

水素ステーション用超高压水素ガス圧縮機の概要

伊藤芳輝・植田秀作

株式会社 加地テック 技術部

587-0064 堺市美原町菩提6番地

Outline of high pressure hydrogen gas compressor for hydrogen station

Yoshiteru ITOH, Shusaku UEDA

Engineering Department, Kaji Technology Corporation

6, bodai, mihara-cho, sakai, osaka 587-0064

To boost up the market of the fuel cell vehicle, the state of art technology for manufacturing high pressure hydrogen compressor, as well as growth of refuelling stations is highly required. It was believed that the development of the piston type high pressure hydrogen compressor is technically difficult. Newly developed high pressure non-lubricated piston type compressor (discharge pressure of 110MPa) manufactured by us has been supplied to a research institute which conducts the studies for the safeness of 70MPa fuel cell vehicle and its related equipment.

key words: hydrogen compressor, hydrogen station, fuel cell vehicle

1. 緒言

燃料電池車は、エネルギー問題、地球温暖化問題で脚光を浴び、研究開発が進められている。燃料電池車の普及には本命のインフラを前提に、高压技術化が求められる。現在、実用化されている燃料電池車に搭載する水素ガス圧力は 35 MPa であるが、走行距離は、300~350 km が限界とされている。実用レベルの燃料電池車の走行距離は 500 km、搭載する水素ガス圧力は 70 MPa が想定されている。

今までは、超高压の圧縮技術と圧縮ガスの清浄度要求から、圧縮機形式が限定され、ダイアフラム式または無給油ピストン・ダイアフラム複合式の圧縮機が採用されていた。ピストン式では、圧縮室に潤滑油を供給する方式では可能であるが、圧縮ガスの清浄度を満足できない。圧縮室に潤滑油を供給しない無給油式が要求されるものの、技術的には困難とされていた。今まで限定採用されていた圧縮機形式の特徴等を鑑み、無給油ピストン式超高压圧縮機を開発した。なお、開発した圧縮機は、圧縮室のみならず、クランク部等にも潤滑油を供給しない形式であり、オイルレス式と呼ばれる。

開発した圧縮機の吐出圧力は、試験・研究段階にある 70 MPa 燃料電池車及び関連機器の安全性評価試験も可能なレベル（常用圧力 70 MPa × 一般耐圧試験乗数 1.5 = 105 MPa 以上）として、110 MPa とした。既に、試験研究機関に納入し、70 MPa 燃料電池車及び関連機器の試験等に寄与している。

2. 超高压水素ガス圧縮機の開発経緯

超高压水素ガス圧縮機開発のコンセプトと技術のベースは、天然ガス自動車用圧縮天然ガス(CNG)急速充填用圧縮機にある。

低公害、代替エネルギーとして普及しつつある天然ガス自動車及び普及に不可欠なエコ・ステーションの関連機器の商品化に早くから着目し、商品開発を進めてきた。天然ガス自動車に搭載する天然ガス圧力は 20MPa、圧縮機の吐出圧力は 24.5 MPa であり、1990 年 3 月に日本で最初の CNG 急速充填用圧縮機を、当時の確立した技術である給油ピストン式圧縮機で納入した。その後、圧縮機能力の大容量化及び無給油化ニーズに応えるべく、1993 年 4 月より空冷オイルレス・ピストン式圧縮機の

開発に着手し、1996年に開発に成功して商品化した。現在では、既にCNG急速充填用圧縮機の納入台数は220台を超え、天然ガス自動車普及に貢献している。また、開発した空冷オイルレス・ピストン式圧縮機は、25MPa以下の産業用水素ガス圧縮機等に展開し、納入実績を増やしてきた。

究極のエコ・カーとして、燃料電池車が脚光を浴びはじめた2002年、40MPa高圧水素ガス圧縮機の開発に着手した。開発コンセプトはCNG急速充填用圧縮機と同じく、空冷オイルレス・ピストン式圧縮機とし、圧縮機能力はCNG急速充填用圧縮機の経験を踏まえ、当初から大容量化設計とした。2003年9月に開発に成功して商品化した。その後、燃料電池車の将来の実用レベルと関連機器等の技術進歩・動向から110MPa超高圧水素ガス圧縮機の開発に着手し、2004年4月に開発に成功して商品化すると同時に試験研究機関に納入した。

3. 空冷オイルレス・ピストン式圧縮機

既に普及しつつある天然ガス自動車用圧縮機の経験から、将来普及するであろうオンサイト型水素ステーション用圧縮機のコンセプトも大きな差異は無いと想定される。エコ・ステーションは、ガソリンスタンドと併設される場合が多く、充填作業者等に、高度な高圧ガスに係わる知識やメンテナンスを要求することはできず、安全面及び運用面での徹底した配慮・設計・設備が要求される。また、車両や住民が密集する都市圏では、設置スペースや騒音・振動も重要な要素になる。今後の燃料電池車普及には技術的な課題に加え、安全性評価に基づく規制緩和と標準化のコンセンサスがインフラ整備の重要な課題となる。

空冷オイルレス・ピストン式圧縮機は、これらのインフラに必要とされるであろう要件を踏まえたコンセプトとした。圧縮室(シリンダ内)はもとより、クランクケース内部の摺動部分にも全く潤滑油を供給しない往復動ピストン式空冷圧縮機であり、以下の特徴がある。

- 1) 圧縮ガス中に潤滑油が混入しない
- 2) 潤滑油の管理が不要
- 3) 冷却水設備・管理が不要
- 4) メンテナンスが容易・短時間
- 5) コンパクト(省スペース・軽量)
- 6) 低騒音・低振動

潤滑油を使用しないため、当然のことながら潤滑油の点検・補充・排油作業は不要になり、潤滑油関係の機器(オイルポンプ、潤滑油タンク、油面計、油ろ過フィルタ等)も不要になる。更に空冷式のため、冷却水関係の機器、配管、弁類等が不要になり、コンパクトにまとめることが出来、メンテナンスが容易となる。最大の特徴は、圧縮ガス中に潤滑油が混入しないことであり、燃料電池にとって非常に重要な要素となる。

クランクケースは密閉構造とし、クランク軸貫通部は特殊なドライメカニカルシールを採用し、外部へのガス漏れが無い。オイルレス化によって問題となるのは摺動部分であるが、軸受は、耐熱性グリースを封入し、流出しない構造を採用した。ピストンリングやライダリングには自己潤滑性を有する特殊樹脂を採用し、シリンダライナには特殊樹脂の耐摩耗性を向上させる特殊合金を採用した。シリンダ配置とバランスウェイトから動荷重を抑え、ユニット全体を屋外防音ケースに納めることで低騒音・低振動化をはかっている。

4. 超高圧水素ガス圧縮機の主要仕様

開発・商品化・納入した超高圧水素ガス圧縮機の主な仕様を表1に示す。110MPa超高圧水素ガス圧縮機は、先行して開発・商品化した40MPa高圧水素ガス圧縮機を前段機とし、前段機から受け入れた圧力をブーストア

表1. 超高圧水素ガス圧縮機の主要な仕様

前段圧縮機	
形式	空冷・レシプロ(4気筒・4段圧縮)・全段ピストン・オイルレス式
吸込圧力	0.6 MPa
吐出圧力	40 MPa
吐出量	200 Nm ³ / h
軸動力	60 kW
後段圧縮機	
形式	空冷・レシプロ(1気筒・1段圧縮)・ピストン・オイルレス式
吸込圧力	40 MPa
吐出圧力	110 MPa
吐出量	200 Nm ³ / h
軸動力	20 kW
屋外防音ケース	
概略寸法	2,800(W) × 5,500(L) × 3,100(H) mm
騒音	65 dB(A)/機側 1m

アップする後段機として開発・商品化した。関連機器等の技術進歩・動向により将来的には1台の圧縮機で一括昇圧可能な圧縮機とする計画である。

図1に屋外防音ケースを搭載する前の外観を示す。図2に屋外防音ケース搭載後の外観を示す。

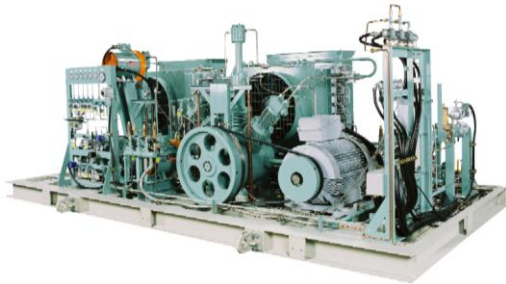


図1. 屋外防音ケースを搭載する前の外観



図2. 屋外防音ケース搭載後の外観

5. 超高压水素ガス圧縮機の開発課題

超高压水素ガス圧縮機の技術ベースは、CNG 急速充填用圧縮機であるが、取扱ガスの物性および吐出圧力の違いにより、以下の課題がある。

- 1) ピストンリングのシール性, 摩耗
- 2) 各部の機械的強度
- 3) 材料のブリスタ, 水素脆性

短時間で課題に対処し、開発するため、自社開発のシミュレーションソフトおよび汎用の有限要素解析ソフトにより圧縮機各部の検討を行い、実機試験により検証を行った。

6. シミュレーションソフトの概要

6. 1 基礎式

自社開発のシミュレーションソフトでは、下記の方程式をルンゲ・クッタ法により解いている[1,2]。

1) 部品毎の運動方程式 (図3)

運動方程式の構成方向を () に示す。

- ・ピストン (X方向, Y方向, 回転(Z軸))
- ・接続棒 (X方向, Y方向, 回転(Z軸))
- ・クランク軸 (X方向, Y方向, 回転(X軸, Y軸), 回転(軸芯中心))
- ・吸込弁/吐出弁 (弁板開閉方向)

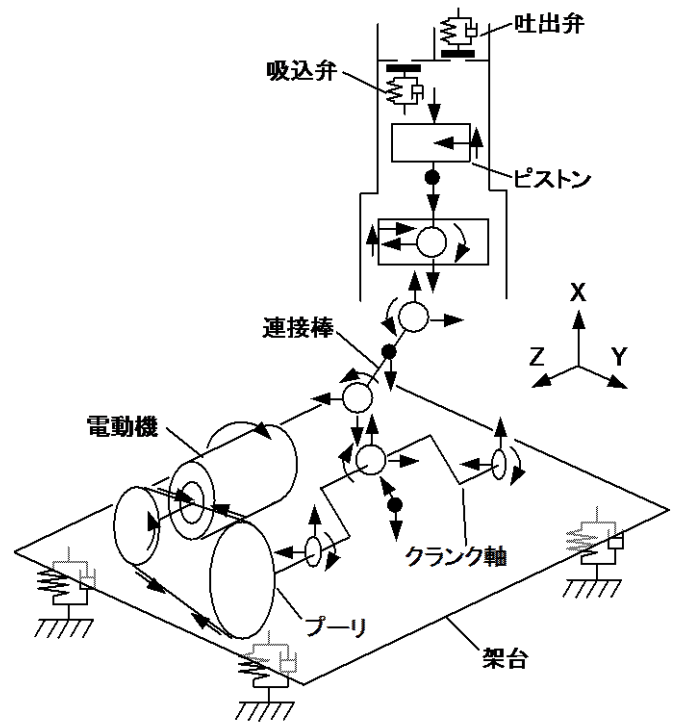


図3. 運動系モデル

2) 圧力変化および温度変化に関する方程式[3,4]。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{GC_v} \left\{ \frac{dQ_{in}}{dt} - Ap \frac{dV}{dt} + Apv \left(\sum \frac{dG_{in}}{dt} - \sum \frac{dG_{out}}{dt} \right) + \sum (h_{in} - h) \frac{dG_{in}}{dt} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} = p \left\{ \frac{1}{GC_v T} \cdot \frac{dQ_{in}}{dt} - \frac{\kappa}{V} \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{1}{GC_v T} \left(\sum h_{in} \frac{dG_{in}}{dt} - \sum h \frac{dG_{out}}{dt} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{dG}{dt} = \sum \frac{dG_{in}}{dt} - \sum \frac{dG_{out}}{dt} \quad (3)$$

G ; 空間内ガスの重量

v ; 空間内ガスの比容積

h ; 空間内ガスのエンタルピ

C_v ; 空間内ガスの定容比熱

- κ ; 空間内ガスの比熱比
- dQ_{in} ; 外部から空間内に流入する熱量
- dG_{in} ; 空間内に流入するガス重量
- h_{in} ; 空間内に流入するガスのエンタルピー
- dG_{out} ; 空間内から流出するガス重量
- p ; 空間内ガスの圧力
- T ; 空間内ガスの温度
- V ; 空間容積
- A ; 仕事の熱当量

図4に漏れ経路を示す。圧縮室、ピストンリングで挟まれる空間（ピストンリング室）および吸込室について式（1）～（3）を適用し、各空間ごとに圧力および温度を算出する。各空間に流入するガス重量 dG_{in} および流出するガス重量 dG_{out} は、ノズル流れの式より算出する。

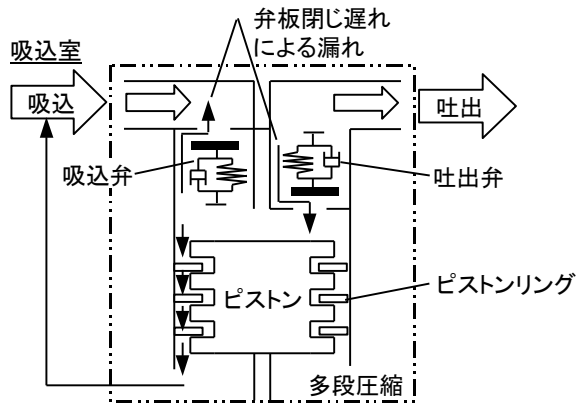
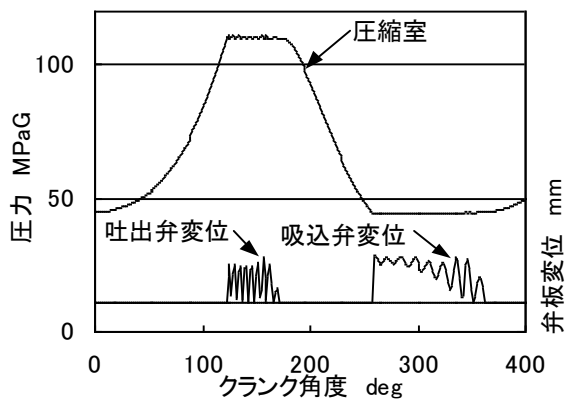


図4. 漏れ経路

3) 圧縮機架台の挙動に関する運動方程式

圧縮機内部で相殺されない動荷重およびモータトルクを加振力とし、圧縮機等の質量および慣性モーメントに関する運動方程式により、圧縮機架台の挙動を算出する。



(a) 水素ガス

6. 2 アウトプット

主なアウトプットは以下の通りである。

- ① 圧縮室の圧力および温度
- ② 各部の荷重（ピストン側面、大端/小端軸受、主軸受）および摩擦損失
- ③ 吸込弁/吐出弁の挙動
- ④ ピストンリングの摩耗
- ⑤ クランク軸の速度変動率
- ⑥ ピストンリングからの漏れ量および体積効率
- ⑦ 中間圧力（多段圧縮の場合）
- ⑧ ピストンリング室の圧力および温度
- ⑨ 圧縮機架台の挙動

以下にアウトプット例を示す。

1) 弁板の挙動

図5は、水素ガスおよび窒素ガスにおける弁板の挙動である。解析モデルは、超高压水素ガス圧縮機の開発途中のアウトプット例である。

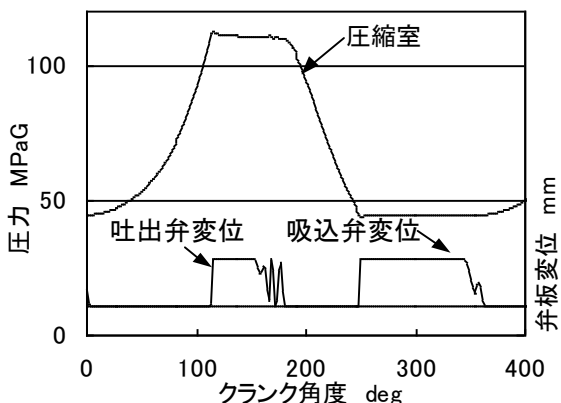
図5 (a) に示すように、水素ガスの場合、弁板がチャタリングを起こし、吐出行程で圧縮室内圧力が変動していることが分かる。一方、図5 (b) の窒素ガスではチャタリングは発生していない。

超高压水素ガス圧縮機では、チャタリングを防止し、弁板を安定させる弁の採用が必要となる。

2) ピストンリング室の圧力

図6は、水素ガスおよび窒素ガスにおけるピストンリング室の圧力である。解析モデルは図5と同一である。なお、ピストンリング室の圧力（a～d）は、複数あるピストンリング室から抜粋したものである。

図6 (a) および (b) に示すように、水素ガスおよび窒素ガスの場合、



(b) 窒素ガス

図5. 弁板の挙動（取扱ガスの違い）

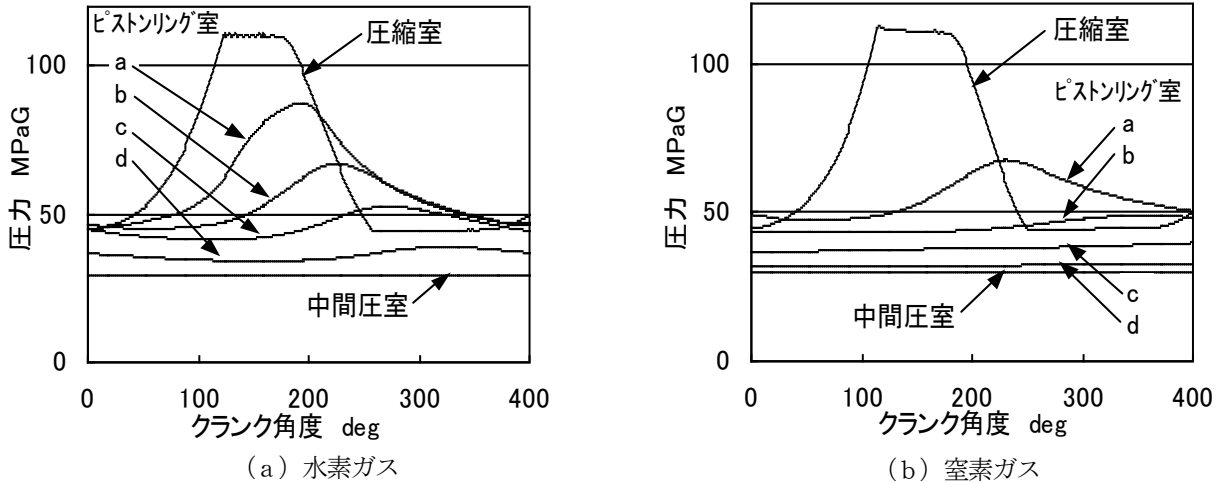


図6. ピストンリング室の圧力 (取扱ガスの違い)

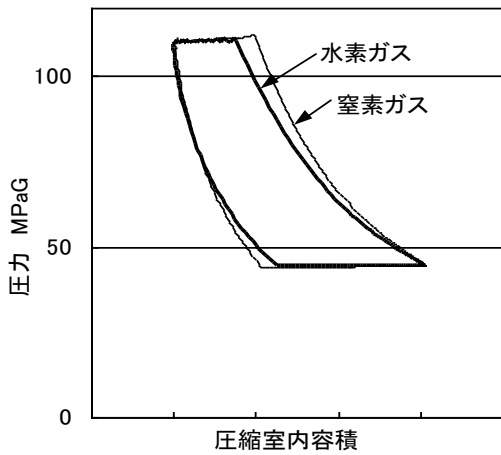


図7. p-V 線図

び窒素ガスとも、圧縮室内の圧力変動に追従するようにピストンリング室の圧力が変動していることが分かる。

各ピストンリング室の圧力を水素ガスと窒素ガスと比較すると、水素ガスの方が圧力が高いことが分かる。これは、水素ガスは窒素ガスに比べて漏れ易いためである。図6のアウトプット例では、水素ガスのピストンリングからの漏れ量の計算結果は、窒素ガスの約8倍(標準状態での流量)であった。

図7は、水素ガスおよび窒素ガスの p-V 線図(圧力-圧縮室内容積)である。漏れ量の違いにより、行程容積が異なる。

7. 開発課題に対する対応

7. 1 ピストンリングの摩耗

ピストンリングの摩耗が進行すると、ピストンリング

合口部からの漏れ量が増加し、ピストンリング室の圧力が変化する。式(4)に示すように、ピストンリングの摩耗量は摺動面圧と摺動距離に比例すると仮定し、ピストンリング室の圧力変化およびピストンリングの摩耗量を算出した。

ピストンリングの摩耗量

$$= \text{比摩耗率} \times \frac{\sum (\text{摺動面圧} \times \text{ピストン速度} \times dt)}{n} \quad (4)$$

ただし、 dt ; 微小計算ピッチ

n ; 1回転するまでの繰り返し計算回数

比摩耗率は実機試験から決定した。

図8は、最終段ピストンのピストンリング摺動面圧の変化である。運転時間の経過とともに、摺動面圧がほぼ一定になることが分かる。

超高圧水素ガス圧縮機では、摺動面圧すなわちピストンリング室の圧力が偏在するのを極力抑制し、一部のピストンリングが早期に摩耗することを防止した。

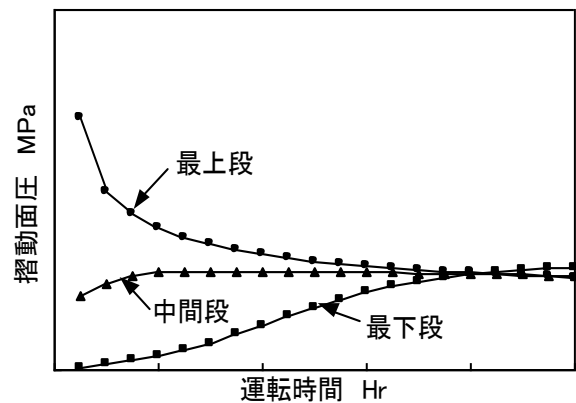


図8. ピストンリングの摺動面圧の変化

7. 2 各部の機械的強度

シミュレーションソフトより得られた荷重を有限要素解析ソフトのインプットデータとし、解析より得られた応力、変位を評価した。超高圧水素ガス圧縮機の強度設計については、高圧段のピストンに対し、圧力が非常に高いことに加え、ピストンのL/D (=全長/直径) が大きい。このため、7. 1項の検討で得られたピストンリング本数を装着し、以下を満足させる強度設計を行った。

- 1) ピストンが座屈しないこと。
- 2) ピストンの変位によりシリンダライナにダメージを与えないこと。
- 3) ピストンリング装着部のつば部が疲労破壊しないこと。

7. 3 材料のブリスタ、水素脆性

ブリスタとは、材料内部に浸入した気体が、急減圧により体積膨張を起こし、材料破壊を起こす現象である。超高圧水素ガス圧縮機では、圧縮機停止時等の減圧速度を制御し、シール材等にブリスタが生じないようにした。

水素脆性については、現状の知見で材料を選定し、実機耐久試験を行っている。現在のところ、水素脆性が原因と思われる破損は確認されていない。

8. 今後の課題

シミュレーションおよび有限要素解析に基いて設計し、耐久試験評価を行った。その結果、ピストンリングの摩耗状況および性能等は、シミュレーション結果と比較的近いものであった。

長い歴史のある往復動圧縮機であるが、超高圧水素ガス圧縮機には、信頼性、性能、音および振動等について、今までにない高いレベルの技術が要求される。それら要求に応えることが、燃料電池車の普及および超高圧水素ガス圧縮機をはじめとするインフラ整備につながると考え、ピストンリングの材質・構造等の見直しを含め、更なるシール性の向上、長寿命化を課題として取り組んでいく。また、関連機器等の技術進歩・動向から生じる更なる要求に応えることを課題とする。

参考文献

1. 今市憲作, 石井徳章, 鹿籠六信夫; ”小型往復圧縮機の振動機論 (第1部) 41-348 (昭50-8) 2333-2346

2. 飯田精一・ほか6名; ”ロータリ圧縮機の高効率化”三菱重工技報 Vol.20 No.3 (1983-5) 29-37
3. 森康夫・ほか2名; ”熱力学概論” (昭57) 201, 養賢堂
4. 新井亨; ”容積形圧縮機の設計に利用されるシミュレーション手法” 冷凍 64 (742) 863-870