

# 部門別CO<sub>2</sub>ゼロエミッションに向けて

CO<sub>2</sub>ゼロエミッション検討チーム※

(公財) 地球環境産業技術研究機構

2018年12月19日

※茅 陽一、山口光恒、野村 眞、高木正人、出口哲也、金星春夫、  
面屋大輔 (太字：発表者)

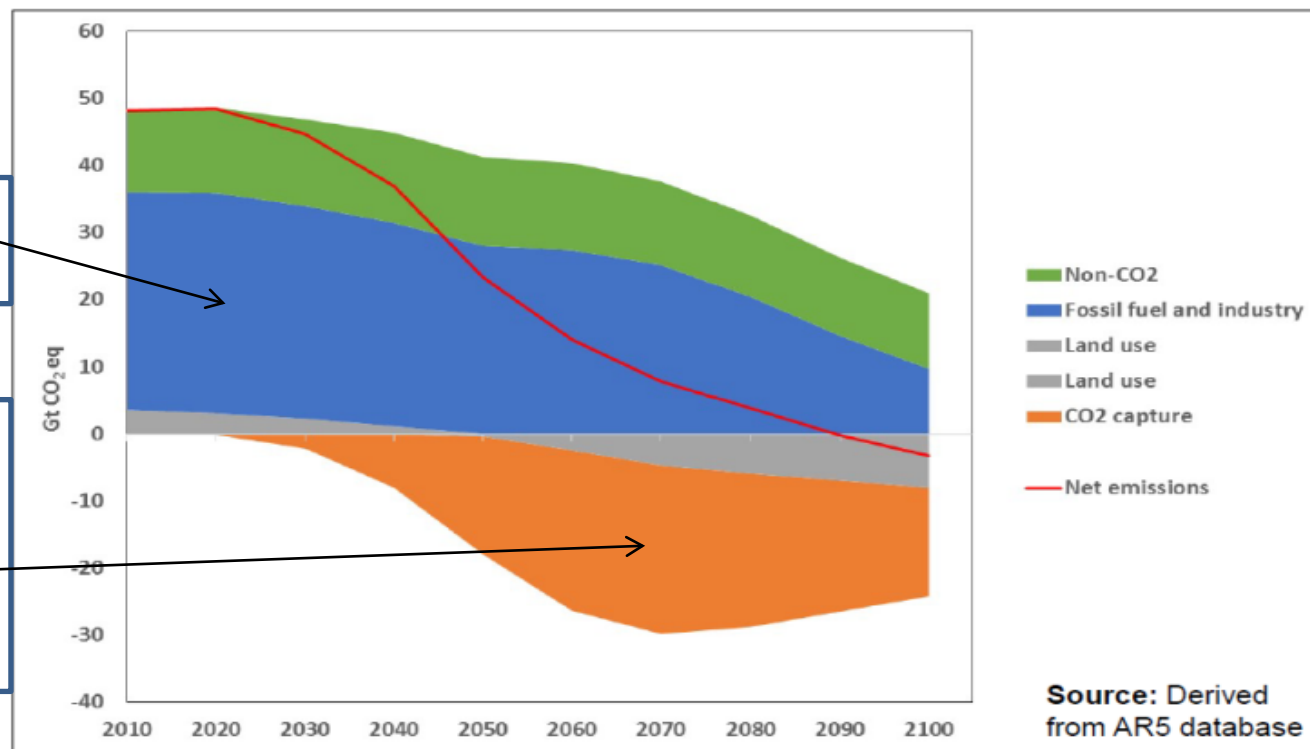
# 目次

---

1. Negative emissionの要請とその実現困難性
2. 電力のゼロエミッション化の問題点
3. 運輸のゼロエミッション化
4. 産業のゼロエミッション化
5. 結論

# IPCC IAM's 2°CシナリオにおけるBECCS -IPCC WG3 chair J.Skeaまとめ-

## Balancing sinks and sources and long-term low greenhouse gas emission development strategies (Article 4)



Note: One illustrative scenario with a 65% probability of getting below 2°C warming

# BECCSの物理的実現困難性

---

CO<sub>2</sub> ネット排出 = 排出 - 吸収

人為的吸収: BECCS, 植林

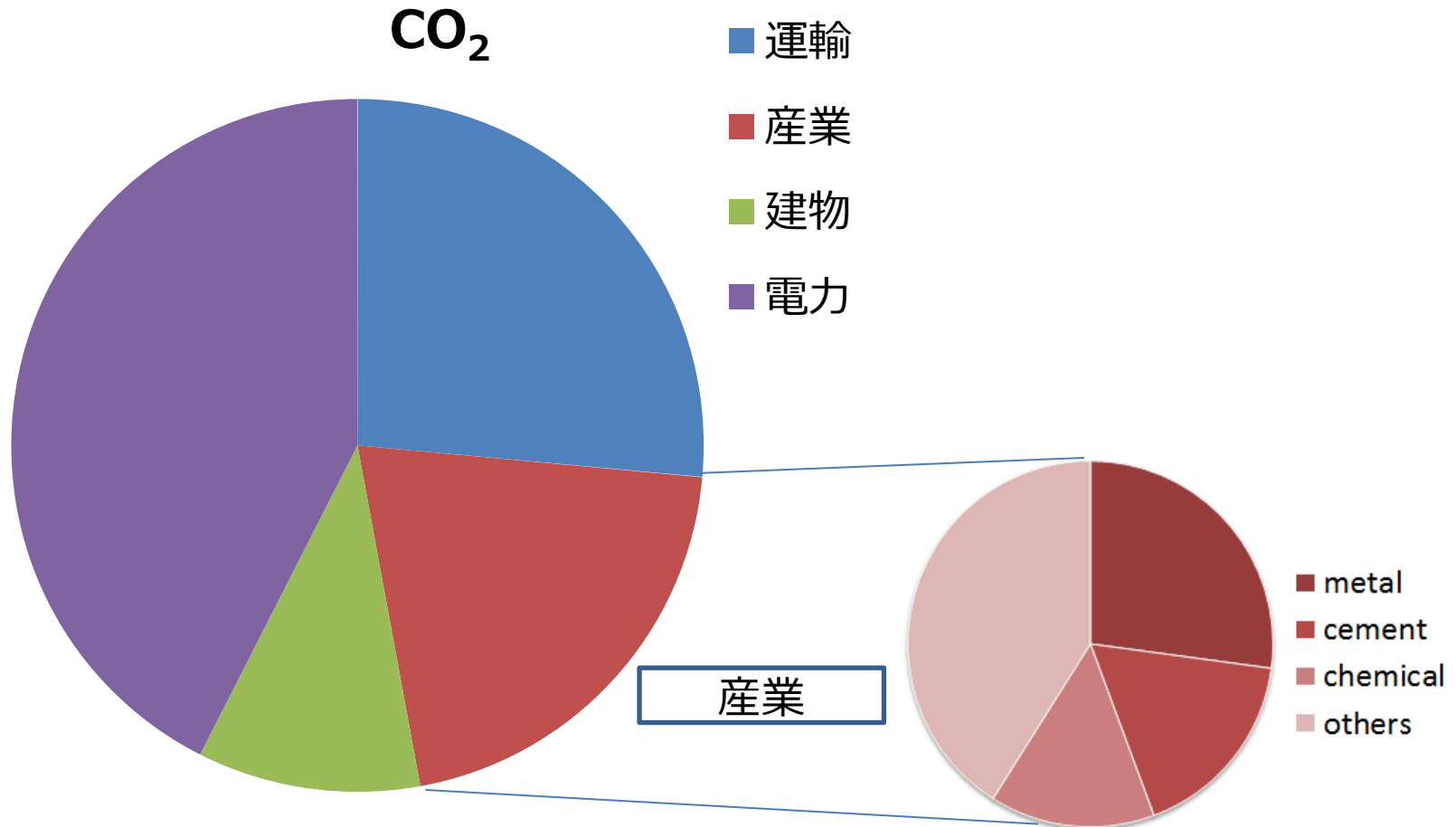
## BECCS の実現の困難性

- 例 : 15Gton/yの CO<sub>2</sub>吸収ケースの実現条件
- 1) 植生必要面積は米国全面積の (0.4~1.0) 倍\*
- 2) 1Mton /yの大規模貯留井1.5万個必要

\* 熱帯雨林~サバンナのデータ

出典:Woodwell, G.M.et al, Science vol.199, Jan 1978

## 世界の部門別CO<sub>2</sub>排出（2014）

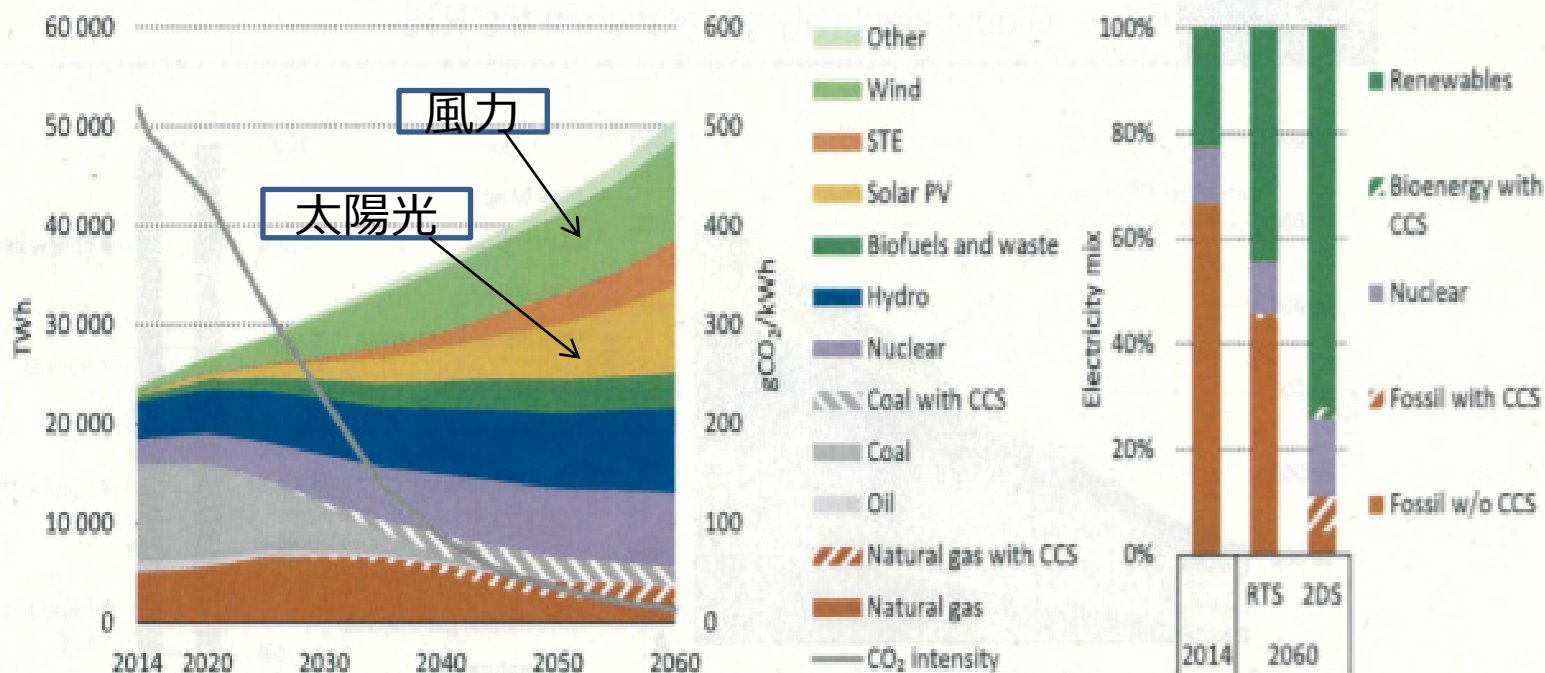


出典: IEA World Energy Outlook  
2016

# 我が国の電源構成

	2017*1	2030政府計画*2
原子力	3%	20~22 %
再エネ		
水力・地熱・バイオ	10	13.5~15
変動再エネ (VRE)		
太陽光	5	7
風力	1	1.7
火力		
石炭	32	26
石油	9	3
LNG	40	27
	*1 総合エネルギー統計	*2 長期エネルギー需給見 通し (H27.7)資源エネルギー庁

Figure 6.4. Global electricity generation in the 2DS



Sources: Data for 2014 from IEA (2016a), *World Energy Statistics and Balances* (database), [www.iea.org/statistics/](http://www.iea.org/statistics/); IEA (2016c), *CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion* (database), [www.iea.org/statistics/](http://www.iea.org/statistics/).

図：2DSにおける電源構成  
—IEA tech. Perspective—

# PV電力貯電のコスト負担（日本）

## —晴天週末2日貯電の場合—

PV電力のシェア	PV必要設備容量 (百万kW)	貯電必要量 (百万kWh)	貯電コスト —PV負担— (円/kWh)	貯電コスト —系統負担— (円/kWh)
10%	95.1	40.2	0.8	0.08
20%	190.2	703	7.0	1.40
30%	285.3	1,580	10.5	3.16

注：1. PV出力抑制ゼロ前提 2. ベース電源が需要の半分をサポート  
3. 蓄電池価格 2万円/kWh を想定



## <回転機慣性と回転数（周波数）変動>

---

### 回転機の運動方程式

$$A J \frac{df}{dt} = P_s - P_d \quad (1)$$

↑ ↑ 駆動 E 負荷 E

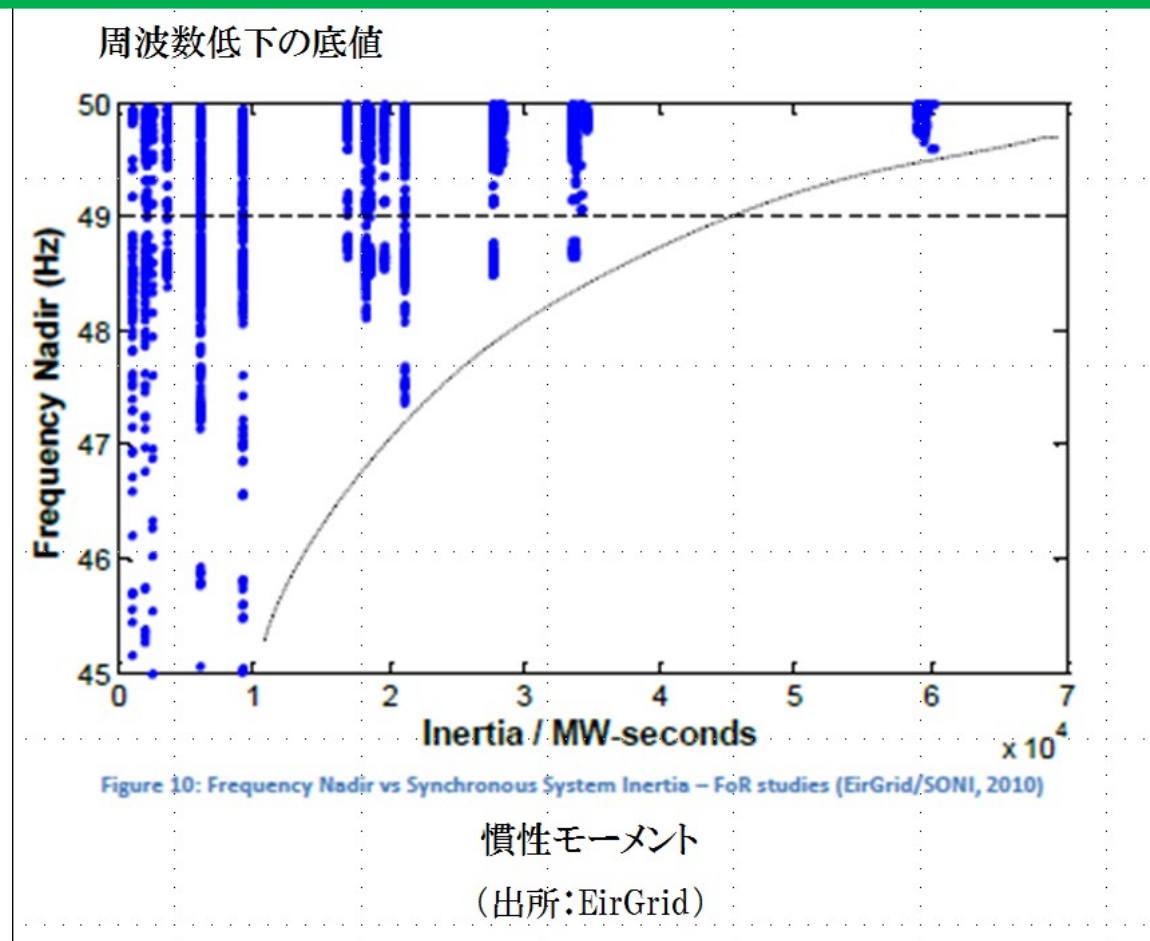
慣性 回転数変化

(電力周波数)

右辺の変化に対して J が小さいほど

回転数（周波数）変化が大きい

# 同期機慣性と系統周波数変動 —アイルランドの例—



Source: Eirgrid: Ensuring a Secure, Reliable and Efficient Power System in a Changing World, June 2011, Fig.10

## 運輸のゼロエミッション化の方向性

**<特徴>** 自動車、船舶、航空機とも、**移動する**という特性から、**発生源のゼロエミ化**が必須。



### **<手段>**

#### **・電動化（ゼロエミ電源）**

- ・蓄電池
- ・燃料電池
- ・（太陽電池）

#### **・バイオ燃料**

- ・バイオエタノール（ガソリン代替）
- ・バイオディーゼル（軽油代替）
- ・バイオジェット燃料

いずれの手段も課題があることから、GHG排出削減効果、導入コスト、その他環境影響（大気・水環境、生物多様性等）を考慮して最適なバランスで進めていくことが望ましい。

## 電動化の動向と主要課題

### <自動車>

- ・乗用車の電動化（HV、EV、PHV）の進展に加え、貨物自動車（小型・大型）への展開が起りつつある。
- ・国内でも配送車（**小型貨物車**）への適用事例があるほか、**大型貨物車**についてもモーターショー等での発表が相次いでいる。

### <船舶>

- ・現状では、電池による航行は航続時間および出力の制約から、内航海運の中でも**近距離**または**港内船**が前提となると考える。
- ・ノルウェーで短距離フェリーやコンテナ船への完全電動化適用の情報あり。

### <航空機>

- ・1人乗りの太陽電池＋リチウムイオン電池の飛行機や4人乗り燃料電池利用飛行機の情報はあるが、いずれも試験飛行のレベルであり旅客輸送の実現には遠い状況。



### 課題：電池の高密度化

- ・現在存在する電池の最大蓄電密度は 0.2kWh/kg 程度。  
石油は、熱量換算すると 12kWh/kg → 電池では**60倍の重量**が必要となる。


## バイオ燃料の動向と主要課題


### <世界の自動車・船舶・航空燃料需要> 2009年

・乗用車・軽貨物車	1,150 Mtoe/y
・貨物車	550
・船舶	220
・航空	240

**計 2,160 Mtoe/y**

source: IPCC AR5 synthesis report, WG3, Fig.8.5, 2014

- 
- 乗用車や貨物車は電動化による対応が相当量考えられるものの、輸送部門の燃料をバイオ燃料に置き換えるためには、**製造量を現状\*から一桁以上拡大**する必要がある。(\*2016年：約80Mtoe)

- 
- 単なるポテンシャルの存在のみならず、既存燃料と競合可能な程度まで**コスト低減**が必要。

例えば、NEDOにおける「**商用化に資する（生産）コスト目標**」70円/L 以下（バイオエタノール）

## バイオ燃料：製造量拡大への対応

---

### ■ セルロース系原料利用の可能性

- サトウキビやトウモロコシ等の食料原料のみでは、食料との競合の観点で大幅な拡大は困難であることから、食料と競合しないセルロース系（残差物等を含む）の利用が期待されている。
- エタノール、ディーゼル、バイオジェット燃料の各燃料種別において、セルロース系利用のプラントが運転されている。

### ■ コスト低減の可能性

- 各プラントにおけるコストの情報は乏しく、どの程度既存燃料に近づけるか、コスト分析が進められている。
- 但し、酵素の有効利用、遺伝子組み換えによる原料生産量向上、プロセスでの残差物有効利用（熱源等）などの技術開発が進められており、コスト低減に資するものと考えられる。

# バイオ燃料のライフサイクルでのGHG排出に留意

## 直接土地利用変化

- ・土壌炭素ストック量の変化
- ・生態バイオマス炭素ストック量の変化

## 原料栽培・収集

- ・肥料・化学物質の製造・調達
- ・施肥・火入れ
- ・機械によるエネルギー消費

## 原料輸送

## 燃料製造

- ・エネルギー投入（電力・熱）
- ・化学物質の製造・調達
- ・反応工程からのGHG排出

## 燃料輸送

## 燃料使用（燃烧）

- 燃料使用までの各工程において、GHGの排出が考えられる。
- 経産省告示\*において、使用量の算定対象となる燃料（バイオエタノール）のライフサイクルでの削減基準（ガソリン比▲55%以上削減）が設けられている。

\* 平成30年度以降の5年間についての  
非化石エネルギー源の利用に関する  
石油精製業者の判断の基準  
(平成30年経産省告示第85号)  
H30.4.17 公布・施行

バイオ燃料は使用時はカーボンニュートラルとみなされるが、**ライフサイクルでのGHG排出に留意**する必要がある。

## 産業のゼロエミッション化の概要

化石資源



熱、化学原料、還元剤

産業部門

- 鉄鋼
- セメント
- 化学
- 紙・パ など

ゼロエミッション化技術

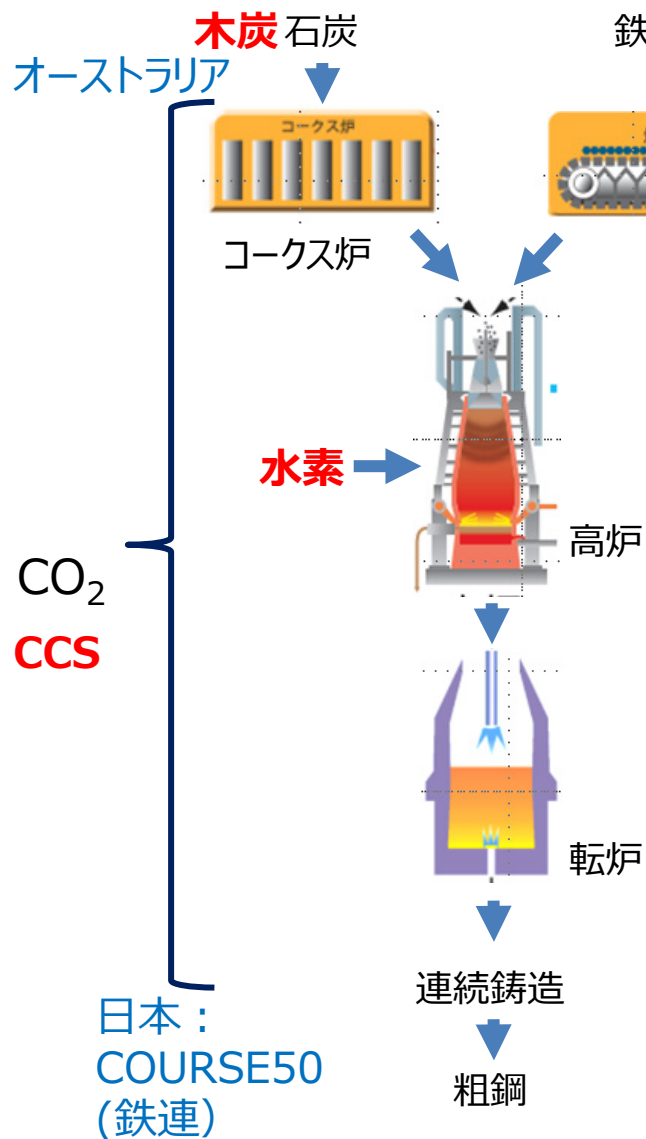
- CO<sub>2</sub>フリー電気の利用
- CO<sub>2</sub>フリー水素※を用いた還元
- CCS
- バイオマス利用

※CO<sub>2</sub>フリー水素：CO<sub>2</sub>フリー電気による水の電気分解  
化石燃料からの水素製造 + CCS

今回はCO<sub>2</sub>フリー電気、CO<sub>2</sub>フリー水素の可能性と課題の検討にフォーカス

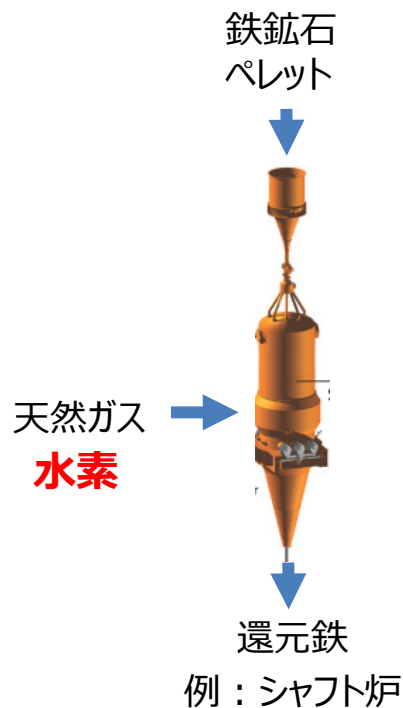


# 鉄鋼のゼロエミッション化技術



高炉・転炉法

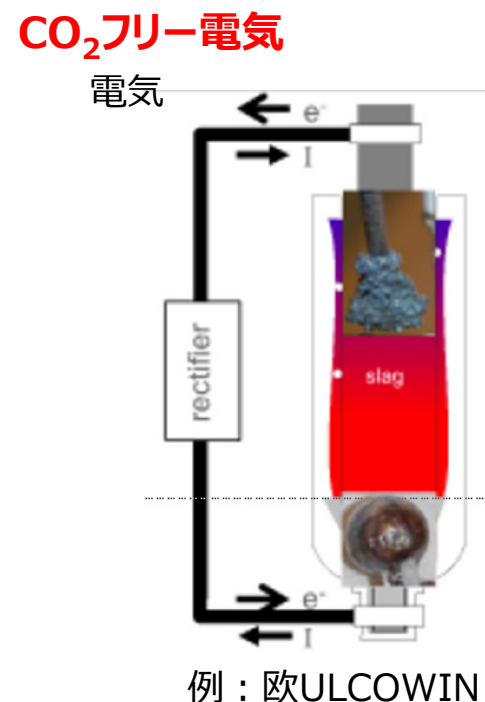
CO<sub>2</sub>フリー電気、水素を用いたゼロエミッション技術が検討されている。



HDR:(Hydrogen direct reduction)

- ・スウェーデン:SSAB等 Hybrit
- ・墺:Voestalpine Stahl
- ・米：ユタ大学
- ・日本：鉄連長期温対ビジョンで、高炉を用いない還元製鉄に言及

直接還元法



EU: ULCOS  
米：MIT

電解還元法

# セメント・コンクリートのゼロエミッション化技術

## <セメント製造プロセスの脱炭素化>

- ◆ クリンカー焼成のための熱エネルギー由来CO<sub>2</sub> <全排出量の約4割>

→ CO<sub>2</sub>フリー電気の利用 (プラズマ加熱等)  
バイオマス(有機廃棄物を含む)の利用

スウェーデン: Vattenfall等 (CemZero)  
EU/メキシコ: Cemex等 (SOLPART)

- ◆ プロセス由来CO<sub>2</sub> (CaCO<sub>3</sub>→CaO+CO<sub>2</sub>) <全排出量の約6割>

→ CCS

ノルウェー: Norcem/RTI 等

米: C2CNT等

CCU (鉱物固定化。化学品や燃料等の製造)

カナダ: CarbonCure, 米: Solidia Technology, 豪: MCI 等

## <既存のセメントに代わる強度発現材料の開発>

→ 例) 酸化マグネシウム (MgO) ベースのセメント

仏: Lafarge等で基礎研究中

(原料MgO<sub>3</sub>Siは焼成時にCO<sub>2</sub>排出なし。硬化時にCO<sub>2</sub>吸収)

ジオポリマー (Alkali-activated binder)

豪州, 日本: NEDO/CRIEPI等

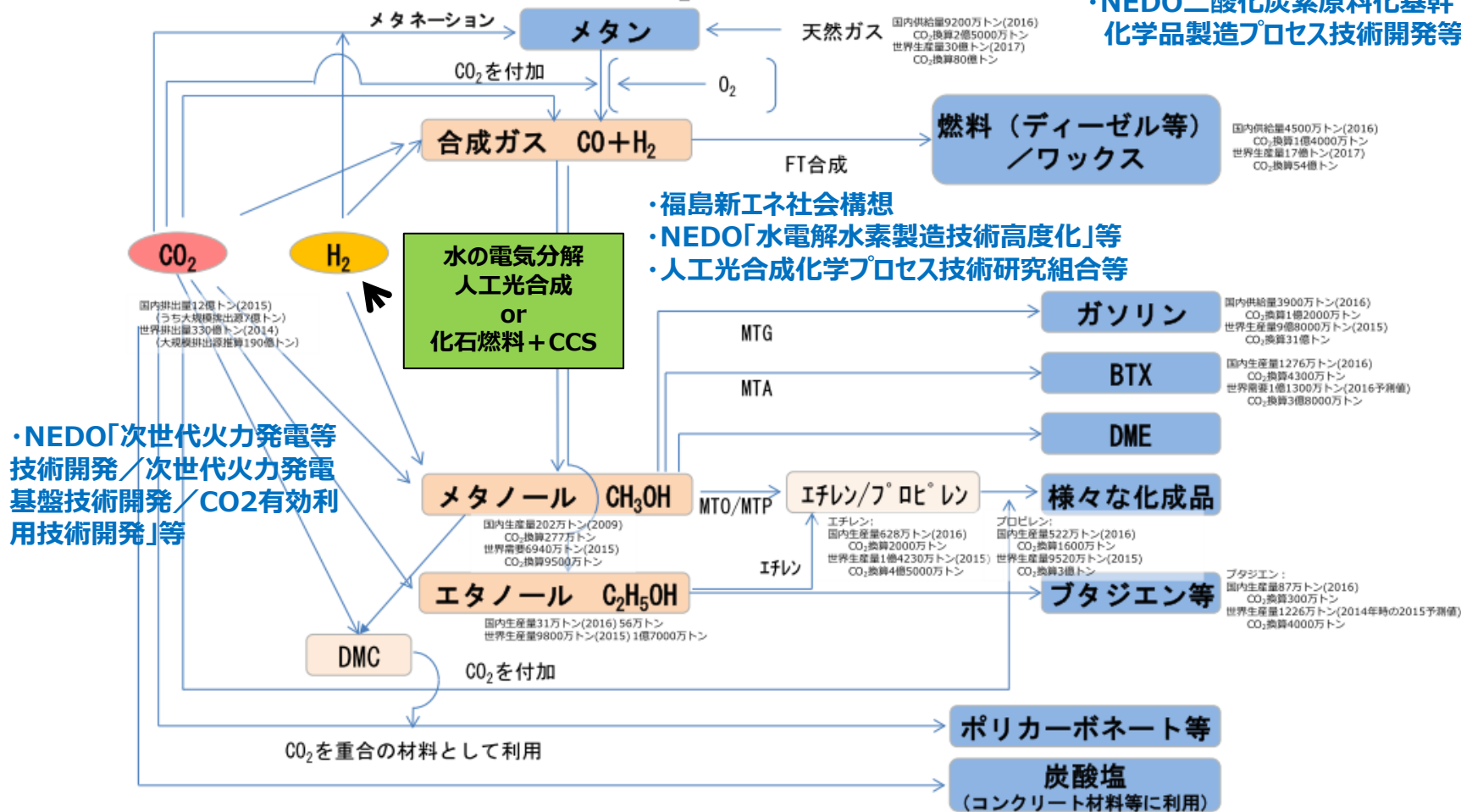
(Si-Al系粉体 (フライアッシュ等) とアルカリ水溶液が重合して硬化)

# 化学品製造のゼロエミッション化

- ・欧州：ドイツ等
- ・日本：CCR研究会等

CO<sub>2</sub>利用の可能性

・NEDO二酸化炭素原料化基幹  
化学品製造プロセス技術開発等



・NEDO「次世代火力発電等  
技術開発 / 次世代火力発電  
基盤技術開発 / CO<sub>2</sub>有効利用  
技術開発」等

- ・福島新エネ社会構想
- ・NEDO「水電解水素製造技術高度化」等
- ・人工光合成化学プロセス技術研究組合等

注：生産量等のデータ出典→ 平成28年資源・エネルギー統計年報（資源・エネルギー庁）、平成28年 経済産業省生産動態統計年報 化学工業統計編、化学品ハンドブック2017、IEA オンライン統計データ（2015）、「2017年版世界化学工業白書」化学経済2017年3月号、三菱化学テクノロジーサーチデータ、METI(世界の石油化学製品の今後の需給動向：平成25年)、OECD-FAO Agricultural Outlook 2017-2026

## 4.産業のゼロエミッション化(5)

# 産業のゼロエミ化に必要なCO<sub>2</sub>フリー電気・水素（世界全体）

部門	製品量 Gトン/年	必要電力量 TWh	必要水素量 万トン/年	備考
鉄鋼	粗鋼1.7	4,420		<b>電解還元</b> : 2.6MWh/t-steel (IEA2017)
		6,120 ← 水の電気分解	12,750	<b>HDR</b> : 75kg-H <sub>2</sub> /t-DRI 電炉分等 0.8 MWh/t-steel (水電解の場合 3.6MWh/t-steel) (IEA2017)
セメント	ポルトランドセメント 4.2	3,600		<b>電気</b> : 0.86MWh/t-セメント 熱 : 8300GJ/ t -セメント (IEA2017)
化学	アンモニア 0.18	1,730		<b>電気</b> : 9.6MWh/t-アンモニア (IEA2017)
	エチレン 0.12	2,400 ← 水の電気分解	5,172	<b>水素</b> 0.431t/t 内閣府ボトルネック研究会2018 (水電解 20MWhr/t) (IEA2017)
	プロピレン 0.09	3,420 ← 水の電気分解	3,879	<b>水素</b> 0.431t/t 内閣府ボトルネック研究会2018 (水電解 38MWh/t) (IEA2017)

合計 15,570（鉄鋼が電解還元の場合、HDRの場合は17,270）

産業のゼロエミ化には大量のCO<sub>2</sub>フリー電気・水素が必要。

CO<sub>2</sub>フリー電力換算では15,570TWh→現状の電力需要（22,000TWh）の71%！

## 産業のゼロエミ化に必要なCO<sub>2</sub>フリー電力・水素（日本）

a)鉄鋼協会、セメント協会、日本アンモニア・肥料協会、石油化学工業協会、エネルギー白書、総合エネルギー統計 生産量は特に断らない限り2016年

部門	製品量 <sup>a)</sup> 万トン/年	必要電力量 TWh	必要水素量 万トン/年	備考
鉄鋼	粗鋼 10,466 (2017年)	356		電解還元 : 2.6+0.8=3.4MWh/t-steel (IEA2017)
		461	← 水の電気分解 →	753 HDR : 75kg-H <sub>2</sub> /t-DRI 電炉分等 0.8 MWh/t-steel (水電解の場合 3.6+0.8=4.4 MWh/t-steel) (IEA2017)
セメント	ポルトランドセメント 4,081	35		電気 : 0.86MWh/t-セメント 熱 : 8300GJ/ t -セメント (IEA2017)
化学	アンモニア 110	11		電気 : 9.6MWh/t-アンモニア (IEA2017)
	エチレン 628	126	← 水の電気分解 →	271 水素 0.431t/t 内閣府ボトルネック研究会2018 (水電解 20MWhr/t) (IEA2017)
	プロピレン 522	104	← 水の電気分解 →	225 水素 0.431t/t 内閣府ボトルネック研究会2018 (水電解 38MWh/t) (IEA2017)

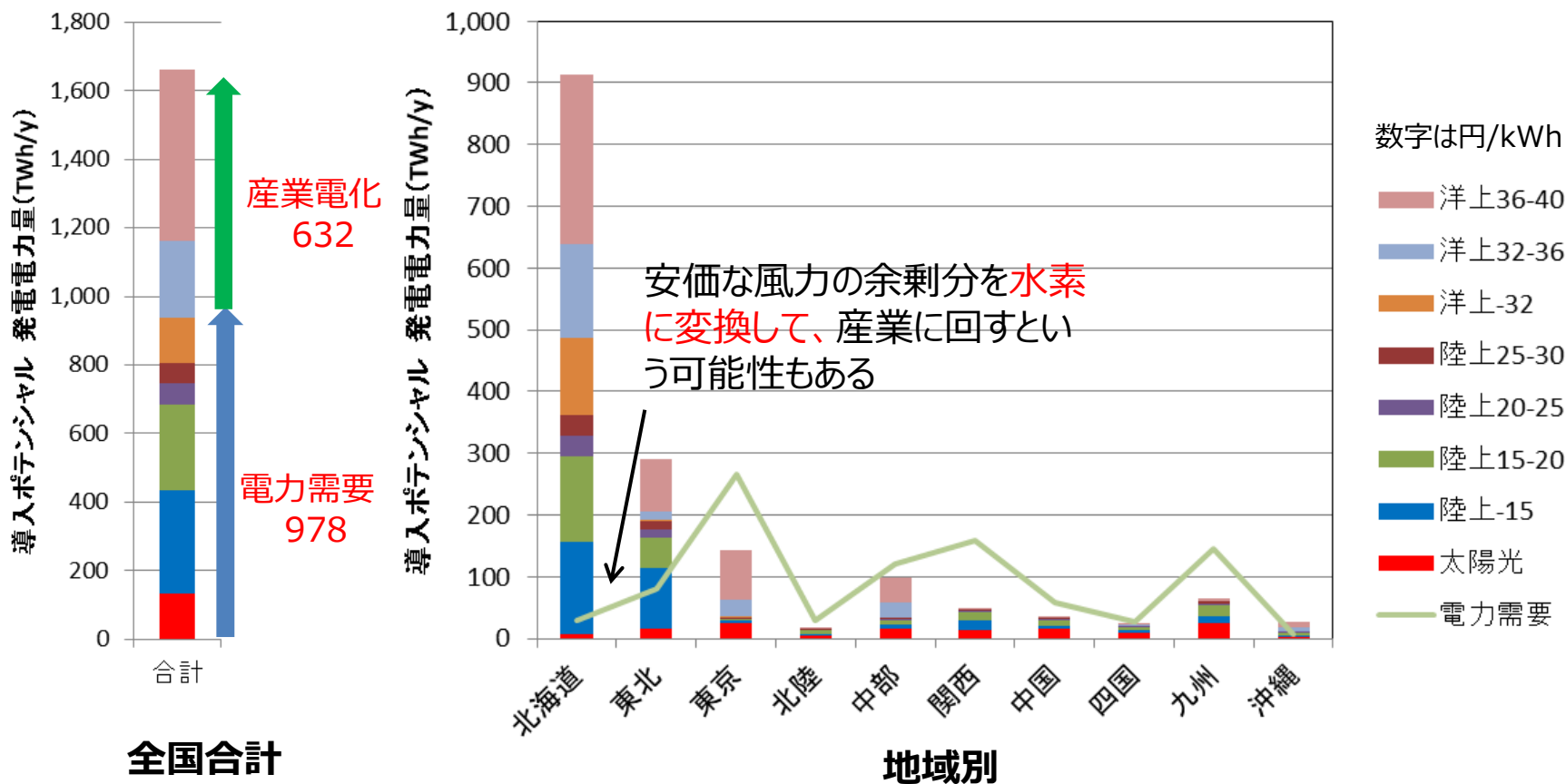
合計 632（鉄鋼が電解還元の場合、HDRの場合は737）

CO<sub>2</sub>フリー電力換算では632TWh→2016年の電力需要（950TWh）の67%！

# 再生可能エネルギーのポテンシャル（日本の場合）

## コスト40円/kWh以下

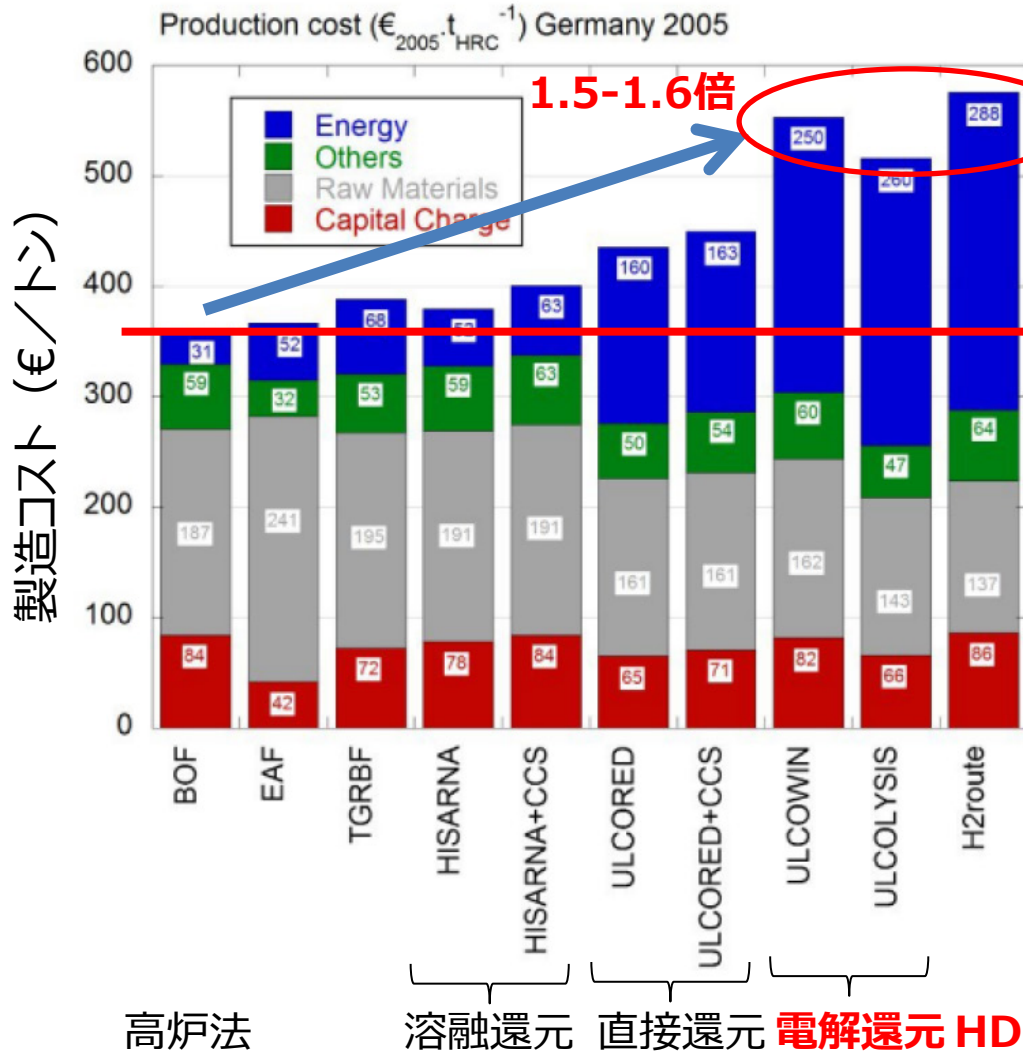
再生可能エネルギーはポテンシャル的には電力需要と産業の電化の両方をカバーできるが、圧倒的にコストが高くなる。また、出力変動に伴う電力品質維持、予備力確保が課題に。



環境省 平成27年度 再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書(2016)

環境省委託事業 平成22年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査(2011) からRITEにて作図

# 鉄鋼のゼロエミッション化 課題：コスト上昇



前提：電力 8.5円/kWh  
(1€=130円)

エネルギーコストが約1/3になれば可能性が出てくる  
→2.8円/kWh

再生可能エネルギーの現状での最安値：30USD/MWh  
→3.3円/kWh

日本目標

太陽光：7円/kWh (2030)\*

風力：8~9円/kWh (2030)\*\*

この先どうなるか？

\*太陽光競争力強化研究会報告書 (2016)

\*\*風力競争力強化研究会報告書 (2016)

# 化学工業のゼロエミッション化 課題：コスト上昇

## 化学品のコスト<sup>1)</sup> (円/kg)

1€=130円、1米ドル=110円で換算。

	再生可能電力 7,000~3,000hr/year			現状価格 <sup>2)</sup>
	1.3円/kWh	3.9円/kWh	6.5円/kWh	
アンモニア	33~49	59~77	96~104	49 <sup>3)</sup>
メタノール	38~58	61~81	87~107	38 <sup>4)</sup>
エチレン	88※	189※※		97~141
プロピレン	88※	189※※		72~118
BTX	169※	364※※		ベンゼン 57~114

※メタノール=39円/kg、※※メタノール=85円/kg

1) Bazzanella A. M.; Ausfelder F., "Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry", *The European Chemical Industry Council report (2017)*

2) 伊藤忠 化学品部門 ケミカルインフォメーション(3年間)

3) 経済産業省 生産動態統計 化学工業 (2017) , 4)財務省 貿易統計(2017)

**現状価格より低くなる  
場合を赤色で示す。**



## 産業のゼロエミッション化 まとめ

---

- 鉄鋼、セメント、化学工業など、ゼロエミッション化を可能とする技術は存在している。
- ゼロエミッション化の為には大量のCO<sub>2</sub>フリーの電気・水素あるいはバイオマス、CCSが必要となる。
- 我が国においても、産業のゼロエミッション化に必要なCO<sub>2</sub>フリーの電気・水素を作る為の再生可能エネルギーのポテンシャルはあるが、コストが高いことが最大の欠点である。また、太陽光・風力等については、出力変動に伴う電力品質維持や予備力確保が課題に。
- CO<sub>2</sub>フリーの電気・水素の低コスト化を進める為の技術革新とともに、安価な水素の国際調達や開発技術を軸とした国際協力なども、本分野で優位に立つ為の重要な要素となる。

# 結論

---

- RITEでは検討グループを立ち上げて、CO<sub>2</sub>ゼロエミッション化の技術、課題、及び対応策等について検討を続けている。本シンポジウムではその一部について発表した。
- 各部門でゼロエミッションを達成できる可能性はあるが、それが実現できるかは技術と経済及び社会システム上の課題を解決できるかにかかっている。
- 需要側での削減とともに、ここで実施した様なボトムアップ・アプローチによって、部門別に何が実際にできるか検討し、技術開発力をより向上させて課題解決を行い、世界全体で脱炭素化を成功させる為の変革を生み出していくのがより良い方策であると考える。