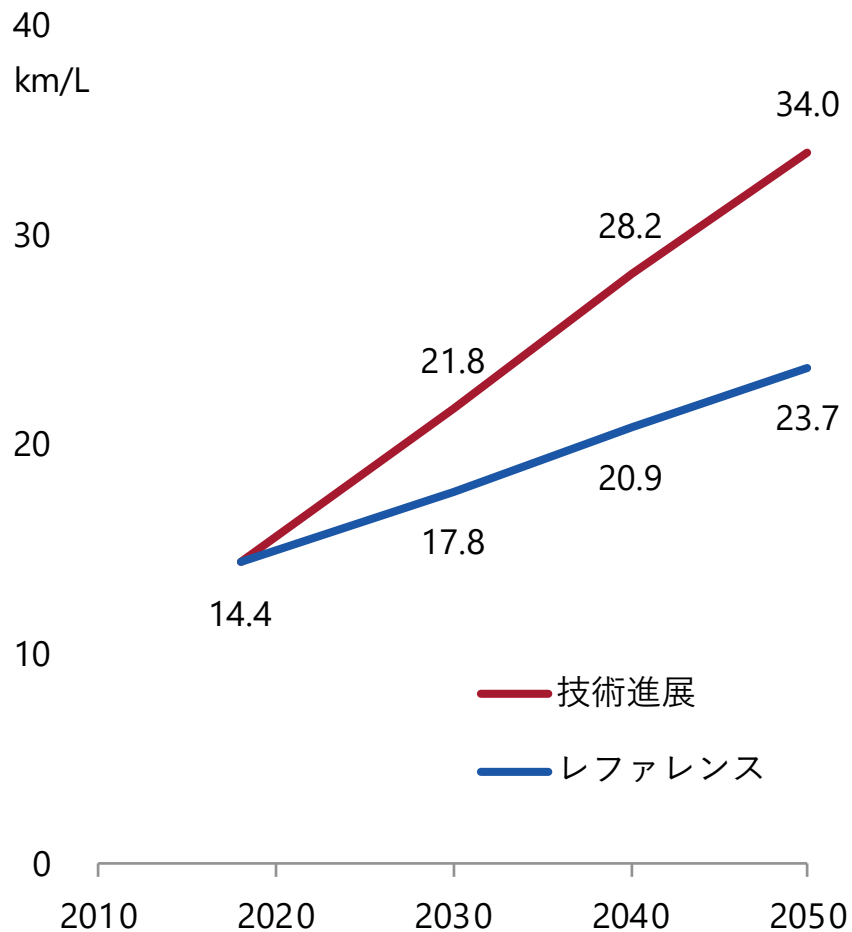


保有台数構成

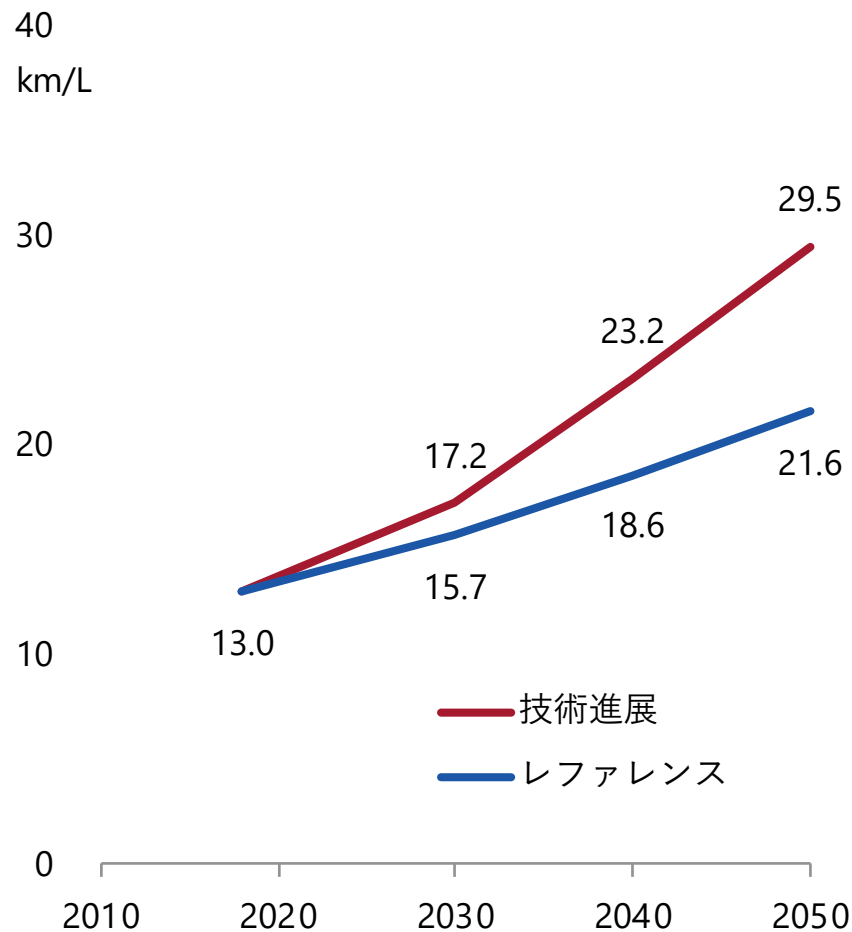


自動車燃費(乗用車)

新車燃費



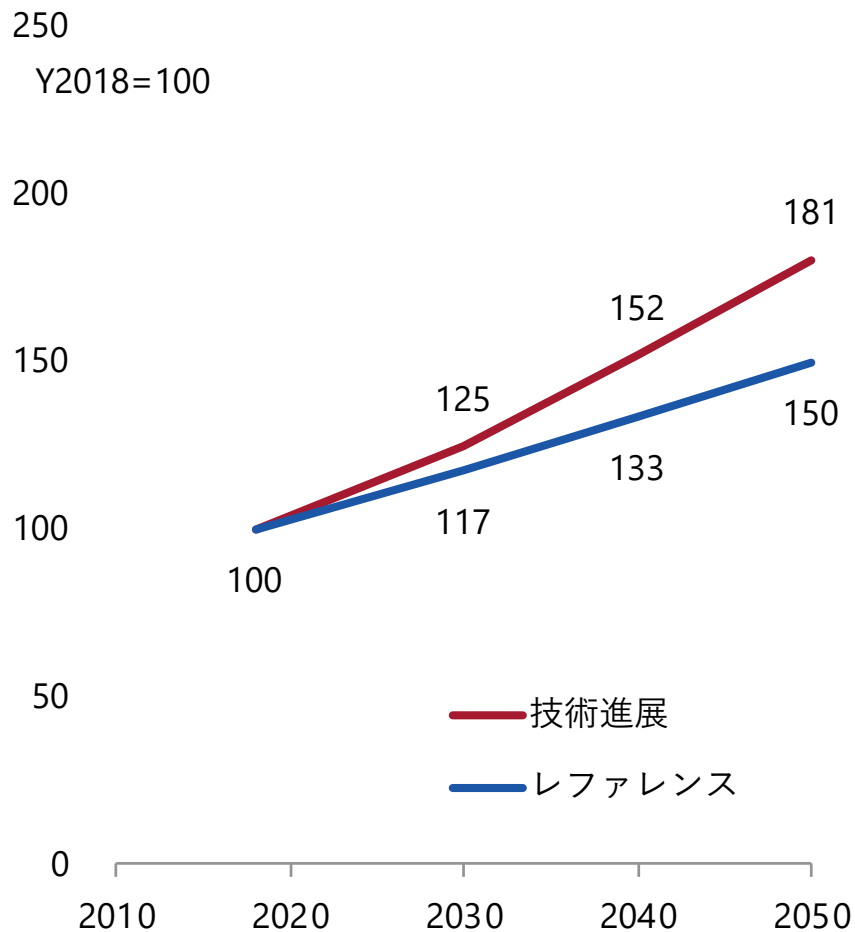
保有燃費



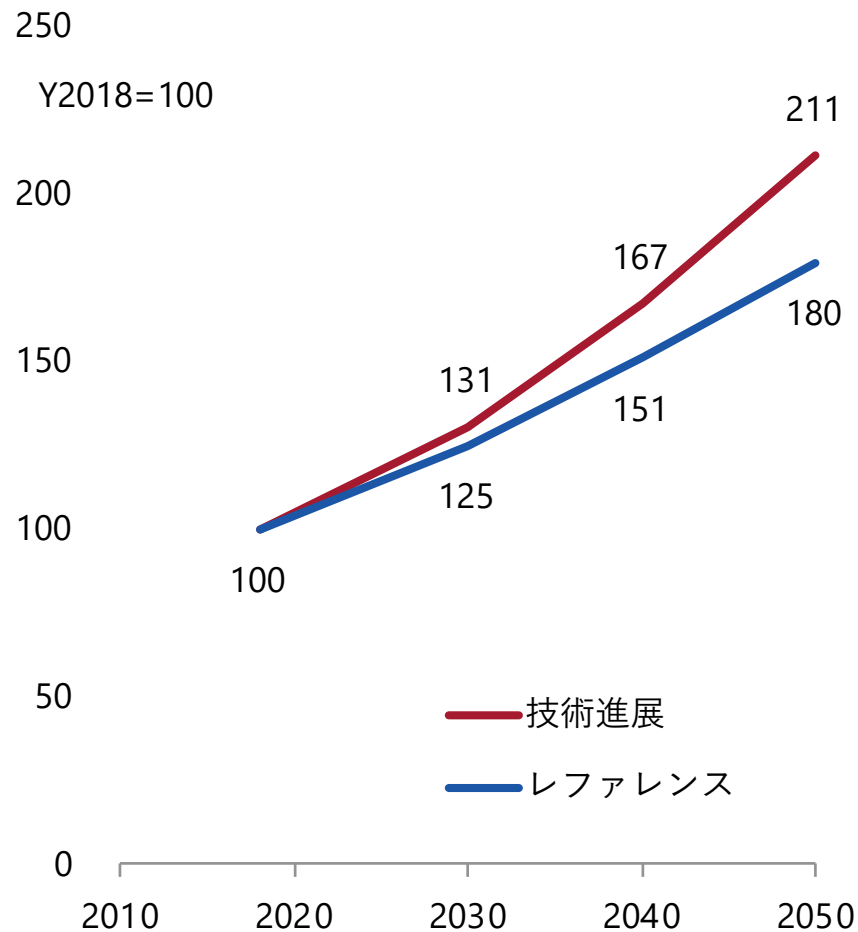
(注) km/L: ガソリン換算1 Lあたり走行距離

民生部門総合効率

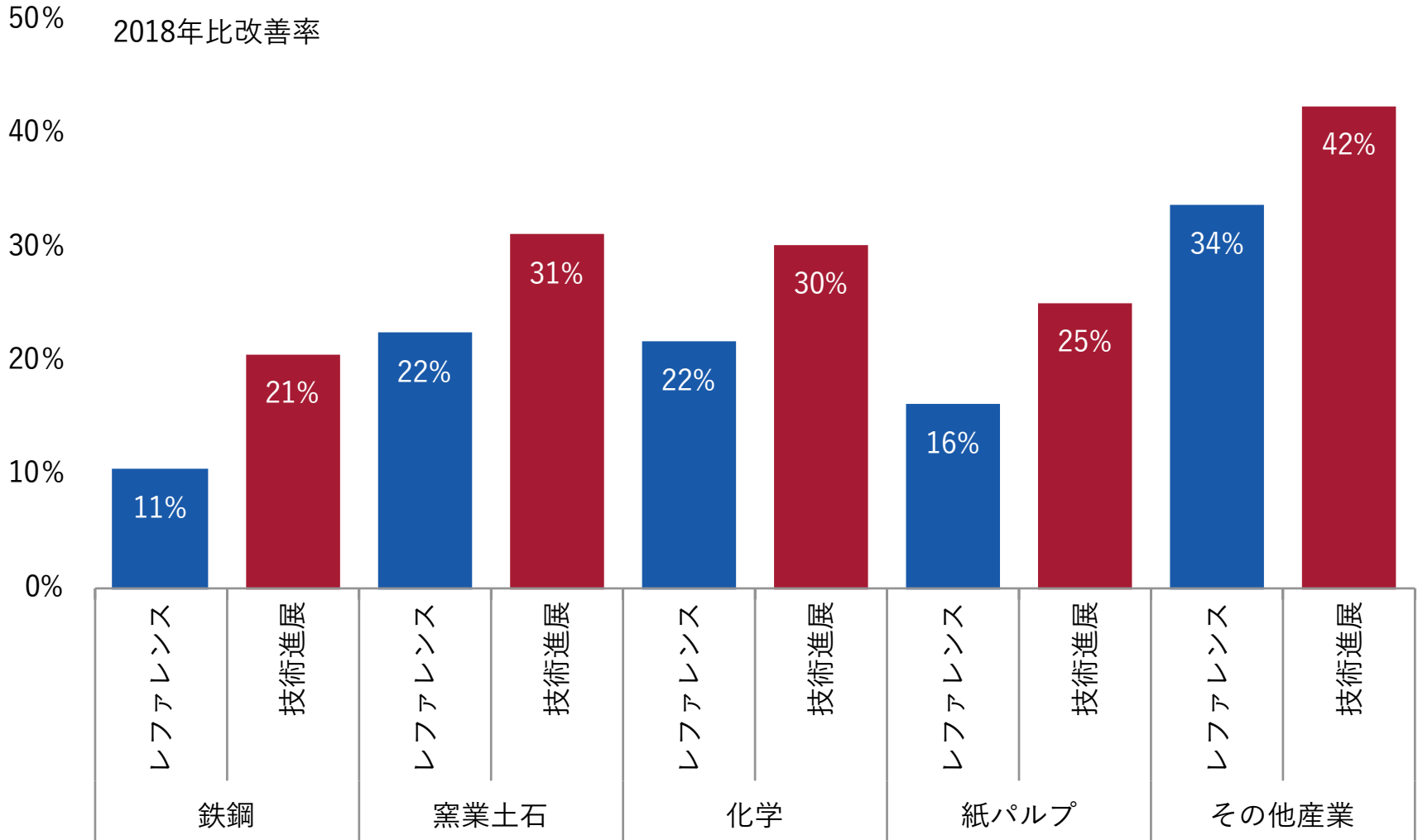
家庭部門



業務部門

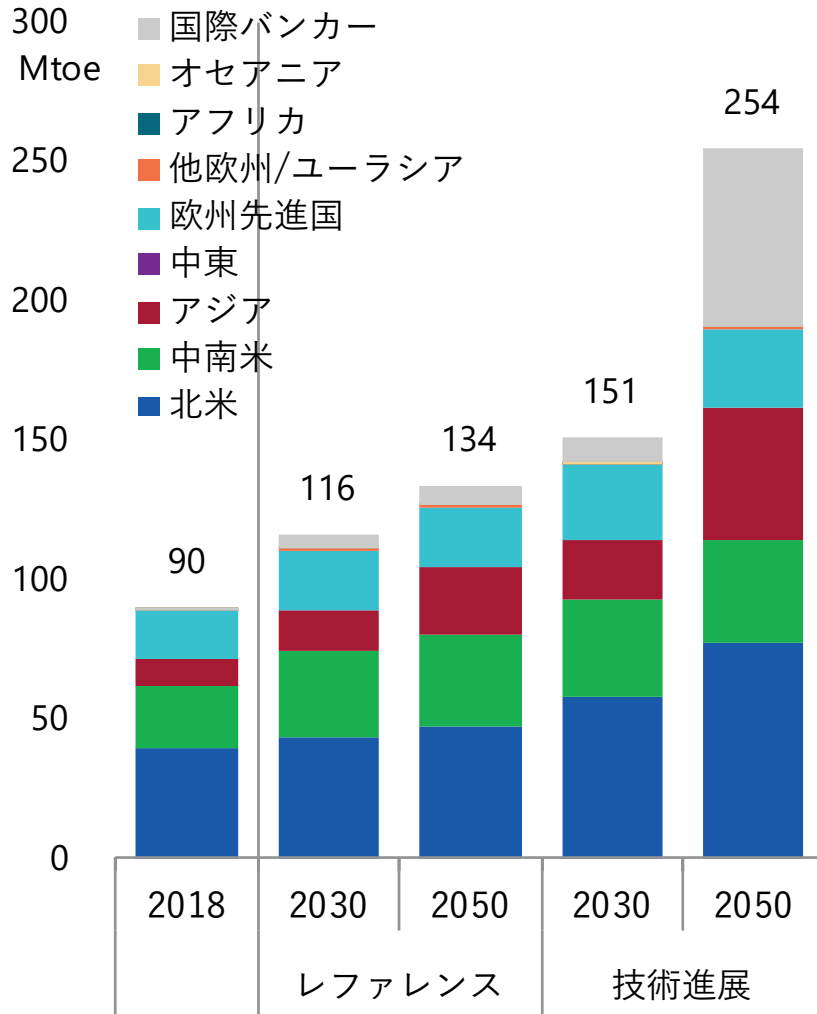


産業部門原単位改善率

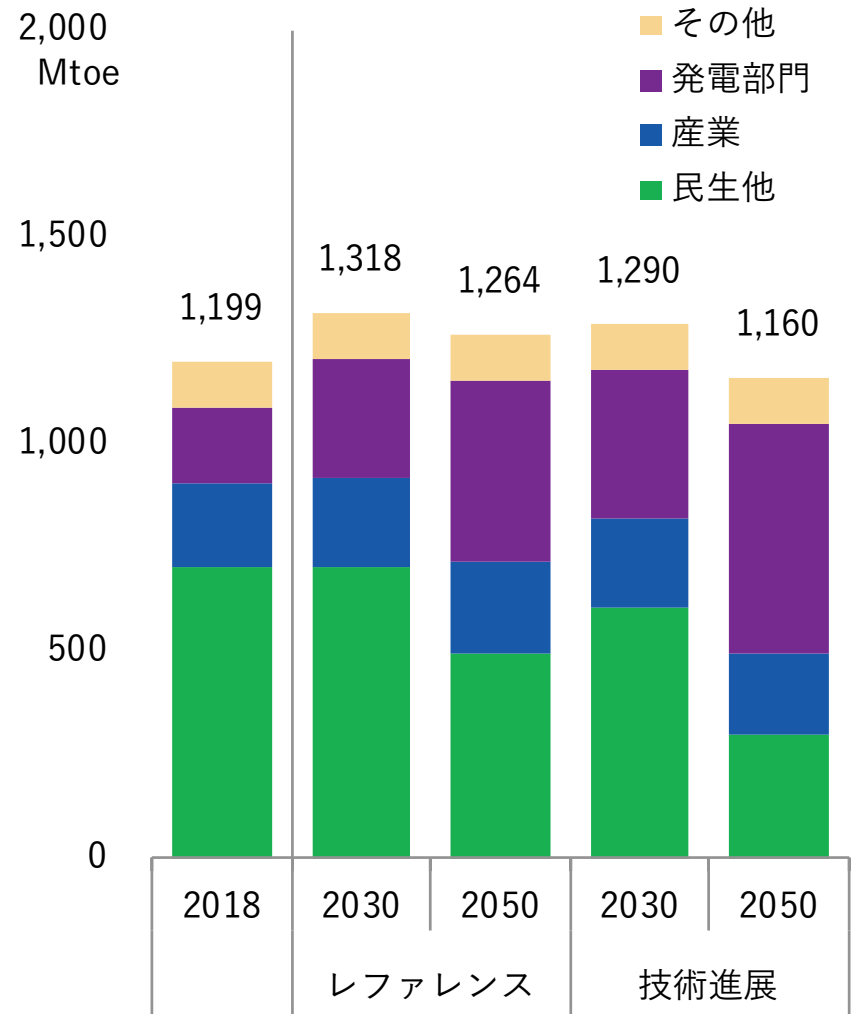


バイオマスエネルギー

輸送用バイオ燃料

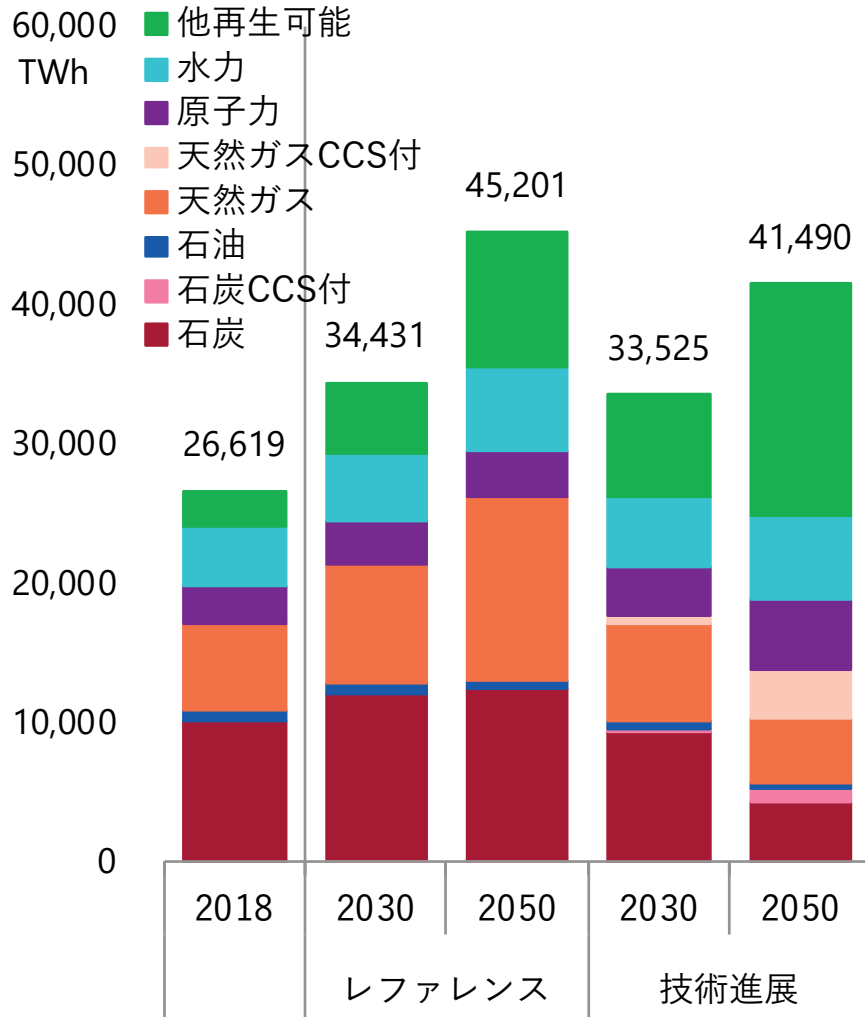


固形バイオマス利用量

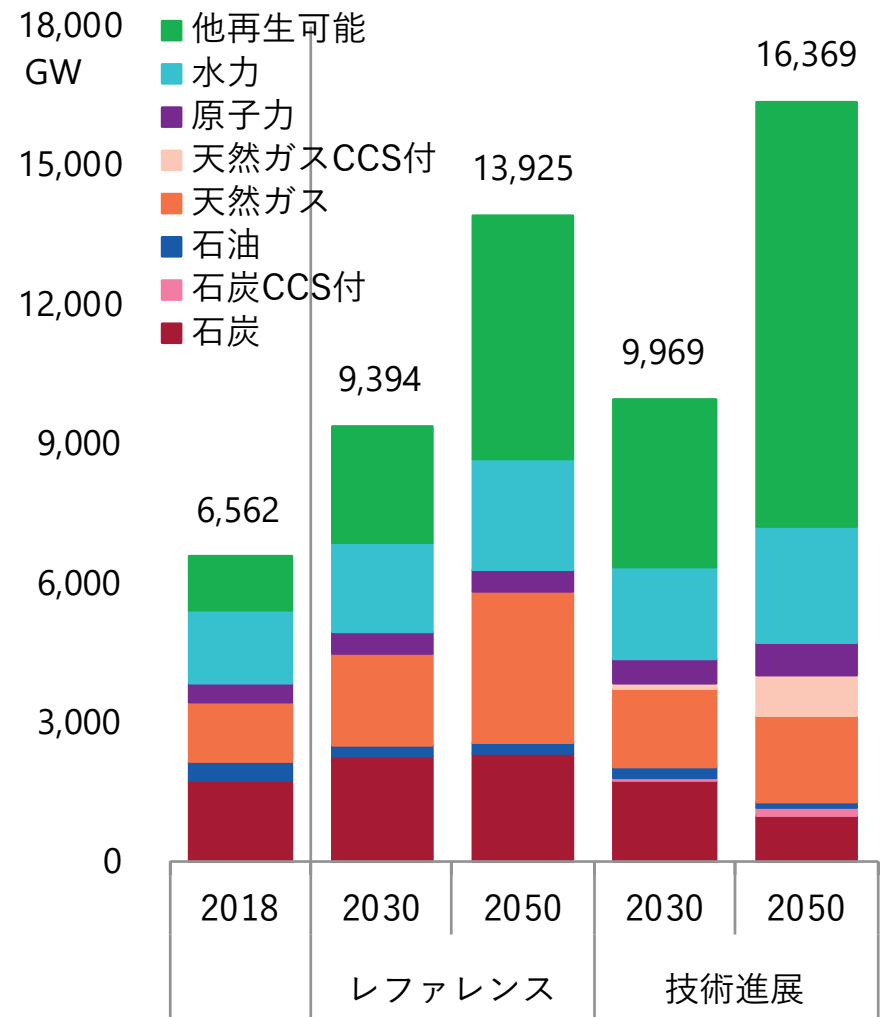


発電構成

発電量

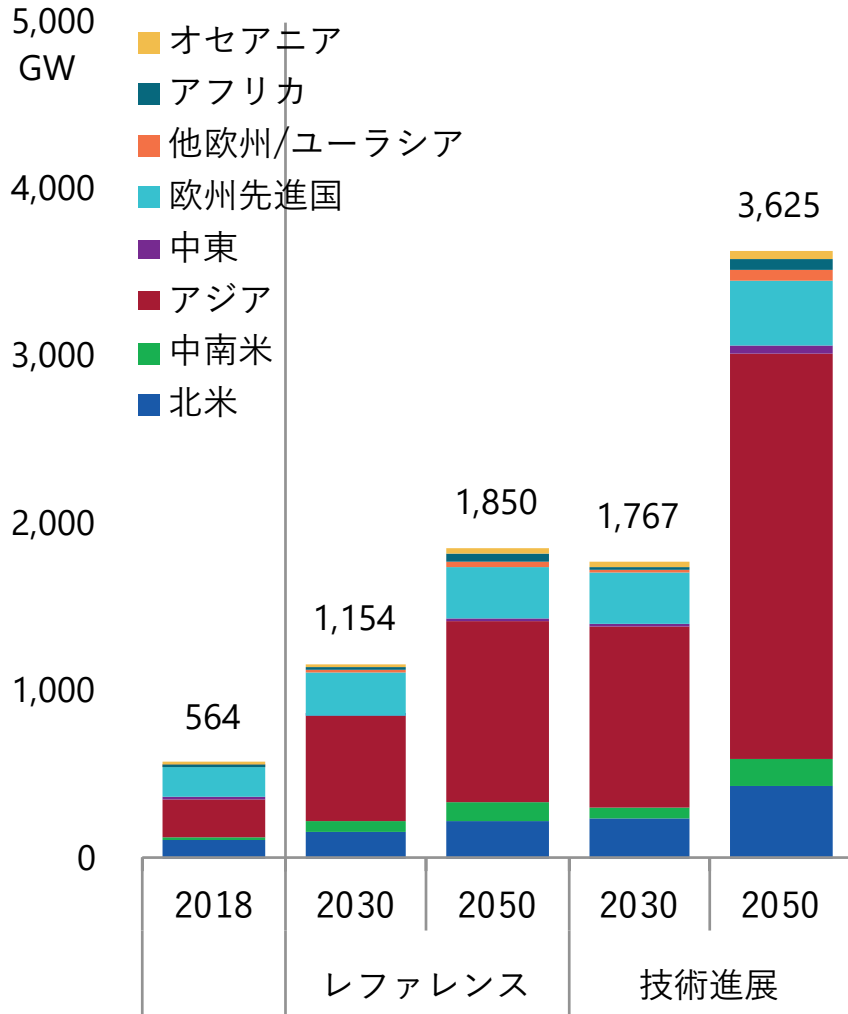


発電設備容量

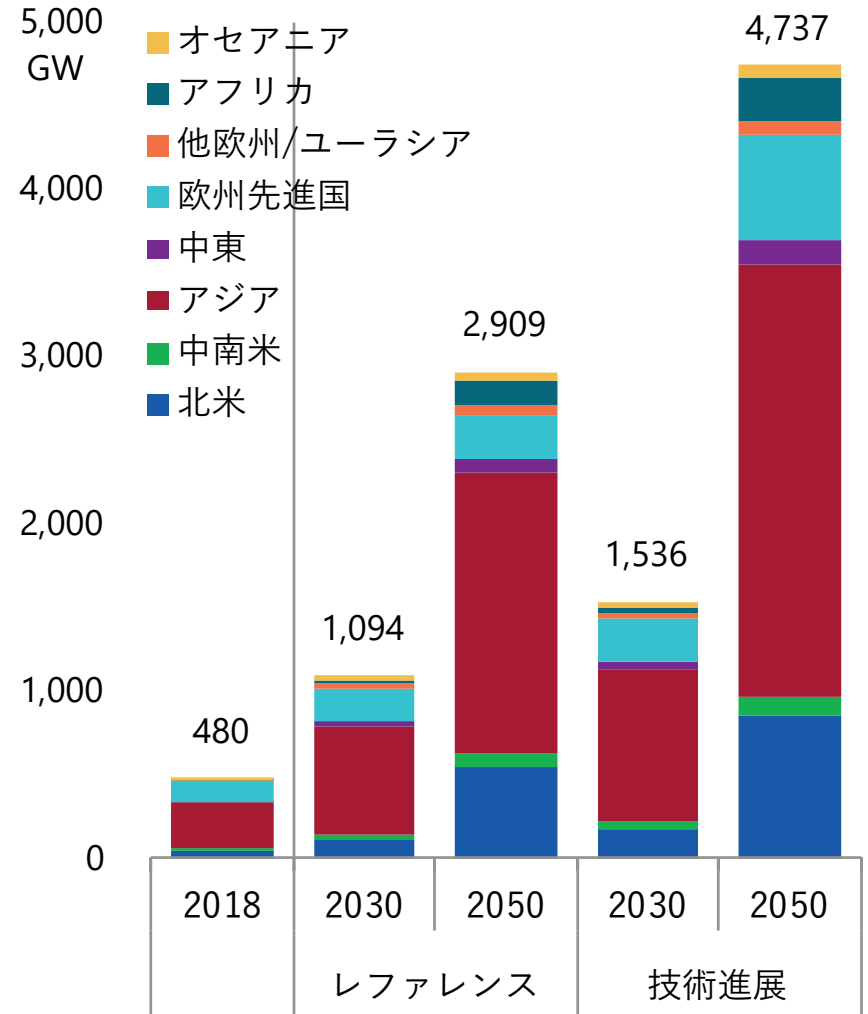


風力・太陽光発電設備容量

風力発電

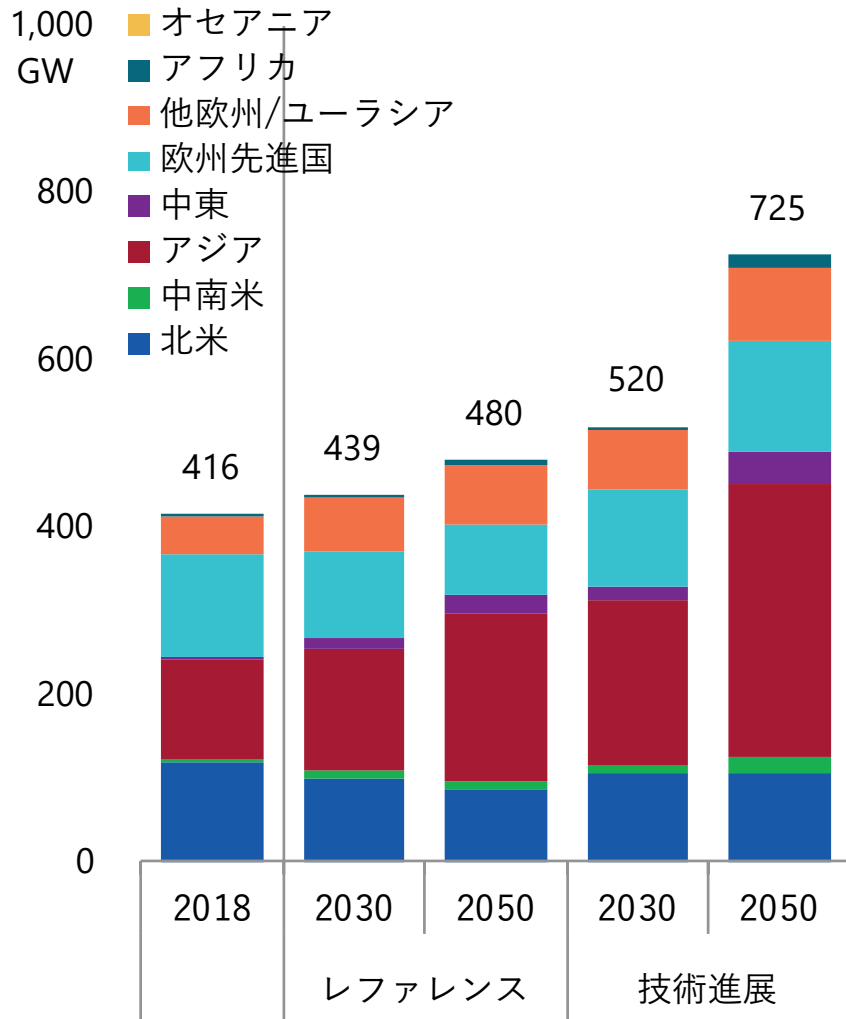


太陽光発電

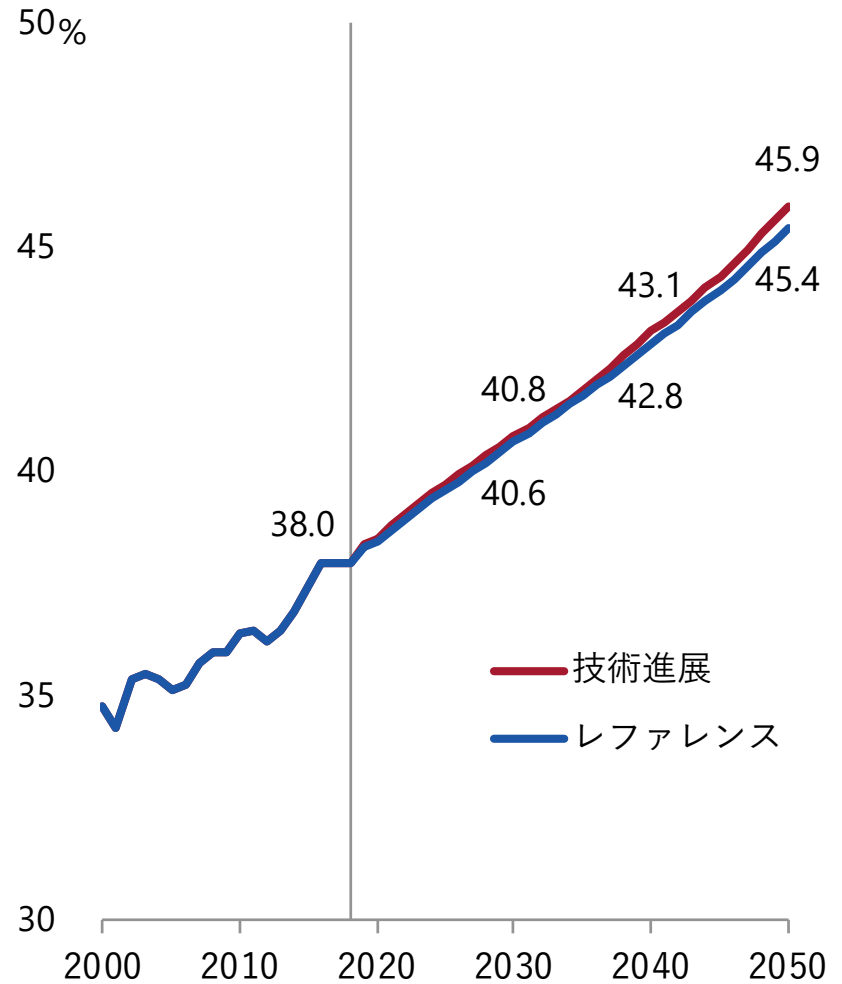


原子力発電設備容量・火力発電効率

原子力発電

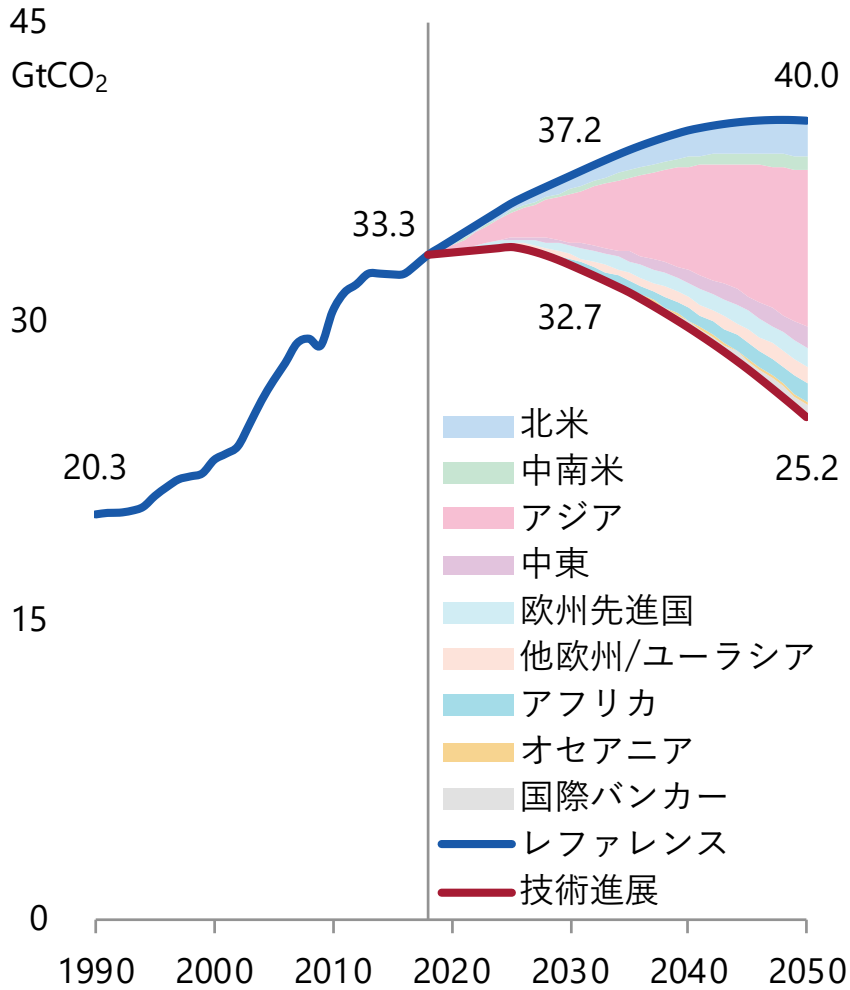


火力発電効率(発電端)

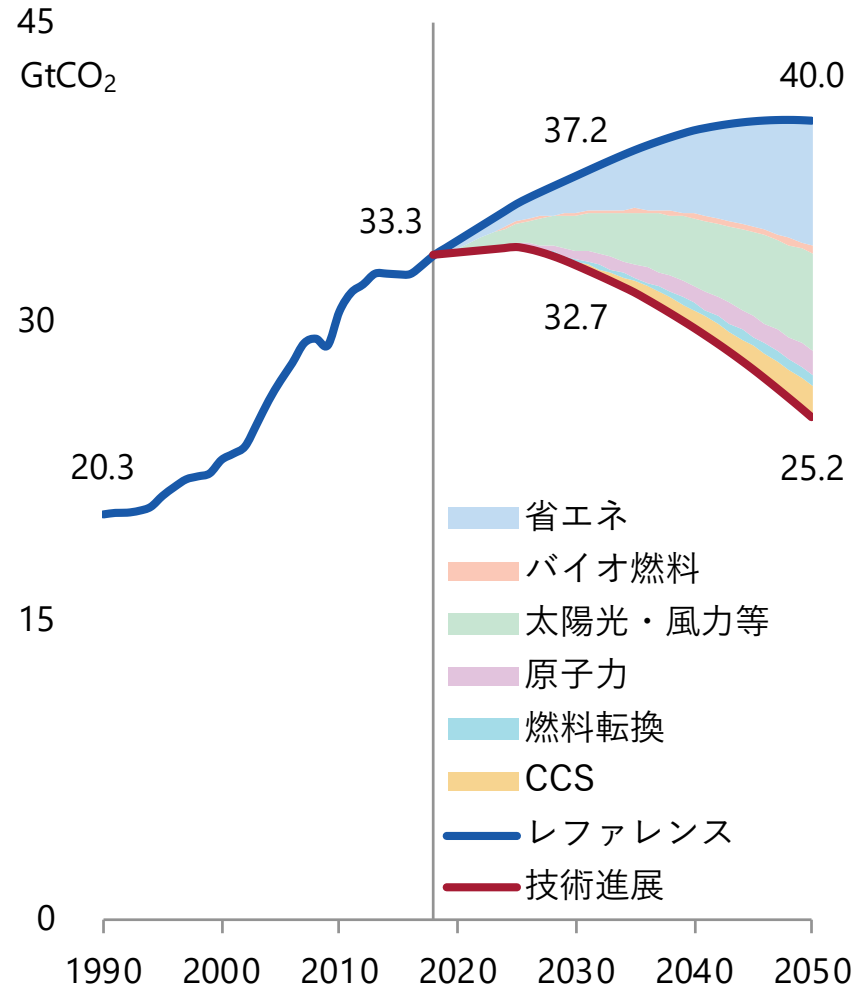


CO₂排出量

国・地域別



技術別



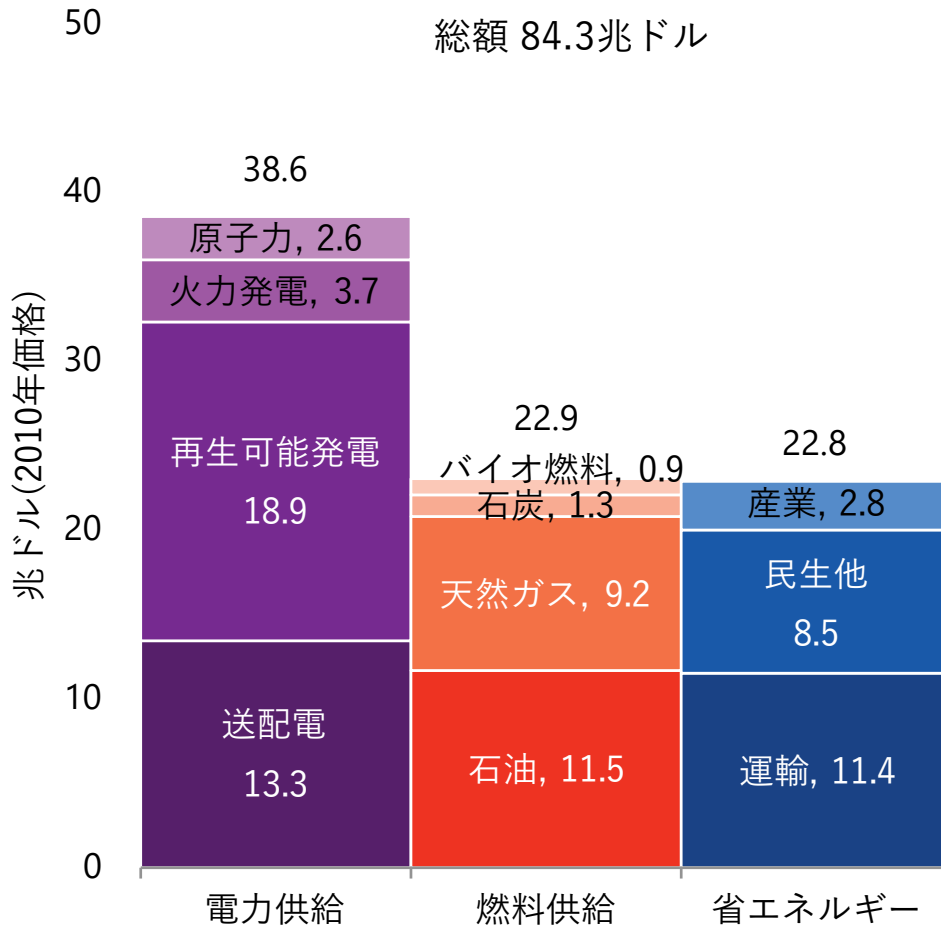
※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

エネルギー関連投資額

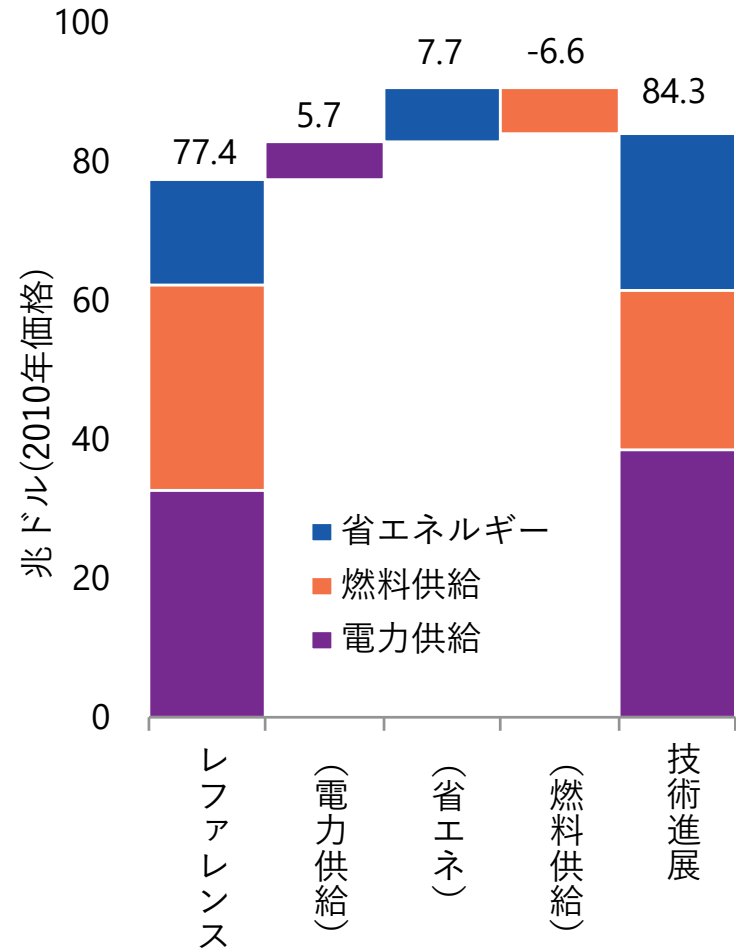
(2019年～2050年 累積投資額)

部門別投資額

総額 84.3兆ドル

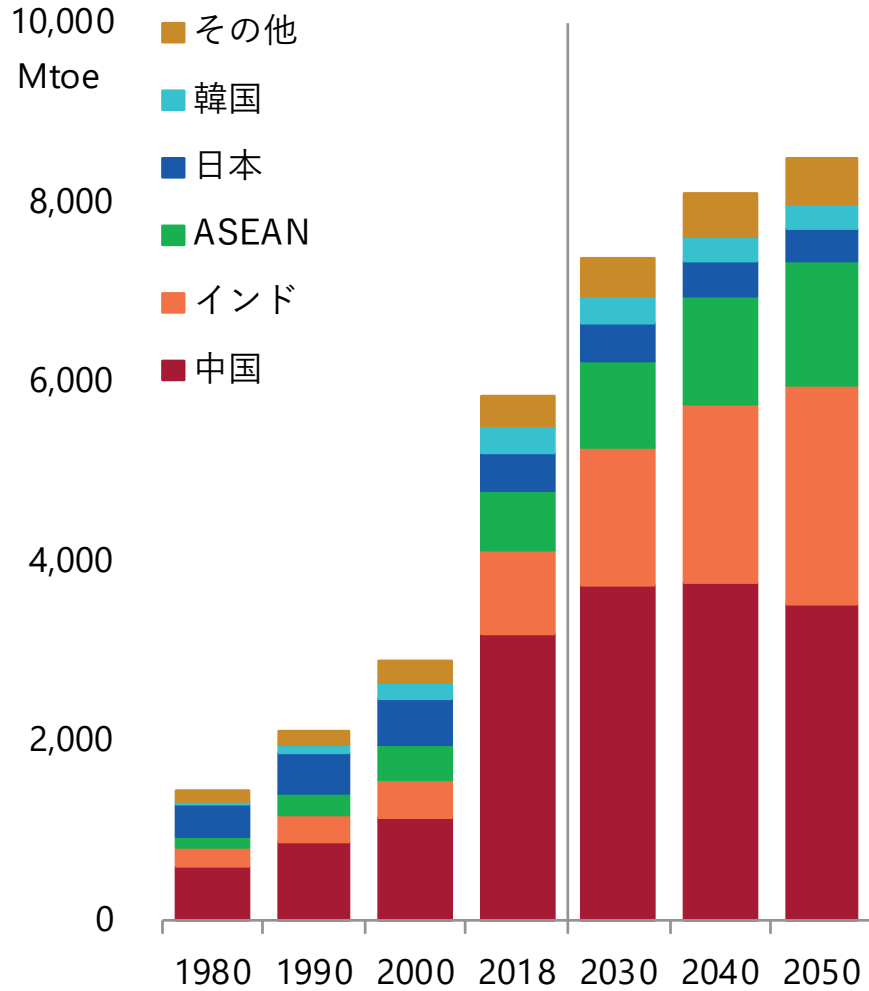


レファレンスシナリオとの比較

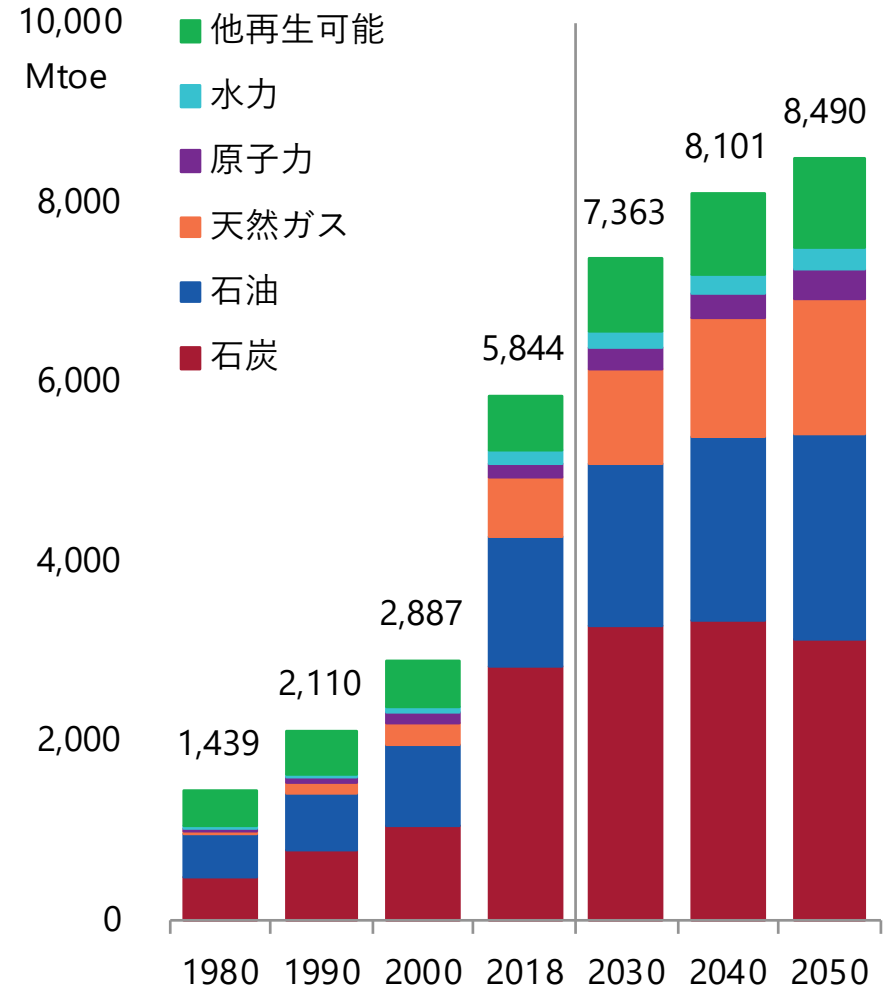


一次エネルギー消費

地域別

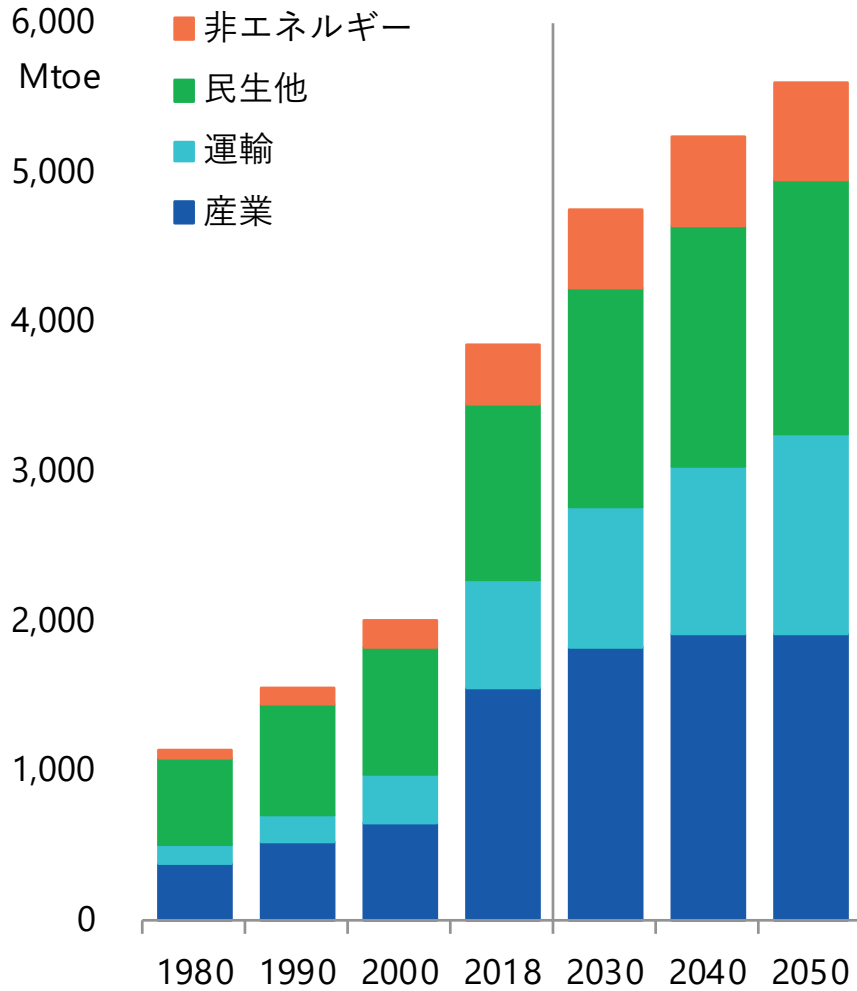


エネルギー源別

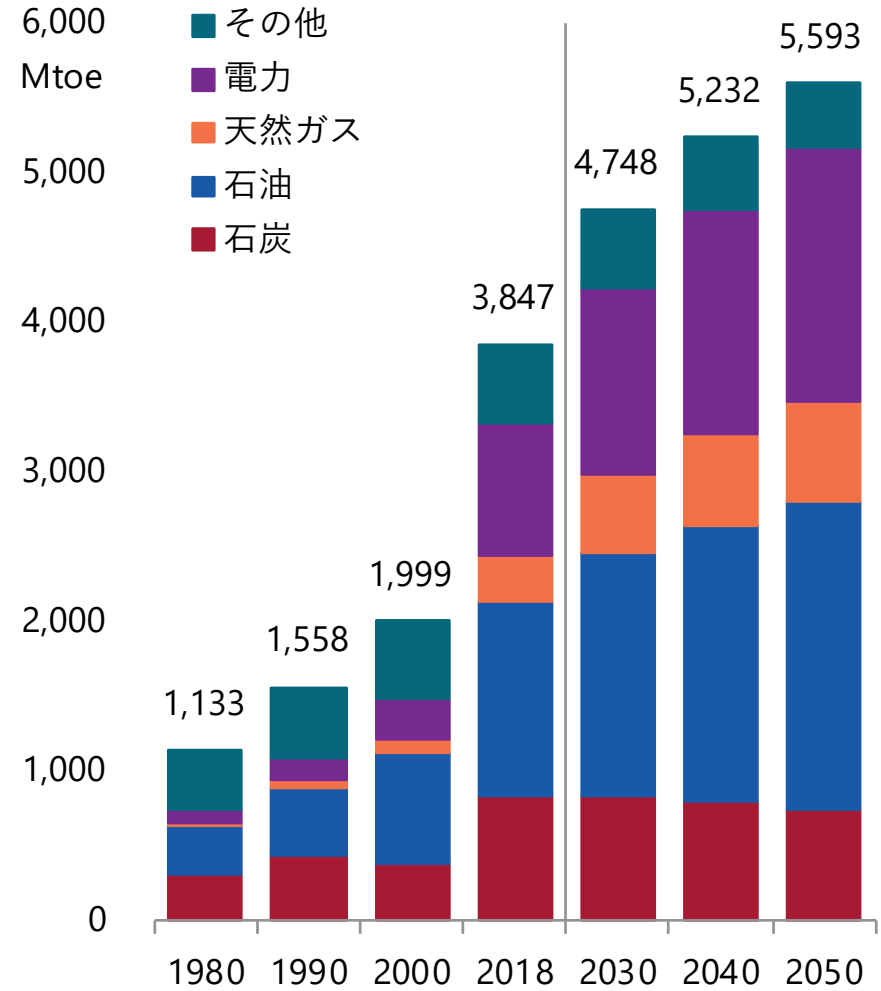


最終エネルギー消費

部門別

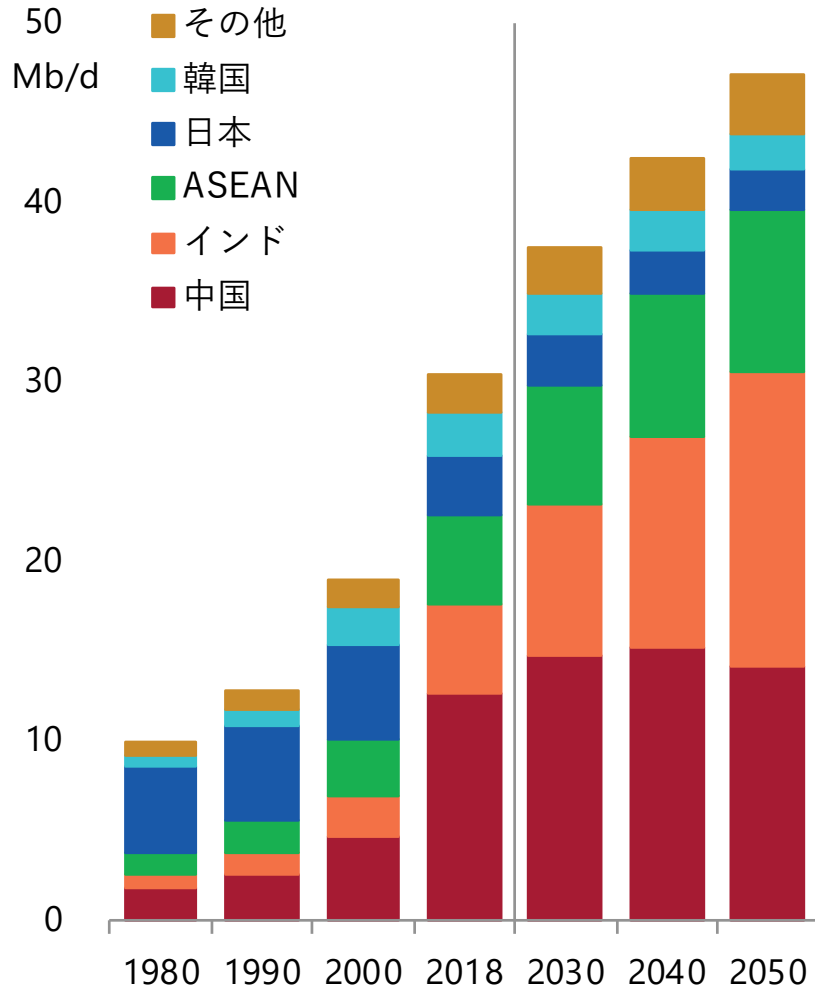


エネルギー別

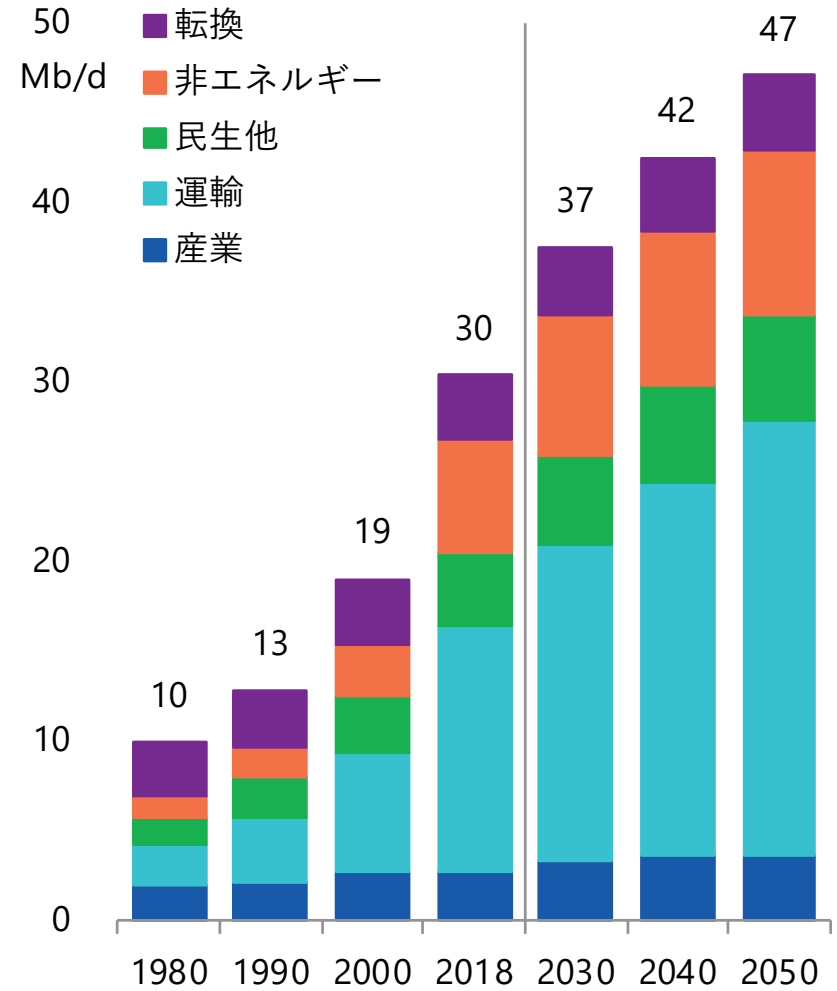


石油消費

地域別

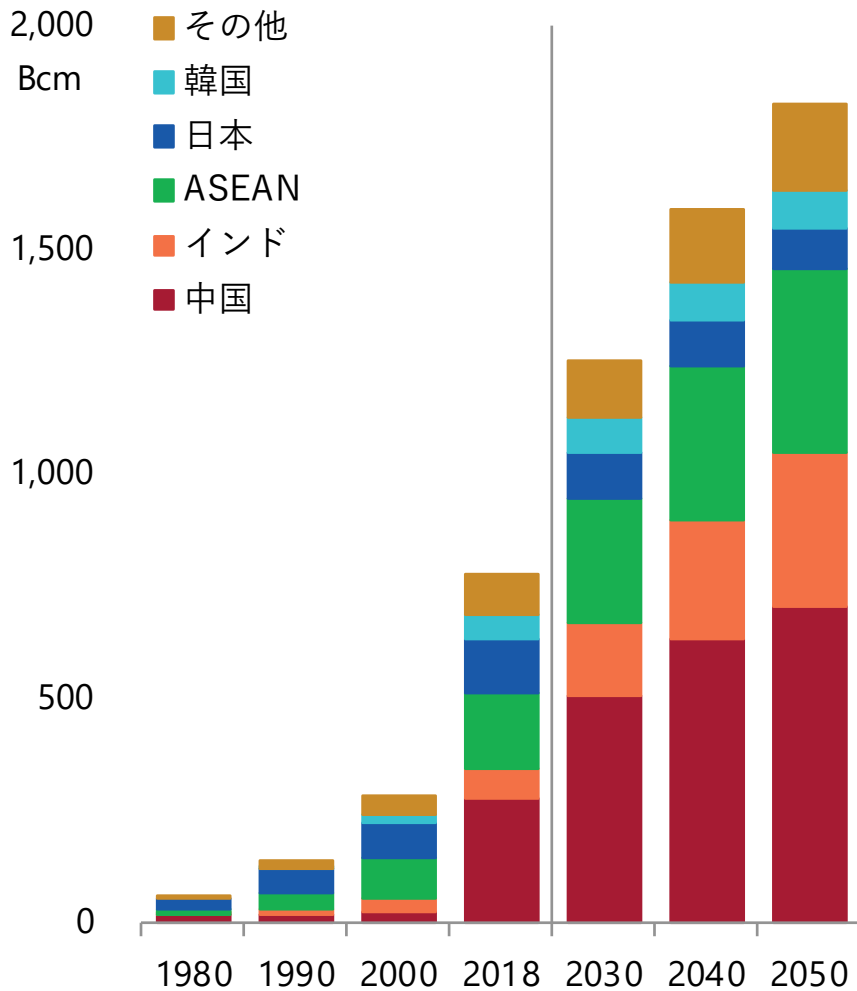


部門別

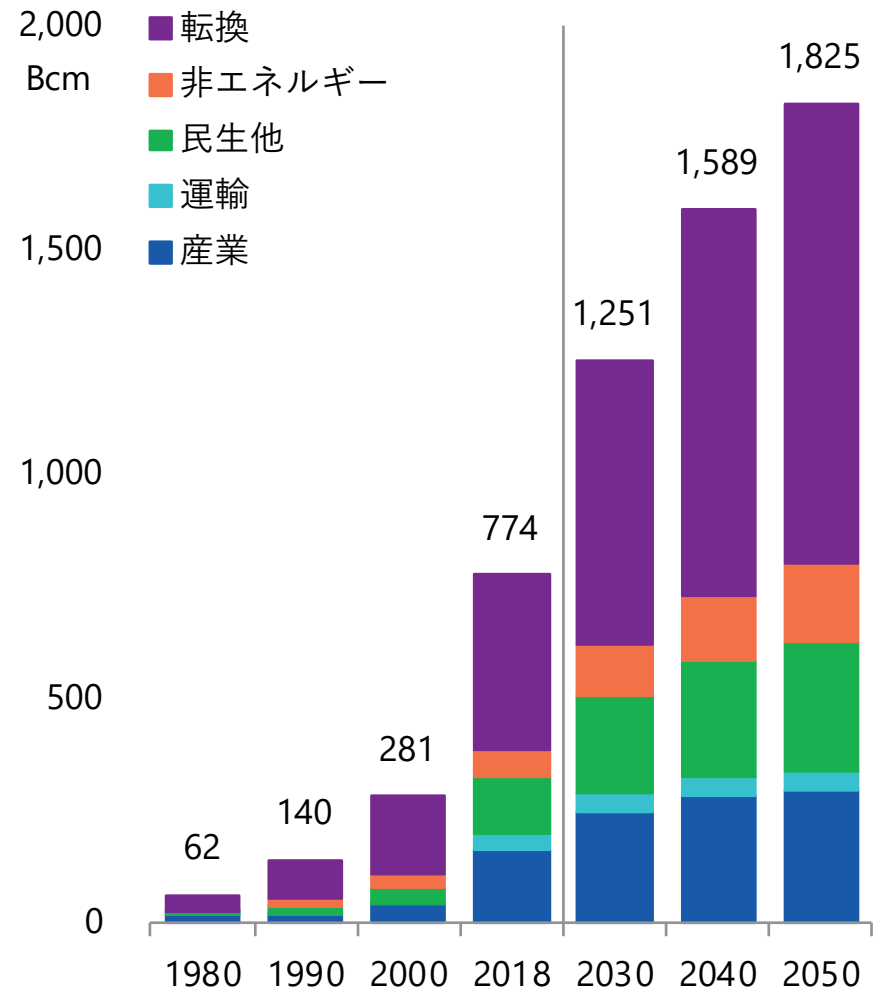


天然ガス消費

地域別

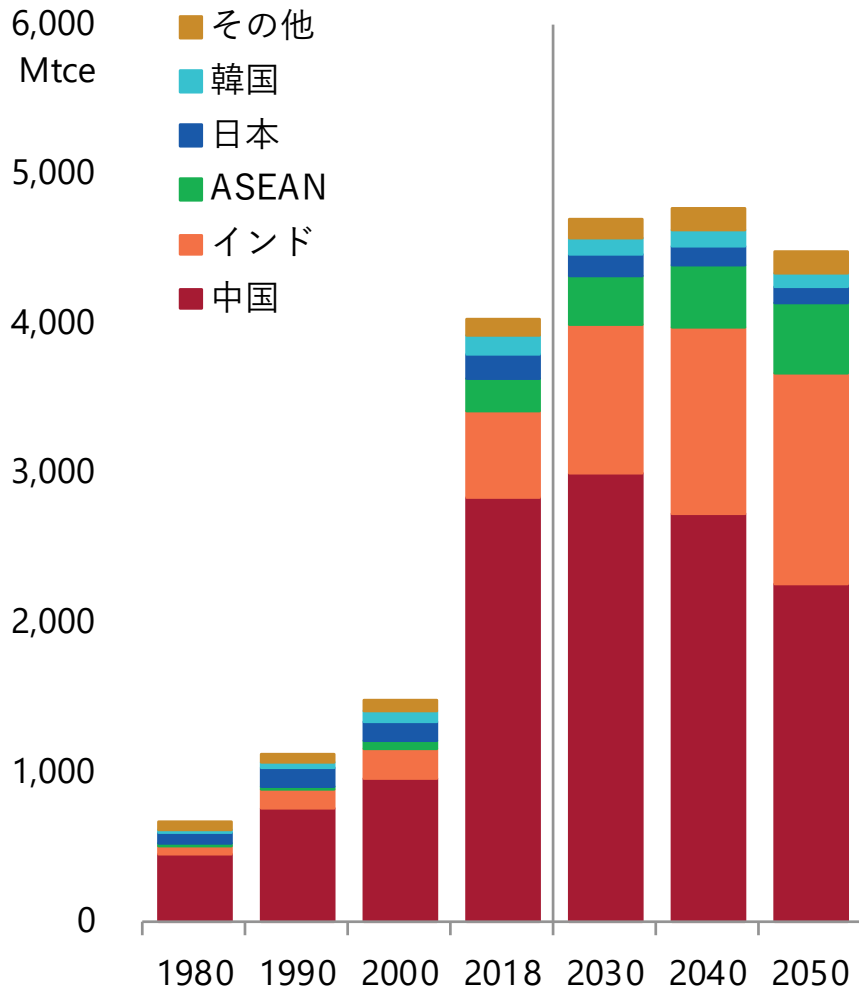


部門別

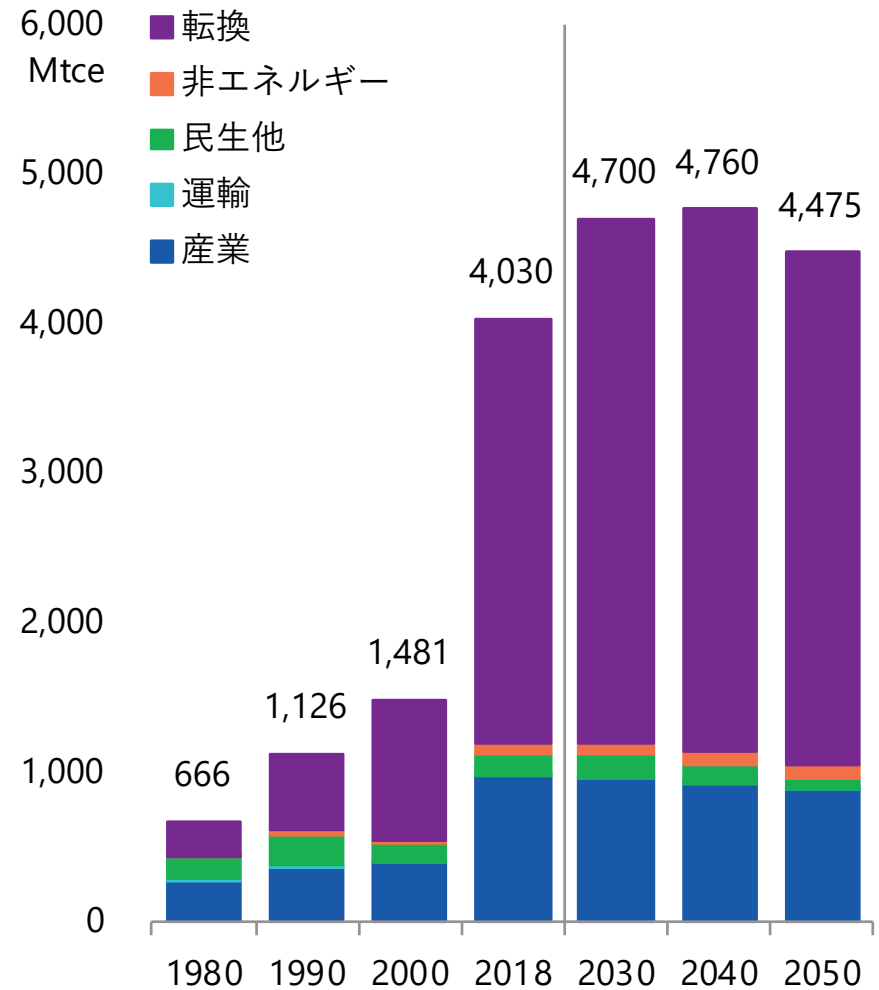


石炭消費

地域別

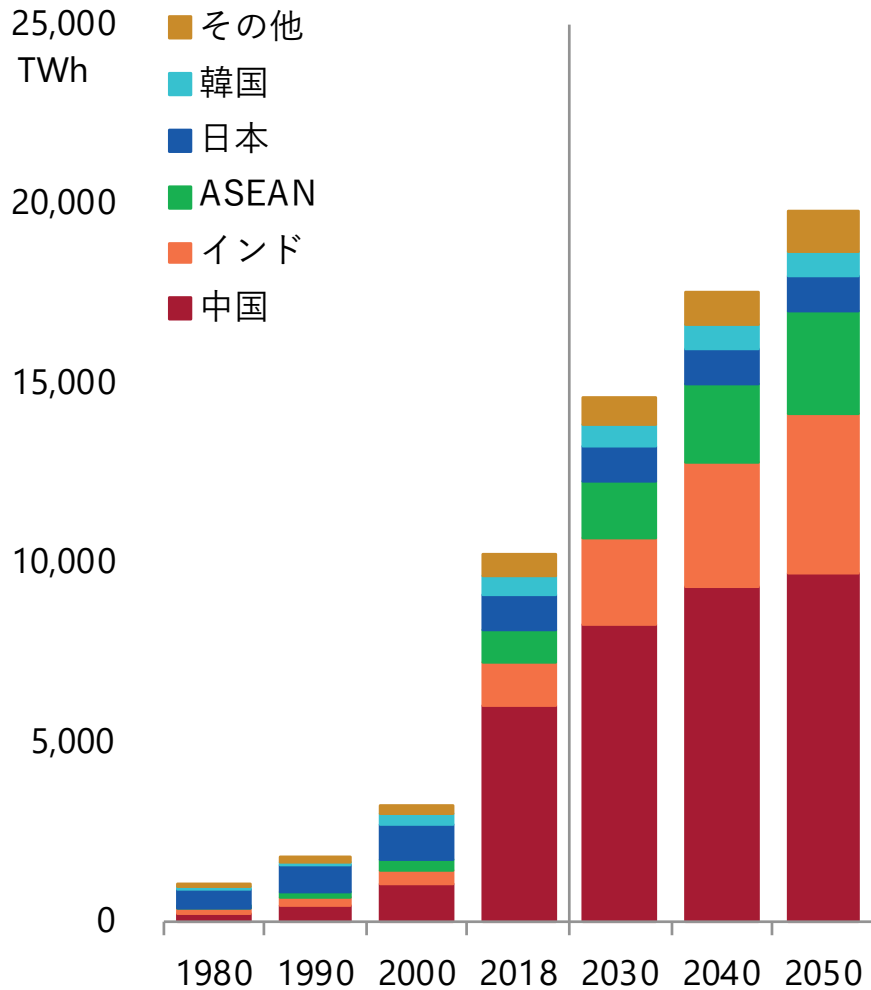


部門別

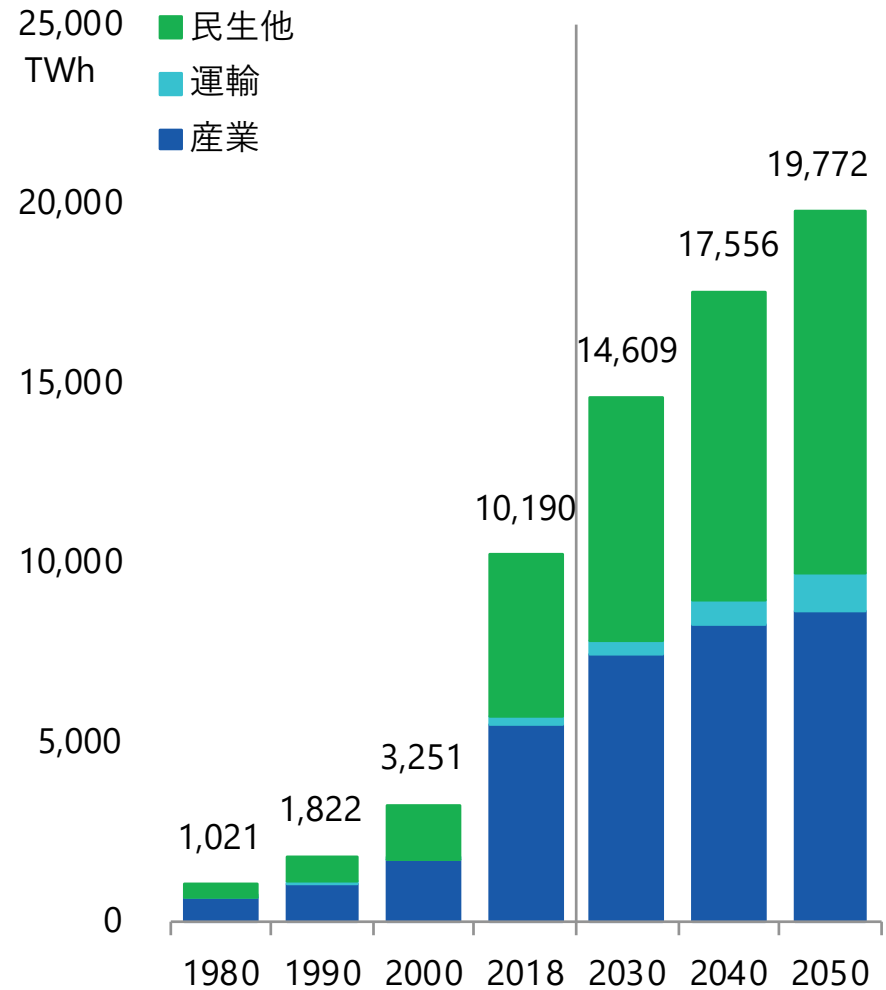


電力最終消費

地域別

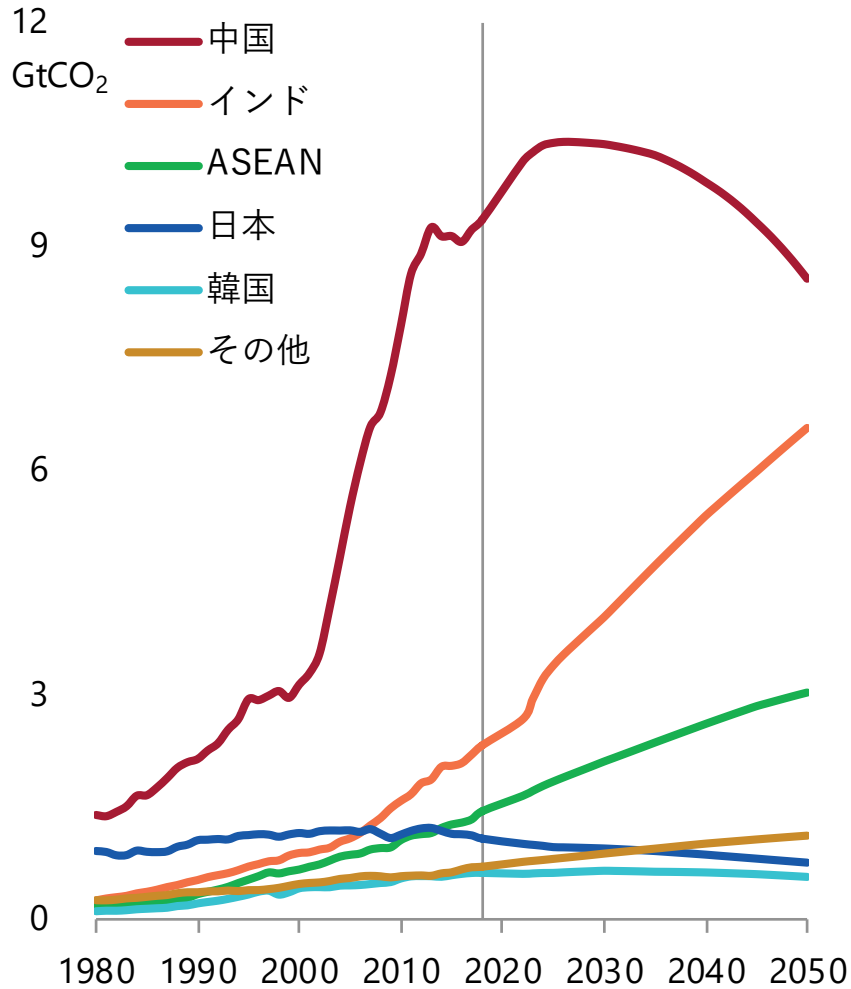


部門別

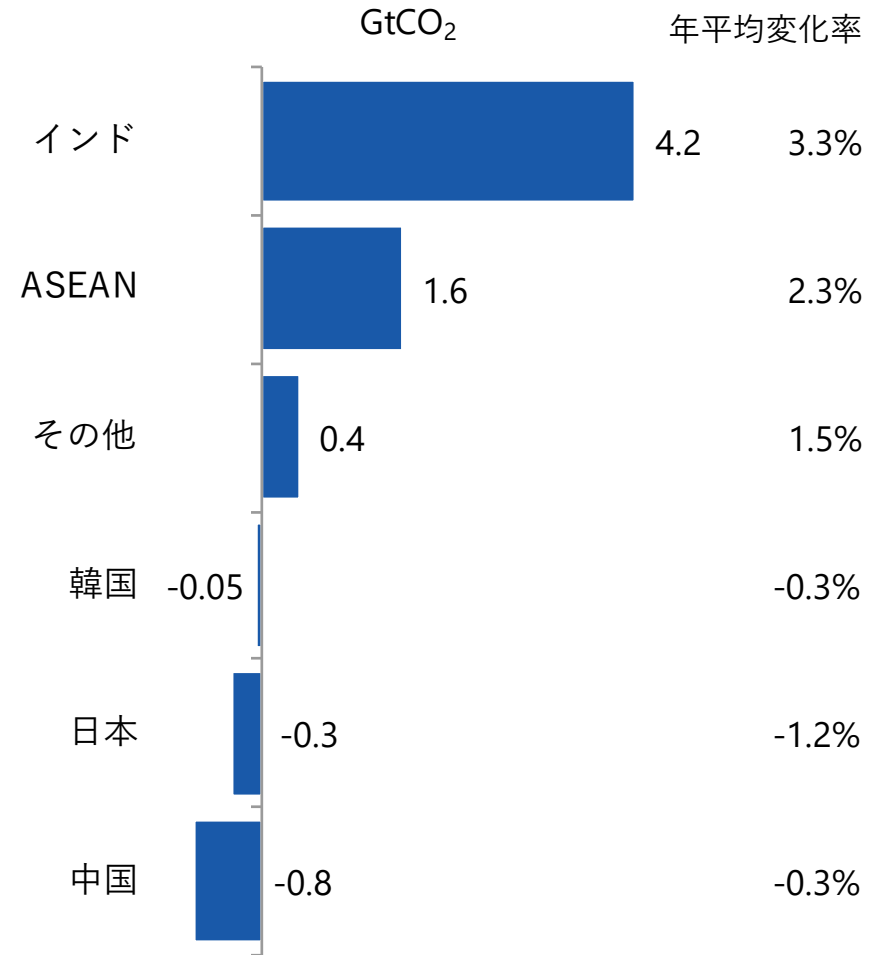


CO₂排出量

エネルギー起源CO₂排出量



増減分(2018-2050年)



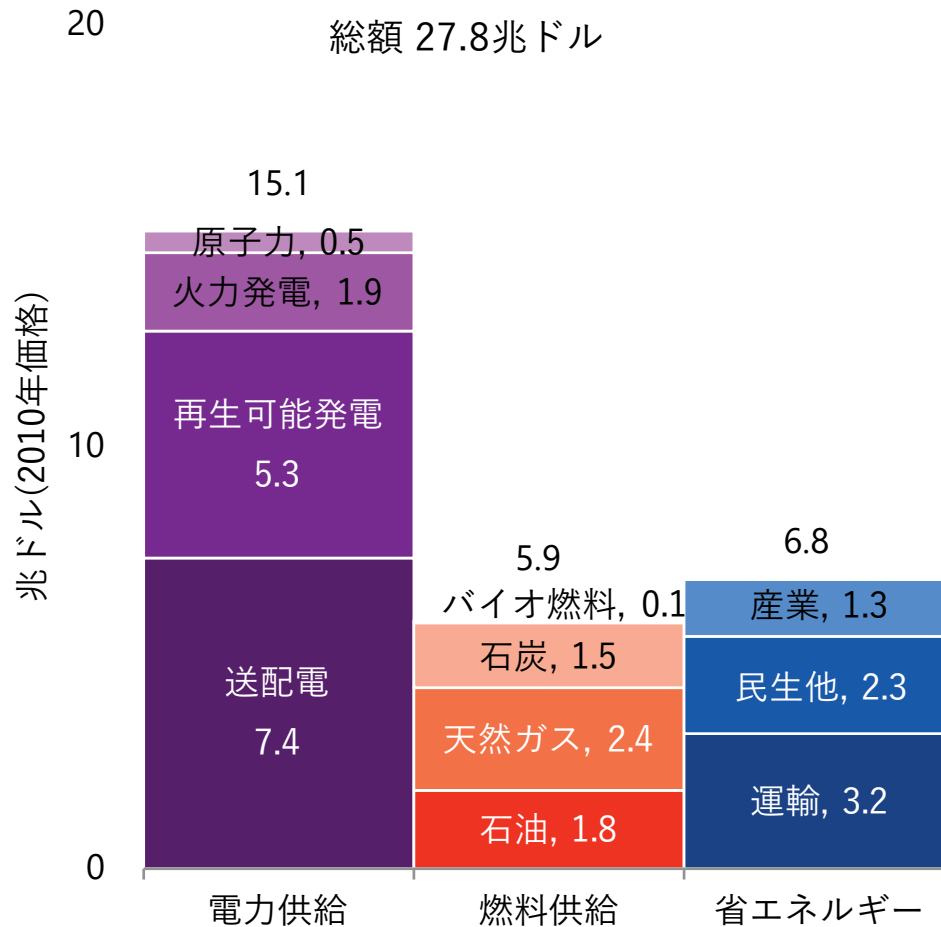
※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

エネルギー関連投資額

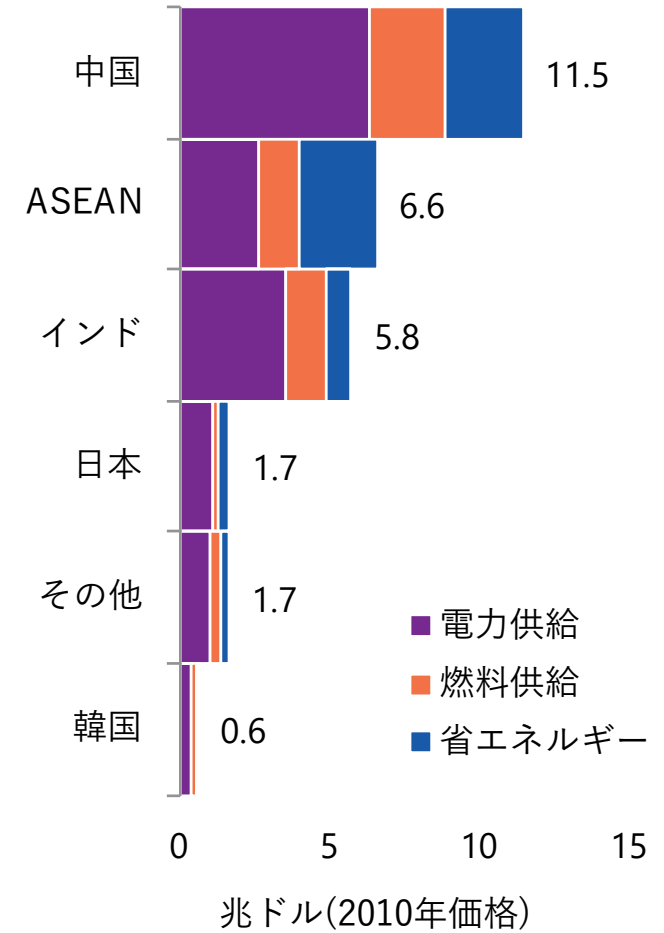
(2019年～2050年 累積投資額)

部門別

総額 27.8兆ドル

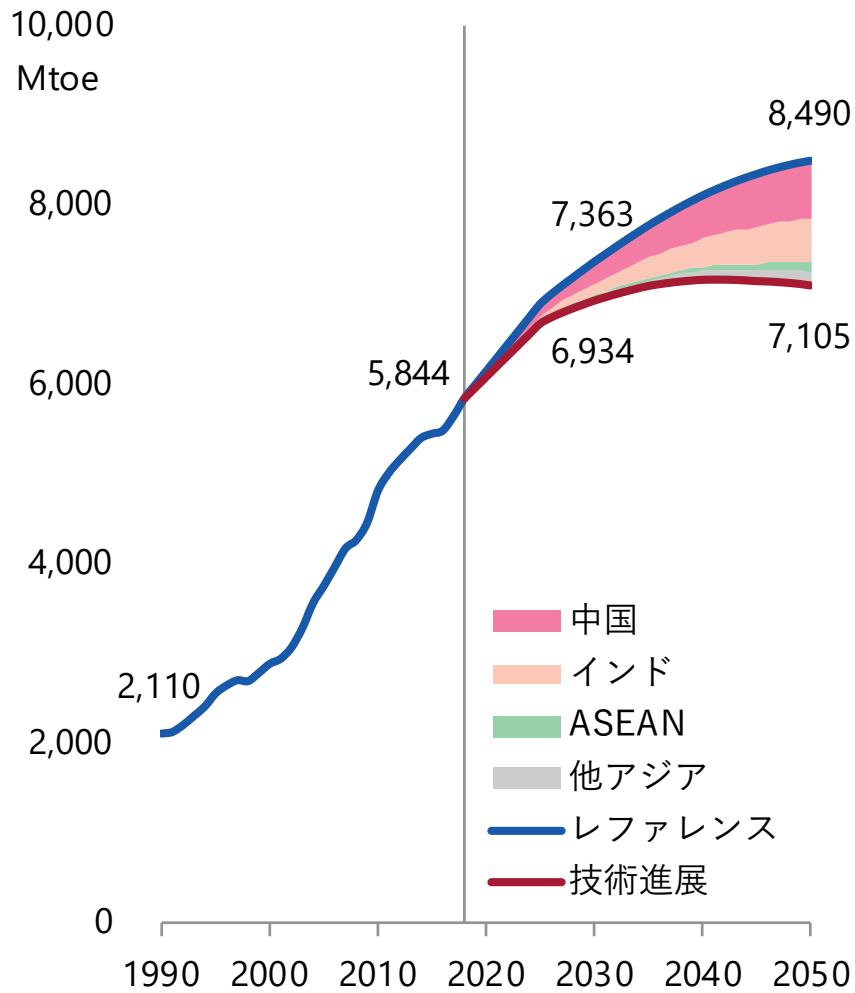


地域別

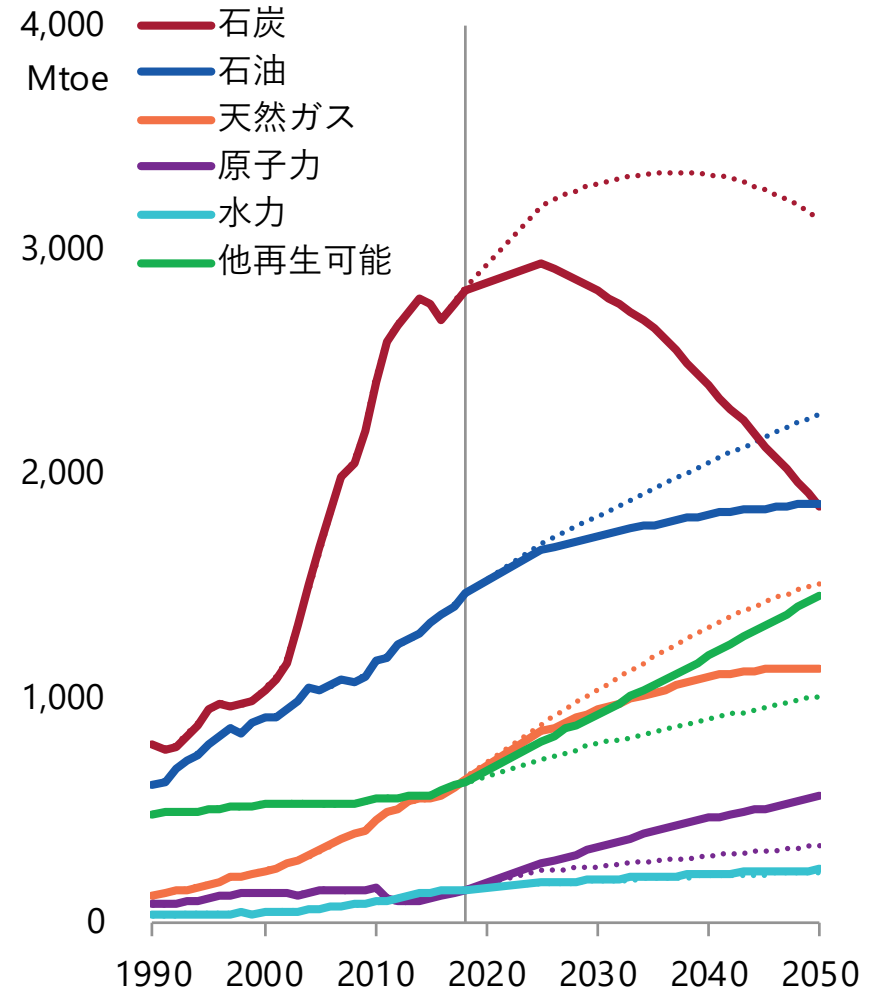


一次エネルギー消費

国・地域別



エネルギー源別

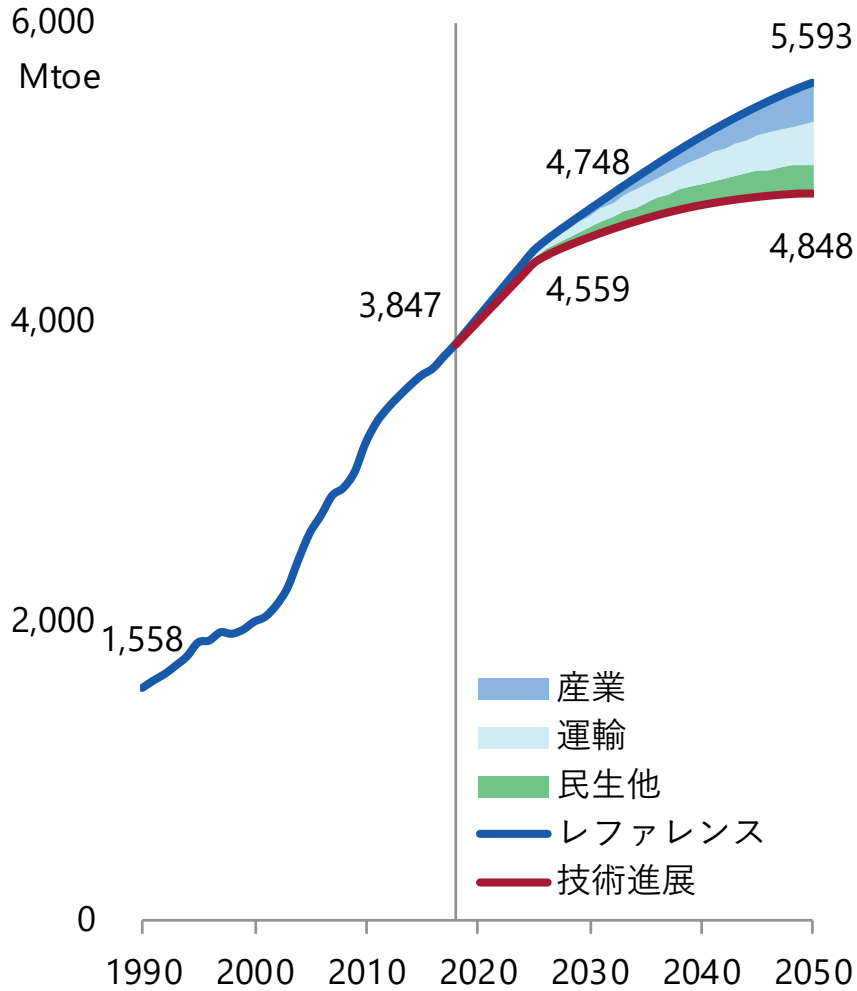


(注)実線：技術進展、破線：レファレンス

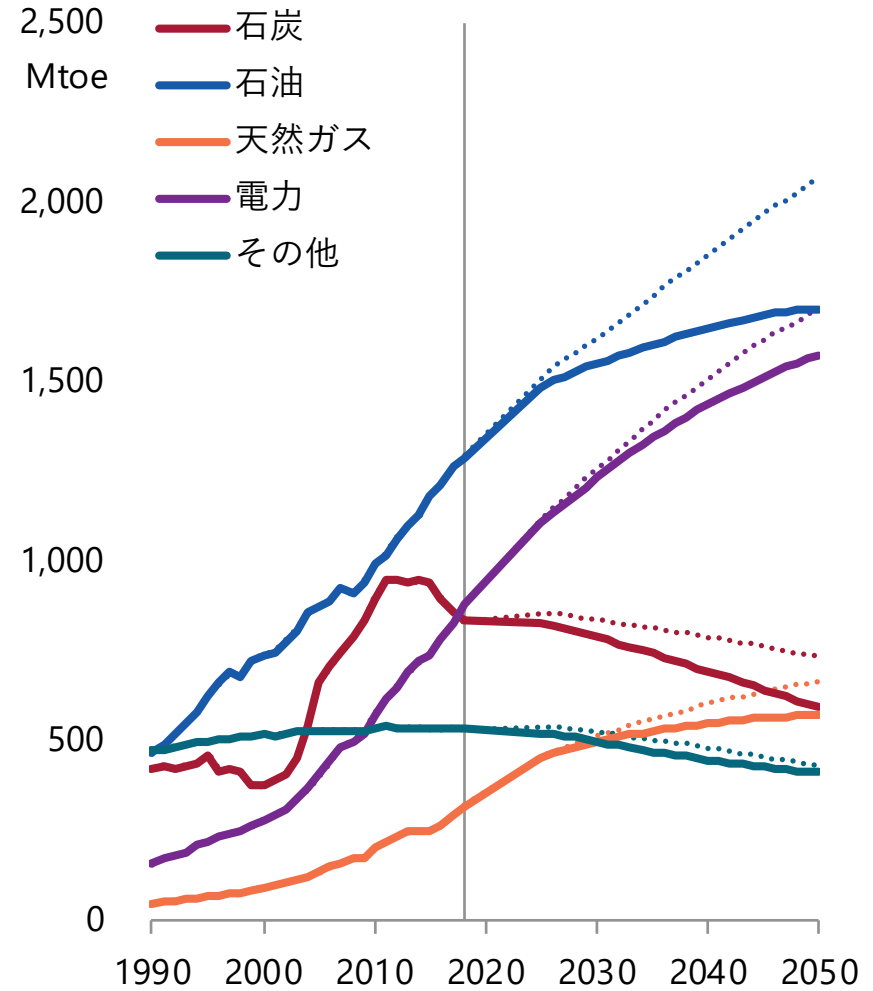
※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

最終エネルギー消費

部門別



エネルギー源別

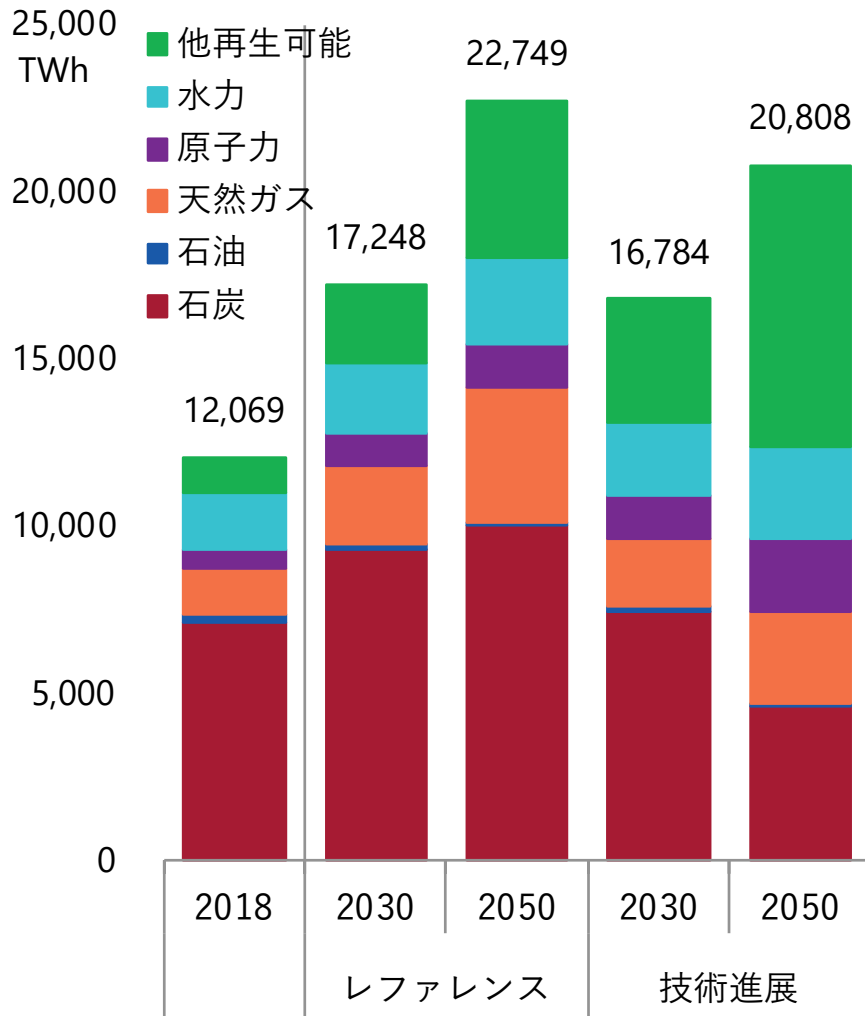


(注)実線：技術進展、破線：レファレンス

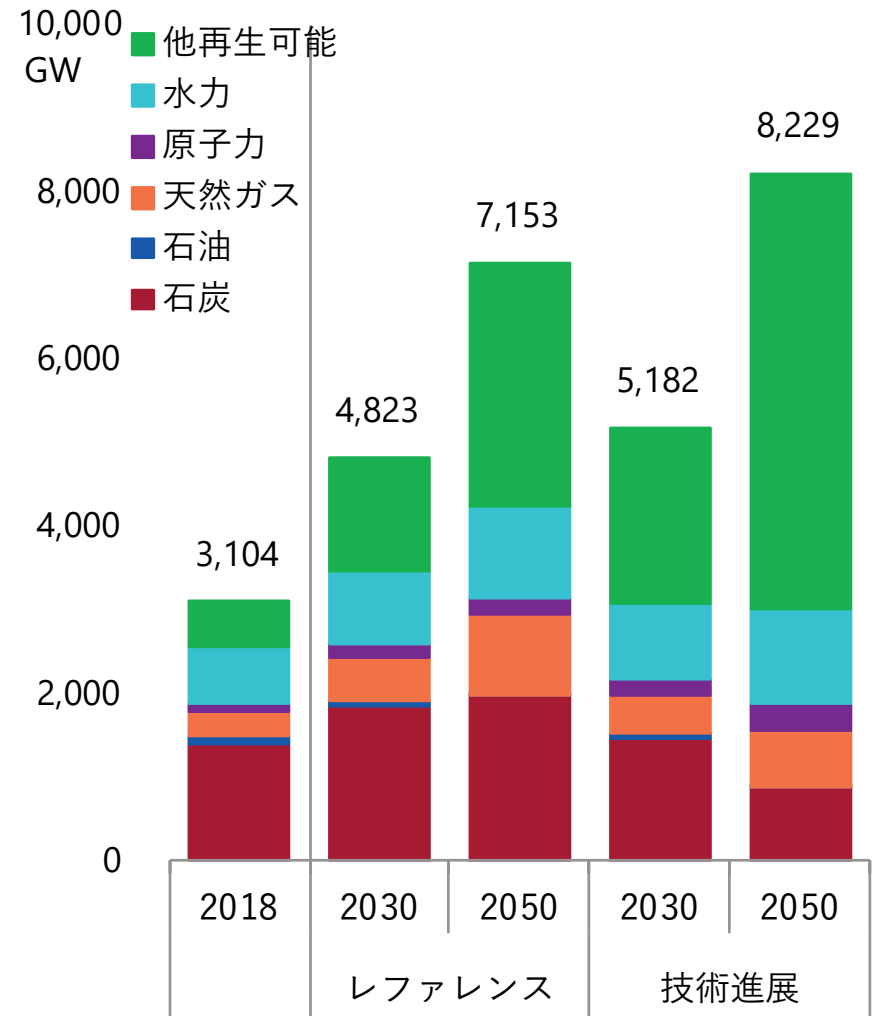
※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

発電構成

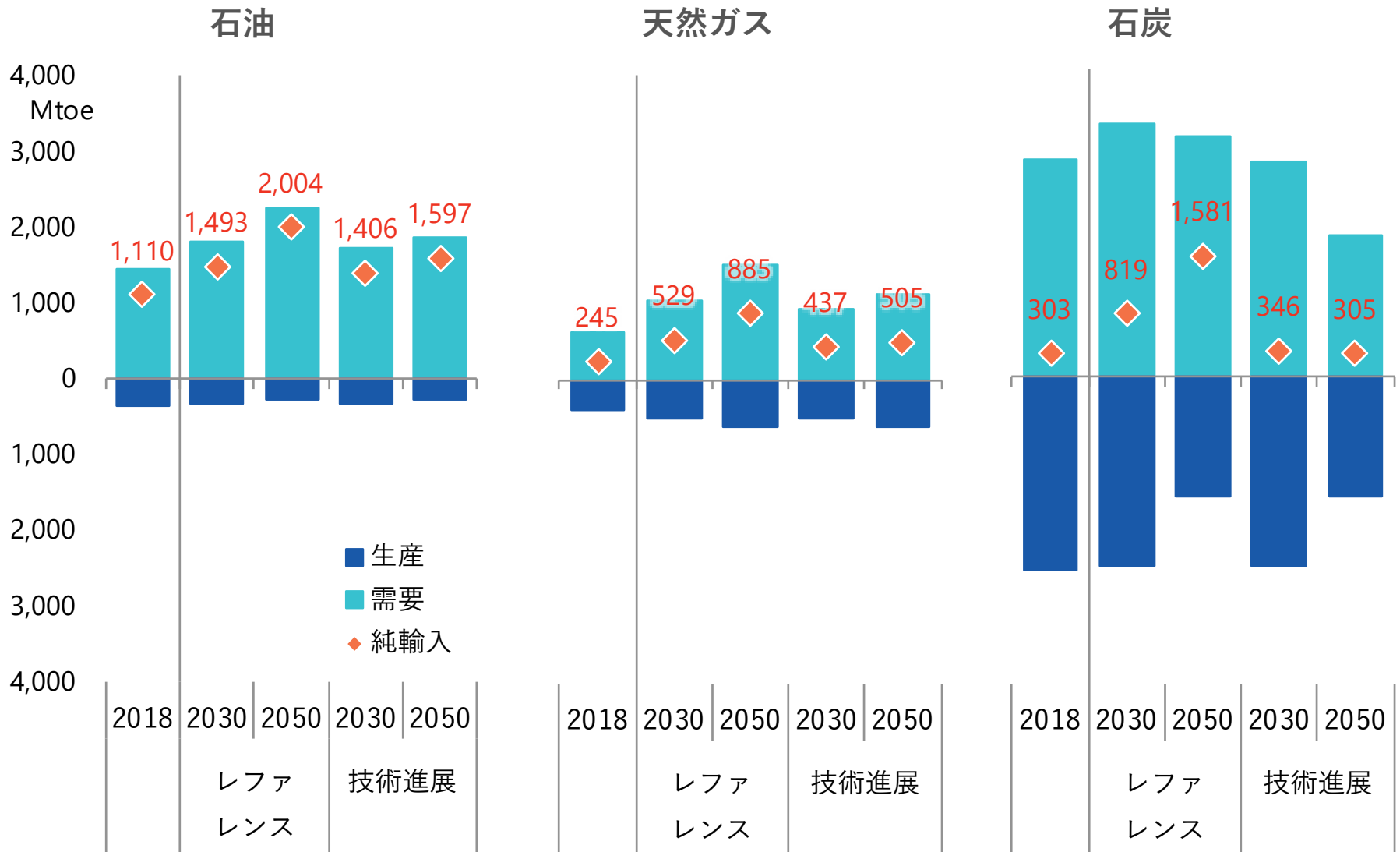
発電量



発電設備容量

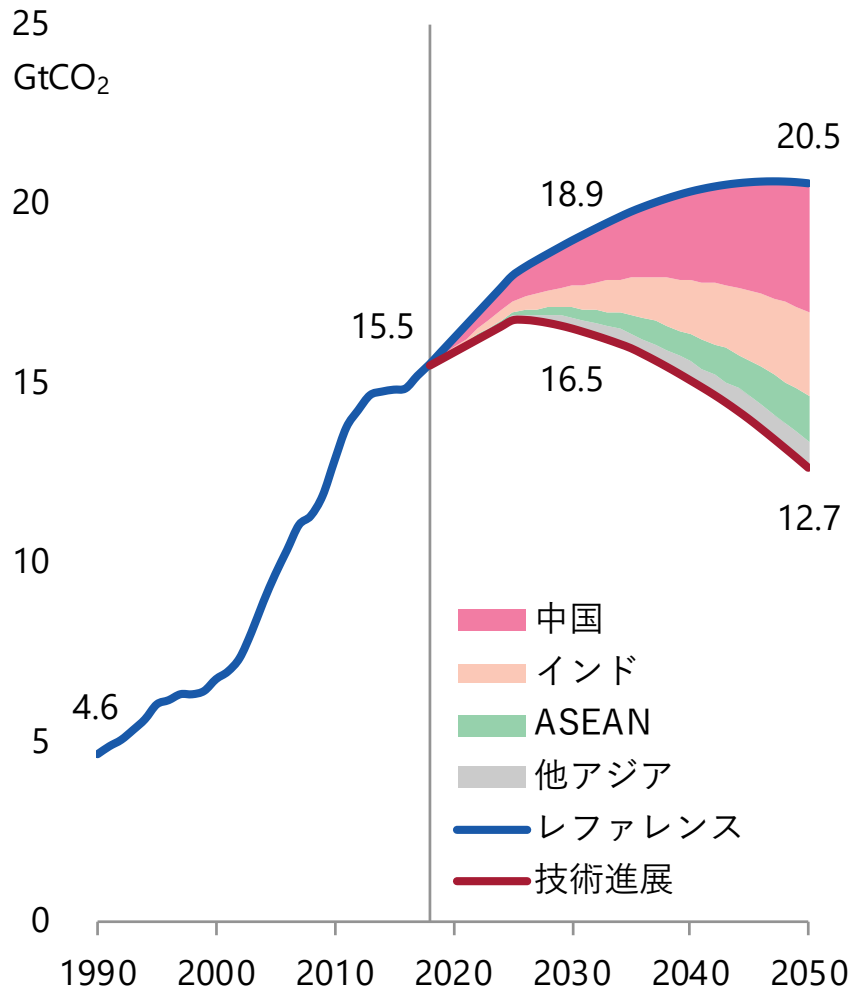


化石燃料需給バランス

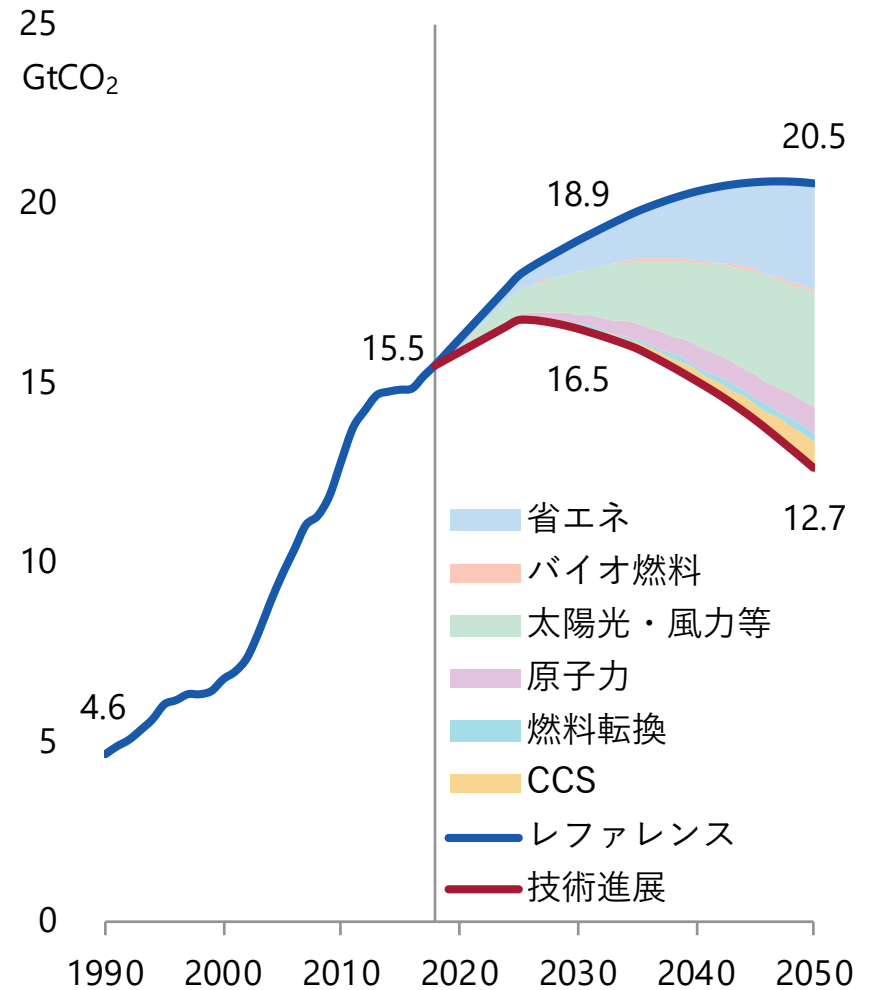


CO₂排出量

国・地域別



技術別

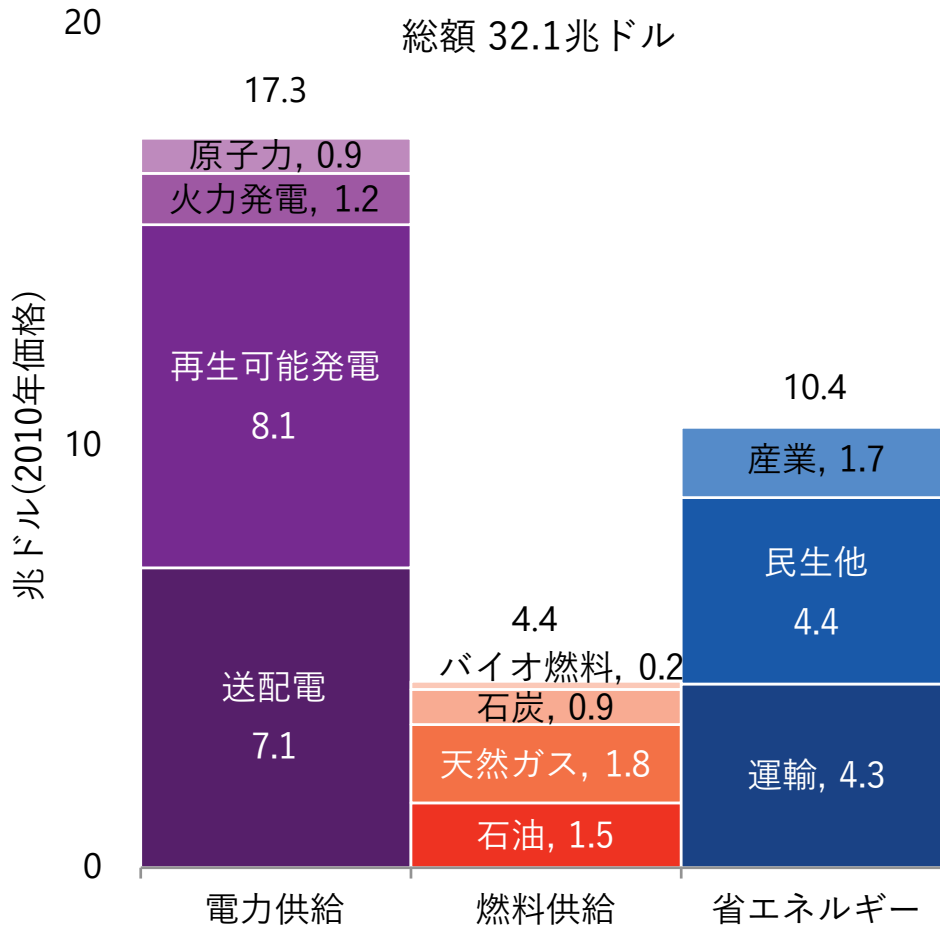


※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

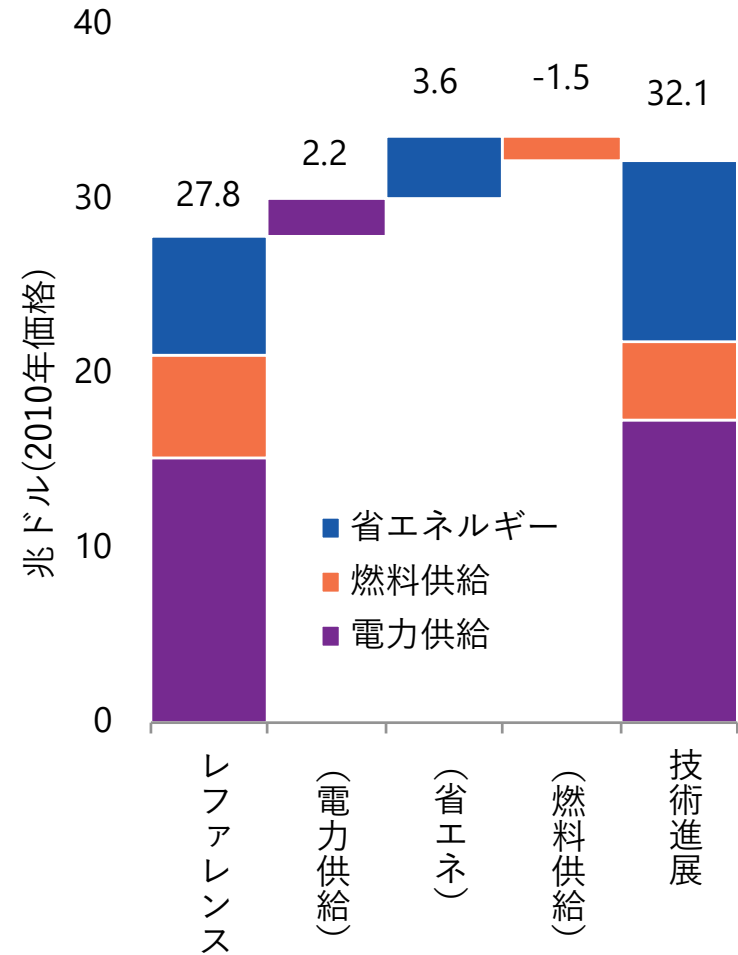
エネルギー関連投資額 (2019年～2050年)

部門別投資額

総額 32.1兆ドル

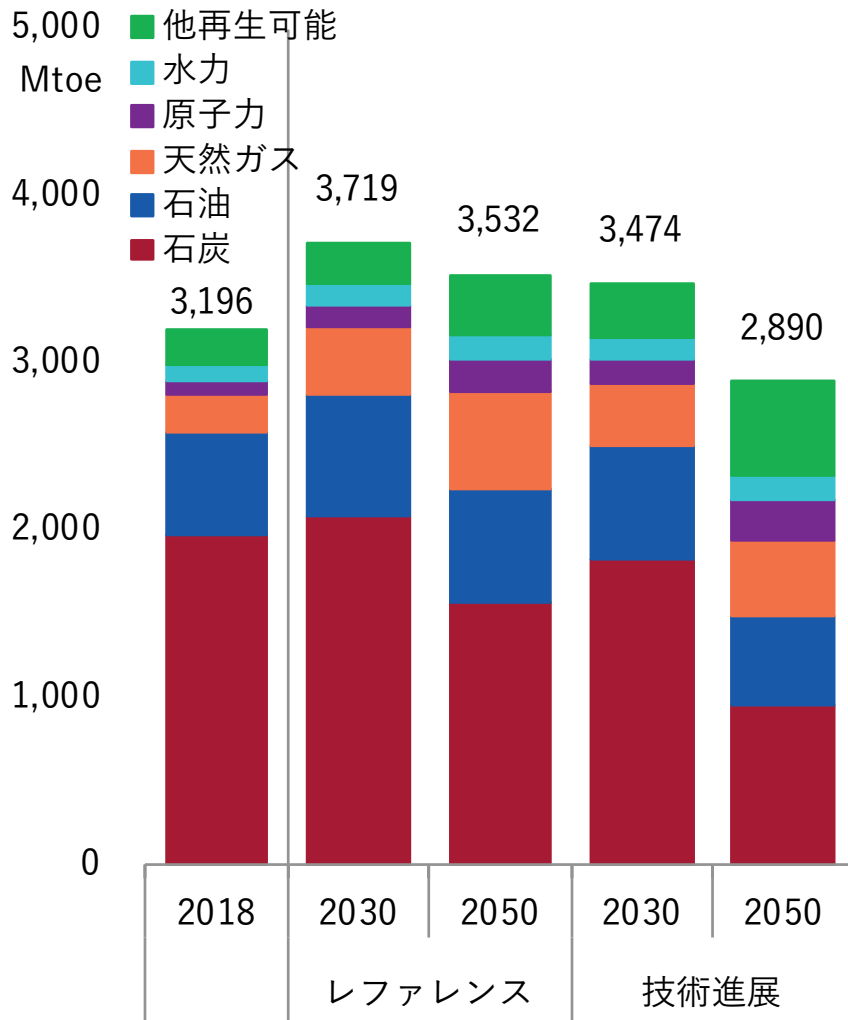


レファレンスシナリオとの比較

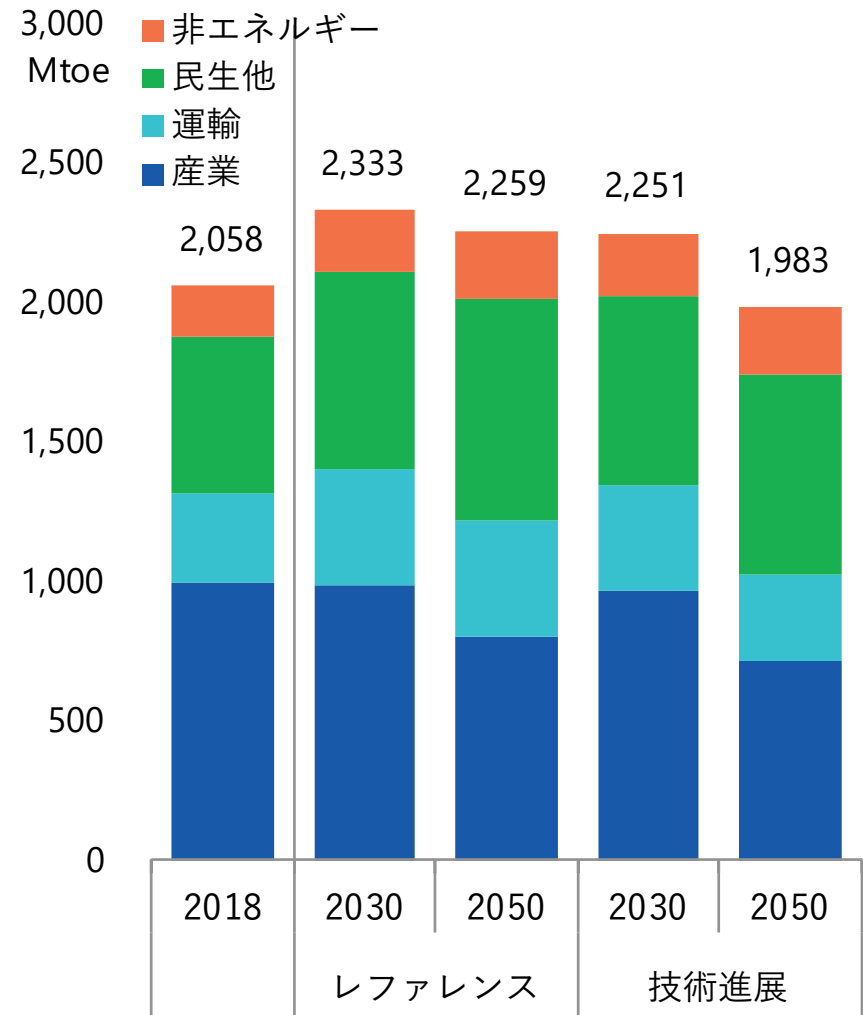


エネルギー消費

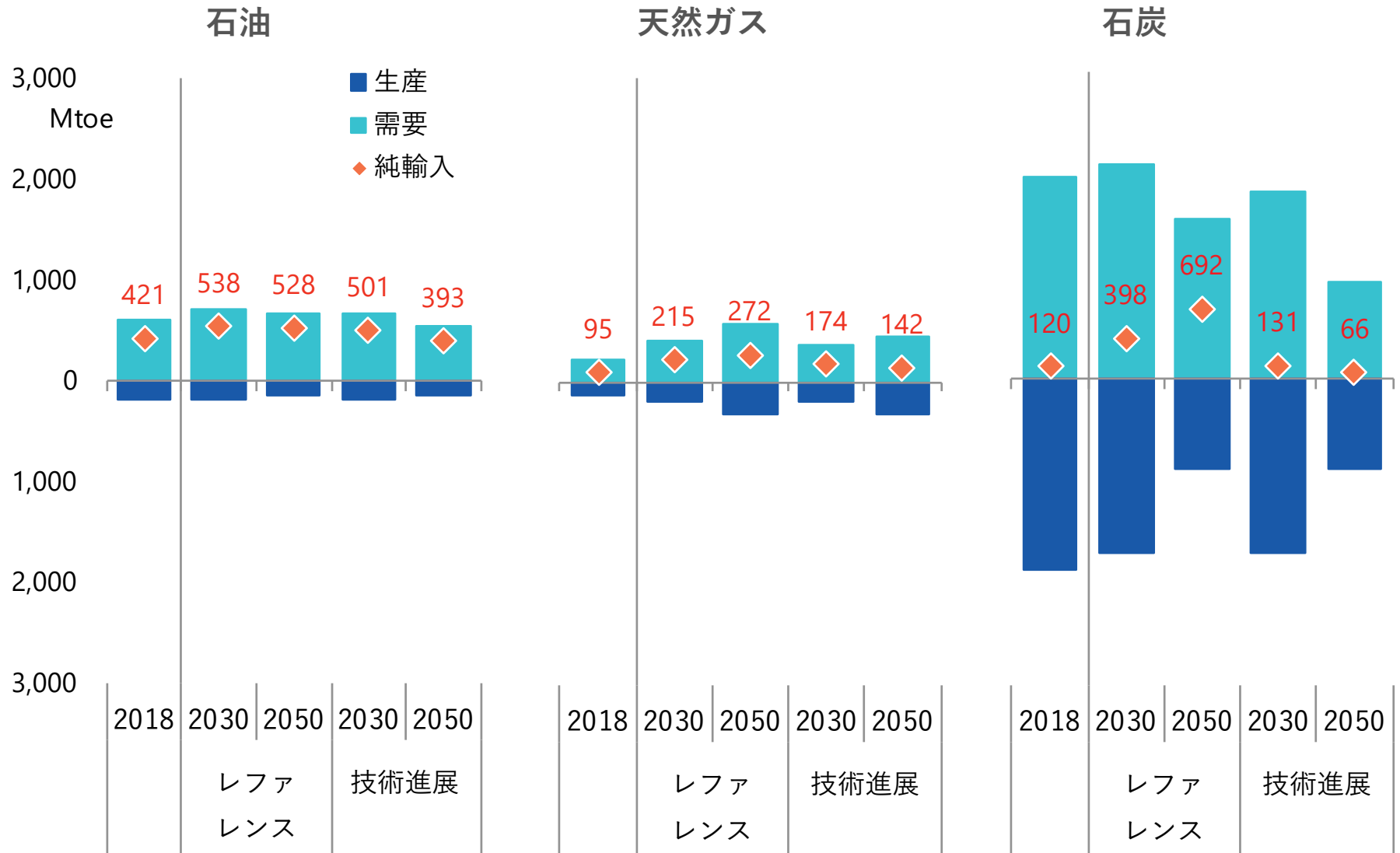
一次エネルギー消費



最終エネルギー消費

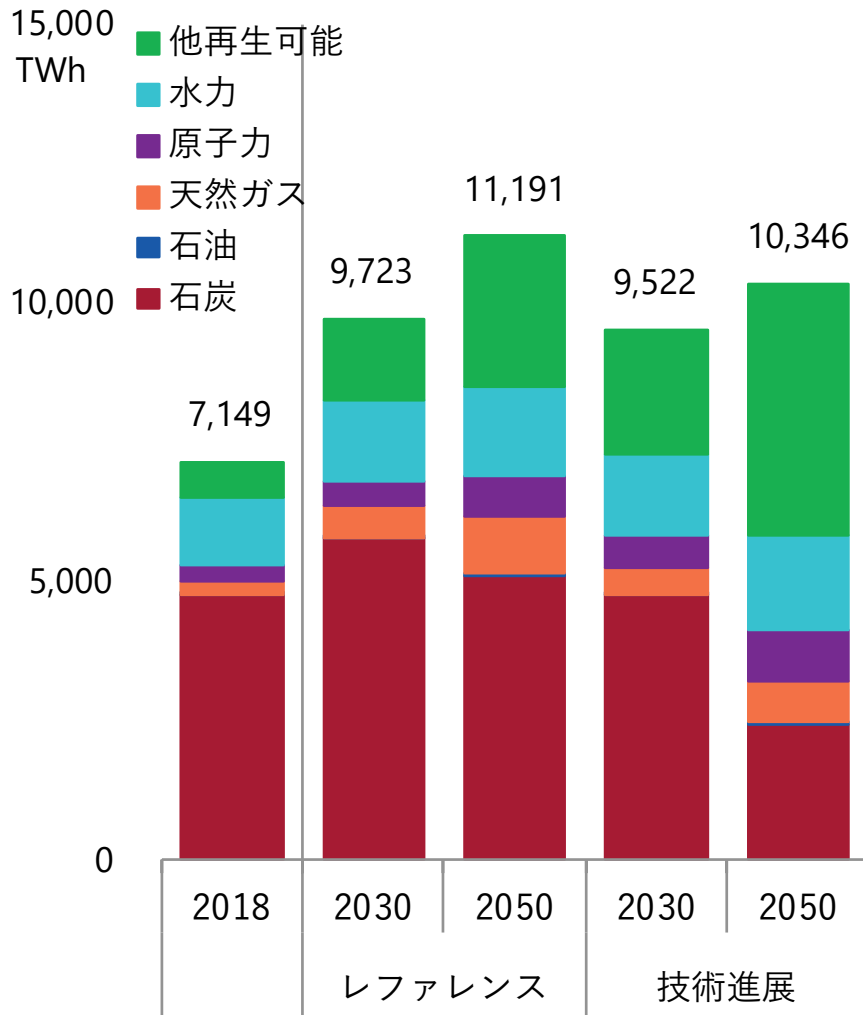


化石燃料需給バランス

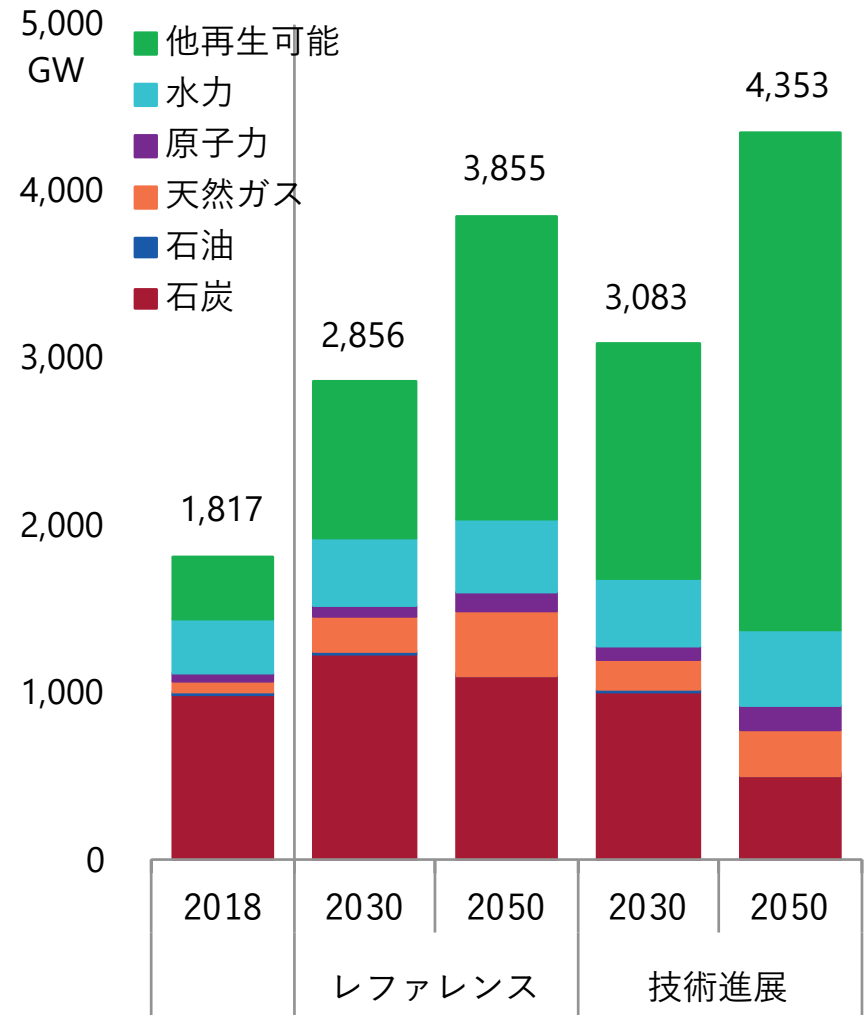


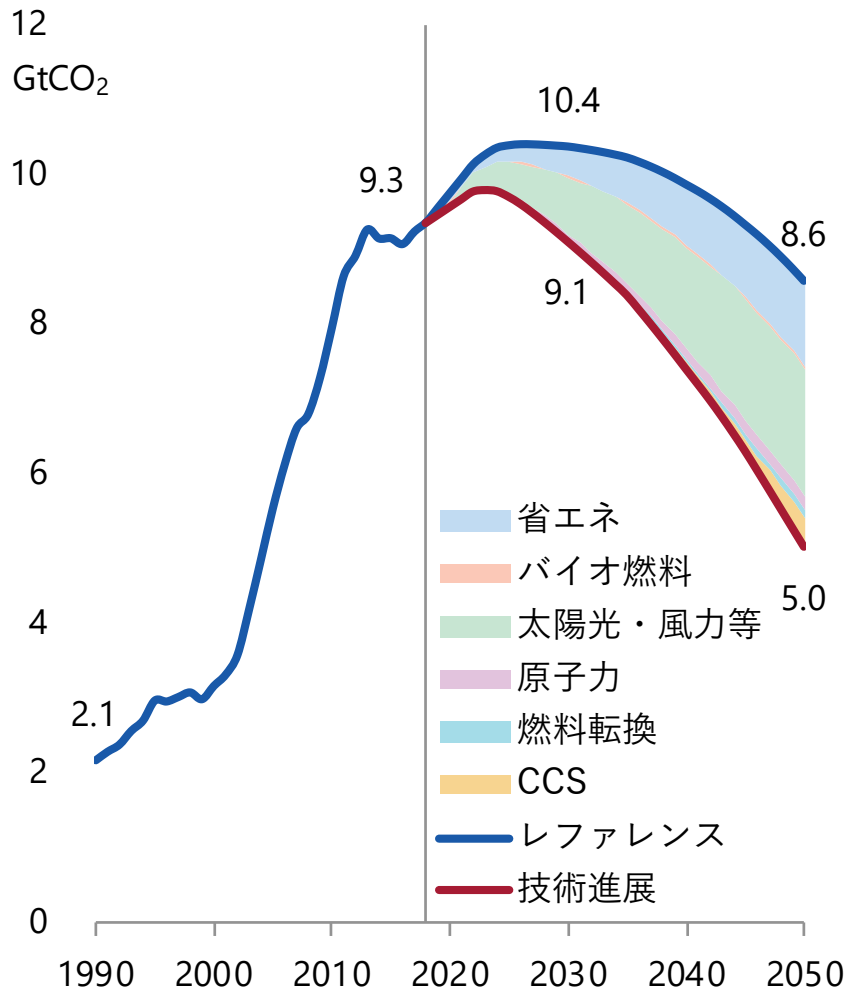
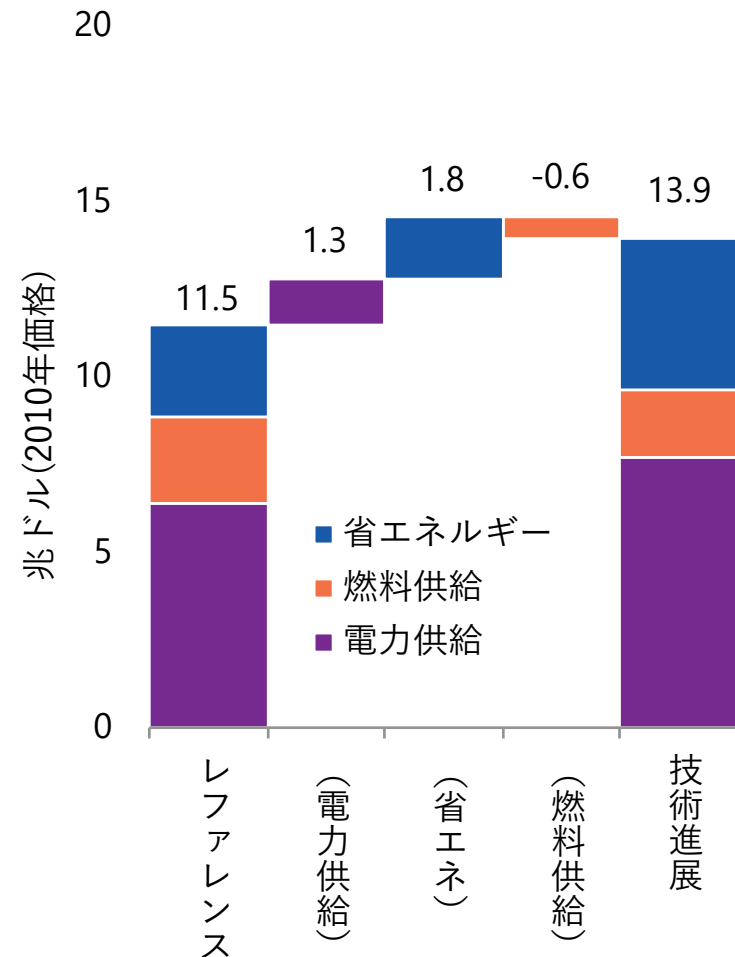
発電構成

発電量



発電設備容量

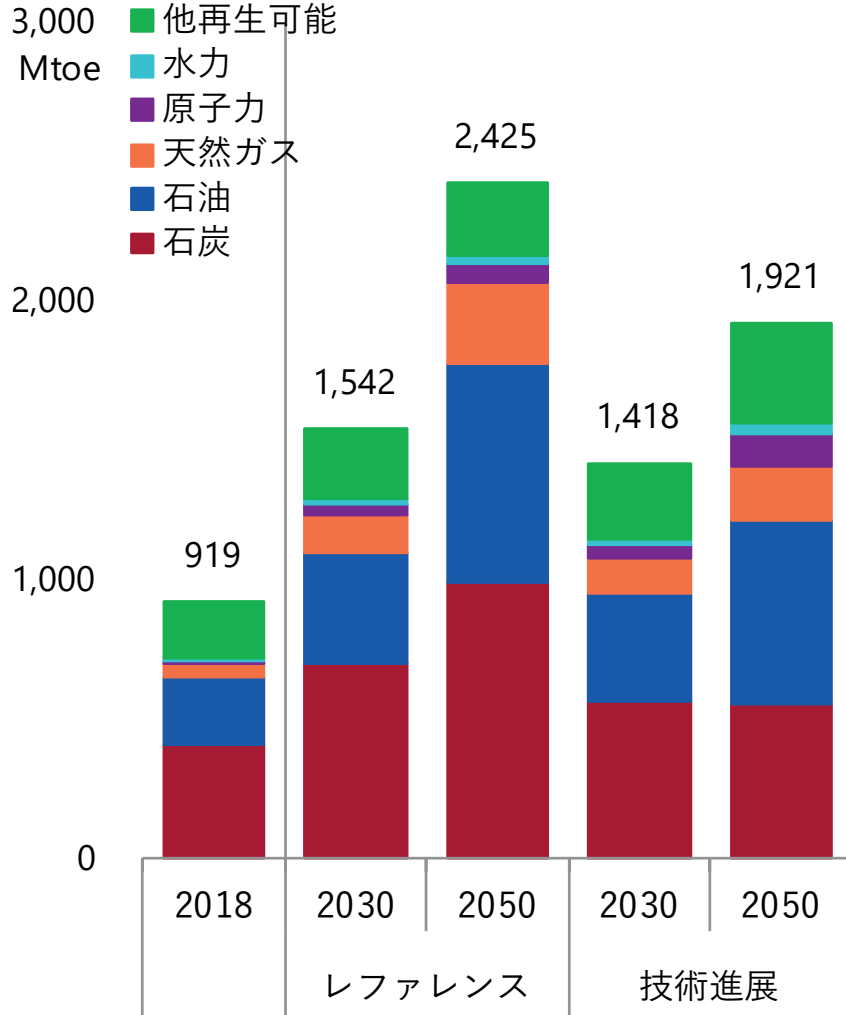


CO₂排出量・エネルギー関連投資エネルギー起源CO₂排出量エネルギー関連投資
(2019年～2050年累積額)

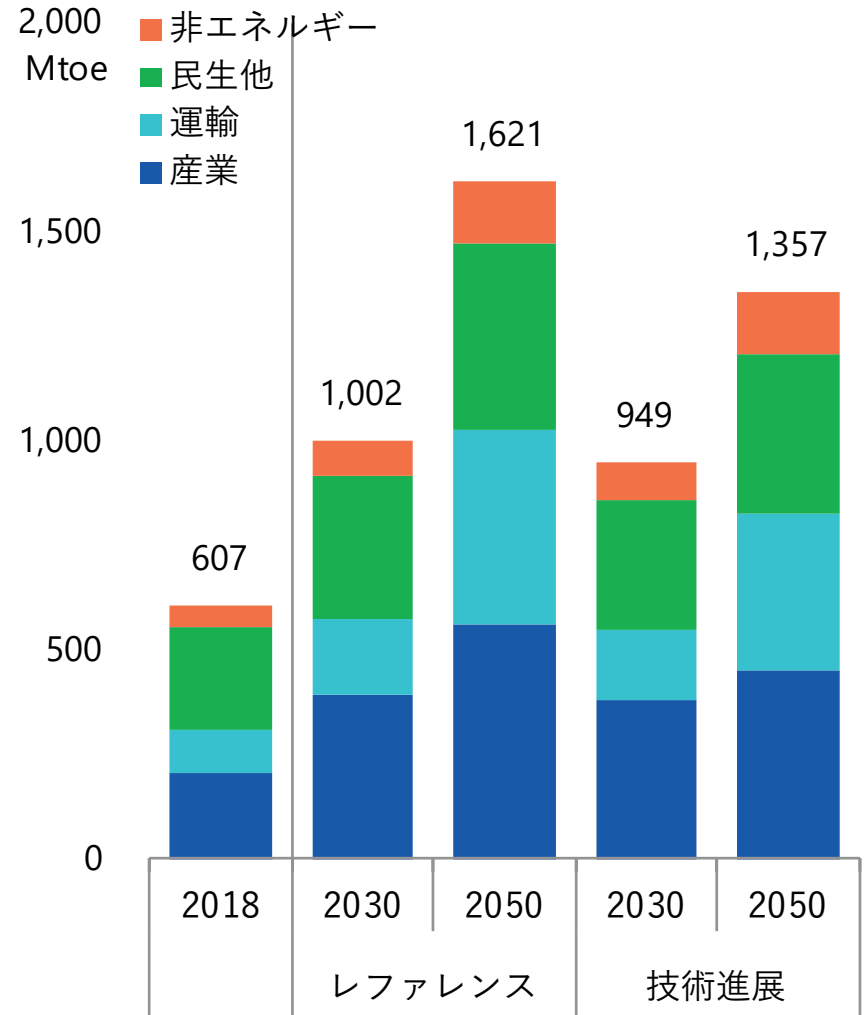
※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

エネルギー消費

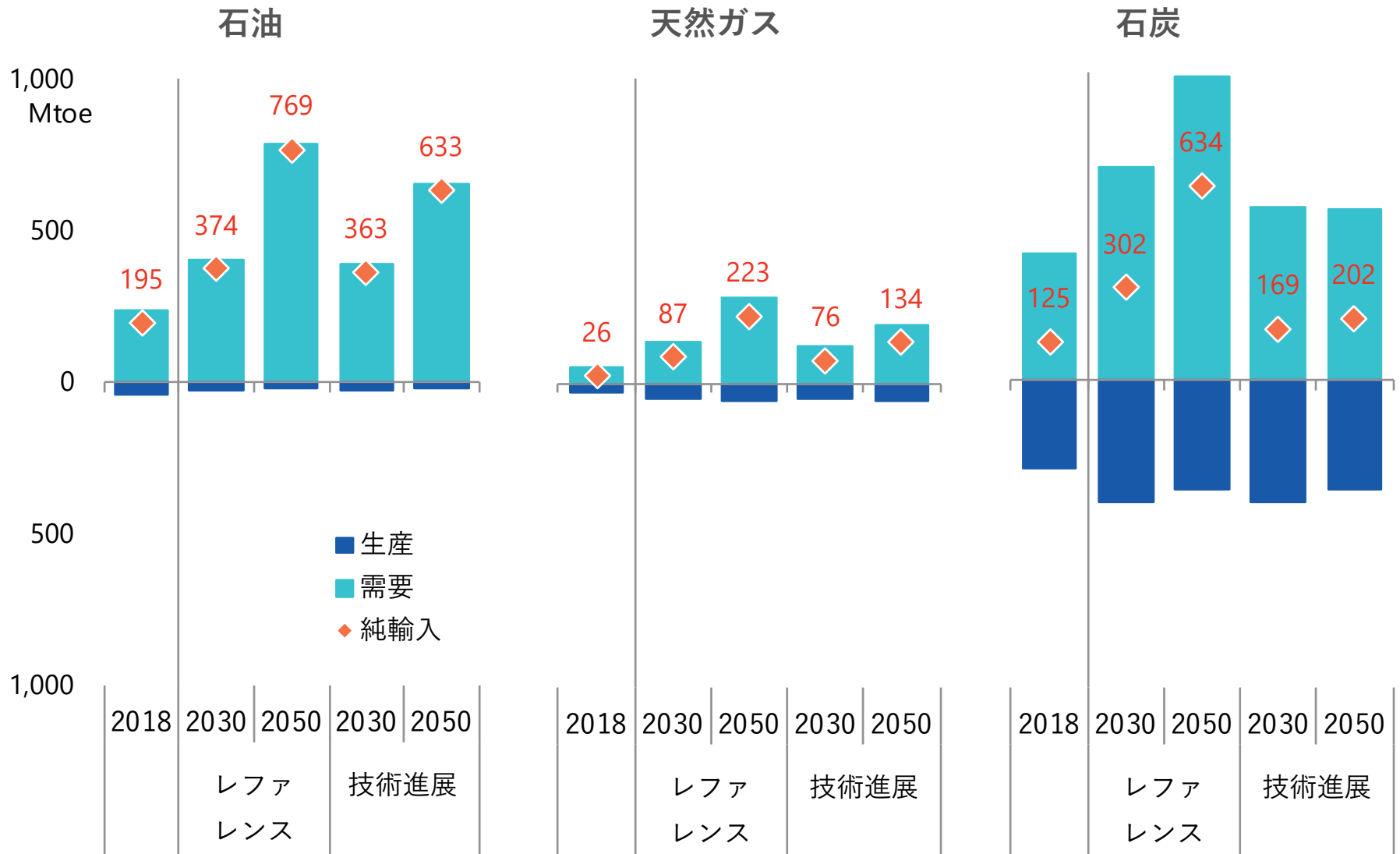
一次エネルギー消費



最終エネルギー消費

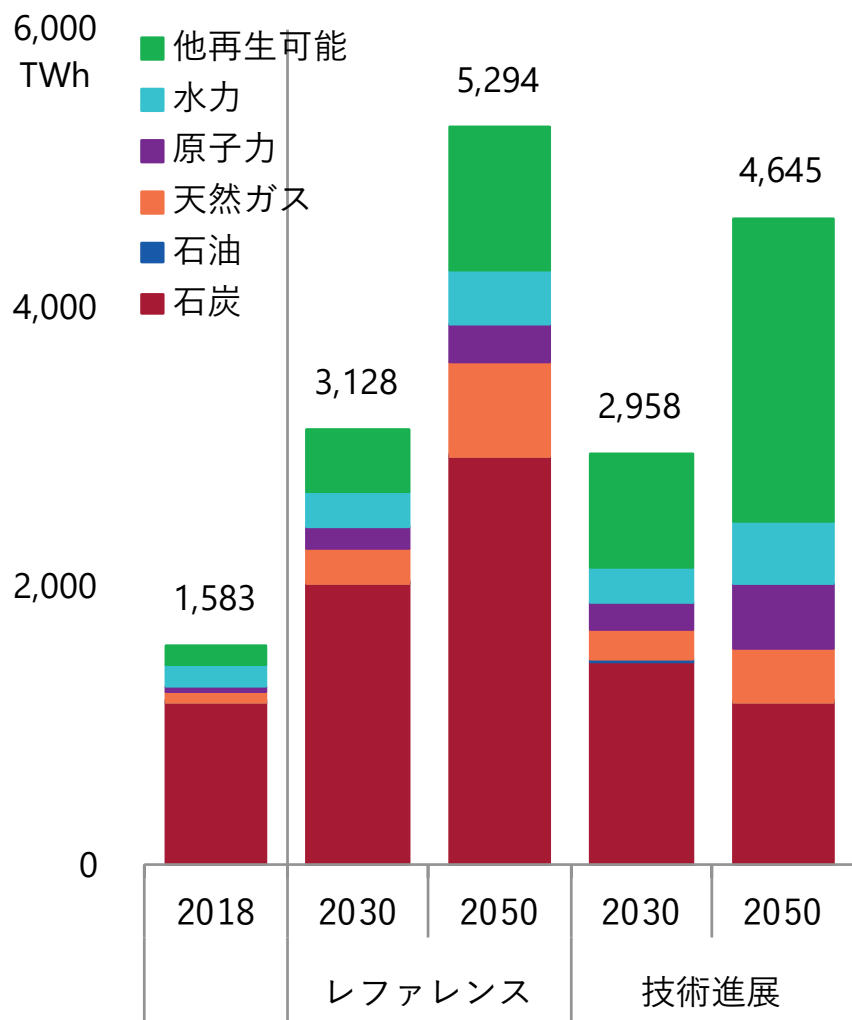


化石燃料需給バランス

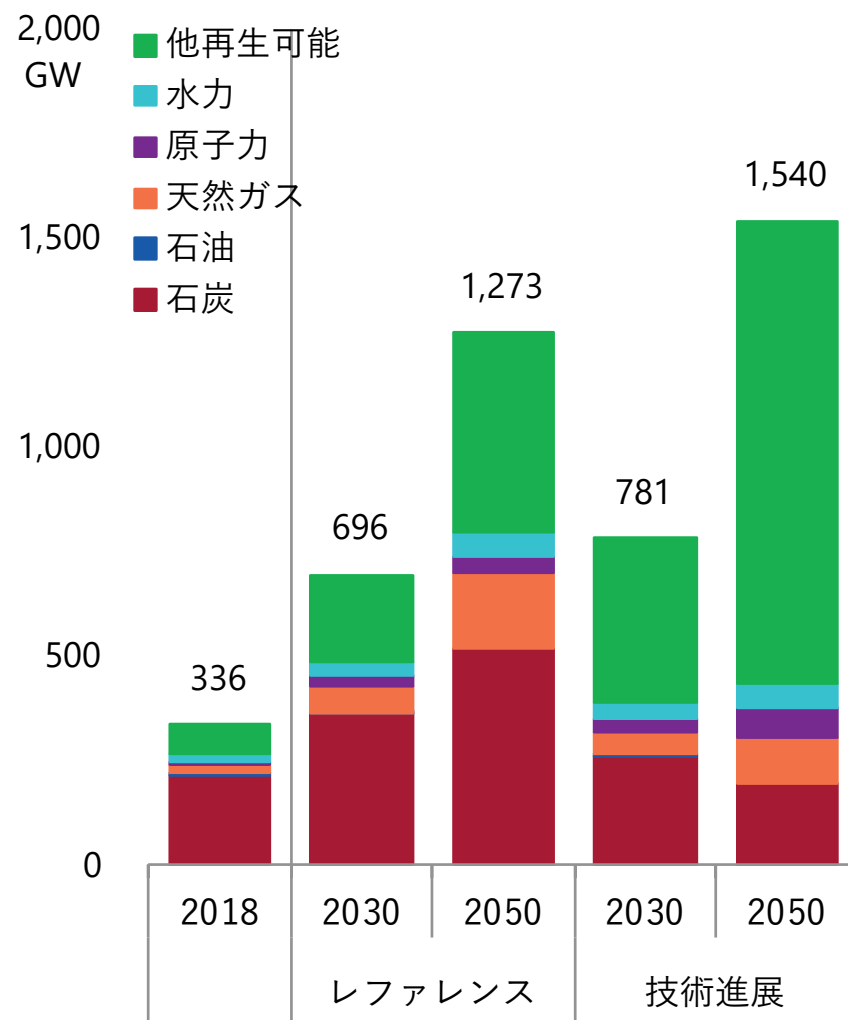


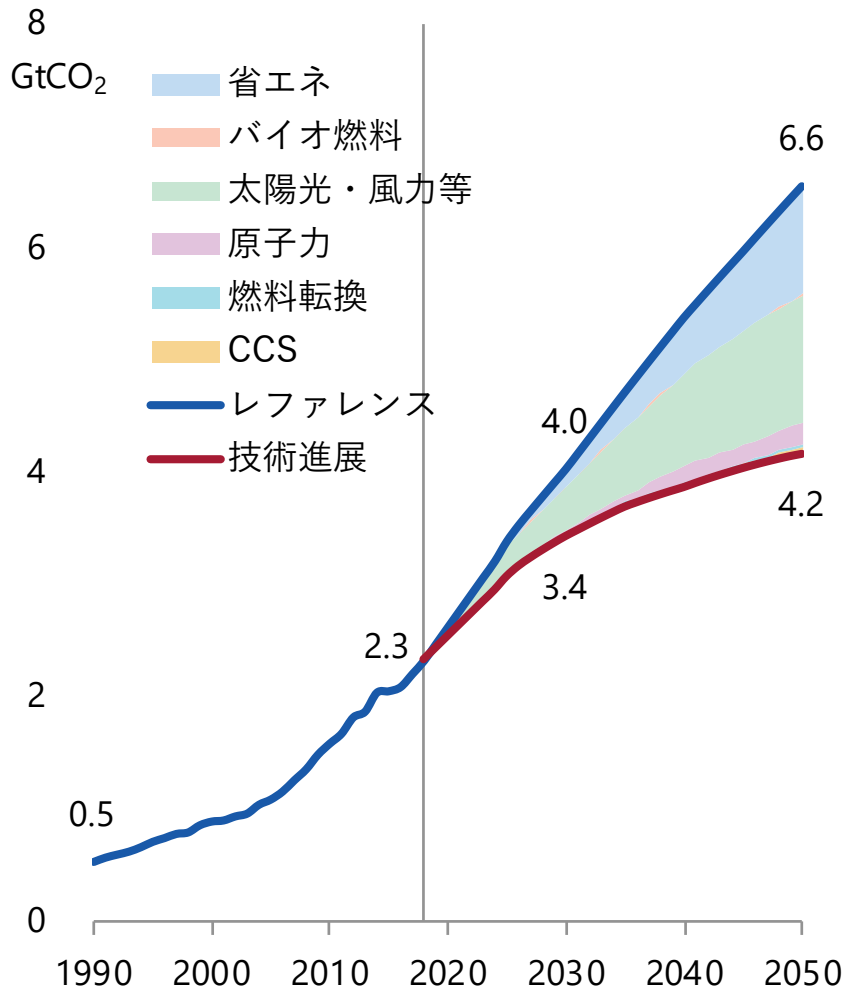
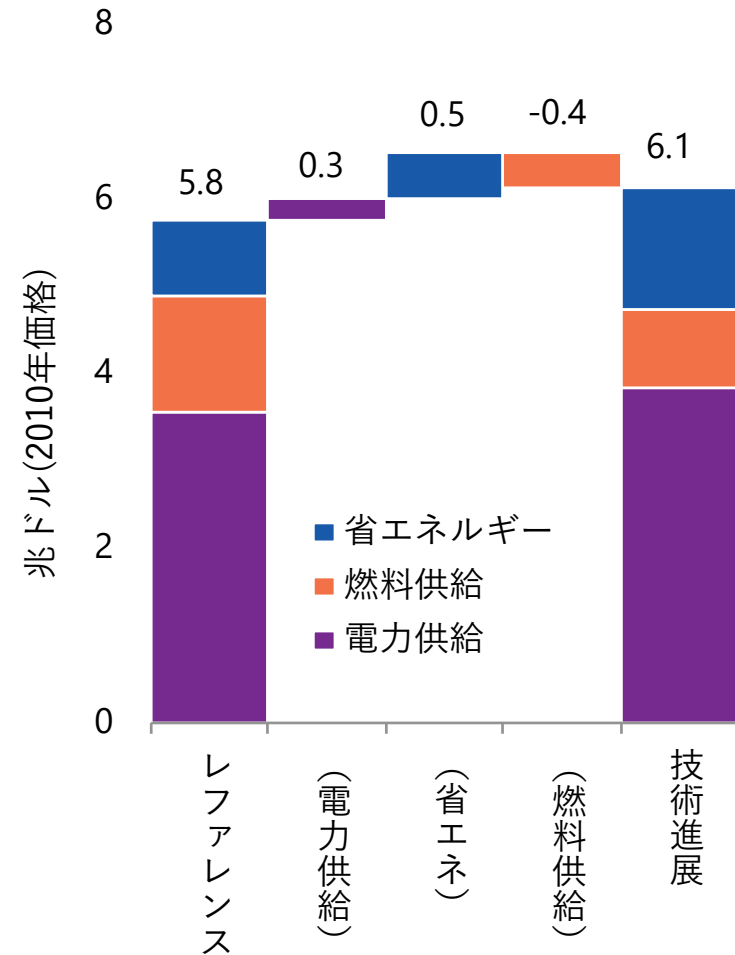
発電構成

発電量



発電設備容量

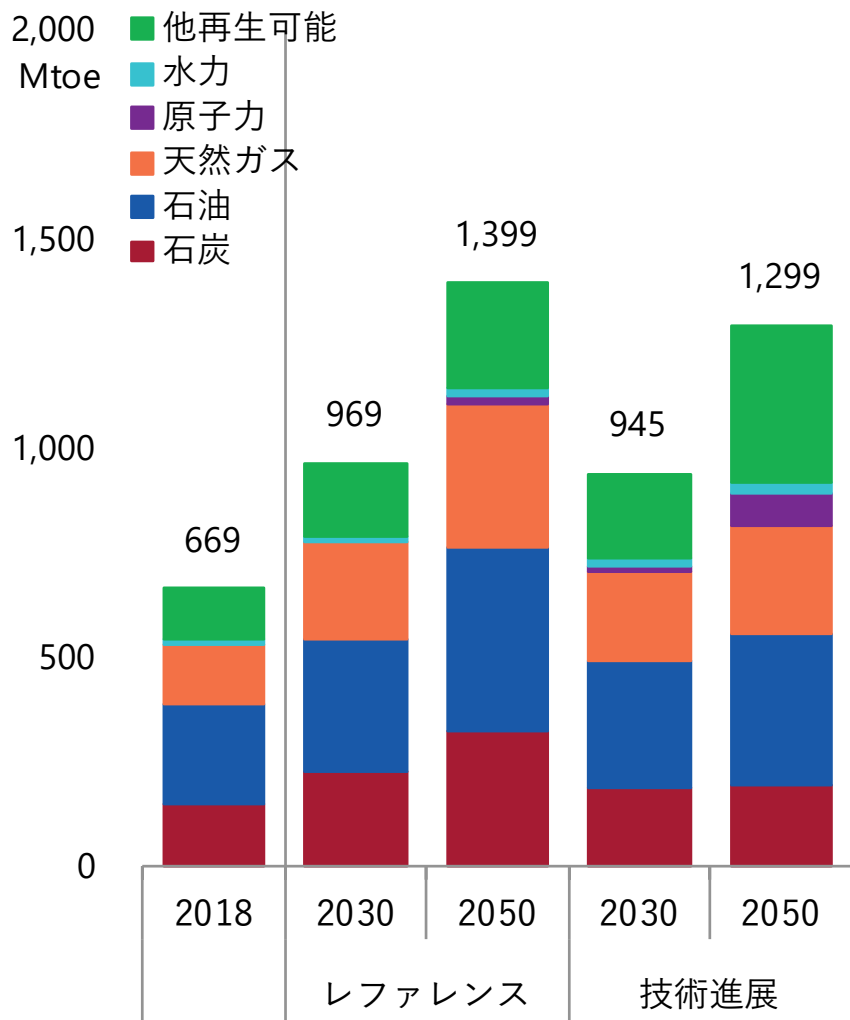


CO₂排出量・エネルギー関連投資エネルギー起源CO₂排出量エネルギー関連投資
(2019年～2050年累積額)

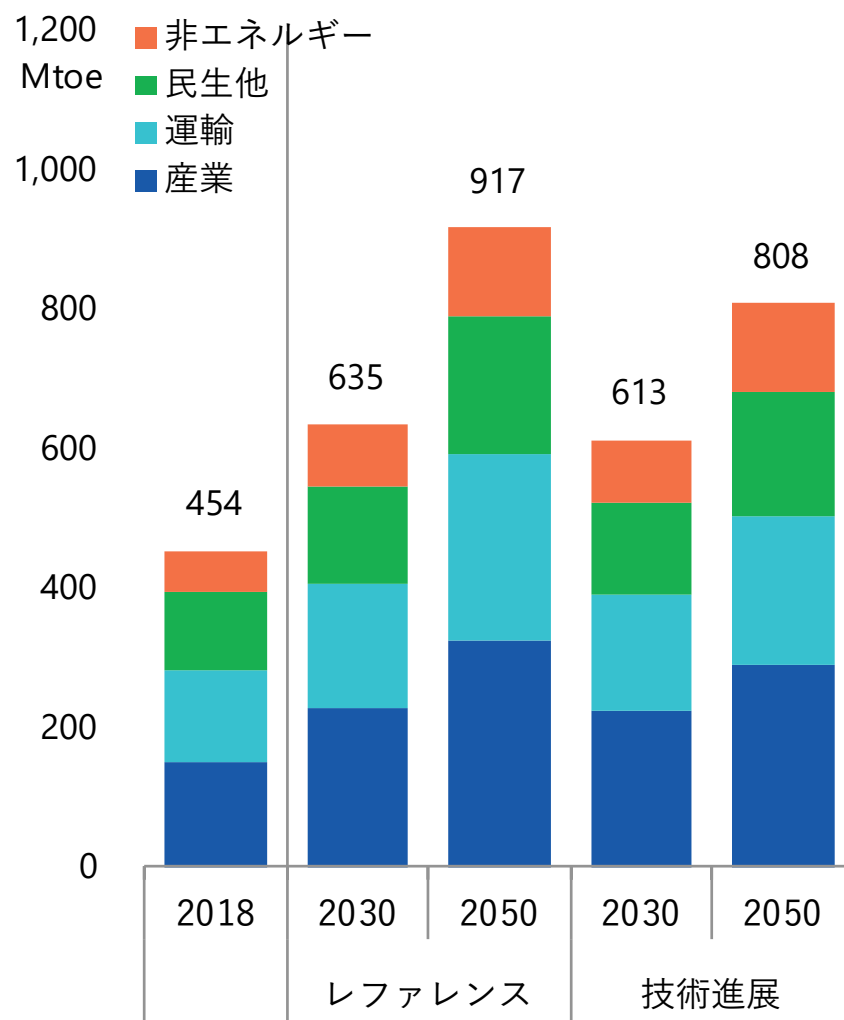
※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照

エネルギー消費

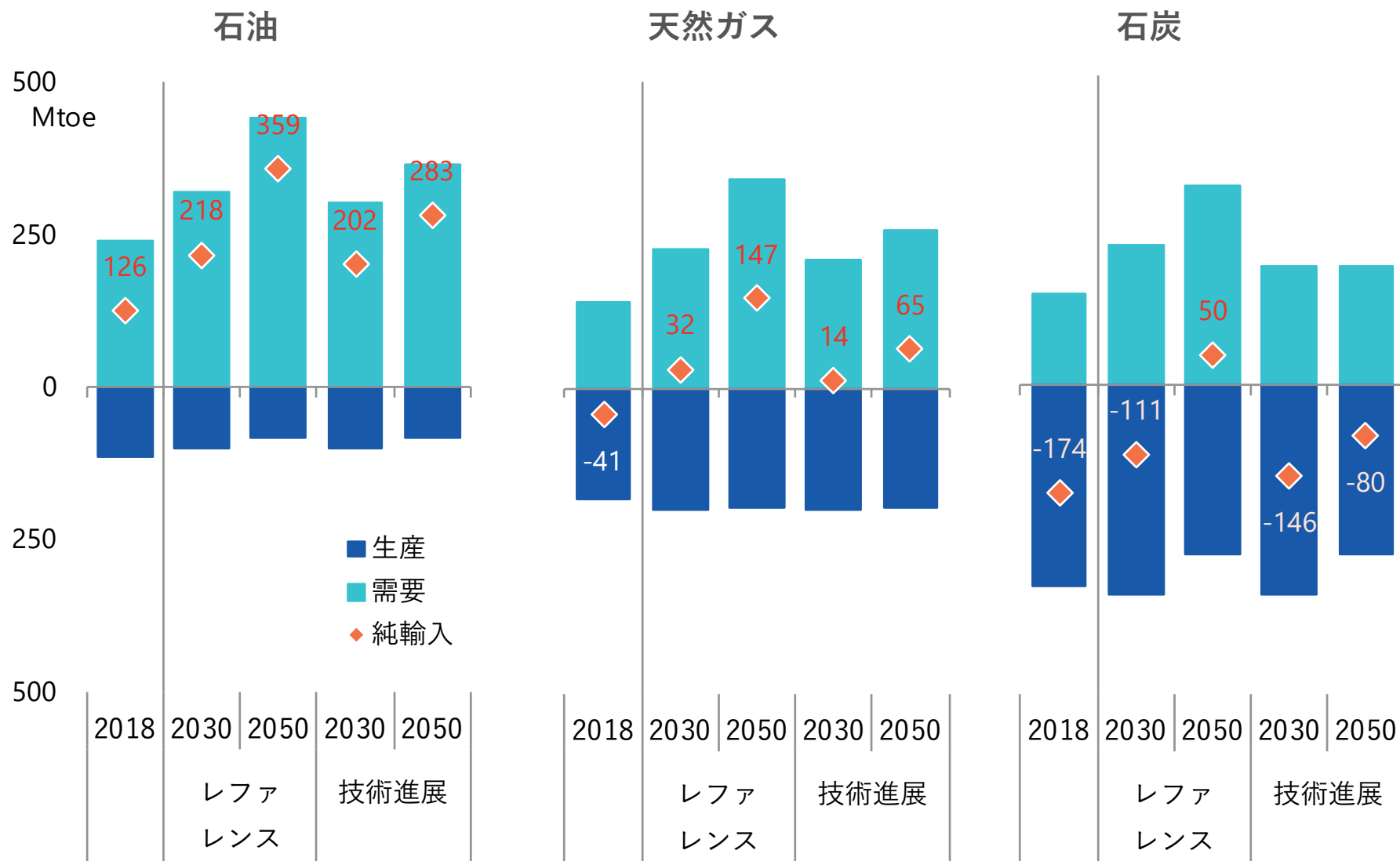
一次エネルギー消費



最終エネルギー消費

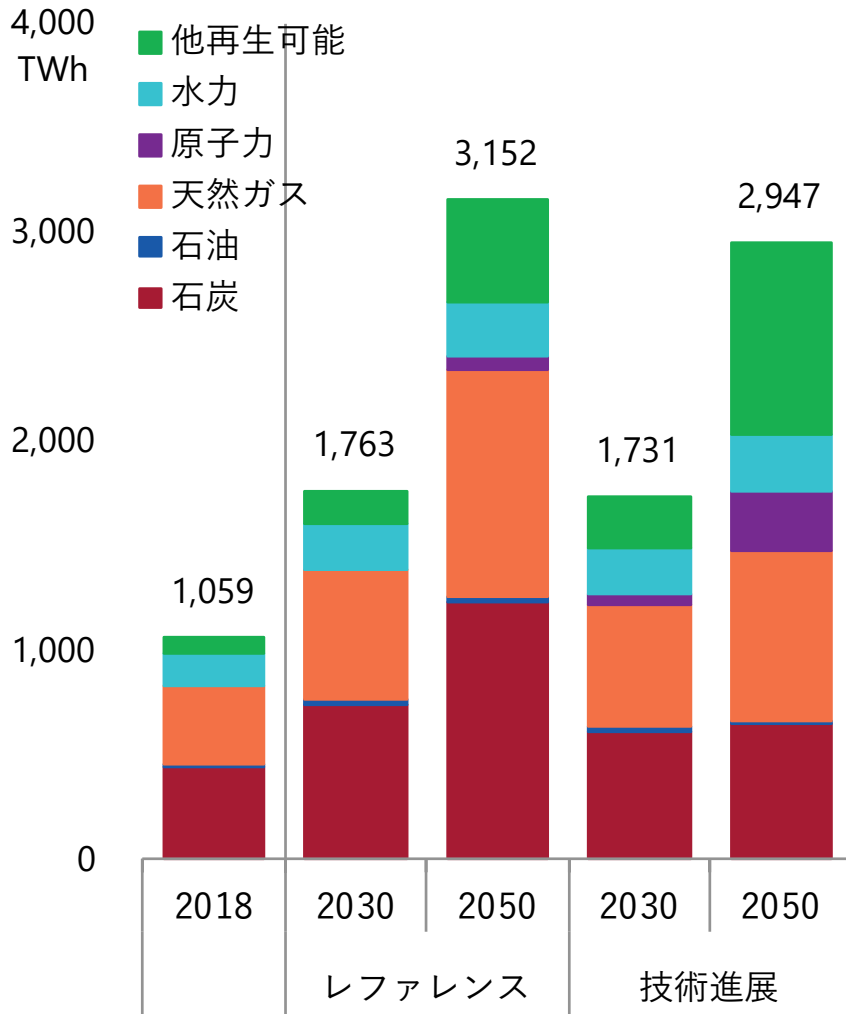


化石燃料需給バランス

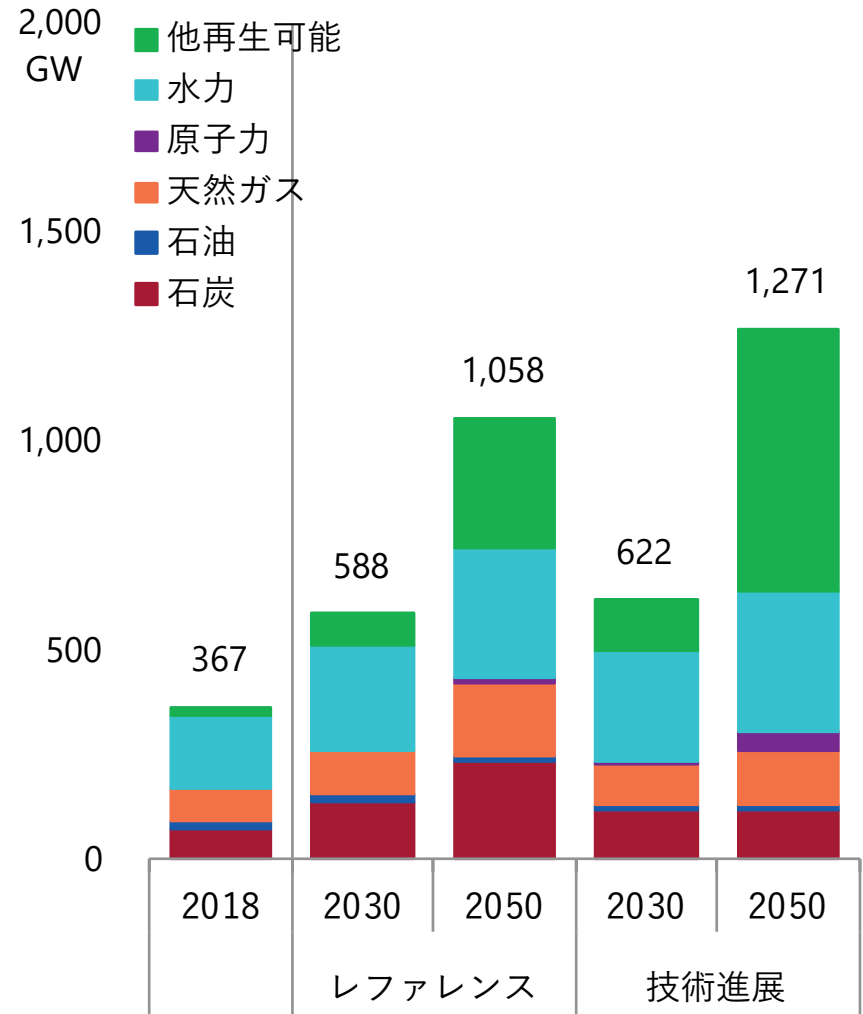


発電構成

発電量

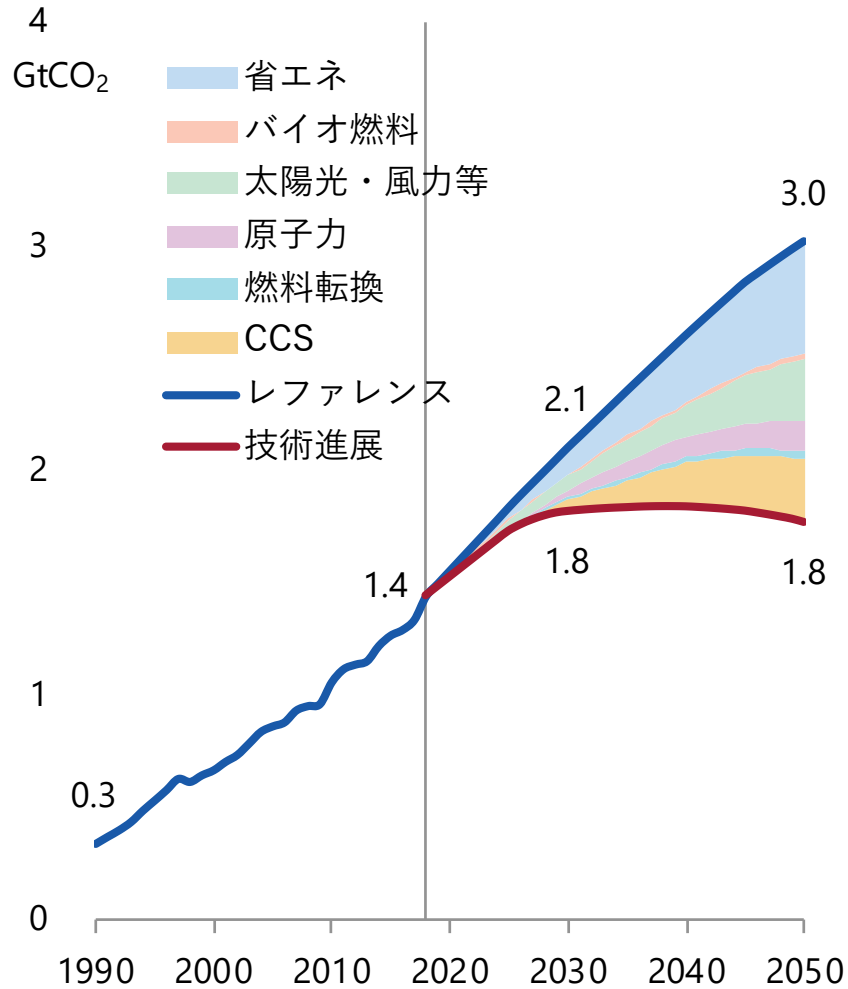


発電設備容量

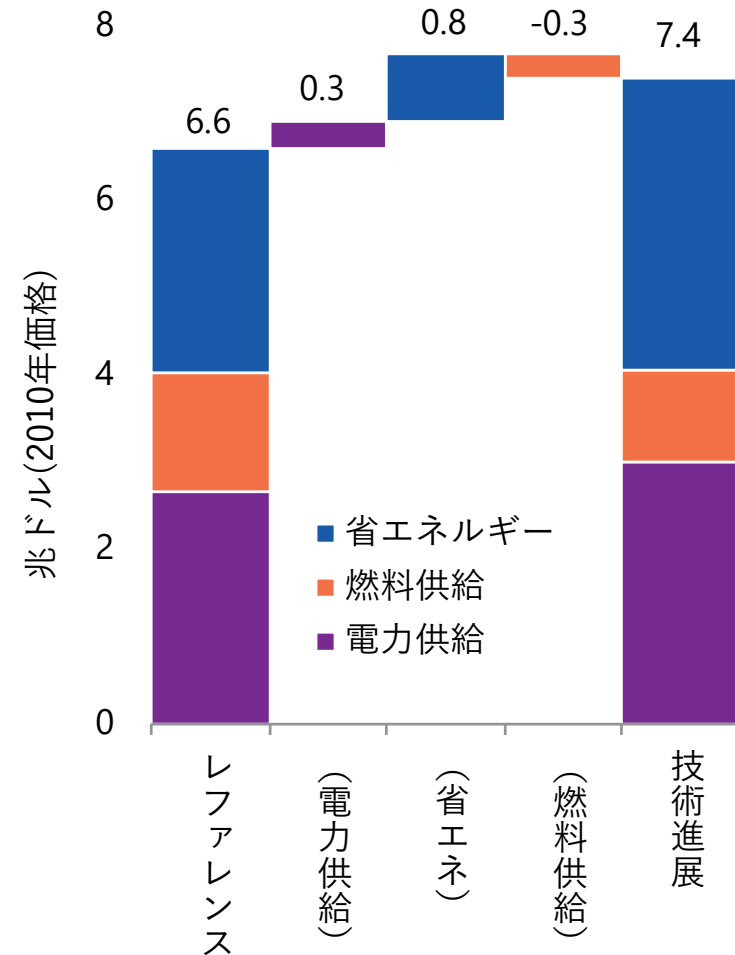


CO₂排出量・エネルギー関連投資

エネルギー起源CO₂排出量



エネルギー関連投資 (2019年～2050年累積額)



※コロナウイルス感染拡大による短期的な影響は6章Box 6-1を参照