

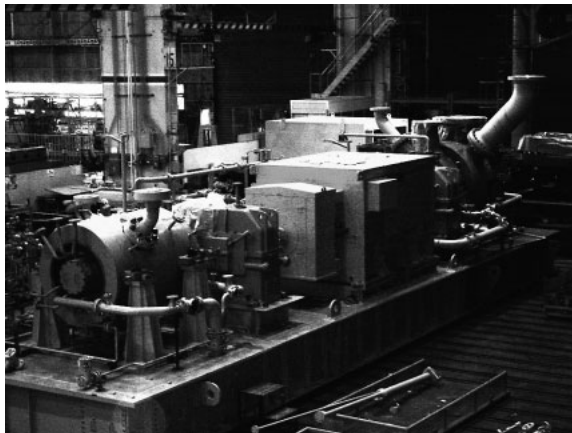
# 地球温暖化防止用CO<sub>2</sub>リインジェクション圧縮機

## Re-injection Compressors for Green House Gas (CO<sub>2</sub>)

佐藤 恒徳<sup>\*1</sup>  
Tsunenori Sato

田崎 彰範<sup>\*2</sup>  
Akinori Tasaki

枘谷 穰<sup>\*3</sup>  
Jyou Masutani



近年地球温暖化の原因の一つといわれている“温室効果ガス”の一つである二酸化炭素ガス（CO<sub>2</sub>）の処理方法が問題になっている。その一つに地中へのCO<sub>2</sub>の圧入（インジェクション）により石油産出量を増加させたり、帯水層に永久的に閉じ込めておく技術がある。本稿ではCO<sub>2</sub>地中閉じ込めのために開発、適用された大型・高効率CO<sub>2</sub>リインジェクション遠心圧縮機の特長及び実圧・実負荷工場試験検証結果を述べる。

### 1. はじめに

近年エネルギー消費を下げることにより地球温暖化の原因の一つといわれている“温室効果ガス”の一つである二酸化炭素ガス（CO<sub>2</sub>）の産出を減少させる試みに加え、発生したCO<sub>2</sub>を大気中に放出しないための一連の技術が注目されている。当社では発電所などのボイラ排ガスなどから高い効率、低いエネルギー消費でCO<sub>2</sub>を回収する排煙脱炭プラントの実用化、また地中へのCO<sub>2</sub>の圧入（インジェクション）により石油産出量を増加させたり、帯水層に永久的に閉じ込めておくための高効率インジェクション圧縮機を実用化している。

### 2. 機器仕様と特長

#### 2.1 HSE (Health, Safety and Environment)

本圧縮機の本来の目的の地球環境保全に沿うべく、設計、製作の全工程にわたりHSE（Health：健康，Safety：安全，Environment：環境）を重視した対応がなされた。

そのためにHAZOP（Hazard and Operability Study：プロセス危険性解析）及びSIL（System Integration Level：安全度水準）の検討も行われ、運転異常時の安全対策また故障時の周囲への影響度について検討・対策が行われた。

#### 2.2 機器の構成

本圧縮機トレンはCO<sub>2</sub>をほぼ大気圧から203 barま

で昇圧するために低圧と高圧の2つの圧縮機から構成され、これを11.7 MWの同期モータにより駆動する。これは、従来の肥料プラントに使用されるCO<sub>2</sub>圧縮機と比較し最終吐出圧力は約1.3倍、所要動力は約1.5倍の仕様に相当し、CO<sub>2</sub>圧縮機としては世界最大級である。

吐出圧力 : 203 bar

吸込体積流量 : 37 100m<sup>3</sup>/h (77.6 t/h)

必要駆動力 : 11.7 MW

#### 2.3 機器の特長

##### (1) 機器配置

この圧縮機トレンは、両軸駆動モータ（軸の両端でモータの出力を取り出すことが可能）をトレンの中心に配置し、その外側に2台の増速ギヤを、更に外側に2台の圧縮機を配置している。また、潤滑油システムを含めてSKID化（一体化）しており輸送・据付も容易としている（図1）。この配置により増速ギヤの動力ロスを最小限に抑えることを可能としている。

また、圧縮機は内部品カートリッジを軸方向に抜き出すことで開放できるため、圧縮機ケーシング自身は分解する必要がない。よって圧縮機ケーシングへ接続される主ガス配管の分解なしに圧縮機のメンテナンスが可能である。従来よく採用されている低圧と高圧の2台の圧縮機が隣り合わせて配置されている“タンデム配置”の場合、そのままでは干渉により圧縮機の内部品カートリッジを軸方向に抜き出

<sup>\*1</sup> 広島製作所ターボ機械技術部プロジェクトグループ

<sup>\*2</sup> 広島製作所ターボ機械技術部コンプレッサ設計課

<sup>\*3</sup> 技術本部高砂研究所ターボ機械研究推進室主席

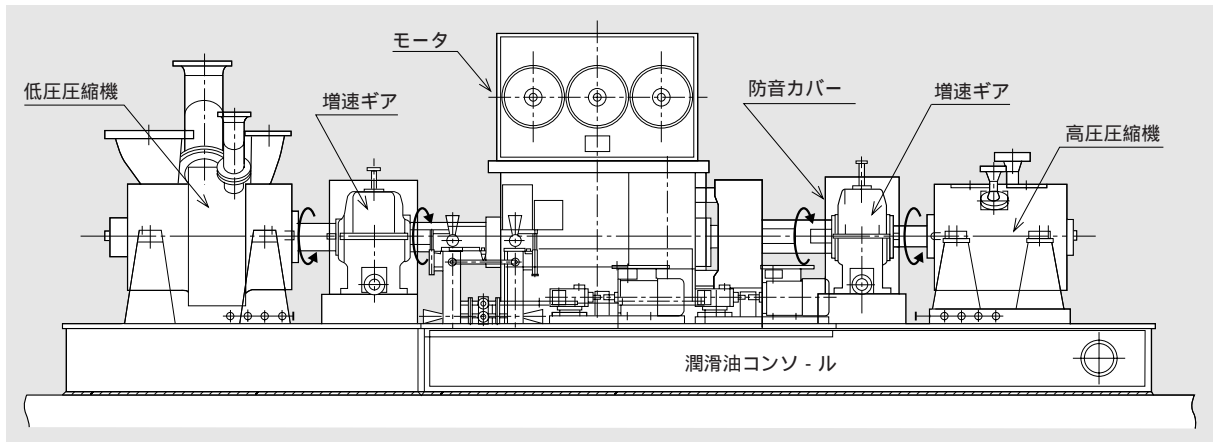


図1 CO<sub>2</sub>リインジェクション圧縮機トレン配置 両軸駆動モータをトレンの中心に配置し、その外側に2台の増速ギアを、更に外側に2台の圧縮機を配置する。

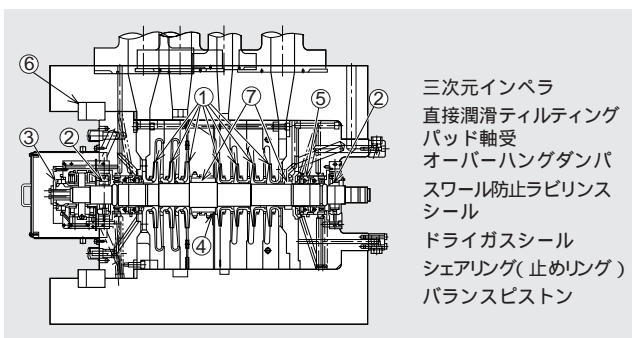


図2 CO<sub>2</sub>リインジェクション圧縮機断面 CO<sub>2</sub>リインジェクション圧縮機断面図にて、要求される高度な技術とHSEに有効な数種の特長を示す。

することができないため、どちらか1台の圧縮機をクレーンで移設してからの作業となる。しかしこの配置ではトレンの両端に圧縮機が位置するため、圧縮機の移設なしに内部品カートリッジの開放が可能であり、メンテナンス性に優れた人にやさしい構成になっている。

### (2) ソフトスタータ

また、本圧縮機トレンの駆動機の同期モータの起動には、ソフトスタータを採用している。本圧縮機トレンは電源設備（電源容量）に余裕が無い場所へ設置されるため、直入れ起動を実施すると大きな電流が流れてしまい、このときに地域の他の電力機器に電圧低下などの悪影響を及ぼす可能性が高い。そこでソフトスタータを採用し、起動時の電流を最小限にし他の設備への影響を防いでいる。

### (3) 圧縮機

圧縮機本体は、世界最大級のCO<sub>2</sub>圧縮機に要求される高度な技術とHSEに有効な数種の特長を兼ね備えている（図2）。

まず、全ステージとも使用条件により最適化された三次元羽根形状のインペラと静止ガス通路を持

表1 CO<sub>2</sub>リインジェクション圧縮機吐出ガス条件

吐出圧力	(bar)	203
吐出温度	( )	172.7
ガス分子量		43.96
ガス密度	(kg/m <sup>3</sup> )	291

ち、1段セクションでは85%の高効率を達成し、消費電力節減に貢献している。同時に三次元インペラ翼列の採用による広い運転レンジをも可能とすることで、圧縮機現地使用条件の変化にも十分に対応できる柔軟性を備えている。

CO<sub>2</sub>は遠心圧縮機で取り扱われるガスの中でも比較的分子量が大きい（表1）。このため今回の圧縮機のような高圧条件下においては比重が水の3分の1にもなり、これに起因する圧縮機ロータの不安定振動を防止する技術が重要となる。

今回の圧縮機には、ロータの振動減衰特性を向上させるために軸受外側の軸端部へオーバハンクダンパと称するスクイーズフィルム機構のダンパを付加するとともに、ティルティングパッド軸受を採用し軸受自身の不安定化力発生防止を行っている。また、差圧が大きくなる中間仕切壁部のラピルスシールには、通過するガスのスワールによる不安定化力を防止するために、高圧ガスをラピルスシール途中にガススワールと逆方向に導くスワールキャンセラを採用している。これらにより高圧条件下でもロータの十分な安定性を確保することに成功している<sup>(1)</sup>。

また、高圧ガスゆえ、運転点の変化によりロータに働く軸方向スラスト力が大きく変化することになる。そこでインペラを背面配列することに加え、スラスト力をキャンセルするバランスピストンを2つ

設置し、運転状態によらずスラスト力がほぼ一定となるようにした。

シールにはタンデムドライガスシールを採用した。すべての条件（起動、運転、停止）でのガス状態量を考慮してシステム系統、部品、材料が決定されている。

### 2.4 高密度ガス対応適用技術

高密度ガス中では大気中と比較しインペラの固有振動数が低下し、インペラの共振が発生することがある。これに対し十分な解析を実施することで固有振動数が大気中での約60%まで低下することを確認し、インペラの共振を防ぐための設計を実施している。

また、CO<sub>2</sub>のような高密度ガスは小流量側にてインペラ出口近傍で回転失速が発生しやすい。この回転失速によるSub-N成分の軸振動の増加を避けるために連続運転可能な運転範囲が狭くなることがある。そこで本圧縮機ではインペラ出口幅と静止流路幅の比を工夫することで回転失速発生点がより小流量側に寄るように設計している。

また、圧縮機の空力性能を予測することにおいて、ガス物性値の予測精度が非常に重要となるが、高圧条件下でのCO<sub>2</sub>物性値予測は臨界点近傍となり非常に難しい。三菱遠心圧縮機は肥料プラント用CO<sub>2</sub>圧縮機にて十分な実績と235 barの工場テスト結果を持っており、この技術を今回の圧縮機にも適用している。

## 3. 全負荷/全圧力工場試験設備

### 3.1 ねらい

前述のロータ安定性、回転失速発生点、インペラ共振、そしてガス物性値予測の設計妥当性について、圧縮機出荷前に確認する目的で現地運転同様のCO<sub>2</sub>ガスを用いた実圧・実負荷工場試運転を行った（図3）。

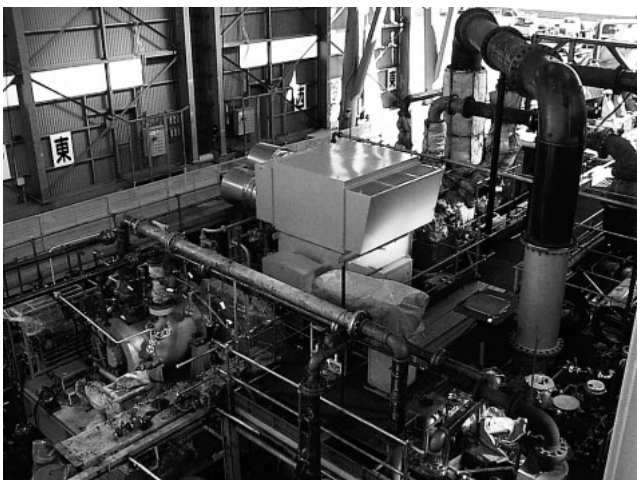


図3 工場運転試験状況 出荷前に実施した全負荷全圧力工場運転試験状況を示す。

### 3.2 試験設備仕様

本試験のために屋外テストスタンドに14 MVA容量の高圧電源設備を準備した。また、現地では起動時しか使用しないため本来5000 kW仕様でよいソフトスタータを、工場試験にて周波数変換器（工場仕様60 Hz 現地仕様50 Hz）として連続使用できるように11.7 MWの仕様とした。

試験内容及び計測はAPI-617及びASME PTC-10に準じたが、特殊計測として、圧縮機最終吐出ノズル流路に圧力センサを設置し、微小圧力変動から回転失速の発生を監視できるようにした。

また、高圧電源線により計測信号にノイズ影響がないように防磁対策に留意した。

## 4. 工場試験結果

### 4.1 空力性能

現地運転条件と等しいASME PTC-10 TYPE 1条件を満足する工場性能試験を実施し、計画どおりの性能を達成し設計検討手法が正しいことを確認した（図4）。

### 4.2 インペラ回転失速

回転失速発生による軸振動増加は通常運転点（設計点）より28%小流量で発生し（サージ予想点から23%大流量）、軸振動値制限から通常運転点（設計点）より33%小流量（サージ予想点から13%大流量）まで運転可能であることを確認でき、計画どおりの十分な運転範囲が確保され現地運転には問題ないことを確認した（図4）。

この小流量時の振動成分には回転数（N）成分以下の軸振動が増加し回転失速が発生していることが分かる（図5）。

### 4.3 ロータ振動特性

通常運転点での軸振動値はAPI-617の許容値を下回り、また非同期の振動成分が生じていないことを確認

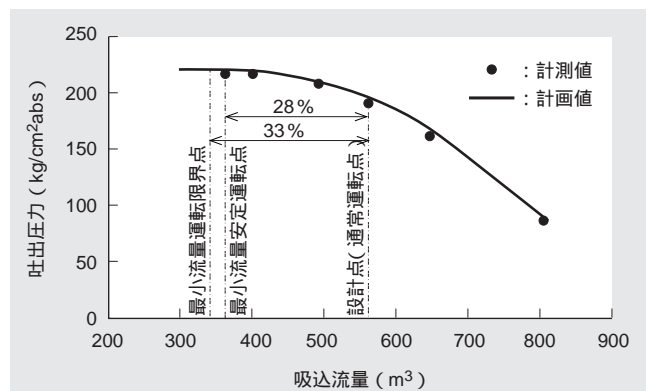


図4 最終セクション工場性能試験結果 最終セクションにおける全負荷全圧力工場性能試験結果を示す。

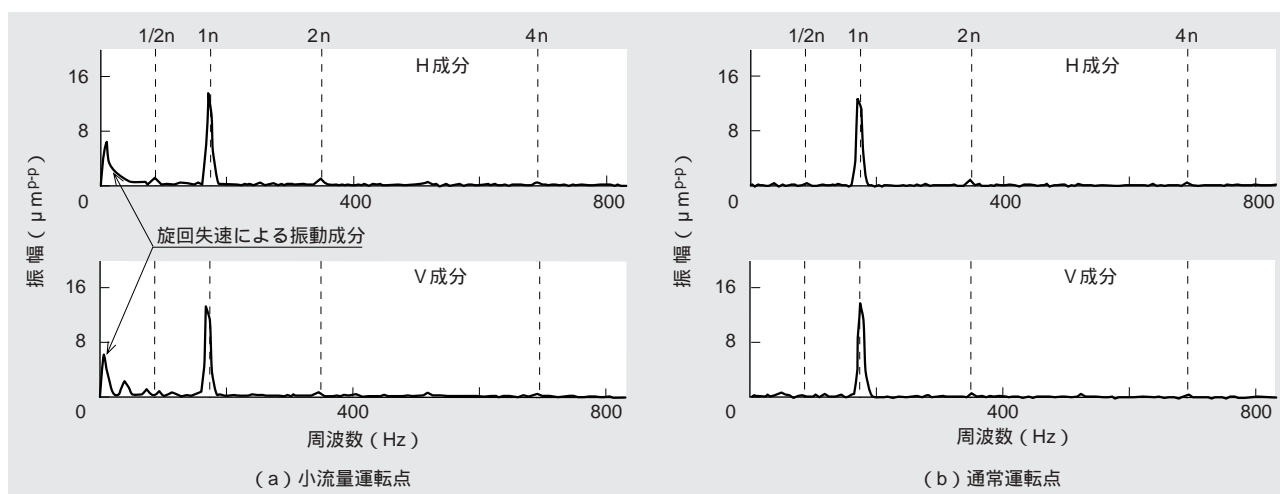


図5 振動特性結果（回転失速発生点と通常運転点）  
回転数（N）成分以下の振動が発生することを示す。

軸振動のスペクトル解析結果を示す。小流量域では回転失速にて

した（図5）。

## 5.まとめ

世界最大級のCO<sub>2</sub>リインジェクション遠心圧縮機を開発し、高空力性能、ロータ安定性（低軸振動）、回転失速発生点の小流量化、インペラ共振防止そしてガス物性値予測の設計妥当性について実圧・実負荷工場運転試験において確認できた。

CO<sub>2</sub>を取り出し、大気に放出しないための技術は今後ますます現実化し、これまで人類が経験していない1系列5000～15000t/d規模の大型のCO<sub>2</sub>回収設備が必要になるといわれている<sup>(2)</sup>。

当社はこれまで培ってきた一連の技術の更なる研さ

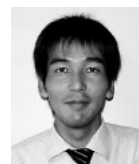
ん、発展を通じ社会の要求にこたえ、より良い地球環境構築のために貢献していく所存である。

## 参考文献

- (1) 川島ほか、肥料プラント用CO<sub>2</sub>圧縮機の開発、三菱重工技報 Vol.31 No.2 (1994)
- (2) 飯嶋、光岡ほか、排煙脱炭技術とその適用、三菱重工技報 Vol.34 No.3 (1997)



佐藤恒徳



田崎彰範



栢谷穰