

(解説)

二酸化炭素回収・貯留および長期エネルギー貯蔵用途向け ギア内蔵型遠心圧縮機

藤岡輝明^{*1}

Integrally-geared Centrifugal Compressor for Carbon Capture and Storage (CCS) and Long Duration Energy Storage (LDES) Applications

Komei FUJIOKA

要旨

近年、社会の環境意識が高まるなか、当社は温室効果ガスの削減を目的とする二酸化炭素回収・貯留（Carbon Capture and Storage：CCS）において回収したCO₂を地下貯留層に圧入する高圧のCO₂圧縮機を開発し、当社工場内でCO₂ガスを用いた超臨界状態での実圧試験を実施した。また、技術開発が期待されている長期エネルギー貯蔵（Long Duration Energy Storage：LDES）における機械式バッテリーシステムの充電用圧縮機は、高温ガスの取り扱いや頻繁に起動・停止を繰り返す運転条件に技術課題がある。当社はこれまでに培った技術やノウハウを組み合わせ、これらの課題解決に取り組んでいる。本稿ではお客様のより良い環境を「つくる」に寄り添う遠心圧縮機の製品開発や技術課題への取り組みについて解説する。

Abstract

In recent years, as environmental awareness in society has increased, Carbon Capture and Storage (CCS) has been implemented to reduce greenhouse gas emissions. Kobe Steel has developed a high-pressure CO₂ compressor for injecting captured CO₂ into underground reservoirs and conducted pressure tests in a supercritical state using CO₂ gas in its factory. Meanwhile, the charging compressor for the mechanical battery system in Long Duration Energy Storage (LDES), which is expected to undergo technological advancement, faces technical challenges in handling high-temperature gas and operating conditions that require daily start and stop. Kobe Steel is addressing these challenges by combining its own technologies and know-how the company has cultivated to date. This article explains Kobe Steel's product development and approach to technical issues for centrifugal compressors to support its customers by creating a better environment.

検索用キーワード

地球温暖化、二酸化炭素回収・貯留、ギア内蔵型遠心圧縮機、CO₂圧縮機、長期エネルギー貯蔵、高温圧縮機、CCS、LDES

まえがき＝二酸化炭素回収・貯留（Carbon capture and storage：CCS）はカーボンニュートラルの実現に不可欠な役割が期待されているだけでなく、ブルー水素、ブルーアンモニアのエネルギー供給の面でも貢献度が高く、近年とくに米国や欧州でプラント計画および稼働実績が増えている。また我が国でも2020年に、2050年までのカーボンニュートラル実現を目標に掲げている。それにともない2024年には二酸化炭素の貯留事業に関する法律（CCS事業法）が成立し、2030年の事業開始を目指していることから、日本においてもCCS事業が近い将来身近な存在になると考えられる。

CCSの中で圧縮機は主に輸送、貯留で用いられ、それぞれCO₂を排出源から船舶やパイプライン輸送のための圧送用として、さらに貯留地へ圧入用として用いられる。一般にCCSに関わる設備費や運転費用はCCSが設置されるプラント全体の経済的効率性を下げるため、機械的信頼性に加えて安価で高効率な経済性の高い圧縮機が求められる。

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーが増えていくなかで、余ったエネルギーを長時間貯める長期

エネルギー貯蔵（Long Duration Energy Storage：LDES）が注目され始めており、2020年代に入り様々なプロセスが開発され、一部は商用化まで進んでいる。その中の一つとして圧縮機を用いてガスの圧力エネルギーと熱エネルギーを貯蔵する機械式がある。リチウムイオンバッテリーに代表される蓄電池と比べ、部品を構成する材料の調達に制約が少なく、機械自体の耐久年数が長く、大容量蓄電ができるなどの利点がある。いっぽう取扱ガスが高温であることや頻繁に起動・停止を行うことなど、通常連続運転で使用される機械とは異なる点に配慮が必要である。

本稿では、まずCCSにおいて回収したCO₂を地下貯留層に圧入する用途を想定した当社の高圧CO₂圧縮機の開発内容と技術のポイントについて紹介する。ついでLDESで用いられる高温圧縮機の技術要求と課題、およびその解決に向けた当社の取り組みについて解説する。

1. CCS用高圧CO₂圧縮機

当社の主力商品のギア内蔵型遠心圧縮機（以下、ギア内蔵型）は図1の圧縮機断面モデルに示すように大歯

^{*1} 機械事業部門 技術本部 回転機・機器技術部

車（Bull gear）を介して増速された小歯車を有するピニオンロータの先端にインペラが取り付けられている。そのため、ギア比を変えることでピニオンロータごとにインペラの回転数を調整することができる。図2に一例を示すように遠心圧縮機の効率はインペラの形状の相似性を表す指標である比速度（ n_s ）で整理される¹⁾。必要なヘッドと体積流量に対してインペラの外径と回転数を変えて適当な比速度を選定することで効率を最適化できる。比速度の定義式は回転数、体積流量、ヘッド、重力加速度でつぎのように示される。

$$n_s = 2\pi N Q^{\frac{1}{2}} / (gH)^{\frac{3}{4}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 N ：回転数（1/s）

Q ：体積流量（ m^3/s ）

g ：重力加速度（ m/s^2 ）

H ：ヘッド（m）

さらにギア内蔵型は各段が独立しており段間に中間冷却器を配置することが容易なため、より等温圧縮に近づくことで動力削減効果が期待できる。いっぽうロータの両端にインペラが取り付けられた状態で高速回転するため、ロータ剛性が下がりやすい。そのため効率を優先して回転数を高くしすぎるとロータの振動に対する安定性の確保が難しくなることが課題である。

このような特徴を持つギア内蔵型をCCS用途におけ

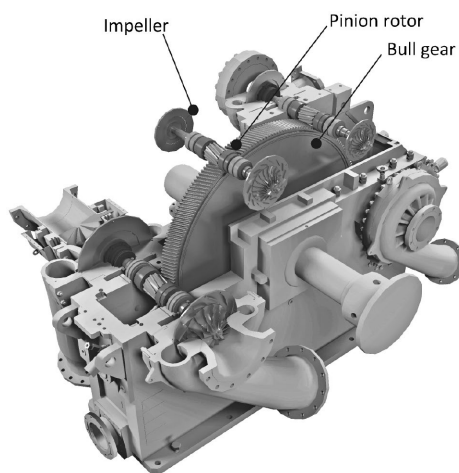


図1 ギア内蔵型遠心圧縮機断面モデル

Fig.1 Section model of integrally geared centrifugal compressor

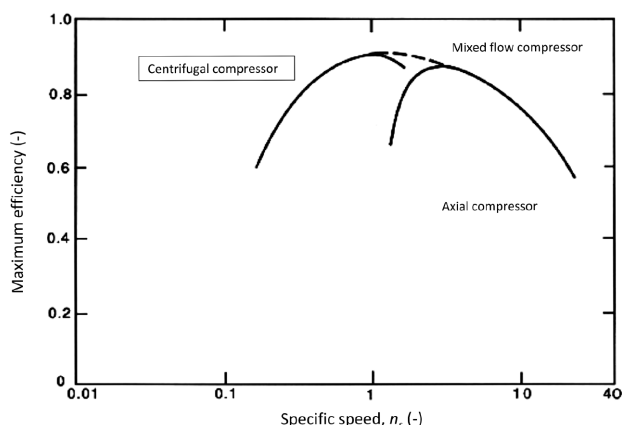


図2 比速度と最高効率

Fig.2 Specific speed vs maximum efficiency¹⁾

る高圧のCO₂圧縮機に適用した場合、つぎのような技術的課題がある。

- i) 高圧状態のCO₂の物性値変化を考慮した空力性能の予測精度の確保
- ii) 高圧・高密度のCO₂から流体力が作用するロータの振動安定性およびインペラブレードの振動強度の確保
- iii) 高圧CO₂ガスの漏えいを低減するシール性能の確保
- iv) ライフサイクルコストの低減

当社はこれらの課題解決とその検証を行うために試作圧縮機を設計・製作し、工場内でCO₂ガスを用いた実圧試験を実施した²⁾。表1に試作したCO₂圧縮機の詳細仕様を示す。また、図3にCO₂圧縮機本体および機器類が試運転設備に据え付けられた状態の外観写真を示す。

以下に前述の技術課題解決のために高圧CO₂圧縮機（以下、開発機という）に適用した技術のポイントと実圧試験による検証結果を説明する。²⁾

1.1 空力設計および性能試験結果

ガスに速度エネルギーを与えるインペラおよび速度エネルギーを静圧上昇に変えるディフューザは圧縮機の性能を決めるうえで重要な部品である。CO₂ガスは圧力が高い超臨界域では物性値の変化が大きいため、理想気体として扱うと圧力比が予想と大きくずれることがある。その場合、空力設計に組み込まれるガス物性の変化を考

表1 高圧CO₂圧縮機の開発目標仕様

Table 1 Specification of development target for high pressure CO₂ compressor

Application	Prototype
Type	Integrally geared
No. of stage	8 stages
Gas handled	CO ₂
Capacity	140,000 kg/h (72,500 m ³ /h)
Suction / discharge pressure	0.01 / 20 MPaG
Shaft power	16,600 kW
Driver	Motor (18,500kW)

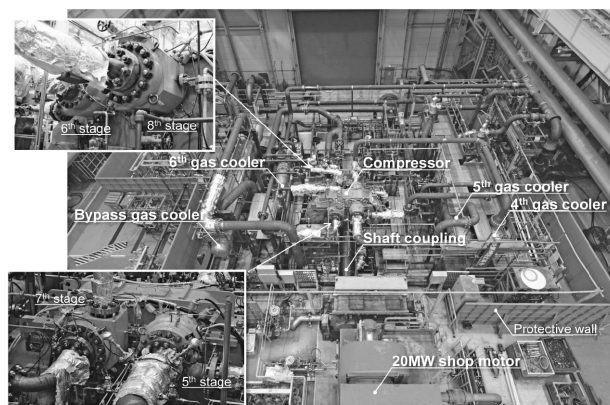


図3 高圧CO₂圧縮機開発機と試験設備外観

Fig.3 Overview of high pressure CO₂ prototype compressor and test facility

慮することでより正確なインペラ設計を行っている。

図4に実圧試験における開発機の空力性能試験結果を示す。仕様流量 ($\phi/\phi_{\text{design}} = 1$) において最終段 (8段) の吐出圧力が20 MPaGを達成しており、空力設計の妥当性が検証された。

1.2 ロータ設計および安定性評価

ロータに組み込まれたインペラやシールで発生する流体力は不安定化力として作用し、不安定振動の元となるため、十分な安定性が求められる。安定性は一般的にロータと軸受により構成されるロータ系の対数減衰率で評価され、対数減衰率が正であればロータ系は安定し、負であれば不安定となる。図5に開発機の7-8段ロータの安定性解析の結果を示す。横軸に遠心圧縮機で広く用いられる規格API617³⁾で規定されている不安定化力 (Cross coupling) を示し、縦軸に対数減衰率を示す。ガスが高圧になるにともない動力や密度が高くなるため、インペラおよびシールに作用する不安定化力が大きくなる。API617では設計時の対数減衰率は0.1以上確保することが求められるが、ティルティングパッド軸受 (TPJB) の場合、計算上は過大な不安定化力により0.1以上を確保することが難しい。不安定化力を抑えるためにインペラ吸込シール部のラビリンズシールに旋回流れを抑制する多数のフィンを持つスワールブレーカ (Swirl braker) を用いた。さらにロータに高減衰を付加させるダンパー軸受 (ISFD) を用いることで、安定性の高いロータ設計を実現している。

ロータの振動特性を実測する方法として加振試験が行

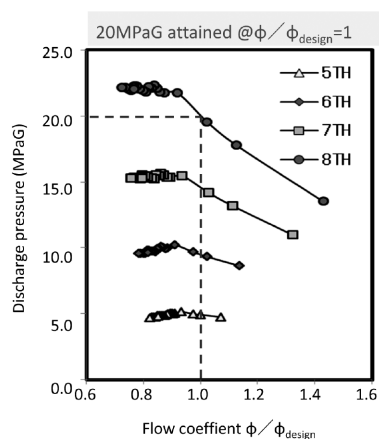


図4 各段吐出圧力
Fig.4 Discharge pressure of each stage

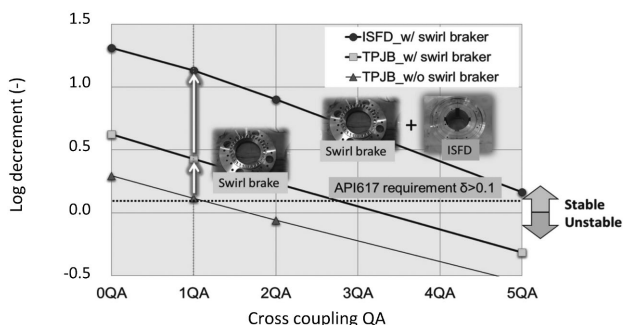


図5 ロータ安定性解析結果
Fig.5 Result of rotor stability analysis

われている。当社は図6に示すロータ安定性を評価するためにロータを加振する試験を実施した。円周方向に四つの電磁石をインペラ前方に配置し、圧縮機運転時にインペラを介してロータに曲げモーメントを電磁力により作用させることで軸直角方向に加振し、精度良くロータの減衰特性を取得することができた。図7に、横軸に最終段の吐出圧力を示し、縦軸に加振試験により測定されたロータの1次前回りモード (1stFW) と2次前回りモード (2ndFW) の固有振動数および対数減衰率を示している。加振試験の結果から、高圧条件下においてもAPI617で定められている対数減衰率以上の安定性を有することが分かった。

1.3 インペラブレード振動測定と強度評価

オープンインペラはブレードが片持ちになるためガス密度が高い場合、ブレードに大きなガス荷重が作用し、振動が大きくなった場合に過大な変動応力が発生することで破損に至る可能性がある。そこで当社は開発機の5, 6段インペラに対してブレード振動測定による強度評価を行った。

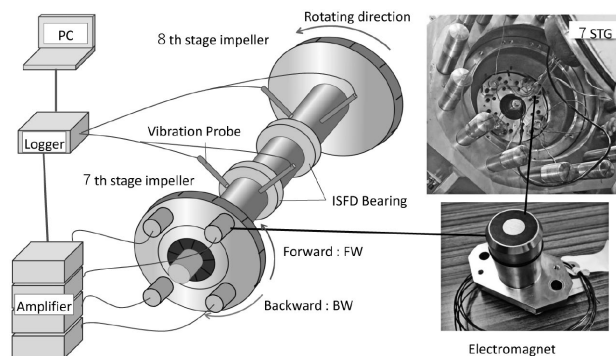


図6 開発した磁気加振システム
Fig.6 Developed magnetic excitation system

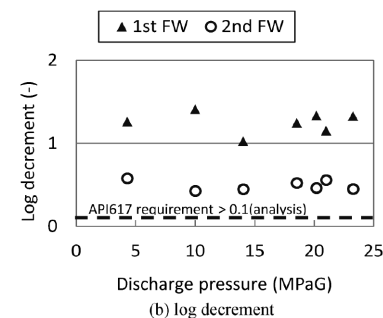
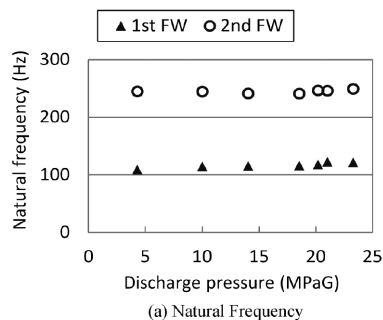


図7 吐出圧力に対するロータ動特性測定結果 (ISFD軸受)
Fig.7 Measured dynamic characteristics of rotor vs discharge pressure (ISFD bearing)

ブレード振動測定システム概念図を図8に示す。インペラと向かい合わせのケーシングに光学式変位センサを設置し、振動しながらセンサを通過するブレードのタイミングを計測する（破線）。それに加えて振動していないブレードのタイミング（実線）との時間偏差（ ΔT ）を分析してインペラの振動振幅（ ΔX ）と振動周波数を求めている。図9は横軸に設計流量に対する流量比を示し、縦軸に6段吐出圧力を示した図上に各運転点におけるインペラのブレード振幅をプロットしたものである。各プロットの丸の大きさはブレード振幅の大きさを表している。取得した振幅を元に有限要素解析を用いて変動応力を算出し、横軸に一般化された平均応力、縦軸に一般化された変動応力で整理した修正グッドマン線図を図10に示す。通常の運転範囲における振動のほかにもサージ時の応力も算出し、どの運転点においてもインペラ材料の疲労限以下であり、インペラに作用する負荷が十分低いことが確認できた。この検証により、クローズドインペラに比べ高周速化が可能なオープンインペラの適用拡大により、段数削減効果ならびにコンパクトな圧縮機の実現が可能となった。

1.4 軸シール選定と漏れ量検証結果

図11に主にCO₂圧縮機で使用されるカーボンリングシールとドライガスシールを示す。系内が比較的低圧の

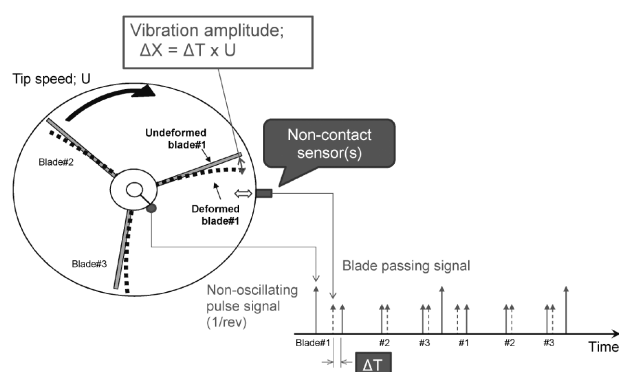


図8 ブレード振動測定システム概略図
Fig.8 Schematic of blade vibration measurement system

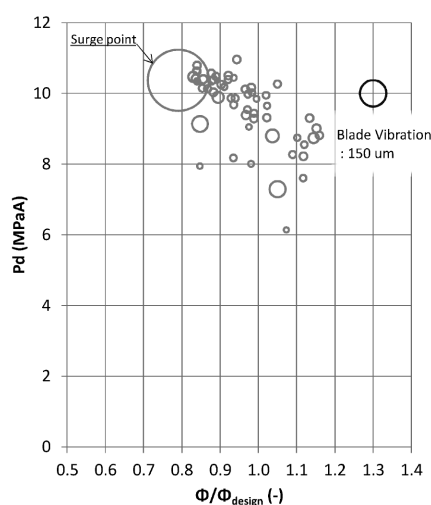


図9 各運転点における6段オープンインペラのブレード振動
Fig.9 Blade vibration of 6th stage open impeller each operation point

場合は、大気との圧力差が小さいため、安価で漏れ量の削減効果が期待できるカーボンリングシールが用いられる。カーボンリングシールは非接触型の環状シールであり、軸とカーボンの線膨張係数の差を利用し、運転時のシール部の隙間を小さくする効果があり、大気への漏れ量を削減することができる。いっぽう、シール圧力が高圧になる場合は、カーボンリングの枚数や厚みを増やす必要があり、両端にインペラを配置するギア内蔵型にとってはオーバーハングが長くなることにより、ロータ剛性と安定性が下がる傾向にある。そのため、圧力によらずシール長さが一定で、カーボンリングシールより漏れ量をさらに少なくすることができるドライガスシールが高圧条件下で用いられる。ドライガスシールは半径流方向のシールであり、シール面に溝を設け回転時にガスを巻き込むことで発生する動圧によりシール面を微小に浮

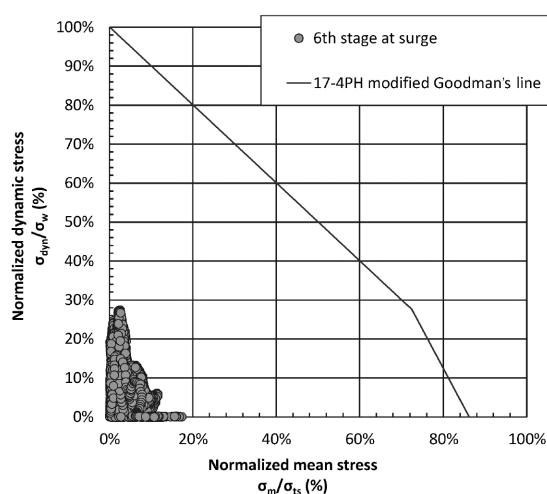
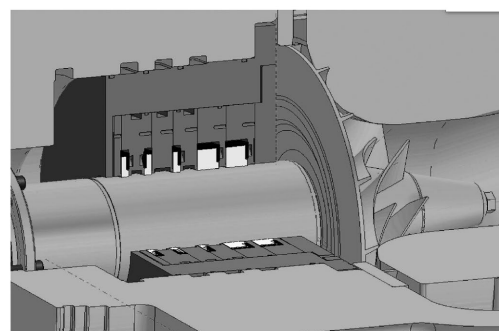
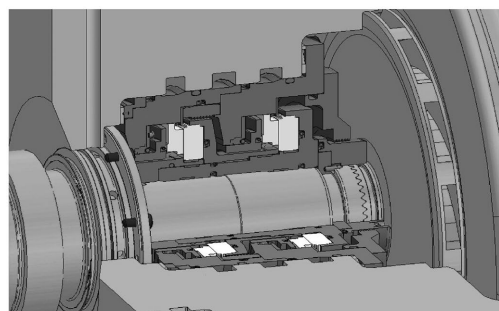


図10 オープンインペラの修正グッドマン線図
Fig.10 Modified Goodman's diagram of open impeller



(a) Carbon ring seal



(b) Dry gas seal

図11 ガスシール
Fig.11 Gas seal

上させる非接触シールである。

当社は開発機の軸シールとしてドライガスシールを使用した。吐出圧力20 MPaGにおける漏れ量計測を実施し、ドライガスシールの高い信頼性と少ない漏れ量を検証した。図12に、横軸に最終段（8段）吐出圧力を示し、縦軸に最終段（8段）に搭載したドライガスシールの漏れ量を示す。

一般的にドライガスシールはドライ環境化で使用することが求められるため、シールガスの温度は注意が必要である。高圧段の吐出ガスから分岐して、低圧段にシールガスを掃気する場合は、ジュールトムソン効果によるガスの液化を回避するように対策してある。

なおCCSで使用される圧縮機用軸シールは分離回収、輸送、貯留それぞれの圧力レベルにおいて漏れ特性、コスト、機械的信頼性が最適になるよう選定される。

1.5 スキッドを用いた圧縮機パッケージ

圧縮機の設置スペースを抑え、現地据え付け工期を短縮する方法の一つに、鋼材を組み合わせた、二階建ての骨組み（以下、スキッドという）を用いたパッケージがある。主に一階には低圧段の中間冷却器、潤滑油ユニットやシールガスユニットを設置し、二階に圧縮機、駆動機と高圧段の中間冷却器を配置することで、圧縮機ユニットをコンパクトに一体化することが目的である。図13にスキッド構造で圧縮機をパッケージした外観を示す。

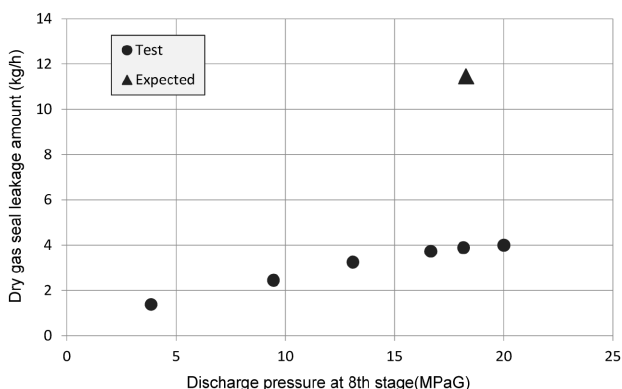


図12 8段ドライガスシール漏れ量

Fig.12 Dry gas seal leakage amount of 8th stage

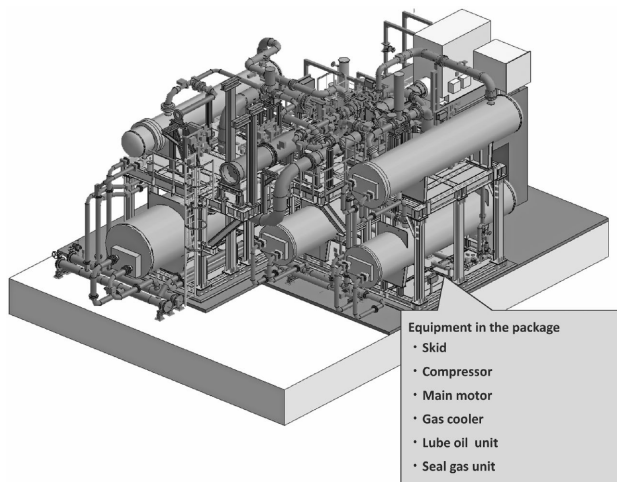


図13 圧縮機パッケージ外観

Fig.13 Overview of compressor package

この圧縮機パッケージの利点は、二階建て構造とすることで圧縮機および付帯機器の占有面積を減らすことができる。さらに圧縮機パッケージは工場出荷前に配管最終のつなぎこみまで行うため、現地で配管溶接施工、耐圧気密試験をする必要が無いことや、各機器はあらかじめ工場で組み立てた順番に設置することで、現地では容易に組み立てることができるため、現地作業時間の削減により、近年高騰する人件費を抑えることが期待できる。いっぽう、メンテナンス時には圧縮機および付帯機器を容易に吊り下ろせること、作業者が機械へ容易にアクセスできること、手すりなど安全面での配慮が必要である。また、圧縮機パッケージは二階建て構造となるため、スキッドの固有振動数と運転周波数の共振回避を固有値解析などを用いて設計時に確認する必要がある。さらに回転体から発生する動荷重に対しては、基礎ボルトのサイズ、材質の妥当性などを評価する。当社は以上の技術アプローチにより信頼性の高い圧縮機ユニットを提供している。

2. LDES用高温圧縮機

再生可能エネルギーを長期間貯蔵するシステムの検討、実証プロジェクトが近年増えている⁴⁾。圧縮機によってエネルギーが与えられた高温ガスを圧力エネルギーと熱エネルギーに分離して貯留する機械式の充電システムに遠心圧縮機が用いられており、熱交換器、蓄圧・蓄熱装置、発電タービンを組み合わせて充電と発電を行う。機械式の蓄エネルギーシステムはリチウムイオン電池に代表される蓄電池に比べ材料の調達に制約が無いことや、充放電効率の経年的な劣化も無く、充放電量が大きくなると運用コストが低くなるというメリットがある。

機械式の蓄エネルギーシステムの一つであるCO₂バッテリーの系統図⁵⁾を図14に示す。充電時はドームと呼ばれる大容量のCO₂ガスホルダーからCO₂ガスを吸い込み、圧縮機を用いて、圧力および温度を上昇させる。その後、TES (Thermal energy storage) と呼ばれる熱交換器に熱エネルギーを貯蔵し、その後CO₂を液化させ高圧状態で貯蔵する。放電時は貯めたCO₂をTESで気化および加熱されたガスを用いてタービンによる膨張で発電するシステムである。本用途に納入したCO₂バッテリー用の圧縮機の外観を図15に示す。

図16に取り扱うガスを空気とし、低温液化システムを組み合わせたLAES (Liquid air energy storage) の系統を示す⁶⁾。これらに用いられる圧縮機の技術的課題は大きく二つあり、一つ目は高温状態で使用されること、二つ目は発停頻度が多いことである。本章ではそれぞれの課題と当社対応について解説する。

2.1 高温および熱遮断設計

高温になるにしたがい遠心圧縮機で用いられるインペラ材料は強度が低下する。そのため、インペラは運転時の温度における許容応力以下になるよう材質と回転数を決定する。とくにインペラ背面はインペラ出口温度にさらされることで高温状態となる。さらにインペラは自身

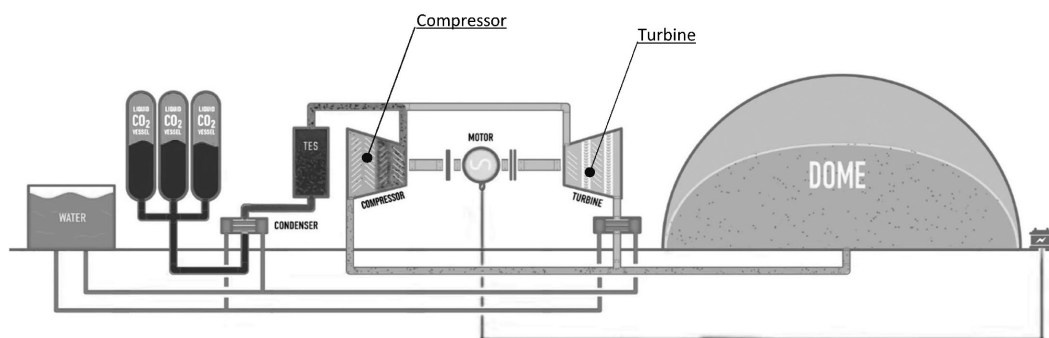


図14 CO₂バッテリー系統概略図⁵⁾
Fig.14 System schematic of CO₂ battery

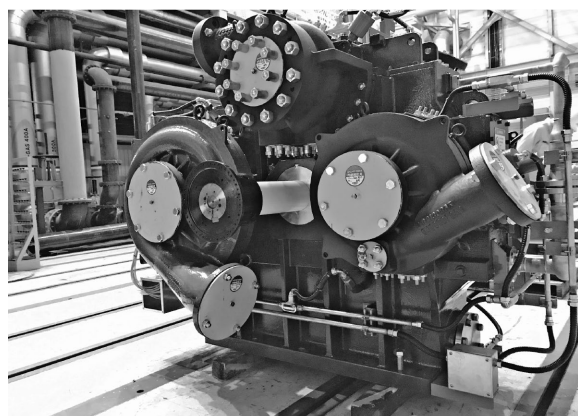


図15 CO₂バッテリー用遠心圧縮機
Fig.15 Centrifugal compressor for CO₂ battery

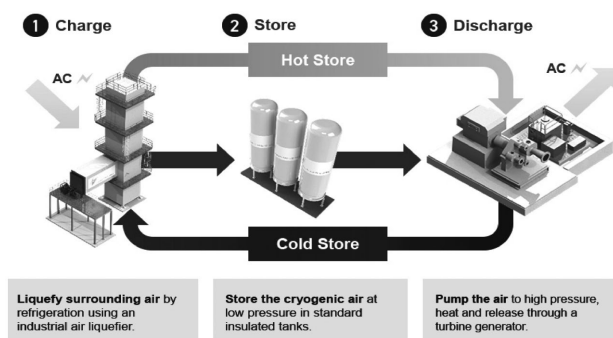


図16 LAES系統概略図⁶⁾
Fig.16 System schematic of LAES

の回転による遠心応力によって運転中は常に高応力場がインペラ内部および背面に発生する。有限要素解析を用いた強度解析により、許容応力を超えていないことや、クリープ寿命についても考慮しておくべき必要がある。当社ではインペラおよび周辺部品は設計温度に応じた耐熱鋼を使用することで高温対策を行っている。

ピニオンロータもインペラからの熱伝導およびガスからの熱伝達により高温状態となる。ピニオンロータは歯車強度を上げるために熱処理を施しており、運転時の温度が材料の焼戻し温度より高くないようにする必要がある。トルク伝達部である軸端の強度評価はもちろん軸部に熱を伝達させない工夫も必要となる。その課題を解決するために、当社はインペラとピニオンロータの間に耐熱鋼のスリーブを軸方向に挟むことでピニオンロータとインペラの距離を増やし、ロータへの入熱を抑える

工夫を行った⁷⁾。

さらに圧縮機ケーシングからギアケースへの過大な入熱はギアケースの熱変形を起こし、軸受部の芯ずれを発生させる。それにより、回転体と静止体の接触を起こす原因となるため、ギアケースへの熱遮断も必要である。こうした熱変形による影響を少なくするために断熱材を圧縮機ケーシングとギアケースの間に使用することでギアケースへの入熱を抑えた構造として対策している。

2.2 熱応力および高発停頻度

停止時と運転時の温度差が大きい場合、熱伸びで発生する配管ノズル荷重およびモーメントは非常に大きく、それらを低減もしくは支持するための工夫が必要となる。伸縮管や曲げ配管による配管外力緩和や配管荷重を支持するサポート計画は事前に検討を行っている。

また、本用途はエネルギーロスを最小化するため、起動時間を短くすることが望ましい。しかし、熱応力は起動・停止時における急激な温度変化により発生するため、どのタイミングでどの部分が高応力状態になるか把握する必要がある。当社は流体解析による接ガス部の温度状態の計算や過渡伝熱解析および構造解析を組み合わせ、熱応力の計算を行った。図17に圧縮機が起動から定格回転数到達までの時間で正規化した時間を横軸とし、縦軸にインペラに発生する応力をその最大値で正規化した値を取り、起動時の暖気運転有無による応力の変化を比較した。暖機温度および保持時間を最適化することでインペラブレード根元の応力比を10%削減することで、インペラの長寿命化を図っている。

余剰に生成された電気をを用いて充電し、調整力として使用されるLDESは、起動停止の頻度が高く、毎日起動停止（Daily Start and Stop：DSS）の繰り返し回数を設計時に考慮する必要がある。前述した熱応力は起動・停止ごとに繰り返し荷重を受けるため繰り返し数を考慮した疲労設計を行っている。また、トルク伝達する軸や軸継手は起動時に定格の数倍もの起動トルクが発生するため、起動トルクと発停数を加味した強度設計を行っている。

停止してから次の起動までの時間が比較的短い場合、圧縮機内部の部品は一律に冷めず、回転体では不均一な温度分布によりロータに熱曲がりが生じることがある。熱曲がりが発生した状態ではバランスが崩れ、起動時に振動が高くなり定格回転数まで昇速できないことがあ

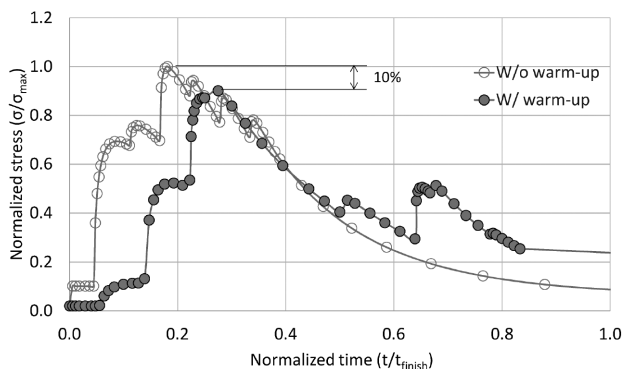


図17 起動時のインペラブレード根元応力
Fig.17 Stress at root of impeller blade during start-up

る。そのため、とくに熱変形の影響が大きい大型機には、運転後にロータを完全に停止してしまうのではなく、ターニング装置を用いた低速回転運転を行うことで、ロータの温度均一化を図り、つぎの運転時にスムーズな起動ができるように対策を行っている。

むすび = CCSで使用される高圧CO₂圧縮機やLDES向けで期待されている高温圧縮機に対する技術課題やその取り組みについて述べた。これらは今後のカーボンニュートラル社会および持続可能な社会実現に向けて重要な技術である。当社はこれからも高効率で信頼性の高い圧縮機製品技術の高度化を進めるだけでなく新しいニーズに対してもチャレンジし続け、お客様の「つくる」に寄り添った圧縮機の製品展開を行っていく。

参考文献

- 1) O. E. Balje. TURBOMACHINES, John Wiley & Sons, Inc. 1981, p.55.
- 2) 馬場利秋ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.1, p.75-80.
- 3) API STANDARD 617, NINTH EDITION, APRIL 2022.
- 4) 蓄電池以外のエネルギー貯蔵システム (LDES) の技術動向・課題整理 (経済産業省). 2024年第4回定置用蓄電システム普及拡大検討会. 2024-11-11.
- 5) ENERGYDOME S. p. A. HP. <https://energydome.com/CO2-battery/>, (参照2024-12-24).
- 6) 住友重機械工業HP. <https://www.shi.co.jp/products/energy/cryobattery/index.html>, (参照2024-12-24).
- 7) 株式会社神戸製鋼所. 藤岡輝明ほか. 回転機械. 特許第7610742号. 2025-01-08.