

ボイラー技術の系統化調査

Innovating Survey on the Boiler Technologies

1

寺本 憲宗 Kenshu Teramoto

■ 要旨

本調査では、世界におけるボイラーの歴史を2つに分けた。1つは1700年から1950年までの産業革命の初頭から第二次世界大戦後の混乱終了時期までの2世紀半を「近代」とした。2つは1950年から2000年の20世紀後半の時期を「現代」とした。この期間は「近代」よりも、高度な工業技術をボイラーの安全設計に組み込むことができた。

初めの「近代」は長い期間であり、個人がボイラーの発明に大いに傾注し多数の発明があった。これらのボイラーには、発明者の名前がボイラーの呼称についている。例えばヤーローボイラー、スターリングボイラー、ベルヴィユボイラー、レフラーボイラー、スコッチボイラー、および池田ボイラーなどがその一部である。少数のボイラーは現代でも記憶に残っているが、ほとんどのボイラーはその名前も忘れられ市場から消えて行った。それは1900年代の米国・英国などの年間ボイラー事故件数が1,000件をこえる状況が現出したからである。これらの事故は、当時の本体の設計および工作技術並びに関連機器の技術が十分に揃っておらず、意にかなうボイラーを製作できないためであった。ボイラーの安全確保のため、安全規則、構造規格、並びに検査制度の早急な整備が要請された。20世紀前半は世界戦争が多発し、各国海軍の軍用面での進歩は多大であった。特に、石炭ストーカ焚きボイラーから重油専焼ボイラーへの切り替えが積極的に促進された。しかし、一般産業用ボイラーおよび発電事業用ボイラーまでは手がつけられなかった。

「現代」に入ると、米国ではボイラーの規格・大量生産設備・品質管理などの物量作戦が大きく発展し世界を独走している状態が、わが国視察団の調査により歴然となった。これは1880年に創立されたASME (American Society of Mechanical Engineers) が牽引役となって発展させたことによる。わが国は戦後、主として米国の技術導入に専心し、自らの勤勉性をもって世界に誇れる技術の確立に向かった。それはボイラー本体の安全を確保する基礎理論、設計・工作技術、品質管理および運転・保守のほかに、これらをサポートする各種の関連技術である材料・溶接・水処理・自動制御・環境対策などが、急速にその理論体系を整えることができたことが安定したボイラーの発展に結びついた。これらの自主技術の育成が、その効果を表し世界の第一線に並んだと自負できる状況になったといえる。

本書は、このように日本のボイラー技術の導入と発展を「近代」と「現代」として比較解析し、さらに今後のボイラーの方向性として推進すべき事項の要点を述べる。

■ Abstract

We have divided the history of the boiler into two eras: one of the boilers of the past and the other more recent designs. The former era spans the previous two and half centuries from 1700 to 1950, beginning during the industrial revolution and continuing to the end of World War II. The latter includes the second half of the 20th century from the years 1950 to 2000. During this time, modern engineering technologies were incorporated into boiler design and this led to boilers that were far safer than previous ones.

In the first era, many boilers displayed the names of their designers at the top of their structure. Some well known boilers from this period were the Yarrow boiler, the Stirling boiler, the Belleville boiler, the Loeffler boiler, the Scotch boiler and the Ikeda boiler. A few boiler designs may be remembered today, but most of these designs have ceased to be used because of their high rate of failure. There were over 1,000 failures during the 1900's throughout the U.S.A. and England. This high number can be attributed to the low level of engineering technology of the day. Design philosophy and manufacturing technologies were not highly developed. Then, the establishment of safety regulations, boiler design codes, and inspection systems addressed these problems. In the first half of 20th century, the navies of most of the more powerful countries had converted the firing systems of marine boilers from coal stoker ones to oil firing ones. This research was limited to naval vessels, however.

At the beginning of the latter period, the U.S.A. was far ahead of other countries in the areas of boiler design codes, mass production systems and quality control. The American Society of Mechanical Engineers (ASME) started in 1880 and was to contributed to this development. Japanese engineers adopted some of their ideas and strove to establish and refine their own design methods, manufacturing networks, quality control, operation, maintenance and all related technologies, so that their boilers could compete with those of the advanced countries.

We will compare boiler technologies of these two eras and look ahead to the future aspects for their further development.

■ Profile

寺本 憲宗 *Kenshu Teramoto*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員
技術士

昭和35年 3月	北海道大学工学部機械科卒業
昭和35年 4月	三菱重工業(株)横浜製作所入社
平成10年 3月	同社退社
平成10年 4月	(社)日本ボイラ協会 入会
平成14年12月	同退会
平成16年 4月	国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任 調査員

■ Contents

1. はじめに	0
2. 近代におけるボイラーの創造	0
3. 現代におけるボイラーの発展	00
年表	00
4. 主要国のボイラーに関する規格	00
5. ボイラーの適用分類	00
6. ボイラー本体の主要技術	00
7. 主要関連技術	00
8. 考察	00
9. あとがき	00
10. 挿話	00
参考文献	00
付録：ボイラー調査票一覧	00

1 はじめに

ボイラーは産業革命の推進役となった原動機である。この歴史を「近代」と「現代」の2つに区分したが、それは安全を守る上でボイラー構造規格にてボイラー圧力の上限を図1.1に示すようにを定めていたが、そのボイラーの圧力制限の差異が大きかったからである。

図中JES規格は、ドイツに習うものでボイラーのドラム・胴はリベット継手によるため圧力は3.5MPa以下に制限されていた。第二次世界大戦後は、米国のASME規格に習いボイラー圧力は当初6MPa以下であった。しかし、溶接技術の発達からASMEのリベット規格が1971年版で凍結され、溶接ボイラーが全盛となり圧力の制限は外された。

第2章で近代、第3章で現代のボイラー歴史を概観するが、近代はボイラーの基本技術および必要な周辺技術との調和がとれないため、完全とはいえない。20世紀前半になっても事故は減少しなかった。現代に入ると驚異的な速さで全般の技術が進歩して行くことがわかる。

第4章では現代の主要国のボイラーに関する規格を比較調査した。第5章ではボイラーの適用分類を行い、第6章でボイラー本体主要技術の概括を述べ、第7章では主要関連技術が現在達成しているレベルを要点的に記述した。第8章で今回の調査の「考察」をし、第9章「あとがき」で所感とした。

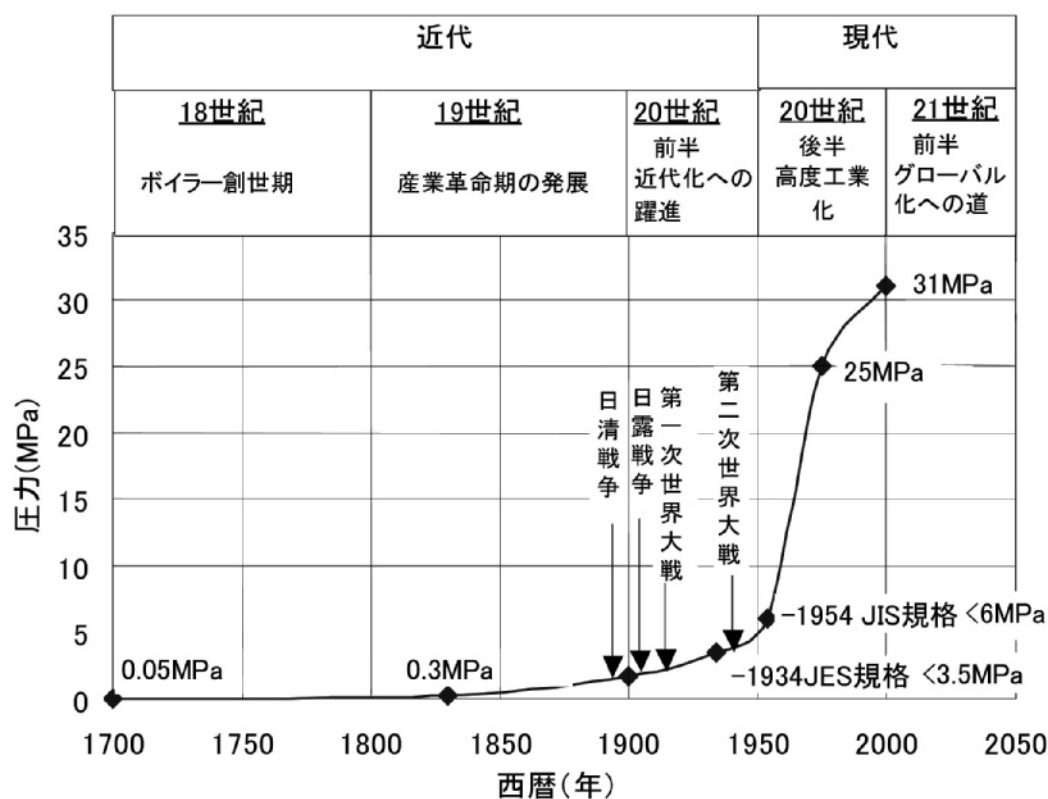


図1.1 ボイラー高圧化の変遷

2 近代におけるボイラーの創造

2.1 欧州のボイラー創生期（18世紀）

ボイラーが産業革命の推進力であったことはいうまでもない。当時、炭坑では坑内に湧き出る水を地上に汲み上げる仕事は悲惨な重労働であった。この水の搬出を行うことは困難を極め、人力で水を汲み出せる坑道の深さは20mが限界であった。そのため1705年ニューコメン（英, Thomas Newcomen, 1663-1729）は図2.1のニューコメン機関を利用して水の汲み上げをできるようにした。しかし、この機関は、蒸気をシリンダー内に充満させた後に、水を吹き込むので、シリン

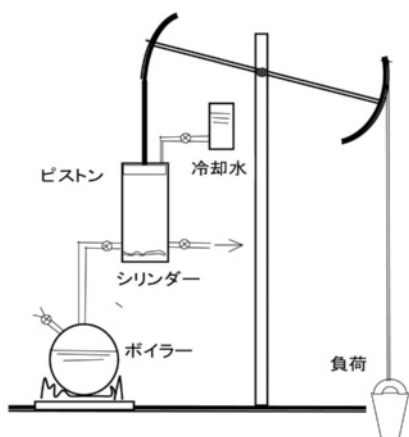


図2.1 ニューコメン単筒大気圧蒸気機関

ダー全体が冷えてしまうので仕事の効率が悪く「ニューコメンの蒸気機関はそれをつくるのに鉄鉱山が一ついるし、それを動かすのにも炭鉱が一ついる。」などと悪口をたたかれていた。そこで修理工であったワット（英, James Watt, 1736-1819）は、この機関の改良に興味を持った。彼は図2.2のようにシリンダーの後

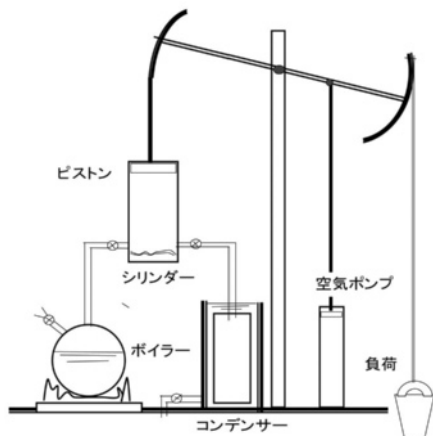


図2.2 ワットによる改良機関

に凝縮器（コンデンサー）をつなぎ、冷却は凝縮器で行い、シリンダーの温度を下げない工夫により燃料消費量を少なくすることに成功した。さらに、クランクを取り付け上下運動を回転運動に変える工夫も行った。このことが更に蒸気機関車や蒸気船の動力源として発展していった。

ニューコメンからワットによる改良機関になって燃料消費量が大幅に減り、これにより鉱山の水汲み出し作業が人手に頼らずにすむようになり、鉱山主を満足させることができた。しかし、容器の予熱・燃焼のまずさがあり、ほとんどの熱は排気および保温不備のため単に損失となり効率は良くなかった。

わが国でも100年後の1875（明治8）年に筑豊炭坑でボイラーを用いて坑内からの揚水実験（後述挿話10.2石炭史話）が行われたが、苦心惨たんたるものであったと記録されている。しかし、5年後には高島炭坑でボイラーによる動力が各種採炭機械に実用され、以後石炭増産に寄与した。

2.2 欧米の産業革命期の発展（19世紀）

2-2-1 ボイラーの高圧化

1830年ころまでボイラーは大気圧蒸気機関であり蒸気圧力は0.05～0.07MPa程度であったが、それ以降はコルニシュボイラー（図2.3）、ランカシャボイラー（図2.4）など0.2～0.3MPa以上のものが登場した。いずれも石炭のストーカ燃焼方式であった。

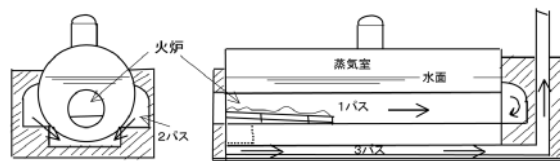


図2.3 コルニシュボイラー

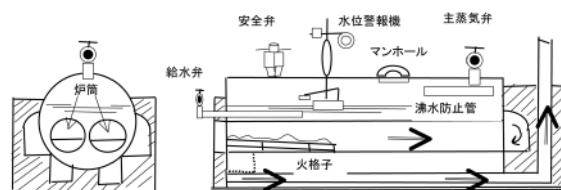


図2.4 ランカシャボイラー

一方船用ボイラーは、英国で1847年スコッチボイラー（Scotch boiler）の原形が図2.5のように箱形の胴の中に炉筒2個と煙管群を内蔵した大気圧ボイラーが開

発された。ボイラーは圧力が高いから円筒であるべきという前に、ボイラーは大気圧から始まったのである。ストーカの燃焼ガスが後部ジャケットで反転し煙管を通る戻火式である。⁽¹⁾

その後、高圧化のため胴が円形となり図2.6に示すものは片面スコッチ炉筒煙管ボイラーとよばれ、胴の直径5m、炉筒3個と煙管群をもつ船用ボイラーへと進化した。1960年ころまでの100年間はこのスコッチボイラーが王座を占めていた。

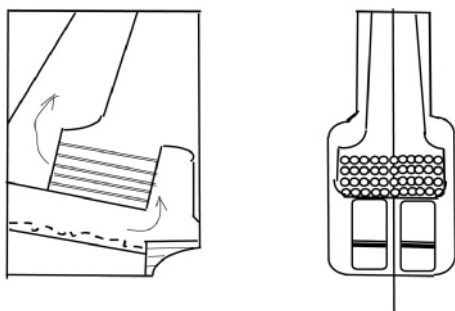


図2.5 スコッチボイラー原形⁽¹⁾

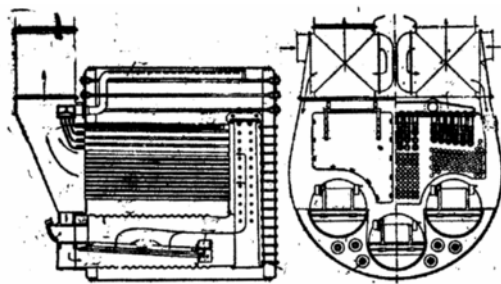


図2.6 スコッチボイラーの構造⁽¹⁾

わが国でも1885（明治18）年三菱造船 長崎造船所にて、最初のスコッチ炉筒煙管ボイラーが製作され、第一次世界大戦前まで船用主力ボイラーであり続けた。図2.7は片面スコッチ炉筒煙管ボイラーを向かい合わせて両面スコッチボイラーとしたもので、1898（明治31）年常陸丸用ボイラーの組み立て完了時の写真である。圧力1.4MPa、モリソン形波形炉筒を採用した伝熱面積270m²のスコッチボイラーは、当時としては記録的大形である。

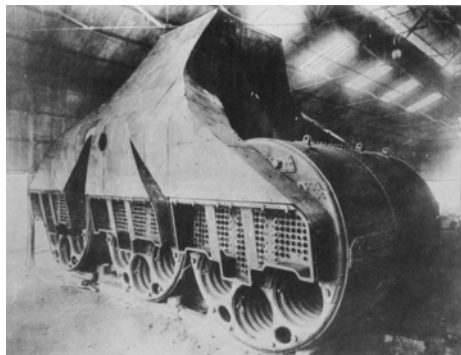


図2.7 完成したスコッチボイラー⁽²⁵⁾

2-2-2 事故の多発

ワットはボイラー破裂の危険を予測し特許で高圧化を抑えていたが、その後高圧化が進みだしワットが懸念したように事故が頻発するようになった。

1880年のASME設立時では、英国・米国でそれぞれ年間1,000件に及ぶボイラー破裂事故が続くような状況で、ボイラーは危険な機械の代表であった。このような深刻な事態に対処するため各国で保険会社が設立された。

1834年（英）ロイズ船級協会（Lloyd's Register of British and Foreign Shipping）

1866年（米）ハートフォード蒸気ボイラー保険会社（Hartford Steam Boiler inspection and Insurance co）設立

1872年（独）蒸気ボイラー検査協会（D U V : Dampfkessel Überwachungs Verein）設立

1908（明治41）年 日本初のボイラー保険会社「第一機関汽罐保険株式会社」設立（安田生命の前身）

2.3 日本の黎明期

2-3-1 ボイラーメーカーの出現⁽¹²⁾

幕府は、1855（安政2）年長崎海軍伝習所（後述挿話10-1わが国の欧米技術への開眼）を開設し欧米の技術習得に努めた。1853年ペリー来航の9月「大船建造禁止令」を解いて大形艦船を国内で建造する道を拓いた。

明治政府になってから、1880（明治13）年「工場払い下げ規則」を公布し、軍事上重要なものを除いて官業を民間に払い下げる方針に切替えた。そこで造船所については横須賀を海軍工廠として政府が確保することにし、長崎は岩崎弥太郎（現三菱重工業）、兵庫は川崎正蔵（現川崎重工業）へそれぞれ払い下げ、これが民营造船業の発展に大きな影響を与えた。石川島造船所は民間企業として最も早く1876（明治9）年に設立され官営石川島造船所跡の敷地とドック、付属工場を借用して造船業を始めた。

なお、1881（明治14）年大阪鉄工所（現日立造船）は英人ハンター（E.H.Hunter）によって設立された。ボイラーメーカーの創立が多くあり、三菱合資会社 神戸造船所、大阪鉄工所、汽車製造などの大企業のほかに、小さな個人経営から出発したものが多い。高尾鉄工所は1908年、平川鉄工所は1912年、颯波鉄工所（サッパボイラー）は1918年に創業しているが、何れも個人企業から発展した。その製品はコルニシュボイラー、ランカシャボイラー、機関車型ボイラー、炉筒煙管式

ボイラー、あるいは水管式ボイラーなどである。当時のボイラー作りの難しさを平川鉄工所の社史より要約した（後述挿話10.3：平川鉄工所の創業）。水管式ボイラーでは、颯波鉄工所がイケダ式を1960年ころまで日本車両と並んで多数製造し、汽車製造は田熊常吉が1912年に発明したタクマ式ボイラーの特許を譲り受け1920年から製造した。田熊はこれに改良を加えた「つねきちボイラー」を発明し、1938年 田熊汽缶製造を設立し現在のタクマとなっている。タクマ式水管ボイラーは、ボイラーの水循環上で画期的な集水器・降水管を持ち、1922年に鉄道省大竹発電所でボイラー効率82%という当時世界最高の成績を挙げ、従来輸入に頼っていたボイラーを完全に国産化することに貢献した（後述挿話10.4：田熊常吉の独創）。このころ、三菱重工業がセクショナルボイラーを、日立製作所がヤーローボイラーを、それぞれ外国との技術提携で製作していた。以上の自然循環ボイラーのほか水管ボイラーとしては強制循環ボイラーと貫流ボイラーがあった。

2-3-2 殖産振興と産業用ボイラー⁽¹²⁾

明治の初期から政府の殖産振興の遂行と共に、わが国のあらゆる産業は手工業から機械化工業へと活発に動きだした。産業用ボイラーとしては、(1) 炭鉱、(2) 製糸、(3) 紡績、(4) 製紙、(5) 発電、(6) 綿・絹織物、(7) 毛織物、(8) 精糖、(9) 製粉、(10) ビール等々あらゆる分野にわたるのであるが、発電所を除いてボイラーの形式は殆どがコルニシュ、ランカシャボイラーであった。製糸工場が最も多い長野県地方では1886（明治19）年ころ、全国汽缶設置数1,500基のうち約600基が据え付けられており、独特の半通多管式と称せられるものが普及していた。この図2.8のボイラーは胴が直径に比して非常に長く、中には13mぐらいのものもあった。一般に、圧力は0.4MPa以下であった。

これらのボイラーは、長野県地方の養蚕家がドイツから輸入したものでオランダボイラーとよばれた。炉筒が大きくストーカ燃焼向きであるが、炉筒後部が暖まりにくい面があった。

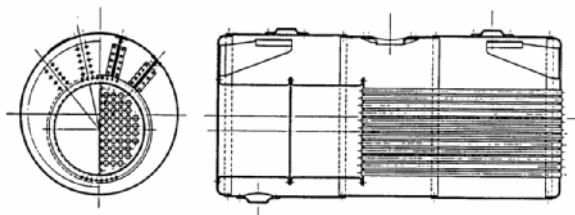


図2.8 半通多管式ボイラー⁽¹²⁾

2-3-3 取締りの始まり

政府は、典型的な危険機械である汽缶の取締りに関して1878（明治11）年工部大学校雇英人“ダイエル”をして汽缶の容量、膨張圧迫の程度、汽缶室と人家ないし街路との距離、汽缶の試験法、平常検査法等の十数ヶ条の方法を編成した。

炭坑が盛んとなった福岡県においては、1883（明治16）年 汽缶、汽機に関する取締り規則が公布された。以来、各府県で相次いで同様な規則が公布された。また、1889（明治22）年 官営佐渡金山で「汽缶取締規則」制定され、一方、「工業場に使用する汽缶取締り法」の制定のため各府県における汽缶の総数、種類、その他これに関する事項について実態調査を行った。

2.4 わが国の近代化への躍進（20世紀前半）

2-4-1 艦艇用ボイラーの創造⁽¹²⁾

コルニシュ、ランカシャボイラーに代表される丸ボイラーは主として産業用に使用され、徐々に発達を重ねて行った。軍艦でも最初スコッチボイラーなどが使用されたが、強制通風による火室温度の上昇に伴い損傷する個所が増加した。この欠点を解消するものこそ水管式ボイラーであるとしたのである。

水管式ボイラーの発達過程については、世界各国の海軍が自国の軍艦の戦闘力増強の要請に応えるべく鋭意ボイラーの研究開発に専念したことがその発達要因となったといっても過言ではない。

わが国の場合、1897（明治30）年 図2.9の宮原式水管ボイラーがその端緒であり、20世紀前半へのつながりとしてここに述べる。この艦艇用ボイラーは海軍機関総監宮原二郎が発明したもので、圧力1.6～1.9MPaであった。日本海軍では試みに水雷敷設船にとりつけて実験し、1902（明治35）年には軍艦「橋立」にと

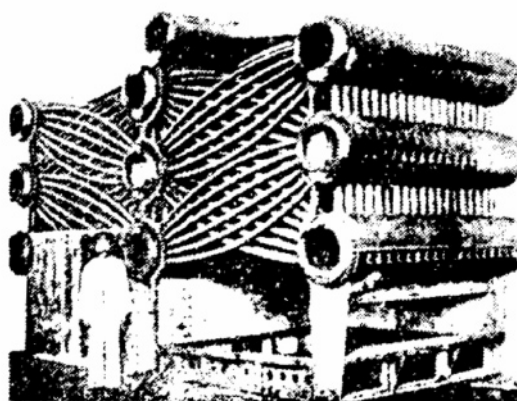


図2.9 宮原式水管ボイラー⁽¹²⁾

りつけ普及した。世界の大部分の軍艦のボイラーが煙管ボイラーを使っていた時代に独自に水管ボイラーを発明した功績は大であった。以後、日露戦争から第一次世界大戦まで主力汽缶となった。

図 2.10は、1908（明治41）年竣工の「桜丸」用宮原式水管ボイラー製作中の写真である。3,205トンの船に6基の宮原式水管ボイラーが搭載された。

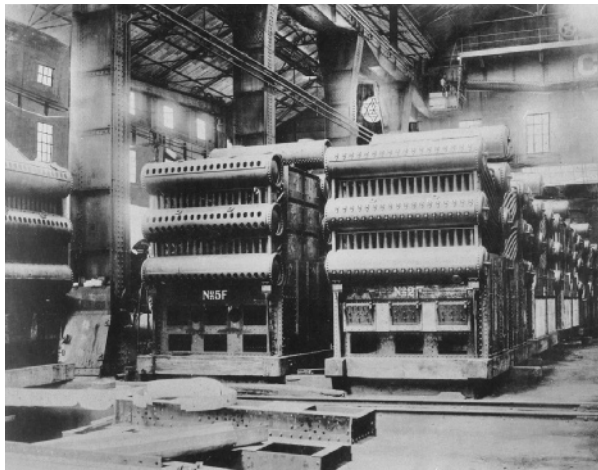


図2.10 製作中の宮原式水管ボイラー (25)

次に1903（明治36）年、図2.11の池田式ボイラーは池田三代吉元海軍技師の発明によるもので、4胴水管式ボイラーの特許権を取得した。このボイラーの特長は大体三角定規形をしており、容積が小さくてすむので船用および陸用の地下室などにも適した。1926（昭和元）年、当時の日本国有鉄道は増大する本州—北海道の貨物輸送に対処するため、青函連絡船に貨車を直接積載可能とするため図2.12に示す「第一青函丸」を横浜船渠（現：三菱重工業 横浜製作所）にて建造した。このとき搭載されたボイラーは池田式水管ボイラー（圧力1.4MPa、過熱度67℃、数量 2基）であった。

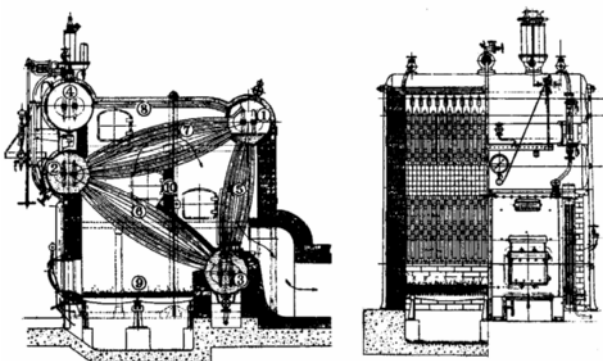


図2.11 池田式ボイラー (1)

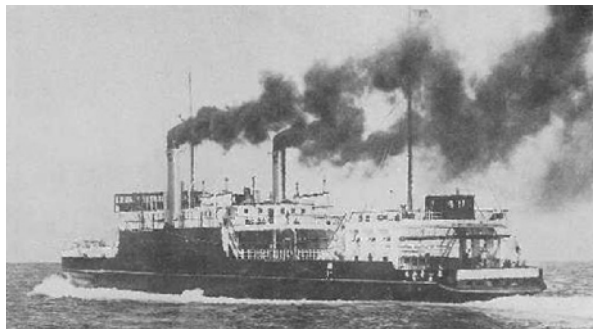


図2.12 第一青函丸 (30)

2-4-2 陸用水管式ボイラーの導入

日露戦争後、わが国の工業もだんだんと発展してきて水管式陸用ボイラーの需要が多くなり、当時は英国バブcock式のものが専ら用いられていた。1912（大正元）年ころ、三菱はバブcock社と技術提携しようと考え交渉したが、対価がべらぼうに高かったののでこれを断念し、その代わりに1909（明治42）年 三菱造船 長崎造船所は英国のネスドラムボイラー社と技術提携した。図2.13のボイラーはストーカ焚き、3.6t/h、1.7MPaである。その後、1926（大正15）年までに計21缶製作した。しかし、このネスドラムボイラーは上下に配置された短い円筒の鏡板（かがみいた）の所に直管を取り付け、一組の伝熱管束群を形成し、このような管束群を多数寄せ集めて1つのボイラーにした形式のもので、あまりよいデザインではなかった。(26)

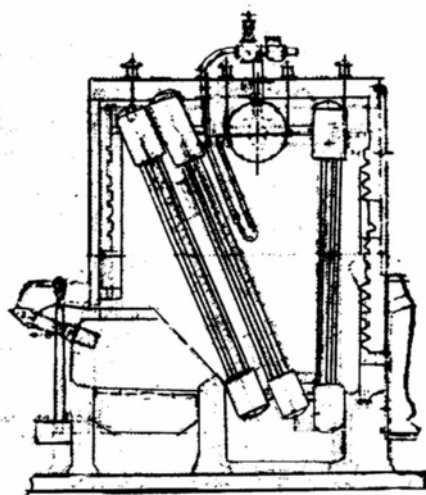


図2.13 ネスドラムボイラー (12)

このボイラーは当時ドラムをリベット締めにて製作したため大径のものは作れず、短円筒管寄せ2個を直管数本を拡張にて結びこれを伝熱管束群とした。この伝熱管束群を必要に応じ1〜3群程度配列した。ストーカによる石炭焚きの火炎がこの伝熱管束群と対流伝熱を行うことで蒸発を促進した。図2.14の1927（昭和2）

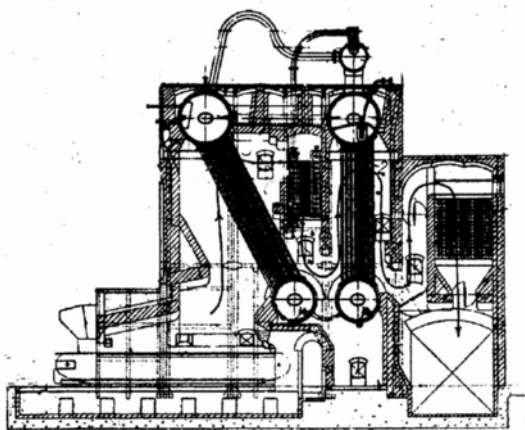


図2.14 直管4胴型ガルベボイラー⁽²⁾

年 住友炭坑向けの16t/h, 1.24MPa, 276℃の微粉炭燃焼ガルベ缶もこの伝熱管束群を装備したもので火炉は空気冷却壁であった。⁽²⁴⁾

1927(昭和2)年 日立製作所は英国ヤーロー社と技術提携した。図2.15に示すヤーローボイラー(Yarrow boiler)は大径の円筒形の上ドラム1個と水管の取り付けのため半円に近い小さな2個の下ドラムとを直管で連結したもので、構造が割合簡単で掃除修繕が容易である。ドラムは長手に長い構造であるが火炎がすぐ両側の管束群に横方向に流れる点ではこれまでと同様に火炎は対流伝熱方式となる。ストーカは2個の下ドラムの間に設けられるから充分広く作ることができ燃焼室は大きく水管に直面しているから熱負荷が大きい。一方、降水管は後部に非加熱の口径の大きい管が配置されていて水循環がよい。このボイラーの欠点は熱ガスが水管に接触している時間が短いことであるが、上部に設置された空気予熱器がこの余熱を利用して熱損失を少なくすると同時に燃焼の改善を図っている。⁽¹⁾

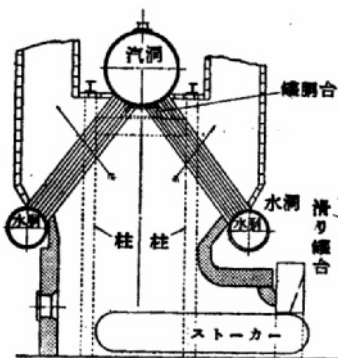


図2.15 ヤーローボイラー⁽¹⁾

水管式ボイラーは多種の形式が鋭意開発され始めたが、1913(大正2)年 海軍は戦力拡大のため金剛型戦艦を英ヴィッカーズ社へ発注した。搭載のボイラーはヤーロー缶36基の石炭石油混焼缶であった。この最古ともいふべき戦艦金剛に搭載されたヤーロー缶1基が

呉市「大和ミュージアム」に展示されている。また、同型艦の「比叡」を横須賀海軍工廠、「榛名」を神戸川崎造船所、「霧島」を三菱長崎造船所と相次いで建造した。これは造船技術のみならずボイラー研究のためにも大いに役立った。

初期のヤーロー缶の下部ドラムは水管取付のため頂部がだ円形であったため圧力が上がると丸く変形するわけで水漏れの原因となって不都合であった。

艦本ロ号式はこれを真円に改良したものでヤーロー式3ドラムボイラーの決定版といえる。このボイラーは第二次大戦まで活躍した。図2.16は1918(大正7)年 戦艦日向用の艦本ロ号式ボイラーの工場組み立て中の写真である。24基が製作された。⁽²⁴⁾

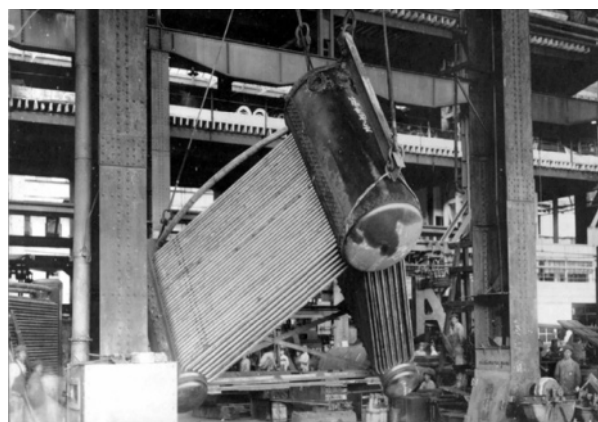


図2.16 艦本ロ号式ボイラー組み立て⁽²⁵⁾

2-4-3 取締りの強化⁽¹²⁾

蒸汽缶と呼ばれていたころのボイラーに対する行政の対応は遅く、国がボイラーに対して本格的な取締りを実施したのは1911(明治44)年に公布された「工場法」以降であった。工場法施行以前の輸入ボイラーの時代から明治時代の後期、日清・日露の戦役までの富国強兵策に呼応するようにあらゆる産業は拡大傾向にいたり、工業技術の発達は日進月歩となりボイラーも足並みを揃え進歩した。進歩と同時にわが国における設置台数も増加し、それに伴い破壊等の災害も発生し工場設備の中核をなすボイラーの事故防止および労働者保護の観点から取締りを必要とするに至った。1900(明治33)年 行政執行法第4条及び同法施行令第2条に汽缶、汽機、及びその付属装置について危険が生じる恐れがあると認めるときは、行政官庁はその使用を制限することができることを謳っている。また、1903(明治36)年 内務省警保局長通達で「蒸気機関技術者取締りに関する依命」が各府県長官に出された。この規則では毎年1回の定期検査を義務づけた。

当時、ボイラーは5年使用または300回起動・停止の

どちらか早い方で廃棄する慣例があった。事故原因では過圧事故がかなりあったと記録に散見される。いわゆる安全弁は「おもり」か「てこ式」であったためスケールで固着したり、使用により軸が湾曲したりしたため、石炭焚きボイラーを安全弁が故障状態のまま止められず過圧・破裂など悲惨な事故になったと推測される。

1935年（昭和10）年

内務省から汽缶取締令及び付帯の「汽缶構造規格」が制定されボイラー取締法規の全国的な統一が実現した。

- 1) 同法第4章において汽缶士および汽缶取扱主任者に関する規則が制定された。
- 2) 規則では伝熱面積 25m^2 以上、又は最高使用圧力 0.7MPa 以上のボイラーの取扱作業主任者には一級を、それ以外のボイラーの取扱作業主任者には一級又は二級を選任すべしとされた。

1947（昭和22）年

労働基準法が施行され汽缶取締令が廃止された。同年9月労働省、労働基準局、労働基準監督署が設立された。同規則では伝熱面積の合計が 500m^2 以上、又は最高使用圧力 2.1MPa 以上のボイラーの取扱作業主任者は、特級汽缶士とすることとなった。なお、特級汽缶士（Special class boiler operator）は、わが国のみの呼称である。

1948（昭和23）年

「労働安全衛生規則（汽缶関係）第2輯 汽缶及び特殊汽缶構造規格」発行

第1条に、鋼板製汽缶又は鋼板製温水缶は次のものを含まないと規定されている。

- 1) 蒸気の圧力が 6MPa を超える高压ボイラー
- 2) 蒸気の温度が 450°C を超える高温ボイラー
- 3) 機関車用汽缶

第19条では、胴の長手継手は鋸によることが示されている。

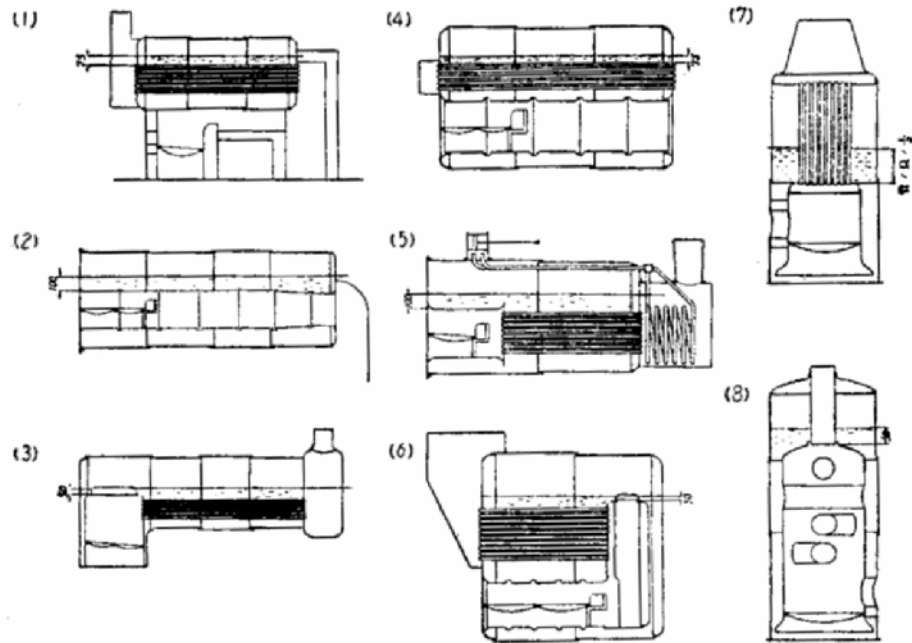
第127条では、新たに溶接又は鍛接した胴などの水圧試験規定が追記された。

当時の主なボイラーは、立てボイラーおよびコルニシボイラー等であったが、水管ボイラーの高压化の要請が強くなったため溶接が公式に認可対象となった記念すべき年である。

2.4.4 JESボイラー構造規格の制定

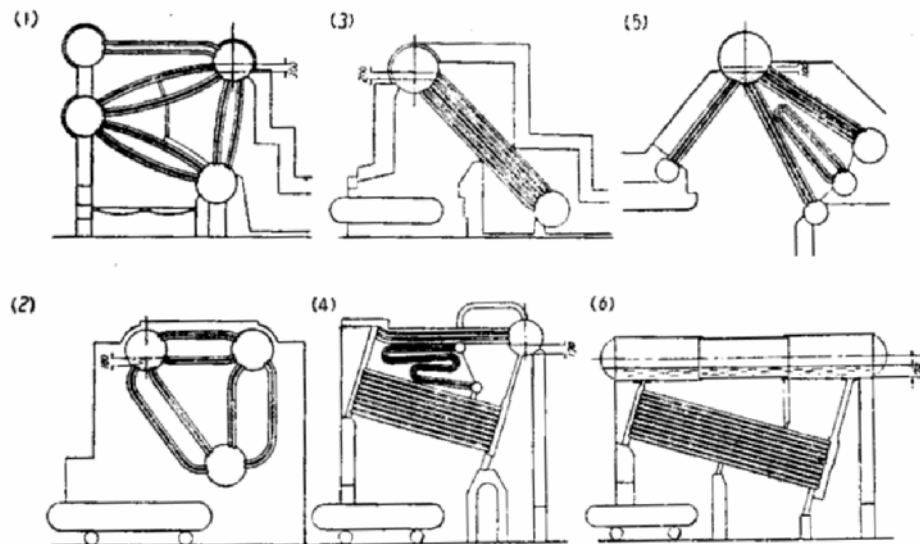
1934（昭和9）年日本機械規格JES第248号（陸用蒸気汽缶の構造）が制定された。この規格は日本機械学会が主となってドイツ規格に準拠し編纂したものである。その第1条には、「本規格は陸用鋼製蒸気缶並びにこれに用いる過熱器にして最高使用圧力 $0.5\sim 3.5\text{MPa}$ のものに、これを適用す。」とある。図2.17および図2.18にはJES 1934 248号に記載のボイラー図集を示す。

戦前のボイラーは、図2.17の丸ボイラーと図2.18の多胴の水管ボイラーである。共通していることはすべて石炭だきであるため、ストーカをボイラー下部に設置しなければならないことである。ストーカは可動機械部分が複雑なためボイラー構造として纏めるのは難しく大形化も困難であった。また、ドラムの製作はリベット継手によるので大径で肉厚のものは製作できない。さらに水管をほとんど直管としているのは掃除がしやすくするためであるが、逆に多胴またはセクショナル式となり高価な胴や管寄せを製作する数が増えるという反作用にもなった。池田式ボイラーとスターリングボイラーは三角定規のような形となり図の右上に中間ドラムを置き降水管の経路を形成している。このように水管ボイラーの構造はドラムを複数有するものが多かった。その中でタクマ式ボイラーは、そのうち2辺を削減し1辺のみで伝熱管束群とした画期的設計である。



- | | |
|-----------------|-------------------|
| (1) 外だき煙管ボイラー | (5) 半通多管式炉筒煙管ボイラー |
| (2) 内だき炉筒ボイラー | (6) 戻り火式炉筒煙管ボイラー |
| (3) 機関車形ボイラー | (7) 立て煙管ボイラー |
| (4) 内だき炉筒煙管ボイラー | (8) 立てボイラー |

図2.17 JES 248号陸用煙管ボイラーの構造⁽¹⁾



- | | |
|----------------|---------------------|
| (1) 池田式ボイラー | (4) 高蒸発率形セクショナルボイラー |
| (2) スターリングボイラー | (5) ヤーロー式ボイラー |
| (3) タクマ式ボイラー | (6) セクショナルボイラー |

図2.18 JES248号陸用水管ボイラーの構造⁽¹⁾

3 | 現代におけるボイラーの発展

3.1 わが国の経済および電力事情

20世紀後半のわが国の経済は激しい曲折がありながら力づよい発展を実現した。わが国における経済は1950年代以降の高度成長に産業界の発展が必須であり、この間後述する「重油使用規制法」の解除が転機となり工場の新鋭設備投資によりボイラー並びに自家発電設備が大きく伸びた。この技術の発展は石炭のみからの脱却に始まり、省エネルギーの推進と大気汚染の抑止を条件に強力に推進され、さらに安全確保を第一とするボイラーおよび関連技術の飛躍的進歩により加速した。

一方、わが国の電力政策の基本は1952（昭和27）年の電源開発5か年計画では「水主火従」であったが、その後急激な電力需要の伸びに対応して1956年の電源開発新5か年計画では「火主水従」に切り替えられた。これに伴い発電設備量では、37年度末で水力1,410万kWに対し、火力1,610万kWと「火主水従」に逆転した。発電所の燃料についても1960年の「重油ボイラー規制法」改正により事業用ボイラーの重油専焼が認められたことからそれ以降建設費や燃料単価の面で有利な石油への転換が進んだ。⁽²³⁾

また、原子力発電も大いに進展し「原主油従」が進んだが、1995年試運転中の「もんじゅ」のナトリウム漏れ事故、さらに21世紀に入り主な原子力発電所で製造・保守・点検の不備などによる事故が相次ぎ、住民の不信および反対運動にあい停止が長期化するものがある。そのため休転中の火力発電所を急遽再稼働しなければならない事態が発生したり、火力発電所のバックアップが必須の状況にもある。これからは“ベストミックス”でバランスをとりながら、発展しなければならない。

3.2 新たな技術導入

近代においてわが国もボイラー技術の進歩に大いに努力したが、生産方式・品質・安全の確保が十分ではなかった。これを一気に挽回するため各社は諸外国との技術提携に踏み切った。ボイラーの場合、米国および欧州からの導入が表3.1のように実行された。

その一例として三菱重工業の場合を見る。1950（昭和25）年の朝鮮戦争による特需を契機に産業復興

の熱は高まり産業用や発電用に適した水管ボイラーの需要増加が予測された。欧米に対する技術的空白を埋めるため三菱重工業はボイラーの技術導入を急ぎ、米国最大のボイラーメーカーCE社と交渉を開始し昭和26年水管ボイラーおよび燃焼装置に関する技術援助契約を締結し政府の認可を得た。

表3.1 高度成長期1950年代の技術導入先⁽¹²⁾
(括弧内は英文字略語)

ボイラーメーカー	技術導入先
三菱重工業(株) (MHI)	(米)コンパッション・エンジニアリング社(CE)
	(スイス)スルザーブラザーズ社(SULZER)
バブコック日立(株) (BHK)	(米)(英)バブコック&ウイルコックス社(B&W)
石川島重工業(株) (IHI)	(米)フォスター・ホイラー社(FW)
	(スイス)スルザーブラザーズ社(SULZER)
横山工業(株)	(独)ジーマス社(ベンソンボイラー)
川崎重工業(株)	(独)ラ・モント社
汽車製造(株)	(独)ジーマス社(ベンソンボイラー)
(株)タクマ	(スイス)スルザーブラザーズ社(SULZER)
	(米)クレイトン社

CE社のVU-10形ボイラーは蒸発量4～35t/h、蒸気圧力3.5MPa以下、蒸気温度380℃以下を対象に標準化されたボイラーで、燃料も重油・石炭のいずれにも対応でき、図3.1にみるようにコンパクトでレンガ構造が少なくなり重量は従来の約半分、高効率で革新的なボイラーであった。このため復興途上の産業界から好評を得て注文が殺到した。また、工場設備もX線装置、管曲機、大形電気焼鈍炉、1,500トン水圧プレスなどが増設されて設備が一新された。⁽²⁸⁾

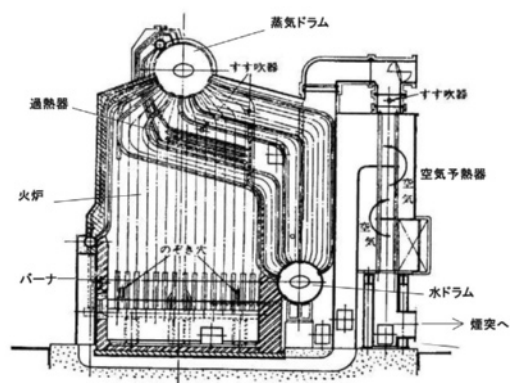


図3.1 米国CE社の水管ボイラー⁽²⁸⁾

このボイラーを見ると、近代から現代へのボイラー変革の要点が分かる。すなわち、上下ドラムは斜め段違い配置ではあるが、次のように多くの点で改善が図られている。

- 1) ドラムは完全溶接構造であり作業員が中に入って作業ができる。

- 2) 管は自由に曲げられている。
- 3) 自立形ボイラーで上ドラムは主に両側壁にて支えられている。
- 4) 火炉は裸管水冷壁により比較的大きく構成され重油・石炭両用に対応できる。
- 5) 水管の内部清掃はチューブクリーナーで可能である。
- 6) 米国式の標準化と大量生産が可能な設計となっている。
- 7) 空気予熱器、すす吹き器が装備されている。

3.3 法令・規格の整備

昭和24年の工業標準化法の公布とともに、従来のJESは日本工業規格JISに切り替えることになり、ASMEボイラーコードをベースとして1954（昭和29）年「陸用鋼製蒸気ボイラー構造JIS B8201 -1954」が数年にわたる審議を経て公布された。この規格の水圧試験の規定およびその解説によれば、「最高使用圧力1MPa以下のリベット構造によるボイラーの水圧試験は、試験を終わるまでにリベット継手の漏れがアワ粒大に止まる場合はこの継手を緊密なものとみなす。」とあり、いかにボイラーの製作が困難でありさらにリベット構造では1MPa級のボイラーでも苦勞してやっと製作できた様子がうかがえる。

1959（昭和34）年労働省はボイラー及び圧力容器に関する科学技術の進歩および新しい形式のボイラーの出現があり、またわが国の産業災害の増加のすう勢およびこれに伴う災害防止対策を樹立するため「ボイラー及び圧力容器安全規則」を制定した。⁽¹²⁾

新たに規制した主な内容は下記である。

- 1) ボイラー及び圧力容器の定義を明確にした。
- 2) 伝熱面積の定義を最近の新しいボイラーにも適用し得るように定めた。
- 3) ボイラー及び第一種圧力容器について製造認可に関する規定を設けた。
- 4) 就業制限に関する規制を緩和した。
- 5) 設置認可に関する規定を明確にした。
- 6) ボイラー室に関する規定を具体的に定めた。
- 7) 取扱主任者に関する規定を改正した。
- 8) 構造上の要件の維持に関する規定を設けた。
- 9) ボイラー又は圧力容器の内部に入るときの措置に関する規定を改正した。
- 10) 小型ボイラー及び小型圧力容器に関する規定を設けた。
- 11) 技能免許に関する規定を改正した。
- 12) 電気事業法、高圧ガス取締法など他の法令との

関係に関する規定を定めた。

この規則により、以後わが国のボイラー及び圧力容器の安全に関する遵守事項が明示され人命に関わるような大事故は幸いにも僅少に留まるよう運用されたといえる。

その後の規制および規格関連の主な事項は次である。

1963（昭和38）年 実技試験が廃止されこれに代わる実技講習制度が導入された。

1972（昭和47）年 労働安全衛生法が制定された。

1972（昭和47）年 「ボイラー及び圧力容器安全規則」が施行された。⁽¹²⁾

1997（平成9）年 電気設備の技術基準が全面改正され性能規定化された。

1997（平成9）年 ISO TC11は長年休眠状態にあったが、国際規格一本化の動きにより再開となり、第1回が東京で開催されたが、10年後も継続審議中である。

1998年（米） ASME規格は、動力用ボイラーASME Sec I 及び圧力容器Sec VIII div1において安全率を4から3.5に引き下げた。

2002年（欧州）「圧力装置指令（Pressure Equipment Directive-PEDと略記）」が施行され、欧州統一のボイラー規格（EN規格と略記）がEU内で実行されている。

2003（平成15）年 厚生労働省所管の「ボイラー構造規格」および「圧力容器構造規格」においても性能規定化を図った「新規格」を制定した。

2005（平成17）年 JIS B 8201が8回目の改訂をし、国際規格との調和を念頭におき改正し公布された。

主要国のボイラー構造規格関連については、第4章で詳しく比較検討する。

3.4 産業用ボイラーの躍進

1960（昭和35）年「重油使用規制法」の改正で、伝熱面積50m²以下のボイラーは重油規制法が解除され、さらに1963（昭和38）年 伝熱面積100m²以下のボイラーまで解除され、各社は一斉に油だきボイラーの開発競争に突入した。1967（昭和42）年には「重油使用規制法」が廃止され大形ボイラーも重油専焼が認められた。一方、石炭産業は斜陽化の道を辿った。また、ボイラー構造もリベット構造時代に別れを告げ、1965（昭和40）年にはメンブレン式構造（全溶接形水冷壁

構造)が開発されて一挙に溶接ボイラーに切り替わった。

以下においてボイラー容量の小さい方から大きい順にその要点を列挙する。

3-4-1 鋳鉄製ボイラー⁽²¹⁾

鋳鉄製ボイラーは最初1910年にドイツ製が登場した。暫時米国製のほうが多くなり、現在のセクショナルボイラーの原形となった。このころのセクショナルボイラーは輸入品であり、国内では製造されていなかった。国内での製造は1931年ころからであり、米国形のボイラーをモデルとした自然通風方式のボイラーである。セクショナルボイラーは、図3.2に見るように複数枚の鋳鉄製セクションを前後に並べて組み合わせたもので、各セクションを特殊ニップルで接続しステーボルトを使用して組み立て、1台のボイラーを構成している。以来、その耐久性と取扱いの簡便さから、主にビルや中規模の建物の暖房や給湯設備の熱源として使用され続けている。しかし、設置台数は1982年以降年々減少の一途をたどっている。これは鋳鉄製ボイラーという機械が性能面ほかで時代のニーズに応えられなくなったためであり、これに代わって真空式、無圧式の温水発生機が伸びてるのは当然といえる。セクショナルボイラーとして今後大きな伸びは期待できないものの、その耐久性とコンパクト設計の思想は鋳鉄製無圧式温水発生機、あるいは鋳鉄製真空式温水発生機に引き継がれ残っていくものと思われる。当面、技術的には、さらにきびしくなる低NO_x化への対応が急務となると考えられる。

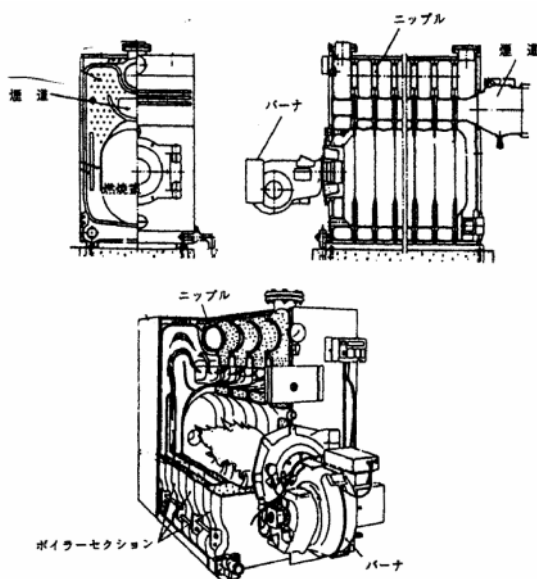


図3.2 鋳鉄製ボイラー⁽¹¹⁾

3-4-2 小形貫流ボイラー

蒸発量4t/h～10kg/h程度の暖房用、業務用、および工場プロセス用などの小形低圧ボイラーとして単管式および多管式の小形貫流ボイラーが増加している。このボイラーの特徴はコンパクトな構造と伝熱面積当たりの保有水量が他のボイラーに比べて小さく、そのため起動時間が短い。また、ボイラー効率は87～95%と高いものが多い。図3.3の単管式は基本的に強制循環式である。

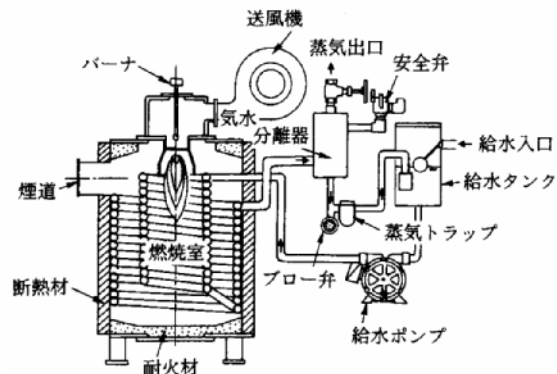


図3.3 単管式貫流ボイラーの例⁽²¹⁾

一方、図3.4に示す多管式貫流ボイラーは、1963(昭和38)年に許可されたわが国特有の循環比2以下の自然循環式ボイラーであり、加熱管のすべてが上昇管であるものに限り貫流ボイラーと定義された。主として低圧用であるが蒸発量に対し保有水量が少なく起動が早い。しかし、ボイラー水の濃縮度が大きいので水管理には注意を要する。その中で、蒸気圧力1.0MPa、伝熱面積10m²以下のものは「小型ボイラー」に該当する。このボイラーには数社が参入している。⁽¹¹⁾

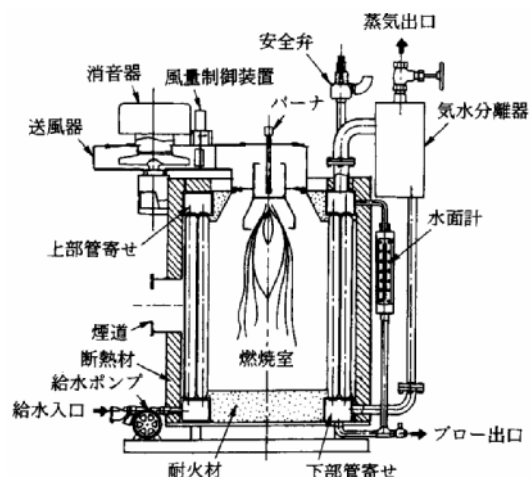


図3.4 多管式貫流ボイラーの例⁽²¹⁾

ヒラカワガイダムはパッケージ水管ボイラーのコンパクト化を目指して従来の火炉を構成している空間に水管群を配列し、この水管群内にて燃焼させ水管群の回りに鋸状の火炎（Jaggy-Fireballという）を構成させ、この火炎燃焼と伝熱を同時に促進させるという管巢燃焼技術を開発した。図3.5にその概念図を示す。

この技術が多管式貫流ボイラーにも適用され研究結果による適切な水管群の配列により、火炎の局所的な高温部分が抑制され伝熱面熱流束の均一化が図られることから、NO_x発生抑制とボイラーの小形化が同時に期待でき、安全性も向上し従来の小形ボイラーの範疇で換算蒸発量2.0t/hを超え2.5t/hのものが作られるようになった。⁽³³⁾

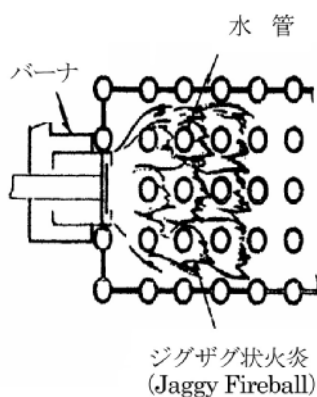


図3.5 管巢燃焼の概念⁽³³⁾

3-4-3 炉筒煙管ボイラー

1900年以降に欧米で発達した炉筒煙管ボイラーには次の3つの形式があった。

- 1) 2炉筒煙管ボイラー（図3.7に現在の例を示す）
- 2) 4パス式炉筒煙管ボイラー（ガス流れが4回流式のもの）
- 3) オランダボイラー（Holland kessel）（図2.8参照）

現代に入りわが国では炉筒煙管ボイラーへの進出は戦後となる。1953年に国内メーカ独自の開発により国産第1号機が登場した。この構造はガスや重油には好適であったが、1955年重油規制法が制定され石炭では焚きにくいという難点があった。しかし、1960年に重油規制法が一部改正されこの障壁が外された。このボイラーは胴内に炉筒と燃焼排ガスからの熱を吸収する煙管群からなるシンプルなものである。水処理等も他の大形ボイラーに比して容易であることからその存在が認識され、現在でもその普及は目覚ましいものがある。特に、1968年ヒラカワガイダムが開発した戻り燃焼方式を採用したボイラーは一つの炉筒内で火炎を反転させるため炉筒伝熱面における熱流束の均一化により大形化と、火炉内を反転してくる燃焼ガス循環効果

により低NO_x化も図られ当時としては画期的な換算蒸発量が18t/hのものが実現した。

その後、大容量化の技術開発により1炉筒からなるタイプで換算蒸発量30t/hのものが製造されており、地域冷暖房用ボイラーとして広く普及している。図3.6に戻り燃焼方式炉筒煙管ボイラーの代表的な形式の概略図を示す。

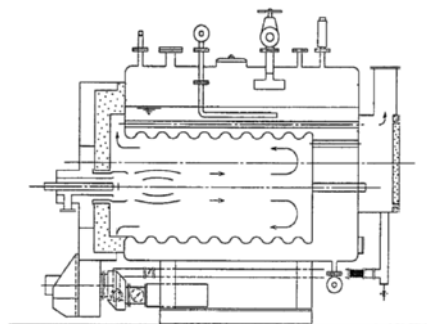


図3.6 MP800形戻り燃焼方式

図3.7は、高尾鉄工所が開発したツイン炉筒煙管ボイラーで換算蒸発量30t/h程度の大容量化を狙ったもので、地域冷暖房用として活用されている。このボイラーの特徴は、2つの炉筒からなる構造で中小容量のバーナの組み合わせができることによる低NO_x化指向と低負荷時での片肺運転等の運転多様化によりターンダウン比の拡大などの特長を有している。

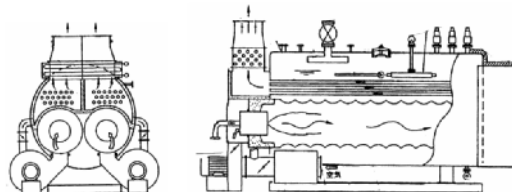


図3.7 ツイン炉筒煙管ボイラー

なお、炉筒煙管ボイラーの範疇にあって図3.8に示す、胴の内径750mm以下、胴長1,300mm以下のものはその取扱いにおいてボイラー技士の資格を必要とせずボイラー技能講習の終了者でよい。ヒラカワガイダムは換算蒸発量2t/hのものまで製作している。このタイプは通称小規模ボイラーとよばれている。

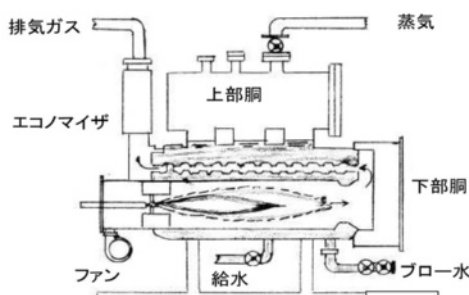


図3.8 MPミニ

3-4-4 パッケージ形水管ボイラー

1950年代米国および欧州との技術提携が行われた水管ボイラーのうち、特にパッケージ形水管ボイラーが米国で貨車またはトレーラー輸送されていることが強い影響を与えた。わが国の輸送限界は米国よりきつく、巾3.5m、地上高さ4.3m、長さ17m、重量40tで輸送許可が必要なので各社とも国情にあった小形パッケージ形水管ボイラーの開発を自己努力で急いだ。一般に、技術提携は設計図面・マニュアルの提供のみで設計法等のノウハウは提供されないのが普通である。そのため、日本の各社は研究所の充実、テストボイラーによる実験等を積極的に推進した。この間、A形、O形、D形、セク

ショナル形などコンパクトで高性能なボイラーが種々出現した。

しかし、1968（昭和43）年の「大気汚染防止法」発効から次々とNO_x、SO_xばいじん等の規制が厳しくなり、短期間に火炉の大きさに余裕あるボイラーへの設計変更を余儀なくされ、図3.9～3.14に示すようなボイラーすなわちD形ボイラーが主流となる方向に収斂してきた。また、ボイラー正面図は同一で、平面図で長さを任意に伸ばすシリーズ化設計により大量生産が実現した。このパッケージ形水管ボイラーの開発は技術提携があるとはいえ、わが国情によるもので各社独自に開発をしなければならない状況となり、わが国のボ

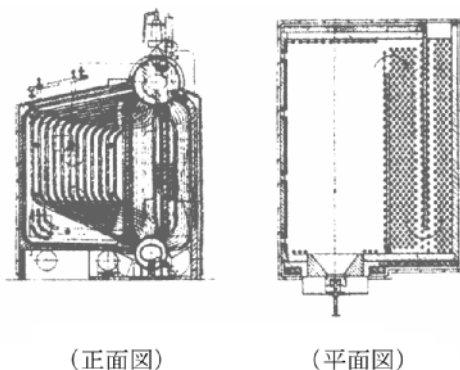


図3.9 NPOボイラー（株タクマ）

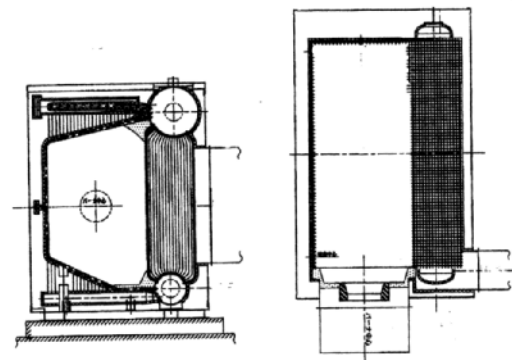


図3.12 SCMボイラー（石川島汎用ボイラ株）

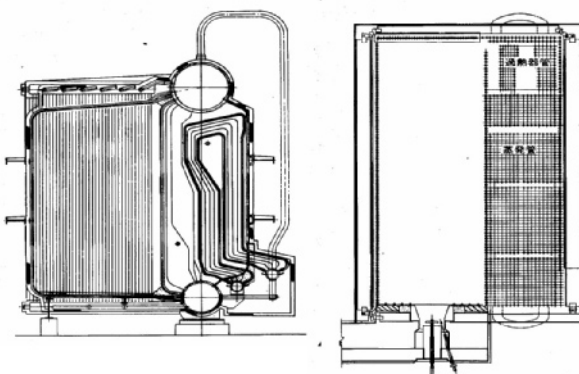


図3.10 BMボイラー（バブコック日立株）

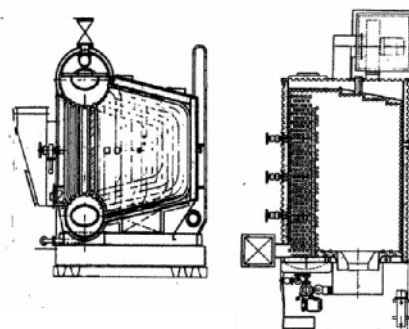


図3.13 NHAボイラー（株よしみね）

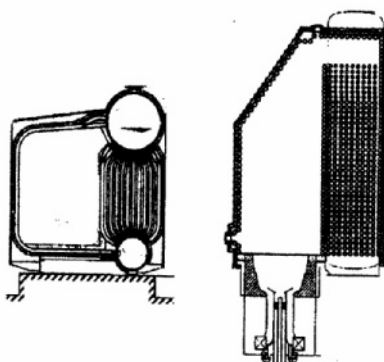


図3.11 MY-Gボイラー（三菱重工業株）

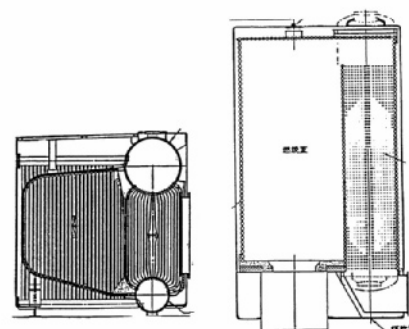


図3.14 KDボイラー（川重冷熱工業株）

イラー技術の基盤を構築するきっかけとなった。

パッケージ形水管ボイラーメーカーの1つ石川島播磨重工業の社史には次のように記載されている。

1950年代初期ころまでの一般工場用ボイラーは効率の悪い石炭だき煙管式か、容量に比べて規模の大きい旧式の水管式であったので、これらに代わる新形の水管式SC型ボイラーの製造を開始した。SC型ボイラーは小型軽量で工場で組み立てて現地へ運搬することを可能にした蒸発量3～16t/h（蒸気圧力5MPa 蒸気温度400℃以下）を原形とし燃料は重油、またはガスである。1970年代のピーク時には年産150～200缶を生産した。さらに、1970年代に入ってSCM型ボイラーシリーズへと発展した。同シリーズは蒸発量3～50t/hを12機種に区分し各機種とも工場組立し燃料は重油およびガスを使用し、納入実績は約2,100缶に達している。⁽³⁴⁾

3-4-5 産業用水管ボイラー

産業用現地組立て水管ボイラーは、500 t/h クラスまで発展した。図3.15～3.17に見るようにドラム数の少ない2胴および単胴水管ボイラーとなり、火炉を出来るだけ大きくし燃焼の完結を図っている。また、過熱器を備え自家発電も行える容量のものが増加した。当初は空気予熱器が多用されたが、エコノマイザであれば常温の燃焼用空気を使用することになり低NO_x化のため好都合であり後者が増加している。また、初期の過熱器の配置は火炉出口にスクリーン管を設けその後部に保護するように設置した。また、水循環を良好に維持するためドラム間の管群を燃料ガスの流れを導くバッフルで平行に仕切った構造とした。

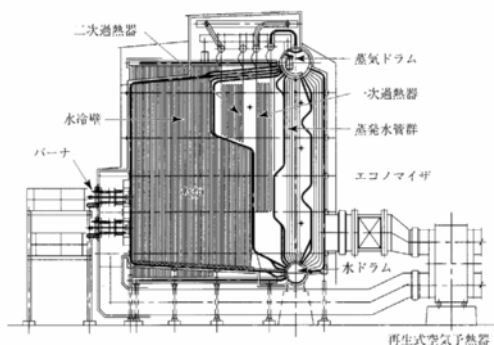


図3.15 二胴水管ボイラーの例1 ⁽¹¹⁾

図3.16は、火炉上部に放射形過熱器を張り出し管群はバッフルで斜めに仕切って伝熱量の増加を図った構造である。水循環は、前者より若干厳しくなるが特に問題にならない。2例とも大形火炉と上下ドラム2個を結ぶ蒸発管群を基本構造とした二胴水管ボイラーである。

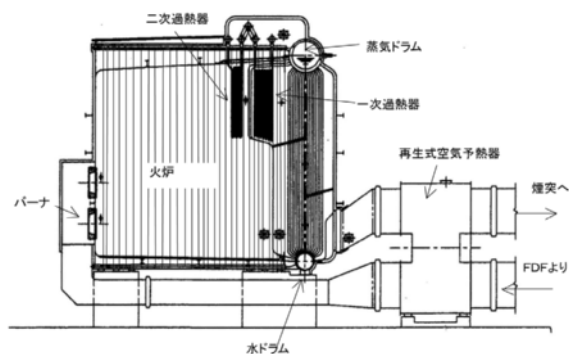


図3.16 二胴水管ボイラーの例2 ⁽³⁰⁾

10MPa、100t/h、500℃以上のより高圧・高温化を図るボイラーとしては図3.21に示す放射形自然循環水管ボイラーが原形である。これは、降水管を非加熱とするため蒸気ドラムから大口径の降水管をボイラー本体外部を直下している。また、この大形ボイラーはボイラーを吊り下げるため大きな架構を建設しなければならない。

そこで図3.17のボトムサポート形単胴放射形水管ボイラーは、わが国の特殊事情として地震対応をしなければならないためボイラー高さを低くすること、ならびに高価な架構を廃止するためボトムサポート形に改良したものである。この場合後部煙道の後壁管を非加熱として降水管としている。

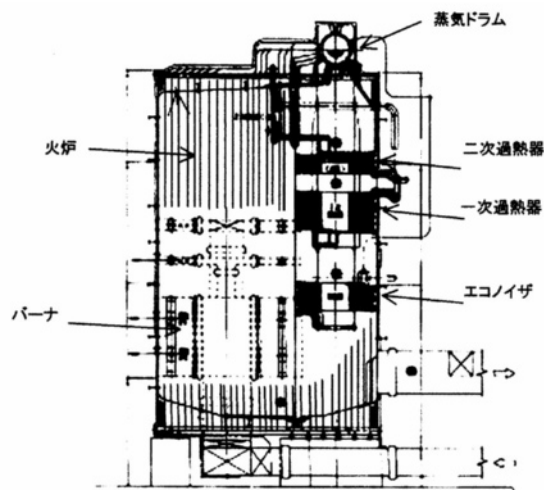


図3.17 単胴放射形水管ボイラーの例 ⁽²⁹⁾

3-4-6 産業用ボイラーの応用編

今回調査しているボイラーの主な範囲は「化石燃料を燃焼し、その発生熱により大気圧以上の圧力で水を蒸発させて蒸気を発生させ他に供給する装置」である。しかし、ボイラーの応用分野は広く、化石燃料のみでなく他の発生源からの高温ガスや電気を熱源とすることができる。また、ボイラーの目的が蒸気の発生は従で、プラントとしての生産過程の一工程と見るべきも

のや、省エネルギーおよび環境対策が主体となるものなど多様となる。また、それらに適用するボイラーの形式の選定も選択肢が多く列挙しつくせないものがある。表3.2は、主目的で分類し、よく知られている応用ボイラー名を列挙することによりボイラーの貢献度が理解できる。各々の内容は、該当文献・図書などを参照されたい。

表3.2 産業用ボイラー応用例

応用目的	例示ボイラー	適用ボイラー形式
小規模熱源用ボイラー	電気ボイラー 熱媒ボイラー	容器 炉筒煙管ボイラー
プラントの工程に組み込まれているボイラー	紙プラント：回収ボイラー、パークボイラー 石油化学プラント：COボイラー 鋳物プラント：銅精錬自溶炉廃熱ボイラー 硫黄プラント：鋳石焙焼炉用廃熱ボイラー 砂糖プラント：バガスボイラー 鉄鋼プラント：高炉ボイラー、 副生ガス燃焼ボイラ セメントプラント：キルン排熱ボイラー プラント全般：独立過熱器	水管ボイラー
環境対策が主なボイラー	ごみ、RDF焼却ボイラー 汚泥焼却ボイラー バイオマスボイラー	
コジェネレーションプラント用ボイラー	ガスタービン排熱ボイラー エンジン排熱ボイラー	
燃料の多様化に対応するボイラー	バブリング流動層燃焼ボイラー、 循環流動層燃焼ボイラー COM,CWM燃焼ボイラー	
新システム用のボイラー	加圧燃焼ボイラー 石炭ガス化と排熱ボイラー	

3.5 事業用発電プラントの進展

3-5-1 近代の発電用ボイラー

1919年米国にて初の微粉炭燃焼ボイラーがレークサイド（Lakeside）発電所で稼働した。微粉炭機からの直接噴射方式である。図3.18に示すボイラー上部本体はスターリング式水管ボイラーで、火炉は空冷壁であるのが興味深い。

図3.19は三菱重工業が1939（昭和14）年 日本発送電 戸畑発電所向けに製作した144t/h, 4.3MPa, 445℃の微粉炭燃焼ボイラーである。スターリング式曲管三胴缶を上部に設置して蒸気ドラムの役目とする。これに火炉を吊り下げた形式であり水冷壁はバーレーウォールが採用されている。

バーレーウォールに関し、バブcock社は裸水管では冷え過ぎて燃焼に支障をきたすというので裸水管の表面に鋳物のバーレーブロックなる四角な覆いを取

り付け、調節具合によりその内部に耐火物をぬり込み冷却度を調節して、燃焼を妨げないようにするという形式のものである。しかし、この採用には意見が分かれたのが実態であった。⁽²⁶⁾

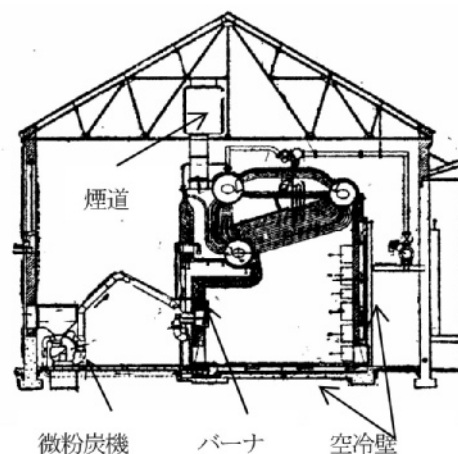


図3.18 レークサイド微粉炭燃焼ボイラー⁽²⁾

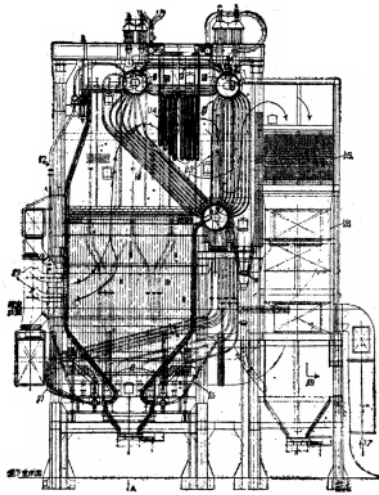


図3.19 三菱曲管三胴型微粉炭燃焼ボイラー⁽²⁾

図3.20にバーレー式水冷壁の構造を示す。①水管、②铸铁製ブロック、③押さえ金具、および④ボルトからなっていて、水管は直接燃焼室の内面に露出しないようになっている。铸铁ブロックは押さえ金具とボルトで裏面から水管に固定している。往時、水質が悪くスケールの堆積により管壁温度が上昇し易いため火災から水管を出来るだけ保護したが、現在は使用されていない。⁽¹⁾

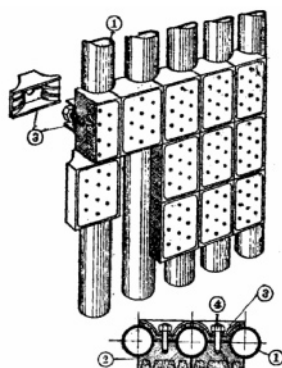


図3.20 バーレー式水冷壁⁽¹⁾

バーレーブロックを用いたのはボイラーチューブの過熱事故や石炭溶融灰の付着問題の解決に明快な答が得られないための処置と考えられる。事実、現代のボイラーではボイラーチューブの過熱事故は水処理不良によるスケール付着が主因であり石炭溶融灰の付着問題は水冷壁構造で冷却すれば改善できることが明確でありバーレーウォールは過去の一時的な対処であった。

3-5-2 現代の発電用ボイラー⁽²¹⁾

戦前から戦後にかけて、各メーカは自主技術をもとに75MW級プラントのボイラー（約200t/h）を製作していたが、戦後欧米各社の技術情報が入手できるようになるにつれてわが国と欧米との技術的格差が認識され始めた。このため各社は1950年ころから欧米メーカ

との技術提携に踏み切ることにより先進技術の習得、工場設備の改善、大形化に向けての準備が始まった。また、当初は新鋭機が第1号機として輸入されたが、各社は建設期間を通してプラント建設計画、建設手法などに対しての技術習得ができたことはその後の各社のボイラー事業に対してきわめて有益であった。

ボイラーとしては微粉炭燃焼ボイラーが図3.21放射形自然循環水管ボイラーのように大形水冷壁火炉が溶接構造で作れるようになって大いに事業用発電ボイラーおよび自家発電用ボイラーにも活用された。

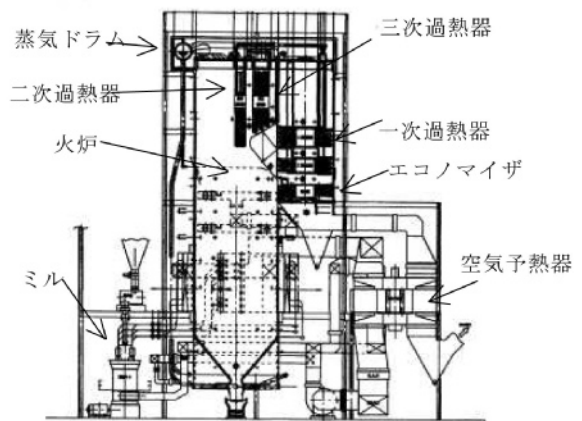


図3.21 放射形自然循環水管ボイラーの例⁽²⁹⁾

一方、自主技術の台頭は1965年ころから始まった。これはライセンスの技術範囲ではカバーできないわが国の先進的な開発課題、たとえばNO_x低減、耐震設計技術、プラント制御システムなどの改善のためにわが国の新技術が登場し世界的にも独自性のある技術として評価されるに至っている。

1962年になると火力総出力が水力を上回り「火主水従」の時代に突入したが、この時期になって清水共同発電新清水発電所1・2号ボイラー（75MW、油焚き—バブコック日立—BHKと略記）ならびに九州電力新小倉2号ボイラー（156MW、油焚き—横山）において蒸気圧力は12.45MPaクラスではあるものの、事業用ボイラーとしてわが国ではじめての貫流ボイラーが採用された。

大容量油専焼火力が多数運開される状態が続くなかで、1964年には関西電力 姫路第2発電所2号ボイラー（325MW、油焚き—三菱重工業—MHIと略記）、東京電力 横須賀発電所3・4号ボイラー（350MW、油焚き—CE/MHI）や中郡電力 尾鷲発電所1・2号ボイラー（375MW、油焚き—CE/MHI）が建設され単機容量の記録を塗り変えた。これらのユニットはいずれも輸入ボイラーであるが、300MWクラスへと容量が増加した記念すべきボイラーといえる。

その後、1967年になって東京電力 姉崎発電所1号にわが国初の超臨界圧ボイラー（600MW 24.12MPa, 538/566℃、油焚き—B&W/BHK）が運転を開始しこれをもって大容量ボイラーの時代へと移行する契機となり、1974年には東京電力 鹿島発電所5号ボイラーにおいてついに1000MWの超臨界圧ボイラーが建設されるに至った。

3-5-3 容量増大と中間負荷運用⁽²¹⁾

原子力発電設備の増加にともない火力発電設備は負荷調整用として中間負荷運用の傾向が強まり、ユニットの急速起動、停止、負荷変化に対する運転制御、信頼性確保、寿命予測などの技術開発が進められた。

石川島播磨重工業の場合、変圧運転超臨界圧貫流ボイラーに関して先行した実績を持つ西独のシュタインミュラー社と協調関係が成立した。1978年東京電力広野1号機用ボイラーを変圧運転ユニットとすることが正式に決定された。これは国内における大形変圧運転ユニット1号機であり従来の超臨界圧ユニットと比べて構造的に大きく異なるのはボイラー再循環ポンプ・蒸発器出口気水分離器を持つこと、火炉をヘリカル管構成としてその支持構造を変えたことである。⁽³⁴⁾

新設ユニット1基当たりの容量は年代とともに上昇の傾向をたどったが、この時点でも約700MW/缶のレベルに到達しており単機容量としては着実に増加している傾向が見られる。また、1987年には世界最大出力の変圧貫流ボイラーとして東京電力 東扇島発電所1号ボイラー（1,000MW LNG専焼—石川島重工業—IHIと略記）が運転を開始した。さらに1985年以降では、ほとんどが従来の定圧運転ボイラーから変圧運転ボイラーへと移行してきた。

三菱重工業では1989（平成元）年運開の九州電力松浦1号700MW石炭焚きボイラーにおいて、10年来実用化研究を続けていた管内熱伝達率の優れたライフル管を用いた世界初の石炭焚き垂直蒸発管型 超臨圧変圧運転ボイラーを開発した。同年、中部電力 川越1・2号（700MW, 32.5MPa, 571/569/569℃, LNG焚き）は垂直蒸発管型 超臨界圧変圧運転ボイラーは高効率化を追求するため蒸気条件を向上させた新開発機である。本機の熱効率は従来の超臨界圧ボイラー（25.5MPa, 543/541℃）に比べ5%向上した。⁽²³⁾

超臨界圧変圧貫流ボイラーは、定格負荷では超臨界圧力で中間負荷域では亜臨界圧力で運転される。超臨界圧力状態では火炉内流体が単相流であるが、亜臨界圧域では水・蒸気の二相流となり亜臨界圧域ボイラーと同様に熱伝達率低下への対策が必要である。しかし、

自然・強制循環ボイラーは循環比を高めているが、貫流ボイラーの循環比は1であるため火炉壁管を傾斜させ火炉壁管本数を減らし管内流体速度を2～3倍程度に高めることにより対応していた。これをスパイラル管方式火炉という。しかしながらこの方式は亜臨界圧垂直管ボイラーに比べて炉壁構成や支持構造が複雑となり据付や保守性に難点がある。

そこで亜臨界圧運転域での膜沸騰を防止し核沸騰を維持する対策として、低流体速度においても水と蒸気の混合を促進し亜臨界圧運転状態での高い蒸気含有率域においても核沸騰状態を維持し良好な熱伝達特性を有するライフル管（伝熱管内面の溝による伝熱促進管）と、均一な熱負荷分布を実現する旋回燃焼との組み合わせにより従来技術と同等以上の信頼性を確保できる垂直管火炉の適用が実現した。本型式の基本構造は自然・強制循環ボイラーと同等で簡潔な構造となっており据付や保守性が改善されている。図3.22 にはこの垂直管火炉とスパイラル火炉の比較図を示す。⁽³¹⁾

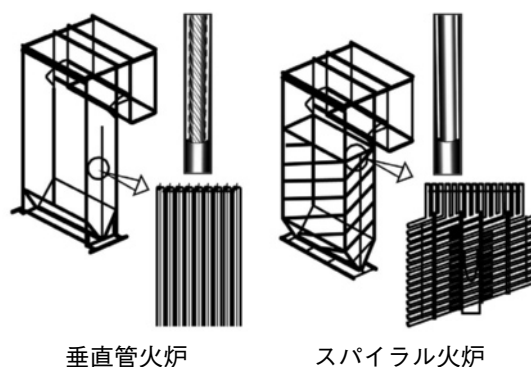


図3.22 超臨界圧ボイラーの構造⁽³⁰⁾

CO₂による地球温暖化問題に関しては、需要電力量が今後とも増加していく状況のなかで、火力発電設備の発電効率の向上によるCO₂排出量削減が不可欠となっている。このため主流の石炭焚きボイラーといえども蒸気条件の向上により、高効率化への対応を図らざるをえない状況となっている。とくに蒸気温度に関しては、1997年に電源開発松浦発電所2号ボイラー（1,000MW、593/593℃—BHK）において593℃が達成され、1960年代の566/566℃クラスから約40年ぶりで記録を更新した。この結果は2000年に電源開発 橋湾発電所1号ボイラー（1,050MW、24.52MPa, 600/610℃—IHI）に反映され、高温化へ向けての1ステップを達成したといえる。⁽²¹⁾ つづいて、2001年図3.23に示す電源開発 橋湾発電所2号ベンソン超臨界圧ボイラー（1050MW, 3000t/h, 26.4MPa, 605/613℃—BHK）が運転した。

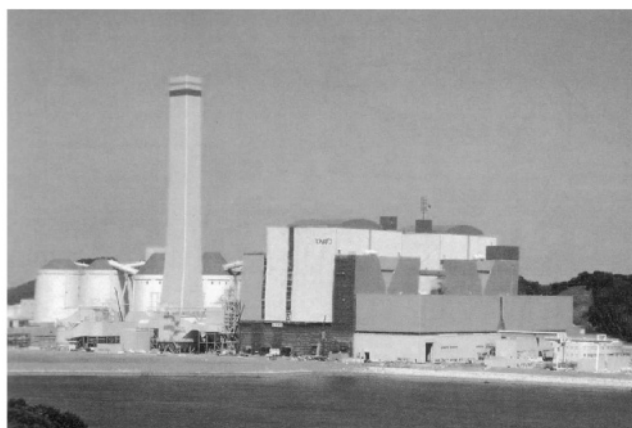
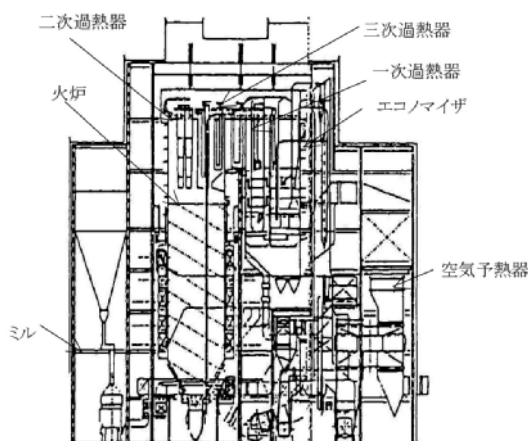


図3.23 電源開発(株)橋湾発電所2号ベンソンボイラー (22)

3.6 事業用発電プラントの将来 (21)

3-6-1 概括

世界の石油埋蔵量には限界があり石油資源は2010年ころ、天然ガスは2030年ころには生産が頭打ちとなりそれ以降は減産していくとの予測がある。さらに可採埋蔵量を2倍と仮定しても生産のピークは15～30年しか伸びない。一方、石炭資源は豊富であり可採年数も300年といわれており、燃料コストの安いことにより今後の火力発電主要燃料である。この状況のなかで石炭をベースとする火力発電における課題はCO₂発生量をいかに減らすかでありこの方策としての高効率化が不可欠となってきた。

一方、環境問題もますますきびしくなるため環境適合性向上も念頭においた取組みが必要となってきた。したがって、石炭を燃料とする事業用火力においては単に蒸気条件の向上を指向するだけでは限界にきており、今後のプラントではガスタービンを組み込んだコンバインド サイクル プラントが指向されつつある。この面から石炭を燃料とする加圧流動床複合発電プラント (Pressurized Fluidized Bed Combustion Combined Cycle-PFBCと略記) や石炭ガス化複合発電プラント (Integrated Gasification Combined Cycle-IGCCと略記) の技術開発が国内外でさかに行われており、実用化へ向けた取組みがなされている。以下にそれぞれのプラントの特徴と今後の展開について述べる。

3-6-2 加圧流動床複合発電プラント

加圧流動床複合発電プラントとは、加圧容器のなかに格納された流動床ボイラーから発生する蒸気で駆動する蒸気タービンとボイラーから発生する高圧・高温

ガスによって駆動されるガスタービンとを組み合わせた複合発電プラントである。商用機の第1号として北海道電力 苫東厚真発電所3号 (85MW) が1998年3月から適用運転を開始した。さらに世界最大のPFBCとして、九州電力 荏田発電所第1号機360 MWのプラントが完成した。次世代の石炭ガス化複合発電プラント (APFBC; Advanced PFBC) の調査研究が1992年度から1995年度にかけて行われた。

これに続き1996年度より、経済産業省からの補助金を得て石炭処理量15t/d級のPDU (Process Development Unit) 開発が行われ、電源開発、石炭エネルギーセンター、中部電力、三菱重工業の共同研究として電源開発 若松研究所内に試験プラントが建設され2001年度から2002年度にかけて運転試験が実施された。同試験では、石炭ガス化特性、脱硫特性の把握や起動停止方法を含めたプラントの運転方法を確認、また次ステップのスケールアップに必要なデータを取得し、試験結果を反映した大形システムの概念設計を行い研究が終了している。

3-6-3 石炭ガス化複合発電プラント

石炭ガス化発電プラントは、次世代の新形石炭火力の最有力候補と目されており、その第一の特徴は供給燃料である石炭を加圧化で分解することによりガス燃料に転換し従来のガス焚きコンバインド サイクル プラントと結合させることにある。石炭ガス化複合発電技術研究組合 (IGC組合) により研究がつけられ、1992年7月には空気吹きガス化炉と乾式ガス精製の組合せとして世界で初めての石炭ガス化発電に成功した。運転開始当初はガス化炉内の灰付着等のトラブルが発生したが、それらを全て解決し1995年3月から4月にかけて約1ヶ月間 (789時間) の連続運転に成功、ガス化炉-ガス精製-ガスタービン閉サイクル提携運転

によるIGCC基本システムが実証された。その後も1996年2月までの運転期間に各種データの取得を進め1996年度には解体研究を実施し成功裏に終了した。

パイロットプラントの成果を踏まえ実証機計画に関する検討が行われ、1997・98年度にNEDOより東京電力への委託研究として実証機FSおよび要素研究が実施された（研究体制としては9電力会社と電源開発、電力中央研究所の共同研究）。

同研究にてIGCC方式、最適システムの検討などを実施した結果、商用機と同じ方式・設備構成のプラントを設計・建設・運転することにより発電プラントとして求められる信頼性・運用性・保守性・経済性などを検証することを目的とし、パイロットプラントと同じ二段噴流床空気吹きガス化炉を用いたIGCC実証機計画の実施に至った。プロジェクトの推進のため国内電力9社と電源開発の出資により、クリーンコールパワー研究所（CCP研究所）が2001年に設立され、実証機の詳細設計と環境アセスメントを開始し約3年間にわたる環境アセスメントは2004年に完了、同年8月に福島県いわき市の常磐共同火力 勿来発電所構内で建設工事に着工した。実証試験は2007年9月から2009年度末まで実施する計画である。

一方米国では、自国に豊富なエネルギー資源の利用および最近の天然ガス価格の上昇により多くの石炭火力の計画が進められており、特に環境性能の改善の観点から、IGCCが注目されている。さらに2005年8月に施行されたエネルギー政策法（Energy Policy Act以下EPACT）の優遇税制を前提とし2010年ころの運転開始を目標とした複数IGCC プロジェクトが検討されている。さらに、ゼロエミッションを目指し、CO₂回収を組み合わせたIGCCの検討が進められており、2002年にブッシュ大統領がCO₂隔離および水素利用を目的とした出力275MWのFUTURE-GENプロジェクトを発表した。2005年9月に電力会社および石炭会社等が出資するFuture Gen Industrial Allianceが設立されエネルギー省（The Department of Energy-DOEと略記）と契約を締結している。2007年に建設場所を決定し、2012年運転の開始が予定されている。

3-6-4 超々臨界圧発電技術

ここで超々臨界圧発電技術（圧力22.06MPa以上で蒸気温度593℃を越えるものをいう。—USC技術と略記）は、蒸気タービンの作動媒体である蒸気の温度・圧力を上昇させることによって熱効率を高めるものである。このUSC技術に用いられる材料はフェライト系とオーステナイト系の2種類に分けられ材料技術の開発動向を踏まえつつ段階的に技術開発が行われている。USC技術は1980年度から1993年度までをPhase-1、1994年度から2000年度までをPhase-2として開発された。Phase-1のSTEP-1ではフェライト系材料を用いて31.4MPa, 593℃/593℃/593℃の2段再熱再生サイクルを目標とし、STEP-2ではオーステナイト系材料を用いた34.3MPa, 649℃/593℃/593℃の2段再熱再生サイクルを目標として行われたが、バルブなどのオーステナイト系材料の厚肉部品で若干の開発課題が残された。Phase-2では運用性や経済性に優れたフェライト系材料の新材料を用いて30MPa, 630℃/630℃を目標として行われ、技術開発は終了している。

最近では欧米で更なる熱効率の向上、CO₂排出量削減のためにニッケル系材料を用いた700℃級USC技術開発の国家プロジェクトが進行中である。世界トップレベルにある日本のUSC技術の国際競争力を維持、発展、強化するためには、国内でも700℃級USC技術開発の推進が望まれる。

年表

世 界		日 本	
(1) 18世紀ボイラー創世期			
1705年	(英) ニューコメンが最初に単筒大気圧蒸気機関を発明		
1765年	(英) ワットによる改良機関出現		
(2) 19世紀産業革命期の発展			
1830年	(英) コルニシュ、ランカシャボイラー、0.2～0.3 MPa以上が登場		
1834年	(英) ロイズ船級協会設立	1853(嘉永6)年	ペリー浦賀へ来航。
1847年	(英) スコッチボイラーが船用炉筒煙管ボイラーとして発明される。	1855(安政2)年	長崎海軍伝習所開設。
1865年	(米) 蒸気船スルタナ号の汽缶が破裂、南北戦争帰還の南軍兵士が多数死亡。	1862(文久2)年	「開陽丸」発注のため、榎本武揚らオランダへ留学生として長崎を出航。
1866年	(米) ハートフォード蒸気ボイラー保険会社が設立	1870(明治3)年	岩崎弥太郎 九十九商会を設立し監督となる。 (現:三菱重工業㈱の起源)
1866年	(米) George Babcock とStephen Wilcoxが新形の水管式ボイラーの特許を取得。B&W社設立		
1872年	(独) ボイラーの定期的検査を行うドイツで初の蒸気ボイラー検査協会設立	1875(明治8)年	筑豊炭田において、炉筒煙管ボイラーを持ち込み、揚水実験が行われた。
1876年	米国のフィアデルフィアで万国博覧会にて、「ボイラー馬力」を定義した。	1876(明治9)年	石川島造船所が民間企業として発足した。
1879年	(オーストリア) Joseph Stefan 黒体からの放射量が絶対温度の4乗に比例することを明らかにした。	1880(明治13)年	「工場払い下げ規則」を公布、長崎造船所を三菱造船㈱へ。兵庫造船所を川崎重工業㈱払い下げた。
1880年	(米) 米国機械学会(ASME)設立。	1881(明治12)年	日立造船㈱設立される。
1882年	(英) ボイラー破裂法(Boiler Explosion Act)を制定	1883(明治16)年	福岡県において、汽缶、汽機に関する取締り規則が公布
		1891(明治24)年	横浜船渠会社設立 (現:三菱重工業㈱横浜製作所の前身)
		1893(明治26)年	三菱合資会社 三菱造船所と改称。(現:三菱重工業㈱長崎造船所)
1894年 日清戦争勃発		1896(明治29)年	汽車製造㈱設立
		1897(明治30)年	宮原式水管ボイラーが艦艇用に発明された。
(3) 20世紀前半 近代化への躍進			
		1900(明治33)年	行政執行法第4条及び同法施行令施行
1904年	日露戦争勃発	1903(明治36)年	内務省警保局長通達で「蒸気機関技術者取締りに関する依命」が各府県長官に出された。
当時1910年以降(英)・(米)、年間事故件数1,000件を超える規模となった。		1903(明治36)年	池田三代吉元海軍技師が池田式ボイラーを発明。
		1905(明治38)年	三菱合資会社 神戸三菱造船所設立。(現:三菱重工業㈱神戸造船所)
		1908(明治41)年	英国B&W社が独自資本により禪馬ウォルクス(株)創立
		1908(明治41)年	「第一機関汽罐保険株式会社」設立(安田生命の前身)
		1908(明治41)年	㈱高尾鉄工所創業
1911年	(英) タイタニック号完成、直径5mのスコッチ炉筒煙管ボイラーを29基搭載す。	1909(明治42)年	三菱造船(株)はネスドラム社と提携
1914年 第一次世界大戦勃発		1912(明治45)年	平川鉄工所創業。1992より「現:㈱ヒラカワガイダム」と改称。
1914年	(米) ASME Boiler and Pressure Vessel Code初版を発行。	1912(大正元)年	田熊常吉はボイラーの構造上、革新的な意義をもつ集水器、降水管を創案す。
1918年	第一次世界大戦終結	1916(大正5)年	工場法が施行された。
		1917(大正6)年	三菱造船(株)を設立。
1919年	(米) NBBI (National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspection) が設立。	1918(大正7)年	㈱サッパボイラー創立
1919年	(米) レークサイド(Lakeside) 発電所にて初の微粉炭焚きボイラー運用される。	1922(大正11)年	平川鉄工所ランカシャボイラー製造す。
1921年	ワシントン条約により、保有艦艇数、米・英・日=5・5・3が締結された。	1925(大正14)年	三菱造船(株)がドイツデュール社よりガルベボイラーの製作権獲得。
1925年	(英) ヤーロー社大形船に同社ボイラーを多数搭載開始。	1927(昭和2)年	日立製作所はヤーロー(英)と技術提携する。
1927年	(独) ベンソンボイラー発明される。30t/h, 18 MPa, 450℃	1927(昭和2)年	三浦工業(株)創業。昭和37年よりZボイラー製造す。
		1928(昭和3)年	英国B&W社の資本による禪馬ウォルクス(株)が㈱東洋バブコックとなる。
1932年	(スイス) ズルザー社がモノチューブボイラー発明す。	1932(昭和7)年	大阪府において「汽缶取締規則」が制定された。
		1934(昭和9)年	日本機械規格JES第248号(陸用蒸気汽缶の構造)を制定。

世 界		日 本	
		1934 (昭和9) 年	三菱重工業(株)発足(注:これ以前は三菱造船(株)と総称する。)
1936年	(独) 蒸気ボイラー検査協会、技術検査協会(TUV)と改名。	1935 (昭和10) 年	内務省から汽缶取り及び付帯の「汽缶構造規格」が制定され、ボイラー取締法規の全国的な統一が実現。
		1937 (昭和12) 年	ラ・umont式強制循環ボイラー製作開始(川崎重工業(株))
		1937 (昭和12) 年	(株)よしみね創業
		1938 (昭和13) 年	田熊汽缶製造(株)は日本十大発明家の一人である社長田熊常吉として創立された。
1939年	第二次世界大戦勃発	1938 (昭和13) 年	三菱重工業(株)長崎造船所にて溶接ドラムの破壊試験を実施した。これにより溶接形ボイラードラムの技術が促進された。
1945年	第二次世界大戦終結	1945 (昭和20) 年	サムソン(株)創業す。
1947年	ISO TC11設立。(TC11: Technical committee for Boilers and Pressure Vessels)が設置された。しかし、1997年まで休眠状態となった。	1946 (昭和21) 年	日本汽缶協会発足。(現:(社)日本ボイラ協会の前身)
		1947 (昭和22) 年	労働基準法が施行され労働省、労働基準局、労働基準監督署が設立された。
		1948 (昭和23) 年	労働安全衛生規則(汽缶関係)第2輯汽缶及び特殊汽缶構造規格発行。
(4) 20世紀後半 高度工業化			
		1951 (昭和26) 年	三菱重工業(株)は、米国C E社と技術提携する。
		1952 (昭和27) 年	石川島播磨重工業(株)は、米国F W社と技術提携する。
		1952 (昭和27) 年	重油の統制解除、ボイラーに重油使用が始まる。
		1953 (昭和28) 年	英国B&W社との提携により、バブコック日立(株)設立
		1953 (昭和28) 年	炉筒煙管ボイラーに関し、(株)サッパボイラーが4パスボイラーを、(株)ヒラカワガイダムがMP100シリーズの国産開始した。
		1954 (昭和29) 年	JIS B8201 1954 (陸用鋼製蒸気ボイラーの構造が公布された。
		1955 (昭和30) 年代	リベット構造時代に別れを告げ溶接の時代へと移行した。
		1959 (昭和34) 年	「ボイラーおよび圧力容器安全規則」が施行。
1962年	(米) ASME 規格に後熟処理が必須となった。予熱も強調された。	1960 (昭和35) 年	「重油ボイラー規制法」の改正で事業用ボイラーに重油専燃が認められる。
		1962 (昭和37) 年	ばい煙排出規制法公布
		1963 (昭和38) 年	伝熱面積100m ² 以下のボイラーは、重油規制法解除
		1963 (昭和38) 年	多管貫流ボイラー基発第267号として許可された。
		1965 (昭和40) 年	メンブレン式構造(全溶接形水冷壁構造)開発される。
		1967 (昭和42) 年	重油規制法全面解除。
		1968 (昭和43) 年	「大気汚染防止法」発行
1971年	(米) ASME part PR リベット製ボイラー規格を停止とする。	1970 (昭和45) 年	製鋼法がスクラップ材を使用する電気炉から、鉄鉱石を高炉から連続鑄造する一貫製鉄所に変貌した。
1997年	ISO TC11は、50年休眠状態にあったが、東京で再開す。	1972 (昭和47) 年	労働安全衛生法が制定された。
		1975 (昭和50) 年	狭間先MIG溶接開発(バブコック日立(株))。
		1988 (昭和63) 年	超臨界圧力ボイラー、中部電力(株)・川越火力発電所1号機(700 MW, 32.5MPa, 571/569/569℃)が運開
1998年	(米) ASMEは、ASME Sec.IとSec.VIII div1において、安全率を4から3.5に引き下げた	1997 (平成9) 年	電気設備の技術基準が全面改正され性能規定化された。
		1998 (平成10) 年	中国電力(株)・三隅発電所1号機(1000 MW, 25.5MPa, 604/602℃)で蒸気条件が600℃を超えたプラントが運開した。
(5) 21世紀前半 グローバル化への道			
2001年	ISO TC11の審議は、性能基準案(CD16528)まで漕ぎつけたが、未決定のままとなる。	2001年	電源開発(株)橘湾発電所2号ベンソン超臨界圧ボイラー(バブコック日立製)3000t/h, 26.4 MPa, 605/613℃ 1050 MW 運開
2002年	欧州の圧力装置指令(Pressure Equipment Directive - PEDと略す。)が2002年5月29日から発効	2003 (平成15) 年	性能規定化された「ボイラー構造規格」施行となる。
		2005 (平成17) 年	陸用鋼製ボイラー構造(JIS B8201-2005) 8回目の改正版発行。

4 主要国のボイラーに関する規格

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ー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ーの事故が多発したため構造規格の統一により安全性の確保が切望された。

世界のボイラーに関する規格は技術力で先駆したドイツ規格が最も速く進歩したといえよう。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。

一方、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ー規格（ENボイラー規格）が作成されEU内で実行されている。これに刺激を受けた米国・日本と欧州の主導権争いがISO TC11委員会で続いている。

ここでは日本・米国・欧州のボイラーに関する規格の要点を調べ、わが国として規格統一に前向きに取り組むべき方向を策定する資料とする。

4.1 日本の安全規則および構造規格の体系

4-1-1 日本の規格

わが国では技術基準の性能規定化が促進され、経済産業省の電気事業法においては「発電用火力設備の技術基準」が改正され1997（平成9）年6月から施行されている。また、厚生労働省所管の「ボイラー構造規格」および「压力容器構造規格」においても2003（平成15）年度に性能規定化を図った「新規格」を制定した。また、その例示基準が通達された。

ボイラー・压力容器関連4法の技術基準とJIS規格の構成を図4.1示す。ここで関連4法の技術基準は強制法規であることにに対しJIS規格は任意規格である。JIS B8265は压力容器関連4法における技術基準の整合化を図る目的で各技術基準における一般事項を規定したものである。

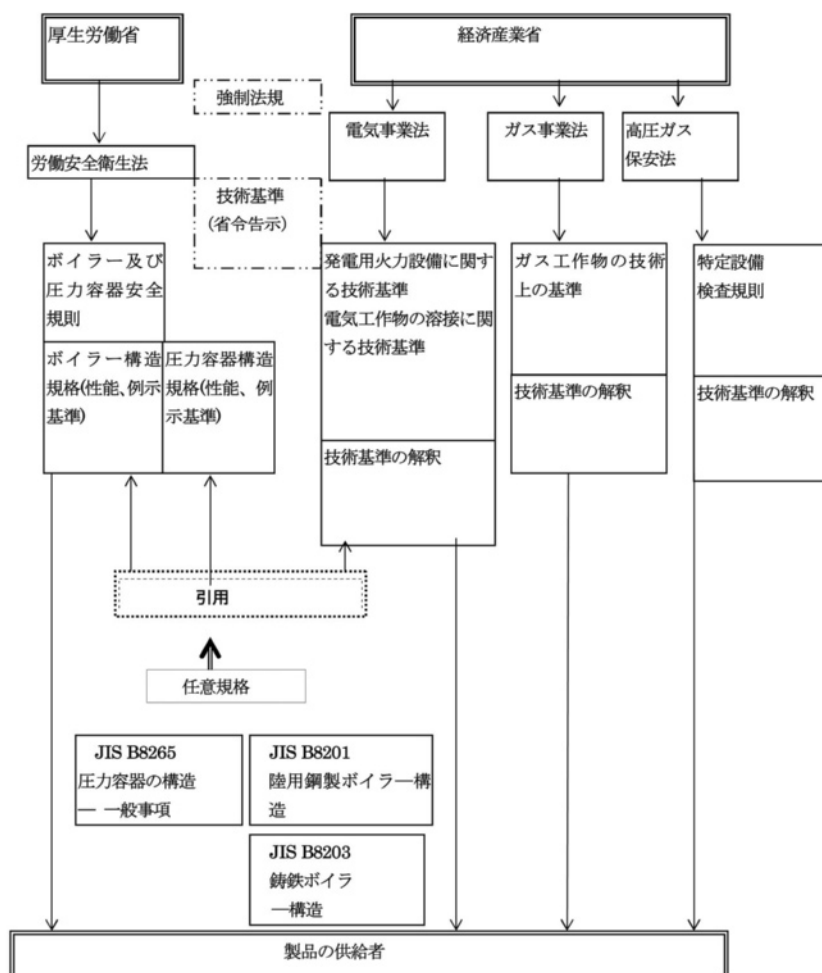
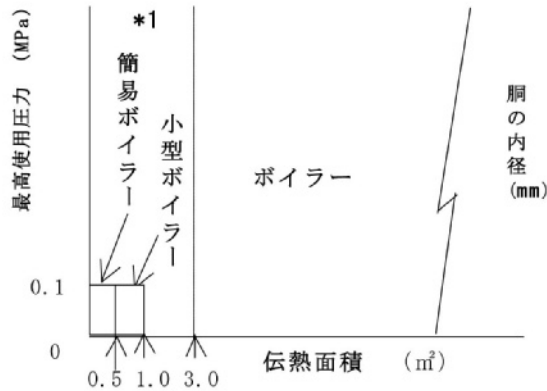


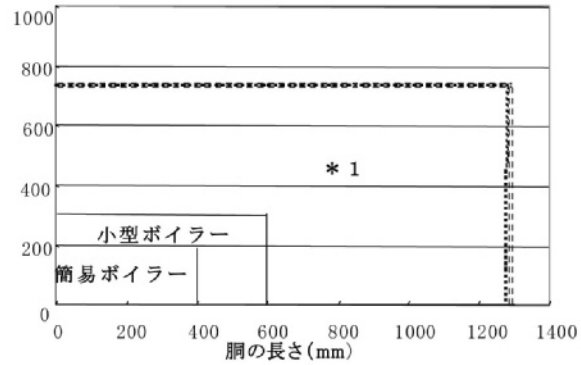
図4.1 ボイラー・压力容器関連4法の技術基準とJIS規格の構成

4-1-2 労働安全衛生法のボイラーの適用区分

労働安全衛生法（以下、労安法と略記）のボイラーは図 4.2に示すように蒸気ボイラー、温水ボイラー、貫流ボイラーの3つに区分されている。各々はまず各図の左下に簡易ボイラーと小型ボイラーを示す範囲を定義し、これを超える圧力と伝熱面積のものはすべてボイラーとされている。



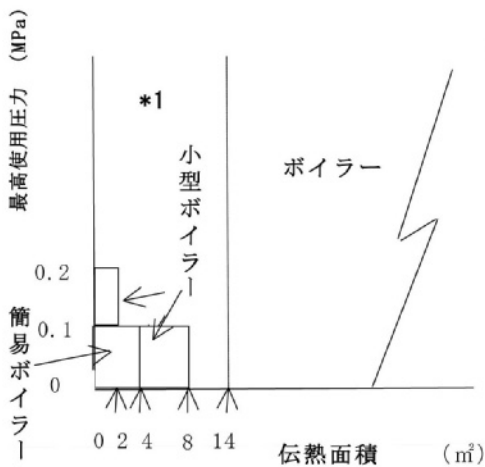
(I) 最高使用圧力と伝熱面積による区分



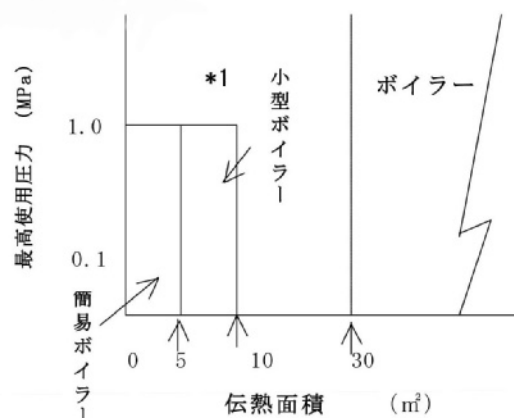
注：簡易・小型イラーの場合はゲージ圧力
0.1MPa以下で使用する場合に限る。

(II) 胴の内径と長さによる区分

(a) 蒸気ボイラー



(b) 温水ボイラー



(c) 貫流ボイラー

図4.2 労安法のボイラーの適用区分⁽⁶⁾

4-1-3 JIS規格の国際規格への整合

戦前の日本機械規格JES第248号「陸用蒸気汽缶の構造」は日本機械学会が主となってドイツ規格に準拠して編纂したものであった。1949（昭和24）年に工業標準化法の公布とともに「JIS B 8201陸用鋼製ボイラー構造」は従来のJESを日本工業規格JISに切り替えることになり、ボイラー構造規格もJESよりも詳細に規

定し指導性をもたせることASMEのボイラー規格にあわせること、溶接に関する規定を取り入れることなどを基本方針として数年にわたる審議を経て1954（昭和29）年にJIS B 8201として公布された。

JIS規格は5年ごとに見直しをすることに決まっている。2005年度は8回目であり国際規格との調和を念頭におき改正し2005年3月に発行された。

4.2 米国のボイラーおよび圧力容器に関する規格

4-2-1 ASME規格の誕生

米国におけるボイラーおよび圧力容器の1910年以降の年間事故件数は1,000件を超えるものとなった。そのため1911年より、ASMEボイラーコード委員会を設置し114頁のASME Boiler and Pressure Vessel Code(1914 edition)を制定し1915年から公布した。

4-2-2 ASME Section I ボイラー規格の構成と概要

ASME規格は図4.3に示すように「共通要求事項Part PG構造全般に関する一般要求事項」を全体の頭において、以下「機種ごとの要求事項・PART PWT 水管ボイラー・…」などを並べている。この方法はよいので必要に応じボイラー形式を追加すべきと考える。

また、図4.4にはASME規格のボイラー区分図を示す。

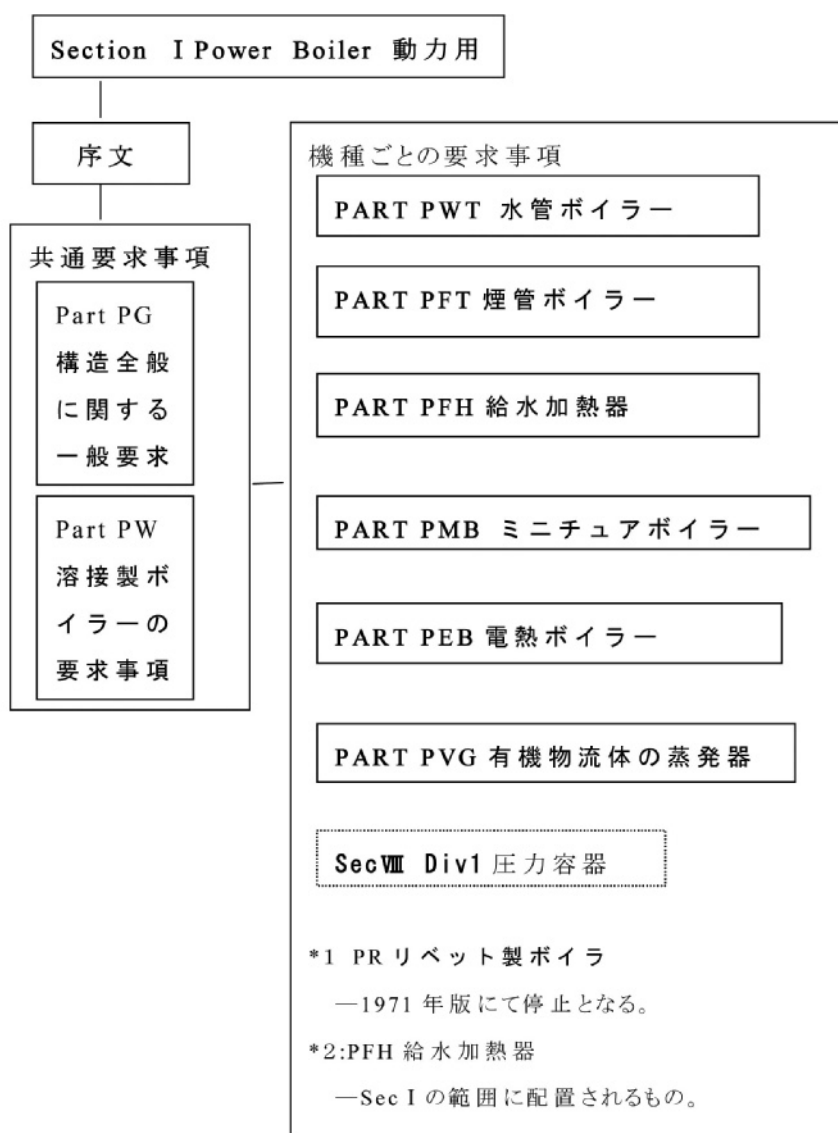


図4.3 ASME Section I ボイラー規格の構成⁽¹⁷⁾

圧力 PS (MPa)

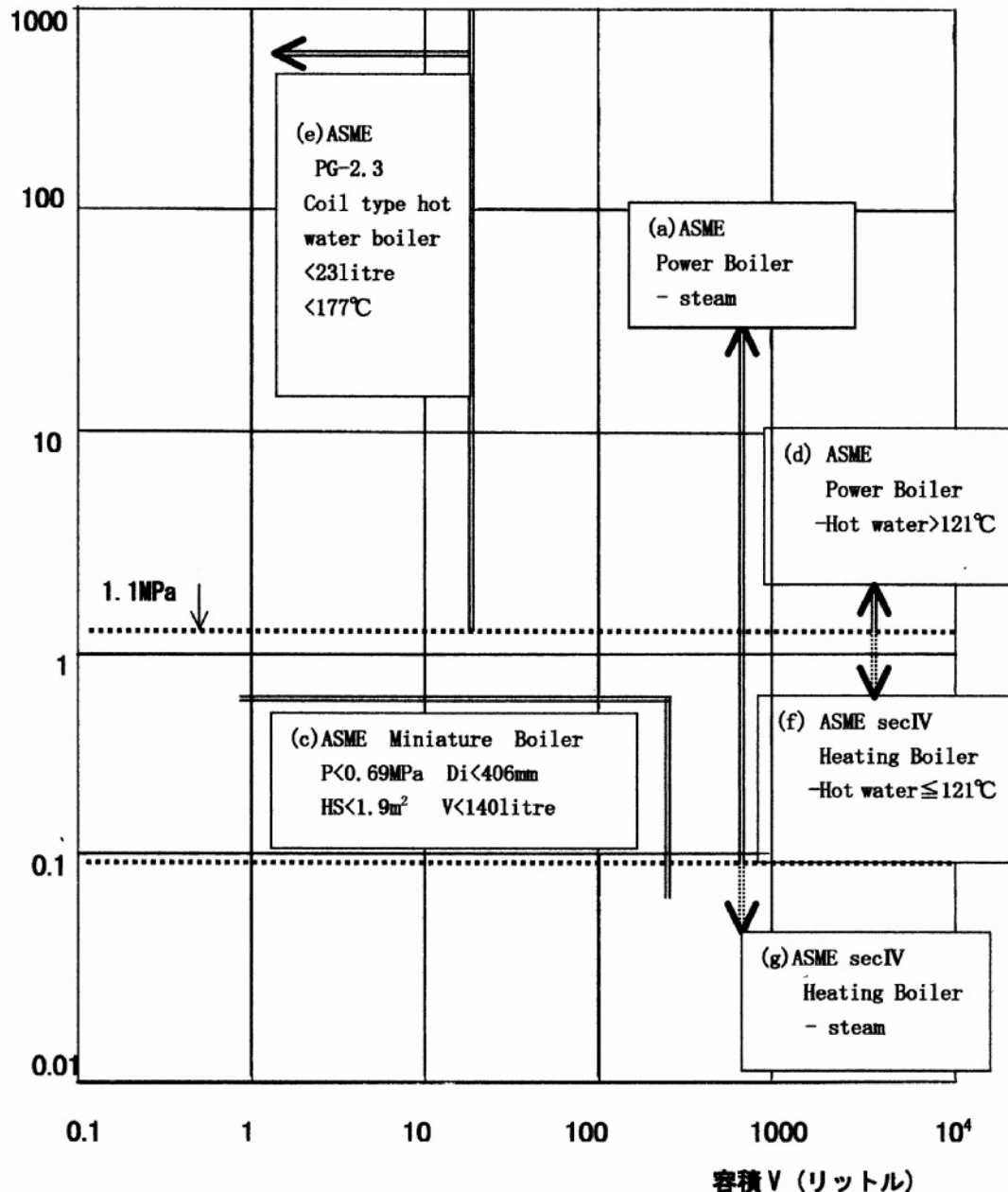


図4.4 ASME規格のボイラー区分図 (17)

4.3 欧州のボイラー及び压力容器に関する規格

欧州連合 (EU) はボイラー及び压力容器に関して、EU委員会にて圧力装置指令(Pressure Equipment Directive-PEDと略記)が1997年5月29日に採択され準備期間5年を経て2002年5月29日より施行となった。この指令はEUとして貿易に関する技術的な障壁を取り除くため「ニューアプローチ」宣言の下に作成されたもので、圧力装置の設計と製造に係わる適合アセスメントに関するメンバー国家間の法律を調和することを目的としている。2002年5月29日からEU内で市場に出荷される大半の圧力装置は、PEDに適合する必要がある。

この指令に適合するボイラー、火なし压力容器、単純压力容器などの規格に関して英国・フランス・ドイツが主体となってEN規格の原案が作成されEU内で実行されている。

圧力装置指令は圧力装置の形式を、容器、蒸気発生器、配管 (安全用附属品および耐圧附属品を含む) の3つに分類し9つのチャートがある。ボイラーは蒸気発生器として図4.5によりカテゴリ I, II, III, IVまたは「品質証明」(SEP; Sound Engineering Practice) の1つに装置を分類する。

なお、図4.5は労安法の压力容器の区分規定と合致する点があり両者の類似性が分かるようにした。

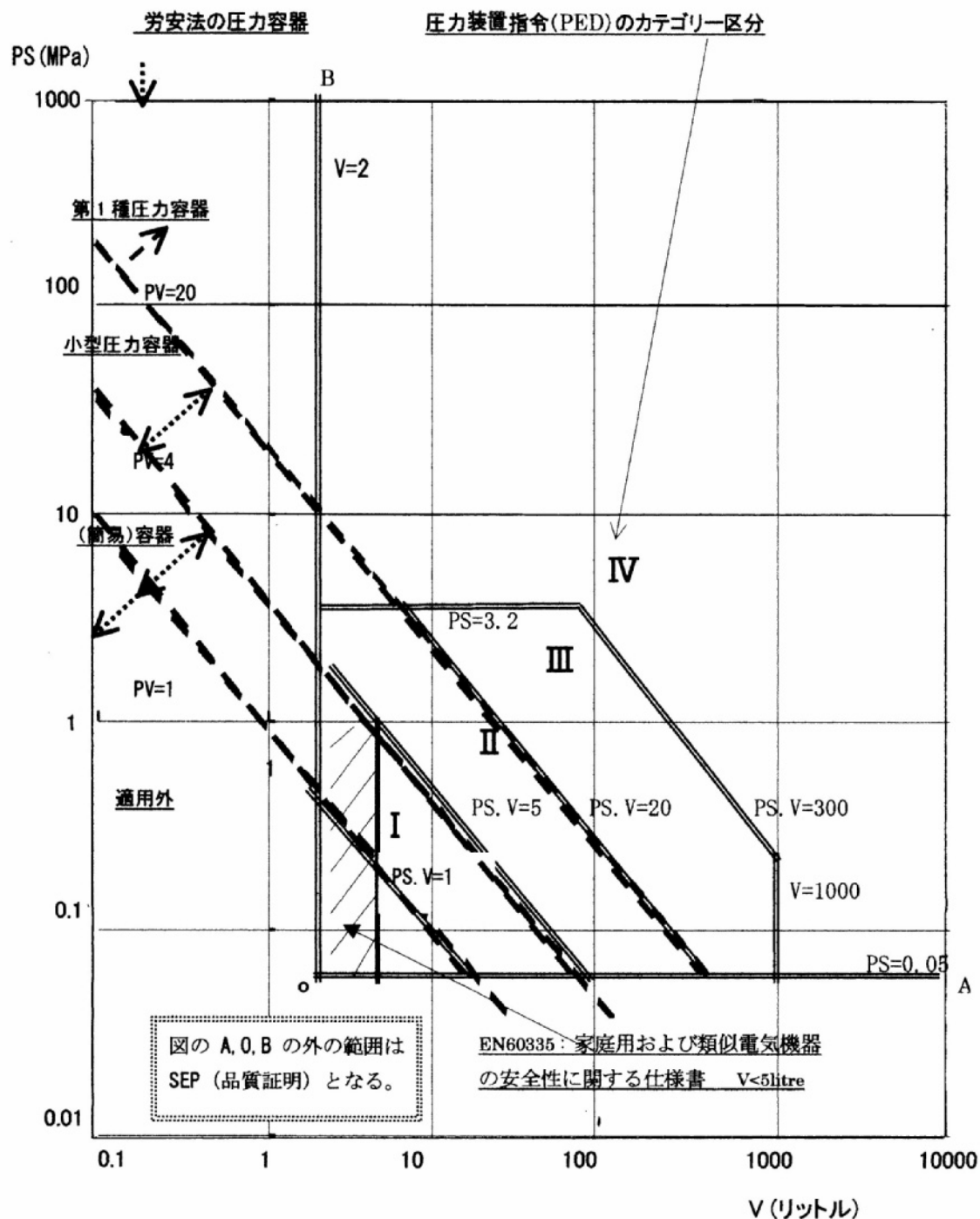


図4.5 圧力機器指令（PED）の蒸気発生器チャートNo.5と労安法の圧力容器適用区分との比較 ⁽⁶⁾ ⁽¹⁴⁾

4.4 主要国のボイラーおよび圧力容器に関する法体系

4-4-1 法体系の比較

表4.1に主要国の制度の比較を示す。日・米・欧州の法体系の相違点は、日本は厚生労働省と経済産業省

の二本建てである。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。ボイラー構造規格はASME一本になっている。欧州は、英国、独国、仏国が中心となって「圧力機器指令」の下でボイラー構造規格も一本化された。

表4.1 主要国の制度の比較

	日本		米国	欧州共同体		
	厚生労働省	経済産業省		独 国	英 国	仏 国
主務官庁			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 (Gerätessicherheitgesetz)(B)GewO (事業法)	Factories ct(1974) Health & Safety at Work etc. Act(HSW 法)	JO1498- I (1990) General text JO
省令	ボイラー及び 圧力容器安全 規則	発電用火力設備に 関する技術基準 電気工作物の溶接に 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 圧力容器構造規格	技術基準の解釈	ASME Boiler & Pressure Vessels Code Sec I :Power Boiler SecIV:Heating Boiler SecVIII:Pressure Vessels	Water tube boiler Shell boiler	EN12952 part 1～16 EN12953 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。

4-4-2 国際的なボイラー構造規格の動向

産業革命にボイラーが果たした役割は多大であった。しかし、当時の技術は不十分なためボイラーの破裂・爆発事故が多発し、この防止対策を策定するため1947年ISO TC11が設置されたがそのまま休眠状態となった。

TC11は50年後の1997年国際規格一本化として再開となり、第1回が東京で開催された。2001年 TC11の審議は、性能規定化することにより性能基準案(CD16528)まで漕ぎつけたが欧州の反対で否決された。その後、10年を経過して継続審議中である。

ここで主要国の各規格の許容応力に関する安全率の考え方を整理し比較する。安全率の変遷は各国の材料製法に差異があり、また製品の水压試験圧力の設定にも影響があり、これらの関連を調査することは大切である。まず、表4.2に現在の日本、米国、欧州のクリープ域に達しない温度範囲の許容応力の決め方をまとめてある。⁽¹⁵⁾

表4.2 ボイラー鋼材の許容応力のきめ方⁽¹⁵⁾

	許容応力は、下記の小さい値とする。	
日本JIS規格	引張強さの1/4	降伏点の 1/1.5
米国ASME1998	〃 1/3.5	〃 1/1.5
欧州EN規格	〃 1/2.4	〃 1/1.5

従来、米国ASME規格および日本のボイラー・压力容器構造規格ではこれまで安全率4が採用されていて引張強さの1/4が許容応力となるケースが大半であった。しかし、これは欧州のEN規格によって同じ材料であれば許容応力が小さくなり、使用する材料の厚さが大となる。ASMEは、1998年のコードケース2278にて鉄鋼材料等の安全率を4から3.5に下げた。わが国でもこれを採用すべきかの検討が2002年から開始された。

なお、図4.6に示すように、各国のボイラー用鉄鋼材料の強度元素としての炭素許容量が異なる。この件は7.6節製鋼技術で解説する。

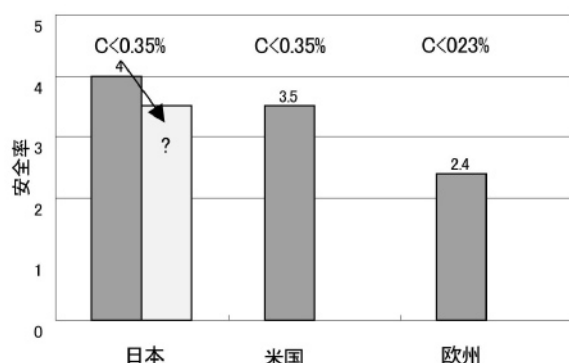


図4.6 主要国の安全率と炭素量の制限

4-4-3 安全率と許容応力のわが国の選択⁽¹⁵⁾

世界のボイラー規格は特にドイツの流れを汲む規格が多い。これはボイラー用材料としてスクラップ材を電気炉にて再生するものであるが、炭素含有量を0.23%未満と制限しこれに他の元素が必然的に混入するので例えばCr+Cu+Mo+N≤0.70などと制限している。

一方、日・米は連続鋳造法により炭素含有量を0.35%未満とし余計な元素は容れない。この方が高温でも降伏点の低下が前者より少なく強い材料となり、安全率4であるのでドラム・管寄せ・水管・煙管などの炭素鋼材料は使用温度350℃以下のクリープ域以下では引張強さの1/4と一定の許容応力となるケースが多く便利である。

ASMEの安全率4から3.5への変更は欧州の安全率2.4を睨んだものと推測される。わが国においても压力容器構造規格の検討結果は現状の4のほかASME規格による場合は3.5を容認の結論となっている。ボイラー構造規格では検討未着手であるが、材料の製法と性質・強度が異なるのでこの変更は慎重にすべきである。このことはボイラー構造規格は安全重視を目的に作られてきたものであることがどう変貌するかにつながるので慎重な検討を要する。

材料の許容応力の決め方について各材料の降伏比を勘案すれば現在の許容応力がどう決まっているかが分かりやすい。材料別の降伏比を取り入れると表4.3のように簡明になる。

表4.3 材料種別と降伏比の概略値

材 料	クリープ域以下	クリープ域
炭素鋼 (0.55～0.6)	引張強さの1/4	(使用例はすくない。)
低合金鋼 (0.5)	引張強さの1/4	クリープ強度による 制限となる。
ステンレス鋼 (0.4)	降伏点の1/1.5	
注：降伏比は引張強さに対する降伏点の比である。		

わが国のボイラー構造規格は図4.1に示したように2本立てとなっているが、電気事業法の「発電用火力設備に関する技術基準」に続き、労安法の「ボイラー構造規格」も性能化され「JIS B8201陸用鋼製ボイラ」を引用するようになった。

今回の主要国のボイラー構造規格の比較から、国際標準化を図る上では主要国の材料の違いが大きく、材料・安全率・水压試験を含めた国際規格の一本化を困難にしている。わが国の材料および構造規格は充分高いレベルにあるので、JIS B 8201のISO登録を推進すべきである。

5 | ボイラーの適用分類

5.1 実用ボイラーの分類

図5.1は現代の実用ボイラーの適用分類を示す。また、近年コージェネレーションの発展、焼却設備の増加、粗悪燃料を活用した循環流動層ボイラーなど多目的のボイラーが出現しておりこれらの実績も一部ではあるが加えてある。

- ① 立てボイラー； 近代の当初から使用されてきた低圧用ボイラーで胴内に火室を有する構造である。石炭を固定炉で燃焼するので小形のものに限られる。現代では使用されなくなっている。
- ② 炉筒煙管ボイラー； 構造上外径約2～4m前後の胴

体の中に外圧を受ける炉筒を1～2本と多数の煙管を設けている。煙管は管の中を燃焼ガスが流れる。炉筒の前後は平らな管板で閉じられているが、平板の強度の関係で3 MPa以下の設計となっている。

- ③ パッケージ水管ボイラー； 低・中圧ボイラー向きであり工場組立を可能としたボイラーである。水管ボイラーは基本構造として蒸気ドラムおよび水ドラムは外径1～2m前後であるが、ドラムの両端は例えば皿形鏡板を採用しており耐圧強度が高い。また、ボイラー外壁は全溶接構造のメンブレン水冷壁構造を採用し、かつ、ドラムの付け根部などに生じる隙間は外側に鉄板を溶接して内から耐火

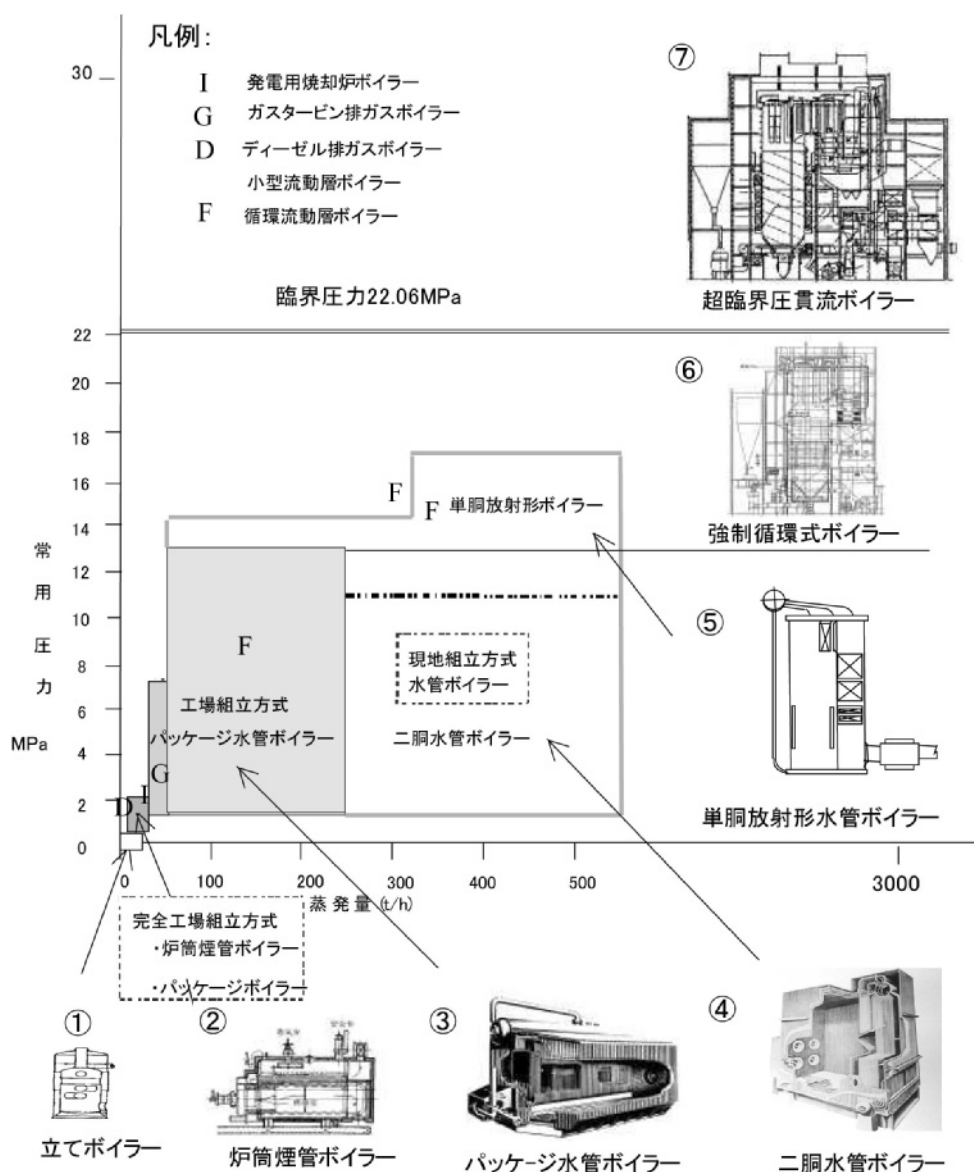


図5.1 ボイラー形式とボイラーの適用区分

キャストブルを塗り込みシール構造とし気密性を確保している。両ドラム間は多数の曲り水管を拡張管にてとりつけてある。水循環として高温側が昇水管となり、降水管はガス温度の低い出口側の管群となっていて負荷によって自動的にバランス点が管群の前後に若干移動して平衡点に落ち着く。

- ④ **二胴水管ボイラー**；中・高圧ボイラー向きでありその構造は自然循環ボイラーの基本である。蒸気ドラムおよび水ドラムを任意の高さに配置しこれを結ぶ火炉と管群で形成し火炉容積を任意に取りうるので自由な設計ができる。一般に過熱器をボイラー本体内に設置し、さらにエコノマイザをボイラーの後に設けることが多い。現地組立て方式である。
- ⑤ **単胴放射形水管ボイラー**；高圧ボイラー向きであり火炉のみで蒸発の機能を果たし管群が不要のため水ドラムも不要となる。後部煙道に多段の過熱器およびエコノマイザを収納することができる。降水管は数本の大径管にて蒸気ドラムから下部管寄せに連結している。これを非加熱降水管という。また、高圧であるため拡張による管の取り付けはなくすべて溶接継手となっている。
- ⑥ **強制循環ボイラー**；15～20MPaと高圧になるため水循環上の密度差を確保出来ず上ドラムから下部管寄せに循環ポンプで強制的にボイラー水を循環させる。
- ⑦ **超臨界圧貫流ボイラー**；液体・気体の区別がなくなるのでドラムはなく給水ポンプからエコノマイザを通過し火炉壁を構成する。その後過熱器を構成してボイラーから出て行く。管のみで一方から他方へ通過するので貫流ボイラーとよばれる。最近の事業用発電ボイラーはすべて貫流方式である。

5.2 蒸気表によるボイラーの適用範囲

図5.2は、日本機械学会発行の1999年版の水および水蒸気のエンタルピ・圧力線図である。このP-I線図は蒸気表とボイラーの関連を理解するのに適している。

5-2-1 蒸気の一般的性質

ボイラーを理解する上で、蒸気表を習得することが大切である。蒸気表は蒸気の諸性質を圧力と温度をパラメータとして広範囲のデータを集積したものであり、そのためには温度の定点を一つ決めなければならない。その定点として水の三重点が採用されている。水の三重点は611Paと真空に近い圧力で温度は0.01℃にあり、ここでは氷・水・水蒸気が共存する状態となる。

図5.2の横軸は絶対圧力、縦軸は蒸気の熱量を表す比エンタルピである。まず、標準大気圧は0.1013MPaであり、この状態で容器に水を入れて加熱すると次第に温度が上昇し100℃で温度上昇がとまる。ここから沸騰が始まる。この点がA点で示され100℃×4.187 kJ/kg=419 kJ/kgの比エンタルピとなる。この温度をその圧力の飽和温度といい、その時の圧力を飽和圧力という。水が飽和温度に達し沸騰を開始し、全部の水が蒸気になるまでは加えた熱が蒸発に費やされるため水の温度は変化しない。標準大気圧での蒸発熱は2257 kJ/kgでありこれを蒸発熱または潜熱といい圧力が高くなるほど小さくなり、ある圧力になるとゼロになる。この圧力を臨界圧力その時の温度を臨界温度といいK点が臨界点である。飽和温度の水を飽和水、発生した蒸気を飽和蒸気という。圧力が変化した場合の飽和水はA-K、飽和蒸気はB-Kの線で示す。飽和蒸気をさらに熱すると温度は上昇する。このように飽和温度より高い温度の蒸気を過熱蒸気という。ある圧力での飽和蒸気温度と過熱蒸気の温度差を過熱度という。

蒸気タービンなどの蒸気原動機に過熱蒸気を使用すると、飽和蒸気を使用する場合と比較し熱効率が向上し使用後の蒸気の湿り度が少なくなり、タービン翼などの腐食、摩耗、破損などの障害が防止できる。

5-2-2 ボイラーへの適用

図5.2によりボイラーの構成との関連をみると、飽和水線A-Kより下方は圧縮水の領域でありボイラーの付属設備としてエコノマイザが構成される。飽和水線A-Kと飽和蒸気B-Kで囲まれる範囲は湿り蒸気が発生する部分であり、いわゆるボイラーの蒸発部を構成する。飽和蒸気B-Kより上の状態は過熱蒸気でありボイラーの付属設備として過熱器が構成される。

各形式のボイラーと対応すると、

- ① 立てボイラーである。
- ② 炉筒煙管ボイラーの範囲で一般に飽和蒸気を発生するボイラー本体のみの場合が多い。
- ③ 低圧・中圧のパッケージ水管ボイラーの範囲である。
- ④ 中圧・高圧水管ボイラーの範囲でエコノマイザおよび蒸気温度500℃クラスの過熱器が設置されるケースが多い。
- ⑤ 高圧の水管ボイラーで圧力17MPa、蒸気温度540℃程度まで製作されている。
- ⑥ 蒸発部の飽和蒸気と飽和水の密度差が少なくなり、自然循環が成立せず強制循環ボイラーとなる範囲である。
- ⑦ 臨界点Kを越し、超臨界圧ボイラーの範囲となる。

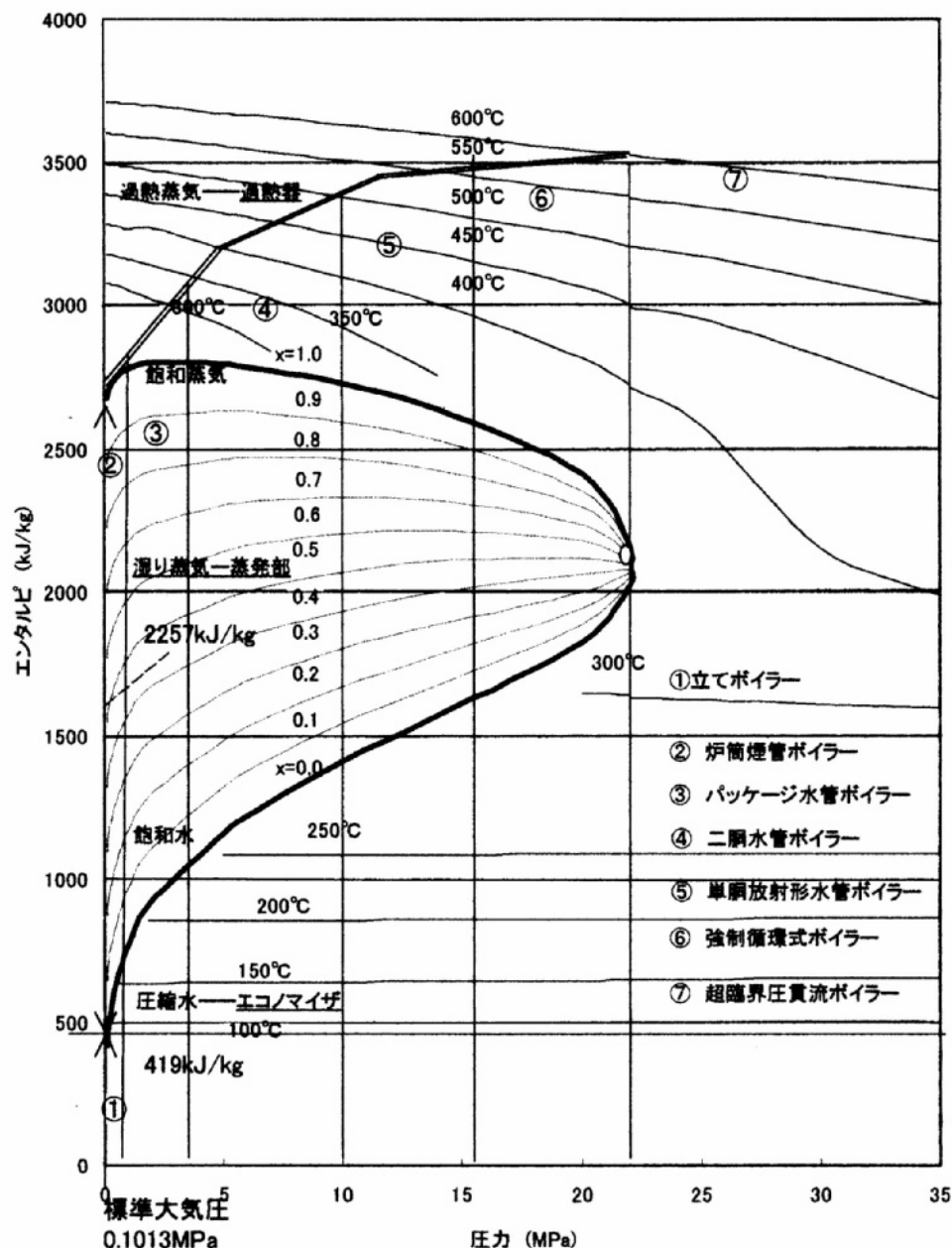


図5.2 蒸気表とボイラーの適用範囲

5.3 将来の規則のための新たなボイラーの分類

ボイラーは「第2章 近代におけるボイラーの創造」で、「近代」には種々の着想によるボイラーが発明家の個人名を付して発表された。しかし、これらは石炭を燃料とするストーカ燃焼方式がほとんどであり、さらにボイラードラムまたは胴はリベットにより製作されていたため低圧ボイラーの製作に限られた。

「現代」に入り溶接が認可され燃料も重油が使用できるようになり、さらにボイラー技術理論体系の充実と関連技術の発展により設計が自由で、かつ、安全なボイラーが設計できるようになった。そして前項で述べたように蒸気表に忠実に合わせるボイラーへと収斂していった。

ボイラーの分類をボイラー水の流動方式（水循環と水位制御方式）により整理したのが表5.1である。このボイラーの分類案をもとにボイラーの安全率と材料選定係数を表5.2のように考察する。

今回のASMEの安全率の変更は従来の安全率4の体系を安全率のみ3.5としたように見受けられる。ボイラー規格の国際的統合が行われないまま「現代」に入り、ボイラー本体並びに関連技術が驚異的に進歩したので安全が高まったとはいえる。しかし、世界各国の規格は今や数十にもなっている。3大系列は米国、英国、ドイツであるが、これが他国に流れ、かつ、各国の修正が加わりとても一本化できる状態ではない。

TC11がまとまらないのはこの事情があるからで、現代に合うボイラーの分類としこれによって各国の規格が再整備される必要があると考える。

すなわち安全率は長い伝統ある大黒柱であり変えられない。これを補完するものとして材料選定係数を取り入れることを提案する。例えば1) 肉厚が厚すぎて熱応力が過大になるから理論計算を根拠に0.9にする、2) 過熱器管が高温クリープを考慮して薄いほうがよい場合0.8にするなどがいえる。

表5.1 ボイラー水の流動方式によるボイラーの分類

分 類		水循環と水位制御の方式	備 考
Ⅰ 丸ボイラー	① 立てボイラー 鋳鉄製ボイラー	・ 気泡置換式循環	液相のみで飽和水に達するか、加圧しても120℃以下が多い。
	② 炉筒煙管ボイラー	・ 水位制御あり	二相流であるが、大きい気泡が上昇し飽和水と入れ替わる。
Ⅱ 水管ボイラー	③ パッケージボイラー	・ 管路網自然循環 ・ 水位制御あり	上昇管と降水管のなかで二相流となり流動抵抗のバランスが取れた状態で流動する。
	④ 二胴水管ボイラー		
	⑤ 単胴放射形ボイラー		
Ⅲ 強制循環ボイラー	⑥ 強制循環式ボイラー	・ 管路網強制循環 ・ 水位制御あり	二相流であり強制循環ポンプで循環する。
	⑦ 超臨界圧貫流ボイラー	・ 単層貫流流動 ・ 水位制御なし ・ 変圧運転可能	相変化がない。変圧運転では、亜臨界圧および超臨界圧運転を任意に行う。

表5.2 安全率と材料選定係数の案

JIS B8201「陸用鋼製ボイラ」		安全率	材料選定係数(例)
序文	機種の区分		
共通要求事項	Ⅰ 丸ボイラー	4	1
Part PG 構造全般に関する一般要求事項	Ⅱ 水管ボイラー	4	1
Part PW 溶接製ボイラーの要求事項	Ⅲ 強制循環ボイラー	4	0.9～
	Ⅳ 高压燃焼ボイラー (例えば1MPa以下)	4	0.9～

6 | ボイラーの主要技術

6.1 ボイラーに関する技術

蒸気原動機であるボイラーは、自然界に存在する空気と燃料および水、これを鉄鋼材料を介して伝熱するよう上手く組み合わせて構成されている。図6.1は、ボイラー関連の技術を燃焼ガス側、材料、水側と区分して示す。

燃焼ガス側は火炉における燃焼に始まり、水冷壁・過熱器・エコノマイザ・空気予熱器へと伝熱を行う。この過程で通風力（ドラフトロス）を必要とする。

受熱側の水側は沸騰伝熱となり蒸気を発生し、さらに気水混合体の密度差により水循環を生じ、蒸気ドラムにおいて気水分離して蒸気を発生する。一方、伝熱管のスケール付着防止の観点からボイラーの水管理が不可欠である。運転に関しては計装・制御技術が重要である。

ボイラーを構成する鉄鋼材料は高圧・高温に耐える材料選定と強度計算、メタル温度計算・クリープ評価、内外面からの腐食、保全・余寿命診断等が要素技術である。ボイラーの製作には検査・品質管理がある。ボイラー技術者は、これらの幅広い知識および技術を習得していなければならない。

また、ボイラー本体を取り巻く関連技術には、「環境対策」、そして国際的規格統一を目指す「ISO対策」などがある。

6.2 火炉伝熱

6-2-1 ステファン・ボルツマンの法則

「近代」の水管ボイラーは火炎対流により伝熱していたといえる。負荷が高くなると火炎が伝熱管束群にすぐ接触するため急冷され、そのため未燃炭素分を発生し黒煙を発するボイラーが多かった。このため、例えば燃焼効率が80～90%となりボイラー効率は70から85%に止まったと思われる。現代では、燃焼効率は100%が常識である。

1879年 ヨーゼフ・ステファン（オーストリア、Joseph Stefan, 1835～1893）が 黒体からの放射伝熱量はその絶対温度の4乗に比例することを明らかにした。弟子の名前と共にステファン・ボルツマンの法則として有名であり伝熱の教科書には必ず載っている。

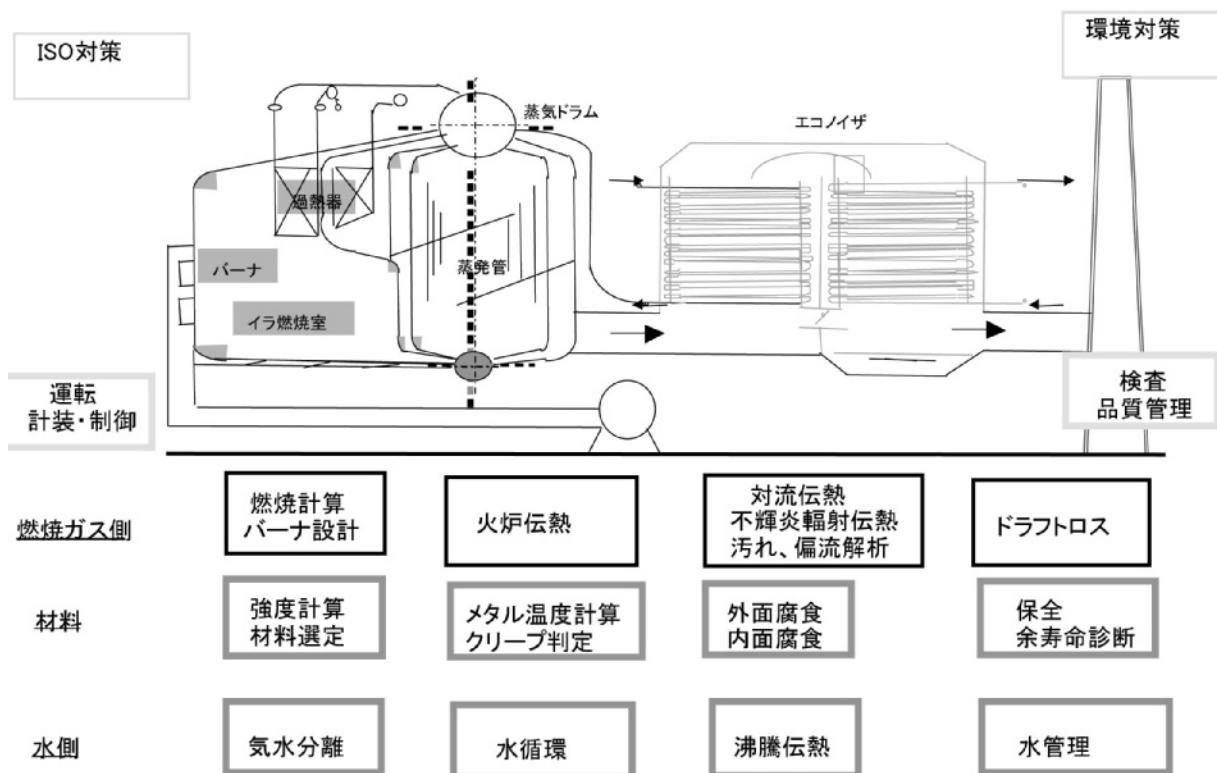


図6.1 ボイラーに関する主要技術

$$E=C\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \quad (6.1)$$

E：放射エネルギー流速[W/m²]

T₁：火球表面の絶対温度[K]

T₂：伝熱表面の絶対温度[K]

C：放射係数

しかし、放射伝熱の考えがボイラーに取り入れられたのは、1919年米国レークサイドにて初の微粉炭燃焼ボイラーが運転された時と推定する。このボイラーの火炉は、図3.18に示したように空冷火炉であったが火炉の必要性が認識されたものといえる。

気体燃料または液体および固体燃料を微粒化したものの燃焼は、燃料粒子の表面積が大きくなり燃焼用空気との拡散燃焼が迅速に行われ高温の球状の火炎を形成する。この火球表面から火炉伝熱面へ放射伝熱が行われる。

ボイラーは火炉とその後部の熱交換器類とに大別されるが、特に火炉の役割は大切でありその特性要件は次である。

- 1) 適正な火球を形成し水冷壁に放射伝熱を行う。
- 2) 火炎は火炉形状に合った形状で完全に燃えきる。
- 3) 負荷追従性の良いバーナを装備し制御特性が良い。
- 4) 適正な空気比で燃焼しNO_x、SO_x、ばいじん等の環境規制値を低減する。

6-2-2 火炉の熱吸収割合

ここで図6.2に示した放射形自然循環ボイラー(300t/h, 10MPa, 540℃クラス)の火炉を例にしてこの火炉における伝熱状況を解析した結果の一部を示す。この火炉を箱形とみなし高さ17m、幅7m、奥行き8mの立方体とする。このボイラーの使用燃料および伝熱面積、火炉容積は1~4である。

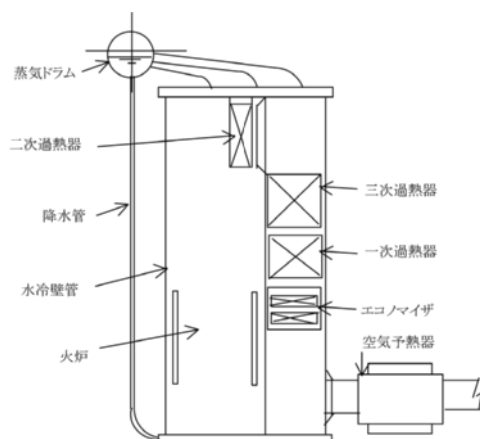


図6.2 例示放射形自然循環ボイラー

1. 燃料使用量 C重油= 20000 kg/h

2. 低位発熱量 = 40 MJ/kg

3. 伝熱面積s=532m²

4. 火炉容積V=952m³

まず、火炉特性を把握する上で全燃焼量に対する火炉における熱吸収割合がどの程度かを知ることが必要である。最近のボイラーで採用されている加圧燃焼方式の火炉は、気密構造の水冷壁と優れたバーナを採用することによって3~5kPaの炉内圧で燃焼させその火炎は水冷壁管と過熱管に強い放射伝熱を行う。

このボイラーの場合、図6.3に示すように火炉の熱吸収割合は40%となっている。これは最近のボイラーでは火炉の熱吸収割合は約半分近いものが多いといえる。この火炉の熱吸収割合の精度を上げるには、火炉出口ガス温度を実測する方法やボイラー各部分の熱吸収割合から各部温度を演繹的に求めて行く方法などがある。

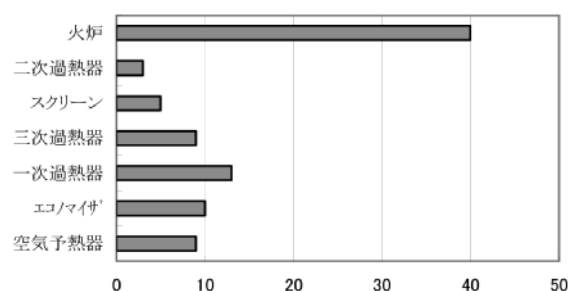


図6.3 例示ボイラーの各部熱吸収割合(%)

6-2-3 火炉の重要性

火炉特性を正確に知ることはステファン・ボルツマンの法則を知っていても、火炉の熱流束並びにガス温度分布を知り、火球の大きさ・温度分布・各部の化学反応状態・放射係数などを数値表現することが極めて難しい。しかし、前述のように火炉は全熱量の約半分以上を全伝熱面積の1割前後で吸収するのでその効果は絶大である。また、関連技術で述べる環境改善にも火炉の燃焼性の工夫は不可欠のものである。

現代ではコンピュータの発達により理論計算と各種伝熱実験の解析の照合ができることと、これを実際に計測することにより、火炉伝熱のデータを十分に蓄積しているのでいかなるボイラーにも対応できる。

6.3 燃焼技術⁽⁵⁾

6-3-1 各種燃料と燃焼技術

家庭用の小形ボイラーから産業用のボイラー、さらに事業用大形のボイラーまで伝熱面積、使用燃料の種

類、使用量は広範囲にわたっており、その燃焼技術は多岐にわかれる。いずれも過剰空気をなるべく減らし、ボイラー効率を高める努力をしながら、ばいじんや窒素酸化物の生成を抑制するように工夫されている。

6-3-2 液体燃料

産業用のボイラーに使用される燃料のほとんどは市販の石油系の液体燃料の灯油、軽油、重油が使用され、最近では石油精製過程で生成される残さ油等の重質油もボイラー燃料として利用されている。

液体燃料は微細な粒子となるように気流中に噴霧して燃焼させるので、動粘性係数が適度に小さいことが重要である。常温の粘度が高いB重油、C重油は加熱し粘度を下げてから使用する。また、燃料に含まれる窒素分、硫黄分は燃焼過程で窒素酸化物、硫黄酸化物に変化し伝熱面の腐食や大気汚染の原因になる。そこで燃料の脱窒素プロセスや低NO_x燃焼技術を採用する。硫黄分はすべて燃焼過程で硫黄酸化物となってしまうので、硫黄を高濃度で含む重油には硫黄分を減らす脱硫プロセスを行う場合が多い。

ボイラーの燃焼方式としては噴霧燃焼が一般的であり、種々の液体微粒化方式を使った燃料噴射ノズルから空気流中に燃料を噴霧し拡散させて燃焼場を形成する。燃料の噴霧特性が燃焼場および排気に影響し、噴霧粒径が大きければ火炎が長く局所火炎温度が高くなる傾向があり、窒素酸化物、ばいじんの排出も多くなる。また、ボイラー効率を高めるために空気過剰率をなるべく下げるので気体燃料と同様に局部的に火炎温度が高くないように二段燃焼、分割火炎、排ガス循環などの工夫を行っている。

6-3-3 気体燃料

気体燃料は取扱いおよび燃焼制御の容易さ、燃焼排気の清浄性などの点からボイラー燃料として液体燃料、固体燃料に代わって広く使われるようになりつつある。ガス発生所から直接配管する必要がある。

気体燃料はバーナの近傍で空気と容易に混合させることができる利点があり、大気汚染物質の低減技術の適用も容易である。小形産業用ボイラーの気体燃料として最も良く使用されるのが天然ガスを主成分とした都市ガスでありその成分の約90%がメタンである。都市ガスには硫黄分、窒素分が含まれていないため高温燃焼起因の窒素酸化物以外の大気汚染成分を排出せず、ばいじんの排出も極めて少ない。

また、液体、固体燃料に比べてエネルギー原単位当たりのCO₂の排出量が少なく地球温暖化防止への寄与

も大きいこともあり、今後、産業用ボイラーへの都市ガスの需要が増加するものと予想される。図 6.4は気体・液体燃料用バーナの例を示す。

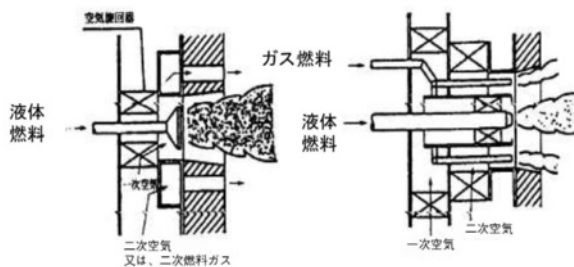


図6.4 気体・液体低NO_xバーナの例

6-3-4 固体燃焼技術

石炭は化石燃料の中で最も埋蔵量が多く、今後も長期間にわたって使用できる化石燃料である。石炭化度の順に褐炭、亜炭、亜歴青炭、歴青炭、半無煙炭、無煙炭と名づけられ順に炭素分が多くなる。石炭には燃焼後の残さ分となる灰分が含まれており、その成分、含有量、融点などによって燃焼に影響を及ぼす場合があり燃焼方式の採用には注意が必要である。

固体燃料の燃焼方法としては大別すると1) 固定燃焼、2) 流動層燃焼、3) 浮遊燃焼がある。図6.5において底を多孔板で作った容器に粒子を層状に詰め、空気を多孔板を通して送り込んでいく。最初、低速の空気では粒子間のすき間を通りながら上昇し層外へと排出される。これはストーカだきボイラーの燃焼状態である（図6.5A）。さらに空気速度を増加させると粒子は空気によって動きはじめ、ある空気流速に達すると粒子の重力と空気による抗力は釣り合い粒子は浮遊状態となる。このとき粒子層はあたかも液体のような挙動を示し、外部から衝撃を加えると粒子層表面は波打つほどである。この粒子層の状態を流動層といい、粒子と空気の混合は良好で層の温度はほぼ均一となりガスと粒子の温度差もわずかとなる。

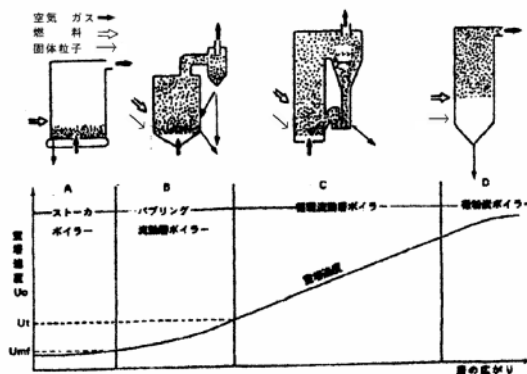


図6.5 固体燃焼の流動状態

ここで流動化状態を表す基本的な因子として、流動化開始速度 U_{mf} と終末速度 U_t について説明する。 U_{mf} と U_t は粉体と流動化流体の性質（密度、粒子の大きさ等）によって決定される因子である。

流体の空塔速度 U_0 (=全空気流量/容器の水平断面積)が U_{mf} (流動化開始速度)以下であれば粉体層は固定層の状態にある(図 6.5 A)。流速が上がり、 $U_0 > U_{mf}$ になると流動化状態となる(図 6.5 B)。

さらに流速を増し U_t 以上にすると、層表面から飛び出した粒子の一部は燃焼ガス流体に同伴されて層外に輸送される。しかし、 U_t 以上の流速でも粒子の補給やりサイクルを行うと流動層を定常的に形成できる速度流域がある(図 6.5 C)。

$U_{mf} < U_0 < U_t$ ……バブリング流動層

$U_0 > U_t$ ……循環流動層

さらに U_0 が大きくなると、リサイクルを行っても流動層を形成できなくなり(噴流層)、粒子は常に空気に同伴された状態となる。この領域を利用したボイラーが微粉炭ボイラー(図6.5 D)である。

また、硫黄分、窒素分が含まれているためにストロカボイラーおよび微粉炭ボイラーでは排煙脱硫装置、排煙脱硝装置の設置が必要となる。流動層ボイラーの場合は投入された燃料は熱媒体粒子との攪拌が行われるため、一般に低い850℃前後の低い燃焼温度での燃焼が可能でありサーマル NO_x の発生が少ない。また、脱硫剤を用いることにより炉内脱硫が可能である。

石炭の燃焼法としては固定床燃焼法が古くから使用され、ついで微粉炭燃焼法が使用されてきた。現代では流動層燃焼法が多目的に有効な使用ができるため、その採用が増加している。図6.6は小形バブリング流動層ボイラーを、図6.7は循環流動層ボイラーの例をそれぞれ示す。これらの現代の実績は図5.1ボイラー形式とボイラーの適用区分において、D：小形流動層ボイラーは工場の廃棄物焼却用などとして重宝に使用され、またF：循環流動層ボイラーは難燃性の半無煙

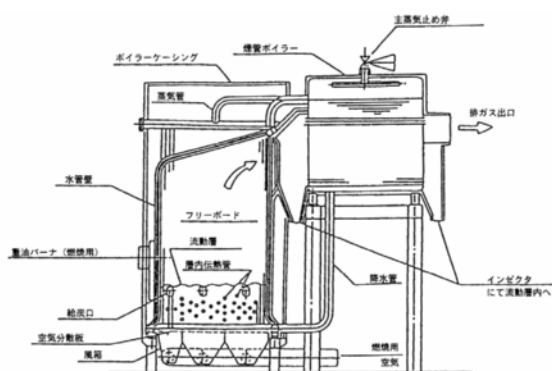


図6.6 小形バブリング流動層ボイラー

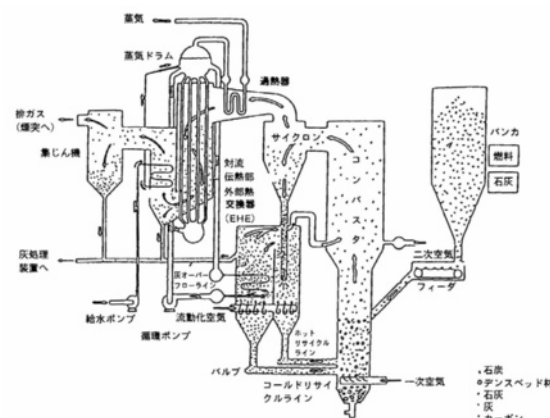


図6.7 循環流動層ボイラー

炭・無煙炭でもよく燃焼させることができ自家発電用として大形のものが実績を挙げている。

6.4 水側の技術

6-4-1 沸騰特性曲線

図6.8の沸騰特性曲線は、大気圧の水中に沈めた白金線に電流を通して加熱したときの線表面からの熱流束 q と、線表面温度と水の飽和温度との差すなわち過熱度 $\Delta T_{sat} = T_w - T_s$ の関係を示したもので沸騰特性曲線またはプール沸騰曲線とよばれている。図中の下の線は熱伝達率 $\alpha = q / \Delta T_{sat}$ である。白金線の温度を上げてゆくと、水への熱伝達是非沸騰域から核沸騰に移行する。核沸騰は伝熱面上に蒸気泡が発生している領域である。気泡を生ずると熱伝達率は著しく増大し、過熱度 ΔT_{sat} のわずかの増加によって熱流束も急激に増加する。

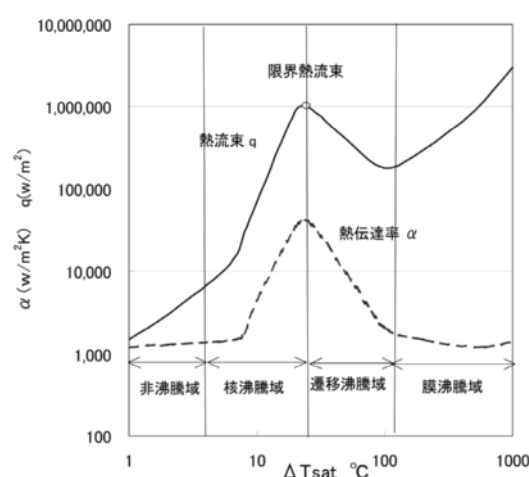


図6.8 沸騰特性曲線⁽³⁾

中央の最高点は核沸騰域の上限点である。実際、ボイラーの沸騰伝熱面では加熱熱流束がこの最高点以下なので、伝熱面の過熱度はこれ以下となる。すなわち、過熱度 $\Delta T_{sat} \approx 2 \sim 20^\circ\text{C}$ 程度に水管の鉄面温度が抑えら

れる。その後遷移沸騰域から膜沸騰域に入ると伝熱面が焼損するようになる。このことから 上限点の熱流束を限界熱流束あるいはバーンアウト熱流束とよんでいる。

6-4-2 水循環の管路網

自然循環ボイラーのボイラー水はその運転圧力の飽和温度に達しており、図6.9に示すように火炎の放射を受ける火炉や高温の燃焼ガスに接触する部分では気泡を発生し気水混合体となり上昇する。ボイラー出口などガス温度が低い部分や加熱されない管では飽和水が下降する。このように上昇管と下降管の気水混合体に密度差が生じ、例えば下降管では1m/s前後で下向きに流れ、上昇管では1~5m/s程度に加速して上向きに流れている。上昇した蒸気は蒸気ドラムで水分を分離して外部に供給される。一方、その分の給水が蒸気ドラムに供給され飽和水と混合し下降管を下ることになる。

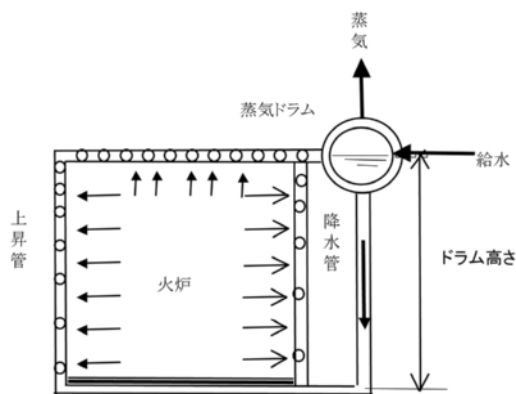


図6.9 水循環の管路網

このように自然循環ボイラーは気水混合体を循環する管路網が形成される。これらを「蒸発に係わる耐圧部分」と呼ぶ。蒸気ドラム、気水分離器、上昇管、降水管、水ドラム、分配管、管寄せ、連絡管などがある。過熱器、エコノマイザは含まれない。

6-4-3 ボイラーの循環比

循環比（Circulation Ratio- C_R ）の定義は蒸発量に対しボイラー内を何倍の気水混合体が循環しているかを表す。

$$C_R = \frac{\text{全流量 (kg/h)}}{\text{蒸気量 (kg/h)}} = \frac{W_T}{G_s} \quad (6.2)$$

図6.10に代表的ボイラーの循環系と循環比を示す。

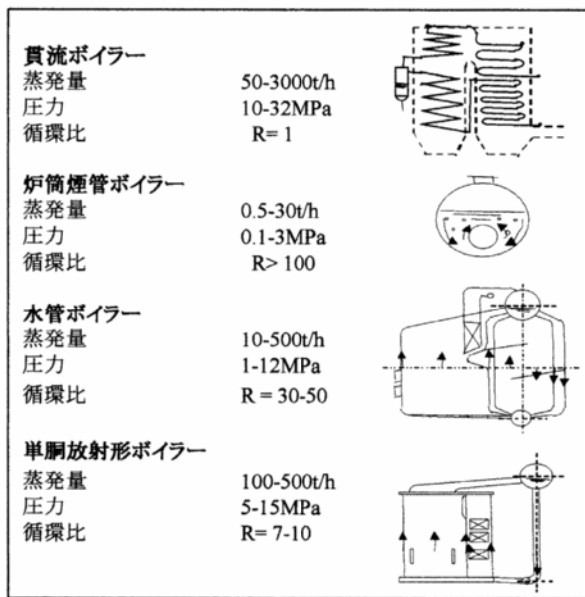


図6.10 自然循環ボイラーの循環系

貫流ボイラーは給水ポンプにて給水を一端から押し込み、一方通行で流れ蒸発し他端から過熱蒸気となって押し出される。この間、明確な水と蒸気の区分点がないわけである。貫流ボイラーの循環比は $C_R=1$ である。

最近の事業用ボイラーは殆どが超臨界圧ボイラーであり、最近では日常の負荷変化に対応するため変圧運転方式が採用され運転圧力が随時変化する。

炉筒煙管ボイラーでは炉筒での受熱量が大きく炉筒の周囲を気泡が上昇する。一方、本体の胴にそって飽和水が下降する。このボイラーは3MPa以下の低圧であり蒸気泡が大きく水との密度差が大きい。この気泡の浮力差により循環水量が大きくなり循環比は100を超える。

水管ボイラーでは火炉および高温燃焼ガスに触れる管群が上昇管となり、ガス温度の低い後部管群が下降管となる。循環比は30~50程度である。水管ボイラーの管路網はこの循環比を確実に維持するように設計しなければならない。

単胴放射形ボイラーは、火炉の周囲の水冷壁管が上昇管となり、降水管は非加熱の大径管がボイラー外に独立して配置されている。10MPaを超えるクラスのボイラーは飽和蒸気と飽和水の密度差が小さいので非加熱降水管としなければならない。また、飽和蒸気と飽和水のエンタルピー差が小さく蒸発部は水冷壁管のみで蒸発管群がなく過熱器とエコノマイザが附設される。

「水循環が良い。」「水循環が悪い。」というが、「良い」とは管内を気水混合体が安定した流速で流れて管内面の沸騰による伝熱が核沸騰状態を維持することで

ある。この核沸騰状態により蒸発管のメタル温度は飽和水温度より20℃程度しか上がらず、炭素鋼製の蒸発管の鉄面温度を安定して低く抑えることができる。これがボイラーを成立させている大事な要件である。このように安定した循環とは、大量のボイラー水に十分な循環慣性力を与えることが自然循環ボイラーの基本である。

6.5 ボイラー本体用材料

6-5-1 JISボイラー用材料

図6.11はボイラー圧力1～15MPa、蒸気温度が540℃級までのボイラーに使用される主な材料を挙げてある。この表を見ると降伏比（材料の引張強さに対する降伏点の比）はそれぞれ炭素鋼で0.55～0.6、低合金鋼で0.5、ステンレス鋼0.4となっていることが分かる。現在まで材料の評価に降伏比はあまり利用されていないが、その重要性をここに取り上げた。

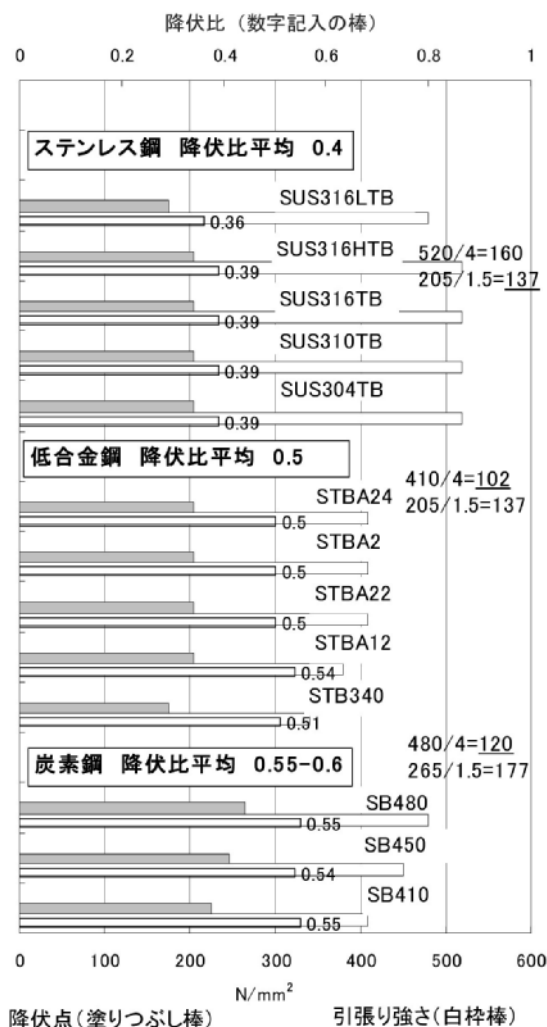


図6.11 JISボイラー用材料の引張強さと降伏点

6-5-2 寿命予測

ボイラー用材料の管理は、ボイラーの寿命予測に重要な因子であり、下記の手法が組み合わせて用いられている。実施にあたっては規則上の決まりがあるので関連資料を参照されたい。

- 1) 外径・肉厚計測
- 2) 腐食・酸化による減肉予測
- 3) 金属組織判別法
- 4) クリープ破壊予測法
- 5) 疲労破壊予測法

6.6 安全率と許容応力

6-6-1 ボイラー構造規格に定める材料の許容応力⁽⁸⁾

鉄鋼材料及び非鉄金属材料の許容引張応力は、戦後のASMEに習い次のうち最小のものとする。

- イ. 常温における引張強さの最小値の4分の1
- ロ. 材料の使用温度における引張強さの4分の1
- ハ. 常温における降伏点又は0.2%耐力の最小値の1.5分の1
- ニ. 材料の使用温度における降伏点又は0.2%耐力の1.5分の1

基準とすべき強さ「許容応力」については、材料の種類や容器の使用条件に応じて許容される最大の応力をいう。クリープを問題にしないでよい温度範囲の許容応力をきめるには、(1) 引張強さを基準にする方法 (2) 降伏点を基準にする方法の2通りがある。

基準強さは、荷重の種類、使用温度その他によって異なる値であり、一般に延性材料で作られた常温容器で静的荷重を受けるものにあつては、降伏点あるいは耐力とし、ぜい性材料で作られた容器にあつては引張強さとすることが妥当と考えられる。

安全率はすべての条件が安全なものであれば1.0として許容応力をこれらの基準強さにまで近づけることができるが、材料、設計、製作、運転の各方面にそれぞれ避けることができない不確定要素があるため、また予測しにくい外力などがあり安全率の決定が重要な問題となる。

ここで安全率に加算すべき因子を挙げる。すなわち

- 1) 材料の不確定要素としては材料の製造時に於いて生じる成分、金属組織の不同がある。
- 2) 設計計算においても、運転中のあらゆる状態において作用する荷重をすべて正確に計算することは不可能に近い。
- 3) 容器製作の面でも、製作中に生じる材料組織のひずみ、残留応力あるいは切欠き効果など予測

できない問題がある。

- 4) ボイラーの運転についても運転によって生じる腐食、損耗や材料の劣化など確実に把握できない要素がある。⁽³⁾

6-6-2 安全率チャートの活用

(1) 降伏比を勘案した安全率

ボイラー構造規格では安全率と許容応力は1対1の関係で決まるようになっている。

しかし、材料には降伏比 $f = \sigma_{YN} / \sigma_{BN}$ が、炭素鋼・合金鋼・ステンレス鋼・その他材料で異なっているので、これを勘案しないと安全率の意義が適正か否か異論があるところである。その判別のため安全率チャートが便利である。ここでは降伏比を勘案しながら安全率を考察する必要がある。使用する記号は次である。

S : 安全率

S_Y : 降伏点に対する安全係数

P_d : 設計圧力 (MPa)

σ_{BN} : 規格引張強さ (N/mm²)

σ_{YN} : 規格降伏点 (N/mm²)

f : 降伏比

σ_a : 許容応力 (N/mm²)

まず、炭素鋼の降伏比 $f = \sigma_{YN} / \sigma_{BN}$ と引張強さおよび降伏点の関係を調べる。

図6.12には、材料の降伏比をパラメータとし安全率を横軸とし縦軸には降伏点に対する安全係数

$S_Y (= \sigma_a / \sigma_{YN})$ を示す。

「JIS B8201陸用鋼製ボイラー構造」の検定水圧の項目である「9.3.3 特殊形状の部分の検定水圧試験および最高使用圧力」を参照すると検定水圧は降伏比が0.625以下である材料にだけ適用できるとされている。すなわち、ボイラー用鋼材は $f=0.625$ 以下と定義されているので、図中の①の点の安全率は2.4なので、許容応力は $\sigma_a = \sigma_{BN} / 2.4$ となり、この式の上下に0.625を乗ざると $\sigma_a = \sigma_{YN} / 1.5$ となり両者は同一のものである。これはEN材の許容応力はすべて $\sigma_{YN} / 1.5$ の降伏点ベースで決まるということである。降伏点の1/1.5で許容応力が決まる点を整理すると、炭素鋼で降伏比 $f=0.6$ では安全率 $S=2.5$ の②以下、低合金鋼 $f=0.5$ では安全率 $S=3.0$ の③以下となる。ステンレス鋼では安全率 $S=3.75$ の④以下が降伏点の1/1.5で許容応力がきまる。

(2) 水圧試験時の限界応力

図6.12の太字矢印の各水圧範囲は炭素鋼 (降伏比 $f=0.6$)、低合金鋼 (降伏比 $f=0.5$) およびステンレス鋼 (降伏比 $f=0.4$) を代表値として、最高使用圧力の1.5倍

の水圧試験応力範囲を示す。

- 1) ASME SECTION I PG99には、「水圧時の一次膜応力は降伏点 (0.2%耐力) の90%を超えてはならない。」とある。安全率 $S=3.5$ と3.0の場合を算出すると、

例1) 安全率 $S=3.5$ では降伏比が図の[a] $f=0.477$ 以上であれば1.5倍の水圧をかけられる。

例2) 安全率 $S=3.0$ では降伏比が図の[b] $f=0.556$ 以上でないと1.5倍の水圧をかけられない。

したがって、ASMEの新しい安全率 $S=3.5$ は、1.5倍の水圧をかけられる下限界である。もし $S=3$ 以下になると、 $f=0.556$ 以下の鋼材は1.5倍の水圧はかけられない。

2) JIS の水圧試験圧力

JISのSB材は連続鑄造鋼なので板厚に関係なく降伏点の温度に対する曲線は図7.24のSB480の降伏点に見るように σ_Y は1本である。このように常温で設計圧力の1.5 P_d を水圧試験圧力としても常温の降伏点には十分な余裕がある。また、ドラム・胴を有するボイラーは拡張継手が多いので従来どおり最高使用圧力の1.5倍の圧力をかけるべきと考える。

- 3) ENの水圧試験圧力は図のEN水圧範囲と示すように、降伏点 (0.2%耐力) の90%を超えてしまうので、1.5倍の水圧はかけられないことになる。

[降伏点が1.0である。]

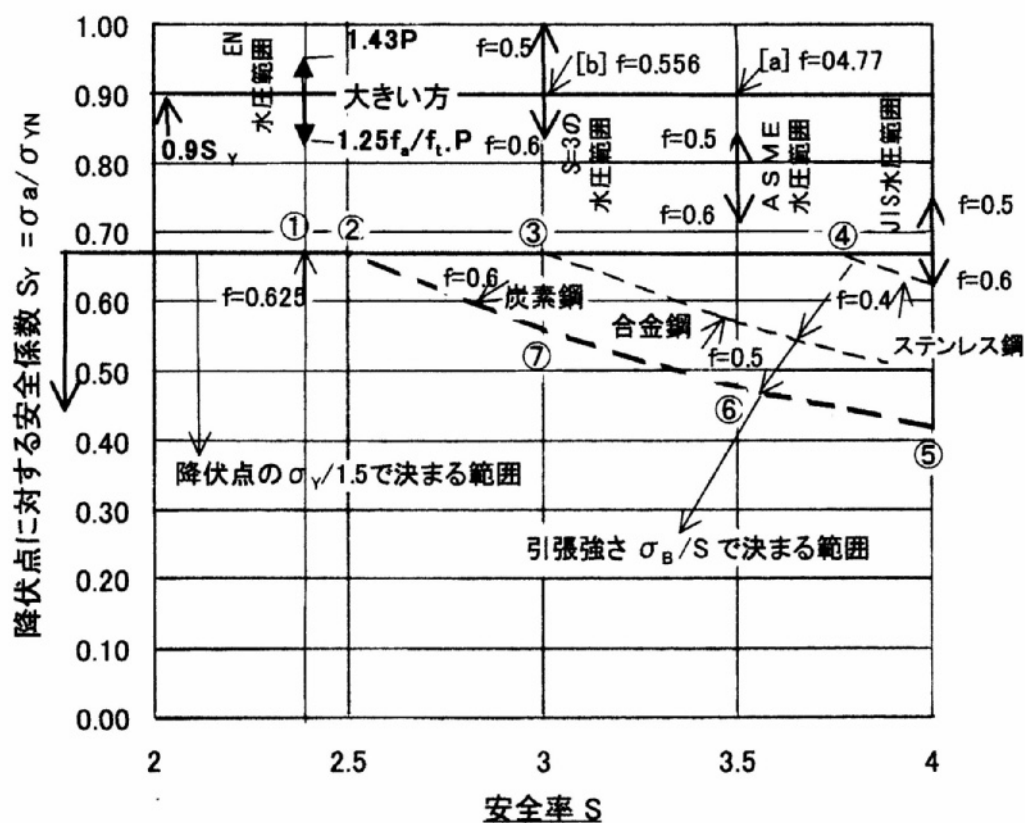


図6.12 安全率チャート (15)

7 | 主要関連技術

7.1 ボイラー制御

7-1-1 近代の制御技術⁽¹²⁾

ボイラーの蒸気ドラムの水位を一定にする装置として、図7.1の熱膨張管式水位調節計が用いられた。これは水位の変動を銅管（図中A）の熱膨張による伸びの変化として検知するもので、古くから広く用いられていた。戦前・戦中には、これ以外の自動制御装置はほとんどなかった。

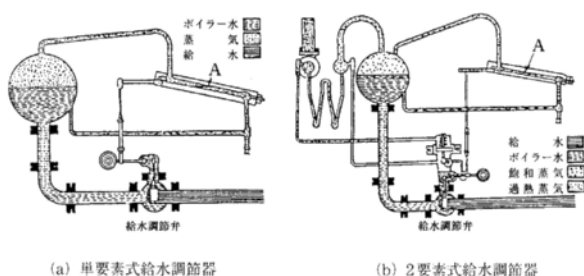


図7.1 熱膨張管式水位調整装置⁽¹¹⁾

フロート式水位調節計はそれ以前の19世紀から小さいボイラーに使用されていた。

近代とした時期は、すべて小粒の石炭を火格子燃焼方式のストーカ焚きであったから、石炭を手だきで投炭するか、フィーダで均一に押し込まなければならなかった。ボイラーの制御を考えた場合、例えば圧力変化が発生すると石炭量を増減することになるがその追従性は遅い。また、負荷がなくなってもストーカ上に残り火があるので、ボイラー圧力があがり安全弁が吹けばよいが、故障によりボイラーが過圧状態となり破裂し大事故が多発した。

ワットが予測したように1900年ころ米国・英国では年間1,000件もの事故が発生し重大問題となった。事故は制御のみが原因ではなく他の節で述べる数点にもまだまだ問題があった。

7-1-2 現代の制御技術⁽¹²⁾

戦後ボイラーが輸入されると、これと共に本格的な計器と自動制御装置が輸入され、次いで国産化が行われた。自動制御装置の発達はボイラーの大容量化・複雑化に伴い性能の向上および省力化を目的として非常に勢いで行われた。半導体の開発・発展によって計器および自動制御装置がデジタル化され、運転技術の高度化・運転支援の必要性および管理の集約・効率化の

ために階層形デジタル自動制御装置が用いられ、なお非常に勢いで発達しつつある。制御方式の伝達機構には、3つの方式がある。

(1) 空気式

1950年代米国から事業用ボイラーが相次いで輸入されたが、これとともに米国のベーレー（Bailey）社の空気式自動制御装置が導入された。

(2) 油圧式

油圧機器の発達と呼応して油圧式自動制御装置が用いられた。これは空気式と同じくフラップノズルと油圧モータを用いるものであるが、作動媒体が液体（油）であるため圧縮性がなく伝達遅れがない。油圧による信号伝達に振動を利用し伝達速度および精度を上げるものもある。後には電油式と称して電気を伝達信号に用い操作端に油圧機器を用いて制御する方式が採用された。

(3) 電子式

ボイラーが大形化し信号伝達距離が長くなると、精度が高く伝達速度の速い電子式自動制御装置が採用された。現在では中・大形ボイラーの制御は電子式がほとんどである。

(4) ポジショニング

前述の3方式の自動制御装置はメータリング制御と称し、制御量はもとより操作量も流量を計測してフィードバックして所要の流量になっている事を確認する方式である。

一方、低価格のパッケージボイラーが開発されたので、従来ボイラーの15～20%を占める自動制御装置の価格を低減する必要が生じた。このため操作端の位置決めだけによるポジショニング制御方式が採用された。これによってパッケージボイラーの自動制御装置の価格は大幅に低減した。

7-1-3 高度化

1950年代に至ってコンピュータが長足の進歩を遂げたので、これをボイラーの自動制御に利用して制御の高性能化・省力化が意図された。

制御の高性能化は定常運転時の制御はもとより、起動・停止時および異常運転時の対応を高度に効率よく行おうとするものである。また、省力化は発電用ボイラー・タービン設備が複雑・大形化する中で、熟練運転員の減少傾向に対応するために取り入れられたものである。

そのため、まず複雑な操作を必要とする起動・停止の自動化にコンピュータが投入され、また運転管理用

計測諸量の記録・計算にこれが用いられた。

1) ONE L00Pコントローラ

現代の半導体の性能の進歩と価格の低減が目覚ましく、1980（昭和55）年ころ調節計として計算機を内蔵したONE L00Pコントローラが用いられた。これは制御系を従来のアナログ式からデジタル式へ変換するもので、制御の精度を大幅に向上させることができた。

2) 階層式制御器

上述のONE L00Pコントローラでは勿論高度な制御は出来ないで、計算機を階層・分散的に設けて自動制御の全デジタル化が図られた。これは上位に大形計算機を、中位にミニコンピュータを、下位にONE L00Pコントローラを用いて階層化するもので、下位の制御系が故障してもその影響が全体の制御系に及ばないようにしている。また、各階層の制御器を二重に設ける多重化・冗長化が用いられる。

デジタル制御器の信頼性は高くなり、また上述の階層・多重化によって制御系の信頼性が著しく向上したので、ついで制御と操作性の高性能化が図られた。すなわち、起動・停止の完全自動化、異常運転時の対応の自動化、中央操作室における情報管理・操作の集約化（マンマシン・インターフェース）および異常予知・診断である。特に、情報管理・操作の集約化は、従来のように多数の計器の指示を主体とした量・数値

を単に表示するのを止め、それから真に必要な加工データを緊急順に従来データとの対比も行つて視聴覚的に画像表示するものである。

例えば、起動・停止時監視画面がブレイクポイントで自動的にディスプレイに現れ、その異常時には制御系統図が表示され、次に制御ロジックがブロック図の形に表示されてシーケンス渋滞の原因究明や状況把握が出来るようにしている。プラントに異常が生じた場合にはプロセス測定量や警報から異常原因と、その状態に対応した適切な処理・操作が表示される。

異常予知・診断では例えば制御系の異常診断が大いに進み、二重化した機器の信号を相互に比較したり、ループの合理性を計算して異常を見出した場合、機器の動作をロックまたは代替制御を行う。また、発電各設備の寿命診断が行われ、事故に至る前に補修・取換えが行われている。

7-1-4 水管ボイラーの自動制御例⁽¹⁰⁾

図7.2は平衡通風方式の自然循環水管ボイラーの自動制御系統の例を示す。図7.3は工業計器を用いた中・大形ボイラーの制御システムのブロック線図の例を示す。最近の工業計器は、データ管理システムとして接続が容易なコンピュータやデータロガーなどの電子式が多く採用されている。

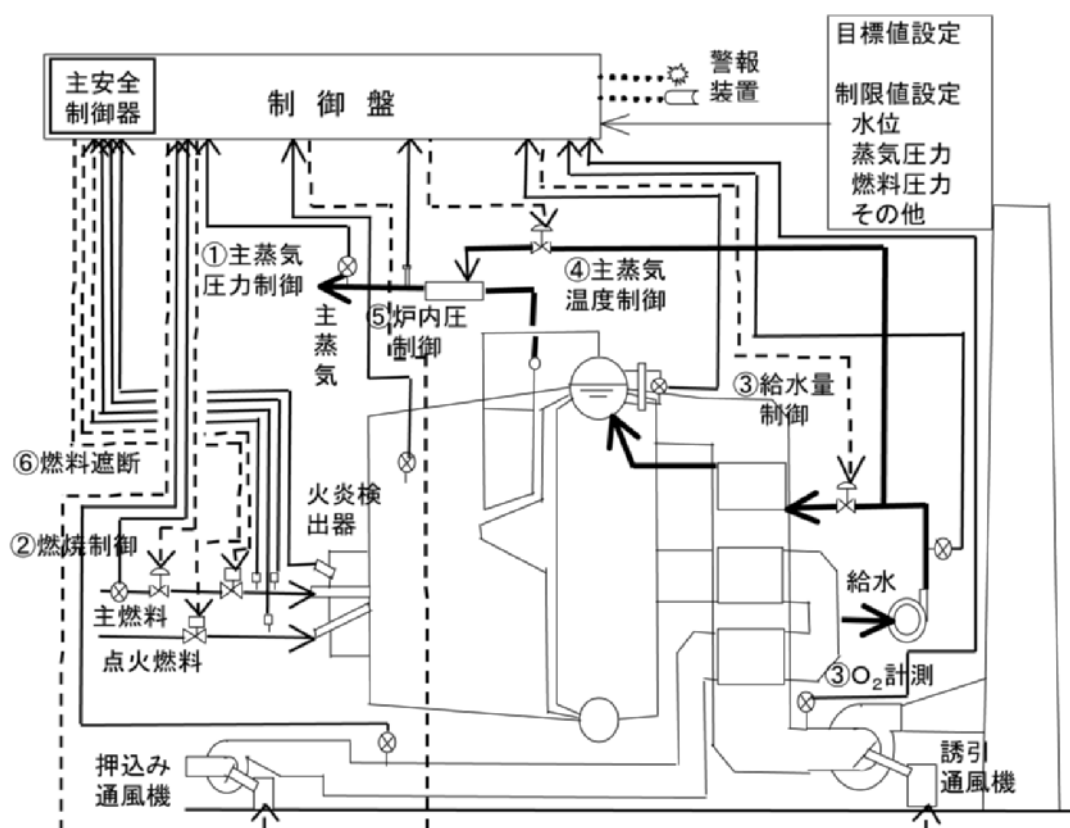


図7.2 ボイラー制御系統の説明図例

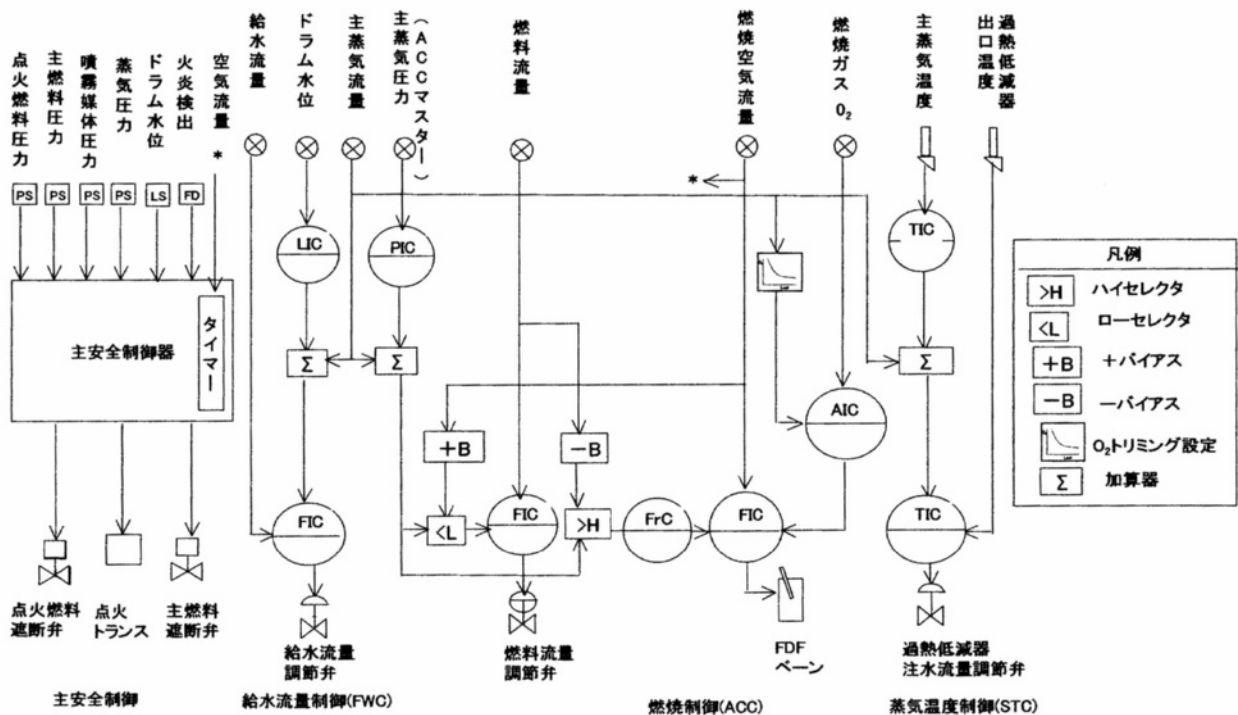


図 7.3 ボイラー制御システムのブロック線図例⁽¹¹⁾

図7.2、図7.3により各制御について概略を述べる。
付番は図7.2に対応している。

- ① 主蒸気圧力制御のための燃焼制御は圧力上昇時には空気先行、圧力降下には燃料先行の方式（クロスリミット制御系統）を採用している。
- ② 燃焼制御はボイラー負荷が上昇して燃料増加の信号が来ても空気量が増加しないうちは燃料流量調節器への出力は増加しない。
- ③ 給水量制御は三要素式を採用し、負荷変動の先行値として主蒸気流量を検出し給水流量の調整を行い、最終的にボイラー水位を目標値となるよう制御している。
- ④ 主蒸気温度制御は、過熱低減器への注水量を調整して過熱器出口蒸気温度を一定にするよう制御される。制御図では負荷に対する蒸気温度特性も組み込んでいる。
- ⑤ 図7.2は平衡通風の場合である。加圧通風では炉内圧制御は不要となる。
- ⑥ 燃料遮断ラインであり、現在のボイラーは主安全制御器が必ず組み込まれ異常時には即時に燃料供給が停止される。

従来、これらの制御には工業計器が多く用いられてきたが、最近では計算機を用いた、DCS (Distributed Computer Control System) の採用が増してきている。⁽¹¹⁾

7.2 水管理技術

近代におけるボイラーの水管理技術は稚拙であり水質による事故が多かった。その後、ボイラー技術が発達するに伴いさらに高度な技術が要求された。これに対処するため現代における水管理技術の発達は著しく、今日の高性能新鋭ボイラーの定着化に向けて水管理技術の果たした役割は極めて大きいといえる。

7-2-1 近代の水管理⁽⁴⁾

18世紀以前はボイラー圧力が低く水に関する関心も低かったため、各種の原水がそのままボイラーに使用されていた。その後、ボイラー性能が高度化するにつれ水に起因する障害としてボイラー内のスケール付着とスラッジたい積が問題となっていった。19世紀に入ってボイラーは圧力が1.5MPaと高くなり、スケール付着とスラッジによる障害が深刻となった。その主因は原水中の硬度成分であることが分かり、沈殿およびろ過法による懸濁物の除去、および化学処理としての水酸化ナトリウム又は炭酸ナトリウムの添加などの水処理方法が開発され使用されるようになった。しかし、これらの方法を採用したプラントはごくわずかで、大部分は無処理のまま原水が使用されていた。特にわが国では、原水が欧米諸国に比べて硬度成分が少なく簡単な清浄剤の添加だけでほぼ支障なく運転できたため

ボイラー水管理技術に関してはあまり関心が持たれなかった。

船用ボイラーでは古くから海水が使用されており、ボイラー水の塩類濃度を規制した管理方法が使われていた。濃度測定にはサリノメータ（塩分計）が用いられ、海水濃度の4倍を超えないことが一応の基準とされていた。船用ボイラーも容量の増大と水管式ボイラーの採用へと進み海水使用による障害も大きくなってきた。海水に代わって淡水使用の道が開けてきた。

7-2-2 現代の水管理⁽¹¹⁾

ボイラーの水管理は、水質に起因する障害および事故の防止を目的とする水質標準を設定し、そのボイラーに該当する水質標準を達成するための管理が必要となる。

水管理は、(1) 補給水処理と (2) ボイラー系統内処理である。その概要を次に述べる。

(1) 補給水処理

- 1) 懸濁物の除去が必要であり、原水をa) 自然沈降法、b) 凝集沈殿法、c) ろ過法を組み合わせ用いて除去する。

2) 溶解性蒸発残留物の除去

イオン状に溶け込んでいる溶解性蒸発残留物を除去する方法には、イオン交換法、膜処理法などがあるが、表7.1 に示すイオン交換法が主に使用される。

(2) ボイラー系統内処理

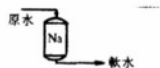
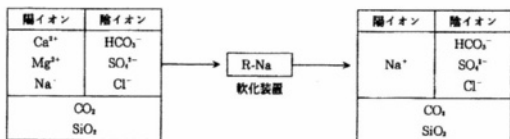
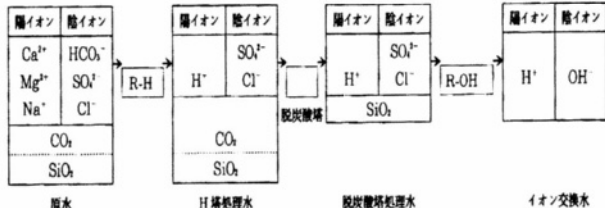
ボイラー系統内処理は、給水およびボイラー水、および復水に対する処理がある。給水およびボイラー水に対しては腐食、スケールの付着、キャリーオーバーなどの障害や事故を防止するため給水を脱気したり、脱酸素剤、pH調節剤、軟化剤、泡立ち防止剤などを給水およびボイラー水に直接添加したりする。また、ブローによるボイラー水の濃度管理を行う。

復水に対しては防食剤を添加するか復水中の不純物を除去するために、ろ過、膜処理およびイオン交換処理を単独又は併用して行う。また、復水系統は溶存酸素 (O_2) および二酸化炭素 (CO_2) によって腐食が発生する。低圧ボイラーでは給水中に水酸化物、炭酸塩、炭酸水素塩などのアルカリ分が含まれるが、これが熱分解することによって二酸化炭素が発生しこれが蒸気・復水系統で凝縮水中に溶解してpHが低下する。これを防止するためpH調節（防食）剤、被膜性防食剤などが使用される。

1) 溶存気体の除去（脱気）

脱気は給水中に溶存している酸素 (O_2)、二酸化炭素 (CO_2) を除去する。その方法は2つあり、脱気器により給水を昇温することにより溶存気体の溶解度の低下により除去するものと、脱酸素剤で給水中の溶存酸素との化学反応により除去するものがある。

表7.1 二つの代表的イオン水交換法⁽⁴⁾

分類	処理方式	イオン交換樹脂の作用
硬水軟化法		 R-Na: 強酸性陽イオン交換樹脂（塩化ナトリウム再生） 陽イオンが、すべて Na^+ イオンに置換する。
イオン交換水製造法		 R-H: 強酸性陽イオン交換樹脂（塩酸再生） R-OH: 強塩基性陰イオン交換樹脂（水酸化ナトリウム再生） 原水成分が、すべて H^+ と OH^- のイオン交換水となる。

2) 清缶剤（ボイラー清浄剤）の使用

水に起因するスケールの付着、腐食、キャリアオーバー等の障害を防止するために給水およびボイラー水に直接添加する薬品である。

3) ボイラー水の濃度管理

ボイラー水は蒸発に伴いしだいに浮遊物と溶解塩類の濃度を増してキャリアオーバーを生じたり、またはスケール、スラッジを生じたりする。これを防ぐためにボイラー水の一部を外に排出し新しい給水と入れ替えて濃度を下げる必要がある。この操作をボイラー水の吹出しという。吹出しの方法には間欠吹出しと連続吹出しがある。

7-2-3 水管理技術の発達状況の概括

表7.2には、1950年以前の近代と1950年以降の現代に2分割したわが国における水管理技術の発達状況の概括を示す。表に見るように、近代には水管理基準がなく、ボイラー用水は飲料水であれば十分としていたようで研究がたりない。また、ボイラー使用中の缶水管理も初歩のものといえる。これに比べて現代の水管理は精緻な技術である。

7.3 環境対策技術

7-3-1 ボイラーから発生する汚染物質⁽⁹⁾⁽¹¹⁾

現代に入りボイラーの設置数が急激に増加し、C重油および石炭だきが多いため、ボイラーから発生する汚染物質として、ばいじん、窒素酸化物、および硫黄酸化物が激増し健康被害が社会問題化した。

次に、各汚染物質の概要を説明する。

(1) ばいじん

ボイラーにおいて燃料を燃焼させる際発生する固体微粒子には、すすとダストがあり両者を含めてばいじんと称している。燃料中の炭化水素は燃焼により分解し、水素原子（H）は水（H₂O）に、炭素（C）は二酸化炭素（CO₂）となるが、その際冷却などにより反応が中断されたり、酸素が十分に供給されなかったりすると分解した炭素がそのまま遊離炭素として残存することとなる。これが“すす”である。

ダストは灰分が主体でこれに若干の未燃分が含まれていて、例えば微粉炭燃焼などによって生じた微粒子灰はこれに当たる。これらが空中に飛散して浮遊するのである。

表7.2 わが国における水管理技術の発達状況

年 代	近代（1950年以前）	現代（1950年以降）
(1) ボイラー用水	○河川水、ろ過水、上水を給水とする ○舶用は海水使用19世紀末から清水	○軟水装置採用 ○イオン交換水の採用
(2) ボイラー水処理方式	○アルカリ処理	○アルカリ処理（低圧） ○りん酸塩処理（中・高圧） ○揮発性物質処理（高圧） ○酸素処理JISに採用
(3) 清缶剤	○天然化合物（さつまいも、茶がら、リグニン塩等） ○アルカリ剤 ○りん酸塩	アルカリ剤、りん酸塩が主流となる更に 1. 多目的複合薬品処理の実施 2. 安全衛生性を考慮した薬品処理の開発
(4) 脱酸素剤	○淡水使用	○亜硫酸塩 ○ヒドラジン
(5) pH調節剤	○水酸化ナトリウム（一部）	○水酸化ナトリウム ○りん酸塩 ○揮発性アミン、アンモニア
(6) 用水処理	○沈殿、ろ過	○イオン交換法 前期軟化装置主流 後期脱塩装置主流 ○脱塩装置高度化 ○ポリッシャー付脱塩装置 ○復水脱塩装置
(7) 水管理基準	○なし	○JISB8223 ボイラの給水および ボイラ水の水質制定（1961）

ばいじんの人体への影響は呼吸器の障害である。特に慢性気管支炎の発症には重大な影響を与えている。

(2) 窒素酸化物

一般に大気汚染物質としての窒素の酸化物は、一酸化窒素 (NO) と二酸化窒素 (NO₂) である。このほかに数種類の化合物があり、これらを総称して窒素酸化物 (NO_x) という。

排ガス中のNO_xは大部分がNOであるが、煙突から排出されると大気中のO₂で酸化されてNO₂になる。これが大気中の水分に溶けて酸性雨の原因にもなるといわれる。

NO_x は燃料中のN分に起因するフューエルNO_xと空気中のN₂に起因するサーマルNO_x とに区分される。フューエルNO_x は燃料中のN化合物が多いほど大きくなり、また両者とも①燃焼温度が高い、②高温域の滞留時間が長い、③燃焼域でのO₂濃度が高い等の条件で発生量が大きくなる。

(3) 硫黄酸化物

ボイラーの煙突から排出される硫黄の酸化物は、二酸化硫黄 (SO₂) とSO₂の一部が燃焼ガス中の酸素により酸化された三酸化硫黄 (SO₃) が主なものである。このほかに硫黄の酸化物としては数種類のものがあり、これらを総称して硫黄酸化物 (SO_x) という。SO_xは人体への影響も大きく、呼吸器系統の障害および循環器も冒す有害物質である。なお、1950～1970年代のボイラーから発生する汚染物質を燃料種別によって、概略値を表7.3に示す。

7-3-2 低減対策全般⁽⁹⁾

(1) ボイラーにおける発生源対策

環境対策としてボイラーにおける発生源対策が最も重要である。汚染物質の発生量が少ないほど公害低減対策が簡便になり、また安価にもなる。省エネルギーの観点からも適度な火炉とバーナの選定が肝要である。

一般的に小形ボイラーは良質燃料を用い、附帯環境設備が不要とする方向を採る。中・大形ボイラーは粗

悪燃料でも十分な環境設備を設置し、安価な燃料で費用回収が図れるようにする。

(2) 燃料の良質化

ボイラーにおける大気汚染防止の観点からその対策としての第一歩は燃料の良質化、すなわち、

- 1) 硫黄分、窒素分、残留炭素分、灰分などの大気汚染原因物質を含まないか、より少ない良質な燃料を使用する“良質燃料への転換”
- 2) 燃料中の硫黄分、窒素分、残留炭素分等を除去する燃料の脱硫・脱硝技術などによる“燃料の改質”にある。

(3) 燃焼の管理

規制対象であるSO_x、NO_x、ばいじんのうちSO_xについては前述したように、燃料中の可燃性の硫黄分が燃焼によって100% SO_xに転化するものとして燃料中の硫黄含有率より単純な燃焼計算によってその生成量を算出することができる。NO_xとばいじんの生成量は、燃料と空気の初期混合条件（噴霧粒径、空気比、運動量比など）、火炎温度に関与する諸因子（空気温度、炉壁温度、火炉負荷など）によって左右される。

また、これらの諸条件は燃料の良質化、火炉負荷の軽減などを除いては、概して、NO_xとばいじんの抑制に対して相反する方向に作用するため、両者の抑制の両立を困難なものとしている。NO_xを減らそうとするとばいじんが増え逆にばいじんを減らそうとするとNO_xが増えるという燃焼の特性の中で、NO_xとばいじんの両者の抑制を同時に図るためには、燃焼諸条件がこれらの生成にどのように関与しているかを十分に理解し把握したうえで、それぞれの生成量を最小化するようにボイラーごとに条件値を確定し、これらを常時維持できるような燃焼管理の強化が必要となる。

7-3-3 ばいじん対策の概要⁽⁹⁾

(1) ばいじんの抑制

図7.4 は大気汚染物質の発生に関与する燃焼の条件を示したものである。ばいじんを抑制するためまず注

表7.3 汚染物質の一般的な発生数値⁽⁹⁾

燃料種別	ばいじん (g/m ³ N)	NO _x (ppm) (O ₂ 換算)	SO _x (ppm)	CO ₂ (%)
灯油	トレース	70～140 (4%)	1～10	12～15
A重油	0.01～0.10	80～150 (4%)	45～600	12～15
C重油	0.30～0.50	185～225 (4%)	200～2,000	12～15
都市ガス	トレース	60～120 (0%)	トレース	7～9
LPG	トレース	80～150 (0%)	トレース	7～13
石炭	10～30	250以下 (6%)	400～1,000	7～13

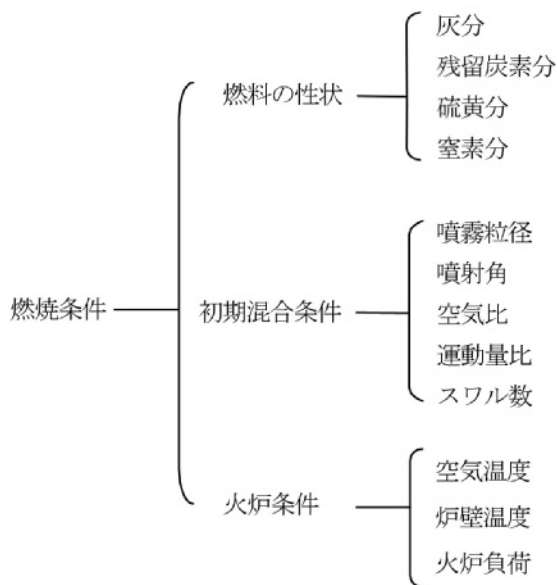


図7.4 ばいじんの要因

目しなくてはならないのは燃焼技術であり、また、燃焼の管理である。燃料の完全燃焼に必要な最少の空気量は理論空気量（空気比 $m=1$ ）であるが、現実的に完全燃焼を行うには多少過剰の空気を供給する（ $m>1$ ）。しかし、この過剰空気の量はできるだけ少ない過剰空気で良好な燃焼を行い、ばいじん発生を抑制することが燃焼技術の基点である。燃焼方式は燃料の種別によっていろいろあるが、基本的な考えは燃料と空気の混合を良くし燃焼のための時間を十分取ることである。さらに火炉の大きさは火炎の大きさに応じて選定する必要がある、両者が適合しないと火炎が水冷壁に接触してすすを発生したり燃料が完全燃焼しないままで火炉から出て行く。⁽⁷⁾

(2) 集じん装置の種類 表7.4は、ばいじんを除去する各種集じん装置の概要である。

以下、1)～6)は各種集じん装置の種類と特徴を挙げる。

1) 重力集じん装置

図7.5のように含じんガス中の粒子を重力による自然沈降によって分離捕集する装置で、1段のものと多段の沈降室をもつものがある。

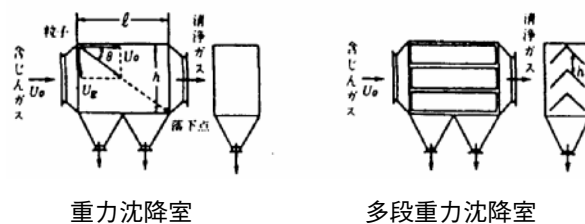


図7.5 重力集じん装置

2) 慣性力集じん装置

図7.6に示すように含じんガスを邪魔板などに衝突させ気流の急激な方向転換を行い粒子の慣性力によって分離する装置である。

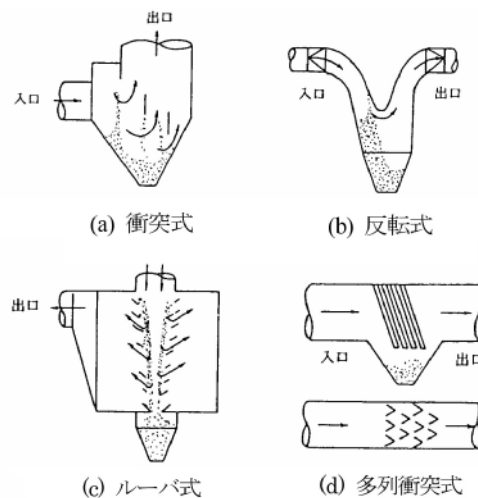


図7.6 慣性力集じん装置

3) 遠心力集じん装置

含じんガスに旋回運動を与え、粒子に作用する遠心力によって粒子をガスから分離捕集する装置で、普通サイクロンと呼ばれている。サイクロンは図7.7に示すように排ガスを排気管の接線方向から導入し旋回運動を与えて分離するものである。小口径のサイクロンを多数並列に採用するものをマルチサイクロンと呼んでいる。

4) 洗浄集じん装置

図7.8は加圧水洗式集じん装置を示す。液滴、液膜、気泡等によって含じんガスを洗浄し粒子の分離を行う。

表7.4 各種集じん装置の性能と特徴

分類名	形式	粒度(μm)	圧力損失(Pa)	集じん効率(%)	設備費	運転費
①重力集じん装置	沈降室	50～1000	100～150	40～60	小程度	小程度
②慣性力集じん装置	ルーバ形	10～100	300～700	50～70	〃	〃
③遠心力集じん装置	サイクロン形	5～100	1000～2000	70～95	中程度	中程度
④洗浄集じん装置	ベンチュリ	0.1～100	3000～8000	80～95	〃	大程度
⑤ろ過集じん装置	スクラバ	0.1～20	1000～2000	90～99.9	〃	中程度以上
⑥電気集じん装置	バグフィルター	0.1～20	100～200	90～99.9	大程度	小～中程度

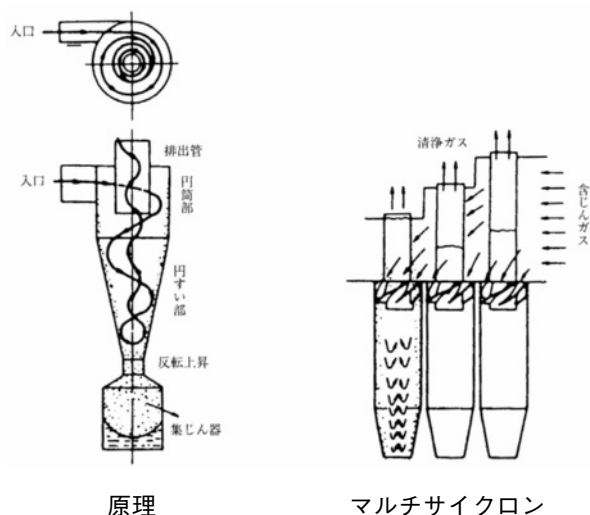


図7.7 サイクロン

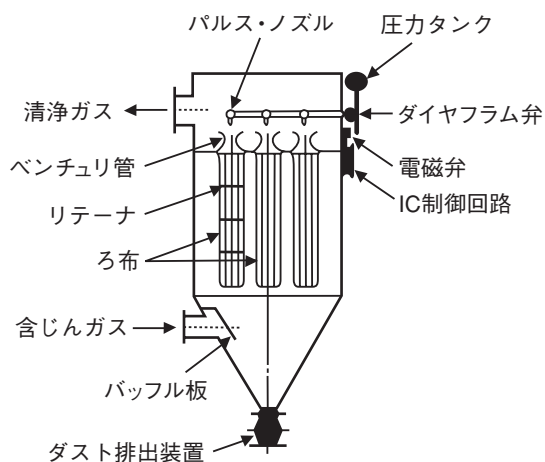


図7.9 パルスジェット形フィルタ

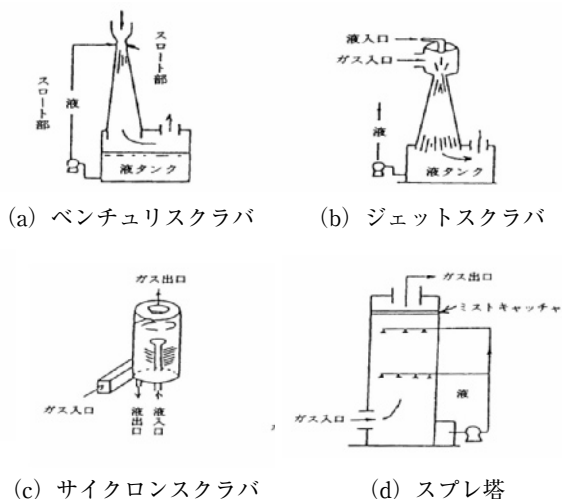


図7.8 加圧水洗式集じん装置

装置で、留水式、加圧水式がある。留水式洗浄にはロータ形噴水形、ガイドベーン形等があり、加圧水式洗浄にはベンチュリ形、サイクロン形、ジェット形等のスクラバや充てん塔が使用される。水を多量に使用するから有害ガスも除去できるが、排水処理に留意する必要がある。

5) ろ過集じん装置

図7.9に示すように、含じんガスをろ布を通して粒子を分離捕集する装置で一般にバグフィルタと呼ばれている。ろ布の材質によって耐用温度が定まり、木綿で80℃、人造繊維で100～150℃、ガラス繊維でも250℃程度が上限であり、高温ガスの処理には適さない。高温用にはセラミックを使う例がでてきている。場合によっては処理ガスに空気を注入してろ布の許容温度以下に下げる場合もある。一般的に集じん効率は高く例えば流動層ボイラーのように炉内脱硫を行うために石灰を炉内に注入すると、電気集じん装置で捕集できないダストも発生するからバグフィルタを利用する。

6) 電気集じん装置

特高压直流電源によってコロナ放電を起こさせガス中の粒子に電荷を与え、この帯電粒子を「クーロン力」によって集じん極（十）に分離捕集する装置である。図7.10は電気集じん装置の原理を示す。放電極を負、集じん極を正とした電場の高压直流電圧を適当に高めてゆくと、いわゆるコロナ放電現象を起こし正イオンは直ちに放電極に中和され、負イオン電子は集じん極に向かって走行するようになる。この電場に排ガスを通すと、ばいじんは負電荷を得て集じん極に吸引される。

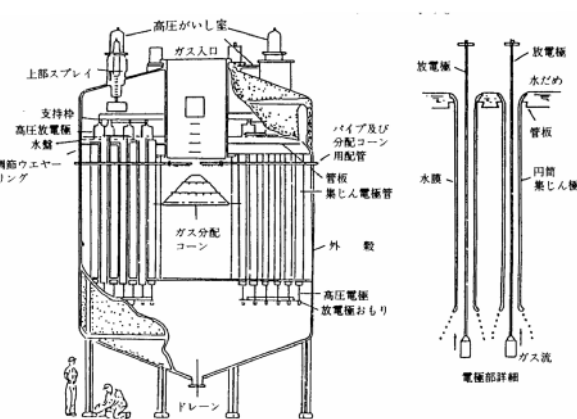


図7.10 湿式電気集じん装置（管形集じん極）

(3) ばいじんの規制

ここで表7.3に汚染物質の一般的な発生数値があり、表7.5にその排出基準とこれを守るための対策例を、代表的ボイラー施設について調べる。ガス専焼ボイラーは発生ばいじんがトレースなので対策は要らない。C重油ボイラーおよび石炭専焼ボイラーは次に述べる窒素酸化物および硫黄酸化物対策も負担となるので、ボイラー施設の規模と使用燃料および環境対策費等のコスト回収計画を慎重に検討しなければならない。

表7.5 ボイラー施設とばいじん対策例⁽⁵⁾

施 設	排出ガス量 (m ³ _N /h)	表7.3の汚染物質 (g/m ³ _N)	排出基準 特別 (g/m ³ _N)	集じん機対策例
ガス専焼ボイラー (約40t/h)	40000以上	トレース	0.03	必要なし
液体専焼ボイラー (C重油約200t/h)	200000以上	0.30～0.50	0.04	90%以上の低減が必要となり 他の重対策と併せて検討となる。
石炭専焼ボイラー (約200t/h)	200000以上	10～30	0.05	99%以上の低減が必要となり 他の重対策と併せて検討となる。

(注：表に記す施設・規模の区分は多岐にわたるので、3例に止めた。)

7-3-4 低NO_x技術⁽⁹⁾

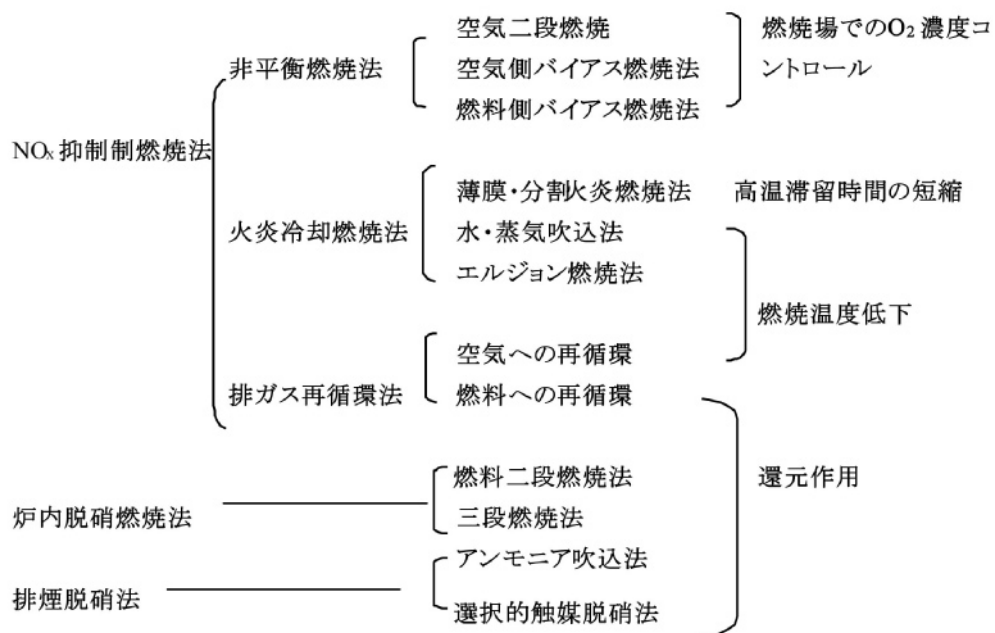
(1) 低減対策⁽⁹⁾

ボイラーのNO_x低減対策は、大きく分けてNO_x抑制燃焼法と炉内脱硝燃焼法および排煙脱硝法とがある。図7.11にこの対策系列を示す。

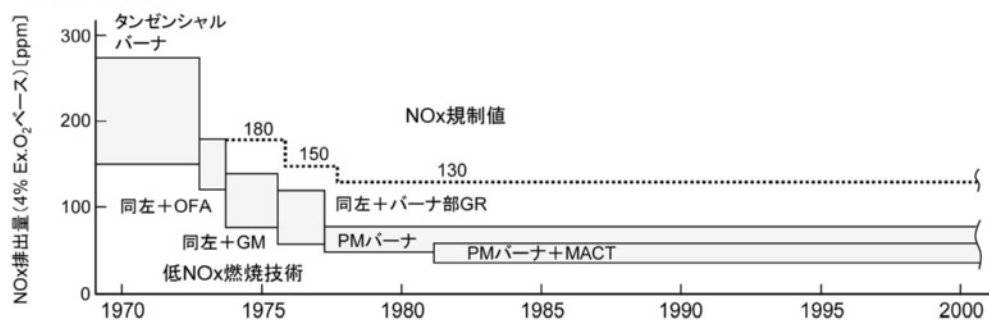
排煙脱硝装置は大別して乾式法と湿式法に分けられるが、主として用いられているのは乾式法である。このうち現在実用化されているものは、アンモニア(尿素)吹込法(無触媒還元法)と選択的触媒脱硝法である。

(2) NO_x抑制燃焼法

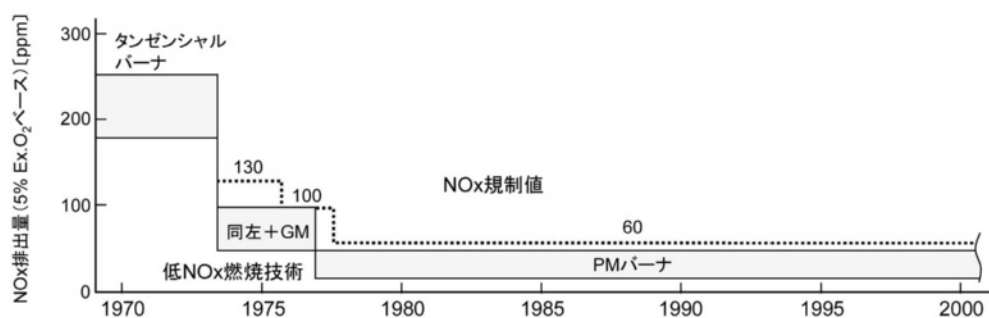
NO_x低減の第一歩は、燃料に合った火炉の大きさ、性能のよいバーナを装備し、良質燃料で行くか、または重対策の汚染物質処理設備を置くかを選択しなければならない。図7.11に低NO_x燃焼法の代表的項目を挙げたが、その詳細は各社の方式によって多岐にわたり、簡単に評価・分析した記述は出来ない。図7.12は、事業用ボイラーの低NO_xバーナの開発推移の例を取りまとめた希少な資料である。

図7.11 低NO_x燃焼法および脱硝法の分類⁽⁹⁾

＜油焼きボイラ＞



＜ガス焼きボイラ＞



＜石炭焼きボイラ＞

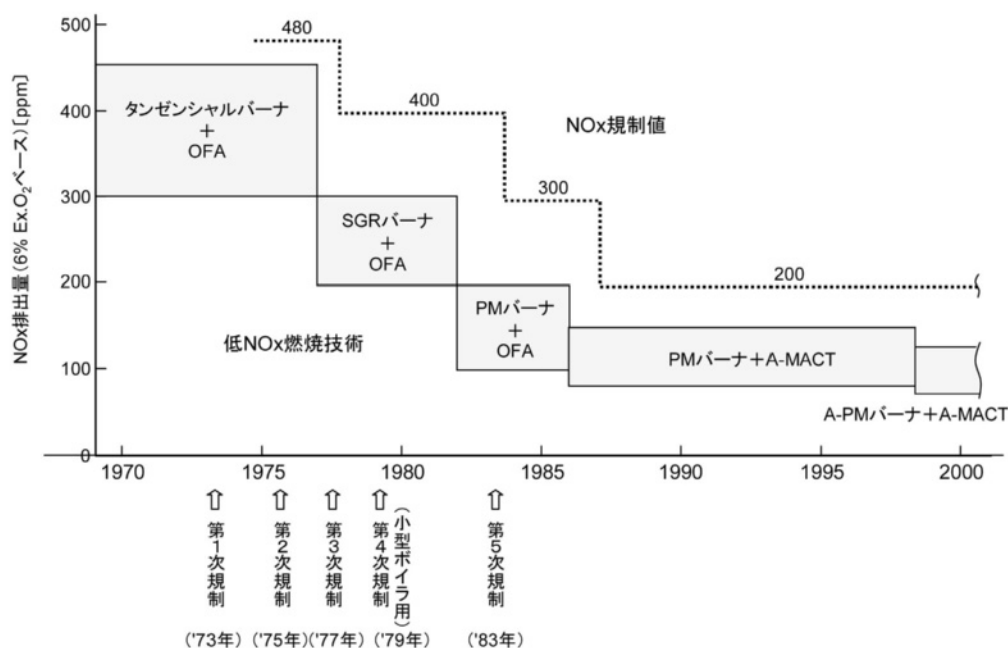


図7.12 事業用ボイラー低NOx燃焼技術開発推移の例⁽³⁰⁾

(図の注記)

タンゼンシャルバーナー：箱形火炉下部の四隅から旋回火炎を形成するように燃焼する方式。

OFA（Over Firing Air）：バーナ上部より別途燃焼用空気を吹き込む燃焼方式。

PMバーナ（Pollution Minimum Burner）：濃・淡火炎を形成することにより、NOx低減を図るバーナ。

SGRバーナ（Separate Gas Recirculation Burner）：バーナ間に排ガスを投入しNOx低減を図るバーナ。

A-MACT（Advanced- Mitsubishi Advanced Combustion Technology）：火炉上部に追加空気を投入し、二段燃焼を行わせることにより還元域を形成し炉内脱硝を行うもの。

GM（flue Gas Mixing）：排ガスを燃焼用空気中に混合するもの。

GR（flue Gas Recirculation）：排ガスを火炉に投入するもの。

(3) 無触媒還元法

無触媒還元法は図7.13に示すように、700～900℃の高温排ガス中にアンモニア水または尿素水を添加してNO_xをN₂に還元する方法で、設備費、運転費が他より安価であるが、反応する時間（空間）が必要となるので中小規模ボイラーには向かない。

固形燃料だき大形ボイラーは、液体、気体燃料だきボイラーに比べて火炉容積が大きいいため比較的方法を採用しやすい。

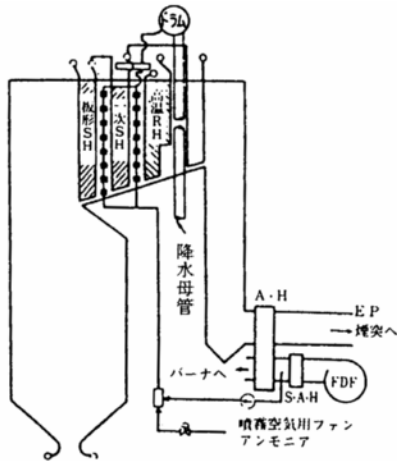


図7.13 無触媒脱硝法の概要図⁽⁹⁾

(4) 選択的触媒脱硝法

図7.14に示すように、適当な触媒の存在下で還元剤を添加するとNO_xが容易に分解してN₂ガスとなることを利用するものである。このうち、NO_xだけを選択的に還元するものが選択的触媒脱硝法で、還元剤には一般的にアンモニアが用いられている。この方法については、日本から米国・欧州へ技術供与している。

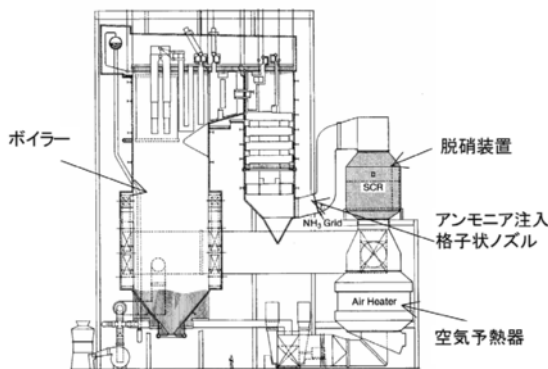


図7.14 選択的触媒脱硝法の配置例⁽⁹⁾

7-3-5 硫酸化物抑制対策⁽⁷⁾

燃料中にS分があれば必ずSO_xは発生する。ボイラー本体では処理できない。ただし、SO₃の発生は抑制できる。

SO_xによる大気汚染の防止方法には次の3つが考

えられる。

- 1) 硫黄含有量の少ない燃料を使用する。
- 2) 燃焼排ガス中のSO_xを除去する。
- 3) 煙突を高くしたり、あるいは排ガスの排出速度を大きくし、排出温度を高くして大気への拡散を容易にする。ただし、この手段は大気中のSO_xの総量を低減するのではなく、結果的にSO_xを広範囲に拡散することになり、酸性雨の問題を引き起こすことになるので慎重な考慮を加える必要がある。

(1) 硫酸化物の規制

これには①SO_xの着地濃度を抑えるk値規制と②施設単位でのSO_x総量規制がある。

下記に横浜市で低硫黄重油を使用する200t/hボイラーの場合を試算した。

- ① 計算例 横浜市にて200t/hボイラーをC重油（s分0.5%）煙突高さ 100m 排出ガス速度30m/s 温度200℃として使用できるか。このボイラーのでは、排出ガス量は約53m³_N/hである。計算結果はSO_x許容排出量74 m³_N/h となり、k値規制では低硫黄重油（0.5%）は使える。
- ② 総量規制では、横浜市のケースでSO_x 許容排出量は17m³_N/hとなるので、とても使えない。結論として低硫黄重油でもこの例では使用できないことになる。

2) SO_xの除去⁽⁹⁾

排ガス中のSO_xを処理する排煙脱硫装置は湿式と乾式に大別されるが、表7.6に示すように現在使用されているものの大部分は湿式法で、なかでも大形ボイラーでは吸収剤として石灰石あるいは消石灰をスラリーとして石膏を回収する方法が最も多く用いられている。中形ボイラーでは水酸化マグネシウムを吸収剤とする方法が多く用いられている。図7.15には石灰—石膏法のプロセスフローシートを示す。

表7.6 排煙脱硫方式の分類⁽⁵⁾

施設	吸収剤	回収物
事業用ボイラー	石灰石あるいは消石灰スラリー	石膏
産業用ボイラー	水酸化マグネシウム	硫酸マグネシウム水溶液として排出

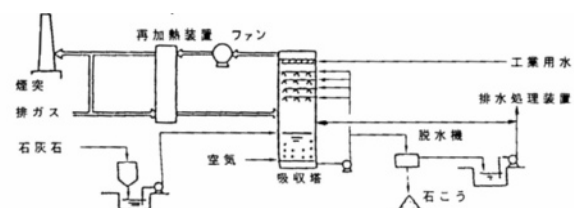


図7.15 石灰—石膏法のプロセスフローシート

7-3-6 CO₂による地球の温暖化⁽⁷⁾

地球表面は太陽からの光と熱を受けとめて暖められ、また地表で発生した熱の一部は赤外線形で宇宙に放散されるので均衡がとれ、地表の温度は一定に保たれている。大気中のCO₂、CH₄等は、特定の波長の赤外線を吸収するから地表からの放熱を防ぐ蓄熱作用をもっている。これを温室効果という。

したがって、CO₂の排出量が限度を超せば気温が上昇して氷山が融け、低地帯は水没の運命に遭いオランダ周辺などは被害甚大となる。地球温暖化を防止するために各国が進んでCO₂の削減に努力するように協議している。わが国もCO₂の発生がない石油代替エネルギーとして、水力、原子力、地熱、太陽熱等の開発に力を注いでいる。

図 7.16にCO₂の排出量を燃料の発生熱量を一定ベースとして比較したもので、れき青炭を1とした場合の比率で示す。

二酸化炭素は燃料中の炭素が燃焼してCO₂となる。発生量は理論燃焼時のCO₂が最大となるので(CO₂)maxという。実用時は過剰空気により薄まるが、CO₂絶対量の変化はない。

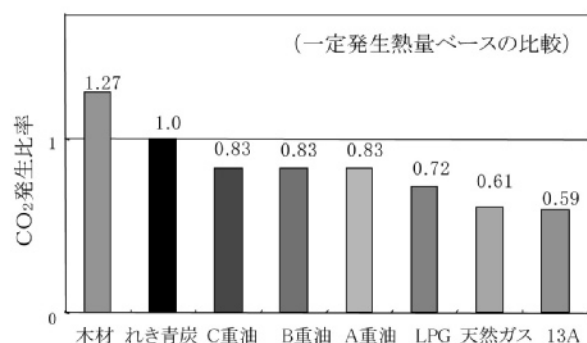


図7.16 燃料別のCO₂発生量

化石燃料の燃焼によって生じる二酸化炭素(炭酸ガス)は、かつては無害なものと考えられていたが、近年は地球温暖化の原因物質としてその排出抑制が世界的に問題となっている。地球温暖化の原因物質には二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、フロンが挙げられる。他の物質に比較して二酸化炭素の温室効果は相対的には小さいが、人類のエネルギー使用量の急激な増加によってエネルギー起源の二酸化炭素の排出量が急増した。その結果大気中の二酸化炭素濃度が顕著に増え、1800年代に280ppmであったものが現在では360 ppm以上に達している。この二酸化炭素の濃度上昇の結果1900年からの100年間で全地球の平均気温が約0.8℃上昇するという地球温暖化傾向を生んでいるとされている。二酸化炭素とともにメタンや一酸化二

窒素(N₂O)のもつ温暖化効果を考えると、ともに排出規制が必要であることが認識されている。

7.4 溶接技術

7-4-1 近代(1950年以前)のドラム製作

(1) ドラムの製作

水管ボイラーでは1ないし数個のドラムを使用する。ドラムは水管等に比し直径が大きいから蒸気圧力が高くなるとその厚さが増し、その厚さを適当にするためには直径を小さくし、かつ、特殊の強い材料を使用しその製作にも特別の注意を払わなければならない。3.5MPa以下の圧力に対してはリベット締胴を使用するが、圧力3.5~5MPaの高圧缶に対しては胴体を1個の鍛造品とするか、少くも充分念入りに施工した溶接胴に鏡板をリベット締めしたものを使用する。圧力が5MPa以上になると全体を単一の鍛造品としその両端に人の出入し得る大きさの孔を設ける。材料としては炭素鋼を使用するのが普通であるが、またCr-Mo鋼あるいはCr-Ni-Mo鋼のような特殊鋼を用いて肉厚を減じ、その重量および加熱による応力を出来るだけ少なくするようにしている。このようにドラムは蒸気圧力が高くなると肉厚が厚くなり材料費も製作費も増加して高価になるのみならず、不均等な加熱が行われる時は大きな熱応力を生じ破壊の原因となるから、高圧ボイラーではドラムの数をできるだけ減じ、かつ、熱ガスで直接熱せられることのないようにレンガ壁などで保護するのが普通である。⁽¹⁾

(2) ドラム破壊試験

上記のような状況からリベット締胴または高価な単一の鍛造品では、ドラムの中に入り作業するのに十分な口径、例えば600mm以上のドラムを製作することは不可能であった。そこで溶接によるドラムの製作が待望され、溶接部の強度を確認するための破壊試験が始まった。1922(大正12)年平川鉄工所は大阪府工業試験所で溶接部の破壊試験を実施した。1938(昭和13)年三菱重工業 長崎造船所は、図7.17に示す溶接ドラム破壊試験を実施した。溶接部は何ら異常のないことが実証され、当時の電気庁の火力課といろいろ検討の結果、内諾を得ることができた。このようにして1940(昭和15)年にわが国最初の溶接ドラムが完成した。この時の規定案はだいたいASMEの規定を基としたものであったが、やがてわが国の汽缶溶接規定の基となったものである。^{(26) (27)}

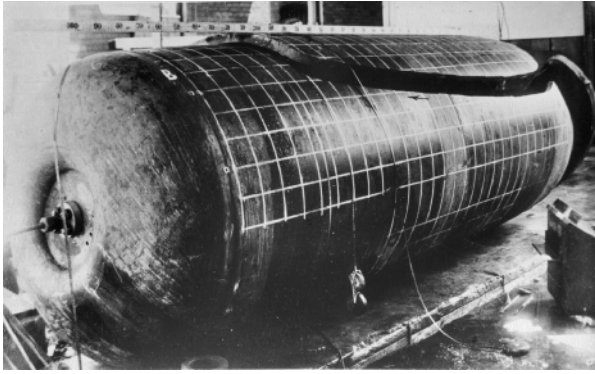


図7.17 溶接ドラム破壊試験⁽²⁵⁾

(3) 溶接規定の制定

1948（昭和23）年労働安全衛生規則（汽缶関係）第2輯 汽缶及び特殊汽缶構造規格が発行され、溶接によるドラムの製作法が正式に制定された。

その要点はつぎである。

第1条 鋼板製汽缶又は鋼板製温水缶の構造規格は、この章の規定による。但し、次の各号の一に該当するものはこの限りでない。

1 蒸気の圧力が6MPaを超えるもの

2 蒸気の温度が450℃を超えるもの

第19条 胴の長手鉋継手は、次の各号（省略）によらなければならない。

第127条 水圧試験における水圧力は、次の各号による。
(1～4,6省略)

5 過熱器又は水管缶の管寄せおよび溶接又は鍛接した胴では、制限圧力の1.5 倍の圧力
前項第5号の水圧試験にあっては、孔をあける前に、これを行わなければならない。⁽¹⁶⁾

ここで溶接により製作する胴が初めて登場し、制限圧力の1.5倍の水圧試験をすることが規定されている。また、「前項第5号の水圧試験にあっては、孔をあける前に、これを行わなければならない。」とある。ドラム単体の加工の良否判定には、溶接作業終了後に熱処理をし水圧試験が決められた。水管ボイラーは多数の水管を拡管にて取り付けるので、その管挿入の孔開け前に水圧によりドラム単体の強度を確認し、作業の後戻りを防ぐよう決められた。

7-4-2 現代のボイラーおよびドラム製作⁽³⁾

ASME ボイラー・圧容器規格では、圧容器部品の継手として融接法は1931年版まで認められなかった。また、1962年版に至るまでセクションIもセクションVIIIも後熱処理と予熱の項目を含んでいなかった。

た。今日、セクションI、III（核容器）、およびセクションVIIIですべての溶接物は後熱処理（PWHT）が必須である。現代の代表的二胴水管ボイラーの構造を図7.18に示す。その主なボイラー部品の溶接接合部分は次のようになる。

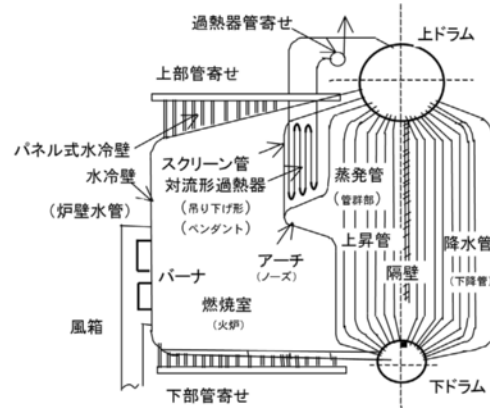


図7.18 二胴水管ボイラーの構造例

(1) 上下ドラムはすべて溶接により製作される。図7.19に溶接ドラムの主な継手として長手継手と周継手を示す。いずれも溶接開先を精密に加工し溶接員が自動溶接機を正確にセットして一定の溶接量と速度が維持されてドラムが製作される。

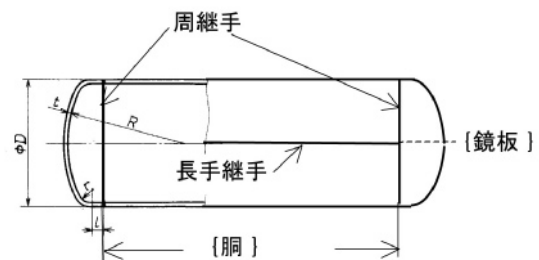


図7.19 溶接ドラム主な継手

- (2) パネル式水冷壁はパネルとなる管と管をマグ溶接法 (MAG-Metal active gas welding) の一つである炭酸ガス溶接法により大きな板状パネルを製作する。次に、上下の管寄せにパネル両端の多数の管端を差し込み、自動ロボット溶接にて各管端の溶接開先形状に沿いながら自動的に溶接作業が進む。
- (3) 過熱器は例えば図7.18のように全長が48mある場合、8mの管を6本用意し、この管を長いローラで送り、管の合わせ面を自動円周溶接機にて接合し先へ送る。そこにはターンテーブルがあり、溶接された過熱器管をU字に曲げる。これを連続的に進めると図のような過熱器コイルが自動製作される。
- (4) 過熱器用の管寄せは、長いパイプの両端にふた板を円周溶接にて自動溶接する。また、多数の短管ノズルを自動ロボット溶接にて取り付ける。

7-4-3 溶接方法の種類

現代では多種類の溶接方法が開発されている。この中でボイラー製作に使用されるものを図7.20に示す。

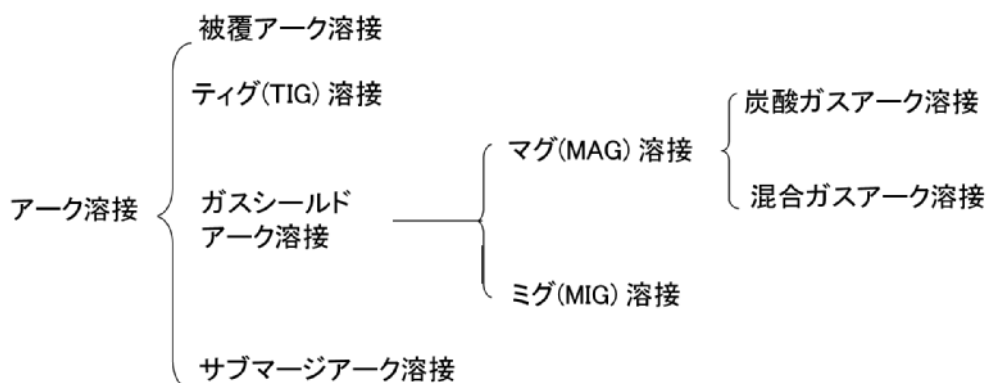


図7.20 溶接方法の種類⁽³⁸⁾

7-4-4 狭開先溶接法

溶接される母板の厚さが大きくなると、V、XおよびU開先などでは板の表面に近くでは開先幅が大きくなり、溶接量が極端に増大する。これに対し開先底部から表面まで10～15mm幅のほぼ平行な開先とし、特殊な機構を持った自動ミグ溶接装置あるいは特別に設計された溶接材料によるサブマージアーク溶接により、良好な継手を経済的につくる方法が研究され、厚さ200mmくらいまでの板の接合に実用化されている。⁽³⁾

パプコック日立は、1978年世界で最初に波状ワイヤによる狭開先MIG溶接法を開発し、原子炉圧力容器の溶接に適用して狭開先溶接技術を完成した。ボイラー耐圧部等板厚25mm以上の工場溶接部材はすべてに狭開先溶接を採用し、溶接冶金面からも検討を行い、優位性、高温・低温割れ防止技術を明らかにし予熱温度の低下と中間焼鈍の省略を図った。これは製作のコスト低減と製作期間の短縮に大きく寄与した。

また、ボイラの蒸気条件の超々高温・高圧化と共に、高温強度新材料の溶接条件の適正化研究が本格的に開始され、ホットワイヤスイッチングTIG法およびパルス加熱法を開発するなど溶接作業性を著しく改善した新ホットワイヤ溶接法を、あらたに開発されるボイラーに9～12% Cr鋼の採用が急増してきた現在、ホットワイヤTIGは必須技術として活用されており、狭開先MIGと併せ世界に誇れる溶接技術となっている。⁽²²⁾

くことが肝要である。また、施行方法を理解し、使用される材料の検査から工作終了までに実施される試験・検査の種類、時期および方法を具体的に定めておかなければならない。工事に行われるものについては、工作関係者との間に十分な協議が必要である。現在試験・検査に利用されている方法は図7.21に示すように破壊試験と非破壊試験とに大別される。

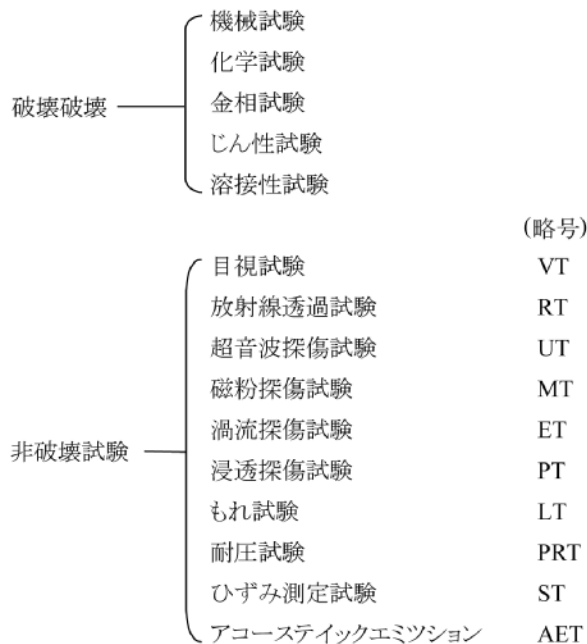


図7.21 溶接継手試験法の分類

7.5 非破壊検査技術⁽³⁾

7-5-1 非破壊検査一般

試験・検査を実施するにあたっては、工作物の利用目的、設置場所の環境、稼動状況を精細に理解してお

7-5-2 材料の非破壊試験

一般のボイラー・圧力容器用材料については、溶接継手の試験方法と同様の非破壊試験が行われる。

(1) 目視試験

ボイラ構造規格においては有害な欠陥のないことと

されている。WES2803-1984「圧力容器用鋼板の表面きずによる等級基準」、WES2804 1984「圧力容器用鋼板のラミネーションによる等級基準」（いずれも日本溶接協会制定）では、きずまたはラミネーションの存在について数量的表示により鋼板を分類することができるようになっている。

(2) その他の非破壊試験

鋼板に対する非破壊試験は目視のほかは一般には行われていない。必要に応じ超音波探傷試験および浸透探傷試験または磁粉探傷試験が行われている。高圧ガス取締法では厚さ50mm以上の炭素鋼材についてこれらの試験を実施するよう規定されている。その方法はJISG0801「圧力容器用鋼板の超音波探傷検査」、JISZ3060「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」およびJISG0565「鉄鋼材料の磁粉探傷試験方法及び磁粉模様の分類」またはJISZ2343「浸透探傷試験方法及び浸透指示模様の分類」によることとされている。

鋳鋼品については別にJISG0581「鋳鋼品の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」があり、鍛鋼品については「炭素鋼及び低合金鋼鍛鋼品の超音波探傷試験方法及び試験結果の等級分類方法」（日本非破壊検査協会制定）があり参考として用いられている。

7-5-3 溶接部の非破壊試験 (N.D.T)

(1) 溶接欠陥と非破壊試験

溶接継手の外観検査をいかに厳格に行っても内部欠陥は発見することは不可能で、非破壊試験によらなければならない。溶接部の内部欠陥とは通常次のものをいう。

- 1) ブローホール（気孔）
- 2) スラグ巻込み
- 3) 溶込不良又は融合不良
- 4) 割れ（表面にあらわれているものは外部欠陥として検査）

一方、溶接欠陥の発見には次の4つの非破壊試験法が用いられている。

- 1) 放射線透過試験
- 2) 超音波探傷試験
- 3) 磁粉探傷試験
- 4) 浸透探傷試験

(2) 放射線透過試験

非破壊試験法のうち最も広く用いられている方法である。X線又は γ 線のように短い波長の放射線を溶接部に透過させると欠陥部と健全部とでは透過する放射線の吸収のされ方が異なるため写真フィルムに欠陥の形に相当する濃淡像を生じる。これによって欠陥を発見するものである。

(3) 超音波探傷試験

超音波とは耳に聞こえる音波より更に短い波長の音波で、超音波探傷試験はこの超音波が一定方向にだけ進む性質（指向性）を持っていることを利用したものである。超音波を試験体にむけて発射したとき内部に欠陥があれば反射した音波が戻ってくる。この反射波の強さと反射までの時間を計測して欠陥の大きさと位置を知ろうとするものである。すなわち船舶や航空機を発見するレーダーと同じ原理で、反射波の強さや反射までの時間を正確に読みとるためブラウン管が内蔵された機器を用いる。

放射線写真では、欠陥の像が分かるため欠陥を具体的につかむことができるが、超音波探傷において反射波の高さや位置だけではかなり教育訓練を受けないと欠陥の実体をつかみにくいことや波形の記録しか残せないなどの欠点がある。しかし、放射線試験に比べ次の利点があり、今後、大幅に利用されることが期待されている。

- 1) 検査機器が小さく軽く携帯に便利で高所作業も容易であること。
- 2) 現像処理、フィルム観察器が不要でその場で可否の判定が可能であること。
- 3) 放射線障害がないので、附近の作業を中断する必要がないこと。

7-5-4 ボイラー製作時の非破壊検査の実態

ボイラーは溶接構造物であり、製作時に溶接部に対してその健全性を確認し信頼性を向上させるための品質管理の手段として非破壊検査を実施する。主要耐圧部については、適用検査手法、検査方法や判定基準が種々の法規に規定されている。また、法規に規定されていない部位については製造者が自主的な検査によって品質を確保する

(1) ドラムの検査

ボイラー耐圧部の主要構成品であるドラムは、胴板、管板、端板を溶接により一体化する。ドラムの円周方向と長手方向の溶接主継手に対しては全溶接部にわたりフィルム撮影のRT検査を実施し有害な欠陥がないことを確認する。ドラムに取り付けられるノズルの溶接部にはUT、MT、PT検査を、付着品の溶接部にはPT、MT検査を実施する。

なお、これらの検査はドラム製造ラインの動線に沿って実施され極力製品の移動の無駄を省いている。

(2) オンライン検査

ボイラー、過熱器やエコノマイザの管では、管と管との突合せ溶接部が多数となるので省力化の観点から

製作ラインでの自動溶接が採用される。それに伴い突合せ溶接部の検査がラインに組み込まれ自動化されることができる。例としては下記のようなものがある。

- フィルム撮影のRT検査に替わり、X線-TV装置を使用しTVモニターで溶接欠陥の有無を見て健全性を判定する。
- UT検査を自動化し斜角探傷で欠陥を検出しその結果を表示する。
- 管台等では個々の構造に合わせた可搬式の自動UT装置も実用化されている。

なお、以上はボイラー製作時の非破壊検査について述べたが、最近ではこれらの非破壊検査が経年ボイラーの劣化診断や余寿命診断に活用されて効率的な予防保全に役立っている。特にUT検査技術は目覚しく発展している。

7.6 製鋼技術

7-6-1 炭素鋼のフック線図

基礎的な理解のため、図7.22に炭素鋼の応力—ひずみ線図を示す。試験片を引張試験すると、A点は比例限度といい応力とひずみが比例して増加し、力を除くと原点Oに戻る。これをフックの法則という。炭素鋼は降伏点が現れる材料でありC点が降伏点を表し、B点は弾性限度でありこれを超えると塑性変形が始まる。降伏点C点で塑性変形が急激に進行する。D点は最大応力で引張強さという。この後、局部収縮を起こしE点で破断する。水管ボイラーの製作においてボイラードラムにボイラー管を挿入して拡張作業をF点まで行い、力を抜くとFからG点となりO-Gの永久ひずみが残る。このときボイラードラムはAからOへ戻るので、管の永久ひずみ分が縮まることになる。

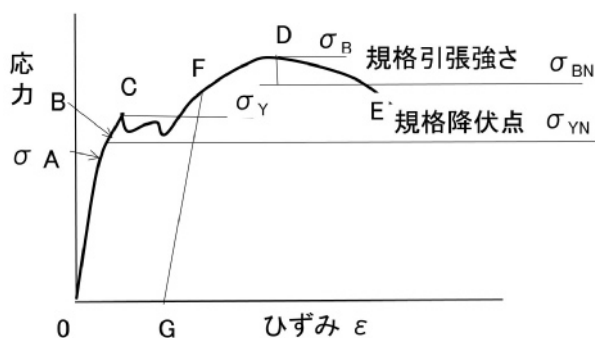


図7.22 炭素鋼応力—ひずみ線図

図7.23はステンレス鋼SUS304であるが、降伏点が明確に現れず連続的に引張強さに達する。降伏点の代わりにひずみが0.2% となるときの0.2% 耐力が用いられる。D点は引張強さである。

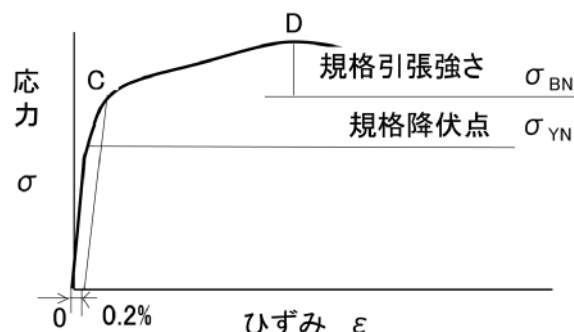


図7.23 SUS304応力—ひずみ線図

各材料規格には規格降伏点および規格引張強さの値が最低値として規定されている。材料の常温における規格降伏点を規格引張強さで割った値を降伏比といい材料の特性を示す重要な値である。炭素鋼の場合の拡張作業、ステンレス鋼の深絞り加工などは降伏点から引張強さまでの余裕が十分あるので加工が可能となる。もし、降伏点が引張強さに近いと加工時にすぐ引張強さに達し割れたりすることになる。

炭素鋼の降伏比はおおよそ0.55～0.6の範囲にあり、オーステナイトステンレス鋼は0.4前後である。降伏比がほぼ決まっていることは、許容応力が引張強さで決まるか降伏点で決まるかを仕分けることになるのでこの点の考察が大切である。

7-6-2 ボイラー用材料の化学成分と製鋼法

ボイラーのドラム用鋼板についてJIS・ASME・EN規格材の化学成分の比較を表7.7に示す。大きい差異はJIS・ASME材は炭素を0.35%までとしているが、EN鋼材では0.23%以下としている。Siについては、JIS材が0.15-0.30%に対し、EN材は0.040%以下などと1桁低い点に差がある。この他の元素ではMn、P、Sは同等と見られる。

鉄鋼材料の生産は鉄鉱石を原料とする高炉—転炉法と、くず鉄（スクラップ）を原料とする電気炉法で行われる。鉄鋼製錬の分野では、炭素（C）、けい素（Si）、マンガン（Mn）、りん（P）、硫黄（S）の5つの元素を微量に制限する。不純物の削減には鉄鉱石の還元および銑鉄の酸化の過程でできる限り分離除去することが行われ、多大な技術の累積により現在の値が達成された。

JIS材SB480とASME材SA515 Gr.70は相当材といえるが、金属組織的に差異がある。すなわち、JIS材では粒度に関する規定がなく実質的に細粒鋼であるが、ASME規格では粗粒鋼となっている。このため粗粒鋼の低温における靱性が細粒鋼のものに比べ低く、低温における水圧試験の場合には試験温度における衝撃値に注意を必要とする。

7-6-3 全連続鋳造法

2002（平成14）年版科学技術白書は、全連続鋳造法について次のように述べている。

「全連続鋳造法は転炉等で精錬された溶鋼から直接連続的に鋼片をつくる技術であり、鋼材歩留りの向上、作業の機械化、省力化が図れる上、省エネルギーであるという特徴を有している。元の技術は米国で開発されたもので、1955年にはわが国に技術導入されていたが、生産性、品質、設備費等の解決すべき点があり、研究開発の未、1965年代後半から急速に普及し、1972年には世界に先駆けて全連続鋳造法による一貫製鉄所がわが国に建設された。これにより、わが国の鉄鋼業は生産方式の優位を確保し、強い国際競争力を獲得した。」⁽³⁷⁾

転炉から出た溶鋼には0.05%程度の酸素（O）も含有されているので脱酸素（脱酸）処理を行う。脱酸の程度によりリムド鋼、セミキルド鋼、キルド鋼に区分する。取鋼にAlやSi-Mnなどを投入して十分に脱酸したのがキルド鋼である。連続鋳造法で製造される鋼はすべてキルド鋼である。日本では圧延材の98%（世界平均では約80%）は連続鋳造法で製造される。

連続鋳造法は優れた製法である。最近の鋼板に対する要求性能は高水準に移行し、その一例として不純物の低減、微量合金元素の利用と化学組成の正確な調整および材質制御のオンライン化等があげられる。連続鋳造法は従来の普通造塊、分塊圧延の方式に比べて次

のような特性がある。

- 1) すべてキルド鋼のため鋼塊法のキルド鋼と同様材質的に安定している。
- 2) スラブの表面は欠陥が少ない。
- 3) スラブの表面から中心まで均一で偏析が少ない。
- 4) スラブのトップからボトムまでの引張強さの差が少ない。
- 5) 非金属介在物が少なく、また粗大化しない。
- 6) 製造工程が短縮される。また、小人数の作業員ですみ鋳造作業の機械化、自動化ができ造塊における労働条件が改善される。⁽³⁾

7-6-4 JIS材とEN材の比較

前項で述べたように、JIS・ASME材とEN材では材料の化学成分が大きく異なり、また製法も異なる。図7.24は、JIS材とEN材のドラム材料の常温における降伏点が265N/mm²のものを同クラス材として比較した。EN材の板厚は、16mm以下、16～40mm、40～60mm、60～100mm、100～150mm、150～250mmの6段階に区分されている。これは図に示したように、EN材はJIS・ASME材より高温になるほど各温度における降伏点の値が低く、また材料が厚くなると更に低くなる。厚さによって降伏点の値が異なるのはまことに都合が悪いといえる。

表7.7 JIS・ASME・EN規格材のドラム用鋼板材料の成分制限

		%C	%Si	%Mn	%P	%S
JIS 鋼材	SB450	≤0.33	0.15-0.30	≤0.90	≤0.035	≤0.040
	SB480	≤0.35	〃	〃	〃	〃
ASME 鋼材	SA515Gr65	≤0.35	0.15-0.40	〃	≤0.035	≤0.035
	SA515Gr70	〃	〃	≤1.20	〃	〃
EN 鋼材	P235GH	≤0.23	≤0.035	0.60-1.20	≤0.035	≤0.030
	P265GH	〃	≤0.040	0.80-1.40	〃	〃
他に、Al,N,Cr,Cu,Mo,Nb,Ni,Ti,V の制限あり。						

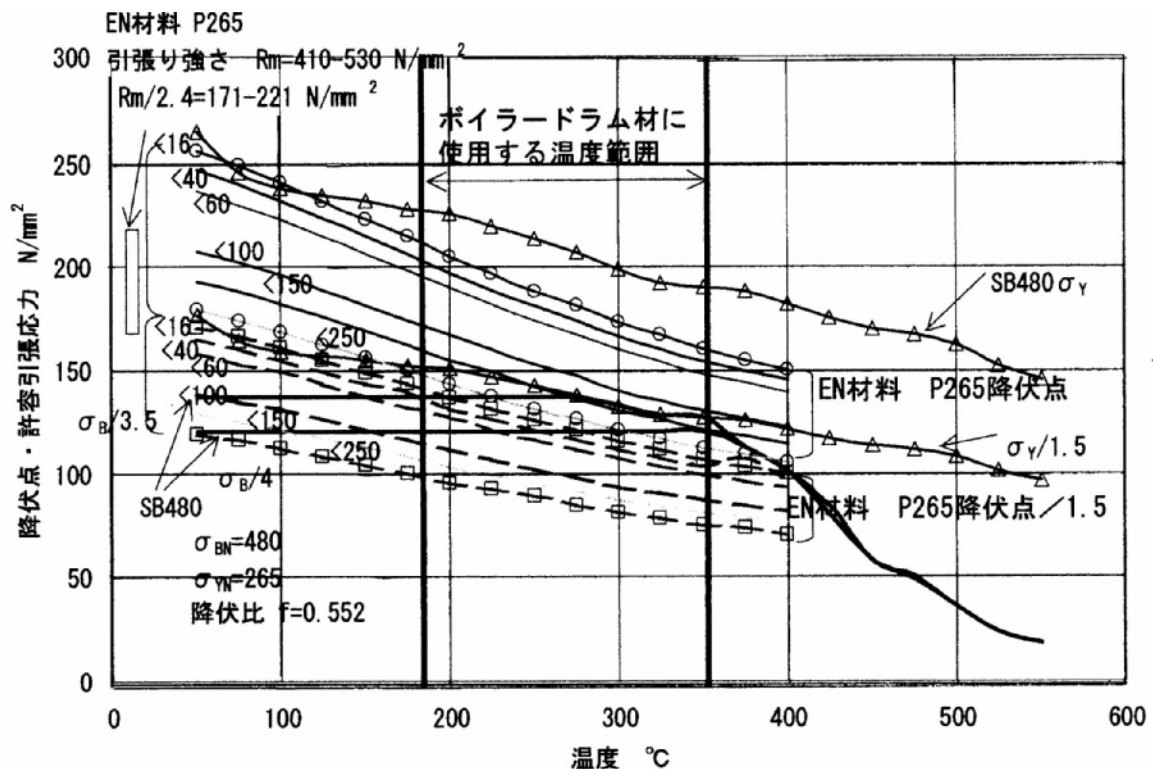


図7.24 JIS材とEN材の同クラス材の比較

7.7 すす吹き装置

7-7-1 近代のすすの掃除

近代は、石炭をストーカで焚いて黒煙を吐きながらのボイラーがほとんどであったから、ガス側すすの掃除は燃焼を一時的に停止して、煙管であればブラシ通しを行う。水管であれば、手やり棒で管群の間をこすり落とす。また、多缶設置であれば順次切り替え運転で休止することとなった。到底1ヶ月連続運転などはできなかった。

7-7-2 現代のすすの掃除

現代に入り米国を視察した技術者は、大形ボイラーがすす吹き装置（スートブロワという。）を多数備え、これらがスートブロワ制御盤により自動的に噴射順番および噴射媒体弁の開閉操作を自動的に進めていくのを見て感嘆した。現代のボイラー関係者は、スートブロワがあるのは当たり前と思っている節があるが、ボイラーが一年以上も連続運転が可能になったのはスートブロワのお陰と感謝すべきである。

続いてスートブロワの概要を述べる。この噴射媒体には蒸気噴射によるものと空気噴射によるものが広く採用されている。また、スートブロワの作動方式を大別すると回転式と抜き差し式となる。

(1) 定置回転式スートブロワ

定置回転式は、ボイラーのガス通路部、エコノマイザ、空気予熱器などのスートブロワに使用されるものである。

図7.25に電動式および手動式の定置回転式のスートブロワの例を示す。

(2) 抜き差し式スートブロワ

火炉や高温ガスの通路などに用いられる。先端に1～2個の噴射口のある噴射管を使用中だけ炉壁内に差し入れ回転させながら噴射する。使用後は炉壁外に抜き出しておくように構成されている。

(a) ロングレトラクタブル形（長抜き差し形）

ボイラーの高温ガス部に用いられる。

(b) デスラッグ（短抜き差し形）

火炉の壁に付着している燃えかす（スラッグ）などの除去に適する。

(3) エアヒータクリーナ

空気予熱器の有効な掃除を行うため噴射管が移動できる構造となっているものもある。

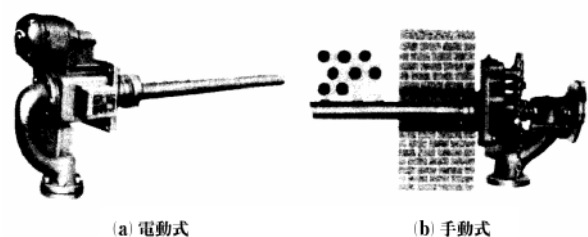


図7.25 定置回転式スートブロワ

8 | 考察

8.1 ボイラー技術の総括

ボイラーに関し若い技術者に講義するとき、「ボイラーは鉄という鉄鋼材料をはさんで、外側は火炎や高温ガスが流れ、内側の水に熱を伝えて蒸発させ仕事をするもので、自然に存在する空気と燃料・鉄鋼材料・水の3要素を上手く組み合わせた原動機である。」と説明している。

産業革命時からボイラーはポンプ・送風機などの駆動源、汽船や機関車の動力源として重要な役割を果たしてきた。徐々にその役目をエンジン・電動機に替わったが、産業用熱源および発電用タービン駆動用として、なお、その重要性を増している。

また、ボイラーの設計には各種の技術分野が関連しており、さらに技術計算が可能な面が沢山あり、放射伝熱、対流伝熱、ガス輻射伝熱、沸騰伝熱、構造、燃焼、気水分離、水循環、水質管理、鉄面温度、制御、寿命、耐震、環境関連、圧力損失などの計算がある。

これらが若い技術者の身につくものになればその応用範囲は広大であろう。

本調査ではボイラー技術の変遷を第2章「近代」、第3章「現代」にて、新旧のボイラーの発展を調査した。その要約を表8.1に示す。

表に示すボイラーに関する技術の12項目のうち、ストーカの使用、水位調節器の進展、そして拡張継手の3つは継続されたが、それ以外は「近代」と「現代」とで大きく異なるので歴史的に隔壁があったというべきである。また、「現代」に入ってボイラー本体技術と関連技術が、たてよこ十文字のように発展したことを述べた。そのお陰で現代のボイラーは安全な機械として完成した。

これらのボイラーの適用分類については、第5章でボイラーが蒸気表に沿って忠実に発展し、かつ、分類できることを示した。このような分類をベースとして、将来のボイラーの発展と安全のより向上のためにも、世界共通の規格を樹立しなければならないと考える。

表8.1 近代と現代のボイラー技術の総括

近代		現代
1934 年まで 3.5MPa 以下、1954 年まで 6MPa 以下の制限あり	上限圧力	超臨界圧ボイラー達成、30MPa 級
伝熱管束群（直管が主体）	伝熱構造	火炉と曲管群の組み合わせ
リベット継手（人が入れない。）	ドラム、胴	溶接継手（内部作業可能）
<u>拡張継手</u>	管継手	<u>拡張継手</u> 、溶接継手
<u>ストーカ</u> による石炭粒子定置燃焼	燃焼方式	<u>ストーカ</u> および各種バーナおよび流動層
<u>水位調節器主体</u>	制御方式	<u>水位調節器</u> を含む自動ボイラー・燃焼制御並びに安全装置
海水、清水、淡水、蒸留水	水管理	イオン交換水、清缶剤
電気炉を使用、スクラップ材なので多成分の変動あり。	鋼材	全連続鋳造法を採用し、強度を出す炭素と微量の不純物のシリカ、マンガン、りん、硫黄を含む。
なし	環境装置	ばいじん、窒素酸化物、硫黄酸化物の環境規制あり。
手やり	外部清掃	スートブロワ
ブラシ	内部清掃	化学洗浄、チューブクリーナ
5 年使用、または 300 回使用のどちらか早い方で廃棄	寿命	長寿命となった。30～50 年で経済性・保守の面から、更新となる。

8.2 将来への展望

8-2-1 法令・規則のあり方

今回は、ボイラーの安全を守るための法令・規則についても主要国のあらましを調査した。米国ASMEの「安全率」と欧州EN規格の「材料選定係数」の2つの流れがある。現代のボイラーは、大事故がほぼなくなったので、材料が薄くてできる後者で良いではないかという流れがある。しかし、現在の規格類は現代初期のものを改訂を重ねてきたもので、どの部分が古くてどの部分が新しいか分からなくなっている。今後高圧燃焼方式などが出現してくると、それらの構造規格も制定しなければならない。例えば、熱応力の規定や疲労の規定はASMEにもない。欧州のENボイラー規格には余寿命診断として規定されている。一部に規格は無料と考えている節があるが、規格は後追いつけるものではなく、安全の先取りとして開発の目標を設定し、これを確認して何人も納得できるものに切り替えていくことを実行しなければならないと思考する。わが国も規格の後進国を1日も早く脱すべきであろう。

なお、現在問題となっている「安全率」については次のように考える。

「安全率」の問題に関し、一つの案は「安全率4」は変えず、ボイラーの構造と種類を明確に定義し、その種類のなかで「必然的理由」から材料選定係数を設定したほうがよいものは、それを明記する。すなわち、

- 1) 伝統の数値である安全率「4」は動かさない。
- 2) 耐圧試験は拡張のあるボイラーが多数あり、最高使用圧力の1.5倍を維持する。
- 3) 材料の肉厚を決める材料選定係数を導入する。

強制循環ボイラーや貫流ボイラーのように高温・高圧ボイラーで溶接のみで製作される場合は、例えば熱応力等を解析して材料選定係数=0.9などとする。安全率は「4」×0.9=3.6となり、ASMEと同等になる。

表5.2 安全率と材料選定係数の案に示したように、安全率に変更せず材料選定係数を導入し、ボイラー形式ごとに理論的な数値の裏付けを認証して使用すべきと考える。

8-2-2 ボイラーの将来

ボイラーは第5章ボイラーの適用分類で示したように、種類としては低圧の立てボイラーから超臨界圧ボイラーまで出揃ったといえる。今後は環境問題および国際間のエネルギーの分配問題があり、単に発展するという状況ではない。国際情勢とからんで、どう、進展するかは難問である。ここでは各種ボイラーをどう

いう方向で使っていくかを簡明に述べることにする。

- (1) 立てボイラー、炉筒煙管ボイラー、パッケージ水管ボイラーの小形のボイラーは、クリーンな燃料を使用して、その簡便性を生かしていく。
- (2) 二胴水管ボイラー、単胴放射形水管ボイラーはIPP自家発電事業に関連させ、また水管ボイラー全般として大工場のプラントの一部として反応および排熱回収用に活用する。
- (3) 事業用発電ボイラーの次期石炭プロジェクトの推進については、3.6節の事業用発電プラントの将来の項で下記3件の現状までのあらましを述べた。

加圧流動床複合発電プラント

石炭ガス化複合発電プラント

超々臨界圧発電技術

石炭は、なお、300年分の埋蔵量があるといわれている。なかでも、褐炭がその半分以上を占め、中国、東欧、トルコ、東南アジアなどに存する。水分が多く、その利用法の開発が待たれている。それには、ストーカ、微粉炭燃焼、および流動層燃焼の現存技術が出番をまっている。石炭ガス化プラントも大いに期待されている。

- (4) 材料・工作法の研究推進。

材料が果たした役割が多岐であったことも述べた。日本は、現在素材生産技術では世界トップクラスである。今後も、その重要性は増す一方である。材料には希望的観測を含めて次のような発展を期待する。

- 1) 金属の超微細粒化により高強度で加工性の良い材料の開発。
- 2) 焼鈍が不要な材料、または溶接と同時に焼鈍効果を兼ね備える加工技術の開発。

8-2-3 海外への支援

第7.3節の環境対策技術の中で、わが国の事情から、ばいじん、窒素酸化物および硫黄酸化物などの対策技術が進歩したことを述べた。世界的に、現在から将来にわたって低価格の石炭燃料を使用し公害対策を設備したプラントを必要とすることになるのでこの分野において、世界的にもトップレベルにあるわが国の大手ボイラーメーカーはすでに海外に技術供与または公害対策機器を完備したボイラーを輸出しており、これから一層支援要請が増加するものと考えられる。

9 | あとがき

今回の「ボイラー技術の系統化」調査において、まず、その歴史を18世紀から見てきたが、ボイラー技術者である著者の知らなかった過去の艱難辛苦により発明されたボイラーが沢山あった。それらは現代から見れば前節で述べたような技術格差があり残念ながら消え去る運命となった。しかし、この繰り返し努力が理論的解明のデータを生むことに継続され、現代の開花へとつながったのである。

ボイラーの発明者といわれるワットは、大気圧ボイラーの仕事効率向上にコンデンサーを発明したことを冒頭部分で述べた。この着想は偉大であった。以後ボ

イラーは高圧化の一途をたどるが、ランキンサイクルのコンデンサーの役割は欠かすことができない。また、本書ではステファン・ボルツマンの法則が火炉伝熱の根幹となったことにもふれたが、さらに数多の有名な学者およびボイラー研究者の貢献があったことを忘れてはならない。

今回の調査において参考とした貴重な文献の中には、すでに忘れられていて絶版となりそうなものがあったが、その本が大いに参考となった。わが国は、諸分野の先賢の労苦により現代の繁栄がえられたのであり、それを保存する意義は多大なものがあるといえる。

10.1：わが国の欧米技術への開眼⁽¹²⁾

1855（安政2）年 当時、西欧技術の移植は1855年に幕府が開設した長崎海軍伝習所に原点が求められる。ここでは航海術、造船、機械設備など、当時の近代的科学技術の教育機関として17ヵ月の伝習が行われて指導者級の技術者が多く巣立っている。榎本武揚（釜次郎）は二期生機関科であった。1862（文久2）年「開陽丸」発注のため、長崎からオランダに留学生として、榎本武揚らを出航させた。この成果をふまえ伝習取締、永井玄蕃頭の上申で1861年に長崎製鉄所が長崎飽之浦に建設され稼働している。

薩摩の藩主、島津斎彬は蘭学者箕作阮甫に訳させたボイラーを製造するための教科書は「水蒸気船説略」で、その内容は「第1・第2巻、温熱作用、沸騰、蒸気の性状、水蒸気の膨張、圧縮、水蒸気の管内通過、第3・第4巻、機械缶及びその付属具の構造、回転運動の原理、第5・第6巻、船用推進に用いる機関の装置」等になっていると報告されている。

わが国で最初に「日の丸」を掲げた観光丸は、1850（嘉永3）年 オランダで建造された木造船であって、ボイラーは最高使用圧力0.035MPaの銅板製であった。

1853年ペリー来航により、アメリカの蒸気軍艦の威力に接した幕府は軍備の強化に迫られ、「大船建造禁止令」を解いて大型艦船を国内で建造する道を開いた。そして早くも浦賀に造船所を建設、イギリス船を模倣して「鳳凰丸」を起工する一方、水戸藩に命じて石川島造船所を造らせた。それ以後も幕府は苦しい財政の中から長崎製鉄所、横浜製鉄所と相次いで造船所を開き、加賀、薩摩、長州などの諸藩もこのころから西洋型船の建造にのり出す。本来、造船業は欧米先進国では総合的機械工業として発達したものであり、それを移植するとしてもわが国では関連機械事業部門がなく、新しい造船技術を消化できる船大工が居なかったため、全面的に外国技術に依存し指導を求めざるを得なかった。例えば長崎の場合、鎖国以来のよしみでオランダに諸道具と機械設備を求め、11人の技師の来日を待ち、その指導のもとに建設工事をはじめ、1857（安政4）年 日本最初の蒸気船に着工した。

続いて、幕府を倒して政務を握った明治新政府にとっては「富国強兵、殖産興業」の路線に沿って、海軍および海運業の基礎となる造船業を育てることが重要な課題であつた。政府は幕府・諸藩から引き継いだ各造船所を直営し整備に努めたが、1880（明治13）年、

政府は「工場払い下げ規則」を公布、官営政策も軍事上重要なものを除いて官業を民間に払い下げる方針に切替えた。

10.2：石炭史話⁽⁴¹⁾ 1875（明治8）年

「水とのたたかい、ドットンブーさま」

蒸気ポンプによる初の排水実験

鉄でつくられた大きな太鼓のような機械のまわりに竹矢來がはりめぐらされ、近辺から見物人がつめかけた。数ざっと1万人（筑豊炭坑誌 明治31年刊）、茶店、みやげ店も立つ騒ぎ。「長崎からもってきた蒸気汽缶、おばけのごとある」「坑内の水ば、くみあげるげな」。ものめずらしそうな目が「奇妙な機械」に注がれる。その中には後に筑豊炭田のご三家となった麻生、貝島、安川などの炭鉱主の姿も見られた。暮れもおしせまった明治八年、遠賀川の支流、中元寺川のほとり福岡県田川郡糸田の小高い丘。片山逸太が行なった筑豊初の蒸気ポンプによる排水実験である。

筑豊炭田の夜明けは水との戦いで始まった。地下の炭層を掘れば水がわく、地表から浅いときや、山はだの炭層に横穴を開いて掘るぐらいなら、排水も大したことではない。十メートル、二十メートルと掘り進むと、もう水で掘れなくなる。採炭、排水はすべて人力。だから水が出るとそこを捨てほかの炭層を探す。

「一にも水、二にも水。地下水に勝ちさえすれば、もっとスミは掘れるとやが」

一維新直後の坑主の悲願だった。そこに機械排水。

動かぬ圧力計の針

「だいぶ燃やしたごとあるが…」直径二メートル、長さ二メートルばかりの汽缶。片山逸太はその下部にあるたき口から石炭を必死につきこんだ。真赤な炎は汽缶の後部にまわり、さらにパイプを通つて汽缶の中の水を熱し、また前部に戻って煙突に抜ける仕組み。しかし、目ざまし時計ような圧力計の針は少しも動かない。

長崎で造船技師をしていた経験から、蒸気船の汽缶のヒントに炭坑排水をやってみようと考え、古い汽船の「ドンキーポンプ」を買ってきたの機械排水。だが、まだ技術は幼稚。狭い船内と、師走の冷たい風が吹きさらす坑口。同じ石炭をたいても条件がちがう。それに、汽缶は裸で何ひとつおおいがないので、外気で冷却されていることも気付かない。最初の日はやたら見物人のストープ役にしかならず、間歩（坑内）から一滴の水も出なかった。

「ポンプの弁を開け」

二日目。朝から昼過ぎまで石炭をたきつづけた。逸太の目は血走り汽缶のまわりをいく度も回る。

「こげんなったら、カマが割れるごとたいてみる、もっと炭バ！。みんな竹矢来の外に離れとれ」逸太は、フンドシひとつになってカマをたく。太陽が西の空に傾きかけたころ圧力計がやっと動いた。

「ポンプの弁を開け」。その瞬間「ドットン、ドットンブー」という異様な音とともに間歩から勢よく水がはき出された。

「これは、この世にあるもんじゃなか」

「長崎からもってきたとやき、世にいいよるキリシタンの本体じゃ。それでなきゃ、神か仏ばい。おろそかにでけんばい」

「ドットソブー様」

サイ銭を投げておがむもの。腰を抜かす見物人。鉦主たちだけは目を光らせ、機械のすみずみまで見入っていた。

技術革新の第一声

「これで、排水がでくるとなりゃ、水くみは一人もいらんごとなる。みんなでスミば掘れるたい」鉦主たちが機械を見たのはこの時が始めてだった。そして、その威力におどろいた。ドットン、ドットンブー様は筑豊のヤマの技術革新の第一陣となった。たしかに片山逸太が実験した機械は坑内から水をくみあげた。しかしそれはツカの間だった。どよめきがおさまらぬうちに「ドットンブー」と威勢のよいポンプの音もとまってしまった。神に祈る気で投げたサイ銭が歯車にはさまって故障したとか、あまりカマをたきすぎて汽缶の油が切れたためとか、古い炭鉦本には記されている。

10.3：平川鉄工所の創業⁽³²⁾

平川鉄工所の創業は、1912（大正元）年で舟くぎ作りからはじめた。その後、1921（大正10）年平川鉄工所がはじめてボイラー製作の機会をつかんだ。当時、ボイラー業界ではすでにランカシャーボイラーが造られていたが、平川ではタンク類の製作が主で、ボイラー製作の経験は無かった。しかし、ある病院へランカシャーボイラー2缶が納入されることを知って発注を頼み込んだ。粘り強い熱意が「平川では無理だ」という顧客をついに動かし、その2缶の受注が実現した。チャンスは到来したが、図面片手にいざ製作にとりかかってみると、ボイラーづくりはむずかしい大仕事である。鉄板を切るにしても、当時はまだガス切断の初期であり、タガネでたたき切った。炉筒の溶接も「わかしづけ」といって、鉄板の端を重ねて「ほど」（火床）で焼き、溶けるくらい熱したその上をたたき

つけてくつつける。リベットは大きなハンマーで、それも2人がかりで鋳頭を作るなど、ほとんどが手作業のたいへんな重労働であった。

寝食を忘れて製作に没頭し、ついに直径2m長さ10mのランカシャーボイラー2缶を完成、無事納品して顧客はじめ関係者の目をみはらせた。こうして大正11年の春、平川鉄工所のボイラーの歩みが始まった。ランカシャーボイラーの製作で自信を強めた平川鉄工所は、ひきつづきコルニシュ、立て横管式、あるいは立て多管式と各種ボイラー製造に手を広げていった。

昭和2年7月、そのころには、ボイラーの設計製図はもとより、製作も社長が全工程を指揮するようになった。なにしろ大がかりな鍛冶仕事である。ボイラーの継ぎ手はすべてリベットであり、空気ハンマーで鋳のかしめやコーキングが行われ、作業場には耳をつんざく騒音が響き渡った。また鏡板は、「火作り場」（ほど＝地面に円形の穴を掘り強粘結炭で火をおこす）でしゃく熱させた鉄板を、上半身裸の男たちが数人がかりで大きな木製ハンマーを振るい、円板状態から円端をたたきながら周囲をぐるぐる回って仕上げる。よほど屈強でなければ職人もつとまらない。

いずれにしても、一般にボイラーや熱工学に関する理論、理解がまだ低かった時代であり、加工機械類も未発達であった。横文字の図面をたよりに外国製品と見くらべながら、半ば手探りの状態、それもほとんどは重労働の手作業でこなしていった。

それでも溶接技術などには、早くからその導入に取り組み、平川では大正11年に最寄りの大阪府工業試験所で溶接の破壊試験も行っている。厚さ25 mmの鉄板を径600 mmに巻き、10.5MPaの水圧でテストしたが、ビール樽のように変形しながらも、溶接部位にはなんの異状も認められなかった。

平川鉄工所は昭和19年には、図10.1に示す舞鶴海軍工廠向けの水管ボイラー2缶を納入した。換算蒸発量6t/hのパブコック・ウイルコックスと同型式の横形水管ボイラーである。

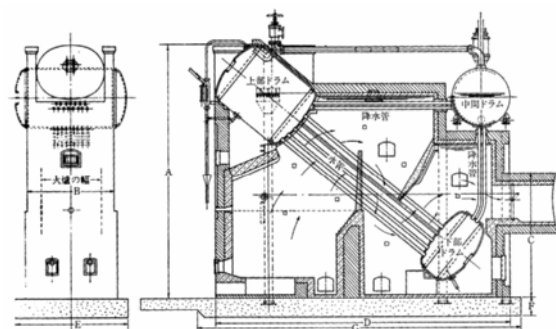


図10.1 平川HK-B型水管ボイラー

10.4：田熊常吉の独創^{(39) (40)}

1. 汽缶は生きもの

常吉は、頭に浮かんだ事柄を図面に書き加えたり、不可能と思われる部分を消したり、思索と修正を繰り返して図面に改良を加えていった。朝早く山頂に登り、終日考案に没頭する彼の耳には夏山にすだくせみ時雨も聞こえず、帰路の夜道にも天の川を仰ぐでなし、ひたすら汽缶の図面のみに考えをめぐらせた。

十数日が経過し、何十回となく書き改めた図面が真っ黒になって、常吉はようやく汽缶の構造に一応の成案を得た。ひきつづき、性能について考案を進めたが、ある日、思索が中断して二進も三進も行かず、精も根も尽き果てたように眠り込んでしまった。そのまどろみの中で、常吉は、「汽缶は生きものである。汽缶は石炭の熱で水を蒸気に変えるが、水から蒸気をつくるのは缶水の循環が生命である。それは人間の血液の循環と同じ働きをするものだ。これまでの汽缶には人間の心臓に当たるものがなく、動脈に当たる部分も不完全である」と直感した。

常吉は、遂に汽缶の神髄に触れることができたのである。これについても、彼は後々、やはり神のお告げであったと言っている。とはいえ、生来、特定の信仰を持ち合わせていたようでもない。しかし、洋上の大悟といい、山頂の会得といい、人事のすべてを尽くし、あらん限りの思索をめぐらせたすえに、思いも寄らぬ妙案のひらめきを得たことは、万策尽きた挙句の出来事であるだけに、常吉にとってはまさしく神のお告げ、天の啓示であったろう。高取山で「汽缶は生きもの」と悟った常吉は、再び自宅を仕事場として妻を助手に缶水循環の実験に取り組んだ。実験といっても、それはごく簡単な方法であり、台所のなべとガラス製の罎瓶に水を入れ、下からコンロに炭火をたき、水と蒸気がどのような状態で循環するかを観察するのである。これにより、常吉は、1) 蒸気発生の状態、2) 缶水循環が起こる原因、3) その流れ具合を知り、集水器と降水管の構想をまとめあげた。そこで、茶やゴマをいる素焼のホウロクの柄に穴を開けて集水器、降水管の模形を取りつけ、コンロにかけてあるなべの中に入れてみたところ、不完全ながら、缶水循環の有様をとらえることができた。

1912（大正元）年8月8日のことであるが、後年、常吉は「今でもあの時のことがまざまざと思い出される。貧弱な実験ではあったが、水の循環について自分が抱いていたさまざまな想像や疑問をみごとに証明、解決し、缶水循環の自然の動きを如実に示してくれた」と述懐している。彼が当時知り得た既存の水管式ボイ

ラーは、缶水循環が鈍く、蒸発が盛んになるほど蒸発が阻まれた。そこで、彼は汽缶の心臓として集水器を、また動脈として降水管を考えついた。次いで、このなべにたぎる熱湯を包容する生きものとしての汽缶の機構をどうまとめあげるかの研究に全身全霊を打ち込んだ。

2. 集水器と降水管

図10.2に見る集水器と降水管は、常吉が発明したボイラーの最大の特徴であり、「汽缶は生きものである」との発想から生まれたものである。生物にたとえれば、集水器が心臓、降水管が動脈にあたり、上昇水管は静脈に相当する。

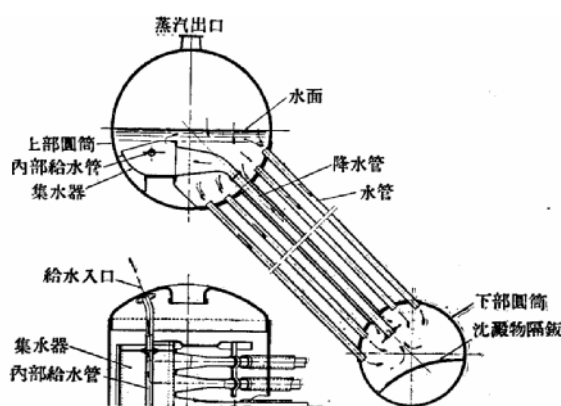


図10.2 タクマ式ボイラー水循環図

常吉のボイラーでは、集水器は上ドラム内に設けられ、ポンプからの給水とドラム内で蒸気を分離した缶水とが混合し、降水管へ送入できる構造になっている。また、降水管は、上ドラムから下ドラムへの降水に支障がないように工夫されていた。従って、下ドラムに送られた缶水は多数の上昇水管に分流し、汽水混合の状態の上ドラムへ送られ、そこで蒸気と缶水に分離され、蒸気は用途先へ、缶水は集水器へ流入する仕組みである。その構造は、上ドラムと下ドラムを水管でつなぎ、その中に二重水管を取り付け、内部の水管を降水管として集水器と連結している。この二重になった管の温度は、内部にある降水管の方が外部の水管よりも低いので、中の水の密度に差ができて循環し始める。温度が高くなり、蒸発が盛んになればなるほど、水管の方は気泡が多くなって密度がますます軽くなる。従って、降水管の中の水との密度の差はさらに大きくなる。こうして、循環は一層活発になり、水管内にできた気泡はこの水の流れで洗われ、どんどん上へ上がっていくわけである。

□ 参考文献

参考文献および図表を引用した時の付番は次とする。章・節・項が1.2.3とある場合、

- ・ 節および項の概要を参考文献によるものは、その題名の左上に付番する。
- ・ 数行程度の引用文は、その冒頭を改行し一字あけ、引用文の末尾左上に付番する。
- ・ 図および表は、題名の末尾左上に付番する。

- (1) 菅原菅雄：「蒸気缶」産業図書(株) (1938)
- (2) 吉原英夫：「蒸気原動機」ARS(株) (不明) (1941)
- (3) (社)日本ボイラ協会：「ボイラー・圧力容器の設計および工作」(1986)
- (4) (社)日本ボイラ協会：「ボイラーの水管理」＜知識と応用＞ (2001)
- (5) (社)日本ボイラ協会：「エネルギー有効利用と環境負荷低減に配慮した燃料・燃焼技術」 (2003)
- (6) (社)日本ボイラ協会：「ボイラーと圧力容器安全規則の解説」—第9版 (2001)
- (7) (社)日本ボイラ協会：「燃料および燃焼」 (2000)
- (8) (社)日本ボイラ協会：「ボイラー構造規格」(平成15年厚労省告示第197号) (2003)
- (9) (社)日本ボイラ協会：「地球環境および大気汚染の現状と対策」 (1999)
- (10) (社)日本ボイラ協会：「最近のボイラーの自動制御とその取扱い」 (1992)
- (11) (社)日本ボイラ協会：「一級ボイラー技士教本」 (2006)
- (12) (社)日本ボイラ協会大阪支部：「中小形ボイラーの変遷に関する調査研究報告書」(1992)
- (13) 日本規格協会：「JIS B8201陸用鋼製ボイラー—構造」(2005)
- (14) 寺本憲宗：「日、米、欧州のボイラーと圧力容器の適用区分」ボイラー研究 (Dec 2003)
- (15) 寺本憲宗：「ボイラー・圧力容器の安全率と許容応力に係わる国際動向」ボイラー研究 (Oct 2002)
- (16) 寺本憲宗：「ボイラーの水圧試験および検定水圧試験の解説」ボイラー研究 (Oct 2004)
- (17) ASME "ASME 2001 Boiler & Pressure Vessel Code Section I、II、VIII" (2001)
- (18) 欧州規格： "EN12952 Water tube boiler" (2001)
- (19) 欧州規格： "EN12953 Shell boiler" (2001)
- (20) 欧州規格： "prEN10028-2: Flat products made of steels for pressure purpose-part-2" (2000)
- (21) (社)日本産業機械工業会「産業機械工業五十年史」(1998)
- (22) バブコック日立(株)：「日立のボイラー百年史」(2000)
- (23) 三菱重工(株)：「海に陸にそして宇宙へ 続三菱重工業社史」(1990)
- (24) 三菱造船(株)：「創業百年の長崎造船所」(1957)
- (25) 三菱重工(株)長崎造船所 史料館 {写真提供}
- (26) 谷口健八：「ボイラの思い出」三菱造船(株) (1971) (非売品)
- (27) 三菱重工(株)長崎造船所 実験報告第1669号「高压汽缶用熔接缶胴加压破壊試験報告」(1938) (非売品)
- (28) 三菱重工(株)横浜製作所：「三菱重工横浜製作所百年史」(1992)
- (29) 荒川善久「産業用ボイラー」配管技術 (1998)
- (30) 三菱重工(株) (資料提供)
- (31) (社)火力原子力発電協会「火原協講座32 ボイラ」(2005)
- (32) (株)平川鉄工所：「平川鉄工所七十年のあゆみ」(1983)
- (33) (株)ヒラカワガイダム：「管束燃焼ボイラーの開発」日本機械学会論文集 (1993)
- (34) 石川島播磨重工業(株)：「石川島播磨重工業社史」(1992)
- (35) 欧州規格：「EC圧力装置指令のガイダンスノート」(97/23/EC) (1997)
- (36) 火力原子力発電「超々臨界圧発電技術」(1998. 4)
- (37) 平成14年版科学技術白書
- (38) 日本規格協会「JISハンドブッカー溶接」(1987)
- (39) (株)タクマ：「タクマ50年史」
- (40) (株)タクマ：「田熊常吉自伝」(2005) (非売品)
- (41) 朝日新聞関西本社：「石炭史話」(株)謙光社 (1970)

番号	名称	資料形態	所在地	制作者	制作年	コメント
1	巡洋戦艦金剛の ヤーロー式ボイラー	実体	広島県呉市 宝町 5-20	英国 ビッカース社	1912	戦艦金剛には、36基のボイラーが搭載されていたが、この1缶のみ保存されている。
2	立てボイラー	実体	滋賀県野州市三上 2308 番地	㈱ヒラカワガイダム 滋賀事業所	1952	歴史の古いボイラーで、中小企業の各方面で多用された。
3	コルニシユボイラー	実体	滋賀県野州市三上 2308 番地	(不明)	1883 頃	わが国最古のコルニシユボイラーで、保存されている貴重な1缶である。
4	三胴式水管ボイラー	実体	滋賀県野州市三上 2308 番地	㈱ヒラカワガイダム 滋賀事業所	1941	古典的三胴式水管ボイラーの名残りをとどめる。
5	高圧汽缶用熔接缶胴 加圧破壊試験報告書	文献 試験報告書	長崎市飽の浦町 1 番 1 号	三菱重工業㈱ 長崎造船所	1938	高圧ボイラー用溶接ドラムの破壊形態を明らかにし、大型圧力容器に対する試験・評価方法の礎となった。
6	石炭焚き Advanced - Pollution Minimum バーナー	模型	長崎市飽の浦町 1 番 1 号	三菱重工業㈱ 長崎造船所	1996	PM バーナーは微粉炭用の低 NO _x バーナーとして開発された。その後継機バーナーであり、超々臨界圧ボイラーの火炉内の平均的燃焼負荷を達成した。
7	中国電力㈱三隅 1 号 1000MW ボイラ	設計図、写真	長崎市飽の浦町 1 番 1 号	三菱重工業㈱ 長崎造船所	1998	超々臨界圧変圧運転ボイラ(1000MW, 25.4MPa, 604℃/602℃)、火炉は垂直管方式を採用

国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第7集

平成19(2007)年3月30日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館
産業技術史資料情報センター
(担当：コーディネイト・エディット 永田 宇征 田里 誠、エディット 久保田稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20
TEL：03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク

年月日	箇所	誤	正
2007年3月30日	p33 図5.2 蒸気表とボイラーの 適用範囲	記号脱落	下図を参考にA、B、Kの文字を加筆
	エンタルピー (kJ/kg) 標準大気圧 0.1013MPa 圧力 (MPa) ① 立てボイラー ② 炉筒煙管ボイラー ③ パッケージ水管ボイラー ④ 二胴水管ボイラー ⑤ 単胴放射形水管ボイラー ⑥ 強制循環式ボイラー ⑦ 超臨界圧貫流ボイラー		