

# 日本の脱炭素化への 道筋

グリーントランスフォーメーション推進小委員会発表資料

2022年3月23日



# 要旨

---

マッキンゼー日本支社では、2030年から2050年にかけての脱炭素化目標を実現するための最もコスト効率的な経路について、独自のエネルギー需給モデルや脱炭素化技術のコストモデルを活用したシナリオ分析を実施

同分析によると、日本は、2030年までは脱炭素化目標をコスト効率的に達成できる一方で、2050年にかけてコストが増大する見込み

- 2030年までは、従来技術よりもコスト優位な脱炭素化技術が多く、社会全体ではコストを下げながら脱炭素化目標を実現できる。一方で、2050年にかけては水素やCCS等コスト高な脱炭素化技術の導入が必要であることから、社会全体ではコストが増大する
- 欧州との比較においては、2030年までは社会全体で同程度のコストで脱炭素化目標が達成できるが、2050年までにはコスト高となる見込み

脱炭素化と日本産業の競争力強化を同時に実現していくためには、①脱炭素化によって生まれる事業成長機会の確実な獲得と②より効率的な脱炭素化実現に向けた日本全体の産業構造の検討が論点となる

- ①日本企業は典型的には、既存事業の改善には長けている一方で、市場変化を捉えた、大胆なポートフォリオ変革は諸外国と比べて必ずしも活発ではない
- ②日本全体の排出削減コストを低減するという観点から、各企業の事業戦略を越えて、日本の産業構造には複数のシナリオの可能性が存在

---

# Content



- 脱炭素化に向けた社会コスト
  - 分析の手法
  - 日本と欧州の比較結果
  - 参考) 日本の詳細分析
- 脱炭素化の実現に向けた日本産業における論点

# 本研究の位置づけ

---



## 本研究は以下に当てはまる

- クライアント組織からの依頼ではなく、マッキンゼーのグローバルのサステナビリティ研究グループ、そして日本支社として独自の研究活動内容である
- 社会的観点から、実現可能でコスト最適な日本の気候変動目標を達成するためのロードマップを提示
- 経路選定基準はあくまでもコスト最適化



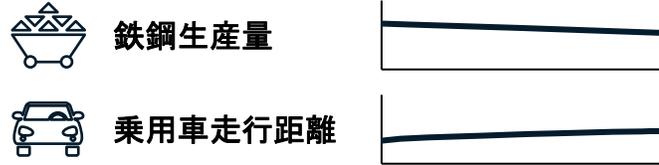
## 一方、本研究は以下には当てはまらない

- 現在の政策、社会環境、技術の条件下で何が起こるかの予測
- 非技術コスト要因の反映と最適化 (例: 政治的実現可能性、国際貿易)
- 各企業および個人についてすべての個別事情を考慮した評価 (例: 独自のサプライチェーン、技術プロセス、原価)

# 各テクノロジーのコストの毎年変化とコモディティのコスト、およびリソースの制約を検討し、2050年までの経済全体のシステムコストを最小限に抑えるように最適化を行った

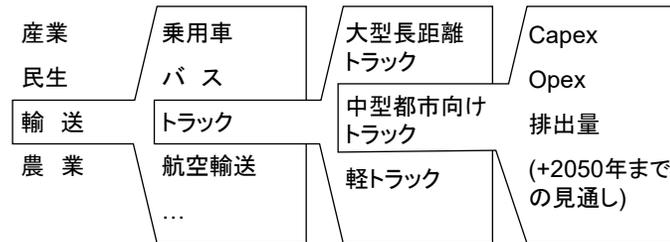
## A 各国の状況を反映したインプット

### 需要および生産予測



### 500件超のビジネスケース

セクターを横断、技術コスト予測に基づく



### 地域特有の制約条件

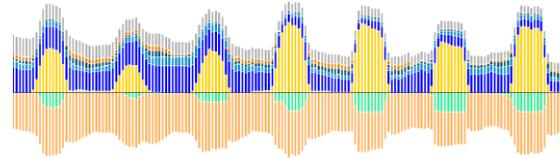
- 土地の利用可能性
- 水素バリューチェーンの成熟度
- 炭素貯留ポテンシャル



## B システムの最適化

### 電力システムの1時間ごとシミュレーション

地域間の電力系統分離と気象パターンを考慮

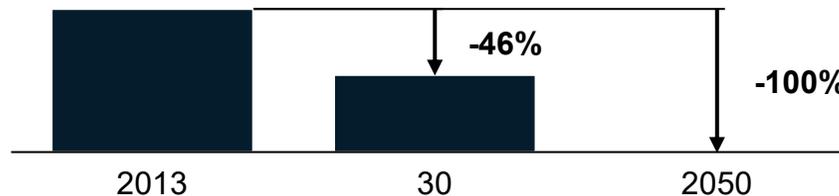


### 経済全体にわたる総合的なシステムコストの最適化

各テクノロジーの変化を2050年までに毎年 年単位でシミュレーションすることにより、セクター間およびモデリング期間を渡ったコスト最適化



### 排出削減目標に達成する前提



## アウトプット

- テクノロジーミックスの変化の軌跡
- エネルギー使用とエネルギーのコスト推移
- レバーごとの削減コスト
- システム全体コスト
- 必要な投資
- シナリオ比較

# 複数の脱炭素化シナリオを検討しており、本資料においてはベースケースシナリオを主軸に議論を行う



## 1. ベースケース

土地利用制約により、2050年の発電構成(容量)に占める再生可能エネルギーの割合は47%

原子力規制委員会の許可の下で17基の原子炉を再稼働、2基の新規建設中の原子炉を稼働開始(60年寿命想定)

人口とGDPの変化による経済活動量の低下を考慮しつつ、産業構造を維持する

本資料の主軸 (P.9-19)



## 2. 製造業の高付加価値集中シナリオ

エネルギー集約度が低く付加価値の高い製品とプロセスに集中したシナリオを検討。例えば以下を輸入に切り替え:

### 汎用還元鉄

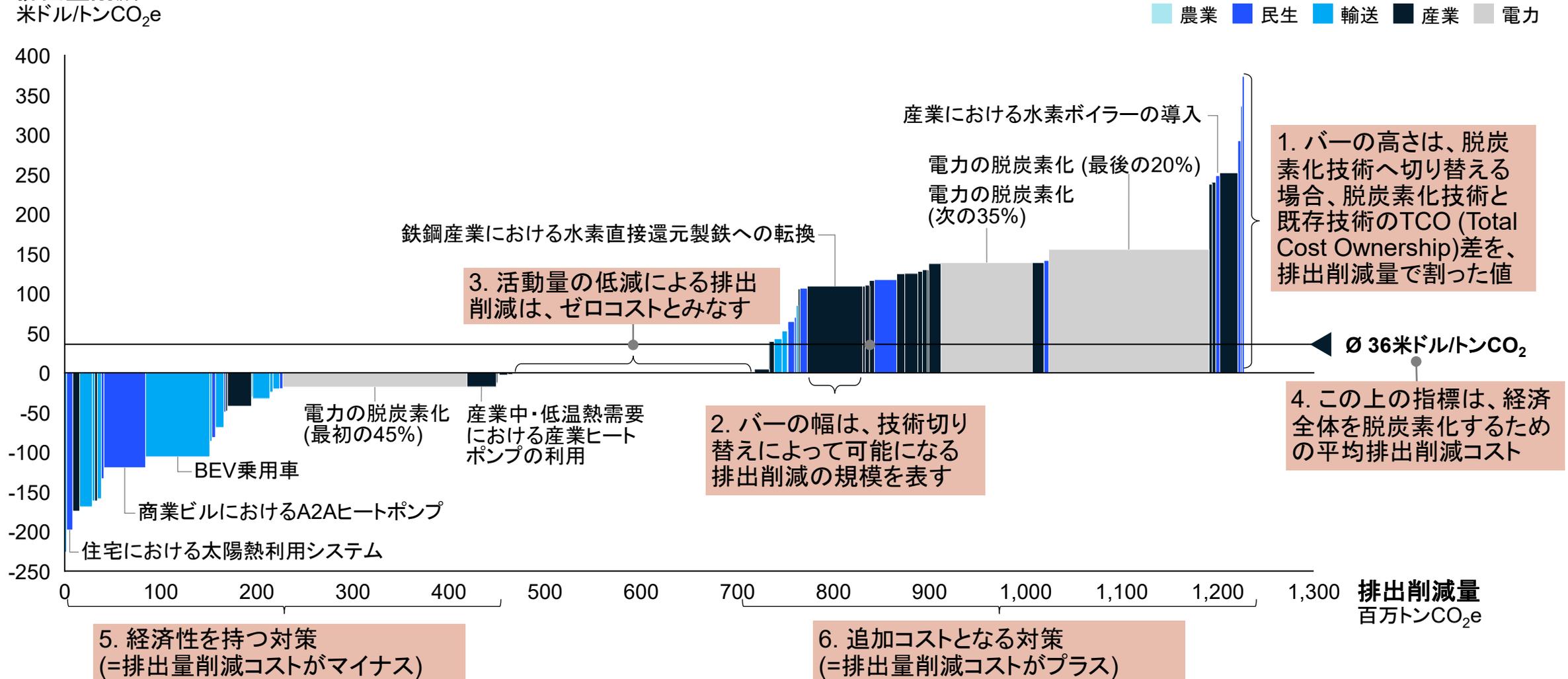
ダウンストリーム製鋼・特殊製品へフォーカス

### 汎用化学品

例: エチレン誘導体、アンモニアを輸入し、特殊化学品へフォーカス

# 参考) 排出削減コスト曲線とは?

排出量削減コスト  
米ドル/トンCO<sub>2</sub>e



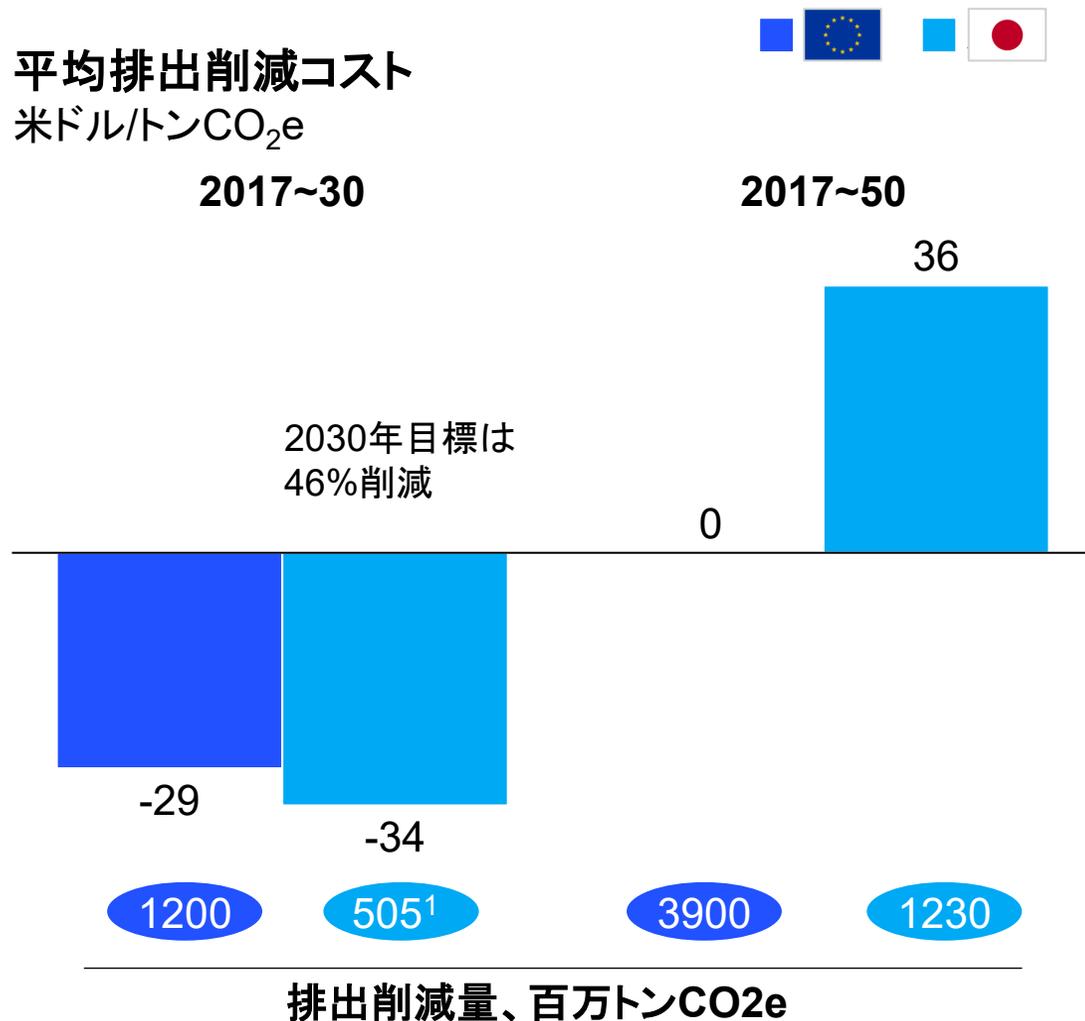
---

# Content



- 脱炭素化に向けた社会コスト
  - 分析の手法
  - 日本と欧州の比較結果
  - 参考) 日本の詳細分析
- 脱炭素化の実現に向けた日本産業における論点

# 日本と欧州の平均排出削減コストは2030年までの短期・中期において同程度である 一方、2050年にかけては日本のコストが高くなる



1. 日本の削減目標は2013年度対比で排出量46%削減

2030年までは、日欧共に既存の成熟した技術による削減ポテンシャルが高く、マイナスの削減コストで目標を達成可能。例えば、

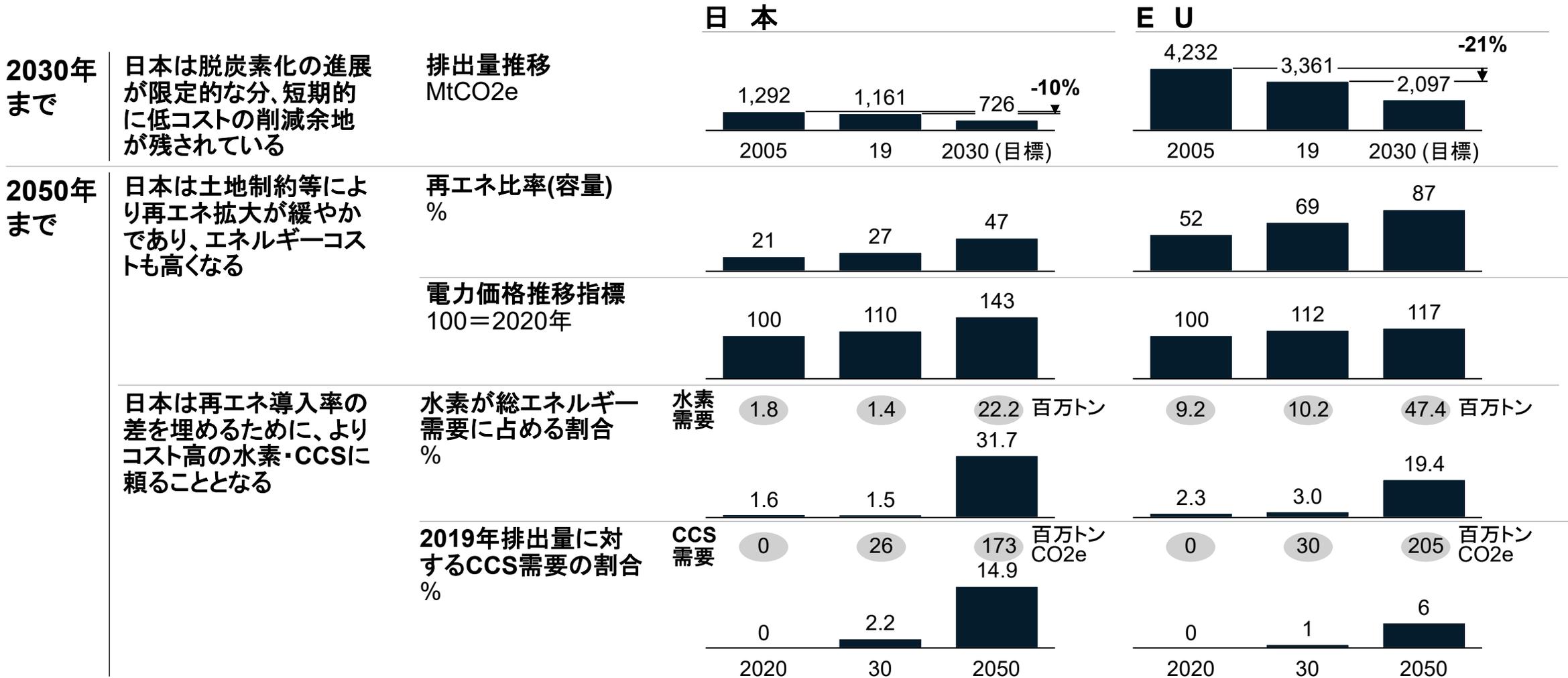
- 太陽光・風力等の安価な再エネ導入
- 自家用車のEV化
- 産業、民生の熱供給における、ガスへの燃料転換 等

一方、脱炭素化コストは2050年までに大幅に高まり、日本の増加が顕著

- 土地制約により再エネ比率が欧州よりも伸び悩む分、安価な再エネの恩恵を享受できず電力価格が高まる
- 再エネ比率が低い結果、水素・CCS等の高コストな脱炭素化技術に頼る必要がある

# 日本は2030年までは確立された安価な技術で脱炭素化を進められるが、2050年に向けては再エネ導入可能率の限界からより高コストな水素・CCSへの依存が高まる

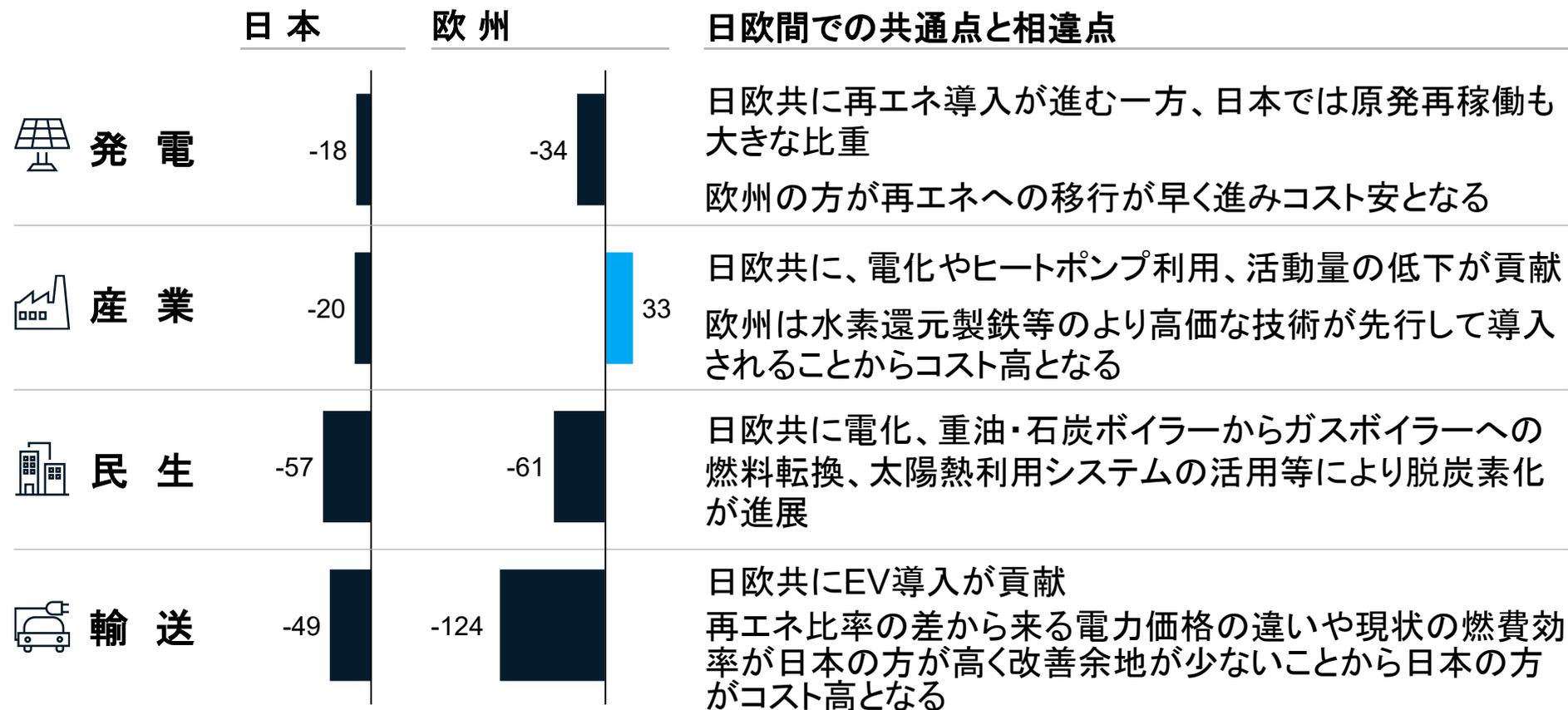
日・EUコスト差の主要因



# 2030年に向けて産業部門と輸送部門での排出削減コストの開きが見られるが、総合的なコスト水準は日欧で同程度となる見込み

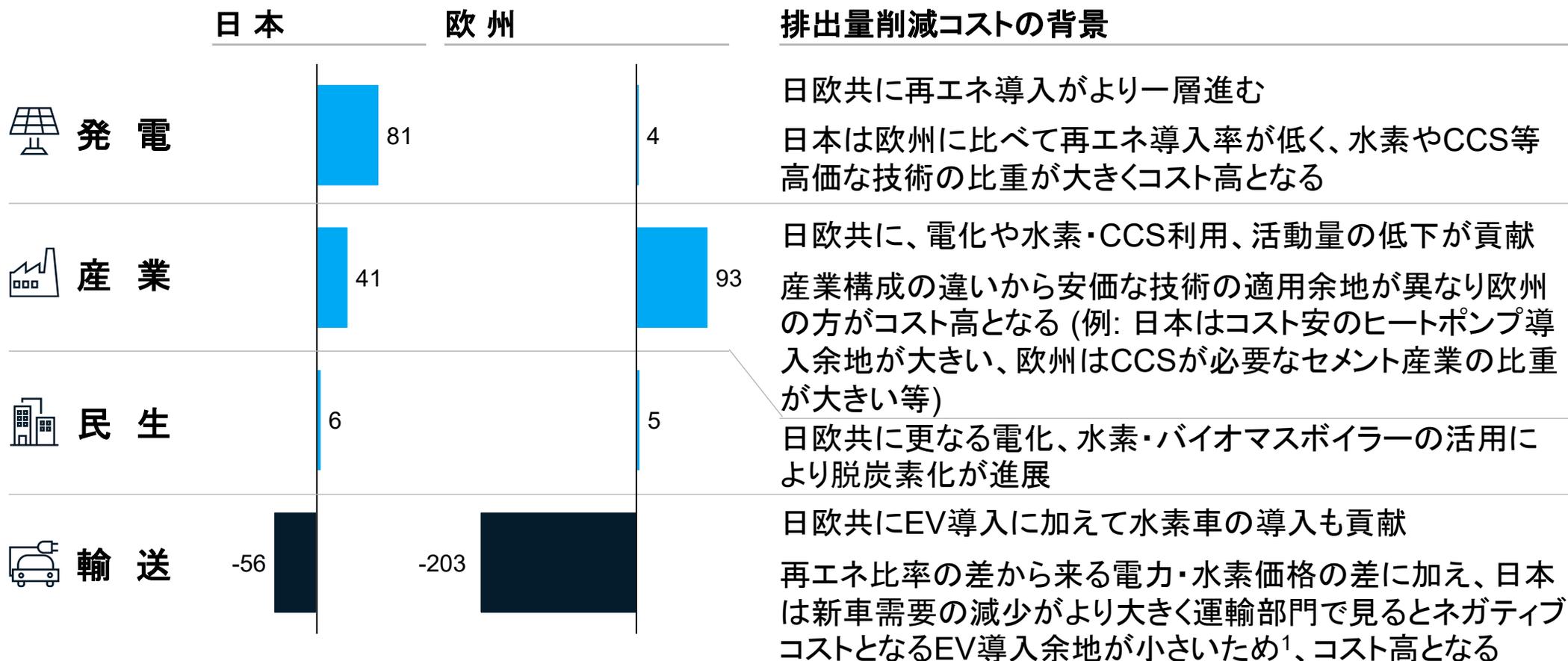
## 2017から2030年にかけてのセクター別排出量削減コスト

米ドル/トンCO2e



# 2050年に向けては、削減コストの高い水素、アンモニア、CCSが本格的に採用される結果、日本の方がコスト高となる

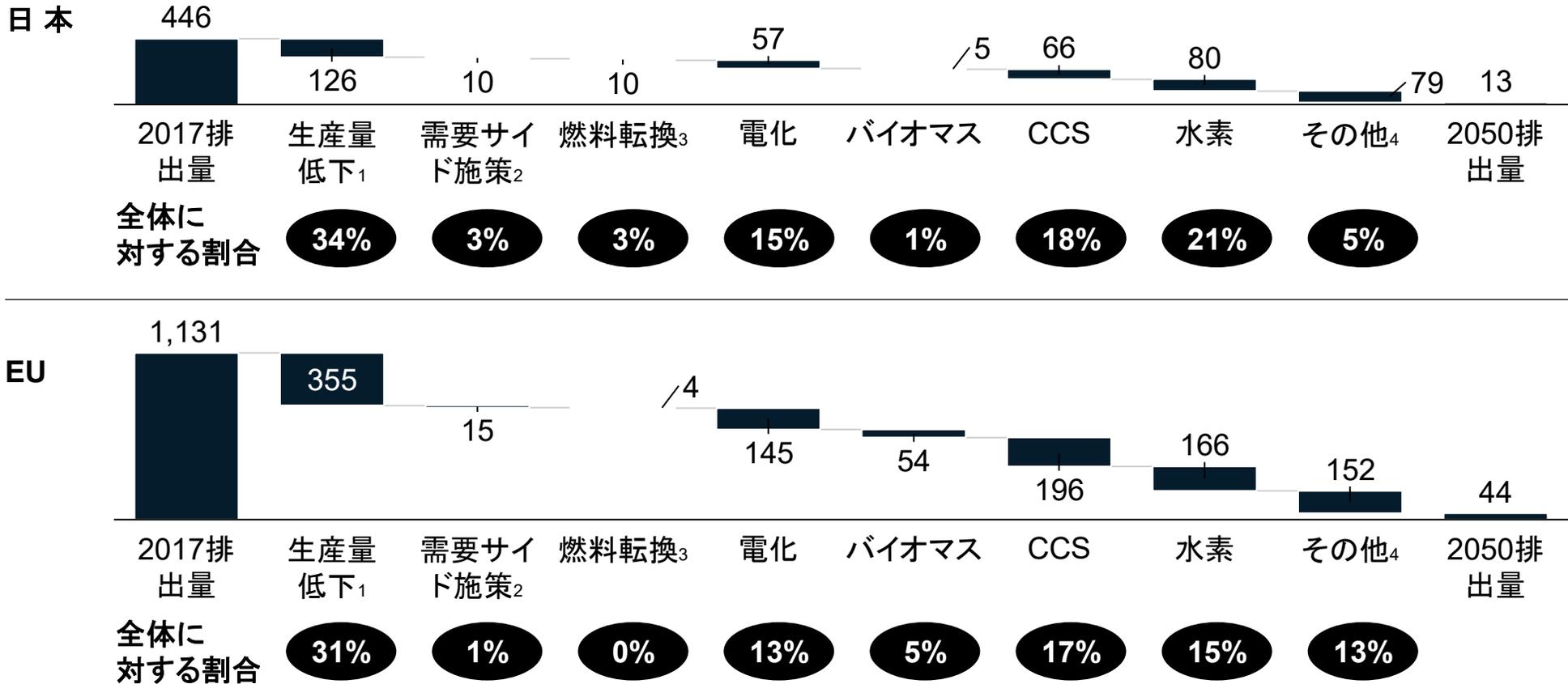
## 2017から2050年にかけてのセクター別排出量削減コスト 米ドル/トンCO2e



1. EV導入はネガティブコストで実現できる一方、需要減はゼロコストであるため、運輸部門に関しては、需要減が大きい程EV導入によるネガティブコストの影響が薄れ、コスト高。一方で、全体の脱炭素化コストに対しては新車需要減少もコスト低減に貢献

# 参考) 産業については、生産量の低下も大きな排出削減要因となっている

産業の排出削減要因; 百万トンCO2e



1. 生産量低下は生産量の低下(主に人口減が要因)と脱炭素化による特定製品の需要減から来る(例: ガソリン需要の低下) 2. 需要サイド施策はプラスチックリサイクルによるエチレン需要低下、CLT活用によるセメント需要低下などを含む  
 3. 燃料転換はボイラーや炉の燃料のガスや太陽熱への転換を含む 4. その他には廃棄物のセメント原料としての利用、エチレン生産におけるバイオエタノールの濃縮等を含む

---

# Content

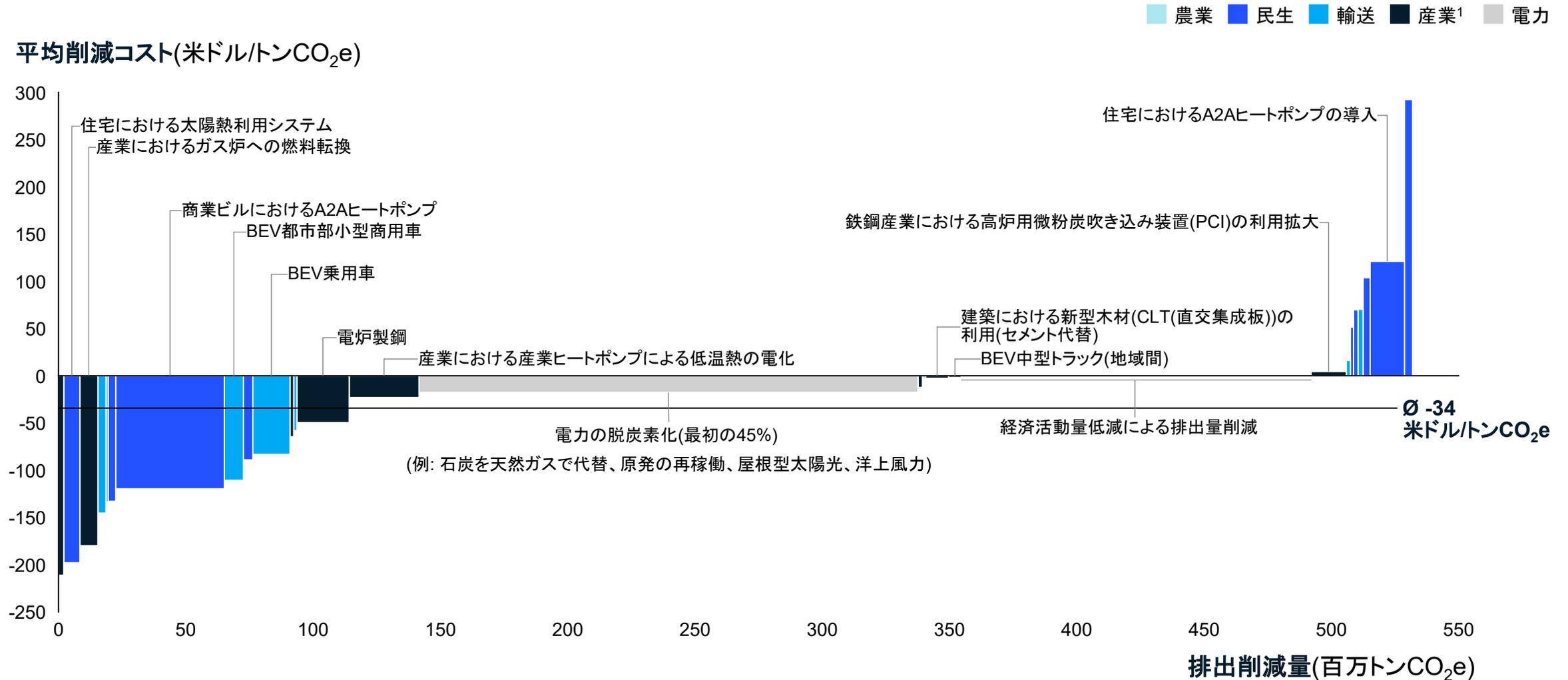


- 脱炭素化に向けた社会コスト
  - 分析の手法
  - 日本と欧州の比較結果
  - 参考) 日本の詳細分析
- 脱炭素化の実現に向けた日本産業における論点

# 2030年に向けては、従来技術よりも低コストで導入可能な脱炭素化技術が多く存在し、社会的コストを低減しながら脱炭素化目標を実現することが可能



## 2030年目標達成に向けた温室効果ガス排出削減コスト曲線

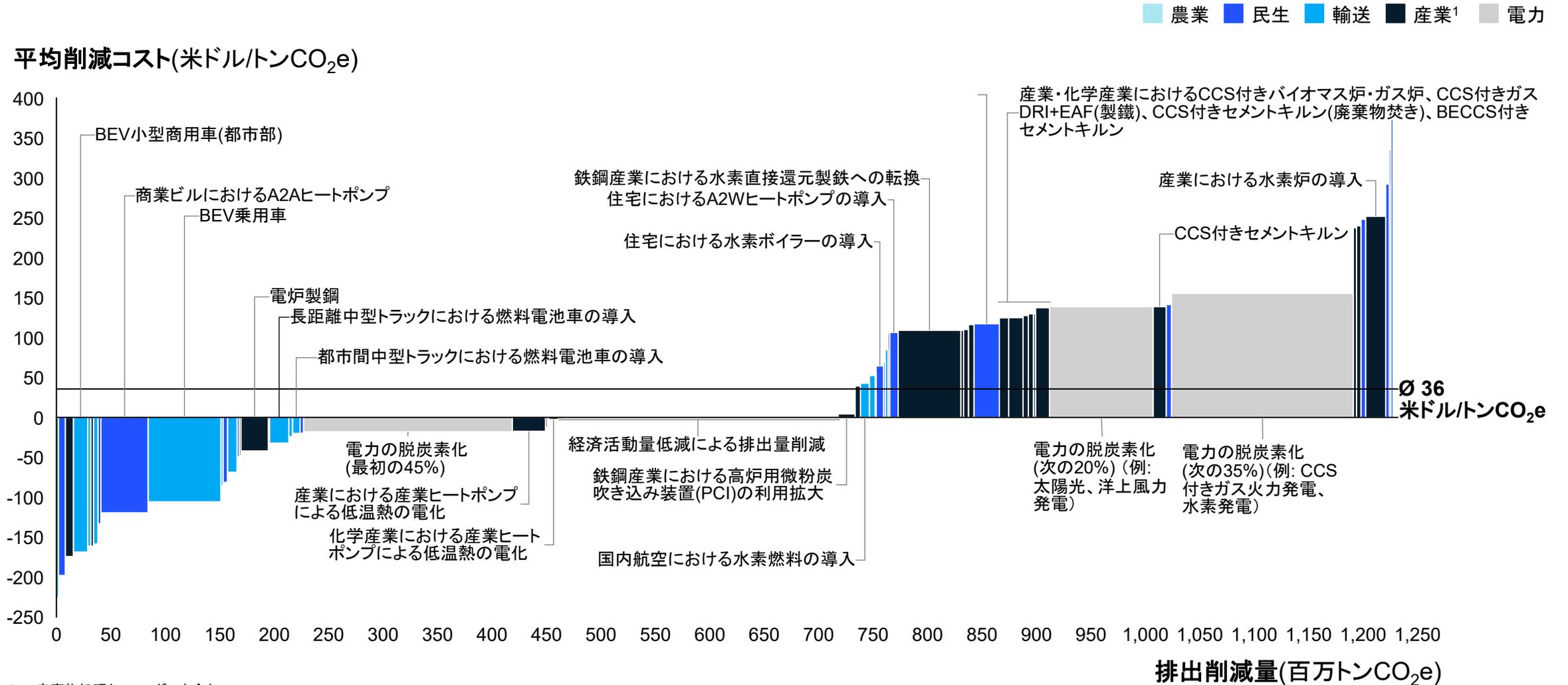


1. 廃棄物処理とフロンガスを含む  
注: 施策のラベルでは、「産業」は鉄鋼、セメント、化学、エチレン生産、アンモニア生産以外の産業を示す

# 2050年に向けては、水素やCCS等高コスト技術の導入を迫られることから、目標実現に向けて社会的コストが増大する



## 2050年目標達成に向けた温室効果ガス排出削減コスト曲線



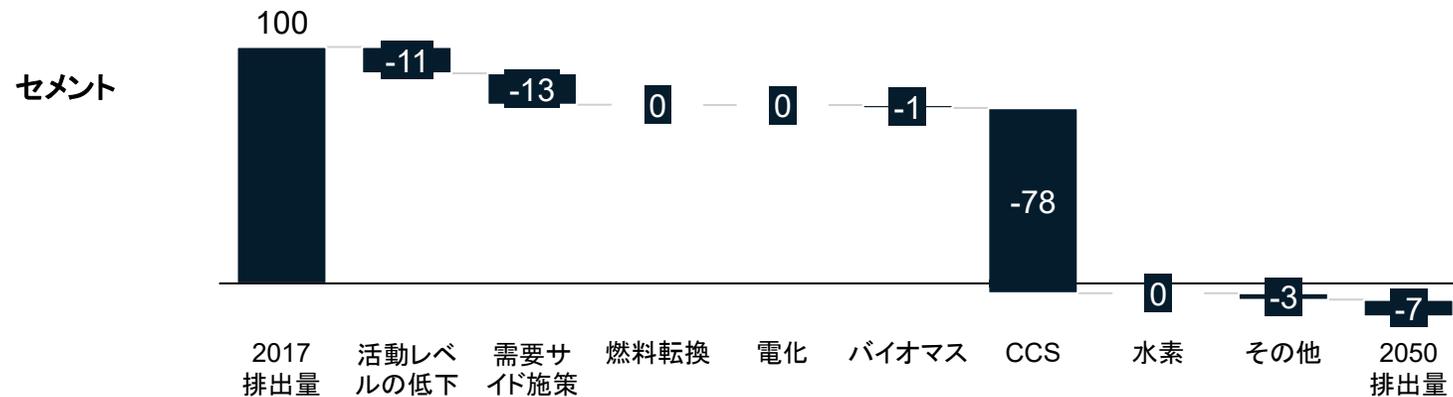
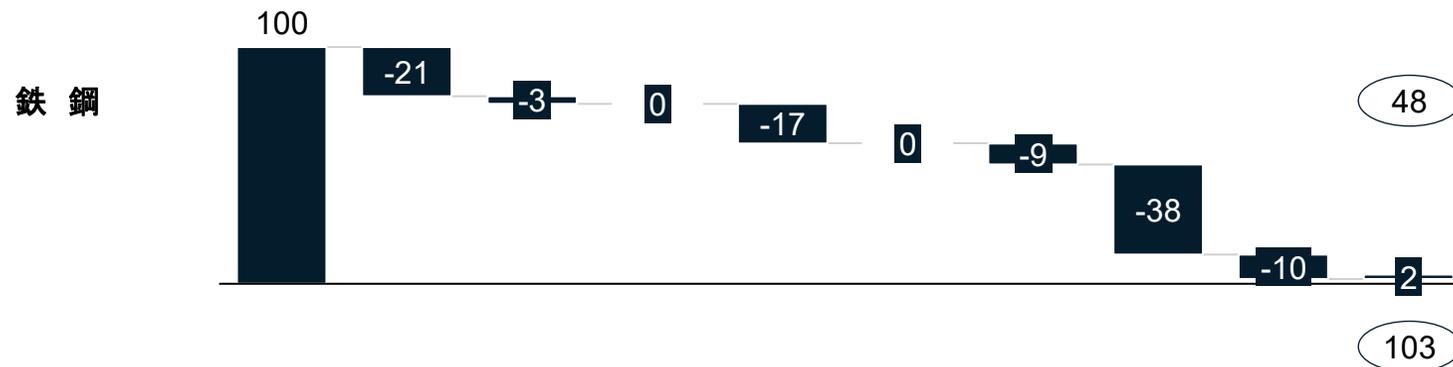
1. 廃棄物処理とフロンガスを含む  
注: 施策のラベルでは、「産業」は鉄鋼、セメント、化学、エチレン生産、アンモニア生産以外の産業を示す



# 産業セクターにおいては、電化、水素活用、CCS導入といった産業構造の転換が求められている (1/2)

XX 平均削減コスト、米ドル/トンCO2e、2050年

主要産業サブセクターを対象とした施策毎の排出削減  
2017年排出量指数=100



高炉から電炉へのシフトは低コストで済むが、鉄スクラップの供給状況に制約される

スクラップのサプライチェーンをより積極的に展開することで、削減コストをさらに低減できる可能性がある(現在、電炉は24%、モデルの上限は35%、グローバルのスクラップ供給ポテンシャルは56%)

他産業の排出量もCCSで吸収

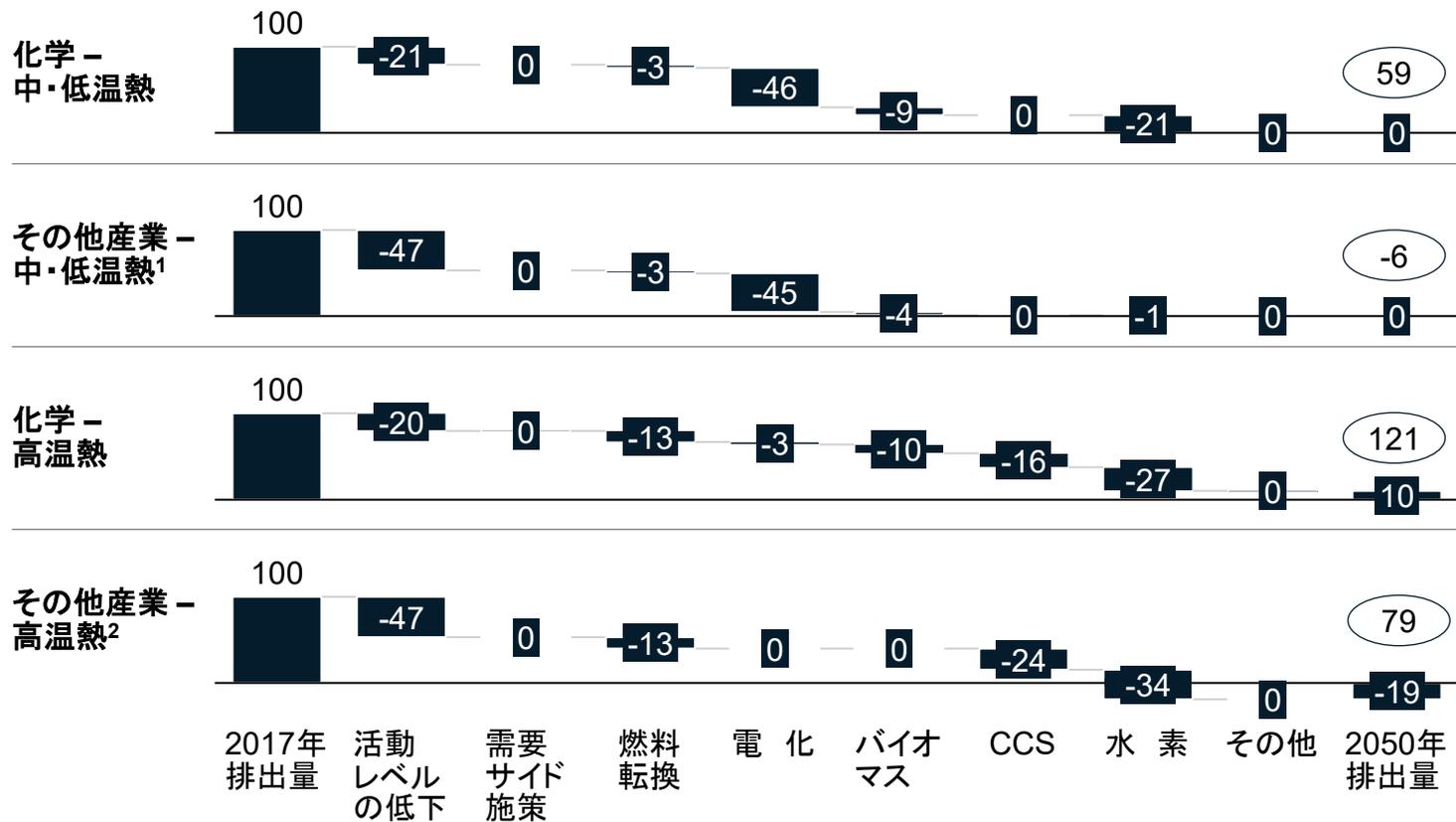
一部の産業はコスト高な脱炭素化技術を導入するよりもCCSを行い回収した炭素をセメント原料に活用する方が産業全体としては安価。建設業界としてよりコスト効率的なセメント代用品(例: CLT代用セメント、クリンカ代用品)の普及は、新素材への受容性次第

# 産業セクターにおいては、電化、水素活用、CCS導入といった産業構造の転換が求められている (2/2)



XX 平均削減コスト、米ドル/トンCO2e、2050年

## 主要産業サブセクターを対象とした施策毎の排出削減 2017年排出量指数=100



1. 例えば、製紙業界でのパルプ製造や熱湯洗浄、および食品業界での蒸気殺菌等  
2. 例えば、非鉄金属、金属製品を製造する際の溶解、製錬、鑄造工程等

### 中低温熱利用

- 化石燃料焚きボイラーからヒートポンプに転換(電化)することにより、低コストで排出削減が可能
- 熱源が分散する中・低温熱利用にはCCSは適さないため、残余排出量はすべて高価な水素燃料を使用する必要がある
- 電化技術に関する技術革新を推進することで(例: 200°C以上の加熱が可能なヒートポンプ等)、削減コストをさらに低減できる可能性がある

### 高温熱利用

- 石油からガスへの燃料転換により、最低コストでの排出削減が可能
- 電気料金が高価となることから、電気ボイラーが最も高コストな削減レバーとなる
- したがって、唯一の選択肢は、電気ボイラーに次いで高コストなレバーである水素およびCCSとなる
- 削減コストを更に低減するには、技術革新の推進により代替プロセスを開発する(例: 低温プラズマ滅菌による食品加工等)必要がある

---

# Content



- 脱炭素化に向けた社会コスト
- 脱炭素化の実現に向けた日本産業における論点

# 脱炭素化の実現に向けた日本産業における論点

---

1

## ミクロ: 脱炭素化によって生まれる事業成長機会の確実な獲得

脱炭素化による市場の変化を機会として捉え、大胆な事業ポートフォリオの変革を遂げる企業や、脱炭素化・環境配慮を新たな訴求価値として活用する企業が台頭  
(例: Ørsted (Dong Energy)の洋上風力シフト、Rio Tintoのサステナビリティ証明付アルミニウム、Appleによる2030年までのサプライチェーン全体の脱炭素化実現 等)

日本企業にも迅速な行動が求められる一方で、M&A実績や投下資本の低さにも現れているように、機先を制した大胆なポートフォリオ入替は諸外国と比べて必ずしも活況ではない

2

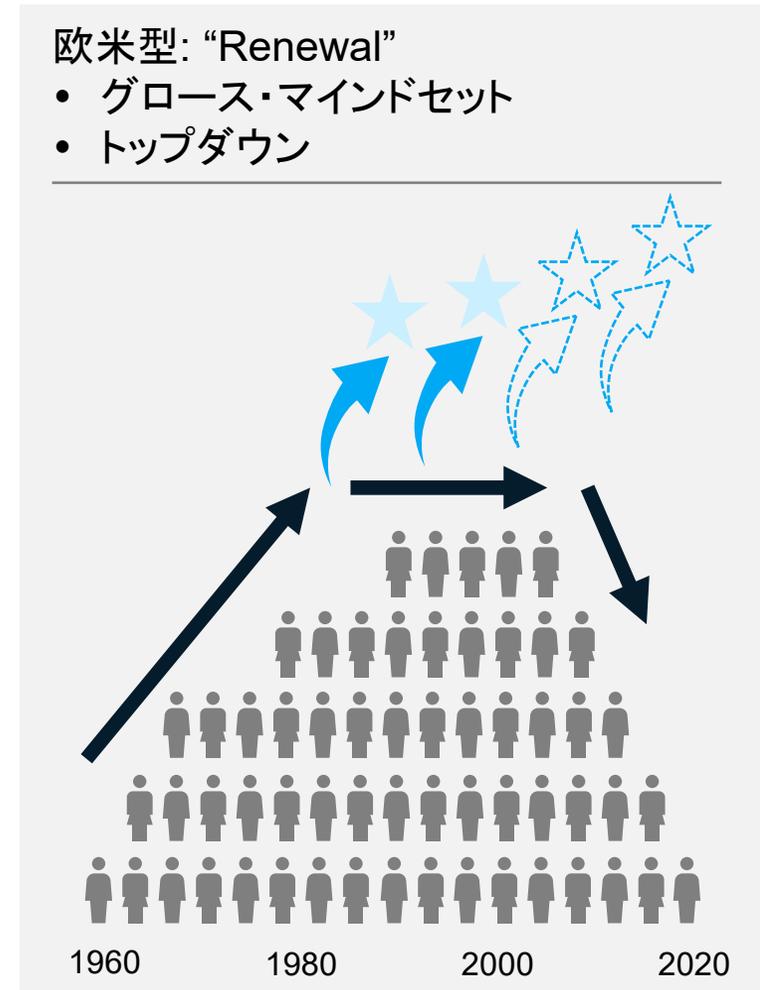
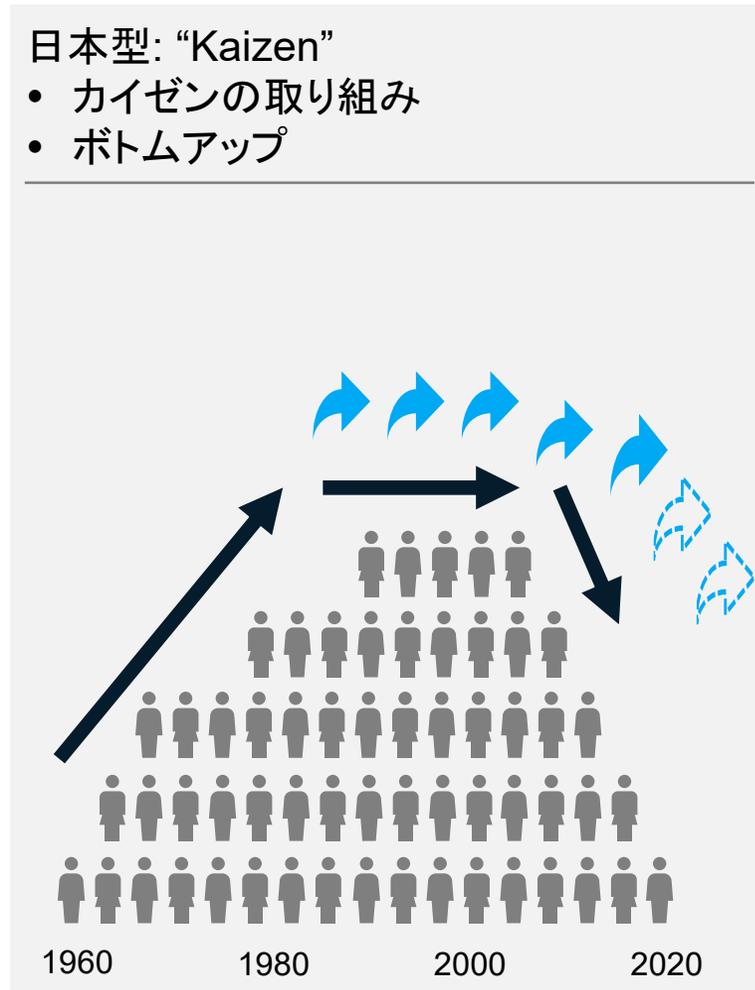
## マクロ: より効率的な脱炭素化実現に向けた日本全体の産業構造の議論

日本全体での排出削減コストの低減という観点から、各企業による事業戦略を越えた、日本全体の産業構造の道筋には複数のシナリオの可能性が存在

例えば、エネルギー集約度が低く付加価値の高いセグメントに集中するシナリオの場合、産業セクターの排出削減コストを抑えることができる

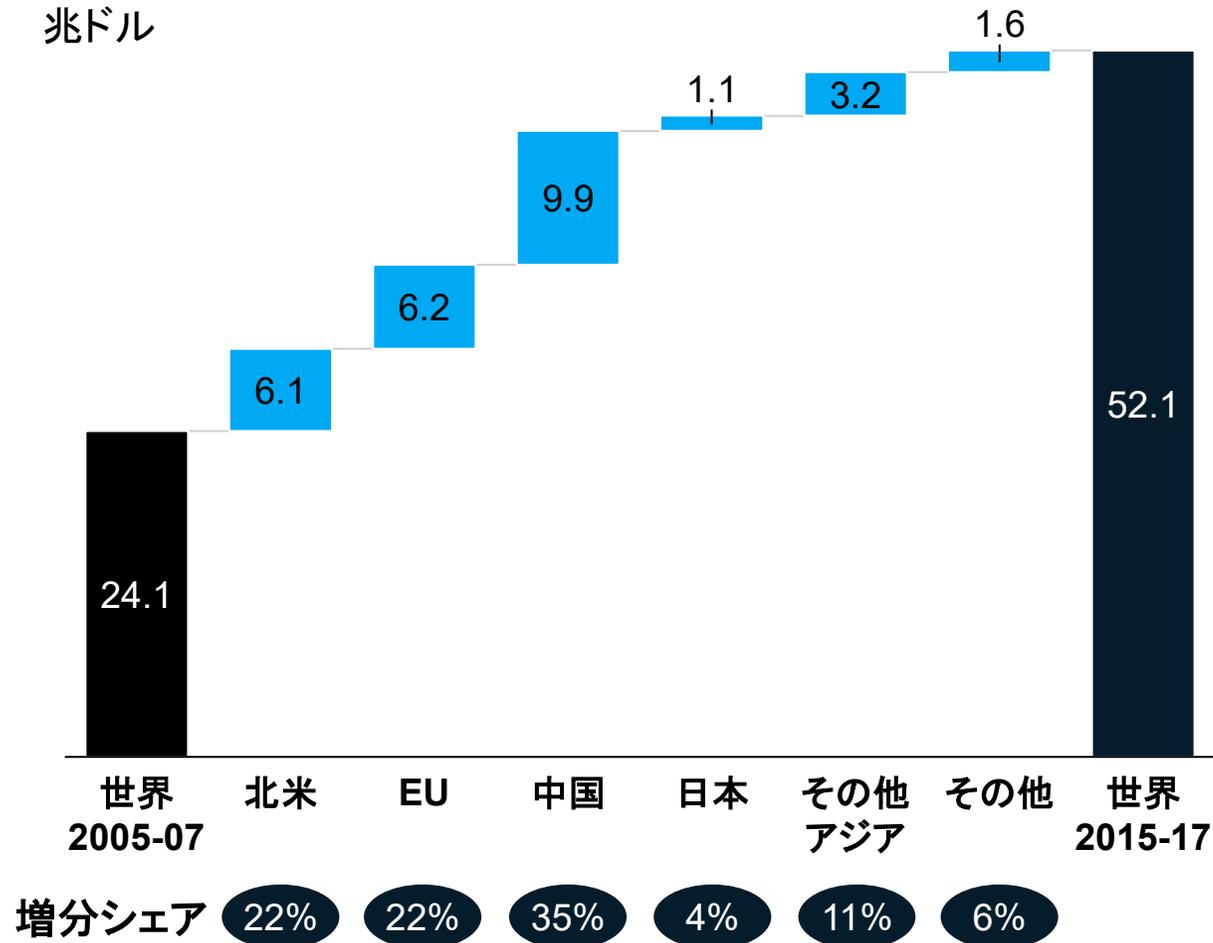
# ① 日本の産業は典型的には既存事業をベースにした改善を通じた成長を得意としてきた

日本における産業および企業の特徴

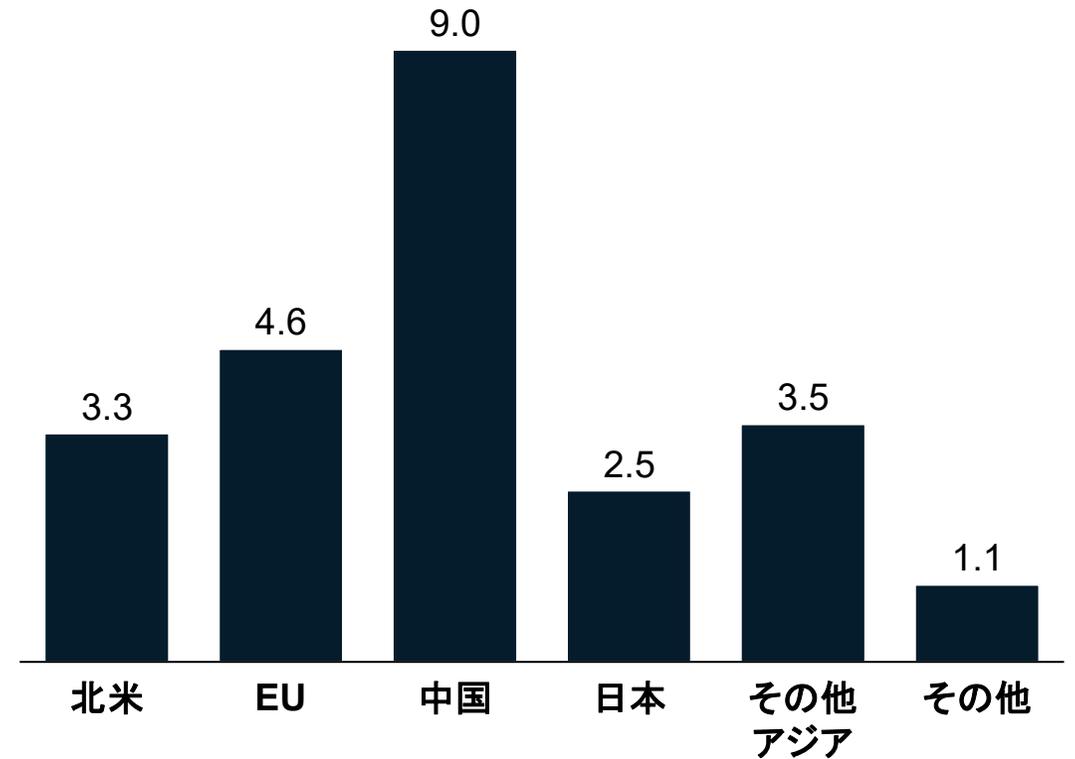


# ① 例えば、過去10年、グローバルで資本の約半分がアジアへと向かったが、日本での投資はわずか4%程度

世界全体の投下資本増加分の国・地域別内訳  
兆ドル

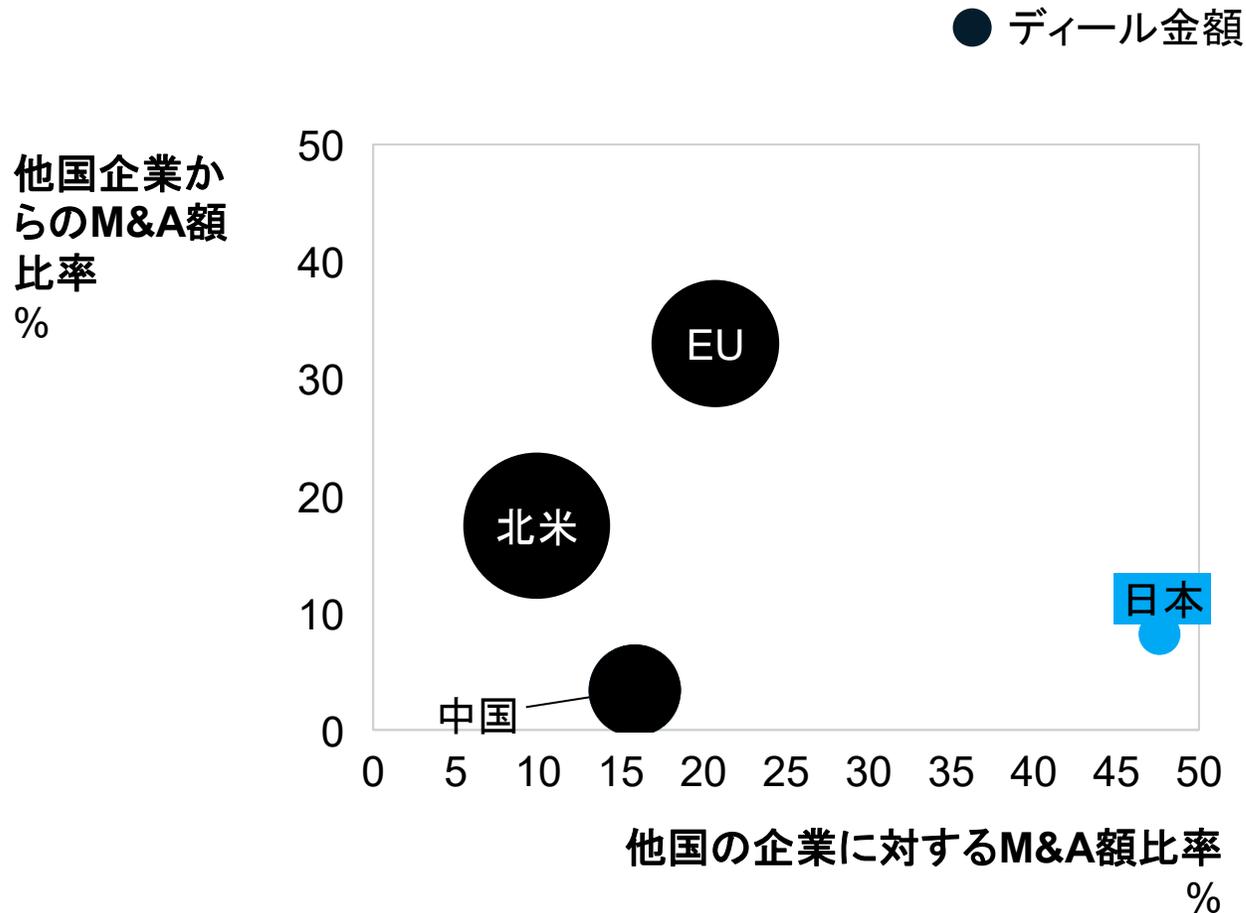


各国・地域のGDPに対する投下資本増加分の割合  
%, 2015年GDPに対する年換算



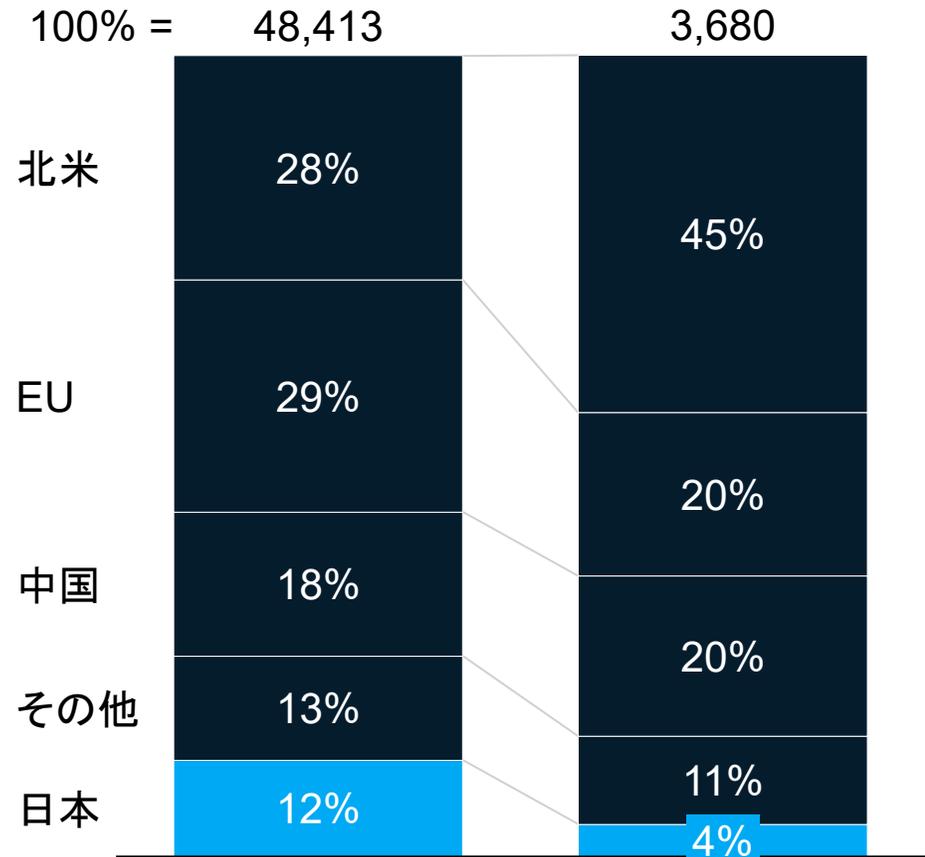
# ① また、海外企業に対するM&Aが活発になってきているが、売上高に対するM&A投資比率は未だ低い

M&Aの流れ; %, 2015-17



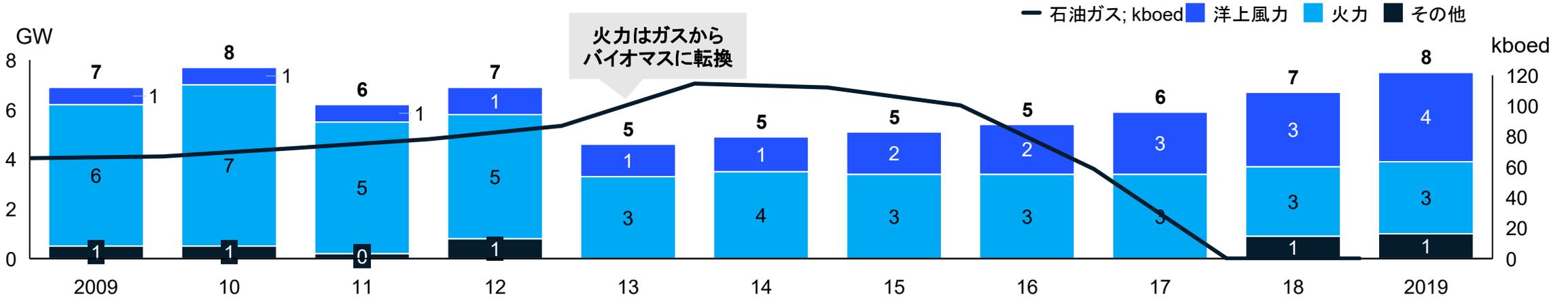
売上高構成比  
%, 2015-17平均

M&A額構成比  
%, 2015-17平均

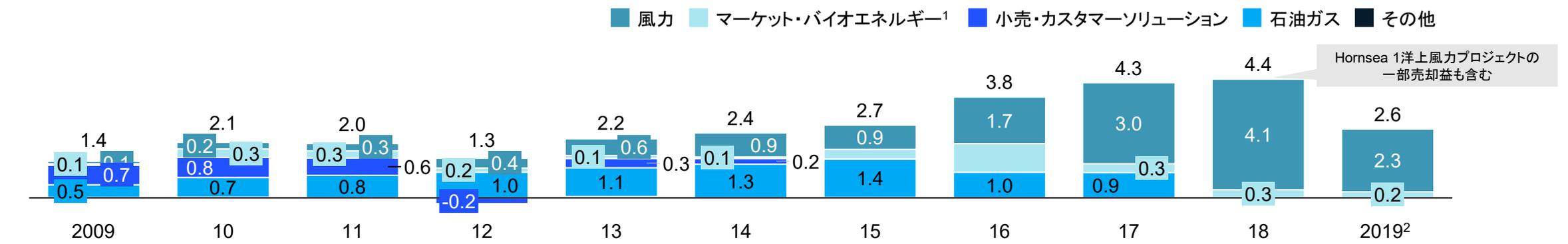


# ① デンマークの元国営石油・ガス会社のDONG Energyは洋上風力事業への大胆なポートフォリオ転換を行い、社名もØrstedとしてリブランディング

Ørstedは洋上風力に軸足を移してきた (発電容量 (GW)と石油ガス生産量 (kboed)) DONG energy Ørsted



このポートフォリオ転換はEBITDAの向上と時期が一致する (十億ドル)



1. 2019年にカスタマーソリューション事業はバイオエネルギー事業と統合され「マーケット・バイオエネルギー」事業に再編。新たな事業区分に沿った財務報告は2015年にまで遡って公開。2014年以前は「小売・カスタマーソリューション事業」は単体で報告 | 2. EBITDA減少はHornsea 1洋上風力プロジェクトの50%売却によるところが大きい (2018年には、22億ドルのEBITDA増に寄与)

## 2 産業構造の変化を仮定したシナリオも検討



### 1. ベースケース (本資料ここまでの分析結果)

土地利用制約により、2050年の発電構成(容量)に占める再生可能エネルギーの割合は47%

原子力規制委員会の許可の下で17基の原子炉を再稼働、2基の新規建設中の原子炉を稼働開始(60年寿命想定)

人口とGDPの変化による経済活動量の低下を考慮しつつ、産業構造を維持する



### 2. 製造業の高付加価値集中シナリオ

エネルギー集約度が低く付加価値の高い製品とプロセスに集中したシナリオを検討。例えば以下を輸入に切り替え:

#### 汎用還元鉄

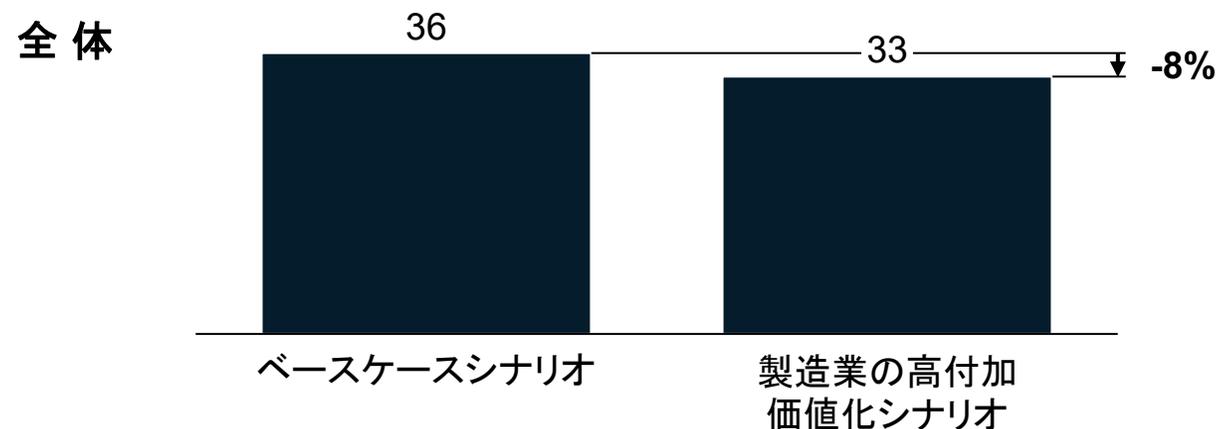
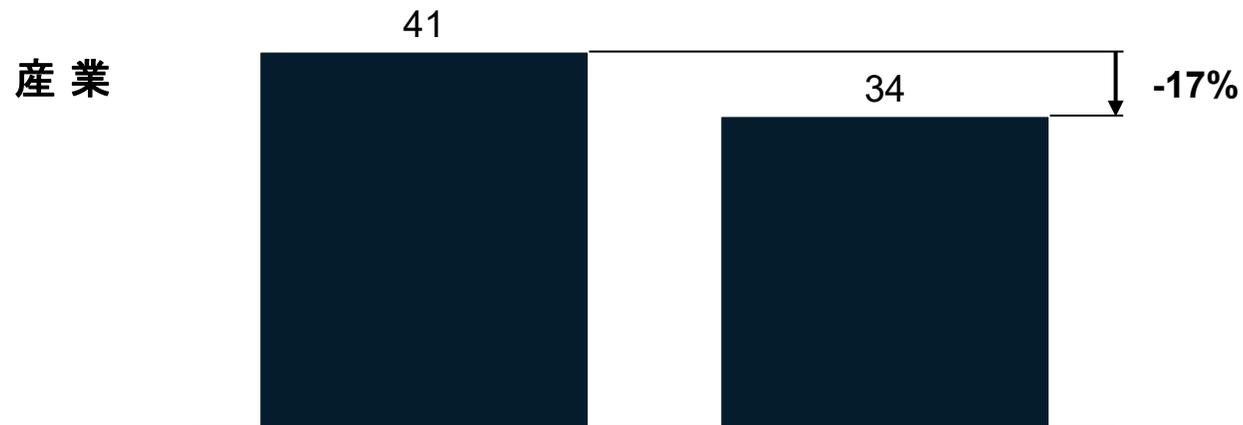
ダウンストリーム製鋼・特殊製品へフォーカス

#### 汎用化学品

例: エチレン誘導体、アンモニアを輸入し、特殊化学品へフォーカス

## ② 製造業の高付加価値集中シナリオにおいて 排出削減コストをある程度抑えることが可能

平均排出削減コストの感度分析; ドル/トンCO<sub>2</sub>eq, 2017~2050



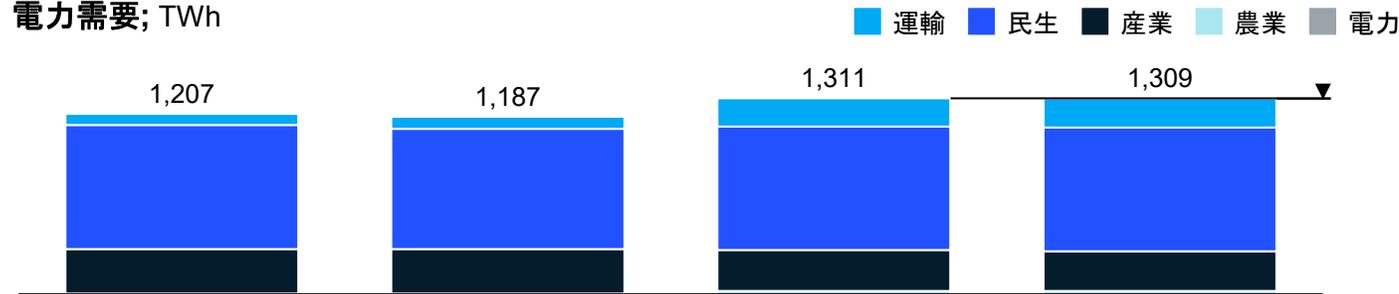
仮に、エネルギー集約度が低く付加価値の高い製品とプロセスに注力した場合、産業の排出削減コストを削減可能(例: 汎用還元鉄を輸入し、ダウンストリーム製鋼・特殊製品に集中、エチレン誘導体、アンモニア等の汎用化学品を輸入し、特殊化学品に集中)

一方で、輸入原料の輸送時の排出が増加することなどから、日本全体の排出削減コストへの影響は薄まる

## ② 加えて、水素需要が減少する代わりにCCS需要が高まる等、脱炭素化に向けて活用される技術にも変化が生じる

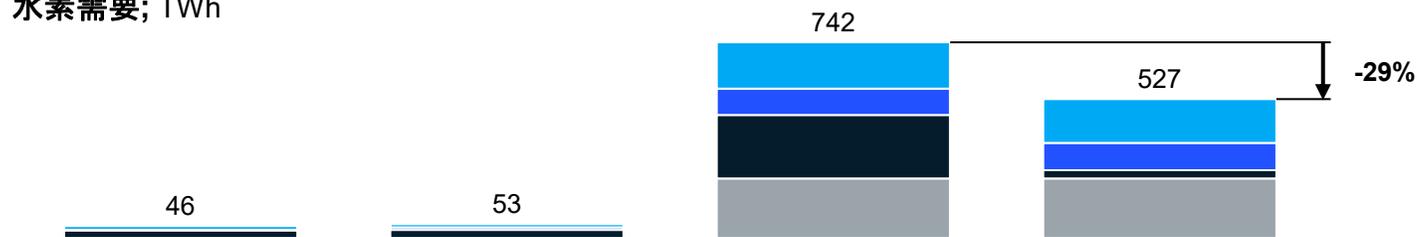
日本全体での変化

電力需要; TWh



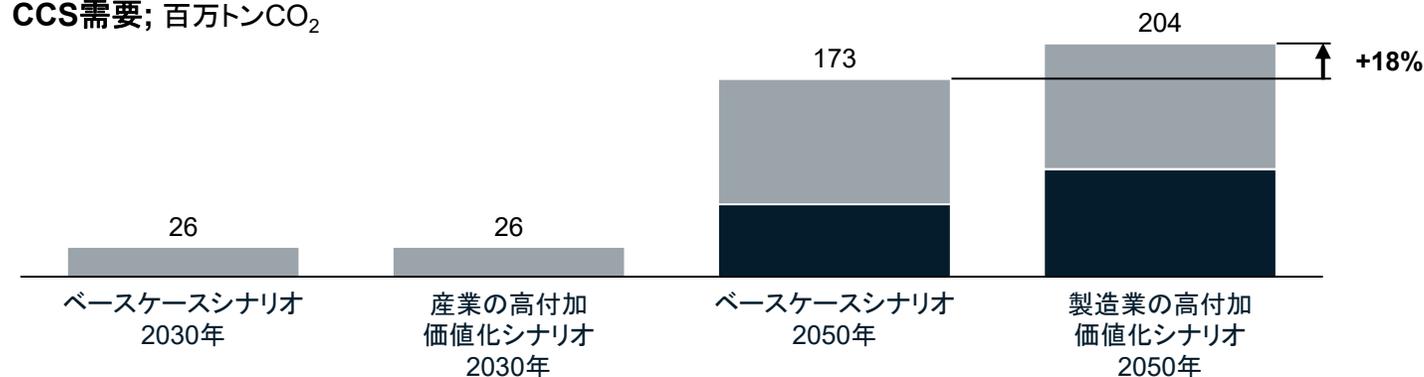
シナリオ間で電力価格の差は生じないため、ベースケースシナリオと、製造業の高付加価値化シナリオの間で電力需要は同水準

水素需要; TWh



製造業の高付加価値化シナリオでは、2050年の水素需要は~29%低下。主な違いは特にコスト高な水素用途が不要となることにより産業セクターの水素需要が~87%減少すること

CCS需要; 百万トンCO<sub>2</sub>



産業の高付加価値化シナリオでは、2050年のCCS需要が~18%増加。主な違いは、鉄鋼業で高炉転炉へのCCS活用が増加すること(還元鉄を輸入したうえで電炉を活用するよりも安価となるため)

# 脱炭素化の実現とその際の社会コスト最適化に向けて企業からも迅速な行動が必要とされている



## 「守りから攻め」への戦略の練り直し

排出量削減目標や顧客要請への対応による「守り」の徹底

既存のアセット・強みを活用した「攻め」の領域の特定とポートフォリオの再構築

- インパクトを受ける事業の出口戦略(例: ICEに特化した自動車部品、精製における燃料油製品)
- 市場規模拡大領域への重点投資・資本配分(例: BEV、バッテリー、風力タービン)



## グリーンビジネスの構築

脱炭素化によって推進される成長領域における事業機会の優先順位づけとビジネスプランの策定を(テクノロジー以外のバリューチェーンも視野にパートナーリングも含め)行う

市場規模の桁や進展が一段先をいく海外市場での商用化・「武者修行」による競争力の強化



## 脱炭素化投資に必要な原資創出

「勇み足」による過剰投資ならびに「脱炭素化出遅れリスク」を避けるべく、各企業毎に排出削減曲線を作成し、優先順位化を行う

優先順位化と共に、今後10年にかかる大型設備投資のCAPEX最適化によりキャッシュを絞り出す事も必須



## 組織能力・体制の開発

必要スキルのシフトに対応した雇用戦略/計画の策定

従業員のスキル向上と再構築のためのトレーニングプログラム(例: 自動車アセンブリから蓄電池のアセンブリへ)

左記活動を全社で効率的に司る専門部門ならびに人材の育成が急務

---

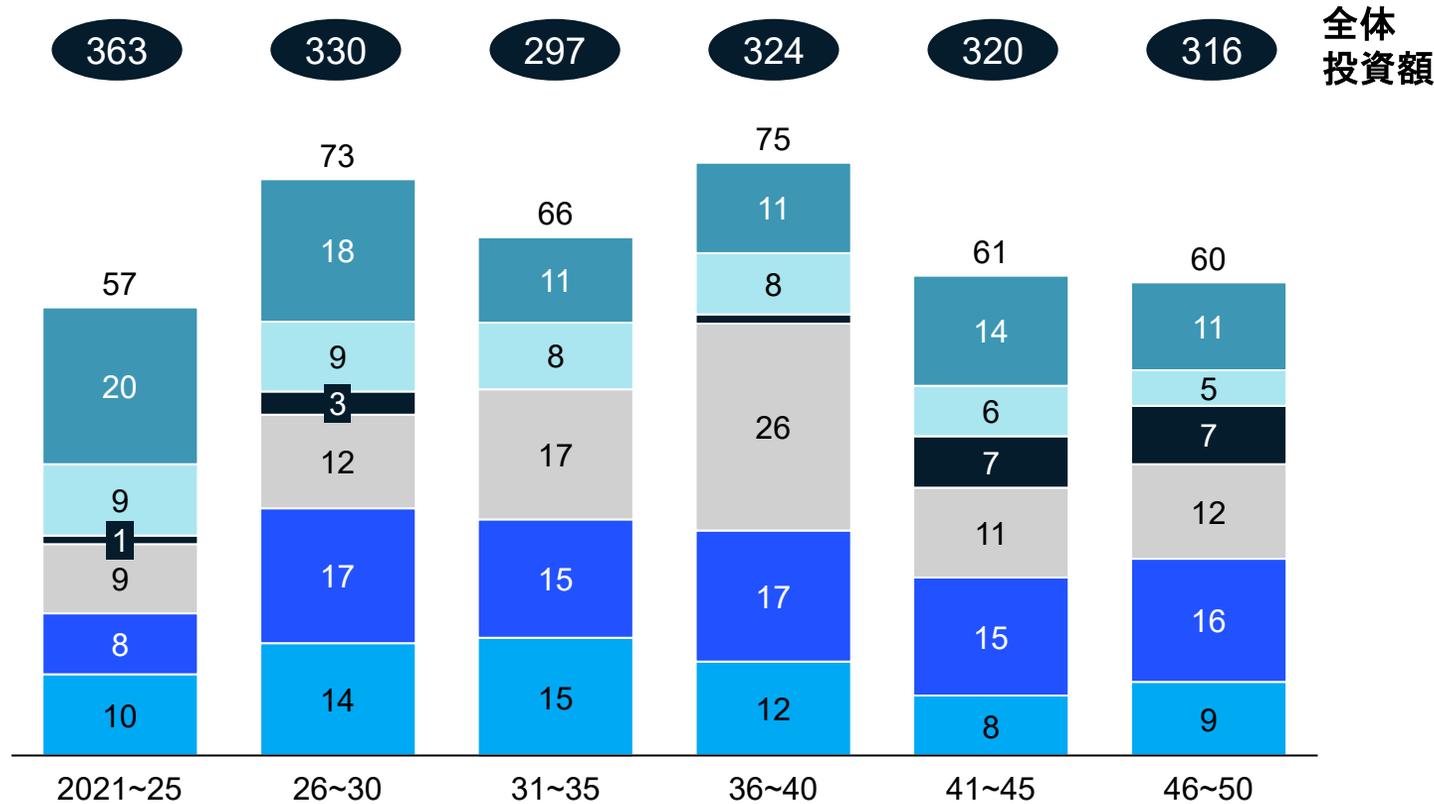
# Appendix



# 脱炭素化の実現に向けて直接排出に関わるプロセス上での追加設備投資は2050年までに2.1兆ドルとなる見込み

■ インフラ<sup>1</sup> ■ 農業 ■ 産業 ■ 電力 ■ 民生 ■ 運輸

直接排出に関わるプロセス上での脱炭素化に必要な追加設備投資<sup>2</sup>の推移  
10億米ドル/年、5年平均



2020~50年累計投資  
10億米ドル、全体の%

	インフラ <sup>2</sup>	448	21%
	農業	235	11%
	工業	95	5%
	電力	436	21%
	民生	435	21%
	運輸	455	22%
	合計	2,104	

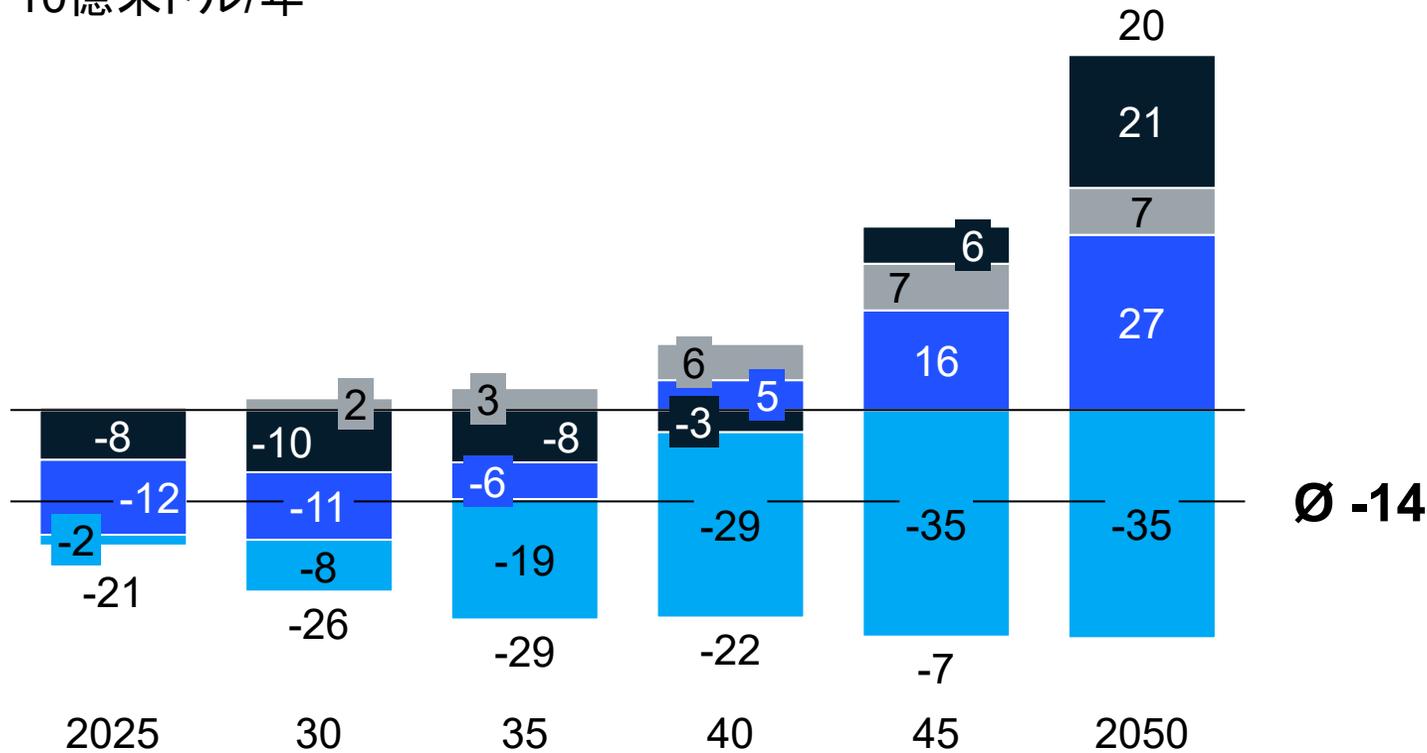
1. EV充電インフラ、水素ステーション、送配電網、CO<sub>2</sub>・水素輸送インフラ、ブルー水素生産設備などを含む  
2. 事業活動上で直接温暖化ガスを排出するプロセスに対する設備投資のみ考慮。例えば、製造業においてはボイラー等の燃料を消費するプロセスや高炉・転炉等の温暖化ガスを排出する化学的プロセスを想定。通常の製造機械(例: プレス機、産業用ロボット)は電力セクターで動力をカバーすることから該当する設備投資は含まない



# 短中期では脱炭素化により運営費用の削減に繋がるが、2050年に向けての水素の大量導入により、運営費用増になる

■ インフラ<sup>2</sup> ■ 農業 ■ 産業 ■ 電力 ■ 民生 ■ 運輸

## 増分年間運営費用 (OPEX)<sup>1</sup> 10億米ドル/年



## 2020~50年累計 10億米ドル、全体の%

インフラ <sup>2</sup>	-	-
農業	-1	0%
鉱工業	-17	4%
電力	129	-29%
建築物	86	-19%
輸送	-638	145%
合計	-441	

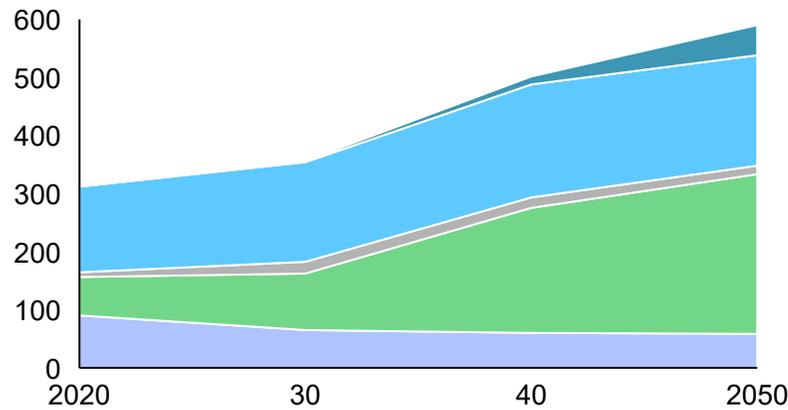
1. 1.直近5年間ににおける5年平均値(例: 2025年は2021年から2025年までの平均) 2. BEV充電設備とFCEV水素ステーション、送配電網の補強、CO2と水素の輸送インフラ、国産ブルー水素製造の設備が含まれる



# 2030年までの石炭火力発電の段階的廃止が鍵となる一方で、2050年に向けて太陽光、風力、ネットゼロ火力発電の拡大が見込まれる



**発電容量**  
GW



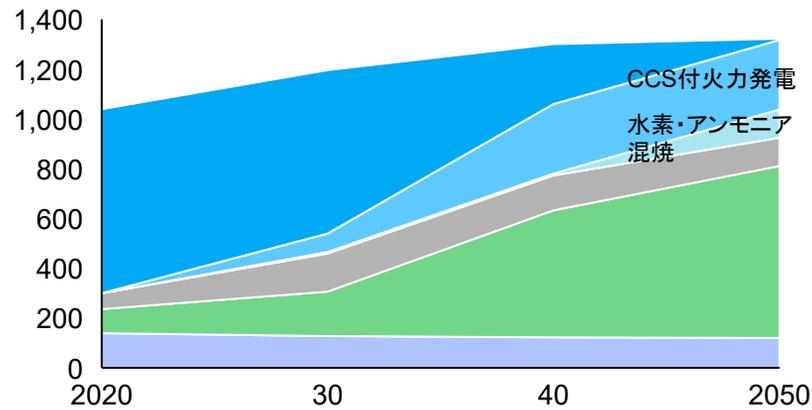
**変動性再エネの割合**

21%      27%      43%      47%

**蓄電の割合(蓄電池、揚水)**

7%      7%      7%      12%

**発電量**  
TWh



**水素混焼の割合**

0%      0%      12%      95%

**アンモニア混焼の割合**

0%      20%      48%      100%

**再エネの割合**

21%      25%      48%      60%

**2030**

**88%**の石炭火力発電量削減

**+35GW**の太陽光および風力  
発電容量の増加

**+12GW**の再稼働・新規稼働  
原子力発電容量

**2050**

**9%**の水素・アンモニア発電

**275GW**の太陽光と風力発電  
容量

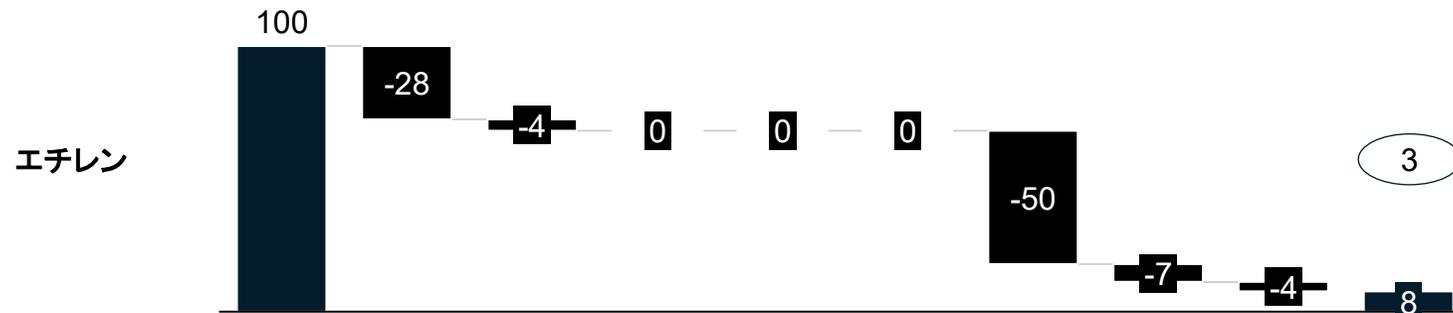
1. 石油・石炭・ガス火力、CCS付きの石油・石炭・ガス火力、アンモニア混焼・専焼、水素混焼・専焼が含まれる  
 2. 事業型太陽光、屋根型太陽光、陸上風力、洋上風力が含まれる  
 3. 水力、バイオマス、地熱、石油火力発電が含まれる  
 4. 発電容量の「火力発電(混焼、専焼、CCS付き発電を含む)」カテゴリに、発電量の「石炭・ガス火力発電」、「水素・アンモニア発電」、「CCS付き火力発電」が含まれる



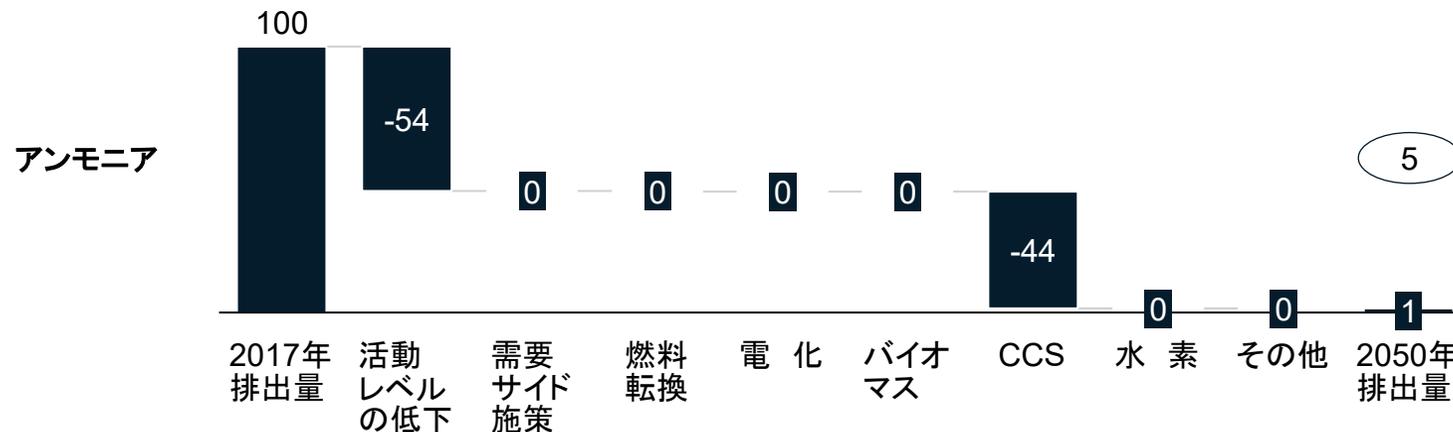
# 産業セクターにおいては、電化、水素活用、CCS導入といった産業構造の転換が求められている

XX 平均削減コスト、米ドル/トンCO2e、2050年

主要産業サブセクターを対象とした施策毎の排出削減  
2017年排出量指数=100



プラスチックのリサイクル率(特にケミカルリサイクル)を上げることで、削減コストを更に抑制できる可能性がある。加えて、ケミカルリサイクルには石油精製の設備を活用できるため、同業界の存続にも貢献し得る



全産業の中で最も早いペースで脱炭素化を実現しつつある(石油精製における需要減少による削減を除く)水蒸気メタン改質工程で排出されるCO2の純度が高いため、CCSを適用した最初のセクターになる

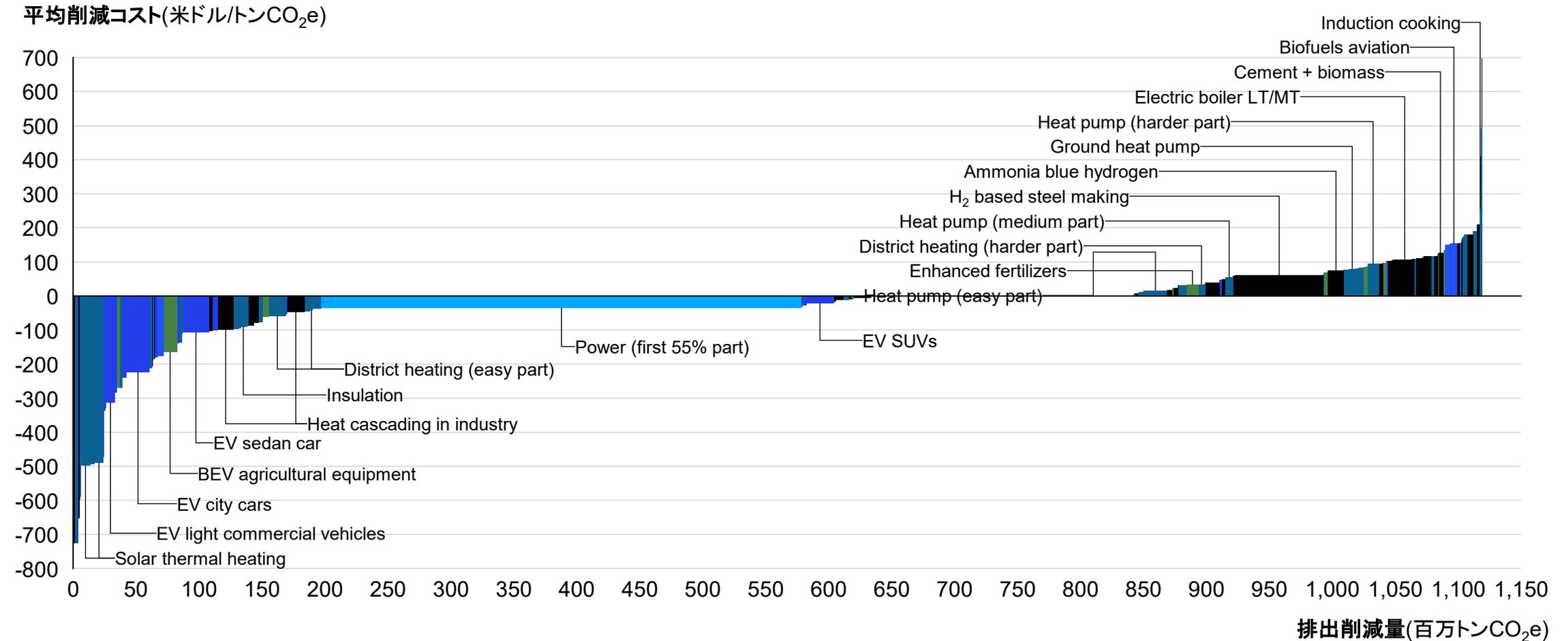
# 2030年に向けて、多くの脱炭素化技術は従来よりも低いコストで導入可能であり、脱炭素化目標を実現しながら社会的コストを低減することが可能



2030年目標達成に向けた温室効果ガス排出削減コスト曲線

NON-FINAL NUMBERS, STILL SUBJECT TO CHANGE

■ 農業 ■ 民生 ■ 運輸 ■ 製造業 ■ 電力

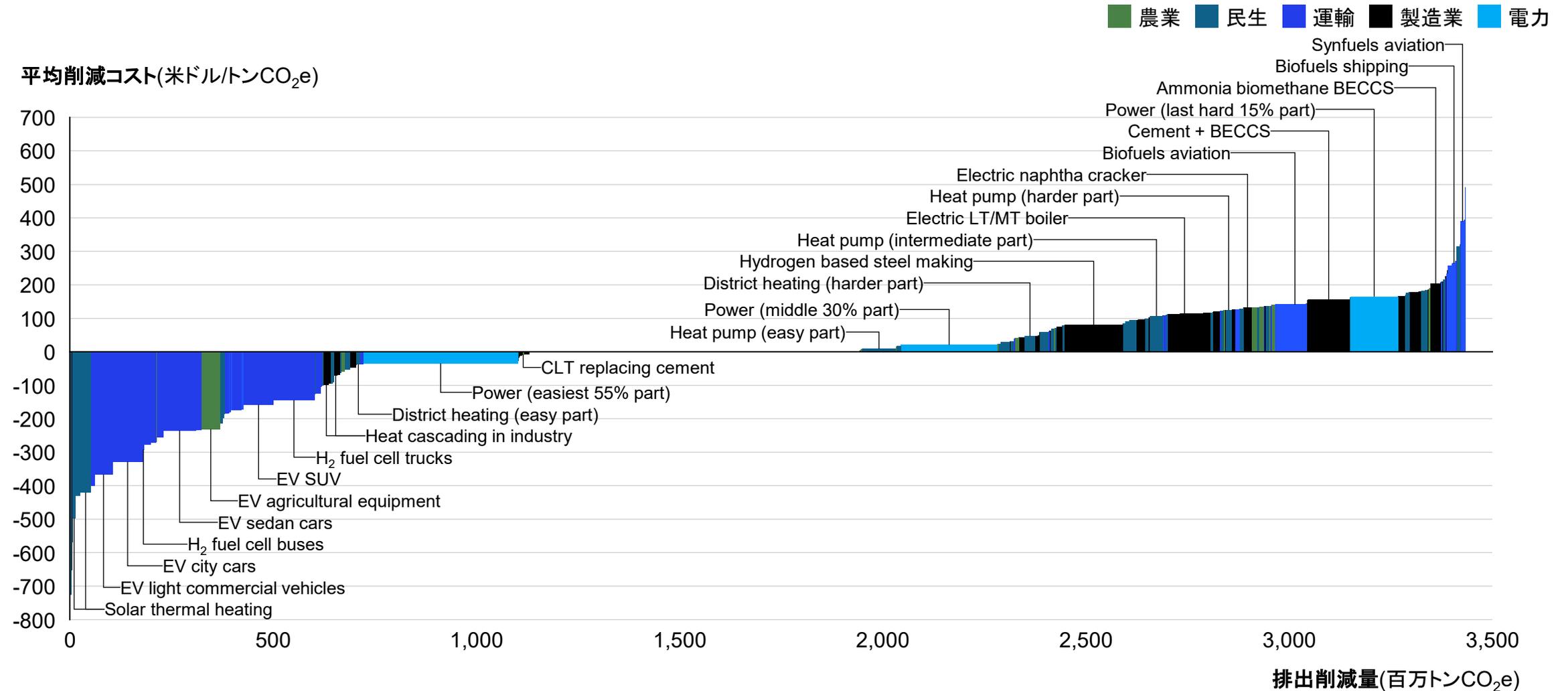


# 2050年に向けても、従来よりも低いコストで脱炭素化が可能な技術が多く、社会的コストを増加させることなく脱炭素化目標を達成可能



2050年目標達成に向けた温室効果ガス排出削減コスト曲線

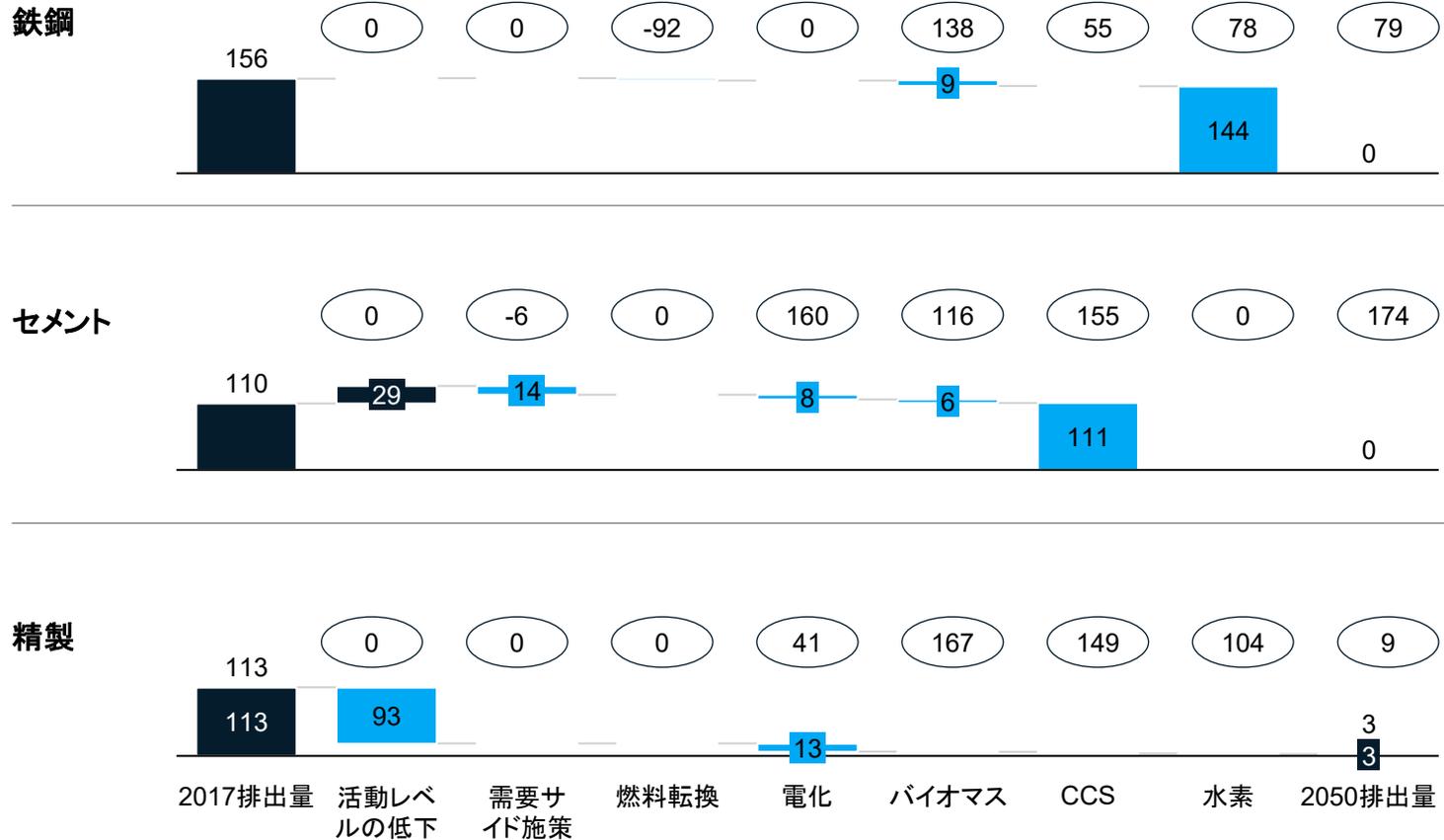
NON-FINAL NUMBERS, STILL SUBJECT TO CHANGE



# 主要産業サブセクターを対象とした施策毎の排出削減量、平均削減コスト (1/3)



Emissions, MtCO<sub>2</sub>eq 
  Emissions reduction, MtCO<sub>2</sub>eq 
 xx Average abatement cost, USD/tCO<sub>2</sub>eq, 2050

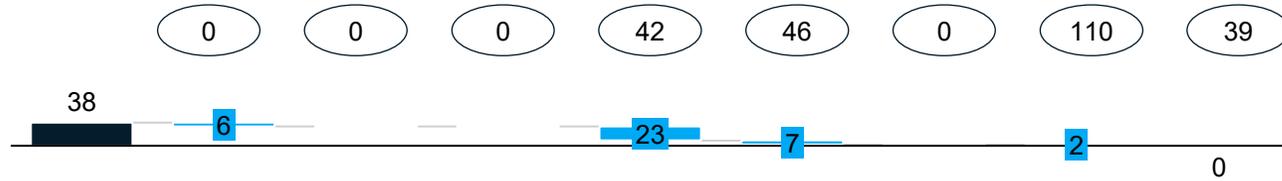


# 主要産業サブセクターを対象とした施策毎の排出削減量、平均削減コスト (2/3)

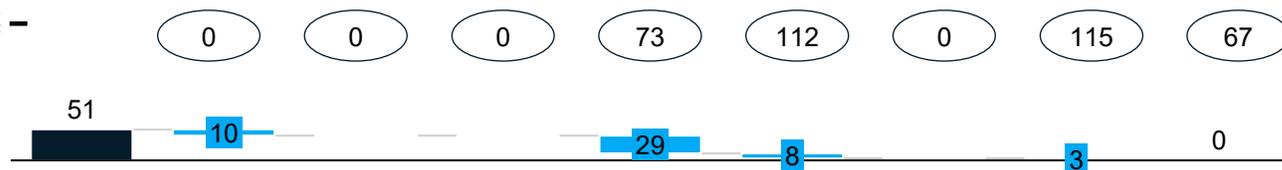


Emissions, MtCO<sub>2</sub>eq 
  Emissions reduction, MtCO<sub>2</sub>eq 
 xx Average abatement cost, USD/tCO<sub>2</sub>eq, 2050

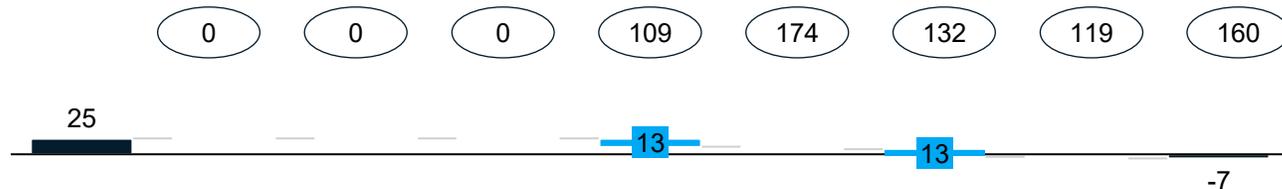
化学 - 中・低温熱



その他産業 - 中・低温熱<sup>1</sup>



化学 - 高温熱



2017排出量    活動レベルの低下    需要サイド施策    燃料転換    電化    バイオマス    CCS    水素    2050排出量

# 主要産業サブセクターを対象とした施策毎の排出削減量、平均削減コスト (3/3)



■ 排出量, 百万トンCO<sub>2</sub>e ■ 排出削減量, 百万トンCO<sub>2</sub>e (xx) 平均削減コスト, 米ドル/トンCO<sub>2</sub>e, 2017-2050

