

ビヨンド・ゼロ EXPO について

専務理事 企画調査グループ	グループリーダー・主席研究員 サブリーダー 研究管理チームリーダー 調査役	本庄 孝志 柳生 勇 川口 圭史 箕浦 靖明 金星 春夫 久保 道代 辰巳 奈美 秋元 圭吾
システム研究グループ 化学研究グループ	グループリーダー・主席研究員 サブリーダー・主席研究員 副主席研究員 主任研究員	長谷川 俊之 余語 克則 山田 秀尚 内田 堅二
CO ₂ 貯留研究グループ	サブリーダー・主席研究員 主任研究員	三戸 彩絵子
無機膜研究センター	主任研究員	安原 健一郎

1. はじめに

2020年10月26日の菅首相所信表明に示されたように2050年社会はCO₂排出実質ゼロが求められている。実現のためには、高効率化による必要エネルギーの低減、太陽光・風力等CO₂を排出しないエネルギーの最大活用に加えて、排出を避けられないCO₂を回収し地中貯留や固定化利用し、カーボンニュートラルを実現するシステムの確立が重要となる。そしてこの地中貯留・固定化利用技術の普及・発展とCO₂排出の更なる減少により、革新的環境イノベーション戦略に示されるニュートラル(すなわちゼロ)を超えるビヨンド・ゼロの実現が近づくと考えられる。我々は2025年の大阪・関西万博(図1)で、このビヨンド・ゼロを単なる展示ではなく、会場内・開催期間で先駆的に達成するシステムであるビヨンド・ゼロ EXPO を提案する。



図1 大阪・関西万博会場イメージ
(提供:2025年日本国際博覧会協会)

このシステム構築のために、まず期間内での会場への供給電力はCO₂を排出しないエネルギーに限定する必要がある(グリーン電力証書の獲得)。また都市ガスは(2025年時点では避けられないため)製造・消費に伴い発生するCO₂をクレジットで相殺する(カーボンニュートラル都市ガス)。水素に関しても、グリーンまたはブルー水素とし、カーボンニュートラルとする。さらに会場内車両も電気自動車・水素自動車を活用し、ガソリン自動車は都市ガス同様発生するCO₂分をクレジットで相殺する。これらの取り組みにより、端緒としてカーボンニュートラルを実現する。

その上で次のステップとしてビヨンド・ゼロ実現および環境技術のアピールのため、本提案では会場内大気中のCO₂を回収し地中貯留や固定化利用を行う。

大気中のCO₂濃度は約400ppmと、分離回収技術で実用化されている対象の数百分の一という薄さであり、これを効率的に回収する技術はまだ確立しているとは言いがたい。しかし日本の最先端技術を駆使し、トン単位(1日あたり)のCO₂を効率的に回収するDAC(Direct Air Capture)装置を2025年までに製造し、会場で設置・実働させることは可能と考えている。

次に回収したCO₂を大量かつ恒久的に処理するため、会場内で地中貯留(CCS)を行う。貯留量自体は会期で数百トン程度と少量(苫小牧で30万トン/3年の実績)ではあるが、大阪という大都市での貯留は世界に類を

見ない画期的な試みであり大きな意味がある。

加えて環境技術として、回収した CO₂ の固定化技術・カーボンリサイクル技術も会場内で実現する。具体的には前述の DAC 装置からの CO₂ とカーボンフリー水素からメタンを製造するメタネーション装置を会場内で設置し、迎賓館厨房等へ都市ガスとして供給する。さらに会場内に設置した植物工場にも同様に CO₂ を供給し、栽培した野菜を日々迎賓館食堂等へ提供する。また CO₂ 固定化により製造したメタノールを原料としたアクリル樹脂で会場備品・記念品等を製造する。

これらの提案をまとめると図2のようになる。さらに博覧会会場では装置を展示ディスプレイとしても位置づけ、カーボンニュートラルや DAC、地中貯留その他 CO₂ 固定化・カーボンリサイクル技術とあわせビヨンド・ゼロパビリオンとし、日本の環境技術を多くの来訪者にアピールしたいと考えている。

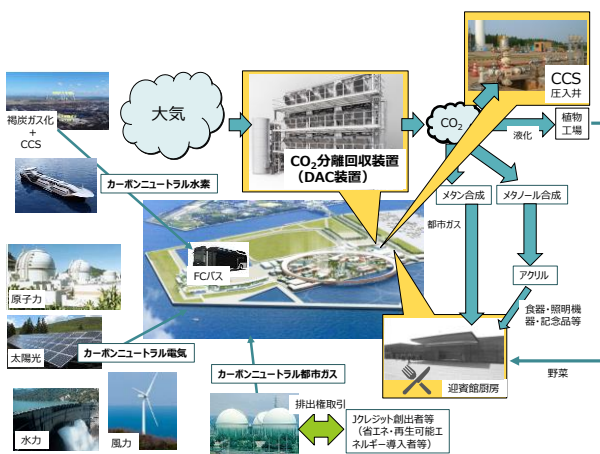


図2 ビヨンド・ゼロ EXPO 提案イメージ

本特集ではビヨンド・ゼロEXPO実現に関する各技術を詳しく紹介する。まず2章でカーボンニュートラル実現の必要性からビヨンド・ゼロへの展望について述べる。次に第3章ではDAC、地中貯留、その他技術(メタネーション・メタノール合成・植物工場)について紹介する。第4章はまとめとして、本提案と大阪・関西万博の基本方針の関連について述べる。

2. カーボンニュートラル実現のために

前章にあるように2020年10月26日に菅首相は「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」と宣言した。カーボンニュートラル実現のためにはどのような対策が求められるのかについて議論する。

2.1. カーボンニュートラル実現の複数の可能性

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)1.5℃特別報告書(SR15)は、1.5℃上昇に抑えるには、2050年頃に世界のCO₂排出量を正味でほぼゼロにすることが必要とした¹⁾。2050年カーボンニュートラルはこれに沿ったものである。

SR15においては、典型的な4種類のシナリオについて提示がなされている。そのうちの極端な2種類について言及しておく。1つは、徹底的な省エネシナリオであり、Low Energy Demand (LED)シナリオとして知られるものである。エネルギー需要サイドには本来必要な水準を大きく超えるエネルギーが利用されている。それはデジタル化技術の進展等により大きく低減できる可能性がある。それに社会変化が重なって低エネルギー需要、低CO₂排出社会を実現し得る可能性が示されたシナリオである(RITEシステム研究グループでは2020年度よりEDITS事業を立ち上げ、低エネルギー需要シナリオの国際的な詳細検討を開始)。SR15で引用されたLEDシナリオでは、CDR(Carbon Dioxide Removal)技術の利用は想定されていない。もう一つの典型的なシナリオは、化石燃料が引き続き安価な中、カーボンニュートラルを実現するシナリオであり、化石燃料を利用しながら、大量のCDR技術を利用するものである。CDRにはCCUSに加え、負の排出を実現するCCS付バイオマス(BECCS)、大気中CO₂直接回収貯留(DACCS)等が含まれる。複数のシナリオを有しつつ、カーボンニュートラルの実現性を高めていき、早期に達成するようにしていくことが望まれる。

2.2. カーボンニュートラル実現のイメージ

図3は、温室効果ガス排出で見たネットゼロエミッション(=カーボンニュートラル)の対策のイメージである。

大きくは省エネと CO₂ 原単位の低減があるが、まず、デジタル化による物質、エネルギーサービスの低減を含む、省エネルギーは基本的に重要である。CO₂ 原単位の低減については、電力は非電力よりも低減しやすい傾向にあるので、IPCC でも、電化を促進し同時に電源の脱炭素化を進めることが重要としている²⁾。一方、省エネにしても、CO₂ 原単位の低減にしても、大幅に低減しようとすればするほど、とりわけゼロに近付けようとすればするほど、費用が急激に増大する。更には、畜産から発生するメタンなど CO₂ 以上に削減が難しい部門もある。それら残る排出量を負の排出技術(NETs)でキャンセルアウトするというのがカーボンニュートラル実現の大きな方向性となる。ただ、前節で述べたように、それぞれの寄与度の見通しは複数ある。オプションを広く持ってカーボンニュートラルを目指すべきである。

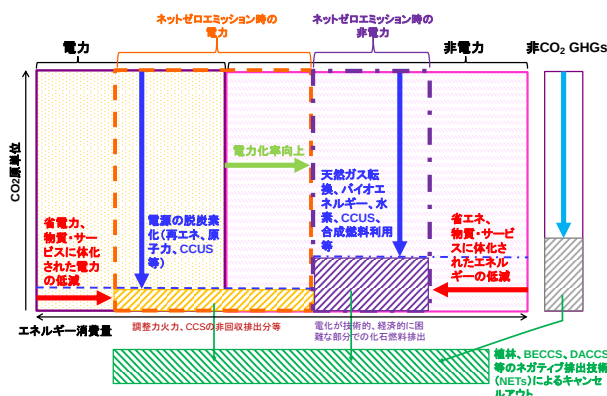


図3 温室効果ガス排出で見たネットゼロエミッションの対策のイメージ

図4は、同様にネットゼロの対策のイメージを日本における一次エネルギー供給の視点で記載したものである。一次エネルギーとしては、原則、再生可能エネルギー、原子力、化石燃料+CCSのみで構成することが必要となる。ただし、再生エネ、CCSについては海外資源の活用を考えることも重要で、その際、水素への転換が重要になる。再生エネ由来はグリーン水素、化石燃料+CCS由来はブルー水素とも呼ばれている。また、利便性向上のため、水素をアンモニアや合成燃料に転換して、輸送、利用することも重要となり得る。ただ、CCS無しの化石燃料利用も残る可能性は高い。これを植林、BECCS、CO₂

鉱物化(コンクリートでのCO₂固定など)等でキャンセルアウトすることも必要である。しかし、量の制約のため、DACCSの活用も重要と考えられる。なお、BECCS、DACCSを含むCCSは貯留可能量により制約を受けるため、CO₂貯留サイトの確保が重要であるし、また、海外のCO₂貯留サイトの活用も視野に入れることも重要性が高い。

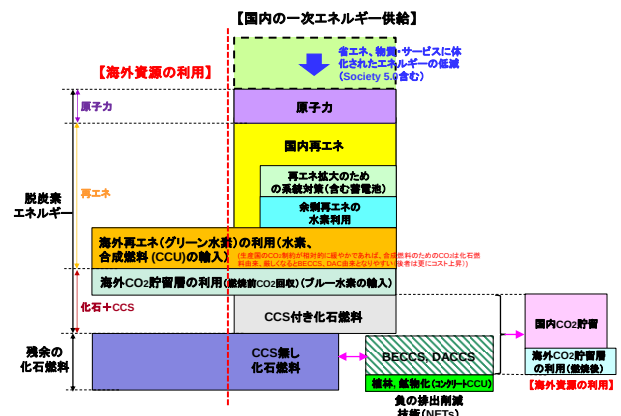


図4 日本の一次エネルギー供給量で見たネットゼロエミッションの対策のイメージ

2.3. 世界エネルギーシステム・温暖化対策評価モデルによる総合的な分析例: DACCS の役割

次に世界エネルギーシステム・温暖化対策評価モデルDNE21+による世界全体のカーボンニュートラルの対策の分析例について示す。排出シナリオの内、2℃未満、1.5℃未満シナリオはそれぞれ2060年頃、2050年頃にCO₂排出量がネットゼロになりその後ネガティブ(ビヨンド・ゼロ)となるシナリオであり、温室効果ガス排出ではそれぞれ2100年頃、2065年頃にネットゼロとなり、その後ネガティブとなるシナリオである。1.5℃シナリオについては本モデルの想定では、DACを想定しない場合、実行可能解はなかった(表1)。

図5はモデル分析結果としての世界のCO₂回収と貯留・利用のバランスを示している(分析の詳細は文献3)を参照)。DACのコストを高位(現状技術水準維持)と想定したシナリオでも、余剰再生エネの活用により投入エネルギーの費用が低減するため、カーボンニュートラルを目指す上で2050年頃には費用効率的なオプションと評価される。コスト低位シナリオでは、更に大規模な利用

が見られる。DACCS によって負排出とできる分、CCS 無しの化石燃料も適切な水準で利用可能となる。DAC の技術開発余地はまだ大きく残っているが、全体として費用効率的なカーボンニュートラルの達成に寄与し、更にビヨンド・ゼロ達成も視野に入る。

表 1 DAC 関連のモデル分析の想定シナリオ

	排出シナリオ	DAC 想定	実行可能解
2°C(DAC 無)	2°C未満 (>66%)	無	○
2°C(DAC 有, コスト高位)		コスト高位	○
2°C(DAC 有, コスト低位)		コスト低位	○
1.5°C(DAC 無)	2100 年 1.5°C未満 (>66%)、 気温オーバー シュート有	無	×
1.5°C(DAC 有, コスト高位)		コスト高位	○
1.5°C(DAC 有, コスト低位)		コスト低位	○

注)DAC の想定は文献 4)を参考にした。必要エネルギーは2050年時点でコスト高位の場合 5.5~7.2 GJ/tCO₂、低位の場合 4.7 GJ/tCO₂を想定

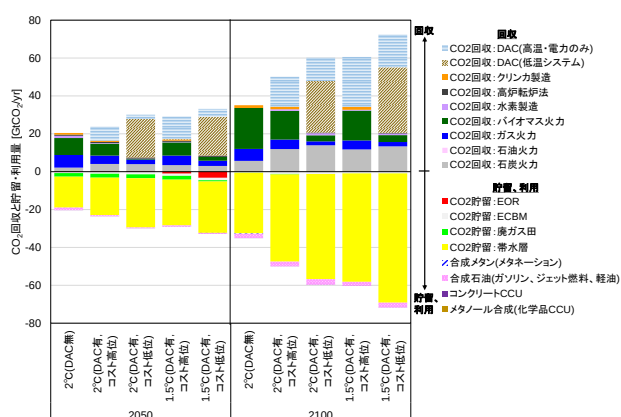


図 5 世界の CO₂ 回収と貯留・利用のバランス

3. 技術紹介

3.1. DAC

近年、大気中からの CO₂ 回収技術(DAC: Direct Air Capture)が実現可能性のある気候変動緩和技術のオプションとして提唱されて以来、本コンセプトが注目を浴びている。Energy Technology Perspectives 2020 では、持続可能開発シナリオの達成にむけて、BECCS(Bio-energy with CCS)と DACCS(Direct Air CO₂ Capture and Storage)等により 2070 年に 3Gt のネガティブ・エミッションに貢献、あ

るいは 5 百万バレル/d のクリーンな航空燃料を生産するために使用されると位置づけている。

DAC は Storage と組み合わせた DACCS としてネガティブエミッション技術と成り得るが、DAC で回収した CO₂ を有効利用する技術も検討されている。従来型の化学製品や燃料としての利用は CO₂ の排出削減、CO₂ 有効利用に寄与し得るが、大気中からの CO₂ 除去効果は小さい。

また、DAC はエネルギー消費量が多くコストも高いと考えられているが、BECCS や植林・再植林よりも土地面積と水使用量は少なく済むため、食糧生産との土地競合の問題や生物多様性への悪影響を抑制できる可能性がある。

表 2 海外における DAC 技術の開発状況⁵⁾

会社名	材料	CO ₂ 分離回収エネルギー・コスト	備考
Climeworks (スイス)	アミン修飾フィルター(固体吸収材でフィルターは樹脂)	9.0GJ/t-CO ₂ (熱) 450kWh/t-CO ₂ (電力) 600\$/t-CO ₂ (2025年項目 標コスト100\$/t-CO ₂)	世界初の商用プラント(900t-CO ₂ /year)を発表、これまでに8か所に導入済み。エネルギーとコストが高い。
Carbon Engineering (Canada)	KOH/Ca(OH) ₂ を含む水溶液	5.3 GJ/t-CO ₂ (熱) 366 kWh/t-CO ₂ (電力) 94-232\$/t-CO ₂	Occidental Petroleum社と50万t-CO ₂ /yのDACプラント2基を2022年に稼働予定。唯一アルカリ水溶液を使用し、エネルギー・コスト削減余地がない。
Global Thermostat (USA)	アミン含有セラミックス(固体吸収材)	4.4 GJ/t-CO ₂ (熱) 160 kWh/t-CO ₂ (電力) 150\$/t-CO ₂ (将来達成可能なコスト: 50\$/t-CO ₂)	ジョージア工科大と協力、これまでに6基の導入実績。消費エネルギーの低減が課題。4,000t-CO ₂ /yearのパイロット設備を建設。
Center for Negative Carbon Emissions, Arizona State Univ. (USA)	イオン交換樹脂(アミン系)	220\$/t-CO ₂ (将来達成可能なコスト: 30\$/t-CO ₂)	除湿・加湿のスイングで吸脱着、Artificial treeを高速道路沿いに設置を提案
The VTT Technical Research Centre (Finland)	イオン交換樹脂(アミン系)	8.9GJ/t-CO ₂	Day/night capture cycle方式で、1~2kg-CO ₂ /day

表 2 に示すように、米国や北欧でアミン系固体吸収材を用いたシステムの研究が行われているが、現状では高コストであり、今後の普及のためには回収エネルギー・コストともに大幅に低減する必要がある。コスト低減(特にコンタクター部分)と吸収材の加熱再生エネルギーの低減(廃熱利用等含め)が課題である。また、DAC はまだ発展途上ということもあり、試算されるコストの幅が広い(\$ 100~600/t-CO₂)、今後精査が必要である。

大気中からの CO₂ 分離回収は、通常の天然ガスや石炭等の燃焼後排ガスから CO₂ 分離回収する場合と比べ、CO₂ 濃度は 400ppm 程度と 2~3 桁低いと、その分回収コストも高価になることが予想される。1ton の CO₂ を含む空気量はおよそ 127 万 m³ であり、CO₂ 回

収率が 100%であったとしても、東京ドーム(容積: 124 万 m^3)に相当する空気を処理しなければならない。

DAC を現実的なものとするためには、これまでにない高性能な CO_2 分離材料の開発と大量の空気を効率よく吸脱着できるプロセスを構築する必要がある。 CO_2 分離材料については、RITE がこれまで取り組んできた固体吸収材や有人宇宙活動用の CO_2 吸着剤の研究経験で培ってきたアミン系化合物を中心とする材料設計の知見を活かし、回収コストを低減できる優れた材料開発を目指している。一方、 CO_2 分離回収プロセスについては、民間企業、大学の協力を得て、高効率な DAC システムの開発を目指している(図 6)。

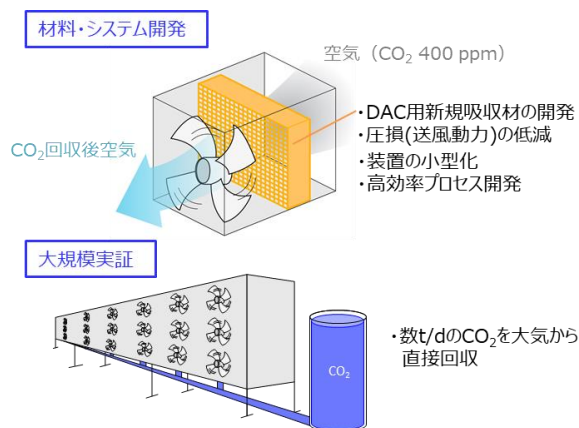


図 6 大気中からの CO_2 回収技術開発

本提案では我々は日本の最先端技術を駆使し、トン単位(1 日あたり)の CO_2 を効率的に回収するDAC (Direct Air Capture)装置を製造し、会場で設置・実働させることを考えている。

3.2. CO_2 の地中貯留

地中への CO_2 圧入・貯留については、油層に CO_2 を圧入して石油の増進回収を行うEOR(Enhanced Oil Recovery)、炭層に CO_2 を圧入してメタンを回収するECBM(Enhanced Coal Bed Methane)、塩水性帯水層への貯留などがある。

CO_2 を地中貯留する場合の地質構造として「貯留層」と「遮蔽層」が必要である。「貯留層」としては、多孔質砂岩のような堆積層が適しており、浸透性の大きい帯水層

がそれに相当する。

帯水層貯留とは、地下 800m 以深の砂岩層を対象とした貯留方法である。砂岩層は砂粒が堆積してできる地層で、砂粒の隙間には地下水利用されない塩水が留まっている。図 7 に帯水層貯留のイメージ図を示す。地上から掘削した坑井から、 CO_2 は砂岩層に圧入され、塩水を押しのけて隙間に溜まり、一部は塩水に溶解して貯留される。砂岩層上部にガスや液体をほとんど通さないシール性の高い泥質岩が存在する場所では、 CO_2 を長期間に安定して貯留することが可能である。

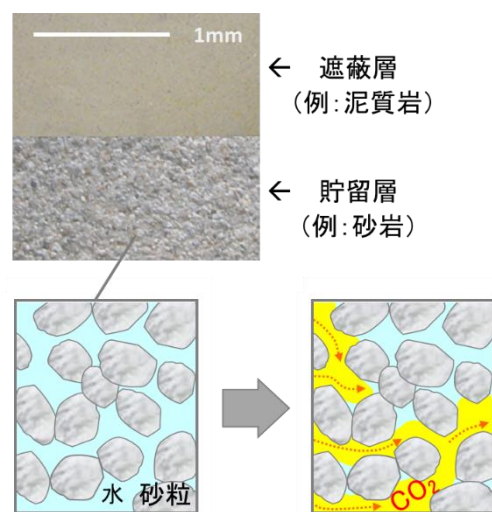


図 7 CO_2 地中貯留の模式図

図 8 に CO_2 貯留サイトの概観を示す。 CO_2 の発生源から CO_2 を分離・回収し、地上施設から直下に貯留、地上施設から海底下に貯留、あるいは海上施設から海底下に貯留する。

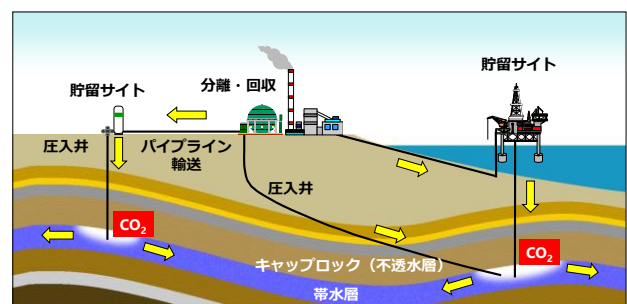


図 8 CO_2 地中貯留サイトの概観

前章で述べたように CO_2 地中貯留は、回収した CO_2

を隔離する方策として重要な選択肢のひとつである。

地球温暖化を抑制するレベルの CO_2 分離・回収をして、それを地中貯留するには、多数の CO_2 圧入井が必要であるが、全世界で今までに掘削された石油生産井の数に比べればごくわずかである。 CO_2 地中貯留が本格的に活用され、地球温暖化対策のひとつになることが期待される。このような CO_2 地中貯留について広く皆様に知ってもらうため、大阪・関西万博で紹介することは意義深いといえる。

本提案では会場内で地中貯留を行う。貯留量自体は会期で数百トン程度と少量(苫小牧で 30 万トン/3 年の実績)ではあるが、大阪という大都市での貯留は世界に類を見ない画期的な試みであり大きな意味がある。

3.3. その他

3.3.1. メタネーション

メタネーションとは CO_2 と水素からメタンを合成する技術である。合成にエネルギーを要するが、水素と異なり、既存の都市ガスインフラを活用できる利点が大きく、注目されている。

技術自体は 1911 年にフランスの化学者サバティエが発見した既存技術であり、日本国内においては 2019 年に NEDO の CO_2 有効利用技術開発事業のプロジェクトにおいて、国際石油開発帝石と日立造船がメタン合成能力 $8\text{Nm}^3/\text{h}$ の試験設備を完成させ、連続運転などの実証試験を実施した。一方、都市ガスとして活用された事例はなく、転換効率・経済性の向上とスケールアップが課題とされている。合成には CO_2 の 4 倍量の水素が必要であるが、水素を再生可能エネルギーの余剰電力から製造すれば、合成メタンを利用することで化石燃料としての天然ガス使用量が削減でき、脱炭素化に貢献する。また、実質カーボンゼロに向けて大量の再生可能エネルギー電源が導入された場合、大量の余剰電力の貯蔵が課題とされているが、メタネーションはその貯蔵技術や電力系統の安定化としても期待されている。

水素をメタンに変換する理由は、水素は貯蔵、輸送、利用において新たな設備投資や設備技術の開発が必要なのに対し、メタンは天然ガスとほぼ同じ成分であり、

ガスのパイプラインに接続すれば新たな設備を建設することなく利用が可能といった点である。また、1 次エネルギーの熱利用に対する低位炭素化の観点から、エネルギーキャリアとしてのメタンはその可能性が注目されている。

脱炭素化への動きが進む欧州では、Audi がメタン合成能力 $315\text{Nm}^3/\text{h}$ の世界最大の実証プラントを稼働しており、再生可能エネルギーが大量に市場に出た際に市場価格が下がると想定し、再生可能エネルギー由来の電力と、バイオガスから分離した CO_2 からメタネーションしている。また、2060 年に CO_2 排出量実質ゼロを目指すとする中国において、2020 年 12 月に日立造船がメタネーション技術の事業実証検討することを公表し、社会実装に向けてサプライチェーンや事業採算性等を評価する計画である。

本提案では前節の DAC 装置からの CO_2 を活用したメタネーション装置を会場内で設置し、迎賓館厨房等へ都市ガスとして供給することを考えている。

3.3.2. メタノール合成

メタノールは、エチレンやプロピレンといった低級オレフィンを製造する原料として広く使用されているほか、合成樹脂や接着剤、薬品、塗料など化学品の基礎原料である。世界で年間約 8,000 万トンの需要があり、現在は、化石資源である天然ガスや液化石油ガス、石炭を主原料に、高温高压下で複数の製造工程を経て生産されている。

このメタノールを化石資源を原料に得るのではなく、石炭燃焼発電所や高炉等の燃焼排ガスや大気から分離・回収して得られる CO_2 と再生可能エネルギー由来の水素を原料として合成することで、温室効果ガス排出量の削減と同時に、メタノールという有用な工業製品の生産が可能となる。

この分離・回収により得た CO_2 と再生可能エネルギー由来の水素から得られたメタノールは、その後、メタクリル酸と反応させる事で、アクリル樹脂(PMMA)を合成することができる。アクリル樹脂は、高い透明性・耐衝撃性があり、加工や着色も容易なことから、建築や乗り物

の窓材、照明器具のカバー、看板等さまざまな用途に利用されている。

本提案では、会場でこのアクリル樹脂を用いた展示品や記念品、さらには大気中の CO₂ を分離・回収する装置として博覧会場で展示する DAC (Direct Air Capture) 装置の周囲を囲う透明ボードなどに用いる事で、炭素循環社会実現の一例として示したいと考えている (図 9)。

メタノール合成

万博会場の CO₂ 由来のメタノールを利用し、アクリル樹脂を製造し、食器、照明、記念品に活用

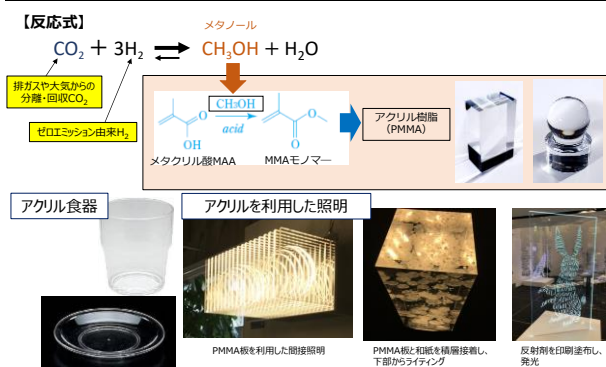


図 9 メタノールの万博での活用

3.3.3. 植物工場

将来的に世界規模で CO₂ を利用するものとして植物工場がある。植物工場には人工光型植物工場と太陽光型植物工場があるが、人工光型植物工場 (図 10) は光源に人工光を用い、空調と養液栽培を導入し、植物生育に必要な環境要素 (光、温度、湿度、CO₂ ガス濃度、気流) を制御し、周年安定的に高品質の植物を栽培している⁶⁾。

例えば実用化されているリーフレタス (1 株 100g) では 3000 株生産するためには CO₂ 22kg の追加が必要となっており、生産性に大きく寄与している⁶⁾。また、イチゴの生産に向けて研究開発が進められているなどさらなる発展が期待できる。

本提案では、会場内 DAC で回収した CO₂ を利用し、実用化されている最新の野菜を生産する小型工場を設置し、その野菜を迎賓館等の厨房に供給することにより、カーボンリサイクル、植物工場の最新技術をアピールする。



図 10 人工光型植物工場例
(Techno Farm HP より)

4. おわりに

以上のような技術を用いて我々は 2025 年の大阪・関西万博において、ビヨンド・ゼロを展示だけではなく、会場内・開催期間で先駆的に達成するシステムの提案を行っている。

この提案はすでに 2020 年 9 月 24 日に弊機構が主催するシンポジウム (未来社会を支える温暖化対策技術シンポジウム in 関西) で概要を発信し、化学工業日報紙にも 10 月 14 日付で記事として取り上げていただいている。

一方で 2020 年 12 月 21 日に閣議決定された大阪・関西万博の基本方針においては 12 項目の基本的な考え方の第三項目にカーボンニュートラルを目指す上での大阪・関西万博の形として以下の記載がある。

『日本は 2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指し、ネガティブエミッション技術 (Direct Air Carbon Capture and Storage)、次世代型太陽電池やカーボンリサイクルをはじめとした、革新的なイノベーションの実用化を見据えた研究開発を促進していくことで地球温暖化対策を進めていくこととしている。『未来社会の実験場』である会場では、過去の

ストックベースでの二酸化炭素の削減(ビヨンド・ゼロ)を可能とする日本の革新的な技術を通して世界に向けて脱炭素社会の在り方を示していく。』

またその基本方針概要の2ページにも重要な位置づけとして『カーボンニュートラルを目指す上での大阪・関西万博での形』が紹介されている(図 11 参照)。



図 11 万博基本方針概要(2ページ)

我々はこの基本方針の実現に向けて、本提案を更に精査・具体化に尽力していく。

参考文献

- 1) IPCC 1.5℃特別報告書(2018)
- 2) IPCC WG3 第5次評価報告書(2014)
- 3) 佐野 他、第37回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2021)
- 4) M. Fasihi et al., J. Cleaner Prod. (2019)
- 5) ICEF「Direct Air Capture of Carbon Dioxide」他、各社公表資料より作成
- 6) 一般社団法人日本植物工場産業協会 HP