

一 般 財 団 法 人 油 脂 工 業 会 館

第 53 回 表 彰

油 脂 産 業 優 秀 論 文

優 秀 賞

2050 年温室効果ガス排出ゼロへの油脂産業の貢献

～ Dry Water と界面活性剤を活用した温室効果ガスの新トラップシステム～

ラ イ オ ン 株 式 会 社

いしづか ともたか
石塚 智貴

目次

はじめに	1
第1章 地球温暖化の概要	
1-1. 地球温暖化による気候変動.....	2
1-2. 温室効果ガスの排出量.....	4
1-2-1. 世界の温室効果ガス排出量.....	4
1-2-2. 日本の温室効果ガス排出量.....	5
1-3. 地球温暖化対策.....	7
1-3-1. 日本が目指す目標値.....	7
1-3-2. 各部門の CO ₂ 削減対策	7
1-3-3. 温室効果ガス吸収源対策.....	8
1-3-4. 地球温暖化対策の技術開発.....	8
第2章 CCS・CCU・CCUS について	
2-1. CCS・CCU・CCUS とは	10
2-2. CCS 等の位置づけ.....	11
2-3. CO ₂ 回収技術	12
2-4. CO ₂ 回収技術の課題.....	13
第3章 Dry Water による CO ₂ 回収技術	
3-1. Dry Water とは	14
3-2. Dry Water の CO ₂ 吸着能力.....	15
3-3. Dry Water を活用した CO ₂ トラップシステム.....	17
3-4. Dry Water を活用した CO ₂ 回収におけるコスト試算.....	18
3-5. Dry Water の展望	20
おわりに	21
参考文献	22

はじめに

類まれな惑星、地球。1970 年頃の人口は約 40 億人、現在は約 80 億人とこの 50 年で 2 倍の人口となり、1970 年には 1 次エネルギー消費量は石油換算で約 50 億 t であったものが、2019 年は約 140 億 t で約 3 倍となっている。また、IMF(国際通貨基金)による世界 GDP 数値は 1970 年代には約 11 兆 \$ が、2018 年には約 84 兆 \$ と約 8 倍に膨らみ、それらが地球環境許容収容力の激減につながっていると考えられる。

一方で、地球温暖化阻止に大きく影響する「温室効果ガスの排出量と経済成長」は、日本では 2000 年代初頭までエネルギー起源 CO₂ 排出量と実質 GDP は同様の傾向の伸びを示してきたが、地球温暖化対策を背景に 2013 年度以降は温室効果ガス排出量が減少しつつ、GDP が成長しているデカップリングの兆候が見られている¹⁾。

しかしながら、依然として現在起きている地球温暖化による気候変動と災害、バグポカリプスなどは局地的なものではなく、全世界へ及び生態系の破壊に直結している。危機的状況のすべての源はこれまでの人間の生活様式、産業活動によるもので、この阻止の必要性は急務であり、人間の全活動のリ・デザイン(ReDesign)が必要である。

2015 年の第 21 回国連気候変動枠組条約締結国会議(COP21)で合意されたパリ協定では、気候変動緩和策について、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2°C より十分低く保つ(2°C 目標)とともに、1.5°C に抑える努力を追求すること(1.5°C 目標)が示されたが、1.5°C ケースであっても世界の温室効果ガス許容排出量(カーボンバジェット)は残り約 0.6 兆 t しかない²⁾。2019 年に世界が排出した温室効果ガスは約 590 億 t-CO₂/年であり、このまま排出し続けると、2030 年には許容排出量を使い切り、国連環境計画(UNEP)は、今の排出ペースでは今世紀末の気温は産業革命前と比べ 3.2°C 以上の温度上昇が見込まれると発表している。このように世界は既に温室効果ガスにより後戻りできない最悪のシナリオへの道を歩み始めている。

このような現状に対し、当社では長期環境目標「LION Eco Challenge 2050」を策定している。「脱炭素社会」と「資源循環型社会」の実現を目指し、2050 年までに事業所活動における CO₂ 排出量ゼロ、2030 年までに 30%削減(対 2017 年、絶対量)を目標に掲げている。しかしながら、実現には相当な努力と技術革新が必要である。このため、新たな技術革新を本論文で提案する。

本論文では、地球温暖化に大きな影響を与えている CO₂ の回収・貯留に着目し、従来の高温・高圧条件という特別なエネルギーを必要とする CO₂ 回収技術から脱却するため、新たに「Dry Water」を活用した CO₂ 回収技術について検討した。さらに油脂産業の代表製品である各種界面活性剤と組み合わせることにより、CO₂ の吸着率を飛躍的に向上することを見出したことから、簡便で効率的な CO₂ 回収・貯蔵を実現させ、得られた CO₂ を利用することで循環型社会を実現し、温室効果ガス排出ゼロに貢献する。

第1章 地球温暖化の概要

1-1 地球温暖化による気候変動

「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」の第6次評価報告書が2021年8月9日に発表された。報告書では「人間の影響が大気、海洋および陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない」と記し³⁾、地球温暖化の原因が人間の活動によるものと初めて断定する表現となった。

気候変動問題は、私たち一人一人、この星に生きる全ての生き物にとって避けることができない喫緊の課題である。持続可能な開発目標 (SDGs) 達成を始めとした地球規模課題への対応として、様々な社会変革を進めていく必要がある中で、特に、温室効果ガス排出量を実質ゼロとし、世界のカーボンニュートラルへの貢献を図ることは国家間競争の中核となる様相が顕在化してきている。既に世界的にも平均気温の上昇、雪氷の融解、海面水位の上昇が観測されている。他、日本においても平均気温の上昇、大雨、台風等による被害、農作物や生態系への影響等が観測されている。個々の気象災害と地球温暖化との関係を明らかにすることは容易ではないが、観測値を基にした数値モデルによる解析では、地球温暖化の進行に伴い、今後、豪雨や猛暑のリスクが更に高まることが予測されている。気象庁によれば、2020年の世界平均気温は、2016年と並んで観測史上最高となった。また世界気象機関 (WMO) の報告によれば、特にシベリアでは長期間にわたって高温が続き、2020年6月にはベルホヤンスクにおいて北極圏の観測史上最高気温となる 38.0℃が観測された。米西部カリフォルニア州デスバレーでは2021年7月に 54.4 度を記録し、また州北部で同13日に史上2番目の規模となった山火事「ディクシー・ファイア」が発生 (図1)。消火活動に約1万人

が動員されたが、難航し、1 ヶ月以上に渡り鎮火の見通しが立たなかった⁴⁾。長期化の背景には、乾燥状態などを招いた気候変動の影響があると指摘されている。米国コロラド州では、2020 年 9 月に観測史上最高気温となる 38.3℃が観測された 3 日後に、降雪が観測される（図 2）という異常気象も見られた⁵⁾。

2020 年の日本の平均気温は、基準値（1981～2010 年の 30 年平均値）からの偏差が +0.95℃で、1898 年の統計開始以降最も高い値となった。特に 2019 年から 2020 年にかけての冬は全国的に暖冬となり、東・西日本で記録的な高温、日本海側で記録的な少雪となった。2020 年 7 月には、日本付近に停滞した前線の影響で、暖かく湿った空気が継続して流れ込み、各地で大雨となり、人的被害や物的被害が発生した（「令和 2 年 7 月豪雨」）。この期間の総降水量は、長野県や高知県の多い所で 2,000 ミリを超えた地域があり、九州南部、九州北部地方、東海地方及び東北地方の多くの地点で、24、48、72 時間降水量が観測史上 1 位の値を超えた。



図 1. 米カリフォルニア州の山火事「ディクシー・ファイア」（AFP 時事）⁴⁾



図 2. 米国コロラド州における 9 月観測史上、最高気温を観測した 3 日後の降雪⁵⁾

1-2 温室効果ガスの排出量

1-2-1 世界の温室効果ガス排出量

国連環境計画（UNEP）の「Emissions Gap Report 2020」によると、2019年の世界の人為起源の温室効果ガスの総排出量は依然として増加しており、全体でおよそ591億トンとされている（図3）。2020年の世界の温室効果ガス排出量は、新型コロナウイルス感染症による経済活動の減速により減少したものの、依然としてパリ協定の排出削減目標からはほど遠く、今世紀内に3℃以上の気温上昇につながる方向へ向かっている。また、CO₂以外の温室効果ガスの削減幅は小さく、大気中の温室効果ガス濃度は上昇が続いている。

UNEPの「Production Gap Report 2020」では、1.5℃目標達成のために、世界は2030年までの間に毎年約6%の化石燃料生産を削減する必要があると述べられている⁷⁾。しかし、各国は年2%の化石燃料の増産を見込んでおり、目標達成のために抑えるべきラインの2倍に相当する量の化石燃料が2030年までに生産されると言われている。新型コロナウイルス感染症による影響で、2020年における化石燃料の生産量は減少したものの、各国が経済刺激策を脱炭素型のものとししない限り、2030年までの排出量削減には大きく寄与しない。つまり、各国政府の従来型の経済刺激策や復興対策によって、パンデミック以前の生産に戻り気候変動問題を加速させるか、段階的な化石燃料依存からの脱却に進むか、世界はその岐路にある。

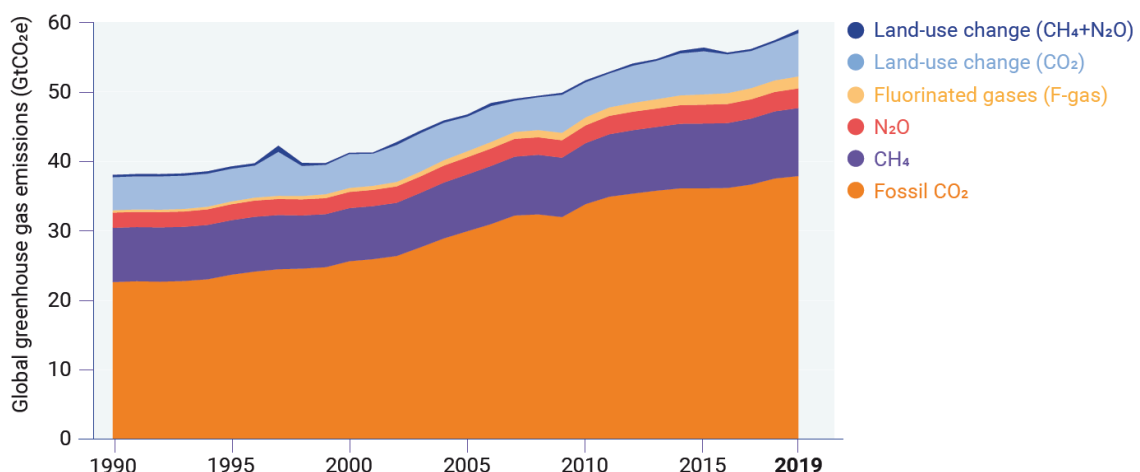


図3. 世界の温室効果ガス排出量⁶⁾ 出典：UNEP Emissions Gap Report 2020

1-2-2 日本の温室効果ガスの排出量

日本の 2019 年度の温室効果ガス排出量は、12 億 1,200 万トン（CO₂ 換算）であり、2014 年度以降、6 年連続で減少（図 4）している⁸⁾。この排出量は、算定を行っている 1990 年度以降の過去 30 年間で最も少ない排出量であり、2018 年度に引き続き、2 年連続で過去最少の排出量を更新した。日本の削減目標の基準年である 2013 年度の総排出量（14 億 800 万トン CO₂）と比べて、14.0%（1 億 9,700 万トン CO₂）減少しており、その要因としては、エネルギー消費量の減少（省エネ等）や、電力の低炭素化（再エネ拡大、原発再稼働）等が挙げられる。また、日本から排出される温室効果ガスの 9 割以上を CO₂ が占めており、世界の割合（約 7 割）と比べて、CO₂ 排出量の占める割合が高いという特徴がある。2019 年度の CO₂ 排出量は 11 億 800 万トン CO₂（2013 年度比 15.9% 減少）であり、そのうち、発電及び熱発生等のための化石燃料の使用に由来するエネルギー起源の CO₂ 排出量は 10 億 2,900 万トン CO₂ であった。さらに、エネルギー起源の CO₂ 排出量の内訳を部門別に分けると、間接排出については、産業部門からの排出量は 3 億 8,400 万トン CO₂、運輸部門からの排出量は 2 億 600 万トン CO₂、業務その他部門からの排出量は 1 億 9,300 万トン CO₂ であった（図 5、図 6）。

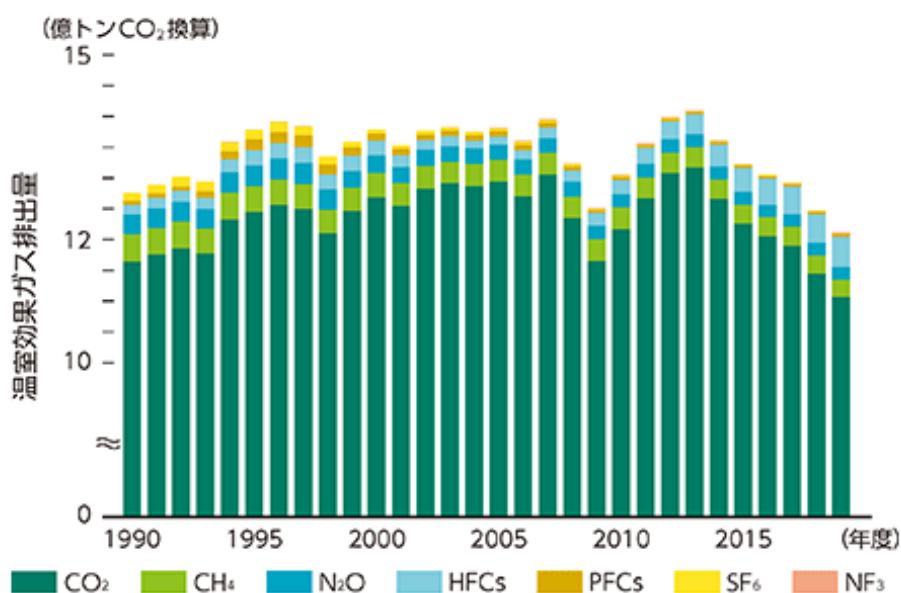
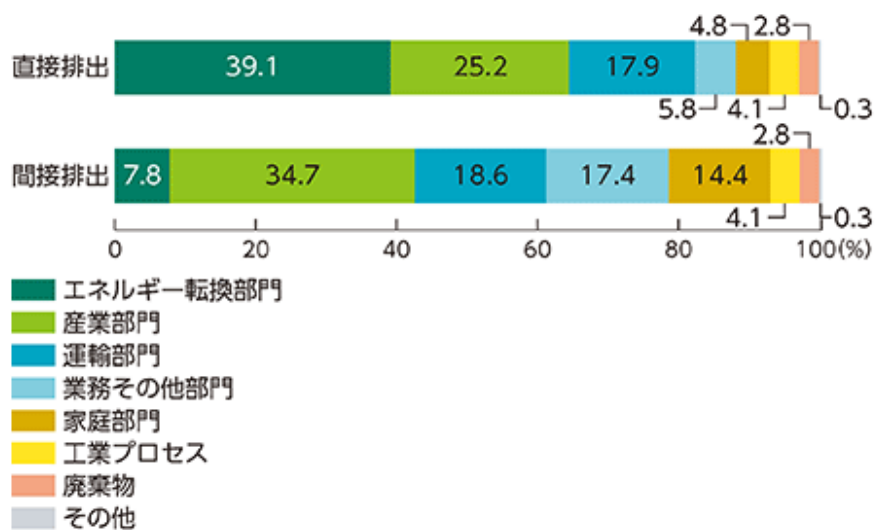


図 4. 日本の温室効果ガス排出量⁸⁾ 出典：環境省



注1：直接排出とは、発電及び熱発生に伴うエネルギー起源CO₂排出量を、その生産者側の排出として計上した値（電気・熱配分前）
 注2：間接排出とは、発電及び熱発生に伴うエネルギー起源CO₂排出量を、その消費量に応じて各部門に配分した値（電気・熱配分後）

図5. CO₂排出量の部門別内訳⁸⁾ 出典：環境省

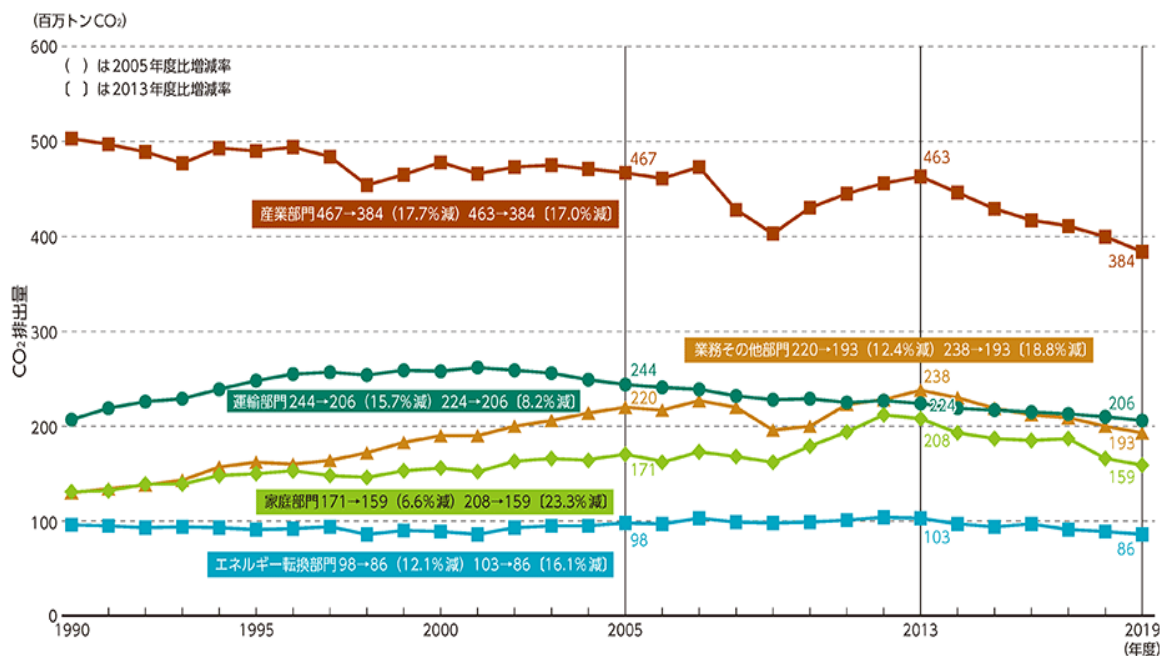


図6. 部門別エネルギー起源 CO₂排出量の推移⁸⁾ 出典：環境省

1－3 地球温暖化対策

1－3－1 日本が目指す目標値

日本では、2015年に国連気候変動枠組条約事務局に提出した「日本の約束草案」に基づき、国内の排出削減・吸収量の確保により、2030年度において、2013年度比で26.0%削減（2005年度比25.4%削減）とする中期目標の達成に着実に取り組むこととした。また長期的な戦略の策定に向けては、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略策定に向けた懇談会」において、議論が進められ、2019年4月に、今世紀後半のできるだけ早期に「脱炭素社会」の実現を目指し、2050年までに80%の温室効果ガス排出削減に大胆に取り組むことが提言された⁹⁾。また2020年10月26日に、菅義偉内閣総理大臣は第203回国会の所信表明演説において、我が国として2050年までに、温室効果ガスの排出を全体として実質的にゼロにする、すなわちカーボンニュートラルを目指すことを宣言した¹⁰⁾。

1－3－2 各部門のCO₂削減対策

上記の目標をもとに部門別の対策を策定。部門は主に5つに分けられ、各部門の対策は異なるが、それぞれを達成することで中期目標を達成していけるよう道筋を明らかにしている。以下に各部門における対策について記す⁸⁾。

1－3－2－（1）産業部門（製造事業者等）

温室効果ガスの主となるガスは二酸化炭素である。そのため産業部門ではその元となる炭素の削減を目指し、低炭素社会実行計画を策定して着実な実施と評価、検証を行っている。またエネルギーを生み出す火力発電でも温室効果ガスが発生することから、設備や機器の省エネとエネルギー管理の徹底も対策として盛り込まれている。

1－3－2－（2）業務その他部門

新築建造物省エネ基準適応義務化を行い、新しく建てる建造物には省エネを導入していくことを示し、既存の建造物に関しても省エネ改修を実施している。機器の省エネ化としてLEDなどの高効率照明のストックを2030年までに100%にすることやトップランナー制度による省エネ性能向上を進めている。

1－3－2－（3）家庭部門

国民一人一人に配慮した無理のない行動変容を促進し、脱炭素社会にふさわしいライフスタイルの自発的な変革を創出することを目的として、ナッジ等の行動科学の知見に基づく新たな政策手法の検証を行っている。

1－3－2－（4）運輸部門

運輸においては温室効果ガスを排出する輸送機、機器の使用は欠かせないが、これらを抑制するために、EV や FCV などの次世代自動車の普及や燃料の改善などが進められている。また交通流対策の推進やエコドライブ、公共交通機関の利用促進、低炭素物流の推進なども取り組まれている。

1－3－2－（5）エネルギー転換部門

太陽光、風力、水力、地熱、太陽熱、バイオマス等の再生可能エネルギーは、地球温暖化対策に大きく貢献するとともに、エネルギー源の多様化に資するため、国の支援策によりその導入を促進。また、二酸化炭素回収・貯留（CCS）の導入に向け、技術開発や貯留適地調査等を実施している。

1－3－3 温室効果ガス吸収源対策

温室効果ガス、二酸化炭素の吸収源は森林などの植物である。そのため適切な間伐や造林等を通じた健全な森林の整備、木材及び木質バイオマスの利用等が推進されている。また森林だけでなく、都市における吸収源対策として、都市公園整備や道路緑化等を推進している。さらに、農地土壌の吸収源対策として、炭素貯留量の増加につながる土壌管理等の営農活動の普及、地球温暖化防止等に効果の高い営農活動に対する支援を行っている。加えて、ブルーカーボン生態系による CO₂ 吸収量の計測・推計に向けた検討を行うとともに、CO₂ 吸収源となる藻場等の造成を実施している。

1－3－4 地球温暖化対策の技術開発

前述の部門別対策・温室効果ガス吸収源対策の他、地球温暖化の防止に向け、革新技術の高度化、有効活用を図り、必要な技術イノベーションを推進するため、再生可

能エネルギーの利用、エネルギー使用の合理化だけでなく、民間の自主的な技術開発に委ねるだけでは進まない多様な分野における CO₂ 排出削減効果の高い技術の開発、窒化ガリウム (GaN) やセルロースナノファイバー (CNF) 等の新素材の活用によるエネルギー消費の大幅削減、燃料電池や水素エネルギー、蓄電池、二酸化炭素回収・有効利用・貯留 (CCUS) 等に関連する技術の開発・実証、普及を促進している。

2021 年 4 月 22 日の米国主催の気候変動サミットで、菅義偉首相は「日本が誇る省エネ、水素、CCS などの技術を最大限活用し、世界の脱炭素移行を支援する」と語り、CCUS 技術の早期確立が必須と位置づけた。

次章に CCS・CCU・CCUS 技術の詳細について説明する。

第2章 CCS・CCU・CCUS について

2-1 CCS・CCU・CCUS とは

気候変動問題に関する国際的な枠組み「パリ協定」が、2020 年から運用開始となった。協定に基づき、温室効果ガスの削減目標を達成するためには、これまでにない技術革新が必要である。具体的には、2020 年 1 月に策定された「革新的環境イノベーション戦略」では、世界の CO₂ 排出量と吸収量がプラスマイナスゼロになる「カーボンニュートラル」を実現するような技術、さらには過去に排出された大気中の CO₂ をも削減する「ビヨンド・ゼロ」を可能とするような革新的技術を、2050 年までに確立することを目指している¹¹⁾。その革新的技術のひとつが CCS、CCU、CCUS である。

CCUS は、発生源から回収した CO₂ を輸送し地中に貯留する CCS (Carbon Capture and Storage) と、回収した CO₂ を利用する CCU (Carbon Capture and Utilization) を包括した呼称である。現状は、石油生産効率の向上に CO₂ を用いる EOR (Enhanced Oil Recovery ; 石油増進回収) が CCUS としての代表的な CO₂ 削減技術となっている¹²⁾。なお、引用する文献や発言によって、CCS、CCU、CCUS の文言の使用にばらつきがあるが、どれも基本的に二酸化炭素を大気放出させずに回収し、貯留又は利用をしようと意図する文脈で使われているものである。本論文で引用する場合には原典¹²⁾によった。

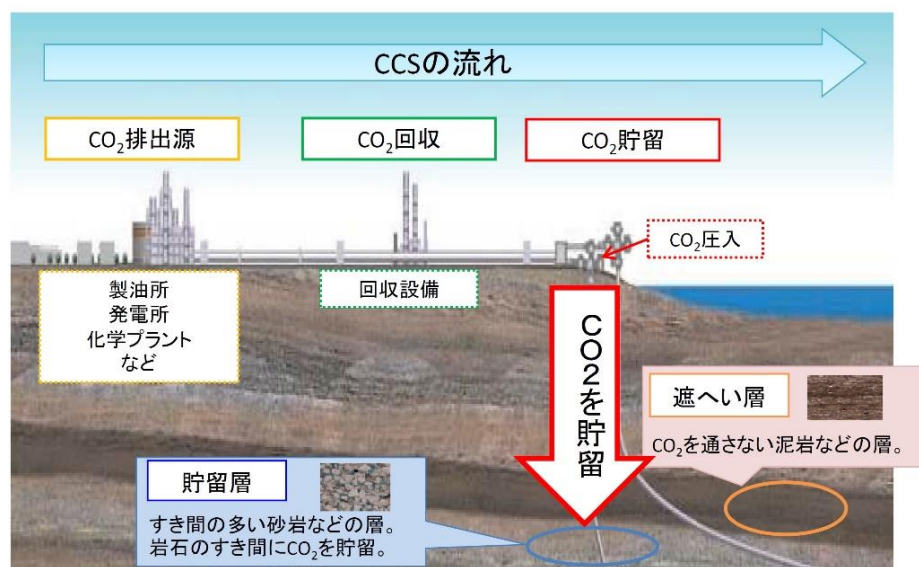


図 7. CCS の流れ 出典：経済産業省 資源エネルギー庁

2-2 CCS等の位置づけ

前述のように、化石燃料の利用に伴うCO₂排出を大幅に削減していくことが、パリ協定に掲げられた目標達成のためには必要であり、その観点から、CO₂の分離・回収や貯留・利用に係る技術は、将来、有望な選択肢の一つであり、そのイノベーションが重要である。IEA（国際エネルギー機関）報告書¹³⁾によると、2060年までの累積CO₂削減量の14%をCCSが担うことが期待されている（2060年時におけるCO₂削減量の16%、49億トン／年）（図8）。

また2021年8月3日に開催されたCCUSの早期社会実装会議（第3回）にて、CCUS事業の今後の方針について「2030年の本格的な社会実装に向け、国内最大の商用規模の回収技術実証（世界初の商用BECCSプロジェクト）、2023年までに最初の商用化規模のCCU技術の確立を目指す。」と記されている¹¹⁾ことから、大幅にCO₂を削減させるCCU技術の早期確立が急務と捉える。

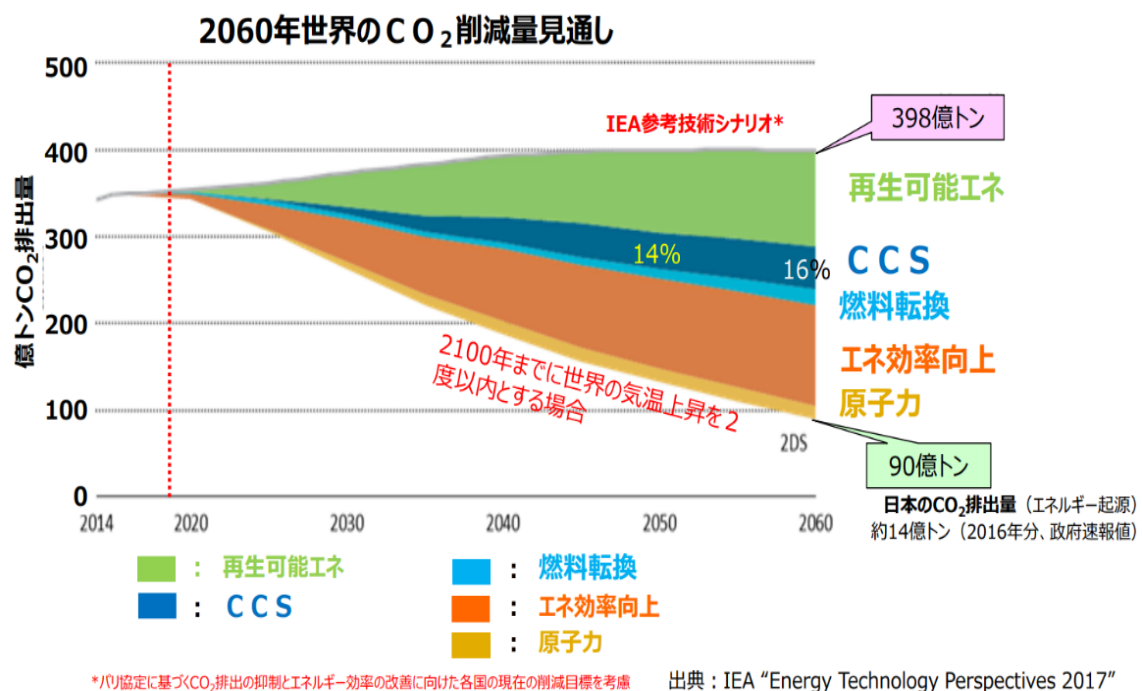


図8. 2060年 世界のCO₂削減量見通し¹¹⁾

2-3 CO₂回収技術

燃焼後排ガスからの CO₂回収技術としては、化学吸収法（アミン等の溶剤を用いて化学的に CO₂を吸収液に吸収させ分離する方法）、物理吸収法（高压下で CO₂を物理吸収液に吸収させて分離する方法）、膜分離法（CO₂が選択的に透過する膜を用いて分離する方法）、深冷分離法（極低温下で液化し沸点の違いを用いて分離する方法）がある。

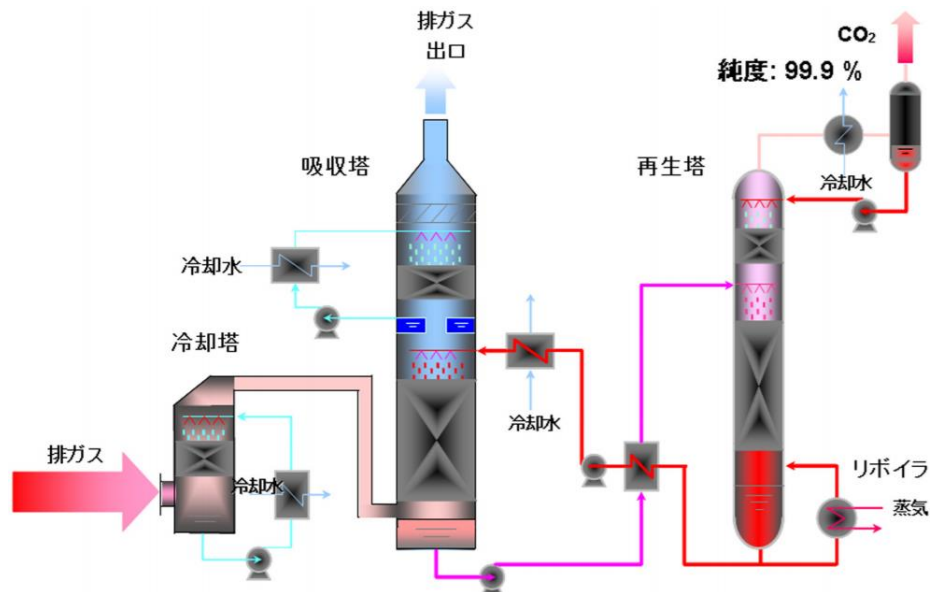


図9．化学吸収法による排ガスからの CO₂回収プロセスフロー¹⁴⁾

図9に燃焼排ガスからの CO₂回収プロセスフローを示す¹⁴⁾。発電所等から排出された排ガスは冷却塔にて冷却された後、吸収塔に送られ、吸収塔内で上部より流れてきた吸収液と接触することにより排ガス中の CO₂が吸収される。CO₂が除去された排ガスは冷却後、CO₂の少ないガスとして吸収塔の塔頂より大気へ放出される。一方、CO₂を吸収した後の吸収液は吸収塔下部から再生塔に送られ、蒸気により加熱されることで CO₂を放出し、再生された吸収液は吸収塔に戻り再利用される。

CO₂は pKa が 6.35 の酸であるため、塩基を媒体とした分離が可能である（化学吸収法）。また、CO₂の溶解度が高い媒体を用いた分離も可能である（物理吸収法）。さらに、吸着法においても媒体と CO₂ との親和性が高いことが重要な要素である。

膜分離は、分子サイズや膜材料への親和性の違いに基づくガス移動速度の違いを利用して分離する。濃度差（すなわち、CO₂の分圧差）が分離のドライビングフォースとなる。

深冷分離は沸点の違いを利用した蒸留による分離である。CO₂ の三重点 (-56.6℃、5.11atm) より高温・高圧では液相が出現するので、この条件で沸点差を利用して分離する。

2-4 CO₂回収技術の課題

アミンの様な CO₂ と化学反応を起こし強く結合する媒体を用いた化学吸収法では、その高い反応性のため燃焼排ガスなどの低分圧 CO₂ にも適用できる一方、化学的に強く結合した媒体から CO₂ を再生するには大きなエネルギーを必要とする。また物理的な溶解現象を利用して分離を行う物理吸収方法では、CO₂ 再生のための消費エネルギーは小さいが、高い CO₂ 分圧が必要とし、IGCC (石炭ガス化複合発電、Integrated coal Gasification Combined Cycle) などの全圧および CO₂ 濃度も高いガスに適合するが、低 CO₂ 分圧の燃焼排ガスには不向きである。CO₂ の動力的直径 0.33nm であるので、分離する物質との直径の差が大きい場合には (例えば CH₄)、分子ふるいによる膜分離が可能である。直径差が小さい場合には親和性の差を利用する。いずれにしても、駆動力として圧力差をつける必要がある。深冷分離ではガスを圧縮・冷却した上で蒸留分離を行うので、目的ガスの濃度が小さいと目的物を回収するために必要なエネルギーが膨大となるため、CO₂ 濃度の高いガスに用いるのが一般的である。そのため CO₂ を再生するには大きなエネルギーを必要とする。

吸着法は活性炭やゼオライトなどの固体の吸着剤に CO₂ を吸着させ、除圧あるいは加熱によって CO₂ を脱離させる回収方法である。固体と CO₂ の間に化学反応が起こる場合は固体吸収法と呼ぶ。吸着法と固体吸収法の関係は、物理吸収法と化学吸収法の関係と同じである。媒体が固体であるため、媒体が液の場合とは異なり吸収部と再生部間の媒体移動が難しい。このため複数の塔を用意し、媒体を固定して、圧力・温度などの環境条件を変化 (スイング法) させなければならない。このように CO₂ の回収には依然として莫大なエネルギーが必要となる。

次章ではこのような莫大なエネルギー消費から脱却した新たな CO₂ 回収技術について論ずる。

第3章 Dry Water による CO₂回収技術

3-1 Dry Water とは

Dry Water とは、95%が水で、粉の一粒一粒は、水滴を変性シリカ（海の砂の成分）で包んだ構造であり、砂粒くらいの小さな水滴が砂状のシリカコーティングで覆われた水-空気エマルジョンである¹⁵⁾。

通常は水滴と水滴が触れ合うと表面張力を崩してつながりあい、そうして大きくなった水滴同士がさらに合体し、大きなひとつながりの水となり、「液体」の水の性質を持つようになるが、Dry Water はシリカコーティングにより、水滴同士が触れ合い、くっつきあい、「液体」となることを防いでいる¹⁶⁾。その結果、あらゆる気体を吸着することのできる微粉末が得られる。特定の気体は、Dry Water と混合すると水と結合し、固体の包接水和物内に閉じ込められる。これは、偶発的な爆発リスクを低減し、爆発性のガスを簡単に輸送できる可能性も示している¹⁷⁾。

この Dry Water を活用することで、大気中の温室効果ガスを捕捉して密封する二酸化炭素隔離剤としての使用が見込まれる。また、Dry Water には、前述のように危険な物質の輸送と保管のための用途があり、Dry Water の内部に貯えられた物質は粉末化して安定化させることができるため、揮発性化合物の媒体として使用することができる。また、物質の揮発性を抑制するだけでなく、輸送重量をも減少させることが期待される¹⁸⁾。大量の揮発性ガスや物質を恒久的に拘束することなく貯蔵し、安定化させることができるため、Dry Water は自動車の燃料電池の構成材として潜在的な用途があるという理論も立てられている¹⁹⁾。その性質上、Dry Water は吸着剤として分類される。



図10. Dry Water の外観

3-2 Dry Water の CO₂ 吸着能力

そこでまず、Dry Water の二酸化炭素に対する吸着能力を測定した結果を図 1 1 に示す。その結果、水とシリカを単に混ぜたものと比較し、Dry Water の構造をとること、CO₂ 吸着率は 3 倍以上に飛躍し、CO₂ を貯蔵できることが分かった。

次に CO₂ の吸着剤として主に活用されているゼオライトや活性炭と CO₂ の吸着率を比較した結果を図 1 2 に示す。

その結果、大気圧条件下において、Dry Water の CO₂ 吸着率はゼオライトや活性炭と比較し、約 2 倍以上の値を示すことが分かった。一般的に使用されるゼオライトや活性炭は CO₂ 吸着に高温や高圧下条件等を必要とするが、Dry Water は大気圧条件下での CO₂ 吸着が可能であることを新たに見出した。そのため、CO₂ 吸着において従来必要であったエネルギーが不要となり、簡便性に優れることを見出した。

ここでさらに、Dry Water 粒子をより小さくさせ、比表面積を上げることで CO₂ 吸着率が向上すると仮説を立て、Dry Water の粒径を微細化するため油脂産業製品の代表として、各種界面活性剤の活用を検討した。

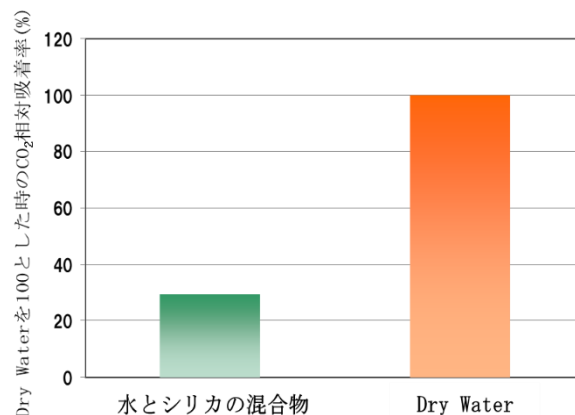


図 1 1. Dry Water の CO₂ 吸着率

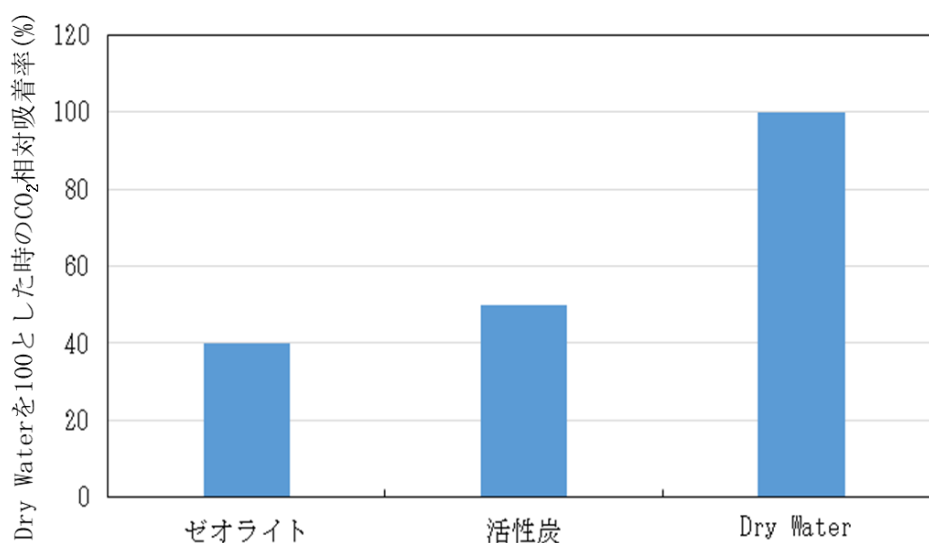


図 1 2. 各吸着基剤の CO₂ 吸着率 (大気圧条件下)

その結果を図13に示す。界面活性剤は、アニオン界面活性剤としてMES（アルファスルホ脂肪酸エステルナトリウム）、AES（アルキルエーテル硫酸エステル塩）、ノニオン界面活性剤として、AE（ポリオキシエチレンアルキルエーテル(15E.O.)）、MEE（脂肪酸(C12,C14)ポリオキシエチレンメチルエーテル(15E.O.)）を活用し（表1）、各界面活性剤0.1%水溶液でDry Waterを作成した。

その結果、各界面活性剤の添加により系内の界面自由エネルギーが低下し、Dry Waterが微細化されたため、比表面積が向上しCO₂吸着率が向上することが分かった。特に界面活性性能の高いMEEを添加した系において、CO₂吸着率が飛躍的に向上することが新たに分かった。

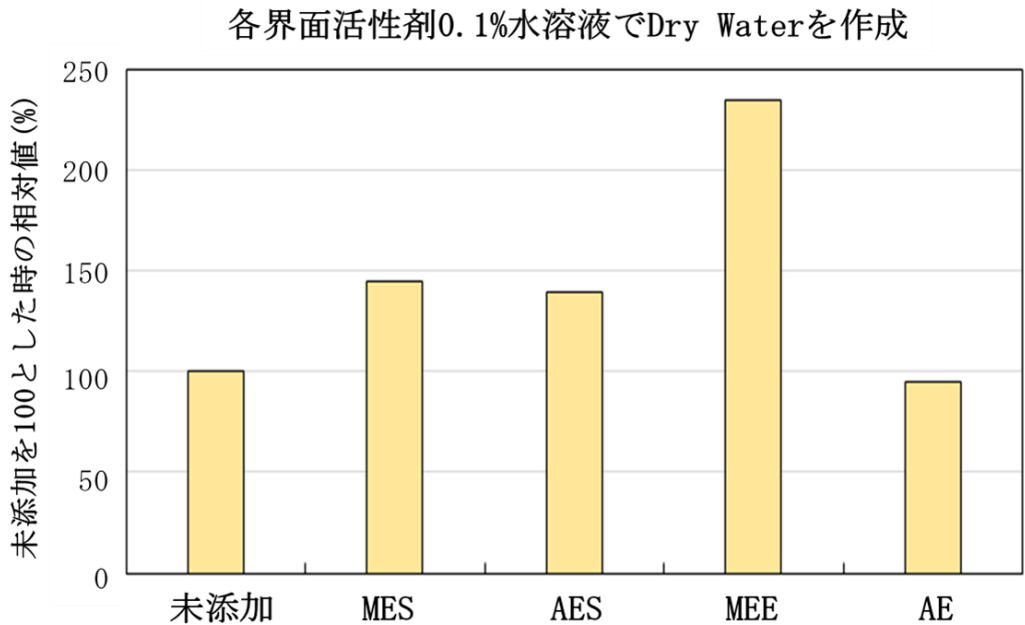


図13. 各界面活性剤添加系におけるCO₂吸着率（相対値）

表1. Dry Waterに添加した界面活性剤の種類

界面活性剤種	アニオン界面活性剤		ノニオン界面活性剤	
略称	MES	AES	AE	MEE
名称	アルファスルホ脂肪酸エステルナトリウム	アルキルエーテル硫酸エステル塩	ポリオキシエチレンアルキルエーテル	脂肪酸ポリオキシエチレンメチルエーテル
構造式	$\text{R}-\text{CH}-\overset{\text{O}}{\parallel}\text{COCH}_3$ SO ₃ Na	$\text{R}-(\text{EO})_n-\text{SO}_3\text{Na}$	$\text{R}-\text{CH}_2\text{O}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$	$\text{RC}(=\text{O})$ $\backslash (\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OCH}_3$

3-3 Dry Water を活用した CO₂ トラップシステム

従来の CO₂ トラップシステムは第 2 章で述べたように、大掛かりな設備が必要であり、高温・高圧条件下等の莫大なエネルギーも必要となる。さらに回収された CO₂ は、貯留する場所まで輸送する必要がある。現在、CCS が多く行われているアメリカでは、貯留場所まで CO₂ 専用のパイプラインで輸送している。CO₂ は、天然ガスなどに比べて、高い温度でも液化させることができる（天然ガス：-162℃、CO₂：-80℃）ため、トラックや船舶などでも輸送できる。一方、Dry Water は大気圧条件下で CO₂ 吸着が可能であるため、特別なエネルギーを必要とせず、そのままの輸送が可能といったメリットがある。さらに CO₂ 吸着工程も簡便であり、CO₂ が排出される排気ダクト等に常圧下で設置するのみで、特別な高温・高圧条件は不要である。そのため、大小問わず様々なプラントでの活用が見込まれる。

また Dry Water の CO₂ 吸着の終点を容易に判別するため、水が CO₂ を吸収すると液性(pH)が中性から酸性に変わる性質を利用し、水の酸性度を色で表す試薬として、例えばアリザリンレッド S を添加することで、CO₂ を十分に吸収した Dry Water は、薄赤色から黄白色に変化する（図 1 4）。このように目視で Dry Water の CO₂ 飽和吸着状態が分かるため、交換時期も明確に分かり簡便な使用が考えられる。

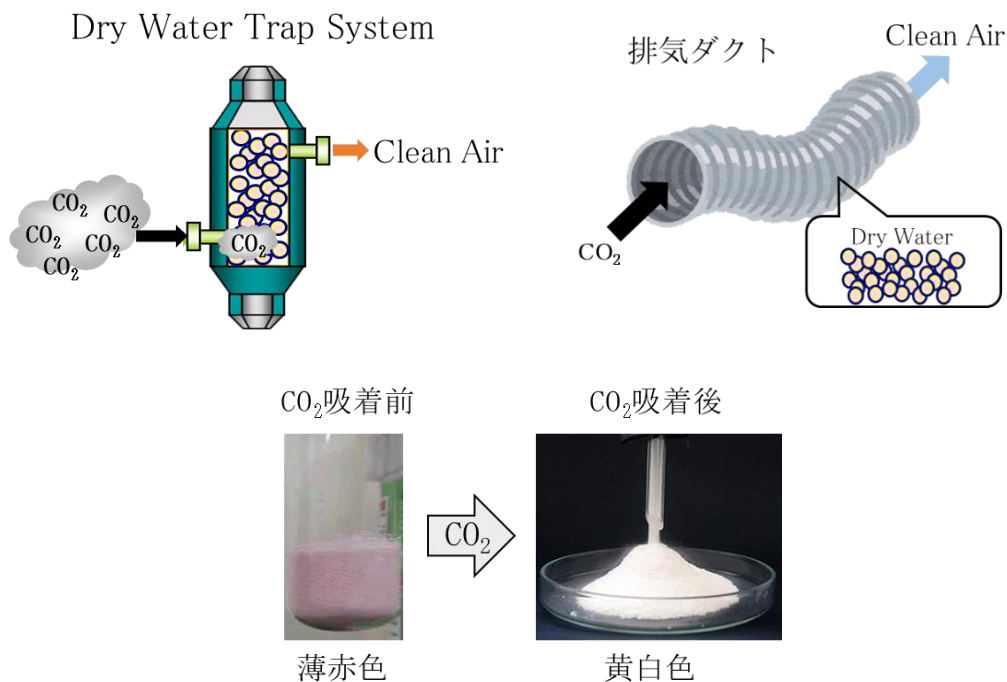


図 1 4. Dry Water のトラップシステム案

3-4 Dry Water を活用した CO₂回収におけるコスト試算

CCS の実用化に向けては、CCS コストの削減が大きな課題である。図 15 は、石炭火力発電所を対象に CCS 技術を適用した場合の CCS コストの試算値である²⁰⁾。図は、CCS 技術を予め考慮した新設火力発電所のケースと、既設の火力発電所に CCS 設備を導入したケースである。両ケースにおいて、CCS コスト全体の中で CO₂分離回収コストが占める割合に注目すると、その比率は約 6 割と大きい。従って、CCS コスト削減には CO₂分離回収技術の開発が重要であることが分かる。図の試算において、CO₂分離回収技術には商業化済みの化学吸収液（CO₂分離回収エネルギー：3.0 GJ/t-CO₂）が想定されている。本論文では、低エネルギー消費／低コスト型の新規材料として Dry Water と界面活性剤の組合せを見出し、それらを用いた CO₂回収プロセスについて、発電システムレベルでの CO₂回収コストを試算し、化学吸収法と固体吸収材との比較評価を行った。

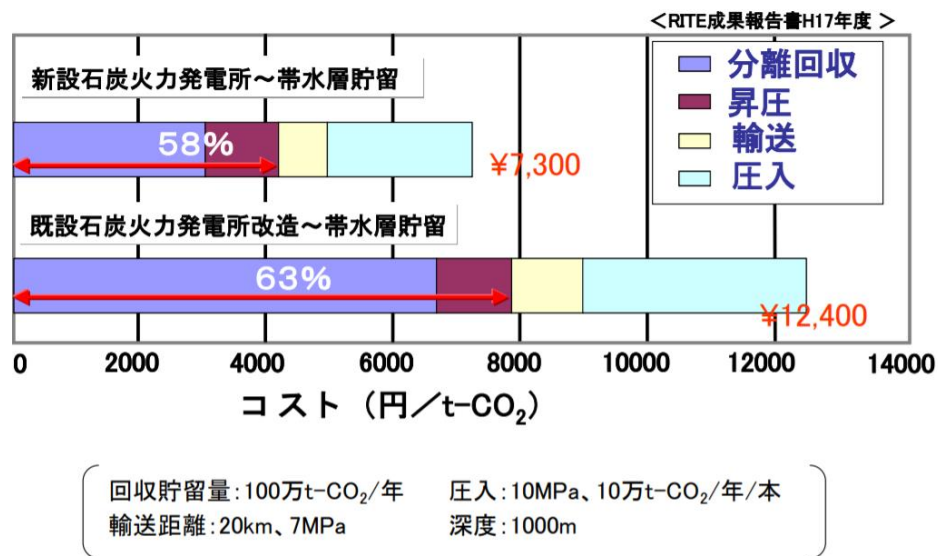


図 15. 発電システムレベルでの CCS コストの試算値²⁰⁾

CO₂回収コストの推算は、石炭火力発電所を対象に年間 100 万 t の CO₂を回収し、昇圧後、貯留サイトへ供給することを想定。図 16 に示すように、火力発電所から排出される燃焼排ガスは約 12%の CO₂を含んでおり、ほぼ常圧で CO₂分離回収設備に供給される。CO₂回収量が年間 100 万 t とは時間当たり処理ガス量 578,000Nm³/h、設備規模 3000t-CO₂/day が設定条件となる。

CO₂回収型火力発電所

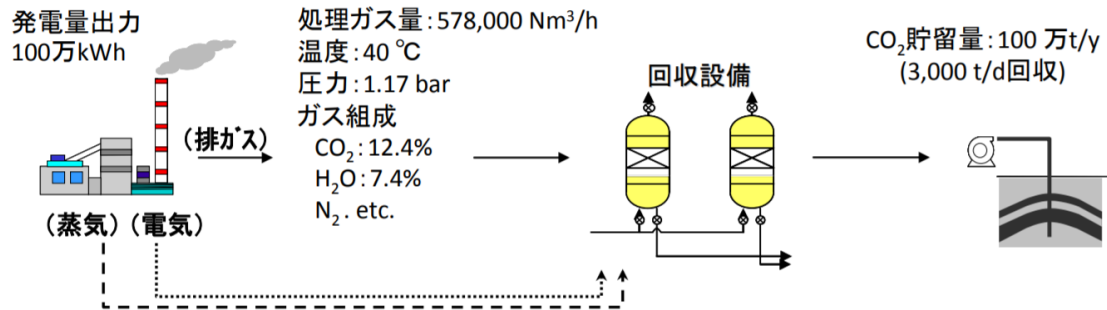


図 1 6．コスト評価の対象とする CCS 技術²⁰⁾

CO₂回収コストの考え方は以下の（１）式としている。

$$\text{CO}_2\text{回収コスト (円/t-CO}_2\text{)} = (\text{固定費} + \text{変動費}) / \text{CO}_2\text{回収量} \cdots (1)$$

ここで固定費は、CO₂回収設備費、設備修繕費、初期固体吸収材費、固体吸収材メークアップ費用を指す。また変動費は再生用蒸気費用、ポンプ動力費用としている。その結果、概算にはなるが既存の吸収液を用いた場合、及び固体吸収材(PEI/Q30)の場合、それぞれ CO₂ 1 トン当りの回収が 2,413 円/t-CO₂、2,451 円/t-CO₂ と推算される。それらの回収技術に対して、Dry Water を活用した場合、社外秘の部分があるため詳細な試算は省略せざるを得ないが、コストは約 1,568 円/t-CO₂ と小さく、コスト面でも優位性があると推定される。

当社は、「脱炭素社会」と「資源循環型社会」の実現を目指し、2050 年までに事業所活動における CO₂ 排出量ゼロ、2030 年までに 30%削減(対 2017 年、絶対量)を目標として掲げている。こうした中、東南アジアの国において需要が高い粉末衣料用洗剤の製造を例にとると、当社の海外工場では粉末衣料用洗剤の製造工程で、高温加熱炉等を用いて製造を行っている。その製造工程で排出される CO₂ は工場全体から排出される CO₂ の約 20%を占めている。この CO₂ 排出に対し、前述の Dry Water を活用したトラップシステムを導入することにより、低コストで CO₂ 排出量を限りなく 0%に近づけることができると推定している。これにより 2050 年までに事業所活動における CO₂ 排出量ゼロ達成を目指すと同時に、世界で最も CO₂ 排出量の多い中国、米国（図 1 7）を中心に⁸⁾、本システムを各プラントや事業所に導入することで、世界全体の CO₂ 排出量の低減に繋げていきたい。

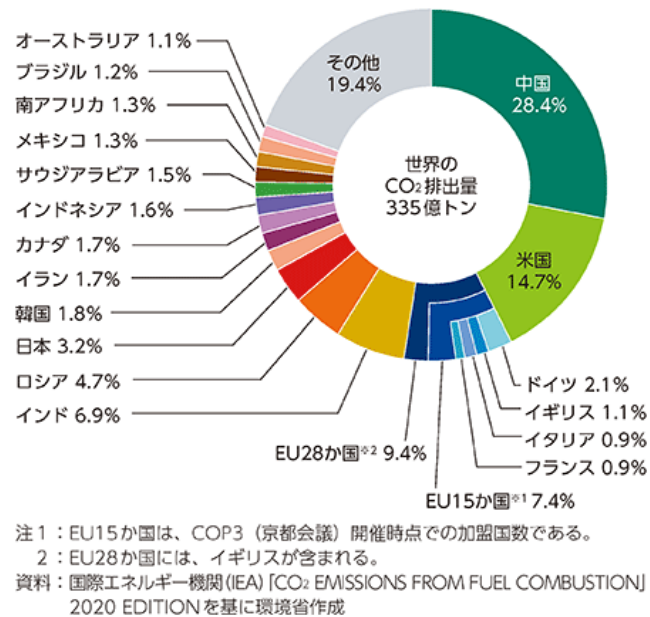


図17. 世界のエネルギー起源CO₂の国別排出量⁸⁾

3-5 Dry Waterの展望

Dry Waterで回収したCO₂については、安定した利用方法が必要である。例えば、世界の森林面積は約40億ヘクタールで陸地の31%を占めているが、世界全体の森林面積の65%を有する118か国で毎年1,980万ヘクタールの森林が火災によって消失している²¹⁾。森林火災の範囲は年々大きくなっており、生物多様性や人々の暮らしにも影響している。その中でDry WaterはCO₂、水、シリカを構成成分とする粉末状形態であるため、例えば森林火災の際の消火剤としての活用が考えられる(図18)。

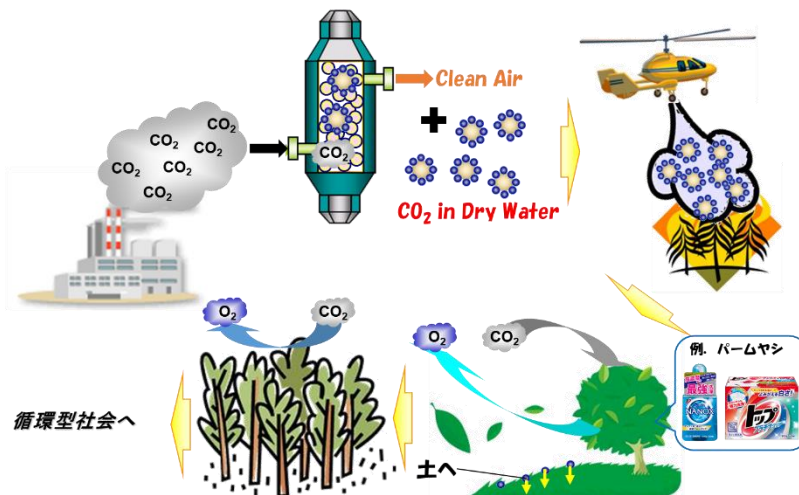


図18. Dry Waterを活用した循環型社会の例1

またアルカリと反応させることで、一般家庭用品として、例えば衣料用洗剤に使用している重曹への展開や、自動車の排気ガストラップへの活用も見込まれる（図19）。また遠い未来では、人体再生製剤開発の一環として、Dry Waterに人工多機能性幹細胞(iPS)を安定配合させることで再生医療などの分野へ貢献できると考えている。

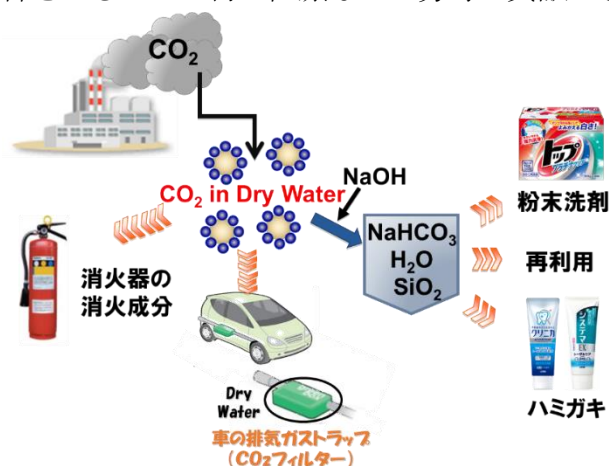


図19. Dry Water を活用した循環型社会の例2

4. おわりに

私たちは今、地球の未来を決める重大な分岐点に立たされている。2020年の新型コロナウイルス感染症の拡大によるパンデミックは、地球規模の課題であり、各国・地域の経済や社会に大きな影響を与えている。ポストコロナ時代の世界は、単に以前の状態に戻すのではなく、今を生きる私たちが環境問題の解決を図りながら、傷ついた経済を立て直し、将来の世代が豊かに生きていける社会を実現することが何より大事である。そしてその実現には、「脱炭素社会への移行」が不可欠である。

地球温暖化対策は急務であり、数々の対策が積み上げられているが、2050年にカーボンニュートラルを目指すためには、今後、分離回収・利用技術が必要不可欠である。本論文では、その実現の一助としてCO₂の回収・利用技術の一案について述べてきた。油脂産業は、その代表製品である各種界面活性剤と Dry Water を組合せることにより、大幅にCO₂吸着能を向上させ、回収したCO₂を多岐にわたる分野で利用することで循環型社会を実現させ、2050年温室効果ガス排出ゼロに貢献できると考える。

私たち一人一人が、持続可能な社会をつくる当事者として、誰かに任せるのではなく、自分事として行動変容しなければならない。本論がその一端を担うことができるのであれば幸いである。

参考文献

- 1) 環境省, 平成 29 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書, “第 3 節パリ協定を踏まえた我が国の地球温暖化対策”
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h29/html/hj17010203.html>
- 2) IPCC, Special Report : Global Warming of 1.5°C, Figure 2.3
<https://www.ipcc.ch/sr15/>
- 3) 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 6 次評価報告書, 第 1 作業部会報告書 (自然科学的根拠) と従来の IPCC 報告書の政策決定者向け要約 (SPM) における主な評価
<https://www.env.go.jp/press/109850/116629.pdf>
- 4) AFP BB News, 2021 年 7 月 26 日記事より
<https://www.afpbb.com/articles/-/3358385>
- 5) 環境省, 令和 3 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書, “第 1 部 総合的な施策等に関する報告, 第 1 章 経済社会のリデザイン(再設計)と 3 つの移行, 第 2 節 気候変動問題の影響”
https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r03/html/hj21010102.html#n1_1_2
- 6) UNEP, UNEP DTU Partnership, Emissions Gap Report 2020
<https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>
- 7) UNEP, Production Gap Report 2020
<https://www.unep.org/resources/report/production-gap-2020>
- 8) 環境省, 令和 3 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書, “第 2 部 各分野の施策等に関する報告, 第 1 章 地球環境の保全, 第 1 節 地球温暖化対策”
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r03/html/hj21020101.html>
- 9) 経済産業省, パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略, “パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略策定に向けた懇談会提言 (平成 31 年 4 月 2 日)”
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/teigen.pdf
- 10) 経済産業省, 第 2 回 中央環境審議会地球環境部会, 地球環境小委員会地球温暖化対策検討ワーキンググループ 合同会合、資料 3 2050 年カーボンニュートラルを巡る国内外の動き

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/on_danka_wg/pdf/002_03_00.pdf

- 11) 環境省, 2021 年 8 月 3 日 CCUS の早期社会実装会議 (第 3 回) ～これまでの歩みと脱炭素化に向けた展望～, 資料 4 環境省 CCU 事業の今後の方針について
http://www.env.go.jp/earth/R3ccus/ENVCCS_R02_4_MOE_r.pdf
- 12) 下田 他, CCU の CO₂ 排出削減対策としての位置付け ―国外事例と電気事業への含意―, 電力中央研究所報告, V20003, 2021 年 3 月
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDownload?reportNoUkCode=V20003&tenpuTypeCode=30&seqNo=1&reportId=9015>
- 13) Energy Technology Perspectives 2017
<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>
- 14) 三菱重工技報, Vol.47 No.1 (2010) 低炭素社会特集, 地球温暖化対策技術としての CO₂ 回収技術
<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/471/471045.pdf>
- 15) ““Dry water” could be the next storage medium for dangerous chemicals”, Io9.com, 25 August 2010
- 16) ““Dry water” could make a big splash commercially, help fight global warming”, ScienceDaily, 26 August 2010
- 17) Gas Storage in “Dry Water” and “Dry Gel” clathrates, B. O. Carter, Langmuir, 2010, 26, 3186-3193
- 18) Pausing a stir : heterogeneous catalysis in “dry water”, Benjamin O. Carter, Dave J. Adams and Andrew I. Cooper Green Chem., 2010, 12, 783-785
- 19) ““Dry water” could make commercial waves”, Edie.net. 31 August 2010
- 20) (公財) 地球環境産業技術研究機構, 第 2 回 平成 27 年度 二酸化炭素回収・貯留分野 評価検討会 (2), 資料 3-2-1
- 21) FAO, 「世界森林資源評価 2010」, 2010 年

令和4年2月21日

〒103-0027 東京都中央区日本橋三丁目13番11号

一般財団法人 油脂工業会館

☎東京03(3271)4307 (代表)

<https://www.yushikaikan.or.jp/>