

# 自然界のエネルギー貯蔵と それを人類の利益のために利用すること

—クラウジウス論文の訳と解説—

河 宮 信 郎

本稿は Rudolf Clausius の講演記録 Ueber die Energievorräthe der Natur und ihre Verwendung zum Nutzen der Menschheit の翻訳およびそれに若干の注釈を付したものである。これは、ウィルヘルム I 世の 88 回目の誕生日、1885 年 3 月 22 日にクラウジウスがボン大学総長として行った講演をもとにしたものである。なお、原語の綴りは当時の正書法にしたがった。また、欄外の数字 p. n は原著頁の始めを示す。

『自然界のエネルギー貯蔵とそれを人類の利益のために利用すること』

著者 R. Clausius, 出版社 Max Cohen & Sohn (Fr. Cohen), Bonn, 1885.

## 序 言

これはある学術的な記念講演の要旨で、そのなかで主題とやや関連が薄く、省いても理解の妨げとならない部分を削ったものである。現在および未来における工業の発展というテーマは重要な意味をもっており、おそらく広範囲の人々の関心をひくであろう。

ボン 1885 年 5 月

自然力を人類の用に役立てる努力は近年著しい成果をあげており、それら p. 5  
を過去の成果と比べてみると特徴ある将来の展望が明らかになる。したがって、このような努力の経緯と今日までのおよびこれから実現しそうな成果について簡単な論評を与えることも無益ではなからう。

永い間、人類は非生物的自然の諸力 (Kräfte) のうちで、それ自身であ

る程度利用可能なもののを自分たちのために利用してきた。たとえば、水車・風車の回転や船の運航のために流水や風の力 (Kraft) を、高い速度を得るなどの目的のために弾性力を利用してきた。近代になってはじめて、こういう動力 (Kräfte) を人工的に作り出すこと、とりわけ、熱によって蒸気力を発生させそれを機械的な出力として利用することが始められた。

大変興味深いことに、もともと理論的に正しい着想を実用可能な機械にまで具体化すること、そしてそれをいっそう改良することには非常な時間を要することがわかる。初期に大規模な応用をめざした努力はほとんど鉱山業に関連したもので、それ以外のものは小規模で散発的な試みに終わった。そこでは、鉱内から水を排除することが重要課題であった。まず 17 世紀初めに、「火を用い蒸気の圧力で水を高いところに押し上げる」という考えが出された。この世紀を通じて、これらの考えは多様なかたちで議論され、様々な実験によって試された。しかし、装置があまりにも不完全で、真に実用的な成果は得られなかった。17 世紀末にフランス人の Papin (ナントの勅令の廃止によってフランスから追放され、その後マールブルクで大学教授となった人物) が、Carl von Hessen 侯から「火力によって水を揚げる」実験を依頼された。しかし、彼は実験の方向を変え、最初のシリンダー式蒸気機関を造ることに成功した。彼の製作した円筒状の容器には、下部にいくらかの水が入れてあり上部に可動性のピストンがある。いまこのシリンダーを下から熱すると、水から蒸気が発生してピストンを押し上げる。ついでシリンダーが再び冷却されると、蒸気は凝結し大気圧がピストンを押し下げる。しかし、シリンダーの加熱・冷却には相当の時間が必要だった。彼の小型の装置でもピストンの上昇・下降をひき起こすのに数分間を要したので、大型の装置ではもっと長い時間がかかったに違いない。この点で彼の機関を実用化することは失敗に終わった。

およそ 10 年後、この仕事は二人の英国人、Newkomen<sup>(1)</sup> と Cawley によって再びとり上げられた。彼らはこの機関をつぎのように改良した。すなわちこの場合、蒸気はシリンダー自体の中で発生するのではなく、特別

p. 6

p. 7

な蒸気釜〔ボイラー〕の中で発生し、そこから管を通してシリンダー内に導かれる。こうしてシリンダー内の蒸気の凝結<sup>(2)</sup>ははるかに急速に生じ、そのためピストンの動きが速められることになった。この方式によって1712年にはじめて実用可能な機関の製造に成功した。この種の機関は、揚水に用いられるポンプを動かすために鉱山で実際に使用された。

この成果から一層の発展が急速に生じると、人々は期待したかもしれない。ところが、制御装置が多少改良されたのみで、その後再び長い停滞期に入った。半世紀もの間、こういう機関はまったく従来通りの方法で動かされ、根本的な改良はなに一つなされなかった。これらの機関は、いつも  
p. 8

従来通りの型に造られただけであり、鉱山以外での利用法が見出されることもなかった。じつは、機関があまりにも大量の石炭を消費したので、鉱山—石炭が安価に得られるところ—でしか採算がとれなかったのである。

1764年になってようやく、大きな前進がみられた。若い技術者 James Watt —当時グラスゴウ大学の物理学研究室で働いており地位も低かった—がニューコメンの蒸気機関の模型を入手して修理しようとしていた。そのとき、彼はある着想を得た。その考えは、あまりに簡単明瞭で、人々が蒸気機関の動きを半世紀もの間見ていながら、どうしてこんなことに気づかずにいられたのかわからないほどであった<sup>(3)</sup>。

すでに述べたように、ニューコメンの蒸気機関における蒸気の発生は、シリンダー内ではなくボイラー内で行われ、両者が管によって一時的に連結されるようになっていた。ところが、蒸気の凝結は、シリンダー本体の内部に冷水を噴射することによって行われる。ここで Watt が気づいたことは、もしシリンダーを冷たい真空の空間に管で一時的に連結すれば、蒸気の凝結をもシリンダーの外部で行える、ということであった。こうして、彼は復水器の発明者となった。この装置では、シリンダー内部はもはやピストンの往復のたびに冷却・加熱を繰り返す必要はなく、そのため燃料の  
p. 9

大幅な節約がもたらされた。この節約がいかに大きなものであったかということは、以下の事実から明らかになる。すなわち、Watt はこの改良機関に関して特許を取り、協力者の Boulton とともにその特許を実施したが、

その際彼らは、改良機関の所有者が石炭使用量の減少によって節約された経費の1/3を支払うように請求した。このやり方で、3基のポンプが稼働している一鉱山からだけで年に48,000マルクを受け取っていた。(原注 S. Arago, Notices bibliographiques 巻 p. 422) [以上の改良点に関しては付録A参照]

Watt は、このような改良以外にも多くの改良をこの機械に加え、鉱山のみならずほかの場所でもこの機関が使用されるようになった。その後30年ほど種々の方法で研究が行われ、さらに何度も改良が重ねられた後、今世紀〔19世紀〕はじめには船の推進に用いて採算がとれるようになった。さらに20年後、高圧蒸気機関が製作されるようになって、最初の実用的な機関車が造られた。

この発明によって人間の交通や生活全体にいかなる激変をもたらされたかについて、ここで述べる必要はないであろう。 p. 10

このようにして蒸気の効能が長期間にゆっくりしかし絶えず確実に向上し拡大して、すばらしく改善された力能 (Macht) になったので、Watt の発明以降の時代は「蒸気の世紀」と呼ばれているが、最近それと並んで電気という強力なライバルが台頭してきた。

電気の顕著な特性は速度である。その作用は任意に設置された経路〔電線〕上を高速で伝わる。この特性はもう長い間電信という非常に重要な分野に応用されてきた。しかし、この応用は蒸気の応用とはあまり関わりがない。むしろ、電気を蒸気の強力な競争相手たらしめる他の特性というのは、強力で急速に変化する力の作用 (Kraftwirkung) を及ぼす能力で、これは近いうちに大々的に利用されるにちがいない。

電気で駆動される機械をつくる試みはたしかに数十年前に遡るものであり、小規模のものではすでに多くの注目すべき成果が記されている。

可動的な電磁石が固定された永久磁石と向かい合わせに置かれ、コイルを通る電流の反転によって磁石の極性も反転する——N極がS極に、S極がN極に変わる——方式の機械が作られた。こうして生じた交互に変化する力がこの機械を回転させる働きをする。小型機の場合この方式の機械は p. 11

みごとに作動し、蒸気機関のような危険性をもたず、操作の快適さは申し分がなかった。大規模での実用化、たとえば機関車や船の動力装置などの製造においては、なお希望する運行速度を得ることが難しいという難点が明らかに存在している。にもかかわらず、装置の改善によってこの難点を次第に克服することができると予想される。しかし、もうひとつ自然の原理そのものに由来する障害があり、これを単に装置の改善によって除くことは不可能である。

作業能力と結びついた、または技術的表現では、力学的エネルギーの発生と結びついたある種の〔力学的〕作用を生み出すためには、やはり力学的なエネルギーが使われねばならず、そしてそれは消尽されてしまうと考えられる。

エネルギーの消耗なしに働き続け、それによって他の運動を生じさせて力学的仕事を行うことのできる機械——この種の機械は永久運動（perpetuum mobile）と呼ばれた——を造るためにじつに多くの考案がなされ、数多くの実験が行われてきた。もしこのような機械があったら、その有益な作用力により富の無限の源泉になるはずである。したがって、いつの世にも勤勉ではあるが夢想的な人々が居て、なにか新しい発明によってこの目的を達成できるという願望に身を投じ、そのために自らの精神力と自由にできる物質的手段のすべてを使って研究し続け、ついには経済的な破綻や精神的な破滅にいたる、ということも不思議ではない。近年になってようやく、この永久運動の不可能性の根拠は力学の原理そのものにある、という見解に人々は到達し、そしてそこからエネルギーの保存という重要な法則を導き出した。この法則によれば、力学的なエネルギーをひとつの形態から他の形態へ変換することはたしかにできる、しかし無からエネルギーを発生させることや現に在るエネルギーを消滅させることは決してできない。

p. 12

この場合に問題となるのは、われわれの意図する力学的作用を生み出すために利用できるものとして、いかなる形態のエネルギーが存在するのか、ということである。

ここでとくに化学的エネルギーについて述べておこう。二種の物質が互いに化学的結合性をもっているとき、その中の原子は互いに引き合い結合しようとする。双方の物質はその結合に対して隠された状態にあるエネルギー、言い換えると一定の潜在的なエネルギー (potentielle Energie) をもっている。これは、結合が始まると顕在的なエネルギー (aktuelle Energie) に転化する。たとえば、石炭を酸素と一緒にしどこか一部分を加熱して化合ををひき起こすと、化合〔反応〕はどんどん進行して燃焼過程が得られる。その際、潜在的なエネルギーは、熱と呼ばれる顕在的なエネルギーに転化し、さらにそれが多様なエネルギー作用 (Kraftwirkungen) に変換される。燃料と呼ばれる物質はすべて石炭と同様なふるまいをする。他の物質にも本質的に同じ挙動をしめすものがある、ただしその際現れる見かけの現象は多種多様でありうる。たとえば、金属も酸素やそれに類する他の物質とに対して化学的親和性をもつ。金属がそれらの物質と化合するときやはり潜在的エネルギーが消費され、その際それが顕在的なエネルギーに移行しうるのである。

p. 13

さてここで、エネルギー保存の法則を考慮しつつ、実際的な利用可能性という視点から電磁氣的機械と蒸気機関とを比較してみよう。この際、もっとも重視しなければならない問題点は、実際に有効となるエネルギーがいかなる源泉から取り出されるのか、ということである。

蒸気機関では、源泉は燃料として使用された石炭であり、それがまず燃焼によって熱を生み出し、その熱が機関を動かす蒸気をつくり出す。電磁

的機械では、電磁力を発生させる電流は化学電池でつくり出される。そこにおいて、真に効力をもつものは鉛といった金属の酸化とそれに続く化合とである。したがって、二種の機関において、一方では石炭の消費が、他方では亜鉛と電池中にある他の物質との消費が、それぞれ作動に必要な消費として対応している。この点に着目すると、実用性に関して二種の機関がもつ対照的な特性を判断することが自然にできるようになる。なぜなら、亜鉛やその他必要な物資の価格が石炭に比べて非常に高いために、大工場において電磁氣的機関が蒸気機関と競合するとは考えられない。その

p. 14

状況は、たとえ前者のもつ機構的な難点が完全に克服できると想定してもかわらないだろう。この理由から、電磁機関をさらに改良しようという努力はあまり熱心には進められず、しだいに行き詰まったのである。

こういう状況に対し、新しい視点からの展開によって、大きな前進をもたらす刺激が再び与えられた。同時に、この刺激は、達成すべき目的に関してある新しい方向を与えた。

すでに 30 年代に、電気の分野で多くの先駆的研究をした英国人物理学者 Faraday はつぎのような発見をした。すなわち、電線を磁極の近くで運動させることによって、電線中に電流をつくり出すことができるのである。この電流を Faraday は誘導電流と名づけた。同時に彼が発見したことは、電線を軟鉄の芯の周りに巻きつけておくと、この電流が運動に同調し、磁極の影響を通して磁極の磁場を変化させ、電流がさらに強められるということである。

p. 15

この発見は、化学的要素なしに電流を生み出すために利用された。そのために、前に述べた電磁氣的機械と本質的には同じ装置がつくられたが、それとは逆の方法で使用された。つまり今度は、電流から運動がつくり出されるのではなく、反対に運動から電流がつくり出されるのである。

この装置は、もっと強力な電流を発生させるのには適していない。なぜなら、この装置で使用される鋼磁石を十分強力にすることができないからである。電磁石は、鋼磁石よりもはるかに強力につくれるからその目的に適している。とはいえ、電磁石はまず電流が存在してはじめて働くので、電流を発生させる装置を電磁石でつくることは不可能であるように思われた。

p. 16

しかしここで、わが国の天才 Werner Siemens が、この障害を独特な方法で取り除くことを考えついた。

すなわち、この〔電流発生〕装置に電磁石を用いると、それは非常に弱いものながらも若干の磁気を予めもっており、装置自身によってつくり出された電流を、外部の導線だけでなく電磁石のコイルにも流すようにすると、電磁石の磁化を強めることができる。増大した磁化は、いっそう大き

な電流を生み出し、その電流が再び磁化を増大させる結果になる。このそれ自体でどんどん進行する電流と磁化との相互的な強化作用によって最終的には非常に強い電流が得られる。

この種の装置においては、エネルギーの真の源泉——有効な磁気とそれによる電流とを生み出す源泉——は、装置の回転をひき起こす力の支出であり、このことからこの装置は発電・電動機 (dynamoelektrische Maschine) と名づけられた。この装置の運転には、つねに装置の回転のための仕事能力を提供する他の出力機械、たとえば蒸気機関などが必要である。しかし、そのためにかかる費用は、同じ強さの電流を化学電池、すなわち亜鉛と酸の消費から生み出す場合の費用よりもはるかに低い。

p. 17

この電流を利用する方法はじつに多様である。最近よく論じられているのは、電気による照明で、それはこの快適で安価な電流発生方式によってはじめて実用的にも経済的にも重要なものとなってきた。さらにこの電流は電気版製造法 (Galvanoplastik) その他の化学的効果に応用されて大きな利益をあげるだろう。しかし、将来とくに注目されるのは、他の分野への応用である。つまり、この発電・電動機によってつくられた電流を用いて、第二の発電・電動機を運転し、その運動によって生じる力を力学的な仕事能力として利用するのである。

しかし、力学的な仕事能力を得るこの方法は、蒸気機関の場合とは非常に異なっている。すなわち、後者にあっては、力学的な仕事能力は、石炭と酸素のなかに不活性的に存在する潜在的なエネルギーから得られる。これに対して、発電・電動機の場合は、第一の装置〔発電機〕の運転のために力学的な仕事能力が消費されねばならず、ついで第二の装置〔電動機〕からは反対に仕事能力が供給される。

つまり、この場合、運動エネルギー (bewegende Kraft) が潜在的エネルギーから産出されるのではなく、運動エネルギーが一地点から他地点へすなわち第一の装置がある場所から第二の装置がある場所へ単に移動するのである。

p. 18

それでは、このようなエネルギーの移動がはたして特別な重要性をもち



うるであろうか、そしてそれはどのような状況のもとであろうか。

鉄道の場合、蒸気機関車を単純に発電・電動機で代用することはできず、ただ機関車の代わりに他の動力源 (Kraftquellen)、たとえば定置式の蒸気機関、を用いることができるだけである。この動力 (Kraft) はレール上を移動する車両に発電・電動機によって伝達される。通常の状態では、このことはほとんど利益とはならない。たしかに、大規模の蒸気機関は機関車よりは経済的である。ただし、動力 (kraft) の一部が移転の際に失われるので、経済的利益は相殺されてしまう。しかし、機関車の使用が甚だしく不都合になる場合もある。たとえば、長いトンネルの中では、蒸気機関から出る煙や蒸気がほとんど除去されないので困ったことになる。また、市街地の鉄道では、長い距離にわたって密集した住宅地の側を通過する。これらの場合、定置式の蒸気機関で運転される発電・電動機はすばらしい役割を果たすことができる。

p. 19

他にも有望な用途がある。すなわち、大都市にはすべてガス工場があり、そこでガスが大規模に製造され、各々の家庭に供給され、必要に応じて消費される。さらにまた、大きな貯水池がつくられ、各家庭に水が供給されている。ちょうどこれらと同じように、動力もまた中央の工場で大規模な蒸気機関によってつくられ、電線や発電・電動機によって各家庭に運ばれ、そこで必要に応じて消費される、というぐあいにはできる。もし各労働者が仕事に必要な装置——旋盤であれ、織機やふいごであれ、他の装置であれ——を好きなときに任意の時間運転することができ、蒸気機関や他の原動機類をまったく設置せずすませるとしたら、それは小規模の企業にとっていかに大きな利益であろうか。一般家庭でも、ミシンのような小型機械を特別の原動機なしに動かすことができれば、大変便利であろう。そしておそらく、ガスや水をいまでは必要に応じて自由に使えるように、動力を自由自在に使える時代もそう遠くないであろう。

しかし、これらすべての利点も、もう一つの効用に比べると副次的なものといえる。すなわち、それは動力の輸送が人類にもたらされたことであり、その最大限の利用が不可欠であることは時とともにますます明白にな

p. 20

るであろう。〔電気利用の歴史に関しては付録B参照〕

いまやわれわれは力学的エネルギーの消費に関してはすばらしい時代に生きている。経済学的には、いかなる財も、その時期に再生産されうる分量を超えて消費することは許されないという一般的な法則がある。この法則によれば、われわれが消費できる燃料は森林の成長によって新たに生産される分量だけであるはずだった。しかし実際には、われわれはまったく違うやり方をしてきた。

よく知られているように、石炭は遠い昔から地下に埋蔵されていた。それは、当時地上に存在していた植物の成長によって長期間かかって形成され、大量に堆積したものである。この期間に比べると、歴史時代全体の時間も微々たるものになる。現在われわれはそれを消費するさい、まるで莫大な遺産を消尽する幸せな相続人のようにふるまっている。石炭は、人力や技術的手段によって可能なかぎり大量に地下から運び出されて、あたかも無尽蔵であるかのように消費されている。石炭を消費する鉄道、蒸気船、蒸気機関で動かされる工場などが驚異的な勢いで増加しつつあるので、未来のある時点で石炭鉱床が枯渇したらいったいどうなるか、という疑問が思わず湧き起こってくる。

石炭埋蔵量の豊富さを考えるとそんなことは無駄な疑問だ、ということ p. 21  
はできない。たしかに、全地球上にはなお見積もることのできないほどの埋蔵量が存在する。しかし、個々の国に関しては、埋蔵量およびあといつまで間に合うかという期間がすでに見通されている。英国については、William Siemens (原注 Inaugural Address delivered at the General Meeting of the Iron and Steel Institute, March 1877, p. 7.) つぎのような計算をしている。もし石炭の年間消費が現在の量で一定に保たれると仮定すると、埋蔵量はあと1100年をまかなうであろう。しかし、もし消費量が最近20年間と同じ増加率で増大しつづけると、石炭鉱床はあと250年で掘り尽くされてしまうだろう。たとえこの数字が厳密に正確なものとはいえないにしても、そのような危機の到来が不可視の未来にあるのではなく、人間の一生と比べてもそう長いとはいえない期間が問題となる、とい

うことが示されている。

このような万一の事態を論じるとき、しばしばこんな異議が唱えられる。石炭鉱床が尽きるよりもずっと前に、熱をつくり出すための新しい手段が発明されるにちがいない、だからそれについて心配する必要はないのだ、と。しかし、どんな発明がそういう手段になりうるのか、が問題となる。ここでよく現れてくる意見は、「エネルギーの消費なしに水をその成分の酸素と水素に分解することに多分成功するであろうし、そして水素の燃焼熱から無尽蔵の熱源が開発されうる」というのである。

p. 22

こういう意見は、しかしながら、物理学の根本原理にまったく背反している。ここで問題となっていることは、もはや蓋然性の根拠を吟味するというのではなく、可能なことと不可能なことを確実に識別できるか否かということである。いかなるエネルギーの生産も、それに相当した他のエネルギーの消費なしには、絶対に不可能である。石炭層のなかに存在する潜在的なエネルギーの蓄えが形成されえたのは、太陽が地球に、植物の成長に必要な放射熱の形で、人類の発生に先立つ長い間、潜在的なエネルギーを送ってきたおかげである。もしこの蓄えが消尽されてしまったら、他のエネルギー源を見出す手段は、たとえ科学がもっと進歩しても手に入らない。したがって人類は、太陽から放射によって今後もお永続的に供給されるエネルギーで間に合わせるように運命づけられている。

このエネルギーは、一方では植物の絶え間ない成長によってつくられる酸化可能な物質のなかに生成し、他方では風のなかや落下あるいは流下する水のなかに存在する運動、そして太陽放射の作用によって引き起こされる同様の運動のなかに生成する。とくに水の運動は非常に多量の利用可能なエネルギーを供給しうる。大きな滝は大規模な石炭鉱山の代わりになりうる。また、流速の大きい河川や潮流はすべて同様の働きをする。

p. 23

この運動する水のエネルギーは、これまでの水車や水力工場ではごく一部しか利用されていない。このエネルギーの大部分は利用されずに失われるままになっていた。実際には、ある程度大きい滝や急流の場合、そのエネルギーのすべてをその現場で有効に使用することには大きな困難が伴っ

ていた。しかし、このエネルギーを他の遠く離れた場所に運ぶことが可能になるにちがいない。そうすると、このエネルギーを有効に使用することはきわめて容易になるであろう。このための手段として、発電・電動機が提供されているのであり、おそらくこの点に、将来におけるこの装置の主要な用途がある。

すでにこの利用法に関する仕事が始まっている。報道されている例では、ある工業局 (technisches Bureau) がライン河の水力を、たとえその一部でも、都市の役に立てるための事業に従事している。水は、はじめ適当な水路に導かれ、タービンを駆動して 3 ~ 4000 馬力の仕事能力をつくり出す。それは電流として都市に導かれ、石炭の節約に役立つであろう。同様のことは他の場所でもすぐに実現するであろう。とくに滝の場合、距離が長くそれゆえコストが高い水路を省くことができるので、近い将来この方法がますます多く利用されるであろう。

p. 24

自然愛好家にとっては、滝という激しい泡立ちで山岳の景観美の主な源泉をなすものが捕らえられ機械の前に縛りつけられるのを思い浮かべることは当然愉快なことではないだろう。しかし、この損失は避けられないものであり、滝の近くで発達する活発な産業活動は失われた自然美の償いになるにちがいない。

この方式をできるかぎり速やかにかつ大規模に実施することが人類のために望ましいであろう。なぜなら、この方式こそ、これまで無為に失われてきた自然力を有効に利用し、それによって長い間地中に保存されてきた石炭の蓄えを急速な消耗から保護するものだから。

これまでの 100 年を際立たせる特徴は、蒸気機関をはじめとする諸機械の発明・改良により、過去には考えもつかなかった方法で自然のエネルギー源が人類の用に供されるようになったことである。他方、これから先数世紀の課題は、自然から与えられたエネルギー源の消費に関してある種の経済学 (eine weise Oekonomie) を導入すること<sup>(4)</sup>、およびとくに、古い時代からの遺産として大地にあり何物によっても代替できない諸資源の浪費を防ぐことである。転換の開始が早ければ早いほど、未来によい結果

p. 25

が得られるであろう。文明の先端に立つ諸国家は、よく組織された国家が森林の開発を管理しているのと同じやり方で、炭田の開発を管理するために共同の行動をとるべきである。このような対策の実施を成功させるためには、たしかに非常に多くの国家の協調が必要とされる。様々な国の利害が互いに対立していることを考えると、このような対策の実現はとうてい不可能だと思えられるかも知れない。しかし、直面している困難の大きさを過大に見積もってはならない。国際的な条約という分野では、最近しかもとくにドイツの影響のもとに、すでに多くの条約が成立した。かつては、こういう協調が可能になるとは、考えることもできなかったのである。この点に関しては、万国郵便連合が大々的に結成され、ほとんどの文明国がこぞって加盟したこと、および中立の大コンゴ国の創設とそれに関わる国際法的な取り決め<sup>5)</sup>を挙げるだけで十分であろう。これらは、広大な領域

### 訳注・解説

訳者は、この翻訳に多大の助力を与えられた山田百合子氏に感謝したい。氏の協力がなければ、時間的余裕に乏しい訳者が短時間でこの翻訳を仕上げることはできなかったにちがいない。ただし、訳文に対する最終的な責任はありうべき誤りを含めて訳者にある。原典は、スイス連邦工科大学(チューリッヒ)図書館(E. T. H. Bibliothek, Zurich)に所蔵されている。なお、現在のとは異なっている。原語を引用する際は、原文通りの綴り字を用いた。また、文中〔 〕で囲まれた部分はすべて訳者が挿入したものである。

最後に、クラウジウスの見解を現代の状況と対比しておこう。

この時代イギリスは石炭1.5億トン、銑鉄800万トンを生産していた。ドイツの生産は英に比して石炭が1/3、銑鉄が2/3であった。イギリ

スの石炭埋蔵量の静態的な（消費量不変とみる）耐用年数1100年という William. ジーメンス（Werner の弟）の見積もりに大して、なおクラウジウスは石炭の節約を真剣に提唱し、水力利用も石炭節約という視点から推奨した。これは、慎重すぎるようにみえるが、しかし約100年後・現在のイギリスは年消費料1.3億トンで埋蔵量は990億トン、経済的可採埋蔵量はわずかに40億トンと見積もられており（『WAE S レポート世界エネルギーの将来1985-2000』日本A E S機構訳、共立出版、1977、p. 203）、前者をとっても静態的耐用年数は750年に低下している。北海の油田・ガス田が21世紀始めに枯渇すると、石炭消費の増大は必至であろう。

クラウジウスが国際協定による石炭消費節約を唱えたのは、枯渇を心配したからであるが、今日ではむしろ燃焼廃棄物を減らすためにエネルギー消費を削減する必要が高まっているといえよう。実際、燃焼廃棄物——炭酸ガスと毒性酸化物——やフロンのような有害化学物質、さらに核廃棄物の蓄積に伴う危険を考えると、エネルギー消費の規制のための国際条件、という構想は将来的には人類の存続に関わる重要性をもちうる。

この論文の要旨の紹介としては、注末尾の文献（6）、（7）、（8）を参照されたい。

#### 注

- （1）正しい綴りは Thomas Newcomen であるが、原文通りに記載した。
- （2）ここは、文脈からみて、蒸気の凝結 *Dampfniederschlag* ではなく、シリンダー内への「蒸気の流入・膨張」となるべきところであろう。
- （3）復水器の発明により、シリンダーを常に100℃以上に保ち、蒸気の凝結と動力の損失を防止することが可能になった。この「着想」に到達するまで、Watt は大変な苦労を重ねた。したがって、これを「コロンブスの卵」扱いするのはやや問題であるが、後智恵としてはクラウジウスの感想もなりたつ。

パパン、ニューコメン、ワットの蒸気機関は、それぞれ付録Aのような構成をもつ。この間の効率改善は、機能分化によって達成されたといつてよい。これとは対照的に、内燃機関は全く機能分化を廃し、いわばボイラーをシリンダー内に取り込む形態で、いかなるシリンダー式蒸気機関よりも高い効率を達成する。これは、シリンダー内の気体が急激な圧縮・膨張により急激に上昇・下降し、シリンダー壁の温度——ほぼ一定——とは独立に変化するからであ

る。付録A参照。

- (4) この“Oekonomie”は経済学よりも経済・節約を意味するとも考えられる。ここでは、「純生産を超える消費は許されない」ことを経済学の基本法則と著者がみなしていることと関連して、経済学と訳した。
- (5) コンゴ (現ザイール) に関する列国会議が1884～1885年ベルリンで開かれ、コンゴ自由国 (Congo Free State) が1885年に成立した。しかし、これは、1879年ベルギー国王レオポルドが探検家スタンレーとの契約でコンゴをベルギー王室領にしたことへの国際干渉を意味するもので、結局コンゴは1908年ベルギー領土とされた。歴史的には1880年代は、列強によるアフリカ分割が最も劇的に展開された時期であった。この地域が独立して、「ザイール」となったのは1960年である。
- (6) Martinez-Alier, Juan, Ecological Economics — Energy, Environment and Skociety, (Oxford Basil Blackwell, 1987) 73 ff.
- (7) 室田武「クラウジウスの生涯」, 『エントロピーと地域の物質循環』(経セミ・臨時増刊), 日本評論社, 1988.
- (8) Martinez-Alier, 前掲書, 83頁によれば、もとの原稿がミュンヘン・ドイツ博物館の特別コレクションに保存されているという。

### 付 録

#### A. Papin, Newcomen, Watt の蒸気機関の構造および熱機関の熱効率の歴史的発展

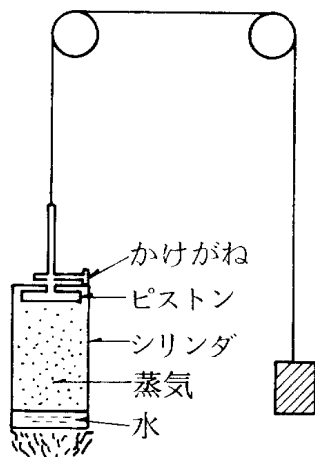


図1 パピンの蒸気機関 (1663年)

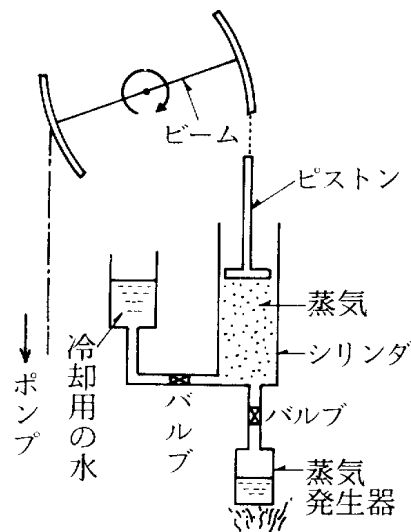


図2 ニューコメンの蒸気機関 (1712年)

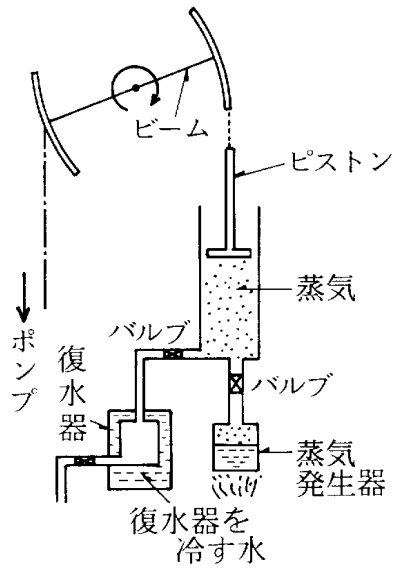


図3 ワットの大気圧蒸気機関 (1769年)

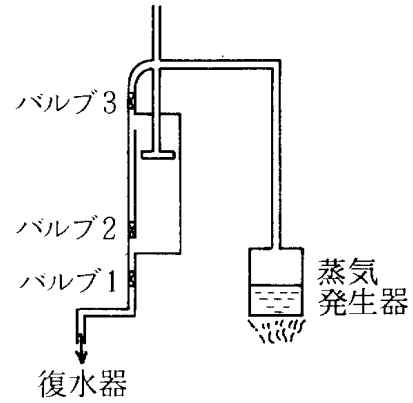


図4 ワットの高圧蒸気機関

図1～図4は井田幸次郎『やさしい熱力学』東京図書(1968)による。図5は河宮信郎『エントロピーと工業社会の選択』海鳴社(1983)による。

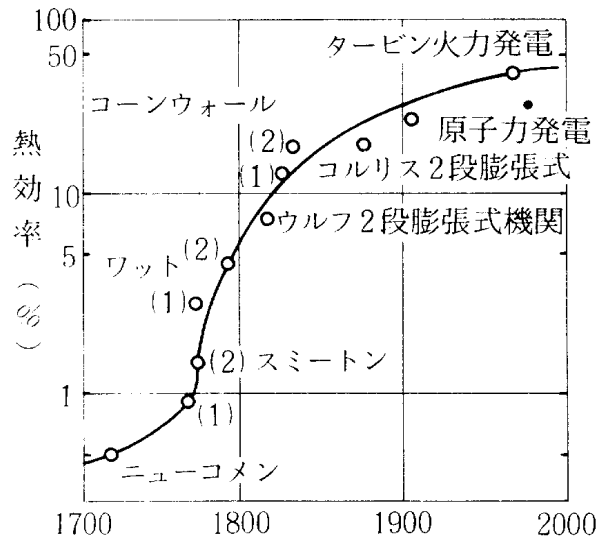


図5 熱機関効率の歴史的発展



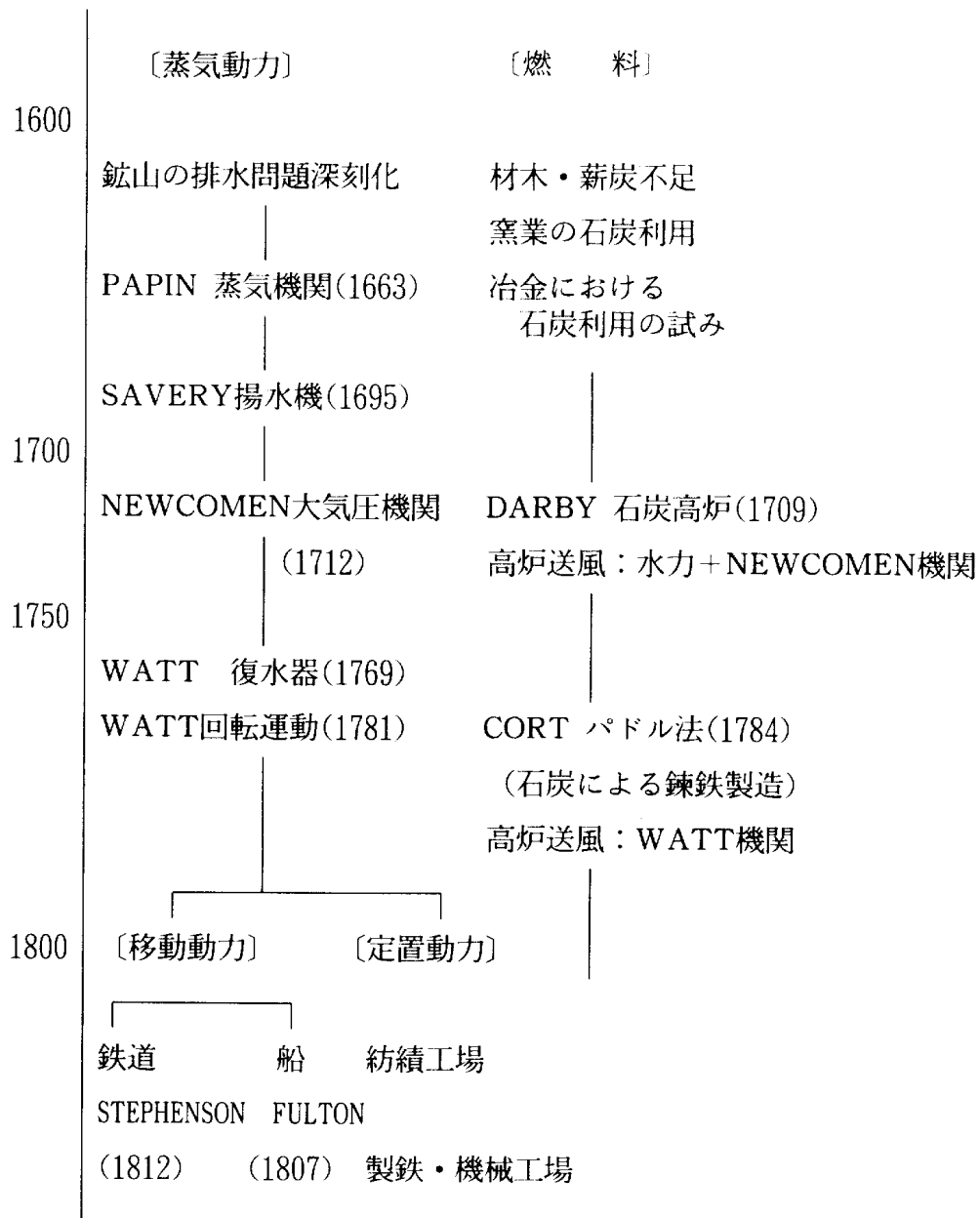


図6 蒸気機関と石炭利用の歴史

参照：『技術の歴史・第7巻 産業革命・上』田辺振太郎編訳，  
 (筑摩書房，1979) 138ff. 原著 A History of technology,  
 ed. by C. Singer, E.J.Holmyard, A.R.Hall and T.I.Williams,  
 in 5 vols., (The Clarendon Press, Oxford, 1954-1958) vol.5  
 Chapter 6 (Fig.99).

## B. 19世紀における電気技術の発展

電気の利用は、電灯のような単純な装置ではなく、通信という複雑なシステムにおいて始められた。クラウジウスも指摘しているように、電力源が電池の場合には電気を動力として使うことは経済的に引き合わない。また、電球のフィラメントには3000°C程度の耐熱性が要求され、この条件を備えた材料の発見・加工には大きな困難があった。電気を動力の輸送方式とみるクラウジウスの見解は優れた洞察である。なお、遠距離送電が実用化したのは、交流発電機の発明(1887)と変圧器の実用化以降である。

本文に関係の深い電気技術を年表のかたちで示す。

- 1831 M. Faraday (英) 電磁誘導の法則発見.
- 1835 S. F. B. Morse (米) 電信機試作. ドイツで鉄道開通.
- 1836 ハンブルクストックホルム間の電信開通.
- 1842 J. R. Mayer (独) エネルギー保存の法則に関する最初の論文刊行.
- 1844 モールス電信機実用: ワシントンボルチモア間.
- 1847 H. L. F. Helmholtz (独) エネルギー保存則定式化.
- 1850 ドーバー海峡海底電信線敷設. R. Clausius (独) 熱力学第二法則定式化.
- 1858 大西洋横断の海底電信敷設事業開始, 66年完成.
- 1866 E. W. Siemens (独) 発電機(ダイナモ)改良.
- 1870 T. Gramme (ベルギー) 環状発電機発明.
- 1876 A. G. Bell (米) 電話機発明. N. A. Otto 内燃式オットー機関発明.
- 1877 L. Boltzmann (オーストリア) 熱力学第二法則の統計力学的基礎づけ.
- 1879 T. A. Edison (米) 炭素フィラメント電球発明. Siemens 電車製作.
- 1881 ニューヨークで大型火力発電所による電灯事業始まる. ドイツに電気鉄道開通(ベルリンリヒテンフェルト間).
- 1884 C. A. Parsons (英) 蒸気タービン発明.
- 1887 N. Tesla (米) 多相交流発電機発明. この頃ロンドンで電気動力による地下鉄建設. : 湯浅光朝編著『解説科学文化史年表』中央公論社クラウジウス研究会蒸気機関の歴史