

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7287529号

(P7287529)

(45)発行日 令和5年6月6日(2023.6.6)

(24)登録日 令和5年5月29日(2023.5.29)

(51)国際特許分類

F I

C 2 5 B 1/01 (2021.01)

C 2 5 B 1/01

Z

C 0 1 B 32/50 (2017.01)

C 0 1 B 32/50

C 2 5 B 1/02 (2006.01)

C 2 5 B 1/02

C 2 5 B 1/55 (2021.01)

C 2 5 B 1/55

C 2 5 B 9/00 (2021.01)

C 2 5 B 9/00

Z

請求項の数 11 外国語出願 (全18頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2022-59725(P2022-59725)

(22)出願日 令和4年3月31日(2022.3.31)

(65)公開番号 特開2022-161022(P2022-161022
A)

(43)公開日 令和4年10月20日(2022.10.20)

審査請求日 令和4年5月2日(2022.5.2)

(31)優先権主張番号 21167103

(32)優先日 令和3年4月7日(2021.4.7)

(33)優先権主張国・地域又は機関
欧州特許庁(EP)

(73)特許権者 000003207

トヨタ自動車株式会社
愛知県豊田市トヨタ町1番地

(74)代理人 110001195

弁理士法人深見特許事務所

(72)発明者 ハンナ・ヨンソン

ベルギー、1140ブリュッセル、ア
ブニユ・デュ・ブルジェ、60、トヨタ
・モーター・ヨーロッパ、テクニカル・
ストラテジック・プランニング・オペレー
ション内

(72)発明者 サチン・キング

ベルギー、1140ブリュッセル、ア
ブニユ・デュ・ブルジェ、60、トヨタ
・モーター・ヨーロッパ、テクニカル・
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 大気中の二酸化炭素を捕獲、濃縮、および回収するための光電気化学デバイス

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

(A)多孔質(光)アノードと多孔質(光)カソードとの間に配置されるアニオン交換膜を備え、前記(光)アノードは、酸素発生触媒および/もしくは二酸化炭素発生触媒を含有するまたはこれに物理的もしくは電氣的に接続され、前記(光)カソードは、酸素還元触媒を含有するまたはこれに物理的もしくは電氣的に接続される、第1のリアクタと、

(B)多孔質(光)アノードと多孔質(光)カソードとの間に配置されるプロトン交換膜を備え、前記(光)アノードは、酸素発生触媒を含有するまたはこれに物理的もしくは電氣的に接続され、前記(光)カソードは、酸素還元触媒を含有するまたはこれに物理的もしくは電氣的に接続される、第2のリアクタと、を備える二酸化炭素捕獲デバイスであって、

前記第1のリアクタの多孔質(光)カソードは、二酸化炭素、空気、および水を運搬できる流体入口を少なくとも有し、前記第1のリアクタの多孔質(光)アノードは、水および酸素を運搬できる流体入口を少なくとも有し、

前記第2のリアクタの多孔質(光)カソードは、二酸化炭素および水を運搬できる流体出口を少なくとも有し、前記第2のリアクタの多孔質(光)アノードは、水および酸素を運搬できる流体出口を少なくとも有し、

前記二酸化炭素捕獲デバイスは、前記第1のリアクタの多孔質(光)カソードから出た流体を前記第2のリアクタの多孔質(光)アノードへと移動させ、前記第1のリアクタの多孔質(光)アノードから出た流体を前記第2のリアクタの多孔質(光)カソードへと移

動させるよう構成される、二酸化炭素捕獲デバイス。

【請求項 2】

- 前記第 1 のリアクタの多孔質（光）カソードは、空気中および水中の二酸化炭素を運搬できる流体入口および流体出口を有し、前記第 1 のリアクタの多孔質（光）アノードは、水および酸素を運搬できる流体入口および流体出口を有し、

- 前記第 2 のリアクタの多孔質（光）カソードは、二酸化炭素、酸素、および水を運搬できる流体入口および流体出口を有し、前記第 2 のリアクタの多孔質（光）アノードは、水および酸素を運搬できる流体入口および流体出口を有し、

前記第 1 のリアクタの多孔質（光）カソードの流体出口は、前記第 2 のリアクタの多孔質（光）アノードの流体入口に流体接続され、前記第 1 のリアクタの多孔質（光）アノードの流体出口は、前記第 2 のリアクタの多孔質（光）カソードの流体入口に流体接続される、請求項 1 に記載の二酸化炭素捕獲デバイス。

10

【請求項 3】

前記第 1 のリアクタの多孔質（光）カソードと前記第 2 のリアクタの多孔質（光）アノードとが向かい合って位置しかつセパレータにより互いから隔てられるように、かつ前記第 1 のリアクタの多孔質（光）アノードと前記第 2 のリアクタの多孔質（光）カソードとが向かい合いかつ前記セパレータにより互いから隔てられるように、前記第 1 のリアクタおよび前記第 2 のリアクタが前記セパレータにより隔てられて連結ブロック内に配置され、前記第 1 のリアクタの多孔質（光）カソードの流体入口と前記第 2 のリアクタの多孔質（光）アノードの流体出口とを含む 1 つの流体ラインが、前記連結ブロックの 1 つの壁に沿って伸び、前記第 1 のリアクタの多孔質（光）アノードの流体入口と前記第 2 のリアクタの多孔質（光）カソードの流体出口とを含むもう 1 つの流体ラインが、前記連結ブロックの別の壁に沿って伸び、これら 2 つの壁が互いに向かい合いかつ前記セパレータと接している、請求項 1 に記載の二酸化炭素捕獲デバイス。

20

【請求項 4】

前記第 1 のリアクタの多孔質（光）アノードは、 BiVO_4 、 TaO_xN_y 、 LaTiO_2N 、 BaTaO_2N 、 SrTaO_2N 、 WO_3 、 CuWO_4 、 Fe_2O_3 、 ZnFe_2O_4 、および/または TiO_2 を備え、かつ、 Ni 、 Ni ラネー、 NiCo 、 NiFe 、 NiP 、 CoP 、 CoPi 、 SrCoO_3 、 Ru 、 Mg 、 Ag 、 Au 、 Fe-OOH 、 Ni-OOH 、 IrO_x 、 CoOH 、 FeO_x 、 Pt 、 Rh 、 RhO_x 、 RuO_x 、および PtO_x のうちの 1 種以上に基づく（助）触媒材料をさらに含み得る、請求項 1～3 のいずれか 1 項に記載の二酸化炭素捕獲デバイス。

30

【請求項 5】

前記第 2 のリアクタの多孔質（光）アノードは、 BiVO_4 、 TaO_xN_y 、 LaTiO_2N 、 BaTaO_2N 、 CuWO_4 、 WO_3 、および/または TiO_2 を備え、かつ、 Ir 、 IrO_x 、 Rh 、 RhO_x 、 Pt 、 PtO_x 、 Ni 、 Co 、 CoO_x 、 NiO_x 、 MnO_x 、 Co ホスフェート、 Mg 、 Ru 、 Au 、式中 $\text{M} = \text{Ni}$ または Co または Y である Pt_3M 、 PtRu 、 NiP 、 CoP 、 FeP 、 NiCo 、 NiMo 、および NiW のうちの 1 種以上に基づく（助）触媒材料をさらに含み得る、請求項 1～4 のいずれか 1 項に記載の二酸化炭素捕獲デバイス。

40

【請求項 6】

前記第 1 のリアクタの多孔質（光）カソードは、 MoS_2 、 MoSe_2 、 WS_2 、 GaP 、 CdS 、 CdSe 、 ZnSe 、 CuNbO_4 、 PMPDI 、 InP 、 WSe_2 、 ZnFe_2O_4 、 CuNbO_3 、 PMPDI 、 Cu_2O 、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 、 CIGS 、 CIGSe 、 CaFeO_2 、 CuFeO_2 のうちの 1 種以上を備え、かつ、 Ni 、 Ni ラネー、 LaNiO_3 、 LaMnO_3 、 Ag 、 Ru 、 Au 、 Pt 、式中 $\text{M} = \text{Ni}$ または Co または Y である Pt_3M 、 PtRu 、 Co 、 NiP 、 CoP 、 FeP 、 NiCo 、 NiMo 、 NiW 、 Ir 、 Mg 、 Ru 、 Pt 、 Rh 、および RhO_x のうちの 1 種以上に基づく（助）触媒材料をさらに含み得る、請求項 1～5 のいずれか 1 項に記載の二酸化炭素捕獲デバイス。

【請求項 7】

50

前記第 2 のリアクタの多孔質（光）カソードは、 MoS_2 、 MoSe_2 、 WS_2 、 GaP 、 CdS 、 CdSe 、 ZnSe 、 CuNbO_4 、 PMPDI 、 InP 、 WSe_2 、 ZnFe_2O_4 、 CuNbO_3 、 PMPDI 、 Cu_2O 、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 、 CIGS 、 CIGSe 、 CaFeO_2 、および CuFeO_2 のうちの 1 種以上を備え、かつ、 Ru 、 Au 、 Pt 、式中 $\text{M} = \text{Ni}$ 、 Co 、 Y である Pt_3M 、 PtRu 、 NiP 、 CoP 、 FeP 、 NiCo 、 NiMo 、および / または NiW に基づく（助）触媒材料をさらに含み得る、請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 項に記載の二酸化炭素捕獲デバイス。

【請求項 8】

前記第 1 のリアクタの多孔質（光）アノードおよび / または前記第 2 のリアクタの多孔質（光）アノードおよび / または前記第 1 のリアクタの多孔質（光）カソードおよび / または前記第 2 のリアクタの多孔質（光）カソードは、メッシュ、フェルト、フォーム、布または紙の形状の多孔質基材を備え、前記多孔質基材は、炭素、チタン、タングステン、ステンレス鋼、ニッケル、および伝導性酸化物からなる群より選択される材料を備える、請求項 1 ~ 7 のいずれか 1 項に記載の二酸化炭素捕獲デバイス。

10

【請求項 9】

前記第 1 のリアクタのアニオン交換膜は、第 4 級アンモニウム基を含有する材料、第 4 級アンモニウム基を有する低密度ポリウレタン、イミダゾリウムまたはポリベンゾイミダゾール基を含有する材料、およびトリアミンまたはジアミン架橋 4 級化ポリスルホンからなる群より選択される材料を備える、請求項 1 ~ 8 のいずれか 1 項に記載の二酸化炭素捕獲デバイス。

20

【請求項 10】

前記第 1 のリアクタのアニオン交換膜は、ビニルベンジルクロリドおよびイミダゾリウム基を有する材料を備える、請求項 9 に記載の二酸化炭素捕獲デバイス。

【請求項 11】

前記第 2 のリアクタのためのプロトン交換膜は、パーフルオロカーボンスルホン酸ポリマー、ポリスルホン酸ポリマー、ポリベンゾイミダゾール、ポリアクリル酸、および炭化水素膜材料からなる群より選択される材料を備える、請求項 1 ~ 10 のいずれか 1 項に記載の二酸化炭素捕獲デバイス。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

30

【0001】

発明の分野

本発明は、第 1 のリアクタおよび第 2 のリアクタを備える二酸化炭素回収デバイスに関し、両リアクタは、酸素発生触媒および / もしくは二酸化炭素発生触媒を含有するまたはこれに接続される（光）アノードと、酸素還元触媒を含有するまたはこれに接続される（光）カソードとを示し、第 1 のリアクタは、多孔質（光）アノードと多孔質（光）カソードとの間に配置されるアニオン交換膜を備え、第 2 のリアクタは、多孔質（光）アノードと多孔質（光）カソードとの間に配置されるプロトン交換膜を備える。第 1 のリアクタの多孔質（光）カソード側には二酸化炭素、空気、および水を運搬できる流体入口があり、第 2 のリアクタの多孔質（光）カソード側には二酸化炭素および水を運搬できる流体出口があり、デバイスは、第 1 のリアクタの多孔質（光）カソード側を出た流体を第 2 のリアクタの多孔質（光）アノード側へと移動させ、第 1 のリアクタの多孔質（光）アノード側を出た流体を第 2 のリアクタの多孔質（光）カソード側へと移動させるよう構成される。

40

【0002】

本発明の好ましい実施形態において、流体入口での流れに関与する流体は気体状である、すなわち、水および二酸化炭素と酸素とは周囲の空気から捕獲される。

【背景技術】

【0003】

人間活動に起因する二酸化炭素排出は地球環境の危機を引き起こしており、その例としては、自然災害（洪水および干ばつなど）の増加傾向、大規模な氷の融解と、これにより

50

引き起こされる、平均海面の上昇、ならびに新しい気候条件を生き抜けるほどには進化が早くない動物および植物の大規模な絶滅が挙げられる。

【 0 0 0 4 】

再生可能な動力源が導入されてエネルギー効率が改善されることによって、今後、二酸化炭素レベルが減少することが望まれている。しかしながら、こうしたことのみでは、気候危機に対処するのに十分ではない。実際、気候変動に関する政府間パネルによる最近の報告によると、炭素の捕獲および貯蔵、すなわち排出二酸化炭素の捕獲とその（たとえば地下での）長期貯蔵が地球温暖化の程度を限定するために重要な役割を果たし得ることが示されている。具体的には、2 のシナリオでは2050年までに排出二酸化炭素の14%を、2 未満のシナリオでは32%を捕獲および貯蔵する必要があると考えられる。

10

【 0 0 0 5 】

濃縮された二酸化炭素を捕獲するための方策はよく知られており、既に中程度の規模において民間で実施されているが、一方、輸送（現時点で）などの不可避な非濃縮源から放出される二酸化炭素や、製造の場（これはオフセットを要する可能性あり）および農業の場で通常生じる二酸化炭素排出への対処は、それほど進んでいない。非濃縮二酸化炭素の捕獲は、ダイレクトエアキャプチャとして知られている。

【 0 0 0 6 】

先行技術においては、電気化学的ダイレクトエアキャプチャが、特許文献1中に開示される。ここでは、たとえばキノン、フェナジン、アロキサジン、イソアロキサジン、またはポリオキソメタレートなどのプロトン共役レドックス活性種が使用され、そのプロトン化および脱プロトン化を電気化学的に制御することによって水溶液または水性懸濁液のpHを変化させることができる。このpH変化を用いてCO₂を隔離および放出することができる。代替的には、アミン、キノン、およびその他のイオン液体の酸化還元サイクルを利用することもできる。このCO₂は、分子の酸化状態に依存して選択的に結合および脱離させることができ、これによって、捕獲を制御でき、次いで回収ポータルでの気体の放出を制御できる。

20

【 0 0 0 7 】

光電気化学による二酸化炭素の捕獲が特許文献2中に開示される。レドックスメディエータを使用して、CO₂を、デバイスの一方の側から他方の側へと、液体電解質（非水性溶媒またはアニオン性液体）を経て移動させる。CO₂を移動させるための電気を外部供給源から取るのではなく、光を使用して半導体内で電荷を発生させる（ただし、たとえば夜間などには、外部供給源も使用され得る）。次いで、この電荷を使用して、CO₂をデバイス内に通す。また、CO₂抑制が回避される場合には、このデバイスを光起電力セルとして使用できる。

30

【 0 0 0 8 】

上述されるようなアミンサイクルおよび二酸化炭素の（光）電気化学的ダイレクトエアキャプチャに加えて、特許文献3、特許文献4、特許文献5、および特許文献6中に開示されるように、膜マトリックスアプローチが知られている。CO₂吸着体を気体混合物に対して曝露して、CO₂を吸着させる。次いで、再生手順を経て吸着体からこの気体を放出させて気体濃縮混合物を得て、次いでこのCO₂気体濃縮混合物を、CO₂を選択的に吸収する水溶液と接触させる。吸着材料は比較的大きな表面積を有する固相アニオン交換膜（最小限の抵抗で空気が流れる）であってよく、オープンマトリックスであってもよいし、セルロースマトリックスなどの担体材料に被覆されていてもよい。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 0 9 】

【文献】WO 2019 / 136374 A 1

US 8791354 B 2

US 7993432 B 2

US 2015 / 0165373 A 1

50

U S 2 0 1 2 / 0 2 2 0 0 1 9 A 1

U S 1 0 1 5 0 1 1 2 B 2

【非特許文献】

【0010】

【文献】Nanoscale Horiz., 2016, 1, 243-267

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

CO₂捕獲デバイスについて、現在の方策は、i . エネルギー集約型であり、i i . コストが高く、i i i . 設置時の奨励金がわずかである（将来的に炭素税は回避できるが、将来的なコストは未だ決定されていない）。

10

【0012】

CO₂捕獲と平行して電気を発生できることが望ましく、これができるば、電気化学的アプローチ、膜マトリックスアプローチ、およびアミンサイクルアプローチではなく当該概念を採用する動機がさらに与えられる。固体状デバイスを提案することが好ましく、これによって、設置および操作が簡潔になり、また、高価でありかつ評価の難しいレドックスメディエータなどの新たな化学種を使用せずに済む。

【課題を解決するための手段】

【0013】

発明の概要

20

本明細書中において記載される発明は、ソーラー駆動型ダイレクトエア二酸化炭素捕獲および分離のためのデバイスである。これは、アニオン交換膜を利用して当該デバイスの第1のリアクタ内において二酸化炭素を選択的に捕らえ、これを、好ましくはバイアスのない電流を使用して、当該デバイスの第1のリアクタのもう一方の側にある貯蔵領域へと移動させる。次いで、デバイスの第2のリアクタが、プロトン交換膜を経て酸素を水に変換して、二酸化炭素からの分離を促進する。また、当該デバイスによれば、二酸化炭素捕獲と平行して電力も提供される。これは、二酸化炭素捕獲機能を有する光起電装置であると考えることができる。本発明に係るデバイスは、周囲の空気から、または汚染（濃縮）源から、CO₂を捕獲するために使用できる。周囲の空気からCO₂を捕獲することが好ましい、というのは、濃度が高過ぎる場合には、単位面積あたりに発生し得る太陽光エネルギーによって、膜の一方の側から他方の側へのCO₂の移動を制限できるためである。

30

【0014】

したがって、本発明は、アニオン交換膜を介して酸素の酸化還元サイクルを経てCO₂を捕獲および濃縮するための光電気化学的な固体状デバイスを記載する。次いで、こうして濃縮された気体流は、好ましくない酸素の除去によりCO₂精製装置として働く第2の光電気化学セル（リアクタ）の中に入る。

【0015】

よって、この文脈において、本発明は、

（A）多孔質（光）アノードと多孔質（光）カソードとの間に配置されるアニオン交換膜を備え、（光）アノードは、酸素発生触媒および／もしくは二酸化炭素発生触媒を含有するまたはこれに物理的もしくは電氣的に接続され、（光）カソードは、酸素還元触媒を含有するまたはこれに物理的もしくは電氣的に接続される、第1のリアクタと、

40

（B）多孔質（光）アノードと多孔質（光）カソードとの間に配置されるプロトン交換膜を備え、（光）アノードは、酸素発生触媒を含有するまたはこれに物理的もしくは電氣的に接続され、（光）カソードは、酸素還元触媒を含有するまたはこれに物理的もしくは電氣的に接続される、第2のリアクタと、を備える二酸化炭素捕獲デバイスであって、

第1のリアクタの多孔質（光）カソードは、二酸化炭素、空気、および水を運搬できる流体入口を少なくとも有し、第1のリアクタの多孔質（光）アノードは、水および酸素を運搬できる流体入口を少なくとも有し、

第2のリアクタの多孔質（光）カソードは、二酸化炭素および水を運搬できる流体出口

50

を少なくとも有し、第2のリアクタの多孔質（光）アノードは、水および酸素を運搬できる流体出口を少なくとも有し、

二酸化炭素捕獲デバイスは、第1のリアクタの多孔質（光）カソードから出た流体を第2のリアクタの多孔質（光）アノードへと移動させ、第1のリアクタの多孔質（光）アノードから出た流体を第2のリアクタの多孔質（光）カソードへと移動させるよう構成される、二酸化炭素捕獲デバイスを提供する。

【0016】

好ましい実施形態において、第1のリアクタおよび第2のリアクタのアノードは、いずれも光アノードである。しかしながら、この光吸収体は、第1のリアクタおよび第2のリアクタのいずれについても、アノード側に光アノードとしてある代わりに、カソード側に、アノードと光カソードとの組み合わせとしてあってよい。代替的には、光アノードと光カソードとの組み合わせも使用できる。第1のリアクタおよび第2のリアクタのいずれについても、少なくとも1つの光吸収体が存在するべきである。よって、どちらも光吸収体ではないようなカソードとアノードとの組み合わせは適切ではないが、光アノードとカソード、アノードと光カソード、および光アノードと光カソードといったその他の組み合わせは可能である。

【0017】

本発明に係るデバイスにおいて、その様々な実施形態において、すべての入口は液体または気体の入口であってよい。好ましい実施形態において、入ってくる水は周囲の空気から入ってくるもの（水分）であり、気体の輸送に適した入口が好ましい。また、本発明に係るデバイスにとって適切な出口も、特に、気体輸送に適したものである。

【0018】

本発明において第1のリアクタまたは第2のリアクタの多孔質（光）カソードまたは多孔質（光）アノードとして使用される（光）電極は、有利には、多孔質導電性担体材料上に堆積、または成長、または担持され得る。本発明の実施において、（光）カソードまたは多孔質（光）アノード構築体に多孔質特性を特に提供できるのは、（光）カソードまたは多孔質（光）アノード材料自体ではなく、多孔質伝導性担体である。第1のリアクタおよび/または第2のリアクタの多孔質（光）カソードまたは多孔質（光）アノードにとって適切な（光）電極担体材料は、たとえば、炭素、チタン、タングステン、ステンレス鋼、ニッケル、または伝導性酸化物と結合した多孔質（たとえば、メッシュ、フェルト、フォーム、布、紙などの）基材である。このような多孔質担体材料は、当技術分野において「気体拡散電極」とも称され得るが、適切には、空隙を10～90%、より好ましくは30～80%含有し、好ましくはその中を流体が浸透し得て、特に気体が移動し得る。当該多孔質担体材料は、たとえばメッシュまたはフェルト形状であってよい。メッシュは、多孔質材料の単層であり、空隙（開いた領域）が10～80%であり得て、好ましくは空隙が20～60%であり得る。多孔質担体材料の表面積は、適切には、幾何学的領域1cm²あたり10～1000cm²の範囲であってよい（フェルトの場合）。多孔質担体材料は、適切には、バルク層厚さが1～1000ミクロン、好ましくは100～400ミクロンであってよい。光電極の厚さの観点では、最大5マイクロメートル、好ましくは最大1マイクロメートルが一般的に適切である。このような多孔質担体材料の上に、電極触媒反応を促進するために特に選択される（光）カソード材料または（光）アノード材料（以下に、より詳細に記載される）が堆積し得る。多孔質（光）カソード材料または多孔質（光）アノード材料の厚さは、5ミクロン未満、より好ましくは1ミクロン未満、たとえば約300nmであってよい。適切な（助）触媒材料は、好ましくは厚さが200nm未満、より好ましくは50nm未満の層として提供され得る。（光）カソード材料または（光）アノード材料に対して、助触媒材料は、100倍もの性能向上を与え得る。酸素還元または酸素発生および/または二酸化炭素発生を促進するために特に選択される（光）電極材料の添加量は、たとえばメッシュ、フェルト、またはフォーム形状の多孔質担体材料の質量に対して、典型的には、1質量%以下であってよく、（助）触媒材料の添加量は、典型的には、材料の添加量よりも少量であり得る。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 9 】

本発明に係るデバイスにおいては、第1のリアクタおよび/または第2のリアクタの(光)アノードと(光)カソードとの間に、導電線があってもよい。これは、いずれのリアクタについても、(光)アノードと(光)カソードとが必ずしも互いに近接していなくてもよく、(光)カソードが電気接続を有する異なるチャンバ内にあってもよい、ということの意味する。最も適切には、(光)アノードおよび(光)カソードは、両者間の線などの電気接点を介して接続されている。発生する電気は、本発明に係るデバイスの有利な機能実施において、ランプまたは強制対流に使用できる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 0 】

10

【図1】酸素還元反応(ORR)を実施できる(光)カソードと酸素発生反応(OER)/二酸化炭素発生反応(CO₂ER)を実施できる光アノードとを備える本発明に係る二酸化炭素捕獲デバイスの第1のリアクタによる二酸化炭素(CO₂)濃縮の概略図である。ここでの記号「h⁺」は、電子を吸収する正孔を指す。

【図2】様々な半導体のバンドギャップと、参考資料(非特許文献1)に基づいて長い点線で示される酸素の発生および還元のための電位とを示す。

【図3】酸素還元反応(ORR)を実施できる(光)カソードと酸素発生反応(OER)を実施できる光アノードとを備える本発明に係る二酸化炭素捕獲デバイスの第2のリアクタによる二酸化炭素(CO₂)分離の概略図である。

【図4A】捕獲機能と分離機能とが1つのデバイス中に組み合わせられた組み合わせデバイス構成を示し、ここでは構成の一例を図4Aとして示す。

20

【図4B】捕獲機能と分離機能とが1つのデバイス中に組み合わせられた組み合わせデバイス構成を示し、ここでは構成の一例を図4Bとして示す。

【図5】アニオン交換膜中への吸収を経る二酸化炭素(CO₂)の捕獲を示す。図5において、光は(光)アノード側から照射される。光カソードのみが(アノードと共に)あるような場合には、光を反対側から照射するのが好ましいと考えられる。

【図6A】デバイスの反対側で回収された気体を示し、これに関わるデバイス部分が図6A中に示される。

【図6B】デバイスの反対側で回収された気体を示し、結果が図6B中に示される。

【図7A】本発明に係る概念を用いたCO₂分離の実験データを示し、これに関わるデバイス部分が図7A中に示される。

30

【図7B】本発明に係る概念を用いたCO₂分離の実験データを示し、結果が図7B中に示される。

【図8】本発明において使用できる可能なデバイス構造要素を示す。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 1 】

発明の詳細な説明

本発明は、互いに接続された2つの膜リアクタを備えるデバイスに関する。これらのリアクタは、第1のリアクタが十分に透明である場合には、たとえば横に並んだ構成または一方が他方の上に載った構成が挙げられるがこれらに限定されない様々な構成にて配置できる。

40

【 0 0 2 2 】

既知の二酸化炭素捕獲デバイスにおいて見受けられ得る1つ以上の利点を含む複数の利点のうち、本発明は、以下を提供し得る。

【 0 0 2 3 】

- 1) 実施が容易でありかつ独立型のデバイス、ならびに/または
- 2) O₂をH₂Oに(気体を液体に)変換することによる、O₂とCO₂の新しい分離方法。

【 0 0 2 4 】

本発明は、連続的な酸素還元/酸化サイクルによってCO₂を吸着体から回収体へと移

50

動させるための新しい機構を提供する。(光)電気化学的な CO_2 吸着は、これまでのところイオン液体に限定されており、レドックスメディエータは一般的に高価で新しい材料である。本発明は、 CO_2 を捕獲して同時に電気を生成する単純な固体状デバイス設計のための機構を提供して、その使用を奨励するものである。また、 O_2 を H_2O に変換することによって O_2 と CO_2 を分離するための光電気化学的な方法も提案する。本発明は、以下を構想するものである。

【0025】

i. 酸素還元および酸素発生の反応サイクルを利用することにより、 HCO_3^- イオンをアニオン交換膜に通す手段としてのバイアスのない電流を創出すること。

【0026】

ii. 水を利用することにより、 H^+ イオンをプロトン交換膜に通すこと。

iii. 太陽光エネルギーを使用することにより、同一デバイス内において、反応に電力を供給すると平行して電気を生成すること(ただし、本発明は外部電源による電力供給または補助も可能である)。

【0027】

第1のリアクタの機能は、雰囲気中から CO_2 を除去することであり、これは、理想的には周囲の空気から直接実施できる、または、代替的には KHCO_3 などの濃縮溶液から実施できる。實際上、この代替実施形態において、 KHCO_3 から CO_2 を取り去って特に第1のリアクタの光アノードの流体出口側(117)で濃縮する目的で、液体溶液中の CO_2 をたとえば $\text{KOH} \rightarrow \text{KHCO}_3$ 変換によって捕獲するための労力と、本発明において統合されるシステムとを組み合わせてもよい。

【0028】

第1のリアクタは、多孔質(光)アノードと多孔質(光)カソードとの間に配置されるアニオン交換膜を備える。(光)アノードは、酸素発生触媒および/または二酸化炭素発生触媒を含有するまたはこれに(物理的または電氣的に)接続され、一方、(光)カソードは、酸素還元触媒を含有するまたはこれに接続される。これによりバイアスのない電流が創出され得て、ここでは、光電流は光照射のみによって発生され、電位バイアスの印加は不要である。光電極から光電流を効率よく発生させるために、太陽光と電位バイアス印加の両方が光電極全体にわたって必要とされる場合がある。その主要な機能は、 e^- と h^+ との間の電荷分離を改善することである。しかしながら、電位を印加することにより、さらなる複雑さが加わる。本発明の有利な実施形態においては、光電流は、光照射下においてのみ発生し得る、すなわち、電位バイアス印加は不要である。アニオン交換膜は、自然対流または強制対流を経て雰囲気から CO_2 を吸収して、 HCO_3^- イオンを生じる。強制対流は、たとえば、ファンまたはポンプを使用してデバイス中に空気を強制通気および/または循環させることによって実施され得る。デバイスは強制対流なしでも動作できるが、アニオン交換膜内での CO_2 の吸着速度を増大させるためには、これも実施可能な実施形態である。太陽照射下において、 HCO_3^- イオンが、バイアスのない電流下において、デバイスのもう一方の側へと、すなわち第1のリアクタの光アノードのOERおよび CO_2 ER流体出口(117)へと、強制的に動かされる。回収工程は、適切には、主に夜間に実施され得るが、回収は、太陽光照射下で移動工程と平行して実施することもできる(図1)。反対側で集められた混合物は、 CO_2 と O_2 の混合物であるが、好ましくは CO_2 濃度が比較的高い。酸素発生および酸素還元を行なうための総過電圧損失は約0.7Vであり、そのため、好適なバンドギャップを有する多種多様な材料が、光電極の候補となり得る(図2)。

【0029】

本発明において、アニオン交換膜(AEM)(112、212、312、412)を含有する第1のリアクタ(1)の多孔質(光)アノード(113、213、313、413)にとって適切な材料は、好適なバンドギャップを有するAEMに適合するn型またはp型(光)電極材料である(図2に従う)。例は、 BiVO_4 、 TiO_2 、 WO_3 を含み、これらを(光)カソードと組み合わせることによりOER/ CO_2 ER電位およびORR電

10

20

30

40

50

位の両方に到達できる。 TiO_2 は、デバイスを準備するにあたっての実用的な例であるが、 TiO_2 はバンドギャップが大きく、これにより、吸収が紫外光の吸収に本質的に制限される。バンドギャップがこれよりも小さく、伝導帯(CB)と価電子帯(VB)とがOER/CO₂ER反応電位側およびORR反応電位側のいずれかにあるような材料が、有利である。バンドギャップが比較的小さいと可視光線の高吸収が可能となり、これによって、実際の応用において多量のエネルギーを使用できるようになる。バンドギャップが約1.0~2.0 eVで、伝導帯の端が約0.7 eV vs. NHEよりも低く、価電子帯が約1.7 eV vs. NHEよりも高い材料が適切であり、ここで、NHE(=標準水素電極)は、参照極であり、1 M酸性溶液(pH = 0)中における白金の電位である。

第1のリアクタ(1)の多孔質(光)アノードにとって好ましい材料は、 BiVO_4 、 TaO_xN_y 、 LaTiO_2N 、 BaTaO_2N 、 SrTaO_2N 、 WO_3 、 CuWO_4 、 Fe_2O_3 、 ZnFe_2O_4 、 TiO_2 からなる群より選択され得る。特に好ましいものを列記すると、 BiVO_4 、 TiO_2 、 WO_3 である。保護層または助触媒(光電極上の触媒、その材料は同じであってよい)は、性能を向上させ得る、および/またはアルカリ性環境に対する化学的適合性を提供し得る。第1のリアクタ(1)の多孔質(光)アノード(113、213、313、413)のためのOER/CO₂ER(助)触媒材料は、適切には、以下のうちの1種以上に基づく触媒を含み得る：(A)OERについては、Ni、Niラネー、NiCo、NiFe、NiP、CoP、CoPi、 SrCoO_3 、Ru、Mg、Ag、Au；(B)CO₂ERについては、Ni、Niラネー、 LaNiO_3 、 LaMnO_3 、Ag、Ru、Au、Pt、式中M = Ni、Co、Yである Pt_3M 、 PtRu 、Co、NiP、CoP、FeP、NiCo、NiMo、NiW(および、列記したすべての金属の酸化物)。CO₂ERについては、これらの材料は、単独であってもよい、または、たとえば炭素などに、担持されていてもよい。保護は、たとえば TiO_2 などを、上塗りすることによって提供され得る。さらに、多孔質光アノードの材料として TiO_2 を使用する場合、助触媒は必ずしも必要ではなく、 TiO_2 自体が自己触媒性である。

【0030】

本発明において、プロトン交換膜(PEM)(122、222、322、422)を含有する第2のリアクタ(2)の多孔質(光)アノード(123、223、333、423)にとって適切な材料は、第1のリアクタの多孔質(光)アノードについて上述される材料と、類似しているが、同一ではない。實際上、リアクタ1の膜がアルカリ性でリアクタ2の膜が酸性であり、2つのリアクタの環境が異なるために電位安定性が異なるという問題が生じる。

【0031】

よって、第2のリアクタ(2)の多孔質(光)アノードにとって好ましい材料は、 BiVO_4 、 TaO_xN_y 、 LaTiO_2N 、 BaTaO_2N 、 CuWO_4 、 WO_3 、 TiO_2 からなる群より選択され得る。保護層または助触媒は、性能を向上させ得る、および/またはアルカリ性環境に対する化学的適合性を提供し得る。OER触媒は、有利には、Ir、Mg、Ru、Rh、およびこれらの酸化物(IrO_x 、 RhO_x など)、Pt、Pd、Auを含み得る。ORR触媒は、有利には、Ru、Au、Pt、式中M = NiまたはCoまたはYである Pt_3M 、 PtRu 、NiP、CoP、FeP、NiCo、NiMo、NiWを含み得る。これらは、単独で使用されてもよい、または、たとえば炭素上に、担持されていてもよい。第2のリアクタ(2)の多孔質(光)アノード(123、223、323、423)のためのOER(助)触媒材料は、好ましくは、Ir、Mg、および/またはRuに基づく触媒を含み得る。保護は、たとえば TiO_2 などを、上塗りすることによって提供され得る。さらに、 TiO_2 を使用する場合には、助触媒は必ずしも必要ではなく、 TiO_2 自体が自己触媒性である。

【0032】

本発明において、アニオン交換膜(AEM)(112、212、312、412)を含有する第1のリアクタ(1)の多孔質(光)カソード(111、211、311、411)にとって適切な材料は、一般的に、好適なバンドギャップおよびバンド端を有するアル

カリ交換膜と適合する p 型（光）電極材料である（図 2 を参照）。カソード材料の例は Pt / C、Pt - Ru / C、Au / C、Ni / C、および Ni - フェルトを含み、これらの中で好ましいものは Pt、Pt - Ru / C である。バンドギャップが約 1.0 ~ 2.0 eV で、伝導帯の端が約 0.7 eV vs. NHE よりも低く、価電子帯が約 1.7 eV vs. NHE よりも高い材料が適切である。第 1 のリアクタ（1）の多孔質（光）カソードにとって好ましい材料は、Si、MoS₂、MoSe₂、WS₂、GaP、CdS、CdSe、ZnSe、CuNbO₄、PMPDI、InP、WSe₂、ZnFe₂O₄、CuNbO₃、PMPDI、Cu₂O、g - C₃N₄、CIGS、CIGSe、CaFeO₂、および / または CuFeO₂ からなる群より選択され得る。保護層または助触媒は、性能を向上させ得る。第 1 のリアクタ（1）の多孔質（光）カソード（111、211、311、411）のための ORR（助）触媒材料は、適切には、Ni、Ni ラネー、LaNiO₃、LaMnO₃、Ag、Ru、Au、Pt、式中 M = Ni、Co、Y である Pt₃M、PtRu、Co、NiP、CoP、FeP、NiCo、NiMo、NiW、Ir、Mg、Ru、Pt、Rh、および / または RhO_x に基づく触媒を含み得る。保護および / またはアルカリ性環境に対する化学的適合性は、たとえば TiO₂ などを、上塗りすることによって提供され得る。炭素も好適なカソードであるが、白金などの触媒の使用を要し、Pt / C カソードは典型的には重量で Pt : C が 60 : 40 である。

【0033】

本発明において、プロトン交換膜（PEM）（122、222、322、422）を含有する第 2 のリアクタ（2）の多孔質（光）カソード（121、221、321、421）にとって適切な材料は、第 1 のリアクタ（1）の多孔質（光）カソードについて上述される材料と、類似しているが、同一ではない。よって、第 2 のリアクタ（2）の多孔質（光）カソードにとって好ましい材料は、Si、MoS₂、MoSe₂、WS₂、GaP、CdS、CdSe、ZnSe、CuNbO₄、PMPDI、InP、WSe₂、ZnFe₂O₄、CuNbO₃、PMPDI、Cu₂O、g - C₃N₄、CIGS、CIGSe、CaFeO₂、および CuFeO₂ からなる群より選択され得る。保護層または助触媒は、性能を向上させ得る。第 2 のリアクタ（2）の多孔質（光）カソード（121、221、321、421）のための ORR（助）触媒材料は、適切には、Ru、Au、Pt、式中 M = Ni、Co、Y である Pt₃M、PtRu、NiP、CoP、FeP、NiCo、NiMo、および / または NiW に基づく触媒を含み得る。保護は、たとえば TiO₂ などの、上塗りによって確保され得る。炭素も好適なカソードであるが、白金などの触媒の使用を要し、Pt / C カソードは典型的には重量で Pt : C が 60 : 40 である。

【0034】

本発明において、第 1 のリアクタのためのアニオン交換膜（AEM）（112、212、312、412）は、適切には、第 4 級アンモニウム基を含有するアニオン交換膜材料（商品名 Fumasep（登録商標）FAA、A201、Orion（登録商標）TM1、Durion（登録商標）、Selenium（登録商標）で販売されているものなど）、または第 4 級アンモニウム基を有する低密度ポリウレタン；イミダゾリウムもしくはポリベンゾイミダゾール基を含有するアニオン交換膜材料（商品名 Aemion（登録商標）、Sustainion（登録商標）で販売されているものなど）、またはトリアミンもしくはジアミン架橋 4 級化ポリスルホンであってよい。好ましいアニオン交換膜材料は、第 4 級アンモニウム基を含有するもの、第 4 級アンモニウム基を有する低密度ポリウレタン、またはイミダゾリウムもしくはポリベンゾイミダゾール基を含有するアニオン交換膜である。特に好ましい選択肢は、ビニルベンジルクロリドおよびイミダゾリウム基を有する材料に基づくアニオン交換膜（商品名 Sustainion（登録商標）で販売されているものなど）を使用することである。グラフト LDPE を含む低密度ポリエチレン（LDPE）は、本発明に係るアニオン交換膜（AEM）のもう 1 つの好ましい一実施形態である。

【0035】

第 2 のリアクタのためのプロトン交換膜（PEM）（122、222、322、422

）は、たとえば、適切には、A q u i v i o n（登録商標）およびN a f i o n（登録商標）の名称で市販されているものなどの、ポリスルホン酸材料に基づくものである。その他のプロトン交換膜も使用できる。一般的に、本発明の実施に使用できるプロトン交換膜のための材料は、パーフルオロカーボンスルホン酸またはポリスルホン酸ポリマー（N a f i o n（登録商標）、A q u i v i o n（登録商標）、F u m a p e m（登録商標）- F、F u m a p e m（登録商標）S X P e m i o n（登録商標）の名称で市販されているものなど）、ポリベンゾイミダゾール膜（特に、高温使用の可能なもの）、たとえばC e l t e c（登録商標）、F u m a p e m（登録商標）A M、F u m a p e m（登録商標）S Tなどの名称で市販されているもの、ポリアクリル酸、および炭化水素膜（F u m a t e c h（登録商標）S T、F u m a t e c h（登録商標）P、Eなどの販売名で市販されているものなど）であってよい。プロトン交換膜にとって好ましい材料は、パーフルオロカーボンスルホン酸もしくはポリスルホン酸ポリマー、またはポリアクリル酸であり、最も好ましいものはパーフルオロカーボンスルホン酸またはポリスルホン酸ポリマーである。

【0036】

本発明において、第1のリアクタまたは第2のリアクタのいずれについても、多孔質（光）アノードおよび／または多孔質（光）カソードはアイオノマーで被覆されていてよく、これは、 CO_2 吸着能力の増大に役立ち得る。このような被覆に使用されるアイオノマーは、とりわけ、アニオン交換膜（A E M）またはプロトン交換膜（P E M）としての使用について上述されるアイオノマー材料を含み得る。第1のリアクタにおいて、A E Mを有する場合、アイオノマー被覆の量は、好ましくは最大 50 mg/cm^2 、より好ましくは $0.5 \sim 10 \text{ mg/cm}^2$ である。第2のリアクタにおいて、P E Mを有する場合、アイオノマー被覆の量は、好ましくは最大 50 mg/cm^2 、より好ましくは $0.5 \sim 10 \text{ mg/cm}^2$ 、さらにより好ましくは $1.0 \sim 5.0 \text{ mg/cm}^2$ 、たとえば約 3.0 mg/cm^2 である。本発明の実施にはアイオノマー被覆は必ずしも必要ではなく、第2のリアクタなどの多孔質（光）アノードおよび／または多孔質（光）カソードがアイオノマー被覆を有する場合であっても、他方（たとえば第1のリアクタなど）の多孔質（光）アノードおよび／または多孔質（光）カソードに必ずしもアイオノマー被覆を施す必要はない。さらに、アイオノマーは、第1のリアクタまたは第2のリアクタのいずれについても、（光）アノード側と（光）カソード側とで同じである必要はないが、このオプションは本発明の実施のために想定される。

【0037】

本発明は、完全固体状デバイスであり得るものを提供する。よって、図1中に示されるような炭酸水素塩 HCO_3^- アニオンは、液体が全く存在しない条件下で発生し得て、カソードおよびアノードの入口はすべて気体状である。ここで注目され得ることに、N a f i o n（登録商標）の名称で販売されているものを含むポリスルホン酸材料のようなほとんどのイオン交換膜材料は、膜自体が吸湿性である。よって、実際には、膜の内部に H_2O が存在し、これによって HCO_3^- が流れ得る。しかしながら、完全に「液状」の水は存在しない可能性があり、膜は、含水している場合でも依然として可塑性様／ポリマー構造を保持する。本発明に係るデバイスの適切なフィールド使用において、含水のための水は、周囲の湿気からくるものであってよい。しかしながら、非常に乾燥した条件（低い相対湿度、砂漠）においては、さらなる液状水が必要となる場合もある。

【0038】

第2のリアクタの機能は、 CO_2/O_2 混合物中に残存する O_2 （配管を通して第2のリアクタに運ばれ得る）を水に変換して、 CO_2 の精製（液体と気体の分離）を促進することである。第2のリアクタは、多孔質（光）アノードと多孔質（光）カソードとの間に配置されるプロトン交換膜を備える。（光）アノードは酸素発生触媒に（物理的または電氣的に）接続され、（光）カソードは酸素還元触媒に接続される（図3）。 CO_2 /水の混合物は、容易に分離でき、かつ、貯蔵できるおよび／または他の用途に使用できる。

【0039】

10

20

30

40

50

可能性として、捕獲機能と分離機能とを１つのデバイスに組み合わせることができ、たとえば図４中に示される２つの構成がある。

【００４０】

よって、実施形態の一例が図４a中に示されるようなデバイスにおいて、本発明は、

- 第１のリアクタの多孔質（光）カソードが、空気中および水中の二酸化炭素を運搬できる流体入口および流体出口を有し、第１のリアクタの多孔質（光）アノードが、水および酸素を運搬できる流体入口および流体出口を有し、

- 第２のリアクタの多孔質（光）カソードが、二酸化炭素、酸素、および水を運搬できる流体入口および流体出口を有し、第２のリアクタの多孔質（光）アノードが、水および酸素を運搬できる流体入口および流体出口を有し、

第１のリアクタの多孔質（光）カソードの流体出口が、第２のリアクタの多孔質（光）アノードの流体入口に流体接続され、第１のリアクタの多孔質（光）アノードの流体出口が、第２のリアクタの多孔質（光）カソードの流体入口に流体接続される、二酸化炭素捕獲デバイスを提供する。

【００４１】

よって、実施形態の一例が図４b中に示されるようなデバイスにおいて、本発明は、

第１のリアクタの多孔質（光）カソードと第２のリアクタの多孔質（光）アノードとが向かい合って位置しかつセパレータにより互いから隔てられるように、かつ第１のリアクタの多孔質（光）アノードと第２のリアクタの多孔質（光）カソードとが向かい合いかつセパレータにより互いから隔てられるように、第１のリアクタおよび第２のリアクタがセパレータにより隔てられて連結ブロック内に配置され、第１のリアクタの多孔質（光）カソードの流体入口と第２のリアクタの多孔質光アノードの流体出口とを含む１つの流体ラインが、連結ブロックの１つの壁に沿って伸び、第１のリアクタの多孔質（光）アノードの流体入口と第２のリアクタの多孔質（光）カソードの流体出口とを含むもう１つの流体ラインが、連結ブロックの別の壁に沿って伸び、これら２つの壁が互いに向かい合いかつセパレータと接している、二酸化炭素捕獲デバイスを提供する。

【００４２】

図４bの中程にあるハッシュを付した境界領域は、リアクタ１とリアクタ２（第１のリアクタと第２のリアクタ）を隔てる枠および／または空間である。ハッシュを付した境界領域が有する必須の機能は、これら２つのリアクタが互いに接しないようにすることである。

【００４３】

操作の例

本発明に係る二酸化炭素捕獲デバイスの適切な使用方法において、まず第一に、夜間、アニオン交換膜に CO_2 を吸収させる。この型の膜は、１５時間後にその CO_2 能の約９５％を吸収するので（図５）、太陽光を用いた昼夜サイクルに理想的である。

【００４４】

次いで、 CO_2 を濃縮するための光照射が開始される。これによって電荷（光電流、 I （mA）、図６）が発生し、この電荷がイオンをアニオン交換膜に通す（図１）。第１のリアクタの反対側で回収された気体（図６）は、 O_2 ： CO_2 の比率がおおよそ４：１である（比較として、周囲の空気は O_2 ： CO_2 が２０００：１である）。回収された気体として、流体出口において CO_2 が得られ、図１の右下に、 H_2O 、 O_2 、および CO_2 の気体混合物の一部として示される。

【００４５】

10

20

30

40

【表 1】

表 1

	I (mA)	OER (ppm)	CO ₂ ER (ppm)	CO ₂ 選択性
実験	3	630	170	27%
理論	3	560	1120	(35%)

10

【0046】

ここで、OERは、反応の種類（酸素発生反応）に言及するものであり、CO₂ERはCO₂発生反応を指す。OER（ppm）は第1のリアクタの流体出口（117、217）における酸素のレベルを指し、CO₂ER（ppm）は第1のリアクタの流体出口（117、217）側におけるCO₂のレベルを指す。

【0047】

(OH⁻) - PECセルにおける二酸化炭素の捕獲および分離を、ここで、以下を用いて実施した。

20

【0048】

- 入口カソード：CO₂ 400 ppm + He中H₂O 3%、
- 入口アノード：He中H₂O > 3%、
- 電解質：グラフトLDPEアニオン交換膜。ここで、LDPEは低密度ポリエチレンであり、「電解質」はアニオン交換膜（AEM）である。

【0049】

- 光アノード：TiO₂/Ti - フェルト（基材）
- カソード：Pt/C
- UVランプ：強度7 mW cm⁻²
- CO₂中での前処理：一晚

30

ここで、「(AEM) - PECセル」は、アニオン交換膜を含有する第1のリアクタを指す。PECは「光電気化学」を表す。第2のリアクタは(PEM) - PECセルであり、これもアニオン交換膜を含有する。

【0050】

異なるカソードを、酸素還元反応/CO₂ERについて試験した。Pt/Ru、Au、およびNi。Pt/RuおよびPtは有望な結果を与え、好ましい選択肢の一部として考慮される。

【0051】

次の工程は、プロトン交換膜によるO₂からH₂Oへの変換であり、これも酸素還元および酸素発生サイクルを経る（図3）。ここでも光をデバイスに照射して反応を開始させて電荷キャリアを発生させ、これによってH⁺イオンを膜に通す。光が照射されている時にO₂濃度の明らかな低下が観察され得る。

40

【0052】

ここで、以下を用いて、PEM(H⁺) - PECセルにおける酸素精製を実施した。

- 入口アノード：CO₂ 500 ppm + O₂ 500 ppm + He中H₂O 3%、
- 入口カソード：H₂O 2%；
- 流量：50 sccm（立方センチメートル毎分）
- 電解質：Nafion（登録商標）プロトン交換膜（PEM）

50

- 光アノード： TiO_2/Ti -フェルト、アイオノマーが被覆された N a f i o n (登録商標)

- カソード：P t / C

- UVランプ： 7 mW cm^{-2}

データは、 CO_2 シグナルが安定であり、 O_2 シグナルが25 ppm減少（ファラデー効率約65%に対応）したことを示す。

【符号の説明】

【0053】

1：第1のリアクタ

111、211、311、411：第1のリアクタの（光）カソード

10

112、212、312、412：第1のリアクタのアニオン交換膜（AEM）

113、213、313、413：第1のリアクタの光アノード

114、214、314、414：第1のリアクタの（光）カソードの流体入口

115、215、315、415：第1のリアクタの光アノードの流体入口

116、216：第1のリアクタの（光）カソードの流体出口

117、217：第1のリアクタの光アノードの流体出口

2：第2のリアクタ

121、221、321、421：第2のリアクタの（光）カソード

122、222、322、422：第2のリアクタのプロトン交換膜（PEM）

123、223、323、423：第2のリアクタの光アノード

20

124、224：第2のリアクタの（光）カソードの流体入口

125、225：第2のリアクタの光アノードの流体入口

126、226、326、426：第2のリアクタの（光）カソードの流体出口

127、227、327、427：第2のリアクタの光アノードの流体出口

330、430：第1のリアクタおよび第2のリアクタの連結ブロックアセンブリのためのセパレータ

30

40

50

【図面】

【図 1】

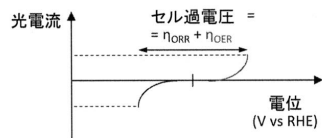
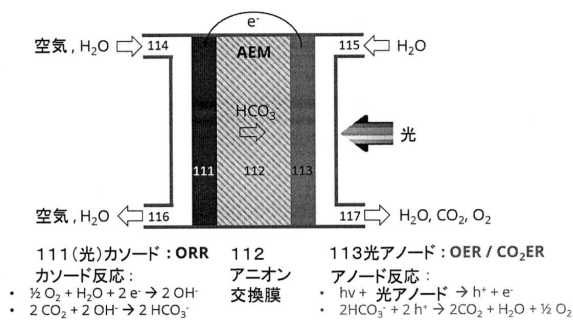


Figure 1

【図 3】

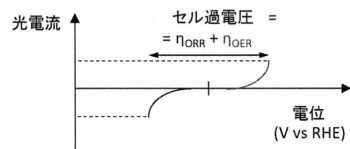
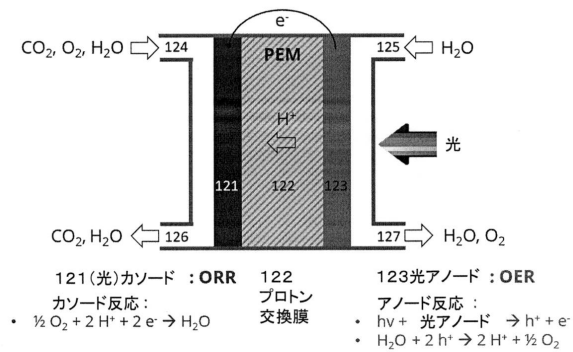


Figure 3

【図 2】

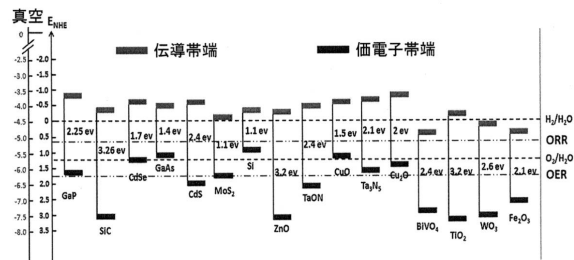


Figure 2

【図 4 A】

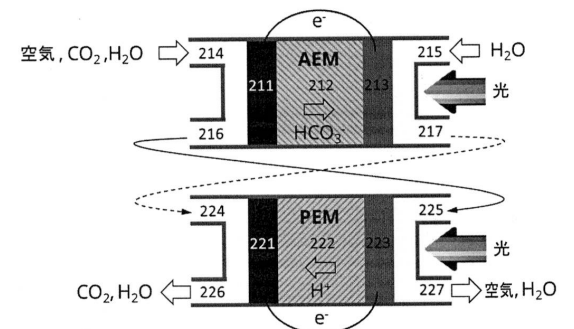


Figure 4A

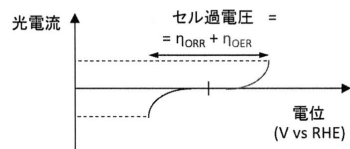


Figure 3

10

20

30

40

50

【 図 4 B 】

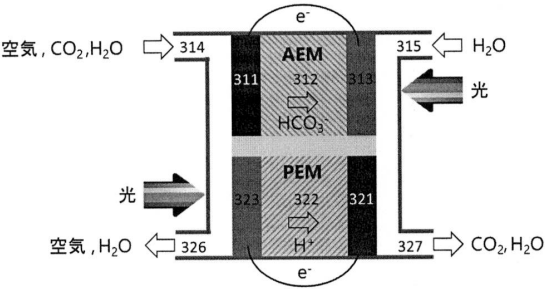


Figure 4B

【 図 5 】

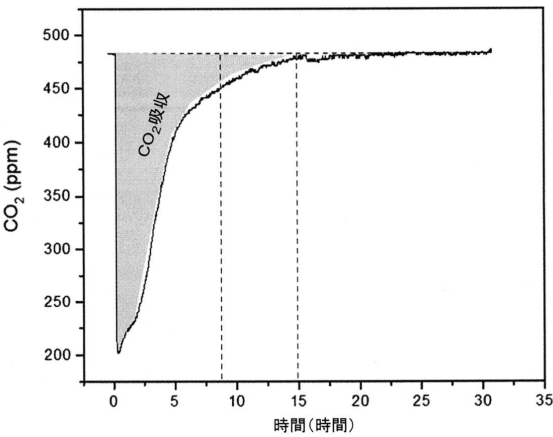


Figure 5

【 図 6 A 】

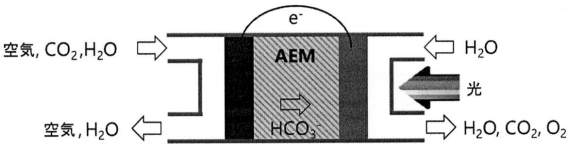


Figure 6A

【 図 6 B 】

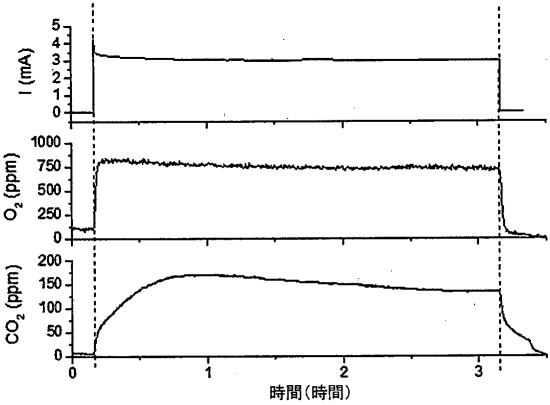


Figure 6B

10

20

30

40

50

【図 7 A】

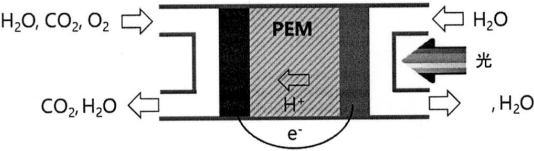


Figure 7A

【図 7 B】

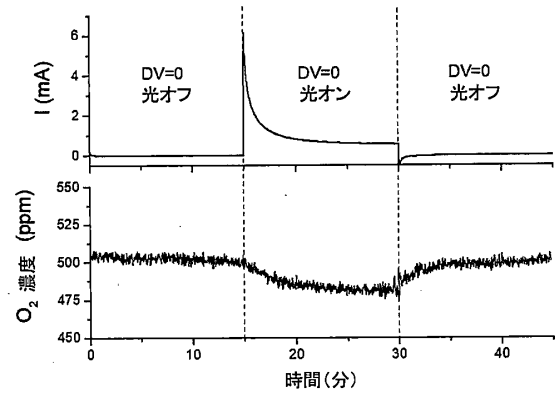


Figure 7B

【図 8】

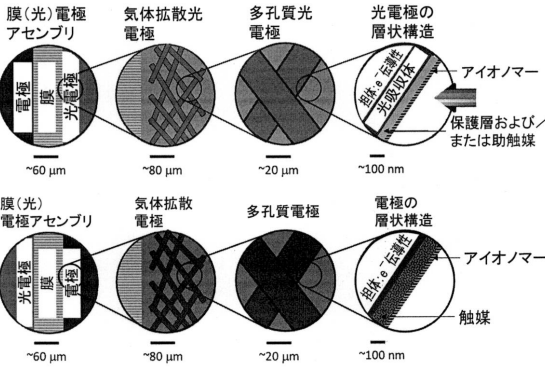


Figure 8

10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類

F I

C 2 5 B	9/23 (2021.01)	C 2 5 B	9/23
C 2 5 B	9/50 (2021.01)	C 2 5 B	9/50
C 2 5 B	9/70 (2021.01)	C 2 5 B	9/70
C 2 5 B	11/031 (2021.01)	C 2 5 B	11/031
C 2 5 B	11/049 (2021.01)	C 2 5 B	11/049
C 2 5 B	11/052 (2021.01)	C 2 5 B	11/052
C 2 5 B	11/054 (2021.01)	C 2 5 B	11/054
C 2 5 B	11/061 (2021.01)	C 2 5 B	11/061
C 2 5 B	11/063 (2021.01)	C 2 5 B	11/063
C 2 5 B	11/065 (2021.01)	C 2 5 B	11/065
C 2 5 B	11/067 (2021.01)	C 2 5 B	11/067
C 2 5 B	11/077 (2021.01)	C 2 5 B	11/077
C 2 5 B	11/081 (2021.01)	C 2 5 B	11/081
C 2 5 B	11/087 (2021.01)	C 2 5 B	11/087
C 2 5 B	11/091 (2021.01)	C 2 5 B	11/091
C 2 5 B	11/093 (2021.01)	C 2 5 B	11/093
C 2 5 B	13/08 (2006.01)	C 2 5 B	13/08 3 0 1
		C 2 5 B	13/08 3 0 2

ストラテジック・プランニング・オペレーション内

(72)発明者

ミハエル・ツァムパス

オランダ、5 6 0 0 ハー・ハー エイントホーフェン、ペー・オウ・ボックス・6 3 3 6、ダッチ・インスティテュート・フォー・ファンダメンタル・エナジー・リサーチ内

(72)発明者

ゲオルギオス・ザフェイロポウロス

オランダ、5 6 0 0 ハー・ハー エイントホーフェン、ペー・オウ・ボックス・6 3 3 6、ダッチ・インスティテュート・フォー・ファンダメンタル・エナジー・リサーチ内

審査官 坂本 薫昭

(56)参考文献

特開昭 6 1 - 1 1 7 1 0 3 (J P , A)

特開 2 0 1 6 - 1 0 2 2 4 5 (J P , A)

国際公開第 2 0 2 0 / 1 0 6 9 0 1 (W O , A 1)

(58)調査した分野 (Int.Cl., D B 名)

C 0 1 B 3 2 / 5 0

C 2 5 B 1 / 0 1 , 1 / 0 2 , 1 / 5 5 , 9 / 0 0 , 9 / 2 3 ,
9 / 5 0 , 9 / 7 0

1 1 / 0 3 1 , 1 1 / 0 4 9 , 1 1 / 0 5 2 , 1 1 / 0 5 4 ,

1 1 / 0 6 1 , 1 1 / 0 6 3 , 1 1 / 0 6 3 , 1 1 / 0 6 5 ,

1 1 / 0 6 7 , 1 1 / 0 7 7 , 1 1 / 0 8 1 , 1 1 / 0 8 7 ,

1 1 / 0 9 1 , 1 1 / 0 9 3 , 1 3 / 0 8