

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02821

研究課題名（和文）電極活物質の時空間制御に基づく自己修復水電解触媒の確立

研究課題名（英文）Development of Self-Repairing Water Electrolysis Catalysts via Spatiotemporal Control of Active Materials

研究代表者

黒田 義之（Kuroda, Yoshiyuki）

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50638640

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,200,000円

研究成果の概要（和文）：再生可能エネルギーを用いたアルカリ水電解による水素製造では、電解の起動停止に伴う電極劣化が課題である。本研究では、ハイブリッド水酸化コバルトナノシート（Co-ns）を用いた自己修復アノード触媒の自己修復機構の解明、高活性化を検討した。Co-nsの修復は電気化学的なプロセスであり、析出速度が電解液に分散させたCo-nsの濃度と電極電位に依存する擬一次反応であることを明らかにした。また、 β -FeOOHナノロッドを用いることで、高活性な自己修復触媒を達成した。Co-nsにおける有機基は、 Co^{2+} の溶存酸素による酸化を抑制し、長期にわたり修復能を維持するために有効であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国が国策として目指すカーボンニュートラル、2050年のネットゼロエミッション実現に向け、化石燃料から再生可能エネルギーへの一次エネルギー転換が急務である。地域的、時間的な偏在性の高い再生可能エネルギーを有効利用するためには水電解による水素への転換が必要である。本技術は水電解装置の長寿命化、高効率化に寄与するものであり、水素の供給コスト低減に貢献することができる。水素の供給コストを低減し、石油や天然ガスとの価格競争力を持たせることで、水素社会の実現に近づくことが可能である。

研究成果の概要（英文）：In the hydrogen production by alkaline water electrolysis powered by renewable energy, the degradation of electrodes due to start and stop of electrolysis is regarded as one of the most important problems. In this study, the self-repairing mechanisms and improvement of activities of self-repairing anode catalysts using a hybrid cobalt hydroxide nanosheet (Co-ns) were investigated. The self-repairing process of Co-ns is found to be a pseudo first-order process, in which the deposition rate depends on the concentration of dispersed Co-ns and electrode potential. Highly active self-repairing catalyst of β -FeOOH nanorods were developed. The organic modification of Co-ns is useful to suppress the oxidation of Co^{2+} by dissolved oxygen to retain the self-repairing ability for a long period.

研究分野：無機材料化学

キーワード：アルカリ水電解 自己修復 ナノシート 酸素発生反応 ハイブリッド材料

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

化石燃料から再生可能エネルギーへの転換を進めるためには、電気エネルギーから水素を製造し、エネルギー輸送や貯蔵に用いる Power-to-X の推進が求められる。水素製造の主要な方法である水電解の中でもアルカリ水電解は安価で大型化が容易であり、大規模水素製造の有力な候補である。しかし、工業的な主流であるバイポーラ型のアルカリ水電解槽では、電解停止時に電極の酸化・還元を伴う逆電流が生じ、触媒の腐食、剥離といった深刻な劣化が生じることが課題である。アルカリ水電解反応の性能は、主に過電圧の大きい酸素発生反応の影響を強く受けることから、特に酸素発生反応 (OER) 触媒の高活性化、高耐久化が求められる。

その様な中、研究代表者らは電極劣化時に電解液から電極触媒を補充、再構築する自己修復触媒を報告した。¹⁾本手法では、電解液に分散したハイブリッド水酸化コバルトナノシート (Co-ns) が電解時に電極表面に堆積し、OER 触媒として機能することを利用し、劣化した際にその場修復が可能な電極触媒として用いた。自己修復触媒は、半永久的な性能維持や運転を止めないメンテナンスが可能となることから、新たな材料開発の指針を提供すると期待される。

ハイブリッド金属水酸化物は本研究に先立ち研究代表者らが独自に開発した新規材料群である。²⁾金属水酸化物 ($M(OH)_2$; $M=Mg, Al, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, \dots$) の表面水酸基に三脚型配位子 ($R-C(CH_2OH)_3$; Tris-R と表記; $R=NH_2, CH_2OH, NHC_2H_4SO_3H, CH_3, C_2H_5, \dots$) が結合した構造であり、有機修飾により層状構造からナノシートへの剥離、溶媒への分散性といった物性を有している。本研究では、特に $M=Co, R=NH_2$ である化合物 (Co-ns) が、溶媒に高い分散性を示すことから、自己修復触媒として検討した。

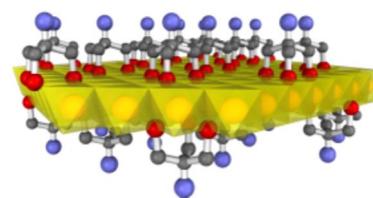


図 1. ハイブリッド金属水酸化物の構造モデル。

2. 研究の目的

自己修復現象は電極触媒であるコロイド粒子が電解液から電極へどのように堆積するかという活物質の時空間制御により成立するが、その詳細は未解明である。本研究では、電極触媒コロイドの電極への堆積機構を解明し、高性能な自己修復触媒材料の創生を目的とする。具体的には、既存触媒である Co-ns を用いた電解中における触媒堆積機構の解明、新たな材料探索により、 100 mA/cm^2 における過電圧 300 mV 以下かつ半永久的耐久性の達成を目標とした。

3. 研究の方法

(1) Co-ns の電気化学的堆積機構解析

自己修復触媒である Co-ns を電解液 (1 M KOH 水溶液) に分散させ、Ni を作用極とした三電極式セルで電解を行うことで電極表面に Co-ns 由来の触媒を堆積させることができる。まず、堆積後の触媒の化学分析により、電気化学的堆積における Co-ns の構造変化を検討した。次に、電解液への Co-ns の分散濃度を $2\text{-}400 \text{ ppm}$ と変化させ、それぞれの条件における触媒堆積速度を測定し、速度論的解析を行った。以下に実験方法の概要を示す。

Co-ns は $CoCl_2$ 水溶液と Tris- NH_2 水溶液を混合後、 80°C で 1 d 加熱することで得た。²⁾これを 1 M KOH 水溶液に触媒重量基準で $2\text{-}400 \text{ ppm}$ の割合で分散させ、電解液とした。PFA 製三電極式セルを用い、作用極に Ni ワイヤ、対極に Ni コイル、参照極に可逆水素電極 (RHE) を用い、 30°C で測定を行った。触媒堆積は 800 mA/cm^2 、 30 min の定電流電解とサイクリックボルタンメトリー (CV) 及び電気化学インピーダンス分光法 (EIS) による OER 活性評価を 1 サイクルとし、これを 8 回繰り返すことで計 240 min における電解の影響を調べた。電極に堆積した触媒は純水で洗浄した後、種々の分析に用いた XRD 及び FTIR には乾燥後の試料を用い、堆積量の評価にはそのまま塩酸中で触媒を溶解させ、ICP-AES により分析した。

(2) 新規 Fe 系自己修復触媒の開発

Co 系触媒はアルカリ水電解用 OER 触媒としての活性は中程度である。そこで、種々の自己修復触媒候補より、 $\beta\text{-FeOOH}$ ナノロッド (Fe-nr) による高活性な自己修復触媒を検討した。Fe-nr は (1) における Co-ns の合成と同様の合成方法を用い、 $CoCl_2$ を $FeCl_3$ に変更して合成した。また、 40 ppm の Fe-nr を電解液に分散させて (1) と同様の電気化学測定を行った。また、 600 mA/cm^2 、 1 min の定電流電解、 1.5 V vs. RHE から 0.5 V vs. RHE への 500 mV/s での電位走査、 0.5 V vs. RHE 、 1 min の電位保持を 1 サイクルとし、これを最大 4000 サイクル繰り返す耐久試験を行った。³⁾この際、 100 サイクル毎に CV、EIS を用いた OER 活性評価を行った (無修復条件での耐久試験)。さらに、上記の耐久試験において OER 活性評価の前に 1 A/cm^2 、 60 min の定電流電解を行い、触媒堆積を行ったものを修復有条件での耐久試験とした。

(3) 自己修復触媒における有機修飾の効果の検証

有機修飾の有無による影響を調べるため、有機修飾されていない $\text{Co}(\text{OH})_2$ 及び CoOOH を合成して用いた。これらの触媒を 40 ppm の濃度で電解液に分散させ、(1)と同様の電気化学測定を行った。また、各触媒の溶存酸素耐性を調査するため、触媒を 1 M KOH 水溶液に分散させて攪拌し、所定の時間毎にろ過し、FTIR で分析した。

4. 研究成果

(1) Co-ns の電気化学的堆積機構解析

図 2a 及び図 3a に Co-ns の XRD パターンと FTIR スペクトルを示す。XRD パターンは層状構造に特徴的な擬六方晶に帰属された。FTIR スペクトルより、表面修飾基に由来する C-O 伸縮、C-H 伸縮振動が観測された。定電流電解サイクルを 8 回行い、電極上に堆積した Co-ns では、XRD パターンにおける積層由来の 001、002 回折が消失したことから、ナノシートがランダムに集合した構造を取っていることが明らかとなった(図 2b)。また、100、110 回折は高角度にシフトしており、 CoOOH の構造に一致した。FTIR スペクトルからは有機基に由来する吸収帯は消失し、表面修飾基がアノード酸化により分解したことが確認された。また、水酸化物骨格に由来する $400\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ のスペクトルは CoOOH に一致した。従って、Co-ns はアノード上で有機修飾基が酸化分解し、その後単層ナノシート CoOOH に変化したことがわかった。

種々の Co-ns 分散濃度にて電解析出を行い、得られた CV 図における $0.8\text{-}1.6\text{ V vs. RHE}$ での還元電量を Q_c とした。この電位領域における還元電流は主に CoOOH が酸化して生成した Co^{4+} の Co^{2+} への還元に対応する。従って、 Q_c と Co 堆積量との関係を調べたところ、良好な直線関係が得られた。この関係式を用い、以降の実験では CV 図から触媒担持量を算出した。

図 4 に Co-ns 分散濃度毎の Q_c 及び Co 担持量の変化を示す。分散濃度が大きい程、触媒析出速度が大きかった。また、電解時間を延長するとだんだんと触媒析出が停止する挙動が明らかとなった。一見するとこれはある飽和量に向かって触媒析出が進行する挙動に見えるが、続く解析により、これは電極電位により整理できることが明らかとなった。

触媒の析出速度 ($v = dm_{\text{Co}}/dt$) が、Co-ns 分散濃度 (c) に比例する擬一次反応と仮定すると、速度定数 (k) は $k = v/c$ で表される。これを各時間区間において算出し、さらに各区間における OER 反応の平均電極電位 (E_{ave}) に対してプロットしたところ、(図 5)これらのプロットは直線関係を示した。これは、析出反応が電極電位に依存する電気化学的プロセスであることを示している。理想的な電気化学プロセスは Butler-Volmer 式に従い、速度定数と電極電位は指数関数の関係を示すと期待されるため、本現象は物質輸送の影響を受けた特殊な条件であると推察される。

Co-ns の析出に伴う電流は大きく見積もっても電解の全電流の 0.05% 以下であり、電極電位はほぼ電極の OER 活性により決まる。従って、ニッケル基材に触媒を析出させる電解初期においては、基材自体の OER 活性が低いことから、一定電流を流通させるための電極電位が高くなり、触媒析出も速やかに進行する。触媒が十分に析出されるようになると、徐々に OER 活性が向上するため、同一電流での電極電位が低下し、触媒析出速度も低下する。これが図 4 において電解時間の増加とともに触媒析出速度が低下する原因である。また、このことは電極が劣化し、電極電位が増加すると触媒析出が促進されるという、自己修復性を裏付ける機構である。

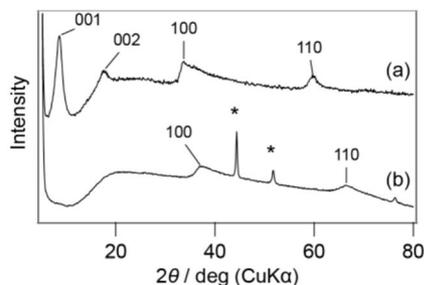


図 2. (a) Co-ns、(b) 電解により堆積した Co-ns の XRD パターン。

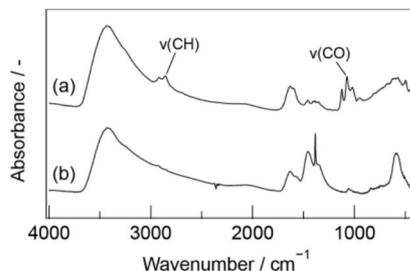


図 3. (a) Co-ns、(b) 電解により堆積した Co-ns の FTIR スペクトル。

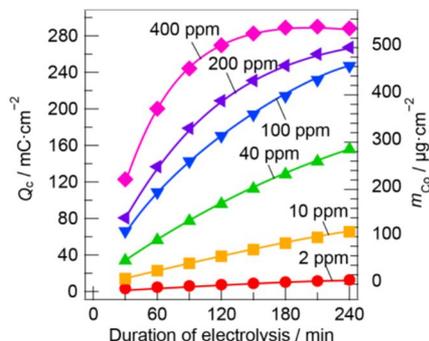


図 4. Q_c と電解時間の関係。尚、 Q_c より算出した Co 担持量 (m_{Co}) を右軸に示す。

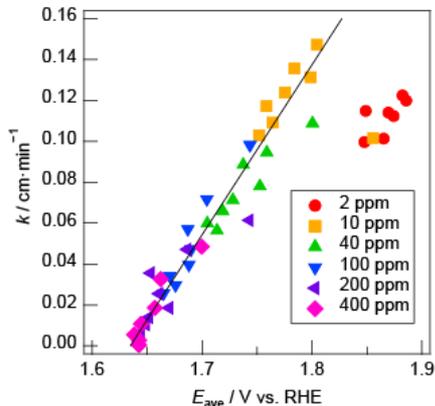


図 5. 触媒析出における速度定数 k と平均電極電位 E_{ave} の関係。

(2) 新規 Fe 系自己修復触媒の開発

アルカリ水電解用 OER 触媒の中でも、特に Fe を含む水酸化物や酸化物は高活性な傾向にある。そこで、種々の Fe 含有物質について検討したところ Fe-nr が高活性かつ自己修復能を有する触媒となることを見いだした。Fe-nr は FeCl_3 と Tris-NH_2 との反応により合成されたが、生成物には Tris-NH_2 は一切含まれておらず、ハイブリッド金属水酸化物の様な有機修飾は生じなかった。Fe-nr の幅は 5 nm 程度、長さは 50 nm 程度と、同様の物質の中では比較的小さく、溶媒に対する分散性も良好であった。

Fe-nr を 40 ppm 分散させた電解液を用い、Co-ns の場合と同様に電解を行ったところ、30 min の電解で OER 活性は大きく低下し、値は Co-ns を用いた場合よりも 30 mV 小さかった。Fe-nr を析出させた電極における Fe の担持量は $2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ であり、Co-ns の場合の Co 担持量 $128 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ に比して非常に小さかった。少量の触媒担持で高い OER 活性が得られるため、短い電解時間で高活性が達成されたと考えられる。

図 8 に起動停止条件での耐久試験の結果を示す。触媒を担持していない Ni 電極では、起動停止回数 50 回未済で大幅な過電圧増加が生じ、起動停止条件での耐久性が低いことがわかった。Co-ns を用いた場合、修復あり条件において OER 活性はほぼ変化せず、安定であることが確認された。この際、2500 サイクル程度から過電圧の増加傾向が見られたが、Co-ns を追加し、電解液に分散させることで OER 活性の変化は抑制された。すなわち、電解液に分散された Co-ns が試験中に消費され、修復に必要な濃度条件を満たさなくなったと考えられる。このような場合でも、新しい Co-ns を電解液に分散させることで自己修復能を維持することができる。Fe-nr の場合も同様に修復を行うことで OER 活性を 4000 サイクル維持することができた。また、活性を発現するための触媒量が少ないため、同じ 40 ppm の分散濃度でも、4000 サイクルにわたり触媒追加は必要なかった。

市販の電極に相当する NiCoO_x 触媒は、通常の起動停止耐久試験条件において 500 ~ 1000 サイクルに大幅な過電圧上昇が認められた。Fe-nr を用い、修復しない条件での耐久試験においても、類似の傾向が見られた。すなわち、Fe-nr は Ni 電極を起動停止による腐食から守る効果はあるもの、徐々に剥離し、劣化をもたらすと解釈できる。

(3) 自己修復触媒における有機修飾の効果の検証

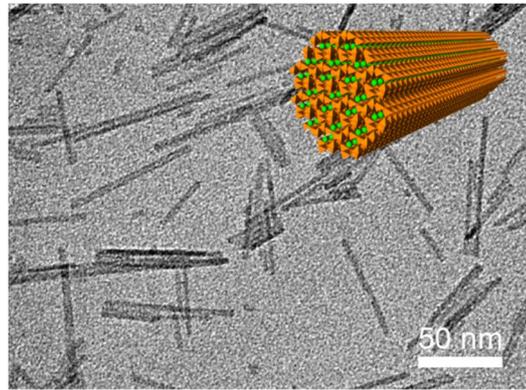


図 6. Fe-nr の TEM 像及び構造モデル (inset).

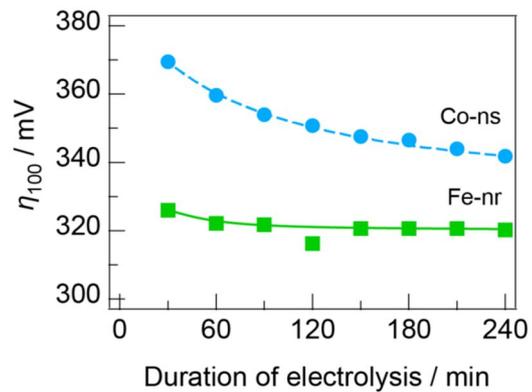


図 7. $100 \text{ mA}/\text{cm}^2$ における OER 過電圧と電解時間の関係.

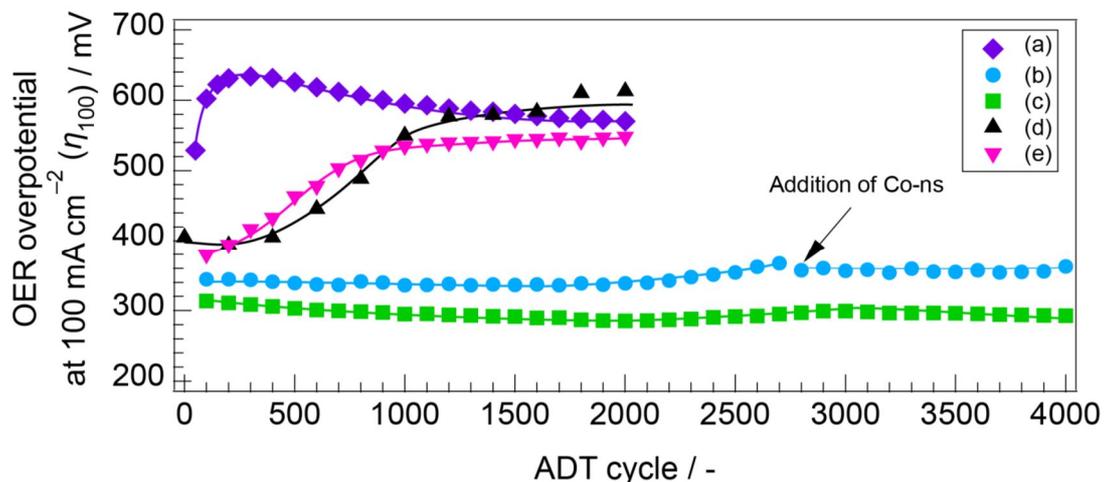


図 8. (a) Ni 電極, (b) Co-ns (修復あり), (c) Fe-nr (修復あり), (d) NiCoO_x 電極, (e) Fe-nr (修復無し) での、耐久試験結果.

図9に、 $\text{Co}(\text{OH})_2$ 及び CoOOH を40 ppm電解液に分散させて用いた場合の Q_c と電解時間の関係を示す。 $\text{Co}(\text{OH})_2$ を用いた場合、 Q_c は60 minの電解で $30 \text{ mC}/\text{cm}^2$ まで増加し、頭打ちとなった。これは Co-ns の場合の約半分の析出速度に相当する。これは主に分散性の違いに起因すると考えられる。一方、 CoOOH を用いた場合は、240 minの電解でも $8 \text{ mC}/\text{cm}^2$ と、殆ど析出が進行しなかった。従って、触媒析出のためには Co が2価である必要があると言える。(2)における Fe-nr も、 Fe の価数は3価であり、中心金属のレドックスが触媒析出の必要条件であると考えられる。

$\text{Co}(\text{OH})_2$ を用いた場合、120 minで触媒析出が頭打ちとなった後、さらに40 ppmの $\text{Co}(\text{OH})_2$ を添加すると再び同程度の触媒析出が進行した。すなわち、触媒析出の停止は触媒析出の飽和や、電極電位の低下によるものではなく、 $\text{Co}(\text{OH})_2$ 触媒自体が溶存酸素により酸化され、 CoOOH に変化して析出能を失ったためと考えられる。

図10に $\text{Co}(\text{OH})_2$ 及び CoOOH のFTIRスペクトルと、 $\text{Co}(\text{OH})_2$ を1 M KOH電解液に1 hないし3 h浸漬した際のFTIRスペクトルを示す。 $\text{Co}(\text{OH})_2$ は電解液に1 h浸漬しただけで大部分が CoOOH に変化し、3 h後にはほぼ全てが CoOOH に変化した。このことは上記の結果と矛盾しない。一方、 Co-ns は3 hの浸漬の後も殆どスペクトルが変化せず、溶存酸素による酸化を受けづらいことがわかった。従って、 Co-ns における有機修飾の効果は、主に Co^{2+} の安定化であり、 $\text{Co}(\text{OH})_2$ を自己修復触媒として利用するための重要な機能を提供している。電解析出の際、 Co-ns の有機基は高電位で酸化分解されるため、その後は Co^{2+} の安定化効果が失われ、 $\text{Co}(\text{OH})_2$ と同様に析出が進行すると考えられる。

5. 結論

以上より、 Co-ns における自己修復挙動の起源を電極電位に依存した反応性と有機修飾による Co^{2+} の安定化の2つの観点から明らかにし、 Fe 系触媒による高活性自己修復触媒を見いだした。これらの知見を元に、高活性、高耐久な自己修復触媒の合理的設計が可能となる。

<参考文献>

- 1) Y. Kuroda, T. Nishimoto, S. Mitsushima, *Electrochim. Acta* **2019**, *323*, 134812.
- 2) Y. Kuroda, T. Koichi, K. Muramatsu, K. Yamaguchi, N. Mizuno, A. Shimojima, H. Wada, K. Kuroda, *Chem. Eur. J.* **2017**, *23*, 5023.
- 3) A. Abdel Haleem, K. Nagasawa, Y. Kuroda, Y. Nishiki, A. Zaenal, S. Mitsushima, *Electrochemistry* **2021**, *89*, 186.

<主な成果発表>

- 1) Y. Kuroda, S. Takatsu, T. Taniguchi, Y. Sasaki, I. Nagashima, A. Inomata, Y. Nishiki, A. Zaenal, T. Nakai, A. Kato, S. Mitsushima, *J. Sol-Gel Sci. Technol.* **2022**, *104*, 647.
- 2) R. Nakajima, T. Taniguchi, Y. Sasaki, Y. Nishiki, Z. Awaludin, T. Nakai, A. Kato, S. Mitsushima, Y. Kuroda, *ChemSusChem*, in press.
- 3) 光島, 黒田, 永島, 谷口, 佐々木, 錦, 加藤, ザエナル, 包, 中井, アルカリ水電解方法及びアルカリ水電解用アノード, WO/2023/095406, PCT/JP2022/032238.

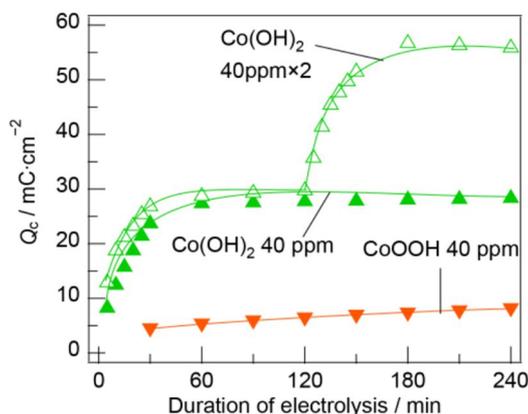


図9. $\text{Co}(\text{OH})_2$ 及び CoOOH を用いた場合の触媒析出挙動。

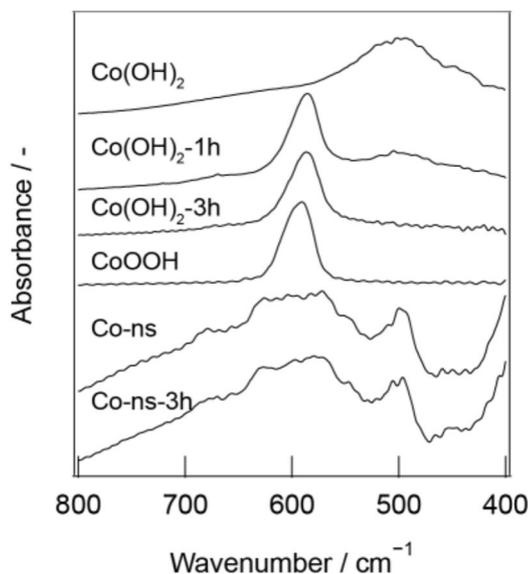


図10. 各触媒及び、これらを1 M KOHに浸漬した後のFTIRスペクトル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakajima Ritsuki, Taniguchi Tatsuya, Sasaki Yuta, Nishiki Yoshinori, Awaludin Zaenal, Nakai Takaaki, Kato Akihiro, Mitsushima Shigenori, Kuroda Yoshiyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Principles of Self Repairing Ability of Tripodal Ligand Stabilized Hybrid Cobalt Hydroxide Nanosheets for Alkaline Water Electrolysis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ChemSusChem	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cssc.202300384	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ferreira Eduardo B., Gibaldi Marco, Okada Ryuki, Kuroda Yoshiyuki, Mitsushima Shigenori, Jerkiewicz Gregory	4. 巻 -
2. 論文標題 Tunable Method for the Preparation of Layered Double Hydroxide Nanoparticles and Mesoporous Mixed Metal Oxide Electrocatalysts for the Oxygen Evolution Reaction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.3c00617	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Oda Kazuaki, Kuroda Yoshiyuki, Mitsushima Shigenori	4. 巻 14
2. 論文標題 Investigation of Charge/Discharging Behavior of Metal Oxide-Based Anode Electrocatalysts for Alkaline Water Electrolysis to Suppress Degradation due to Reverse Current	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Electrocatalysis	6. 最初と最後の頁 499 ~ 510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12678-023-00815-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kuroda Yoshiyuki, Takatsu Shohei, Taniguchi Tatsuya, Sasaki Yuta, Nagashima Ikuo, Inomata Akihiko, Nishiki Yoshinori, Zaenal Awaludin, Nakai Takaaki, Kato Akihiro, Mitsushima Shigenori	4. 巻 104
2. 論文標題 -FeOOH nanorod as a highly active and durable self-repairing anode catalyst for alkaline water electrolysis powered by renewable energy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Sol-Gel Science and Technology	6. 最初と最後の頁 647 ~ 658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10971-022-05882-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 織田和明、黒田義之、光島重徳
2. 発表標題 アルカリ電解質中での水電解用電極材料の充放電特性の評価
3. 学会等名 2021年電気化学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 織田和明、黒田義之、光島重徳
2. 発表標題 アルカリ水電解の逆電流抑制に向けた副酸化物系アノード触媒の酸化還元耐性試験
3. 学会等名 第45回電解技術討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中嶋律起、谷口達也、佐々木雄太、永島郁男、猪股昭彦、錦善、Zaenal Awaludin、中井貴章、加藤昭博、光島重徳、黒田義之
2. 発表標題 剥離ナノシートからなる自己組織化ハイドロゲル電極の酸素発生能
3. 学会等名 第45回電解技術討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高津正平、谷口達也、佐々木雄太、永島郁男、猪股昭彦、錦善則、Zaenal Awaludin、中井貴章、加藤昭博、光島重徳、黒田義之
2. 発表標題 3 元系ハイブリッド金属水酸化物を用いた高活性なアルカリ水電解用自己修復触媒
3. 学会等名 第45回電解技術討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Ritsuki Nakajima, Tatsuya Taniguchi, Ayaka Oishi, Ikuo Nagashima, Akihiko Inomata, Yoshinori Nishiki, Zaenal Awaludin, Takaaki Nakai, Akihiro Kato, Shigenori Mitsushima, and Yoshiyuki Kuroda
2. 発表標題	Structure and Activity of Electrolytically Deposited Hybrid Cobalt Hydroxide Nanosheet for Self-Repairing Oxygen Evolution Reaction Catalysts
3. 学会等名	The 240th ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	黒田義之
2. 発表標題	アルカリ水電解用アノードの変動電源における耐久性
3. 学会等名	第32回電解プロセス研究会 (招待講演)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	黒田義之
2. 発表標題	ハイブリッド水酸化物ナノシートを用いた自己修復性アルカリ水電解アノードの開発
3. 学会等名	水素エネルギー協会第166回定例研究会 (招待講演)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Yoshiyuki Kuroda, Shohei Takatsu, Tatsuya Taniguchi, Ayaka Oishi, Ikuo Nagashima, Akihiko Inomata, Yoshinori Nishiki, Zaenal Awaludin, Takaaki Nakai, Akihiro Kato, Shigenori Mitsushima
2. 発表標題	Highly Active Self-Repairing Anode Catalyst for Alkaline Water Electrolysis Using Ni-Based Hybrid Nanosheets
3. 学会等名	ECS PRiME2020 (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名 Kazuaki Oda, Yoshiyuki Kuroda, Shigenori Mitsushima
2. 発表標題 Durability of nickel electrode coated with manganese-based mixed metal oxide for alkaline water electrolysis
3. 学会等名 71st Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高津正平、谷口達也、大石 彩加、永島 郁男、猪股 昭彦、錦 善則、Zaenal Awaludin、中井 貴章、加藤 昭博、光島 重徳、黒田 義之
2. 発表標題 ハイブリッドナノシートからなるアルカリ水電解アノード用自己修復触媒の高活性化
3. 学会等名 第44回電解技術討論会 - ソーダ工業技術討論会 -
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中嶋律己、谷口達也、大石 彩加、永島 郁男、猪股 昭彦、錦 善則、Zaenal Awaludin、中井 貴章、加藤 昭博、光島 重徳、黒田 義之
2. 発表標題 ハイブリッドナノシート自己修復触媒における電気化学的触媒層形成プロセスの検討
3. 学会等名 電気化学会第88回大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 アルカリ水電解方法及びアルカリ水電解用アノード	発明者 光島、黒田、永島、 谷口、佐々木、錦、 加藤、ジャエナル、	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-190770	出願年 2021年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

横浜国立大学エネルギー変換化学研究室
<http://www.cel.ynu.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
カナダ	Queen's University		