

AT A TCTATAAGA CTCTAACT

第1回グリーンイノベーション戦略推進会議ワーキンググループ

資料7-2

CCUS/カーボンリサイクル

2020年7月7日 (火)

国立研究開発法人科学技術振興機構

研究開発戦略センター

環境・エネルギーユニット

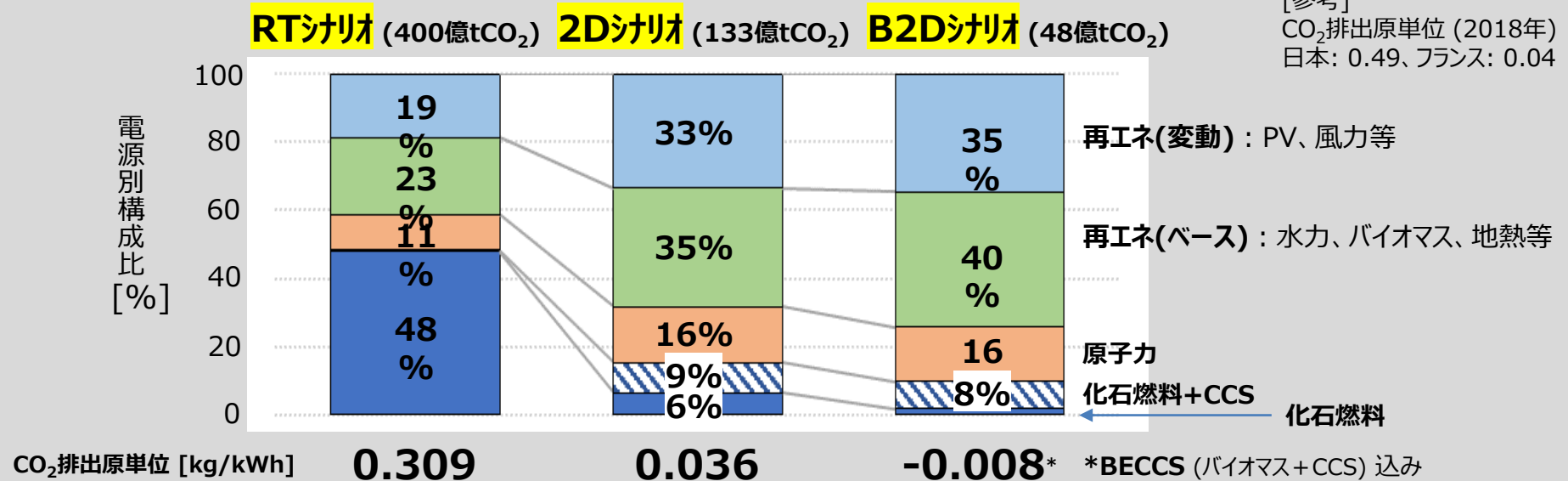


国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

図. 2050年時点の世界の電源別構成比 (シナリオ毎)

OECD/IEA ETP2017データを
 基にCRDSにて図作成

[参考]
 CO₂排出原単位 (2018年)
 日本: 0.49、フランス: 0.04



◆ 2℃目標達成のためには電力の脱化石 (脱炭素・CO₂フリー電源化) が必須

- 再エネ変動電源 (太陽光、風力等) の拡大
- 変動電源増加に対応した「電力システムの安定化」と「余剰電力の最大活用」

その実現には..

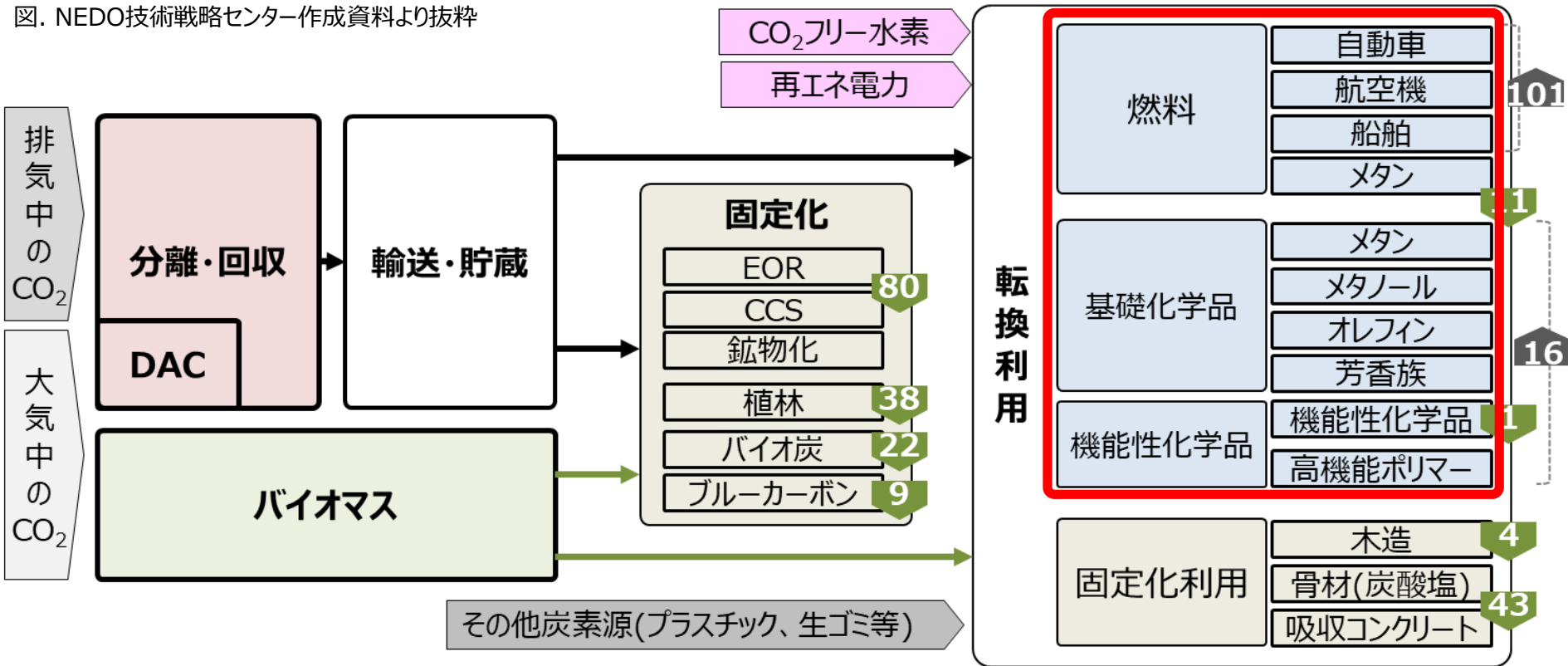
セクターカップリング (再エネ電力の最大限利用のための、需要部門の熱や運輸分野(電気・燃料)にまたがる横断的なエネルギー転換の考え方) **による柔軟性あるエネルギーシステムの構築が鍵**

- Power-to-X (ガス、燃料、化学品) などの技術
- 電力エネルギーの貯蔵: 短期用→電池、長期用→水素、炭化水素等

- 2050年以降のビヨンドゼロを目指すには、脱炭素化が困難な分野（運輸、化学等）での炭素循環（カーボンリサイクル）が必要であり、そのための**燃料・化学品へのCO₂変換技術**（下図の赤枠部分）が長期的視点からは重要になる.*

* JST研究開発戦略センターでは、NEDO技術戦略センターと協力して燃料・化学品へのCO₂変換技術に関する最新動向の調査を実施し、報告書を作成（2020年3月発刊、<https://www.jst.go.jp/crds/report/report04/index.html>）

図. NEDO技術戦略センター作成資料より抜粋



XX : CO₂排出量（直接排出, 2050年, ETP2017, RTシナリオ）
 XX : CO₂削減ポテンシャル（革新的環境イノベーション戦略）

- 2050年以降のビヨンドゼロに寄与するための技術群のうち、長期的視点からの注目技術は以下の2つ。これらに関する研究開発は未だ基礎研究フェーズにあるためアカデミアの役割が重要になる。

A- CO₂変換技術：電解合成、CO₂還元技術

B- CO₂分離・回収技術：DAC（低濃度CO₂）

表. JST-CRDS「二酸化炭素資源化に関する調査報告書」より

<https://www.jst.go.jp/crds/report/report04/index.html>

原料	反応相手	主な反応方法	生成物	研究開発事例
CO ₂	水素	触媒化学 (発熱反応)	合成ガス	・逆シフト反応 (CO ₂ + H ₂ → CO + H ₂ O) によるCO ₂ 還元反応でのCO製造は実用化。ドイツではP2Xとして電解水素を利用した逆シフト反応(電解合成)およびFT合成法も含めた研究開発が進められている。: Sunfire (独) 3トン/年
			メタノール	・(CO ₂ + 3H ₂ → CH ₃ OH + H ₂ O) 実証化プラント実績あり: Carbon Recycling International (CRI)、三井化学
			メタン	・サバティエ反応 (CO ₂ + 4H ₂ → CH ₄ + 2H ₂ O) によるメタネーション技術として実用化: Audi(独) 1000トン/年 日立造船/INPEX が 8 Nm ³ -CO ₂ /hスケールのプラント設置 (NEDO事業)
	水	光触媒	炭化水素等	・人工光合成(水分解 + CO ₂ 還元)として研究開発中: 東工大、東京理大、豊田中研など ・課題: CO ₂ 還元光触媒の選択性や効率向上。また実用化に向けてはプロセス化を考えた検討も必要。
				CO 合成ガス (CO+H ₂)
		電気化学	メタン メタノール 炭化水素等	・中温域(200~400℃程度)で直接電解合成により一段反応での炭化水素合成が可能(プロセス簡略化、また電解水素を経由するよりも高効率化が可能): 東工大 ・課題: 実用に耐える中温域電解質のほとんどない→新規電解質開発が必要
			炭化水素等	・藻類・シアロバクテリア利用: 経済性を含めたプロセス技術が課題
		生物化学 (太陽光、その他)	炭化水素等	・ハイブリッド型 (例えば水分解は光電解・CO ₂ 還元反応に生物代謝を利用。あるいは生体反応における酵素の一部を置き換えることで反応速度や反応選択性を向上) 反応速度の課題が大きい。 ・米国APAR-EのElectroFuelでは微生物と電気などの組み合わせによる研究開発が行われた。
	(分解)	熱	CO	・反応性セラミックスなどの格子酸素欠損を利用したCO ₂ 分解反応など 低温化、エネルギー削減が必要
		電気化学	炭素	・固体炭素の取り扱いも必要になることから技術的に難しい。 北大で熔融塩を用いた電気化学反応を検討。また産総研で液体金属カソードを用いて、電気化学的に粉末炭素を遊離させる基礎研究を予定
エチレンなど (有機分子)	触媒化学 (発熱反応)	高分子材料の原料 カルボキシル化	・CO ₂ を原料としたカーボネート化合物製造法: 旭化成 ・エチレンとCO ₂ からのアクリル酸合成: BASF	

- 欧州は出口寄りの技術に注力する一方、米国は萌芽的研究を含めて可能性のある技術を幅広く検討。

【欧州 (EU)】

- 2050年までにEU域での正味ゼロエミッション化に向けて対応中。2030年目標に向けては政策的な対応が中心。
- 2050年目標に向けた技術シナリオの一つとして、再エネ電力からの燃料・化学品製造技術 (Power-to-X、P2X*) に大きな期待。
- CO₂変換技術等に関する研究開発は着実な実現を目指すため、TRLが高い技術 (開発・商用化フェーズ) に注力 (例：電解水素を用いたCO₂変換技術やCO₂からCOへの電解還元技術など)。

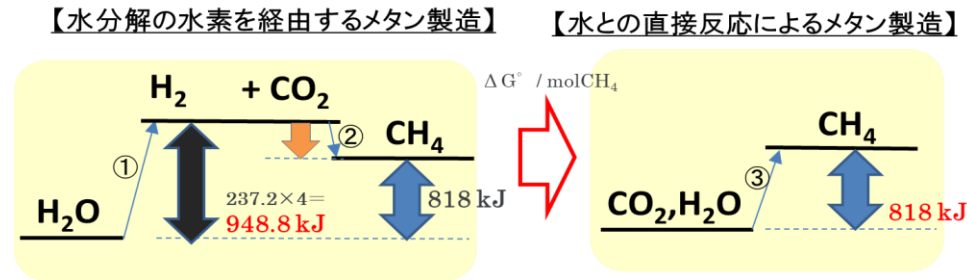
* P2X技術による製品はe-fuel、e-gasなどと呼ばれる

【米国】

- エネルギー安全保障の観点から、多様なエネルギー関連技術に取り組んでおり、その一つとして燃料・化学品へのCO₂変換技術にも注力。
- CO₂電解還元、光触媒以外にも生物学的変換、電気化学とのハイブリッドなど、広範な技術を、基礎 (研究フェーズ) を含めて実施中。
- 電解等で製造した合成ガス (CO+H₂)に微生物を用いたガス発酵でエタノール等へ変換する技術が選択性や原料の柔軟性の観点から着目されている (産業廃ガス利用、廃棄物ガス化も想定)。

● 動向① 水を水素源とする直接CO₂電解還元技術

- 利点1：将来社会ニーズ（将来のCO₂フリー電力システムとの良好な適合性/セクターカップリングへの貢献/長期エネルギー保存を可能にする等）との親和性
- 利点2：複数反応の単反応化による反応プロセスの高効率化・工程簡素化への貢献の可能性



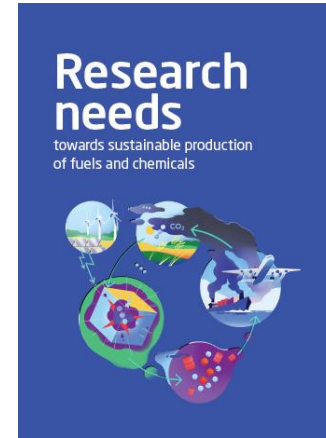
- 課題：触媒技術（反応選択性、耐久性、転換率）が未成熟. 課題克服に向けたアプローチは以下の2つ.
 - 固相触媒以外に分子触媒の検討
 - ガス拡散電極採用などのシステム対応

● 動向② 上記技術の補完・代替を目指した生物学的変換技術の活用

- 対応例：生物代謝の活用（加えて化学的変換とのハイブリッド型）
 - 光合成微生物の機能強化によるCO₂の生物学的変換
 - 非光合成微生物による合成ガスの生物学的変換
 - 合成生物学による微生物の代謝経路の変換（代謝工学）
- 利点：高い反応選択性や原料ガス成分変動への良好な適応性
- 課題：転換速度改善、基礎的理解

(1) 研究ニーズのとりまとめ

- 欧州では、Energy-X (Horizon2020プロジェクト) において欧州アカデミアが中心となり、Power-to-Xに焦点を当てた “Research needs towards sustainable production of fuels and chemicals” を発刊(更新版2020.2.20)
- 米国では、全米アカデミーズがネガティブエミッション技術 (DAC含む) レポート “Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration” を発刊 (2019)。また “Gaseous Carbon Waste Streams Utilization: Status and Research needs” (CO₂変換技術含む) を発刊(2019)



https://www.energy-x.eu/wp-content/uploads/2019/09/Energy_X_Research-needs-report.pdf



<https://www.nap.edu/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda>

<https://www.nap.edu/download/25232>

(2) Science, Natureでの最近の論文やレビュー例

- Ren *et al.*, *Science*, **365**, 367 (2019.7), 「Molecular electrocatalysts can mediate fast, selective CO₂ reduction in a flow cell」
→ CO₂還元としてガス拡散電極、かつ分子触媒を利用。分子触媒の課題である活性向上 (ファラデー効率が高い)、安定性を向上。
- Li *et al.*, *Nature*, **557**, 509 (2020.1), 「Molecular tuning of CO₂-to-ethylene conversion」
→ 無機有機 (銅触媒 + 有機分子) のハイブリッド触媒によるCO₂還元によりエチレンを生成。
- De Luna *et al.*, *Science* **364**, 350 (2019.4), レビュー 「What would it take for renewably powered electrosynthesis to displace petrochemical processes?」
→ 現状のCO₂還元電解触媒の性能レベルのレビュー、および将来において電解合成が石油化学プロセスを置き換えるための条件を試算 (4 ¢ / kWh以下、エネルギー変換効率60%以上、有望中間体としてCO(合成ガスへ)、後段プロセスとして生物学的変換)

(3) 論文数動向からみる日本の立ち位置

- CO₂変換技術に係る分野では日本はTop5に入る
- JST (ALCA、CREST/さきがけ、ACT-C)、JSPS (I4LEC)、METI (ARPCChem)、NEDO (未踏チャレンジ)、環境省などで短中期～長期的観点の研究開発が進行中
- シーズの裾野を一層広げていくことが重要

そのうち…

「CO₂電解還元技術」

• **世界3位** (286報)*

日本発論文の主要著者：石谷(東工大)、中田(理科大)、栄長(慶応)、森川(豊田中研) など

「CO₂電解還元技術 & 分子触媒」

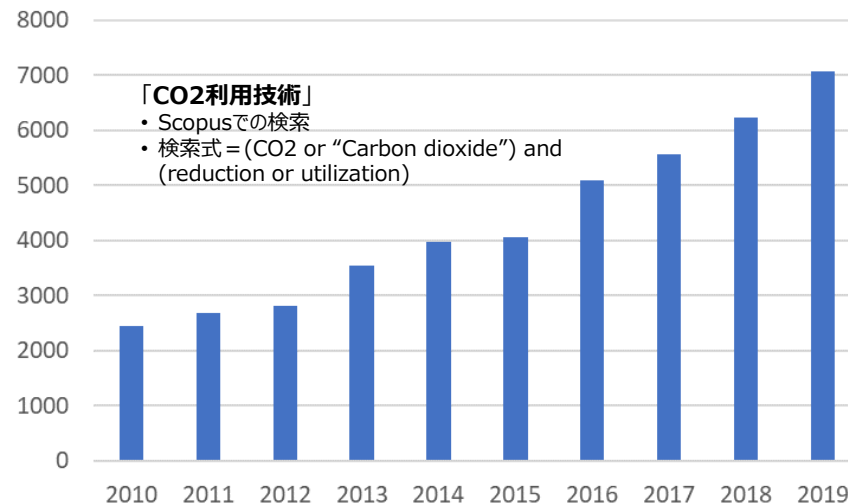
• **世界4位** (38報)*

日本発論文の主要著者：森川(豊田中研)、石谷(東工大)、藤田(米ブルックヘブン国研)、正岡(大阪大) など

「生物電気化学」

• **世界4位** (21報)*

日本発論文の主要著者：加納・白井・北隅(京大)、高木(立命館)、天尾(大阪市大) など



順位	国名	論文数*
1	中国	11,898
2	米国	8,305
3	英国	3,101
4	ドイツ	2,934
5	日本	2,615
6	豪州	1,883
7	イタリア	1,876
8	インド	1,872
9	韓国	1,716
10	スペイン	1,698

* 2010～2019年累計

● 実装化における主な制約はコスト

→ 斬新なエンジニアリングデザインが必要

- 吸脱着方式のコンセプト（固体吸着材利用が前提か？）
- コンタクターの圧損低減、流れ設計、吸脱着材への接触面積最大、フィードの不純物削減など
- 熱回収の設計(温度スウィング・スチーム利用)
- スケールアップにおける概念設計／モジュール技術など

● CCSよりも低濃度のCO₂を回収する技術（5～15%→0.04%）のため、熱力学的に不利（ただし100%回収の必要なし）

→ 吸脱着材の性能、安定性、酸素や水分解への耐性など

- 吸脱着時のエネルギー削減可能な材料/吸脱着速度の向上/吸着容量拡大
- 吸脱着サイクル寿命の長寿命化、耐久性向上、製造コスト削減
- 吸脱着機構の理解

● LCA評価

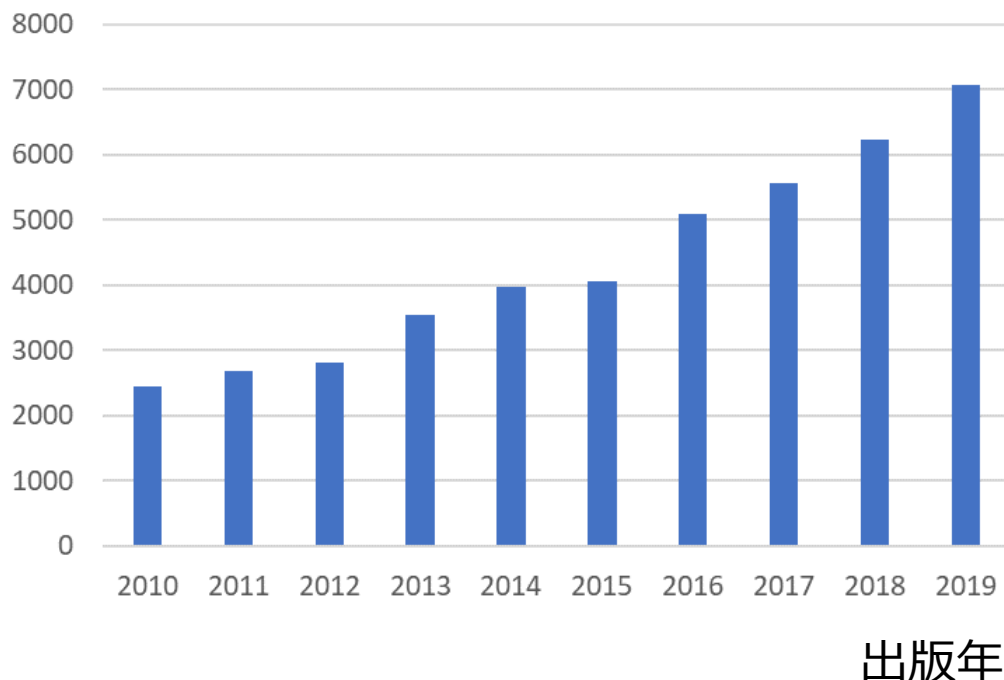


写真出典：ICEF資料より

参考

- CO₂利用技術の論文数は増加。2019年で7,074件
- 2010～2019年で総論文数43,444件、その内日本は2,615件で第5位

論文件数

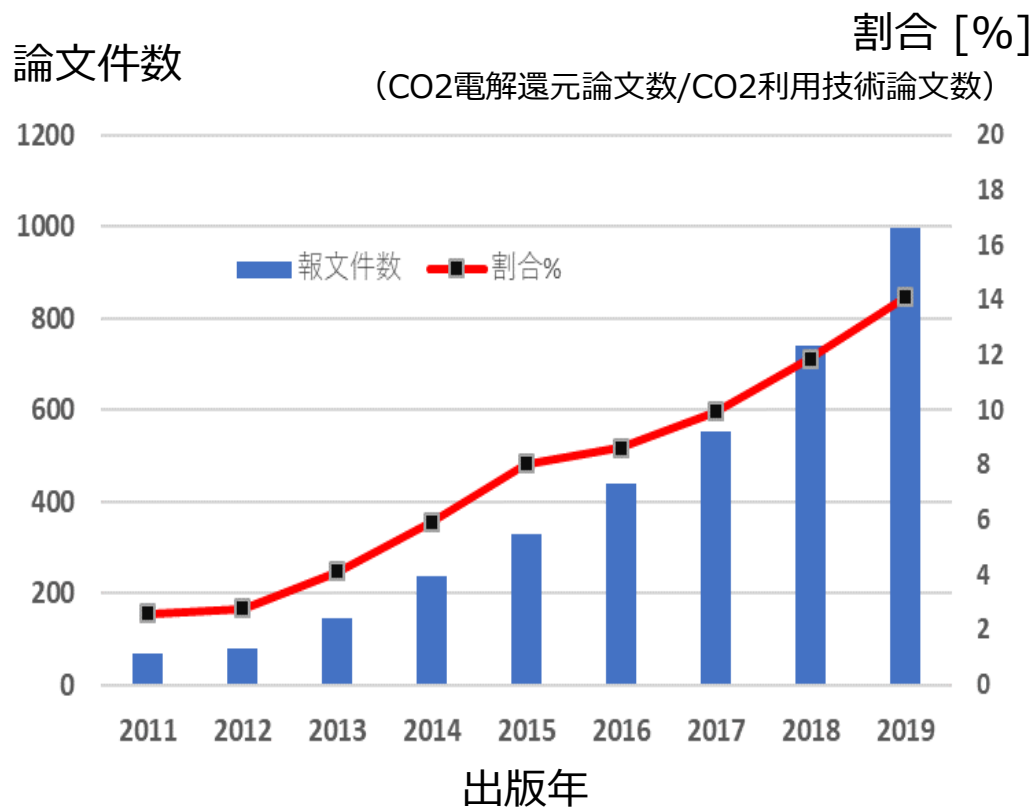


順位	国名	論文数*
1	中国	11,898
2	米国	8,305
3	英国	3,101
4	ドイツ	2,934
5	日本	2,615
6	豪州	1,883
7	イタリア	1,876
8	インド	1,872
9	韓国	1,716
10	スペイン	1,698

* 2010～2019年の累計

- Scopusでの検索
- 検索式 = (CO₂ or "Carbon dioxide") and (reduction or utilization)

- CO₂電解還元の論文数は増加傾向。2010~2019年の総論文数は3,642件、2019年は997件。CO₂利用技術に対する割合も増加傾向にあり現在は約15%。
- 日本発論文の主要著者：石谷(東工大)、中田(理科大)、栄長(慶応)、森川(豊田中研) など

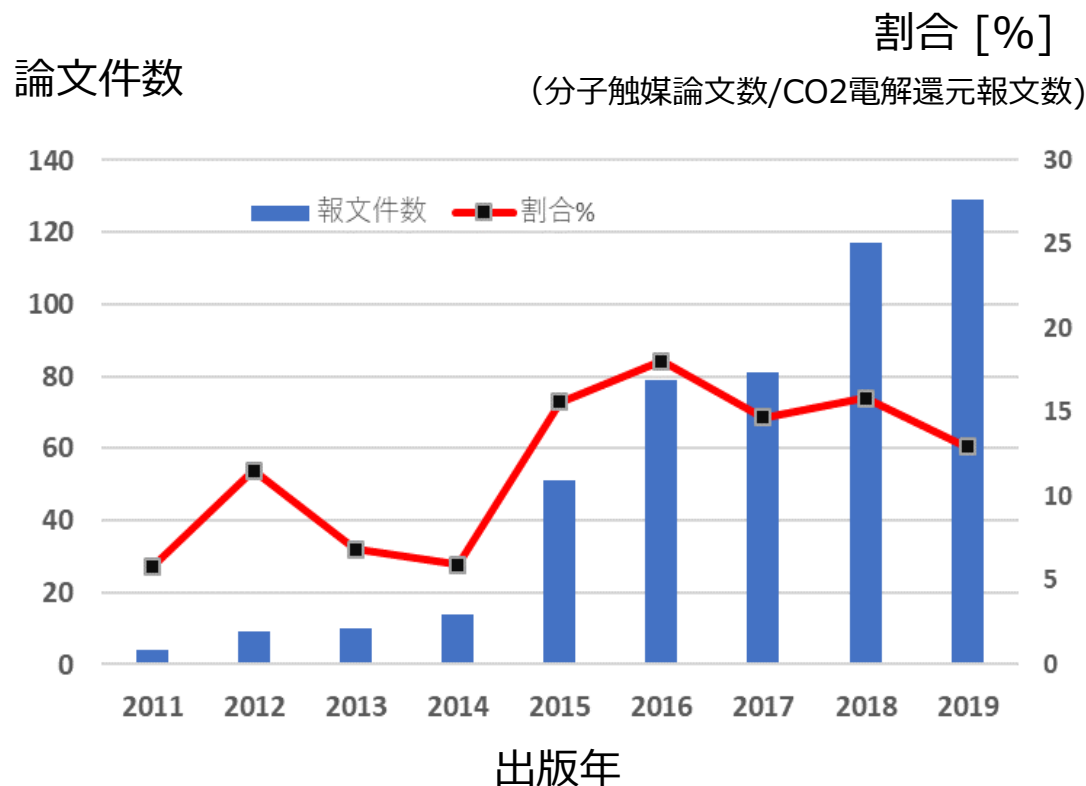


順位	国名	論文数
1	中国	1,288
2	米国	1,088
3	日本	286
4	韓国	214
5	ドイツ	201
6	英国	173
7	フランス	148
8	カナダ	145
9	豪州	128
9	インド	128

* 2010~2019年の累計

- Scopusでの検索
- 検索式 (CO₂利用技術) = (CO₂ or "Carbon dioxide") and (reduction or utilization)
- 検索式 (CO₂電解還元) = 上記母集団を "electrochemical reduction" で絞り込み

- 分子触媒の論文数は増加傾向。特に2015年に大きく伸び、CO₂電解還元技術に対する割合も増加した
- 日本発論文の主要著者：森川(豊田中研)、石谷(東工大)、藤田(米ブルックヘブン国研)、正岡(大阪大) など



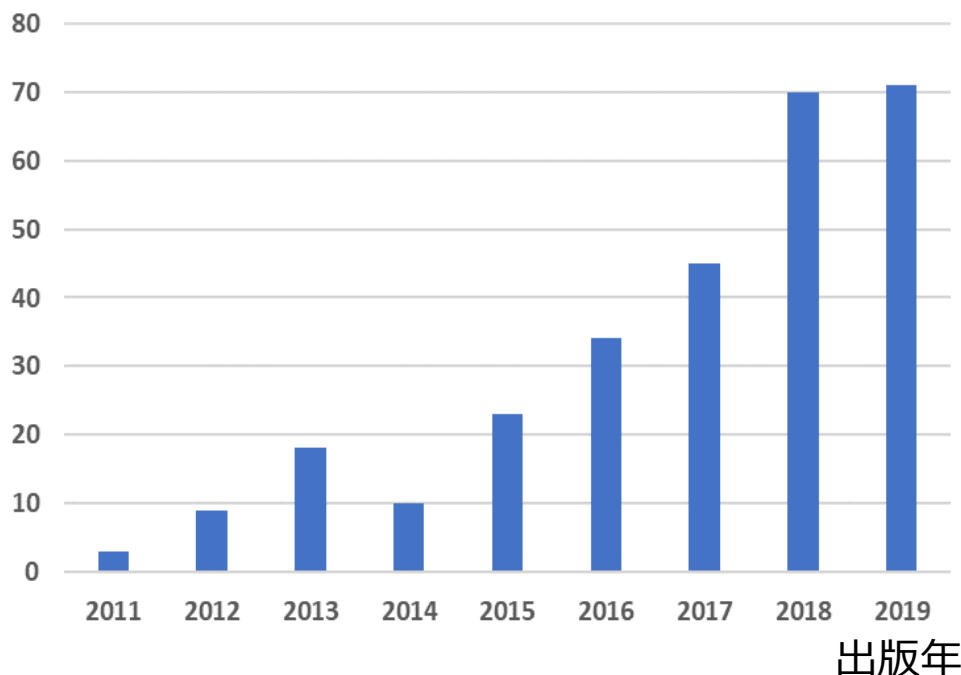
順位	国名	論文数*
1	米国	156
2	中国	139
3	フランス	43
4	日本	38
4	英国	38
6	韓国	27
7	ドイツ	25
8	インド	23
9	カナダ	18
10	香港	16

* 2010～2019年の累計

- Scopusでの検索
- 検索式 (CO₂電解還元) = 前頁参照
- 検索式 (分子触媒) = 上記母集団を “molecular catalyst” でさらに絞り込み

- 生物電気化学の論文数は必ずしも多くないが近年増加傾向
- 2010～2019年総論文数291件。日本は中、米、ベルギーに続く第4位(21件)
- 日本発論文の主要著者：加納・白井・北隅(京大)、高木(立命館)、天尾(大阪市大) など

論文件数



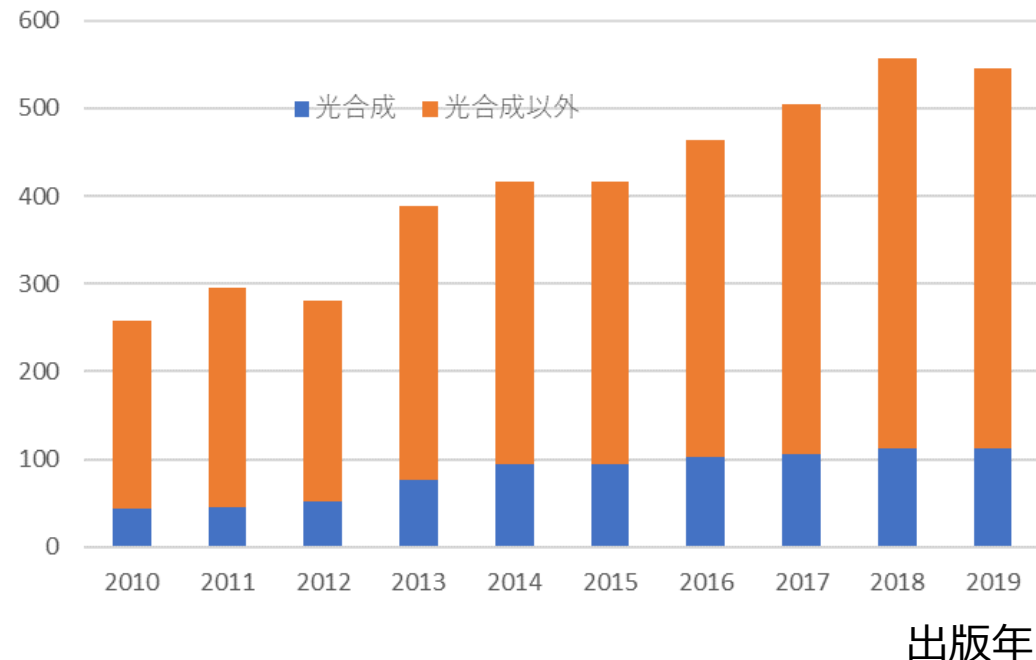
順位	国名	論文数*
1	中国	81
2	米国	55
3	ベルギー	23
4	日本	21
5	韓国	18
5	スペイン	18
7	英国	17
8	インド	16
9	ドイツ	15
10	オランダ	13

* 2010～2019年の累計

- Scopusでの検索
- 検索式 (CO₂利用技術) = (CO₂ or “Carbon dioxide”) and (reduction or utilization)
- 検索式 (生物電気化学) = 上記母集団を “Bioelectrochemical ” でさらに絞り込み

- 「CO₂利用技術」×「微生物学」を利用した論文数は増加傾向
- 2010～2019年の総論文数は4,127件。日本は第6位
- 光合成(微細藻類)および光合成以外(非光合成微生物)に分類すると前者は838件、後者は3,289件（内メタン発酵443件）。
更に後者を「水素/CO」で絞り込むと2,720件該当

論文件数



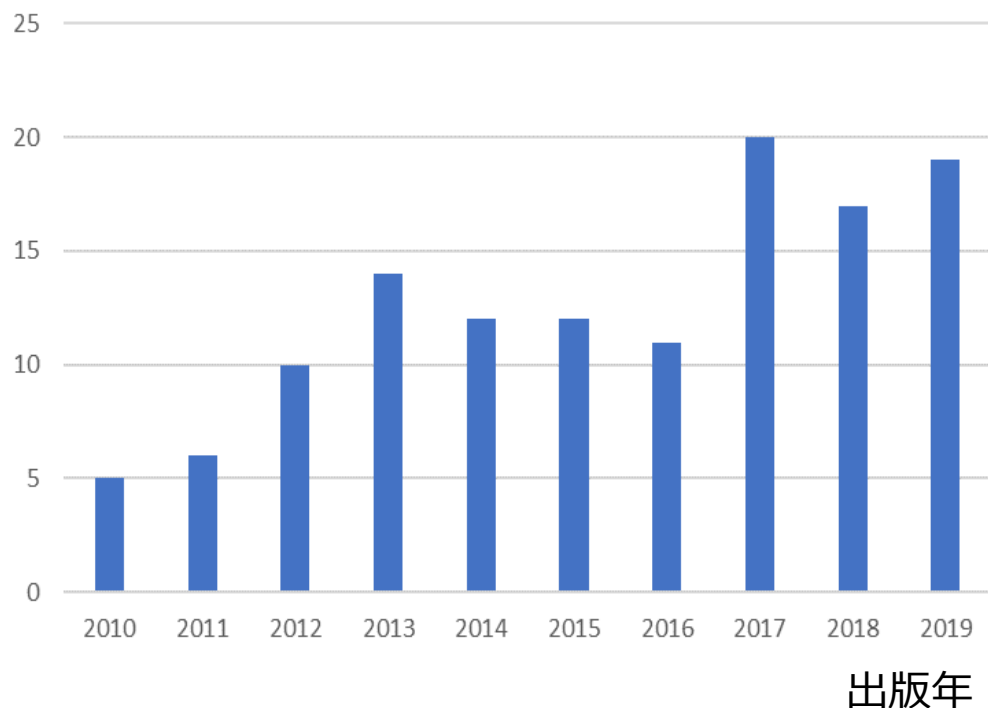
順位	国名	論文数*
1	米国	1,052
2	中国	794
3	ドイツ	478
4	英国	280
5	インド	222
6	日本	221
7	イタリア	182
7	スペイン	182
9	韓国	181
10	豪州	180

* 2010～2019年の累計

- Scopusでの検索
- 検索式 (CO₂利用技術) = (CO₂ or “Carbon dioxide”) and (reduction or utilization)
- 検索式 (微生物学) = 上記母集団を “Microbiology” でさらに絞り込み

- やや波があり、論文総数も126件と必ずしも多くはないが、増加傾向あり。

論文件数



順位	国名	論文数*
1	米国	41
2	ドイツ	33
3	中国	28
4	デンマーク	13
5	豪州	8
5	日本	8
5	英国	8
8	オランダ	5
8	スペイン	5
10	ニュー ランド	3

* 2010～2019年の累計

- Scopusでの検索
- 検索式（「CO₂利用技術」×「微生物学」） = 前頁参照
- 検索式（「CO₂利用技術」×「微生物学」×「アセトゲン」） = 上記母集団を “acetogen” でさらに絞り込み