

# 空気呼吸器の軽量化及び長時間化について

Study on the Light Weight and Long Duration Air Breathing Apparatus

国 本 由 人\*  
 辻 英 機\*  
 富 永 勝 彦\*\*

A light weight cylinder helps lessen the fatigue of firefighters working in toxic atmospheres. A product of aerospace technology, the filament wound cylinder is heat and corrosion resistant, and five kilograms (about 50%) less in weight than the customary steel cylinder. It consists of an inner bottle made of seamless aluminium alloy wound with glass fiber and epoxy resin in helical and hoop patterns.

## 1. はじめに

空気呼吸器の軽量化及び長時間化は、それを装着して現場活動を行う者から長い間、切望されていた課題であった。しかし、軽量化と長時間化という二つの課題は、相反する要素からなり問題が多いが、近年、この問題を解決する一つの方法として新素材のボンベが脚光を浴びているので、これらの事も調査研究した。

## 2. 軽量化について

現在東京消防庁で使用している空気呼吸器は表1に示されるように充てん圧力150kg/cm<sup>2</sup>、8ℓの高圧容器を使用した場合、総重量は、約15kgであ

表1 各呼吸器の部品重量とその割合

型 式	東 消 4 型		東 消 5 型		外 国 製 某 型 式	
	重 量	全重量比	重 量	全重量比	重 量	全重量比
面 体	0.82kg	5.22%	0.82kg	5.29%	0.70kg	4.98%
圧力調整器	0.95	6.05	1.20	7.75	1.05	7.43
警 報 器	0.54	3.44				
高圧導管	0.53	3.37	0.54	3.48		
背 負 板	1.93	12.28	1.99	12.85	2.30	16.37
小 計	4.77	30.36	4.55	29.37	4.05	28.82
高 圧 容 器 8ℓ、150kg 充てん空気 を含む	10.94	69.64	10.94	70.63	10.0	71.18
合 計	15.71	100	15.49	100	14.05	100

\*第一研究室 \*\*世田谷消防署

り、高圧容器重量は約10kgで全体の約7割を占めている。

この点から空気呼吸器の軽量化には重量の大部分を占めている高圧容器の軽量化がまず考えられ、次に他の部品について検討する必要がある。

### (1) 高圧容器の軽量化

現在、高圧容器は国内法（高圧ガス取締法）により規制されており、材質は単一金属でかつ規定の性能を有したものでなければならず、また継ぎ目なし鋼で作らなければならないとされている。

空気呼吸器用の高圧容器の多くは国内外を問わず、クロムモリブデン鋼でありその他として耐食アルミニウム合金がある。これらの材質は耐久性及び耐食性に優れており、従来使用されていた炭素鋼は現在耐食性に問題があり重すぎるといふ点から、ほとんど使用されていない。

国内外の空気呼吸器と高圧容器の重量その他の諸元について表2に示したとおり高圧容器の重量は充てん圧力が150kg/cm<sup>2</sup>、容器の容積8ℓの場合、国内外共に約9kg、また同一圧力で容積が4ℓの場合には約5kgである。

耐食アルミニウムは非鉄金属で、比重が鉄に対し半分以下という軽金属材料であるため、高圧容器に用いた場合、軽量化されるように考えられるが鉄鋼材に比べ強度が弱く同一の強度を持たせるためには、容器の壁を厚くする必要があり量的には主流を占めているクロムモリ

表2 空気呼吸器一覽表

タイプ	150 kg/cm <sup>2</sup> 充てん								180kg/cm <sup>2</sup> 充てん		300kg/cm <sup>2</sup> 充てん	
	国内				米 国				国内		スウェーデン	
製作社	A		B		C		D		E		F	
材 質	クロムモリブデン鋼		ニッケルクロムモリブデン鋼		クロムモリブデン鋼		耐食アルミニウム		クロムモリブデン鋼		クロムモリブデン鋼	
充てん圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	150		150		150		141		156		180	
ボンベ容量 (ℓ)	4	8	4	8	8	4 (×2)	8.5	8.3	8	6	3(×2)	6
ボンベ重量 (約kg)	5	9	4.5	8	9	5	9	—	8	10	6	10
空 気 量 (ℓ)	600	1200	600	1200	1200	600	1200	1300	1440	1620	810	1620
使 用 時 間 (残圧30kg/cm <sup>2</sup> ) (分)	吸気量 30ℓ/分		吸気量 30ℓ/分		吸気量 30ℓ/分		吸気量 30ℓ/分		吸気量 30ℓ/分		吸気量 30ℓ/分	
	16		32		16		32		16 (32)		32	
機 構	肺力式 二段減圧		肺力式 二段減圧		肺力式 二段減圧		肺力式 自動一段減圧		手動切替陽圧式 二段減圧		手動切替陽圧式 二段減圧	
	5		5		8		大気圧		—		—	
一次減圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	5		5		8		大気圧		—		—	
耐圧試験圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	250		250		250		250		235		260	
警 報 器 作動圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	打鈴式 30		打鈴式 30		打鈴式 30±5		共振板式 35±5		打鈴式 35±5		打鈴式 15±5	
警 報 器 作動圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	打鈴式 30		打鈴式 30		打鈴式 30±5		共振板式 35±5		打鈴式 35±5		打鈴式 15±5	
総 重 量 (約kg)	11	16	10	15	15	16	16	16	16	16	18	16
国内法令との適合性	○		○		○		○		○		○	

ブデン鋼による高压容器と重量は大差ない。

次に数年前(昭和53年)よりクロムモリブデン鋼にかわる高压容器の材質として、ニッケル・クロム・モリブデン鋼による高压容器が国内で製造され、従来のクロム・モリブデン鋼に変わりつつあり、東京消防庁でも、約半数の高压容器がニッケル・クロム・モリブデン鋼による容器を使用している。これは、クロム・モリブデン鋼の強度における降伏点が65kg/mm<sup>2</sup>であり、ニッケル・クロム・モリブデン鋼の降伏点は75kg/mm<sup>2</sup>と高くなっているため許容応力値が高くとれるので逆に同じ強度を維持するには軽量となる。重量について従来のクロム・モリブデン鋼によるものに比べ、充てん圧力150kg/cm<sup>2</sup>、容積8ℓで、約1kg、容積4ℓでは、約0.6kgの軽量化がなされ、現在の単一金属材料による軽量化は、これが限界だと言われている。

(2) 高压容器以外の背負板、圧力調整器、面体等の部分の軽量化について

現在東京消防庁で使用している空気呼吸器の高压容器以外の重量は先の表1に示されているとおり約4.6kgである。

面体、背負板、圧力調整器は、国内外のメーカーでさまざまな型式及び異なる材質で製作さ

れたものがあるが、重量的には大差ない。

3. 長時間化について

空気呼吸器の長時間化は携行空気量を多くすることであり、その方法には、高压容器の容積を現在のものより増加させるか充てん圧力を現在の150kg/cm<sup>2</sup>より高くするかの2通りである。

空気呼吸器の使用時間は次の計算式で求められる。

$$T=(P-P')V/Q \dots\dots\dots (1)式$$

- T：使用時間 (min)
- P：最高充てん圧力 (kg/cm<sup>2</sup>)
- P'：高压容器残圧 (kg/cm<sup>2</sup>)
- V：高压容器容積 (ℓ)
- Q：1分間の空気消費量 (ℓ/min)

(1)式により警報ベルの鳴動圧力の30kg/cm<sup>2</sup>をP'とし、高压容器の容積Vを8ℓ、1分間の空気消費量Qを40ℓ/minという条件で、高压容器の最高充てん圧力が150kg/cm<sup>2</sup>と300kg/cm<sup>2</sup>の場合の使用時間について試算すると、

最高充てん圧力 150kg/cm<sup>2</sup>の場合

$$T=(150-30) \times 8 / 40 = 24 \text{ (min)}$$

最高充てん圧力 300kg/cm<sup>2</sup>の場合

$$T=(300-30) \times 8 / 40 = 54 \text{ (min)}$$

となり、20分の長時間化が図れる結果となる。

ここで充てん圧力を高くするためには高压容器の耐圧性能を上げるために容器の肉厚を増さなければならず、重量が増加する。

高压ガス取締法容器保安規則第二条第6項に耐圧試験圧力について記載されているとおり、空気呼吸器用高压容器の場合は、耐圧試験圧力は最高充てん圧力の3分の5倍と規定されており、東京消防庁で使用している空気呼吸器の高压容器の最高充てん圧力は150kg/cm<sup>2</sup>で耐圧試験圧力は3分の5倍の250kg/cm<sup>2</sup>となる。また、充てん圧力を300kg/cm<sup>2</sup>とした場合、耐圧試験圧力は500kg/cm<sup>2</sup>となる。

ヨーロッパではすでに充てん圧力が300kg/cm<sup>2</sup>の高压容器が使用されており、材質はクロム・モリブデン鋼で、容積は6ℓが主流であり、現在東京消防庁採用の充てん圧力150kg/cm<sup>2</sup>、容積8ℓのものとの重量を比較すると約2kg重いが充てんされる空気量は1.5倍あり、長時間化がはかられている。

ヨーロッパで使用されている最高充てん圧力300kg/cm<sup>2</sup>の高压容器を輸入した場合、最高充てん圧力の300kg/cm<sup>2</sup>までは充てんできない。これは、ヨーロッパの耐圧試験圧力が最高充てん圧力の2分の3倍の450kg/cm<sup>2</sup>であり、国内法ではこれに対する最高充てん圧力は270kg/cm<sup>2</sup>となるためである。

先の(1)式で最高充てん圧力270kg/cm<sup>2</sup>、残圧30kg、容器容積6ℓ、1分間の空気消費量40ℓ/min、の条件で使用時間を求めると、

$$T = (270 - 30) \times 6 / 40 = 36 \text{ min}$$

となり、従来の充てん圧力150kg/cm<sup>2</sup>、容積8ℓの高压容器と比較すると12分間の長時間化がはかれる。

#### 4. 軽量化と長時間化の両立

従来の材質の高压容器によれば空気呼吸器の軽量化と長時間化は相反するものと思われるが、昭和40年代後半、アメリカ航空宇宙局(NASA)で開発されたアルミニウム・グラスファイバーの高压容器(以下「FRPポンペ」という。)について述べる。

このFRPポンペはアルミニウム内筒にグラス繊維を巻きさらに繊維を固定するためにエポキシ樹脂を繊維のすき間及び巻いた外側表面で硬化させ強度を増したものである。

グラス繊維をエポキシ樹脂で固定したもの(以

下「FRPポンペ」という。)の特長としては、耐食性に優れ、グラス繊維の引張り強さをうまく利用し軽量でありながら金属とはほぼ同等の強度を有する。それに対しグラス繊維を固定している樹脂は耐熱性が低く長時間使用温度は約150℃である。

FRPポンペの特長としては、ポンペの補強材としてのFRPが金属よりはるかに比重が低いため同じ強度をもたせる場合、軽量となる。またアルミニウム内筒に亀裂が生じても破裂せず、衝撃に対しても強いとされている。

FRPポンペの型式としては2種類あり、グラスファイバーを円筒にたが状(Hoop wrap)に巻いたポンペと円筒にたが状に巻きさらに底及び肩の部分に極らせん状(Helical polar wrap)に全面に巻いたポンペがある

表3 主なFRPポンペの諸元

タイプ	FRPポンペ					
	国内	米			国	
製 作 社	A	D		E		
形 状	完全に巻いたポンペ	完全に巻いたポンペ	完全に巻いたポンペ	たが状に巻いたポンペ	たが状に巻いたポンペ	
充てん圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	300	150	280	150	315	
ポンペ容量 (ℓ)	5	8	6.4	8	4.8	
ポンペ重量 (約kg)	5.6	4.8	6.4	5.4	6.4	
空 気 量 (ℓ)	1500	1200	1792	1200	1512	
使 用 時 間 (残圧30kg/cm <sup>2</sup> )	吸気量30ℓ/分	45	32	54	32	46
	吸気量40ℓ/分	34	24	40	24	34
総 重 量 (kg)	11	10	12	10.5	10	
国内法令との適合性	×	×	×	×	×	

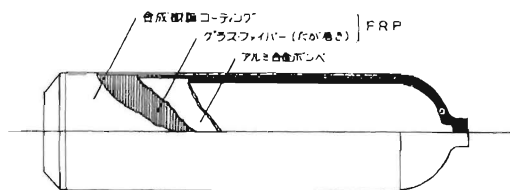


図1 たが巻きFRPポンペ

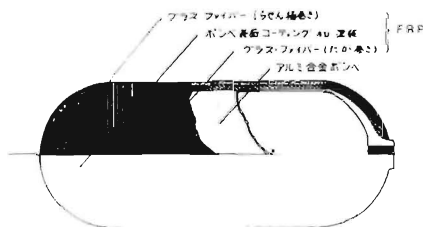


図2 完全巻きFRPポンペ



写真1 たが巻きFRPボンベ



写真2 完全巻きFRPボンベ

表4 FRPボンベと金属製高压容器の比較

種類	金属製高压容器		FRPボンベ			
	クロム・モリブデン鋼	ニッケル・クロム・モリブデン鋼	Helical polar wrap bomb	Helical polar wrap bomb	Hoop wrap (たが巻きボンベ)	Hoop wrap (たが巻きボンベ)
容積	8ℓ	8ℓ	8ℓ	6.4ℓ	8ℓ	4.8ℓ
充てん圧力	150kg/cm <sup>2</sup>	150kg/cm <sup>2</sup>	150kg/cm <sup>2</sup>	280kg/cm <sup>2</sup>	150kg/cm <sup>2</sup>	315kg/cm <sup>2</sup>
空気量	1200ℓ	1200ℓ	1200ℓ	1790ℓ	1200ℓ	1512ℓ
重量	9.2kg	8.2kg	4.8kg	6.4kg	5.4kg	6.4kg

FRPボンベには容量と最高充てん圧力は数種類あり、従来の金属製高压容器との比較と諸元、構造を表3.4、図1、2並びに写真1、2に示す。

このようにFRPボンベは、重量においては従来の金属製高压容器に比較し同充てん圧力及び同容積の場合では約2分の1の重量となり軽量化がはかられている。最高充てん圧力150kg/cm<sup>2</sup>で容積8ℓの金属高压容器と280kg/cm<sup>2</sup>、6.4ℓのFRPボンベを比較し前に試算した様に前者の使用時間が24分であるのに対し後者の使用時間は、

$$T = (280 - 30) \times 8 / 40 = 40.5 \text{ min}$$

となり、約1.7倍長時間化がなされる。重量はクロム・モリブデン鋼製の高压容器、ニッケル・クロム・モリブデン鋼製の高压容器に比較しそれぞれ2.8kg、1.8kgの軽量化がはかられる

#### 5. FRPボンベの使用上の制約について

前に述べたように高压容器に対する国内法の高压ガス取締法では現在のところ制約を受け国産品の製造販売は許されておらず、充てんされている輸入品のFRPボンベは一回限り、または事情により特別充てんが許されているが実質上、使用できないと言える。

従来の高压容器については製造後3年に1回の割合で耐圧試験（最高充てん圧力の3分の5倍）

を受け合格している場合、継続して使用可能であるが、FRPボンベの場合はアメリカの運輸省規格（DOT）によれば、耐圧試験に合格しても製造から15年を経過したものについては更新しなければならない。

次に現在東京消防庁で使用している空気呼吸器の圧力調整器はJ型にあっては150kg/cm<sup>2</sup>、K型にあっては200kg/cm<sup>2</sup>の充てん圧力に対応できる構造となっている。充てん圧力300kg/cm<sup>2</sup>には対応するためには、

- ① 高压導管
- ② 圧力調整器
- ③ 減圧調整器

等の交換、改造及び増設が必要となる。

#### 6. まとめ

呼吸器の軽量化と長時間化を同時に満たすことは難しく、高压容器の充てん圧力もしくは容積を増すことで長時間化が可能となるが重量が増すこととなる。

近年、開発されたFRPボンベは補強材のFRPが軽量でありながら金属と同程度の強さを持ち、これを用いることにより、軽量化と長時間化が可能となり、耐食性、耐衝撃性にすぐれる。法規制の改正がなされ国内での使用が待たれる。

FRPポンベはまだ歴史的に浅く未知の部分が  
多く国内でも開発・研究がなされている段階であ

り、今後、消防活動上での安全性及び性能につい  
て研究される必要がある。