

明 細 書

発明の名称： 培養装置及び培養装置の制御方法

技術分野

[0001] 本開示の技術は、培養装置及び培養装置の制御方法に関する。

背景技術

[0002] 温室効果ガスの排出量抑制を目的として、原料の脱石油化の研究が世界的に盛んである。その研究の一環として、化学製品及びバイオ製品などの製品製造の分野において、石油以外の炭素源を原料として利用する技術が開発されている。例えば、石油以外の炭素源を、増殖または有機物質の産生の原料として利用する微生物が知られている。このような微生物の一例として水素酸化細菌がある。水素酸化細菌は、二酸化炭素、水素及び酸素を含むガスを原料として取り込むことにより増殖し、さらに、水素酸化細菌の遺伝子を改変することによりアルコール及びアミノ酸といった有機物質を効率よく産生する。水素酸化細菌は、水素の酸化によって発生するエネルギーを利用して、二酸化炭素に含まれる炭素を有機物質に変換して細菌内に取り込む化学合成細菌の総称である。水素酸化細菌は、二酸化炭素が、増殖または有機物質を産生するための原料となるため、温室効果ガスとして排出される二酸化炭素を有効利用できるという点でも注目されている。

[0003] 特許 2 5 6 4 0 0 8 号公報及び米国特許出願公開第 2 0 1 9 / 0 3 1 6 0 7 2 号に、水素酸化細菌を培養する培養装置が開示されている。培養装置は、培養液を収容する培養槽を備えている。二酸化炭素、水素及び酸素を含む原料ガスは培養槽内に供給され、原料ガスに含まれる二酸化炭素、水素及び酸素の一部は培養液中に溶解され、水素酸化細菌の増殖または有機物質の産生に消費される。残りの原料ガスは、培養槽内において培養液の液面上方に存在する空間に放出され、培養槽外に排気される。可燃性ガスである水素と、酸素とを含む混合ガスは、組成比によっては爆発の危険があるため、特許 2 5 6 4 0 0 8 号公報及び米国特許出願公開第 2 0 1 9 / 0 3 1 6 0 7 2 号

には、爆発を抑制する技術が開示されている。

[0004] 特許 2 5 6 4 0 0 8 号公報では、原料ガスに含まれる酸素の供給を独立に制御できるようにした上で、培養液中の溶存酸素濃度を測定し、測定した溶存酸素濃度に基づいて、培養槽内への酸素供給量を制限している。米国特許出願公開第 2 0 1 9 / 0 3 1 6 0 7 2 号では、原料ガスの成分を制御することにより安全性を確保している。

[0005] また、以下の国際公開第 2 0 1 1 / 0 7 0 7 9 1 号などには、微生物等を培養する培養装置が開示されている。国際公開第 2 0 1 1 / 0 7 0 7 9 1 号には、原料ガスの気泡の小径化により酸素の利用効率を向上する技術が記載されている。特開 2 0 1 3 - 0 0 5 7 5 4 号公報及び国際公開第 2 0 0 6 / 1 0 1 0 7 4 号には、培養槽として縦長の培養槽を用いることにより原料ガスの溶解性を向上する技術が記載されている。国際公開第 2 0 1 6 / 1 1 7 0 2 3 号には、可燃性ガスを原料ガスとするものではないが、培養槽内における微生物である菌体のダメージを抑制する技術が記載されている。

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 可燃性ガスを含む原料ガスの場合、培養槽において、培養液から放出される混合ガスの爆発の危険が伴うため、爆発を抑制する技術は非常に重要である。上述の特許 2 5 6 4 0 0 8 号公報などに記載の方法では、いずれも爆発を抑制する安全性の対策について改善の余地があった。

[0007] 本開示の技術は、可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する場合において、従来と比較して安全性を向上させることが可能な培養装置及び培養装置の制御方法を提供する。

課題を解決するための手段

[0008] 上記目的を達成するために、本開示の技術に係る第 1 の培養装置は、可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する培養装置であって、微生物または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、培養槽に原料ガスを供給する原料ガス供給部と、培養槽内

において培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスの組成比を測定し、測定した混合ガスの組成比に応じて空間内に調整用ガスを供給することにより、空間内の混合ガスの組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持する組成比制御機構と、空間内の混合ガスを原料ガスとして再利用するためのガス循環経路と、培養中において、ガス循環経路又は原料ガス供給部を通じて培養槽に供給される原料ガスに含まれる可燃性ガスのうち、培養液に溶解される可燃性ガスの割合である可燃性ガス溶解率を測定し、測定した可燃性ガス溶解率を予め設定された目標値以上に維持する溶解率制御機構と、を備える。

[0009] 本開示の技術に係る第1の培養装置の制御方法は、可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、培養槽に可燃性ガスを含む原料ガスを供給する原料ガス供給部とを備え、微生物または細胞を培養する培養装置の制御方法であって、培養槽内において培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスの組成比を測定し、測定した混合ガスの組成比に応じて空間内に調整用ガスを供給することにより、空間内の混合ガスの組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持し、培養中において、空間内の混合ガスを原料ガスとして再利用するためのガス循環経路又は原料ガス供給部を通じて培養槽に供給される原料ガスに含まれる可燃性ガスのうち、培養液に溶解される可燃性ガスの割合である可燃性ガス溶解率を測定し、測定した可燃性ガス溶解率を予め設定された目標値に維持する。

[0010] 本開示の技術に係る第2の培養装置は、可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する培養装置であって、微生物または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、培養槽に原料ガスを供給する原料ガス供給部と、培養槽内において培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスの組成比を測定し、測定した混合ガスの組成比に応じて空間内に調整用ガスを供給することにより、空間内の混合ガスの組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持する組成比制御機構と、を備

えており、培養槽の高さ方向と直交する断面の円相当直径を $D \text{ A m}$ 、液面の最大高さを H とした場合において、培養槽の寸法は、 $H / D \text{ A m} \geq 2$ の条件を満たす。

[0011] 本開示の技術に係る第2の培養装置の制御方法は、可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、培養槽に可燃性ガスを含む原料ガスを供給する原料ガス供給部とを備え、微生物または細胞を培養する培養装置の制御方法であって、培養槽の高さ方向と直交する断面の円相当直径を $D \text{ A m}$ 、液面の最大高さを H とした場合において、培養槽の寸法は、 $H / D \text{ A m} \geq 2$ の条件を満たしており、培養槽内において培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスの組成比を測定し、測定した混合ガスの組成比に応じて空間内に調整用ガスを供給することにより、空間内の混合ガスの組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持する。

[0012] 本開示の技術に係る第3の培養装置は、可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する培養装置であって、微生物または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、培養槽に供給する培養液を貯留する培養液タンクと、微生物または細胞を培養槽に供給する培養対象供給路と、原料ガスを貯留する原料ガスタンクと、培養槽に供給される前の培養液に対して原料ガスを混合させるための気泡発生装置と、培養液タンクと培養槽の間に配設され、気泡発生装置によって原料ガスが混合された培養液を、培養槽に供給する培養液供給路であって、培養対象供給路とは別に設けられた培養液供給路とを備えている。

[0013] 本開示の技術に係る第4の培養装置は、可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する培養装置であって、微生物または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、培養槽に原料ガスを供給する原料ガス供給部と、培養槽内において培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスを原料ガスとして再利用するためのガス循環経路と、ガス循環経路上に配置され、混合ガスに対して混合ガスを循環させる循

環圧力を付与する圧力付与装置とを備えており、圧力付与装置は、機械的な可動部を有さず、圧力付与装置に外部から入力された駆動流体によって混合ガスに循環圧力を付与する。

発明の効果

[0014] 本開示の技術によれば、可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する場合において、従来と比較して安全性を向上させることができる。

図面の簡単な説明

- [0015] [図1]培養装置の機能を説明する図である。
[図2]培養装置の全体構成を示す図である。
[図3]原料ガスを成分毎に供給する構成を示す図である。
[図4]培養液の回収と再利用を行う構成を示す図である。
[図5]培養液から特定の成分を分離する構成を示す図である。
[図6]培養液の取り出し口の配置を示す図である。
[図7]気泡径の指標を示す図である。
[図8]表面張力低下剤を示す図である。
[図9]廃ガスを再利用する構成を示す図である。
[図10]各種制御に用いる構成を示す図である。
[図11]混合ガスの組成比制御の構成を示す図である。
[図12]溶解率制御及び消費率制御の構成を示す図である。
[図13]混合ガスの組成比制御処理のフローチャートである。
[図14]水素の溶解率制御処理のフローチャートである。
[図15]水素の消費率制御処理のフローチャートである。
[図16]第1実施形態の効果を示す図である。
[図17]第2実施形態の培養槽を示す図である。
[図18]第2実施形態の培養槽の第1の変形例を示す図である。
[図19]第2実施形態の培養槽の第2の変形例を示す図である。
[図20]第2実施形態の培養槽の第3の変形例を示す図である。

[図21]第2実施形態の培養槽の第4の変形例を示す図である。

[図22]第3実施形態の培養装置を示す図である。

[図23]第4実施形態の培養装置を示す図である。

[図24]第4実施形態の培養装置の変形例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0016] 「目次」

1. 各実施形態の共通構成の一例
2. 第1実施形態
3. 第2実施形態
4. 第3実施形態
5. 第4実施形態

[0017] 1. 各実施形態の共通構成の一例

まず、図1～図9を用いて本開示の技術の各実施形態に係る培養装置の共通構成の一例を示す。そして、図10以下において、共通構成の一例を前提として各実施形態を説明する。

[0018] 図1に示すように、本開示の技術に係る培養装置10は、培養対象の一例として、微生物である水素酸化細菌を培養する。水素酸化細菌を増殖させる原料は、水素(H_2)、酸素(O_2)及び二酸化炭素(CO_2)の他、硫安等の無機成分を含む。水素は可燃性ガスの一例である。培養装置10は、培養液中に原料ガスを供給することにより、培養液中で水素酸化細菌を増殖させる。また、培養液中において、水素酸化細菌は、水素酸化細菌の遺伝子を改変することによりアルコール及びアミノ酸といった有機物質を効率よく産生する。培養液は、精製されることにより、培養液において産生された有機物質が抽出される。抽出された有機物質は、例えば化学製品又はバイオ製品などの製造に利用される。また、培養液から水素酸化細菌が分離され、分離された水素酸化細菌は、例えば飼料、食品及び燃料などとして利用することが検討されている。

[0019] 図2に示すように、培養装置10は、培養槽11、原料ガスタンク12、

培養液タンク 13、調整用ガスタンク 14、培養対象タンク 15、及びプロセッサ 17を備える。培養槽 11は、培養液 18を収容する。水素酸化細菌 21としては、例えば、ヒドロゲノフィラス属細菌など特許第 6528295 号公報に記載されているような細菌が挙げられる。この場合、培養液 18としては、特許第 6528295 号公報に記載されているように、一例として、硫酸アンモニウム ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)、リン酸二水素カリウム (KH_2PO_4)、リン酸水素ナトリウム (K_2HPO_4)、塩化ナトリウム (NaCl) 等を水に溶解させた水溶液である。培養槽 11は、本開示の技術に係る「培養槽」の一例である。なお、原料ガスタンク 12については、それに代えてまたは加えて、原料ガス 26を発生するガス発生装置を設けてもよい。

[0020] 培養槽 11には、原料ガスタンク 12、培養液タンク 13、調整用ガスタンク 14及び培養対象タンク 15のそれぞれの供給路 12A、13A、14A、及び 15A が接続されている。各供給路 12A、13A、14A、及び 15A は、配管及びバルブなどで構成されている。また、各供給路 12A、13A、14A 及び 15A には、ポンプ 22 及び各供給路を流れる流体の流量を計測する流量計 23 が配置されている。

[0021] 培養液タンク 13 には、培養液 18 が収容されている。培養液 18 は、供給路 13A 上のポンプ 22 が駆動されることにより培養液タンク 13 から培養槽 11 へ、供給路 13A を通じて供給される。培養液 18 の供給タイミング及び供給量は、ポンプ 22 の駆動を制御するプロセッサ 17 によって制御される。

[0022] (培養液タンク内の培養液に対する前処理)

また、一例として、培養液タンク 13 には、脱気装置 13B が設けられている。脱気装置 13B は、培養液タンク 13 から培養槽 11 に培養液 18 を補充する場合において、培養液 18 に溶存している不要ガスを除去する。不要ガスは、例えば、空気及び窒素など、培養に悪影響（培養効率の低下など）を及ぼすガスである。

[0023] なお、培養液タンク 13 と原料ガスタンク 12 とを配管等で接続し、培養

槽 1 1 に供給する前の培養液 1 8 に対して原料ガスを補充できるようにしてもよい。培養槽 1 1 に供給する前の培養液 1 8 に予め原料ガスを補充することで、培養槽 1 1 内に供給される培養液 1 8 内の原料ガスの溶存ガス濃度を向上させることができる。これにより、培養効率が向上する場合がある。この場合において、培養液タンク 1 3 には、培養液 1 8 の原料ガスの溶存ガス濃度を計測する溶存ガス濃度測定部（後述する溶存ガス濃度測定部 4 9 と同様）を設けておき、測定した溶存ガス濃度に応じて原料ガスの補充量を制御してもよい。

[0024] 培養対象タンク 1 5 は、培養対象の一例である水素酸化細菌 2 1 を収容する。水素酸化細菌 2 1 は、供給路 1 5 A 上のポンプ 2 2 が駆動されることにより培養対象タンク 1 5 から培養槽 1 1 へ、供給路 1 5 A を通じて供給される。水素酸化細菌 2 1 の供給タイミング及び供給量は、ポンプ 2 2 の駆動を制御するプロセッサ 1 7 によって制御される。

[0025] 原料ガスタンク 1 2 には、原料ガス 2 6 が収容されている。原料ガス 2 6 は、上述したとおり、一例として、水素（ H_2 ）、酸素（ O_2 ）及び二酸化炭素（ CO_2 ）等の各成分を含むガスである。原料ガス 2 6 は、供給路 1 2 A 上のポンプ 2 2 が駆動されることにより原料ガスタンク 1 2 から培養槽 1 1 へ、供給路 1 2 A を通じて供給される。原料ガス 2 6 の供給タイミング及び供給量は、ポンプ 2 2 の駆動を制御するプロセッサ 1 7 によって制御される。

[0026] 供給路 1 2 A の下流端は、培養槽 1 1 内に配置されており、下流端にはスパージャー 2 8 が設けられている。スパージャー 2 8 は、培養液 1 8 内に原料ガス 2 6 を分散して供給するためのものである。スパージャー 2 8 としては、一例として多孔質材料で形成された通気管が使用される。スパージャー 2 8 は、培養液 1 8 内において原料ガス 2 6 を気泡として発生させる気泡発生装置の一例である。気泡発生装置には、スパージャー 2 8 のような微細孔式の他、高速旋回流によって気泡を発生させる旋回液流式、および気液流路内の急激な圧力変化によって気泡を発生させるエジェクタ式（ベンチュリ式とも呼ばれる）、及び気液流路内の障害物のせん断力で気泡を発生させるス

タティックミキサ式などの種々の方式がある。気泡発生装置としては、スパージャー 28 以外の方式を用いてもよい。

[0027] 培養液 18 内に供給された原料ガス 26 は、一部が培養液 18 に溶解される。溶解された原料ガス 26 は、水素酸化細菌 21 に取り込まれ、水素酸化細菌 21 の増殖または有機物質 29 の産生に消費される。有機物質 29 は、例えばアルコール又はアミノ酸などである。培養液 18 中に溶解されない原料ガス 26 は、培養液 18 の液面 18A の上方に存在する空間 11A に放出される。空間 11A は、培養液 18 に溶解されずに放出された原料ガス 26 である混合ガス 31 によって満たされる。原料ガスタンク 12、及び供給路 12A 上のポンプ 22 は、「原料ガス供給部」の一例である。

[0028] 調整用ガスタンク 14 には、調整用ガス 33 が収容されている。調整用ガス 33 は、供給路 14A 上のポンプ 22 が駆動されることにより調整用ガスタンク 14 から培養槽 11 の空間 11A へ、供給路 14A を通じて供給される。調整用ガス 33 の供給タイミング及び供給量は、ポンプ 22 の駆動を制御するプロセッサ 17 によって制御される。空間 11A 内の混合ガス 31 は、原料ガス 26 の成分である水素と酸素とを含む。水素は可燃性ガスである。後述するように、調整用ガス 33 は、空間 11A 内の混合ガス 31 の組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持するために使用される。

[0029] また、混合ガス 31 は、原料ガス 26 の成分を含む。そのため、混合ガス 31 の一部はガス循環経路 39 を介して培養槽 11 に戻されて、原料ガス 26 として再利用することが可能である。原料ガス 26 として再利用される混合ガス 31 も、スパージャー 28 を介して培養槽 11 に供給される。再利用されない混合ガス 31 は排出される。なお、図示は省略しているが、再利用されない混合ガス 31 の排出の際には、二酸化炭素などの不活性ガスで混合ガス 31 を希釈した上で大気開放する。

[0030] 培養槽 11 には混合ガス 31 を取り出す排出路 36 が接続されており、排出路 36 には、ポンプ 22 と三方弁 38 が設けられている。ポンプ 22 は、混合ガス 31 の排出及び循環を行うための圧力を発生する。三方弁 38 は、

排出路 3 6 をガス循環経路 3 9 に連通させる状態と、排出路 3 6 とガス循環経路 3 9 との連通を閉鎖する状態とを切り替える。三方弁 3 8 によって、混合ガス 3 1 をガス循環経路 3 9 に送るか、あるいは外部に排気するかが切り替えられる。また、排出路 3 6 には、混合ガス 3 1 の組成比を測定する組成比測定部 1 6 が設けられている。組成比測定部 1 6 は、後述する混合ガス 3 1 の組成比制御に用いられる。

[0031] (混合ガスの取り出し口の位置)

また、培養槽 1 1 から混合ガス 3 1 を取り出す混合ガス取り出し口 3 4 は、培養槽 1 1 内の培養液 1 8 の液面 1 8 A に形成される泡沫層 1 8 B を取り込み可能な位置に配置されている。泡沫層 1 8 B は、液面 1 8 A を覆う液体の膜として機能し、空間 1 1 A の熱容量を上昇させることにより、爆発の抑制に寄与する面もある。しかし、一方で、泡沫層 1 8 B は、培養槽 1 1 内に配置される種々のセンサなどに対する悪影響に加えて、水素酸化細菌 2 1 等にダメージを与える懸念もある。そのため、混合ガス取り出し口 3 4 を泡沫層 1 8 B の取り込み可能な位置に配置することにより、混合ガス 3 1 を取り出す際に泡沫層 1 8 B の一部を回収することが可能になり、泡沫層 1 8 B に起因する悪影響を低減することができる。

[0032] (原料ガスの成分毎の供給)

また、図 2 においては、図面の煩雑化を抑制するために便宜上、原料ガス 2 6 の供給路 1 2 A 及び混合ガス 3 1 のガス循環経路 3 9 を 1 本で示している。しかし、実際には、図 3 に示すように、供給路 1 2 A 及びガス循環経路 3 9 は、水素、酸素及び二酸化炭素等のそれぞれの成分毎に分かれており、複数の成分を個別に供給することが可能となっている。成分毎の各供給路 1 2 A 及びガス循環経路 3 9 には、ポンプ 2 2 及び流量計 2 3 が設けられる。また、スパージャー 2 8 も、水素 (H_2)、酸素 (O_2) 及び二酸化炭素 (CO_2) 等のそれぞれの成分毎に設けられている。成分毎の各供給路 1 2 A 及びガス循環経路 3 9 は、各成分に対応するそれぞれのスパージャー 2 8 に接続される。

[0033] (原料ガスからの不純物除去)

連結部材40は、成分毎のスパージャー28の上流側において、供給路12Aとガス循環経路39を連結する。これにより供給路12Aとガス循環経路39が1本に統合されて、スパージャー28に連結される。各連結部材40と各スパージャー28との間には、不純物除去機構51が設けられている。不純物除去機構51は、培養槽11に供給される原料ガス26から、不純物を除去する。不純物としては、硫黄酸化物または窒素酸化物(NO 及び NO_2 等)を含む。不純物除去機構51は、原料ガス26から不純物を分離する方法として、膜分離法、深冷分離法、物理吸着法、及び化学吸収法のうちのいずれかを利用する機構である。

[0034] 図2において、不純物は培養処理を継続すると培養槽11内において蓄積されていく。後述するように、培養槽11内の培養液18の一部はいったん取り出され、再び培養槽11内に戻されて再利用される。培養液18が循環する際に培養液18から原料ガス26が分離され、培養液18中の原料ガス26も、ガス再利用経路62を介して培養槽11に戻されて再利用される。また、混合ガス31の一部もガス循環経路39を介して培養槽11に戻されて再利用される。ガス再利用経路62とガス循環経路39は、不純物除去機構51の上流側に接続される。再利用される混合ガス31及び培養液18から分離された分離ガスは、不純物除去機構51によって不純物が除去された後、培養槽11内に再供給される。このように原料ガス26を循環させながら不純物が除去されるため、培養槽11内の不純物の蓄積を抑制することができる。

[0035] (混合ガスに含まれる成分の分離)

また、混合ガス31は、水素、酸素及び二酸化炭素等の各成分が混合されているため、ガス循環経路39には、混合ガス31に含まれる各成分を分離する成分分離機構52が設けられている。成分分離機構52によって、混合ガス31に含まれる各成分が分離され、分離された各成分が、成分毎に設けられた各ガス循環経路39に供給される。成分分離機構52は、混合ガス3

1 から各成分を分離する方法として、膜分離法、深冷分離法、物理吸着法、及び化学吸収法のうちのいずれかを利用する機構である。成分分離機構 5 2 は、本開示の技術に係る「第 1 の成分分離機構」の一例である。

[0036] このように、培養槽 1 1 に原料ガス 2 6 を供給する場合において、水素 (H_2)、酸素 (O_2) 及び二酸化炭素 (CO_2) 等の各成分を個別に供給することにより、培養効率と安全性の点でメリットがある。培養効率のメリットは、培養槽 1 1 に供給する原料ガス 2 6 を培養効率の観点から適切な組成に調整しやすい。また、安全性のメリットは、次のとおりである。すなわち、爆発の三要素は、可燃性ガス、酸素、及び着火源であるが、培養槽 1 1 へ原料ガス 2 6 を供給する前において、爆発の三要素のうちの可燃性ガスである水素と酸素とを分離して取り扱うことが可能となり、爆発の危険性をより低減することができる。

[0037] なお、成分分離機構 5 2 によって、水素、酸素及び二酸化炭素の他、混合ガス 3 1 に含まれる成分として、窒素及びメタンなどの成分を分離してもよい。窒素及びメタンなどは、原料ガス 2 6 の培養液 1 8 への溶解性を低下させる作用があるため、混合ガス 3 1 を再利用する際に、これらを分離することで、原料ガス 2 6 の溶解性を向上することができる。

[0038] (培養液の循環、回収及び再利用)

また、図 2 に加えて図 4 にも示すように、培養槽 1 1 には、培養液循環経路 5 4 が接続されており、培養液循環経路 5 4 には、培養液回収機構 5 5 が設けられている。培養液循環経路 5 4 は、培養槽 1 1 から培養液 1 8 の一部を取り出す。培養液回収機構 5 5 は、培養液循環経路 5 4 を通じて培養槽 1 1 から取り出した培養液 1 8 から、有機物質 2 9 を含む培養液 1 8 を回収する。培養液循環経路 5 4 は、培養液回収機構 5 5 が回収した後の残りの培養液 1 8 であって、水素酸化細菌 2 1 を含む培養液 1 8 を、培養槽 1 1 に戻す。なお、増殖した水素酸化細菌 2 1 を精製する場合は、例えば有機物質 2 9 とは別の方式で水素酸化細菌 2 1 が回収される。

[0039] (培養液に含まれる溶存ガスの分離)

培養液循環経路 5 4 において、培養液回収機構 5 5 の下流側には、ガス分離機構 6 1 が設けられている。ガス分離機構 6 1 は、培養槽 1 1 に培養液 1 8 を戻す前に、培養液 1 8 に含まれる原料ガス 2 6 の成分を含むガスを分離ガスとして培養液 1 8 から分離する。そして、分離ガスが分離された培養液 1 8 が培養槽 1 1 に戻される。ガス分離機構 6 1 は、膜分離法、深冷分離法、物理吸着法、及び化学吸収法のいずれかを利用する分離機構である。水素の分離には、水素吸蔵合金を利用してもよい。

[0040] (培養液から原料ガスを再利用)

ガス分離機構 6 1 によって分離された分離ガスの一部は、ガス再利用経路 6 2、及び混合ガス 3 1 のガス循環経路 3 9 を介して、培養槽 1 1 に戻される。そして、原料ガス 2 6 として再利用される。このため、原料ガス 2 6 の利用効率が向上する。

[0041] (培養液から原料ガスを再利用する際の爆発抑制)

また、分離ガスは、ガス循環経路 3 9 を介して培養槽 1 1 に戻されるため、上述したとおり、成分分離機構 5 2 によって、水素、酸素及び二酸化炭素等の各成分に分離される。しかし、成分分離機構 5 2 において成分毎に分離するのではなく、ガス再利用経路 6 2 内において、分離ガスを、水素、酸素及び二酸化炭素等の各成分に分離してもよい。これらの分離された各成分は、成分毎に設けられたガス循環経路 3 9 を介して再利用される。ガス再利用経路 6 2 内における分離ガスの成分毎の分離は、例えば、培養液 1 8 からガスを分離するガス分離機構 6 1 によって行ってもよい。

[0042] こうすれば、分離ガスを再利用する際に、可燃性ガスである水素と酸素とを分離することができるため、ガス再利用経路 6 2 内における安全性が向上する。このように、安全性の観点からは、培養槽 1 1 から取り出した培養液 1 8 から、なるべく上流側で可燃性ガスである水素を分離することが好ましい。また、成分を分離する順番としては、最初に水素を分離し、その後に酸素と二酸化炭素を分離することが好ましい。このようなガス分離機構 6 1 は、爆発を抑制する機能を有するため、本開示の技術に係る「爆発抑制機構」

の一例である。

[0043] また、このようにガス分離機構 6 1 において分離ガスの各成分を分離すれば、二酸化炭素については、原料ガス 2 6 として再利用することに加えて、調整用ガスタンク 1 4 に戻して調整用ガス 3 3 として再利用するといったことも可能である。ガス分離機構 6 1 は、分離ガスを各成分に分離する場合は、本開示の技術に係る「第 2 の成分分離機構」の一例でもある。ガス分離機構 6 1 においても、成分分離機構 5 2 と同様に、水素、酸素及び二酸化炭素以外に、窒素及びメタンなどの原料ガス 2 6 の溶解性を低下させる成分を分離してもよい。

[0044] (培養液からの特定の成分の分離)

また、図 5 に示すように、ガス分離機構 6 1 及び成分分離機構 5 2 と同様の分離機構 6 5 を利用することにより、培養液 1 8 からガスを分離することに加えて、培養液 1 8 に含まれる特定の成分を分離してもよい。特定の成分としては、例えばアンモニア及びアンモニウム化合物がある。アンモニア及びアンモニウム化合物は、水素酸化細菌 2 1 の栄養源となる。これらを分離することにより、分離した特定の成分を、供給量を調整しながら再利用することができる。

[0045] このように、混合ガス 3 1 及び培養液 1 8 に含まれる種々の成分を分離することにより、不要な成分を除去し、利用可能なものは再利用するといったことが可能となり、培養効率と原料ガス 2 6 の利用効率を向上することができる。

[0046] 図 4 において、培養液回収機構 5 5 は、回収経路 5 6 を介して、回収した培養液 1 8 である回収液 5 8 を貯留する回収液タンク 5 7 と接続されている。回収液 5 8 は、回収経路 5 6 を通じて培養液回収機構 5 5 から回収液タンク 5 7 に移送される。回収経路 5 6 には、回収液 5 8 を移送するためのポンプ 2 2 が設けられている。

[0047] 回収液タンク 5 7 に収容された回収液 5 8 は、一部が図示しない精製装置に移送される。精製装置において、水素酸化細菌 2 1 の培養によって産生さ

れた有機物質 29 が回収液 58 から抽出される。

[0048] (回収液の溶存可燃性ガス濃度を低下させる処理)

培養装置 10 は、回収液 58 に含まれる溶存水素濃度を、培養槽 11 内の培養液 18 よりも低下させる濃度低下機構を備えている。濃度低下機構は、一例として、培養液循環経路 54 において、培養槽 11 から培養液回収機構 55 までの区間の全長 L を濃度低下に必要な長さに延長することにより構成される。具体的には、当該区間の全長 L は、回収液 58 に含まれる溶存水素濃度を、培養槽 11 内の培養液 18 に含まれる溶存水素濃度の $1/10$ 以下に低下させるために必要な長さを有している。培養槽 11 から取り出された培養液 18 には、水素を消費する水素酸化細菌 21 が含まれており、水素酸化細菌 21 は、培養液循環経路 54 内においても水素を消費する。培養液循環経路 54 が長いほど、水素が水素酸化細菌 21 に消費される時間が確保される。これにより水素の利用効率が向上する。また、培養液循環経路 54 の培養液回収機構 55 までの区間において水素が消費されれば、培養液回収機構 55 によって回収される回収液 58 の溶存水素濃度は低下する。これにより回収液 58 から放出される水素も低減されるため、回収液タンク 57 内における爆発の危険性も低下し、安全性が確保される。上記区間の全長 L が濃度低下に必要な長さを有する培養液循環経路 54 は、本開示の技術に係る「濃度低下機構」の一例である。

[0049] また、培養液循環経路 54 の当該区間の全長 L を延長する代わりに、当該区間を流れる培養液 18 の流速を低下させてもよい。これにより、培養槽 11 から取り出された培養液 18 が培養液回収機構 55 に移送されるまでの時間が延長されるため、取り出された培養液 18 内において水素が消費される時間を延長することができる。結果として、当該区間の全長 L を延長する場合と同様の効果が得られる。培養液 18 の流速は例えばポンプ 22 の単位時間当たりの吸引量を制御することにより調整することができる。ポンプ 22 の吸引量は、プロセッサ 17 によって制御される。このようなプロセッサ 17 とポンプ 22 によって構成される流速調整機構も、本開示の技術に係る「

濃度低下機構」の一例である。

[0050] (回収液タンク 5 7 の下流側)

回収液タンク 5 7 の下流側には、回収液 5 8 から、有機物質 2 9 を含む一部の回収液 5 8 を精製対象として分離し、分離した精製対象を精製装置に送る精製対象分離機構 5 9 が設けられている。精製対象分離機構 5 9 によって精製対象として分離した回収液 5 8 以外の残りの回収液 5 8 は、培養液 1 8 として、液再利用経路 6 3 及び培養液循環経路 5 4 を介して、培養槽 1 1 に戻して再利用される。

[0051] 培養液回収機構 5 5 は、図 4 において一部を拡大して示すように、ポンプ 2 2 と液分離機構 6 4 とを備えている。ポンプ 2 2 は、培養液 1 8 を循環させるための循環圧力を発生させる。液分離機構 6 4 は、精製対象分離機構 5 9 と同様に、培養槽 1 1 から取り出した培養液 1 8 から、有機物質 2 9 を含む一部の培養液 1 8 を分離し、分離した培養液 1 8 を回収液 5 8 として回収経路 5 6 に送る。残りの培養液 1 8 はガス分離機構 6 1 に送られる。

[0052] (培養液の循環経路における培養液の取り出し口の位置)

また、図 6 に示すように、培養液循環経路 5 4 は、培養槽 1 1 から培養液 1 8 を取り出す取り出し口 5 4 A と、取り出した培養液 1 8 の一部を培養槽 1 1 に戻す戻し口 5 4 B とを有している。培養槽 1 1 内の培養液 1 8 は、高さ方向における上方側で原料ガス 2 6 の溶存ガス濃度が低く、下方側で溶存ガス濃度が高い。取り出し口 5 4 A は、溶存ガス濃度が相対的に低い低濃度領域に設定され、戻し口 5 4 B は溶存ガス濃度が相対的に高い高濃度領域に設定されている。より具体的には、取り出し口 5 4 A は、培養槽 1 1 内の培養液 1 8 の溶存ガス濃度が平均値 A_v よりも低い低濃度領域に設定されている。

[0053] これにより、培養液 1 8 を循環させるために培養槽 1 1 から培養液 1 8 の一部を取り出す場合において、培養槽 1 1 内の培養液 1 8 の溶存ガス濃度の濃度ムラを解消しやすい。

[0054] (培養槽の攪拌、温度調整、各種情報のセンシング)

また、図2において、培養槽11には、培養液18を攪拌する攪拌棒41が設けられている。攪拌棒41は、支持棒にスクリー41Aを設けたものであり、スクリー41Aが培養液18内に配置されるように設けられている。攪拌棒41は、プロセッサ17によって制御されるモータ42の駆動によって支持棒を回転軸として回転する。これにより培養液18が攪拌される。攪拌棒41は、培養液18を攪拌することにより、培養液18中の水素酸化細菌21及び原料ガス26について局所的な偏りが生じないように拡散させる。

[0055] また、攪拌棒41は、培養液18を攪拌することにより、培養液18中から泡を作り、培養液18の液面18Aに上述の泡沫層18Bを形成する。

[0056] この他、培養槽11には、温度計46、温度調整器47、圧力計48、溶存ガス濃度測定部49、及び密度測定部50が設けられている。温度計46は、培養液18内の温度Tを測定する。温度調整器47は、培養槽11内の培養液18を加熱または冷却する。圧力計48は、空間11A内の圧力PSを測定する。溶存ガス濃度測定部49は、培養液18に溶解される原料ガス26の溶存ガス濃度Drを測定する。密度測定部50は、培養槽11内の培養液18内に存在する水素酸化細菌21の密度 ρ を測定する。

[0057] 培養液18は、水素酸化細菌21の培養に適した目標温度に維持される。目標温度は一例として40℃以上95℃以下である。目標温度は微生物毎に設定される。水素酸化細菌21がヒドロゲノフィラス属の場合は、より好ましくは50℃程度である。培養液18は目標温度にするために加熱される他、冷却が必要な場合もある。これは培養する微生物が増殖中に発熱し培養液18が目標温度を上回ってしまう場合があるためである。プロセッサ17は、温度計46で測定された温度Tに基づいて、培養液18の温度Tが目標温度に維持されるように温度調整器47の駆動を制御する。

[0058] また、プロセッサ17は、圧力計48によって測定された圧力PSに基づいて、空間11A内の混合ガス31の圧力を制御する。混合ガス31の圧力PSを目標圧力にすることにより、培養液18中における原料ガス26の溶

解性が向上する。このように、プロセッサ 17 は、混合ガス 31 の圧力を制御することにより、培養液 18 中の適正な溶解性を確保する。これにより、水素酸化細菌 21 の培養効率が向上する。混合ガス 31 の圧力 P S の調整対象は、原料ガス 26 の供給量、混合ガス 31 の排出量、及び調整用ガス 33 の供給量のうちの少なくとも 1 つである。プロセッサ 17 は、各ポンプ 22 の駆動を制御することにより、これらのガスの供給量又は排出量を調整する。

- [0059] 溶存ガス濃度測定部 49 は、より具体的には、培養液 18 に溶解される原料ガス 26 に含まれる成分（水素、酸素および二酸化炭素）毎の濃度を測定する。溶存ガス濃度測定部 49 は、一例として、溶存水素濃度（ $D_r(H_2)$ ）を測定する溶存水素計（一例として、共栄電子研究所製：型番 KM210ODH）、溶存酸素濃度（ $D_r(O_2)$ ）を測定する溶存酸素計（一例として、METTLE TOLEDO 製：型番 InPro6860i）、及び溶存二酸化炭素濃度（ $D_r(CO_2)$ ）を測定する溶存二酸化炭素計（一例として、METTLE TOLEDO 製：型番 InPro5000i）で構成される。溶存ガス濃度測定部 49 は、測定値をプロセッサ 17 に出力する。
- [0060] 図 3 に示したとおり、原料ガスタンク 12 は、原料ガス 26 の成分（水素、酸素、二酸化炭素）毎に収容する。また、供給路 12A 及びポンプ 22 は、成分毎に設けられている。
- [0061] プロセッサ 17 は、溶存ガス濃度測定部 49 から、成分毎の溶存ガス濃度の測定値を取得し、成分毎に、溶存ガス濃度と目標値とを比較し、原料ガス 26 のうち不足している成分を培養槽 11 に供給する。プロセッサ 17 は、このような原料ガス 26 の各成分の供給量の制御を通じて、培養液 18 中の原料ガス 26 の溶存ガス濃度を適正な値に維持することができる。
- [0062] 密度測定部 50 は、培養槽 11 内の培養液 18 中に存在する培養対象の密度 ρ を測定する。密度測定部 50 は、一例として総細胞密度センサ（一例として、HAMILTON 製：型番 Dencytee RS485）で構成される。本例では培養対象は水素酸化細菌 21 であるため、密度測定部 50 は培養液 18 内の

水素酸化細菌 21 の密度 ρ を測定する。水素酸化細菌 21 の密度 ρ は、水素酸化細菌 21 が消費する原料ガス 26 の消費量と正の相関を有する。密度 ρ を測定することで、例えば水素酸化細菌 21 が消費する原料ガス 26 の消費量を算出したり、あるいは水素酸化細菌 21 の量に対して原料ガス 26 の消費量が適正か否かを検証するプロセスチェック等に用いることができる。

[0063] 水位計 66 は、培養槽 11 内の培養液 18 の水位、すなわち液面 18A の高さを計測する。水位計 66 が計測する培養液 18 の水位によって、培養槽 11 内に存在する培養液 18 の量を把握することができる。水位計 66 は、培養液 18 の量が適正か否かのプロセスチェック、及び培養液 18 の必要な補充量の算定等に用いられる。

[0064] また、培養槽 11 には放爆口 67 が設けられている。放爆口 67 は培養槽 11 内で万一爆発が生じた場合に、他の部分よりも先に破壊されることにより培養槽 11 内の圧力を安全に開放させ、被害拡大を抑えるための構成である。放爆口 67 の近傍は、圧力が開放された場合でも大きな被害が生じないような場所、または被害が拡大しないような対策が施された場所が選択される。

[0065] プロセッサ 17 は、例えば、CPU (Central Processing Unit) 及び RAM (Random Access Memory) などで構成され、上述のとおり、培養装置 10 の各部を制御する。また、メモリ 17A は、フラッシュメモリなど、各種の設定情報が格納される不揮発性のメモリである。

[0066] (培養槽に供給される原料ガスの気泡径の制御)

培養槽 11 の培養液 18 内に生じる原料ガス 26 の気泡径について、 d_{90} は $1000\mu\text{m}$ 以下に設定される。図 7 に示すように、 d_{90} とは、気泡全体の中で、径の小さいものから順次体積を積算した際に累積体積が全気泡の総和体積の 90% となる気泡径をいう。図 7 に示す棒グラフによる山形の分布は、培養液 18 内に生じる気泡の気泡径のヒストグラムであり、横軸が気泡径で、縦軸が頻度である。このような気泡径の体積を累積していくと、図 7 に示すような右肩上がりの折れ線グラフとなる。 d_{90} は、累積体積の

割合が総和体積の90%となる気泡径であり、培養装置10においては、一例として、この気泡径が1000 μ m以下になるように設定される。このような気泡径は、例えば、スパージャー28等の気泡発生装置の仕様によって決定される。気泡径について、d90を1000 μ m以下にすることで、培養液18への原料ガス26の溶解性を向上することができる。より好ましい気泡径はd90が500 μ m以下であり、d90を200 μ m以下にすることがさらに好ましい。このような気泡径とすることで、原料ガス26が溶解しづらい条件、例えば培養液18の温度が高い場合又は培養槽11の深さが浅い場合等でも、原料ガス26の高い溶解性を確保することができる。

[0067] (表面張力低下剤)

また、図8に示すように、表面張力低下剤を添加することにより、培養液18が表面張力低下剤を含有していてもよい。培養液18の表面張力が低下すると、気泡が小径化しやすくなるため、可燃性ガスである水素を含む原料ガス26の溶解性を向上させることができる。培養液18の表面張力は65mN/m以下とすることが好ましい。この程度の表面張力としておけば、気泡径のd90を1000 μ m以下にしやすい。表面張力がこの値となるように表面張力低下剤の添加量が決められる。より好ましい培養液18の表面張力は55mN/m以下であり、45mN/m以下とすることがさらに好ましい。このような表面張力とすることで、気泡径をより小さくしやすい。

[0068] (廃ガスの再利用)

また、図9に示すように、培養装置10は外部の装置から排出された二酸化炭素を含む廃ガスを培養装置10の原料ガス26として再利用してもよい。外部の装置は、培養装置10以外の他の装置であり、例えば、培養装置10が稼働する施設と同じ施設内の他の装置でもよいし、別の施設（工場等）の他の装置でもよい。廃ガスを再利用する場合は、成分分離機構52によって廃ガスから二酸化炭素を分離し、分離した二酸化炭素を原料ガス26として再利用する。このように廃ガスに含まれる二酸化炭素を再利用することにより、二酸化炭素排出量の削減に寄与することができる。

[0069] 2. 第1実施形態

以上の共通構成の一例を前提として、培養装置10の第1実施形態について、図10～図16を用いて説明する。第1実施形態の培養装置10は、可燃性ガスである水素を用いる場合の安全性の対策として、混合ガス31の組成比制御、水素の溶解率制御及び消費率制御を行う。

[0070] 図10に示すように、プロセッサ17には、培養装置10の各種センサからの測定信号及び検出信号が入力される。そして、プロセッサ17のメモリ17Aには、培養条件情報として、各種制御の目標値が格納されている。プロセッサ17は、各部に対して目標値に応じた制御信号を出力することにより、各種の制御を行う。

[0071] 各種制御の目標値としては、培養液18の目標温度及び目標圧力がある。また、組成比制御に用いる爆発範囲外の目標値としては、一例として、水素濃度の目標値($TD(H_2)$)、酸素濃度の目標値($TD(O_2)$)及び水蒸気濃度(図示せず)などが含まれる。この他、メモリ17Aには、水素の溶解率制御に用いる水素溶解率の目標値($TRd(H_2)$)、及び水素の消費率制御に用いる水素消費率の目標値($TRc(H_2)$)などが設定されている。

[0072] (混合ガスの組成比制御)

上述したとおり、水素は可燃性ガスであり、調整用ガス33は、空間11A内の混合ガス31の組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持するために使用される。混合ガス31においては、可燃性ガスである水素は、酸素と混合している。この場合、混合ガス31の組成比によっては爆発が生じる。爆発が生じる場合の混合ガスの組成比を爆発範囲という。上述のとおり、プロセッサ17のメモリ17Aには、爆発範囲外の目標値として、水素濃度の目標値($TD(H_2)$)、酸素濃度の目標値($TD(O_2)$)及び水蒸気濃度等がそれぞれ設定される。爆発範囲外の目標値は混合ガス31の成分によって異なる。本例のように混合ガス31が水素及び酸素を含む混合ガスの場合、爆発範囲外の目標値は、一般的には、混合ガス31中の酸素濃度が5%未満、または水素濃度が4%未満である。

- [0073] さらに、本出願人は、水蒸気濃度が7%以上であれば、酸素濃度が5%以上であっても混合ガスの組成比を爆発範囲外に維持できることを実験により検証している。そこで、本例では、爆発範囲外の目標値は、一例として、水蒸気濃度が7%以上90%以下であれば、酸素濃度は5%以上9%以下の範囲に設定される。
- [0074] 実験は、以下の方法で行った。爆発容器として、内径200mm、深さ200mm、容積6Lのステンレス製チャンバーを用いた。爆発容器に、水素、酸素、二酸化炭素および水蒸気を充填した（水蒸気は、爆発容器内に水を注ぎ、容器内温度における飽和水蒸気圧まで真空引きを行うことで、水を気化させて充填した。水素、酸素および二酸化炭素は、爆発容器に設けられたガス導入用配管を通じて、ガスボンベから充填した）。爆発容器内の攪拌用ファンを回してガスを均一化した後、爆発容器に設けられた細線爆発装置を用いてガスの着火を試みた。着火又は不着火の判定は、圧力上昇の有無、水の生成による爆発容器内部の負圧発生の有無に基づき行った。圧力は、爆発容器に設けられたガス排出用配管の上弁に配置した圧力センサ（共和電業、PHS-B-10MP）で測定した。
- [0075] 表1は、混合ガスのガス濃度に応じて着火するか否かの実験結果を示す。表1の実施例1と比較例1は、ともに水蒸気濃度が0%の例であり、酸素濃度以外の濃度はほぼ同様である。不着火の実施例1では酸素濃度が4%で、5%未満であり、着火した比較例1では、酸素濃度が9%で、5%を上回っている。実施例1と比較例1によって、一般的に知られているとおり、水蒸気濃度が0%の場合は、酸素濃度が5%未満であると着火しないという実験結果が出ている。
- [0076] また、実施例2、実施例3及び比較例2は、すべて水蒸気濃度が7%以上の例であり、酸素濃度のみ大きく異なっている。実施例2及び実施例3は酸素濃度が9%であり、比較例2は酸素濃度が16%で、9%を上回っている。これらの実験結果から、水蒸気濃度が7%以上の場合は、酸素濃度が5%以上でも9%以下であれば、着火していないことがわかる。

[0077] [表1]

	ガス濃度				温度	結果
	H ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O		
実施例1	72%	4%	24%	0%	31℃	不着火
実施例2	70%	9%	14%	7%	44℃	不着火
実施例3	66%	9%	13%	12%	52℃	不着火
比較例1	67%	9%	24%	0%	31℃	着火
比較例2	59%	16%	13%	12%	52℃	着火

[0078] なお、表1には、水素濃度が4%未満の場合の実験結果はないが、酸素濃度を5%未満にする代わりに、水素濃度が4%未満であれば、水蒸気濃度が0%の場合でも、混合ガスは着火しないことが知られている。そのため、爆発範囲外の目標値としては、混合ガス31の酸素濃度を5%未満とする代わりに、混合ガス31の水素濃度を4%未満としてもよい。

[0079] 調整用ガス33は、例えば不活性ガスである。より具体的には、本例では二酸化炭素(CO₂)が使用される。調整用ガス33が空間11Aに供給されることにより、酸素濃度または水素濃度が低下し、混合ガス31の組成比が爆発範囲外の目標値に維持される。なお、調整用ガス33としては、不活性ガス以外にも任意のガスが利用可能である。例えば、調整用ガス33として、可燃性ガスである水素を用いて混合ガス31の酸素濃度を5%未満とするなど、任意のガスを用いて混合ガス31の組成比を爆発範囲外の目標値にしてもよい。このように、調整用ガス33としては任意のガスを用いることができるが、上述のとおり、混合ガス31を再利用する場合は、調整用ガス33に原料ガス26の成分を用いることが好ましい。

[0080] 図11に示すとおり、組成比測定部16は、培養槽11の空間11Aから混合ガス31を排出する排出路36上に配置されている。組成比測定部16は、例えば、水素濃度(D(H₂))を測定するガス分析計(一例として、堀場製作所製：型番TCA-51d)、酸素濃度(D(O₂))を測定するガス分析計(一例として、堀場製作所製：型番VA-5113)、二酸化炭素濃度(D(CO₂))を測定するガス分析計(一例として、堀場製作所製：型番

V A - 5 1 1 3)、及び混合ガス 3 1 のトータルの流量 ($Q_{out} (total)$) を測定する流量計 (一例として、E m e r s o n 製: 型番 C M F S 0 0 7 M) で構成

される。これにより、組成比測定部 1 6 は、混合ガス 3 1 の各成分の濃度とトータルの流量とを測定することが可能である。組成比測定部 1 6 は、各測定値を測定信号としてプロセッサ 1 7 に出力する。

[0081] プロセッサ 1 7 は、例えば、混合ガス 3 1 のトータルの流量と酸素濃度の測定値に基づいて、混合ガス 3 1 の酸素濃度が予め設定された上限値未満に維持されるように調整用ガス 3 3 の供給量を決定する。そして、プロセッサ 1 7 は、ポンプ 2 2 を制御することにより、決定した供給量の調整用ガス 3 3 を、調整用ガスタンク 1 4 から空間 1 1 A に供給する。これにより、空間 1 1 A 内の二酸化炭素の供給量 ($Q_{in} (CO_2)$) が増加し、相対的に酸素濃度 ($D (O_2)$) が低下し、空間 1 1 A 内の混合ガス 3 1 の組成比が予め設定された爆発範囲外の目標値 ($TD (O_2)$) に維持される。調整用ガス 3 3 の供給量を増加させることにより、水素濃度 ($D (H_2)$) も低下するため、水素濃度についても、爆発範囲外の目標値 ($TD (O_2)$) に維持することが可能である。プロセッサ 1 7、調整用ガスタンク 1 4、及び供給路 1 4 A 上のポンプ 2 2 は、本開示の技術に係る「組成比制御機構」の一例である。

[0082] また、培養液 1 8 も空間 1 1 A もともに培養槽 1 1 内に存在するので、培養液 1 8 の温度 T を目標温度に維持することにより、空間 1 1 A 内の温度もほぼ同様の温度に維持することができる。後述するとおり、空間 1 1 A 内の混合ガス 3 1 の組成比は、予め設定された爆発範囲外の目標値に維持される。目標値には、混合ガス 3 1 の水蒸気濃度も含まれている。培養液 1 8 の温度を $40^{\circ}C$ 以上に制御することを通じて、混合ガス 3 1 の温度を $40^{\circ}C$ 以上にすることができる。これにより、混合ガス 3 1 の水蒸気濃度も 7 % 以上に調整することが可能である。

[0083] (可燃性ガスの溶解率制御)

図 1 2 に示すように、プロセッサ 1 7 を含む溶解率制御機構は、可燃性ガ

ス溶解率制御の一例として水素溶解率制御を実行する。プロセッサ 17、組成比測定部 16、及び流量計 23 は、本開示の技術に係る「溶解率制御機構」の一例である。

- [0084] 溶解率制御機構は、培養中において、ガス循環経路 39 又は原料ガス供給部を通じて培養槽 11 に供給される原料ガスに含まれる可燃性ガスである水素のうち、培養液 18 に溶解される水素の割合である水素溶解率を測定し、測定した水素溶解率 ($R_d(H_2)$) を予め設定された目標値 ($TR_d(H_2)$) 以上に維持する。水素溶解率 ($R_d(H_2)$) は、培養槽 11 から混合ガス 31 として排出される水素量を $Q_{out}(H_2)$ 、培養槽 11 に供給される水素量を $Q_{in}(H_2)$ とした場合に、以下の式 (1) で定義される。

$$R_d(H_2) (\%) = (1 - Q_{out}(H_2) / Q_{in}(H_2)) \times 100 \cdots \text{式 (1)}$$

- [0085] つまり、培養槽 11 に供給された水素量から培養槽 11 から排出される水素量を控除した値が、培養液 18 内に溶解された水素量であり、供給された水素量に対する溶解された水素量の割合が水素溶解率である。

- [0086] $Q_{out}(H_2)$ は、培養槽 11 から排出される混合ガス 31 のトータルの量 ($Q_{out}(total)$) に混合ガス 31 の水素濃度 ($D(H_2)$) を乗じた値である。プロセッサ 17 は、流量計 23 から $Q_{in}(H_2)$ を取得し、組成比測定部 16 から、 $Q_{out}(total)$ 及び水素濃度 ($D(H_2)$) を取得し、取得した測定値に基づいて、水素溶解率 ($R_d(H_2)$) を測定する。

- [0087] そして、プロセッサ 17 は、水素溶解率 ($R_d(H_2)$) が目標値 ($TR_d(H_2)$) 以上に維持されるように、一例として、培養槽 11 への水素の供給量 ($Q_{in}(H_2)$) を制御する。培養槽 11 への水素の供給量を減らすことにより、式 (1) の定義より、水素溶解率 ($R_d(H_2)$) を上げることができる。水素溶解率の目標値は、一例として 90% 以上であることが好ましい。

- [0088] 水素の溶解率を上げると、空間 11A 内に放出される水素量が減る。混合

ガス 3 1 の組成比制御機構に加えて、溶解率制御を行うことにより、混合ガス 3 1 の水素濃度をより減らすことができるため、爆発の危険性が低下し、従来と比較して安全性が向上する。こうした制御は、水素などの可燃性ガスを含む原料ガス 2 6 を用いる場合には、有効な技術である。

[0089] (可燃性ガスの消費率制御)

さらに、図 1 2 に示すように、溶解率制御機構は、溶解率制御を通じて水素消費率を制御してもよい。

[0090] 具体的には、溶解率制御機構は、培養中において、ガス循環経路 3 9 又は原料ガス供給部を通じて培養槽 1 1 に供給される原料ガス 2 6 に含まれる可燃性ガスである水素のうち、水素酸化細菌 2 1 が消費する水素の水素消費率を測定し、水素の溶解率の制御を通じて、測定された水素消費率 ($R_c(H_2)$) を目標値 ($TR_c(H_2)$) である 90% 以上に維持する。

[0091] 水素消費率 ($R_c(H_2)$) は、培養槽 1 1 内の水素酸化細菌 2 1 の水素の消費量を $Q_{cs}(H_2)$ とした場合に、以下の式 (2) で定義される。

$$R_c(H_2) (\%) = Q_{cs}(H_2) / Q_{in}(H_2) \times 100 \cdots \text{式 (2)}$$

[0092] つまり、培養槽 1 1 に供給された水素量に対する培養槽 1 1 内の水素酸化細菌 2 1 が消費した水素量の割合が水素消費率である。

[0093] 培養槽 1 1 への水素の供給量である $Q_{in}(H_2)$ と、培養槽 1 1 から排出される水素の量である $Q_{out}(H_2)$ との差分は、培養液 1 8 内に溶解した水素量を示す。培養液 1 8 内に溶解した水素量には、水素酸化細菌 2 1 が消費した消費量である $Q_{cs}(H_2)$ に加えて、培養液 1 8 に溶解したものの消費せずに存在する溶存水素量が含まれている。そのため、溶存水素量を $Q_r(H_2)$ とすると、 $Q_{cs}(H_2) = Q_{in}(H_2) - (Q_{out}(H_2) + Q_r(H_2))$ となる。ここで、溶存水素量 $Q_r(H_2)$ とは、基準となる溶存水素量からの変化量をいう。例えば、 $Q_{cs}(H_2)$ 、 $Q_{in}(H_2)$ 、 $Q_{out}(H_2)$ をそれぞれ 1 分あたりの水素消費量、水素供給量、水素排出量とした場合には、溶存水素量 $Q_r(H_2)$ は 1 分前の溶存水素量 (培養液 1 8 中に溶解

している水素量) からの変化量を指す。

- [0094] 培養槽 11 内に収容される培養液 18 の収容量を Q_m とすると、溶存水素量 ($Q_r(H_2)$) は、培養液 18 の収容量 (Q_m) に溶存水素濃度 ($D_r(H_2)$) を乗じることで求められる。プロセッサ 17 は、水位計 66 から取得され水位に基づいて培養液 18 の収容量 (Q_m) を計算し、溶存ガス濃度測定部 49 から測定した溶存水素濃度 ($D_r(H_2)$) を取得することにより、溶存水素量 ($Q_r(H_2)$) を測定する。そして、プロセッサ 17 は、式 (2) に従って、水素消費量 ($Q_{cs}(H_2)$) 及び水素消費率 ($R_c(H_2)$) を測定する。
- [0095] プロセッサ 17 を含む溶解率制御機構は、水素の供給量を減らす溶解率制御を通じて、水素消費率 ($R_c(H_2)$) を目標値 ($TR_c(H_2)$) である 90% 以上に維持する。水素消費率を向上することにより、原料ガス 26 の利用効率が向上する。
- [0096] 上記構成による作用について、図 13～図 15 に示すフローチャートを参照しながら説明する。図 13 は、組成比制御処理の手順を示す。プロセッサ 17 は、例えば、培養槽 11 内に、水素酸化細菌 21 を含む培養液 18 が収容された状態で、温度調整器 47 を駆動することにより、培養液 18 の温度を目標温度まで加温する。プロセッサ 17 は、培養液 18 が目標温度に達した後、原料ガス 26 の供給を開始することにより、培養処理を開始する。培養処理を開始後も、プロセッサ 17 は、温度調整器 47 を通じて培養液 18 の温度を目標温度に制御する。培養処理において、水素酸化細菌 21 は、培養液 18 中に溶解された原料ガス 26 を取り込むことにより増殖し、さらに有機物質 29 を産生する。水素酸化細菌 21 は、遺伝子を改変することにより有機物質 29 を効率よく産生する。水素酸化細菌 21 が有機物質 29 を産生するタイミングは増殖中または増殖後である。培養液 18 中に溶解されない一部の原料ガス 26 は、培養液 18 の液面 18A の上方の空間 11A に放出され、混合ガス 31 となる。
- [0097] 組成比制御処理のステップ S101 において、プロセッサ 17 は、組成比

測定部 16 から、混合ガス 31 の各成分の濃度及び混合ガス 31 のトータルの流量の測定値を取得する。そして、プロセッサ 17 は、取得した測定値に基づいて、混合ガス 31 の酸素濃度を算出し、これを混合ガス 31 の組成比として取得する。

[0098] ステップ S 102 において、プロセッサ 17 は、混合ガス 31 の組成比が爆発範囲外か否かを判定する。上述したとおり、本例において、爆発範囲外の目標値は、酸素濃度が 5 % 以上 9 % 以下、かつ水蒸気濃度が 7 % 以上に設定されている。また、本例においては、培養液 18 の目標温度は 40℃ 以上に設定されている。そのため、40℃での飽和水蒸気量は、水蒸気濃度に換算すると約 7 % であるため、培養液 18 の目標温度が 40℃ 以上に設定されていれば、混合ガス 31 の水蒸気濃度を 7 % 以上に調整することが可能である。プロセッサ 17 は、組成比測定部 16 の測定値から導出した酸素濃度と目標値とを比較する。酸素濃度が目標値の範囲内であれば、組成比は爆発範囲外であると判定し（ステップ S 102 で Y）、ステップ S 104 に移行する。

[0099] 一方、酸素濃度が目標値の上限値である 9 % を超えている場合は、プロセッサ 17 は、混合ガス 31 の組成比が爆発範囲であると判定し（ステップ S 102 で N）、ステップ S 103 に移行する。ステップ S 103 において、プロセッサ 17 は、供給路 14 A のポンプ 22 を駆動することにより、調整用ガス 33 を空間 11 A に供給する。これにより、混合ガス 31 の酸素濃度が低下し、混合ガス 31 の組成比を爆発範囲外に戻すことができる。

[0100] プロセッサ 17 は、こうした組成比制御処理を、培養処理が終了するまで（ステップ S 104 で Y）、繰り返す。これにより、空間 11 A の混合ガス 31 の組成比を爆発範囲外の目標値に維持することができる。

[0101] また、培養中において、プロセッサ 17 は、図 14 に示す溶解率制御処理を実行する。プロセッサ 17 は、まず、ステップ S 201 において、式（1）に従って、培養槽 11 内の水素溶解率（ $R_d(H_2)$ ）を測定する。そして、ステップ S 202 において、プロセッサ 17 は、測定した水素溶解率（

($R_d(H_2)$)と目標値($TR_d(H_2)$)とを比較し、水素溶解率($R_d(H_2)$)が目標値($TR_d(H_2)$)以上か否かを判定する。水素溶解率($R_d(H_2)$)が目標値($TR_d(H_2)$)を下回っている場合(ステップS202でN)は、プロセッサ17は、ステップS203に移行し、水素供給量($Q_{in}(H_2)$)を減らす。プロセッサ17は、ステップS203により、水素溶解率($R_d(H_2)$)を目標値($TR_d(H_2)$)以上に維持する。プロセッサ17は、こうした処理を培養処理が終了するまで繰り返す(ステップS204)。

[0102] さらに、プロセッサ17は、溶解率制御処理を通じて、図15に示す消費率制御処理を実行する。プロセッサ17は、まず、ステップS301において、式(2)に従って、培養槽11内の水素消費率($R_c(H_2)$)を測定する。そして、ステップS302において、プロセッサ17は、測定した水素消費率($R_c(H_2)$)と目標値($TR_c(H_2)$)とを比較し、水素消費率($R_c(H_2)$)が目標値($TR_c(H_2)$)以上か否かを判定する。水素消費率($R_c(H_2)$)が目標値($TR_c(H_2)$)を下回っている場合(ステップS302でN)は、プロセッサ17は、ステップS303に移行する。そして、ステップS303において、プロセッサ17は、溶解率制御処理のステップS203と同様に、水素供給量($Q_{in}(H_2)$)を減らす。プロセッサ17は、ステップS303により、水素消費率($R_c(H_2)$)を目標値($TR_c(H_2)$)以上に維持する。プロセッサ17は、こうした処理を培養処理が終了するまで繰り返す(ステップS304)。

[0103] 以上説明したとおり、本開示の技術に係る第1実施形態の培養装置10は、混合ガス31の組成比制御機構と水素(可燃性ガスの一例)の溶解率制御機構を備える。組成比制御機構によって、培養槽11内における混合ガス31の組成比が爆発範囲外の目標値に維持されるため、従来と比較して安全性が向上する。

[0104] また、図16に示すように、溶解率制御によって、培養槽11内の培養液18への水素の溶解率が目標値以上に維持されるため、空間11Aに放出さ

れる水素が減り、混合ガス 31 に含まれる水素量が減少する。これにより、より安全性が向上する。第 1 実施形態の培養装置 10 は、このような混合ガス 31 の組成比制御と溶解率制御とを行うため、従来技術として示した特許 2564008 号公報のように培養液 18 中の溶存酸素濃度を単独で制御する場合と比べて、安全性も高い。図 16 に示すとおり、溶解率制御を行うことにより、原料ガス 26 の利用効率を向上することができる。

[0105] また、第 1 実施形態の培養装置 10 において、混合ガス 31 の組成比制御と溶解率制御を組み合わせることのメリットは次のとおりである。例えば、溶解率制御を行うことなく、混合ガス 31 の組成比制御を単独で実行した場合は、水素濃度及び酸素濃度を爆発範囲外の目標値に維持するために必要な調整用ガス 33 の供給量が多くなってしまう場合がある。調整用ガス 33 の供給量が増加すると混合ガス 31 の排出量も増加する。混合ガス 31 を再利用するとしても、再利用できる量には限界があり、その限界を超えた混合ガス 31 は大気開放させざるを得ない。その場合は、混合ガス 31 を不活性化するための調整用ガス 33 が無駄になってしまう。

[0106] 組成比制御と溶解率制御を組み合わせれば、空間 11A に放出される水素の量が減る。そのため、図 16 に示すように、混合ガス 31 の組成比制御において、水素濃度又は酸素濃度を爆発範囲外の目標値に維持するために必要な調整用ガス 33 の供給量を削減することができる。このように混合ガス 31 の組成比制御と溶解率制御とを組み合わせることにより、調整用ガス 33 の無駄を減らすことができる。

[0107] また、第 1 実施形態の培養装置 10 は、単純に水素の供給量を減らすのではなく、溶解率という指標を用いて水素の供給量を制御する。培養液 18 に溶解しない水素は、培養対象となる水素酸化細菌 21 に消費されることがなく、無駄に放出されることになる。第 1 実施形態の培養装置 10 は、溶解率を指標として水素の供給量を減らすことにより、無駄に放出される水素を減らすことができる。このため、水素酸化細菌 21 の原料が不足する懸念も少なく、原料ガス 26 である水素の利用効率も向上する。

- [0108] 溶解率の目標値を90%とすることで、安全性がより向上する。さらに、水素の消費率制御を行うことにより、原料ガス26の利用効率をより向上させることができる。
- [0109] 上記例においては、溶解率制御として、水素の供給量を減らす例で説明したが、溶解率を向上させる方法としては、培養液18の温度を下げる方法もある。培養液18の温度を調整することにより水素の溶解性を変化させることができる。また、発生させる気泡径が異なる複数の種類の気泡発生装置（一例としてスパージャー28）を設け、これらを選択的に切り替えることにより、溶解率を制御してもよい。上述したとおり、気泡径が小さいほど溶解率は向上するためである。
- [0110] また、溶解率を目標値以上に維持するためには、図7で示した気泡径の設定と組み合わせることが有効である。また、同様に、図8で示したように、培養液18に表面張力低下剤を添加することにより表面張力を低下させる対策も有効である。
- [0111] また、第1実施形態においては、一例として、培養対象の微生物として、水素酸化細菌21を使用し、原料ガス26として、可燃性ガスとして水素を含み、その他の成分として酸素と二酸化炭素を含んでいる。このような培養対象と原料ガス26との組み合わせの場合は、本開示の技術が特に有効である。というのも、まず、原料ガス26の成分として、可燃性ガスである水素に加えて、支燃性ガスである酸素が含まれている。そのため、爆発を抑制するという安全性の対策は非常に重要となるため、より安全性を向上することが可能な本開示の技術は特に有効である。
- [0112] また、原料ガス26の成分として、不活性ガスの二酸化炭素を含んでいるため、調整用ガス33として二酸化炭素を利用することにより、調整用ガス33を原料ガス26として再利用することが可能となる。このため、利用効率という点でも、こうした組み合わせにおいて本開示の技術は有効である。
- [0113] また、第1実施形態の培養装置10において、共通構成の一例において図2及び図3で示した成分分離機構52、及び図2及び図4で示したガス分離

機構 6 1 と組み合わせることにより、安全性の向上と原料ガス 2 6 の利用効率の向上の点で有効である。まず、安全性については、可燃性ガスを分離できるため、ガス循環経路 3 9 及びガス再利用経路 6 2 の安全性を確保しやすい。また、混合ガス 3 1 などから、特定の成分を分離することにより、目的に応じた再利用がしやすい。

[0114] また、第 1 実施形態の培養装置 1 0 において、共通構成の一例において図 2 に示したとおり、ガス循環経路 3 9 の混合ガス取り出し口 3 4 を、泡沫層 1 8 B を取り込み可能な位置に配置する技術を組み合わせている。このような技術は、センサなどに対する悪影響が減り、正確な制御が可能になるという点で有効である。

[0115] また、第 1 実施形態の培養装置 1 0 において、共通構成の一例において図 4 で示した、培養槽 1 1 から取り出した培養液 1 8 の濃度低下機構を組み合わせている。このような技術は、培養液回収機構 5 5 の下流側における回収経路 5 6 及び回収タンク 5 7 における安全性の向上という点で有効である。

[0116] また、第 1 実施形態の培養装置 1 0 において、共通構成の一例において図 2 及び図 4 など示した爆発抑制機構を組み合わせている。このような技術は、ガス再利用経路 6 2 における安全性の向上という点で有効である。

[0117] また、爆発抑制機構としては、培養液 1 8 から分離された分離ガスから水素を分離するガス分離機構 6 1 を例示したが、爆発抑制機構としては、他の構成も考えられる。例えば、ガス再利用経路 6 2 において再利用するガスを移送する際に、例えば、調整用ガス 3 3 などの不活性ガスを追加することにより、再利用するガスの組成比を爆発範囲外の目標値に制御する構成が考えられる。また、ガス再利用経路 6 2 から、着火源となるものを極力排除した構成にすることで、爆発抑制機構とすることも考えられる。例えば摩擦熱を発生させる機械的な可動部を有するポンプ 2 2 などは着火源となりうる。後述する第 4 実施形態で示すとおり、こうしたポンプ 2 2 を、可動部を有さない圧力付与装置（図 2 3 及び図 2 4 に示す流体エジェクタ 7 5、7 6 など）に代えるといった方法で爆発抑制機構を実現してもよい。

[0118] なお、第1実施形態の培養装置10において、共通構成の一例として示した要素については全部を設けなくてもよく、一部と組み合わせるだけでもよい。

[0119] 3. 第2実施形態

図17～図21を用いて第2実施形態の培養装置10を説明する。第2実施形態において、図1～図9に示した共通構成の一例及び図10～図16で示した第1実施形態で説明した構成については説明を省略し、同一の符号を付す。

[0120] 第2実施形態の培養装置10は、第1実施形態の組成比制御機構と、図17に示すような縦長の培養槽111とを組み合わせた構成である。より具体的には、第2実施形態の培養槽111は、培養槽111の高さ方向と直交する断面の円相当直径を $D\text{ A m}$ 、液面18Aの最大高さを H とした場合において、培養槽111の寸法は、 $H/D\text{ A m} \geq 2$ の寸法条件を満たしている。高さ方向は鉛直方向である。

[0121] ここで、「円相当直径」とは、断面が円の場合は円の直径であり、断面が多角形である場合は外接円の直径であり、楕円又は長円の場合は、長径である。「液面の最大高さ」とは、収容可能な最大容量の培養液18を培養槽111に収容した場合の培養液18の液面18Aの高さをいう。収容可能な最大容量とは、培養処理の実行が可能な最大容量である。液面18Aの最大高さは、水位計66などの各種のセンサが培養液18に浸かっている状態で、かつ、攪拌棒41及びスパージャー28など、液面18Aを変動させる要素をすべて停止させた状態で計測される高さである。

[0122] このような寸法条件の縦長の培養槽111を用いることで、可燃性ガスの溶解率が向上する。培養液18に供給された原料ガス26は、液面18Aに向かって上昇し、上昇中に一部は培養液18中に溶解され、溶解されなかった原料ガス26は、液面18Aの上方の空間11Aに放出されて、混合ガス31の成分となる。そのため、培養槽111が縦長であるほど、原料ガス26が溶解する溶解時間を長く確保することができるため、原料ガス26の培

養液 18 への溶解量が多くなり、その分、混合ガス 31 に含まれる原料ガス 26 の量が減る。原料ガス 26 に可燃性ガスが含まれている場合は、混合ガス 31 に含まれる可燃性ガスの量が低減される。これにより、爆発の危険性が低減され、安全性が向上する。

[0123] 第 2 実施形態においても、縦長の培養槽 111 を用いることにより可燃性ガスの溶解率が向上する。図 16 において示したとおり、可燃性ガスの溶解率が向上することにより、原料ガス 26 の利用率も向上する。また、組成比制御と組み合わせることにより、調整用ガス 33 の供給量を削減する効果もある。こうした効果は、第 1 実施形態と同様である。

[0124] 培養槽 111 は、有底の円筒形状である。円筒形状は、断面が多角形の筒形状と比べて、培養液 18 の濃度分布の偏りを低減しやすい。また、円筒形状は、多角形の筒形状と比べて製造もしやすい。

[0125] また、寸法条件は、より好ましくは、 $H/D \geq 1.3$ である。これにより培養槽 111 がより縦長となり、可燃性ガスの溶解率がさらに向上する。

[0126] また、第 2 実施形態において、共通構成の一例において図 7 で示したとおり、原料ガス 26 の気泡径については、 d_{90} は $1000 \mu m$ 以下であることが好ましい。というのも、培養槽 111 の寸法条件が、 $H/D = 2$ の場合を想定すると、 d_{90} を $1000 \mu m$ 以下とすることにより、液面 18 A 付近において、気泡がほぼ消失するサイズとなるためである。

[0127] また、第 2 実施形態においても、表面張力低下剤を添加することにより気泡径を小径化することも有効である。

[0128] また、図 17 に示すように、温度調整器 47 の培養槽 111 の高さ方向の寸法は、全体として、液面 18 A の最大高さの 30% 以上の長さであることが好ましい。すなわち、温度調整器 47 の高さ方向の長さを H_t とすると、 $H_t/H \geq 30\%$ という条件を満たすことが好ましい。ここで、「全体として」の意味は、1 つの温度調整器 47 の連続した長さ H_t が 30% 以上の場合と、複数の温度調整器 47 が分割して配置されている場合は、各分割部分の長さの合計が 30% 以上の場合とを含む趣旨である。

- [0129] 培養槽 1 1 1 が縦長の場合は、温度調整器 4 7 も、液面 1 8 A の高さ H の 3 0 % 以上の長さを有していることが、高さ方向の温度ムラを低減する観点から好ましい。
- [0130] また、温度調整器 4 7 は種々の形態があり得るが、培養槽 1 1 1 の外周を取り囲むように配置されていてもよい。例えば、培養槽 1 1 1 が円筒形状である場合は、温度調整器 4 7 も円筒形状である。あるいは、断面が円弧形状の温度調整器 4 7 が、培養槽 1 1 1 の外周に複数配置されていてもよい。
- [0131] また、図 1 8 に示す変形例のように、温度調整器 4 7 は、培養槽 1 1 1 内に配置されていてもよい。もちろん、図 1 8 に示すように、温度調整器 4 7 は、培養槽 1 1 1 の内部と外部の両方に配置されていてもよい。
- [0132] 図 1 8 に示すように、温度調整器 4 7 の少なくとも一部は培養槽 1 1 1 内に配置されていることが好ましい。というのも、温度調整器 4 7 は培養槽 1 1 1 内の培養液 1 8 の温度を調整するものであるため、温度調整器 4 7 を培養槽 1 1 1 内に配置した方が、培養槽 1 1 1 外にある場合に比べて、エネルギー効率がよいためである。培養槽 1 1 1 内の温度調整器 4 7 の形態は、例えば、円筒形状である。もちろん、円弧形状の温度調整器 4 7 が複数配置されていてもよい。なお、図 1 8 及び後述する図 2 0 において、培養槽 1 1 1 の外側に配置された温度調整器 4 7 の形状については簡略化して示している。実際には、培養槽 1 1 1 の外側に配置された温度調整器 4 7 は、例えば、高さ方向と直交する水平方向の断面が円弧状をしており、培養槽 1 1 1 の外周面の曲面に沿って湾曲している。
- [0133] 上述のとおり、温度調整器 4 7 は、プロセッサ 1 7 によって制御され、プロセッサ 1 7 は、温度調整器 4 7 を通じて、培養液 1 8 の温度を培養に適した温度に調整する。培養液 1 8 の温度は、培養期間中において一定の温度に保たれるようにしてもよいし、培養の進捗状況に応じて温度を変化させてもよい。
- [0134] また、図 1 9 に示す変形例のように、温度調整器 4 7 は、複数有り、複数の温度調整器 4 7 のそれぞれは、培養槽 1 1 1 の高さ方向において、異なる

位置に配置されていてもよい。培養槽 11 は縦長であるため、複数の温度調整器 47 が異なる高さに配置されていれば、高さ方向の温度ムラを低減する観点から好ましい。なお、図 19 において、符号 H t 1 と符号 H t 2 は、高さ方向に並べて配置された 2 つの温度調整器 47 のそれぞれの高さ方向の長さを示す。

[0135] また、図 20 に示す変形例のように、複数のスクリー 41 A を有する攪拌棒 41 を備えており、複数のスクリー 41 A は、培養槽 111 の高さ方向において、異なる位置に配置されていてもよい。スクリー 41 A は、本開示の技術に係る「攪拌部」の一例であり、攪拌棒 41 は、「攪拌機構」の一例である。

[0136] 複数のスクリー 41 A が異なる高さに配置されていれば、培養液 18 中に溶解又は分散されている物質の高さ方向の濃度ムラが低減されるため、好ましい。培養液 18 中に溶解又は分散されている物質は、水素酸化細菌 21 などの培養対象（微生物または細胞）及び原料ガス 26 などである。

[0137] また、図 21 に示すように、複数の温度調整器 47 と、複数のスクリー 41 A とを有する場合においては、少なくとも 1 つの温度調整器 47 と少なくとも 1 つのスクリー 41 A とを組み合わせた複数のペアが、培養槽 111 の高さ方向において、異なる位置に配置されていてもよい。こうすれば、温度ムラと濃度ムラの両方を低減することができる。

[0138] なお、第 2 実施形態の培養装置 10 に、第 1 実施形態の溶解率制御機構を組み合わせてもよい。縦長の培養槽 111 と溶解率制御機構とを組み合わせることにより、混合ガス 31 に含まれる可燃性ガスの量をより減らすことができる。これにより、混合ガス 31 の爆発の危険性が低減され、安全性がより向上する。また、可燃性ガスの溶解率もより向上することにより、水素酸化細菌 21 の水素の消費率など原料ガス 26 の消費率も向上するため、原料ガス 26 の利用効率も向上する。

[0139] 溶解率制御を行う場合は、第 1 実施形態と同様に、溶解率の目標値は 90 % 以上であることが好ましい。安全性及び原料ガス 26 の利用効率を向上す

る効果がより確実になる。

[0140] また、第1実施形態と同様に、溶解率制御に加えて可燃性ガスの消費率制御を組み合わせてもよい。これによれば、原料ガス26の利用効率を向上する効果がより確実になる。

[0141] また、第2実施形態においても、一例として、培養対象の微生物として、水素酸化細菌21を使用し、原料ガス26として、可燃性ガスとして水素を含み、その他の成分として酸素と二酸化炭素を含んでいる。このような培養対象と原料ガス26との組み合わせの場合は、本開示の技術が特に有効である。理由は、第1実施形態で説明したとおりである。

[0142] なお、第2実施形態の培養装置10において、共通構成の一例として示した要素については全部を設けなくてもよく、一部と組み合わせるだけでもよい。また、溶解率制御との組み合わせを例示したとおり、第2実施形態と第1実施形態の各構成とを適宜組み合わせてもよい。

[0143] 4. 第3実施形態

図22を用いて第3実施形態の培養装置310を説明する。第3実施形態において、図1～図9に示した共通構成の一例及び図10～図16で示した第1実施形態など、上述した構成については説明を省略し、同一の符号を付す。

[0144] 図22に示すように、第3実施形態の培養装置310は、培養槽11に供給される前の培養液18に対して原料ガス26を混合させるための気泡発生装置128を有しており、培養液タンク13と培養槽11の間に配設され、気泡発生装置128によって原料ガス26が混合された培養液18を、培養槽11に供給する培養液供給路70であって、水素酸化細菌21を培養槽11に供給する供給路15Aとは別に設けられた培養液供給路70を備えている。

[0145] 培養装置310は、一例として、培養液タンク13に気泡発生装置128が設けられている。原料ガス26の供給路12Aは培養液タンク13内の気泡発生装置128に接続されている。培養液タンク13内において原料ガス

26と混合された培養液18は、培養液供給路70を通じて培養槽11に供給される。培養槽11においてはスパージャー28のような気泡発生装置は設けられていない。培養槽11には、培養対象供給路としての供給路15Aを通じて水素酸化細菌21が供給される。

[0146] 気泡発生装置128が発生する原料ガス26の気泡と、水素酸化細菌21などの培養対象（微生物または細胞）とが接触すると、培養対象にダメージが生じる。培養対象が気泡からダメージを受けると、培養対象が死滅し、培養液18内の培養対象が減少してしまう場合がある。培養液18内の培養対象が減少すると、水素消費率など、原料ガス26に含まれる可燃性ガスの消費率も減少する。可燃性ガスの消費率が減少すると、混合ガス31に含まれる可燃性ガスの量が増加する。これにより、爆発の危険性が増加して、安全性が低下する。

[0147] 第3実施形態の培養装置310は、水素酸化細菌21の供給路15Aとは別に、予め原料ガス26が混合された培養液18を供給する培養液供給路70を設けることにより、培養槽11内において原料ガス26の気泡と水素酸化細菌21とが接触する機会が低減される。これにより、水素酸化細菌21が気泡から受けるダメージが低減され、培養液18内における水素酸化細菌21の減少が抑制される。水素酸化細菌21の減少が抑制されると、水素消費率などの可燃性ガスの消費率が向上し、混合ガス31に含まれる可燃性ガスの量が減る。これにより、爆発の危険性が低下して、安全性が向上する。

[0148] さらに、水素酸化細菌21のダメージが低減されると、水素消費率が増加し、原料ガス26の利用効率及び培養効率も向上する。

[0149] また、図22に示すように、第3実施形態の培養装置310においては、培養槽11に加えて、培養液タンク13にも温度調整器47が設けられている。これにより、培養槽11内の培養液18の温度と、培養液タンク13内の温度とが同様の温度になるように調整される。

[0150] 培養装置310においては、水素酸化細菌21が供給される培養液18は培養槽11にあり、原料ガス26が供給される培養液18は培養液タンク1

3にある。培養液タンク13と培養槽11のそれぞれの培養液18は、培養液供給路70を通じて混合されるが、この際に両者に温度差があると、温度差に起因して混合後の培養液18内において原料ガス26の濃度ムラが生じる場合がある。原料ガス26の濃度ムラがあると、原料ガス26の濃度が低い領域の水素酸化細菌21が死滅するといったことも起こりうる。培養槽11と培養液タンク13のそれぞれに、温度調整器47を設けることにより、水素酸化細菌21などの培養対象に対して培養液18の温度差に起因するダメージを低減することができる。これにより、水素酸化細菌21による水素消費率が向上し、混合ガス31に含まれる水素の量も減るため、安全性がより向上する。同様に、原料ガス26の利用効率及び培養効率も向上する。

[0151] また、原料ガス26と培養液18との混合は、培養槽11に供給される前に行われればよい。例えば、培養液供給路70に気泡発生装置128を設けることも可能である。しかし、図22に示すように、培養液タンク13に気泡発生装置128を設ける方が、培養液供給路70などに設ける場合と比べて、スペース的に余裕があるため、気泡発生装置128の設置がしやすい。

[0152] 気泡発生装置128は、スパージャー28でもよいが、回転せん断力により気泡を発生させる回転せん断式でもよいし、上述したエジェクタ式またはスタティックミキサ式でもよい。これらの方式の気泡発生装置は、スパージャー28と比較して、出力が大きく、より多くの原料ガス26を供給することができるため、量産適正に優れている。このため、培養効率を向上させることができる。一方で、気泡発生装置128は高出力であるほど、気泡に起因する水素酸化細菌21へのダメージは増加する。第3実施形態では、原料ガス26の気泡と水素酸化細菌21との接触を考慮することなく、原料ガス26と培養液18とを混合させることができる。そのため、回転せん断式のような高出力の気泡発生装置128を用いることが可能である。

[0153] また、第3実施形態の培養装置310においても、第1実施形態と同様に、培養槽11から培養液18の一部を取り出し、取り出された培養液18か

ら水素酸化細菌 21 などの培養対象の一部を回収し、回収後の残りの培養液 18 を、培養槽 11 に戻す培養液循環経路 354 を備えている。第 3 実施形態の培養液循環経路 354 は、培養液タンク 13 と培養槽 11 とを結ぶ培養液供給路 70 を含んで構成される。第 3 実施形態の培養液循環経路 354 は、培養液タンク 13 を介して培養槽 11 に戻す点で、第 1 実施形態の培養液循環経路 54 とは異なる。このような培養液循環経路 354 により培養液 18 を灌流させながら培養する灌流培養を行うことができる。灌流培養を行う場合でも、水素酸化細菌 21 が回収された後の培養液 18 を培養液タンク 13 に戻すため、原料ガス 26 の気泡と水素酸化細菌 21 との接触は低減される。これにより、水素酸化細菌 21 が気泡から受けるダメージは少ない。

[0154] また、第 3 実施形態においても、一例として、培養対象の微生物として、水素酸化細菌 21 を使用し、原料ガス 26 として、可燃性ガスとして水素を含み、その他の成分として酸素と二酸化炭素を含んでいる。このような培養対象と原料ガス 26 との組み合わせの場合は、第 1 実施形態と同様に、安全性の向上を課題とする本開示の技術が特に有効である。

[0155] また、水素酸化細菌 21 は、エネルギー源および炭素源として、それぞれ水素と二酸化炭素を消費する。上述したとおり、第 3 実施形態の培養装置 310 においては、培養液タンク 13 において原料ガス 26 と培養液 18 とを混合させるため、水素酸化細菌 21 と原料ガス 26 の気泡との接触を考慮する必要がなく、高出力の気泡発生装置 128 を用いることができる。そのため、スパージャー 28（図 2 参照）と比較して、原料ガス 26 を培養液 18 に十分に供給し、溶解させることが可能となる。そのため、第 3 実施形態の培養装置 310 は、水素酸化細菌 21 に対して十分な栄養を与えることが可能となり、培養効率の点で有利である。

[0156] また、第 3 実施形態においても、共通構成の一例として図 3 に示したように、原料ガス 26 は、水素、酸素及び二酸化炭素の各成分が別々に供給されるようにしてもよい。これにより、培養液 18 内において各成分の濃度分布が生じにくく、水素酸化細菌 21 への原料ガス 26 の不足などが生じにくく

、水素酸化細菌 21 へのダメージが少ない。

[0157] また、第 3 実施形態においても、共通構成の一例として図 7 に示したように、原料ガス 26 の気泡径について、 d_{90} は $1000\mu\text{m}$ 以下であってもよい。上述したとおり、気泡径を小径化することにより、より溶解率を向上させることができる。これにより、安全性と原料ガス 26 の利用効率が向上する。

[0158] また、第 3 実施形態においても、第 1 実施形態において示した組成比制御を行ってもよい。こうすれば、安全性がより向上する。

[0159] なお、第 3 実施形態の培養装置 310 において、共通構成の一例として示した要素については全部を設けなくてもよく、一部と組み合わせるだけでもよい。また、溶解率制御及び縦長の培養槽 111 との組み合わせなど、第 3 実施形態と、第 1 実施形態及び第 2 実施形態の各構成とを適宜組み合わせてもよい。

[0160] 5. 第 4 実施形態

図 23 及び図 24 を用いて第 4 実施形態の培養装置 410 を説明する。第 4 実施形態において、図 1 ～図 9 に示した共通構成の一例及び図 10 ～図 16 で示した第 1 実施形態など、上述した構成については説明を省略し、同一の符号を付す。

[0161] 図 23 に示すように、第 4 実施形態の培養装置 410 は、空間 11A 内の混合ガス 31 を原料ガス 26 として再利用するためのガス循環経路 439 と、ガス循環経路 439 上に配置され、混合ガス 31 に対して混合ガス 31 を循環させる循環圧力を付与する流体エジェクタ 75 とを備えている。流体エジェクタ 75 は、機械的な可動部を有さず、外部から入力された駆動流体によって混合ガス 31 に循環圧力を付与する圧力付与装置の一例である。ポンプ 22 は、圧力付与装置ではあるが、回転体などの機械的可動部を有しており、循環圧力を付与する対象である混合ガス 31 と機械的可動部とが接触する。ポンプ 22 は、機械的な可動部を有する点で、本願の機械的な可動部を有さない圧力付与装置とは区別される。

- [0162] 流体エジェクタ 75 は、混合ガス 31 が入力される第 1 入力ポート 75 A と、駆動流体が入力される第 2 入力ポート 75 B と、混合ガス 31 が出力される出力ポート 75 C とを備えている。第 2 入力ポート 75 B の奥には駆動流体を噴出するノズル 75 D が設けられている。
- [0163] ノズル 75 D は噴出口が形成される先端に向かって先細形状になっている。ノズル 75 D の先端は、第 1 入力ポート 75 A からの流路と第 2 入力ポート 75 B からの流路が合流する場所に配置されている。外部から第 2 入力ポート 75 B に駆動流体が入力されると、駆動流体はノズル 75 D を通過する際にノズル 75 D の先細形状により流速が上がり、その状態で噴出する。駆動流体の流速が速く、圧力が低いため、第 1 入力ポート 75 A から入力された混合ガス 31 は、駆動流体に吸引され、駆動流体と一緒に出力ポート 75 C から出力される。これにより、混合ガス 31 に循環圧力が付与される。
- [0164] 駆動流体は、一例として培養槽 11 内から取り出される培養液 18 である。駆動流体としての培養液 18 は、ポンプ 22 によって圧力が付与されて流体エジェクタ 75 に入力される。流体エジェクタ 75 の出力ポート 75 C からは、培養液 18 と混合ガス 31 とが混合された状態で出力される。出力ポート 75 C には、培養液循環経路 454 が接続されている。培養液 18 と混合ガス 31 は、培養液循環経路 454 を通って培養槽 11 に戻される。これにより、混合ガス 31 が循環する。本例では、培養液循環経路 454 は、ガス循環経路 439 としても利用される。
- [0165] このように、第 4 実施形態の培養装置 410 は、混合ガス 31 が循環するガス循環経路 439 に、流体エジェクタ 75 を設けることにより、混合ガス 31 を循環させている。流体エジェクタ 75 は、機械的な可動部を有さない圧力付与装置の一例であり、機械的な可動部を有さないため、摩擦による発熱が生じず、高温、火花、及び静電気といった着火源とならない。着火源は、爆発の三要素の 1 つである。そのため、培養装置 410 では、混合ガス 31 を原料ガス 26 として再利用する場合においても、爆発の危険性が少なく、従来よりも安全性が向上する。

- [0166] また、培養装置 4 1 0 においても、駆動流体としての培養液 1 8 に対して圧力を付与するために、機械的な可動部を有するポンプ 2 2 を有している。しかし、ポンプ 2 2 は、混合ガス 3 1 が循環するガス循環経路 4 3 9 には配置されていないため、混合ガス 3 1 とポンプ 2 2 が接触することはなく、ポンプ 2 2 は、混合ガス 3 1 の爆発を引き起こす着火源とはならない。
- [0167] このように、第 4 実施形態の培養装置 4 1 0 においては、混合ガス 3 1 を循環させるガス循環経路 4 3 9 から、ポンプ 2 2 のような着火源になりうる装置が排除される。そのため、仮に混合ガス 3 1 の組成比が爆発範囲内であっても、ガス循環経路 4 3 9 にポンプ 2 2 を配置する場合と比べて、安全性が高い。
- [0168] 培養装置 4 1 0 においては、駆動流体として培養液 1 8 を利用している。培養液 1 8 も混合ガス 3 1 と同様に循環させることにより培養処理において再利用可能なものである。そのため、駆動流体として培養液 1 8 を用いれば、駆動流体として培養処理に利用することができない専用の流体を用いる場合と比較して、無駄が少ない。また、混合ガス 3 1 は、培養液 1 8 に溶解して再利用されるため、培養液 1 8 を駆動流体として利用することは原料ガス 2 6 への不純物の混入を防止する観点からもメリットがある。
- [0169] また、上述のとおり、第 4 実施形態の培養装置 4 1 0 においては、混合ガス 3 1 の組成比を爆発範囲内にした場合でも安全性が比較的安全性が高い。そのため、原料ガス 2 6 の供給量についても、安全性の観点よりも、水素酸化細菌 2 1 の培養効率を重視した基準で決定することができる。
- [0170] 例えば、培養装置 4 1 0 においては、培養中において、培養槽 1 1 に供給される原料ガス 2 6 のうち、水素酸化細菌 2 1 が消費する原料ガス 2 6 の消費量を測定し、原料ガス 2 6 の消費量以上の原料ガス 2 6 を供給するといった制御を行ってもよい。培養装置 4 1 0 では、安全性が高いため、このような制御を行いやすい。原料ガス 2 6 の消費量の測定は、第 1 実施形態において図 1 2 で説明した手順と同様の手順で測定することが可能である。プロセス 1 7 を含む原料ガス供給部は、測定した原料ガス 2 6 の消費量以上の原

料ガス 26 を計算し、供給量を決定する。こうした制御により原料ガス 26 の潤沢な供給が可能である。

[0171] 具体的には、原料ガス供給部及びガス循環経路 39 を通じて培養槽 11 に供給される原料ガス 26 の供給量は、原料ガス 26 の消費量の 2 倍～15 倍であってもよい。つまり、培養槽 11 に供給される原料ガス 26 の総供給量が、培養槽 11 内における原料ガス 26 の消費量の 2 倍～15 倍になるように制御する。原料ガス 26 の総供給量をこの程度とすれば、水素酸化細菌 21 が必要とする十分な量の原料ガス 26 を与えることができ、原料ガス 26 が不足することもない。また、このような十分な量の原料ガス 26 を与えれば、培養槽 11 内における原料ガス 26 の濃度ムラも低減される。これにより、培養効率を向上させることができる。

[0172] また、もちろん、第 4 実施形態の培養装置 410 は、上述の各実施形態の構成などと適宜組み合わせることが可能である。例えば、図 11 において示した混合ガス 31 の組成比を爆発範囲内の目標値に維持する組成比制御を行ってもよい。第 4 実施形態では、ガス循環経路 439 から着火源が排除されているため、混合ガス 31 の組成比が爆発範囲内でも安全性は高いが、混合ガス 31 の組成比制御を行うことにより、さらに安全性が向上する。

[0173] また、図 23 に示すように、ガス循環経路 439 の混合ガス取り出し口 34 を、泡沫層 18B を取り込み可能な位置に配置する構成を採用してもよい。これによれば、共通構成の一例において示したとおり、泡沫層 18B の悪影響を低減することができる。

[0174] また、第 4 実施形態においても、一例として、培養対象の微生物として、水素酸化細菌 21 を使用し、原料ガス 26 として、可燃性ガスとして水素を含み、その他の成分として酸素と二酸化炭素を含んでいる。このような培養対象と原料ガス 26 との組み合わせの場合は、本開示の技術が特に有効である。上述したとおり、原料ガス 26 の成分として、可燃性ガスである水素に加えて、支燃性ガスである酸素が含まれている。そのため、爆発を抑制するという安全性の対策は非常に重要となるため、より安全性を向上することが

可能な本開示の技術は特に有効である。

- [0175] なお、本例では、流体エジェクタ 7 5 の出力ポート 7 5 C を、培養液循環経路 4 5 4 の配管を介して培養槽 1 1 に接続しているが、配管を介さずに出力ポート 7 5 C を培養槽 1 1 に直接接続してもよい。
- [0176] なお、本例では、機械的な可動部を有さない圧力付与装置として、流体エジェクタ 7 5 を用いている。流体エジェクタ 7 5 は既存の製品も多く利用しやすい。もちろん、機械的な可動部を有さない圧力付与装置としては、流体エジェクタ 7 5 の代わりに、例えば、旋回せん断式の圧力付与装置を用いることができる。旋回せん断式の圧力付与装置は、駆動流体を旋回させて高速旋回流を発生させ、高速旋回流の圧力によって混合ガス 3 1 に循環圧力を付与する。また、圧力付与装置としては、一例として、エンバイロ・ビジョン株式会社の気泡発生装置「Y J ノズル」を利用することも可能である。「Y J ノズル」は、気泡発生装置としても利用可能であるが、図 2 3 に示した流体エジェクタ 7 5 と同様に、流路内の圧力変化を利用して、流体に圧力を付与する圧力付与装置として利用することも可能である。
- [0177] また、図 2 3 の例では、培養液 1 8 と混合ガス 3 1 を混合させた状態で培養槽 1 1 に戻す例で説明したが、図 2 4 に示すように、培養液 1 8 と混合ガス 3 1 とを分離して、培養槽 1 1 に戻してもよい。
- [0178] この場合は、流体エジェクタ 7 5 の出力ポート 7 5 C から培養液 1 8 と混合ガス 3 1 とを混合させた状態で出力後、ガス分離機構 6 1 によって培養液 1 8 と混合ガス 3 1 とを分離する。そして、分離された培養液 1 8 は培養液循環経路 4 5 4 を通じて培養槽 1 1 に戻される。一方、分離された分離ガスは、ガス再利用経路 6 2 を通じて培養槽 1 1 に戻される。ガス再利用経路 6 2 には、例えば、分離ガスに循環圧力を付与する流体エジェクタ 7 6 が配置されている。流体エジェクタ 7 6 は、一例として、駆動流体として二酸化炭素が使用される。二酸化炭素は分離ガスの成分であるため、分離ガスに不純物が混入することはない。分離ガスは流体エジェクタ 7 6 を介して培養槽 1 1 に戻される。

[0179] 上記各実施形態において、微生物として、水素酸化細菌 21 を例に説明したが、本開示の技術は、水素酸化細菌 21 以外の微生物または細胞にも適用することが可能である。微生物としては、例えば、クロストリジウム・オートエタノゲナムといった酢酸生成菌、及びメチロコッカス・カプラスラツスなどのメタン資化菌などでもよい。酢酸生成菌の場合は、原料ガス 26 の成分は、可燃性ガスである水素 (H_2)、一酸化炭素 (CO) 及び二酸化炭素 (CO_2) である。メタン資化菌の場合は、原料ガス 26 の成分は、可燃性ガスであるメタン (CH_4) 及び空気である。また、細胞とは、生物体を構成する、形態上及び／又は機能上の単位であって、細胞の由来となる生物体としては、特に限定されないが、動物や植物であってよい。細胞は、株化された細胞や遺伝子組み換えされた細胞であってもよく、人工細胞を含んでもよい。例えば、CHO細胞 (Chinese hamster ovary cells)、HEK293細胞 (Human Embryonic Kidney cells 293)、Sf9細胞 (Spodoptera frugiperda cells 9) などが挙げられる。

[0180] (付記項について)

また、上記第1実施形態～第4実施形態の説明から、以下の第1付記項～第4付記項に記載の発明を把握することができる。

[0181] (第1付記項)

[第1付記項1]

可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する培養装置であって、

微生物または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、

培養槽に原料ガスを供給する原料ガス供給部と、

培養槽内において培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスの組成比を測定し、測定した混合ガスの組成比に応じて空間内に調整用ガスを供給することにより、空間内の混合ガスの組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持する組成比制御機構と、

空間内の混合ガスを原料ガスとして再利用するためのガス循環経路と、

培養中において、ガス循環経路又は原料ガス供給部を通じて培養槽に供給される原料ガスに含まれる可燃性ガスのうち、培養液に溶解される可燃性ガスの割合である可燃性ガス溶解率を測定し、測定した可燃性ガス溶解率を予め設定された目標値以上に維持する溶解率制御機構と、を備える、培養装置。

[第1付記項2]

可燃性ガス溶解率の目標値は90%以上である、
第1付記項1に記載の培養装置。

[第1付記項3]

溶解率制御機構は、
さらに、培養中において、ガス循環経路及び原料ガス供給部を通じて培養槽に供給される原料ガスに含まれる可燃性ガスのうち、微生物または細胞が消費する可燃性ガスの割合である可燃性ガス消費率を測定し、可燃性ガスの溶解率の制御を通じて、測定された可燃性ガス消費率を90%以上に維持する、
第1付記項1または第1付記項2に記載の培養装置。

[第1付記項4]

培養液内に生じる原料ガスの気泡径について、 d_{90} は $1000\mu\text{m}$ 以下である、
第1付記項1～第1付記項3のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第1付記項5]

培養液が表面張力低下剤を含有する、
第1付記項1～第1付記項4のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第1付記項6]

培養液の表面張力は 65mN/m 以下である、
第1付記項1～第1付記項5のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第1付記項7]

微生物は、水素酸化細菌であり、

原料ガスは、可燃性ガスとして水素を含み、その他の成分として酸素と二酸化炭素を含み、

調整用ガスは、二酸化炭素である、

第 1 付記項 1 ～第 1 付記項 6 のうちのいずれか 1 項に記載の培養装置。

[第 1 付記項 8]

培養槽から取り出される混合ガスのうち、特定の成分を分離する第 1 の成分分離機構、あるいは、培養槽から取り出される培養液から分離された分離ガスのうち、特定の成分を分離する第 2 の成分分離機構を備える、

第 1 付記項 1 ～第 1 付記項 7 のうちのいずれか 1 項に記載の培養装置。

[第 1 付記項 9]

ガス循環経路において、培養槽から混合ガスを取り出す混合ガス取り出し口は、培養槽内の液面に存在する泡沫層を取り込み可能な位置に配置されている、

第 1 付記項 1 ～第 1 付記項 8 のうちのいずれか 1 項に記載の培養装置。

[第 1 付記項 10]

培養槽から取り出された培養液から、産生された有機物質を含む一部の培養液である回収液を回収する培養液回収機構と、

有機物質を含む回収液を貯留する回収液タンクと、

回収液タンク内に貯留される回収液に含まれる溶存可燃性ガス濃度を、培養槽内の培養液に含まれる溶存可燃性ガス濃度の $1/10$ 以下に低下させる濃度低下機構と、を備えている、

第 1 付記項 1 ～第 1 付記項 9 のうちのいずれか 1 項に記載の培養装置。

[第 1 付記項 11]

培養液から分離されたガスを再利用するためのガス再利用経路内における爆発を抑制する爆発抑制機構を備える、

第 1 付記項 1 ～第 1 付記項 10 のうちのいずれか 1 項に記載の培養装置。

[第 1 付記項 12]

可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物

または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、培養槽に可燃性ガスを含む原料ガスを供給する原料ガス供給部とを備え、微生物または細胞を培養する培養装置の制御方法であって、

培養槽内において培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスの組成比を測定し、測定した混合ガスの組成比に応じて空間内に調整用ガスを供給することにより、空間内の混合ガスの組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持し、

培養中において、空間内の混合ガスを原料ガスとして再利用するためのガス循環経路又は原料ガス供給部を通じて培養槽に供給される原料ガスに含まれる可燃性ガスのうち、培養液に溶解される可燃性ガスの割合である可燃性ガス溶解率を測定し、測定した可燃性ガス溶解率を予め設定された目標値に維持する、

培養装置の制御方法。

[0182] (第2付記項)

[第2付記項1]

可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する培養装置であって、

微生物または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、

培養槽に原料ガスを供給する原料ガス供給部と、

培養槽内において培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスの組成比を測定し、測定した混合ガスの組成比に応じて空間内に調整用ガスを供給することにより、空間内の混合ガスの組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持する組成比制御機構と、を備えており、

培養槽の高さ方向と直交する断面の円相当直径を $D \text{ A m}$ 、液面の最大高さを H とした場合において、培養槽の寸法は、 $H / D \text{ A m} \geq 2$ の条件を満たす、

培養装置。

[第2付記項2]

培養槽は、有底の円筒形状である、

第2付記項1に記載の培養装置。

[第2付記項3]

条件は、 $H/D \geq 1.3$ である、

第2付記項1または第2付記項2に記載の培養装置。

[第2付記項4]

培養液内に生じる原料ガスの気泡径について、 d_{90} は $1000 \mu m$ 以下である、

第2付記項1～第2付記項3のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第2付記項5]

培養液の温度を調整する温度調整器を有し、温度調整器の少なくとも一部は培養槽内に配置されている、

第2付記項1～第2付記項4のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第2付記項6]

温度調整器の培養槽の高さ方向の寸法は、全体として、液面の最大高さの30%以上の長さを有する、

第2付記項5に記載の培養装置。

[第2付記項7]

温度調整器は、複数有り、複数の温度調整器のそれぞれは、培養槽の高さ方向において、異なる位置に配置されている、

第2付記項5または第2付記項6に記載の培養装置。

[第2付記項8]

培養液を攪拌する複数の攪拌部を有する攪拌機構を備えており、複数の攪拌部は、培養槽の高さ方向において、異なる位置に配置されている、

第2付記項5～第2付記項7のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第2付記項9]

複数の温度調整器と、複数の攪拌部とを有する場合において、

少なくとも1つの温度調整器と少なくとも1つの攪拌部とを組み合わせた複数のペアが、培養槽の高さ方向において、異なる位置に配置されている、

第2付記項8に記載の培養装置。

[第2付記項10]

空間内の混合ガスを原料ガスとして再利用するためのガス循環経路と、

培養中において、ガス循環経路及び原料ガス供給部を通じて培養槽に供給される原料ガスに含まれる可燃性ガスのうち、培養液に溶解される可燃性ガスの割合である可燃性ガス溶解率を測定し、測定した可燃性ガス溶解率を予め設定された目標値に維持する溶解率制御機構と、を備える、

第2付記項1～第2付記項9のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第2付記項11]

可燃性ガス溶解率の目標値は90%以上である、

第2付記項10に記載の培養装置。

[第2付記項12]

溶解率制御機構は、

さらに、培養中において、ガス循環経路又は原料ガス供給部を通じて培養槽に供給される原料ガスに含まれる可燃性ガスのうち、微生物または細胞が消費する可燃性ガスの可燃性ガス消費率を測定し、可燃性ガスの溶解率の制御を通じて、測定された可燃性ガス消費率を90%以上に維持する、

第2付記項10または第2付記項11に記載の培養装置。

[第2付記項13]

微生物は、水素酸化細菌であり、

原料ガスは、可燃性ガスとして水素を含み、その他の成分として酸素と二酸化炭素を含み、

調整用ガスは、二酸化炭素である、

第2付記項1～第2付記項12のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第2付記項14]

培養槽から取り出される混合ガスのうち、特定の成分を分離する第1の成

分分離機構、あるいは、培養槽から取り出される培養液から分離された分離ガスのうち、特定の成分を分離する第2の成分分離機構を備える、

第2付記項1～第2付記項13のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第2付記項15]

空間内の混合ガスを原料ガスとして再利用するためのガス循環経路と、

培養中において、ガス循環経路及び原料ガス供給部を通じて培養槽に供給される原料ガスに含まれる可燃性ガスのうち、培養液に溶解される可燃性ガスの割合である可燃性ガス溶解率を測定し、測定した可燃性ガス溶解率を予め設定された目標値に維持する溶解率制御機構と、を備えており、

ガス循環経路において、培養槽から混合ガスを取り出す混合ガス取り出し口は、培養槽内の液面に存在する泡沫層を取り込み可能な位置に配置されている、

第2付記項11～第2付記項14のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第2付記項16]

培養槽から取り出された培養液から、産生された有機物質を含む一部の培養液である回収液を回収する培養液回収機構と、

有機物質を含む回収液を貯留する回収液タンクと、

回収液タンク内に貯留される回収液に含まれる溶存可燃性ガス濃度を、培養槽内の培養液に含まれる溶存可燃性ガス濃度の1/10以下に低下させる濃度低下機構と、を備えている、

第2付記項1～第2付記項15のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第2付記項17]

培養液から分離されたガスを再利用するためのガス再利用経路内における爆発を抑制する爆発抑制機構を備える、

第2付記項1～第2付記項16のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第2付記項18]

可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物

または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、培養槽に可燃性ガスを含む原料ガスを供給する原料ガス供給部とを備え、微生物または細胞を培養する培養装置の制御方法であって、

培養槽の高さ方向と直交する断面の円相当直径を $D \text{ A m}$ 、液面の最大高さを H とした場合において、培養槽の寸法は、 $H / D \text{ A m} \geq 2$ の条件を満たしており、

培養槽内において培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスの組成比を測定し、測定した混合ガスの組成比に応じて空間内に調整用ガスを供給することにより、空間内の混合ガスの組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持する、

培養装置の制御方法。

[0183] (第3付記項)

[第3付記項1]

可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する培養装置であって、

微生物または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、

培養槽に供給する培養液を貯留する培養液タンクと、

微生物または細胞を培養槽に供給する培養対象供給路と、

原料ガスを貯留する原料ガスタンクと、

培養槽に供給される前の培養液に対して原料ガスを混合させるための気泡発生装置と、

培養液タンクと培養槽の間に配設され、気泡発生装置によって原料ガスが混合された培養液を、培養槽に供給する培養液供給路であって、培養対象供給路とは別に設けられた培養液供給路とを備えている、

培養装置。

[第3付記項2]

培養槽、及び培養液タンクのそれぞれに、培養液の温度を調整する温度調整器が設けられている、

第3付記項1に記載の培養装置。

[第3付記項3]

気泡発生装置は、培養液タンクに設けられている、
第3付記項1または第3付記項2に記載の培養装置。

[第3付記項4]

気泡発生装置は、旋回せん断力により気泡を発生させる、
第3付記項1～第3付記項3のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第3付記項5]

培養槽から培養液の一部を取り出し、取り出された培養液から微生物または細胞の一部を回収し、回収後の残りの培養液を、培養液タンクを介して培養槽に戻す培養液循環経路を備えている、

第3付記項1～第3付記項4のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第3付記項6]

微生物は、水素酸化細菌であり、
原料ガスは、可燃性ガスとして水素を含み、その他の成分として酸素と二酸化炭素を含む、

第3付記項1～第3付記項5のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第3付記項7]

原料ガスは、水素、酸素及び二酸化炭素の各成分が別々に供給される、
第3付記項6に記載の培養装置。

[第3付記項8]

培養液内に生じる原料ガスの気泡径について、 d_{90} は $1000\mu\text{m}$ 以下である、

第3付記項1～第3付記項7のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第3付記項9]

培養槽内において培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスの組成比を測定し、測定した混合ガスの組成比に応じて空間内に調整用ガスを供給することにより、空間内の混合ガスの組成比を予め設定された爆発範囲外の目

標値に維持する組成比制御機構と、を備える、

第3付記項1～第3付記項8のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第3付記項10]

培養槽から取り出される混合ガスのうち、特定の成分を分離する第1の成分分離機構、あるいは、培養槽から取り出される培養液から分離された分離ガスのうち、特定の成分を分離する第2の成分分離機構を備える、

第3付記項1～第3付記項9のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第3付記項11]

培養槽から取り出される混合ガスを循環させるガス循環経路において、培養槽から混合ガスを取り出す混合ガス取り出し口は、培養槽内の培養液の液面に存在する泡沫層を取り込み可能な位置に配置されている、

第3付記項1～第3付記項10のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第3付記項12]

培養槽から取り出された培養液から、産生された有機物質を含む一部の培養液である回収液を回収する培養液回収機構と、

有機物質を含む回収液を貯留する回収液タンクと、

回収液タンク内に貯留される回収液に含まれる溶存可燃性ガス濃度を、培養槽内の培養液に含まれる溶存可燃性ガス濃度の $1/10$ 以下に低下させる濃度低下機構と、を備えている、

第3付記項1～第3付記項11のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第3付記項13]

培養液から分離されたガスを再利用するためのガス再利用経路内における爆発を抑制する爆発抑制機構を備える、

第3付記項1～第3付記項12のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[0184] (第4付記項)

[第4付記項1]

可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する培養装置であって、

微生物または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、
培養槽に原料ガスを供給する原料ガス供給部と、
培養槽内において培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスを原料ガスとして再利用するためのガス循環経路と、
ガス循環経路上に配置され、混合ガスに対して混合ガスを循環させる循環圧力を付与する圧力付与装置とを備えており、
圧力付与装置は、機械的な可動部を有さず、入力された駆動流体によって混合ガスに循環圧力を付与する、
培養装置。

[第4付記項2]

圧力付与装置は、流体エジェクタである、
第4付記項1に記載の培養装置。

[第4付記項3]

流体エジェクタに対して入力される駆動流体は、培養槽から取り出される培養液である、
第4付記項2に記載の培養装置。

[第4付記項4]

培養中において、培養槽に供給される原料ガスのうち、微生物または細胞が消費する原料ガスの消費量を測定し、
原料ガス供給部は、原料ガスの消費量以上の原料ガスを供給する、
第4付記項1～第4付記項3のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第4付記項5]

原料ガス供給部及びガス循環経路を通じて培養槽に供給される原料ガスの供給量は、原料ガスの消費量の2倍～15倍である、
第4付記項1～第4付記項4のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第4付記項6]

培養槽内において培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスの組成比を測定し、測定した混合ガスの組成比に応じて空間内に調整用ガスを供給す

ることにより、空間内の混合ガスの組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持する組成比制御機構を備える、

第4付記項1～第4付記項5のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第4付記項7]

ガス循環経路において、培養槽から混合ガスを取り出す混合ガス取り出し口は、培養槽内の液面に存在する泡沫層を取り込み可能な位置に配置されている、

第4付記項1～第4付記項6のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第4付記項8]

微生物は、水素酸化細菌であり、
原料ガスは、可燃性ガスとして水素を含み、その他の成分として酸素と二酸化炭素を含む、

第4付記項1～第4付記項7のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第4付記項9]

培養槽から取り出される混合ガスのうち、特定の成分を分離する第1の成分分離機構、あるいは、培養槽から取り出される培養液から分離された分離ガスのうち、特定の成分を分離する第2の成分分離機構を備える、

第4付記項1～第4付記項8のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第4付記項10]

培養槽から取り出された培養液から、産生された有機物質を含む一部の培養液である回収液を回収する培養液回収機構と、

有機物質を含む回収液を貯留する回収液タンクと、

回収液タンク内に貯留される回収液に含まれる溶存可燃性ガス濃度を、培養槽内の培養液に含まれる溶存可燃性ガス濃度の $1/10$ 以下に低下させる濃度低下機構と、を備えている、

第4付記項1～第4付記項9のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[第4付記項11]

培養液から分離されたガスを再利用するためのガス再利用経路内における

爆発を抑制する爆発抑制機構を備える、

第4付記項1～第4付記項10のうちのいずれか1項に記載の培養装置。

[0185] 上記のプロセッサには、ソフトウェア（プログラム）を実行して各種の処理部として機能するCPU等の汎用的なプロセッサの他、FPGA（Field Programmable Gate Array）等の製造後に回路構成を変更可能なプロセッサであるプログラマブルロジックデバイス（Programmable Logic Device：PLD）、ASIC（Application Specific Integrated Circuit）等の特定の処理を実行させるために専用に設計された回路構成を有するプロセッサである専用電気回路等が含まれる。

[0186] 更に、これらの各種のプロセッサのハードウェア的な構造としては、より具体的には、半導体素子などの回路素子を組み合わせた電気回路（circuitry）を用いることができる。

[0187] 以上に示した記載内容及び図示内容は、本開示の技術に係る部分についての詳細な説明であり、本開示の技術の一例に過ぎない。例えば、上記の構成、機能、作用、及び効果に関する説明は、本開示の技術に係る部分の構成、機能、作用、及び効果の一例に関する説明である。よって、本開示の技術の主旨を逸脱しない範囲内において、以上に示した記載内容及び図示内容に対して、不要な部分を削除したり、新たな要素を追加したり、置き換えたりしてもよいことは言うまでもない。また、錯綜を回避し、本開示の技術に係る部分の理解を容易にするために、以上に示した記載内容及び図示内容では、本開示の技術の実施を可能にする上で特に説明を要しない技術常識等に関する説明は省略されている。

[0188] 2023年7月31日に出願された日本国特許出願2023-125058号の開示は、その全体が参照により本明細書に取り込まれる。また、本明細書に記載された全ての文献、特許出願及び技術規格は、個々の文献、特許出願及び技術規格が参照により取り込まれることが具体的かつ個々に記された場合と同程度に、本明細書中に参照により取り込まれる。

請求の範囲

- [請求項1] 可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する培養装置であって、
前記微生物または前記細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、
前記培養槽に前記原料ガスを供給する原料ガス供給部と、
前記培養槽内において前記培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスの組成比を測定し、測定した前記混合ガスの組成比に応じて前記空間内に調整用ガスを供給することにより、前記空間内の前記混合ガスの組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持する組成比制御機構と、
前記空間内の前記混合ガスを前記原料ガスとして再利用するためのガス循環経路と、
培養中において、前記ガス循環経路又は前記原料ガス供給部を通じて前記培養槽に供給される前記原料ガスに含まれる前記可燃性ガスのうち、前記培養液に溶解される前記可燃性ガスの割合である可燃性ガス溶解率を測定し、測定した前記可燃性ガス溶解率を予め設定された目標値以上に維持する溶解率制御機構と、を備える、
培養装置。
- [請求項2] 前記可燃性ガス溶解率の前記目標値は90%以上である、
請求項1に記載の培養装置。
- [請求項3] 前記溶解率制御機構は、
さらに、培養中において、前記ガス循環経路及び前記原料ガス供給部を通じて前記培養槽に供給される前記原料ガスに含まれる前記可燃性ガスのうち、前記微生物または細胞が消費する可燃性ガスの割合である可燃性ガス消費率を測定し、前記可燃性ガスの溶解率の制御を通じて、測定された前記可燃性ガス消費率を90%以上に維持する、
請求項1に記載の培養装置。
- [請求項4] 前記培養液内に生じる前記原料ガスの気泡径について、 d_{90} は1

- 000 μm 以下である、
請求項1に記載の培養装置。
- [請求項5] 前記培養液が表面張力低下剤を含有する、
請求項1に記載の培養装置。
- [請求項6] 前記培養液の表面張力は65 mN/m 以下である、
請求項1に記載の培養装置。
- [請求項7] 前記微生物は、水素酸化細菌であり、
前記原料ガスは、前記可燃性ガスとして水素を含み、その他の成分として酸素と二酸化炭素を含み、
前記調整用ガスは、二酸化炭素である、
請求項1に記載の培養装置。
- [請求項8] 前記培養槽から取り出される混合ガスのうち、特定の成分を分離する第1の成分分離機構、あるいは、前記培養槽から取り出される培養液から分離された分離ガスのうち、特定の成分を分離する第2の成分分離機構を備える、
請求項1に記載の培養装置。
- [請求項9] 前記ガス循環経路において、前記培養槽から前記混合ガスを取り出す混合ガス取り出し口は、前記培養槽内の前記液面に存在する泡沫層を取り込み可能な位置に配置されている、
請求項1に記載の培養装置。
- [請求項10] 前記培養槽から取り出された前記培養液から、産生された前記有機物質を含む一部の培養液である回収液を回収する培養液回収機構と、
前記有機物質を含む回収液を貯留する回収液タンクと、
前記回収液タンク内に貯留される前記回収液に含まれる溶存可燃性ガス濃度を、前記培養槽内の前記培養液に含まれる溶存可燃性ガス濃度の1/10以下に低下させる濃度低下機構と、を備えている、
請求項1に記載の培養装置。
- [請求項11] 前記培養液から分離されたガスを再利用するためのガス再利用経路

内における爆発を抑制する爆発抑制機構を備える、

請求項 1 に記載の培養装置。

[請求項12]

可燃性ガスを含む原料ガスを増殖または有機物質の産生に利用する微生物または細胞を培養する培養液を収容する培養槽と、前記培養槽に可燃性ガスを含む原料ガスを供給する原料ガス供給部とを備え、微生物または細胞を培養する培養装置の制御方法であって、

前記培養槽内において前記培養液の液面上方に存在する空間内の混合ガスの組成比を測定し、測定した前記混合ガスの組成比に応じて前記空間内に調整用ガスを供給することにより、前記空間内の前記混合ガスの組成比を予め設定された爆発範囲外の目標値に維持し、

培養中において、前記空間内の前記混合ガスを前記原料ガスとして再利用するためのガス循環経路又は前記原料ガス供給部を通じて前記培養槽に供給される前記原料ガスに含まれる前記可燃性ガスのうち、前記培養液に溶解される前記可燃性ガスの割合である可燃性ガス溶解率を測定し、測定した前記可燃性ガス溶解率を予め設定された目標値に維持する、

培養装置の制御方法。