

令和 4 年 6 月 4 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17H03126

研究課題名（和文）太陽光による水素製造のための水分解光触媒の高活性化

研究課題名（英文）Enhancement of Solar Water-Splitting Activity for Hydrogen Production

研究代表者

入江 寛 (Irie, Hiroshi)

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：70334349

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,900,000円

研究成果の概要（和文）：次世代のエネルギー資源として注目されている水素を、恒久的に地球上に降り注ぐクリーンな太陽光エネルギーを利用して水（試薬を必要としない純水）を光触媒により完全分解して水素を製造すべく検討を行った。光触媒材料として、可視光のほぼ全域を利用できる全固体二段階励起型の銀接合もしくは金接合ロジウム酸亜鉛／バナジウム酸ビスマスを用い、助触媒の選択担持により水分解の活性向上を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通じて、太陽光というクリーンな自然エネルギーを用いて、試薬など必要のない水を完全分解し、クリーンエネルギーである水素を、実用化を視野に入れた高い効率で獲得できるようになった。また、この成果は二酸化炭素の固定化によるエネルギー獲得にも展開できることが示唆され、これらは環境・エネルギー問題の解決の一助となることができるであろう。

研究成果の概要（英文）：We have investigated water-splitting photocatalysts under entire range of visible light on the basis of a material design and a mechanistic approach. Then, we discovered all-solid-state hetero-junction photocatalysts, by connecting zinc rhodium oxide (ZnRh2O4) and bismuth vanadium oxide (Bi4V2O11) as hydrogen (H₂)- and oxygen (O₂)-evolution photocatalysts, respectively, with silver (Ag) or gold (Au). These photocatalysts achieved the overall pure-water splitting under red light, following a conventional well-known Z-scheme mechanism, but the present photocatalysts did not require any chemicals as a redox mediator. In addition, we tried to selectively deposit a H₂-evolution cocatalyst onto ZnRh2O4 and a O₂-evolution cocatalyst onto Bi4V2O11 towards the enhancement of water splitting activity.

研究分野：光機能材料、環境・エネルギー材料の創出

キーワード：光触媒 水素 水分解 赤色光 太陽光

1. 研究開始当初の背景

酸化チタン光触媒 / 白金電極を用い、太陽光を利用して水を分解し水素 (H_2)、酸素 (O_2) を製造した、いわゆる”本多 - 藤嶋効果”が 1970 年代初めに報告されて以来¹⁾、世界中でこの研究が行なわれてきた。光触媒を用いた水の分解は光エネルギーを化学エネルギーに変換するという観点から学術的にも有意義な反応であり、さらには、エネルギー・環境問題解決に貢献できることから実用的にも社会的にも有意義な反応であると言える。

光触媒粉末を用いた水の完全分解では、波長 600 nm の光を利用でき、その波長での量子収率が 30% (太陽エネルギー変換効率 5% に相当) の実用化目標が設定されている。その目標に向かって世界中の研究者が可視光照射下で水を完全分解できる光触媒の研究を行ってきた。その結果、可視光で水を完全分解できる光触媒が十数例報告されるに至っていたが²⁾、利用波長はほとんどの場合で高々 500 nm 程度であり目標に程遠い状況であった。その後、波長 620 nm までの可視光で水を完全分解できる光触媒が報告されたが^{3,4)}、波長 600 nm における量子収率は非常に小さく、また極めて煩雑な光触媒であり実用化の観点からは疑問であった。一方で、可視光照射下で犠牲剤存在のもと H_2 もしくは O_2 だけ発生できる水の半反応光触媒 (H_2 発生光触媒、 O_2 発生光触媒) を組み合わせた系が可視光照射下のもと酸化還元媒体が共存すると水を完全分解できることが報告されていた (二段階励起光触媒、通称、Z スキーム)⁵⁾。この Z スキームの利用波長は高々 500 nm 程度、酸化還元媒体の電荷授受効率が低いことから波長 400 nm の可視光で量子収率は 1 ~ 2% に過ぎず、また酸化還元媒体としての試薬が必要であることから、実用化には適しないと考えられた。酸化還元媒体が不要な二光子励起系も報告されたが、 H_2 および O_2 光触媒のゼータ電位を制御し電気的引力で接合するため pH を調整する必要があり (硫酸により pH=3 ~ 4 に調整)、酸化還元媒体としての試薬は不要であるが硫酸が必要であり、試薬不要の水の完全分解ではないという問題があった^{6,7)}。さらに、この系でも利用波長は高々 500 nm、この波長での量子収率は 0.1% 程度であった。同じ H_2 および O_2 光触媒を直接接合した系も報告され、試薬不要での水の完全分解が報告されているが、利用波長が高々 500 nm、この波長での量子収率は低いものとなっていた⁸⁾。このように、実用化できる光触媒は見出されていない。1970 年代初めから 40 数年経過した現在でも目標値に大きく届かないことから、新たな材料の探索に加え、新たなシステムの構築が必要であることは明白であった。

2. 研究の目的

当研究室では既往の Z スキームから発想し、 H_2 および O_2 発生光触媒間に導電層を挿入し全固体型二段階励起光触媒を作製することによって⁹⁾、可視光全域を利用すべく、赤色光を利用した水の完全分解を目標に検討を行っていた。その結果、我々は独自の汎用性のある簡単な方法で全固体型二段階励起光触媒を作製することによって試薬不要の純水を用いた、赤色光で水の完全分解に成功した。具体的には、 H_2 発生光触媒 ($ZnRh_2O_4$ 、バンドギャップ (E_g) = 1.2 eV) と O_2 発生光触媒 ($Bi_4V_2O_{11}$ 、 E_g = 1.7 eV) を、導電層 (Ag) を介して接合する ($ZnRh_2O_4/Ag/Bi_4V_2O_{11}$ の作製) ことによって、波長 740 nm までの赤色光、すなわち、可視光のほぼ全域を利用した純水の完全分解を達成していた^{10,11)} (図 1)。この系の特徴は 全固体型二段階励起光触媒の作製方法が簡便であること、汎用性があり様々な材料に応用できるため、さらに長波長の光が利用できること ($Bi_4V_2O_{11}$ に代わるさらに E_g の小さな O_2 発生光触媒の利用により近赤外光までの利用可能である)、水の分解に関与しない正孔、電子が導電層で消滅するため、通常二段階励起系で用いられる酸化還元媒体や pH 調整の試薬が不要で、純水 (ここでは試薬添加が不要な水と定義する) を分解でき、実用化には適していること、が挙げられた。

研究期間内に、 $ZnRh_2O_4/Ag/Bi_4V_2O_{11}$ を改良し、酸化還元媒体など試薬を添加する必要のない純水を、波長 600 nm での外部量子収率 (QE) 30% 程度 (太陽エネルギー変換効率 5%) の効率での水分解を目指して検討を行った。

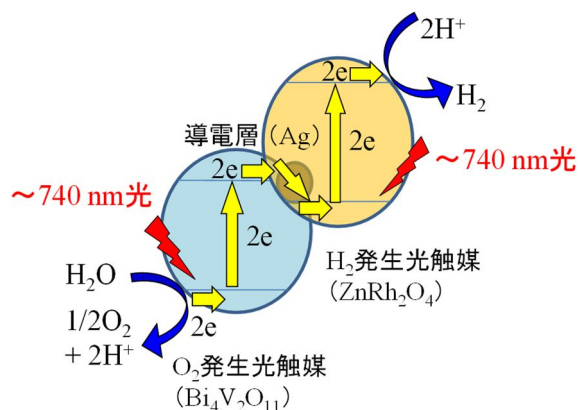


図 1 接合系全固体型二段階励起光触媒の水の完全分解スキーム

3. 研究の方法

光触媒を用いた水分解による水素製造技術を実用化に向けて加速するために、すでに見出していた $\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Ag}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ 光触媒を改良し水分解の高活性化を目指し、波長 600 nm において量子収率 30% で純水を完全分解できるように検討を行った。具体的な検討内容は、

(1) 導電層の変更および混合比の変更

Ag から Au へ変更 ($\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Au}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ の作製と水分解活性評価)

Au ナノ粒子の合成と合成した Au ナノ粒子の $\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Au}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ への適用
 ZnRh_2O_4 , $\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ 光触媒、Au の混合比の最適化

(2) H_2 もしくは O_2 発生助触媒の選択的な ZnRh_2O_4 , もしくは $\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ 上への担持による高活性化

$\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Au}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ での $\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ 上への O_2 発生助触媒 (Co 酸化物) の選択的担持

$\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Ag}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ での ZnRh_2O_4 上への H_2 発生助触媒 (白金 (Pt), Ag) の選択的担持

4. 研究成果

(1) 導電層の変更および混合比の変更

Ag から Au へ変更 ($\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Au}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ の作製と水分解活性評価)

$\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Ag}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ の作製方法は ZnRh_2O_4 , $\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$, Ag_2O を混合し、 Ag_2O の熱分解温度 280°C 以上の 750°C で熱処理し、 ZnRh_2O_4 と $\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ の間に挿入されていない Ag を取り除くため、硝酸 (HNO_3) 処理する必要があった (図 2a)。 ZnRh_2O_4 と $\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ の間に挿入されていない Ag を取り除くのは、取り除かないと O_2 発生過剰となる。これは一部の Ag が O_2 発生の犠牲剤として機能すると推察している。

Au は安定で犠牲剤として機能しないため、 ZnRh_2O_4 と $\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ の間に挿入されていない Au を除去する必要はない。むしろ ZnRh_2O_4 上の Au は還元助触媒として機能させることができる

(Au は導電層としての機能と還元助触媒としての機能の二役) ため、まず Au 担持 ZnRh_2O_4 を Au (市販、粒径 100 nm 程度) と ZnRh_2O_4 を混合、焼成により作製 ($\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Au}$) し、その後再び $\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Au}$ と $\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ を混合、焼成するだけという簡便なものである (図 2b)。 $\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Au}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ の水分解活性は $\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Ag}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ よりも高いことを確認しており、 HNO_3 処理による光触媒の溶解が回避できた

こと、 ZnRh_2O_4 上の Au が還元助触媒として機能したことによって Au 接合系が Ag 接合系よりも高活性であったと考えている¹²⁾。

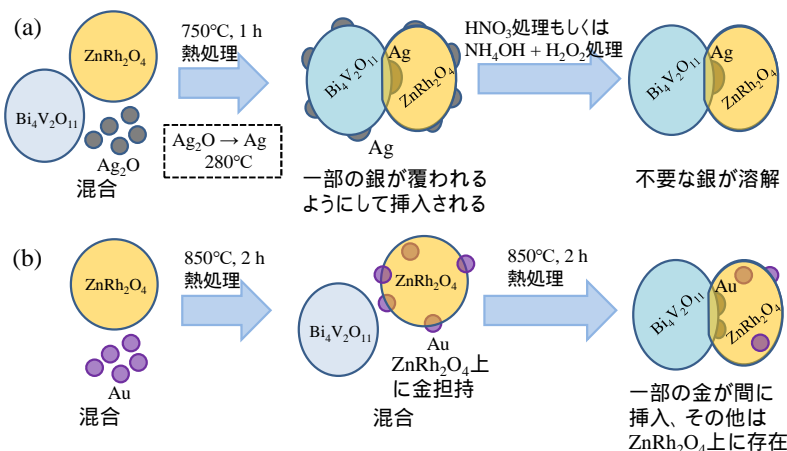


図 2 接合系光触媒の作製手順例 (導電層(a) Ag と(b) Au)

Au ナノ粒子の合成と合成した Au ナノ粒子の $\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Au}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ への適用

Au ナノ粒子 (Au_{sp}) はイオン液体へのスパッタにより作製した¹³⁾。この方法でイオン液体中に得られた Au_{sp} の粒径は、平均 2.3 nm であった。上述の市販 Au を用いた場合と同様の方法によって (図 2b) $\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Au}_{\text{sp}}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ を作製した。波長 700 nm の赤色光照射下での水の完全分解を確認できた¹⁴⁾。

ZnRh_2O_4 , $\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ 光触媒、Au の混合比の最適化

市販の Au を用いて ZnRh_2O_4 , $\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ 光触媒、Au の混合比の最適化を行った。 $\text{ZnRh}_2\text{O}_4 : \text{Au} : \text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11} = 0.2 : 0.12 : 1$ (mol 比) のとき最も水分解活性が高くなり、波長 700 nm での QE は 0.3% 相当であった。

(2) H_2 もしくは O_2 発生助触媒の選択的な ZnRh_2O_4 , もしくは $\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ 上への担持による高活性化

$\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Au}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ 中 $\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ 上への O_2 発生助触媒 (コバルト (Co) 酸化物) の選択的担持

(1) で示した $\text{ZnRh}_2\text{O}_4/\text{Au}/\text{Bi}_4\text{V}_2\text{O}_{11}$ に対し、Co 酸化物を光析出法により担持した。すなわち、リン酸水素二カリウム溶液およびリン酸二水素カリウム溶液を pH 7 になるように混合することでリン酸緩衝液を調製し、そこに硝酸コバルト六水和物を Co 酸化物源に波長 610 nm の光を照射した。波長 700 nm の赤色光照射下での水の完全分解を確認でき、波長 700 nm での QE は 0.8% 相当まで向上した。

ZnRh₂O₄/Ag/Bi₄V₂O₁₁ での ZnRh₂O₄ 上への H₂ 発生助触媒 (白金 (Pt), Ag) の選択的担持

助触媒の担持は ZnRh₂O₄, Bi₄V₂O₁₁ の E_g がそれぞれ 1.2 eV, 1.7 eV であるため、波長 800 nm 以上の光を照射すると Bi₄V₂O₁₁ は光励起されず、ZnRh₂O₄ のみが光励起でき ZnRh₂O₄ 上でのみに助触媒が光析出可能である。具体的には、塩化白金酸 (H₂PtCl₆)、硝酸銀 (AgNO₃) をそれぞれ Pt, Ag 源に正孔補足犠牲剤としてのホルムアルデヒド (HCHO) と共に加え、波長 800 nm 以上の光照射を行った。

波長 700 nm の LED 光照射による純水を用いた水分解実験を行った結果を図 3a, 3b に示す。図 3a が Pt 担持と無担持、図 3b が Ag 担持と無担持の比較、共に実線が Pt もしくは Ag 担持した場合、破線が無担持の場合である。Pt, Ag 担持によりそれぞれ H₂ の発生速度が向上した¹⁵⁻¹⁷⁾。

また、ZnRh₂O₄ 上への H₂ 発生助触媒 Pt の、Bi₄V₂O₁₁ 上への O₂ 発生助触媒 Co 酸化物の選択的担持も開始しており、波長 700 nm での水分解活性は大きく向上している。

Pt 上にクロム (Cr) を更に担持することによって、更なる水分解活性向上も確認しており、現状では波長 700 nm での QE は 3% 相当まで向上している。波長 700 nm での QE=3% は波長 600 nm での QE=7~8% に相当し、目標の波長 600 nm での QE=30% 程度まで、あと約 4 倍のところまで来ている。別の検討で Bi₄V₂O₁₁ を単結晶由来の粉末を用いれば QE は 3 倍程度向上すること、また ZnRh₂O₄ を高結晶化することにより QE は 2 倍程度向上することを確認しているため、単結晶由来の Bi₄V₂O₁₁ 粉末、高結晶化 ZnRh₂O₄ を用いて同様に助触媒を担持すれば目標の波長 600 nm での QE=30% 程度は、検証作業は必要であるものの、達成できたと想定している。

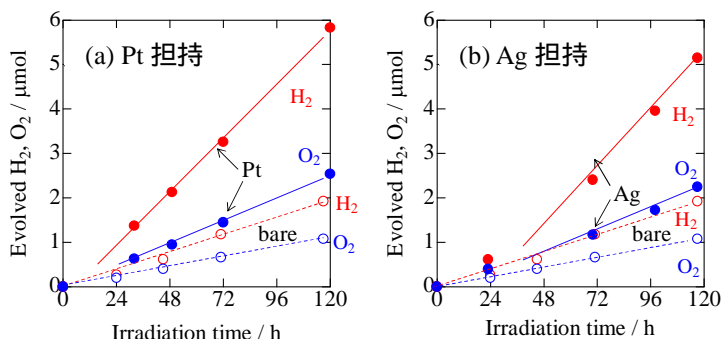


図 3 (a) Pt 担持 ZnRh₂O₄/Ag/Bi₄V₂O₁₁, (b) Ag 担持 ZnRh₂O₄/Ag/Bi₄V₂O₁₁ の 700 nm LED 光照射下での水分解活性評価。比較のため ZnRh₂O₄/Ag/Bi₄V₂O₁₁ も示す。

引用文献

- 1) A. Fujishima *et al.*, *Nature*, 238, 37 (1972)
- 2) 例えば、K. Domen *et al.*, *Nature*, 440, 295 (2006)
- 3) L. Liao *et al.*, *Nature Nanotech.*, 9, 69 (2014)
- 4) K. Domen *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 54, 2955 (2015)
- 5) K. Sayama *et al.*, *J. Photo. Photo. A: Chem.*, 148, 71 (2002)
- 6) A. Kudo *et al.*, *J. Phys. Chem. B*, 113, 17536 (2009)
- 7) R. Amal *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 133, 11054 (2011)
- 8) A. Kudo *et al.*, *Chem. Sci.*, 5, 1513 (2014)
- 9) H. Irie *et al.*, *J. Phys. Chem. C*, 118, 22450 (2014)
- 10) H. Irie *et al.*, *J. Mater. Chem. A*, 4, 3061 (2016)
- 11) H. Irie *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 18, 27693 (2016)
- 12) H. Irie *et al.*, *Chem. Commun.*, 54, 7999 (2018)
- 13) T. Torimoto *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 243117 (2006)
- 14) H. Irie *et al.*, *J. Chem. Phys.*, 153, 014701 (2020)
- 15) H. Irie *et al.*, *RSC Adv.*, 9, 41913 (2019)
- 16) H. Irie *et al.*, *Appl. Catal. B, Environ.*, 284, 119744 (2020)
- 17) H. Irie *et al.*, *J. Ceram. Soc. Jap.*, 129, 119744 (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 H. Irie, M. Yoda, T. Takashima, and J. Osaki	4. 巻 129
2. 論文標題 Selective Loading of Platinum Cocatalyst onto Zinc Rhodium Oxide in a Silver-Inserted Heterojunction Overall Water-Splitting Photocatalyst Consisting of Zinc Rhodium Oxide and Bismuth Vanadium Oxide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Ceram. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 453 457
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2109/jcersj2.20227	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 M. Yoda, T. Takashima, K. Akiyoshi, T. Torimoto, and H. Irie	4. 巻 153
2. 論文標題 Red Light-Inducible Overall Water-Splitting Photocatalyst, Gold-Inserted Zinc Rhodium Oxide and Bismuth Vanadium Oxide Heterojunction, Connected using Gold Prepared by Sputtering in Ionic Liquid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Chem. Phys.	6. 最初と最後の頁 14701
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0010100	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 H. Irie, M. Yoda, T. Takashima, and J. Osaki	4. 巻 284
2. 論文標題 Silver Cocatalyst-Concentration Dependence of Overall Water Splitting Performance over Silver-Inserted Solid-State Heterojunction Photocatalyst Composed of Zinc Rhodium Oxide and Bismuth Vanadium Oxide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Appl. Catal. B, Environ.	6. 最初と最後の頁 119744
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apcatb.2020.119744	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 J. Osaki, M. Yoda, T. Takashima, and H. Irie	4. 巻 9
2. 論文標題 Selective Loading of Platinum or Silver Cocatalyst onto a Hydrogen-Evolution Photocatalyst in a Silver-Mediated All Solid-State Z-Scheme System for Enhanced Overall Water Splitting	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RSC Adv.	6. 最初と最後の頁 41913 41917
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9RA09421K	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 K. Kamijyo, T. Takashima, M. Yoda, J. Osaki, and H. Irie	4. 巻 54
2. 論文標題 Facile Synthesis of a Red Light-Inducible Overall Water-Splitting Photocatalyst using Gold as a Solid-State Electron Mediator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chem. Commun.	6. 最初と最後の頁 79998002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CC02942C	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30件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 入江 寛
2. 発表標題 光誘起電荷移動に基づく複合光触媒の構築と高機能化
3. 学会等名 日本セラミックス協会2022年 年会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Irie
2. 発表標題 Selective Loading of Platinum or Silver Cocatalyst on a Hydrogen-Evolution Photocatalyst in an Overall Water-Splitting System, Silver-Inserted Zinc Rhodium Oxide and Bismuth Vanadium Oxide
3. 学会等名 Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid State Science (PRiME 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Yoda, T. Takashima, K. Akiyoshi, T. Torimoto, and H. Irie
2. 発表標題 Gold Amount Dependence of Red Light Responsive Z-Scheme Photocatalyst on Water-Splitting Activity Using Gold Prepared By Sputtering in Ionic Liquid
3. 学会等名 Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid State Science (PRIME 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 入江 寛
2. 発表標題 ソーラー水素製造と材料開発
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Irie, M. Yoda, J. Osaki, and T. Takashima
2. 発表標題 Cocatalyst Modification for Enhancement of Red Light-Sensitive Overall Water-Splitting Heterojunction Photocatalyst
3. 学会等名 The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Irie, M. Yoda, R. Hanada M. Hirukawa, J. Osaki, and T. Takashima
2. 発表標題 Red Light-Inducible Photocatalysts for Overall Water-Splitting and Carbon Dioxide Reduction
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Recent Progress of Energy and Environmental Photocatalysis (Photocatalysis 3) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Yoda, T. Takashima, and H. Irie
2. 発表標題 Preparation of Gold Inserted Water-Splitting Photocatalyst for Improved Activity
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Recent Progress of Energy and Environmental Photocatalysis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 入江寛、依田将臣、尾崎純也、高嶋敏宏
2. 発表標題 赤色光に応答する水分解光触媒の創製とその活性向上
3. 学会等名 第38回 光がかかわる触媒化学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Irie
2. 発表標題 A Red Light-Inducible Overall Water-Splitting Photocatalyst using Gold as a Solid-State Electron Mediator
3. 学会等名 22nd International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尾崎純也、高嶋敏宏、入江寛
2. 発表標題 赤色光に応答する水分解及び二酸化炭素還元光触媒の開発
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Irie
2. 発表標題 Construction of a Solid-State Overall Water-Splitting Photocatalyst for Sensitization to Red-Light
3. 学会等名 II International Energy & Environment Summit; 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Irie
2. 発表標題 Overall Water-Splitting Photocatalysts towards Sensitization to Red Light for Solar Hydrogen Production
3. 学会等名 BIT's 7th Annual World Congress of Nano Science & Technology-2017 (Nano S&T-2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Irie
2. 発表標題 All Solid-State Overall Water-Splitting Photocatalyst, Silver-Inserted Zinc Rhodium Oxide and Bismuth Vanadium Oxide, Sensitive to Red Light
3. 学会等名 23rd China-Japan Bilateral Symposium on Intelligent Electrophotonic Materials and Molecular Electronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Takashima and H. Irie
2. 発表標題 Induction of the concerted proton-coupled electron transfer for promoting oxygen evolution on hematite
3. 学会等名 13th International Conference on Materials Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Takashima, K. Ishikawa, and H. Irie
2 . 発表標題 Enhancement of Oxygen Evolution Activity of Hematite Electrodes byInducing the Concerted Proton-Coupled Electron Transfer
3 . 学会等名 23rd China-Japan Bilateral Symposium on Intelligent Electrophotonic Materials and Molecular Electronics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 J. Osaki, T. Takashima, and H. Irie
2 . 発表標題 Visible light sensitive calcium copper titanate photocatalyst, CaCu ₃ Ti ₄ O ₁₅ , for oxygen evolution
3 . 学会等名 13th International Conference on Materials Chemistry (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 J. Osaki, T. Takashima, and H. Irie
2 . 発表標題 Bismuth Vanadate as an Oxygen-Evolution Photocatalyst
3 . 学会等名 23rd China-Japan Bilateral Symposium on Intelligent Electrophotonic Materials and Molecular Electronics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Higuchi, T. Takashima, and H. Irie
2 . 発表標題 Zinc Rhodium Oxide Photocatalyst for Reduction of Carbon Dioxide
3 . 学会等名 23rd China-Japan Bilateral Symposium on Intelligent Electrophotonic Materials and Molecular Electronics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

クリーンエネルギー研究センター
<http://www.clean.yamanashi.ac.jp/>
クリーンエネルギー研究センター 太陽エネルギー変換研究部門ホームページ
<http://www.scgroup.yamanashi.ac.jp/>

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
---------	---------