

歴史の散歩道(52)

我が国における蒸気動力技術の展開①



欧米におけるボイラ及び蒸気原動機の
発展過程

A Short History of Steam Power Technology in Japan Vol.1
The Development of Boilers and Steam Engines in the Western World

小 澤 守*
Mamoru Ozawa

1. はじめに

蒸気動力技術は火力、原子力を中心とした発電技術の根幹であるが、現今の大学教育課程の中では、「熱工学」あるいは「エネルギー変換論」といった、より包括的な科目の中でかろうじて語られる程度であって、事実上、絶滅科目ともいわれるような状況にある。現在の最先端技術は半導体であり、それに駆動される情報や各種ソフトウェアであろうが、社会を支える基盤インフラは過去300年に亘って先端技術であり続けた蒸気動力技術を前提として成り立っている。エネルギー・資源誌の読者諸賢にはそのような基盤技術の成り立ちについては十分に理解されているところではあるが、これから複数回にわたって展開する拙論にお付き合いをお願いしたい。

我が国においては蒸気動力技術は幕末から始まり、それも自ら開発したのではなく、欧州からの輸入技術であった。火力分野は幕末から170年余りで我が国の中で消化発展されて、現在、世界第一の技術を誇るまでに成長した。したがってタイトル通りにいえば、幕末、明治当初から出発して、国内事情を説明すればよいのであるが、海外技術を導入して開始したことから、海外特に欧米の状況も議論の背景として説明しておかねばならないだろう。

したがってこの第1回目は駆け足ながら欧米における蒸気動力技術の発展過程のおさらいをしておきたい。

2. ボイラ技術発展の全体像

蒸気動力の基本は蒸気発生と蒸気を持つ熱エネルギーの機械動力への変換である。蒸気発生の熱源には化石燃料の燃焼熱でも或いはまた核分裂エネルギーや太陽熱であってもよく、またエネルギー変換過程は往復動の機関であってもタービンであってもよい。そのことから蒸気動力の中心にあるのは水側であり、熱源を持つ熱エネルギーを蒸気の熱エネルギーへの伝達装置であるボイラの推移をみればおおよその全体像がつかめることになる。

図1は1700年から2000年頃までの蒸気圧力と温度、対応するボイラの基本構造を表したものである。1700年代初頭にThomas Newcomenが機械動力を外部的に取り出し、それによってポンプを駆動する所謂Newcomen機関を開発した。図2に示すものがそれである。Newcomen機関のボイラは銅板で構成され、はんだ或いはロウ付けによって接合されていた。James WattはNewcomen機関の欠点

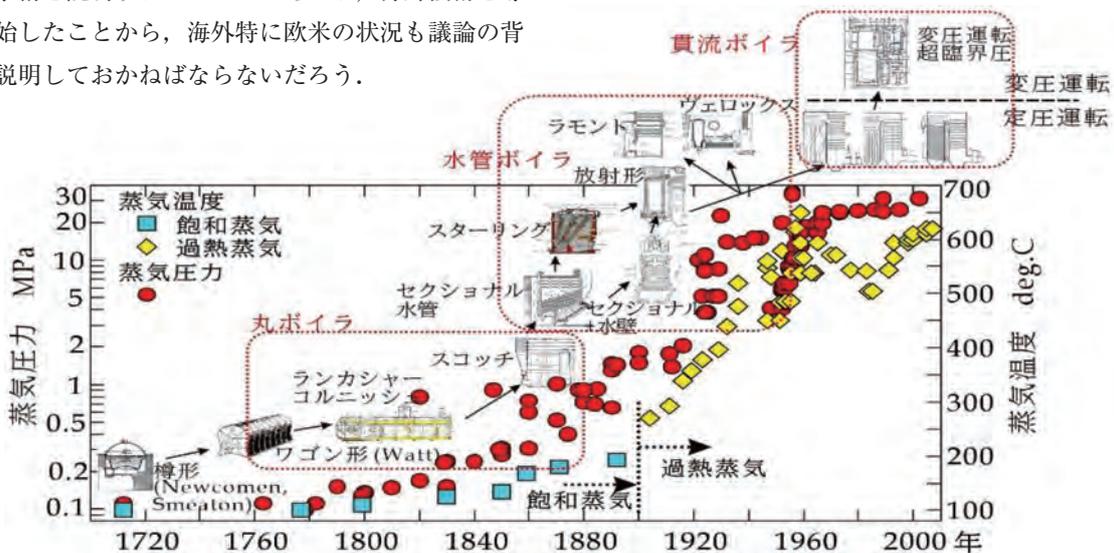


図1 蒸気圧力、蒸気温度の推移とボイラ形式

*関西大学名誉教授
E-mail : ozawa@kansai-u.ac.jp

を機能分離によって克服し、さらに現在でいう自動制御の概念も導入し、図3に示す機関を開発した。これによって熱効率は飛躍的に改善された。当時の製鉄技術や加工技術は未発達で、大きな鉄板を製造することもまた溶接もできなかったことから、小さな鉄板を手作業でリベット接合した。当然ながら高压高温には絶えなかつただろう。さらにはSaveryのポンプ機関をも背景としていたことから、Newcomen機関もWatt機関も蒸気の凝縮によって生成される真空と大気圧との差を利用した所謂大気圧機関であった。

1800年にはWattの特許が満了し、Richard Trevithickはボイラ胴の製造の容易さから鑄鉄を用いた所謂Cornishボイラを開発したが、1807年にボイラ破裂を起こしたことから、鍛鉄板のリベット接合ボイラに変更した。CornishボイラやLancashireボイラは胴内に燃焼室、即ち炉筒を配し、ボイラ効率の大幅な改善を成し遂げた。のちには燃焼排ガスが通過する煙管も設置されるようになり、その典型が船用ボイラとして頻用された図4に示すScotchボイラである。このボイラは1912年就航の著名なTitanic号に両面焚、片面焚合計29缶搭載され、2機の3段膨張4シリンダ機関各15,000 HP、低压シリンダからの排気を利用した低压タービン16,000 HP、合計56,000 HPを生み出す蒸気を供給した。以上のボイラが丸ボイラと呼ばれるもので、現在でも炉筒煙管ボイラとして一定の地位を占めている。

ボイラのさらなる大容量化と高压化（当初は飽和蒸気）には水を管内におく所謂水管ボイラが用いられることになる。ただし当初から水循環の重要性が十分に明らかであったわけではなく、例えばHowardボイラなど無循環の水管ボイラが多く開発されたが、十分な水循環が得られないことから伝熱面負荷をあげることができなかつた。それに対して水管を二重管構造としてスムーズな水の流れを確保しようとしたNiclausseボイラやRootボイラも出現したが、明確な循環管路をもつボイラ出現までの中間段階にとどまった。

明確な循環回路を形成した典型的な水管ボイラとして1867年に出現したBabcock & Wilcox社のセクショナルボイラは様々な改良ののち1883年頃には図5に示す構造となった。このボイラは降水管と上昇管相当のヘッダ間に設置された緩傾斜の直管からなる蒸発管と蒸気ドラムからなる。傾斜した蒸発管はその両端にプラグが設置されている。この当時、水処理技術は十分には発達せず、水管内の定期的な掃除が必要であった。このボイラは当初石炭の手焚きであったが、後に機械式のストーカが開発された。

水管ボイラの水循環は水管の傾斜が垂直に近づくにつれて良好になるのは必然で、1890年代にはAlan Stirlingによる急傾斜ボイラが出現する。水処理の根本的な解決が十分になされていたわけではないが、ボイラ蒸発量の増加、

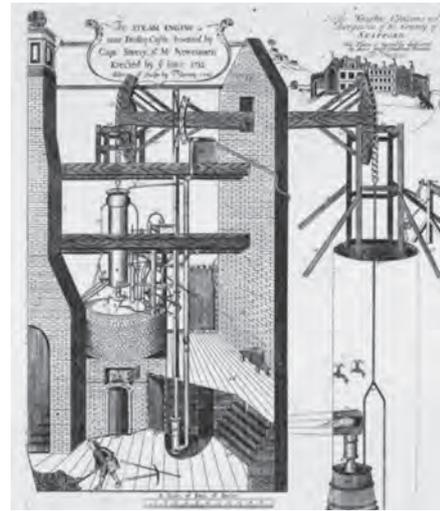


図2 Newcomen機関 (1712)¹⁾

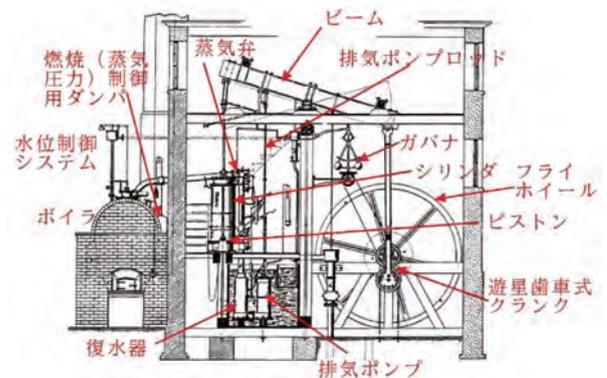


図3 Wattの複動回転機関 (1787-1800)²⁾

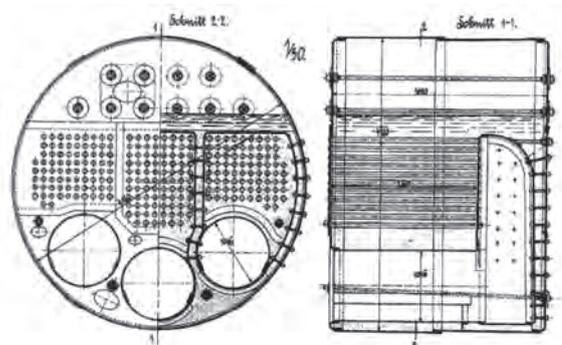


図4 Scotchボイラ (1900年頃)³⁾



図5 セクショナルボイラ (Babcock & Wilcox, 1883)⁴⁾

つまり大容量化には良好な水循環が不可欠で、図6に示すのは4ドラム形のStirlingボイラである。図中に示すように上部に3個のドラム、下部に水ドラムを設置、左端のドラムには給水口が設置されている。中央、右端の蒸気ドラムにつながる水管群の背面にはバップル板があり、燃焼ガスの流れを制御するようになっている。左端の給水用ドラムにつながった水管群は降水管として作用している。燃焼室の壁はレンガ積みで、起動時の燃焼火災の放射エネルギーの多くは壁面のレンガが吸収するのであるから、立上げの時定数はかなり長いものになっていたはずである。ボイラの大形化、燃焼室温度の上昇、つまりは高発熱量に対応するために1930年前後には燃焼室の壁を水冷壁とするようになった。

図1にも示すように1900年頃までの蒸気機関は飽和蒸気を利用してしたが、それ以降、過熱器を設置して過熱蒸気を蒸気機関に供給するようになった。石炭供給にも各種の機械式ストカが利用されていたが、1920年頃には微粉炭燃焼が完全に実用化され、微粉炭バーナ、水冷壁、過熱器を備えたボイラが出現するようになった。ただし当初は緩傾斜水管ボイラの下側に水壁を置いたものから図7に

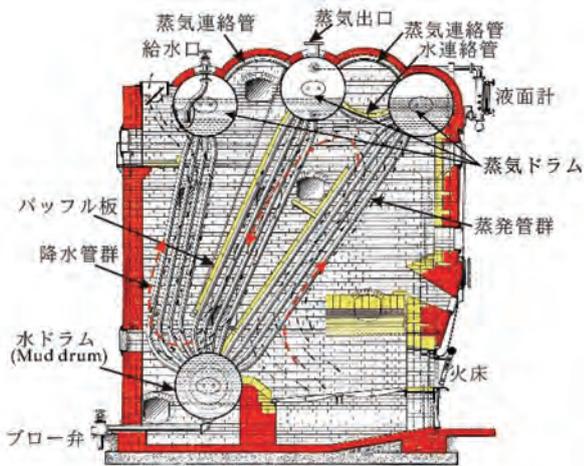


図6 4ドラム形Stirlingボイラ (1892)⁵⁾

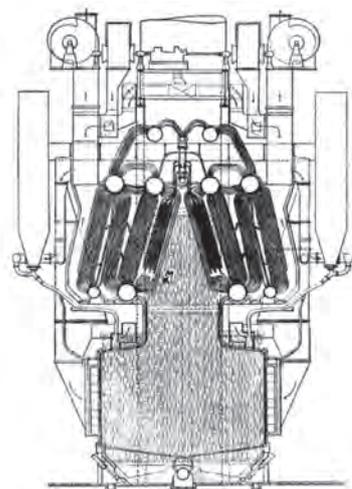


図7 微粉炭焚Double-Stirlingボイラ (CE, 1929)⁶⁾

示す急傾斜水管ボイラの下に水冷壁を置いたものまで、過渡的、中間的なボイラが出現した。

石炭燃焼は石炭中に含まれる灰への対応が必須である。灰の融点が高い場合にはフライアッシュとして排出されるが、低い場合には燃焼室内で溶融することから、燃焼室下部に設置されたスラグスクリーン或いはウォータスクリーンを置いたスラグタップボイラが開発された。

これら水管ボイラは降水管と上昇管の水頭差で駆動される所謂自然循環形式である。水循環の基礎的な実験は1900年前後に行われていたが、本格的なモデル化や基本的な特性把握については1920年頃にFriedrich Münzinger⁷⁾やその後のErnst Schmidt⁸⁾の研究成果を待たねばならなかった。前者のモデルは二相流を均質流と仮定したものであり、後者のグループは相対速度と自己蒸発までをも含んだ検討を行った。

ところで一般に自然循環ボイラでは蒸発管出口でボイド率が0.7~0.8程度になると流量脈動が発生する。したがって蒸発管入口には適度な絞りが必要である。蒸発管の吸収熱量増加はボイド率増加、ひいては循環力の増加による循環流量増加につながるが、その一方で二相流の圧力損失が増加し、これは循環力低下に作用する。そこで水の循環力をアシストする目的で循環ポンプを挿入したものが強制循環ボイラと呼ばれるものである。図8は強制循環ボイラの代表的存在である1941~42年頃のCE社製La Montボイラである。

Mark Benson (Mark Müller) は1922年に貫流ボイラのドイツ特許をとった。彼のボイラでは給水を超臨界圧まで加圧して加熱し、制御弁を通じてフラッシュさせて所定の重臨界圧の過熱蒸気を生成するとしたもので、英国Rugbyで開発試験を行っていたが、その将来性を見抜いたSiemens社がライセンスを取得し、Siemens-Schuckert社のケーブル工場に2缶設置した。これが実用のBenson

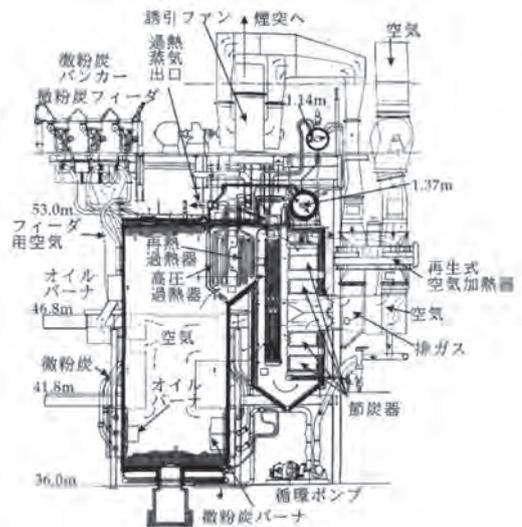


図8 La Montボイラ (CE, 1941-42)⁶⁾

ボイラとして最初のものである。のちには直接高压高温蒸気をボイラ内で生成してタービンに供給するようになっていく。同様にSulzer社でも貫流ボイラが開発され、Mono-tubeボイラと呼ばれている。いずれも基本は同様であるが、水管配置様式と気水分離器を置くかどうかの違いである。図9にBensonボイラの実例を示しておく。

1950年代半ばには超臨界圧貫流ボイラが開発され、その代表がドイツのHüls II (1956運開, 蒸気圧力29.4 MPa, 600/560/560℃, 260 t/h, Dürr) であり, 米国のPhilo #6 (1957運開, 31 MPa, 621/566/538℃, 306 t/h, Babcock & Wilcox Upボイラ) である。図10にPhilo #6のボイラを示す。発電効率は年を追って上昇し, 図11に示すように1960年頃にはほぼ40%に達している^{注)}。

1970年代には原子力発電所の建設が盛んにおこなわれるようになり, 原発がベースロードを担うようになってくると, 火力には当然ながら季節, 日, 時間の変動を吸収することが求められるようになり, 制御理論, 材料工学の発展も相まって, 変圧運転が行われるようになる。1980年に運開した超臨界圧変圧運転貫流ボイラでは最低安定負荷15%というものまで現れている。火力のさらなる効率改善はトッピングとしてガスタービンを置き, ボイラをガスタービン排熱で運転するコンバインド発電によって実現され, その効率はLHV基準で62%にも達している。

3. 単機出力の変遷

以上のようなボイラ技術をベースとした動力技術の全体像を見るうえでは単機出力の変遷を概観するのが最も適切だろう。図12はNewcomen機関から現在の原子力発電までを単機出力の視点でプロットしたものである。当初のNewcomen機関の出力はせいぜい4 kWであったが, それに続くWatt機関などで数十kWのレベルまで上昇し, 1700年代末期に出現する船用機関が1830~1900年頃には定置機関を凌駕している。1800年代末期に電灯事業から始まった発電事業は工場用動力としても急速に成長し, 1920年頃には単機出力において船用動力を凌駕した。船用動力は艦

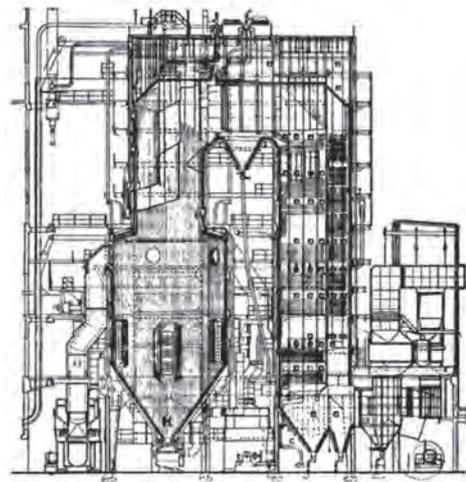


図9 微粉炭焚Bensonボイラ (VKW, 1957運開)⁹⁾

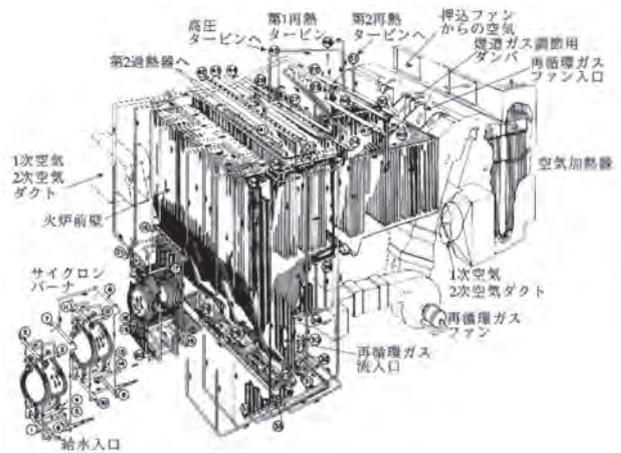


図10 Philo #6 超臨界圧ボイラ (1957運開)⁶⁾

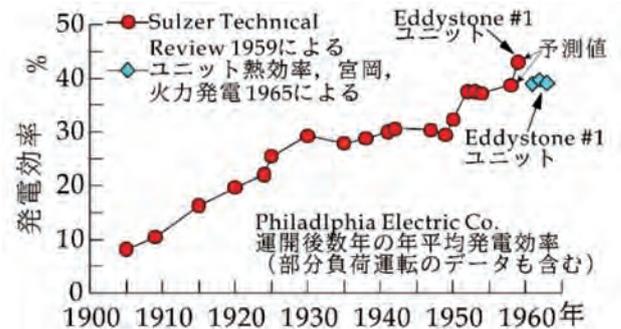


図11 発電効率の推移⁶⁾

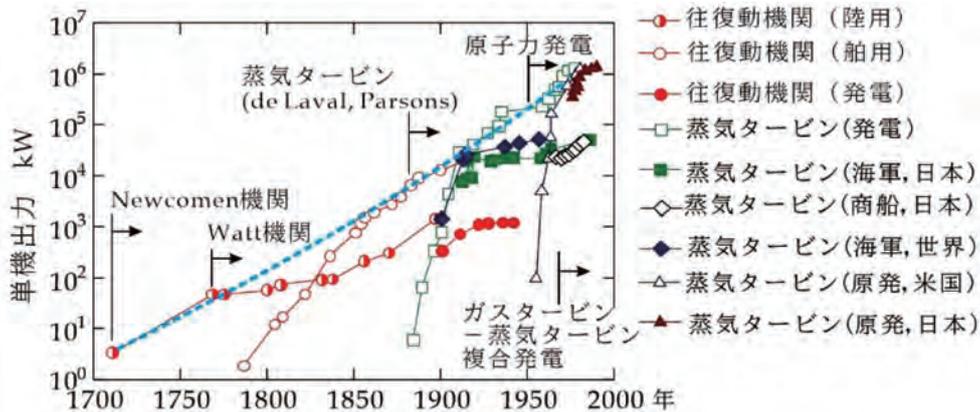


図12 単機出力の推移 (赤川浩爾教授のご好意による)

艇や商船のサイズと速度に限界があり，所要動力としても頭打ちになっている．一方原発では発電容量は1,300 MW級にまで達している．

一方，そのような出力をだす機関としては，当初はポン

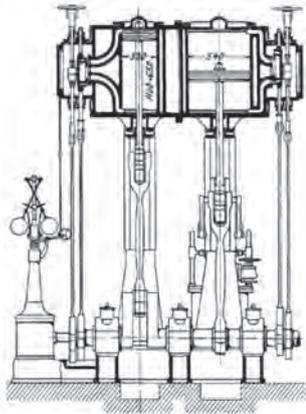


図13 2段膨張機関 (1875)³⁾

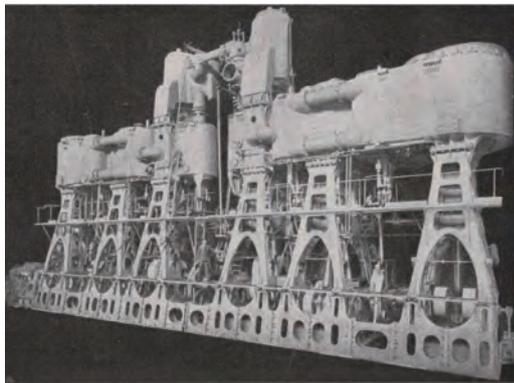


図14 Kaiser Wilhelm II号の4段膨張機関 (1902)³⁾

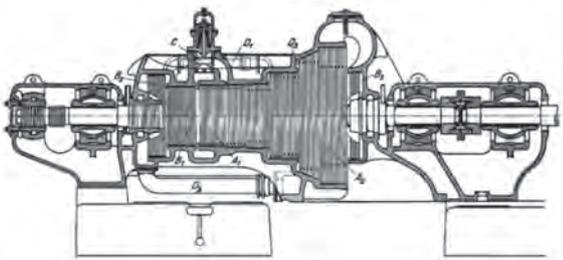


図15 Parsonsタービン (1900年初頭, 4,000kW)¹⁰⁾

プ用動力源として図2，3に示す単気筒の往復機関から出発し，工場用や蒸気船用の横置機関，図13に示す立形2段膨張（高圧，低压シリンダ）機関，3段膨張機関，最大級のKaiser Wilhelm II号（1902年進水）（図14）では2軸合計出力45,000 HPで，シリンダ径は高圧980 mm，第一中圧1,250 mm，第2中圧1,900 mm，低压2,850 mmの4段膨張，行程は1,800 mmであった．

1800年代末期にはParsonsやde Laval，さらにはCurtisの蒸気タービンが出現した．図15に示すのは1900年頃のParsonsタービンで出力は1,500 rpmで，4,000 kWである．大容量分野ではタービン機関は出力当たり機関重量が大きい往復動機関を凌駕する．現在では原子力発電，コンバインド発電など最大規模の発電を支えている．

図12には最大容量に包絡線を引いているがほぼ300年間に250,000倍にまで増大してきたことになる．

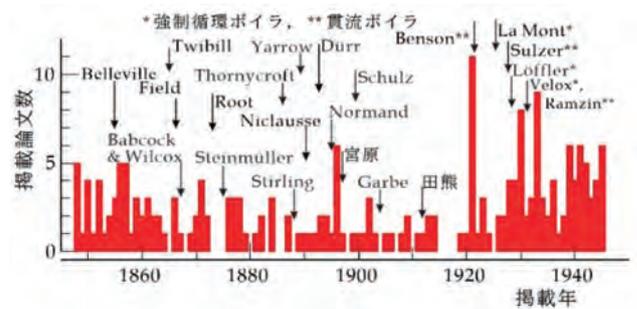


図16 IMechE論文集掲載のボイラ関連論文数とボイラ開発状況

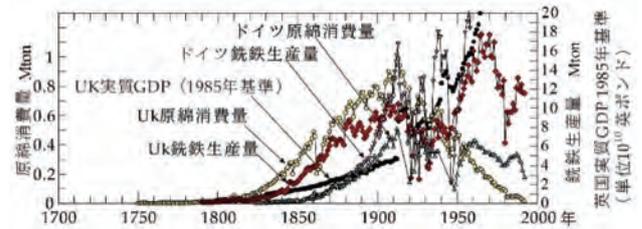


図17 英国，ドイツにおける経済発展¹¹⁾

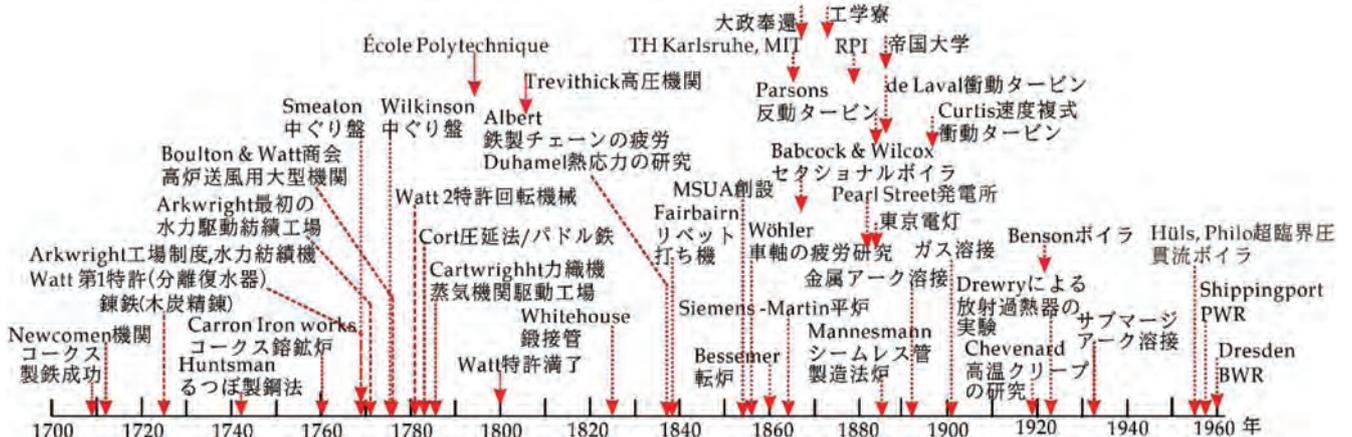


図18 加工技術，材料技術の推移とボイラ関連事象

4. ボイラ技術発展の背景

このような蒸気動力技術の展開には、背景になる経済発展、材料技術の展開、加工技術の発展、MUSA等の第三者検査制度など社会経済的、科学技術的発展があって初めて可能となる。図16に英国機械技術者協会 (IMechE) 創立の1847年から1945年頃までの論文誌に掲載されたボイラ関連論文数の推移と様々な水管ボイラの開発時期を列記している。またその時期を中心として英国及びドイツの原綿消費量と銑鉄生産量の推移を図17に示している。この時期は主として英国において経済発展が著しく、蒸気動力技術も大きな貢献をなした時期でもある。ドイツの台頭は英国より数十年遅れて始まったことが見て取れる。

このような蒸気動力技術を支えたのは製造技術であり、中ぐり盤、リベット、製鉄製鋼技術など様々な背景技術があった。そのような経緯を図18は端的に示している。

IMechEや後のASMEの出現はそれまでの学問体系に工学分野が付け加わったことを意味し、大学においても力学、電磁気学や化学などに準拠した体系的な教育がなされるようになっていった。

5. まとめに代えて

1867年の大政奉還を中心とした幕末期はBabcock & Wilcoxに代表される本格的な水管ボイラ、そして蒸気動力技術の発展期に対応する。我が国は西欧に少し後れながらも動力技術を展開することができ、非常に幸運であったと思う。西欧技術の導入から始まる我が国における蒸気動

力技術については次回以降に述べたい。

注) 1960年代まで海外技術に依存していた我が国の火力発電技術は、現在では世界最高クラスになっている。例えば2009年運開の超々臨界圧 (USC) 微粉炭火力である磯子新2号機では25MPa, 600/610℃, LHV基準で発電効率45%, 2020年に運開した竹原新1号機では27 MPa, 600/630℃の蒸気条件で48%にまで到達している。

参考文献

- 1) Barney's Print of the Steam Engine at Dudley Castle (1719), https://coimages.sciencemuseumgroup.org.uk/22/1/large_1930_0921.jpg (2025.2.10閲覧).
- 2) J. Farey; A Treatise on the Steam Engine, Longman, Rees, Orme, Brown, and Green, London (1827).
- 3) C. Matshoss; Die Entwicklung der Dampfmaschine, Springer, Berlin (1908).
- 4) The Babcock & Wilcox Co.; Steam - Its Generation and Use, 22 ed., New York (1890).
- 5) The Stirling Co.; Stirling - A Book on Steam for Engineers, New York (1905).
- 6) 小澤守; 蒸気機関発達史, クラフティヴ電子出版 (2023).
- 7) F. Münzinger; Untersuchungen an Steilrohrkesseln- Der Wasserumlauf in Steilrohrkesseln, VDI Zeitschrift, 64-25 (1920), s. 453-457.
- 8) E. Schmidt; Der Wasserumlauf in Steilrohrkesseln, Festschrift "Fünfundzwanzig Jahre Technische Hochschule Danzig", Verlag Kafemann, Danzig (1929), s. 231-250.
- 9) 江草龍男; 貫流ボイラ, オーム社 (1962).
- 10) A. Stodola; Die Dampfturbinen, Springer, Berlin (1910).
- 11) B. R. Mitchell 編著, 中村宏, 中村牧子訳; マクミラン・ヨーロッパ歴史統計1750-1933, 東洋書林 (2001).