High Pressure Tank in National Maritime Research Institute

Yasuharu Nakajima

The High Pressure Tank in the National Maritime Research Institute (NMRI) is an experimental facility for research and development of deep-sea technology, where deep-sea conditions, such as pressure and temperature, can be conveniently simulated. The tank has a size of 1.1m at the inner diameter and 3.0m depth. The maximum pressure is 60MPa. Sensors are installed to measure the pressure, temperature and pH of the water in the tank, and six monitoring cameras have been installed in the tank. Subsidiary units belonging to the tank control its pressure, temperature and pH in the tank. Using the tank the NMRI has carried out various experiments of deep-sea technologies, such as a pressure test of the pressure vessel for a submersible vehicle, the corrosion test of ship materials in a deep-sea environment, and simulation experiments of ocean storage of Carbon Dioxide (CO₂).

1. はじめに

近年、原油価格の急激な上昇や金属資源の需要増大により、これまで未開発であった大水深石油・天然ガス田の開発や、メタンハイドレート、熱水鉱床などの新しい海底資源の探査が我が国を含む世界各地で精力的に行われている。また、海洋深層水の利用や二酸化炭素 (CO₂) の深海貯留などの海洋空間利用に関する研究も進められている。深海域における海洋資源開発や空間利用が活発化するにつれて、これらに関連する深海技術の研究開発も進められている。独立行政法人海上技術安全研究所 (以下、海技研) では、深海技術に関する研究施設の 1 つとして、水深 6000m までの深海環境を再現できる高圧タンクを有している。

海技研では、これまでに、高圧タンクを用いて 1) 深海艇耐圧殻の耐圧試験、2) 沈没船を想定した船体材料の深海環境中での腐食試験、3) CO₂ 深海貯留の模擬実験等を行っている。特に、CO₂ 深海貯留については、地球温暖化を抑制するための革新的技術として、技術開発及び環境影響評価の実験を行っている。本稿では、高圧タンク及び関連装置とともに、本施設を用いた

CO₂ 深海貯留の研究についても紹介する。

2. 高圧タンク及び関連装置

2. 1 高圧タンク 高圧タンクの概観及び主要目を図 1 及び表 1 に示す。高圧タンクは、内径 1.1m、深さ 3.0m の圧力容器であり、最大圧力は 60MPa (液体 CO₂ 使用時は 40MPa) である。加圧媒体として、清水及び海水を使用できる。密閉時は、蓋の上に 8 分割されたセクショナルリングを設置し、これをタンク開口部の溝にはめ込むことによりロックする。

図 1 高圧タンクの概観

*原稿受付 平成 20 年 6 月 23 日.

**正会員 海上技術安全研究所 (三鷹市新川 6-38-1) .

表1 高圧タンクの主要目

内径	1.1m
深さ	3.0m
最高使用圧力	60MPa
(液体CO ₂ 使用時)	(40MPa)
水温	2℃～常温
加圧媒体	清水, 人工海水
ロック機構	セクショナルリング方式
監視装置	水中カメラ, 水中ライト

タンク内には水中カメラ及び水中ライトが縦に6台ずつ設置されており、図2に示す実験準備室内の監視制御コンソールにおいて内部の様子を観察することができる。また、圧力センサ、温度センサ、pHセンサ等が設置されており、これらのデータも監視制御コンソールにおいて表示、記録することができる。また、後述するCO₂投入装置により液体CO₂を投入するための投入孔及び投入管が設置されている。さらに、高圧タンクの圧力、温度等の制御を行うため、図3に示す加圧装置等の関連装置が付属している。

図2 監視制御コンソール

図3 高圧タンクに付属する関連装置

(a) 加圧装置, (b) CO₂投入装置, (c) pH調整装置, (d) 温度調節装置(保冷装置)

2. 2加圧装置 加圧装置は、高圧タンクを加圧するための装置であり、高圧ポンプ、給水タンク、制御バルブ、制御盤等で構成されている。密閉した高圧タンクにポンプで水を注入することにより、高圧タンクを加圧する。

2. 3回流装置 回流装置は、高圧タンク内に水流を発生させるための装置である。高圧タンクの側面には回流装置用の一対の貫通孔があり、水中モーターを格納した高圧配管が接続されている。水中モーターにより一方の孔からタンク内の水を吸入し、もう一方の孔からタンクへと放出することにより水流を発生させる。

2. 4 CO₂装置 CO₂投入装置は、高圧タンク内に液体CO₂を注入するための装置であり、サイホン式CO₂ポンプ、CO₂投入ポンプ、チラーユニット、制御盤等で構成されている。ポンプからくみ出した液体CO₂を、チラーユニットで冷却しながら投入ポンプにより高圧タンク内に圧入する。CO₂の温度が上昇すると液化圧力も上昇し、さらに臨界点(31.1℃)以上では超臨界流体となって液化しなくなるため、チラーユニットにより冷却を行う。

2. 5 pH調整装置 pH調整装置は、高圧タンクに使用する人工海水を調製し、そのpHを調整するための装置である。清水のpHを調整する場合も使用できる。

2. 6温度調節装置 温度調節装置は、高圧タンク内の水温を調節するための装置である。タンクの蓋を開放した状態で直接内部の水を冷却する事前冷却装置、タンクを密閉した状態で、タンクの周囲に冷風を吹き付けて冷却する保冷装置、制御盤等から構成されている。

3. 高圧タンクでのCO₂深海貯留の研究

3. 1 CO₂深海貯留の概要 火力発電所等の大規模CO₂排出源において排気ガスからCO₂を分離・回収し、地中や海中に貯留することにより大気へのCO₂排出を削減するCO₂回収・貯留(CO₂ Capture and Storage: CCS)は、地球温暖化を抑制するための革新的技術の1つであり、我が国をはじめ米国、カナダ、欧州などでも研究開発が進められている。¹⁾ 枯渇油田・ガス田や帯水層などの地中貯留に適した地中空間を有する北米や欧州に対して、広大かつ水深の大きな排他的経済水域(Exclusive Economic Zone: EEZ)を有

する我が国には、海中に貯留する海洋貯留が適していると考えられる。

海洋貯留は、海中に広く CO_2 を溶解・希釈する方法（溶解法）と、深海底の窪地に液体 CO_2 を貯留する方法（深海貯留）とに大別される。図4及び5に溶解法及び深海貯留の概念図を示す。溶解法では、航行する船舶（ムービングシップ）により曳航される投入管から水深 500～2000m の中深層に液体 CO_2 を放出し、液滴を浮上させながら海中に溶解・希釈させる。本法では、 CO_2 液滴の急速な溶解による高濃度 CO_2 溶解水の発生を防ぐため、放出される液滴のサイズを制御する必要がある。また、投入管の曳航により CO_2 液滴及び高濃度 CO_2 溶解水を速やかに拡散・希釈する必要がある。これに対して、深海貯留法では、水深 3500m 以深の窪地状の海底に液体 CO_2 を送り込んで貯留する。常温において CO_2 は 5MPa の圧力で液化し、27MPa 以上の圧力では周囲の海水よりも密度が大きくなり、自然に海中を沈降する。但し、 CO_2 溶解海水は通常の海水よりも密度が大きいため、これを考慮して貯留サイトは水深 3500m 以深とされている。さらに、貯留した CO_2 の表面には周囲の海水と液体 CO_2 との反応により CO_2 ハイドレート膜が生成し、周囲の海水への CO_2 の溶出が抑制されると期待されている。海技研では、深海貯留の研究を行っている。

図4 CO_2 溶解法の概念図

図5 CO_2 深海貯留の概念図

3. 2CO_2 深海貯留のための技術開発 深海貯留において海上から海底まで CO_2 を送り込む方法として、 CO_2 の三重点（純粋な物質の気体、液体及び固体が共存する温度）である -56°C の液体 CO_2 を水深約 500m の海中に放出し、自重により水深 2700m まで自然に沈降させる方法（ CO_2 Sending System for Ocean Storage : COSMOS）が提案されている。²⁾ -56°C における液体 CO_2 の密度は約 1.2kg/L であり、海水の密度よりも大きく、自重により海中を沈降すると期待された。周囲の海水から CO_2 液滴への伝熱を検討した結果、直径 1m の液滴であれば水深 2700m まで沈降することが期待された。しかし、このような大液滴の形状を維持することはきわめて困難と考えられた。そこで、ドライアイスと液体 CO_2 を混合した CO_2 スラリーを海中に放出する方法（新 COSMOS）が提案された。³⁾ ドライアイスの潜熱により液滴の温度上昇を抑制されるとともに、冷熱により液滴の周囲に氷膜が生成し、周囲の海水からの入熱が抑制されると期待される。液滴の沈降シミュレーションにより、スラリー中のドライアイス率が 50% であれば、直径 42cm 以上の液滴は水深 2700m 以深まで沈降することが示された。

そこで、新 COSMOS に基づく深海貯留の実用化を検討するため、鉄道建設・運輸施設整備支援機構（JRIT）の運輸分野における基礎的研究推進制度による助成を受けて、洋上浮体、投入管及び投入ノズルから構成される洋上投入システムの検討及び要素技術の開発が行われた。低温の CO_2 スラリーを海中に投入するためのノズルとして、図6に示す二重管型スラリー投入ノズルが考案された。⁴⁾ 二重管の内側から CO_2 スラリーを、内管と外管の間から常温の液体 CO_2 を放出することにより、スラリーにより冷却された内管と海水との接触を抑制し、スラリー放出時のノズルの閉塞を防止できると期待された。このコンセプトに基づくスラリー投入実験装置を製作し、これを高圧タンクに搭載して高圧水中に CO_2 スラリーを投入する実験を行い、二重管型ノズルの有効性を確認することとした。

図6 二重管型ノズルの概念図

図7にスラリー投入実験装置の概要を示す。本装置は、ドライアイスを充填するチャンバに液体CO₂の注入孔を設けたスラリー調製装置を、遠隔操作式大口径ボールバルブを介して二重管型ノズルと接続したものである。チャンバ内に充填されたドライアイス粒子に液体CO₂を注入することによりCO₂スラリーを調製した。ボールバルブを開放した後、ピストンを駆動してスラリーを高圧タンク内に投入した。タンク内の温度及び圧力は、7.0±1.0°C、5.0~5.5MPaとした。

図7 スラリー投入実験装置の概要

実験の結果、閉塞を起こすことなくスラリーを投入することに成功し、二重管型ノズルの有効性を確認した。さらに、ノズル形状及び投入条件を最適化することにより、図8に示すように、スラリーを液滴として放出することに成功した。

図8 二重管型ノズルから放出されたスラリー液滴

3.3 CO₂ 深海貯留の環境影響評価 CO₂ 深海貯留の実用化を図る上では、技術開発や経済性の評価とともに環境への影響を評価することが重要である。環境影響評価においては、深海生物への影響の調査などとともに、貯留サイト近傍における pH 変化や、貯留

CO₂ の海中への溶出速度等の見積もりが必要となる。そこで、高圧タンクを用いて貯留サイトに相当する温度、圧力条件においてCO₂液滴を貯留する実験を行い、液滴近傍における pH 変化の測定、及び溶出速度の測定を行った。⁵⁾

溶出速度は液滴径の変化により求めることとした。液滴径を測定するため、高圧タンクの底面に50mm間隔で格子状に白線を引いた板を設置した。液滴径20~30mmのCO₂液滴をタンク内に投入し、温度5~7°C、圧力30MPaにおいて1~2日間にわたって液滴を静置し、液滴近傍における pH 及び液滴径の変化を測定した。本実験におけるCO₂液滴の様子を図9に示す。さらに、pH 変化及び溶出速度に対する液滴周辺の流速の影響を調べるため、回流装置を用いて水流を発生させ、同様に実験を行った。

図9 高圧タンク内に貯留したCO₂液滴

pH 測定の結果を図10に示す。CO₂液滴近傍の pH は、初めは7.0~8.0であったが溶解に伴って徐々に低下し、最終的に4.0付近にまで低下した。また、流速の増大により、pH 変化の速度が増大することが示された。

図10 CO₂液滴近傍における pH の変化

さらに、溶出速度の測定データをもとに、液滴からのCO₂溶出モデルを検討した。深海貯留の条件では液

滴が CO_2 ハイドレート膜に被覆されることに着目し、固体球からの物質移動モデルに基づく溶出速度式を検討し、実験データとの比較を行った。 CO_2 液滴径の測定結果及び速度式からの予測を図 11 に示す。速度式からの予測値は流速が低く貯留時間が短い場合は実験データと比較的によく一致したが、時間の経過とともに予測よりも実際の溶出速度は低下した。溶出により液滴近傍の CO_2 濃度が増大し、溶出の駆動力となる液滴表面と近傍との間の CO_2 濃度差が減少したことが原因ではないかと推定された。

図 11 CO_2 液滴径の測定結果及び速度式からの予測
図中の○は測定結果, 実線は流速 1.0mm/s に対する,
破線は流速 0.0mm/s に対する予測

4. 結び

近年のエネルギー価格の上昇や資源の需要増大により、海底に賦存するエネルギー・鉱物資源の開発や海洋空間利用の検討が進められており、これらに関連する深海技術の研究開発も活発化している。海上技術安全研究所の高圧タンクは最大で 60MPa (水深約 6000m 相当) の圧力環境を模擬できるだけでなく、水温や pH の調整、水流の発生機能を有し、6 台のビデオカメラによるタンク内部のモニターが可能であるなどユニークな機能を有する施設である。深海環境を模擬できる海上技術安全研究所の高圧タンクは、 CO_2 深海貯留などの深海技術の研究に活用されてきた。今後も様々な研究に活用されることが期待されている。

参考文献

- 1) B. Metz, et al, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage (2005), 431, Cambridge Univ. Press.
- 2) I. Aya, K. Yamane and K. Shiozaki, Greenhouse Gas Control Technologies, (1999), 269-274, Elsevier.
- 3) I. Aya, et al, Am. Chem. Soc. Fuel Chem. Div. Prep. 47-1 (2002), 27-33.
- 4) 中島ほか 5 名, 二酸化炭素海洋貯留に関するシン

ポジウム講演論文集, (2008-03), 25-32.

5) Y. Nakajima, et al, J. JIME, 41-Special Issue, (2006-09), 150-157.