

明 細 書

発明の名称： 発電システムおよび発電方法

技術分野

[0001] 本発明は、発電システムおよび発電方法に関する。

背景技術

[0002] 水素化芳香族化合物等の有機ハイドライドから脱水素反応で水素を取り出し、得られた水素を発電装置に導入して発電する発電システムが知られている（例えば特許文献1参照）。この発電システムでは、発電装置の排ガスの熱で脱水素反応に必要な熱の少なくとも一部を賄っていた。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2012-206909号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 本発明者らは、鋭意検討を重ねた結果、有機ハイドライドを用いた水素製造と水素を用いた発電とを組み合わせた発電システムにおいて、さらなる発電効率の向上を図る技術に想到した。

[0005] 本発明はこうした状況に鑑みてなされたものであり、その目的の1つは、有機ハイドライドを用いた水素製造と水素を用いた発電とを組み合わせた発電システムにおける発電効率の向上を図る技術を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0006] 本発明のある態様は、発電システムである。このシステムは、有機ハイドライドから水素および脱水素生成物を生成する脱水素反応部と、脱水素反応部の流出物から少なくとも第1ガス成分と第2ガス成分とを分離する第1水素精製部であって、第1ガス成分が第2ガス成分より水素を多く含み、第2ガス成分が第1ガス成分より気体の脱水素生成物および気体の有機ハイドライドを多く含む第1水素精製部と、第1ガス成分の供給を受けて発電する燃

料電池と、第2ガス成分を脱水素反応部に供給するリサイクルラインと、燃料電池のオフガスを燃焼して燃焼ガスを生成する燃焼部と、燃焼ガスで脱水素反応部を加熱する第1加熱部と、燃焼ガスで脱水素反応部に供給される有機ハイドライドを加熱する第2加熱部と、を備え、燃焼ガスの流路において第2加熱部は第1加熱部の下流側に位置する。

[0007] 本発明の他の態様は、発電方法である。この方法は、有機ハイドライドから水素および脱水素生成物を生成する脱水素反応工程と、脱水素反応工程の流出物から少なくとも第1ガス成分と第2ガス成分とを分離する第1水素精製工程であって、第1ガス成分が第2ガス成分より水素を多く含み、第2ガス成分が第1ガス成分より気体の脱水素生成物および気体の有機ハイドライドを多く含む第1水素精製工程と、第1ガス成分を燃料電池に供給して燃料電池で発電する発電工程と、第2ガス成分を脱水素反応工程に供給するリサイクル工程と、燃料電池のオフガスを燃焼して燃焼ガスを生成する燃焼工程と、燃焼ガスの熱を脱水素反応工程に供給する第1加熱工程と、第1加熱工程で用いられた後の燃焼ガスで脱水素反応工程に供給される有機ハイドライドを加熱する第2加熱工程と、を含む。

[0008] 以上の構成要素の任意の組合せ、本開示の表現を方法、装置、システムなどの間で変換したものもまた、本開示の態様として有効である。

発明の効果

[0009] 本発明によれば、有機ハイドライドを用いた水素製造と水素を用いた発電とを組み合わせた発電システムにおける発電効率の向上を図ることができる。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]実施の形態に係る発電システムの模式図である。

[図2]残存割合と発電効率の相対値との関係を示す図である。

発明を実施するための形態

[0011] 以下、本発明を好適な実施の形態をもとに図面を参照しながら説明する。実施の形態は、本発明の技術的範囲を限定するものではなく例示であって、

実施の形態に記述されるすべての特徴やその組み合わせは、必ずしも発明の本質的なものであるとは限らない。したがって、実施の形態の内容は、請求の範囲に規定された発明の思想を逸脱しない範囲において、構成要素の変更、追加、削除等の多くの設計変更が可能である。設計変更が加えられた新たな実施の形態は、組み合わせられる実施の形態および変形それぞれの効果をあわせもつ。実施の形態では、このような設計変更が可能な内容に関して、「本実施の形態の」、「本実施の形態では」等の表記を付して強調しているが、そのような表記のない内容でも設計変更が許容される。実施の形態に記述される構成要素の任意の組み合わせも、本発明の態様として有効である。各図面に示される同一又は同等の構成要素、部材、処理には、同一の符号を付するものとし、適宜重複した説明は省略する。また、各図に示す各部の縮尺や形状は、説明を容易にするために便宜的に設定されており、特に言及がない限り限定的に解釈されるものではない。また、本明細書または請求項中に「第1」、「第2」等の用語が用いられる場合には、この用語はいかなる順序や重要度を表すものでもなく、ある構成と他の構成とを区別するためのものである。また、各図面において実施の形態を説明する上で重要ではない部材の一部は省略して表示する。

[0012] 図1は、実施の形態に係る発電システム1の模式図である。発電システム1は、脱水素反応部2と、第1水素精製部4と、燃料電池6と、リサイクルラインRLと、燃焼部8と、第1加熱部10と、第2加熱部12と、第3加熱部14と、第4加熱部16と、第2水素精製部18とを備える。

[0013] 脱水素反応部2は、有機ハイドライドを脱水素化して水素および脱水素生成物（言い換えれば被水素化物）を生成する。脱水素反応部2は、白金、パラジウム、ニッケル等の公知の脱水素触媒を用いた脱水素反応により、有機ハイドライドから水素を取り出すことができる。有機ハイドライドは、水素が取り出されると脱水素生成物となる。脱水素触媒は、アルミナ、シリカ、チタニア等の担体上に担持されていてもよい。

[0014] 脱水素反応部2にはフィードラインFL2が接続され、フィードラインF

L 2 を介して外部から脱水素反応部 2 に有機ハイドライドが供給される。有機ハイドライドは、例えば公知の有機ハイドライド製造装置（図示せず）を用いて製造される。一例としての有機ハイドライド製造装置は、カソード電極と、アノード電極と、これら 2 つの電極を隔てる電解質膜とを備える。アノード電極では、水または水酸化物イオンが酸化される。カソード電極では、脱水素生成物が電気化学的に還元されて有機ハイドライドが生成される。生成された有機ハイドライドは、一例として製造地に設置される公知のタンク（図示せず）に貯蔵され、当該タンクから消費地へ輸送される。そして、消費地に設置される公知のタンク（図示せず）に貯蔵され、当該タンクからフィードライン F L 2 に送られる。

[0015] 有機ハイドライド製造装置は、電力供給装置（図示せず）から脱水素生成物の電解還元に必要な電力の供給を受ける。電力供給装置としては、再生可能エネルギーを利用して発電する発電装置、例えば風力発電装置や太陽光発電装置等が例示される。これにより、有機ハイドライドの生成に伴う二酸化炭素の排出量を低減できる。なお、電力供給装置は、再生可能エネルギーを利用する発電装置に限定されず、系統電源であってもよいし、再生可能エネルギーを利用する発電装置や系統電源からの電力を蓄えた蓄電装置等であってもよい。また、これらの 2 つ以上の組み合わせであってもよい。

[0016] 本実施の形態で用いられる脱水素生成物および有機ハイドライドは、水素化反応／脱水素反応を可逆的に起こすことにより、水素を添加／脱離できる有機化合物であれば特に限定されず、アセトン－イソプロパノール系、ベンゾキノーン－ヒドロキノーン系、芳香族炭化水素系等を広く用いることができる。これらの中で、エネルギー輸送時の運搬性等の観点から、芳香族炭化水素系が好ましい。

[0017] 脱水素生成物として用いられる芳香族炭化水素化合物は、少なくとも 1 つの芳香環を含む化合物であり、例えば、ベンゼン、アルキルベンゼン、ナフタレン、アルキルナフタレン、アントラセン、ジフェニルエタン等が挙げられる。アルキルベンゼンには、芳香環の 1 ～ 4 の水素原子が炭素数 1 ～ 6 の

直鎖アルキル基または分岐アルキル基で置換された化合物が含まれる。このような化合物としては、例えばトルエン、キシレン、メシチレン、エチルベンゼン、ジエチルベンゼン等が挙げられる。アルキルナフタレンには、芳香環の1～4の水素原子が炭素数1～6の直鎖アルキル基または分岐アルキル基で置換された化合物が含まれる。このような化合物としては、例えばメチルナフタレン等が挙げられる。これらは単独で用いられても、組み合わせて用いられてもよい。

[0018] 脱水素生成物は、好ましくはトルエン、ベンゼンおよびキシレンの少なくとも1つである。なお、ピリジン、ピリミジン、ピラジン、キノリン、イソキノリン、N-アルキルピロール、N-アルキルインドール、N-アルキルジベンゾピロール等の含窒素複素環式芳香族化合物も、脱水素生成物として用いることができる。有機ハイドライドは、上述の脱水素生成物が水素化されたものであり、シクロヘキサン、メチルシクロヘキサン、ジメチルシクロヘキサン、ピペリジン等が例示される。

[0019] 有機ハイドライドの脱水素反応は、吸熱反応である。したがって、脱水素反応部2と、脱水素反応部2に供給される有機ハイドライドとは高温であることが好ましい。そこで本実施の形態では、フィードラインFL2の途中に第4加熱部16と第2加熱部12とが接続され、脱水素反応部2より上流で有機ハイドライドが予め加熱される。第4加熱部16および第2加熱部12には、公知の熱交換器を用いることができる。第4加熱部16は、第2加熱部12よりも有機ハイドライドの流れの上流側に位置する。

[0020] 第4加熱部16には、脱水素反応部2の流出物Eが流れるフィードラインFL4が接続される。フィードラインFL2を流れる有機ハイドライドは、第4加熱部16においてフィードラインFL4を流れる流出物E（例えば250℃～400℃）と熱交換して加熱される（例えば120℃～250℃まで加熱される）。第4加熱部16での加熱により、有機ハイドライドは蒸発して気体となる。流出物Eの熱で有機ハイドライドを予熱することで、発電システム1における熱の利用効率を高めることができる。よって、発電シス

テム 1 における発電効率の向上を図ることができる。

[0021] 第 4 加熱部 1 6 で蒸発した有機ハイドライドは、第 2 加熱部 1 2 に進行する。第 2 加熱部 1 2 には、燃焼部 8 の燃焼ガス C G が流れる流路であるガスライン G L 2 が接続される。第 2 加熱部 1 2 に到達した有機ハイドライドは、第 2 加熱部 1 2 においてガスライン G L 2 を流れる燃焼ガス C G（例えば 3 0 0℃～5 0 0℃）と熱交換してさらに加熱される（例えば 2 5 0℃～4 0 0℃まで加熱される）。これにより、昇温された有機ハイドライドを脱水素反応部 2 に供給することができる。燃焼ガス C G の熱で有機ハイドライドを予熱することで、発電システム 1 における熱の利用効率を高めることができる。よって、発電システム 1 における発電効率の向上を図ることができる。なお、第 2 加熱部 1 2 は、ガスライン G L 2 において第 1 加熱部 1 0 よりも燃焼ガス C G の流れの下流側に配置される。したがって、第 2 加熱部 1 2 は、第 1 加熱部 1 0 で用いられた後の燃焼ガス C G で有機ハイドライドを加熱する。

[0022] また、脱水素反応部 2 は、第 1 加熱部 1 0 によって加熱される。第 1 加熱部 1 0 は、燃焼部 8 の燃焼ガス C G で脱水素反応部 2 を加熱する。これにより、発電システム 1 における熱の利用効率を高めることができ、発電システム 1 における発電効率の向上を図ることができる。

[0023] 一例としての第 1 加熱部 1 0 は、熱媒体 H C を用いて脱水素反応部 2 を加熱する。熱媒体 H C としては、ジベンジルトルエン、シリコンオイル等の公知のものを用いることができる。第 1 加熱部 1 0 は、熱交換器 2 0 と、熱媒体ライン C L とを有する。熱交換器 2 0 には公知のものを用いることができる。熱交換器 2 0 には、ガスライン G L 2 と熱媒体ライン C L とが接続される。熱媒体ライン C L は、脱水素反応部 2 にも接続され、熱交換器 2 0 と脱水素反応部 2 との間で熱媒体 H C を循環させる。

[0024] 熱媒体ライン C L を流れる熱媒体 H C は、ガスライン G L 2 を流れる燃焼ガス C G（例えば 7 5 0℃～1 0 0 0℃）と熱交換器 2 0 において熱交換し、燃焼ガス C G から熱の供給を受けて加熱される（例えば 3 0 0℃～4 0 0℃）。

℃まで加熱される)。加熱された熱媒体HCは、熱媒体ラインCLを流れて脱水素反応部2に到達する。脱水素反応部2は、熱媒体ラインCLを流れる熱媒体HCとの間で熱交換可能な機構を備えており、熱媒体HCから熱の供給を受ける。加熱された有機ハイドライドの供給や、第1加熱部10による脱水素反応部2の加熱等の結果、脱水素反応部2の反応場の温度は例えば300℃～400℃となる。

[0025] 燃焼ガスCGで脱水素反応部2を直に加熱すると、脱水素生成物および有機ハイドライドに起因するコーキング（つまり触媒上への固体炭素の析出）や、脱水素生成物および有機ハイドライドの分解等が生じ得る。これに対し、燃焼ガスCGの熱を熱媒体HCを介して脱水素反応部2に供給する場合、脱水素反応部2に与える熱量および脱水素反応部2の温度を熱媒体HCで調整することができる。これにより、シンタリングやコーキングによる触媒の劣化や分解等の発生を抑制することができる。よって、脱水素反応部2の劣化を抑制したり、有機ハイドライドの利用率の低下を抑制したりすることができる。なお、発電システム1における発電効率の向上を図ることができる。なお、熱媒体HCを用いずに、燃焼ガスCGで脱水素反応部2を直に加熱してもよい。この場合には、発電システム1の構造を簡素化することができる。

[0026] 脱水素反応部2は、フィードラインFL4により第1水素精製部4に接続される。脱水素反応部2の流出物Eは、フィードラインFL4を通して第1水素精製部4に送られる。流出物Eは、水素および脱水素生成物に加えて、未反応の有機ハイドライドを含み得る。第1水素精製部4は、脱水素反応部2の流出物Eから少なくとも第1ガス成分G1と第2ガス成分G2とを分離する。第1ガス成分G1は、第2ガス成分G2より水素を多く含む。第2ガス成分G2は、第1ガス成分G1より気体の脱水素生成物および気体の有機ハイドライドを多く含む。

[0027] 第1ガス成分G1は、脱水素生成物および有機ハイドライドを含まないことが望ましいが、実際には脱水素生成物および有機ハイドライドの少なくとも一方を少量含む傾向にある。第2ガス成分G2は、水素を含まないことが

望ましいが、実際には水素を少量含む傾向にある。したがって、第1ガス成分G1は高純度水素、第2ガス成分G2は低純度水素と解釈することもできる。

[0028] 一例としての第1水素精製部4は、気液分離部22および水素分離膜24を有する。気液分離部22は、水素分離膜24よりも流出物Eの流れの上流側に位置する。気液分離部22は、脱水素反応部2の流出物Eから液体成分Lとガス成分G0とを分離する。液体成分Lは、ガス成分G0より液体の脱水素生成物および液体の有機ハイドライドを多く含む。ガス成分G0は、液体成分Lより第1ガス成分G1および第2ガス成分G2を多く含む。なお、液体成分Lは、第1ガス成分G1および第2ガス成分G2を含まないことが望ましいが、これらのガス成分を微量ながら含むこともあり得る。また、ガス成分G0は、液体の脱水素生成物および液体の有機ハイドライドを含まないことが望ましいが、これらの液体成分を微量ながら含むこともあり得る。

[0029] 一例としての気液分離部22は、冷却器26と、ロックアウトドラム28とを有する。ロックアウトドラム28は、冷却器26の下流側に位置する。冷却器26は、フィードラインFL4に接続される。フィードラインFL4を流れる流出物Eは、冷却器26において冷却水CW（例えば5℃～50℃）と熱交換して冷却される（例えば5℃～50℃まで冷却される）。これにより、流出物Eに含まれる脱水素生成物および有機ハイドライドが液体となる。冷却器26には、公知の熱交換器を用いることができる。

[0030] 冷却器26で冷却された流出物Eは、ロックアウトドラム28に送られる。ロックアウトドラム28は、流出物Eから液体成分Lとガス成分G0とを分離する。ロックアウトドラム28には、公知のものを用いることができる。分離された液体成分Lは、系外に排出される。液体成分Lは、脱水素反応部2や有機ハイドライド製造装置で再利用されてもよい。これにより、有機ハイドライドの利用率を高めることができる。

[0031] ロックアウトドラム28で分離されたガス成分G0は、水素分離膜24に送られる。水素分離膜24は、ガス成分G0から第1ガス成分G1と第2ガ

ス成分G 2とを分離する。水素分離膜2 4には、公知のシリカ膜、ゼオライト膜、高分子膜、カーボン膜、パラジウム膜等を用いることができる。ノックアウトドラム2 8と水素分離膜2 4との間には、ガス成分G 0を昇圧するコンプレッサが設けられてもよい。ガス成分G 0を昇圧することで、水素分離膜2 4でのガス分離を促進させることができる。

[0032] なお、第1水素精製部4は、水素分離膜2 4に代えてT S A分離部を有してもよい。T S A分離部は、温度スイング吸着法（T S A法）を用いてガス成分G 0から第1ガス成分G 1と第2ガス成分G 2とを分離する。T S A分離部には、公知のものを用いることができる。一例としてのT S A分離部は、常温下ではガス成分G 0に含まれる脱水素生成物や有機ハイドライドを吸着し、高温下では吸着した脱水素生成物や有機ハイドライドを脱離する吸着材を備える。T S A分離部が用いられる場合、燃焼部8の燃焼ガスC Gを吸着材の再生に利用してもよい。

[0033] 第1水素精製部4の構造は、上述のものに限定されない。例えば、燃料電池6に求められる水素の純度、用いられる分離膜や吸着材の性能等に応じて、気液分離部2 2の省略といった変更も可能である。また、蒸留、圧力変動吸着法（P S A法）、深冷分離法といった他の分離手法が用いられてもよい。また、T S A法およびP S A法以外の吸着原理を利用する吸着分離部が採用されてもよい。このような吸着分離部には、吸着材を再生せずに吸着だけ行う分離部が含まれる。また、複数の第1水素精製部4が互いに直列にまたは並列に設けられてもよい。

[0034] 第1水素精製部4にはリサイクルラインR Lが接続される。リサイクルラインR Lは、水素分離膜2 4で分離された第2ガス成分G 2を脱水素反応部2に供給する。一例としてのリサイクルラインR Lは、一端が水素分離膜2 4に接続され、他端がフィードラインF L 2における第4加熱部1 6と第2加熱部1 2との間に接続される。水素分離膜2 4で分離された第2ガス成分G 2は、リサイクルラインR Lを通してフィードラインF L 2に戻される。フィードラインF L 2に戻された第2ガス成分G 2は、第2加熱部1 2で加

熱された後に脱水素反応部 2 に供給され、第 2 ガス成分 G 2 中の有機ハイドライドが水素製造に供される。これにより、有機ハイドライドの利用率を向上させることができる。よって、発電システム 1 における発電効率を向上させることができる。

[0035] また、第 1 水素精製部 4 は、フィードライン F L 6 により第 2 水素精製部 1 8 に接続される。水素分離膜 2 4 で分離された第 1 ガス成分 G 1 は、フィードライン F L 6 を通って第 2 水素精製部 1 8 に送られる。第 2 水素精製部 1 8 は、燃料電池 6 の上流に位置し、第 1 ガス成分 G 1 に含まれる脱水素生成物および有機ハイドライドの少なくとも一方を水素化分解または水蒸気改質する。これにより、脱水素生成物や有機ハイドライドは、メタンや水素等に変換される。

[0036] 第 2 水素精製部 1 8 が脱水素生成物等を水素化分解する場合、第 2 水素精製部 1 8 には公知の水素化分解装置を用いることができる。水素化分解に必要な水素は、第 1 ガス成分 G 1 中の水素で賄うことができる。第 2 水素精製部 1 8 が脱水素生成物等を水蒸気改質する場合、第 2 水素精製部 1 8 には公知の改質器を用いることができる。また、第 2 水素精製部 1 8 を構成する改質器は、燃料電池 6 に一体的に設けられてもよい。例えば、発電システム 1 は、改質触媒が充填された改質器一体型の燃料電池 6 を備えてもよい。水蒸気改質に必要な水（好ましくは水蒸気）は、例えば外部から供給される。また、当該水は、燃料電池 6 や燃焼部 8 で生成される水や水蒸気で賄うこともできる。なお、第 2 水素精製部 1 8 は、水素化分解と水蒸気改質との両方を実施してもよい。

[0037] 発電システム 1 は、第 2 水素精製部 1 8 に代えて、燃料電池 6 の上流で第 1 ガス成分 G 1 に水を添加する添加部を備えてもよい。一例としての添加部は、外部から供給される水（好ましくは水蒸気）を第 1 ガス成分 G 1 に添加する。第 1 ガス成分 G 1 に水を添加することで、燃料電池 6 のアノード電極 6 a において、アノード触媒による脱水素生成物等の水蒸気改質反応を進行させることができる。つまり、燃料電池 6 を第 2 水素精製部 1 8 としても機

能させることができる。

[0038] 第2水素精製部18は、フィードラインFL8により燃料電池6に接続される。第2水素精製部18から送り出された第1ガス成分G1は、フィードラインFL8を通して燃料電池6に供給される。

[0039] 第1ガス成分G1は、第1水素精製部4によって脱水素生成物および有機ハイドライドの含有量が低減されている。また、第1ガス成分G1は、第2水素精製部18によって脱水素生成物等の含有量がさらに低減されている。あるいは、添加部による第1ガス成分G1への水の添加により、燃料電池6において脱水素生成物等が改質される。これらにより、脱水素生成物等に起因するコーキングの発生を抑制でき、燃料電池6の劣化を抑制することができる。また、脱水素生成物等の分解や改質によって燃料電池6に供給される燃料の量を増やすことができる。よって、発電システム1における発電効率を向上させることができる。

[0040] 燃料電池6は、第1ガス成分G1の供給を受けて、第1ガス成分G1中の水素を用いて発電する。燃料電池6の動作温度は、例えば600℃～800℃と高温である。燃料電池6の好ましい例としては、公知の固体酸化物形燃料電池(SOFC)や熔融炭酸塩型燃料電池(MCFC)が挙げられる。動作温度が高い燃料電池6を用いることで、燃料電池6の熱を脱水素反応部2での脱水素反応に利用しやすくなることができる。また、これらの燃料電池6を用いることで、オフガスの燃焼熱に加えて、発電時に生じるジュール熱も利用することができる。さらに、これらの燃料電池6は、水素だけでなく一酸化炭素やメタン等の軽質炭化水素を燃料として利用することができる。よって、発電システム1における発電効率の向上が図りやすくなる。

[0041] 一例としての燃料電池6は、アノード電極6aと、カソード電極6bと、アノード電極6aおよびカソード電極6bを隔てる電解質膜6cとを有する。アノード電極6aの入口には、フィードラインFL8が接続され、水素を含む第1ガス成分G1が供給される。カソード電極6bの入口には、フィードラインFL10が接続され、外部から酸素を含むカソードガスが供給され

る。カソードガスとしては、空気等を用いることができる。カソード電極 6 b では、酸素が電子と反応して酸素イオンが生成される。酸素イオンは電解質膜 6 c を通ってアノード電極 6 a に移動する。アノード電極 6 a では、水素が酸素イオンと反応して水と電子が生成される。

[0042] フィードライン F L 1 0 の途中には、第 3 加熱部 1 4 が接続される。第 3 加熱部 1 4 には、ガスライン G L 2 が接続される。第 3 加熱部 1 4 に到達したカソードガスは、ガスライン G L 2 を流れる燃焼ガス C G（例えば 2 0 0 °C ~ 3 5 0 °C）と第 3 加熱部 1 4 において熱交換して加熱される（例えば 1 5 0 °C ~ 3 0 0 °C まで加熱される）。これにより、昇温されたカソードガスを燃料電池 6 に供給することができる。燃焼ガス C G の熱でカソードガスを予熱することで、発電システム 1 における熱の利用効率を高めることができる。よって、発電システム 1 における発電効率の向上を図ることができる。なお、第 3 加熱部 1 4 は、第 2 加熱部 1 2 よりも燃焼ガス C G の流れの下流側に配置される。したがって、第 3 加熱部 1 4 は、第 2 加熱部 1 2 で用いられた後の燃焼ガス C G でカソードガスを加熱する。

[0043] アノード電極 6 a の出口は、ガスライン G L 4 により燃焼部 8 に接続される。発電に利用されずにアノード電極 6 a を通過したオフガス O G は、ガスライン G L 4 を通って燃焼部 8 に送られる。カソード電極 6 b の出口は、ガスライン G L 6 により燃焼部 8 に接続される。発電に利用されずにカソード電極 6 b を通過したオフガス O G は、ガスライン G L 6 を通って燃焼部 8 に送られる。以下では適宜、アノード電極 6 a のオフガス O G とカソード電極 6 b のオフガス O G とをまとめて燃料電池 6 のオフガス O G という。

[0044] 燃焼部 8 は、燃料電池 6 のオフガス O G を燃焼して燃焼ガス C G（例えば 7 5 0 °C ~ 1 0 0 0 °C）を生成する。燃焼部 8 には、公知の触媒燃焼器や公知の燃焼器を用いることができる。燃焼部 8 にはガスライン G L 2 が接続される。燃焼部 8 で生成された燃焼ガス C G は、ガスライン G L 2 に流入する。上述のようにガスライン G L 2 には、燃焼ガス C G の流れの上流側から熱交換器 2 0、第 2 加熱部 1 2、および第 3 加熱部 1 4 が接続される。したが

って、ガスラインGL2を流れる燃焼ガスCGは、まず熱交換器20において熱媒体HCと熱交換し、次に第2加熱部12で有機ハイドライドと熱交換し、次に第3加熱部14においてカソードガスと熱交換し、その後に系外に排出される。

[0045] カソード電極6bに供給される酸素の量(O_{2_IN})に対する、カソード電極6bのオフガスOGに含まれる酸素の量(O_{2_OUT})の割合(O_{2_OUT}/O_{2_IN}) (以下ではこの割合を残存割合Uという)は、好ましくは0.4以上であり、より好ましくは0.5以上である。また、残存割合Uは、好ましくは0.7以下であり、より好ましくは0.65以下である。最も好ましくは、残存割合Uは0.6である。カソード電極6bに供給される酸素の量に対する、カソード電極6bで消費される酸素の量の割合を U_a とするとき (以下ではこの割合を消費割合 U_a という)、残存割合Uは $U = 1 - U_a$ を満たす。

[0046] 発電システム1は、残存割合Uが上記範囲となるように、カソードガスの供給量や第1ガス成分G1(アノードガス)の供給量といったカソード電極6bでの酸素消費に影響する公知の運転条件が制御される。例えばカソードガスやアノードガスの供給量の制御であれば、フィードラインFL2、FL10に設けられる弁(図示せず)の開度調整で実現できる。当該制御は、発電システム1が備える制御装置(図示せず)によって実行されてもよいし、発電システム1の使用者によって手動で実行されてよい。一例としての制御装置は、CPU(Central Processing Unit)やMPU(Micro Processing Unit)、マイコンなどのプロセッサ(ハードウェア)と、プロセッサが実行するソフトウェアプログラムとの組み合わせで構成される。

[0047] 本発明者らは、残存割合Uを0.3~0.7の範囲で異ならせて発電システム1の各残存割合Uにおける発電効率を算出した。また、残存割合Uが0.3であるときの発電効率を基準として各残存割合Uにおける発電効率の相対値を算出した。結果を図2に示す。図2は、残存割合Uと発電効率の相対値との関係を示す図である。

- [0048] 図2に示すように、残存割合 U が0.4以上であるとき、発電システム1における発電効率が向上することが確認された。また、発電効率は、残存割合 U が0.7以下でより向上し、0.5以上でさらに向上し、残存割合 U が0.6で最も高いことが確認された。
- [0049] 残存割合 U を上述の範囲とすることで発電効率が向上する理由は以下の通りである。すなわち、残存割合 U が高い、言い換えれば消費割合 U_a が低い場合、これはカソード電極6bに供給しなければならないカソードガスの量が多いことを意味する。この場合、カソードガスの加熱に必要な熱量が増える。したがって、カソードガスの加熱用の熱を確保する必要から、発電システム1の発電効率が低下していく。
- [0050] 一方、残存割合 U が低い、言い換えれば消費割合 U_a が高い場合、カソード電極6bに供給しなければならないカソードガスの量は少なくなる。このため、カソードガスの加熱に必要な熱量は減る。一方で、カソード電極6bから排出されるオフガスOGの量が減るため、燃焼ガスCGの生成量が減ってしまう。この結果、脱水素反応部2、有機ハイドライドおよびカソードガスの加熱に必要な熱が不足し、発電システム1の発電効率が低下していく。
- [0051] 以上の理由から、残存割合 U が好ましくは0.4以上となるように発電システム1の運転を制御することで、発電システム1における発電効率をより向上させることができる。また、一例として残存割合 U は、0.4以上0.7以下がより好ましく、0.5以上0.65以下がさらに好ましく、0.6が最も好ましい。
- [0052] なお、フィードラインFL2～FL10、リサイクルラインRL、ガスラインGL2～GL6は、それぞれ公知の配管等で構成することができる。また、発電システム1は、第3加熱部14で用いられた後の燃焼ガスCGを用いて発電する公知のガスタービンをも有してもよい。また、再生可能エネルギーを利用する発電と発電システム1とが組み合わせられる場合や、再生可能エネルギーを利用する発電の電力で生成される有機ハイドライドの供給を発電システム1が受ける場合、発電システム1は、再生可能エネルギーを利用す

る発電における発電量の変動に応じて燃料電池 6 の発電量を調整してもよい。

[0053] 本発明は、以下に記載する項目によって特定されてもよい。

[第 1 項目]

有機ハイドライドから水素および脱水素生成物を生成する脱水素反応部（2）と、

脱水素反応部（2）の流出物（E）から少なくとも第 1 ガス成分（G 1）と第 2 ガス成分（G 2）とを分離する第 1 水素精製部（4）であって、第 1 ガス成分（G 1）が第 2 ガス成分（G 2）より水素を多く含み、第 2 ガス成分（G 2）が第 1 ガス成分（G 1）より気体の脱水素生成物および気体の有機ハイドライドを多く含む第 1 水素精製部（4）と、

第 1 ガス成分（G 1）の供給を受けて発電する燃料電池（6）と、

第 2 ガス成分（G 2）を脱水素反応部（2）に供給するリサイクルライン（R L）と、

燃料電池（6）のオフガス（O G）を燃焼して燃焼ガス（C G）を生成する燃焼部（8）と、

燃焼ガス（C G）で脱水素反応部（2）を加熱する第 1 加熱部（1 0）と、

燃焼ガス（C G）で脱水素反応部（2）に供給される有機ハイドライドを加熱する第 2 加熱部（1 2）と、を備え、

燃焼ガス（C G）の流路（G L 2）において第 2 加熱部（1 2）は第 1 加熱部（1 0）の下流側に位置する、

発電システム（1）。

[第 2 項目]

第 1 水素精製部（4）は、

気液分離部（2 2）および水素分離膜（2 4）を有するか、

気液分離部（2 2）および T S A 分離部を有し、

気液分離部（2 2）は、脱水素反応部（2）の流出物（E）から液体成分

(L) とガス成分 (G 0) とを分離し、液体成分 (L) は、ガス成分 (G 0) より液体の脱水素生成物および液体の有機ハイドライドを多く含み、ガス成分 (G 0) は、液体成分 (L) より第 1 ガス成分 (G 1) および第 2 ガス成分 (G 2) を多く含み、

水素分離膜 (2 4) および T S A 分離部は、ガス成分 (G 0) から第 1 ガス成分 (G 1) と第 2 ガス成分 (G 2) とを分離する、

第 1 項目に記載の発電システム (1)。

[第 3 項目]

第 1 加熱部 (1 0) は、燃焼ガス (C G) から熱の供給を受けて当該熱を脱水素反応部 (2) に供給する熱媒体 (H C) を有する、

第 1 項目または第 2 項目に記載の発電システム (1)。

[第 4 項目]

第 2 加熱部 (1 2) で用いられた後の燃焼ガス (C G) で、酸素を含み燃料電池 (6) に供給されるカソードガスを加熱する第 3 加熱部 (1 4) をさらに備える、

第 1 項目乃至第 3 項目のいずれかに記載の発電システム (1)。

[第 5 項目]

燃料電池 (6) は、第 1 ガス成分 (G 1) が供給されるアノード電極 (6 a) と、酸素を含むカソードガスが供給されるカソード電極 (6 b) とを有し、

カソード電極 (6 b) に供給される酸素の量 (O_{2_IN}) に対するカソード電極 (6 b) のオフガス (O G) に含まれる酸素の量 (O_{2_OUT}) の割合 (U) (O_{2_OUT}/O_{2_IN}) は、0.4 以上である、

第 1 項目乃至第 4 項目のいずれかに記載の発電システム (1)。

[第 6 項目]

燃料電池 (6) の上流に位置し、第 1 ガス成分 (G 1) に含まれる脱水素生成物および有機ハイドライドの少なくとも一方を水素化分解または水蒸気改質する第 2 水素精製部 (1 8) をさらに備える、

第1項目乃至第5項目のいずれかに記載の発電システム（1）。

〔第7項目〕

燃料電池（6）の上流に位置し、第1ガス成分（G1）に水を添加する添加部をさらに備える、

第1項目乃至第6項目のいずれかに記載の発電システム（1）。

〔第8項目〕

有機ハイドライドから水素および脱水素生成物を生成する脱水素反応工程と、

脱水素反応工程の流出物（E）から少なくとも第1ガス成分（G1）と第2ガス成分（G2）とを分離する第1水素精製工程であって、第1ガス成分（G1）が第2ガス成分（G2）より水素を多く含み、第2ガス成分（G2）が第1ガス成分（G1）より気体の脱水素生成物および気体の有機ハイドライドを多く含む第1水素精製工程と、

第1ガス成分（G1）を燃料電池（6）に供給して燃料電池（6）で発電する発電工程と、

第2ガス成分（G2）を脱水素反応工程に供給するリサイクル工程と、

燃料電池（6）のオフガス（OG）を燃焼して燃焼ガス（CG）を生成する燃焼工程と、

燃焼ガス（CG）の熱を脱水素反応工程に供給する第1加熱工程と、

第1加熱工程で用いられた後の燃焼ガス（CG）で脱水素反応工程に供給される有機ハイドライドを加熱する第2加熱工程と、を含む、
発電方法。

〔第9項目〕

再生可能エネルギーを利用する発電、および当該発電の電力を用いる有機ハイドライドの製造の少なくとも一方と、

再生可能エネルギーを利用する発電における発電量の変動に応じて燃料電池（6）の発電量を制御することと、を含む、

第8項目に記載の発電方法。

産業上の利用可能性

[0054] 本発明は、発電システムおよび発電方法に利用することができる。

符号の説明

[0055] 1 発電システム、 2 脱水素反応部、 4 第1水素精製部、 6
燃料電池、 6 a アノード電極、 6 b カソード電極、 8 燃焼部、
10 第1加熱部、 12 第2加熱部、 14 第3加熱部、 18
第2水素精製部、 22 気液分離部、 24 水素分離膜。

請求の範囲

- [請求項1] 有機ハイドライドから水素および脱水素生成物を生成する脱水素反応部と、
- 前記脱水素反応部の流出物から少なくとも第1ガス成分と第2ガス成分とを分離する第1水素精製部であって、前記第1ガス成分が前記第2ガス成分より前記水素を多く含み、前記第2ガス成分が前記第1ガス成分より気体の前記脱水素生成物および気体の前記有機ハイドライドを多く含む第1水素精製部と、
- 前記第1ガス成分の供給を受けて発電する燃料電池と、
- 前記第2ガス成分を前記脱水素反応部に供給するリサイクルラインと、
- 前記燃料電池のオフガスを燃焼して燃焼ガスを生成する燃焼部と、
- 前記燃焼ガスで前記脱水素反応部を加熱する第1加熱部と、
- 前記燃焼ガスで前記脱水素反応部に供給される前記有機ハイドライドを加熱する第2加熱部と、を備え、
- 前記燃焼ガスの流路において前記第2加熱部は前記第1加熱部の下流側に位置する、
- 発電システム。
- [請求項2] 前記第1水素精製部は、
- 気液分離部および水素分離膜を有するか、
- 気液分離部およびT S A分離部を有し、
- 前記気液分離部は、前記脱水素反応部の流出物から液体成分とガス成分とを分離し、前記液体成分は、前記ガス成分より液体の前記脱水素生成物および液体の前記有機ハイドライドを多く含み、前記ガス成分は、前記液体成分より前記第1ガス成分および前記第2ガス成分を多く含み、
- 前記水素分離膜および前記T S A分離部は、前記ガス成分から前記第1ガス成分と前記第2ガス成分とを分離する、

請求項 1 に記載の発電システム。

[請求項3] 前記第 1 加熱部は、前記燃焼ガスから熱の供給を受けて当該熱を前記脱水素反応部に供給する熱媒体を有する、
請求項 1 または 2 に記載の発電システム。

[請求項4] 前記第 2 加熱部で用いられた後の前記燃焼ガスで、酸素を含み前記燃料電池に供給されるカソードガスを加熱する第 3 加熱部をさらに備える、
請求項 1 または 2 に記載の発電システム。

[請求項5] 前記燃料電池は、前記第 1 ガス成分が供給されるアノード電極と、酸素を含むカソードガスが供給されるカソード電極とを有し、
前記カソード電極に供給される酸素の量 (O_{2_IN}) に対する前記カソード電極のオフガスに含まれる酸素の量 (O_{2_OUT}) の割合 (O_{2_OUT}/O_{2_IN}) は、0.4 以上である、
請求項 1 または 2 に記載の発電システム。

[請求項6] 前記燃料電池の上流に位置し、前記第 1 ガス成分に含まれる前記脱水素生成物および前記有機ヒドライドの少なくとも一方を水素化分解または水蒸気改質する第 2 水素精製部をさらに備える、
請求項 1 または 2 に記載の発電システム。

[請求項7] 前記燃料電池の上流に位置し、前記第 1 ガス成分に水を添加する添加部をさらに備える、
請求項 1 または 2 に記載の発電システム。

[請求項8] 有機ヒドライドから水素および脱水素生成物を生成する脱水素反応工程と、
前記脱水素反応工程の流出物から少なくとも第 1 ガス成分と第 2 ガス成分とを分離する第 1 水素精製工程であって、前記第 1 ガス成分が前記第 2 ガス成分より前記水素を多く含み、前記第 2 ガス成分が前記第 1 ガス成分より気体の前記脱水素生成物および気体の前記有機ヒドライドを多く含む第 1 水素精製工程と、

前記第 1 ガス成分を燃料電池に供給して前記燃料電池で発電する発電工程と、

前記第 2 ガス成分を前記脱水素反応工程に供給するリサイクル工程と、

前記燃料電池のオフガスを燃焼して燃焼ガスを生成する燃焼工程と

、

前記燃焼ガスの熱を前記脱水素反応工程に供給する第 1 加熱工程と

、

前記第 1 加熱工程で用いられた後の前記燃焼ガスで前記脱水素反応工程に供給される前記有機ハイドライドを加熱する第 2 加熱工程と、

を含む、

発電方法。

[請求項9]

再生可能エネルギーを利用する発電、および当該発電の電力を用いる前記有機ハイドライドの製造の少なくとも一方と、

前記再生可能エネルギーを利用する発電における発電量の変動に応じて前記燃料電池の発電量を制御することと、を含む、

請求項 8 に記載の発電方法。