

戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)  
日本ードイツ共同研究  
終了報告書 概要

1. 研究課題名：「固体高分子形水分解を利用した水素製造のための高耐久性・高効率な複合電極の研究開発」
2. 研究期間：令和4年4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	宮崎 晃平	准教授	京都大学	酸素発生触媒の開発
研究参加者	宮原 雄人	助教	京都大学	
研究参加者	井上 雄太	学生(博士課程)	京都大学	
主たる共同研究者	結城 典夫	取締役副社長	東邦チタニウム(株)	陽極側PTL用チタン多孔質シートの開発
研究参加者	井上 洋介	グループマネージャー	東邦チタニウム(株)	
研究参加者	高田 規	-	東邦チタニウム(株)	BPの原料チタン粉末の開発と供給
研究期間中の全参加研究者数			12名	

相手側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Daniel Schröder	Full Professor	Technische Universität Braunschweig	開発材を用いた水電解性能の評価及び数値解析
研究参加者	Felix Kerner	Research Assistant	Technische Universität Braunschweig	
研究参加者	Jiang Liu	Research Assistant	Technische Universität Braunschweig	
主たる共同研究者	Thorsten Hickmann	CEO	Eisenhuth GmbH & Co.	チタン粉末を原料としたBPの開発
研究参加者	Vinod-Kumar Banoth	-	Eisenhuth GmbH & Co.	
研究期間中の全参加研究者数			7名	

4. 国際共同研究の概要

本研究では、チタン製バイポーラプレート (BP)、チタン製陽極 Porous Transport Layer (PTL)、および高性能な酸素発生触媒を一体的に開発し、電解効率・耐久性・資源利用率に優れた固体高分子形 (PEM) 水電解セルの構築を目指した。各機関が高い専門性を発揮し、Eisenhuth 社は BP、東邦チタニウムは PTL と BP 用チタン粉末、京都大学は触媒の開発を担った。さらに、ブラウンシュヴァイク工科大学 (TUB) は、水電解性能の実証評価と数値解析を通じて全体の技術統合を推進し、4 機関が緊密に連携することで、単独では得られなかった研究成果を実現するに至った。

## 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

京都大学が担当した酸素発生触媒の開発では、 $A_2Ir_2O_7$ の構造式で表される Ir 系パイロクロア酸化物に注目し、A サイトを 2 価カチオンで部分置換することで、高い活性が得られるという設計指針を得た。具体的には  $Pr_2Ir_2O_7$  を対象に置換元素種や置換率の検討を行った結果、マグネシウムを用いた場合に、特に高い活性が得られ、ベンチマークである  $IrO_2$  に比して、約 4 倍の OER 活性が見られた。加えて、極めて希少性が高い Ir を、比較的、供給量が多い Ru に置き換えるため、Ru 系パイロクロア酸化物の検討も行った。Ru 系酸化物は、Ir 系酸化物に比して、活性は優れる反面、耐久性が劣るとされているが、同様にマグネシウムで部分置換した複合ルテニウム酸化物で、高い活性と耐久性が得られ、ベンチマークである市販の  $IrO_2$  に比して、約 2 倍の OER 活性が見られた。これらの触媒を実用化できれば、大幅な活性向上に伴うエネルギー効率や触媒使用量削減が期待できる。特に、複合ルテニウム酸化物の場合、Ir が不要となるため、その省資源化効果は大きい。

東邦チタニウムが担当した陽極 PTL の開発では、チタン粉末を原料とした PTL を試作し、その水電解性能を TUB にて評価した。チタン繊維を原料とした一般的な PTL をベンチマークとして比較すると、所定の粒子形状を持つチタン粉で作った PTL は、薄い電解質と組み合わせた際の特性に優れ、IV カーブでの電圧値が数%小さかった。また、陽極側に透過するクロスオーバー水素量も、ベンチマークの PTL に比して小さく、電解質膜ひいてはセル全体の耐久性向上効果が示唆された。

以上のように、酸素発生触媒、陽極 PTL で、それぞれ開発成果が得られ、その組み合わせにより、エネルギー効率、耐久性向上、省資源化（特に Ir）の合算効果が期待される。

### 5-2 国際共同研究による相乗効果

PEM 水電解セルは、様々な部材で構成されており開発対象領域が広範なため、Eisenhuth が BP、東邦チタニウムが PTL、京都大学が酸素発生触媒、TUB が評価と解析と、分担して研究を行えたことで、多くの相乗効果が得られた。一例として下記が挙げられる。

- 東邦チタニウムが CT スキャンで PTL 内部の三次元形状データを取得し、それを基に TUB が酸素拡散モデルを構築することで、PTL 内部の酸素拡散状態の数値シミュレーションが可能となった。この成果は、ACS Applied Energy Materials 誌に投稿され受理されている。
- TUB から京都大学へ博士課程学生が短期留学し、京都大学の指導の下、触媒合成のノウハウや活性評価技術を学んで、新たな触媒合成に取り組んだ結果、OER 活性が高い触媒を見出した。この成果は、アメリカ電気化学会（モントリオール大会）で口頭発表するに至った。
- 各種ノウハウが必要な電解性能評価を専門家である TUB が担当したことで、他機関は、電解性能評価に関する多くの知見を得ることができた。
- Eisenhuth が開発した BP の製造プロセスでは、チタン粉末の作り込みが重要であったが、東邦チタニウムグループでは、様々な仕様のチタン粉末を試作してきた経験があったため、比較的容易に Eisenhuth が必要とするチタン粉末を供給できた。

### 5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

実用化という観点では、東邦チタニウムで開発を行ってきた陽極 PTL は、チタン多孔質体 WEBTi という名称で、共同開発期間中に事業化が決定し、令和 7 年 4 月現在、量産工場の建設が進んでいる。京都大学が開発を行った酸素発生触媒については、現在はラボスケールの試作に留まっており、スケールアップに向けた開発が必要である。見通しが立ち次第、東邦チタニウム等と協議する予定である。

今後の開発という観点では、東邦チタニウムと TUB が開発した PTL 内部の酸素拡散の数値解析や、京都大学が見出した、酸素発生触媒の設計指針・活性の支配因子は、今後の材料開発における、基礎的な知見として、継続的な開発促進効果が期待される。

Strategic International Collaborative Research Program (SICORP)  
Japan-Germany Joint Research Program  
Executive Summary of Final Report

1. Project title : 「Durable and Efficient Compound Electrodes for Hydrogen Generation in PEM Electrolysis」
2. Research period : April 2022 ~ March 2025
3. Main participants :

Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Kohei Miyazaki	Associate Professor	Kyoto University	Anode catalysts
Collaborator	Yuto Miyahara	Assistant Professor	Kyoto University	
Collaborator	Yuta Inoue	Ph.D Student	Kyoto University	
Co-PI	Norio Yuki	Executive Vice-president	Toho Titanium	Anode PTL sheet
Collaborator	Yosuke Inoue	Group Manager	Toho Titanium	Titanium powder
Collaborator	Motomu Takada		Toho Titanium	
Total number of participants throughout the research period:				12

Partner-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Daniel Schröder	Full Professor	Technische Universität Braunschweig	Simulation and performance tests for PEM electrolyzers
Collaborator	Felix Kerner	Research Assistant	Technische Universität Braunschweig	
Collaborator	Jiang Liu	Research Assistant	Technische Universität Braunschweig	
Co-PI	Thorsten Hickmann	CEO	Eisenhuth GmbH & Co.	BP production using titanium powder
Collaborator	Vinod-Kumar Banoth	-	Eisenhuth GmbH & Co.	
Total number of participants throughout the research period:				7

4. Summary of the international joint research

In this study, a titanium bipolar plate (BP), a titanium anode Porous Transport Layer (PTL), and an oxygen evolution catalyst were developed to construct a polymer electrolyte membrane (PEM) water electrolysis cell with excellent electrolysis efficiency, durability, and resource conservation. Eisenhuth, Toho Titanium, and Kyoto University were in charge of the development of the titanium BP, the titanium PTL, and the oxygen evolution catalyst, respectively, while the Technical University of Braunschweig (TUB) was in charge of the water electrolysis performance evaluation and numerical analysis of these developed materials. Toho Titanium was also responsible for the development of titanium powder, the raw material

for titanium BP, and its supply to Eisenhuth.

## 5. Outcomes of the international joint research

### 5-1 Scientific outputs and implemented activities of the joint research

In the development of oxygen-evolving catalysts, Kyoto University focused on Ir-based pyrochlore oxides with the structural formula  $A_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ , and obtained the design guideline that high activity can be obtained by partial substitution of the A site with a divalent cation. Specifically, we investigated the substitution element species and substitution ratio for  $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ . As a result, we found that magnesium was particularly active, and the OER activity was about four times higher than that of the benchmark  $\text{IrO}_2$ . In addition, Ru-based pyrochlore oxides were investigated to replace Ir, which is extremely rare, with Ru, which is in relatively abundant supply, and Ru-based oxides are said to have superior activity but inferior durability compared to Ir-based oxides. However, the composite ruthenium oxide partially substituted with magnesium showed high activity and durability, and approximately twice the OER activity compared to the benchmark commercial  $\text{IrO}_2$ . If these catalysts can be commercialized, energy efficiency and reduction of catalyst usage due to significant activity improvement can be expected. In particular, in the case of the composite ruthenium oxide, Ir is no longer needed, and its resource-saving effect is significant.

In the development of the anode PTL that Toho Titanium was in charge of, a prototype PTL made from titanium powder was fabricated and its water electrolysis performance was evaluated at TUB. Compared to a common PTL made of titanium fiber as a benchmark, the PTL made of titanium powder with a specified particle size had superior characteristics when combined with a thin electrolyte, and the voltage value in the IV curve was several percent lower. The amount of crossover hydrogen transmitted to the anode side was also smaller than that of the benchmark PTL, suggesting that the PTL improves the durability of the electrolyte membrane and thus the cell as a whole.

As described above, development results were obtained in oxygen generation catalyst and anode PTL, respectively, and their combination is expected to have a combined effect of energy efficiency, durability improvement, and resource saving (especially Ir).

### 5-2 Synergistic effects of the joint research

Since the PEM water electrolysis cell is composed of various components and has a wide range of development areas, many synergistic effects were achieved through the shared research of BP by Eisenhuth, PTL by Toho Titanium, oxygen generation catalyst by Kyoto University, and evaluation and analysis by TUB. Examples are as follows.

- Toho Titanium used CT scans to obtain PTL internal geometry, and TUB built an oxygen diffusion model for simulation. The results were published in ACS Applied Energy Materials.
- A TUB Ph.D. student trained at Kyoto University, learned catalyst synthesis and evaluation, and discovered a new high-activity OER catalyst.
- TUB, with expertise in electrolytic performance evaluation, led the testing, enabling other partners—especially Toho Titanium—to gain valuable know-how.
- Eisenhuth required titanium powder for BP production, which Toho Titanium readily supplied thanks to its prototyping experience.

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

In terms of practical application, the anode PTL developed by Toho Titanium, under the name of WEBTi porous titanium, was decided during the joint development period, and as of April 2025, a mass production plant is under construction. The oxygen evolution catalyst developed by Kyoto University is currently only a lab-scale prototype and needs to be developed for scale-up. We plan to discuss this with Toho Titanium and others as soon as the prospects are clear.

In terms of future development, the numerical analysis of oxygen diffusion inside PTL developed by Toho Titanium and TUB, and the design guidelines and controlling factors for activity of oxygen-evolving catalysts discovered by Kyoto University are expected to promote

continuous development as fundamental knowledge for future material development.

## 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）発表件数：計 1 件

・査読有り：発表件数：計 1 件

1. J. Liu, M. Takada, F. Kerner, Y. Inoue, and D. Schröder, "Reconstruction and Modeling of Porous Transport Layers Based on X-ray Computed Tomography Imaging", *ACS Applied Energy Materials*, **2024**, 7, 10092-10101 DOI: 10.1021/acsaem.4c02193

・査読無し：発表件数：計 0 件

\*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 3 件

・査読有り：発表件数：計 3 件

1. Y. Inoue, Y. Miyahara, K. Miyazaki, C. Lee, R. Sakamoto, and T. Abe, "Tracking activity behavior of oxygen evolution reaction on perovskite oxides in alkaline solution via 3-dimensional electrochemical impedance spectroscopy", *Journal of the Electroanalytical Chemistry*, **2024**, 962, 118270 DOI: 10.1016/j.jelechem.2024.118270
2. A. Ikezawa, J. Kida, K. Miyazaki, and H. Arai, "Quantitative DEMS Analysis of CO<sub>2</sub> Evolution Reactions in Alkaline Electrolyte Solutions", *Electrochemistry Communications*, **2024**, 159, 107647 DOI: 10.1016/j.elecom.2023.107647
3. Y. Inoue, Y. Miyahara, K. Miyazaki, C. Lee, R. Sakamoto, and T. Abe, "Synergistic Interplay between Fe-based Perovskite Oxides and Co in Electrolyte for Efficient Oxygen Evolution Reaction", *ChemSusChem*, **2025**, 18, e202401982 DOI: 10.1002/cssc.202401982

・査読無し：発表件数：計 0 件

\*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）：発表件数：計 0 件

\*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：計 0 件

### 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 1 件（うち招待講演：0 件）

\*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 3 件（うち招待講演：0 件）

\*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 0 件

\*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 0 件

### 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

特になし

#### 4. 研究交流の実績（主要な実績）

##### 【合同ミーティング】

- 第1回：2022年9月28,29日 日本開催（含：設備、施設見学）
- 第2回：2023年9月12,13日 ドイツ開催（含：設備、施設見学）
- 第3回：2024年4月15日 Web開催
- 第4回：2024年9月5,6日 日本開催（含：設備、施設見学）

##### 【学生・研究者の派遣、受入】

- ・2024年9～11月：TUBの博士課程学生1名が京都大学に滞在し、京都大学の指導の下、アノード触媒の調製作業を行い、キャラクター化および活性評価に至るまでの一連の解析を共通して行った。

#### 5. 特許出願

研究期間累積出願件数：0件

#### 6. 受賞・新聞報道等

- 日本経済新聞「東邦チタニウム、水素装置向け材料を生産 26年から」（2024年6月14日）
- MONOist「グリーン水素の製造装置に使える、チタン多孔質体薄板の生産工場を新設」（2024年7月2日）
- 日刊自動車新聞「東邦チタニウム、水電解装置向け材料生産に進出 20億円投じ 2026年1月にも」（2024年6月20日）

#### 7. その他

- 東邦チタニウム WEBTi（チタン多孔質体薄板）の新工場建設に向けて、20億円の投資  
<https://www.toho-titanium.co.jp/2024/06/post-4423/>