

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5848964号
(P5848964)

(45) 発行日 平成28年1月27日 (2016. 1. 27)

(24) 登録日 平成27年12月4日 (2015. 12. 4)

(51) Int. Cl.

F I

B O 1 D 61/44 (2006. 01)

B O 1 D 61/44 5 0 0

C 2 5 B 1/00 (2006. 01)

B O 1 D 61/44 5 1 0

C O 2 F 1/469 (2006. 01)

C 2 5 B 1/00 Z

C O 2 F 1/46 1 0 3

請求項の数 4 (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2011-268376 (P2011-268376)
 (22) 出願日 平成23年12月7日 (2011. 12. 7)
 (65) 公開番号 特開2012-125761 (P2012-125761A)
 (43) 公開日 平成24年7月5日 (2012. 7. 5)
 審査請求日 平成26年12月5日 (2014. 12. 5)
 (31) 優先権主張番号 12/969, 485
 (32) 優先日 平成22年12月15日 (2010. 12. 15)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

早期審査対象出願

(73) 特許権者 502096543
 パロ・アルト・リサーチ・センター・イン
 コーポレーテッド
 Palo Alto Research
 Center Incorporated
 アメリカ合衆国、カリフォルニア州 94
 304、パロ・アルト、コヨーテ・ヒル・
 ロード 3333
 (74) 代理人 100079049
 弁理士 中島 淳
 (74) 代理人 100084995
 弁理士 加藤 和詳

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 炭酸塩水溶液および炭酸水素塩溶液からのガスの電気透析分離

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

電気透析装置を用いて、ガスを生成するプロセスであって、

電気透析スタックを囲む筐体を定義するように密封して接続された2つの軸支持メンバを備える前記電気透析装置へ、少なくとも第1溶液および第2溶液を流入させるステップと、

前記電気透析装置へ電極溶液を流入させるステップと、

前記電気透析装置を第1のスタック圧力より大きい第2のスタック圧力で加圧するステップと、

前記第2のスタック圧力において、前記第2溶液内にガスが発生するように、前記電気透析装置の電気透析スタックへ、前記電気透析装置を前記第1のスタック圧力で加圧した場合にガスが発生する条件で加える所定の電圧よりも小さい電圧を加えるステップと、

前記電気透析装置から前記第2溶液を流出させるステップと、

前記第2溶液から前記ガスを分離するステップと、

前記ガスを収集するステップと、

を含み、

前記第1溶液は、アルカリ性溶液及び酸性溶液の一方であり、

前記第2溶液は、アルカリ性溶液及び酸性溶液の他方であり、

前記ガスは、CO₂ガスである、

プロセス。

10

20

【請求項 2】

前記第 1 のスタック圧力は、周囲圧力よりも大きい、請求項 1 に記載のプロセス。

【請求項 3】

電気透析装置を用いて、入力溶液からガスを発生させるプロセスであって、

電気透析スタックを囲む筐体を定義するように密封して接続された 2 つの軸支持メンバを備える前記電気透析装置へ、少なくとも第 1 溶液および第 2 溶液を流入させるステップと、

前記電気透析装置へ電極溶液を流入させるステップと、

前記電気透析装置の温度および圧力を調整するステップであって、前記温度および圧力は、前記第 2 溶液から前記ガスが発生するように選択されると共に前記電気透析装置を第 1 のスタック圧力より大きい第 2 のスタック圧力で加圧する、調整するステップと、

前記第 2 のスタック圧力において、前記第 2 溶液内にガスが発生するように、前記電気透析装置の電気透析スタックへ、前記電気透析装置を前記第 1 のスタック圧力で加圧した場合にガスが発生する条件で加える所定の電圧よりも小さい電圧を加えるステップと、

前記電気透析装置から前記第 2 溶液を分離させるステップと、

前記第 2 溶液から前記ガスを収集するステップと、

を含み、

前記第 1 溶液は、アルカリ性溶液及び酸性溶液の一方であり、

前記第 2 溶液は、アルカリ性溶液及び酸性溶液の他方であり、

前記ガスは、CO₂ガスである、

プロセス。

【請求項 4】

前記第 1 のスタック圧力は、周囲圧力よりも大きい、請求項 3 に記載のプロセス。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

混合ガス流から CO₂ を除去する技術は、典型的には捕捉および再生という 2 ステップのプロセスが必要である。最初に、ガスは水の「捕捉前溶液」と接触し、捕捉前溶液は、混合ガス流内の CO₂ ガスと反応し、CO₂ を「捕捉後溶液」内へ「捕捉する」。次に、この CO₂ を多く含む捕捉後水溶液から、純粋な CO₂ ガス流が再生される。種々の捕捉前溶液が存在する。CO₂ 濃度が 386 ppm の雰囲気などの低濃度の CO₂ を有する混合ガス流にとって、水酸化カリウム (KOH) もしくは水酸化ナトリウム (NaOH) などの水酸化物捕捉前水溶液、炭酸カリウム (K₂CO₃) もしくは炭酸ナトリウム (Na₂CO₃) などの炭酸塩捕捉前水溶液、または炭酸水素カリウム (KHCO₃) もしくは炭酸水素ナトリウム (NaHCO₃) などの炭酸水素塩捕捉前水溶液は、CO₂ 捕捉前溶液として有望な候補である。他の捕捉前溶液では、例えば、モノエタノールアミン (MEA: monoethanolamine) が知られており、これは、例えば燃焼排ガスからの CO₂ を除去するために、ガス流浄化用途に用いられる。これらの捕捉前溶液内へ CO₂ ガスを捕捉すると、元の水酸化物 / 炭酸塩 / 炭酸水素塩の捕捉前溶液は、水酸化物 (KOH もしくは NaOH)、炭酸塩 (K₂CO₃ もしくは Na₂CO₃)、および / または炭酸水素カリウム (KHCO₃) もしくは炭酸水素ナトリウム (NaHCO₃) 捕捉後溶液から成る混合物で構成される、より酸性の捕捉後溶液へ変換される。

【0002】

CO₂ ガスが、CO₃⁽²⁻⁾ および / または HCO₃⁻ というイオンの形態で捕捉されて、捕捉後溶液を形成すると、典型的には溶液から純粋な CO₂ ガスが再生される。このプロセスが与える全体にわたる効果は、比較的低いモル (mole) 分率の CO₂ ガスを有する分離前混合ガス流から、分離前ガス流よりも高いモル分率の CO₂ ガスを有する分離後ガス流へ、CO₂ ガスの分離および濃縮を行うことである。次いで、捕捉および再生後、分離後ガスは、地質学的に隔離されるか、またはコンクリート、プラスチック、もしくは液体炭化水素燃料などの有益な生成物内へ包含されるか、することができる。再生

された CO_2 のうちの可能性がある用途の多くは、1気圧よりも高い圧力へ CO_2 を加圧する必要がある。

【0003】

バイポーラ膜電気透析(BPMED:bipolar membrane electrolysis)は、他の化学薬品を追加せずに、塩類水溶液を酸および塩基へ変換するのに用いることができる。BPMEDデバイスのコンポーネントは、溶液内のイオン種を分離するのに用いられるイオン交換膜であり、複数の膜を横切って電界が加えられるときに分離される。

【図面の簡単な説明】

【0004】

【図1】図1は、高圧電気透析システムの一実施の形態の概略図である。

【図2】図2は、高圧電気透析システムに用いる高圧電気透析装置の一実施の形態の分解図である。

【図3】図3は、一実施の形態に従って CO_2 ガスを発生させる電気透析膜スタック動作の概略図である。

【図4】図4は、一実施の形態に従って CO_2 ガスを発生させる電気透析膜スタック動作の概略図である。

【図5A】図5Aは、0.5Mの KHCO_3 溶液を流れる4A、8A、16A、22A、および25Aの電流において、高圧電気透析装置の一実施の形態の性能を特徴付けるように設計された実験の測定値を示す。

【図5B】図5Bは、0.5Mの KHCO_3 溶液を流れる4A、8A、16A、22A、および25Aの電流において、高圧電気透析装置の一実施の形態の性能を特徴付けるように設計された実験の測定値を示す。

【図5C】図5Cは、0.5Mの KHCO_3 溶液を流れる4A、8A、16A、22A、および25Aの電流において、高圧電気透析装置の一実施の形態の性能を特徴付けるように設計された実験の測定値を示す。

【図5D】図5Dは、0.5Mの KHCO_3 溶液を流れる4A、8A、16A、22A、および25Aの電流において、高圧電気透析装置の一実施の形態の性能を特徴付けるように設計された実験の測定値を示す。

【発明を実施するための形態】

【0005】

現在利用可能なバイポーラ膜電気透析(BPMED)装置は、少なくとも1つの電気透析セルで構成される電気透析スタックを含む。電気透析セルは、少なくとも1つのバイポーラ膜(BPM:bipolar membrane)を含み、セルを横切る両端間に電位が加えられると、水素(H^+)イオンおよび水酸化物(OH^-)イオンへの水の解離が発生するようにする。

【0006】

BPMED膜スタックは、2室構成または3室構成を有することができる。2室構成では、隣接する膜は、BPMとAEMとの間で交互に並べて、BPM、AEM、BPM、AEMなどの形式の膜スタックを形成してもよいし、または隣接する膜は、BPMとCEMとの間で交互に並べて、BPM、CEM、BPM、CEMなどの形式の膜スタックを形成してもよい。3室セルでは、隣接する膜は、BPMからAEM、CEMまでを循環させて、BPM、AEM、CEM、BPM、AEM、CEMなどの形式の膜スタックを形成してもよい。バイポーラ膜を有しない電気透析も可能性があり、交互に並ぶ一連のAEMおよびCEMによって形成された2室構成で構成されて、AEM、CEM、AEM、CEM、AEMなどの形式の膜スタックを形成する。

【0007】

市販のBPMEDシステムの内部にあるガス気泡により、膜表面の近傍にガス気泡が生じ、同ガス気泡により、この領域内のイオン輸送が阻止されて、膜の有効な表面面積が縮小されることがあり、その結果、抵抗が増加し、極めて高い電流密度の局所的な「ホット

10

20

30

40

50

スポット」が発生して、膜寿命を短くすることになる。結果として、一般に使用される入力溶液および出力溶液は、周囲圧力において膜スタック内部に大した量のガスを放出しないように選択される。電気透析処理による全クラスのガス放出溶液は、このことから除外される。

【 0 0 0 8 】

一実施の形態では、これらの課題は、高圧で、すなわち周囲圧力を超える圧力で、電気透析装置を動作することによって克服される。動作圧力は十分に高く、他のプロセス条件であれば、典型的には周囲圧力において溶液から膜スタック内へ放出することになるガスが、代わりに溶液内に溶解した状態のままであり、結果的に膜スタックの内部におけるガス気泡の放出が防止される。溶解ガスを含有する溶液の圧力は、スタックの下流で低減することができ、その結果溶解ガスは溶液から放出されて、他の用途に収集することができる。低減される、溶液の圧力は、膜スタックの動作圧力未満の任意の圧力とすることができる。このように、ガスは、周囲圧力よりも大きい圧力で放出することができ、必要に応じて周囲圧力未満の圧力で放出することもできる。

【 0 0 0 9 】

本明細書で説明されるプロセスを用いて、ガス、液体、超臨界流体、またはこれらの何らかの組み合わせのうちのいずれが発生するかは、1) 電気透析が実行される温度および圧力、および2) 入力溶液組成物に依存する。例えば、 CO_2 を含有する入力溶液が用いられるとき、 CO_2 ガス、 CO_2 液体、または超臨界 CO_2 のうちのいずれかが、使用される温度および圧力に依存して発生してもよい。動作圧力および動作温度が CO_2 相図のガス部分に入ると、例えば大略 10 気圧の圧力および大略 20 °C の温度で、 CO_2 は、ガスとして出力溶液内に発生する。用いられる動作圧力および動作温度が CO_2 相図の液体部分内に収まると、例えば大略 100 気圧および 20 °C で、 CO_2 液体が発生する。動作圧力および動作温度が CO_2 の臨界点を通るのに十分に高いと、例えば大略 75 気圧および 35 °C で、超臨界 CO_2 流体が発生する。これらの場合のうちのいずれかでは、 CO_2 ガス、液体、または超臨界流体は、ガス / 液体分離、液体 / 液体分離または液体 / 超臨界流体分離などの、既知の方法によって、出力溶液から再生することができる。用いられる入力溶液に依存して、 CO_2 以外に、 SO_2 または NH_3 などの他のガス、液体、または超臨界流体生成物が発生することもできる。電気透析プロセスの温度は、例えば入力溶液を直接に加熱することによって、制御してもよい。

【 0 0 1 0 】

スタック内の溶液（電極溶液、第 1 溶液、第 2 溶液、および任意の第 3 溶液）を加圧し、その後で溶液内へイオン輸送を実行して同溶液からガスが放出されることによって、標準プロセスの場合よりも効率的に、加圧が成し遂げられる。これにより、 CO_2 の場合には、液体燃料に対する隔離および反応などの一定の用途に必要な圧力で、 CO_2 を直接に発生させることが可能となる。これにより、引き続き反応ステップに必要な高められた圧力で、直接に再生することもできる他のガスに対しても、利益を享受することができる。例えば、 SO_2 ガスは、亜硫酸塩水溶液または硫酸水素塩水溶液が本システム内へ入力され、本システムの工程を経由して、より酸性にされるときに、生成することができ、 NH_3 ガスは、アンモニウム水溶液が本システム内へ入力され、本システムの工程を経由して、よりアルカリ性にされるときに、生成することができる。

【 0 0 1 1 】

図 1 は、一実施の形態の高圧電気透析システムを示す。2 室式電気透析を行う装置を含むシステムは、3 つのループ、すなわち第 1 溶液ループ、第 2 溶液ループ、および電極溶液ループで構成される。3 室式電気透析を行う装置を含むシステムは、追加の第 3 溶液ループを含む。

【 0 0 1 2 】

一実施の形態では、第 1 溶液はアルカリ性溶液、および第 2 溶液は酸性溶液である。代わりの構成としては、第 1 溶液は酸性溶液、および第 2 溶液はアルカリ性溶液である。電極溶液は、例えば電解液でもよい。4 つのループを包含する一実施の形態では、第 3 溶液

10

20

30

40

50

は、例えば動作中の電気透析ユニットの中を通過しながら希薄化された塩類溶液でもよい。

【 0 0 1 3 】

各ループは、1つ以上のタンク（例えば、第1溶液タンク100）、ポンプ（例えば、第1溶液ポンプ104）、振動吸収材（例えば、第1溶液振動吸収材107）、1つ以上の温度計およびpH計（例えば、計器116）、1つ以上の温度計および導電率計（例えば、計器117）、1つ以上の圧力計および流量計（例えば、計器123および123）、バイパスモードとスタックモードとの間で動作モードを変化させるバルブ（例えば、バルブ112および120）、ならびに電気透析装置110の圧力を調整するバルブ（例えば、バルブ121）を含む。

10

【 0 0 1 4 】

一実施の形態では、本システムは、高圧電気透析装置110も含む。図2は、一実施の形態に従うシステムに用いる高圧電気透析装置の分解図を示す。高圧電気透析装置は、アノード端部201およびカソード端部202を含む。本装置は、軸支持メンバ203および補強メンバ204を有する筐体を含む。本装置が組み立てられるとき、軸支持メンバ203は、いっしょにつがいにされて、電気透析膜スタック205を収容するセルチャンバを形成する。補強メンバ204は、同メンバが結合されるとき、軸方向に圧縮力を加えるように構成され、それによって、軸支持メンバ203がつがいにされるようにするとともに、電気透析装置が、本装置の周囲の環境内で自然に生じる圧力として定義される周囲圧力を超える圧力で、動作することができるようにする。周囲圧力は、海水面の高度において、典型的には大略1気圧、または101.325 kPaである。高圧電気透析装置は、20気圧を含めて最大20気圧までの圧力で、または20気圧を超える圧力で、動作することができる。一実施の形態では、アノード端部201における軸支持メンバ203は、少なくとも1つの加圧ポート216を含み、同ポートは、電気透析膜スタック205の内部と、軸支持メンバ203のつがいによって形成されるセルチャンバとの間の圧力が、電極溶液の一部を電気透析スタック205の外側にあるセルチャンバの領域へ転換することによって、等しくなることを可能にする。

20

【 0 0 1 5 】

電気透析スタック205は、バイポーラ膜なしに電気透析を実行するように構成される1つ以上の電気透析セル206、またはBPMEDを実行するように構成される1つ以上のセルを含む。BPMEDを実行するように構成されるセルは、2室セルまたは3室セルのいずれかとすることができる。例えば、図2の電気透析セル206は、第1イオン交換膜208および第2イオン交換膜209に対して交互となるように配置された、2つのセルガasket 207を含む。例えば、第1イオン交換膜208がAEMであり、第2イオン交換膜209がCEMであれば、セル206は、バイポーラ膜なしに電気透析を実行することもできる。代わりの構成としては、例えば、第1イオン交換膜208がBPMであり、第2イオン交換膜209がAEMまたはCEMであれば、セルは、BPMEDを実行することもできる。

30

【 0 0 1 6 】

電気透析スタック205は、スタックの一方または両方の端部において端部ガasket 211、スタックの一方または両方の端部において端部イオン交換膜210、および膜スタック205のカソード端部202においてn番目の電気透析セル206と端部イオン交換膜210との間に挿入される追加のセルガasket 212も含むことができる。端部イオン交換膜210および追加のセルガasket 212が必要となるかどうか、およびどんなタイプのイオン交換膜210が適切であるかは、使用される入力溶液および所望の出力溶液に依存する。

40

【 0 0 1 7 】

図3は、1つの2室BPMEDセルを収容する高圧電気透析装置内で、CO₂ガスを発生させるのに用いられる電気透析膜スタック動作の概略図を示す。図示されるスタック構成およびプロセスを用い、本システム内への入力に依存して、他のガスが発生してもよい

50

。

【0018】

1つの2室BPMEDセル302を含む電気透析スタック301では、電気透析セル302は、2つのセルガasket303および305、ならびにセルガasket303および305に対して軸方向に交互となるように配置された2つのイオン交換膜304および306で構成される。電気透析スタック301はまた、2つの端部イオン交換膜307および308を含み、電気透析セル302は、2つの端部イオン交換膜307および308の間に挿入される。電気透析スタックはまた、電気透析セル302の第2イオン交換膜306と第2端部イオン交換膜308との間に挿入される追加のセルガasket309を含む。電気透析スタック301はまた、2つの端部ガasket310および311を含み、第1端部ガasket310は、本装置のアノード端部電極312と第1端部イオン交換膜307との間に挿入され、第2端部ガasket311は、本装置のカソード端部電極313と第2端部イオン交換膜308との間に挿入される。

10

【0019】

電気透析スタックが2室BPMEDを実行するように構成される一実施の形態では、第1イオン交換膜304はBPMであり、第2イオン交換膜306はAEMであり、端部イオン交換膜307および308はCEMである。第1CEM307とBPM304との間に、アルカリ性溶液が発生し、BPM304とAEM306との間に、酸性溶液が発生する。溶存種の濃度、pH、および絶対圧力などのシステムパラメータに依存して、ガスは、BPM304とAEM306との間の酸性溶液から放出してもよいし、酸性溶液内に溶解した状態のままでよい。例えば、所与の濃度の溶解CO₂および所与のpHの酸性溶液に対して、CO₂ガスが酸性溶液内に溶解しているとき、圧力が十分に高ければ、全CO₂ガスは、溶液内に溶解した状態のままであることになる。例えば、入力水溶液は、いずれかの電極に流れるKOHの電極溶液であり；ガasket303によって定義される溶液室内にある端部CEM307とBPM304との間、およびガasket309によって定義される溶液室内にあるAEM306と端部CEM308との間、に流れるKHCO₃およびK₂CO₃の塩基溶液であり；ガasket305によって定義される溶液室内にあるBPM304とAEM306との間に流れるKH₂PO₄およびH₃PO₄の酸溶液である。K⁺イオンは、ガasket310によって定義される室内にある電極溶液から、端部CEM307を横切って移送され、OH⁻およびH⁺イオンは、BPM304を横切る両端間で解離し、HCO₃⁻およびCO₃²⁻は、ガasket309によって定義される室内にあるアルカリ性溶液から、AEM306を横切って移送される。K⁺イオンは、解離したOH⁻イオンと化合して、第1CEM307とBPM304との間にKOHを発生させ、H⁺イオンは、HCO₃⁻イオンおよびCO₃²⁻イオンと化合して、BPM304とAEM306との間のガasket305によって定義される溶液室内に、H₂CO₃および溶解CO₂を形成する。

20

30

【0020】

一実施の形態では、電気透析スタックは、代わりに1つ以上の3室セルを含む。図4は、1つの3室セルを収容する高圧BPMED装置内で、CO₂ガスを発生させる電気透析スタック動作の概略図を示す。図示されるスタック構成およびプロセスを用い、本システム内への入力に依存して、他のガスが発生してもよい。

40

【0021】

1つの3室式電気透析セル402を含む電気透析スタック401の一実施の形態では、電気透析セル402は、3つのセルガasket403、405、407、およびセルガasket403、405、407に対して軸方向に交互となるように配置された3つのイオン交換膜404、406、408で構成される。電気透析スタック401はまた、2つの端部ガasket411および412を含み、第1端部ガasket411は、本装置のアノード端部電極413と端部イオン交換膜409との間に挿入され、第2端部ガasket412は、本装置のカソード端部電極414と電気透析セル402との間に挿入される。電気透析スタック401はまた、電気透析セル402と端部ガasket411との間に挿入

50

される1つの端部イオン交換膜409を含む。

【0022】

本実施の形態では、第1膜404はBPMであり、第2膜406はAEMであり、第3膜408はCEMであり、端部膜409はCEMである。アルカリ性溶液は、端部イオン交換膜409とBPM404との間に発生し、酸性溶液および CO_2 ガスは、BPM404とAEM406との間に発生し、脱塩入力溶液は、AEM406とCEM408との間に発生する。例えば、入力溶液は、ガスケット411および412によって定義される室内にある KOH の電極溶液、ガスケット403および407によって定義される室内にある KHCO_3 および K_2CO_3 のアルカリ性溶液、ならびにガスケット405によって定義される室内にある KH_2PO_4 および H_3PO_4 の酸性溶液を含むことができる。この
10
のような条件のもとで、 K^+ イオンは、端部ガスケット411によって定義される室内にある電極溶液から端部CEM409を横切って、および端部ガスケット412によって定義される室内にある電極溶液内へCEM408を横切って移送され、 OH^- および H^+ イオンは、BPM404を横切る両端間で解離し、 HCO_3^- および CO_3^{2-} は、ガスケット407によって定義される室内にあるアルカリ性溶液から、AEM406を横切って移送される。 K^+ イオンは、解離した OH^- イオンと化合して、端部イオン交換膜409とBPM404との間に KOH を発生させ、 H^+ イオンは、 HCO_3^- および CO_3^{2-} イオンと化合して、BPM404とAEM406との間のガスケット405によって定義される溶液室内に、 H_2CO_3 および溶解 CO_2 を形成し、入力溶液ほど濃縮されていない、希薄化された KHCO_3 および K_2CO_3 溶液は、AEM406とCEM408との間
20
に発生する。

【0023】

図2へ戻ると、高圧電気透析装置はまた、溶液が本装置へ流入するおよび本装置から流出することを可能にするポートを含む。ポートは、軸支持メンバ203内に形成される飾りポートであって、補強メンバ204内に形成される飾りポート穴を通してスライドする飾りポートでもよいし、フランジアダプタ213は、各飾りポートにぴったりかぶせて、補強メンバ204へ取り付けてもよい。本装置の流れは、アノード端部201にあるポートが放出口ポートであり、カソード端部202にあるポートが注入口ポートであるように、必要に応じて逆にすることができる。加えて、この流れは、アノード端部201において、一方の溶液用に入力ポートおよび他方の溶液用に出力ポートがあり、カソード端部2
30
02において、アノード端部に入力ポートがある溶液用に出力ポートおよびアノード端部に出力ポートがある溶液用に入力ポートがあるようにすることができる。本装置の各端部は、電極溶液注入口ポートおよび電極溶液放出口ポートを両方とも有する。

【0024】

高圧電気透析装置はまた、2つの電極であって、スタック205のいずれの端部にもそのうちの1つがある2つの電極214、および2つの電極格子であって、電極214のうちの1つと電気透析スタック205との間に各電極格子が挿入される2つの電極格子215を含む。一実施の形態では、本装置はまた、2つの応力低減シリンダ217を含み、そのうちの1つが各補強メンバ204へ取り付けられる。

【0025】

一実施の形態では、図2に示される電気透析装置は、図1に示される高圧電気透析システムへ、電気透析装置110として包含される。電気透析装置110が、BPMEDE電気透析スタックを含むとき、図1の電気透析システムは、例えば、炭酸塩水溶液および炭酸水素塩溶液から CO_2 ガスを再生するのに用いることができる。

【0026】

図1に戻ると、タンク100~103は、周囲圧力と電気透析スタックの絶対圧力との間の任意の圧力に加圧することができる。タンクがこのように加圧されると、周囲圧力を超える圧力で、すなわちタンク100~103の圧力と実質的に同じ圧力で、溶液からガスが放出される。

【0027】

10

20

30

40

50

－実施の形態では、第１溶液タンク１００および第２溶液タンク１０１はそれぞれ、バイパスまたは電気透析装置１１０から入る注入口と、第１溶液ポンプ１０４または第２溶液ポンプ１０５へ向う放出口との両方を有する。タンク１００および１０１は、ｐＨ計１１６ならびに導電率計１１７を溶液に差し込むためのフィードスルーを有する。第２溶液タンク１０１のカバーは、通気孔およびガス注入用の１／８インチ導管を備える。

【００２８】

－実施の形態では、第１溶液タンク１００および第２溶液タンク１０１は両方とも、タンクの状態に関する一定の情報を測定し、示し、および記録するための計器を有する。例えば、第１溶液タンク１００は、第１溶液の温度およびｐＨを測定し、示し、および記録するコンピュータ（ＴＸＩＲ）計器１１６への、温度情報およびｐＨ情報ならびに記録動作を含んでもよい。第１溶液タンク１００は、第１溶液の温度および導電率を測定し、示し、および記録するＴＸＩＲ計器１１７をさらに含んでもよい。第２溶液タンク１０１は、第２溶液に対して同一の機能を実行するＴＸＩＲ計器１１６およびＴＸＩＲ計器１１７をさらに有してもよい。

10

【００２９】

－実施の形態では、第２溶液タンク１０１は、電気透析スタックを通して動作している間、ガスを再生するために、第２溶液へガスを注入する手段をさらに有してもよい。例えば、第２溶液タンク１０１は、例えば導管によって接続されるＣＯ₂ガスボトルを有する塩基溶液タンクでもよい。ガスの第１溶液タンク１０１への注入は、バルブ１１８を用いて、オンまたはオフすることができる。

20

【００３０】

－実施の形態では、第１溶液ループはまた、第１溶液ループを排液するバルブ１１９、およびバイパスモードから電気透析スタックモードへ動作を変化させるバルブ１２０を含む。第２溶液ループもまた、第２溶液ループに対して同一の機能を実行するバルブ１１９および１２０を含む。第１溶液ループはまた、本システム内の圧力を変化させるバルブ１２１、およびサンプルを取り込むバルブ１２２を含む。第２溶液ループもまた、第２溶液ループに対して同一の機能を実行するバルブ１２１および１２２を含む。－実施の形態では、第１溶液ループの圧力および流量は、それぞれ、コンピュータ（ＰＩＲ）計器１２３への圧力情報および記録動作、ならびにコンピュータ（ＦＩＲ）計器１２４への圧力情報および記録動作によって、測定され、記録される。第２溶液ループもまた、第２溶液ループに対して同一の機能を実行するＰＩＲ計器１２３およびＦＩＲ計器１２４を含む。

30

【００３１】

－実施の形態では、電極溶液ループは、２つのタンク１０２～１０３を有する。各タンク１０２～１０３は、バイパスまたは電気透析装置１１０から入る注入口、および電極溶液ポンプ１０６へ向う放出口を有する。電極溶液タンク１０２は、酸素を放出することになる電気透析装置１１０のアノード端部２０１から入る電極溶液のためのものである。電極溶液タンク１０３は、水素を放出することになる電気透析装置１１０のカソード端部２０２から入る流体のためのものである。

【００３２】

－実施の形態では、電極溶液ループもまた、電極溶液ループを排液するバルブ１１１を有する。電極溶液ループもまた、バイパスモードから電気透析スタックモードへ動作を変化させる２つのバルブ１１２を含んでもよい。電極溶液ループもまた、本システム内の圧力を変化させるように変更することができる２つのバルブ１１３を含んでもよい。－実施の形態では、電極溶液ループの圧力および流量は、それぞれＰＩＲ計器１１４およびＦＩＲ計器１１５によって測定され、記録される。

40

【００３３】

－実施の形態では、電気透析装置１１０の各ポートは、本システムがバイパスモードで動作中に、任意の溶液が電気透析装置１１０内へ流れることを回避する、チェックバルブ１２８を備える。各ループは、容積型ポンプ１０４の動作によって引き起こされる圧力振動を減衰させる振動吸収材１０７を有する。

50

【 0 0 3 4 】

一実施の形態では、本システムは、家庭用真空器へ接続される、三方弁であるバルブ 1 3 1 を含む。本システムが使用される前に、バルブ 1 3 1 は、バルブ 1 1 8 を用いて交互に開閉することができ、バルブ 1 1 8 は、本システムが使用中に発生させるどんなガスでも含むシリンダへ接続される。これにより、本システムが使用中に発生させるどんなガスでも、それ以外にヘッドスペースが何も含有しないように、第 1 溶液タンク 1 0 0 のヘッドスペースから空気が除去される。ヘッドスペースをこのように浄化することによって、F I R 計器 1 3 0 を流れるガスがすべて純粋になること、またはできる限り純粋に近いものとなることが確実にされ、F I R 計器 1 3 0 によるガス流量の正確な測定が保障される。

10

【 0 0 3 5 】

一実施の形態では、電気透析システムは、各溶液ループ用に各 1 つのモータ 1 2 5、および各溶液ループ用に各 1 つの H z / R P M コントローラ 1 2 6 を含む。電気透析システムはまた、各溶液ループ用に各 1 つの圧力軽減バルブ 1 2 7 を含む。電気透析システムはまた、真空またはガスシリンダからの流れを接続するまたは阻止することを可能にする双方向バルブであるバルブ 1 3 2 を含み、この流れは、バルブ 1 3 1 およびバルブ 1 1 8 の設定に依存して阻止される。電気透析システムはまた、F I R 計器 1 3 0 を流れるガス流量を制御するバルブ 1 3 3 を含む。本システムはまた、タンク 1 0 0 ~ 1 0 3 からそれぞれバルブ 1 1 1 および 1 1 9 を経由して排液される任意の溶液を受ける排液管 1 2 9 を含む。

20

【 0 0 3 6 】

高圧電気透析装置を包含する電気透析システムを用いることによって、ガスは、任意のガス放出溶液から、周囲圧力と電気透析スタックの絶対圧力との間の任意の圧力で生成することができる。次の図および説明では、C O ₂ ガスを発生させる一実施の形態に従うプロセスが、参照される。しかしながら、高圧電気透析システム、プロセス、および本明細書で説明される好ましい条件の実施の形態は、どんな溶液が用いられるかに依存して、C O ₂ 以外の他のガスを発生させるのに用いることができる。

【 0 0 3 7 】

電気透析スタック内で行われるイオン輸送は、高圧電気透析システムを用いて C O ₂ ガスを放出するプロセスを説明することによって、もっともよく理解される。K ₂ C O ₃ などの炭酸塩、および K H C O ₃ などの炭酸水素塩の水溶液に関する電気透析において、C O ₂ が発生する場合、電気透析装置内の圧力を増加させると、電気透析膜スタック内で膜面積を縮小する気泡が抑圧され、それによって所与の速度に対する C O ₂ 発生電圧およびエネルギー消費が減少する。次の図は、この原理を説明する。

30

【 0 0 3 8 】

高圧電気透析システムが、炭酸塩 / 炭酸水素塩水溶液から C O ₂ ガスを放出するのに用いられるとき、次のようないくつかの性能特性が理解される：1) C O ₂ 流量は、電流密度が増加するにつれて増加する、2) 電圧は、所与の電流密度および塩基溶液に対して、圧力が増加するにつれて減少する、3) 電圧減少の大きさは、電流密度が増加するにつれて増加する、4) C O ₂ のモル当たりに必要なエネルギーは、設定された電流密度および C O ₂ 輸送速度に対して、圧力が増加するにつれて減少する。これらの性能特性が生じるのは、高圧電気透析を実行する結果として、電気透析スタック内におけるガス気泡の放出を抑圧するからである。これらの特性は、次の表および図面を参照することによって、より良好に理解されることになる。

40

【 0 0 3 9 】

表 1 ~ 5 は、1 . 5 気圧から 1 0 気圧までの絶対圧力において、図 2 に示される本実施の形態などの高圧電気透析装置の性能を特徴付けるように行われた実験に対して、C O ₂ 流量 (s l p m) (表 1)、効率 (表 2)、電圧 (ボルト) (表 3)、分数電圧低減量 (表 4)、およびエネルギー (k J / m o l C O ₂) (表 5) の測定値を示す。これらの実験は、すべて次の条件のもとで実行された：使用された B P M、A E M、および C E M は、

50

それぞれネオセプタ (Neosepta) BP-1E、ネオセプタAHA、ネオセプタC66-10Fであった； KHCO_3 の塩基溶液は0.5Mであり、pHは大略8.6であった； K_2CO_3 の塩基溶液は0.5Mであり、pHは大略11.6であった； KOH の塩基溶液は0.5Mであり、pHは大略13.6であった；すべての電極溶液は、2Mの KOH であった；すべての酸溶液は、0.3Mの KH_2PO_4 および純水 (DI water) 5L当たり30mLの H_3PO_4 であり、pHは大略2.6であった。本実施の形態における7つのセルの高圧電気透析ユニット (図2を参照) を通る体積流量は、酸および塩基溶液に対して2.33lpm、電極溶液に対して6.9lpmであった。

【0040】

次の塩基溶液 / 圧力組み合わせが調査された：1.5気圧、5気圧、および10気圧における0.5Mの KHCO_3 ；1.5気圧および5気圧における0.5Mの K_2CO_3 ；ならびに1.5気圧、5気圧、および10気圧における0.5Mの KOH 。

【0041】

表1は、増加中の電流密度において、1.5気圧、5気圧、および10気圧の絶対圧力から1気圧へ減圧後、酸タンクから CO_2 ガスが放出される速度の測定値を示す。 CO_2 流量は、所与の電流密度において、 KHCO_3 に対しては K_2CO_3 よりも2倍高く、電流密度が増加するにつれて線形的に増加する。

【表1】

CO_2 ガス放出速度

CO_2 流量 (slpm)		電流密度 (mA/cm^2)						
		5.6	11.1	22.3	44.5	66.8	89.0	111.3
KHCO_3	1.5気圧	0.05	0.12	0.32	0.69	1.08	1.40	
	5気圧	0.04	0.11	0.31	0.69	1.07	1.42	
	10気圧	0.04	0.12	0.35	0.73	1.11	1.44	
K_2CO_3	1.5気圧	0.02	0.08	0.18	0.38	0.58	0.77	0.97
	5気圧	0.01	0.07	0.17	0.36	0.54	0.73	0.92

【0042】

表2は、増加中の電流密度において、1.5気圧、5気圧、および10気圧の絶対圧力に対する効率を示す。効率は、電流の電子電荷当たりに放出されるガスの分子比率として定義される。この定義のもとで起こりうる最大効率は、 KHCO_3 に対しては1.0であり、 K_2CO_3 に対しては0.5である。 KOH が塩基溶液として用いられるとき、 CO_2 流量はゼロになるので、 KOH の塩基溶液に対するどんなデータも収集されなかった。表3は、効率が圧力に依存しないことを示す。さらに、電流密度が増加するにつれて、効率は、 K_2CO_3 に対して大略0.45および KHCO_3 に対して0.85の漸近値に達する。

【表 2】

効率

効率		電流密度 (mA / cm ²)						
		5. 6	1 1. 1	2 2. 3	4 4. 5	6 6. 8	8 9. 0	1 1 1. 3
KHCO ₃	1. 5 気圧	0. 4 6	0. 5 8	0. 7 7	0. 8 2	0. 8 6	0. 8 4	
	5 気圧	0. 4 0	0. 5 4	0. 7 5	0. 8 2	0. 8 5	0. 8 5	
	1 0 気圧	0. 3 9	0. 5 8	0. 8 3	0. 8 7	0. 8 8	0. 8 5	
K ₂ CO ₃	1. 5 気圧	0. 2 4	0. 3 8	0. 4 3	0. 4 5	0. 4 6	0. 4 6	0. 4 6
	5 気圧	0. 0 8	0. 3 2	0. 4 0	0. 4 3	0. 4 3	0. 4 6	0. 4 4

10

20

【 0 0 4 3 】

表 3 は、増加中の電流密度において、1. 5 気圧、5 気圧、および 1 0 気圧の絶対圧力に対する測定電圧を示す。表 3 は、1) 所与の電流密度および塩基溶液に対して、絶対圧力が増加するにつれて、電気透析スタックを横切る両端間の全電圧は減少すること、および 2) この減少量は、KOH に対してよりも、K₂CO₃ および KHCO₃ の塩基溶液に対して大きくなること、を示す。表 4 は、1. 5 気圧で測定された電圧に関して、圧力 p において、式 $(V_{1.5 \text{ 気圧}} - V_p) / V_{1.5 \text{ 気圧}}$ によって決定される分数電圧低減量を示す。表 4 は、1) K₂CO₃ および KHCO₃ に対する分数低減量が、高電流密度においてそれぞれ大略 2 0 % および 1 5 % である一方で、KOH に対する低減量は、多くても 5 % であること、および 2) 分数電圧低減量は、電流密度が増加するにつれて増加すること、を示す。これらの観察は、両方とも、電気透析システムの絶対圧力を増加させる効果が、電気透析スタックの内部の溶液から放出する CO₂ ガスの量を減少させることになっているという事実によって説明することができる。

30

【表 3】

電圧

電圧 (ボルト)		電流密度 (mA / cm ²)						
		5. 6	1 1. 1	2 2. 3	4 4. 5	6 6. 8	8 9. 0	1 1 1. 3
KHCO ₃	1. 5 気圧	7. 2 7	8. 8 6	1 1. 4 3	1 5. 6 0	2 0. 5 0	2 3. 2 8	
	5 気圧	7. 1 7	8. 4 6	1 0. 2 4	1 3. 4 6	1 6. 7 2	1 9. 3 9	
	1 0 気圧	7. 1 1	8. 3 4	1 0. 2 7	1 3. 2 9	1 5. 5 2	1 9. 2 4	
K ₂ CO ₃	1. 5 気圧	7. 2 0	8. 2 4	1 0. 2 5	1 3. 1 7	1 7. 3 1	1 9. 1 1	2 1. 5 0
	5 気圧	7. 0 7	8. 0 0	9. 4 7	1 1. 8 9	1 4. 3 6	1 6. 8 1	1 8. 9 0
KOH	1. 5 気圧	7. 1 9	7. 9 9	9. 6 5	1 1. 6 0	1 5. 0 4	1 5. 9 7	1 7. 4 7
	5 気圧	7. 0 8	7. 8 9	9. 6 2	1 1. 2 8	1 3. 7 3	1 5. 2 4	1 6. 9 5
	1 0 気圧	7. 1 9	7. 9 5	9. 1 2	1 1. 2 8	1 3. 4 0	1 5. 2 8	1 6. 5 3

【表 4】

分数電圧低減量

分数電圧低減量		電流密度 (mA / cm ²)						
		5. 6	1 1. 1	2 2. 3	4 4. 5	6 6. 8	8 9. 0	1 1 1. 3
KHCO ₃	5 気圧	0. 0 1	0. 0 4	0. 1 0	0. 1 4	0. 1 8	0. 1 7	
	1 0 気圧	0. 0 2	0. 0 6	0. 1 0	0. 1 5	0. 2 4	0. 1 7	
K ₂ CO ₃	5 気圧	0. 0 2	0. 0 3	0. 0 8	0. 1 0	0. 1 7	0. 1 2	0. 1 2
KOH	5 気圧	0. 0 2	0. 0 1	0. 0 0	0. 0 3	0. 0 9	0. 0 5	0. 0 3
	1 0 気圧	0. 0 0	0. 0 0	0. 0 5	0. 0 3	0. 1 1	0. 0 4	0. 0 5

【 0 0 4 4 】

一定の電流密度および効率に対して、一定量のCO₂が、膜を横切って、HCO₃⁻およびCO₃⁽²⁻⁾イオンの形態の酸溶液内へ、輸送されることになる。酸溶液のpHが、溶液内に溶解したCO₃⁽²⁻⁾、HCO₃⁻、およびCO₂ガスの濃度の比率を決定し、他方、酸溶液と平衡にあるCO₂ガスの分圧が、溶液内に溶解したCO₂の濃度の絶対値を決定する。電気透析システムの内部の酸溶液と平衡にあるガスは、定常状態では純

10

20

30

40

50

粋 CO_2 であり、その結果、酸溶液と平衡にある CO_2 の分圧は、酸室の絶対圧力となる。一定の電流密度において、一定量の CO_2 が酸溶液内へ輸送されるとすると、一定の電流密度に対して圧力が増加するにつれて、AEMを横切って酸溶液内へ輸送される CO_2 の割合が増加し、それによって、溶解 CO_2 、 HCO_3^- 、および CO_3^{2-} として、酸溶液 pH によって決定されるこれらの種の濃度比率で、溶液内に溶解した状態のままのようになる。各 CO_2 輸送速度に対して、すなわち何らかの効率にある各電流密度に対して、輸送されるすべての CO_2 が、溶液内の状態のままであることとなるための圧力が存在し、この点を超えて圧力を増加させても、さらなる効果は何も与えないはずである。

【0045】

電気透析スタックそれ自体の内部でガスが放出されると、膜表面上にガス気泡が捕捉されるようになることが知られている。これにより、膜の有効な表面面積が縮小されて、電流密度および抵抗が増加するとともに、局所的に限定された極めて高い電流密度の領域、すなわち「電流集中現象」が発生し、結果として膜にダメージを与えることがある。一実施の形態では、高圧電気透析システムは、所与の電流密度およびしたがって所与の CO_2 輸送速度に対して、圧力を増加させると、電気透析スタックそれ自体の内部にある溶液から生じるガス気泡の量が削減され、それによって抵抗が小さくなり、スタックを横切る両端間の全電圧が低減される。代わりに、電気透析スタックから物理的に分離された酸タンク内で、酸溶液が大略1気圧まで、または周囲圧力と電気透析装置の圧力との間の何らかの圧力まで減圧されると、溶液から CO_2 が生じる。分数低減量は、所与の電流密度において、 K_2CO_3 に対してよりも KHCO_3 に対して大きくなるが、これは、所与の電流密度において、 KHCO_3 に対する CO_2 輸送速度が、 K_2CO_3 に対するよりも高くなるからである。同様に、 KHCO_3 および K_2CO_3 に対する低減量は、 KOH に対するよりもさらに大きく、これは、 KOH に対してどんな CO_2 放出も発生しないからであり、絶対圧力が増加することによって、電極において化学的活性が増加するために、 KOH に対して観察される小さな低減が起こりうる。

【0046】

最後に、圧力が増加すると、一定の CO_2 発生速度に必要な電圧が低減されるという事実により、表5に示されるデータが得られるが、同表では、増加中の電流密度において、1.5気圧、5気圧、および10気圧のモル CO_2 当たりのエネルギーが示される。一定の電流密度および CO_2 輸送速度において、 CO_2 のモル当たりに必要なエネルギーは、圧力が増加するにつれて、電気透析スタックの内部におけるガス気泡の放出が抑圧されるために、低減される。

【表 5】

エネルギー

エネルギー (kJ/mol CO ₂)		電流密度 (mA/cm ²)						
		5. 6	1 1. 1	2 2. 3	4 4. 5	6 6. 8	8 9. 0	1 1 1. 3
KHCO ₃	1. 5 気圧	2 2 3. 1 5	2 1 1. 2 2	2 0 5. 7 5	2 6 1. 7 2	3 2 9. 2 0	3 8 3. 7 1	
	5 気圧	2 4 7. 8 9	2 1 5. 3 2	1 8 9. 2 0	2 2 5. 3 5	2 7 1. 8 9	3 1 5. 5 0	
	1 0 気圧	2 5 0. 6 5	1 9 6. 7 6	1 7 0. 8 1	2 1 1. 1 7	2 4 3. 8 9	3 1 1. 5 4	
K ₂ CO ₃	1. 5 気圧	4 2 2. 6 9	3 0 2. 3 3	3 2 6. 7 8	4 0 2. 1 1	5 1 4. 0 1	5 7 1. 5 8	6 3 9. 7 2
			3 5	3 2	3 8	4 5	5 0	5 9
	5 気圧	1 4 0 6. 7 7	0. 3 8	7. 2 4	3. 4 6	8. 9 4	8. 7 5	2. 6 1

【0047】

図5A～5Dは、4A、8A、16A、22A、および25Aの電流において、図2に示される本実施の形態などの高圧電気透析装置の性能を特徴付ける実験に対して、CO₂流量 (slpm) (図5A)、効率 (図5B)、電圧 (ボルト) (図5C)、およびエネルギー (kJ/mol CO₂) (図5D) の測定値を示す。各実験の実行は、一定の電流密度において、圧力が増加するにつれて電圧がその漸近値に達するまで行われた。本実施の形態における実験設定によって可能となる最大電流は、25Aであったが、別の実施の形態の場合には、より大きな電流の可能性があってもよいことが理解されるだろう。本実験における各膜に対する膜面積は、大略180cm²であったが、これは25Aが、139mA/cm²の電流密度に対応することを意味する。次の条件が使用された：使用されるBPM、AEM、およびCEMは、それぞれネオセプタBP-1E、ネオセプタAHA、およびネオセプタC66-10Fであった；KHCO₃の塩基溶液は0.5Mであり、pHは大略8.6であった；すべての電極溶液は、2MのKOHであった；すべての酸溶液は、0.3MのKH₂PO₄および純水5L当たり30mLのH₃PO₄であり、pHは大略2.6であった。高圧電気透析ユニットを通る体積流量は、酸および塩基溶液に対して2.33lpm、電極溶液に対して6.9lpmであった。実験は、1.5気圧から10.2気圧までの圧力において0.5MのKHCO₃の塩基溶液を調査した。

【0048】

図5Aは、絶対圧力 (気圧) に対して、1気圧に減圧後に酸タンクからCO₂ガスが放出される速度の測定値のプロットを示す。図5Bは、同一のデータ点に対して、効率対絶対圧力のプロットを示す。効率は、電流の電子電荷当たりに放出されるガスの分子比率として定義される。図5Aは、電流密度が大略線形的に増加するにつれて、すべての圧力において、CO₂流量が多くなることを示す。図5Bは、高い電流密度において、CO₂流量が線形的増加よりも若干高く増加するのは、電流密度が増加するにつれて、効率がわずかに増加することに起因することを示す。

【0049】

10

20

30

40

50

図5Cは、5つの種々の総電流値：4A、8A、16A、22A、および25Aに対して、測定電圧対絶対圧力のプロットを示す。図5Cは、1)所与の電流密度および塩基溶液に対して、電気透析スタックを横切る両端間の全電圧は、絶対圧力が増加するにつれて、減少すること、2)この減少量は、電流密度が高くなるにつれて、ますます大きくなること、3)一定の電流密度に対して、電圧は、圧力が増加するにつれて、最低電圧に漸近的に接近すること、を示す。圧力が増加するにつれて、電圧が漸近的に振る舞うのは、各CO₂輸送速度に対して、すなわち何らかの効率にある各電流密度に対して、輸送されるすべてのCO₂が、溶液内の状態のままであることとなるための圧力があるからであり、この点を超えて圧力を増加させても、さらなる効果は何も与えないはずである。

【0050】

10

図5Cもまた、所与の電流密度、およびしたがって所与のCO₂輸送速度に対して、圧力を増加させると、膜スタックそれ自体の内部にある溶液から生じるガス気泡の量を削減することによって、抵抗が小さくなり、スタックを横切る両端間の全電圧が低減されることを示す。代わりに、膜スタックから物理的に分離された酸タンク内で、酸溶液が1気圧まで減圧されると、溶液からCO₂が生じる。この低減量は、電流密度の増加に対して増加するが、これはCO₂輸送速度が電流密度とともに増加するからである。この低減量は、圧力が増加するにつれて、漸近的限界に達するが、これは、ある圧力を超える圧力では、すべてのCO₂は溶液内に溶解した状態のままであるからである。

【0051】

図5Dは、5つの値の電流密度に対して、モルCO₂当たりのエネルギー対圧力のプロットを示す。一実施の形態では、装置内にある膜の膜面積は大略180cm²であり、その結果、25Aの電流は、大略140mA/cm²の電流密度に対応する。図5Dは、圧力が増加すると、一定のCO₂発生速度に必要な電圧が低減されることを示す。一定の電流密度およびCO₂輸送速度において、圧力が増加するにつれて、電気透析スタックの内部におけるガス気泡の放出が抑圧され、それによってCO₂のモル当たり必要なエネルギーは、低減される。25Aに対して、10.2気圧において必要なエネルギー、すなわち333kJ/molCO₂は、1.5気圧において必要なエネルギー、すなわち471kJ/molCO₂よりも大略30%少ない。それゆえに、電流密度およびしたがってCO₂発生速度が増加するにつれて、圧力を増加させると、1気圧における動作と比較して、エネルギー消費の分数低減量はますます大きくなる。

20

【0052】

30

高圧電気透析システムは、小型の信頼性のあるユニット内で、ガス、例えばCO₂のエネルギー効率の優れた高速濃縮を可能にする。CO₂の場合には、これは、例えば図2に示される本実施の形態などの高圧BPME Dシステムを用いて、炭酸塩/炭酸水素塩捕捉水溶液上で、高圧BPME Dを実行することによって行うことができる。これにより、周囲圧力と同等以上かつ電気透析装置の圧力未満の圧力において、捕捉溶液から純粋CO₂の放出が可能となるが、このようなCO₂は、例えば、液体燃料、隔離、またはセメントのような他の部材への組み込みに対する反応に適している。さらに、一実施の形態では、高圧電気透析システムは、エネルギー効率の優れたCO₂分離用に能動型pH制御(pH_{塩基}-pH_酸 7)、およびガス放出システム内で高圧動作によって可能となる高電流密度(100mA/cm²)を含む。このように高圧動作をpH制御および高電流密度と組み合わせることによって、小型の信頼性のあるユニット内で、エネルギー効率の優れた高速CO₂分離が可能となる。

40

【0053】

一実施の形態では、高圧電気透析システムは、所与の流量に対して発生したCO₂のモル当たりに消費されるエネルギーを、最小化することを可能にする。例えば、CO₂について一定の体積流量が望ましい場合、再生されるCO₂のモル当たりに消費されるエネルギーは、1)すべてのCO₂が、炭酸水素塩(HCO₃⁻)イオン、例えばKHCO₃の形態で含有されるような塩基溶液を用いること、2)HCO₃⁻イオンの濃度が0.5Mの塩基溶液を用いること、3)少なくとも10気圧の絶対圧力という電気透析スタック圧力で

50

動作すること、および４）膜スタックを横切る両端間に適用される電流密度を、所望の CO_2 体積流量に一致するように設定すること、によって最小化することができる。

【 0 0 5 4 】

一実施の形態では、高圧電気透析システムはまた、一定の電流密度が与えられたとすると、電圧を最小化することを可能にする。例えば、一定の電流密度ならびに溶液濃度および流量などの他の一定のパラメータに対して、電圧は、十分に大きい電気透析スタック圧力で動作することによって最小化することができる。所与のパラメータセットに対して、電気透析スタックの絶対圧力が、１気圧を超えて増加するにつれて、どんな追加の圧力増加も、もはや電圧に影響を及ぼさないような、あるしきい値電圧に至るまで、電圧は減少する。このしきい値電圧の値は、残りのプロセス条件の値に依存することになり、 CO_2 ガス再生の体積流量に直接に関連している。

10

【 0 0 5 5 】

一実施の形態では、電気透析のイオンが移送された後、動作圧力および動作温度により、ガス状 CO_2 が溶液内に溶解した状態となる場合、 CO_2 再生は、溶剤からの CO_2 のガス／液体分離によって実行される。電気透析のイオンが移送された後、動作圧力および動作温度により、溶液／液体 CO_2 混合物または溶液／超臨界 CO_2 混合物の状態となる場合には、 CO_2 再生は、高圧電気透析、続いて溶剤からの CO_2 の液体／液体分離または液体／超臨界流体分離によって、実行される。

【 0 0 5 6 】

一実施の形態では、 CO_2 以外のガスを放出する溶液が用いられてもよい。例えば、 SO_2 ガスは、亜硫酸塩水溶液または硫酸水素塩水溶液が本システム内へ入力され、本システムの工程を経由してより酸性にされると、生成することができ、 NH_3 ガスは、アンモニウム水溶液が本システム内へ入力され、本システムの工程を経由してよりアルカリ性にされると、生成することができる。

20

【 0 0 5 7 】

一実施の形態では、ガスは、ある圧力 p_{low} において水溶液内へ吸収される。次いで、溶液上で高圧電気透析が実行され、その後で同一のガスが、 $p_{high} > p_{low}$ となる圧力 p_{high} で再生される。このように、本実施の形態は、非効率的な機械式のコンプレッサを置き換えることができる、新規なガス加圧プロセスとして用いることができる。

30

【図 1】

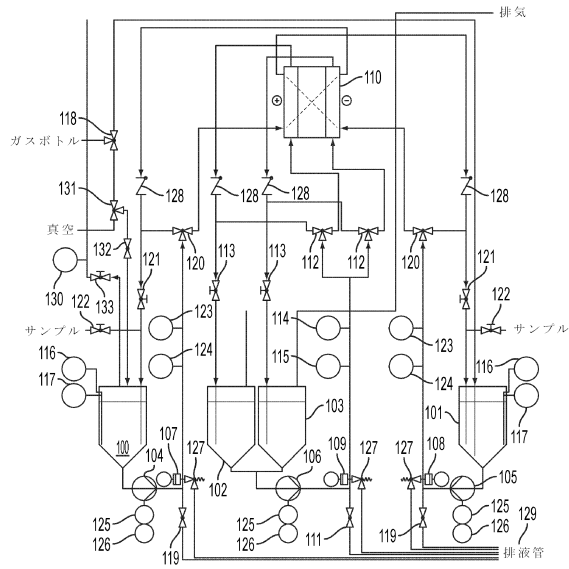


図 1

【図 2】

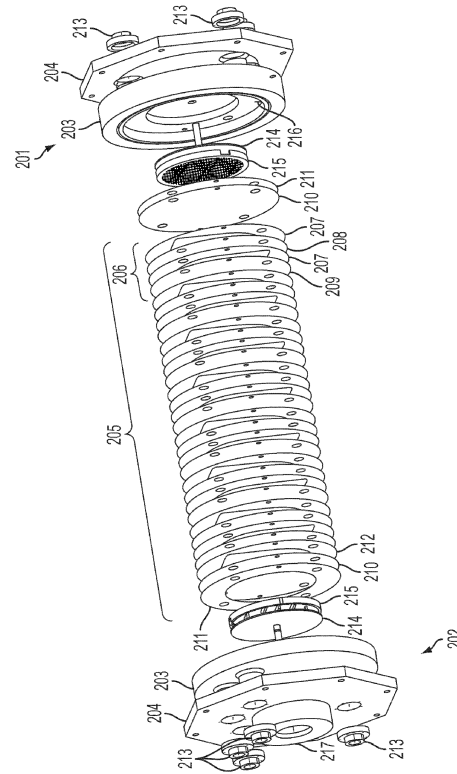


図 2

【図 3】

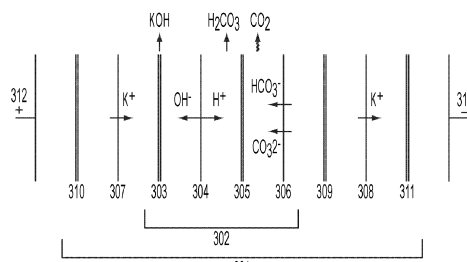


図 3

【図 4】

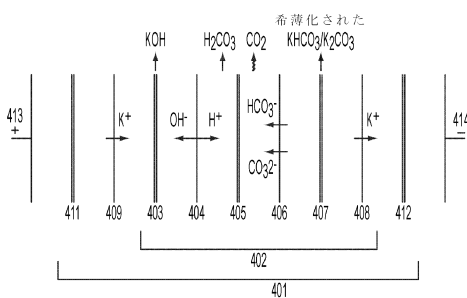


図 4

【図 5 A】

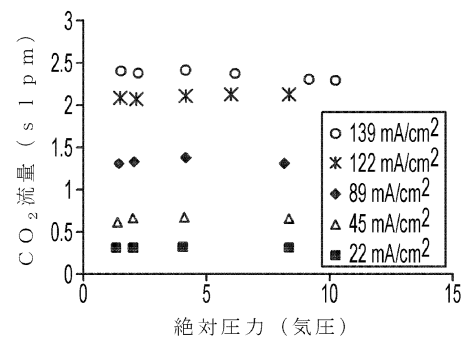


図 5 A

【図 5 B】

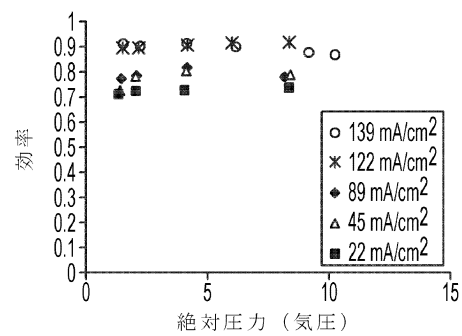


図 5 B

【図 5 C】

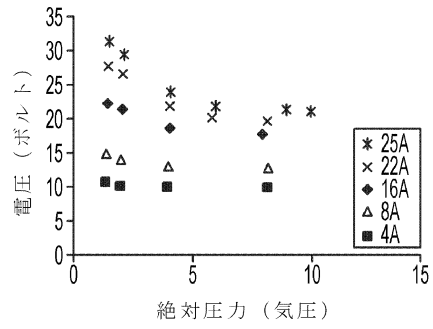


図 5 C

【図 5 D】

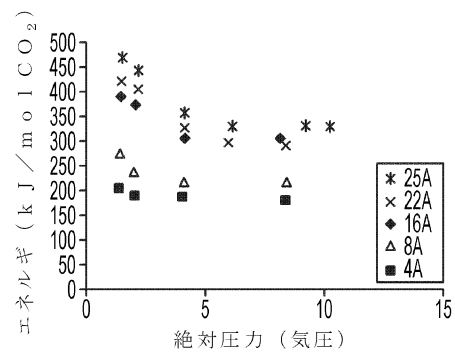


図 5 D

フロントページの続き

(72)発明者 マシュー・ディー・アイサマン

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 4 3 0 4 パロ・アルト コヨーテ・ヒル・ロード 3 3
3 3

(72)発明者 カール・エー・リッタウ

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 4 3 0 4 パロ・アルト コヨーテ・ヒル・ロード 3 3
3 3

審査官 長谷川 真一

(56)参考文献 特開2010-064067(JP,A)

特開2007-203212(JP,A)

特開昭59-036505(JP,A)

特表2005-532147(JP,A)

特表2008-510600(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B01D 53/22

B01D 61/00-71/82

C02F 1/44-1/48

C25B 1/00-9/20

C25B 13/00-15/08