

特集

文明の発達と動力エネルギー

蒸気動力

Steam Power

赤川 浩爾*

Koji Akagawa

1. まえがき

“蒸気動力”と云う言葉に対する大多数の読者のイメージは、おそらく“1712年のニューコメンの蒸気機関に始まり、遂に消え去った栄光の蒸気機関車で代表される過去の技術”ではないだろうか。しかし実際には現代文明の基盤の電力を発生するための地上で最大の動力機関であり、また本年4月に稼動した高速増殖炉「もんじゅ」のように最新技術として、現在においてもまた将来も蒸気動力は重要な地位を占めているのである。

「科学史—技術史事典」¹⁾の事項索引によると、「蒸気機関」の索引項目数は50項目であり、他の殆どどの事項では1項目にすぎないのと著しく異なっている。これに匹敵するものとしては、「火」の50項目、「太陽」の41項目のように極めて普遍的な事項であって、個別的な装置、機械などの事項では索引項目数は多くても数編に過ぎないことから、「蒸気動力」が如何に科学史、技術史上で占める地位が大きいかを示しているのである。

本文ではエネルギーに関連する技術史の中で、蒸気動力の発達と変遷を社会との関連で概観することにする。それによって蒸気動力がエネルギー文明上でどのような位置にあるかを認識し、将来の動力発生への見通しへの一助としたい。

2. 蒸気動力とは何か——（その形態）——

蒸気動力とは蒸気を作動媒体とする動力機関を総称するものであり、その形態は極めて多様であるので、まずその定義と分野について説明しよう。蒸気動力の構成要素とフローは図-1のようである。(1)のエネルギー源は石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料、薪、廃棄

物などの燃料、核燃料および太陽熱、地熱、海洋熱などの自然エネルギー源である。蒸気動力は内燃機関とは異なって外燃機関であるので、如何なる燃料も使用可能である利点を持っている。(2)の蒸気発生装置は18世紀頃のヤカン型ボイラから自然循環式ボイラ、強制循環式ボイラ、貫流ボイラ、超臨界圧貫流ボイラと大きな容量的、質的な変化をなし、また原子炉および蒸気発生器にも連らなっているが、これらはすべて蒸気発生のみが目的である点では同一機能のものである。(3)作業流体は蒸気であるが、圧力、温度の上昇の変遷は大きい。また液体金属、冷媒も使用される。(4)動力発生部はシリンダーとピストンよりなる往復動機関と高速回転のタービン機関がある。なお特殊な場合にロータリー式およびスクリュウ式機関（二相膨張機）がある。(5)駆動対象は工場用、陸上交通用、船用および発電用であり、社会的需要の規模に応じて変化していくものである。これらの(1)~(5)の組み合わせによって蒸気機関は多様な形態をとり、時代的にも変遷してきているのである。

蒸気動力は1712年にニューコメンにより人類初の熱機関として創り出されたものであり、それまでの風車、水車による自然エネルギーの利用とは全く異なり、場所的な制約にとらわれずに熱エネルギーを自由に動力に変換すると云う画期的なものであった。その機関は図-1の構成によると、(1)薪あるいは石炭、(2)ボイラ、(3)大気圧の蒸気、(4)往復動機関、(5)主として揚水用と云う組み合わせである。それに対して現在の最新の蒸気動力では(1)核燃料、(2)原子炉（蒸気発生器）、(3)高温高圧蒸気、(4)蒸気タービン、(5)発電用の組み合わせである。このように各要素の構成は異なっても、現在でも蒸気機関の本質は変わっていないのであり、将来の核融合発電についても、また自然の熱エネルギー利用の発電についても、この本質からは離れることなく、蒸気動力として存続して行くであろう。

本特集のエネルギー文明における蒸気動力の位置付

* 龍谷大学理工学部教授・神戸大学名誉教授
〒520-21 大津市瀬田

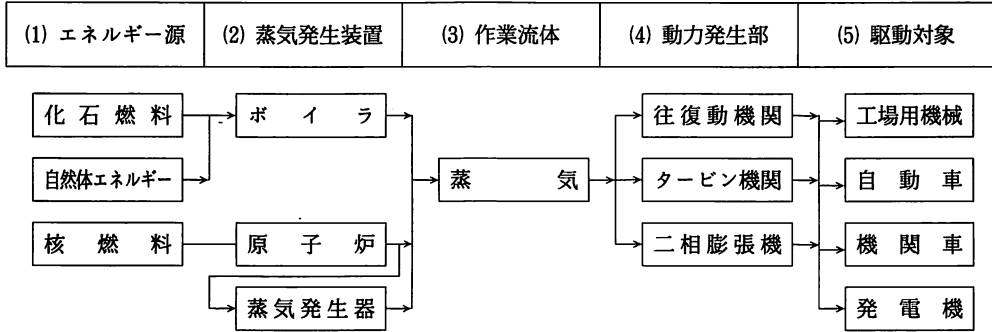


図-1 蒸気動力機関の定義

けを論ずる場合にも、多くの視点がある。例えば(1)原動機としての単機出力、(2)社会的な使用状態すなわち全台数、全容量など、(3)他種原動機との競合（最適規模、取扱いやすさ、効率、使用対象など）、(4)社会的環境条件との関連、(5)個々の技術的発明、開発の歴史的、技術史的記述などの断面である。本小文ではこれらを広く述べることはできないので、主として(1)単機出力の変遷と(3)他種原動機との競合の面から蒸気動力の歴史的な位置付けのみを解説することにする。

3. 各種の蒸気機関の発達と変遷

3.1 最大出力の動力機関としての蒸気動力

各種蒸気動力の創生から発展の詳細な状況が後出の図-3に示されている。この図の大意は次のようである。曲線Aが陸用機関の単機最大出力の変遷であり、1712年のニューコメンの機関から現在の火力発電用機関までをつなぐものである。曲線Bは船用機関、曲線Cは原子力発電（米国）、曲線Dは我が国の原子力発電機関の変遷である（これらについては次節以降で詳述する）。

図-2に各種動力機関の単機最大出力と蒸気機関の最大出力の変遷が比較して示されている。ここで太実線は図-3の各種蒸気動力の最大出力の包絡線である。これによると何時の時代にも蒸気動力は最大出力の動力機関であって、人類史に重要な役割をはたしてきたことが明らかであろう。

a) 自然エネルギー動力装置との比較：図-2に水車（H-1）、水力タービン（H-2）および風車（WT）の単機出力の変遷が示されている。18世紀初頭の熱機関の発明以前に人類が利用してきた動力は風車と水車であり、当時は風車で20kW、水車で60kW程度であった。1712年の蒸気機関の発明から40年位後には風車の出力を超え、1830年頃には当時の水車の最大出力400kWを超えて、ここで熱機関は自然エネルギー利用の

動力装置より出力に関して優位に立ったのである。水力に関しては1880年頃までは曲線H-1の上かけ水車、下かけ水車の低出力であったが、1827年の水力タービン（4.4kW）の開発より単機出力は曲線H-2のように急増した。1890年のナイアガラ発電所の建設に始まる水力発電の需要に応じるために、水力タービンの単機出力の増大は著しく、現在では60万kWにも達している。しかしこれも現在の火力発電、原子力発電の120万kWには及ばない。なお我が国においてはかつて発電に関して“水主火従”と云う言葉があり、水力発電容量は火力発電容量よりもはるかに多かったのであるが、火力発電の急増により1960年にそれが逆転して、現在では水力発電の割合は20%程度にすぎない。水力発電は自然エネルギーの利用の面からは好ましいものであるが、我が国においては立地条件から将来の発展は望めないのである。

また自然エネルギーを利用する風車は曲線WTで示されるように、古代から利用され最大出力20kW程度であったが、近年になって省燃料資源、環境問題の面から見なおされて、急激に研究が進み、最大4000kW程度の風車が建造されている。

b) 内燃機関との比較：図-2の曲線GEは気体燃料を用いる内燃機関すなわちガス機関の単機出力の変遷である。1860年のルノアールによる開発の成功から急速に発達し、1920年頃には最大出力4300kWに達している。このガス機関はガソリン機関、ディーゼル機関の開発により約30年先行しており、1900年頃までは定置式機関としては優位を保っていた。しかしガソリン機関、ディーゼル機関の進展により1930年頃には姿を消した。

曲線DEはディーゼル機関の単機最大出力の変遷である。1897年のディーゼルによる開発の成功より始まり、図のように急速に進展して30年後にはガス機関を

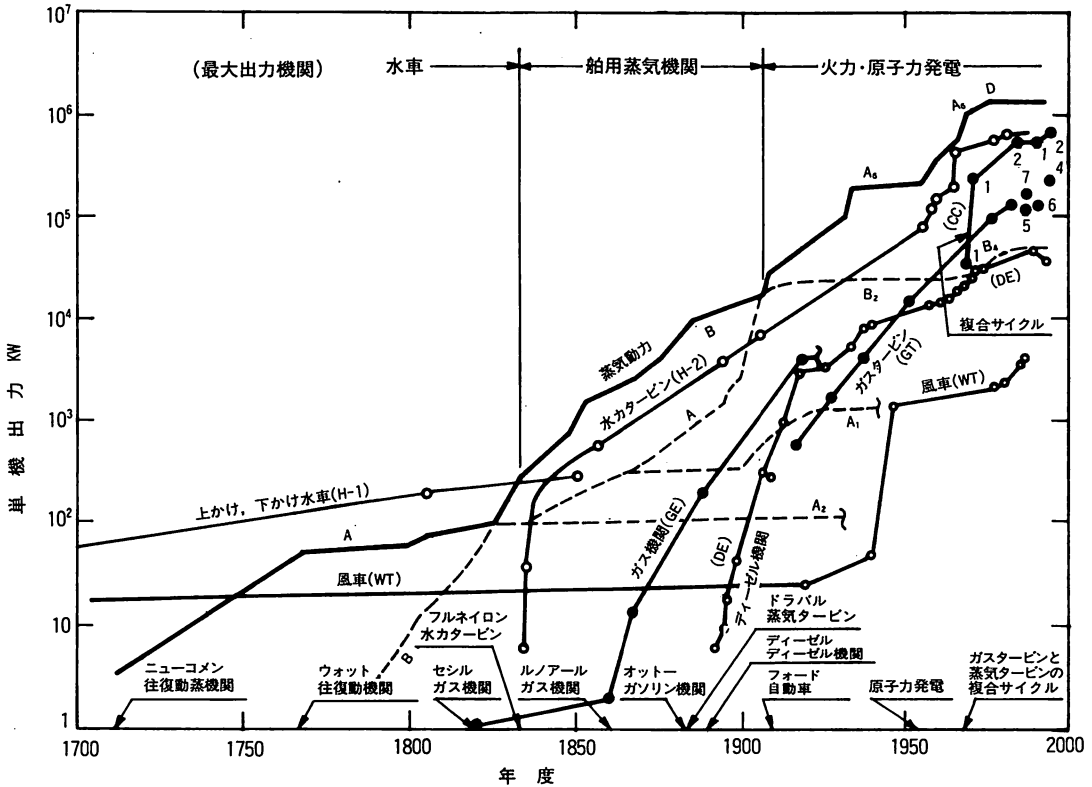


図-2 蒸気動力機関と各種動力機関の変遷

超えるに至っている。さらに船用機関として開発が進められて、現在では単機最大出力4.7万kWにも達しており、この船用の分野では蒸気動力と同一最大出力となるばかりでなく、効率の面で優れているので1970年代から蒸気動力を圧倒するに至っている。

またガスタービンは曲線GTのように1900年頃から実用化され現在では船用で2.2万kW程度のもので用いられているが（航空機用の場合は本文では除外する）、まだ最大出力の面では蒸気機関の1/10程度である。しかし4.4節で述べるようにガスタービンは蒸気タービンとの複合機関として新しい分野で発展しつつある。

以上の解説で明らかのように、単機出力のみの面から見ると蒸気動力は常に一位の地位を占めてきており、将来においても変ることはないと考えられる。

3.2 往復動蒸気機関の発明から陸用蒸気動力としての発展から終焉

図-3の曲線Aは陸用蒸気機関の単機出力の変遷を示すものである。1712年の人類最初の動力機関はシリンダーとピストンからなる往復動蒸気機関であり、出力は約4kW、効率は0.3%程度のものであった（図中の点a）。これは炭坑の排水ポンプの駆動用として考案

されたものである。この当時の社会的背景としては多量の燃料として実質的に薪に依存しており樹木の伐採により山林の荒廃が進んでおり、今日の環境問題と同じようなことが生じていたようである。このための燃料資源としてまた製鉄業の急増に対応して石炭の需要の増大および鉱山、炭坑での大容量の揚水ポンプが要望されていたのである。ところで動力は本質的に多方面への応用が可能なものであるから、一度蒸気機関が出現すると揚水ポンプ以外の工場の機械駆動用、輸送機関用として用いられるようになるのは当然の動向である。このことはニューコメン以前に1698年にセバリの特許（この時の揚水装置は実質的には動力機関ではなく、蒸気の凝縮によって生じる真空で水を吸い上げる装置である）でも次のように書かれていることからもうかがえる。「火力によって揚水し、ならびにあらゆる種類の動力を出し、鉱山の排水に大きな用途と利益を与え、都市に給水し、水力あるいは一定の風力が得られない場合にもあらゆる種類の動力を供給する」。

このニューコメンの機関は次第に大形のものを作られるようになったが、これは今日で云う学問的裏付けによってなされたものではない。それから約50年経過

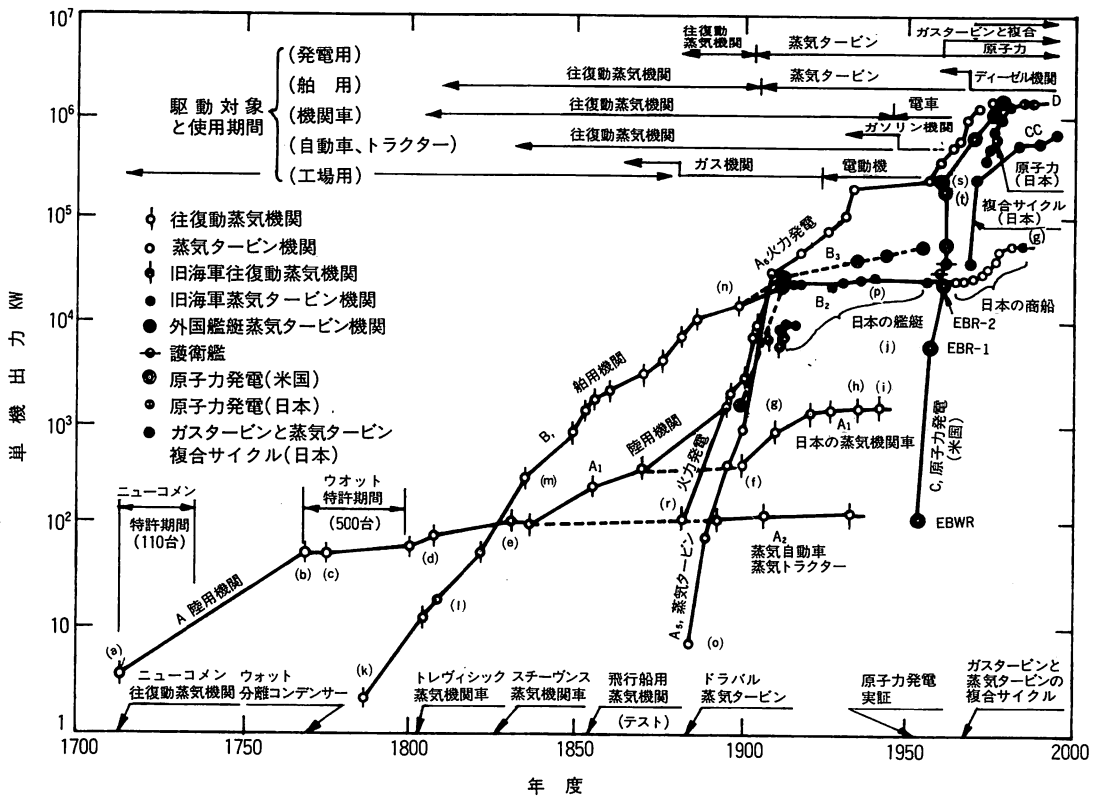


図-3 蒸気動力機関の変遷

して1765年になりスミートンによって始めて工学的研究がなされ、130種にも及ぶ実験により最適のシリンダ径、ピストン行程、回転数などの規準が0.7~57kWの出力に対して定められている(図中の点b)。

なお1769年にウォットにより復水器の設置により効率の上昇がはかられ(これによっても1%程度であった)、蒸気機関は唯一の動力機関として近代文明の象徴的存在になったのである(点c)。1777年には真鍮製で直径1.8m、行程3m、出力56kWの巨大なピーム機関が製作されており、これらは現在の目で見ても力強く、機能美を備えている。

このような蒸気動力の勃興期において、1733年までのニューコメンの特許期間中に110台が製作され、1769年から1800年までのウォットの特許期間中に500台、合わせて1800年までに2154台が製作されている。この中で英国のバーミンガム、リーズ、マンチェスターの三大工業地帯における設置数は289台、合計出力3340kWであって、現在の容量の視点で見ると中出力の内燃機関の1台分に過ぎないのであるが、自由に大きな

動力を発生させることができると云う質的な変化によって1760年頃からの産業革命に深く影響を与えたのである。

定置用の蒸気機関が成功すると直ちに当然のように輸送機関としての使用が考えられた。1807年には軌道上を走る5.5kWの機関車がトレヴィシックにより完成され(点d)、1825年にはストックトン—ダリントン間の最初の鉄道で開通し、1829年には出力100kWのロケット号(点e)が時速46.4kmの高性能を発揮するまでに至っている。蒸気機関車の成功により鉄道網は急速に拡がり、大規模の土木工事、鉄橋の建設など土木技術の進展にも大きな影響を与えた。陸上用の大出力輸送機関として往復動蒸気機関車は唯一のものであり、例えば我が国においては曲線A₁のような発展をとげた。点fは1889年(明治22年)に輸入第1号の機関車であり、出力は294kWであり、点gは出力640kWの1913年(大正2年)の国産第1号車である。これ以後わが国の技術で開発が進められて、1936年のD51形機関車(点h)、1939年の出力約1300kWのD52形機関車(点i)

まで発展した。最後の蒸気機関車の開発は1947年のE10形で終りを告げた。鉄道用としては所要動力に限度があり、我が国では最高約1300kWであって、この出力範囲では電気機関車、電車が有利であって、蒸気機関車は1970年代初頭に全て姿を消した。このことは一面では蒸気動力の消滅であるが、他方では電車を駆動する電力は蒸気原動所から供給されている面から見ると、電車も蒸気動力に依存しているとも云えるのである。また点*i*は米国の大陸横断鉄道用の蒸気機関車ビッグボーイであって、出力4486kWの大出力であって、蒸気機関車の最後を飾ったものである。

また蒸気機関は発明の当初から馬車に代る自動車としても開発され、1802年にトレヴィシックも機関車よりも先に蒸気自動車を走らせている。また1826年にはロンドンで蒸気自動車のバスが運行されるようになった。内燃機関が出現したのが1900年以降であり、フォードのガソリン機関による自動車造られたのが1908年であるから、それまでの100年以上の間は自動車はすべて蒸気機関によって駆動されていたのである。例えば1904年頃の小型自動車の一例は図-4²⁾のようであり、コンパクトで軽快な姿をしており、技術的にも完成されたように見える。また米国においては当時において既に農業、林業において大小各種のトラクター、耕運機が広く用いられている。図-5³⁾は1906年頃のトラクターであり、出力80kWで65トンの材木を運搬する性能を持っており、技術の完熟と機能美を感じさせるものである。このようなトラクターは最高出力110kW程度のもので造られて、1930年頃までは使用されていて、その後内燃機関の進出によって姿を消したようである(曲線A₂)。

陸用の往復動蒸気機関は定置式のもので1900年頃に

終りを告げて、蒸気タービン機関に移行し、自動車では1930年頃に内燃機関に移り、機関車では1970年頃に電車に座を譲って消えていったのである。

3.3 船用往復動蒸気機関の発展から限界へ

図-2の曲線Bは船用蒸気動力の単機最大出力の変遷である。1780年に最初の実験用蒸気船(点*k*, 出力2kW)が造られてから20年後の1800年には150トンのフルトンの実用船(点*l*, 出力20kW)が建造された。それ以後の発展は急激であって、1825年頃には陸用機関を超えて大出力機関が造られるようになった。これは欧米における海上運送の需要、米国と欧州を結ぶ交易の増大と云う社会的必然性によるものであり、1838年に始めて蒸気船による大西洋横断に成功している。それは図中の点*m*で出力280kWで平均速度は6ノットであった。それ以後の発展も著しく、1895年には最大出力11,100kWの機関が造られたが(図*n*点)、これが往復動機関の最後を飾ったものであって、ここで蒸気タービン機関に完全に移行したのである。また我が国の艦艇においても図で見られるように1910年頃に往復動機関からタービン機関に切り替えられている。

3.4 蒸気タービン機関の創生から陸上、船用機関への発展

回転羽根に蒸気を吹きつけて回転させて動力を発生させる原理は往復動機関よりは構造的に有利なはずであるが、実際には回転数が大きいなどの技術的困難のために、実用化に成功したのは往復動機関よりおくれること180年後であった。その最初は1883年のドラバルによる衝動タービンであり、引き続いて1884年のパーソンスタービン(曲線A₃の点O, 出力7.5kW, 回転数17,000rpm)、1895年のカーチスの速度複式タービン、1898年のラトーの圧力複式タービンと相継いで全ての

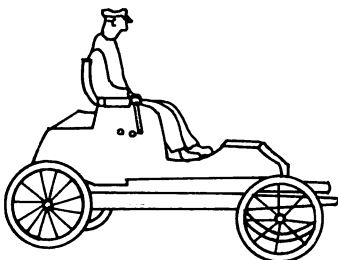


図-4 蒸気自動車 (1904年)

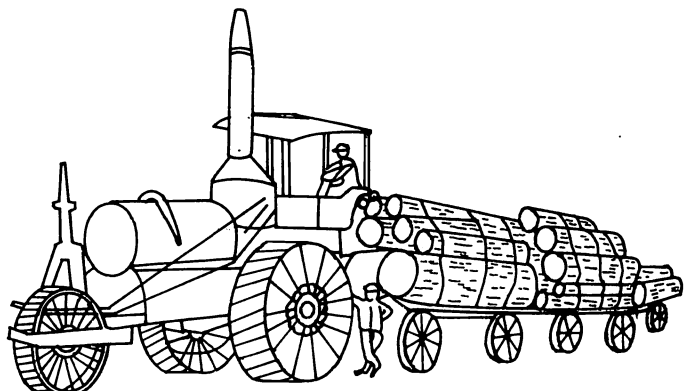


図-5 蒸気トラクター (1906年)

タービン型式が出現した。このように社会的、技術的環境条件が成熟すると技術製品は各所で同時に独立して創り出されるものである。

発電所における蒸気タービンの単機出力の変遷は曲線A₅のように急上昇しており、1900年には曲線A₄の往復動蒸気機関を追い越して、以後は曲線A₅のような変遷をたどって現在では最大120万kWに達している。

また船用機関については、1897年の蒸気タービン船タービニア号(点p, 出力1760kW)が34ノットと云う当時では驚異的な高速を出して成功してから、曲線B₁、B₂(日本の艦艇)、B₃(日本の商船)、B₄(世界の艦艇)のように出力は変遷している。これらにおいて曲線Bの船用往復動機関と1910年頃に滑らかに接続し、完全にタービンに移り替わっているのである。我が国の旧海軍のタービン機関では約3万kWが最高であって、1940年の戦艦大和では出力3万kW(点p)の機関4基で合計12万kWであった。また第二次世界大戦後の我が国の商船は大形タンカー(最高50万トン)、高速コンテナ船の特性上から大出力が必要であり、曲線B₄のように毎年増大をつづけて最高3.3万kWの機関が造られている。艦艇の場合には艦のトン数は少なくても、高速が要求されるので必要馬力が大きくて4.4万kW(点g)にも達している。

3.5 原子力発電の創生から発展

原子力による発電は1956年に発電量100kWのEBWR(Experimental Boiling Water Reactor, 米国)による実証がなされて以来、曲線Cの示すように実験炉EBR-1, EBR-2をへて、わずか数年後の1960年に商業用ドレスデン発電所(点s, BWR, 20万kW)およびヤンキー発電所(点t, PWR, 18万kW)が稼動しているほど進歩は速い。さらに現在では最大出力130万kWに達して、火力発電所と肩を並べて陸用動力機関としては最大の出力となっているのである。また我が国の原子力発電所の変遷は曲線Dのように、米国から約10年おくれて出発しているが、技術導入によって、最初から32万kWの出力から始まって現在では130万kWに達している。

4. 各種蒸気機関と内燃機関との競合

4.1 定置機関におけるガス機関との競合

蒸気機関に次いで開発された熱機関はガス機関であって、これが内燃機関の始まりである。1960年にルノールにより実用化されると0.3~14kW程度の機関が簡便さのために急速に普及して、数年間で35,000台以

上が生産される状況であった。これは有名なロンドンのガス燈の設置からもわかるように1812年にはガス会社が設立されてガスの使用が容易となるような社会的な条件との相互作用にもよっている。図-3の曲線GEのように急速に大出力の機関が造られるようになり、この出力範囲では蒸気機関より取扱いが簡便であり、また効率は当時の蒸気機関の10数パーセントに対して20%程度の高効率であったために、蒸気機関を圧倒した。例えば我が国においては、1907年(明治40年)に東京だけで1156台、合計出力5700kWのガス機関が用いられていたほどであって、定置機関として首位を占めていた。しかし曲線DEのようにディーゼル機関の進出などの影響を受けて1930年頃には完全に消滅した。

4.2 陸上交通機関における内燃機関との競合

蒸気自動車、蒸気トラクターなどは曲線A₂のように最大出力100kW程度であるが、この出力範囲ではガソリン機関、ディーゼル機関が当然有利であるので、1908年のフォードの自動車で代表されるガソリン機関に蒸気機関は席を譲り、1930年頃に姿を消したのである。また曲線A₁の蒸気機関車もこの出力範囲におけるディーゼル機関車、電気機関車および電車との適合性の優劣から1970年頃に消滅した。

4.3 船用機関におけるディーゼル機関との競合

曲線DEのディーゼル機関の単機最大出力の変遷は事実上は船用ディーゼル機関のものである。1950年以降は過給機関の成功により出力増大は著しく、1950年代の1シリンダ当りの出力750kW程度から急増して現在では3760kWにも達している。したがって最大出力の12シリンダで4.5万kWにも達するのである。このようにディーゼル機関は曲線B₄の蒸気タービン機関の最大出力に達するとともに効率も最高55%にも及び蒸気タービン機関の30%程度をはるかに超えた。したがってディーゼル船は経済性に高いのでタービン船からディーゼル船に急速に移行し、1977年度には2000トン以上の船舶1014隻の中95%がディーゼル船となり、現在では殆んど全数がディーゼル船となっている。このように全盛を極めていた大出力の船用蒸気動力もディーゼル機関へ首位の座を譲ったのである。

4.4 火力発電における蒸気タービンとガスタービンの複合化

火力発電所の進歩は熱力学的サイクル効率を高めるための蒸気の高温高圧化の歴史でもある。最初の気圧飽和蒸気から出発して、現在の超臨界圧31.6MPa, 593℃に及び、ボイラと蒸気発生器についても著しい

進歩を遂げてきた。その効率も40%に達しているが、より一層の向上が必要である。またガスタービンも曲線GTのように単機出力も増大してきているが、蒸気タービン機関にははるかに及ばない。ところでより高効率にするためにガスタービンと蒸気タービンの複合サイクルが出現し、我が国において曲線CC（図-2および図-3）のように1968年に最初のプラントが稼動して以来急速に発展して、現在では単機出力55万kWの発電所が稼動するに至っている。このような発電所の効率は48%程度であって、蒸気タービン単独プラントよりもはるかに高いのである。これらの複合発電においてはガスタービンと蒸気タービンの出力割合は66～68%対32～34%程度であって、ガスタービンの出力の方が大きくなっているのである。ただしガスタービン1台当りの出力はあまり大きくできないので複合発電所では複数の台数で構成される。曲線CCはガスタービンと蒸気タービンの組み合わせられたユニット数が1～2のものであり、黒丸はユニット数が4～7台のものである。例えば100万kWの発電所でガスタービン7台と蒸気タービン7台の構成のもの、あるいはガスタービン6台と蒸気タービン2台の構成のものなどがある。このような複数個の組み合わせによって、蒸気タービンのみの火力発電所、原子力発電所と同一規模の大出力発電所が造られているのである。

4.5 将来の利用分野

太陽熱、地熱および海洋熱のような熱エネルギー源を動力に変換するシステムは蒸気サイクル以外にはないので、将来とも蒸気機関は用いられるであろう。

また未完成ではあるが将来のMHD発電に関しては、媒体の高温部分はMHD発電機であるが、中低温部分は蒸気動力機関である。この組み合わせによって始めて高効率を得られるのである。また核融合炉の場合にも発生した熱エネルギーを動力化するためには蒸気サ

イクルによらざるを得ないのである。このようにして大出力の発電所においては何らかの形で蒸気動力は依然として重要な役目を荷って行くものであろう。

5. おわりに

各種の蒸気機関は280年の発展の歴史の中で栄枯盛衰を繰り返してきた。そこには名をあげた著名な発明者以外の多くの技術者、工学者の開発の努力が秘められている。しかしここではその結果として現われた単機最大出力の変遷のみを示して、他種の熱機関の発達との関連を述べた、これによって現在の蒸気動力の文明史における位置付けが理解していただけるものと思う。将来の動力技術の開発には現在までに蓄積された技術を謙虚に学び、その伝承の上に築くと云う心構えが必要であろう。本小文では意を尽せなかったが、その一助となれば幸である。

なお蒸気動力の発展を曲線A, B, A_sの動向により始めて提示し、技術発展の法則を明らかにされたのは石谷清幹先生（大阪大学名誉教授）であって、今から37年も以前のことである。著書「蒸気原動機Ⅱ」（昭和32年）¹⁾で詳細に論述されている。科学史、技術史の専門家でなく、熱工学、気液二相流学の研究者である著者が本文を書いて感じたことは、本文の構成の基盤がその教示に与るところが多かったと云うことである。

参考文献

- 1) 伊東俊太郎, 坂本賢三, 山田慶児, 村上陽一郎編; 科学史技術史事典 (1983), 弘文堂.
- 2) Floyd Clymer; Steam Traction Engines and Threshing Equipment. No. 1. (1949) の写真より著者が作成.
- 3) 2) に同じ
- 4) 石谷清幹; 蒸気原動機Ⅱ (後に「ボイラ要論」と改題), 熱機関体系9 (1958), コロナ社.