

"A Treatise on the Steam Engine" by John Farey (1827)

第 4 章 製鉄等への蒸気機関の応用

(邦訳 S. Yamauchi)

2020 年 1 月 11 日

目次

1	背景	2
2	戻り機関としての火の機関の応用	9
2.1	小型の火の機関と製鉄炉送風機、1779	13
2.2	もう一つの火の機関と製鉄炉送風機、1780	14
3	空気送風機を直接駆動するための大気圧機関の応用、1780	16
3.1	リフトポンプを改良した空気送風機、1790	19
3.2	送風機のための水調整器、1794	20
3.3	送風機を調整する空気貯蔵室、1796	22
4	火の機関のためのシリンダ中ぐり機	24
5	工場の機械駆動用水車への揚水のための大気圧機関の応用	30
5.1	スミートン氏設計による揚水、水車への給水および炭鉱石炭搬出のための大気圧機関、1777	31
6	ニューコメン機関についての結論	41

1 背景

(p.269) 蒸気機関および現代的な工場システムの発明の進展は、機関、水車、機械類、ビルディング、その他の部品を製作する材料として鑄鉄を使用することにより、極めて大きく促進されてきた。これは、炭鉱からの石炭を燃料として用いることで製鉄システムが改良された結果として、前世紀 (18 世紀) の中頃に実現された新しい応用である。そして、その製鉄システムが実用化されることにより、それはこの国の大きな優位性となり、その結果、現在の機械技術の洗練された状態を作り出すことに極めて大きく貢献してきた。それは、未だに他の国ではほとんど知られていなくて、ほとんど実用化されていないシステムである。我々が大いに誇るこの技術が他の国では不足している理由は多くあるが、価値ある材料および石炭が他の国では不足していることも、その一つの理由である。

炭鉱での採炭と鑄鉄の生産とは互いに関連しており、また蒸気機関の歴史とも直接関係している。これらの両技術の実際は、蒸気機関を鉱山の排水と製鉄炉への送風に応用することにより、大いに促進されたからである。そして、蒸気機関は、燃料として石炭を用い、その建造に鑄鉄を用いることにより、現在のように、その他あらゆる目的にも応用できるようになったのである。

木炭による製鉄 鉱石から鉄を製錬 (smelt) する旧来の方法は、鍛冶屋のフォージ (forge) のような炉つまり炉床 (hearth) の中で、木材の炭で作られた火炎により行なわれた。木炭が手に入る他の国々では、未だに木炭を用いることが実際に行われている。しかし今日の英国では、炭にした石炭つまりコークスが製鉄に用いられている。ペローズを用いて炉の中へ強風に空気を吹き込むことにより、木炭の燃焼はかき立てられる。ペローズは、最初は人力で、後では大規模に水車のパワーにより動かされた。これらのペローズは、以前は家庭用の通常のペローズと同じ製法により木材と皮で作られた。しかしその後、すべて木材で作られたペローズが導入され、より強力な風を起こすという点で、大きな優位性を持つようになった。これらのペローズは木炭炉にとっては全く十分であったし、大陸では未だに一般的に使用されている。

イングランドでは、このシステムによる製鉄は、エリザベス女王およびジェームズ I 世の時代に極めて広範になった。鉄の大砲は、最初イングランドで 1547 年に鑄造されたと言われているが、16 世紀の終りになるまでは極めて少数しか作られなかった。1615 年に木炭で鉄鉱石を製錬する炉が 300 台あったと言われており、当時、木材は家庭用の用途での普通の燃料であった。しかしその後の時代では農業の発展により陸上から木が無くなり、質素な趣向が廃れたことも相まって、人口の全般的増加が薪 (たきぎ)、建物、船舶建造向けの木材の要求の増大を引き起こし、このように多数の製鉄炉を維持することは不可能となった。近隣の森は消費され尽くして次々に諦められ、前世紀 (18c) の初めまでには、年間約 300 トン以上の鑄鉄を作って稼動していた炉は 50 を超えなかった。

(p.270) このように木炭を用いて作られた鑄鉄は、棒鉄を作る材料としての用途を除くと、ごくわずかな用途にしか用いられなかった。鑄型製作と鉄の鑄造の技術はほとんど知られておらず、粗末な目的を除いてほとんど実用化されていなかった。

1677 年の "Philosophical Transactions", vol. xii, p.931 では、グロスタシャー (Gloucestershire) 州のデーンの森 (the Forest of Dean) で当時実施された鉄製品について、ポール (Powle) 氏による記事が掲載されている。

ワイ (Wye) 川とセヴァーン (Severn) 川の間は、通常、硬い粘土質の土であり、自然の状態では特にハシバミとオークの森となる傾向があるが、しかし現在では、そこは製鉄所 (iron-works) の増加によりほとんど消滅させられてい

る。その森の中で、多量の石炭と鉄鉱石が発見されている。それらの最良の鉄石から多量の鉄が得られるが、それを単独で溶融させると、さくさくした脆い性状のものとなる。そのため、人々は鉄石を一部のスラグ、つまり前の溶融により金属を抽出した鉄石がすと混ぜ合わす。このように混合することにより、鉄に強靱性を付与することができる。

以前は、人力以外で動かされるベローズ (送風装置) は用いられず、そのように引き起こされる熱は金属の一部を抽出することができただけであり、その大部分はスラグまたは鉄石がすの中に残された。そのような鉄石がすは、以前の方式が用いられた国の各地で大量に見つかるのである。

鉄石は、まず普通の石灰窯 (lime kiln) のような窯で石炭と鉄石を層状に重ねて充填して、融解せずに焼 (calcine) される。か焼の後、鉄石が炉 (furnace) で製錬 (smelt) される。その製錬炉はレンガまたは石で積み上げられ、外側は幅約 24 フィート角で高さ約 30 フィートで、その内側は卵のように形づくられ、もっとも広い所で 8 ないし 10 フィートを越えず、上部と下部が狭くなっている。炉の背後に 2 台の巨大なベローズが置かれ、そのノーズ部が炉の底近くの小さい穴に繋がっている。これらのベローズは共に、上射式水車の水力で回転される大車輪の軸に取り付けられたボタンにより押し下げられる。ボタンが外れると、つり合い重りによりベローズはすぐに再度持ち上げられ、2 台のベローズが交互に動作することにより、一方が持ち上げられる時には、常に他方が送風することになる。

製錬炉は木炭を混ぜた鉄石とスラグで充填され、一度着火されると、その火はベローズにより非常に激しい状態に維持され、それらの材料は一緒に結合して堅いケーキ状または塊状となって炉の形状により保持されて、金属は溶融するに従ってこの間を通して底のレシーバーの中へ滴り落ちる。レシーバーの底には通路が開かれていて、それにより浮かす (scum and dross) が取り除かれて、通常見られる金属が流れ出される。

炉の口の前には大きな砂床があり、その中に鉄を鑄込む型の溝が作られている。レシーバーが一杯になると、これらの砂の型の中へ金属を入れる。金属は火の激しさによって非常に流動的になっているので、それはかなりの距離流れるだけでなく、しばらく沸騰し続ける。炉は何ヶ月もの間中断せずに動作し続け、日夜火が緩まることはなく、燃料と別の材料を頂上から新たに投入して供給しなければならない。

これらの作業で、木炭の代わりに石炭を使用するいくつかの試みがなされた。石炭を用いると木炭を用いるより遅い速度で進行するが、これまでは、それらのことは有効ではないとされてきた。— 作業者たちは経験的に、石炭の火は、たとえ激しくても鉄石の最も固定された部分を貫通することができず、金属の多くを融解しないままに残すことを知っていた。

これらの製錬炉から、いわゆる sow iron と pig iron がそれぞれのフォージ (炉) の中へ取り出された。これらのフォージは、同じ屋根下に一緒に建造されているが別の種類のフォージであり、一方は彼らが finery forge (脱炭炉)、他方は chafery forge (鍛冶炉) と呼ぶものである。その両方とも上部が開いた炉床であり、その上には石炭を大量に積み上げ、その後方には、製錬炉と同じような、しかし少し小さ目のベローズがある。脱炭炉の中には 3 ないし 4 個の pig iron が、その端が火の中に入るように置かれ、火が次第にそれらを柔らかくして、遂には金属を一緒にして丸い塊にする。彼らはその金属塊を half bloom と呼んでいる。これを彼らは取り出して、水車の運動で持ち上げられる重いハンマーで分厚い短い矩形に打つ。彼らはこれを finery forge の赤熱の中で再び加熱して、再度同じハンマーで中央が棒状で両端が四角いノブの形状となるように打つ。そして最後に他の火、つまり chafery forge の中で再度加熱してハンマーで打ち、鉄の棒に仕上げる。

煙突の背骨 (back)、オープン炉床などのいくつかの用途のために、炉のレシーバーから大きな柄杓 (ひしゃく) で取り出して細かな砂型に注ぐと、一種の鑄鉄が得られる。しかし、この種類の鉄は非常に脆いので、加熱してハンマーでたたくと完全にバラバラに壊れてしまう。

また、1693 年の "Philosophical Transactions", Vol. xvii, p.695 では、ランカシャー (Lancashire) の ミルソープ・フォージ (Millthorpe-forge) 社の鉄製品について、ジョン・スタディ (John Sturdy) 氏による記事が掲載されている。

彼らは異なる性質の鉄を生産する数種類の鉄の石を有していて、異なる種類の石を同時に混ぜ合わせる。その鉄石は、ミルソープから 15 マイル離れたファーンズ (Furnace) で得られ、その一部は石炭のように層をなして、他のものは石灰岩の間の鉄脈となっている。

(p.271) 木炭の細かい粉末の部分が鉄の石を燃やすために使用され、燃やすときには、焼成していない石灰岩 $\frac{1}{17}$ 量およびそれ相当量の木炭と共に、鉄の石を炉の頂上からその中へ投入する。炉は丘の側面に作られ、底は内側 2 ヤード角、高さ 1 ヤードまたはそれ以上であり、炉の石造りを熱から保護するために、耐火石の壁で覆われる。それから上方へ 6 ないし 7 ヤード角のまま立ち上がり、その上はテーパ状に先細となって、頂部で約 $\frac{1}{2}$ ヤード角の穴となる。火は水車駆動

の非常に大きな送風装置で底から風を吹き込まれ、炉は鉍石、石灰岩および木炭で頂部まで満たされる。炉内で原料が 1 ヤード半だけ降下した時、追加の原料が投入される。

石灰岩は鉍石を自由に溶融させてスラグを固まらせるためであり、そのスラグは穴の位置で取り除かれて、穴から金属だけが流し出される。炉の底には、鉄またはスラグの中に解かされるもの以外何も残らない。最近 sow 金属を再溶融して、ターフ (turf; 芝状に四角に切り出した泥炭塊) と木炭を使うことにより、これまでより更に良い鉄が作られた。以前は、その燃料は木炭だけであった。かつて、彼らは石炭を試みたがうまく行かなかった。

フォージは、sow iron でできた炉床がある普通の鍛冶屋の炉のようなものであり、その炉で木炭の火を起こして、ハトの卵大の破片に砕いた鉍石を最初に投入する。新鮮な木炭を追加しながら約 12 時間にわたり送風を継続して鉍石を溶かし、そして、溶けたガラス状のスラグが取り出されて、完全には溶融していない鉄の塊が残される。鉄の塊は取り出されて、水車で動かされる大きなハンマーで打たれ、同じ炉で数回加熱された後、棒状に成形される。一回の溶融で約 1 cwt の金属が得られ、これは、その約 3 倍に量の鉍石からの産物である。石灰岩や他の融剤は、使用されない。

この著者は、フォージの中でこのように処理されているのは鉍石であると述べているが、そうではなく、sow 金属または鑄鉄であった可能性が最も高い。

これらの記述や同じ期間の他の記述から、当時木炭を用いて作られていた鑄鉄は、それが今日応用されている用途には不適當であったとまとめることができる。この方法は、フランスや大陸の他の部分では未だ実際に行われていることであり、そこでは、17 世紀について後半個所で記述したとおりの古い製鉄システムが実施され続けている。

木炭を用いて普通に作られた鑄鉄の欠点は過度に硬く脆いことであり、内部の健全さと固さが欠けている。これらの欠点の多くは可溶性の不足から生じている。そのため、完全に合体した状態になるのに十分な程には流動的にならず、鑄型の全ての部分を確実に充填して鑄造して健全な鑄物を形成することができない。これらの欠点は、おそらくそのすべてを木炭使用のせいにするにはできないであろうが、その大部分は木炭を用いた処理システムが原因である。木炭を用いたその処理システムは、イングランドでは過去に用いられていて、他の全ての国では未だ用いられている。そのシステムは、鑄鉄の状態での性質に関わらず、その鑄鉄から最良の錬鉄または棒鉄を作り出せるという点で、長い経験により完全なものとなったのである。

石炭・コークスによる製鉄 鑄鉄が最も有用な金属の一つとなったために、現代のイングランドの製鉄システムの対象が変わってきた。木炭に代わって石炭のコークスが最初に用いられたときに根本的に変化したこの鉍石の処理方法は鑄鉄の改良をもたらし、木炭が用いられた時に達成できると考えられていた以上に鑄鉄に可溶性 (fusibility)、結合性 (cohesion)、柔軟性 (softness) を付与した。なぜなら、当時鉄の中に鑄込まれていた粗雑な品物は、工具で簡単に加工することには硬過ぎ、また、脆くて組織が不健全であったので、金属が厳しい荷重を受ける目的には不適當であった。

当時は、木型製作や鉄鑄造の技術の理解が極めて不完全であったので、今日ほとんどすべての機械部品を鑄鉄で作るのに用いている設備は、当時は使えなかった。重い大砲は中空の状態で鑄込まれ、中ぐりにより内面が滑らかにされた。水を汲むポンプ胴は同じ作業員により作られた。水を運ぶパイプも鑄造されたが、非常に肉厚となり、長さが短く、しばしば欠陥があった。

最初は真ちゅうで作られていた大気圧機関のシリンダを、製鉄業者は、鉄で鑄造できるように徐々に改良していった^{*1}。これらの応用に加えて、大砲の砲弾、フェンスの鉄レール、船のバラスト、重り、炉床板、暖炉

^{*1} 石炭による鉄が導入される以前に、木炭による鉄を用いて、鑄鉄のシリンダが火の機関用に作られたかどうかは疑わしい。最初に鉄のシリンダについて言及したのは、デザギュリエによる 1743 年の記述であるが、彼は真ちゅうのシリンダの方が好ましいと推奨した。"Philosophical Transactions", 1747 年のメイソン (Mason) 氏のレビューでは、石炭を用いた鑄鉄を柔軟で強靱にして、錬鉄のように旋盤加工して大砲を作れるようにする技術は、コールブルック・デールのフォード (Ford) 氏に負っている。しかし、同じ論文で彼が述べているところでは、フォード氏は火の機関のシリンダを亜鉛鑄物 (spelter) で作り、それは真ちゅうの

背板 (fire-backs)、および炉の火格子棒を挙げるならば、溶鉱炉の燃料として石炭が導入される以前においては、鑄鉄が用いられていたほとんどすべての用途を含むことになるであろう。そして、これらの例は、その応用の非常に限られた範囲のものでしかなかったのである。

(p.272) イングランドで燃料としての木材の不足から鉄の生産が衰退していた同じ時期に、棒鉄に対する需要は引き続き増加して、ロシアとスウェーデンからの莫大な年間輸入によりまかなわれていた。それらの国では優れた性質の鉱石が発見され、また、未だ多くの広大な森が木の燃料を大量に供給していたのである。

17 世紀の間、イングランドとスコットランドの炭鉱に近い地域や水運により石炭を運ぶことができた地域では、家庭用の燃料として石炭を使用することが一般的となったようである。そして、木材がより希少になり石炭がより豊富になるにつれて、窯業 (potters)、醸造業、蒸留業、染色業などのように、火の助けを大いに必要とするほとんどの業界では、燃料として石炭を使用する技術を徐々に習得していった。しかし、製鉄の目的で石炭を応用することは大きい困難を伴い、それが確立されるまでに 1 世紀以上にわたって多くの実り無い試みがなされた。

ジェームズ I 世は、石炭で鉄を製造する独占的な特権に対していくつかの特許に与えたが、そのプロジェクトはどれも全く成功しなかった。1619 年にダドリー (Dudley) 氏が石炭を用いて鉄を作るところまでは成功したが、1 台の炉から週に 3 トンの割合だけであった。この賞賛に値する努力を、彼は長い人生の間弱まることのない熱意をもって続けたが、取引に対する偏見と悪意のある反対、内戦 (the civil wars) の間の国の混乱、およびプロセスにおける彼の不完全な成功のために、極めて不十分な成功しか成し得なかった。ダドリー氏は絶え間ない改善により、他にいくつかの特許を取っていた。そして、1663 年に最後に適用したときの結果では、一人の作業者が疲労することなく 1 時間作業できるように改良した炉とペローズを用いて、週に 7 トンの鑄鉄を作ることができたと述べた。17 世紀の後半、鍛冶屋は石炭を使い始めた。また、棒鉄を作るために鍛冶炉 (chaferly forge) は、しばしば石炭を燃料として動かされた。

コールブルック・デール 1677 年にポール (Powle) 氏により、また 1693 年にスタディ (Sturdy) 氏により言及されているように、この時代以後、コークスつまり炭化した石炭を用いて鉄を製錬するプロジェクトが、成功はしなかったが、しばしば繰り返された。しかし、多くの方法による実験と試行によりその実用性が証明されたときでも、1740 年頃までは実際の製造工業としては確立されなかった。1740 年頃に、それはフォード氏の指導のもとで、シュロップシャー (Shropshire) のコールブルック・デール (Colebrook Dale) で生産が最初に開始され、製鉄業が確立した*2。彼らは、他の幾人かが行なったように小規模な方法で開始したが、プロセスを改善する試行を継続することにより、初めて実用に耐えられるまでに持ってくるという幸運に恵まれた。

(p.273) それまで木が燃やされて炭になっていたのとほぼ同じ方法で、石炭が積み重ねられて燃やされてコークスにされた。鉄の石つまり鉄鉱石もまた、積み重ねてローストつまりが焼することにより前処理され、そしてコークスおよび石灰岩と混合され、大きな炉に投入された。それは炉の中で徐々に回復 (還元) され、強烈な火の熱によって鉱石から溶け出された。その火はコークスの燃焼によって維持され、水車で動かされる大

ように良好に鑄造でき、中ぐりもうまくでき、錆 (さび) がピストンの運動の抵抗となる鉄製シリンダよりも良い性能であった。しかし、ここで引き合いに出された鉄製シリンダが、改良されたこの鑄鉄で作られていたのか、または、他の鑄造家により以前に作られたものであったかはついては、言及されていない。

*2 "Philosophical Transactions", 1747, vol. xlv. p.370 のメイソン氏のレビューの中に、コールブルック・デールで彼が見たものの説明がある。

「石炭を用いて鉄鉱石を処理するために、いくつかの試みがなされた。それが実用されたとの話がなかったので、それはどこでも成功しなかったと考えられる。しかし、私が知るところでは、フォード氏は、共に同じ谷で得た鉄鉱石と石炭から、脆くも強靱にも望むように鉄を作ることができ、鍊鉄のように旋盤加工に耐えられる程、柔らかく鑄込まれた大砲が存在する。」

きなペローズで風を吹きつけられていた。そのプロセスは、あらゆる点で以前に実践されたのと同様の方法でなされ、燃料として木炭の代わりにコークスを用いることだけが変更された。この製造方法を極めて長い間遅らせていた困難さは、古い木炭炉に対して必要とされよりもより大きくより高い炉と、より強力な送風機を使用することにより克服された。なぜなら、コークスは木炭と同じ燃え易さではないために、この欠点をより大量に火を当てることにより補い、空気をより大量に強力に流して活性化し、必要な熱を奮い立たせなければならぬからである。鉱石の中で金属と結合している土の物質から金属を分離するために、鉱石は炉を満たして燃焼している燃料の中に、より長い時間留まることになるであろう。

コールブルック・デールの会社設立後の数年間、その成功は、用いた石炭と鉄鉱石の中のいくつかの独特の特性に依るものであると考えられた。そしてこの考えは、その後の小規模ないくつかの他の試みの失敗によって強められた。他の人々が彼らのキャリアの中に、彼らの後を追うための秘訣を見出したのは、これらの最初の会社がかんりの範囲に拡大してからであった。それと同時に、彼らが作った鑄鉄は非常に優秀であり、また、この材料を新しい用途に適用できるようになったので、そのことにより彼らは大きな交易が可能となった。他の人々は、鉄鉱石と石炭を大量に持っていたとしても、木炭で鉱石を処理するための木を容易に入手できなかったり、入手できたとしてもそれで良質の鑄鉄を作れなかったため、コールブルック・デールの鑄鉄は羨望の対象であった。

キャロン 1759年に、スコットランドのキャロン製鉄所がローバック (Roebuck) 氏^{*3}、ガーベット (Garbet) 氏^{*4}、その他により創業された。彼らは十分な資金を出資し、ファルカーク (Falkirk) 近郊のキャロン川の堤防の上の優れた位置を設置場所として選んだ。そこは石炭や鉄鉱石の鉱山のすぐ近くであり、機械を動かすためのかなりの落差のある川の多量の水が利用可能であった。

彼らの最初の炉は1760年の初めに稼働し始め、水車駆動のペローズで送風されたが、初期の間は、事業の成功が非常に疑わしく、彼らは、当時まさに著名になりつつあったスミートン氏に援助を求めた。スミートン氏は、第2の炉のためにより強力で完全な送風機を建造することにより、彼らの関心事項を解決した。その送風機は上射式水車で駆動される4個の大きなシリンダ、つまり押し出しポンプで動作するものであり、送風の中断を避けるために交互にその作業行程を行った。これは非常に大きな成功を収めた。なぜなら、多くの欠点があったにもかかわらず、その送風機により彼らは十分な熱を起こす手段を手に入れ、まもなく石炭と鉱石の適切な処理方法を見出し、それまでに知られていた以上に、非常に優れた品質の鑄鉄を生産できるようになったからである。

(p.274) この成功の結果として、スミートン氏はその後、彼の計画に基づいて多くの改良をして最初の機械を作り直し、キャロン社は短期間の間に大砲、機関のシリンダ、鉄パイプで非常に有名となった。そして、独創的な鑄型職人と鑄造職人の学校をつくり、彼らの材料を新しい用途に応用することに次々と成功した。その後、ギャスコイン (Gascoigne) 氏が主支配人となり、彼らの全ての機械の製造でスミートン氏の援助を受けて会社は急速に成長し、その時代のこの種の会社ではかつて無かった程の規模になった。

彼らの最初の創業から10年後の1769年の、スミートン氏による彼らの機械についてのレポートによると、彼らは4台の炉を動かしており、それぞれは、平均風量 毎分 1500 立方フィートの空気をそれぞれの炉に送る独自の送風装置を備えていたようである。また、彼らは、大砲用の中ぐり機械、シリンダやポンプ用の別の中ぐり機械、および鑄鉄用旋盤を持っていた。同じく、鑄鉄を棒鉄にするフォージおよびその他の付属物も備

^{*3} (訳注) John Roebuck(1718 - 1794)、医師、化学者、実業家。鉛室法による硫酸製造法の先駆者。ワットの蒸気機関の最初の共同出資者。

^{*4} (訳注) Samuel Garbett(1717 - 1803)、化学者。

えていた。合わせて、川の水で動作する 10 台の大きな水車があり、それは全ての中ぐり機械に対して乾期を除いて十分であった。しかし、送風機にまで供給するには不十分であったので、会社から約 2 マイル上流の川のそばに、水を集めるための大きな貯水槽が造られた。しかし、会社が規模を大きくするにつれてこれらは不十分となったので、乾期に川の水を戻すために、直径 72 インチのシリンダの火の機関が追加された。ポンプは直径 52 インチであり、下の池から上の池へ 24 フィートの高低差へ水を上げた。

この機関は 1765 年頃に建造され、水車を動かすのに蒸気のパワーを大規模に用いた最初の応用例であり、それは、特定のシーズンだけ動作する補助的なものとして意図されていた。しかし、ほとんどの他の最初の試行と同様に、その機関は非常に悪いものであると分かり、その大きなサイズにもかかわらず、長さ $5\frac{1}{2}$ フィートの行程を毎分 6 から 8 行程だけ行い、しばしば停止して、24 フィート高さへ毎分わずか 440 立方フィートを上げるだけであり、わずか 20 馬力であった。また、雨の最も少ない時の川の供給は、毎分 660 立方フィートだけの量または 30 HP であり、彼らはより多くのパワーを必要とした。なぜなら、4 台の炉がきちんと送風されている時、それらの水車は毎分 3500 立方フィートの水を消費した。

その機関は、スミートン氏がその問題を取り上げる前に作られていたが、彼はその出力の不足とその仕事の更なる増大方法について意見を聞かれ、それらの水車をすべて改良し、より少ない水で動く新しいより完全な送風機を作った。新しい貯水槽も造られ、一番上の水は落差 27 フィートまで上げられた。そして、主落差の下流の第 2 落差を使って、中ぐりや他の作業のための新しい水車が建造された。

これらの様々な改善は漸次実施に移され、望ましい効果をもたらした。会社は引き続いてますます繁栄し、その後さらに 2 台の炉が追加され、そして、雨の最も少ない時期でも動作を維持できるように、スミートン氏のプランに基づいて、火の機関が建造された。この主題の詳細は、スミートン氏の一連のレポート ("Smeaton's Reports", 四つ折版, Vol. I) に見られる。

スミートン氏は、彼がそのために計画した新しい機械によるだけでなく、彼らの鑄造事業を拡大して、彼が指揮した様々な水車の新しい用途にその鑄鉄を絶えず応用することによっても、この会社の成功を大いに推進した。鑄鉄を用いたこれらの製品を、彼はキャロンで製作するよう推奨した。キャロンでは、ギヤスコイン氏のもとで、作業員たちは鑄造事業で極めて良好な成功を収めた。風車用の最初の鑄鉄の軸が、1754 年にスミートン氏により採用されたが、キャロン社が鑄造工場を設立するまでは、彼は信頼できる健全な鑄造品を得るのに大変苦労した。

(p.275) 水車のための最初の鑄鉄の軸は、1769 年にスミートン氏によりキャロンの 1 台の送風機のために採用され、その後まもなく、キャロン社は自身の工場のために鑄鉄製の種々の寸法の大きな歯車と軸を製作した。そして、それらは木製のものより非常によく機能することが分かったので、それ以降、スミートン氏は彼が設計するその他の機械に対して鑄鉄を推奨するようになり、20 年の間に、次第に鑄鉄は極めて一般的に使用されるようになった。

その他の事業者 コールブルック・デールの成功に続くキャロン社の成功は、多くの他の起業心に富む人々を励まし、その例に続くようにしむけて、十分な力を持って始めた人々のほとんどは成功を収めた。コークス銑鉄つまり鑄鉄を棒鉄に変えるプロセスも実現されたが、それ以前の古い方法で finery iron に木炭を用い、chafing iron に石炭を用いて棒鉄が作られた。

ジョン・ウィルキンソン (John Wilkinson) 氏は、キャロンが設立されたすぐ後、ブローズリー (Broseley) で彼の会社を創業し、また、ケトレイ (Ketley) のレノルズ (Reynolds) 氏、ヨークシャーのロザラム (Rotherham) のウォーカー (Walker) 氏も同様であった。現在、技術は完成されており、作業員はこれらの学校で訓練されており、石炭と鉄が得られるイングランドとスコットランドの各地で、資本家たちにより製鉄会社が設立され

た。また、少数の起業心に富むイギリス人により会社が設立されていた南ウェールズでも、それ以降、もっとも莫大な数にまで増加してきた。

1788年には、イングランド、ウェールズおよびスコットランドで、59台の新しい炉が動いていた。それらは、それぞれの炉から1年間に900トンのコークス銑鉄作り出していると言われていた。古い木炭の炉は同じ期間にわずかに26台残っていて、それらの炉の生産量は年間約550トンであった。

2 戻り機関としての火の機関の応用

初期の製鉄所はすべて、機械類を動かすために水の滝の場所に位置していた。その機械類は、一般にキャロンの模倣であった。しかし、彼らの事業が大きく成功すると、彼らのほとんどは最初の視野を越えて拡大し、前述のように、水車の上へ水を戻すために火の機関を追加した。このシステムで、水車に水を戻す機関を、年間を通じて日夜恒常的に動かすことが必要になった時、水や水車の介在をなくして送風ポンプまたはシリンダのピストンを機関の大レバーに直接つなぎ、直接ピストンの作用で動かす方がより有利であることを見出した。

火の機関のこの応用は、コールブルック・デール近郊で創業したいくつかの新しい会社で最初に試みられ、その数年後に、キャロンでシリンダ式のペローズが作られた。しかし、最初のうちは、水車が四つのシリンダを動かしていたように完全には成功しなかったようであり、風が不規則で機関の行程ごとに途絶えていた。そのため、この不具合の対処法が発見されるまでは、水車を用いたキャロンの最初の機械が、すべての場合で模倣される模範となり続けた。そして、水車のために十分な自然の滝が得られない場合には、火の機関で水を汲みあげるにより供給された。これらは、戻り機関 (returning engine) と呼ばれていた。

スミートン氏は 1772 年に、十分な水の落差が得られない場所での新しい炉の送風機の建造について相談を受け、機関を直接使用することについて以下の意見を述べた。「火の機関はもちろん往復運動であるが、安定した送風のためにシリンダを動かすには、まったく適していない。火の機関自身の独特の動作を妨げるような何らかの拘束を行なうことは、火の機関にとって障害となる一方で、2 台の機関を同時に動かして一方が行程の端で停止している間に、他方が行程の中央に来るようにすることが要求されている。そのように同期して動くように 2 台を制御することは不可能ではないが、それは複雑な動作であり、結局その業務は不安定になるであろう。」結果としてこの炉のために、4 本のシリンダ付きの水車が建造された。

(p.276) 1775 年に、キャロン社は 4 台の送風装置を持つ 5 基の溶鉱炉を作った。送風装置は、専用の上射式の水車の軸に 4 個のクランクを取り付けて駆動され、長いレバーにより 4 個の大きいポンプつまりシリンダを動かした。それぞれのシリンダは、ピストンが下がる時に中の空気を共通のノーズ管から炉の中へ送風し、ピストンが再度上がる時に新たな給気をシリンダの中へ吸い込んだ。4 個のシリンダがすべて同じノーズ管に送風して交互に動作したので、ほとんど連続的な空気の送風を維持した。

これらの機械の銅版画が、"Smeaton's Reports", Vol. I, p.365 に掲載されている。彼の計算によると、4 台の機械は毎分約 6000 立方フィートの通常の空気を 4 台の炉に送り、24 時間で 66000 トンの水を消費したようである。これをワイン測度であるとみなすと、それは 1 分間あたり 1544 立方フィートであり、落差 24 フィートであるので 70 馬力となる^{*5}。

^{*5} (訳注) ここでの トン はワイン測度 (Imperial system) の tun であるとすると、

$$1 \text{ tun} = 210 \text{ gal} = 210 \times 0.16051 \text{ ft}^3 = 33.7 \text{ ft}^3$$

したがって、

$$66000 \text{ tun/day} = \frac{66000 \times 33.7}{24 \times 60} \text{ ft}^3/\text{min} = 1544.58 \text{ ft}^3/\text{min}$$

動力 (HP) は

$$1544.58 \text{ ft}^3/\text{min} \times 62.5 \text{ lb/ft}^3 \times 24 \text{ ft} = 2316870 \text{ lb ft/min} = 70.21 \text{ HP}$$

となる。

溶鋳炉のために使われたこれらのノーズ管の直径は、 $2\frac{1}{2}$ インチ以上 $2\frac{3}{4}$ インチ以下であり、それぞれの炉にこのような管が一本あった。そして、それぞれの管を通じて約 1500 立方フィートの普通の空気が送られ、この送風で、一つの炉は通常週に 20 トンの鑄鉄を作った。

最初、大砲や重量鑄造物は溶鋳炉から型へ直接送られた。しかしその後、まずランナー (pig) の中へ鑄鉄を入れ、鑄造に用いるために石炭を用いた反射炉の中でそれを再溶融するように改善された。これにより、溶鋳炉が以前より少ない送風でより有利に運転されるようになった。

No. 2 と呼ばれるこれらの機械の最良のものの寸法は、以下のようであった。

水車は直径 20 フィート、バケット数 60 個、各バケットの内側幅 $4\frac{1}{2}$ フィート、バケット深さ 10 インチ、水的全落差 24 フィート、上部池水面は水車頂部の上方 $3\frac{1}{2}$ フィートであり、下方に 6 インチの隙間があった。

水車の軸は鑄鉄製で、直径 9 インチ、軸受間長さ $7\frac{1}{2}$ フィートであり、両端に直径 7 インチ、軸受部長さ 7 インチのネック部つまりガジョンピン (軸頭) を有していた。この軸の一端は角棒とカップリングボックスにより 7 インチ角の鑄鉄軸に繋がれ、その鑄鉄軸には半径約 17 インチの 2 個のクランクが形作られた。この軸は、更に 2 個のクランクが形成された他の同様の軸により延長され、全体として、水車軸を延長した一本の水平軸を形成し、そこには、正確に交互に動作するように、4 個のクランクが互いに直角をなすように設定された。

これらのクランクは、 $2\frac{1}{4}$ インチ角で長さ $10\frac{1}{2}$ フィートの錬鉄の接続棒により、4 本の長い大レバーつまり作業はり (梁) を動かした。それぞれの大レバーの一端は各クランクの真上に取り付けられ、他端は各送風シリンダの真上に取り付けられて、それぞれの大レバーは、中央近くに重心が来るように取り付けられた。この大レバーの接続棒が繋がれた側の端部はその運動の中心から約 8 フィートの長さであり、送風シリンダのピストン棒が繋がれた他端部は運動中心から 12 フィートの長さであった。

それぞれの大レバーは上下に重ねた 12 インチ角の 2 本のはりで構成され、中央部で両はりの間に軸を入れて挟み、はりをばね状に曲げて両端で締め付けた。各レバーのクランク端にピストンにつり合わせて引き上げるための鑄鉄の大きな重りが取り付けられ、クランクの軸受と接続棒の連結部には、常に上向きの力が作用するようにされた。

その機械の枠は互いに平行な 8 本 (つまり各シリンダに 2 本) の水平はりで構成され、その端を繋ぐように別の 2 本の長いはりにより結び付けられて、大きな水平格子を作っていた。クランク軸の軸受はこれら 8 本のはりの一方の端で支えられ、4 個のシリンダが他方の端の上に立てられ、空気室がそれらすべてを跨ぐように置かれた。これらのはりは深さ 24 インチ × 幅 12 インチであり、れんが壁の上に支えられて土台を形成し、クランクはそれらの間の空間で動作した。それぞれの 8 本の水平はりの上に鉛直方向の枠が立てられ、4 本の大レバーのガジョンを支えていた。これらの鉛直方向の枠には、それぞれに 12 インチ角の 2 本のはりが斜め方向に配置されて頂部で合わされて、底辺 15 フィート、高さ 12 フィートの三角形を形成した。8 個の三角形は、三角形の上部に固定した水平部材ですべて結合され、各三角形の頂点は、大レバーの軸のガジョンの支点を形成した。

4 個のシリンダは、それぞれ直径 54.2 インチで、ピストンは行程長 4.35 フィートであった。ピストンは上部が開放で、底部が閉じて、大気圧機関とほぼ同様の方法でピストンがその中へ入っていた。それぞれシリンダの底には二重の弁で蓋をされた開口があり、ピストンが上へ引かれるときには空気を受け入れ、ピストンが戻る時には閉じられた。シリンダ底から下方へ出て直角に曲がった管があり、再度上へ曲がって、15 インチ角で長さ $16\frac{1}{2}$ フィートの長い四角形のトラंक、つまり 1 本の管に繋がっていた。その送風トラंकは 4 個のシリンダの前面に沿って水平に広がり、それらすべてのシリンダからの空気の共通のレシーバーとなっていた。各シリンダからの曲管が繋がっているこの送風トラंकの底の口金は、下方へ閉じる弁で閉じられていて、シリンダから出てその送風トラंकへ入る空気を通過させて、戻る空気を遮断していた。最後に、この送風トラंकの中央部から直径 7 インチの管が炉へ繋がり、その端は均整のとれたテーバー状に細くなって、直径 $2\frac{5}{8}$ インチの口金の噴き出し管となり、全ての空気がこれを通過した。

(p.277) この機械が動作する通常の送風量は、毎分 24 シリンダであり、そのとき水車は毎分 6 回転を行った。それぞれのシリンダの容積は (直径 54.2 インチ、行程長 4.35 フィート =) 69.75 立方フィートであった。しかし、ピストンはシリンダの底の 3 インチの区間へは下がらず、空気を運ぶ通路を含めて、約 $5\frac{1}{4}$ 立方フィートの空間が底に残されて、ピストンはその部分から空気を排出できなかった。スミートン氏は空気の圧縮について注意を払わなかったが、圧縮空気の弾性 (圧力) は外気より 1 平方インチあたり $2\frac{1}{2}$ ポンドだけ高いと仮定するのは、実際からさほど外れていないはずである。そのとき、通常の空気の弾性を 1 平方インチあたり 14.7 ポンドとして、圧縮空気の弾性は、1 平方インチあたり 17.2 ポンドとなる。

空気の容積はその弾性に反比例するので、圧縮空気の体積はシリンダに入る通常の空気の体積の $\frac{147}{172}$ であったはずであ

り、各シリンダは、ピストンが行程の上端にある時に、 $(69.75 + 5.25 =)$ 約 75 立方フィートを含んでいるので、空気が十分な弾性を得て弁を開いて送風トランクへ入る直前では、この空気は 64.1 立方フィートに縮んでいるであろう。しかし、ピストンが行程の下端にある時、シリンダのこの縮んだ空気の 5.25 立方フィートがシリンダの底に残るので、漏れないとして、各行程で排出される量は、 $(64.1 - 5.25 =)$ 59.85 立方フィート以上にはならない。そして、全体の $\frac{1}{10}$ がピストンおよび弁から逃げたと仮定するならば、各行程排出量は、約 54 立方フィートの圧縮空気となり、毎分 24 行程を掛けて、毎分 1296 立方フィートが炉に供給されることになる。

この量が直径 2.625 インチの開口部 (= 6.89 円インチ) を通過するので、流出空気の色度は毎秒 575 フィートとならなければならない。なぜなら、 $1296 \text{ ft}^3/\text{min} \times 183.3 = 237700 \text{ cyl. in ft}/\text{min}$ 、 $\div 6.89 \text{ cir. in}/\text{min} = 34500 \text{ ft}/\text{min}$ 、 $\div 60 = 575 \text{ ft}/\text{s}$ 。

技術者の間では、送風装置の効果を、圧縮を考えずに、また漏れに対する考慮を行わずに、単にシリンダに取り込む空気量だけで見積もるのが極めて一般的である。その場合の空気量は、この機械では毎分 $(69.75 \times 24 =)$ 1674 立方フィートの空気を送風するということになる。その速度は、その全量が直径 $2 \frac{5}{8}$ インチの開口部を通過したと仮定して、毎分 44500 フィートつまり毎秒 742 フィートとすることができる。しかし、これは誤った評価方法である。

この量が一つの炉に送風され、炉は毎週 18 から 20 トンの割合で銹鉄 (pig iron) を生産する。しかし、必要な時には、水車にさらに水量を追加するとその機械はより速く動作でき、別の小さい炉に空気を供給することができる。

この機械を動作させるのに要するパワーは、以下の観察から推定できるであろう。水は噴出口から水平方向に水車のバケットの中へ噴出され、シャトルが $2 \frac{1}{2}$ インチ引き上げられて、開口部面積は、その高さ \times 幅 $45 \frac{1}{2}$ インチ = 102.4 平方インチ、つまり $(\div 144 =)$ 0.711 平方フィートとなる。上の池の水面から測ったこの開口部の底の深さは、 $41 \frac{1}{4}$ インチであり、開放部の頂部の深さは $39 \frac{1}{4}$ インチであった。

物体が $41 \frac{1}{2}$ インチ落下することにより得る速度は、毎分 895 フィートであり、 $39 \frac{1}{4}$ インチ落下による速度は 870 フィートである。これら両者の平均 = 毎分 882.5 フィートは、水車のバケットの中へ水が当たる平均速度とすることができるであろう。しかし、開口部から出る際には、水は直ちにその完全な運動状態に置かれるのではないので、すぐにその全速度となっている訳ではない。スミートン氏は、これらの水車に類似した水路を用いた多くの実験により、開口部を実際に通過する時の水の速度は、物体が水面から開口部までの高さを落下する時に得る速度の 0.707 倍でしかなく、開口部を離れてからほぼ間もなく、その落下速度に達することを見出した*6。

これより車輪の上に注がれる水の量を求めるのに、速度は $(882.5 \times 0.707 =)$ 624 フィート/分と計算されねばならず、これに開口部面積 0.711 平方フィートを掛けて、水量は 444 立方フィートとなる。

火の機関で水が持ち上げられた全高さは、鉛直方向へ 24 フィートであり、水の排出量は毎分 444 立方フィートであるので、上記の割合で機械を動かし続けるのに要求されるパワーは、 $444 \text{ 立方フィート} \times 24 \text{ フィート} (= 10650 \div 528 \text{ 立方フィート}/\text{HP})$ *7 = 20.2 馬力となる。

(p.278) 水を水車に供給する際に、このパワーの一部に損失が生じたことは明らかであり、この量は次のように推定されるであろう。水車の上端のバケットに送られる水は、水車の上端より少なくとも 6 インチ下方であり、水車の底は、下方水面より上に 3 インチ離れていた。そして、水車の下のピットからポンプの井戸まで水が流れて、ポンプの吐き出し口から水車の樋まで戻るのが、更に 3 インチの落差が失われていた。バケットは、水車の底から約 3 フィート上方へ到達した時に水を排出し始め、底から 2 フィートになった時に全く空になるので、バケットから水が流出する際に、約 $2 \frac{1}{2}$ フィートの落差が失われるであろう。

全体として、重力により水車を回す水の作用は、鉛直に 17 フィート降下する間継続するだけであるが、頂部のバケットの中へ水が水平に入る時の水の衝突により水車に伝えられる力を加えねばならない。そのとき、毎分 882.5 フィートの速度で、水車の中心から $9 \frac{1}{2}$ フィートの位置で、その作用が直径 19 フィートの円の接

*6 (訳注) ここで述べられていることは、おそらく開口部での縮流現象について言っていると思われる。

*7 (訳注)

$$1 \text{ HP} = 33000 \text{ lb ft}/\text{min} = \frac{33000 \text{ lb}}{62.5 \text{ lb}/\text{ft}^3(\text{水})} \text{ ft}/\text{min} = 528 \text{ ft}^3(\text{水})/\text{min}$$

線の方向となるように、バケットの板を打つ。その円の円周長は 59.7 フィートで、水車は毎分 6 回転するので、その速度は毎分 368.2 フィートとなる。従って、水車の速度は、そこへ当たる水の速度の $(358.2 \div 882.6 =) 0.406$ 倍となるであろう。

スミートン氏の下射式水車の実験によると、水車の速度が水の速度の $\frac{5}{12}$ ($= 0.416$) である時に、最大の効果が生み出される (これは上記の割合に極めて近い)。その場合、衝突により水車へ伝えられる力学的パワーは、水に保有されていたパワーの半分でしかなく、他の半分は衝突の相互作用の中で失われる。従って、水の流速を生み出す実際の落差 $3 \frac{1}{2}$ フィートの半分、つまり $1 \frac{3}{4}$ フィートが、水車を回す際に有効だったとすることができるであろう。それを 17 フィートに加えて、24 フィートのうち $18 \frac{3}{4}$ フィートまたは $\frac{3}{4}$ 少々が有効落差となる*⁸。

毎分 444 立方フィートの水を 18.75 フィート落下させてなされるパワーは、15.76 馬力であり、そのパワーが、実際に水車を回し空気を圧縮して速度を与え、そして可動部分の全ての摩擦に打ち勝つために発揮されるのである。

この機械は、その当時の製鉄炉の標準的送風機の一例として役立つであろう。その後、もう 1 台の機械が加えられて合計 5 台となった*⁹。

キャロン社の戻り機関は、1780 年にスミートン氏により作り直された。古い機関では直径 72 インチのシリンダが使われたが、ピストンは 9 フィートの行程を行った。直径 52 インチのポンプは、このように大きなバケットと弁の皮革は交換するのに非常に不都合であることがわかり、直径 30 インチの 4 台のポンプに置き換えられた。これらのポンプのうち 2 台のロッドは、大レバーの先端のアーチヘッドから鎖で吊られ、9 フィートの行程を行った。他の 2 台のポンプのロッドは、行程長が 6 インチになるように、大レバーの運動中心により近い位置の各側に取り付けた別の二つのアーチヘッドから鎖で吊られた。しかし、4 台のポンプはすべては同時に行程を行い、水車から水を受け取った下の池の水位から水を上げて上の池に戻し、全揚程は 27 フィートであった。

(p.279) この場合には弁座が水没する危険がなかったため、それらは (下の) 水面よりわずか 3 フィート上方に置かれ、水面は床を覆っているため、弁を修理するために簡単な段が形成されていた。各弁の皮革は 6 個のボルトナットで固定され、弁座から弁を取り出さずに取り外して新しい皮革を入れることができた。それぞれの弁は、4 枚の弁体つまり 2 対の蝶形弁で構成された。

ポンプ胴は 10 フィートの長さであり、その頂部に水を水槽または樋まで上げるための吐出し管があった。樋は水車のための上部池に繋がっていた。ポンプバケットが修繕を要する時は、胴から引き上げられた。ポンプロッドは大きいサイズの鋳鉄で作られていて、ピストンを引き上げるためのつり合い重りとして十分な重さとなっていた。機関は、以前にクロンシュタット機関で記述したものと同一構造の 3 台の鋳鉄製ボイラで動かされた。

機関の他の部分の構造と寸法は、チェイス・ウォーターのものと同じであって、そのパワーもほぼ同じであったので、4 台の送風機のために水を戻すのに十分であった。鍛冶場や他の目的のために、同じ池から水を

*⁸ 著者は、このことは調査した多くの上射式水車でほとんど同じであることを見出し、敢えて、良好な近似として、通常の構造の上射式の水車では水車に供給される水の落差の損失は、用いられる上下の池の水位差の約 $\frac{1}{4}$ であるとすることを主張する。ただし、これは漏れまたは水車の摩擦による損失量を考慮していない。

*⁹ 著者は 1819 年にキャロン社を訪問し、これらの機械がスミートン氏の計画と同じ形で動いているのを見た。しかし、溶鉱炉の運転の新しいシステムに応じて、一つの炉に以前に送っていた空気量の 2 倍の量が必要とされ、5 台の機械に加えて 1 台の大きな蒸気機関が追加されて、継続的に動いていた。5 台の送風機の全ての送風トランクとその蒸気機関の送風トランクとは配管により結合され、一つの共通のシステムとして 5 台の炉の全てに送風していた。

供給された他の水車は、乾季にはすべての川の水を使った*10。

2.1 小型の火の機関と製鉄炉送風機、1779

初期の製鉄所はすべて自然の滝のある場所に置かれ、火の機関は、それが不可欠になったときにだけ補助として導入されるだけであった。しかし、火の機関がより知られて理解されるようになった時、製鉄所は、蒸気機関のパワーで送風することを意図して設立されるようになった。

スミートン氏は、1779年にヨークシャーのシークロフト (Seacroft) で建造された溶鉱炉用に、小さい火の機関と送風機を設計した。その工場の場所には、以前古いコーン製粉水車があり、それは冬季には若干の水の供給があったが、乾季と夏季には概して水は不足していた。この炉の送風機を動かすのに必要なパワーに関するスミートン氏の報告が、彼のレポートの第2巻 p.373 に記載されており、このような場合についての彼の計算方法の良い例となっている。

その古いコーン水車の水の最大落差は $33 \frac{1}{3}$ フィートであったが、長い用水路で水を適当な速度で流すことを考えると、炉の場所では $31 \frac{1}{3}$ フィートの落差しかなかった。したがって、彼は直径 28 フィートの上射式水車を提案し、コークス炉を中程度の速度で十分に動作させるには、1日に 7294 トンの水を直径 28 フィートの水車の上へ放流する必要がある、と述べた。

(p.280) 彼は、以下のような計算も行っている。古いコーン水車 (その直径はわずか 14 フィートであった) に流されたのと同量の水は、毎時間 3 ブッシェルつまり 1 ロード (load) の割合でコーンを挽くであろう。したがって、年間を通じてコーン水車が 1 時間あたり 1 ロードの割合で粉を挽くことができているとしたら、外部の援助なくその自然の水の供給だけによって、炉を動かせると期待できるであろう。

その現場で得られた情報から、年の 5 か月の間は完全な水の供給があり、他の 3 か月間は完全な量の $\frac{2}{3}$ の供給があり、他の 4 か月間は平均して一日に 6 時間水車を動かすのに十分な水があると、彼は推測した。全体として、炉には年間 8 か月分だけの水の供給しかないであろうと予想された。したがって、何らかの補助的なパワーしでは、炉は継続的に動かすことはできなかつたであろう。

そのため彼は、自然の給水とは独立に、水車に給水するのに十分なパワーの火の機関を助言した。そして、送風機を適切に動かすのに水の供給が不足する時は、いつでもその機関を動かすように設定し、水車で消費されるすべての水を機関で供給して、自然に供給される水を貯水池に満杯になるまで蓄積し、そして、貯水池が空になるまで、燃料を節約するために機関を停止すればよいとした。

24 時間に必要とされる水量 7294 トン (= 毎分 182 立方フィート*11) は、直径 30 インチのシリンダの火の機関で揚水することができ、その火の機関は 24 時間でハルトン・ブライト (Halton Bright) と呼ばれる良質の石炭を 72 cwt、または生のくず炭 86 cwt を消費し、それは一日 3 シリング 3 ペンスの費用となった。したがって、機関が年間 4 か月間稼働したとすると、全燃料費は 20 ポンド以下となったであろう。提案された機関は 1 日に 12 時間だけ動かされてその業務を行うのであれば、一人の人間で運転することができ、1 日 24 時間動かすのであれば二人の人間で運転することができた。

*10 スミートン氏の戻り機関が乾季の川の水を戻し続けたが、壊れた大レバーは、アーチヘッドと鎖の代わりに平行運動レバーを用いた鑄鉄製レバーに取り換えられた。

*11 (訳注) 1 トン (2240 lb) の水の体積は $\frac{2240 \text{ lb}}{62.5 \text{ lb/ft}^3} = 35.84 \text{ ft}^3$ となるので、

$$7294 \times 35.84 \text{ ft}^3/\text{day} = \frac{7294 \times 35.84 \text{ ft}^3}{24 \times 60 \text{ min}} = 181.5 \text{ ft}^3/\text{min}$$

この推奨に基づいて建造された機関と送風機は、以下のとおりであった。シリンダは直径 30 インチ、行程 6 フィート。ポンプは直径 21 インチ。部品の比率はスミートン氏のテーブル (183 ページ) に従う。水車は直径 30 フィートであり、直径 54 インチで行程長 $4\frac{1}{2}$ フィートの 4 台の送風シリンダを持ち、それらは、水車の軸の延長線上に位置して水車軸に繋がれた鑄鉄製の軸上の 4 個のクランクで駆動された。水車は通常で毎分 $4\frac{1}{2}$ 回転し、したがってシリンダは約 18 行程を行い、それぞれは $71\frac{1}{2}$ 立方フィートを含むので、その機械により送風される空気の全量は、空気の圧縮の影響を考慮しなければ、毎分 1286 立方フィートとなった。送風トランクは直径 4 インチであった。水はそのポンプにより 34 フィート高さへ上げられ、その量は毎分 182 立方フィートであり、11.7 馬力となった。それは、前述のキャロンのものより炉 1 台あたりの馬力の 4 余裕は大幅に少なかった。

この機関と機械は、非常にうまく動作した。著者は、1782 年に動いているのを父^{*12}が見て描いたスケッチを持っているが、その会社は石炭と鉄鉱石の品質が悪かったために成功せず、他の地域からの石炭を入手するまでは、良い鉄を作ることができなかった。会社は 100 マイル離れた地域から持ってきた石炭で数年間運営されたが、出費が非常に大きいことが分かり、最後には放棄された。

2.2 もう一つの火の機関と製鉄炉送風機、1780

1780 年に、ウェールズのアバーガベニー (Abergavenny) の近くのビューフォート (Beaufort) で、一つの炉が建造された。それは、その後ウェールズで非常に多く建造されることになる最初の炉の一つであった。そこは水供給が少なく不定期であり、その落差は 46 フィートであった。スミートン氏は 36 インチのシリンダで行程長 $6\frac{1}{2}$ フィートの火の機関を用い、毎分 203 立方フィートの水を 46 フィート高さへ上げる計画を作った。それは、17.7 馬力である。

(p.281) この量の水が、直径 42 フィートでバケット内幅 18 インチの上射式水車の上へ落ちた。その水車は深さ 10 インチの 96 個のバケットを持ち、水車軸のガジョンピンは直径 8 インチであり、その端は 4 個のクランクが成形された 1 本の軸に繋がれ、前述のものと同様にレバーを介して 4 個の送風シリンダを動かした。そのシリンダは直径 60 インチであり、ピストンの行程長 $4\frac{1}{2}$ フィート、容積 88 立方フィートであった。

水車は通常毎分約 6 回転を行ったので、炉の中へ 24 シリンダ分の空気を吹き込み、漏洩と圧縮の効果を考えなければ、その量は毎分 2112 立方フィートとなったであろう。この空気は、直径 $3\frac{1}{4}$ インチの送風トランクを通じて送られた。

この機関のボイラは直径 12 フィート、高さ $11\frac{1}{2}$ フィート、底の直径は 10 フィートであった。火格子は 4 フィート角であり、煙突は内側 24 インチ角で、その高さは火格子の上方 43 フィートであった。それは、最良の石炭を 1 時間に 3 cwt、または通常のウェールズ炭を 4 cwt 燃やした。蒸気管は直径 6 インチであり、漏らし弁の開口部は直径 $1\frac{3}{4}$ インチ、噴射管は開口部 $\frac{7}{8}$ インチ角でその水柱高さ 25 フィートであった。

大レバーは長さ 18 フィートで、深さは中央部で 50 インチ、幅 14 インチであり、その軸のガジョンピンは直径 6 インチであった。

シリンダを支えたはり は、深さ 36 インチ、幅 12 インチ、壁面間長さ 12 フィートであった。ピストン柄は 2 インチ角で、直径 $1\frac{5}{8}$ インチの 1 本の継手ピンでアーチヘッドの 2 本の鎖に繋がれた。鎖のリンクは $\frac{3}{4}$ インチ角の鉄の棒で作られ、これらの 8 断面 ($= 4\frac{1}{2}$ 平方インチ) で全荷重を支えた。鎖の継手ピンは直径

^{*12} (訳注) 著者の同名の父 John Farey Sr.(1766-1826) は地質学者で著作家。

1 $\frac{1}{4}$ インチであった。

3 空気送風機を直接駆動するための大気圧機関の応用、1780

水車を用いずに、大気圧機関で送風機を直接駆動する方法は 1784 年頃に使われ始め、連続的な送風を持続する方法が達成された時、この方法は、水車にポンプで水をくみ上げるよりも、はるかに簡単な方法であることがわかった。その機関は、既に(第 2 章 p.133 および 205 で)述べた普通の形で建造されたが、ポンプに代えて大きな送風シリンダが置かれた。このシリンダにピストンが取り付けられ、その柄が、鎖を使った通常の方法で大レバーの端のアーチから吊るされた。送風ピストンには十分な重りが加えられ、機関の戻りの行程で送風ピストンが下がって、送風シリンダから空気を押し出した。

送風シリンダは実質上、上端開放で底が閉じた大きな押し出しポンプであったが、底部に革のフラップ弁で覆われた開口部があり、機関の作業行程の間にピストンが引き上げられた時、大気圧の空気をシリンダ内へ自由に受け入れた。また、機関の戻り行程で重りの付いたピストンが下降して空気が排出される時、シリンダの下部から空気を送り出す通路つまり送風トランクもあった。この送風トランクは吊下げ弁 (hanging-valve) を備えていて、送風シリンダから送風トランクへ空気を通過させて、送風管 (conveyance-pipe) を介して炉のノーズ管へ送った。

このように、機関の作業行程の間は空気は完全に中断されるので、間欠的に送風されることは明らかである。炉への空気の排出を均一化するために、送風シリンダの底につながる送風トランクは、送風管に直接合流するのではなく、それは、内部で一つのピストンが上下する別の大きなシリンダの底に繋がれた。ピストンには十分な重りが載せられて中の空気に必要な圧力を加え、その底から炉のノーズ管まで繋がる送風管を通じて、空気を大きなシリンダから排出した。これは、調整シリンダ (regulating cylinder) と呼ばれ、そのピストンは遊動ピストン (floating piston or fly piston) と呼ばれていた。その動作は、正確に普通の鍛冶屋のペローズの上部のコンパートメントと同じであった。たとえば、送風シリンダは、その行程でノーズ管が炉へ排出する空気量の 2 倍の量を毎行程送風するよう調整され、従って、機関の戻り行程では送風シリンダが下がって中の空気を排出して、その空気の半分の量が炉へ送られるが、残りの半分は調整シリンダのピストンが上昇することによりその中に蓄えられた。そして、機関の作業行程の間は送風シリンダは空気を押し出さず、遊動ピストンが自身の重量で、調整シリンダの中に蓄えられている空気を送風管を通じて炉のノーズ管へ押し出した。

(p.282) この方法により炉への空気の供給は中断することなく維持されたが、送風の力は完全に規則的ではなかった。なぜなら、シリンダの中の遊動ピストンの摩擦、およびピストンを押していた大きな重りの慣性は、ピストンの運動にとって大きな障害となって、このために、調整シリンダ内の空気は、その弾性が平均値以上に増加するまで遊動ピストンを持ち上げることができなかつたし、また、同じ理由により、送風シリンダが調整シリンダ内へ空気を送るのを止めた時、遊動ピストンはすぐに降下するのではなく、シリンダ内の空気の弾性が少し低下するまで動かないままだった。このため、ノーズ管を通る空気の流れは、機関の戻り行程ではそれとわかる程度により大きくなり、作業行程ではより小さくなった。しかし、その変化は炉の運転を大きく損なうほど大きくはなかつた。

調整シリンダ内で遊動ピストンが上昇できる高さは、強力なストップ・スプリングで制限されていた。そのスプリングはトネリコ材 (ash wood) で作られ、一端が遊動ピストンの鉛直の柄の上に水平に突き出て、他端で強固に固定されていた。遊動ピストンが所定の高さまで上がったとき、その柄の上端がこの木のスプリングの端に当たり、そのスプリングの弾性でピストンのそれ以上の上昇を妨げた。しかし、そのことは空気を押す圧力の上昇を引き起こし、その結果、その空気はより大きな速度でノーズ管から押し出された。遊動ピストンが調整シリンダの外へ完全に押し出されるのを防ぐために、ピストンにある安全弁が取り付けられ、それを閉

じておくのに十分な荷重が加えられた。1 本のでこがピストンに取り付けられ、その一端はこの弁に繋がれ、ピストンがその最大高さに達したときはいつでも、てこの他端が固定したストップに当たって押さえられて、弁を解放して余分の空気を排出するようにされた。

この装置の最大の欠点は、シリンダ内に蓄えられる空気量が増加するにつれてその空気の弾力を徐々に少しずつ増加させて、遊動ピストンの上昇に対する抵抗を増加させることができないことであった。もし、これができるならば、空気は送風シリンダで送られる量に応じた速度で炉に送られたであろう。しかし、上述した普通の構造では、行程の方向が変わるごとにピストンの摩擦と重りの慣性による力が変化することを除けば、遊動ピストンの上の重りつまり荷重は空気に均一な圧力を及ぼすことになる。その荷重を均一に近づけたことは失敗であった。なぜなら、機関はしばしばその速度を変えるため、機関のその速度に応じてその荷重を正確に調整して、送風シリンダにより調整シリンダへ押し込まれる量と正確に同じ量の空気を炉に排出するようにすることは、非常に困難であった。たとえば、機関が遅く動くときに遊動ピストンの荷重が大き過ぎるならば、ピストンはシリンダの中で徐々に低く沈み込んで底に当たるであろう。または、機関が速く動くとき荷重が小さ過ぎるならば、遊動ピストンは調整シリンダの頂部にまで上昇し、スプリングに当たって止められたり、安全弁（排気弁）を開いたりするであろう。いずれの場合でも送風は非常に不規則になり、底やストップ・スプリングに当たることにより、遊動ピストンの自由な運動は妨げられる。

(p.283) この欠陥の部分的な対策として、遊動ピストン自身を非常に厚くて重くし、少しだけの追加の重りでその作用を調整できるようにされた。そして、調整シリンダの開放した頂部を横断して強力なはりを通し、これに鋳鉄の重い 1 個のリングをシリンダ上端より少し下の高さに水平に吊り下げ、遊動ピストンがその最大高さ近くまで上昇した時には、リングに当たって持ち上げるようにした。そのリングの重量が誘導ピストンの追加の荷重となって空気の圧力の増加を引き起こし、それによりピストンが最大高さに上がると直ちに空気はより速い速度で噴き出した。そのリングは はり から 4 本または 6 本の強い革帯で吊るされていて、遊動ピストンがその適切な限度内に降下している時はいつでもリングの荷重を支えている。その状態でピストンがその適当な制限以上に上昇すると、リングは常にその上昇を押し留めることができる。このリングは木のストップ・スプリングの役目を果たすが、その動作はそれほど急激ではなかった。シリンダの上の横りはリングが高く上がるのを止めて、遊動ピストンがシリンダから押し出されるのを防いだ。

シリンダ内でのピストンの降下に制限を設けるために、二つのストップ・スプリングも使用された。このスプリングの一端は大きな横りはりに固く固定され、その他端は、ピストンの鉛直の柄つまりロッドの近くに配置された。ピストンの柄には鉄のキャッチピンが通されて先端が両側に突き出ている、ピストンがその最下部の限界まで下がった時は、常にスプリングの端に当たった。これらのスプリングは、機関の大レバーの両先端でストップ・スプリングとキャッチ・ピンが、機関のピストンが蒸気シリンダの中でそれ以上に降下するを制限したのと同じ方法で、遊動ピストンがシリンダの底を激しくたたくのを防いだ。これらの対策で送風をより連続的に規則的にすることにより、機械の運転はかなり改善された。

以下は、1790 年頃にスコットランドの製鉄所で建造されたこの種類の送風機の寸法であり、ロビンソン博士により、ブリタニカ大百科事典の記事 "Pneumatics" に記録されている。

蒸気シリンダは直径 40 インチ (= 1257 平方インチ) であり*¹³、ピストンは行程長 6 フィートで動作した。送風シリンダ直径 60 インチ (= 2827 平方インチの面積) であり、そのピストンは同じく行程長 6 フィート

*¹³ この機関が長く使われなくなっていた 1819 年に、著者がそれを調べると、同じ地点に、現代的 (19c) な複動機関が 2 台の炉に送風するために建造されていたが、新しい機関の何らかの事故に備えて、古い機関が動作できるように保存されていた。蒸気シリンダ直径は、ロビンソン博士が述べた 40 インチではなく 44 インチであったが、おそらく、元のシリンダはより大きなものと取り替えられたのであろう。

であった。そのピストンには $3\frac{1}{2}$ トン (= 7840 ポンド) の重りが載せられた。それは、1 平方インチあたり 2.77 ポンドの割合となる。

(p.284) この重りは、機関の作業行程の間に蒸気シリンダのピストンの上の大気の圧力により引き上げられ、戻りの行程で降下することにより送風シリンダから空気を押し出した。蒸気シリンダは 1257 平方インチであり、7840 ポンドの荷重は、そのピストンの 1 平方インチあたり 6.23 ポンドの比率であった。

空気は送風トランク または通路により、送風シリンダの底から直径 96 インチ (= 面積 7238 平方インチ) で長さ 6 フィートの調整シリンダへ運ばれた。調整シリンダの容積は送風シリンダの容積の約 $2\frac{1}{2}$ 倍であり、遊動ピストンとそれに加えられた重りは重さ $8\frac{1}{2}$ トン = 19040 ポンドであり、それは 1 平方インチあたり 2.63 ポンドの割合であった。通常、機関の各行程で、遊動ピストンは調整シリンダ内を約 1 フィートの高さを上下した。

調整シリンダの底から炉へ空気を運ぶ送風管 (conduit-pipe) は直径 12 インチであり、ノーズ管へ繋がっていた^{*14}。送風シリンダの底には、上方に開いた弁があり、シリンダに入る空気を受け入れて戻りを防いだ。また、送風トランクまたは通路の中にも弁があり、送風シリンダの中から調整シリンダの中へ空気を通して戻りを防いだ。空気を調整シリンダの底から炉のノーズ管へ運び出す送風管には、弁は必要なかった。なぜなら、送風シリンダのピストンが降下して空気が調整シリンダへ押し込まれることによるか、または、送風シリンダが作用しない間は調整シリンダの遊動ピストンが降下することにより、空気は連続的に送風管を通過したからである。

送風シリンダは直径 60 インチ、行程長 6 フィートであり、毎行程 117.8 立方フィートの空気を取り込み、通常、毎分 15 ないし 18 行程行った。15 行程のときはピストンの運動は毎分 90 フィートであり、機関により送られる空気量は、漏洩と圧縮により損失が生じなかったとすると、毎分 1767 立方フィートとなったであろう。

ピストンが最下位置へ下がった時に、送風シリンダの底に 1 フィートの隙間が残されたと仮定すると、その隙間の容積は 19.63 立方フィートである。大気圧の空気の普通の弾性は 1 平方インチあたり 14.7 ポンドであると仮定して、送風ピストンの降下により、1 平方インチあたり 2.77 ポンドの圧力だけ圧縮された空気は、1 平方インチあたり 17.47 ポンドに増加した弾性力を持つであろう。その状態では、通常空気の 23.3 立方フィートに等しい空気の量が、ピストン底部の下の 19.63 立方フィートの空間に押し込まれているであろう。それは、圧縮が終わったときにそれが含む体積より、3.67 立方フィートだけ大きい。ピストンにより排出されないこの量は、毎分 15 行程の場合で、毎分 55 立方フィートの空気の損失となるであろう。

このように推論し、また、ピストンと弁による漏洩に $\frac{1}{15}$ の余裕量を見込むと、炉に吹き込まれる空気量は、通常の弾性力 14.7 lb/in² を持つとして、毎分約 1600 立方フィートとなるであろう。しかし、それが 17.47 lb/in² の弾性力に圧縮されると、その体積は 1346 立方フィートに減少するであろう^{*15}。

この量の空気の実際の重さは $120\frac{1}{2}$ ポンドとなるであろう。なぜなら、通常空気は水より 830 倍軽く、水 1 立方フィートの重さは $62\frac{1}{2}$ ポンドである。空気 ($830 \div 62.5 =$) 13.28 立方フィートが 1 ポンドの重さであり、1600 立方フィートは $\frac{1600}{13.28} = 120.5$ ポンドである。

(p.285) この機関で取り出されるパワーは、以下のように計算されるであろう。重さ $3\frac{1}{2}$ トン (= 7840 ポンド) の送風ピストンが、蒸気ピストンにより毎行程 6 フィート持ち上げられる。しかし、戻り行程では、圧縮によって送風シリンダ内の空気の体積が減少するため、そのパワーのいくらかは有効に加えられない。なぜ

^{*14} ロビンソン博士はノーズ管の直径を $1\frac{5}{8}$ インチと述べているが、それは間違いなく誤りである

^{*15} そのノーズ管が直径 $2\frac{5}{8}$ インチならば、そこを出る圧縮空気の色度は 35820 フィート/分 つまり 597 フィート/秒 となるであろう。

なら、送風シリンダ内の普通の空気がピストンの運動に対抗する最初の抵抗はゼロから始まり、そして、その空気の弾性は 1 平方インチあたり 14.7 ポンドから 17.47 ポンドに圧縮されるまで増加する。したがって、行程 6 フィートの全運動のうち、5.05 フィートだけが 2.77 lb/in² のフルの抵抗に対抗するが、ピストンの運動の最初の 0.95 フィートの間は、ゼロから始まって最後に 2.77 lb/in² まで増加する抵抗に対抗することになる。

全体として、そのパワーは、7840 ポンドの様な抵抗でほぼ 5 $\frac{1}{2}$ フィートの行程を動くのに等しいであろう。そして、5 $\frac{1}{2}$ フィート \times 15 行程/分 = 82.5 フィート/分、 \times 7840 ポンド = 646800 ポンド フィート/分、 \div 33000 = 19.6 馬力となる。このパワーが一つの炉に送風するのに使用され、圧縮前体積で 1600 立方フィート、重さで 120 $\frac{1}{2}$ ポンドの空気が送られる。それは、ノーズ管 から圧縮された状態でおそらく 597 ft/s の速度で流出する^{*16}。

3.1 リフトポンプを改良した空気送風機、1790

その後、送風機関の構造は送風シリンダを上下逆に配置して、火の機関の戻り行程でなく作業行程の間に送風ピストンで空気を排出するように改良された。この配置により送風ピストンの重りの荷重を避けることができ、空気は、つり合い重りの戻りによるのではなく、蒸気ピストン上に作用する大気圧の作用により直接送風されるようになった。

送風シリンダは下部で開放されて上部で閉じ、その中にピストンが入っていた。ピストンには穴が設けられて上に開く弁が取り付けられ、ピストンが降下する時にそこから空気が入り、機関の作業行程の間にピストンが上へ引き上げられる時、弁が閉じて空気が逃げるのを防いだ。送風シリンダの上部に送風トランクが繋がり、空気を調整シリンダの底へ運んだ。調整シリンダは前述のものと同じであったが、送風シリンダより高い位置に置かれた。送風トランク の中に弁が設けられ、調整シリンダから送風シリンダへ空気が戻るのを防いだ。

逆向きに配置されたシリンダのピストンに運動を伝えるために、大レバーのアーチヘッドから鎖で、木製の大きな長方形の枠 (スライド枠) が吊るされた。この枠の鉛直の辺は固定された鉛直のガイドの間に挟まれ、窓サッシがそのガイド枠の中を上下するのと同じように、機関が動いている間上下に移動した。このスライド枠の鉛直の辺の間に送風シリンダがあり、枠の上辺部材は、シリンダの閉じた上端を水平に横切り、アーチヘッドから吊るすための主鎖がこの上辺部材の中央に取り付けられた。スライド枠の下辺部材はシリンダの底つまり開放端を水平に横切り、この下辺部材の中央にピストンの柄が固定され、シリンダの内部へ向かって鉛直上方へ伸びていた。シリンダは、前述の火の機関のシリンダと同じ方法で、強力な 2 本の水平はりで支えられた。これらのはりの両端は、建屋の側壁の中に強固に固定され、下方へ向かって保持された。

(p.286) この厄介なスライド枠は、その後廃止され、送風ピストンのロッドは大レバーから直接鎖で繋がれた。送風シリンダの閉じた上端の中央に穴が設けられ、滑らかに真直に作られたロッドが通され、側面から空気が漏れるのを防ぐために、周囲のカラー部に皮革または麻のパッキングが詰められた。この構造は給水設備のリフトポンプの図 (第 3 章 p.247) を参照すれば、容易に理解されるであろう。送風シリンダが空気を圧縮する動作は、リフトポンプが水を上げる動作と類似である。最初に記述した重り付きピストンの送風シリンダ、および上端開放のシリンダの動作は、同図の押し出しポンプの動作と類似である。

^{*16} この計算は、キャロンでの計算 (p.277) に非常によく一致している。キャロンの機械は 17.2 lb/in² の弾性に圧縮された 1272 ft³ の空気を送風したが、それは大気圧の空気の通常の状態では 1488 ft³、または (\div 13.28 =) 112 ポンドの重さであったであろう。この量をノーズ管を通して 563 ft/s の速度で出すには、水車で約 15.76 馬力を必要とした。

送風シリンダを逆向きに配置して上を密閉端とし、滑らかなピストンロッドをシリンダ上部の皮革カラーに通した大気圧機関は、非常に効率的な機械であって、長年にわたって製鉄炉の標準的な機関であり続けた。その良好な数台の機関は、現在でもまだ使用されている。(蒸気シリンダによる) 間欠的な送風は、遊動ピストンを持つ調整シリンダにより均一化された。いくつかの最良の機械では、より大量の空気を送風するために、このような調整シリンダとピストンが 2 組用いられて、送風をより均一にした。

3.2 送風機のための水調整器、1794

調整シリンダは完全に均一な送風を作り出すことができないことがわかり、最後に他のプランが採用され、それが現在一般に送風機として実用になっている。このプランは水調整器と呼ばれていて、鉄板を互いにねじ止めして作られた非常に大きい容器で構成され、水を入れた更により大きい水槽の中に置かれる。その容器は底が開放されているが、他の部分は閉じている。その容器の重さは、水槽の底から 1 フィート持ち上がるように、数個の小さいレンガの橋脚 (pier) の上で支えられ、そのため、底の端から容器の中へ水が自由に出入りできる。送風シリンダからの送風トランクまたは配管は、炉に繋がる途中でこの送風容器の上を横切っており、鉛直の分岐管が配管から分かれて降りてきてその容器の頂部に繋がっている。空気が送風シリンダで圧縮される時、空気はこの分岐管から逆向きの容器内へ入ってそこから水を排除する。水が容器内へ戻ろうとするために空気に対して一定の圧力を生み出し、ノーズ管を通じて非常に均一な速度で空気を炉の中へ押し流す。

たとえば、送風シリンダがその行程を行うとすると、その作業行程の間にノーズ管を通じて炉の中へ送るのに必要な空気量の 2 倍の空気を押し出す。そのため、余分の空気は逆向きの容器 (空気室) へ入り、同じ量の水をそこから追い出す。この水は空気室を置いた外側の水槽内へ上って行き、通常動作を行っているときは、空気室の外側の水槽の水面は空気室内の水位より 5 から 6 フィート高くなる。この高さの差を持つ水が空気を圧縮状態に保つ重りとして作用し、空気室が圧縮空気の巨大な弾倉を形作る。そして、送風機の戻り行程の間、送風に必要な空気を水がそこから押し出すであろう。しかし、作業行程の間は送風シリンダがその時に必要な量以上の空気を提供するので、水は空気室から出て行って過剰の空気のための余地を与えるであろう。

(p.287) このようにして、空気室に水が継続的に流入流出するが、空気室の容積は送風シリンダの容積に比べて非常に大きく、空気室の水面の変動は極めて小さく、送風の規則性にさほど影響を及ぼさない。逆向きの空気室の容量を大きくすることにより、この方式は調整シリンダによる方式に比べて決定的な利点を持っている。漏洩により空気が失われることはないし、また、水の流入流出により生じる空気室の容積の膨張収縮には、遊動ピストンで実際に生じるような摩擦による妨害もない。

以前に述べたように、遊動ピストンの運動は大きいので、つり合い重りの慣性が遊動ピストンの作用にかなりの影響を及ぼす。ピストンの大きな重さは、最初は運動を起こすための抵抗の原因になり、そのためピストンを動かすのに必要な以上に、空気は圧縮されるに違いない。また、送風シリンダが空気を押し出すのを止めた当初の間は、遊動ピストンは戻りを開始できず、送風を継続することができない。水調整器では、つり合い重りの役目を果たす水の重さは遊動ピストンの重さよりかなり大きい、水に与えられる運動は遊動ピストンに与えられる運動より極めて遅いので、水の運動質量のエネルギーは遊動ピストンのそれに比べて非常に小さく、その結果、送風はより均一になる。

以下は、水調整器のある大気圧機関と送風機の寸法であり、1794 年頃にダービーシャー (Derbyshire) の製鉄炉用に建造され、現在も使用されているものである。

蒸気シリンダは直径 48 インチで、ピストンは長さ 6 フィートの行程を毎分約 12 行程行う。送風シリンダは直径 72 インチで行程長 6 フィートである。逆向きの空気室は円形で直径 15 フィート、深さ $7\frac{1}{2}$ フィート

であり、動作時のその容積は、送風シリンダの容積の約 6 ないし 7 倍である。この空気室は、頂部の直径 26 フィート、深さ 10 フィート、底の直径 20 フィートの円形の水槽の中に収められている。その水槽の側面は傾斜した石の壁面であり、底にはレンガが敷かれている。

空気室は互いにねじで止められた鋳鉄の板で構成されて、円形の頂部は一枚の中心の板を 16 枚の扇形で囲んで構成され、その空気室の円筒部を構成する鉛直の側面も、互いに端をねじで止められた長さ $7\frac{1}{2}$ フィートで幅 3 フィート近くの 16 枚の板で構成されている。空気室の下の端は水が自由に空気室の中へ出入りできるように、石のブロックの上に載せて水槽の底から $1\frac{1}{2}$ フィート上に支えられている。空気室の頂部の中心の板は、水槽の底から 2 本の鋳鉄の柱で支えられている。空気室の円形の頂部には、空気室を押さえるために、厚さ 2 フィートで直径 15 フィートの石造りの重りが載せられている。それは、空気室自身の重さだけで保持するならば、空気によりそこから水が排除された時に浮き上がるであろうからである。

送風シリンダは最後に記述した種類のものであり、つまり底部が開放されて頂部が閉じていて、カバーの中央にはピストンロッドが通過するための皮革のカラーが取り付けられている。直径 15 インチの空気配管が送風シリンダから炉へ向かってつながっていて、空気室の円形頂部の 5 フィート上を水平に横切っている。その配管から 3 本の鉛直の分岐管が下りてきて、一本は空気室の頂部の中央に、他の 2 本は頂部の周辺近くに繋がっている。

(p.288) 空気配管と空気室のこのような接続は、空気室の下方部分を占める空気が入れ替わらないようにするためであり、その部分の空気が炉の中へ吹き込まれないようにするためである。その部分の空気は、水との接触により湿気を含んでおり、そのため火を活性化するのに適していないと考えられたからである。

空気配管は大きな寸法であり、送風シリンダから炉まで直線状に繋がり、3 本の分岐管により空気室の頂部と繋がっている。毎行程で、その行程で炉が必要とする量以上に送風シリンダが送った余剰の空気は、これらの分岐管を通じて空気室へ入る。しかし、その直後に送風シリンダの動作が休憩している間に、同じ空気が分岐管を通じて空気配管へ戻る。このように、空気室の上の部分に新たに導入された空気はその後ただちに出て行き、空気室の下部の水面近くに留まっていた空気とは混合しないであろう。なぜなら、空気が急に圧縮されると熱が発生し、その温度は圧縮される前より高くなるが、ある時間容器の下の部分にあった空気は水との接触により冷やされており、そのため、新たに導入された空気より特に重くなっているであろう。その結果、新たに導入された空気は空気室の上の部分の分岐管入り口近くの位置に留まるであろう。そのため、送風ピストンの各行程で空気室へ入ってきた空気と同じ空気が、次の行程までの休止時間に再び排出される。これにより、炉へ送られる空気は水から湿度つまり湿り気を受け取ることがないであろう。

空気室を沈める水槽の水の深さは、機関が停止して空気の圧縮が終わった時、空気室の中で水が高く上昇して、炉の空気を送る 3 本の分岐管の入口に入る危険が生じないように調整される。なぜなら、もし、機関が停止したときにこれらの分岐管の中にいくらかの水が跳ね上がり、炉の中へ放り込まれるならば、水から蒸気への非常に急激な希薄化 (rarefaction) によって、爆発が生じるであろう。

水調整器が最初に導入されたとき、水から空気へ伝えられる湿気と、炉に放り込まれた水の危険性に関して、鉄生産者たちは大きな恐れと偏見を持っていた。装置がきちんと作られなかったいくつかの場合では、このような不具合が実際に感じられた。しかし、送風が極めて規則的であったことが、遊動ピストンの代わりに水を使用することの優位性が明確に決定的となり、次第に、水調整器が一般的に用いられるようになった。

3.3 送風機を調整する空気貯蔵室、1796

空気を非常に大きな空気室へ送り込むだけで送風機の送風を調整する一つの試みが、1796 年に行われた。空気はピストンや水の反作用力を用いることなく、それ自身の弾性によりその空気室から流出する。これはスコットランドのスターリング (Stirling) 近郊のデボン (Devon) 製鉄所で大規模に実施され、その実験の報告は、その計画を提案したローバック氏により発表された ("Edinburgh Philosophical Transactions", 1796, vol. v. を参照)。

(p.289) 2 台の炉が、一般に行われていた石組みで作られるのではなく、固い岩の中に掘られた。それぞれの炉は高さ 44 フィート、最大部分の内側直径 13 フィートであった。機関は直径 $48 \frac{3}{4}$ インチの大気圧のシリンダを持ち、ピストンは $4 \frac{2}{3}$ フィート長の行程を通常毎分 16 行程、つまり $74 \frac{1}{2}$ フィート/分の運動を行った。送風シリンダは直径 78 インチで、そのピストンは蒸気ピストンと同じ長さの行程を行った。したがって、毎分 16 行程で、毎分 2470 立方フィートの空気を排出する (漏洩と圧縮による損失は考慮されていない)。この量の空気が、一つの炉へ直径 $2 \frac{3}{4}$ インチのノーズ管により送風された。

送風を調整するために、大きな貯蔵室つまり空気室が、炉の後方の 16 フィート離れた位置の岩の中に掘られた。その内側寸法は長さ 72 フィート、幅 14 フィート、高さ 13 フィートであり、その容積は 13100 立方フィート、つまり送風シリンダの容積の約 84 倍であった。空気は送風シリンダの上部から空気貯蔵室の一端へ直径 16 インチの配管で導入され、さらに空気貯蔵室の他端から炉まで同様の配管で運ばれた。この配管の端は二つの炉の間に位置する立方体の箱につながり、その箱の対抗位置からより小さい 2 本の配管が出て、それぞれの炉のノーズ管まで繋がっていた。立方体の箱の上部に安全弁を取り付けた開口部があり、必要な圧力以上に圧縮された時に空気を逃がすように重りで押さえられていた。また、空気の弾性力を示すために、サイフォン管を逆さまにして水銀を入れた管があり、空気の弾性は通常、水銀柱 5 インチ (= 2.45 lb/in²) であり、機関の戻り行程の間は $\frac{1}{2}$ インチだけ低下した。

空気貯蔵室が作られた岩は、非常に緻密で固かったが、何らかの割れ目が現れた個所にはオーカムで詰め物をされた。その空気貯蔵室の内側全体は漆喰を塗られ、それを完全に気密にするために、ピッチを塗ったクラフト紙 (brown paper; ハトロン紙) で覆われた。

この送風装置の運転開始時に、空気貯蔵室内の岩から水滴が滴り落ち、水がしばしばノーズ管を通して炉の中へ運ばれ、炉が熱せられるのを妨げた^{*17}。

ローバック氏が述べているところによると、岩が炉の熱で繰り返し加熱されて完全に乾いた後、ノーズ管での水の発生はなくなった。しかし、炉はうまく動作せず、その不具合は送風を制御するこの新しい方式に起因していると判断されたので、その方式はその後諦められ、普通の調整シリンダによる方法がその代わりに用いられた。

この湿気が空気へ伝えられるという推定された不具合は、以前に水調整器のところで説明したように、配管を適当に配置して、貯蔵室内の空気がを入れ替えずに、入った空気と同じ部分がそのまま出て行くようにする

^{*17} この水が出てきた源を確かめるために、ローバック氏はもう一人の人と空気貯蔵室に入り、機関が作動中の間、彼らはその中に閉じ込められたまま留まった。機関は彼らが入る約 2 時間前に停止されており、彼らは貯蔵室の空気が湿って霧が立ち込めているのを見出したが、機関が動き始めるとすぐにそれは消えた。圧縮空気の中に閉じ込められている間、彼らは耳に痛みを感じたが、彼らの呼吸は影響を受けなかった。音は、非常に大きく拡大されたように見えた。炉に最も近い側が熱せられた結果、その側から水が滴るのが見出された。機関が動作し続けている間は、空気中に湿気または霧の出現はなかったが、機関が停止した瞬間、貯蔵室は霧のような蒸気で満たされた。そして彼は、この蒸気が輸送配管内で凝縮して、機関が最初に動き出すときは常に水滴が形成されるのである、と結論した。

ことにより、簡単に直せたかもしれない*¹⁸。

*¹⁸ その後、空気貯蔵室はスタッフォードシャー (Staffordshire) のブラッドリー (Bradley) の炉で使用され、非常にうまく動作した。それは、直径 10 ないし 12 フィートで長さ 50 ないし 60 フィートの鉄板製の円筒形容器であった。

4 火の機関のためのシリンダ中ぐり機

(p.290) もっとも初期の蒸気機関の建造において、もっとも大変な困難はシリンダの鑄造と中ぐりであった。最初の機関で使われたような(第2章 p.155 を参照) 直径 22 から 80 インチまでの小口径シリンダについても、常に真ちゅうで作られていたのもかわらず、このことは深刻な問題であったにちがいない^{*19}。

前世紀(18 c.)の初めにおいて、機関の他のすべての部品は、ロンドンやイングランドの他の地域で見つかる技術工により、それ相応の精度で製作することができた。たとえば、醸造業および染色業のための大きな銅製品を作るのに習熟していた銅器職人は、ボイラをすぐに製作することができた。ボイラは、彼らが扱い慣れてきた以上の大きさを必要としなかった。ボイラのための炉とレンガも醸造の銅製品と同じであった。唯一の追加部であった蒸気を溜めるドームの頂部は、配管工により鉛で作られた。

同様に、ポンプと立坑仕掛け、大レバーと鎖も、炭鉱や鉱山を排水していた水車のポンプ仕掛けを作るのに習熟していた同じ作業員たちが、容易に製作することができた。そのポンプ胴は真ちゅうで作られ、ポンプの木の管は木材を中ぐりして、外側を鉄のたが(箍)で補強された。この起源のため、それは現在鑄鉄で作られているのもかわらず、鉱夫からは未だにポンプ・ツリーと呼ばれている。

ポンプ胴を作るのに、シリンダを作るのと同じすべての操作を必要とすることはそのとおりであるが、シリンダは当時作られていたどのようなものよりも極めて大きい寸法であり、多くの困難を示したにちがいない。そして、シリンダの中でピストンが自由に動いて、なおかつ気密を保つために、シリンダとピストンの両方には、当時の技術工が他の作業に使い慣れてきた以上のより大きい精度を必要とした。

最初の真ちゅう製シリンダがどんな手段で作られたかは記録されていないが、1727年にロンドン近郊で作られたように見える(第3章 p.230 を参照)。おそらく、それらは釣鐘鑄造者(bell founder)らにより鑄造された。その後、デザギュリエによって言及されているように(第3章 p.231 参照)、鑄鉄業者らが鑄鉄の鑄造方法とシリンダを十分正確に中ぐりする方法とを見出した。

炭坑での蒸気機関の需要がかなり大きくなった前世紀(18 c.)の中頃にかけて、鑄鉄工場が北イングランドで設立された。特に、木炭の代わりに石炭のークスで製鉄する改良された方法の導入以降、それは顕著であった。新しいプロセスにより鑄鉄の品質は大きく改善され、多くの新しい用途に適する材料となり、極めて容易に旋盤作業や中ぐり作業が行えるようになった。鉄を鑄造するプロセスは多くの独創的な労働者によって習得され、かなりの完全度に達した。

(p.291) 大きな鑄造工場のほとんどは、鉄の大砲やポンプ胴、および蒸気機関のシリンダのための中ぐり機械を持っていた。これらの機械のうち小さい規模のものは馬で回されたが、より良いタイプのもものは水車で動かされた。それらはすべて、水道設備の木製の管を作る際の木材の中ぐりに用いられる普通の機械と同じ原理に基づいて建造された。

シリンダまたはポンプ胴は、その軸を水平にして、そり(sledge)または滑り台(sliding carriage)の上に寝

^{*19} 1747年のコールブルック・デール製鉄所の状態のいくつかの特徴を記録した牧師のメイソン氏は、機関のシリンダに使用された垂鉛鑄物または真ちゅう系はんだ(solder or brass solder)について記載している("Philosophical Transactions", vol. xiv, p.370)。垂鉛鑄物が何であるか、またはそれが何に使われていたかについて、メイソン氏は知らないと告白している。しかし、シュロップシャーのコールブルック・デールのフォード氏がそれに成功するまでは、火の機関のシリンダのような大きなものに適用されることはなかったと、彼は信じている。それは、ほんの少し温めるとより容易に溶けて真ちゅうのように正確に鑄造できる。冷たい間はガラスのように硬く脆いが、手の暖かさですぐに非常に従順になり、一枚の紙のようにその削り屑で指を包むことができた。この金属は決して錆びず、そのため、少し休止するとその錆がピストンの運動を妨げる鉄に比べて、より良好に動作した。

かされ、そこに鎖で固く固定された。そりは、シリンダをその軸の方向にボーラ (borer) に向かって進めるために、適当なガイド (roadway) の上を水平に動かされた。ボーラは、ピストンと同じように、シリンダの内側にほぼフィットした円形の鉄のディスクまたは車輪であったが、円形のボーラの周囲には、車輪の端に作られたノッチの中に 6 ないし 8 枚の鋼のカッターがくさびで固く固定されて取り付けられていた。

このように取り付けられたボーラは、水車によりゆっくり回転される水平の鉄の軸の端に固定され、ボーラがシリンダの一方の端の中へ挿入されて、カッターが回転し、鋳鉄の内表面からすべての突出部と粗さを削り取った。シリンダが置かれたそりは、鎖とプーリのテークルとウィンドラス (錨巻き上げ機) とにより作り出される非常にゆっくりした動きで、ボーラの方へ連続的に進み、ボーラがシリンダの内面の一方の端から他方まで、ゆっくりと完全に通過した。しかし、シリンダをすべての個所を完全に滑らかにするには、その操作を数回にわたって繰り返すことが必要であった。

キャロン製鉄所は、この目的のための最も完全な装置を持っていた。彼らが最初に操業を開始した時に用いた中ぐり機械は大砲の中ぐりだけを意図していたが、彼らは時折、それをを用いてポンプ胴とシリンダの中ぐりした。2、3 年のうちに、この機械は彼らの取引に必要な仕事を行うには小さ過ぎることがわかり、1769 にスミートン氏は彼らに、銃身用の全く新しい中ぐり機械とシリンダ用の他の一台を製作した。この機械の図面の銅版画が、スミートン氏の "Smeaton's Reports", Vol. I. p.376 (および deserve notice) に掲載されている。これは当時最も強力な機械であり、それをを用いて大気圧機関のための多くの大きなシリンダの中ぐりされた、と説明されている。

水車は直径 18 フィート、幅 5 フィートであり、胸掛け式 (breast fall; 中射式) と呼ばれる種類であった。それは水の作用を受けるための 40 個の float board を持ち、水は、breasting と呼ばれる石の壁を越えて水車の下半分の部分へ注がれた。breasting は float board の端が描く円に対応した円筒形に作られ、水車の約 $\frac{1}{4}$ の部分を、接触しない範囲でできる限り接近して包み込んで回転させ、円筒形のビットとして作用した。^{*20}

水車用貯水池つまり貯水槽の水面は水車中心のレベルより 2 フィート下であったので、水車を駆動する水の全落差は 7 フィートであった。水が注がれる石造りの頂上つまり crown of fall は、水面レベルより $1\frac{1}{4}$ フィート下方であった。水は水車の接線方向となるように傾斜したシャトルまたはスルスゲートにより調整された。シャトルが下降して石造りの fall が閉じられると、水がせき止められた。しかし、シャトルが引き上げられると、シャトルの下端と石造りの頂部との間にすき間ができ、それを通して水が薄膜となって流れ出て、水車の float board の一つを上から打ちつけた。一部は、水が float board を打つ衝撃により、また、一部では float board の上に載った水の重量により、水車を回転させた。breasting の円形の石壁と float board の隙間が微小であるため、そこへ入った水は逃げることができず、その重みで float board を押し続け、水車が回ることにより円形コースの最下位置へ達して、そこで水平方向へ通り抜けて川の流路の中へ出て行った。

(p.292) 水車の軸は直径 9 インチの鋳鉄製であり、軸受間距離は 7 フィートであった。軸の中央部には直径 4 フィートのフランジつまり円形の板が出ており、水車の 2 個のリングの木製アームを固定する中心部材を形成した。これらの木製アームは円形フランジの平らな面に取り付けられて、ボルトでそこへ固定された。水車の二つのリングは、運動を制御する重いはずみ車の作用を行うように鋳鉄で作られた。それぞれのリングは 8 個の円弧部から成り、鍛鉄の板とボルトにより互いに繋ぎ合わされた。各鋳鉄リングには、木のアームを受けるための 8 個のほぞ (臍) 穴が掘られ、他に、木片を受けるための 40 個のほぞ穴も掘られて、そこへ float board が釘づけされた。

^{*20} この種の水車は、以前下掛け水車と呼ばれたものの代わりに、スミートン氏によって導入され、水力応用における大きな改善であった。水車を回すパワーの主な部分は、水の重さにより引き出される。曲がった breast 壁と水車を挟む側壁とが float board に合わされ、float board と壁面との間から漏れて通過する水ができる限り少なくなるようにされた。

水車の軸の工場内側の端部に、歯数 29、直径 $3\frac{1}{4}$ フィート、幅 4 インチの鑄鉄製歯車を取り付けられ、これにより、その両側の二つの大きな歯車を駆動した。一つは、歯数 90、直径 $10\frac{1}{4}$ フィート、幅 2 インチであり、他方は、歯数 60、直径 $6\frac{3}{4}$ フィート、幅 2 インチであった。これら両歯車の軸は、水車の軸と平行で同じ高さで水平に配置され、全ての 3 本の軸は同じ水平面に位置した。その軸受は平行に置かれた 2 本の水平の大きなオーク材のはりで支持され、オーク材のはりの両端は短い横木で繋がれて細長い枠を形成した。これらのはりは二つの平行な壁の上で、基礎まで届いたボルトで固定されて支持された。これらの壁の間の空間は一つの細長いピットを形成し、そのピットの中で 3 個の歯車の下半分が動作した。それらの軸のネック部つまりガジョンピンは直径 8 インチであり、二つの壁の頂部 (capping)、つまりピットの縁を形成するオーク材のはりの上に固定された軸受で支持された。

各軸の端は軸受からその先へ突き出ており、軸に中ぐり棒の端を結合するために、四角形の端部、つまりスミートン氏が fluted head または citadal head と呼んだ端部となっていた。水車の軸の端部もそれと同様の形となっていたので、この中ぐり機械は、異なる直径のシリンダの中ぐりに用いるための、異なる速度で動く 3 本の平行な水平軸を持っていたことになる。水車は、平均して毎分 7 回転するように計画されており、その水車軸は小さなポンプ胴の中ぐり用に動かすのに適用された。毎分 $3\frac{1}{2}$ 回転以下で回転する歯数 60 の歯車は、大きなポンプ胴と小さなシリンダの中ぐりするので使用され、水車軸の反対側の歯数 90 の大きな歯車は、最も遅い回転数の毎分約 $2\frac{1}{4}$ で回転し、大きなシリンダの中ぐりすることが意図されていた。水車の回転は毎分 7 回転に限定されていたのではなく、中ぐりすべきシリンダのサイズに対して最も適した中ぐり運動となるように、調整することができた。

(p.293) 三つの歯車が収められているピットは工場建屋の一方の端を横切る狭いスペースを占めており、3 本の軸の端が突き出した向かい側には、中ぐりする胴またはシリンダを受けるための広いプラットホームつまり平らな床が残されていた。それぞれの胴またはシリンダには適当なそりつまりキャリッジ (carriage) が用意され、軸またはシリンダの中心線に沿って正確に直線運動して、それらをボーラの方向へ移動するようにされていた。このために、それぞれの軸端の向かい側の床の上に 2 本の丈夫なはり置かれ、軸よりかなり低い高さで軸に平行でかつ互いに平行な車道 (road-way) が作られた。これらのはりの上面は正確に真っ直ぐに、水平に、かつ平行に仕上げられ、その上を鉄の棒で覆われた。小さい胴用のそりはその上を滑らせて用いられ、またシリンダ用のキャリッジは摩擦を減らすために小さい車輪が用いられた。しかし、そりまたはキャリッジがその車道の上に沿って、自由にかつ正しい直線から感知できる程度のずれを生じることなく、正確に動くようにあらゆる配慮がなされた。

そりとキャリッジは、シリンダよりかなり長くて広い木材の平らな長方形の枠であった。キャリッジの 2 側辺がその車道に合わされ、側辺を繋ぐ横桁 (cross rail) の上に木のブロックが固定され、ブロックは、その上にシリンダを載せるために、適当な形の窪みが作られていた。このブロックの上にシリンダを横たえ、その間をくさびで調整することにより、シリンダの軸を水平に、かつ中ぐり車輪の軸と完全に一致させた。シリンダはそのブロックの上で鎖を架けて下へ強固に固定され、鎖の両端は、キャリッジの両側の 2 台のウィンドラスつまり小さなローラーで巻き上げられて、非常に固く張力をかけて固定された。これらのローラーはレバーで回転され、巻き戻るのを防ぐためのラチェット歯車と爪車を備えていた。キャリッジとシリンダは、適当な滑車を通してローラーつまりウィンドラスに巻きつけた鎖を、人力で巻き取りることにより、車道に沿ってゆっくりと引いて動かされた。

シリンダの内側へ入る中ぐりヘッドは、シリンダの内面にほぼフィットしている鑄鉄の円形車輪であり、その周囲に 6 ないし 8 個のノッチを持ち、その中に小さい鋼のカッターつまりナイフがくさびで固定されていた。6 ないし 8 枚のカッターすべての切れ刃は、意図するシリンダの正確な直径より極わずかだけ小さい円の

円周に一致するように、くさびで正確に調整された。中ぐりヘッドとそのカッターは、シリンダの底まで届く十分な長さの強力な鉄の軸の一端に固定され、この軸の他の端は、歯車軸の端の突き出た citadel head にソケットで繋がれた。そのポーラにゆっくりした確実な円運動を伝えて、その切れ刃がシリンダの中で回転することにより、シリンダ内表面の全ての不規則さを削り取って滑らかにし、真に円筒形のシリンダを作り出した。

スミートン氏の時代以前に作られたすべての古い中ぐり機械は、強度を欠いていた。そのため、大きなシリンダをうまく中ぐりすることができなかった。なぜなら、中ぐりヘッドは 4 ないし 6 枚のカッターを持っていたが、(大きな直径のシリンダであれば、) 荒削りのシリンダ直径よりむしろ小さい円に調整せざるを得ず、そのために、シリンダの内周全体を一度に切削中ぐりすることはできなかった。もし、大きなシリンダを一度に全周を切削するために、カッターがフルサイズの円に調整されたならば、全てのカッターを同時に動かすための抵抗は、水車が確実に定期的に動ける値より大きくなったであろう。または、そのような完全な中ぐりに耐えるためには、そのキャリッジの上でシリンダを確実に保持することはできなかったであろう。

(p.294) 中ぐりヘッドとその軸の重さを支える適当な支持はなく、円周の下部に来たカッターで支える形になっていた。そのため、切削されるのはシリンダの円周の下部だけにほぼ限られていて、大きなシリンダをこのポーラで一とおり処理した後では、下部は滑らかにされたが、上部は非常に不完全に、または全く不完全にしか削られなかった。この不備を直すために、初回の中ぐりの後シリンダを外して、キャリッジの上で半回転回して取り付け直し、他の側を上にして、再び最後までそれに中ぐりすることが必要であった。最も大きいシリンダでは、この操作が 4 回に分けて反復され、内面の $\frac{1}{4}$ 部分を滑らかにする操作が繰り返し行われた。

スミートン氏は彼の中ぐり機械で、シリンダの全周に渡って 6 枚のカッターすべてで同時に切削するために、水車の十分なパワーと要求にかなう部品の強さを与えようと意図した。中ぐり工具の重さを支えるために、彼はシリンダの中へ入る小さい車輪キャリッジを工夫した。その車輪キャリッジでこつまりさおばかりの支柱を支え、てこの一端から中ぐりヘッドの軸の先端を吊るし、他端に中ぐりツールの重さとつり合いをとるための十分な重りを吊るした。この方法により、中ぐりツールは上下どちら側にも均等に力を及ぼし、シリンダの内面全周を均等に正しく切削して一度に正確に中ぐりできると期待された。このようにして、シリンダをキャリッジの上で回転して上下を変えて再度中ぐりする必要性を取り除いた。

このさおばかり式キャリッジの構造は、図 1 から十分に明らかである。A A はシリンダの断面であり、B B はシリンダを載せるキャリッジの横桁の上に固定された木ブロックの断面である。C はポーラの軸であり、その一端は中ぐり歯車の軸の突き出た先端に継手により繋がれており、その他端に中ぐりヘッドつまり車輪 D が繋がっている。この車輪 D は、側断面で示されるように、6 個のアームで作られて 6 枚のカッターが付けられている。車輪 D から突き出ている軸 C の先端は、鉄のこつまりさおばかり b d e の短い端 b からリンク a により吊り下げられている。てこの長い端 e には重りが吊るされ、支点つまり運動中心 d は鉄の支柱 f の頂部で支えられる。支柱 f は強力な木の支柱 g の穴の中を上下に滑り、鉄の支柱 f の穴の一つにピンを差すことにより、求められる高さで支柱を固定することができる。木の支柱 g は小キャリッジの平らな厚板台 h の上に固定され、小キャリッジは 4 個の車輪でシリンダの内面上を動くことができ、または、むしろその下でシリンダが自由に動くことができる。なぜなら、実際はその小キャリッジはまったく動かずに、中ぐり軸の端に対して静止してその重さを支えなければならず、シリンダとそれを固定したキャリッジが少しづつ進んで、ポーラがシリンダの一端から他端まで中ぐりできるようにしなければならない。小キャリッジのベッド h の端面の中に 1 個のローラーが取り付けられ、中ぐり車輪 D のリムの上を転がって押され、さおばかりキャリッジがポーラの方へ移動するのを防いでいる。E はキャリッジの端から突き出した長いハンドルつまり尻尾であり、作業者が時折小キャリッジを操縦して、シリンダ内でそれを適当な位置に保てるようにするためのものである。シリンダの端を超えた F の位置では、2 枚の厚板が固定されていて、棹ばかりキャリッジの車輪

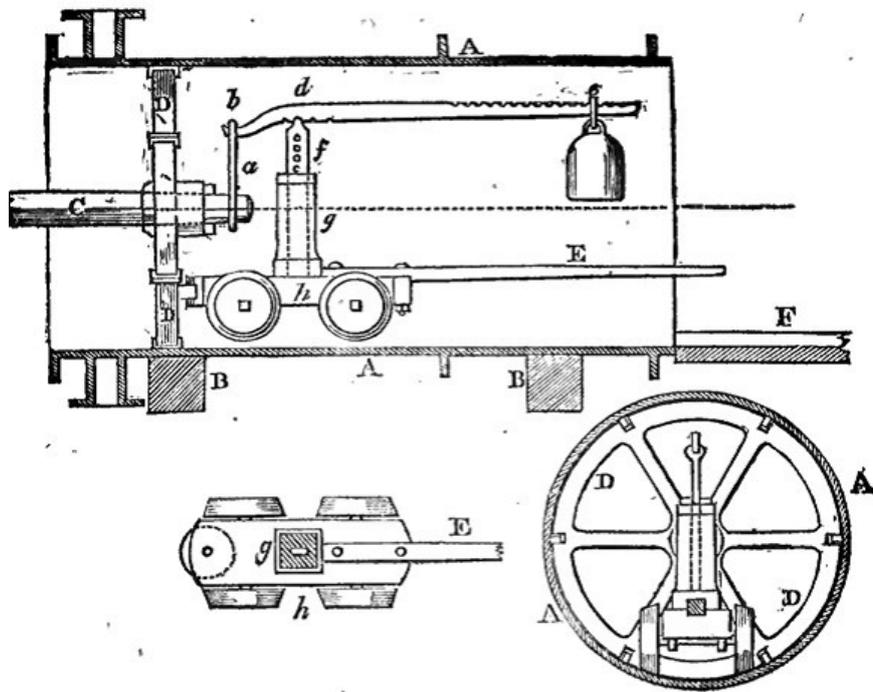


図1 スミートン氏の中ぐり機械

のための道路の延長となっている。これらの厚板は、ポーラがシリンダをほとんど通過するまでポーラ車輪を支える。上記のスケッチは直径 36 インチのシリンダに対して描かれているが、鉄の支柱 *f* を上げ下げしてレバーの支柱 *d* を変えて、バランス重り *e* を調節することにより、異なるサイズに対しても同じ装置が使えることは明らかである。

(p.295) スミートン氏は、この方式についての彼のコメントの中で以下のように述べている。「シリンダは、鉛直方向に置かれる場合を除いて、正確に中ぐりされることはないであろう、というのが多くの機械技師らの意見であった。もし、シリンダを鉛直方向に置くのと同じ条件にするこの案を思いつかなかつたら、私は鉛直中ぐり機械を建造しなければならなかつたであろう。鉛直中ぐり機械は運動をますます複雑にし、操作を大きく妨げたであろう。」

スミートン氏のさおばかりキャリッジがキャロンの労働者の支持を得て、直ぐに使用されるようになったようには見えない。しかしその数年後、その支配人はスミートン氏に、中ぐりでシリンダを全周に渡って円形に簡単に正確に切削することが可能かどうか、検討するように求めた。なぜなら、当時実用になっていたシリンダを四分分割する方法では、内面を完全に円形および円筒形に形作ることはできなかつたからである。

それに答えてスミートン氏は、全周を切削する強力な built machine を可能とするために、彼が工夫できた最良のものとして、彼の上記の方式を推奨している。しかし、最も大きなシリンダを一回の操作で中ぐりするには、水車のパワーおよびキャリッジの上にシリンダを固定する方法が十分ではなかつたようである。彼は中ぐり抵抗を減らすために 6 枚の代わりに 1 枚だけのカッターを用い、切れ刃を持たない滑らかな 2 枚の鋼片を中ぐり水車の二つのノッチに固定し、カッターと合わせて三角形を作るように配置することを提案した。また、他の 3 個のノッチを固い木の楔で埋めることも提案した。楔が擦り減るにつれてエッジが押し出されて、

運動ができる程度に常に固く正確にシリンダに接し続けるであろう。「カッターの刃がシリンダの表面となす角度は、適切な切削を行いさえすればよく、できる限り鋭い切断とならないようにするべきである。切れ刃は非常に正しく研磨されて、油砥石で滑らかに設定されねばならない。カッターの刃はシリンダの軸と平行であってはならず、非常に長いねじの一部を形成するように、軸に対して少し傾いていなければならない。その傾斜は、カッターの運動がポーラを食い込ませるのでなく、後方へ押し込もうとする方向である。1枚のカッターで中ぐりするこの方法でシリンダ粗削りするのは、長時間を要して退屈であるので、まず、6枚のカッターを用いた普通の方法により4回の操作で中ぐりし、5回目の操作として上記の1枚のカッターを用いたシステムで一とおり中ぐりして、シリンダを作るのが最良であろう。また、さおばかりキャリッジと良好なテークルを慎重に用いると、きれいに削ることができ、表面を全く滑らかにまた磨かれたようにさえすることができるであろう。」

(p.296) 完全な中ぐり機械についてのスミートン氏の考えは、ウィルキンソン氏が新しい機械を発明するまでは、実現されたようには見えない。ウィルキンソン氏の機械は今日蒸気機関シリンダの中ぐりに広く使用されており、適当な個所で後述されるであろう。

5 工場の機械駆動用水車への揚水のための大気圧機関の応用

セイヴァリ氏は 1698 年の特許と 1702 年の "鉱夫の友" の中で、あらゆる形態、種類の水車を動かすために水を供給する用途について、特に石炭が安価な場所で彼の機関を応用する案を記述している。しかし、この提案は、ニューコメン機関が鉱山の排水や都市への給水に一般に使用されるようになるまで、実現されることはなかった。

1752 年頃、ブリストル (Bristol) のチャンピオン (Champion) 氏により、その近郊で設立されたある広大な brass battery work のパワー源として、火の機関が用いられた。そこには、火の機関で大きな貯水槽へ揚水した水で動かされる何台かの上射式水車があった。水は水車を動かした後、水車下のプールから上の貯水槽へ火の機関により再び揚水され、同じ水が絶えず循環した。この動作は約 20 年間続けられたが、機関で消費される石炭の費用が高つくため、それ以降諦められた。

前世紀 (18 c) の初期においては、機械力と水車を使用した工場は現代のそれらと比較して小規模で、その数も極めて少なかった。いくつかは馬による機械を持っていたが、ほとんどの工場は滝のある場所に位置し、最初の設立以降の長い期間、そこから必要とされる十分なパワーを得ていた。しかし、やがて事業が次第に増大するにつれ、一般に工場主たちはより大きなパワーの必要性を感じるようになった。

1754 年頃、スミートン氏は風と水の自然の力を機械に応用する方法について改良を行い、それにより、当時存在していたほとんどすべての機械の性能を、同じ水の量で 2 倍にすることが可能となった。彼は 30 年の間、そのような機械の建造を指揮する実務を広範に行った。この王国各地に彼が残した多数の見本は、それぞれの近隣の他の人々によりコピーされ、水車を建造する改善された方法が一般的になり、事業に大きな利益をもたらした。

夏に水が不足していたいくつかの例では、乾季に工場を動かすために馬駆動の機械が建造された。スミートン氏はかつて、水が不足する時期に水車用の水を汲み戻すための馬機械を作った。

このように自然の滝が有効に使用されたので、その後、数年後に工場が以前の規模を超えて大きく拡張されるまでは、水車のために蒸気パワーを使用する必要性は感じられなかった。そして、他のパワー源がなくなっただけで、水を元の高さへ戻すことにより自然による水の供給不足を補うために、火の機関が建造された。

この応用は、最初 1760 年ないし 1765 年頃に、コールブルック・デールまたはキャロンの大きな製鉄所で最初に行われた。ここでは、工場作業の種々の操作のためにいくつかの水車が必要とされていて、それらはすべて川の水により動かされていた。しかし、夏季の間では水の供給は必然的に不足し、それらをすべて動かすには不十分となった。鉄の製造には熱が弱められることが決してないように、炉に休まずに絶えず送風し続けることが最も重要であり、そのために炉の送風機を動かすために最初の戻り機関 (returning engine) が建造された。しかし、このような必要性から始まった機関の使用は非常に良好であることがわかり、その後、他の目的にも機関の応用が広く拡張されていった。

(p.297) 火の機関からのパワーに完全に依拠した工場が建設されたのは、自然の滝の落差により水車を補助する戻り機関の使用から、ある期間過ぎた後のことであった。この種の最初の試みは、1762 年にオックスレー (Oxley) 氏によってなされたように見える。彼は、ノーサンバーランド (Northumberland) のシートン・デラバル (Seaton Delaval) 近郊のハートリー (Hartley) 炭鉱で、縦坑から石炭を引き上げるための機械を建造した。それは当初、火の機関の大レバーの直接の作用により駆動する連続的な回転運動を用いて、機械を回すことが意図されていた。しかし、その案はうまく動作しなことがわかって、その後、機械を動かす水車に供給する水を揚水するように変更された。この機関は数年間動き続け、不完全な建造のために最後には諦められ

たが、その方法の実用性を実証することができ、火の機関で給水される水車で石炭を引き上げるための他のいくつかの試みを引き起こした。しかし、これら最初の試みは幾人かの計画者の技術の貧困のために、不成功であるとわかった。彼らは炭坑のための普通の機関製造者であり、機関に対する火の作用や水車に対する水の作用の原理について、等しく無知であった。

1776年に、スミートン氏はハル(Hull)で、給水設備のための機関からの予備の水で駆動される小さなオイル水車(oil-mill)を建造した(257ページを参照)。そしてその翌年、彼は石炭を引き上げるための水車と機械に加えて、それに水を供給する火の機関を建造した。これは、特に水車に水を供給する目的で建造された蒸気機関の、おそらく2番目の例であった。少なくとも、実際の使用のための確立した計画になる程度に、完全に目的に答えることのできた例としては、2番目の例であった。

5.1 スミートン氏設計による揚水、水車への給水および炭鉱石炭搬出のための大気圧機関、1777

スミートン氏は1774年に、大部分の炭坑で普通に行われていた馬による方法に代わって、直径37フィートの上射式水車のパワーにより、深さ100ヤードの立坑から石炭を引き上げるための機械を建造した。この機械は、ワーウィックシャーのグリフのロジャー・ニューディゲート(Roger Newdigate)卿の地所で建造された。そこは、1712年に最初の大気圧機関がニューコメン氏によって建造されたのと同じ炭坑であった。その水車は幅1フィートでポケット深さ10インチであったが、それは、深さ50ファゾムの立坑の底から、1分半の間に重さ5cwtの一籠(a corf or basket of)の石炭を引き上げた。

この機械の成功により、自然の滝の落差が得られない他の場所でも、石炭を引き上げるために同じ方法を用いることが切望されるようになった。そのためにスミートン氏は、上射式水車のポケットに水を供給する貯水槽まで揚水するための火の機関を建造することを提案した。そして歯車仕掛けによりこれで円筒形の胴を回してロープを巻き上げ、鉱山から石炭の籠を引き上げた。この案は以前にニューカースルで実用に移されたが、機関および機械においてその比率が不完全であったために非常に不十分な効果しか得られず、馬により引き上げるほどの良い結果とならず、断念されてしまっていた。

これらの火の機関の石炭機械で最初のもは、82ファゾムの深さから石炭を引き上げるために、1777年にロング・ベントン炭坑に設置された。その機関のシリンダは直径26インチであり、ピストンは $5\frac{2}{3}$ フィートの行程を毎分 $13\frac{3}{4}$ 行程、つまり毎分78フィートの運動を行った。ポンプは直径 $18\frac{1}{2}$ インチで、揚程は34フィートであった。ポンプの中の水柱の重さは3975ポンド^{*21}であり、毎分78フィート上げたので、それは $9\frac{4}{10}$ 馬力に等しい。送水量は、毎分146立方フィートであった。

(p.298) 噴射水はポンプが水を上げた主水槽から供給されたので、別個の噴射ポンプはなかった。噴射噴流の開口部は $\frac{3}{4}$ インチ角であり、水槽水面の高さは開口部の上方 $16\frac{1}{2}$ フィートであった^{*22}。毎分6立方フィートが噴射に消費されたとすると、直径30フィートの水車への供給として毎分140立方フィートが残されるであろう。

この機関は炭坑のある立坑から他の立坑へ時々移動されることを意図していたので、それに要する作業を簡

^{*21} (訳注)Farey の計算方法に従うと、p.162(第2章)の規則により、

$$(\text{水柱の重さ [lb]}) = 0.341 \times (\text{直径 [in]})^2 \times (\text{水柱高さ [ft]}) = 0.341 \times 18.5^2 \times 34 = 3968.0 \text{ lb}$$

^{*22} 噴射キャップの開口部と噴射できる量は、共にスミートン氏の表(第2章 p.183)より大きい値である。これは、噴射水柱の高さが表に定められている値よりかなり小さいためである。

潔にするためにその構造は前述のいずれとも異なっていた。そのため、ボイラの据付と基礎壁つまり橋脚以外に建屋つまり石造りの機関室はなく、すべての可動部は木のフレームで支持され、大レバーに代えて車輪つまり大きな滑車が用いられた。ピストン・ロッドからの鎖がポンプ・ロッドの鎖に直接繋がれて、その鎖が車輪外周の上の部分にロープとプーリのように掛けられ、ピストンが降下するとその動きに等しい量だけ逆方向へポンプ・バケットとその水柱を引き上げた。この配置によりレバー機関に比べてポンプはシリンダの位置により近くなり、またそれらの間にレバー壁がなかったため、全体の機関はより小さい範囲に収まった（この機関の銅版画と説明は、"Smeaton's Reports", Vol. II, p. 435 で与えられている*23）。

ボイラは直径 10 フィートで、火格子は 3 フィート角 (= 9 平方フィート) であった。煙突は内側 19 インチ角で、その頂上は火格子から高さ 40 フィートであった。ボイラは、既述のスミートン氏の機関の普通の方法で作られたレンガ積みの中に設置され、そのレンガ積みは約 14 フィート角の立方体状であり、基礎の上約 15 フィート高さであったが、ボイラのドームの上部はレンガより上に出ていた。レンガ積みのこの立方体の一辺に煙突が置かれ、その辺上でボイラ用のレンガの上方 4 フィートの高さに壁が築かれて、機関の上方部分を支持する木材枠の一端が支えられた。木材枠の反対側の端は、ボイラのその端の向かい側にボイラから 9 フィート離して立てられた高さ 19 フィートの壁の上に置かれた。その 9 フィートのスペースにはポンプと制御ギアが設置され、その下部は地面が掘られて、ポンプで引き上げる水のタンクまたはピットとなっていた。

木の枠は二つの二等辺三角形から構成され、両者は 5 フィートの間隔を空けて互いに平行な鉛直面内で固定された。それぞれの三角形は底辺約 23 フィート、垂直高さ 23 フィートであり、従って、頂点の角度は約 60 度であった。各三角形の底辺は 2 本のはりを結合して、幅 12 インチ、深さ 24 インチ、長さ 27 フィートの小角材で構成された。その端は、(14 + 9 =) 23 フィートの間隔を空けた前述の二つの基礎壁の上に載せられた。プーリ車輪の軸は三角形の頂点で支えられ、その軸のガジョンピンは、両三角形の斜辺となる 12 インチ角はりの上端に取り付けられた鑄鉄キャップつまり箱の中の真ちゅうにより支持された。

(p.299) 二つの三角形枠は、それらの中に組み込まれた数本の横断部材と適当な結合ボルト、筋交いにより固く繋がれ、正面図上で文字 A の形に似た強固な枠を形作った。

プーリの軸は木製であり、中央で直径約 24 インチ、両端で直径 18 インチ、長さは 5 フィートであり、鉄のたがで締められていた。直径 5 インチの鑄鉄の軸が木製軸の中心に通され、木部から直径 $4\frac{1}{2}$ インチのガジョンピンが突き出て、両先端が三角形枠の頂部の真ちゅうの中に入れられていた。この軸の中央に固定されたプーリ車輪は直径 10 フィートであり、円形リムは幅 12 インチ厚さ 5 インチであり、ワゴンの車輪と同じ方式でほぞ継ぎされた 10 本のアームで軸に取り付けられていた。

シリンダは、二つの三角形枠の間の空間に鉛直に立てられた。その底にはフランジから両側へ突き出た強力なアームがあり、それが 2 本の強力な水平はりつまり三角形枠の基礎に差し渡されてボルト止めされ、シリンダを下方へ非常に強固に固定した。そのシリンダはボイラのドーム中心の真上に位置し、直径 $4\frac{1}{2}$ インチの蒸気管が、半球形のシリンダ底に普通どおり取り付けられていた。しかし、シリンダはその中央部でなく底部で固定されていて、三角形はりの基礎はシリンダのはりの役目も果たしていた。

ピストンの柄は $2\frac{1}{2}$ インチ角の錬鉄製であり、その上端は車輪の周囲に掛けられた 2 本並列の鎖に繋がれた。これら 2 本の鎖は 2 本の鉄の棒つまり長い曲がったリンクによりポンプロッドを吊るした同様の 1 対の鎖に繋がれた。ポンプロッドは同じく鉄製であり、その先はポンプ胴の中へ下りて下端でバケットに繋がれた。2 組の鎖対を繋ぐ長いリンクはプーリ車輪の周囲に沿うように曲がっており、滑るのを防ぐために車輪に固定されていた。

*23 (訳注) "Smeaton's Reports" 掲載の銅版画を 図 2 に示す。

ELEVATION & PLAN of a FIRE ENGINE, for raising Water for the WATER COAL GIN, at the Prosperous Pit, LONG BENTON COLLIERY.

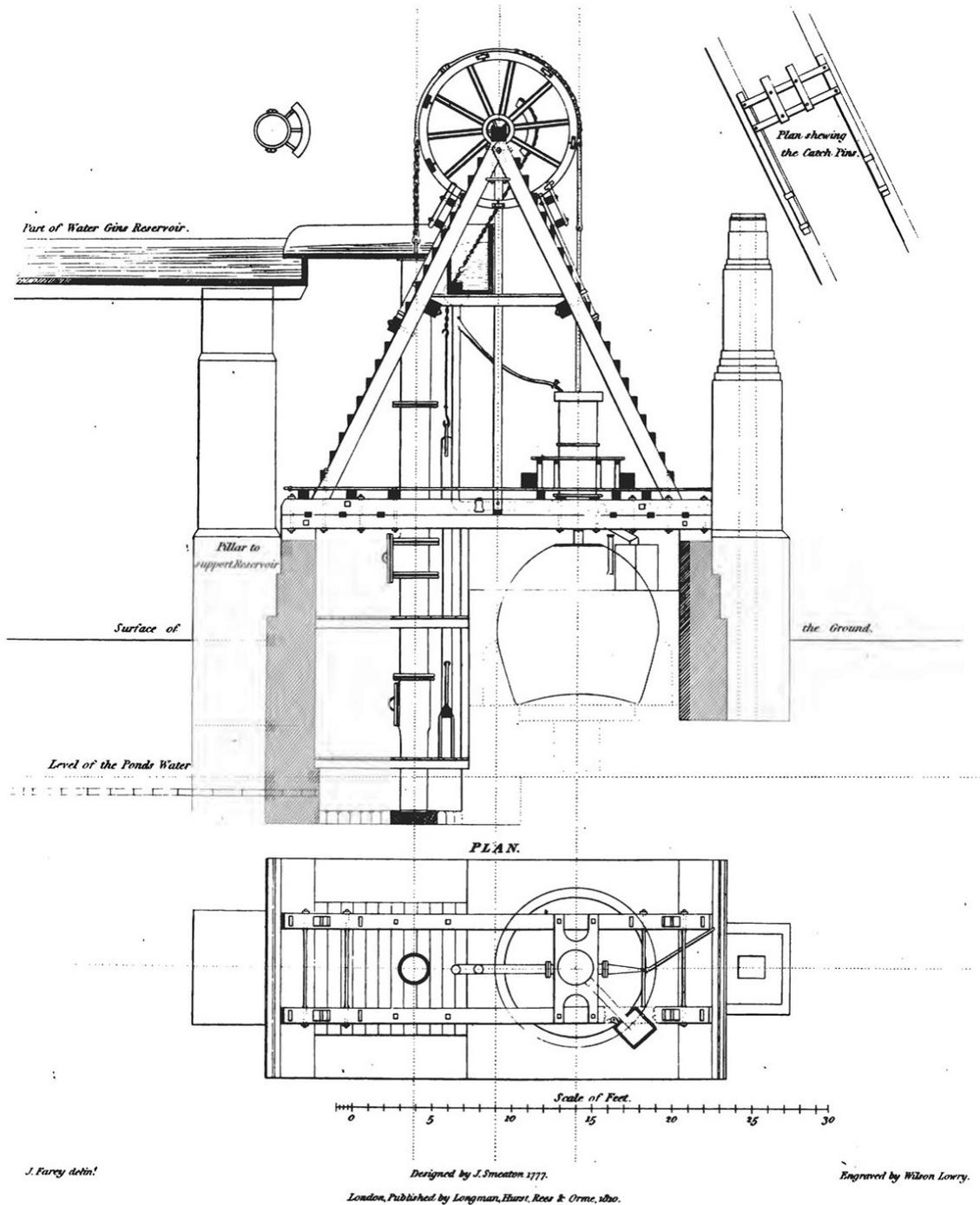


図2 スミートン氏の水車駆動石炭引き上げ機の戻り機関 (訳者挿入)

ポンプの鉛直のコラムは高さ 35 フィートであり、5 本の区間で構成されて、フランジとネジボルトで繋がれていた。ウィンドボアと呼ばれる最下部の区間は底が平らになっていて、約 $2\frac{1}{2}$ フィートの深さの水が溜まったピットつまりタンクの底の、大きな礎石の上で支持されていた。そして、下端の周囲には幅 $3\frac{1}{2}$ インチで高さ 8 インチの 8 個の穴つまり直立スリットがあり、水を自由に通して異物の流入を防いだ。ウィンドボアは内径 18 インチであったが、その上端でポンプ胴の下端に繋がる部分は広がって円錐形弁座を形成し、

下部弁 (lower clack) つまり固定弁 (fixed valve) が入れられて栓のように固定された。この円錐形弁座のすぐ上の片側には、必要なときに弁体を出し入れするための 20 インチ角の開口部が設けられた。その開口部は強力な鉄の扉で閉じられ、開口部の全周に突き出たフランジに 8 本のボルトを通してネジ止めされた。

ウインドボアの上端に繋がれたポンプ胴は、直径 $18\frac{1}{2}$ インチ、長さ $6\frac{1}{2}$ フィートであり、その内側は正確に中ぐりされた。そのすぐ上には短い区間があり、必要な場合にはバケットにアクセスまたは取り出せるように、20 インチ角の開口部があり、ねじ止めされた扉が付いていた。最後に、このバケット扉部の上方に直径 $19\frac{1}{2}$ インチの区間が 2 本繋がり、それは、水車用貯水槽へ水を運ぶ木製のポンプ樋つまり吐き出し口まで達していた。ポンプ樋はシリンダの頂部よりかなり高のプリー車輪のごく近くまで達し、ポンプ自身で支えられていた。ポンプは、三角形枠の間の水平横材の一つに固定されて安定化された。鎖に吊るされたポンプロッドの一部は $2\frac{1}{2}$ インチ角の錬鉄であったが、バケット柄までの残りの部分は 4 インチ角で 5 フィート長さの鑄鉄製であり、それぞれの区間の間は直径 $1\frac{1}{3}$ インチのピンによる継手で繋がれた。これらの全ロッドの重さが、ピストンとつり合ってそれを引き上げるつり合い重りとして作用した。

(p.300) ポンプの吐き出し口の水を受けて水車へ運ぶ貯水槽つまり樋は長さ 18 フィート、幅 5 フィートであり、フル稼働時の深さは 2 フィート 2 インチであった。機関につながったその一端はレンガ造りの高い橋脚に載せられ、水車の上に達する他端は、水車の両側に地面から立てられた鉛直の 2 本の柱により支持された。その水車側の樋の端は底を 10 インチ下げて、より低くされていた。この樋は水車のバケットに水を運ぶ噴出口となっていて、そのために、水車を止める時に水の流れを止めるための鉛直の水門つまりドロップ・シャトル (drop shuttle) が取り付けられた。この樋の水平の底は貯水槽の満水時の水面より 38 インチ低く、直径 30 フィートの水車の頂部より 2 インチ下であった。

水車の底は下部のピットつまり水槽の水面より 2 インチ上であり、下部ピットは水車からの水を受けて、既述のように、そこから機関のポンプが水を引き上げ、このようにして同じ水が連続して循環した。つまり、水はそのピットから頂上の貯水槽の一端へポンプで引き上げられ、その他端の樋を通して水車のバケットへ流れた。そして、水車を下って下部のピットの一端の中へ落下し、ピット内を他端まで流れて再度ポンプにより汲み上げられた。

上の貯水槽は 18 フィート×5 フィートであり、深さ 2 フィートのとき 180 立方フィートの水を含み、水車の水消費が毎分 140 立方フィートであったので、何らかの事故により機関が停止した時、貯水槽は $1\frac{1}{4}$ 分間フルに水を供給できたであろう。貯水槽の深さが 26 インチまで上がったときは常に、溢れる水を運び去るために、一本の大きなトランクつまり排水管が水槽の一方の側に設置された。この排水トランクは、貯水槽を支える橋脚の横へ下って下のピットへ水を返した。

前述のドロップ・シャトルに加えて、噴出口にもう一つのシャトルがあり、機関が水を再度上へ上げるのと同じ速さで水が流れ出るように、また、水車が適当な速さで回るのに必要とされる水量になるように制御された。この高さは実験的に求められ、シャトルはその開度で釘付けされた。他方のドロップ・シャトルは、水を自由に流れさせるために完全に上へ引き上げられるか、または、すべて止めるために完全に下ろされた。

水車は外径 30 フィートで、72 個のバケットを持ち、バケットの内側の幅は 16 インチ、バケットの深さは 12 インチであった。水は噴出口から水車の頂上の最も高い位置のバケットの中へ、水平方向に注がれた。

水車は 12 本のアームつまり半径材を持ち、アームは中心部で 6 インチ角、リム部で 4 インチ×6 インチであった。そのアームは鑄鉄の軸に固定されていて、その軸は軸受間距離 10 フィート、中央部直径 9 インチであり、両端で直径 $7\frac{1}{2}$ インチとなるようにテーパ状に細くなり、両端に直径 6 インチ、軸受部長さ 6 インチのガジョンピンが付いていた。水車にはこの軸の一方の端近くに、円形フランジ、つまり厚さ 2 インチで直径 4 フィートの円板が取り付けられた。フランジは 12 本の木製のアームに押し当てられ、それぞれに 2 本のボ

ルトが通されて固定された。その軸にはまた、2 個の主歯車を固定するために二つの四角い箱が取り付けられていた。これらの箱の一方は軸の中央近くの位置にあり、他方は一方の端近くにあった。

(p.301) 両歯車は直径 $12 \frac{1}{2}$ フィートで、歯車の平らな面から軸と平行に突き出した 88 枚の歯を持っていた。二つの歯車の歯はお互に向き合っており、両者の間の 20 本の棧 (stave) のついたトランドル (trundle; 小車輪) とかみ合っており、一方または他方の歯車のいずれかにより回転させることができた。トランドルの直径は二つの歯車の歯先の間の間隔より小さいので、それが同時に両方にかみ合うことはなかった。

このトランドルは、長さ 37 フィートで 14 インチ角のモミ材の水平軸の一端に固定され、その他端は、ロープを立坑から巻き上げる胴の軸に繋がれた。トランドルが固定された長い木の軸のその端に取り付けられたガジンは、直径 3 インチで、軸受長さ 5 インチであり、外側に鋼をかぶせて硬化された鍛鉄で作られた。このガジンは、二つの歯車の間に立てられた鉛直のはりつまりポストで支持され、そのはりは下端を中心に動いてどちらかへ傾くことにより、トランドルがギアに投入されてどちらかの歯車の歯にかみ合っており、ある方向または逆の方向へ回転させることができた。このようにして、水車とその歯車は、噴出口からバケットの中へ注がれる水の重力により、常に同じ方向へ回転し続けるにもかかわらず、ロープを巻き上げたり下ろしたりできた*²⁴。

長い軸のガジンを支持する鉛直のポストの頂部は、歯車の上はかなりの高さまで伸ばされていて、その上に建てられた小さいハウスつまりキャビンの中まで届いていた。その中では運転員が立って鉛直はりの上端を一方または他方へ動かすことにより、トランドルと巻き上げ胴を自由にいずれの方向へも回すことができた。また、それを中央の位置に保つことにより、両方の歯車から切り離すこともできた。鉛直ポストの頂部は水平はり内の溝または長いほぞ穴でガイドされていて、大きい船のティラー (舵柄) を動かすのと同様に、ポストをどちらかへ引くために 2 対のプーリ・ブロックが取り付けられた。トランドルがどちらかの歯車とかみ合ったとき、ピンをほぞ穴に通してポストをその側に固定した。

運転員が機械の運動を制御できるように、水車に最も近い大歯車には、風車のものに類似したブレーキつまりグリップが組み込まれていて、レバーを引くと歯車の周りにブレーキを固く引き付けて、摩擦が大きくなり水車の動きを止めることができた。このブレーキのためのレバーはキャビンの中に置かれて、同じ運転員が操作できた。彼はまた、機械を停止または始動する必要があるときに、水車のシャトルを上げ下げするためのつり鐘の引き綱のようなハンドルも操作した。

ロープが巻かれていた胴は、長い水平軸の端に置かれて継がれていた。それは樽状、つまり底部と底部を結合した 2 個の円錐のような形であり、中央で直径 $5 \frac{1}{4}$ フィート、両端で直径 3 フィート、長さ $10 \frac{1}{2}$ フィートであった。その胴は中心に 1 フィート角の木の軸を持ち、その上にサイズの異なる 5 個の車輪が固定され、これらの上に胴の木製の棧が釘付けされた。胴を支持するために、軸の両端にガジンピンが取り付けられた。その一端のガジンピンは鍛鉄製で、直径 3 インチ、軸受長さ $4 \frac{1}{2}$ インチであった。他端のガジンピンは鍛鉄製で、直径 4 インチ、長さ 6 インチであり、胴を回す全ての力はこのガジンピンを通じて伝えられるので、それは、木の軸に固く固定されていた。そのガジンピンの先端は突き出た正方形であり、長い木の軸の先端に固く固定された鍛鉄のソケットの中で受け止められた。

(p.302) 胴の軸は水車の軸に対して直角方向に水平に置かれ、胴の両端のガジンは適当な木材細工の枠で支持された。長い軸から運動を伝えられる突き出た正方形とソケットには、十分な遊びが設けられていて、長い軸の他の端にあるトランドルが一方の歯車から他方の歯車へ移された時、長い軸の方向が少し変化しても支

*²⁴ この機械は、リー (Ree) の "Cyclopaedia、第 XXXVIII 巻、記事 巻き上げ機械" の中で記述されている。同書には、スミートン氏の元のプランをもとに、著者により描写された銅版画も掲載されている。

障ないようにされていた。また、この方向変化の影響をなくすために、その軸は 37 フィートもの長さに作られた。

水車の軸から胴の中央つまり最大直径部までの水平距離は 50 フィートであり、胴の軸から炭坑の立坑の中心までの距離も 50 フィートであった。胴からのロープはプーリに導かれて斜めの方向へ向けられ、立坑口の上方で地表から 20 フィートの高さにある、固定された 2 個の大きなプーリに導かれた。これらのプーリで曲げられた後、ロープは、垂直深さ 82 ファゾムの立坑の中へ下りた。

石炭の二つの揚げ籠 (corfe) つまりバスケットを交互に引き上げるために、胴の回りに逆向きに巻かれた二つの別々のロープがあり、一方のロープで満載の揚げ籠が引き上げられている間、他のロープで空の揚げ籠が下ろされた。1 本のロープを巻くのに、円錐形胴の長さのそれぞれ半分が用いられた。ロープの端は胴の小さい端に固定され、毎回のロープのコイルは胴のより大きい部分へ巻き取られていき、ロープは中央部つまり最も大きい部分に到達した。胴の各半分部分は、ロープの約 84 ファゾム (= 504 ft) を周囲に巻くことになると計算されていた。ロープの直径は約 $1 \frac{5}{8}$ インチで、胴の各半分部分の長さは $5 \frac{1}{4}$ フィート (= 63 インチ) であり、ロープを横に隣接して巻いたと仮定すると、それはロープを 39 回巻けることになったであろう。胴の小さい方の端 (直径 3 フィート) は周囲 9.42 フィートであり、最も大きい部分 (直径 $5 \frac{1}{4}$ フィート) は周囲 16.49 フィート、または最も小さい部分より 7.07 フィート大きかった。この増加量が 39 回のコイルで得られるのであるから、一回巻くごとに増加する長さは 0.18 フィートであったに違いない。

胴を円錐形とする意図は、2 本のロープの重さにより生じる不均等な抵抗を補償することであった。たとえば、満載の揚げ籠が立坑の底にあるとき、揚げ籠自身とその中の石炭の重さに加えて、立坑内で垂れているロープ 82 ファゾムの全ての重さが、機械により引き上げられるべき余分の重量となったであろう。なぜなら、空の揚げ籠のロープは胴のまわりに全て巻かれていて、その重量はつり合い重りとして作用し得ないであろうからである。満載の揚げ籠が立坑の底から引き上げられるにつれて、それを吊り下げているロープの重さは運動に対する抵抗を次第に小さくしたであろう。また、空の揚げ籠を立坑内へ下ろしている他のロープの重さは、その抵抗へのつり合い重りとして作用し始め、より多くのロープが下りるにつれて、抵抗のますますより大きな部分とつり合うようになり、同時に、上昇しているロープのより多くの部分が巻き上げられるにつれて、抵抗自身も減少していくであろう。

周囲長さ 5 インチのロープは、単位ファゾムあたり約 5.6 ポンドの重さであり、したがって、82 ファゾムでは 460 ポンド近くの重さとなったであろう。空の揚げ籠の重さは約 84 ポンドであり、その中に含まれる石炭の重さは約 $6 \frac{1}{4}$ cwt つまり 700 ポンドであった。

満載の揚げ籠が立坑の底にあるとき、引き上げるべき重さは $(700 + 84 + 460 =)$ 1244 ポンドであり、それが、胴の最も小さな部分、つまり $1 \frac{1}{2}$ フィートの半径に作用するので、1 フィートの半径に作用する $(1244 \times 1.5 =)$ 1866 ポンドの力に等価であろう。これに対抗する重さは、単に空の揚げ籠 84 ポンドの重さだけであるが、それが半径 $2 \frac{5}{8}$ フィートの胴の最も大きな部分に作用するので、それは、1 フィートの半径に作用する $(84 \times 2.625 =)$ 220 ポンドの力に等価となり、胴の運動に対する全抵抗は、1 フィートの半径に作用する $(1866 - 220 =)$ 1646 ポンドの力に等価となるであろう。

(p.303) 満載の揚げ籠が立坑の頂上まで引き上げられたとき、重さは半径 $2 \frac{5}{8}$ フィートに作用する $(700 + 84 =)$ 784 ポンド、または半径 1 フィートに作用する $(784 \times 2.625 =)$ 2058 ポンドに等しいであろう。それに対抗する力は半径 $1 \frac{1}{2}$ フィートに作用する $(84 + 460 =)$ 544、または半径 1 フィートに作用する $(544 \times 1.5 =)$ 816 ポンドの力であり、胴の運動に対する全抵抗は、半径 1 フィートに作用する $(2058 - 816 =)$ 1242 ポンドに等価となるであろう。

ここで、胴の形は、抵抗を完全に均等にするのに十分な円錐形ではなかったことが分かる。なぜなら、抵抗

は最初は 1646 ポンドであり、終わりではわずか 1242 となり、つまり、近似的に 4:3 であった。したがって、もし水車への水が均等に供給されていたならば、揚げ籠を引き上げている間、その運動はかなり速くなったであろう。

この機械は、それ自身の動きにより水車に流れる水を止めるよう改変され、その停止の瞬間は、満載の揚げ籠が正確に立坑の頂上に持って来られた時になるよう調整された。この目的のために、歯数 15 枚のピニオンが長い軸のガジヨンの最端部の、トランドルが固定されている端部に取り付けられた。このピニオンは、水平スピンドルの端に取り付けられた歯数 60 の歯車を回した (つまり 4:1)。その水平スピンドルは二つの大きな歯車の間に、長い軸の方向の延長線上のより高い位置に置かれた。このスピンドルの他端には歯数 8 枚のピニオンがあり、歯数 80 枚 (10:1) の歯車を回した。それは計数歯車 (count-wheel) と呼ばれ、最初のスピンドルの上側に平行に水平に置かれた。ロープ胴の 40 回転で計数歯車が 1 回転したこと、および、ロープを胴の周りに約 38 コイルすると、ロープを 82 ファゾム巻き上げるのに十分であったことは明らかである。

計数歯車は水車のリムに取り付けられてその側面から突き出た二つの曲がった鉄部材により、水車のシャトルを操作した。計数歯車が回転し、これらの鉄部材が爪 (dettent) の下へ来た時は常に、爪を遮って押し上げた。爪は可動シャトルを制御するレバーに繋がれていて、それを上げ下げして、水車への水の流れを調整した。その突出物は計数歯車の表面にねじ込まれていて、それらの位置は以下のように調節された。つまり、機械が立坑の頂上の近くまで揚げ籠を引き上げた時、計数歯車の突出物の一つが爪を遮り、シャトルを下ろして適当な瞬間に水を止める。水車の動きが惰性を失って揚げ籠がちょうど頂上へ来た時に機械が停止するように調整された。運転員の側は何の注意も払う必要がない。この条件は、計数歯車の上の突出物の位置を調整することにより簡単に確保され、一度調節されるとそれらは常に正しく動作した。胴の 40 回転に対して計数歯車が 1 回だけ回転するので、計数歯車が完全に 1 回転することで、機械は立坑の底から揚げ籠を引き上げることになるであろう。

二つの揚げ籠が同じ立坑内で上がったたり下がったりの反対の動作を行ったので、それらは、立坑の半分近くと同じ深さの位置で互に行き違った。揚げ籠の揺れ運動によりそれらは行き違う際に衝突し易く、時々、石炭の一部が衝撃で外へ投げ出されたであろう。そのような事故の悪弊を減らすために、計数歯車に更に小さい突起物を取り付けられた。それは爪を押し上げてシャトルを下ろし、水車への水の流れを減らし、立坑内で揚げ籠がすれ違う間、機械はゆっくり動くことになった。しかし、それらが通過するとすぐに突起物は爪を放し、シャトルは再び上がって水をフルに供給して機械をフルモーションの状態に戻し、そしてそれは揚げ籠が立坑の頂上にほぼ到着するまで継続された。

(p.304) この機械は 20 ペック (peck) の石炭、重さにして $6\frac{1}{4}$ cwt つまり 700 ポンド^{*25}を入れた揚げ籠を、82 ファゾムの深さから 2 分間隔 (1 時間に 30 籠 (corfe) の割合) で引き上げた。そして、すべての停止時間を含めて、それは通常 12 時間で 17 スコア (score) つまり 340 籠を引き上げ、また時には 14 時間で 20 スコア (= 400 籠) を引き上げた。

機関は廃物の石炭で完全に運転された。その石炭は、さもなければ立坑の底に放置されていたものであったが、機関が 12 時間で消費するすべての廃物石炭をその機械は 12 分間で引き上げた。その機関と機械は、3 人の男性で運転された。

以前は同じ仕事をするのに 16 頭の馬が必要とされ、1 日に 12 時間だけしか継続できなかった。そのためには、それらの世話をするために 4 人の人間が必要とされた。

^{*25} (訳注) ペック (peck) は元来は乾量の体積を表すとされ、元来重さに対応するものではない。ここでは 1 peck = 35 lb となっているが、他の箇所 (p.305 および p.306) では 1 peck = 31 lb と換算されている。

その機械は 2 分間で 700 ポンドの重さを 82 ファゾムの高さへ上げたので、それは 毎分 246 フィートの割合であり、 $\times 700 \text{ ポンド} = 172\,200 \text{ ポンド}$ を毎分 1 フィート上げるのに等しく、 $\div 33\,000 = 5.22$ 馬力に等しい。この機関で水車に供給される水の量は毎分 140 立方フィートであり、落差 34 フィートであるので、4760 立方フィートを毎分 1 フィート上げるのに等しく、 $\div 528 \text{ 立方フィート} = 9.02$ 馬力となる。したがって、石炭の引き上げに寄与していない摩擦等によるパワーの損失は、9 馬力のうち 3.8 馬力であった。この損失の一部は、水車のバケットへ出入りする際の水の落下によって引き起こされ、それは 2.25 馬力、つまり機関でなされる全パワーの $\frac{1}{4}$ と推定されるであろう。この比率とすれば、いくつかのガジョンと歯車およびロープのプリーおよびロープの堅さによる摩擦は、1.55 馬力の抵抗を引き起こしたにちがいない。

この機械が動作するよう設定された後、それは馬により石炭を引き上げる以前の方法より遥かに良好に結果を出すことが分り、その所有者は同じ大きさのものをもう一台を設置し、それもまた非常な満足感を与えた。その後、3 番目の機械も建造された。これらの機械は、その後ニューカースルの近くの他の炭坑でもコピーされた。

スミートン氏の石炭機械は、それを部品ごとに分解して他の立坑へ移しても、当初の意図に答えることが分った。1778 年に製造された最初の機械の 1 台は、1785 年に深さ 78 ファゾムの新しい立坑へ移され、そこから 1 分ごとに 20 ペックを入れた提げ籠を引き上げた。機関は、毎分 14 行程を行った。この機関は、その地下を完全に掘削されて地下作業のために排水された地表上に設置されたので、噴射水を十分に得ることが困難であり、長い小さな鉛の配管で持ってくることできた最大量は、わずか毎時 90 ガロンであった。しかし、漏洩を防ぐために基礎の壁はセメントで慎重に建設され、ホットウェルからの温水は、開放された樋で水車が動作しているピットの最も離れた場所まで運ばれたので、ポンプへ戻るまでの時間に十分冷却されて貯水槽へ揚水され、機関は非常にうまく動作した*26。

(p.305) 1785 年にロング・ベントンで、最初のものと同じプランで、石炭を深さ $104 \frac{1}{2}$ ファゾムの立坑から引き上げるより大きい石炭機械が建造された。シリンダは直径 32 インチで、ピストンは行程長 6 フィートを毎分 14 行程、つまり毎分 84 フィートの運動を行った。ボイラは直径 11 フィートであり、ポンプは直径 21 インチで、シリンダと同じ行程長であった。そのポンプは高さ約 34 フィートの水を上げ、その水柱の重さは 5112 ポンド*27であった。 $5112 \text{ ポンド} \times 84 \text{ フィート} = (429408 \div 3300 =) 13$ より、これは 13 馬力の出力であった。

水車は直径 30 フィート、バケット内幅 $1 \frac{1}{2}$ フィートであり、鉄製の軸は直径 $9 \frac{1}{4}$ インチで、ガジョン直径 7 インチ、軸受長さ 7 インチであった*28。主歯車は歯数 96 枚、トランドルの棧は 20 本であり、ロープ胴は

*26 このケースでスミートン氏は、ホットウェルのオーバーフローからの排水は、鉛の配管を用いて、水車ピットの水と同じ水位の大気に接した水槽または池へ落とされるべきである、と推奨した。その配管の終端は噴出口として上方へ曲げて、水を 8 ないし 10 フィート高さの噴水として空気中へ噴出する。そのとき水は空気中を水滴のシャワーとなって再び落ちてくることにより、非常に有効に冷却されるであろう。そして、水が水車ピットに戻るまで噴水の浅い円形的水槽内で空気にさらされることにより、更に冷却されるであろう。上記のケースではこの方法は必要とされなかったが、他のケースでは役立ったであろう。水を冷却する方法により、水は通常よりも多くの空気を含むことになるが、大気圧機関のシリンダ内へ若干の空気を入れることには利点があるので、これは何の障害にもならないであろう。

*27 (訳注)Farey の計算方法に従うと、p.162 (第 2 章) の規則により、

$$(\text{水柱の重さ [lb]}) = 0.341 \times (\text{直径 [in]})^2 \times (\text{水柱高さ [ft]}) = 0.341 \times 21^2 \times 34 = 5113.0 \text{ lb}$$

*28 これらの機械の水車の鑄鉄の軸は、最初に作られたままでは弱過ぎることが分り、それら全ては、水車のアームが固定された大きなフランジの近くで破損した。それらは強度不足を示す兆候なく 8 年間常時使用されて、そして、霜の降りる天候の中で両方とも同時に破損した。それらの破損箇所は直径 9 インチであり、金属が内部的に不健全であったと分り、それらは直径 $10 \frac{1}{4}$ インチの他の軸と取り替えられた。

類似した事故が、ウォーカー (Walker) 炭鉱のより大きな機械の軸で起こり、それは交換されてその後再度破損し、そして、直

長さ 12 フィート、両端部直径 $3\frac{1}{2}$ フィート、中央部直径 6 フィートであった。

立坑の深さは $104\frac{1}{2}$ ファゾムであり、その底から 20 ベックの石炭、重さ 620 ポンドを含む提げ籠が、 $1\frac{1}{4}$ 分ごとに引き上げられた。その時間は、立坑の最上部で満載の提げ籠を降ろすか、または取り外して、再度下ろすべき空の提げ籠を吊るす時間を含んでおり、立坑の底では同じ時間に、空の提げ籠が満載の提げ籠に交換される。定期的な作業では 12 時間で 18 スコアつまり 360 籠が引き上げられ、それは 2 分で 1 籠の割合であった。したがって、提げ籠の運動は、毎分 $313\frac{1}{2}$ フィートの速さであったに違いない。

$620\text{ lb} \times 313\frac{1}{2}\text{ ft/min} = (194370, \div 33000 =) 5.89\text{ HP}$ であるので、これは 5.89 馬力のパワーであり、この機関によりなされる 13 馬力のうち、ほぼ 6 馬力が実現されている。水車に水を供給する際に全パワーの $\frac{1}{4}$ が失われたと仮定すると、($\frac{3}{4}$ of $13 =$) 9.75 馬力が機械に加えられて 5.89 馬力の効果を生じたことになり、したがって、機械の摩擦は 3.86 馬力に等しかったことになる。

1782 年にスミートン氏は、ニューカースルのウォーカー (Walker) 炭坑でもう一つの石炭機械を建造した。それはロング・ベントンのものと同じ構成であったが、よりより大きい規模であり、深さ 95 ファゾムの立坑から石炭を引き上げた。この機械は、同じ立坑で 18 年間運転する見込みで設計されたので、機関は普通の案によりレンガ壁の建屋の中に建造され、木材の枠はできる限り避けられた。

(p.306) シリンダは直径 36 インチであり、ピストンは $6\frac{1}{2}$ フィートの行程を毎分 13 行程行い、毎分平均 $= 84\frac{1}{2}$ フィートの運動となった。ポンプは直径 24 インチで、シリンダと同じ行程長であった。それは水を高さ 34 フィートへ揚水し、水柱の重さは 6677 ポンドであり、毎分 $84\frac{1}{2}$ フィートの速度で上げて、それは 17.1 馬力の出力であった。

ボイラは直径 12 フィート、深さ 12 フィートであり、機関のその他の寸法はスミートン氏の表 (第 2 章 p.183) に従っていた。上射式水車は直径 30 フィート、幅 $1\frac{1}{2}$ フィート、バケット数 72 であり、ロング・ベントンの以前の機械と同じく、鑄鉄の軸の上に取り付けられた。その軸の上の大きなフェース歯車 (face wheel)^{*29} は、歯数 108、ピッチ $5\frac{1}{4}$ インチであった。それらは、歯数 18 で直径 $2\frac{1}{2}$ フィートの鉄のピニオンに作用した。このピニオン軸に繋がれたロープ胴は、長さ 13 フィート、中央の直径 $5\frac{1}{4}$ フィート、両端部の直径 $2\frac{2}{3}$ フィートであった。ロープの直径は $1\frac{3}{4}$ インチ、つまり周長さ $5\frac{1}{2}$ インチであった。

この機械は、95 ファゾムの深さから石炭 22 ベックを含む籠を 1 時間に 43 籠、つまり 682 ポンドの重さを引きあげた。したがって、提げ籠の運動は毎分 $408\frac{1}{2}$ フィートであった。加えられる 17.1 馬力のうち、有用となる効果は 8.44 馬力であった。

この機関での石炭の消費は、通常 12 時間で 36 cwt、言い換えると毎時 336 ポンド^{*30}つまり 4 ブッシェルであった。従って、1 ブッシェルで 15 分間動き、その間に、機関は ($6677\text{ ポンド} \times 84\frac{1}{2}\text{ フィート} \times 15\text{ 分} =$) 8463 097 ポンドの水を 1 フィートの高さに上げる効果を作り出したにちがいない。つまり、1 ブッシェル

径 $10\frac{1}{4}$ インチの軸を用いて修復された。

大きな歯車の円周の回りに加えらるるブレーキにより水車の運動が止められたとき、特に機械の停止が急であるときに、水車のエネルギーが軸に非常に大きなねじり力を引き起こした。これらの軸のいくつかは機械が緩慢に動いていたときに壊れたが、おそらく、それらは以前に過度に荷重を受けていたのであろう。

これらの事故の期間、スミートン氏が作った風車や水車では、25 から 30 インチの大きな鑄鉄の軸が使用されていて、破損の例は 1 例も生じなかったが、そのうちのいくつかは 5 ないし 6 年間使用された後で破損した。それら全ては同じ個所で破損し、その金属が多孔性であって内部に空洞があったと分った。この欠陥は、大きいフランジが軸と一体で鑄造された結果であった。なぜなら、直径 4 フィートで厚さ 2 インチであったために、多量の金属が凝固する瞬間に収縮することにより、軸の中心部分から液体の金属を吸引または引き出したに違はなく、したがって、軸を多孔質またはスポンジ状にした。その後フランジは軸とは別に作られて、くさびで軸に固定され、こうすることにより鑄鉄の軸は極めて永久的であることが分った。

^{*29} (訳注) 円板面に歯形を形成した face gear の意味と思われるが、この時代を考えると、単なる平歯車 (spur gear) かも知れない。

^{*30} (訳注) 原文は 360 ポンド。

または 84 ポンドの重さのニューカースル炭の消費により、8.46 ミリオンポンドの重さの水が高さ 1 フィートへ上げられた。

または、15 分間で石炭機械で作り出される有用な力学的効果を考えるならば、(重さ 682 ポンド × 深さ 570 フィート × $10 \frac{3}{4}$ 籠 =) 4 178 955 の石炭が 1 フィート高さへ上げられる。つまり、1 ブッシェルの石炭の消費により、4.18 ミリオンポンドの重さが高さ 1 フィートへ上げられた*³¹。

*³¹ ウォーカー炭鉱ではその後、深さ 85 ファゾムの立坑から石炭を引き上げるために第 2 の機械が建造された。その機関は前のものと同じサイズであったが、ポンプは直径 $22 \frac{3}{4}$ インチであり、ピストンは 6 フィート 10 インチの行程を毎分 13 行程行い、つまり、毎分 = 89 フィートの運動を行った。

この機械は、石炭 22 ベックつまり 682 ポンドを含む提げ籠を毎時間 50 籠引き上げた。

6 ニューコメン機関についての結論

これまで、ニューコメン機関についてその最初の起源から、その完全化と有用な応用の種々の段階を経て、ワット氏の改良によりその形の機関が乗り越えられる時期までの進歩の跡を辿ってきたので、私たちはここでニューコメンの蒸気機関の記述をまとめることができるであろう。

その大気圧機関はスミートン氏の時代以降大いに改良され、既述したものの以上の多くの用途に応用されてきたが、これらの改良のすべてはワット氏の発明から導かれているので、それらについての批評はワット氏の機関の説明の後まで取って置くことにする。

(p.307) ニューコメン機関をより広範に使用するための最大の障害は、その燃料費が高くつくことであった。直径 48 インチのシリンダを持ち長さ 7 フィートの行程を毎分 12 行程行う機関は、スミートン氏の表によると 36 馬力に等しく、良質のニューカースル炭を単位時間に $6\frac{1}{2}$ ブッシェル消費する。または、p.181 (第 2 章) の記述によると、少なくとも 1 時間に 7 ブッシェル消費する。日夜休みなく稼働したとして、週あたり 33 チャルドロン、年に 1700 チャルドロン近くを燃やす。

これは、機関が最良の状態の時に行われた実験に従って消費量を求めている。しかし、平均的な状態をとれば、このような機関はさらに $\frac{1}{3}$ 余分に、つまり $9\frac{1}{3}$ ブッシェル/時間 = 44 チャルドロン/週 = 2267/年を消費するであろう。

この状況は、この機関の使用を大きく制限している。売ることのできない小粒の石炭で機関を動かせる炭鉱の立坑から水を引くために、その機関はいまだに普通に採用されている。その機関は価値ある鉱山から排水したり、巨大な消費を生み出している大きい豊かな都市に給水するために、極めて良好に应运してきた。しかし、もしニューコメン機関より経済的なシステムが発明されていなかったならば、今日のように蒸気機関の無制限のパワーが優先的に用いられている極めて多くの場合、蒸気機関の使用はその燃料が高価であったために不可能であったであろう。

技術者たちの関心の多くは、この費用を減らすためのあらゆる事柄に向けられた。全ての技術者は火炉の建造について彼ら自身のプランを持ち、疑いなくその幾人かは他の者より、より成功を収めた。しかし、ワット氏が 1774 年頃に彼の偉大な発明を行うまで、重要なことは何もなされなかった。スミートン氏によるニューコメン機関の改良は、その部品の比率 (相対的寸法) に関することだけで構成されており、原理的な事柄は変更されず、完成度は達成されたとしても原理はニューコメンのままであった。

ブリッジウォーター公爵 (Duke of Bridgewater) の運河の遂行を指揮したジェイムズ・ブリンドリ (James Brindley) 氏は、1759 年に火の機関の構造の改良についての特許を取得した。彼が提案したボイラは木と石で作られ、その中に鑄鉄のストーブつまり火床を配置して、水に熱を加えるために全周を水で囲まれた。煙突は鉄の管つまり筒であり、ボイラの水の中に沈められた。彼が期待したこのプランは、燃料のかなりの部分を節約することであった。ボイラへ水を供給する給水管には弁が取り付けられ、機関員の管理を必要とせず、ボイラの水面に浮くブイにより開閉するように改造された。大レバーのアーチの鎖は木で作られ、ポンプもたがで締めた木の桶板で作られることになっていた。これらはすべて、彼の特許の仕様書の中で述べられた改良であるが、1756 年に調べた "Biographia Britannica" によると、ブリンドリ氏はニューカースル・アンダー・ライン (Newcastle-under-Line) 近郊で、彼の方法による火の機関を建造しようと着手したが、彼が何らかの改良を実際に実施したようには見えない。彼の方法が遭遇した障害により、彼は落胆させられたと述べられて

いる*32。

ニューコメン機関の熱損失および燃料浪費の最大の原因は、以前に(第2章 p.143で)説明したように、戻りの行程の間で蒸気が冷たいシリンダに入ってきた時、蒸気が凝縮することによるものである。その量はかなりのものであり、この形の蒸気機関の最大の欠点である。

(p.308) 機関の動作をさらに観察すると、蒸気の浪費が他にもあることが分かるが、凝縮する量は大したことではない。ピストンが行程の底に来て調整器が開いた瞬間、蒸気は一般の空気より約1ポンド/平方インチだけ弾性が強いので、蒸気が漏らし弁から勢いよく流出するのに気づくが、ピストンが上がるにつれてこの蒸気の漏らしは無くなり、ピストンが上昇する行程の間、それ以上の蒸気は流出しないであろう。52インチシリンダの機関の場合(第2章 p.174を参照)、凝縮による蒸気の損失は、全量の $\frac{3}{8}$ に極めて近い値となり、その結果、全燃料の $\frac{3}{8}$ が浪費されていることになる。凝縮量は蒸気がさらされる内表面積の大きさに比例するので、必要な蒸気量に対する蒸気損失量の割合は、大きなシリンダの機関では小さいものより明らかに少なくなるであろう。シリンダの面積とその容積の比率を石炭量の計算の基礎として用いるという、スミートン氏の規則(第2章 p.186)の理由を、ここに見るのである。

52インチシリンダは中サイズより上の方であるので、安全側に見て、蒸気の損失を全体の半分であると見積もることができる。したがって、普通の中規模サイズの大気圧の火の機関が、1平方インチあたり7または8ポンドの荷重を受けるとき、前回の冷水噴射により奪われた熱をシリンダへ戻す際に凝縮する蒸気量は、ほぼそのシリンダの全容積に等しい。シリンダを実際に満たす蒸気は、別に必要である。そのため、ピストンの1平方インチあたり7ないし8ポンドの重さに等しい水柱を持ち上げるのに、シリンダの体積の2倍に等しい蒸気量が必要とされることになる。

または、それをより単純に述べると、1立方フィートの蒸気の凝縮により作り出される真空の空間は、そこへ戻って満たそうとする大気圧の空気が、1立方フィートの水を約7ないし8フィート高さまで持ち上げるのに十分な力を引き起こす*33。ただし、機関の摩擦や水の運動による抵抗に対抗する力は除いている。

例えば、ロング・ベントンの機関は、有効な力学的効果1馬力あたり、毎分62.95立方フィートの蒸気を消費する(第2章 p.174を参照)。1馬力は毎分528立方フィートの水を1フィート高さへ上げるのに等しく、したがって、消費される蒸気1立方フィートあたり、 $(528 \div 62.95 =) 8.39$ 立方フィートの水を、1フィート高さへ上げることができる。言い換えると、1立方フィートの蒸気は1立方フィートの水を8.39フィート高さへ上げることができる。

この機関は大形であり、うまく建造されているので、その性能は他の多くのものよりも良かった。これより、実際に蒸気が同じ体積の水を上げることでできる高さは安全サイドに見て7~8フィート高さであることができるであろう。

*32 1741年の"Philosophical Transactions"で、機関に供給する蒸気の圧力を上げる新しい方式の提案が記録されている。ボイラは炉の上に被せて置かれる金属の容器であり、赤熱近くまで加熱される。水はその中の全ての部分に分散するように、細い噴流または流れにより投入されるようになっていて、水が直ちに蒸気に変換されることが期待されていた。このプランは、実行されることはなかった。

*33 (訳注) 大気との圧力差 p によりなされる仕事は $p \times (\text{シリンダ面積}) \times (\text{行程長}) = p \times (\text{行程容積})$ であり、必要な蒸気量は $2 \times (\text{行程容積})$ であるので、蒸気単位体積あたりの仕事は $0.5 p$ である。 $p = 7 \sim 8 \text{ lb/in}^2 = 144 \times (7 \sim 8) \text{ lb/ft}^2$ より、

$$\text{蒸気 } 1 \text{ ft}^3 \text{ あたりの仕事} = 0.5 \times 144 \times (7 \sim 8) \text{ lb/ft}^2$$

水の比重量 $\gamma = 62.5 \text{ lb/ft}^3$ を用いて、

$$(\text{水 } 1 \text{ ft}^3 \text{ の揚水高さ [ft]}) = \frac{0.5 \times 144}{62.5} \times (7 \sim 8) \text{ ft} = 1.152 \times (7 \sim 8) \text{ ft}$$

著者は、 $1 \text{ lb/in}^2 \cong 2 \text{ ft Aq}$ と近似している。