

戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)
日本－EU 国際共同研究
終了報告書 概要

1. **研究課題名**：「革新的水素化技術を基盤にした二酸化炭素と再生可能水素からのグリーンメタノール合成」
2. **研究期間**：令和3年5月 ～ 令和7年 3月
3. **主な参加研究者名**：

日本側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	多湖 輝興	教授	東京科学大学	・研究総括 ・触媒調製 (WP1) ・触媒性能評価 (WP5)
主たる共同研究者	横井 俊之	教授	東京科学大学	・触媒調製 (WP1) ・触媒性能評価 (WP5) ・触媒構造解析 (WP6)
主たる共同研究者	脇原 徹	教授	東京大学	・触媒調製 (WP1)
研究参加者	藤墳 大裕	助教	京都大学	
研究参加者	木村 健太郎	助教	東京科学大学	
研究参加者	保田 修平	助教	富山大学	
研究参加者	Raquel Simancas Coloma	助教	東京大学	
研究期間中の全参加研究者数			47名	

相手側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Fernando Rey García	Director, Professor	Instituto de Tecnología Química	コンソーシアム研究代表者 触媒調製 (WP1)、触媒性能評価 (WP4) 触媒構造解析 (WP6)
主たる共同研究者	Adolfo Benedito	General Assembly Chair	Asociación de Investigación de Materiales Plásticos y Conexas	プロジェクトコーディネーター (WP9)、触媒調製 (WP1)、触媒性能評価 (WP2, WP5)
主たる共同研究者	Pascual Oña-Burgos	Principal Investigator	Universidad de Almería	触媒設計・合成 構造解析

主たる共同研究者	Christopher Hardacre	Professor	University of Manchester	触媒性能評価 (WP3) 触媒構造解析 (WP6)
主たる共同研究者	Andrew M. Beale	Professor	University College of London	触媒構造解析 (WP6)
主たる共同研究者	Rudolf Emmerich	Principal Investigator	Institute for Chemical Technology (Fraunhofer)	触媒性能評価 (WP2)
主たる共同研究者	Raf Roelant	Experienced Researcher	Process Design Center	触媒プロセス設計、安全性評価 (WP7)
主たる共同研究者	Cécile Fouquet	Founding Partner, Director	ALIENOR SRL	知財管理 (WP8)
研究期間中の全参加研究者数			8名	

4. 国際共同研究の概要

本研究の目標は、「二酸化炭素と再生可能水素から代替再生可能燃料となるメタノールを高効率で合成するための革新的な水素化触媒プロセスの開発」である。その実現に向けて、欧州と日本の共同により、「プラズマ・磁気誘導・マイクロ波誘導による非熱反応促進に寄与する触媒材料に求められる諸要件の明確化」、および「反応促進を可能とする触媒材料の開発」を遂行した。具体的には、非熱反応促進に寄与すると期待される触媒の各種パラメーター、すなわち担体構造（ミクロ・メソ・マクロ細孔構造、元素配置、内包構造）、組成（触媒金属組成、担体構成元素組成）、物性（親疎水性、分光学的特性、磁気特性、熱安定性）に関する検討を行った。

欧州側は主に反応装置の設計・開発を、日本側は触媒材料の設計を担当した。特に、日本側で実施した熱触媒反応の結果を、欧州側より得られる非熱触媒反応の結果と比較・分析することで、非熱反応促進に有効な触媒材料の設計要素や考慮すべき構造・組成・物性を明確化し、革新的な水素化触媒の開発へとつながる知見を得るに至った。さらに、日本側の熱触媒反応と欧州側の非熱触媒反応の比較検討を経て、異なる機構・駆動原理に関する理解を深めることができた。欧州側研究者と連携したことで、反応制御技術に関する最先端の技術とノウハウを蓄積することが可能となり、その意義は我が国の触媒化学および材料化学において極めて大きいものとなった。

5. 国際共同研究の成果

5-1 国際共同研究の学術成果および実施内容

本課題では、二酸化炭素の水素化によるメタノール合成において、従来の熱に加え、新たにプラズマ・磁気・マイクロ波を駆動源とした革新的な触媒プロセスの開発に日本と欧州で、共同で取り組んだ。日本側では各駆動源に対して最適な触媒開発を、担体構造と活性金属種の両方の観点から実施した。欧州側で新しい駆動源による二酸化炭素水素化反応プロセスの開発に、リアクターデザインも含め、化学工学的観点より取り組んだ。加えて、欧州側では各駆動源に対する経済性・LCA評価も実施した。

5-2 国際共同研究による相乗効果

日本とEUの国際共同研究「二酸化炭素と再生可能水素から代替再生可能燃料となるメタノールを高効率で合成するための革新的な水素化触媒プロセスの開発」に関して、触媒調製の専門家である日本側研究者が、マイクロ波やプラズマなどを用いた外場誘導型物質変換プロセスの開発を専門とするEU側研究者と連携したことで、反応制御技術に関する最先端の技術とノウハウを蓄積することが可能となり、その意義は我が国の触媒化学および材料化学において極めて大きいものとなった。

5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

本研究は、日本とEUの研究者が連携し、CO₂と再生可能水素からメタノールを高効率で合成する革新的プロセスの開発を目指したものである。研究期間中にはセミナーや若手研究者の交流も実施され、学術的・人的連携が強化された。化学、エネルギー、鉄鋼など多くの産業界から高い関心が寄せられており、今後はスケールアップ、産学官連携の強化、継続的な国際ネットワークの構築が期待される。プロジェクト終了後も協力を継続し、新たな国際研究や社会実装に向けた取り組みが期待されている。

Strategic International Collaborative Research Program (SICORP)
Japan – EU Joint Research Program
Executive Summary of Final Report

1. **Project title** : Selective CO₂ conversion in renewable methanol through innovative heterogeneous catalyst systems optimized for advanced hydrogenation technologies
2. **Research period** : May 2021 to March 2025
3. **Main participants** :

Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Teruoki Tago	Professor	Science Tokyo	Research Overview Catalyst Preparation (WP1) Catalyst Performance Evaluation (WP5)
Co-PI	Toshiyuki Yokoi	Professor	Science Tokyo	Catalyst Preparation (WP1) Catalyst Performance Evaluation (WP5) Catalyst Structure Analysis (WP6)
Co-PI	Toru Wakihara	Professor	The University of Tokyo	• Catalyst preparation (WP1)
Collaborator	Hiroyasu Fujitsuka	Assistant Professor	Kyoto University	
Collaborator	Kentaro Kimura	Assistant Professor	Science Tokyo	
Collaborator	Shuhei Yasuda	Assistant Professor	University of Toyama	
Collaborator	Raquel Simancas Coloma	Assistant Professor	The University of Tokyo	
Total number of participants throughout the research period : 47				

Partner-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Fernando Rey García	Director, Professor	Instituto de Tecnología	Consortium Research

			Química	Representative Catalyst preparation (WP1), catalyst performance evaluation (WP4), catalyst structure analysis (WP6)
Co-PI	Adolfo Benedito	General Assembly Chair	Asociación de Investigación de Materiales Plásticos y Conexas.	Project Coordinator (WP9), Catalyst Preparation (WP1), Catalyst Performance Evaluation (WP2, WP5)
Co-PI	Pascual Oña-Burgos	Principal Investigator	Universidad de Almería	Catalyst design/synthesis structural analysis
Co-PI	Cristopher Hardacre	Professor	University of Manchester	Catalyst performance evaluation (WP3) Catalyst structure analysis (WP6)
Co-PI	Andrew M. Beale	Professor	University College London	Catalyst structure analysis (WP6)
Co-PI	Rudolf Emmerich	Principal Investigator	Institute for Chemical Technology (Fraunhofer)	Catalyst performance evaluation (WP2)
Co-PI	Raf Roelant	Experienced Researcher	Process Design Center	Catalytic process design and safety assessment (WP7)
Co-PI	Cécile Fouquet	Founding Partner, Director	ALIENOR SRL	Intellectual Property Management (WP8)
Total number of participants throughout the research period: 8				

4. Summary of international joint research

The goal of this research was to develop an innovative hydrogenation catalyst process for the highly efficient synthesis of methanol, a promising alternative renewable fuel, from carbon dioxide and renewable hydrogen. To achieve this goal, a collaborative effort between Europe and Japan was conducted to: (1) clarify the requirements for catalyst materials that contribute to non-thermal reaction enhancement, such as those induced by plasma, magnetic fields, and microwaves; and (2) develop catalyst materials capable of enabling such reaction enhancement. Specifically, various parameters of catalysts expected to contribute to non-thermal reaction enhancement were investigated. These parameters included: support structure (micro-, meso-, and macro-porous structures, elemental

distribution, and encapsulation structure), composition (catalyst metal composition and support constituent elements), and physical properties (hydrophilicity/hydrophobicity, spectroscopic characteristics, magnetic properties, and thermal stability).

The European team was mainly responsible for designing and developing the reactors, while the Japanese team focused on catalyst material design. In particular, by comparing the results of thermal catalytic reactions conducted in Japan with the non-thermal catalytic reactions performed in Europe, we were able to identify key structural, compositional, and physicochemical design elements that are effective for promoting non-thermal reactions. These insights significantly contributed to the development of advanced hydrogenation catalysts. Furthermore, this comparative study deepened our understanding of the different reaction mechanisms and driving principles between thermal and non-thermal systems. Through close collaboration with European researchers, the Japanese team was able to acquire state-of-the-art techniques and expertise in reaction control, which holds substantial significance for the advancement of catalysis and materials chemistry in Japan.

5. Outcomes of international joint research

5-1 Scientific outputs and implemented activities of joint research

In this project, Japan and Europe jointly worked on the development of an innovative catalytic process for methanol synthesis via CO₂ hydrogenation, utilizing not only conventional thermal energy but also new energy sources such as plasma, magnetic fields, and microwaves. On the Japanese side, catalyst development was conducted to optimize performance for each energy source, focusing on both support structure and active metal species. On the European side, the development of CO₂ hydrogenation processes using these novel energy sources was pursued from a chemical engineering perspective, including reactor design. Additionally, the European team conducted economic and life cycle assessments (LCA) for each energy source.

5-2 Synergistic effects of joint research

By collaborating with EU researchers who specialize in the development of external-field-induced CO₂ transformation processes using novel powers including magnetic, microwaves and plasma, the Japanese researchers who are experts in catalyst preparation were able to accumulate cutting-edge technologies and know-how in reaction control. This collaboration has had a significant impact on the fields of catalytic chemistry and materials chemistry in both Japan and EU.

5-3 Scientific, industrial or societal impacts/effects of outputs

This study aimed to develop an innovative process for the efficient synthesis of methanol from CO₂ and renewable hydrogen through collaboration between Japanese and EU researchers. During the project period, seminars and exchanges among young researchers were conducted, strengthening both academic and human resource networks. The project attracted strong interest from various industries, including chemical, energy, and steel sectors. Moving forward, further developments are expected in process scale-up, enhanced collaboration among academia, industry, and government, and the continued establishment of international research networks. Even after the project's conclusion, continuing cooperation is expected, along with new international research initiatives and efforts toward real-world applications.

国際共同研究における主要な研究成果リスト

1. 論文発表等

* 原著論文（相手側研究チームとの共著論文）

・ 査読有り：
該当なし

・ 査読無し：
該当なし

* 原著論文（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの論文）：発表件数：計 4 件

・ 査読有り：発表件数：計 4 件

1. Ryokuto Kanomata, Koki Awano, Hiroyasu Fujitsuka, Kentaro Kimura, Shuhei Yasuda, Raquel Simancas, Samya Bekhti, Toru Wakihara, Toshiyuki Yokoi, Teruoki Tago, "Development of Silicalite-1 encapsulated Cu-ZnO catalysts for methanol synthesis by CO₂ hydrogenation", *Chemical Engineering Journal*, **2024**, 485, 149896 DOI: 10.1016/j.cej.2024.149896

2. Willie Yang, Shuhei Yasuda, Sridharan Balu, Yong Wang, Junko N Kondo, Thomas C-K Yang, Toshiyuki Yokoi, "A mechanistic study on the CO₂ activation over Pd-containing MCM-22 zeolite based on DRIFT analysis: Impact of counter cations in the zeolite framework", *Chemical Engineering Journal*, **2023**, 471, 144762 DOI: 10.1016/j.cej.2023.144762

3. Hidekazu Goto, Ryosuke Abiru, Kentaro Kimura, Hiroyasu Fujitsuka, Teruoki Tago, "Adsorption and desorption properties of toluene on an Ni-encapsulated Beta zeolite catalyst" *Catalysis Today*, **2024**, 427(1), 114408 DOI: 10.1016/j.cattod.2023.114408

4. Masaki ENDOH, Nodoka NAKATANI, Ye JIANAN, Hiroyasu FUJITSUKA, Kentaro KIMURA, and Teruoki TAGO, "Synthesis of MFI Zeolite-encapsulated Metal Nanoparticles by the Dry-gel Conversion Method and Ethane Dehydroaromatization for the Production of Valuable Chemicals" *Journal of the Japan Petroleum Institute*, **2024**, 67(5), 158-166 DOI: 10.1627/jpi.67.158

・ 査読無し：
該当なし

* その他の著作物（相手側研究チームとの共著総説、書籍など）：

該当なし

* その他の著作物（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの総説、書籍など）：発表件数：1 件

多湖輝興, 木村健太郎, 藤埴大裕 "ゼオライト内包 Cu 系触媒によるグリーンメタノール合成", ペトロテック, **2025**, 48(1), 20-25

2. 学会発表

* 口頭発表（相手側研究チームとの連名発表）

発表件数：計 3 件（うち招待講演：0 件）

1. S. Xu, R. Simancas, T. Wakihara, X. Fan, C. Hardacre. Zeolite-supported metal catalysts for CO₂ conversion. 20th International Zeolite Conference, **2022**.

2. Piya Goswami, Raquel Simancas, Shanshan Xu, Toru Wakihara, Xiaolei Fan, Christopher Hardacre, Rosa Cuellar-Franca. Life cycle assessment driven design of a non-thermal plasma reactor for CO₂ utilisation. SDEWES2024, **2024**.

＊口頭発表（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表）

発表件数：計 10 件（うち招待講演：1 件）

1. R. Simancas, R. Kanomata, S. Yasuda, H. Fujitsuka, T. Tago, T. Yokoi, T. Okubo, T. Wakihara. Encapsulation of Cu nanoparticles in ZSM-5 zeolite by fast hydrothermal synthesis. 20th International Zeolite Conference, 2022. Valencia (Spain)
2. R. Simancas, R. Kanomata, S. Yasuda, S. Yamaguchi, H. Fujitsuka, K. Kimura, T. Tago, T. Yokoi, T. Okubo, T. Wakihara. Preparation of encapsulated Cu nanoparticles in ZSM-5 zeolite by fast hydrothermal synthesis. 第 38 回ゼオライト研究発表会
3. 鹿又 緑斗, 栗野 興紀, 藤埴 大裕, 木村 健太郎, Simancas Raquel, 横井 俊之, 脇原 徹, 保田 修平, 松本 剛, 多湖 輝興「Cu シリケート前駆体としたゼオライト内包 Cu 系微粒子触媒の開発と二酸化炭素の水素化によるメタノール合成」化学工学会第 54 回秋季大会, 福岡大学, Q109, 2023 年 9 月 11 日.
4. 堀池 徳馬, Willie Yang, 保田 修平, Simancas Raquel, 脇原 徹, 藤埴 大裕, 木村 健太郎, 多湖 輝興, 野村 淳子, 横井 俊之「Cu-Zn 系触媒による二酸化炭素水素化反応における触媒担体の影響」第 132 回触媒討論会, 北海道大学, 2I19, 2023 年 9 月 14 日.
5. 堀池 徳馬, Willie Yang, 保田 修平, Simancas Raquel, 脇原 徹, 藤埴 大裕, 木村 健太郎, 多湖 輝興, 野村 淳子, 横井 俊之「Cu-Zn 系触媒の合成条件検討と二酸化炭素水素化反応評価」第 53 回石油・石油化学討論会, 大阪科学技術センター, 1B07, 2023 年 10 月 26 日
6. Teruoki Tago "Zeolite-encapsulated metal nanoparticles for catalyst" ISPM2023, 東京工業大学, 2023 年 11 月 24 日.
7. 栗野 興紀, 鹿又 緑斗, G. Buyandelger, 木村 健太郎, 藤埴 大裕, R. Simancas, 保田 修平, 松本 剛, 脇原 徹, 横井 俊之, 多湖 輝興「CO₂ からのメタノール選択合成を指向した Silicalite-1 内包 CuZnO 触媒の開発」第 39 回ゼオライト研究発表会, タワーホール船堀, B17, 2023 年 12 月 1 日.
8. Teruoki Tago, Key Note Lecture "Metal Particles Confined in Zeolites (Metal@Zeolite) -Synthesis and their application as catalysts-, Taiwan International Conference on Catalysis TICC2024 June 19-21, 2024
9. 栗野興紀, 石毛隼也, 栗原巧, 木村健太郎, 藤埴大裕, SIMANCAS, Raquel, 脇原徹, 横井俊之, 多湖輝興 「CO₂ からのメタノール選択合成のための豊富な活性点を有するゼオライト内包 Cu-ZnO 触媒の開発」 第 134 回触媒討論会, 名古屋大学, 1I01, 2024 年 9 月 18 日
10. R. Simancas, S. Yamaguchi, R. Kanomata, K. Awano, K. Kimura, S. Yasuda, H. Fujitsuka, T. Tago, T. Yokoi, T. Okubo, T. Wakihara. Rapid Synthesis of Cu-Encapsulated Nanoparticles in ZSM-5 Zeolite for Enhanced Catalytic Conversion of CO₂ to Methanol. 第 40 回ゼオライト研究発表会

＊ポスター発表（相手側研究チームとの連名発表）

発表件数：計 1 件

1. S. Xu, A. M. Beale, R. Simancas, M. E. Potter, S. Mediavilla Madrigal, T. Wakihara, X. Fan, C. Hardacre. Non-thermal plasma catalytic CO₂ hydrogenation to methanol at atmospheric pressure. Europacat2023, Prague (Czech Republic), 2023.

＊ポスター発表（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表）発表件数：計 5 件

1. 栗野 興紀, 鹿又 緑斗, 木村 健太郎, 藤埴 大裕, Simancas Raquel, 保田 修平, 松本 剛, 脇原 徹, 横井 俊之, 多湖 輝興「CO₂ 水素化反応によるメタノール選

択合成を目的とした Cu-Zn 内包 MFI 型ゼオライト触媒の開発」第 27 回 JPIJS ポスターセッション, タワーホール船堀学, P28, 2023 年 5 月 29 日.

2. 栗野 興紀, 鹿又 緑斗, 木村 健太郎, 藤墳 大裕, Raquel Simancas, 保田 修平, 松本 剛, 脇原 徹, 横井 俊之, 多湖 輝興「Cu-ZnO 内包ゼオライト触媒を用いた CO₂ からのメタノール選択合成」化学工学会第 89 年会, 大阪公立大学, PE320, 2024 年 3 月 20 日.
3. Koki Awano, Ryokuto Kanomata, Kentaro Kimura, Hiroyasu Fujitsuka, Raquel Simancas, Syuhei Yasuda, Takeshi Matsumoto, Toru Wakihara, Toshiyuki Yokoi, Teruoki Tago. Selective synthesis of methanol from CO₂ using zeolite-encapsulated CuZnO catalyst, ZMPC2024, Congrès Convention Center, P2-17[CN] July 21 2024.
4. 栗原 巧, 栗野 興紀, 石毛 隼也, 木村 健太郎, 藤墳 大裕, Raquel Simancas, 脇原 徹, 横井 俊之, 多湖 輝興「CO₂ 水素化反応によるアルコール合成を目的としたゼオライト内包 Cu 微粒子触媒の開発」化学工学会 第 90 年会, 東京理科大学(葛飾), PD365, 2025 年 3 月 14 日
5. R. Simancas, S. Yamaguchi, R. Kanomata, K. Awano, K. Kimura, S. Yasuda, H. Fujitsuka, T. Tago, T. Yokoi, T. Okubo, T. Wakihara. Rapid Synthesis of Cu-Encapsulated Nanoparticles in ZSM-5 Zeolite for Enhanced Catalytic Conversion of CO₂ to Methanol. 6th Euro-Asia Zeolite Conference, 2025.

3. 主催したワークショップ・セミナー・シンポジウム等の開催

1. Dialogues for a Sustainable future – Heterogeneous Catalysis: working towards Carbon Neutrality, ACE Japon (Raquel Simancas), Embassy of Spain in Japan (Tokyo, Japan), 2023/11/17, 参加人数 60 人程度
2. EU-Japan research Cluster event: New e-fuel production methods for sustainable transport, LAURELIN members, University of Tokyo (Tokyo, Japan), 2023/11/22, 参加人数 60 人程度
3. 5th International Symposium on Porous Materials 2023 and LAURELIN Open Symposium in Japan 2023, Toshiyuki Yokoi & Toru Wakihara, Tokyo Institute of Technology (Tokyo, Japan), 2023/11/23~2023/11/24, 参加人数 100 人程度
4. EU-Japan research Cluster event on “New production methods of synthetic fuels for a de-carbonised economy”, 4AirCRAFT members, CSIC premises (Brussels, Belgium), 2024/11/8, 参加人数 50 人程度

4. 研究交流の実績（主要な実績）

【全体会議】

2021 年 11 月 2~3 日	6 Monthly Meeting (6MM)	オンライン
2022 年 5 月 13~27 日	12 Monthly Meeting (12MM)	オンライン
2022 年 10 月 17~18 日	18 Monthly Meeting (18MM)	対面 (Valencia Spain)
2023 年 4 月 25~26 日	24 Monthly Meeting (24MM)	対面 (Manchester UK)
2023 年 11 月 20~21 日	30 Monthly Meeting (30MM)	対面 (Tokyo Japan)
2024 年 5 月 7~8 日	36 Monthly Meeting (36MM)	対面 (Oxford UK)
2024 年 11 月 6~7 日	43 Monthly Meeting (43MM)	対面 (Brussels Belgium)

【研究検討会】

テクニカルミーティング、WP ミーティングがほぼ月 1 回程度の頻度でオンライン開催され

た。

【クラスター会議】

2023 年 11 月 22 日、日本、東京にて、the 1st EU-Japan research cluster event on “new e-fuel production methods for sustainable transport” を「4AirCRAFT」、「ORACLE.」らとともに開催。

2024 年 11 月 8 日、ベルギー、ブリュッセルにて、2nd EU-Japan research Cluster Workshop を同 SICORP プロジェクトである「4AirCRAFT」、「ORACLE.」らとともに開催。

【学生・研究者の派遣、受入】

東京大学大学院生の山口冴子さんが、大学内の制度「武者修行」に採択され、2023 年 9 月 13 日から 15 日に ITQ（スペイン）を訪問し、成果発表・交流を実施。

5. 特許出願

該当なし

6. 受賞・新聞報道等

1. Ryokuto KANOMATA, RSC Poster Award Winners(TOCAT9), 2022/7/29
2. 栗野 興紀, 優秀ポスター賞(JPIJS ポスターセッション), 2023/5/29
3. 栗野 興紀, 学生ポスター発表賞(第 132 回触媒討論会), 2023/9/15
4. Shanshan Xu, Poster presentation award at the 9th Catalysis Conference held in Loughborough (UK), 2023/1/6
5. Piya Gosalvit, Poster presentation at the Inaugural Symposium: The Role of Higher Education Institutes and Life Cycle Assessment in Achieving Sustainable Futures, 2025/3/25
6. プレスリリース, “二酸化炭素からの高効率メタノール合成に成功” 2024/5/8
<https://www.titech.ac.jp/news/2024/069198>

7. その他

該当なし