

戦略的創造研究推進事業
研究領域「低エネルギー、低環境負荷で持続可能な
ものづくりのための先導的な物質変換技術の創出」
(ACT-C)

研究課題「プロトン応答性錯体に基づく二酸化炭素の高
効率水素化触媒の開発と人工光合成への展開」

研究終了報告書

研究期間 平成24年10月～平成30年3月

姫田 雄一郎

(国立研究開発法人産業技術総合研究所
創エネルギー研究部門エネルギー触媒技術グループ
上級主任研究員)

目次

§ 1. 研究実施の概要	(2)
(1) 実施概要	
(2) 顕著な成果	
§ 3. 研究実施体制	(3)
(1) 研究体制について	
(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について	
§ 4. 研究実施内容	(4)
§ 6. 成果発表等	(7)
(1) 原著論文発表	
(2) その他の著作物	
(3) 国際学会発表及び主要な国内学会発表	
(4) 知財出願	
(5) 受賞・報道等	
(6) 成果展開事例	
§ 7. 研究期間中の活動	(13)
(2) 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動	

§ 1. 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究の目的は、「水素の貯蔵を指向した高効率な二酸化炭素(CO₂)の水素化触媒の開発」と「多機能型錯体触媒を目指したプロトン応答性触媒の設計指針の構築」である。具体的には、プロトン応答性触媒設計指針に基づいて CO₂ を還元するための高効率触媒の開発とともに、ギ酸やメタノールを燃料や炭素資源として利用するための研究を行ってきた。産総研(AIST)では、水中での「CO₂ 水素化触媒」、「ギ酸脱水素化触媒」、および「CO₂ からのメタノール合成触媒」の開発により、それぞれ世界最高性能の触媒を見出すことが出来た。ブルックヘブン国立研究所(BNL)では、これら実験結果を基に、分光分析・計算化学を駆使して、反応機構を解明した。実験と理論の連携により、CO₂ 水素化触媒の新たな触媒設計指針を得ることができた。また、国際研究支援策において、スイス連邦工科大学ローザンヌ校との共同研究で、世界で初めて錯体触媒を用いた CO₂ からの直接メタノール合成に成功した。さらに、高性能ギ酸脱水素化反応による高圧水素製造技術は CREST 採択に繋がり、現在、連続高圧水素製造プロセスへの展開を図っている。また本プロジェクトで開発した触媒は、水分解反応、CO₂ 電気化学的還元反応にも応用が可能である。本研究課題では、AIST の触媒技術と BNL の材料解析技術の連携により、効率よく研究開発が実施できたと考えている。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 「プロトン応答性配位子の機能解明と高性能触媒開発」

水酸基の酸塩基平衡を利用した新しい触媒設計指針(プロトン応答性触媒)を提案した。この指針により、(i)水酸基の脱プロトン化によって生成するオキシアニオンの電子供与性効果による触媒活性化効果、(ii) ヒドロゲナーゼの水素分子活性化を範とした「ペンダントベース効果」による水素分子の不均化反応の促進を、実験、理論的に解明した。この指針に基づいて、水中常温常圧条件で、CO₂ を効率的に還元できる均一系錯体触媒を複数開発することが出来た。特に、*ACS Catal.*, **2013**, *3*, 856 は、2013 年の *ACS Catalysis* の最も重要な論文に選ばれた(*ACS Catal.*, **2016**, *6*, 7977)。また、他の研究者から本触媒設計指針に基づいた高性能触媒が、数多く報告されるようになってきた。

2. 「新規な高性能触媒配位子の開発」

窒素5員環やアミドが、CO₂ 水素化およびギ酸脱水素化の触媒配位子に有効であることを見出した。これらは構造が単純で安価なため、様々な誘導体の設計・合成が容易である。上記のプロトン応答性配位子を組み合わせた新規触媒配位子によって、水中常温常圧下での CO₂ 水素化反応の従来の記録(*Nat. Chem.* **2012**, *4*, 383)を更新することができた(*ChemSusChem.*, **2017**, *10*, 1071, 特願 2017-104867, *ACS Catal.*, **2017**, *7*, 6426)。

<科学技術イノベーション・課題解決に大きく寄与する成果>

1. 「ギ酸脱水素化による高圧水素供給」

ギ酸から高圧水素(>10 MPa)を発生できる高性能な脱水素化触媒を見出した。この触媒は、実用化に適した100度以下の低温条件かつ有機添加物を含まない水中反応で、CO を副生しない優れた特性を有している。そのため、ギ酸からの高圧水素製造技術は、CREST 採択に繋がった。水素の昇圧コスト(70 MPa)は、ガスステーションにおける水素コストの半分以上を占めるため、本技術は有望な高圧水素供給技術と考えている。

2. 「低温条件下での CO₂ からのメタノール合成」

世界で初めて、均一系触媒を用いた CO₂ の水素化による直接メタノール合成に成功した。また、水素を圧入することなく、大気圧下あるいはギ酸脱水素化で生じる自生圧によって、ギ酸からメタノールを合成することもわかった。これらの触媒反応は100度以下の低温反応条件であるため、平衡制限を回避できる。さらに、CO₂ からのギ酸製造技術を組み合わせることで、水中温和な条件で、CO₂ から選択的にメタノールを製造できれば、大きなインパクトがあると考えている。本技術は、国際研究支援策のもと行われた、スイス連邦工科大学ローザンヌ校との共同研究の成果であり、WIPO に出願した(PCT/IB2015/059242)。

§ 3. 研究実施体制

(1) 研究体制について

① 「姫田」グループ

研究代表者: 姫田 雄一郎 (産業技術総合研究所、上級主任研究員)

研究項目

・「CO₂水素化」、「ギ酸脱水素化」、「メタノール合成」の触媒開発および評価

参画した研究者の数 (研究員4名、研究補助員2名、学生0名)

② 「藤田」グループ

主たる共同研究者: 藤田 恵津子 (米国ブルックヘブン国立研究所、シニアケミスト) (共著論文22報)

研究項目

・計算化学・分光分析を用いた反応機構の解析

・「水分解触媒」の触媒開発および評価

参画した研究者の数 (研究員4名、研究補助員0名、学生0名)

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

スイス、スイス連邦工科大学ローザンヌ校 Gábor Laurenczy 教授 (共著論文4報)

ACT-C 国際研究支援策により、「CO₂からのメタノール合成法の研究」を上記機関と実施した。

参画した研究者の数 (研究員2名、研究補助員0名、学生0名)

株式会社 豊田中央研究所 稲垣伸二シニアフェロー

当チームで開発した CO₂ 水素化触媒を、稲垣チームで開発したメソポーラス有機シリカ上へ固定化し、固定化触媒によるギ酸からのメタノール合成の研究を実施している。

参画した研究者の数 (研究員2名、研究補助員0名、学生0名)

サウジアラビア、キング・アブドゥッラー科学技術大学 触媒センター Kuo-Wei Huang 教授 (共著論文1報)

ギ酸からの高圧ガス発生プロセスに関する共同研究

中国、大連理工大学石油与化学工程学院 王 万輝副教授 (共著論文1報)

触媒開発に関する共同研究

産業技術総合研究所

化学プロセス研究部門 川波 肇グループ長 (共著論文7報)

CREST において、高圧水素発生プロセス構築に関する共同研究

エネルギー化学材料オープンイノベーションラボラトリ 徐 強ラボ長 (共著論文1報)

固体触媒を用いたギ酸脱水素化反応による水素発生に関する共同研究

無機機能材料研究部門 神 哲郎主任研究員 (共願特許1件)

触媒固定化に関する共同研究

§ 4. 研究実施内容

研究項目 1 「プロトン応答性触媒設計指針に基づいた CO₂ 水素化触媒の開発」
(産総研 姫田グループ、ブルックヘブン国立研究所 藤田グループ)

① 研究のねらい

高性能触媒の開発によって、効率よく CO₂ の水素化を行い、CO₂ の有効利用を図る。

② 研究実施方法

当チームで見出した触媒設計指針(プロトン応答性触媒)に基づいた高性能触媒開発を行うとともに、新しい触媒設計指針を得るために、実験的手法と計算化学との連携を通じた新たな触媒配位子の探索を行った(図3)。また、非プラチナ系金属触媒の開発や連続フロープロセスにむけた触媒固定化を試みた。

③ 採択当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§ 2. と関連します)と得られた成果

CO₂ 水素化反応において、水酸基によるプロトン応答性配位子が極めて有効であることを実証した。特に、電子供与性効果だけでなく、酵素の機能を模倣して反応近傍にベースを配置することにより(ペンダントベース効果)、水素分子の開裂を促進することがわかった。この反応機構を、速度論的同位体効果と DFT 計算を連携させることにより、詳細に解明することができた。さらに、基本骨格として、窒素5員環系配位子やアミド窒素配位も有効であることも示した。アミド系配位子を持つ触媒では、当研究チームで開発したもっとも高い触媒(Nat. Chem. 2012, 4, 383)を2倍上回る性能を示した(図4)。以上、プロトン応答性触媒の高い一般性を示すとともに、新たな触媒設計指針を見出すことが出来た。

これらの触媒設計指針をもとに、非プラチナ系金属を用いた触媒の開発を行い、世界で初めて有機添加物を用いない水中でのコバルト触媒を見出した。非プラチナ系金属触媒においてもプロトン応答性配位子の有効性を示すことができた。

また、共同研究により多孔質ガラス、有機メソポーラスシリカの担体の提供を受け、触媒固定化を図っている。現在、固定化した触媒を用いて、触媒能の評価、触媒溶出量などを測定し、高性能、高機能な固定化触媒を探索している。

④ 当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況と得られた成果

顕著な成果として、プロトン応答性配位子の機能解明をした *ACS Catal.*, **2013**, *3*, 856 は、2013 年の *ACS Catalysis* の最も重要な論文に選ばれた(*ACS Catal.*, **2016**, *6*, 7977)。また、近年、他の研究者から本触媒設計指針に基づいた触媒開発が数多く報告され、プロトン応答性配位子の高い一般性が認識されつつある。

さらに、プロトン応答性配位子に加えて、窒素5員環系配位子、アミド構造が強い電子供与性効果により、触媒活性化する新たな触媒設計指針を見出した。単純な構造であるため、プロトン応答性配位子に加えて様々な配位子構造の展開が可能となる。

これらの新規触媒開発技術により、水中常温常圧の温和な条件で CO₂ の水素化反応が進行する高性能錯体触媒を報告しているのは、*Energy Environ. Sci.* **2012**, *5*, 7360 の1報を除けば当チームで開発した触媒しかない。特に、有機添加物(塩基、溶媒)が不要な水中で作用する触媒は、実用化を目指すうえで有用な特性と考えている。

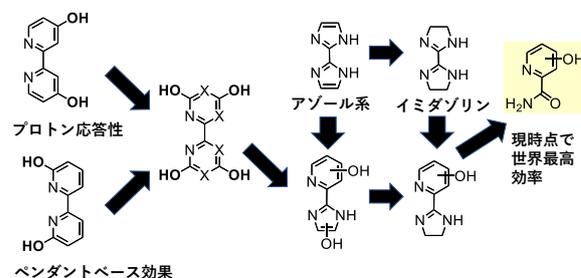


図 3. 触媒配位子の系統図

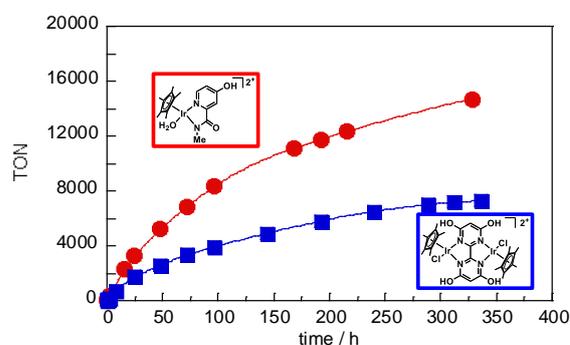


図 4. 水中常温常圧条件下での CO₂ 水素化反応の TON の時間変化

研究項目 2 「ギ酸脱水素化反応による水素製造」

(産総研 姫田グループ、ブルックヘブン国立研究所 藤田グループ)

① 研究のねらい

CO₂ 水素化によって得られるギ酸を水素貯蔵媒体として利用するため(図5)、高性能・高耐久性のギ酸脱水素化触媒の開発を行い、CO₂ の還元物であるギ酸が、水素貯蔵媒体として有効であることを提示する。

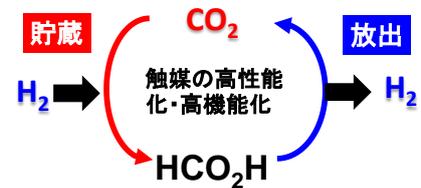


図5. 水素貯蔵・放出による CO₂ の利用サイクル

② 研究実施方法

CO₂ 水素化触媒の開発で得られた触媒を用いて、ギ酸脱水素化反応の反応性評価を行った。この際、反応速度、反応選択性(一酸化炭素(CO)の検出)だけではなく、様々な反応条件(温度、圧力、ギ酸濃度)での触媒の安定性、耐久性も評価した。これらの結果をフィードバックさせ、ギ酸脱水素化反応に適した触媒開発を進める。また、水素発生システムの実証化のための反応プロセス評価を進める。

③ 採択当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§ 2. と関連します)と得られた成果

有機添加物を用いない水中条件で CO が全く副生しない優れた特性を示すことがわかった。また、ギ酸の脱水素化触媒の開発については、研究項目1と密接に連携させることで、新たな触媒設計指針を構築することが出来た。また、実用化に向けて、触媒の耐久化を図り、2ヶ月間、1000 万回以上の触媒回転数を達成し、採択当初の目標は達成した。さらに、密閉容器を用いるとギ酸脱水素化反応から、想定以上の高圧水素(10 MPa 以上)が容易に発生することもわかった。

④ 当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況と得られた成果

顕著な成果として、ギ酸が、他の水素キャリアでは発現できない**高圧水素供給**という優れた特性を持つことを示した。本技術は、CREST「再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けた革新的エネルギーキャリア利用基盤技術の創出」で採択され、高圧反応プロセスに精通した研究者と組んで高圧水素発生システムに特化した研究を展開している。その結果、ギ酸から100 MPa 以上のガスが発生し、発生した高圧ガスを冷却することによる気液分離で水素を 93%まで濃縮できることを実証した。ケミカルコンプレッサーによる高圧水素供給技術に対して、多数の企業から問い合わせを受けている。

研究項目 3 「再生可能エネルギーからの液体燃料製造法の開発」

(産総研 姫田グループ、ブルックヘブン国立研究所 藤田グループ)

① 研究のねらい

再生可能エネルギーに由来する水素源(電子源)を用いて、CO₂から直接液体燃料の製造を目指す。

② 研究実施方法

上記の目的のため、太陽電池等で生じる電気エネルギーの利用を想定し、CO₂の電気化学的還元触媒あるいは水分解触媒の開発を行った。

③ 採択当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§ 2. と関連します)と得られた成果

プロトン応答性触媒を用いることで、CO₂の電気化学的還元や水分解反応の高効率化を図った。いずれの反応においても、無置換ピリジン錯体に比べて、プロトン応答性触媒が有効であることがわかった。

④ 当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況と得られた成果

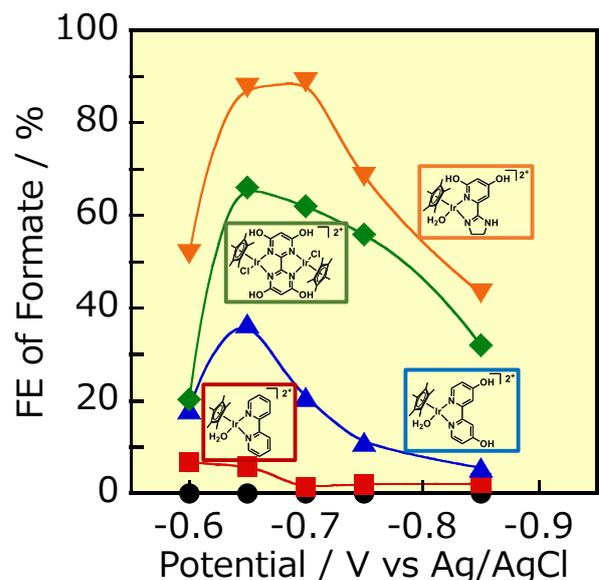


図6. 錯体触媒を用いた CO₂ の電気化学的還元

錯体触媒を用いた CO₂ の電気化学的還元はこれまでほとんど知られていないが、プロトン応答性触媒やイミダゾリン系触媒を用いることによって、極めて高い効率(ファラデー効率、低い過電圧、高い電流密度)を示した(図6)。現在知られているプラチナ系電極に比べて、これらの効率は遜色ないことに加えて、排他的にギ酸塩が生成することが特色として挙げられる。

研究項目 4 「メタノール合成法の開発」

(産総研 姫田グループ、スイス連邦工科大学 (国際研究支援策))

① 研究のねらい

低温条件下、高効率に CO₂ からメタノールへの変換を目指す。

② 研究実施方法

当初、ギ酸エステルを経由したメタノール合成を検討したが、その後 CO₂ あるいはギ酸より直接メタノールが生成する端緒を見出した。そこで、国際共同研究支援策のもと、高圧 NMR 解析技術を持つスイス連邦工科大学と連携し、反応条件の最適化による反応効率の向上を目指した。

③ 採択当初の研究計画(全体研究計画書)に対する現在の研究進捗状況(§ 2. と関連します)と得られた成果

ギ酸の不均化反応(式 1)によるメタノール合成の最適な触媒、実験条件を検討し、従来法を大幅に上回る触媒回転数・メタノール選択性・濃度を達成できた。また、大気圧条件下(60 度)でもギ酸水溶液からメタノールが生成した。これらの結果をもとに、錯体触媒による水中での CO₂ の水素化による直接メタノール合成に世界で初めて成功した。すなわち、酸性条件下、CO₂ 水素化によりギ酸が生成し、生成したギ酸がさらに水素化されることにより、メタノールが生成する。この条件では、ギ酸の生成濃度は平衡に制限されるが、メタノールは漸次生成量が増えている(図7)。

④ 当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況と得られた成果

顕著な成果として、ギ酸を経由した CO₂ からのメタノール合成があげられる。これにより、世界で初めて、錯体触媒による水中での CO₂ の水素化による直接メタノール合成に成功した。特に、従来の CO₂ からのメタノール合成では、高温反応条件での平衡制限によりメタノールへの低い転化率が問題であったが、本反応は 100 度以下であるために、この平衡制限が回避できる。

また、ギ酸の不均化によるメタノール生成では、高圧水素をギ酸脱水素化反応によって供給できるため、加圧エネルギーが不要になる。さらに、付随するギ酸脱水素化反応から生じるガスは系外に排出し、メタノール水溶液だけが得られるため、生成物の分離が不要となる。これらの検討により、従来と比較して高いメタノール生成効率(選択性、収率、メタノール濃度)を達成した。また、加圧水素ガスを用いることなく、大気圧下でもギ酸からメタノールを生成することが可能である。今後、我々が開発したイリジウム二核錯体を用いた常温常圧での CO₂ 水素化によるギ酸塩合成反応(*Nat. Chem.* **2012**, *4*, 383) と組み合わせて、大気圧条件下で CO₂ からメタノールを合成することを試みたい。また、低圧低温条件下 CO₂ から直接メタノール合成できる触媒の端緒を見出しており、引き続き触媒開発を進めている。当初想定したギ酸エステルを経由する方法ではなく、一段階で CO₂ からメタノールを合成できた。

また、連続フロープロセスへの応用を図るために、ガラスやメソポーラス有機シリカ等への触媒の固定化を図っている。この触媒固定化技術は他の研究項目に応用が可能であり、新たな展開が期待できる。

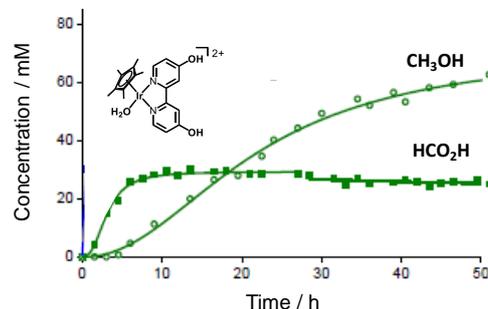
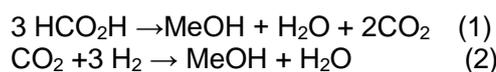


図 7. CO₂ 水素化によるギ酸、メタノールの生成の時間変化 (70 度, 8 MPa)

§ 6. 成果発表等

(1)原著論文発表【国内(和文)誌 0 件、国際(欧文)誌 19 件】

1. Wan-Hui Wang (AIST), James T. Muckerman, Etsuko Fujita, Yuichiro Himeda, “Mechanistic insight through factors controlling effective hydrogenation of CO₂ catalyzed by bio-inspired proton-responsive iridium(III) complexes”, *ACS Catalysis*, Vol. 3, No. 5, pp. 856-860, 2013. (DOI: 10.1021/cs400172j)
2. Wan-Hui Wang (AIST), Yuki Suna, Yuichiro Himeda, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, “Functionalized cyclopentadienyl rhodium (III) bipyridine complexes: Synthesis, characterization, and catalytic application in hydrogenation of ketones”, *Dalton Transactions*, Vol. 42, No. 26, pp. 9628-9636, 2013. (DOI: 10.1039/C3DT50445J)
3. Badiei Yosra (BNL), Wan-Hui Wang, Jonathan Hull, David J. Szalda, James T. Muckerman, Yuichiro Himeda, Etsuko Fujita, “Cp*Co (III) catalysts with proton-responsive ligands for carbon dioxide hydrogenation in aqueous media”, *Inorganic Chemistry*, Vol. 52, No. 21, pp. 12576-12586, 2013. (DOI: 10.1021/ic401707u)
4. Yuichi Manaka (AIST), Wan-Hui Wang, Yuki Suna, Hide Kambayashi, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, Yuichiro Himeda, “Efficient H₂ generation from formic acid using azole complexes in water”, *Catalysis Science & Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 34-37, 2014. (DOI: 10.1039/C3CY00830D)
5. Anna Lewandowska-Andralojc (BNL), Dmitry E. Polyansky, Chiu-Hui Wang, Wan-Hui Wang, Yuichiro Himeda, Etsuko Fujita, “Efficient water oxidation with organometallic iridium complexes as precatalysts at neutral pH”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 16, No.24, pp. 11976-11987, 2014. (DOI: 10.1039/C3CP55101F)
6. Wan-Hui Wang (AIST), Shaoan Xu, Yuichi Manaka, Yuki Suna, Hide Kambayashi, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, Yuichiro Himeda, “Formic acid dehydrogenation with bioinspired iridium complexes: A kinetic isotope effect study and mechanistic insight”, *ChemSusChem*, Vol. 7, Issue 7, pp. 1976–1983, 2014. (DOI: 10.1002/cssc.201301414)
7. Yuki Suna (AIST), Wan-Hui Wang, Yuichi Manaka, Yuichiro Himeda, “An environmentally friendly hydrogen supply and storage system based on reversible hydrogenation of carbon dioxide to formic acid”, *GRAND RENEWABLE ENERGY 2014 Proceedings*, P-Hf-7. 2014.
8. Yuki Suna (AIST), Mehmed Z. Ertem, Wan-Hui Wang, Hide Kambayashi, Yuichi Manaka, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, Yuichiro Himeda, “Positional effects of hydroxy groups on catalytic activity of iridium (III) complexes with proton-responsive ligands”, *Organometallics*, Vol. 33, No. 22, pp. 6519–6530, 2014. (DOI: 10.1021/om500832d).
9. Gerald Manbeck (BNL), James Muckerman, David Szalda, Yuichiro Himeda, Etsuko Fujita, “Push or pull? Proton responsive ligand effects in rhenium tricarbonyl CO₂ reduction catalysts”, *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 119, No. 24, pp. 7457-7466, 2015. (DOI: 10.1021/jp511131x)
10. Naoya Onishi (AIST), Shaoan Xu, Yuichi Manaka, Yuki Suna, Wan-Hui Wang, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, Yuichiro Himeda, “CO₂ hydrogenation catalyzed by iridium complexes with proton-responsive ligand”, *Inorganic Chemistry*, Vol. 54, No. 11, pp. 5114–5123, 2015. (DOI: 10.1021/ic502904q)
11. Shaoan Xu(AIST), Naoya Onishi, Akihiro Tsurusaki, Yuichi Manaka, Wan-Hui Wang, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, Yuichiro Himeda, “Efficient Cp*Ir catalysts with imidazoline ligands for CO₂ hydrogenation”, *European Journal of Inorganic Chemistry*, Vol. 34, pp. 5591–5594, 2015. (DOI: 10.1002/ejic.201501030)
12. Mehmed Ertem (BNL), Yuichiro Himeda, Etsuko Fujita, James Muckerman, “Interconversion of formic acid and carbon dioxide by proton-responsive, half-sandwich Cp*Ir(III) complexes: A computational mechanistic investigation”, *ACS Catalysis*, Vol. 6, No. 2, pp. 600-609, 2016. (DOI:10.1021/acscatal.5b01663)
13. Lele Duan (BNL), Gerald F. Manbeck, Marta Kowalczyk, David J. Szalda, James T. Muckerman, Yuichiro Himeda, Etsuko Fujita, “A non-innocent proton-responsive ligand facilitates reductive deprotonation and hinders CO₂ reduction catalysis in [Ru(tpy)(6DHBP)(NCCH₃)]²⁺ (6DHBP = 6,6'-(OH)₂bpy)”, *Inorganic Chemistry*, Vol. 55, No. 9, pp. 4582–4594, 2016. (DOI: 10.1021/acs.inorgchem.6b00398)
14. Katerina Sordakis (EPFL), Akihiro Tsurusaki, Masaya Iguchi, Hajime Kawanami, Yuichiro Himeda, Gábor Laurenczy, “Carbon dioxide to methanol: The aqueous catalytic way at room temperature”, *Chemistry - A European Journal*, Vol. 22, No. 44, pp. 15605–15608, 2016. (DOI: 10.1002/chem.201603407)
15. Akihiro Tsurusaki (AIST), Kazuhisa Murata, Naoya Onishi, Katerina Sordakis, Gábor Laurenczy, Yuichiro Himeda, “Investigation of hydrogenation of formic acid to methanol using H₂ or formic acid as a hydrogen source”, *ACS Catalysis*, Vol. 7, No. 2, pp.1123–1131, 2017. (DOI: 10.1039/C6GC03359H)
16. Lin Wang (AIST), Onishi Naoya, Kazuhisa Murata, Takuji Hirose, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, Yuichiro Himeda, “Efficient hydrogen storage and production using a catalyst with imidazoline-based proton-responsive ligand”, *ChemSusChem*, Vol. 10, No. 6, pp.1071–1075, 2017. (DOI: 10.1002/cssc.201601437)
17. Katerina Sordakis (EPFL), Akihiro Tsurusaki, Masaya Iguchi, Hajime Kawanami, Yuichiro Himeda, Gábor

- Laurency, “Aqueous phase homogeneous formic acid disproportionation into methanol”, *Green Chemistry*, Vol. 19, No. 10. pp. 2371-2378, 2017. (DOI: 10.1039/C6GC03359H)
18. Ryoichi Kanega, Naoya Onishi, David J. Szalda, Mehmed Z. Ertem, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, Yuichiro Himeda, “CO₂ Hydrogenation Catalysts with Deprotonated Picolinamide Ligands”, *ACS Catal.*, 7, pp 6426–6429, 2017. (DOI: 10.1021/acscatal.7b00566)
 19. Yuki Suna, Yuichiro Himeda, Etsuko Fujita, James T. Muckerman, Mehmed Z. Ertem, “Iridium Complexes with Proton-Responsive Azole-Type Ligands as Effective Catalysts for CO₂ Hydrogenation”, *ChemSusChem*, 10(22), pp 4535–4543, 2017. (DOI: 10.1002/cssc.201701676)

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. Wan-Hui Wang, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, Yuichiro Himeda, “Hydroxy-substituted pyridine-like N-heterocycles: Versatile ligands in organometallic catalysis”, *New Journal of Chemistry*, Vol.37, pp.1860-1866, 2013. (DOI: 10.1039/c3nj41146j)
2. Wan-Hui Wang, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, Yuichiro Himeda, “Interconversion of CO₂/H₂ and formic acid under mild conditions in water: Ligand design for effective catalysis”, *Advances in Inorganic Chemistry*, Vol 66: CO₂ Chemistry, 2014, pp. 189-222. (DOI: 10.1016/B978-0-12-420221-4.00006-8)
3. 福住俊一、佐山和弘、姫田雄一郎、「人工光合成」実現にいとむ 実用化のスタートラインに立った夢の技術、ニュートン別冊『社会を一変させる新素材 100 注目のスーパーマテリアル』、2014年2月、78頁～83頁
4. Wan-Hui Wang, Yuichiro Himeda, James T. Muckerman, Gerald F. Manbeck Etsuko Fujita, “CO₂ hydrogenation to formate and methanol as an alternative to photochemical CO₂ reduction”, *Chemical Reviews*, Vol. 115, pp. 12936-12973, 2015. (DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00197)
5. Lin Wang, Ryouichi Kanega, Hajime Kawanami, Yuichiro Himeda, “Development of proton-responsive catalysts”, *The Chemical Record*, 17(11), 1071-1094, 2017

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 3 件、国際会議 29 件)

1. Etsuko Fujita (BNL), Yosra Badiei, Jonathan F. Hull, James T. Muckerman, Wan-Hui Wang, Yuichiro Himeda, “Interconversion of CO₂ and formic acid by bio-inspired complexes with pendent bases”, 245th ACS Meeting, Daniel DuBois symposium, New Orleans, Louisiana, USA, 2013.4.7.
2. Yuichiro Himeda (AIST), Wan-Hui Wang, Yuki Suna, Jonathan F. Hull, Yosra Badiei, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, “Catalyst design for interconversion of CO₂ and formic acid on the basis of proton-responsive ligand”, The International Conference on Carbon Dioxide Utilization, Alexandria, USA, 2013.6.24.
3. Etsuko Fujita (BNL), “Alternatives to direct photochemical CO₂ reduction: CO₂ Hydrogenation by complexes with a proton responsive ligand containing pendent bases”, Gordon Research Conference on Organometallic Chemistry, Newport, Rhode Island, USA, 2013.7.11.
4. Etsuko Fujita (BNL), Yosra Badiei, Wei-Fu Chen, Anna Lewandowska-Andralojc, James T. Muckerman, Dmitry E. Polyansky, Kotaro Sasaki, Wan-Hui Wang, Yuichiro Himeda, “From CO₂ hydrogenation by solar produced H₂ to photochemical water oxidation”, 246th ACS Meeting, Physical Chemistry symposium, Indianapolis, Indiana, USA, 2013.9.11.
5. Etsuko Fujita (BNL), “Alternatives to direct photochemical CO₂ reduction: CO₂ Hydrogenation by complexes with a proton responsive ligand containing pendent bases”, International Institute for Carbon Neutral Energy Center (I²CNER) Symposium: Catalytic Concepts for Energy, University of Illinois, Urbana, Illinois, USA, 2013.9.13.
6. Etsuko Fujita (BNL), “Artificial photosynthesis for fuel generation and water oxidation”, 2013-2014 MSE Colloquium Series, Boston University, Boston, Massachusetts, USA, 2013.9.20.
7. Etsuko Fujita (BNL), “From CO₂ hydrogenation by solar-produced H₂ to photochemical water oxidation”, Seminar, Arizona State University, Tempe, Arizona, USA, 2013.10.9
8. Etsuko Fujita (BNL), “Artificial photosynthesis for fuel generation and water oxidation”, The Second Symposium on Solar Energy Conversion by Artificial Photosynthesis, Ritsumeikan University, Kyoto, Japan, 2013.10.26.
9. Etsuko Fujita (BNL), “CO₂ hydrogenation vs. photo- and electrochemical CO₂ reduction”, Gordon Research Conference on Renewable Energy: Solar Fuels, Ventura, California, USA, 2014.1.22.
10. Yuichiro Himeda (AIST), “Catalyst design for interconversion of CO₂ and formic acid on the basis of proton-responsive ligand”, I²CNER & ACT-C Joint Symposium 2014, Fukuoka, Japan, 2014.1.30.
11. Etsuko Fujita (BNL), Wei-Fu Chen, James T. Muckerman, Kotaro Sasaki, Wan-Hui Wang, Yuichiro Himeda, “Alternatives to direct photochemical CO₂ reduction: CO₂ hydrogenation by bioinspired complexes and

- biomass-derived H₂ evolution catalysts”, Fusion Conference on Molecules and Materials for Artificial Photosynthesis Conference, Cancun, Mexico, 2014.2.6.
12. Etsuko Fujita (BNL), Yasuo Matsubara, Gerald F. Manbeck, David C. Grills, Dmitry E. Polyansky, James T. Muckerman, Wan-Hui Wang, Yuichiro Himeda, “Carbon dioxide reduction with bio-inspired catalysts: Electrochemical CO₂ reduction vs CO₂ hydrogenation”, 247th ACS National Meeting, Dallas, Texas, USA, 2014.3.16.
 13. Etsuko Fujita (BNL), James T. Muckerman, David C. Grills, R. Morris Bullock, Yuichiro Himeda, “Mechanistic insight into carbon-to-os hydrogen atom transfer and CO₂ hydrogenation using bio-inspired proton-responsive iridium complexes”, 2nd International Conference on Proton-Coupled Electron Transfer, Uppsala, Sweden, 2014.6. 15.
 14. Etsuko Fujita (BNL), James T. Muckemrman, Yuichiro Himeda, “Theoretical and experimental approaches meet in solar fuel generation”, The 248th ACS National Meeting, San Francisco, USA, 2014.8.11.
 15. Etsuko Fujita (BNL), James T. Muckemrman, Yuichiro Himeda, “Artificial photosynthesis for generation of fuels”, 4th International Symposium on Solar Fuels and Solar Cells, Daliang, China, 2014.10.21.
 16. Etsuko Fujita (BNL), James T. Muckerman, Kotaro Sasaki, Yuichiro Himeda, “From photochemical CO₂ reduction to CO₂ hydrogenation by solar-produced CO₂”, 2014 International Conference on Artificial Photosynthesis, Awajishima, Japan, 2014.11.26.
 17. 姫田雄一郎 (AIST)、「CO₂/ギ酸の相互変換触媒の開発」、日本表面科学会触媒表面科学研究部会、筑波大学、2014.3.13.
 18. 姫田雄一郎 (AIST)、「二酸化炭素/ギ酸の相互変換を利用した水素貯蔵」、日本化学会第 95 春季年会、船橋、2015. 3. 26.
 19. Etsuko Fujita (BNL), James T. Muckerman, Yuichiro Himeda, “Ir–H species as key intermediates in CO₂ hydrogenation, formic acid dehydrogenation and photochemical CO₂ reduction”, 249th ACS National Meeting, Denver, USA, 2015.3.
 20. Etsuko Fujita (BNL), James T. Muckerman, Kotaro Sasaki, Yuichiro Himeda, “Artificial photosynthesis for generation of fuels using molecular catalysts and metal carbide-nitride composites”, The 1st International Solar Fuels conference (ISF-1), Uppsala, Sweden, 2015.4.26.
 21. James T. Muckerman (BNL), Mehmed Z. Ertem, Yuichiro Himeda, Etsuko Fujita, “Bioinspired structural motifs for multi-functional behavior in the design of molecular catalysts for CO₂/H₂ interconversion with formic acid”, Symposium on “Biological Inspiration for Sustainability” The 250th National ACS meeting in Boston, USA, 2015.8.15.
 22. Etsuko Fujita (BNL), Gerald F. Manbeck, Lele Duan, Komal Garg, Yasuo Matsubara, “Reduction of CO₂ using photo-induced electrons and metal complexes bearing bases in the second coordination sphere and the alternative hydrogenation and hydride transfer reactions”, Pacificchem 2015, Honolulu, USA, 2015.12.15.
 23. Yuichiro Himeda (AIST), Hajime Kawanami, James Muckerman, Etsuko Fujita, “Hydrogen production by dehydrogenation of formic acid using homogeneous iridium catalysts”, Pacificchem 2015, Honolulu, USA, 2015.12.15.
 24. Etsuko Fujita (BNL), James T. Muckerman, Kotaro Sasaki, Yuichiro Himeda, “Artificial photosynthesis for generation of fuels using molecular catalysts and metal carbide-nitride composites”, KAUST Research Conference: Catalysis for Artificial Photosynthesis, Thuwal, Saudi Arabia, 2016.2.1.
 25. Etsuko Fujita (BNL), Gerald F. Manbeck, Lele Duan, Komal Garg, Yasuo Matsubara, James T. Muckerman, Yuichiro Himeda, “Reduction of CO₂ using metal complexes: second coordination sphere effects and hydride transfer reactions”, 2nd Molecules and Materials for Artificial Photosynthesis Conference, Cancun, Mexico, 2016.2.25.
 26. Etsuko Fujita (BNL), James T. Muckerman, Yuichiro Himeda, “CO₂ hydrogenation and formic acid dehydrogenation by half-sandwich Cp*Ir complexes with proton-responsive ligands in water”, 2nd Small Molecule Activation Conference, Cancun, Mexico, 2016.5.20.
 27. Yuichiro Himeda (AIST), James T. Muckerman, Etsuko Fujita, “Mechanistic investigation of interconversion of formic acid and carbon dioxide by iridium complexes with proton-responsive ligands in water”, European Colloquium on Inorganic Reaction Mechanisms, Krakow, Poland, 2016.6.23.
 28. Etsuko Fujita (BNL), Lele Duan, Gerald F. Manbeck, Marta Kowalczyk, David J. Szalda, James T. Muckerman, Yuichiro Himeda, “Do bases in the second coordination sphere aid CO₂ reduction?”, 252nd ACS Meeting, Philadelphia, USA, 2016.8.26.
 29. 姫田雄一郎(AIST)、「水素貯蔵を指向した CO₂ 水素化触媒の開発」、第 10 回 技術開発フォーラム: COP21 –パリ協定と CO₂ 削減の取り組みを考える–、東京、2016.11.11.
 30. Etsuko Fujita (BNL), Javier J. Concepcion, Mehmed Z. Ertem, David C. Grills, Gerald F. Manbeck, James T. Muckerman, Dmitry E. Polyansky, Kotaro Sasaki, Yuichiro Himeda, “Artificial photosynthesis for

photogeneration of fuels”, ICARP2017, Kyoto, Japan, 2017.3.2.

31. Etsuko Fujita, James Muckerman, and Yuichiro Himeda, “Reversible interconversion of CO₂/H₂ and formic acid using Cp*Ir(III) complexes with proton responsive ligands”, 253rd ACS Meeting, San Francisco, USA, 2017.4.2.
32. Etsuko Fujita, Gerald F. Manbeck, James T. Muckerman, Kotaro Sasaki, Yuichiro Himeda, “Hydrogen Production and Storage”, The 17th IUPAC International Symposium on Macromolecular Complexes (MMC-17), 早稲田, 2017.8.28.

② 口頭発表 (国内会議 9 件、国際会議 9 件)

1. 王万輝 (AIST)、姫田雄一郎、Jonathan F. Hull、James T. Muckerman、藤田恵津子、「イリジウム触媒を用いた HCOOH/D₂O 中の高効率・高選択的な D₂ 生成と重水素移動反応」、日本化学会第93春季年会、滋賀県草津市、2013.3.23.
2. Etsuko Fujita (BNL), James T. Muckerman, Yosra M. Badieli, David J. Szalda, Jonathan F. Hull, Wan-Hui Wang, Yuichiro Himeda, “Mechanistic insight into effective hydrogenation of CO₂ by complexes with a proton-responsive ligand containing pendent bases”, ISACS12 Challenges in Chemical Renewable Energy, Cambridge, UK, 2013.9.4.
3. 王万輝 (AIST)、姫田雄一郎、James T. Muckerman、藤田恵津子、「Controlling factors in highly efficient hydrogenation of CO₂ using bio-inspired Ir complexes in water」、錯体化学会第 63 回討論会、沖縄県那覇市、2013.11.3.
4. 姫田雄一郎 (AIST)、王万輝、砂有紀、眞中雄一、James T. Muckerman、藤田恵津子、「多置換シクロペンタジエニル-ロジウム錯体の合成と触媒への応用」、錯体化学会第 63 回討論会、沖縄県那覇市、2013.11.2.
5. Yuichiro Himeda(AIST), Wan-Hui Wang, Yuki Suna, Yuichi Manaka, Shaoan Xu, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, “Catalyst design for interconversion of CO₂ and formic acid on the basis of proton-responsive ligand with pendent base”, The 41st International Conference on Coordination Chemistry, Singapore, 2014.7.22.
6. 姫田雄一郎(AIST)、砂有紀、徐紹安、尾西尚弥、眞中雄一、川波肇、「均一系イリジウム触媒を用いた二酸化炭素とギ酸の相互変換反応による水素貯蔵・製造」、第 44 回石油・石油化学討論会、旭川、2014.10.17.
7. Wan-Hui Wang (AIST), Ming Bao, Yuichiro Himeda, “Efficient H₂ storage using CO₂ and bio-inspired Ir complexes in water”, The 9th international Conference on Cutting-Edge Organic Chemistry in Asia, Malaysia, 2014.12.2.
8. 尾西尚弥(AIST)、姫田雄一郎、「アゾール誘導体を配位子とするイリジウム触媒を用いた二酸化炭素の水素化反応」、日本化学会第 95 春季年会、船橋、2015.3.26.
9. 徐紹安(AIST)、姫田雄一郎、「Bio-inspired Ir complexes for highly efficient hydrogen generation from dehydrogenation of formic acid in water」、日本化学会第 95 春季年会、船橋、2015.3.26.
10. Yuichiro Himeda (AIST), Shaoan Xu, Yuki Suna, Yuichi Manaka, Naoya Onishi, James T. Muckerman, Etsuko Fujita, “CO₂ hydrogenation to formic acid for hydrogen Storage using bio-inspired iridium catalysts with proton-responsive ligands”, 13th International Conference on Carbon Dioxide Utilization(ICCUDU XIII), Singapore, Singapore, 2015.7.5.
11. Naoya Onishi (AIST), Shaoan Xu, Yuichi Manaka, Yuichiro Himeda, “Ir catalyst coordinated by azole derivative for CO₂ hydrogenation to formate”, Asian Conference on Coordination Chemistry (ACCC5), Hong Kong, China, 2015.7.12.
12. Yuichiro Himeda (AIST), Shaoan Xu, Akihiro Tsurusaki, Yuki Suna, Onishi Naoya, Yuichi Manaka, Hajime Kawanami, “High-pressure hydrogen production by dehydrogenation of formic acid”, The 4th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology (JCREN) 2015, Matsuyama, Japan, 2015.12.5.
13. Naoya Onishi (AIST), Shaoan Xu, Yuichi Manaka, Yuichiro Himeda, “Effective catalytic cycle of CO₂ hydrogenation/formic acid dehydrogenation: Enhanced by azole ligand”, Pacificchem 2015, Honolulu, USA, 2015.12.15.
14. Mehmed Ertem (BNL), Wan-Hui Wang, Yuichiro Himeda, Etsuko Fujita, James Muckerman, “Mechanistic investigation of highly robust hydrogen generation by new bioinspired Ir complexes for dehydrogenation of formic acid in water”, Pacificchem 2015, Honolulu, USA, 2015.12.15.
15. 尾西尚弥(AIST)、藤田恵津子、James Muckerman、姫田雄一郎、砂有紀、津留崎陽大、「イミダゾリンを配位子として有するイリジウム触媒によるギ酸と CO₂/H₂ の相互変換反応」、日本化学会第 96 春季年会 2016、京都、2016.3.24.
16. Yuichiro Himeda (AIST), Lin Wang, Naoya Onishi, James Muckerman, Etsuko Fujita, “Hydrogenation of

CO₂ using iridium catalysts with an imidazoline-based proton-responsive ligand in water”, International Symposium Green Chemistry 2017, La Rochelle, France, 2017.5.19.

17. 兼賀量一、尾西尚弥、王林、姫田雄一郎、「水溶性 Ir 触媒を用いた二酸化炭素の電解還元によるギ酸塩合成」、第 120 回触媒討論会、愛媛、2017.9.12.
18. Ryoichi Kanega, Naoya Onishi, Mehmed Ertem, David Szalda, James Muckerman, Etsuko Fujita, Yuichiro Himeda, “Water soluble Cp*Ir Complexes for Catalytic Hydrogenation of CO₂ to Formate”, 錯体化学会 第 67 回討論会, 札幌, 2017.9.16

③ ポスター発表 (国内会議 7 件、国際会議 5 件)

1. 王万輝(AIST)、徐紹安、眞中雄一、砂有紀、James T. Muckerman、藤田恵津子、姫田雄一郎、”Highly efficient formic acid dehydrogenation using bio-inspired Ir complexes: A deuterium kinetic isotope effect study and mechanistic insight”, I²CNER & ACT-C Joint Workshop 2014、福岡、2014.1.31.
2. Shaoan Xu (AIST), Yuki Suna, Naoya Onishi, Yuichi Manaka, Yuichiro Himeda, “Hydrogen storage technology using CO₂: Development of homogenous catalyst for CO₂ hydrogenation and dehydrogenation of formic acid”, CO₂ forum, Lyon, France, 2014.9.25.
3. Shaoan Xu (AIST), Wan-Hui Wang, Yuichi Manaka, Yuki Suna, Hide Kambayashi, Etsuko Fujita, Yuichiro Himeda, “Bioinspired iridium complexes-catalyzed formic acid dehydrogenation: A kinetic isotope effect study and mechanistic insight”, 4th International Symposium on Solar Fuels and Solar Cells, Dalian, China, 2014.10.
4. 尾西尚弥(AIST)、姫田雄一郎、「イリジウム触媒による高効率水素貯蔵・発生システムの開発」、日本化学会第 95 春季年会、船橋、日本、2015.3.26.
5. 尾西尚弥(AIST)、徐紹安、眞中雄一、姫田雄一郎、「アゾール配位子を有するイリジウム触媒を用いた水素貯蔵サイクル」、錯体化学会第 65 回討論会、奈良、2015.9.21.
6. 尾西尚弥(AIST)、藤田恵津子、James T. Muckerman、姫田雄一郎、砂有紀、津留崎陽大、「ギ酸の脱水素化による水素の大量製造」、日本化学会第 96 春季年会 2016、京都、2016.3.26.
7. 尾西尚弥(AIST)、姫田雄一郎、「均一系触媒を用いたギ酸分解による水素の大量発生」、第 5 回 JACI/GSC シンポジウム、神戸、2016.6.2.
8. Naoya Onishi (AIST), Yuichiro Himeda, “Development of robust Ir catalyst for the dehydrogenation of formic acid in large scale”, 20th International Symposium on Homogeneous Catalysis, Kyoto, 2016.7.10.
9. Wan-Hui Wang, Yuichiro Himeda, Ming Bao, “Reversible hydrogen storage based on a CO₂/HCO₂H system using bio-inspired Ir complexes”, OM&Cat-2016, Seoul, 2016.8.28.
10. 尾西尚弥(AIST)、姫田雄一郎、「ギ酸分解反応に高耐久性を示すイリジウム触媒の開発」、第 63 回有機金属化学討論会、早稲田、2016.9.14.
11. 尾西尚弥 (AIST)、藤田恵津子、James Muckerman、姫田雄一郎、「Development of iridium catalyst for formic acid dehydrogenation to H₂ evolution」、日本化学会第 99 春季年会、日吉、2017.3.16.
12. Ryoichi Kanega, Naoya Onishi, Yuichiro Himeda, 「アミド配位子を有する Ir 触媒による CO₂ とギ酸の相互変換」、日本化学会第 98 回春季年会 2018、船橋、2018. 3. 20.

(4) 知財出願

① 国内出願 (1 件)

1. ≪二酸化炭素の水素化に用いる触媒、ギ酸製造方法、水素の貯蔵方法、姫田 雄一郎・尾西尚弥・兼賀 量一・村田 和久、産業技術総合研究所、H29.05.26、特願 2017-104867≫

② 海外出願 (1 件)

1. ≪水中での均一系触媒を用いた二酸化炭素と水素からのメタノール合成法、姫田雄一郎・川波肇・津留崎陽大・井口昌幸・Gábor Laurenczy・Katerina Sordakis、国立研究開発法人産業技術総合研究所・Ecole Polytechnique Federale de Lausanne(スイス連邦工科大学ローザンヌ校)、H27.12.1、PCT/IB2015/059242、WIPO・日本≫

③ その他の知的財産権

(他に記載すべき知的財産権があれば記入してください。(実用新案 意匠 プログラム著作権 等))
該当なし

(5)受賞・報道等

①受賞

1. 尾西尚弥、日本化学会第96春季年会(2016)優秀講演賞(産業)、2016年4月
2. 尾西尚弥、第5回JACI/GSCシンポジウム GSCポスター賞、2016年6月

②マスコミ(新聞・TV等)報道(プレス発表をした場合にはその概要も記入してください。)

該当なし

③その他

該当なし

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

② 社会還元的な展開活動

該当なし

§ 7. 研究期間中の活動

(2) 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 24 年 10 月 30 日	高校生への特別講座 (非公開)	産業技術総合研究所	10 人	大阪市立東高等学校(スーパーサイエンスハイスクール指定校)の理数科生徒に対する研究内容の説明
平成 25 年 1 月 28 日～31 日	チーム内ミーティング (非公開)	ブルックヘブン国立研究所(米国)	5 人	H25 年度共同研究を開始予定の米国ブルックヘブン国立研究所藤田博士、Muckerman 博士と研究計画作成のためのミーティング
平成 25 年 6 月 20 日	チーム内ミーティング (非公開)	ブルックヘブン国立研究所(米国)	10 人	研究進捗報告のためのミーティング
平成 26 年 2 月 17 日	チーム内ミーティング (非公開)	産業技術総合研究所	5 人	研究進捗報告のためのミーティング
平成 26 年 5 月 9,12,13 日	講演会(公開)およびチーム内ミーティング(非公開)	産業技術総合研究所	20 名(5 名)	CO ₂ 還元に関する講演会および研究進捗報告のためのミーティング
平成 26 年 7 月 3 日	チーム内ミーティング (非公開)	ブルックヘブン国立研究所(米国)	5 名	研究進捗報告のためのミーティング
平成 26 年 11 月 24 日	チーム内ミーティング (非公開)	産業技術総合研究所	5 名	研究進捗報告のためのミーティング
平成 27 年 9 月 11, 14, 15 日	チーム内ミーティング (非公開)	産業技術総合研究所	5 名	BNL 藤田博士とつくば、福島、郡山で研究進捗報告のためのミーティング
平成 28 年 3 月 4, 7 日	チーム内ミーティング (非公開)	産業技術総合研究所	5 名	BNL 藤田博士とつくばで研究進捗報告のためのミーティング
平成 28 年 7 月 8～15 日	チーム内ミーティング (非公開)、ISHC 参加	産業技術総合研究所	5 名	EPFL の Laurency 教授と産総研東北センターで研究進捗報告のためのミーティング、京都での学会に参加
平成 28 年 8 月 10, 12 日	チーム内ミーティング (非公開)	産業技術総合研究所	5 名	大連理工大学 Wang 副教授と産総研つくばセンターで研究進捗報告のためのミーティング
平成 29 年 1 月 13, 16 日	チーム内ミーティング (非公開)	産業技術総合研究所	5 名	BNL 藤田博士とつくばで研究進捗報告のためのミーティング
平成 29 年 10 月 4-6 日	チーム内ミーティング (非公開)	産業技術総合研究所	5 名	BNL 藤田博士とつくばで研究進捗報告のためのミーティング