

## ボイラ「設計編」\*

村上 修\*\*, 梶原 健司\*\*, 石岡 泰和\*\*, 西部 孝明\*\*



村上 修

梶原 健司

石岡 泰和

西部 孝明

## Boiler (Design)\*

by MURAKAMI Osamu \*\*, KAJIHARA Kenji \*\*, ISHIOKA Yasukazu \*\* and NISHIBE Takaaki \*\*

**キーワード** ボイラ(-), 自然循環式水管ボイラ, ドラム, レーザ溶接, MIAB 溶接, PWHT, ぜい性破壊, 水圧試験

## 1. はじめに

本論に入る前に、文中での用語について記す。現在、「ボイラー」及び「ボイラ」のいずれもが一般に用いられている。英語の“boiler”は学術用語では過去「汽罐」と呼んでいたが、罐の字が当用漢字ではなくなったので、用語としては仮名書きにして「ボイラー」又は「ボイラ」とすることになった。法令・規格でも電気事業法及び労働安全衛

生法では「ボイラー」、JIS B 8201「陸用鋼製ボイラー構造」及びJIS用語では「ボイラ」と称され、混用されている。本書ではJIS用語にしたがって、「ボイラ」を用いる。

ボイラは、次の3つの要件を満たすものと定義されている<sup>2)</sup>。

- ① 火気、高温ガス又は電気を熱源とする
- ② 水又は熱媒を加熱して蒸気又は温水を作る装置である
- ③ 蒸気又は温水を他に供給する装置である

ボイラは燃料の燃焼熱を利用して、所要の蒸気又は温水を発生する装置であるが、その発生蒸気は電力用（動力発

表1 ボイラ種類別・規模別設置数<sup>3)</sup>

(平成23年12月31日現在)

種別	蒸気ボイラー													温水ボイラー		計						
	水 管	ボ イ ラ ー	強 制 循 環	ボ イ ラ ー	貫 流	ボ イ ラ ー	ラ ン ヤ カ	コ シ ル ユ ニ	立 形	横 煙 管 式	炉 筒 煙 管	船 用 形	機 関 車 形	機 関 車 用	鑄 鉄 製 式	組 合 せ 他	そ の 他	鑄 鉄 製 式	組 合 せ 他	新 設	廃 止	現 在
5㎡未満	75	5	93	1	9	757	66	63	0	4	83	291	239	408	1,747	44	197	3,841				
5~10	197	25	1,506	0	10	263	238	1,333	0	2	7	1,073	104	1,394	1,187	151	393	7,339				
10~40	752	103	2,450	2	26	172	620	4,989	2	3	15	2,807	189	1,568	1,072	223	918	14,770				
40~100	833	45	486	3	5	71	472	3,738	3	8	5	211	173	50	435	121	341	6,538				
100~200	810	34	187	1	0	25	247	813	9	3	3	89	165	2	143	40	102	2,531				
200~300	441	14	43	0	0	2	56	87	0	1	5	5	64	1	52	13	38	771				
300~500	540	28	7	0	0	9	72	22	0	0	0	2	92	0	19	14	37	791				
500~700	176	20	1	0	0	1	13	2	0	0	0	0	25	0	6	5	6	244				
700以上	324	47	12	0	0	0	17	4	0	0	0	0	71	0	24	8	20	500				
新設	43	3	301	0	0	1	26	79	0	0	1	24	34	10	97	619						
廃止	274	6	194	0	1	23	48	671	0	2	0	375	54	250	233				2,131			
現在	4,148	321	4,785	7	50	1,300	1,801	11,051	14	21	118	4,479	1,122	3,423	4,685							37,325

\*原稿受付 平成25年3月8日

\*\*正 員 株式会社イメックス Member, IMEX Co., Ltd.

生用), 工場のプロセス用として各種機器操作用や暖房用などとして広く用いられている。したがってボイラの構造は, 使用目的に応じて種々の形式をとる。参考に(社)日本ボイラ協会のまとめによる最近のボイラの種類別・規模別設置数<sup>3)</sup>を表1に示す。

ボイラの発達はその製造技術に負うところが大きい。今やユニット蒸発量 2,000 t/h 近くの画期的大容量ボイラまで出現する時代になった。これは高張力鋼や特殊鋼などボイラ用材料の進歩にもよるが, 特に接合技術がリベット構造に代わる溶接技術の導入によって, ボイラの高圧・高圧・軽量化を促進し, 超大型ボイラの製造が可能になった。現在いわゆる新鋭火力と称する発電用ボイラはもちろんのこと, 工場用, 暖房用の小形ボイラに至るまで, 溶接技術を度外視しては考えられない。

## 2. 製品概要

1. 章で概説したように, ボイラは多種多様である。その中から, 我々の生活の中で発生するごみを燃料とするごみ焼却施設に設置される自然循環式水管ボイラを例にとって説明する。このボイラは, ごみの燃焼によって発生した燃焼ガスを所定の温度まで冷却する。言い換えると, 廃熱を利用して蒸気を発生させるものである。また, 自然循環式とはボイラ水を加熱することによって生じる水の温度差(密度差)を利用して, ボイラ水の循環を行なわせるものである。

ボイラの全体図を図1に示すが, 蒸気ドラム, 降水管, 連絡管, 管寄せ, 伝熱管などで構成されている。

図1中の□で示すように燃焼装置から発生する燃焼ガスは, 第1煙道~第2煙道を通り, 第3煙道に設置された接触伝熱管(過熱器管, 第1~3蒸発器管, エコノマイザ管)を通ることにより, 冷却されて排出される。

また, ボイラの水循環については, 給水ポンプからの供給水は, まずエコノマイザに入る。ここで熱回収を行った後, 給水連絡管を通り蒸気ドラムに入る。蒸気ドラムに供給されたボイラ水は, 降水管を通して側壁下部管寄せ(分配管)を経由し, 伝熱管に入る。ここで, ガス側からの放射および接触伝熱により加熱され, 汽水混合物となって上昇し側壁上部管寄せ(集合管)に流入する。

次に, 流入した汽水混合物は, 側壁上部管寄せ内で蒸気と水に一次分離し, 分離された蒸気は蒸気管及び側壁上部管寄せを通して蒸気ドラムへ, ボイラ水は再び降水管を通して側壁下部管寄せへ流れていく。

一方, 蒸気ドラムに入った蒸気は, 飽和蒸気連絡管を通り, 過熱器に入る。ここで接触伝熱により過熱蒸気となって発電設備他へ供給される。

## 3. 溶接構造物としての設計思想

### 3.1 ボイラに関する規格<sup>4)</sup>

産業革命は英国から始まったが, その原動力としてボイラは大気圧汽缶として登場した。しかし, 高圧化を目指す

傾向が強まり, その反面ボイラの事故が多発したため, 構造規格の統一による安全性の確保が切望された。世界のボイラに関する規格は, 技術力で先駆したドイツ規格が最も早く進歩したといえる。一方, 米国の ASME 規格の充実もあり, 技術安全上早期に世界の双方の共通化が必要とされ, 1947年 ISO TC11 が設置された。しかし, 1997年まで50年間も休眠状態となった。

なお, 2002年5月29日から EU 域内で英国・フランス・ドイツが主体となって欧州ボイラ規格(EN ボイラ規格)が作成され EU 内で適用されている。これに刺激を受けた米国・日本と欧州との主導権争いが ISO TC11 委員会で続いている。

主要国のボイラ及び圧力容器に関する法体系の比較を表2に示す。日本は厚生労働省と経済産業省の二本立てである。米国は一本化しているように見えるが, 各州の省令があり多種多様である。ボイラ構造規格は ASME 一本になっている。欧州は, 英国, ドイツ, フランスが中心となって「圧力機器指令」の下でボイラ構造規格も一本化された。EU では構造規格の統一がなされているが, その他の国では自国の規格があるため, 適用される規格に基づいて材料, 設計, 製作を考慮しなければならない。

### 3.2 材料

鋼の引張強さは, 350℃ 以下では変化が少ないが, それより高い温度になると, 常温でどんなに引張強さが高くても大きく低下する。鋼の試験片を 350℃ 以上の一定温度に保ちながら一定の荷重をかけておくと, 試験片内の引張応力が弾性限度内であるのに, 長時間のあいだに次第に伸びて行く。これは常温ではみられない現象で, クリーブと呼

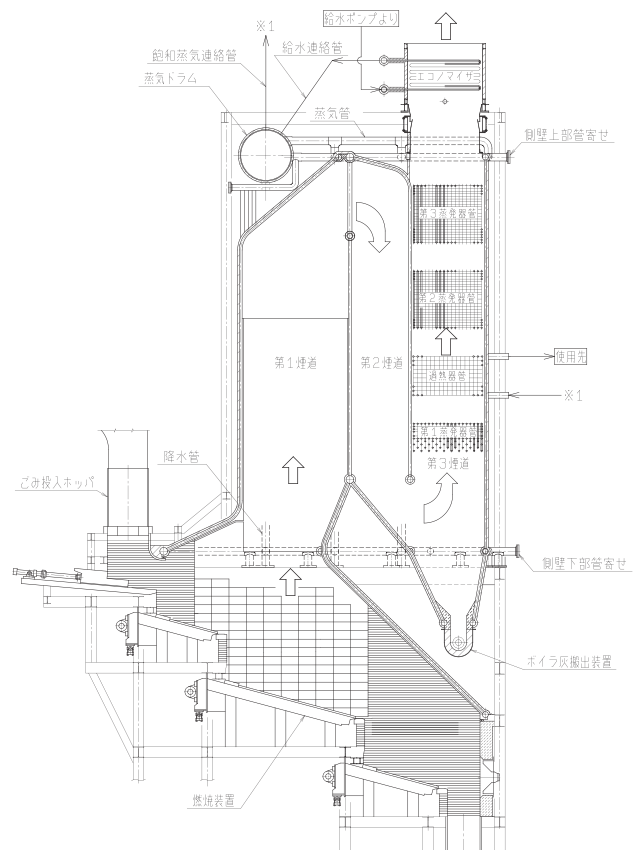


図1 ボイラ全体図

表2 主要国のボイラに関する制度の比較<sup>4)</sup>

	日 本		米 国	欧 州 共 同 体		
	厚生労働省	経済産業省	労働省安全衛生庁	独 国	英 国	仏 国
主務官庁	厚生労働省	経済産業省	労働省安全衛生庁	BAS (連邦労働社会庁)	DTI (産業貿易省)	産業省
適用基本法	労働安全衛生法	電気事業法	OSHA (Occupational Safety & Health Act)	連邦法 GSG (Gerätssicherheitgesetz) (B) GewO (事業法)	Factories Act (1974) Health & Safety at Work etc. Act (HSW法)	J01498-I (1990) General Text J0
省 令	ボイラー及び压力容器安全規則	発電用火力設備に関する技術基準	Rules & Regulation of States, Cities, Countries & Provinces	圧力装置指令 (Pressure Equipment Directive - PEDと略記)		
規格・基準	ボイラー構造規格 (JIS B 8201を引用) 压力容器構造規格	技術基準の解釈 (JIS B 8201を引用)	ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec I : Power Boiler Sec IV : Heating Boiler Sec VIII : Pressure Vessels	Water Tube Boiler : EN 12952 Part 1~16 Shell Boiler : EN 12953 Part 1~13		

注：本表は、1990年代の調査に2000年代の新しい変動を加味したものであり、最新状態は再確認を求められるものである。

表3 ボイラの伝熱部とそこで使用される材料<sup>5)</sup>

用途	メタル温度 (°C)				
	≤450	≤500	≤550	≤600	≥600
節炭器管	STB340 STB410 STB510				
蒸発管 伝管	STB340 STB410 STB510	STBA12 STBA20 STBA22	STBA23 STBA24		
過熱器管 再熱器管	STB340 STB410 STB510 STBA12	STBA12 STBA20 STBA22	STBA23 STBA24	STBA24 火STBA28 SUS304HTB 火SUS304J1HTB 火SUSTP347HTB	火SUS304J1HTB 火SUSTP347HTB 火SUS310J1TB

ばれる。

3.3項で示す強度検討において、材料における許容引張応力が必要になってくるが、その値はそれぞれの法規・基準で引張強さや降伏点、又はクリープ状態を考慮し規定されている。参考に JIS B 8201 の規定を以下に示す。

A. クリープ領域に達しない使用温度における許容引張応力は次の値のうち、最小のもの以下とする。

- ① 常温におけるその材料の引張強さの最小の規定値の 1/4
- ② 使用温度における引張強さの 1/4
- ③ 常温における降伏点又は 0.2% 耐力の最小の規定値の 1/1.5
- ④ 使用温度における降伏点又は 0.2% 耐力の 1/1.5 又は 90%

B. クリープ領域の使用温度における許容引張応力は次の値のうち、最小のもの以下とする。

- ① 使用温度において 1,000 時間に 0.01% のクリープを生じる応力の平均値
- ② 使用温度において 10 万時間でのクリープ破断応力の平均値の 67%
- ③ 使用温度において 10 万時間でのクリープ破断応力の最小値の 80%

このようにクリープ領域に達しない場合とクリープ領域の場合とは許容引張応力の求め方が異なる。

ボイラシステムで、水と蒸気を分離するための蒸気ドラムは、最高到達温度が飽和温度である 360°C 程度なので炭素鋼で十分である。しかし、気水分離後に蒸気を使用条件まで過熱するための過熱器や、一度タービンに供給された蒸気を再度使用するための再熱器などは、管材の温

度が 450~500°C 以上といったボイラシステム中もっとも高い温度にさらされるため、Mo 鋼又は Cr-Mo 鋼が必要になる。

ボイラ用鋼管にはいろいろな種類があり、ボイラ給水を予熱するためのエコノマイザなどの比較的低温部には、炭素鋼鋼管の STB340, STB410 が使用される。また高温部の合金鋼鋼管としては、Mo 鋼の STBA12, 13, Cr-Mo 鋼の STBA20~24 がある。ここで記号の T は Tube (管), A は Alloy (合金) を意味する。

Cr は, Mo に次いでクリープ強さを高め、また高温引張強さを改善する。その上、耐食性も与えるので、有用な合金元素である。しかし Mn や Mo と同じく溶接性に影響を及ぼす炭素当量を高めるため、溶接施工には注意が必要である。

表3にボイラの伝熱管として使用される材料を示す。

### 3.3 強度検討

#### 3.3.1 内圧による強度検討

ボイラは大気圧以上の蒸気(圧力)を発生させるため、ボイラ内部にはその圧力を保持することが必要である。実際にボイラを構成する部位であるドラムを例にとりて説明する。図2に蒸気ドラムを示すが、内部の圧力(内圧)を均等に受ける円筒形状である。この円筒形状は鋼板を曲げて成形し、曲げた板の端同士を溶接により接合している。

内圧を受ける円筒胴の計算式は、JIS B 8201 によれば次の式になる。

$$t = \frac{PD}{2\sigma\eta - 2P(1-k)} + \alpha \tag{式1}$$

t：円筒部の最小厚さ(mm), P：最高使用圧力(MPa),

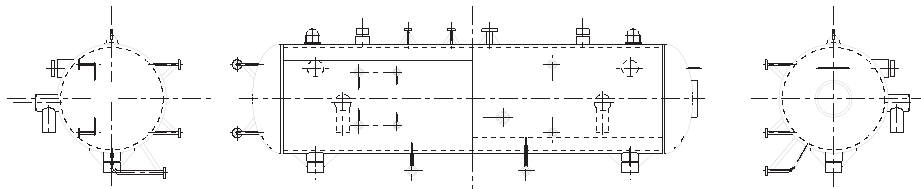


図2 蒸気ドラム

$\sigma$  : 許容引張応力 (N/mm<sup>2</sup>),  $\eta$  : 長手継手の効率又は穴のある部分の効率,  $k$  : 材料による係数,  $\alpha$  : 付けしろ (mm)

本計算は規格に規定されている計算式であるが、この基となる理論式は、次の薄肉円筒の計算式である。

$$t = \frac{PD}{2\sigma} \quad (式 2)$$

式1と式2を比較すると、 $\eta$ ,  $k$ ,  $\alpha$  が式1には付加されている。

$\eta$  は長手継手の効率又は穴のある部分の効率であるが、ここでは穴のある部分の効率については説明を省略する。長手継手の効率は、継手の種類や溶接後の放射線透過試験の実施の有無によって変わる。表4に溶接継手の効率を示すが、強度検討の一つの要素として計算に組み込まれている。 $k$  は高温におけるクリープを考慮した係数であり表5で示される。さらに $\alpha$  は、腐食及び摩耗についての余裕として見込んでいる。このように、規格の計算式は、理論的に構造的要素として溶接、材料、使用状態による条件を付加して安全性を高めている。

3.3.2 外力による局部応力の検討

ボイラは鋼管や鋼板で作られる重量物であり、そのボイラを支える支持脚等をボイラの内圧を受ける部分へ溶接で取付けているため、その支持部分にはボイラの重量(外力)による応力が発生する。そこにボイラの内圧による応力が重畳するため、複合応力による解析を実施する必要がある。

図3にFEM解析の結果を示す。局部応力の最大値が許容値以内になるよう構造を決定する必要がある。

表4 溶接継手の効率 (JIS B 8201 表8.2)<sup>6)</sup>

分類番号	継手の種類	溶接継手の効率 %	
		放射線透過試験を行うもの	放射線透過試験を行わないもの
1	突合せ両側溶接又はこれと同等以上とみなされる突合せ片側溶接継手	100	70
2	裏当て金を使用した突合せ片側溶接継手で当て金を残す場合	90	65
3	1, 2以外の突合せ片側溶接継手	—	60
4	両側全厚すみ肉重ね溶接継手	—	55
5	片側全厚すみ肉重ね溶接継手	—	45

表5 係数 k の値 (JIS B 8201 表6.1)<sup>6)</sup>

材料	使用温度 °C					
	480以下	510	535	565	590	620以上
フェライト鋼	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
オーステナイト鋼	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7

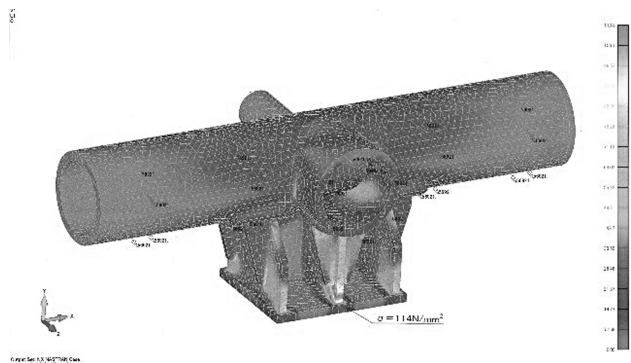


図3 FEM 解析結果

4. 溶接継手の特徴と要求性能

4.1 ボイラ製造に適用される溶接方法

ボイラも压力容器の一種として分類されることから、原則として完全溶込みの突合せ溶接又は開先溶接が適用されるが、一部管台の取付溶接などで部分溶込み溶接の適用が認められている。また、溶接継手形状及び各種溶接方法についても、一般の压力容器と同様に被覆アーク、サブマージアーク、マグ、ミグ及びティグ溶接、また積極的に狭開先溶接が用いられている。これらの溶接法のうちボイラでは、比較的小径管周継手が多いため、手動又は自動ティグ溶接法による裏波溶接が特徴的である。

ボイラ製造においても省人化を目的とした溶接の自動化、ロボット化が盛んに行われているところであるが、ボイラ構造の特殊性から閉所、高所又は狭隘個所といった自

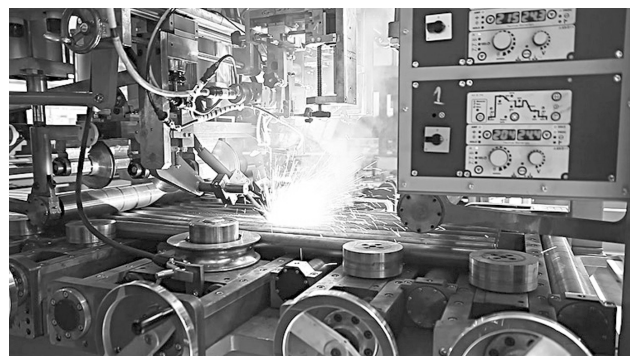


図4 メンブレンウォールのレーザー・ハイブリッド溶接<sup>7)</sup>

動化の難しい溶接継手があり、熟練溶接士の確保も欠かせない。

ここ数年レーザー溶接の開発及び適用が活発に行われているが、ボイラ部材については、ポーランドの Energoinstal 社が管とフィンとで構成されるメンブレンウォール(水冷壁)の溶接(図4参照)及びフィンチューブのフィン取付

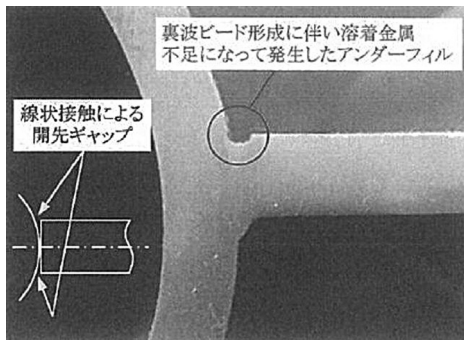


図5 メンブレウォールのレーザー溶接部断面

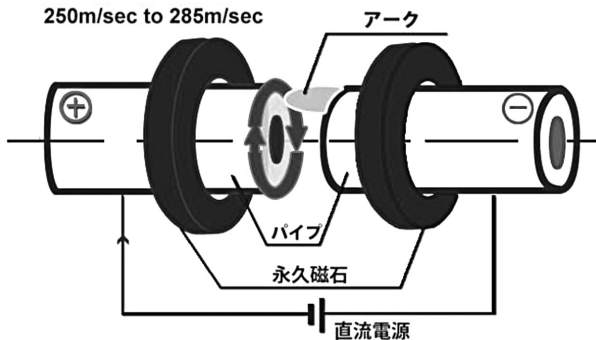


図6 MIAB 溶接法の原理<sup>11)</sup>

溶接にレーザー・ハイブリッド溶接を実用化している。

図5は、10kW ファイバーレーザー溶接装置を用いて、試験的に管とフィンの溶接を実施したものである。管に取付くフィン上下部には間隙があり、レーザー溶接単独では表ビード側にアンダーフィル（肉不足）が発生するため、ハイブリッド・レーザー溶接の適用が必要になる。メンブレウォールを既存の6電極ないし12電極のサブマージアーク溶接又はマグ溶接で施工すると、溶接歪が発生し寸法精度の確保が困難になることもあり、変形がほとんど発生しないレーザー溶接の特徴が生かせる継手であると言える。

一方、管周継手溶接方法として、MIABW (Magnetically Impelled Arc Butt Welding: 磁気駆動アークバット溶接) が注目されている。磁気駆動アーク溶接は、1950年代半ばに特許が取られ、1960年代になり多数の論文が発表された<sup>8)</sup>。しかしながら、管周継手の溶接としては、溶接継手品質が満足のいくものでなかったこと、また特に管内面の凸形ビードによる腐食及び管内流の乱れから実用化されなかった<sup>9)</sup>。

その後、ウクライナのバトン電気溶接研究所などで改良が重ねられ、2011年 ASME Code Case 2694 として、ASME Sec. I 適用工事に対して MIABW を管周継手突合せ溶接に適用することが認められた。ここで、Code Case とは、改訂を待たずに緊急に規定を作成する必要性が生じた場合や、便宜上特別に規定を設けたものである。MIABW の適用範囲は、P-1 (炭素鋼) 材に限定され、その管厚は 4.0～7.6 mm である<sup>10)</sup>。

MIABW の原理としては、図6に示すようにパイプ間にアークを発生させ、永久磁石でアークを高速度(約 285 m/秒)で回転させることにより、熔融温度近くまで加熱し圧

接することで拡散接合溶接を行うものである。本溶接法によると、炭素鋼管の外径 60.5 mm×板厚 5.5 mm の周継手 1 個所を約16秒で溶接を完了することができる<sup>11)</sup>。

#### 4.2 ボイラドラム用鋼板

ここでは、ドラム胴板、鏡板などに使用される炭素鋼鋼板である SB 材について解説する。SB 材は、B がボイラを示すように、ボイラ及び压力容器の中温から高温で使用される炭素鋼及びモリブデン鋼の熱間圧延鋼板である。ボイラは高温高压下で用いられるため、温度に対して安定な材料でなくてはならない。そのため、化学成分を限定する必要がある。

C (炭素) は鋼の中ではセメントイト  $Fe_3C$  の形で存在する。これは高温に長くさらされると、 $Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$  のように分解して黒鉛化する。黒鉛 (グラファイト) は炭の粉のようなもので、鋼材を弱くする。そのため、黒鉛化しないようなコントロールが必要になる。それには、Al は黒鉛化を促す作用があるため、脱酸剤としての Al の使用量を制限することが大切になる<sup>12)</sup>。また、高温強度の点から Si 脱酸によって、中程度の結晶粒度に調整してある。更に、高温強度の点を考慮して、Mn で強度を出すよりも、C を高めて強度を出しているため、低温じん性があまり良くない。したがって、溶接用構造圧延鋼板である SM 材に比較して低温じん性が劣り、ぜい性破壊の危険度が高いから、できるだけ常温以下の温度で使用する構造物には使わないことが望ましい。このため、4.5 項に示すようにボイラの耐圧試験時の水温に注意する必要がある。また、SB 材は SM 材に比較して C% が高いので、溶接性が悪く、このために溶接に際しては低温割れ防止に注意することが必要である<sup>13)</sup>。

なお、JIS B 3103「ボイラ及び压力容器用炭素鋼及びモリブデン鋼鋼板」の2003年改正において、以下の解説がなされている。すなわち、耐圧試験時のぜい性破壊防止の観点から、よい切欠きじん性が要求され、Al を添加して細粒鋼にして製造する場合が大半を占めている。実際にこの Al 添加が問題になるのは使用温度が 450℃ 以上で長時間さらされるときに発生する可能性が否定できない黒鉛化の問題であり、450℃ 以下で炭素鋼を使用する場合はクリープ及び黒鉛化の問題は少ない<sup>14)</sup>。ボイラドラムの使用温度は、3.2 項で記したように最高 360℃ 程度である。

表6に JIS, ASME 及び EN 規格で規定されているドラム用鋼板の化学成分、降伏点及び引張強さを示す。ここで、EN 規格は欧州30か国で構成される CEN (欧州標準化委員会) などが発行する欧州の統一規格であり、独自に出版されることはなく、欧州各国の国家規格 (英国では BS EN, ドイツでは DIN EN 規格など) としてその国の言語で発行されている<sup>15)</sup>。JIS は ASME のベースである ASTM (米国試験材料協会) 規格を採り入れているので、P 及び S 量を厳しく制限している他は同一である。一方、EN 規格では C を低く抑えた分 Mn を増やし、また Al の添加を規定することにより細粒鋼としている。

#### 4.3 溶接後熱処理の要否

溶接後熱処理 (Postweld Heat Treatment, 略称 PWHT) の目的としては、残留応力及び変形対策、母材・溶接部・構造物の性能の改善が挙げられる<sup>16)</sup>。残留応力は低温ぜい性に影響し、構造物としてのぜい性破壊発生要因となる。

表6 ボイラドラム用鋼板規格比較 (板厚 50 mm を超え 100 mm 以下で比較)

規格名	記号	化学成分 (%)															引張試験		
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Ti	B	N	Al	他	降伏点 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>
JIS G 3103	SB410	≦0.29	0.15~0.40	≦0.90	≦0.020	≦0.020	≦0.40	≦0.40	≦0.30	≦0.12	≦0.02	≦0.03	≦0.03	≦0.0010	—	—	Cu+Ni+Cr+Mo≦1.00 Cr+Mo≦0.32	≧225	410~550
ASME SA-515M	Grade 415	≦0.29	0.15~0.40	≦0.90	≦0.035 <sup>*1</sup>	≦0.035 <sup>*1</sup>	≦0.40	≦0.40	≦0.30	≦0.12	≦0.02	≦0.03	≦0.03	- <sup>*2</sup>	—	—	Cu+Ni+Cr+Mo≦1.00 Cr+Mo≦0.32	≧220	415~550
EN 10028-2	P265GH	≦0.20	≦0.40	0.80~1.40	≦0.025	≦0.015	≦0.30	≦0.30	≦0.30	≦0.08	≦0.020	≦0.02	≦0.03	—	≦0.012	≧0.020	Cr+Cu+Mo+Ni≦0.70 Al/N≧2	≧245	410~530
JIS G 3103	SB450	≦0.33	0.15~0.40	≦0.90	≦0.020	≦0.020	≦0.40	≦0.40	≦0.30	≦0.12	≦0.02	≦0.03	≦0.03	≦0.0010	—	—	Cu+Ni+Cr+Mo≦1.00 Cr+Mo≦0.32	≧245	450~590
ASME SA-515M	Grade 450	≦0.33	0.15~0.40	≦0.90	≦0.035 <sup>*1</sup>	≦0.035 <sup>*1</sup>	≦0.40	≦0.40	≦0.30	≦0.12	≦0.02	≦0.03	≦0.03	- <sup>*2</sup>	—	—	Cu+Ni+Cr+Mo≦1.00 Cr+Mo≦0.32	≧240	450~585
EN 10028-2	P295GH	0.08~0.20	≦0.40	0.90~1.50	≦0.025	≦0.015	≦0.30	≦0.30	≦0.30	≦0.08	≦0.020	≦0.02	≦0.03	—	≦0.012	≧0.020	Cr+Cu+Mo+Ni≦0.70 Al/N≧2	≧285	460~580
JIS G 3103	SB480	≦0.35	0.15~0.40	≦1.20	≦0.020	≦0.020	≦0.40	≦0.40	≦0.30	≦0.12	≦0.02	≦0.03	≦0.03	≦0.0010	—	—	Cu+Ni+Cr+Mo≦1.00 Cr+Mo≦0.32	≧265	480~620
ASME SA-515M	Grade 485	≦0.35	0.15~0.40	≦1.20	≦0.035 <sup>*1</sup>	≦0.035 <sup>*1</sup>	≦0.40	≦0.40	≦0.30	≦0.12	≦0.02	≦0.03	≦0.03	- <sup>*2</sup>	—	—	Cu+Ni+Cr+Mo≦1.00 Cr+Mo≦0.32	≧260	485~620
EN 10028-2	P295GH	0.08~0.20	≦0.40	0.90~1.50	≦0.025	≦0.015	≦0.30	≦0.30	≦0.30	≦0.08	≦0.020	≦0.02	≦0.03	—	≦0.012	≧0.020	Cr+Cu+Mo+Ni≦0.70 Al/N≧2	≧285	460~580
EN 10028-2	P355GH	0.10~0.22	≦0.60	1.10~1.70	≦0.025	≦0.015	≦0.30	≦0.30	≦0.30	≦0.08	≦0.020	≦0.02	≦0.03	—	≦0.012	≧0.020	Cr+Cu+Mo+Ni≦0.70 Al/N≧2	≧335	510~650

注 \*1: ASTM A 515Mは、2010年の改正によりP及びSの上限既定値が0.035%から0.025%に改正された。ただし、ASME SA-515M:2011aは、ASTM A 515M:2003 (R2007)に準拠しているため、0.035%のままとなっている。

\*2: ASTM A 20の2010年改正により、Bの規定0.0010%以下の規定が追加された。

JIS G 3103:2012では上記\*1及び\*2のASTM改正内容を取り入れ、かつP及びSの不純物元素についてはより厳しく制限している。

表7 P-1 材を用いるボイラドラム PWHT における最低保持時間

単位:分

溶接部の厚さ (mm)	6	12.5	19	25	32	35	38	50	90	125	
電気事業法	30	$t / 25 \times 60$									
労働安全衛生法	15	$t / 25 \times 60$									
ASME Sec. I	省略可		Ceq <sub>W</sub> ≦0.45, 予熱≧120°C, 各パス厚≦6 mmで省略可							$\{2 + (t - 50) / 100\} \times 60$	
			予熱≧95°C で省略可		$t / 25 \times 60, 15$ 以上						
ASME Sec. VIII Div. 1	省略可				予熱≧95°Cで省略可		$t / 25 \times 60$				
EN 12952-5	不要					1 x t			90 + 0.5 x (t - 90)		

PWHT に関しては、法規・基準でそれぞれ規定されている。ボイラに対する主なものとして電気事業法、労働安全衛生法、ASME Sec. I 及び EN 12952 を取り上げる。

ボイラは溶接構造になる前のリベット構造を用いた時代に、4.4 項で示すように数多くの爆発、破損事故を起こし、幾多の尊い人命を失って来た。そのため、溶接構造を採用してからも ASME Sec. I では重要構造部材であるボイラドラムの炭素鋼溶接部に対して、板厚を問わず PWHT を要求してきた。ただし、1962年版に至るまで Sec. I も Sec. VIII も、予熱及び後熱処理の項目を含んでいなかった<sup>4)</sup>。我が国の法規、規格は ASME の考え方を取り入れたものであり、PWHT に対する規定も ASME と同様になっている。

ところが、P-1 材 (SB410, SB450 及び SB480 相当材を含む) に対して ASME Sec. I では、2003年の Addenda (補足版) で 19 mm までの耐圧部周継手溶接部に対して、また、2009年の Addenda において 19 mm までの突合せ溶接又は開先溶接部に対して、PWHT を省略してもよいことに改定された。したがって、板厚 19 mm 以下のドラム溶接部に対しては、PWHT を省略できることになった。これは、EN 規

格が板厚 35 mm 未満に対して PWHT を不要としていることの影響もあるものと考えられる。これらを整理すると、表7 のようになる。なお比較のため、ASME Sec. VIII Div. 1 の規定も併記した。

国内関係法規においても、近い将来 ASME Sec. I などにならって改定されることを期待する。現状では例えば、板厚が 10 mm 程度の低圧ドラムなどでも PWHT が必要とされ、また定期点検時などに、ドラム母材上に溶接補修を実施すれば、その補修深さにかかわらず PWHT が必要になる。これは、溶接による残留応力を軽減する反面、PWHT 施工時の熱応力による新たな残留応力を発生することにもなる。ボイラは 4.5 項で示す水圧試験に合格すれば、あとは高温で使用されるものであり、ぜい性破壊の危険性はなくなることから PWHT の省略は可能と言える。

ただし、過大な応力集中又は応力腐食割れの危険性があるような場合には、板厚に関係なく PWHT が必要になることは当然である。

#### 4.4 ボイラドラムの破損事故

1705年に英国においてニューコメンが大気圧蒸気機関を発明して以来、各種改良を経てボイラは19世紀産業革命

に大きな寄与をなした。他方、当時の蒸気ボイラはリベット構造であったこと、及び安全弁などの安全対策が不十分であったことにより、数多くの破裂事故があり、多数の人命を失うこととなった。そのうち、最大の事故としては1865年4月27日に米国ミシシッピ川で発生した蒸気船サルタナ号のボイラ破裂が有名であり、1,500名以上もの死者が出た<sup>17-19)</sup>。図7にサルタナ号の写真を示すが、南北戦争終了後に故郷に帰還する兵士を多数乗せていた(376人乗りに対して2,400名)ことも、ボイラの爆発及び炎上の原因の一つとして挙げられている<sup>19)</sup>。

このような相次ぐ事故を契機にして、1834年に英国でロイズ船級協会(Lloyd's Register of British and Foreign Shipping)、1866年に米国でハートフォード蒸気ボイラ保険会社(Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Co.)、1872年にはドイツで蒸気ボイラ検査協会(DÜV: Dampfkessel Überwachungs Verein)が設立された。国内では少し遅れて、1908(明治41)年ボイラー保険会社「第一

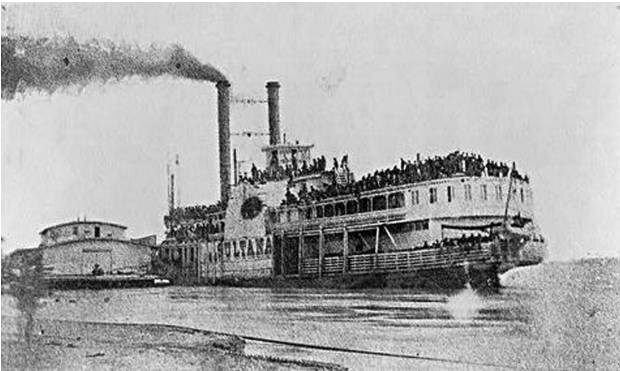


図7 蒸気船サルタナ号<sup>19)</sup>

機関汽罐保険(株)(安田生命の前身)が設立された。また、1880年にASMEが設立され、1914年のASME Boiler and Pressure Vessel Code 初版の発行につながって行くことになる<sup>4)</sup>。

その後は、全溶接構造のボイラドラムへの移行、その他の安全対策が功を奏しボイラ破裂事故は激減し今日に至っている。

#### 4.5 水圧試験温度

ボイラは、常時高温で運転されることにより、ぜい性破壊の危険性はなく、EN規格、一部船級協会規則などを除いて、材料及び溶接施工法確認試験などへの衝撃試験の要求はない。ただし、ボイラ製作時の最終試験及び定期点検などにおいて実施される水圧試験時には、ぜい性破壊の危険がある。以下に水圧試験時に発生したぜい性破壊事故二例<sup>20)</sup>を紹介する。

一例目は、英国 Sizewell Nuclear Power Station で1963年5月31日に発生したものであり、水温13℃で試験圧力3.1 MPaでの水圧試験の昇圧時にぜい性破壊を起こしたものである(図8参照)。ドラムを支持するため水圧試験用に用意された8本のI形鋼による脚のうちの一部の固定が不十分で外れ、突然支持力を失ったことによる衝撃でサーマルスリーブ取付部からぜい性破壊が発生した。

二例目は、1965年12月22日にスコットランド Cockenzie Power Station で発生したものである。水圧試験圧力の約96%である約27 MPaに昇圧したときに、ぜい性破壊が発生した(図9参照)。その時の周囲温度は7℃であった。製作時にドラム付きノズル溶接部の一部に深い割れが発見されたため、新規ノズルに交換するための補修溶接を行ったが、その後のPWHT初期に発生し、停止したぜい性き裂(図9破断面写真の黒っぽい箇所)が起点となったもので

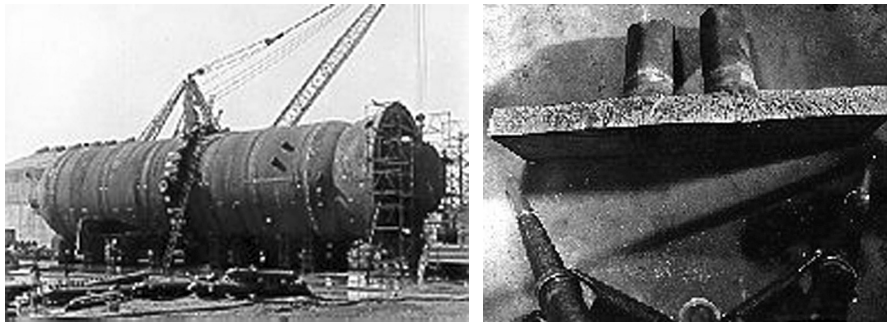


図8 Sizewell ボイラドラムの破損事故と破断面<sup>20)</sup>

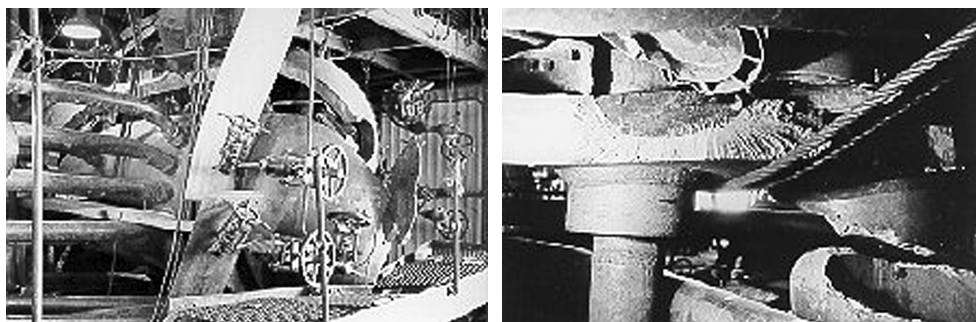


図9 Cockenzie ボイラドラムの破損事故と破断面<sup>20)</sup>

表8 水圧試験温度<sup>22)</sup>

項目	火技解釈	ASME Sec. I	EN 12952-6
試験温度	特に規定はないが、寒冷時に行う場合は凍結しない水温で、圧力容器の温度（金属温度）ぜい性破壊を起こす恐れがない温度とする。 (注) 「火力発電所の定期点検指針」では、温度40℃前後が望ましい（最低5℃以上）とされている。	PG-99 周囲温度以上または20℃以上の水を使用すること。 試験温度で、降伏強さ（0.2%オフセット）の90%を超える膜応力を発生させないこと。 試験が終了するまで、金属温度は50℃を超えないこと。	10.2 凍結の恐れがない水温で、耐圧部でのぜい性破壊の危険性を考慮した水温とし、いかなる場合も50℃を超えてはならない。

ある。本補修溶接部に対する非破壊検査は、PWHT 後には行われていなかった<sup>20, 21)</sup>。

これら水圧試験時のぜい性破壊事故の危険性もあり、各国のボイラ法規・基準では表8に示すように試験温度は、ぜい性破壊を起こす恐れがない温度以上などと規定されている。

## 5. おわりに

平成23年3月11日、東北地方を襲った大地震及びそれに続く大津波により、福島第1原子力発電所は大被害を受け停止し、廃炉に向けた準備がなされている。また、他の原子力発電所においても、活断層問題などで操業再開への道のは厳しい状況にある。これらの状況から、代替発電に頼る必要があり、火力、廃棄物、バイオマス及びHRSG（排熱回収ボイラ）発電に対する需要の増加が見込まれている。もちろん、風力、太陽光、地熱、波力などの自然エネルギーを使用できる発電への期待も大きくなっている。このような中、ボイラは火力、廃棄物、バイオマス及びHRSG発電に欠かせないものである。

ボイラ製造は国内向けも含めて現在、韓国、中国などへの海外調達が活発になされているところではあるが、日本のものづくり技術及び技能を絶やさないため、差別化、高付加価値化を進めることも含め、生き残りを図って行く必要があると考えている。

## 参考文献

- 1) 谷下市松：ボイラーかボイラか、コンピューターか、コンピュータか—仮名書き学術用語と国語との不統一を是正しよう—、日本機械学会誌、Vol. 101 (1998), pp300-301.
- 2) (社)日本ボイラ協会ホームページ：よくある質問.
- 3) (社)日本ボイラ協会：ボイラー年鑑（平成24年版）、平成

24年10月26日発行。

- 4) 寺本憲宗：ボイラー技術の系統化調査，国立科学博物館，技術の系統化調査報告 第7集，産業技術史資料情報センター，平成19（2007）年3月30日。
- 5) 中森正治監修：ボイラ燃焼ガスによる高温腐食事例とその対策，テクノシステム，2012年8月11日発行。
- 6) JIS B 8201:2005，陸用鋼製ボイラー構造，日本規格協会。
- 7) Energoinstal S.A.: Centre of Innovative Laser Technologies.
- 8) Egon Schlebeck, et al. (益本，赤石訳)：磁気駆動アーク溶接—新しい合理化手段，溶接学会誌，第44巻（1975）第3号，pp188-192.
- 9) Ivan Samardzic, et al.: Automatic Pipe Butt Welding Processes in Steam Boilers Production, Meeting of "WELDING & MATERIALS Technical, Economic and Ecological Aspects", 1-8.07.2007, Dubrovnik & Cavtat, Hrvatska.
- 10) ASME Cases of ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Case 2694 Use of Magnetically Impelled Arc Butt Welding (MIABW), Sep. 26, 2011.
- 11) 愛知産業(株)：MIAB パイプ溶接装置（磁気アーク回転突合せ溶接法）。
- 12) 大和久重雄：JIS 鉄鋼材料入門，大河出版，昭和59年1月10日発行。
- 13) 大和久重雄：鉄鋼材料の選択のポイント，日本規格協会，1975年5月31日発行。
- 14) JIS G 3103: 2007，ボイラ及び圧力容器用炭素鋼及びモリブデン鋼鋼板，日本規格協会。
- 15) 国立国会図書館リサーチナビ：EN 規格～欧州の統一規格～
- 16) 社団法人日本高圧力技術協会 応力焼鈍（SR）委員会編：日本高圧力技術協会規格（HPIS）溶接後熱処理基準とその解説，1994年9月，日刊工業新聞社。
- 17) Wikipedia: Boiler explosion.
- 18) Wikipedia: List of boiler explosion.
- 19) Wikipedia: SS Sultana.
- 20) B. Hayes, R. Phaal: Catastrophic Failures of Steel Structures in Industry: Case Histories, TWI 632/1998.
- 21) 小倉信和：厚肉圧力容器のぜい性破壊事故例とその対策，高圧力，Vol. 7 No. 5 (1969), pp1756-1762.
- 22) (財)発電設備技術検査協会：平成21年度火力関係設備効率化技術調査報告書（1/2），平成22年3月。