

歴史の散歩道(60)

我が国における蒸気動力技術の展開④



明治期から昭和期までの陸用蒸気機関の展開

A Short History of Steam Power Technology in Japan Vol. 4

The Evolution of Land-Based Steam Engines from the Meiji Era to the Showa Era

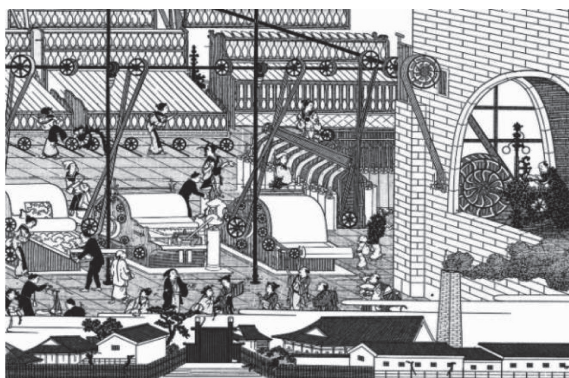
小 澤 守*
Mamoru Ozawa

1. はじめに

既報¹⁾では幕末から昭和初期に至る期間に、西欧から導入された主として艦船主機に関する技術が我が国に定着してどのように発展してきたか、その概要を述べた。この記事の第4回目は陸用蒸気機関、とくに発電技術を中心に述べたい。

蒸気動力が英国で開花した当初はポンプ駆動用機関であり、その後、各種工場内の機器駆動用の動力源であった。その後、艦船の主機としての展開が図られ、海軍創設を希求した幕府、明治政府は多数の艦艇ならびに主機を西欧特に英国から導入して、我が国の海軍技術の展開を図った¹⁾。我が国では蒸気動力技術は英国とは違って船用技術の確立から始まって陸用技術は若干遅れて船用技術の影響を受けながら進展したともいえる。

図1は幕末の先進藩であった鹿児島における紡績工場の状況を描いたものである。

図1 1867年竣工の鹿児島紡績²⁾

図の右端の建物の中にボイラならびに蒸気機関が据付けられているように見える。ボイラは丸ボイラで機関は横置単汽筒と思うが、実際はどうか不明。また回転数制御のためのガバナと大きなプーリから伸びたベルトによってラインシャフトを駆動している様子が描かれている。1872年に操業を開始した富岡製糸工場でもフランス人技師Paul Brunatの名を取った横置単汽筒のプリュナエンジンに

*関西大学名誉教授

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

よってラインシャフトを通じて多数の製糸機を駆動していた。我が国で電灯事業が始まるのはさらに十数年後である。

2. 初期の電力事業

欧米ではMichael Faradayの電磁誘導の研究(1831年)、さらにはErnst Werner von Siemensの電動機(1866年)などの技術開発が行われていた。同じ頃、我が国は開国そして明治維新の激動の時代にあり、堰を切ったように西欧文明がなだれ込んできた。その典型が馬車であり、煉瓦作りの建築物であった。またそれまで屋内においてはろうそくや菜種油の燃焼による発光であったが、1871-1872年頃に西欧式ガス灯が導入され、瞬く間に広く利用されるようになった。その後、ガス灯に替わってDuboscq式アーク灯(1878年、工部大学校初点灯)さらにはBrush式アーク灯(1882年、東京・銀座の街頭で点灯)が導入された。その少し前にThomas Edisonによって実用白熱電球が開発(1879年)され、照明のための発電と配電事業が開始された。5年後の1884年には我が国においても白熱電灯が初めて点灯された³⁾。

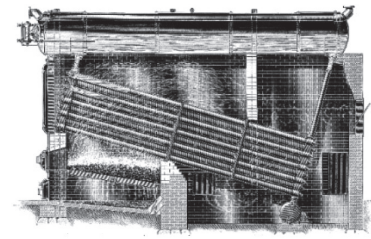
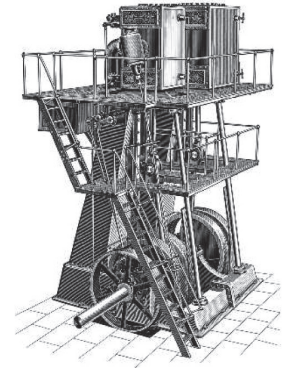
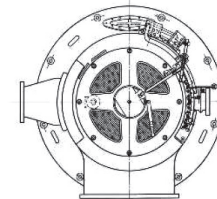
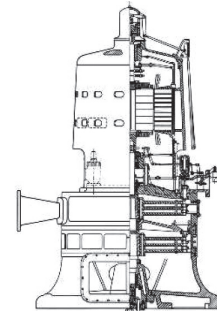
発電所の嚆矢としては英国ロンドンで1882年に建設されたHolborn Viaduct発電所、米国ニューヨークのPearl Street発電所があげられる。若干遅れるがドイツベルリンのMarkgrafenstrasse(1885年)においても発電所が稼働を始める。Edisonの発電所は当初直流配電であったため、需要端の近傍に発電所を置く必要があったが、Nikola TeslaやErnst Werner von Siemensによる技術開発によって交流が利用できるようになり、そのネットワークは急速に拡大していった⁴⁾。

このPearl Streetと同じ年に東京電燈設立準備会が開催された。そして5年遅れて1887年には南茅場町に第2電燈局、その翌年に第1電燈局が建設され、順次第5電燈局まで建設された⁵⁾。同様な電燈事業は全国各地で開始され、例えば神戸電燈は1888年、大阪電燈は1889年に事業を開始している³⁾。

表1に示すように、初期には汽罐としてはRoot水管ボイラが多く用いられ、汽機としてはStraight Line, Armington & Sims, New York Safety Powerなど横置往復動機関が利

表1 初期の電燈会社発電所設備の仕様^{2, 3, 5)}

和暦	西暦	社名	発電所名	汽罐	汽機	発電機
明治20-23	1887-1890	東京電燈	南茅場町第二電灯局, 麹町第一電灯局, 千束村第五電灯局, 京橋新有町第三電灯局, 神田錦町第四電灯局	Vertical multitubular boiler, Root boiler	Straight Line, Armington & Sims, New York Safety Power	Edison直流発電機, Brush直流発電機
明治21	1888	神戸電燈	栄町発電所	William H. Potter & Son's boiler, Root boiler	Straight Line, New York Safety Power	Edison直流発電機
明治24	1891	大阪電燈	南発電所, 北発電所	Woodbury多管式ボイラ	Woodbury120HP横置機関	Thomson-Houston単相交流発電機
明治24	1891	京都電燈		Root boiler	Straight Line, Armington & Sims	Edison直流発電機
明治24	1891	横浜電燈		Root boiler	New York Safety Power	Edison, Westinghouse直流発電機
明治24	1891	名古屋電燈		Hampson boiler		ドイツEdison直流発電機
明治24	1891	熊本電燈		Root boiler	New York Safety Power	Edison直流発電機

図2 Babcock & Wilcox WIF型セクショナル水管ボイラ (1883年頃)⁷⁾図3 McIntosh & Seymour社製直立3段膨張機関⁸⁾図4 王子製紙に導入された500 kW GE社製2段串形Curtisタービン (1906年)²⁾表2 浅草発電所の設備の仕様^{5, 6)}

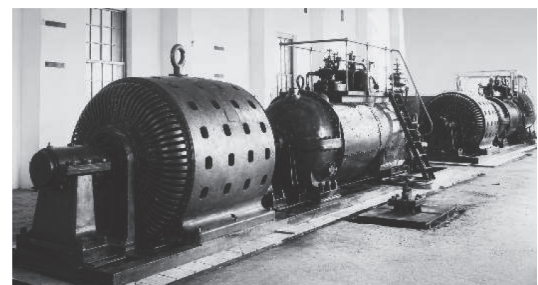
工事名	機種		基数	仕様	製造会社
第1工事 1896(M.29)	汽罐	Root水管式缶	8	2160kW*	石川島造船所
		エコノマイザ	4		Green
		給水ポンプ	2		Worthington
	汽機	直立3段膨張復水式	6	246kW, 1.03MPaG, 飽和	石川島造船所
		表面型復水器	6		
		単相交流	4	200kW	石川島造船所
第2工事 1897(M.30)	汽罐	水管缶	6	2160kW*	Babcock & Wilcox
		直立3段膨張機関	4	276kW, 1.03MPaG, 飽和	McIntosh & Seymour
		表面型復水器	4		Worthington
	汽機	3相交流	4	265kW	AEG
		宮原式水管缶**	2	2160kW*, 1.03MPaG, 飽和	芝浦製作所**
		直立中央弁式高速機関	1	559kW	Willans & Robinson
増設工事 1902(M.35)	汽罐	宮原式水管缶**	2	2160kW*, 1.03MPaG, 飽和	芝浦製作所**
		直立中央弁式高速機関	1	559kW	Willans & Robinson
		単相交流	1	500kW	GE
第2期増設工事 1903(M.36)	汽罐	宮原式水管缶	12	3430kW*	芝浦製作所**
		直立機関	3	895kW	Maschinenfabrik Ph. Swiderski
		3相交流	3	800kW	AEG

*ボイラ馬力 = 9.81 kWで換算して表示

用された。大阪電燈以外は直流発電・送電であった。配電事業が拡大するに及んで、表2に示す東京電燈の集中式中央発電所として浅草発電所が1896年に竣工、さらに1897年には第2工事によって発電設備が増設された⁵⁾。

後出の図15に示すように、初期には電燈事業が中心で、1890年代から1910年頃まで非常な勢いで増加したことがわかる。一方、電動機のための需要は1920年頃には設備容量とほとんど一致し、発電の中心は照明器具から電動機に替わっていった。当初は火力発電が水力を上回っていたが、水力発電所建設が進行し、1910年頃には火力を上回った。

集中大規模発電所の嚆矢とも言える浅草発電所の仕様を表2に示す。浅草発電所の第1工事では石川島造船所製のRootボイラが用いられていたが、第2工事においては我が国で初めて図2に示すBabcock & Wilcoxの水管ボイラが使用された。汽機には直立3段膨張機関（第1工事では石川島造船所製、第2工事では図3のMcIntosh & Seymour社の機関）が用いられている。

図5 千住火力発電所に導入されたWH社製Parsonsタービン²⁾, 1500 HP (1906年)

1902年の増設工事ではWillans & Robinson社の中央弁式高速蒸気機関が用いられた。また汽罐としては海軍艦艇用に開発された宮原式水管ボイラが用いられている。

3. 蒸気タービンの技術導入とその後の発展

1883年にKarl Gustaf de Lavalが実用衝動タービンを開発し、その2年後にはCharles A. Parsonsが反動タービンを開発した。1896年になってCharles G. Curtisが速度複式衝動タービンを、同じ年にAuguste Rateauは圧力複式衝動タービンを開発、さらに3年後にHeinrich Zoellyが圧力複式衝動タービンを開発した。このように蒸気タービンが次々と開発されてきたが、実際に欧米でも蒸気タービンが発電に使用されるようになるのは1900年以降になる。わが国でも東京市街鉄道深川発電所でGeneral Electric (GE) 社製Curtisタービンが導入され(1904年)、東京電燈千住発電所ではWestinghouse (WH) 社製Parsonsタービンが導入された(1906年)。これ以降、大規模発電所ではほとんどが蒸気タービンを用いることになる。

図4には500 kWのCurtisタービン発電機を示す。設置面積は特に立形の場合には横置往復動機関に比べて格段に小さい。1905年に東京電燈千住発電所に設置された500 kWのWestinghouse社製Parsonsタービン発電機の実例を図5に示す。図の手前が発電機でその奥にタービンが設置されている。さらにその奥にはもう1セット配置されている。1907～1930年の間に、GE, WHをはじめ多くのタービンが輸入され、また同時に製作権取得によって国内でもタービンが製造されるようになった。1904年に三菱長崎造船所はParsonsタービンの製作権を取得し、その4年後の1908年には早くも図6に示す500 kWの初号機が完成している。このような蒸気タービンの利用拡大は供給事業用発電にとどまらず、工場用自家発電所にも多く利用されるようになった。

1908年以降、定置用蒸気タービンの製造は上記の三菱長崎造船所(Parsons反動型, Zoelly衝動型)のほか、三菱神戸造船所(Ljungström反動型)、石川島造船所と芝浦製作所(Zoelly衝動型)、日立製作所(Rateau衝動型)が代表的⁹⁾で、その製造台数を図7に示す。初期には三菱長崎が多いが、1919年になると、神戸造船所がタービン製造を開始し、その後には石川島造船所、芝浦製作所のグループ(1936年石川島芝浦タービン会社設立)が多く製作した。1932年には日立製作所が参入している。同じこ

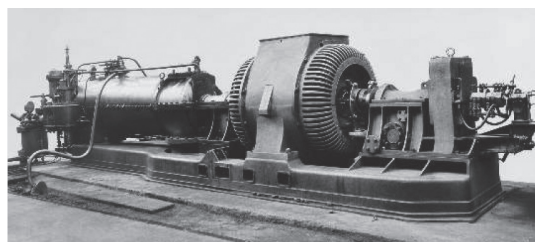


図6 三菱長崎造船所製500 kW Parsonsタービン初号機²⁾(1908年)

れら企業でのタービン出力合計の推移を図8に示す。1928年以前のスケールは1929年以降のスケールの10倍になっていることに注意されたい。図の最終年度の1937年を見ると、陸用タービンとして1年間に約130台製作され、石川島芝浦タービンが、全体の70%あまり製作し、合計出力は740 MW、1台当たりの平均は5,600 kWに達していた。

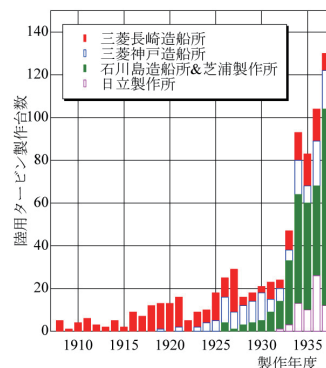


図7 国産蒸気タービン台数の推移¹⁰⁾

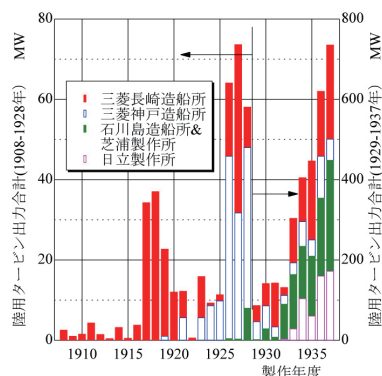


図8 国産蒸気タービンの出力合計¹⁰⁾

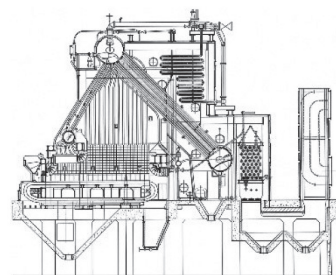


図9 タクマ式水管ボイラ¹¹⁾(2.26 MPaG, 365 °C)

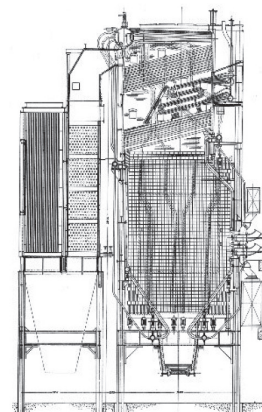


図10 微粉炭焚き放射型セクショナル水管ボイラ¹¹⁾神戸造船所, 4.12 MPaG, 445 °C)

ボイラについても当初はBabcock & Wilcoxを始めとする海外製が中心であったが、1912年に田熊常吉が水管ボイラの特許をとるなど、徐々に国産のボイラは出現し始めた。ここで特徴的なボイラを2点ほど示しておこう。図9はタクマ式水管ボイラで1935年汽車製造製、図10は三菱神戸造船所のセクショナルボイラで同じく1935年製造である。

ボイラ、タービンともに海外技術の導入、ライセンス取得・製作、独自技術開発と進展する。特に第二次世界大戦後の進展が著しいが、誌面の制約からこれ以上述べられないので、それらは次節で述べる圧力、温度、単機出力などの特性数に基づいて全体的な傾向について説明したい。

4. 蒸気圧力、温度、単機出力の推移

図11, 12に蒸気圧力と蒸気温度の推移を示す。図中白抜きのマークは定置用と比較のために既報¹⁾で示した海

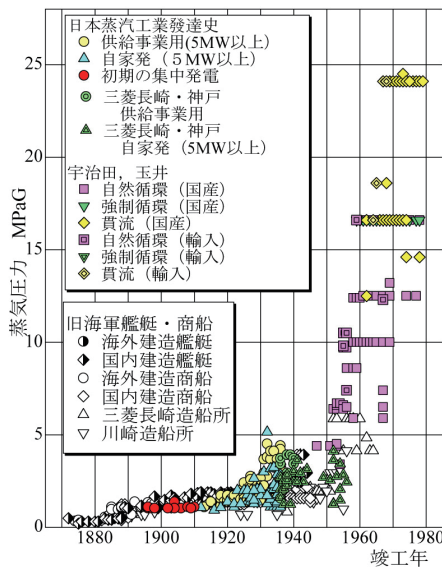


図11 艦船、定置機関の蒸気圧力^{1, 2, 12)}

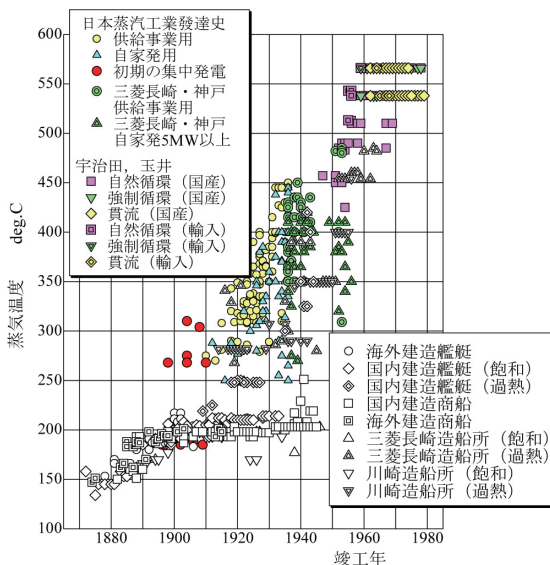


図12 艦船、定置機関の蒸気温度^{1, 2, 12)}

軍艦艇、並びに三菱長崎造船所、川崎神戸造船所で建造された艦船のデータ（往復動、タービンを含む）である。色付きのマークは定置機関（供給事業用、自家発）^{2, 12)}のデータである。艦船データでは1945年以降は商船であり、1960年内外までプロットされているが、その後はディーゼル船がほとんどになり蒸気タービン搭載船が極く少数になったことによる。その最高圧力は6 MPa程度でとどまるが、蒸気温度に関しては艦船では1910年以降過熱蒸気利用により1960年頃の490℃に至るまで順次増加している。定置用データを見ると1945年頃まで圧力においては艦船と同程度であったが、戦後特に1950年以降には輸入、国産を問わず急速に圧力が増加し、次いで強制循環、貫流ボイラにおいて上昇し、1967年には超臨界圧24 MPa程度にまで上昇している。

蒸気温度は1950年頃には450℃であったのが1960年頃には570℃にまで上昇した。その後蒸気温度はほぼ一定にとどまっている。戦前はもちろんのこと戦後の復興期に活用されたボイラは自然循環であるが、その後強制循環ボイラが出現し、最後には大型では貫流ボイラが席卷する。

単機出力の発展経緯を図13に示す。1890年頃の単機出力はせいぜい0.02 MWであったが急速に上昇して1900年

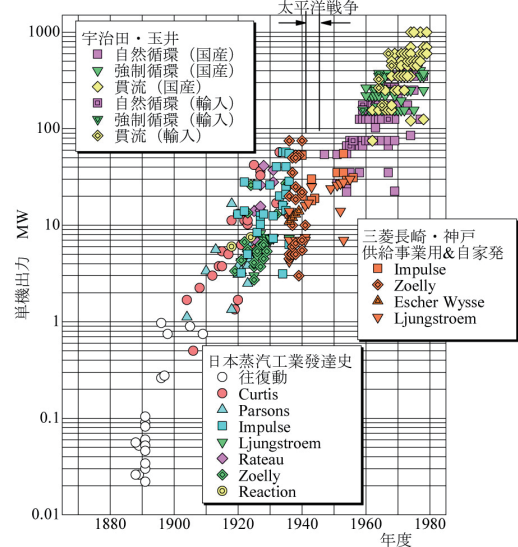


図13 単機出力の変遷^{2, 12-14)}

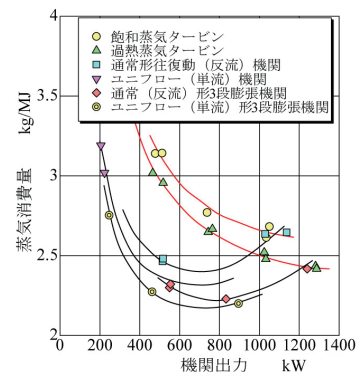


図14 往復動機関とタービン機関の比較¹⁵⁾

頃には1 MWにまで達した。当然それは往復動機関であった。発電用に蒸気タービンが導入されると0.5 MW (Curtis) および1 MW (Parsons) から始まって急速に出力上昇が始まり、太平洋戦争中の一時的な停滞はあったものの、1950年以降再び上昇し、1970年代後半には1,000 MWにまで達した。なお1950年頃以降の宇治田、玉井のデータ¹²⁾ではタービン型式が不明であったため、ボイラ形式の分類でプロットしている。また図13に示した定置用で見る限り、往復動からタービンへの遷移の境界は1 MWあたりにありそうだ。

図14はStodolaの著書に掲載のデータから作成したもので、通常の往復動機関(反流式)、ユニフロー機関(単流式)、通常の3段膨張機関と3段膨張のユニフロー機関の蒸気消費量kg/MJが、飽和蒸気タービン、過熱蒸気タービンの蒸気消費量と比較されている。通常型あるいはユニフロー型にしても低出力の時はタービンに比較して蒸気消費量はかなり低いが、出力増加と共に蒸気消費量が増加し、1,000~1,200 kW付近で飽和蒸気タービン、過熱蒸気タービンと入れ替わる。この結果はさきの傾向とよく一致している。

図13において1937年頃までの『日本蒸汽工業發達史』²⁾のデータで見る限り、発電用として当初登場するのはParsonsタービンとCurtisタービンであるが、Parsonsタービンは1920年頃までで、それ以降には見当たらない。一方のCurtisタービンは1930年頃まで製作されている。三菱長崎・神戸のデータで見れば大容量域で1960年頃には純衝動タービンが多かったようであるが、現在では発電容量に応じて適宜使い分けられ、大容量分野では高压部に衝動式、低压部に反動式を置きたいいわゆる混式のタービンが多い。

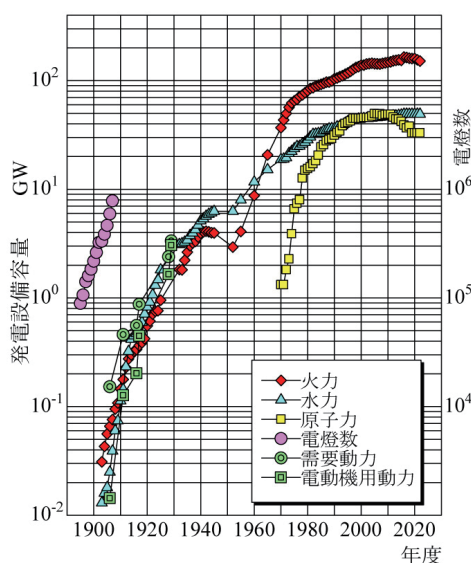


図15 発電設備容量の推移

(データは電気事業發達史³⁾, エネルギー白書各年度, 2016年度以降は電力広域的運営推進機関供給計画の取りまとめによる)

発電設備容量並びに発電効率について、少し視野を広げて1900年代初期から2020年頃までのデータを図15、16に示しておこう。ごく初期には発電は電燈事業が中心で、電燈数の推移からも明らかなように1890年代から1910年頃まで非常な勢いで増加したことがわかる。一方、電動機用動力の需要は1920年頃には設備容量とほとんど一致し、発電の中心は照明器具から電動機用動力に替わっていった。当初は火力発電が水力を上回っていたが、水力発電所建設が進行し、1910年頃には火力を上回った。この状態は1960年の入れ替わりまで続き、その間水主火従と呼ばれた。水力発電所にはダム建設の適地が必要で、国土の制限から頭打ちになるのは容易に想像できる。それに対して高度経済成長期には火力の大容量化が進み、1960年以降には火主水従に替わった。1970年以降には軽水炉による原子力発電が加わり、ベースロード電源として用いられるようになると、火力は負荷変動吸収用に利用されるようになる。つまりは部分負荷運転が必要になるのである。プラントの発電効率をできるだけ下げないようにする工夫として火力に変圧運転(部分負荷になってもタービンを通過する蒸気量を下げない工夫)が導入されるようになった。

低負荷時に水管のバーンアウトなど不具合事象を避けるために貫流ボイラであっても一部を再循環する工夫が例えば三菱重工などではコンバインドサーキュレーション Combined circulation と称する Combustion Engineering (CE) で開発された技術を組み込んだ三菱-Sulzer-CE コンバインドサーキュレーションボイラが開発されている。ほかの企業においても名称はともかく、部分負荷時の水壁への水供給を確保するための循環ポンプを備えた形式になっている。

図16に示すように、発電効率は当初10%にも満たなかったが、1960年頃にかけてほぼ直線状に上昇して40%程度に達すると、それ以降は超臨界圧(SC)でもまた超々臨界圧(USC)であってもその効率の上昇はわずかで、蒸汽単独での限界に近付いているようにも見える。図11、12に示すように圧力、温度が頭打ちになっていることにも対応する。

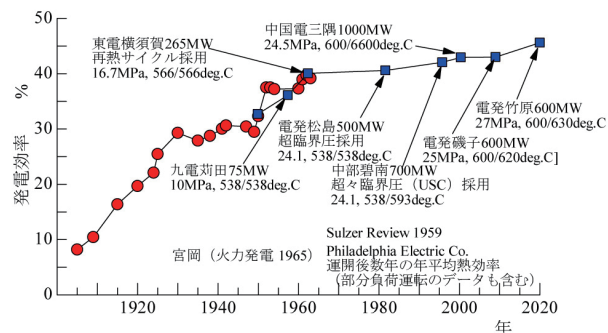


図16 発電効率(データは文献^{16, 17)}並びに各電力会社の資料による)

5. おわりに

我が国の火力発電の燃料は開始当初以来長らく石炭が中心であった。初期の塊炭のストーカ燃焼から始まって、米国 Oneida Street 発電所で微粉炭燃焼の試験が行われた 1920 年には日本電力尼崎発電所において、Oneida と同じ Lopulco バーナを用いた微粉炭燃焼ボイラが運開している。我が国が経済復興中であった 1950 年代から 1960 年代にかけて石炭から石油、重油に交代した、所謂資源エネルギーの流体革命と言われた。その後、石油危機を経て天然ガスへのシフトと同時に石炭への回帰が進行した。

石炭はその性状に分散が非常に大きいのと、特に灰の存在が重要である。融点の低い灰は燃焼室内で溶融して水壁に付着して伝熱阻害要因になることから 1931 年にはスラグタップ炉が出現した。融点の高い灰の場合にはフライアッシュとして燃焼排ガスと共に外部に放出されることから、バグフィルタや電気集塵機で捕捉することになる。また、炭種に対するロバスト性が高く、多様な燃料に対応可能であることから、流動層ボイラが注目され、なかでも循環流動層ボイラに一時大きな関心が集まった。炉内脱硫が可能でベッド温度も低く保たれることから NO_x 生成も少なく、将来性があると思われたがコストの点から大きく広がらなかった。

流動層技術を用いた加圧流動層コンバインドプラント (PFBC) は研究開発開始から約 40 年経過して、2000 年大崎 1 号 (259 MW)、2001 年荻田新 1 号 (360 MW) が運開した。高压の压力容器内の流動層で燃焼させて発生した高温ガスをガスタービンに導き、炉内伝熱管並びにガスタービン排気で蒸気生成を行うことで大きく注目を集めたが、大崎はいち早く運転を終了し、現在では石炭ガス化複合発電 (IGCC) の開発拠点ともなっている。また後者は 2026 年 6 月に運転を終了した。石炭の灰の処理と同時にコンバインド発電のもつ高効率性を兼ね備えた IGCC が最終的な形態かもしれない。その文脈でいえば PFBC は IGCC への橋渡しの意味合いもあったのだろう。

火力ではそれが超々臨界圧 となったとしても精々 45% 程度にとどまる。現在開発中の AUSC のように 35 MPa 700/720/720℃ としても HHV 基準で 46~48% 程度である。さらに高効率を求めて、LNG 焚ボイラの代わりにガスタービンを置き、その排ガスで蒸気を生成する LNG 焚コンバインド発電プラントが 1984 年東新潟火力発電所 3 号系列として運開した。その後新たに建設される LNG 焚発電所は殆どがコンバインド発電となっている。最も賦存量が多

い、しかし一部には最も嫌われている石炭を今後どうするかが重要な課題と思う。18 世紀初頭から 300 年に亘って活用してきた石炭をこの際さっぱりとあきらめるのも一つの案だろうが、本当に社会がそれで成立するのだろうか、本質的な議論が欠かせない。

本稿ではボイラ、蒸気タービンについて、とくに昭和期の著しい発展の軌跡など残念ながらほとんど示せていない。国内の発展については文献²⁾ にかんがりの図面とデータが掲載されている。また菅原菅雄の『蒸気罐及蒸気原動機 (蒸気ボイラ及蒸気原動機)』(丸善)や『蒸気ボイラ及び蒸気機関 (上下)』(機械学会)などに詳細な記述と共に多くの図面が収録されている。石谷清幹の『ボイラ要論』にはボイラ通論から個別要素の特性に至るまで書かれた名著である。これらいずれも国会図書館デジタルコレクションに収録されている。なお石谷の著書はさきごろ森北出版から POD 版として復刻されている。

参考文献

- 1) 小澤守；我が国における蒸気動力技術の展開②，エネルギー資源，46-5 (2025)，pp. 333-338，③，同誌，47-2 (2026)，pp. 123-128.
- 2) ワット誕生二百年記念会編；図説日本蒸気工業発達史 (1938)。
- 3) 電気事業講座編集委員会編；電気事業発達史，エネルギーフォーラム (2007)。
- 4) Thomas P. Hughes；Networks of Power, The Johns Hopkins University Press, Baltimore (1993)。
- 5) 東京電燈株式会社開業五十年史 (1936)。
- 6) 山口歩；1890~1930 年の日本の火力発電所ボイラ市場を Babcock & Wilcox 社が独占した過程とその技術的理由，科学史研究 II, 31 (1992)，pp. 9-18.
- 7) The Babcock & Wilcox Co.；Steam-Its Generation and Use, 22 ed., New York (1890)。
- 8) N. Hawkins；New Catechism of the Steam Engine, Theo. Audel & Co., New York (1902)。
- 9) 松本壽；國産蒸気タービン発電機装置並に水管式汽罐装置に就て，機械学会誌，34-166 (1931)，pp. 188-211.
- 10) 吉田孝太郎；我が国における蒸気タービンの発達，機械学会誌，41-253 (1938)，pp. 440-452.
- 11) 日本機械学会；改訂国産機械図集 (1938)。
- 12) 宇治田惣次，玉井幸久；ボイラ技術の歩み，火力原子力発電，31-12 (1980)，pp. 1315-1367.
- 13) 三菱造船株式会社；創業百年の長崎造船所 (1957)。
- 14) 新三菱重工業株式会社神戸造船所；新三菱神戸造船所五十年史 (1957)。
- 15) A. Stodola；Die Dampfturbinen und die Aussichten der Wärmekraftmaschinen, Verlag von Julius Springer, Berlin (1903)，pp. 146-150.
- 16) J. Gubler；Eddystone Steam Power Station, Philadelphia, Sulzer Technical Review, 41-1 (1959)，pp. 3-20.
- 17) 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，1-11 (1965)，pp. 902-916.