

人と熱の関わりの足跡（その2） ボイラ技術の展開 — 高効率化への挑戦と破裂との戦い —

*Footprints of the relationship between humans and heat (Part 2):
Development in Boiler Technologies
-Towards High-Efficiency Boiler and Prevention of Explosion-*

小澤 守 (関西大学)

Mamoru OZAWA (Kansai University)

e-mail: ozawa@kansai-u.ac.jp

1. はじめに

ボイラの原型はおそらくブランデーやウィスキーの蒸留釜であったと思う。これらの蒸留釜では当然ながら発生する蒸気を用いて動力を発生するといった用途ではなかった。したがって作動圧力も大気圧近傍で、熱負荷もそう高いものではなかった。周知のように Heron の蒸気タービンは丸釜で発生した蒸気を回転体に取り付けたノズルから噴出して回転する反動タービンであるが、動力発生を目的として産業応用するには千数百年の歳月が必要であった。その間を支えた原動機は風車や水車で、1600年代初頭の Giovanni Branca の考案した装置にしてもボイラは Heron のそれとは大差はなかった。ボイラによる発生蒸気を利用した最初のもは、揚水機関、つまりポンプであった。著名な Thomas Savery よりも少なくとも数年前に Edward Somerset の Water commanding engine[1]など幾つかの試みはあるが、実用面からは Thomas Savery の機関に帰着するといつて間違いないだろう。Savery の蒸気による揚水機関[2] (1698年特許 No. 356) を図1に示す。ボイラからの蒸気を凝縮させそれによって水を吸い上げ、さらにボイラの蒸気圧を用いて高所へ水を押し上げる機関であったため、記録に残る最初のボイラ破裂 (1716年) を引き起こした[3]。破裂の原因は性能向上を目論んで、安全弁のバーに過剰な錘を取り付けたことによるとされており、当初の Savery のボイラには Denis Papin 式の安全弁が設置されていなかったことから判断して、破裂したのは J. T. Desaguliers による改良版[3]であったと推測する。

具体的にボイラ技術が進展し始めたのは、シリンダ、ピストンを用いて動力を取り出した Thomas Newcomen からであろう。Newcomen は Somerset や Savery の蒸気発生部としてのボイラと動力発生部、さらに負荷としてのポンプを分離した。さらに James Watt は周知のように大気圧機関として

の必須の真空を作るための復水器をシリンダから分離したことによって Newcomen 機関に比べて飛躍的に機関効率が上昇した。Watt はその後、遊星歯車による回転運動の導入 (後にクランク機構を採用) とガバナによる回転数制御、水面制御、圧力制御などを導入し、現在の動力機関の主要構造を作り上げたのである。ただしこのような Newcomen や Watt 機関の出現が直ちに産業を牽引したかどうか、より一般的には新規技術の出現が直ちに旧技術を駆逐したかどうかといった視点は、技術の展開を理解する上で非常に重要である。

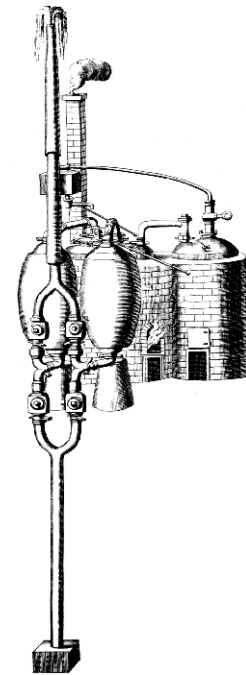


Fig. 1 Savery's engine [2].

2. 科学技術と社会状況の推移

図2は1600年頃から現在に至る科学技術の流れを簡単に示したものである。16世紀までの英国はヨーロッパにおいて後発国であった。宗教戦争やその他様々な社会的要因によるオランダやフランスからの移住者によって、各種の技術がもたらされ、結果的に17世紀から19世紀に至る産業革命期を中心として、西欧の科学技術の中心的存在として君臨することになった。英国産業進展については薬師寺の著書を参照されたい[4]。英国における典型的な動力技術として、Papin (フランス人、英国移住) の構想や上記の Savery の揚水機関があ

であった。それに対して当時の水車動力の最大は40 kWであり、これを凌駕する機関はWattの特許が切れた1800年頃になって漸く出現した。その後の単機出力は指数関数的に増大したのである。

図4にはNewcomen機関、Watt機関の累積基数と関連技術を示している[6]。Watt機関の出現は1760年代初めで、当初の機関効率はNewcomen機関に比べて遙かに高かったが、1780～1800年においてもNewcomen機関は製造され続けたのである。勿論、様々な改良がなされ続けたのはいうまでもないが、高価な動力源を工場に設置するには、技術の安定性、製品の信頼性、低コストなどの条件を克服する必要もあった。Newcomen機関は当初から炭鉱の揚水機関として用いられており、粗悪炭を燃料とすることができたため、炭鉱主は燃費についてほとんど配慮しなかったのだろう。これが工場用動力となると、効率が大きな選択要因になってくる。いずれにしても技術の転換はこのようなして行われ、特に基盤となるインフラは社会情勢や他産業の状況に大きく左右される。

3. ボイラ技術の展開

本節ではNewcomenやWattのボイラから出発して、ボイラ技術の全体的な展開について述べる。

まずボイラにおける技術的課題について説明しておこう。日本ではボイラに対して「汽罐」（さら

に古くは水蒸罐）の文字が当てられ、蒸気を発生する金属製容器であった。熱エネルギーを与えて蒸気を発生するとすれば、電気ボイラも蒸缶（蒸し器）も含まれるが、ここでは化石燃料を燃焼させ、壁を通じて熱を水に伝え、蒸気を発生するものをボイラと限定しておく。ボイラの種類と開発課題を表1に列記しておく。赤字の形式のボイラは現在におけるボイラである。

ボイラは当初、煉瓦積みで燃焼室に置かれていたが、燃焼ガスの熱エネルギーを有効利用するために、ボイラ周囲をめぐった燃焼ガスをボイラ胴内に設置した煙管に導いた煙管ボイラ、燃焼室を胴内に設置した炉筒ボイラなどが開発された。CornishやLancashireボイラなどはこれに該当する。その後、炉筒と煙管の両方を組み込んだ炉筒煙管ボイラが誕生した。Scotchボイラがその典型で、Titanic号には29缶搭載され、2機のレシプロエンジンと1基の蒸気タービンによって46,000 HPの出力をだした。

燃料としては当初から石炭が中心であった。石炭塊を手で火格子上に散布する方法から、給炭機を導入したストーカ燃焼、さらには微粉炭を空気に搬送させて噴き込む微粉炭燃焼、或いはまた微粉碎する動力が大きいことから石炭の粗粒をそのまま燃焼させるサイクロンバーナが順次開発された。石炭は基本的にチャー、揮発成分、灰成分か

Table 1 Boiler classification and problems to be solved

Category	Type of boiler	Water circulation	Gas circulation	Furnace	Common problems	Safety measures
Cylindrical	Simple cylindrical boiler	Submerged	Outside shell	Brick-walled	Construction Materials Incrustation Inside corrosion Outside corrosion Priming Superheat & burnout Creep Deterioration Explosion Water treatment Flue-gas treatment	Water-level control Pressure control Safety valve Registration & inspection Insurance Boiler code
	Tubular (smoke tube) boiler		Outside shell & smoke tube	Brick-walled		
	Flue (furnace)-tube boiler		Single and multiple flue tubes	Flue tube		
	Flue- and smoke-tube boiler		Flue tube & smoke tube	Flue tube		
Watertube	Submerged watertube boiler	Submerged	Outsie of tube	Brick-walled	Construction Materials Incrustation Inside corrosion Outside corrosion Priming Superheat & burnout Creep Deterioration Explosion Water treatment Flue-gas treatment	Water-level control Pressure control Safety valve Registration & inspection Insurance Boiler code
	Natural circulation boiler	Inclined watertube	Outsie of tube	Brick-walled		
		Vertical watertube	Outsie of tube	Brick-walled		
	Forced circulation boiler		Natural & Forced	Outsie of tube		
Once-through	Once-through boiler	Forced-flow	Outsie of tube	Water-wall	Construction Materials Incrustation Inside corrosion Outside corrosion Priming Superheat & burnout Creep Deterioration Explosion Water treatment Flue-gas treatment	Water-level control Pressure control Safety valve Registration & inspection Insurance Boiler code

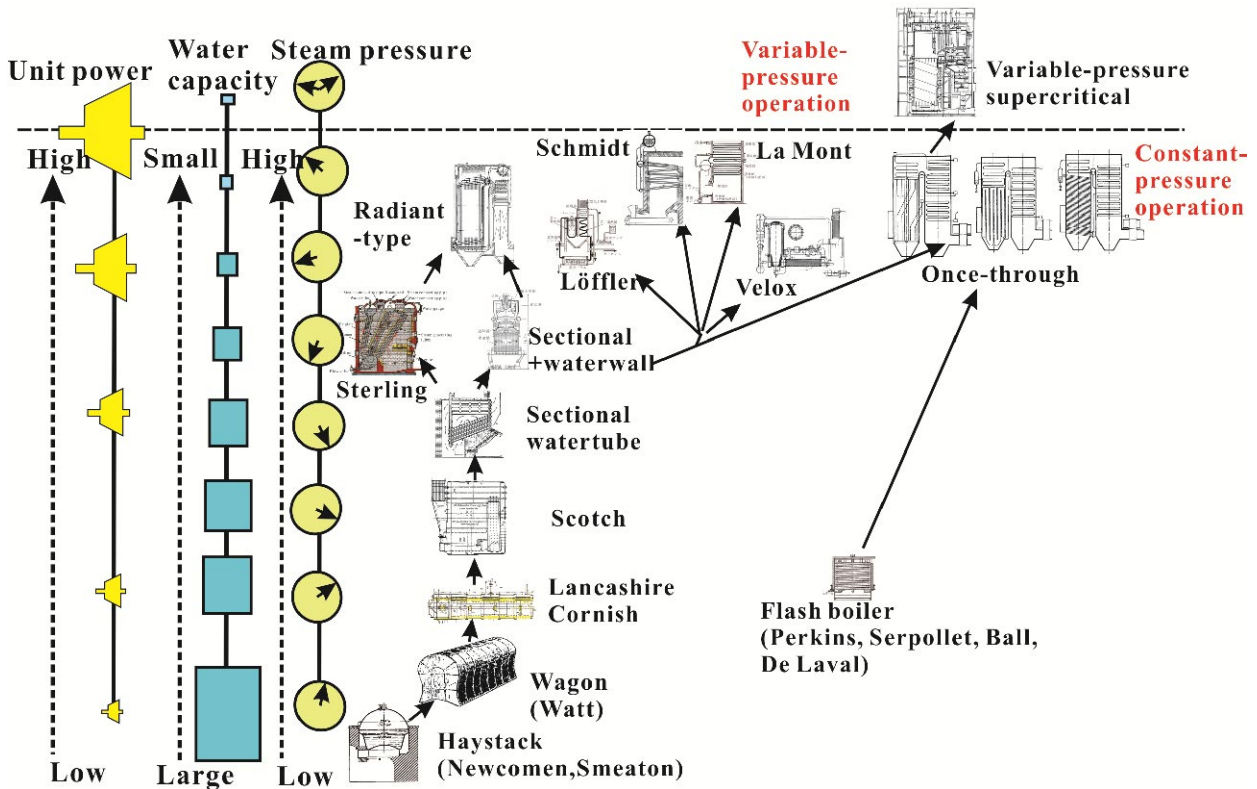


Fig. 5 Development of boilers (based on literatures [7-9]).

らなるが、灰の融点が低いと、水管に付着して伝熱を阻害するし、場合によってはクリンカを形成して運転を不能にすることもある。融点が高いとフライアッシュとして適切な排ガス処理がなければ環境中に放出される。低融点灰を含む石炭に対しては積極的に炉内で溶融させ、炉底から排出するスラグタップ炉なども開発された。その後、石油の利用が広がると、扱いにくい石炭が変わって油焚きボイラが席卷することになるが、これは事業用や産業用などを中心に第二次世界大戦後の状況である。

このようなボイラに係る各種課題を解決しながら、より高性能、大出力のボイラが追求されてきた。図5はF. Ohlmüllerの示したボイラの発達過程[7]、さらにはC. Matschoß[8]やH. W. Dickinson[9]を参考にして作成した図で、下から斜め上方向に順次ボイラの形式や保有水量、圧力、単機出力の変遷を模式的に表している。最下段はNewcomenのボイラで、ついでWattのワゴンボイラが出現した。ボイラの高圧化に伴ってボイラは円筒形に変わり、CornishやLancashireボイラが開発され、これが炉筒煙管ボイラの初期の形式であるScotchボイラに繋がる。更なる出力、つまりボ

イラ蒸発量の増大は、伝熱面積増大によって解決され、水とガスの配置を入れ替えた水管ボイラの時代となる。当初は水が水管内を行きつ戻りつするHowardのボイラやRootボイラなど、水が水管とドラムをめぐって循環しないボイラが出現した。中にはFieldボイラのように2重管構造のボイラもあった。本格的な水循環を確保したボイラの典型はBabcock & Wilcoxのセクショナルボイラである。水管は緩傾斜の直管で、両端には掃除用のプラグが設置されていた。これは水処理技術が十分に確立していなかったことによる。自然循環力は垂直管のほうが優れているのは明らかで、後にStirlingボイラがこれを実現した。火炉壁は当初は煉瓦積みであったが、様々な形式の水壁構造が開発され、これが現在に繋がる放射式水管ボイラとなる。ボイラ蒸発量の増加は燃焼量の増加に繋がり、水循環量にも大きく影響する。自然循環ボイラでは水循環の安定性の面から循環量には限界があり、これをカバーするために強制循環ボイラが開発された。La Montボイラはこの典型である。

W. J. M. Rankine [10]の著名な論文がPhilosophical Magazineを通じて公表されたのは1854年であるが、それ以前から高圧高温化は性能

向上の必須要件であった。高压化は気液密度差を小さくし、自然循環による水循環は不適當となる。従って超臨界圧ボイラは必然的に貫流ボイラの形態をとる。その先駆者ともいべき Mark Benson が、水単相部を超臨界圧で実現し、フラッシュさせて任意の圧力の蒸気を発生させる形式の貫流ボイラのドイツ特許を取得したのは 1920 年である。1924 年には Siemens 社は Benson ボイラの特許を取得し、ベルリンの自社工場用として設置し、これによって Benson ボイラの実用化が始まった。しかし本格的な超臨界圧ボイラの出現はおおよそ 30 年後の 1956 年であった[11]。現在では発電用大型ボイラは、超臨界圧変圧運転になっている。定圧運転から変圧運転への移行には、材料技術のみならず制御技術、特にコンピュータの導入が大きく寄与している。

4. 破裂との戦い

ボイラの高圧化、高性能化は必然的に破裂の頻発につながった。ボイラの破裂は火薬の爆発にも例えられ、ドラム内保有水の有する内部エネルギーが急激な蒸発・膨張となって缶板やバルブなどの部品を広範囲にわたって飛散させ、それによって多数の死傷者を発生した。図 6 に示すものは、大阪電灯安治川発電所西発電所において 1920 年



Fig. 6 Boiler explosion at Ajikawa Steam Power Station (1920) [12] (Courtesy of the family of Seiichi Ishigai).

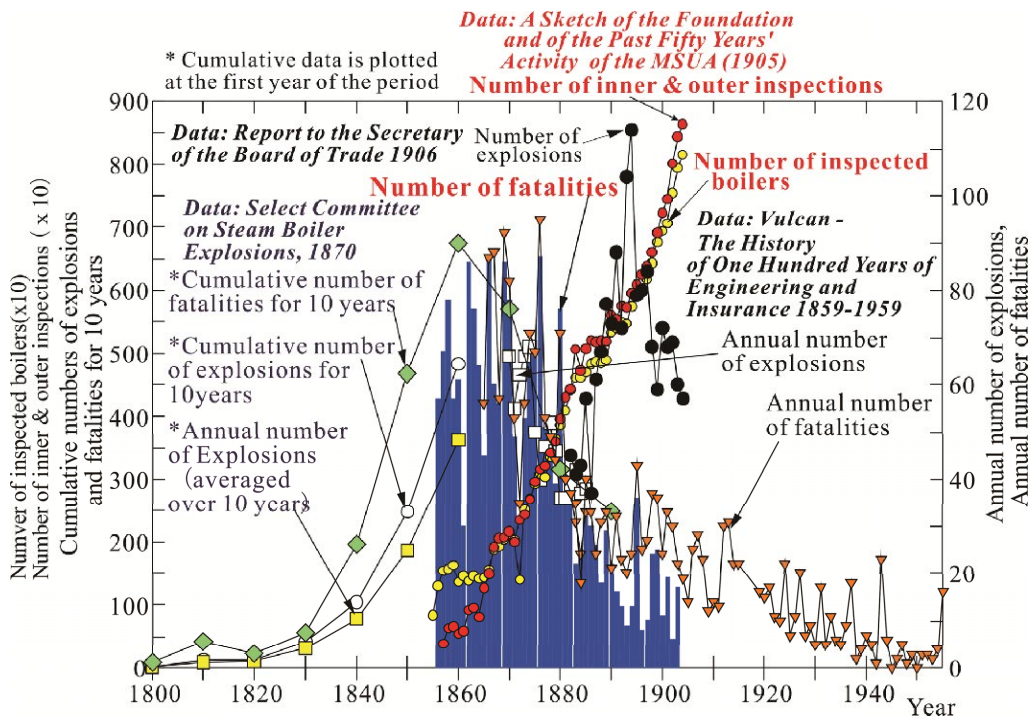


Fig. 7 Boiler explosion statistics in the UK [14-16].

に発生した Babcock & Wilcox 社製ボイラの破裂現場の写真である[12]. このボイラは運開から 10 年経過したボイラで, 定格圧力 1.1 MPa, 蒸発量 8.5 t/h, 蒸気温度 254°Cであった. 死傷者は 7 名にも達した. ボイラ破裂による最も悲惨な事故はミシシッピ川における Sultana 号で, ボイラ破裂によって 1600 人を超える死者を出した[13].

図7に1800年以降の英国におけるボイラ破裂事故と死者数の推移を示している[14-16]. ボイラ設置台数の増加は当然ながら, 特に1820年頃から急激な勢いで破裂件数と死者数が増加している. しかしながら1860年頃を境にして, 破裂件数, 死者数ともに急速に減少していった. これには同図に示すボイラ検査台数の急激な増加が大きく影響している. このようなボイラ検査の有効性は米国においても顕著である.

図8は1780~1940年頃のボイラ圧力と蒸気温度の推移をプロットしている[13, 15-17]. Wattの特許の満了後, 1800年代初めに Richard Trevithick は鑄鉄製の高圧機関を製造した. しかし1803年にこれが破裂するにおよんで[18], Trevithick は鍛鉄製のボイラに変更した. 製鉄技術そのものはそれ以前から進んでいたとはいえ, 圧延機の出現までは十分な大きさの鉄板は望めなかったのはいうまでもない. 鉄板があったからといって溶接技術が完備していたわけでもない. Newcomen ボイラや Wattのボイラでは当初はろう付や手打ちのリベット接合が行われていたが, 1835年前後には機械打ちのリベット接合が広く用いられるようになった[19]. このようにボイラ製造技術は製鉄技術や工作技術に大きく依存し, またそれが製鉄技術に新たな展開を促すのである. ボイラ技術の展開や安全に関してもそのような流れの中で見ることがある. 図8には圧力上昇過程について, 出典ごとに着目点異なることによって大きな分散があるため, ここでは曲線を2本引いているが, 1900年の段階では最大で2MPa程度にまで圧力が上昇して

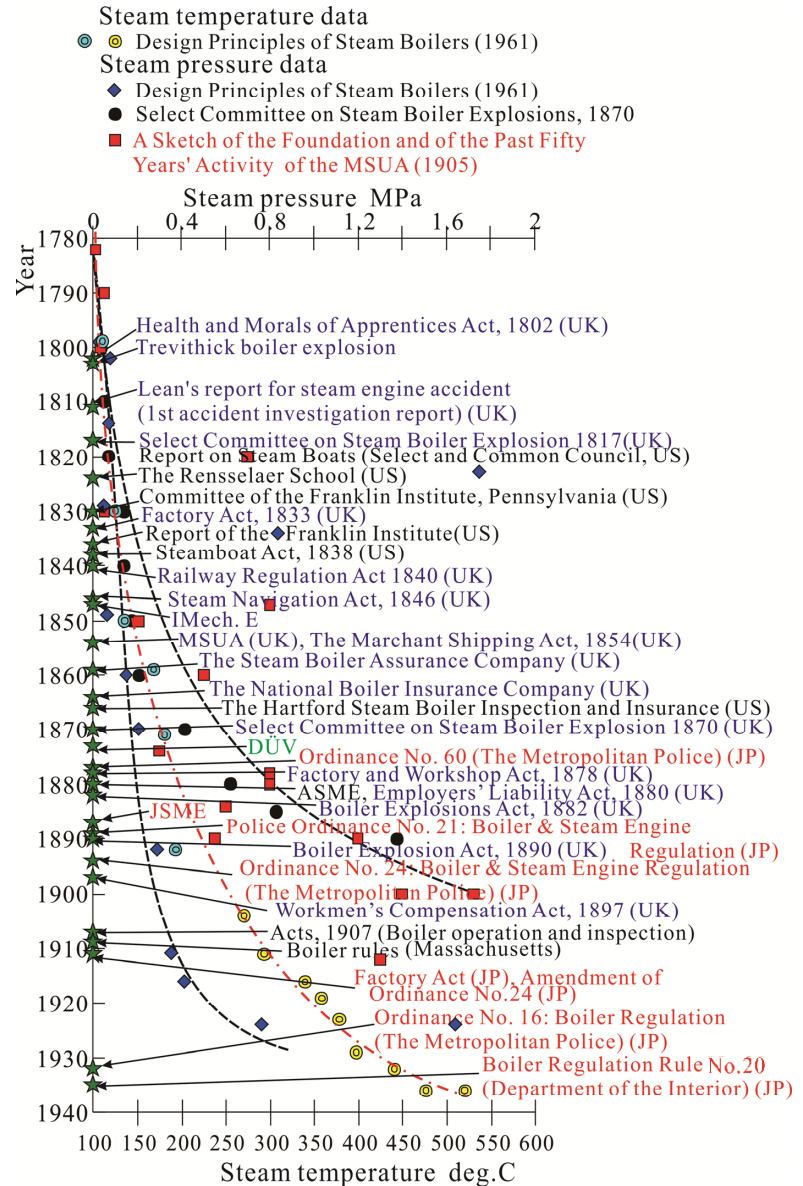


Fig. 8 History of steam pressure & temperature with various acts and events (based on literatures [14-17] and [22-27]).

いたことが分かる. しかも1900年以前には蒸気温度はほぼ飽和蒸気温度であったが, 以降は過熱蒸気となっていて, 1935年頃には蒸気温度はすでに520°Cにも達していた. 当然ながらそれには材料技術に関する大きな進展があったのは間違いない.

ボイラ破裂に対して, 公的な取り組みで最も初期に行われたのは英国における特別委員会である. この当時, すでに蒸気船が出現しており, 機関出力は定置用と同程度で, 1830年頃には船用機関の出力は定置用を凌駕した.

大量の貨物輸送や乗客輸送を求められたのは英

国に限らない。米国においても一般に Western rivers と呼ばれたミシシッピ川やオハイオ川ではボイラ破裂が頻発した[20,21]。破裂事故の多発を受けて、米国では1830年にフィラデルフィアにおいて Franklin Institute がボイラ研究を開始した[22]。実際に米国や英国で舶用ボイラに関する規制がはじまったのが1830～40年頃である。Franklin Institute の研究成果が公表されたのは1836年が最初で、材料技術のみならず沸騰の観察や実際に破裂実験も行った[23]。

1854年に英国マンチェスターにおいてボイラ利用者、保有者、製造者などが Lancashire ボイラの開発者でもあった Willian Fairbairn の提案を受けて、The Association for the Prevention of Steam Boiler Explosions, and for Effecting Economy in the Raising and Use of Steam (後に The Manchester Steam Users' Association for the Prevention of Boiler Explosions and for the Attainment of Economy in the Application of Steam, MSUA)を組織した[14, 27]。これは自ら使用するあるいは製造するボイラの運転や技術の基準を設定し、それに基づいて定期検査を行うものであった。登録されたボイラは定期検査を受け、良好であれば認証が与えられ、不都合があれば改善や運転停止が求められた。英国では1833年には Factory Act が制定されている。すでに工場労働者の安全管理が問題となっており、ボイラ破裂が工場主や労働者にとっても大きな損害に繋がるのが認識されていた。MSUA の設立以降、損害保険会社が設立され、ボイラ検査が行われるようになった。英国では、政府官庁による検査・規制は規則を厳しくする方向に向うとの考えから、できるだけ民間で規制したいとの Fairbairn の考え方が浸透していたこともあり、定置ボイラに関する法制化はどちらかといえば遅れ、Boiler Explosion Act の制定はMSUA の設立から約30年後の1882年であった[14]。なお舶用では Lloyd's Register of British and Foreign Shipping (1834年、船級規則発行)も重要な第三者検査機関であった[21]。

米国においては Franklin Institute による組織的な研究は早かったが、ボイラ検査を行う Hartford などの損害保険会社は1860年代に設立された。マサチューセッツ州における法的枠組みについては、1907年のボイラ破裂防止法の施行まで待たねば

ならなかった。また同州では1909年にボイラの構造運転規則が制定された。オハイオ州でも同様の規則が制定され、各保険会社の検査とあいまって1900年頃をピークとして急速に破裂事故は減少して行ったのである[22]。マサチューセッツ州では州警察にボイラ検査部門を設置していた。このような形態はドイツや後の日本の状況と同じである。なお舶用ボイラに関しては財務省の所管として始まり、後に商務省、最後には沿岸警備隊へと移行した。

図8中には日本の状況についても示している。明治期には殖産興業の掛声と共に西欧から蒸気機関が急速に導入された。石炭燃焼に伴う煤塵に対する規制とも言える1877(明治10)年の東京警視本署第60号布達がおそらく最初のボイラ規制であろう[24, 25]。1889(明治22)年には汽罐及汽機取締規則(警察令第21号)、1911(明治44)年に当時の第一機関汽罐保険による代行検査が認められ、漸く民間による検査業務が始まった[24]。日本におけるボイラ規制は府県単位の警察本部が担当していた[25]。従って規制条例も個々に発令されていた。これが全国共通の「汽罐取締令(内務省令第20号)」及び「汽罐構造規格(内務省告示第204号)」になるのは1935(昭和10)年であった[26]。

5. おわりに

本稿ではボイラ技術の展開とボイラ破裂問題について概説した。技術の発展は、当該技術だけでは閉じず、周辺分野の技術発展にも大きく影響される。さらにはその技術を利用し、支えるあるいは場合によっては規制する社会制度の成熟が、技術そのものを育てる上で非常に重要である。ボイラそのものには約300年の歴史が有り、その安全性については200年の歴史を踏まえて現在の状況があることを忘れてはならない。

ボイラも含めた蒸気動力技術の展開については文献[9]の翻訳本として山川敏夫訳『蒸気機関発達史』(伊藤書店, 1944)、磯田浩訳『蒸気動力の歴史』(平凡社, 1994)がある。さらにはドイツ語ではあるが文献[8]は好書である。

著者がこのような分野に入り込んだのは師匠である石谷清幹、赤川浩爾両先生(共に故人)の影響が強い。これらの先生方と共に著した Steam

Power Engineering (Cambridge University Press) は On demand で手に入る。なお著者は日本ボイラ協会の会誌「ボイラ研究」に2013年以来「ボイラー技術の史的展開」のタイトルで連載している。ご興味があればご一読、ご意見などいただければ幸いです。

参考文献

- [1] Edward Somerset, A Century of the Names and Scantlings of such Inventions, F. Grismond, London (1663).
- [2] Thomas Savery, The Miner's Friend, or an Engine to Raise Water by Fire, S. Crouch, London (1702).
- [3] J. T. Desaguliers, A Course of Experimental Philosophy, Vo. II, Section XV, Printed for W. Innys and 2 Persons in London (1744), pp. 484-490.
- [4] 薬師寺泰蔵, テクノヘゲモニー, 中公新書, (1989).
- [5] C. Singer, E. J. Holmyard, A. R. Hall, T. I. Williams eds., A History of Technology, Vol. IV, Oxford University Press, Oxford (1958), pp. 148-198.
- [6] L. T. C. Rolt, J. S. Allen, The Steam Engine of Thomas Newcomen, Landmark Pub., Ashbourne (1997), p. 145.
- [7] F. Ohlmüller, The Influence of the Benson Boiler on the Development of Power Stations, J. of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 75, Issue 452 (1934), pp. 161-184.
- [8] C. Matschoß, Die Entwicklung der Dampfmaschine, VDI Verlag, Düsseldorf (1987).
- [9] H. W. Dickinson, A Short History of the Steam Engine, Cambridge University Press, Cambridge (1938).
- [10] W. J. M. Rankine, On the Mechanical Action of Heat, Philosophical Magazine and Journal of Science, Vol. VII, 4th Series, (January - June 1854), pp. 1-21, 111-122, 172-185, 239-254.
- [11] 宮岡貞隆, 超臨界圧ユニットの現状とその経済性, 火力発電, Vol. 1, No. 11 (1965), pp. 902-916.
- [12] 石谷精一, 三ツノ汽缶爆発ノ研究 (原題: 私の調査した三つの汽缶爆発の鑑定) (1923年頃の執筆と思われる) .
- [13] C. Hocking ed., Dictionary of Disasters at Sea during the Age of Steam, Vol. II, Lloyd's Register of Shipping, London (1969).
- [14] Manchester Steam Users' Association (MSUA), A Sketch of the Foundation and of the Past Fifty Years' Activity of the Manchester Steam Users' Association for the Prevention of Steam Boiler Explosions and for the Attainment of Economy in the Application of Steam, Taylor, Granett, Evans, & Co., Manchester (1905).
- [15] Report to the Secretary of the Board of Trade upon the Working of the Boiler Explosions Acts, 1882 and 1890 (1906).
- [16] W. H. Chaloner, Vulcan - The History of One Hundred Years of Engineering and Insurance 1859-1959, (1959).
- [17] 石谷清幹, ボイラ要論, 山海堂 (1961).
- [18] Alexander Tilloch ed., Dreadful Accident, Philosophical Magazine, Vol. 16 (1803), pp. 372-373.
- [19] R. L. Hills, Power from Steam, Cambridge University Press, Cambridge (1989).
- [20] L. C. Hunter, Steamboats on the Western Rivers, Harvard University Press, Cambridge (1949).
- [21] J. T. Lloyd, Lloyd's Steamboat Directory and Disasters on the Western Waters, James T. Lloyd & Co., Cincinnati (1856).
- [22] A. M. Greene, Jr., History of the ASME Boiler Code, ASME, New York ((1953).
- [23] Report of the Committee of the Franklin Institute on the Explosions of Steam-Boilers, Part I (1836), Part II (1837).
- [24] 安田火災海上保険, 安田火災百年史 (1990), pp. 288-290.
- [25] 日本科学者会議編, 環境問題資料集成, 第9巻, pp. 8-31.
- [26] 吉武恵市, 武田晴爾, 上野民治, 汽罐取締令解説, 汽罐協会 (1936).
- [27] William Fairbairn, Useful Information for Engineers, 4th ed., Green, Longman, Roberts, & Green, London (1864).