(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)特許出願公開番号
特開2010-201330
(P2010-201330A)
(43)公開日　平成22年9月16日(2010.9.16)

(51)Int.Cl.		F I			テーマコード（参考）
B01J 19/00	(2006.01)	B01J	19/00	A	4G035
B01F 1/00	(2006.01)	B01F	1/00	A	4G075
B01J 3/00	(2006.01)	B01J	3/00	A	4G146
C01B 31/20	(2006.01)	C01B	31/20	Z	

審査請求 未請求　請求項の数 11　ＯＬ　（全 25 頁）

(21)出願番号　特願2009-49067(P2009-49067)
(22)出願日　平成21年3月3日(2009.3.3)

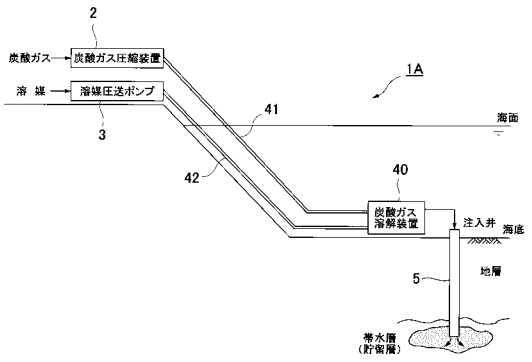
(71)出願人　000003687
東京電力株式会社
東京都千代田区内幸町１丁目１番３号
(74)代理人　100104927
弁理士　和泉　久志
(72)発明者　関根　裕治
東京都千代田区内幸町１丁目１番３号　東京電力株式会社内
(72)発明者　岸　裕和
東京都千代田区内幸町１丁目１番３号　東京電力株式会社内
(72)発明者　増田　雅之
東京都千代田区内幸町１丁目１番３号　東京電力株式会社内

Ｆターム(参考)　4G035 AA01

最終頁に続く

(54)【発明の名称】炭酸ガスの地中貯留システム

(57)【要約】
【課題】炭酸ガスを効率よく溶媒に溶解させるとともに、輸送コストの増加を抑える。
【解決手段】炭酸ガスを液体又は超臨界状態まで圧縮する炭酸ガス圧縮装置２と、溶媒を圧縮・搬送する圧送ポンプ３とを設け、主流管路を流れる溶媒のせん断力によって炭酸ガスを細泡化しながら混入させる細泡化装置７と、細泡化装置７の後段に設置され、溶媒に炭酸ガスを溶解させて炭酸ガス溶解水とする溶解槽４とからなる炭酸ガス溶解装置４０を設置し、生成された炭酸ガス溶解水を地中の帯水層に圧入する地表面から帯水層まで貫通した注入井５を設置して構成され、炭酸ガス圧縮装置２及び溶媒圧送ポンプ３が帯水層から離れた陸上に配置されるとともに、炭酸ガス溶解装置４０が注入井５の近傍に配置され、これら炭酸ガス圧縮装置２及び溶媒圧送ポンプ３と炭酸ガス溶解装置４０とがそれぞれパイプライン４１、４２で接続されている。
【選択図】図１



【特許請求の範囲】
【請求項１】
炭酸ガスを溶媒に溶解させた状態で地中の帯水層に圧入し、貯留・隔離するための炭酸ガスの地中貯留システムであって、
炭酸ガスを液体又は超臨界状態まで圧縮する炭酸ガス圧縮装置と、海水及び／又は水からなる溶媒を圧縮・搬送する圧送ポンプとを設け、
前記溶媒を所定の高流速で流した主流管路の内部に前記炭酸ガスの供給管路を配設するか、前記主流管路を外嵌する前記炭酸ガスの供給管路を配設し、前記溶媒と炭酸ガスとを仕切る管路壁面に細孔を形成し、前記主流管路を流れる溶媒のせん断力によって前記炭酸ガスを細泡化しながら混入させる高圧用炭酸ガス細泡化装置と、前記高圧用炭酸ガス細泡化装置の後段に設置され、密閉された容器の下部に、前記細泡化された炭酸ガスが混入された溶媒の注入口が形成されるとともに、前記容器の上部に前記溶媒に前記炭酸ガスを溶解させた炭酸ガス溶解水が吐出される吐出口が形成され、前記容器内に粒状の充填材が充填されて構成された１又は複数の溶解槽とを含む炭酸ガス溶解装置を設置し、
前記溶解槽から吐出された炭酸ガス溶解水を地中の帯水層に圧入するために地表面から前記帯水層まで貫通した注入井を設置して構成され、
前記炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプを前記帯水層から離れた陸上に配置するとともに、前記炭酸ガス溶解装置を前記注入井の近傍に配置し、これら炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプと炭酸ガス溶解装置とをそれぞれパイプラインで接続したことを特徴とする炭酸ガスの地中貯留システム。
【請求項２】
前記炭酸ガス溶解装置には、前記溶解槽から注入井に至る流路の途中に、送給された炭酸ガス溶解水の全量に対して、未溶解の炭酸ガスと、炭酸ガスが飽和濃度で溶解した状態の炭酸ガス溶解水とを分離する分離槽と、分離された前記未溶解炭酸ガスを前記炭酸ガス圧縮装置と溶解槽との中間流路に戻す炭酸ガス圧送装置とが含まれる請求項１記載の炭酸ガスの地中貯留システム。
【請求項３】
炭酸ガスを溶媒に溶解させた状態で地中の帯水層に圧入し、貯留・隔離するための炭酸ガスの地中貯留システムであって、
炭酸ガスを液体又は超臨界状態まで圧縮する炭酸ガス圧縮装置と、海水及び／又は水からなる溶媒を圧縮・搬送する圧送ポンプとを設け、
密閉された容器の下部に、前記炭酸ガス圧縮装置から送られた炭酸ガスが注入される炭酸ガス注入口と、前記溶媒圧送ポンプから送られた溶媒が注入される溶媒注入口とが形成されるとともに、前記容器の上部に前記溶媒に前記炭酸ガスを溶解させた炭酸ガス溶解水が吐出される吐出口が形成され、前記容器内に粒状の充填材が充填されて構成された１又は複数の溶解槽と、前記溶解槽の後段に設置され、送給された炭酸ガス溶解水の全量に対して、未溶解の炭酸ガスと炭酸ガスが飽和濃度で溶解した状態の炭酸ガス溶解水とを分離する分離槽と、該分離槽で分離された炭酸ガスを圧送する炭酸ガス圧送装置と、この炭酸ガス圧送装置の後段に、前記炭酸ガス溶解水を所定の高流速で流した主流管路の内部に、前記炭酸ガス圧送装置から圧送された炭酸ガスの供給管路を配設するか、前記主流管路を外嵌するように前記炭酸ガス圧送装置から圧送された炭酸ガスの供給管路を配設し、前記炭酸ガス溶解水と炭酸ガスとを仕切る管路壁面に細孔を形成し、前記主流管路を流れる炭酸ガス溶解水によるせん断力によって前記炭酸ガスを細泡化しながら混入させる高圧用炭酸ガス細泡化装置とを含む炭酸ガス溶解装置を設置し、
生成された炭酸ガス溶解水を地中の帯水層に圧入するために地表面から前記帯水層まで貫通した注入井を設置して構成され、
前記炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプを前記帯水層から離れた陸上に配置するとともに、前記炭酸ガス溶解装置を前記注入井の近傍に配置し、これら炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプと炭酸ガス溶解装置とをそれぞれパイプラインで接続したことを特徴とする炭酸ガスの地中貯留システム。

【請求項４】
前記炭酸ガス圧送装置と前記供給管路との間に、前記炭酸ガス圧送装置から圧送された炭酸ガスを分岐する分岐装置が配置されるとともに、前記分岐装置にて前記炭酸ガスのうち前記細泡化装置から前記帯水層までの経路で溶解可能な量を分岐して前記供給管路に圧送し、前記炭酸ガスのうち残りの量を前記溶解槽に戻すようにしてある請求項３記載の炭酸ガスの地中貯留システム。
【請求項５】
前記帯水層から離れた陸上に配置された溶媒圧送ポンプは低圧用とされ、前記炭酸ガス溶解装置近傍の前段に高圧用の増圧ポンプを配置した請求項１～４いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システム。
【請求項６】
前記溶媒圧送ポンプを前記帯水層から離れた陸上に配置することに代えて、前記炭酸ガス溶解装置の近傍に設置し、前記炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプと炭酸ガス溶解装置とをそれぞれパイプラインで接続した請求項１～４いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システム。
【請求項７】
前記帯水層が海底面下の地層に位置する場合において、前記帯水層近傍の海洋上に海上プラットフォームを構築し、この海上プラットフォームに少なくとも前記炭酸ガス溶解装置を配置してある請求項１～６いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システム。
【請求項８】
下式(1)によって求められるウェーバー数(Ｗｅ)が１０以上となるように、前記溶媒の流速、前記細孔の孔径が設定されている請求項１～７いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システム。
【数１】

$$W_e = \frac{\rho_w V^2 d}{\sigma} \qquad \cdots (1)$$

ここに、ρ_w：水密度（kg/m³）
Ｖ：パイプ内水流速（m/s）
ｄ：細孔径（m）
σ：界面張力（N/m）

【請求項９】
前記粒状の充填材として、砂、砕石、ラシヒリング、サドルの内のいずれか又は組み合わせとする請求項１～８いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システム。
【請求項１０】
前記粒状の充填材は、充填材の種類ごとに、炭酸ガス及び溶媒の流量及び前記溶解槽の形状に基づいて定められる炭酸ガス溶解量と前記溶解槽における圧力損失とから決定される最適な平均粒径とする請求項１～９いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システム。
【請求項１１】
前記溶解槽において、前記充填材の充填領域内に、流路を仕切るように多数の開孔が形成された整流板が１又は複数設けられている請求項１～１０いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システム。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、地球温暖化の原因とされる温室効果ガスの一つである炭酸ガスの削減に資するため、炭酸ガスの大規模な排出源等から分離・回収した炭酸ガスを、地中に圧入し、長期的かつ安定的に貯留・隔離するための炭酸ガスの地中貯留システムに関する。

【背景技術】
【０００２】
従来より、排出ガスから分離・回収した炭酸ガスを、地中の枯渇した油田やガス田あるいは帯水層に貯留する際、下記非特許文献１，２に記載されるように、前記炭酸ガスを液体又は超臨界状態に圧縮し、注入井より地中に圧入することが試みられている。一般に、この炭酸ガスは深度800ｍ以上の貯留層に圧入することにより、炭酸ガスの超臨界状態（二酸化炭素の場合、温度31℃以上、圧力7.4MPa以上）を維持し、炭酸ガスの密度を大きくして効率的な貯留を図っている。
【０００３】
しかしながら、超臨界状態の炭酸ガスは周辺地下水より比重が軽く、浮力で上方へ移動するため、炭酸ガスを貯留する帯水層として、形状がドーム状とされ、上方中央部に浮上した炭酸ガスがトラップされるようなシール層（キャップロック）が形成されていることが必要であった。ところが、一般的に油田やガス田では、貯留層が前記シール層とドーム形状との組合せによるトラップ構造を有することが確認されているが、自然界において係る条件に適合した帯水層を見つけることが課題となっている。このため適用できる条件を拡げ、炭酸ガスが浮上せず長期的かつ安定的に地中に貯留・隔離させる方法が望まれていた。
【０００４】
一方、炭酸ガスの地中への圧入方法としては、地表面上から地中に貫通したパイプの上部から、CO_2昇圧装置で昇圧された二酸化炭素と、ポンプで昇圧された水とをパイプ内で合流混合しつつ圧入する下記特許文献１記載の方法、ガス田又は油田の地下層内に二酸化炭素をミキサーによって水に溶解させた状態で貯蔵する下記特許文献２記載の方法、炭酸ガスを含む気体をマイクロバブル化して水または海水中に分散させ、マイクロバブル化した炭酸ガスを地底に隔離する下記特許文献３記載の方法などがある。これらいずれの方法も、帯水層に海水又は水の溶媒と炭酸ガスとを圧入し、溶媒に炭酸ガスを溶解させて帯水層に貯留させるようにしている。
【０００５】
しかしながら、下記特許文献１～３記載の方法では、溶媒に炭酸ガスを飽和濃度レベルの高い濃度で溶解させることにより、周辺地下水より比重を重くした状態とし、帯水層に炭酸ガスを長期的かつ安定的に貯留・隔離させるというものであるが、溶媒が水だけであったり、溶解手段が「合流」、「ミキサー」、「マイクロバブル発生装置」では、溶解条件によっては、炭酸ガスの溶解濃度レベルが不十分であると考えられ、周辺地下水より比重を重くすることができないおそれがあった。また、溶解する位置によっては、炭酸ガスの溶解量の確認が出来ないおそれもある。
【０００６】
そこで本出願人は、下記特許文献４において、炭酸ガスを溶媒に溶解させた状態で地中の帯水層に圧入し、貯留・隔離するための炭酸ガスの地中貯留システムであって、炭酸ガスを液体又は超臨界状態まで圧縮する炭酸ガス圧縮装置と、海水及び／又は水からなる溶媒を圧縮・搬送する圧送ポンプと、前記圧縮された炭酸ガス及び溶媒が注入され、前記溶媒に前記炭酸ガスを溶解させて炭酸ガス溶解水とする１又は複数の溶解槽と、生成された炭酸ガス溶解水を地中の帯水層に圧入する地表面から前記帯水層まで貫通した注入井とから構成され、前記溶解槽は、密閉された容器の下部に、前記炭酸ガス圧縮装置から送られた炭酸ガスが注入される炭酸ガス注入口と、前記溶媒圧送ポンプから送られた溶媒が注入される溶媒注入口とが形成されるとともに、前記容器の上部に前記炭酸ガス溶解水が吐出される吐出口が形成され、前記容器内に粒状の充填材が充填されて構成される炭酸ガスの地中貯留システムを提案した。
【０００７】
下記特許文献４によれば、前記溶解槽において飽和濃度レベル付近の高い濃度で炭酸ガスを溶媒に溶解させることが可能になり、これにより炭酸ガス溶解水の比重が周辺地下水より大きくなるため、炭酸ガスを帯水層に長期的かつ安定的に貯留・隔離させることがで

きるようになるなどの効果が発揮されるようになった。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００８】
【特許文献１】特開平６－１７０２１５号公報
【特許文献２】特開平３－２５８３４０号公報
【特許文献３】特開２００４－５０１６７号公報
【特許文献４】特開２００８－２３８０５４号公報
【非特許文献】
【０００９】
【非特許文献１】IPCC、“IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage”、Chapter 5、2005年、Cambridge University Press
【非特許文献２】大関真一、嘉納康二、”「二酸化炭素地中貯留」事業の実現にむけて～石油・天然ガス上流技術への期待～”、「石油・天然ガスレビュー」、独立行政法人　石油天然ガス・金属鉱物資源機構、2006.7、vol.40 No.4、p57-70
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【００１０】
しかしながら、上記特許文献４における溶解槽の場合は、炭酸ガスの十分な溶解を促すとともに、大量の炭酸ガスを効率的に処理するには、溶解槽の容積が大きくなる問題、および溶解槽中で滞留時間を確保するために溶解槽の流路長、すなわち溶解槽の高さ寸法が長くなる問題などがある。
【００１１】
上記問題を解決するために、本発明者等は鋭意研究を重ねた結果、炭酸ガスを細泡化して溶媒との接触面積の増大を図ることが有効であるとの知見を得た。　細泡化装置としては、例えば上記マイクロバブル発生装置などが開発されているが、炭酸ガスの溶解は、８ＭＰａ以上の高圧状態下（８～２０ＭＰａ）で行われるため、マイクロバブル発生装置の内、圧力開放を伴うものは原理的に採用することができない。また、エジェクタ方式、旋回流方式のものは高圧状態下で実証されておらず、また高圧状態に適用するためには機構が複雑であり、信頼性および耐久性を実証されていないなどの問題がある。
【００１２】
一方、上記特許文献４記載の地中貯留システムにおいて、炭酸ガスの排出源と帯水層とが近距離にある場合は問題とはならないが、例えば帯水層が沿岸部から離れた海底面下の地層に位置する場合、溶解槽を炭酸ガスの排出源近傍に設置したのでは、溶解槽で生成された炭酸ガス溶解水を注入井まで輸送する際、パイプライン等での長距離輸送による摩擦損失の増大、高圧ガスの取扱いを受けることによるパイプライン設備の高強度化等により、輸送コストが増加し、経済性が悪化する可能性がある。
【００１３】
そこで本発明の第１の課題として、飽和濃度レベル付近の高い濃度で炭酸ガスを溶媒（海水又は水）に溶解させた状態で、炭酸ガス溶解水を帯水層に圧入し、貯留・隔離するための炭酸ガスの地中貯留システムを提供することにある。
【００１４】
また第２の課題として、炭酸ガスを効率よく溶媒に溶解させるとともに、輸送コストの増加を抑えた炭酸ガスの地中貯留システムを提供することにある。
【課題を解決するための手段】
【００１５】
前記課題を解決するために請求項１に係る本発明として、炭酸ガスを溶媒に溶解させた状態で地中の帯水層に圧入し、貯留・隔離するための炭酸ガスの地中貯留システムであって、
炭酸ガスを液体又は超臨界状態まで圧縮する炭酸ガス圧縮装置と、海水及び／又は水か

らなる溶媒を圧縮・搬送する圧送ポンプとを設け、
前記溶媒を所定の高流速で流した主流管路の内部に前記炭酸ガスの供給管路を配設するか、前記主流管路を外嵌する前記炭酸ガスの供給管路を配設し、前記溶媒と炭酸ガスとを仕切る管路壁面に細孔を形成し、前記主流管路を流れる溶媒のせん断力によって前記炭酸ガスを細泡化しながら混入させる高圧用炭酸ガス細泡化装置と、前記高圧用炭酸ガス細泡化装置の後段に設置され、密閉された容器の下部に、前記細泡化された炭酸ガスが混入された溶媒の注入口が形成されるとともに、前記容器の上部に前記溶媒に前記炭酸ガスを溶解させた炭酸ガス溶解水が吐出される吐出口が形成され、前記容器内に粒状の充填材が充填されて構成された１又は複数の溶解槽とを含む炭酸ガス溶解装置を設置し、
前記溶解槽から吐出された炭酸ガス溶解水を地中の帯水層に圧入するために地表面から前記帯水層まで貫通した注入井を設置して構成され、
前記炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプを前記帯水層から離れた陸上に配置するとともに、前記炭酸ガス溶解装置を前記注入井の近傍に配置し、これら炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプと炭酸ガス溶解装置とをそれぞれパイプラインで接続したことを特徴とする炭酸ガスの地中貯留システムが提供される。

【００１６】

上記請求項１記載の発明は、本発明に係る地中貯留システムのケース１であり、且つこれに使用される炭酸ガス溶解装置の第１構成パターンについて規定したものである。具体的に、地中貯留システムのケース１では、炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプを帯水層から離れた陸上に配置するとともに、炭酸ガス溶解装置を注入井の近傍に配置し、これら炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプと炭酸ガス溶解装置とをそれぞれパイプラインで接続する構成とした。

【００１７】

また、これに使用される炭酸ガス溶解装置の第１構成パターンとしては、前記溶媒を所定の高流速で流した主流管路の内部に前記炭酸ガスの供給管路を配設するか、前記主流管路を外嵌する前記炭酸ガスの供給管路を配設し、前記溶媒と炭酸ガスとを仕切る管路壁面に細孔を形成し、前記主流管路を流れる溶媒のせん断力によって前記炭酸ガスを細泡化しながら混入させる高圧用炭酸ガス細泡化装置と、前記高圧用炭酸ガス細泡化装置の後段に設置され、密閉された容器の下部に、前記細泡化された炭酸ガスが混入された溶媒の注入口が形成されるとともに、前記容器の上部に前記溶媒に前記炭酸ガスを溶解させた炭酸ガス溶解水が吐出される吐出口が形成され、前記容器内に粒状の充填材が充填されて構成された１又は複数の溶解槽とが含まれる構成とした。なお、この炭酸ガス溶解装置では、炭酸ガス細泡化装置と溶解槽の基数を適切に選定することにより、一定量の細泡化した未溶解炭酸ガスを注入井に送ることが可能である。

【００１８】

上記炭酸ガス溶解装置では、先ず溶解槽は、密閉容器内に粒状の充填材が充填されて構成されることにより、この溶解槽において飽和濃度レベル付近の高い濃度で炭酸ガス（液体又は超臨界状態）を溶媒（海水又は水）に溶解させることが可能となり、これにより炭酸ガス溶解水の比重が周辺地下水より大きくなるため、炭酸ガスを帯水層に長期的かつ安定的に貯留・隔離させることができるようになる。

【００１９】

また、前記溶解槽の前段に、高圧用炭酸ガス細泡化装置を設置することにより、後述の実施例２－１に示されるように、溶解槽との相乗効果により高い溶解効率を実現することが可能となる。その結果、溶解槽のコンパクト化が可能になるとともに、高い処理能力を有するようになる。

【００２０】

一方、ケース１に係る地中貯留システムでは、帯水層が沿岸部から離れた海底面下の地層に位置する場合でも、前記炭酸ガス溶解装置で生成された炭酸ガス溶解水をパイプライン等で長距離輸送する必要がなくなるため、輸送時の摩擦損失等によって輸送コストが増大し、経済性が悪化する問題が解決できる。また、炭酸ガス溶解水を輸送するパイプライ

ンは高圧ガスの取扱いを受けるが、溶媒用パイプラインはこの取扱いを受けないため、輸送コストの増大を抑制できる。

【００２１】

加えて、炭酸ガス溶解装置が注入井の近傍に設置されるとともに、前記溶媒圧送ポンプと炭酸ガス溶解装置との間がパイプラインで接続されているため、帯水層が沿岸部から離れた海底面下の地層に位置する場合、海底面に設置される炭酸ガス溶解装置及びパイプラインの温度が１０℃前後の低温条件となり、炭酸ガスの溶媒への溶解上有利となる。すなわち、炭酸ガスの溶媒への溶解量は、低温の方が増加する傾向にあることが実験により明らかとなり、炭酸ガス溶解装置及びパイプラインが設置される海底付近の海水温が１０℃前後の低温で安定しているため、前記炭酸ガス溶解装置において炭酸ガスを効率よく溶媒に溶解させることができるようになる。

【００２２】

請求項２に係る本発明として、前記炭酸ガス溶解装置には、前記溶解槽から注入井に至る流路の途中に、送給された炭酸ガス溶解水の全量に対して、未溶解の炭酸ガスと、炭酸ガスが飽和濃度で溶解した状態の炭酸ガス溶解水とを分離する分離槽と、分離された前記未溶解炭酸ガスを前記炭酸ガス圧縮装置と溶解槽との中間流路に戻す炭酸ガス圧送装置とが含まれる請求項１記載の炭酸ガスの地中貯留システムが提供される。

【００２３】

上記請求項２記載の発明は、前記炭酸ガス溶解装置の第１構成パターンの変形例として分離槽を組み込んだものである。これにより、前記溶解槽で生成した炭酸ガス溶解水の全量を対象として、未溶解炭酸ガス分を前記分離槽において分離し、この未溶解の炭酸ガス分を溶解槽にリターンさせることにより、確実に飽和濃度レベルで炭酸ガスを溶媒（海水又は水）に溶解させた状態で地中に圧入することが可能となる。この炭酸ガス溶解水は、帯水層の周辺地下水より大きな比重を持つようになり、帯水層に注入しても炭酸ガスが浮上せず、長期的かつ安定的に帯水層に貯留・隔離させることができるようになる。

【００２４】

請求項３に係る本発明として、炭酸ガスを溶媒に溶解させた状態で地中の帯水層に圧入し、貯留・隔離するための炭酸ガスの地中貯留システムであって、

炭酸ガスを液体又は超臨界状態まで圧縮する炭酸ガス圧縮装置と、海水及び／又は水からなる溶媒を圧縮・搬送する圧送ポンプとを設け、

密閉された容器の下部に、前記炭酸ガス圧縮装置から送られた炭酸ガスが注入される炭酸ガス注入口と、前記溶媒圧送ポンプから送られた溶媒が注入される溶媒注入口とが形成されるとともに、前記容器の上部に前記溶媒に前記炭酸ガスを溶解させた炭酸ガス溶解水が吐出される吐出口が形成され、前記容器内に粒状の充填材が充填されて構成された１又は複数の溶解槽と、前記溶解槽の後段に設置され、送給された炭酸ガス溶解水の全量に対して、未溶解の炭酸ガスと炭酸ガスが飽和濃度で溶解した状態の炭酸ガス溶解水とを分離する分離槽と、該分離槽で分離された炭酸ガスを圧送する炭酸ガス圧送装置と、この炭酸ガス圧送装置の後段に、前記炭酸ガス溶解水を所定の高流速で流した主流管路の内部に、前記炭酸ガス圧送装置から圧送された炭酸ガスの供給管路を配設するか、前記主流管路を外嵌するように前記炭酸ガス圧送装置から圧送された炭酸ガスの供給管路を配設し、前記炭酸ガス溶解水と炭酸ガスとを仕切る管路壁面に細孔を形成し、前記主流管路を流れる炭酸ガス溶解水によるせん断力によって前記炭酸ガスを細泡化しながら混入させる高圧用炭酸ガス細泡化装置とを含む炭酸ガス溶解装置を設置し、

生成された炭酸ガス溶解水を地中の帯水層に圧入するために地表面から前記帯水層まで貫通した注入井を設置して構成され、

前記炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプを前記帯水層から離れた陸上に配置するとともに、前記炭酸ガス溶解装置を前記注入井の近傍に配置し、これら炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプと炭酸ガス溶解装置とをそれぞれパイプラインで接続したことを特徴とする炭酸ガスの地中貯留システムが提供される。

【００２５】

上記請求項３記載の発明は、ケース１に係る地中貯留システムに使用される炭酸ガス溶解装置の第２構成パターンについて規定したものである。炭酸ガス溶解装置の第２構成パターンでは、高圧用炭酸ガス細泡化装置を溶解槽から注入井に至る管路中に組み込んである。

【００２６】

請求項４に係る本発明として、前記炭酸ガス圧送装置と前記供給管路との間に、前記炭酸ガス圧送装置から圧送された炭酸ガスを分岐する分岐装置が配置されるとともに、前記分岐装置にて前記炭酸ガスのうち前記細泡化装置から前記帯水層までの経路で溶解可能な量を分岐して前記供給管路に圧送し、前記炭酸ガスのうち残りの量を前記溶解槽に戻すようにしてある請求項３記載の炭酸ガスの地中貯留システムが提供される。

【００２７】

上記請求項４記載の発明は、炭酸ガス溶解装置の第２構成パターンに対して、未溶解の炭酸ガス分を溶解槽にリターンさせることにより、確実に飽和濃度レベルで炭酸ガスを溶媒（海水又は水）に溶解させた状態で地中に圧入することを可能としたものである。なお、この炭酸ガス溶解装置では、分岐装置からの細泡化装置への未溶解炭酸ガス圧送量を適切に選定することにより、一定量の細泡化した未溶解炭酸ガスを注入井に送ることが可能である。

【００２８】

請求項５に係る本発明として、前記帯水層から離れた陸上に配置された溶媒圧送ポンプは低圧用とされ、前記炭酸ガス溶解装置近傍の前段に高圧用の増圧ポンプを配置した請求項１～４いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システムが提供される。

【００２９】

上記請求項５記載の発明は、本発明に係る地中貯留システムのケース２について規定したものである。具体的には、帯水層から離れた陸上に設置された溶媒圧縮ポンプを低圧用とし、炭酸ガス溶解装置近傍の前段に高圧用の増圧ポンプを配置したものである。これにより、溶媒用パイプラインとして炭酸ガス溶解装置近傍まで低圧用のパイプラインが使用可能であり、設備コストが低減できる。なお、ケース２に係る地中貯留システムにおいても、前記炭酸ガス溶解装置の第１構成パターン及び第２構成パターンのいずれも使用可能である。

【００３０】

請求項６に係る本発明として、前記溶媒圧送ポンプを前記帯水層から離れた陸上に配置することに代えて、前記炭酸ガス溶解装置の近傍に設置し、前記炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプと炭酸ガス溶解装置とをそれぞれパイプラインで接続した請求項１～４いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システムが提供される。

【００３１】

上記請求項６記載の発明は、本発明に係る地中貯留システムのケース３である。具体的には、炭酸ガス圧縮装置を帯水層から離れた陸上に設置するとともに、炭酸ガス溶解装置を注入井の近傍に配置し、且つ溶媒圧送ポンプを炭酸ガス溶解装置の近傍に配置して、これら炭酸ガス圧縮装置及び溶媒圧送ポンプと炭酸ガス溶解装置とをそれぞれパイプラインで接続したものである。これにより、溶媒用パイプラインが短縮できるとともに、帯水層が沿岸部から離れた海底面下の地層に位置する場合に、溶媒圧送ポンプ周辺の低温で安定した海水を取水して溶媒とすることにより、炭酸ガス溶解装置において炭酸ガスを効率よく溶媒に溶解させることができるようになる。なお、本地中貯留システムのケース３においても、前記炭酸ガス溶解装置の第１構成パターン及び第２構成パターンのいずれも使用可能である。

【００３２】

請求項７に係る本発明として、前記帯水層が海底面下の地層に位置する場合において、前記帯水層近傍の海洋上に海上プラットフォームを構築し、この海上プラットフォームに少なくとも前記炭酸ガス溶解装置を配置してある請求項１～６いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システムが提供される。

【００３３】
上記請求項７記載の発明は、本発明に係る地中貯留システムのケース４である。ケース４では、帯水層が海底面下の地層に位置する場合において、帯水層近傍の海洋上に海上プラットフォームを構築し、この海上プラットフォームに少なくとも炭酸ガス溶解装置を配置した。これにより、炭酸ガス溶解装置の維持管理が容易化できる。なお、本地中貯留システムのケース４においても、前記炭酸ガス溶解装置の第１構成パターン及び第２構成パターンのいずれも使用可能である。
【００３４】
請求項８に係る本発明として、下式(1)によって求められるウェーバー数(Ｗｅ)が１０以上となるように、前記溶媒の流速、前記細孔の孔径が設定されている請求項１～７いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システムが提供される。
【数１】

$$W_e = \frac{\rho_w V^2 d}{\sigma} \qquad \cdots (1)$$

ここに、ρ_w：水密度（kg/m³）
Ｖ：パイプ内水流速（m/s）
ｄ：細孔径（m）
σ：界面張力（N/m）

【００３５】
上記請求項８記載の発明では、後述の実施例２－３に従い、溶媒の流速、前記細孔の孔径の設定に際して、ウェーバー数(Ｗｅ)が１０以上とすることにより、効率的かつ高い処理能力で細泡化し、高い溶解効率をもたらすことが可能となる。
【００３６】
請求項９に係る本発明として、前記粒状の充填材として、砂、砕石、ラシヒリング、サドルの内のいずれか又は組み合わせとする請求項１～８いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システムが提供される。
【００３７】
上記請求項９記載の発明では、溶解槽に充填される粒状充填材として、例えば砂、砕石、ラシヒリング、サドルの内のいずれか又は組み合わせて用いるものである。
【００３８】
請求項１０に係る本発明として、前記粒状の充填材は、充填材の種類ごとに、炭酸ガス及び溶媒の流量及び前記溶解槽の形状に基づいて定められる炭酸ガス溶解量と前記溶解槽における圧力損失とから決定される最適な平均粒径とする請求項１～９いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システムが提供される。
【００３９】
上記請求項１０記載の発明では、粒状の充填材は、充填材の種類ごとに、炭酸ガス及び溶媒の流量及び前記溶解槽の形状に基づいて定められる炭酸ガス溶解量と前記溶解槽における圧力損失とから決定される最適な平均粒径のものを用いるものであり、平均粒径が上記の最適平均粒径であると、溶解効率に優れるようになる。
【００４０】
請求項１１に係る本発明として、前記溶解槽において、前記充填材の充填領域内に、流路を仕切るように多数の開孔が形成された整流板が１又は複数設けられている請求項１～１０いずれかに記載の炭酸ガスの地中貯留システムが提供される。
【００４１】
上記請求項１１記載の発明では、前記整流板を設けることにより、前記溶解槽における炭酸ガスの溶解が促進されるようになる。
【発明の効果】

【００４２】
以上詳説のとおり本発明によれば、飽和濃度レベル付近の高い濃度で炭酸ガスを溶媒（海水又は水）に溶解させた状態で、炭酸ガス溶解水を帯水層に圧入し、貯留・隔離するための炭酸ガスの地中貯留システムが提供できる。さらに、炭酸ガスを効率よく溶媒に溶解することができ、輸送コストの増加を抑えた炭酸ガスの地中貯留システムが提供できる。
【図面の簡単な説明】
【００４３】
【図１】本発明のケース１に係る地中貯留システム１Ａの概念図である。
【図２】第１構成パターンに係る炭酸ガス溶解装置４０Ａの概念図（その１）である。
【図３】第１構成パターンに係る炭酸ガス溶解装置４０Ａの概念図（その２）である。
【図４】その溶解槽４の縦断面図である。
【図５】第１形態例に係る細泡化装置７Ａの縦断面図である。
【図６】第２形態例（その１）に係る細泡化装置７Ｂの縦断面図である。
【図７】第２形態例（その２）に係る細泡化装置７Ｃの縦断面図である。
【図８】分離槽６の縦断面図である。
【図９】第２構成パターンに係る炭酸ガス溶解装置４０Ｂの概念図である。
【図１０】その溶解槽４の縦断面図である。
【図１１】ケース２に係る地中貯留システム１Ｂの概念図である。
【図１２】ケース３に係る地中貯留システム１Ｃの概念図である。
【図１３】ケース４に係る地中貯留システム１Ｄの概念図である。
【図１４】ケース５に係る地中貯留システム１Ｅの概念図である。
【図１５】実験装置の概念図である。
【図１６】実施例１における温度29℃における粒度並びに塩水流量の条件を変えたときの炭酸ガス／塩水重量比と炭酸ガス溶解量との関係を示すグラフである。
【図１７】実施例１における温度33℃における粒度並びに塩水流量の条件を変えたときの炭酸ガス／塩水重量比と炭酸ガス溶解量との関係を示すグラフである。
【図１８】実施例１における温度25℃における圧力並びに塩水流量の条件を変えたときの炭酸ガス／塩水重量比と炭酸ガス溶解量との関係を示すグラフである。
【図１９】実施例１における温度29℃における圧力並びに塩水流量の条件を変えたときの炭酸ガス／塩水重量比と炭酸ガス溶解量との関係を示すグラフである。
【図２０】実施例１における温度33℃における圧力並びに塩水流量の条件を変えたときの炭酸ガス／塩水重量比と炭酸ガス溶解量との関係を示すグラフである。
【図２１】実施例１における温度と炭酸ガス溶解量との関係を示すグラフである。
【図２２】実施例１における充填材の平均粒径と炭酸ガス溶解量との関係を示すグラフである。
【図２３】実施例２－１における細泡化装置７での溶解効果及び溶解槽４での溶解効果の定量的に検証実験結果を示すグラフである。
【図２４】実施例２－２における総括容量係数$K_x a$と水の断面モル流速との関係を表すグラフ（その１）である。
【図２５】実施例２－２における総括容量係数$K_x a$と水の断面モル流速との関係を表すグラフ（その２）である。
【図２６】実施例２－２における総括容量係数$K_x a$と水の断面モル流速との関係を表すグラフ（その３）である。
【図２７】実施例２－３における総括容量係数比$K_x a(B)／K_x a(NB)$とウェーバー数Ｗｅとの関係を表すグラフである。
【発明を実施するための形態】
【００４４】
以下、本発明の実施の形態について図面を参照しながら詳述する。
【００４５】
本発明に係る炭酸ガスの地中貯留システム１は、炭酸ガスの大規模な排出源等から分離

・回収した炭酸ガスを、飽和濃度レベル付近の高い濃度で溶媒（海水及び／又は水）に溶解させた状態で地中の帯水層に封じ込め、長期的かつ安定的に貯留・隔離するためのものである。

【００４６】

特に本発明では、帯水層が沿岸部から離れた海底面下の地層に位置する場合、炭酸ガスの排出源と帯水層直上の地表面とが長距離の場合などにおいて、輸送コスト上及び炭酸ガスの溶解上有利な地中貯留システムを提供するものである。

【００４７】

このように本発明では、溶媒に炭酸ガスを飽和濃度レベルの高い濃度で溶解させることにより、周辺地下水より比重を重くした状態とし、帯水層に炭酸ガスを長期的かつ安定的に貯留・隔離させるというものであるため、炭酸ガスの溶解量は、溶媒１ｍ^{3}当たり４０～５０kg、好ましくは４５～５０kgを目標とする。

【００４８】

また、系内の圧力は、炭酸ガスが液体又は超臨界状態を維持した状態で溶解が行われるようにするとともに、炭酸ガス溶解水を地下の帯水層に圧入するための帯水層内の注入圧力と配管系の圧力損失とを考慮して、８ＭＰａ以上の高圧状態を維持するようにすることが望ましい。なお、一般的に帯水層内においては５ＭＰａ以上の地下水圧を確保できれば効率的に貯留が可能である。

【００４９】

本発明に係る地中貯留システム１は、適用される現地サイトの条件等により、以下のケース１～ケース４に分類できる。

【００５０】

〔ケース１〕

ケース１に係る地中貯留システム１Ａは、図１に示されるように、炭酸ガスを液体又は超臨界状態まで圧縮する炭酸ガス圧縮装置２と、海水及び／又は水からなる溶媒を圧縮・搬送する圧送ポンプ３と、前記圧縮された炭酸ガス及び溶媒が注入され、前記溶媒に前記炭酸ガスを溶解させて炭酸ガス溶解水とする炭酸ガス溶解装置４０と、生成された炭酸ガス溶解水を地中の帯水層に圧入する地表面から前記帯水層まで貫通した注入井５とから主に構成される。

【００５１】

本ケース１では、前記炭酸ガス圧縮装置２及び溶媒圧送ポンプ３が帯水層から離れた陸上に配置されるとともに、前記炭酸ガス溶解装置４０が注入井５近傍に設置されている。さらに、前記炭酸ガス圧縮装置２と炭酸ガス溶解装置４０とが炭酸ガス用パイプライン４１で接続されるとともに、前記溶媒圧送ポンプ３と炭酸ガス溶解装置４０とが溶媒用パイプライン４２で接続されている。図１は、帯水層の貯留サイトが海底面下の地層に位置する場合についての図示であり、この場合には、前記炭酸ガス溶解装置４０は注入井５近傍の海底面に設置されるとともに、炭酸ガス用パイプライン４１及び溶媒用パイプライン４２は海底面に配設されて炭酸ガス溶解装置４０に接続されている。

【００５２】

前記炭酸ガス溶解装置４０は、以下の第１構成パターン４０Ａ又は第２構成パターン４０Ｂのいずれかとすることができる。

【００５３】

（第１構成パターンに係る炭酸ガス溶解装置４０Ａ）

第１構成パターンに係る炭酸ガス溶解装置４０Ａは、図２に示されるように、前記液体又は超臨界状態まで圧縮された炭酸ガスを細泡化して溶媒中に混入させる高圧用炭酸ガス細泡化装置７（以下、単に細泡化装置という）と、該細泡化装置７によって細泡化された炭酸ガスが混入された溶媒が注入され、前記溶媒に前記炭酸ガスを溶解させて炭酸ガス溶解水とする溶解槽４とが複数並設されて構成される。なお、本形態例では、前記溶解槽４及び細泡化装置７は、炭酸ガスの溶解を促進するため複数設置したが、処理能力に応じた数とすればよい。

【００５４】
前記細泡化装置７は、図５～図７に示されるように、液体又は超臨界状態まで圧縮した炭酸ガスを細泡化して溶媒中に混入させることにより、接触面積の増大化により炭酸ガスの溶解を促進させるためのものである。この細泡化装置７は、単独で使用されるか、好ましくは後述の実施例のように、溶解槽４と組み合わせて使用される。前記細泡化装置７は、以下の第１形態例７Ａ又は第２形態例７Ｂ、７Ｃとすることができる。
【００５５】
第１形態例に係る細泡化装置７Ａは、図５に示されるように、本第１構成パターンに係る炭酸ガス溶解装置４０Ａの場合は海水及び／又は水を溶媒とし、後述の第２構成パターンに係る炭酸ガス溶解装置４０Ｂの場合は炭酸ガス溶解水を溶媒として、これらの溶媒を所定の高流速で流した主流管路３０に対して、これを外嵌する炭酸ガス供給管路３１を配設し、前記溶媒と炭酸ガスとを仕切る管路壁面、図示例の場合は主流管路３０の管路壁面に細孔３０ａ、３０ａ…を形成し、前記主流管路３０を流れる溶媒のせん断力によって、液体又は超臨界状態まで圧縮した炭酸ガスを細泡化しながら混入させるものである。
【００５６】
前記細孔３０ａは、複数配置する場合は、図示されるように、主流管路３０の管路壁面に、周方向に均等配置としかつ軸方向に間隔を空けて多段配置で複数設けるのが望ましい。
【００５７】
前記溶媒の流速、前記細孔３０ａの孔径は、後述の実施例２－３に従って、下式(1)によって求められるウェーバー数(Ｗｅ)が１０以上となるように設定するのが望ましい。但し、細孔からの炭酸ガスの流速は、８×１０$^{-2}$m/s以上であることを条件とする。
【数１】

$$W_e = \frac{\rho_w V^2 d}{\sigma} \qquad \cdots (1)$$

ここに、ρ_w：水密度（kg/m^3）
Ｖ：パイプ内水流速（m/s）
ｄ：細孔径（m）
σ：界面張力（N/m）

【００５８】
なお、前記細泡化された炭酸ガスの径は、概ね０．０５～０．２㎜程度で十分であり、特にマイクロレベル（１０～数十μｍ）までは細泡化する必要はない。
【００５９】
第２形態例に係る細泡化装置７Ｂ、７Ｃは、図６及び図７に示されるように、溶媒を所定の高流速で流した主流管路３０の内部に、炭酸ガス供給管路３１を配設し、前記溶媒と炭酸ガスとを仕切る管路壁面、図示例の場合は炭酸ガス供給管路３１の管路壁面に細孔３１ａ、３１ａ…を形成し、前記主流管路３０を流れる溶媒のせん断力によって液体又は超臨界状態まで圧縮した炭酸ガスを細泡化しながら混入するものである。
【００６０】
図４に示される細泡化装置７は、上記第２形態例に係る細泡化装置であり、各溶解槽４の下部に設置され、前記溶媒圧送ポンプ３から圧送された溶媒を所定の高流速で流した主流管路３０の内部に、前記炭酸ガス圧縮装置２によって圧縮された炭酸ガスが供給される炭酸ガス供給管路３１を配設し、前記溶媒と炭酸ガスとを仕切る炭酸ガス供給管路３１の管路壁面に細孔３１ａ、３１ａ…を形成し、前記主流管路３０を流れる溶媒のせん断力によって液体又は超臨界状態まで圧縮した炭酸ガスを細泡化しながら混入させるものである。
【００６１】

前記溶解槽４は、図４に示されるように、密閉された容器１０の下部に、前記細泡化装置７によって細泡化された炭酸ガスが混入された溶媒が注入される注入口９が形成されるとともに、前記容器１０の上部に前記炭酸ガス溶解水が吐出される吐出口１３が形成され、前記容器１０内の下方及び上方に夫々、前記容器１０内を上下方向に仕切る多孔板１４、１４がそれぞれ配設され、前記多孔板１４、１４間に粒状の充填材１６が充填されて構成されている。また、前記注入口９にはメッシュ板１５が設置されている。

【００６２】

前記充填材１６は、溶媒と炭酸ガスとの撹拌を促し、炭酸ガスの溶解を効率化するためのものであり、例えば、砂、砕石、ラシヒリング、サドルの内のいずれか又は組み合わせとすることができる。前記ラシヒリングとは、セラミック、プラスチック、メタル、カーボンなどからなる円筒形状をした、充填塔で使用される充填物で、一般に広く用いられているものを使用することができる。前記サドルとは、セラミックなどからなる馬鞍形状をした、充填塔で使用される充填物で、一般に前記ラシヒリングより圧力損失が小さくなるように形成されている。

【００６３】

また、前記充填材１６は、充填材の種類ごとに、炭酸ガス及び溶媒の流量及び前記溶解槽の形状に基づいて定められる炭酸ガス溶解量と前記溶解槽における圧力損失とから決定する最適な平均粒径とすることが好ましい。具体的には、充填材の種類ごとに、充填材の平均粒径に対する下記の２つの関係(1)(2)を実験的に得た上で、溶解槽において許容される圧力損失（溶解槽の注入口と吐出口の間の圧力差）に対して、最も溶解量が多くなる平均粒径のものを最適な平均粒径として選定する。

(1)所定の炭酸ガス及び溶媒の流量及び溶解槽の形状において、充填材の平均粒径に対する炭酸ガス溶解量の関係。

(2)充填材の平均粒径に対する溶解槽の圧力損失の関係。

【００６４】

一般に、前記充填材の平均粒径に対する特性は、(1)炭酸ガス及び溶媒の流量と溶解槽の形状とが与えられれば、充填材の平均粒径を細かくするほど、炭酸ガスの溶解量は増加する。(2)一方、充填材の平均粒径を細かくするほど、溶解槽内の炭酸ガス及び溶媒の流れによる圧力損失が大きくなり、一定の流量を確保するために使用するエネルギーが増加する、という傾向がある。したがって、上記炭酸ガス及び溶媒の流量と溶解槽の形状とを総合的に勘案した上で、充填材の平均粒径を選定する。上記の最適な平均粒径の充填材１６を用いることにより、炭酸ガスの溶解効率に優れるようになる。

【００６５】

前記容器１０は、図４に示されるように、密閉された縦長の管型とすることが好ましい。これにより、溶解槽４における炭酸ガスと溶媒の滞留時間を確保することが可能になる。また、系内の前記設定圧力に対して耐圧性を有する構造とすることができるとともに、短時間で連続的かつ安定的な炭酸ガス溶解水の生成が可能となる。

【００６６】

ここで、溶解槽４内の流れについて説明すると、前記注入口９から容器１０内に圧送された炭酸ガス及び溶媒は、メッシュ板１５から均等に充填材１６の充填領域に浸入する。前記充填材１６の充填領域においては、充填材１６間での流動と相まって溶媒と炭酸ガスとが充分に撹拌されて溶媒に炭酸ガスが溶解されるとともに、上方に流動していく。この作用により、上方側多孔板１４に到達したときには、溶媒に炭酸ガスがほぼ溶解された炭酸ガス溶解水が生成され、溶媒の飽和溶解レベルにまで達するようになる。その後、上方側多孔板１４から上方ホッパー部１８に浸入した炭酸ガス溶解水は、吐出口１３から吐出される。

【００６７】

前記溶解槽４においては、前記充填材１６の充填領域内に、流路を仕切るように多数の開孔が形成された整流板１９を１又は複数設けるようにするのが望ましい。前記整流板１９を設けることにより、充填材１６による炭酸ガスと溶媒との流れが均一に整えられ、両

者の接触機会の増大により、前記溶解槽４における炭酸ガスの溶解が向上するようになる。前記溶解槽４における滞留時間と炭酸ガス溶解量とは、飽和濃度レベルまでは概ね比例的関係にあるため、所定の操業条件の下で、目標溶解量に応じた滞留時間となるように装置規模を設定するのが望ましい。

【００６８】

溶解槽１基当たりの溶媒及び炭酸ガスの各流量は、溶解槽４の容積と炭酸ガス及び溶媒の溶解槽４内の滞留時間によって定めた全体流量に対して、注入する炭酸ガス及び溶媒の重量比（炭酸ガス重量／溶媒重量）から求めることができる。この際、炭酸ガス及び溶媒の重量比は、所望の炭酸ガスの溶解量に基づいて定められる。この炭酸ガス及び溶媒の重量比と炭酸ガスの溶解量との関係については、予め行われる通水試験によって求めておく。

【００６９】

後段の実施例で詳述するように、溶解槽４での溶解濃度は、注入される炭酸ガス及び溶媒の重量比（炭酸ガス重量／溶媒重量）に影響する。具体的には、注入される前記重量比が大きくなると、溶解槽４での溶解濃度が大きくなる傾向にあるため、炭酸ガスの溶解を促進させる目的で、炭酸ガス及び溶媒の注入重量比は、前記炭酸ガス溶解濃度の目標値より大きく設定することが好ましい。

【００７０】

また、本第１構成パターンの変形例として、図３に示されるように、前記溶解槽４から注入井５に至る流路の途中に、送給された炭酸ガス溶解水の全量に対して、未溶解の炭酸ガスと、炭酸ガスが飽和濃度で溶解した状態の炭酸ガス溶解水とを分離する分離槽６を配設し、分離された前記未溶解炭酸ガスを前記細泡化装置７前段の炭酸ガス用パイプライン４１に戻す炭酸ガス圧送装置８が配設される構成とすることができる。

【００７１】

前記溶解槽４から吐出された炭酸ガス溶解水の全量を対象として、未溶解炭酸ガス分を前記分離槽６において分離し、この未溶解の炭酸ガス分を溶解槽４にリターンさせることにより、飽和濃度レベルで炭酸ガスを溶媒（海水又は水）に溶解させた状態で地中に圧入することが可能となる。従って、この炭酸ガス溶解水は、未溶解炭酸ガスを含むことなく、帯水層の周辺地下水より大きな比重を持つようになり、帯水層に注入しても炭酸ガスが浮上せず、長期的かつ安定的に帯水層に貯留・隔離させることができるようになる。

【００７２】

前記分離槽６は、図８に示されるように、密閉された容器２０の内部に下面から所定高さで立設し、前記溶解槽４を通過した炭酸ガス溶解水の流路と接続した流入管２１が設けられ、概ね前記炭酸ガス溶解水で容器２０内が満たされて、未溶解炭酸ガスが上方側に重力分離されるとともに、前記容器２０の上部に、前記未溶解炭酸ガスを吐出する未溶解炭酸ガス吐出口２２が形成され、前記容器２０の下方に、前記未溶解炭酸ガスが分離された後の炭酸ガス溶解水を吐出する炭酸ガス溶解水吐出口２３が形成されて構成されている。

【００７３】

本第１構成パターンの変形例では、前述の通り、全ての溶解槽４、４…から吐出された炭酸ガス溶解水は前記分離槽６に注入されるため、前記分離槽６において溶解槽４、４…から吐出される炭酸ガス溶解水に含まれる未溶解炭酸ガスが完全に分離され、注入井５には、炭酸ガスが溶媒に完全に溶解した状態の炭酸ガス溶解水が圧入される。

【００７４】

（第２構成パターンに係る炭酸ガス溶解装置４０Ｂ）

次に、図９及び図１０に基づいて、第２構成パターンに係る炭酸ガス溶解装置４０Ｂについて述べる。

【００７５】

本炭酸ガス溶解装置４０Ｂは、図９に示されるように、炭酸ガス圧縮装置２によって液体又は超臨界状態まで圧縮された炭酸ガス及び圧送ポンプ３によって圧縮・搬送された海水及び／又は水からなる溶媒が注入され、前記溶媒に前記炭酸ガスを溶解させて炭酸ガス

溶解水とする複数の溶解槽４、４…と、前記溶解槽４、４…の後段に設置され、送給された炭酸ガス溶解水の全量に対して、未溶解の炭酸ガスと、炭酸ガスが飽和濃度で溶解した状態の炭酸ガス溶解水とを分離する分離槽６と、該分離槽６で分離された炭酸ガスを圧送する炭酸ガス圧送装置８と、この炭酸ガス圧送装置８の後段に、前記炭酸ガス溶解水を所定の高流速で流した主流管路３０の内部に、前記炭酸ガス圧送装置８から圧送された炭酸ガスが供給される供給管路３１を配設するか、前記主流管路３０を外嵌するとともに、前記炭酸ガス圧送装置８から圧送された炭酸ガスが供給される供給管路３１を配設し、前記炭酸ガス溶解水と炭酸ガスとを仕切る管路壁面に細孔を形成し、前記主流管路３０を流れる炭酸ガス溶解水によるせん断力によって前記炭酸ガスを細泡化しながら混入させる細泡化装置７とから主に構成されるものである。

【００７６】

前記溶解槽４は、図１０に示されるように、密閉された容器１０の下部に、前記炭酸ガス圧縮装置２から送られた炭酸ガスが注入される炭酸ガス注入口１１と、前記溶媒圧送ポンプ３から送られた溶媒が注入される溶媒注入口１２とが形成されるとともに、前記容器１０の上部に前記炭酸ガス溶解水が吐出される吐出口１３が形成され、前記容器１０内の下方及び上方に夫々、前記容器１０内を上下方向に仕切る多孔板１４、１５がそれぞれ配設され、前記多孔板１４、１５間に粒状の充填材１６が充填されて構成されている。

【００７７】

また、本炭酸ガス溶解装置４０Ｂでは、図９に示されるように、前記炭酸ガス圧送装置８と前記供給管路３０との間に、前記炭酸ガス圧送装置８から圧送された炭酸ガスを分岐する分岐装置３２が配置されるとともに、前記分岐装置３２にて前記炭酸ガスのうち前記細泡化装置７から前記帯水層までの経路で溶解可能な量を分岐して前記供給管路３０に圧送し、前記炭酸ガスのうち残りの量を前記溶解槽４、４…に戻すようにしてもよい。

【００７８】

以上の構成からなる本ケース１に係る地中貯留システム１Ａでは、炭酸ガスが陸上の炭酸ガス圧縮装置２によって圧縮され、所要の圧力まで昇圧された後、炭酸ガス用パイプライン４１で帯水層近傍の炭酸ガス溶解装置４０に輸送される。また、海水及び／又は水等の溶媒が陸上の溶媒圧送ポンプ３によって所要の圧力まで昇圧された後、溶媒用パイプライン４２で炭酸ガス溶解装置４０に輸送される。その後、炭酸ガス及び溶媒は、炭酸ガス溶解装置４０に組み込まれた前記溶解槽４及び細泡化装置７によって炭酸ガス溶解水とされた後、注入井５を通って帯水層に貯留される。

【００７９】

本ケース１では、炭酸ガス溶解装置４０で生成された炭酸ガス溶解水をパイプラインで長距離輸送する必要がなくなるため、輸送時の摩擦損失等によって輸送コストが増大することがない。また、炭酸ガス溶解水を輸送するパイプラインの場合高圧ガスの取扱いを受けるが、溶媒用パイプライン４２ではこの取扱いを受けないため、輸送コストの増大を抑制できる。

【００８０】

さらに、前記炭酸ガス溶解装置４０が海底面上に設置されるとともに、これに接続する前記炭酸ガス用パイプライン４１及び溶媒用パイプライン４２が海底付近に配設されるため、内部を流れる溶媒及び炭酸ガスが海水温と同等のおよそ１０℃前後で安定する。ここで、炭酸ガスの溶媒への溶解量は、後段で詳述する溶解実験の結果、低温ほど増加する傾向にある（図２１の15℃～20℃の相対的低温条件を参照）。したがって、本ケース１では、パイプライン４１、４２及び炭酸ガス溶解装置４０が低温化した雰囲気中に配置されるため、炭酸ガスの溶解上有利となる。

【００８１】

加えて、炭酸ガス圧縮装置２及び溶媒圧送ポンプ３が陸上に設けられるため、電力供給用のケーブルを海中に設置する必要がなくなり、設備コスト及び保守・点検のコストを低減できる。

【００８２】

〔ケース２〕
ケース２に係る地中貯留システム１Ｂは、図１１に示されるように、帯水層から離れた陸上に設置された溶媒圧送ポンプ３Ａが低圧用とされ、炭酸ガス溶解装置４０近傍の前段に高圧用の増圧ポンプ３Ｂが配置されるとともに、前記溶媒圧送ポンプ３Ａと増圧ポンプ３Ｂとの間は低圧用の溶媒用パイプライン４２Ａで接続され、増圧ポンプ３Ｂと炭酸ガス溶解装置４０との間は高圧用の溶媒用パイプライン４２Ｂで接続される点で上記ケース１と相違する。
【００８３】
低圧用の溶媒圧送ポンプ３Ａは、溶媒を前記増圧ポンプ３Ｂに圧送できるだけの圧力を発生させるもので足り、高圧用の増圧ポンプ３Ｂは、炭酸ガス溶解装置４０において炭酸ガス溶解水を生成するのに必要な圧力に加圧するためのものである。
【００８４】
図示例のように帯水層が海底面下の地層に位置する場合、前記増圧ポンプ３Ｂは、前記炭酸ガス溶解装置４０と同様に海底面上に設置することが好ましい。また、海底面上に設置される増圧ポンプ３Ｂに対して、陸上から電力供給用のケーブルが配設される。
【００８５】
本地中貯留システム１Ｂでは、炭酸ガスが陸上の炭酸ガス圧縮装置２によって圧縮され、所要の圧力まで昇圧された後、炭酸ガス用パイプライン４１を通って帯水層近傍の炭酸ガス溶解装置４０に輸送される。また、海水及び／又は水等の溶媒が陸上の低圧用の溶媒圧送ポンプ３Ａによって低圧条件の下で低圧用の溶媒用パイプライン４２Ａで炭酸ガス溶解装置４０近傍に設置された増圧ポンプ３Ｂに輸送される。その後、増圧ポンプによって所要の圧力に増圧され、高圧用の溶媒用パイプライン４２Ｂを通って炭酸ガス溶解装置４０に輸送される。しかる後、炭酸ガス及び溶媒は、炭酸ガス溶解装置４０に組み込まれた溶解槽４及び細泡化装置７によって炭酸ガス溶解水とされた後、注入井５を通って帯水層に貯留される。なお、前記炭酸ガス溶解装置４０として、上記ケース１に係る地中貯留システム１Ａと同様に、第１構成パターン４０Ａ又は第２構成パターン４０Ｂのいずれかとすることができる。
【００８６】
本ケース２では、炭酸ガス溶解装置４０近傍の増圧ポンプ３Ｂまでは低圧用の溶媒用パイプライン４２Ａが使用可能であるため、設備コストが低減できる。
【００８７】
〔ケース３〕
ケース３に係る地中貯留システム１Ｃは、図１２に示されるように、溶媒圧送ポンプ３を前記帯水層から離れた陸上に配置することに代えて、炭酸ガス溶解装置４０の近傍に設置される点で上記ケース１と相違する。ここで、図示例のように帯水層が海底面下の地層に位置する場合、前記溶媒圧送ポンプ３が設置される海底面周辺の海水を溶媒として取水することができる。その他に、地下水を揚水する又は他の事業で揚水された地下水の供給を受けるなどによって前記溶媒としてもよい。また、海底面上に設置される溶媒圧送ポンプ３に対して、陸上から電力供給用のケーブルが配設される。
【００８８】
本地中貯留システム１Ｃでは、炭酸ガスが陸上の炭酸ガス圧縮装置２によって圧縮され、所要の圧力まで昇圧された後、炭酸ガス用パイプライン４１を通って帯水層近傍の炭酸ガス溶解装置４０に輸送される。周辺の海水を取水するなどして吸込まれた溶媒が溶媒圧送ポンプ３によって所要の圧力まで昇圧された後、溶媒用パイプライン４２を通って隣接する炭酸ガス溶解装置４０に送られる。その後、炭酸ガス及び溶媒は、炭酸ガス溶解装置４０に組み込まれた前記溶解槽４及び細泡化装置７によって炭酸ガス溶解水とされた後、注入井５を通って帯水層に貯留される。
【００８９】
本ケース３では、溶媒用パイプライン４２が短縮できるとともに、帯水層が沿岸部から離れた海底面下に位置する場合には、溶媒圧送ポンプ３が周辺の低温状態で安定した海水

を取水できるため、炭酸ガス溶解装置４０において炭酸ガスを効率よく溶解することができる。

【００９０】

〔ケース４〕

ケース４に係る地中貯留システム１Ｄでは、図１３に示されるように、帯水層が海底面下の地層に位置する場合において、帯水層近傍の海洋上に海上プラットフォーム４３を構築し、この海上プラットフォーム４３に少なくとも炭酸ガス溶解装置４０を配置する点で上記ケース１と相違する。また、図示例では、溶媒圧送ポンプ３が炭酸ガス溶解装置４０の近傍の海中に配置され、周辺の海水を取水して溶媒とし炭酸ガス溶解装置４０に圧送している点でも上記ケース１と相違する。なお、前記溶媒圧送ポンプ３は、海上プラットフォーム４３に設置しても良く、また溶媒として地下水などを使用することもできる。

【００９１】

本ケース４における前記海上プラットフォーム４３を構築してこの海上プラットフォーム４３に炭酸ガス溶解装置４０を配置する点は、上記ケース１～３の地中貯留システム１にも同様に適用することができる。

【００９２】

本地中貯留システム１Ｄでは、炭酸ガスが陸上の炭酸ガス圧縮装置２によって圧縮され、所要の圧力まで昇圧された後、炭酸ガス用パイプライン４１を通って帯水層近傍の炭酸ガス溶解装置４０に輸送される。また、周辺の海水を取水するなどして吸込まれた溶媒が海中に設置された溶媒圧送ポンプ３によって所要の圧力まで昇圧された後、溶媒用パイプライン４２を通って炭酸ガス溶解装置４０に送られる。その後、炭酸ガス及び溶媒は、炭酸ガス溶解装置４０に組み込まれた前記溶解槽４及び細泡化装置７によって炭酸ガス溶解水とされた後、注入井５を通って帯水層に貯留される。

【００９３】

ケース４では、少なくとも前記炭酸ガス溶解装置４０を海上プラットフォーム４３に配置することにより、炭酸ガス溶解装置４０の維持管理等が容易化できる。また、炭酸ガスの溶解に最適な水温となる水深から取水することにより、炭酸ガスの溶解濃度及び溶解速度を増加させることができる。

【００９４】

〔ケース５〕

ケース５に係る地中貯留システム１Ｅでは、図１４に示されるように、陸上において炭酸ガスの排出源と炭酸ガスの帯水層とが離れた場合において、上記ケース１～３と同様の地中貯留システム１を採用したものである。図示例の場合、炭酸ガスが排出源近くに設置された炭酸ガス圧縮装置２によって圧縮され、所要の圧力まで昇圧された後、炭酸ガス用パイプライン４１を通って帯水層近傍の陸上に設置された炭酸ガス溶解装置４０に輸送される。溶媒については、貯留サイト近傍において河川水を取水するか、又は地下水を揚水するもしくは他の事業で揚水された地下水の供給を受けるなどにより確保し、貯留サイト近傍に設置した溶媒圧送ポンプ３によって所要の圧力まで昇圧された後、溶媒用パイプライン４２を通って前記炭酸ガス溶解装置４０に送られる。その後、炭酸ガス溶解装置４０に組み込まれた前記溶解槽４及び細泡化装置７によって、各パイプラインを通って圧送されてきた炭酸ガスを溶媒に溶解させた後、陸上の地表面から帯水層まで貫通した注入井５を通って帯水層に貯留される。

【実施例１】

【００９５】

本地中貯留システム１による炭酸ガスの溶解状態を実証するため、図１５に示される実験装置を用いて炭酸ガスの溶解実験を行った。なお、細泡化装置７は後述の実施例２の細泡化装置有りのケースにおいて設置した。

【００９６】

実験装置は、炭酸ガスボンベ４５の炭酸ガスを炭酸ガス圧縮装置２によって加圧して溶解槽４に注入するとともに、塩水タンク４６の塩水を溶媒圧送ポンプ３によって加圧して

溶解槽４に注入し、溶解槽４で炭酸ガスの溶解処理を行い、この炭酸ガス溶解水を分離槽６で未溶解炭酸ガスを分離した後の炭酸ガス溶解水をサンプリングする。ここで、溶解槽４の容積は850mlとし、充填材１６は、平均粒径が0.18mm（粒度１）、0.63mm（粒度２）、1.32mm（粒度３）の砂状のものを使用した。実験では、温度、圧力、塩水流量、充填材１６の粒度及び炭酸ガスと塩水の重量比（炭酸ガス重量／塩水重量）をそれぞれ変化させたとき、サンプリングした炭酸ガス溶解水の炭酸ガス溶解量を測定した。

【００９７】

図１６、図１７は、各温度における塩水流量及び充填材１６の粒度をそれぞれ変化させたときの溶解槽４に注入する炭酸ガス及び塩水の重量比（炭酸ガス重量／塩水重量）と炭酸ガス溶解量との関係を示すグラフである。この結果、温度29℃、33℃のいずれの試験温度においても、炭酸ガスと塩水の重量比を増大させるほど、また充填材１６の粒度を小さくするほど炭酸ガス溶解量が大きくなる傾向にある。

【００９８】

図１８～図２０は、各温度における塩水流量及び圧力をそれぞれ変化させたときの前記重量比と炭酸ガス溶解量との関係を示すグラフである。この結果、前述と同様に、炭酸ガスと塩水の重量比を増大させるほど、炭酸ガス溶解量が増大する傾向にあるが、ある重量比以上では炭酸ガス溶解量がほぼ一定の飽和濃度レベルとなり、本地中貯留システムの有効性が確認された。

【００９９】

図２１は、各圧力における温度と炭酸ガス溶解量との関係を示すグラフである。この結果、25℃～40℃の範囲の一般的な温度条件においては、炭酸ガス溶解量に大きく影響を及ぼさないことが確認された。また、15℃～20℃の相対的低温条件では、炭酸ガスの溶解が促進されることが確認された。

【０１００】

図２２は、各塩水流量における充填材の平均粒径と炭酸ガス溶解量との関係を示すグラフである。この結果、本実施例では、充填材の平均粒径は、平均粒径１．０mm以下とすることにより、炭酸ガスの溶解効率に優れるようになる。

【実施例２】

【０１０１】

（実施例２－１）

本実施例２－１では、本地中貯留システム１による前記細泡化装置７での溶解効果、前記溶解槽４での溶解効果を定量的に検証するための実験を行った。

【０１０２】

実験は、条件１：溶解槽４の充填材無し及び細泡化装置７無し、条件２：溶解槽４の充填材無し及び細泡化装置７有り、条件３：溶解槽４の充填材有り及び細泡化装置７有りの３ケースとし、(1)試験圧力：１５MPa、試験温度：２９℃、（炭酸ガス／塩水）重量比：約８％、(2)試験圧力：１５MPa、試験温度：３３℃、（炭酸ガス／塩水）重量比：約８％の２種類について溶解試験を行った。

【０１０３】

その結果を図２３に示す。同図２３より、細泡化装置７単独によってもかなり炭酸ガスの溶解が促進されている事、更に細泡化装置７と溶解槽４とを組合せることによって、更に溶解が促進されることが実証できた。

【０１０４】

（実施例２－２）

本実施例２－２では、前記細泡化装置７による溶解促進効果の検証実験を行った。

【０１０５】

一般に、炭酸ガス溶解量と溶解槽の容器高さＺとの間には、下式(2)の関係が成り立つことが判明している。

【数２】

$$Z = \frac{L_m}{K_x\, a}\{lnx^* - ln(x^* - x)\} \qquad \cdots (2)$$

ここに、Ｚ：容器の高さ（ｍ）
Ｌｍ：水の断面モル流量（mol/m²s）
Ｋｘａ：総括容量係数（mol/m³s）
ｘ*：飽和溶解モル分率
ｘ：溶解モル分率（計測値）

【０１０６】
溶解に要する容器の高さＺは、総括容量係数$K_X a$に依存しており、この総括容量係数$K_X a$を溶解効率を表す指標とした。実験は、細泡化装置無しと細泡化装置有りの各ケースについて、(1)試験圧力：１５MPa、試験温度：２９℃、（炭酸ガス／塩水）重量比：約８％、(2)試験圧力：１５MPa、試験温度：２９℃、（炭酸ガス／塩水）重量比：約１０％、(3)試験圧力：１５MPa、試験温度：３３℃、（炭酸ガス／塩水）重量比：約８％の３種類について試験を行い、図２４～図２６に示されるように、縦軸を総括容量係数$K_x a$（mol/m³s）とし、横軸を水の断面モル流速（mol/(m²・s))とするグラフを得た。同図２４～図２６のグラフによれば、水の断面モル流速（mol/(m²・s))の高い領域においては、細泡化装置有りのケースが細泡化装置無しのケースに比べて、総括容量係数$K_x a$が１．５倍以上になることが判明した。

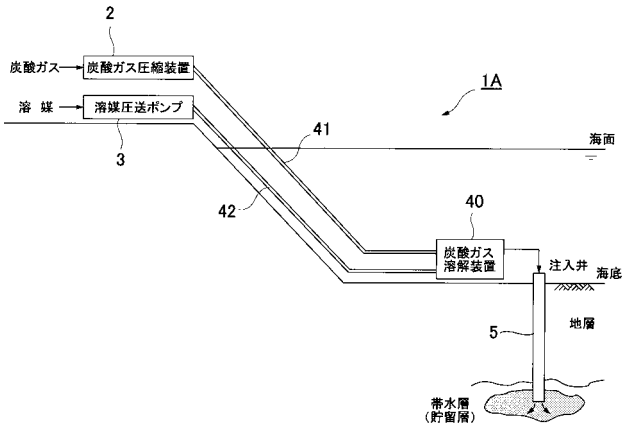
【０１０７】
（実施例２－３）
上記実施例２－２の実験結果を下式(1)に示すウェーバー数Ｗｅを用いて整理し直して、図２７に示されるように、縦軸を総括容量係数比$K_x a(B)／K_x a(NB)$［ここに、$K_x a(B)$：細泡化装置有りの総括容量係数、$K_x a(NB)$：細泡化装置無しの総括容量係数］、横軸をウェーバー係数Weとするグラフを得た。

【０１０８】
同図２７より、ウェーバー数Weが１０以上の領域で細泡化による溶解効率が高いことが判明した。従って、前記細泡化装置７においては、溶媒の流速、細孔３０ａ(３１ａ)の孔径は、ウェーバー数(Ｗｅ)が１０以上となるように設定するのが望ましい。但し、細孔からの炭酸ガスの流速は、同実験によれば、8×10^{-2}m/s以上であることを条件とする。

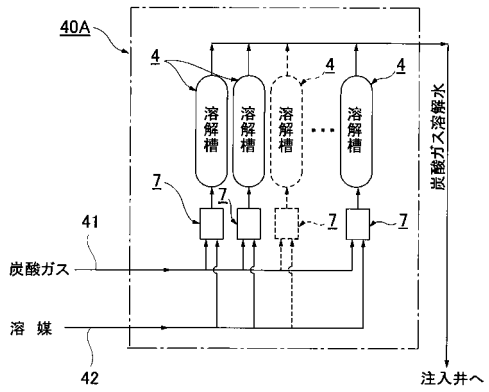
【０１０９】
〔他の形態例〕
(1)上記形態例では海水及び／又は水などをそのまま溶媒として使用していたが、溶媒として地下水を揚水する若しくは他の事業で揚水された地下水の供給を受けるなどの場合、地下水の水温が高いことが予想される。このため、溶媒としてこのような地下水を使用する場合、海底部の比較的低温の海水と熱交換を行い、地下水の水温を低下させることが可能である。

【符号の説明】
【０１１０】
１・１Ａ～１Ｅ…地中貯留システム、２…炭酸ガス圧縮装置、３…溶媒圧送ポンプ、４…溶解槽、５…注入井、６…分離槽、７…細泡化装置、８…炭酸ガス圧送装置、１０…容器、１１…炭酸ガス注入口、１２…溶媒注入口、１３…吐出口、１４…多孔板、１５…メッシュ板、１６…充填材、１９…整流板、２０…容器、２１…流入管、２２…未溶解炭酸ガス吐出口、２３…炭酸ガス溶解水吐出口、３０…主流管路、３１…炭酸ガス供給管路、３０ａ・３１ａ…細孔、３２…分岐装置、４０・４０Ａ・４０Ｂ…炭酸ガス溶解装置、４１…炭酸ガス用パイプライン、４２…溶媒用パイプライン、４３…海上プラットフォーム

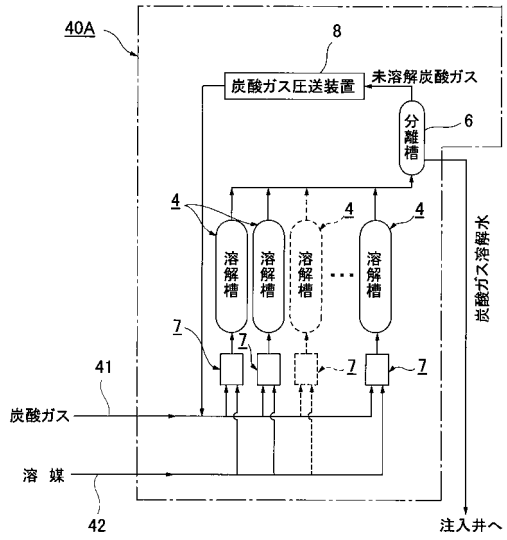
【図１】



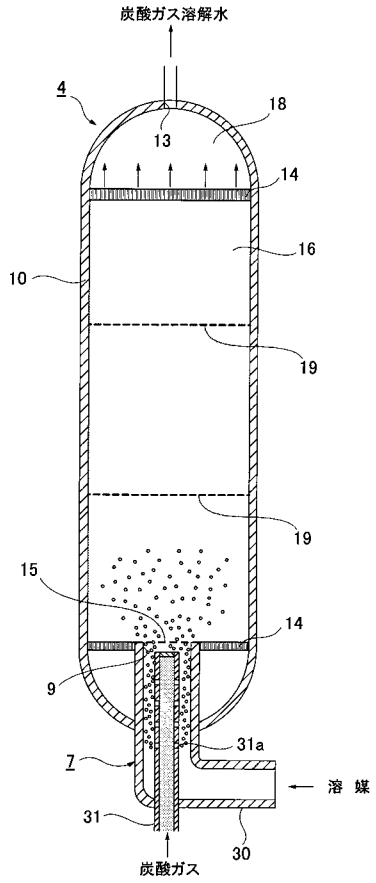
【図２】



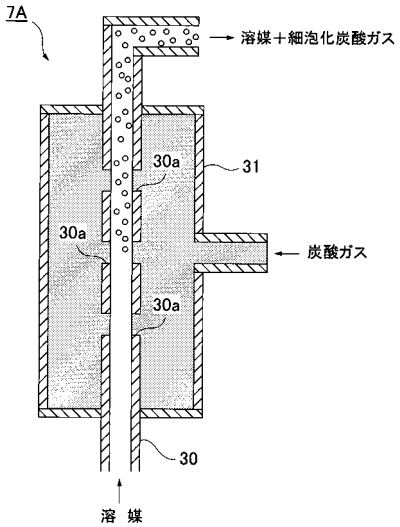
【図３】



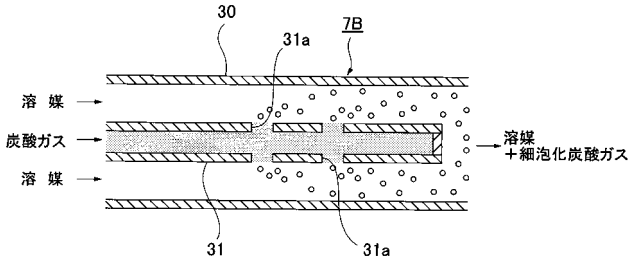
【図４】



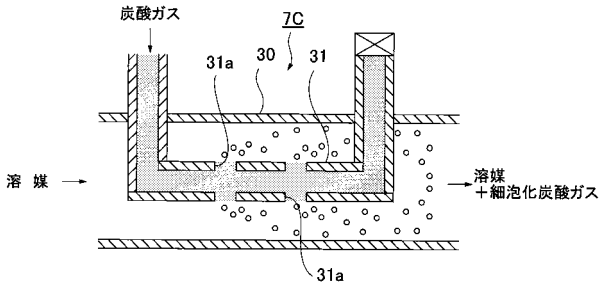
【図５】



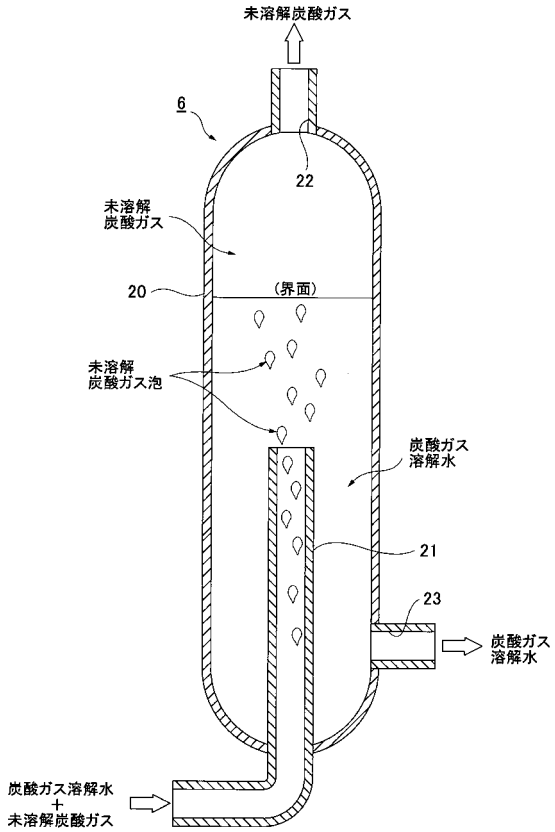
【図６】



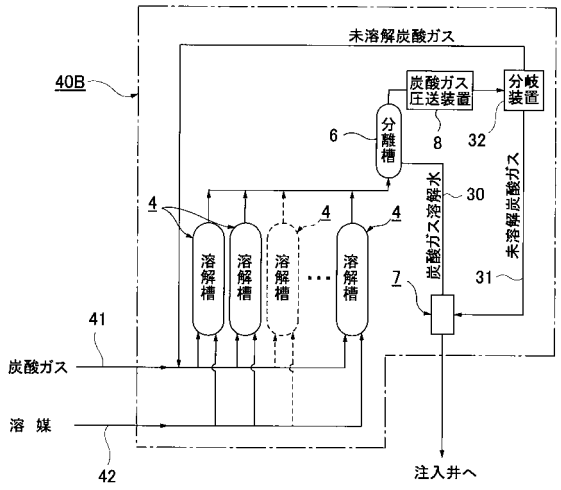
【図７】


炭酸ガス
7C
31a
30
31
溶 媒
溶媒
＋細泡化炭酸ガス
31a

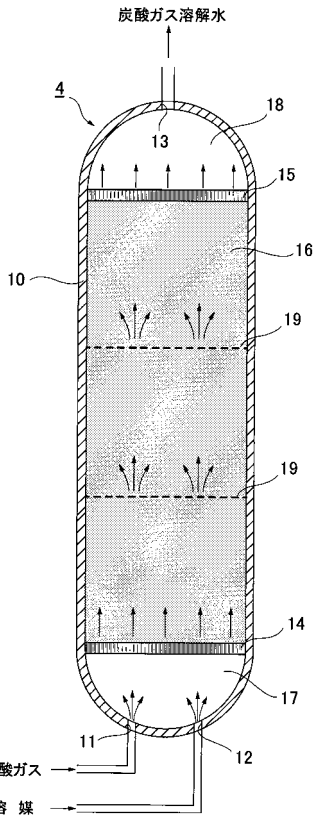
【図８】


未溶解炭酸ガス
6
22
未溶解
炭酸ガス
20
（界面）
未溶解
炭酸ガス泡
炭酸ガス
溶解水
21
23
炭酸ガス
溶解水
炭酸ガス溶解水
＋
未溶解炭酸ガス

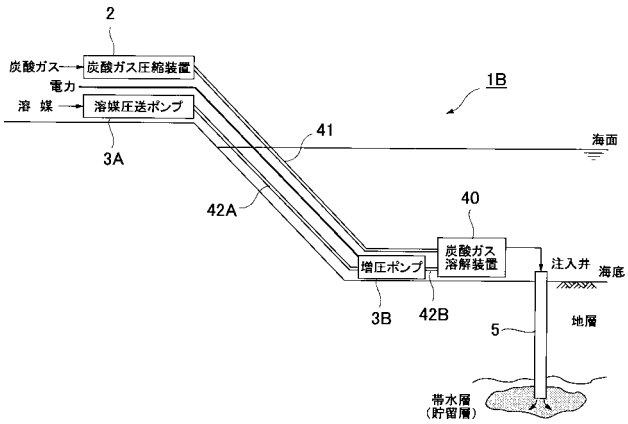
【図９】


未溶解炭酸ガス
40B
炭酸ガス
圧送装置
分岐
装置
6
分
離
槽
8
32
4
4
4
溶
解
槽
溶
解
槽
溶
解
槽
溶
解
槽
炭酸ガス溶解水
30
未溶解炭酸ガス
7
31
41
炭酸ガス
溶 媒
42
注入井へ

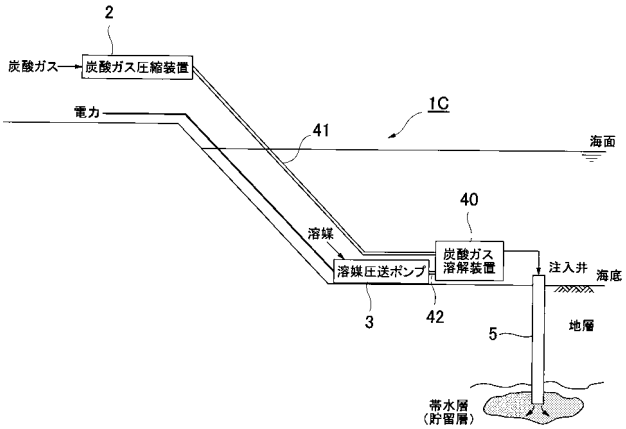
【図１０】


炭酸ガス溶解水
4
18
13
15
16
10
19
19
14
17
11
12
炭酸ガス
溶 媒

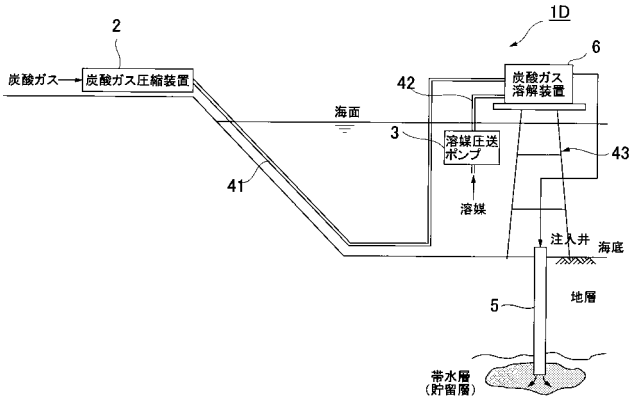
【図１１】



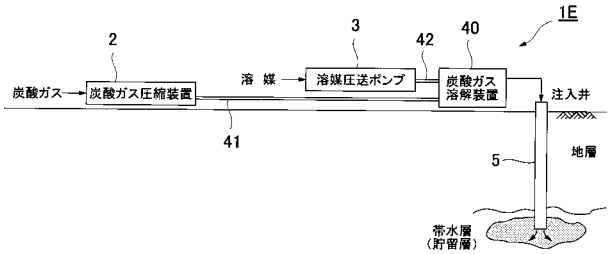
【図１２】



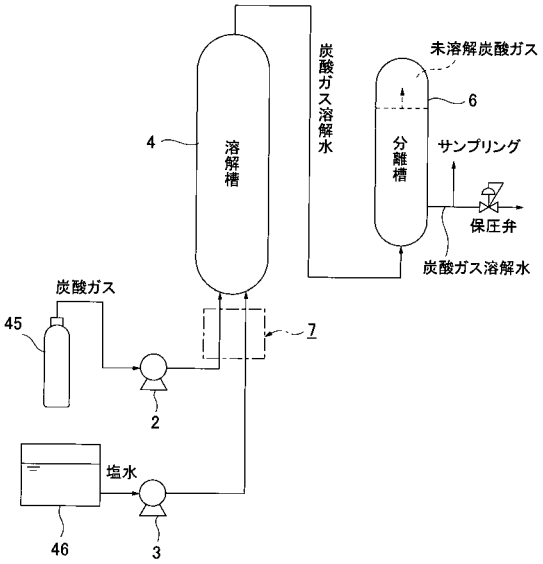
【図１３】



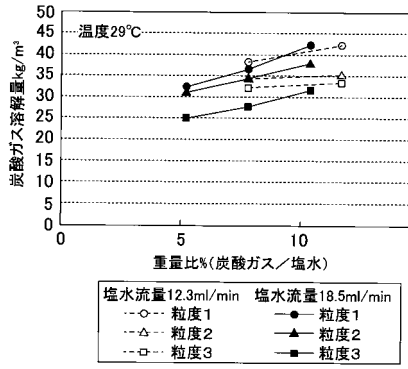
【図１４】



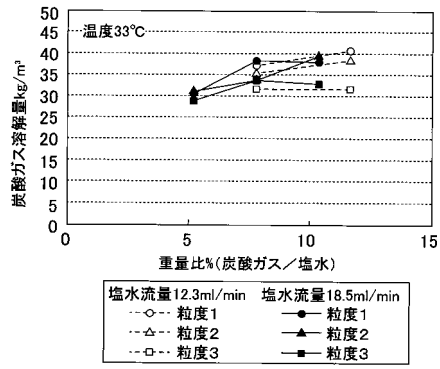
【図１５】



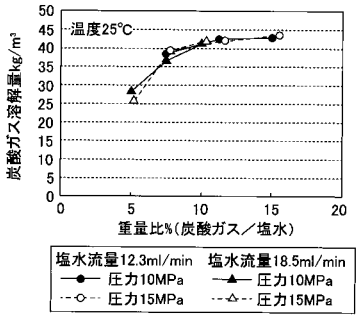
【図１６】



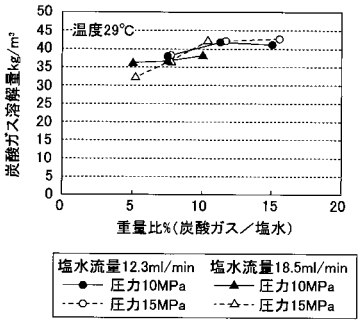
【図１７】



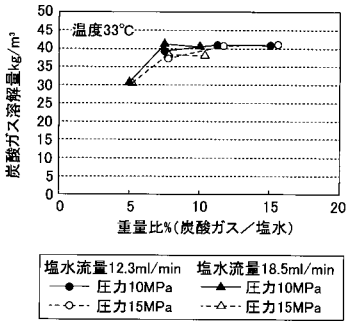
【図１８】



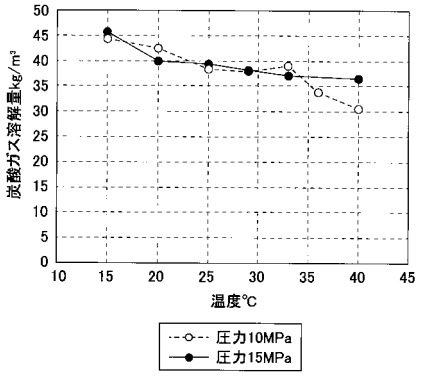
【図１９】



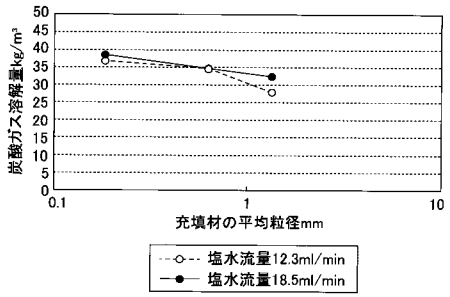
【図２０】



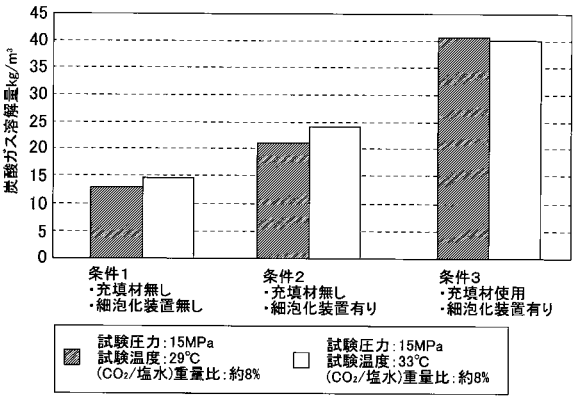
【図２１】



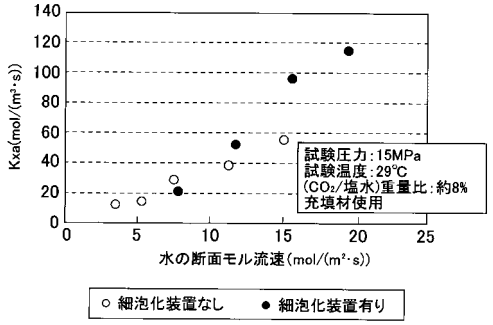
【図２２】



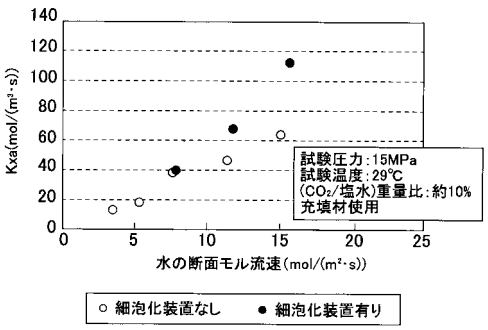
【図２３】



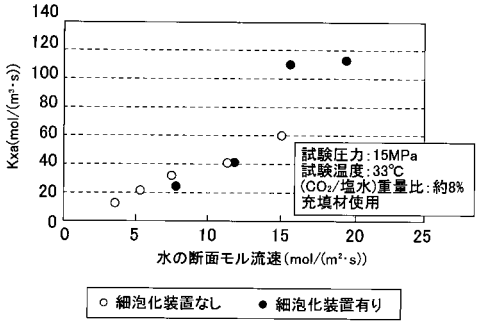
【図２４】



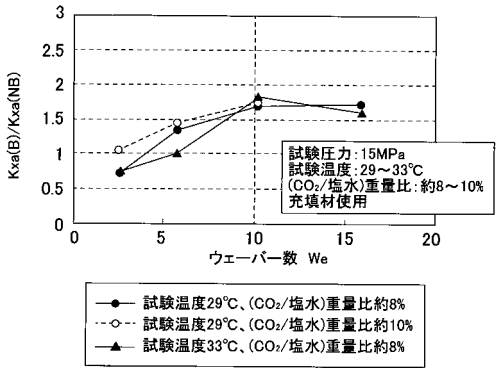
【図２５】



【図２６】


140
120
100
80
60
40
20
0
Kxa(mol/(m³·s))
0
5
10
15
20
25
水の断面モル流速(mol/(m²·s))
試験圧力:15MPa
試験温度:33℃
(CO₂/塩水)重量比:約8%
充填材使用
○ 細泡化装置なし
● 細泡化装置有り

【図２７】


3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
Kxa(B)/Kxa(NB)
0
5
10
15
20
ウェーバー数 We
試験圧力:15MPa
試験温度:29～33℃
(CO₂/塩水)重量比:約8～10%
充填材使用
試験温度29℃、(CO₂/塩水)重量比約8%
試験温度29℃、(CO₂/塩水)重量比約10%
試験温度33℃、(CO₂/塩水)重量比約8%

フロントページの続き

Ｆターム(参考) 4G075 AA04 BB03 BD27 CA73 DA02 DA18
4G146 JA02 JB09 JC36 JC39