高圧円筒の最近の傾向*

井上 威 恭**

はじめに

石油工業、化学工業の分野で使用されている高圧円筒のうち最新鋭と称せられるものを要約すれば表1となり大型化されてきたうえに高温高压で使用されていることがわかり、技術的な傾向としてはつぎのような点があげられる。

(1) 大型となって容器単体の重量が大きくなっているため、応力解析を十分におこなって、安全率を必要最小限度に下げて重量をできるだけ軽減するような努力が払われている。

(2) 巨大化されてきたために陸上輸送が困難となり現地で溶接組立のうえ、ストレスリーフから検査までを野外でおこなう技術が開発されてきた。

(3) 高温高压で使用される場合、応力腐食および熱疲労などが問題となってきたため、耐熱耐食性材料の進歩もめざましいが耐熱絶縁材のライニング、耐食耐熱性金属の爆発圧接、溶接肉盛法によるクラッド技術なども進歩してきている。

(4) 大型の高圧円筒として、従来の一体鍛造方式の高圧円筒に対抗して各種の方式による層成円筒の技術が研究開発されてきている。

本稿においては、最近の高圧円筒の傾向のうち材料以外の点に関して顕著なものを展望してみることにする。

1. 巨大化

図1は最近国産された压力容器の大きさを示す概略図である¹⁾。巨大压力容器の製造技術は原子力発電からの要求によって開発が促進されているのが実状であるから、高圧円筒大型化の今後の傾向は原子炉用压力容器の傾向から推測することができる。

A. L. Gaines はアメリカにおける压力容器製造能力の現状をつぎのごとく述べている²⁾。

(1) アメリカでは現在100~150万kWの原子力発電所を建設できる。

(2) アメリカで製作できる鋼板の最大厚みは305

mmであり、仕上り最大重量は45.3tである。

(3) 鍛鋼品は63.5tの重量まで製造ができ、マンドレル方式で鍛造する場合の最大外径は5200mmでありロールミル方式によって鍛造できる最大外径は8225mmである。

(4) 大型容器の重量は725tを越え、輸送が問題となっている。

R. H. Sterne, Jr. はアメリカにおいては重量1000t

(a) 多層型の550 ton 級压力容器 (b) リング鍛造材溶接型の320 ton 級压力容器
図1 国産された大型压力容器

表1 高圧円筒の使用例

用途別	最大容重量 [t]	使用圧力 [kg/cm ²]	温度 [°C]
石油精製反応筒	1000	100~200	350~450
メタノール合成筒	500	150~300	約200
アンモニア・尿素合成筒	300	300~1000	約200~600
高圧ポリエチレン重合反応筒	40	2000~3000	200~300
水晶用オートクレーブ		1000~2000	約400

* 昭和42年12月12日 受理

** Takeyasu Inoue (株)日本製鋼所

図2 試作された超高圧多層型円筒

表2 超高圧円筒の様式

様式	最高圧力 [kg/cm ²]	開発者
厚肉鍛鋼円筒	7000	
複合鍛鋼円筒 (焼ばめ・自緊)	12000	
ピアノ線巻き円筒	14000	ASEA 社
内外筒のあいだに液圧をいれた2重高圧円筒	34000	P.W. Bridgman
分割式扇形圧力保持筒に補強された高圧円筒	34000	T.C. Poulter
ヒンデピン付扇形圧力保持筒に補強された高圧円筒	34000	Barogenics 社
同時に軸圧縮を与えるターバ付複合高圧円筒	52000	H.T. Hall

表3 各国の圧力容器の安全率^{9),10)}

規格名または国名	設計応力の基準	安全率
日本高圧ガス取締法	σ_B	4.0
日本ボイラ協会	σ_B	4.0~6.0
JIS 陸用ボイラ規格	σ_B	4.0
日本高圧技術研究会推薦	σ_B	3.0
米国 ASME sec VII	σ_B	4.0
米国 ASME Sec III	σ_s	1.5
独乙圧力容器協会	σ_s	1.5~2.5
イギリス	σ_B	4.5~9.8
イタリア	σ_B	4.5
スウェーデン	σ_B	1.5
スイス	σ_B	4.0

注: σ_s は降伏応力, σ_B は引張り強さを示す

までの圧力容器の製造が可能であり、今後ますますこの能力は拡大されるであろうと述べ、また直径6m、長さ18mまでは海上輸送が可能であるが、陸上輸送には問題があると述べている⁹⁾。

わが国の圧力容器製造能力もアメリカの現在の能力にはほぼ近づきつつある。

2. 高 圧 化

最近の超高圧科学の発達により表2に示されているような超高圧円筒があらわれ、特に静液圧による金属押しや粉末の3次元圧縮の技術が開発されて34000kg/cm²以上の超高圧円筒も使用されるようになった。しかしながら一般産業用に使用される比較的大型の高圧円筒は12000kg/cm²以下であって、このような高圧のものに対しては厚肉の一体鍛鋼製円筒か、またはこれらを焼ばめあるいは嵌合した複合円筒が多く使用されている⁹⁾。

しかしながら一体鍛鋼製の高圧円筒には製造の設備能力からその大きさに制限が生ずるので、最近図2にみられるような多数の鋼板を重ねあわせた多層円筒型高圧容器の試作研究が進められている。図2(a)は2H鋼板20層からなるもので、内面降伏圧力1750kg/cm²、破壊圧力3300kg/cm²に設計されたものである⁹⁾。図2(b)も胴部は軟鋼、50キロ鋼、60キロ鋼の鋼板を混用し、内側に軟鋼、外側に60キロ鋼を配置したいわゆる内柔外剛型のもので、胴部は20層からなっていて、全面降伏圧力2020kg/cm²、破壊圧力2540kg/cm²となっている⁹⁾。図2(c)は100キロ鋼で作られた内筒を80キロ鋼、60キロ鋼、50キロ鋼の3種の鋼板を図2(b)の場合と反対に内剛外柔型に配置したもので、胴部は23層からなっており、常用3000kg/cm²、破壊圧力5580kg/cm²を目標としたものである⁹⁾。

以上の3個の高圧円筒の試作品はいずれも溶接円筒式であって、常用1000~5000kg/cm²の化学工業用を目的としたものであるが、特殊な超高圧円筒としては6×1.5mmの矩形状ピアノ線を内筒のまわりに張力をかけながら多数巻きつけて円周方向の強度だけをもたし、軸方向の荷重は上下のピストン式の蓋を通じて外部のプレスで負担させた。内径400mm、14000kg/cm²に耐える超高圧円筒がすでに実用に供されている⁹⁾。

一般用の圧力円筒としてはこのほかに、厚み3mm程度の帯状鋼板を張力をかけながら内筒の

表4 チタンの大型压力容器への利用法

加工法 压力容器	クラッド 鋼板	爆発圧接	オーバーレイ 溶接	爆発成形
多層型	内筒材として利用	板継ぎ溶接部以外の部分に利用	—	複雑形状品の成形に利用
鍛鋼型	—	—	内面肉盛り に利用	—

まわりに多数捲きつけ、軸方向だけを溶接したもの、みぞのある帯鋼を内筒のまわりにはめこみながら捲きつけて、円周方向の張力のほかにみぞのかみこみで軸方向の荷重をも負担させたもの、厚鋼板から切りぬいた丸孔のある円板を内筒のまわりにはめこんでいった積層板型高圧円筒などが知られている。

3. 安全率の軽減化

図1に示されているような単体で550tというような高圧円筒があらわれてくると、安全率を2とするか1.5にするかによって重量は100t以上も異なってくる、価格のうえでも構造においてもいちじるしく異なってくるので、安全率の決定はメーカー側にとってもユーザー側にとってもきわめて重要な問題となってきた。表3は压力容器に関する世界の代表的な国々の安全率を一覧表にしたものであるが^{9,10)}、ASME, sec. III が公表されてからは、これにならって安全率を軽減する傾向があらわれ厚板の中心における設計応力は降伏応力を基準にしてこれの1.5倍、局部応力や表面応力は塑性疲れを考慮しているが降伏応力以上の値がとられ、いわゆる塑性設計の域に入っている。化学工業界ではASME, sec. III を全面的に採用しているところは少ないが、これに近づけるべく压力容器各部の応力解析、とくに容器本体、ノズルフランジ、スカートなど接合部の応力解析が、電子計算機、光弾性実験、模型実験などによってあきらかにされてきて、全般的に安全率はしだいに軽減されてきている。

4. ライニング技術の向上

高温高圧を利用するプロセスが増加してきたためであろうか、高温高圧円筒の需要が増加してきている。高温高圧となると腐食、熱疲労、クリープが問題となってくる。高温に接する円筒を高温筒壁型 (Hot Wall) と称

し、高級な耐熱合金を使用し、クリープ限界以下の低い基準強度で設計しなければならないので重量も重くなり高価な円筒となる。

最近の傾向としては高圧円筒の内面に特殊な耐熱絶縁材を裏張りした、いわゆる常温筒壁型 (Cold Wall) の高圧円筒があらわれている。多層型円筒に耐熱絶縁材を鑄込んだもので、内部の反応温度は470°Cであっても筒壁温度は180°C以下におさえられ、組立現地で鑄込み作業ができるものが発表されている¹¹⁾。

耐食用の压力容器に古くからステンレスクラッド鋼板が使用されているが、最近ステンレスを経済的にオーバーレイ溶接する技術が発達し、弯曲の多い部分などにはかえて信頼性があるので需要が多くなってきている。オーバーレイ溶接としては、308, 309, 347, 405などのステンレス鋼が用いられているが、今後は用途によってハステロイ、インコネル、銅合金も使用されるようになるとおもわれる¹²⁾。

溶接法としては帯状電極溶接法およびシリーズアーク溶接法などが採用されていて、オーバーレイの厚みも当初6mm程度であったものが4mm程度の薄いものまで可能になってきている。

耐食性金属として注目されているのがチタンであるが、チタンをライニングするのは非常に困難な技術とされている。表4は大型压力容器にチタンを利用する場合の加工法を列挙したものであるが、現在のところ1つの加工法だけでは信頼性が乏しいので2つ以上の方法を併用するのがよいとされている。しかしながらソ連の文献によるとCa-F系のフラックスを利用したサブマージアークによるチタンのオーバーレイ溶接の実施例が紹介されており、近い将来チタンのオーバーレイ溶接も実現されてくるものと考えられる¹³⁾。

おわりに

化学工業の反応筒、原子炉用圧力円筒は巨大化の傾向をたどっており、金属加工の静液圧押出機および等圧圧縮用の超高圧円筒もしだいに大型化してきて実験室から工業化に移る傾向がみられる。しかもいずれも作用温度が上昇する傾向にあり、これらの技術革新の要望に答えて高圧円筒の製造技術も急速に開発されていくものとおもわれる。本稿においては高圧円筒使用の実状を展望して、今後の傾向を要約したつもりである。

引用文献

- 1) 小野寺真作, 笠原正光: 高圧力, 4, No. 6, p. 35 (1969)
- 2) A. L. Gaines: 3rd U.N. International Conference on the

Peaceful Uses of Atomic Energy, Paper No. 227 (1964—8)

- 3) Robert, H. Sterne, Jr.: *Nucleonics*, 25, No. 3, p. 60 (1967—3)
- 4) Alexander Zeitlin, J. Brayman, F. George Boggio: ASME Publication, 64-WA/PT-14 (1964)
- 5) 水野五郎, 渡辺正男, 藤岡慶一: 日本製鋼技報, No. 11 (1962) p. 5
- 6) 塚部一郎, 北村勝美: 高圧力, 4, No. 6, p. 859 (1966)
- 7) 吉村正男: 強さの異なる材料を組合せた多層巻円筒並びに多層鏡板の研究 (1966—5) 千代田化工建設
- 8) Stig Johnson: Winding Technique Makes Possible Very light Hydraulic Presses and High Pressure Chamber, ASEA, 8146 Reg. 6735 (1967)
- 9) 橋戸口英善, 岡村弘之: 高圧力, 3, No. 3, p. 28 (1965)
- 10) 妹島五彦, 松本輝夫: 高圧力, 4, No. 3, p. 34 (1966)
- 11) D. W. McDowell, Jr., J. D. Milligan, A. D. Korin: *Hydrocarbon Process*, 45, No. 3, p. 157 (1966—3)
- 12) 山下岩男, 小山内真二, 坂本敏一: 日本製鋼技報, No. 22, p. 72 (1967)
- 13) 山下岩男, 中条之保, 小林忠男: 日本製鋼技報, No. 22, p. 65 (1967)

(特集 終わり)

会員の恵

化学工学パズル

今や世の中はパズル狂時代といわれる位、頭脳の訓練が流行しています。これはその流行に沿ったわけでもありませんが、化学工学に関する問題を作ってみました。興味のある方は試みて下さい。正解は次号へ掲載いたします。

化学と工学を加えたものが化学工学 (Chem. Ing.) である。この意義には異論のある方もありますが、これを次のように計算しました。

$$\begin{array}{l} \text{KAGAKU} \\ + \text{K} \text{OGAKU} \\ \hline \text{CHEMING} \end{array}$$

これをいわゆる虫喰算で解いて下さい。ただし

$$\bar{O}=8$$

$$I=1$$

とします。その他のアルファベットはそれぞれ 1~9 迄の数字を表わすものとします。(1 および 8 は $\bar{O}$ および I 以外の文字にもあります。)

[出題者 新保卓而]

正 誤 表

◇化学工学 31 巻 10 号 (1967) 994 頁所載の山田幾庵ら報文「多成分非理想系蒸留計算法」中の数式の誤を次のように訂正致します。

$$(34) \text{ 式, 最終 () 内 } \left(\frac{\overset{(s)}{p(i)} \overset{(s)}{x_D(i)}}{\overset{(s)}{w^2(i)}} \right)$$

$$(39) \text{ 式, 最終等置項 } \overset{(s)}{H_s} \overset{(s)}{X_s}(i)$$

$$(41) \text{ 式, 最終項 } \overset{(s)}{f_s}(i)$$

$$(78) \text{ 式, [] 内最終項から}$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{k>i} \left[\frac{\overset{(s)}{p_j(k)} \overset{(s)}{x_D(k)}}{\overset{(s)}{p(i)} - \overset{(s)}{p(k)}} \right] \left(\overset{(s)}{R} \overset{(s)}{p}(i) \right)^{-j} \\ & + \frac{1}{\overset{(s)}{R}} \left[\frac{\overset{(s)}{p_1(i)} \overset{(s)}{x_D(i)}}{\overset{(s)}{p}(i)} \overset{(s)}{w}(i) \right. \\ & \left. + \sum_{j>i} \left[\frac{\overset{(s)}{p_1(j)} \overset{(s)}{x_D(j)}}{\overset{(s)}{p}(i) - \overset{(s)}{p}(j)} \right] \right] \end{aligned}$$

$$(94) \text{ 式 [] 内最終項 } (\overset{(s)}{R} \overset{(s)}{p}^*(i))^{-j}$$

$$(98) \text{ 式 } \approx \text{以下の項 } \overset{(s)}{w}^*(i) \overset{(s)}{C}_i^*(s) \overset{(s)}{p}^{*-s-1}$$

$$(\overset{(s)}{i}) \overset{(s)}{x_w}(i)$$

以上、多数の読者に御迷惑をおかけしたことをお詫び申し上げます。(著者ら)

◇化学工学 32 巻 2 号 (1968) 175 頁所載の橋谷元由氏ら報文「気液平衡に及ぼす塩の影響および塩を加えた蒸留——エタノール-, i -プロパノール-, n -プロパノール-, 水-塩化カルシウム 3 成分系——」におきまして、表紙目次および英文目次中の著者名を橋本元由, Motoyoshi Hashimoto と記載いたしました。橋谷元由, Motoyoshi Hashitani の誤りにつき、お詫びして訂正させていただきます。(編集課)