

科学技術開発課題の立案に係る情報の収集 (II)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

技 術 資 料		
開示区分	レポ ー ト No.	受 領 日
丁	J168297-001	1997. 6.11.
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1997年3月

(株) 矢 沢 事 務 所

1997年3月

科学技術開発課題の立案に係る情報の収集(Ⅱ)

策定者

策定者 矢沢 潔

策定者

策定者

要 旨

原子力技術のさらなるブレークスルーが求められているいま、原子力分野に限らず科学一般について、さまざまな事象や技術に係る発明・発見の歴史をふり返ることはきわめて有用であると思われる。発見や発明がいかにしてなされたかを整理し、それらが産業へ導入される経過を分析することによって、原子力技術の新たな展開に利用できる発明・発見の原理（発明・発見を可能にする条件、環境等）を模索することができよう。

また、一般公衆に対して原子力の広報活動を行っていく上でも、発明・発見の内容やそれらが及ぼす社会への波及効果についてわかりやすく説明する情報をもつことはきわめて有益である。

本件は、地域との協力的関係を促進し、地域産業に有益な情報を提供する振興技術の一環として実施しているものであり、これらの情報を提供することによって人々の興味を喚起し、近年の青少年層に顕著な“理科離れ”を抑制し、かつ“総合的学問としての理科”を推進する目標を補完するものでもある。

以上の事由から、昨年度に引き続き、世界の主要な発明・発見を取り上げ、それらに関連する情報を収集・整理する。

目 次

はじめに	1
1. 情報の収集にあたって	1
1.1 情報収集の目的	1
1.2 情報収集の内容	2
2. 情報の利用の仕方	3
2.1 データベースと公開資料への応用	3
2.2 その他への展開	3
おわりに	3
収集した情報と応用例	4
1. 世界の主要な発明・発見	
①医学 ■「抗生物質」はいかにして発見されたか	5
②電気 ■動物電気から生まれた「ボルタ電池」	14
③磁気 ■「羅針盤」が開いた大航海時代	25
④冶金 ■「たたら製鉄」はこうして生まれた	34
⑤動力機関■産業革命を牽引した「蒸気機関」	49
⑥推進機関■爆竹から花火、そして「ロケット」へ	60
2. 関連文献一覧	74

はじめに

本件は、原子力技術の新たな展開を促す諸条件を模索するため、過去の歴史をふり返り、人類の科学・技術史上、重要な発明・発見、技術的ブレークスルーに至る経過を調べ、それらに関する情報を収集するものである。

1. 情報の収集にあたって

1.1 情報収集の目的

いま、原子力技術におけるさらなるブレークスルーが求められている。そこで、原子力分野に限らず科学・技術一般について、人類がなしたさまざまな事象や技術に係る発明・発見の歴史をふり返り、それらに関する情報を収集することはきわめて有用であると思われる。発明や発見がなされた経過を知り、それを可能にした社会的、経済的、科学・技術的諸条件とは何かを分析する。さらに、発明・発見が実用的な機械や道具となって、社会・産業へと導入される経過を追跡し、その長期的な波及効果を考察する。こうした歴史的調査を通して、今日の原子力技術に求められる新たな展開を可能とする発明・発見の諸条件、環境等を導き出すことができよう。

また、一般公衆に対して原子力の広報活動を行っていく上で、人類史における主要な発明・発見に至る経過や、それらが人類社会へ及ぼした波及効果について、わかりやすく説明できる情報を収集しておくことはきわめて有益である。とくに、放射性廃棄物の関連施設の立地誘発においては、廃棄物そのものの説明以上に、施設建設による周辺地域への影響や、それらが地域住民、とりわけ若年層へ及ぼす影響についての説明がつねに求められるからである。

本件は、こうした地域との協力的関係を促進し、地域産業に有益な情報を提供する振興技術の一環として昨年度来、実施しているものである。これらの情報を地域住民および一般公衆に提供することによって、科学技術への人々の興味を喚起し、かつ理解を促進する一助となろう。また、近年青少年層にいわゆる“理科離れ”が顕著であるとされるが、歴史的な発明・発見に至る経過と、それらが以後の社会にどのような波及効果をもたらしたかについて知ることは、彼らの科学への関心を呼び覚まし、“総合的学問としての理科”を推進するという目標にも役立つと思われる。

1.2 情報収集の内容

以上の事由から、昨年度は次の6分野について、重要な発明・発見に関連する情報を収集し、発明発見に至る経過やそれらを可能にした諸条件の分析・評価を行った（「科学技術開発課題の立案に係る情報の収集」（1996））。

- ①放射線 ■ 「X線」はどうやって発見されたか
- ②原子力 ■ 核分裂の発見から「原子炉」まで
- ③光 ■ 「レーザー」はこうして誕生した
- ④情報処理 ■ 「コンピュータ」開発の100年史
- ⑤物理・化学 ■ 「超電導」はこうして発見された
- ⑥基礎研究 ■ 核物理学を変えた「粒子加速器」

今年度は引き続き、以下の6分野の重要な発明・発見にまつわる情報を収集した。

- ①医学 ■ 「抗生物質」はこうして生まれた
- ②電気 ■ 動物電気から「ボルタ電池」へ
- ③磁気 ■ 「羅針盤」が開いた大航海時代
- ④冶金 ■ 「たたら製鉄」はこうして生まれた
- ⑤動力機関 ■ 産業革命を牽引した「蒸気機関」
- ⑥推進機関 ■ 爆竹から花火、そして「ロケット」へ

収集した情報の内容は、発明・発見に使われた機器類や設計図、その他の関連情報である。また、発明・発見が産業分野に応用された初めての例についての情報も収集した。これらの情報をもとに、発明・発見に至る経過やそれを可能にした社会的、文化的、経済的諸条件の分析・評価を行った。それについては本報告書の「収集した情報とその応用例」の項に示す。

2. 情報の利用の仕方

2.1 データベース化と公開資料への応用

昨年度と同様、上記の6分野についての情報を、文章、映像ともにMOディスクに納めてデータベース化した。これらの情報は、原子力技術に関連する公開資料作成の際に目的に合わせて簡単に抽出することができ、レイアウトの変更や映像の入れ換え、拡大・縮小等が可能である。また、データベース化により、コンピューターネットを通して日本中どこからでも即座に情報を引き出すことが可能である。なお収集した映像情報はすべてMOディスクに別のディレクトリを設け、テーマごとにページ番号をつけて整理した。

公開資料作成のためにデータベースの映像情報を使用する際には、該当の映像資料（図版、文献、写真等）を所有している関連機関の許可を取る必要がある。

2.2 その他への展開

発明・発見にまつわる歴史的情報は、一般公衆の知的好奇心を刺激し、若い世代が自ら発明・発見に挑むきっかけを作ると思われる。また、発明・発見が社会や産業にいかなる波及効果を及ぼし、その結果として現代の技術文明が存在することを人々が知ることで、技術開発の意義と有用性に気づかされるであろう。また本件の試みを続けて、より多くの情報を収集し、それらを1冊の本にまとめて出版すれば、一般公衆の科学・技術一般への興味や理解を促進し、それが、原子力技術に対する彼らの理解を深める土壌作りに役立つことになろう。

おわりに

昨年度に引き続いて発明・発見にまつわる情報を収集したが、いまだ取り上げていない分野における重要な発明・発見が数多く残されている。それらについても同様の情報収集を行い、データベースを充実させていくことによって、わが国の原子力技術において将来の発明・発見を可能にする諸条件の検討材料が蓄積されると考える。

収集した情報と応用例

この章では、収集した情報と、その情報を用いた応用例について、具体的な事例を挙げて説明する。また、収集した情報の活用方法についても、具体的な事例を挙げて説明する。

収集した情報の活用方法として、まず挙げられるのは、マーケティング活動への応用である。収集した情報は、顧客のニーズや行動パターンを把握するために活用され、商品開発やサービス改善に役立つ。また、競合他社の動向を把握し、市場戦略を立てるにも活用される。

次に、収集した情報は、業務効率化にも活用される。例えば、顧客の問い合わせ履歴を分析することで、よくある質問や課題を特定し、FAQを作成したり、業務プロセスを改善したりすることができる。

また、収集した情報は、リスク管理にも活用される。例えば、SNS上の評判や口コミを監視することで、顧客の不満やクレームを早期に発見し、対応することができる。また、業界動向や規制の変化を把握し、リスクを軽減することもできる。

以上のように、収集した情報は、さまざまな分野で活用される。収集した情報の活用方法を、具体的な事例を挙げて説明する。

収集した情報の活用方法として、まず挙げられるのは、マーケティング活動への応用である。収集した情報は、顧客のニーズや行動パターンを把握するために活用され、商品開発やサービス改善に役立つ。また、競合他社の動向を把握し、市場戦略を立てるにも活用される。

偶然の連鎖が生んだ奇跡の薬 「抗生物質」はいかにして発見されたか

偶然と創造力が 発見に結びつく

「彼の一生は一見何の関連もない多くの偶然がより合わさったものであり、それらのうちのどれひとつが欠けても、あの頂きに達することはなかったでしょう」——これは、イギリスの細菌学者アレグザンダー・フレミングの葬儀の折りに、彼の親友が弔辞で述べた言葉である。「あの頂き」とは、フレミングの名を世界に知らしめた抗生物質ペニシリンの発見である。だが、その幸運な偶然の連鎖も、フレミングの知性と好奇心、それに豊かな創造力と鋭い洞察力なくしては、偉大な発見には結びつかなかっただろう。

アレグザンダー・フレミングは1881年、スコットランドの農家の5人兄弟の4番目の男子として生まれた。幼くして父が死に、職を求めてロンドンに出た彼は、16歳で船会社の下級職員として働き始めた。最初の転職は20歳の時にやって来た。叔父が死に、当時の初任給の10年分に当たる250ポンドの遺産が彼に残されたのだ。フレミングはこれを学費に、医学校に進む決心をした。生来頭よかった彼は、その年の入学試験に一度で合格し、セント・メリー病院の付属医学校で学び始めた。

5年後、彼は医師の資格試験に合格するが、その後の進路を決めたのは試験の成績ではなく、彼の射撃の腕だった。セント・メリー病院には職員からなる射撃クラブがあり、優秀な選手であった彼を病院にとどめるため、病院側が予防接種研究室の助手の口を世話したのだ。この研究室でフレミングは、細菌や微生物によって引き起こされる種々の感染症に対する免疫療法の研究を行うようになった。当時、ドイツの医学者パウル・エールリッヒらが、病原菌のみを選択的に殺し体細胞には影響を与えない化学物質——“魔法の弾丸”——の存在を予言していたが、多くの学者はそのよ



▲アレグザンダー・フレミング (1881~1955年)。1928年、彼は実験中のシャーレが汚染されるという出来事をきっかけに抗生物質ペニシリンを発見した。この功績によりフレミングは1945年、ペニシリンの分離精製・大量生産に成功したフローリー、チェインとともにノーベル生理学医学賞を共同受賞した。

うなもの存在しないと考えていた。そして感染症の治療法としては、患者の体の免疫力を高める免疫療法が広く行われていたのである。1914年に第一次世界大戦が始まると、フレミングは陸軍大尉として医療部隊に配属された。そこで傷病兵の治療にあたるうち、体液中の白血球が病原菌を破壊する抗菌作用をもつことに強い関心を抱いた。これが最初の重要な発見の土壌となった。

1922年、風邪をひいた彼は細菌を培養していたシャーレの上でくしゃみをしてしまった。しばらくして見ると、そのシャーレの細菌のコロニーの一部がいつまでも成長しないことに気づいた。唾液に含まれる何かの物質が細菌の成長を抑制して

いるのではないかと彼は試しに、手近にあった細菌を入れた試験管に自分の涙をたらしてみた。すると同じ抗菌作用を示した。フレミングは唾液や涙に含まれる抗菌作用をもつ物質に「リゾチーム」という名をつけた。

後でわかったことだが、問題のシャーレで培養していた細菌はM・リソデイクティカスと呼ばれる非常に珍しい細菌であった。そしてこれも幸運な偶然だが、リゾチームが抗菌作用を発揮するのはこのM・リソデイクティカスに限られるのである。つまり、この2つがシャーレの中で偶然出合わなければ、リゾチームが発見されることもなかったのだ。そして6年後、フレミングはまたもや、これとよく似た天の配剤に恵まれることになる。

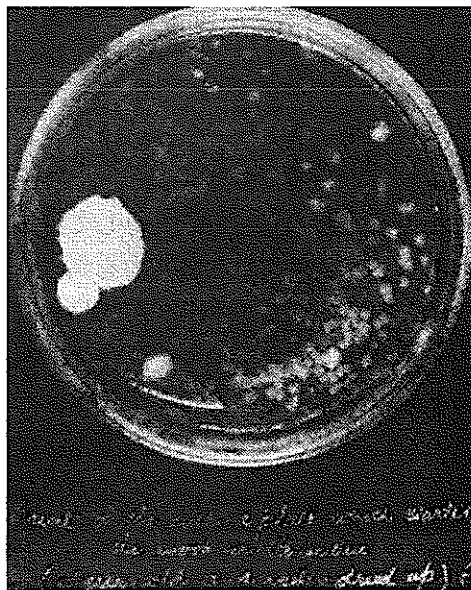
ペニシリン濃縮に成功した フローリーとチェイン

1928年9月、夏の休暇から戻ったフレミングは、休み前に洗わずにクレゾール液につけたままにしておいたシャーレの山をより分けていた（彼

は使用した実験器具をほったからしにしておくことで有名だった)。すると、乱雑に積み上げていたためクレゾール液につかっていたシャーレの1つに、変わったカビが繁殖していた。それはブドウ球菌を培養していたものだが、そのカビの周囲では細菌がきれいに消えていた。リゾチームの発見のことを思い出したフレミングは、カビがもつ何らかの物質がブドウ球菌を殺したのだと考えた。

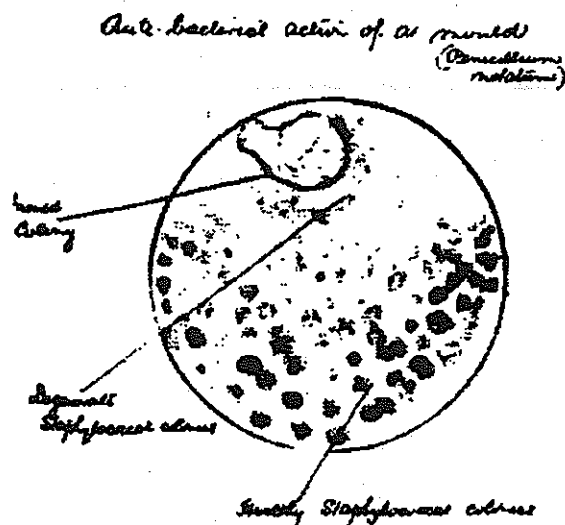
その“何らかの物質”こそが抗生物質ペニシリンだったのだが、ここにも幸運な偶然が作用していた。ペニシリンはある種の細菌には無害なのである。「何千というカビがあり、何千という細菌があるのに、ちょうどいいときにちょうどいいカビがそこに落ちた。まるで宝くじに当たったようなものだ」と、後年フレミングも回想している。

話を戻そう。フレミングは問題のカビがペニシリウム・ノタートゥムと呼ばれるアオカビの一種であることをつきとめ、それが作る抗菌作用のある物質を「ペニシリン」と名づけ、翌年論文を発表した。その後は、カビから抽出したペニシリンを使って実験を続け、この物質が細菌を殺すが、



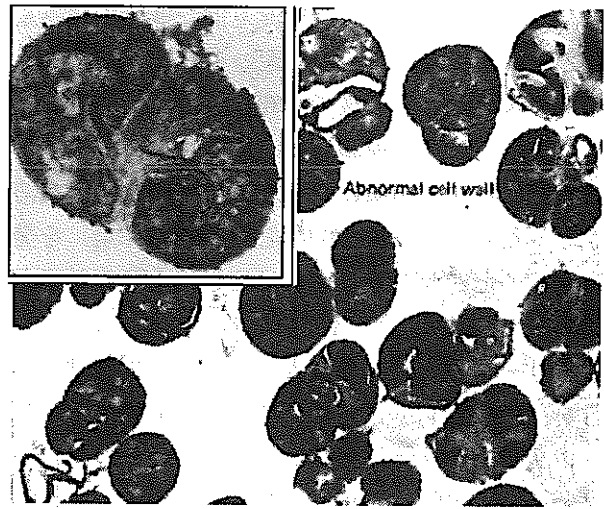
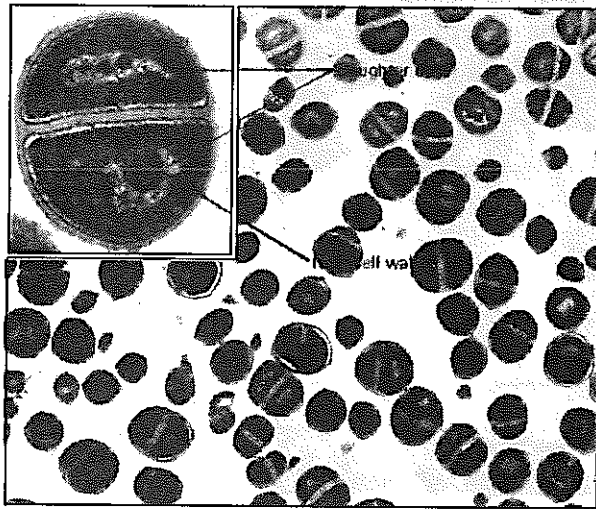
▲ペニシリン発見のきっかけとなったシャーレ。左側の白い円がアオカビで、その周囲ではブドウ球菌のコロニーが消えている。

▶フレミングの手帳のメモ。このスケッチではシャーレの上部にアオカビが見える。



Aut. bacterial action of a mould
(*Penicillium notatum*)

As a plate plated with staphylococci a colony of a mould appeared. After about two weeks it was seen that the colonies of staphylococci near the mould colony were degenerate.



▲ペニシリンの抗生作用。左は正常な細菌で、左上が分裂過程の細菌を拡大したもの。右はペニシリンを与えた後の状態。細菌の細胞壁が破壊され、増殖が抑制されている。

写真/Drs. Victor Lorian and Barbara Atkinson / The American Journal of Clinical Pathology

生物の体や細胞組織、白血球等には害を及ぼさないことを確認した（これが抗生物質の定義である）。だがこの物質に十分な殺菌効果をもたせるには、それをカビから単離して濃縮する必要があることもわかった。フレミングは濃縮を試みたが失敗に終わり、実用化への研究は中断し、その後ペニシリンの存在は何年も忘れ去られることになった。

1936年、オクスフォード大学の病理学者F. フローリーと生化学者のアーンスト・チェイン（ナチスの迫害を受けてイギリスに亡命したロシア系ユダヤ人）の2人は、リゾチームの研究するためにフレミングの論文を取り寄せ、そこでペニシリンのことを知った。2人は、リゾチームよりはるかに多くの種類の細菌に効力のあるペニシリンに興味をもち、3年後にこれを濃縮・精製することに成功した。

1940年5月、2人は濃縮ペニシリンを使って最初の動物実験を行った。ハツカネズミの集団にブドウ球菌と連鎖球菌を感染させ、一部のネズミにのみペニシリンを注射した。するとそれらのネズミたちは治癒したが、注射をしなかったネズミたちは次々に死んでいった。こうして、細菌による感染症にペニシリンが効力をもつことがはじめて実証されたのである。

この実験が成功した背景にも、ひとつの偶然が作用していた。当時は第二次世界大戦のさなかで、イギリス国内で実験用のモルモットが不足していた。そこでフローリーらはやむなくハツカネズミを使った。後でわかったことだが、ペニシリンはモルモットに対しては強い毒性があり、同じ条件で注射していたらモルモットは確実に死んでいたのである。ある動物に効く抗生物質が他の動物にも効果があるとは限らない。抗生物質研究の草創期に、もしモルモットを使って実験が失敗していたなら、ペニシリンの研究は中断されていた可能性が高い。

フレミングとペニシリンをめぐる僥倖はまだ続く。1942年8月5日、フレミングのもとに瀕死の脳膜炎患者が運び込まれた。脳膜炎は種々の細菌またはウイルスの感染が原因で起こる。フレミングはフローリーに電話し、患者に濃縮ペニシリンを注射していいと思うかと聞いた。フローリーは経験がないからわからないと答えたが、フレミングは思いきって注射し、患者は快方に向かった（1カ月後に退院）。このときフレミングが躊躇していたら結果は違っていた。彼が患者に注射してまもなく、フローリーが電話でこう警告してきたのだ。「心配になってネコに注射したら、ネコは死んでしまった。人間も危険なのではないか」

こうして、いくつもの網渡り的な偶然の積み重ねの上に、ついに“奇跡の薬”、ペニシリンが人々の前に現れた。その後の研究によって、ペニシリンはブドウ球菌、連鎖球菌、肺炎球菌、リン菌など広範な種類の細菌に対して抗生作用（細菌を溶かして殺したり成長を抑制したりする作用）を発揮することがわかり、さらに梅毒にも治療効果があることが判明した。1945年10月、フレミング、フローリー、チェインの3人はノーベル生理学医学賞を共同受賞し、さらに、彼らの研究によって多くの人命が救われたとしてフレミングとフローリーの2人にサーの称号が与えられたのだった。



◀ オクスフォード大学の
ハワード・フローリーは
アーレスト・チェインと
ともにペニシリンを“再
発見”し、その分離・精製
および量産に成功した。
写真/レポルタゲビルト

第二次大戦中に 量産技術を開発

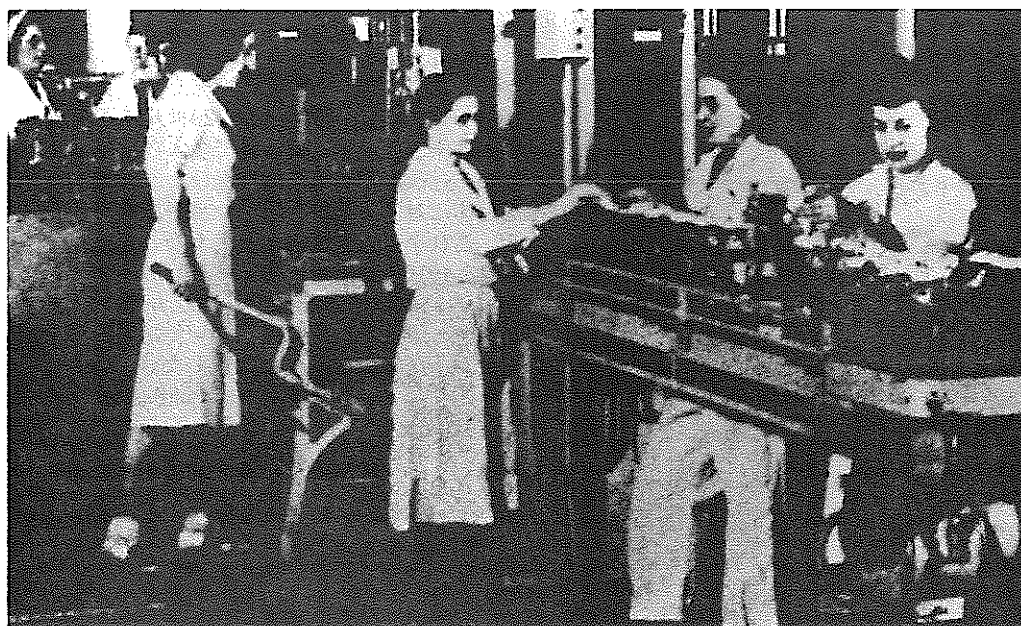
こうして登場した“奇跡の薬”は、人間への臨床試験が始まった初期には非常に手に入りにくかった。ペニシリンを注射した患者の尿を採取し、そこからふたたびペニシリンを回収して用いることも行われていたのである。この薬を多くの人間に役立てるには量産技術を開発する必要があった。それを可能にした最大の原動力が、第二次世界大戦だったのである。

1940～41年、イギリスはナチスドイツによるたび重なる大空襲によって都市を破壊され、大量の被災者を出していた。イギリス政府は被災者を救うためペニシリンの量産を急務と考えたが、国内は疲弊して研究体制が整わない。そこで、当時まだ参戦していなかったアメリカに活路を求めた。一方、アメリカでは、ドイツおよび日本との来たるべき戦争状態に備え、軍事医療研究の一環としてペニシリンの研究が行われていたが、思うような成果が上がっていなかった。

1941年、フローリーを含めたイギリスの特別使節団がアメリカに渡り、ペニシリン研究の成果を伝えた。そして翌年、両国の間で正式な共同研究がスタートした。アメリカでは、ルーズベルト大統領の指揮のもとに、政府研究機関、大学、民間の製薬会社が協力し、国家プロジェクトとしてのペニシリンの量産・合成技術の開発が行われた。まもなく、生産量を20倍に高める技術が生み出さ



▲ オクスフォード大学のカウンター・フロー（向流）装置。粗製のペニシリンが下に置いたレモネードの空き瓶にたまると、ベルが鳴り電灯がついて知らせる仕組みだった。
写真/サー・ウィリアム・ダン・スクール



◀ 第二次世界大戦中（1944年）のアメリカにおけるペニシリン工場の様子。最初は流れ作業による生産効率の向上を計った。ここではミルク瓶を殺菌して培養液を入れ、カビの胞子を植えつけている。写真/Eli Lilly & Company

れ、以後ペニシリンは巨大タンクの中で大量生産されるようになった。第二次世界大戦の最後の2年間は、こうして作られたペニシリンが連合国側の数多くの兵士や民間人の命を救ったのである。

当時、アメリカやイギリスは、すぐれた科学技術力をもつドイツや日本がペニシリン研究に着手することを予想し、極秘で研究を進めていた。しかしドイツや日本は医学専門誌や論文を通じて情報を入手し、独自に研究を開始した。とくに日本では、1944年1月にイギリスのチャーチル首相が肺炎にかかったがペニシリンによって奇跡的に治癒したという外電が入ると、陸軍がこれに注目して、軍や民間から医学、薬学、農学の専門家からなる「碧素（ペニシリン）研究委員会」を発足させ、研究を急がせた。同委員会は10カ月後に臨床試験に成功、翌年には森永製菓と萬有製菓が国産ペニシリンの小規模な生産・供給を始めてもいる。しかし、量産技術の開発にはついに成功しなかった（ちなみにチャーチル首相のニュースは後に誤報であることが判明した。医師たちが新薬ペニシリンの使用を躊躇したといわれる）。

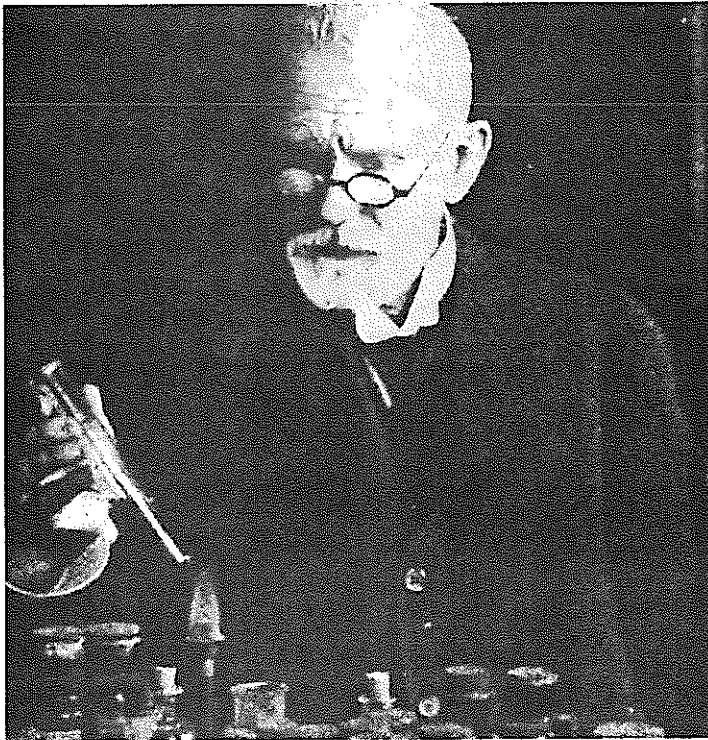
合成ペニシリンが 化学療法の幕を開けた

戦後は世界中で抗生物質の研究がさかんになり、結核に有効なストレプトマイシンをはじめ、

クロラムフェニコール、テトラサイクリンなど、新種の抗生物質が次々と発見されていった。その数は現在では数百種類に上っている。また、1957年にアメリカの生化学者ジョン・シーハンがペニシリンの人工合成にはじめて成功すると（大戦中には合成できなかった）、抗生物質はさらに安価に量産できるようになった。

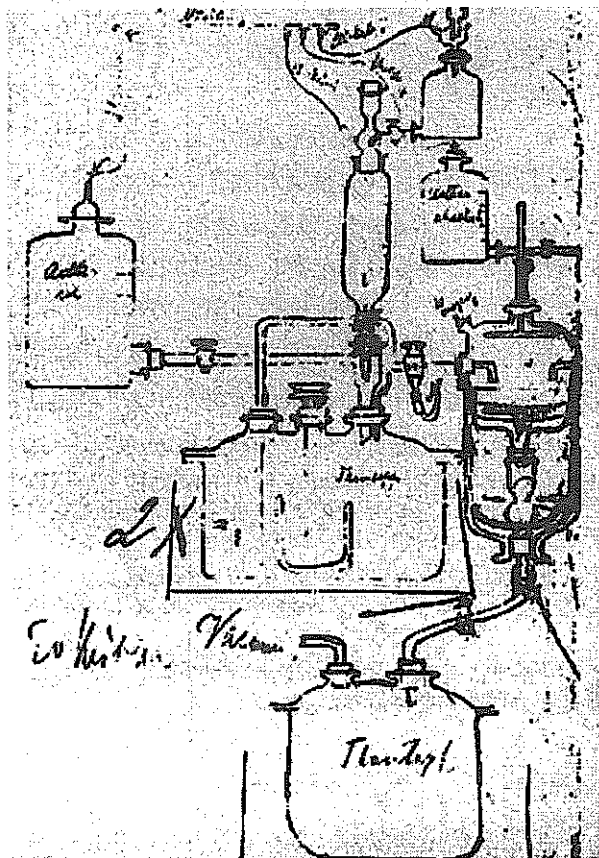
これらの発見や技術開発が20世紀の医療に与えた影響ははかりしれないほど大きい。それまで治らなかった病気が抗生物質の登場で治るようになったことはもちろんだが、それ以上に、特定の病原菌に効く薬を人工的に作り出して利用する本格的な化学療法の時代が幕を開けたことが重要である。それは、医学および化学が、生物の機能に学び、それを模倣する「バイオミメティクス（生物模倣）」を実行した一例であり、その流れは、近年のバイオテクノロジーの発展によって新たな段階を迎えている。生物の作り出す抗生物質をまねて量産するのみならず、バイオテクノロジーによってそれを人類にとってより望ましい物質に改造することが可能になったのだ。こうして、従来の抗生物質ではまったく効果のなかったウイルスに効く抗ウイルス物質や、ガン細胞を殺す抗ガン性抗生物質など、多くの新薬が登場しているのである。

●化学療法の夜明け

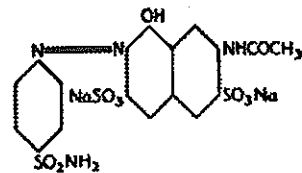


◀ドイツの医学者パウル・エールリッヒ (1854~1915年)。19世紀から20世紀にかけて血液学、免疫学、薬学等で多大な功績を残し、近代医学の幕を開けたひとり。彼は病原体に対する薬物を用いた治療法を導入し、これを「化学療法」と呼ぶことを提唱した。1910年に梅毒の病原体トレポネマを特異的に攻撃する薬品サルヴァルサン (アルスヘナミン) を開発、フレミングのいるセント・メリー病院に提供した。

写真/Insutitut Pasteur



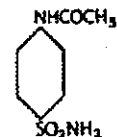
▲サルヴァルサン合成装置の略図 (エールリッヒによる)。この技術によって大量生産が可能になった。エールリッヒは薬品の量産には基礎研究と企業の協力体制が不可欠であると強く主張していた。資料/Hoechst AG.



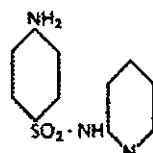
Azosulfamide (Neoprontosil or Prontosil-Soluble)



Sulfanilamide



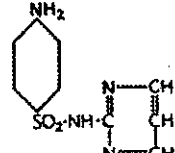
Conjugated or acetylated sulfanilamide



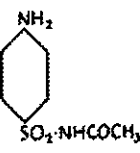
Sulfapyridine



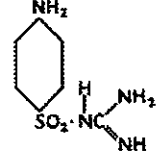
Sulfathiazole



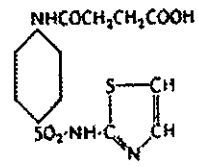
Sulfadiazine



Sulfacetimide



Sulfaquanidine



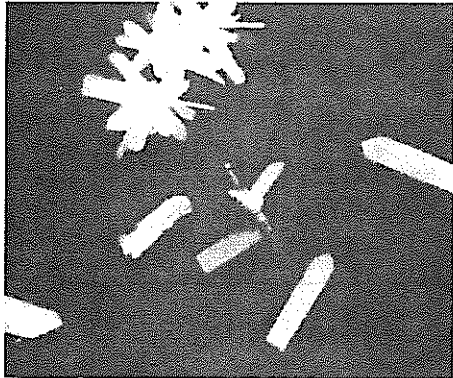
Succinylsulfathiazole

▲1930年代後半に数多くのスルファニルアミドの誘導体が合成された。これらの化学物質は細菌の増殖を抑制する作用があったが、一部の細菌はやがて耐性を獲得してしまった。資料/Wesley W. Spink, Sulfanilamide and Its Related Compounds in General Practice

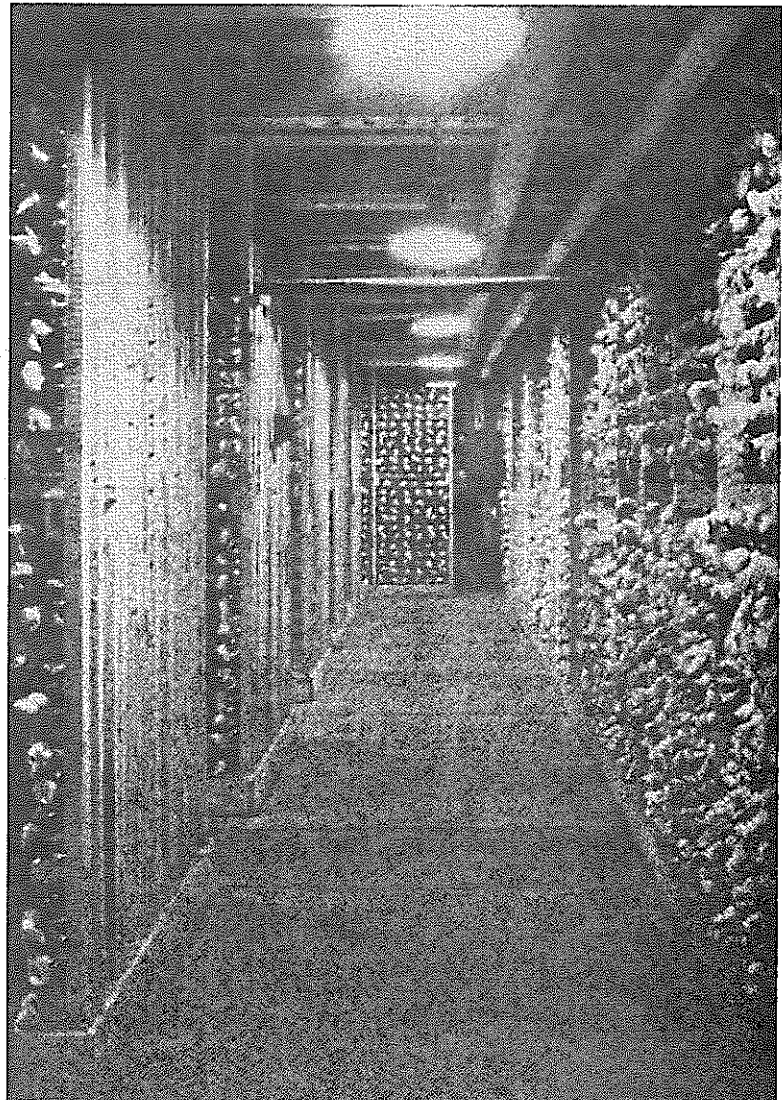
●ペニシリンの量産技術



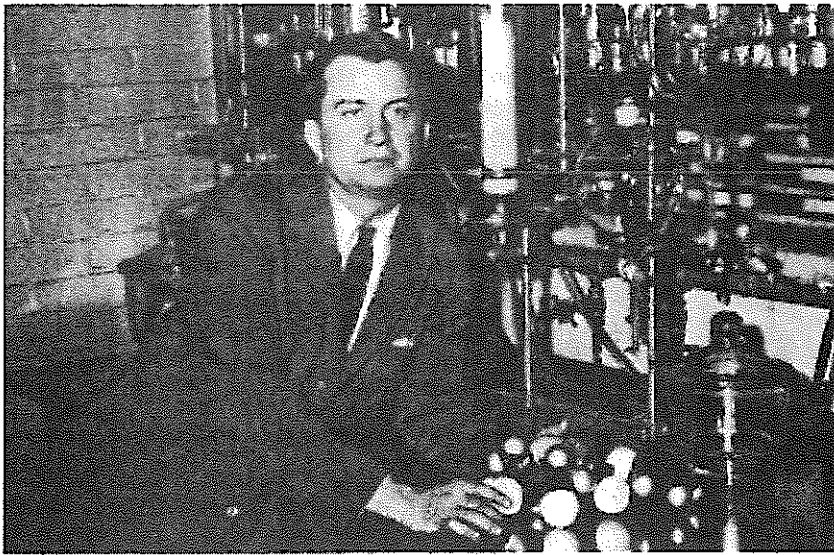
◀第二次世界大戦中、アメリカ政府は国家プロジェクトとしてペニシリンの量産技術開発を押し進めた。そして培養液の表面だけでなく液中でもカビを増殖させる「半液体培養技術」が開発されると、ペニシリンは巨大タンクの中で大量生産できるようになり、生産量は飛躍的に増大した。これはフレミングがニュージャージーのペニシリン工場を訪れ、半液体培養タンク（1万5000ガロン）をのぞき込んでいるところ。 写真/E. R. Squibb & Sons, Inc.



▲ペニシリンの結晶。現在では数種類のペニシリンが知られている。
写真/Squibb Pharmaceutical Company

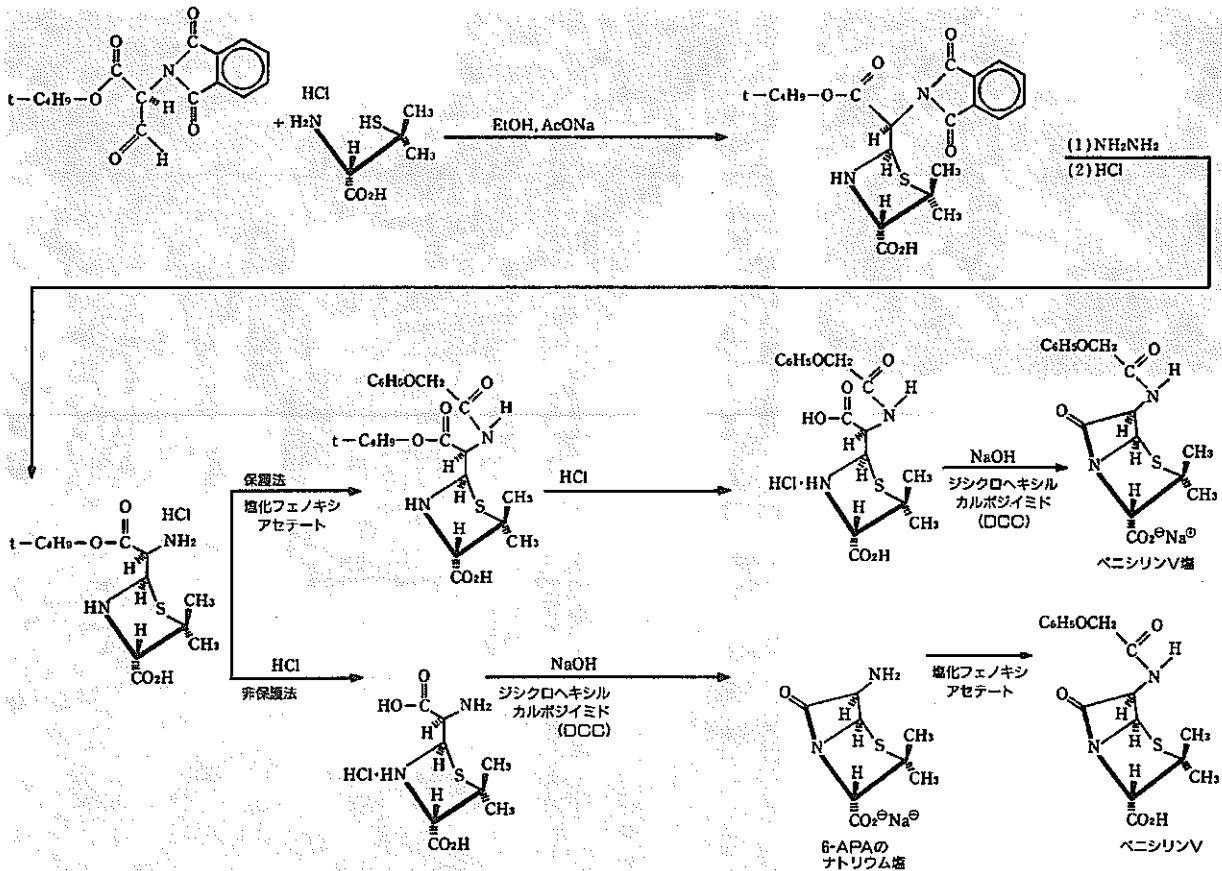


▶1943年のアメリカ、シカゴのペニシリン生産工場。表面培養中の瓶が12万本も並んでいる。写真/ワード・C・モルガン・スタジオ

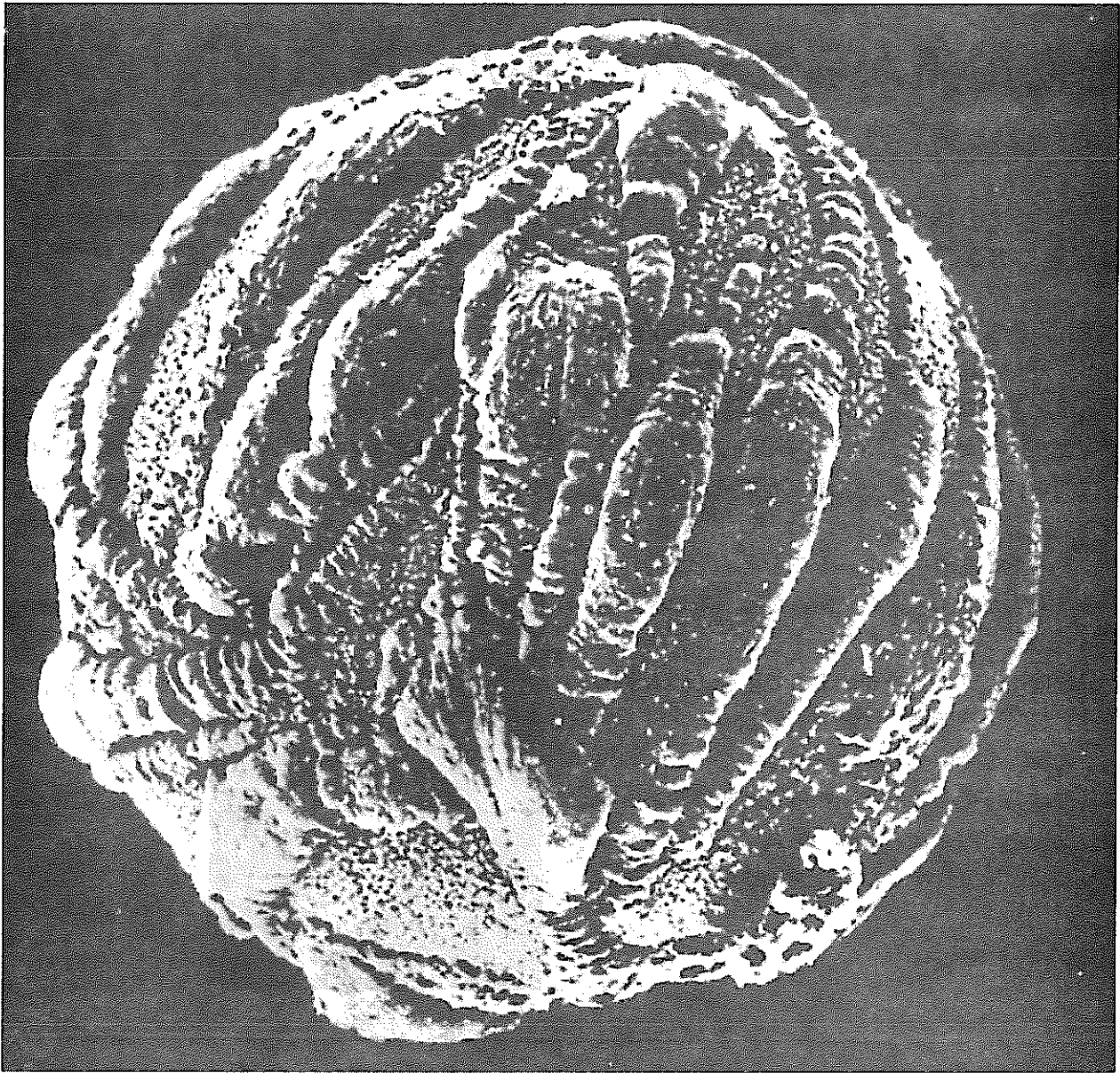


◀1957年、ペニシリン（ペニシリン V）の人工合成にはじめて成功したジョン・シーハン。後ろに合成に使用した装置の一部が見える。

●ペニシリン V の基本的な反応系



▲最初の反応系ではペニシリン V の収率はわずか 1% であった。シーハン は反応系を改良することによって、わずか 2 年後に収率を 60~70% に向上させることに成功した。



▲バイオテクノロジーの登場によって化学療法は新たな段階に進んでいる。これは抗ウイルス作用をもつインターフェロンの培養。合成ポリマーで作ったビーズのまわりにヒトの皮膚細胞を植えつけ、インターフェロンを作らせる。

写真/Don Siegel et al., Scientific American

現代に息づく200年前の発明 動物電気から生まれた「ボルタ電池」

死んだ動物の体が なぜ動くのか？

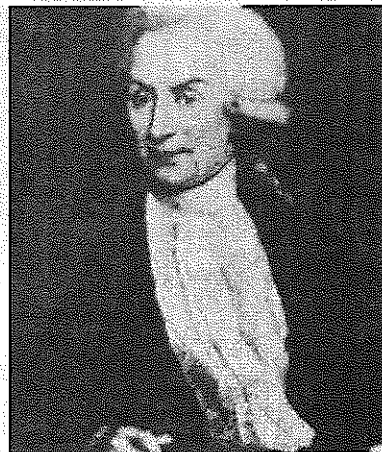
新しい現象を誤って解釈するという小さな出来事が、ときとして後の社会に大きな影響を与えることがある。少なくともイタリアの解剖学者ルイジ・ガルバーニの場合がそうであった。

1780年11月、ガルバーニは、実験室の帯電した静電発電機の近くに皮をはいだカエルの脚を置き、そのまま部屋を出た。そこをたまたま通りかかった人物が、ふと近くにあった解剖用のメスをとってカエルの脚に触れた。すると火花が勢いよく飛び散り、カエルの脚はまるで生きているかのようにびくりと痙攣したという。

この報告を受けたガルバーニはすぐに、この現象は静電発電機のもっていた電気と関係があるのではないかと考えた。当時、電気についてわかっていることは少なかったが、空気放電によって火

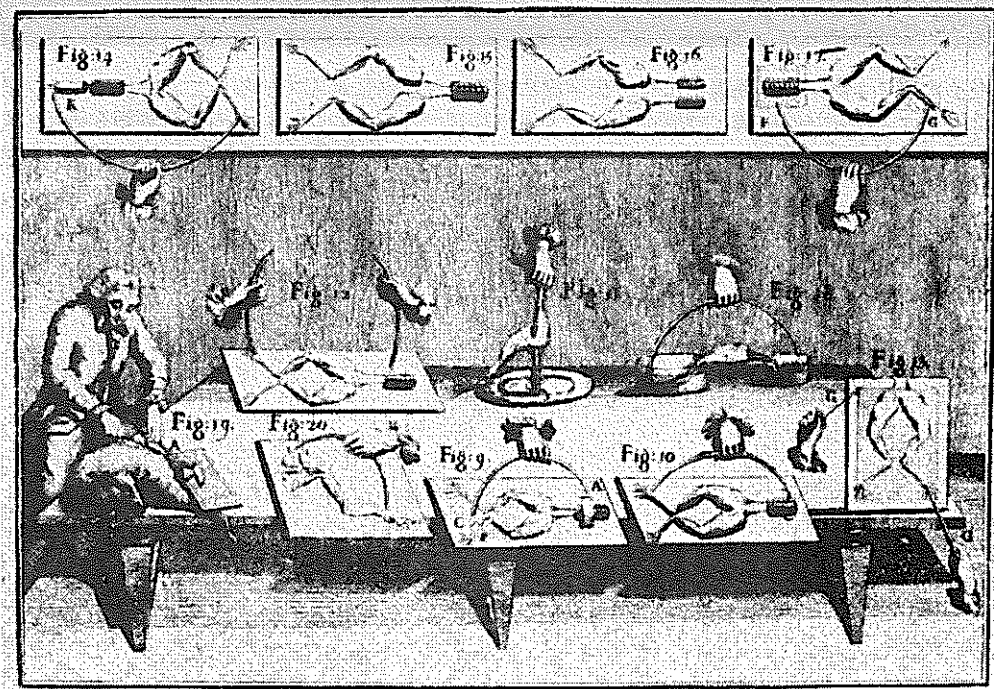
花が飛び散ったり、体に放電すると衝撃が走ることは知られていたからだ。さらに、雷が大気中の大規模な放電現象であることも、アメリカの科学者であり独立宣言の草案者のひとりでもあるベンジャミン・フランクリンによって明らかにされていた。

そこでガルバーニは、雷が発生したときにもカエルの脚が動くのではないかと考え、カエルの脚を真鍮の鉤にかけ、それを鉄製の窓枠に立てかけておいた。実際、雷が起こったとき、彼の予想通り



◀イタリアの解剖学者ルイジ・ガルバーニ。

▶ 18世紀末にガルバーニが行った電気の実験。彼は死んだカエルの脚に放電すると、その筋肉が生きているようにふるえたり収縮したりすることに気づいた。ガルバーニはこれを動物が本来もつ電気だと考えた。



り脚は痙攣した。だが、そうでないときにもときどき脚は動いた。カエルの脚の痙攣はたしかに電気によって起こっているらしいが、それは空中からの電気とは限らないようなのであった。

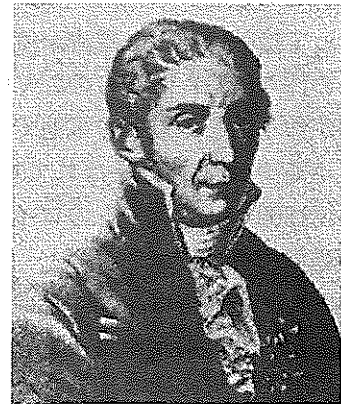
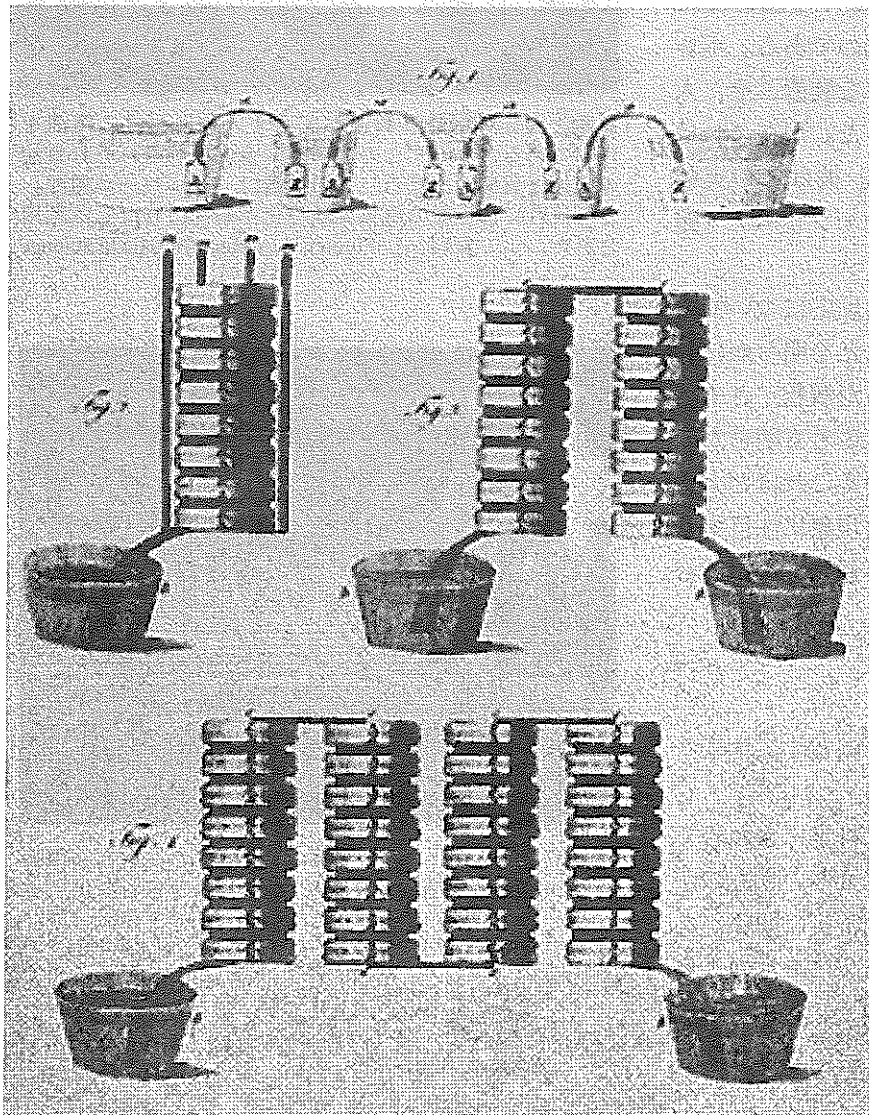
ある日ガルバーニは、カエルの脚を引っかけた鉤を鉄製の窓枠に押しつけると脚がはげしく痙攣することに気づいた。彼はこのことから、この電気は動物の体内に蓄積されていたものに違いないと結論し、これを「動物電気」と呼んだ。

ガルバーニのこの報告はたちまちヨーロッパ中を駆けめぐり、多くの知識人たちに動物電気の実験を始めさせることになった。おそらく当時の人々にとって、重さも実体もないように見えながら物体に影響を与える電気の中には、生命の原理そのものの秘密が隠されているように思えたから

であろう。

ある実験では囚人の死体が使われ、放電する点をあちこちに移しながら体に電流を流したところ、筋肉がひきつったり呼吸するように動いた。顔の筋肉にいたっては、あたかも感情を表すような動きを見せた。精密な検電装置も作られ、動物の体を流れる電流が測定された。その結果、多くの生理現象が電気と関係していることが明らかになった。このような研究は、後に電気生理学という学問分野を成立させることになった。神経パルスの発見、心電図や脳波の測定なども、こうした研究の中で実現したのであった。

だが、そうした熱狂にのみ込まれず、ガルバーニの研究結果をひとり冷静に分析した人物がいた。同じイタリアのアレッサンドロ・ボルタであ



▲ガルバーニの「動物電気」を研究しているうちに、電池の原理を発見したイタリアのアレッサンドロ・ボルタ。

◀1800年、イタリアのアレッサンドロ・ボルタが作った“電気をたくわえる池”、すなわち電池。ライデン瓶とは異なり、安定した電流を長時間得ることができる。1番上の図は性質の異なる2種類の金属（銀と亜鉛）を導線をつなぎ、それぞれを別のコップの塩水につけている。また、下の3つの図の円筒状のものは、2種類の金属板をはり合わせたものを何枚も用意し、水で湿らせた布で仕切って重ねたもの。資料/Philosophical Transactions of the Royal Society

る。彼は、カエルの筋肉を震えさせた電気は動物の体から生じたのではなく、鉄の窓枠と真鍮（銅と亜鉛の合金）の鉤という2種類の金属から発生したのだと考えた。そして、カエルの筋肉はおそらく微弱な電流をとらえる検電器の役割を果たしただけであると主張した。彼はこれを証明するために次のような装置を作った。

塩水もしくは酸を入れた数個の容器に銀と亜鉛などの2種類の金属片を入れ、それらの金属片をそれぞれ隣の容器の金属片と導線でつなぎ合わせた。こうすると、この装置の端から電流を取り出すことができた。ボルタはこれを「杯の王冠」と呼んだ。さらに彼はより単純で強力な装置も作り出した。2種類の金属の円板を張り合わせたものを多数用意し、それらの間に塩水に浸したフランネルの布をはさみ込みながら積み重ねた。そして、この装置の上端と下端を導線や金属の棒によって接続すると、電流が流れたのである。ボルタの作り出したこれらのごく簡単な装置こそ、人間が作り出した最初の電池であった。現在これは「ボルタ電池」と呼ばれている。彼はこの実験を、1800年にロンドンのロイヤル・ソサエティ宛の書簡で報告した。

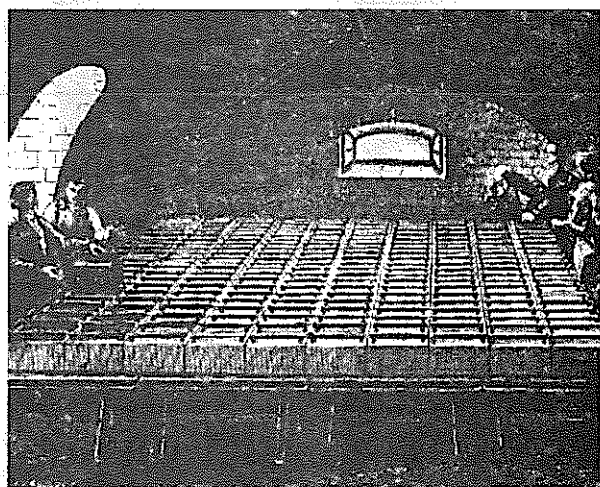
ボルタの報告は、カエルの脚の反応についてのガルバーニの解釈が誤っていたことを明らかにした。だが、ガルバーニのその誤った解釈がさまざまな生理現象の解明につながったことも明らかである。そして、誤っていたとはいえこれほど大きな反響がなければ、ボルタもこの現象に注目することはなく、電池の発明もずっと遅れていたかもしれない。

宇宙に飛び出した 「燃料電池」

電池の発明は、いくつかの点で科学にきわめて大きな影響を与えた。第1に、電気というものが超自然的なものではなく、物質と密接な関係があることを明らかにした。そして第2に、水のような物質が電気によって別の物質に変化する現象（電気分解）が明らかになり、化学の大きな発展をもたらした。第3に、それまでのような静電気



▲銅と亜鉛の板を多数並べてうすい酸につけ、電池を作っているところ。この2種類の金属板がそれぞれ電池の正極と負極にあたる。この装置は「ガルバーニ電池」と呼ばれ、19世紀の電気実験や化学研究にしばしば利用された。資料/L. Figuiet, Les Merveilles de la Science



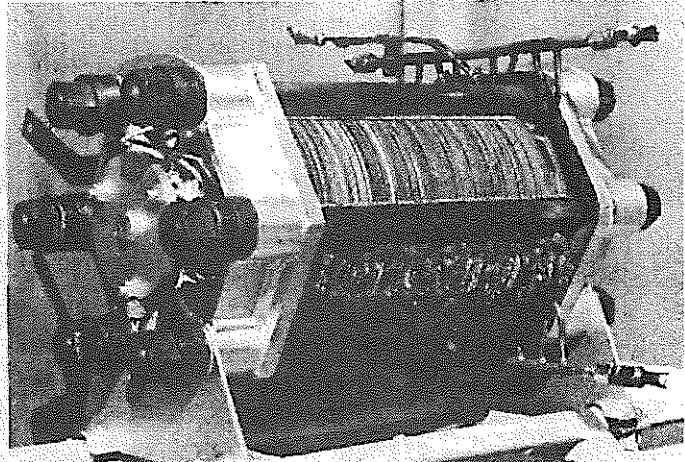
▲1807年にイギリスの王立協会で作られた巨大な蓄電装置。200組もの電極からなる。イギリスの有名な化学者ハンフリー・デービーは、この装置を使って電気分解などの実験を行った。

資料/L. Figuiet, Les Merveilles de la Sciences



◀最初の実用的な燃料電池を開発したイギリスの技術者フランシス・ベーコン。彼は1930年代から燃料電池の開発に取り組み、完成したのは1959年のことであった。

▼ベーコンの作った最初の燃料電池。酸素と水素を燃料として使い、6キロワットの電力を生み出す。



の放電や雷のような瞬間的な放電ではなく、安定した電流が得られるようになった。これは、電気を研究する上では重要な収穫であった。また電池は、後に大規模なタービン式の発電装置が作られるまでは、電信や街灯などの発電源として活躍することになった。

電池の仕組みは比較的単純である。酸化しやすい金属板とそうでない金属板を導線で結び、それらを容器内に入れた酸につければ、それでボルタ電池ができあがる。子どもの頃に、亜鉛の板と銅の板をレモンに突き刺し、2枚の板をそれぞれ導線で1個の豆電球につなぎ、電球に明かりをつけるという遊びをしたことのある人もいるだろう。これもボルタ電池の一種である。この場合、亜鉛の板が陰極（負極）になり、銅の板が陽極（正極）になる。

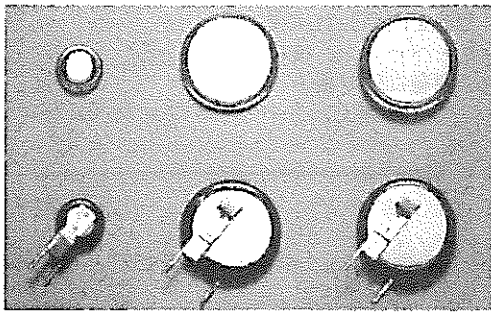
亜鉛のような酸化しやすい金属は、酸につけると電子を放出して（つまり酸化して）溶ける。この電子は導線を通して陽極に向かう。そこで、電子はたとえば水素イオンのような正のイオンに渡される。こうして陰極から陽極への電子の流れ（電流）が生じる。酸の代わりにたとえば硫酸銅

溶液のような電解質の溶液を使えば、銅イオンが電子を受け取ることになる。

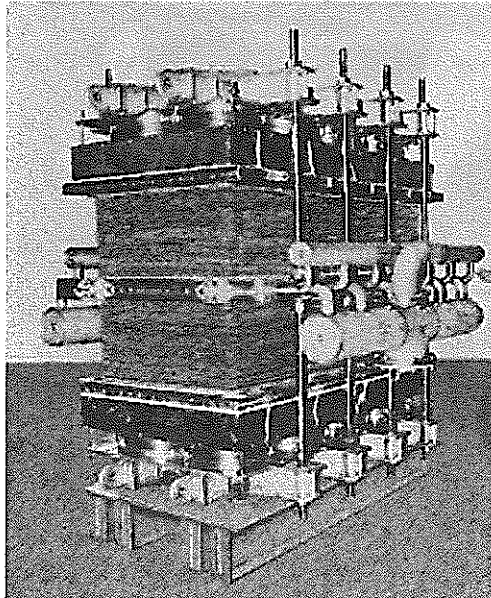
ボルタ電池は単純で効果的に電気を発生させたが、問題点もあった。それは寿命が短く、陰極となる金属の板が全部溶けてしまえば使えなくなることである。そこで、電極の種類や溶液の種類をいろいろ組み合わせ、さまざまな電池が作られた。なかでも有名なものは1859年に発明された鉛蓄電池であり、これは現在でも自動車やオートバイのバッテリーとして使われている。

鉛蓄電池の特徴は何度でも充電できるということである。鉛蓄電池は硫酸水溶液の中に、陰極として鉛、陽極として過酸化鉛を浸す。放電の際には、陰極側では鉛が希硫酸と反応して電子を放出して硫酸鉛（2価）となり、陽極側では過酸化鉛（4価）が電子を受け取ってやはり硫酸鉛となる。充電するときにはこの反応を逆向きに起こす。すると、硫酸鉛はふたたび過酸化鉛と鉛に戻るのである。

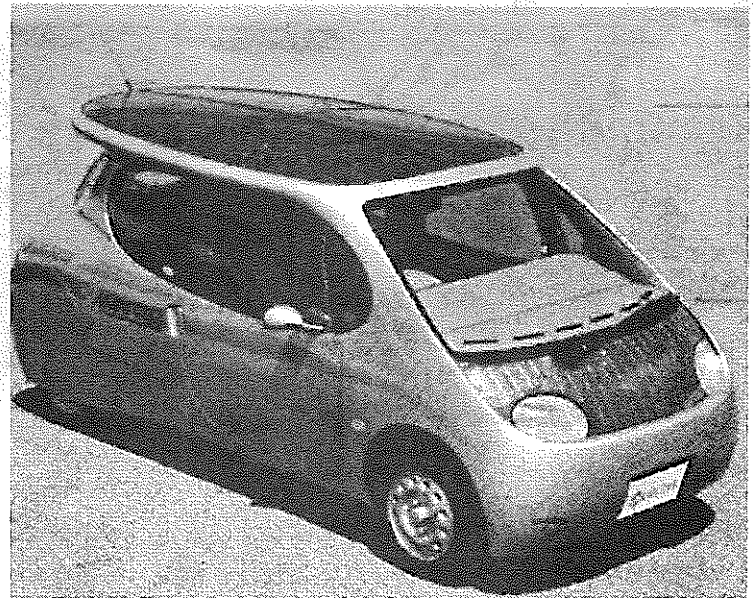
ボルタ電池のように一度しか使えない電池を「一次電池」、鉛蓄電池のように充電できるものを「二次電池」という。いまのわれわれがふつう



◀リチウム電池は軽量でエネルギー密度が高いため、用途が広い。これは最近開発されたリチウムポリマー電池。



▲日本で開発中の燃料電池。発電中に発生する熱をヒーターなどに利用することもできる。



▲太陽エネルギーを利用するソーラーカー。発電効率などに問題はあるものの、実用化を念頭に置いたソーラーカーの開発が進んでいる。写真のソーラーカーは屋根と前部に太陽電池が乗っており、余分の電気は蓄電池にたくわえる。

に利用する乾電池（ル克蘭シェ電池）は、一次電池の一種である。この2種類の電池の他に、1950年代に開発された「燃料電池」がある。

一次電池は消耗品であり、一定時間しか使えない。二次電池も長期間もつといても、充電をくり返さねばならない。つまり、連続使用はできない。これは、電流を取り出すために電極自体の反応を利用しているためである。燃料電池はこの欠点を克服するために、電極ではなく別の物質の化学反応を利用している。代表的な燃料電池は、陽極側に酸素、陰極側に水素を送り込んで、それらから水が生成する過程で生じる電気の流れを取り出すものである。“燃料”となる酸素と水素を供給し続ければ、この電池は半永久的に働き続けることになる。

燃料電池の構想は1838年には提出されていたが、燃料をコンスタントに供給するのが難しく、なかなか実用化までには至らなかった。だが、1958年にイギリスのフランシス・バーコンが長時間安定して燃料を供給できる信頼性の高い燃料電池を開発すると、その特質が評価され、1965年にはアメリカの宇宙船ジェミニに利用された。また、アメリカが国家の威信をかけて実行したアポロ計画でも、宇宙船に燃料電池が搭載された。

ぞくぞく登場する 新しい電池

電池は発電源として考えたとき、火力発電や水力発電などのタービン式の発電と比較して、大規

模な発電が難しく、またコストも高い。だが、コンパクトで持ち運びできるという長所があるため、小電力の供給用として利用範囲が広い。これまでも用途に合わせて水銀電池、アルカリ電池、銀電池、ニッケル-カドミウム電池（ニッカド電池）などさまざまな電池が生み出され、現在も、より効率が高く、小さくて軽い、そして環境に影響の少ない電池の開発研究が続いている。

とくに、期待がかかっているのがリチウム二次電池である。リチウムは容易に電子を放出してイオンになる性質がある。そのため、リチウムを陰極に使うと、比較的高い電圧の電池ができる。また、リチウムは原子量が小さいためにエネルギー密度も高くなる。リチウムを利用した一次電池はすでに実用化し、精密機器やカメラなどに利用されているが、二次電池は実用化がきわめて難しい。というのは、充電の際にリチウム結晶が枝状に成長しやすく、電極同士が接続してショートする危険性があるからである。しかし、リチウムをそのまま電極として使うのではなく、炭素などの間に埋め込んで使用方法によってこの問題は克服されようとしている。

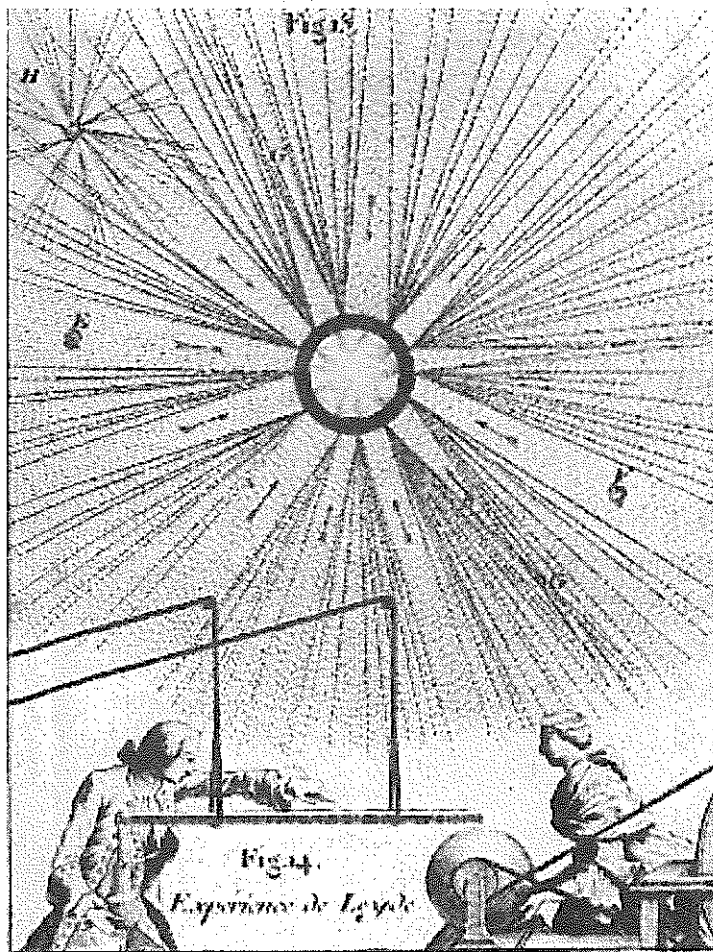
また、最近では電気を通すプラスチック、つまり導電性のポリマーを使った電池も注目されている。これは電極にポリアセチレンやポリアニリンなどのポリマーを利用しているため非常に軽量な上、超薄型をはじめとしてさまざまな形状のものを作ることができる。いまのところエネルギー密度が低く、性能は一般の電池に劣るものの、精密機械に利用するなどの幅広い応用が期待されている。

また燃料電池も、通常の電池よりも低いコストで大きな電力を生み出すことができるため、現在さまざまな改良が加えられ、新しいエネルギー源としての地歩を固めつつある。反応物として水などの物質と熱が発生するだけで環境を汚染することが少ないことも、利点の1つである。

これまで見てきた電池はどれも、化学反応によって生じる電流を取り出すものである。現在ではこれら以外にも、太陽電池や原子力電池のように光や熱、放射線などの物理的なエネルギーを電気に変換する「物理電池」が登場している。

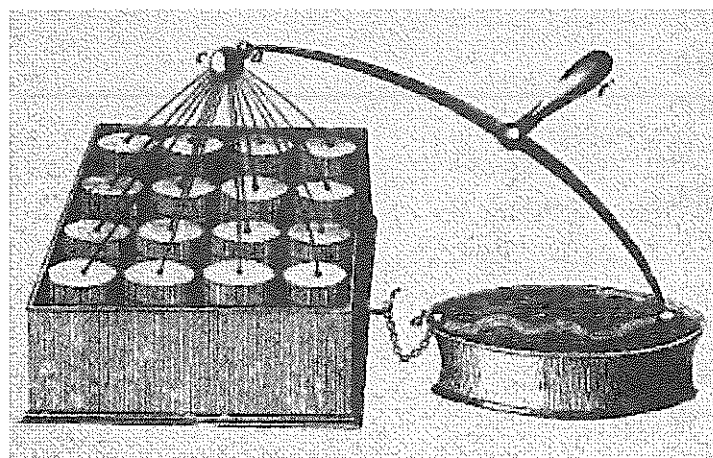
ボルタが電池を発明してから200年近くが過ぎた。電池は、時代とともに社会の中でだいに大きな役割を果たすようになっており、今後も新しい、よりすぐれた電池が開発されていくに違いない。 ●

●電池発明以前の蓄電装置「ライデン瓶」



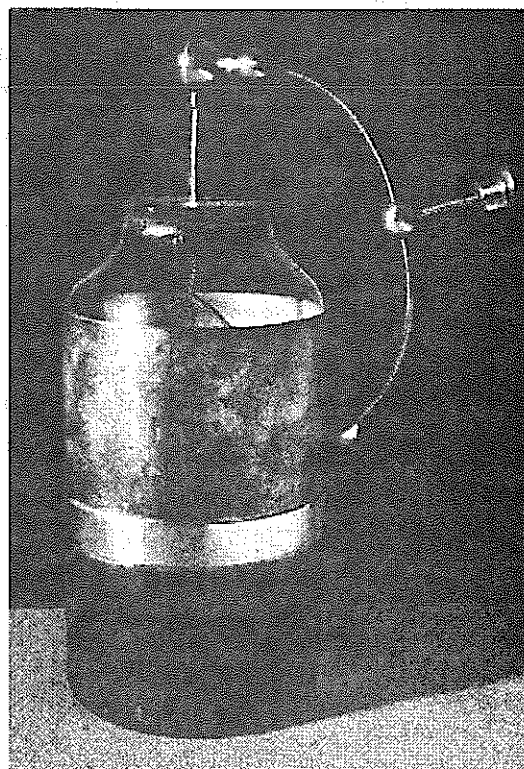
◀18世紀の半ば、もっとも単純な電池である「ライデン瓶」が発明された。これはライデン瓶に電気をたくわえているところ。右の女性が回転するガラス球に手を触れて静電気を発生させている。こうして生まれた電荷は、金属の棒を伝って左の男性が右手にもつライデン瓶の中に広がる。ちなみにライデン瓶の名は、オランダのライデン大学の研究者がこの装置を考案したことに由来する。
資料/Harvard College Library

▼江戸時代の日本の書物(1813年)に描かれたライデン瓶の実験の様子。多数の人間が手をつなぎ、端の人の手にライデン瓶中の電気を放電させる。人間も導体なので、電気は“人間の鎖”を伝わって他方の端まで届く。こうした実験では、たいていの参加者が衝撃と驚きで飛び上がったという。この絵では人の代わりに金属製と思われる火鉢がいくつか見える。

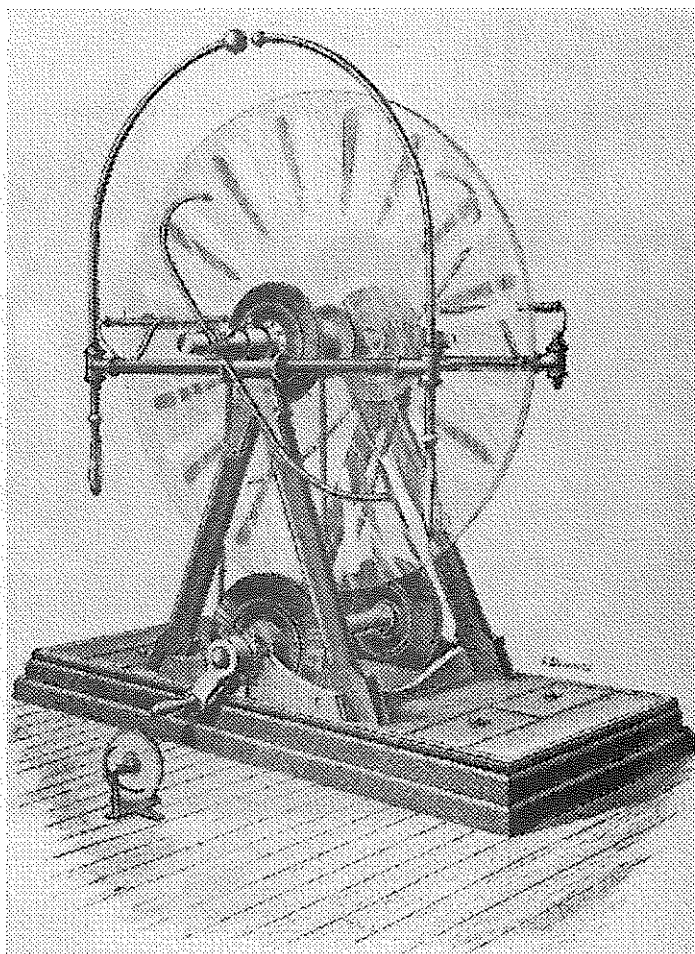
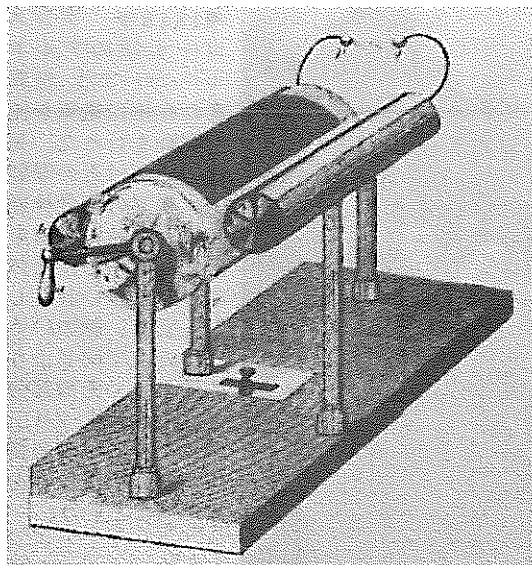


▲ボルタが電池を発明する以前に使われていた電気実験用の蓄電装置。ライデン瓶を多数並べ、それぞれの瓶の中の金属棒を1本の端子に接続する。図はこの端子から右の容器の水に放電しているところ。ライデン瓶は短時間ですべての電気を放出するため、精密な実験には向かなかった。

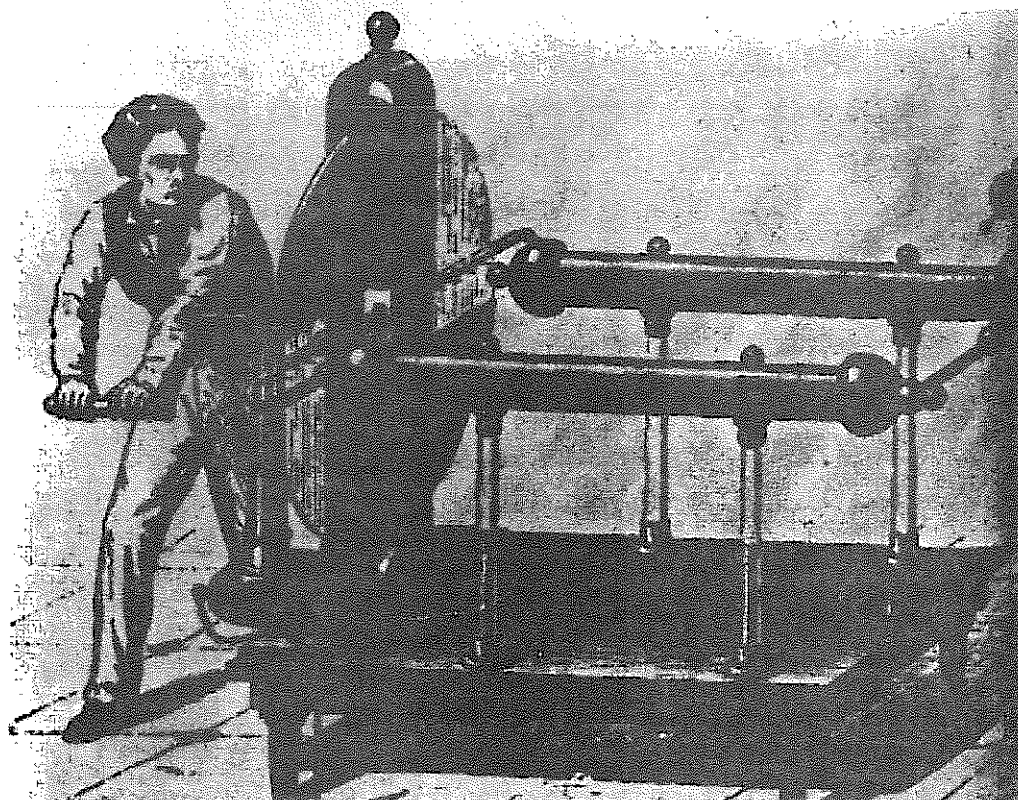
▶ライデン瓶は、外側、内側ともに金属箔で覆ったガラス瓶に水を満たし、中心に金属の棒を固定したもの。電気を与えると、金属棒とガラス瓶が互いに逆の電荷をもつ。写真はライデン瓶から放電させているところ。



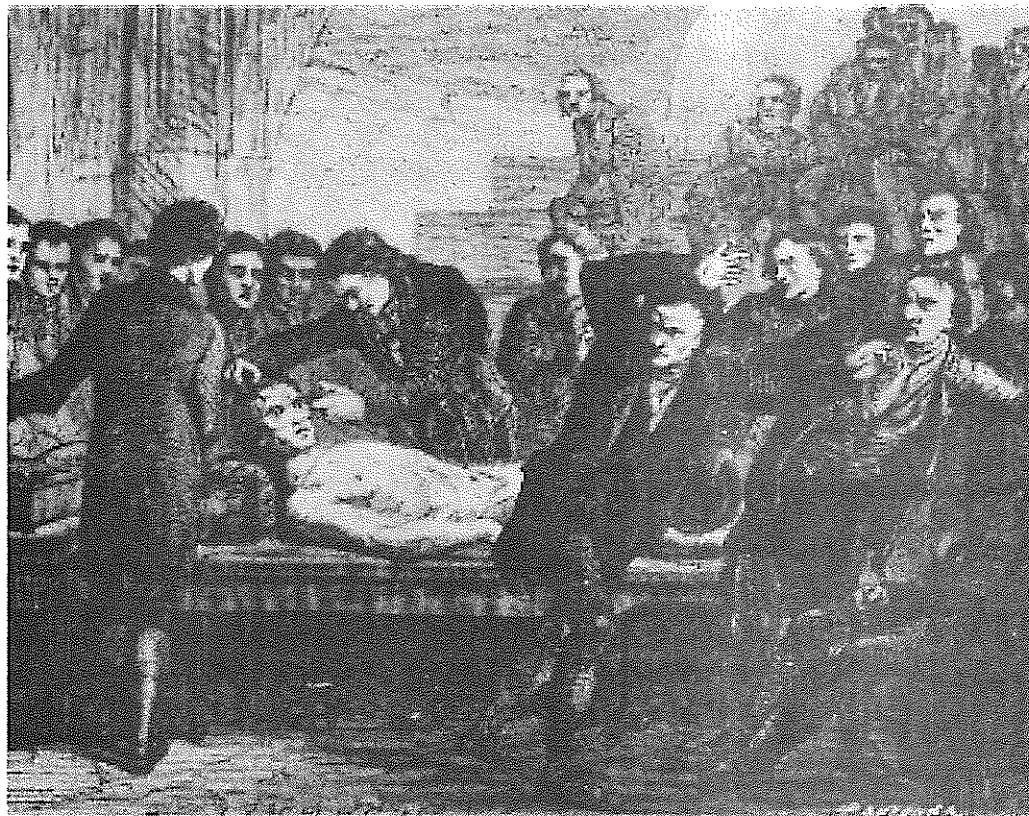
●電池発明以前の発電装置



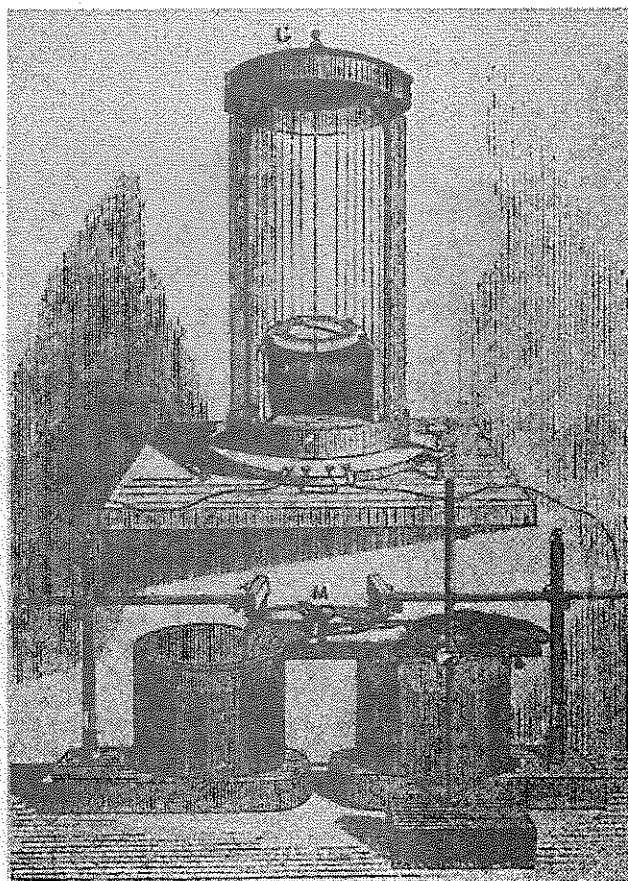
▲▼▶これらはいずれも静電気を発生させる装置。1800年の電池の発明以前には、このような装置によって電気の実験が行われた。上は布とガラスをこすり合わせるもの、右はガラス板同士をこすり合わせるもの。また下はこうした装置の規模を大きくしたもの。19世紀になっても、有名な科学者マイケル・ファラデーなどがこのような装置を利用して電気や化学の実験を行った。



●動物電気の実験

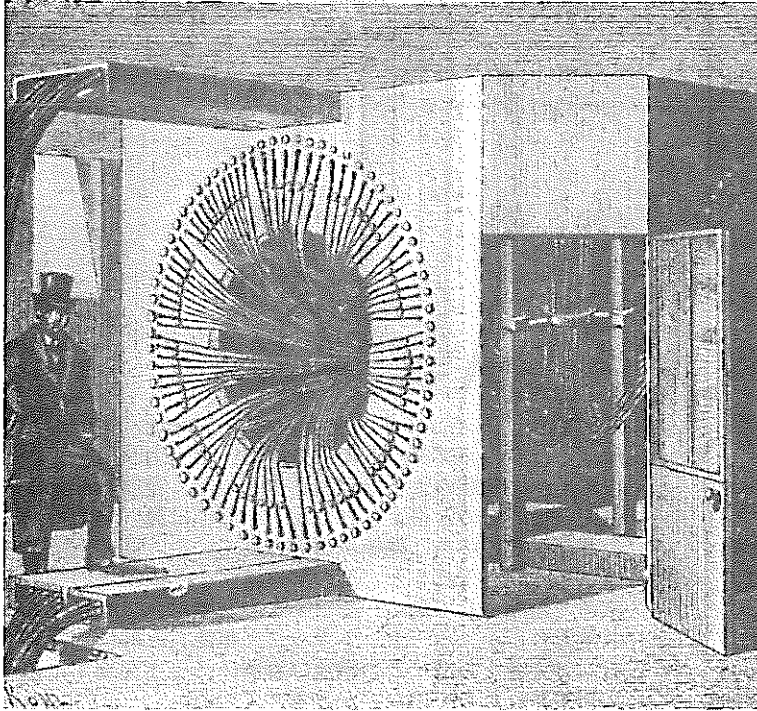


◀1818年、グラスゴー大学のアルドルー・ユーアは、犯罪者の死体に電気を流す実験を行った。死体の頭部付近の脊髄と大腿部の座骨神経を露出させ、導線を接触させると、死体は激しくけいれんした。また、顔のいくつかの点で同じように試すと、その部分の筋肉がひきつり、怒りや苦しみの表情や喜びの表情などを浮かべたという。



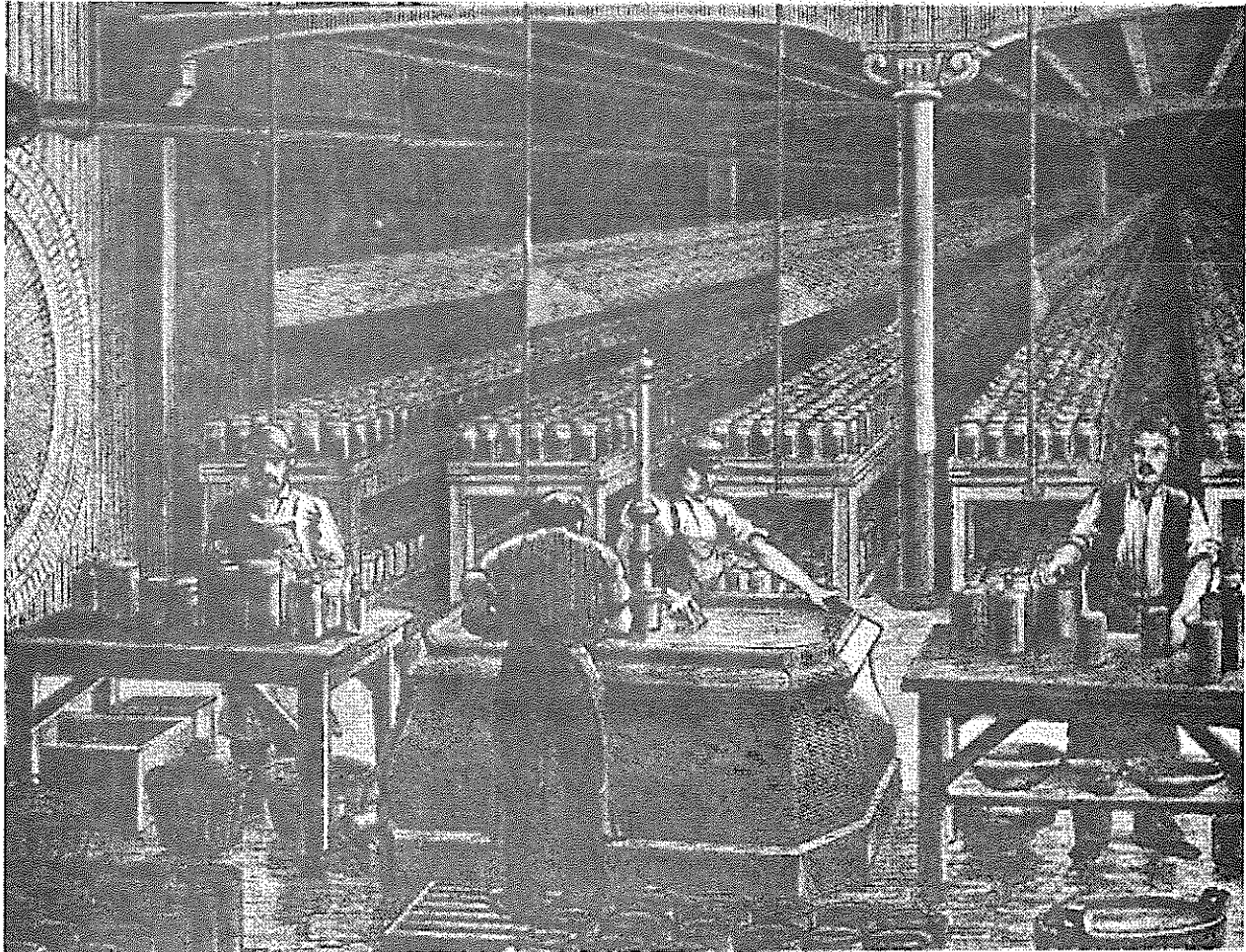
▶19世紀になると、上の筒状の装置 (G) を使って、生体組織 (M) に電気を通すとどんな反応が現れるのかも調べられた。

●発電装置としての電池の利用

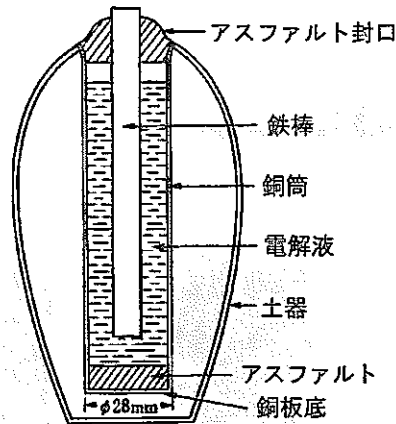
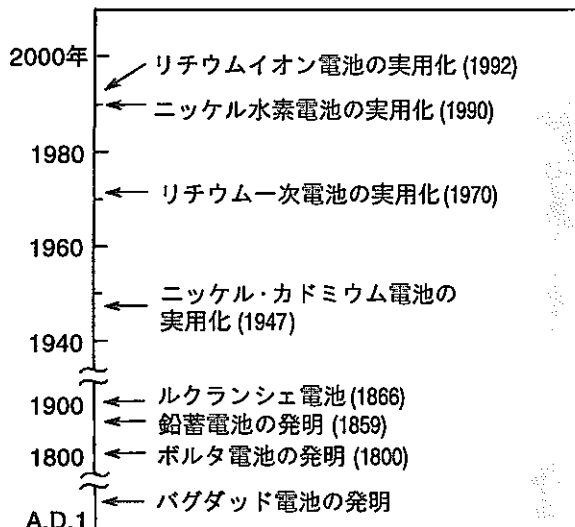


◀19世紀には電気が発明され、パリをはじめとするヨーロッパの主要都市には大規模な電信網が引かれた。これは電信局に集められた多数の回線。

▼巨大な電信網を維持するには大量の電気が必要である。効率的な発電機が発明されていなかった当時は電池のみが頼りであり、電信局にはこのように無数の電池がずらりと並べられていた。手前では職人たちが電池を作っている。 資料/L'illustration

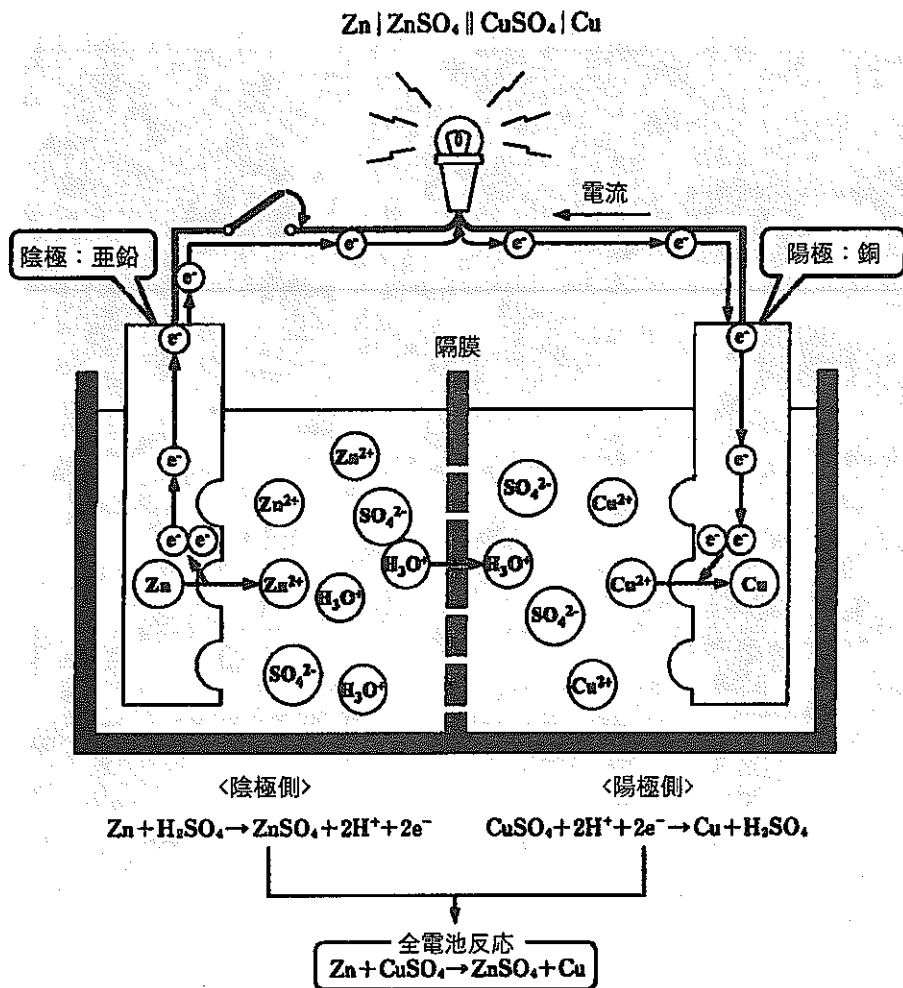


●電池の歴史とメカニズム



▲1932年、ドイツの考古学者ヴィルヘルム・ケーニヒは、イラクのバグダッドの東方のホーヤットラップアから素焼きの花瓶のような容器を発見した。容器は紀元1世紀前後のものだと推定されたが、内側には薄い銅製の筒があり、その中央に鉄棒が固定されていた。筒の内部にワインや酢を入れると、この装置はボルタ電池と同様の原理で電池として働く。そこでこの容器は、「バグダッド電池」とか「ホーヤットラップア電池」と呼ばれている。研究者たちは、この電池は容器にメッキを施すために利用されたのではないかと考えている。

▲電池の種類や用途がきわめて多様化した現在でも19世紀半ばに発明された電池のうちいくつかは日常的に使用されている。たとえば鉛蓄電池は自動車のバッテリー、またルクランシェ電池は乾電池として使われている。図中のバグダッド電池とは、約2000年前のイラクの遺跡から発掘された遺物だが、電池として利用できる構造をもつ。



◀ボルタ電池に改良を加えて作られたダニエル電池のメカニズム。亜鉛は酸に溶けやすく、銅は溶けにくい。そこで、亜鉛板と銅板をつなぐと、陰極側では亜鉛が電子を放出して溶け、陽極側では銅イオンがそれを受け取って銅板に析出する。ボルタ電池と異なるのは、2つの電極の間に水を通す隔壁を置き、それぞれ異なる溶液に電極を浸していること。これによってボルタ電池よりも効率よく電流が流れる。

中国の3大発明の1つ 「羅針盤」が開いた大航海時代

古代の磁気コンパスは 南を指す

天然磁石は地球上のどこにでも見つかる。人類はおそらく先史時代から、それがあつた種の金属（鉄）を引きつける不思議な性質をもつことに気づいていただろう。しかし、この天然磁石を方角を知るために利用した最古の記録は、紀元前4世紀の古代中国の書物『鬼谷子』に現れる。

「鄭の人々は玉を取りに行くとき、道に迷わないように指南器をもっていく」

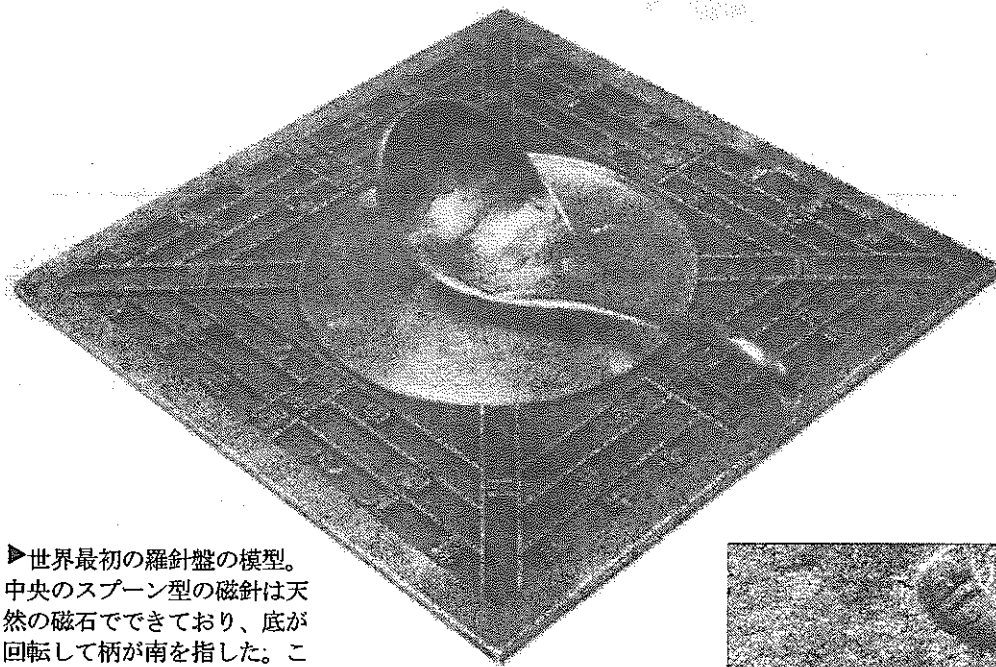
さらに、紀元前3世紀の中国の思想家、韓非が残した『韓非子』にも次のような記述がある。

「臣民は支配者を侵し、移動する砂丘や高い丘のように彼の特権を侵害する。そのため王は自らの地位を忘れ、西と東の区別もつかなくなり、つい

には自分の立場が本当にわからなくなる。そこで、古代の王たちは、日の出と日の入りの方向を区別するために指南器を据えた」

これらの文献に出てくる「指南器」こそ、世界最古の磁気コンパス（羅針盤）であつたと考えられている。当時の中国の羅針盤の針は南を指すように作られていた。中国人たちは、なぜか南を指す方を好んだのである（ちなみに、もっと古い伝説的記録には「指南車」というものが出てくる。紀元前2634年に黄帝が蜀と戦つたとき、濃い霧の中で敵の退却方向を見失わないため、戦場で指南車を使ったという。指南車は台車の上に腕を伸ばした人形が乗っており、その指が南を指すようになっていたというが、どのような仕組みだったかは明らかではない）。

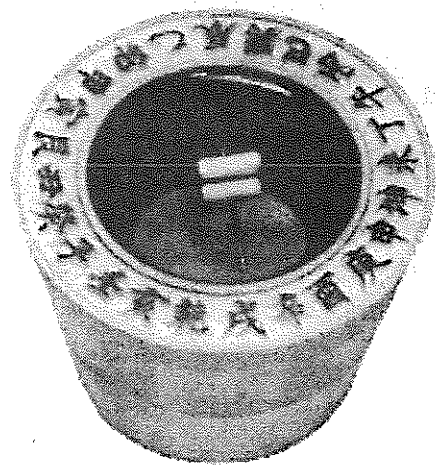
だが、古代中国で生まれた羅針盤が航海に用いられるようになるのは、少なくとも1000年以上後



▶世界最初の羅針盤の模型。
中央のスプーン型の磁針は天然の磁石でできており、底が回転して柄が南を指した。これは地相占いに使われた。
写真/Ontario Science Center

▼紀元1世紀の漢時代のレリーフ。左の箱の上にスプーン型の羅針盤が見える。写真/リートベルク博物館





▲初期の航海用羅針盤。磁化した針を木片に通し、水に浮かべて方位を知った。
写真/Ontario Science Center

◀中国の書物『天工開物』（1637年）の挿絵。
4人の職人が針金を短く切って、羅針盤用の磁針を作っている。右端に大きな水瓶が見え、彼らが熱残留磁化を利用していたことがわかる。
資料/Joseph Needham, Science and Civilisation in China

のことである。それまでは、羅針盤はもっぱら、家や都市を作るのに適した場所を決めるための地相占いに用いられた。初期の羅針盤は、地を表す四角い盤（盤面には北、北東、東、南東……の8つの方角が記されている）の上に天を表す小型の円盤を重ね、その中心に磁針を置いたものだった。この磁針は今日のような鉄の針ではなく、スプーン型をした天然の磁石で、スプーンの底が回転して柄がつねに南を指すようになっていた。ほかに、磁針が魚の形をしている「指南魚」や、亀の形をしているものもあった。だが、このような羅針盤では方角を正確に知ることはできず、揺れる船の上ではなおさら、その実用性は低かった。

中国で航海に用いられた羅針盤に関する記述が現れるのは、12世紀はじめの朱彥の著『萍州可談』（1117年）が最初である。だが実用化されたのはもっと早く、おそらく9世紀から11世紀の間の

ことと見られている。そして中国では、これより先に羅針盤の登場を準備する2つの重要な発明・発見がなされていた。1つは、5世紀頃に中国で世界に先駆けて鋼が生産されるようになり、やがて鋼で作った針を磁石によって磁化させ、磁針として用いることが始まったことである（それ以前の鉄つまり錬鉄は磁気を長く保つことができず、また磁性も弱かった。鉄の技術史については「たたら製鉄はこうして生まれた」参照）。針型の磁針が作られたことにより、針の指し示す方向をより正確に読めるようになった。

もう1つは、針を磁石で磁化させるのではなく、地球の磁場によって磁化させる方法を中国人が発見したことである。鉄を高温に熱して地球の磁場の南北方向に向けて置き、冷却すると、鉄は地磁気によって軽く磁化される。これは現在「熱残留磁化」として知られている。前述したよう



◀中国人たちは8世紀から9世紀頃には磁気偏角の現象を知っていた。これは10世紀初めの地相占いの書物に出てくる羅針盤。外側の2枚の円盤の方位が7.5度ずつずれている。資料/ Joseph Needham, Science and Civilisation in China

に、中国人は製鉄技術では世界をはるかに先んじていた。そうした製鉄の長い歴史の中で、彼らはこの現象を経験的に発見したのかもしれない。11世紀に曾公亮が書いた『武経総要』には、この方法によって磁針を作る過程が述べられている。

「軍隊は曇天の日や真っ暗な夜に方向がわからない場合、方向を確認するために指南車や指南魚を使った。指南魚の作り方はこうである。薄い鉄片を削り、長さ5センチ、幅1.25センチのとがった尾と頭をもつ魚の形にする。これを炭火で熱し、灼熱したら、火ばしで頭の部分をつかんで取り出し、尾が北を指すようにして水につける。その際、尾が少し水に沈むようにする。次いで、それを密閉した箱にしまう。使用するときは、水を満たした容器を風のない場所に置き、魚を水面に平らに（注・木片などを利用したと思われる）浮かせる。すると魚の頭が南を指す」

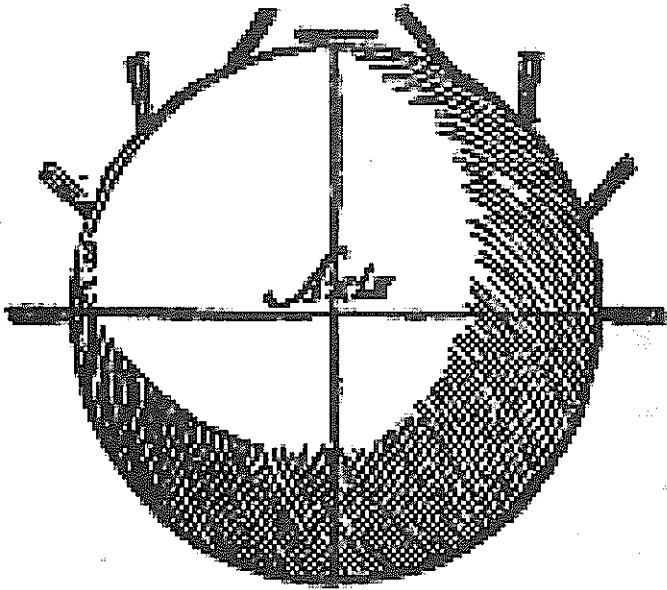
方角を正確に指し示す鋼の針と、地磁気を利用して磁針を作る方法が手に入ったことで、羅針盤の精度は著しく向上し、その結果、用途が格段に広がった。とりわけ活躍したのが軍用と航海用であった。軍隊は遠征先で必要に応じて羅針盤を作れるようになり、また船乗りたちは、航海の途上で磁針の磁性が弱まり使い物にならなくなるこ

とを心配する必要がなくなった。こうして、中国の3大発明の1つ、羅針盤は中国からまたたくまに世界へと広がっていった。

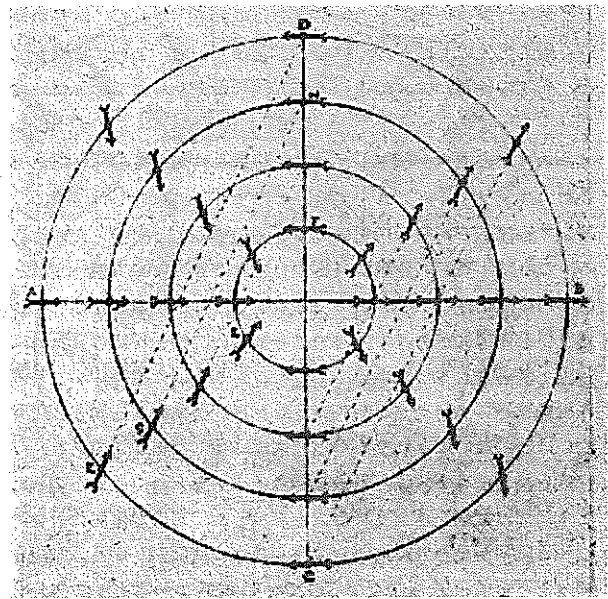
羅針盤が大航海時代を開いた

中国で発明された羅針盤は、12世紀末から13世紀はじめ頃にはアラビアやヨーロッパに伝播していた。中国からの伝来であったことは、ヨーロッパの測量士や天文学者たちが17世紀になるまで南を指す羅針盤を使用していたことからわかる。しかし、ヨーロッパにおける羅針盤の最初の記述はイギリス人の修道士アレクサンダー・ネッカムの著書『物の本性について』（1190年）に現れ、ネッカムは「針の動きが止まるとそれは北を指す」と書いている。船乗りたちの間では、早くから北を指す羅針盤への改良がなされていたのかもしれない。

ところで、羅針盤が中国から伝わってくる以前のヨーロッパの船乗りたちは、どうやって進路を決めていたのだろうか。世界中どこでもそうだが、昼は太陽の位置や風の向き、水深などを頼りにし、夜は天に輝く星の位置で知った。とくに重要



▲ギルバートは天然磁石で作った「テレラ」を使って伏角の実験を行った。図では地球の自転軸が水平に描かれている。資料/『磁石について』



▲ギルバートが考えた磁場の構造。矢印が磁針のN極の向きを示す。資料/『磁石について』

▶『磁石について』を著したイギリスのウィリアム・ギルバート (1544～1603年)。

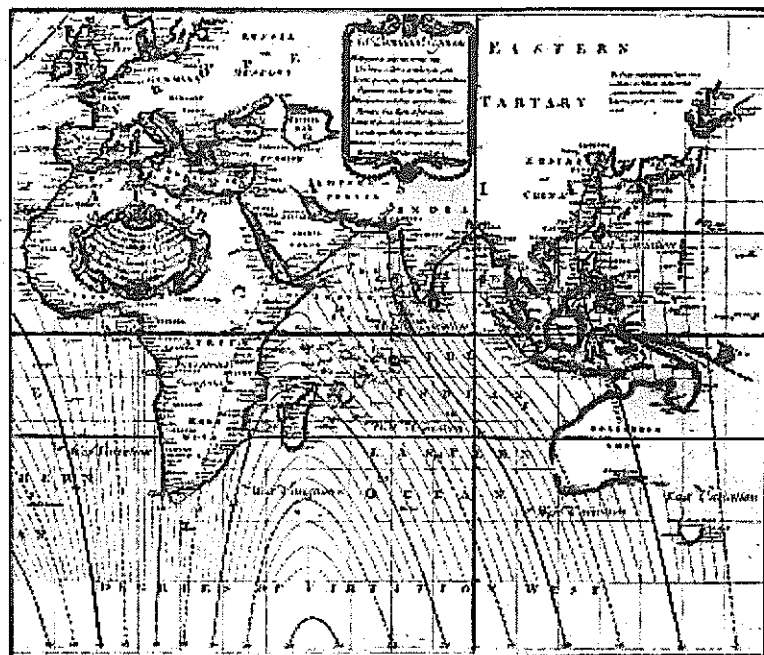


だったのが風向きである。昔の海図は風の方角を細かく調べて記録したもので、風配図と呼ばれた。だが当然ながら、風向は季節によって変わり、無風や悪天候の際にはわからなくなる。そのため、たとえばイタリアでは悪天候の多い冬季(3～10月)には遠方への航海をいっさい行わなかった。14世紀になって羅針盤が広く利用されるようになってはじめて、地中海の海上貿易は活況を呈した。こうして、羅針盤は、何千年にも及ぶ歴史の中ではじめて冬期の地中海航路を開いたのだ。

15世紀には、ヨーロッパの船乗りたちにとって

羅針盤は必須の道具となっていた。羅針盤を用いることによって非常にくわしい海図が作られ、航海術も大きく進歩した。同時に、いまだ未知の海域へ向けて“北を指す針”だけを頼りにこぎ出ていくことが可能になり、海洋探険への機運は高まった。こうして、ヨーロッパはいわゆる「大航海時代」を迎え、コロンブスの新大陸発見やマゼランによる世界一周の旅へとつながるのである。

「偏角」を発見したのも中国人



◀エドモンド・ハレーによる世界の偏角図。これによってヨーロッパの航海術は格段に進歩した。地図には日本と韓国間の海域がわからないという注記がある。

資料/National Maritime Museum

磁気に関して中国人がなしたもう1つの重要な発見は、磁針の指す極が地理上の極からわずかにずれることであった。12世紀に寇宗奭は『本草衍義』の中でこう書いている。

「とがった鉄の針を天然磁石の上でこすると、それは南を指す性質を獲得する。しかし（針は）つねに東に偏り、真南は指さない」

この角度差は今日「偏角」と呼ばれ、場所によって異なり、また時間とともに変化することが知られている（ちなみに1990年の日本磁気点の観測では、北海道帯広における偏角は約8.3度西、沖縄は約4.1度西である）。驚くべきことに、中国人は8世紀か9世紀にはこの偏角を知っており、地相占いに利用していた。10世紀初めの地相占いの書に描かれた羅針盤を見ると、方位を記した円盤が2枚組になっており、両者の方位の表示が7.5度ずつずれている（27ページ図）。これが当時の偏角であったのだろう。

西洋文明が偏角を知ったのは15世紀初めのことであり、中国にはるかに遅れをとった。だが、磁気（地磁気）について実験や観察を行い、科学的な理論を発展させたのは西洋文明であった。最初の重要な実験は、16世紀のイギリスのウィリアム・ギルバートによってなされた。彼は王立医科大学の学長を務め、エリザベス女王の侍医とも

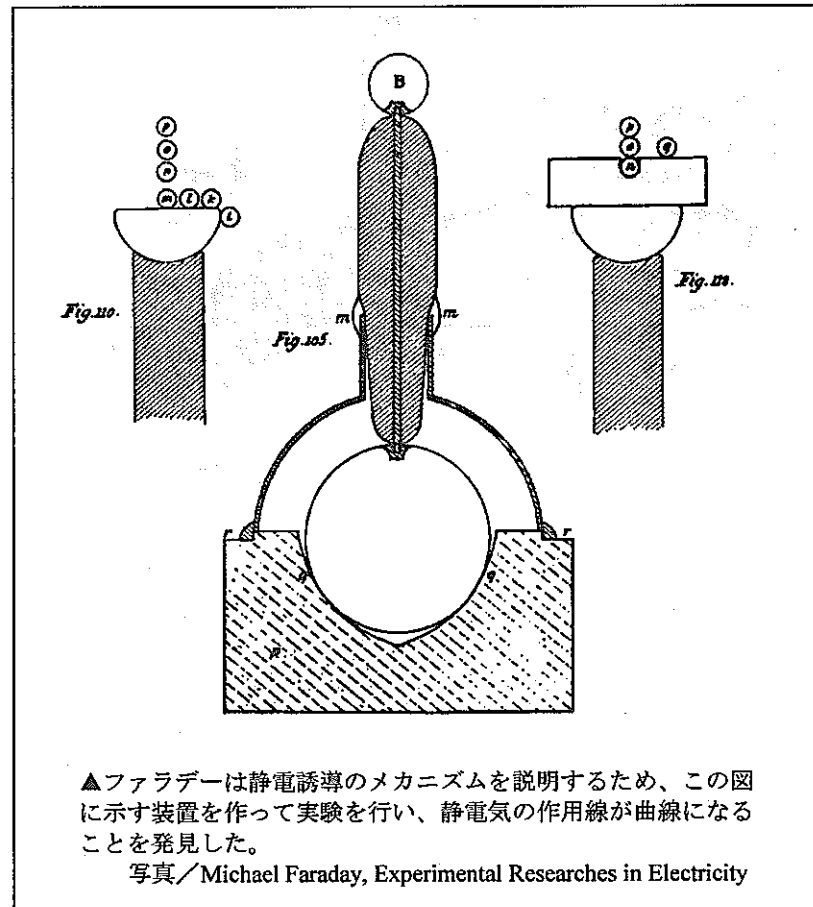
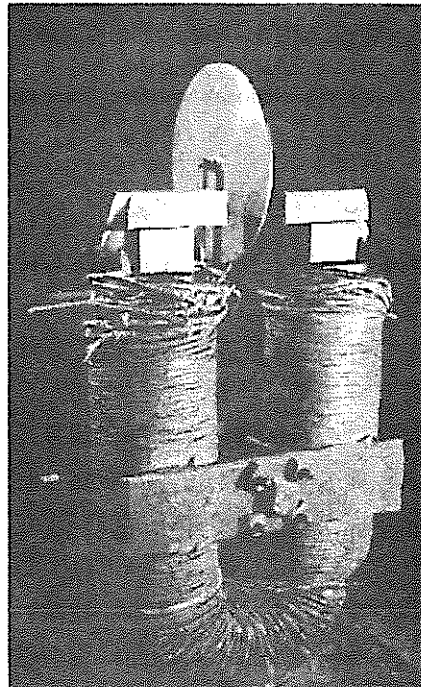
なった人物である（前ページ図）。しかし、磁石に関する多くの研究を行い、16世紀末に『磁石について』と題する書物を出した。

ギルバートは、天然磁石から球形の磁石を作り、それを地球に見立てて「テレラ」と呼んだ。当時、北半球では磁針のN極側の先が下に傾き、南半球では逆にS極側の先が下がるのが知られていた。磁針が水平面から傾くこの角度は、現在「伏角」と呼ばれる。そして、ギルバートはテレラを使ってこの現象を実験したのである。彼は、細い鉄の針をこの小さな“地球”の表面に近づけた。すると、赤道上では針は表面に対して水平になるが、高緯度になるに従って針が傾いていき、両極上では直立することを確認した。これらの研究からギルバートは、「地球もまた1個の磁石である」という結論を導き出した。彼は地球がもつ巨大な磁場を「磁気性能圏」と命名した。

17世紀になると、ハレー彗星の発見で知られるイギリスの天文学者のエドモンド・ハレーが地球の磁場に関心をもち、世界各地で測定された偏角や伏角をまとめて世界地図（上図）に表した。彼は、同じ場所の偏角が時間的に変化することを説明するため、地球は4つの磁極をもつという考えを打ち出した。地球は外殻とコア（内核）の2重構造からなり、両者はそれぞれ1つの磁極ペアを



▲「電磁誘導」を発見したマイケル・ファラデー（1791～1867年）。
写真/Ferrofluidio Corp.



▲ファラデーは静電誘導のメカニズムを説明するため、この図に示す装置を作って実験を行い、静電気的作用線が曲線になることを発見した。
写真/Michael Faraday, Experimental Researches in Electricity

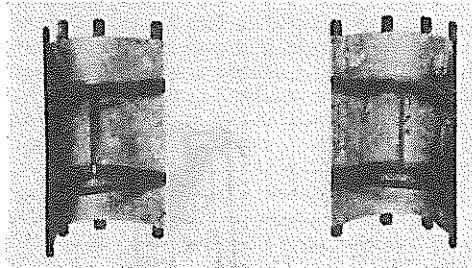
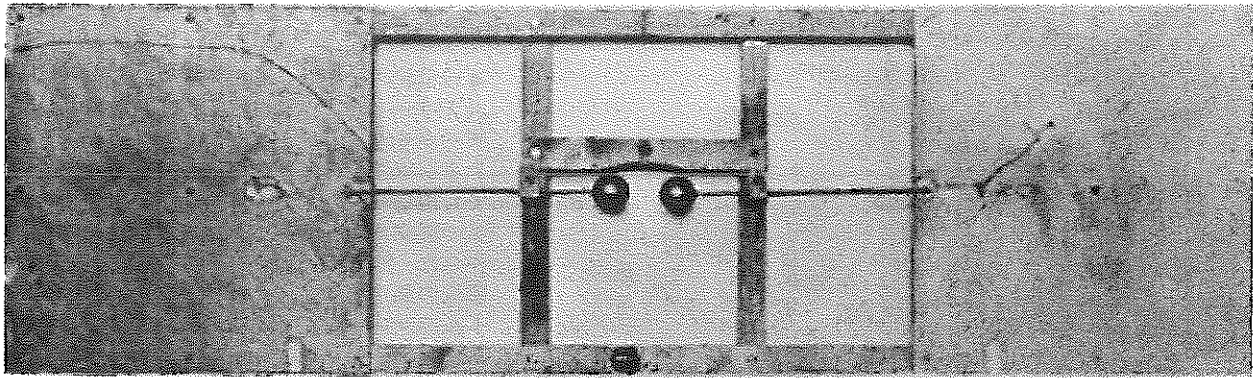
◀ファラデーが1831年に作った世界最初の発電機。磁石の間で銅の円盤が回転すると、電磁誘導の原理によって電気が発生して円盤にたまる。

もち、ゆっくりと回転している。しかしコアの回転速度は外殻よりも遅いため、偏角が変化すると考えたのである。これは、地球の内部構造および地磁気の発生源についての卓抜な推論であった。

18世紀に入ると、フランスの物理学者シャルル・クーロンが電気や磁気に関するさまざまな実験を行い、2つの磁極または電荷間に働く力の強さがいずれも「距離の2乗に反比例する」という法則を見いだした。こうして、磁気および地球磁場についてのさまざまな知識が集まったところで、19世紀のドイツの数学者フリードリッヒ・ガウスが登場する。彼は数学のみならず、天文学、測地学、電磁気学に多くの業績を残した。ガウス

は、地球磁場の分布は、地球の中心に棒磁石があると仮定するとうまく説明できることを証明し、近代的な地球磁気学の祖となった。

このガウスや同じくドイツのヴィルヘルム・ウェーバーらの努力によって、世界最初の地磁気観測所がドイツに作られた。やがてイギリスやフランスなどヨーロッパ各地に同様の観測所、あるいは気象観測を兼ねた観測所が登場し、偏角や伏角、それに地磁気の強さが精密に測定されるようになった。その背景には、ガウスらの地磁気に関する理論的発展だけでなく、電気その他の現象についての科学的理解が進んだこと、精密な測定が可能なる計測装置を作る技術が成熟したことなどが



◀▲1886年にドイツのハインリヒ・ヘルツは上の火花間隙の装置を用いて「電磁波」を検出し、マクスウェルの電磁気理論の正しさを証明した。下は火花間隙を組み込んだパラボラ型装置で、これによって電磁波の発信にも成功した。写真/Deutsches Museum

あげられる。やがて、極地周辺で見られる美しいオーロラが地球磁場と関係があること、太陽黒点の11年周期も関連があることが発見された。地磁気の観測は現在もお気象観測の一環としてなされており、その研究は地球物理学、さらには惑星物理学における重要な一分野をなしている。

「電磁誘導」の発見がもたらしたもの

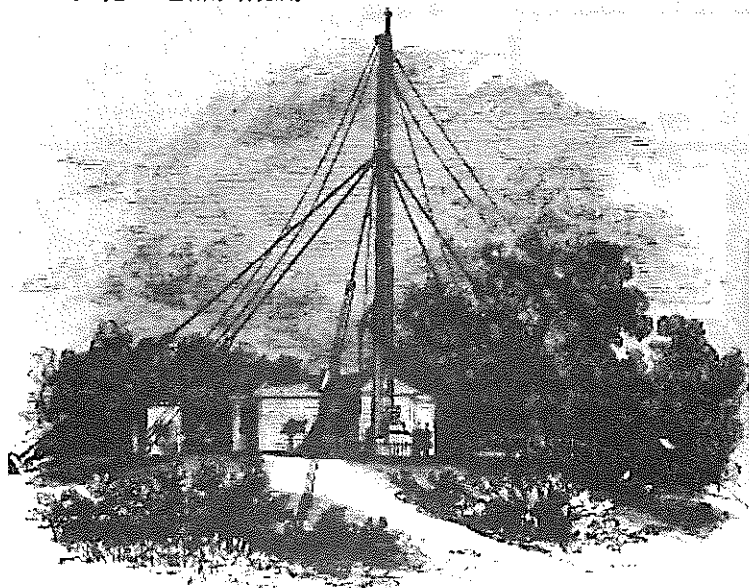
19世紀には磁気についてきわめて重要な発見があった。イギリスの物理学者マイケル・ファラデーが、磁気によって電流を発生させる「電磁誘導」の原理を発見したのだ（前ページ図）。この発見は2つの意味できわめて重要であった。1つは、これによってはじめて、電気と磁気の相似性が確認され、両者を1つの理論で説明する準備が整ったことである。そしてまもなく、イギリスのジェームズ・マクスウェルが、電気力と磁気力を電磁気力として統一した「電磁気理論」を完成させる。マクスウェルの理論は人類が最初に手にした「力の統一理論」であった。以後、科学者たちは、自然界のすべての力を統一する究極の理論の構築へ向けて走り出すのである。

ファラデーの発見がもつもう1つの意味は、電

磁誘導のメカニズムが発電機の誕生につながったことである。これは、現代の発電所で行われていることと原理的には同じである。

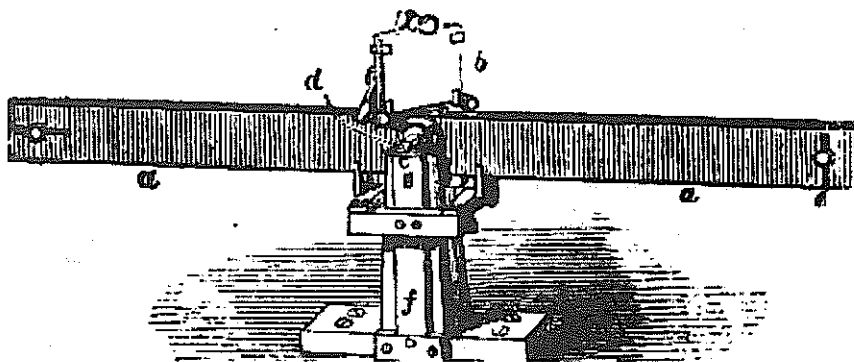
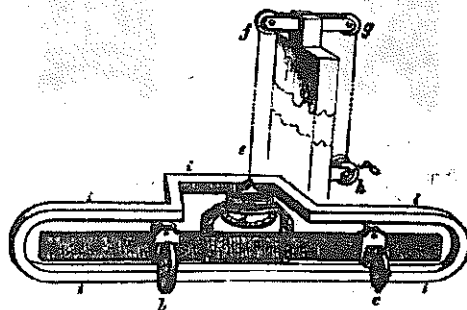
中国で発明された羅針盤は、方位を知るための便利な道具に過ぎなかった。だがそれは、ヨーロッパに渡ることで、単なる実用的な道具から磁気についての理解を深める科学的な道具となった。そしてそれらの知識が、ファラデーの電磁誘導の発見を経て、自然界のさまざまな力についての統一理論の先鞭をつけ、さらに、発電機の発明を生み出して人類に電気という新しいエネルギーをもたらした。そしていま磁気は、日常の道具から電子機器などの先端技術までじつにさまざまな面で応用されている。コンピューターの磁気記憶システム、磁力の反発力を利用したリニアモーターカー（磁気浮上列車）、加速器の中を走る粒子の軌道を曲げる超電導磁石、人体の内部を鮮明に透視して見せるNMR（核磁気共鳴診断装置）、そして核融合（磁場閉じ込め式慣性核融合）等々。磁気は電気ほどには目立たないが、現代文明のいたるところで応用されており、今後のわれわれの生活の中で重要な存在であり続けるだろう。

●19世紀の地磁気観測

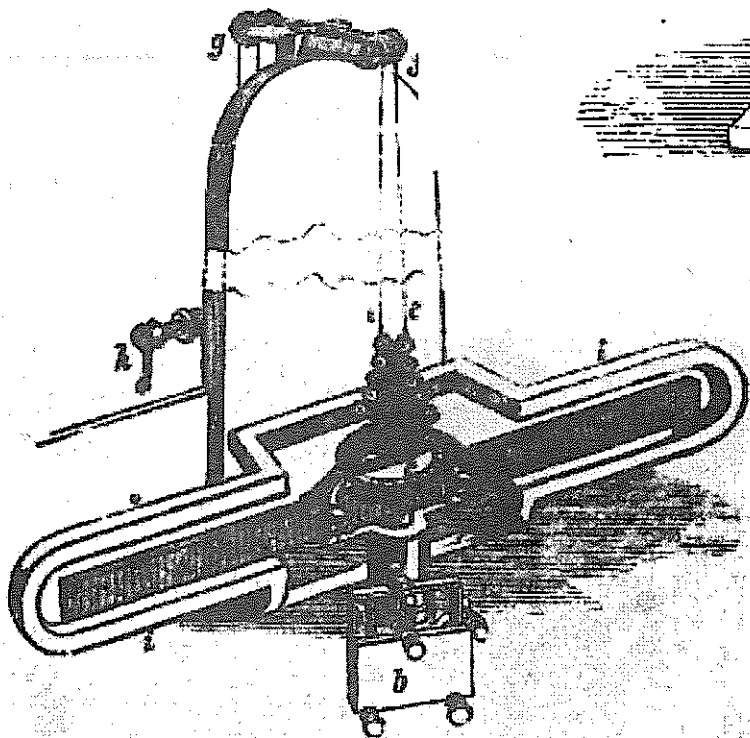


◀19世紀のイギリスの王室天文官ジョージ・エアリーは気象や地磁気に関するあらゆるデータを集めることに熱意を燃やし、グリニッジ磁気・気象観測所を設立した。なかでも最重要視されたのが地磁気と大気中の電気の観測であった。そのため建物は十字型に作られ、南、東、西の3つの翼にそれぞれ地磁気の測定装置が置かれた。また高さ24メートルのマストは、大気中の電気の測定に用いられた。資料/Illustrirte Zeitung (4点とも)

▶グリニッジ磁気・気象観測所の南翼に置かれた偏角測定装置。中央の糸で吊った羅針盤の磁針の動きをレンズb、cで観測した。

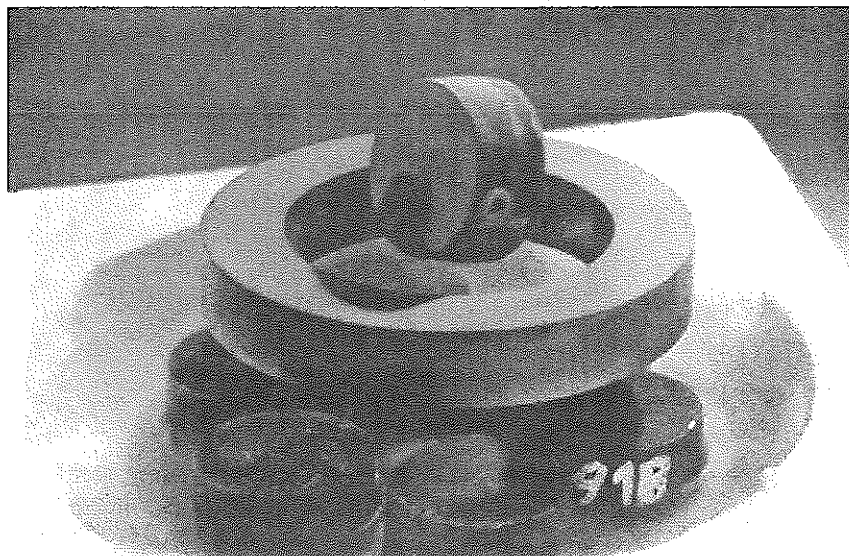


▲観測所の西翼に置かれた磁場の鉛直成分を測る装置。磁石の回転を鏡bで拡大し、離れた距離に置いた望遠鏡を用いて測定した。



◀観測所の東翼は磁気子午線と直角をなし、ここに水平面の磁気成分の変化を測る測定装置が置かれた。2本の糸で羅針盤を吊り下げ、水平面の磁気の偏位を感知するねじりばかりとする仕組みだった。偏位は鏡bによって検出した。

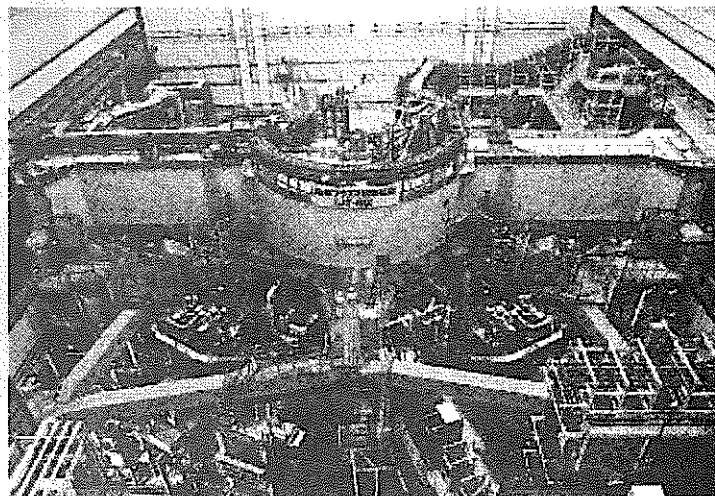
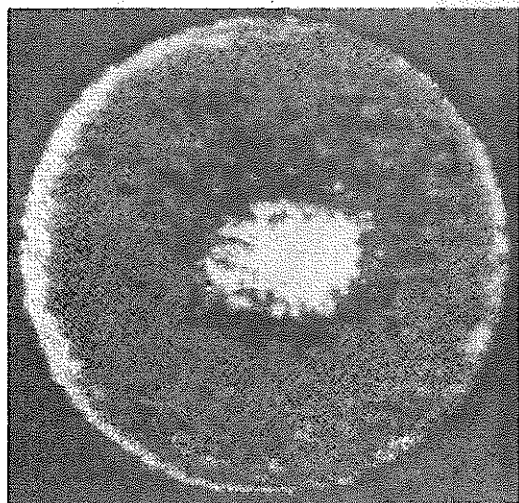
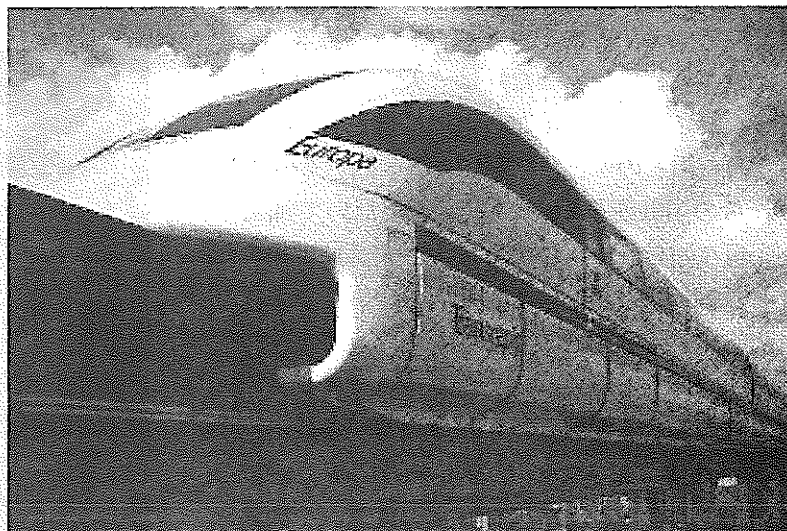
●磁気利用の未来



◀超電導状態の物質は電気抵抗がゼロになるだけでなく、磁力線も通さない。そのためその上に磁石をもつてくると、磁石が宙に浮く。これをマイスナー効果という。

▶現在、日本やドイツなどで磁気の反発力あるいは吸引力を利用して浮上するリニアモーターカーの開発が進んでいる。これは超電導磁石を利用するフランスのリニアモーターカー。

写真/Transrapid International



▲左は日本の原子力研究所の磁場閉じ込め型核融合実験装置「JT-60」の内部で起こる反応。原子を超高温・超高压状態にしてプラズマとし、それを強大な磁場で閉じ込めることによって核融合反応を起こさせる。右は装置の外観。

写真/日本原子力研究所

鉄 — 5000年の技術史

「たたら製鉄」はこうして生まれた

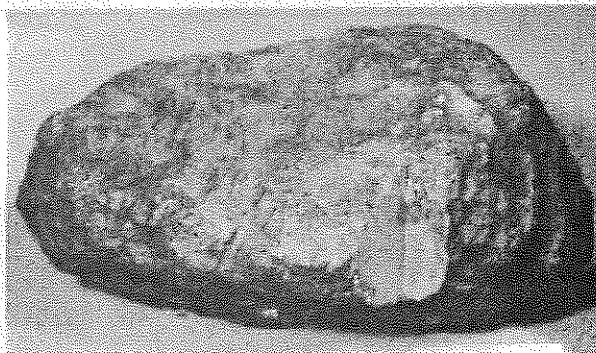
古代中国で 発展した製鉄技術

現代はシリコンの時代とかセラミックスの時代といわれる。しかし、人類の歴史を道具によって区分するなら、われわれはいまも鉄器時代にいる。鉄は自動車、船、航空機、橋やビルなどの建造物、それに日常の道具を作るために大量に使用されている基本材料であり、それらのすべてをプラスチックやシリコンで代用することはとうてい不可能である。

人類が最初に利用した鉄は“天からの贈り物”だったとされる。宇宙から地球に飛来した鉄分を多く含む隕石の一種、隕鉄である。古代の人々はこれらの隕鉄を採取し、それをたたいて加工した。現在知られている世界最古の鉄器は古代エジプトの王墓から出土した隕鉄製の首飾りであり、紀元前3500年頃のものだと推定される。また、時代が1000年ほど下るが、いまのトルコやイラクの古代遺跡からも隕鉄製と見られる鉄器が多数出土する。隕鉄はニッケルなどの不純物を多く含むため、化学分析によって後の時代の鉄鉱石や砂鉄から抽出した鉄と区別がつく。

世界で最初に製鉄（鉄冶金）技術を手に入れたのが、紀元前1700年頃にトルコのアナトリア地方に統一王朝を築いたヒッタイトであった。彼らは鉄鉱石から鉄を取り出し、鉄製の武器や馬具、装飾品などを作った。ただし、鉄を完全に融かすことはできず、半熔融状態の鉄をしぼって「錬鉄」と呼ばれるスポンジ状の還元鉄の塊を得ていた。金や銅は約1000℃で融けるが、鉄は熔融温度が約1500℃と高く、当時はこれだけの高温に加熱する方法がなかったためである。

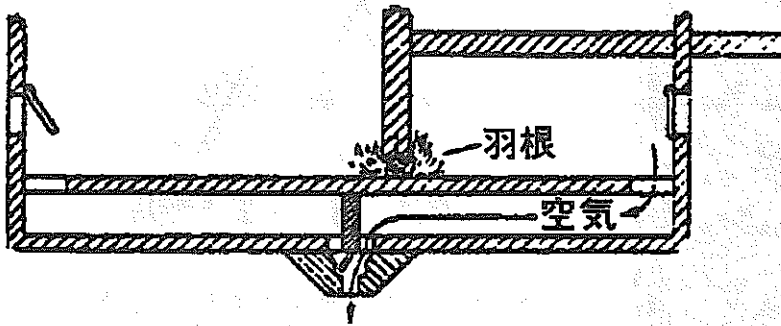
ところで、かつて鉄器の製造に用いられた鉄は、純粋な鉄ではなく炭素を含んでおり、炭素含有量によって錬鉄、鋼、銑鉄の3つに分けられる。低温の炉で作る錬鉄は、炭素分が少なく、鍛



▲人類が最初に利用した鉄は、宇宙から地球に飛来した隕鉄であった。これは明治18年に滋賀県大津市で発見された田上隕鉄。 写真/国立科学博物館



▲鉄製の武器をもつヒッタイト。 写真/アンカラ考古学博物館



◀紀元前4世紀頃に中国で発明された複動式ピストンふいご（断面図）。ピストンを引き出すと（右方向）、右側の箱の空気が押されて底の出口から出る。ピストンを押し込むと、左側の部屋の空気が押されて出口から出る。ピストンを押し引いても空気が出るので、たいへん効率がよい（この図では上部の密閉構造が描かれていない）。

造には適するが鑄造には向かない。これに対して鉄鉱石を高温で流動状態にまで融かして得られる鉄は、銑鉄（鑄鉄）と呼ばれ、炭素を多く含んでいる。銑鉄は鑄造に適するが、鍛造には向かない。そして炭素分が両者の中間のものが鋼であり、鋼は鍛えることによって硬度が増し、刀剣など刃物の素材にたいへん適している。

もちろん、古代の人々がこのような科学的知識をもっていたわけではなく、彼らは経験によってそれぞれの鉄の特性を知り、利用していたにすぎなかった。たとえば、ヒッタイトの鍛冶屋たちは、錬鉄を木炭の火で熱する（炭素分を加える）ことによって、原始的な「鋼」を作り出していた。この鋼で作った武器は非常に強靱であり、青銅の武器の比ではなかった。ヒッタイトはこの鉄冶金の技術をほぼ独占し、圧倒的な武力を誇るとともに、鉄製品の交易によって多大な利益をあげた。しかし、紀元前1200年頃に帝国が崩壊すると、ヒッタイトの鉄職人たちは周囲の国々に四散し、製鉄技術が各地に伝播した。こうして人類は鉄器時代に移行した。

製鉄技術はその後、古代中国において劇的な発展を遂げた。ヨーロッパに最初の溶鉱炉が登場したのは紀元後4世紀のことであり、鉄器が庶民にまで広まるのはようやく14世紀以降になってからである。しかし中国では、紀元前4世紀にはすでに溶鉱炉で鉄を融かしてさまざまな鑄造品を作り出していた。これにはいくつか理由がある。まず、中国には炉を作るのに適した耐火性の粘土が豊富に存在したこと、炉に添加物（リン酸塩が多

く含む黒土）を加えることによって鉄鉱石を低い温度で融かせることを発見したこと、そして、火力を強める効率のよいふいご（上図）を発明したことなどである。

また、中国人は紀元前3世紀頃に「焼き入れ」の技法を開発し、それが世界中に広まった。さらに驚くべきことは、現代の高炉と基本的に同じ原理のものが、少なくとも紀元前1世紀頃にはこの地に出現していたことである。紀元後5世紀には、中国人は錬鉄と銑鉄を一緒に融かして炭素含有量が中間のもの、つまり鋼を作る技術も生み出した。これは、1863年にドイツで開発されたジーマンス＝マルチン製鋼法と基本的には同じ原理であり、中国はそれを1400年も早く発見し実用化していたのである。

このように、中国は製鉄技術において西洋世界にゆうに1000年以上も先んじていた。「鉄は西低東高」といわれるゆえんである。そして日本もまた、鉄の技術史において独自の位置を占めている。日本では鉄鉱石の代わりに砂鉄を原料とした「たたら製鉄法」が誕生し、これによって得られる鋼（和鋼）を用いて、日本刀などのきわめてすぐれた鉄製品を作り出したのである。

「野だたら」から 「高殿たたら」へ

日本に鉄の文化が流入したのは、縄文時代末期（紀元前300年頃）から弥生時代前期（紀元前200年頃）にかけてだといわれる。これまでに知られ

●日本のたたら製鉄

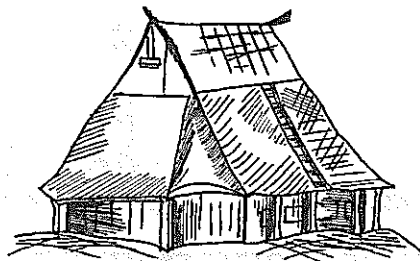


▲野だたらによる製鉄の様子を描いた絵。野外に粘土で小さな炉を作り砂鉄を運び入れるか、砂鉄のあるところに炉を築いて、鉄を作った。この技術は5～6世紀に朝鮮半島からの渡来人によって日本にもたらされ、8世紀には日本各地に広まっていた。野だたらは天気の良い日にしか操業できず、得られる鉄もごくわずかだった。

資料／和鋼記念館

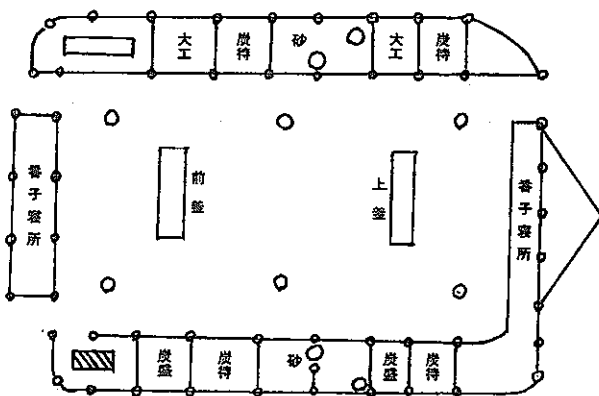
▶高殿は砂鉄を産出する鉄山に作られ、製鉄業に従事する人々がその周囲に1つの集落を形成した。周辺の農民は炭焼きや砂鉄採取の副業によって潤い、地域への経済効果は大きかった。

資料／平庭鉄山（『三閉伊日記』より）



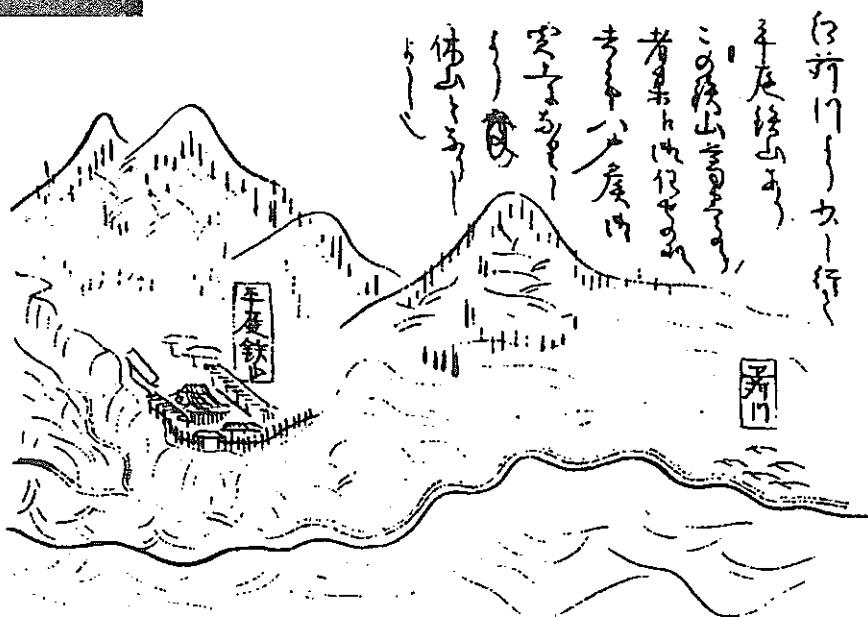
▲15世紀、高殿と呼ばれる建屋の中に比較的大きな炉を作り、大量の砂鉄と木材を使用する新しい技法、「高殿式たたら」が登場した。高殿は地面から屋根までの高さが8mにも達する巨大なものだった。

資料／『古来の砂鉄精錬法』



▲奥羽地方の高殿内部の配置図。大工（責任者）を筆頭に炭待、炭盛り、吹子を動かす番子らが高殿にこもり、3日3晩、炉をたき続けた。

資料／『日本僻地の史的硏究』



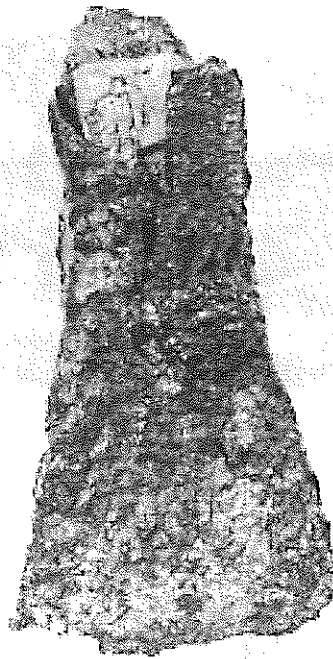
ている日本最古の鉄器は、北九州で出土した銚鉄製の斧の破片であり、大陸からの輸入品だったと見られている。日本で最初の製鉄が行われたのは、おそらく5～6世紀になってからである。最初は大陸からの渡来人によって製鉄技術がもたらされ、それが日本で手に入りやすい砂鉄を原料とするたたら製鉄法へと発展したのだろう。8世紀の奈良時代には、このたたら製鉄が全国各地で行われていた。

当時の鉄作りは野外の炉で行われたため、「野だたら」と呼ばれた。炉は山の斜面に築かれ、上昇気流による自然通風と人力によるふいごを利用して火勢を強めた。炉の中には砂鉄と木炭を入れて熱したが、火力が低かったために鉄が融けるまでには至らず、半熔融状態になって炉の底にたまる鉄塊を後で炉を壊して取り出した。野外での作業は当然ながら天候に大きく左右され、雨が降れば仕事を中断するしかなかった。また、毎回炉を壊して新たに作り直さねばならず、効率もすこぶ悪かった。

室町時代末期から江戸時代にかけて、たたら製鉄の能力を一気に高める重要な技術革新が起こった。高殿と呼ばれる建て屋の中に炉を作り、天候に関係なく操業できるようにしたのである。これは「高殿式たたら」、あるいは半永久的に操業できるという意味で「永代たたら」と呼ばれた。その背景には、戦乱の規模が大きくなり武器を作るための鉄の需要が激増したこと、鉄の利用が広まり、農工具や日常の道具への応用が増えたことなどがあげられる。さらに、江戸時代に入って幕府が鎖国政策を実施すると西洋からの鉄の輸入が止まり、国内での量産を図るしかなくなった。こうして、江戸時代の半ば過ぎには、野だたらは完全に高殿式たたらへと移行し、鉄が安定かつ大量に生産・供給されるようになった。当時の状況について江戸時代の思想家三浦梅園が『価原』(1773年)の中でこう書いている。

「金、銀、銅、鉛、鉄、合わせていえばみな金なり。五金の内にては鉄を至宝とす。銅これに次ぐ。如何となれば、鉄はその価廉にして、その用広し。民生一日も無くんば有るべからず」

つまり、庶民の生活は鉄なくしては1日も成



◀九州で出土した鉄製の斧の破片。縄文末期もしくは弥生初期のもので、大陸からの渡来品と見られている。写真/北九州市教育文化事業団

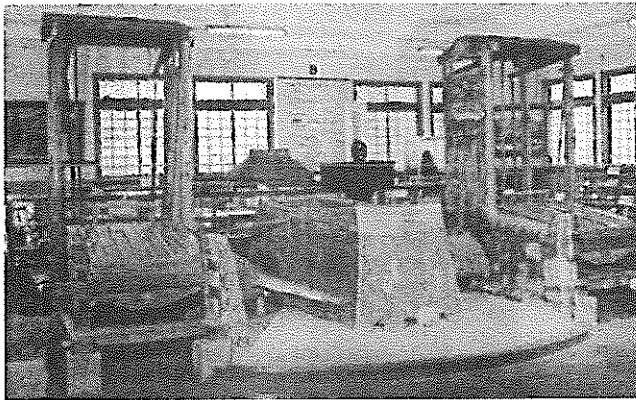
り立たないというわけである。

天秤ふいごの発明で省力化を実現

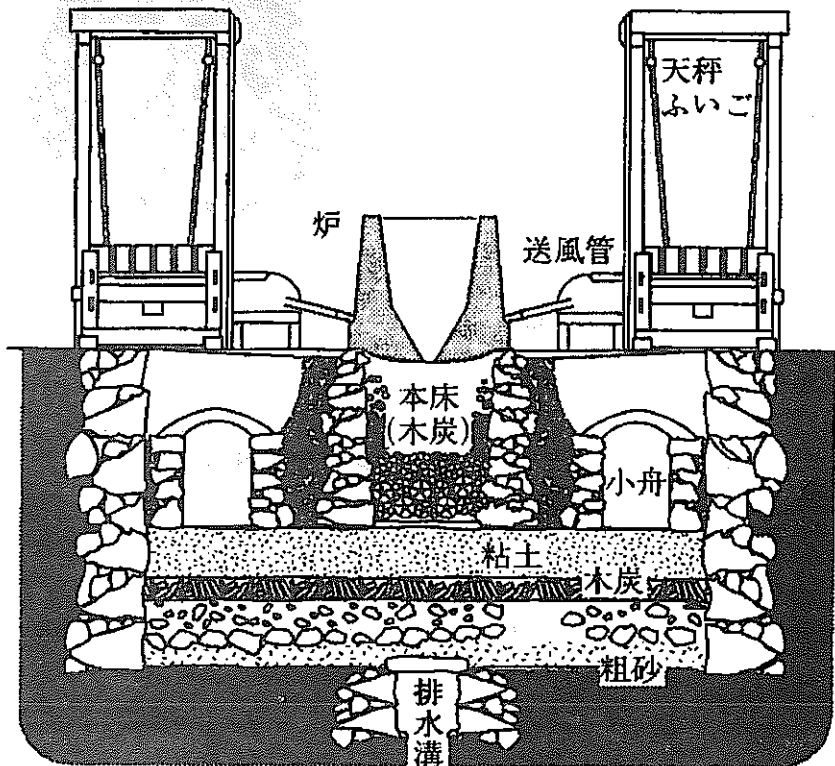
高殿は、炉から上がる火炎を避けるために非常に屋根の高い建物となった。鳥根県に現在も残る高殿の場合、地面から屋根のいちばん高いところまでの高さが8.65メートルあり、内部の広さは18メートル四方、約100坪である。炉は高殿内部の中央に作られたが、炉を築く前にその下の地面を深く掘り下げ、乾燥させた土や木炭などを詰めた特殊な地下構造を作った(次ページ下図)。これを炉床といい、地下からの湿気防止が目的であった。その上に、長さ2～3メートル、幅1メートル、高さ1メートル程度の炉を作った。

鉄を作るときは、この炉の中に砂鉄と木炭を30分おきに継ぎ足しながら、3昼夜連続で燃やし続けた。1回の操業で消費される砂鉄と木炭はそれぞれ10～15トンに達し、炉を壊して取り出される鉄は2～3トンだった。たたら製鉄の場合、得られる鉄塊の成分は均一ではなく、鋼や錬鉄、それに銚鉄などが混ざり合っていた。これを選別してそれぞれの目的に使用した。

高殿式たたらの操業は1年に50～60回行われ



◀▼左は高殿式のたたら炉と天秤ふいご、下はその断面図。炉の大きさは長さ2.9メートル、幅0.7メートル、高さ1.2メートル。資料/和鋼記念館



た。江戸時代の松江藩の記録によると、最盛期には1つの高殿で年間180トンの鉄が生産されたという。しかし、そのために必要な砂鉄もさることながら、木炭の手配が大変だった（1回の操業で消費する木炭の量は1ヘクタールの山林に相当するといわれる）。そのため、木炭が手に入りやすくなると、高殿を閉鎖して別の場所に移動した。ところで、「たたら」という言葉はふいご、もしくはたたら製鉄に用いる炉を意味する。江戸時代の書物、『日本山海名物図会』には、両側に3人ずつ計6人が足踏み式ふいごを動かしている様子が描かれており、次のような説明がついている

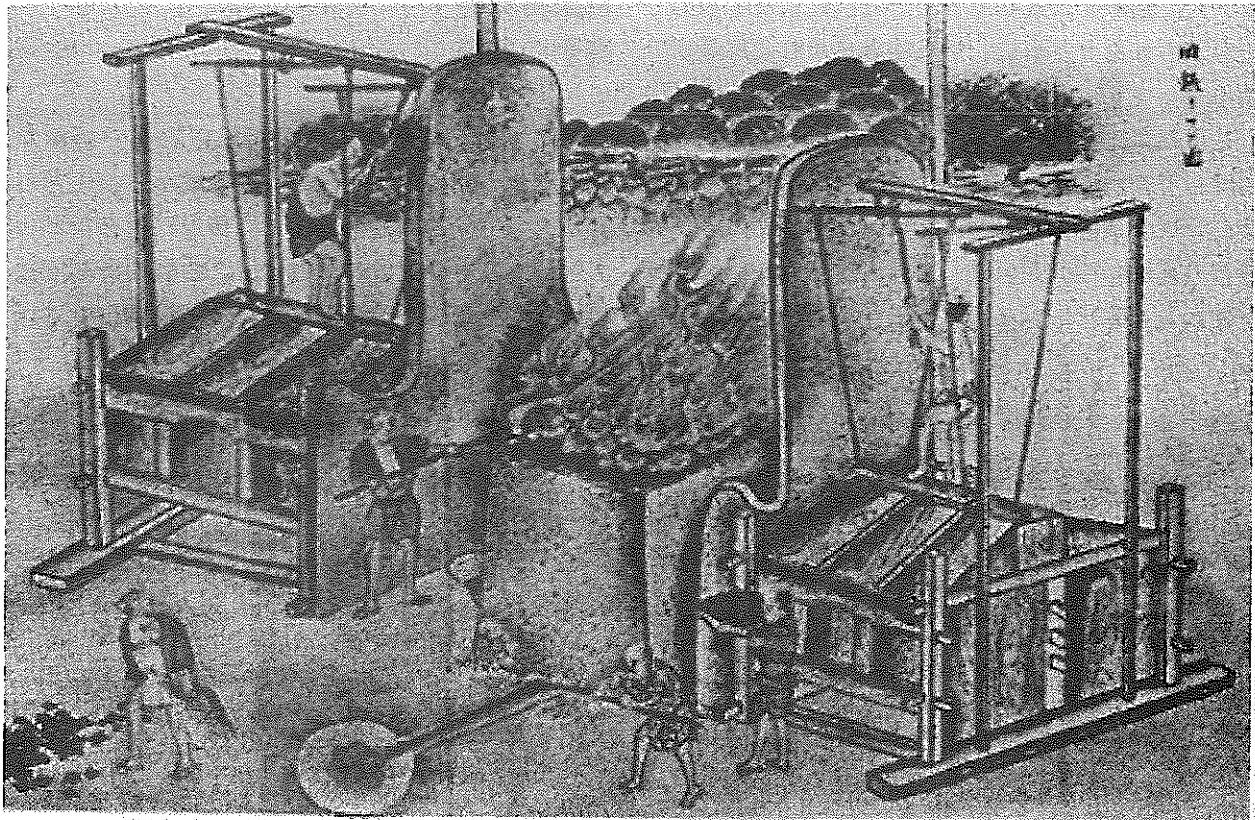
(次ページ中図)。

「鉄をふくにはふいごにては湯になりがたし。故にたたらにかけて湯にわかすなり」

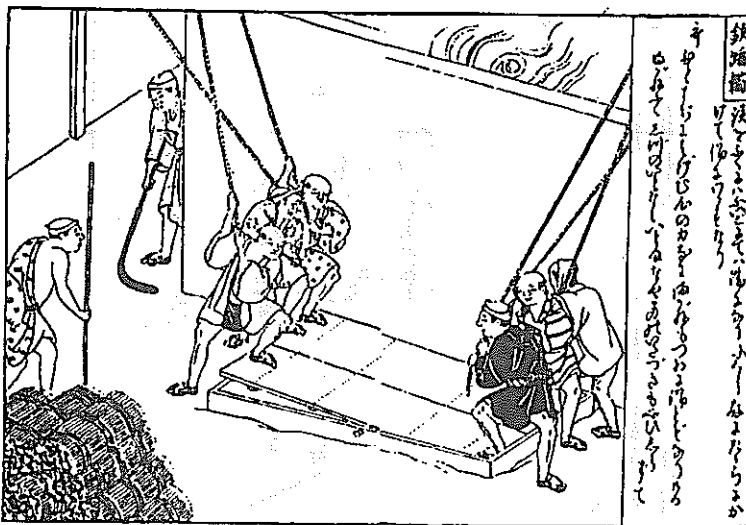
このふいごを踏む人夫は番子と呼ばれ、交替制で3日3晩ふいごを休みなく動かし続けた。彼らの仕事は重労働のうえ単調きわまりなく、あまりのつらさに番子が逃げ出したという記録が数多く残っている。鉄山の経営者たちはつねに番子の手配に頭を悩ませていた。

元禄時代になると、天秤ふいごが発明され、この問題が大きく改善された。これは、踏み板を天秤棒で吊ったもので、片方の板を踏むともう一方

●高殿式たたらと天秤吹子

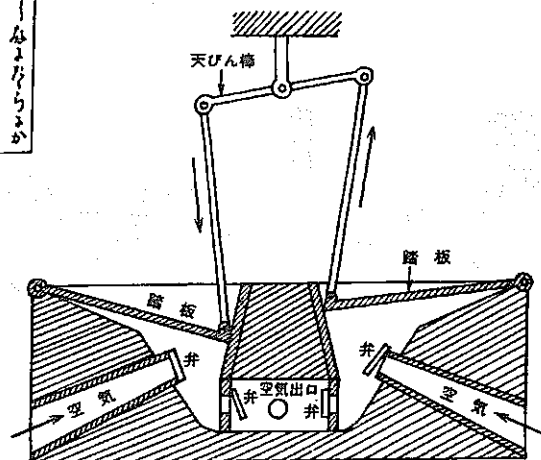


▲高殿式たたらと吹き子の発達によって鉄の生産量は飛躍的に増大した。これは吹き手（番子）が両足で交互に踏み板を踏み、風を送る天秤吹子。中央の炉に左右から風を送って砂鉄を融かした。 資料／先大津阿川村山砂鉄洗取之図



◀踏吹子（踏たたら）の様子。踏み板（たたら板）の両わきに番子が立ち、天井から下がるひもにつかまって、踏み板を交互に踏み、風を送った。 資料／『日本山海名物図絵』

▶天秤吹子の構造図（上段の図参照）。番子が片方の踏み板を踏むと、天秤棒が動いてもう一方の踏み板を上げる。それまでの踏吹子では6～12人で吹子を動かしていたが、この天秤吹子なら2人ですみ、人力の軽減につながった。 資料／『小判・生糸・和鉄』

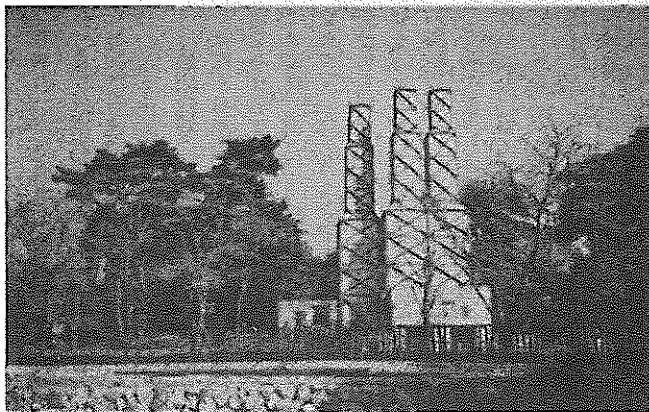


の板が自然に上がるという仕組みで、1人もしくは2人で動かすことができた。これによって省力化が図られるとともに、炉に吹き込まれる風量が多くなって鉄の生産量が増大した。

さらに大正時代になると、人力ではなく水車を利用して動かす水車ふいごが発明された。これは最初に東北地方に登場し、後に岩手県釜石で日本最初の高炉の操業が成功したときも、水車ふいごが使われた。

日本最初の高炉の登場

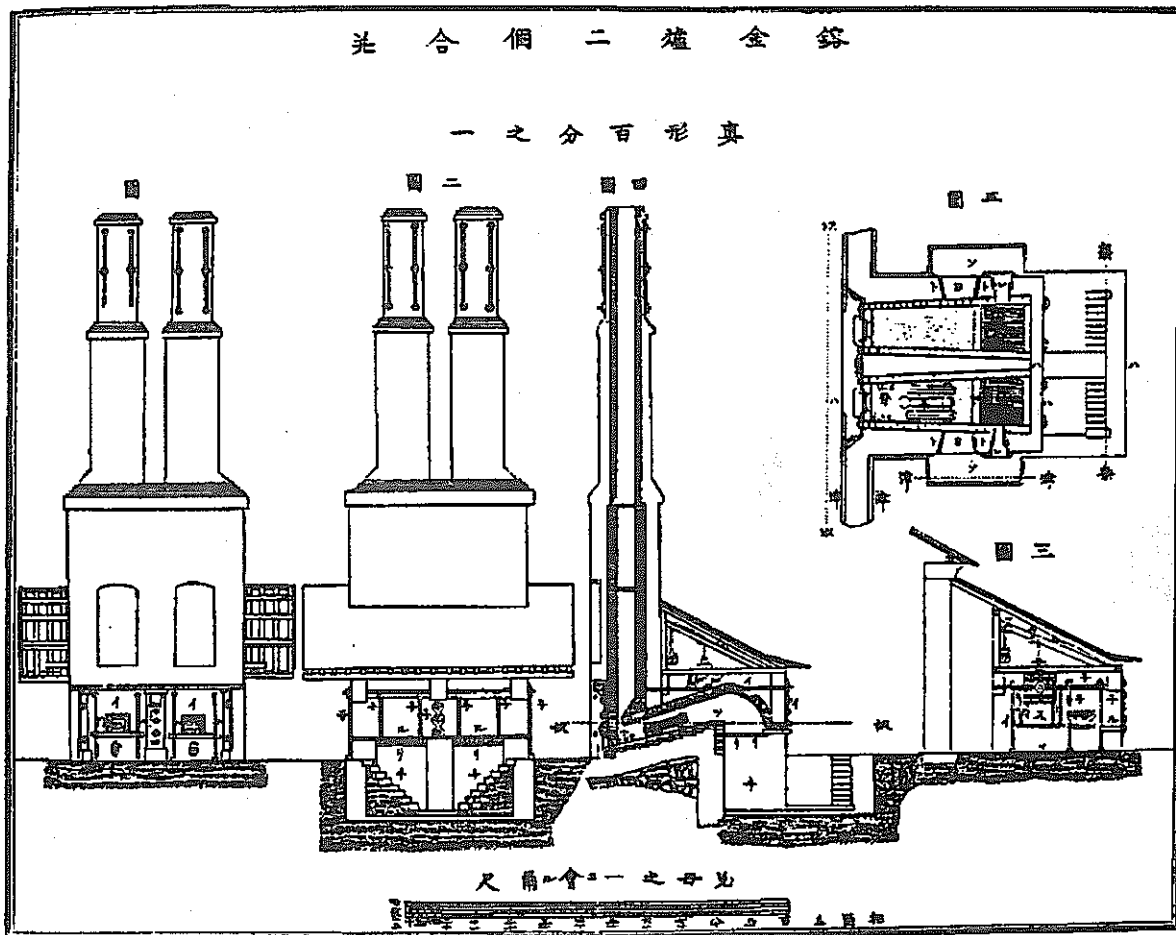
日本独自の発展を遂げたたたら製鉄であったが、江戸末期に開国を求める諸外国からの圧力と脅威の中で、この技術は徐々に衰退の道をたどっていった。その最大の理由は、この製鉄技術では大砲を作れないことにあった。ヨーロッパでは16



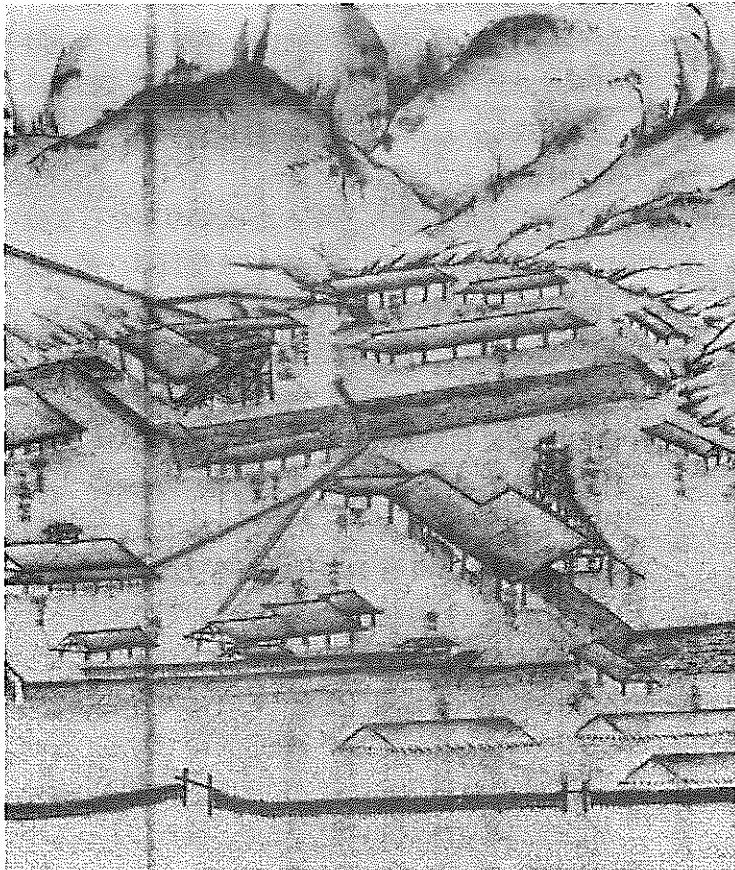
◀伊豆の葦山反射炉。現在も施設が残されている。

▼ヒューゲンの本に掲載されていた反射炉の図。片側に2炉、計4炉の構成で、全基を同時に操業すると150ポンド砲（口径約27センチメートル、砲身約3.3メートル）を铸造するのに必要な約15トンの鉄を融かす能力があった。

資料/和鋼博物館



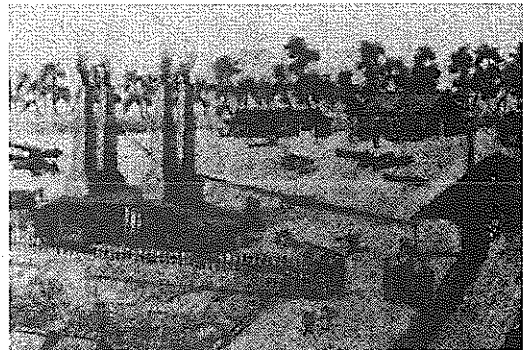
●幕末の高炉と反射炉



◀薩摩藩の島津斉彬は鹿児島島の集成館に巨大な製鉄用施設を建設した。大砲のように大きな衝撃がかかるものを作るには、従来の砂鉄を使った鉄ではなく、高炉を用いて鉄鉱石から鉄を作る必要があった。この絵では左奥に高炉が、右手前に反射炉が見える。しかし高炉の運転は失敗続きで、斉彬が死ぬと操業は中断され、その後の薩英戦争で破壊されてしまった。資料/佐賀藩士千住大之助筆、佐賀県立図書館

▶日本最初の反射炉は佐賀藩が築地に建設した2炉合体2双式のもので、1851年に操業を開始した。しかし、ここで铸込んだ大砲5門はすべて、試射で破裂してしまった。これは同藩が1854年に多布施に完成した同じく2炉合体2双式の反射炉。建設のためのノウハウはオランダの砲兵将校ヒューゲンが書いたたった1冊の技術書から得たものだった。

資料/ (財) 鍋島報効会所蔵



幕末の反射炉

経営	領地	反射炉の場所	最初の炉の着工年月	同操業開始年月	炉数	鉄製砲製作数
幕府ないし藩経営	佐賀	佐賀・築地	1850(嘉永3)年7月	1851(嘉永4)年12月	2炉合体2双 ⁴	約200 (門)
		同・多布施	1853(嘉永6)年9月	1854(安政元)年3月	2炉合体2双 ⁴	
	薩摩	鹿児島・集成館	1852(嘉永5)年秋	1853(嘉永6)年夏	2	不詳
	幕府天領	伊豆・韮山	1854(安政元)年2月	1855(安政2)年2月	2炉合体2双 ⁴	2?
	水戸	那珂	1854(安政元)年8月	1856(安政3)年2月	2	20以下
	長州	萩	不詳	安政5年とされるが不詳	不詳	なし
幕府	江戸・滝野川	1865(慶応元)年	1867(慶応2)年2月(推定)	不詳	不詳	
民間経営	島原藩 (豊前飛地領)	安心院・佐田	1855(安政2)年4月	1855(安政2)年月不詳	1炉	30以上
	島取	六尾	1857(安政4)年4月	1857(安政4)年9月	2	53以上
	岡山	大野	1864(元治元)年	1865(慶応元)年1月	1	数門
	福岡	博多・土居町	不詳	試験操業のみ	不詳	なし

資料/大橋周治『幕末明治製鉄史』

世紀に大量の銑鉄を作る高炉が一般化し、18世紀にはその銑鉄を一度に大量に融解する反射炉が登場して大規模な鑄造が可能になった。一方、1回ごとに炉を壊す日本のたたら製鉄では、高炉のように連続運転ができず、鉄の生産量にはおのずと限界があった。さらに、日本にも鑄造用の鉄を融かすこしき炉と呼ばれる小規模な炉があったが、大砲を作るのに必要な何トンもの鉄の融解はとうてい不可能であった。

このため、江戸末期から明治初めにかけて、薩摩藩や佐賀藩などが次々とヨーロッパの製鉄技術をまねた反射炉や高炉を建設した。彼らが参考にしたのは、オランダの砲兵将校J・ヒューゲニンが書いた1冊の書物、『ゲシュットギテレイ(ロイク王立鉄製大砲鑄造所における鑄造法)』だけであった。この本は砲術関係の情報を探していた佐賀藩によって発見され、十分な辞書などない中で翻訳が進められた。そして1851年、佐賀藩はこの本をもとに、佐賀の築地に日本最初の反射炉を完成させた。しかしもっぱら図版に頼った試みであったため、操業は失敗の連続であった。試行錯誤の末、ついに大砲鑄造に成功するものの、最初に完成した5門の砲身は試射の際にすべて破裂してしまった。

続いて1854年に、薩摩藩が鹿児島島の集成館に日本で2番目の反射炉を完成させた。藩主の島津斉彬は、7000坪という広大な敷地に反射炉とともに日本最初の高炉を建設し、そのまわりに各種工場を配した。施設はさながら一大コンビナートの様相を呈した。高炉を建設したのは、佐賀藩の大砲破裂の原因がたたら炉で作った銑鉄にあったと考えたため、高炉を用いて銑鉄を作り出そうとしたのである。しかしこの高炉の操業はうまくいかず、斉彬の死とともに計画は縮小され、その後薩英戦争によって施設は破壊されてしまった。

日本で2番目の高炉は、南部藩の大島高任の指導により、いまの岩手県釜石に作られた大橋高炉である。大島は、大砲鑄造には砂鉄ではなく鉄鉱石を原料とする銑鉄の生産が必須と考え、鉄鉱石を産する釜石鉄山の開発を行ったのである。こうして1857年12月1日(旧暦)、大橋高炉は初出銑に成功した。これを記念して、12月1日は今日、「鉄の記念日」となっている。

明治に入ると、鉄の需要はますます増大していき、日清戦争を機に国家政策として鉄の生産量の拡大が図られた。そして1901年(明治34年)、当時は寒村であったいまの北九州市に官営の八幡製鉄所が完成し、以後、日本の製鉄は高炉方式へと大きく転換するのである。

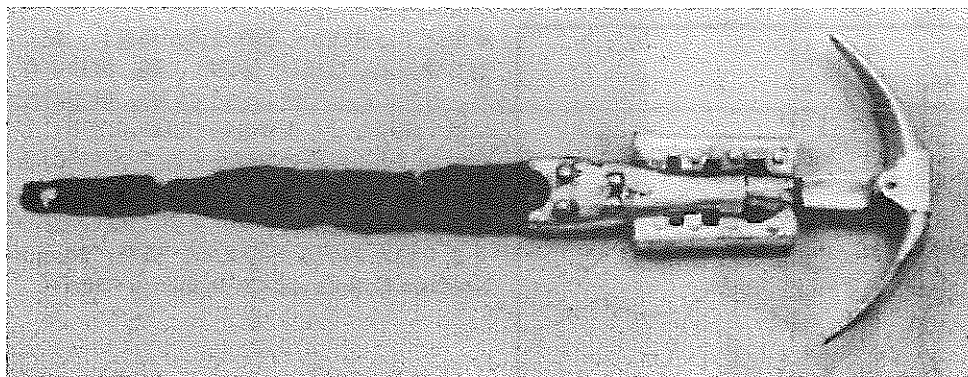
しかし、時代遅れとなったはずのたたら製鉄は、その後2度復活している。1度目は、第二次世界大戦の勃発によって鉄鉱石の輸入が止まり、国内産の砂鉄を利用した鉄の生産に目が向けられたときである。江戸時代のたたら製鉄の際に出たスラグまで利用されたが、結局、うまくいかなかった。2度目の復活は、大戦後、美術品としての日本刀の生産が再開されたことによる。日本刀の刀身は、2~4種類の硬さの違う鋼を合わせ、これを何度も打ち鍛えて作り出す。その素材として、近代製鉄によって作られる鋼よりも、たたら製鉄で得られる和鋼(玉鋼という)の方が数段すぐれていると刀工たちが主張したのである。なぜそうなのかは科学的に完全に解明されていないが、1977年以降いまに至るまで、彼らによって小規模のたたら製鉄が行われている。

先端材料としての “スーパースティール”

今日、鉄は特殊鋼の登場によって新たな時代を迎えている。金属材料の95パーセント以上(重量換算)を占める現代の鋼は、炭素を含むだけではない。ニッケル、マンガン、クロム、シリコン(ケイ素)等を添加した合金鋼が登場し、それらは耐食性、耐熱性、耐摩耗性等、多様な特性を備えている。一例を上げると、明石海峡大橋のケーブルのように軽量できわめて張力が高いニッケル鋼、さびにくいステンレス鋼、電気的特性にすぐれたケイ素鋼などである。鉄は、少し前の重厚長大というイメージから先端材料としての“スーパースティール”へと変貌しつつある。

21世紀に人類が宇宙へ本格的に進出する時代を迎えても、鉄はさまざまな形で、もっとも大量に用いられる材料であり続けるだろう。人類の鉄器時代は、その意味ではまだ続きそうである。 ●

●隕鉄製の鉄器



◀トルコのアラジャホユク遺跡から出土した短剣。紀元前2300年頃のもので、刃の部分に隕鉄を使っている可能性が高い。右側の柄の部分は黄金製。

遺物形状	出土場所	推定年代	分析結果
小管玉	エジプト ゲルゼー墳墓	BC3500~3300	Fe92.50 Petrie. Wainwright Mackay
鉄器刃	エジプト 11王朝ピラミッド	BC2050~2025	鉄とニッケルの比率 10:1
鉄剣刃部 金製鞘	エジプト ツタンカーメン王墓	第18王朝 BC1340	Dr. Iskander によつて調査されニッケル含有量から隕鉄を証明している
鉄器刃部 4 g	〃	〃	〃
枕飾金具	〃	〃	〃
三日月形飾板	トルコ アラジャホユク王墓	BC2400~2200	Fe ₂ O ₃ 76.30% NiO 3.06%
ピン(頭部は金)	〃	〃	Fe ₂ O ₃ 72.20% NiO 3.44%
鋸先の飾り 2 個	トルコ トロイ宝庫	BC2400~2200	Fe ₂ O ₃ Fe ₃ O ₄ NiO a 72.94 6.05 2.44% b 62.02 0.84 3.91%
工具破片	イラク ウル王墓	BC2500	Fe89.0% Ni10.9%
鉄器破片	イラク ウバイド墳墓	BC2900~2400	Prof. Desch が隕鉄からのものと発表
斧 頭	シリア ラス・シャムラ小神殿	ウガリット王国時代 BC1450~1350	Fe84.95% Ni3.25% S0.192% P0.39% C0.410% FexOx10.80%
護 符	クレタ島 ミノア宮殿	BC1600~1400	鋸刃状の跡があったとされている

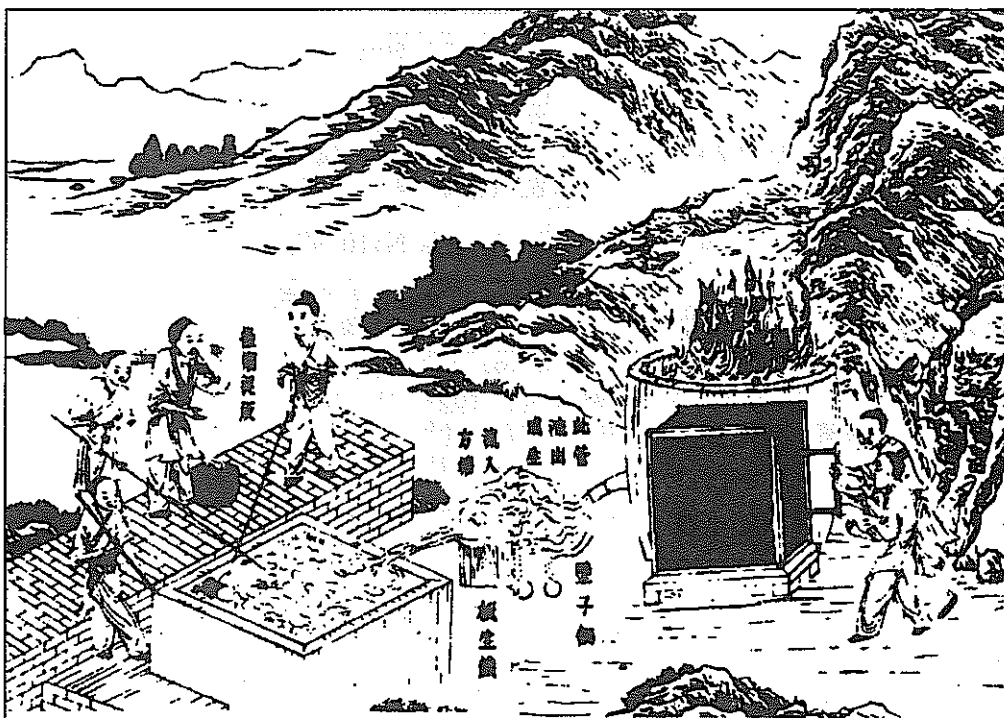
▲中近東の古代遺跡から出土した隕鉄製と見られる鉄器類。隕鉄は地上に落下するまでにガスや空気抵抗による発熱の影響を受け、不純物を生成・含有している。とくにニッケルの含有率が高い。これらの特徴をもとに人工の鉄器類と区別している。

資料/ロバート・マデン、Early Iron Metallurgy in the Near East

●中国の製鉄技術



◀ 中国では古代から製鉄技術が発達し、紀元前2世紀頃には銑鉄（鑄鉄）、鋼、錬鉄を作り、目的に応じて使い分けていた。戦国時代には小規模ながら世界最初の高炉が出現していたらしく、当時の遺跡から鑄型や鑄物製品が出土している。これは16世紀の高炉操業を指導する伝説を描いた図。左奥に現代のものとよく似た高炉がそびえる。資料/ Joseph Needham, Science and Civilisation in China



◀ 5世紀頃、中国で鋼を作る方法が発明された。これは1637年当時の鉄鋼製造の様子。溶鉄炉の中で錬鉄と銑鉄の板を積み重ねたものを熱し、一体にして融かし出す。これを取り出して鍛え、再び加熱して鍛える。この過程をくり返し、均質な鋼を作り出す。

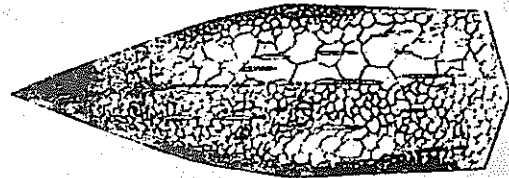
●鉄剣



日本刀の断面



兼元元作



来国光

▲鉄は冷却の仕方によってさまざまな組織を作る。日本刀の断面を観察すると、組織が粗いところと密なところが層をなしていることがわかる。高度な焼き入れ技術が生み出した鉄の工芸品でもある。資料／近藤真澄「科学篇（四）『日本刀の横断面』日本刀講座第3巻』

◀ 宮廷工場で働く鍛冶職人たちを描いた図。左上で鉄剣を鍛えている。剣の嶺側には比較的柔らかい錬鉄を、刃には硬い鋼を鍛接し、鋼の炭素含有量は融けた鉄に供給する酸素の量で調節した。

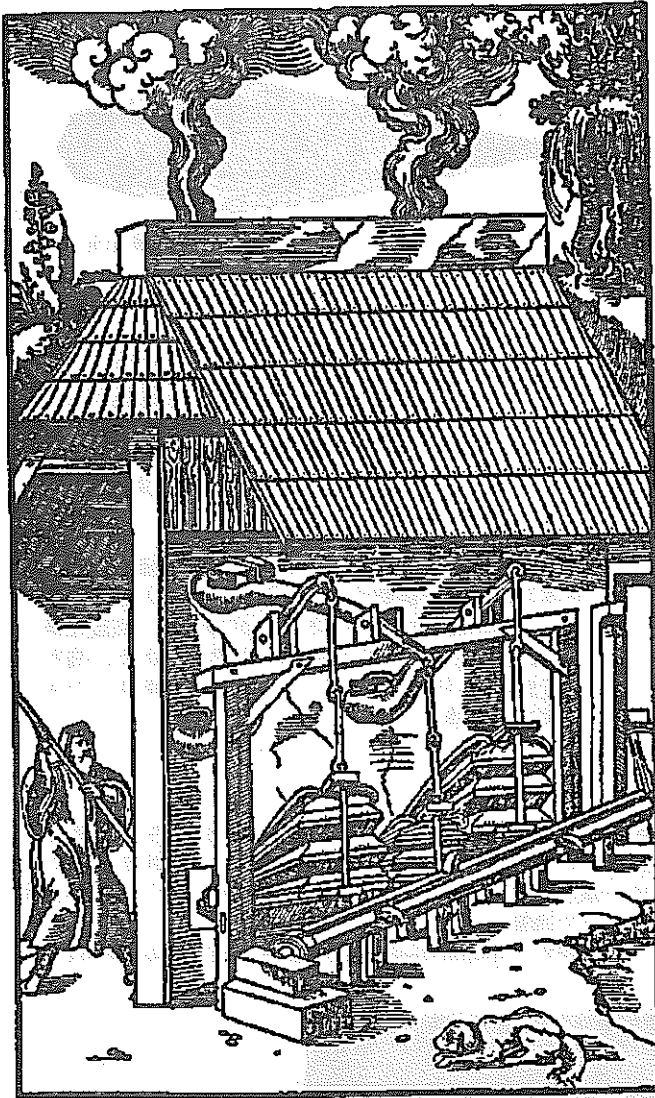
資料／Joseph Needham, Science and Civilisation in China



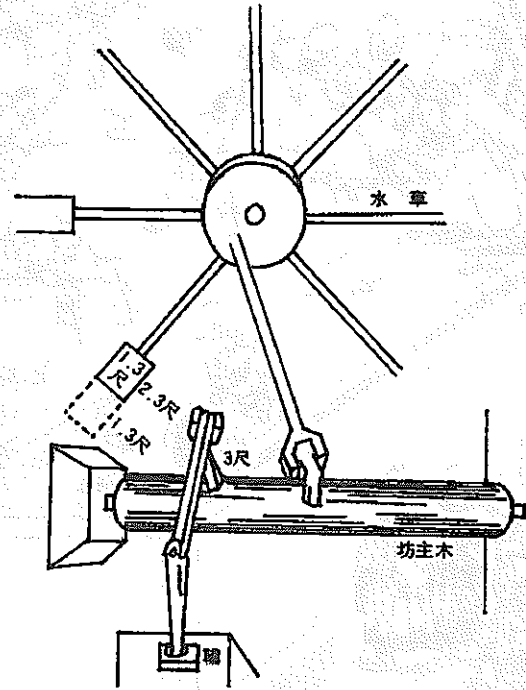
◀ 右手前の割れ目のある大石は、伝説で紀元前2500年頃に中国の呉王が自分の鉄剣を試すために切ったとされる「試剣石」。左の石にそのいわれが刻まれている。この遺跡は呉王の墓のある徐州近くの虎山にあり、王の墓には3000本の鉄剣が副葬品として埋められたという。

写真／Ulrich Hausmann

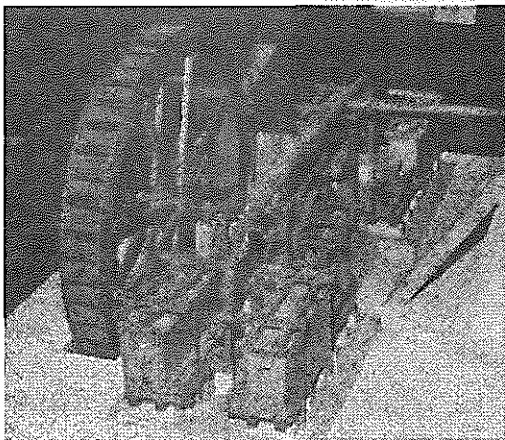
●水車吹子



◀1556年にドイツの鉱山学者アグリコラが出した『デ・レ・メタリカ（金属について）』に描かれた水車吹子。『デ・レ・メタリカ』は全12巻からなり、鉱山労働者の心構えから始まり、鉱脈の見つけ方、鉱業機械の技術、選鉱、製鉄、冶金、鑄造等、当時の知識、技術、理論を集大成したものであった。資料／『デ・レ・メタリカ』



▲江戸時代の天保年間（1830～1843年）に薩摩藩が砂鉄精錬に用いていた水車吹子の構造図。水車の回転につれて坊主木が180度近く回転する。資料／『鉄の文明史』

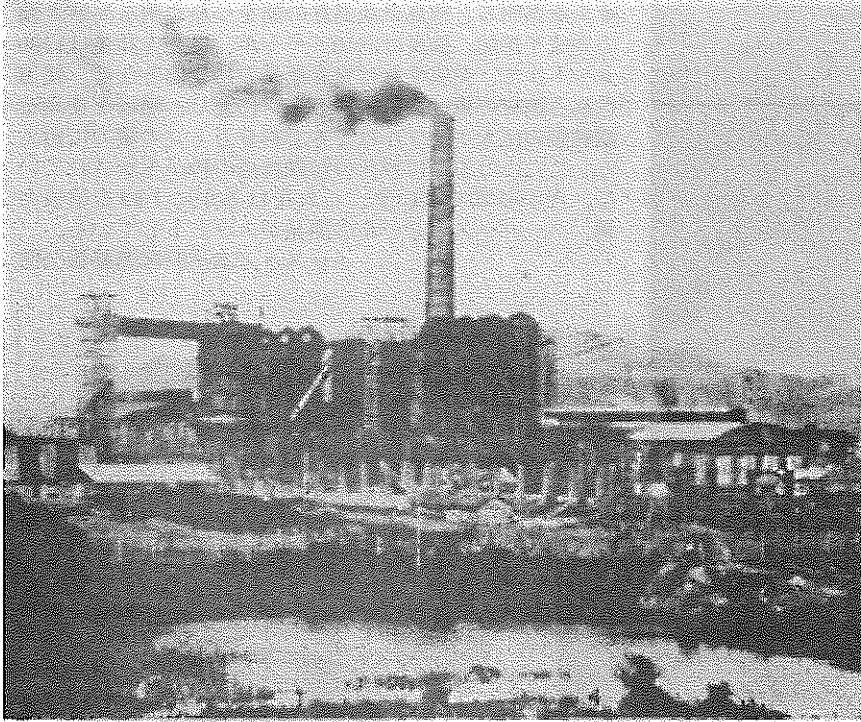


▲中国地方で用いられていた水車吹子の模型。天秤吹子から水車吹子への切り替えは明治時代に本格化した。資料／和鋼博物館



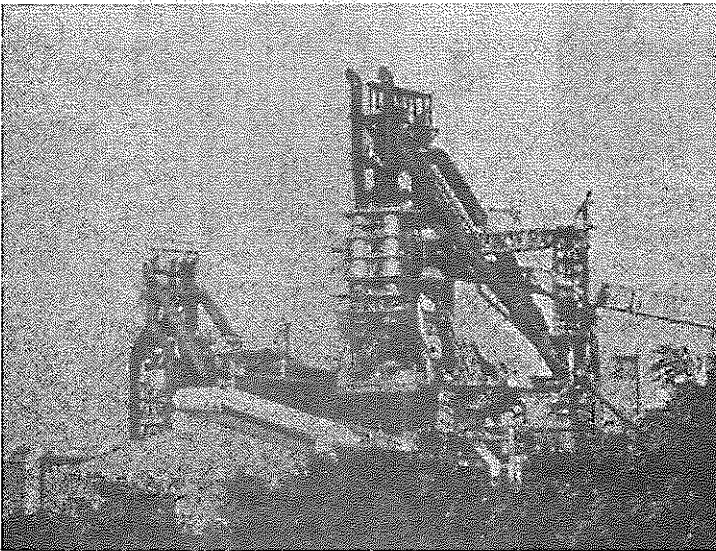
▲江戸末期から明治にかけて奥羽地方（岩手県）で使われていた水車吹子を、古老の記憶をもとに再現した模型。左の水車が回転すると、水車軸に接続した歯板が動き、ピストンを左右に運動させて吹子（吹差吹子）を動かす。水車の回転運動をピストンの横運動に変換する点に工夫がある。写真／『鉄の社会史』

●高炉の発達



◀明治政府は激増する鉄鋼需要に応えるため、国内の製鉄事業の拡大を強力に推進した。これは明治30年に福岡県八幡村に完成した八幡製鉄所の1号炉。日産能力は160トンであった。

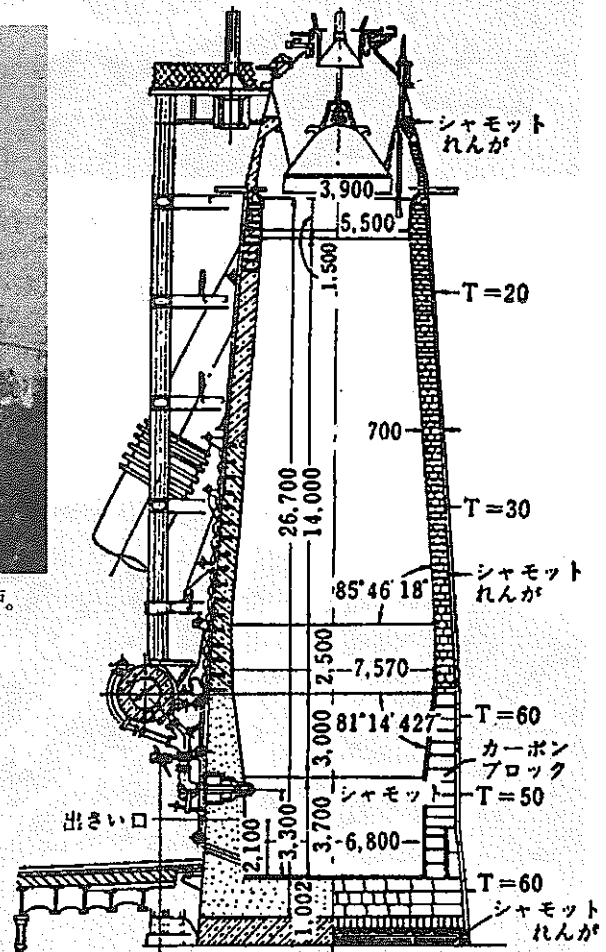
写真/『鉄の文明史』



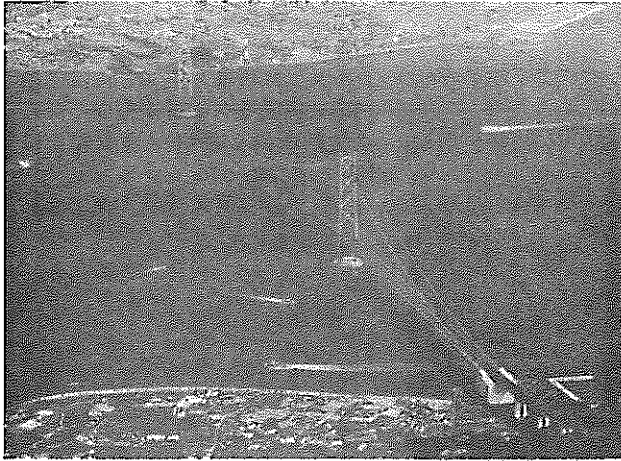
▲現在世界最大規模の高炉である新日本製鉄大分製鉄所の2号炉。

▶八幡製鉄所が最初に動かした高炉の構造図。円筒形の炉の上部から原料の鉄鉱石と媒溶剤の石灰岩、それに燃料のコークスを投入し、下から熱風を送り込む。炉内の温度は1300度Cくらいになり、鉄鉱石が落下する間に鉄が融け出して下にたまる。これを出さい口から取り出す。こうして作られる鉄は、コークスと接触するため大量の炭素を含む銑鉄であり、鋳物には使えるが鍛造には使えない。鍛造に用いるには、融けたままの銑鉄を転炉に入れて炭素分を下げ、鋼にする必要がある。

資料/『金属精錬Ⅰ』実教出版

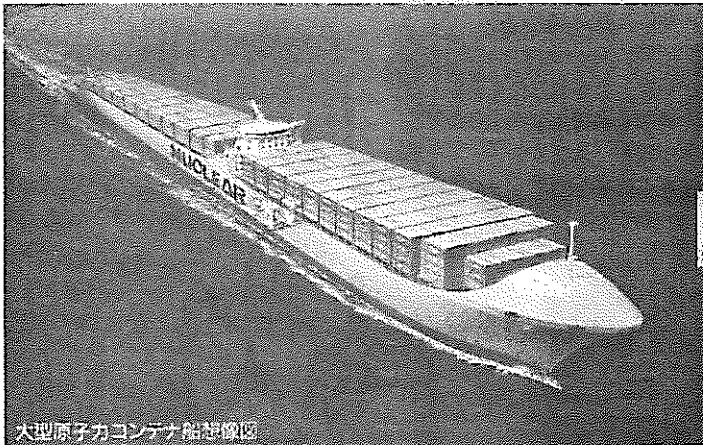


●鉄の未来



◀兵庫県明石と徳島県淡路島の間をつなぐ明石海峡大橋の完成予想図。橋長は3910メートル、中央支間長は1990メートルで、完成すれば世界最長の吊り橋となる。使用される鋼材の量は合計約20万トンに達し、橋桁を支える鋼鉄製の巨大ケーブルは1本で約6万トンの張力に耐える。ここにはまさに現代の製鉄技術の粋が生かされている。だが日本ではいま、これをはるかに上回る超強力鋼、スーパースティールの開発がスタートしている。

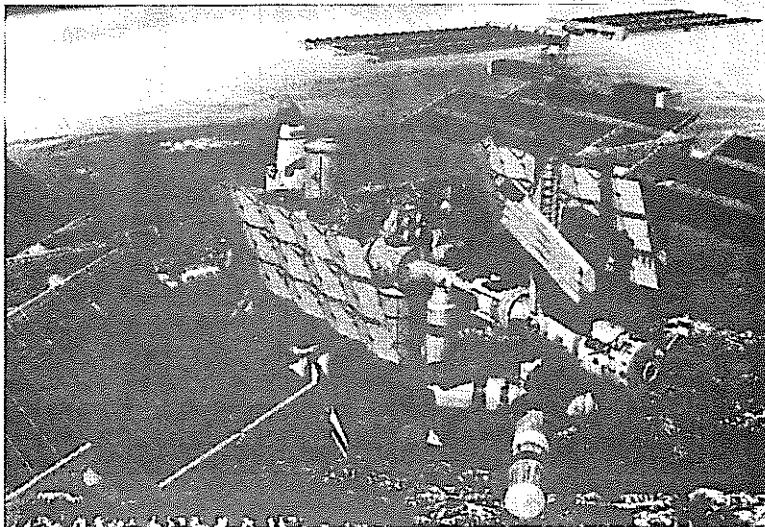
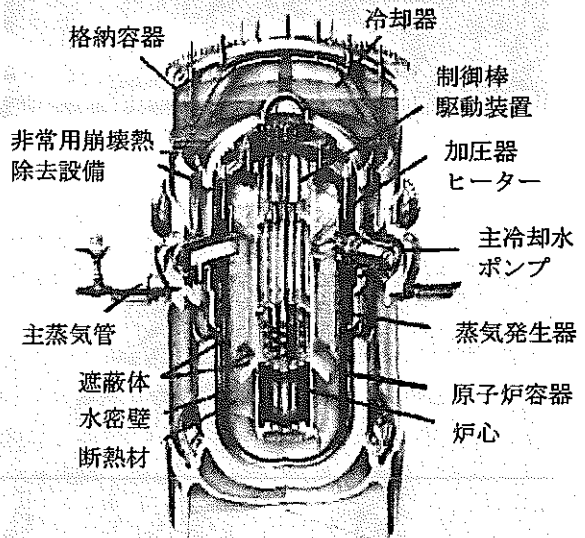
イラスト/本州四国連絡橋公団



大型原子力コンテナ船想像図

▲▶船舶、自動車、飛行機、電車——現代の輸送機関の材料として鉄は欠かすことができない存在である。未来の鉄には強度のみならず、耐久性、耐熱性、耐腐食性、軽量化など、多くの付加価値が求められる。左は排気ガスによる環境汚染を引き起こさない未来の大型原子力コンテナ船の想像図、右はこれに搭載される船舶用原子炉の概念図。高熱を発する原子炉には高耐熱性の鉄鋼を使用する。

資料/船の科学館、日本原子力研究所



◀アメリカ、ヨーロッパ、カナダ、日本、そして、ロシアの国際協力で建造が予定されている宇宙ステーションの想像図。宇宙技術のあらゆる面で、鉄は主たる構造材料として用いられる。

資料/NASA

生産性と輸送力を飛躍させた動力源 産業革命を牽引した「蒸気機関」

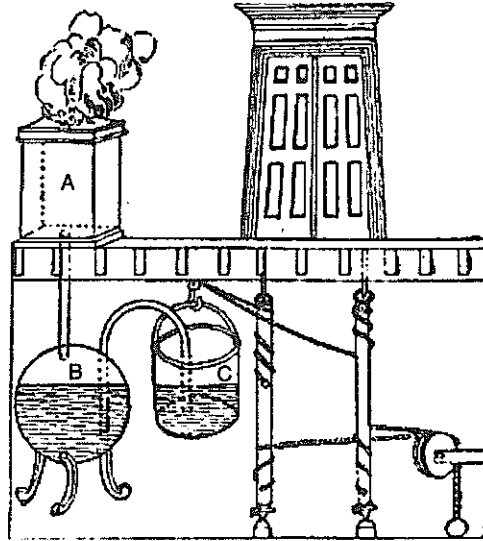
圧力鍋から 蒸気機関へ

ある日、イギリスのジェームズ・ワットが湯を沸かしているときに、やかんのふたが蒸気でもち上がるのを見て蒸気機関の原理を思いついた——これは蒸気機関の発明についての有名なエピソードである。しかし実際には、ワットは蒸気機関の発明史の中の重要な1ページを占めるにすぎない。

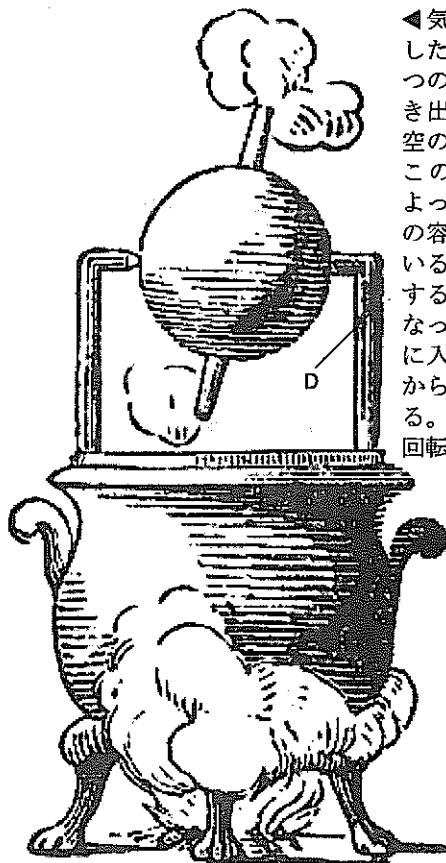
蒸気機関のもっとも基本的なアイデア、すなわち気体の膨脹と収縮を物体を動かすためのエネルギー源として使うという考え方は、紀元1世紀のアレクサンドリアの自然科学者ヘロンにさかのぼる。彼は、蒸気の圧力を用いて壺を回転させたり祭壇の扉を開閉する仕組みを考案した。だがこれは一種の遊びの域を出ず、こうした仕組みが産業技術として歴史の表舞台に登場するのは、それから1500年以上も後のことであった。

17世紀のフランスのデニス・パパンは、気体の体積と圧力の法則（ボイルの法則）で知られるイギリスのロバート・ボイルと共同で研究しているとき、「パパンの鍋」と呼ばれるいまで言う圧力鍋を発明した。密封した容器で湯を沸かすと、その中で発生する蒸気のために容器内の圧力が高まり、その結果、水の沸点が上がる（高山で水の沸点が下がるのと逆の現象）。パパンの鍋は、この蒸気の性質を利用して食べものを短時間でやわらかく煮るものであった。

パパンはこの発明に代表されるように実用的なものに興味をもっていたらしく、1680年頃から火薬の爆発力や蒸気の圧力を用いる揚水装置の開発を試みた。当時のヨーロッパは産業革命が本格的に始まったところだった。農業に代わって、紡績、ガラス、鉄冶金などの工業がさかんになり、その燃料として薪や木炭の代わりに石炭が利用されるようになった。結果として石炭の需要が急激に高まったものの、その需要に応えるには2つの



▲ヘロンが考案した扉の開閉装置。祭壇 (A) に火をともしると内部の空洞の空気が膨脹し、下の球 (B) 内の水が追い出され、隣のバケツ (C) に入る。その重みでバケツが下がると扉が開く。
資料/Mansell



◀気体の圧力を利用したヘロンのもう1つの発明。上下に吹き出し口のついた中空の球を用意する。この球は管 (D) によって水の入った下の容器とつながっている。この容器を熱すると、水が蒸気になって管を通して球に入り、吹き出し口から勢いよく噴出する。その反動で球が回転する。

資料/Radio Times Hulton Picture Library

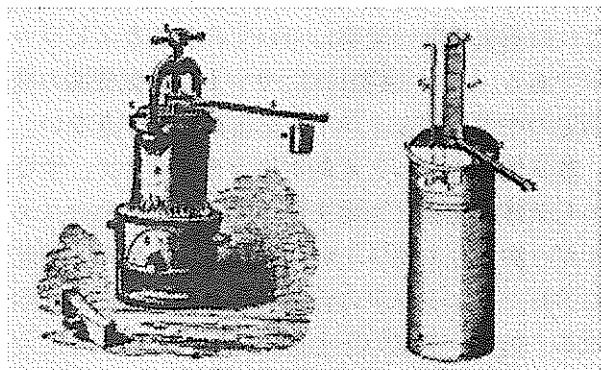
問題を乗り越えなくてはならなかった。1つは石炭輸送力の増強、もう1つは採掘の際に炭鉱の底にたまる水の除去であった。後者については人力や動物の力を利用した排水では限界がある上、経済性も低かった。そのため、機械的な排水装置が求められていたのである。

はじめパパンは火薬によってピストンを動かそうと考えたが、うまくいかなかった。彼は次に、その性質を熟知している蒸気によってピストンを動かすことを試みた。金属製のシリンダーとピストンを用意し、シリンダーの中に少量の水を入れてピストンをシリンダーの底近くまで下げる。そして、シリンダーを底から熱すると蒸気が発生し、その圧力が勢いよくピストンを押し上げる。次にシリンダーを冷却すれば、蒸気が凝縮して水に戻り、シリンダー内の圧力が低下してピストンは下がる。これは「パパンの大気圧機関」と呼ばれ、1690年に発表されたが、実用化には至らなかった。

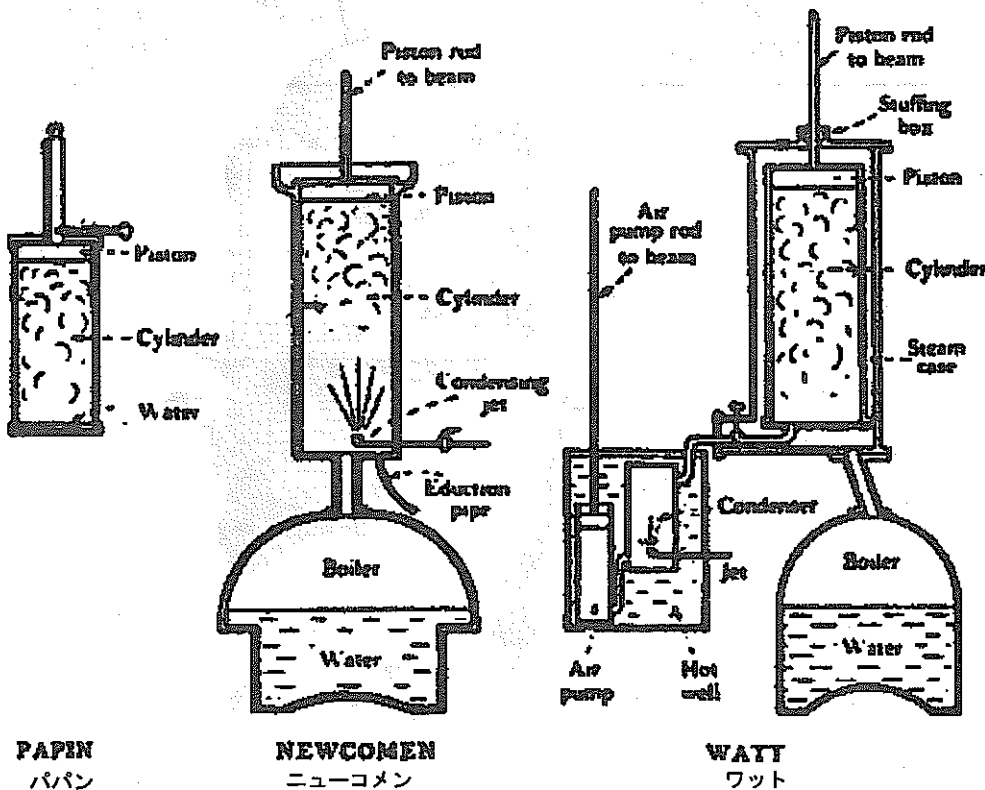
次いでこの課題に取り組んだのは、2人のイギリス人トーマス・セーヴァリとトーマス・ニューコメンであった。セーヴァリの揚水機関はピストン式ではなく、サイフォンの原理（水面を押す気圧が水中に入れた細いパイプの水を押し上げる）



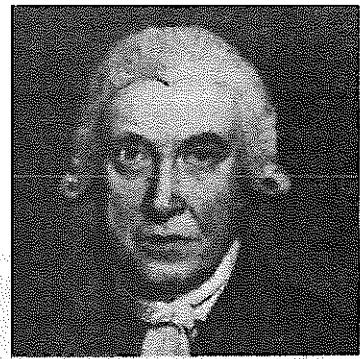
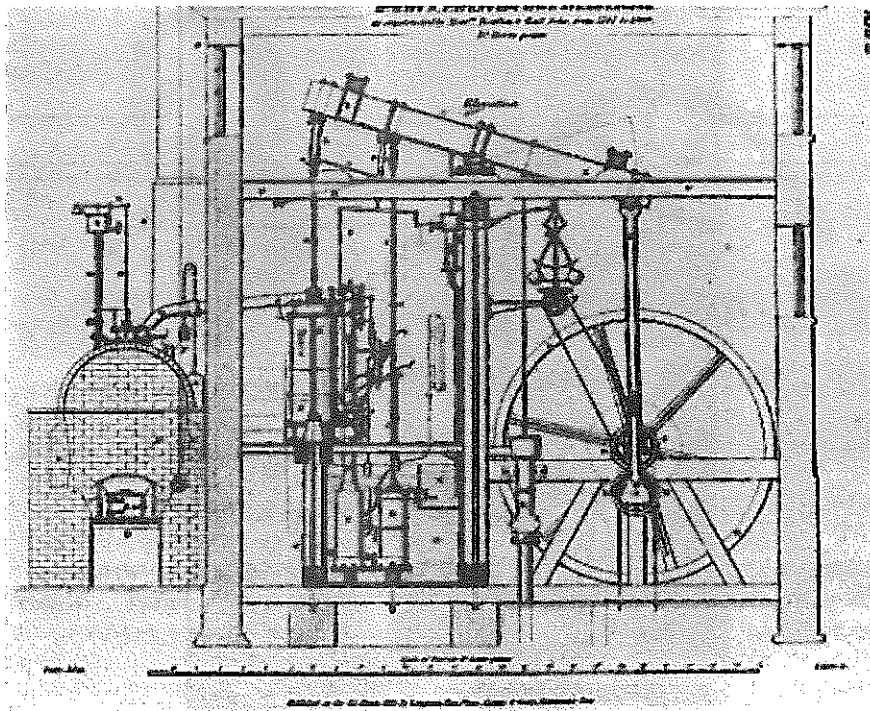
◀フランスのデニス・パパンは、蒸気の圧力によってピストンが上下する「パパンの大気圧機関」を発明した。



▲左は圧力鍋の前身「パパンの鍋」。蒸気圧で水の沸点が上がって内部が高温になり、短時間でものを柔らかく煮ることができた。右は「パパンの大気圧機関」。



◀パパン、ニューコメン、そしてワットの蒸気機関。パパンの装置にボイラーがついたものがニューコメンの機関であり、それに復水器を合体させたものがワットの機関である。



▲イギリスの技術者ジェームズ・ワット。M・ボルトンという実業家の援助を受けてニューコメン機関の改良を重ね、1782年に回転式の蒸気機関を完成させた。写真/Mansell

▲ワットの発明した回転式の蒸気機関。それまで蒸気機関は揚水装置の動力源としてしか利用されていなかったが、ワットの発明により汎用型の動力源となり、産業革命の原動力となった。

資料/The Houghton Library, Harvard University

にもとづいたものであり、蒸気の膨張・収縮によって水を吸い上げる力を強力にした。これははじめて実際に利用された揚水装置でもあった。だが、当時の炭鉱の深さが平均的には100メートルに達していたのに対し、この揚水装置はわずか15メートルの深さまでしか利用できなかった。

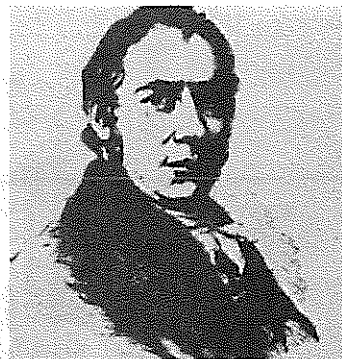
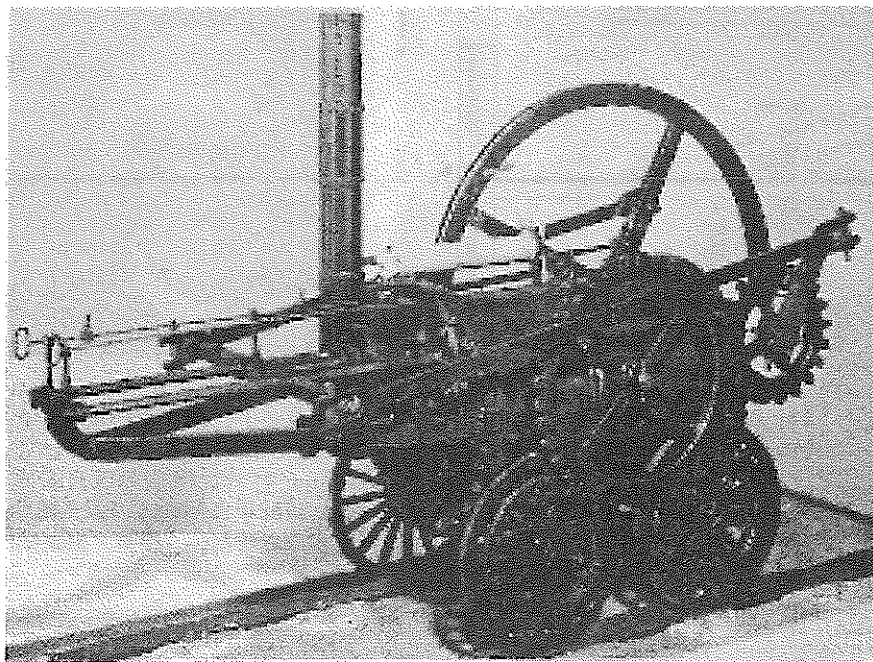
これに対してピストン方式を採用したニューコメンの揚水装置（Xページ図参照）は十分に実用的であった。1705年、彼は、パパンの大気圧機関に蒸気を作るボイラーを加えるという改良をほどこした。ボイラーで作った蒸気をシリンダーに入れてピストンを押し上げ、次にシリンダーを冷却してピストンを引き下げる。ピストンには中央を支点とするシーソー型のはりが接続されており、これがピストンの上下動に合わせて揚水ポンプを上下に動かす。ニューコメンの揚水装置は1712年に実際に鉱山に設置され、稼働を開始した。

しかし、この装置にも問題があった。石炭の燃焼によって発生する熱量のわずか1パーセントしか利用できず、きわめて効率が悪いという点である。じつはニューコメンの蒸気機関は、ピストン

の1往復ごとにシリンダーを熱したり冷やしたりしていた。これでは無駄が多いのも当然である。ここでようやくワットが登場する。

18世紀の半ば、ジェームズ・ワットはグラスゴー大学で器具職人として働いていた。あるとき彼はニューコメン機関の修理を頼まれ、その仕組みに興味を抱いた。そして、もしシリンダー以外の場所で蒸気を冷やせば、この機関の効率がかなり向上することに気づいた。そこで彼は、ニューコメン機関に蒸気を凝縮して水に戻すための装置、復水器を取り付けようと考えた。こうすればシリンダーはつねに熱せられたままなので熱効率がよい上、ピストンの上下動もずっと速くなる。

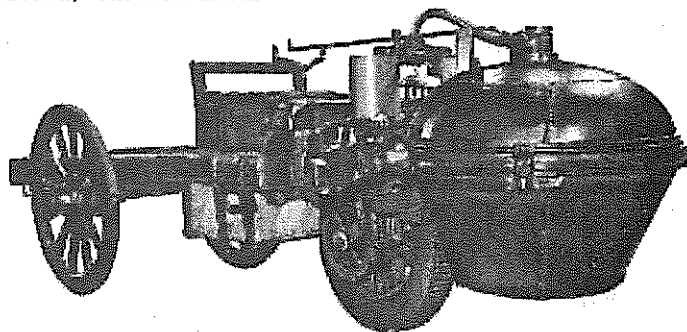
ワットの機関では、シリンダーは開閉式の弁のついたボイラーと復水器に接続している。復水器内の蒸気が凝縮してシリンダー内の蒸気圧が低下すると、ピストンが下がる。すると、ボイラーの弁が開いて蒸気がシリンダー内に導入され、ピストンがふたたび押し上げられる。ニューコメン機関とワット機関のもう1つの大きな違いは、前者では蒸気圧はピストンの下面を押すだけであった



▲イギリスのリチャード・トレビシック。効率の高い小型の高圧蒸気機関を完成させ、蒸気機関車の製作にも取り組んだ。後年、仕事で南米のペルーに行った際、独立戦争に巻き込まれて10年間その地にとどめられた。帰国後は極度に貧窮し、不遇のうちに生涯を終えたという。

▲トレビシックが作った蒸気機関車。自ら開発した高圧蒸気機関を動力源としていた。資料/J. T. VAN. Riemsdijk and Kenneth Brown, The Pictorial History of Steam Power

▶1769年にフランスのキュニョーが製作した最初の蒸気自動車（3輪）の模型。この車はまた、パリの兵器廠の壁に衝突するという世界初の自動車事故を起こすことになった。



が、後者では蒸気圧をピストンの上面にも与え、より大きな圧力差を得るようにした点である。1769年、ワットはこの装置で特許を取得した。

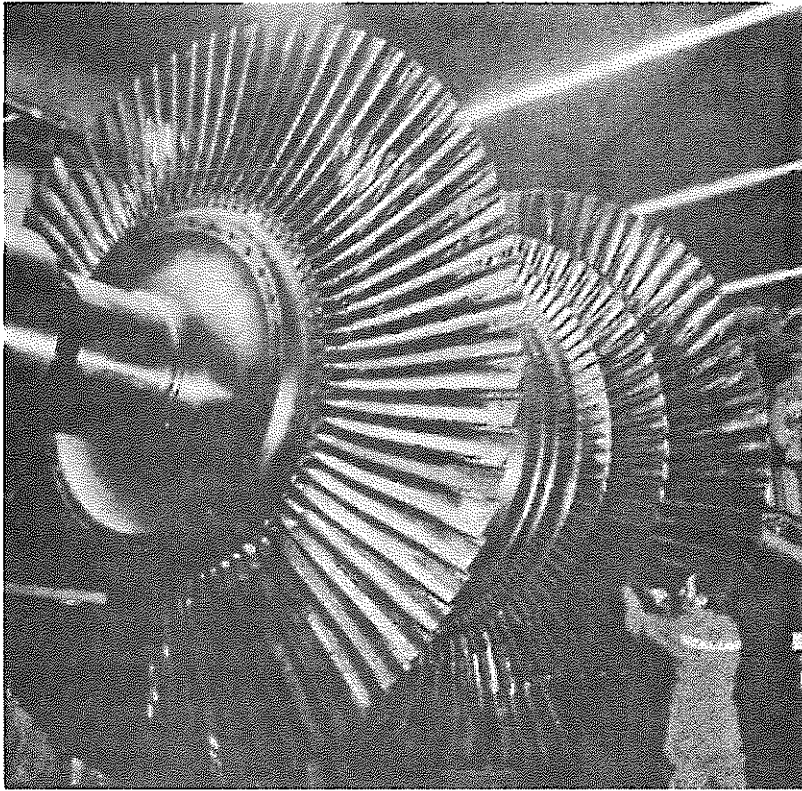
次いでワットは、この装置に改良を加え、シリンダー上部にも蒸気弁をつけ、蒸気圧をピストンの上と下ともに変化させることによってピストンの動きをなめらかにした。さらに彼は、ピストンの上下運動を回転運動に変えようと考えた。当時すでにそのためのクランクが発明されていたが、その特許は他人がもっていて利用できなかった。そこでワットは、太陽-惑星ギヤと呼ばれる歯車を使った回転運動装置を作り出した（前ページ図）。こうして生まれたワットの回転式蒸気機関の運動はなめらかで効率もよく、1時間あたりの石炭消費量はニューコメン機関の約4分の1に抑えられた。ワット機関は単なる揚水装置用の動力

ではなく、炭鉱の巻き上げ機や紡織機などの動力としても使用されるようになり、汎用蒸気機関としての第1歩を踏み出すことになったのである。

驚異的なスピードの蒸気機関車の登場

18世紀末から19世紀中頃までに、人力や動物の力、水力などに代わって、蒸気機関を動力とするさまざまな製造工場が稼働しはじめた。紡績工場や石鹼工場、製紙工場、製粉工場などである。同じ頃、作業工程の分業化やオートメーション化による生産の効率化や大量生産も始まった。工場の機械化が進んだため、精巧な機械部品を作る工作機械も登場した。

さらに、産業の発達に不可欠な輸送機関も蒸気



◀蒸気機関は過去のものとなったが、蒸気圧は現代の発電所でいまでも利用されている。写真は蒸気を羽根に当てて回転させる蒸気タービン。 写真/ASEA

機関の登場によって一気に進歩し、材料や燃料の輸送や消費者への供給がスムーズに行われるようになっていった。

蒸気を動力とした最初の輸送機関は、1769年にフランスの技術者N・J・キュニョーの作った蒸気自動車であった。これは時速が最高4キロメートル程度で、歩いた方が速いほどであった。蒸気機関による輸送機関の開発が本格化したのは、19世紀初頭にイギリスのリチャード・トレビシックが高圧蒸気機関を発明してからである。

ワットの蒸気機関は蒸気圧がせいぜい1気圧前後にしかならず、ピストンを動かす力はむしろ蒸気が冷やされたときの減圧による吸引力によって生み出されていた。そのため大きな動力を得るにはよほど巨大な装置を作るしかなかった。そこで、はじめワットのもとで働いていたトレビシックは、ピストンを動かす蒸気をもっと高圧にしてその圧力を動力にしたいと考え、ワットに相談した。だがワットは、もろい鑄鉄製のシリンダーの内部を高圧にするのは危険すぎると彼に忠告し、「そのような機関を作れば首を吊ることになる」とまで言ったという。だがトレビシックは、こうした意見をものともせず研究を続けた。そして

1802年にとうとう、ピストン内の蒸気が10気圧にまで上昇し、小型でも大出力を得ることのできる高圧蒸気機関を作り出した。彼はさらに、これを使って蒸気機関車の製作にも取り組んだ。

1804年、トレビシックが開発した世界初のレール式の蒸気機関車は、南ウェールズの鉱山鉄道（トロッコ用）で試験運転を行った。機関車の後ろには5両の貨車が連結され、貨車には10トンの鉄と70人の人間が乗った。だが、トレビシックの蒸気機関車はこの重さをもものともせず、15キロメートルの距離を時速8キロメートルで無事往復したのであった。

トレビシックの蒸気機関車は十分な馬力は得られたものの、レールが鑄鉄製であったためにその重さを十分に支えることができなかった。結局、蒸気機関車を完成させたのは、同じイギリス人技術者ジョージ・スティーブンソンであった。

1825年、彼の蒸気機関車「ロコモーション号」は、ストックトン―ダーリントン間に敷設された世界最初の旅客用の鉄道の上を38両の客車を引いて走った。次いで彼が作ったロケット号は蒸気機関車の競争で優勝し、リバプールとマンチェスターの間を結ぶ鉄道で利用されることになった。

ロケット号は客車を引きながら時速45キロメートルという当時としては驚異的なスピードで走り、リバプールとマンチェスター間を約1時間で結ぶことになった。

蒸気機関はその他にも蒸気船や乗り合い蒸気自動車のエンジンとして利用され、輸送や交通のスピードや効率を大きく向上させることになった。ちなみに、蒸気機関車の生みの親ともいえるトレビシックの2人の孫は明治維新後に日本を訪れ、明治政府の鉄道敷設に力を尽くした。

日本を開国させた 蒸気船

ヨーロッパの産業革命は、当時鎖国していた遠い日本にも影響を与えずにおこななかった。薩摩藩のように制度の刷新や技術的な近代化を進めていた藩ではオランダから技術書をはじめとするさまざまな書物を輸入し、その記述をもとにいろいろな機械装置の製作を試みた。また1842年、隣国の中国がアヘン戦争でイギリスに敗れたというニュースが伝えられると、西洋の脅威を感じる人も少なくなかった。しかし、日本のその後の近代化への道を決定づけたのは、1853年にアメリカのペリー提督の率いる黒船が来航したことであろう。

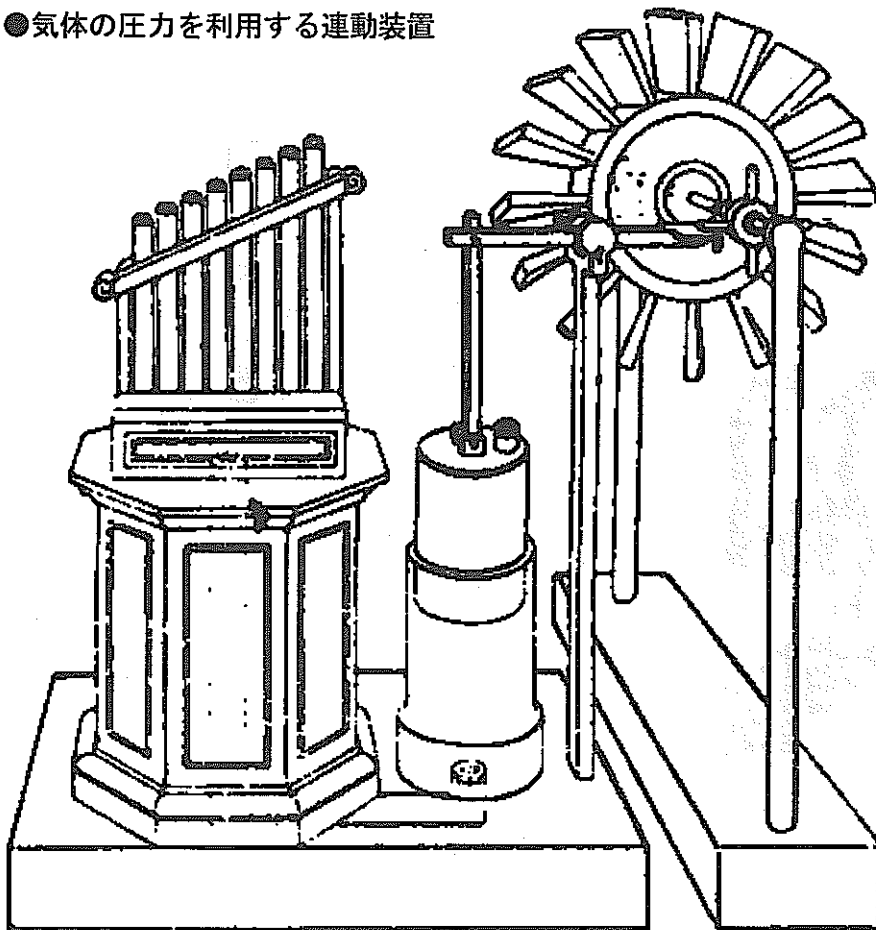
黒船は船体の外側に巨大な“水車”をもつ外輪船であり、蒸気機関の動力でこの外輪を動かした。蒸気船は1807年にアメリカのロバート・フルトンがはじめて実用化し、その30年後にはイギリスの蒸気船がはじめて蒸気動力のみの大西洋横断に成功している。しかし1850年代になっても蒸気機関の信頼性はそれほど高くなくスピードも出なかったため、黒船は3本のマストをもち、帆走を併用していた。とはいえ、当時の知識人たちが西洋に比べ日本の技術力や軍事力の遅れを痛感するには十分な衝撃力があつた。

黒船来航の結果、日本はやむなく開国に至り、幕府および各藩は、ただちに西洋の近代技術の導入を図ることになった。新たな学問所が開かれ、製鉄所や造船所が作られた。イギリスやフランスに留学生が派遣され、逆に海外から技術者が招か

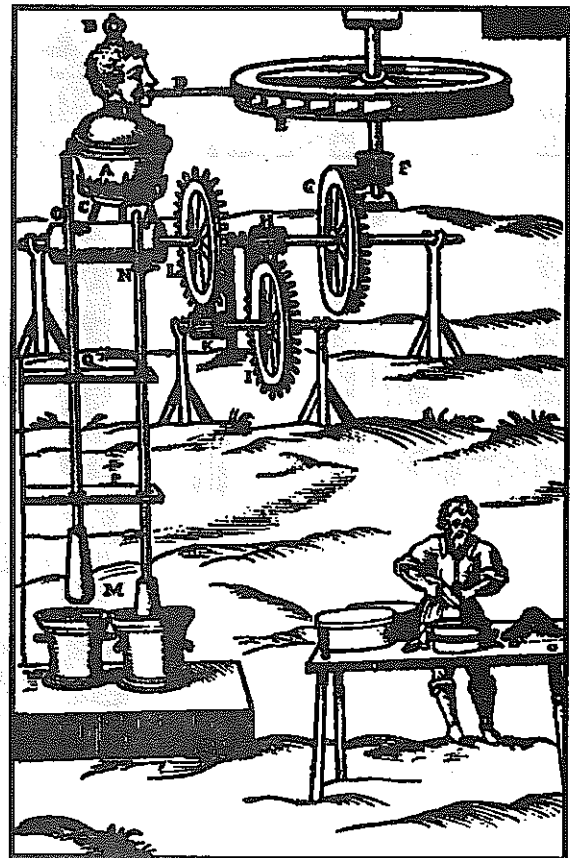
れた。オランダからは1855年に蒸気船（観光丸）が輸入された。また同じ年に薩摩藩は、箕作院甫が1848年に翻訳した『水蒸船説略』をもとに蒸気船を建造し、その試運転に成功した。そして、黒船来航から13年目に当たる1866年には、幕府の石川島造船所で、設計から製作まですべて日本人の手になる初の本格的なスクリュー式蒸気船が完成した。自分たちで西洋的な近代技術を開発したわけではなかったものの、当時の日本に潜在的な技術力がなくてはこれほどの早さで近代化を進めることはできなかったであろう。

17～19世紀の西洋を大きく変貌させ、東洋に脅威を与えることになった産業革命。それは、燃料としての石炭、材料としての鉄鋼、そして動力としての蒸気機関という3つの要素に支えられていた。これらは互いを不可欠の要素として要求し、技術力のさらなる向上を促すことになった。いまでは産業用や輸送用の動力は、電力や内燃機関が中心となっている（もともと蒸気を利用するという意味では、火力発電所は現在も蒸気圧によってタービンを回転させている）。だが、蒸気機関の発達が産業革命を支え、今日の技術社会の礎を築いたことには疑問の余地がない。将来さらに新たな材料と新たな燃料、それに新たな動力という3要素がそろって登場したとき、われわれはふたたび技術革新の時代に突入するのではなかろうか。●

●気体の圧力を利用する連動装置

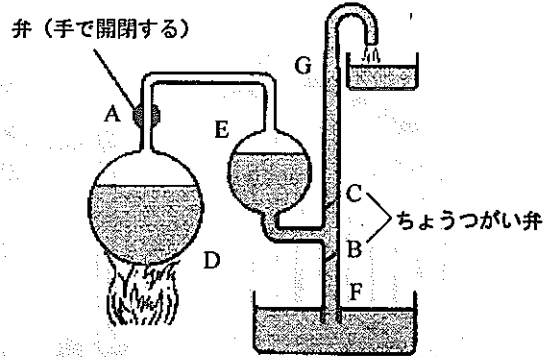
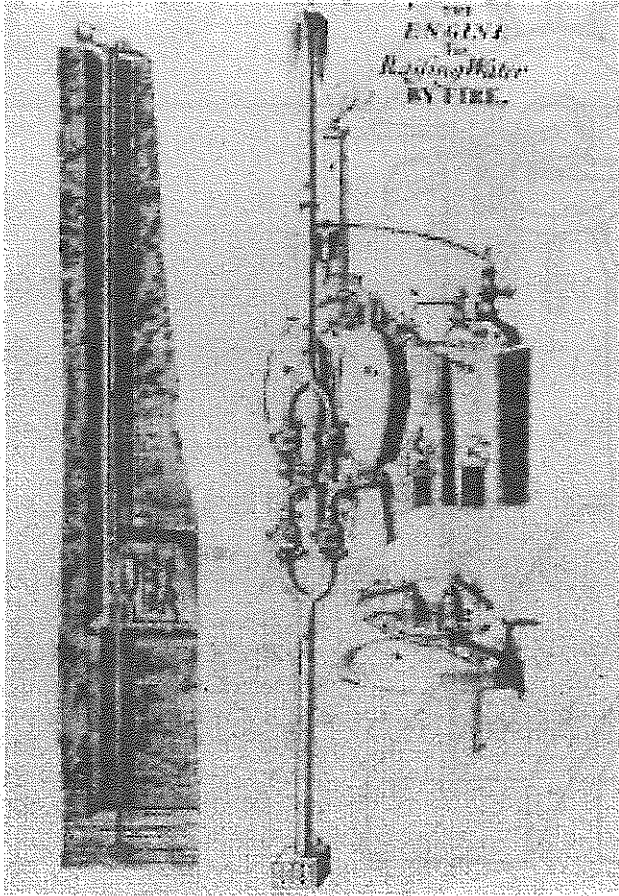


◀ヘロンが考案した空気の圧力で音を出すオルガン。右の風車が回転すると、その軸に連結している棒が上下する。この棒がピストンを上下に動かすと、シリンダーの中の空気がオルガンに送られ、パイプを鳴らす。



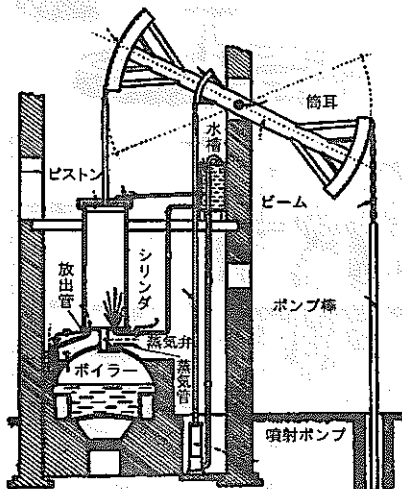
▶16世紀に考案された蒸気製粉機。蒸気を回転輪の羽根に当てると回転輪が回り、いくつかの歯車を介して製粉用のきねが上下するようになっている。これは、ヘロンのいくつかの発明にアイデアを得たといわれる。

●揚水装置から蒸気機関へ

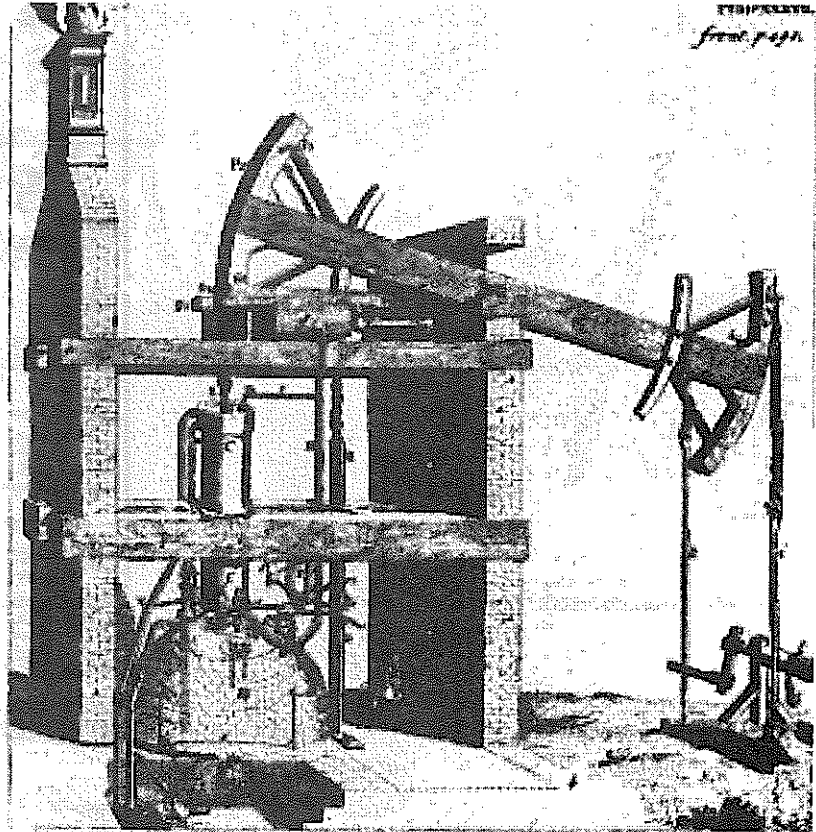


◀▲サイフォンの原理を利用したセーヴァリの揚水装置。わずか15メートルの深さまでしか利用できず、結局使用されたのは1機のみだったという。上はセーヴァリの揚水装置の原理。Dを加熱すると、発生した蒸気の圧力によってEの内部の水がパイプの上の出口まで押し出される。Eの水が排出されたらAの弁を閉じ、Eを冷却すると、Eの内部の蒸気が水になり、E内の圧力が低下する。その結果、E内の圧力とFの水面を押し大気圧との圧力差が生じ、Fの水がEに吸い上げられる。

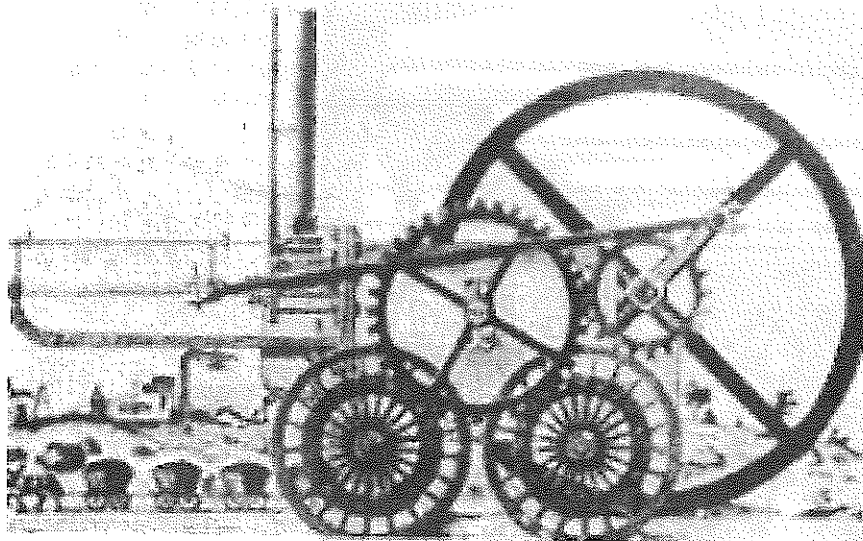
▼ニューコメンの蒸気機関。セーヴァリの揚水機関とはまったく原理が異なるが、セーヴァリが“火力を動力源とする鉱山用の揚水装置”という広い範囲の特許を取得していたため、実用化には彼の認可が必要になった。資料/John Farey, A Treatise on the Steam Engine (1827) Harvard College Library



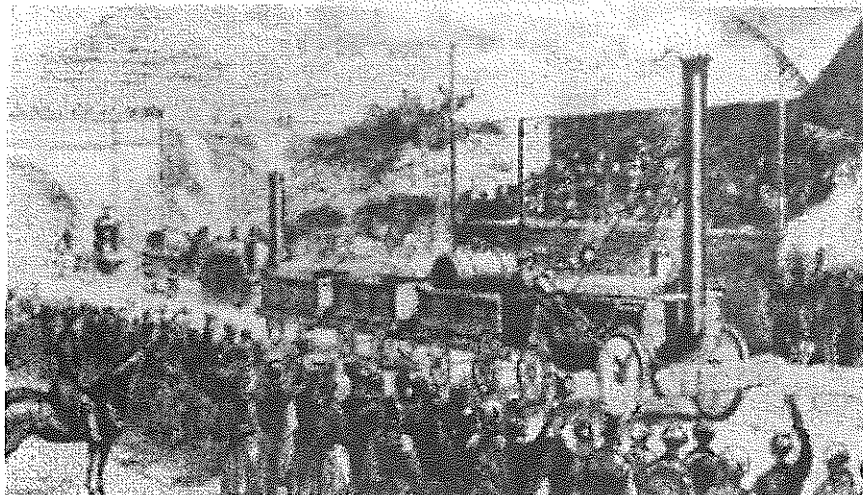
▲ニューコメンの蒸気機関の原理。ボイラーから蒸気がシリンダーに入ると、ピストンが押し上げられ、シリンダー下部の放出管から蒸気や水が排出される。ここで排気管の弁を閉じてシリンダー内部に冷却水を噴射すると、蒸気が凝縮して水に戻り、シリンダー内の圧力が低下する。その結果、ピストンが下方に引き下ろされる。



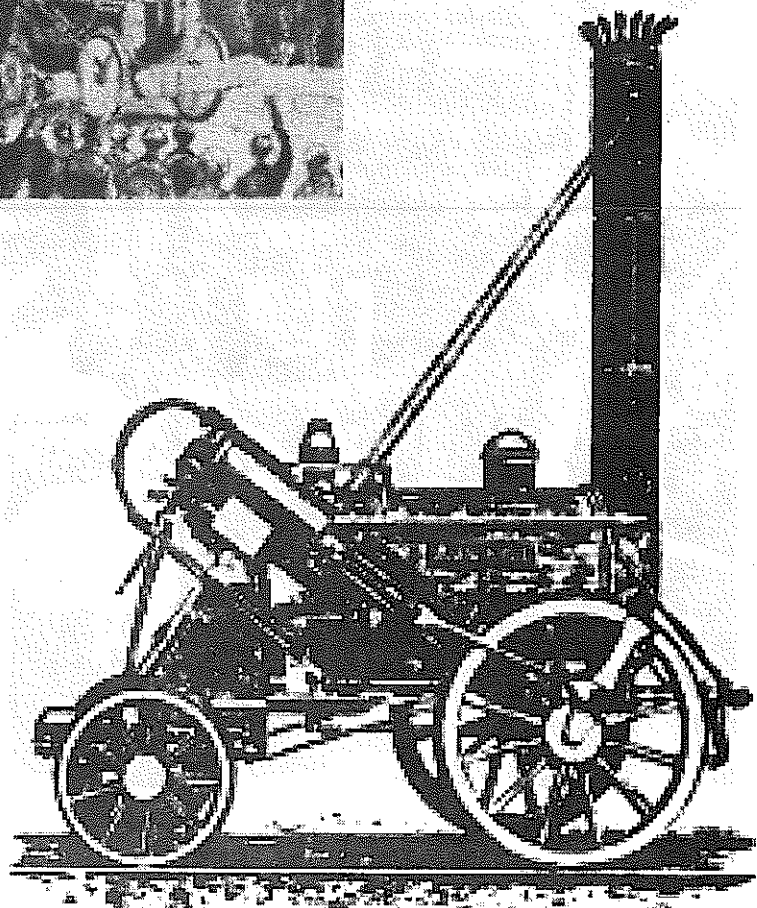
●蒸気機関車の発達



◀1804年、トレビシックは南ウェールズの製鉄所から15キロメートル離れた運河まで敷かれた鉱山鉄道で、この蒸気機関車の試運転を行った。このイラストでは、後方に石炭を乗せたトロッコが連なっている様子が見える。

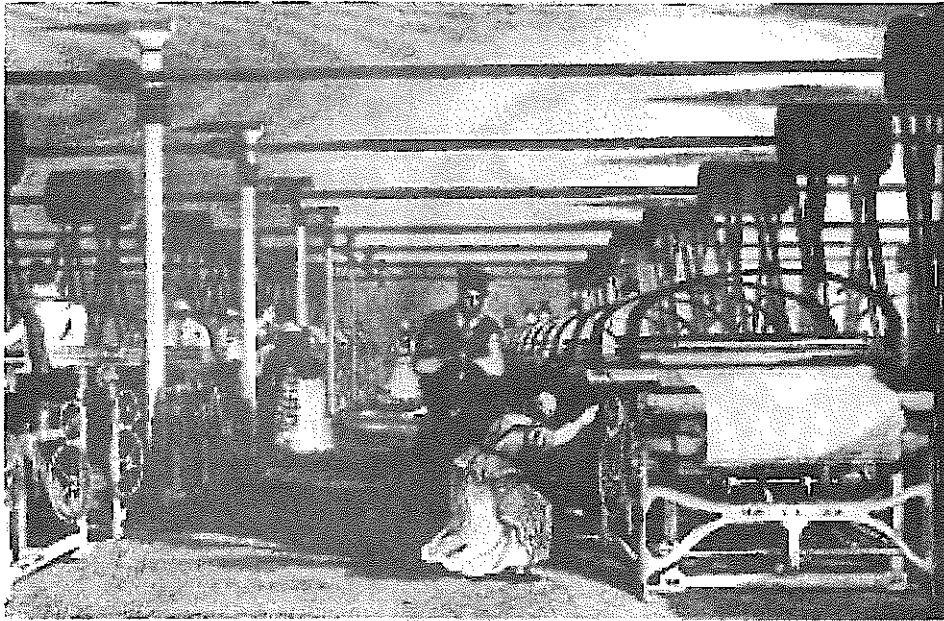


◀機関車競争に優勝し、大衆の歓声に迎えられるスティーブンスンのロケット号。

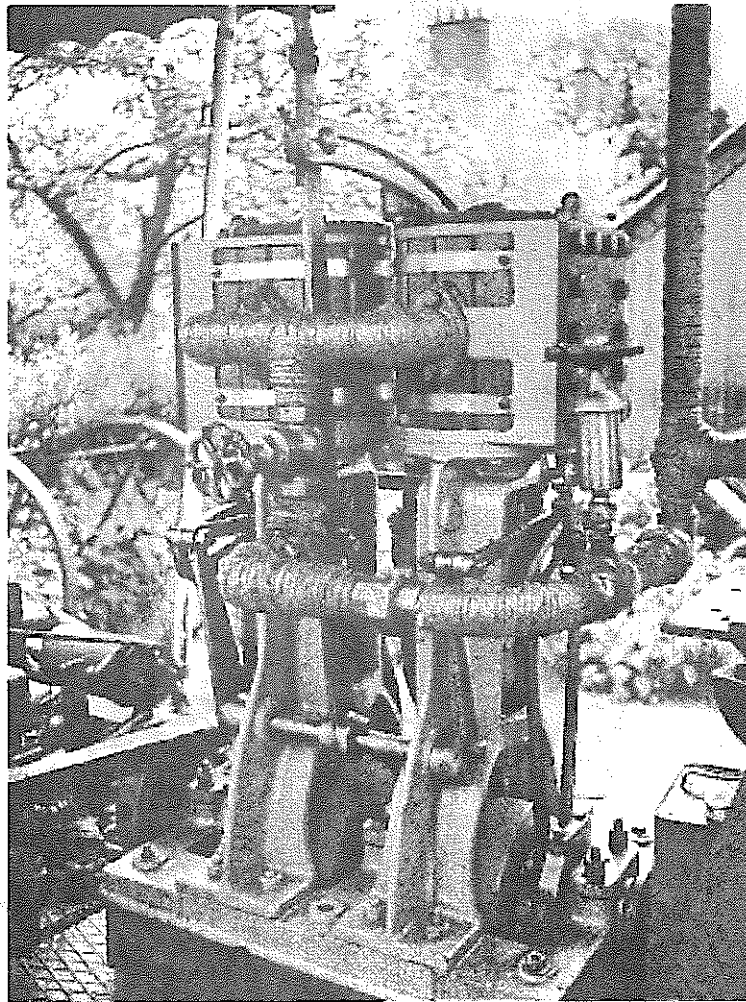


▶ジョージ・スティーブンスンの設計したロケット号は、マンチェスターリバプール間を結ぶ初の本格的な蒸気機関車となった。

●蒸気機関の利用

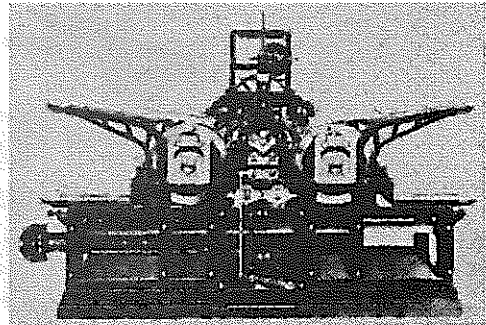


◀蒸気機関を動力とする「動力織機」を用いた大規模な紡績工場。力織機は1785年、イギリスの牧師エドムンド・カートライトが発明した綿糸を織る織機で、はじめは動力として踏み車を用いていたが、後に蒸気機関を使用するようになった。



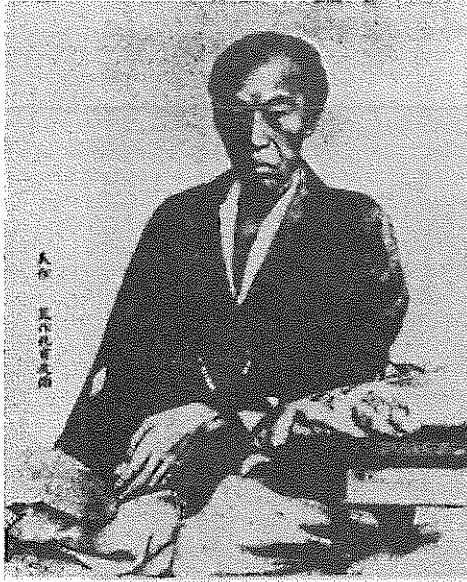
▲小型の貨物船に搭載された高圧蒸気機関。

写真/John Watney



▲蒸気機関を利用した新聞印刷機。シリンダーの上に活字が張りつけてあり、その上を通る紙の動きに合わせて回転するいわゆる輪転機。

●日本の蒸気船

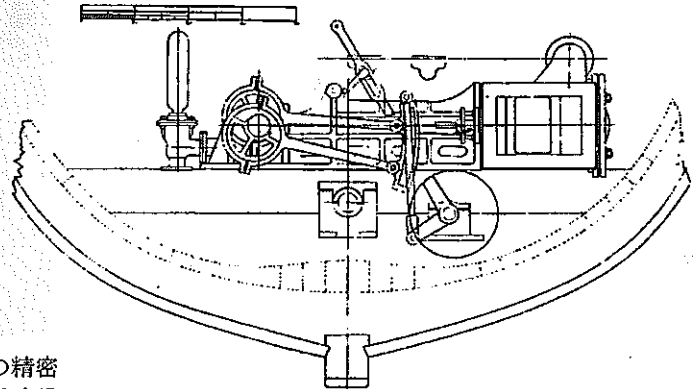


▲19世紀の蘭学者、箕作院甫。彼ははじめ西洋医学を学んで医院を開いたが、後に翻訳に専念し、医学書や技術書、兵学書、科学書など広範な分野にわたる訳述に従事した。彼が島津斉彬の求めに応じて翻訳した『水蒸船説略』は、当時の西洋の蒸気機関および蒸気船の原理と構造を詳細に説明したものであった。

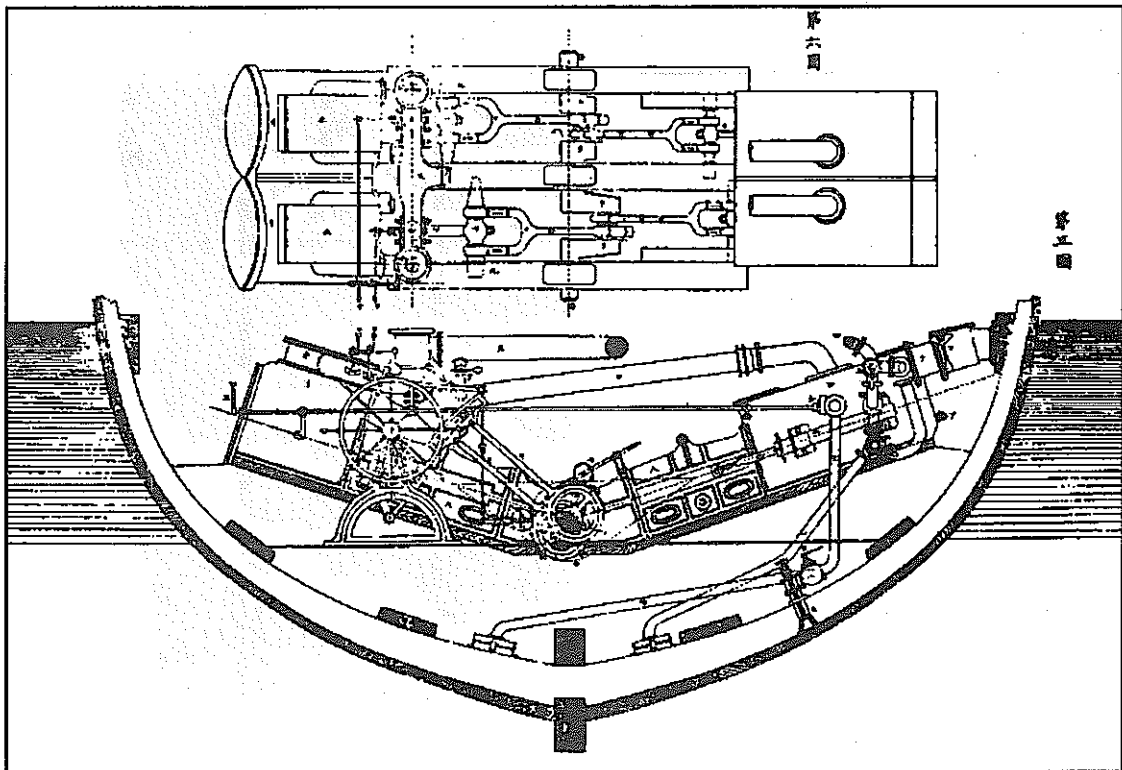
水蒸船説略
 箕作 院甫 著
 第一編 蒸機の作用の概論
 第一節 蒸機及び其作用の概論
 第一節 蒸機の作用の概論
 第一節 蒸機の作用の概論
 第一節 蒸機の作用の概論

◀オランダで1837年に刊行された技術書の翻訳『水蒸船説略』の一部。黒船来航前の1849年に訳出された。資料/ワット誕生二百年記念会『図説日本蒸気工業発産史』

▼設計から製作まですべて日本人の手になるスクリュー式の蒸気船「千代田型」の機関部。



▼1869年に訳出された『蒸気器械書』の付録の精密な図（日本人が描いたものと見られる）。原書はオランダの技術書で、1853年に刊行された。



ロケットの800年史 爆竹から花火、そして「ロケット」へ

中国文明の ロケット技術

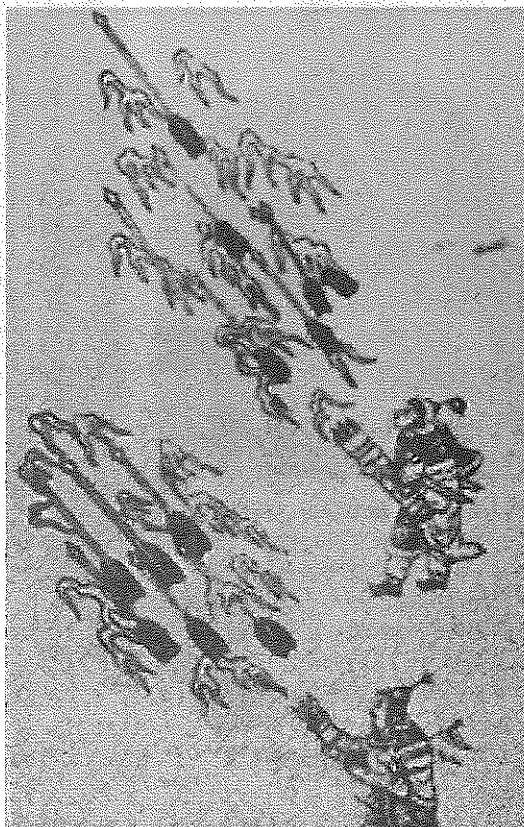
ニュートンは、17世紀に著した著書『プリンキピア』の中で、自然界における物体の運動についてはじめて科学的に、くわしくかつ正確な記述を行った。彼はそこで、運動には3つの法則があると説いた。ここで問題になるのは、そのうちの第3の法則（作用反作用の法則）である。ニュートンはこう書いている。

「何かの運動が起こるとき、そこではつねに、まったく同等でかつ反対方向に働く反作用というものが存在する。あるものが別のものを押したり引いたりすると、そのものは別のものから逆に押されたり引かれたりする。もし1頭のウマが岩に縛りつけられたロープを引っばると、岩もまたウマを引っばる。ただしその方向は逆である。このときロープはウマを岩の方向へ引っばり、同時に岩をウマの方向へと引っばるのである」

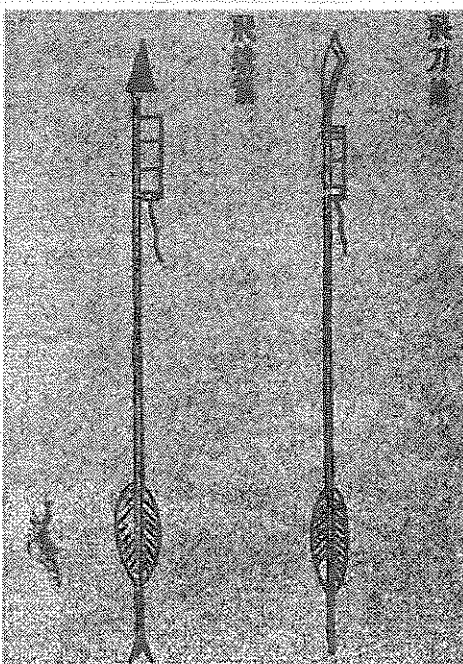
この法則を技術的に応用したもの、それがロケットである。軍事兵器としてのミサイルや人工衛星を打ち上げるロケット、それに人間や貨物を宇宙空間に運び上げるスペースシャトルなどは、すべてロケットエンジンを用いている。そしてロケットエンジンは、この法則を利用して大気圏内や宇宙空間で「推力」を生み出しているのである。

こうして見ると、ロケットの原理はニュートンによって発見され、その原理が20世紀になってようやく技術的に応用されたかのように思える。だが歴史的に見ると、ロケットはニュートンの時代より数百年も前に登場していた。そして意外にも、ロケットを生み出したのはニュートンが生きた世界である西洋文明ではなく、中国文明であった。それも、中国人はあるときロケットを「発明」したのではなく、歴史の中でいつのまにかそれを手にしていたのである。

中国には、紀元前200年頃から花火が存在した

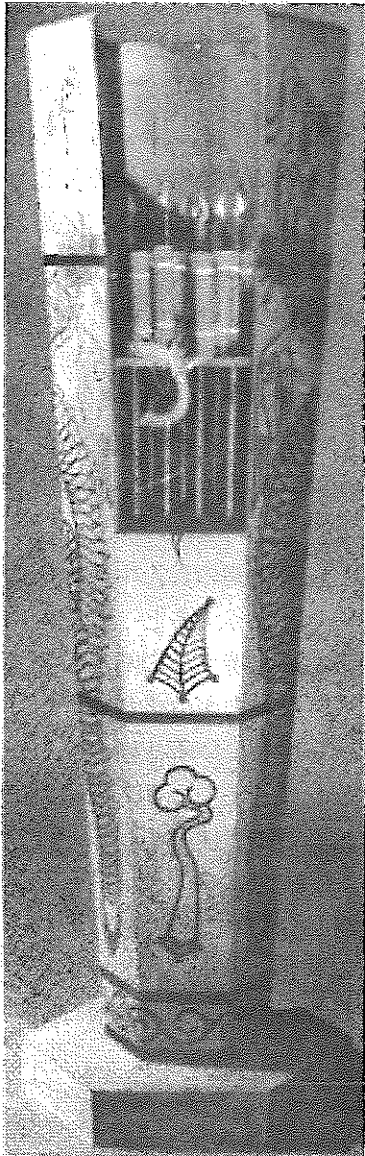


▲14世紀に用いられた携帯式の火矢発射装置。歩兵が持ち歩いて現代のバズーカ砲のように使用した。これらの火矢の射程は80メートル以上あった。



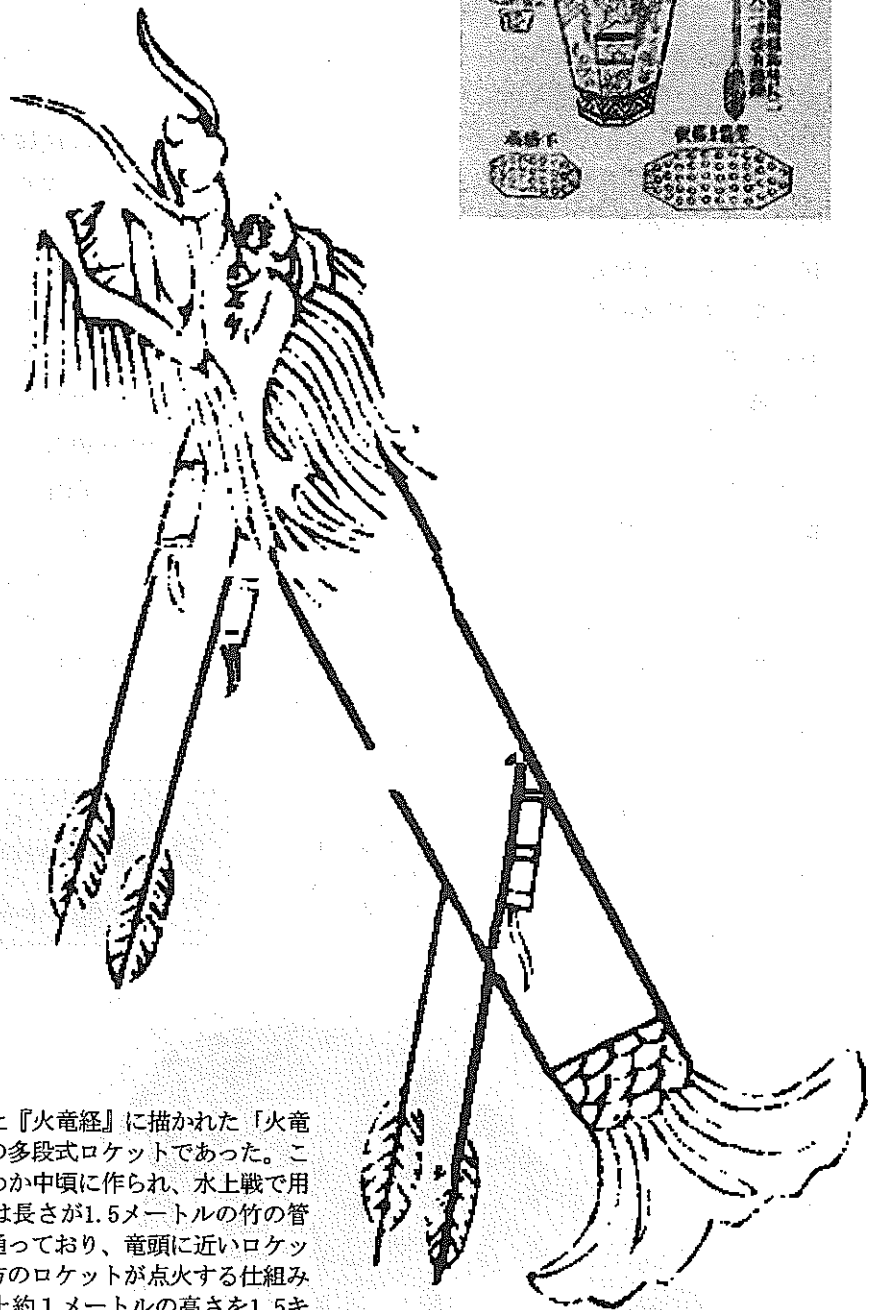
▲飛刀箭（右）と飛鎗箭。

●中国の火矢（ロケット）



▲14世紀の中国の書物に出てくる火矢発射装置「一窩蜂（蜂巢）」を復元したもの。矢じりの近くに小さなロケットが取り付けられていた。

▶17世紀の「群豹横奔箭（飛ぶ豹のごとき矢の意）」の説明図。火矢は穴の開いた仕切り板によって別々に保持され、一度に全部の矢を発射することができた。外枠は上方に向かって口径が広がり、火矢が広い範囲に散らばるようになっていた。



▶1412年に出版された『火竜経』に描かれた「火竜出水」は、世界最初の多段式ロケットであった。この装置は14世紀の初めか中頃に作られ、水上戦で用いられた。竜の胴体は長さが1.5メートルの竹の管で、内部に導火線が通っており、竜頭に近いロケットが燃え尽きると後方のロケットが点火する仕組みだった。こうして水上約1メートルの高さを1.5キロメートルほど直線的に飛び、2段目のロケットがほとんど燃えつきたときに胴体内部に仕掛けられた火矢のロケットに火がついて、それらが飛び出して敵を攻撃した。

ことが記録に残っている。竹を火に投げ入れると内部に閉じ込められている空気が熱で膨張し、ついには大きな爆発音とともに竹が破裂する。これが花火の起源「爆竹」であった。

中国人は古来、何かの催し物や祭のたびに爆竹のような爆発物を鳴らすことを好んだ。その伝統は現在まで受けつがれている。そのうち黒色火薬が登場すると、あらゆる形の爆竹が作られるようになり、それらは花火をも生み出した。花火の中には、後方から炎を噴き出しながら地表を走り回る「地老鼠（ねずみ花火）」や空中を飛ぶものまで、さまざまなものがあった。

火薬は、硝石（硝酸カリウム）の含有量が少ないと、マッチのようにはげしくは燃えるが爆発は起こさない。10世紀になると、この火薬を利用して大量の新兵器が作られるようになった。火矢である。紙で包んでロウで固めた火薬の固まりを矢の先端につけ、そこから導火線をたらす。導火線に火をつけて矢を射ると、矢は敵陣に落下してから火を噴く。西暦994年には、梓潼という町を攻撃した10万の大軍がこの火矢による火攻めの反撃に合い、町を追い払われたという記録がある。

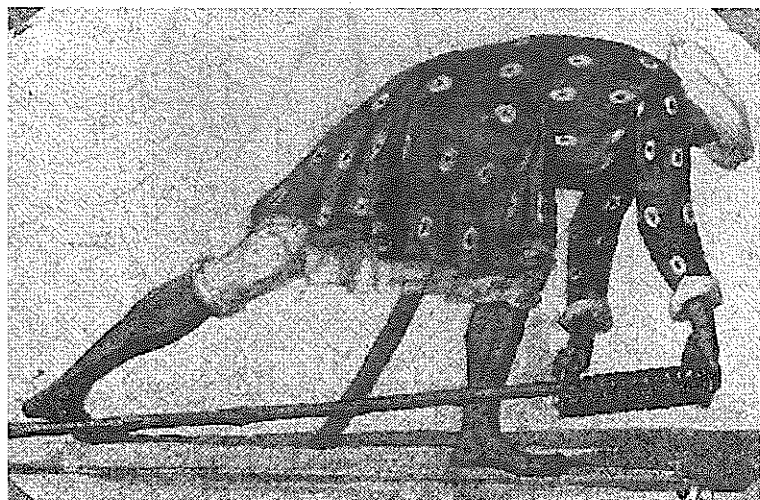
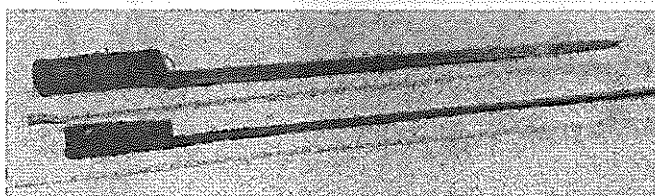
こうして中国では、火薬を用いた花火や火矢が広く用いられるようになり、その中から羽根のついた棒に地老鼠を取り付けた“自力で空を飛ぶ花

火”が現れた。それは、弓で射なくても自ら生み出す花火の推力によって空を飛ぶ、文字通りの世界最初のロケットであり、ロケット兵器であった。

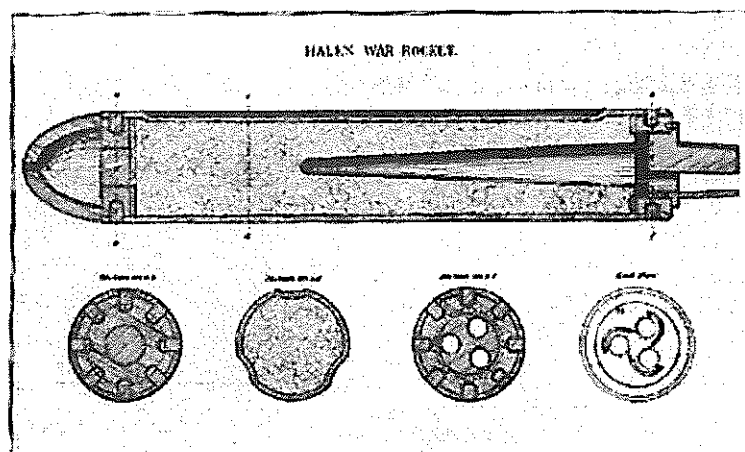
当時の記録によれば、この最初の“ロケット矢”は長さ1.3メートルほどの竹の棒を用いており、先端には長さ11センチほどの鉄か鋼の矢じりがついていた。そして注目すべきことに、後端の矢羽根の後ろに小さな鉄のおもりを固定してあった。ロケット矢が飛び出したとき、尻が軽いと噴射方向が不安定になり、すぐに頭を下げて地上に落下してしまう。そこでおもりをつけると、ロケットは後端を下に向けたまま噴射を続けることになり、火薬の燃焼が続くかぎり空中を飛行できることになる。

さらに驚くべきことに、火薬の真ん中に穴を開けることも記されている。こうすると、火薬の内部の穴の表面も燃えるため燃焼ガスの噴出が強まり、その結果、より大きな推力が生まれる。現在の固体燃料ロケットが採用している技術とまったく同じ理屈である。これに加えて、ガスの噴出口（ノズル）を小さく絞ると噴出速度がいつそう速くなることも彼らは経験的に学んだ。「ヴェンチュリー効果」を先取りしていたのである。12～13世紀の間に、中国のロケットはこうして次第に洗練されていった。これらのロケットの飛行距離

▼ロケット兵器の準備をしているインド人。1792～99年のインドとイギリスの戦いでこの兵器が利用され、イギリス人は非常な驚きと恐怖を覚えた。しかし、これによってロケット兵器が西洋にも広まることになった。



▲18世紀末にインドで使われたロケット兵器。竹や剣に鉄管をくくりつけ、その内部に火薬をつめて作る。この恐るべき兵器は1キロメートルもの距離を飛び、兵士を傷つけた。



◀イギリスのウィリアム・ヘールはロケットを軸方向に回転させて姿勢を安定させる仕組みを開発した（1844年に特許取得）。はじめヘールはロケットの外枠の穴から排ガスを出して回転力を得ようとしたが、それでは推進力が低下する。そこで、噴射口の近くにガスの噴射方向を偏心させる装置を取り付けた。
資料/Smithsonian Institution

は数百メートル～1キロメートルくらいだった。

その後中国では固定式や移動式のロケット発射台が作られ、なかには一度に320本のロケットを撃ち出せる連射装置まで作られるようになった。明の時代には、ある戦闘でこのような装置が100台も並べられた。一度に3万本以上ものロケット矢を発射できたことになる。また14世紀に入ると、ロケットの飛行姿勢を安定させるために、鳥の翼や魚のヒレの形をした安定板が考え出された。そのロケット飛行体は鳥のような姿で、腹の下に噴射装置を抱えていた。この鳥は300メートル以上飛び、最後に敵の陣地に落下すると、内部に積まれた爆薬が破裂する。その閃光は何キロメートルも離れたところからでも見えたという。これは、第二次世界大戦中にドイツ軍が作り出したV-1ロケットに似た世界最古の有翼ロケットだった。

奇抜な飛び道具としての ロケット兵器

こうして中国で発明されたロケットが西洋世界にはじめて現れたのは、ずっと後のことである。1380年に、いまのイタリアのジェノバとヴェネチア間の戦闘（チオジアの戦い）でロケットが用いられたという記録がはじめて現れたところから見て、それは14世紀後半ということになる。おそらくマルコポーロ以降のイタリア人旅行者たちが中国から母国に伝えたものと考えられる。

だがその後、中国においてもヨーロッパにおい

ても、ロケットが戦争やそれ以外の社会活動の中でとくに重要な役割を果たしたという記録は見られない。数百年にわたって、ロケットは奇抜な兵器の一種でしかなかったのである。

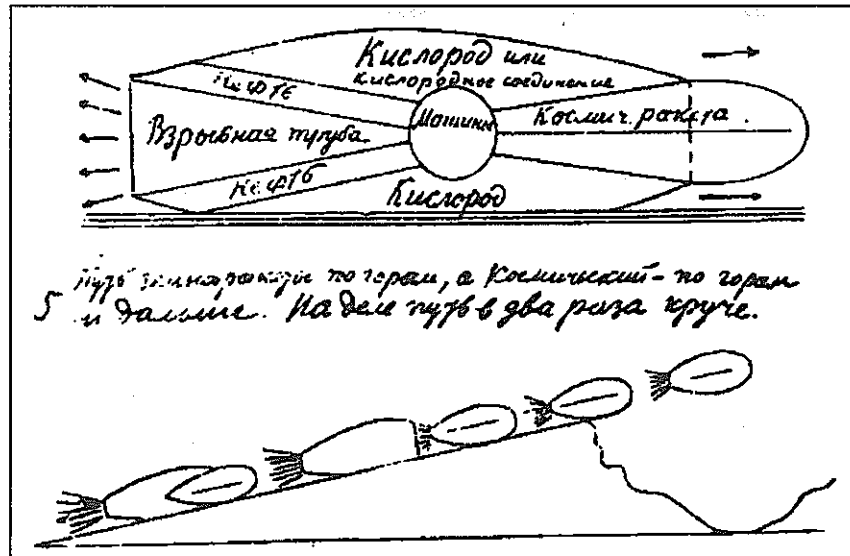
そして18世紀に入ると、ヨーロッパ人がロケットに真剣な興味を示す出来事が、またも意外なことにヨーロッパではなく、インドで起こった。当時、イギリスとフランスに侵入され続けていたムガル帝国の南部マイソールのサルタン、ハイデル・アリがロケット部隊を編成したのだ。1200人からなる部隊はその後5000人になり、1792年と1799年のセリングパタンでのイギリスとの戦いで、ロケット兵器の可能性をヨーロッパ人たちに垣間見せた。そこで19世紀に入る頃から、とりわけイギリスが対フランス戦を想定して、真剣にロケット研究を始めた。この中で、飛行姿勢を安定させるためにロケットを軸方向に回転させる（ヘール・ロケット。上図）などの技術が発展していった。19世紀中頃には、捕鯨のためのロケットもりなども作られ、特許がとられたりしている。

ツィオルコフスキーの ロケットと宇宙の研究

だが、現代的な意味でのロケット時代が幕を開けたのは、19世紀末から20世紀にかけてのロシアの宇宙学者・理論家のコンスタンチン・ツィオルコフスキーの登場であった。幼くして猩紅熱にかかり聴力を失った彼は読書にとりつかれ、独学で学校教師となり、さらに宇宙および宇宙飛行の研



◀ロシアの宇宙学者・理論家コンスタンチン・ツィオルコフスキー。多段式ロケットや地球重力圏からの脱出速度を論じたほか、無重力環境に長期間滞在することによって生体が受ける影響などを研究した。



▶ツィオルコフスキーの原稿に描かれたイラスト。上は2段式の液体推進ロケットの構造、下はこのロケットを山の斜面に沿って打ち上げる様子。

究に没頭した。彼は「気体の理論」「動物のからだのメカニズム」「空虚なる宇宙」などと題した論文を次々と発表し、しだいに宇宙飛行とロケットの理論についての考察を深めていった。彼によってはじめて、かつて中国人が経験的な知識によって作り出した素朴なロケットが、科学的な研究テーマとなったのである。

ツィオルコフスキーは、地球重力圏からの脱出速度、多段式ロケット、軌道回る人工衛星や宇宙ステーションの可能性、無重力状態に長期間滞在したときに生体が受ける影響などを理論的に論じた。さらに、液体燃料の使用がロケットエンジンの冷却に有利であることにまでくわしく言及した。彼はこれらのアイデアを、その著書や論文の中に図解をつけて解説している。

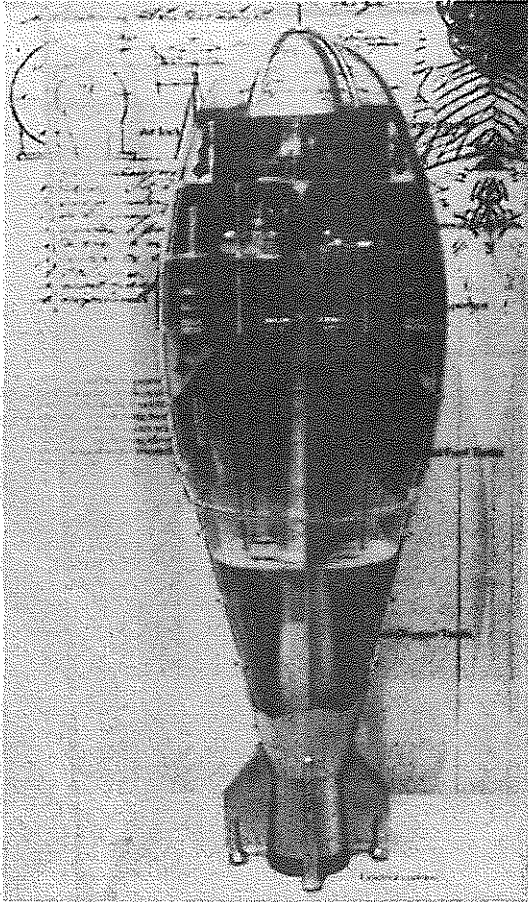
ツィオルコフスキーに続くように、1920年代にはドイツのヘルマン・オーベルトやアメリカのロバート・ゴダード、フランスのロベール・エスナールペルテリらが、現代的なロケットの原型と

なる実物のロケットを作って実験を始めた。まもなくドイツでは、まだ20歳の青年だったフォン・ブラウンらが早くも流線型で安定尾翼をもったロケットを作り始めた。そして彼らの研究は、第二次世界大戦中にナチスドイツの生み出したV-1、V-2ロケットへと劇的に発展していった。

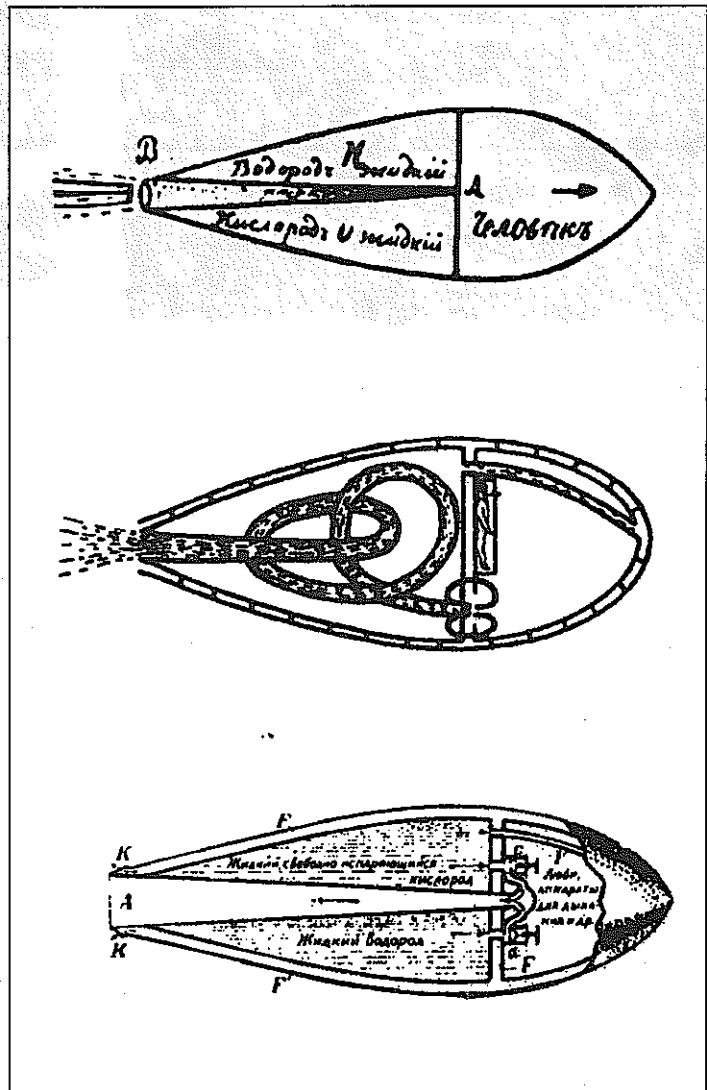
第二次世界大戦が終わると、ドイツのロケット技術をもち帰ったアメリカ、ソ連などによって、ロケットは爆発的な進化を遂げることになる。それは一方では、米ソによる冷戦構造の中で、核兵器を数万キロメートル以上かなたの敵国へと運ぶ史上最強の兵器を生み出し、他方では、やはり米ソの宇宙進出競争の中で、人工衛星を地球周回軌道へ押し上げる宇宙輸送システムへと急速に発展していった。

新しい文明の象徴としてのロケット

●ロケット

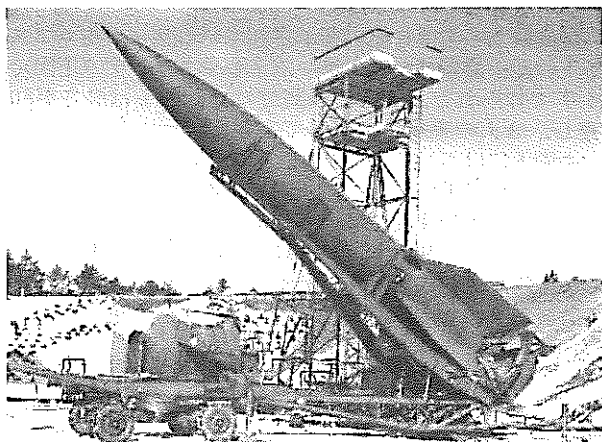


◀アメリカの国立航空宇宙博物館に展示されているツィオルコフスキーのロケットの縮小模型で、彼の書いたメモやスケッチ（下図）をもとにロシアで作られた。実際の構想ではロケットは長さが50メートルに達し、3人の乗組員が乗って宇宙を飛行するものだった。燃料タンクの上にはポンプ室があり、その上にバスタブの文字が見えるが、これは彼が乗組員を人体と同じ比重の水の中に入れることによって体にかかる加速度を減少させようと考えていたため。その隣がエアロック付きの制御室。いちばん上には温室があり、太陽光を利用して植物が光合成を行い、酸素を供給するようになっている。模型の背後に見えるのは、ツィオルコフスキー直筆のメモをパネルにしたもの。左上に風洞実験が描かれている。

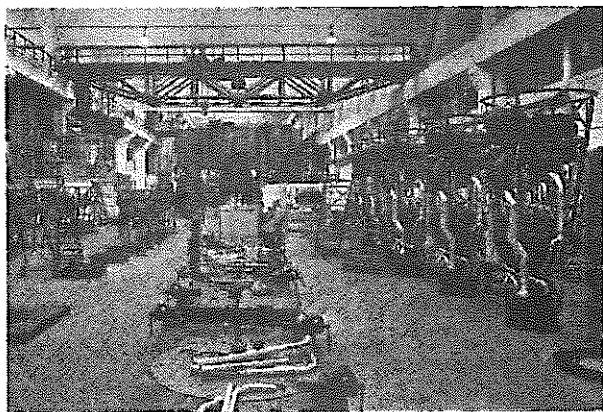


▶ツィオルコフスキーのロケットのスケッチ。彼は液体燃料を利用することを提案した最初の人である。上の図は彼の著書『反動装置による宇宙空間の探査』の1903年版に挿入されたスケッチで、液体燃料を使った最初のロケットのアイデア。図の上部が液体水素、下部が液体酸素であり、これらがAの部屋で混合して反応し、ガスが中央のパイプから出て尾部から放出される。中は同じ本の1911年版に載った図。高温のガスが2個の円を描くパイプの中を流れ、これによって宇宙船の姿勢が安定する。下は1935年に『地上と天の夢』に掲載された図。

●V2ロケット



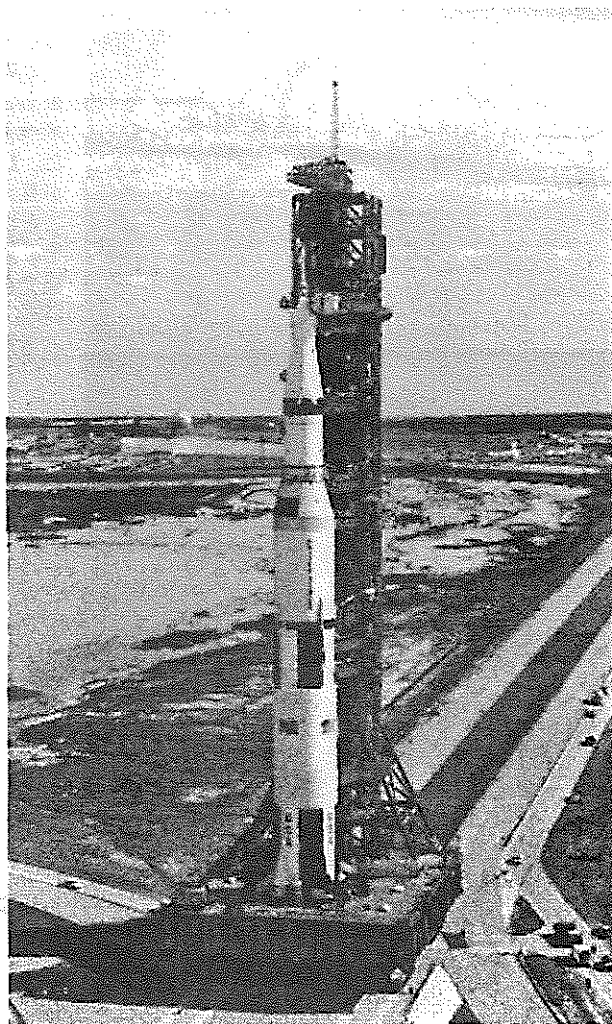
▲第二次世界大戦末期の1944年9月、最初のV2ロケットがパリ爆撃に成功した。固定式発射台は攻撃を受けやすいため、フランスやオランダには移動式発射台が配備された。これは、ドイツのペーネミュンデの打ち上げ試験場で撮影された写真。資料/Deutsches Museum



▲1944年のペーネミュンデのA4/V2組み立て工場。右側に完成したエンジンが並んでいる。

資料/Deutsches Museum

こうして中国人がいまから800年も昔に作り出したロケットは、いまでは20世紀を代表する最大の技術のひとつとなった。ロケットはもともと軍事的な目的のために生み出されたが、20世紀後半になって、それは人類を発展的な未来へと導く上で不可欠な“宇宙特急便”であり“宇宙トラック”であることがようやく人々に認識されるまでになった。物体の運動の反作用を利用するというロケットの原理に人間が気づかなかつたなら、われわれはいまも通信衛星や気象衛星をもたず、宇宙から地球を見降ろして自らの視野を宇宙的に広げることなく、また人類の未来を宇宙への進出



▲人類初の月旅行を実現した巨大なサターンロケット。

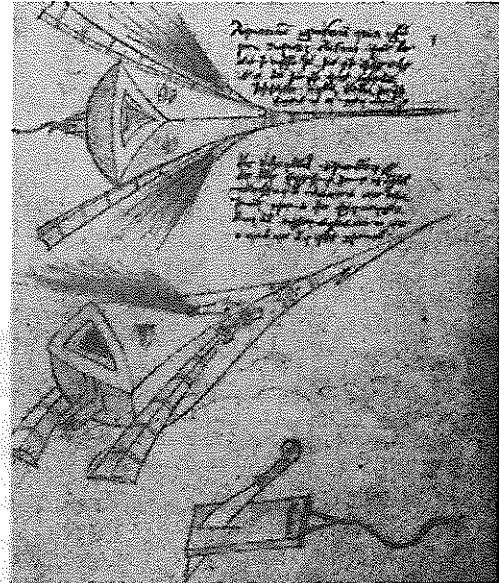
に託すこともできずに、永遠に地上に縛りつけられたままだったであろう。

ロケットはこれまでつねに化学燃料を燃やし、それによって推力を生み出すものと決まっていた。しかしロケット技術者たちはすでに、化学反応以外の推進原理を用いたイオンロケット、ソーラーセール、核融合ロケットなどを考察している。21世紀には、さまざまな原理で推力を生み出すロケットが地球軌道や太陽系宇宙へと貨物や人間を運び、新時代の人類文明にとって象徴的な光景を生み出しているに違いない。●

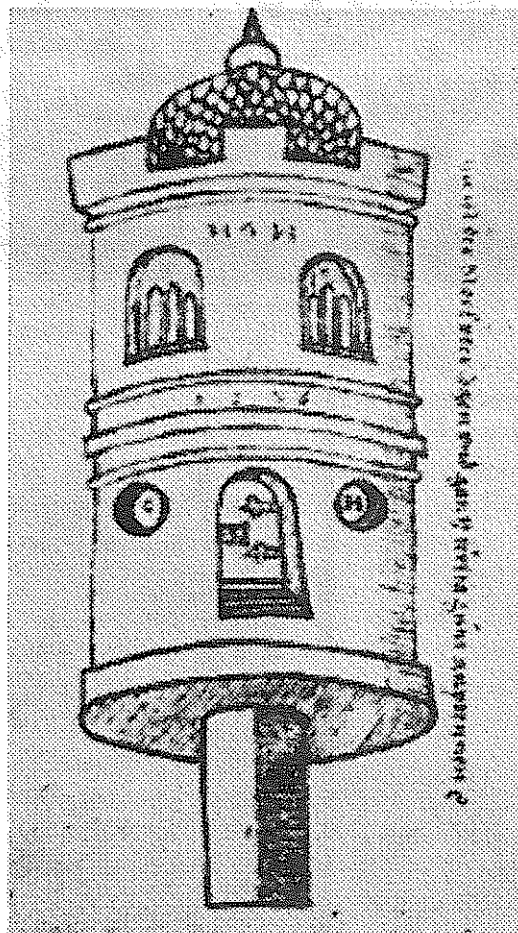
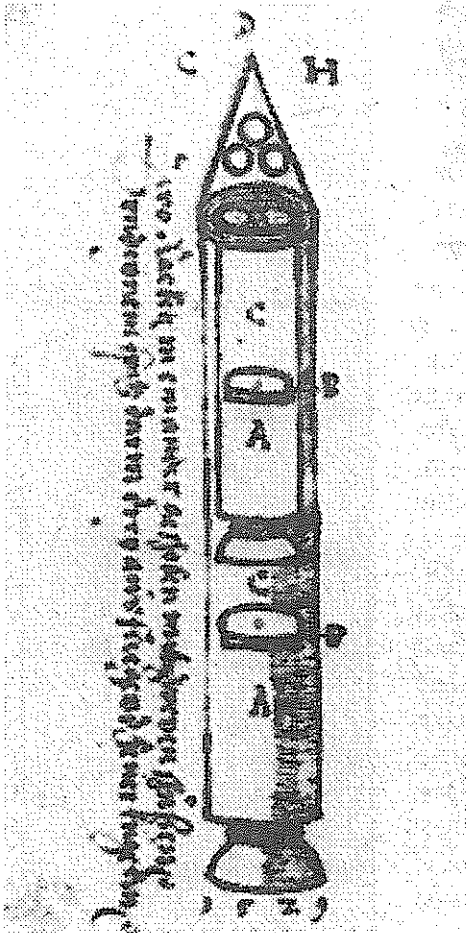
●西洋のロケット



◀1610年にナッソー伯爵が描いたロケットの水彩画。右の人物の手にロケット発射装置が見える。

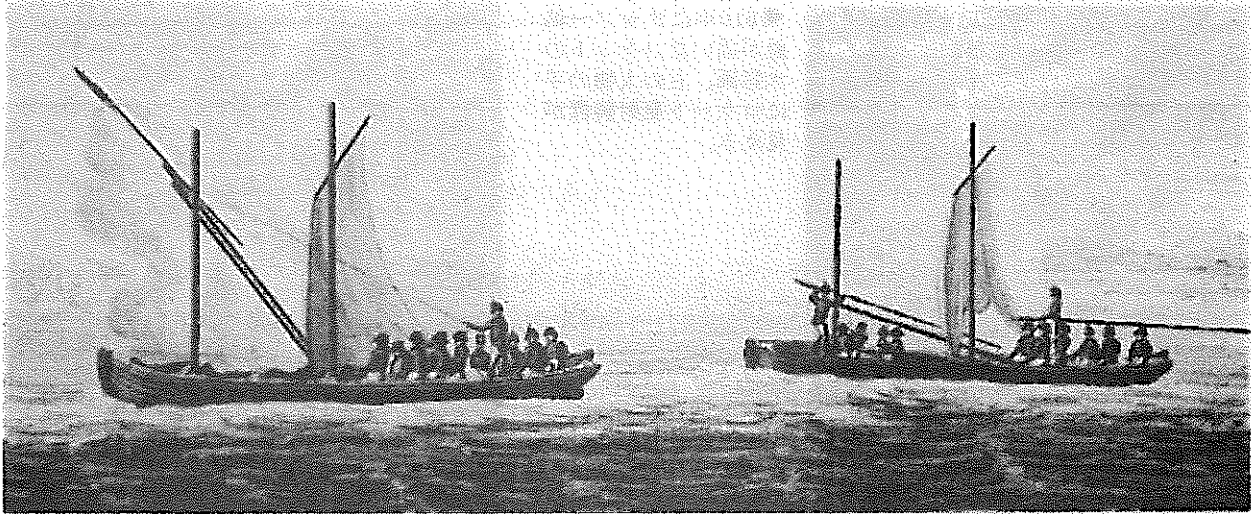


▲15世紀のヴェネチアの技術者ジョバンニ・ダ・フォンタナは火薬式ロケットを推進力とするさまざまな装置を考案した。これは2個のロケットエンジンを利用した魚雷。絵の下の板に突き刺した短剣は、竜骨（船体を安定させるために船底から張り出した板）の役割を果たしている。

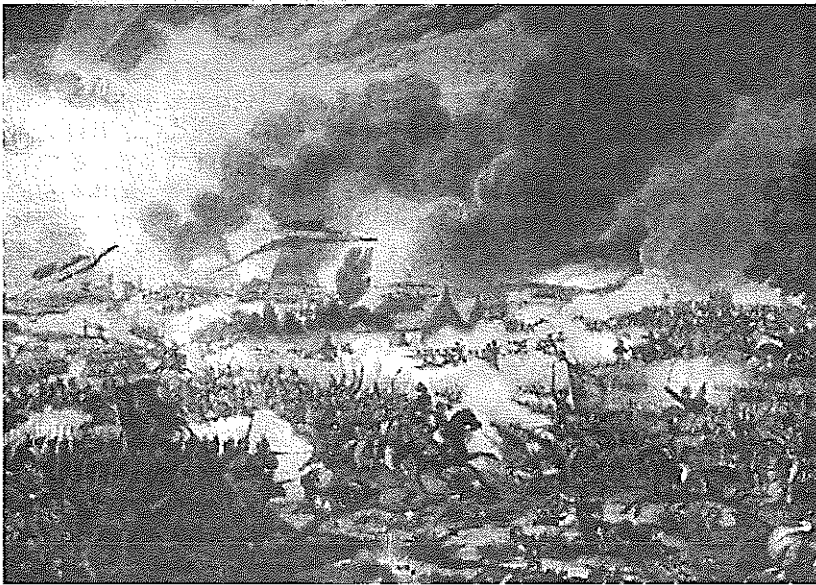


◀16世紀前半にシビウ（いまのルーマニア）の兵器庫の責任者だったコンラート・ハースが描いた“有人ロケット”の想像図。左は2段式ロケットで、1段目が燃えつきると総重量が軽くなり、2段目に点火する。右はロケットの先端部分で、居住施設になっている。

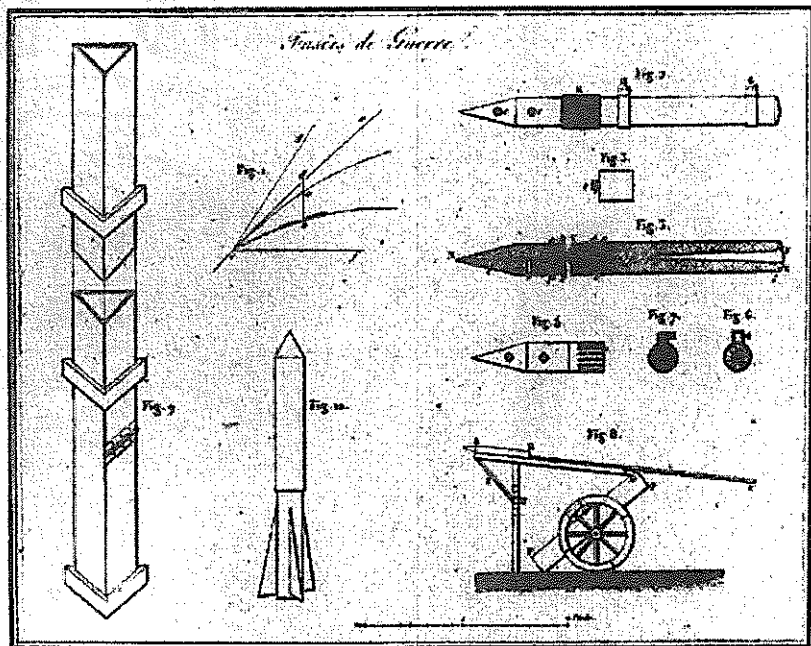
●19世紀の軍事用ロケット



▲19世紀初めにイギリスのコングレーブが描いたロケット発射船。左のボートでは、船首側のマストを発射台として利用してロケットを発射している。資料／The Details of Other Rocket System

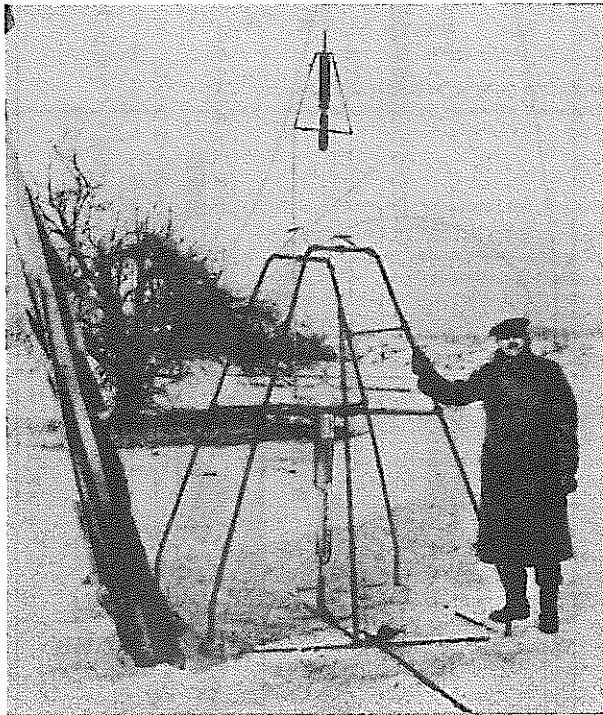


▲1815年6月18日、ワーテルローの戦いでコングレーブ・ロケットが使われた。ナポレオン戦争では、イギリス軍はアイクス島、カディス、そしてライプチヒの戦いなどで、スペイン軍を相手にロケットを使用した。

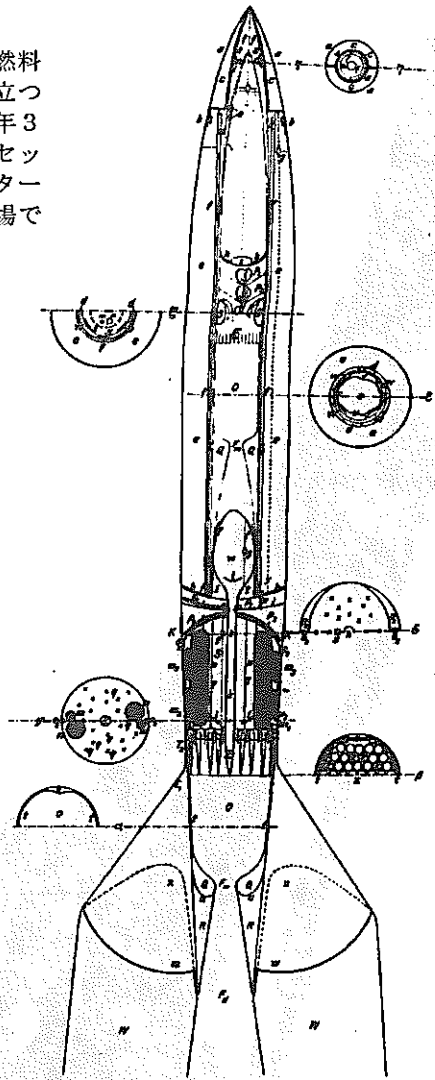


▶1825年に出版された「陸海軍の軍事科学ジャーナル」誌に掲載された「軍事用ロケットに関する条約」と題する記事の図版。数種類のロケット、ロケットの弾道飛行軌道、それに戦車上の発射台が描かれている。

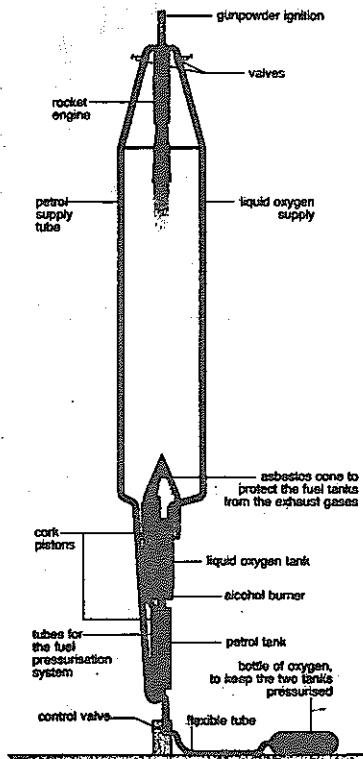
●宇宙飛行のパイオニア



◀世界初の液体燃料ロケットの脇に立つゴダード。1926年3月、マサチューセッツ州、ウォルスターの彼の叔母の農場で撮影された。

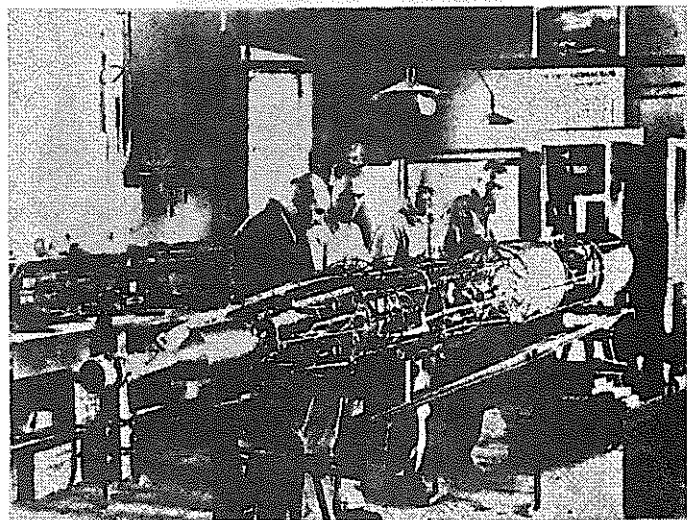


▶1923年のヘルマン・オーベルトの本に掲載された2段式の液体燃料ロケットの概念図（高層大気の研究が目的）。建造はされなかったものの、後のドイツのロケットにそのアイデアが活かされた。第1段は液体酸素とアルコールと水の混合物を燃料とし、第2段は水素と液体酸素を燃料とする。



▲ゴダードのロケットの概念図。長さ3.4メートル、機体の乾燥重量は2.6キログラム、打ち上げ重量は4.6キログラム。推進剤を噴出させ、液体酸素と反応させる（燃焼）ことによって約40ニュートン（推定）の推力を得た。

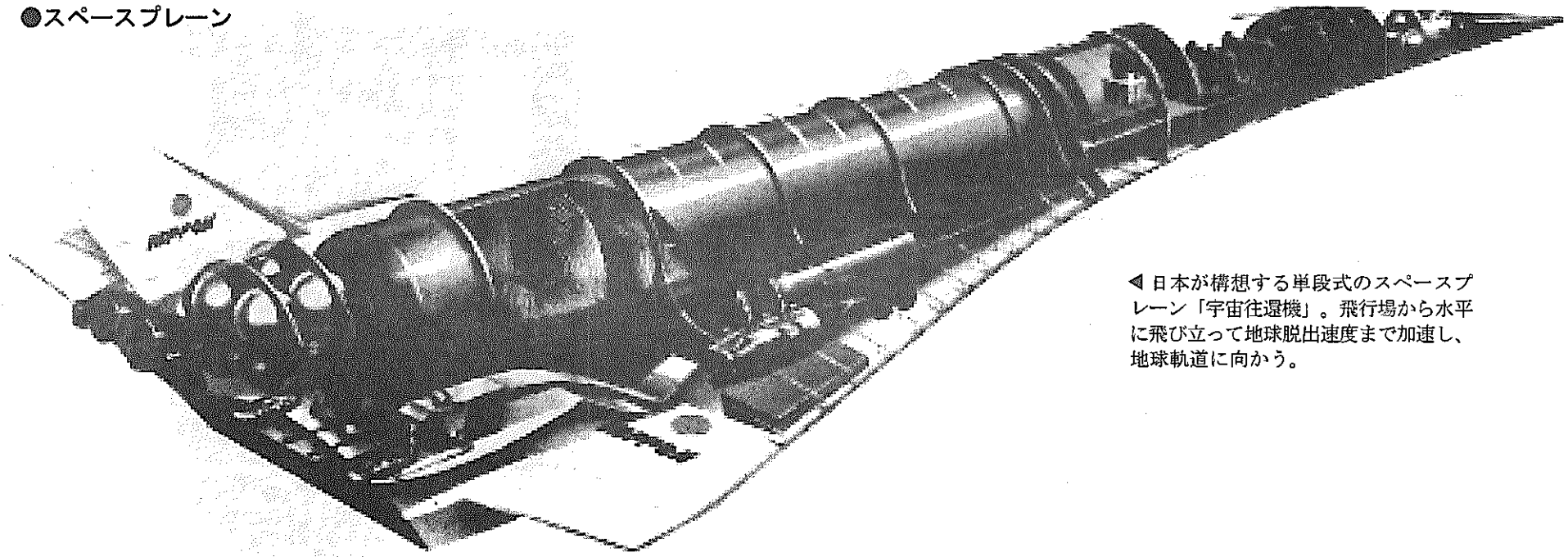
資料/Esther C. Godard/Smithsonian Institute



▲これは1940年に撮影された写真で、ゴダード（左端）とその助手がロケットのターボポンプ・エンジンの製作に取り組んでいる。このロケットは液体燃料を使って燃焼室を冷却させる仕組みをもつ。

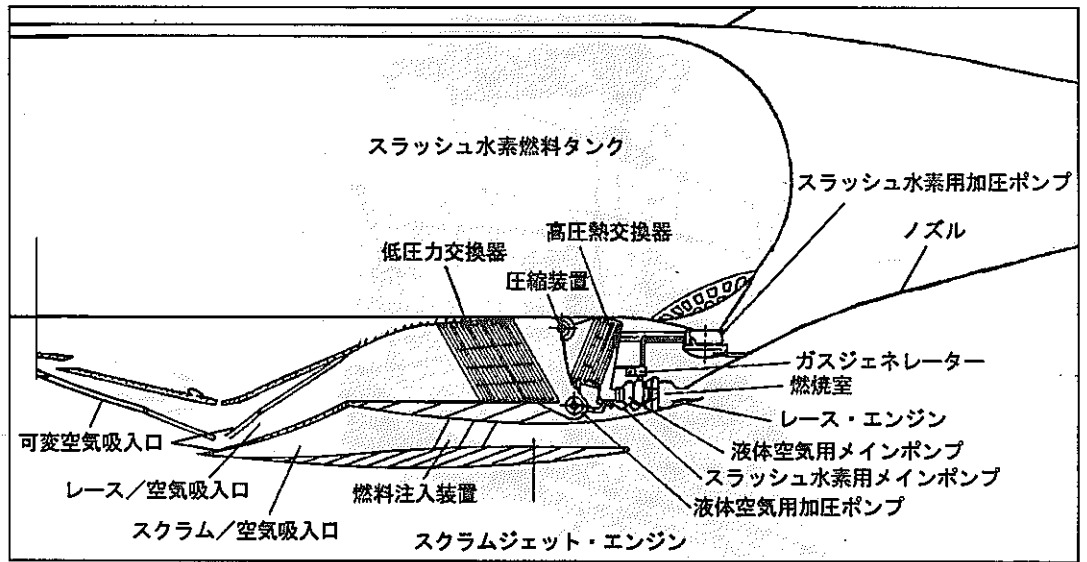
資料/National Geographic Society/NASA/F.I. Ordway3.

●スペースプレーン

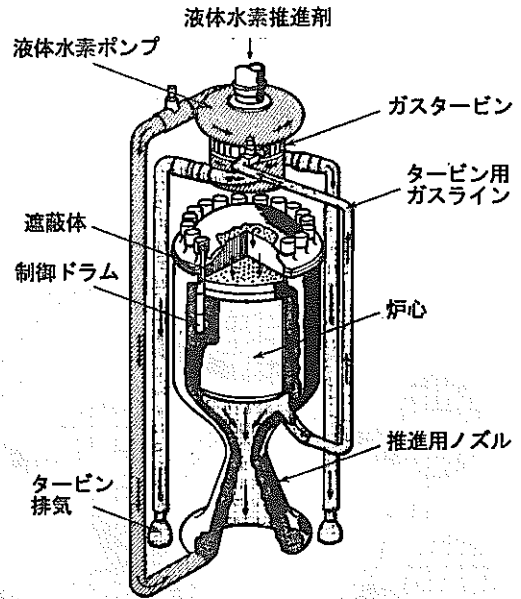
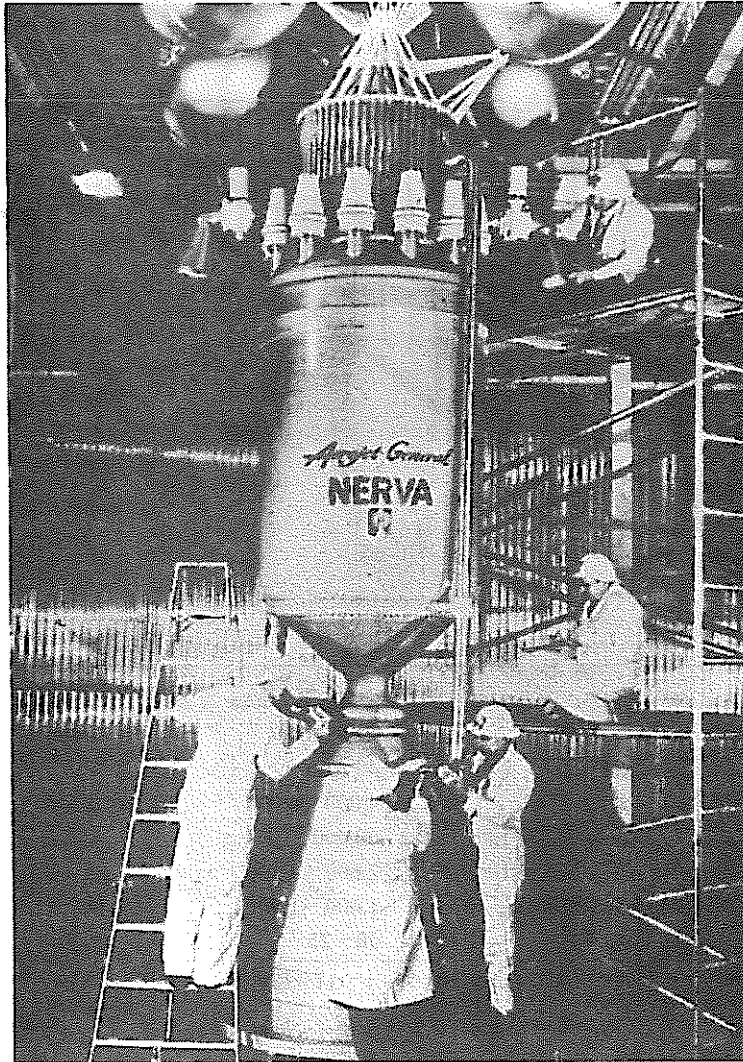


◀日本が構想する単段式のスペースプレーン「宇宙往還機」。飛行場から水平に飛び立って地球脱出速度まで加速し、地球軌道に向かう。

▶宇宙往還機のエンジン部分の概念図。飛行中に吸入された空気（圧縮空気）を酸化剤として使うスクラムジェット・エンジンとレース・エンジン（ロケット推進）を併用する。燃料はシャープベット状になったスラッシュ水素。打ち上げのときはレース・エンジンを使い、マッハ5でスクラムジェット・エンジンに切り換わる。さらにマッハ20に達したとき、ふたたびレース・エンジンが作動する。



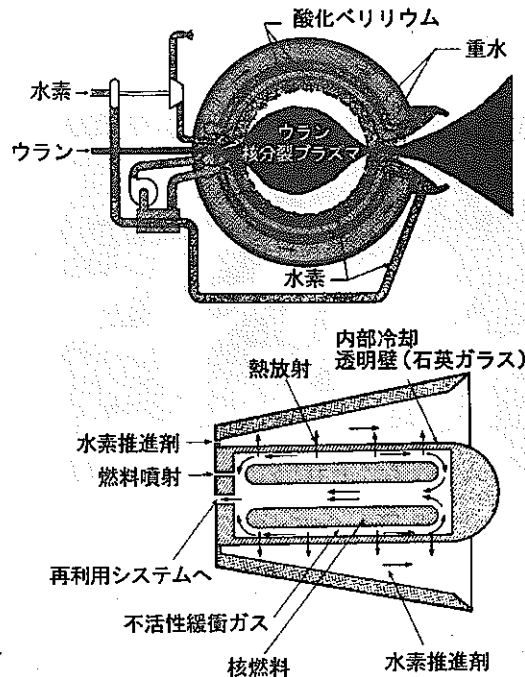
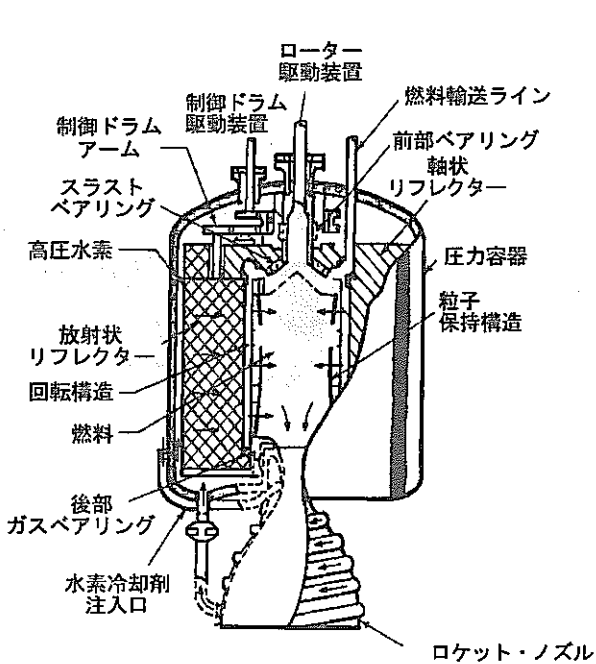
●原子力ロケット「ナーバ」



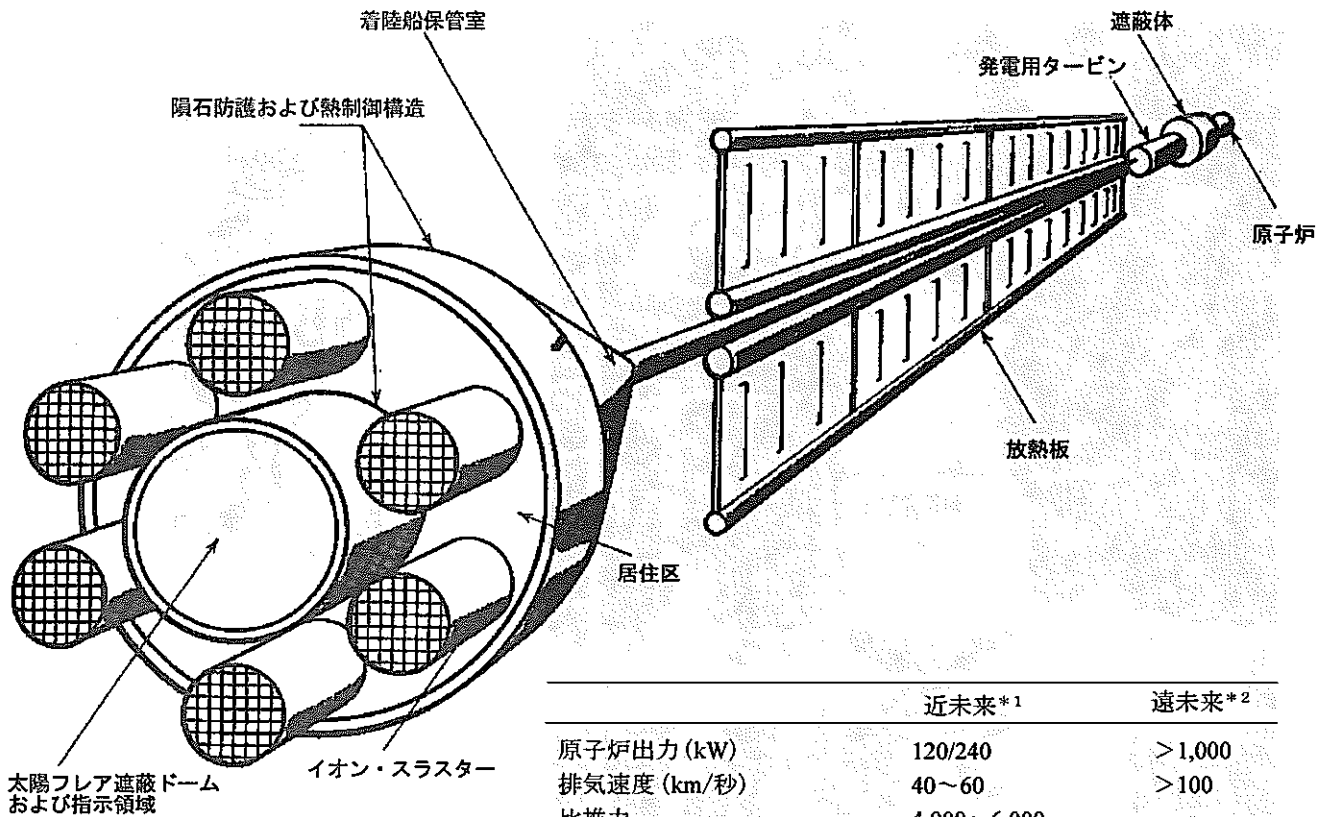
▲1969年、ネバダ砂漠で「ナーバ」のプロトタイプ・エンジンの噴射実験が行われた。これはその構造図。

◀アメリカは1960～70年代に原子力ロケットによる宇宙ロケットの開発を行った。これは原子力エンジン「ナーバ」の等倍模型。

●その他の原子力エンジンのアイデア



●イオン・ロケット



太陽フレア遮蔽ドーム
および指示領域

イオン・スラスター

居住区

遮蔽体

発電用タービン

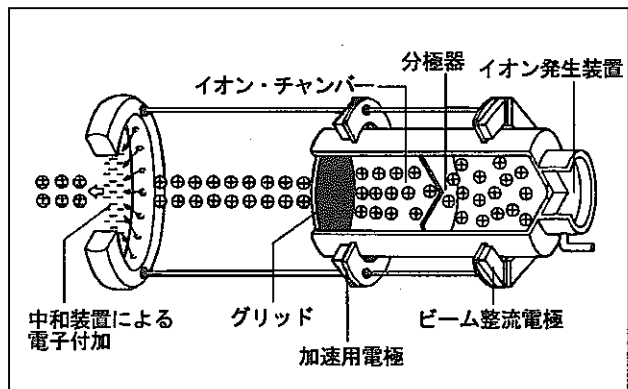
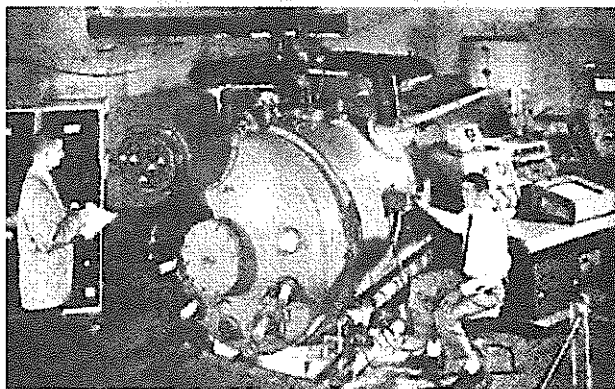
原子炉

放熱板

	近未来*1	遠未来*2
原子炉出力 (kW)	120/240	>1,000
排気速度 (km/秒)	40~60	>100
比推力	4,000~6,000	
エンジン耐久時間 (時間)	20,000	
原子炉関連機器重量 (kg)	2,600~4,100	
推力関連機器重量 (kg)	1,000~1,900	>10
比重量 (kg/kW)	30~25	

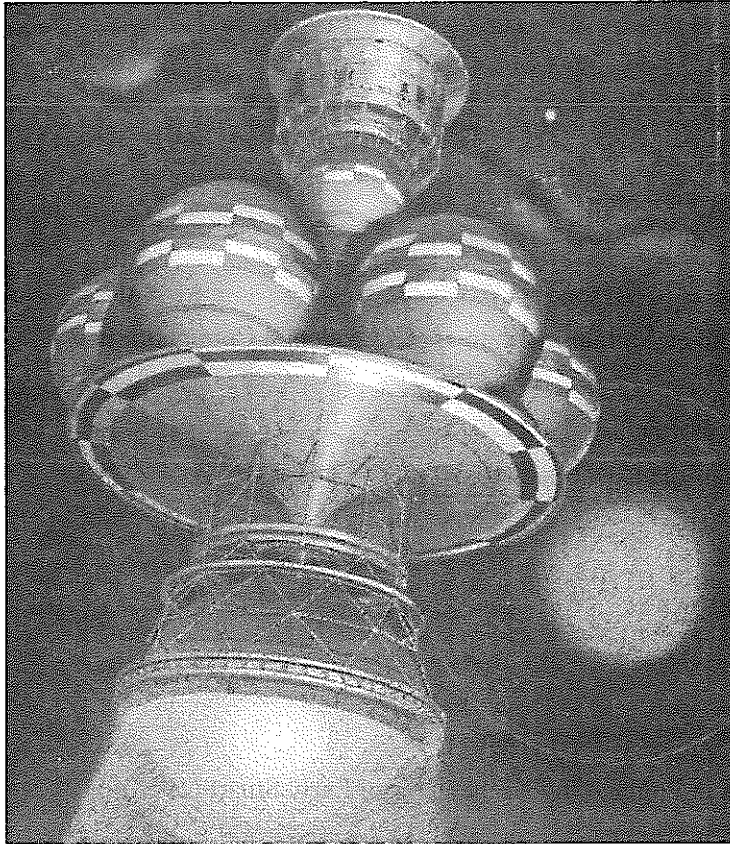
*1 比較的近未来のイオン・ロケット (核分裂電気ロケット) は太陽系内の無人飛行ミッションに適している。

*2 遠未来のイオン・ロケットは太陽系外への無人飛行ミッションを可能にするだろう。有人飛行を行うには、原子炉出力10MWおよび比重量が10kg/kW以下であることが必要である。



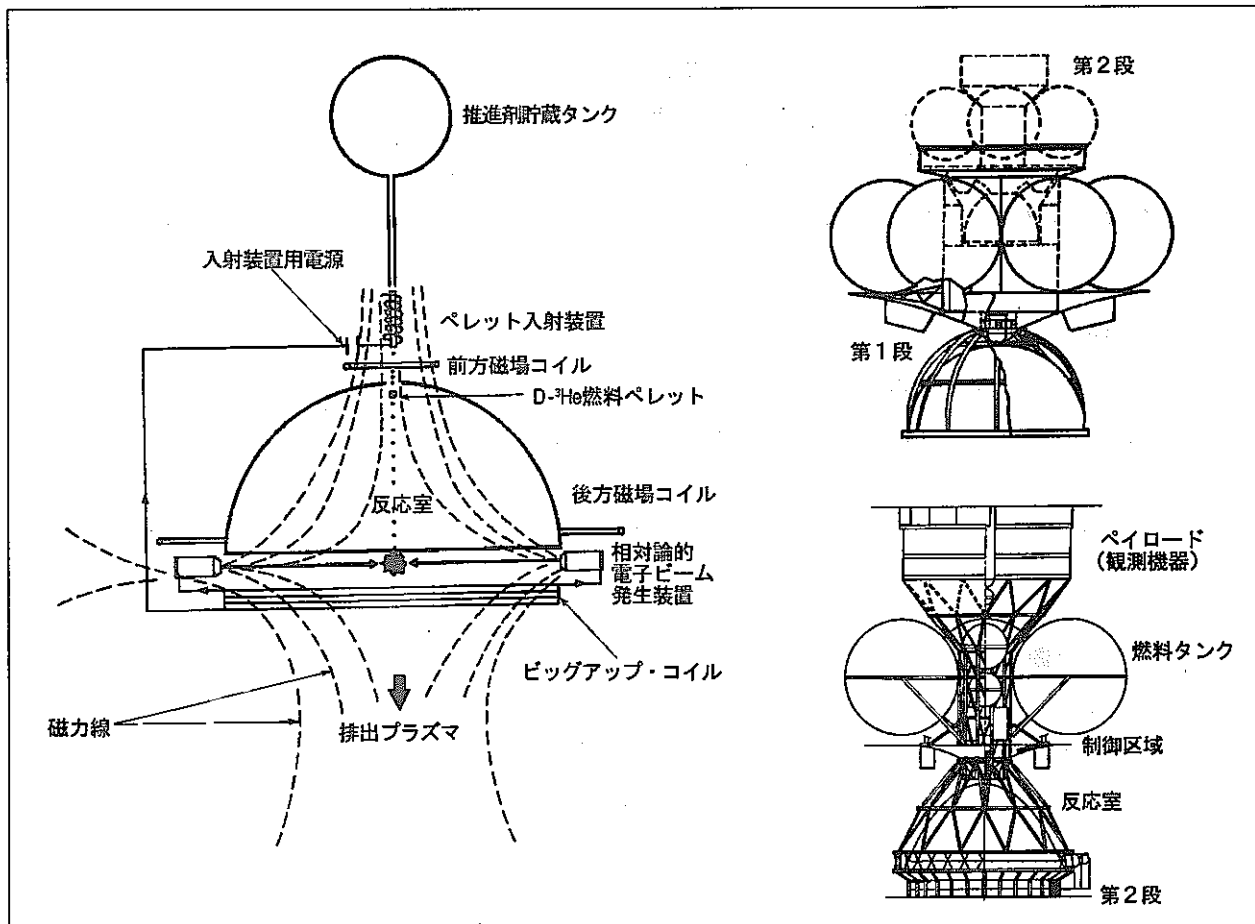
▲NASAは1960年代にイオン・ロケットの研究を行ったが、実用化はされなかった。右はそのエンジンの概念図。

●核融合ロケット



◀1970年代にイギリス惑星協会のアラン・ボン
ドらが考案した核融合ロケット「ダイダロス」
の想像イラスト。地球から約6光年の距離にあ
るバーナード星系を目指す。

▼ダイダロスは2段式ロケットで、出発から
2年後に第1段ロケットを切り離す。その後
2年間核融合で推進し、光速の12パーセント
まで達したところで慣性飛行に移行する。
バーナード星に到達するのは地球出発の50年
後であり、ロケットはここで第2段上部の観
測機器を切り離す。



2. 関連文献一覧

①医学■「抗生物質」はいかにして発見されたか

- [1] A. Fleming, Brit. J. Exp. Path., 10 (1928)
- [2] E. B. Chain, H. W. Florey et al., Lancet, 2 (1940)
- [3] A. Maurois, The Life of Sir Alexander Fleming (1951)

②電気■動物電気から生まれた「ボルタ電池」

- [1] L. Galvani, De Boloniensi Scientiarum et Antium Instituto atque Academia Commentarii, 7 (1791) 363-418
- [2] L. Galvani, De viribus electricitatis in motu musculari (1791)
- [3] A. Volta, Philosophical Transactions of the Royal Society, 90 (1800) 403-431
- [4] G. Polvani, Alessandro Volta (1942)

③磁気■「羅針盤」が開いた大航海時代

- [1] R. Norman, The Newe Attractive (1581)
- [2] W. Gilbert, De Magnete (1600)
- [3] D. H. D. Roller, The De Magnete of Willam Gilbert (1959)
- [4] D. W. Waters, The Art of Navigation in England in Elizabethan and Early Stuart (1958)
- [5] J. Needham, Science and Civilisation in China

④冶金■「たたら製鉄」はこうして生まれた

- [1] J. Needham, Science and Civilisation in China
- [2] 鈴木卓夫『たたら製鉄と日本刀の科学』
- [3] 斎藤潔『鉄の社会史』
- [4] 窪田蔵郎『鉄の文明史』

⑤動力機関■産業革命を牽引した「蒸気機関」

- [1] H. W. Dickinson, A Short History of the Steam Engine (1938)
- [2] Louis de Saussaye, La vie et les ouvrages de Dennis Papin (1869)
- [3] H. W. Dickinson, James Watt, Craftsman and Engineer (1936)
- [4] J. Jahn, Die Dampflokomotive in Entwicklungsgeschichtlicher Darstellung ihres Gesamtaufbaues (1924)

⑥推進機関■爆竹から花火、そして「ロケット」へ

- [1] M. Rycroft, ed., The Cambridge Encyclopedia of Space (1990)
- [2] K. Tsiolkovsky, Exploration of Cosmic Space (1911)
- [3] W. Ley, Rockets, Missiles and Space Travel (1951)