

2018年度～2019年度成果報告書

次世代火力発電等技術開発  
次世代火力発電技術推進事業  
CO2排出削減のための要素技術検討

2019年10月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

(委託先) デロイトトーマツ コンサルティング 合同会社

# 目次

I 要素技術検討	3	II LCA評価	133
はじめに	3	1 オレフィン	140
1 CO <sub>2</sub> 有効利用技術の位置付け	9	2 メタン	145
2 カーボン・CO	21	3 コンクリート製品	149
3 炭酸塩	51	4 まとめ	153
4 ポリカーボネート	80		
5 有望性・実現性の検討	95		
6 研究開発シナリオの検討	100		
提言	106		
Appendix	108		

- 本報告書に記載されている情報は、公開情報に加え、本調査の分析に利用する承諾を得た上で、ヒアリング等で第三者から提供を頂いたデータも含まれています。これら情報自体の妥当性・正確性については、弊社では責任を負いません。
- 本報告書における分析手法は、多様なものがありうる中でのひとつを採用したに過ぎず、その正確性や実現可能性に関して、弊社がいかなる保証を与えるものではありません。
- 本報告書は、調査委託契約に従って貴機構の政策決定の参考資料として作成されたものです。内容の採否や使用方法については、貴機構自らの責任で判断を行うものとします。

# はじめに

# はじめに 本調査では火力発電によるCO<sub>2</sub>の一層の低減に向けて 革新的なCO<sub>2</sub>固定化技術を抽出する

## 本調査の背景

---

- 我が国では「第五次エネルギー基本計画」において、石炭火力発電は重要なベースロード電源として位置付けられている。
- また、我が国では「長期エネルギー需給見通し」において、パリ協定を踏まえ2030年におけるエネルギー消費に起因するCO<sub>2</sub>排出量を2013年比21.9%削減する目標を掲げている。
- 石炭火力発電のCO<sub>2</sub>排出原単位は他電源よりも大きいことを踏まえると、引き続き石炭火力発電をベースロード電源として活用していくためには、CO<sub>2</sub>排出量の削減に一層配慮する必要がある。
- このような背景のもと、「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」において、発電所そのものの高効率化に加え、CCUS技術の開発推進が掲げられている。

## 本調査の目的

---

- 前年度調査ではCO<sub>2</sub>の分離回収技術及び利用技術、並びに固定化技術を網羅的に調査し、火力発電所等から排出されるCO<sub>2</sub>の有効利用や固定化に適用するにふさわしい有望技術を選定した。
- 本調査では、選定された有望技術におけるCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルとコストターゲットを推計することで、研究開発要素を抽出し、研究開発シナリオを策定することを目的とする。

## 本調査の実施方法

---

- 本調査では、文献調査及び主要な研究機関へのヒアリングを通じ、CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルとコストターゲットを推計する。
- 学識経験者を中心とした専門家ワーキンググループ等を通じ、選定された有望技術に対し、CO<sub>2</sub>固定化量や潜在的なコスト競争力、技術的課題等を多面的に評価することで、研究開発要素を抽出し、技術開発ロードマップを策定する。

## 和文要約

### 有望技術における技術開発要素の抽出

- 本調査では国内外の統計調査、論文検索、国プロ調査、研究者へのヒアリング、専門家によるワーキンググループにより、CO<sub>2</sub>有効利用に資する有望技術の研究開発に向けた検討を行った。
- 有望技術はカーボン・CO、炭酸塩、ポリカーボネートの3つが前回調査によって選定されており、それぞれの技術に対してCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルとコストターゲットを推計し、プロセス上で想定される技術的な課題を評価した。
- これらの評価を基に、実用化の障害となる技術課題を有識者ワーキンググループを通じて検討し、課題を解決するための研究開発要素を抽出した。研究開発要素は多岐に渡るが、有望技術ごとに大まかな方向性を以下のとおり取りまとめた。
  - カーボン・CO:再生可能エネルギー由来電力の使用を可能とする電解効率の向上に資する技術の開発等
  - 炭酸塩:安価な原料調達が可能である未利用廃棄物へのCO<sub>2</sub>固定化技術と生成物の有価物化に向けた研究等
  - ポリカーボネート:投入エネルギーが大きく増CO<sub>2</sub>となる可能性があるため、精密なLCA評価の実施と有望な触媒の開発等

### 研究開発シナリオの策定

- 抽出された研究開発要素に対し、技術間の優先順位や研究開発に要する期間を考慮することで研究開発シナリオを策定した。
- 研究開発シナリオでは研究開発フェーズを設定し、各フェーズごとの技術開発要素を検討した。これにより、それぞれの有望技術に対して商用化時期を推計し、技術開発目標を以下のとおり設定した。
  - カーボン・CO:2030年以降の安価な再エネ電力普及後の商用化を目指す
  - 炭酸塩:2025~2030年までの早期商用化を目指す

### 並行調査事項・検討課題リストの作成

- 有識者ワーキンググループによる検討では技術的に解決できない課題も多く提示された。これを受け、策定した研究開発シナリオを円滑に進めるために調査・検討すべき課題を検討し、並行調査事項・検討課題リストを策定した。
- 並行調査事項・検討課題リストでは横断的な研究開発や商用化を推進するための体制構築のほか、技術の海外展開や規制面における検討、実地調査の必要性など、研究開発シナリオを補完するための検討事項を取りまとめた。

## Summary

### Identifying the technology elements to be developed

---

- This survey examined the R&D of promising and effective CO<sub>2</sub> utilization technologies using statistics from both Japan and other countries, academic papers, national projects, interviews with researchers, and working groups of experts.
- In the previous survey, 3 promising technologies were selected: carbon / carbon monoxide, carbonate, and polycarbonate. For each technology, CO<sub>2</sub> immobilization potential and target costs were estimated. Then the technological issues were assessed.
- Based on these assessments, working groups of experts examined the technological obstacles to practical use and identified the technological elements that must be developed to solve those issues. Although these elements span numerous domains, the general direction for each of the promising technologies can be summarized as follows:
  - Carbon / carbon monoxide: Develop technologies that is familiar with renewable energy and have high electrolytic efficiency
  - Carbonate: Research CO<sub>2</sub> immobilization technologies for unused waste and those materials can be procured at a low cost; research how to convert recycled materials into valuable products.
  - Polycarbonate: Since energy input is large, CO<sub>2</sub> emission may increase; conduct more precise LCA and develop a promising catalyst

### Creating R&D scenarios

---

- R&D scenarios were created for the selected technology elements to research and develop, taking into account priority among the technologies and the time required for R&D.
- The R&D scenario was divided into phases and the technology elements were examined at each phase. Then the commercialization period was estimated for each technology, and development goals were set as follows:
  - Carbon / carbon monoxide: Aim to commercialize in 2030 or later after inexpensive renewable energy becomes commonplace
  - Carbonate: Aim for early commercialization by 2025 – 2030

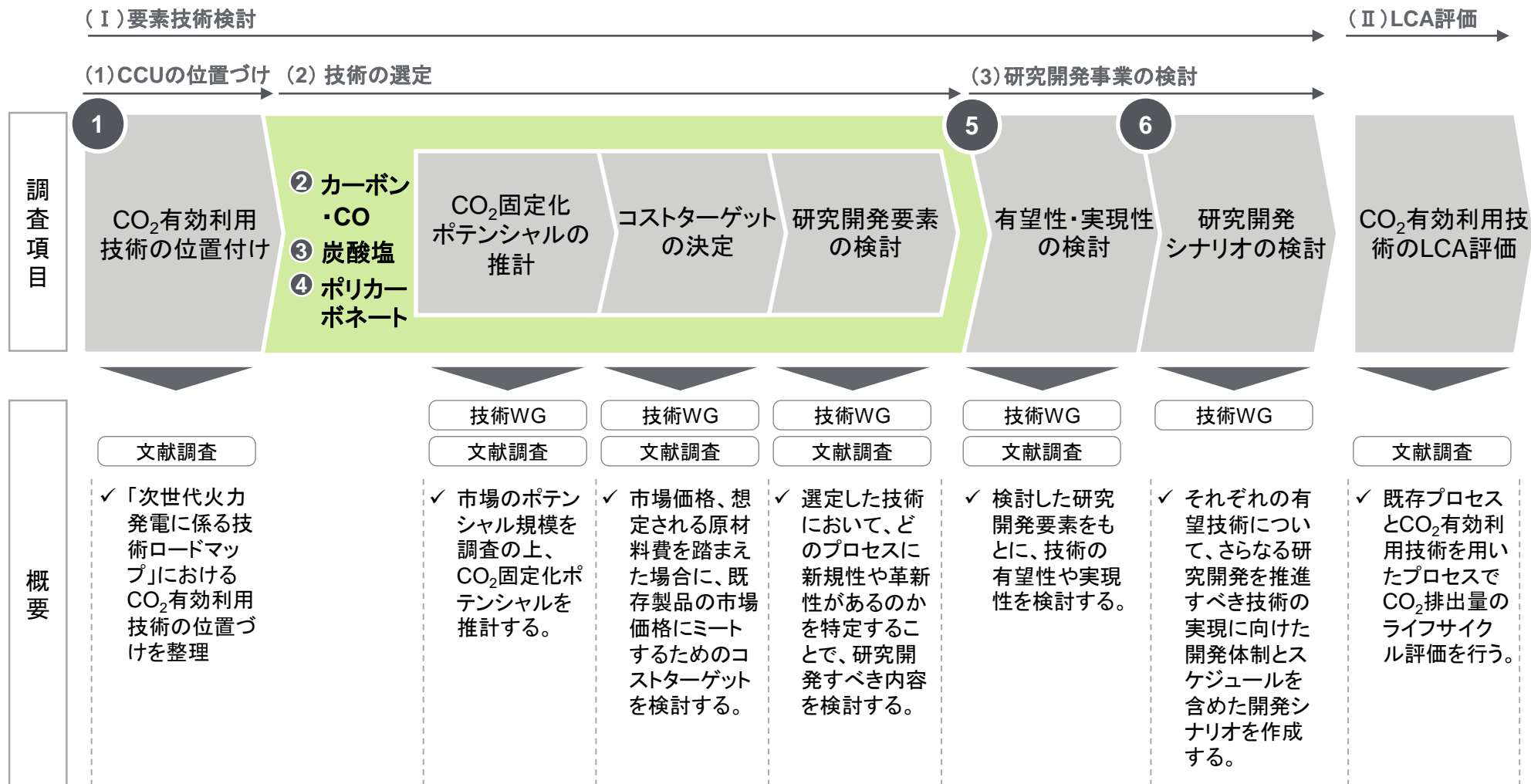
### Items surveyed at the same time and lists of issues to consider

---

- The expert working group presented many issues that could not be solved technologically. In response to this, issues were considered that must be examined further in order to proceed smoothly through the R&D scenarios, and a list of items to survey in parallel with research and issues to consider were made.
- The list of items to survey and the list of issues include building the structures to facilitate cross-domain R&D and facilitate commercialization, necessity for expanding the technology to other countries, complying with regulatory requirements and the field surveys.

# はじめに CO<sub>2</sub>有効利用に係る次世代技術の研究開発に向け CO<sub>2</sub>排出削減目標の達成に有効な技術进行分析のうえ 研究開発事業を検討した

## 調査フロー



はじめに  
**本調査では3つの有望技術ごとに  
 合計26の大学・研究所・企業の有識者による技術WGを実施した**

本調査における技術WGのメンバー

属性	カーボン・CO	炭酸塩	ポリカーボネート
大学	東京工業大学 技術創成研究院	大阪工業大学 工学部	東北大学 大学院工学研究科
	東京工業大学 物質理工学院	成蹊大学 理工学部	
	岐阜大学 大学院工学研究科	東北大学 多元物質科学研究所	
	九州大学 工学研究院		
	北海道大学 工学研究院		
研究所	産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門	電力中央研究所 環境科学研究所	
	電力中央研究所 エネルギー技術研究所		
企業	大阪ガス エネルギー技術研究所	IHI 資源・エネルギー・環境事業領域	東ソー 研究企画部
	東芝エネルギーシステムズ エネルギーシステム技術開発センター	出光興産 石炭事業部石炭・環境研究所	日本製鉄 技術開発企画部
		宇部興産 研究開発本部	三井化学 研究開発本部
		日揮 プロセステクノロジー本部	
		日本コンクリート工業 環境・エネルギー事業部	
		三菱日立パワーシステムズ グローバル戦略本部	
		三菱日立パワーシステムズ 環境プラント総括部	

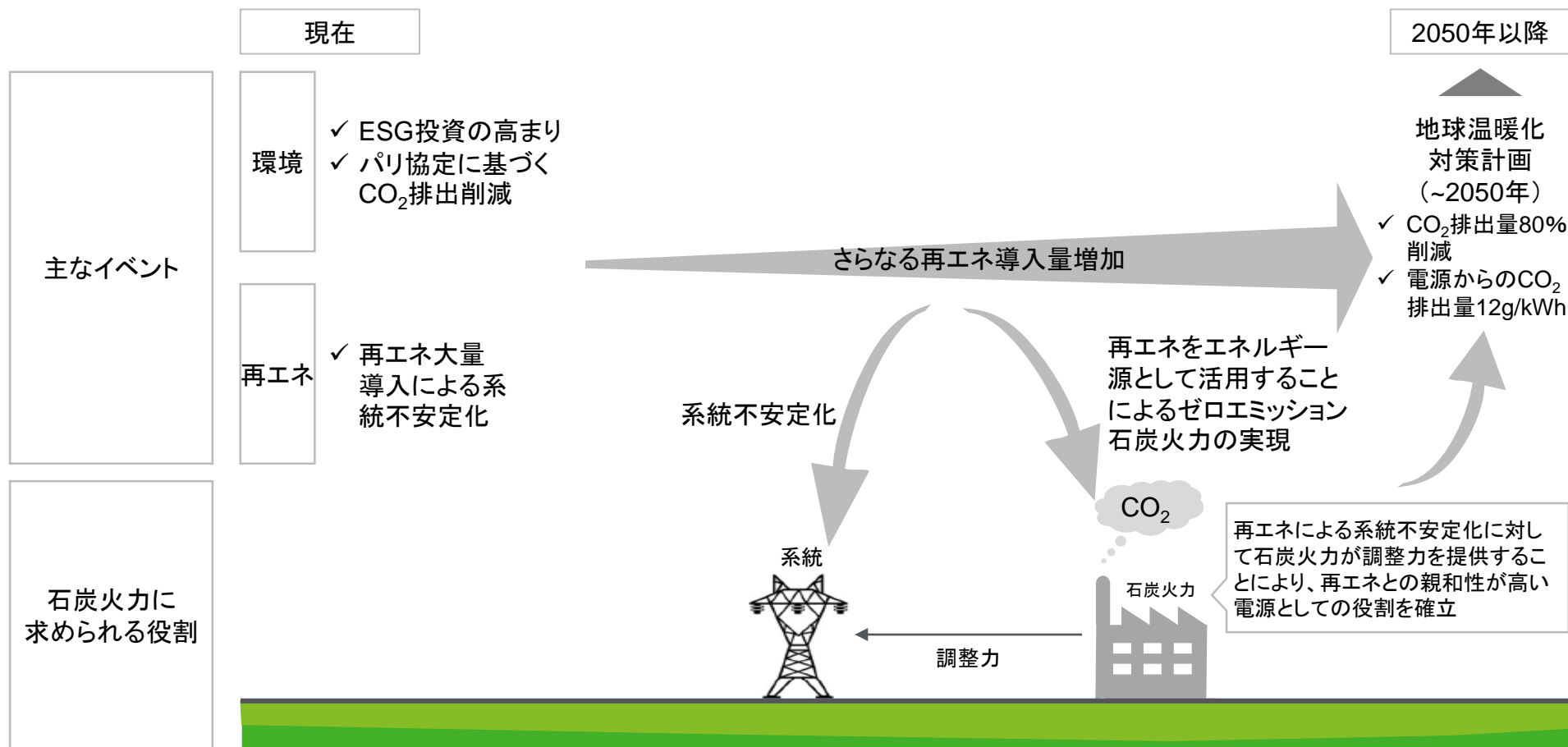
※五十音順



# 1. CO<sub>2</sub>有効利用技術の位置付け

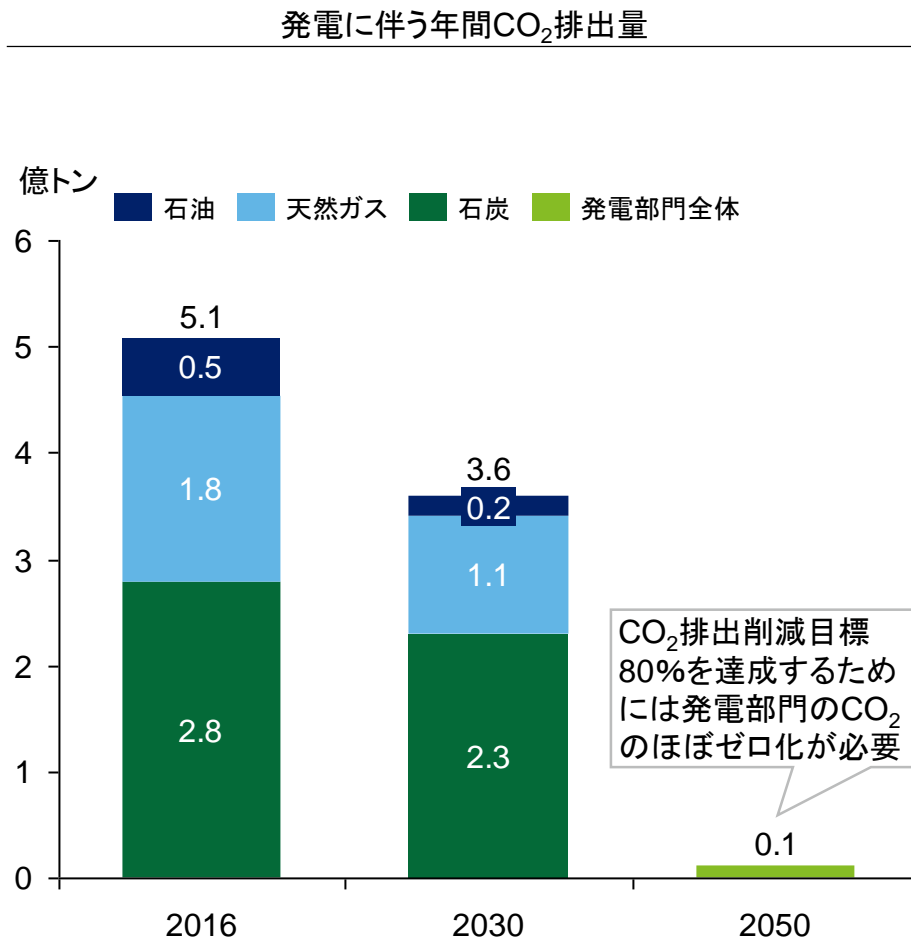
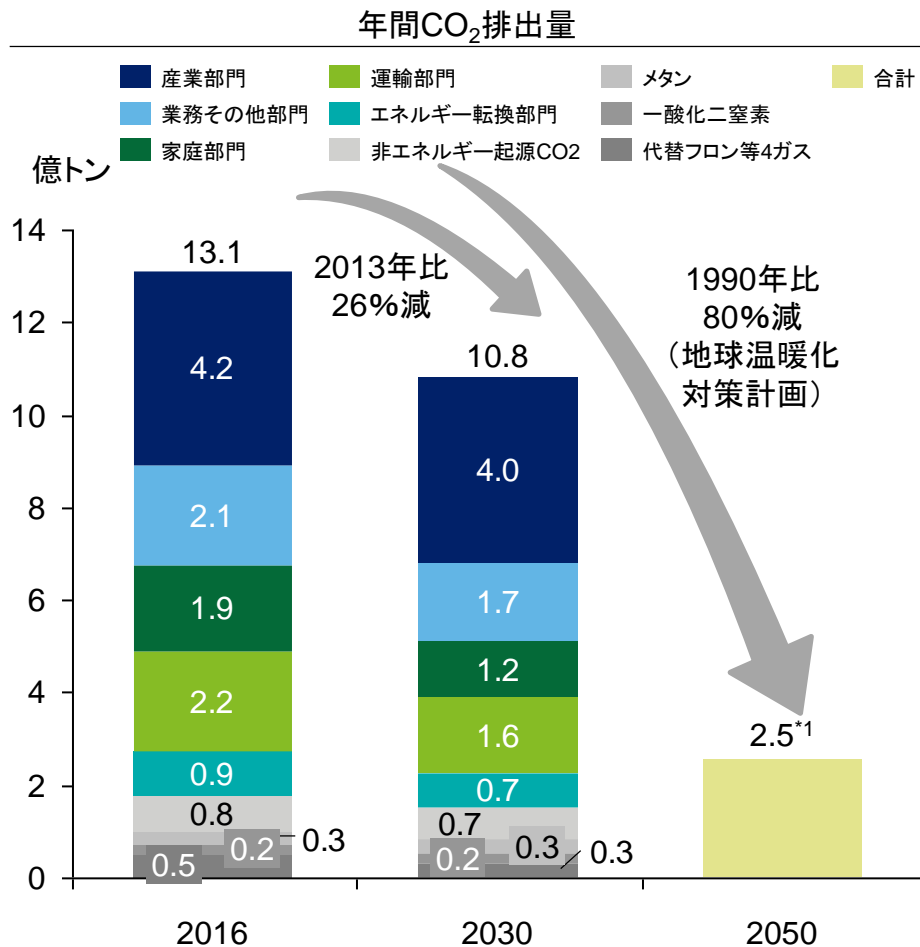
# 本調査では再エネ大量導入時代における石炭火力に求められる役割を整理する

## 本調査における絵姿



# ① CO<sub>2</sub>有効利用技術の位置付け 2050年までにCO<sub>2</sub>排出量80%削減目標を達成するためには 発電部門におけるCO<sub>2</sub>排出量をほぼゼロにする必要がある

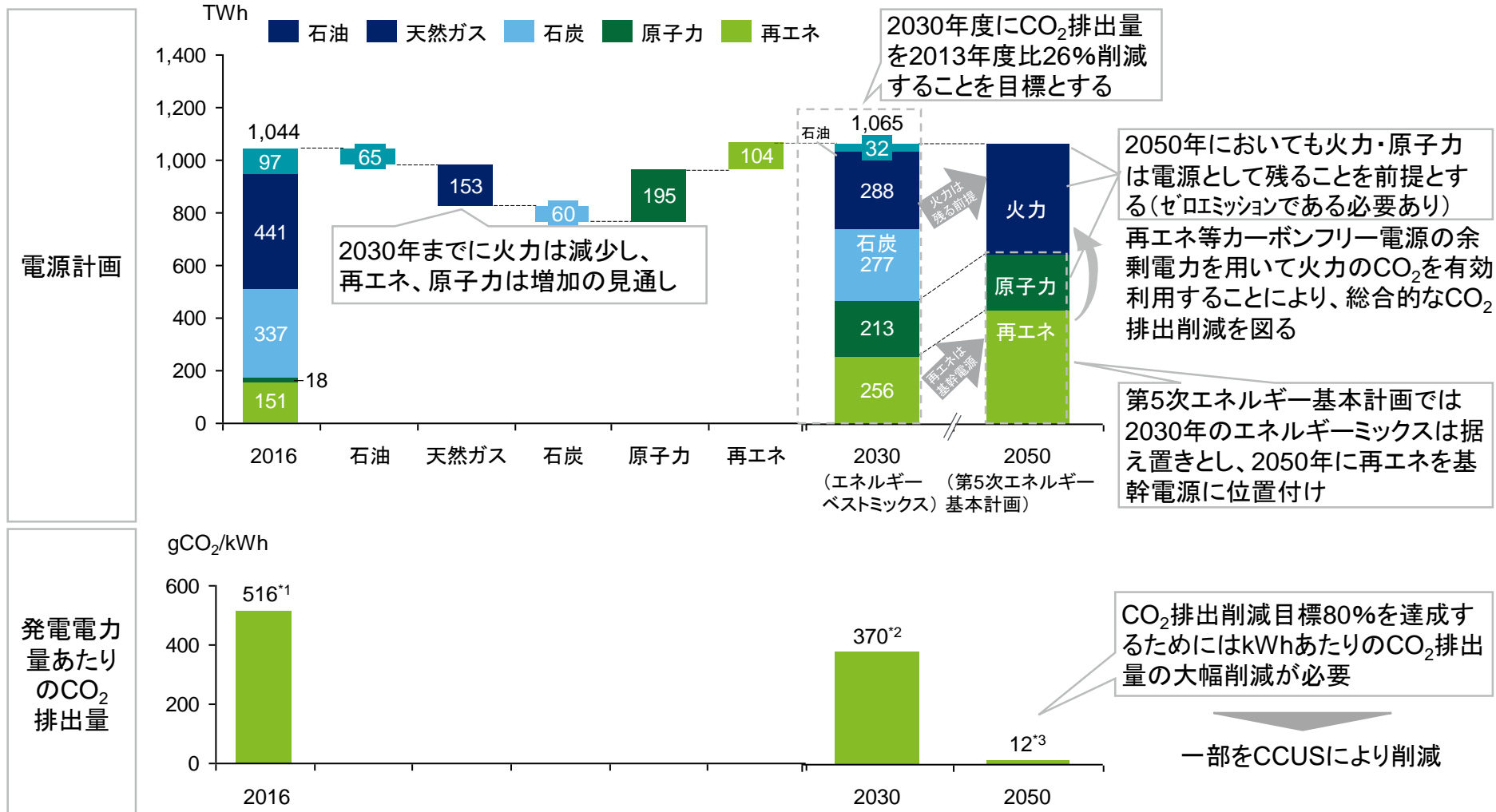
## 我が国のCO<sub>2</sub>排出量及び発電に伴うCO<sub>2</sub>排出量



出所: 環境省「電気事業分野の地球温暖化対策について」、環境省「日本の約束草案」、環境省「温室効果ガス排出量の算定結果」、Institute for Global Environmental Strategies (IGES), "Paris Agreement: From Low Carbon to Decarbonization", \*1:1990年比で80%削減することと算出

# ① CO<sub>2</sub>有効利用技術の位置付け 我が国では再エネ導入量を大幅に増加させる計画となっており 2050年までに発電電力量あたりのCO<sub>2</sub>排出量を12gまで削減することが求められる

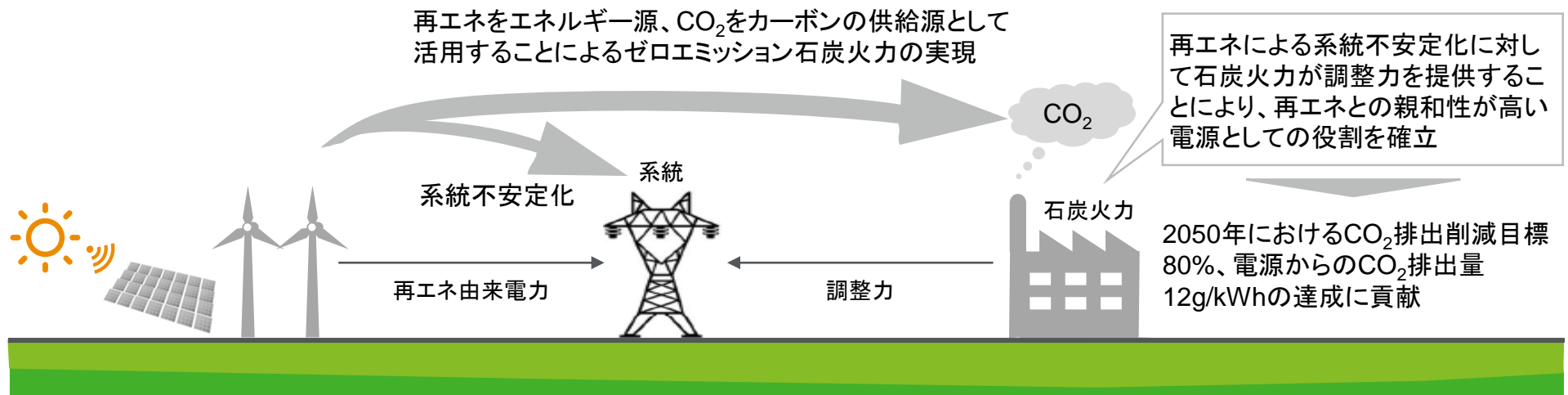
## 電源構成の見通し



出所: 経済産業省「第5次エネルギー基本計画」、\*1:電気事業連合会「INFOBASE 2017」より抽出、\*2:電気事業連合会「電気事業からのCO<sub>2</sub>排出量等について」より抽出、\*3:Institute for Global Environmental Strategies (IGES), "Paris Agreement: From Low Carbon to Decarbonization"より抽出

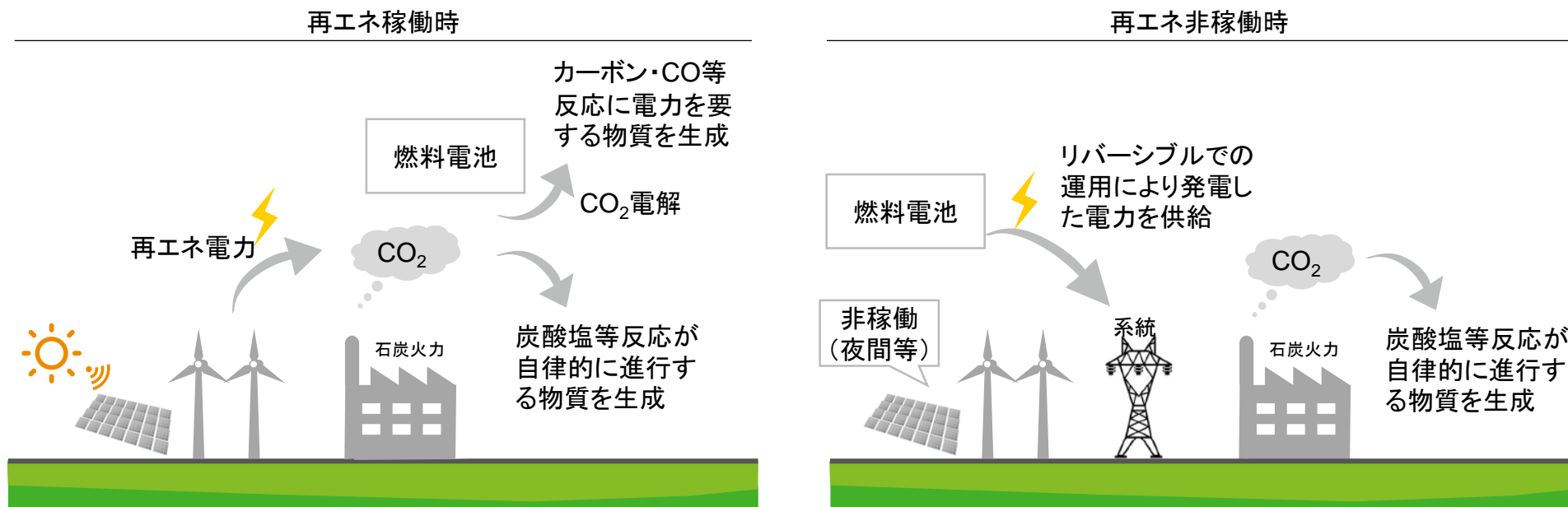
# ① CO<sub>2</sub>有効利用技術の位置付け 発電からのCO<sub>2</sub>排出量をほぼゼロ化するためには 再エネを主力電源としつつ 再エネとの親和性が高い石炭火力の役割を確立することが肝要である

## 本調査において求められる石炭火力の役割



# ① CO<sub>2</sub>有効利用技術の位置付け 石炭火力の低炭素化にはCCUが不可欠であり CO<sub>2</sub>電解や炭酸塩化等のCO<sub>2</sub>有効利用技術によるCO<sub>2</sub>削減を考える必要がある

## 本調査において目指すCCUの絵姿



# ① CO<sub>2</sub>有効利用技術の位置付け

## CO<sub>2</sub>有効利用技術が実用化すれば

### 実用的な用途でCO<sub>2</sub>を大量かつ安定的に固定化できる可能性がある

#### 生成物の固定化期間

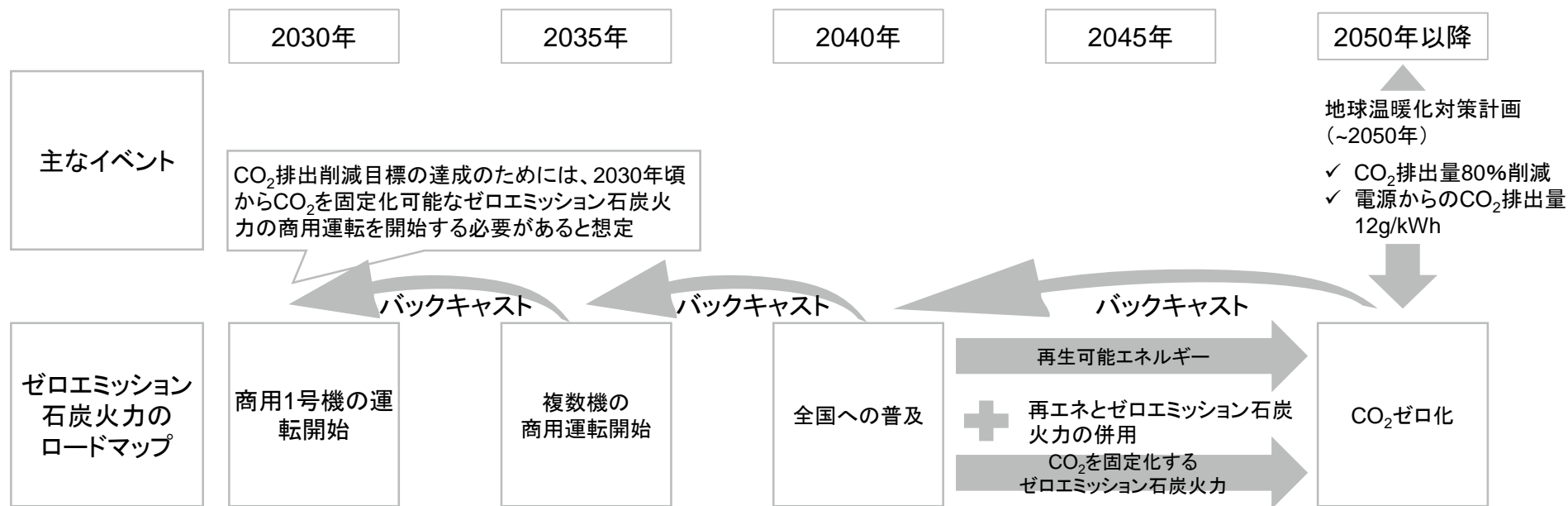
生成物	特徴	固定化期間
カーボン	固体として安定的に保管可能 <sup>*1</sup>	長期間 (カーボンは燃焼まで)
炭酸塩		
燃料	1サイクル分のCO <sub>2</sub> <sup>*2</sup> を削減可能	短期間 (燃焼まで)
化学誘導品		短期間 (最終製品の焼却処分まで)
ポリカーボネート	固体として安定的に保管可能	短期間 (最終製品の焼却処分まで)

CO<sub>2</sub>を固定化(CCS)するのに加えて製品として利用(CCU)することによりカーボンリサイクルを実現

\*1:従来の処理法によるCO<sub>2</sub>排出削減効果を考慮する必要があるが、CO<sub>2</sub>排出を伴ってセメント製造に使用された場合にも全体としてはCO<sub>2</sub>削減できる場合がある、\*2:燃料や化学品の製造に当たり、従来製法では必要だった原油燃焼分のCO<sub>2</sub>を削減可能。ただし固定化したCO<sub>2</sub>は製品燃焼時に再度大気に放出される。

# ① CO<sub>2</sub>有効利用技術の位置付け 2050年のCO<sub>2</sub>削減目標の達成からバックキャストすると 2030年頃までにゼロエミッション石炭火力の商用一号機の運転開始が必要であると想定

## CO<sub>2</sub>排出削減目標達成に向けたゼロエミッション石炭火力の利用ロードマップ





① CO<sub>2</sub>有効利用技術の位置付け  
**CO<sub>2</sub>の大量固定化と高付加価値品の生産が可能であり  
 既存技術の課題を補完する新しい技術の発掘を目的とした調査を実施した**

次世代火力発電に係る技術ロードマップと本PJにおけるCO<sub>2</sub>有効利用技術の位置づけ

		Pros	Cons
次世代火力発電に係る技術ロードマップ	CCS	○ 安価にCO <sub>2</sub> を固定化可能	✕ 貯留地に制約がある 貯留場所の確保が困難
	CCU	○ 高付加価値	✕ 需要が少ない
本調査		○ 都市へのCO <sub>2</sub> の固定化等、貯留地の制約を受けず豊富な需要が見込まれる製品開発 ○ CO <sub>2</sub> の大量固定化と高付加価値品の生産の両立が可能な技術開発に向けた取組	

従来のCCUSの課題にアプローチ

# ① CO<sub>2</sub>有効利用技術の位置付け 前年度の調査では既存技術の課題を補完しうる新しい技術を発掘するため 考えられる様々なCCUの技術群から3つの評価指標をもとに有望技術を選定した

## 有望技術の選定

生成プロセス	分類	有望技術候補	
電気分解	カーボン	カーボンファイバー・ナノチューブ	
	化学品 <small>基礎原料</small>	一酸化炭素	
バイオプロセス	燃料	液体燃料(藻類、人工光合成含)	
	植物	植物への固定化	
化学プロセス	燃料	メタン	
	基礎原料	メタノール	
		エタノール	
		一酸化炭素(光触媒含)	
		ジメチルカーボネート	
		ホルムアルデヒド	
		オレフィン	オレフィン(エチレン・プロピレン等)
	ポリカーボネート	脂肪族ポリカーボネート	
		芳香族ポリカーボネート	
		芳香族ポリウレタン	
		ポリヒドロキシウレタン	
		ポリウレア	
		その他(ラクトン)	
		食品添加物	α-アミノ酸
		炭酸塩	炭酸カルシウム
	その他炭酸塩		

有望技術	特徴
カーボン・CO	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ CO<sub>2</sub>還元で電気エネルギーを消費するため、再エネ等カーボンフリー電源の利用が必要</li> <li>✓ 固体化することで安全かつ燃焼可能なエネルギーとして貯蔵可能(カーボン)</li> <li>✓ C1化学に接続でき、誘導品の需要が多い(CO)</li> </ul>
炭酸塩	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 炭酸カルシウム由来の原料ではCO<sub>2</sub>を排出するため、CO<sub>2</sub>フリーの原料が必要</li> <li>✓ CO<sub>2</sub>フリーの原料として廃棄物を利用できればCO<sub>2</sub>を多量に固定化可能</li> </ul>
ポリカーボネート	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ポリカーボネート等の汎用品として都市への固定化が可能</li> </ul>

**評価指標**

- ✓ 技術の新規性
- ✓ CO<sub>2</sub>削減ポテンシャル
- ✓ プロセス効率

3つの評価指標により絞り込み

① CO<sub>2</sub>有効利用技術の位置付け  
 前年度の調査では選定した有望技術において  
 CO<sub>2</sub>固定化技術の利点や実用化における課題を洗い出し・整理した

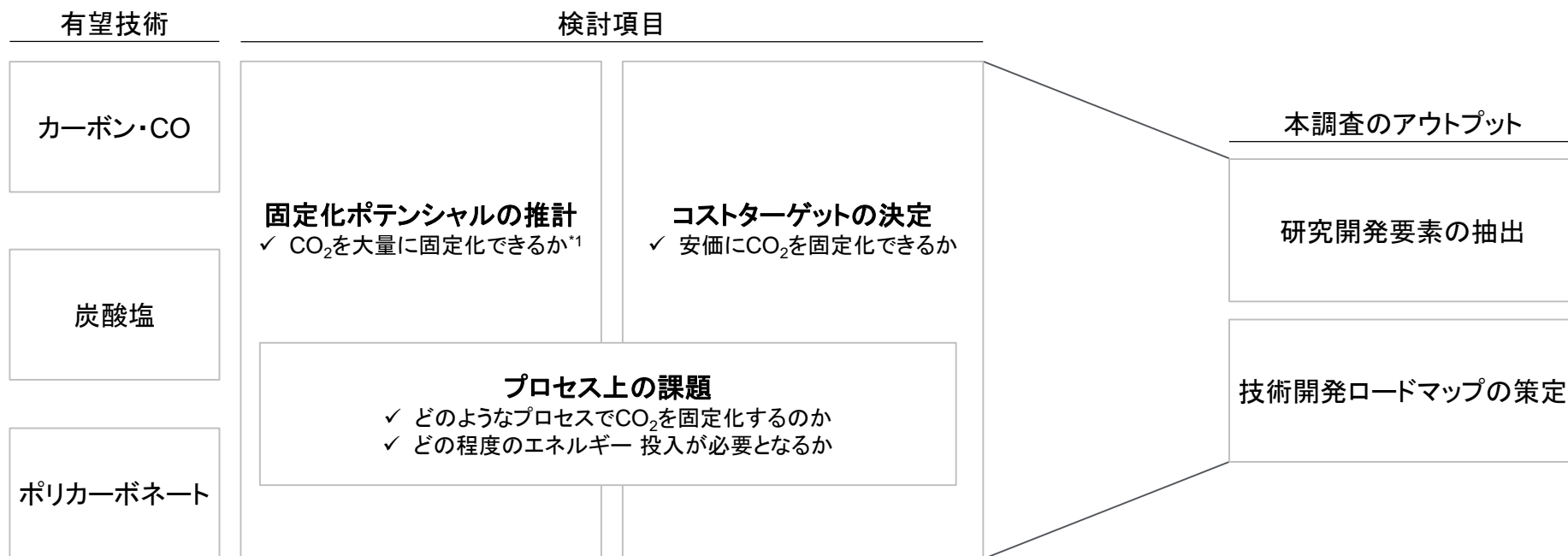
技術開発に向けた有望技術の利点・課題

有望技術	利点	課題	
		技術面	需要面
カーボン	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 固体化することで安全かつ燃焼可能なエネルギーとして貯蔵可能</li> <li>✓ 火力発電所等で燃焼させることで循環利用可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ CO<sub>2</sub>還元にも多量の電力を利用するため、再エネ等カーボンフリー電源の余剰電力の利用が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 現時点では製品需要が数十万t/年程度と少ないため燃料、カーボンファイバー等の用途開発が必要</li> </ul>
CO	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ C1化学に接続でき、誘導品の需要が多い</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ CO単独では需要が少ないため、需要が期待できるC1化学への接続が必要</li> </ul>
炭酸塩	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 固体化することにより安全に貯蔵可能</li> <li>✓ セメント等の用途があり大量にCO<sub>2</sub>を固定化可能</li> <li>✓ 自発的に進行する反応のため外部からのエネルギー投入が不要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 炭酸カルシウム由来の原料ではCO<sub>2</sub>が排出されるため、バイオマス灰や鉄鋼スラグ等CO<sub>2</sub>フリーのアルカリ土類金属源が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 固体として安定的に保存できるがセメント以外は用途が少ない</li> <li>✓ セメント用の需要は数千万～1億t/年、セメント用以外では数千万t/年程度</li> </ul>
ポリカーボネート	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ポリカーボネートとして都市の中で固定化可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 生成プロセス中で発生するCO<sub>2</sub>排出量の低減が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ポリカーボネート単独では製品需要が少ないため、ガラス代替材等の用途開発が必要</li> </ul>

貯留地の制約を受けずCO<sub>2</sub>を安定的かつ多量に固定化可能

# ① CO<sub>2</sub>有効利用技術の位置付け 選択された有望技術について固定化ポテンシャルとコストターゲットの評価により 研究開発要素を抽出して技術開発ロードマップを策定する

## 研究開発要素の抽出と技術開発ロードマップの策定



\*1:CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルは有望技術による単位生成物あたりに必要なCO<sub>2</sub>量と国内市場規模との積として算出した

## 2. カーボン・CO

### 2.1 CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルの推計

### 2.2 コストターゲットの決定

### 2.3 研究開発要素の検討

# カーボン製品をCO<sub>2</sub>の電気分解により製造する方法が研究されている

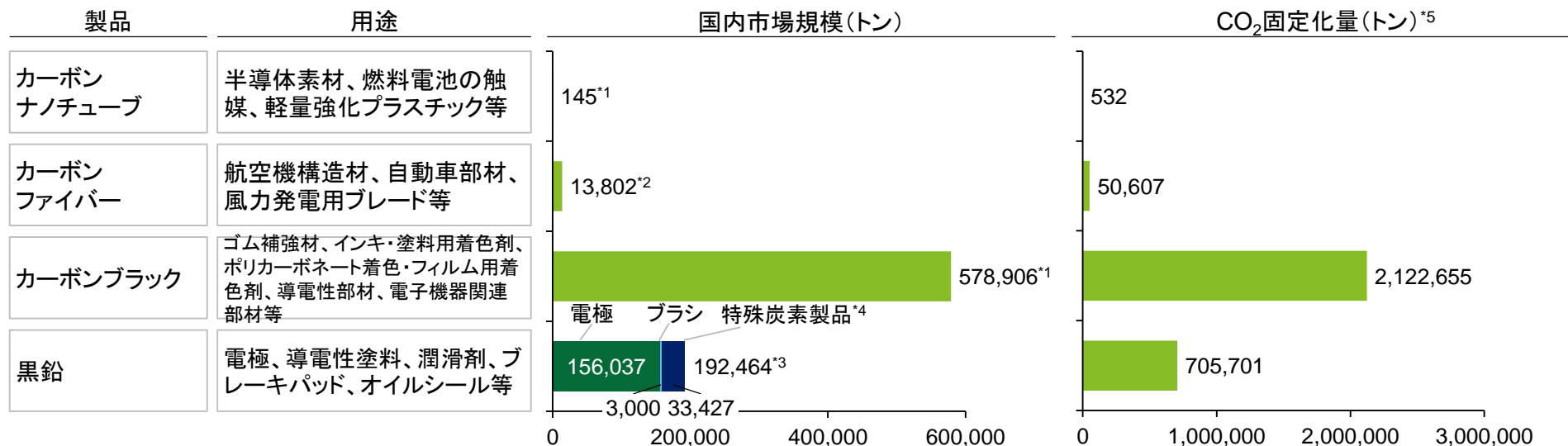
## カーボン製品における既存製法・CCUによる製法

製品	特徴	必要とされる仕様	製法	
			既存製法	CCUによる製法
カーボンナノチューブ	強度・熱伝導性・電気伝導性に優れる。	炭素原子同士が六角形に結合し、直径数nmの筒状構造をなす。	アーク放電法、レーザー蒸発法、化学的気相成長法(CVD法)の3つの製法により製造。	高温溶融塩を用いたCO <sub>2</sub> 電気分解によるカーボンナノチューブ生成(北海道大学・鈴木教授、George Washington University・Licht教授)
カーボンファイバー	軽量であり、強度・弾性率に優れる。	炭素含有量が90%以上の微細な黒鉛結晶構造をもつ繊維状の炭素物質。	ポリアクリロニトリル(PAN)繊維・ピッチ繊維を蒸し焼きにし、炭素以外の元素を脱離させて製造。	高温溶融塩を用いたCO <sub>2</sub> 電気分解によるカーボンファイバー生成(George Washington University・Licht教授)
カーボンブラック	着色力が強く、熱安定性・導電性に優れる。	直径約1~500nmの炭素粉末であり、表面に多数の官能基が結合。	高温ガス中に原料として石油系や石炭系の油を吹き込み、不完全燃焼させて製造する方法が一般的。	該当なし
黒鉛	耐熱性や導電性に優れ、軽量かつ引っ張りに強い。	六角形格子状に結合している炭素原子のシートが積層。炭素原子のみから構成。	石油コークスやピッチコークを粉砕機で粒子状にし、コールタルピッチを加えてペーパースト状に捏合させ、焼成して製造。	該当なし

# カーボンの市場規模は大きくないが カーボン製品の中ではカーボンブラックや黒鉛は市場規模が大きい

## カーボンの市場規模とCO<sub>2</sub>固定化量

カーボン

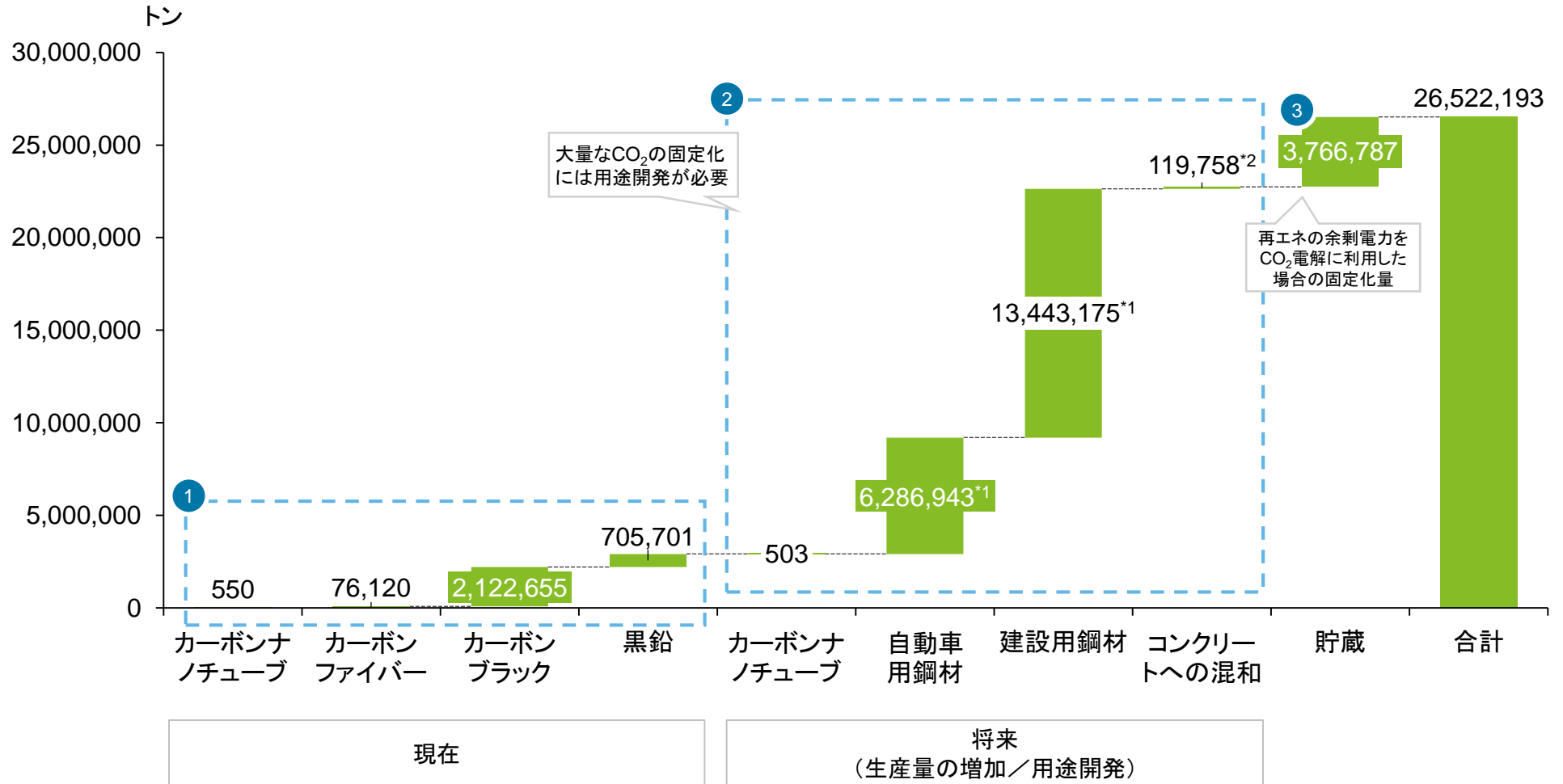


\*1:経済産業省「ナノマテリアルの製造量等の推移」より製造量の中間値を抽出、\*2:経済産業省「生産動態統計」より2017年の炭素繊維出荷量を抽出、\*3:経済産業省「生産動態統計」より市場価格・規模を抽出、\*4:半導体、電気、機械、冶金等に用いられる高機能製品の総称、\*5:国内市場規模にCO<sub>2</sub>とCの分子量比(44/12=3.67)を掛け算

# 大量のCO<sub>2</sub>の固定化にはカーボン製品の用途開発が必要である

## カーボンのCO<sub>2</sub>固定化量

カーボン



\*1: 日本鉄鋼連盟Websiteに記載の2017年における自動車・建設用普通鋼・特殊鋼の生産量に、鉄をCFRPで置き換えた場合の重量比(4:1)及びCFRPの生成に必要なカーボンファイバーの割合50%をもとに求められるカーボンファイバーの必要量にCO<sub>2</sub>とCの分子量比(44/12=3.67)を掛け算出、\*2: セメントハンドブック2019年度版より2017年の道路用コンクリート生産量にCO<sub>2</sub>-SUICOMのCO<sub>2</sub>固定化量109kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>を掛け算出



## (参考) 固定化ポテンシャルのバックデータ(1/4)

現状の市場規模に対するCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルは約288万トンである

## ① 現在の用途への固定化ポテンシャル

カーボン

項目	カーボンナノチューブ	カーボンナノファイバー	カーボンブラック	黒鉛
国内市場規模	145トン <sup>*1</sup>	1万3,802トン <sup>*2</sup>	57万8,906トン <sup>*1</sup>	19万2,464トン <sup>*3</sup>
CO <sub>2</sub> 固定化ポテンシャル	532トン	5万607トン	212万2,655トン	70万5,701トン

CO<sub>2</sub>固定化率  
367%

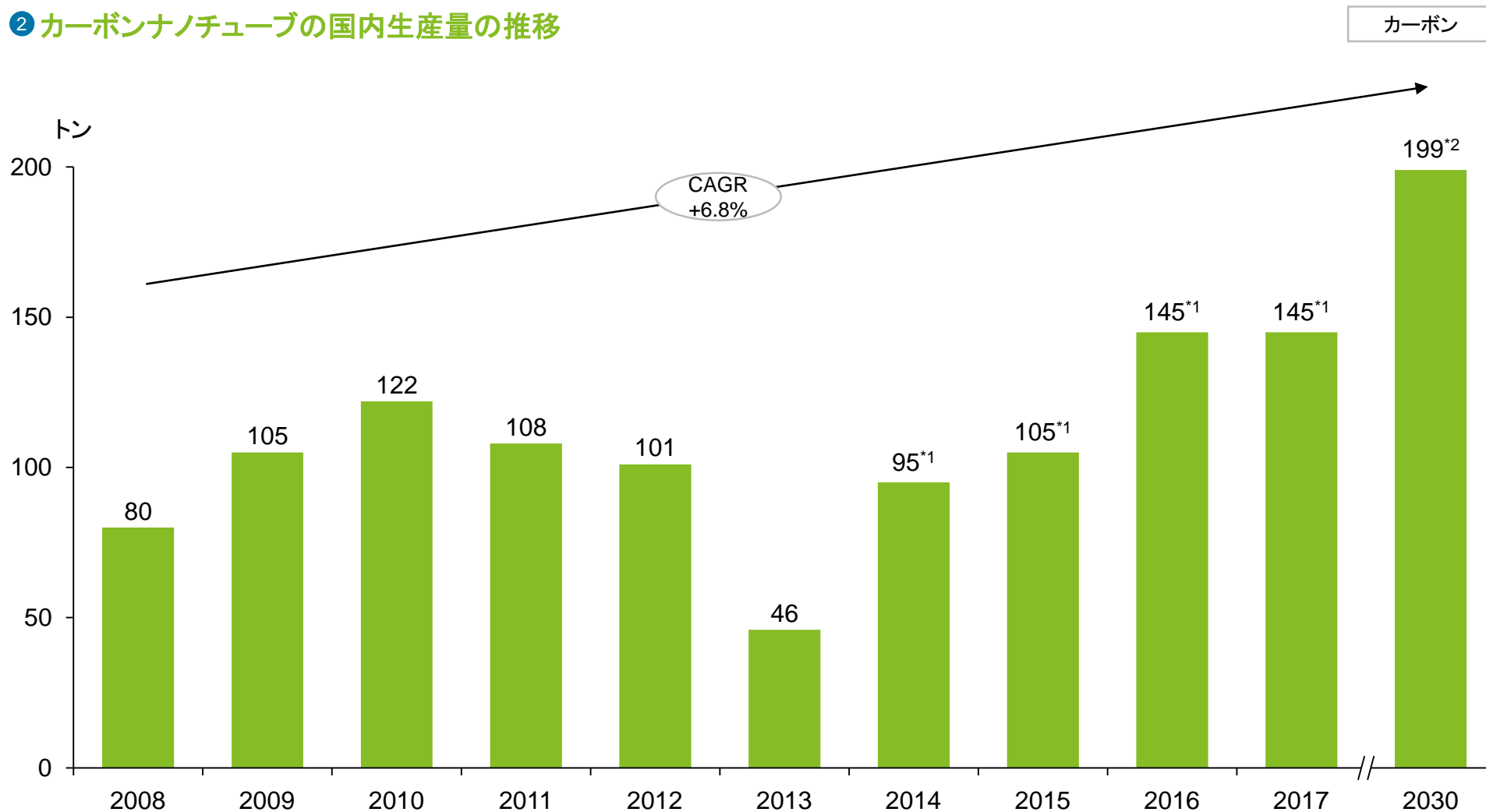
$44/12=3.67$   
(CO<sub>2</sub>とCの分子量比)

CO<sub>2</sub>固定化量 約288万トン

\*1:経済産業省「ナノマテリアルの製造量等の推移」より製造量の中間値を抽出、\*2:経済産業省「生産動態統計」より2017年の炭素繊維出荷量を抽出、\*3:経済産業省「生産動態統計」より市場価格・規模を抽出

## カーボンナノチューブの国内生産量は年平均6.8%増加している

## ② カーボンナノチューブの国内生産量の推移



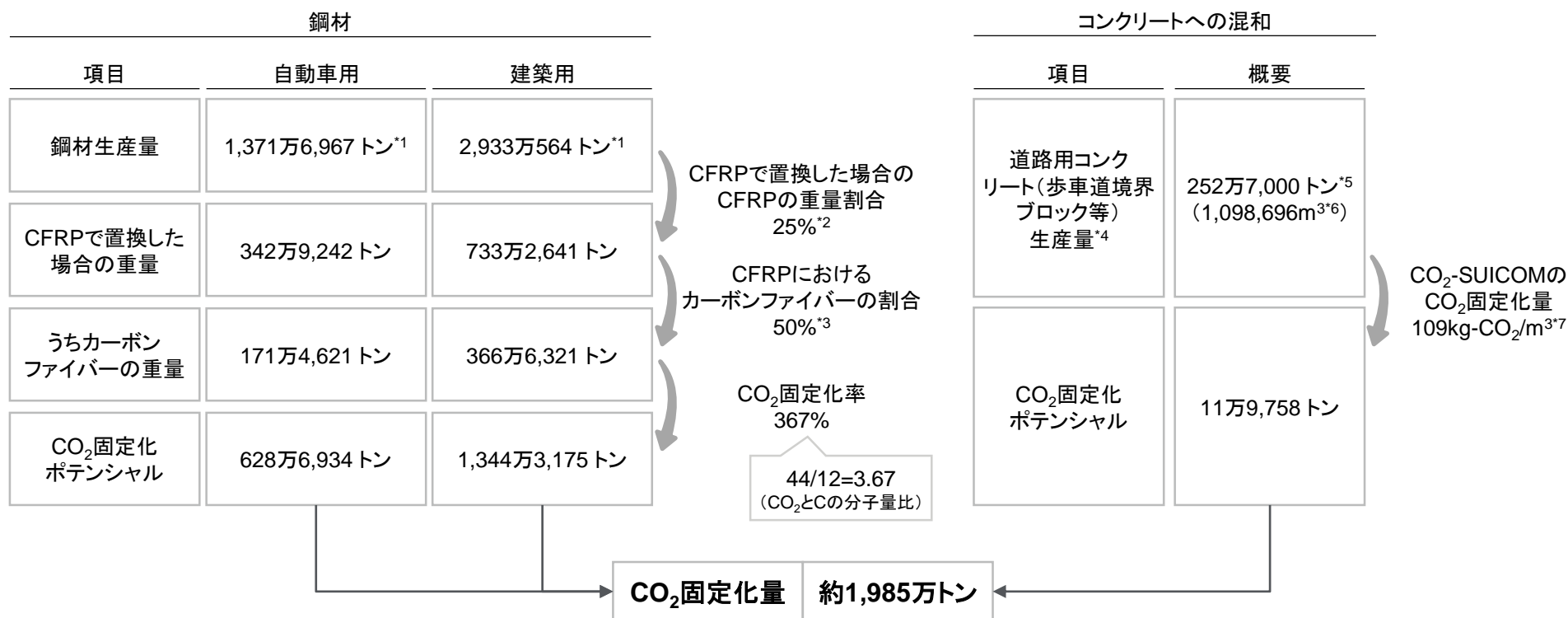
出所: 経済産業省「ナノマテリアルの製造量等の推移」、\*1: 経済産業省「ナノマテリアルの製造量等の推移」より製造量の間接値を抽出、\*2: 2017年の生産量から年平均6.8%増加すると仮定して算出

用途開発によるCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルは約1,985万トンである

鋼材はCFRPで置換すると仮定し、コンクリートへの混和剤はCO<sub>2</sub>-SUICOMで代替すると仮定して、用途開発における固定化ポテンシャルを算出した。

カーボン

## ② 用途開発による固定化ポテンシャル



\*1:日本鉄鋼連盟Websiteより2017年生産量を抽出、\*2:東レWebsiteより鉄とCFRPの重量比(4:1)を抽出、\*3:CFRPにおけるカーボンファイバーの含有割合は商品によって異なるが、本試算では50%とした、\*4:鉄筋腐食の恐れがあるため、鉄筋を要しない道路用コンクリート(分離帯、歩車道境界ブロック等)に適用することとした、\*5:セメントハンドブック2019年度版より抽出、\*6:コンクリートの比重を2.3t/m<sup>3</sup>とし算出、\*7:取違ら「CO<sub>2</sub>排出量ゼロ以下の環境配慮型コンクリートCO<sub>2</sub>-SUICOM」より抽出

再エネの余剰電力をすべて用いた場合は約377万トンのCO<sub>2</sub>を電解できる

## ③ 想定される余剰電力をすべて固定化に使用した場合の固定化ポテンシャル

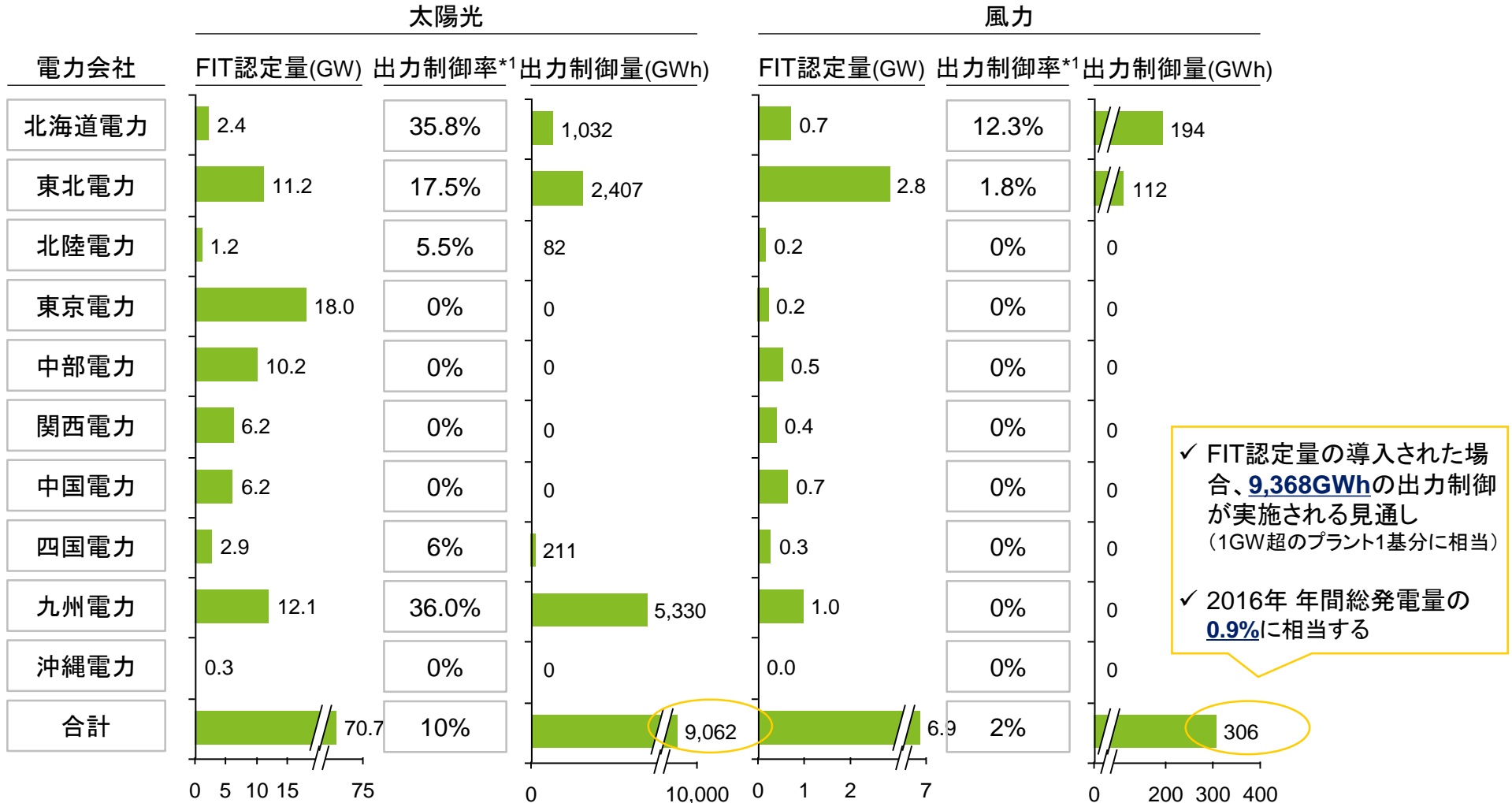
カーボン

項目	黒鉛として貯蔵	
予想される 再エネ余剰電力量*1	9,368GWh (日本の総電力量の約0.9%)	次項参照
CO <sub>2</sub> 固定化 ポテンシャル	376万6,787トン	1tのCO <sub>2</sub> の電解 に必要な電力量 ÷2,487kWh/t P.38参照
生成される カーボンの量	102万7,306トン	CO <sub>2</sub> 固定化率 ÷367% 44/12=3.67 (CO <sub>2</sub> とCの分子量比)
貯蔵に必要な容積	45万4,560 m <sup>3</sup> (東京ドーム 約0.4個分*2)	黒鉛の密度 ÷2.26 g/cm <sup>3</sup>

\*1:2018年時点のFIT認定量(太陽光+風力)がすべて導入された場合の発電量に2015~2017年における出力抑制実績を積算したものを再エネ余剰電力量とした、\*2:東京ドームシティ Websiteより東京ドームの容積(124万立方メートル)から算出

# 現時点のFIT認定量が全て導入されると年間9,368GWhの余剰が発生する見込み

## FIT認定設備に対する出力制御量(FIT認定量は2018年時点)



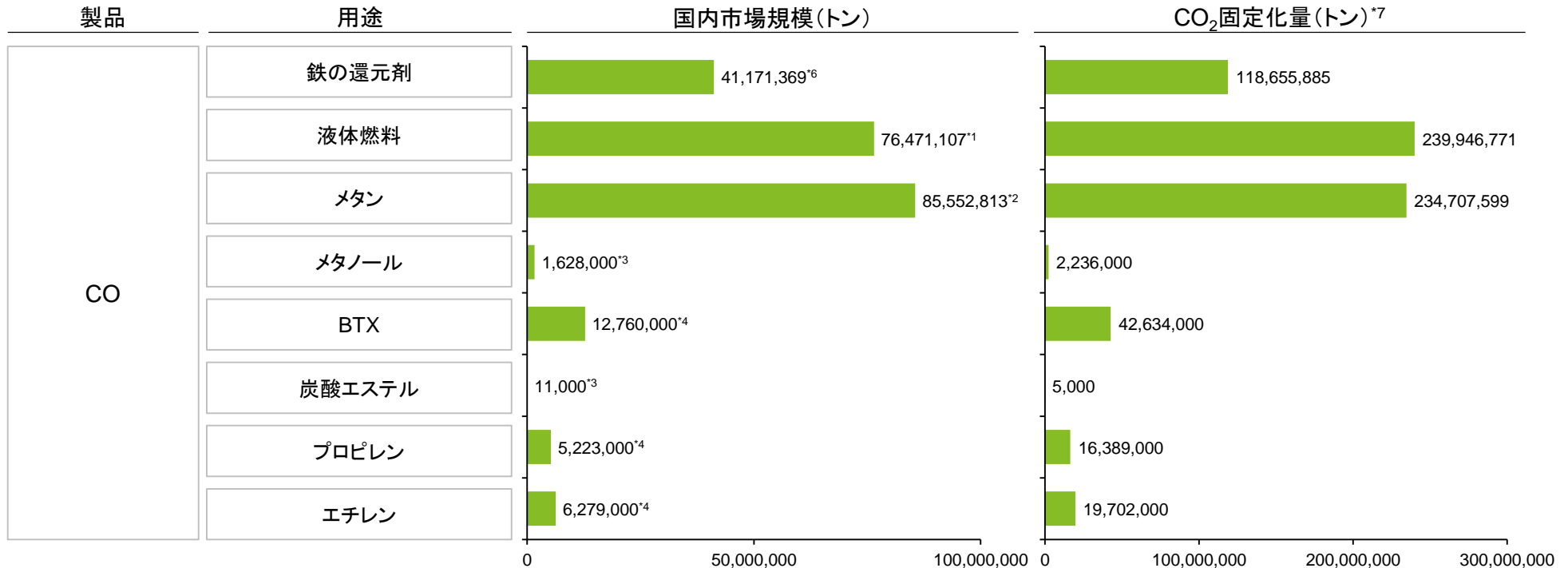
\*1:発電可能電力量(制御前)に対する出力制御量の比率であり、経済産業省「系統WG」にて各電力会社から提示された出力抑制の割合(連系統線活用量50%ケース、2015-2017年を想定)

# COはカーボンよりも市場規模が大きく

特に液体燃料やメタン等の燃料向け用途としての需要が大きい

## COの市場規模とCO<sub>2</sub>固定化量

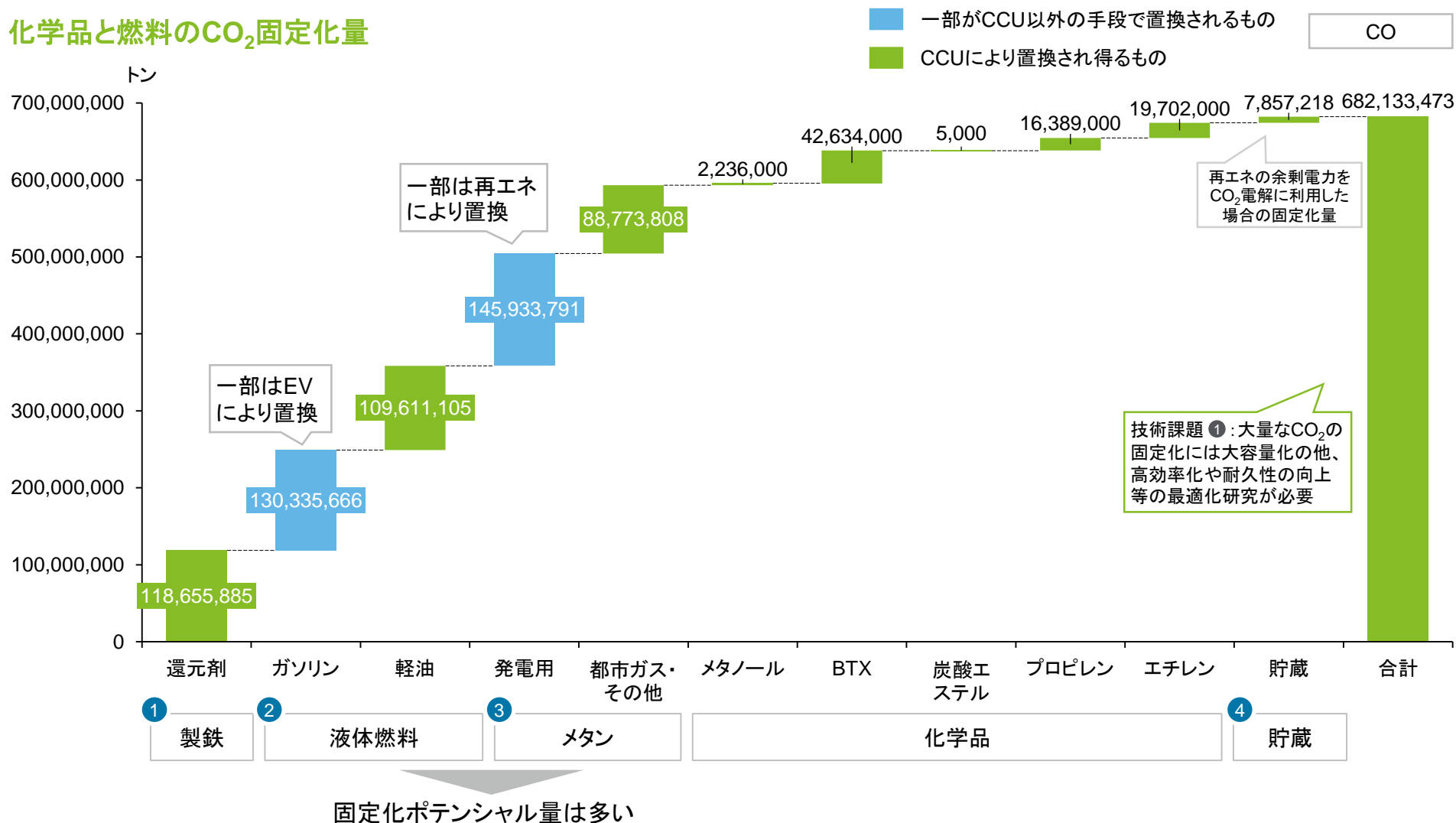
CO



\*1:経済産業省「資源・エネルギー統計年報」より2016年のガソリン・軽油の払出合計値を抽出、\*2:経済産業省「天然ガスの用途別消費量の推移」より2015年度の消費量を抽出、\*3:財務省貿易統計より2016年の輸入量を抽出、\*4:化学工業協会Websiteより2016年の生産量を抽出、\*5:第1回技術WGにおける議論による、\*6:財務省貿易統計より2018年の原料炭輸入量を抽出、\*7:最終製品とCO<sub>2</sub>の分子量比をもとに算出

# 化学品と比較して燃料は大量にCO<sub>2</sub>を固定化可能だが 燃料需要が今後減少するため一部を代替することが有意である

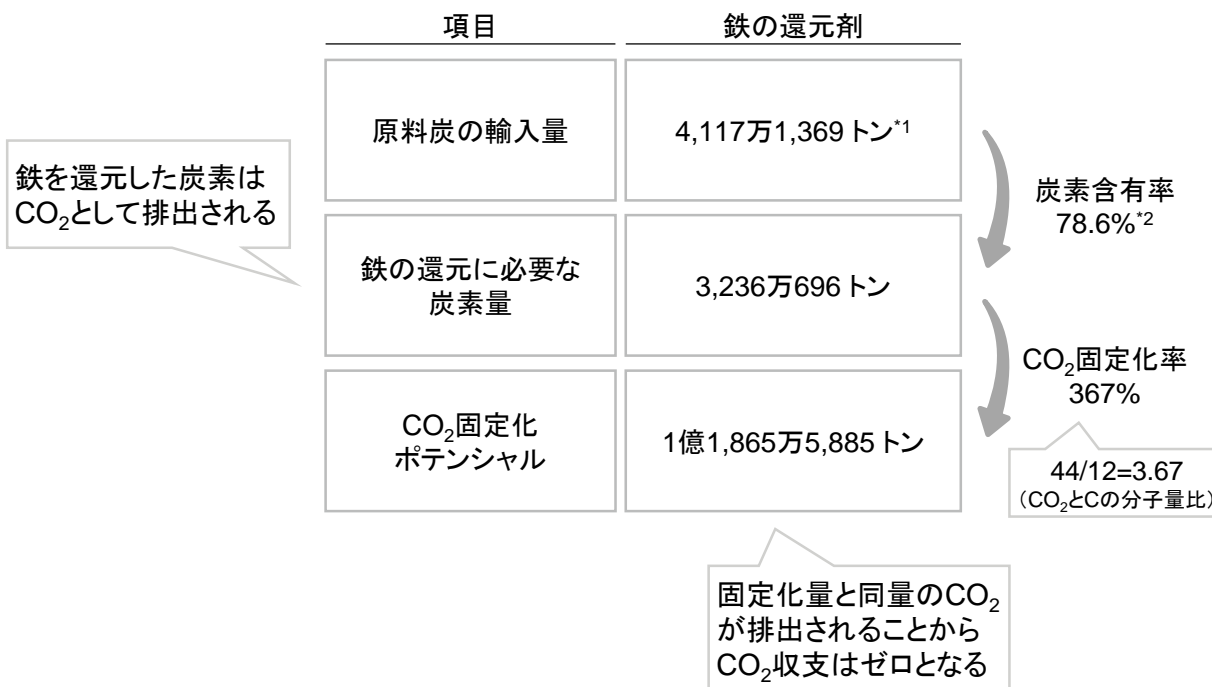
## 化学品と燃料のCO<sub>2</sub>固定化量



## (参考) 固定化ポテンシャルのバックデータ(1/4)

原料炭代替による還元剤のCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルは約1.2億トンである① 鉄の還元剤のCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャル

CO



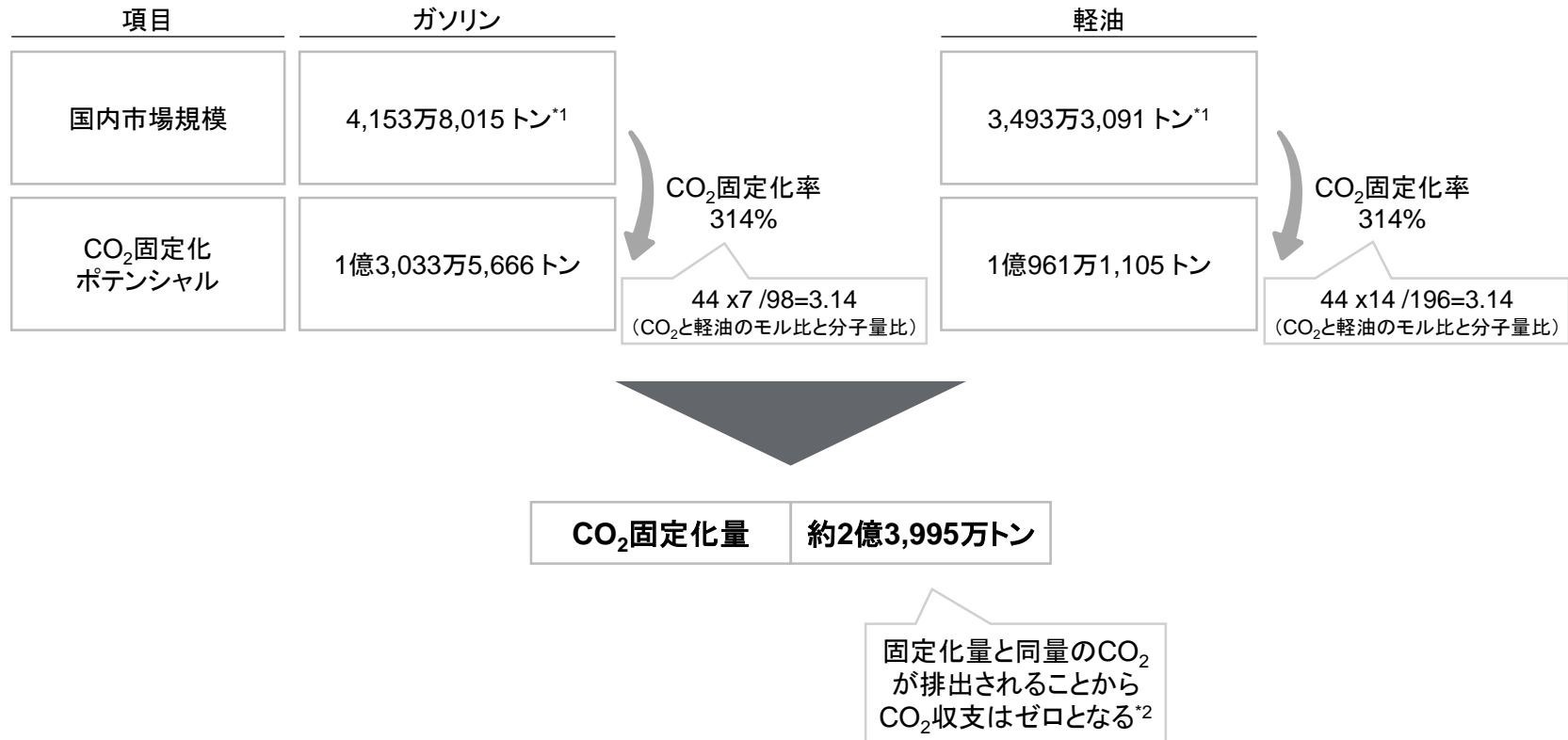
\*1:財務省貿易統計より2018年の原料炭輸入量を抽出、\*2:経済産業研究所「エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数の改訂案について(2013年度改訂標準発熱量・炭素排出係数表)」より抽出



# 液体燃料のCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルは約2.4億トンである

## ② 液体燃料のCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャル

CO

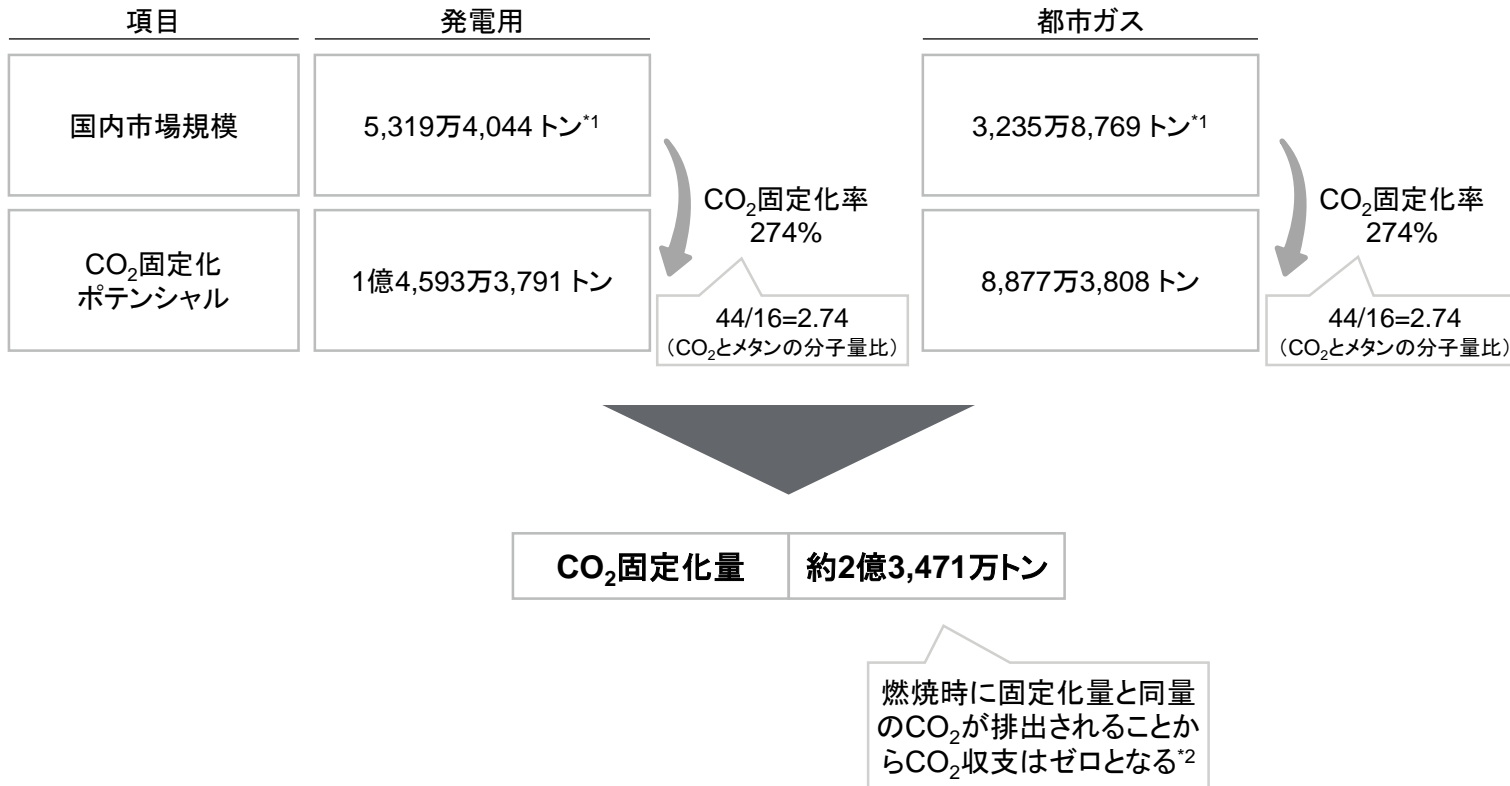


\*1:経済産業省「資源・エネルギー統計年報」より2016年のガソリン・軽油の払出合計値を抽出、\*2:燃料や化学品の製造にあたり、従来製法では必要だった原油燃焼分のCO<sub>2</sub>を削減可能。ただし固定化したCO<sub>2</sub>は製品燃焼時に再度大気に放出される

# メタンのCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルは約2.3億トンである

## ③ メタンのCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャル

CO



\*1:経済産業省「天然ガスの用途別消費量の推移」より2015年度の消費量を抽出、\*2:燃料や化学品の製造にあたり、従来製法では必要だった原油燃焼分のCO<sub>2</sub>を削減可能。ただし固定化したCO<sub>2</sub>は製品燃焼時に再度大気に放出される

再エネの余剰電力をすべて用いた場合は約786万トンのCO<sub>2</sub>を電解できる

## ④ 想定される余剰電力をすべて固定化に使用した場合の固定化ポテンシャル

CO

項目	COとして貯蔵	
予想される再エネ余剰電力量*1	9,368GWh	余剰電力量は P.29参照
CO <sub>2</sub> 固定化ポテンシャル	785万7,218トン	1tのCO <sub>2</sub> の電解に必要な電力量 ÷ 1,192 kWh/t 必要電力量は P.42参照
生成されるCOの量	500万697トン	CO <sub>2</sub> 固定化率 ÷ 157% 44/28=1.57 (CO <sub>2</sub> とCOの分子量比)
貯蔵に必要な容積	メタノールにして貯蔵した場合 722万4,278 m <sup>3</sup> (国内市場規模の約3.5倍)	COとCH <sub>3</sub> -OHの分子量比 × 32/28 メタノールの密度 ÷ 0.792 g/cm <sup>3</sup>

\*1:2018年時点のFIT認定量(太陽光+風力)がすべて導入された場合の発電量に2015~2017年における出力抑制実績を積算したものを再エネ余剰電力量とした

## 2. カーボン・CO

2.1 CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルの推計

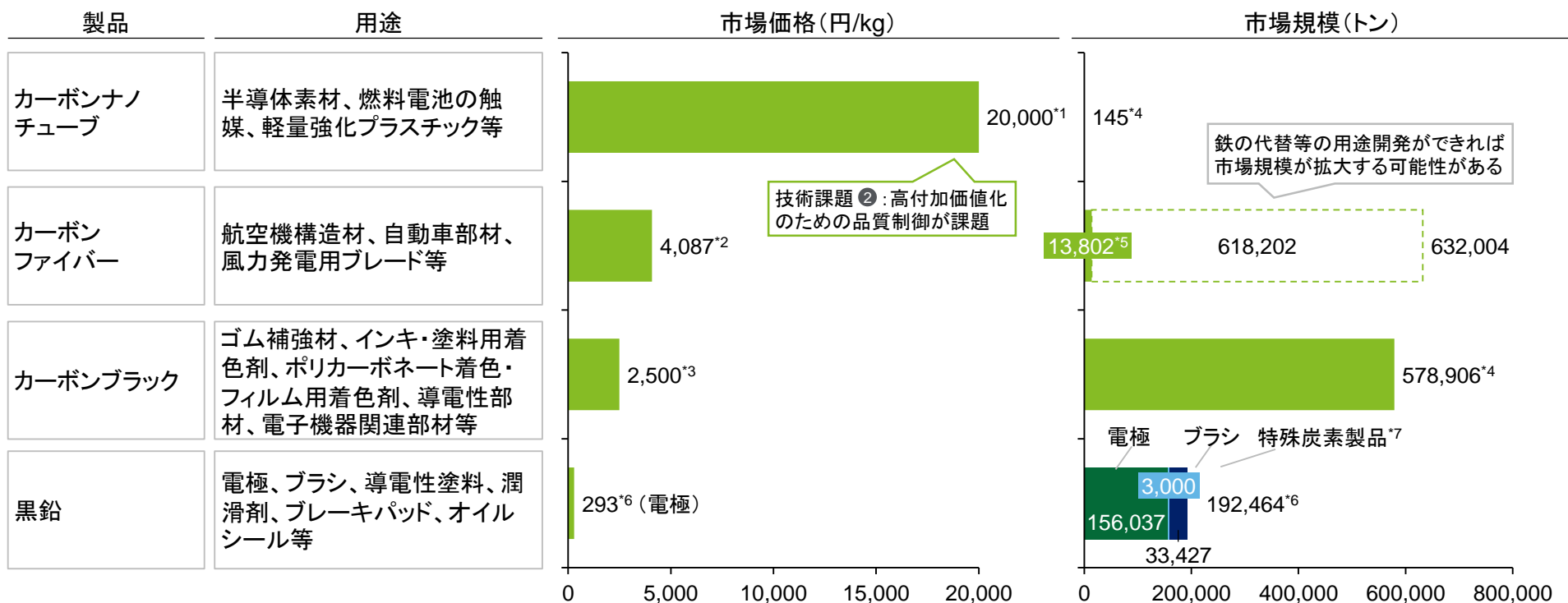
2.2 コストターゲットの決定

2.3 研究開発要素の検討

# カーボンは高付加価値品であるが市場規模が小さいため 用途開発による既存製品の代替が求められる

## カーボンの用途別市場価格・規模

カーボン

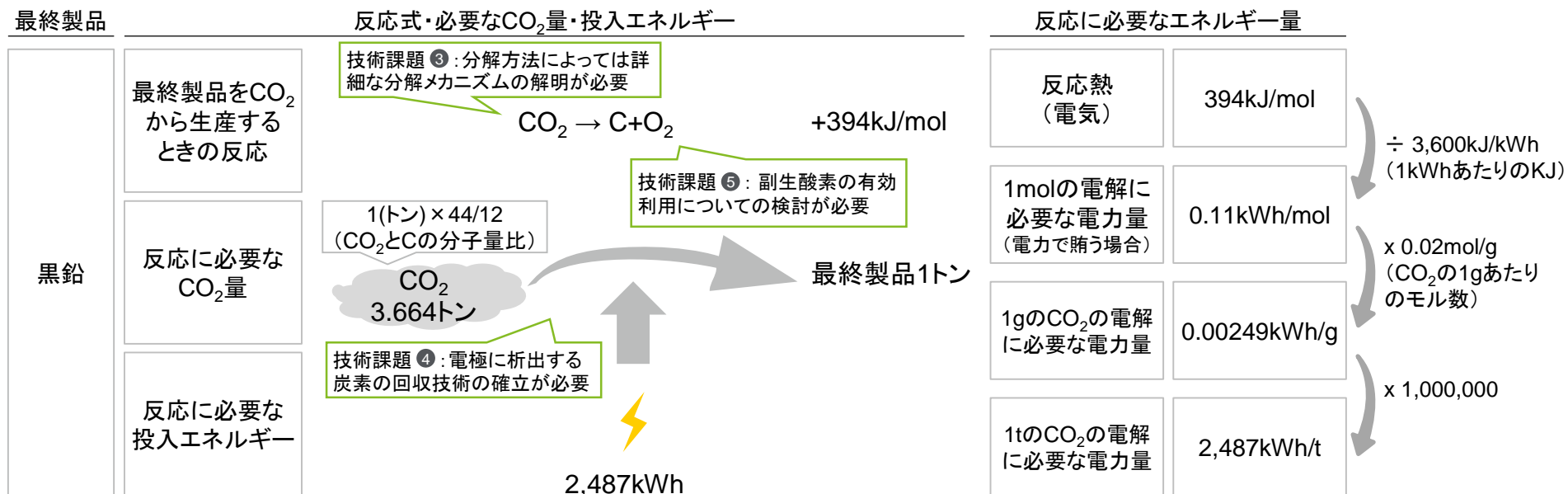


\*1: NEDO「ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて」(2015/10)より2013年の市場価格・規模を抽出、\*2: 経済産業省生産動態統計年報より2017年の出荷額を出荷量で割り算出(2016/7/7)に掲載のkg単価を抽出、\*3: 経済産業省Website、\*4: 経済産業省「ナノマテリアルの製造量等の推移」より製造量の中間値を抽出、\*5: 経済産業省生産動態統計年報より2017年の炭素繊維出荷量を抽出、\*6: 経済産業省「生産動態統計」より市場価格・規模を抽出、\*7: 半導体、電気、機械、冶金等に用いられる高機能製品の総称

# CO<sub>2</sub>から黒鉛を生成する際に必要なCO<sub>2</sub>量と電力量を推定した

最終製品1トンを生産するときの必要原料・エネルギー\*1

カーボン

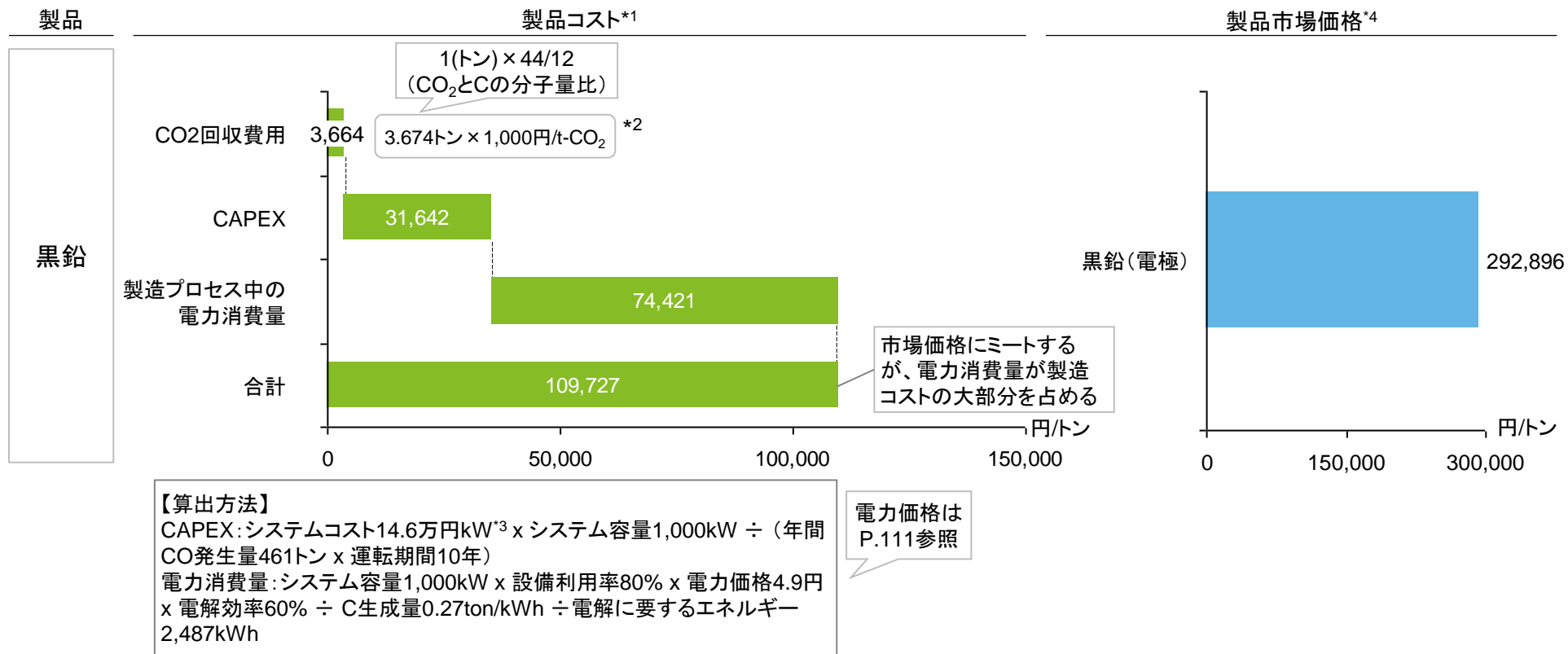


\*1:原料費と電解に必要な電気エネルギーのみ考慮

# CO<sub>2</sub>から黒鉛を製造する場合 既存製品よりも安価に製造できる可能性がある

## 黒鉛の製造コストと市場価格

カーボン



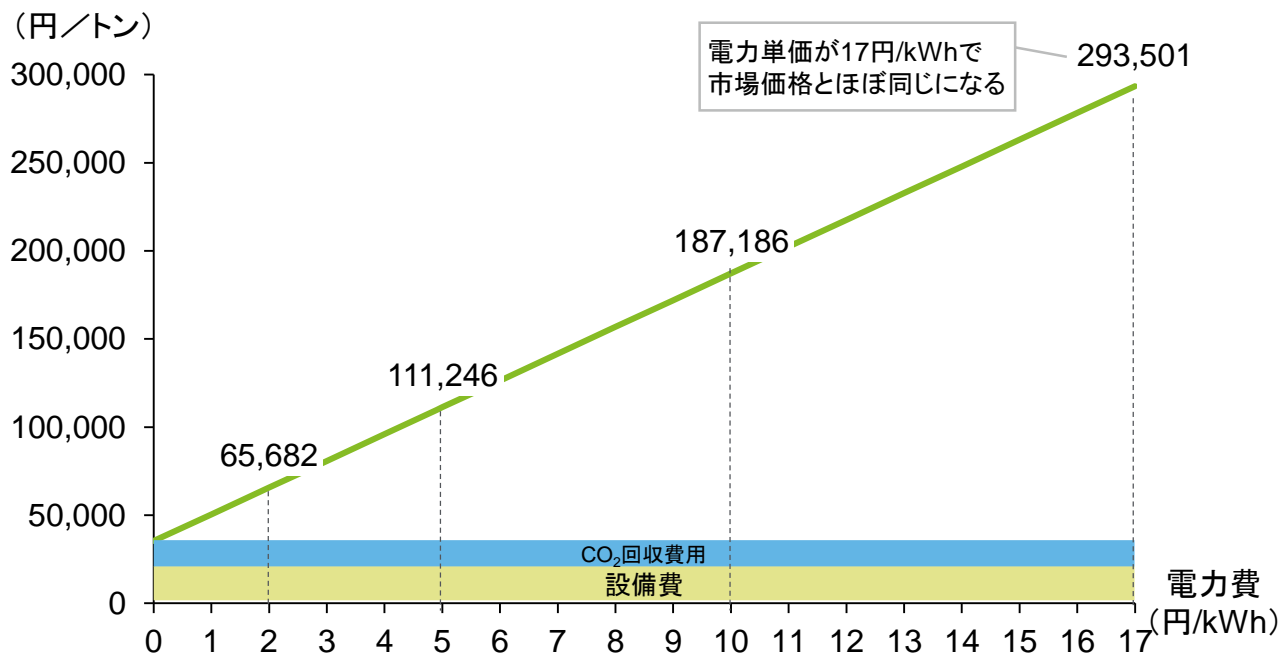
\*1:原料と電解に必要な電気エネルギーのみ考慮しており、人件費等は考慮していない、\*2:原料として必要となるCO<sub>2</sub>量にCO<sub>2</sub>の目標回収コスト1,000円/t-CO<sub>2</sub>を乗じ算出、\*3:科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター「固体酸化物形燃料電池システム (Vol.4) -水蒸気電解への適用と技術開発課題-」より2030年におけるシステムコストを抽出、\*4:経済産業省「生産動態統計」より市場価格・規模を抽出

# 電力単価が約5円/kWh以下になれば 既存製法を代替できる可能性がある

## CO<sub>2</sub>電解によるカーボン生成コストの電力費感度

カーボン

CO<sub>2</sub>電解によるカーボン生成コストの電力費感度



CO生成コストの詳細

電力価格	CO生成コスト (円/トン)	
	構成要素	合計
2円 /kWh	CAPEX	31,642
	Energy cost	30,376
	CO <sub>2</sub> 回収費用	3,664
	<b>合計</b>	<b>65,682</b>
5円 /kWh	CAPEX	31,642
	Energy cost	75,940
	CO <sub>2</sub> 回収費用	3,664
	<b>合計</b>	<b>111,246</b>
10円 /kWh	CAPEX	31,642
	Energy cost	151,880
	CO <sub>2</sub> 回収費用	3,664
	<b>合計</b>	<b>187,186</b>
15円 /kWh	CAPEX	31,642
	Energy cost	258,195
	CO <sub>2</sub> 回収費用	3,664
	<b>合計</b>	<b>293,501</b>

諸元

**電解設備** 電解装置: 1,000 kW・14.6万円/kW<sup>\*1</sup>、設備利用率: 80%、電解効率: 100%、電力量: 2,487 kWh/t-CO<sub>2</sub>

**CO<sub>2</sub>回収費** CO<sub>2</sub>回収費用: 1,000円/t-CO<sub>2</sub>

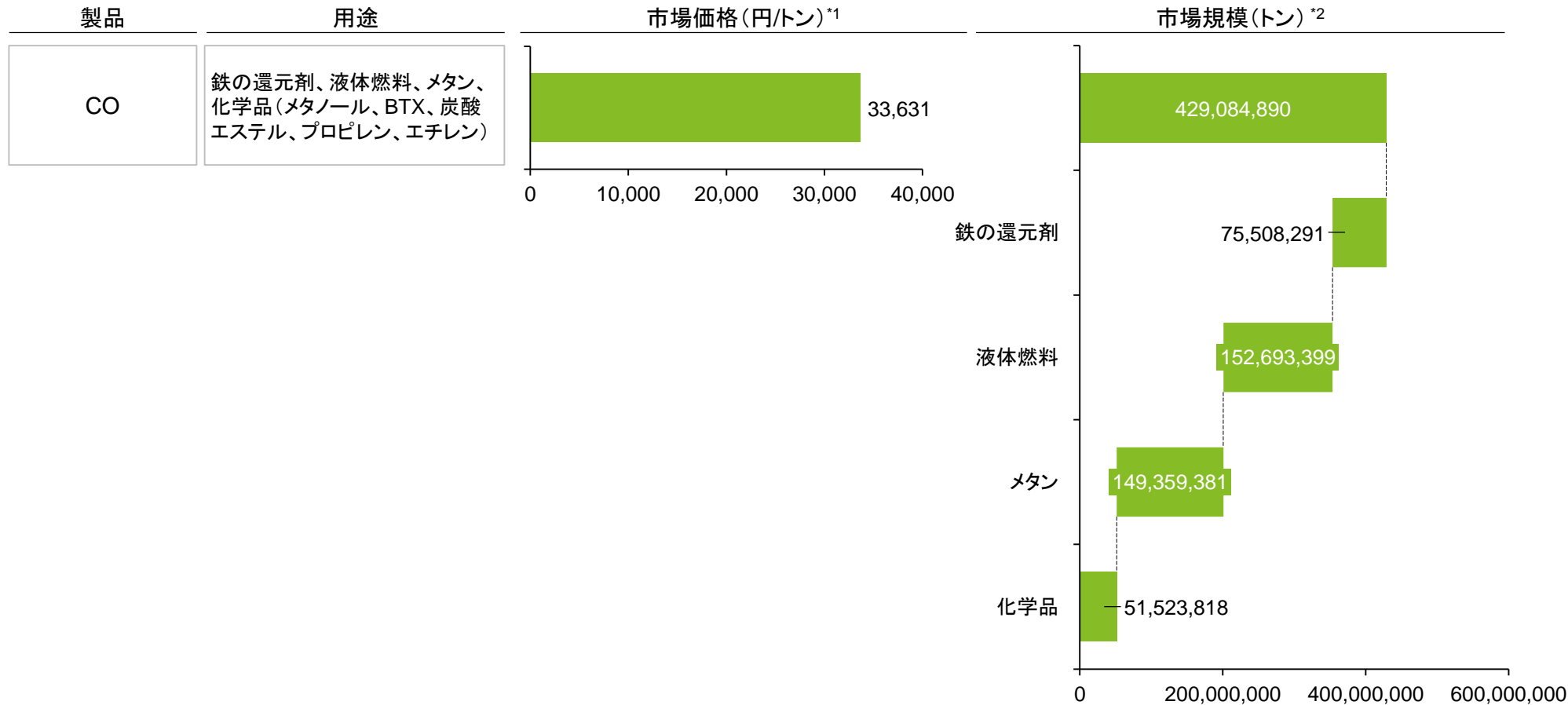
\*1: 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター「固体酸化物形燃料電池システム (Vol.4) -水蒸気電解への適用と技術開発課題-」より2030年におけるシステムコストを抽出



# 製品需要からCOの需要は膨大である

## COの用途別市場価格・規模

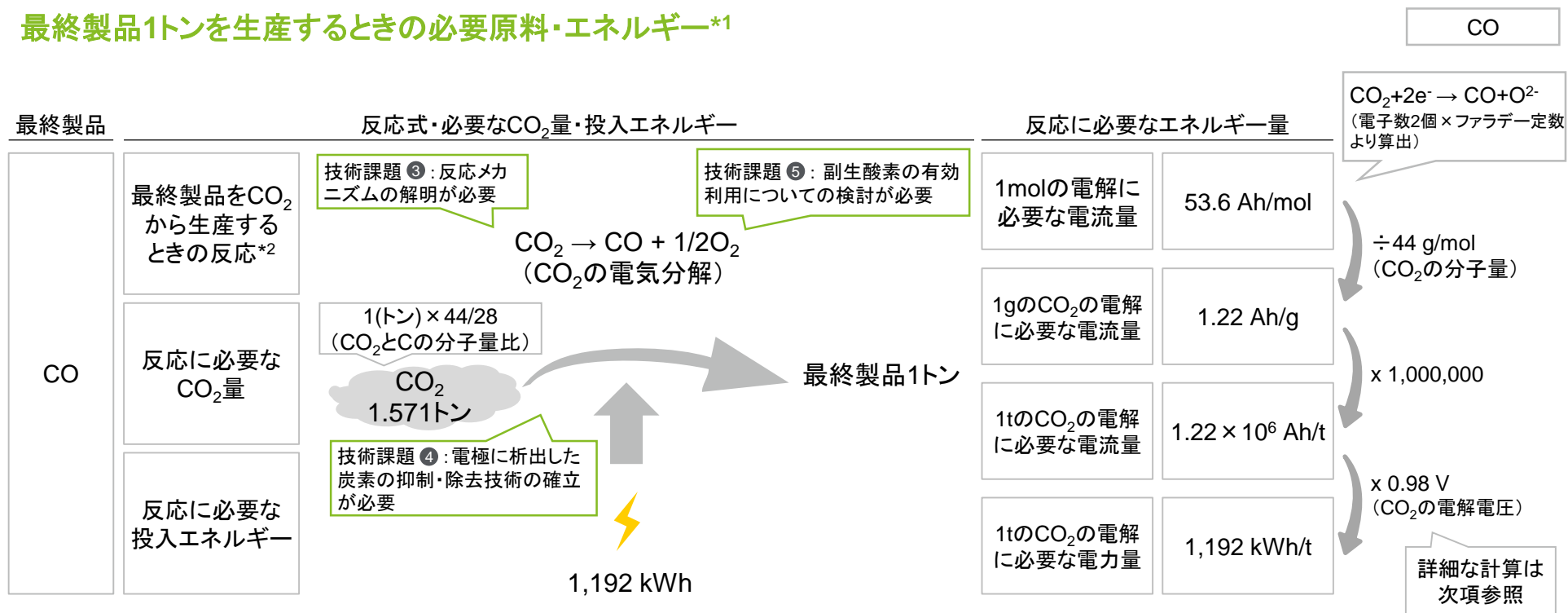
CO



\*1:Matthew Jouny, "General Techno-Economic Analysis of CO<sub>2</sub> Electrolysis Systems"、\*2:本資料P.31に記載の用途別固定化ポテンシャルに分子量比(28/44)を掛けて算出

# CO<sub>2</sub>からCOを生成する際に必要なCO<sub>2</sub>量と電力量を推定した

## 最終製品1トンを生産するときの必要原料・エネルギー\*1



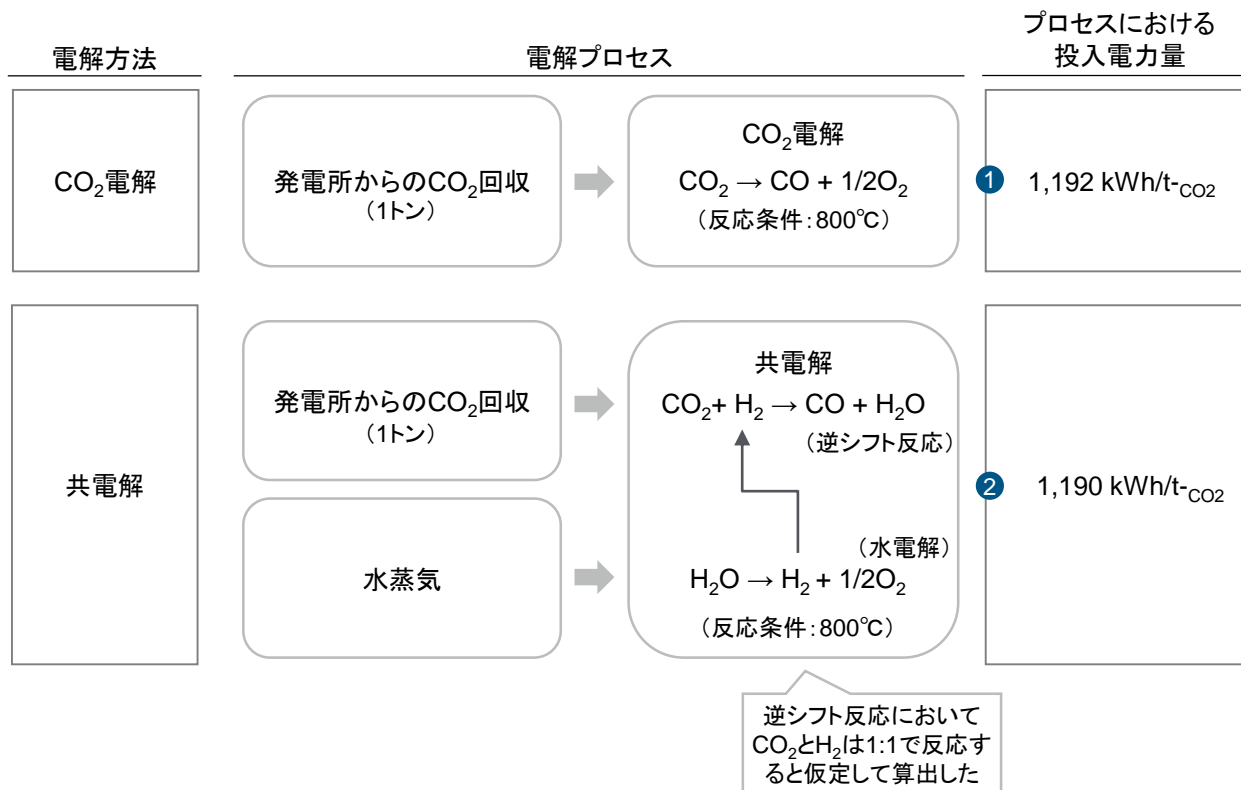
\*1:原料費と電解に必要な電気エネルギーのみ考慮

(参考) COの生成に必要な電力量のバックデータ(1/2)

CO<sub>2</sub>電解と共電解を比較するとCO<sub>2</sub>の固定化に必要な電力量はほぼ等しい

1トンのCO<sub>2</sub>の電解に必要な投入電力量

CO



## ギプスの自由エネルギーによる電力量算出方法

## 電気分解に関する計算\*1

CO

## 定義と公式

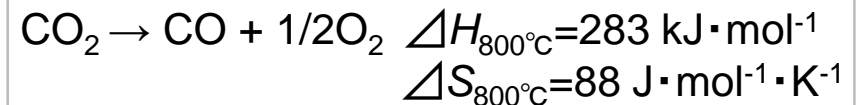
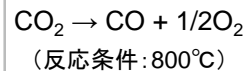
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$E = \frac{\Delta G}{eF}$$

$$W = EI$$

$\Delta H$ : エンタルピー変化 [kJ・mol<sup>-1</sup>]  
 $\Delta G$ : ギプスの自由エネルギー [kJ・mol<sup>-1</sup>]  
 $T$ : 条件温度 [K]  
 $\Delta S$ : エントロピー変化 [kJ・mol<sup>-1</sup>・K<sup>-1</sup>]  
 $E$ : 電解電圧 [V]  
 $e$ : 電子数 [mol]  
 $F$ : ファラデー定数 [C/mol]  
 $W$ : 電力量 [kWh]  
 $I$ : 電流量 [Ah]

## エンタルピー変化量/エントロピー変化量

① CO<sub>2</sub>電解に必要な電力量

$$\Delta H = 283 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta S = 0.088 \text{ kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$= 283 - 1073 \times 0.088 = 188.9 \text{ kJ/mol}$$

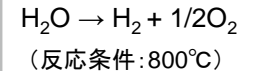
$$E = \frac{\Delta G}{eF}$$

$$= \frac{188.9 \times 10^3}{2 \times 96485} = 0.979 \text{ V}$$

$$W = EI^2$$

$$= 0.979 \times 1.22 \times 10^6 = 1,192 \text{ kWh/t}_{\text{-CO}_2}$$

## ② 共電解に必要な電力量



$$\Delta H = 248 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta S = 0.055 \text{ kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$= 248 - 1073 \times 0.055 = 188.6 \text{ kJ/mol}$$

$$E = \frac{\Delta G}{eF}$$

$$= \frac{188.6 \times 10^3}{2 \times 96485} = 0.977 \text{ V}$$

$$W = EI^2$$

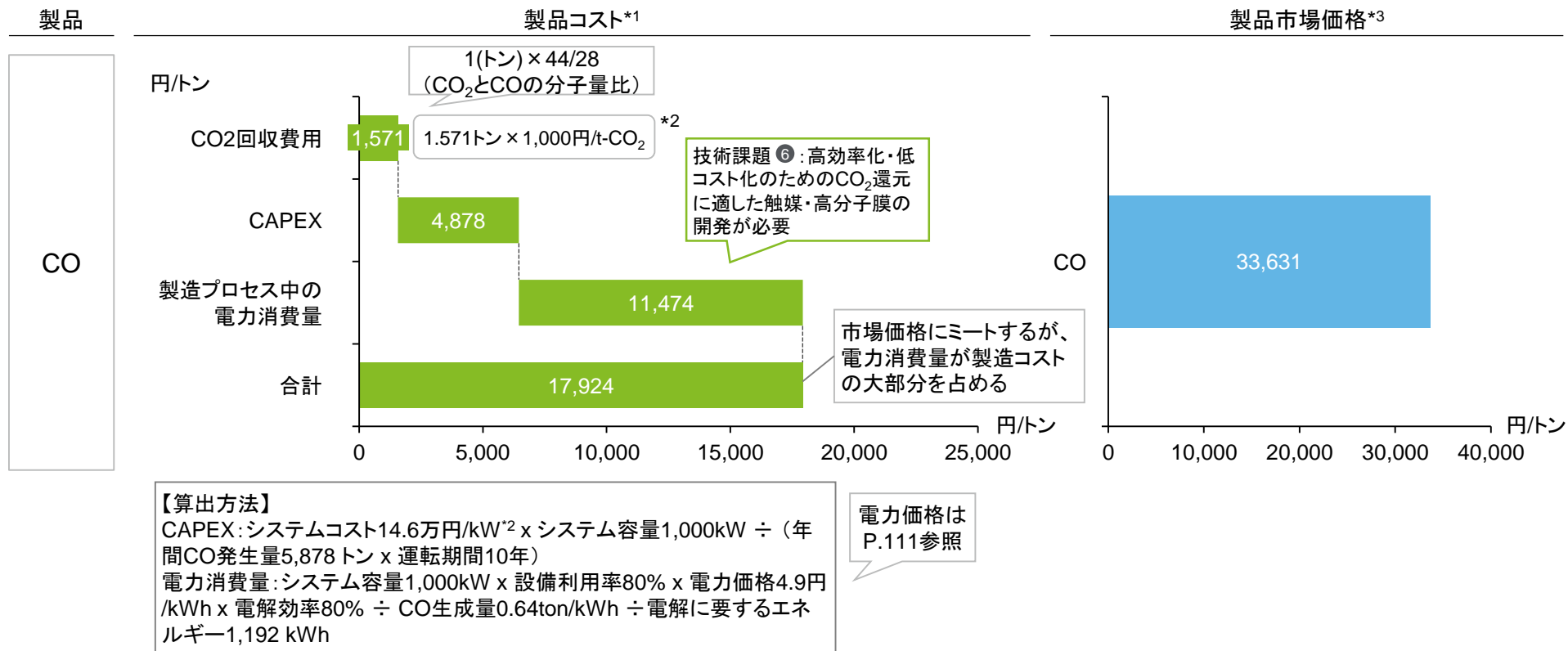
$$= 0.977 \times 1.22 \times 10^6 = 1,190 \text{ kWh/t}_{\text{-CO}_2}$$

\*1: 800°CではCO<sub>2</sub>と水蒸気の電解はほぼ同じΔGとなるが、実際の分解にはTΔS分の熱が必要であり、CO<sub>2</sub>の直接分解は水蒸気分解の約1.6倍の熱を要する。また、共電解で生じる逆シフト反応にも41.2 kJ/molの熱を要する。本調査では必要な熱を未利用廃熱等から得られると仮定し、どの程度の再エネ電力を消費するかを試算している。\*2: 1トンのCO<sub>2</sub>を電解するために必要な電流量はCO<sub>2</sub>+2e<sup>-</sup>→CO+O<sup>2-</sup>から電子数2個とファラデー定数の積(=53.6 Ah/mol)にCO<sub>2</sub>の分子量44 g/molを割り単位換算(×10<sup>6</sup> g/t)して算出した。\*3: H<sub>2</sub>Oの電解に必要な電流量はH<sub>2</sub>O+2e<sup>-</sup>→H<sub>2</sub>+O<sup>2-</sup>から電子数2個×ファラデー定数より53.6 Ah/molであり、CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>は分子量比1:1で反応すると仮定するとCO<sub>2</sub>の電解に必要な電流量は\*2と等しくなる

# COの製造原価の大部分は電力コストであり 安価なCO<sub>2</sub>フリーの電力を活用できることが条件となる

## COの製造コストと市場価格

CO



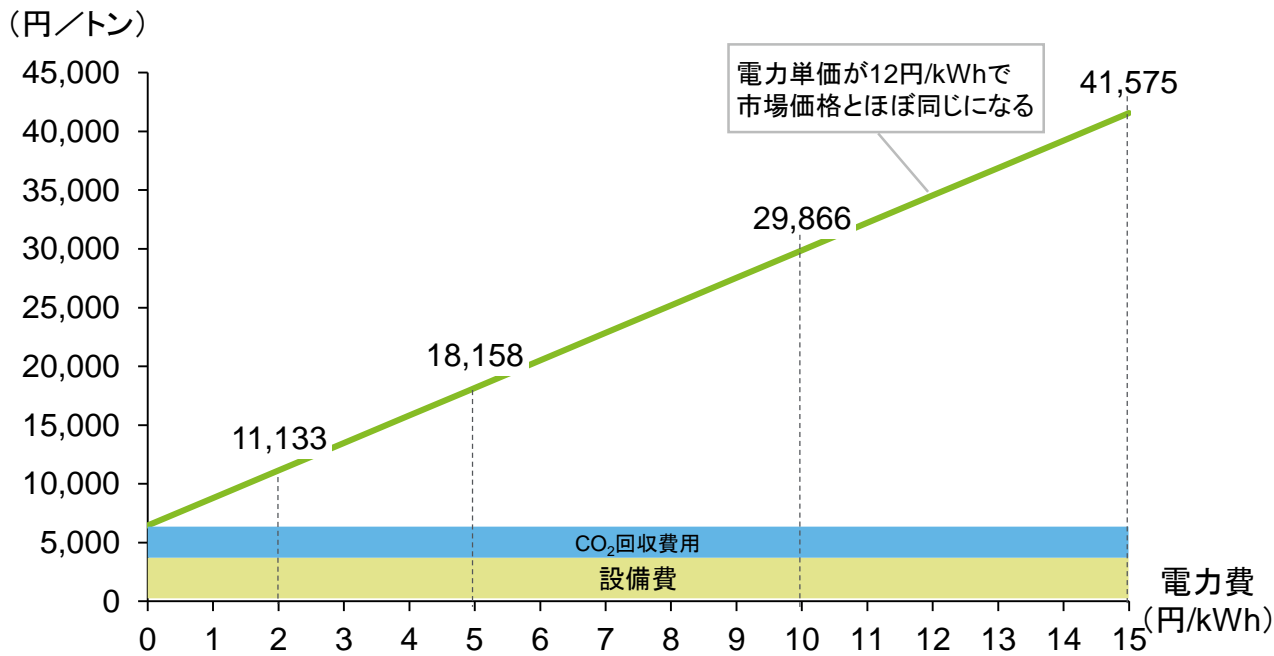
\*1:原料と電解に必要な電気エネルギーのみ考慮しており、人件費等は考慮していない、\*2:原料として必要となるCO<sub>2</sub>量にCO<sub>2</sub>の目標回収コスト1,000円/t-CO<sub>2</sub>を乗じ算出、\*3:科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター「固体酸化物形燃料電池システム(Vol.4)ー水蒸気電解への適用と技術開発課題ー」より2030年におけるシステムコストを抽出、3:Matthew Jouny, "General Techno-Economic Analysis of CO2 Electrolysis Systems"

# 電力単価が約5円/kWh以下になれば 既存製法を代替できる可能性がある

## CO<sub>2</sub>電解によるCO生成コストの電力費感度

CO

CO<sub>2</sub>電解によるCO生成コストの電力費感度



CO生成コストの詳細

電力価格	CO生成コストの詳細	
	項目	コスト (円)
2円 /kWh	CAPEX	4,878
	Energy cost	4,683
	CO <sub>2</sub> 回収費用	1,571
	合計	11,133
5円 /kWh	CAPEX	4,878
	Energy cost	11,708
	CO <sub>2</sub> 回収費用	1,571
	合計	18,158
10円 /kWh	CAPEX	4,878
	Energy cost	23,417
	CO <sub>2</sub> 回収費用	1,571
	合計	29,866
15円 /kWh	CAPEX	4,878
	Energy cost	35,125
	CO <sub>2</sub> 回収費用	1,571
	合計	41,575

諸元

**電解設備** 電解装置: 1,000 kW・14.6万円/kW<sup>\*1</sup>、設備利用率: 80%、電解効率: 80%、電力量: 1,192 kWh/t-CO<sub>2</sub>

**CO<sub>2</sub>回収費** CO<sub>2</sub>回収費用: 1,000円/t-CO<sub>2</sub>

\*1: 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター「固体酸化物形燃料電池システム (Vol.4) -水蒸気電解への適用と技術開発課題-」より2030年におけるシステムコストを抽出

## 2. カーボン・CO

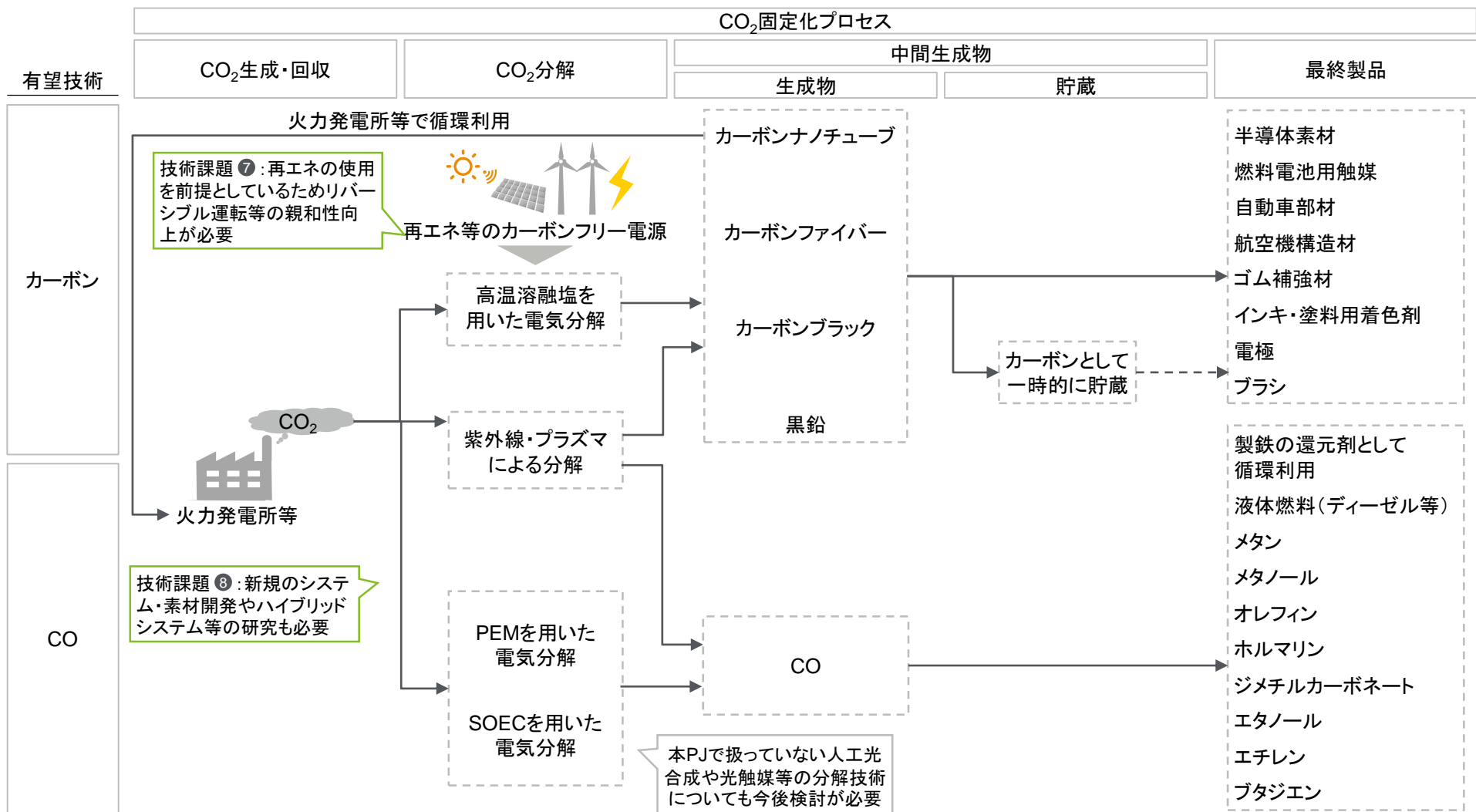
2.1 CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルの推計

2.2 コストターゲットの決定

**2.3 研究開発要素の検討**

# 主にCO<sub>2</sub>の分解に関連するプロセスが研究開発要素になる

## CO<sub>2</sub>固定化プロセスのフロー



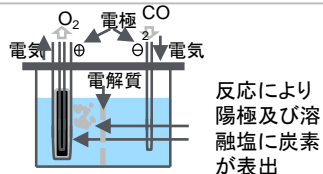
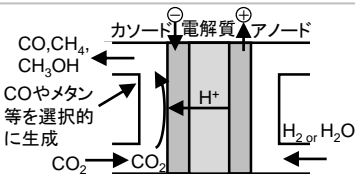
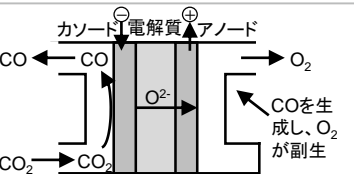
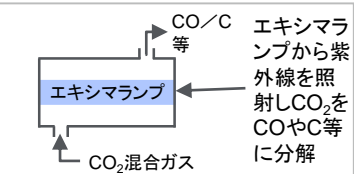
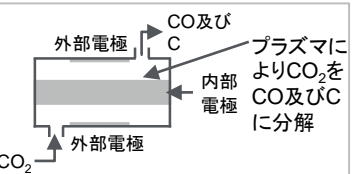


# (参考) CO<sub>2</sub>分解技術は燃料電池の逆反応を利用する方法のほか紫外線により分解する方法が研究されている

## 電気分解技術の研究例

燃料電池の逆反応を用いた電気分解

紫外線・プラズマによるCO<sub>2</sub>分解

	溶融炭酸塩形電解	固体高分子形電解 (PEM)	固体酸化物形電解 (SOEC)	紫外線分解法	プラズマ分解法
反応イメージ					
特徴	高温の溶融塩に高温のCO <sub>2</sub> ガスを導き、電気分解により炭素と酸素イオンに分解。CO <sub>2</sub> の電解は可能だが、水電解は不可能	アルカリ水溶液の代わりに高分子イオン交換膜を電解質として電解を行う方法。電流密度が上げられ、高効率を得られるため次の電解技術として着目されている	高温の水蒸気をセラミックス電解質を用いて電解する方法。SOFCの逆反応の技術を利用したものであり、水だけでなくCO <sub>2</sub> の電解も可能	CO <sub>2</sub> を紫外線を照射することで分解し、カーボン・CO等を得る方法	CO <sub>2</sub> をプラズマによる分解でカーボン・COを得る方法
利点	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 排熱利用が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 反応温度が低い</li> <li>✓ 高圧運転が可能</li> <li>✓ 大量生産に適する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ SOFCとの組み合わせにより発電・電解を切り替え可能</li> <li>✓ CO<sub>2</sub>変換効率が高い</li> <li>✓ 排熱利用が可能で、高温になるほど電解に要する電力量を削減可能</li> <li>✓ 副生する酸素を酸素富化燃焼に利用可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 反応条件によりCO<sub>2</sub>をカーボンやCOに分解できるほか、炭酸アンモニウムも生成可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 反応条件によりCO<sub>2</sub>をカーボンやCOに分解可能</li> </ul>
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 高温下での反応が必要</li> <li>✓ 陽極のコストが高い</li> <li>✓ メンテナンス性が低い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 電極に希少電極を用いるため設備費用が高い</li> <li>✓ 高分子イオン交換膜の劣化が早い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 高温下での反応が必要</li> <li>✓ 大規模製造のためにセルの面積化・積層化研究が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 多くの電力を要するため再エネ利用を前提とする</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 多くの電力を要するため再エネ利用を前提とする</li> </ul>
反応式	$4\text{Li} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{C} + 2\text{Li}_2\text{O}$	$\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ 等	$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1/2\text{O}_2$	$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1/2\text{O}_2$ $\text{CO}_2 \rightarrow \text{C} + \text{O}_2$ 等	$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1/2\text{O}_2$ $\text{CO}_2 \rightarrow \text{C} + \text{O}_2$
電解質	炭酸リチウム・炭酸カリウム、炭酸カリウム炭酸塩	フッ素系ポリマー	セラミックス材料	-	-
陽極	ニッケル・クロム・アルミニウム合金	カーボン担持Pt (Pt/CB)・カーボンナノファイバー・テフロンパウダー	ランタン・ストロンチウム・マンガン (LSM) 等	-	-
陰極	酸化ニッケル	活性炭担持コバルト・テトラフェニルポルフィリン化合物	ニッケル-イットリウム安定化ジルコニア複合体 (Ni/YSZ) 等	-	-
電解時温度	800~900℃	80℃	600~900℃	温度条件なし	温度条件なし

# 技術課題から分解プロセスごとに研究開発要素を抽出した

## 分解プロセスごとの技術課題と研究開発要素

分解プロセス	技術課題	研究開発要素
高温溶融塩	③ CO <sub>2</sub> 還元プロセスの高効率化	カーボンナノチューブの生成メカニズムの解明
	② 高品質カーボンの生成	市販品水準の高品質カーボンを生成するための品質制御技術の確立
紫外線 プラズマ	③ 分解メカニズムの解析	カーボンやCOが生成されるメカニズムの解明
	④ 析出した炭素の回収・除去	電極に析出した炭素の回収・除去技術の研究
	① 最適化研究	セル及びスタックの耐久性の向上や高効率化、大容量化の研究
PEM	⑥ 触媒・高分子膜の開発	CO <sub>2</sub> 還元に適した触媒／高分子膜の開発
	① 最適化研究	セル及びスタックの耐久性の向上や高効率化、大容量化の研究
SOEC	③ 分解メカニズムの解析	CO <sub>2</sub> 電解反応メカニズムの解明とセル材料の最適化
	⑦ リバーシブル運転の研究	再エネ親和性の向上に向けた燃料電池の間欠運転及びリバーシブル運転の研究
	④ 析出する炭素の抑制・除去	電極に析出する炭素の抑制・除去技術の研究
	⑤ 副生酸素の活用	副生酸素を有効利用する方法の検討
	① 最適化研究	セル及びスタックの耐久性の向上や高効率化、大容量化、大規模化(大面積化・積層化)の研究
横断・共通	⑧ 新システム・素材の検討	低コスト化・運用性向上等を実現する新規システム・素材の開発やハイブリッドシステム等の検討

## 3. 炭酸塩

### 3.1 CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルの推計

### 3.2 コストターゲットの決定

### 3.3 研究開発要素の検討

### ③ 炭酸塩

# 製鋼スラグ、焼却灰、スラッジは未利用部分が多く CO<sub>2</sub>固定化のために活用できる可能性が高い

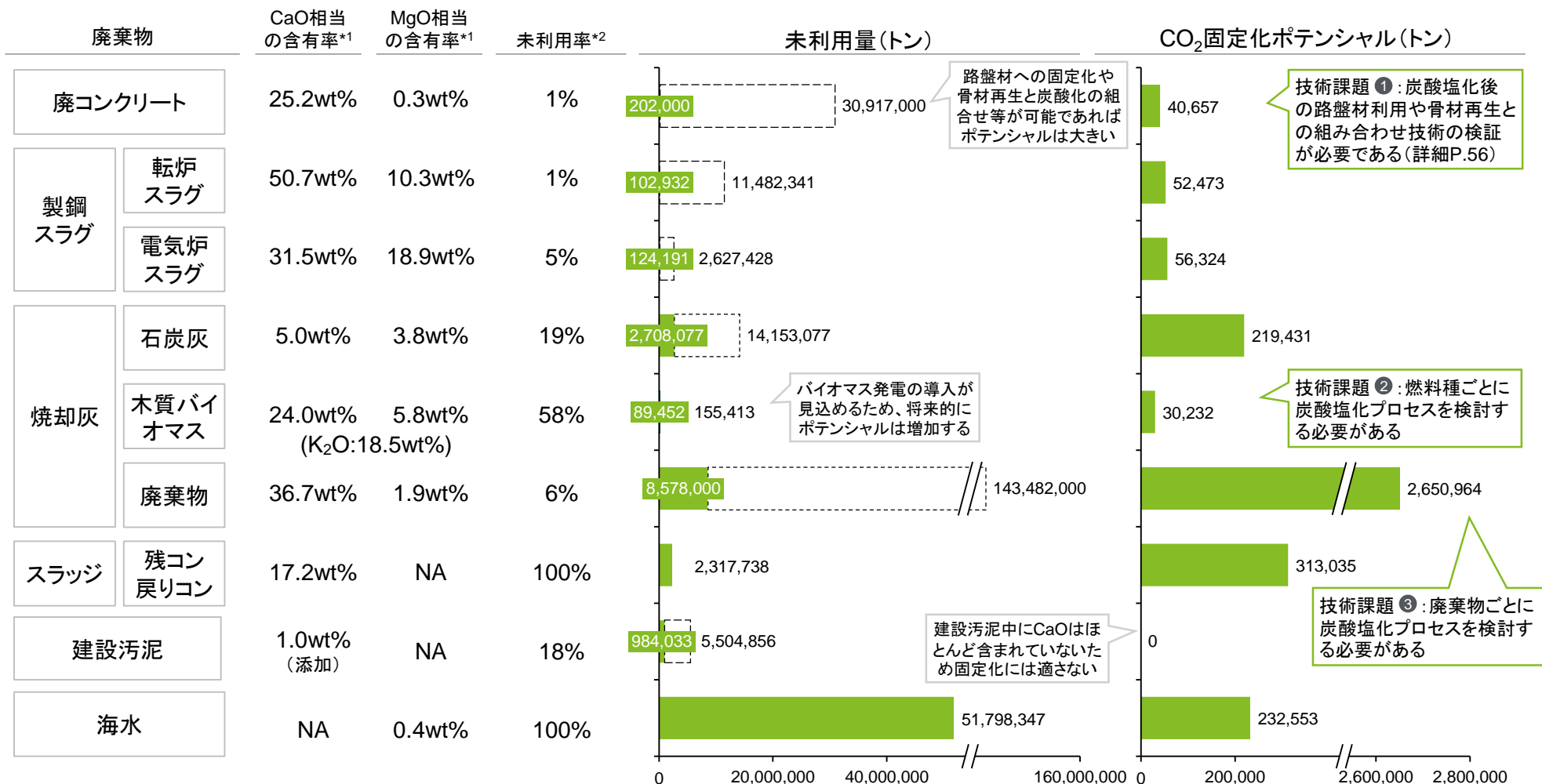
## 炭酸塩の原料別利用フロー

未利用

原料		主な用途	マテリアルフロー		特徴
廃コンクリート		路盤材 等	工事現場	3,072万トン ↓ 埋立 20万トン	路盤材 等 骨材は路盤材として再資源化されているが、細粉は未利用
鉄鋼スラグ	高炉スラグ	セメント原料 道路用路盤材 等	鉄鋼メーカー	2,390万トン	セメント原料 等 非常に安価 排出量のほとんどが有効利用
	製鋼スラグ	道路用路盤材 土工用材 等	鉄鋼メーカー	1,391万トン ↓ 埋立 22万トン	道路用路盤材 等 遊離石灰の膨張作用が原因で 一部埋立処分
焼却灰	石炭灰	セメント原料 道路用路盤材 等	電力会社	1415万トン ↓ 埋立 125万トン	セメント原料 等 国内で処理できないものは海外に 逆有償で輸出
	木質バイオマス	農業用肥料 等	排出事業者	6万トン ↓ 埋立 7万トン	農業用肥料 等 保管 2万トン 焼却灰のほとんどは埋立処分
	廃棄物	セメント原料 プラスチック 等	一般/産業	1.3億トン ↓ 埋立 858万トン	セメント原料 等 多量の焼却灰を埋立
スラッジ	残コン 戻りコン	フレッシュコンクリート 路盤材・舗装材 等	生コン工場	232万トン	埋立 残コンのほとんどは埋立処分
建設汚泥		埋戻材 盛土 等	工事現場	657万トン ↓ 埋立 98万トン	埋戻材 等 ほとんどが埋戻材や盛土として有効利用
安山岩/玄武岩		碑石 建築用岩石 等	採掘事業者 (鉱山)	4,794万トン	碑石 等 採石されたものは碑石や建築用岩石として利用
海水		食塩 にがり 等	淡水化プラント	5,180万トン ↓ 放流	食塩 等 濃縮海水は有限であるが、海水はほぼ無尽蔵

# 未利用廃棄物を利用することによるCO<sub>2</sub>固定化量を算出した

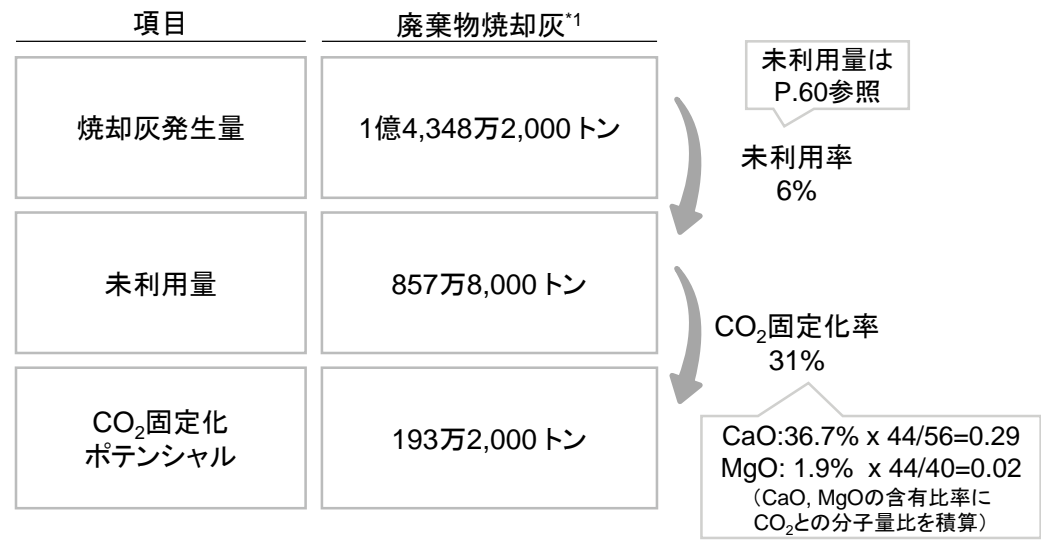
## 未利用廃棄物の発生量・CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャル



\*1: 製鋼スラグ協会Website、日本フライアッシュ協会website、廃棄物学会研究発表会「木質系バイオマス燃焼灰の安全性評価および有効利用」、富士通総研、環境エネルギー普及株式会社「木質バイオマスボイラー導入・運用にかかわる実務テキスト」を基に算出。環境省「既存静脈施設集積地域の高効率活用」に資する動脈産業と静脈産業との有効な連携方策等に関する調査業務、「ヘインシモンポンプセメントの化学成分」、津布久陽平(早稲田大学中垣研究室)「廃液かん水を用いた有機物産CO<sub>2</sub>固定化プロセスの実現可能性の検討」、\*2: 本調査では廃棄物の未利用量に着目しているが、有効利用されている原料へのCO<sub>2</sub>固定化も検討の余地がある

# (参考) 固定化ポテンシャルのバックデータ 未利用量に対してCaO等の含有比率とCO<sub>2</sub>との分子量比を掛けて算出した

## 炭酸塩のCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャル

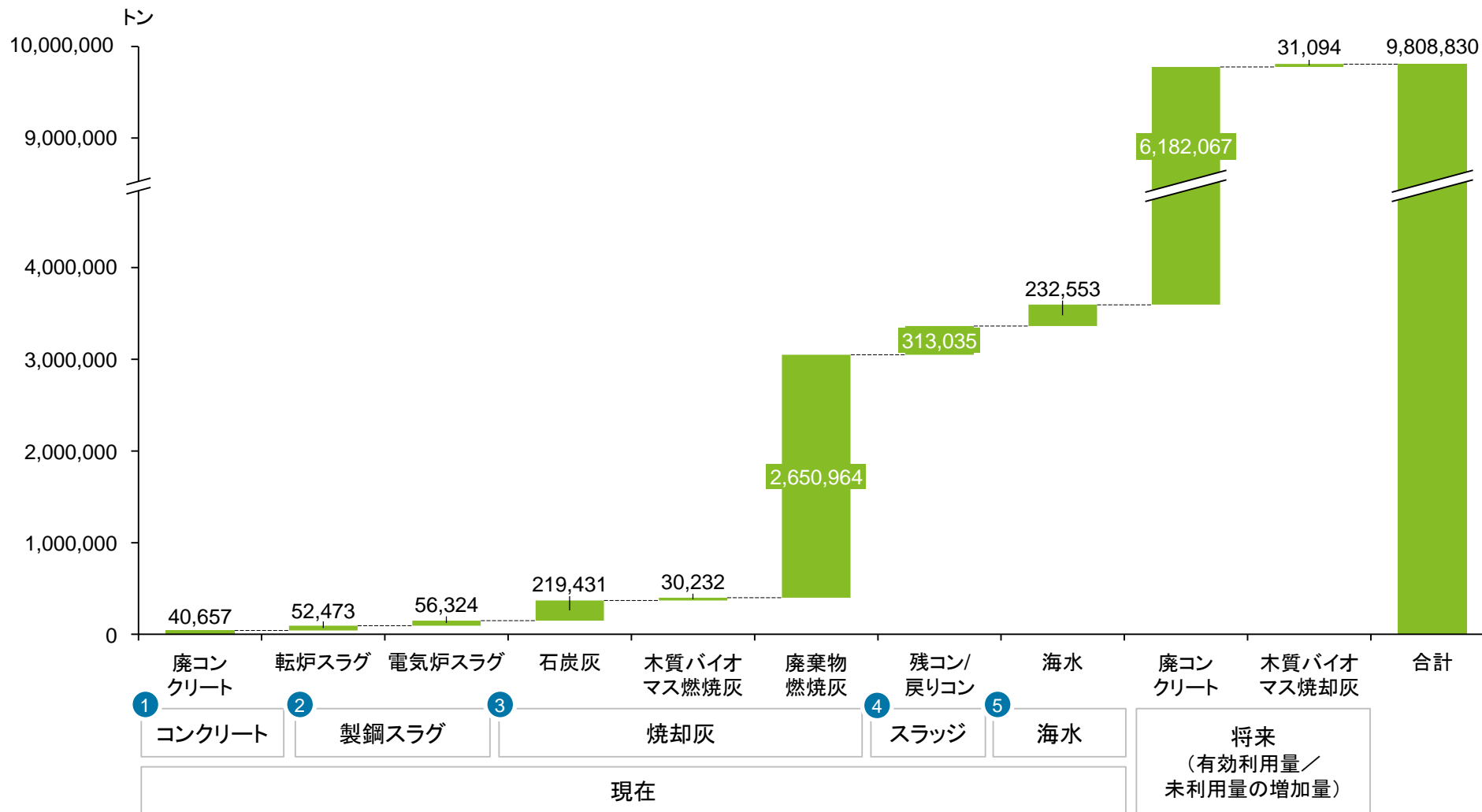


出所: 環境省「産業廃棄物の排出及び処理状況等(平成28年度実績)」及び環境省「一般廃棄物の排出及び処理状況等(平成28年度)」についてより作成、\*1: 炭酸塩原料のCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルはすべて同一の算出方法を用いているため、廃棄物焼却灰を算出方法の一例として記載した、

### ③ 炭酸塩

# 未利用廃棄物を炭酸塩化原料として利用することにより 約980万トンのCO<sub>2</sub>を固定化できる可能性がある

## 未利用廃棄物を炭酸塩化に利用する場合のCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャル



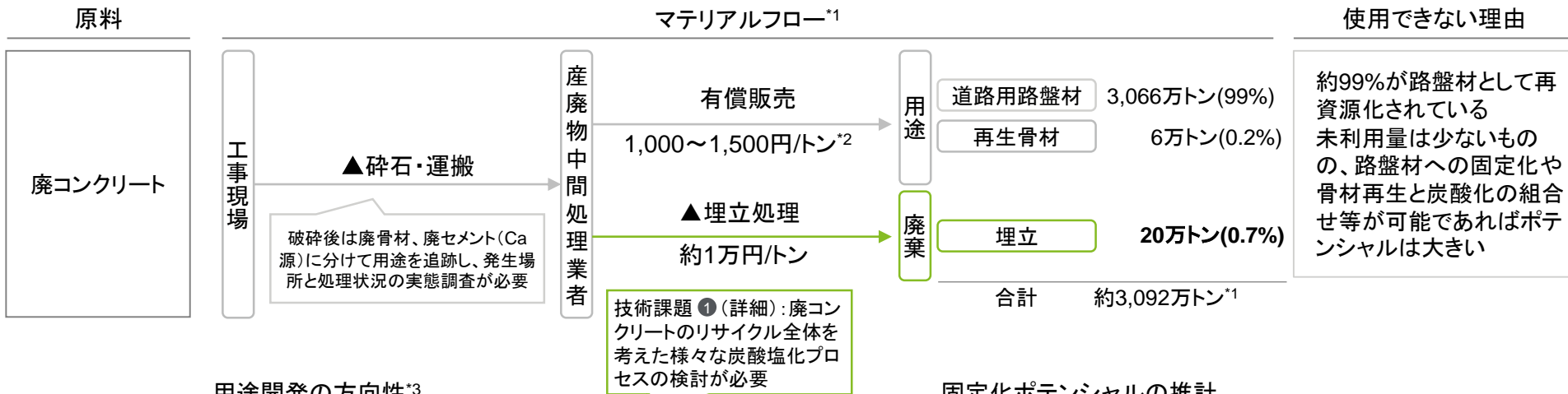
# 未利用量は少ないが 路盤材等への固定化技術が確立されればポテンシャルは膨大

## ① 廃コンクリートのマテリアルフロー

▲ 逆有償

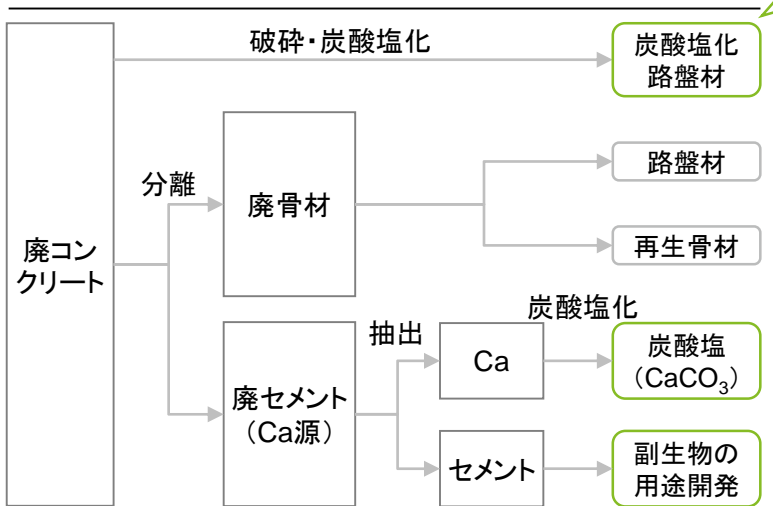


未利用



使用できない理由  
約99%が路盤材として再資源化されている  
未利用量は少ないものの、路盤材への固定化や骨材再生と炭酸化の組合せ等が可能であればポテンシャルは大きい

### 用途開発の方向性<sup>\*3</sup>



### 固定化ポテンシャルの推計

項目	道路用路盤材	再生コンクリート骨材	未利用量
用途別利用量	3,066万トン	5万5,000トン	20万2,000トン
未利用量			20万2,000トン
CO <sub>2</sub> 固定化ポテンシャル	618万2,067トン	1万1,070トン	4万657トン
CO <sub>2</sub> 固定化量	約622万トン		

CO<sub>2</sub>固定化率 20%

CaO: 25.2% x 44/56 = 0.20  
MgO: 0.3% x 44/40 = 0.003  
(CaO, MgOの含有比率にCO<sub>2</sub>との分子量比を積算)

\*1:国土交通省「平成24年度建設副産物実態調査結果」より抽出、\*2:有識者へのヒアリング結果をもとに記載、\*3:技術WGでの議論をもとに記載



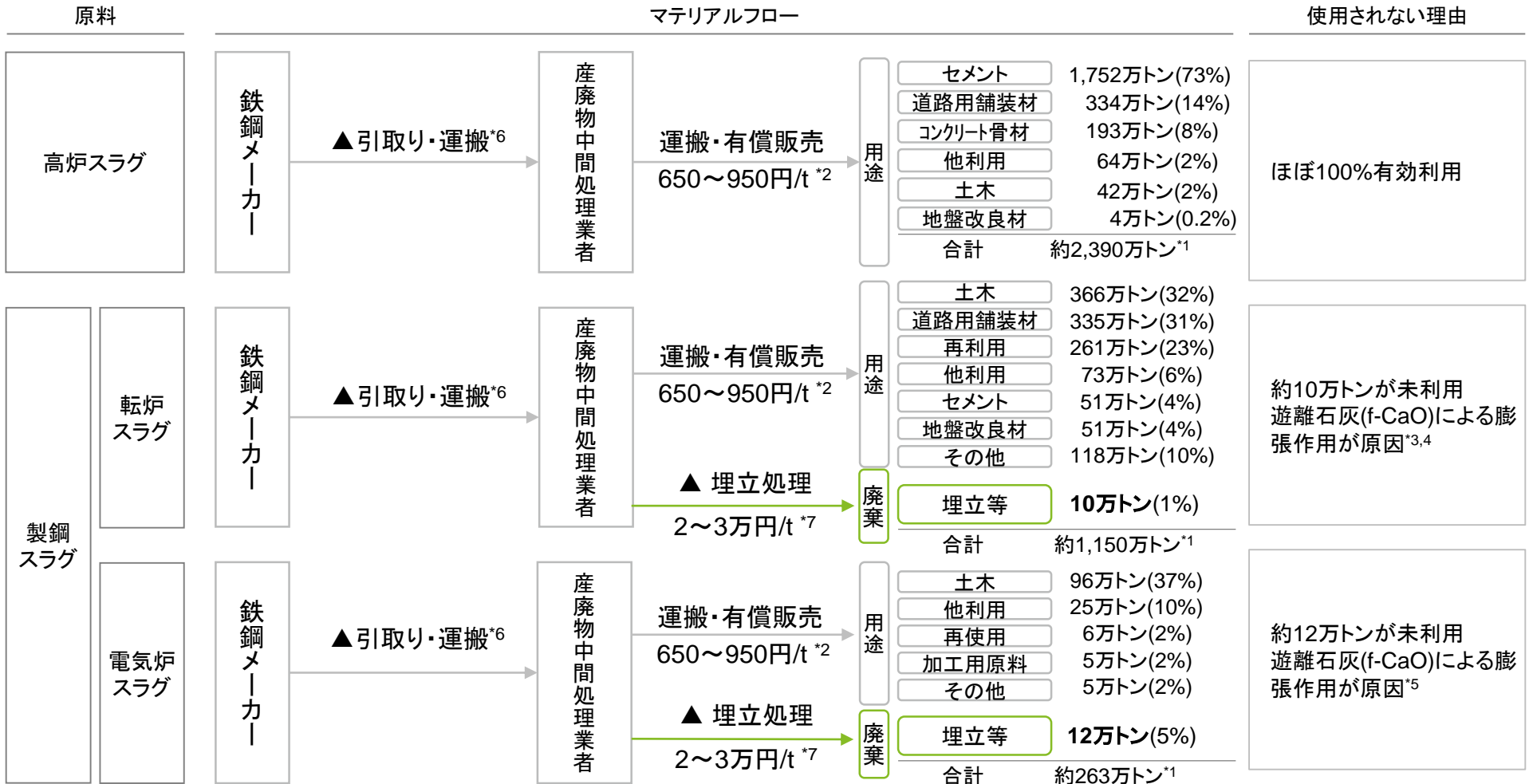
# 高炉スラグは有効利用されているが 製鋼スラグは約22万トンが埋立処分されている

## ② 鉄鋼スラグのマテリアルフロー

▲ 逆有償



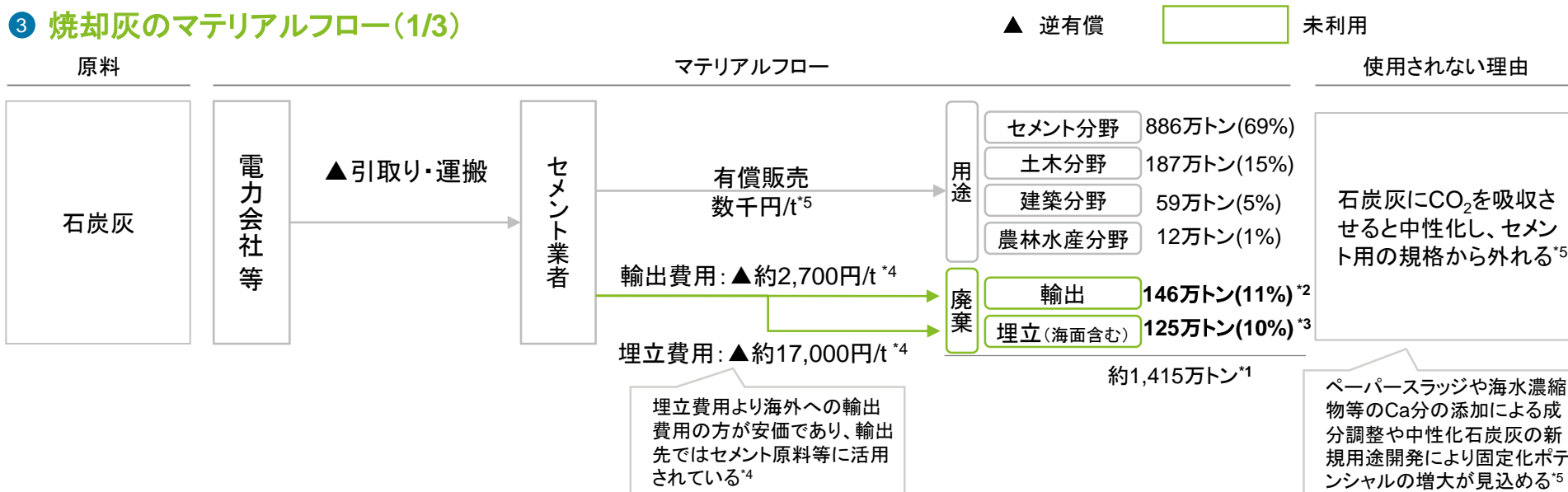
未利用



\*1:鉄鋼スラグ協会「環境資材 鉄鋼スラグ」、\*2:国土交通省「土木工事材料単価表」より抽出、\*3:竹田 重三「鉄鋼スラグとその資源化」、\*4:高山 俊一, 出光 隆 他「蒸気エージングした転炉スラグの上層路盤材としての利用に関する研究」、\*5:桑山忠, 本多淳裕 他「電気炉スラグの吸水による膨張特性」、\*6:メーカーによってはユーザーに直接販売している場合がある、\*7:毎日新聞「広がる有害スラグ 根深いリサイクル偽装」(2014年12月30日朝刊)

# 石炭灰は271万トンが未利用であり 逆有償で処分されている

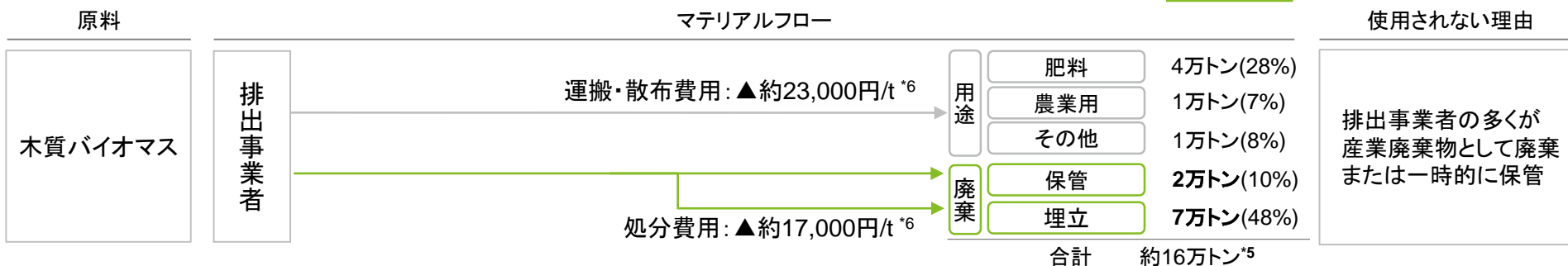
## ③ 焼却灰のマテリアルフロー(1/3)



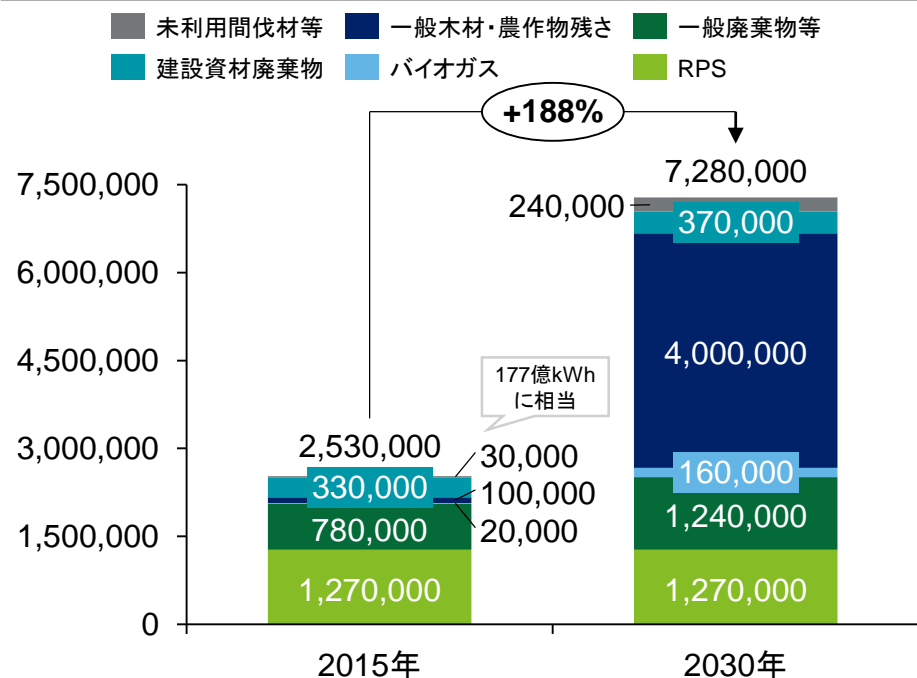
\*1:石炭エネルギーセンター「石炭灰全国実態調査報告書(平成29年度実績)」より抽出、\*2:環境省「廃棄物処理法に基づく廃棄物の輸出確認及び輸入許可(平成29年)について」より抽出、\*3:経済産業省「電気事業に属する事業を行う者の石炭灰の利用の促進に関する判断の基準となるべき事項を定める省令等の運用について」(平成3年12月24日付け3資庁第14230号)についての解釈について、\*4:一般財団法人 日本エネルギー経済研究所「石炭燃焼に伴い発生する石炭灰に係る状況」より抽出したが、自社処分場の場合は11,000~12,000円程度となる(有識者へのヒアリング)、\*5:技術WGにおける有識者の発言より記載

# 木質バイオマス焼却灰は バイオマス発電の普及に伴い 未利用量が増加する

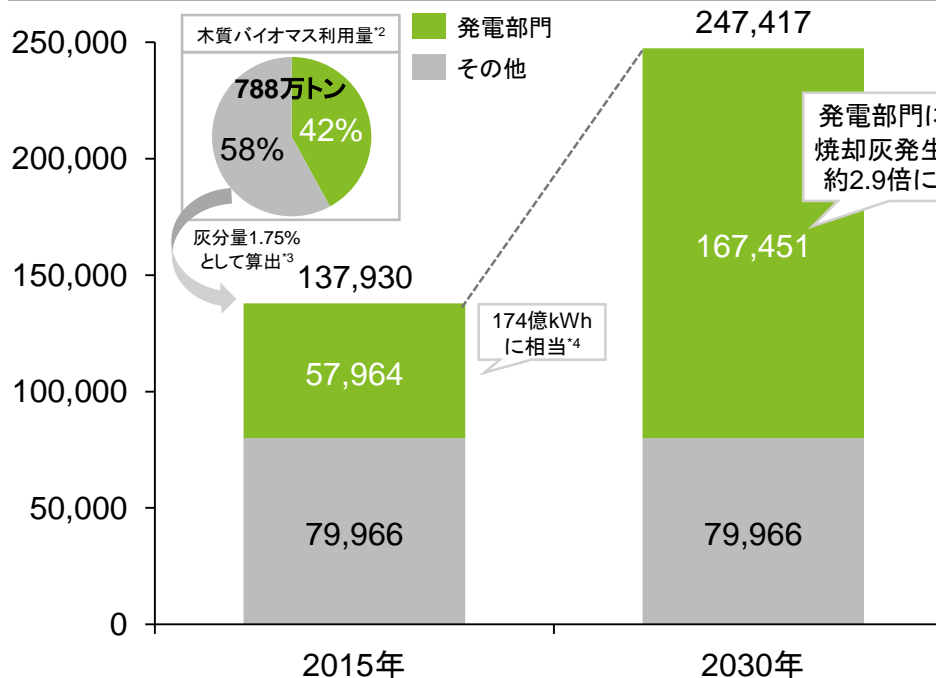
## ③ 焼却灰のマテリアルフロー(2/3)



バイオマス発電の設備容量\*1



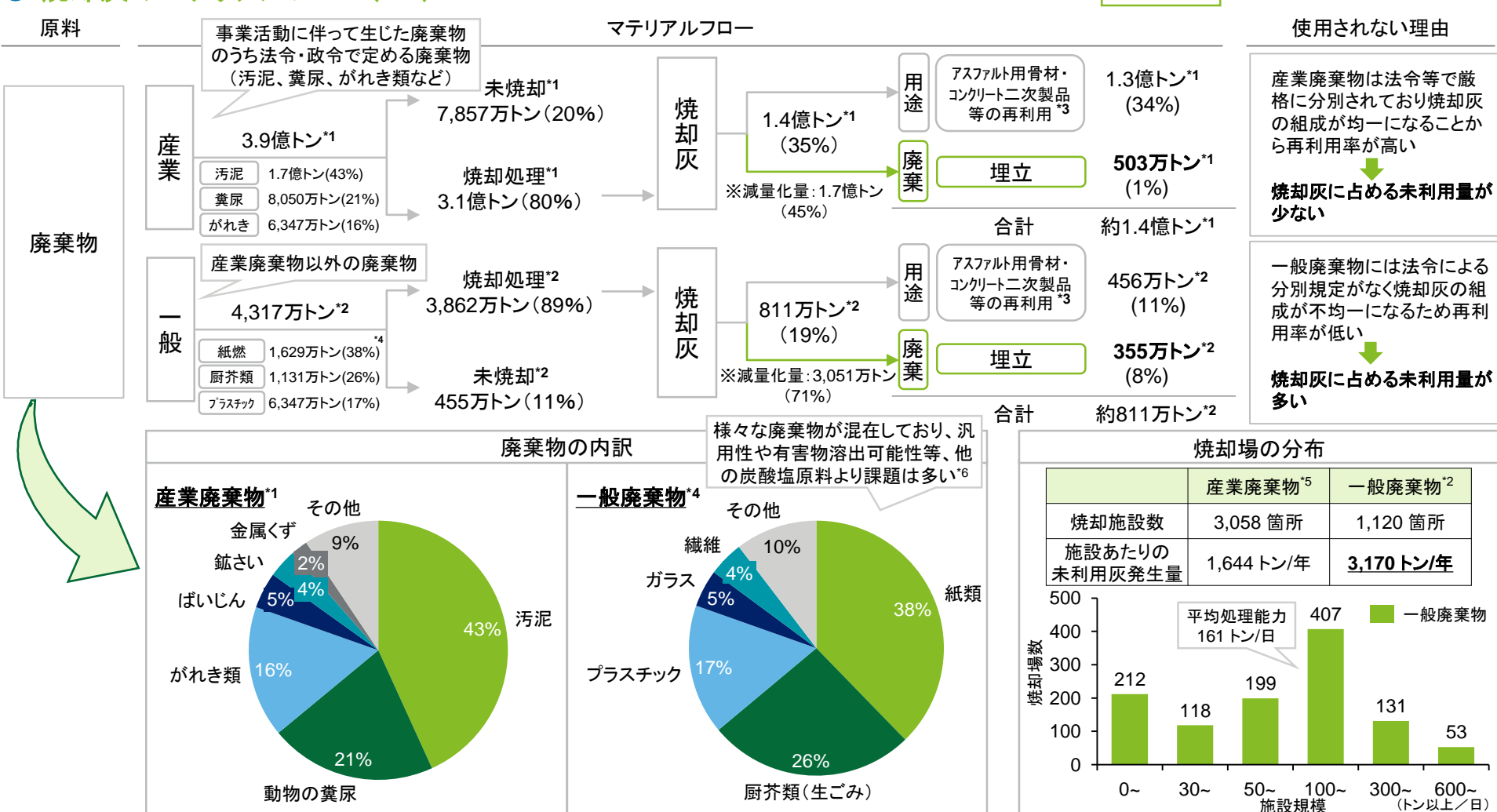
木質バイオマス焼却灰の発生量



\*1: 経済産業省「長期エネルギー需給見通し(平成27年)」より抽出、\*2: 林野庁「平成27年 木質バイオマスエネルギー利用動向調査」より発電機による木質バイオマス使用量(絶対トン)を発電部門として抽出、\*3: 日本木質バイオマスエネルギー協会Websiteより木質チップの灰分量1.0-2.5%の中央値1.75%を計上、\*4: 日本木質バイオマスエネルギー協会Websiteより全乾木材の低位発熱量18.9 MJ/kg(針葉樹19.4 MJ/kgと広葉樹18.4 MJ/kgの平均値)に発電部門の木質バイオマス利用量57,964トンを用いて算出、\*5: 林野庁「平成28年木質バイオマスエネルギー利用動向調査」より推計、\*6: 国立開発研究法人森林総合研究所「木質バイオマス燃焼灰循環利用のための林地還元技術の開発」

# 産廃の未利用量は大きいが 焼却場あたりの未利用焼却灰では一般廃棄物が大きい

## ③ 焼却灰のマテリアルフロー(3/3)

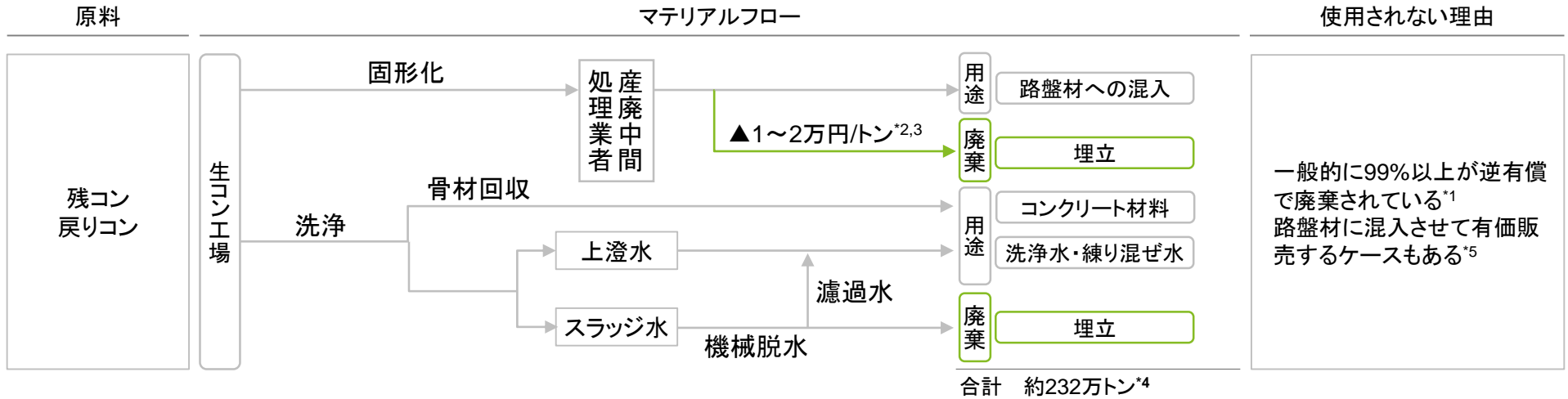


\*1: 環境省「産業廃棄物の排出及び処理状況等(平成28年度実績)」より抽出、\*2: 環境省「一般廃棄物の排出及び処理状況等(平成28年度)について」より抽出、\*3: 東京都「ごみ焼却灰の処理及びそれに伴う資源の有効利用等について」より主な焼却灰の再利用先を参照、\*4: 大阪市「平成29年度の家系ごみ組成分析調査結果について」より家系ごみの組成を抽出して算出、\*5: 環境省「産業廃棄物行政組織等調査報告書」より平成28年4月1日時点における産業廃棄物の焼却施設数を抽出、\*6: 技術WGにおける議論より記載

### ③ 炭酸塩 (参考) 固定化ポテンシャルのバックデータ(5/6) 残コン/戻リコンは約99%以上が廃棄されている

#### ④ スラッジのマテリアルフロー

▲ 逆有償  未利用

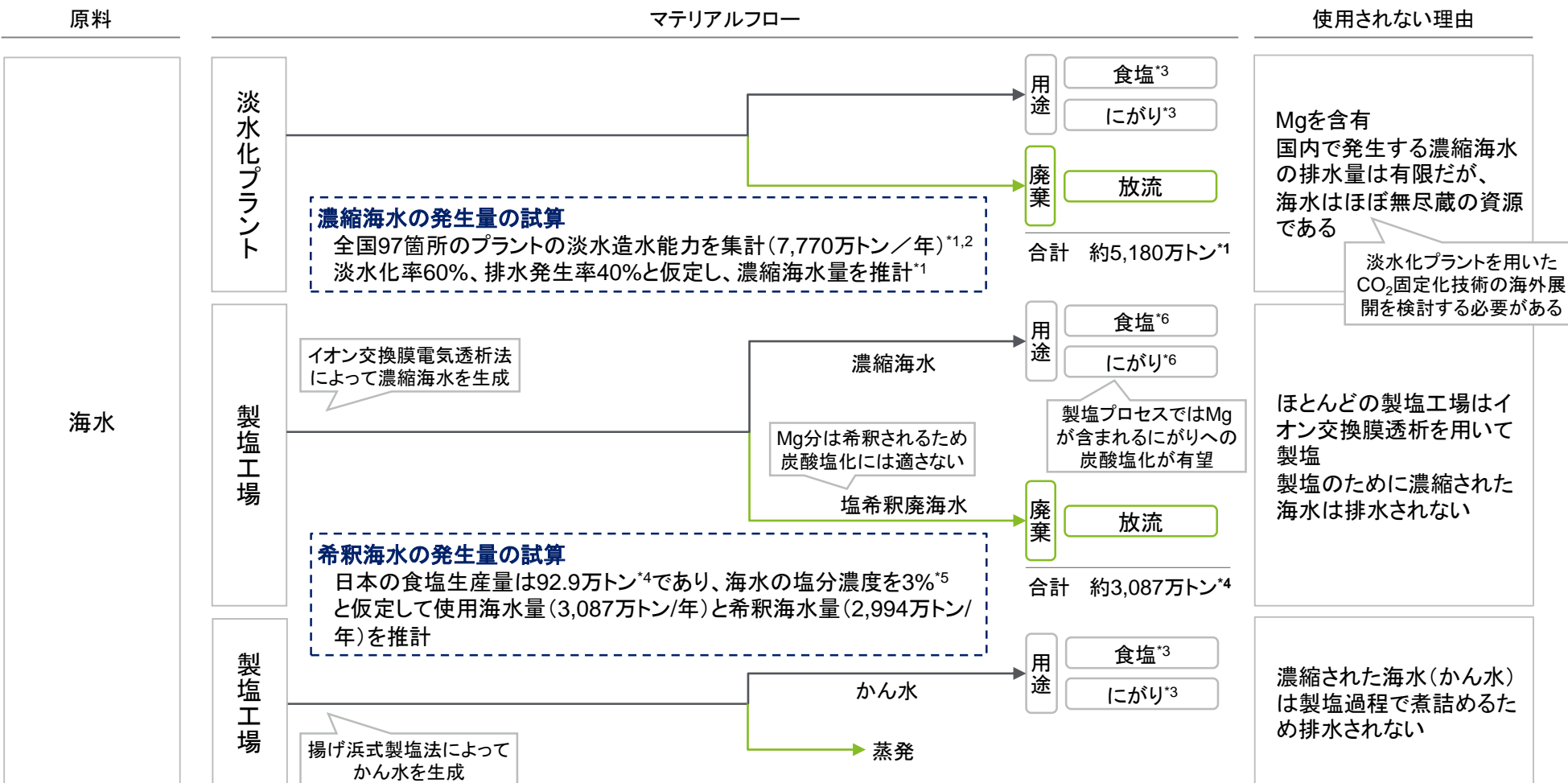


出所: 全国生コンクリート工業組合連合会Website、\*1:公益社団法人 日本コンクリート工学会「残コンを減らす工夫」、\*2:国土交通省「残コン・戻リコンの発生抑制、有効利用に関するアンケート調査の結果概要について」、\*3:経済産業省「生コンクリート流通統計調査」、\*4:未利用量は生コンの年間生産量を\*3より抽出し\*2に記載の残痕発生率1.6%をかけて算出)、\*5:有識者へのヒアリングより記載

# 海水を淡水化した後の濃縮海水はほとんどが海へ放流されている

## ⑤ 海水のマテリアルフロー

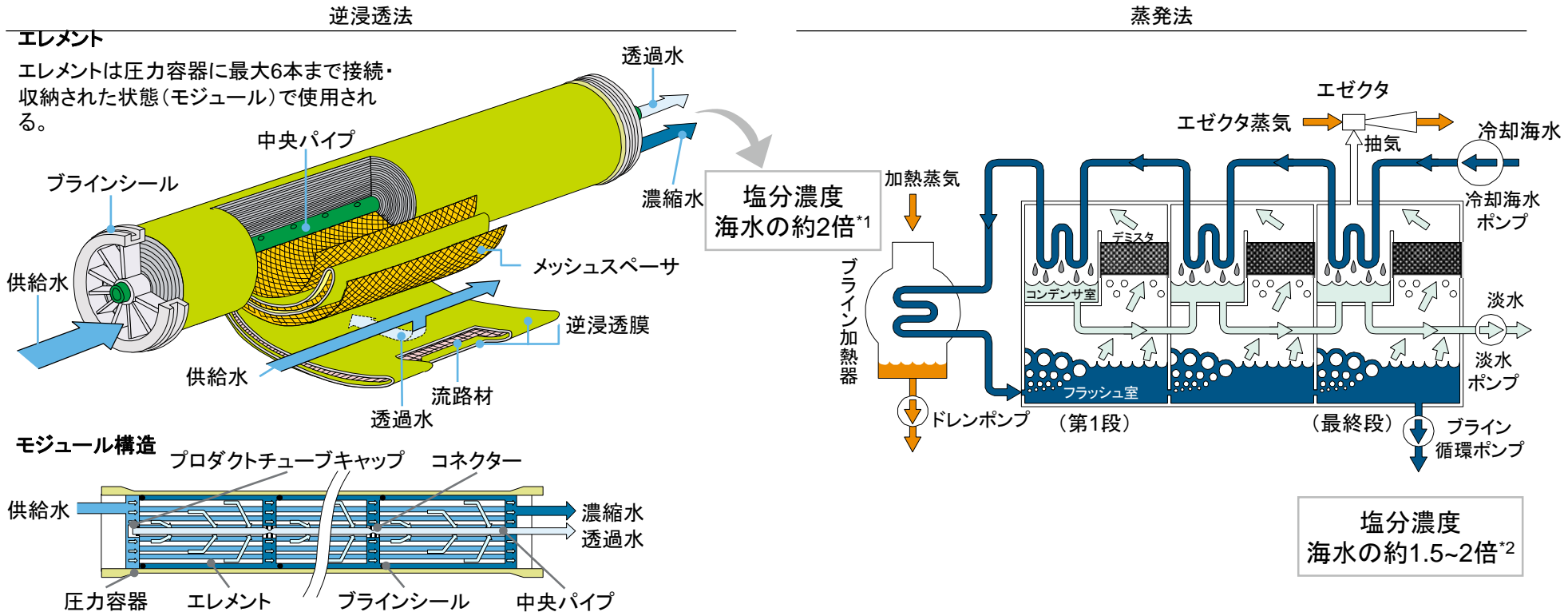
未利用



\*1:国土交通省「第2回水マネジメント懇談会資料」、\*2:福岡地区水道企業団Website、\*3:沖縄北谷自然海塩株式会社Website、\*4:財務省「平成30年度 塩需給実績」より国内生産量を抽出、\*5:たばこと塩の博物館Website、\*6:村上正祥「イオン交換膜電気透析法による製塩の現状と将来」

# 淡水化プラントから排出される濃縮海水の塩分濃度は海水の約2倍である

## 淡水化プラントの濃縮排水の塩分濃度



	単位: wt%				
海水	H <sub>2</sub> O	NaCl	MgCl <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>
	96.6	2.65	0.33	0.21	0.14
濃縮排水	単位: wt%				
	H <sub>2</sub> O	NaCl	MgCl <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>
	93.3	5.30	0.66	0.42	0.28

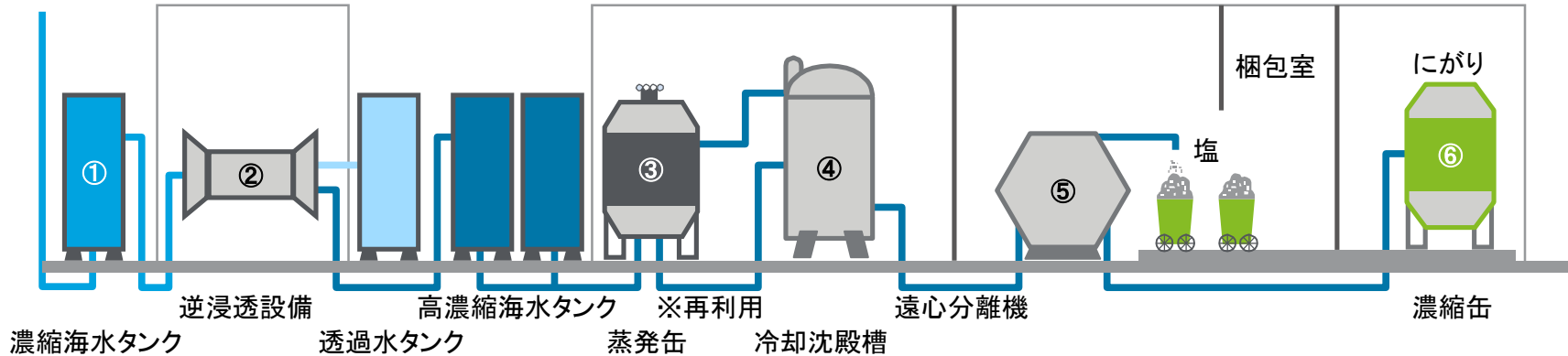
濃縮排水の塩分濃度は  
海水の約2倍

食塩やにがりの  
製造に利用

\*1:福岡地区水道事業団Website、\*2:経済産業省「平成27年度地球温暖化対策技術普及等推進事業(サウジアラビア王国・海水淡水化事業における省エネルギー設備の導入)」

# 淡水化プラントから得られる濃縮海水からは塩とにがり製造されている

## 淡水化プラントの濃縮海水からの塩・にがり製造プロセス



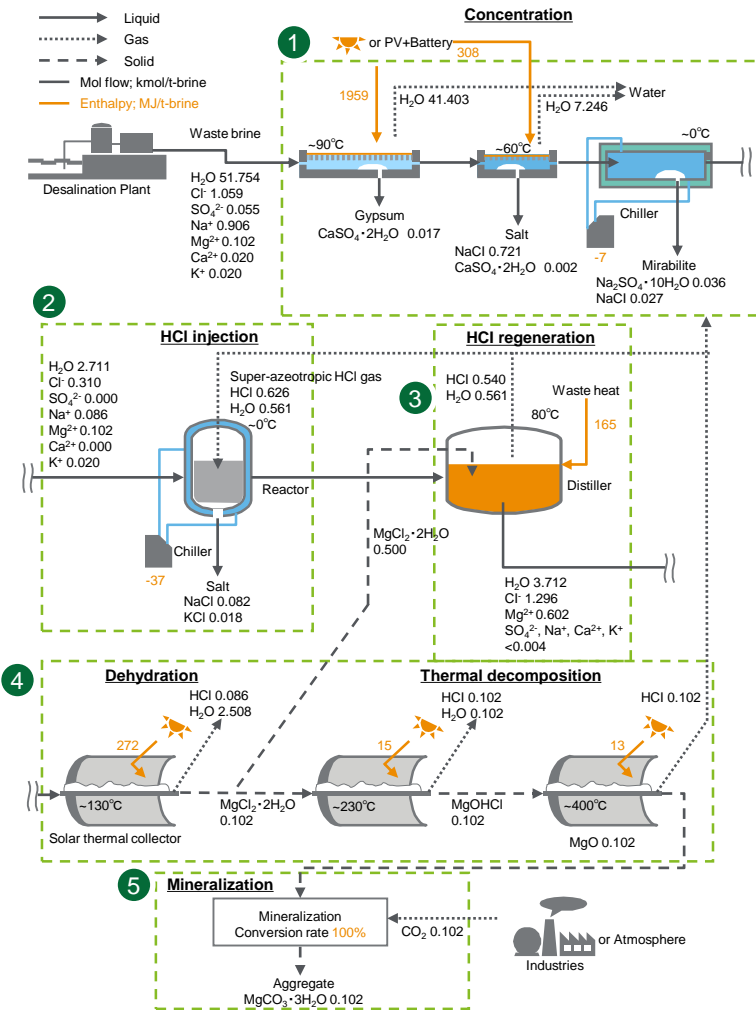
No.	プロセス	概要
①	貯蔵	濃縮海水を貯蔵する
②	逆浸透膜による濃縮	逆浸透膜を通すことにより、塩分濃度を上げる(約14%まで)
③	蒸発による濃縮	低温蒸発技術により逆浸透膜から送られた約14%の濃縮海水を約35%まで濃度を高める
④	冷却	濃縮海水を冷却し海水塩を沈殿させる
⑤	遠心分離	冷却沈殿槽で攪拌した海水塩を遠心分離機で分離。海水100%のにがりと海水100%の食塩に分離させる
⑥	にがり濃縮	遠心分離機で分離されたにがりを濃縮する

出所: 沖縄北谷自然海塩株式会社



# 淡水化プラントの濃縮排水中に含まれるMgOへのCO<sub>2</sub>固定化技術が研究されている

## 濃縮海水を用いた炭酸マグネシウム生成(早稲田大学・中垣研究室)



No.	プロセス	概要
①	Ca <sup>2+</sup> ・SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> の析出分離	濃縮海水の蒸発濃縮によりCa <sup>2+</sup> ・SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> を析出分離し、濃縮後0°C以下に冷却
②	NaCl・KClの析出分離	冷却後の濃縮海水にHClガスを添加し、NaClとKClを析出分離
③	HClの回収	HClのリサイクルのため、Na・K分離後の高濃度HClを含む濃縮海水にMgCl <sub>2</sub> 二水和物を添加・加熱することでHClを回収
④	MgOへの熱分解	HCl回収後に得られるMgCl <sub>2</sub> スラリーは乾燥工程を経てMgCl <sub>2</sub> 二水和物となり、その一部はHCl回収のための添加剤として再利用され、残りは追加の加熱によりMgOに熱分解
⑤	炭酸塩化	CO <sub>2</sub> とMgOを反応させることにより炭酸マグネシウムを生成

出所:早稲田大学Website、津布久陽平(早稲田大学中垣研究室)「廃液かん水を用いた有価物併産CO<sub>2</sub>固定化プロセスの実現可能性の検討」

## 3. 炭酸塩

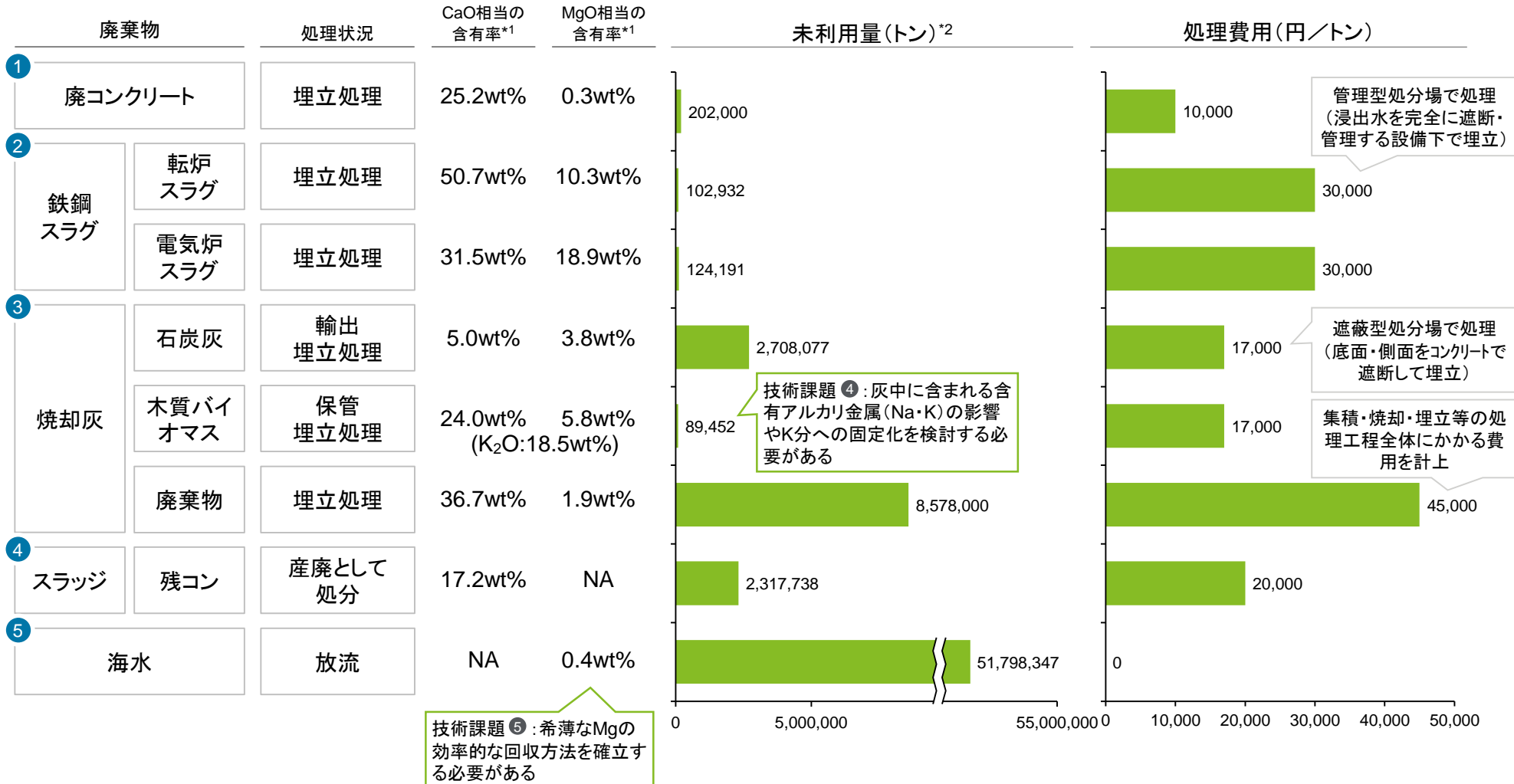
3.1 CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルの推計

3.2 コストターゲットの決定

3.3 研究開発要素の検討

# 焼却灰やスラッジは再資源化の取り組みが比較的進んでいないため未利用量が他の廃棄物と比較して大きい

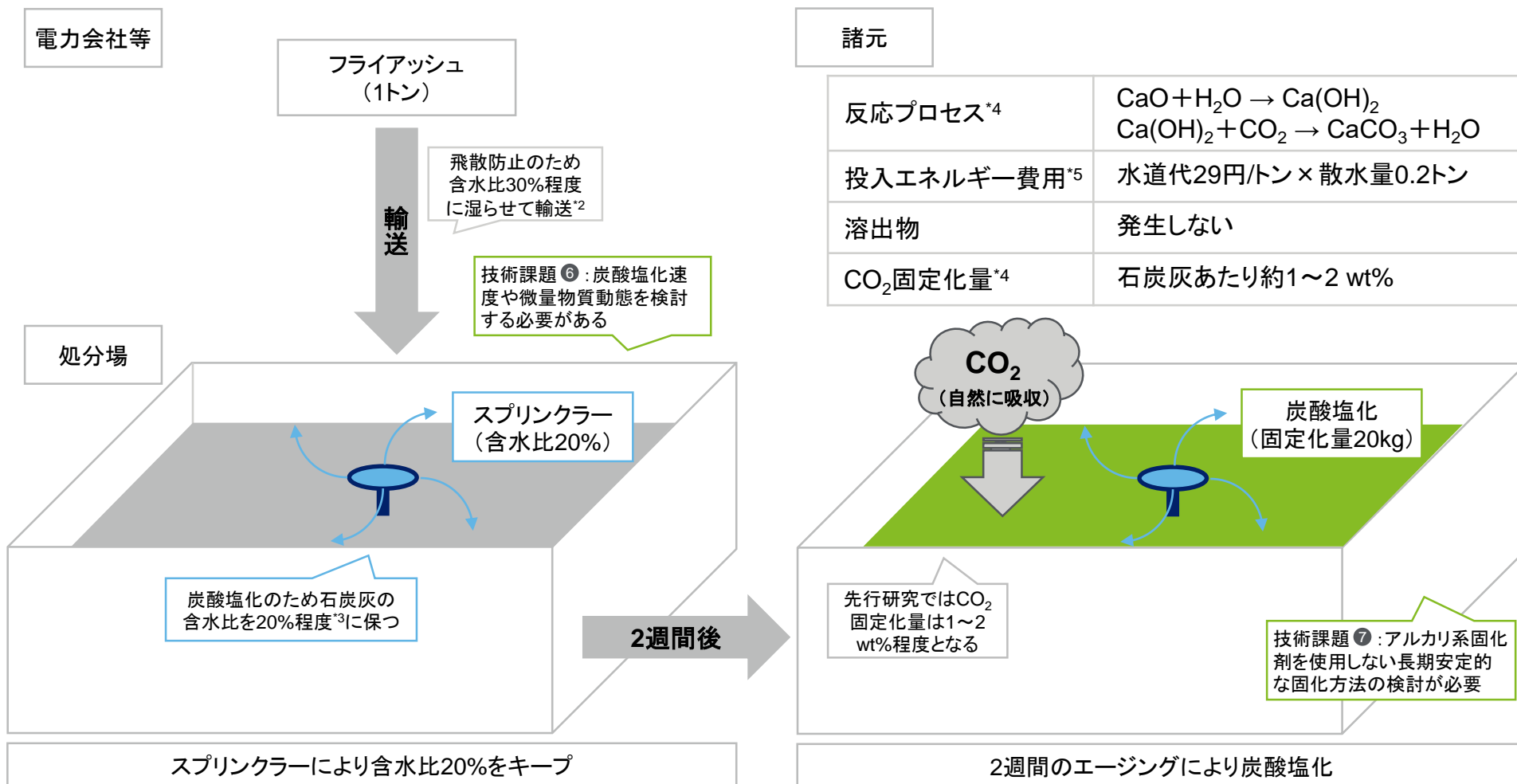
## 廃棄物の未利用量・処理費用



\*1: 鉄鋼スラッジ協会Website、日本フライアッシュ協会website、廃棄物学会研究発表会「木質系バイオマス燃焼灰の安全性評価および有効利用」、富士通総研、環境エネルギー普及株式会社「木質バイオマスボイラー導入・運用にかかわる実務テキスト」を基に算出、環境省「既存静脈施設集積地域の高効率活用」に資する動脈産業と静脈産業との有効な連携方策等に関する調査業務、「ヘインシモンポンプセメントの化学成分」、津布久陽平(早稲田大学中垣研究室)「廃液かん水を用いた有機物併産CO<sub>2</sub>固定化プロセスの実現可能性の検討」、\*2: 本調査では廃棄物の未利用量に着目しているが、有効利用されている原料へのCO<sub>2</sub>固定化も検討の余地がある

# 代表的な未利用原料の炭酸塩化プロセスとして石炭灰へのCO<sub>2</sub>固定化を想定した

## 石炭灰を原料とする炭酸塩製造プロセス\*1

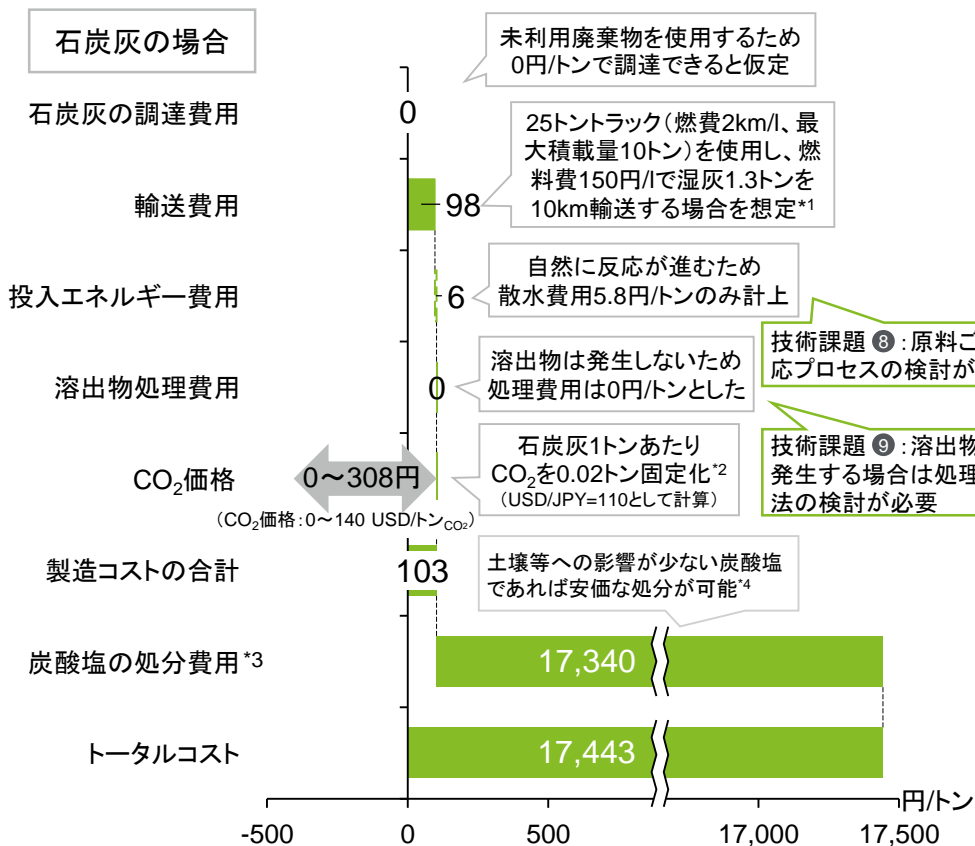


\*1:有識者へのヒアリングを基にDeloitte作成、\*2:国土交通省「活用が期待される石炭灰有効利用技術」及び相馬市産業廃棄物埋立処分場「維持管理計画」より飛散防止対策として含水比30%の湿灰として輸送されている、\*3:炭酸塩化させるためにはCaOを水と反応させる必要があるため含水比20%を保持すると仮定、\*4:齊藤栄一「エージング作用による石炭灰フライアッシュのCO<sub>2</sub>固定量と有害物質の挙動」より抽出、\*5:東京都水道局Website「工業用水道料金」より29円/m<sup>3</sup>の水道水を用いて、2週間で搬入時に含まれていた水分がすべて蒸発すると仮定し、スプリンクラーで含水比20%を保持した場合にかかる費用を計上

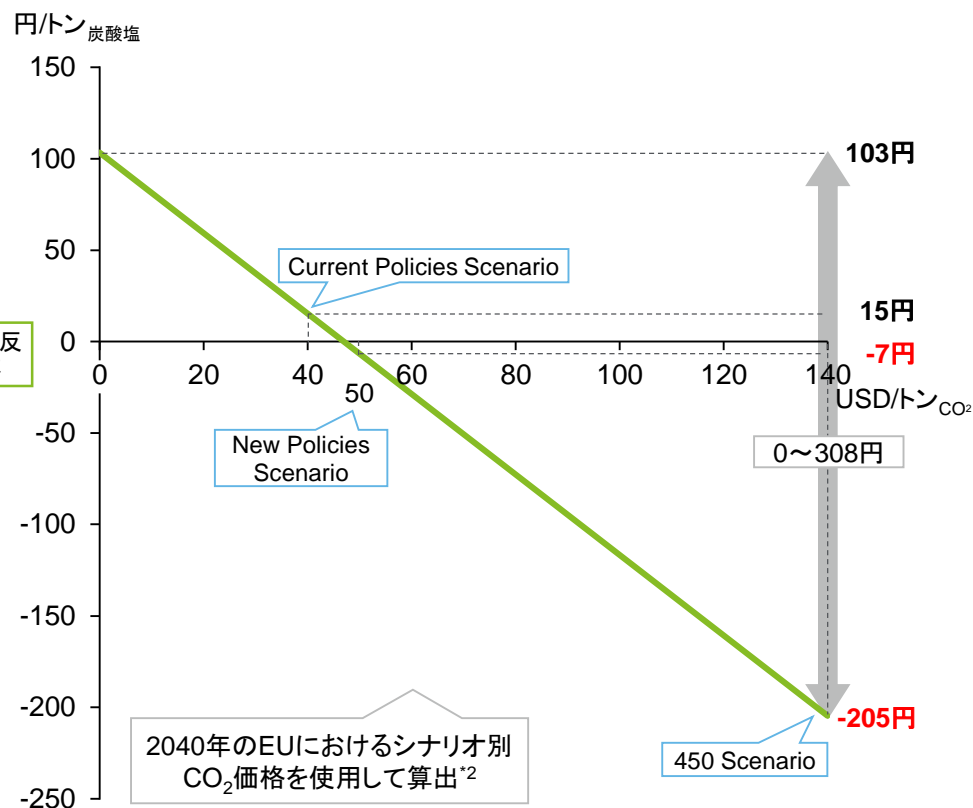
# 未利用廃棄物を原料とする炭酸塩のトータルコストは処分費用が支配的となるため 土壌等への影響が少ない固定化方法の検討により安価な処分が可能となる

## 炭酸塩の製造コスト

コスト(円/トン炭酸塩原料)



炭酸塩化費用のCO<sub>2</sub>価格感度\*2



\*1:燃料費150円/lと輸送距離10kmの積を燃費2km/lおよび最大積載量10トンで割ると1トンあたりの輸送費は75円となるが、石炭灰は30%の湿灰として輸送するため含水量0.3トンを加算して計上、\*2:IEA "World Energy Outlook 2016"よりEUにおけるシナリオ別CO<sub>2</sub>価格予測を抽出し、石炭灰1あたりのCO<sub>2</sub>固定化量を掛けて算出、CO<sub>2</sub>は大気中から自然に固定化されると仮定、\*3:一般財団法人 日本エネルギー経済研究所「石炭燃焼に伴い発生する石炭灰に係る状況」より最終処分場への埋立費用1.7万円/トンに炭酸塩1.02トンを掛けて算出、\*4:処分場閉鎖後のモニタリング期間の削減や安定型処分場への処分による費用の削減が見込まれる

# 土壌等への影響が少ない炭酸塩の製造プロセスの検討が必要である

## 炭酸塩からの溶出が想定される物質の検討

主要化学成分が廃棄物中でのどのような組成で存在しているかが重要

溶出系	廃棄物	姿形	主要化学成分 (wt%)					微量元素					鉍物組成	想定される溶出物質	
			Ca	Mg	Si	Al	Fe	F	B	Se	Pb	その他			
クローズド	① 廃コンクリート	砂利状	18	0.2	25.6	1.2	1	×	×	○	○	Cr Cd	Ca(OH) <sub>2</sub> ケイ酸カルシウム水 和物類	六価クロム	
	② 製鋼スラグ	転炉スラグ	0.075~37.5mm	36.2	6.2	8.3	0.6	12.8	○	○	○	○	Cr	2CaO・SiO <sub>2</sub> CaO・FeO	ふっ素
		電気炉スラグ	0.075~37.5mm	19.2 ~ 25.8	11.4	15.1 ~ 18.6	2.8 ~ 10.0	1.9 ~ 2.0	○	○	○	○	Cr	2CaO・SiO <sub>2</sub> CaO・FeO	ふっ素、六価クロム
	③ 焼却灰	石炭灰	フライアッシュ:パウダー状 クリンカアッシュ:砂利状	3.6 4.0	N/A	19.3 27.0	14.6 11.7	2.3 5.3	×	○	○	×	As Cr	アルミノケイ酸ガラス ムライト 石英	セレン、砒素、 六価クロム
		木質バイオマス	飛灰:約20 μm ボトムアッシュ:砂利状	17.1	3.5	16.5	3.6	3.8	×	○	×	○	Na K	—	ナトリウム、カリウ ム、ほう素
オープン	④ スラッジ	残コン 戻りコン	泥状	12.3	N/A	1.5	0.3	1.3	×	×	○	○	Cr Cd	Ca(OH) <sub>2</sub> 2CaO・SiO <sub>2</sub>	六価クロム
	⑤ 濃縮海水	液状	N/A	0.2	N/A	N/A	N/A	○	○	×	×	Cl S	Mg <sup>2+</sup>	塩酸、硫酸	

溶出物質が拡散しにくい  
ため土壌や地下水への影  
響を考慮する必要がある

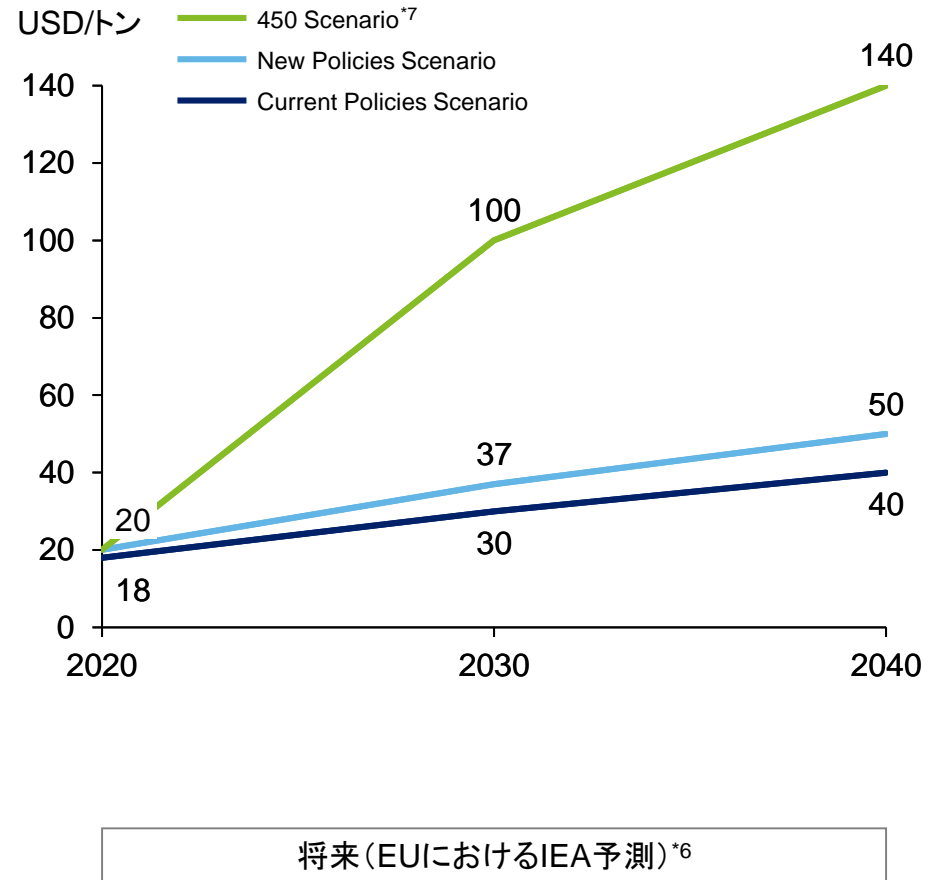
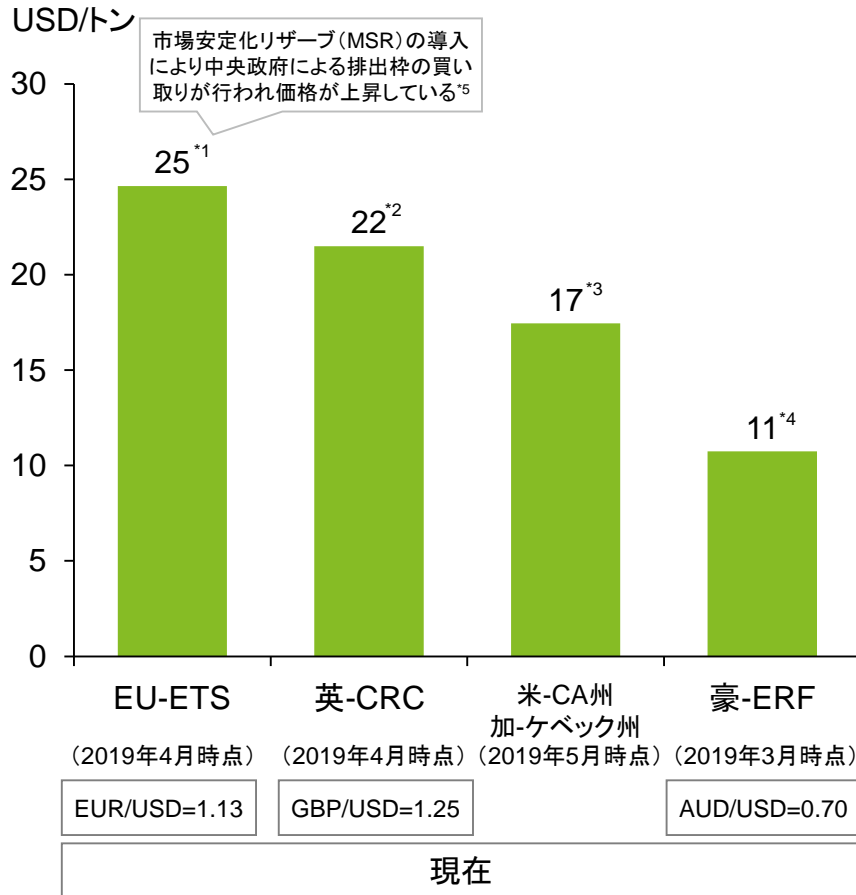
溶出物質が拡散されるため  
影響は軽微である

\*1:土木学会「コンクリートからの微量成分溶出に関する現状と課題」、一般社団法人沿岸技術センター「港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル」、Hsing-Jung Ho, Atsushi Iizuka, and Etsuro Shibata "Carbon Capture and Utilization Technology without Carbon Dioxide Purification and Pressurization: A Review on Its Necessity and Available Technologies"、製鋼スラグ協会Website、日本フライアッシュ協会Website、炭酸塩協会研究発表会「木質系バイオマス燃焼灰の安全性評価および有効利用」、日本木質バイオマスエネルギー協会Website、環境エネルギー普及株式会社「木質バイオマスボイラー導入・運用にかかわる実務テキスト」、環境省「既存静脈施設集積地域の高効率活用に関する動脈産業と静脈産業との有効な連携方策等に関する調査業務」、津布久陽平(早稲田大学中埋研究室)「廃液かん水を用いた有価物併産CO<sub>2</sub>固定化プロセスの実現可能性の検討」より抽出

# IEAによるとCO<sub>2</sub>価格は2040年までにUSD40~140/トンとなる見込み

## CO<sub>2</sub>価格見通し

先進国

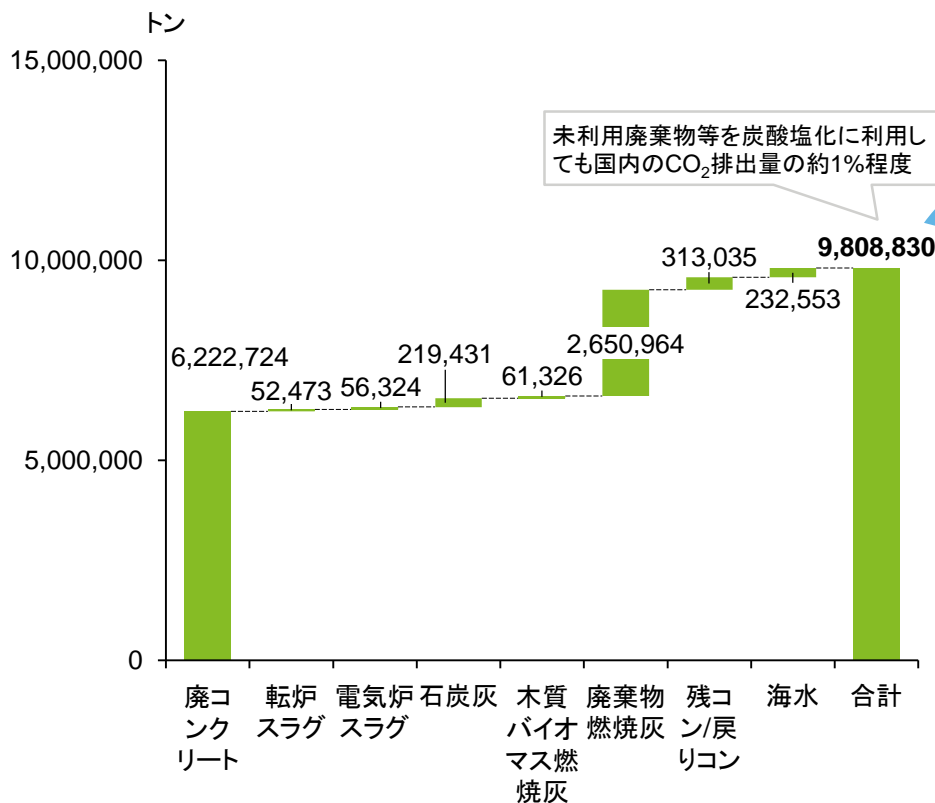


\*1:ICE "EUA Phase 3 Daily Futures"より2019年4月のCO<sub>2</sub>価格を抽出、\*2:Environment Agency, UK "CRC Energy Efficiency Scheme Annual Report Publication"より2018-2019年のCO<sub>2</sub>価格を抽出、\*3:CARB "California Cap-and-Trade Program, and Québec Cap-and-Trade System May 2019 Joint Auction #19 Summary Results Report"より2016-2019年のCO<sub>2</sub>価格を抽出、\*4:Australian Government Clean Energy Regulator "Emissions Reduction Fund Auctions results December 2018"より2018年のCO<sub>2</sub>価格を抽出、\*5:Carbon Tracker "Carbon Countdown: Prices and Politics in the EU-ETS"、\*6:IEA "World Energy Outlook 2016"よりEUにおけるシナリオ別CO<sub>2</sub>価格予測を抽出、\*7:温室効果ガスの大気中濃度を450ppm(気温上昇2°C)以下にすることを旨とするシナリオであり、いわゆる2°Cシナリオ

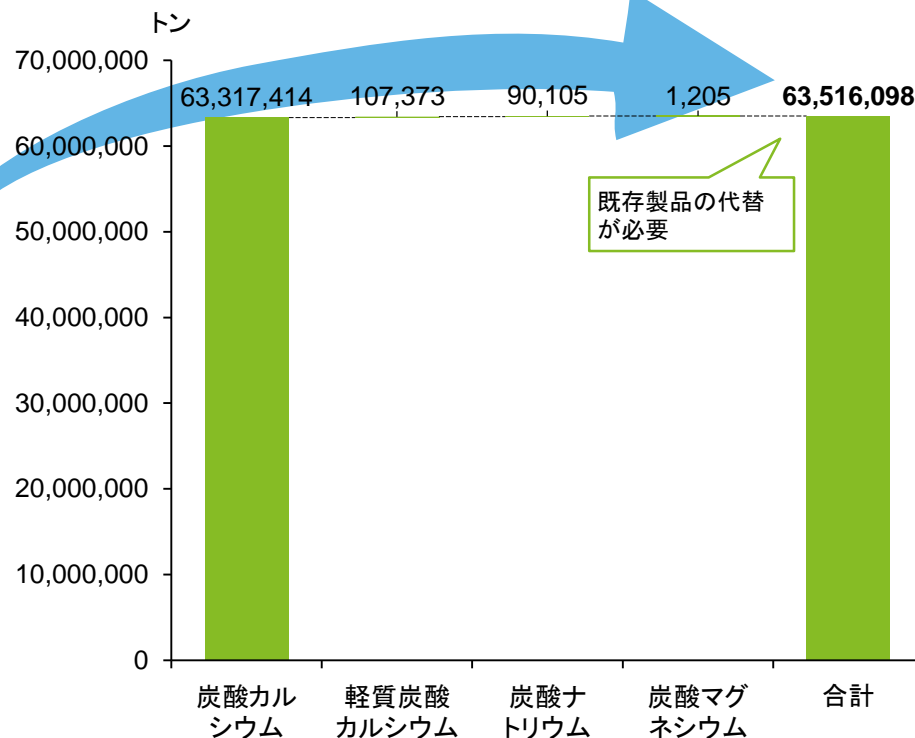
# 未利用廃棄物を炭酸塩化しても固定化量は約1,000万トン程度であることからさらなる固定化のためには既存製品の代替が必要である

## 炭酸塩の固定化ポテンシャル比較

未利用廃棄物等を炭酸塩化に利用した場合のCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャル



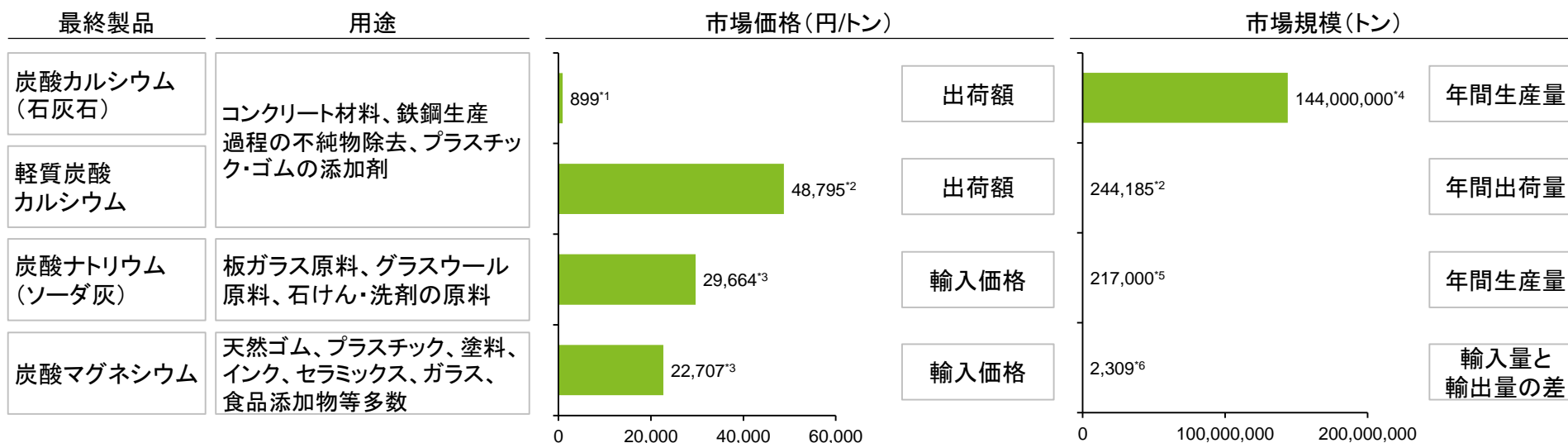
既存製品を置き換える場合のCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャル





# 炭酸塩の中ではセメント原料となる石灰石の市場規模が最も大きい

## 炭酸塩の用途別市場価格・規模

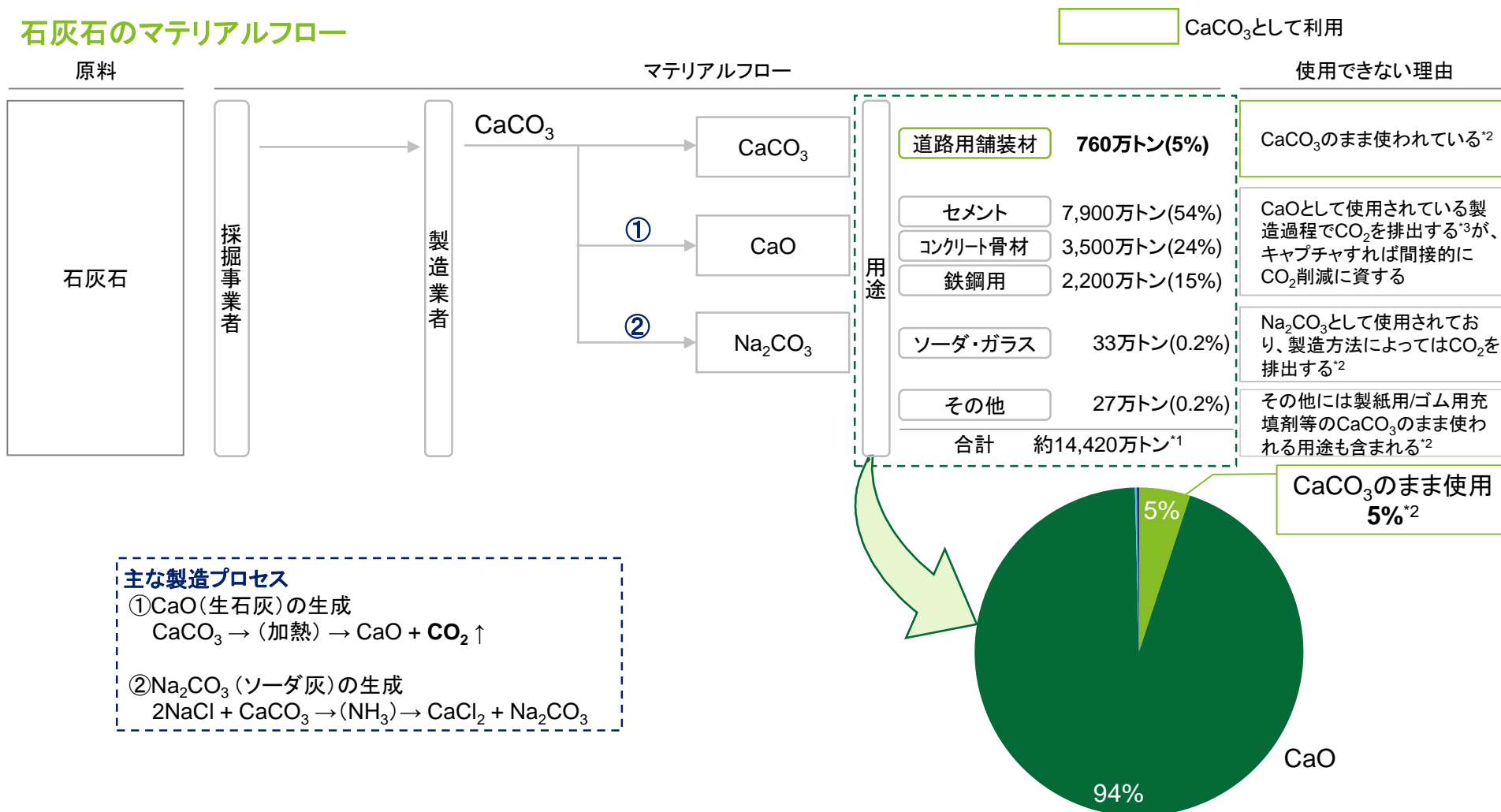


\*1:経済産業省生産動態統計月報より2019年2月の石灰石の価格を抽出、\*2:経済産業省「2018年 経済産業省生産動態統計」より抽出、\*3:2017年財務省貿易統計から輸入額を輸入量で割り算出、\*4:石灰石鉱業協会Websiteより2016年の石灰石の生産量を抽出、\*5:経済産業省「平成30年度 ソーダ工業用の塩需給見通し」より平成28年の生産量実績を抽出、\*6:2017年財務省貿易統計から輸入量から輸出量を引き算出

# 石灰石は主に加熱して使用されるためCO<sub>2</sub>を排出する 加熱せずに使用されている割合は5%である

CO<sub>2</sub>由来のCaCO<sub>3</sub>で石灰石を代替した場合、CaOとしての用途ではCO<sub>2</sub>収支はマイナスにならないが、石灰石使用量の削減に伴うCO<sub>2</sub>排出量の削減が可能である。

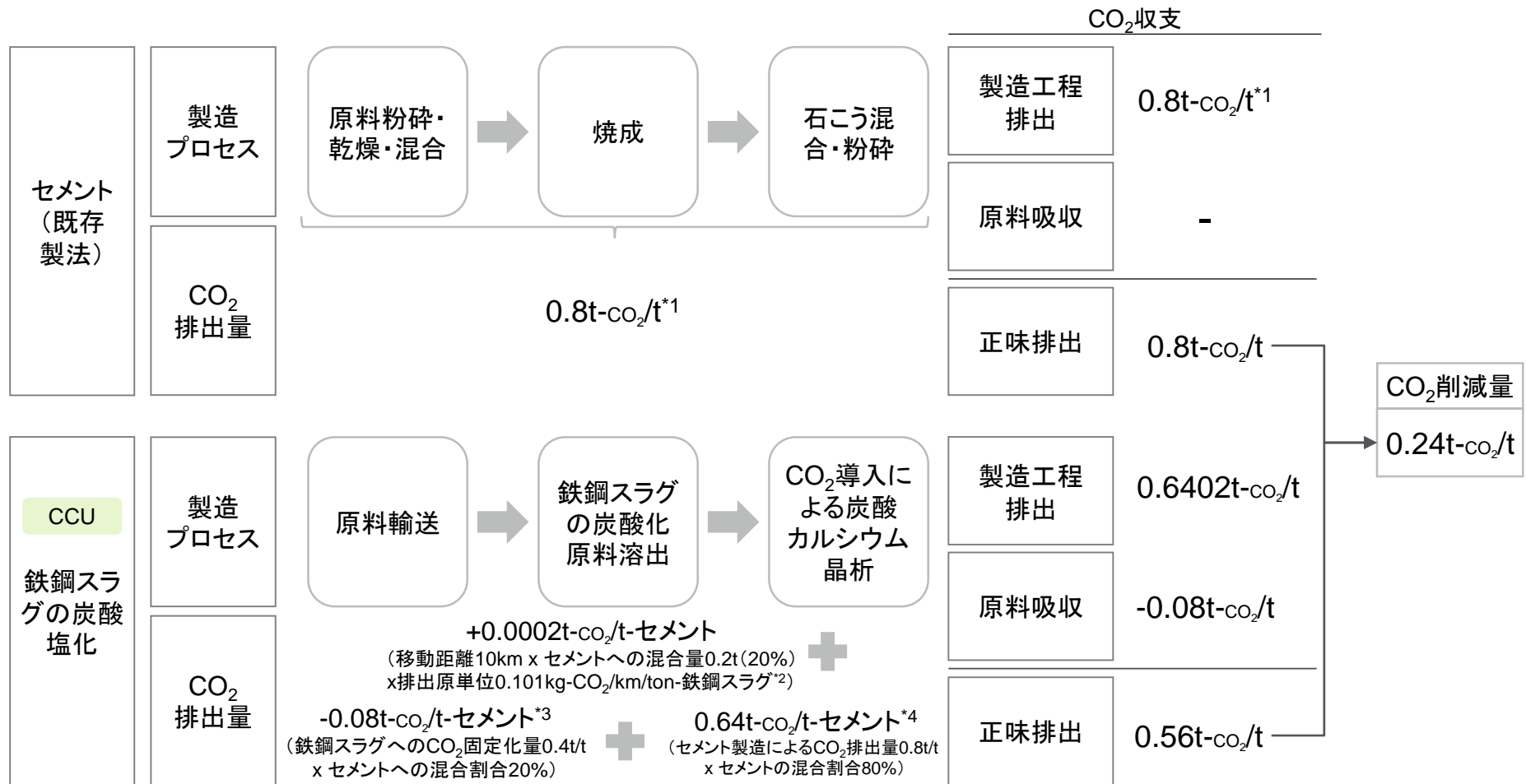
## 石灰石のマテリアルフロー



\*1:石灰石鉱業協会Websiteより2016年の石灰石の生産量を抽出、\*2:独立行政法人経済産業研究所「産業連関表・鉱工業統計を用いた石灰石起源 CO<sub>2</sub> 排出などの評価・検証」より抽出

# セメント代替により製品1トンあたりのCO<sub>2</sub>排出量を1.04トン削減できる可能性がある

## 炭酸塩の従来製法とCCUのプロセスCO<sub>2</sub>収支



\*1:セメント協会「セメントのLCI データの概要」より抽出、\*2:10トントラックの燃費4km/lをCO<sub>2</sub>排出原単位2.619kg-CO<sub>2</sub>/l及び最大積載量6.5トンで割り算出、\*3:既存製法によるセメント生産時のCO<sub>2</sub>排出量にCCU製品の混合割合20%を掛けて算出した固定化量に対し、鉄鋼スラグにおけるCaO及びMgOの含有率にそれぞれのCO<sub>2</sub>に対する分子量比を掛け算出、\*4:既存製法によるセメント生産時のCO<sub>2</sub>排出量にCCU製品の混合割合20%を掛けて算出

## 3. 炭酸塩

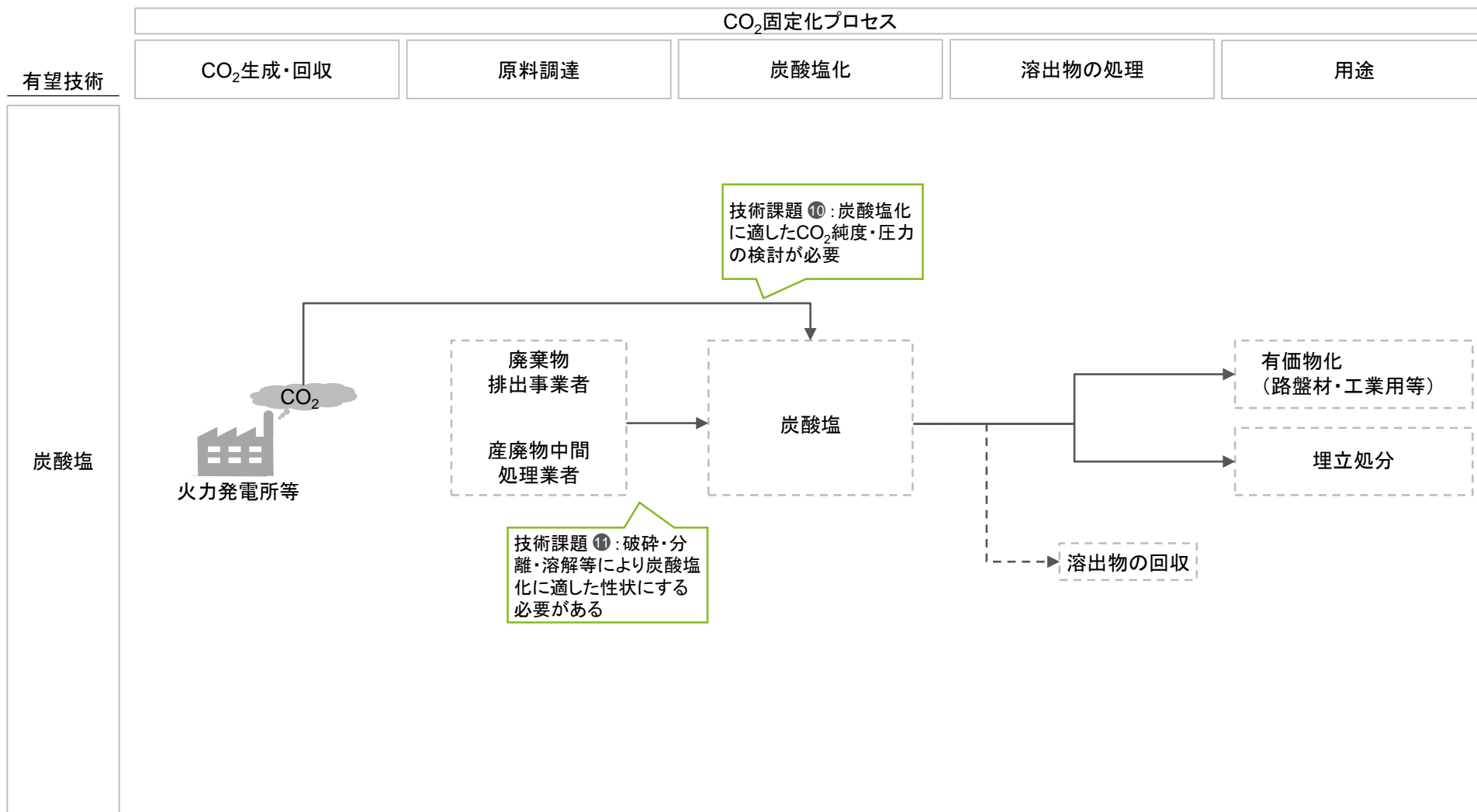
3.1 CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルの推計

3.2 コストターゲットの決定

3.3 研究開発要素の検討

# 主に未利用廃棄物の炭酸塩化が研究開発要素になるが 廃コンクリートや製鋼スラグは粒度調整プロセスも検討する必要がある

## CO<sub>2</sub>固定化プロセスのフロー



# 石炭灰や木質バイオマス灰のほか廃棄物が炭酸塩化原料として有望である

## 炭酸塩化に用いる有望な原料の評価

原料		評価指標				
		原料	技術の新規性 <sup>*1</sup>	CO <sub>2</sub> 固定化ポテンシャル <sup>*2</sup>	総合評価 <sup>*3</sup>	備考
鉄鋼スラグ	高炉スラグ	廃コンクリート	○	△ 4.0万トン	○	✓ 未利用量は少ないが、路盤材等への活用が期待できることからCO <sub>2</sub> 固定化量は増加するため有望
	転炉スラグ	製鋼スラグ	×	×	×	✓ CO <sub>2</sub> 固定化量が少ない ✓ エージング工程で実質的に炭酸塩化は実用化済
	電気炉スラグ		×	×	×	✓ CO <sub>2</sub> 固定化量が少ない ✓ エージング工程で実質的に炭酸塩化は実用化済
焼却灰	石炭灰	焼却灰	○	△ 21.5万トン	○	✓ CO <sub>2</sub> 固定化量は多くないものの、技術の新規性があるため有望
	木質バイオマス		○	△ 3.0万トン	○	✓ CO <sub>2</sub> 固定化量は少ないが、バイオマス発電の導入で将来的に増加するため有望
	廃棄物		○	○ 193.2万トン	○	✓ CO <sub>2</sub> 固定化量が多く、技術の新規性があるため有望 ✓ 多様な不純物への対応が課題
スラッジ	残コン	スラッジ	×	○ 116.7万トン	△	✓ 類似研究では炭酸塩化が実証化されているため、残コン・戻りコンを対象とした展開が期待される
	生コンの絞り水		○	△ 23.3万トン	○	✓ CO <sub>2</sub> 固定化量は少ないが、技術の新規性があるため有望 ✓ 濃度が低く炭酸塩原料の抽出に多くのエネルギーが必要 ✓ 淡水化プラントや随伴水は技術の海外展開が期待される
	建設汚泥		○			
安山岩／玄武岩		濃縮海水	○	△ 23.3万トン	○	✓ CO <sub>2</sub> 固定化量は少ないが、技術の新規性があるため有望 ✓ 濃度が低く炭酸塩原料の抽出に多くのエネルギーが必要 ✓ 淡水化プラントや随伴水は技術の海外展開が期待される
海水						

**評価指標**  
未利用となっている原料があるか  
別用途で有効利用されている原料は除外

未利用となっている原料から2つの評価指標をもとに有望な原料を絞り込んだ

\*1:実証研究まで至っていないものを○とした、\*2:固定化ポテンシャルが10万トン未満を×、10万~100万トンまたは将来的な増加が見込めるものを△、100万トン以上を○とした、\*3:2つの評価指標において○が1つ以上あり、かつ×がないものを○とし、△が1つ以上もしくは×が1つ以上あるものは△とした

# 技術課題から炭酸塩原料ごとに技術開発要素を抽出した

## 廃棄物ごとの技術課題と研究開発要素

廃棄物	技術課題	研究開発要素	
共通	<ul style="list-style-type: none"> <li>11 前処理プロセス</li> <li>8 反応プロセスの検討</li> <li>9 溶出物の処理</li> <li>10 CO<sub>2</sub>純度・圧力の検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>破碎や分離、溶解などの炭酸塩化に適した性状にするためのプロセス検討</li> <li>炭酸塩化のための反応プロセスの研究</li> <li>副生物の発生メカニズムの解明及び溶出物の処理方法の確立</li> <li>炭酸塩化に適したCO<sub>2</sub>純度や圧力等の研究</li> </ul>	
廃コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 路盤材・骨材等への活用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>路盤材等の様々な用途展開に向けた炭酸化/Ca抽出反応に関するプロセス研究</li> </ul>	
焼却灰	石炭灰	<ul style="list-style-type: none"> <li>6 反応速度の評価</li> <li>7 固化方法の研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既成灰・新生灰ごとの炭酸塩化速度の評価及び炭酸塩化に伴う微量物質動態の評価</li> <li>アルカリ系固化材を使用しない固化法の研究とヤード試験による長期安定性の確認</li> </ul>
	木質バイオマス	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 燃料種ごとのプロセス研究</li> <li>4 含有アルカリ金属の評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料種ごとに組成が異なる焼却灰への炭酸塩化プロセスを検討</li> <li>灰中に含まれるNaやK等の影響評価及びK分を利用したCO<sub>2</sub>固定化プロセスの検討</li> </ul>
	廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 廃棄物ごとのプロセス研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物ごとに組成が異なる焼却灰への炭酸塩化プロセスを検討</li> </ul>
濃縮海水	<ul style="list-style-type: none"> <li>5 Mgの回収方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>希薄なMgの効率的な回収方法の確立</li> </ul>	

## 4. ポリカーボネート

### 4.1 CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルの推計

### 4.2 コストターゲットの決定

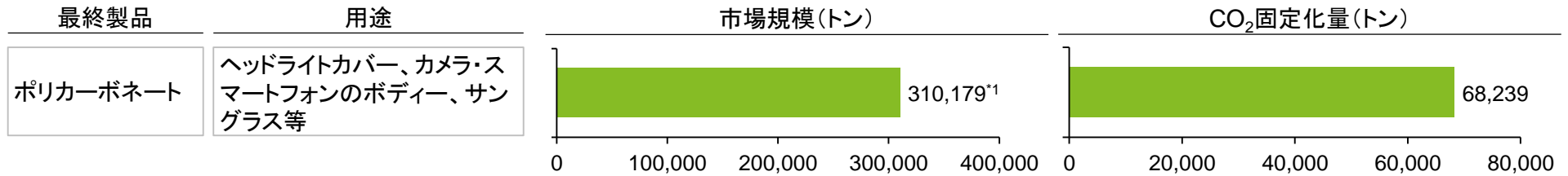
### 4.3 研究開発要素の検討



#### ④ ポリカーボネート

代表的なポリカーボネートであるポリカーボネートは市場規模が小さいことから固定化ポテンシャルが小さい

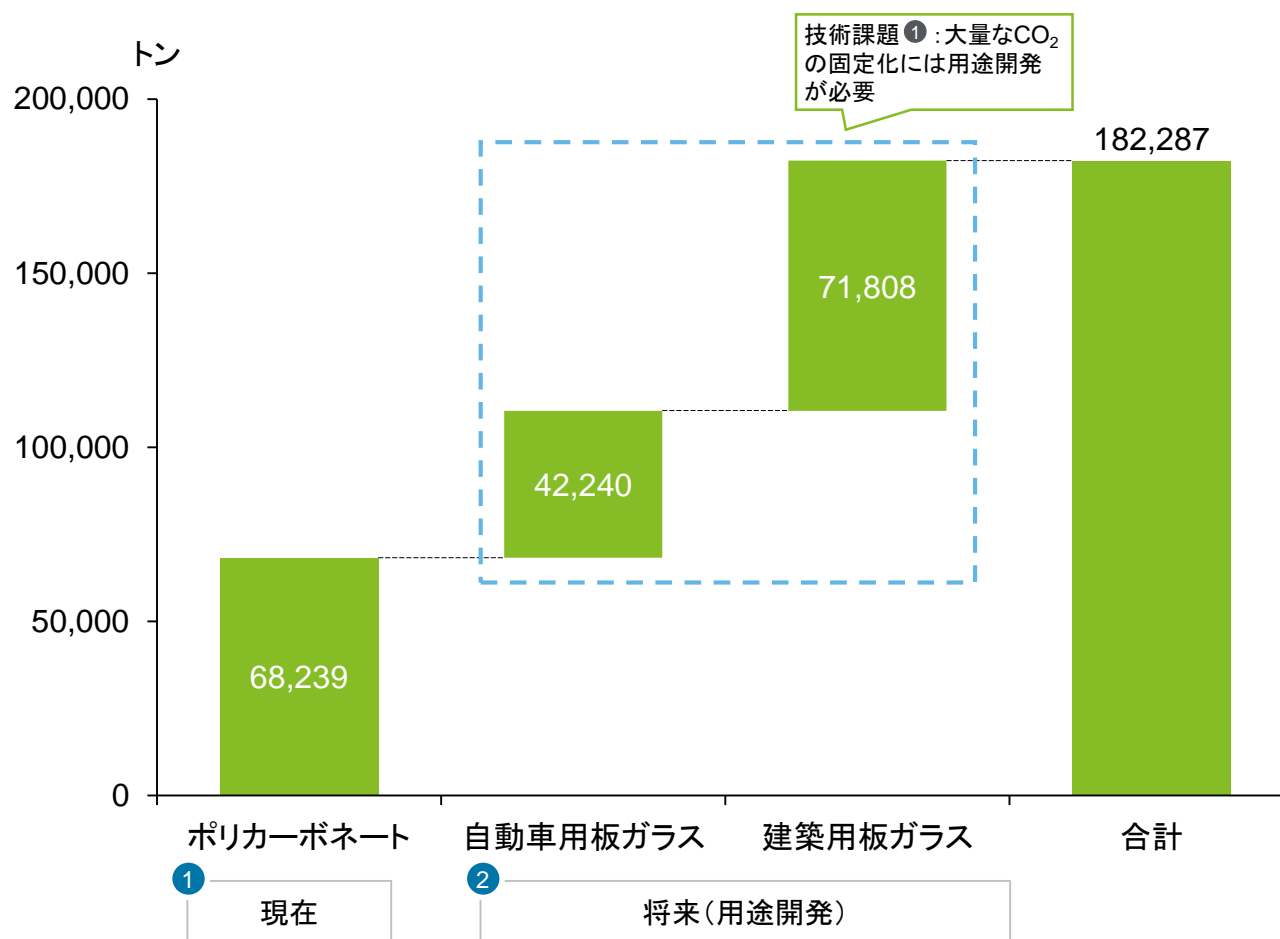
#### ポリカーボネートの市場価格・規模



\*1:経済産業省「生産動態統計年報 化学工業統計編」より2017年の出荷額・生産量を抽出

# 大量のCO<sub>2</sub>の固定化にはガラス代替材料等の用途開発が必要である

## ポリカーボネートのCO<sub>2</sub>固定化量



現状の市場規模に対するCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルは約7万トンである

## ① 現在の用途への固定化ポテンシャル

項目	ポリカーボネート
国内市場規模	31万179トン <sup>*1</sup>
CO <sub>2</sub> 固定化ポテンシャル	6万8,239トン

CO<sub>2</sub>固定化率  
22%<sup>\*2</sup>

\*1:経済産業省「生産動態統計年報 化学工業統計編」より2017年の出荷額・生産量を抽出、\*2:RITE「平成22年度温暖化対策基盤整備関連調査(二酸化炭素固定化・有効利用技術等調査)」に記載のCO<sub>2</sub>固定化量0.22t-co<sub>2</sub>/tをもとに算出

## ④ ポリカーボネート (参考)固定化ポテンシャルのバックデータ(2/3)

ポリカーボネートは耐衝撃性・軽量性に優れているため ガラス代替が有望である

### ② 用途開発の方向性

特性	板ガラス	ポリカーボネート	用途開発の方向性
耐衝撃性	✓ 割れやすく破損個所が危険	✓ 非常に割れにくい (同厚ガラスの約200倍)	<p>✓ ガラス代替として特に耐衝撃性や軽量性が求められる用途への展開</p> <p>主な用途候補</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 建築用ガラス</li> <li>✓ 自動車用ガラス・内外装材</li> <li>✓ モバイル端末用ガラス</li> </ul>
引っかかり硬さ (鉛筆硬度)	✓ 傷つきにくい(10H)	✓ 傷つきやすい(2B)	
耐久性	✓ 雨風や太陽光で劣化しない	✓ 変色・劣化しやすい	
光の透過率	✓ 92%	✓ 85~90%	
断熱性 (熱貫流率)	✓ 6.4W/(m・K)(1枚板) ✓ 2.9W/(m・K)(ペアガラス)	✓ 5.5W/(m・K)(1枚板) (2枚板は一般利用がないため不明)	
耐熱温度	✓ 最高700℃	✓ 約130℃	
紫外線カット性	✓ 低い(ただし高機能ガラスやフィルムにより99%以上カット可)	✓ 高い(99%以上カット可)	
軽量性 (比重)	✓ 2.5	✓ 1.2	

用途開発によるCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルは約11万トンである

## ② 用途開発による固定化ポテンシャル

項目	自動車用板ガラス	建築用板ガラス
板ガラス生産量	40万トン <sup>*1</sup>	68万トン <sup>*1</sup>
うちポリカーボネートの重量	19万2,000トン	32万6,400トン
CO <sub>2</sub> 固定化ポテンシャル	4万2,240トン	7万1,808トン

板ガラスに占めるポリカーボネートの割合 48%<sup>\*2</sup>

CO<sub>2</sub>固定化率 22%<sup>\*3</sup>

CO <sub>2</sub> 固定化量	約11万トン
----------------------	--------

\*1:経済産業省「板ガラス産業の市場構造に関する調査報告」より2014年の建築用及び自動車用板ガラス生産量を抽出、\*2:板ガラスとポリカーボネートの比重より $1.2/2.5=0.48$ として算出、\*3:RITE「平成22年度温暖化対策基盤整備関連調査(二酸化炭素固定化・有効利用技術等調査)」に記載のCO<sub>2</sub>固定化量0.22t-co<sub>2</sub>/tをCCUにおけるポリカーボネートのCO<sub>2</sub>固定化率として計上

## 4. ポリカーボネート

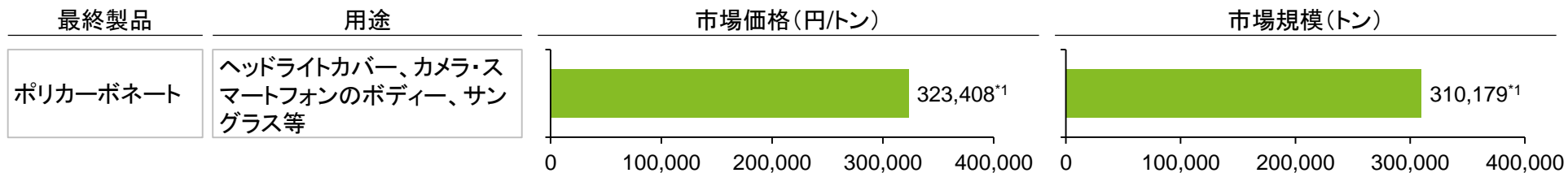
4.1 CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルの推計

4.2 コストターゲットの決定

4.3 研究開発要素の検討

# ポリカーボネートは他のCCU技術に比べ高付加価値である

## ポリカーボネートの市場価格・規模



\*1:経済産業省「生産動態統計年報 化学工業統計編」より2017年の出荷額・生産量を抽出

# CCUによる合成方法は有毒なホスゲンを代替することが可能である

## ポリカーボネート合成法の比較

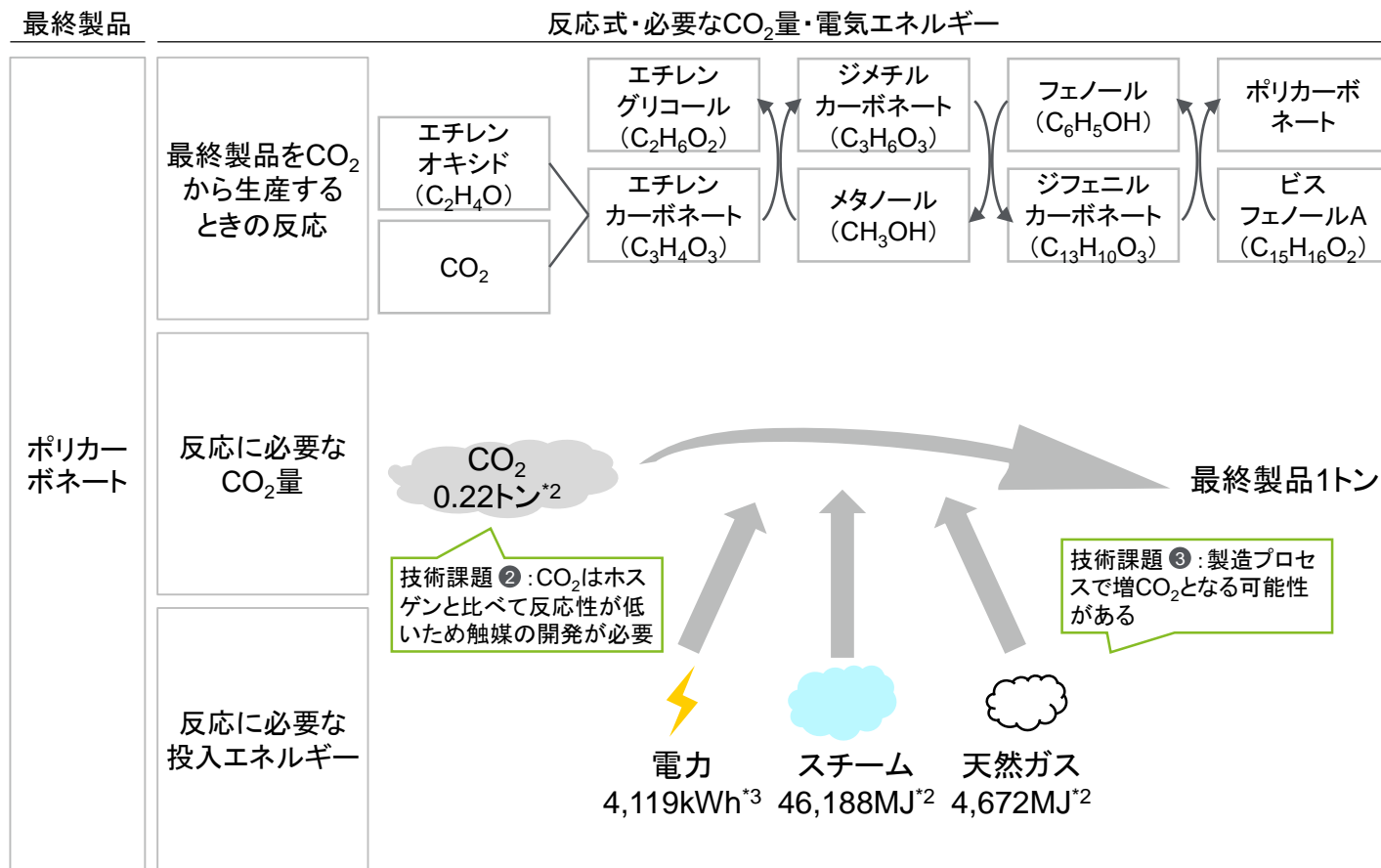
有望技術	製造プロセス	CO <sub>2</sub> 収支						
ホスゲン法	<pre> graph LR     CO[CO] --&gt; Phosgene[ホスゲン]     Chlorine[塩素] --&gt; Phosgene     Phosgene --&gt; PC[ポリカーボネート]     NaOH[NaOH] --&gt; PC     BisphenolA[ビスフェノールA] --&gt; PC     NaOH --&gt; NaCl[NaCl]         </pre>	<table border="1"> <tr> <td>製造工程 排出</td> <td>7.2t-co<sub>2</sub>/t<sup>1</sup></td> </tr> <tr> <td>原料吸収</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>正味排出</td> <td>7.2t-co<sub>2</sub>/t</td> </tr> </table>	製造工程 排出	7.2t-co <sub>2</sub> /t <sup>1</sup>	原料吸収	-	正味排出	7.2t-co <sub>2</sub> /t
製造工程 排出	7.2t-co <sub>2</sub> /t <sup>1</sup>							
原料吸収	-							
正味排出	7.2t-co <sub>2</sub> /t							
非ホスゲン法 (旭化成)	<pre> graph LR     EO[エチレンオキシド] --&gt; EC[エチレンカーボネート]     CO2[CO2] --&gt; EC     EG[エチレングリコール] --&gt; DMC[ジメチルカーボネート]     EC --&gt; DMC     DMC --&gt; M[メタノール]     M --&gt; P[フェノール]     P --&gt; PC[ポリカーボネート]     BisphenolA[ビスフェノールA] --&gt; PC     P --&gt; DPC[ジフェニルカーボネート]     DPC --&gt; PC         </pre>	<table border="1"> <tr> <td>製造工程 排出</td> <td>9.2t-co<sub>2</sub>/t<sup>1</sup> ※スチーム使用量削減 など改良の余地あり</td> </tr> <tr> <td>原料吸収</td> <td>-0.22t-co<sub>2</sub>/t<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>正味排出</td> <td>8.9t-co<sub>2</sub>/t</td> </tr> </table>	製造工程 排出	9.2t-co <sub>2</sub> /t <sup>1</sup> ※スチーム使用量削減 など改良の余地あり	原料吸収	-0.22t-co <sub>2</sub> /t <sup>2</sup>	正味排出	8.9t-co <sub>2</sub> /t
製造工程 排出	9.2t-co <sub>2</sub> /t <sup>1</sup> ※スチーム使用量削減 など改良の余地あり							
原料吸収	-0.22t-co <sub>2</sub> /t <sup>2</sup>							
正味排出	8.9t-co <sub>2</sub> /t							

\*1:RITE「環境にやさしい化学反応プロセスに関する一考察-ポリカーボネート製造法の評価-」をもとに算出、\*2:RITE「平成22年度温暖化対策基盤整備関連調査(二酸化炭素固定化・有効利用技術等調査)」に記載のCO<sub>2</sub>固定化量0.22t/tを記載



# CO<sub>2</sub>からポリカーボネートを生成する際に必要なCO<sub>2</sub>量と化学原料量を算出した

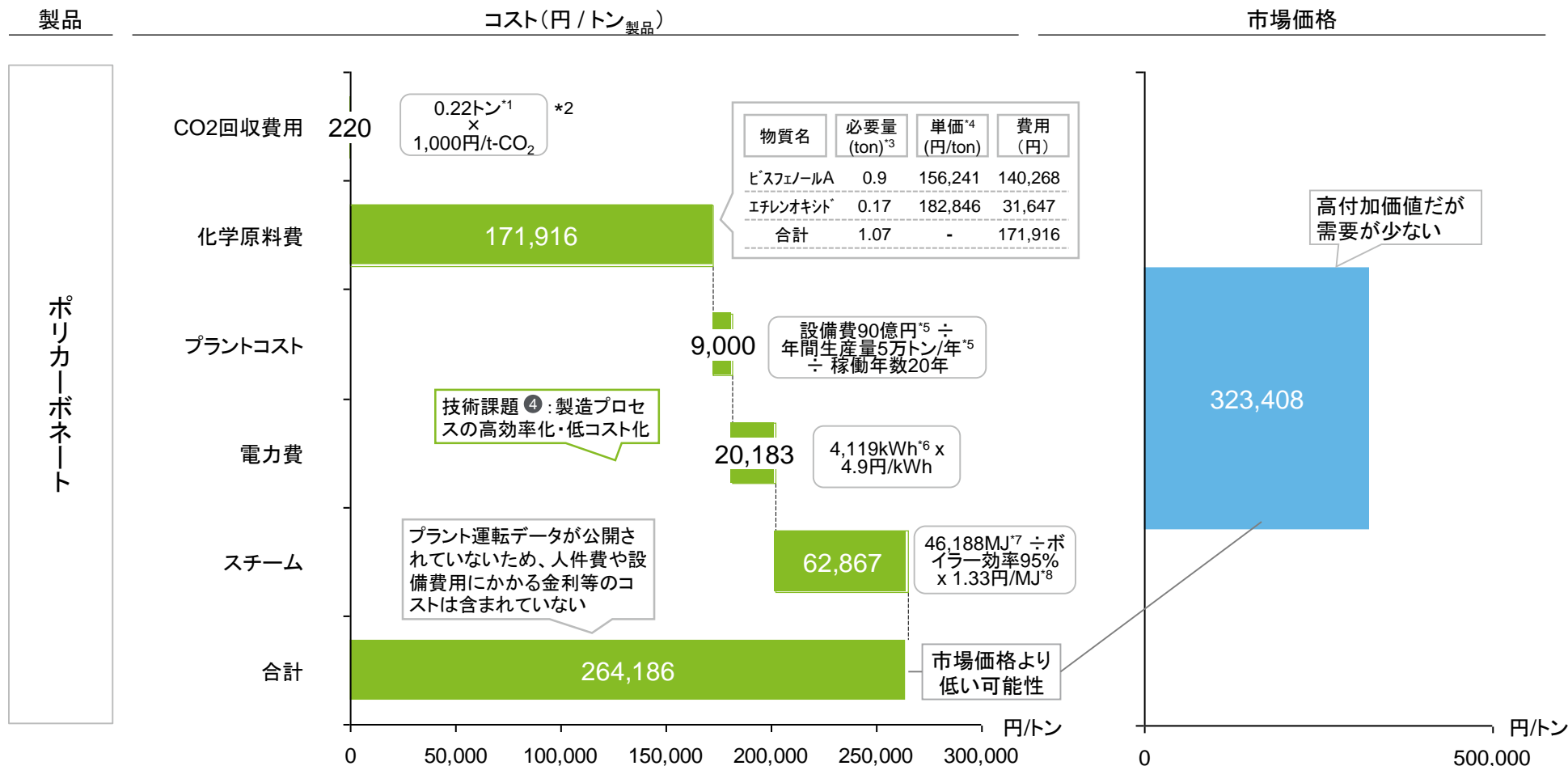
最終製品1トンを生産するときの必要原料・エネルギー\*1 (RITEシミュレーションの場合)



\*1:原料費と電解に必要な電気エネルギーのみ考慮、\*2:RITE「平成22年度温暖化対策基盤整備関連調査(二酸化炭素固定化・有効利用技術等調査)」、\*3:RITE「平成22年度温暖化対策基盤整備関連調査(二酸化炭素固定化・有効利用技術等調査)」に記載の電力(14,827MJ)をkWhに変換

# CO<sub>2</sub>を出発原料とするポリカーボネートの製造コストを試算した

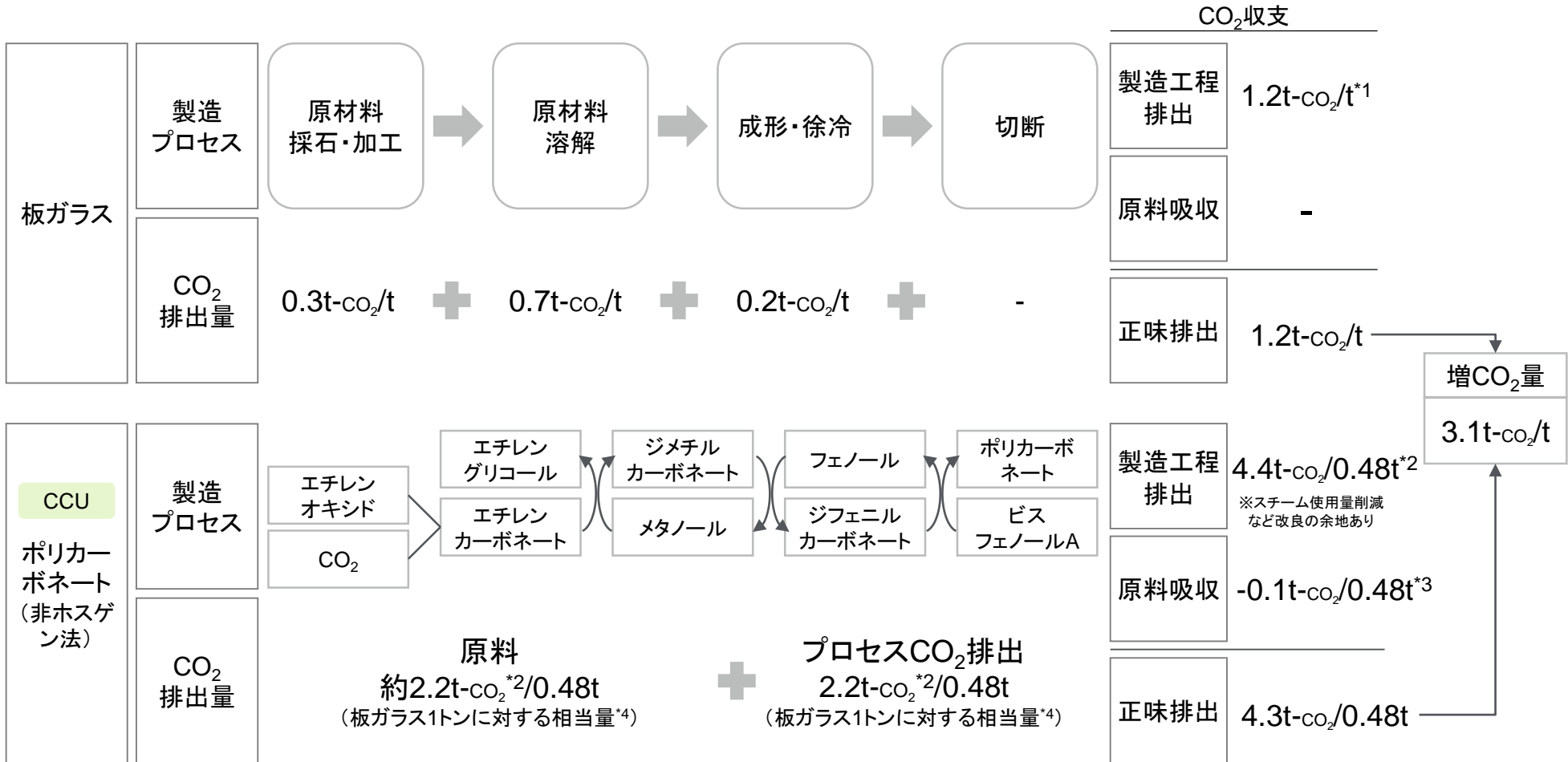
## ポリカーボネートの製造コストと市場価格



\*1:RITE「平成22年度温暖化対策基盤整備関連調査(二酸化炭素固定化・有効利用技術等調査)」、\*2:原料として必要となるCO<sub>2</sub>量にCO<sub>2</sub>の目標回収コスト1,000円/t-CO<sub>2</sub>を乗じ算出、\*3:プロセス中で再利用される原料量を控除し、製造の度に必要となるエチレンオキシド、CO<sub>2</sub>、ビスフェノールAの必要量を算出、\*4:必要となる原料は自社製造していると考えられるため、経済産業省生産動態統計から抽出した出荷額を某化学メーカーの2019年3月期の売上総利益率で割り算出、\*5:Fukuoka et al., "A novel non-phosgene polycarbonate production process using by-product CO<sub>2</sub> as starting material"より抽出、\*6:RITE「平成22年度温暖化対策基盤整備関連調査(二酸化炭素固定化・有効利用技術等調査)」に記載のエネルギー原単位(MJ)をkWhに変換、\*7:RITE「平成22年度温暖化対策基盤整備関連調査(二酸化炭素固定化・有効利用技術等調査)」より抽出、\*8:平成30年のC重油平均単価56円/lをC重油標準発熱量41.78MJ/lで割り算出

# 板ガラスをCCUで製造したポリカーボネートで置き換えるとCO<sub>2</sub>排出量が増加する

## ポリカーボネートの従来製法とCCUのプロセスCO<sub>2</sub>収支



\*1:日本板硝子Website、\*2:RITE「環境にやさしい化学反応プロセスに関する一考察-ポリカーボネート製造法の評価-」\*3:RITE「平成22年度温暖化対策基盤整備関連調査(二酸化炭素固定化・有効利用技術等調査)」をもとに算出 \*4:板ガラスとポリカの比重をそれぞれ2.5、1.2として算出

## 4. ポリカーボネート

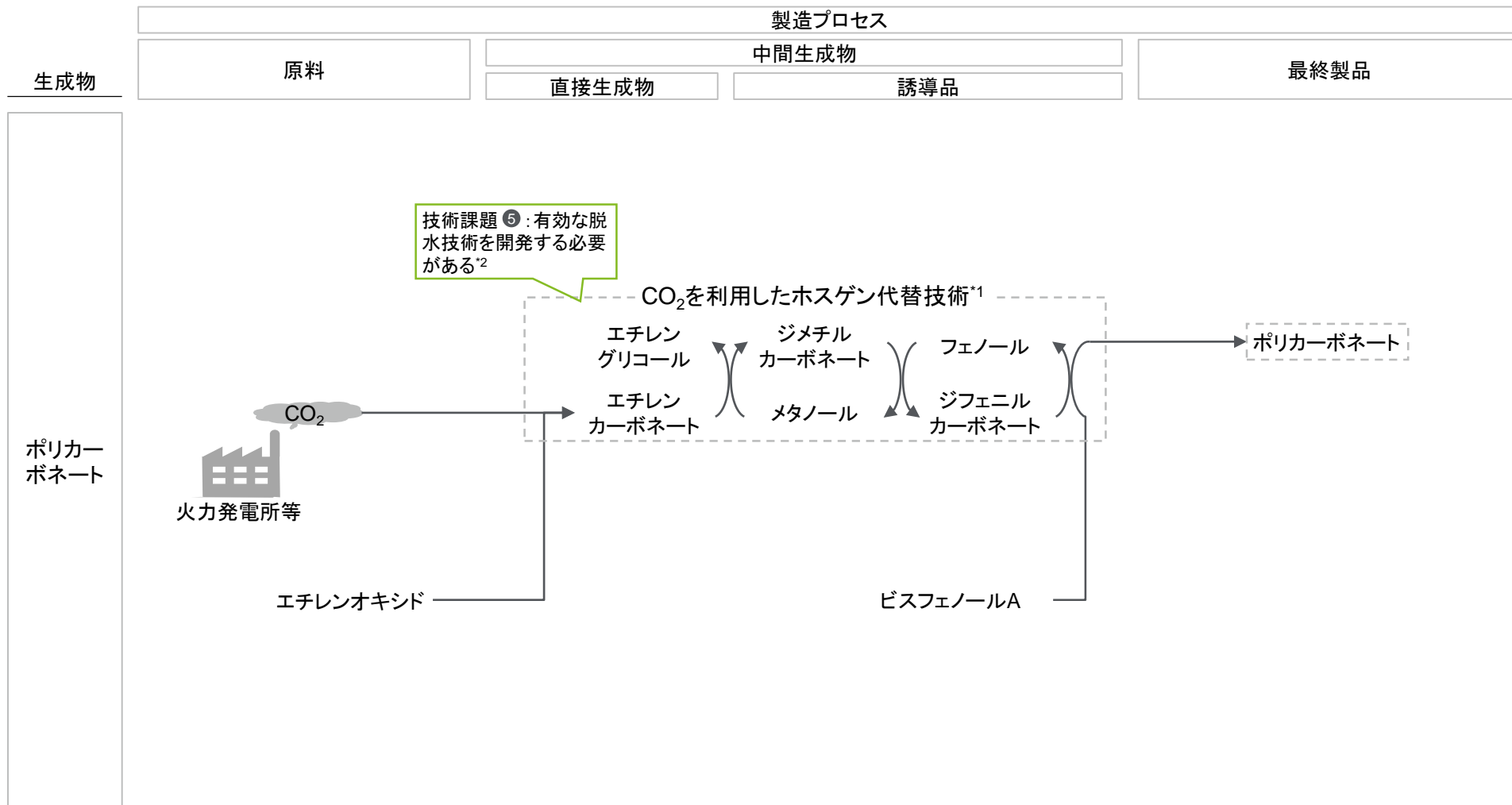
4.1 CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルの推計

4.2 コストターゲットの決定

**4.3 研究開発要素の検討**

# ポリカーボネートは効率的な製法の開発のほか 最終製品の用途開発が研究開発要素になると考えられる

## ポリカーボネートの研究開発要素



\*1:ホスゲン代替技術の一例として反応プロセスを記載、\*2:脱水剤として使用したエチレンオキシドがエチレングリコールになるプロセスではエチレングリコールを脱水して再使用する場合とエチレングリコールとして有価販売する場合がある、脱水剤を脱水して再使用する反応は吸熱反応でありエネルギー収支に影響を与えることから技術課題として記載した

# 技術課題から技術開発要素を抽出した

## 技術課題と研究開発要素

ポリカーボネート	技術課題	研究開発要素
ホスゲン代替技術	① 用途開発	用途拡大を目的とした板ガラス等への代替方法の確立
	② 触媒の開発	ホスゲンよりも反応性が低いCO <sub>2</sub> を活性化させる触媒技術の開発
	③ 増CO <sub>2</sub> となる可能性	LCAによる詳細なCO <sub>2</sub> 排出量の解析
	④ 高効率化・低コスト化	既存のCCUプロセスよりもCO <sub>2</sub> 排出量の少ない製造方法の確立
	⑤ 脱水技術の開発	脱水剤を再使用するための効率的な脱水技術の開発

## 5. 有望性・実現性の検討

## ⑤ 有望性・実現性の検討

# 各有望技術が実用化された場合に想定されるCO<sub>2</sub>固定化量等から有望性をコストターゲット達成までに要する期間から実現性を検討した

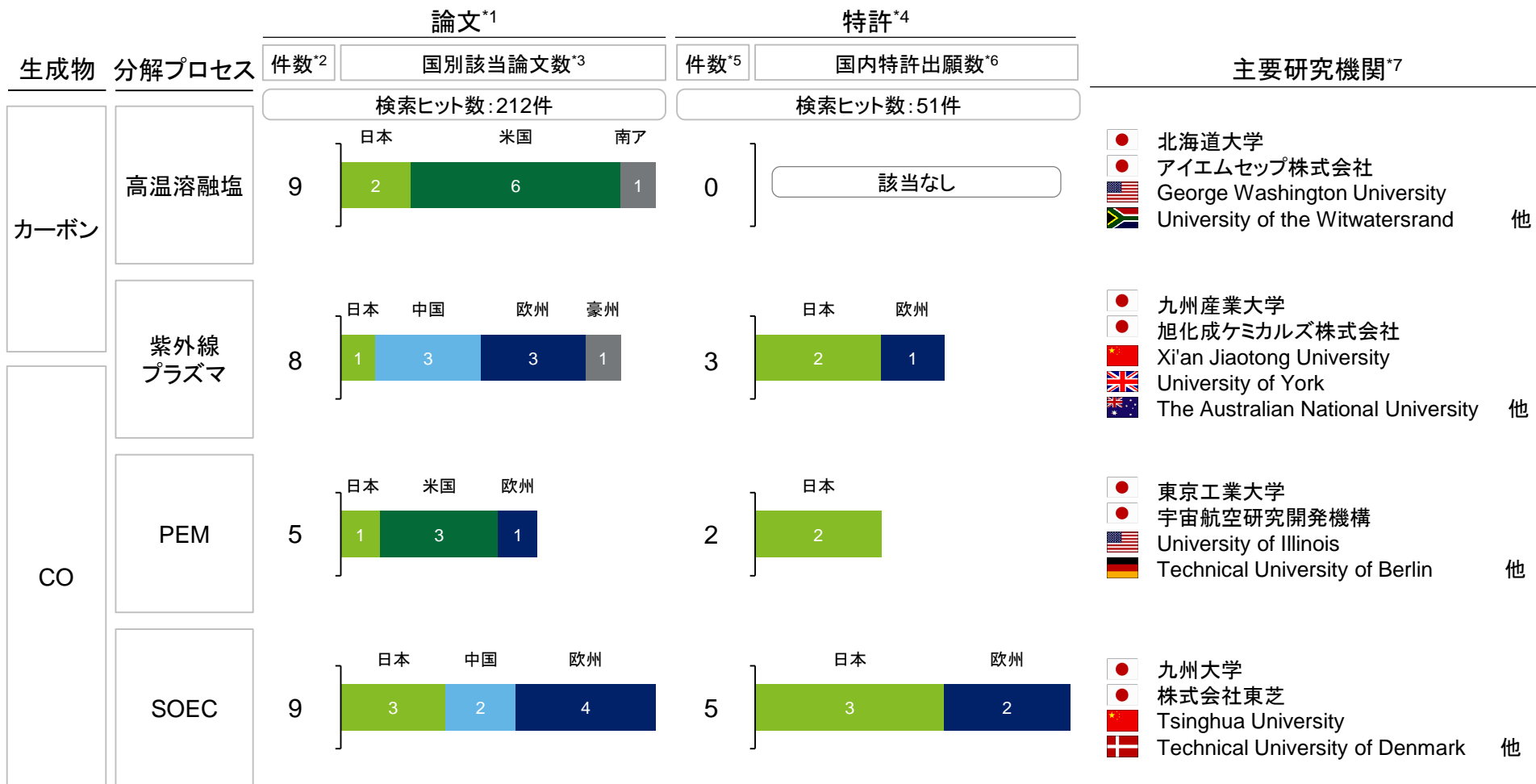
## 有望性・実現性の検討

有望技術	有望性	実現性
カーボン・CO	<b>高付加価値な固定化が可能</b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ カーボンは高付加価値な有価物化としてCO<sub>2</sub>の固定化が可能</li><li>✓ COは汎用性が高く、その需要から固定化ポテンシャルが膨大</li></ul>	<b>再エネの普及により実現可能</b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ CO<sub>2</sub>還元によくのエネルギー投入が必要なため、安価な再エネ電力が普及すれば実現性は高い</li></ul>
炭酸塩	<b>未利用廃棄物に固定化可能</b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ 安価に調達できる未利用廃棄物に対してCO<sub>2</sub>の固定化が可能</li><li>✓ 有償販売できればさらに有望性は高まる</li></ul>	<b>早期に実現可能</b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ 自発的に反応が進行することからエネルギー投入が少ないため、早期実現が可能</li></ul>
ポリカーボネート	<b>有望な触媒の開発が必要</b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ 増CO<sub>2</sub>となる可能性があるため、エネルギー投入を少なくする有望な触媒が開発されれば可能性はある</li><li>✓ 用途開発と並行して、求められる機能性を担保できれば有望</li></ul>	<b>早期に実現可能</b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ 水素を必要としないため、安価な水素の普及を待たずに実現可能</li></ul>



# CO<sub>2</sub>由来のカーボン・CO製造に係る先行研究は主に日本と米国で実施されている

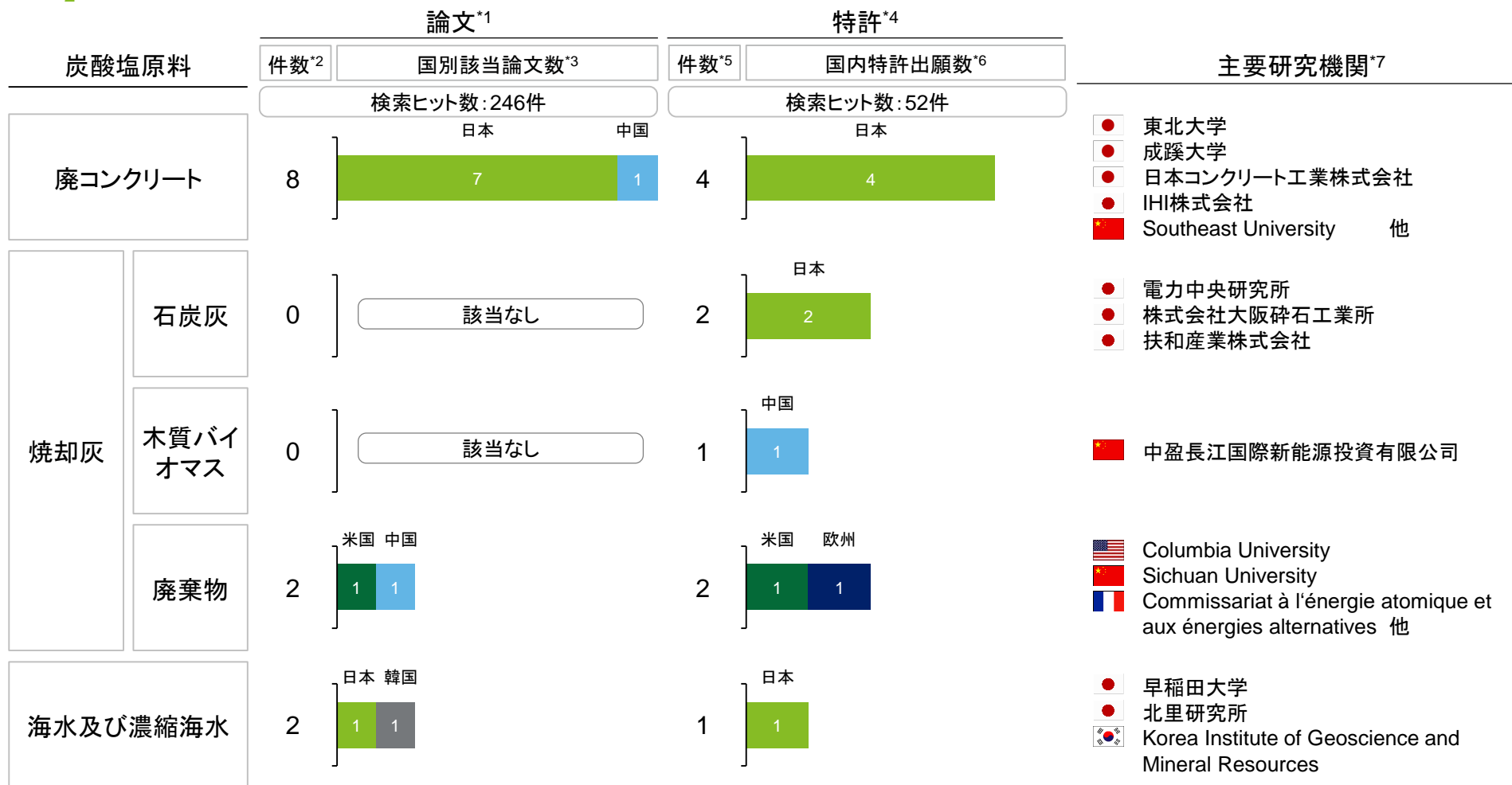
## CO<sub>2</sub>固定化技術の主要研究機関



\*1: Google Scholar及びCiNiiを用いて日本語・英語で2013~2017年(5年間)に発行された論文を検索した結果をもとに作成、\*2: 論文タイトルに検索ワードを含む論文の検索結果のうち二酸化炭素の固定化において有用と思われる論文数、\*3: 同一論文に複数の研究機関が関連する場合は主席執筆者の研究機関を計上、\*4: 特許情報プラットフォームJ-Plat Patを用いて2013~2017年(5年間)に公知または発行された特許を検索した結果をもとに作成、\*5: 特許の要約/抄録に検索ワードを含む論文の検索結果のうち二酸化炭素の固定化において有用と思われる国内特許の出願件数、\*6: 同一特許に複数の出願人が関連する場合は筆頭出願人の研究機関を計上、\*7: 論文及び特許の検索結果と有識者へのヒアリングより抽出

# ⑤ 有望性・実現性の検討 特定の炭酸塩原料に特化した先行研究は少ないが 廃コンクリートは日本において研究例がある

## CO<sub>2</sub>固定化技術の主要研究機関

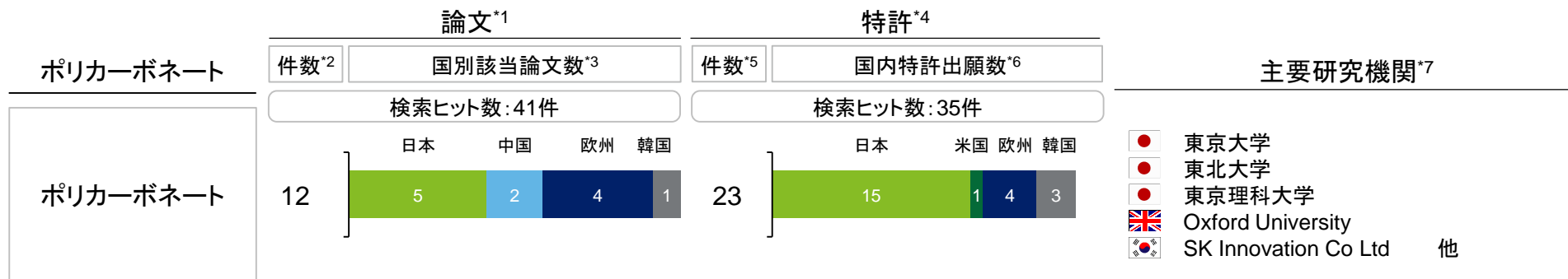


\*1: Google Scholar及びCiNiiを用いて日本語・英語で2013~2017年(5年間)に発行された論文を検索した結果をもとに作成、\*2: 論文タイトルに検索ワードを含む論文の検索結果のうち二酸化炭素の固定化において有用と思われる論文数、\*3: 同一論文に複数の研究機関が関連する場合は主席執筆者の研究機関を計上、\*4: 特許情報プラットフォームJ-Plat Patを用いて2013~2017年(5年間)に公知または発行された特許を検索した結果をもとに作成、\*5: 特許の要約/抄録に検索ワードを含む論文の検索結果のうち二酸化炭素の固定化において有用と思われる国内特許の出願件数、\*6: 同一特許に複数の出願人が関連する場合は筆頭出願人の研究機関を計上、\*7: 論文及び特許の検索結果と有識者へのヒアリングより抽出

## ⑤ 有望性・実現性の検討

# ポリカーボネートの中でもポリカーボネートの研究実績は世界的に多く 中でも日本において研究開発が活発に行われている

## CO<sub>2</sub>固定化技術の主要研究機関

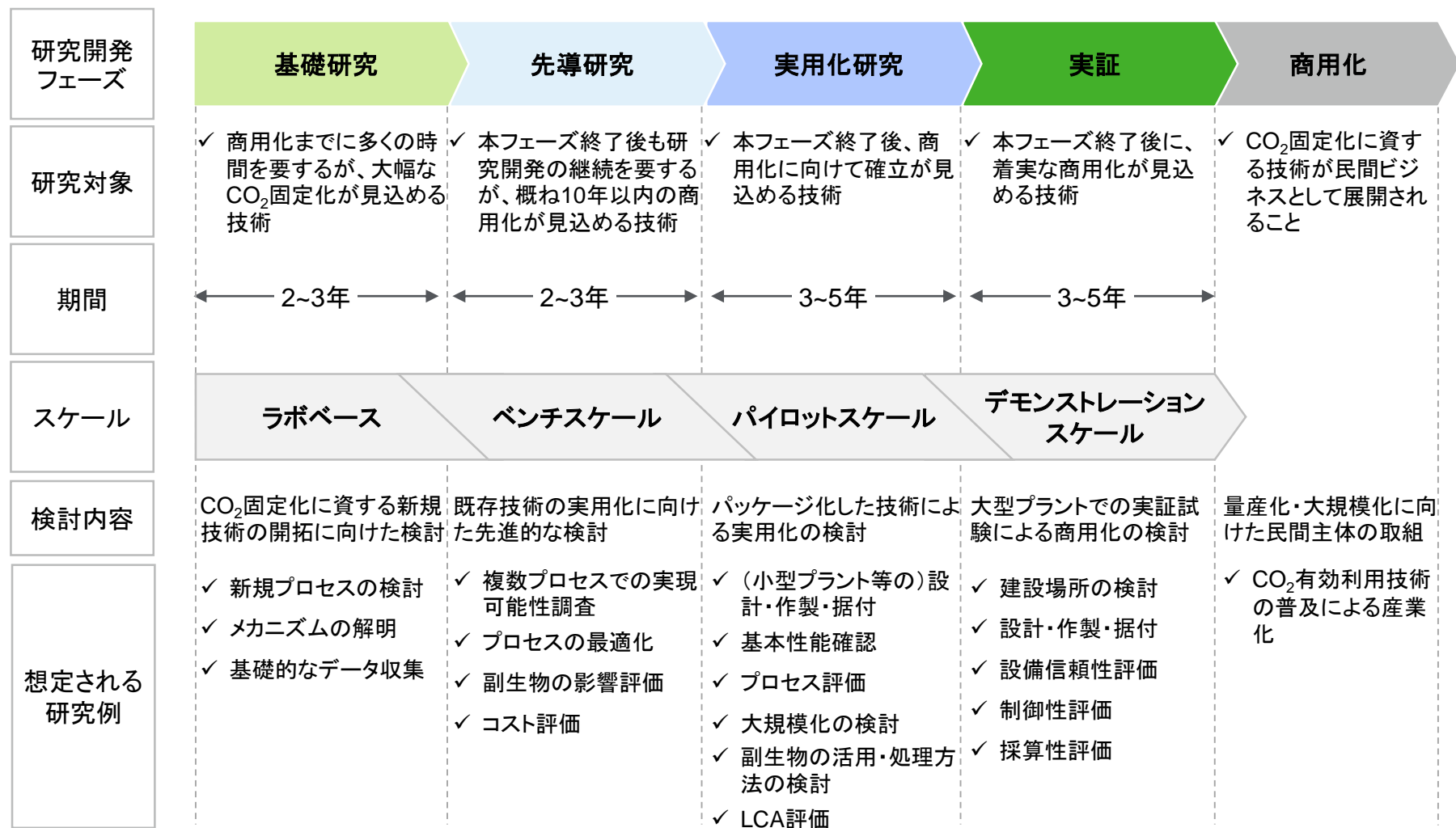


\*1: Google Scholar及びCiNiiを用いて日本語・英語で2013~2017年(5年間)に発行された論文を検索した結果をもとに作成、\*2: 論文タイトルに検索ワードを含む論文の検索結果のうち二酸化炭素の固定化において有用と思われる論文数、\*3: 同一論文に複数の研究機関が関連する場合は主席執筆者の研究機関を計上、\*4: 特許情報プラットフォームJ-Plat Patを用いて2013~2017年(5年間)に公知または発行された特許を検索した結果をもとに作成、\*5: 特許の要約/抄録に検索ワードを含む論文の検索結果のうち二酸化炭素の固定化において有用と思われる国内特許の出願件数、\*6: 同一特許に複数の出願人が関連する場合は筆頭出願人の研究機関を計上、\*7: 論文及び特許の検索結果と有識者へのヒアリングより抽出

## 6. 研究開発シナリオの検討

# 要素技術開発の開始時期や技術間の優先順位を考慮した計画を策定した

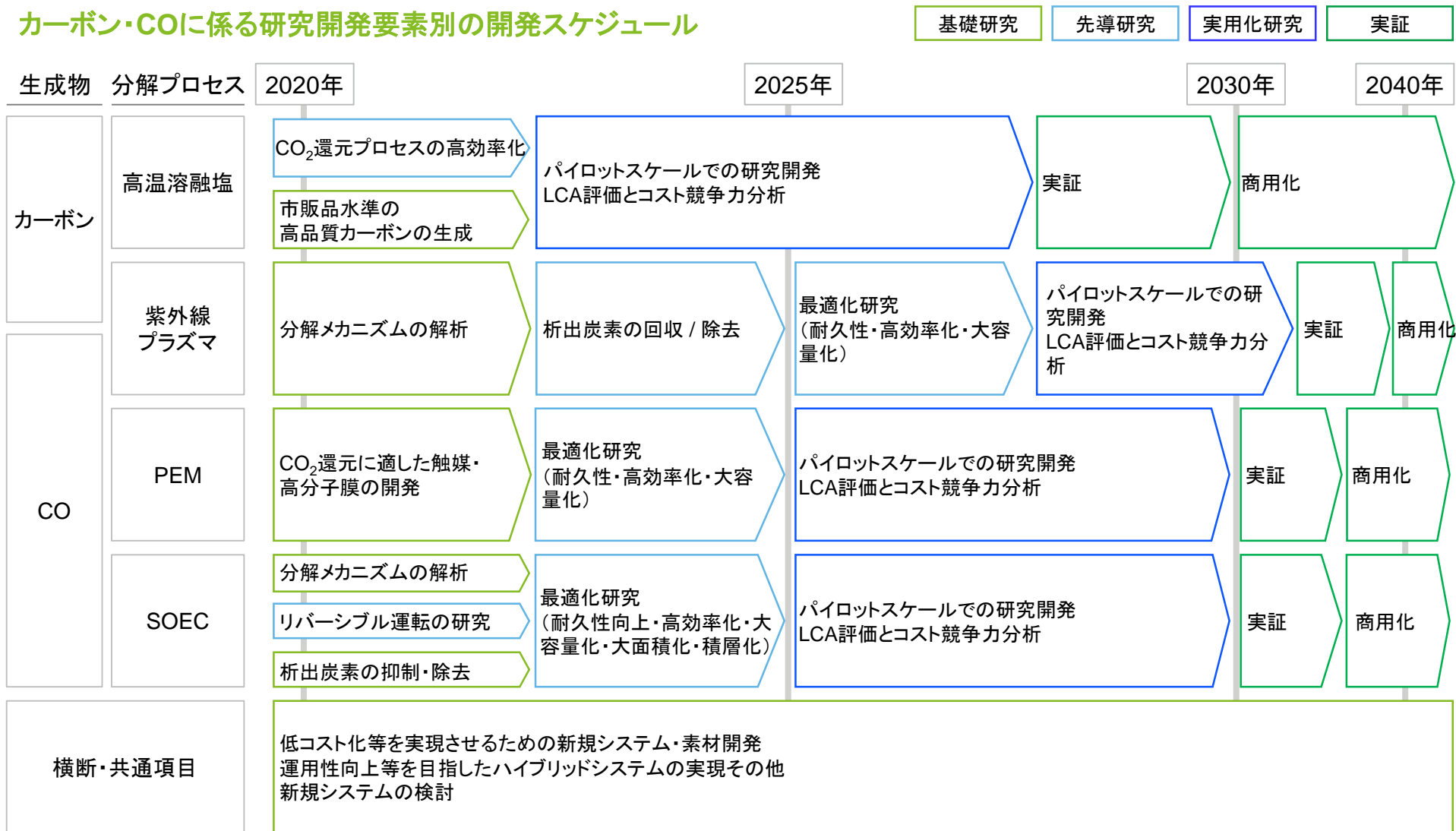
## NEDO事業における研究開発フェーズの一例\*1



\*1:各フェーズにおける研究開発体制は、研究機関、サプライヤー、メーカーなどが考えられるが、どのフェーズをどの団体が担当するかは特定されるものではない

# 要素技術開発の開始時期や技術間の優先順位を考慮した計画を策定した

## カーボン・COに係る研究開発要素別の開発スケジュール



# 要素技術開発の開始時期や技術間の優先順位を考慮した計画を策定した

## 炭酸塩生成プロセスに係る研究開発要素別の開発スケジュール



先導研究    実用化研究    実証

## ⑥ 研究開発シナリオの検討 研究開発シナリオの円滑な進捗のためには 技術課題以外にも調査・検討すべき課題がある

### 並行調査事項・検討課題リスト(1/2)

有望技術	項目	調査・検討すべき課題	詳細
共通	横断的な研究開発	個別技術に関する研究開発の設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 同一条件での実験が行われておらず、エネルギー効率等の比較ができていないため、研究開発計画の策定と研究結果の横断的な分析を行う</li> <li>✓ 横断的な分析で得られた結果をもとに適切な数値目標を設定し、研究開発における定量的な指標の導入を図る</li> </ul>
		各研究開発によって得られた結果の比較分析	
		的確な技術マネジメント体制の構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 研究開発シナリオの円滑な遂行のため、委員会等の各研究開発プロジェクトをマネジメントする体制の構築を図る</li> </ul>
	実用化の推進	メーカー等の事業者との協力体制の構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ メーカーの巻き込みができていないため、関心のあるメーカー等を調査し、研究機関による基礎研究の結果を提供することで協力体制の構築を図る</li> </ul>
		商用化した際の経済合理性の分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 得られた技術が商用化できるかを詳細なコスト分析を実施することで事前に判断を行う</li> </ul>
	技術の海外展開	競争となる技術の海外調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 電解技術は欧米諸国で研究が活発であり、競争となる海外技術を調査する</li> <li>✓ 淡水化プラントを活用した濃縮海水への固定化技術等は国内の市場が限られており、中東諸国との連携を検討する</li> </ul>
		国産技術の海外展開の推進	
	規制面における検討	社会システムの構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 技術的にCO<sub>2</sub>有効利用技術が実現した場合でも規制的な側面から商用化に至らない可能性があるため、障害となり得る規制の特定と適切な制度の検討を実施する</li> </ul>



## ⑥ 研究開発シナリオの検討

# 研究開発シナリオの円滑な進捗のためには 技術課題以外にも調査・検討すべき課題がある

### 並行調査事項・検討課題リスト(2/2)

有望技術	項目	調査・検討すべき課題	詳細
カーボン・CO	分解技術の比較分析	各分解技術の比較分析	✓ 電解・紫外線・プラズマ・人工光合成などのエネルギー効率やコストが比較されていないため、どの技術が有望かを分析する
炭酸塩	技術調査	新規炭酸塩原料の探索	✓ 随伴水や天然岩石、ペーパースラッジ等の新しい炭酸塩化原料を探索する
	実地調査	マテリアルフロー内の課題抽出	✓ 統計情報には集計されない単一施設の規模や処理方法等の実態を実地調査する
		廃棄物ごとのサンプル採取と組成分析	✓ 塩基性カルシウム化合物*1の含有率や組成は廃棄物ごとに差があるため、適切なサンプリングを行い、組成分析をする
	ビジネスモデルの確立	廃棄物ビジネスの検討	✓ 原料となる塩基性廃棄物*2の集約や炭酸化生成物あるいは反応残渣の埋立において新しいCO <sub>2</sub> ビジネスのモデルを策定する

\*1:Ca(OH)<sub>2</sub>等の(炭酸と反応する)塩基性を示すカルシウム化合物の総称、\*2:塩基性カルシウム化合物(\*1にて詳述)を含有している廃棄物の総称

# 提言

# 有望なCO<sub>2</sub>有効利用技術であるカーボン・COと炭酸塩において 研究開発シナリオを策定した

## CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルの推計／コストターゲットの決定

- 本調査では前年度調査によって選定された有望技術であるカーボン・CO、炭酸塩、ポリカーボネートにおいてCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルとコストターゲットを推計し、各技術における有望性と実現性を評価した。
- 有望技術ごとの有望性及び実現性の評価は以下のとおり取りまとめた。
  - ①カーボン・CO: 高付加価値な固定化が可能な点で有望性があり、再エネの普及により実現可能
  - ②炭酸塩: 安価な未利用廃棄物に固定化できる点で有望性があり、エネルギー投入が少ないため早期実現が可能
  - ③ポリカーボネート: 増CO<sub>2</sub>となる可能性があるため有望な触媒開発が必要であるが、水素を必要としないため早期実現が可能

## 研究開発要素の抽出

- CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルとコストターゲットの議論によって明らかにされた課題に対し、プロセス上で想定される技術的な課題を検討することで、研究開発によって解決すべき研究開発要素を抽出した。
  - ①カーボン・CO: 再生可能エネルギー由来電力の有効利用を可能とする電解効率の向上に資する技術の開発等
  - ②炭酸塩: 安価な原料調達が可能である未利用廃棄物へのCO<sub>2</sub>固定化技術と生成物の有価物化に向けた研究等
  - ③ポリカーボネート: 投入エネルギーが大きく増CO<sub>2</sub>となる可能性があるため、精密なLCA評価の実施と有望な触媒の開発等

## 提言

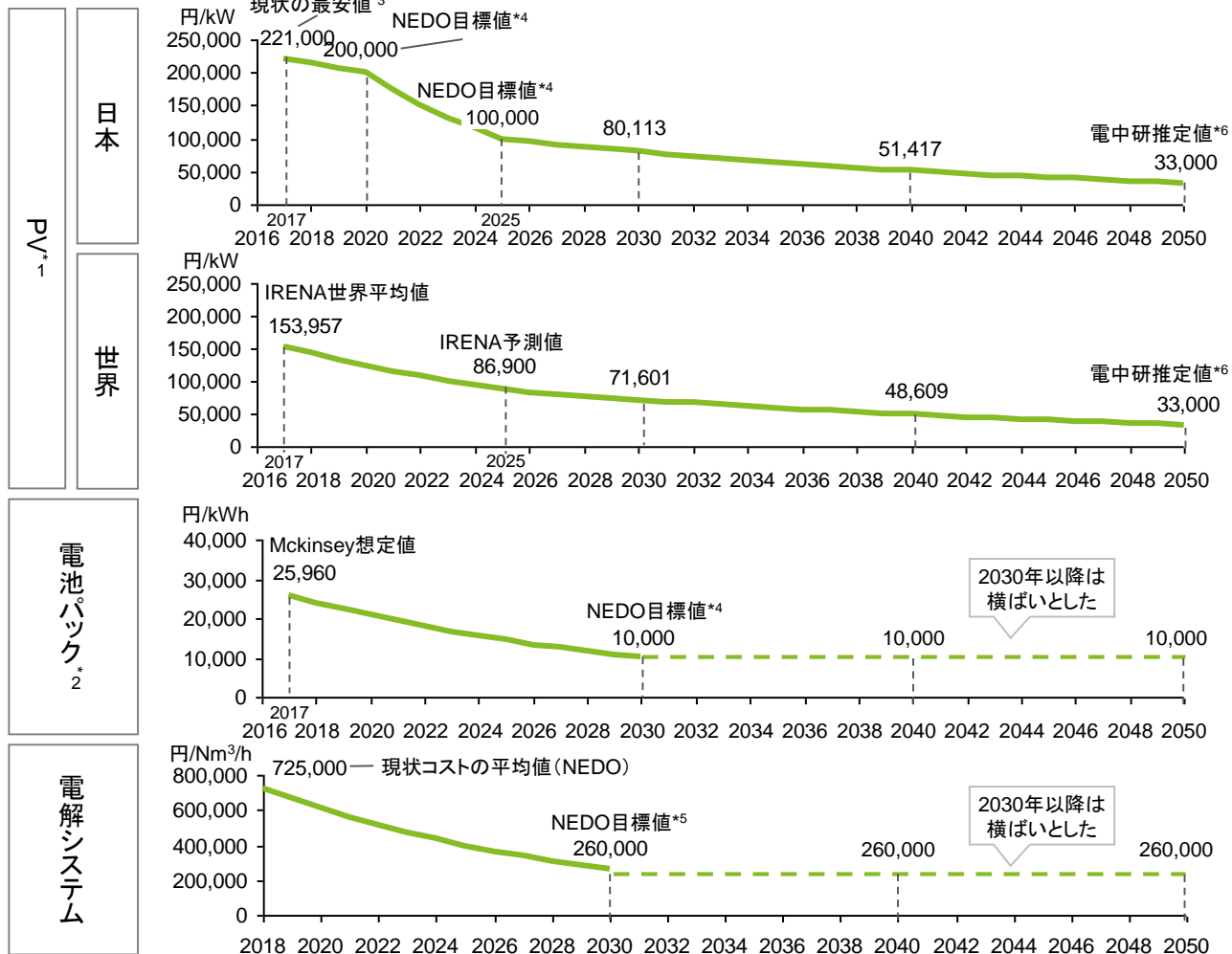
- 抽出された研究開発要素に対し、技術間の優先順位や研究開発に要する期間を考慮することで研究開発シナリオを策定した。
  - ①カーボン・CO: 2030年以降の安価な再エネ電力普及後の商用化を目指す
  - ②炭酸塩: 2025~2030年までの早期商用化を目指す
- 策定した研究開発シナリオの円滑な進捗のために、並行調査事項・検討課題リストを策定した。当該リストには横断的な研究開発や商用化を推進するための体制構築のほか、技術の海外展開や規制面における検討、実地調査の必要性など、研究開発シナリオを補完するための検討事項を取りまとめた。

# Appendix

# 現在は太陽光のコストが高いものの

# 再エネの導入が進むことで水素製造コストを低減可能である

## 太陽光・蓄電システムのシステムコスト



(円/kW)	2017	2030	2040	2050
PV(日本)	221,000	80,113	51,417	33,000

(円/kW)	2017	2030	2040	2050
PV(世界)	153,957	61,100	48,609	33,000

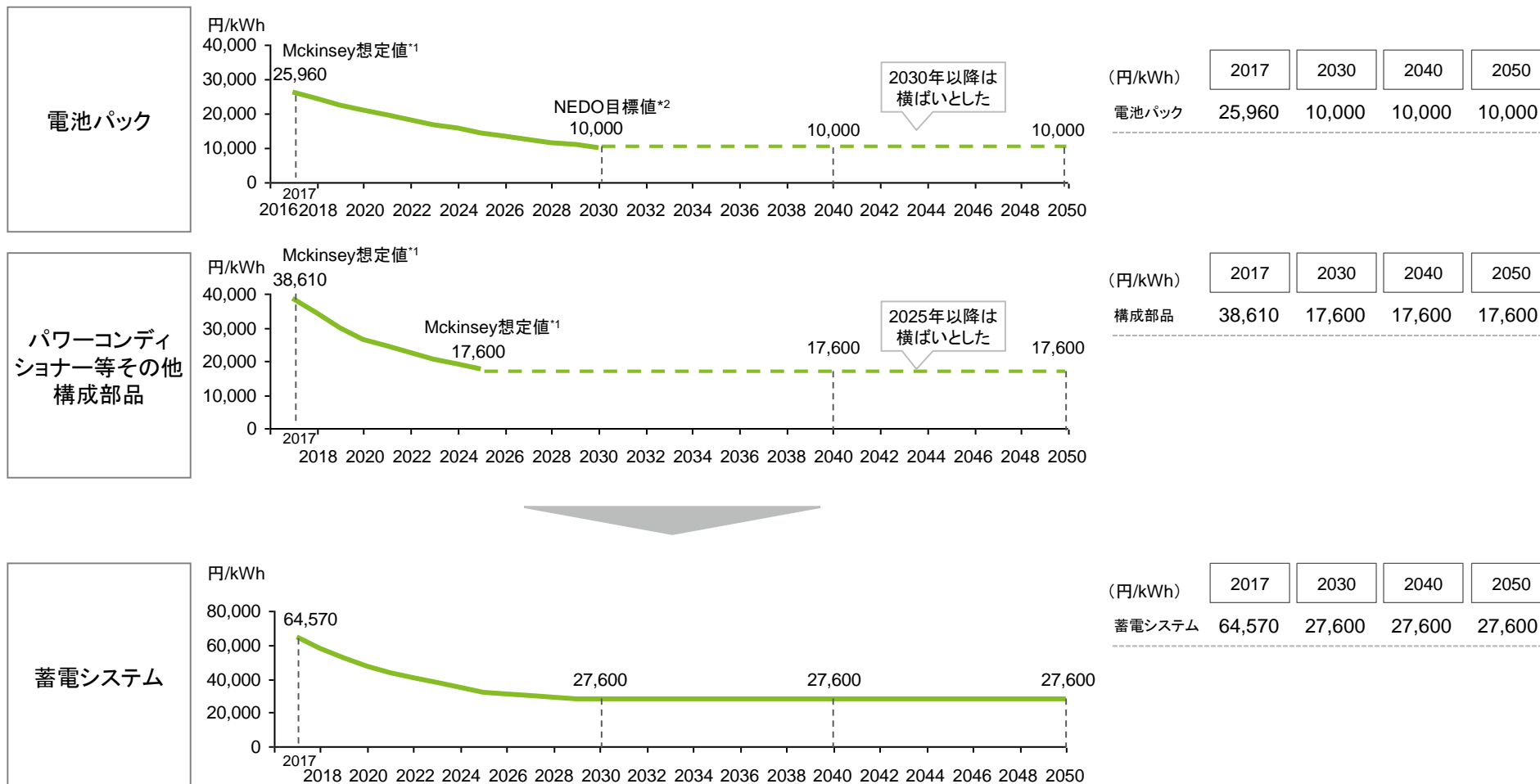
(円/kWh)	2017	2030	2040	2050
電池パック	25,960	10,000	10,000	10,000

(円/Nm <sup>3</sup> /h)	2018	2030	2040	2050
電解システム	725,000	260,000	260,000	260,000

\*1:調達価格等算定委員会「平成30年度以降の調達価格等に関する意見(案)」、資源エネルギー庁「FIT法改正を踏まえた調達価格の算定について」をもとに算出、\*2:Mckinsey, "The new rules of competition in energy storage"をもとに算出、\*3:調達価格等算定委員会「平成30年度以降の調達価格等に関する意見(案)」から抽出、\*4:NEDO Websiteより抽出、\*5:NEDO「革新型蓄電池実用化基盤技術開発」より抽出、\*6:電力中央研究所「2050年までの太陽光・風力発電の将来コストに関する考察」より抽出

# 蓄電システム価格は電池パック及びその他構成部品の価格動向を踏まえ2030年までに27,600円/kWhまで下落すると考えられる

## 蓄電システムの構成価格

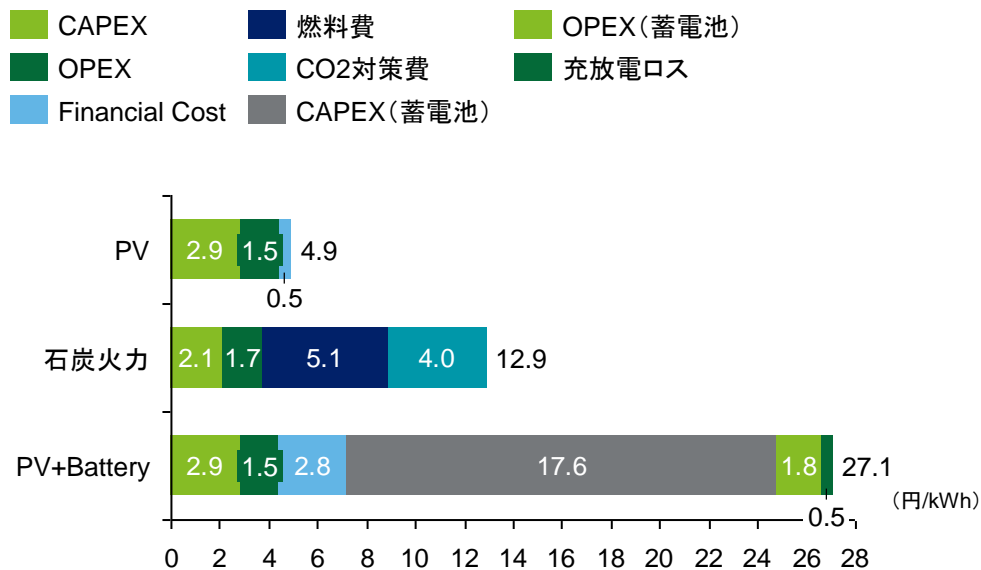


\*1:McKinsey, "The new rules of competition in energy storage"をもとに算出、\*2:NEDO「革新型蓄電池実用化基盤技術開発」より抽出

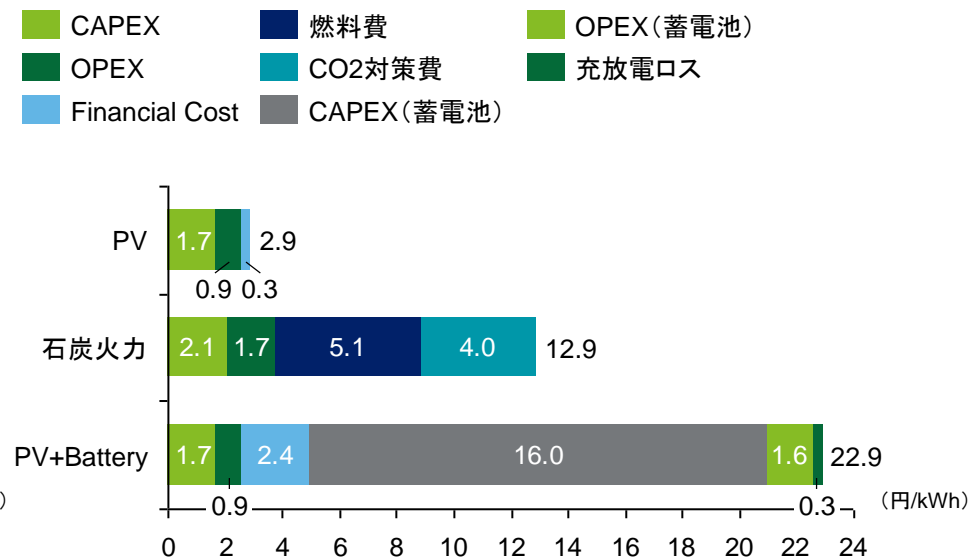
# Appendix 太陽光のLCOEはCAPEXの低下により 2030年から2040年にかけて約2円程度下落見込みである

## 発電コスト及びPV・蓄電池の発電容量感度

発電原価(2030年予測)



発電原価(2040年予測)



諸元

PV	PV: 10MW・8万円/kW、設備利用率: 15.8%、OPEX: CAPEXの2.6%、Debtレシオ: 70%、支払い利息: 3%
石炭火力	CAPEX: 25万円/kW、設備利用率: 70%、稼働年数: 40年、燃料費: \$133.45/t、CO2対策費(発電時に排出されるCO <sub>2</sub> 対策に要する費用): 4,630円/ton
PV+Battery	PV: 10MW、8万円/kW、蓄電池: 5MW、1万円/kWh 充電時間48時間、Debtレシオ: 70%、支払い利息: 3%、充放電ロス: 10%

諸元

PV	PV: 10MW・5.1万円/kW、設備利用率: 17.4%、OPEX: CAPEXの2.6%、Debtレシオ: 70%、支払い利息: 3%
石炭火力	CAPEX: 25万円/kW、設備利用率: 70%、稼働年数: 40年、燃料費: \$133.45/t、CO2対策費(発電時に排出されるCO <sub>2</sub> 対策に要する費用): 4.6円/ton
PV+Battery	PV: 10MW、5.1万円/kW、蓄電池: 5MW、1万円/kWh 充電時間48時間、Debtレシオ: 70%、支払い利息: 3%、充放電ロス: 10%

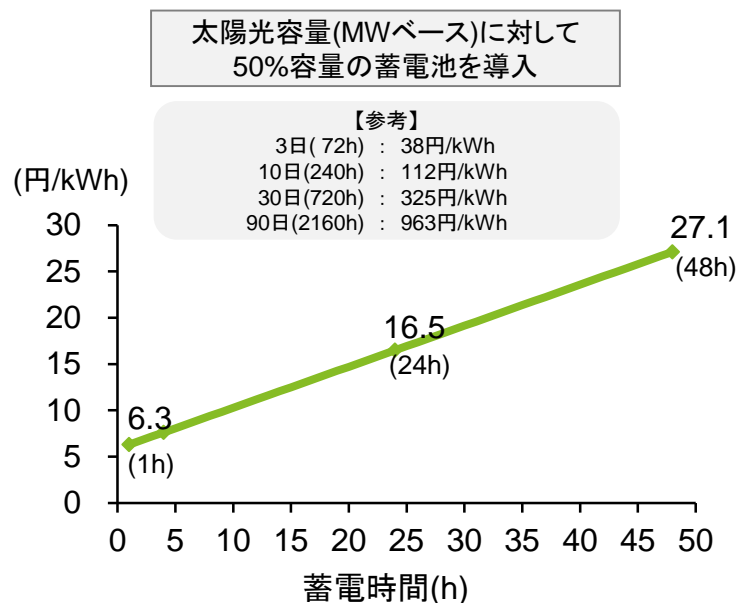
出所: 調達価格等算定委員会「平成30年度以降の調達価格等に関する意見(案)」、発電コスト検証ワーキンググループ「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告」

## 蓄電時間が長くなるほどコストが高くなるため

## 蓄電池がコスト競争力を持つためには蓄電時間が短時間であることが求められる

## 発電コスト及びPV・蓄電池の発電容量感度

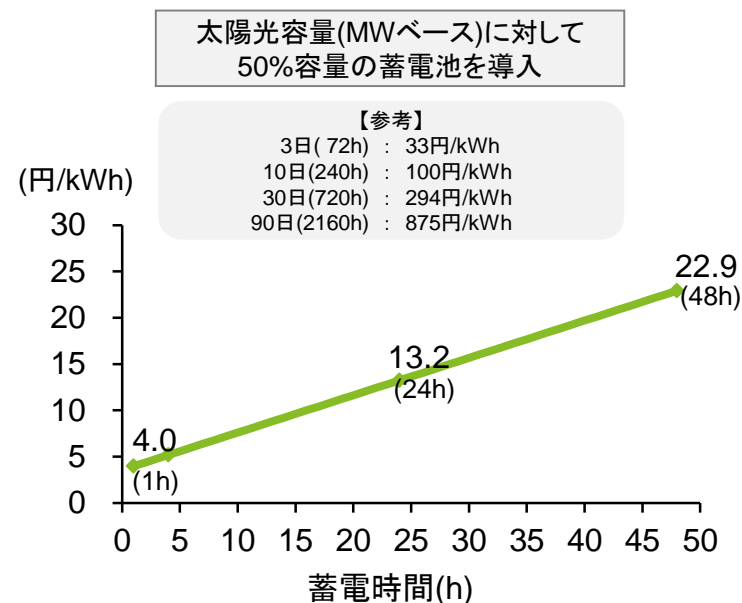
太陽光+蓄電池コストの蓄電容量(h)感度(2030年)



諸元

PV	PV: 10MW・8万円/kW、設備利用率: 15.8%、OPEX: CAPEXの2.6%、Debt ratio: 70%
Battery	蓄電池: 5MW、1万円/kWh
Financial Cost	Debtレシオ: 70%、支払い利息: 3%、充放電ロス: 10%

太陽光+蓄電池コストの蓄電容量(h)感度(2040年)



諸元

PV	PV: 10MW・5.1万円/kW、設備利用率: 17.4%、OPEX: CAPEXの2.6%、Debtレシオ: 70%
Battery	蓄電池: 5MW、1万円/kWh
Financial Cost	Debtレシオ: 70%、支払い利息: 3%、充放電ロス: 10%

出所: 調達価格等算定委員会「平成30年度以降の調達価格等に関する意見(案)」、発電コスト検証ワーキンググループ「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告」

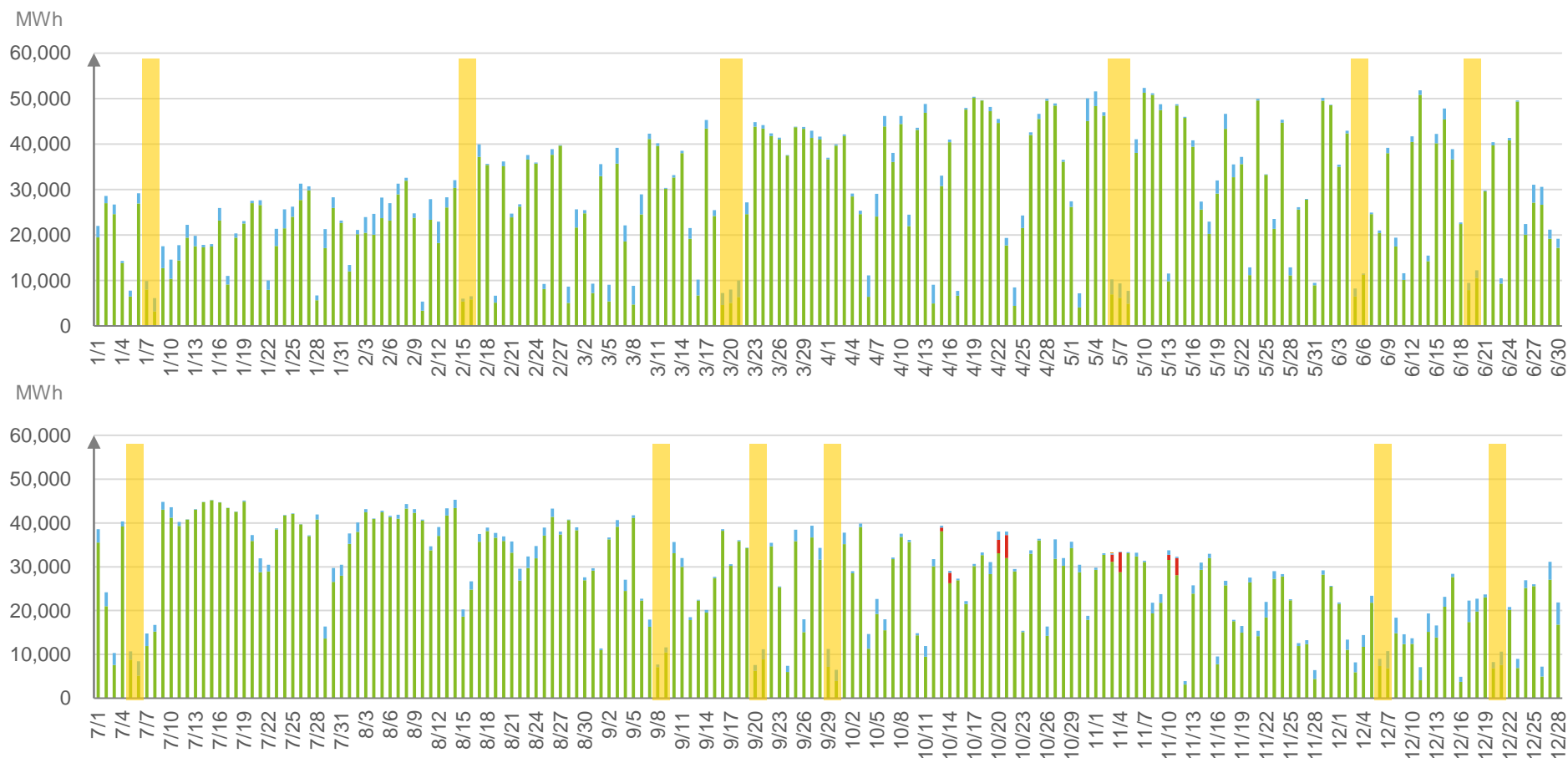


# 九州で太陽光・風力の発電量が著しく低下する頻度\*は年間約12回あり 再エネ・蓄電池のみで電力供給を行うには2日以上の充放電対応が求められる

九州では太陽光・風力の設備利用率が2日以上連続して5%を下回ることが年間約12回あった。従って、再エネ及び蓄電池だけで電力供給を行うためには2日以上の充放電に対応できる必要がある。

## 九州電力管内の太陽光・風力発電量(2018年)

■ 発電量低下期間  
■ 太陽光・実績[MWh] ■ 太陽光・抑制量[MWh] ■ 風力・実績[MWh] ■ 風力・抑制量[MWh]

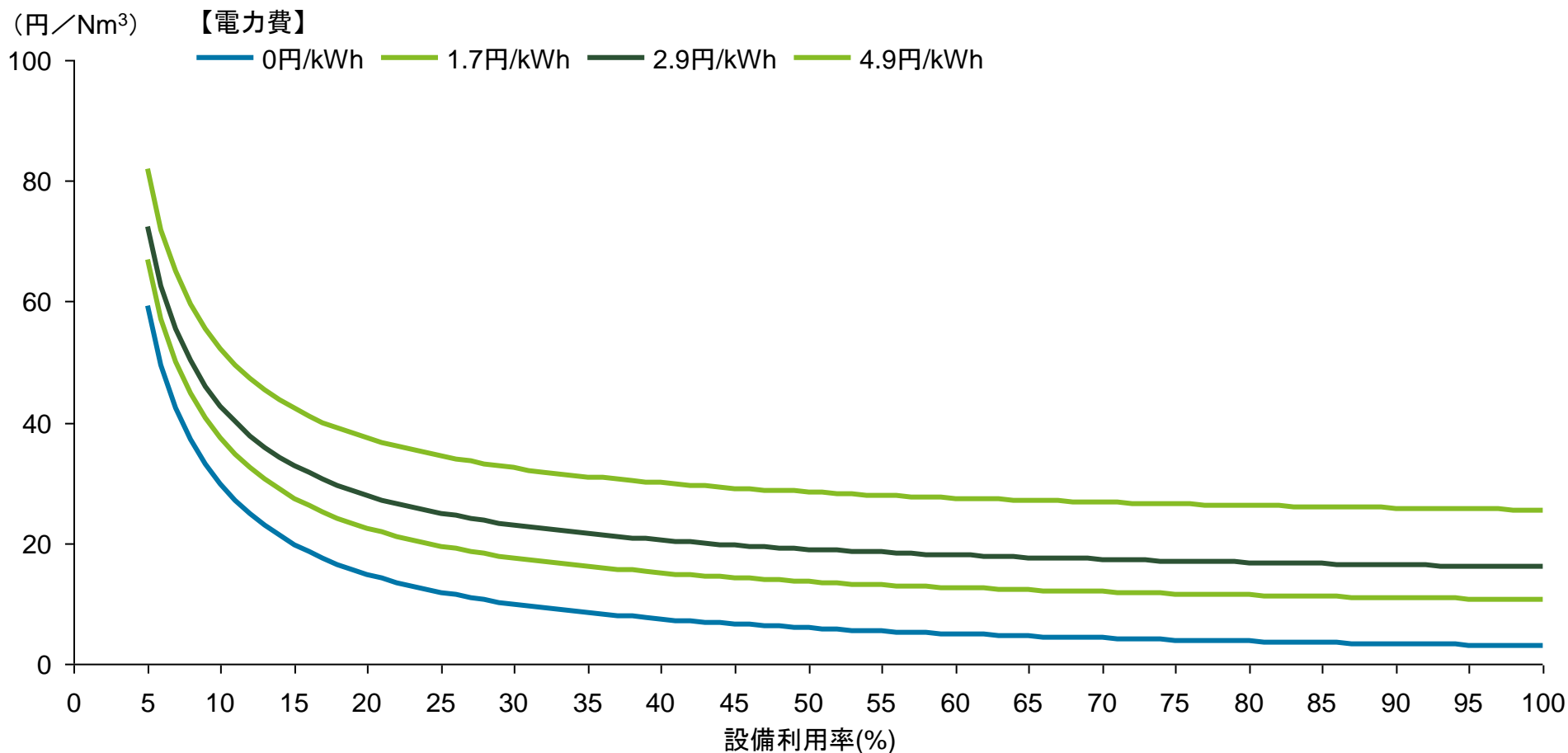


出所:九州電力「エリア需給実績」、「九州本土の再生可能エネルギーの接続状況」を基にDeloitte作成

\*設備利用率5%未満が2日以上連続する回数(2018年末の設備容量を基準とした)

# 電解システムコストよりも投入電力単価が水素製造コストに占める割合が大きいため 投入電力単価をどのように下げるのかが課題である

## 水電解コストの分析(1/2)



# 設備利用率が22%以上の領域では 電力価格の影響度が大きく 水電解水素の低価格化には 安価な電力が必須であるといえる

## 水電解コストの分析(2/2)

コスト計算の前提

条件別水電解コストの詳細(円/Nm<sup>3</sup>)

	算出使用値	現状の アルカリ水電解 <sup>*2</sup>	電力 価格	設備利用率					
				10%	30%	50%	70%	90%	
電力 原単位	4.5 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.5~7.0 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.9 円/kWh	CAPEX	29.7	9.9	5.9	4.2	3.3
				Energy cost	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
				合計	52.2	32.4	28.4	26.7	25.8
システム コスト	NEDO目標値 <sup>*1</sup> 5万円/kW (26万円/Nm <sup>3</sup> /h)	65~80 万円/Nm <sup>3</sup> /h	2.9 円/kWh	CAPEX	29.7	22.9	5.9	4.2	3.3
				Energy cost	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1
				合計	42.7	9.9	18.9	17.3	16.3
稼働 年数	10年	-	1.7 円/kWh	CAPEX	29.7	9.9	5.9	4.2	3.3
				Energy cost	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
				合計	37.3	17.5	13.6	11.9	10.9
稼働 年数	10年	-	0 円/kWh	CAPEX	29.7	9.9	5.9	4.2	3.3
				Energy cost	-	-	-	-	-
				合計	29.7	9.9	5.9	4.2	3.3

\*1:NEDO技術開発指針目標値、\*2:NEDO「水素の技術俯瞰・技術開発動向」(第二回検討会 資料5)

# 今後再エネが大量に導入されることにより発生する余剰電力を電解に用いることで 安価に水素を製造可能である

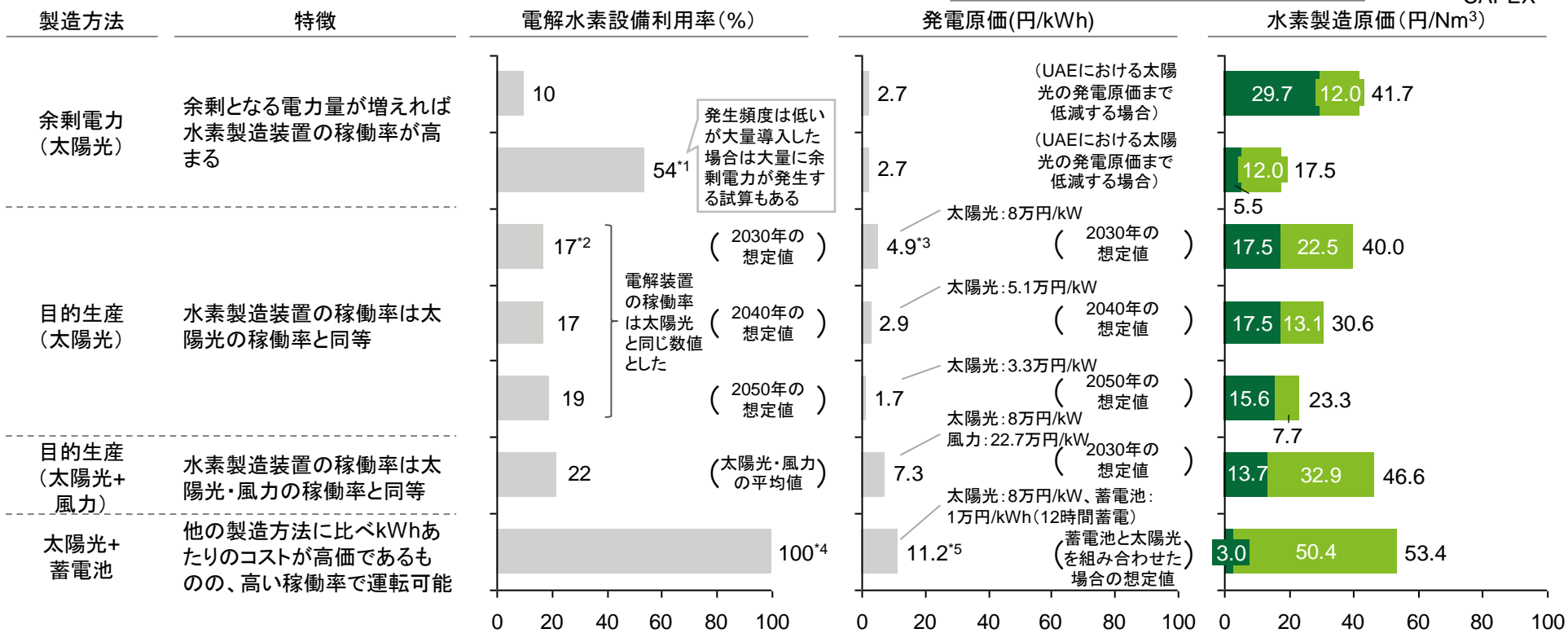
## 水電解の設備利用率と水素製造コスト(発電種別毎、2030年見込み)

【共通前提】

電解システムコスト: 26万円/kW (NEDO目標値)

電力原単位: 4.5kWh/Nm<sup>3</sup>

電力費  
電解装置の  
CAPEX



【水素製造原価算出方法】

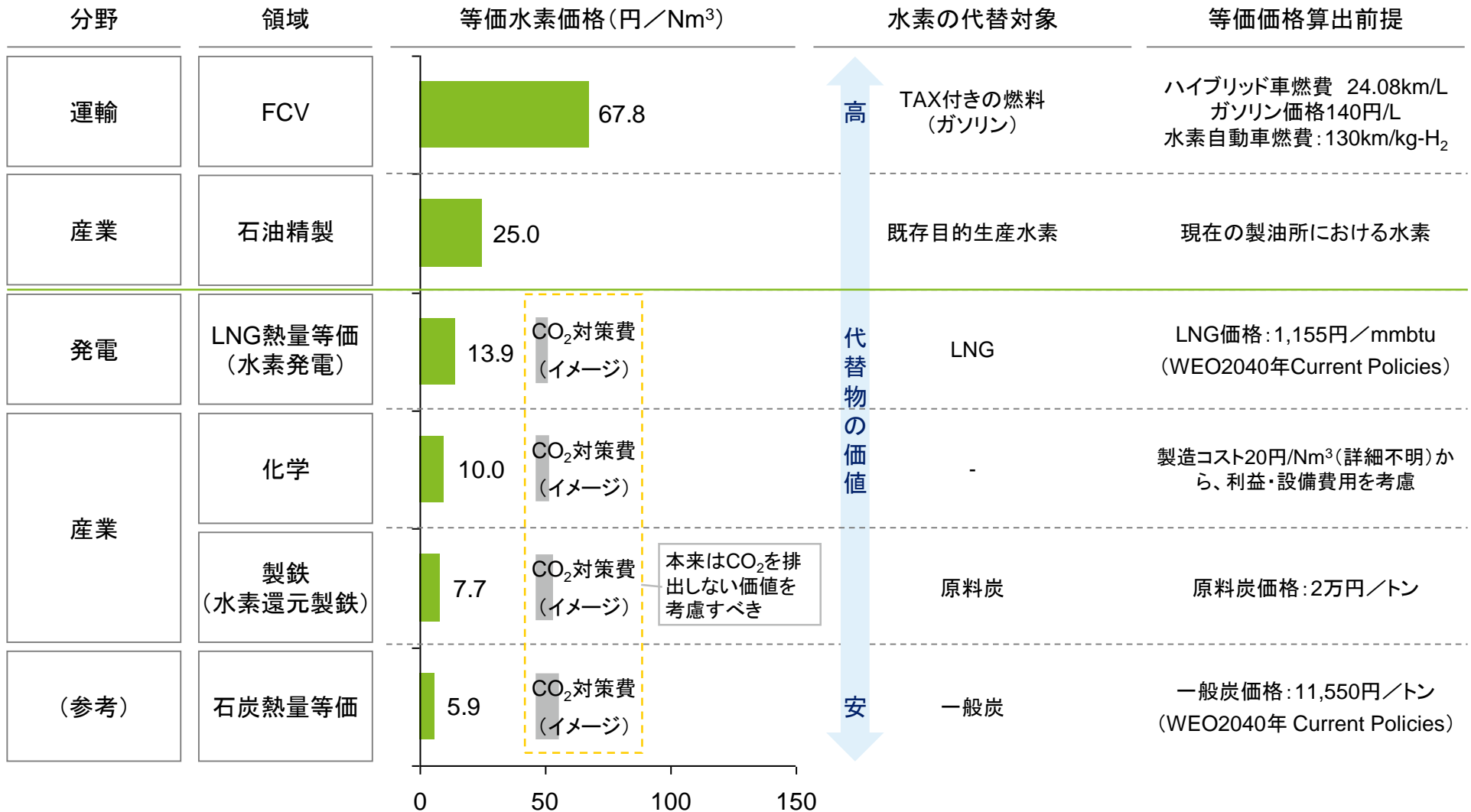
CAPEX: システムコスト26万円 × システム容量1,000Nm<sup>3</sup> ÷  
(システム容量1,000Nm<sup>3</sup> × 設備利用率 × 運転期間10年)

電力費: 発電原価 × 電力原単位4.5kWh/Nm<sup>3</sup>

出所: 経済産業省「水素基本戦略」、\*1: 東京大学他「2050年に向けた日本のエネルギー需給検討」より、日本全国でPV 250GW、Wind 70GW、Battery 0GW、東北地方で水電解プラント容量 355MWが導入される場合の稼働率を抽出、\*2: 調達価格等算定委員会「平成31年度以降の調達価格等に関する意見」より事業用太陽光の2018年度における設備利用率の想定率を抽出、\*3: NEDO Websiteより抽出した2025年の太陽光による発電原価目標値7円/kWhをもとに、太陽光のCAPEXが電中研「2050年までの太陽光発電・風力発電の将来コストに関する考察」におけるUSD300/kWhまで低減することとし算出、\*4: 理論上の最大値を記載、\*5: 太陽光の設備容量を10MW、蓄電池の設備容量を5MWとし、蓄電池の充電時間を36時間として算出

# 水素価格が20円まで低下すれば一定の需要を代替できる可能性がある




## 熱量等価・性能等価分析



## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 論文リスト(1/4)






カーボン・CO

生成物	分解プロセス	国	論文名	研究機関
カーボン	高温溶融塩	 日本	Carbon Nanotube Synthesis via the Calciothermic Reduction of Carbon Dioxide with Iron Additives	北海道大学
			革新的炭素めっき技術	アイエムセップ株式会社
		 米国	Carbon nanotube wools made directly from CO <sub>2</sub> by molten electrolysis: Value driven pathways to carbon dioxide greenhouse gas mitigation	George Washington University
			Electrosynthetic control of CNT conductivity & morphology: Scale-up of the transformation of the greenhouse gas CO <sub>2</sub> into carbon nanotubes by molten carbonate electrolysis	George Washington University
			Carbon dioxide to carbon nanotube scale-up	George Washington University
			One-Pot Synthesis of Carbon Nanofibers from CO <sub>2</sub>	George Washington University
			Thermodynamic assessment of CO <sub>2</sub> to carbon nanofiber transformation for carbon sequestration in a combined cycle gas or a coal power plant	George Washington University
			Sustainable Capture and Conversion of Carbon Dioxide into Valuable Multiwalled Carbon Nanotubes Using Metal Scrap Materials	Vanderbilt University
		 南ア	Kinetic model of carbon nanotube production from carbon dioxide in a floating catalytic chemical vapour deposition reactor	University of the Witwatersrand

## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 論文リスト(2/4)




カーボン・CO

生成物	分解プロセス	国	論文名	研究機関
カーボン	紫外線 プラズマ	 日本	パルスアーク放電を用いた二酸化炭素分解によるカーボン微粒子の創製	九州産業大学
			Simultaneous Generation of Syngas and Multiwalled Carbon Nanotube via CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> Reforming with Spark Discharge	National Central University
 中国		Conversion of carbon dioxide to carbon monoxide by pulse dielectric barrier discharge plasma	Xi'an Jiaotong University, East China Normal University	
		Enhanced effect of plasma on catalytic reduction of CO <sub>2</sub> to CO with hydrogen over Au/CeO <sub>2</sub> at low temperature	Dalian University of Technology	
CO		 英国	Conversion of CO <sub>2</sub> to CO using radio-frequency atmospheric pressure plasmas	University of York
			Reaction engineering of carbon monoxide generation by treatment with atmospheric pressure, low power CO <sub>2</sub> DBD plasma	University of Sheffield
		 ベルギー	CO <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub> conversion and syngas formation at atmospheric pressure using a multi-electrode dielectric barrier discharge	Université Libre de Bruxelles
		 豪州	Conversion of carbon dioxide to carbon monoxide using non-thermal radio-frequency microplasmas at atmospheric pressure	The Australian National University

## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 論文リスト(3/4)

カーボン・CO





生成物	分解プロセス	国	論文名	研究機関
CO	PEM	 日本	Electroreduction of Carbon Dioxide to Carbon Monoxide by Co-phthalocyanine Electrocatalyst under Ambient Conditions	東京工業大学
		 米国	A Nitrogen - Doped Carbon Catalyst for Electrochemical CO <sub>2</sub> Conversion to CO with High Selectivity and Current Density	University of Illinois
			Metal - free Nanoporous Carbon as a Catalyst for Electrochemical Reduction of CO <sub>2</sub> to CO and CH <sub>4</sub>	The City College of New York
			Electrode-Ligand Interactions Dramatically Enhance CO <sub>2</sub> Conversion to CO by the [Ni(cyclam)](PF <sub>6</sub> ) <sub>2</sub> Catalyst	Yale University
			Insights in the Catalytic Product Selectivity Trends of Single Site Transition Metal-Nitrogen-Doped Carbons during the Electrochemical Reduction of CO <sub>2</sub> to CO	Technical University of Berlin
	SOEC	 日本	Efficient Heterogeneous CO <sub>2</sub> to CO Conversion with a Phosphonic Acid Fabricated Cofacial Iron Porphyrin Dimer	中部大学
			Highly active oxide cathode of La (Sr) Fe (Mn) O <sub>3</sub> for intermediate temperature CO <sub>2</sub> and CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O co-electrolysis using LSGM electrolyte	九州大学
			High Temperature CO <sub>2</sub> Electrolysis on La (Sr) Fe (Mn) O <sub>3</sub> Oxide Cathode by Using LaGaO <sub>3</sub> Based Electrolyte	九州大学
			Possibility of Application of Solid Oxide Electrolysis Cell on a Smart Iron-making Process Based on an Active Carbon Recycling Energy System (iACRES)	東京工業大学



## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 論文リスト(4/4)

カーボン・CO

生成物	分解プロセス	国	論文名	研究機関
CO	SOEC	 中国	Carbon monoxide/carbon dioxide electrochemical conversion on patterned nickel electrodes operating in fuel cell and electrolysis cell modes	Tsinghua University, China Academy of Engineering Physics
			Electrochemical Reaction Kinetics for CO-CO <sub>2</sub> Electrochemical Conversion in the Nickel-Patterned Electrode	Tsinghua University
		 英国	Insights in the Catalytic Product Selectivity Trends of Single Site Transition Metal-Nitrogen-Doped Carbons during the Electrochemical Reduction of CO <sub>2</sub> to CO	University of Cambridge
			Conversion of CO <sub>2</sub> to CO using radio-frequency atmospheric pressure plasmas	University of Cambridge
		 スイス	Reaction engineering of carbon monoxide generation by treatment with atmospheric pressure, low power CO <sub>2</sub> DBD plasma	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
		 デンマーク	New Electrolytes for CO <sub>2</sub> Electrolysis Cells	Technical University of Denmark

## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 特許リスト(1/2)

カーボン・CO

生成物	分解プロセス	国	特許名	研究機関
CO	紫外線 プラズマ	 日本	マイクロ波非平衡プラズマによる二酸化炭素の分解方法	愛知電機株式会社
			二酸化炭素からの一酸化炭素製造方法	旭化成ケミカルズ株式会社、旭化成株式会社
		 ドイツ	合成ガスの製造方法およびプラント	Deutsche Luft Hansa Aktiengesellschaft、CCP Technologies Gesellschaft mit beschränkter Haftung
カーボン	PEM	 日本	固体高分子形発電方法およびシステム	宇宙航空研究開発機構、国立大学法人長岡技術科学大学、住友大阪セメント株式会社
			固体高分子形発電方法およびシステム	宇宙航空研究開発機構、国立大学法人長岡技術科学大学、住友大阪セメント株式会社

## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 特許リスト(2/2)



カーボン・CO

生成物	分解プロセス	国	特許名	研究機関
カーボン・CO	SOEC	 日本	カーボン材料生成システム	東京瓦斯株式会社
			カーボン材料生成システム	東京瓦斯株式会社
CO		 デンマーク	電気化学セル及びその製造方法	株式会社東芝
			SOECにより最適化された一酸化炭素製造方法	Haldor Topsoe aktieselskab
			超高純度一酸化炭素の製造方法	Haldor Topsoe aktieselskab

## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 論文リスト(1/2)





炭酸塩

生成物	原料	国	論文名	研究機関
炭酸塩	廃コンクリート	 日本	コンクリートスラッジを利用した二酸化炭素排出量削減プロセス構築のためのカルシウム抽出速度測定	東北大学、日本コンクリート工業株式会社、成蹊大学
			気泡コンクリートを用いる二酸化炭素固定技術に関する研究	山口大学
			Cost Evaluation for a Carbon Dioxide Sequestration Process by Aqueous Mineral Carbonation of Waste Concrete	東北大学、成蹊大学、東京大学
			Dissolution Rates of Alkaline Rocks by Carbonic Acid: Influence of Solid/Liquid Ratio, Temperature, and CO <sub>2</sub> Pressure	東京大学、東北大学、成蹊大学
			A CO <sub>2</sub> Fixation Process with Waste Cement Powder via Regeneration of Alkali and Acid by Electrodialysis	成蹊大学、広島大学、東北大
			CO <sub>2</sub> Fixation Process with Waste Cement Powder via Regeneration of Alkali and Acid by Electrodialysis: Effect of Operation Conditions	成蹊大学、広島大学、東北大学
			Pilot-Scale Operation of a Concrete Sludge Recycling Plant and Simultaneous Production of Calcium Carbonate	東北大学、日本コンクリート工業株式会社、東京大学、成蹊大学
		 中国	Bio-mineralization on cement-based materials consuming CO <sub>2</sub> from atmosphere	Southeast University

## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 論文リスト(2/2)


炭酸塩

生成物	原料	国	論文名	研究機関
炭酸塩	廃棄物 焼却灰	 中国	An efficient milling-assisted technology for K-feldspar processing, industrial waste treatment and CO <sub>2</sub> mineralization	Sichuan University
		 米国	Effect of H <sub>2</sub> O on Mg(OH) <sub>2</sub> carbonation pathways for combined CO <sub>2</sub> capture and storage	Columbia University
	海水及び 濃縮海水	 日本	廃液かん水を用いた有価物併産CO <sub>2</sub> 固定化プロセスの実現可能性の検討	早稲田大学
		 韓国	CO <sub>2</sub> Mineralization Using Brine Discharged from a Seawater Desalination Plant	Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 特許リスト(1/2)





炭酸塩

生成物	原料	国	特許名	研究機関
炭酸塩	廃コンクリート	 日本	炭酸カルシウムの製造方法および炭酸カルシウム製造装置	日本コンクリート工業株式会社、成蹊大学、東北大学
			コンクリート製品の製造方法	鹿島建設株式会社、中国電力株式会社、電気化学工業株式会社
			炭酸カルシウムの製造方法及び炭酸カルシウム製造システム	株式会社IHI
	石炭灰		炭酸カルシウムの製造方法及び炭酸カルシウム製造システム	株式会社IHI
			生コンクリートの製造方法	株式会社大阪砕石工業所
			生コンクリートの製造方法	扶和産業株式会社

## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 特許リスト(2/2)

炭酸塩

生成物	原料	国	特許名	研究機関
炭酸塩	木質バイオマス焼却灰	 中国	バイオマス発電所の粉殻灰および排煙を利用するナノサイズ二酸化ケイ素およびナノサイズ炭酸カルシウムの製造方法	中盈長江国際新能源投資有限公司
	廃棄物焼却灰	 米国	カルシウム抽出とPCC製造を継続的に行うための回収方法	Corex Materials Inc.
		 フランス	焼結した水素化カルシウムを含有するクラッドを処理するための方法	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
	海水及び濃縮海水	 日本	空気中の二酸化炭素を用いたアルカリ土類金属炭酸塩の製造方法とその利用	北里研究所

## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 論文リスト(1/2)

ポリカーボネート



生成物	国	論文	研究機関
ポリカーボネート	 日本	二酸化炭素とジオールからの直接ポリカーボネート合成法	東北大学、東京理科大学
		二酸化炭素とジオールからの直接ポリカーボネート合成用触媒の開発	東北大学
		Carbon-dioxide-derived unsaturated alicyclic polycarbonate: Synthesis, characterization, and post-polymerization modification	東京理科大学
		二酸化炭素とエピクロロヒドリンとの交互共重合と得られた脂肪族ポリカーボネートの四級アンモニウム塩化	日本ゼオン株式会社、東京理科大学
		二酸化炭素とエピクロロヒドリンとの交互共重合と得られた脂肪族ポリカーボネートの四級アンモニウム塩化	日本ゼオン株式会社、東京理科大学
	 ドイツ	Controlled Synthesis of Multi - Arm Star Polyether-Polycarbonate Polyols Based on Propylene Oxide and CO <sub>2</sub>	Universität Mainz
		POLYCARBONATE DIOLS TO PRODUCE ELASTIC POLYURETHANE FOAMS – A METHOD OF IMMOBILIZATION OF CARBON DIOXIDE INTO A POLYMER STRUCTURE	University of Applied Sciences Wildau, University of Chemical Technology and Metallurgy
	 スペイン	Polycarbonate foams with tailor-made cellular structures by controlling the dissolution temperature in a two-step supercritical carbon dioxide foaming process	Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech
		Novel polyurethane reactive hot melt adhesives based on polycarbonate polyols derived from CO <sub>2</sub> for the footwear industry	INESCOP



## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 論文リスト(2/2)

ポリカーボネート

生成物	国	論文名	研究機関
ポリカーボネート	 中国	Synthesis of fully alternating polycarbonate with low Tg from carbon dioxide and bio-based fatty acid	Zhejiang University
		Influence of Co(ii) Ionic Liquids Catalytic System for Polycarbonate (CHO/CO <sub>2</sub> ) Synthesis	Tianjin Vocational Institute
	 韓国	Process of producing polycarbonate by copolymerization of carbon dioxide and epoxide using the same as catalyst	SK Innovation Co Ltd

## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 特許リスト(1/3)

ポリカーボネート

生成物	国	特許名	研究機関
ポリカーボネート	 日本	脂肪族ポリカーボネートの製造方法	株式会社リコー、丸善石油化学株式会社
		ポリカーボネート組成物、複合材料及びポリカーボネート組成物の製造方法	金沢大学、住友精化株式会社
		トナーバインダー及びトナー組成物	三洋化成工業株式会社
		成形用加飾シート、成形品の製造方法及び成形品	恵和株式会社
		ポリカーボネートの製造方法	東京農工大学、東京大学、住友精化株式会社
		ポリカーボネート成形体	燕化学工業株式会社
		脂肪族ポリカーボネートポリカーボネート組成物	住友精化株式会社
		ポリカーボネート化合物および電解質組成物	日本ゼオン株式会社
		耐ブロッキング性脂肪族ポリカーボネートおよびその製造方法	住友精化株式会社

## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 特許リスト(2/3)




ポリカーボネート

生成物	国	特許名	研究機関
ポリカーボネート	 日本	ポリカーボネート成形体	燕化学工業株式会社
		共重合用触媒及びポリカーボネートの製造方法	住友化学株式会社
		高分子固体電解質および高分子固体電解質フィルム	住友精化株式会社
		ポリカーボネートポリカーボネート組成物及び成形体	出光ライオンコンポジット株式会社、三重大学
		ポリカーボネートポリカーボネート組成物及び成形体	出光ライオンコンポジット株式会社、三重大学
		電子写真トナー用バインダー組成物	三菱商事株式会社
	 米国	脂肪族ポリカーボネートクエンチ方法	Novomer Inc.
	 英国	ポリオールの調製方法	Econic Technologies Ltd.
		マルチブロックコポリマー	Imperial Innovations Ltd.

## (参考)有望性・実現性のバックデータ

## 特許リスト(3/3)

ポリカーボネート

生成物	国	特許名	研究機関
ポリカーボネート	 英国	二酸化炭素とエポキシドとの共重合のための二金属触媒錯体	Imperial Innovations Ltd.
	 ドイツ	ポリエーテルカーボネートポリオール製造方法	Bayer Intellectual Property Gesellschaft mit beschränkter Haftung
	 韓国	複金属シアン化物触媒及びその製造方法、並びに上記触媒を用いたポリカーボネートポリオールの製造方法	POSCO Research Institute
		自己接着組成物及びそれから製造されたガラス用自己接着フィルム	SK Innovation Co. Ltd. 、 SK Global Chemical Co. Ltd.
		透明な脂肪族ポリカーボネートポリカーボネート組成物及びその利用	SK Innovation Co. Ltd. 、 SK Global Chemical Co. Ltd.

## II LCA評価

# オレフィン、メタン、コンクリート製品においてLCA評価を実施した

## LCA評価の目的

- 本調査ではCO<sub>2</sub>排出量の削減に資するCO<sub>2</sub>有効利用技術においてライフサイクルにおけるCO<sub>2</sub>削減量の評価を行った。
- CO<sub>2</sub>有効利用技術における物質収支及びエネルギー収支、並びにCO<sub>2</sub>収支をライフサイクルを通して評価(LCA評価)し、それら評価をCO<sub>2</sub>有効利用技術を使用しない既存の製品製造プロセスと比較することで、実質的なCO<sub>2</sub>削減量を算定した。

## 評価対象

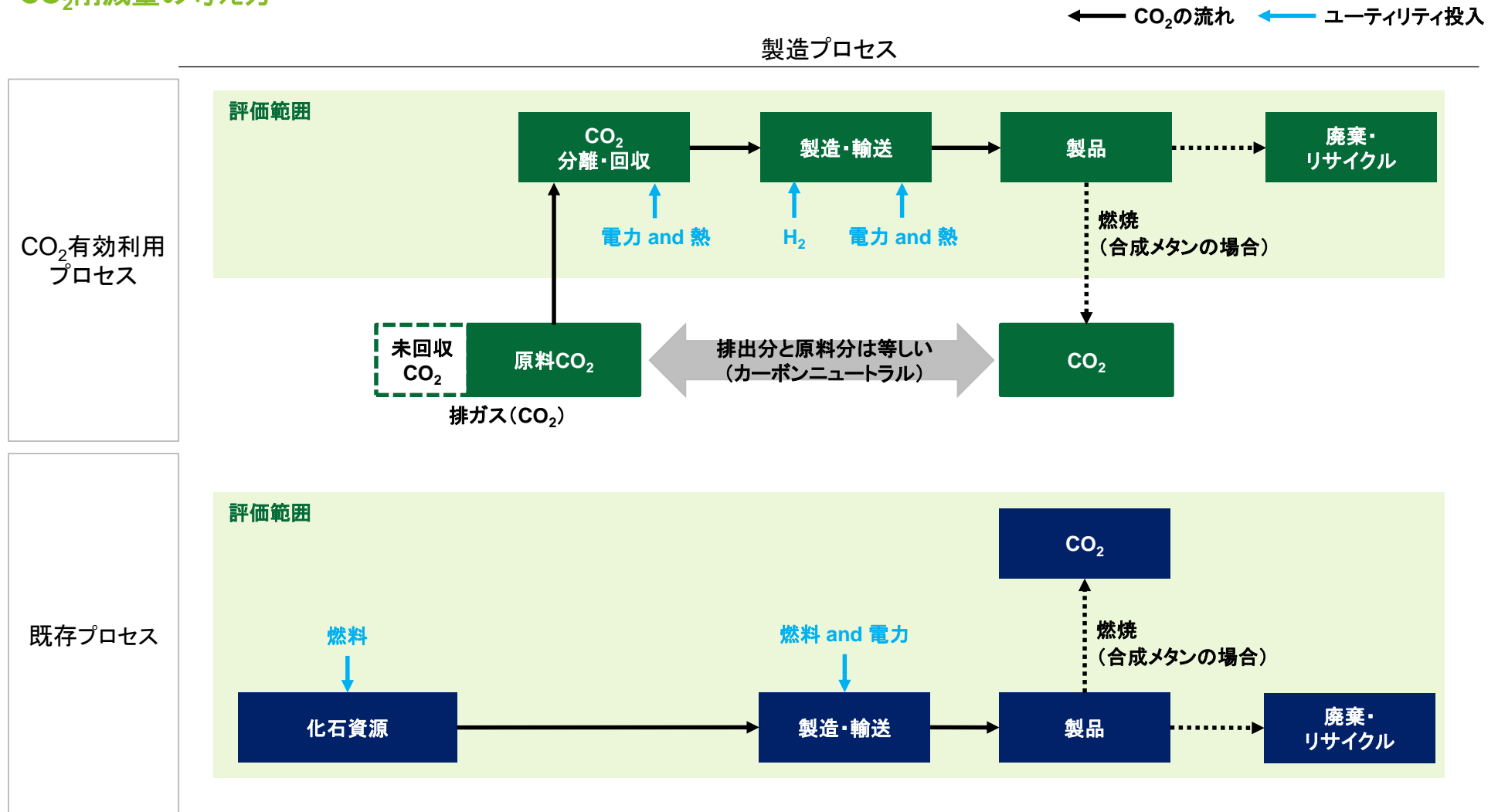
- 本調査におけるLCA評価では化成品、燃料、鉱物の3つの分野における代表的な技術の評価対象とした。代表的な技術については以下の通りである。
  - ①化成品:オレフィン(CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>の直接メタノール合成を経由したMTO合成反応)
  - ②燃料:メタン(CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>のメタネーション反応)
  - ③鉱物:コンクリート製品(γ-C<sub>2</sub>Sを混和剤としたコンクリートCO<sub>2</sub>-SUICOM)

## 評価範囲

- 以下の4項目を評価範囲として設定し、LCA評価を実施した。なお、プラントにおける設備・部品の製造に要するエネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量は含めないものとした。
  - ①資源調達
  - ②水素製造
  - ③発電・製鉄プロセスからのCO<sub>2</sub>分離回収
  - ④製品製造・輸送

# Ⅱ LCA評価 CO<sub>2</sub>有効利用技術における製造プロセスと 既存のCO<sub>2</sub>を用いないプロセスのLCA評価を比較し CO<sub>2</sub>削減量を推計した

## CO<sub>2</sub>削減量の考え方



# エネルギーの換算係数、発熱量、CO<sub>2</sub>排出原単位に関する前提条件を設定した

## 前提条件(1/4)

### 主な設定条件

- a 発熱量は高位発熱量を使用
- b プロセスへの熱供給はLPGを使用<sup>\*1</sup>
- c プラントの稼働時間は8,000 h/y



諸元		
項目	単位	数値
エネルギー単位熱量換算係数	MJ/kWh	3.6
燃料の発熱量(輸入一般炭)	MJ-HHV/kg	25.7
燃料のCO <sub>2</sub> 排出原単位(輸入一般炭)	t-C/GJ	0.0247
	t-CO <sub>2</sub> /GJ-HHV	0.091
燃料の発熱量(LPG)	MJ-HHV/kg	50.8
燃料のCO <sub>2</sub> 排出原単位(LPG)	t-C/GJ	0.0161
	t-CO <sub>2</sub> /t	3.00
プラント稼働時間 <sup>*2</sup>	h/y	8000
電力のCO <sub>2</sub> 排出係数	t-CO <sub>2</sub> /MWh	0.512
アミン吸収液(MEA)のCO <sub>2</sub> 排出原単位	t-CO <sub>2</sub> /t	1.6

\*1: 後述の微粉炭火力・製鉄プロセスは除く、\*2: プラント稼働時間は一般的な値として8,000h/yと仮定



# 水素製造・供給に関する前提条件を設定した

## 前提条件(2/4)

### 主な設定条件

- a 水素はUAEのPV電力による水電解で製造する
- b PV電力は直接CO<sub>2</sub>排出のみ考慮しゼロエミッションとする
- c すべてのプロセス投入電力はPV電力で賄うものとする



### 諸元\*1

項目	単位	数値
製品水素量(生産規模)	Nm <sup>3</sup> /y	2.5 x 10 <sup>9</sup>
水素密度	kg/Nm <sup>3</sup>	0.0899
水電解電力原単位	kWh/Nm <sup>3</sup>	4.9
水素液化電力原単位	kWh/Nm <sup>3</sup>	0.91
CO <sub>2</sub> 排出量	kg-CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	0.002

\*1: NEDO「エネルギーキャリアの俯瞰特性研究会」より液化水素を用いた海外再エネ水素長距離輸送に伴うライフサイクル(水素製造、液化、積地貯蔵、海上輸送、揚地貯蔵)CO<sub>2</sub>排出量を基に算出

# CO<sub>2</sub>発生源に関する前提条件を設定した

## 前提条件(3/4)

主な設定条件

- a CO<sub>2</sub>発生源は微粉炭火力発電所と鉄鋼プラントを想定<sup>\*1</sup>
- b 鉄鋼プラントは高炉と転炉を想定

諸元

項目	単位	微粉炭火力	高炉	転炉
排ガス温度	°C	600級	300~400	175
CO <sub>2</sub> 濃度	vol%	13	27	33
排ガス流量	Nm <sup>3</sup> /y	184,523,630	176,000,000	155,200,000
CO <sub>2</sub> 排出量	t/y	4,711,943	93,343	100,602
発電電力量(Gross)	MWh/y	6,132,000	N/A	N/A
発電電力量(Net)	MWh/y	5,821,721		
発電効率(熱効率)	%	42.43		
所内率	%	5.06		
設備利用率	%	70		
定格出力	MW	1,000		

\*1: 微粉炭火力発電所と鉄鋼プラントはどちらも国内プラントの実績値を用いた、\*2: 鉄鋼プラントはプロセスによってコークス炉、高炉、転炉の排ガスがあるが本評価では排ガス中のCO<sub>2</sub>濃度が高い高炉と転炉を想定

# CO<sub>2</sub>分離回収に関する前提条件を設定した

## 前提条件(4/4)

CO<sub>2</sub>分離・回収には**化学吸収法**と**PSA(物理吸着)**法がある  
 ✓ 化学吸収法: 吸収液にCO<sub>2</sub>を吸収させた後、高温で吸収液を再生させることを繰り返す  
 ✓ PSA法: 吸着材へのCO<sub>2</sub>吸着と脱着を圧力差によって繰り返す

主な設定条件

- a 化学吸収法の吸収液はRITE吸収液(MEA<sup>\*1</sup>)を想定
- b PSA法の吸着材<sup>\*2</sup>は活性炭を想定
- c 分離回収したCO<sub>2</sub>は液化せず気相での使用を想定<sup>\*3</sup>

諸元

項目	単位	微粉炭火力	高炉	転炉
吸収法	—	化学吸収法	PSA法	PSA法
CO <sub>2</sub> 回収率	%	90	66.4	56.3
CO <sub>2</sub> 回収量	t/y	4,240,748	61,980	56,639
CO <sub>2</sub> オフガス	t/y	471,194	31,363	43,963
回収CO <sub>2</sub> 濃度	%	99.9	99.9	99.9
分離回収熱源単位	GJ/t-CO <sub>2</sub>	2.5	N/A	N/A
分離回収動力源単位	kWh/t-CO <sub>2</sub>	23.6	199	170

✓ 化学吸収法: 吸収液の再生熱が主な所要エネルギーとなる  
 ✓ PSA法: 圧力差を生じさせ津ための圧縮機(または真空ポンプ)の消費電力が主な所要エネルギーとなる

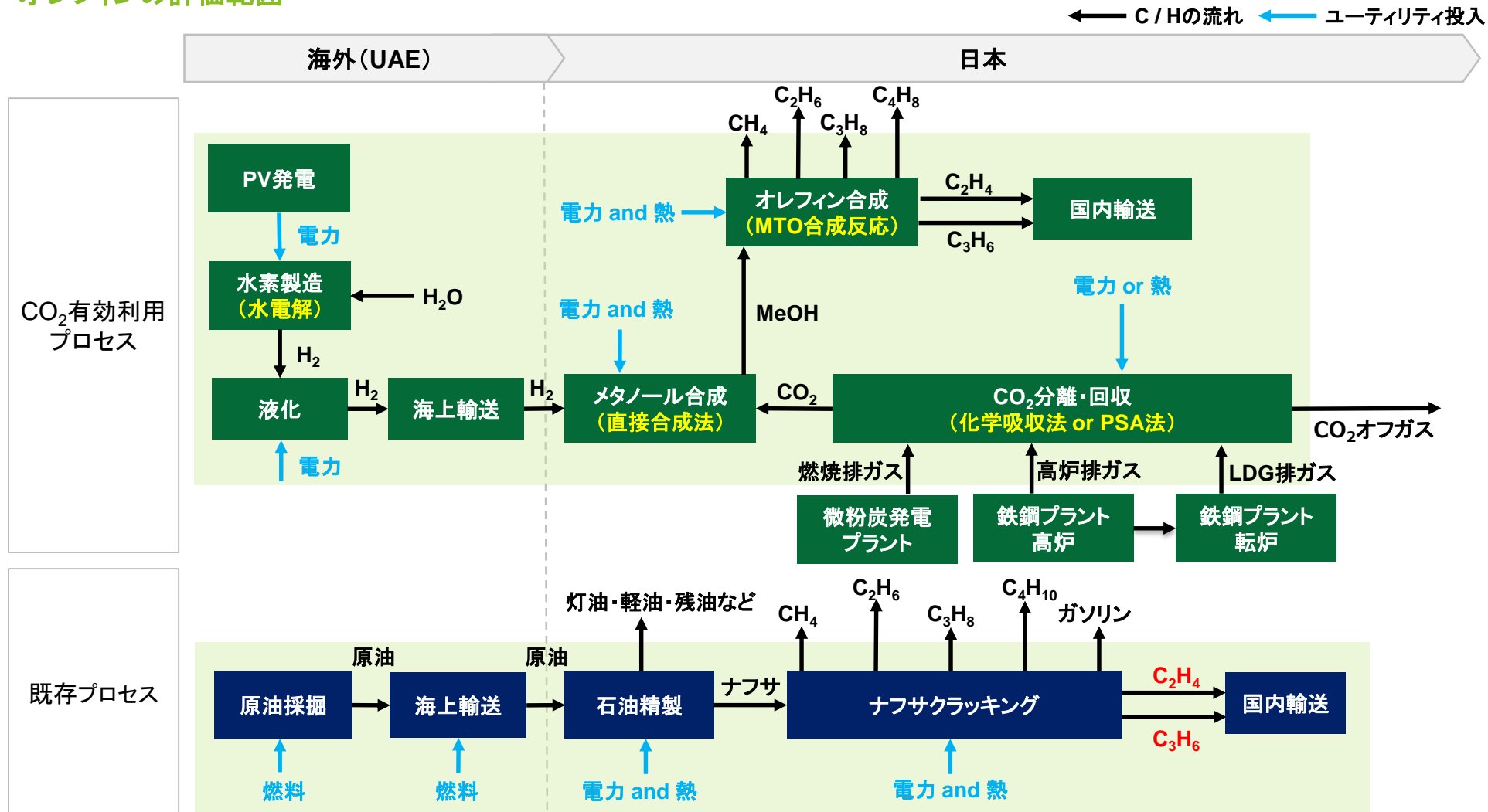
\*1: 化学吸収法において用いられる主流な吸収液「アミン吸収液」の略称、\*2: PSA法の吸着材は活性炭やモレキュラーシーブ等が使用されるが本評価では(熱風炉に)活性炭を想定、\*3: 一般的に分離回収したCO<sub>2</sub>は濃縮・運搬用に液化されるが、本評価では次の工程を気相反応としているため液化動力は含めないものと仮定

## Ⅱ - 1. オレフィン

II LCA評価

# UAEから液化水素で輸入した水電解水素と直接反応させることでメタノールを生成しMTO反応で得られエチレンとプロピレンを国内輸送するプロセスを想定した

## オレフィンの評価範囲



# オレフィン合成に関する前提条件を設定した

## オレフィン合成の前提条件

主な設定条件

- a メタノールのMTO反応\*1によるオレフィン合成を想定
- b 生成物組成はエチレンとプロピレンが40%ずつと仮定\*2
- c 反応器の熱は動力回収できるため冷凍機動力への使用を想定\*3



諸元

項目		単位	数値
メタノール供給量		t/y	800,000
メタノール供給温度		°C	25
メタノール供給圧力		t/y	0.26
エチレン生成量		t/y	133,776
プロピレン生成量		t/y	133,776
熱交換器	①(熱)	kWh/kg-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> orC <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0.024
	②(熱)		0.116
	③(熱)		0.054
圧縮機	①-1(電力)	kWh/kg-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> orC <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0.012
	②-1(電力)		0.010
	②-2(電力)		0.002
	②-3(電力)		0.001
冷凍機	①、②(電力)	kWh/kg-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> orC <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0.021
	③(電力)		0.094
	④(熱)		0.000
	⑤、⑥(熱)		0.000

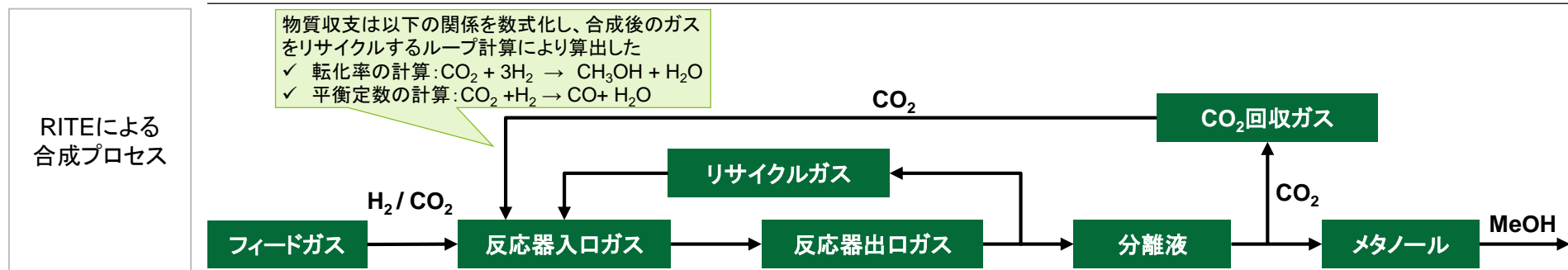
\*1:メタノールとH<sub>2</sub>Oを高温高压で反応させて生成物を冷却・精製する合成方法、\*2:SAPO-34触媒を使った研究論文より抽出、主な生成物はエチレン・プロピレンだがメタン・プロパン・ブテン等の炭化水素も生成される、\*3:文献においては反応器の熱を利用して動力回収しているため、主な所要エネルギーである冷却・精製する際の冷凍機動力に使用すると想定

# MTO反応に用いるメタノールの合成に関しても前提条件を設定した

## メタノール合成の前提条件

← C / Hの流れ

メタノール合成のフロー



主な設定条件

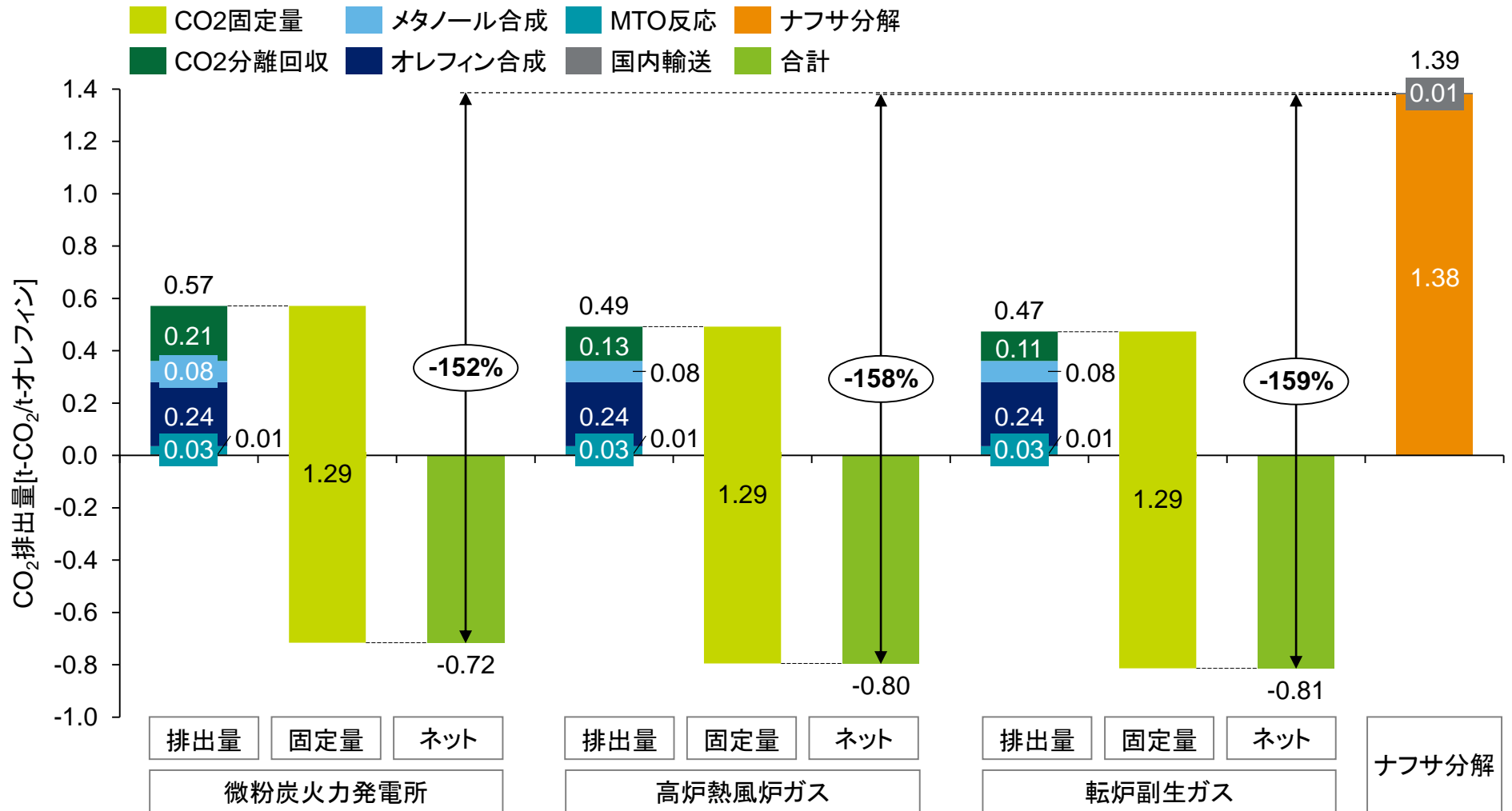
- a メタノール合成はRITEの最適化されたプロセス\*1を想定
- b 液化水素のフィードポンプ動力と圧縮機動力は考慮しない\*2

諸元		
項目	単位	数値
反応圧力	MPa	5
反応温度	°C	250
SV	1/h	10,000
CO <sub>2</sub> 転化率	%	22.3
平衡定数	—	0.0112
メタノール選択率	mol%	99.8
H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 比率	—	2.8589
動力原単位	kWh/kg-MeOH	0.16
熱量原単位	kWh/kg-MeOH	0.02

\*1: 海外でベンチプラントが開発されており実働例もあるRITEプロセス(気相で直接反応させる合成法)を採用、触媒(Cu/ZnO/ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>)は反応条件で活性が変わるためRITEで最適化された温度、圧力、H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>比を適用、リサイクルガス圧縮機等の動力・熱(CO<sub>2</sub>圧縮機動力のみAISTの独自プロセスシミュレータで計算)における所要エネルギーについてもRITE試算結果を適用、\*2: 液化水素を供給する際の厳密な圧力値が不明であるため。また、液化水素の冷熱利用などの熱の有効利用も想定されるが考慮しないものとした

# CO<sub>2</sub>有効利用技術によるオレフィン合成は ナフサ分解による製法と比較してCO<sub>2</sub>排出量を152~159%程度削減できる

## オレフィンのLCA評価結果



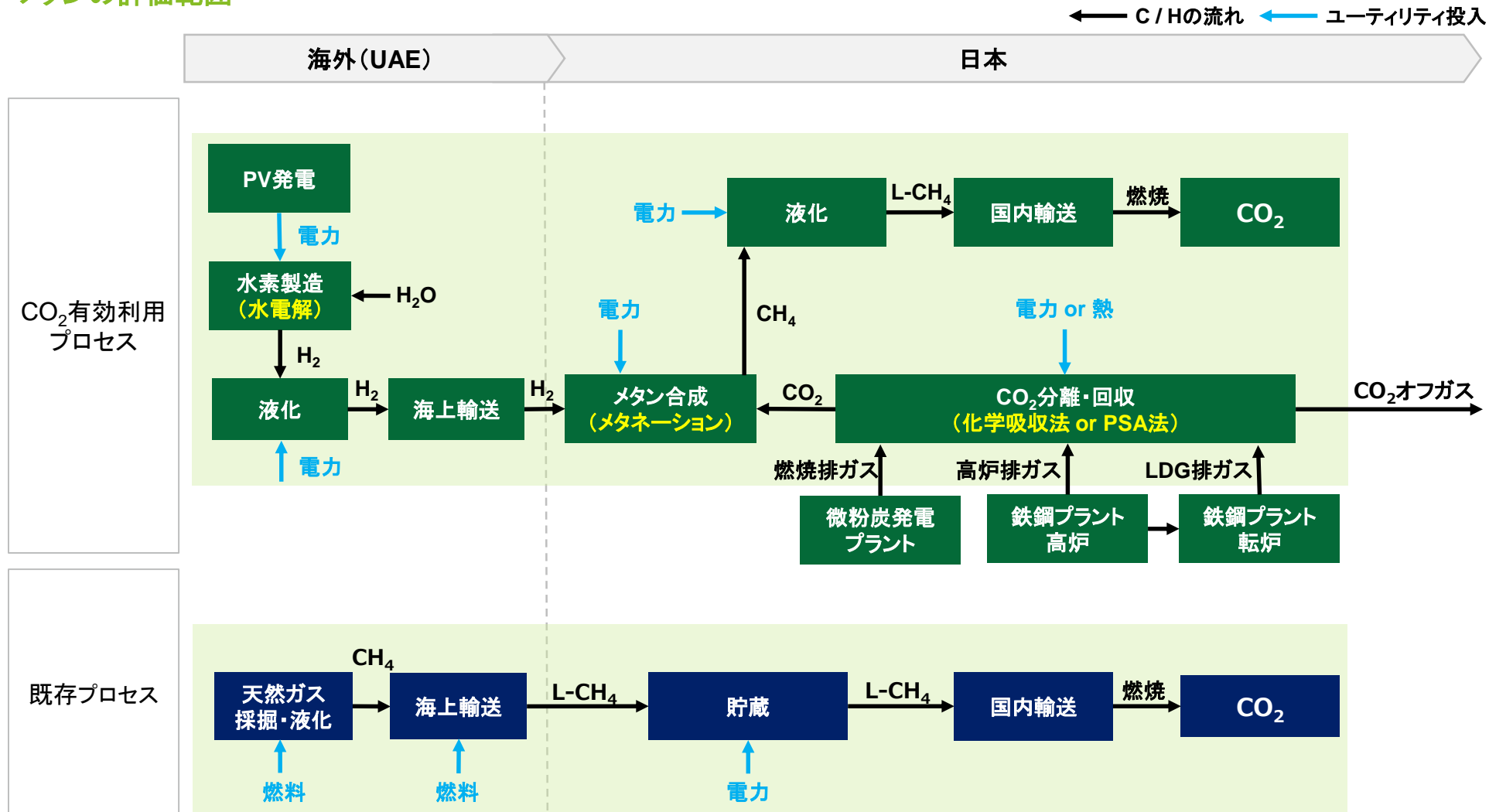


## Ⅱ - 2. メタン

II LCA評価

# UAEから液化水素で輸入した水電解水素をメタネーション反応させ生成されたメタンを液化して国内輸送するまでのプロセスを想定した

## メタンの評価範囲



# メタネーションに関する前提条件を設定した

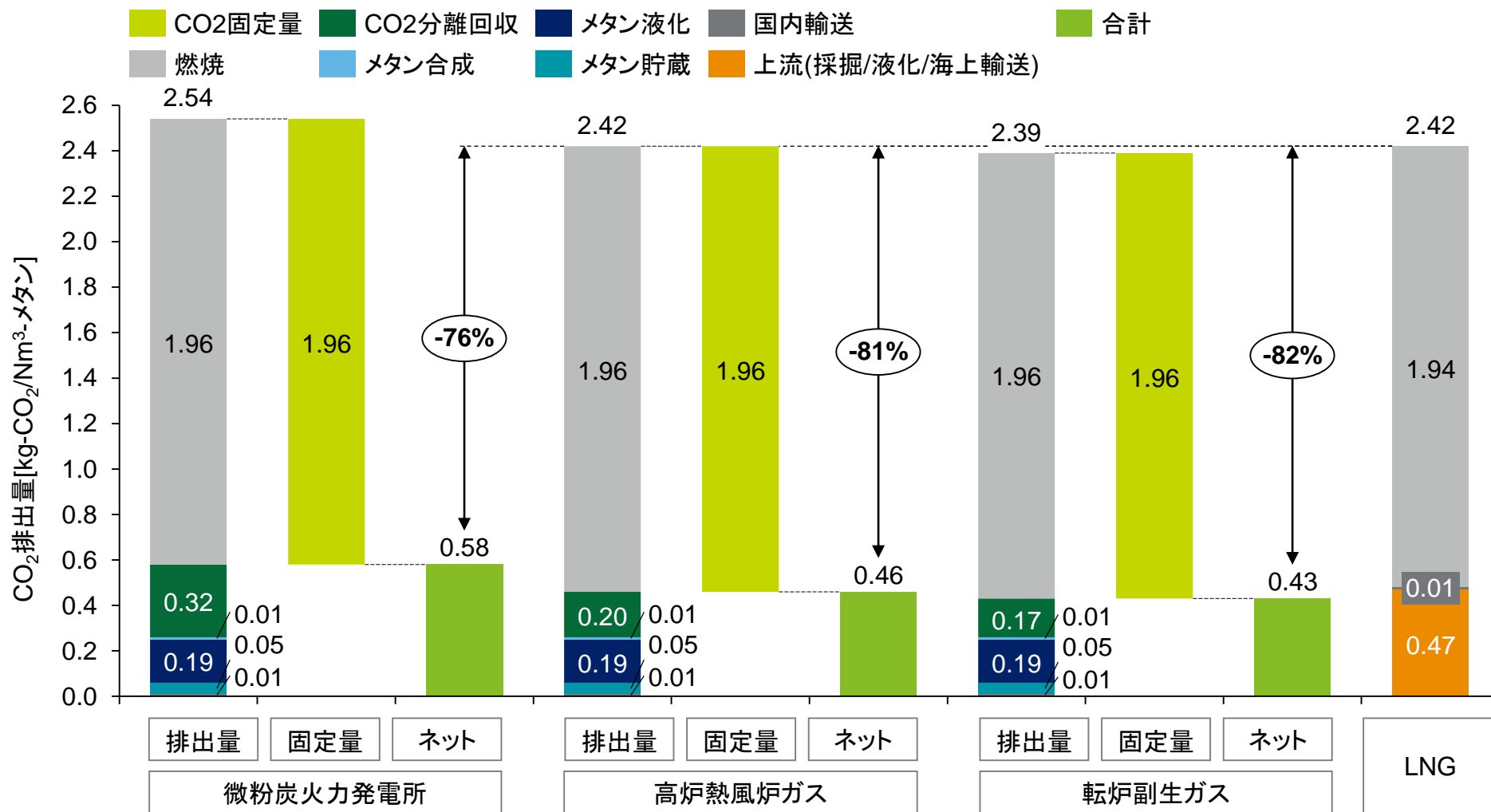
## メタネーションの前提条件

主な設定条件		諸元				
		項目	単位	微粉炭火力	高炉	転炉
a	サバティエ反応*1によるメタン合成を想定	供給CO <sub>2</sub> 量	t/y	4,240,748	61,980	56,639
	CO <sub>2</sub> ガス密度 (0°C, 0.1MPa)	kg/Nm <sup>3</sup>	1.976	1.976	1.976	
	供給H <sub>2</sub> 量	Nm <sup>3</sup> /y	8.58 x 10 <sup>9</sup>	1.25 x 10 <sup>8</sup>	1.15 x 10 <sup>8</sup>	
	水素密度	kg/Nm <sup>3</sup>	0.0899	0.0899	0.0899	
	生成CH <sub>4</sub> 量	Nm <sup>3</sup> /y	2.15 x 10 <sup>9</sup>	3.14 x 10 <sup>7</sup>	2.87 x 10 <sup>7</sup>	
	電力原単位(液化)	kWh/Nm <sup>3</sup> -CH <sub>4</sub>	0.37			
	電力原単位(貯蔵)	kWh/Nm <sup>3</sup> -LCH <sub>4</sub>	0.103			

出所: NEDO「エネルギーキャリアの俯瞰特性研究会報告書」、(一財)エネルギー総合工学研究所「メタネーションによる合成メタンの経済性評価の調査報告書」及び「メタネーションによる合成メタンの経済性評価の調査報告書～国内輸送～」、\*1: CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>を直接反応させるメタン合成反応 (CO<sub>2</sub> + 4H<sub>2</sub> → CH<sub>4</sub> + 2H<sub>2</sub>O)

# Ⅱ LCA評価 CO<sub>2</sub>有効利用技術によるメタン合成は LNGと比較してCO<sub>2</sub>排出量を76~82%程度削減できる

## メタンのLCA評価結果

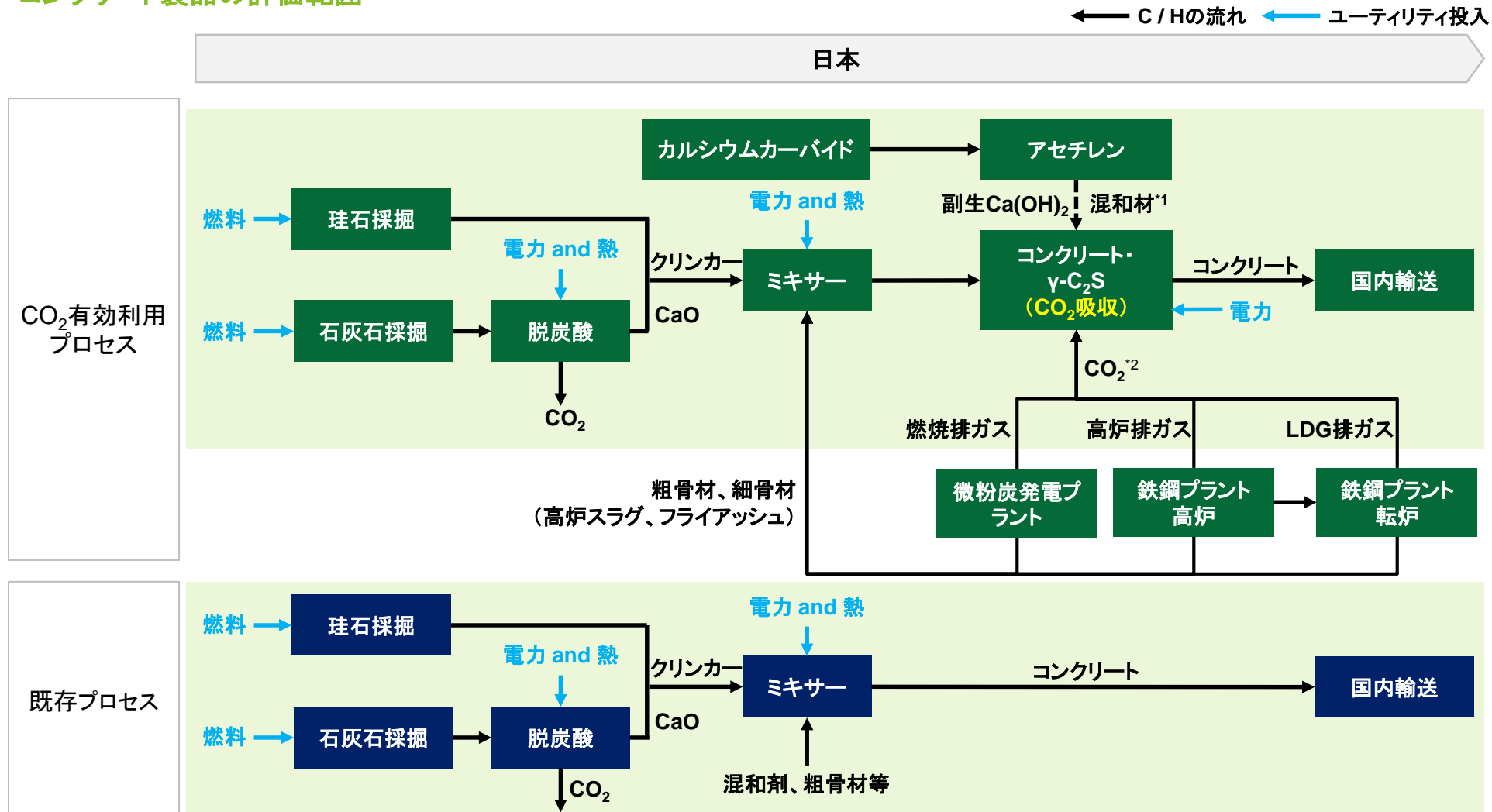


## Ⅱ - 3. コンクリート製品

## II LCA評価

# ポルトランドセメントの代替として $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sを混和材として混入したコンクリートにCO<sub>2</sub>を吸収させて国内輸送するプロセスを想定した

### コンクリート製品の評価範囲



\*1:  $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sは石灰石由来のものとカルシウムカーバイドからアセチレンを生成する際の副生水酸化カルシウムの2通りを想定、アセチレンの副生水酸化カルシウムは副生物を有効利用する観点からカルシウムカーバイドの生成及びアセチレンの生成における投入エネルギーは考慮しない、\*2: CO<sub>2</sub>発生源の煙道にコンクリートを置く炭酸化養生を行っているためCO<sub>2</sub>分離回収プロセスは伴わない

# コンクリート製造に関する前提条件を設定した

## コンクリート製品の前提条件

主な設定条件

- a  $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sを混和材として使用したCO<sub>2</sub>-SUICOM\*1を想定
- b 混和材はCaCO<sub>3</sub>とCa(OH)<sub>2</sub>のそれぞれから製造する場合の2通りを想定
- c ポルトランドセメントに代わって高炉スラグやフライアッシュの使用を想定\*2
- d スランプ0と8のコンクリート\*3を想定(標準0 or 8、環境0 or 8と表記\*4)

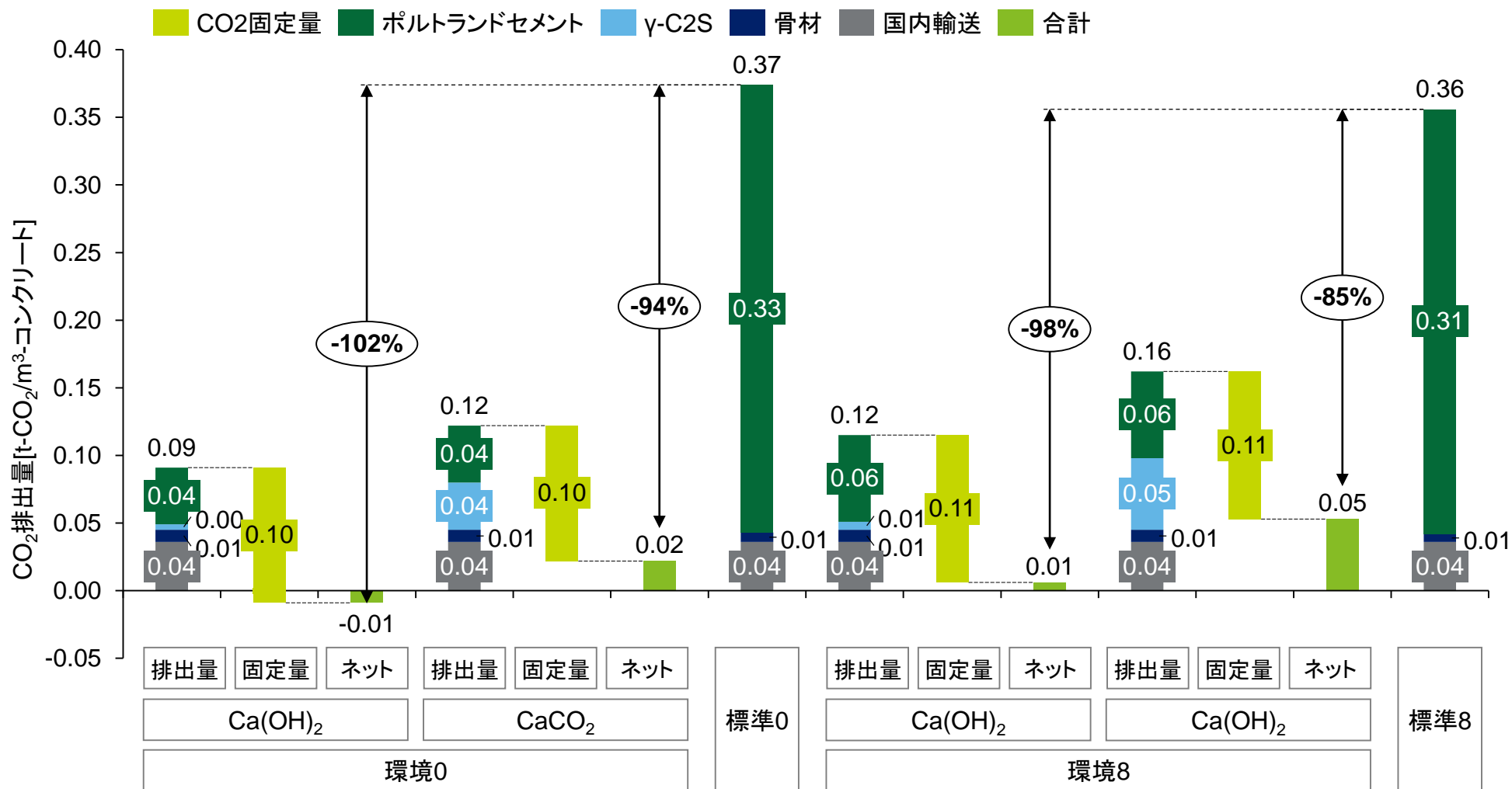
諸元

項目	単位	標準0	環境0	標準8	環境8
スランプ	cm	0		8	
水道水	kg/m <sup>3</sup>	120	118	164	167
ポルトランド	kg/m <sup>3</sup>	432	55	410	84
$\gamma$ -C <sub>2</sub> S	kg/m <sup>3</sup>		55		84
BFS(高炉スラグ)	kg/m <sup>3</sup>	N/A	73	N/A	111
F(フライアッシュ)	kg/m <sup>3</sup>		212		69
S1(砕砂)	kg/m <sup>3</sup>	1,032	1,020	699	418
S2(砕砂)	kg/m <sup>3</sup>	795	757	N/A	N/A
S3(山砂)	kg/m <sup>3</sup>	N/A	N/A	N/A	265
G(碎石)	kg/m <sup>3</sup>	N/A	N/A	1,029	1,052
CO <sub>2</sub> 吸収量	kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	N/A	100	N/A	109

\*1: CO<sub>2</sub>をカルシウムに吸収させたセメントを使用してコンクリートを製造する方法(理論的吸収量: 0.512 kg-CO<sub>2</sub>/kg- $\gamma$ -C<sub>2</sub>S)、\*2: CO<sub>2</sub>-SUICOM によるCO<sub>2</sub>削減効果には $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sを使用する他にもポルトランドセメントを高炉スラグやフライアッシュで代替する効果も含まれる、\*3: 凝固前の生コンの流動性を示す値であり、値が大きいかほど流動性が高い、\*4: 標準的なコンクリートと環境配慮型コンクリートの略称、それぞれの養生条件については標準で蒸気養生(65°C、3時間)の後に気中養生(20°C、13.4日間)、環境では封かん養生(20°C、2日間)の後に炭酸化養生(50°C、12日間)

# CO<sub>2</sub>有効利用技術によるコンクリート製造は標準的なコンクリートと比較してCO<sub>2</sub>排出量を85~102%程度削減できる

## コンクリート製品のLCA評価結果



\*1: 環境配慮型コンクリートはコンクリートブロックにしか適用できないこと、また副生水酸化カルシウム由来のコンクリートはアセチレンの需要量によって生産量の制約を受けることに留意する必要がある



## Ⅱ - 4. まとめ

## II LCA評価

# CO<sub>2</sub>有効利用技術を用いてオレフィン、メタン、コンクリート製品を生産する際のCO<sub>2</sub>排出量をライフサイクルで評価した

## LCA評価の概要

- 本調査ではCO<sub>2</sub>分離回収技術によって排ガスから回収したCO<sub>2</sub>を利用してオレフィン、メタン、コンクリート製品を生産する際のCO<sub>2</sub>排出量をライフサイクルで評価した。また、これら各製品における既存の製造プロセスとCO<sub>2</sub>排出量を比較し、その差をCO<sub>2</sub>削減量として推計した。
- 一方で、これらの結果はあくまで収集した前提条件に基づくものであり、各プロセスの立地条件、CO<sub>2</sub>発生源、触媒やプロセス等の技術によって変わるものであることに注意が必要である。

## 評価結果

- オレフィンについて、CO<sub>2</sub>を有効利用した合成プロセスは既存のナフサ分解による合成プロセスと比較するとCO<sub>2</sub>削減効果があり、また、CO<sub>2</sub>固定量も考慮するとさらにCO<sub>2</sub>削減効果が高い結果となった。一方で、巨視的なCO<sub>2</sub>削減量を考える際には需要（樹脂等のオレフィン用途）による限界があることを考慮しなければならない。
- メタンについて、メタネーションにより合成されたメタンは、LNGと比較すると燃焼した際のCO<sub>2</sub>排出量を大きく低減できる効果がある。更に、メタンの国内需要が大きいことや排ガスから回収したCO<sub>2</sub>を循環的に利用できるという観点から、脱化石燃料として大きなポテンシャルを持つと考えられる。
- コンクリートについて、CO<sub>2</sub>有効利用技術によって製造されるコンクリート製品はライフサイクルでのCO<sub>2</sub>削減量は少なくないものの、コンクリートブロックにしか適用できないなど、用途が限られているため巨視的なCO<sub>2</sub>削減量には限界があることは留意すべきである。

## 今後の課題

- 本評価ではプロセス相互の熱の有効利用や動力回収を考慮できていない。正確なLCA評価を行うためには、全体システムのプロセスシミュレーション、及び最適化が不可欠となる。

# Make your impact

国境 を超え、信をつなぐ。

本件に関するお問い合わせ先

---

## Deloitte.

デロイトトーマツ コンサルティング 合同会社  
エネルギー ユニット

海外事業戦略・公共政策チーム リード  
シニアマネジャー  
榎本 哲也

Email : [teenomoto@tohmatu.co.jp](mailto:teenomoto@tohmatu.co.jp)

〒100-8361 東京都千代田区丸の内 3-2-3 丸の内二重橋ビルディング  
[www.deloitte.com/jp/dtc](http://www.deloitte.com/jp/dtc)

---

デロイト トーマツ グループは、日本におけるデロイト アジア パシフィック リミテッドおよびデロイトネットワークのメンバーであるデロイト トーマツ 合同会社並びにそのグループ法人(有限責任監査法人トーマツ、デロイト トーマツ コンサルティング 合同会社、デロイト トーマツ ファイナンシャルアドバイザー 合同会社、デロイト トーマツ 税理士法人、DT 弁護士法人およびデロイト トーマツ コーポレート ソリューション 合同会社を含む)の総称です。デロイト トーマツ グループは、日本で最大級のビジネスプロフェッショナルグループのひとつであり、各法人がそれぞれの適用法令に従い、監査・保証業務、リスクアドバイザー、コンサルティング、ファイナンシャルアドバイザー、税務、法務等を提供しています。また、国内約40都市に1万名以上の専門家を擁し、多国籍企業や主要な日本企業をクライアントとしています。詳細はデロイト トーマツ グループWebサイト( [www.deloitte.com/jp](http://www.deloitte.com/jp) )をご覧ください。

Deloitte(デロイト)とは、デロイト トウシュ トーマツ リミテッド(“DTTL”)ならびにそのグローバルネットワーク組織を構成するメンバーファームおよびそれらの関係法人のひとつまたは複数を指します。DTTL(または“Deloitte Global”)および各メンバーファーム並びにそれらの関係法人はそれぞれ法的に独立した別個の組織体です。DTTLはクライアントへのサービス提供を行いません。詳細は [www.deloitte.com/jp/about](http://www.deloitte.com/jp/about) をご覧ください。

デロイト アジア パシフィック リミテッドはDTTLのメンバーファームであり、保証有限責任会社です。デロイト アジア パシフィック リミテッドのメンバーおよびそれらの関係法人は、オーストラリア、ブルネイ、カンボジア、東ティモール、ミクロネシア連邦、グアム、インドネシア、日本、ラオス、マレーシア、モンゴル、ミャンマー、ニュージーランド、パラオ、パプアニューギニア、シンガポール、タイ、マーシャル諸島、北マリアナ諸島、中国(香港およびマカオを含む)、フィリピンおよびベトナムでサービスを提供しており、これらの各国および地域における運営はそれぞれ法的に独立した別個の組織体により行われています。

Deloitte(デロイト)は、監査・保証業務、コンサルティング、ファイナンシャルアドバイザー、リスクアドバイザー、税務およびこれらに関連する第一級のサービスを全世界で行っています。150を超える国・地域のメンバーファームのネットワークを通じFortune Global 500® の8割の企業に対してサービス提供をしています。“Making an impact that matters”を自らの使命とするデロイトの約286,000名の専門家については、( [www.deloitte.com](http://www.deloitte.com) )をご覧ください。

本資料は皆様への情報提供として一般的な情報を掲載するのみであり、その性質上、特定の個人や事業体に具体的に適用される個別の事情に対応するものではありません。また、本資料の作成または発行後に、関連する制度その他の適用の前提となる状況について、変動を生じる可能性もあります。個別の事案に適用するためには、当該時点で有効とされる内容により結論等を異にする可能性があることをご留意いただき、本資料の記載のみに依拠して意思決定・行動をされることなく、適用に関する具体的事案をもとに適切な専門家にご相談ください。



IS 669126 / ISO 27001