

## CO<sub>2</sub>の昇圧・搬送

神野秀基\* 吉川 成\*  
井上修行\* 深作善郎\*\*

### Technology for Pressurizing and Transporting CO<sub>2</sub>

by Hideki KANNO, Shigeru YOSHIKAWA, Naoyuki INOUE, & Yoshiro FUKASAKU

CO<sub>2</sub> for CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) is at about atmospheric pressure when recovered and needs to be pressurized by compressor, taking into account underground pressure and pressure resistance in the line of passage. An investigation done by simulation revealed that an optimally energy saving operation can be done by compressing CO<sub>2</sub> to 5.0 - 5.5 MPa and condensing it, furthermore pressurizing the CO<sub>2</sub> by an injection pump. The following outlines the turbomachinery used for this process, namely a refrigerating machine for supplying cooling water for CO<sub>2</sub> condensation, and discusses the performance of a large-scale CO<sub>2</sub> gas compressor, as well as of an injection pump for CO<sub>2</sub> pressurization.

**Keywords:** CCS, Compressor, Refrigerator, Pump, Liquefaction, p-h diagram, Specific enthalpy, Acid gas, Super critical, Power saving

### 1. ま え が き

地球温暖化は、人間の産業活動に伴って排出された人為的な温室効果ガスが主因となって引き起こされ、なかでも二酸化炭素CO<sub>2</sub>の大量放出の影響が大きいとされている。エネルギー消費及びCO<sub>2</sub>排出は開発途上国を中心とした経済発展とともに飛躍的に増え続けており、地球温暖化防止は急務である。その対策には、CO<sub>2</sub>排出量削減と発生CO<sub>2</sub>の固定化という大きな流れがあり、様々な技術が開発され適用が進んでいる。CO<sub>2</sub>排出量の削減策には、エネルギー消費そのものを抑える省エネルギー、CO<sub>2</sub>排出量の少ない資源に切り換える燃料転換、原子力エネルギーあるいは再生可能エネルギーの利用などがあり、発生CO<sub>2</sub>の固定化策には、生物による吸収固定（植林等）、排出CO<sub>2</sub>の回収・地中貯留などがある。

本稿は、CO<sub>2</sub>の回収貯留（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）において、排出源から回収したCO<sub>2</sub>を昇圧して搬送し、圧入井を通じて地下深部帯水層などに圧入する際に使用されるターボ機械を中心としたシステムについて紹介する。

### 2. CO<sub>2</sub>の昇圧システム

CO<sub>2</sub>を分離回収後に搬送し貯留するには、ほぼ大気圧のCO<sub>2</sub>ガスを、地下の圧力及び管路抵抗を考慮に入れた圧力まで昇圧する必要がある。CO<sub>2</sub>は、石炭・石油・天然ガス等の化石燃料からエネルギーを発生させる際に生じるものであり、CCSは発生させたエネルギーの一部を消費してしまうので、CCSに必要なエネルギーを低減させることは大きな課題である。CCSにおける大きなエネルギー消費は、CO<sub>2</sub>の分離回収部と昇圧部で生じるが、ここではCO<sub>2</sub>分離後の昇圧システムについて検討する。昇圧に必要なエネルギーは、CO<sub>2</sub>の圧縮工程がどのような経路を通るかで異なってくる<sup>1)</sup>。文献1)では等温圧縮に近い多段圧縮などを取り扱っているが、本検討では、より実機に近い条件で検討した。なお、流体の物性値にはデータベースREFPROP<sup>2)</sup>を用いた。

昇圧システムの出入口条件を表1のように設定する。CO<sub>2</sub>の分離回収にはアミン系水溶液による吸収を利用す

\* 風水力機械カンパニー 開発統括部

\*\* (株)荏原エリオット アジアパンパシフィック技術統括

本稿は(社)火力原子力発電技術協会協会誌「火力原子力発電」低炭素社会の実現に向けた電力エネルギー・環境技術特集号「CO<sub>2</sub>の昇圧・搬送」執筆者：神野秀基ほか、2009年10月号、P.129～134への投稿原稿に一部加筆修正を加えたものである。

表1 CO<sub>2</sub>の出入口条件  
Table 1 CO<sub>2</sub> conditions

CO <sub>2</sub> ガスの入口条件 Inlet condition	
温度 Temperature	40℃
全圧 Total pressure	絶対圧力 120 kPa
水蒸気分圧 H <sub>2</sub> O pressure	絶対圧力 7.4 kPa
CO <sub>2</sub> 分圧 CO <sub>2</sub> pressure	絶対圧力 112.6 kPa
組成 Composition	CO <sub>2</sub> 97.4 wt% H <sub>2</sub> O 2.6 wt%
CO <sub>2</sub> 処理量 CO <sub>2</sub> flow rate	137 t/h 38.06 kg/s
CO <sub>2</sub> の出口条件 Outlet condition	
出口圧力 Pressure	絶対圧力 20000 kPa
出口温度 Temperature	30～60℃

流量は年間連続で1200000 t-CO<sub>2</sub>/年  
Flow rate is 1200000 t-CO<sub>2</sub>/year

ることが多く、CO<sub>2</sub>を吸収した水溶液は、加熱してCO<sub>2</sub>を分離し、吸収能力の高い水溶液に再生する。水溶液から分離したCO<sub>2</sub>ガスは冷却して凝縮水分を吸収液に戻すので、回収装置から出てくる冷却後のCO<sub>2</sub>ガスは、ガス温度で飽和した水蒸気を含み、湿度は100%である。昇圧システムの入口ガス圧力はCO<sub>2</sub>発生源のシステムに大きく関係するが、分離回収システムから昇圧システムに送られてくる圧力として、大気圧よりも幾分高めに設定した。昇圧後のCO<sub>2</sub>圧力は20 MPa、CO<sub>2</sub>流量は年間100万トンクラスとした。

また、昇圧に必要なエネルギー算出の際、ガス圧縮機のポリトロップ効率を80%、液化したCO<sub>2</sub>を昇圧するインジェクションポンプの効率を80%、前記圧縮機・ポンプの駆動用モータとギアを含む駆動源の効率を95%とした。更に圧縮機の間中冷却器（熱交換器）及び凝縮水分を分離するスクラバ（気液分離器）などCO<sub>2</sub>流れ系の圧力損失を考慮し、また圧縮機中間冷却器の冷却水を出入口温度差10 K、中間冷却器を含めた配管系の圧力損失を20 kPaとして、その搬送動力を考慮した。なお、計算簡略化のため、水分除去は圧縮後の冷却による凝縮水分分離だけとし、除湿乾燥装置は考慮していない。

2-1 ガス圧縮機だけによる昇圧

入口の大気圧付近のガス状態から超臨界圧までガス圧縮機だけで昇圧する場合を検討する。圧縮の途中でガスを冷却することで、ガス比容積の縮小による圧縮動力の低減を図り、また水蒸気の一部を凝縮分離してガス量を

減らすことにより必要動力の低減を図ることができる。圧縮機を数セクションに分割し、セクション間に中間冷却器を設けて冷却する。3～5セクションに分割したときのイメージを図1に示す。(3セクション分割の圧縮機構成は後述の図6に示す)。各セクションで圧縮比がほぼ一定になるよう分割し、中間冷却器出口（セクション入口）温度を45℃及び40℃としたときの必要圧縮動力を図2に示す。圧縮経路を図3の圧力・比エンタルピー

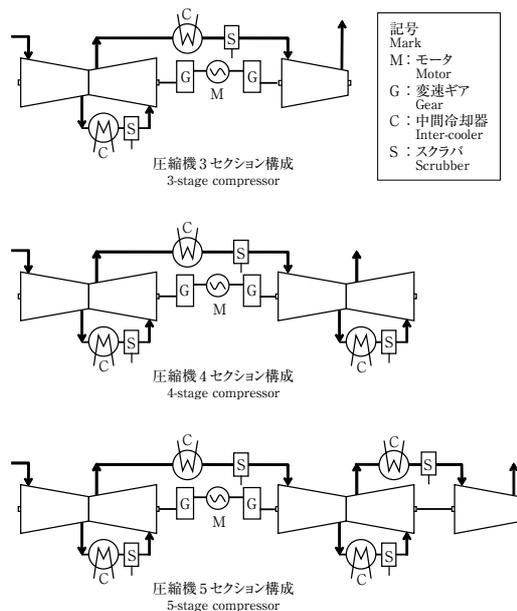


図1 圧縮機構成図  
Fig. 1 Compression train

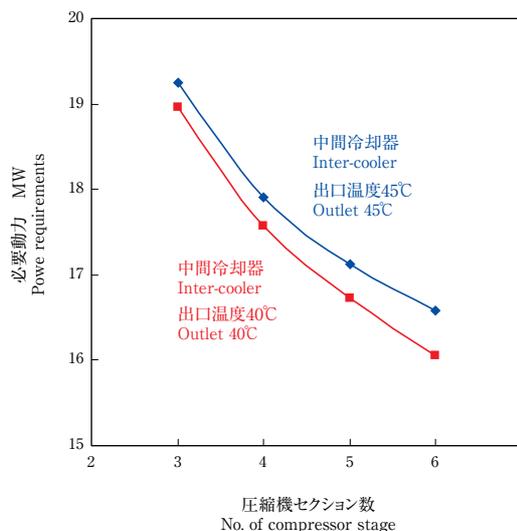


図2 圧縮方式の必要動力  
Fig. 2 Compression power requirements (Gas compression)

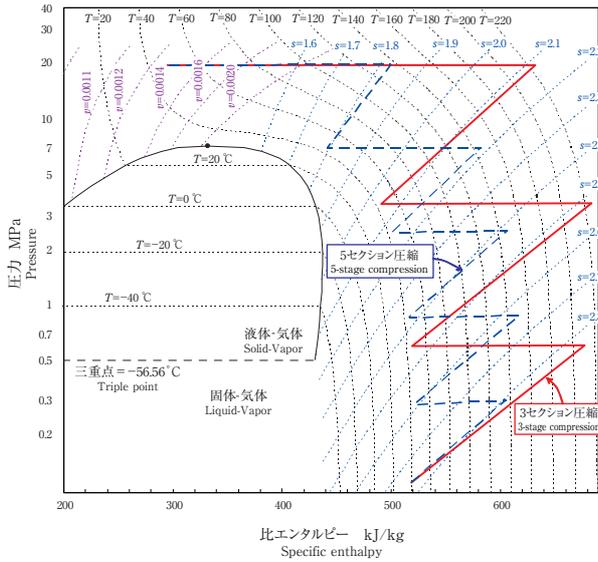


図3 P-h線図上の圧縮経路 (ガス側から昇圧)  
**Fig. 3** Compression process on P-h diagram (Gas compression)

線図上に示す。中間冷却器出口温度を低下させることで圧縮動力を減らすことができ、またセクション数を増やして中間冷却器を増やすことで、等温圧縮に近づけていけば、圧縮動力は低下していくことが分かる。ただし、セクション数及び中間冷却水を増やすことは、設備費がセクション数に比例するような形で増大するので、省エネルギーとのバランスで決定することになる。

なお、必要動力は、圧縮機動力と中間冷却器の冷却水搬送動力であるが、冷却水搬送動力は圧縮動力の0.5～

0.85%程度と非常に少ない。

## 2-2 ガス圧縮機とインジェクションポンプの併用による昇圧

ガス昇圧の必要動力を減らす方法として、ガス圧縮機による昇圧の途中でCO<sub>2</sub>ガスを冷熱源で液化しその後インジェクションポンプで昇圧するシステムが考えられる。途中で液化するには、最低でも三重点の圧力0.518 MPa以上、臨界圧7.377 MPa以下の液化圧力までガス圧縮機で昇圧し、冷凍機からの冷水で冷却液化させる必要がある。ガス圧縮機の動力低減には前述のガス圧縮機だけの場合と同様に中間冷却が有効であり、ガス圧縮機を3～5セクション構成とし、冷却液化後のCO<sub>2</sub>をインジェクションポンプで昇圧、貯留部に注入する。液化圧力をパラメータにして、昇圧に必要な動力を検討する。CO<sub>2</sub>ガスを冷却して液化させる冷凍機のCOPは、冷凍サイクルの冷媒凝縮温度と蒸発温度を基にしたカルノーサイクルのCOPの63%とする。冷凍機の冷水（又はブライン）、冷却水の出入口温度差は5 Kとして、蒸発温度と凝縮温度の差を抑制し、冷凍機のCOP上昇を図った（出入口温度差を大きくすると、流量減少による水ポンプ動力低減よりも、冷凍機COP低下による冷凍機動力増大の方が大きい）。

検討結果を図4に示す。ガス圧縮機だけの経路よりも、途中で液化してポンプで昇圧する経路の方が、必要動力を減らすことができる。破線で示すグラフは、液化CO<sub>2</sub>をポンプで昇圧し、そのまま低温で吐出する場合の必要動力であり、4.5～5.5 MPa程度の液化圧力において最

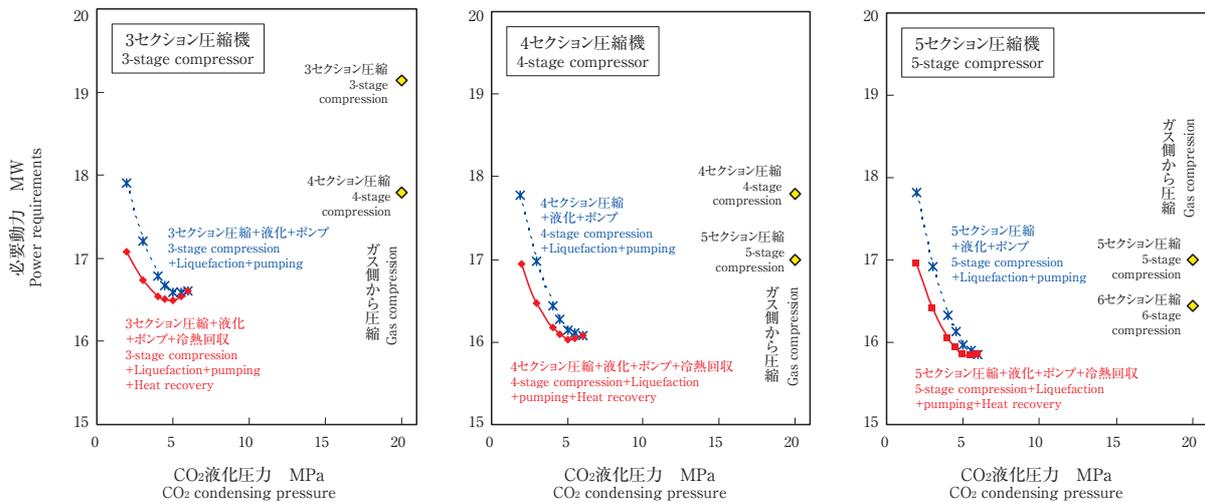


図4 圧縮機とポンプによる昇圧方式の必要動力  
**Fig. 4** Compression power requirement (Compression + pumping)

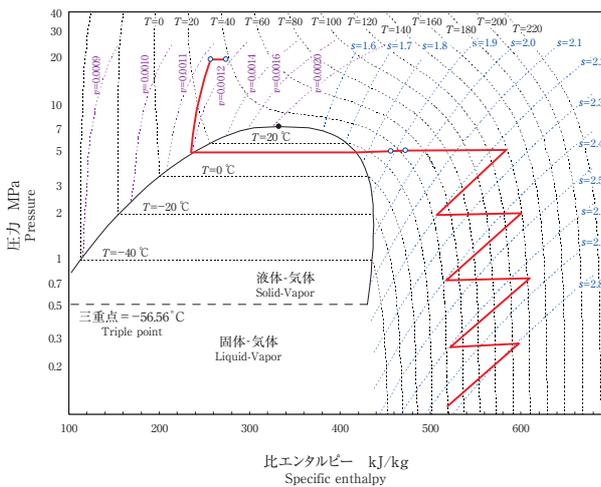


図5 P-h線図上の圧縮経路 (圧縮機とポンプによる昇圧方式)  
**Fig. 5** Compression process on P-h diagram  
 (Compression + pumping)

小になる。液化圧力を低くし過ぎると、液化温度が低く、ポンプ昇圧後も低温のエネルギーをもったまま吐き出されるため、必要動力が増加してくる。グラフ中の実線は、ポンプ吐出し後の液化CO<sub>2</sub>から冷熱を回収し、液化前のCO<sub>2</sub>ガスを冷却することで、冷却液化に必要な冷凍機動力を減らした場合を示す。最適液化圧力が低压側になってくる。ただし、CO<sub>2</sub>液化に用いる冷水温度が5℃未満になってくると、凍結防止のために不凍液（ブライン）にする必要があり、伝熱の悪化による冷凍機COPの低下、更に粘度上昇による搬送動力の増大もある。液化圧力5.0～5.5 MPa程度であれば不凍液の必要はなく、冷凍機も地域冷房用に使用される標準的な大型冷凍機が利用でき、また省エネルギー上も有利である。代表的な圧縮経路として4セクション圧縮機を用い、5.0 MPaでCO<sub>2</sub>を液化、冷熱回収をした場合の経路を図5に示す。

### 3. CO<sub>2</sub>ガス圧縮機の紹介

ガス圧縮機によって、ほぼ大気圧のCO<sub>2</sub>ガスを凝縮圧(4.5～6.0 MPa程度)まで昇圧する。昇圧の際の温度上昇を抑え、動力削減を図るため、前述のように中間冷却器を設けているが、この冷却器は、CO<sub>2</sub>ガス温度上昇による圧縮機材料への腐食性増大を抑える役目も兼ねている。冷却温度は、地域及び季節変化を考慮すると30～50℃程度となることが多い。

図6は、大気圧付近のガスを最終吐出し圧約5.0 MPaまで昇圧する3セクション構成の遠心式ガス圧縮機トレーンの外形図である。2セクションの昇圧を行う低圧

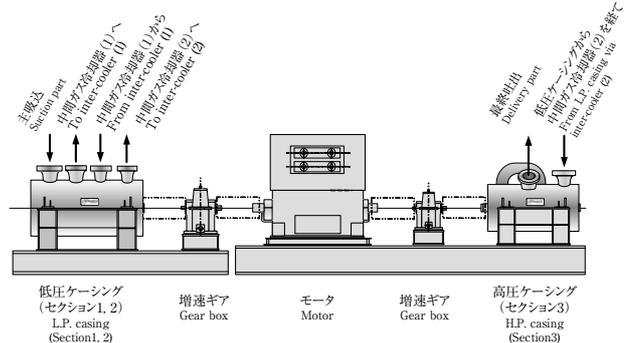


図6 ガス圧縮機トレーン (3セクション構成)  
**Fig. 6** 3-stage gas-compressor

ケーシングと、1セクションの昇圧を行う高圧ケーシングで構成し、増速ギヤを介して適切なスピードで運転される。低圧ケーシングは、設計圧力からは水平分割型も可能であるが、H<sub>2</sub>Sなどの危険性の高いガスを含む場合は、ガス漏洩のリスクを減らすためにバレル型とすることもある。また低圧ケーシングには中間冷却用のノズルが設けられており、中間ガス冷却器(1)に接続される。低圧ケーシングを出たガスは、再度別の中間ガス冷却器(2)を経て、高圧ケーシングにおいて昇圧される。高圧ケーシングは通常、設計圧力からバレル型となる。また、スラスト力の低減を図るためインペラの配列を途中で逆にする背面配列(back-to-back)となる。最終吐出しを出た後は、再びガス冷却器によって冷却され、液化された後ポンプによって圧送される。

表2に、当社のガス圧縮機型式とCO<sub>2</sub>の年間処理量を示す。Mは水平分割型、MBはバレル型を表しており、処理体積流量は同じである。CO<sub>2</sub>処理能力は圧縮機の主

表2 圧縮機ケーシング型式  
**Table 2** Compressor frame and flow range

圧縮機フレーム Compressor frame	ケーシング外径 mm Casing outer dia.	CO <sub>2</sub> 流量 t/年 CO <sub>2</sub> flow range (t-CO <sub>2</sub> /year)
10 M/MB	673	50 000～130 000
15 M/MB	756	60 000～170 000
20 M/MB	881	90 000～230 000
25 M/MB	972	110 000～300 000
29 M/MB	1080	150 000～400 000
32 M/MB	1207	200 000～520 000
38 M/MB	1353	260 000～690 000
46 M/MB	1499	350 000～920 000
56 M/MB	1695	460 000～1210 000
60 M/MB	1778	610 000～1610 000

吸込体積流量で決まるので、低圧ケーシングの型式がおおよその年間処理量を決定する。表2の処理量は、常温大気圧で100%濃度のCO<sub>2</sub>を処理するとしたときの年間処理量である。CO<sub>2</sub>の分圧が下がれば、それに応じてCO<sub>2</sub>処理量は低下する。高圧ケーシングは、昇圧されたガスの体積流量が減るため、小さいケーシングとなる。

CO<sub>2</sub>ガス圧縮機のインペラ材料は、CO<sub>2</sub>の腐食性を考慮してマルテンサイト系ステンレスである13Cr-4Niが一般的であるが、H<sub>2</sub>Sなどの腐食性の高いアシッドガスを含む場合は析出硬化系ステンレスである17-4PHも使用される。圧縮機の軸シールは、取り扱うガスが純粋なCO<sub>2</sub>の場合は構造が簡単なラビリンスシールを採用してもよい。ただし、可燃性ガスやH<sub>2</sub>Sなど毒性のある成分が含まれている、ガスが周囲へ漏洩しないようにする必要のある時は、メカニカルシールもしくはドライガスシールが使用される。

#### 4. インジェクションポンプ

前述2-2のように、昇圧途中で凝縮液化した後、インジェクションポンプにより超臨界状態まで昇圧するのが、省エネルギーの点から望ましい。

石油業界では以前から老朽油田に対し増進回収法(EOR: Enhanced Oil Recovery)を使用し、水、ガスの圧入による二次回収を行っている。CO<sub>2</sub>等を圧入する方法は、油層中の高圧下で原油によく溶解し、油層中での原油の流動性を向上させる。天然ガスや原油を採取、精製過程で発生するCO<sub>2</sub>のほかアシッドガス及びその他のガスを採取した。

不要な物質を地中に圧入固定化し、更に原油増産をする一挙両得の試みがなされている。こうした背景のなか

で、米国の某石油会社が、天然ガスプラントにおいて硫化物を除去するガススイートニング(Gas sweetening)プロセスで発生した副産物をCO<sub>2</sub>とともに地下に戻すプラントを建設した。当社は本プラントに、有毒で炭素鋼を腐食させる性質をもつと同時に超臨界状態では更に流体が活性化し腐食性が増すとされるアシッドガス(Acid gas: 主にH<sub>2</sub>S)とCO<sub>2</sub>の混合流体を加圧し、超臨界状態で地下に搬送するポンプを納入した実績があるので概要を紹介する<sup>3)</sup>。

インジェクションプロセスは図7に示すように、複数のガス圧縮機と冷却器及び可変速ポンプとからなる。対象ガスをガス圧縮機で加圧し中間冷却器で冷却するプロセスを数回繰り返した後に、液化したガスをポンプにより昇圧し超臨界状態にしている。

インジェクションポンプは二重胴横軸多段ポンプ(段数11段、図8)で、要項は流量2.5 m<sup>3</sup>/min、圧力22.5 MPa、電動機出力1120 kW {1500 HP} であり、アキシャルラスト低減装置としてラストディスク型バランス機構を設けている。高圧流体を低圧側に排出し、ディスク前後に生じる差圧力とポンプに発生するアキシャルラストとが釣り合う構造を採用することにより、取り扱われる流体がポンプの中間段で変化しても自動的に安定してラストバランスさせることが可能であり、外部に設けた油潤滑軸受に大きな負荷変化を与えない。また、ラストディスク型バランス機構の低圧側がいかなる条件下でも、気化しないような圧力に保持する必要がある、低圧側を吸込配管ではなく、中間段に接続させている。

インジェクションポンプは前述のように最適凝縮圧力が5.0~5.5 MPaで吸込圧力が高くなり、更に反駆動機側は前述のポンプバランス機構のとおり吸込圧力より高

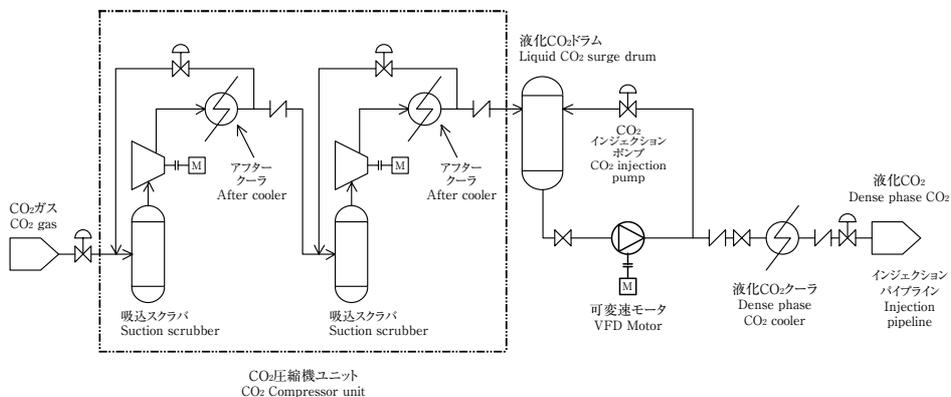


図7 CO<sub>2</sub>地下圧入のための昇圧プロセス  
Fig. 7 CO<sub>2</sub> storage process

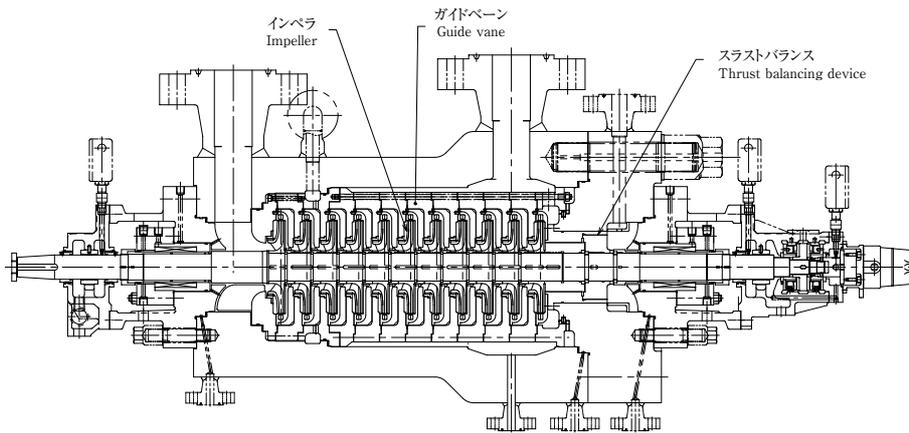


図8 インジェクションポンプ断面図  
Fig. 8 Cross section of injection pump

く設定するため、メカニカルシールは過酷な条件となる。また加圧対象がH<sub>2</sub>Sを含有する毒性の強い流体であるため、外部に漏洩しないよう配慮が必要である。この条件を満足するメカニカルシール及びシールシステムについて種々の試験を実施して、最適な構造・材料のシールとシールオイル及び制御方法の開発を行った。シール性能保持のために、シールの摺動部前後の差圧を一定に保つことが不可欠である。このため、ダブルメカニカルシールを採用し、シール差圧一定保持の制御機能と、電源喪失などの緊急事態に制御弁動作完了までシールの必要差圧を保持するためのアキュムレータをもつシールオイルユニットを設置した。更に、インジェクションポンプをインバータ制御の可変速ソフトスタートとし、メカニカルシール負荷状態に急激な変化が生じないように配慮した。

材料に関しては、アシッドガス及びCO<sub>2</sub>の超臨界流体は腐食性が強いいため、耐腐食性に優れた材料の選定が必要であり、ケーシングはステンレス系を使用し、スラストバランス機構やインペラ摺動部などは耐食性とカジリ防止のため特殊な表面硬化処理（ハードフェーシング）を施した。これらの材料はすべて国際防食技術者協会規格NACEMR01.75の要求に適合している。

この超臨界ポンプは、天然ガスのスウィートニングプロセスで生じたアシッドガスとCO<sub>2</sub>の地下返送プロセス

に採用され、懸念されたアシッドガスによる腐食の進行もなく既に3年半以上順調に運転されている。

## 5. まとめ

シミュレーションにて、CO<sub>2</sub>ガスの昇圧に必要なエネルギーが圧縮経路により変化すること、圧縮機で5.0～5.5 MPa程度まで昇圧して凝縮させた後に、液化CO<sub>2</sub>をインジェクションポンプで昇圧する経路が最適であることを確認した。

地球温暖化対策としてのCO<sub>2</sub>の分離回収貯留（CCS）には、数多くの解決しなければならない課題があり、世界各地でテストプラントの検討がなされているが、CCSに用いるターボ機械として、これまでの圧縮機、ポンプ、冷凍機などの実機経験が課題解決の一助になると確信する。

## 参考文献

- 1) J. Moore, K. Brun, M. Nored, R. Gernentz "Novel Concepts for the Compression of Large Volume of CO<sub>2</sub>" 2007 ASME Turbo Expo, Montreal, Canada, May, 2007.
- 2) E. W. Lemmon, M. L. Huber, M. O. McLinden "REFPROP: Reference Fluid Thermo-dynamic and Transport Properties" NIST Standard Database, Version 8.0 (2007).
- 3) 寺垣, 神野: アシッドガス及び二酸化炭素インジェクションポンプ, ターボ機械 第36巻 第8号, 2008年.