特集「二酸化炭素を資源に」を企画して

特集担当編集委員　井上 義之、下坂 厚子

2050年のカーボンニュートラル実現に向け、温室効果ガス（二酸化炭素：CO_2）の排出削減にとどまらず、排出されたCO_2や大気中に存在するCO_2を回収して有用な燃料・化学品・建設資材などへと変換・再利用する「カーボンリサイクル（CCU：Carbon dioxide Capture and Utilization）」ならびに「ネガティブエミッション技術（NETs：Negative Emissions Technologies）」の重要性が急速に高まっている。これらの技術基盤においては、ナノレベルの粉体触媒創製から不均一系反応プロセスの構築、高度な分析評価、さらには大気中CO_2の直接回収（DAC：Direct Air Capture）や建築・土木インフラへの利用に至るまで、粉体技術が極めて重要な役割を果たしている。本特集では、粉体・触媒技術を核としたCO_2資源化・資源循環の最前線で活躍する企業・大学・研究機関の最新の取り組みを紹介し、読者の皆様の今後の研究開発や産業応用の参考になればと考え、企画した。

本特集は大きく、以下の3群から構成されている。

第1群　ミクロ領域 **材料・評価** 粉体材料の精密創製と多角的分析	**人工光合成用粉体触媒** **超音波還元法によるAgナノ粒子助触媒担持** 1～3 nmのAg粒子を高分散に担持 水素発生を抑え、CO選択率 約90%		**人工光合成の分析ソリューション** **光触媒の特性評価と生成物定量** 不均一系粉体触媒を用いる 人工光合成研究を多角的に支援
第2群　メソ領域 **反応・プロセス** CO_2を原料とした燃料合成と高効率反応プロセス	**クリーン水素製造** **光触媒・電解ハイブリッド** 大面積の粉末光触媒シートと高効率水電解（PEMセル）を融合	**アンモニアメタネーション** **Ni系・Ru系ハイブリッド触媒** CO_2をアンモニアで還元しメタン合成 水冷不要のコンパクト断熱型反応器 CO_2逐次添加型プロセスを ベンチプラントへ展開	**Carbon Looping** **産業排ガスCO_2の循環利用** 合成メタン、合成ガス（e-Fuel原料）、固体炭素（機能性材料）を多段階で連続製造・回収
第3群　マクロ領域 **回収・固定化** 大気中CO_2の直接回収（DAC）と広域・持続的固定化	**膜分離型の直接空気回収** **自立性ナノ膜によるm-DAC** 無欠陥PDMSナノ膜で希薄CO_2を回収 その場変換（DAC-U）を軸に ユビキタスCO_2回収を構想		**DACCUSによるコンクリート循環** **C4Sプロジェクト（CCC）** 解体廃コンクリートのCaOと 大気中CO_2を結合し$CaCO_3$を生成 従来のセメントに替わる結合材に再生

第1群は、以下の二つの内容から構成されている。1件目は**住友金属鉱山㈱の川田稀士氏、西本大夢氏、京都大学の井口翔之氏、寺村謙太郎氏**に「人工光合成用粉体触媒 ― 超音波還元法による Ag ナノ粒子助触媒担持 ―」を紹介いただいた。水を電子源とするCO_2光還元において、超音波還元法を用いることで1～3 nm の極めて微小な Ag ナノ粒子助触媒を半導体光触媒粒子表面へ高分散に担持する新たな材料創製技術と、副反応（水素発生）を抑えて高い CO 選択率（約90 %）と優れた生成速度を達成する触媒設計指針を紹介いただいた。

2件目として**㈱島津製作所の丹下祥之氏、丸山かれん氏、真保恵美子氏、臼井慧氏**に「人工光合成の分析ソリューション ― 光触媒キャラクタリゼーションと生成物定量 ―」を紹介いただいた。比表面積・細孔分布測定や積分球付紫外可視分光光度計による触媒物性評価、走査プローブ顕微鏡/ケルビンプローブフォース顕微鏡による光照射時の表面電荷分布の可視化、光反応量子収率の測定、ならびに GC や GC-MS を用いた同位体標識実験による生成物の高感度定量と由来証明まで、不均一系粉体触媒を用いた人工光合成研究を総合的に支える多角的な分析ソリューションについて紹介いただいた。

第2群は以下の3件から構成されている。1件目は**国研産業技術総合研究所**の**三石雄悟氏**に「二酸化炭素資源化を支えるクリーン水素製造 ― 粉末光触媒と水電解を融合したハイブリッド技術 ―」を紹介いただいた。CO_2資源化に不可欠なクリーン水素の低コスト供給を目指し、大面積化に適した粉末光触媒シートと高効率な水電解（PEM セル）を組み合わせた「光触媒－電解ハイブリッドシステム」について、太陽光エネルギーの化学貯蔵原理や屋外実証試験において高いファラデー効率（98 %）を達成した最新成果を紹介いただいた。

2件目は**広島大学**の**斉間等氏**に「ハイブリッド触媒を用いたアンモニアメタネーション」を紹介いただいた。CO_2をアンモニアで還元してメタンを合成する際、メタネーションの発熱反応（165 kJ/mol）とアンモニア分解の吸熱反応（−122 kJ/mol）を同時進行させて反応熱を大きく相殺（発熱量わずか 43 kJ/mol）し、水冷設備が不要なコンパクト断熱型反応器を可能にする技術や、Ni 系・Ru 系ハイブリッド触媒の挙動、ならびに二酸化炭素逐次添加型プロセスのベンチプラント展開について紹介いただいた。

3件目は**炭素資源工学研究所**同、**静岡大学名誉教授**の**福原長寿氏**に「温室効果ガス（GHG）を有用資源に変換：CO_2の Carbon Looping 技術」を紹介いただいた。産業排ガス CO_2から合成メタン、合成ガス（e-Fuel 原料）、固体炭素（機能性材料）を多段階で連続製造・回収する循環プロセス「Carbon Looping」について、旋回流れを生み出すスパイラル形構造体触媒による熱・物質移動抵抗の克服、外部加熱なしの室温 Auto-methanation 現象、および高い固体炭素捕集力（70 %）を紹介いただいた。

第3群は以下の2件から構成されている。1件目は**九州大学**の**藤川茂紀氏**に「分離膜による大気中二酸化炭素の直接回収技術 ― ユビキタス二酸化炭素回収をめざす自立性ナノ膜 ―」を紹介いただいた。大気中の希薄な CO_2（400 ppm）を効率的に回収するため、厚さ約30 nm の無欠陥 PDMS ナノ膜を用いた膜分離型直接空気回収（m-DAC）技術と、従来膜を1桁上回る高い CO_2透過度（約40, 000 GPU）、オフィスビルなどの都市空間での回収と炭素資源への「その場変換（DAC-U）」を軸とするユビキタス CO_2回収の構想を紹介いただいた。

2件目は**東京大学**の**野口貴文氏**に「DACCUS によるコンクリートの永久循環」を紹介いただいた。て、解体廃コンクリート中のカルシウム（CaO）と大気中 CO_2（DAC）を結合させて炭酸カルシウム（$CaCO_3$）とし、従来のセメントに替わる結合材として再生させる「C4S プロジェクト（炭酸カルシウムコンクリート：CCC）」について、粒子径分布や加水方法の影響、およびコールドシンタリング成形法、積層プレストレス柱部材への応用、製造時のカーボンマイナス達成、ならびに建築インフラ内への CO_2永久固定（ホワイトカーボン循環社会）の可能性を紹介いただいた。

以上のように、粉体・触媒の精密創製や分析評価から、高効率な反応プロセス、大気中 CO_2の直接回収や社会インフラへの利用に至るまで、粉体技術を基軸としてカーボンリサイクルと持続可能な資源循環に向けた多様なアプローチが進められている。今後は、これらの技術の社会実装や産業間連携がさらに重要になると考える。本特集が、脱炭素社会の実現に向けた次世代の粉体プロセス・材料開発における新たな着想や連携の一助となれば幸いである。