

俯瞰セミナー①、②『研究開発の俯瞰と潮流 ～今後の活路を展望する』

# 持続可能な社会の実現に貢献する 環境エネルギー分野の研究開発の潮流

2019年8月29-30日

JST研究開発戦略センター

環境・エネルギーユニット 尾山 宏次



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

# 「環境・エネルギー分野 俯瞰報告書」について

- 本日の発表は主に「環境・エネルギー分野（2019年）俯瞰報告書」より要点をまとめたもの



- <目次>
- エグゼクティブサマリー
  - はじめに
  - 1. 研究対象分野の全体像
    - 1.1 俯瞰の範囲と構造
    - 1.2 研究開発を取り巻く現状
    - 1.3 今後の展望・方向性
  - 2. 研究開発領域

## 報告書の (1) 関連学協会との連携

特徴：

- 27法人（原稿作成協力, 俯瞰ワークショップ参加）

## (2) 俯瞰ワークショップにおける議論

- 対話と客観性の確保を目的とした2回のワークショップの開催  
環境分野(2018年11月12日)/エネルギー分野(2018年11月19日)

## (3) 専門家・有識者による協力

- 原稿作成協力者：90名
- 俯瞰ワークショップ参加者：57名

## 持続可能な 豊かな社会

■ 人間活動による影響を自然のメカニズムが許容可能なレベルに抑えつつ持続的な社会の構築・発展を実現。

## パリ協定

■ 世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて

**2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力を追求。**

■ 温室効果ガス（GHG）排出量のピークアウト時期を極力早める。

■ 緩和、適応、資金、技術、能力構築、透明性を包括的に取扱い。

■ 日本の約束草案：**2030年度までに2013年度比▲26.0%。**

## SDGs

■ 国連・持続可能な開発

**目標：水、生産と消費、エネルギーアクセス、気候変動、海洋、陸上生態系、まちづくり、産業・技術革新、持続可能な経済成長等（Goal 2,3,6,7,9,11-15）。**

## 循環型経済

■ EUが掲げる循環型社会形成に向けた新たなイニシアチブ「サーキュラー・エコノミー」。

## 3E+S

■ エネルギー分野の基本的視点：**安全性（Safety）**を前提としたエネルギーの「**安定供給性（Energy Security）**」、「**経済効率性（Economic Efficiency）**」、「**環境への負荷低減（Environmental Load）**」同時達成の追求。

発生の可能性が高い  
グローバルリスクの  
上位5位

影響が大きい  
グローバルリスクの  
上位5位

1	異常気象	大量破壊兵器
2	自然災害	異常気象
3	サイバー攻撃	自然災害
4	データの不正利用または窃盗	気候変動の緩和や適応への失敗
5	気候変動の緩和や適応への失敗	水危機

世界経済フォーラム, 第13回グローバルリスク報告書2018年版（日本語版）を基に作成。

## 人口, 石油需給

- 世界人口は76億人（2017年）から**90億人超（2050年）**に
- 石油需要は約0.9億バレル/日（2017年）から**約0.7～1.2億バレル/日, 予想価格約64～137ドル/バレル（2040年）**に ※1

## CO<sub>2</sub>排出量推移

- 増加を続けており2017年の**人為起源CO<sub>2</sub>排出量は約326億t** ※1

## ESG投資

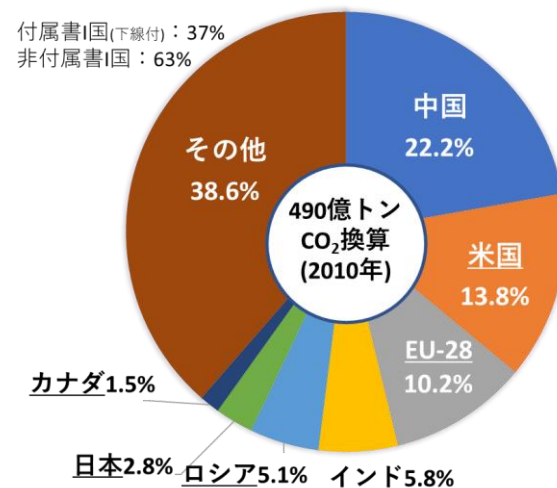
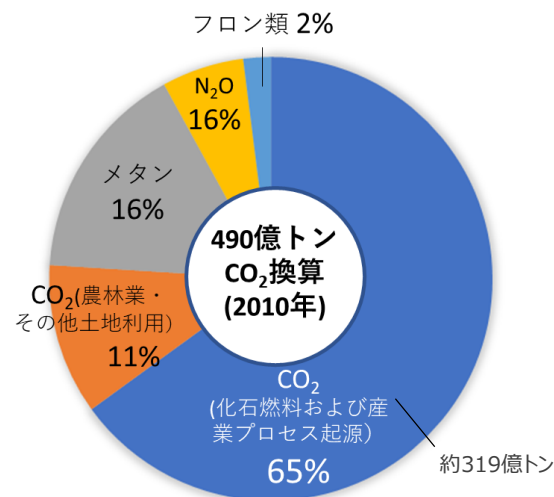
- 国連のイニシアチブである**責任投資原則（PRI）**に署名する機関が増加。
- ネガティブ・排除型スクリーニングによる**投資引き揚げ（ダイベストメント）**が化石資源利用関連技術に影響。（石炭火力新增設計画を持つ日本の旧一般電気事業者や商社を投資引き揚げ対象に含めた事例が既に生じている）

## 海洋プラスチックごみ問題

- **EU循環型経済政策, 中国プラスチックごみ輸入規制.**

※1 世界エネルギー機関

図. 2010年温室効果ガス排出（起源別, 国・地域別）





## 日本

- ここ1, 2年でエネルギー、環境に関連する計画や戦略を立て続けに策定。「**エネルギー基本計画（第5次）**」（'18年）はパリ協定における日本の約束草案との整合性も図りつつ、**2030年に加えて2050年に向けた基本方針も提示**。
- 環境分野では**海洋プラスチックごみ問題対応**を中心に循環型社会形成に向けた検討が**徐々に活発化**。また**気候変動適応**関連の法律制定並びに計画策定があり、**今後のSTI政策との連動に注目**。
- STI政策で府省横断的なものは中長期的視点からの「**エネルギー・環境イノベーション戦略（NESTI2050）**」（'16年）、「**革新的環境イノベーション戦略**」（'19年予定）等。

## 米国

- 国家安全保障及び国内産業の保護・強化が第一優先。「**米国第一エネルギー計画**」（'17年）では国内資源活用最大化や輸入原油への依存低減を目指した非在来型化石資源開発促進等を掲げる。前政権による気候変動対応や水に関する規則等の廃止にも言及。**予算審議は大統領と議会の間で大きなギャップ**。
- **政府の環境分野における気候変動対応は消極的**。しかし自治体や民間、アカデミアレベルでは機運を継続（パリ協定を正式離脱できるのは2020年11月であり次期大統領選後）。
- 海洋プラスチックごみ問題対応で特別な動きは見られず。
- 予算の増減はあるものの再生可能エネルギー含めて**研究開発は全方位的**。

## EU

- 「**すべての欧州市民にクリーンエネルギーを**」パッケージ（'16年）で2030年目標（GHG排出を45%削減）、「**2050長期戦略**」（'18年）で2050年目標（同80%以上削減）を掲げる。
- 並行してエネルギー安全保障への取り組みも積極的。再エネ導入拡大の促進やロシア天然ガス依存への懸念を念頭に、**EU圏内のエネルギー網の連系強化を進める**。
- **海洋プラスチックごみ問題対応**を環境政策としてのみならず「**循環型経済**」戦略の一環として**SDGsとも関連づけて推進し世界を主導する姿勢を明確に打ち出し**。
- STI政策でも次期「**Horizon Europe**」に向け気候変動と海洋プラスチックごみ問題を重要視。

## 中国

- 環境と経済の両立を重視し**大気（'13年）、水（'15年）、土壌（'16年）の汚染防止を推進**。
- エネルギー分野では「**エネルギー発展『第13次5ヶ年』計画**」（'16年）に基づき**安全、安定、経済的、かつクリーンなエネルギー産業システム構築を目指す**。太陽光・風力を中心に再エネ導入量はEUに匹敵。新エネルギー自動車の導入も強力に推進。
- 連動してSTI政策では**重点分野の一つに電池分野を設定**。大気汚染問題もあり石炭高効率利用も重視。気候変動や大気汚染に関するデータ収集にも積極姿勢。
- 豊富な資金と人的資源を背景に**全方位的に研究開発を強力に推進**。

## 独

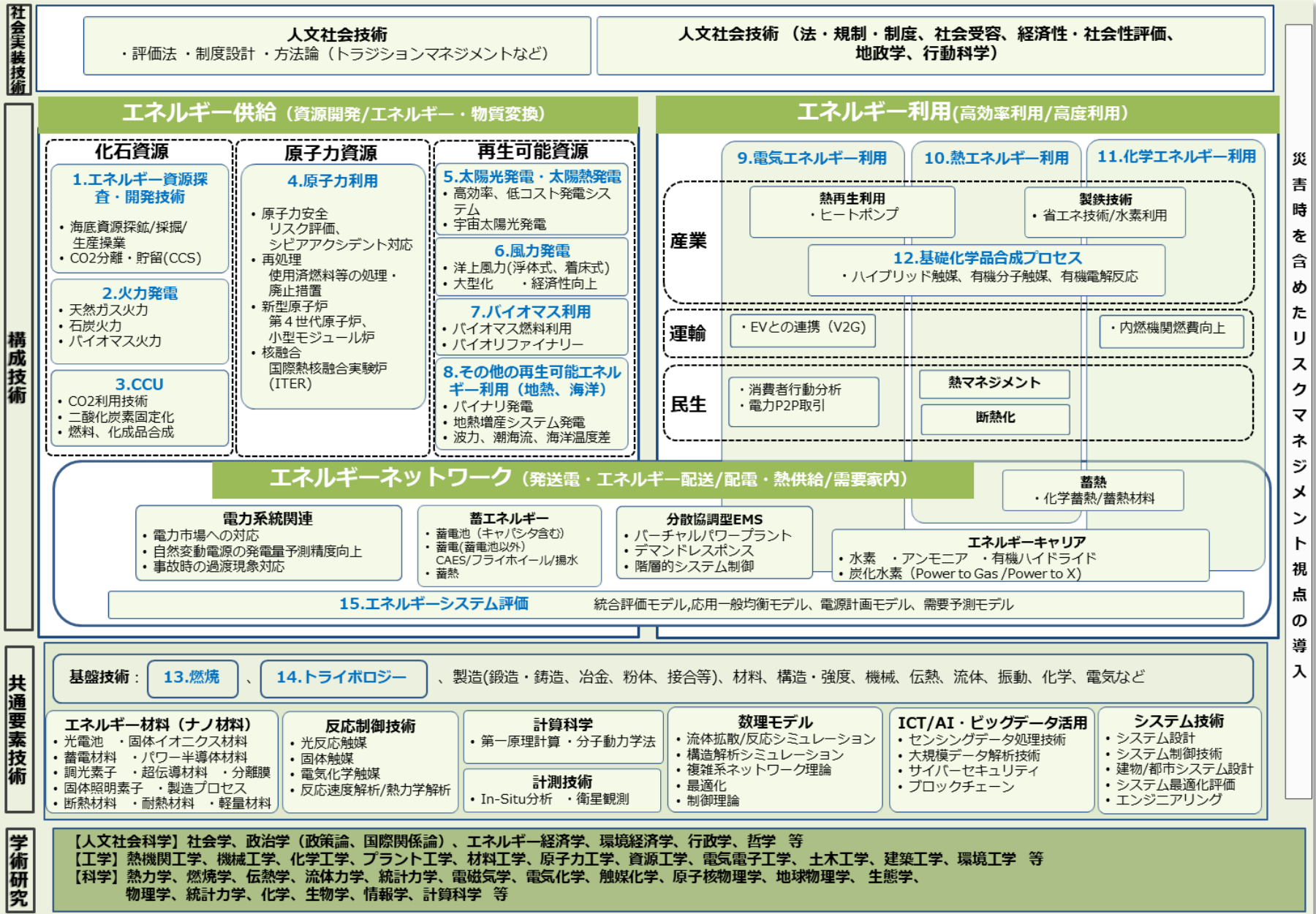
- 脱原子力や再エネへの移行を掲げた「**エネルギー転換**」（'11年）を推進中。
- 風力・太陽光を主に再エネ導入が進んだが、**CO<sub>2</sub>排出の低減はまだ見えていない**。
- STI政策では**継続してエネルギーを重点分野に設定**。最新の「**ハイテク戦略2025**」（'18～'25年）では「**未来技術**」の中に「**電池**」を包含。
- 「**コペルニクス・プロジェクト**」（'16年～）で再エネ由来の余剰電力を化学原料や燃料等の形で貯蔵するための研究開発を推進（**Power-to-X**）。

## 仏

- 2030年までにGHG排出を40%削減、2025年までに原子力依存度を50%に低減等の目標を掲げた「**エネルギー移行法**」（'15年）に基づく戦略や計画を策定。背景にはCO<sub>2</sub>排出削減の伸び悩みも。
- STI政策は「**国家研究戦略（SNR）**」（'15年）と「**国家エネルギー研究戦略（SNRE）**」（'16年）に基づき推進。
- 大統領のイニシアチブ「**大投資計画（GPI）**」（'18年）では優先項目の一つで再エネ拡大、ビルの熱効率向上、輸送部門のCO<sub>2</sub>排出削減を設定。

## 英

- 「**気候変動法**」（'08年）に基づき推進。最近では気候変動適応に関する基本方針を示した「**第二次国家適応プログラム**」（'18年）やSTI政策として「**産業戦略**」（'17年）を策定。
- 研究助成機関を統合した組織**UKRI**の発足。ODAを兼ねたGCRF、組織横断的な課題を設定するSPFや学際研究プログラム、前述の産業戦略と関連付けられたISCFにおいて気候変動やエネルギー関連の研究開発を支援。その他にInnovate UKが運営する**カタパルト・プログラム**に複数の拠点。



災害時を含めたリスクマネジメント視点の導入

社会実装技術

システム・設計・エンジニアリング

人文社会技術（法・規制・制度、社会受容、経済性・社会性評価、行動科学）

## 循環型持続可能社会

### 18. 水循環

- ・雨量観測技術（高精度化、短時間降雨予測）
- ・河川水位・流量観測 ・多目的ダム事前放流
- ・水循環モデル ・蒸発散、積雪、地下水データ
- ・Food-Energy-Water Nexus
- ・流域管理 ・気候変動影響（well-being）

### 24. 資源生産・消費管理

- ・Circular Economy
- ・ライフサイクルアセスメント（LCA）
- ・物質ストック・フロー分析（MSFA）
- ・Food-Energy-Water Nexus
- ・Assessment of Emerging Technology（新規技術評価）

### 25. リサイクル・資源利用効率化

- ・Circular Economy
- ・デザインforリサイクル ・サプライチェーン全体情報管理
- ・プラスチック臭素系難燃剤除去技術
- ・社会普及製品リサイクル（太陽電池/パネル、Liイオン、CFRP）
- ・製品情報管理（含有物質、使用履歴）、リユース判定技術

構成技術

## 気候変動

### 16. 気候変動観測

- ・次世代静止衛星、高分解能化
- ・能動光学
- ・CO<sub>2</sub>、短寿命気候汚染物質（SLCPs）観測
- ・温室効果ガス多成分・連続・現場観測
- ・海洋観測

### 17. 気候変動予測

- ・温暖化評価のグローバル連携
- ・10年規模変動予測、データ同化、不確実性
- ・統合評価モデル（IAM）とESM結合
- ・力学的ダウンスケーリング
- ・異常気象・極端現象の温暖化影響寄与

## ヒト健康影響・環境浄化

### 19. 水処理

- ・逆浸透膜、正浸透膜 ・濃度差発電
- ・UV-LED、水銀規制
- ・親水性汚染物質補足
- ・被災時浄水システム、分散システム
- ・次世代シーケンサ

### 22. 環境分析・物質動態

- ・物質動態、ヒト健康・生態系影響
- ・毒性発現機序 ・バイオアッセイ
- ・実試料採取、実環境計測、複合影響
- ・有機分析、無機・同位体分析、PM
- ・マイクロプラスチック、ナノ材料

### 23. 汚染物質の除去・浄化

- ・自動車用パワートレイン電動化
- ・排ガス実走行試験、粒子数（PN）
- ・希薄燃焼ガソリンエンジン
- ・越境汚染、PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>x</sub> ・Cs137
- ・サステナブル・レメディエーション

### 26. 健康・都市生活

- ・気候変動適応策
- ・温暖化ダウンスケーリング
- ・熱ストレス、熱関連超過死亡推定
- ・タイムライン、ハザードマップ
- ・グリーンインフラ

## 生物多様性・生態系

### 20. 生物多様性・生態系の把握

- ・生物多様性と生態系機能の関係解明
- ・遺伝子情報活用、衛星観測データ活用
- ・動的全球植生モデル ・階層ベイズモデル
- ・外来種感染症、野生生物かく乱
- ・気象モデル連携生態系変化予測

### 21. 生物多様性・生態系の管理・活用

- ・生態系サービス定量評価・可視化
- ・トレードオフ、シナジー分析
- ・空間明示的モデル（森林伐採、炭素貯蔵量）
- ・文化的サービス、自然資本の経済学的評価
- ・開発投資への環境影響評価指標

共通要素技術

### 観測・計測技術

- ・衛星・航空機観測（リモートセンシング）、船舶観測
- ・観測網・モニタリング ・ センサ
- ・定性分析・定量分析 ・ 網羅分析・一斉分析
- ・形状・組成・状態・動態把握 ・ 同位体分析

### 予測・評価技術

- ・モデリング・シミュレーション
- ・データ同化・高精度化・精緻化
- ・高解像度化・ダウンスケーリング
- ・モデル統合、モデル比較 ・ 影響評価・リスク評価

### 対策・マネジメント技術

- ・緩和・適応
- ・未然防止・浄化・修復
- ・保全・管理
- ・資源回収・リサイクル

### 環境情報基盤

- ・データ収集・共有・管理
- ・ネットワーク・インタフェース
- ・データ統合・解析・利活用
- ・高速度処理

学術研究

【人文社会科学】 法学、経済学、社会学、政治学、国際関係、行政学、哲学、教育学、倫理・道徳 等  
 【自然科学】 土木工学、建築学、統計学、材料工学、化学工学、生態学、農芸化学、保健・衛生、情報学、システム科学、防災学、物理学、化学、生物学、地球惑星科学、工学、農学、医学、数学 等

災害時を含めたリスクマネジメント視点の導入



## エネルギーシステム, エネルギー利用

[研究開発領域 : 1, 9, 10, 15]

電化推進と変動電源拡大を受け, エネルギー製造・貯蔵/運搬・利用に関する検討が活発だが, エネルギーシステム全体を統合的に考える視点が不足. エネルギーフローの双方向化によりICTを活用した需給連携がますます重要に.

日本の現状➡ エネルギーマネジメント分野で電力システムの安定化や新技術を活用したサービス開発のための研究等が盛り上がりを見せている.



## 集中電源, 大規模発電

[研究開発領域 : 2, 4, 13, 14]

北海道におけるブラックアウトを受け, 電力システムのレジリエンス性向上が新たな重要課題として認識されつつある.

日本の現状➡ 火力, 原子力など日本が基礎及び応用・開発とも優位性を持つ分野の基盤技術の弱体化が懸念される. 今後どのように研究開発を進めていくか岐路に立たされている.



## 化学的エネルギーの活用

[研究開発領域 : 3, 7, 10, 11, 12]

再生可能エネルギーの貯蔵/運搬・利用のための技術開発 (蓄電, 蓄熱, Power to X: 炭化水素合成, CCU) が活発.

日本の現状➡ 化学分野は活発化しており, 脱化石燃料化やCO<sub>2</sub>排出削減の観点から基礎研究並びに応用・開発が産学官で活発に取り組まれている.



## 分散電源, 再生可能エネルギー

[研究開発領域 : 5, 6, 8]

世界各国の変動・分散型再生可能エネルギーの競争力が向上. 一方で導入拡大によるエネルギーネットワークへの影響が顕在化 (例: 太陽光の出力制御). 予測技術の活用, 蓄エネルギー, 最適制御等に係る研究開発が課題に.

日本の現状➡ それぞれに研究の蓄積はあるものの, 基礎研究の成果が応用・開発, 社会実装へと繋がっていく力強い流れは見えにくい. 但しこうした状況には政策, 法規制, 地理的条件等, 社会的要因や環境面の制約も大きい.



## 環境観測

[研究開発領域 : 16, 18, 20]

観測技術・データ解析技術とともに研究開発が継続的に進展. IoT/AIの隆盛を受け環境ビッグデータの高度活用のための研究開発が活発化.

日本の現状➡ 雨量観測の高精度化, 中小河川の流量予測, 全球レベルの水循環や気候変動適応策の研究等, 水分野で高水準の研究開発が進行. 海洋観測でも国際的に重要な貢献を果たす. 課題は広域のデータ統合・解析や解析に基づく大規模実証研究等の不足. 気候変動観測衛星の戦略立案も停滞気味.



## 気候変動適応

[研究開発領域 : 17, 21, 26]

気候変動の影響評価のダウンスケーリングが建物レベルにまで進展 (例: ヒートアイランドとの一体評価). 極端現象への温暖化の寄与を明らかにする研究 (イベントアトリビューション) も活発化.

日本の現状➡ 地球システムモデル (ESM) の開発とその成果の活用が政策的支援の下で異分野連携によって進みつつある. 一方で社会-生態系の一体的評価や, そのガバナンスに関する研究では他国に比べ遅れている.



## 環境分析・汚染除去/浄化・リサイクル

[研究開発領域 : 19, 22, 23, 24, 25]

海洋プラスチックごみ問題対応が世界的に活発化. ヒトや自然環境への影響の評価のニーズが高まる. 代替材料開発の議論も再燃.

日本の現状➡ 水処理や汚染物質の除去・浄化分野では個々に研究が進んでいる. 水インフラの老朽化及び地方自治体の体力低下は社会的に深刻な問題. 自動車排気後処理技術は世界トップ水準の研究が展開されている.



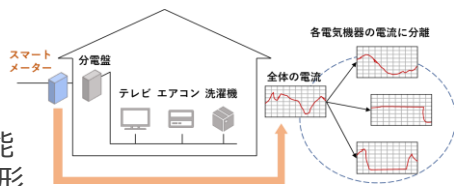


## エネルギー需要分析技術

エネルギー需要のより詳細な分析とサービスへの活用に向けたIoTプラットフォームの構築が進む。

(例) 家電分離推定技術  
(ディスアグリゲーション技術)

→ 一般家庭の分電盤内に設置可能な電力センサーにおいて全体電力波形データを測定し、機械学習で個別の家電の稼働状況を推定する技術の開発。



NEDOプロジェクト紹介資料  
<https://www.nedo.go.jp/content/100803684.pdf>  
を基に作成

## エネルギー×ブロックチェーン技術

スマートメータによる電力計測の自動化に伴い、電力取引におけるブロックチェーン技術活用のための実証化検討が活発化。

(例) 電力個人間(P2P)取引

→ 仮想空間上での電力融通。埼玉県浦和美園地区で環境省事業として実証試験(東大)。

(例) ディマンドレスポンス(DR)

→ 米・加州のDRオークション市場実証試験にスタートアップ企業・leapがブロックチェーンを用いたプラットフォーム技術を提供。

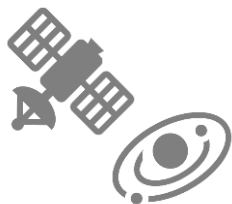


## 地球観測衛星

観測性能や機能が向上した衛星の打ち上げ・運用開始により、一層多くの環境関連データの収集・蓄積が進み、その解析も活発。

(例) ひまわり8号, 9号の運用開始。

→ これまでの衛星と比較し、より高分解能(可視光が1km→500m)、高頻度(全球観測が24回/日→142回/日)、多数の観測バンド(5→16)に。

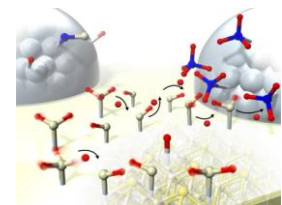


## オペランド計測と計算化学

触媒反応機構の詳細解析(新しい触媒反応メカニズムの立証)が可能に。

(例) 電場の中で反応中の触媒の状態を観察。

→ 触媒表面に吸着した水を介したプロトン(H<sup>+</sup>)の表面ホッピングが反応を促進していること、プロトンと吸着分子との衝突が不可逆過程を生み出していることを発見。



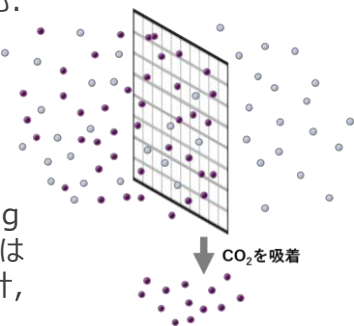
出典: 早稲田大プレスリリース <https://www.waseda.jp/top/news/46989>

## 直接空気回収技術 (DAC, Direct Air Capture)

大気中CO<sub>2</sub>を直接回収する技術の開発が進む。

(例) ネガティブエミッション技術の有望技術の一つとしてDACが注目され、欧米で複数のスタートアップ企業が活動。

→ Climeworks(スイス), Global Thermostat(米国), Carbon Engineering(カナダ)。前者2社は固体アミン吸着材、後者はアミン吸着液を利用。コスト低減、システム設計、吸着剤最適化等が研究課題。

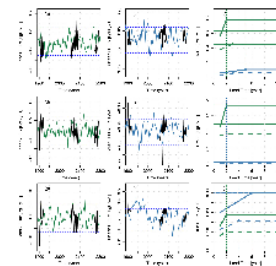


## 気候変動予測技術

膨大なデータを大量かつ高速に解析し新たな知の発見・創出につなげる。

(例) 十年規模変動予測

→ パリ協定への対応で今後重要性が増すと見られている最大10年程度の時間規模を対象とした予測研究が活発化。仏「パーフェクトモデルアプローチ」では地球規模の炭素循環について最大6年間の予測可能性があることを示した。



- ➔ 我が国の研究開発は着実に進められてきており、一部では世界的にトップ水準の取組みもある。
- ➔ 一方で昨今は中国や欧米に匹敵することの厳しさが複数の領域で指摘されている。
- ➔ 今後は中長期的観点からの大きな方向性に基づき、全体バランスに配慮しつつ研究開発を推進していくことが必要。方向性として重要なキーワードは以下の5つ。

## 目指す方向性

- ・地球の持続可能性維持
- ・世界の持続的な発展

## 中核となる価値観

- ・サステナブル
- ・インクルーシブ

## Z ゼロエミッション

温室効果ガス（GHG）の  
正味ゼロ排出

## S セーフティ

自然災害や  
事故への備え

## A アダプテーション

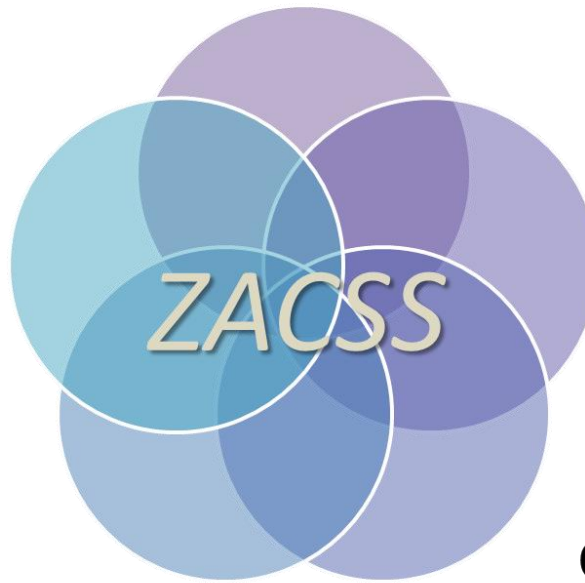
気候変動影響への  
対応（適応）

## S スマート

デジタル化、データ活用

## C サーキュラー

循環型社会形成

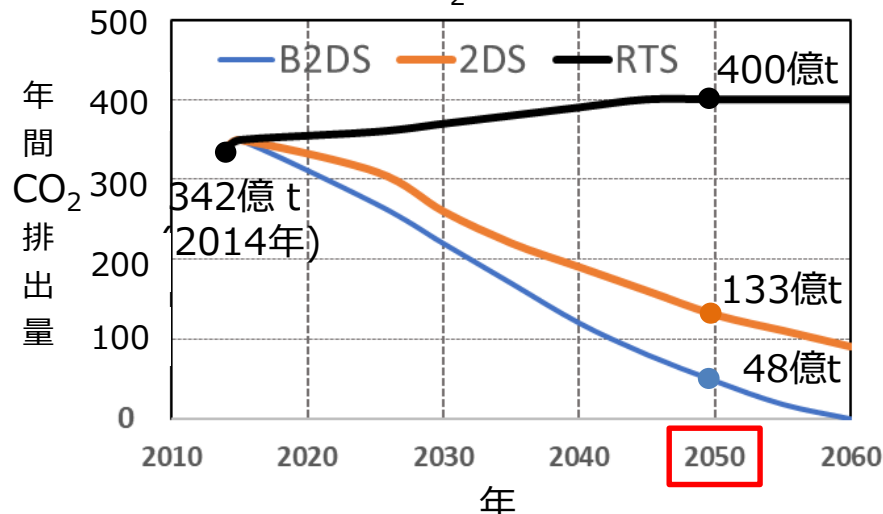


キーワード	展望および今後の重要課題例
ゼロエミッション	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2°C目標達成のためのGHG排出の大幅削減に向け、その手段として脱化石燃料、及び再生可能エネルギー主流化が進展。 ⇒回収CO<sub>2</sub>を用いた合成炭化水素研究（Power to XやCCU）</li> <li>● 従来の一方向的・大規模集中型のエネルギーシステムの中に双方向的・分散型の要素が広がる。 ⇒日本の社会システムとしてのエネルギーの研究（エネルギー構成、都市と地方）</li> </ul>
アダプテーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 気候変動影響への適応がより重要に、影響予測の精度を高め、対策に繋げる。 ⇒温暖化に伴う異常気象による災害への対応（洪水・土砂災害） ⇒異常気象と温暖化影響の関連性解明（イベントアトリビューション）</li> </ul>
サーキュラー	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 海洋プラスチックごみ問題への取組みが国際的に本格化。 ⇒環境中での物質動態や環境影響評価、規制・基準 ⇒人々の行動への働きかけ（行動変動、ナッジ）</li> <li>● 世界的な淡水資源の枯渇、日本では水インフラの老朽化と人口減少・過疎化。 ⇒グローバル・ローカルな水循環、水利用</li> </ul>
スマート	<ul style="list-style-type: none"> <li>● データ駆動型社会が一層現実化。 ⇒エネルギー問題への適用（エネルギーネットワークと需要科学、気象予測に基づく再エネ最適制御、蓄エネ） ⇒データインフラの整備（共通データ基盤の構築、環境観測インフラ）</li> </ul>
セーフティ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● レジリエントな社会構築への要請高まる。 ⇒地震による社会への影響予測と対応検討（エネルギーや水のインフラ停止） ⇒日本のエネルギー源の確保（グローバルなエネルギーサプライチェーン） ⇒原子力（リスク、人材、世界の研究開発潮流としての小型モジュール炉）</li> </ul>

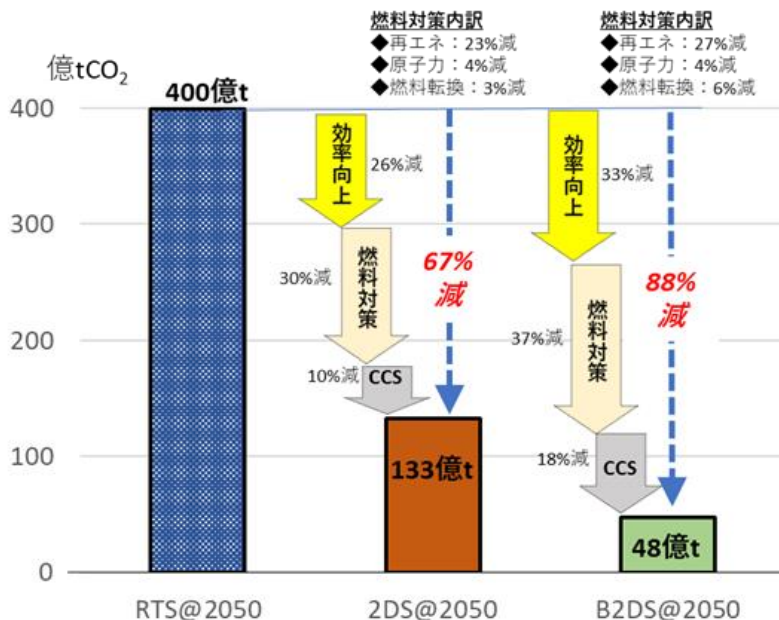
## ● パリ協定2℃目標のためのCO<sub>2</sub>削減とそのためのエネルギー対策シナリオは？

国際エネルギー機関 (IEA)による世界の総CO<sub>2</sub>排出量計算例 (3つのシナリオ毎のモデル解析結果例)

シナリオ毎のCO<sub>2</sub>排出量のトレンド



2050年におけるシナリオ毎のCO<sub>2</sub>排出量と削減寄与



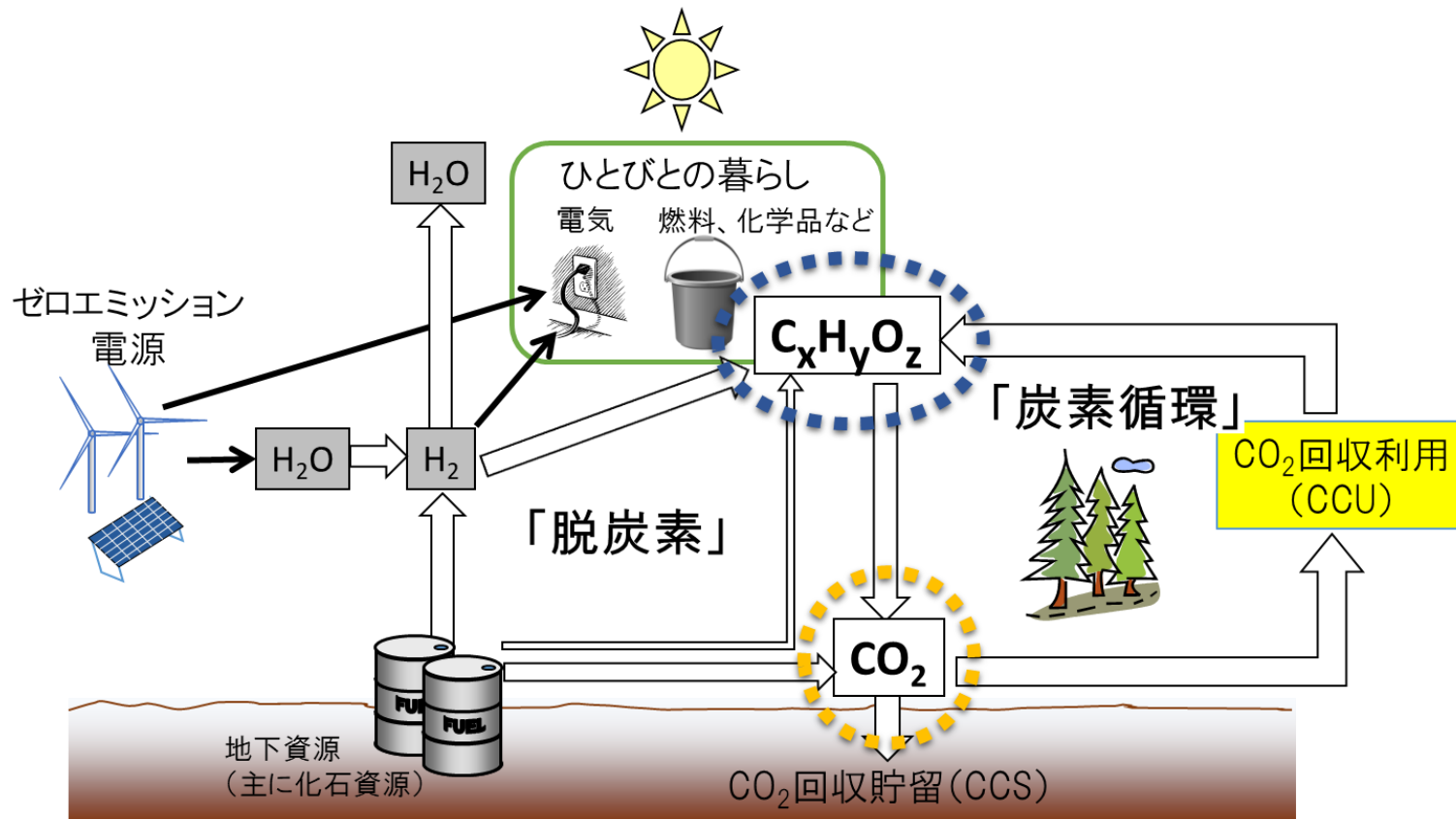
- **RTS** : 現状の政策・技術シナリオを基にした参照用シナリオ
- **2DS** : 2℃目標を達成するシナリオ
- **B2DS** : 2℃超(1.75℃)を達成するシナリオ

2050年時点の世界のシナリオ毎の概略

項目	シナリオ			2014年 (参考)	備考
	RTS	2DS	B2DS		
CO <sub>2</sub> 排出量【億t】	400	133	48	340	
一次供給エネルギー量【EJ】	796	633	581	569	
化石資源割合【%】	70	43	33	82	
電力総発電量【TWh】	46,944	42,546	44,321	23,819	電化率は向上
電力CO <sub>2</sub> 排出原単位【kgCO <sub>2</sub> /kWh】	0.309	0.036	-0.008	0.572	B2DSではネガティブエミッション技術を利用
電力構成における変動電源割合【%】	19	33	35	4	変動電源：PV、風力、海洋等
CCS量【億t】	9	54	84	0	



- エネルギーシステムのゼロエミッション化のためには「脱炭素」と「炭素循環」を実現する技術が必要
  - 「脱炭素」の技術としては電力CO<sub>2</sub>フリー化が重要 → 当面の優先課題
  - 「炭素循環」の技術としては、CO<sub>2</sub>回収利用技術（CCU）が重要
  - CO<sub>2</sub>資源化により再エネ水素や再エネ+水との合成による燃料や化学品



# CCUの必要性 ~ネット・ゼロ排出・エネルギー社会（Science誌）からの示唆~

## 論文の要点

- エネルギーシステムの脱炭素化において、対応が困難なエネルギーサービスやプロセスが存在することを認識した上で、個々のエネルギー部門と工業プロセスを統合化して考えることが必要
- 2014年CO<sub>2</sub>排出量：339億トンの内、脱炭素化が困難な部門割合は**27%**（92億トン）に上る(右表)
- ◆ **脱炭素化には電化推進が重要。また電化が困難な部門にはカーボンニュートラルの燃料が重要。**

カーボンニュートラル燃料  
 ・バイオマス燃料  
 ・ネットゼロエミッション燃料  
 (DAC+CCU)

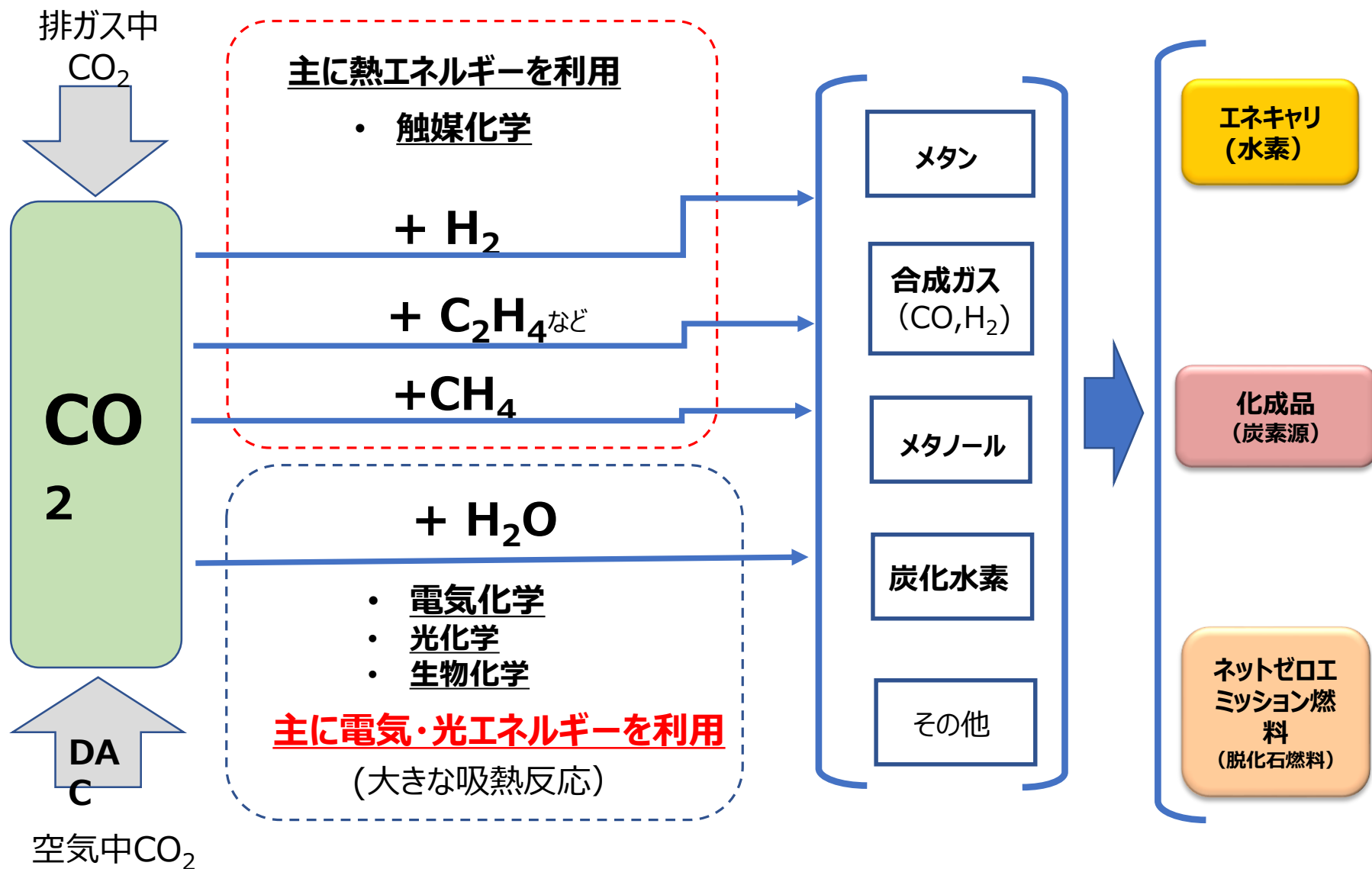
- **これまでのエネルギーシステムやインフラの転換を必要としないため、迅速な対応策になる**

## 2014年世界におけるCO<sub>2</sub>排出内訳 および脱炭素化が困難な部門

部門		CO <sub>2</sub> 排出内訳【%】	
運輸	陸上	乗用車系	11
		短距離・中重量貨物	5
		<b>長距離貨物</b>	<b>1</b>
	<b>船舶</b>		<b>3</b>
	<b>航空</b>		<b>2</b>
発電	<b>負荷調整用発電(ガスタービン火力等)</b>		<b>12</b>
	発電		26
	コージェンネ(発電+熱)		5
	熱利用		2
産業	<b>セメント</b>		<b>4</b>
	<b>製鉄</b>		<b>5</b>
	他の産業		14
民生(家庭・業務)		10	

出所. Davis et al., Science vol.360, issue 6396, eaas9793 (2018)

# CCU技術の全体概略図



# 欧州を中心にカーボンニュートラルな燃料製造に向けた検討の進展

- 欧州では、ドイツを中心に再生可能エネルギー由来の余剰電力で水を電気分解して生成した水素や、その水素をCO<sub>2</sub>と合成して生成したメタンの燃料等への利用を狙った研究開発を盛んに実施。
- 現在は水素およびメタンを目的生産物としたPower to Gas が主流だが、近年はディーゼル等の液体燃料を製造する事例（Power to Liquids）やメタノール等の化学品を製造する事例（Power to Chemicals）が見られ、今後の拡大が予想される。
- PtL(Power to Liquids) による合成燃料のGHG排出は、バイオ燃料等と比較しても低いと見積もられている（表1）

表1. PtL (Power to Liquids) のGHG排出削減への貢献可能性

ジェット燃料の原料	GHG排出【gCO <sub>2</sub> eq/Mjfuel】	参考 直接土地利用変化分を含む場合のGHG排出値	備考
原油(参考)	87.5	←	
天然ガス (GTL)	101.0	←	GTL:Gas to Liquid
スイッチグラス (BTL)	17.7	-2 ※1	食料と競合しない BTL: Biomass to Liquids
大豆油	37.0	97.8 ~ 564.2	食料と競合する
パーム油	30.1	39.8 ~ 698.0	森林・草地から農地への直接的土地利用変化の際の
菜種油	54.9	97.9	GHG排出増加分考慮
ジャトロファ	39.4	←	食料と競合しない
PtL ※2	~1	←	
PtL ※3	11 ~28	←	

※1 炭素固定が活発になるため。

※2 ドイツの風力・PVの電力利用前提とした場合。

※3 ※2に加えて資材・建設のGHG排出を含む場合（現在のベース）。

表1のデータ参照元. Schmidt et al., Chem. Ing. Tech. 2018, 90, No.1-2, 127-140



# トピックス : DAC(Direct Air Capture:空気中CO<sub>2</sub>直接回収)

## ● DACの必要性

- ① 回収CO<sub>2</sub>をCCSで固定化により、自動車、飛行機などの分散排出源、あるいはCO<sub>2</sub>削減策が困難なセクター・技術(製鉄など)でのCO<sub>2</sub>削減の代替策になる。

また、過去に排出した分のCO<sub>2</sub>を削減できるため、大気中CO<sub>2</sub>濃度を積極的に低減できる方策(ネガティブエミッション技術 : BECCS代替)になる。

補注 : 2℃シナリオではBECCSなどのネガティブエミッション技術が必須とされる

- ② 回収CO<sub>2</sub>を再生可能エネルギーを用いたCCU技術により合成炭化水素を製造すれば、ネットゼロエミッションの非化石燃料(運輸部門用など)になる。

## ● DACの技術課題

規模が大きいため、装置のモジュール化やそのシステム設計、要素技術としてはCO<sub>2</sub>吸着材(主として化学吸着材)の最適化など

※コスト削減が最大課題 : 試算例 : 数十~1000米ドル/トンCO<sub>2</sub>

## ● 海外の動向

- カナダ、米国、スイスでは、CO<sub>2</sub>回収装置・プラントの商用化を目指したスタートアップ企業が現れてきている。

以下參考資料

## エネルギー分野（15領域）

	研究開発領域名
1	エネルギー資源探査・開発技術*
2	火力発電
3	CCU (Carbon Capture and Utilization)
4	原子力利用
5	太陽光発電・太陽熱発電
6	風力発電
7	バイオマス利用
8	その他の再生可能エネルギー利用 (地熱、海洋)
9	電気エネルギー利用
10	熱エネルギー利用
11	化学エネルギー利用
12	基礎化学品合成プロセス
13	燃焼
14	トライボロジー
15	エネルギーシステム評価

\* CCSを含む

	研究開発領域群
①	エネルギーシステム, エネルギー利用
②	集中電源, 大規模発電
③	化学的エネルギーの活用
④	分散電源, 再生可能エネルギー
⑤	環境観測
⑥	気候変動適応
⑦	環境分析, 汚染除去/浄化, リサイクル

## 環境分野（11領域）

	研究開発領域名
16	気候変動観測
17	気候変動予測
18	水循環
19	水処理
20	生物多様性・生態系の把握
21	生物多様性・生態系の管理・活用
22	環境分析・物質動態
23	除去・浄化技術
24	資源・生産・消費管理
25	リサイクルと循環利用
26	健康・都市生活

環境分野とエネルギー分野を7  
領域群にまとめた上で評価

表. 関連学協会会員数（個人会員）

環境・エネルギー分野の研究コミュニティが縮小.

学会名	個人会員数（人）		
	2004年度末	2014年度末	増減
自動車技術会	37,872	47,000	9,128
日本機械学会	37,837	34,696	▲ 3,141
日本建築学会	35,576	33,741	▲ 1,835
電気学会	24,328	21,814	▲ 2,514
応用物理学会	23,132	21,603	▲ 1,529
高分子学会	11,555	10,248	▲ 1,307
日本鉄鋼協会	8,721	8,927	206
化学工学会	8,197	7,165	▲ 1,032
計測自動制御学会	7,461	5,550	▲ 1,911
日本原子力学会	7,059	6,861	▲ 198
有機合成化学協会	5,233	4,918	▲ 315
日本冷凍空調学会	5,150	4,045	▲ 1,105
日本セラミックス協会	4,985	4,516	▲ 469
日本金属学会	4,436	5,340	904
石油学会	3,668	3,069	▲ 599
電気化学会	2,945	3,193	248
トライボロジー学会	2,645	2,629	▲ 16
触媒学会	2,545	2,476	▲ 69
エネルギー・資源学会	1,912	1,322	▲ 590
日本伝熱学会	1,379	1,285	▲ 94
日本流体力学会	1,367	1,257	▲ 110
土木学会	36,406	37,284	878
日本化学会	33,340	28,394	▲ 4,946

学会名	個人会員数（人）		
	2004年度末	2014年度末	増減
日本分析化学会	6,884	5,346	▲ 1,538
廃棄物資源循環学会	3,826	4,000	174
日本気象学会	3,812	3,311	▲ 501
日本生態学会	3,682	3,819	137
水産学会	3,593	3,235	▲ 358
日本水環境学会	2,614	1,982	▲ 632
日本森林学会	2,542	2,444	▲ 98
環境科学会	1,510	1,020	▲ 490
日本環境化学会	1,489	885	▲ 604
水文・水資源学会	1,272	1,279	7
大気環境学会	NA	1,080	
日本陸水学会	NA	733	
LCA学会	NA	405	
日本E-センシング学会	NA	1,063	
環境経済・政策学会	NA	1,185	

<参考>

日本作物学会	1,392	1,219	▲ 173
植物生理学会	2,493	2,355	▲ 138
日本分子生物学会	NA	13,447	
日本薬理学会	5,995	4,724	▲ 1,271
人工知能学会	3,151	3,188	37
電子情報通信学会	34,945	30,029	▲ 4,916
日本ロボット学会	4,027	4,096	69



新規参入者の母集団も縮小。  
特に規模の大きい工学部は減少幅が大きい。

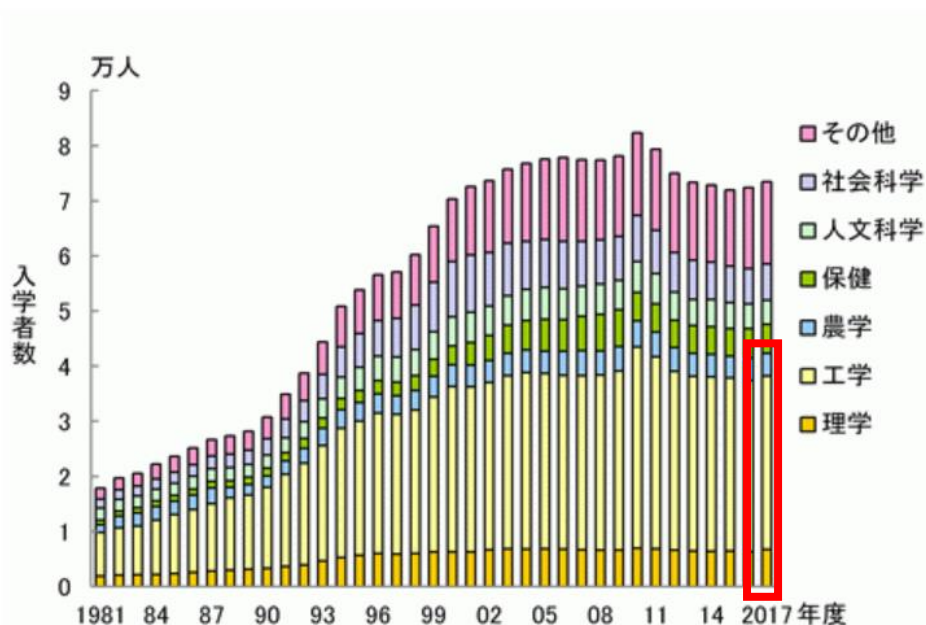
表. 2017年度の大学院入学者数

	修士	博士*
農学	4,098	703
工学	31,446	2,362
理学	6,746	1,129

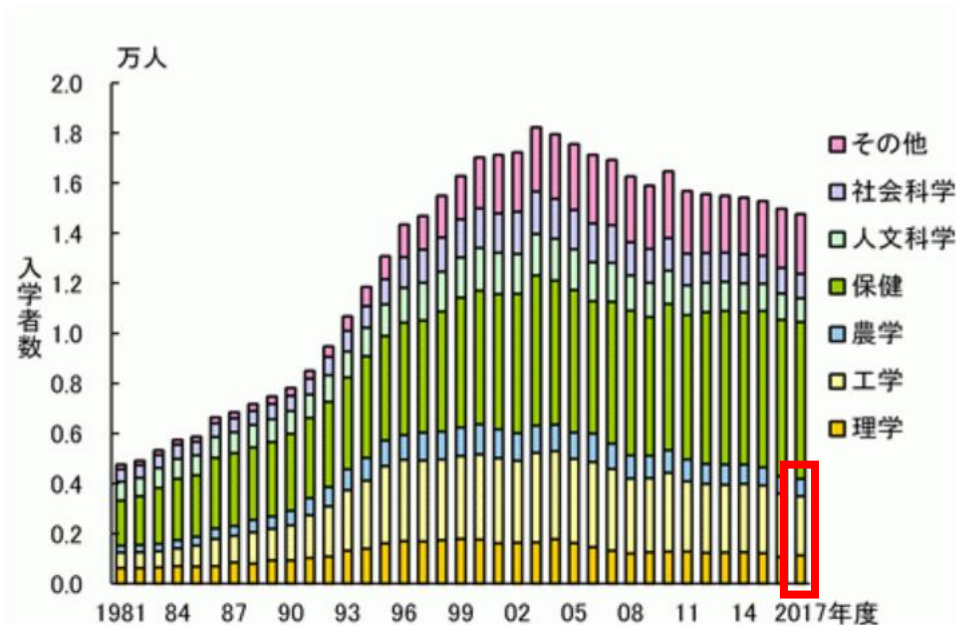
\* 2003年度前後のピーク時からそれぞれ600, 1,200, 400人減少した。

図. 大学院入学者数推移

(A)専攻別入学者数の推移（修士課程）



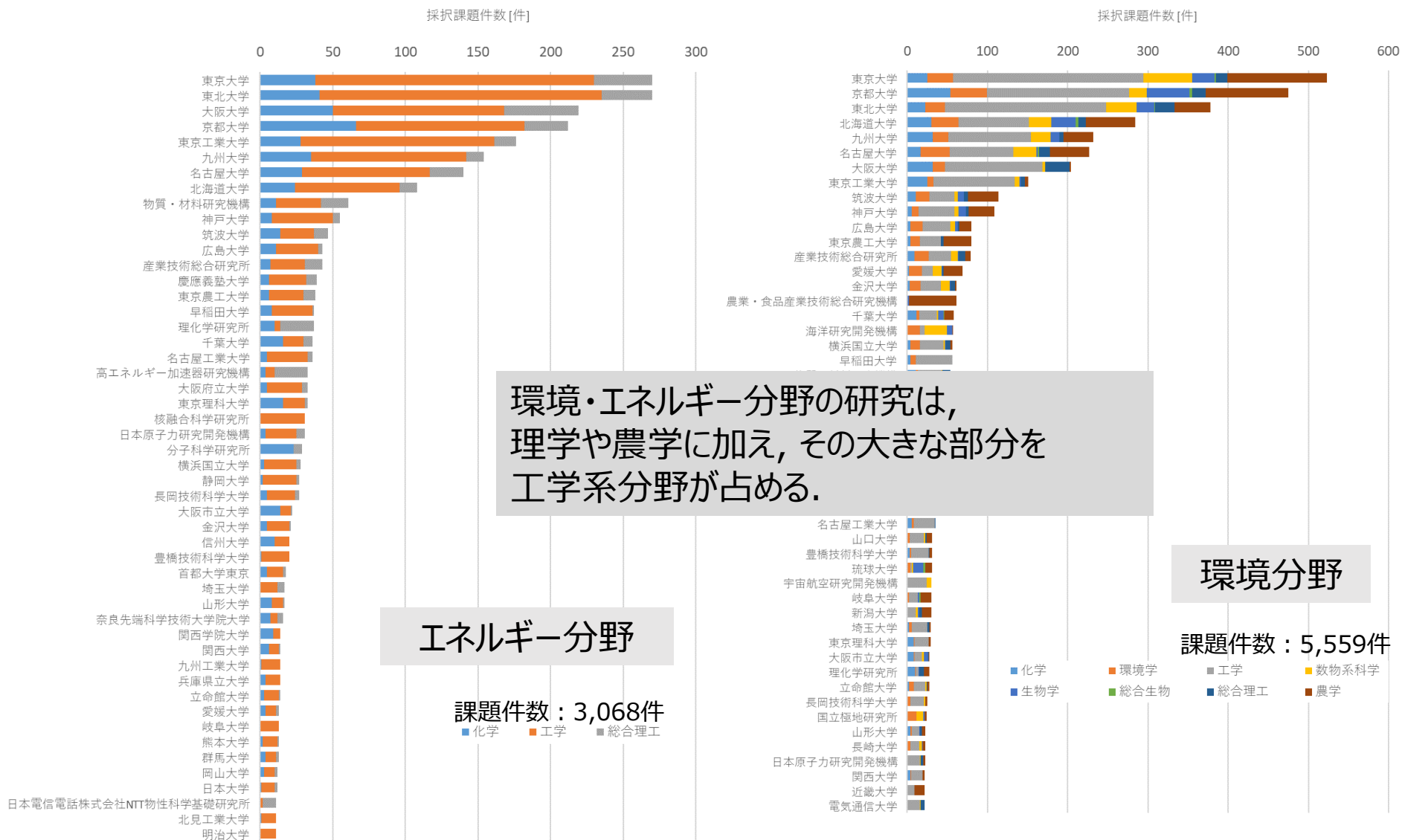
(A)専攻別入学者数の推移（博士課程）



図出典. 科学技術指標2018、NISTEP

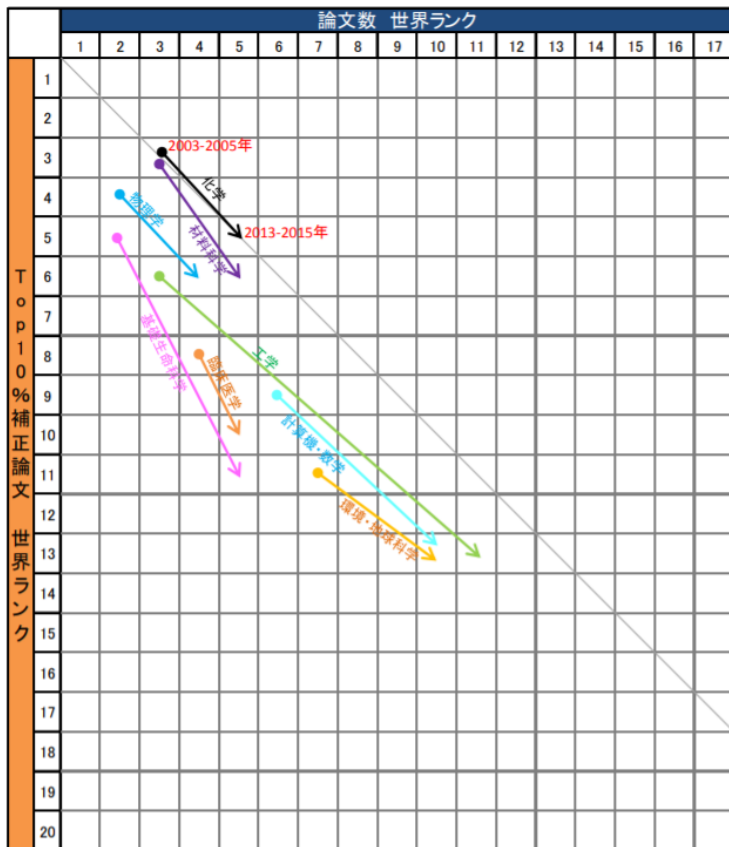
【検索条件：期間（研究開始年度）；2008～2017年度（10年分），研究種目；基盤S/A/B, 若手A, 研究分野；凡例参照, 入力キーワード；「エネルギー」又は「環境」】

## 図. 採択件数上位50機関の研究分野内訳



## 論文数動向

図表 51 日本の分野毎の世界ランクの変化(整数カウント法、2003-2005年から2013-2015年)



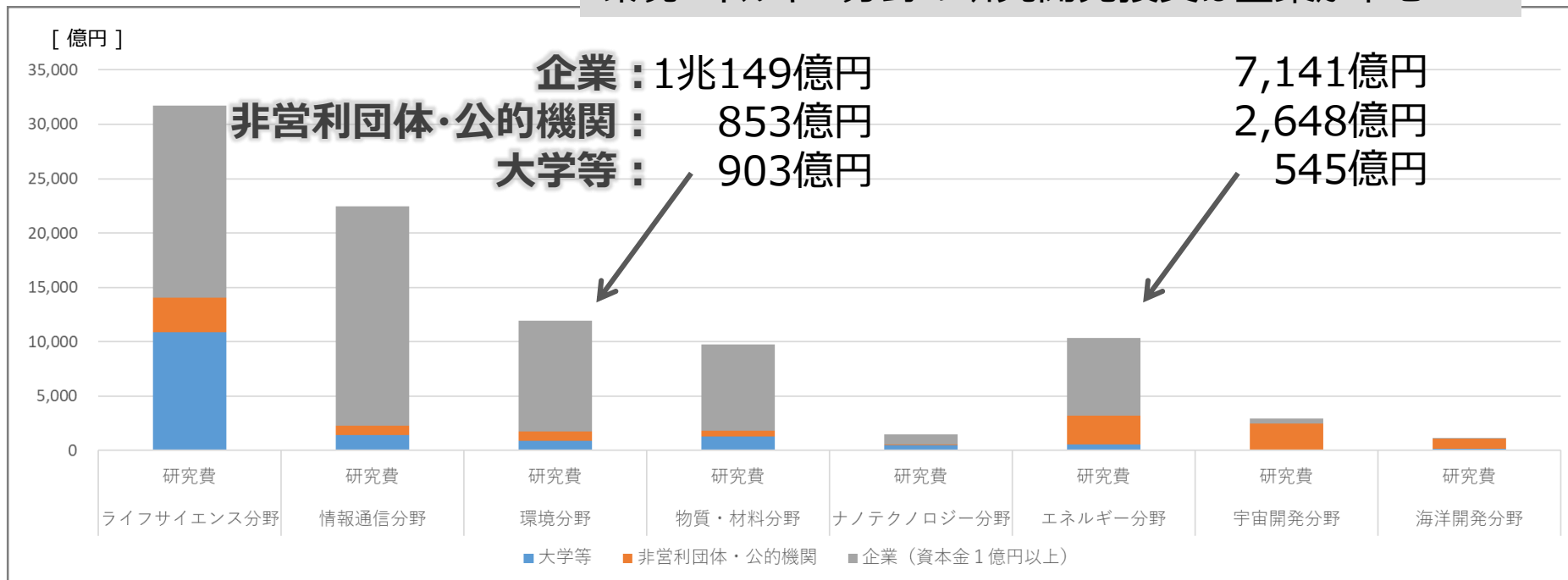
(注) Top10%(1%)補正論文数とは、被引用数が各年各分野で上位10%(1%)に入る論文の抽出後、実数で論文数の1/10(1/100)となるように補正を加えた論文数を指す。詳細は、本論2-2(7) Top10%補正論文数の計算方法を参照のこと。

- 「化学」、「工学」：論文数及びTop10%補正論文数が**減少**
- 「物理学」：論文数が**減少**
- 「環境・地球科学」：論文数、Top10%補正論文数、Top1%補正論文数のいずれでも**増加**

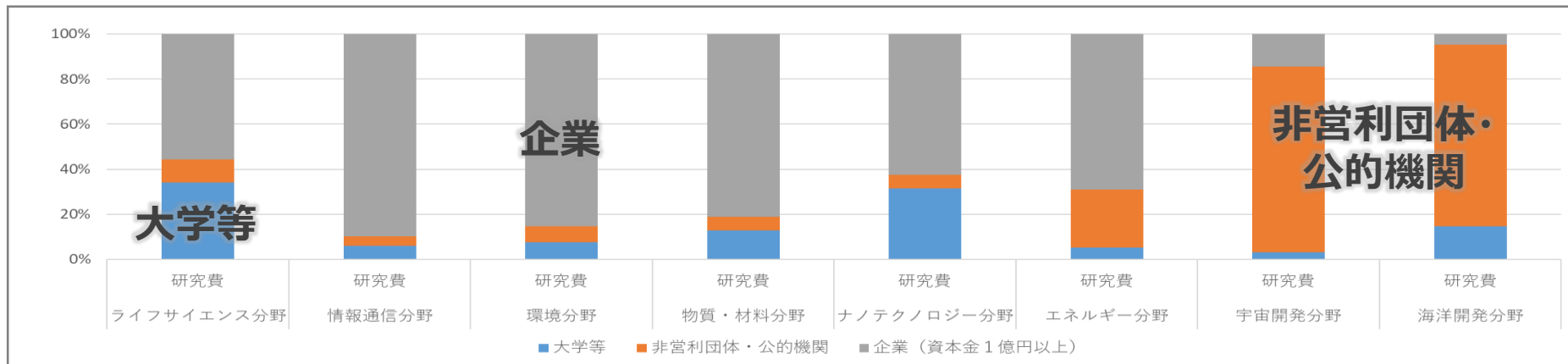
(出典) 文部科学省 科学技術・学術政策研究所、科学研究のベンチマーキング2017、調査資料-262、2017年8月

## ■ 特定目的別内部使用研究費（2017年度）

環境エネルギー分野の研究開発投資は企業が中心。



## ■ 各主体の研究費が当該分野研究費に占める割合（2017年度）





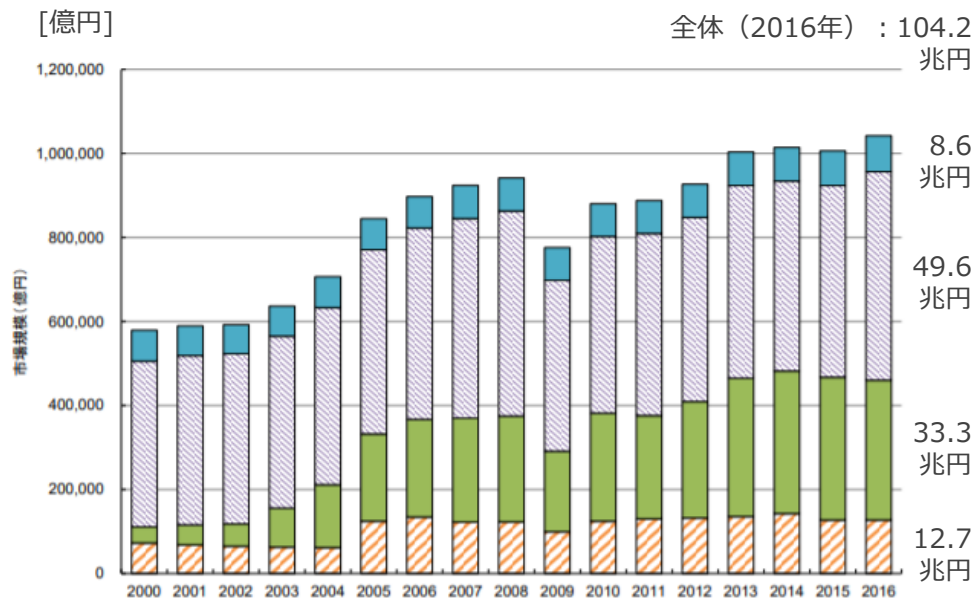
## 環境エネルギー分野関連産業の裾野は広い。

### ■ 売上（収入）金額上位の産業小分類（一部抜粋）

順位	産業小分類項目名	売上（収入）金額 [兆円]	産業計に 占める 割合 [%]
1	自動車・同附属品製造業	66.7	4.1
12	ソフトウェア業	23.0	1.4
17	電気業	20.8	1.3
23	石油精製業	16.9	1.0
30	医薬品製造業	12.9	0.8
39	有機化学工業製品製造業	11.4	0.7
40	電子デバイス製造業	10.9	0.7
44	畜産食料品製造業	10.2	0.6
61	製鉄業	7.4	0.5
62	発電用・送電用・配電用 電気機械器具製造業	7.2	0.4
82	水産食料品製造業	4.9	0.3
84	ガス業	4.8	0.3
91	工業用プラスチック製品 製造業	4.2	0.3
-	産業計	1,624.7	100.0

参照元：平成28年経済センサス

### ■ 環境分野の国内市場規模



- **自然環境保全** 緑化・水辺再生, 水資源利用, 持続可能な農林水産業, 環境保護意識向上
- **廃棄物処理・資源有効利用** 廃棄物処理・リサイクル, 資源・機器の有効利用, 長寿命化
- **地球温暖化対策** クリーンエネルギー利用, 省エネルギー化, 自動車の低燃費化, 排出権取引
- **環境汚染防止** 大気汚染防止, 下水・排水処理, 土壌・水質浄化, 騒音・振動防止, 環境経営支援, 化学物質汚染防止

参照元：環境産業の市場規模・雇用規模等に関する報告書

## 国際社会の動向

- 気候変動をはじめ地球の持続可能性に関する懸念のこれまで以上の高まり。
- SDGs, 気候変動対応（パリ協定）, 循環型社会形成（海洋プラスチックごみ問題対応）への取り組みとの連動に焦点。規制・制度, 金融, 科学技術など総動員で取り組む必要性を認識。
- 課題解決に資する技術・システムに優位性を持つ者が世界の潮流を左右する時代へ。

## エネルギー分野の科学技術・研究開発の動向

- ネット・ゼロエミッションへの移行に向けた技術・システム（回収CO<sub>2</sub>を用いた合成炭化水素研究等）
- 再エネ（主に太陽光・風力）由来電力の導入拡大に伴う課題への対応（調整力, 蓄エネ, エネ需要変化等）
- デジタル化の推進によるバリューチェーン全体の効率化・高度化（多様なデータの収集, 高度な利活用）

## 環境分野の科学技術・研究開発の動向

- 社会的要請への応答（気候変動対応, 海洋プラスチックごみ問題対応等）
- ビッグデータ化・ビッグサイエンス化, データの高度利活用（地球観測, 観測データ利活用等）
- 政策立案・課題への取り組みを支援する科学的知見の蓄積, ツールの開発（海洋プラごみ環境動態・リスク評価, 社会－生態系評価等）

## 今後の研究開発の方向性

- 研究開発では5つのキーワード（ZACSS）の統合的な推進が重要：（1）ゼロエミッション, （2）アダプテーション, （3）サーキュラー, （4）スマート, （5）セーフティ。

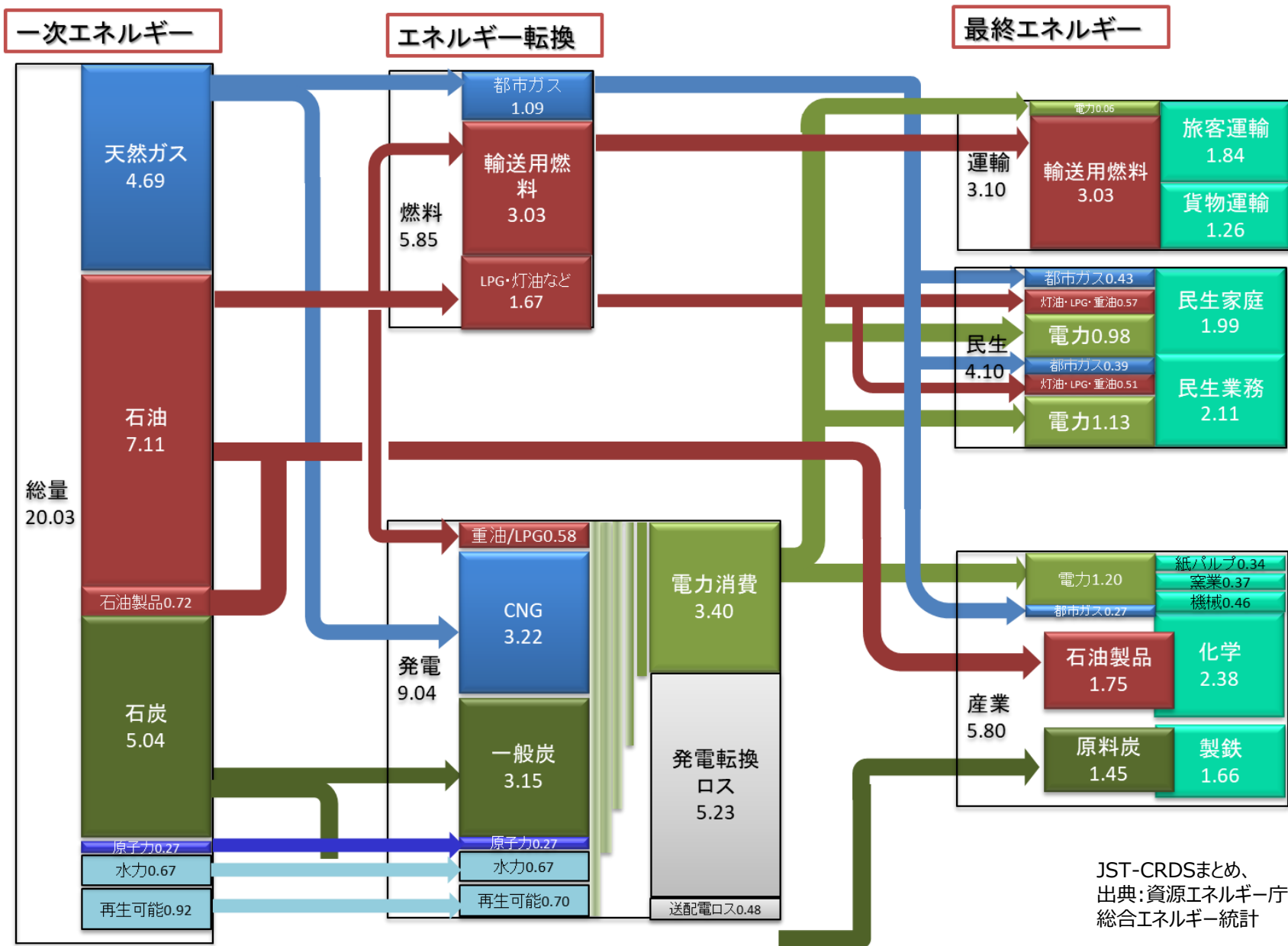
## 横断的課題

- 研究コミュニティの縮小（学協会会員の減少, 大学院進学者数の減少）
- 我が国の屋台骨である工学系分野における基礎基盤的研究の弱体化（研究インフラやデータ基盤等含む）
- 計測データの共有化やプラットフォーム構築, 工学基盤科学（エンジニアリングサイエンス）に基づく知識基盤構築, 人材育成等の根本的な強化方策検討が重要。

研究開発領域		国・地域		米国		欧州		中国		韓国		
		フェーズ	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発
1 エネルギー資源探査・開発技術*	*CCS含む	現状	○	○	◎	◎	◎	○	△	○	—	△
		トレンド	→	↗	→	→	↗	↗	↗	↗	—	→
2 火力発電		現状	○	◎	◎	○	○	△	◎	◎	○	○
		トレンド	→	→	↗	→	→	↘	↗	↗	→	→
3 CCU (Carbon Capture and Utilization)		現状	◎	◎	◎	◎	○	○	△	×	△	×
		トレンド	↗	↗	→	→	↗	↗	↗	→	↗	→
4 原子力利用	新型炉	現状	△	△	△	○	△	○	◎	△	△	
		トレンド	→	→	→	→	→	→	↗	↗	→	↘
	核融合	現状	○	◎	○	◎	○	◎	○	◎	○	○
		トレンド	→	→	↘	→	→	↗	↗	↗	→	→
	原子力安全	現状	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	○	◎
		トレンド	↗	↗	→	↗	→	→	↗	↗	→	↗
	再処理	現状	○	○	○	△	○	△	○	○	○	△
		トレンド	→	↘	→	→	→	→	↗	↗	→	→
5 太陽光発電・太陽熱発電	太陽光	現状	○	○	◎	○	◎	○	◎	△	△	
		トレンド	→	→	↗	→	↗	↗	→	↗	→	→
	宇宙太陽光発電	現状	○	○	△	○	×	△	◎	◎	○	○
		トレンド	→	→	→	↗	↘	↗	↗	↗	→	↗
	太陽熱発電	現状	○	△	◎	◎	◎	◎	○	◎	○	×
		トレンド	↗	→	↗	↗	↗	↗	↗	↗	→	→
6 風力発電		現状	△	△	△	×	◎	◎	△	△	×	△
		トレンド	↗	→	↘	↘	→	→	→	→	↘	→
7 バイオマス利用		現状	○	△	○	○	○	◎	△	△	△	○
		トレンド	↗	→	→	→	↗	↗	→	→	→	↗

研究開発領域		国・地域		米国		欧州		中国		韓国		
		フェーズ	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発
8 その他の再生可能エネルギー (地熱、海洋)	地熱	現状	◎	◎	○	○	◎	○	○	○	△	△
		トレンド	↗	↗	→	→	↗	↗	→	→	→	→
	海洋	現状	○	○	◎	◎	◎	◎	○	◎	○	◎
		トレンド	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
9 電気エネルギー利用		現状	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		トレンド	→	↗	↗	↗	→	→	↗	↗	↗	↗
10 熱エネルギー利用	蓄熱技術	現状	◎	△	○	○	◎	◎	◎	◎	○	△
		トレンド	↗	→	↗	↗	↗	→	↗	↗	→	→
	熱再生利用技術	現状	○	○	◎	○	○	○	△	○	△	○
		トレンド	→	→	↗	→	→	↗	↗	↗	→	→
	居住空間の熱マネジメント	現状	◎	○	△	○	◎	○	△	△	—	—
		トレンド	↗	→	→	↗	→	→	↗	↗		
11 化学エネルギー利用		現状	○	◎	○	○	○	◎	△	○	○	○
		トレンド	↗	↗	↗	↗	↗	↗	→	↗	→	→
12 基礎化学品合成プロセス		現状	◎	△	◎	○	○	△	◎	○	○	×
		トレンド	↗	→	↗	↗	→	↘	↗	→	↘	↘
13 燃焼		現状	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	△	△
		トレンド	→	→	→	↗	→	↗	↗	↗	→	→
14 トライボロジー		現状	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	×	△
		トレンド	↗	↗	→	→	↗	→	↗	↗	↘	→
15 エネルギーシステム評価		現状	○	○	△	△	○	○	○	○	—	○
		トレンド	↗	→	→	→	→	→	↗	↗		↗

研究開発領域		国・地域	日本		米国		欧州		中国		韓国	
		フェーズ	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発
16 気候変動観測	衛星による観測	現状	○	○	◎	○	◎	◎	△	○	△	△
		トレンド	↘	↘	→	→	→	→	↗	↗	→	→
	大気の観測	現状	○	○	◎	◎	◎	◎	○	△	○	△
		トレンド	→	→	↗	→	→	↗	↗	→	↗	→
	海洋の観測	現状	◎	△	◎	◎	◎	△	○	△	○	△
		トレンド	→	→	→	→	→	→	↗	→	→	→
17 気候変動予測		現状	◎	○	◎	◎	◎	◎	△	○	△	○
		トレンド	→	↗	↘	↘	→	↗	↗	↗	↗	→
18 水循環		現状	◎	○	◎	◎	○	◎	○	○	△	△
		トレンド	→	↗	→	↗	→	→	→	→	→	→
19 水処理		現状	○	○	○	○	◎	◎	○	○	○	○
		トレンド	→	→	→	↗	→	→	↗	↗	↘	→
20 生物多様性・生態系の把握		現状	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	△	△
		トレンド	→	→	↗	↗	↗	↗	↗	↗	→	→
21 生物多様性・生態系の管理・活用		現状	○	○	◎	◎	◎	◎	○	◎	△	△
		トレンド	→	→	↗	→	↗	↗	↗	↗	↗	→
22 環境分析・物質動態		現状	○	○	◎	◎	◎	◎	○	○	△	△
		トレンド	→	→	→	→	↗	↗	↗	↗	→	→
23 除去・浄化技術	大気汚染	現状	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	△	○
		トレンド	→	→	→	→	→	→	↗	↗	→	→
	土壌・地下水汚染	現状	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	△
		トレンド	→	→	→	→	→	↗	↗	↗	→	→
24 資源・生産・消費管理		現状	○	○	○	◎	◎	◎	×	◎	△	△
		トレンド	→	→	→	↗	↗	↗	↘	↗	↘	↘
25 リサイクルと循環利用		現状	△	○	△	△	○	◎	△	○	△	△
		トレンド	→	↗	→	↗	↗	↗	↗	↗	→	→
26 健康・都市生活		現状	○	○	-	○	◎	◎	-	△	-	△
		トレンド	↗	↗	-	↗	↗	↗	-	↗	-	↗



JST-CRDSまとめ、  
出典:資源エネルギー庁・  
総合エネルギー統計