

(論文)

## 100MPa級高圧水素試験機の開発

## Development of 100MPa Class High Hydrogen Pressure Testing Equipment



真鍋康夫\*

Yasuo MANABE



宮下泰秀\*

Yasuhide MIYASHITA

In recent years, hydrogen is attracting attention as one of the promising clean energy sources without emission of carbon dioxide which is regarded as the main cause of global warming. Fuel cell utilizing high pressure hydrogen is considered as a most practical power source for vehicles at present. However, there's a problem of insufficient amount of data for designing components exposed to high pressure hydrogen. For this reason, we developed 100MPa class high hydrogen pressure testing equipment especially for fatigue property evaluation.

まえがき = 近年、地球温暖化問題の深刻化により、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の排出量の削減が急務となっている。この解決策の一つに、クリーンエネルギーとして水素を積極的に利用する水素社会の構築に向けた様々な開発が進められている。輸送分野においては、燃料電池自動車の開発が進められており、高圧水素ガスタンクを搭載する方式が有望視されている。この方式では、35MPa以上の高圧水素ガスを扱うため、高圧水素にさらされる各種部材の安全面での特性評価の必要性が高まっている。ただ、高圧水素ガスを扱うため、特性評価は容易でなく、評価装置も十分に整備されていないのが実情である。

当社は長年、HIP (Hot Isostatic Pressing, 熱間等方圧加圧)、CIP (Cold Isostatic Pressing, 冷間等方圧加圧)を始めとした各種超高压装置を設計、製作してきた。この度、その技術を試験機分野に応用し、特に疲労試験に適した高圧水素試験機を開発したので以下にその内容を紹介する。

## 1. 高圧水素試験機の開発仕様

前述したように各種部材の高圧水素中での特性評価を行うニーズが高まってきている。ガソリンエンジン並みの走行距離を得るためには、高圧水素ガスタンクの圧力は35MPaでは不足であり、圧力70MPa以上が必要と報告されている<sup>1)</sup>。このことから、水素ガスを供給する水素ステーションでは、圧力70MPa以上100MPa近くの能力を有する設備が必要となり、評価装置としても100MPaレベルの圧力が必要となる。今回、開発した試験機の仕様を表1に示す。試験圧力は最高99MPa、試験温度は-45から90まで対応可能とした。圧力容器の材料には、低温特性とともに耐水素脆化性に優れているとされているSUH660(A286)もしくはSUS316Lを採用している。SUH660(A286)の場合には、熱処理条件を検討し、水素脆化が生じにくい条件で熱処理している。試験対象項目としては、主眼とした疲労試験、疲労き裂伝ば試験

表1 高圧水素試験機の主仕様

Table 1 Specification of high hydrogen pressure testing equipment

Maximum pressure	99MPa pure hydrogen
Temperature range	- 45 to 90
Loading type	Oil hydraulic
Evaluation items	Fatigue strength, Fatigue crack growth, Tensile strength, Fracture Toughness (K <sub>IC</sub> , J <sub>IC</sub> )
Maximum load	- 100 to 100kN
Loading velocity	0.001 to 60 mm/min
Inside vessel size	150mm x 460mm
Vessel structure	Double plate press frame type Bottom-closure-penetrating pull rod
Vessel material	SUH660(A286), SUS316L

\*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 重機械部

のほか、引張試験、破壊靱性試験 ( $K_{IC}$ ,  $J_{IC}$ ) が可能である。荷重設定値は  $\pm 100\text{kN}$ 、荷重速度は最大  $60\text{mm}/\text{min}$  であり、油圧による負荷制御を行っている。以下に装置の特徴的な仕様に関して詳細を述べる。

## 2. 試験機構成の特徴

### 2.1 軸力支持 / 内圧キャンセル機構

これまでの試験機では、図 1 に示す通り、圧力容器胴自身が圧力容器に発生する軸力を支持する構造となっており、蓋は多数のボルトで容器胴に固定され、ボルトの脱着により圧力容器の開閉が行われる。圧力が高くなるとボルトの本数が多くなり、脱着操作は非常に煩雑にな

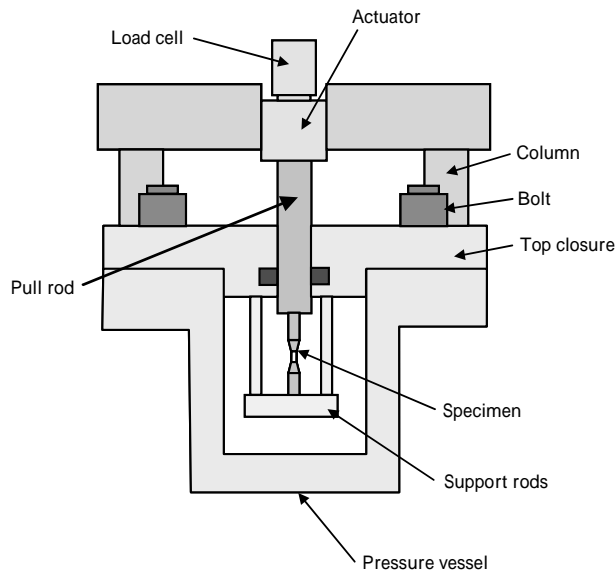


図 1 従来の高圧試験機の構造

Fig. 1 Schematic view of conventional high pressure testing equipment

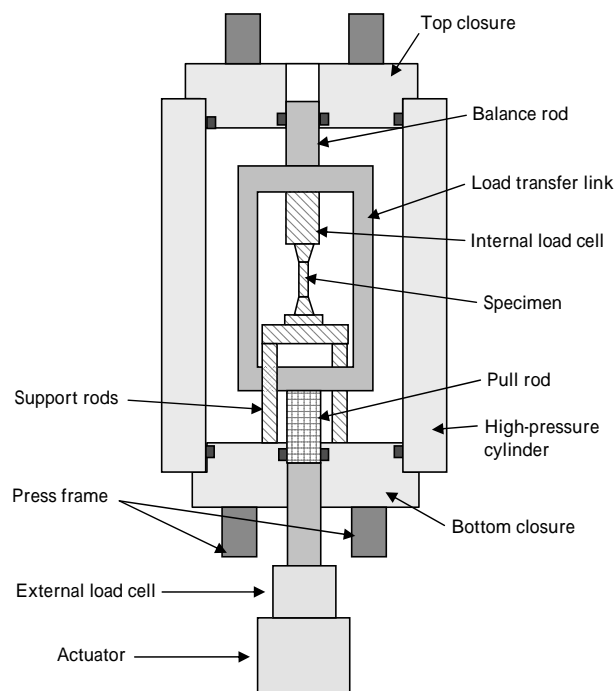


図 2 開発した高圧水素試験機の構造

Fig. 2 Schematic view of developed high hydrogen pressure testing equipment

る。また、圧力容器内の試験片を外部から引張る仕組みのため、プルロッドを挿入することとなるが、プルロッドには容器内外の圧力差による軸方向荷重が作用する結果、圧力  $100\text{MPa}$ 、直径  $30\text{mm}$  のプルロッドの場合、 $70\text{kN}$  程度の荷重となる。試験荷重の制御は、この荷重を常に重量させた状態で実施する必要があるため、プルロッドとアクチュエータの間にガス圧を導入して圧力をバランスさせ、内圧をキャンセルする方式が提案されているが、構造的に複雑である<sup>2)</sup>。

これに対し、開発機では、図 2 に示すような独自の方式を考案構築した<sup>3)</sup>。上下蓋に作用するガス圧による軸方向荷重は、圧力容器とは別の構造物である一对のプレスフレームが支える構造とした。後掲の図 10 に示す枠型の軸力支持構造であり、ねじ構造のような応力集中を持たないことを特徴とする。内圧キャンセル機構としては、プルロッドと同径のバランスロッドを上蓋側に配置し、内部の荷重伝達リンクで結合したバランスロッド方式を採用した。この方式では、プルロッドに作用するガス圧に基づく軸力は、荷重伝達リンクを通じてバランスロッドに作用するガス圧に基づく同じ大きさの軸力で打ち消されるため、急な圧力変動や電源停止などのトラブル時においても安定した試験が可能となる。

### 2.2 容器内ロードセル方式

引張試験や疲労試験などを実施した場合、通常用いられる圧力容器外のロードセルの荷重値は、試験荷重だけでなく、容器内圧力に応じた圧力容器シール部の摩擦抵抗が加わった値となる。そのため、正確な試験荷重が測定できない。そこで、容器内にロードセルを配置して荷重測定することを目指した。試験治具の外観を図 3 に示す<sup>4)</sup>。ロードセルの荷重検出には複数のひずみゲージを使用したホイートストンブリッジ方式を採用し、容器内

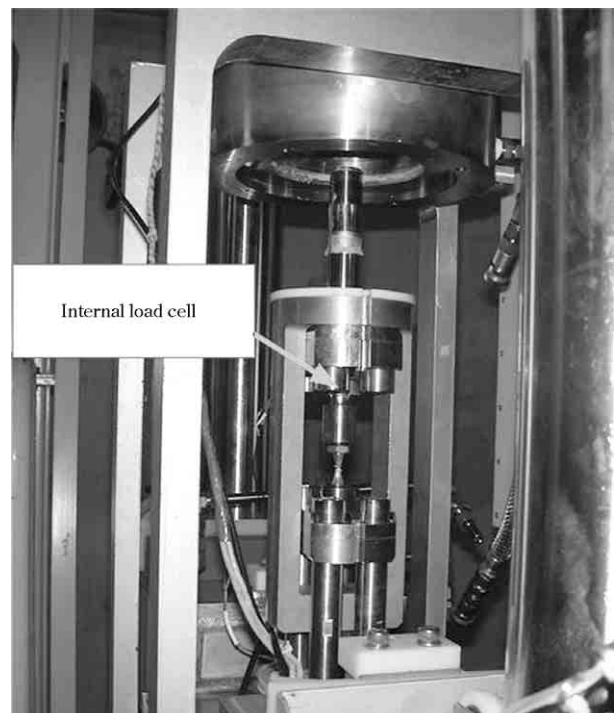


図 3 試験治具外観

Fig. 3 General view of testing jigs

ロードセル信号を圧力容器外に取出して、正味の荷重もしくは変位での制御に供している。

市販のひずみゲージを高圧水素中に暴露した場合、図4に示すように荷重変動がないにもかかわらず、時間経過とともにひずみ値が変化する場合がある。高圧水素中でひずみ値が変化する原因については、水素がひずみゲージの金属抵抗箔に侵入することで金属抵抗箔の抵抗値が変化していると推定される。このため、ひずみゲージメーカーと協力して材質の検討を加え、何種類かの材料に

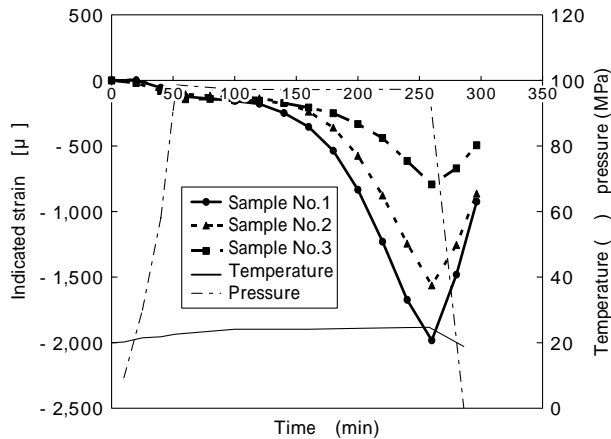


図4 高圧水素中での市販ひずみゲージの出力変化  
Fig. 4 Output drift of commercial strain gauge under high hydrogen pressure

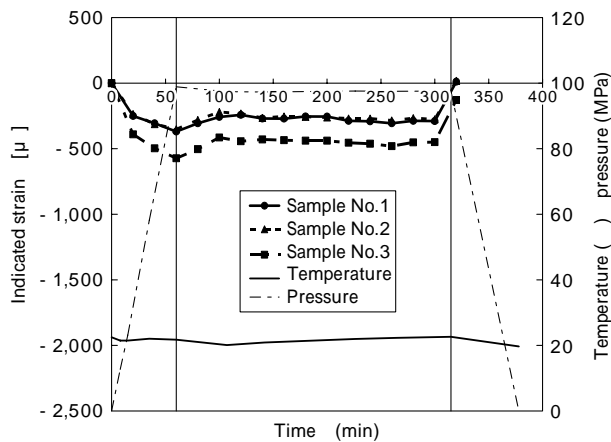


図5 高圧水素中での開発品ひずみゲージの出力変化  
Fig. 5 Output drift of developed strain gauge under high hydrogen pressure

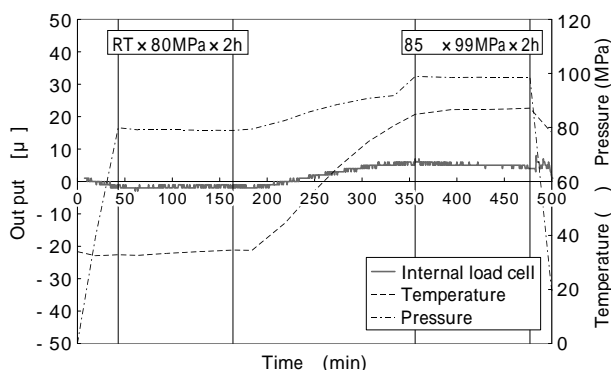


図6 高圧水素中での開発品ロードセルの出力変化  
Fig. 6 Output of developed load cell under high hydrogen pressure

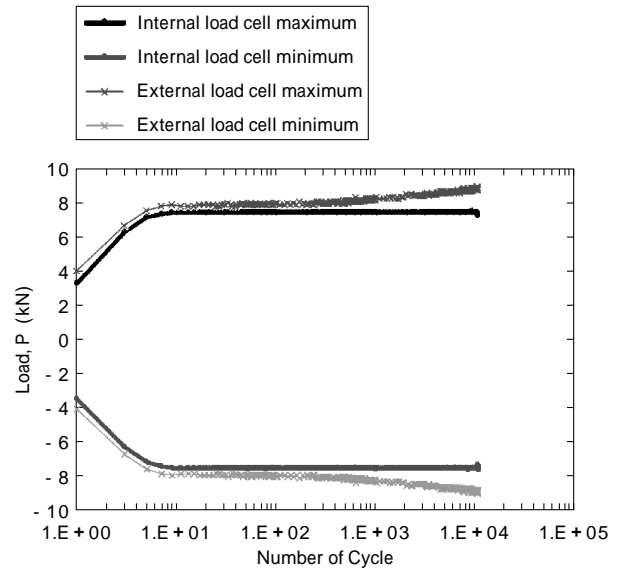


図7 疲労試験中の測定荷重の変化  
Fig. 7 Output drift of measured load during tension-compression fatigue test

ついて高圧水素中で行った試験結果からひずみ値の変化の少ないものを選定した<sup>5)</sup>。選定したひずみゲージでは、図5に示すように高圧水素中でドリフトの少ない安定した出力が得られている。このひずみゲージを用いてロードセルを試作し、高圧水素中に暴露した試験結果を図6に示す。温度を上げることで6 $\mu$ 程度の出力変化(荷重相当で0.13kN)が出ているが、温度、圧力一定下では非常に安定しており、高圧水素ガスの影響を受けにくい結果となっている。

容器内ロードセルを用いた引張・圧縮疲労試験データの一例を図7に示す<sup>6)</sup>。容器内ロードセルによる正味荷重制御のデータであるが、試験後半では、繰返し変位により、パッキンの抵抗が増えることを反映して、外部ロードセルの荷重値が徐々に大きくなっている。このように、容器内ロードセルによる正味荷重制御は、外部ロードセルによる荷重制御と比較して、誤差影響因子を排した精度の良い試験を可能とする。

### 3. 試験機操作方法

本試験機では、試験治具のセットを容易にするため、ブルロッドを下蓋中央に貫通させ、下蓋上面に試験治具を取付ける構造を採用した。試験片セット時には、図8(c)に示すように圧力容器胴および上蓋を上昇させる。この上昇には、試験機のクロスヘッドを用いることで簡単に操作できるよう配慮した。操作手順は以下の通りである。1) プレスフレームを左右に移動させ((a)), 圧力容器胴および蓋から離脱させる。2) 試験機クロスヘッドを下降させ((b)), 圧力容器胴および上蓋を一体で持ち上げる((c))。3) 試験片をセットする。4) 逆の操作を行い、元の位置に戻す。このように非常に簡単な操作で試験片の脱着が可能であり、従来試験機に比べ作業時間が10分の1以下となり、機能の安定性および作業性が大幅に改善された。

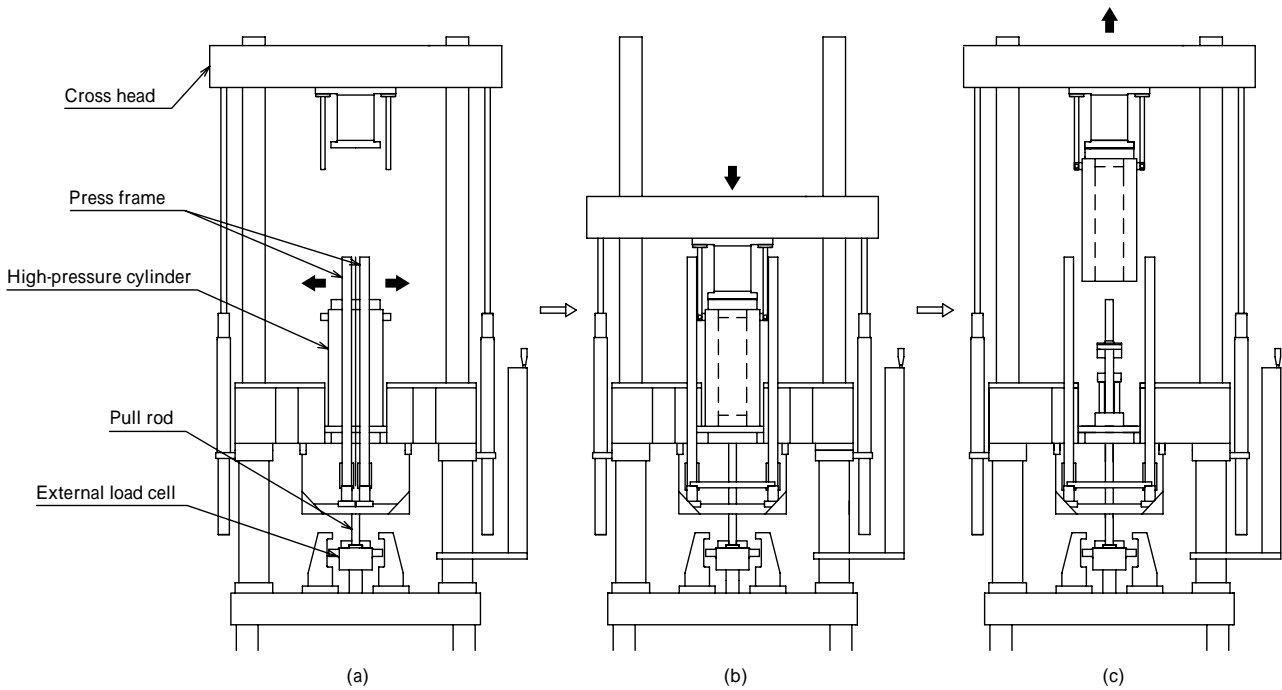


図8 試験機操作方法  
 ((a) フレーム開, (b) クロスヘッド下降, (c) クロスヘッド上昇)  
 Fig. 8 Operating procedure of testing equipment  
 ((a) frame open, (b) crosshead down, (c) crosshead up)

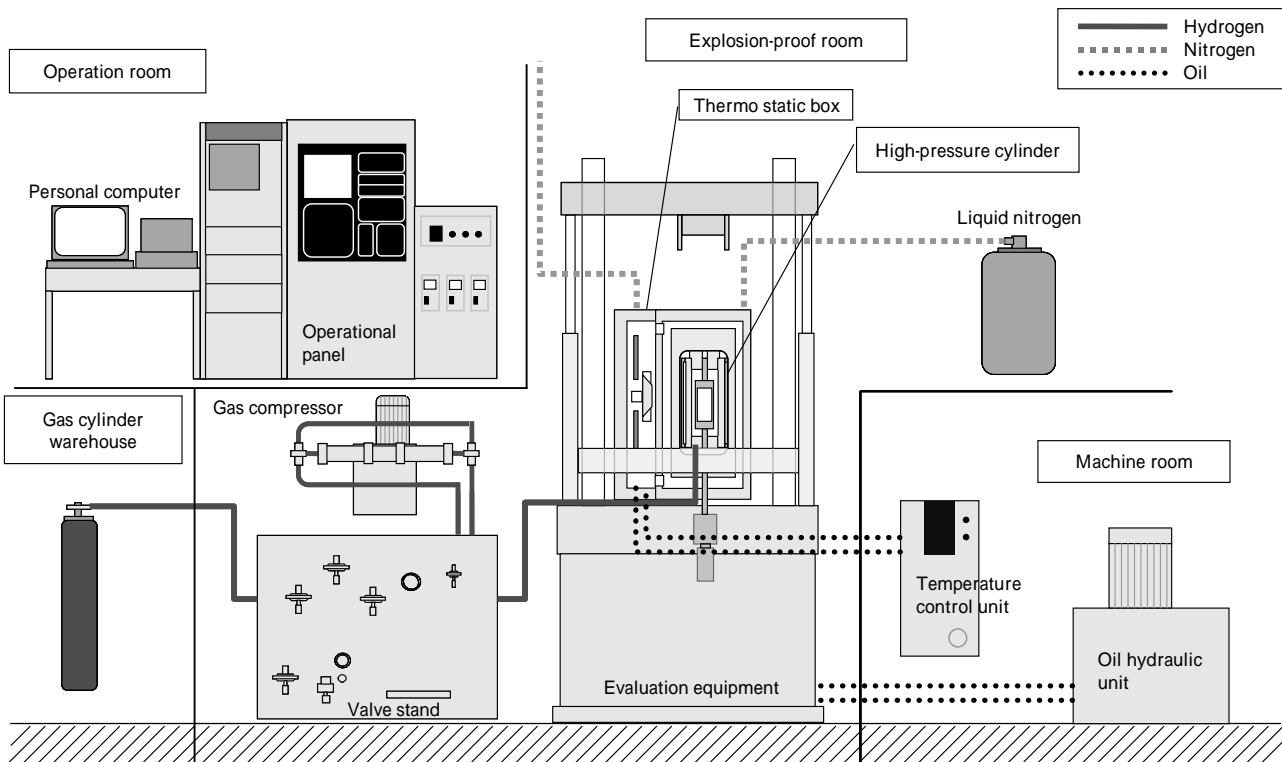


図9 全体システム構成  
 Fig. 9 Layout of high hydrogen pressure testing equipment

#### 4. 全体システム構成

全体システム構成の一例を図9に示す。油圧関連機器は機械室、高圧水素ガス機器および試験機本体は防爆室、操作盤を制御室にそれぞれ設置して遠隔操作にて安全に運転を行えるよう配慮している。試験機外観を図

10に示す。圧力容器全体を恒温槽内に装着し、恒温槽内を加熱もしくは冷却することで圧力容器内の温度コントロールを行えるようになっている。運転中は恒温槽内部を窒素雰囲気として、万一水素ガス漏れが発生した場合でも窒素ガスで希釈して屋外に排気する安全設計として万全の配慮を行っている。



図10 高圧水素試験機本体外観

Fig.10 General view of high hydrogen pressure testing equipment

むすび = 本開発は燃料電池・水素技術分野における NEDO（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）プロジェクト事業での要望に応えるべく開始し、既に '03 年度に 1 台，'06 年度に 3 台を製作・納入し、燃料電池自動車関連の例示基準策定などに活用されている。本装置の特徴は、雰囲気圧力が高圧になるほど有効性を持ってくるため、現状唯一無二の装置との評価を得ており、引続き多方面で活用されることを期待している。

なお、図 10 に示す試験装置は、NEDO プロジェクト「水素社会構築共通基盤整備事業」の一環として新日本製鐵(株)、(株)日本製鋼所および九州大学に納入したものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 梶村芳敬：高圧ガス，Vol.43, No.1 (2006) pp.13-16.
- 2) 公告特許：昭 54 - 10875
- 3) 公開特許：2004-340920
- 4) S. Ohmiya et al. : Proc. of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conf, (2005) PVP2005-71735.
- 5) 公開特許：2008-64569.
- 6) 大宮慎一ほか：日本機械学会 2006 年度年次講演論文集 (1) (2006), p.617.