


国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	ネガティブエミッション技術の必要性とその実現に向けた課題
他言語論題 Title in other language	Necessity of Negative Emission Technology and Issues for Its Realization
著者 / 所属 Author(s)	西尾 匡弘 (NISHIO Masahiro) / 産業技術総合研究所エネルギー・環境領域連携推進室イノベーションコーディネーター
書名 Title of Book	2050年カーボンニュートラルの実現に向けた脱炭素技術の課題と展望 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Issues and Prospects of Decarbonization Technology to Achieve Carbon Neutrality by 2050)
シリーズ Series	調査資料 2022-4 (Research Materials 2022-4)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2023-02-27
ページ Pages	—
ISBN	978-4-87582-903-4
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	—

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。



産総研
ともに進む。つぎを創る。


ネガティブエミッション技術の必要性と その実現に向けた課題

産業技術総合研究所
ゼロエミッション研究企画室
西尾 匡弘
m.nishio@aist.go.jp

2022.9.30:科学技術に関する調査プロジェクト2022シンポジウム

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

スライド 1



産総研
ともに進む。つぎを創る。

カーボンニュートラル実現に向けた対策

エネルギー起源CO₂の排出量=CO₂排出原単位×エネルギー消費量
 CO₂排出原単位：一定量のエネルギーを使用する時に排出されるCO₂排出量
 エネルギー消費量：エネルギーを使用した量

CO₂を回収/貯留するネガティブエミッション技術

- 電源の脱炭素化にむけた**再生可能エネルギーの大量導入**
- 化石燃料をエネルギー源とした生産技術等の**電化促進**
- 水素やアンモニア、バイオマスの利用等の**非電力分野の低炭素化**
- 上記技術も含めたさらなる**省エネルギー**

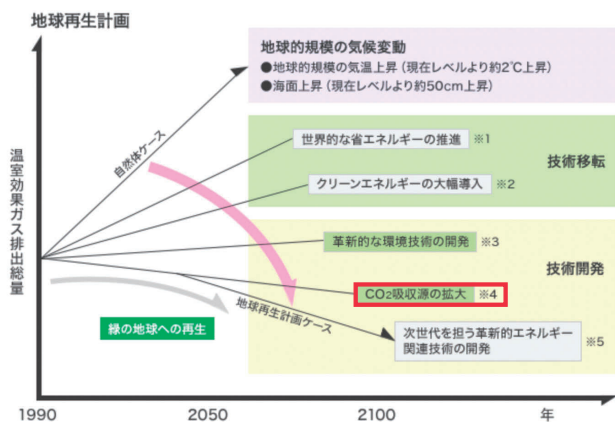
しかし、これらのCO₂排出量削減だけではカーボンニュートラルの解は無いことから、CO₂を回収する**ネガティブエミッション技術**が必要。

出典：2021年11月27日 第4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を産総研が編集

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 2

スライド 2

地球再生計画(1990)



- 日本政府が提唱 (1990年)
- 吸収源の拡大として
 - 植林
 - 森林保全
 - 砂漠緑化
 - 海洋の固定能力強化
 - 他

→ 気候変動対策の項目としては、当初から吸収源の拡大は課題であった

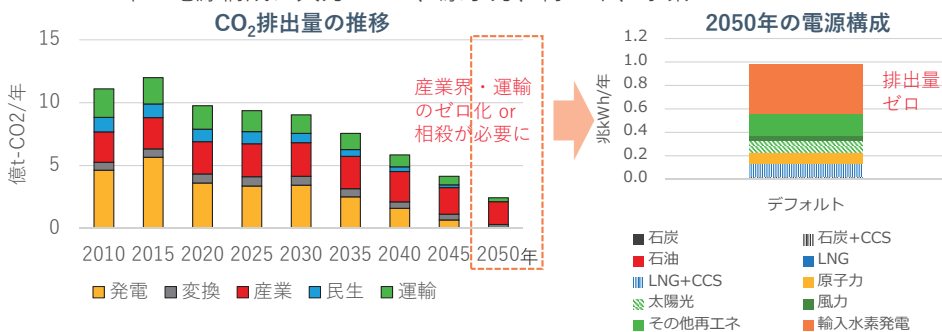
- ※1 総合的な省エネルギーの推進、フロン廃止等
- ※2 太陽光発電・燃料電池など新・再生可能エネルギーの技術開発・導入、安全性確保に十分配慮した原子力の導入促進等
- ※3 CO₂固定化・有効利用技術開発、生分解性プラスチック、新世代冷媒開発、環境調和型生産プロセス技術開発、CO₂海洋隔離技術開発等
- ※4 植林・森林保全、砂漠緑化、海洋のCO₂固定能力の強化等
- ※5 宇宙太陽発電技術・核融合技術の開発等

<https://www.rite.or.jp/system/research/new-earth/about/>

スライド 3

将来のエネルギー分析の例(産総研試算)

- 2050年CO₂を80%削減 (2013年度比) を達成可能なエネルギーシステム像を、エネルギーモデル「産総研版MARKAL」を用いて分析 (バックキャスト)
- 2050年には発電部門の直接CO₂排出がほぼゼロになる
 - 2050年の電源構成は火力+CCS、原子力、再エネ、水素



【前提条件】

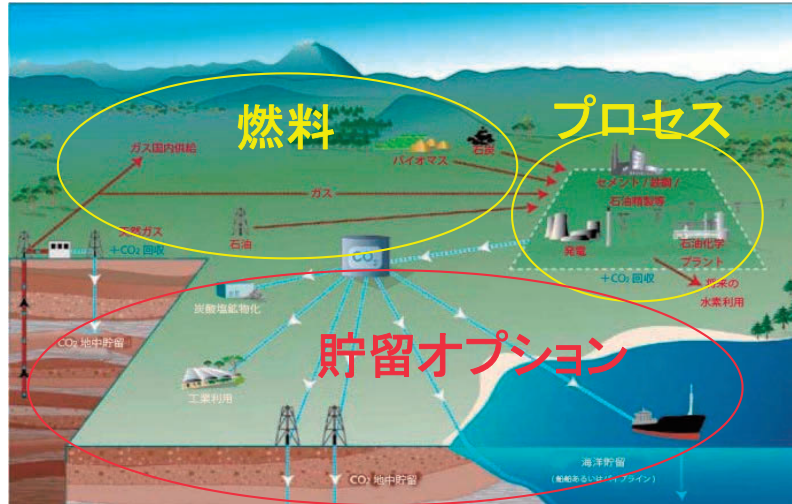
- 再エネ設置コスト：メガソーラー→2030年 10万円/kW、住宅用PV→2030年 20万円/kW、陸上風力→2030年 24.6万円/kW
- 原発：長期需給見通しの2030年シェアを達成しつつ段階的に廃炉 (40年稼働、計画中新設あり)
- CCS：CO₂回収率90%、2050年最大貯留量1億t-CO₂/年
- 輸入水素価格：2050年30円/Nm³

(出典) A. Ozawa, et al. (2018). International Journal of Hydrogen Energy, 43, 18083-18094.

スライド 4

二酸化炭素の回収・貯留技術(CCS)とは

- Carbon Dioxide Capture and Storage



IPCC 二酸化炭素回収・貯留技術に関する特別報告書から引用、和訳、追記(2005)

スライド 5

ネガティブエミッション技術のIPCCでの議論

- CDR : Carbon Dioxide Removal
 - 1990年代初頭から議論。
- NE : Negative EmissionとBECCS
 - SRCCSでバイオマス利用とCCSを組合せてNE実現と言及
 - AR4でBECCSと共にNEがシナリオに導入
 - それ以降、NE技術無しに削減シナリオが成立しないことが示唆
- DAC : Direct Air CaptureとDACCS
 - AR5からDACが出現。AR6でDACCSが出現

関連ワードのIPCC報告書中の出現回数

レポート名	CDR	Negative Emission	BECCS	DAC	DACCS
SRCCS(2005)	-	10	-	-	-
AR4(2007)	-	8	6	-	-
AR5(2013)	123	92	130	51	-
AR6(2022)	490	168	287	130	118

スライド 6

ネガティブエミッション技術のサマリー



技術名	概要	TRL	コスト US \$/tCO ₂	ポテンシャル Gt CO ₂ /yr
植林・再生林	樹木によるCO ₂ 吸収を促進する技術	8~9	0~240	0.5~10
土壌炭素貯留	有機物を土壌に貯蔵・管理する技術。CO ₂ 貯留量が、自然分解による土壌からのCO ₂ 放出量より多い場合に土壌炭素貯留となる。	8~9	45~100	0.6~9.3
泥炭地と沿岸湿地の回復	泥炭地と沿岸湿地の機能を回復させることによるCO ₂ 吸収能力を向上	8~9	データ不十分	0.5~2.1
森林農法： アグロフォレストリー	植樹し、森を管理しながらその間の土地で農作物の栽培や牧畜などを行う。森を伐採しないのが特徴	8~9	データ不十分	0.3~9.4
森林管理の改善	森林を管理することによるCO ₂ 吸収・固定能力の向上、改善	8~9	データ不十分	0.1~2.1
バイオ炭	有機物を熱分解により炭化し、土壌に埋設することにより炭素を固定する技術。土壌炭素隔離技術の一つ	6~7	10~345	0.3~6.6
DAACS	大気中のCO ₂ を直接捕集する技術。CCSとの組み合わせ(DAACS)でネット・ネガティブとなる。	6	100~300	5~40
BECCS	バイオマスエネルギーの燃焼により発生したCO ₂ を捕集・貯留する技術	5~6	15~400	0.5~11
風化促進	ケイ酸塩鉱物などの岩石を粉砕し表面積を大きくするなどして、風化を人工的に促進する技術。風化の過程でCO ₂ を吸収する。	3~4	50~200	2~4(1-95)
沿岸湿地の ブルーカーボンマネジメント	大気中のCO ₂ が光合成によって沿岸地域に生息するブルーカーボン生態系に取り込まれ、CO ₂ を有機物として隔離・貯留する。	2~3	データ不十分 推測されるレンジ ~100 ~10000	<1
海洋アルカリ化	天然あるいは人工的にアルカリ鉱物の溶解・アルカリイオン等を海洋へ添加することにより、CO ₂ の化学変化を促進し、海洋中の重炭酸イオン・碳酸イオンとして隔離。	1~2	40~260	1~100
海洋肥沃/施肥	鉄分や窒素分を海洋表面に散布することにより植物プランクトン等生物学的生産を促進する技術。最終的に大気からのCO ₂ の吸収量の増加を見込む。	1~2	50~500	1~3

IPCC AR6/WG3 Table12. 6を参考に作成

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

7

スライド 7

陸域におけるネガティブエミッション技術



技術名	概要	TRL	コスト US \$/tCO ₂	ポテンシャル Gt CO ₂ /yr	リスク・影響	コベネフィット	トレードオフと波及効果
植林・再生林	樹木によるCO ₂ 吸収を促進する技術	8~9	0~240	0.5~10	山火事、病気、害虫による炭素除去の逆転が発生する可能性があります。種やバイオームが不適切な場合、集水域の水量が減少し、地下水位が低下します。	雇用と地域の生活の向上、生物多様性の改善、再生可能な木材製品の供給の改善、土壌炭素と養分循環。おそらく原生林への圧力は少ないでしょう。	大規模な不適切な展開は、生物多様性の保全と食料生産を伴う土地の競争につながる可能性があります。
土壌炭素貯留	有機物を土壌に貯蔵・管理する技術。CO ₂ 貯留量が、自然分解による土壌からのCO ₂ 放出量より多い場合に土壌炭素貯留となる。	8~9	45~100	0.6~9.3	土壌中の有機窒素レベルが高いために亜酸化窒素の排出が増加するリスク。炭素隔離の逆転のリスク。	土壌品質の回復力と農業生産性を向上させます。	生産を犠牲にして炭素隔離の可能性を高める試み。面積あたりの純添加量は非常に少ない。監視するのは難しい。
泥炭地と沿岸湿地の回復	泥炭地と沿岸湿地の機能を回復させることによるCO ₂ 吸収能力を向上	8~9	データ不十分	0.5~2.1	干ばつまたは将来の暴乱における炭素除去の逆転。メタン排出量の増加のリスク。	雇用と地域の生計の向上、水産物の生産性の向上、生物多様性の改善、土壌炭素と養分循環。	食糧生産に使用されるいくつかの泥炭地での食糧生産のための土地の競争。
森林農法： アグロフォレストリー	植樹し、森を管理しながらその間の土地で農作物の栽培や牧畜などを行う。森を伐採しないのが特徴	8~9	データ不十分	0.3~9.4	一部の土地が食糧生産によって失われるリスク。高いスキルが必要です。	雇用と地域の生活の向上、さまざまな製品により、土壌の質が向上し、システムの回復力が高まる。	農作物の生産とのトレードオフがあるが、生物多様性とシステムの回復力が向上する。
森林管理の改善	森林を管理することによるCO ₂ 吸収・固定能力の向上、改善	8~9	データ不十分	0.1~2.1	管理の改善が、肥料の使用と外来種の増加を伴う単なる強化として理解されれば、それは生物多様性を減らし、富栄養化を増加させる可能性があります	持続可能な森林経営の場合、それは雇用と地域の生計の向上、生物多様性の向上、生産性の向上につながります	肥料の使用量の増加と外来種の増加を伴う場合、生物多様性を減らし、富栄養化と上流のGHG排出量を増やす可能性があります。

- 森林や土壌関連のNE技術は、総じてTRLが高く実行に移せば良いものが多い
- 技術適用の拡大が、生物多様性や自然環境への影響が懸念される
- 実際に吸収源となっているかどうかの評価法などに課題

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

8

スライド 8

海域におけるネガティブエミッション技術



技術名	概要	TRL	コスト US \$/tCO ₂	ポテンシャル Gt CO ₂ /yr	リスク・影響	コベネフィット	トレードオフと波及効果
沿岸湿地のブルーカーボンマネジメント	大気中のCO ₂ が光合成によって沿岸湿地に生息するブルーカーボン生態系に取り込まれ、CO ₂ を有機物として隔離・貯留する。	2~3	***-**** ~100 ~10000	<1	劣化または失われた場合、沿岸のブルーカーボン生態系は、その炭素の大部分を大気に放出する可能性。 底質汚染物質、毒性、生物蓄積および生物濃縮の可能性。 潮が湿地の炭素除去のための潮汐下地域の分解性の変化に関連する問題。 堆積物の再堆積と自然の湿地の埋没に対する海岸線の変更の影響。 炭素除去能力を低下させる目的で土地を埋め立てる手段としての沿岸ブルーカーボンの乱用。	多くの非炭素の利益を提供し、生態系に基づく適応、沿岸保護、生物多様性の増加、土壌海洋酸性化の減少に貢献できる。 人間の炭素に利益をもたらす可能性があり、陸生農産物の肥料、メタン生成菌の飼料添加物、または工業用または材料の原料として生産する可能性があります。	劣化または失われた場合、沿岸のブルーカーボン生態系は、その炭素の大部分を奪回する。最大のグローバルカーボンシンクでメリットを完全に提供するには、達成するのに数年から数十年を要する。
海洋アルカリ化	天然あるいは人工的にアルカリ塩物の溶解・アルカリイオン等を海洋へ添加することにより、CO ₂ の化学変化を促進し、海洋中の重炭酸イオン・炭酸イオンとして隔離。	1~2	40~260	1~100	海水のpHと飽和状態が上昇し、海洋生物相に影響を与える可能性 炭素または有毒な元素および化合物の放出の可能性 鉱業への影響	海洋酸性化を抑制	データ無し
海洋肥沃/施肥	鉄分や窒素分を海洋表面に散布することにより植物プランクトン等生物学的生産を促進する技術。最終的に大気からのCO ₂ の吸収量の増加を見込む。	1~2	50~500	1~3	栄養素の再分配、生態系の再構築、深海での酸素消費と酸性化の強化、除去されなばすべての余分な炭素の大気への数十年から数十年規模の復帰の可能性、意図しない副作用のリスク。	生産性と漁業の向上、海洋酸性化の減少	採掘、輸送、および展開作業からのCO ₂ および物理の排出量増加する可能性

- 海洋・沿岸利用のNE技術は、総じてTRLが低い
- 技術適用の拡大が、生物環境への影響に懸念がある
- 実際に吸収源となるかどうかの評価法などに課題

スライド 9

技術開発の進むネガティブエミッション技術



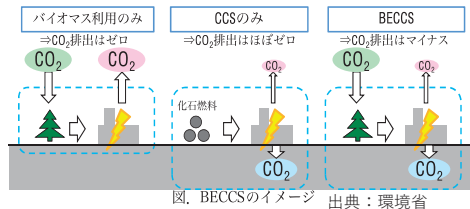
技術名	概要	TRL	コスト US \$/tCO ₂	ポテンシャル Gt CO ₂ /yr	リスク・影響	コベネフィット	トレードオフと波及効果
バイオ炭	有機物を熱分解により炭化し、土壌に埋設することにより炭素を固定する技術。土壌炭素隔離技術の一つ	6~7	10~345	0.3~6.6	主産からの粒子状物質とGHG排出量。持続可能なバイオマス収穫による生物多様性と炭素貯蔵量の損失	作物収量の増加と土壌からの非CO ₂ 排出量の削減。干ばつに対する回復影響/バイオマス資源をめぐる競争	粒子状物質に関連する環境への影響/バイオマス資源をめぐる競争
DACCS	大気中のCO ₂ を直接捕集する技術。CCSとの組み合わせ(DACCS)でネット・ネガティブとなる。	6	100~300	5~40	エネルギーと水の使用量の増加	水の生成（固体吸着剤DACのみ）	輸水とエネルギー生成からの排出量が増加する可能性
BECCS	バイオマスエネルギーの燃焼により発生したCO ₂ を捕集・貯留する技術	5~6	15~400	0.5~11	バイオマス原料を栽培するための土地と水資源の競争。持続可能なバイオマス収穫による場合の生物多様性と炭素蓄積量の損失	大気汚染物質の削減/燃料の安全性、残留物の農用使用、追加収入、健康上の利点、生物多様性、土壌の健全性、土地の炭素を高める可能性	生物多様性の保全と食料生産を伴う土地をめぐる競争
風化促進	ケイ酸塩鉱物などの岩石を粉砕し表面積を大きくすることで、風化を人工的に促進する技術。風化の過程でCO ₂ を吸収する。	3~4	50~200	2~4(<1-95)	鉱業への影響、土壌に広がる岩粉の空気質への影響	植物の成長促進、侵食の減少、土壌炭素の増加、pHの低下、土壌水分の保持	輸水とエネルギー生成からの排出量が増加する可能性

- 総じてTRLが中間レベル。実装に向けた検証の促進が求められる
- 技術適用の拡大が、生物多様性や自然環境への影響が懸念される
- 実際に吸収源となりうるかどうかの評価法などに課題

スライド 10

バイオマスCO₂除去・貯留技術

- 大気中のCO₂を除去・減少させる技術
- バイオマスエネルギーCCS (BECCS) → バイオマス炭素除去・貯蔵 (BiCRS)、直接空気回収 (Direct Air Capture)



Bioenergy with CCS (BECCS)

炭素中立なバイオマス
×
CO₂隔離貯留
↓
大気中のCO₂除去

BECCS
BiCRS

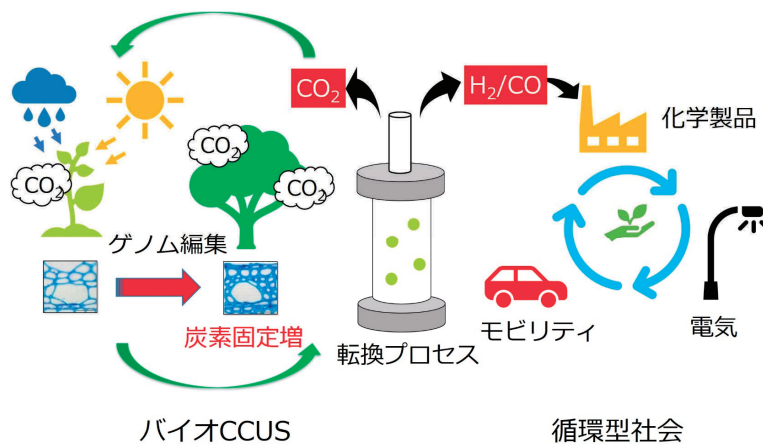
出典: ICEF 2020

- BiCRS (Biomass Carbon Removal and Storage)
- ・ バイオマスを用いて大気中からCO₂を除去しそのCO₂を地下または耐久消費財に貯蔵
 - バイオマス資源へのCO₂固定を含む

スライド 11

革新的バイオマス利用技術

- ・ CCUS/カーボンリサイクルの基盤となるCO₂分離・回収・固定化技術
- ・ バイオテクノロジーによるカーボンニュートラル資源利用の拡大、CO₂吸収・固定化および有効利用技術



スライド 12

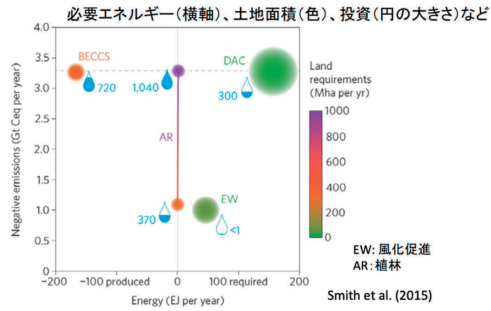
DACCS：大気CO₂直接回収 + 貯留



- DACは、大気中からCO₂を回収。400 ppm程度の濃度の低いCO₂を回収するため、化石燃料燃焼時 排ガス等からの回収と比べ、より大きなエネルギーが必要。
- DACCS = DAC + CS (貯留まで) をすれば、吸収と同様のネガティブエミッションとなる。
- CO₂貯留層に近く、エネルギーが安価に入手できる地域 (安価なPV供給が可能な地域など) での実施ができれば経済的にも大きな役割が期待される
- 2021年現在、1.7万tCO₂/年規模。2024年迄に100万tCO₂/年規模への拡大を計画



Climeworks



スライド 13

風化促進：CO₂の天然鉱物固定技術

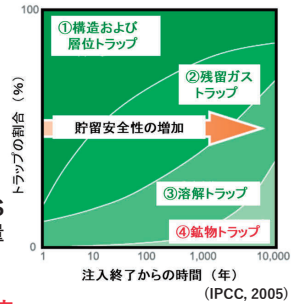


太古の地球のCO₂濃度は岩石の化学風化が規定 (Urey, 1952)

CO₂は石灰岩として海底に固定



一般的なCCS
→ 鉱物化は少量
かつ長時間



玄武岩の活用による鉱物化の加速



玄武岩でのCCS
→ 海外では2年で95%鉱物化の例 (CarbFIX)



風化促進
→ 粉砕による反応表面積の増加 (Lehmann and Possinger, 2020)



- 国内でも玄武岩が産出(偏在)
- 海洋底は玄武岩の宝庫
- 海洋底の玄武岩を活用できれば、鉱物化の促進のみならず、貯留ポテンシャルの拡大までが期待可

スライド 14

まとめ



- カーボンニュートラル社会を実現するために
 - 将来的にはゼロエミッション技術での実現が理想
 - 2050年の断面では削減しきれないCO₂量に相当する分を相殺できるだけのネガティブエミッション技術の実装が必要となる
 - ネガティブエミッション技術の効果も含めた実証と実装の加速に期待したい

ご静聴ありがとうございました

スライド 15



TRL (技術成熟度レベル) の定義

段階	TRL	定義
実装	9	大量生産
	8	パイロットライン
実証	7	トップユーザーテスト (システム)
	6	想定使用環境でのテスト
	5	研究室レベルでのテスト
	4	実証・デモンストレーション (システム)
基礎	3	技術コンセプトの確認 (POC: 概念実証)
	2	原理・現象の定式化応用的な研究
	1	科学的な基本原理・現象の発見

The Technology Readiness Levels, NASA, 2012.を基に作成

補足スライド

CO₂ 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業における TRL（技術成熟度）の定義

段階	TRL	定義
実装	9	最終段階、実運用
量産化	8	製造・導入プロセスを含め、開発機器・システムの改良が完了しており、製品の量産化又はモデルの水平展開の段階となっている。
フィールド実証	7	機器・システムが最終化され、製造・導入プロセスを含め、実際の導入環境における実証が完了している。
	6	機器・システムの実用型プロトタイプ/実用地域モデルが、実際の導入環境において実証されており、量産化/水平展開に向けた具体的なスケジュール等が確定している。
模擬実証	5	機器・システムの実用型プロトタイプ/実用地域モデルが、実際の導入環境に近い状態で実証されており、量産化/水平展開に十分な条件が理論的に満たされている。
実用化研究	4	主要な構成要素が限定的なプロトタイプ/限定的な地域モデルが機器・システムとして機能することが確認されており、量産化/水平展開に向け必要となる基礎情報が明確になっている。
応用研究	3	主要構成要素の性能に関する研究・実験が実施されており、量産化/水平展開に関するコスト等の分析が行われている。
	2	将来的な性能の目標値が設定されており、実際の技術開発に向けた情報収集や分析が実施されている。
基礎研究	1	要素技術の基本的な特性に関する論文研究やレポート等が完了しており、基礎研究から応用研究への展開が行われている。

注：環境省による定義は、技術開発・実証事業用であるため、実装段階のTRL9についての記述はない。加筆していることに留意されたい。

https://www.env.go.jp/earth/ondanka/biz_local/26_01/trl_manual.pdf

補足スライド

報告 (2) 脱炭素社会の実現

ネガティブエミッション技術の必要性とその実現に向けた課題

産業技術総合研究所エネルギー・環境領域連携推進室
イノベーションコーディネーター
西尾 匡弘

本日は「ネガティブエミッション技術の必要性とその実現に向けた課題」についてお話させていただきます。かなり絞り込んだようなタイトルに見えますが、中身としては広範な問題をはらんでいる話になると思います。イノベーションコーディネーターという、本当にコーディネートできたらすごいんだけど、という役職にありますが、この辺りの課題についてお話できればと思っております。

私が所属している産総研のゼロエミッション研究企画室は、カーボンニュートラルが前面に出てくる直前にできた組織体で、当時はゼロエミッション実現に向けて頑張るぞというところから始まりました。ゼロエミッションと言いますか、カーボンニュートラルの実現に向けて、どうしたらよいか、既に全般的なお話がなされてきましたが、スライド2はグリーンイノベーション戦略推進会議で出された資料を基に私どもで少し整理したものです。エネルギー消費の形態として、電力と非電力があり、この中でCO₂原単位をいかに削減していくのかと、エネルギー消費量をいかに削減していくのかに関して、カーボンニュートラル、ゼロエミッションに向けた取組みが必要となります。

スライド2を見ていただくと、電力を脱炭素化することでCO₂原単位を削減し、更に省エネすることで相当量のCO₂排出量の削減が期待できることが分かります。非電力部門も、天然ガス、水素、バイオ、CCUSなどの活用で全体的なCO₂原単位を落とし、更に省エネも進め電化することで、水色の四角が右側に少し食い込んだ格好になりますが、それでもCO₂そのものの排出がゼロになることはないと思っております。

その分を何とかしなければならぬわけですが、そのためには、カーボンニュートラルな発生源からのCO₂を、回収・貯留するネガティブエミッション技術で相殺することが必要になると考えています。技術が必要であるという点は、最初の結論となります。つまり、電源の脱炭素化に向けた再生可能エネルギーの大量導入、化石燃料をエネルギー源とした生産技術の電化促進、水素やアンモニア、バイオマスの利用などの非電力分野の低炭素化、これらの技術も含めた更なる省エネルギーの部分を実施した後で、最終的にネガティブエミッション技術が必要であるというのが結論です。

思い返すと、1990年がどのような年だったかと言えば、IPCCの最初の報告書が出た年です。この年、当時の通産省が中心となって、日本政府は「地球再生計画」を提唱しました（スライド3）。そこに書かれているお品書きは、現在になっても変わっていませんし、CO₂吸収源の拡大について、当時も植林、森林保全、それから海洋のCO₂固定能力といった分野に生物を使うという案が含まれていました。ちなみに、1990年当時は100年かけて再生しようという、ある意味悠長な計画になっていました。その時点から取り組んでいけば、本当にできたのかもしれないとも思います。

先ほど黒沢さんからモデルを用いた検討について御紹介がありましたが、私ども産総研では、MARKAL⁽¹⁾を用いて2050年にCO₂80%削減という一つ前の目標について分析しています（スライド4）。その分析では、2050年には発電分野からのCO₂排出量はほぼゼロに、運輸分野からの排出量もほぼゼロになるという結果になりました。また、最終的に、どうしてもCO₂が排出される産業が2割ほど残ると試算しました。この分析は、いわゆるネガティブエミッションを導入したものとはなっていません。逆に言うと、この部分をネガティブエミッション技術で相殺しないとゼロにはならないという結果です。2050年の電源構成で見ると、非常に大きな部分を占めているのが輸入水素発電です。これ以外に解がないかというところもございます。

私自身は元々CCSの研究者で、この研究を始めたのは地球再生計画の始まった1990年です。この後、ネガティブエミッション技術は、CCSあるいはCCUSが不可欠となるような構造になっていることを御紹介します。

既に御存知かと思いますが、CCSとはCarbon Dioxide Capture and Storageの略です。CCSの技術に関して、IPCCが初めて刊行した特別報告書に掲載されている図を御紹介します（スライド5）。CCSは、CO₂を回収して大気に出さないようにする技術です。ここで貯留という言葉方をしていますが、私が海洋の方で検討していた時には、隔離するという言い方をしており、大気に出さない技術を考えています。IEAがこれまでに出示してきたシナリオの数々を歴史的に眺めると、CO₂を削減するためには何十%というオーダーでこの技術が使われなければ成立しないようなシナリオが提示されていたことを御記憶の方もいらっしゃるかと思います。

ここで、どのような議論がなされてきたかを簡単に紹介しておきます（スライド6）。1990年代初頭から使われるようになってきた、Carbon Dioxide Removal (CDR)、要するにCO₂を除去するという言葉が、既に30年以上前から使われておりました。しばらく使われませんでした。昨今復活してきたワードです。ネガティブエミッションとBECCS⁽²⁾は、2005年に発行されたIPCCの二酸化炭素の回収隔離に関する特別報告書である“Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage (SRCCS)”で登場しました。この特別報告書の中で、CO₂を埋めるCCSと、バイオマス利用等を組み合わせることで、ネガティブエミッションが実現可能であると言及されました。私の記憶する限り、そのような指摘があったのはこの年代からだと思います。

それに続いて、2007年に発行された第4次評価報告書では、BECCSと共にネガティブエミッションがシナリオに導入されました。逆に言うと、ネガティブエミッション技術なしにはゼロエミッションのシナリオが成立しないことが露呈したと思っています。

ネガティブエミッションという用語自体が2005年頃から使われ始め、第4次、第5次、第6次とIPCCの報告書の中でもその存在感がどんどん増していることがお分かりいただけだと思います。

それから、先ほども少し話題に上りましたが、大気から直接CO₂を回収し、それを埋めるネガティブエミッション技術が出現したのが、2014年に出された第5次評価報告書です。そして、2022年に発表された第6次評価報告書では、CDR、ネガティブエミッション、BECCS、DAC⁽³⁾、DACCS⁽⁴⁾といったワードが踊っていることが見てとれます。

(1) 国際エネルギー機関 (IEA) が提供する「MARKAL」(MARKet ALlocation) というエネルギーモデルのフレームワークに基づいて、日本のエネルギーシステムを分析するために産業技術総合研究所が開発した。

(2) バイオマスの燃焼により発生したCO₂を回収・貯留する技術。BioEnergy with Carbon Capture and Storage の略。

(3) 直接空気回収。Direct Air Capture の略。

(4) 大気中のCO₂を直接回収し貯留する技術。Direct Air Carbon Capture and Storage の略。

IPCC の第 6 次評価報告書では、ネガティブエミッション技術にどのようなものがあるか、Table 12.6 に一覧表として示されました。スライド 7 は、技術名と TRL⁽⁵⁾、コスト、ポテンシャルはその表から引用していますが、概要は私が簡単に説明を付けたものです。ご興味がある方は原文を見ていただければと思います。

また、表の順番は、私が TRL の順に並べ直しています。TRL が 8 から 9 とは、実際に使える技術です。使われていない理由は、コストが問題であることもあるかと思いますが、コストについてはデータがまだ不十分なものが多いことが分かります。

中間の 3 から 7 については、この後、具体的に少し御紹介します。TRL が 1 から 3 は、まだまだプリミティブな状況にある技術です。それは海の関係のものです。この TRL 順に並べると、3 つのカテゴリーに分かれることが見てとれます。

一つずつ御紹介していきます（スライド 8）。まず TRL が非常に高い技術は、実行に移せばよいのですが、恐らく資金もかかるのでなかなか進まないかなと思います。植林・再生林、それから土壤炭素貯留は、コントロールをしっかりとやれば CO₂ 放出源ではなく吸収源にすることができることから、現在も検討が進められています。

泥炭地と沿岸湿地の回復は吸収源になり得ますが、その機能が低下しているため何とか回復させようという話を中心になります。森林管理によって CO₂ を吸収させることも書かれています。技術適用の拡大により、生物多様性、自然環境への影響が懸念される面もありますし、本当に吸収源になっているのかといった評価法がまだ曖昧であったり、難しかったりするという課題がございます。しかしながら、特に植林、土壤炭素については実施すればよいと思っております。

逆に、TRL の低い海に関する技術についても、実を言うと 1990 年代から言及されていたものが復活しています。湿地のブルーカーボンマネジメントや、海洋のアルカリ化です（スライド 9）。現在、CO₂ により海洋が酸性化しているところを、アルカリ化することで吸収能力を高めようということです。それから、海洋肥沃、施肥です。広く海洋肥沃と言っていますが、以前は鉄を撒くことで、生物活性を高めて CO₂ を吸収させることなどが言われていました。海岸・沿岸利用の技術については、まだ TRL が低く実際に技術適用することでどのような影響が出るか、例えば、赤潮が発生してしまうのではないかとされており、実際に吸収するかどうかといった評価方法が課題となっています。

現在、注目されているのが、スライド 10 に示す 4 点かだと思います。バイオ炭、先ほどお話が出ました DACCS、BECCS、それから風化促進です。風化促進は、特別報告書の中ではミネラルカーボネーションという言い方で、その当時から取り上げられておりました。コストも幅があります。コストをどれだけ下げていくのか、規模をどうやって拡大していくかが課題となっています。また、いずれの技術も、実際に吸収していることをどう評価するか、どう証明するかも課題です。

来週（令和 4 年（2022）年 10 月 5～6 日）、ICEF⁽⁶⁾ 2022 がありますが、BECCS を更に発展させた格好で、バイオマスエネルギーだけでなくバイオマスで炭素除去して貯蔵する

(5) Technology Readiness Level の略。新技術の成熟度（開発状況）を 1～9 で表す指標である。補足スライドとパネルディスカッションも参照。

(6) Innovation for Cool Earth Forum (ICEF) は、地球温暖化対策の鍵となる「イノベーション」を推進するため、世界中の産学官のリーダーが議論する知のプラットフォーム。

Biomass Carbon Removal and Storage (BiCRS) が提唱されています (スライド 11)。ネガティブエミッションということは、既にカーボンニュートラルになっているものについて、更に CO₂ を大気に出さないことで実現することであることがお分かりいただけるかと思います。

この辺りは後ほど御覧いただければと思いますが、産総研で取り組んでいる革新的なバイオマス利用技術による CCUS やネガティブエミッション技術 (スライド 12)、DAC があります (スライド 13)。DAC は 400ppm 程度の CO₂ を回収するため、非常に大きなエネルギーが必要になりますが、再生可能エネルギーが安価に使えるようなところであれば利用可能になるのではないかと期待されている技術です。現状まだ 2 万 t 規模にもなりません、2 年後には 100 万 t 規模まで拡大して実証する段階にあります。将来的に日本で使っていくのであれば、相当大規模に展開する必要があります。先ほどの風車を展開するのに比べても、はるかに大規模なことをやらなければならないという実情があります。

産総研では、現在、新たにムーンショット・プロジェクトにもアプライして研究を進めることになっています (スライド 14)。これは塩基性岩を粉砕して CO₂ と接触をさせることで、CO₂ を固定化させる技術です。日本周辺にも苦鉄質岩⁽⁷⁾が多く分布しているので、それなりのポテンシャルがあると考えられています。

私どもは、数年前までは「ゼロエミッションの夢」と言っていましたが、それを乗り越えてカーボンニュートラルを実現するためのネガティブエミッションまで足を踏み込んでいかなければならなくなってきました (スライド 15)。将来的にはゼロエミッション技術を実現することが理想だと思いますが、2050 年の断面では削減しきれない CO₂ 量に相当するだけのネガティブエミッション技術の実装に向けて、今後加速していく必要があります。ネガティブエミッション技術の効果も含めた実証と実装の加速に期待をしたいと思います。

御清聴ありがとうございました。

(にしお まさひろ)

(7) 玄武岩は苦鉄質岩の一種である。スライド 14 参照。