

太陽光発電—水電解システムを用いた 太陽光水素製造の基礎と最新動向

Fundamentals and recent progress in solar hydrogen production using photovoltaic-electrolyzer systems

坪ノ内優太¹・Zaki Zahran²・八木政行^{3*}

1. はじめに

水素は、重量エネルギー密度が高く（水素ガス 1 kg 当たりのエネルギーはおよそガソリン 2.8 kg に相当する.），燃焼しても CO₂ を排出しないため，化石燃料に替わるクリーンなエネルギー源として注目されている^{1,2)}。しかしながら，現在，水素の約 90% が化石燃料の水蒸気改質法を用いて製造されており，その製造過程で大量の CO₂ が排出されているため，カーボンニュートラルな水素製造技術の開発が急務となっている³⁻⁵⁾。

このような背景から，太陽光エネルギーを用いて水を分解（式 1）して水素を製造する人工光合成システムに関する研究が近年盛んに行われている。本システムは図 1 に示すように，(A) 半導体粉末を水中に分散させて光を照射することで水を分解する光触媒システム⁶⁾，(B) n 型半導体光アノードと p 型半導体光カソードから構成される光電気化学シ

ステム⁷⁾，(C) 太陽電池と水の電気分解セルを組み合わせた太陽光発電—水電解システム⁸⁾，の三つに大別できる。本稿では，比較的高い太陽光—水素変換効率（STH: solar-to-hydrogen efficiency）が期待される太陽光発電—水電解システムに着目し⁸⁾，その設計指針を概説した後，最近 10 年の高効率水素製造システムの進展を紹介する。なお，紙幅の都合上，著者らの研究を中心に紹介することにご容赦願うとともに，詳細は文献を参照されたい⁹⁾。



2. 太陽光発電—水電解システムの設計指針

水電解セルの全印加電圧 E_{cell}^{10} は，水分解の理論電圧 (V_{th} / V) に加え，アノードの酸素発生過電圧 $\eta_{\text{O}_2}^{10}$ とカソードの水素発生過電圧 $\eta_{\text{H}_2}^{10}$ からなるセル過電圧 ($\eta_{\text{cell}}^{10} = \eta_{\text{O}_2}^{10} + \eta_{\text{H}_2}^{10}$) との和で表され

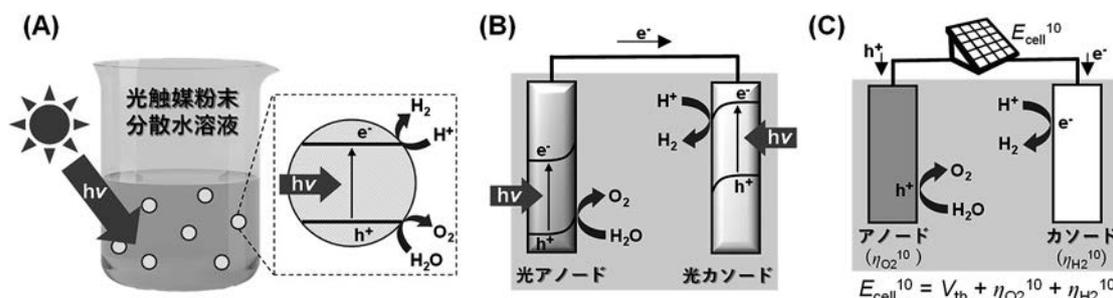


図 1 水素製造人工光合成システムの模式図。(A) 光触媒システム、(B) 光電気化学システム、(C) 太陽光発電—水電解システム。

*1 新潟大学 自然科学系 特任助教

*2 新潟大学 外国人客員研究員

*3 新潟大学 自然科学系 教授 (〒 950-2181 新潟県新潟市西区 五十嵐二の町 8050)

* e-mail: yagi@eng.niigata-u.ac.jp

る（上付きの数字は、到達する電流密度（mA cm⁻²）を表す。図1C参照）。したがって、高効率水電解を達成するためには、酸素発生アノードと水素発生カソード両方の高活性電極触媒の開発が必須である。最近では、元素戦略の観点から卑金属材料を基盤とした高活性的かつ高耐久性のアノードおよびカソードが開発され、それらを用いた高性能水電解セルが報告されている¹⁰⁻¹²⁾。

太陽電池と水電解セルを組み合わせた太陽光発電-水電解システムにおける、STHは式2により算出される。

$$STH = (V_{th} \times J_{op} \times FE_{H_2}) / P_s \quad (2)$$

J_{op}、FE_{H₂}およびP_sはそれぞれ、太陽光水分解時の電解セルの作動電流密度（mA cm⁻²）、水素生成のファラデー効率（%）、照射光エネルギー密度（mW cm⁻²）を表す。V_{th}値は、25℃における水分解反応（式1）の標準ギブスエネルギー変化（ΔG° = -237.2 kJ mol⁻¹）を基準とした1.23 V、または標準エンタルピー（ΔH° = -285.8 kJ mol⁻¹）を基準とした1.45 Vが用いられる。J_{op}とFE_{H₂}は、太陽光照射下（P_s / mW cm⁻²）における水分解実験により求められる。一方、STHは式3からも算出される。

$$STH = STE \times ETH \times MF \quad (3)$$

STE、ETHおよびMFはそれぞれ、太陽電池の太陽光-電気変換効率（STE：solar-to-electricity efficiency）、水電解セルの電気-水素変換効率（ETH：electricity-to-hydrogen efficiency）、太陽電池と水電解セルの最大出力の比（MF：matching factor）である。

一般的な太陽電池の電流密度-電圧（J-V）特性において、電圧がゼロのとき、すなわち縦軸と特性曲線の交点が短絡電流密度（J_{sc} / mA cm⁻²）、電流密度がゼロとなる横軸と特性曲線の交点が開放電圧（V_{oc} / V）を示す。太陽電池の最大出力（P_{max} / mW cm⁻²）は、特性曲線で作動電流密度と作動電圧の積が最大となる点で、それぞれ最大作動電流密度（J_{max} / mA cm⁻²）と最大作動電圧（V_{max} / V）として表される。STEは、P_{max}をP_sで除した式4から算出される。

$$STE = P_{max} / P_s = (V_{max} \times J_{max}) / P_s \quad (4)$$

ETHは式5で表され、V_{op}は太陽光水分解時の電解セルの作動電圧である。V_{op}はさらに式6で表すことができ、η_{cell}値が小さいほどETHは大きくなる。

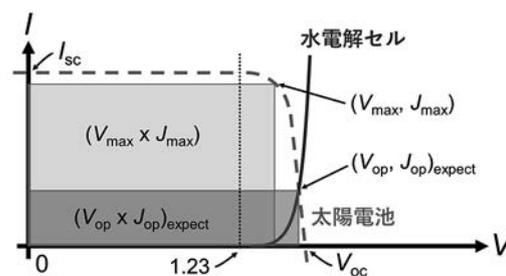
$$ETH = V_{th} / V_{op} \quad (5)$$

$$V_{op} = V_{th} + \eta_{cell} \quad (6)$$

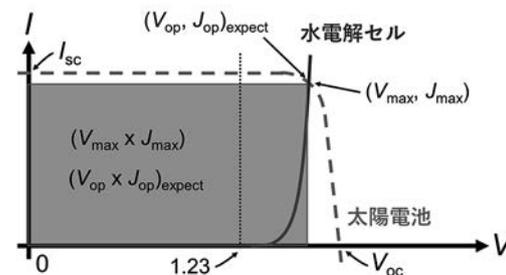
$$MF = (V_{op} \times J_{op}) / (V_{max} \times J_{max}) \quad (7)$$

MFは式7で表されるが、以下に詳しく説明する。太陽電池と水電解セルの電流-電圧（I-V）曲線の関係は図2の三つ（Case A-C）に場合分けでき

Case A ((V_{op})_{expect} > V_{max}) MF < 100 %



Case B ((V_{op})_{expect} = V_{max}) MF = 100 %



Case C ((V_{op})_{expect} < V_{max}) MF < 100 %

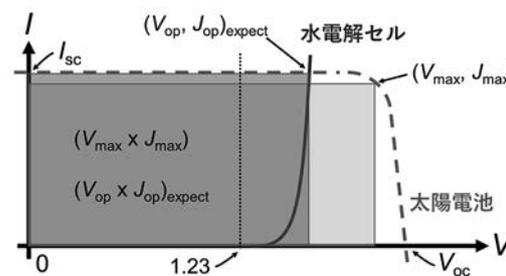


図2 太陽光発電-水電解システムにおける太陽電池と水電解セルの電流-電圧曲線の関係。電流値を電流密度に換算する場合には、太陽電池の照射面積、水電解セルのアノードおよびカソードの面積のうち最小の面積を用いる。

る¹³⁾。多くの場合で、太陽電池の光照射面積と水電解セルのアノードおよびカソードの面積が異なるため、図2では縦軸を電流密度ではなく電流値として表記している点に注意頂きたい。光照射面積、アノードおよびカソードの内で最小の面積で電流値を除して電流密度に換算するが、光照射面積が最小となる条件が多いため、これを用いて換算するケースが多い。太陽電池と水電解セルの電流-電圧曲線の交点から(図2)、太陽光水分解時における作動電流密度($(J_{op})_{expect}$)および作動電圧($(V_{op})_{expect}$)を予測することができる。 $(V_{op})_{expect} > V_{max}$ の場合(Case A)は、 J_{op} は J_{max} よりも低くなり、両者の最大出力にミスマッチが生じる。その結果、 MF は小さくなる($MF < 100\%$)。 $(V_{op})_{expect} = V_{max}$ の場合(Case B)、太陽電池の最大出力と水電解セルの電流-電圧特性がよく適合し、理想的な組み合わせとなる($MF = 100\%$)。 $(V_{op})_{expect} < V_{max}$ の場合(Case C)は、Case Aと同様、 MF は小さくなる($MF < 100\%$)。このように、高い STH を達成するには、 STE と ETH の向上に加えて、 MF の最適化が重要である。

3. 水電解セルの種類と特性

水電解セルは、電解質の種類により、アルカリ水電解(図3A)¹⁴⁾、プロトン交換膜型(PEM: proton exchange membrane)水電解(図3B)¹⁵⁾、アニオン交換膜(AEM: anion exchange membrane)型水電解(図3C)¹⁶⁾に分類される。アルカリ水電解セルは、優れた安定性を有することに加えて、安価な卑金属からなる電極触媒を利用できるため、低コストで作製することが可能である。一方で、60~90°Cの作動温度環境下で、1.7~2.4 Vほどの電圧を印可した際の水電解電流密度は300~400 mA cm⁻²程度の値を示す。プロトン交換膜型水分解セルは、

2.0 V程度の印可電圧において1~6 A cm⁻²の高い電流密度で作動するが、酸に耐性のあるイリジウムやルテニウムなどの貴金属材料が電極触媒として用いられており、貴金属フリーの触媒材料の開発が課題となっている。アニオン交換膜型水電解セルは、塩基性条件で作動するため、卑金属電極触媒を利用可能である。80°Cの作動温度環境下、24 wt% KOH溶液を電解質としたアニオン交換膜型水電解セル(ニッケル系触媒電極)の触媒電流密度は1.7 A cm⁻²(印可電圧1.8 V)¹⁶⁾であり、アルカリ水電解セルよりも優れた性能を示す。

4. 太陽光発電-水電解システムの開発の最前線

日常生活で良く目にするシリコン(Si)太陽電池¹⁷⁾を始め、III-V族化合物太陽電池¹⁸⁾、カルコゲナイド系太陽電池¹⁹⁾、ペロブスカイト太陽電池²⁰⁾、バルクヘテロ接合有機太陽電池²¹⁾など様々な太陽電池が開発され、太陽光発電-水電解システムに適用されている。これらの太陽電池の単接合型モジュールの1 sun照射下における V_{oc} 値は、0.51~1.43 V程度と小さく、水電解セルの V_{op} に届かない場合が多い。そのため、複数の太陽電池を積層させた多接合型モジュール($V_{oc} = 1.92 \sim 5.15$ V)が用いられている。これまでに報告されている高効率な太陽光発電-水電解システムを太陽電池の種類別に表1にまとめた^{13, 22-38)}。

著者らのグループは、独自に開発した混合金属酸化物膜合成法を用いて、強固にニッケル多孔体基板(NF)表面に密着したFeNiWO_x膜(FeNiWO_x/NF)の合成に成功した¹⁰⁾。1.0 M KOH水溶液(pH 14.0)中においてFeNiWO_x/NFが $\eta_{O_2}^{10} = 167$ mVの極めて低い酸素発生過電圧で100時間以上に渡って酸素発生反応を促進する高性能アノードとして働

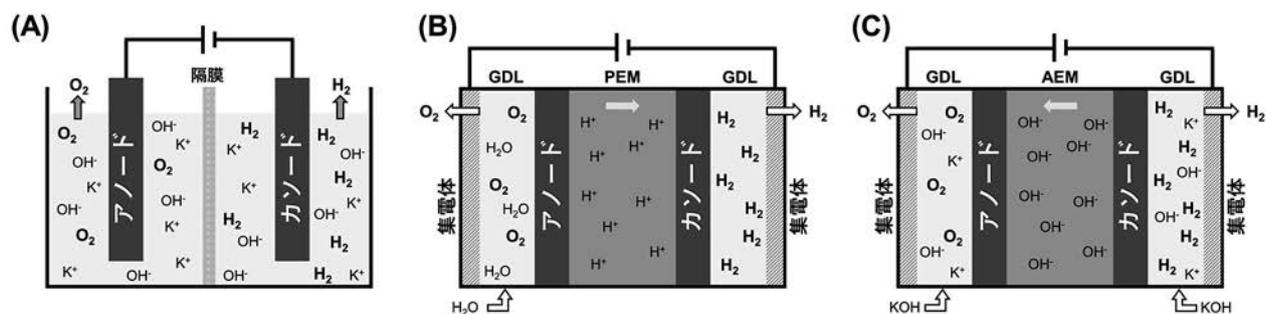


図3 水電解セルの模式図。(A) アルカリ水電解セル、(B) プロトン交換膜型(PEM: proton exchange membrane)水電解セル、(C) アニオン交換膜(AEM: anion exchange membrane)型水電解セル。GDLはガス拡散層(Gas diffusion layer)を意味する。

表1 太陽電池と水電解セルを組み合わせた太陽光発電-水電解システムの性能^{a)}

太陽電池					水電解セル				太陽光水素製造性能							Ref	
デバイス	接合数	セル数	V_{oc} / V	J_{sc} / mA cm ⁻²	STE (%)	アノード	カソード	電解質	セル数	光強度 / Sun	$(V_{op})_{expect}$ / V ^{b)}	ETH_{expect} (%) ^{c)}	MF_{expect} (%) ^{d)}	J_{op}	STH (%)	耐久性 / h	
シリコン太陽電池を用いたシステム																	
非結晶性 Si	—	4	2.75	8.26	15.0	NiFe/Ni	NiFe/Ni	1M KOH	1	1	1.75	70	90	7.7	9.5	25	[23]
結晶性 Si	—	4	2.45	8.5	16.0	NiBi	NiMoZn	pH 9.2 KBi	1	1	1.90	65	94	7.9	9.8	168	[24]
結晶性 Si	—	3	1.67	13.3	14.4	NiCoP/NiCoS/NF	NiCoP/NiCoS/NF	1M NaOH	1	1	1.60	77	97	8.8	10.8	48	[25]
結晶性 Si	—	3	2.08	11.9	20.6	IrO ₂	Pt	PEM, H ₂ O	1	1	1.67	74	93	11.5	14.2	100	[26]
III-V 族化合物太陽電池を用いたシステム																	
InGaP/GaAs/GaInNAs(Sb)	3	1	2.8	13.4	33.0	Pt	Pt	1M H ₂ SO ₄	1	1	1.70	72	67	13.0	16	24	[27]
GaAs/GaAs	2	1	1.79	13.40	16.5	FeNiWO _x /NF	Pt/NF	1M KOH	1	1	1.5 (1.45) ^{e)}	82 (85) ^{d)}	~100 (99) ^{d)}	11.3	13.9	72	[13]
GaInP/GaAs/Ge	3	1	2.6	1,770	38	NF	NF	1M NaOH	3	100	2.18	56	~100	18.2	22.4	24	[28]
GaInP/GaAs/Ge	3	3	3.0	13,200	31.2	Pt/C	Pt/C	PEM, H ₂ O	5	800	1.50	82	95	18.2	24.4	NR	[29]
GaInP/GaInAs	2	1	2.3	14.5	21.0	Ir	Pt	PEM, H ₂ O	1	81.2	1.60	77	100	13.2	16.2	2	[30]
GaInP/GaAs/GaInAsNSb	3	1	3.2	584	39.0	Ir black	Pt black	PEM, H ₂ O	2	42	2.90	42	183	24.4	30.0	48	[22]
AlGaAs/Si	2	1	1.57	23.6	21.2	RuO ₂ /Ti foil	Pt black/Pt mesh	1M HClO ₄	1	1.4	1.40	88	98	14.9	18.3	14	[31]
カルコゲナイド系太陽電池を用いたシステム																	
(Ag, Cu)(In, Ga)Se ₂	—	4	2.90	7.30	16.0	NiO/NF	NiMoV/NF	1M KOH	1	1	2.30	53	100	6.9	8.5	100	[32]
(Ag, Cu)(In, Ga)Se ₂	—	3	2.20	9.50	14.5	NiO/NF	NiMoV/NF	1M KOH	1	1	1.63	75	92	8.1	10.0	NR	
CIGSe	—	3	1.97	11.7	17.0	Pt/Pt foil	Pt/Pt foil	3M H ₂ SO ₄	1	1	1.72	72	90	8.9	11.0	10 min	[33]
(Ag, Cu)(In, Ga)Se ₂	2	1	NR	NR	17.3	NiFe-LDH	NiFe-LDH	1M KOH	1	1	NR	NR	—	9.2	11.3	10	[34]
ペロブスカイト太陽電池を用いたシステム																	
CH ₃ NH ₃ PbI ₃	—	2	2.00	10.6	15.7	NiFe-LDH/NF	NiFe-LDH/NF	1M NaOH	1	1	1.53	80	98	10.0	12.3	2	[35]
CH ₃ NH ₃ PbI ₃	—	2	2.29	12.3	19.8	NiFe	MoS ₂	1M KOH	1	1	1.91	64	100	10.3	12.7	270 sec	[36]
バルクヘテロ接合有機太陽電池を用いたシステム																	
PBDTTPD-PC ₇₁ BM	2	1	1.84	6.54	8.35	NF	Pt	1M NaOH	1	1	1.50	82	89	4.9	6.1	NR	[37]
PF10BT-PC ₆₁ BM/	3	1	2.50	4.42	5.3	Pt	Pt	1M KOH	1	1	1.70	80	73	2.5	3.1	NR	[38]
PDPPTPT-PC ₆₁ BM/																	
PDPPTPT-PC ₆₁ BM																	

^{a)} NR: not reported; PBDTTPD: poly(benzo[1,2-b:4,5-b'] dithiophene-thieno[3,4-c]pyrrole-4,6-dione); PC₇₁BM: ([6,6]-phenyl-C₇₁ butyric acid methyl ester) fullerenes; PF10BT:(poly[2,7-(9,9-didecylfluorene)-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole)]); PC₆₁BM: [6,6]-phenyl-C₆₁ butyric acid methyl ester; PDPPTPT: poly[2,5-bis(2-hexyldecyl)-2,3,5,6-tetrahydro-3,6-dioxopyrrolo[3,4-c]pyrrole-1,4-diyl]-alt-[2,2'-(1,4-phenylene)bisthiophene]-5,5'-diyl]; LDH: layered double hydroxide; PEM: polymer electrolyte membrane, ^{b)}太陽電池と水電解セルの電流密度-電圧曲線の交点より予想される V_{op} 値 ($(V_{op})_{expect}$), ^{c)} $ETH_{expect} = 1.23 / (V_{op})_{expect}$ (式 5 参照), ^{d)} $MF_{expect} = STH / (STE \times (ETH)_{expect})$ (式 3 参照), ^{e)} 実測 V_{op} 値, ^{f)} $ETH = 1.23 / \text{実測 } V_{op}$ (式 5 参照), ^{g)} $MF = (\text{実測 } V_{op} \times J_{op}) / (V_{max} \times J_{max})$ (式 7 参照)

くことを見出した¹⁰⁾. FeNiWO_x/NF を酸素発生アノード, Pt 触媒を担持した NF 基板 (Pt/NF) を水素発生カソードとして用いたアルカリ水電解セルの LSV 測定では, 1.41 V 以上で水分解に由来する触媒電流が確認された¹³⁾. IR ドロップ補正後の LSV では, η_{cell}^{10} は 240 mV と見積もられ, この η_{cell}^{10} 値は, これまでに報告されている世界最高水準のアルカリ水電解セル (315 mV 程度) よりも小さい. 10 mA cm⁻² における定電流電解実験では, $\eta_{cell}^{10} = 242$ mV の低過電圧で安定的に水分解が進行することを実証した.

このアルカリ水電解セルの電流-電圧曲線に適合する 2 接合型 GaAs 太陽電池 (デバイス A と B, 面積 0.26 cm²) を, 2 つの GaAs の p-n 接合型セルをトンネル接合により直列に接続することで作製した (図 4A)¹³⁾. 疑似太陽光照射下 (AM 1.5, 100 mW cm⁻²) におけるデバイス A と B の電流-電圧曲線を図 4B にそれぞれ黒色線と灰色線で示している. デバイス A と B の J_{max} 値 (11.1 と 10.6 mA cm⁻²) は, 水電解セルの LSV (点線) との交点における

電流密度 (11.1 と 10.2 mA cm⁻²) と極めて近く, デバイス A と B が本水電解セルに良く適合していることが示された. デバイス A と B の STE 値は, 式 4 から, それぞれ 16.5% および 15.5% と見積もられた (表 1).

二接合型 GaAs 太陽電池 (デバイス A) と水電解セル (FeNiWO_x/NF アノードと Pt/NF カソードの二極式セル) を組み合わせて, 1.0 M KOH 水溶液 (pH 14) 中, 疑似太陽光照射下 (AM 1.5, 100 mW cm⁻²) において太陽光水分解性能を評価した¹³⁾. 一定の作動電流密度 ($J_{op} = 11.3$ mA cm⁻²) で 70 時間に渡り安定的に太陽光水分解が進行し (図 5C), この時の $J_{op} = 11.3$ mA cm⁻² と $V_{op} = 1.45$ V (図 4C 挿入図) は, 太陽電池 (デバイス A) と水電解セルの電流-電圧曲線 (図 4B) の交点より見積もられる値 (11.1 mA cm⁻² と 1.49 V) と良い一致を示した. 太陽光水分解により発生した酸素 (n_{O_2} / mol) と水素 (n_{H_2} / mol) の時間変化を図 4D に示す. 光照射 5 時間における n_{O_2} と n_{H_2} から見積もられる酸素および水素の発生速度は, それぞれ 25.6 μ mol h⁻¹ と

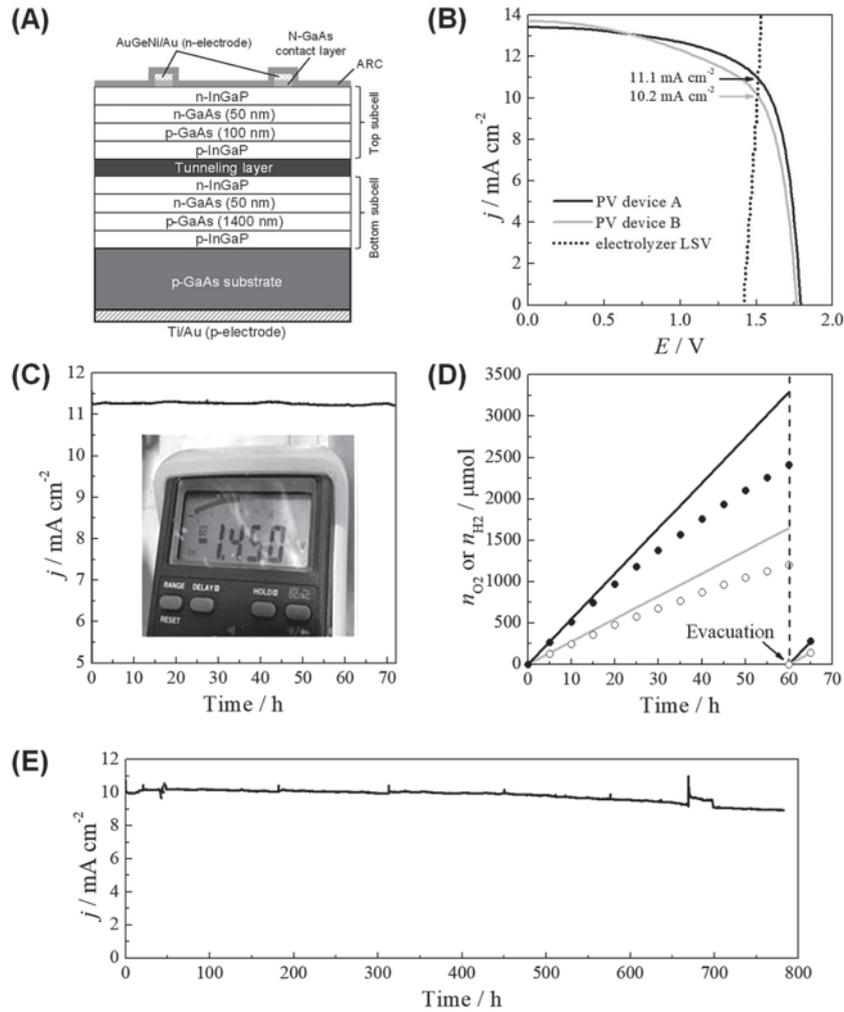


図4 (A) 2 接合型 GaAs 太陽電池の模式図、(B) 2 接合型 GaAs 太陽電池 (デバイス A (黒色線) とデバイス B (灰色線)) と水電解セル (点線) の電流—電圧曲線、(C) 疑似太陽光照射実験下 (AM 1.5、 100 mW cm^{-2}) における太陽光発電-水電解システム (デバイス A) の電流密度の経時変化 (挿絵は太陽光水分解時の電解セルの作動電圧 (V_{op}) を示す。)、(D) 太陽光水分解時 (デバイス A) の発生酸素量 (白丸) と水素量 (黒丸) の経時変化 (灰色線と黒色線は、それぞれ酸素と水素の理論発生量を表す) (E) 太陽光発電-水電解システム (デバイス B) の耐久性試験 (出版社からの許諾を得て文献 [13] から再生 Copyright 2022 American chemical Society)

$53.1 \mu\text{mol h}^{-1}$ となり、 FE は 93% と 97% と算出された。20 時間以降の気体発生量は、時間とともに減少する傾向が見られたが、65 時間後に水電解セル内の酸素と水素を排気して、光照射を再開した際には、気体発生速度は初期と同等の値に回復した。このことから、気体発生量の低下は、セル内に蓄積した酸素と水素が Pt/NF カソード表面で反応して水が生成する逆反応が進行したためと考えられる。本システムの ETH は、式 5 から $V_{op} = 1.45 \text{ V}$ と $V_{th} = 1.23 \text{ V}$ より 85% と算出された。この ETH は、これまで報告されている非貴金属系アノードを用いた高効率太陽光発電-水電解システム ($ETH = 48\text{--}88\%$) と比べても極めて高い値である (表 1 参照)。また、 MF は式 7 を用いて $V_{op} = 1.45 \text{ V}$ 、 $J_{op} = 11.3 \text{ mA cm}^{-2}$ 、 $V_{max} = 1.49 \text{ V}$ および $J_{max} = 11.1$

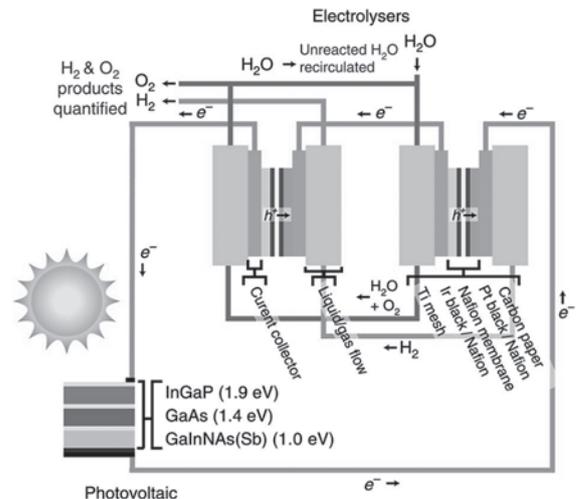


図5 三接合型 III-V 族化合物太陽電池 (InGaP/GaAs/GaInNAsSb) を二つのプロトン交換膜型水電解セル (Ir ブラックアノードと Pt ブラックカソード) に直列に接続した太陽光発電-水電解システムの模式図 (文献 [22] から転載 open access)

mA cm⁻² から 99% と算出され、水分解時において、太陽電池の最大出力と水電解セルの LSV が良く適合することが示された。STH は、 $J_{op} = 11.3 \text{ mA cm}^{-2}$ 、 $P_s = 100 \text{ mW cm}^{-2}$ であり、 $FE_{H_2} = 100\%$ とすると、式 2 により 13.9% と算出された。これは、式 3 から算出された値とも一致した ($STH = STE (16.5\%) \times ETH (85\%) \times MF (99\%)$)。

デバイス B を用いて太陽光発電 - 水電解システムの長期安定性を評価した (図 4E)¹³⁾。疑似太陽照射 300 時間に渡り $J_{op} = 10.2 \text{ mA cm}^{-2}$ の作動電流密度を維持した。それ以降 J_{op} は緩やかに減少し、783 時間 (32.6 日) で $J_{op} = 8.9 \text{ mA cm}^{-2}$ と 12.7% 減少した。この J_{op} 値の低下の原因を明らかにするために、783 時間の太陽光水分解実験前後の FeNiWO_x/NF アノードと Pt/NF カソードの LSV を測定した。FeNiWO_x/NF アノードの LSV は、水分解前後でほとんど変化は確認されなかったのに対し、Pt/NF カソードでは水分解後に $\eta_{H_2}^{10}$ 値が 25mV から 40mV に増加した。この結果から、 J_{op} 値の低下は、Pt/NF カソードの劣化に起因しており、FeNiWO_x/NF アノードは 1 か月以上極めて安定に作用することが示された。

図 5 には、39% の極めて高い STE 値で駆動する三接合型太陽電池 (InGaP/GaAs/GaInNAsSb) を二つのプロトン交換膜型水電解セル (Ir ブラックアノードと Pt ブラックカソード) に直列に接続した太陽光発電 - 水電解システムの模式図を示している²²⁾。本システムは、42 sun 照射下において世界最高である $STH = 30\%$ を達成した。太陽電池と水電解セルの電流密度 - 電圧曲線の交点より (V_{op})_{expect} 値は 2.90 V と見積もられ、この値を用いて ETH_{expect} 値と MF_{expect} 値はそれぞれ、42% および 183% と算出される (本システムでは V_{op} は実測されていない)。この異常に高い MF_{expect} 値 (183%) は、複雑な集光型光照射条件に起因すると予想される。この結果からも、 V_{op} 値を実測し、 ETH と MF を算出することが太陽光水分解水素製造システムの性能評価において重要であることがわかる。

5. おわりに

太陽電池と水電解セルを組み合わせた太陽光発電 - 水電解システムの開発は、持続可能なカーボンニュートラル社会の実現に向けて重要な研究テーマである。本稿では、太陽光発電 - 水電解システムの設計指針を概説した後、最近 10 年に報告された高性能なシステムを太陽電池の種類別にまとめた (表

1)。STH 値の向上には、更に低い過電圧で作動する高効率水電解セルを開発し、その最大出力に適した太陽電池と組み合わせることが有効であると考えられる。

太陽光発電 - 水電解システムの性能評価法に目を向けると、実測 J_{op} 値から STH 値は算出される一方で、実測 V_{op} 値から ETH と MF を算出している報告が極めて少ないことが分かる (表 1)。ほとんどの場合で、太陽電池と水電解セルの電流密度 - 電圧曲線の交点より得られる (V_{op})_{expect} 値から ETH_{expect} 値と MF_{expect} 値を見積もっている。実作動時における太陽電池と水電解セルの出力マッチングの確認には、実測 V_{op} 値から ETH と MF を算出することが重要であり、また両値を予測値 (ETH_{expect} と MF_{expect}) と比較することはシステムの性能を正しく評価する上で大切であることをここで強調したい。太陽電池と水電解セルの最適マッチングの観点を踏まえ、両分野の研究者が融合することで、革新的な太陽光発電 - 水電解システムの開発の道が開けると期待している。

参考文献

- 1) J. A. Turner, Sustainable Hydrogen Production, *Science*, **305** (5686), 972-974 (2004).
- 2) T. J. Meyer, The Art of Splitting Water, *Nature*, **451** (7180), 778-779 (2008).
- 3) A. P. Simpson, A. E. Lutz, Exergy Analysis of Hydrogen Production via Steam Methane Reforming, *Int. J. Hydrogen Energy*, **32** (18), 4811-4820 (2007).
- 4) J. X. Qian, T. W. Chen, L. R. Enakonda, D. Bin Liu, J. M. Basset, L. Zhou, Methane decomposition to pure hydrogen and carbon nano materials: State-of-the-art and future perspectives, *Int. J. Hydrogen Energy*, **45** (32), 15721-15743 (2020).
- 5) M. S. Dresselhaus, I. L. Thomas, Alternative Energy Technologies, *Nature*, **414** (6861), 332-337 (2001).
- 6) A. Kudo, Y. Miseki, Heterogeneous Photocatalyst Materials for Water Splitting, *Chem. Soc. Rev.*, **38** (1), 253-278 (2009).
- 7) C. Jiang, S. J. A. Moniz, A. Wang, T. Zhang, J. Tang, Photoelectrochemical Devices for Solar Water Splitting-Materials and Challenges,

- Chem. Soc. Rev., **46** (15), 4645–4660 (2017).
- 8) H. Song, S. Luo, H. Huang, B. Deng, J. Ye, Solar-Driven Hydrogen Production : Recent Advances, Challenges, and Future Perspectives, *ACS Energy Lett.*, **7** (3), 1043–1065 (2022).
 - 9) Z. N. Zahran, Y. Tsubonouchi, M. Yagi, *Solar Fuels*, 341–373 (2022), Wiley.
 - 10) Z. N. Zahran, E.A. Mohamed, Y. Tsubonouchi, M. Ishizaki, T. Togashi, M. Kurihara, K. Saito, T. Yui, M. Yagi, Concisely Synthesized FeNiWO_x Film as a Highly Efficient and Robust Catalyst for Electrochemical Water Oxidation, *ACS Appl. Energy Mater.*, **4** (2), 1410–1420 (2021).
 - 11) Z. N. Zahran, E. A. Mohamed, Y. Tsubonouchi, M. Ishizaki, T. Togashi, M. Kurihara, K. Saito, T. Yui, M. Yagi, Electrocatalytic Water Splitting with Unprecedentedly Low Overpotentials by Nickel Sulfide Nanowires Stuffed into Carbon Nitride Scabbards, *Energy Environ. Sci.*, **14** (10), 5358–5365 (2021).
 - 12) Z. N. Zahran, E. A. Mohamed, T. Katsuki, Y. Tsubonouchi, M. Yagi, Nickel Sulfate as an Influential Precursor of Amorphous High-Valent Ni (III) Oxides for Efficient Water Oxidation in Preparation via a Mixed Metal-Imidazole Casting Method, *ACS Appl. Energy Mater.*, **5** (2), 1894–1904 (2022).
 - 13) Z. N. Zahran, Y. Miseki, E.A. Mohamed, Y. Tsubonouchi, K. Makita, T. Sugaya, K. Sayama, M. Yagi, Perfect Matching Factor between a Customized Double-Junction GaAs Photovoltaic Device and an Electrolyzer for Efficient Solar Water Splitting, *ACS Appl. Energy Mater.* **5** (7), 8241–8253 (2022).
 - 14) M. David, C. Ocampo-Martínez, R. Sánchez-Peña, Advances in Alkaline Water Electrolyzers : A Review, *J. Energy Storage.*, **23** 392–403 (2019).
 - 15) S. Shiva Kumar, V. Himabindu, Hydrogen Production by PEM Water Electrolysis – A Review, *Mater. Sci. Energy Technol.* **2** (3), 442–454 (2019).
 - 16) K. Zeng, D. Zhang, Recent Progress in Alkaline Water Electrolysis for Hydrogen Production and Applications, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **36** (3), 307–326 (2010).
 - 17) K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, T. Irie, K. Konishi, K. Nakano, T. Uto, D. Adachi, M. Kanematsu, H. Uzu, K. Yamamoto, Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26% , *Nat. Energy.*, **2** (5), 17032 (2017).
 - 18) B. M. Kayes, H. Nie, R. Twist, S. G. Spruytte, F. Reinhardt, I. C. Kizilyalli, G. S. Higashi, 27.6% Conversion Efficiency, a New Record for Single-Junction Solar Cells under 1 Sun Illumination, 2011 37th IEEE Photovolt. Spec. Conf., 000004–000008 (2011), IEEE.
 - 19) C. Yan, J. Huang, K. Sun, S. Johnston, Y. Zhang, H. Sun, A. Pu, M. He, F. Liu, K. Eder, L. Yang, J. M. Cairney, N. J. Ekins-Daukes, Z. Hameiri, J. A. Stride, S. Chen, M. A. Green, X. Hao, Cu₂ZnSnS₄ Solar Cells with over 10% Power Conversion Efficiency Enabled by Heterojunction Heat Treatment, *Nat. Energy.*, **3** (9), 764 (2018).
 - 20) A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka, Organometal Halide Perovskites as Visible-light Sensitizers for Photovoltaic Cells, *J. Am. Chem. Soc.*, **131** (17), 6050–6051 (2009).
 - 21) L. Sun, K. Fukuda, T. Someya, Recent Progress in Slution-processed Flexible Organic Photovoltaics, *Npj Flex. Electron.*, **6** (1), 89 (2022).
 - 22) J. Jia, L. C. Seitz, J. D. Benck, Y. Huo, Y. Chen, J. W. D. Ng, T. Bilir, J. S. Harris, T. F. Jaramillo, Solar Water Splitting by Photovoltaic-Electrolysis with a Solar-to-Hydrogen Efficiency over 30% , *Nat. Commun.*, **7**, 13237 (2016).
 - 23) H. Song, S. Oh, H. Yoon, K.-H. Kim, S. Ryu, J. Oh, Bifunctional NiFe Inverse Opal Electrocatalysts with Heterojunction Si Solar cells for 9.54% -Efficient Unassisted Solar Water Splitting, *Nano Energy.*, **42**, 1–7 (2017).
 - 24) C. R. Cox, J. Z. Lee, D. G. Nocera, T. Buonassisi, Ten-Percent Solar-to-Fuel Conversion with Nonprecious Materials, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **111** (39), 14057–14061 (2014).
 - 25) X. Zhou, J. Zhou, G. Huang, R. Fan, S. Ju, Z. Mi, M. Shen, A Bifunctional and Stable Ni-Co-S/Ni-Co-P Bistratal Electrocatalyst for 10.8% -Efficient Overall Solar Water Splitting, *J. Mater. Chem. A.*, **6** (41), 20297–20303 (2018).
 - 26) J.-W. Schüttauf, M. A. Modestino, E. Chinello, D.

- Lambelet, A. Delfino, D. Dominé, A. Faes, M. Despeisse, J. Bailat, D. Psaltis, C. Moser, C. Ballif, Solar-to-Hydrogen Production at 14.2% Efficiency with Silicon Photovoltaics and Earth-Abundant Electrocatalysts, *J. Electrochem. Soc.*, **163** (10), F1177–F1181 (2016).
- 27) M. A. Nadeem, H. Idriss, Effect of pH, Temperature, and Low Light Flux on the Performance (16% STH) of Coupled Triple Junction Solar Cell to Water Electrolysis, *J. Power Sources.*, **459**, 228074 (2020).
- 28) S. A. Bonke, M. Wiechen, D. R. MacFarlane, L. Spiccia, Renewable Fuels from Concentrated Solar Power : towards Practical Artificial Photosynthesis, *Energy Environ. Sci.*, **8** (9), 2791–2796 (2015).
- 29) A. Nakamura, Y. Ota, K. Koike, Y. Hidaka, K. Nishioka, M. Sugiyama, K. Fujii, A 24.4% Solar to Hydrogen Energy Conversion Efficiency by Combining Concentrator Photovoltaic Modules and Electrochemical Cells, *Appl. Phys. Express.*, **8** (10), 107101 (2015).
- 30) G. Peharz, F. Dimroth, U. Wittstadt, Solar Hydrogen Production by Water Splitting with a Conversion Efficiency of 18% , *Int. J. Hydrogen Energy.*, **32** (15), 3248–3252 (2007).
- 31) S. Licht, B. Wang, S. Mukerji, T. Soga, M. Umeno, H. Tributsch, Efficient Solar Water Splitting, Exemplified by RuO₂-catalyzed AlGaAs/Si Photoelectrolysis, *J. Phys. Chem. B.*, **104** (38), 8920–8924 (2000).
- 32) I. B. Pehlivan, J. Oscarsson, Z. Qiu, L. Stolt, M. Edoff, T. Edvinsson, NiMoV and NiO-based Catalysts for Wfficient Solar-driven Water Splitting using Thermally Integrated Photovoltaics in a Scalable Approach, *IScience.*, **24** (1), 101910 (2021).
- 33) T. J. Jacobsson, V. Fjällström, M. Sahlberg, M. Edoff, T. Edvinsson, A Monolithic Device for Solar Water Splitting based on Series Interconnected Thin Film Absorbers Reaching over 10% Solar-to-Hydrogen Efficiency, *Energy Environ. Sci.*, **6** (12) 3676–3683 (2013).
- 34) S. Calnan, R. Bagacki, F. Bao, I. Dorbandt, E. Kemppainen, C. Schary, R. Schlattmann, M. Leonardi, S. A. Lombardo, R. G. Milazzo, S. M. S. Privitera, F. Bizzarri, C. Conelli, D. Consoli, C. Gerardi, P. Zani, M. Carmo, S. Haas, M. Lee, M. Mueller, W. Zwaygardt, J. Oscarsson, L. Stolt, M. Edoff, T. Edvinsson, I. B. Pehlivan, Development of Various Photovoltaic - Driven Water Electrolysis Technologies for Green Solar Hydrogen Generation, *Sol. RRL.* **6** (5), 2100479 (2022).
- 35) J. Luo, J. H. Im, M. T. Mayer, M. Schreier, M. K. Nazeeruddin, N. G. Park, S. D. Tilley, H. J. Fan, M. Grätzel, Water Photolysis at 12.3% Efficiency via Perovskite Photovoltaics and Earth-Abundant Catalysts, *Science.*, **345** (6204), 1593–1596 (2014).
- 36) A. M. Asiri, D. Ren, H. Zhang, S. Bahadar Khan, K. A. Alamry, H. M. Marwani, M. Sherjeel Javed Khan, W. A. Adeosun, S. M. Zakeeruddin, M. Grätzel, Solar Water Splitting Using Earth - Abundant Electrocatalysts Driven by High - Efficiency Perovskite Solar Cells, *ChemSusChem.*, **15** (4), e202102471 (2022).
- 37) Y. Gao, V. M. Le Corre, A. Gäitis, M. Neophytou, M. A. Hamid, K. Takanabe, P.M. Beaujuge, Homo-Tandem Polymer Solar Cells with V_{oc} > 1.8 V for Efficient PV-Driven Water Splitting, *Adv. Mater.*, **28** (17), 3366–3373 (2016).
- 38) S. Esiner, H. Van Eersel, M. M. Wienk, R. A. J. Janssen, Triple Junction Polymer Solar Cells for Photoelectrochemical Water Splitting, *Adv. Mater.*, **25** (21), 2932–2936 (2013).

著者略歴



坪ノ内 優太 (つぼのうち ゆうた)

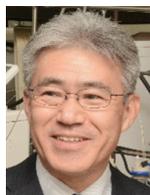
2018年九州大学理学府化学専攻博士後期課程修了, 同年新潟大学自然科学系特任助教, 現在に至る. 博士(理学), 専門: 錯体化学, 電気化学, 触媒科学



Zaki Zahran (ざはらん ざき)

2007年オクラホマ大学化学・生命科学科博士課程修了, 2008年九州大学先端物質化学研究所博士研究員・特任助教, 2013年中部大学総合工学研究所エネルギー変換化学研究センター博士研究員, 2018年新潟大学自然科学系特任准教授, 2023年新

潟大学外国人客員研究員, 現在に至る. 博士(理学),
専門: 材料科学, 触媒科学, 電気化学



八木 政行 (やぎ まさゆき)

1996年埼玉大学大学院理工学研究科
博士後期課程修了, 同年新潟大学教育
学部助手, 1997年新潟大学教育学部
助教授, 2009年新潟大学自然科学系

教授, 現在に至る. この間 2009~2013年独立行政
法人科学技術振興機構 (JST) さきがけ研究員 併任.
博士 (工学), 専門: 光化学, 錯体化学, 電気化学,
材料科学