

欧州における古代直接製鉄の復元操業実験*

長谷川 熊 彦**

Experimental Investigations on the Ancient Direct Iron-Smelting Processes in Europe

Kumahiko HASEGAWA

1. 緒 言

古代製鉄製鋼の研究は、古代産業や製鉄史の研究家によつてかなり追及され発表されている。有名なドイツの大家 LUDWIG BECK¹⁾ の大著述のごときは、世界最高の鉄文化史といえよう。また英人 TYLECOTE²⁾, COGCOHLAN³⁾ を初め多数の学者によつて説明されている。しかしその内容は、主として史実に基づいたもので、細部に至れば不徹底な点が少なくない。直接製鉄の科学技術的内容に関しては、文書記録などの資料がはなはだ少ない。特に科学的の内容に乏しい。

古代産業のすべては、各国とも、従業者が長年繰り返し努力した経験の積上げによつて目的とする製品を得たもので、記録を後世に残さず技術を公開せず秘密を厳守した。したがって現代人は、史実のみでは満足しかねる場合が多い。

考古学者、古代歴史学者、冶金学者の間で古代製鉄製鋼の内容が研究され、真相を記述せんと努められている。

考古学の立場からすれば、従来と同様の手段によつて遺跡を発掘し遺物の一部分を推理するのみでは満足できず、現代の科学を応用して事実を解明せんとするに至つた。たとえば原始人の使用した各種の石器を現代人の手で製作して、その内容を科学的に説明する。製鉄の場合には、古代の製鉄炉を復元して古代同様の操業を実験し科学的説明を行なう。土器、陶器、製塩などについても同様の方法によつて古代文化の究明が進められるという。もちろん考古学者と一般科学者の共同研究によるものである。ソ連では、このような分野を実験考古学と呼んでいる。

冶金学の立場からすれば、古代の直接製鉄製鋼の事実を実験によつて確認することは意義深いことと思われる。製鉄の起源を究明しその発達過程を解明して技術の核心に接しうるのはあるまいか。

最近行なわれた製鉄炉復元操業実験のおもなものとしては次のようなものがある。

1956 年ベルギー人 SADZOT⁴⁾ は自然通風炉で復元実験を 8 回行ない、6 回は失敗して何も取れなかつたが、2 回は炉底に形成された混合物のかたまり中に還元鉄の小

片を得ている。その後の人工通風炉実験では 5 kg の鉄塊を得、鉍滓は含まれていなかった。

1958 年イギリス人 E. WYNNE および R. TYLECOTE⁵⁾ は、人工通風製鉄炉で実験した。このうち成功した実験では金属鉄を得ている。火床炉で行なつた実験では炉内温度 1100°C 以上に昇り鉍滓を含む鉄を得ている。この実験の要点を後節に抄録する。

1958 年ドイツ人 J. GILLS⁷⁾ は、自然通風堅炉を復元して 2 回の実験を行なつて成功し鉍滓と金属鉄を得ている。温度、通風力、ガスの組成などを測定し、鉍石、鉍滓、鉄などの化学分析が行なわれている。この実験の要点も後節に抄録する。

考古学者が行なつた実験では、チェコ人 P. PLEINER ポーランド人 RADMAN⁸⁾ らがポーランドのクラクフ鉍山金属科学院の中で行なつた直接製鉄炉復元操業がある。

1961 年ソ連人、ベ・ア・コルチン⁹⁾, オ・ユ・クルクは、古代ルーシ時代 (10~13 世紀) の炉を復元して操業実験を行なつた。人工通風直接製鉄炉で最大限に古代生産状況に接近して実験している。実験は成功し海綿鉄が多量に得られた。この実験の要点を後節に抄録する。

これらの抄録記事は、自然通風シャフト炉、人工通風シャフト炉、人工通風火床炉の 3 操業実験を比較し若干著者の解説をも加えたものである。

2. ドイツ La-Tène 時代自然通風直接製鉄 堅炉復元操業実験⁷⁾

ドイツ連合鉄冶金学会歴史委員会で有史前の冶金炉について調査し、La-Tène 時代 (紀元前約 500 年) におけるジーガランド地方の自然通風直接製鉄堅炉を復元して操業実験を行なうこととなつた。1956 年に予備実験を行ない、翌 1957 年 10 月本実験を行なつたが、天候不良のため失敗し、1958 年 5 月 13, 14 日に延べ 30 時間実験を行なつている。実験操業中に、炉内温度の測定、炉頂ガス分析、多数の鉍滓試料の分析などを行ない、貴重な科学的データが得られた。それらの結果は、同委員会第 27 報告として J. W. GILLES の編集により “Stahl und Eisen” に発表⁷⁾されている。以下は、この発表の

* 昭和 43 年 3 月 14 日受付

** 資源科学研究所

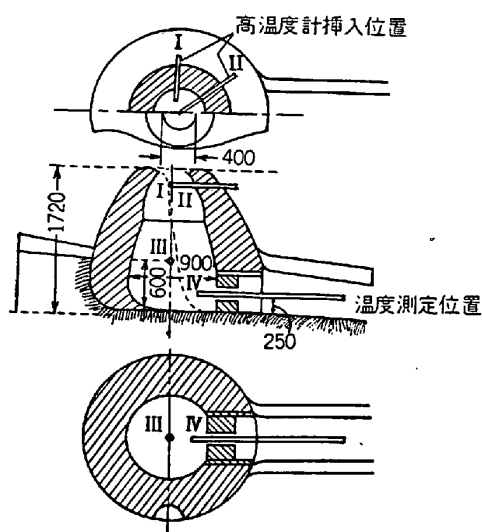


図 1 La-Téne 時代自然通風直接製鉄炉復元構造

抄録である。

2.1 自然通風製鉄炉

図 1 はこの炉の図である。炉は丸形堅炉で若干傾斜した土中に約 600 mm 掘下げて築かれている。炉材は、粘土と雑木束が使われている。

炉の主要寸法の一部は図 1 に示すとおりであるが、なお追記すれば、炉高 1.72m、炉外径 0.8~2.0m、炉腹内径 0.3~0.9m、炉壁厚 0.2~0.5m で、最小値はいずれも炉頂部である。図に示したように高温計 4 個を次の位置に挿入し操業中の炉内温度を測定した。

I : 炉頂から 0.22m 下 (炉壁)

II : 炉頂から 0.22m 下 (炉中心)

III : 炉底から 0.6m 上 (炉中心)

IV : 炉底から 0.25m 上 (羽口前方)

もちろん炉内の最高温度は IV によつて、最低温度は I によつて得られた。

炉底の一方に通風を取入れる羽口孔 (直径約 0.1m) を設ける。なおこの羽口孔は、必要に応じて直径を増減または開閉しうる。炉底から 0.6m 上に鉍滓口がある。炉底以下土中に作られる排水溝や炉底耐熱構造などは図には省略されている。

2.2 実験操業

使用した鉍石は表 1 に示したとおりである。この 3 種の鉄鉍石を等分に混合して使用した。鉍石の粒度は 30 mm 以下とした。木炭は硫黄分を含まぬ良品質のものである。

原料のカサ比重は、木炭 218 kg/m³ ショベル 1 杯の鉍石は 1 kg、使用木炭対鉍石の比は 1:0.91、ただし最初の実験では 1:0.53 であった。鉍石の割合を多くすれば溶解困難となるので、初めは鉍石量を少なくし漸次増加して荷重を増す。1 装入の標準は、木炭 2.7 kg、鉍石 2.0 kg としている。

表 1 使用鉄鉍石分析

成分	鉍石 褐鉄鉍 コゼン ハ	*輝鉄鉍 ハールス	褐鉄鉍 ルックス	平均	
				乾量	湿量
Fe	51.8	60.0	43.0	51.6	48.8
Mn	2.1	1.6	0.5	1.4	1.32
SiO ₂	12.6	9.0	13.5	11.7	11.0
P	0.2	0.03	0.55	0.26	0.25
Cu	0.25	0.08	—	0.11	0.10
CaO	未定量	未定量	—	1.4	1.3
MgO			—	0.7	0.66
Al ₂ O ₃			4.2	4.2	4.0
FeO			—	2.1	—
Fe ₂ O ₃			—	71.0	—
水分	3.0	3.6	11.5	6.0	—

* 輝鉄鉍は地方俗称で内容は赤鉄鉍

1958年 5月12日薪木と木炭とで乾燥を始め、1昼夜熟し翌朝 8 時に木炭を充填した。同 9 時に通風孔を粘土で密閉しさらに直径 6cm の羽口孔を開き、また鉍滓口 10cm×10cm を開いて、両方から通風を盛んにし燃焼させる。充填物が降下するに従い新たに炉頂から装入する。1 時間に標準装入 1 ないし 2 個を装入する。前に掲げた 4 カ所の炉内温度を測定した。13日 9 時以後温度は次第に上り、温度計 IV は 11 時 50 分には 1130°C、同 13 時 30 分には 1300°C を示し、第 1 回鉍滓を抽出し流動せしめた。固化した鉍滓は青灰色を示し重い。14日 9 時 45 分には IV は 1420°C に達し最高温度を示している。

炉頂温度は下部の温度に準じて上り、120~300°C である。

鉍滓が通風口付近に達すれば鉄棒を用いてかき出す。燃焼帯は、炉壁に沿つて羽口の前 0.2~0.3m 付近で大体炉断面 1/3 くらいに偏在している。したがつて炉内温度は均一を欠いている。炉頂からの装入物降下が不良となり操業困難となれば鉄棒を用いて鉍滓をかき出し装入物を降下させ、さらに新装入を行ない炉内温度を上げる。操業の終りには装入物が降下せず、通風悪く温度下り、炉内には溶融物が粘着して炉外に出ず、還元鉄は海綿状となつて炉の中心部に集合した。

14日 15 時 35 分に至り作業を止め、炉を破つて鉄塊を炉外に引き出し翌日まで冷却した。同時に炉内鉍滓や炉壁粘着鉍滓なども採取した。

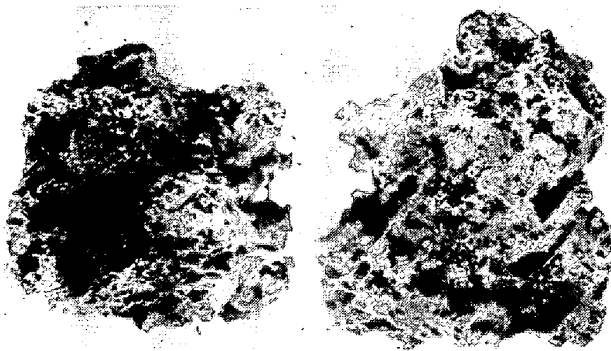
操業延時間 30 時間 35 分で、木炭装入 77 回実量 208 kg、鉍石装入 76 回 152 kg、得られた鉍滓 128 kg、鉄塊 18 kg である。

取り出された鉄塊にはなお鉍滓を含むので、破碎して鉍滓を分離した。そのようにして得た鉄塊は 20~30 mm 形状のものが 18 kg であった。この塊中で 37% は柔軟性であるが、残り 36% は脆弱であった。この脆弱部に

表 2 鉍 滓 分 析 表

番号		最初鉍滓 重		鉄粒	鉄粒を含みぬ重鉍滓			鉄 粒 を 含 む 重 鉍 滓					
		1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	
1 2	Fe 金 属 Fe 全	— 38.0	— 8.0	91.20 —	— 40.1	— 40.4	— 40.4	17.5 } 41.7 } 59.2	31.6 } 35.0 } 66.6	19.2 } 35.9 } 55.1	11.6 } 42.0 } 53.6	26.0 } 33.9 } 59.9	
3 4 5 6	Mn Fe+Mn P Cu 全	2.0 40.0 0.15 —	0.4 8.4 0.15 —	0.85 92.05 0.11 0.38	1.3 41.4 0.31 0.06	1.3 41.7 0.31 0.06	1.5 41.9 0.29 0.05	1.2 60.4 0.22 0.12	1.5 68.1 0.26 0.29	1.6 56.7 0.26 0.08	1.5 55.1 0.14 0.13	1.3 61.2 0.3 0.17	
7 8 9 10 11	S Ni P Cu Fe } 金属	— — — — —	— — — — —	0.05 0.02 0.01 0.38 91.20	— — — — —	— — — — —	— — — — —	0.01 — 0.02 0.07 17.50	0.02 — 0.04 0.13 31.6	0.01 — 0.02 0.08 19.2	0.01 — 0.01 0.05 11.6	0.01 — 0.03 0.11 26.0	
12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22	FeO Fe ₂ O ₃ MnO P ₂ O ₃ SiO ₂ Al ₂ O ₃ CaO MgO CuO C K+Na ₂ O + 残	32.3 18.6 2.8 0.55 36.8 7.1 0.6 0.3 — — 1.15	4.7 6.3 0.5 0.35 68.7 13.8 2.0 1.0 — — 2.66	— — 1.15 — 7.0 — — — — 0.09 —	29.7 25.5 1.7 0.7 29.1 8.1 2.0 0.8 0.08 — 2.32	40.3 12.9 1.7 0.71 30.1 9.2 2.0 0.8 0.08 — 2.21	45.7 7.2 1.9 0.67 30.8 9.4 2.0 0.7 0.06 — 1.57	47.30 10.70 1.70 0.75 17.4 4.6 2.1 0.7 0.12 0.92 0.31	38.50 7.30 1.50 0.44 13.7 4.1 0.8 0.3 0.06 0.03 1.48	43.5 3.2 1.8 0.54 20.50 6.80 1.4 0.5 — 0.02 2.43	49.0 5.8 1.9 0.3 20.4 7.4 0.9 0.4 0.09 0.01 2.13	41.6 4.0 1.4 0.6 17.7 6.4 1.4 0.4 0.06 0.03 0.26	
7—22 合 計 重 量 (kg) %		100	100	100 17.32 13.5	100 22.3 17.4	100 26.7 20.8	100 11.03 8.6	100 15.0 11.7	100 13.7 10.7	100 4.6 3.6	100 10.3 8.0	100 7.3 5.7	計 128.25 100

註 試料 7, 8, 9, 10, 11 は金属鉄粒を多く含む。全鉄は金属鉄と酸化鉄中の鉄の合計である。
たとえば No. 7 において全鉄は、金属鉄 17.5+酸化鉄中 Fe 41.7=59.2



a 粗鉄塊 高さ 6.5cm, 厚さ 5.0cm
b 研摩された鉄塊 高さ 7.0cm, 厚さ 4.5cm

写真 1 鉄塊の外観

はなお鉍滓を残すことがわかり、さらに細碎して 1~30 mmとして鉍滓を分離し、最終的に17.3 kgの鉄とした。

作業中に得られた全鉍滓は 11 種に分類し精密分析を行なった。表 2 は分析結果である。また得られた鉄塊の外観は写真 1 に示し、その化学分析値は表 3 に示す。表 3 で脆性部に SiO₂ が著しく多いのは鉄滓の含有が特に多いためである。特に C の含量が少ないことが特徴である。

表 3 鉄粒分析表

	歩合%	C	SiO ₂	Mn	P	S	Cu	Ni
脆性部	63	0.096	8.48	1.0	0.100	0.56	0.48	0.022
軟性部	37	0.084	4.50	0.6	0.108	0.46	0.20	0.018
平均		0.090	6.49	0.8	0.104	0.51	0.34	0.020

炉頂ガスの分析結果は平均値で CO 23.3%, CO₂ 7.3 %, O₂ 0.04% である。近世木炭溶鉍炉の炉頂ガスの成分はおおよそ CO 28%, CO₂ 10%であるので、この操業実験では炉内が一部酸化雰囲気となつているといえる。

2.3 むすび

以上述べたこの復元操業実験は、今から約 2500 年前のドイツ・ジーランド地方における直接製鉄法を確かめるために行なわれ、所期の目的が達せられた。おそらくシャフト炉による近代溶鉍炉の起源となつたものであろう。

抄録のむすびとして次のことを追記する。

この操業実験のデータから、装入鉍石の数量と元素の

3.2 溶解実験

実験に使用した鉱石の大部分は、レーニングラード近くのヤーニン泥炭採掘場から採取された普通の沼鉄鉱（褐鉄鉱の一種）であつた。この鉱床は泥炭層中にレンズ状に堆積している。

ノブゴロド採掘の沼鉄鉱は、ウラルのスベルドロフスクの南 70 km にある古鉱山ツスナ鉱山の古坑道の鉱層から採掘した鉱石で、500 kg 以上を使用した。

沼鉄鉱の化学分析値は、酸化鉄 77% 以下、酸化マンガ 3.37% 以下、石灰 0.39% 以下を示すが詳細の発表はない。

鉱石の前処理はまず粒度の問題である。20~30 cm 大に採取された沼鉄鉱は、使用前に破碎してクルミ大より若干大きな粒度にする。

次に鉱石は乾燥される。鉄製フライパンを用い 1 装入分ごとに完全に乾燥する。また鉱塵や小塊は除去されねばならない。一部の鉱石は 20~30 分間焙焼する。

燃料木炭としては、堅形炭焼窯で焼いた松炭を 40 俵準備した。木炭の大きさは、クルミ大からジャガイモ大くらいである。

炉は築造後 3 日間風により自然乾燥し、次に一昼夜薪を燃して乾燥し予熱する。

原料装入前の操作はヤクツ人の技術を参考とした。その方法順序を示せば大体次のようである。

まず 2 時間松の小枝を燃して炉を乾燥し予熱する。次に木炭を燃焼する。木炭を充填し羽口孔をふさぎ粘土で隙間をぬる。通風を開始して 20~30 分間で炉内 1/3 の木炭は燃えつきるので、炉頂から木炭を装入しその上に鉱石を装入する。装入物が降下して炉頂が空になったときに次の装入を行なう。

溶解実験は 1961 年に 10 回、翌年に 7 回、合計 17 回、延 5 日間行なわれた。すべて同様の操業でヤクツ人の方法を採用した。

操業の状況を通して観察すれば、次のことがいえる。使用鉱石は沼鉄鉱を主とし、1 装入には鉱石 2 kg で木炭 1 kg または鉱石 1.5 kg、木炭 1.2 kg で 1 回の溶解作業に 4~5 回装入、延操業時間 1.5~2.0 時間。装入中に骨材、石灰、砂を加えた場合があるがその成績は追及されていない。操業中に鉱滓は 3~5 回抽出され、流動する場合とかき出す場合があり、その量や性状ははなはだしく不同である。温度の上昇佳良の場合には、鉱滓の流動性がよく海绵鉄の生産が多い。炉内で還元された鉄は鉱滓と混つて大小の塊となり海绵状鉄となる。作業の末期には炉内が酸化雰囲気とされ酸化精錬が行なわれる。炉底に鉱滓が集まり、鉄を含む塊はその上にあつて酸化精錬をうける。最後には送風を止め、炉の一部を破り鉄塊を取り出す。この鉄+鉱滓の塊はさらに加熱され鍛錬を繰り返されて鉱滓を分離する。

17回の操業を通して作業状況ははなはだしく不同で、生

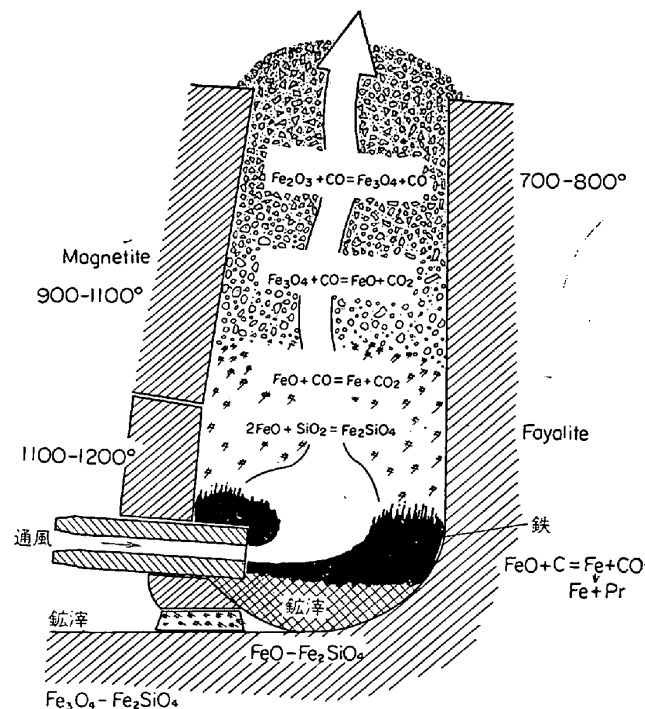
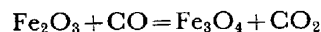


図 3 直接製鉄炉内化学変化

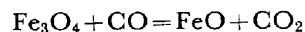
産される鉄塊の量も多いときは 5 kg、少ないときは 0.6 kg または皆無の場合もあつた。この種の操業で一定の順調な操業を継続するには多大の熟練が大切と思われる。なお次節でこれらの操業についての考察および結論が繰り返し詳述されている。

3.3 炉内反応ならびに鉄および鉱滓の組織

炉内の還元反応は、図 3 に示したとおり説明される。鉱石中の Fe_2O_3 は木炭の燃焼によつて生ずる高温ガスによつて予熱され、次に CO と反応して Fe_3O_4 に変ずる。



この Fe_3O_4 は CO により還元され FeO となる。



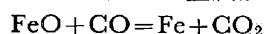
前同様この際生ずる CO_2 は装入口から出る。直接製鉄操業の際に生ずる含鉄鉱滓はこの FeO によつて生ずる。



この鉱滓生成のためには、炉内温度は約 1130°C でなければならない。すなわち、 SiO_2 - FeO 系の平衡状態図において第 1 共融点 (Eutectic point) で、最低温度である。 1230°C では第 2 共融混合物が形成され、ますます多くの FeO が鉱滓中に入り操業が早まる。この鉱滓を構成する成分に MnO , CaO , MgO その他を含む場合には、鉱滓化の温度は若干低下する。それは FeO の大部分が SiO_2 やそのほかの酸化物との反応によつて液体状の鉱滓を形成するからである。

鉱滓の基本としては、 Fe_2SiO_4 (鉱物名で fayalite) の形成であり、それらは炉底に沈下する。 FeO の残りの部

分は CO と反応して金属鉄となる。(図 3 参照)



この際に生じた鉄の細片は、炉の下部において鉍滓と混った海綿鉄をつくる。

次に、実験の結果得られた、鉄、鉍滓、温度状況について順をおって述べる。

(1) 鉄 金属鉄は 17 回の溶解実験全部において得られた。特に最後の 8 例の溶解で多量の純海綿鉄が得られた。6 例の溶解では純海綿鉄の小塊と多量の金属性溶解物塊ができた。この混合物の内部には海綿鉄の塊があり多量の鉍滓と混合している。残り 3 例では、鉄片は小さくてえんどう豆大を越えず、小塊中には鉍滓、磁鉄鉍、その他の構成物が混合している。

これらの海綿鉄から真の鉄塊を得るには、この粗海綿鉄塊中の鉍滓や雑廃石を除くことが必要である。最後に延鉄を作るために多くの失敗をくりかえした。粗海綿鉄を鍛錬するとばらばらになつて崩壊する。鍛接時に加熱炉の温度が 1300°C 以上にならぬための失敗とわかつた。すなわち、この場合の鉍滓は鍛接の場合のつなぎとならぬのが失敗の理由であつた。鍛錬温度は 1450°C までの間であるべきことが発見された。その方法で 5~6 kg の延鉄が得られた。これは古代ルーシ法で得られた鉄塊量の限界でしかも複雑な困難を伴う。炉からとりだした大きな粗海綿鉄を鍛錬して延鉄に仕上げることは技術的に不可能であるので、大粗海綿鉄は必ず小割として取り扱われる。

元来、鉄は 1100~1200°C で鍛接されるはずであるが、この粗海綿鉄の場合には多量の鉍滓を混ずるために 1400°C のような高温で鍛錬し鉍滓を絞り出しながら鍛接する。しかもこのような高温に熱することは、古代技術としては困難が多い。実際古代技術では、粗海綿鉄を何回も過熱しながら鍛錬して鉍滓を絞り出す。

写真 4, 5 は海綿鉄の外観を示している。写真 6, 7 は鉍石、鉍滓および海綿鉄の反射光線顕微鏡組織である。

写真 6 の 3, 4, 5, 6 および写真 7 の 1, 2, 4 は純粋の鉄粒が非常に多い鉍滓を示し、写真 7 の 3, 5 は高炭素鋼の組織を示している。得られた鉄は炭素の含有量はなほだ不同で、不均一の組織である。同一海綿鉄塊でも炭素量は 0.1~0.5% の間を変動する。

鉄の硬度 (micro-hardness) の測定では 170~230 kg/mm² の変動がある。鋼の場合には 250~412 kg/mm² の間を変動している。

(2) 鉍滓 鉍滓は複雑性が多く、研究に困難がある。直接製鉄における鉍滓形成の特殊性を理解するため溶解温度、結晶温度、液状鉍滓中の酸化物などの相互関係を明らかにするため図 4 を参考にしてもらいたい。このような手段で鉍滓中の鉍物相の順次結晶化の確定やその温度状況が解明される。

鉍滓試料の岩石学的研究の結果は大体次のようであ

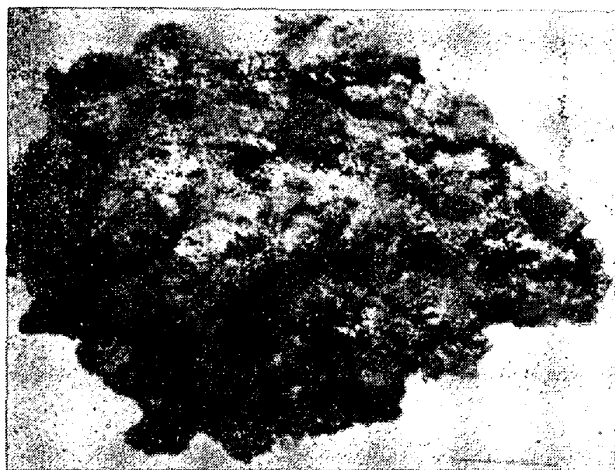
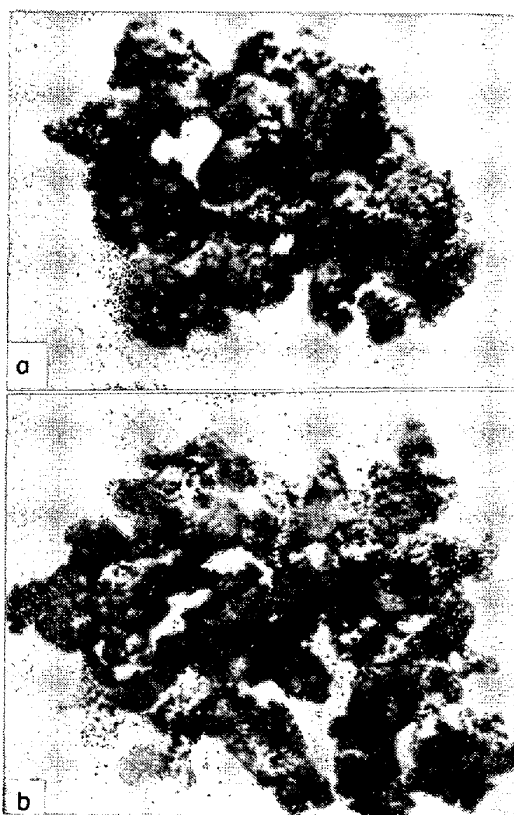


写真 4 金属性混合物



a 第10回溶解実験 b 第2回溶解実験
写真 5 海綿鉄

る。

第2, 3, 10回溶解実験の鉍滓試料を研究した。第2回溶解のもの 42 個、第3回のもの 3 個、第10回のもの 5 個、合計 50 個の試料を採取した。第2回の試料を多数採取した理由は、溶解実験が最も多面にわたっておりそれぞれ特徴的な操業に成功したからである。第3回溶解は失敗した例、また第10回溶解はきわめて良好な結果を得た例である。

第2回溶解実験鉍滓の透過光線および反射光線による顕微鏡観察結果は表 4 のとおりである。(原著には文章によつてあらわしてあるが、抄録者によつて表とした)

第2回溶解実験鉍滓の反射光線による顕微鏡組織は写真8に示した。

第2回溶解実験第2回抽出の鉍滓を化学分析した結果は、 SiO_2 23.96%, Al_2O_3 1.77%, Fe_2O_3 7.06%, FeO

56.34%, MnO 6.71% であった。

第2回溶解実験鉍滓試料の顕微鏡分析結果を、操業の状況と関連させて考察すると次のような結論を得る。第1回抽出の鉍滓は若干早すぎて作られたもので、 FeO の大部分がまだ金属鉄に還元されないうちに多くの量が流れ出る。この FeO は自由な不安定化合物であるため、空気と反応して Fe_3O_4 を構成する。この磁鉄鉍は二次的と名づけることができる。試片において磁鉄鉍は大きな樹枝状結晶であることよからみて、液状鉍滓から冷却の際晶出するものと、存在する FeO が通風口で酸化されて生ずるものの2種がある。

第2回抽出の鉍滓は大体においてよく結晶しているのを特徴とする。fayalite と magnetite の大樹枝結晶が認められる。

第3回抽出鉍滓は最も鉄分少なく、組織はよく発達し結晶化が進み、自由な FeO は見出し難い。すなわち鉍滓抽出前に FeO は金属鉄に還元されている。

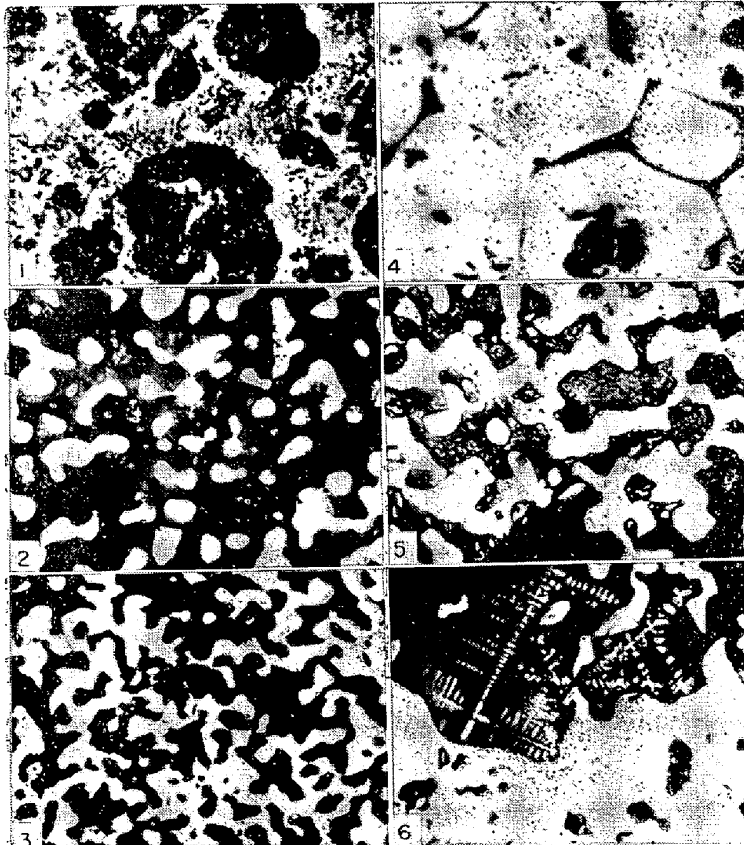
第4回抽出の鉍滓中には磁鉄鉍の増大が観察される。これは炉内温度の上昇によつて説明される。溶解において残った FeO は二次的に磁鉄鉍状となっている。

第3回溶解実験は失敗した操業であった。その原因は、鉍石が乾燥されずまた焙焼されてないことにあるであろう。

第10回溶解実験鉍滓の鉍物組成は、第2回溶解実験第3抽出の鉍滓と類似している。(写真8の5参照)。最後の鉍石装入から25分後に鉍滓を抽出したとき、装入物は炉の半分の高さまで下つていた。この場合の鉍滓は fayalite 50% で鉍石中の夾雑物は完全に鉍滓化し、鉍滓中の FeO は最小限にとどまつた。

(3) 炉内温度の測定 炉内温度の測定には、白金-白金ロジウム熱電対による高温計を用いた。高温計を羽口の位置から10cmの高さの炉中に挿入した。

炉内で金属鉄を得る条件の主なものには炉内温度である。この温度は操業中に著しく変動する。おそらく通風の変化や装入物に含まれる水分の変化が原因であろう。炉内温度は大体において 1200°C 前後であつた。この温度は用いた鉍石に対して高すぎるため、溶解の際に多くの鉄が鉍滓中に入り損失となる。操業温度は 1150°C を越えないのがよい。マンガン、石灰などが鉍石中にあればもう少し低いであろう。



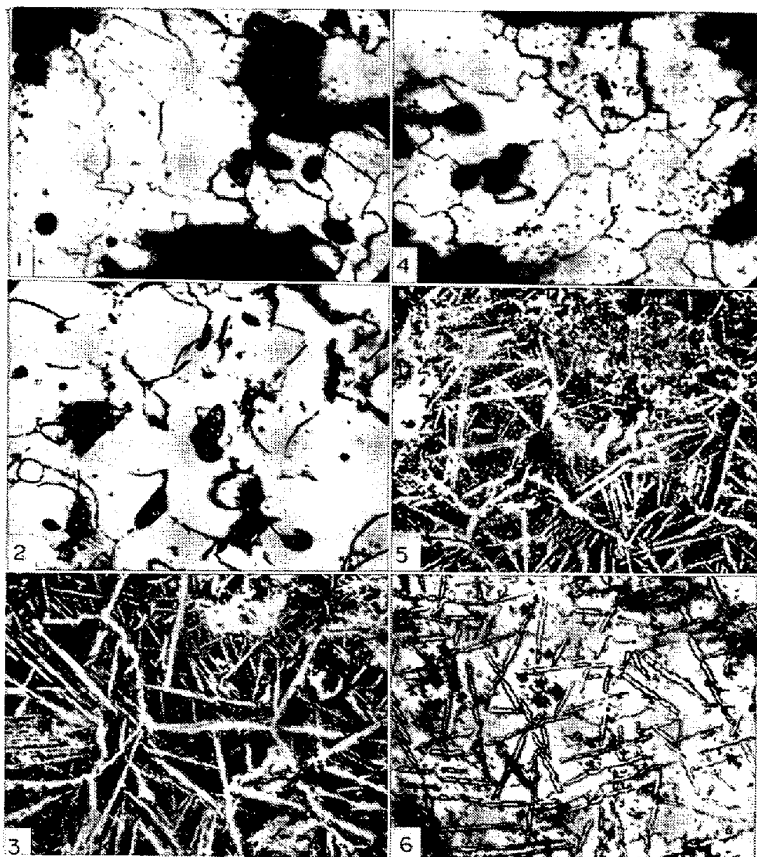
1 焙焼された沼鉄鉍の組織 2 焙焼された磁鉄鉍
3, 4, 5, 6 海綿状鉄塊の形式 白色粒: 鉄, Ferrite 暗色: 鉍滓
6 特に鉍滓の大塊 鉍滓の部に樹枝状 magnetite 結晶

写真6 鉍石および海綿鉄の顕微鏡組織 その1(反射光線) $\times 80$ (4/7)

時間	第1回溶解実験			第2回溶解実験			第11回溶解実験			第12回溶解実験		
	鉍石	鉍滓	$^\circ$	鉍石	鉍滓	$^\circ$	鉍石	鉍滓	$^\circ$	鉍石	鉍滓	$^\circ$
0	■			■		$\cdot 1240^\circ$	■		$\cdot 1150^\circ$	■		$\cdot 1100^\circ$
15M	■		$\cdot 1055^\circ$	■		$\cdot 1230^\circ$	■		$\cdot 1100^\circ$	■		$\cdot 1100^\circ$
30M	■		$\cdot 1160^\circ$	■		$\cdot 1180^\circ$	■		$\cdot 1050^\circ$	■		$\cdot 1240^\circ$
45M	■		$\cdot 1220^\circ$	■		$\cdot 1230^\circ$	■	●	$\cdot 1050^\circ$	■		$\cdot 1260^\circ$
1時間		●	$\cdot 1100^\circ$	■	●	$\cdot 1140^\circ$			$\cdot 1080^\circ$			
15M	■	●	$\cdot 1200^\circ$	■	●	$\cdot 1030^\circ$	■		$\cdot 1050^\circ$	■	●	$\cdot 1200^\circ$
30M		●	$\cdot 1200^\circ$			$\cdot 1140^\circ$			$\cdot 1050^\circ$			$\cdot 1200^\circ$
45M			$\cdot 1290^\circ$	■	●	$\cdot 1120^\circ$	■	●	$\cdot 1120^\circ$			$\cdot 1200^\circ$
2時間				■	●	$\cdot 1080^\circ$						$\cdot 1240^\circ$
15M				■	●	$\cdot 1280^\circ$			$\cdot 1180^\circ$	K		
30M	K			K			K					
45M												

■-1 ●-2 K-3 1-鉍石装入 2-鉍滓抽出 3-終了

図4 鉍滓形成説明図
第1, 2, 11, 12回溶解実験に鉍石装入
鉍滓抽出関係



1, 2, 4 Ferrite 3, 5 黒: Pearlite 白: Cementite 6 Nitride

写真 7 海綿鉄の顕微鏡組織 その 2 (反射光線)

×80 (4/7)

第2溶解実験第3抽出の鉍滓は、鉄含量最も少なく良成績であり、炉内温度は 1100°C であった。

3.4 結 論

以上コルチンとクルリの実験発表⁹⁾の概要を摘録してきたが、さらに原著者は全般にわたって次のような結論を述べている。

(1) 1961 年の良好な溶解実験では、鉍石 7 kg, 木炭 6 kg から海綿鉄 1.4 kg (鉍石に対し 20%), 鉍滓 2.55 kg (鉍石に対し 36.5%) が得られた。

温度の高すぎたときは鉄の生産少なく、鉍滓中の FeO は 77% に上る。適当温度では、同様装入原料で海綿状鉄 2.5 kg が得られるであろう。

(2) 7 kg の鉍石で適当鉍滓を生成するには 1 時間半かかり、やや不良の場合では 2 時間に達した。古代ルーシ炉では 1 回操業で鉍石量最大 25 kg まで溶解でき、5 kg 以上の鉄ができるはずである。

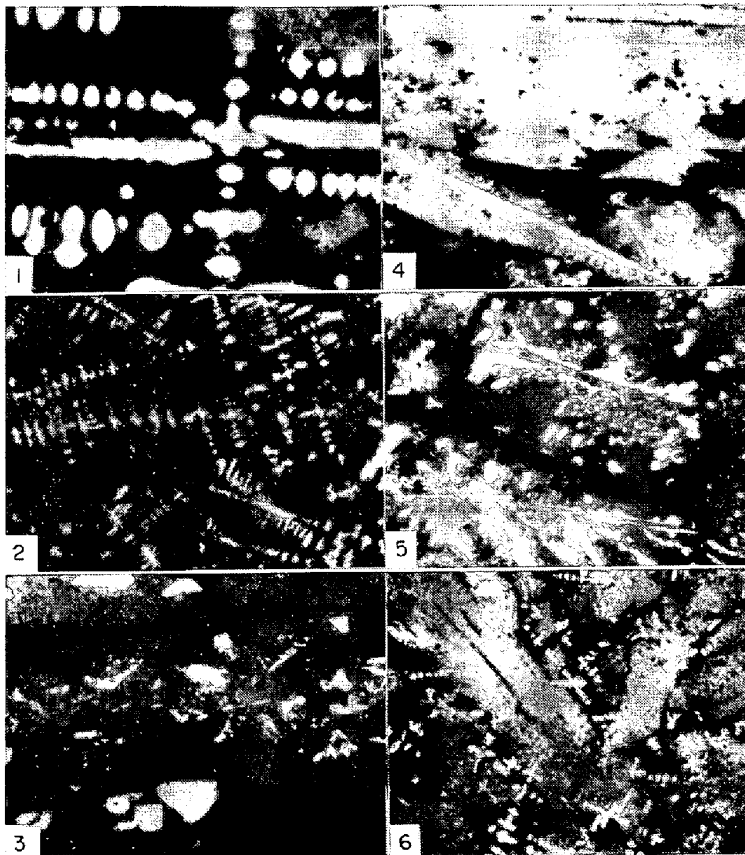
(3) この溶解実験の温度は 50~150°C 高すぎた。高温のため FeO の鉍滓への溶解を著しく増大させた。適当な温度の選択は、鉍石の質と操業熟練の程度に依存される。鉍石の質は SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO などの鉍石成分によつてきまる。

(4) 温度のほかに操業条件のうちで非常に重

表 4 第2回溶解実験鉍滓の顕微鏡観察結果一覧 (抄録者編集)

抽出回数	透過光線による観察 (×64)			反射光線による観察 (×450)		
	Fayalite	Magnetite	備 考	Magnetite	Fayalite	備 考
第1回抽出試料 4 コ	結晶化第2段階 固定微細ガラス 状光軸角 2 V = -53° 22%	磁鉄鉍+ガラス =78%	間隙率41%	樹枝状 写真8の1, 2, 3 ガラス付近に小塊	ガラスに接近して大きく伸びる	写真8の1, 2, 3参照 試片10コ
第2回抽出試料 5 コ	樹枝状結晶の間を埋める 2 V の決定困難 百分率28%	磁鉄鉍+ガラス=72%	間隙率9% 樹枝状結晶発達し全体ちみつ	樹枝状結晶の発達せぬ部分がある 写真8の4	FeO との混合物が崩かいする	写真8の4 ガラス状部は微晶 試片6コ
第3回抽出試料 4 コ	分離する長伸結晶間にガラス 2 V = -55° 全体の50%	ガラスとともに分離する立方体+ガラス=50%	粗結晶, 間隙率50%	帯状立方体 写真8の5	明りよう	写真8の5 ガラスは鉄から分離 試片6コ
第4回抽出 2 コ	大きさ0.06~0.6 mm ガラス状に発達帯状自由結晶 2 V = -53° 全体の40%	磁鉄鉍+ガラス=60%	Fayalite 粒子の大部分はガラス状包有物の斑点	微小樹枝状結晶はガラスとともに第3階段に発達する	大結晶は第1階段, 小結晶は第2階段に発達する 全体の約40%	写真8の6 試片5コ

註 2 V = -55° 等は顕微鏡下で決定される光学的性質をあらわす数値。
2 V = -53° 鉍物組成の存在する%は顕微鏡写真から測定する。



白色結晶: Magnetite
灰色: Fayalite
黒色: Glass

1, 2, 3 第1回抽出
4 第2回抽出
5 第3回抽出
6 第4回抽出

写真8 図2溶解実験鉍滓の顕微鏡組織(反射光線)
×450(4/7)

要なことは鉍滓抽出の時間の選択である。鉍滓の抽出があまり早いかまたはあまり遅いと、FeOの大部分が鉍滓中に入り、金属鉄の生産量が減少する。FeOを多量に含む鉍滓は粘性をもち、鉄の分離がよくない。また長時間炉内に鉍滓を留めることはFeOを増すのでよくない。鉍滓抽出の間隔は15～30分であった。

(5) 還元された海綿鉄は炉の最下部に沈下せず、若干上部にとどまり、最下部には常に液体状の鉍滓がある。

(6) 鉍滓を抽出しない操業によっても金属性の混合物がえられた。それらは鉍滓、海綿鉄、木炭の混合物で鉄は上部に、鉍滓は下部に、木炭片は随所にある。この混合物から鉄を得るためには第2工程が必要となる。すなわち機械的にこの混合物を砕き、鉄を選別して鍛接するかルツボに入れて溶解する。

(7) 金属鉄片を鍛接することによって塊鉄を完成することははなはだ複雑な操作である。冶金学者や鍛冶工は高温加熱の必要を述べていない。かれらは特別な鍛接溶剤を加えて鉍滓を液化して分離する。

(8) 鉍石を焙焼することは、必要で重要な操作である。装入物が湿気や化合水を含む場合には、炉内に磁鉄

鉍の不完全還元塊を作り、つぎにFeOに対し還元ガスの浸透がとまり操業は次第に弱まり最後に消滅するに至る。

(9) 操業において鉍石の微粉とか極小鉍石片は妨げとなるので、標準装入物からは除く。

(10) 前掲操業実験の際に鉄の炭化物を生じた場合がある。すなわちある条件の際には鋼がえられた。すなわち直接に鍊鉄と鍊鋼が得られる。

(11) 鉍石と鉄の分光分析を行なうとNi, Ti, Mo, その他の元素が見い出された。すなわち沼鉄鉍がそれらの元素を含んでおり、またそれらが金属鉄中に移行することを示している。

4. 英国における人工通風原始直接製鉄火床炉の復元操業実験⁷⁾

4.1 沿革

2000年以前の頃には、冶金術の一般が発達し鉄が各国の住民によって使用されるに至った。これらの原始時代における製鉄炉は主として火床炉であった。地面の上に直径1～6 ft.の半球状の穴を掘り、人工送風によって木炭を燃焼し鉄鉍石を溶解した。原料は鉄鉍石、木炭、含鉄鉍滓などである。

古代製鉄の記録は近年COGHLAN¹⁰⁾およびSCHUBERT¹¹⁾によって発表された。その大要は次のとおりである。

炉は浅い碗形のピットで、その内面は粘土で作られた火床である。このような製鉄火床炉で、英国で発見された最も古いものは、KESTER (Devon)¹²⁾で紀元前400年の鉄器時代の遺跡から発見されたものである。火床は小さい粗雑な円形で、内面は粘土裏づけのピット、最大長径15 in., 最大幅10 in., 深さ6 in., 床の一方に大塊の鉍滓が付着している。その分析結果は表5に示す。表中cinderとは鉍石が還元反応や鉍滓化反応を十分受けず溶解したものである。

表5 溶滓(cinder) および
鉍滓(slag)の成分比較

	Kester 溶 滓	Great Carteron 鉍 滓	Great Carteron 溶 滓
Fe ₂ O ₃	17.4%	11.9%	7.7%
FeO	48.3	61.8	64.4
SiO ₂	21.4	20.9	18.2
Al ₂ O ₃	7.3	1.9	3.7
CaO	0.4	2.4	1.8
MgO	0.1	0.9	0.1
TiO ₂	0.3	n.d.	n.d.
MnO ₂	n.d.	nil	1.4
	95.3	99.8	97.3

註 n.d.: 分析せぬ nil: ナシ

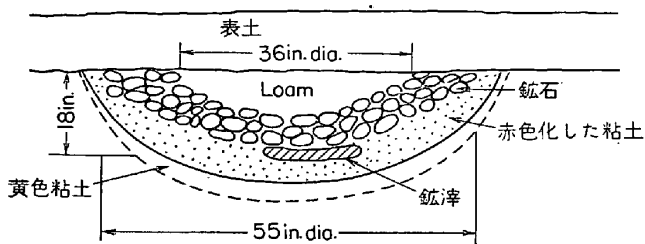


図 5 Great Casterton における古代製鉄火床炉

最も古い火床は、すべて直径 12~18 in. である¹³⁾。

O. KELLY は Ballyvourney¹⁴⁾ において発見された火床炉について述べているが、火床内に残る鉍滓から推理して火床は直径 7 in. だけが実用されていたことを明らかにした。

1956 年の Great Casterton (Rutland) における発掘は R. CORDER¹⁵⁾ の指図によつて行なわれ、ローマ型碗形炉が知られた。図 5 はこの火床炉を示す。炉の内面に鉄鉍石（高品位で、80% Fe_2O_3 ）が詰められ鉍滓も図のように発見された。おそらく前操業¹⁶⁾の遺品であると思われる多量の溶滓 (cinder) と鉍滓 (slag) が発見されたが、それらの化学成分は近似している。(表 5 参照)

直接製鉄の鉍滓の化学成分は、大体 FeO 60~70%, SiO_2 20% である。もちろん使用鉍石によつて異なるはずである。詳細の記録は STRAKEN¹⁷⁾ が出している。前掲した溶滓と鉍滓は、化学成分よりも外観の観察から区別される。前者は空隙が多くて多孔鉍石の外観を残し、その中に木炭屑を含む。鉍滓は一般に黒色で、いかにも FeO が高いと察せられ、全体が緻密である。換言すれば、鉍滓は溶滓よりも一般的で、よりよい製錬時に生ずる。原始的製鉄炉における鉄滓の形成については NEUMANN¹⁸⁾によつて論ぜられている。

古代製鉄の普通方法^{19)~22)}をあげるとおおよそ次のとおりである。鉍石と木炭を交互に積み重ねるか、あるいは両者を混合して火床炉に装入し、炉のふちにフィゴを設置して送風を開始し、木炭を数時間燃焼させる。次々に木炭を装入し羽口先は常に木炭で覆われる²³⁾²⁴⁾。このようにして鉍滓を含む海綿鉄が得られる。この海綿鉄は加熱され鍛錬されて鉍滓が絞り出され、現在と同じ鉄が得られる。

AGRICOLA²⁵⁾ や BIRINGUCCIO²⁶⁾ の著書では、中世紀の鍛冶を説明し製鉄について述べているが定性的なものである。古代火床炉による製鉄の機構について NEUMANN²⁷⁾ が述べている。彼の考えでは、“鉍石が火床炉内で加熱され、 FeO と SiO_2 が化合して溶解して鉍滓を作る。 Fe_3O_4 や FeO のような鉄の酸化物は木炭の固定炭素粒で直接還元されるかあるいは CO ガスによつて間接還元される。あるいは CO の分解によつて C と CO_2 を生じ還元役に役立つ”としている。

4.2 実験

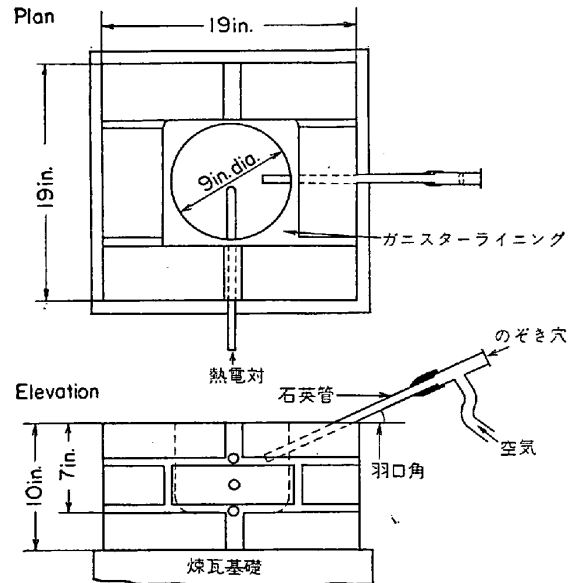


図 6 実験火床炉構造細部

4.2.1 炉および原料

炉床の寸法は直径 9 in., 深さ 7 in. である。火床の内面は湿気を与えたガニスター砂でかため、炉は開放されるかまたは特に耐火煉瓦をならべ熱の絶縁に役立てる。炉の内壁にクロメル-アルメル熱電対を挿入して炉の各高さにおける温度を測定した。羽口は 1 ないし 2 個を挿入し、その材料は石英管である。図 6 に示すとおり、石英管の一端に T 形の真鍮管を取りつけ、その一端にガラスをつけ炉内をのぞけるようにする。空気は電動圧搾機で送られ風量計をつなぐ、高さ 12 in., 径 10 in. の鋼管を炉頂に取りつけ装入物の貯蔵に役立てる。

燃料木炭はぶなの木から作られる。2 種の鉄鉍石が使用された。富鉍 Newfoundland 鉍および自溶性 Northants 鉍である。実験前にすべての鉍石は 800°C 酸化雰囲気のもとで数時間焙焼する。

4.2.2 炉の操業

次の 2 種類の特徴ある方法が採用された。

〔第 1 法〕 鉍石と木炭を混合して装入管に装入する方法で、一般に行なわれる。炉と装入口にまず木炭を充填して点火する。燃焼が進むとき装入管を取り付け、鉍石木炭の互層を必要だけ装入する。普通各層の鉍石は 1/2 ポンドである。4~5 時間の送風で鉍石は炉内に降下し終る。この時間で酸化鉄は CO ガスによつて還元される。還元された鉍石が炉床に入ればさらに木炭を装入して温度を上げ、鉄と鉍滓とを分離する。最後には送風を止めて数時間冷却し、炉内の海綿鉄塊を引出して検査する。

この場合の鉍石の還元と降下の状態を知るために、ニッケル線の先に鉍石を取りつけて装入し後に取り出して顕微鏡で検査した。

〔第 2 法〕 この方法は点火前に鉍石を炉床に充填する

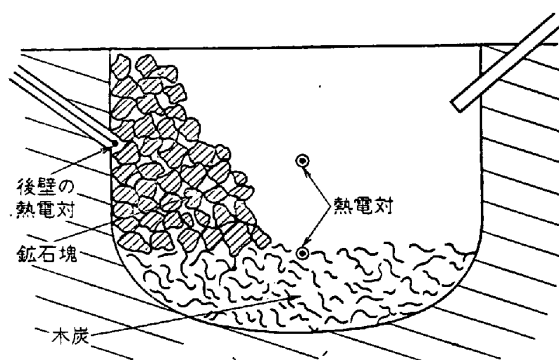


図 7 大床に鉍石を充填する方法

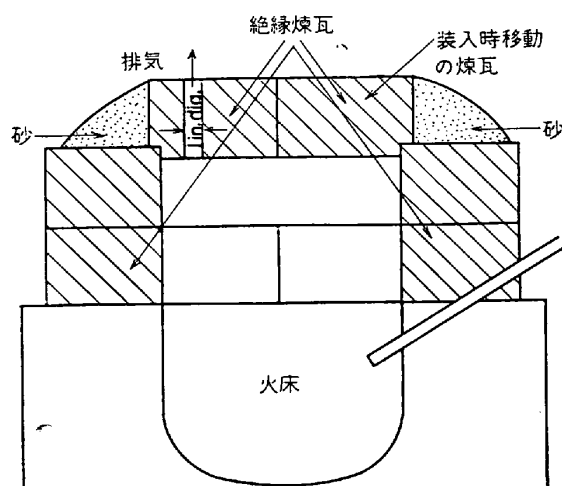


図 8 熱絶縁ドームを備える火床炉

ことが特徴である。鉍石は火床内で羽口を入れる反対側の壁に充填し、燃焼帯からはなれ CO ガスによる還元作用が促進されるようにする。炉底に挿入された熱電対はとりはずされ、装入鉍石に接近した壁にのける。この充填の様を図 7 に示している。炉頂の装入鋼管を取り除き、耐火煉瓦でふたをして上天井ドームとした。図 8 に示される。

研究された方法は非常に多くて、標準化することは困難であるが、おもな条件は次のとおりである。

- 1) 送風量：1.5～3.2 立方in./分
- 2) 羽口寸法：送風圧力に關係する。
 $\text{送風圧力} = (\text{送風量}) / (\text{羽口断面積})$
 羽口の径は 0.25in. と 0.5in.
- 3) 羽口数：第 1 法では炉内温度を均一にするため羽口数は 1 または 2 個とする。第 2 法の場合は 1 個とする。
- 4) 羽口角度：20～60°
- 5) 鉍石の寸法：2 in. 以下が研究された。
 粉鉍を混ぜる限度をも研究した。

4.2.3 実験結果

操業実験の記録を見れば大要次のようである。鉍石木炭混合装入の第 1 法では、羽口を 2 および 1 個使用し送

風量を調節した。炉内温度は炉底が最低で 700～900°C 中心部は 1050～1300°C、炉頂 900～1300°C であった。

20 回の実験で鉄を得たのは 2 回で、ほかは失敗している。1 回の操業は 4～10 時間である。鉍石の事前充填をした第 2 法では 1 個の羽口を用い、送風量は第 1 法と近似し、炉内温度は炉底 700～850°C、中心部 1100～1200°C、炉頂 1250～1350°C であった。1 回の操業時間は 6～9 時間である。全部で 13 回の実験のうち 3 回以外は鉄を得ている。装入物と生産物の一例をあげれば次のようである。

1/2 in. 大の鉍石 4 ポンド、1/2 in. 大の木炭 16 ポンドを装入し、操業時間 6 時間で鉄 0.3 ポンド、鉍滓 3.5 ポンド、還元鉍塊 1.5 ポンドを得ている。

両法ともに鉄の歩留に関する条件は不明確である。製鉄の経験によると A, B, C, D の 4 つの型の生産物が得られる。この 4 種は少しずつ相異しているが、外観、肉眼あるいは顕微鏡組織などは大同小異である。各型の特徴を次に述べる。A 型は第 1 法の 2 個羽口で 1100°C 以下の最低温度の場合に生ずる。写真 9 はその一部で、火床の中心、羽口水準の下で得られたものである。鉍石塊は一部焼結する。結局、温度が低く流動する鉍滓を作るに不十分の場合である。写真 10 は試料の反射光線顕微鏡写真で、白色部は wüstite、暗色部は fayalite を示す。B 型は同様 2 個羽口を用い温度 1100°C 以上の場合である。写真 11 はその断面写真である。この型の生産物は大部分非磁性であるが、小部分は磁性である。C 型生産物は第 1 法で 1 個羽口の場合で、炉内における位置とその形状は図 9 に示されている。この場合、鉄塊は羽口に最も近づいており炉の半分を占める。上半分は緻密で堅実、下半分は著しく多孔質である。下半分は fayalite のガラス状鉍滓からなり、写真 12 に示すように magnetite の樹枝状晶からなる。

鉍石充填型 D では図 10 に示すように 3 つの部分には



写真 9 Newfoundland 鉍からの 1100°C 以下還元海綿鉄 (A 型生産物)

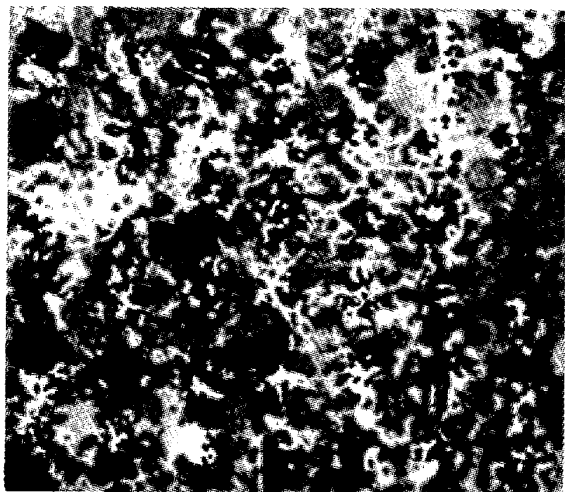


写真10 A型生産物の顕微鏡写真
ガラス地内 wüstite $\times 300$ (3/4)



写真12 C_3 の顕微鏡写真
鉍滓ガラス基地中の樹枝状 magnetite $\times 150$ (3/4)



写真11 B型生産物の断面
ガラス地内 magnetite (7/9)

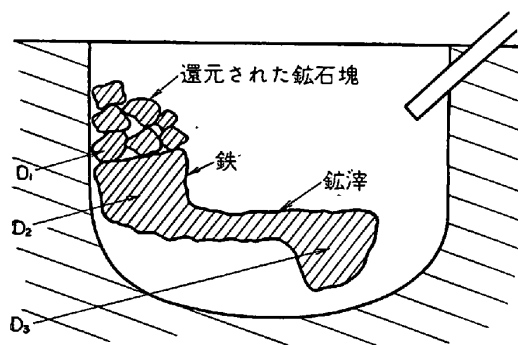


図 10 事前充填法を採用した場合の結果

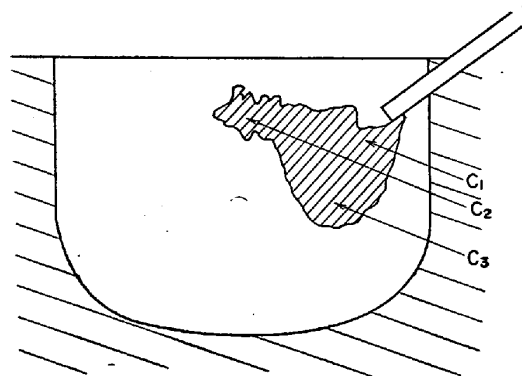


図 9 C型生産物の位置

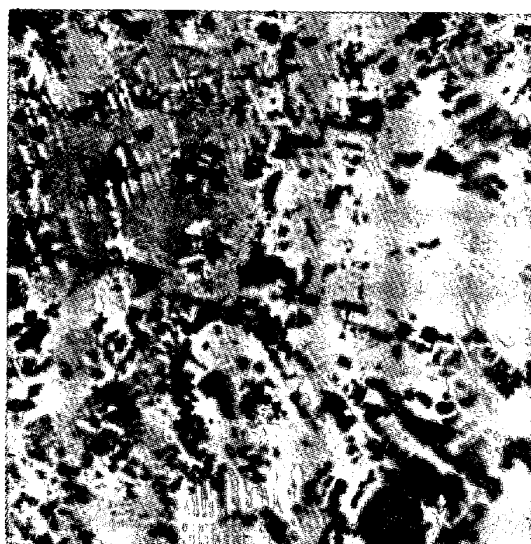


写真13 D_3 の部分の顕微鏡写真
ガラス状鉍滓中の樹枝状 magnetite $\times 300$ (3/4)

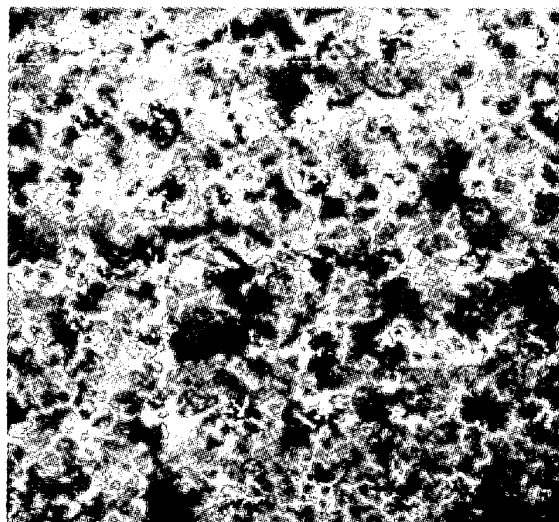


写真14 D₁ の部分の顕微鏡組織
多孔性の鉄および鉱滓 ×300 (6/7)

つきり分けられる。炉底部 D3 を横ぎつて薄い鉱滓層があり、樹枝状 magnetite を含む fayalite が散在する。写真 13 はその状況を示す。次の部分 D2 は鉄からなり、緻密で堅く、その上部が還元鉱 D1 の一片である。写真 14 は鉄粒と鉱滓の緻密混合である。

代表的鉱滓 (D3) として、Northants 鉱石からこの方法で得られたものの分析値を示せば、次のごとくである。

FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO
40.4%	23.7	16.1	5.3	4.6
Al ₂ O ₃	TiO ₂			
7.7	0.5			

鉱石を滓化するに必要な最低温度は、実験の結果、Northants 鉱は Newfoundland 鉱の場合より約 50°C 低い。

生産物の加工：製錬に成功した操業の生産物は、多孔質の鉄塊 (bloom) で多量の鉱滓を混ずる。鉱滓の分離が良好なことは、炉内で完全に還元され長く保持されること、および温度上昇で鉱滓の粘性を減ずるためである。

加工の場合に炉から取り出して直ちに鍛造することは不可能であることがわかった。この問題を解決するため、シリマナイト製ルツボに粗生産品を入れ、ガス炉で 1250°C で 2 時間加熱した。その結果鉄粒は分離し、液状鉱滓を通過して下方に沈降した。そしてほとんど鉱滓を含み緻密な鉄ができた。すなわち炉内温度より高い加熱温度が必要とされる。

多孔質鉄の緻密化：鉱滓を分離する最終の方法は 1100°C で鍛錬することである。鍛造の初期に 1000°C 以下の温度で鍛打せぬことが大切である。そうでないと容易に粉碎化する。鍛造の最初は緩慢操作であり、緻密化を進めるためには再熱が必要である。こうして鍛錬を繰り返

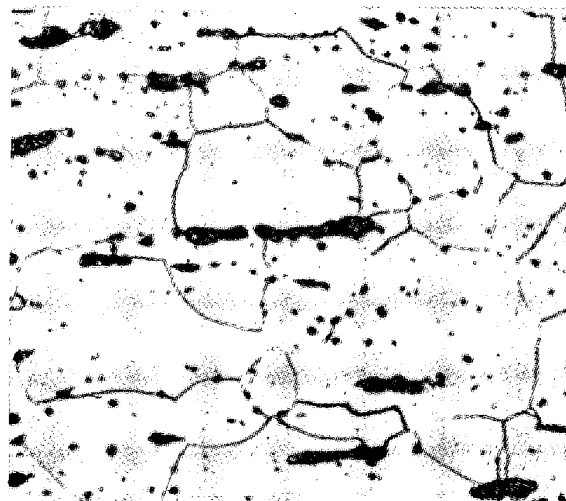


写真15 焼鈍後の鉄塊顕微鏡写真
4%硝酸アルコール腐食 ×200(3/4)

返し、最後には黒熱となるまでつづける。鍛造後の鉄塊は焼鈍化される。写真 15 は焼鈍後の標準組織で錬鉄の代表的組織である。この錬鉄組織は COGHLAN¹⁾ が中世紀の鉄鑛 (やじり) について示したものと相異していない。炭素含有量は 0.06 ないし 0.08% の間である。

4.2.4 実験結果に対する考察

前述したような方法によつて、鉱石と木炭混合物を装入する第 1 法で作られた鉄は少量であつた。また同一状態を再現することはほとんど不可能であつた。炉内温度を約 1100°C 以上として実験すると、鉱石塊の還元は炉床の上部で行なわれた。

2 個羽口を使用したときは操業困難である。条件が多様多様となるため、多種の反応が起こり複雑となる。1 個羽口の操業では、少量の鉄が作られ 5 時間連続する。時間を長くすれば一般に FeO が得られる。

Fe-O-C の平衡状態図を見れば、Fe が存在する雰囲気は、1000~1400°C で CO が少なくとも 80% 存在せねばならない。もしこの雰囲気成分が維持されぬならば wüstite が安定相である。

Morr³⁰⁾ の論文によれば CO/CO₂=4 の場合に鉄が得られる。

2 個羽口、木炭粒形 1~1½ in., 炉床径 9 in. の場合は、ガスが羽口間を通過し炉は最高温度となり、CO₂ と N₂ が排気として出る。

1 個羽口の場合には酸化層が制限され、炉床の大部分における雰囲気中で鉄相が維持された。しかし木炭が羽口またはその近くのみで燃焼するならば、装入物は炉床の一部のみに向かって降下する傾向がある。また鉱石が炉内の高い位置で還元された場合には羽口レベルで酸化される。また炉内に長く鉄塊を置けば再酸化する。

装入物が羽口前の一部分で反応し溶解する場合はほかの大部分は炉内に留まる。かような極部反応では鉱石の還元は緩慢となり鉄を得る温度に上らない。これらの困

難を克服するために第2法が試みられた。それは鉍石を前もって炉床に充填する場合である。空気を鉍石にあてる前に 6 in. 厚の木炭層を通過させるようにすれば、混合ガス中の CO を必要分圧となしうる。木炭の寸法と送風圧力の調節が大切である。

鉍石の充填法で得られた製品は図 10 に示す 3 種からなる。D1: 還元鉍で脆弱品, D2: 緻密鉄, D3: fayalite 型鉍滓, の 3 種である。これら 3 部分の量は、条件によつて異なる。炉温 1200°C に達したときには、鉍石の還元前に鉍滓が形成され、wüstite, magnetite その他の夾雑鉍は溶解する。多くの場合、微小鉄粒がこの鉍滓中に入る。加熱時間の長短にかかわらず、この鉍滓中に含まれた鉄ははなはだ少ない。このことは、NEUMANN が述べた“すべての鉄は鉍滓中の酸化鉄を固体木炭粒で還元して得られる”という説を否定した。

鉍滓は炉底に近い最低温度の部分で形成されるが、正確な位置は炉の構造によつてきまる。炉の上部低温度帯で鉄鉍石は鉄に還元される。鉍滓は炉内を移動して沈下し還元鉍を最高温度帯に残す。

原始火床炉の操業で、熱保持は最も重要なことである。炉頂をドーム形に密閉すると炉床温度は 50°C 上昇する。また重要な点は空気の供給量を減らしうることである。0.5~0.7 立方 ft./分でも炉の温度を保持できる。このように炉の操業を改善すれば、鉍石充填法は、鉄の生産を増し、最大限となしうる。

鉄の歩留は一般に低く、最良成績の場合でもわずかに 20% で、鉍石 4 ポンドから 3/4 ポンドの鉄が得られるにすぎない。木炭の消費は鉄 1 ポンドに対し 16 ポンドである。大量の鉍滓はできるが、溶滓 (cinder) はない。溶滓は大形炉の場合にのみでき、充填法の場合には少ない。本実験のように 9 in. の火床では溶滓は不可能である。実際に鉍石木炭混合装入方法で鉄の生産に成功するには、この炉は小型すぎる。大型炉では、鉄の生産が増し歩留が向上し木炭消費量が減る。

これらの実験から得たひとつの興味ある結論は、鉍滓が炉内液相の下部に沈降し移動し分離することである。この現象は一見不思議なように見えるが、鉄は不完全溶解であり、しかもその表面には半溶解の鉍滓薄膜が被覆しているためである。海綿鉄鍛造の目的でルツボ内で再熱すれば、鉄は沈降する。すなわち再熱し若干温度を上げれば、流動性を増し比重の差によつて分離するのである。

4.2.5 結 論

(1) 鉍石の完全還元が原始火床炉で行なわれた。鉍石木炭混合法を採用し、鉄の大部分が炉の上部で得られ、羽口層で再酸化されて鉍滓に入る。

(2) 鉍石の事前充填法によつて最高の鉄歩留を得た。鉍石 4 ポンドから 3/4 ポンドの鉄を得、鉄 1 ポンドに対し木炭 16 ポンドを消費した。

(3) 炉の溶解層では 1100°C の温度を保たねばならない。実際温度は鉍石によつて異なり、実験した範囲では 1050~1100°C である。

(4) 9 in. 径の火床では、1100°C の温度は 2.3 立方 ft./分の空気供給で実現する。

(5) 木炭の寸法は、完全還元のために最も大切である。9 in. 炉では、木炭を 1/4 in. までに碎く必要がある。

(6) 能率よい炉頂閉鎖法は、均一な熱分布を与え炉の能率を向上させる。

5. 古代製鉄の操業温度

以上列举した、ドイツ、ソ連および英国における古代製鉄還元操業実験の報告は、それぞれ担当学者の真しな研究発表である。抄録者はここで冶金学の立場から操業実験の炉内温度について考察を試みたい。

まず上述 3 実験の操業条件を総括してみれば

年代: ドイツのは紀元前 500 年, ソ連および英国のはローマ時代の復元

炉形: ドイツのは自然通風堅炉, ソ連のは人工通風堅炉で、この 2 つはともに円筒状であり、英国のは火床炉である。

使用鉍石: 炭酸鉄鉍, 赤鉄鉍, 沼鉄鉍

生産鉄: 鉍滓を混ざる海綿鉄, 鍛接鉄塊, 鍊鉄板および鉄片

実験連続時間と回数: ドイツのは 2 日間延べ 32 時間,

ソ連のは 17 回実験で 1 回は、1.5~2.0 時間, 英国のは毎回 4~10 時間で 30 余回操業

このような条件で実験され、炉内最高温度は、ドイツ実験では 1180~1420°C, ソ連実験では 1150~1200°C 英国実験では 1100~1200°C, しかもソ連、英国ともに 1150°C が適当と述べている。

ドイツの実験は特別高温であるが、ソ連と英国は同様で、類似の作業が行なわれたものと思われる。

ドイツの場合は炉の高さ方向数個所について温度を測定していることは敬服に値する。すなわち温度の分布が得られている。ソ連、英国はともに温度の分布は不明である。

炉内温度と炉内反応に関しては、ドイツのは考察を欠いているが、ソ連、英国はともに CO ガスによる還元を推理している。すなわち鉍石は炉の上部 1000°C 以下で還元され、次に鉍滓化するとし、熔融鉍滓が固体炭素で還元されるという NEUMANN の学説は否定している。鉍滓の熔融点は 1200°C 以下であつて 1150°C が製鍊に都合のよい温度とされている。

一般に、炉内温度は不均一であり、装入物の分布もまた不均一と思われるので、炉内反応を理論づけることは困難と思われる。

実験を継続して順調に鉄を生産するためには、実験技

術の熟練が大切である。すなわち技術熟練によつて、良成績を得るに必要な温度が見い出されると思う。ソ連と英国では 1150°C と結論されている。

6. 結 言

ソ連考古学者の主張する実験考古学の趣旨に基づいた、ドイツの I. W. GILLS⁷⁾ の La-Tène 時代自然通風直接製鉄堅炉復元操業実験、ソ連のベ・ア・コリチンおよびオ・ユ・クルクによるルーシ時代人工通風直接製鉄堅炉復元操業実験⁹⁾、および E. WYNNE, R. TYLECOTE⁶⁾ による英国のローマ時代直接製鉄火床炉復元操業実験の3発表の大意を抄録し、若干の解説を加えてこの小品を集録した。

約言して3実験発表を対照してみれば、ドイツのは炉内温度を熱心に測定して堅炉内の温度分布を決定し、操業中に多数の鉍滓試料を採取して精密分析を行ない、直接製鉄の内容を明らかにした。次のソ連のは直接製鉄炉内の還元反応を推理し、特に鉍滓について透過光線ならびに反射光線による顕微鏡組織を研究して鉍物組成を発表している。最後に英国のは小形火床炉について多種類の直接製鉄操業実験を発表している。わが国古代に多数存在した火床炉の操業を研究する場合の参考資料となると思う。

3者に共通する点は、これらの直接製鉄においては、現代の製鉄に比較してはるかに低温度で製錬されて鉍滓を混じた海綿鉄が得られ、第2次工程で実用に適する優秀な鉄が作られたことである。また古代において知られた鉄鉍石が、当時の技術者によつて適当に工夫されて目的とする鉄器に仕上げられたことである。

製鉄に必要な温度を得る方法や、炉の築造法、海綿鉄と鉍滓などに関する基礎的技術に至つては現代のそれと近似している。またこれらの技術が欧州諸国の近代製鉄の技術発達の根本となつたことが想像される。

最後にこれらの実験に従われ、報告して下さつた諸先輩学者に対し感謝をささげたい。またわが国の古代直接製鉄が前掲した欧州の技術に近似していることを想像してみたい。

謝辞 本抄録を編集するに当たつて、ソ連の文献を翻訳してくださつた、考古学者中村嘉男氏に対し深く感謝する。次に本編中の多数の図、表、写真などの調製に協力くださった小宮恒雄氏に篤く感謝する。また富士製鉄株式会社中央研究所の場所長および同所図書館各位のご支援に感謝する。

文 献

- 1) L. BECK: Die Geschichte des Eisen.
- 2) R. F. TYLECOTE: Metallurgy in Archaeology, (1962)
- 3) H. H. COGLAN: Notes on Prehistoric and Early Iron on the old World.

- 4) "Nature", 184 (1961)
- 5) J. SADZOT: Les defuts de la Fabrication du Fer. "Industrie revue de la Federation des Industries Belges", 10 (1956), p. 564
- 6) E. WYNNE and R. TYLECOTE: Iron steel Inst., 190 (1958), p. 338
- 7) I. W. GILLS: Stahl und Eisen, 78 (1958) 23, S 1690
- 8) R. PLEINER and M. RADWAN: Kmartalnik hestorii naukii Techniki, 7 (1962), p. 318~319
- 9) Б. А. КОЛЧИНА, О. Ю. КРУГ:
ベ・ア・コリチン, オ・ユ・クルク:
"ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СЫРОДУТНУЮ ПРОЧЕССА ПРОИЗВО-
ДСТВА АЕЛЕЗА",
鉄生産の直接製鉄炉の物理的復元
АРХЕОЛОГИЯ И ЕСТЕСТВЕННЫЕ
НАУКИ ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ,
Б. А. КОЛЧИНА: ИЗДАТЕЛЬСТВО
"НАУКА" 1965
ベ・ア・コリチン編: 考古学と自然科学,
科学出版社, 1965
- 10) H. H. COGLAN: "Notes on Prehistoric and Early Iron in the Old World": 1956, Oxford, Pitt-Rivers Museum Occasional Papers on Technology, No 8
- 11) H. R. SCHUBERT: "History of the British Iron and Steel Industry": 1957, London, Routledge and Kegan Paul Ltd.
- 12) A. FOX: Devonshire Association for the Advancement of Science, Literature and Art, 56 (1954), p. 39
- 13) H. R. SCHUBERT: Op. cit., p. 19-25
- 14) M. J. O' KELLY: Journal of the Cork Historical Society, 56 (1951) part I, p. 32
- 15) J. P. GILLAM: Private communication
- 16) P. CORDER: "The Roman Town and Villa at Great Casterton, Rutland," 2nd Report, (1953), p. 127 University of Nottingham
- 17) E. STRAKER: "Wealden Iron," (1931), p. 89-100 London, G. Bell and Sons Ltd.
- 18) B. NEUMANN: "Die ältesten Verfahren des Erzeugungs technischen Eisens," Freiburger Forschungshafte, Kultur und Technik D. 6, (1954), p. 34 Berlin, Akademie Verlag
- 19) W. GOWLAND: Archaeologia, 56 (1899) part II, p. 267
- 20) H. GARLAND and C. O. BANNISTER: "Ancient Egyptian Metallurgy," (1927), p. 87 London, Charles Griffin and Co., Ltd.
- 21) J. PERCY: Metallurgy (Iron and Steel)," (1864), p. 254 London, J. MURRAY
- 22) E. STRAKER: Op. cit., p. 16-25
- 23) T. A. RICKARD: J. Iron Steel Inst., (1929) II, p. 336-342

-
- 24) J. PERCY: *Op. cit.*, p. 278
- 25) G. AGRICOLA: "De re metallica": translated from the first Latin edition of 1556 by H. C. and L. H. HOOVER, (1950), p. 421 New York, Dover Publications Inc.
- 26) BIRINGUCCIO: "Pirotechnia": translated by C. S. SMITH and L. GNUDI, (1942), p. 61 New York
- 27) B. NEUMANN: *Op. cit.*, p. 41
- 28) G. T. LAPSLEY: *English Historical Review*, 14 (1899), p. 509
- 29) L. DARKEN and R. W. GURRY: *J. Amer. Chem. Soc.*, 67 (1945), p. 1345
- 30) R. A. MOTT and R. V. WHEELER: "Coke for Blast Furnaces," Iron and Steel Industrial Research Council Technical Report (1930) No 1 London, The Colliery Guardian Co., Ltd.
-