

CCUS バリューチェーンにおけるターボ機械の課題とソリューション

株式会社荏原製作所
エネルギーカンパニー 企画管理統括部
製品・技術開発部 マーケティング課

藤澤 宏行、前田 淳、西川 昌挙、ラリー・ゲルン (Larry Gerung)

1. はじめに

地球温暖化対策として世界中で脱炭素化の機運が高まる中、再生可能エネルギーの導入に加えて、化石燃料の利用に伴うCO₂を固定化する CCUS (二酸化炭素回収・有効利用・貯留) 技術等、次世代カーボンフリー燃料への転換など、様々な取り組みが検討・普及しつつある。

本稿では、カーボンニュートラル社会実現に不可欠な CCUS バリューチェーンに焦点を当て、その社会実装における課題と、それらを解決するための最適なターボ機械ソリューションについて紹介する。

2. CCUS バリューチェーンの全体像と課題

CCUS バリューチェーンの全体像を図1に示す。CCUS は、大きく「回収・輸送」「貯留・利用」のフェーズで構成される。

回収・輸送：DAC (直接空気回収) や燃焼前後で回収されたCO₂は、パイプラインや運搬船を用いて輸送される。

貯留・利用：集められたCO₂は、EOR (原油増進回収) や深部帯水層、枯渇油ガス田へ貯留されるほか、合成燃料や化学品として再利用される。

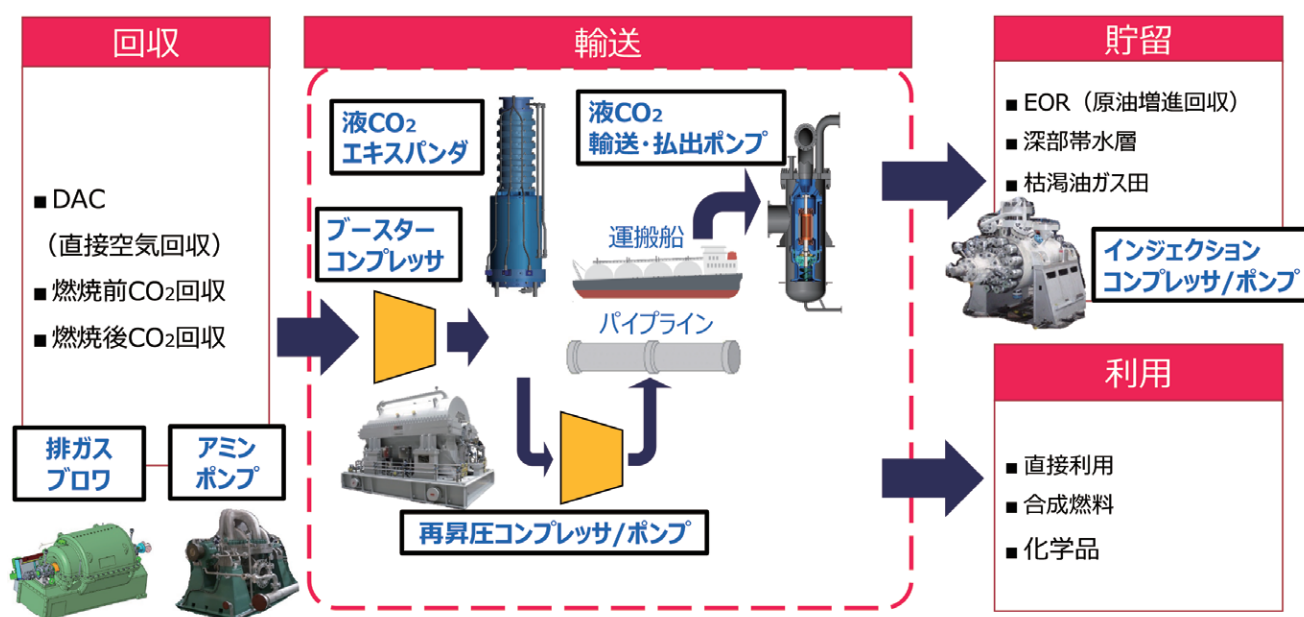


図1 CCUS バリューチェーンの全体イメージ

ターボ機械技術から見た技術課題として、主に下記2つを挙げる。

(1) 回収～輸送～貯留プロセスにおける大きな圧力差を克服する最適化設計

例えば、産業プラントの排ガス等から、これまで採用実績が多いアミン吸収液による化学吸収法を用いてCO₂の分離回収がなされる場合、ガス（気相）のCO₂が大気圧～数 bar 程度で得られる。またCO₂を地下に貯留する際には、CO₂は超臨界相として貯留することが一般的である。超臨界相は臨界温度（CO₂では 31.1℃）、臨界圧力（CO₂では 7.38MPa）を超えた領域の状態であり、液体のような高密度、気体のような低粘度・高拡散性を有しているため、地下貯留に適した性状である。したがって輸送工程においてCO₂は低圧の気相から高圧の超臨界相まで大きな状態の変化を生じることになるが、この圧縮経路、つまりどのように昇圧を行っていくかというルートは輸送形態・距離・必要エネルギー・利用可能スペース・ユーティリティなど様々な制約要因によって決定され、それに伴ってCO₂の昇圧に必要なターボ機械に対する技術仕様にも様々なバリエーションがある。したがって、ターボ機械の選定・設計・運用に関する最適解を見出すには高度なエンジニアリングとCCUS事業者・エンジニアリング企業・機器メーカ

など複数のステークホルダー間での綿密な協議が必要となる。

(2) 液化プロセスにおけるエネルギー損失

CO₂の長距離船舶輸送では、高密度の液体として運搬船のカーゴタンクに貯蔵することで、効率良く大量輸送を行うことが計画されている。その際に必要な液化プロセスにおいては、昇圧に伴う温度上昇やボイルオフガス（BOG）の発生によるエネルギー損失が生産効率を下げる要因となる。

3. 課題解決に向けたソリューション

当社では回収・輸送・貯留・利用プロセスにおいて用いられるターボ機械製品技術を広く有しているが、本稿においては上述した重要課題に対する解決策となる下記2点を紹介する。

(1) CO₂コンプレッサとポンプのハイブリッドシステム

上述のとおり、案件ごとに異なる制約条件に応じて最適なCO₂昇圧用ターボ機械の選定・設計は都度決定されるものではあるが、特に運用コスト最適化の観点から有効なソリューションとして、CO₂コンプレッサとCO₂ポンプを組み合わせたハイブリッドシステムを提案する（図2）。

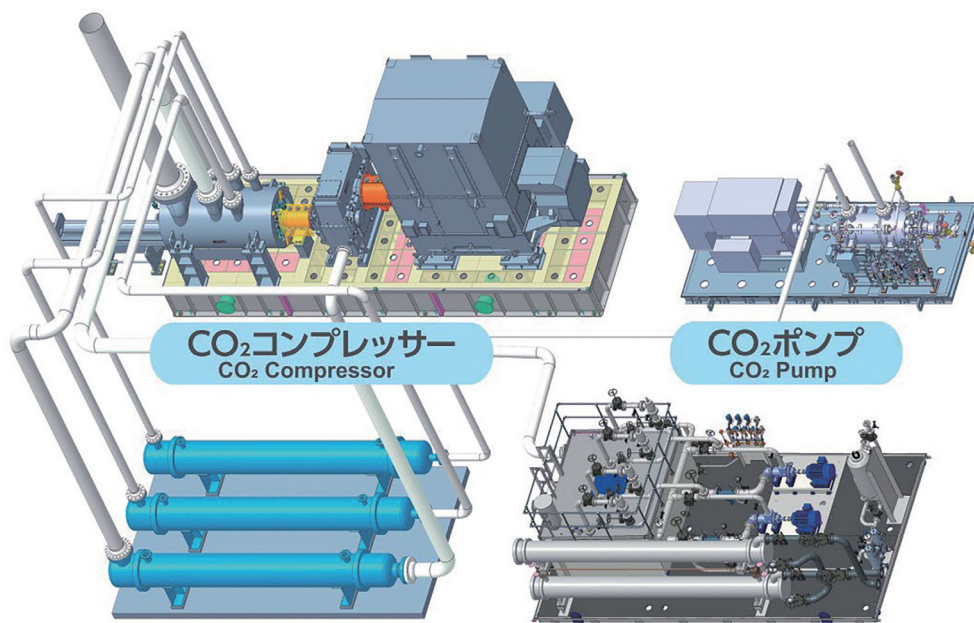


図2 CO₂ Phase コンプレッサ & ポンプ ハイブリッドシステム

コンセプトとしては、分離回収プロセス下流における気体のCO₂をコンプレッサで圧縮し、その後工程にて超臨界相になった高密度のCO₂をポンプで昇圧する、というシステムである。図3に示すモリエル線図(100%のCO₂流体を想定)にて、本システムによる昇圧工程を説明する。赤矢印で示されるように、第一段階として気体のCO₂をコンプレッサで昇圧する。ガスの昇圧は大きな温度上昇を伴うため、必要ヘッドの増加や機器設計温度の制約を考慮して、機外に設置されたインタークーラで徐熱して再度コンプレッサに戻して再昇圧することが一般的である。コンプレッサで臨界圧力を超えて超臨界相まで昇圧した後(図3の例では 100bar

程度まで)、インタークーラで 40℃程度まで冷やすことで、超臨界相の中でも液相に近く、より高密度な状態に変化させる(図3の緑破線矢印)。その高密度の超臨界流体を、ポンプによって地下圧入に必要となる出口圧力まで昇圧する(図3の青矢印)。

CCUSインフラの運用コスト全体においてCO₂昇圧に掛かる消費動力は大きな割合を占める。図3のモリエル線図において、気相及び気相に近い超臨界相では等温線の幅が狭い、つまり圧力上昇に伴う温度上昇幅が大きいことが示されている。温度上昇が大きいということは、その分だけターボ機械の必要軸動力が増大することを意味する。

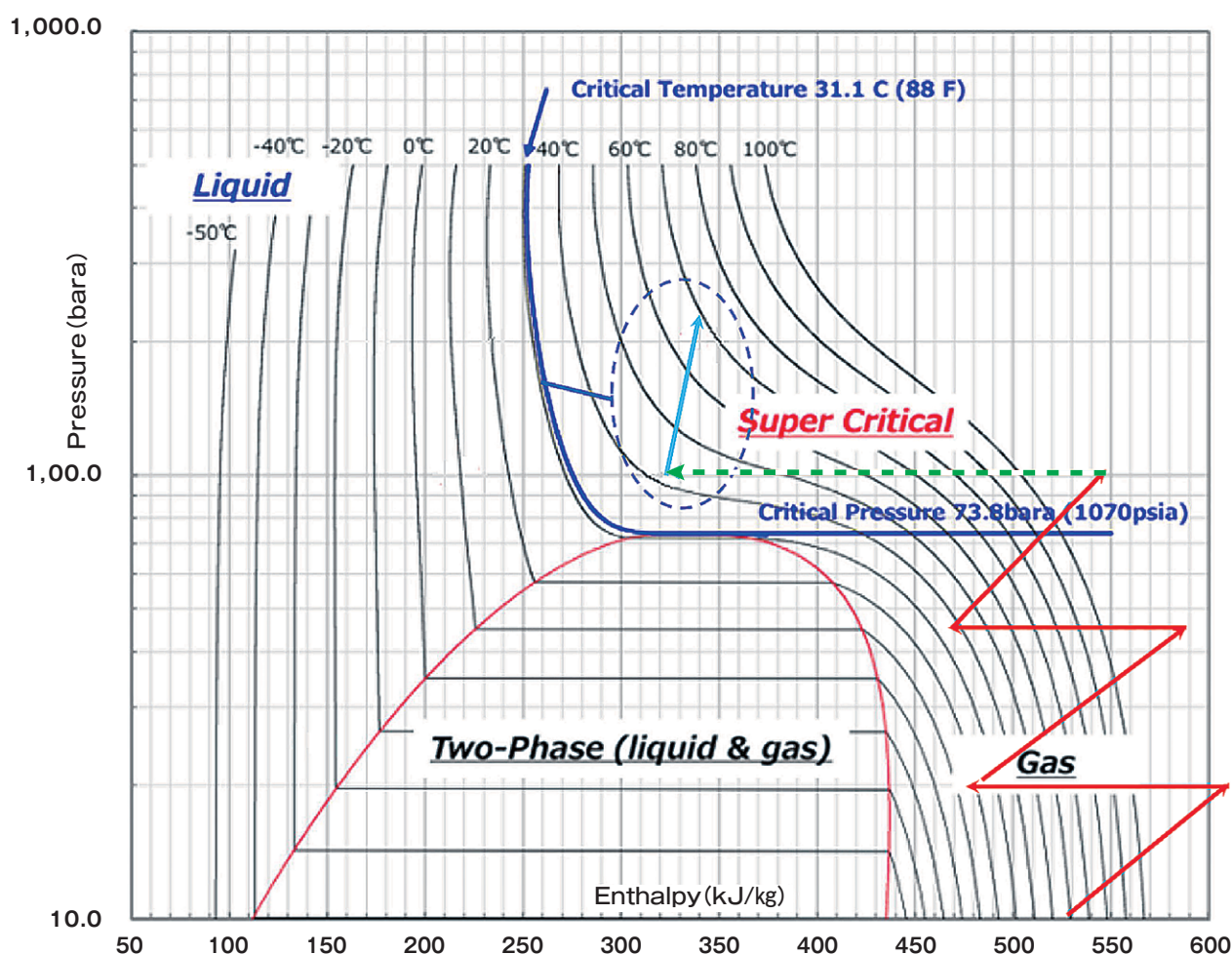


図3 ハイブリッドシステムによる昇圧工程の最適化

それと比較して、液相や液相に近い超臨界相の領域では等温線の幅が広く、圧力上昇に対する温度上昇幅が緩やかである。したがって、コンプレッサよりもポンプにて液相に近い超臨界相領域を昇圧した方が必要動力を大幅に削減することができる。また、同じくポンプにて液相にて昇圧することも可能であるが、高圧領域で臨界温度線を跨がないように昇圧するためにはポンプ入口温度を0～30℃程度まで冷却する必要がある。その多くの場合においては冷温水機などを導入して低温の流体を用意する必要があり、冷熱を生み出すためのエネルギーが運用コストに追加される。一方、本ハイブリッドシステムで想定する40℃程度の冷却であれば一般的な冷却水との熱交換で実現できるため、冷熱生成のためのエネルギーは不要であり、運用コストを抑えられる。

(2) 省エネを実現するCO₂エキスパンダの導入

未利用エネルギーを活用したプラント省エネ化やエネルギー効率改善を目的として、液化プロセスにCO₂リキッドエキスパンダを組み込むことを提案する(図4)。

液化プロセスにおけるCO₂の熱力学的変化としては、昇圧⇒徐熱を経て、次の膨張過程によって急激な温度及び圧力の低下を生じることで、取り扱いやすい低圧状態で高密度の液化CO₂を得られる。この膨張過程を大別すると、主にジュールトムソン膨張と断熱膨張の2つがある。ジュールトムソン膨張は、内部エネルギーを使って膨張の仕事に変換する、等エントルピー変化を用いた方法であり、一般的に絞り弁を用いて行われる。一方、断熱膨張は外部との熱のやり取りがなく、つまり等エントロピー変化を行いながら膨張を行う方法であり、外部に対する仕事をエキスパンダ等の動力として変換する。

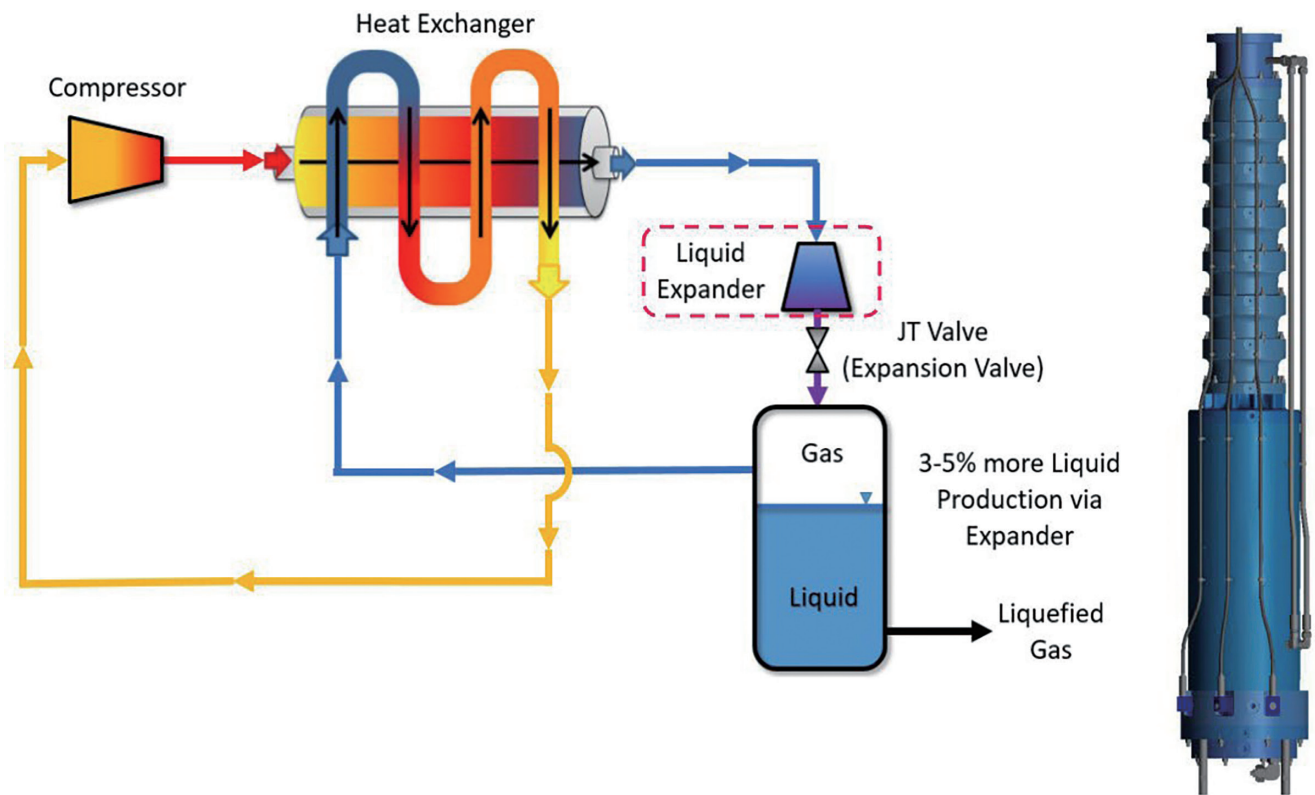


図4 動力回収エキスパンダ

断熱膨張の利点は主に2つあるが、これを図5の膨張過程を示すモリエル線図にて、ジュールトムソン膨張（図中の黄矢印）と断熱膨張（図中の青矢印）との比較にて説明する。1点目は膨張による仕事が動力として回収できることである。図中①で示すように、断熱膨張の場合は流体がもつエンタルピーを減しながら膨張しており、この差分をエキスパンダの回転エネルギーとして取り出すことができる。エキスパンダに連結された発電機を回し、電気エネルギーとして取り出すことで、余剰エネルギーを活用したクリーンな電力を生み出す。2点目は液分収率の増加である。多くの場合で、膨張後の状態は気液二相となり、そこで発生したボイルオフガスは再液化するなどの処理が必要となるため、液化に要するエネルギーの増加につながる。図中②で示すように、断熱膨張はジュールトムソン膨張よりも液相線に近い、つまりボイルオフガス発生量を抑えることができるため、再液化エネルギー低減につながる。したがって、エキス

パンダの導入は、これら2点の効果によって設備の省エネルギー化や脱炭素化に貢献することが期待される。なお、図5では断熱膨張過程を全てエキスパンダで行う、つまりエキスパンダは気液二相流を扱うものを例として図示しているが、動的機器であるエキスパンダは運転での信頼性を高めるために液相のみで膨張を行い、その後の気液二相領域は絞り弁で膨張させる、という両者を組み合わせた方式もあり、プロセス条件や CAPEX／OPEX バランスへの顧客ニーズを踏まえて最適な技術ソリューションをご提案する。

4. おわりに

CCUSバリューチェーン実現には、高圧技術や省エネ技術を駆使した、高度で多様なターボ機械技術が鍵となる。用途とフェーズに応じた最適なターボ機械ソリューションを提供することで、持続可能な脱炭素社会の実現に貢献していきたい。

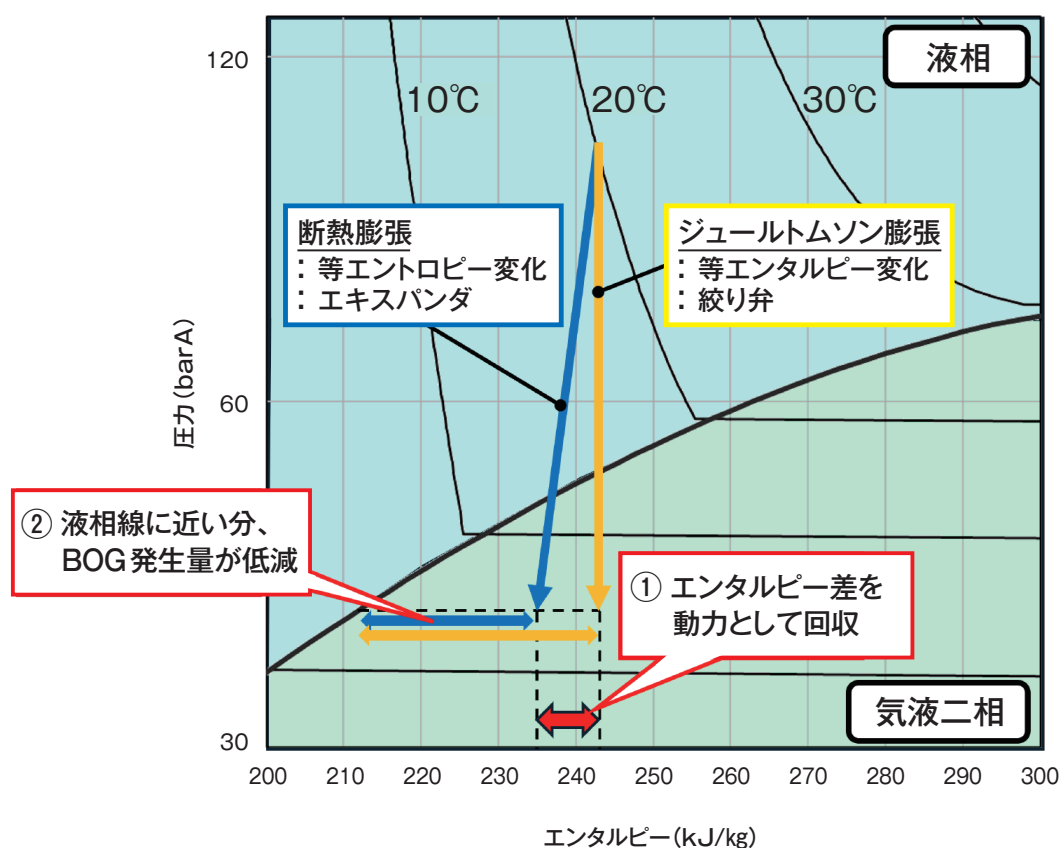


図5 熱力学的変化におけるジュールトムソン膨張と断熱膨張の比較（模式図）