

(解説)

プロセス用往復動圧縮機

Reciprocating Process Compressor



赤毛直樹*
Naoki AKAMO

In order to improve energy consumption, plants, such as oil refinery, petrochemical, energy and gas industry, are getting larger and process operating pressures are increasing. This paper describes the features of the heavy duty reciprocating compressor used for oil refinery and cryogenic service, and recent technology of the step-less capacity control device.

まえがき = 当社は、1915年に国産1号機となる往復動式高圧空気圧縮機を製作して以来、石油精製、石油化学およびガス・エネルギー分野を中心に2,300台以上の往復動圧縮機を納入しており、総動力は150万kWに達している。最高吐出圧力は、給油式では100MPa以上、無給油式では30MPa、また水素ステーション用の無給油式超高压水素圧縮機では100MPaの製作実績がある。一方、吸込ガス温度が-150℃近くまで低下する超低温分野では、1983年に世界初の超低温窒素圧縮機を納入し、1996年には国内液化天然ガス(以下、LNGという)受入基地にLNG BOG(Boil Off Gas)圧縮機を納入した。それ以降も継続的に受注し、これまでに20台以上の超低温圧縮機を製作・納入しており、石油精製向けとならんで当社の主力メニューとなっている。

本稿では、石油精製向けに納入している大型高圧圧縮機と、LNG BOG用超低温圧縮機の概要を、新しい技術の紹介もありませながら述べるとともに、最近の動向として省エネルギー(以下、省エネという)の目的で導入が進んでいる無段階容量調整装置を紹介する。

1. 主要マーケットの動向

1.1 大型高圧圧縮機

往復動圧縮機は、水素のような低分子量ガスを高圧まで効率よく圧縮することができることから、連続触媒再生式接触改質装置(CCR: Continuous Catalytic Reforming)、水素化分解装置、脱硫装置など石油精製プラントにおける水素ガスを扱う用途で広く使用されている。また、他の圧縮機と比較して、取扱いガスの成分、圧力、温度の変化に対する許容範囲が広いと、扱いやすいという特長もある。代表的な大型高圧圧縮機の仕様を表1の欄に示す。

往復動圧縮機には、ピストンリング、ライダリング、

表1 プロセス用往復動圧縮機の適用例
Table 1 Typical application of reciprocating process compressor

Application	Make-up gas compressor	LNG BOG compressor	BOG booster compressor
Model	KR70-4	KR50-2	KR60-4
No. of stage	3	1	3
No. of cylinder	4	2	4
Cylinder lubrication	Lube	Non-Lube	Non-Lube
Gas composition (mol. weight)	H ₂ (2.3)	CH ₄ (16.1)	()
Capacity (Nm ³ /h)	75,300	20,800	20,800
Suction press(MPa)	1.8	0.01	0.35
Suction temp. ()	45	- 155 (- 100 ~ - 159)	- 30
Discharge press (MPa)	19.5	0.4	9.8
Motor power (kW)	5,400	700	3,000

ピストン棒パッキンといったしゅう動部品や、シリンダ弁などの消耗部品があるため、スクリュ圧縮機や遠心式圧縮機に代表される他の形式の圧縮機と比較してメンテナンス頻度が多く、それらの耐久性、信頼性の向上により長期連続運転を可能にすることが望まれている。さらに近年は、エネルギー効率の改善を目的としたプラントの大型化が進んでおり、大型高圧圧縮機の需要も高まってきた。

また、後に紹介する無段階容量調整装置に代表される新しい省エネ技術や装置が開発されてきており、大幅な消費動力の削減が可能になった。現在は、地球温暖化防止対策としてCO₂回収・貯留技術(CCS: Carbon Capture and Storage)が注目され始めている。大量のCO₂を高圧で地中に圧入することが計画されていることから、石油精製以外でも大型高圧圧縮機の需要は継続すると考えられる。

*機械エンジニアリングカンパニー 圧縮機事業部 回転機技術部

1.2 LNG BOG 圧縮機

LNG はクリーンなエネルギーとして世界的に注目されており、今後十数年にわたって液化・受入基地の建設が増加すると予測されている。LNG BOG 圧縮機は LNG 貯蔵タンク内の圧力を一定に保持するために設けられる圧縮機である。タンク内で発生する BOG を吸込んで圧縮・再液化した LNG をタンクに戻したり、天然ガスのパイプラインに送り込む機能を担っている。BOG の温度が低いので、無給油式の圧縮機が使用される。

国内の LNG 受入基地においては、BOG を再液化装置に送る用途では低圧圧縮機が使用されているが、LNG 気化器を介してパイプラインに送り込む用途では、そのラインの圧力が上昇の傾向にあり、とくに長距離圧送用パイプラインでは 8~9MPa にする計画が進んでいることから、大気圧から 9MPa まで昇圧する高圧 BOG 圧縮機が必要になってきている。米国では、LNG BOG 圧縮機の後段に BOG ブースタ圧縮機を設ける方法が採用され、約 9~10MPa まで昇圧してパイプラインに送り込んでいく。当社は、2006 年に再液化用の低圧 LNG BOG 圧縮機とパイプラインに直送するための高圧 BOG ブースタ圧縮機（ともに無給油式）を米国大手ユーザに納入した。2008 年 5 月から商用運転が開始されており、BOG ブースタ圧縮機の後段吐出圧力は常用で 9MPa に達するが、現在までトラブルなく順調に稼働している。

LNG BOG 圧縮機および BOG ブースタ圧縮機の仕様を表 1 の 欄に示す。なお、LNG BOG 圧縮機、BOG ブースタ圧縮機ともに 25 - 50 - 75 - 100% の広い範囲で段階的に容量調整することができ、他の形式の圧縮機と比較して運転範囲が広いというメリットもある。

2. 圧縮機の構造

往復動圧縮機には電動機やガスエンジン、スチームタービンなどの様々な駆動機が使用される。圧縮機クランクシャフトの回転運動は、接合棒とクロスヘッドを介して往復運動に変換され、シリンダ内のピストンを動かしてガスを圧縮する。駆動部の構造は、高圧圧縮機と LNG BOG 圧縮機で同じであるが、シリンダ部の材料や詳細構造が異なり、それぞれ特有の設計手法、構造を採用している。主な特徴を以下に紹介する。

2.1 大型高圧圧縮機

当社の最大標準モデルでは、ピストン前後の圧力差により発生するガス荷重差は 1,600kN、伝達軸動力は 30,000kW まで対応可能となっている。図 1 に代表的な大型高圧圧縮機 (KR70-4) の外観を示す。

2.1.1 3D - CAD ソリッドモデルの活用

クランクケース、クロスガイド、クランクシャフト、クロスヘッド、接合棒などの主要部品は、3D-CAD によるソリッドモデルを作成している。それらを組合せたモデルを対象に、運転中にかかるガス荷重や慣性力を荷重条件として与えた 3 次元有限要素法解析を実施し、各部の変形量や強度を確認している。図 2 は、駆動部の 3D-CAD ソリッドモデルを示している。

さらに、実機による荷重試験も行い、各部品の実際の

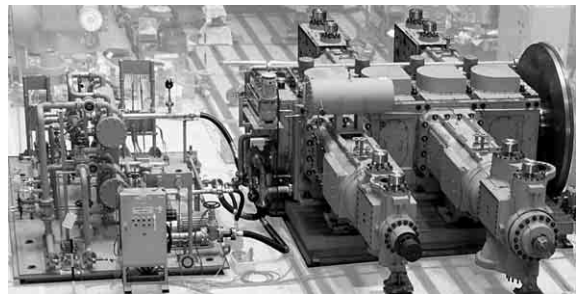


図 1 KR70-4 ガス圧縮機 (5,400kW)
Fig. 1 KR70-4 gas compressor (5,400kW)

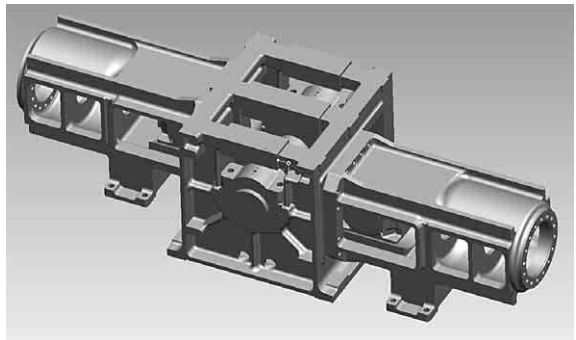


図 2 3D-CAD ソリッドモデル
Fig. 2 3D-CAD solid model

応力レベルを確認するとともに、十分な剛性が確保できていることを検証している。

2.1.2 メンテナンス性の向上

往復動圧縮機は、各構成部品を多数のボルトで締付けて組立てられている。部品点数も多いことから、他の形式の圧縮機と比べてメンテナンス時の分解・組込時間が長くなる傾向がある。大型圧縮機では、主要部品が大きくボルトの締付力が増すため、その傾向はさらに強くなる。このため、様々な部分でメンテナンス性改善に向けた取組みを進めている。例えば、ピストン棒とクロスヘッドの取付け部や、主軸受キャップ、接合棒ビッグエンドボルト、ピストンナットなどの大きな締付トルクが必要な部分には油圧締付方式を採用して適正な締付力を確保するとともに、作業性を改善した。これは、安全性や信頼性の向上にもつながっている。

2.2 LNG BOG 圧縮機

運転中にガス温度が大きく変化するため、各部位の温度を適確に把握し、熱影響を考慮した設計が必要になる。

2.2.1 プレヒート

超低温圧縮機の性能を正確に予測するうえで最も重要な要素の一つにプレヒートがある。プレヒートが正確に考慮されていない場合、圧縮機処理容量は計画容量を下回り、吐出ガス温度も予測値から大きく外れる。また、プレヒートは圧縮機の運転状態によって大きく変化する。当社では、超低温試験機による測定データと納入機の運転データを継続的に入手し、データベース化しており、あらゆる運転領域におけるプレヒートを予測し、正確な性能評価を可能にしている。

2.2.2 温度変化

図 3 に LNG BOG 圧縮機の外観を示す。運転開始後一定時間が経過すると、シリンダ内のガス温度は低温領域

で安定し、シリンダ外表面の温度が0以下となって大気中の水分が冷却されて氷結する。起動時のシリンダ内温度は大気温に等しく、吐出ガス温度はいったん上昇する(図4¹⁾)。そのため、シリンダやピストンなどのガスと接触する部品には、高温から低温までの広い温度領域で安定した強度を有するとともに、熱膨張・熱収縮を吸収できる構造が要求される。また、省スペース化、部品点数削減によるメンテナンスコスト削減の観点から、大口径ピストンを使用することによってシリンダ数を可能な限り減らしている。ピストン材料にはアルミニウム合金を使用すると同時に、すべての運転条件における圧力、温度、荷重条件を考慮した有限要素法による応力解析結果に基づき、軽量かつ広範囲の温度変化に耐え得る構造とした。図5¹⁾にピストンの応力解析例を示す。

2.2.3 しゅう動材の寿命

ピストンリング、ライダリング、ピストン棒パッキンなどのしゅう動部品は、往復動圧縮機の性能に直接影響を及ぼす重要な部品であるが、摩耗する消耗部品であるため、使用限界に達した時点で交換が必要になる。しゅう動部品の摩耗特性は、圧力、温度、ガス組成、相手材との相性など様々な要素によって大きく異なる。

超低温のLNG BOG 圧縮機は、シリンダ内に給油できないうえにガス温度変化も大きいなどの極めて過酷な条件を強いられている。このため、長寿命を得ることが非常に難しい。当社では、耐摩耗性に優れた新しいエンジ

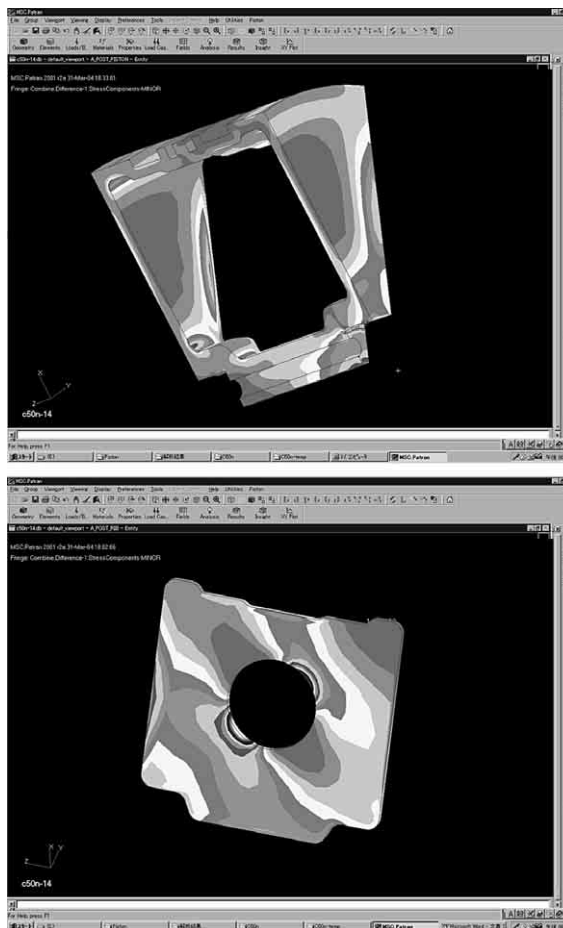


図5 有限要素法によるピストンの応力解析
Fig. 5 FEM stress analysis of piston



図3 LNG BOG 圧縮機
Fig. 3 LNG BOG compressor

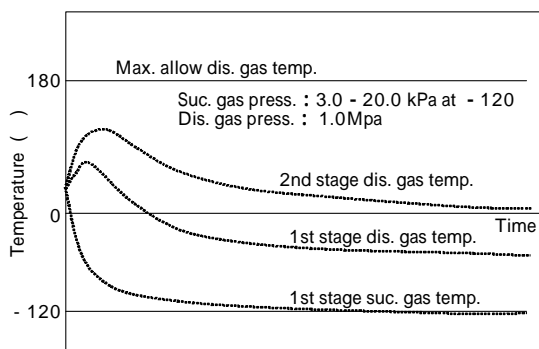


図4 2 段階 LNG BOG 圧縮機ガス温度 - 時間チャート
Fig. 4 Temperature - Time chart for two stage LNG BOG compressor

ニアリングプラスチック複合材を採用することにより、従来材の3倍を超える寿命となる24,000時間以上の連続運転を達成している。

また、高圧BOGブースタ圧縮機では、低圧から高圧まですべての圧力レンジで優れた摩耗特性を要求されるが、これまでに10,000時間以上の連続運転を達成しており、現在も運転を継続している。このような良好な摩耗特性が確認できたことにより、今後国内で需要が増えると思われ高圧BOG用途においても、お客様のご期待に十分こたえることができるものとする。

2.2.4 予防保全

圧縮機の運転状態や部品の状況を正確に把握し、適切な予防保全を実施することは、メンテナンス時間・頻度の削減などの経済的な効果をもたらす。例えば、ライダリングが摩耗していることを知らずに運転を継続した結果、ピストンとシリンダライナの接触により大きな被害をもたらすことになる。

ピストン棒ドロップモニタリングシステム(図6)は、圧縮機運転中にピストン棒の位置を継続的に監視し、その位置変化からライダリングの摩耗の進行状況を把握することができる。これによってリング寿命が予測でき、必要最小限のメンテナンスが可能になった。当社では、超低温圧縮機から高圧圧縮機までこのシステムを多数採用している。

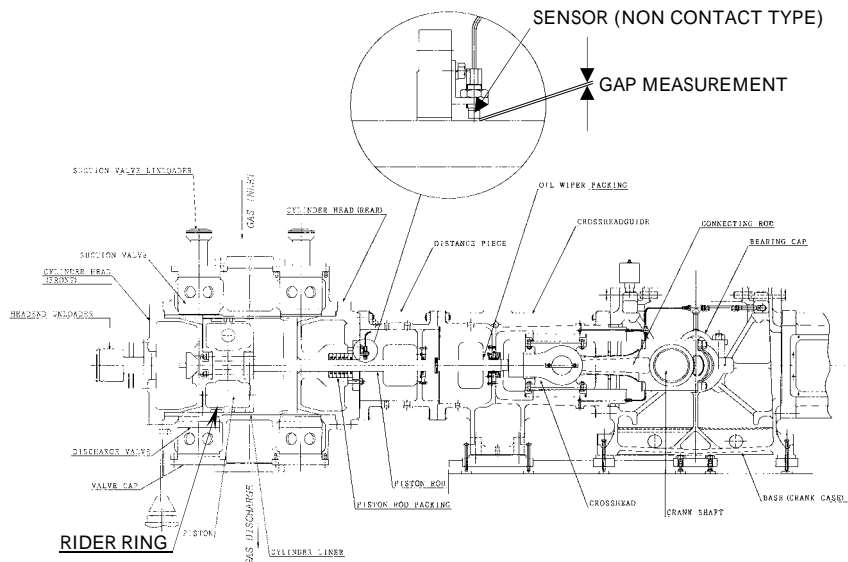


図6 ロッドドロップモニタリングシステム
Fig. 6 Rod drop monitoring system

3. 往復動圧縮機の容量調整

石油精製プラントに納入される往復動圧縮機的主要用途は、消費ガスを昇圧して脱硫装置などに供給することであるが、製品の品質を確保するために装置の圧力を一定に保つ必要がある。圧力変化は、装置側の要求容量と圧縮機吐出し容量の不釣り合いにより生じることから、それらをバランスさせるために次のような容量調整装置が取り付けられる。

1) 吸込弁アンロード方式

シリンダの吸込弁板を押さえつけて開放し、いったん吸込んだガスを吸込側へ逆流させて圧縮仕事をを行わないようにして流量を調整する方式である。ただし、開閉動作となるため、段階的な調整となる。

2) クリアランスポケット方式

シリンダヘッドなどに取付けられたクリアランスポケットを開閉することによって筒隙（クリアランス）容積を変化させる方式である。これによって体積効率を変え、流量を調整することができる。吸込弁アンロード方式と同様に段階的な調整となる。

3) バイパス方式

中間段、または最終段よりバイパス弁を通じて余剰ガスを吸込ラインへ戻す方式である。プラント側の圧力あるいは容量を調整する目的で適用される。

4) スピードコントロール方式

駆動機の回転数を変化させて流量を調整するものである。シリンダ弁作動への影響や駆動機の電流脈動、ねじりトルクへの影響から制御範囲は限定される。さらに、駆動機のインシャルコストが高くなるというデメリットがある。

3.1 段階式容量調整の弱点

図7に示すとおり、上記1), 2)を組合せることによって25%ごとの容量調整は可能であるが、さらに細かい容量調整が必要な場合は、上記3)を併用している。このとき、圧縮機は余剰分を含めた流量のガスを圧縮する

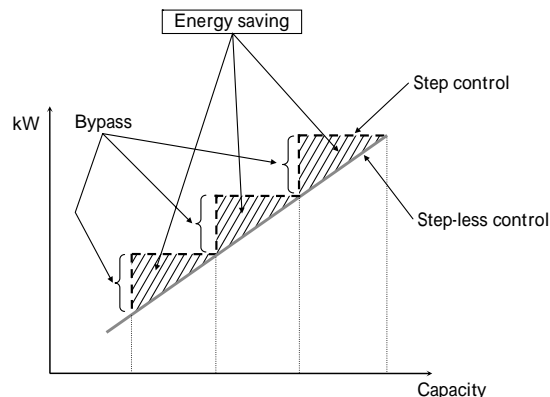


図7 往復動圧縮機の容量調整
Fig. 7 Capacity control system for reciprocating compressor

ため、その軸動力が消費されてエネルギーロスが発生する。往復動圧縮機のこれまでの弱点は、このような場合に無段階容量調整ができないことであった。

3.2 無段階容量調整装置

'90年代後半に欧州のホルピガー社（以下、H社という）は、吸込弁アンロード機構に油圧制御を組合せることによって約20~100%の範囲を無段階に調整できる装置の実用化に成功した。その後このシステムは広く認知され、石油精製、石油化学プラントで多く使用されている。国内でも、約10年前に初めて重油直接脱硫装置用圧縮機に採用されて以来、省エネに対して大きな効果が認められ、新設機や既設機を改造して採用されるケースが増えてきている。

また、従来のクリアランスポケット方式を流用し、可変式にして体積効率を連続的に変化させ、容量を無段階に調整する可変クリアランスポケット方式も実用化されている。

3.3 無段階容量調整装置の特長

H社の無段階容量制御システムをP-V線図とピストンの動きで表すと図8²⁾のようになる。100%負荷時は、ピストン下死点Aにおいて吸込弁が閉じて圧縮行程が始まり、Bにおいて吐出弁が開き（吐出行程）、Cにおいて吐

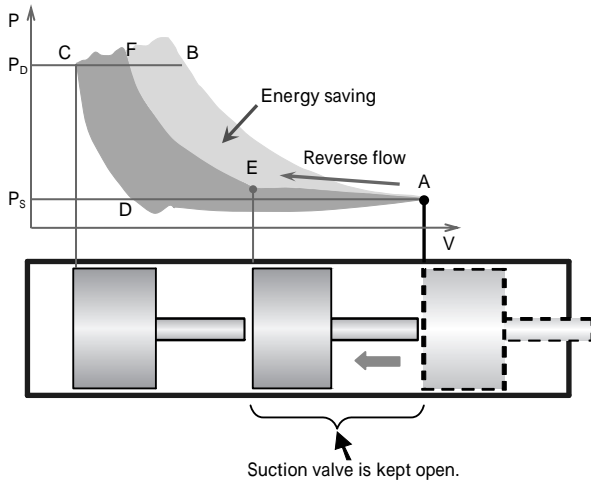


図8 無段階容量調整 P-V 線図(吸込弁閉止タイミング制御式)
Fig. 8 P-V diagram of step-less unloading system (reverse flow regulation)

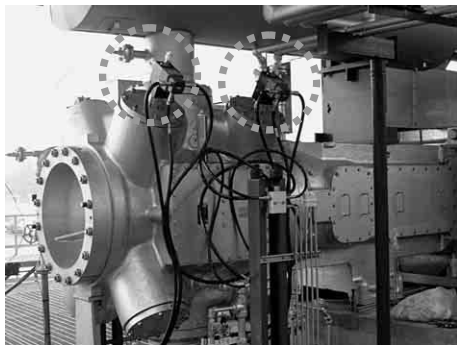


図9 無段階容量調整装置(図中の○印部)付リサイクル水素圧縮機(吸込弁閉止タイミング制御式)
Fig. 9 H₂ recycle compressor with step-less unloading system (reverse flow regulation)

出弁が閉じ(膨張行程), Dにおいて吸込弁が開く(吸込行程)サイクルを繰り返す。このA B C Dで囲まれる面積が1サイクルの仕事量となる。

無段階容量調整装置は, 吸込弁を時間制御(クランク位相角制御)することによってAにおける吸込弁閉止タイミングをEへ強制的に遅らせ, シリンダ内のガスを一時的に吸込側に逆流させて圧縮を行わないようにする。これによって処理量を低下させるとともに, E F C Dで囲まれる面積の仕事量を減らして動力を削減する。

この方式は, 圧縮行程ごとに吸込弁閉止タイミングを変えることができることから応答性の早い制御が可能で, 運転状態の変化が大きい用途にも対応できる。図9に吸込弁閉止タイミングを制御する方式の無段階容量調整装置付リサイクル水素圧縮機の外観を示す。

当社が開発した可変クリアランスポケット方式による無段階容量調整は, 油圧駆動のクリアランスピストンとインバータモータ駆動のポンプを搭載した油圧ユニットで構成されている(図10)。インバータモータの回転数, および回転方向制御によってクリアランスピストンを前後させる仕組みになっている。これによってクリアランスポケットの容積を変化させ, 容量調整を行っている。これをP-V線図で表すと図11のようになる。1サイクルあたりの仕事量(面積)が小さくなるため, 動力が削減さ

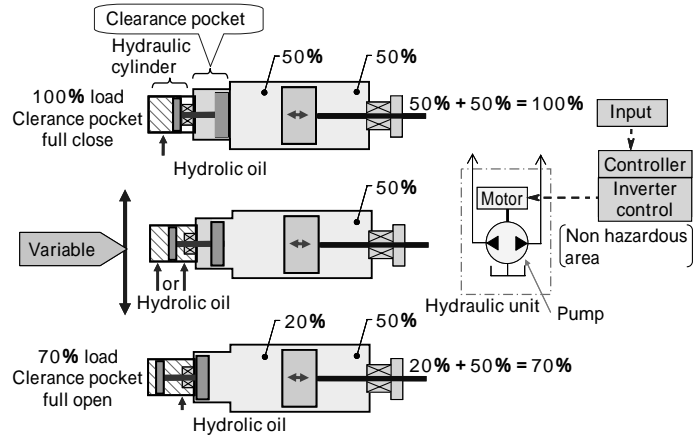


図10 可変式クリアランスポケットシステム
Fig.10 Variable clearance pocket system

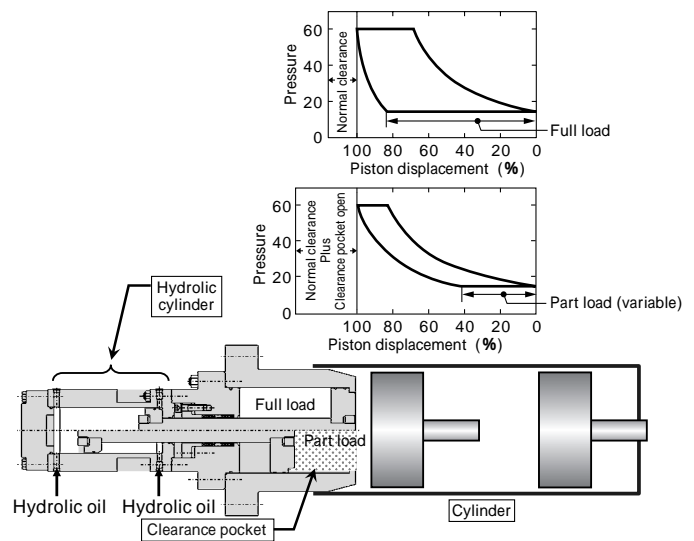


図11 可変式クリアランスポケット P-V 線図
Fig.11 P-V diagram of step-less unloading system (variable clearance pocket)

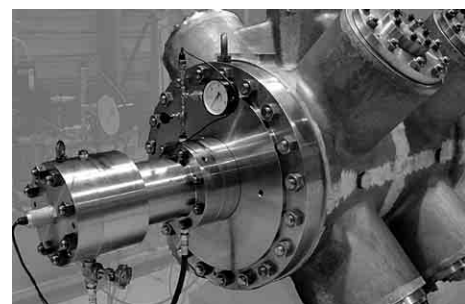


図12 可変式クリアランスポケットの外観
Fig.12 Variable clearance pocket

れることが分る。

構造は, 従来型クリアランスポケットを流用していることから実績は多数あり, 信頼性・耐久性も問題なく, シリンダは従来のものをそのまま使用できる。クランク位相角などの複雑な制御信号は必要なく, 前述のシステムに比べてシンプルなことから, 初期投資が小さくて済み短期間で回収できる。また, 高圧シリンダにも適用でき, 新設機, 既設機を問わず搭載可能である。

この方式は, 緩やかな容量調整が許容されるプロセスに適している。図12に可変式クリアランスポケットの外観を示す。

むすび=無段階容量調整が実用化され、広範囲での連続した容量調整が可能になった。さらに、往復動圧縮機の長所とされている効率の良さと相まって省エネ効果も飛躍的に進歩してきている。また、消耗（摩耗）部品の長寿命化により、連続運転時間も長いものでは4年間以上の実績が報告されるなど、大幅に改善されてきた。大型の高圧圧縮機ではその効果がさらに拡大されることが

ら、往復動圧縮機の競争力は確実に向上していく。今後もさらなる省エネ化に重点を置き、社会に貢献できる圧縮機の開発、製作に取り組んでいく所存である。

参 考 文 献

- 1) Naoki Akamo : LNG INDUSTRY, Autumn 2008, p.88.
- 2) ホルピガー-日本㈱, Hydro COM System 4.0 技術資料 .