

各種製鉄法

大阪大学工学部 足立 彰

I. まえがき

年々生産されている金属の90%以上は鉄である。この大量に生産される鉄は、その大部分が製鉄溶鉱炉すなわち高炉によって原料としての酸化鉄状態の鉱石よりコークスを燃料および還元剤として用い炭素と珪素とを多量に含む銑鉄をつくり、これをさらに各種用途に応じた低炭素鉄合金すなわち鋼に変えるいわゆる間接法によって製造されている。直接製鉄法というのは、溶鉱炉によることなく鉄鉱石から低炭素鉄合金即ち鋼をつくる方法であって、古くから行われていたが、上記の間接法に対して技術的にはともかく経済的には劣り、現在まではごく特殊な条件のもとにある地域で少量生産されているにすぎない。我国でも戦時中鉄の欠乏した時期には、欧米で試みられた各種製鉄法を改良工夫して特殊な製鉄法に成功した例はあるが現在ではほとんど行われていない。

近年鉄鋼生産量の増大に逆比例して、高炉（製鉄溶鉱炉）で必要とする燃料および還元剤としてのコークスは、その原料の石炭が特殊な性能と高品位のものを必要としているので世界的にその資源が欠乏してきたので、その節減改良法が工夫されているが、従来の高炉法に代る特殊なコークスを必要としない新製鉄法が要望されている。また特殊鋼その他の原料としての屑鉄資源の欠乏あるいはその品位の低下、さらに粉末冶金用鉄粉の需要増加等の諸事情から低品位燃料が使用可能で操業温度が低く、として酸化鉄のみが還元された多孔質の海綿鉄をつくる方法その他が最近注目されて来た。

日本鉄鋼協会においてもこれらの目的のため「直接製鉄法研究部会」が置かれていたが、近年さらに発展して代りに「原子力利用製鉄法部会」が設けられ、その実現発展に努力されている。

II. 高炉製鉄法と直接製鉄法との比較

約600年の技術的、経済的伝統を持つ現在の高炉法発展の歴史を見ると、その初期の方法は直接製鉄法に属するものであった。炉の規模が小さく炉内温度が十分高くない状態であるため、原料酸化物より Fe その他の元素の還元度合が少なく、金属鉄中の炭素の吸収が少なく

その組成も不均質で、半熔融状態で産出された製品中に多量の酸化物を抱合した状態であった。古代製鉄法による錬鉄、錬鋼がそれである。技術的、経済的発展と共に炉の規模は次第に大きくなり、高温に予熱された送風によって熱エネルギーが有効に利用されるようになると炉内の高温均熱部分が広がり、原料より Fe は勿論 Si その他の元素も十分還元されて合金となり、炭素も飽和点まで吸収されて融点の低い液体状態の合金と共に不用成分は珪酸塩即ち液体状態のスラグとなり、それらの比重差から分離されるため、常に均等組成の鉄合金が得られるようになった。このいわゆる銑鉄はそのままでは用途が少いので、鉄よりも高温で酸素との親和力の大きな C, Si 等の元素を酸化除去して鋼をつくる間接法が盛んになった。

しかし、近代的高能率の高炉製鉄法は規模が大きく建設費が莫大なため経済的投機となり、経済界の変動によって短期間の要求、急増の調制等に応じ難く、また原料も次第に低品位のものに移り、前処理が大規模となると共に電気製鋼法、平炉製鋼法等の原料の調制が困難であるため種々の製鉄法を発展させる必要がある。

高炉法はコークス用炭に束縛されているため、これに代る天然ガス、石油、非粘性炭、電力等の使用が可能な方法が望まれる。屑鉄を原料とする製鋼法では、屑鉄の価格および供給量が市況に左右され非常に変動が激しく不安定である。従って屑鉄価格の高騰期には低価格の安定した人工屑鉄代用品をつくり、また最近のように屑鉄の汚染度が著しい時には製品の品質が安定した純度の高い鉄源を必要としているため、特に特殊鋼、高級鋼の原料としての製鉄法が望まれる。スウェーデンでは高級鋼を大量生産しているが、この場合不純物が混入しないことが大切である。従って屑鉄使用を嚴重に管理し制限している。高級鋼は大部分電弧炉でつくられているが、その原料としての海綿鉄を設備費の少ない方法でつくっている。即ち、年間10万 T の海綿鉄を Wieberg-Söderfors 法によって生産し、また年間3万 T を Högånäs 法でつくっている。海綿鉄は比較的比重が小さいが電気伝導度が良く、気孔率が大きいため熱伝導率は低いが、電弧炉製鋼では不利ではない。

なお、本文においては電気製鉄法、低炉法等による製鉄法以外の直接法と称する低炭素製鉄法の概要を述べる。

Ⅲ. 原料とエネルギー

1) 原料

多くの国のガス化学工業のガス供給源として製鉄所のコークス炉がその役割を果たして来たが、近年石油化学工業の発展と共にコークス炉部門は次第に赤字経営になって来た。製鉄業では企業全体として利益をあげているためコークス炉は新增設されているが、石油化学工業発展以前に比べるとコークス価格は割高となっている。この傾向は高炉におけるコークス消費量の減少に圧力をかけ、鉄鉱石の予備処理、高品位鉄の輸入増加の傾向を高めた。1957年迄は原料政策として将来の鉄鉱石原料不足を如何に解決すべきかの点が重点であったが、近年世界各地、特にオーストラリアで埋蔵量の多い富鉄資源が続々と発見、開発され、供給力が需要を上廻る傾向となった。

また多量の貧鉄の予備処理法が発展して高品位原料が多量供給されるようになった。例えば、米国スペリオール湖地方の低品位鉄石タコナイトが高炉用高品位原料資源となり約300年の供給が可能と推定されている。米国メサビ地区の直接船積鉄石の品位は鉄分平均51.5%であるが、「ペレット」の平均鉄分は65%、Bethlehem社の開発した鉄山の精鉄分は約70%で純酸化鉄に近い成分である。アメリカ以外で最も重要な最近の開発鉄山は西オーストラリアで、過去10年間に150億Tの鉄石埋蔵量が発見された。

近年、予備還元ペレットに関心が集っている。コークス比を低下させ出鉄量を増す予備還元ペレットは、簡易高炉で非常に高能率で鉄を生産できる可能性がある。また還元度の高い予備還元ペレットは、高炉を経由せず直接製鉄炉へ装入することが出来る。米国では95%予備還元ペレットについての工業化が進められているが、我国でもこれについての関心が高まっている。

2) エネルギー

現在の我国の原子力発電は重油火力発電に比べてまだ経済的に劣るようであるが、原子力発電の価格は急速に低下しつつあるように思われ、将来の原子力利用の新製鉄法が課題となっている。

高炉製鉄法でのコークス価格と電気製鉄炉の電力価格とを比べると、R. Dürrer と F. Lüth によるとそれぞれ

$$(1 \text{ kg コークスの価格}) = 5 \times (1 \text{ KWH の電力価格}) \dots\dots(1)$$

$$(1 \text{ kg コークスの価格}) = 3.6 \times (1 \text{ KWH の電力価格}) - 3.2 \text{ ペニヒ} \dots(2)$$

なる条件で高炉と電気炉との経済的均衡が保たれているとされている。高炉のコークス比を0.500、電気製鉄炉のコークス比を0.330、所要電力2,100 KWH/t とすると、1屯のコークスを一万円と仮定すると、均衡電力価格は(1)式では1円75銭/KWH、(2)式では2円44銭/KWHとなる。高炉技術は経験が歴史的に長く良く発達しているが、電気炉法は劣っていると思われるので、それだけ将来発展する可能性も大きいことが考えられる。電力が現在の物価水準で1~2円/KWH程度に安くなれば電気炉製鉄法以外の方法も考えられる。例えば還元度90%以上の予備還元ペレットを電気炉で直接製鉄することもできる。

鉄鋼業において使用される1次エネルギーは石炭、コークスとともに電力、重油が多量に使用されている。(第1表) 我国鉄鋼業は電力需要の約15%を消費する大

第1表 鉄鋼業に使用される1次エネルギーと副生ガスエネルギー

区 分	単 位 発熱量 (kcal)	昭和42年度実績			
		消費量	発熱量	比 率	
一 次 エ ネ ル ギ ー	原 料 炭(10 ³ t)	7,500	18,959	142,193	40.6
	発 生 炉 炭(")	6,500			
	一 般 炭(")	5,500	340	1,870	0.5
	無 煙 炭(")	7,000	184	1,288	0.4
	コークス(")	7,200	11,011	79,279	22.6
	石油コークス(")	8,000	83	664	0.2
	重 油(10 ³ kl)	9,900	6,615	65,989	18.7
	電 力(10 ⁶ KWH)	2,450	24,228	59,359	17.0
計			350,141	100.	
副 エ ネ ル ギ ー	Bガス(10 ⁶ m ³)	800	61,125	48,900	13.9
	Cガス(")	4,800	5,975	28,680	8.2
	L Dガス(")	2,200	2,197	4,833	1.4
	計			82,413	23.5
粗鋼生産 (10 ⁴ t)			63,776		
粗鋼トン当り1次エネルギー (10 ³ kcal)				5,490	

- 注：1. コークスと電力は全消費量から製鉄所内生産分を差引いたもの
2. LDガスは発生量を示す
3. 通産省指定統計による (42年—50 m³/t)

電力使用産業であり、低廉かつ安定した電力の供給を受けることは鉄鋼製産費切下げに大きな影響を与えるとともに、鉄鋼製品の国際競争力強化の観点からも重要な問題となっている。安価な電力の供給は、製鉄工程において、電気炉の活用を含めて、電力需要分野を増大せしめ

技術革新を促すことになる。また天然ガス、石油が安く多量に供給されるならば、製鉄工程において助燃剤に止まらず、コークスの代わりに (H₂-CO) などのガス吹込みによる還元技術が発達するかも知れない。最近、亜硫酸ガスによる大気汚染が問題となり高硫黄重油使用の制限対策が検討されているが、製鋼業における重油の選択、脱硫の実施は生産費上昇を招くため、公害要素となる硫黄を含まない輸入天然ガスの利用を検討する必要がある。この場合、液化輸送に伴うタンカー、パイプライン等の設備は多額費用を要し、当面、石油に比べ経済性は劣るが、将来のエネルギー源として考慮すべき余地がある。

IV. 主要な直接還元法

第2表、第3表は主要な直接還元法を示す。直接製鉄法を大別すると2つに分けることができる。すなわち、還元剤としてガスを使用し流動層によるもの、他はガスあるいは固体還元剤を使用して堅型炉、回転炉あるいはトルトで還元を行わせるものである。また別の分類によると、スラグをつくらせて行う方法と作らせないで行う方法とに分けることができる。スラグを作らせる方法は鉱石中の不純物をかなり除去することができるが、スラグを作らせない方法は鉱石中の酸素および一部の硫黄分しか除去することができないので、使用する鉱石はある程度制限されてくるわけである。

第1図はスウェーデンの Stora Kopparberg Bergslags AB 社が発表したもので、赤鉄鉱 (Fe₂O₃) あるいは磁鉄鉱 (Fe₃O₄) を夫々 90%還元して海綿鉄を作る場合、鉄鉱石中の鉄含有量%と成品海綿鉄中の鉄分%の関係を

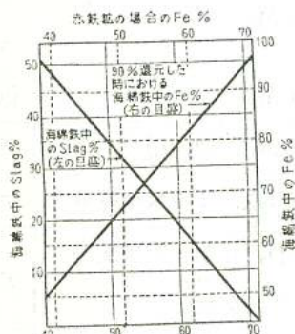


図1 鉄石中の Fe %と海綿中の Fe および非金属物との関係

示したものである。すなわち鉄分60%の赤鉄鉱を使用した場合海綿鉄中の鉄分は約82%になり、また鉄分60%の磁鉄鉱を使用した場合海綿鉄の鉄分は約79%になる。つまりこれは、同じ鉄分の鉄鉱石を使用する場合、赤鉄鉱

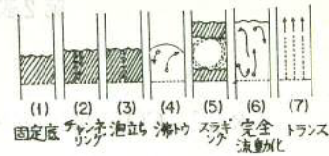


図2 流動層の状態

の方が有利であるということの意味したものである。

近年直接製鉄法が急速に発展した面としては、技術的には固体流動法 (Fluidized-Solids Process) が発明されこれを直接製鉄法に適用したことが大きな役割を果たしている。固体流動法は Warren K. Lewis が発見し、直ちに石油化学に適用して好成績を収めたものである。第2図に示すように、有孔底を有する容器の中に粉鉱を入れ、下からガスを吹込み、順次ガスの速度を早めていった場合、最初は(1)のように固定底 (fixed bed) においてガスは静かに粉鉱層を通過する。次にややガスの速度を早めると(2)のようにチャンネルング (Channeling) を起す。さらにガス速度を早めると(3)のようにガスは泡状となって沸騰 (boiling) を起す。それ以上ガス速度を早めると(5)のように粉鉱層は上下2層に分れ、空間部の高さが容器の直径より大きくなり、上部の粉鉱層は落下し、その後再び上下2層に分かれこれを繰り返す。この状態をスラッキング (Slugging) という。さらにガス速度を早めると(7)のようにトランス (trans) と称して粉鉱はガスと共に飛散してしまう。

V. 各種直接製鉄法

1) ヘガネス法 (Höganäs Process)

鉄鉱石を固体炭素質還元剤と共に耐火物容器に充填し外熱して還元する。スウェーデンの E. Sieurin の発明になり1910年から Höganäs で工業化された。当初は、シャモット製のルツボに粉鉱と還元剤 (木炭、石炭粉あるいはコークス粉に脱硫用生石灰粉を配合したもの) を水平の交互層状に充填し、これをリング炉に装入して1150-1200°Cに加熱保持し、炉中冷却のうちに、生成した海綿鉄をルツボから取出して残存付着している過剰炭粉や石炭を清掃するという方法によっていた。その後、(1)耐火物容器として炭化珪素製サヤを用いる。(2)充填剤中に粉鉱を3列柱状ないし円筒状に充填する。(3)リング炉の代わりにトンネル炉を用いる、などの改良が行われ、鉄石の炉中滞留時間は初期の8-10日間から、現在の36-38時間に短縮している。それに伴って海綿鉄生産能力も、リング炉 (1940年代、炉内加熱室長さ160m、巾6m、深さ2.5m) の日産20tから、トンネル炉 (Riverton,

第2表 主要な直接還元法

	還元剤	名称	鉍石	実施地
シャフト炉法	水素とCOの混合ガス 電炉でCO ₂ →CO	Wiberg 法	塊鉍又はペレット 高品位鉍	スエーデン 日本
	電炉廃ガス利用	上島式	塊, 高品位	富山
流動床法	70% CO, 30% H ₂	Flash Steel 法	ペレット	アメリカ
	メタン	Golleisen 法	塊 鉍	スエーデン
	水素	H-Iron	粉, 高品位	アメリカ
	水素	H-Iron バッチ式	〃	〃
	水素	中島式	〃	日本
	石油性ガス	富国石油ガス (資源科研究)	砂 鉄	新潟
	水素	塩素蒸発—流動還元 (Oxley 法)	粉 鉍	アメリカ
	水素	Nu-Iron	〃 -10 mesh	
	CO ₂ +H ₂	プリバロフ ボコビイコブ法	粉 鉍	ソ 連
	CO+H ₂ +Cl ₂	日産化学法	硫酸焼鉍	富山
廻転炉法	粉コークス	Krupp-Renn 法	低品位, 粉	西ドイツ, 日本
	天然ガス, 重油	R-N法	粉, 低品位	アメリカ
	重油, コークス	米国鉍山局法	シンダー	〃
	微粉炭	日下式	粉, 塊	満州, 日本
リングキルン又はトンネル炉法	発生炉ガス	Hoganas	高品位	アメリカ スエーデン
電気炉法	コークス	Albert 高周波電炉法	高品位	仏
	コークス	Elektrokemik	高品位, 塊, 粉	ノルウェー
	コークス	Lubatti 法	硫酸鉄, ミルスケール	アメリカ
	木炭	Electromelt Demag	鉍石, フリコダスト ミルスケール	アメリカ
	コークス	Werber-Wenzel 法	塊 鉍	独
レトルト法	天然ガス	HYL 法	高品位, ミルスケール	メキシコ
	コークス	Smith 法	鉍石, ミルスケール	満洲

第3表 最近における直接還元法の概要

	方法	実施地域	還元状況				成品	現状	備考
			使用炉 及 タイプ	使用還 元剤	還元 温度	圧力			
{1}	H-Iron process	米国 New Jersey 州 Tranton	流動層	H ₂	480°C	28.1 m/cm ²	粉末鉄或 は圧縮成 型したもの の	パイロッ ト工場	去る10月 Alan Wood Steel Co. が 50 t/d の工場建設を發 表し、現在建設中。還元ガスの ため地域的に制約される。
{2}	Shipley process	米国 Illinois 州 South Chicago	"	H ₂ + CO	704°C	4.2 m/cm ²	"	"	天然ガスを使用する関係上地域 的に制約される。
{3}	Esso-Little process	米国 Massachu- setts 州 Cambridge	"	H ₂ + CO	814~ 871°C	大気圧 に近い	"	"	同上
{4}	Cyclosteel process	英国 B I S R A	旋回層	CO			熔 鋼	実験段階	熔融鋼を目的とした奇抜的な方 法
{5}	Stelling process	スウェーデン Domnarfvet	流動層	"	590°C	大気圧	セメント ダイト (Fe ₃ C)	パイロッ ト工場	セメントダイトを目的とした最も 新しい方法
{6}	Madaras process	米国 Texas 州 Longview	レトル ト	H ₂ + CO	980°C	1.8 m/cm ²	海綿鉄	生産中	天然ガスを使用する関係上地域 的に制約される。メキシコでは 現在1,200t/d工場の計画がある
{7}	Wiberg- Roderfors	スウェーデン Soderfors	堅型炉	"	1,000 °C		"	"	スウェーデンで古くから採用さ れている方法
{8}	Norsk-Sthal process	ノールウェイ Bochum	"	"			"	"	ノールウェイで古くから採用さ れている方法で堅型炉を面白く 修正したもの。
{9}	R-N process	米国 Alabama 州 Birmingham	回転炉	粉コー クスま たは石 炭	1,260 °C		圧縮成型 したもの	セミプラ ント	Krupp-Renn process と良く似 たもので、低品位鉱石の処理を 主眼としたもの。
{10}	Domnarfver Kiln process	スウェーデン Domnarfvet	"	"	1,100 ~ 1,300 °C		焙 焼 鉱	生産中	鉄鉱石の磁化焙焼を主眼とした もの。
{11}	Krupp-Renn process	ド イ ツ	"	"	1,250 °C		ル ッ ペ	"	欧州地域では広く採用されてい る。
{12}	Hoganas process	スウェーデン	トンネ ル キルン	"	1,200 °C		海綿鉄	"	スウェーデンで最も早く工業化 された方法。
{13}	Tysland- Hole process	スウェーデン ノールウェイ	電弧炉	コーク ス及び CO.H ₂			熔融鉄	"	電力の安い地域に制約される。

1953年、加熱室長さ165m、巾1.5 m、高さ1.625 m) の年産20,000 t に増大している。

原料鉱石には脈石分が低いことが望ましく、磁選精鉱 (Fe>70%) を使用している例が多い、粉鉱または粒鉱 (10~25 mm) を予備処理することなく使用する。還元剤は石炭粉、コークス粉のいずれでもよく、S<1%で灰分の融点が高いと灰分30%までの低質炭も使用できる。還元反応で生成する CO ガスの燃焼で加熱が行われるが、発生炉ガス、重油などで補熱する。酸性平炉や電気炉による高級鋼製鋼原料用の海綿鉄はサヤから出したのち圧縮して比重を高める。粉末冶金用鉄粉は海綿鉄を粉砕、磁選して品位を高め、再還元、篩別、粒度調整などの処理を行って成品とする。

本法の稼動現況は次のとおりである。

Höganäs (スウェーデン) 1910年以降操業	リング炉 2基
2500 t/yr, 粉末冶金用鉄粉	
Monterrey (メキシコ)	トンネル炉 1基
10,000 t/yr, 電気炉製鉄原料	
Oxelösund (スウェーデン) 1954年以降操業	トンネル炉 2基
30,000 t/yr, 高級製鋼原料	
Riverton (アメリカ) 1954年以降操業	トンネル炉 2基
29,000 t/yr. 粉末冶金用鉄粉	

我国でもこの Höganäs 法と類似の方法で、特殊鋼用海綿鉄の生産が行われた例がある。すなわち本溪湖では、1932年頃から終戦時まで、陶器焼成用の松村式角型炉で日産 2 t の海綿鉄 (T. Fe 97~98%, M. Fe 96~87%) が生産され、特殊鋼原料に使用された。また1941年には垣内等によって名古屋で、現在の Höganäs 法と同様にトンネル炉を用いて日産10 t の特殊鋼用海綿鉄が生産された。

1953年 Häganös Sponge Iron Corp. によって第3図に示すような方法を採用した工場がアメリカ、ニュージャージー州、リバートンに建てられた。この方法は従来

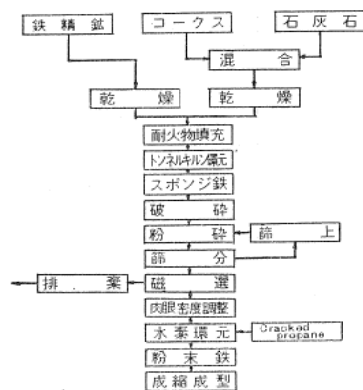


図3 改良した Höganäs 法

のものに改良を加えたもので、能力は年間3万 t である。

2) ウィーベルグ、ゼーダーホルス法 (Wiberg-Söderfors Process)

スエーデンの発明者マーチン・ウィーベルグ (Marten Wiberg) のこの方法はゼーダーホルス・プルン (Söderfors Bern) で1932年工業化され現在最も広くスエーデンで採用されている。

鉱石はシャフト炉の炉頂から装入し、還元ガス (H₂: CO=1:3) は炉底から吹き込むが、このガスは炉の中段から還元廃ガスの一部を高温ファンで吸引し、再生炉で所定成分に再生および加熱し、ドロマイト充填塔を通じて脱硫したものである。残余の廃ガスはシャフト炉を上昇して鉱石の予備還元に与り、さらに炉高の3/4の高さに吹き込む空気によって燃焼して鉱石を予熱する。炉頂から装入した鉱石は予熱帯、予備還元帯、還元帯 (1000°C) を経て、冷却マントル付きの炉底から回転テーブルによって排出する。再生炉は上下数対の電極から抵抗炉としてのコークスに通電する電熱炉で、上方からコークスおよび還元廃ガスを併流する。脱硫塔は上方からドロマイト、下方から再生ガスを送るが、脱硫済み還元ガスの一部は塔頂から再生炉の炉底に導いてドロマイトの予熱および使用済みコークスの冷却に利用する。Söderfors (1932年) のシャフト炉 (高さ24m、炉頂内径0.8m、炉底内径2.0m) は日産30 t であった。

原料鉱石はPが低く、かつ還元中の機械的強度が大きくなければならない。焼結鉱も使用でき、Söderfors では磁鉄鉱のグリナワルト焼結鉱 (Fe 60%) を用いて、80%の海綿鉄をつくるのが正常操業になっている。団鉱も成績がよい。鉱石粒度は25~80mm、還元ガスは H₂ 20~30% CO 残りという組成がよいが、再生炉にコークスを用いる場合は水、天然ガス、重油などを添加しないと H₂ 濃度がこの値にならない。このコークスは高炉用コークスを用い、使用済のコークスは 30 mm 篩上物を再使用する。脱硫剤としては石灰石よりもドロマイトがよい。強度が大であって炉内の圧力降下が少ないからである。

Wiberg 法の稼動現況は次のとおり

Söderfors	1932年以降	1基	10,000 t/yr.
Sandwicken	1951年以降	1基	18,000 t/yr.
Persberg	1954年以降	2基*	30,000~40,000 t/yr.
Hellefors	1952年以降		18,000 t/yr.
Hofors	1953年以降		20,000~30,000 t/yr.

* 直径 3 m、高さ24m、再生炉容量3600 KVA

我国の上島式製鉄法はこの Wiberg 法と同じくシャフト炉を用いて塊鉄を高炉ガスで還元する方法であって、

磷化学工業KKが1959年以来、同社の磷製造に伴う廃ガスを利用して日産15 tの海绵鉄生産を行った。

この方法は還元ガスとして密閉式電気炉からの廃ガス(CO 90%, H₂ 4%, その他6%)を用いるが、その予熱には(850—900℃)還元廃ガスの $\frac{1}{3}$ 量を Wiberg 式と同様にシャフト炉の中段から抜きとってその燃焼熱を利用する(補熱に電熱を用いる)。還元廃ガスの残り $\frac{1}{3}$ 量はシャフト炉を上昇して炉内を下降する鉍石を予備還元し、さらに炉外から送入した空気によって約1000℃に燃焼して炉頂からの鉍石を予熱し、約100℃で大気中に放出する。成品海绵鉄は炉底から取出す。使用鉍石の性質、粒度は Wiberg 法と同様、還元ガスはカーバイト炉その他の密閉式電気炉からの廃ガスを使用すると経済的に有利である。海绵鉄1トンあたりの原単位は、原鉍1400 kg 還元ガス(密閉式電気炉廃ガス)1180 m³、電力250 KWH である。

炉頂より装入された鉄鉍石は第4図に示す4段階の工程を経て海绵鉄となる。

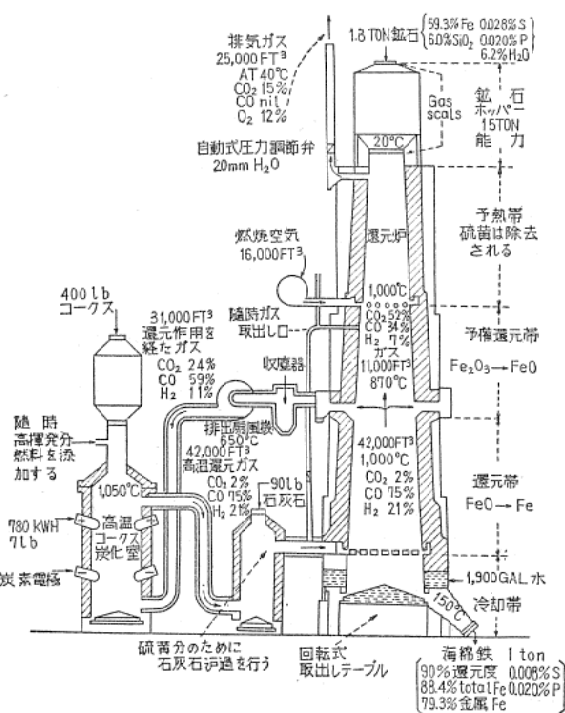


図4 Wiberg-Söderfors 法

3) クルップ・レン法 (Krupp-Renn Process)

本法は Friedrich Johannsen が1931年より1933年にわたってドイツの Krupp-Grusen 工場で研究開発した。回転炉で貧鉍を処理して(ザルツギッター鉍石を対象として)粒鉄(Luppe)を作るもので、工業的に最初に稼動したのは1939年であり太古のレン法(Renn feuer)が

全く近代的な方法として登場した。

この方法は鉍滓塩基度が0.1~0.3という強酸性操業法で第5図に示す回転炉で操業を行うから、高炉法で使用

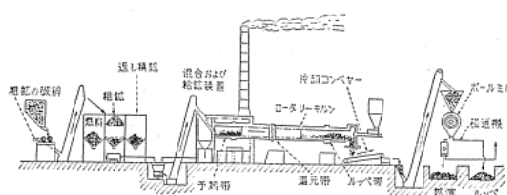


図5 クリップ・レン法

できない高珪酸質の低品位粉鉄鉍および低品質炭を活用できる点に特徴がある。鉍石の還元は長軸の方向に2~3%傾斜した回転炉中で連続的に行われる。原料鉄鉍石と共に粉炭を回転炉の高い方の端から装入し、低い方の端から固体、液体、気体いずれかの燃料を炉内に送りこんで生ずる火焰で加熱する。回転炉全長に対する最初の約20%の長さのところが予熱帯で、450~500℃にて乾燥および予熱を行う。これに続く約60%の長さのところが還元帯で600~1100℃にて鉄鉍石が還元されて海绵鉄となる。残りの約20%のところがルッペ帯で1200~1300℃である。装入物はルッペ帯に比較的長時間(5~6時間)滞留し、海绵鉄はこの間に自然に鍛接されてやわらかいルッペ(粒鉄)となり、半流動状の鉍滓の中にルッペがまきこまれている。装入物の炉内通過時間は約7~8時間である。ルッペを含む鉍滓は炉の端で水に流しこみ、砕いて磁力選別でルッペを分離する。ルッペの大きさは広範囲に亘っているが一般には3~8 mmである。C含有量は0.5~1.0%程度であるがそれより高くも低くもできる。Pは装入原料中の70~90%がルッペの中に入る。Mn, Siは僅かに還元されるがこれらの元素の含有量は低い。原料中のSの略々 $\frac{1}{3}$ は粒鉄中に入るの、鉄中のS含有量は高くなり普通0.5~1.0%Sになる。S含有量の高いことはこの方法の大きな短所であり、Sの低い製品を作るにはSの低い特別の原料が必要になる。順調な操業を行うために鉍滓量は500 kg/t ルッペ以上でなければならない。粒鉄は製鋼炉で鋼にすることもできるし、製錬炉で銑鉄にすることもできる。クルップレン法は貧鉍石の選鉍法と同じ意味に解釈して冶金選鉍法(metallurgische Aufbereitung Verfahren)とも呼ばれている。本法はチタン酸化物を含んだ鉍石またはNiを含んだ鉍石の製錬にも意義がある。築炉には特別の耐火材が必要である。予熱帯および還元帯は特殊なものを必要としないが、ルッペ帯には酸性耐火レンガ(SiO₂ 70~75%, Al₂O₃ 20~23%)の緻密なものを必要とする。ルッペ製造t当り生産費は17,300円であり、その設備費は処理鉍石年間能力のt当り約1,600円である。

4) H-iron 法 水素還元法

米国の Hydrocarfon³ Research Inc. と Bethlehem Steel Co. が協同で開発したもので、粉鉄石を流動炉において高温、高圧の水素で固体流動法によって浮遊させ直接還元鉄を作る方法で、日産10 t の Pilot Plant を経て1957年10月に Alan Wood Steel Co. が 50 t/d の工場を建設し1960年工業化して以来注目を浴びている。

本法は、まず高品位鉄鉄石を 20~325 メッシュの粒度に破碎し、ロータリードライヤーで脱水と予熱が行われる。予熱された鉄石は自動的に鉄石移送容器に入れる。この鉄石移送容器に鉄石が一杯になると高圧の水素ガスが充填される。この場合移送容器のガス圧力は次の還元炉より約 7 kg/cm² 高くなっているため、この圧力差によって鉄石は順次還元炉の中に送り込まれ、下から吹上げて来た水素ガスによって還元される。この粉鉄を流体として移動させる方法は本法の一つの大きな特徴となっており、バルブの操作によって粉鉄は一定の密度と適当な速度を保ちつつ、還元炉中の水素の圧力および流動速度に大きな変化を与えることなく移送できるといわれている。

還元温度は、できた還元鉄が団結しないように約 480 °C という比較的低温で還元を行わせるため、圧力は 28.1 kg/cm² という高圧を必要とする。一般に還元温度が低いと反応速度および水素の利用率は低いが、高圧を用いてこの問題を解消している。

1 回の鉄石を還元する時間は 5~8 時間要し、還元粉鉄は還元鉄容器に入り、還元炉には新しい鉄石が装入される。出来た粉鉄は圧縮成型され、再酸化防止のため塗油を行ったのち製品として搬出される。第 6 図は本法の製造工程を示すフローシートである。還元を使用する時間は使用する鉄石の品種および品質に左右されることは勿論である。第 7 図はトレントにおける Pilot plant で実施した代表的赤鉄鉱と代表的磁鉄鉱を使用した場合の還元度とそれに要する時間の関係を示したものである。

本法の第 2 の特徴は還元炉内における粉鉄の動行である。次に示す第 8 図のように粉鉄は固体流動法によって流動層を形づくり、水素ガスはこの中を水泡が沸騰するように通過し、ガスと固体の接触反応が効果的に行われ

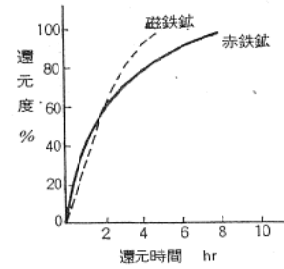


図 7 磁鉄鉱、赤鉄鋼の還元に要する時間

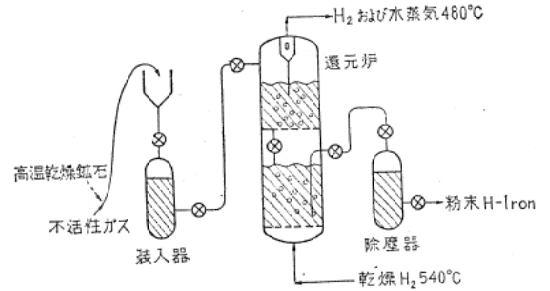


図 8 装 入 器

る。この際水素ガスの流通によって粉鉄がダストとなって飛散しないように、ガスの圧力と速度には特別の注意を払う必要がある。

一方還元用の水素ガスは天然ガスあるいは燃料油を部分酸化させて作られるが、この中には多量の炭酸ガスが含まれているためエタノールアミンを使用し、この炭酸ガスを吸収させて殆んど純粋の水素ガスとする。この水素ガスは予めガス加熱器の中で約 540 °C に加熱されたのち還元炉に入り、還元炉から出る時は約 480 °C の温度で還元によって生成した水蒸気を伴って排出される。排出されたガスは熱交換器および冷却器を通して約 50 °C に冷却され、脱水の後ガス回路に戻る。従って最終的には全還元ガスが使用されることになる。粉鉄製品の用途としては純度が高いため、製鋼炉 (平炉, 電気炉) 用としても使用できる。特に屑鉄が高価で、しかも入手が困難な際にはさらに効果的である。

トレントで作った H-iron を Bethlehem Steel Co. の平炉および電気炉で使用した試験成績を第 4 表, 第 5 表に示した。H-iron の生産費について Hydrocarfon Research Inc. では次のように推定している。東海岸で水素源に燃料油を使用した場合は大体 13.32\$/H-iron t. これに対し天然ガスが豊富なテキサス地方では大体 6.13\$/H-iron t. である。ただしこれには鉄石代が入っていない。ここで鉄分 51.5% (単価 \$11.70 と仮定) の鉄石を使用すると、95% の還元鉄 1 t を作るには約 1.8 t の鉄石を要するので、全製造原価は東海岸で \$42.21, テキサス地方で \$34.70 となり十分屑鉄と対抗できると発表

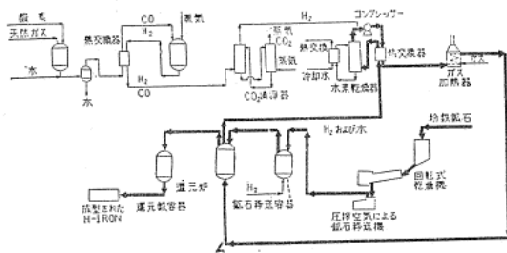


図 6 H-Iron 法

第4表 電気炉熔解 (Double Slag) でスクラップの代りに93%還元 H-Iron を使用した場合の作業成績

熔 解 番 号	Orade	炉 能 力 t	金 属 装 入 %		コークス 装 入 量 %	熔 落 素 %	装入～ 出鋼時 間	歩 留 %	備 考
			H-Iron	スクラップ					
21G085	52~100	35	50.8*	49.2	1.5	2.04	10°30'	88.8	
21G116	4340-AQ	35	32.3	67.7	1.25	0.65	7°20'	94.2	
22G172	52~100	65	34.7	65.3	1.0	1.50	10°55'	94.6	
21G300	1025	35	20.5	79.5	1.0	0.53	5°35'	96.3	熔解良好
23G337	1025	65	21.6	78.4	0.78	0.39	9°00'	95.0	〃
23G368	1025	65	18.0	82.0	0.7	0.48	7°20'	94.5	〃

[注] * 印は油塗布を示す。

第5表 H-Iron 工場と熔 鋳 炉 の 比 較

	H-Iron 工場	熔 鋳 炉
投 下 資 本	2,300万 \$(テキサス)	4,700万 \$(含コークス炉)
鋳 石 荷 揚 設 備	700万 \$	700万 \$
H-Iron Passivation *	1.0~1.5 \$/t(見積り)	
キ ュ ポ ラ* 操 業 費	7 \$/t(コークス炉は除く)	
鋳 鉄 製 造 Passivation *	30~35 \$/t	35~40 \$/t
キ ュ ポ ラ 還 元*	0.50~0.75 \$/t(見積り)	
	7 \$/t	

[注] * 印は投下資本の比較

している。また鉄1tを作るのに約650m³の水素を要し、この費用は燃料油を使用した場合\$6~8天然ガスを使用した場合\$4~7瀝青炭を使用した場合\$6といわれ、天然ガスを使用した場合が最も安価である。工場の建設費が溶鋳炉に比べて非常に安い点も注目に価する。最新式溶鋳炉はコークス炉を含めて約4,700万ドルの建設費を必要とするが、本法では日産2,200tの工場で僅か2,300万ドルで建設され、さらにキュポラのような再溶解工場を付設すれば低品位鋳石の使用が可能となるが、その場合の費用は建設費において年産1t当たり7ドル、作業費7ドル、計14ドルが増加する。すなわち溶鋳炉、コークス炉、平炉の建設費に対して20~50%節約ができるといわれる。(第5表参照)

本法は直ちに現在の高炉—平炉(転炉)という一貫した製鉄法式に置き代るものではないが、確かに有望な方法といえる。

5) Nu-Iron 法 (別名 Shipley process)

この方法は H-Iron 法と同様に固体流動法を採用し、

元来還元ガスとして水素を使用するものであったが、その後水素と一酸化炭素の混合ガスによって還元させる方法も研究し、粉鉄鋳石を連続的にガス還元を行わせる方法で、現在 U. S. Steel Corp. と Dorr-Oliver Inc. が協同してイリノイ州のサウス・シカゴにある pilot plant を操業している。この方法のフロー・シートは第9図に示す通りで連続的に予熱炉に装入し、ここで還元炉からの排ガスによって、370°C.に予熱する。予熱された鋳石

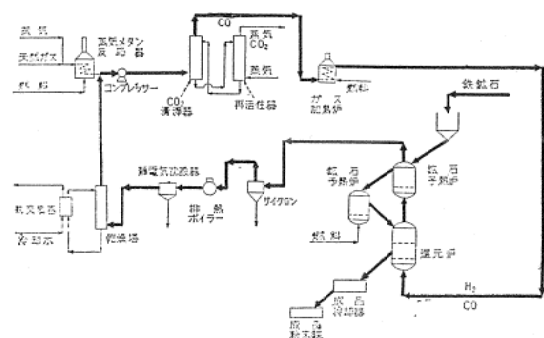


図9 Nu-Iron 法 (U. S. Steel Corp)

は順次加熱炉に入り、ここで天然ガスあるいはその他の適当な燃料を燃焼させることによって930°Cまで加熱される。これら予熱炉、加熱炉において固体流動法が利用されるか否かは明らかにされていないが、固体—ガスを接触させる方法としてはこの方法が最も効果的であるので、おそらく採用しているものとおもわれる。930°Cまで加熱された鉱石は次に固体流動法を採用した還元炉の第1の反応器に入れる。ここは温度を705°C、圧力を4.2 kg/cm²に保持してあり、鉱石の赤鉄鉱は酸化第一鉄まで還元される。加熱鉱石の保有熱量の一部はここで吸熱反応のために消費される。第1の反応器で一部還元された鉱石は続いて第2の反応器に送られる。この温度と圧力は第1の反応器と同じに保たれており、酸化第一鉄は金属鉄に還元される。使用する還元ガスは水素と一酸化炭素とからなり、天然ガスと水蒸気を反応させて作られる。還元が連続的に行われているため、還元ガスは鉱石に逆行して還元炉の第2反応器から第1反応器に入る。さらに還元炉を出るガスは予熱炉に導かれて鉱石の予熱に使用される。

排ガスはCO、CO₂、H₂、H₂O、N₂よりなり、サイクロン、排熱ボイラー、電気収塵機を通過する。ガスはその後水蒸気を除去するため50°Cまで冷却したのち、新しく作られた還元ガスとともに4.2 kg/cm²に加圧され、モノエタノールアミン清浄塔に入ってCO₂が吸収される。清浄塔を出たガスは殆んどH₂とCOでガス予熱器に入って870°Cに加熱される。4.2 kg/cm²という圧力を採用したのは、還元ガスの利用率を高め、流動層から出るダストの量を最小に止めるためである。利用されなかった還元ガスは循環させるので最終的には全部還元剤として働くわけであるが、循環させる量には制限があり、還元ガス中の窒素含有量を10%またはそれ以下におさえる必要がある。

Nu-Iron法について明らかにされない点が多いがその特徴をあげると

(i) 固体流動法を採用して連続的に還元作用を行わせる。もし予熱炉および加熱炉にも固体流動法を採用していると特徴といえる。

(ii) 還元炉内の温度、圧力はH-Iron法が低温高圧であるに対し、本法は高温低圧である。

(iii) 還元ガスは天然ガスをH₂Oで分解して作る。

6) R-N法

この方法は米国のRepublic Steel CorpとNational Lead Co.が協力して発明したもので、現在アラバマ州バーミングサムにおいて、両社系列のR-N Corp.の手で2年間、175 t/dの設備で中間工業化が行われている。

この方法は比較的低温を使用する点を除くとクルップ・レン法と似ている。回転炉を用い、バーミングサム地区およびレッド・マウンテン地区の低品位含鉄砂岩の処理を目的としている。

鉄鉱石は25~1 mmに整粒し、石灰石および還元剤(粉コークス、無煙炭、木炭等)と共に回転炉(直径2.7 m、長さ45.7 m)の中に装入し、約1,260°Cの温度で還元する。炉から出たクリンカーを急冷し、その後ボールミルの中で微粉碎し、磁選機を通して鉄分を回収する。この際、未燃焼の炭素分は回収して再使用する。R-N Corp.の工場では50,000 t以上の鉄を製造しており、成品は鉄分85~95%、珪酸1%以下の品質で、使用する鉱石が高品位(鉄分50%以上)であれば鉄分90%のものとなり、平炉や電気炉の装入物となるが、低品位鉱石を使用した場合は鉄分90%のものと鉄分70%の2種類のものができる。鉄分70%のものは溶鉱炉用とされている。また鉄分の回収率は90%で鉱石中のSとPは約90%が除去されるといわれている。第10図は本法の工程図を示す。

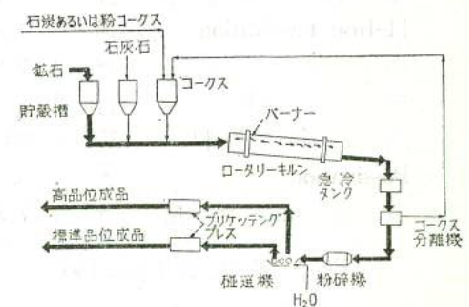


図10 R-N法
(Republic steel-National Lead)

7) マダラス法 (Madaras Process)

鉄鉱石をレトルト内で高温の脈動変性天然ガスで還元する方法である。鉱石は塊状のまま装入されるが、大塊は50mm以下に破碎され6 mm以下の粉鉱はペレットにして装入する。天然ガスは430°Cに予熱し、脱硫後触媒の存在の下で加熱して水蒸気と反応させて変性し(H₂ 75%)、残留水蒸気を除去したのち1000~1200°Cに加熱した再生炉で残留CH₄を廃ガスと反応させてCOとH₂(CO₂ 2.5%)の還元ガスを作る。鉄鉱石を装入したレトルトに還元ガスを導いて還元するが、このガス流に脈動を与えて還元速度を促進するのが本法の特徴であり、この脈動はガス導管に設けた制御弁の回転(21 r.p.m.)による。

第11図はMadison Corp.(米国テキサス州)における本法の工程図を示す。本法の一部を改良したものにMonterrey Processがある。

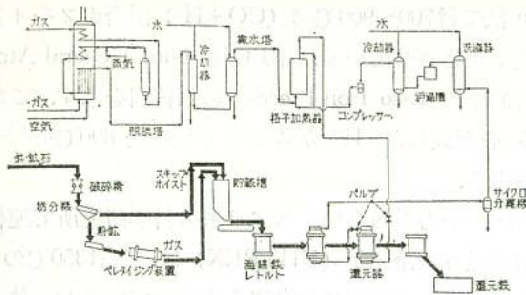


図11 Madaras 法 (Madiron Corp)

8) サイクロスチール法 (Cyclo-Steel Process)

本法は英国鉄鉱研究所 (BISRA) で発明された方法であって、鉄鉱石から直接製鋼する方法である。

微粉碎した鉄鋼石を粘性の出る直前の温度まで予熱し、同じく微粉碎した石炭と酸素 (または空気) と共に円筒型又は円錐型、あるいはそれらを組合せた型の燃焼室に、切線方向に沿って吹き込む。燃焼室の中では石炭と酸素が反応して一酸化炭素を発生し、この CO が鉄鉱石を還元して CO₂ になる。この際、原料の粒子が微細で表面積が非常に大きいことと粒子の速度が速いため、反応は瞬時に行われ還元は数秒のうちに行われる。燃焼室の排ガス温度は約 750°C で鉄鉱石の予熱に利用される。反応が進行して鉄鉱石が熔融金属とスラグになると、遠心力と重力が作用してガス雰囲気から分離して、燃焼室の下に連なる室の中に旋回しながら落下して分離する。出来た鉄は P が少く、S が高い場合は石灰吹込みを行うと脱硫される。燃焼室は外部より冷却し、内壁にスラグライニングを形成させて高熱と装入物の摩耗による損傷を防いでいる。この方法の特徴は微粉鉄石を用い、燃料は粘性炭を必要としないが未だ試験段階である。

第12図は本法の概要を示す。

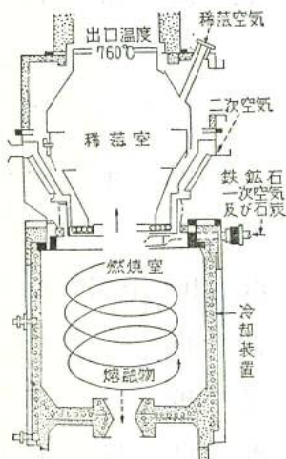


図12 Cyclosteel 法

VI. 直接製鉄法の問題点

直接製鉄法は(1)同じ能力の溶鉄炉に比べて建設費が著

しく小さいこと、(2)固体流動法という化学工業技術の採用、(3)高品位鉄鉱床の開発と低品位鉄の選鉄技術の発達、(4)低廉な還元ガス源の開発および製造法の発展、(5)良質屑鉄の量的欠乏と価格の高騰、(6)原子炉の開発による熱と電力の安価な供給の将来性、などの理由から近年脚光を浴びて来た。

しかしながら総体的に見ると未だ pilot plant の域を越えないものも多く、商業的生産を行っている方法においてもその量は僅少である。従って直接製鉄法が将来現在の高炉、転炉法と競争するか否かは別として、鉄鋼業にその地位を確立するためには今後技術的にも、経済的にも究明されねばならない問題が多い。それらの問題点を述べると、たとえば

(1) H-Iron 法, Madaras 法のように製造方式が連続式でなく、還元時間が比較的長いことは生産面で不利である。

(2) 回転炉～磁選系統の方式以外では原鉄石の脈石部分はそのまま還元鉄に持ち込まれるので、純度の高い海綿鉄を製造するためには必然的に高品位鉄を使用しなければならない。低品位鉄石を使用するための予備処理ならびに脱硫、脱磷の方法にはなお研究の余地がある。

(3) 高炉製鉄にコークス (強粘性炭) の制約があるのと同じように、直接製鉄の生産費に大きな割合を占めている還元ガスを如何に安価にかつ豊富に得るかが大きな問題として残されており、電力とともに地理的、経済的条件を十分に考慮のうえ解決しなければならない。

(4) サイクロスチール、マダラス法等においては相当の高温を使用し、特に前者の場合高速度で粉鉄石を旋回させ、また熔融鉄および熔融鉄滓を生成する等の特徴により還元炉に使用する耐火物、鋼材の材質を選択せねばならない。

以上指摘した問題点の解決に諸種の研究が強力に行われているが、現在米国においても直接製鉄法を採用している会社はきわめて僅かである。しかしながら、これらの問題点を一つ一つ解決するとともに直接製鉄法が飛躍的に拡大されるであろうとの見通しもたてられている。

VII. 原子炉による製鉄

西ドイツのアーヘン工科大学製鉄研究所では、ユーリッヒ原子力研究所の高温ガス冷却原子炉 (HTGR) の核熱エネルギーを製鉄に利用する計画が進められている。即ち、1200°C の He ガスの熱交換により還元ガスを加熱し、それによって鉄鉱石の還元を行ない海綿鉄を作り、これを電気炉で製鋼するのであるが、さらにこの排出 He ガスを熱交換して発生した水蒸気で発電を行う。

現在の原子炉では He ガス温度は 750~850°C 程度で

生産と技術

あり、還元ガスとして $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ または $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$ と変成するには 1000°C 以上の高温を必要とし、できれば $1200\sim 1300^\circ\text{C}$ 程度に上げたいと努力されている。

前述のように製鉄法は種々あるが、流動床還元法は比較的低温で目的が達せられ特に H-Iron 法は 550°C 、30 気圧の H ガスで微粉鉄鉱石を還元している。また Nn-

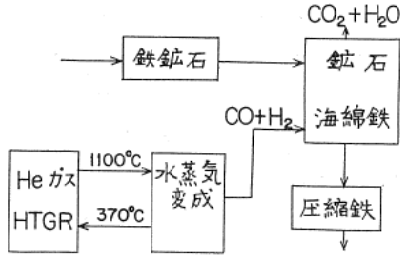


図13 Esso Iron Process

Iron 法では $700\sim 900^\circ\text{C}$ の $(\text{CO} + \text{H}_2)$ 混合ガスを 4 気圧程度で反応させている。第13図は Gulf General Atomic で計画中の Esso Iron Process の系統図を示す。これは CH_4 を変成した H_2 ガスで還元反応を 800°C で行うものである。

米国原子力委員会のロスアラモス科学研究所で運転中の超高温ガス冷却炉 (UHTREX) は、現在 1350°C の He ガス冷却剤で石炭ガス化の研究を行っているが、熱を回収する熱交換器の材料設計等に問題が残されている。この程度の高温ガスが経済的に得られると、各種製鉄法への適用範囲は著しく容易となる。

原子炉利用の製鉄法としては、安価な電力が利用できれば電気製鉄法、電気製鋼法が現在のままの技術でも活用されるので、高温還元ガスによる鉄石の還元は第2義的とも考えられる。