

CO₂ の電気化学還元とその応用利用に関する最近の研究動向

Recent Progress in Study on Electrochemical CO₂ Reduction Reaction and its Application

山内美穂*

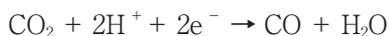
1. はじめに

CO₂ の電気化学的還元反応 (CO₂-eRR) により CO₂ から CO, エチレン, アルコールなどの有用な化学物質が作られる。将来的に, 再生可能エネルギーから作られる電力の価格が大幅に低下し, 電力と水などのユビキタス資源をつかって CO₂ から効率よく化学物質を作製できるようになれば, CO₂ は化学工業における重要な炭素源になると期待される。最近, CO₂ から天然ガス (CH₄) を製造する技術としてメタネーションが注目されている。メタネーションでは, CO₂ と H₂ の反応により CH₄ と H₂O が生成する。カーボンニュートラルを実現するためには, 水素源として CO₂ 排出なしに製造されるグリーン H₂ を用いる必要がある。水を電気化学的あるいは光触媒的に分解して製造されるグリーン水素を使う場合は, H₂ 製造とメタネーションの二段階のプロセス構成となる。

他方, CO₂-eRR では, H₂O の酸化と CO₂ の還元を一つの電気化学反応プロセスとして扱うことができる。CO₂-eRR におけるアノードでの水の酸化反応は



と記述される。一方, カソードでは, CO₂ から様々な物質が生成する可能性がある。以下に, いくつかの化学物質が制する場合の反応式を示す。



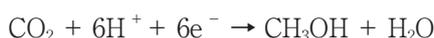
$$E^0 = -0.1 \text{ V vs RHE}$$



$$E^0 = -0.12 \text{ V vs RHE}$$



$$E^0 = -0.1 \text{ V vs RHE}$$



$$E^0 = -0.1 \text{ V vs RHE}$$



$$E^0 = 0.17 \text{ V vs RHE}$$



$$E^0 = -0.1 \text{ V vs RHE}$$



$$E^0 = 0.09 \text{ V vs RHE}$$



$$E^0 = 0.08 \text{ V vs RHE}$$

これらのカソード反応の平衡電極電位は -0.1 - 0.17 V (vs RHE) であるので, CO₂-eRR 反応を進行させるためには, 電極反応系に 1.06 - 1.33 V のバイアス電圧をかければ良い。しかしながら, CO₂ を溶解させた水溶液を使って電気化学反応を行うと, 多くの場合, 水素が生成するのみで CO₂ の還元生成物を得ることができない。これは, 水溶液中に溶けている CO₂ よりも圧倒的に水分子の数が多きことと, 無極性で, 反応性の低い CO₂ 分子と電極 (触媒) との相互作用が弱いことが原因である。

千葉大学名誉教授の堀先生は, 世界に先駆けて Cu が電極触媒として高い CO₂-eRR 活性を示すことを発見した。これをきっかけに CO₂-eRR 触媒の研究が本格的に始動したといわれている。本稿では, Cu 触媒についての研究例を紹介するとともに, これまでに明らかとなった CO₂-eRR 触媒の開発指針を解説する。

2. CO₂-eRR 触媒の発見

堀先生は, 様々な金属 Cu, Au, Ag, Zn, Pd, Ga, Ni および Pt 上での CO₂-eRR 特性を調べ, CO₂-eRR における生成物によってこれらの金属の分

*九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 教授

類を行った¹⁾。表1に示すように、CO、ホルメート (HCOO⁻) あるいはH₂を生成する金属、そしてCuの4種類に分けられている。

表1 金属と主なCO₂還元生成物

金属	生成物
Au, Ag, Zn, Pd, Ga	CO
Pb, Hg, Tl, In, Sn, Cd	HCOO ⁻
Ni, Fe, Pt, Ti	H ₂
Cu	HCOO ⁻ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₅ OH ...

最近、計算化学のアプローチにより、このような金属上での生成物選択性に違いが現れる要因についての研究が行われている。密度汎関数理論 (Density Functional Theory, DFT) を用いた量子化学計算により、反応分子や中間体と触媒表面との結合エネルギーを求めることができる。Nørskovらは反応中間体の結合エネルギーと反応素過程における遷移状態のエネルギーと相関があることを明らかにした²⁾。具体的にいうと、触媒表面に結合した化学種の結合エネルギーをパラメータとして用いることで、触媒反応の素反応が進行するために必要な電圧を計算するというものである。例えば、CO₂の8プロトン付加と8電子還元を介してCH₄が生成する場合を考える。この反応では7つの吸着中間体が生成する素過程が存在する。これらの素反応の進行に必要な電圧は反応中間体であるCO種と金属表面との結合エネルギーによって記述することができる²⁾。CO種と結合エネルギーが大きい金属上では、より小さい電圧印加によって中間体の生成が起こるが、一方で、結合エネルギーが大きすぎると生成物の解離が起こりにくくなるため、反応の進行が妨げられることになる。したがって、Nørskovらの考え方は、素反応の進行に必要な過電圧を明確にすることで、Sabatierの原理をより定量的に表したものであるといえる。これにより、CuがCO₂eRRにおいて高い活性を示し、多様な生成物を生成するのは、CO₂および反応中間体分子と適度な結合エネルギーを持つためであると理解することができる。

3. Cuナノ粒子触媒上での生成物選択性を決める要因

3.1 結晶面

堀先生らは、特定の面が表面に現れた単結晶電極を作製して、電極上での生成物分布を詳細に調べた³⁾。CO₂eRRにおける生成物選択性は、投入された電荷量のうち、注目する化合物の生成のために消費

された割合をしめすファラデー効率 (Faradaic efficiency, FE) から知ることができる。ファラデー効率 (Faradaic efficiency, FE) は以下の式で表される。

$$FE (\%) = \frac{n \times m \times F}{Q}$$

ここで、 n , m , F , Q は、それぞれ、1 molの生成物の生成に必要な電子数、生成物のモル数、ファラデー定数 (96,485 C mol⁻¹)、回路を流れた電荷量 (C) である。

堀先生が実験を行なった結果、C2化合物であるエチレンの生成に着目すると、(111)面上におけるエチレン生成のFEは8.3%であるが、(100)テラスをもつ触媒上ではエチレン生成のFEは40.4%と大幅に増大することが明らかとなった。このようにC-C結合を有する生成物の形成を促進することは、Cu触媒の大きな特徴である。さらに、(100)基底面上に(111)あるいは(110)ステップが存在する場合には、エチレン生成のFEがさらに向上することも明らかにしている。最近、立方体や接頭多面体など、形状が制御されたCuナノ粒子が作製されるようになってきている。形状制御されたCuナノ粒子を使ってCO₂eRR試験を行なった場合も、(100)面のみが露出している立方体Cuナノ粒子上で高いC₂H₄選択性が現れることが確認されている。

3.2 粒子サイズ

触媒のサイズによっても生成物選択性が大きく変化する。Raskeらは、直径2 - 15 nmの粒径が制御されたCuナノ粒子を作製し、生成物分布のサイズ依存性を明らかにした⁴⁾。その結果、直径が5 nm以下の粒子上ではH₂やCOが主生成物となるが、一方で、15 nm以上の粒子上ではCH₄やエチレンの生成のFEが大きくなることがわかった。これは、粒径の小さなCuナノ粒子には、他の金属との結合を十分に形成していない低い配位数を示す表面原子が多く含まれていることに関係している。さらに、DFT計算を使ってCuナノ粒子の構造と中間生成物の結合エネルギーの関連性が詳しく調べられた。その結果、小さい配位数をとる表面原子はH種やCO種と強固な結合を作るため、C-HやC-C結合を生成する素反応が進行しづらいことが明らかとなった。

4. 反応セルと電極形状

CO₂eRRには反応容器に合わせて多様な形状の電極および触媒が用いられる。まず、H型ガラスセル

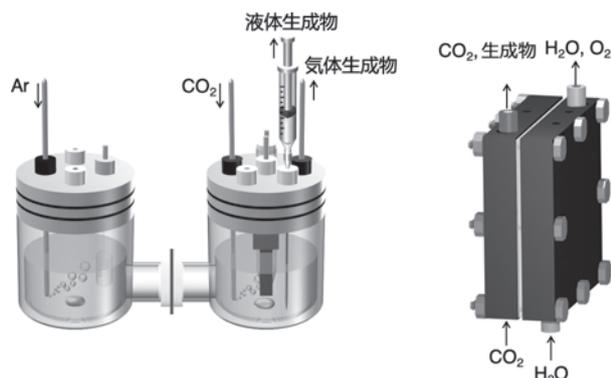


図1 H型(左)とフロー型反応セル(右)

などのバッチ式の反応セルを用いる場合は、Cu板を電極・触媒として用いることができる(図1)。1994年に堀先生らが発表した論文¹⁾の実験では、電極として研磨された高純度のCu板(99.99%)が使われた¹⁾。一般的に、バッチ式のセルを利用する場合、電解質水溶液へのCO₂の溶解度(33 mM)によって制限されるため、還元反応の速度を示す電流密度は数十 mAcm⁻²程度となる。

反応速度を向上させるために、電極触媒に反応ガスを直接吹き付けるフロー型のセルが開発されている。フロー型のセルには、プロトン交換膜型(proton exchange membrane, PEM)水電解水素製造装置と同様に、膜電極接合体(MEA)を用いるMEA型と、電極と電解質の間に電解質溶液を流通させるマイクロ流路型の二つのタイプがある。MEA型はセルの厚みを薄くできるため、セル抵抗の小さい高効率の反応セルとして期待されるが、良好な反応ガス-触媒-電解質膜の三相界面を構築するために、CO₂ガスの供給法、電解質膜の種類、ガス流路などを最適化する必要があるため、現時点ではあまり用いられていない。

他方、著者が所属する九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所(I²CNER)のPIであるイリノイ大学のケニス教授は、カソードとアノードが電解質溶液中で分離されているマイクロ流路型の反応装置を開発している⁵⁾。この装置では、ガス拡散層(gas diffusion layer, GDL)を通過したCO₂ガスが、触媒と電解質溶液と良好な三相界面を形成するため、CO₂eRR反応が効率よく進行する。その結果、マイクロ流路型の装置を使った実験では、数百 mAcm⁻²程度の比較的大きな電流密度が観測されている。また、液体を透過しないGDLが電極に塗布されているため、電解質水溶液に溶解する液体生成物と、GDL透過する気体生成物が自動的に分

離されるため、ガス成分のみを取り出す場合には都合が良い。

5. マイクロ流路型反応セルを使ったCO₂-eRR

5.1 Cuナノ粒子触媒の合成

先に述べたように、Cu触媒はC2化合物生成の選択性が高いことが大きな魅力である。また、C2化合物を作製するためには、15 nm上の大きさをもつ触媒であることが望ましいことも明らかとなっている。そこで、我々は、数十 nm程度のドメインをもつCuナノ粒子触媒を簡便に作製する方法を検討した⁵⁾。

まず、活性な触媒表面を露出させながら大きな反応面積を持つCu触媒を作製するために溶媒と添加剤の検討を行なった。一般的に、化学還元法により金属ナノ粒子を作製する場合には、粒子成長を抑制するために、金属表面と比較的強い相互作用を示す配位子やポリマーなどの添加剤を混合することが多い。その場合、金属粒子の粒径は制御されるものの、活性な触媒表面が失われることが問題となる。そこで、我々は、Cu表面と弱く相互作用すると考えられる2-エトキシエタノールを溶媒として選択した。また、添加剤として金属表面と強い結合を作らないクエン酸を選んだ。表2に作製した試料の名称と溶

表2 Cuナノ粒子触媒の作製に使用した溶媒と添加剤、および粒子の平均サイズ

試料名	溶媒	添加物	サイズ
Cu-1	2-ethoxyethanol	なし	26 nm
Cu-2	水	なし	26 nm
Cu-3	水	クエン酸	23 nm
Cu-4	2-ethoxyethanol/水 (v/v: 50/50)	クエン酸	15 nm

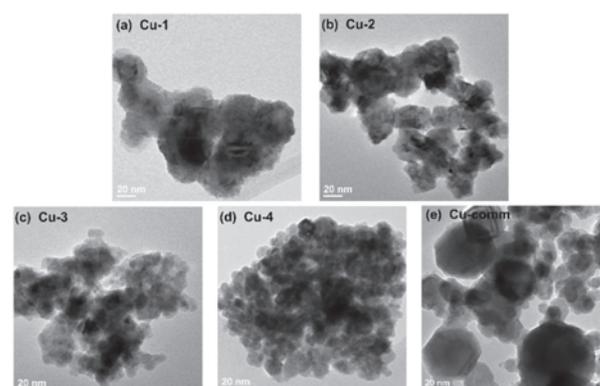


図2 (a) Cu-1, (b) Cu-2, (c) Cu-3, (d) Cu-4 および (e) 市販されているCu粉末(Cu-comm)のTEM像

媒と添加物をまとめて記す。

作製した触媒の TEM 観測では (図 2), 溶媒による粒子サイズの顕著な変化はみられなかった (Cu-1, Cu-2). しかしながら, 2-エトキシエタノールを使った場合は, 表面に凹凸が現れることがわかった. 一方で, クエン酸を混合させることで粒子サイズが減少し, 2-エトキシエタノールとクエン酸を両方用いると, 最も小さいサイズの Cu 粒子が得られることが明らかとなった. また, 市販の Cu 粉末 (Cu-comm) は直径 40 nm 以上の大きな粒子と, 数 nm 程度の小さな粒子の混合物であることがわかった.

5.2 Cu ナノ粒子触媒の CO₂-eRR 特性

電極触媒として Cu ナノ粒子, 電解質として 1M KOH 水溶液を用い, Kenis 教授が開発したマイクロ流路型セルを使用して CO₂-eRR を行った. その結果, Cu-1 を使った場合の, エチレンとエタノールの生成の最大の電流密度は, それぞれ, 150, 45 mAcm⁻² と比較的大きな値となった. 次に, 各生成物の FE の電位依存性を調べた. H₂ 生成の FE をみると, 比較的小粒径の粒子を含む Cu-4 と Cu-comm は高い値を示した. これは, 先ほど触れた Raske らの報告と同様な傾向である. 一方で, Cu-1 上では, -0.4 V vs RHE より正の電位で CO が最も多く生成し, それより負の -0.58 V vs RHE においてエチレンとエタノール生成の FE が最大となることがわかった. また, C2 化合物生成の FE は 46% と, 当時としては最も大きな値となった. 電気容量を測定し, 触媒界面の荒さを評価したところ, Cu-1 が最も高い容量を示すことから, 最も荒い表面をもっていることがわかった. この表面粗さの程度は, 高い C2 化合物選択性を示す要因の一つであると考えられる⁵⁾.

6. Cu-Pd ナノ合金の元素配列と CO₂-eRR 活性

6.1 CuPd ナノ合金の合成

反応分子はいくつかの表面原子と相互作用する.

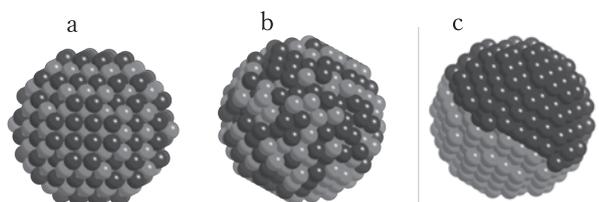


図 3 (a) 規則型, (b) 不規則型, (c) 相分離型ナノ合金の構造

したがって, 反応分子の結合エネルギーは金属の表面組成と元素配置によって変化するため, それらは, 触媒反応に大きな影響を与える要因となると考えられる. 我々は, Cu 触媒上での水素付加を促進させる目的で, 水素吸蔵能を有し, 水素と強い相互作用をしめす Pd を Cu に固溶したナノ合金触媒の作製を行なった⁶⁾. Cu と Pd は共に面心立方 (fcc) 構造を取る金属であるが, Cu : Pd = 60 : 40 を中心に B2 型と呼ばれる, 体心立方 (bcc) 格子の頂点と体心位置を別の元素が占有する規則構造が現れる (図 3a). そこで, 規則型, 不規則型 (図 3b), さらに相分離型 (図 3c) の Cu-Pd ナノ合金を作製して, それらの活性を比較することで, 元素配列が CO₂-eRR に与える影響について検討を行なった.

Cu-Pd ナノ合金の合成には, 先ほど示した Cu ナノ粒子の作製法と同様に 2-エトキシエタノールを溶媒として利用する化学還元法をもちいた. 構成金属が良く混合されている固溶体ナノ粒子を作製するためには, 溶液中の全てのイオンを同時に還元して, ナノ粒子を作製するのが良いと考えられる. Pd/Pd²⁺ と Cu/Cu²⁺ の酸化還元電位は 0.95 および 0.34 V vs. SHE と異なるため, 弱い還元剤を使って合金を作製すると, 反応を進行させるための昇温過程で Pd と Cu が別々に還元されると予想される. そこで, 比較的强大な還元剤である NaBH₄ を用いて原料金属イオンを同時に還元することにより CuPd ナノ合金の作製を試みた⁷⁾. 著者らは, これまでの研究により, 不規則型のナノ合金を水素雰囲気下での加熱処理を行うことにより合金の規則化が促進することを明らかにしている⁸⁾. そこで, 不規則型ナノ合金を H₂ 流通下, 573 K で処理することによって規則型 CuPd ナノ合金を調製した. 図 4 に作製し

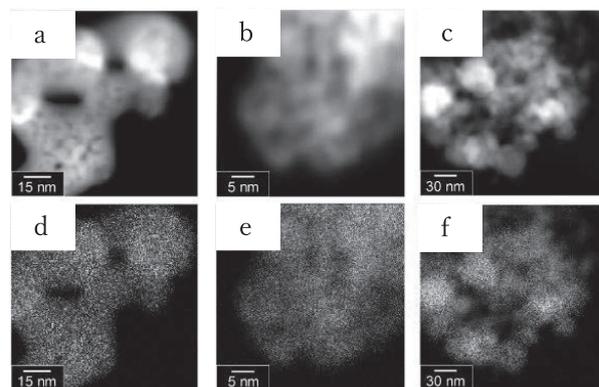


図 4 規則型 (a, d), 不規則型 (b, e), 相分離型 (c, f) CuPd ナノ合金の HAADF-STEM 像 (上) と EDS マップ像 (下). a, b, c と比較して色の濃い部分に Cu が存在する (d, e, f).

たCuPd ナノ合金触媒の高角散乱環状暗視野走査透過顕微鏡 (HAADF-STEM) 像 (上段) およびエネルギー分散型 X 線分光 (EDS) による元素マップ (下段) を示す。相分離型 CuPd ナノ合金の EDS マップ (f) では、暗い色に対応する Cu と明るい色の Pd が別々の場所に分布しているが、それ以外の CuPd ナノ合金上では、合金全体に Cu と Pd が分布していることがわかる。詳細な構造を調べるために粉末 X 線回折を測定すると、不規則型 CuPd では、bcc 構造に帰属できるブロードな回折が観測された。他方、水素下で処理した試料の回折パターンには、B2型に特徴的な 001 回折が観測されたことから、規則 CuPd ナノ合金が生成したことを確認された。

6.2 Cu-Pd ナノ合金の CO₂-eRR 特性

図5に、マイクロ流路型セルを用い、-0.78 V vs RHE で 1M KOH を流通させながら CO₂-eRR を行なった場合の CuPd ナノ合金上で生成物分布 (FE) を示す。規則型 B2 CuPd ナノ合金上では、70% 以上の高い FE で CO が生成することがわかった。しかしながら、C2 化合物はほとんど生成していない (FE < 5%)。相分離型ナノ合金上では、エチレンとエタノールの生成の FE がそれぞれ 48, 15% となり、C2 化合物生成の FE が 63% と、論文を発表した時点では、世界最高の C2 選択性を示すことがわかった⁶⁾。また、不規則 CuPd ナノ合金上では、規則型と相分離型ナノ合金上で観測された結果を平均したような生成物分布が得られたことから、元素配列が CO₂-eRR における生成物選択性に大きな影響を与えることを与えることが明らかとなった。

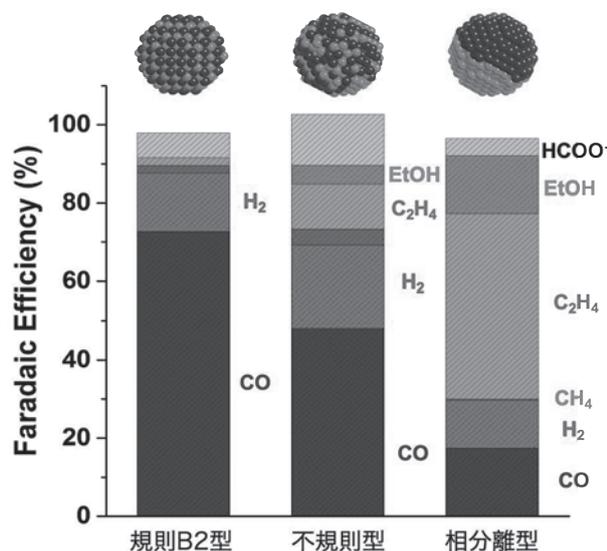


図5 規則型 B2 型、不規則型、相分離型 CuPd ナノ合金上での CO₂-eRR における各生成物に対するファラデー効率

次に、元素配列が選択性に影響を与えるメカニズムを検討した。これまでに、Nørskov らは、さまざまな金属の電子状態と触媒反応の関連性について量子力学的視点から検討を行い、*d* バンドの重心位置と触媒特性が大きな相関を示すことを明らかにしている⁹⁾。そこで、我々は、単純金属ナノ粒子およびナノ合金表面の光電子スペクトルを測定することで価電子帯のエネルギー状態を調べた⁶⁾。その結果、相分離型 CuPd 合金の *d* バンドの重心は最も低いエネルギーの位置にあり、Cu ナノ粒子が最も高い位置にあることがわかった。一般的に、重心がより高いエネルギーを有する場合に、触媒表面と反応分子との結合には反結合性軌道からの寄与が少なくなるため、とより強い相互作用が生まれ、触媒反応が加速されると言われている。しかしながら、最も C2 生成に高い活性を示した相分離型 CuPd ナノ合金のバンドの重心は最も低いエネルギー位置にあることから、ナノ合金上での触媒特性を単純に *d* バンドのエネルギー状態と結びつけることができないことと考えられる。

次に、組成の異なる不規則型ナノ合金の反応特性を検討した (図6)⁶⁾。CuPd₃, CuPd, Cu₃Pd ナノ合金上での生成物分布をみると、Cu の割合とともに C2 化合物生成の FE が増加することがわかった。ただし、相分離型 CuPd ナノ合金は、Cu ナノ粒子および Cu₃Pd ナノ合金よりも高い C2 生成の FE を示す。以上の結果から、次のようなメカニズムを提案した。ナノ合金上では、Cu の濃度が高いほど、C2 化合物生成の FE が増加することから、Cu 原子上に吸着された CO 中間体の二量化が起こるために

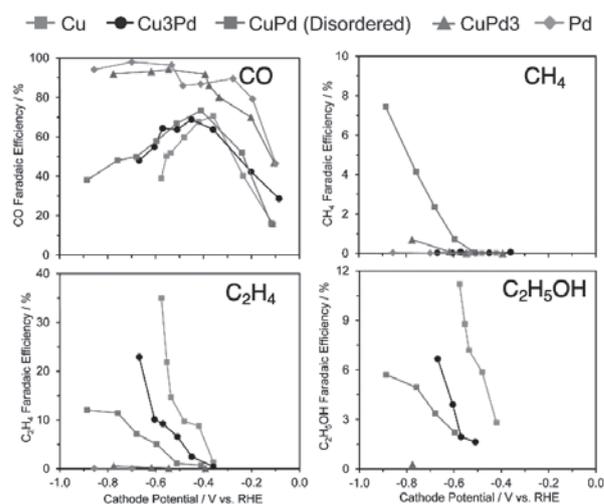


図6 不規則型構造をとる Cu₃Pd, CuPd および CuPd₃ ナノ合金と Cu および Pd ナノ粒子触媒上での各生成物に対するファラデー効率

は、一定以上のサイズをもつ Cu のドメインの形成が必要である。また、CO 中間体は、Pd 原子に部分的に吸着された酸素原子と CHO 中間体を形成することが報告されている。したがって、Cu 原子上に吸着された CO 中間体は CHO 中間体との結合を通して、スムーズに二量化して COCOH を形成すると考えられる。これらの結果は、ナノ触媒での高い生成物選択性を発現するには、活性部位の配置を精密な制御が必要であることを意味している。

7. CO₂-eRR 利用に関する将来展望

金属ナノ粒子触媒上の CO₂-eRR を通して、CO₂ から様々な化合物が生成されるようになってきた。日本においては、再生可能エネルギーから製造される電力（再エネ電力）の価格が他国と比較して高いため、CO₂-eRR によって作られる化成品がすぐに市場に出回ることは考えにくい。他方、2¢/kW 程度の安価な電力を使うことができれば、CO₂ を原料として製造される CO、ギ酸、エチレン、メタノール、エタノールなどの化学製品（CH₄ 以外）は、現状の市場価格と同程度あるいはそれより安くなると試算されている¹⁰。したがって、今後、電力価格が現状の 1/10 程度になれば、CO₂ から製造される化学製品が実用的に利用される可能性がある。

以上のようなことが実現されるためには、CO₂-eRR の原料となる CO₂ の価格が数十ドル/トン程度になる必要がある。CO₂ 価格は、CO₂ 源と回収技術および回収する場所などによって 1\$/t から 900 \$/t と大きく変化する。現在、アミンやアルカリの溶液を吸収媒体とする溶液吸収による CO₂ 回収を行う大規模設備が建設され、試験的に運用されている。他方、日本のように人口密度の高い地域では、大規模設備を設置するよりも、利用する場所で、利用するだけの CO₂ を回収し、欲しいものに変換する、オンサイト方式で利用できるコンパクトな設備を用いることの利便性が高い。

最近、I²CNER の PI である藤川茂紀教授は、ナノレベルに制御された超薄膜を使って大気中の希薄な濃縮する分離膜を使った CO₂ 回収法（membrane-direct air capture, m-DAC）の開発に成功した¹¹。m-DAC の効率がさらに改善されれば、家庭で排出される CO₂ をエアコンの室外機程度の大きさの設備を使って回収できるようになると考えられる。現在、藤川教授と著者は、内閣府が実施しているムーンショット型研究開発事業の支援を受けて、m-DAC 装置に CO₂-eRR の反応セルを連結した、



図7 m-DAC-U 装置の特徴

m-DAC-U 装置の開発を進めている（図7）。m-DAC-U 装置を使えば、大気中の CO₂ から再生可能な電力と水を使った化学原料のオンサイトでの製造が可能になる。このような技術を含め、現在開発されている様々な CO₂ 利用技術の発展により、近い将来、これまで厄介者であった大気中の CO₂ がグリーンな炭素資源として利用できるようになることを期待する。

参考文献

- 1) Hori, Y., Wakebe, H., Tsukamoto, T. & Koga, O. Electrocatalytic process of CO selectivity in electrochemical reduction of CO₂ at metal electrodes in aqueous media. *Electrochim-Acta* **39**, 1833-1839 (1994).
- 2) Peterson, A. A. & Nørskov, J. K. Activity descriptors for CO₂ electroreduction to methane on transition-metal catalysts. *The J. Phys. Chem. Lett.* **3**, 251-258 (2012).
- 3) Hori, Y., Takahashi, I., Koga, O. & Hoshi, N. Electrochemical reduction of carbon dioxide at various series of copper single crystal electrodes. *J. Mol. Catal. A: Chem.* **199**, 39-47 (2003).
- 4) Reske, R., Mistry, H., Behafarid, F., Roldan Cuenya, B. & Strasser, P. Particle size effects in the catalytic electroreduction of CO₂ on Cu nanoparticles. *J. Am. Chem. Soc.* **136**, 6978-6986 (2014).
- 5) Ma, S. *et al.* One-step electrosynthesis of ethylene and ethanol from CO₂ in an alkaline electrolyzer. *J. Power Source* **301**, 219-228 (2016).
- 6) Ma, S. *et al.* Electroreduction of carbon dioxide to hydrocarbons using bimetallic Cu-Pd catalysts with different mixing patterns. *J. Am. Chem. Soc.* **139**, 47-50 (2017).
- 7) Yamauchi, M., Abe, R., Tsukuda, T., Kato, K. &

- Takata, M. Highly selective ammonia synthesis from nitrate with photocatalytically generated hydrogen on CuPd/TiO₂. *J. Am. Chem. Soc.* **133**, 1150-1152 (2011).
- 8) Yamauchi, M. & Tsukuda, T. Production of an ordered (B2) CuPd nanoalloy by low-temperature annealing under hydrogen atmosphere. *Dalton Trans.* **40**, 4842-4845 (2011).
- 9) Nørskov, J. K., Bligaard, T., Rossmeisl, J. & Christensen, C. H. Towards the computational design of solid catalysts. *Nat. chem.* **1**, 37-46 (2009).
- 10) Bushuyev, O. S. *et al.* What should we make with CO₂ and how can we make it? *Joule* **2**, 825-832 (2018).
- 11) Fujikawa, S., Selyanchyn, R. & Kunitake, T. A new strategy for membrane-based direct air capture. *Polym. J.* **53**, 111-119 (2021).

著者略歴



山内 美穂 (やまうち みほ)

カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 教授

専門分野：固体物性化学， ナノ科学， 触媒化学

2001年筑波大学 大学院博士課程 化学研究科 化学専攻を修了後，九州大学院理学研究院・助教，北海道大学触媒化学研究センター・准教授などを経て，2012年九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所・准教授に着任し，2017年から現職に就任した。

専門は固体化学， ナノ科学， 触媒化学で，最近は，電気化学反応を使ったCO₂還元についても研究を行っている。